เอกสารวิชาการ

ช่างประกอบตัวเรือ

กรมอู่ทหารเรือ

(จัดพิมพ์เมื่อ ตุลาคม ๒๕๔๘)

บทที่ 1

ความปลอดภัย

การขนส่งทางทะเล การไปมาค้าขายกันระหว่างกลุ่มต่างๆ ที่มีขอบเขตติดกับทะเลได้ดำเนินติดต่อกันมาหลายพันปีแล้ว ในอดีตผ่านมากลุ่มชนและประเทศต่างๆ ที่มีการขนส่งทางทะเลและใช้น่านน้ำสากลร่วมกัน ต่างก็ประสบปัญหาเกี่ยวกับวินาศภัยทำให้เกิดการสูญเสียชีวิตและทรัพย์สินค่อนข้างสูง ในช่วงต้นคริสต์ศตวรรษที่ 19 เรือได้เกิดการสูญหายและอับปางลงเฉลี่ยแล้วปีละประมาณ 400-500 ลำ สาเหตุสำคัญของวินาศภัยที่เกิดขึ้นกับเรือในอดีตเป็นจำนวนมากนี้ มีอยู่หลายประการเช่น โครงสร้างของเรือแข็งแรงไม่พอ อุปกรณ์ในเรืออยู่ในสภาพทรุดโทรมและไม่สมบูรณ์ ขาดการดูแลรักษาเรือบรรทุกสินค้ามากเกินไป ลูกเรือมีคุณวุฒิต่ำ ขาดระเบียบวินัย ขาดความรับผิดชอบ เสพสุราเป็นนิจ ข้อบกพร่องและความเสียหายในรูปแบบต่างๆ ที่เกิดขึ้นกับเรือในอดีตเป็นเหตุให้ในสมัยต่อมา ได้มีการจัดตั้งองค์การต่าง ๆ ขึ้นมา เพื่อพิจารณามาตรการควบคุมความปลอดภัยของเรือ ความปลอดภัยเกี่ยวกับชีวิตและทรัพย์สิน รวมทั้งการควบคุมมลภาวะทางทะเล โดยออกกฎข้อบังคับเกี่ยวกับเรือ กฎหมายควบคุมการใช้เรือ กฎหมายควบคุมมลภาวะทางทะเล เป็นต้น ซึ่งกฎข้อบังคับและกฎหมายต่าง ๆ เหล่านี้ ได้มีการปรับปรุงแก้ไขเพิ่มเติมตลอดมาโดยองค์การต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง

1.1 สมาคมจัดชั้นเรือ (Classification Societies)

สมาคมจัดชั้นเรือ เป็นองค์การสากลอิสระซึ่งมีหน้าที่สำคัญอยู่ 2 ประการ คือ กำหนดมาตรฐานการแข็งแรงของโครงสร้างเรือ โดยการออกกฎข้อบังคับเกี่ยวกับการสร้างเรือ และการจัดชั้นหรือระดับความแข็งแรงปลอดภัยของเรือ ประวัติการเป็นมาในการก่อตั้งสมาคมจัดชั้นเรือแรกเริ่มนั้นเกิดขึ้นใน กรุงลอนดอน ประเทศอังกฤษ ในต้นคริสต์ศตวรรษที่ 18 ในสมัยนั้นการตกลงว่าจ้างขนส่งสินค้า การรับประกันภัยทางทะเลและการติดต่อทางธุรกิจต่าง ๆ เกี่ยวกับเรือที่เป็นนิยมกระทำกันตามร้านกาแฟทั่วไปในกรุงลอนดอน และในบรรดาร้านกาแฟต่างๆเหล่านี้ มีอยู่ร้านหนึ่งบนถนนทาวเวอร์ ซึ่งเป็นที่นิยมนัดพบของกลุ่มผู้ดำเนินธุรกิจทางเรือเป็นประจำ โดยมีเจ้าของร้านชื่อ ลอยด์ (Edward Lloyd) ลอยด์ได้รวบรวมรายชื่อ พร้อมทั้งข้อมูลเกี่ยวกับประวัติของเรือสินค้าที่ใช้งานอยู่ในสมัยนั้นทั้งหมดโดยมีประวัติของเรือที่สร้างขึ้นย้อนหลังไปจนถึงปี ค.ศ. 1702 และต่อมาเขาได้รวบรวมรายชื่อเรือสินค้า พร้อมทั้งบอกข้อมูลรายละเอียดต่าง ๆ เกี่ยวกับเรือ จัดทำเป็นทำเนียบเรือของลอยด์ (Lloyd,s List) ออกเผยแพร่ครั้งแรกในปี ค.ศ. 1734

การจัดทำเนียบเรือของลอยด์มีประโยชน์มากสำหรับผู้ที่ดำเนินการธุรกิจเกี่ยวกับเรือเพราะการตกลงว่าจ้างขนส่งสินค้า และการประกันภัยทางทะเลขึ้นอยู่กับระดับความเสี่ยงกล่าวคือ เรือที่มีความมั่นคงแข็งแรงมีอุปกรณ์ในเรือที่ได้มาตราฐานไว้ใจในเรื่องของความปลอดภัย ก็สามารถเรียกเก็บค่าขนส่งได้สูงขึ้น และเสียค่าประกันภัยน้อยลงเป็นต้น ในปัจจุบันทำเนียบของลอยด์มีข้อมูลของเรือในเชิงพาณิชย์ทุกชนิดทั่วโลกที่มีขนาดตั้งแต่ 100 ตันกรอสขึ้นไป โดยการรวบรวมพิมพ์ออกเผยแพร่ปีละครั้ง ในช่วงแรกของการจัดทำเนียบเรือลอยด์นั้นเรือสินค้าเป็นเรือที่ทำด้วยไม้ทั้งหมด ข้อมูลรายละเอียดเกี่ยวกับความแข็งแรงปลอดภัยของเรือ ทำได้โดยการระบุชนิดของไม้ที่นำมาใช้ในการต่อเรือ ขนาดของชิ้นส่วนต่าง ๆ วิธีการยึดและต่อไม้ มาตรฐานงานฝีมือ และระดับความเชื่อถือได้ของอู่ต่อเรือ (ในสมัยนั้นถือว่าเรือที่ต่อจากอู่ทางตอนใต้ของอังกฤษ มีระดับคุณภาพสูงกว่าเรือที่ต่อจากอู่ทางตอนเหนือ) ต่อมาจึงได้จัดชั้นเรือขึ้นตามข้อมูลต่าง ๆ ที่ได้กล่าวมาแล้ว โดยการแบ่งเรือตามลำดับชั้นจากระดับสูงไปยังระดับต่ำ และระบุลำดับชั้นด้วยสัญลักษณ์สระ 5 ตัว คือ A E I O U ตามลำดับคุณภาพและความแข็งแรงมั่นคงของโครงสร้างตัวเรือ และใช้ตัวอักษร G, M และ B (good, middle, bad) เพื่อกำหนดคุณภาพของอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่นำมาใช้ในเรือ หลักจากได้มีการจัดชั้นเรือจนเป็นที่ยอมรับกันอย่างกว้างขวาง ต่อมาจึงได้มีการจัดตั้งสมาคมจัดชั้นเรือของลอยด์ (Lloyd’s Register of Shipping) ขึ้นในปี ค.ศ.1760

เรือประกอบด้วยโครงสร้างที่สลับซับซ้อน และเป็นโครงสร้างชนิดเคลื่อนที่ได้ขนาดใหญ่ที่สุดเท่าที่มนุษย์เคยสร้างขึ้นมา การออกแบบและการสร้างเรือตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน มีลักษณะที่แตกต่างจากการออกแบบโครงสร้างอย่างอื่น ที่ใช้งานบนบกทั่วไปโครงสร้างต่าง ๆ ที่อยู่บนบกนั้นสามารถคำนวณออกแบบโดยใช้ทฤษฎีความแข็งแรงของวัสดุได้ละเอียดถูกต้องเชื่อถือได้ เพราะแรงต่างๆ ที่มากระทำกับชิ้นส่วนโครงสร้าง เช่นแรงเนื่องจากภาระการบรรทุก แรงเนื่องจากลม แรงเนื่องจากแผ่นดินไหว รวมทั้งแรงสถิตย์และแรงจลน์อื่น ๆ สามารถกำหนดและประมาณค่าได้ใกล้เคียงกับความเป็นจริงแต่สำหรับเรือ แรงที่มีบทบาทที่สุดคือ แรงเนื่องจากลมและคลื่นซึ่งเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาและหาค่าที่แน่นอนไม่ได้ ด้วยเหตุนี้ การนำทฤษฎีความแข็งแรงของวัสดุมาใช้ในการคำนวณออกแบบเรือเพียงอย่างเดียวจึงไม่ค่อยได้ผล แม้ว่าในปัจจุบันได้มีการเก็บข้อมูลและการวิเคราะห์ทางสถิติเกี่ยวกับคลื่นและลมในทะเลไว้มากแล้วก็ตาม การออกแบบชิ้นส่วนโครงสร้างของเรือ ยังต้องอาศัยประสบการณ์อันยาวนาน ต้องอาศัยข้อมูลเกี่ยวกับความทนทานของเรือ ในทุกสภาวะของทะเลที่เคยสภาวะของทะเลที่เคยเกิดขึ้นในอดีต มาประกอบการกำหนดขนาด กำหนดคุณสมบัติ และความแข็งแรงของชิ้นส่วนโครงสร้าง

ในช่วงแรกที่มีการจัดชั้นเรือของลอยด์นั้น การกำหนดขนาดชิ้นส่วนโครงสร้างของเรือยังไม่มีกฎเกณฑ์ที่แน่นอนตายตัว ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับประสบการณ์ความชำนาญและงานฝีมือของช่างต่อเรือเป็นส่วนสำคัญ ต่อมาเมื่อมีข้อมูลเกี่ยวกับสภาวะการรับแรงในรูปแบบต่าง ๆ การชำรุดเสียหารที่เคย

เกิดขึ้นกับเรือในอดีต ข้อมูลเกี่ยวกับคลื่นและลมในทะเลที่มีผลต่อความแข็งแรงของเรือ สมาคมจัดชั้นเรือของลอยด์ได้ทำการศึกษาค้นคว้าวิจัยเพื่อนำข้อมูลต่าง ๆ เหล่านี้มาใช้ประกอบในการคำนวณออกแบบชิ้นส่วนโครงสร้างของเรือ และออกกฎข้อบังคับ เกี่ยวกับการกำหนดขนาดชิ้นส่วนโครงสร้าง การกำหนดคุณสมบัติความแข็งแรงทนทานของวัสดุ เพื่อให้อยู่ในมาตรฐานเดียวกันสำหรับแต่ละประเภท สมาคมจัดชั้นเรือของลอยด์ ได้ออกกฎข้อบังคับสำหรับการสร้างเรือไม้ขึ้นเป็นครั้งแรกในปี ค.ศ.1835 และออกกฎข้อบังคับสำหรับการสร้างเรือเหล็กในปี ค.ศ.1855 ต่อมาในปี ค.ศ. 1870 ได้มีการเปลี่ยนระบบการจัดชั้นเรือจากระบบเดิมที่ได้กล่าวมาแล้วเป็นระบบใหม่ที่ยังคงใช้อยู่จนถึงปัจจุบันนี้ ตัวอย่างเช่นเรือที่มีเครื่องหมายในใบประกาศนียบัตรรับรองมาตรฐานความแข็งแรงของเรือด้วยสัญลัษณ์ + 100A 1 ความหมายของสัญลักษณ์นี้คือ + หมายถึงเรือที่ได้ผ่านการตรวจสอบทุกขั้นตอนของการสร้าง โดยเจ้าหน้าที่ตรวจสอบของสมาคม ฯ 100A หมายถึงเรือที่สร้างขึ้นตามมาตรฐานสูงสุดของกฎข้อบังคับที่ได้กำหนดไว้ 1 หมายถึงอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้ในเรือมีมาตรฐานสูงสุด

เนื่องจากการกำหนดเกณฑ์มาตรฐานชิ้นส่วนโครงสร้างของตัวเรือแล้ว สมาคมจัดชั้นเรือของลอยด์ยังได้มีการตรวจสอบมาตรฐานของเครื่องจักรขับเคลื่อนเรือด้วย เรือที่ผ่านการตรวจสอบมาตรฐานของเครื่องจักรขับเคลื่อน จะออกใบประกาศนียบัตรรับรองเครื่องจักรเรียกว่าLMC (Lloyd’s Machinery Certificate)

เรือที่สร้างขึ้นตามกฎข้อบังคับของสมาคมจัดชั้นเรือ และได้ผ่านการตรวจสอบมาตรฐานทุกขั้นตอนตามข้อกำหนดของสมาคม จะมีการจดทะเบียนในทำเนียบเรือและมีใบประกาศนียบัตรรับรองความแข็งแรงปลอดภัยมอบให้ เมื่อนำเรอไปใช้งานย่อมจะเกิดการชำรุดทรุดโทรมตามกาลเวลา การที่จะรักษามาตรฐานความแข็งแรงปลอดภัยให้อยู่ในระดับเดิมนั้น จำเป็นต้องมีการดูแลบำรุงรักษาอยู่ตลอดเวลา สมาคมจัดชั้นเรือจึงได้มีข้อกำหนดในการตรวจสภาพเรือตามระยะเวลาที่ได้ระบุไว้แน่นอนสำหรับเรือแต่ละประเภท เช่น การตรวจสอบประจำปี การตรวจสอบโดยการนำเรือเข้าอู่ในช่วงระยะเวลาที่กำหนด การตรวจสอบอย่างละเอียดเป็นกรณีพิเศษทุก ๆ 5 ปี เป็นต้น เรือที่อยู่ในมาตรฐานชั้นต่าง ๆ เมื่อไม่ผ่านมาตรฐานการตรวจสอบในชั้นนั้น ๆ จะถูกลดระดับชั้นลงมาตามสภาพของเรือ

สมาคมจัดชั้นเรืออื่น ๆ ที่ดำเนินกิจการอยู่ในปัจจุบันซึ่งเป็นที่รู้จักกันโดยทั่วไป ได้แก่

American Bureau of Shipping	ในประเทศอเมริกา
Bureau Veritas	ในประเทศฝรั่งเศส
Germanischer Lloyd	ในประเทศเยอรมัน
Det Norske Veritas	ในประเทศนอร์เว
Registro Italiano	ในประเทศอิตาลี
Rgister of Shipping of the USSR	ในประเทศรัสเซีย

Nippon Kaizi Kyokai ในประเทศญี่ปุ่น

Polish Register of Shipping ในประเทศโปแลนด์

สมาคมจัดชั้นเรือเหล่านี้ เป็นหน่วยงานที่ประกอบธุรกิจอิสระในระดับสากล และต่างก็มีลักษณะการดำเนินกิจการที่คล้ายกัน การเลือกใช้กฎข้อบังคับและการจดทะเบียนเทียบชั้นเรือกับสมาคมใด ๆ เป็นสิทธิของเจ้าของเรือที่จะเลือกตามที่เห็นว่าเหมาะสม

1.2 ภัยทางทะเลและการควบคุม

จากอดีตที่ผ่านมาเมื่อจำนวนเรือพาณิชย์เพิ่มขึ้น อุบัติภัยทางทะเลที่เกิดขึ้นก็มีมากตามไปด้วย ตามรายงานของลอยด์ ในช่วงปี ค.ศ.1882 เรือเกิดการสูญหายในทะเลมีจำนวน 1123 ลำ ทั้งนี้ไม่รวมเรือขนาดเล็กที่ใช้บริการอยู่ตามชายฝั่งทั่วไป ในจำนวนเรือที่เกิดการสูญหายนี้ ประมาณครึ่งหนึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากสภาพลมฟ้าอากาศ สาเหตุสำคัญที่เรือไม่สามารถทนต่อสภาพการแปรปรวนของท้องทะเลได้ก็เพราะเรือส่วนใหญ่ที่ใช้บริการอยู่ในสมัยนั้น มีคุณสมบัติที่เหมาะสมกับสภาพของทะเล การบรรทุกสินค้ามากเกินไป ประเทศที่ได้รับความเสียหายเนื่องจากเรือมากที่สุดในอดีตก็คือ ประเทศอังกฤษ เพราะมีเรือพาณิชย์ที่ใช้บริการอยู่ประมาณ 40 เปอร์เซ็นต์ ของเรือพาณิชย์ทั่วโลก รัฐบาลอังกฤษจึงได้จัดตั้งคณะกรรมาธิการพิจารณากำหนดแนวน้ำบรรทุกขึ้นในปี ค.ศ.1883 กฎข้อบังคับเกี่ยวกับการกำหนดแนวน้ำบรรทุก ได้พิจารณาแล้วเสร็จในปี ค.ศ.1885 และมีผลบังคับใช้ในปี ค.ศ. 1890 โดยกำหนดให้เรือทุกลำต้องมีเครื่องหมายแสดงแนวน้ำบรรทุกหรือที่เรียกว่าเครื่องหมายพลิมซอล (Plimsoll) เพื่อบอกระดับแนวน้ำสูงสุดที่เรือสามารถบรรทุกสินค้าได้อย่างปลอดภัย

แม้ว่าทุกประเทศทั่วโลก ที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับการขนส่งทางทะเล ต่างก็ประสบปัญหาเรื่องความปลอดภัยในทะเลเหมือนกัน แต่ในอดีตที่ผ่านมา ปัญหาเหล่านี้ไม่เคยนำมาพิจารณาร่วมกันในระดับนานาชาติเลย การประชุมระหว่างประเทศที่เกี่ยวกับการใช้น่านน้ำสากล เพิ่งเกิดขึ้นเป็นครั้งแรกในปี ค.ศ.1889 โดยการจัดประชุมที่กรุงวอชิงตัน ประเทศสหรัฐอเมริกา เนื้อหาสาระสำคัญในการประชุมครั้งแรกนี้ได้แก่การกำหนดกฎข้อบังคับเกี่ยวกับการป้องกันเรือโดนกัน การช่วยชีวิต และการขอความช่วยเหลือเมื่อเรือประสบอุบัติภัย การกำหนดเส้นทางเดินเรือ การกำหนดคุณสมบัติของผู้ทำการในเรือ และการเตรียมการเพื่อจัดตั้งองค์การสากลเกี่ยวกับการใช้น่านน้ำ ต่อมาในปี ค.ศ.1897 ได้มีการตั้งคณะกรรมการพิจารณาควบคุมการใช้น่านน้ำสากลขึ้น คณะกรรมการชุดนี้ได้จัดประชุมนานาชาติ เกี่ยวกับการขนส่งทางทะเลและการใช้น่านน้ำสากลขึ้นมาหลายครั้ง รวมทั้งเตรียมการประชุมเกี่ยวกับความปลอดภัยของชีวิตในทะเล (Safety of Life at Sea) หรือที่เรียกว่า SOLAS ขึ้นเป็นครั้งแรกในเดือน มกราคม ปี ค.ศ.1914

สาเหตุสำคัญที่ได้มีการจัดประชุมเกี่ยวกับความปลอดภัยของชีวิตในทะเลขึ้นมา เนื่องจากการอับปางของเรือโดยสาร ไตตานิค เมื่อวันที่ 14 เมษายน ค.ศ.1912 ทำให้เกิดการสูญเสียชีวิตและทรัพย์สินมากที่สุดเท่าที่เคยมีในประวัติศาสตร์การเดินเรือคือมีจำนวนผู้เสียชีวิตในครั้งนั้นถึง 1500

คน สาระสำคัญในการประชุมครั้งแรกนี้ได้แก่การกำหนดจำนวนฝากั้นผนึกน้ำของเรือให้มีพอที่จะป้องกันการไหลทะลักของน้ำเมื่อท้องเรือถูกทำลาย การใช้อุปกรณ์ชูชีพให้มีจำนวนเพียงพอกับผู้โดยสารและลูกเรือทั้งหมด ระบบป้องกันและควบคุมอัคคีภัย เป็นต้น หลังจากการประชุมนานาชาติเกี่ยวกับความปลอดภัยของชีวิตในทะเลครั้งแรกในเดือนมกราคา ค.ศ.1914 ต่อมาในเดือนพฤษภาคม ปีเดียวกัน เรือโดยสาร Empress of Ireland เกิดการอับปางลงอีกเนื่องจากชนหินโสโครก ทำให้มีผู้สูญหายและเสียชีวิตมากกว่า 1000 คน อย่างไรก็ตามการจัดประชุมในปี ค.ศ.1914 นั้น ประสบกับความล้มเหลวเนื่องจากเกิดสงครามโลกครั้งที่ 1 ขึ้นมาเสียก่อน

การนำเครื่องยนต์ดีเซลมาใช้เป็นเครื่องจักรใหญ่ เริ่มตั้งแต่ปี ค.ศ.1914 และในช่วงนี้เรือกลไฟซึ่งเดิมใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงสำหรับหม้อน้ำ ก็เริ่มเปลี่ยนมาใช้น้ำมันเป็นเชื้อเพลิงกันมากขึ้น การนำน้ำมันมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในช่วงแรกนั้น เรือได้รับความเสียหาย เนื่องจากการลุกไหม้ของน้ำมันเชื้อเพลิง และการระเบิดเกิดขึ้นในห้องเครื่องเป็นจำนวนมาก เหตุการณ์ที่สำคัญเกี่ยวกับการเกิดอัคคีภัยของเรือในอดีต ได้แก่ เรือ Morro Castle ของสหรัฐอเมริกา เกิดไฟไหม้ทั้งลำในปี ค.ศ.1934 ทำให้มีผู้เสียชีวิต 110 คน เรือโดยสาร Empire Windrush เกิดไฟไหม้เสียหายจนเรือใช้การไม่ได้ในขณะที่มีผู้โดยสารอยู่ในเรือ 1500 คน เมื่อปี ค.ศ.1954 แต่ผู้โดยสารส่วนใหญ่ได้รับการช่วยชีวิตเอาไว้ได้ เรือ Seistan เกิดการระเบิดในห้องเครื่องในปี ค.ศ.1958 ทำให้มีผู้เสียชีวิต 57 คน และเรือบรรทุกน้ำมัน Stanvat Japan เกิดการระเบิดขึ้นในปีเดียวกัน ทำให้มีผู้เสียชีวิต 20 คน

ผลเนื่องจากสงครามโลกครั้งที่ 1 ทำให้ประเทศต่าง ๆ มีภารกิจที่จะต้องฟื้นฟู ปรับปรุงสภาพความเสียหายอันเนื่องมาจากสงคราม การประชุมระหว่างประเทศเกี่ยวกับความปลอดภัยทางทะเลจึงเว้นช่วงนานกว่า 10 ปี คือหลังจากการจัดประชุมครั้งแรกในปี ค.ศ.1914 แล้ว เพิ่งจะนำมาพิจารณาใหม่อีกครั้ง โดยการจัดประชุมนานาชาติที่กรุงลอนดอน ประเทศอังกฤษ ในปี ค.ศ.1929 โดยมีผู้แทนของประเทศต่าง ๆ เข้าประชุมทั้งหมด 18 ประเทศ

ต่อมาในปี ค.ศ.1930 ได้มีการจัดประชุมนานาชาติ เพื่อร่างกฎข้อบังคับเกี่ยวกับการกำหนดแนวน้ำบรรทุกของเรือสินค้าและเรือโดยสาร การประชุมครั้งนี้ได้พิจารณารายละเอียดเพิ่มเติมจากการประชุมครั้งที่แล้วได้แก่ การกำหนดความแข็งแรงของโครงสร้างเรือ อุปกรณ์ช่วยชีวิต อุปกรณ์ยังชีพในทะเล การป้องกันอัคคีภัย การติดต่อสื่อสาร การใช้อุปกรณ์การเดินเรือ การกำหนดเส้นทางการเดินเรือ การตรวจสอบความปลอดภัยของเรือ เป็นต้น

การประชุมนานาชาติเกี่ยวกับการใช้น่านน้ำสากลที่ดำเนินการโดยสหประชาชาติ เกิดขึ้นครั้งแรกในปี ค.ศ.1948 ที่กรุงเจนีวา มีประเทศสมาชิกเข้าร่วมประชุมทั้งหมด 34 ประเทศ ในที่ประชุมได้พิจารณารายละเอียดเพิ่มเติม เกี่ยวกับความปลอดภัย เช่น การกำหนดมาตรฐานการทรงตัวของเรือเมื่อเรือรั่ว การสร้างผนังป้องกันการลุกลามเมื่อเกิดเพลิงไหม้ การทดลองเอียงเรือก่อนการใช้งาน การพิจารณากฎข้อบังคับเกี่ยวกับระบบไฟฟ้าในเรือ ระบบเครื่องสูบ และอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่จำเป็นใน

กรณีฉุกเฉินจากการเกิดอัคคีภัย เรือรั่ว และเรือชนกัน การออกประกาศนียบัตรรับรองระบบการติดตั้งอุปกรณ์ความปลอดภัยสำหรับเรือ การพิจารณากฎข้อบังคับเกี่ยวกับการใช้ระบบสื่อสารในเรือ สาระสำคัญอีกประการหนึ่งจากการประชุมในครั้งนี้คือ การเตรียมการก่อตั้งหน่วยงานใหม่ คือ องค์การที่ปรึกษาทางทะเลระหว่างรัฐบาล ซึ่งเป็นหน่วยงานของสหประชาชาติ หรือเรียกว่า IMCO (Inter-Governmental Maritime Consultative Organization) ต่อมาหน่วยงานนี้ได้เปลี่ยนชื่อใหม่เป็นองค์การทางทะเลระหว่างประเทศ หรือที่เรียกโดยย่อว่า IMO (International Maritime Organization) ในเดือนเมษายน ปี ค.ศ.1982

บทบาทหน้าที่ขององค์การนี้ คือ การควบคุมระบบการขนส่งทางทะเลทั่วโลก การติดต่อประสานงานระหว่างประเทศ การใช้กฎข้อบังคับร่วมกัน การออกกฎหมายสากลระหว่างประเทศ การกำหนดเกณฑ์มาตรฐานความปลอดภัยในทะเล เป็นต้น จากมติที่ประชุมเพื่อการก่อตั้งองค์การใหม่ขึ้นมานี้ได้กำหนดไว้ว่า จะต้องมีประเทศสมาชิกรับรองอย่างน้อย 21 ประเทศ จึงจะมีผลการจัดตั้งเป็นทางการ ต่อมาได้มีประเทศที่เป็นสมาชิกรับรองครบ ในเดือนเมษายน ค.ศ.1958 การก่อตั้งองค์การที่ปรึกษาทางทะเลระหว่างรัฐบาลจึงได้ก่อตั้งขึ้นอย่างเป็นทางการในวันที่ 6 มกราคม ค.ศ. 1959 โดยมีสำนักงานใหญ่อยู่ในกรุงลอนดอน ประเทศอังกฤษ

หลังจากการก่อตั้งองค์การที่ปรึกษาทางทะเลระหว่างรัฐบาลของสหประชาชาติ ก็ได้มีการจัดประชุมประเทศสมาชิกเกี่ยวกับความปลอดภัยในทะเลขึ้นในปี ค.ศ.1960 โดยมีประเทศสมาชิกเข้าร่วมประชุม 55 ประเทศ เรื่องต่าง ๆ ที่นำมาพิจารณาส่วนใหญ่เป็นการปรับปรุงแก้ไขเพิ่มเติมรายละเอียดกฎข้อบังคับที่ได้กำหนดไว้จากผลการประชุมในปี ค.ศ.1948 เหตุการณ์ความเสียหายครั้งสำคัญที่เกิดขึ้นก่อนการจัดการประชุมครั้งนี้ คือ เรือ Stockholm ของสวีเดน ชนกับเรือ Andrea Dorea ของอิตาลี ในปี ค.ศ.1956 เป็นเหตุให้เรือ Andrea Doria จมลมภายในเวลา 11 ชั่วโมง ทำให้มีผู้เสียชีวิตในเหตุการณ์ครั้งนี้ 43 คน

กฎข้อบังคับเพื่อความปลอดภัยทางทะเลที่ได้กำหนดขึ้นจากการประชุมนานาชาติในปี ค.ศ. 1960 มีสาระสำคัญ ได้แก่ เรือที่มีขนาดตั้งแต่ 500 ตันกรอส ขึ้นไป จะต้องมีการตรวจสอบความปลอดภัยตามระยะเวลาที่กำหนด กฎข้อบังคับเกี่ยวกับการใช้วิทยุและเรด้าการรายงานทางอุตุนิยม การให้บริการค้นหาและกู้ภัยทางทะเล การใช้แพชูชีพที่ไม่รั่วไม่จม (inflatabe liferafts) และกฎข้อบังคับเกี่ยวกับเรือพาณิชย์ที่ใช้พลังงานนิวเคลียร์

จากการประชุมครั้งแรกของ IMCO ในปี ค.ศ.1960 เป็นต้นมา มีเหตุการณ์ที่นับว่าสำคัญซึ่งเกิดขึ้นเกี่ยวกับเรือพอสรุปได้ดังนี้

ค.ศ.1961 เรือโดยสาร Dora เกิดระเบิดและเพลิงไหม้เสียหายทั้งลำสาเหตุ เนื่องจากการก่อวินาศกรรมในอ่างเปอร์เซีย มีผู้โดยสารเสียชีวิต 212 คน และลูกเรืออีก 26 คน

ค.ศ.1963 เรือโดยสาร Lakonia ของกรีก เกิดเพลิงไหม้ในห้องพักผู้โดยสารแล้วควบคุมไม่ได้ ไฟไหม้ทั้งลำจนกระทั่งจม ทำให้ผู้โดยสารและลูกเรือเสียชีวิต 128 คน

ค.ศ.1966 มีการจัดประชุมนานาชาติเพื่อออกกฎหมายเกี่ยวกับการกำหนดแนวน้ำบรรทุกขึ้น โดยมีผลบังคับใช้ในปี ค.ศ.1968

ค.ศ.1967 เรือน้ำมัน Torrey Canyon ออกนอกเส้นทางการเดินเรือเนื่องจากระบบควบคุมการเดินเรือขัดข้อง ชนหินโสโครกท้องเรือแตก น้ำมันทะลักลงทะเลจำนวน 119 000 ตัน ครอบคลุมพื้นที่กว่าสองร้อยตารางไมล์

ค.ศ.1969 จัดประชุมนานาชาติ เพื่อออกกฎหมายเกี่ยวกับการกำหนดตันเนจของเรือ จากข้อตกลงในการประชุมได้กำหนดให้มีผลบังคับใช้เมื่อครบกำหนด 24 เดือน หลังจากมีประเทศสมาชิกรับรองไม้น้อยกว่า 25 ประเทศ และมีเรือรวมกันไม่น้อยกว่า 65 % ของจำนวนกรอสตันเนจทั้งหมด

ค.ศ.1971 เรือน้ำมัน Arizona Standard ชนกับเรือน้ำมัน Oregon ที่บริเวณปากอ่าวซานพรานซิสโก น้ำมันไหลลงทะเลจำนวน 3000 ตัน ทำให้เกิดมลภาวะอย่างรุนแรงในบริเวณนั้น

ค.ศ.1972 เรือสินค้า Royston Grange ชนกับเรือน้ำมัน Tien Chin ทางนอกฝั่งของเมืองบูโนสเอเรส ทำให้เกิดระเบิดไฟลุกไหม้เรือจมทั้งสองลำ ลูกเรือเสียชีวิต 78 คน และในปีนี้ได้จัดประชุมนานาชาติเพื่อออกกฎหมายเกี่ยวกับการป้องกันเรือโดนกัน โดยมีผลบังคับใช้ในปี ค.ศ.1977

ค.ศ.1973 จัดประชุมนานาชาติ เพื่อออกกฎหมายเกี่ยวกับการควบคุมมลภาวะ เนื่องจากน้ำมันไหลลงสู่ทะเล (OILPOL) ตามข้อตกลงได้กำหนดให้มีผลบังคับใช้เมื่อครบกำหนด 12 เดือน หลังจากมีประเทศสมาชิกรับรอง 15 ประเทศ และมีเรือรวมกันไม่น้อยกว่า 50 % ของกรอสตันเนจทั้งหมด

ค.ศ.1974 จัดประชุมนานาชาติเพื่อออกกฎหมายเกี่ยวกับความปลอดภัยของชีวิตในทะเล (SOLAS) เป็นกฎหมายฉบับปรับปรุงแก้ไขเพิ่มเติม SOLAS 1960 ซึ่งมีผลบังคับใช้ในปี ค.ศ.1980

ค.ศ.1975 เรือน้ำมัน Berge Istra ในขณะที่บรรทุกน้ำมันเต็มที่จำนวน 224 000 ตัน เกิดการระเบิดและจมลง สามารถช่วยชีวิตลูกเอไว้ได้ 2 คน และในปีเดียวกันนี้ IMCO ได้จัดประชุมนานาชาติเพื่อออกกฎหมายการกำหนดแนวน้ำบรรทุก ฉบับปรับปรุงแก้ไขเพิ่มเติมฉบับปี ค.ศ.1966

ค.ศ.1978 เรือน้ำมัน Amoco Cadiz เกิดการเกยตื้นจนเรือแตก เนื่องจากระบบบังคับหางเสือขัดข้อง ทำให้น้ำมันจำนวน 230 000 ตัน ไหลลงสู่ทะเล นับเป็นการปล่อยน้ำมันลงสู่ทะเลครั้งใหญ่ที่สุดเท่าที่เคยมีมา และในปีเดียวกันนี้ IMCO ได้จัดประชุมนานาชาติเกี่ยวกับการตรวจเรือ การควบคุมเรือ การติดต่อสื่อสาร การกำหนดคุณวุฒิและการฝึกอบรมของผู้ทำการในเรือ และได้มีการจัดประชุมเพื่อออกกฎหมายควบคุมมลภาวะทางทะเล (MARPOL) ขึ้นเป็นครั้งที่สอง

ค.ศ.1979 เรือน้ำมัน Berge Vanger ซึ่งเป็นเรือแบบเดียวกันกับเรือ Berge Istra ก็เกิดเหตุการณ์คล้ายกันและจมหายไป ลูกเรือเสียชีวิตหมด เหตุการณ์ถัดมาคือเรือน้ำมัน Betelgeuse เกิด

ระเบิดในขณะที่ถ่ายน้ำมันขึ้นที่ท่าเรือ Bantry Bay ทำให้เรือและท่าเรือเกิดเพลิงไหม้ มีผู้เสียชีวิต 50 คน ในปีเดียวกันนี้ IMCO ได้จัดการประชุมเกี่ยวกับการค้นหาและช่วยชีวิตในทะเล

ค.ศ.1983 IMO ได้จัดประชุมเกี่ยวกับการออกกฎหมายควบคุมเรือบรรทุกก๊าซเหลวและสารเคมี และกฎหมาย MARPOL 73/78 มีผลบังคับใช้ในปีนี้

ค.ศ.1987 เรือข้ามฟาก Herald of Free Enterprise ออกจากท่าประตูหัวเรือเปิดค้างไว้ทำให้น้ำเข้าเรือจนพลิกคว่ำ มีผู้เสียชีวิต 188 คน

ค.ศ.1988 การสูญเสียชีวิตครั้งใหญ่สุดในปีนี้คือ การจมเนื่องจากพายุของเรือข้ามฟาก Dona Marilyn ในฟิลิปปินส์ มีผู้เสียชีวิตและสูญหายประมาณ 400 คน จากผลการประชุม SOLAS 1974 ของ IMCO นั้นได้เตรียมการจัดตั้งหน่วยงานใหม่ซึ่งเรียกว่า GMDSS (Global maritime Distress and Safty System) และได้มีการจัดตั้งขึ้นอย่างเป็นทางการในปีนี้ กฎหมายและข้อบังคับต่างๆ ที่ GMDSS ได้กำหนดขึ้นมีผลบังคับใช้ในปี ค.ศ. 1992 และทยอยนำออกมาใช้จนถึงปี ค.ศ. 1999

ค.ศ. 1989 เรือน้ำมัน Exxon Valdez เกยตื้นที่นอกฝั่งอลาสกา จนท้องเรือแตกปล่อยน้ำมันลงทะเล 38 143 ตัน เมื่อนับย้อนหลังไปจนถึงปี ค.ศ. 1960 จนถึงปี ค.ศ. 1989 เรือปล่อยน้ำมันลงทะเลไปแล้วมากกว่า 3 ล้านตัน สาเหตุสำคัญได้แก่ความ เสียหายที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างเรือ การเกยตื้นและการชน

ค.ศ. 1990 เรือโดยสาร Scandinavian Star เกิดเพลิงไหม้ มีผู้เสียชีวิต 159 คน ในปีนี้สหรัฐอเมริกาได้ออกกฎหมาย Oil Pollution Act หรือที่เรียกว่า OPA 90 เพื่อใช้ควบคุมเนื้อที่ชายฝั่งในระยะ 200 ไมล์ของสหรัฐอเมริกาทั้งหมด และ IMO ได้มีการปรับปรุงแก้ไขเพิ่มเติมกฎหมายเกี่ยวกับความปลอดภัยของชีวิตในทะเล SOLAS 83/88 โดยมีผลบังคับใช้ในปี ค.ศ. 1994

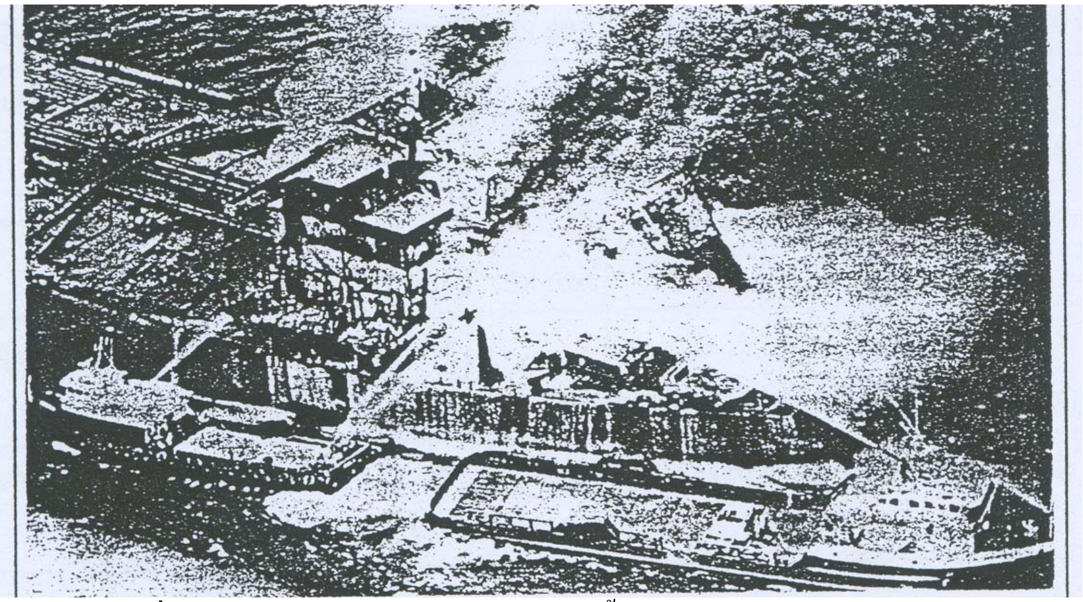
ค.ศ. 1991 ปีนี้เป็นปีที่เกิดความเสียหายขึ้นกับเรือมากที่สุดในช่วงตั้งแต่ปีค.ศ. 1997 เป็นต้นมา คือมีจำนวนถึง 182 ลำ รวมขนาดทั้งหมด 1 708 464 ตัน มีผู้เสียชีวิตทั้งหมด 389 คน เสียหายเนื่องจากอัคคีภัย 38 การเกิดมลภาวะในทะเลที่สำคัญได้แก่เรือนน้ำมันHaven เกยตื้นท้องเรือแตก ปล่อยน้ำมันลงทะเล 109 700 ตัน ที่นอกเมืองท่าเยนัว การเกิดอุบัติภัยที่สำคัญคือเรือข้ามฟาก Moby Price ชนกับเรือนำมัน AGIP Abruzzo ขนาด 98 545 ตัน เป็นเหตุให้เรือข้ามฟาก Moby Price อับปางมีผู้เสียชีวิต 141 คน

ค.ศ. 1992 เรือบรรทุกสารเคมี Seatank ในขณะบรรทุกน้ำมันแก๊สโซลีนเกิดเพลิงไหม้ลูกเรือเสียชีวิตหมด และในปีนี้กฎหมายเกี่ยวกับ GMDSS เริ่มมีผลบังคับใช้

สำหรับประเทศไทยซึ่งได้เป็นสมาชิกของ IMO ประเทศหนึ่ง กฎหมายต่าง ๆ ที่ออกมาบังคับใช้กับเรือไทย จึงมีเนื้อหาสาระที่สอดคล้องกับกฎหมายและกฎข้อบังคับสากลที่ IMO กำหนดขึ้นด้วย กฎหมายที่ออกมาใช้บังคับเรือไทยมีดังต่อไปนี้

- พระราชบัญญัติเรือไทย พ.ศ. 2481

- กฎกระทรวงเศรษฐการ พ.ศ. 2482 ออกตามความในพระราชบัญญัติเรือไทยฉบับ พ.ศ. 2481
- กฎกระทรวงเศรษฐการ ฉบับที่ 2 พ.ศ. 2483 ออกตามความในพระราชบัญญัติเรือไทย ฉบับ พ.ศ. 2481
- พระราชบัญญัติผ่อนผันการปฏิบัติตามมาตรา 50 แห่งพระราชบัญญัติมาตรา 50 แห่งพระราชบัญญัติเรือไทยฉบับ พ.ศ.2481 ออกบังคับใช้ในปี พ.ศ. 2488
- กฎกระทรวงเศรษฐการ ฉบับที่ 3 พ.ศ. 2490 ออกตามความในพระราชบัญญัติเรือไทย ฉบับ พ.ศ.2481
- ประกาศของคณะปฏิวัติ ฉบับที่ 162 พ.ศ. 2515
- กฎกระทรวง ฉบับที่ 4 พ.ศ. 2517 ออกตามความในพระราชบัญญัติเรือไทยฉบับบ พ.ศ. 2481
- พระราชบัญญัติเรือไทย ฉบับที่ 2 พ.ศ.2517
- พระราชบัญญัติเรือไทย ฉบับที่ 3 พ.ศ. 2521
- กฎกระทรวง ฉบับที่ 5 พ.ศ. 2521 ออกตามความในพระราชบัญญัติเรือไทยฉบับ พ.ศ. 2481
- กฎกระทรวง ฉบับที่ 6 พ.ศ.2522 ออกตามความในพระราชบัญญัติเรือไทยฉบับ พ.ศ. 2481
- พระราชบัญญัติป้องกันเรือโดนกัน พ.ศ.2522
- กฎกระทรวง พ.ศ. 2522 ออกตามความในพระราชบัญญัติป้องกันเรือโดนกันฉบับ พ.ศ. 2522
- กฎกระทรวง ฉบับที่ 2 พ.ศ. 2524 ออกตามความในพระราชบัญญัติป้องกันเรือโดนกัน ฉบับ พ.ศ.2522
- ระเบียบกรมเจ้าท่าว่าด้วยการตรวจและอนุมัติแบบแปลนเรือ ฉบับที่ 1 พ.ศ. 2525
- พระราชบัญญัติเรือไทย ฉบับที่ 4 พ.ศ.2528
- กฎกระทรวง ฉบับที่ 3 พ.ศ.2533 ออกตามความในพระราชบัญญัติป้องกันเรือโดนกัน ฉบับ พ.ศ.2522
- พระราชบัญญัติเรือไทย ฉบับที่ 5 พ.ศ.2534 แก้ไขเพิ่มเติมพระราชบัญญัติเรือไทย ฉบับ พ.ศ.2481



รูปที่ 1 เรือนอร์เว Mega Borg ขณะบรรทุกน้ำมัน 141 006 ตัน เกิดการระเบิด เพลิงไหม้ในอ่าวเม็กซิโก ในเดือนมิถุนายน ค.ศ.1990

ตารางที่ 1.1 อุบัติภัยที่เกิดขึ้นกับเรือในช่วง 5 ปี (ค.ศ.1987 – ค.ศ.1991)

(จาก Marine Engineers Review, May 1992)

สาเหตุ		1987	1988	1989	1991	1991
สภาพอากาศ	จำนวนลำ	45	50	54	43	58
อากาศ	กรอสตันเนจ	407 898	262 855	353 770	457 180	453 532
เกยตื้น	จำนวนลำ	20	17	18	10	17
	กรอสตันเนจ	247 314	150 193	121 336	121 489	127 443
การชน	จำนวนลำ	17	11	25	24	24
	กรอสตันเนจ	140 478	30 573	93 008	55 213	158 374
ระเบิด,	จำนวนลำ	28	34	29	27	38
ไฟไหม้	กรอสตันเนจ	246 876	233 897	333 297	263 237	492 219
เครื่องจักร	จำนวนลำ	3	9	8	7	12
	กรอสตันเนจ	6363	29 803	71 286	17 586	51 058
สาเหตุอื่น	จำนวนลำ	22	25	19	23	31
	กรอสตันเนจ	82 967	58 626	76 604	149 015	337 899
สูญหาย	จำนวนลำ	4	1	3	5	2
	กรอสตันเนจ	47 077	9909	28 776	157 405	87 939
รวม	จำนวนลำ	139	147	156	139	182
	กรอสตันเนจ	1178 973	775 856	1078 007	1221 125	1708 464

ตารางที่ 1.2 เรือพาณิชย์ที่จดทะเบียนกับประเทศต่าง ๆ (Lloyd's Register of Shipping 1992)

ประเทศ	จำนวนกรอสตันเนจ	คิดเป็น %
Liberia	52 427 000	12.02
Panama	44 949 000	10.31
Japan	26 407 000	6.06
USSR	26 405 000	6.06
Norway	23 586 000	5.41
Greece	22 753 000	5.22
Cyprus	20 298 000	4.66
USA	20 291 000	4.65
Bahamas	17 541 000	4.02
China	14 299 000	3.28
Philipines	8626 000	1.98
Singapore	8488 000	1.95
Italy	8122 000	1.86
South Korea	7821 000	1.79
Malta	6916 000	1.59
UK	6611 000	1.52
India	6517 000	1.49
Germany	5971 000	1.37
Taiwan	5888 000	1.35
Brazil	5883 000	1.35
Hong Kong	5876 000	1.35
Denmark	5871 000	1.35

1.2 ฟรีบอร์ด (Freeboard)

การพิจารณาระดับความสูงของกราบเรือเหนือแนวน้ำที่เหมาะสมเมื่อเรือบรรทุกสินค้าเต็มที่หรือที่เรียกว่าระยะฟรีบอร์ดนั้น ได้มีการประชุมตกลงกันในระดับสากลที่ IMCO จัดขึ้น เพื่อออกกฎหมายการกำหนดแนวน้ำบรรทุก (Load Line Rules) ในปี ค.ศ.1966 และฉบับปรับปรุงแก้ไขเพิ่มเติมปี ค.ศ. 1971 .1975 และ 1997 เนื่องจากฟรีบอร์ดเกี่ยวข้องโดยตรงกับความปลอดภัยของเรือ ดังนั้นผู้ทำการในเรือควรได้ทราบวิธีการหาค่าฟรีบอร์ดของเรือตามกฎหมายการกำหนดแนวน้ำบรรทุกที่มีผลบังคับใช้อยู่ในปัจจุบันพอสังเขปดังต่อไปนี้

คำนิยามที่ใช้ในกฎข้อบังคับการกำหนดค่าฟรีบอร์ด

ความยาว(L) คือระยะ 95% ของความยาวแนวน้ำที่ระดับ 85% ของความลึกเส้นขอบต่ำสุด หรือความยาวของเรือตามแนวน้ำ เมื่อแนวน้ำอยู่ที่ระดับ 85% ของความลึกเส้นขอบต่ำสุด โดยวัดจากจุดตัดของทวนหัวกับแนวน้ำไปยังเส้นแนวแกนของหางเสือจากวิธีหาค่าที่มากกว่าเป็นค่าความยาว

เส้นฉาก คือเส้นในแนวดิ่งที่ตำแหน่งปลายทั้งสองด้านของความยาว

กึ่งกลางลำ หมายถึงตำแหน่งกึ่งกลางของความยาว

ความกว้าง (B) หมายถึงความกว้างระหว่างเส้นขอบสูงสุดที่ตำแหน่งหนึ่งกลางลำโดยที่เส้นขอบคืนแนวสัมผัสกับผนังกงด้านในสำหรับเรือที่ใช้แผ่นโลหะเป็นตัวเรือ ถ้าใช้วัสดุเป็นตัวเรือ ให้วัดความกว้างระหว่างผิวด้านนอกที่ตำแหน่งเดียวกันนี้

ความลึกเส้นขอบ (D) เป็นระยะในแนวดิ่งที่กึ่งกลางลำจากผิวบนของ กระดูกงูถึงผิวบนของบีมดาดฟ้าฟรีบอร์ดที่ตำแหน่งปลายสุดข้างเรือ ในกรณีที่กราบเรือมีลักษณะโค้งมน ให้ใช้จุดตัดระหว่างเส้นขอบดาดฟ้าฟรีบอร์ดกับเส้นขอบตัวเรือด้านข้างบน

ความลึกฟรีบอร์ด หมายถึงความลึกเส้นขอบโดยนำความหนาของแผ่นสตริงเกอร์มารวมเข้าไปด้วย และในกรณีที่ดาดฟ้ามีวัสดุอื่นเคลือบหรือหุ้ม ก็ให้นำค่า T (L-S) L บวกเข้าไปอีกด้วย ในที่นี้ T คือความหนาเฉลี่ยของวัสดุหุ้ม L คือความยาวตามนิยามข้างบน และ S คือความยาวของซูเปอร์สทรัคเจอร์

สัมประสิทธิ์แท่งตัน หาได้โดยใช้สูตร $\frac{V}{LxBxd_1}$ เมื่อV คือปริมาตรเส้นขอบของเรือ และ d_1 คือ 85% ของความลึกเส้นขอบ

ฟรีบอร์ด หมายถึงระยะในแนวดิ่งที่ตำแหน่งกลางลำเรือจากขอบบนของดาดฟ้าฟรีบอร์ดมายังเส้นแนวน้ำบรรทุกเต็มที่

ดาดฟ้าฟรีบอร์ด หมายถึงดาดฟ้าชั้นบนสุดที่ช่องเปิดต่างๆ บนดาดฟ้าและช่องเปิดต่าง ๆ ใต้ดาดฟ้ามีฝาปิดมั่นคงแข็งแรงไม่มีช่องใดๆ สามารถรั่วน้ำได้

ซูเปอร์สทรัคเจอร์ หมายถึงโครงสร้างบนดาดฟ้าฟรีบอร์ดที่มีผนังของโครงสร้างห่างจากแผ่นเหล็กตัวเรือด้านนอกด้านละไม่เกิน 4% ของความกว้าง

ซูเปอร์สทรัคเจอร์ที่ถูกล้อมรอบ หมายถึง ซูเปอร์สทรัคเจอร์ที่มีฝากั้นทั้งด้านหน้าและด้านหลัง และช่องเปิดต่างๆ ของผนังทุกด้านสามารถปิดได้มิดชิดโดยไม่รั่วน้ำ

เงื่อนไขก่อนการกำหนดฟรีบอร์ด พอสรุปได้ดังนี้

1. มีข้อมูลเกี่ยวกับขั้นตอนและวิธีการขนถ่ายสินค้าที่สมบูรณ์
2. ฝากั้นน้ำของซูเปอร์สทรัคเจอร์ทั้งด้านหน้าและด้านหลังมีความมั่นคงแข็งแรงพอ
3. ช่องประตูหน้าต่างบนฝากั้นน้ำของซุปเปอร์สทรัคเจอร์ต้องปิดได้สนิทไม่มีการรั่วและมีความแข็งแรงเทียบเท่ากับฝากั้นน้ำที่ไม่ได้เจาะช่องประตูหน้าต่าง ช่องเปิดที่ไม่ผนึกน้ำของซูเปอร์สทรัคเจอร์ ต้องมีขอบล่างสูงกว่าพื้นดาดฟ้าอากาศไม่น้อยกว่า 380 มิลลิเมตร
4. ข้อกำหนดเกี่ยวกับปากระวาง ช่องประตูหน้าต่าง ช่องระบายอากาศ ขึ้นอยู่กับตำแหน่งที่กำหนดคือ

   ตำแหน่ง 1 หมายถึงบริเวณส่วนบนของดาดฟ้าฟรีบอร์ด จากหัวเรือไปทางท้าย เป็นระยะ ¼ ของความยาวเรือ

   ตำแหน่ง 2 หมายถึงบริเวณส่วนบนของดาดฟ้าฟรีบอร์ดทั้งหมด นอกเหนือจากตำแหน่ง 1
5. ปากระวางบนชั้นดาดฟ้าฟรีบอร์ดที่มีฝาปิดปากระวางทำด้วยไม้มีผ้าใบชุบน้ำมันหุ้มผนึกน้ำได้ ต้องมีอุปกรณ์การยึดที่มั่นคงแข็งแรง มีขอบปากระวางสูงไม่น้อยกว่า 600 มิลลิเมตร ที่ตำแหน่ง 1 และสูงไม่น้อยกว่า 450 มิลลิเมตร ที่ตำแหน่ง 2
6. ปากระวางบนชั้นดาดฟ้าฟรีบอร์ดที่มีฝาปิดปากระวางทำด้วยเหล็กแผ่น จะต้องมีปะเก็นและอุปกรณ์การยึดที่มั่นคงแข็งแรง ความสูงของขอบปากระวางเช่นเดียวกับข้อ 5
7. ปากทางเข้าออกาของห้องเครื่องที่ตำแหน่ง 1 และ 2 ต้องมีฝาปิดผนึกน้ำได้ และมีอุปกรณ์การยึดที่มั่นคงแข็งแรง ช่องทางที่ผนึกน้ำไม่ได้ต้องมีขอบล่างสูงกว่าพื้นดาดฟ้าฟรีบอร์ด 600 มิลลิเมตร สำหรับตำแหน่ง 1 และ 380 มิลลิเมตร สำหรับตำแหน่ง 2
8. ช่องระบายอากาศ ปากปล่องระบายอากาศจะต้องมีความสูงไม่น้อยกว่า 900 มิลลิเมตร ที่ตำแหน่ง 1 และสูงไม่น้อยกว่า 760 มิลลิเมตรที่ตำแหน่ง 2
9. ท่อหายใจของถังต่าง ๆ ต้องสูงไม่น้อยกว่า 760 มิลลิเมตรที่ตำแหน่ง 1 และสูงไม่น้อยกว่า 450 มิลลิเมตร ที่ตำแหน่ง 2
10. ช่องทางต่าง ๆ ที่อยู่ต่ำกว่าดาดฟ้าฟรีบอร์ด ต้องมีฝาปิดผนึกน้ำที่มั่นคงแข็งแรงเทียบเท่ากับผนังที่ไม่มีช่องทางเปิด
11. ช่องทางน้ำไหล หรือท่อทางใด ๆ ที่อาจทำให้น้ำเข้าเรือได้ต้องมีระบบลิ้นกันกลับ

12. ช่องทางปล่อยอุปกรณ์ชูชีพ ตามกฎข้อบังคับจะกำหนดตำแหน่งและรูปแบบของช่องทางปล่อยอุปกรณ์ชูชีพในกรณีที่อยู่ต่ำกว่าดาดฟ้าฟรีบอร์ด
13. ช่องทางระบายน้ำบนดาดฟ้าฟรีบอร์ด ได้กำหนดสูตรเพื่อใช้ในการคำนวณหาขนาดของช่องทางระบายน้ำ
14. ราวกราบเรือ สูงกว่าพื้นดาดฟ้าอากาศ 1 เมตร แถวแรกสูงกว่าพื้นดาดฟ้าไม่เกิน 230 มิลลิเมตร แถวถัดไปห่างกันไม่เกิน 380 มิลลิเมตร

เมื่อกำหนดมาตรฐานของเรือไว้ที่ระดับหนึ่งตามเงื่อนไขต่าง ๆ ที่ได้กล่าวมาแล้ว การกำหนดฟรีบอร์ดจะแบ่งเรือออกเป็น 2 ชนิด คือ ชนิด A หมายถึงเรือน้ำมัน กับชนิด B หมายถึงเรืออื่น ๆ ที่ไม่ใช่เรือน้ำมัน ในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะค่าฟรีบอร์ดของเรือชนิด B ค่าฟรีบอร์ดจะขึ้นอยู่กับความยาวของเรือตามตารางที่ 1.3

ตารางที่ 1.3 ค่าฟรีบอร์ดของเรือชนิด B (ตัดทอนมาบางส่วนจาก Load Line Rules)

ความยาวเรือ (เมตร)	ฟรีบอร์ด (มิลลิเมตร)	ความยาวเรือ (เมตร)	ฟรีบอร์ด (มิลลิเมตร)
120	1690	129	1881
121	1709	130	1901
122	1729	131	1921
123	1750	132	1940
124	1771	133	1959
125	1793	134	1979
126	1815	135	2000
127	1837	136	2021
128	1859	137	2043

เรือต่าง ๆ ที่มีรูปแบบและคุณสมบัติแตกต่างไปจากมาตรฐานที่กำหนดจะต้องมีการปรับแต่งค่าฟรีบอร์ดตามกฎข้อบังคับต่อไปนี้

1. การปรับแต่งสำหรับเรือที่มีความยาวน้อยกว่า 100 เมตร

เรือที่มีความยาวระหว่าง 24 เมตร ถึง 100 เมตร และซูเปอร์สทรัคเจอร์มีความยาวประสิทธิผลไม่เกิน 35 % ของความยาวเรือ ค่าฟรีบอร์ดจะต้องเพิ่มขึ้นเท่ากับ

$$7.5\,(100 - L)\left\{0.35 - \frac{E}{L}\right\}\ \text{mm}$$

เมื่อ L คือ ความยาวของเรือ

E คือ ความยาวประสิทธิผลของซูเปอร์สทรัคเจอร์

2. การปรับแต่งเกี่ยวกับสัมประสิทธิ์แท่งตัน

เรือที่มีค่าสัมประสิทธิ์แท่งตันเกิน 0.68 ค่าฟรีบอร์ดหาได้จากการนำค่าจากตารางที่ 1.3 คูณด้วย $\frac{C_t + 0.68}{1.36}$ เมื่อ C_b คือค่าสัมประสิทธิ์แท่งตันของเรือ

3. การปรับแต่งค่าความลึก

เมื่อความลึกของเรือ (D) มีค่ามากกว่า $\frac{L}{15}$ ค่าฟรีบอร์ดต้องเพิ่มขึ้นอีกเป็นจำนวน

$\left(D - \frac{L}{15}\right)$ x R mm

โดยที่ ฑ จะมีค่าเท่ากับ $\frac{L}{0.48}$ เมื่อเรือยาวน้อยกว่า 120 เมตร และมีค่าเท่ากับ 250 เมื่อเรือมีความยาวตั้งแต่ 200 เมตรขึ้นไป

4. การปรับแต่งเกี่ยวกับซูเปอร์สทรัคเจอร์

ความยาวของซูเปอร์สทรัคเจอร์ (S) จะใช้ความยาวเฉลี่ย ในกรณีที่ผนังด้านหน้า และ/หรือด้านหลังโค้ง จะวัดจากตำแหน่ง 2/3 ของความลึกของเส้นโค้ง

ความยาวประสิทธิผลของซูเปอร์สทรัคเจอร์ (E) จะเท่ากับความยาวของซูเปอร์สทรัคเจอร์ที่ถูกล้อมรอบ และมีความสูงเท่ากับหรือสูงกว่ามาตรฐาน ถ้าความสูงต่ำกว่ามาตรฐานความยาวประสิทธิผลจะลดลงตามอัตราส่วนของความสูงจริงกับความสูงมาตรฐาน ความสูงมาตรฐานของซูเปอร์สทรัคเจอร์หาได้จากตารางที่ 1.4

ตารางที่ 1.4 ค่าความสูงมาตรฐานของซูเปอร์สทรัคเจอร์

ความยาวเรือ , L (เมตร)	ความสูงของซูเปอร์สทรัคเจอร์ (เมตร)	ความสูงของโครงสร้างอื่น (เมตร)
30 หรือ น้อยกว่า	0.90	1.80
75	1.20	1.80
125 หรือ มากกว่า	1.80	2.30

ค่าความสูงที่อยู่ระหว่างกลางหาได้โดยการเทียบสัดส่วน

เรือที่มีความยาวประสิทธิผลของซูเปอร์สทรัคเจอร์เท่ากับ 1.0L สามารถลดค่าฟรีบอร์ดจากตามรางที่ 1.3 ได้อีกดังนี้

ลดได้ 350 มิลลิเมตร สำหรับเรือยาว 24 เมตร

ลดได้ 860 มิลลิเมตร สำหรับเรือยาว 85 เมตร

ลดได้ 1070 มิลลิเมตร สำหรับเรือยาว ตั้งแต่ 122 เมตรขึ้นไป

เรือที่มีความยาวอยู่ในระหว่างที่กำหนดนี้ให้หาค่าส่วนลดได้โดยวิธีเทียบสัดส่วน สำหรับเรือที่มีความยาวประสิทธิผลของซูเปอร์สทรัคเจอร์น้อยกว่า 1.0L ส่วนลดของค่าฟรีบอร์ดหาได้โดยนำค่าสัมประสิทธิ์จากตารางที่ 1.5 ไปคูณกับตัวเลขส่วนลดของเรือที่มีความยาวประสิทธิผลของซูเปอร์สทรัคเจอร์เท่ากับ 1.0L

ตารางที่ 1.5 ค่าสัมประสิทธ์ของซูเปอร์สทรัคเจอร์

E	0	0.1L	0.2L	0.3L	0.4L	0.5L	0.6L	0.7L	0.8L	0.9L	1.0L
(ก)	0	0.05	0.10	0.15	0.235	0.32	0.46	0.63	0.753	0.877	1.00
(ข)	0	0.063	0.127	0.19	0.275	0.36	0.46	0.63	0.753	0.877	1.00

เมื่อ E คือความยาวประสิทธิผลของซูเปอร์สทรัคเจอร์

(ก) หมายถึงเรือมีเก๋งหัวเรือ (forecastle) ไม่มีเก๋งกลางลำ

(ข) หมายถึงเรือมีเก๋งหัวเรือและมีเก็งกลางลำติดต่อถึงกัน

ถ้าความยาวประสิทธิผลอยู่ระหว่างกลางของค่าที่ระบุไว้ในตารางที่ 1.5 ค่าสัมประสิทธิ์ของซูเปอร์สทรัคเจอร์หาได้ด้วยการเทียบสัดส่วน

ถ้าความยาวประสิทธิผลของเก๋งหัวเรือมากกว่า 0.4L ให้ใช้ค่าสัมประสิทธิ์ในช่อง (ข)

ถ้าความยาวประสิทธิผลของเก๋งหัวเรือน้อยกว่า 0.07L ให้ลดค่าสัมประสิทธิ์ในตารางลงอีกเป็นจำนวน 5 x $\frac{(0.07L - f)}{0.07L}$ เมื่อ f คือความยาวประสิทธิผลของเก๋งหัวเรือ

5. การปรับแต่งค่าเชีย (sheer)

เชีย เป็นระยะในแนวดิ่งที่วัดจากขอบดาดฟ้าฟรีบอร์ดไปยังพื้นระนาบที่ขนานกับกระดูกงู ซึ่งพื้นระนาบนี้อยู่ระดับเดียวกับขอบดาดฟ้าฟรีบอร์ดที่ตำแหน่งกึ่งกลางลำ ถ้าความยาวประสิทธิผลของซูเปอร์สทรัคเจอร์เท่ากับความยาวเรือ (E = L) ให้ใช้ค่าเชียบนดาดฟ้าของซูเปอร์สทรัคเจอร์แทน

เชียมาตรฐานจะกำหนดให้รูปตัดด้านข้างเป็นเส้นโค้งพาราโบลา ซึ่งมีค่าเท่ากับศูนย์ ที่ตำแหน่งกึ่งกลางลำเรือ มีค่าเท่ากับ 25 $(\frac{L}{3}+10)$ ที่ตำแหน่งเส้นฉากท้าย และมีค่าเท่ากับ 50 $(\frac{L}{3}+10)$ ที่ตำแหน่งเส้นฉากหัว

วิธีการปรับแต่งค่าเชียนั้นจะใช้วิธีการหาผลรวมฟังก์ชันของพื้นที่ภายใต้เส้นโค้งของรูปตัดด้านข้างของเรือจริง เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลรวมฟังก์ชันของพื้นที่ภายใต้เส้นโค้งของรูปตัดด้านข้างของเรือมาตรฐาน

ตารางที่ 1.6 ฟังก์ชันของพื้นที่ภายใต้เส้นโค้งของเชีย (ดูรายละเอียดการหาพื้นที่ในบทที่ 3)

	ตำแหน่งรอยตัด	แกนตั้ง (mm)	ตัวคูณ
เชียส่วนหลัง	เส้นฉากท้าย (AP)	25 (L/3 + 10)	1
	L/6 จาก AP	11.1 (L/3 + 10)	3
	L/3 จาก AP	2.8 (L/3 + 10)	3
	กึ่งกลางลำเรือ	0	1
เชียส่วนหน้า	กึ่งกลางลำ	0	1
	L/3 จาก FP	5.6 (L/3 + 10)	3
	L/6 จาก FP	22.2 (L/3 + 10)	3
	เส้นฉากหัว (FP)	50 (L/4 + 10)	1

ผลรวมฟังก์ชันของพื้นที่คือการนำผลคูณระหว่างตัวคูณกับแกนตั้งในตารางที่ 2.6 มารวมกัน ทั้งของเชียส่วนหน้าและเชียส่วนหลัง เมื่อนำผลรวมฟังก์ชันของพื้นที่ของเชียจริงกับเชียมาตรฐานมาหักลบกันแล้วหารด้วย 8 ก็จะได้ค่าส่วนเกินหรือส่วนขาดเพื่อนำไปปรับแต่งฟรีบอร์ดต่อไป

ค่าปรับแต่ง = ค่าส่วนเกินหรือส่วนขาด x $\left(0.75 - \frac{S}{2L}\right)$

เมื่อ S คือ ค่าความยาวของซูเปอร์สทรัคเจอร์

เมื่อเป็นค่าส่วนขาดในสูตรข้างบน ให้นำค่าปรับแต่งที่ได้ไปบวกกับฟรีบอร์ดมาตรฐาน

เมื่อเป็นค่าส่วนเกินในสูตรข้างบน ให้นำค่าปรับแต่งที่ได้ไปลบกับฟรีบอร์ดมาตรฐาน

การนำค่าปรับแต่งไปลบกับฟรีบอร์ดมาตรฐานมีเงื่อนไขดังนี้

ถ้าเรือมีซูเปอร์สทรัคเจอร์กลางลำและมีความยาวในช่วง 0.1L ไปทางหัว โดยวัดจากตำแหน่งกึ่งกลางลำเรือ ให้นำค่าปรับแต่งไปหัดได้ 100 %

ถ้าเรือไม่มีซูเปอร์สทรัคเจอร์กลางลำ ให้นำค่าปรับแต่งไปหักได้ 0%

ถ้าเรือมีซูเปอร์สทรัคเจอร์กลางลำ โดยมีความยาวอยู่ในช่วงระหว่างกลางที่กำหนดนี้ จำนวนซูเปอร์สทรัคเจอร์ของค่าปรับแต่งที่จะนำไปหักได้ให้ใช้ค่าจากการเทียบสัดส่วน

ค่าปรับแต่งที่จะนำไปหักได้ในทุกกรณีต้องมีค่าไม่เกิน 125 มิลลิเมตร ต่อความยาว 100 เมตร ของเรือ

6. **ความสูงของหัวเรือ**

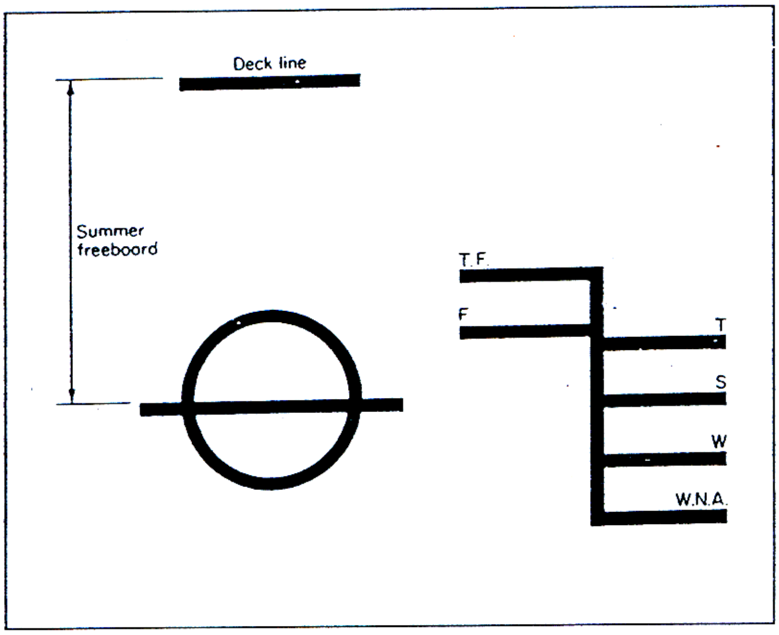
เมื่อหาค่าฟรีบอร์ดของเรือจริงจากการปรับแต่งค่าฟรีบอร์ดมาตรฐานได้แล้วก็สามารถกำหนด

ระดับของแนวน้ำบรรทุกเต็มที่ในฤดูร้อนได้ ขั้นตอนต่อไปก็คือตรวจสอบความสูงของหัวเรือจากแนวน้ำบรรทุกเต็มที่ในฤดูร้อน ถึงดาดฟ้าชั้นบนสุดที่ตำแหน่งเส้นตั้งฉากหัว ความสูงของหัวเรือต้องไม่น้อยกว่า

$$56L\left(1-\frac{L}{500}\right)\left(\frac{1.36}{C_b+0.68}\right)$$ mm สำหรับเรือที่มีความยาวน้อยกว่า 250 เมตร

และ

$$7000\left(\frac{1.36}{C_b+0.68}\right)$$ mm สำหรับเรือที่มีความยาวตั้งแต่ 250 เมตร ขึ้นไป



รูปที่ 2 การกำหนดค่าฟรีบอร์ดด้วยเครื่องหมาย
แนวน้ำบรรทุก (Load Line mark)

1.4 ตันเนจ (tonnage)

การบอกขนาดของเรือตามความสามารถในการบรรทุกสินค้า ได้กระทำติดต่อกันมาหลายร้อยปีแล้ว ซึ่งในแต่ละเขตหรือในแต่ละประเทศจะมีวิธีการบอกขนาดที่แตกต่างกันออกไป บางแห่งจะบอกขนาดเป็นน้ำหนัก บางแห่งบอกขนาดเป็นปริมาตร จากข้อมูลในอดีตที่ได้จดบันทึกไว้ในต้นคริสต์ศตวรรษที่ 15 เหล้าไวน์ที่ชาวฝรั่งเศสนำไปขายในประเทศอังกฤษ จะบรรจุในถังที่มีขนาดเล็กสุดเท่ากับ 252 แกลลอน ชาวอังกฤษสมัยนั้นเรียกถังบรรจุเหล้าไวน์นี้ว่า tun ชาวฝรั่งเศสเรียกว่า tonneau เรือที่บรรทุกถังเหล้าไวน์นี้จะเสียค่าธรรมเนียมต่าง ๆ ตามจำนวนถังที่บรรทุก ด้วยเหตุนี้ตันเนจ (tonnage) จึงเป็นหน่วยที่ใช้ในการบอกปริมาตรความจุของเรือมาจนถึงปัจจุบัน

ในปี ค.ศ.1694 ประเทศอังกฤษได้ออกพระราชบัญญัติการกำหนดค่าตันเนจของเรือโดยใช้ค่าผลคูณของความยาวกระดูกงู ความกว้างภายในเรือ และความลึกภายในเรือ แล้วนำค่าผลคูณมาหารด้วย 94 ข้อยุ่งยากในการหาค่าตันเนจโดยวิธีนี้คือการวัดความลึกภายในเรือทำได้ลำบาก ต่อมาในปี ค.ศ.1793 จึงได้มีการปรับปรุงแก้ไขโดยใช้ค่าครึ่งความกว้างแทนค่าความลึกภายในเรือ ตามข้อกำหนดใหม่นี้ทำให้มีการต่อเรือที่สามารถบรรทุกได้มากแต่มีค่าตันเนจน้อยเพื่อลดค่าธรรมเนียมต่าง ๆ ลง เรือจึงมีลักษณะแคบและลึก สภาพการทรงตัวไม่ดี รัฐบาลอังกฤษจึงได้จัดตั้งคณะกรรมการพิจารณาปรับปรุงแก้ไขการกำหนดขนาดของเรือขึ้นมาหลายครั้ง และได้ออกกฎหมายบังคับใช้ในปี ค.ศ.1821, 1833 และ 1849 การเปลี่ยนแปลงที่สำคัญเกี่ยวกับการกำหนดขนาดของเรือคือในสมัยที่ มอร์สัน (George Moorson) เป็นเลขาธิการของคณะกรรมการดังกล่าวได้เสนอวิธีการหาค่าความจุของเรือแบบใหม่ โดยมีหน่วยการวัดค่าความจุเป็นลูกบาศก์ฟุต เมื่อเทียบค่าความจุที่หาได้ตามวิธีการของมอร์สันกับความจุเป็นตันเนจตามวิธีการเดิมจะได้ 98.22ลูกบาศก์ฟุตเท่ากับค่าตันเนจจำนวน 1 ตัน แต่เพื่อความสะดวกในการใช้ต่อมาจึงได้กำหนดให้ 100 ลูกบาศก์ฟุต เท่ากับ ค่าตันเนจจำนวน 1 ตัน การกำหนดค่าความจุของเรือตามวิธีการของมอร์สัน ได้ออกเป็นกฎหมายบังคับใช้ในปี ค.ศ.1854 (Merchant Shipping Act 1854) ต่อมาวิธีการนี้ได้นำไปใช้กันอย่างแพร่หลายทั่วโลก

หลักการพื้นฐานในการกำหนดค่าตันเนจตามวิธีการของมอร์สัน ได้แก่การแบ่งตันเนจออกเป็น 2 ประเภท คือ กรอสตันเนจ ซึ่งหมายถึงเนื้อที่ภายในเรือทั้งหมดลบด้วยเนื้อที่ยกเว้น (exempted spaces) และ เนทตันเนจ ซึ่งหมายถึงค่ากรอสตันเนจที่นำค่าเนื้อที่ส่วนลด (deductions) ไปหักลบออกแล้ว การกำหนดค่าเนื้อที่ยกเว้นและเนื้อที่ส่วนลดได้มีการปรับปรุงแก้ไขเพิ่มเติมมาโดยตลอดและกฎหมายเกี่ยวกับการกำหนดขนาดของเรือในแต่ละประเทศอาจจะมีรายละเอียดปลีกย่อยแตกต่างกัน แต่เนื้อหาสาระสำคัญส่วนใหญ่จะเหมือนกัน

กรอสตันเนจ เป็นค่าที่นิยมใช้ในการบอกขนาดของเรือ ค่าใช้จ่ายต่าง ๆ ที่ขึ้นอยู่กับกรอสตันเนจ ได้แก่ ค่าธรรมเนียมการจดทะเบียนเรือ ค่าใช้จ่ายในการนำเรือเข้าอู่ การนำร่อง การลากจูง การตรวจเรือ เป็นต้น นอกจากนี้ค่ากรอสตันเนจยังมีส่วนเกี่ยวข้องกับการติดตั้งระบบความปลอดภัย ระบบป้องกันอัคคีภัย จำนวน ตำแหน่ง และระดับชั้นของผู้ทำการในเรือ ตามกฎหมายที่ระบุไว้ด้วย

เนทตันเนจ หรือเรียกว่าตันเนจจดทะเบียน (register tonnage) เป็นค่าที่บอกความสามารถในการทำมาหากินของเรือ (earning capacity) ค่าเนทตันเนจจะมีผลต่อการเสียค่าธรรมเนียมท่าเรือ ค่าธรรมเนียมในการลำเลียงสินค้า เป็นต้น

การหาค่าตันเนจของเรือโดยใช้ 1967 rules

วิธีการคำนวณค่าตันเนจของเรือ ตามกฎข้อบังคับสากลที่บังคับใช้ ในปี ค.ศ.1967 ซึ่งปรากฏอยู่ในหนังสือ “The Merchant Shipping (Tonnage) Regulations 1967 (The 1967 Rules) ของ IMCO พอสรุปหัวข้อสำคัญได้ดังนี้

คำนิยาม

Tonnage Deck หมายถึง ดาดฟ้าชั้นที่สอง สำหรับเรือที่มีดาดฟ้าตั้งแต่สองชั้นขึ้นไป สำหรับเรือที่มีดาดฟ้าชั้นเดียว ก็หมายถึงดาดฟ้าชั้นบนสุด

Upper Deck หมายถึง ดาดฟ้าที่สมบูรณ์ชั้นบนสุด หรือเป็นดาดฟ้าอากาศ ที่นับเป็นโครงสร้างส่วนหนึ่งของลำตัวเรือ ช่องทางต่าง ๆ ของดาดฟ้า และช่องเปิดต่าง ๆ ของตัวเรือด้านข้างใต้ดาดฟ้านี้ สามารถปิดผนึกน้ำได้อย่างถาวร

Second Deck หมายถึงดาดฟ้าชั้นถัดลงมาจาก upper deck ซึ่งเป็นโครงสร้างส่วนหนึ่งของตัวเรือ มีความยาวต่อเนื่อง อย่างน้อยที่สุด จากฝากั้นผนึกน้ำหัวเรือสุดถึงฝากั้นผนึกน้ำท้ายเรือสุด และปากระวางของดาดฟ้านี้มีฝาปิดที่ทนทานถาวร

Tonnage Length หมายถึงความยาวของ tonnage deck

Breadth หมายถึงความกว้างระหว่างผิวด้านในของกง ที่ตำแหน่งกลางลำเรียงตามขวาง และที่ระดับความสูงที่กำหนด

Permanently closed-in spaces on or above the upper deck (Part II Reg.4) เนื้อที่ที่กล่าวถึงนี้หมายถึง เก๋งผนึกน้ำหัวเรือ เก๋งผนึกน้ำกลางลำเรือ เก๋งผนึกน้ำท้ายเรือ เก๋งไม่ผนึกน้ำ (deck house) โครงสร้างอื่น ๆ บน หรืออยู่เหนือ upper deck ที่มีความกว้างจากข้างหนึ่งไปยังอีกข้างหนึ่งของตัวเรือ แม้ว่าจะมีช่องเปิดหรือไม่มีก็ตาม ช่องทางเดินด้านข้างที่มีความกว้างน้อยกว่า 4 ฟุต มีช่องทางออกทางเดียวหรือสองทาง และเนื้อที่ที่มีช่องเปิดบนดาดฟ้า นอกจากว่าช่องเปิดเท่ากับหนึ่งในสี่เท่าของพื้นที่ดาดฟ้า หรือมากกว่า

การกำหนดค่ากรอสตันเนจ (Part II Regs.4 & 5)

กรอสตันเนจจะประกอบด้วย

1. The underdeck tonnage หมายถึงเนื้อที่ภายใต้ tonnage deck ทั้งหมด จนถึงพื้นผิวด้านบนของท้องเรือชั้นใน และมีความกว้างระหว่างพื้นผิวด้านในของกงข้างเรือ
2. ตันเนจของเนื้อที่ระหว่าง secound deck กับ upper deck
3. ตันเนจของ permanectly closed in spaces on or above the upper deck แต่ไม่รวมถึง
    i) ตันเนจของปากระวางที่ปิดมิดชินผนึกน้ำ ส่วนที่อยู่เหนือระดับ upper deck
    ii) ตันเนจของช่องแสงสว่าง และช่องอากาศ ส่วนที่อยู่เหนือระดับ upper deck
    iii) เนื้อที่ยกเว้น (exempted space)
4. เนื้อที่ในปากระวางที่ใหญ่กว่าปกติ
5. ตันเนจของเนื้อที่ด้านบนของ upper deck ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของเครื่องจักรขับเคลื่อนหรือเนื้อที่สำหรับช่องแสงสว่าง หรือช่องระบายอากาศสำหรับห้องเครื่องจักรขับเคลื่อน

เนื้อที่ยกเว้น หรือ exempted space (part II Reg.6) ได้แก่

1. เนื้อที่สำหรับสินค้าแห้ง (dry cargo space)
2. เนื้อที่สำหรับเครื่องจักร หรือคอนเดนเซอร์
3. ห้องต่าง ๆ ที่ใช้สำหรับการเดินเรือ
4. ช่องกระจกสำหรับรับแสงสว่าง โดม หรือช่องแสงสว่างและช่องระบายอากาศ
5. ห้องยุ้งโซ่ และห้องเครื่องกว้านสมอ
6. ห้องสำหรับเก็บอุปกรณ์ช่วยชีวิตและความปลอดภัย
7. ช่องมีหลังคาเหนือบันไดเรือ
8. ห้องครัวและห้องทำขนมปัง
9. ห้องซักรีด ห้องน้ำ ห้องส้วม ของนายเรือ ลูกเรือ และผู้โดยสาร
10. ห้องปฏิบัติงาน (workshop) ของช่างและวิศวกร
11. ห้องอับเฉาถ่วงเรือทั้งหมด ที่ไม่นำมาใช้เป็นประโยชน์อย่างอื่นด้วย
12. บริเวณเนื้อที่ภายใต้ดาดฟ้ากันแดด (shelter deck) สำหรับผู้โดยสารบนดาดฟ้า สำหรับการเดินทางไปเกิน 10 ชั่วโมง
13. เนื้อที่ในช่องทางเดินบนดาดฟ้าสำหรับเรือโดยสารที่เดินทางไกล

ตันเนจจดทะเบียน (Register tonnage หรือ Net tonnage) Part II, Reg.8 หมายถึง กรอสตันเนจที่นำค่าเนื้อที่ส่วนลด (deductions) และส่วนลดสำหรับเครื่องจักรขับเคลื่อน (Propelling Power Allawance) มาหักออกแล้ เนื้อที่ส่วนลดนั้น ส่วนใหญ่จะหมายถึงเนื้อที่ซึ่งไม่สามารถใช้ประโยชน์ในการบรรทุกสินค้าหรือผู้โดยสารได้ ซึ่งได้แก่เนื้อที่ดังต่อไปนี้

1. ห้องนายเรือ
2. ห้องกลาสีเรือ รวมทั้งห้องเก็บน้ำจืดซึ่งมีเนื้อที่ไม่เกิน 15 % ของห้องนายเรือและห้องกลาสีเรือ
3. ห้องถือท้าย ห้องแผนที่ ห้องวิทยุ และห้องสำหรับอุปกรณ์การเดินเรือต่าง ๆ
4. ห้องยุ้งโซ่ ห้องเครื่องกว้านสมอ
5. ห้องเก็บอุปกรณ์ความปลอดภัย
6. ห้องปฏิบัติงาน (workshop) ของช่างและวิศวกร
7. ห้องเครื่องยนต์เล็ก ห้องหม้อน้ำ ที่อยู่นอกห้องเครื่องจักรขับเคลื่อน
8. ห้องเครื่องสูบที่อยู่นอกห้องเครื่องจักรขับเคลื่อน
9. ห้องเก็บใบ สำหรับเรือใบ
10. ห้องอับเฉาถ่วงเรือ ที่ไม่มีจุดประสงค์เป็นอย่างอื่น และมีปริมาตรไม่เกิน 19 % ของค่ากรอสตันเนจ

เมื่อพิจารณาเนื้อที่ยกเว้นกับเนื้อที่ส่วนลด จะเห็นว่ามีส่วนที่เหมือนกันอยู่หลายส่วน ข้อแตกต่างในกรณีนี้คือ เนื้อที่ยกเว้น เป็นเนื้อที่ซึ่งอยู่บนหรือเหนือ upper dece ทั้งหมด แต่เนื้อที่ส่วนลดนั้นเป็นเนื้อที่ภายใต้ upper deck

เกณฑ์ส่วนลดสำหรับเครื่องจักรขับเคลื่อน (Propelling Power Allowance) Part II, Reg.10

เนื้อที่สำหรับเครื่องจักรขับเคลื่อน หมายถึงเนื้อที่ต่อไปนี้

1. ห้องเครื่องจักรขับเคลื่อนซึ่งอยู่ภายใต้ upper deck
2. กล่องเพลาใบจักร (shaft tunnels)
3. ห้องหม้อน้ำที่ใช้ขับเคลื่อนเครื่องจักร
4. ช่องระบายอากาศ ช่องแสงสว่าง หรือช่องทางฉุกเฉินสำหรับห้องเครื่อง
5. ห้องสโตร์ ห้องปฏิบัติการของช่างและวิศวกร ซึ่งมีเนื้อที่รวมไม่เกิน 0.75 % เท่าของค่ากรอสตันเนจ
6. ถังน้ำมันเชื้อเพลิง สำหรับเครื่องจักรใหญ่ และเครื่องจักรย่อย

เกณฑ์ส่วนลดสำหรับเครื่องจักรขับเคลื่อน จะพิจารณาจากอัตราส่วนเนื้อที่สำหรับเครื่องจักรขับเคลื่อน กับค่ากรองสตันเนจดังนี้

i) ถ้าเนื้อที่สำหรับเครื่องจักรขับเคลื่อน อยู่ในระหว่าง 13 % ถึง 20 % ส่วนลดสำหรับเครื่องจักรขับเคลื่อนกำหนดให้เท่ากับ 32 %

ii) ถ้าเนื้อที่สำหรับเครื่องจักรขับเคลื่อนเกิน 20 % ส่วนลดสำหรับเครื่องจักรขับเคลื่อน กำหนดให้เท่ากับ 1.75 เท่า ของเนื้อที่สำหรับเครื่องจักรขับเคลื่อน

iii) ถ้าเนื้อที่ของเครื่องจักรขับเคลื่อนน้อยกว่า 13% ส่วนลดสำหรบเครื่องจักรขับเคลื่อนจะลดลงมาตามส่วน (ตัวอย่างเช่น ถ้าเนื้อที่ของเครื่องจักรขับเคลื่อนเท่ากับ 11 % ส่วนลดสำหรับเครื่องจักรขับเคลื่อนจะเท่ากับ 11/13 x 32 %)

การหาค่าตันเนจของเรือโดยใช้ 1969 rules

ตามกฎหมายสากลของ IMCO เกี่ยวกับการกำหนดขนาดของเรือที่ได้กำหนดขึ้นจากการประชุมในปี ค.ศ.1967 นั้น หลักการพื้นฐานยังคงรูปแบบเดิม ตามวิธีการของมอร์สันอยู่ ซึ่งจะเห็นว่าการหาค่าตันเนจของเรือ เป็นเรื่องที่ยุ่งยากซับซ้อน การให้คำนิยามและคำจำกัดความของเนื้อที่ต่าง ๆ ภายในเรือ ไม่สามารถระบุให้รัดกุมและชัดเจนได้หมดสำหรับเรือทุกประเภท การเปลี่ยนแปลงครั้งสำคัญ ในการกำหนดขนาดของเรือ คือ ผลจากการประชุมของ IMCO ที่จัดขึ้นในปี ค.ศ.1969 แนวทางในการปรับปรุงแก้ไขวิธีการกำหนดขนาดความจุของเรือที่ทางคณะกรรมการได้เสนอในที่ประชุมพอสรุปได้ดังนี้

o การหาค่ากรอสตันเนจกับเนทตันเนจ ควรแยกเป็นอิสระจากกัน

- การหาค่าตันเนจไม่ควรทำให้เกิดผลกระทบต่อคุณภาพและความแข็งแรงของโครงสร้างและความปลอดภัย
- ควรหลีกเลี่ยงการพิจารณารายละเอียดโครงสร้างคือไม่นำมาเกี่ยวข้องมากเกินไป
- ควรหาค่าตันเนจได้ตั้งแต่ช่วงแรกของการสร้างเรือ ไม่จำเป็นต้องคอยให้เรือสร้างเสร็จเสียก่อน ถ้าเป็นไปได้ควรสามารถคำนวณได้จากแบบแปลนที่สมบูรณ์ของเรือ
- ง่ายและสะดวกในทางปฏิบัติ
- ไม่ควรทำให้เกิดผลกระทบในทางลบเกี่ยวกับการทำมาหากินทางเรือ
- การกำหนดเนื้อที่ยกเว้นในซูเปอร์สทรัคเจอร์ควรระบุให้ชัดเจนไม่จุกจิก อย่าให้มีปัญหาในการโต้แย้งได้

ข้อสังเกตทั่วไปเกี่ยวกับกฎข้อบังคับการกำหนดขนาดของเรือ ที่ได้จากการประชุมนานาชาติในปี ค.ศ.1969 พอสรุปได้ดังนี้

ได้กำหนดสูตรสำเร็จรูปสำหรับใช้ในการคำนวณหาค่ากรอสตันเนจและเนทตันเนจ

- ได้กำหนดสูตรสำเร็จรูปสำหรับใช้ในการคำนวณหาค่ากรอสตันเนจและเนจตันเนจ
- หน่วยของตันเนจที่ใช้ติดต่อกันมาเป็นเวลานานคือ ตัน (ton) ซึ่งตรงกับหน่วยของน้ำหนัก ทำให้เกิดความสับสนบ่อยครั้งเรื่อยมา ตามวิธีการใหม่นั้นตันเนจจะไม่มีหน่วยอีกต่อไป ตัวอย่างเช่นเดิมระบุว่า “gross tonnage = 2000 tons” วิธีใหม่จะระบุว่า “gross tonnage = 2000”
- ข้อกำหนดที่ว่า “1 ตัน = 100 ลูกบาศก์ฟุต” จะไม่มีความหมายอีกต่อไป

สูตรที่ใช้ในการหาค่ากรอสตันเนจ (GT) มีดังนี้

$$GT = K_1 V$$

เมื่อ V คือปริมาตรของเนื้อที่ที่ได้รับการปกปิดทั้งหมด (Enclosed space) มีหน่วยเป็นลูกบาศก์เมตร

$$K_1 = 0.2 + 0.02\log_{10} V$$

สูตรที่ใช้หาค่าเนทตันเนจ (NT) มีดังนี้

$$NT = K_2 V_C \left(\frac{4d}{3D}\right)^2 + K_3\left(N_1 + \frac{N_2}{10}\right)$$

เมื่อ V_C คือปริมาตรของเนื้อที่สำหรับบรรทุกสินค้า (Cargo spaces) มีหน่วยเป็นลูกบาศก์เมตร

$$K_2 = 0.2 + 0.02\log_{10} V_C$$

$$K_3 = 1.25 \text{ x } \left(\frac{GT + 10000}{10000}\right)$$

D คือความลึกเส้นขอบที่ตำแหน่งกึ่งกลางลำเรือมีหน่วยเป็นเมตร

d คือค่ากินน้ำลึกเส้นขอบของเรือที่ตำแหน่งกึ่งกลางลำเรือมีหน่วยเป็นเมตร

N_1 คือจำนวนผู้โดยสารโดยนับจากจำนวนเตียงนอนในห้องพักผู้โดยสาร

N_2 คือจำนวนผู้โดยสารอื่น ๆ นอกเหนือจาก N_1

เงื่อนไขในการใช้สูตรนี้คือ

1. ค่าสัมประสิทธิ์ $\left(\frac{4d}{3D}\right)^2$ จะมีค่าเกิน หนึ่ง (1) ไม่ได้
2. ค่า $K_2 V_C \left(\frac{4d}{3D}\right)^2$ มีค่าต่ำกว่า 0.25GT ไม่ได้
3. ถ้า $N_1 + N_2$ มีค่าต่ำกว่า 13 ให้ N_1และ N_2 มีค่าเท่ากับศูนย์
4. ไม่นับรวมผู้โดยสารที่มีอายุต่ำกว่า 1 ขวบ

เนื้อที่ที่ได้รับการปกปิดทั้งหมด (Enclosed spaces) ในสูตรนี้ หมายถึงปริมาตรทั้งหมดภายในลำตัวเรือ โดยมีผิวด้านในของเหล็กแผ่นตัวเรือของขอบเขตปริมาณนี้

การหาค่าตันเนจของเรือตามกฎข้อบังคับของ IMCO ที่ได้กล่าวมาโดยสรุปทั้งสองวิธีนั้นจะเห็นว่าการใช้ 1969 rules นั้น สามารถทำได้สะดวก และไม่ยุ่งยากซับซ้อนเหมือนกับการใช้ 1997 rules

ตัวอย่าง 1.1

ข้อมูลของเรือบรรทุกสินค้าบัลค์ มีดังต่อไปนี้

Length, o.a.	= 187.299 m	Summer draught, moulded	= 11.817 m
Length, b.p.	= 178.00 m	Volume of enclosed spaces	= 96 108 m_3
Breadth, moulded	= 29.40 m	Hold capacity	= 42 192 m_3
Depth, mouldd	= 16.250 m	Deadweight	= 40 790 t

ให้หาค่ากรอสตันเนจ และค่าเนทตันเนจ ของเรือลำนี้

วิธีทำ

หาค่ากรอสตันเนจได้จากสูตร $GT = K_1V$

เมื่อ K1 = $0.2 + 0.02 \log_{10}V$

= $0.2 + 0.02 \log_{10} (96\ 108)$

= 0.2996

ดังนั้นค่ากรอสตันเนจ ของเรือคือ

GT = 0.2996 x 96108

= 28 794

หาค่า เนทตันเนจได้จากสูตร NT = $K_2 V_C \left(\frac{4d}{3D}\right)^2 + K3 \left(N_1 + \frac{N_2}{10}\right)$

เนื่องจากเรือนี้ไม่มีผู้โดยสาร ดังนั้นเทอมสุดท้ายของสมการข้างบนมีค่าเป็นศูนย์

เมื่อ $K_2 = 0.2 + 0.02 \log_{10}VC$

$= 0.2 + 0.02 \log_{10}(42\ 192)$

$= 0.2 + 0.02 \times 4.6252$

$= 0.2925$

ดังนั้นค่าเนทตันเนจ ของเรือคือ

$$NT = 0.2925 \times 42\ 192 \left(\frac{4x11.817}{3x16.250}\right)^2$$

$= 11\ 602$

บทที่ 2

วัสดุที่ใช้ในการต่อเรือ

ในสมัยโบราณโครงสร้างภายในเรือใช้ทำด้วยไม้ เหล็กเหนียว เหล็กสตีล และคอนกรีต ไม้นั้นเป็นวัตถุชนิดแรกที่นำมาต่อเรือ เพราะมีมากและง่ายต่อการทำ แต่เมื่อขนาดของเรือใหญ่โตขึ้น การยึดไม้ให้แน่นเป็นสิ่งที่ทำด้วยความลำบาก ฉะนั้นเรือที่ยาวกว่า 300 ฟุต แล้วไม่สร้างด้วยไม้เลย เรือที่ต่อด้วยไม้ขนาดยาว 200 ฟุต เวลาเดินทางไปในท้องทะเล จะเกิดอาการคุ้ง หรือตกท้องช้าง ประมาณ 3 หรือ 4 ฟุต ทำให้แนวตะเข็บไม้ตัวเรือแตก น้ำรั่วเข้าเรือและเกิดอันตรายถึงเรือจมในที่สุด ยิ่งกว่านั้นความแข็งแรงของไม้ไม่สม่ำเสมอ ติดต่อกันเหมือนเหล็ก ผุกร่อนเพราะตัวแมลงหรือเพรียง และเชื้อเพลิงอย่างดี เวลาเรือโดนระเบิดไม้จะแตกปลิวทำอันตรายให้ถึงชีวิตได้ และหนักกว่าเหล็ก เมื่อกำลังความแข็งแรงเท่า ๆ กัน

2.1 เหล็กเหนียว (Wrought Iron)

โลหะที่ใช้ครั้งแรกในการสร้างเรือนั้นคือ เหล็กเหนียว ครั้นต่อมาการถลุงเหล็กมีประสิทธิภาพดีขึ้น ตามวิธีเบสเซมเมอ (Bessemer) และ โอเปนฮาท (Open Hearth) ทำให้ได้เหล็กสตีลดีขึ้น จึงได้นำเหล็กสตีลลงมาใช้ในการต่อเรือแทนเหล็กเหนียว เพราะถูกกว่าและแข็งแรงกว่า แต่โปรดสังเกตว่าเหล็กเหนียวนั้นทนทางต่อการผุกร่อนดีมาก ซึ่งจะเห็นว่าตัวเรือที่ต่อด้วยเหล็กเหนียวมีอายุ 60 ปี มาแล้วยังคงใช้อยู่จนถึงบัดนี้

2.2 เหล็กสตีล (Steel)

เหล็กดำต่อเรือ (Mild Steel) เป็นเหล็กสตีลชนิดหนึ่งที่ใช้ในการต่อเรืออย่างกว้างขวาง เพราะมีกำลังเฉลี่ยภายในติดต่อสม่ำเสมอกันดี การดัดขึ้นรูปก็ทำได้ง่าย การต่อเรือในระยะหลังนี้ใช้การแล่นประสานเป็นส่วนใหญ่ เหล็กดาต่อเรือก็ใช้แล่นประสาน และติดกันแข็งแรงดี ข้อเสียของเหล็กสตีลนั้นก็คือไม่ทนต่อการผุกร่อน แต่การทำความสะอาดผิวให้สะอาดหมดจดก่อนทาสีอย่างดีจะช่วยการผุกร่อนให้น้อยลงได้มาก มีเหล็กสตีลชนิดหนึ่งที่ทำขึ้นเป็นพิเศษกันผุกร่อน ซึ่งโคโรชันริซิสติ้งสตีล (Corrosion-Resisting Steel, Crs) หรือเรียกกันว่า เหล็กขาว ซึ่งขายในท้องตลาด แต่ราคาแพงมากจึงใช้ในงานที่เป็นพิเศษจริง ๆ

เหล็กดำต่อเรือนี้ต้องมีคุณสมบัติทางฟิสิกส์ดังต่อไปนี้

		แรงดึง	แรงเชียร์
ยังโมดูลัส	E, (Young's Modulus)…	$29x10^6$	$12x10^6$
ขีดประลัย	Ultimate Stress, # /Sq. In.	60,000	45,000
ขีดล้า	Yield Point # / Sq. In.	30,000	21,000

		แรงดึง	แรงเชียร์
แรงใช้คำนวณ	Usual Working Stress, # / Sq. In.	15,000	10,000

2.2.1 เกราะ (Armour Plate) เหล็กสตีลที่ใช้ทำเกราะอย่างหนา ซึ่งเรียกว่าแบบครัปป์ (Krupp Type) นั้นทำด้วยวิธีพิเศษ ผิวหน้าของเกราะนี้ชุบอย่างแข็งที่สุด แต่ภายในอ่อนเหนียว เหล็กชนิดนี้เป็นคำตอบอย่างดีในความต้องการของเกราะ คือผิวแข็งนั้นทำให้หัวกระสุนเกิดระเบิด ความนุ่มเหนียวของเนื้อเหล็กชั้นในเข้ามาทำการดูดกำลังแรงของลูกปืน เมื่อลูกปืนหมดกำลังก็เจาะแผ่นเหล็กไม่ได้ลึก เรือก็ไม่เสียหายมาก

2.2.2 เหล็กสตีลชนิดชุบพิเศษ (Steel, Special Treatment, Sts) เหล็กชนิดนี้เป็นเหล็กที่มีนิกเกิลผสมอยู่ด้วย ใช้หุ้มดาดฟ้าและทำเกราะข้างเรือใช้เป็นเกราะป้องกันเจ้าหน้าที่ประจำเรือ จากลูกกระสุนปืนและลูกระเบิด

2.2.3 เหล็กสตีลชนิดมีกำลังดึงสูง (High Tensile Steel, Hts) ใช้มากในส่วนที่เป็นกำลังสำคัญ ๆ ของเรือประจัญบาญ และเรือเดินสมุทรขนาดใหญ่ การทำให้เหล็กนี้มีกำลังดึงสูงก็โดยลดจำนวนคาร์บอนและเพิ่มจำนวนแมงกานีสจากเหล็กดำต่อเรือนั่นเอง เหล็กสตีลกำลังสูงนี้แข็งแรงกว่าเหล็กดำต่อเรือประมาณ 25% ของกำลังดึง

2.2.4 เหล็กฟอชจิง (Forging Steel) นั้น ทำโดยการนำเอาเหล็กสตีลมาเผาจนแดงขาวแล้วตีขึ้นเป็นรูปด้วยฆ้อน ซึ่งทำให้ได้เหล็กมีกำลังสูงขึ้น เพื่อไปใช้ตามงานที่ต้องการ แต่โดยที่มีวิธีแคสติง (Casting) ซึ่งจะกล่าวต่อไป เกิดขึ้นและให้ผลเป็นที่พอใจจึงทำให้เหล็กฟอชจิงนี้หมดที่ใช้ไปเป็นอันมาก คงเหลือใช้อยู่แต่การทำก้านหางเสือ เพลาข้อเสือ และเพลาใบจักรเท่านั้น เพราะเหตุว่าราคาถูก และยังทำได้เหนียวดีกว่าเหล็กแคสติง

2.2.5 เหล็กแคสติ้ง (Casting Steel) ในการจะทำเหล็กแคสติงนั้นต้องทำไม้แบบขึ้นก่อนตามรูปของงานที่ต้องการจะทำ แล้วนำไม้แบบไปกดแบบบนทรายชนิดพิเศษ (Casting Sand) เมื่อเอาไม้แบบออก อบแบบเสร็จ ก็นำเหล็กสตีลที่หลอมได้อุณหภูมิตามเกณฑ์เทลงในแบบนั้น เหล็กแคสติ้งนี้ใช้มากในเรือ เช่น ทวนหัว, ทวนท้าย, กระบอกดีฟุต, กงบริเวณหางเสือ, โยงโย่รับเพลาใบจักร, กงตอนเพลาพันตัวเรือในเรือสองใบจักร, กระดูกงูเสริม, แท่นเครื่อง, สมอ, รูโซ่สมอ, ท่อโซ่ลงยุ้งโซ่และส่วนอื่น ๆ ที่เป็นส่วนประกอบของเรือ เช่น พุกผูกเรือ ก้ามปู ลูกตน เป็นต้น การใช้เหล็กแคสติงนี้เลือกใช้เนื้อโลหะต่างกันออกไปตามงานที่ต้องการ การแคสติ้งนี้อาจใช้ทองเหลือง หรือโลหะอื่น ๆ ก็ได้

2.3 คอนกรีต (Concrete)

ในระหว่างสงครามโลก มีการต่อเรือด้วยคอนกรีตหลายลำ เช่น เรือเอส.เอส.เจมส์ แอสติน (S.S James Aspdin) เป็นต้น การเสริมกำลังใช้เหล็กเส้นกลม ใส่ไว้ภายในคอนกรีต เรือ คอนกรีตจึงเป็นเรือที่มีน้ำหนักมากเกินไป และแตกตามที่ต่าง ๆ ภายในเรือได้ง่าย จึงทำให้เกิดผลต่อมา คือ ไม่มีใครสร้างเรือชนิดนี้ออกทำการค้า

2.4 แผ่นเหล็กต่าง ๆ หรือเหล็กแผ่น (Plates)

แผ่นเหล็กที่มีความหนาจาก 3/16 นิ้ว ถึง 1 ½ นิ้ว เรียกเหล็กแผ่นต่าง ๆ และแผ่นเหล็กที่หนาน้อยกว่า 3/16 นิ้ว เรียกเหล็กแผ่นบาง (Sheet) ความหนาของแผ่นเหล็กเหล่านี้บ่งเป็นปอนด์ (Guage) หาได้บ่งความหนาเป็นนิ้วหรือหุนตรง ๆ ไม่ แต่ว่าความกว้างของแผ่นเหล็กเหล่านี้ บ่งเป็นนิ้ว ความกว้างของแผ่นเหล็กที่ใช้กันทั่วไปในงานหมุดย้ำ มักถือเป็นมาตรฐานเดียวกันทุกอู่ ดังต่อไปนี้ ทั้งนี้เพราะเป็นการสะดวกต่อการหยิบยก

แผ่นเหล็ก	8 ถึง 10.2 ปอนด์	ใช้กว้าง	75 นิ้ว มากที่สุด
		นิยมใช้	63 นิ้ว
แผ่นเหล็ก	11 ถึง 15.3 ปอนด์	ใช้กว้าง	87 นิ้ว มากที่สุด
		นิยมใช้	75 นิ้ว
แผ่นเหล็ก	16 ถึง 20.4 ปอนด์	ใช้กว้าง	96 นิ้ว มากที่สุด
		นิยมใช้	84 นิ้ว
แผ่นเหล็กมากกว่า	20..4 ปอนด์	ใช้กว้าง	110 นิ้ว มากที่สุด

ความกว้าง 110 นิ้ว เป็นความกว้างที่มากที่สุดที่อู่ขนาดปานกลางจะใช้เกี่ยวกับการต่อแผ่นเหล็กโดยวิธีหมุดย้ำ ทั้งนี้เพราะการย้ำหมุดต้องเจาะรู และปาดขอบรูสลักแผ่นเหล็กก่อนถ้าแผ่นเหล็กกว้างมาก การจัดหยิบยกลำบาก อีกประการหนึ่งความหนาของแผ่นเหล็ก ขนาดนี้ประมาณครึ่งนิ้ว อู่ทั่ว ๆ ไปมีเครื่องมือพอจะเจาะและทำงานได้ แต่ในงานแล่นประสาน ความกว้างไม่เป็นข้อจำกัดต่อเครื่องมือเจาะ และปากขอบรูสลัก เพราะงานแล่นประสานไม่มีการเจาะและปาดขอบรูสลัก

ท้องเรือชั้นใน ฝากั้น, ดาดฟ้า, แผ่นเหล็ก, ทรังค์, ขอบตั้งปากระวาง, เปี๊ยะ, หู, ช้าง, อะเสทั่ว ๆ ไป, บีมพิเศษ และส่วนอื่น ๆ ในเรืออีกมากที่ทำด้วยเหล็กแผ่น

2.4.1 น้ำหนักของเหล็กแผ่น น้ำหนักเหล็กสตีลที่ใช้ต่อเรือ 1 ลูกบาศก์ฟุต หนัก 490 ปอนด์ แผ่นเหล็กหนา 1 นิ้ว หนัก 40.8 ปอนด์ โดยใช้ขนาดแผ่นเหล็ก กว้าง 1 ฟุต ยาว 1 ฟุต เป็นมาตรฐาน หรือแผ่นเหล็กหนา 1 นิ้ว หนัก 40.8 ปอนด์ ต่อ 1 ตร.ฟุต ฉะนั้นแผ่นเหล็ก 20.4 ปอนด์ ต่อตารางฟุต จะหนา ½ นิ้ว และแผ่นเหล็กหนา 10.2 ปอนด์ ต่อตารางฟุต จะหนา ¼ นิ้ว แต่เพื่อความสะดวกเราตัดจุดทศนิยมทิ้งเสีย ฉะนั้นแผ่นเหล็ก 20 ปอนด์ จึงหมายถึงแผ่นเหล็กหนา ½ ดูรูปที่ 22 เพื่อทำความ

เข้าใจให้ดีขึ้นจึงขอชักตัวอย่าง แผ่นเหล็กแผ่นหนึ่งมีขนาด ¼ " x 5' – 0" – 10' – 0" ฉะนั้นแผ่นเหล็กแผ่นนี้จะมีน้ำหนักเท่ากับ

$$\frac{10.2 \text{ ปอนด์}}{\text{ตร.ฟุต}} \times \text{ กว้าง 5 ฟุต } \times \text{ ยาว 10 ฟุต } = 510 \text{ ปอนด์}$$

2.4.2 แผ่นเหล็กแบบต่าง ๆ มีแบบของแผ่นเหล็กอยู่ 2 แบบใหญ่ ที่ใช้กันอยู่ คือ แผ่นธรรมดาอย่างเรียบ (Plain Plate) ซึ่งใช้ทั่วๆ ไปภายในเรือ อีกชนิดหนึ่งคือแผ่นเหล็กกันลื่น มีลักษณะเป็นตารางนูนออกมาจากเนื้อเหล็กบ้าง เป็นเม็ดสั้น-ยาวบ้าง ใช้ในบริเวณห้องเครื่อง ซึ่งพื้นน้ำมันลื่นมาก หรือใช้เป็นแผ่นเหล็กปูทางเท้า (Plathform) ในระหว่างการขึ้นรูปแผ่นเหล็กเพื่อใช้งานนั้น แผ่นเหล็กต้องถูกกระทำหลายอย่าง เช่น เจาะรูด้วยเครื่องสว่าน, เจาะรูด้วนการกระแทก, ดัดทำปีก, ตัด, ไสให้เรียบ, ปาดมุมเอียง, งอทางเดียว,งอสองทาง,ต่อกันโดยวิธีทำปากฉลาม, ปาดมุมรูสลัก, งอเหล็กให้เป็นต้น หยักขอบแผ่นเหล็ก

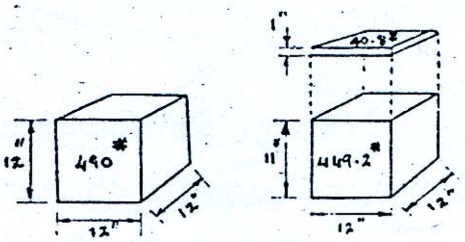
แผ่นเหล็กเมื่อแบ่งตามการดัดโค้งแล้วจะแบ่งได้ 4 แบบ คือแผ่นเหล็ก แบบธรรมดาดูรูปที่ 23 แผ่นเหล็กแบบนี้เป็นส่วนประกอบโครงสร้างของเรือเป็นส่วนใหญ่ ส่วนที่โค้งบ้างเล็กน้อยก็ยังเป็นแผ่นเหล็กแบนอยู่ แผ่นเหล็กชนิดที่ 2 เรียกแผ่นเหล็กโรล หรือแผ่นเหล็กงอทางเดียวเป็นเหล็กที่งอโค้งทิศเดียวและงอเป็นแบบทรงกระบอก แผ่นเหล็กชนิดนี้พบตามท้องเรือตรงแผ่นบิลช์ (Bilge Plate) แผ่นเหล็กชนิดที่ 3 เรียกแผ่นเหล็กงอสองทาง หรือแผ่นเหล็กเฟอเนช เป็นแผ่นเหล็กงอสองทาง การงอต้องอาศัยความร้อนเผาแล้วตีด้วยฆ้อนจนเข้ากันแบบที่ทำไว้ ถ้าไม่ทำอย่างนี้จะได้แผ่นเหล็กที่ไม่เรียบ เปรียบเหมือนเมื่อเอาแผ่นกระดาษบาง งอไว้แล้วงออีกครั้งหนึ่งให้ตั้งฉากกับครั้งแรก จะเห็นว่ามีมุมเกิดขึ้น ด้วยเหตุนี้เองจึงต้องใช้การเผาช่วย จึงเอาชื่อนี้ไปตั้งเป็นแผ่นเหล็กเฟอเนช ส่วนชนิดที่ 4 นั้น เป็นแผ่นเหล็กแบบธรรมดา แล้วทำให้เป็นสัน (Knuckle Plate) ขึ้นนิดหน่อย ใช้เป็นแผ่นเหล็กตัวเรือทางท้ายเรือ

2.5 เชฟ (Shape)

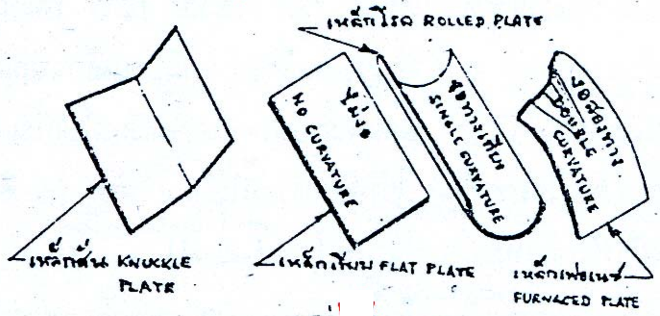
แผ่นเหล็กที่มีความกว้างน้อยกว่า 12 นิ้ว มักเรียกว่าเชฟ หรือเหล็กเส้นแบน ทำด้วยเหล็กดำต่อเรือ หรืออาจทำด้วยเหล็กที่มีกำลังดึงสูง อลูมิเนียมหรือโลหะอย่างอื่นที่สามารถรีดเป็นแผ่นได้

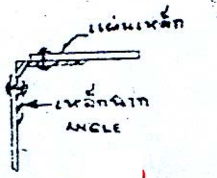
2.5.1 เหล็กฉากธรรมดา(Plain Angle) เหล็กฉากธรรมดาใช้สำหรับทำกง, บีมและสตริงเกอข้าง ในงานมุมย้ำใช้สำหรับต่อเหล็กสองท่อนให้ติดกัน ดูรูปเกชที่(1) และ (2) แสดงการติดเหล็กฉากเข้ากับแผ่นเหล็กโดยหมุดย้ำ เพื่อทำหน้าที่เป็นเหล็กเอ็น ถ้าน้ำหนักกระทำลงตามลูกศร จะเกิดกำลังแรงกดลงที่ปลายปีกเหล็กฉาก แต่ ณ ที่นี้เนื้อโลหะมีน้อย จึงเกิดการต้านทานน้อย กำลังจึงไม่ดี และโปรดสังเกตว่าแนวแกนกลางนั้นอยู่ชิดไปทางแผ่นเหล็กกำลังกดจึงเกิดมากที่ปลายปีกเหล็กฉาก

รูปสเกชที่ (3) แสดงการประกอบเหล็กฉากเข้ากับแผ่นเหล็กเพื่อทำหน้าที่เป็นเหล็กเอ็นอีกแบบหนึ่ง โดยการแล่นประสาน ต้องใช้ปลาบปีกเข้าชนกับแผ่นเหล็ก จึงเรียกเหล็กฉากแบบเดียวกันนี้ในงานแล่นประสานไปอีกชนิดหนึ่ง คือ เหล็กฉากกลับปลายปีก (Inverted Angle,Inv,L) เราสมมุติว่าความยาวของแผ่นเหล็กประมาณ 30 เท่า ของความหนาของแผ่นเหล็กทำหน้าที่เป็นปีกของเหล็กฉากอินเวิทเตทนี้ ฉะนั้นจึงเปรียบเหมือนใช้เหล็กแชลเนล ซึ่งมีเนื้อปีกบนและปีกล่างเท่ากัน เวลาน้ำหนักกระทำลงบนแผ่นเหล็กก็จะเฉลี่ยน้ำหนักลงให้เหล็กฉากนี้ทั่วกัน



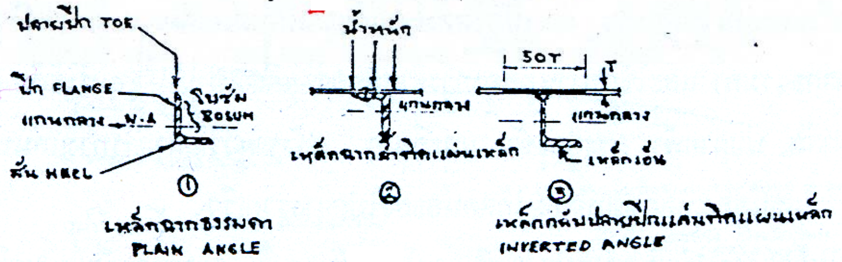
รูปที่ 1 เหล็กที่ต่อเรือ 1 ตร.ฟุต หนา 1 นิ้ว หนัก 40.8 ปอนด์



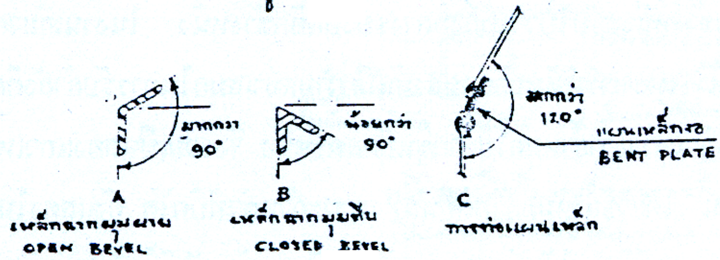


รูปที่ 3 แสดงการใช้เหล็กฉากต่อแผ่นเหล็ก

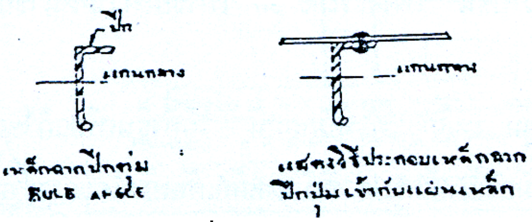
รูปที่ 2 แบบต่างๆของแผ่นเหล็ก



รูปที่ 4



รูปที่ 5 การผายเหล็กฉาก



รูปที่ 6

ทำให้เหล็กเอ็นนี้มีความแข็งแรงกว่าแบบหมุดย้ำถึง 3 เท่าสามารถลดขนาดของเหล็กฉากอินเวิทเตทนี้ลงได้ถึงครึ่งหนึ่งของขนาดเดิม นี่เป็นเหตุผลอันหนึ่งที่การแล่นประสานสามารถประหยัดน้ำหนักโครงสร้างได้มาก

เมื่อขาหรือปีกของเหล็กฉากไม่ได้ทำมุมกัน 90 ดีกรี เราเรียก บีเวล ถ้ามุมมากกว่า 90 ดีกรี เรียกเหล็กฉากมุมผาย ถ้ามุมน้อยกว่า 90 ดีกรี เรียกเหล็กฉากมุมตีบ เหล็กฉากมุมตีบนั้นมีข้อรังเกียจหลายอย่างคือ ทำการตีบลำบาก เจาะรู ย้ำหมุดลำบาก และไม่เรียบไปกับแผ่นเหล็ก เหล็กฉากมุมผายใช้กันมาก มุม 120 ดีกรีใช้มากที่สุด ถ้าต้องการต่อให้มุมมากหว่า 1230 ดีกรี เพื่อใช้ต่อแผ่นเหล็กตามรูปที่ 26 แล้วมักใช้แผ่นเหล็กงอแทนก็ได้ (Bent Plate)

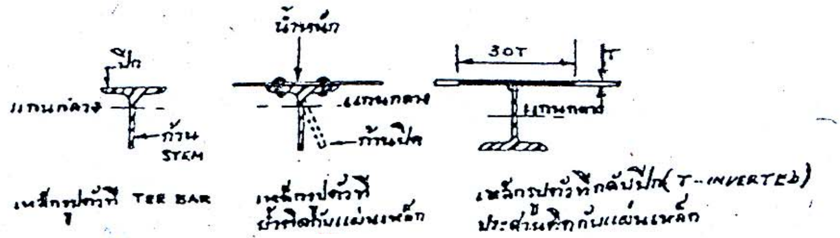
2.5.2 เหล็กฉากปีกตุ่ม เหล็กฉากแบบนี้เป็นเหล็กจากธรรมดาที่กล่าวมาแล้ว แต่ท่าปลายปีกข้างหนึ่งของเหล็กฉากนั้นให้เป็นตุ่ม ด้วยเนื้อโลหะเช่นเดียวกันกับเนื้อเดิม เหล็กฉากปีกตุ่มจึงแข็งแรงกว่าเหล็กฉากธรรมดา และใช้กับงานที่ต้องการย้ำหมุดอย่างเดียวเท่านั้น งานที่ใช้คือ กง, สตริงเกอข้าง, เอ็นฝากั้น, บีมดาดฟ้า, กระดูงูข้าง และอื่น ๆ หลังจากวิวัฒนาการทางแล่นประสานได้เจริญขึ้นนี้ประโยชน์ของเหล็กฉากเป็นตุ่มได้ลดน้อยลงไปอย่างรวดเร็ว

2.5.3 เหล็กฉากรูปตัวที เหล็กรูปตัวที ตามในรูปที่ 28 นี้ อาจคิดว่าเป็นรูปเหล็กฉากตามที่กล่าวมาแล้ว แต่ปีกข้างหนึ่งขยับไปวางที่กึ่งกลางของปีกอีกข้างหนึ่ง ในงานเกี่ยวกับการย้ำหมุดมักจะใช้เหล็กรูปตัวที่นี้ เพราะทำให้หน้าตัดของมันมีความสม่ำเสมอในการรับกำลังดีกว่า ในรูปที่ 25 และการยึดก็มั่นคงดี เพราะว่าย้ำหมุดได้มากขึ้นอีกแถวหนึ่ง จึงรวมเป็นสองแถวเหล็กฉากรูปตัวทีนี้เมื่อใช้เป็นเหล็กเอ็น โดยวิธีย้ำหมุดก็ไม่สู้ดีนัก เพราะก้านตัวที่บิดได้ ดังแสดงในรูปเพราะเนื้อตอนปลายไม่พอทางที่ดีควรใช้แล่นประสานโดยกลับเอาก้านตัวทีขึ้นไปแล่นติดกับแผ่นเหล็กเสร็จแล้วก็จะเกิดเป็นคล้ายรูปตัวไอขึ้น เพราะระยะ 30 เท่าของความหนาของแผ่นเหล็กทำหน้าที่คล้ายปีกบนของ ไอบีม

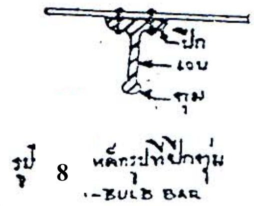
2.5.4 เหล็กรูปตัวทีปีกตุ่ม เหล็กรูปตัวทีปีกตุ่มนี้ ได้ทำขึ้นเพื่อแก้ไขข้อบกพร่อง ตามที่กล่าวมาแล้วในรูปที่ 28 เพราะเมื่อใช้เหล็กรูปตัวทีเป็นเหล็กเส้นเอ็นโดยการย้ำหมุด แล้วาจะบิดง่าย จึงเพิ่มเนื้อโลหะขึ้นที่ก้านของตัวที เพื่อให้มีกำลังขึ้น แต่อย่างไรก็ตามการใช้เหล็กชนิดนี้ในงานหมุดย้ำหมดสมัยไปและ

2.5.5 เหล็กแชนแนลนั้นมีปีกสองปีกอยู่ตอนบนขนานและตั้งฉากกับเวบ เป็นเหล็กที่มีประโยชน์ต่อการทำกงเรือ, ดาดฟ้า, บีม, เหล็กเอ็น ฝากั้น และเสา แต่อย่างไรก็ดีเหล็กชนิดนี้มักเกิดการบิด เพราะเนื้อที่หน้าตัดเมื่อประกอบเข้ากับแผ่นเหล็กแล้วไม่เท่ากัน เป็นเหล็กที่ใช้มากในการต่อเรือ โดยการย้ำหมุดเพราะปีกบนใช้ย้ำหมุดได้แน่นหนาดี

2.5.6 ไอบีมและเอชบีม บีมชนิดนี้มีรูปหน้าตัดเป็นรูปตัวไอ และเอช ดูรูปที่ 31 ไอบีมนั้นอาจคิดเสียว่าเป็นเหล็กแชนเนล โดยเวบของมันมาอยู่ที่กึ่งกลางปีกทั้งสอง หน้าตัดของไอบีมนี้เหมือนกันอย่างแท้จริง จึงเป็นเหตุให้รับกำลังได้อย่างดี โดยใช้เป็นบีมรับดาดฟ้าและอะเส

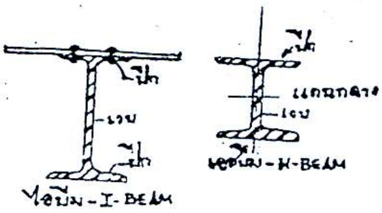


รูปที่ 7

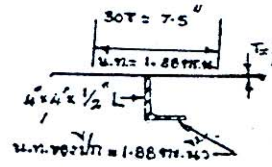


รูปที่ 8

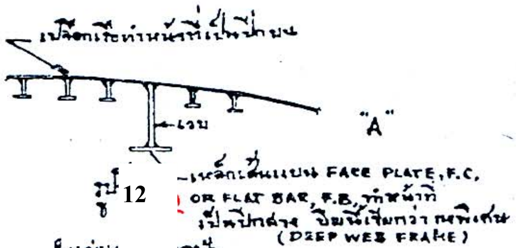
รูปที่ 9



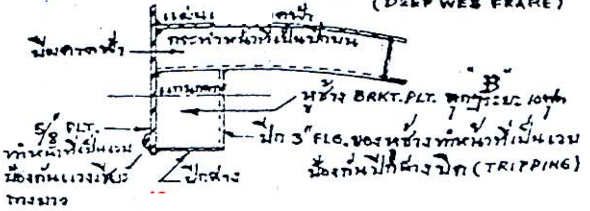
รูปที่ 10



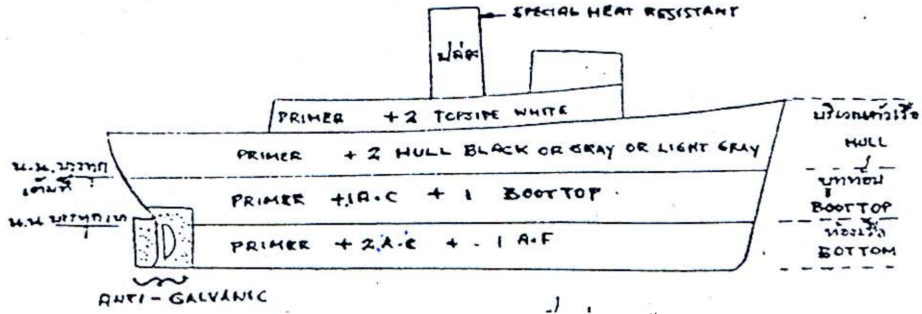
รูปที่ 11



รูปที่ 12



รูปที่ 13 BUILT-UP SECTION
HATCH GIRDER



รูปที่ 14 แสดงการใช้สีต่างๆและจำนวนชั้นที่ทาสี

เมื่อปีกของไอบีมกว้างเท่า ๆ กับเวบ เราเรียกว่าเอชบีม ใช้มากสำหรับทำเสาภายในห้องหม้อน้ำ, ห้องเครื่อง แต่ไม่ดีถ้านำไปใช้ทำเสาในระวางบรรทุกสินค้า เพราะมันคม จะทำให้สินค้าเสียหาย

2.5.7 บีมดัดแปลง (Cut Section) ในงานแล่นประสานนั้น เกิดความดีอีกอย่างหนึ่ง คือสามารถจะตัดปีกของบีมที่กล่าวมาแล้วเสียปีกหนึ่งได้โดยไม่ทำให้กำลังเสียหาย แต่น้ำหนักเบาขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากแผ่นเหล็กที่นำมาแล่นติดบีมชนิดนี้ทำหน้าที่เป็นปีกอีกข้างหนึ่งไปในตัว ระยะปีกที่เกิดแทนขึ้นใหม่นี้เป็นระยะ 30 เท่าของความหนาของแผ่นเหล็กนั้น ดูรูปที่ 32

สมมติว่าเรามีเหล็กฉาก 4” x 4” x ½” แล่นติดกับแผ่นเหล็กแผ่นหนึ่งหนา ¼” ดูรูปที่ 32 เนื้อที่หน้าตัดของเหล็กฉากนี้เท่ากับ 3.75 ตร.นิ้ว (เพื่อความสะดวกใช้หนังสือคู่มือเปิดหาเนื้อที่นี้) ฉะนั้น เนื้อที่หน้าตัดปีกล่างจะประมาณ

$$\frac{3.75 \text{ ตร.นิ้ว}}{2} = 1.88 \text{ ตร.นิ้ว}$$

ในที่นี้เราอาจใช้ความหนาของแผ่นเหล็กเท่าใดก็ได้ และเมื่อใช้ 30 เท่าของความหนานั้นแล้วจะเท่ากับเนื้อที่ 1.88 ตร.นิ้ว จึงจะทำให้เนื้อที่หน้าตัดข้างบน ข้างล่างเท่านั้นในที่นี้ใช้ความหนาแผ่นเหล็ก T = ¼ นิ้ว และ x นิ้วเป็นระยะ

$$T\ x = 1.88 \text{ ตร.นิ้ว}$$

$$x = \frac{1.88 \text{ ตร.นิ้ว}}{0.25 \text{ นิ้ว}} = 7.52 \text{ นิ้ว}$$

ฉะนั้น 30 T หรือ 30 เท่าของ ¼ นิ้ว = 30 x 0.25 = 7.5 นิ้ว ฉะนั้นจึงได้รอยตัดที่ สมดุลกันอันคล้ายกับรูปหน้าตัดของแชนแนล โดยมีขาหนึ่งของเหล็กฉาก อยู่ที่กึ่งกลางของปีกนี้

2.5.8 บีมพิเศษ (Deep Beam) บีมพิเศษนี้เป็นบีมที่เกิดขึ้นด้วยการนำแผ่นเหล็กหลาย ๆ ชั้นมาแล่นประสานติดกันเป็นรูปตัวไอ ตัวที หรือตัวเอช ก็ได้ บีมพิเศษนี้ใช้ทั้งในเรือสินค้าและเรือรบ แต่ราคาแพงกว่าบีมชนิดต่าง ๆ ที่กล่าวมาแล้ว แต่ว่าแข็งแรง ในตำบลที่ต้องการให้แข็งแรง และเป็นการลดน้ำหนักไปในตัว รูปที่ 33 และ 34 แสดงที่ใช้บีมพิเศษ ภายในเรือ และยังมีที่ใช้ที่อื่น ๆ อีก จะได้บอกให้ทราบต่อไป

2.5 วัสดุอื่น ๆ ที่ใช้ภายในเรือ

วัสดุอื่น ๆ ที่ใช้ภายในเรือที่จะกล่าวต่อไปนี้ บางชนิดก็ใช้มาก บางชนิดก็ใช้น้อย และบางชนิดใช้เฉพาะงานที่พิเศษ

2.6.1 วัตถุประเภทเหล็กและโลหะผสม

ก) เหล็กอาบสังกะสี (Galvanized Iron) เป็นเหล็กดำต่อเรือนี่เอง แต่นำลงไปชุบลงในสังกะสีที่ละลายแล้ว เหล็กอาบสังกะสีใช้มากในเรือของราชนาวี และในเรือสินค้าไม่ค่อยจะใช้ ทั้งนี้เพื่อกันการผุกร่อนของตัวเรือไม่ให้ผุไวเกินไป เมื่อนำเหล็กอาบสังกะสีมาใช้ในงานแล่นประสาน ค่าแรงต้องเสียแพง เพราะอันตรายอันเกิดจากควันสังกะสีเป็นพิษต่อร่างกาย เจ้าหน้าที่ต้องมีหน้ากากสวม เหล็กที่มิได้อาบสังกะสีนั้นเรียกว่า เหล็กดำต่อเรือ (Black Iron or Mild Steel) ทั้งนี้เพื่อให้ต่างไปจากเหล็กที่อาบสังกะสี

ข) เหล็กขาว (Corrosion-Resisting-Steel, Crs) เป็นเหล็กชนิดหนึ่งที่ไม่เป็นสนิมเลย แพงและเกือบจะไม่ละลายในไฟ

ค) เหล็กกำลังยืดสูง (High Elastictty Steel, Hes) เป็นเหล็กที่มีกำลังยืดสูงมาก มีความต้านทานต่อการผุกร่อนเป็นสองเท่าของเหล็กดำต่อเรือ เหล็กกำลังสูงนี้มีคุณสมบัติดังนี้

ขีดประลัย	= 72,500 ปอนด์ ต่อ ตร.นิ้ว
ขีดลับ	= 50,000 ปอนด์ ต่อ ตร.นิ้ว

2.6.2 วัตถุประเภทไม่ใช่เหล็ก และโลหะผสม

ก) บรอนซ์ ใช้หล่อใบจักรเรือ และใช้หล่อส่วนประกอบอื่น ๆ ภายในเรือ เช่น ก้ามปู, พุกผูกเรือ เป็นต้น น้ำหนักประมาณ 550 ปอนด์ ต่อ 1 ลูกบาศก์ฟุต

ข) ทองเหลือง ใช้สำหรับทำเครื่องประดับภายในเรือ เช่น ขอแขวนเสื้อ, บานับ, กลอนประตู เป็นต้น นอกจากนี้ใช้ทำหน้าลิ้นกำลังดันต่ำ และของช่องกระจกด้วย ถ้านำทองเหลืองนี้ไปชุบโครเมี่ยมก็สามารถนำไปใช้เป็นเครื่องประกอบระบบเครื่องสุขภัณฑ์ ภายในห้องน้ำ เช่น ก๊อกน้ำ, ที่แขวนเสื้อผ้า เป็นต้น น้ำหนักของทองเหลืองประมาณ 527 ปอนด์ ต่อ 1 ลูกบาศก์ฟุต

ค) ทองแดง ใช้สำหรับทำแป๊บกำลังดันต่ำ เช่น แป๊บในเครื่องกลั่นน้ำ, หลอดในหม้อดับไอน้ำ และใช้เป็นส่วนประสมของสิ่งที่จะนำไปติดตั้งในบริเวณใกล้เข็มทิศเดินเรือ เพื่อไม่ให้เกิดสนามแม่เหล็กในบริเวณนั้น น้ำหนักของทองแดงประมาณ 500 ปอนด์ ต่อ 1 ลูกบาศก์ฟุต

ง) ตะกั่ว ใช้สำหรับบัดกรีภายในห้องเย็น และตามแป๊บต่าง ๆ น้ำหนักตะกั่ว 687 ปอนด์ ต่อ 1 ลูกบาศก์ฟุต

จ) สังกะสี ใช้มากสำหรับทำสังกะสีกันกร่อน ติดที่ตัวเรือบริเวณใบจักรเรือ ซึ่งทำด้วยบรอนซ์ และติดในหม้อน้ำสค๊อช, หม้อดับไอ และที่กระดูกงูปีก น้ำหนักของสังกะสี 449 ปอนด์ ต่อ 1 ลูกบาศก์ฟุต

ฉ) โมเนล (Monel Metal) เป็นโลหะผสมระหว่างนิเกิลกับทองแดง ใช้ทำปีกเทอร์ไบน์อ่างล้างชาม หรือภาชนะหรือสิ่งอื่นที่ต้องการความทนทานและไม่ให้เกิดสนิม น้ำหนักโมเนล หนัก 551 ปอนด์ ต่อ 1 ลูกบาศก์ฟตุ

ช) โลหะเนื้อขาว (White Metal) เป็นโลหะเนื้อขาว เช่น ตะกั่ว, ดีบุก, พลวง (Antimony) โลหะชนิดนี้ใช้ในการบัดกรีระบายเครื่องสุขา และใช้ทำแบริ่งรับเพลา

ซ) อะลูมิเนียม ใช้เป็นเครื่องประกับตกแต่งส่วนต่าง ๆ ให้สวยงาม เช่น ประดับตามราวบันได หรือใช้หล่อส่วนต่าง ๆ ของเครื่องจักรบางส่วน และบางทีใช้เป็นโครงสร้างด้วย เช่น ซูเปอร์สทรัคเจอร์ (Superstructure) ของเรือ เอส.เอส.ยูไนเตดสเตท (S.S.United States) ทั้งหมดใช้อะลูมิเนียมทั้งสิ้น อะลูมิเนียมนี้นำมาติดกันได้โดยใช้หมุดย้ำพิเศษที่มีโลหะอย่างอื่นผสมอยู่ด้วย (Special-Alloy Rivets) ในการจะย้ำหมุดให้ง่าย และได้ผล ต้องนำหมุดย้ำพิเศษนี้ไปทำให้เย็นโดยน้ำแข็งแห้ง (Dry Ice) โดยแช่ไว้ในฟรีสเซอร์แช่ไอสกรีมธรรมดานี้ ต่อจากนั้นเมื่อจะเอาออกมาย้ำครั้งแรกจุ่มลงในแอลกอฮอล์ เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดหยดน้ำบนหมุดย้ำนั้น เมื่อหมุดย้ำนี้ใช้ต่อแผ่นอะลูมิเนียมกับเหล็ก ซึ่งเป็นโลหะต่างชนิดกันต้องใช้ฉนวนกั้นตรงรูหมุดย้ำเพื่อกันเกิดปฏิกิริยาทางไฟฟ้า หมุดย้ำที่เป็นอะลูมิเนียมผสมนี้ มีกำลังดึงประมาณ 42,000 ปอนด์ ต่อ ตร.นิ้ว แรงขีดล้าประมาณ 35,000 ปอนด์ ต่อ ตร.นิ้ว น้ำหนักของอะลูมิเนียมหนัก 129 ปอนด์ ต่อ ลูกบาศก์ฟุต อะลูมิเนียมทนทานต่อการผุกร่อนสนิมดียิ่ง ปัจจุบันราคายังสูง

2.6.3 วัตถุที่ใช้ในการประดับตกแต่ง (Joiner Material)

ก) ไม้ ประโยชน์ของไม้ชนิดต่าง ๆ และน้ำหนักใน 1 ลูกบาศก์ฟุต ได้ปรากฏอยู่ในตารางต่อไปนี้ :-

งานที่ใช้ในเรือ	ชนิดของไม้	น้ำหนัก ปอนด์ ต่อ 1 ลบ.ฟุต
เสากระโดงและบูม	ไม้สน นอรเว	30.0
	ไม้สนเหลืองใบยาวหนาทึบ	39.8
เสาราวลูกกรง	ไม้โอ๊คขาว	44.3
	ไม้สนเหลืองใบยาวหนาทึบ	39.8
ราวลูกกรงภายนอก	ไม้สัก	36.3
ราวลูกกรงภายใน	ไม่แอ๊ช	39.8
ไม้กรุในระวาง	ไม้เฮมล๊อค	27.0
	ไม้สนดักกลาส	32.0
	ไม้สปูช	26.9
ไม้ตาราง	ไม้แอ๊ช	39.8
ฉนวน	ไม้บัลซา	7.5 ถึง 12.5
	ไม่ค๊อค	12.9
แบริ่งรับเพลาใบจักร	ไม้ลิกนัมไวตี	78.0
ไม้ปิดปากระวาง	ไม้สปูช หรือไม้สนออริกอน	26.8
ไม้รองโคนเสา	ไม้สัก	36.3

ข) วัตถุประเภทไม้ (Wood Substitutes) ประกอบไปด้วยวัตถุประเภทกันไฟ ซึ่งนำเข้ามาใช้แทนงานไม้กรุเพดาน ซึ่งจะต้องเซาะและทำลิ้นในเนื้อไม้ให้สนิท งานอย่างนี้ลำบากและใช้แรงงานเสียเวลามาก เมื่อนำวัตถุแทนไม้ เช่น มาริไนท์ (Marinite) เข้ามาแทนแล้วทำให้งานง่ายและสวยงามขึ้น น้ำหนักวัตถุประเภทนี้หนัก 3 ถึง 6 ปอนด์ ต่อ 1 ลบ.ฟุต ขึ้นอยู่กับความหนา วัตถุประเภทนี้นับวันจะมากขึ้น นับตั้งแต่วิทยาศาสตร์ ในการทำปลาสติคเจริญขึ้น

ค) เครื่องเรือน รวมทั้งเครื่องประดับตกแต่ง ผ้าม่าน, พรมเช็ดเท้า, พรมปูห้อง, เครื่องครัว, ภาชนะถ้วยชาม, เครื่องเงิน ฯลฯ

2.6.4 เครื่องบุดาดฟ้า

ก) ไม่ใช้บนดาดฟ้าที่ตากแดดตากลมหรือดาดฟ้าชั้นบน ใช้ไม้สัก หรือไม้สนใบยาว

ข) แมนิไซท์ ใช้ฉาบหน้าพื้นเหล็ก หรือใช้ทาพื้นก่อนปูแผ่นลินโนเลียม ส่วนผสมที่ใช้เหมือนกับซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ แต่เบาและยืดหยุ่นกว่า

ค) บิทูเมน คล้ายกับปูนเทพื้นถนน แต่ผสมไม้ก๊อกด้วยเพื่อให้เบา

ง) ซีเมนต์ ใช้ฉาบหน้าพื้นก่อนปูกระเบื้องเซรามิค

จ) กระเบื้องเคลือบ ใช้ปูพื้นห้องน้ำห้องส้วม ไม่ค่อยใช้ปูตามฝากั้น เพราะหนัก

ฉ) ลินโนเลียม ใช้บุบนดาดฟ้าเหนือห้องกลาสีเพื่อกันความร้อน สามารถปูบนพื้นเหล็กโดยตรง หรือจะลาดแมกนิไซท์เสียก่อนแล้วจึงปูก็ได้ ปกติเป็นสีธรรมดาเรียบ ๆ บัดนี้ลินโนเลียมเกือบไม่ใช้ในเรือรบแล้ว เพราะเป็นวัตถุที่ช่วยให้ไฟติด

ช) กระเบื้องยาง ผลิตออกมาขนาดสี่เหลี่ยมจตุรัสกว้าง 9 นิ้ว จะปูพื้นได้โดยใช้กาวซีเมนต์ หรือ แมกนีไซท์ก็ได้ แต่เมื่อเปียกน้ำและลื่น

ซ) กระเบื้องยางมะตอย เหมือนกระเบื้องยางที่กล่าวมาแล้ว แต่ลื่นน้อยกว่า

ด) กระเบื้องอิฐ ใช้ในบริเวณพื้นห้องครัว

ต) กระเบื้องไวนิล คล้างกระเบื้องยางแต่ทนกว่า

2.6.5 วัตถุฉนวน (Insulations)

ก) ไม้ ใช้เป็นดาดฟ้า หรือบุทาบบนดาดฟ้าเหล็กอีกชั้นหนึ่ง กันความร้อนดี

ข) แมกนีเซีย อาจทำมาเป็นแท่งสี่เหลี่ยมหรือทำมาคล้ายซีเมนต์ ใช้ทารอบหม้อน้ำ, หุ้มเทอร์ไบน์ แล้วกรุด้วยแผ่นเหล็กบาง ๆ ใช้หุ้มแป๊บต่าง ๆ กันความร้อนแล้ว หุ้มด้วยผ้าใบฉนวนแก้ว (Spun Glass) แอสเบสโตส ก็ได้

ค) สักหลาด ใช้หุ้มรอบท่อน้ำเย็น เพื่อกันไม่ให้เกิดเม็ดน้ำจับ และกันไม่ให้น้ำหายเย็นด้วย แล้วหุ้มด้วยผ้าใบ

ง) ไม้ก๊อก เหมือนกับสักหลาด

จ) อิฐทนไฟ ใช้ภายในหม้อน้ำ เพื่อป้องกันไม่ให้หลอดหม้อน้ำถูกความร้อน

เกินไป อันเป็นเหตุให้ละลายได้

ฉ) ไม้ก๊อกคลุกสี เป็นไม้ก๊อกเม็ดเล็ก ๆ กันสีคลุกันแล้วทาบนแผ่นเหล็กเพื่อกันไม่ให้ความเย็นเกาะแผ่นเหล็กจนเกิดเป็นหยดน้ำขึ้น จะทำให้เหล็กผุ

2.6.6 วัตถุที่ใช้ป้องกันสนิมหรือความผุกร่อนต่าง ๆ

2.6.6.1 วัตถุที่ใช้บรรจุ (Filler) ลงในที่แคบคนเข้าไม่ถึง หรือตามมุมต่าง ๆ

ก) ซีเมนต์ ใช้ผสมกับถ่านโค้ก เพื่อให้เบา หรือจะใช้ซีเมนต์อย่างเดียวก็ได้

ข) น้ำมันดินและเชลแลค (Pine Tar And Shellac) ใช้เป็นส่วนผสมทารองพื้น

ค) เสน (Red Lead) ใช้ทาระหว่างแผ่นเหล็กเสริมขอบ

ง) ไม้บัลซา (Balsa) ใช้บรรจุไว้ในหางเสือ กลวง กระดูกงูปีก ปกติมักจุ่มลงในน้ำมันดินร้อน ๆ ก่อนจะบรรจุลงไป

จ) วัตถุอื่น ๆ ซึ่งใช้ในการอุดตามงานต่าง ๆ มักมีขายตามบริษัทผลิตสีและน้ำมัน ซึ่งใช้บรรจุในหางเสือกลวง และในที่ที่เข้าไม่ได้อื่น ๆ

2.6.6.2 วัตถุที่ใช้ทางผิวน้ำ (Proctective Coating Material) ดูรูปที่ 35

ก) สี (Paint)

สีรองพื้น(Primer)ได้แก่ เสนหรือ ซิงโครเมท (Zinc Chromate) ซึ่งมีสีเหลือง

สีกันสนิม (Anticorrosivc, a.c.) ใช้กันสนิม

สีกันเพรียง (Antifouling, a.f.) ประกอบด้วยทองแดงและปรอท

สีบูทท๊อป (Boottop) สีพิเศษใช้ทาบริเวณแนวน้ำเบาที่สุด กับลึกที่สุด ซึ่งมีการเปียกแห้งบ่อยครั้ง

สีกันกร่อน (Antigalvanic) ใช้ทาบริเวณใบจักรที่ทำด้วยบรอนซ์และใช้ทาในลิ้นและปั้ม

สีทาปล่อง (Topside Paint) ใช้ทาปล่องและบริเวณตอนบน ของสิ่งที่ถูกควันและน้ำเค็ม

สีพลาสติก และไวนิล (Plastic And Vinyl-Base Bottom Paint) ก่อนทาต้องใช้ทรายพ่นทำความสะอาดเสียก่อน การพ่นใช้พ่น 6 ชั้น

สีทาภายใน มีหลายชนิด สีชนิดมันและชักเงานั้น ช่วยให้การรักษาความสะอาดดีขึ้น แต่สีมันเงานี้ช่วยให้ไฟไหม้รุนแรงขึ้น

ข) สีฉาบ (Bitumastic – Type Coatings) เช่น ยางมะตอย และน้ำมันดิน ใช้ทั้งเมื่อร้อนและเย็น ใช้ฉาบภายในห้องยุ้งโซ่ ทางกะพุ้งน้ำเข้าลิ้นห้องเรือภายใต้แท่นเครื่อง ใต้ฐานต่าง ๆ และที่อื่น ๆ ที่ลับหูลับตา

ค) ซีเมนต์ฉาบ (Cement Wash) ใช้ฉาบภายในถังน้ำบาง ๆ ก่อนจะใช้น้ำในถังต้องแช่ถังในน้ำจืดสนิทดีเสียก่อน

บทที่ 3

ความแข็งแรงของวัสดุในการต่อเรือ

ส่วนใหญ่ของเหล็กที่นำลงสร้างเรือนั้น แบ่งออกได้เป็น 4 ประเภท คือ บีม แผ่นเหล็กต่าง ๆ เสา และเพลา แต่ละประเภทมีหน้าที่ของมันแต่ละอย่างโดยเฉพาะ ยิ่งกว่านั้นแต่ละประเภทยังมีหน้าที่สัมพันธ์กันและกันอีกด้วย จนกระทั่งตัวเรือเปรียบเหมือนโครงสร้างที่ใหญ่โต ประกอบไปด้วยส่วนต่าง ๆ ใหญ่น้อยเป็นพัน ๆ ชิ้น และเปรียบตัวเรือเป็นคานอย่างใหญ่ชนิดหนึ่ง ซึ่งลอยอยู่ในน้ำ และเปรียบยอดคลื่นเป็นจุดรองรับ ซึ่งยอดคลื่นเหล่านี้จะเปลี่ยนไปมาเกิดขึ้นในช่วงหนึ่งของลำเรือเป็นสองกรณี กรณีที่ 1 ยอดคลื่นอยู่ที่หัวและท้าย และท้องคลื่นอยู่กลาง ลำตอนหัวท้ายจึงอุดมด้วยความลอยหรือแรงพยุง ส่วนกลางลำขาดแรงพยุง น้ำหนักเรือจึงตกลงตรงกลาง ถ้าเรือจะหักก็จะหักที่ท้องเรือดังในรูปที่ 2 กรณีเช่นนี้เรียกเรือตกท้องช้าง ส่วนกรณีที่ 2 นั้น ยอดคลื่นอยู่กลางลำ และท้องคลื่นอยู่ที่หัวกับท้าย แรงพยุงจึงอุดมที่กลางลำ และหัวท้ายขาดแรงพยุง น้ำหนักของเรือจึงเกิดที่หัวท้าย เรือก็จะหักที่ดาดฟ้า ดังรูปที่ 4 กรณีนี้เรียกเรือคุ้งกลาง

เพื่อให้เข้าใจดีถึงการออกแบบโครงสร้างของเรือ ซึ่งจะต้องไปผจญกับคลื่นลม อันเป็นสิ่งที่ไม่ทราบว่าเป็นแรงภายนอกอันยุ่งยากและรุนแรงเท่าใดนั้น จำเป็นต้องศึกษาวิชาคำนวณชั้นสูง และความแข็งแรงของวัตถุมากมาย ซึ่งไม่สามารถที่จะดำเนินสิ่งดังกล่าวอย่างละเอียดในหนังสือเล่มนี้ได้ แต่จำเป็นจะต้องกล่าวไว้บ้างดังต่อไปนี้.-

น้ำหนักบรรทุก เป็นแรงที่กระทำลงบนโครงสร้างของเรือมีหน่วยเป็นปอนด์ หรือตัน

แรงเค้น เป็นแรงที่กระทำในหนึ่งหน่วยของเนื้อที่ มีหน่วยเป็นปอนด์ หรือตันต่อตารางนิ้ว

ความเครียด เป็นความบิดเบี้ยวอันเนื่องจากแรงเค้นมีหน่วยเป็นปอนด์ หรือตัวต่อตารางนิ้ว

แรงเค้นดึง แรงเค้นดึงเกิดขึ้นเมื่อแรงสองแรงดึงสิ่งหนึ่งสิ่งใด เช่นแท่งเหล็ก หรือสลัก ฯลฯ ดังในรูปที่ 5 แท่งเหล็กแท่งหนึ่งถูกแรง P ปอนด์ ดึงเนื้อที่หน้าตัดของแท่งเหล็กที่หน้าตัด Y – Y เท่า A ตร.นิ้ว จะเกิดแรงเค้นดึง

แรงเค้นดึง Tensile Stress Ts $\frac{\text{กำลังดึง}}{\text{เนื้อที่}} = \frac{P}{A} =$

ถ้าแรงเค้นถึง P = 20 ตัน, เนื้อที่ A = 4 ตร.นิ้ว

$$\frac{P}{A} \qquad \frac{20 \text{ ตัน}}{4 \text{ ตร.นิ้ว}}$$

แรงเค้นดึง Ts = = = 5 ตัน ต่อ ตร.นิ้ว

แรงเค้นอัด แรงเค้นอัดเป็นการกระทำกลับกันกับที่กล่าวไว้ในเรื่องแรงเค้นดึง

แรงเค้นอัด Compressive Stress = $\frac{\text{กำลังอัด}}{\text{เนื้อที่}}$

แรงเค้นเชียร์

ดูรูปที่ 6 เป็นรูปแผ่นเหล็กสองแผ่นที่ยึดติดด้วยสลักตัวหนึ่ง เมื่อแผ่นเหล็กทั้งสองถูกดึง ก็จะเกิดแรงเค้นเชียร์ตัดสลักให้ขาดออกจากกัน

แรงเค้นเชียร์ $S_S = \frac{\text{กำลังดึง}}{\text{เนื้อที่}} = \frac{P}{A}$

ถ้ากำลังดึง P = 5 ตัน และสลักโต 1 นิ้ว ซึ่งมีเนื้อที่เท่ากับ

πR^2 = 3.14 x (.5 นิ้ว $)^2$ = 0.785 ตร.นิ้ว

แรงเค้นเชียร์ $S_S = \frac{\text{5 ตัน}}{\text{0.785 ตร.นิ้ว}}$ = 6.5 ตัน/นิ้ว^2

3. การหาความแข็งแรงของวัตถุ

3.1 การหาความแข็งแรงของวัตถุ (Determining The Strength of Steel)

ชิ้นส่วนที่จะนำมาทำการทดลองกำลังวัตถุนั้นถูกนำมาติดในเครื่องทดลองดึง ดังในรูปที่ 7 เสร็จแล้วชิ้นส่วนก็ถูกดึงโดยเครื่องทดลองนั้น อ่านกำลังดึงบนเกชเป็นปอนด์ หรือตัน

ถ้าทำการทดลองดึงต่อไป แล้วทำการคำนวณแรงเค้นและความเครียดไปเป็นขั้น ๆ แล้วทำการเขียนเส้นโค้ง ก็จะปรากฏดังในรูปที่ 8 ซึ่งมีชื่อว่า ไดอาแกรมแรงเค้นความเครียด (Stress Strain Diagram)

เมื่อทำการศึกษาเส้นโค้งที่ปรากฏในรูปที่ 8 จะทราบข้อความหลายอย่างจากจุด O ถึง Aกำลังดึงกับการยืดจะเป็นปฏิภาคต่อกัน เส้น OA จึงเป็นเส้นตรง ซึ่งพูดกันว่าเป็นไปตามกฎของฮู๊ค ถ้าชิ้นส่วนนั้นถูกดึงโดยแรงดึงที่ต่ำกว่าจุด A แล้ว เอาแรงดึงนั้นออก ชิ้นส่วนนั้นจะหดสั้นเข้ามาเองตามตำแหน่งเดิม ถ้าให้ยืดเลยจุด A ขึ้นไป มันจะไม่หดกลับมาตำแหน่งเดิมอีก และขนาดที่ยืดออกไปนั้นจะอยู่อย่างนั้น กำลังดึงที่ไม่ยืดชิ้นส่วนเกิดจุด A เรียกขีดยืด และถือเป็นเขตที่จะนำไปใช้คำนวณ โครงสร้างทุกชนิดต้องออกแบบโดยใช้กำลังวัตถุ ในเขตใช้คำนวณนี้เท่านั้น ถ้าดึงชิ้นส่วนนั้นต่อไป จาก A จนถึงจุด B ชิ้นส่วนนั้นจะยืดออกอย่างรวดเร็ว แม้จะดึงแต่เบา ๆ และจะยืดออกโดยไม่เป็นสัดส่วนกับแรงดึง และจะยืดจนถึงจุด D และขาดในที่สุดที่จุด E การทดลองชนิดนี้เรียกว่าทดลองจนถึงชิ้นส่วนขาดออกจากกัน

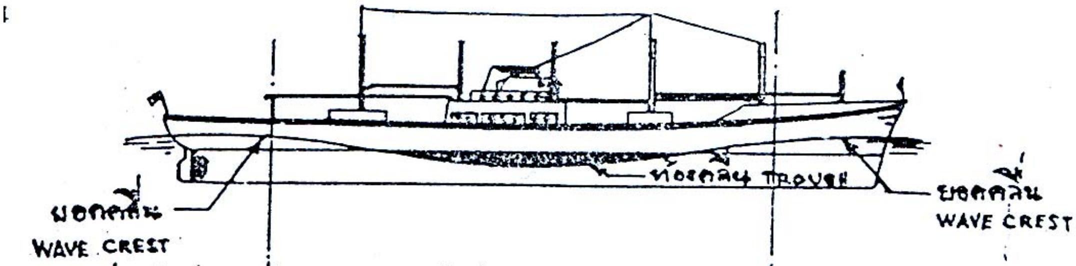
เส้นโค้งตามรูปที่ 8 นั้น จะปรากฏทุกครั้งไม่ว่าจะทดลองดึงโลหะชนิดใด จึงง่ายต่อการ

คำนวณหาว่าวัตถุใดมีกำลังทนทานต่อน้ำหนักต่าง ๆ กันไปอย่างไรบ้าง การออกแบบที่ดีจะต้องออกแบบให้อยู่ในเขตแรงใช้คำนวณ ทั้งนี้จะปลอดภัยได้โดยใช้ส่วนปลอดภัย (Facttor of Safety)

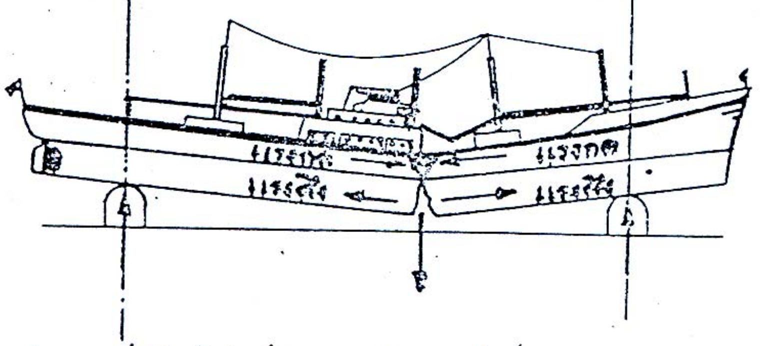
3.2 ส่วนปลอดภัย (Factor of Safety)

ในการจะให้กำลังวัตถุที่จะนำไปทำโครงสร้างอยู่ภายในเขตแรงใช้คำนวณที่ปลอดภัยและอยู่ต่ำกว่าขีดล้านั้น เรานำส่วนปลอดภัยเข้ามาใช้ เมื่อเริ่มจะออกแบบโครงสร้างชนิดหนึ่ง ประการแรกที่จะทำก็คือ พยายามหาว่าโครงสร้างนั้นจะต้องรับแรงภายนอกสักเท่าใด เมื่อได้แรงภายนอกนั้นแล้ว ก็เพิ่มแรงภายนอกนั้นเป็นสองหรือสามเท่า แล้วคำนวณหาโครงสร้าง ทั้งนี้เพื่อให้ได้ชิ้นส่วนของโครงสร้างให้ใหญ่ขึ้นอีก เพื่อป้องกันแรงภายนอกที่ไม่ทราบอันอาจจะเกิดขึ้น ตลอดทั้งเผื่อความผุกร่อนของชิ้นส่วนไว้ด้วย โครงสร้างนั้นจะปลอดภัย

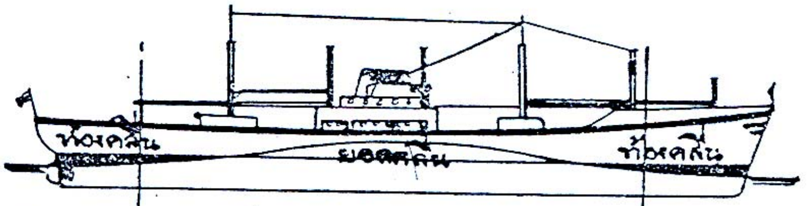
ในการใช้ส่วนปลอดภัยซึ่งยังไม่ทราบนี้ มักคิดเสียว่าเราทำโครงสร้าง ให้แข็งแรงเป็น 4 เท่า หรือพูดว่าส่วนปลอดภัยเท่ากับ 4 ทั้งนี้ใช้แรงประลัยเป็นหลัก แรงประลัยนั้นมากเป็น 2 เท่า ของแรงชีดล้า



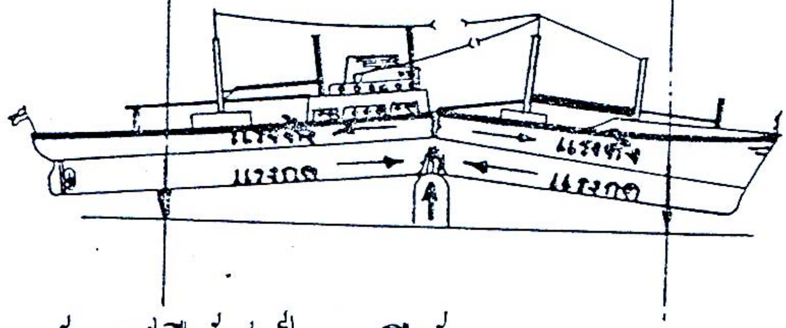
รูปที่ 1 เรือถูกพยุงด้วยยอดคลื่นที่หัวกับท้าย พูดว่าเรือตกท้องช้าง SAGGING CONDITION



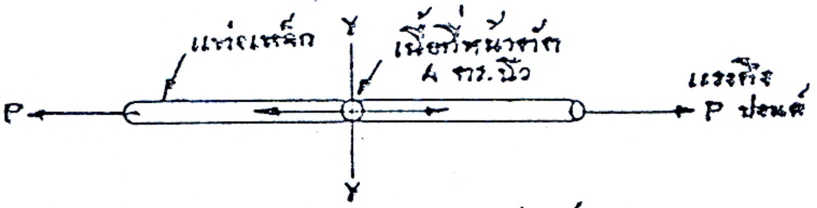
รูปที่ 2 ลักษณะตัวเรือหักอันเป็นผลจากเรือตกท้องช้าง SAGGING CONDITION



รูปที่ 3 เรือถูกพยุงด้วยยอดคลื่นกลางลำแห่งเดียว พูดว่าเรือคุ้งกลาง HOGGING CONDITION

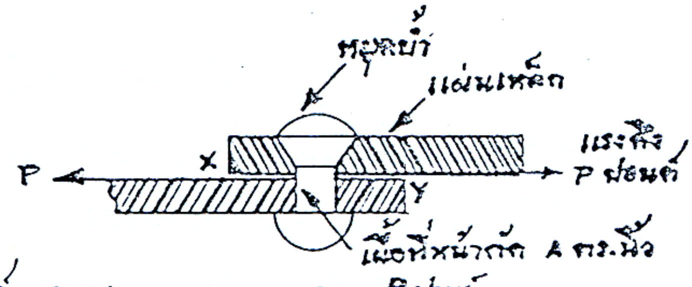


รูปที่ 4 ลักษณะตัวเรือหักอันเป็นผลจากเรือคุ้งกลาง HOGGING CONDITION



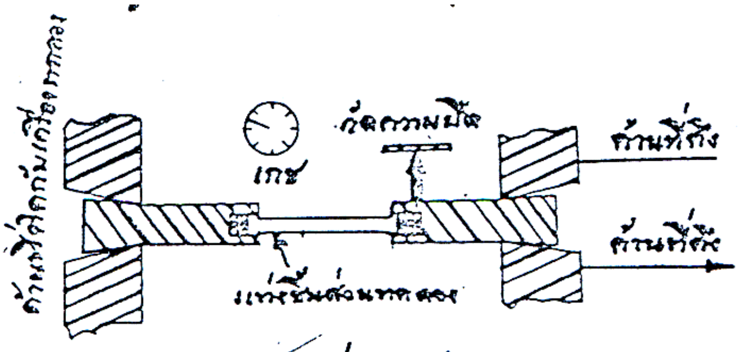
แรงเค้นดึง, TENSILE STRESS, $T_S = \frac{P \text{ ปอนด์}}{A \text{ ตร.นิ้ว}}$

รูปที่ ๕ แรงเค้นดึงในแท่งเหล็ก TIE ROD

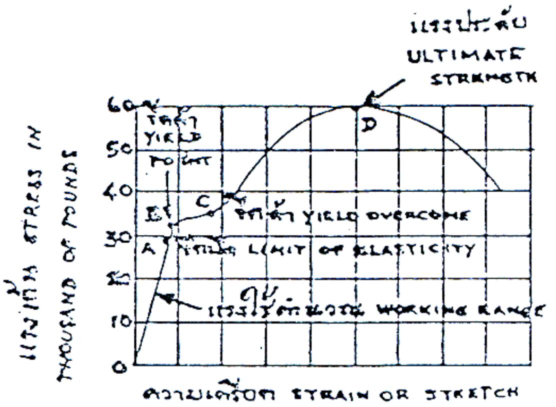


แรงเค้นเชียร์ SHEAR STRESS, $S_S = \frac{P \text{ ปอนด์}}{A \text{ ตร.นิ้ว}}$

รูปที่ ๖ แรงเค้นเชียร์ในหมุดย้ำ (RIVET)



รูปที่ ๗ แสดงการจับชิ้นส่วนที่นำมาทดลอง (SPECIMEN) หากำลังวัสดุ



รูปที่ ๘ แสดง ไดอาแกรม แรงเค้น-ความเครียดของเหล็กเหนียว
STRESS - STRAIN DIAGRAM

ตามตัวอย่างในรูปที่ 5 แรงดึงแท่งเหล็กและเกิดกำลังดึงในแท่งเหล็ก 5 ตัน ต่อตารางนิ้วนั้น ถ้าเราทราบว่าแรงประลัยเหล็กแท่งนี้เท่ากับ 30 ตันต่อ ตร.นิ้ว ก็จะทราบว่าส่วนปลอดภัยเท่ากับ

$$\text{ส่วนปลอดภัย} = \frac{30 \text{ ตัน ต่อ ตร.นิ้ว}}{5.4 \text{ ตัน ต่อ ตร.นิ้ว}}$$

จึงเป็นว่าแท่งเหล็กนั้นใหญ่เกินไปถึง 6 เท่าตัว ควรจะลดขนาดลงได้อีก และตัวอย่างที่แสดงไว้ในรูปที่ 6 แรงเค้นเชียร์ของหมุดย้ำนั้นเกิดแรงเชียร์ 6.4 ตัน ต่อ ตร.นิ้ว ถ้าทราบว่าแรงเค้นเชียร์ของเหล็กนี้เท่ากับ 22 ตัน ต่อ ตร.นิ้ว ก็จะทราบส่วนปลอดภัยของหมุดย้ำเท่ากับ

$$\text{ส่วนปลอดภัย} = \frac{22 \text{ ตัน ต่อ ตร.นิ้ว}}{6.4 \text{ ตัน ต่อ ตร.นิ้ว}}$$

ซึ่งน้อยกว่า 4 หรือหมุดย้ำนี้ใหญ่ไม่ถึง 4 เท่า ของกำลังเดิมจึงควรเพิ่มหมุดย้ำให้โตกว่านี้อีก

3.3 ความแข็งแรงของเรือ (Strength of Ships)

ความแข็งแรงของเรือนั้นแบ่งกว้าง ๆ ได้ 2 อย่าง คือ ความแข็งแรงแต่ละส่วนเป็นกำลังที่เกี่ยวกับกำลังของแต่ละชิ้นส่วนที่ประกอบขึ้นเป็นตัวเรือ กำลังอีกชนิดหนึ่งคือ ความแข็งแรงทั้งหมดเป็นกำลังของเรือทั้งหมดอันเป็นผลมาจากกำลังแต่ละชิ้นประกอบกันขึ้น

ในทางใช้การจะต้องทำการคำนวณน้ำหนักเสียก่อนที่จะคำนวณความแข็งทั้งหมด และในการที่จะหาน้ำหนักของเรือได้ เราจำเป็นต้องหาสแคนทลิง Sccantling ของชิ้นส่วนต่าง ๆ ของส่วนโครงสร้างของเรือ (Ship ‘s Structure) ซึ่งจะยังไม่กล่าวไว้ในเล่มนี้ เพราะเป็นเรื่องยืดยาวเกินไปสำหรับเล่มนี้ ผู้ศึกษาจะค้นคว้าต่อไปได้ในเล่มที่ 4 ความแข็งแรงของเรือ

3.4 สมาคมจัดทำเนียบเรือ (Classification Society)

ในทางใช้การสำหรับเรือสินค้า การหาสแคนทลิง หรือขนาดของชิ้นส่วนต่าง ๆ เช่น บีม, เหล็กเอ็น และแผ่นเหล็กเปลือกเรือนั้น ไม่ได้ทำการหามาโดยการคำนวณ จากความแข็งแรงของวัตถุ แต่หามาโดยใช้กฎของสมาคมจัดทำเนียบเรือ ซึ่งจะทำการจัดขึ้นว่า เรือลำนั้น ๆ อยู่ในประเภทแข็งแรงมากน้อยเท่าใด และออกใบรับรองโครงสร้างของเรือนั้นด้วย

ทุกชาติที่มีการเดินเรือ จะมีสมาคมจัดทำเนียบเรือของตนเองมีหน้าที่ตรวจสอบกำลังและคุณภาพทางทะเลในการทนคลื่นลมของเรือสินค้าต่าง ๆ ที่กำลังจะยื่นใบสมัครแก่บริษัทประกันภัย เรือลำใดที่ไม่ได้สร้างขึ้นตามกฎของสมาคม และสมาคมไม่ได้ออกใบรับรองให้ เมื่อไปทำการประกันภัยกับบริษัทรับประกันก็ย่อมทำได้ แต่เบี้ยประกันที่จะต้องเสียให้แก่บริษัทรับประกันภัยนั้นสูงมากจนบางครั้งการค้าขายอาจไม่มีกำไร ตลอดทั้งเรือที่ไม่ได้รับรองจากสมาคมนั้นจะให้เช่าหรือขายก็ราคาตก เพราะผู้ซื้อไม่เชื่อใจว่าจะเป็นเรือดี

ในสหรัฐอเมริกา สมาคมจัดทำเนียบเรือนี้ได้แก่อเมริกันบูโร (The American Bureau of Shipping) ในอังกฤษ ได้แก่ ลอยด์ (Lloyd’s Register) ในฝรั่งเศส ได้แก่ บูโรเวอริตัส (Bureau Veritas) ในอิตาลี ได้แก่ รียิสโตรอิตาลีโน (Registro Italiano) และในเยอรมัน ได้แก่เยอรมันนิเชลอยด์ (Germanischer Lloyd) ควรสังเกตุว่าสมาคมจัดทำเนียบเหล่านี้ไม่ได้ทำหน้าที่รับประกันภัยเสียเอง หากแต่ทำเอกสารยืนยันรายงานให้แก่บริษัทที่เจ้าของเรือต้องการรับประกันภัยและไม่มีการรับผลกำไร

กฎที่ใช้สร้างเรือสินค้านั้นให้ขนาดต่าง ๆ ของเรือไว้และต่อเรือได้ยาวถึง 700 ฟุต แต่อย่างไรก็ดีขนาดต่าง ๆ ที่ไม่มีในกฎนั้นสามารถที่จะหาได้โดยหลักคำนวณความแข็งแรงของวัตถุ

3.5 การออกแบบเรือรบ (Naval Design)

การออกแบบเรือรบนั้น ไม่มีกฎที่จะนำมาใช้เหมือนกับการออกแบบเรือสินค้า ทั้งนี้เป็นเพราะเรือที่ใช้ในการรบนั้นมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากการยุทธศาสตร์ ยุทธวิธีทางสงคราม จึงเป็นการไม่เหมาะ ไม่มีประโยชน์ที่จะจำกัดความคิดของผู้ออกแบบเรือรบโดยการตรากฎ

อันละเอียดขึ้นไว้ ทั้งนี้เป็นเพราะผู้ออกแบบเรือรบนั้นมีปัญหายุ่งยาก เกิดขึ้นมากมายกว่าผู้ออกแบบเรือสินค้า แต่เป็นเรื่องสนุก เพราะปล่อยข้อคิดเห็น ข้อประดิษฐ์ ข้อริเริ่มไว้ให้แก่ผู้ออกแบบเรือรบแต่ผู้เดียว ขนาดทุกส่วนในเรือรบต้องคิดคำนวณขึ้นเองเป็นส่วน ๆ ไป

ก่อนที่จะทราบว่าแต่ละส่วนในเรือถูกคำนวณขึ้นอย่างไรนั้น จำเป็นต้องถกกันถึงเรื่องความแข็งแรงของวัตถุเสียก่อน โดยที่โมเมนต์ดัด (Bending Moment) เป็นส่วนที่จะนำมาใช้คำนวณขนาดของบีม จึงขอกล่าวถึงเรื่องนี้ก่อน

3.6 โมเมนต์ดัด (Bending Moment)

โมเมนต์ของแรงรอบจุด ๆ หนึ่ง คือผลคูณของแรงกับระยะทางที่ตั้งฉาก กับแรงนั้นไปยังจุดนั้น

รูปที่ 9 โมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นโดยน้ำหนักเฉพาะที่ (Concentrated Load) กระทำบนคานที่มีสิ่งรองรับข้างเดียว (Cantilever Beam)

รูปที่ 9 แสดงไม้กระดานแผ่นหนึ่งติดอยู่ที่กำแพงด้วยปลายข้างเดียว แล้วเอาน้ำหนักเฉพาะที่ถ่วงที่ปลาย ณ ตำแหน่ง A น้ำหนักอยู่ที่กึ่งกลาง ไม้กระดาน ที่ตำแหน่ง B น้ำหนักอันเดียวกันนั้นอยู่ที่ปลายสุด

โปรดสังเกตว่าเมื่อน้ำหนักอยู่ที่ปลายสุดจะทำให้ปลายไม้โค้งมาก (Deflection) กว่าเมื่อน้ำหนักอยู่ที่กึ่งกลาง ทั้งนี้เป็นเพราะโมเมนต์ดัดอันเกิดจากระยะทางที่มากกว่านั่นเอง

โมเมนต์ดัด B.M. = น้ำหนัก x ระยะทางตั้งฉากกับแนวน้ำหนัก = W x D

ณ ตำแหน่ง A.B.M. = 100 ปอนด์ x 4 ฟุต = 400 ฟุต – ปอนด์

ณ ตำแหน่ง B.B.M. = 100 ปอนด์ x 8 ฟุต = 800 ฟุต – ปอนด์

ณ จุดรองรับโมเมนต์ดัดที่ B เป็นสองเท่าของตำแหน่ง A ฉะนั้นแรงเค้นจึงเกิดเป็นสองเท่าด้วย โมเมนต์ดัดอาจทำให้เป็นสองเท่าได้โดยการเพิ่มน้ำหนักเป็นสองเท่า แต่ระยะทางเพียงครึ่งเดียว

ณ ตำแหน่ง C รักษาระยะ 4 ฟุต แล้วเพิ่มน้ำหนักเป็น 200 ปอนด์

B.M. = 200 ปอนด์ x 4 ฟุต = 800 ฟุต – ปอนด์

เราสามารถพูดได้ว่า ถ้าเพิ่มระยะทางเป็นสองเท่าจากจุดรับรอง หรือเรารักษาระยะทางคงที่แต่เพิ่มน้ำหนักเป็นสองเท่าแล้ว โมเมนต์ดัดจะเกิดเป็นสองเท่า

นี่เป็นตอนที่สำคัญและควรจำไว้ให้แม่น เพราะโมเมนต์ดัดเป็นตัวที่ใช้นำมาหาขนาดของชิ้นส่วนต่าง ๆ ภายในเรือ ไม่ใช่แต่นำหนักแต่อย่างเดียว เมื่อเข้าใจดีแล้วจะได้เริ่มกล่าวถึงเรื่องบีมต่อไป

3.7 บีมที่มีหน้าตัดเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Beam of Rectangula Section)

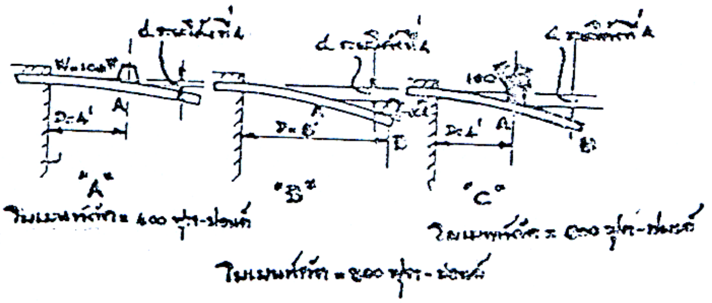
ส่วนโครงสร้างของเรือที่อยู่ในทางระดับและรับแรงกระทำที่มาในทางดิ่งนั้น เรียกส่วนนั้นว่า บีม (Beam) บีมที่ปรากฏอยู่ในรูปที่ 10 เป็นบีมที่มีความสม่ำเสมอ หน้าตัดเท่ากันตลอดเส้น X – X นั้นถือเป็นแกนกลาง

ตามที่ปรากฏในรูปที่ 11 นั้น บีมได้งอโค้งหรืออ่อนลงไป (Deflection) เนื่องจากเอาน้ำหนักถ่วงตรงกลางบีม ตามรูปที่แสดงนั้นเกินความจริงไปมาก แต่ทั้งนี้เพื่อความแจ่มแจ้งในการอธิบาย ทางด้านบนของบีมจะหดสั้น ด้านล่างจะยืดออกอีก ทั้งนี้เป็นเพราะปลายของบีมนั้นไม่ได้ขนานกันเหมือนเดิมหากแต่อยู่ในลักษณะเป็นส่วนหนึ่งของรัศมีของวงกลม

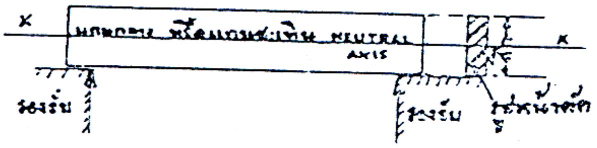
โดยที่ด้านบนของบีมสั้นเข้ามาจึงเกิดแรงอัด (Compression) ส่วนด้านล่างยืดยาวออก จึงเกิดแรงดึง (Tension) แรงอัดและแรงดึงนี้มีทิศทางตรงกันข้าม จึงพอจะคาดหมายได้ว่าต้องมีสักแห่งหนึ่งภายในบีมนั้นที่ไม่ได้รับแรงดึงหรืออัดเลย ซึ่
ในที่นี้ได้แก่แกน X – X

แนวเส้นแกน X – X ซึ่งได้รับกำลังเป็นสูญนี้จะเข้าใจได้ดีขึ้น ถ้าได้พิจารณารูปที่ 12 โดยสมมติว่าบีมนั้นประกอบขึ้นด้วยชั้นบาง ๆ (Layers) หลาย ๆ ชั้นซ้อนกัน ซึ่งไม่ได้สัมพันธ์ติดกันเป็นเนื้อเดียวเลย เมื่อเอาน้ำหนักวางตรงกลางบีมแต่ละชั้น ก็จะเคลื่อนตัวออกจากกันโดยที่ปลายของแต่ละชั้นมีแนวยังขนานกันอยู่ แต่ปลายของต่างชั้นกันจะไม่ขนานกันต่อไป ในการที่จะให้บีมทั้งหมดนี้มีกำลังภายในเท่ากัน จำเป็นต้องกดชั้น (1) และ (2) เข้ามาและดึงชั้น (4) และ (5) ให้ยาวออกจนเท่ากับชั้น (3) ๆ นี้ไม่ต้องทำอะไรเลย เป็นชั้นที่อยู่ในแนวของจุดศูนย์ถ่วง เราเรียกว่าเส้นแกนสะเทินหรือแนวแกนกลาง Neutral Layer หรือ Neutral Axis เพราะไม่มีแรงดึง หรือแรงกดหรือหดสั้นหรือยาวออกเลย

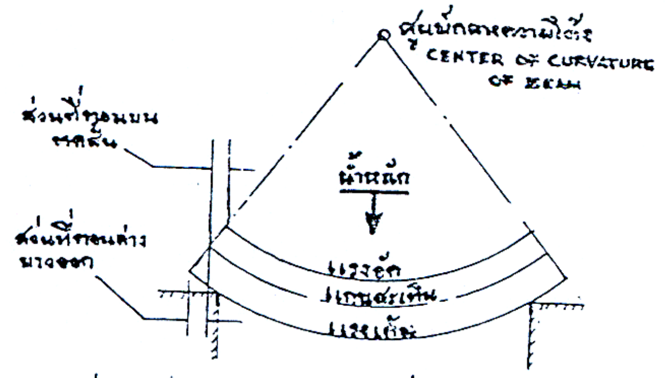
ในการที่จะทำให้ชั้น (1) , (2) , (4) และ (5) เข้าที่เสมอกับชั้น (3) นั้น แรงที่จะกระทำต่อชั้นเหล่านั้นจะไม่มีแรงใดที่มากเท่าแรงที่กระทำต่อชั้นริมสุด คือชั้น (1) กับชั้น (5) จึงเป็นข้อสังเกตได้ว่าชั้นที่ห่างจากแนวแกนกลางยิ่งห่างมากเท่าใดยิ่งต้องออกแรงมากยิ่งขึ้น หรือพูดว่าความลึกของบีมยิ่งมากเท่าใดบีมนั้นยิ่งแข็งแรงมากขึ้นเท่านั้น จึงพูดว่าความลึก (Depth) ของบีมมีผลต่อกำลังชั้นส่วนต่าง ๆ ของโครงสร้างนั้น



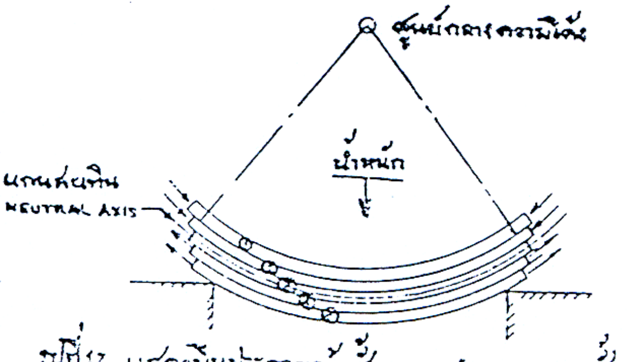
รูปที่ ๙ โมเมนท์ดัด (BENDING MOMENT) ที่เกิดโดยน้ำหนักเฉพาะที่ (CONCENTRATED LOAD) บนปลายของคานยื่นปลายข้างเดียว (CANTILEVER BEAM)



รูปที่ 10 รูปด้านข้างของคานซึ่งมีหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า วางอยู่บนที่รองรับสองแห่ง ปล่อยปลายไว้เฉยๆ (FREE ENDS)



รูปที่ 11 เป็นคานอย่างเดียวกับรูปที่ 10 เมื่อวางน้ำหนักแล้ว



รูปที่ 12 แสดงคานประกอบด้วยชั้นหลายชั้น (LAYERS) 5 ชั้น พร้อมด้วยน้ำหนักวางอยู่

3.8 ผลของความลึก (Effect of Depth)

ความแข็งแรงของบีมรูปหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า เปลี่ยนแปลงไปตามกำลังลอง ของความลึก สมมติว่ามีบีมสองอันขนาด 2 ” x 4 ” และ 2 “ x 8 “ ทั้งสองท่อนนี้วางโดยใช้ด้านแคบเป็นฐาน สมมติให้ D เป็นความลึกของบีมท่อนเล็กเท่ากับ 4 “, d เป็นความลึก ของท่อนที่ใหญ่กว่าเท่ากับ 8”

ความแข็งแรงของท่อนเล็ก αd_1^2

ความแข็งแรงของท่อนใหญ่ αd_2^2

ความแข็งแรงสัมพันธ์ $\left(\frac{d_2}{d_1}\right)^2 = \left(\frac{8}{4}\right)^2 = 4$

แสดงว่าบีมท่อนใหญ่นั้นแข็งแรงเป็น 4 เท่าของบีมท่อนเล็ก ทั้ง ๆ ที่ความลึกมากกว่ากันเพียงสองเท่าเท่านั้น

บีมทุกชนิดไม่ว่าจะมีหน้าตัดเป็นแบบใดเมื่อนำน้ำหนักไปวางแล้วด้านหนึ่ง จะเกิดแรงอัด อีกด้านหนึ่งจะเกิดแรงดึง บีมที่มีความลึกมาก ยิ่งมีความแข็งแรงมาก ความแข็งแรงนั้นปรากฏที่ผิวที่ห่างจากแนวแกนสะเทินของบีม ฉะนั้นเนื้อโลหะที่อยู่ในบริเวณแกนกลางจึงไม่จำเป็นอาจเอาออกเสียบ้างเพื่อทำให้น้ำหนักเบา แล้วเอาเนื้อนั้นไปพอกตอนบนและตอนล่างของความลึกทำให้เป็นปีกออกมา (Flange) ดูรูปที่ 13 B ซึ่งจะกลายเป็น I – Beam แข็งแรงกว่ารูปที่ 13 A ซึ่งเป็นบีมธรรมดา ทั้ง ๆ ที่ความลึกและน้ำหนักเท่ากัน แต่ไอบีมตามรูปที่ 13 B บรรทุกน้ำหนักได้มากกว่าบีม A 84 % ทั้งนี้เพราะปีกของไอบีมทำหน้าที่เป็นเอ็น (Stiffener) จึงทำให้บีมแข็งขึ้นอีก

3.9 แฟกเตอร์ต่าง ๆ ที่มีอิทธิพลต่อขนาดของบีมที่มีหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Factors Affecting The Size of A Beam of Rectangular Section)

มีแฟกเตอร์ที่สำคัญอยู่ 5 ประการด้วยกันที่มีอิทธิพลต่อขนาดของบีม คือ .-

(1) แบบของน้ำหนักที่กระทำบนบีม (Type of Load)

(2) ระยะทางระหว่างจุดรองรับ หรือเรียกว่า ช่วง (Span)

(3) แบบและประสิทธิภาพของรอยต่อ (Connections)

(4) จำนวนของจุดรองรับ (Supports) และ

(5) วัตถุ (Material) ที่ใช้ทำบีม ซึ่งจะได้กล่าวอย่างละเอียดต่อไป

3.9.1 แบบน้ำหนัก (Type of Load) แบบต่าง ๆ ของน้ำหนักที่วางอยู่บน บีมนั้นมีหลายแบบด้วยกัน แต่จะกล่าวเพียง 2 แบบเท่านั้น คือ น้ำหนักเฉพาะที่ ณ ตำแหน่งกึ่งกลางของบีมและน้ำหนักแผ่

ก) น้ำหนักเฉพาะแห่ง เมื่อวางบีมลงบนสิ่งรองรับซึ่งอยู่ที่ปลายทั้งสอง แล้ววางน้ำหนักลงที่กึ่งกลางของบีม ตามรูปที่ 14 เราพูดว่าบีมนี้มีน้ำหนักกระทำที่จุดเดียวคือ ที่กึ่งกลางบีม และเกิดโมเมนต์ดัดมากที่สุดที่กึ่งกลางบีม เพราะน้ำหนักอยู่ห่างมากที่สุดจากสิ่งรองรับ โมเมนต์ดัดในที่นี้เท่ากับ B.M. = WL/4 ตัวอย่างเช่น น้ำหนักเท่ากับ 2 ตัน ช่วงของบีมเท่ากับ 10 ฟุต

$$B.M. = \frac{WL}{4} = \frac{2 \text{ ตัน} \times 10 \text{ ฟุต}}{4} = 5 \text{ ฟุต - ตัน}$$

W = น้ำหนักทั้งหมด ตัน

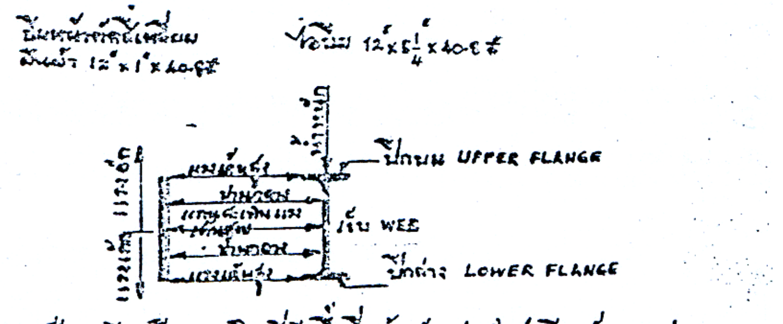
L = ช่วงระหว่างจุดรองรับ (Span) ฟุต

ข) น้ำหนักแผ่ (Uniformly Distributed Load) บีมที่มีน้ำหนักเฉลี่ยสม่ำเสมอวางอยู่นั้นปรากฏในรูปที่ 15 บีมที่มีน้ำหนักเช่นนี้วางอยู่จึงมีแต่บางส่วนของน้ำหนักเท่านั้น ที่ใกล้กับจัดรองรับมากกว่าส่วนอื่น โมเมนต์ดัดจึงเกิดขึ้นน้อยว่าในบีมที่น้ำหนักเฉพาะแห่งวางอยู่ โมเมนต์ดัดของบีมชนิดนี้เท่ากับ B.M. = WL/8 ถ้าใช้ตัวอย่างตามที่กล่าวมาแล้วจะได้ดังนี้

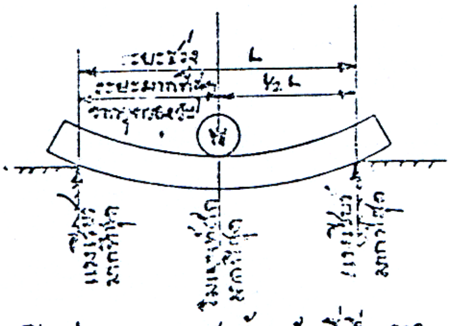
$$B.M. = \frac{WL}{8} = \frac{2 \text{ ตัน} \times 10 \text{ ฟุต}}{8} = 2.5 \text{ ฟุต - ตัน}$$

จึงเห็นว่าบีมที่มีน้ำหนักแผ่วางอยู่นั้นเกิดโมเมนต์ดัดน้อยกว่าครึ่งหนึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับบีมที่มีน้ำหนักเฉพาะแห่งวางอยู่ ถ้าน้ำหนักแบบอื่น ๆ แตกต่างออกไปจากที่กล่าวมาแล้ววางอยู่บนบีมก็จะเกิดโมเมนต์ดัดต่างออกไป

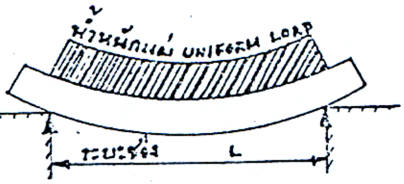
สรุปความว่าในการออกแบบบีมนั้นแบบของน้ำหนักเป็นเรื่องสำคัญที่ต้องนำมาคิดพอ ๆ กับจำนวนน้ำหนักที่นำมาวาง



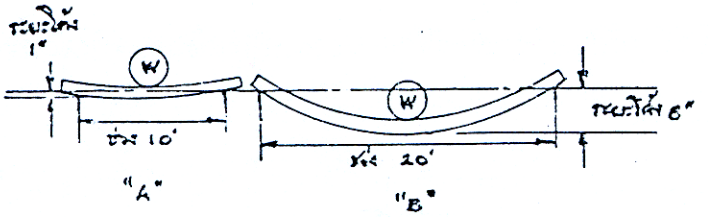
รูปที่ 15 เปรียบเทียบบีม 2 ชนิดที่มีเนื้อที่หน้าตัดเท่ากัน ไอบีมแข็งแรงกว่า 84%



รูปที่ 14 บีมปลายลอยรองรับน้ำหนักที่กึ่งกลาง



รูปที่ 15 บีมปลายลอยรองรับน้ำหนักแผ่



รูปที่ 16 ระยะโค้ง (DEFLECTION) ของบีมหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ปลายลอยเปลี่ยนเป็นกำลังสามของระยะช่วง (SPAN), กำลังแข็งแรงของบีมลดลงเมื่อช่วงยาวขึ้น

3.9.2 ช่วง (Span) ช่วงระหว่างจุดรองรับเป็นแฟคเตอร์ตัวหนึ่งที่มีอิทธิพลต่อความแข็งแรงและระยะโค้งของบีม 2 ประการ

ก) ระยะโค้งของบีมที่มีรูปหน้าตัดเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าและวางอยู่โดยปลายไม่ยึดกับอะไรนั้นเปลี่ยนไปตามกำลังสามของช่วง ดูรูปที่ 16 บีม A ถูกรองรับด้วยช่วง 10 ฟุต วัดระยะโค้งได้ 1 นิ้ว อยากทราบว่าระยะโค้งจะเกิดมีเท่าใดกับบีมอันเดียวกันนี้ ถ้าระยะช่วงยาวออกไปเป็น 20 ฟุต สมมติว่าน้ำหนักที่วางอยู่ไม่เปลี่ยนแปลง

สมมติให้ S_1 = เป็นช่วงที่สั้นกว่า

S_2 = เป็นช่วงที่ยาวกว่า

ความสัมพันธ์ของระยะโค้ง $= \left(\frac{S_2^3}{S_1}\right) = \left(\frac{20\ \text{ฟุต}}{10\ \text{ฟุต}}\right)$

ฉะนั้นระยะโค้งของช่วงที่ยาวกว่า = 1 นิ้ว x 8 = 8 นิ้ว

ข) ความแข็งแรงของบีมที่มีรูปหน้าตัดเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าและวางอยู่โดยปลาย ไม่ได้ยึดกับอะไรนั้นเปลี่ยนเป็นปฏิภาคกลับกับช่วงบีม B ในรูปที่ 16 จะรับน้ำหนักได้เพียงครึ่งเดียว เมื่อเปรียบกับบีม A ซึ่งมีช่วงสั้นกว่าเป็นสองเท่า สมมติว่าบีม A รับน้ำหนักได้ 10 ตัน ช่วง 10 ฟุต บีม B จะรับน้ำหนักได้เท่าใด ถ้าช่วงเป็น 20 ฟุต

ความสัมพันธ์ของความแข็งแรง $= \frac{\text{ช่วง } A}{\text{ช่วง } B}$

น้ำหนักที่บีม จะรับได้เท่ากับ = 10 ตัน x 0.5 ตัน = 5 ตัน

ในการที่จะทำให้บีมและระยะโค้งตัวลดน้อยลงนั้นจำเป็นต้องเพิ่มจุดรองรับให้มากขึ้น นั่นคือลดช่วงให้สั้นลงนั่นเอง

3.9.3 แบบและประสิทธิภาพของรอยต่อ (Fixity of the end – connections) ตามตัวอย่างที่กล่าวมานั้น สมมติว่าปลายของบีมทั้งสองวางอยู่บนที่รองรับเฉย ๆ โดยไม่มีการยึดให้แน่นเลย สำหรับในตอนนี้ถ้าทำปลายบีมให้ยึดติดแน่นโดยฝังเข้าไปในคอนกรีต หรือยึดให้แน่นโดยสลักหรือนัต (Fixed ended Beam) ดังปรากฏในรูปที่ 17 เมื่อเป็นเช่นนี้ การคิดคำนวณก็ต้องเปลี่ยนแปลงไป จะสังเกตได้ว่าส่วนกลางของบีมโค้งเหมือนกับที่กล่าวมาแล้ว แต่ปลายบีมที่ฝังอยู่ในคอนกรีตกลับโค้งไปในทิศทางตรงกับตอนกลาง การยึดปลายบีมให้ติดแน่นนี้ช่วยบีมให้ดีขึ้นสองประการ

ก) จะรับน้ำหนักได้เป็นสองเท่า เมื่อเปรียบเทียบกับบีมปลายลอย และรูปหน้าตัดเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า

ข) ระยะโค้งเป็นเพียง ¼ ของระยะโค้งของบีมปลายลอย และรูปหน้าตัดเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า

เพื่อให้เข้าใจสองประการที่กล่าวมา จึงขอยกตัวอย่างในรูปที่ 16 เมื่อเป็นบีมปลายลอยกับบีมที่ปลายติดแน่น และสมมติว่า

น้ำหนักมากที่สุดของบีมปลายลอย = 10 ตัน

ระยะโค้งมากที่สุดของบีมปลายลอย = 8 นิ้ว

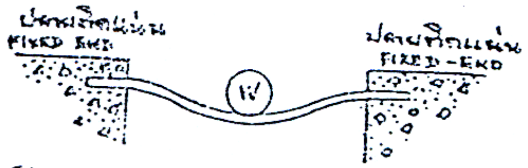
จากข้อ ก) น้ำหนักมากที่สุดที่บีมปลายติดแน่น สามารถรับได้ = 2x10 ตัน = 20 ตัน

และ จากข้อ ข) จากระยะโค้งมากที่สุดของบีมปลายติดแน่น = ¼ x นิ้ว = 2 นิ้ว

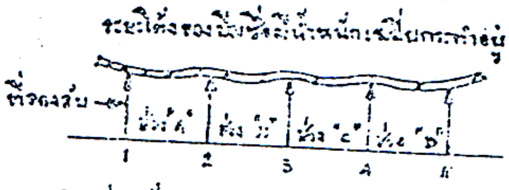
มันเป็นการลำบากอย่างยิ่งที่จะทำให้กสนยึดติดของปลายบีมภายในเรือแข็งแรง 100 % อย่างไรก็ดีเราคาดหมายเพียง 50 ถึง 80 % เท่านั้น ทั้งนี้โดยการใช้หูช้าง (Beam Bracket) ที่มีความลึกมาก ๆ ทำการยึดไว้ และพยายามใช้บีมที่ไม่มีรอยต่อเลยในช่วงหนึ่ง ๆ ของที่รองรับ

ส่วนมากน้ำหนักต่าง ๆ ที่บรรทุกลงในเรือนั้นเป็นน้ำหนักแบบเฉลี่ยสม่ำเสมอ (Uni Form) และบีมภายในเรือส่วนมากยึดที่ปลายเพียงบางส่วน (Partially Fixed) ฉะนั้นจึงเป็นเรื่องที่น่าสนใจว่าบีมที่ปลายยึดติดแน่น และน้ำหนักเฉลี่ยสม่ำเสมอนั้นมีโมเมนต์ดัดที่ปลายเป็นสองเท่าของโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นที่กลางบีม ถ้าบีมนี้เกิดหักลงมามันจะหักที่ปลายทั้งสองนั้น นี่เป็นเหตุผลที่ว่าทำไมจึงติดหูช้างที่ปลายทั้งสองของบีมนั้น

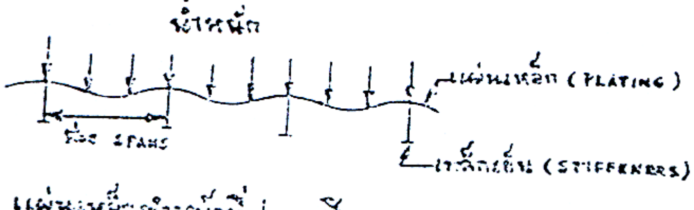
3.9.4 จำนวนจุดรองรับ เมื่อเรามีบีมซึ่งมีช่วงรองรับห่างเท่า ๆ กัน และมีน้ำหนักเฉลี่ยอยู่ทั่วไปบนบีมนั้นวางอยู่บนที่รองรับอันเดียวหรือมากกว่าบีมนี้หน้าที่คล้ายกับบีม ที่มีปลายยึดติดแน่น



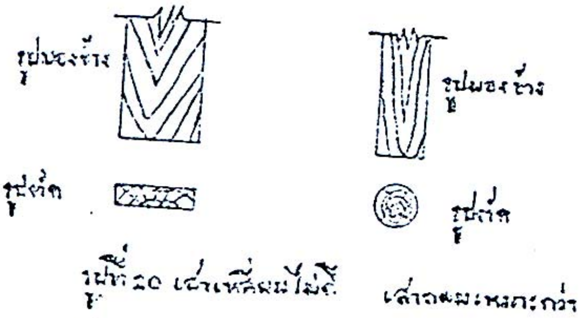
รูปที่ 17 บีมปลายยึดแน่น [illegible] น้ำหนักอยู่ที่กึ่งกลาง

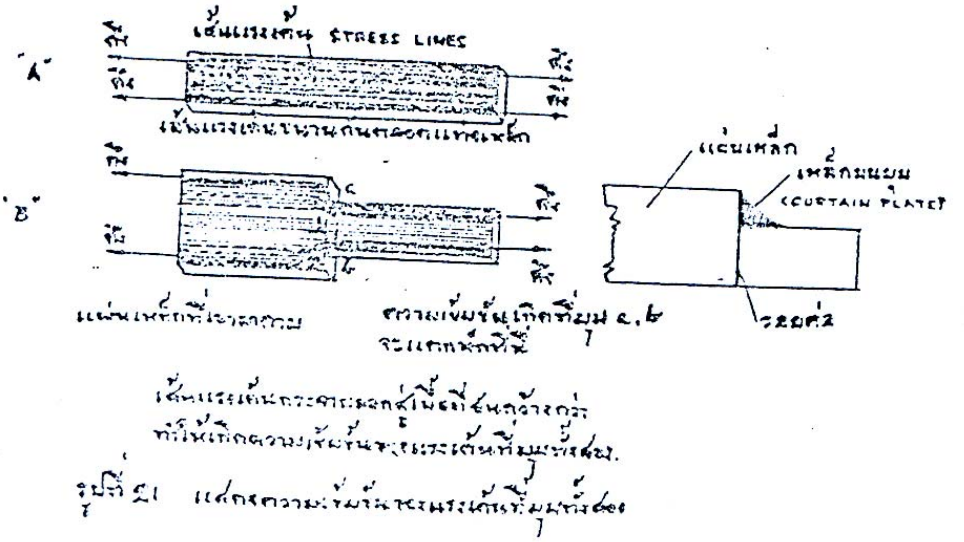


รูปที่ 18 บีมซึ่งมีน้ำหนักเฉลี่ยกระทำอยู่ และวางอยู่บนที่รองรับ 5 แห่ง



รูปที่ 19 แผ่นเหล็กทำหน้าที่ประดุจบีม





ในรูปที่ 18 ช่วง B พยายามจะยึดช่วง A และ C ดังนั้นด้านเหนือจุดรองรับบีมจะทำหน้าที่คล้ายบีมที่มีปลายติดยึดแน่น และถ้ามีการแตกหักเกิดขึ้นก็จะหักที่จุดรองรับนั้น

จำนวนจุดรองรับยิ่งมีมากเท่าใด ช่วงยิ่งสั้นขึ้นเท่านั้น โมเมนต์ดัดยิ่งเกิดน้อย บีมที่จะใช้ก็ลดขนาดเล็กลงได้อีก

3.10 แผ่นเหล็กต่าง ๆ ที่ใช้ในการต่อเรือ

แผ่นเหล็กที่มีความหนาจาก 3/16 นิ้ว ถึง 1 ½ นิ้วและมีความกว้างจาก 6 ถึง 7 ฟุต โดยเฉลี่ย หรือ 9 ถึง 10 ฟุต ชนิดพิเศษนั้นมีชื่อว่า แผ่นเหล็กต่าง ๆ (Plated) แผ่นเหล็กที่กว้างน้อยกว่า 12 นิ้ว มีชื่อว่าเหล็กเส้นแบนหรือ เชพ (Shape) และแผ่นเหล็กที่บางน้อยกว่า 3/16 นิ้ว นั้นเรียกว่าแผ่นเหล็กบาง (Sheet) เหล็กแผ่นนี้ใช้ส่วนมากที่ข้างเรือ ท้องเรือ ฝากั้น และดาดฟ้าเรือ เพื่อป้องกันไม่ให้น้ำเข้าเรือได้ หรือใช้เป็นทางเดินในดาดฟ้าต่ำ ๆ ลงมาแผ่นเหล็กที่ทำหน้าที่เป็นดาดฟ้ารับน้ำหนักสิ่งของและวางอยู่บนสิ่งรองรับ ซึ่งมีชื่อว่ากง หรือเหล็กเอ็น ดาดฟ้านั้นจะทำหน้าที่ประดุจบีมที่กว้างแต่บางอยู่บนเหล็กเอ็นนั้น ตามที่อธิบายมาแล้วข้างบน ถ้าเหล็กเอ็นนี้ทำให้ชิดกันมาก หรือจุดรองรับชิดกันมาก เหล็กแผ่นที่ทำดาดฟ้าก็ยิ่งสามารถทำให้บางลงได้มาก

แต่อย่างไรก็ตาม มีจุด ๆ หนึ่งที่เราไม่สามารถเพิ่มเหล็กเอ็นรองรับบีม เพื่อทำให้ช่วงสั้นลง หรือเพื่อลดความหนาของดาดฟ้าให้น้อยลง ดูรูปที่ 19 ทั้งนี้เกี่ยวกับการประหยัดน้ำหนักเหล็ก เพราะเหตุว่าเหล็กเอ็นที่เพิ่มขึ้นนั้นอาจมีน้ำหนักมากกว่าน้ำหนักของแผ่นเหล็กดาดฟ้าที่ลดลง การรักษาน้ำหนักเหล็กที่ต่อเรือให้น้อยที่สุดนั้น ก็เพื่อให้เรือบรรทุกสินค้าได้มาที่สุด วิ่งได้เร็ว ฉะนั้นจึงต้องระวังในเวลาออกแบบ ต้องคอยระวังเรโชของช่วงของเหล็กเอ็นรองรับ กันน้ำหนักแผ่นเหล็กให้ดี เพื่อจะได้เรือที่มีความแข็งแรงดีตามต้องการ และมีน้ำหนักเบา การออกแบบแผ่นเหล็กเปลือกเรือ, ฝากั้น และแผ่นเหล็กดาดฟ้านั้น ต้องใช้หลักตามที่กล่าวมาแล้ว และจะได้กล่าวอย่างละเอียดต่อไป เหล็กแผ่นนั้นยังใช้เป็นเวบ (Web) และปีก (Flange) ของบีมชนิดพิเศษ (Deep Web) และเสาอีกด้วย

3.11 เสา (Colum or Pillar or Stanchion)

เมื่อเวลาดาดฟ้าเรือถูกน้ำหนักต่าง ๆ วางอยู่ ดาดฟ้าจะอ่อนตัวลง การอ่อนตัวของดาดฟ้าจะหายไปได้โดยการใช้เสาค้ำดาดฟ้าไว้ เสาที่ใช้นี้ควรจะเป็นเสากลมจึงจะเหมาะ ดังในรูปที่ 20 เพราะเนื้อริม ๆ ของหน้าตัดของเสากลมเท่ากันหมด ไม่สามารถจะโค้งหักพับทางหนึ่งทางใดได้ ถ้าใช้เสาเหลี่ยมหรือบีมอาจเกิดโค้งไปทิศหนึ่งทิศใดได้ เพราะเสาเหลี่ยมมีเนื้อริม ๆ ไม่เท่ากันทุกทิศ ทิศใดที่เนื้อโลหะน้อยก็จะโค้งออกมาทางด้านนั้น

เรโช ความยาว – เส้นผ่าศูนย์กลางของเสาที่ใช้ในเรือนั้นน้อยกว่าที่ใช้ในสิ่งก่อสร้างบนบก และโดยที่เรโชนี้เป็นตัวแฟกเตอร์บังคับการโค้งของเสา เราจึงไม่ยายามทำให้ปล่อยเสาภายในเรือติดแน่นจนเกินไป

3.12 เพลา (Shafts)

เพลามีหน้าที่รับโมเมนต์บิด โมเมนต์บิดนี้เรียกอีกอย่างหนึ่ง คือ ท๊อค (Torque)
ท๊อค จะทำให้เกิดแรงเชียร์ขึ้นภายในเพลา เหมือนตัวอย่างบุหรี่ที่ใช้สูบ ถ้าถือบุหรี่ให้แน่นปลายหนึ่ง อีกปลายหนึ่งบิด บุหรี่ก็จะถูกฉีกขาด

นอกจากเพลาจะทำหน้าที่รับโมเมนต์บิดแล้ว ยังต้องรับโมเมนต์ดัดอีก ฉะนั้นตอนชักเพลาใบจักร จึงต้องปรับแต่งให้ได้ระดับจริง ๆ จึงจะทำให้โมเมนต์ดัดเกิดน้อยที่สุด

ท๊อคที่เกิดขึ้นมีสูตรดังนี้

$$\text{ท๊อค (Touque)} \quad Q = \frac{33000\ HP}{2\pi N}$$

HP = แรงม้าของเครื่องจักร Horsepower

N = รอบ ต่อ นาที Rovolution Per Minute

จากการพิจารณาสูตรข้างบน จะพบว่าเครื่องยิ่งหมุนเร็วจะเกิดท๊อคน้อย เพราะจำนวนรอบต่อนาทีเป็นตัวหารอยู่ ฉะนั้นเรือที่เครื่องหมุนเร็วมากจึงใช้เพลาเล็กลงเพราะ ท๊อคน้อย จึงเห็นว่าเรือที่มี

เครื่อง 5,000 แรงม้า เครื่องหมุน 80 รอบ ต่อนาที จะใช้เพลาขนาดเดียวกับเครื่อง 20,000 แรงม้า เครื่องหมุน 320 รอบ ต่อนาที

3.13 ความแข็งแรงที่ต่อเนื่อง (Continuity of Strength)

ส่วนต่าง ๆ ภายในเรือที่ก่อสร้างขึ้นนั้นต้องให้มีความสม่ำเสมอ แผ่นเหล็กที่จะเปลี่ยนให้เล็กลงนั้นต้องค่อย ๆ เปลี่ยน ไม่ใช่เปลี่ยนจากใหญ่เป็นเล็กทันที เพราะจะทำให้เกิดแรงเค้นขึ้นในบริเวณนั้นและเกิดแตกหักขึ้นที่นั่น จากการไม่เอาใจใส่ในเรื่องนี้จึงทำให้เสียเรือวัสดุสิ่งของ และผู้คนเป็นจำนวนมากในสงครามโลกครั้งที่ 2

เพื่อให้เข้าใจง่ายขึ้นขอให้ดูรูปที่ 21 ซึ่งแสดงเหล็กชิ้นหนึ่ง เส้นขีดเล็ก ๆ ที่ชิดกันแสดงถึงความเข้มข้นของแรงเค้นที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงภายนอกมากระทำ ในรูปที่ 21 A เส้นแรงเค้นยังขนานกันอยู่ ความเค้นเป็นระเบียบต่อเนื่องกันตลอดความยาว แม้แรงภายนอกจะกระทำในรูปที่ 21 B แผ่นเหล็กเล็ก A ได้ถูกดามโดยแท่งเหล็กที่มีความกว้างเป็นสองเท่าแล้วแล่นประสานติด ซึ่งดูในครั้งแรกคล้าย ๆ กับว่าแท่งเหล็กเล็กอันเดิมจะมีกำลังแข็งแรงขึ้น ครั้นเมื่อประยุคน้ำหนักจำนวนเดิมลงไปแรงเค้นที่เกิดขึ้นจะเห็นได้ตามเส้นที่แสดง และจะไปอัดยัดเยียดกันตรงที่เหล็กเปลี่ยนขนาดจากใหญ่ไปเล็กโดยทันที แรงเค้นจะเกิดที่ตรง a และ b และจะแตกหักตรงนี้ จึงเห็นว่าแท่งเหล็กที่เพิ่มขึ้นใหม่แทนที่จะเพิ่มกำลังให้แข็งแรงขึ้นกลับทำให้กำลังของแท่งเหล็กนี้ น้อยลงกว่าเดิม เนื่องจากกำลังไม่ต่อเนื่องกันของเหล็กตรงมุมคม

ที่ปากระวางของเรือจะพบมุมคม (Sharp Corners) และที่อื่น ๆ อีกมากมายภายในเรือซึ่งจะทำให้กำลังของเรือเสียไป เพื่อที่จะทำให้กำลังของเรือคงเดิม จำเป็นต้องเพิ่มเติมเหล็กมนมุมบ้าง (Curtain of Fashion Plate) เหล็กดามบ้าง (Doubling Plate) ซึ่งจะกล่าวในบทต่อไป

บทที่ 4

ความแข็งแรงของโครงสร้าง

การศึกษาเกี่ยวกับความแข็งแรงของโครงสร้างเพื่อนำความรู้ไปใช้ในการออกแบบ และสร้างเรือนั้น รายละเอียดของเนื้อหาวิชาไม่สามารถนำมากล่าวถึงได้หมดภายในบทเดียวหรือแม้กระทั่งหนังสือขนาดนี้เพียงเล่มเดียว สำหรับเนื้อหาวิชาที่จะนำมากล่าวถึงในบทนี้ เพียงแต่เป็นความรู้พื้นฐานที่ผู้ทำการในเรือควรทราบ การพิจารณาปัญหาเกี่ยวกับความแข็งแรงของโครงสร้างเรือประกอบด้วยการวิเคราะห์และประเมินค่าแรงในรูปแบบต่าง ๆ ที่มากระทำ กับการวิเคราะห์และประเมินการตอบสนองของโครงสร้างเมื่อมีแรงมากระทำ ซึ่งได้แก่การพิจารณาค่าความเค้นและการเปลี่ยนรูปของโครงสร้าง การศึกษาสภาพการรับแรงของโครงสร้างเรือสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 กรณี คือ สภาพที่ทำให้ตัวเรือเกิดการเปลี่ยนรูปตามยาว สภาพที่ทำให้เรือเกิดการเปลี่ยนรูปตามขวาง และสภาพที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปเฉพาะที่ สภาพการรับแรงที่ทำให้โครงสร้างเกิดการเปลี่ยนรูปตามที่กล่าวมานี้ เป็นลักษณะการตอบสนองของโครงสร้างที่มีผลทำให้เกิดความเค้นในลักษณะต่าง ๆ ขึ้นภายในเนื้อเนื้อวัสดุ เพื่อให้เกิดความสมดุลกับแรงภายนอกที่มากระทำ ซึ่งได้แก่ความเค้นดัด ความเค้นเฉือน และความเค้นเฉพาะที่แบบต่าง ๆ

ตามสภาพการใช้งานของเรือ ลักษณะของแรงที่มากระทำจะแตกต่างจากสภาพที่เรือลอยนิ่งอยู่ในน้ำ เมื่อเรือลอยนิ่งบนผิวน้ำที่เรียบ แรงที่มากระทำกับเรือจะอยู่ในสภาวะสมดุล และไม่มีการเปลี่ยนแปลง หรือหมายถึงความลอยจะมีขนาดเท่ากับน้ำหนักของเรือพอดี และมีค่าคงที่ แต่ตามสภาพการใช้งานของเรือในทะเล ความลอยจะเปลี่ยนรูปแบบไปตามลักษณะของคลื่น และคลื่นก็มีผลทำให้การกระจายความดันของน้ำ ที่กระทำกับเรือ เปลี่ยนรูปแบบไปด้วย ซึ่งผลที่เกิดขึ้นเนื่องจากคลื่น จะทำให้เรือเกิดการเคลื่อนที่ในรูปแบบต่าง ๆ เช่น การโยน การโยก และการโคลงตามที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 7 สภาพการเคลื่อนที่เหล่านี้ ต่างก็มีผลต่อการเปลี่ยนรูป และมีผลกระทบโดยตรงต่อความเค้นที่เกิดขึ้นกับชิ้นส่วนโครงสร้างของตัวเรือ

เนื่องจากตามสภาพความเป็นจริง ปัญหาเกี่ยวกับแรงที่มากระทำกับเรือจะเป็นแรงจลน์เกือบทั้งสิ้น การวิเคราะห์แรงและผลของแรงที่มากระทำกับโครงสร้างจึงเป็นเรื่องที่ทำได้ยาก วิธีที่จะทำให้การแก้ปัญหาทำได้ง่ายและสะดวกขึ้น ตามวิธีการที่ใช้กันก็คือการกำหนดสภาพการรับแรงในสภาวะสมดุลสถิต ที่มีลักษณะเทียบเท่ากับสภาพการรับแรงจลน์ตามร๔ปแบบที่คาดว่าน่าจะเกิดขึ้นจริง การกำหนดสภาวะเทียบเท่าเช่นนี้เป็นหลักการเบื้องต้นที่นำมาใช้ในการคำนวณออกแบบความแข็งแรงของชิ้นส่วนโครงสร้าง

4.1 การดัดตามยาว

เมื่อกำหนดให้ตัวเรือมีสภาพเหมือนกับอะเสขนาดใหญ่ แรงหลักที่มากระทำซึ่งประกอบด้วยแรงโน้มถ่วงและความลอย แรงทั้งสองนี้จะเป็นลักษณะแรงกระจาย สภาวะสมดุลของเรือเกิดขึ้นเมื่อผลรวมของความลอย มีค่าเท่ากับผลรวมของแรงโน้มถ่วงที่มากระทำกับมวลที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของตัวเรือ แต่เนื่องจากการกระจายของแรงทั้งสองนี้ตามแนวยาวมีลักษณะที่ไม่เหมือนกัน ความแตกต่างระหว่างความลอยต่อหน่วยความยาวกับแรงโน้มถ่วงหรือน้ำหนักต่อหน่วยความยาวที่ตำแหน่งต่าง ๆ ก็คือภาระ (Load) ที่มากระทำกับเรือ ซึ่งภาระนี้จะมีผลทำให้เกิดแรงเฉือนและโมเมนต์ดัดตลอดแนวยาวของเรือ

โมเมนต์ดัดตามยาวที่เกิดขึ้นนี้นับได้ว่าเป็นแง่ปัญหาที่สำคัญยิ่งของโครงสร้างเรือ การประเมินค่าแรงรวมต่อหน่วยความยาว เพื่อให้ได้มาซึ่งแรงเฉือนและโมเมนต์ดัดสูงสุดที่มีโอกาสจะเกิดขึ้นได เพื่อใช้เป็นเกณฑ์กำหนดความแข็งแรงของโครงสร้าง จะกำหนดให้เรืออยู่ในสภาวะสมดุลสถิตดังนี้

. เรือลอยอยู่ในน้ำนิ่ง แต่สมมติให้ผิวน้ำมีลักษณะเป็นเส้นโค้งตามรูปแบบของคลื่นที่กำหนด โดยมีความยาวคลื่นเท่ากับความยาวของเรือ

. ยอดคลื่นอยู่ที่ตำแหน่งกึ่งกลางลำสำหรับกรณีตัวเรืออยู่ในสภาพคุ้งกลาง (hogging)

. ท้องคลื่นอยู่ที่ตำแหน่งกึ่งกลางลำสำหรับกรณีตัวเรืออยู่ในสภาพตกท้องช้าง (sagging)

การกำหนดความสูงของคลื่น เพื่อใช้เป็นเกณฑ์ในการคำนวณออกแบบซึ่งได้เป็นที่ยอมรับและนำมาใช้เป็นเวลานานก็คือ การกำหนดให้ความสูงของคลื่นมีค่าเท่ากับ 1/20 เท่าของความยาว แต่จากการสังเกตรูปแบบของคลื่นที่เกิดขึ้นจริงในทะเลจะเห็นว่า คลื่นยาวจะมีความชันน้อยกว่าคลื่นสั้น ดังนั้น สมาคมจัดชั้นเรือของลอยด์ จึงได้เสนอสูตรที่ใช้หาค่าความสูงของคลื่นซึ่งเปลี่ยนแปลงตามความยาวคือ

$h = 0.607 \quad L$ โดยที่ความยาวของเรือ มีหน่วยเป็นเมตร

เมื่อพิจารณารูปแบบของคลื่นที่ละเอียดขึ้น พบว่าความสูงของคลื่นเปลี่ยนแปลงตาม L 0.3 หรือ

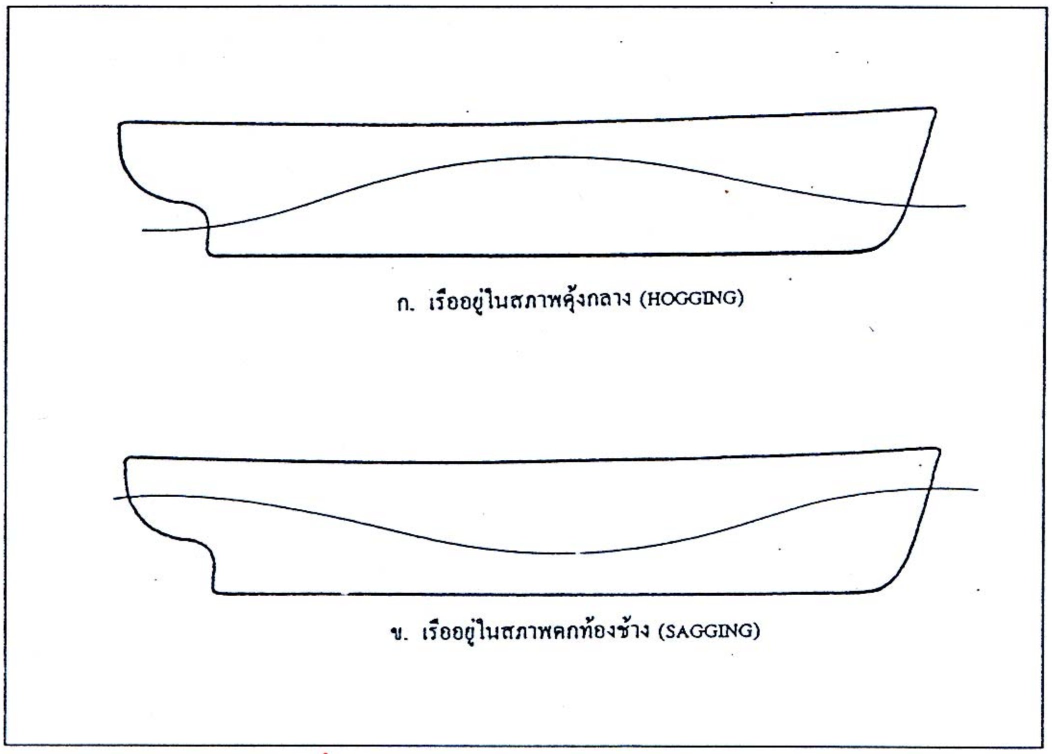
$h = 1.632 \ L \ 0.3$ เมื่อ L มีหน่วยเป็นเมตร

ถ้ากำหนดให้คลื่นโทรคอยด์ เป็นคลื่นมาตรฐานที่จะใช้เป็นข้อมูลในการคำนวณความแข็งแรงของโครงสร้าง เมื่อกำหนดให้ความสูงของคลื่น $h = 1.632 \ L \ 0.3$ จะได้สมการของคลื่นคือ

$$x = \frac{L}{2\pi}\theta - \frac{1.632\,L^{0.3}}{2} \quad \text{sine}\,\theta$$

$$h = \frac{1.632\,L^{0.3}}{2} \quad (1 - \cos\theta)$$

ค่าความลอยต่อหน่วยความยาวที่ตำแหน่งต่าง ๆ สามารถหาได้จากผลคูณระหว่างความหนาแน่นโดยน้ำหนักของน้ำ กับพื้นที่ตัดขวางของเรือซึ่งมีระดับกินน้ำลึกถึงแนวเส้นโค้งของคลื่นที่กำหนด และพื้นที่ตัดขวางที่ตำแหน่งรอยตัดต่าง ๆ นั้นสามารถหาได้จากเส้นโค้งบอนยืน เมื่อนำข้อมูลของความลอยต่อหน่วยความยาว มาเขียนเป็นส้นโค้ง บนแกนความยาวของเรือ พื้นที่ภายใต้เส้นโค้งก็คือ ค่าความลอยทั้งหมด และตำแหน่งเซนทรอยด์ของพื้นที่ตามแนวยาวก็คือ ตำแหน่งศูนย์กลางความลอย การวางตำแหน่งของคลื่นเมื่อเทียบกับลำตัวเรือต้งปรับแต่งให้ผลรวมของระวางขับน้ำมีค่าเท่ากับผลรวมของน้ำหนักเรือ และศูนย์กลางความลอยอยู่ในแนวดิ่งเดียวกันกับศูนย์ถ่วงของเรือ



รูปที่ 1 เรืออยู่ในสภาพคุ้งกลาง และตกท้องช้าง

การกระจายน้ำหนัก

การหาค่าแรงเฉือนและโมเมนต์ที่เกิดขึ้น จากภาระกระจายตลอดความยาวของเรือนั้น จำเป็นต้องทราบค่าการกระจายน้ำหนักตลอดความยาวเรือด้วย ทั้งนี้เนื่องจากภาระ (Load) คือผลต่างระหว่างน้ำหนักกับความลอย การหาค่าน้ำหนักต่อหน่วยความยาว มีความยุ่งยากและเสียเวลามาก โดยปกติการหาค่าน้ำหนักต่อหน่วยความยาว จะแยกน้ำหนักทั้งหมดออกเป็นกลุ่มย่อย คือ น้ำหนักของโครง

สร้างลำตัวเรือ น้ำหนักเครื่องจักรใหญ่ และน้ำหนักบรรทุก ในกลุ่มของน้ำหนักบรรทุกจะรวมถึงน้ำหนักของอุปกรณ์ภายในเรือ น้ำ น้ำมัน และสิ่งอื่น ๆ ที่เหลือ

เมื่อนำภาระต่อหน่วยความยาวที่ตำแหน่งต่าง ๆ มาเขียนเส้นโค้ง ค่าอินทิเกรดของเส้นโค้งภาระตามแนวยาวก็คือแรงเฉือน เมื่อนำค่าแรงเฉือนที่ตำแหน่งต่าง ๆ มาเขียนเส้นโค้ง ค่าอินทิเกรตของเส้นโค้งแรงเฉือนตามแนวยาวก็คือ โมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นกับเรือ ความสัมพันธ์ระหว่างค่าต่าง ๆ ที่กล่าวถึงสรุปได้ดังนี้

ภาระ = b – w

$$S_x = \int_o^x (b - w)\ dx$$

$$M_x = \int_o^x S\,dx$$

เมื่อ b = ความลอยต่อหน่วยความยาว

W = น้ำหนักต่อหน่วยความยาว

(b –m)= ภาระต่อหน่วยความยาว

s = แรงเฉือนที่ตำแหน่ง X

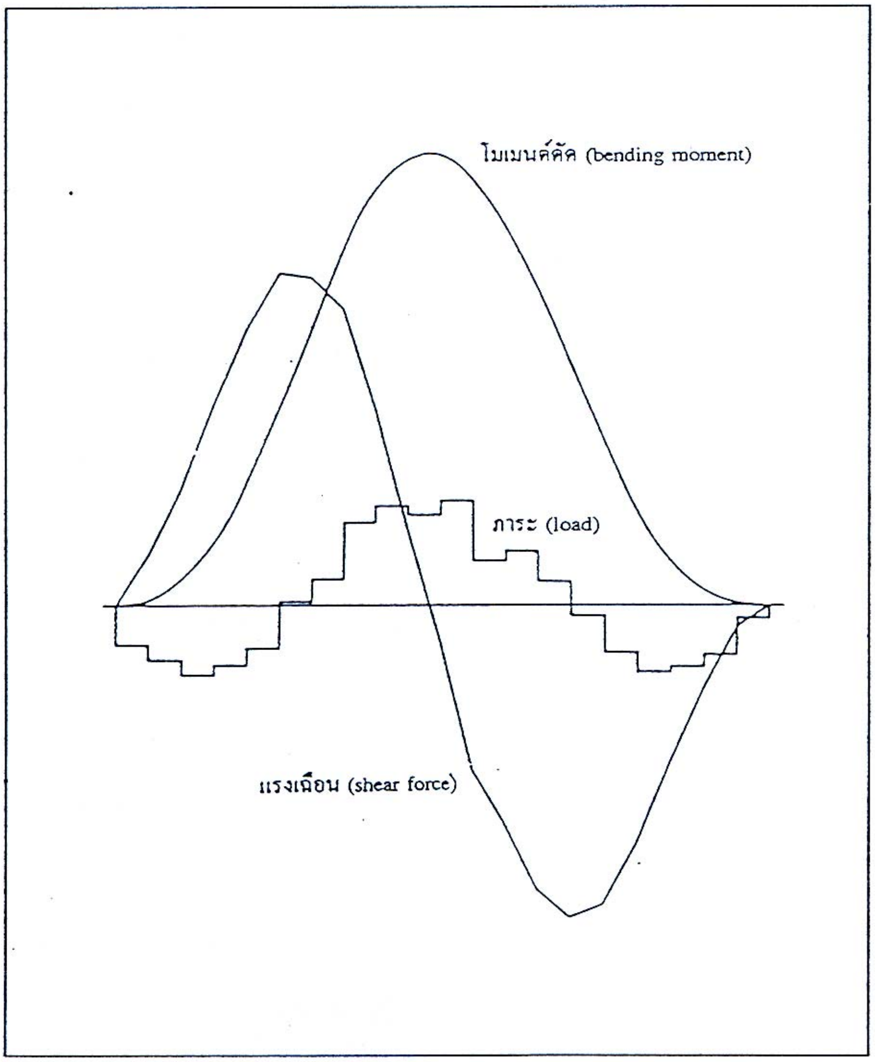
M = โมเมนต์ดัดที่ตำแหน่ง X

เนื่องจากความสัมพันธ์ระหว่างระยะตามยาวของเรือกับภาระ แรงเฉือน และโมเมนต์ดัดไม่เหมาะที่จะแสดงให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ การหาพื้นที่ภายใต้เส้นโค้ง จึงต้องใช้เครื่องมือวัดพื้นที่ เช่น พลานิมิเตอร์ หรืออินทิเกรเตอร์ การหาพื้นที่โดยวิธีการอินทิเกรตด้วยระบบตัวเลข (numerical integration) ก็เป็นวิธีที่ใช้กันมากวิธีหนึ่ง การหาพื้นที่โดยการอินทิเกรตด้วยระบบตัวเลข ทำได้โดยการแบ่งความยาวของเรือออกเป็นส่วนย่อย, h ซึ่งแต่ละส่วนมีความยาวเท่ากัน โดยที่ b และ W เป็นค่าความลอยและน้ำหนักเฉลี่ยในช่วงระยะ h นี้ เส้นโค้งภาระในช่วงความยาว h จะมีพื้นที่เท่ากับ (b – w) h ค่าแรงเฉือนที่ตำแหน่งใด ๆ ก็หาได้จากการรวมพื้นที่ (b – w) h จากตำแหน่งเริ่มต้นไปยังตำแหน่งที่ต้องการทราบค่าแรงเฉือน หรือ

$$S_x = \sum_{n=1}^{n=x} h(b - w)_n = h\sum_{n=1}^{n=x} h(b - w)_n \qquad (4.1)$$

ในทำนองเดียวกัน เมื่อนำค่าแรงเฉือนที่ตำแหน่งต่าง ๆ มาเขียนเส้นโค้งโดยกำหนดให้ S เป็นค่าแรงเฉือนเฉลี่ยในช่วงความยาว h พื้นที่ภายใต้เส้นโค้งแรงเฉือนในช่วงความยาว h คือ hs ค่าโมเมนต์ดัดที่ตำแหน่งใด ๆ ก็คือผลรวมของพื้นที่ hs จากตำแหน่งเริ่มต้นไปยังตำแหน่งที่ต้องการทราบค่าโมเมนต์ดัด หรือ

$$M_x = \sum_{n=1}^{n=x} hS_n = h\sum_{n=1}^{n=x} hS_n \qquad (4.2)$$



รูปที่ 2 การกระจายภาระ แรงเฉือน และโมเมนต์ดัด

สรุปความสัมพันธ์ระหว่างเส้นโค้งต่าง ๆ มีดังนี้

- พื้นที่ทั้งหมดภายใต้เส้นโค้งน้ำหนักเท่ากับพื้นที่ทั้งหมดภายใต้เส้นโค้งความลอย
- เซนทรอยด์ของพื้นที่ภายใต้เส้นโค้งน้ำหนัก อยู่ในแนวดิ่งเดียวกันกับเซนทรอยด์ของพื้นที่ภายใต้เส้นโค้งความลอย
- พื้นที่ภายใต้เส้นโค้งภาระที่มีค่าเป็นบวก กับพื้นที่ภายใต้เส้นโค้งภาระที่มีค่าเป็นลบมีจำนวนเท่ากัน
- เส้นโค้งแรงเฉือนมีค่าสูงสุดที่ตำแหน่งเส้นโค้งภาระมีค่าเป็นศูนย์
- เส้นโค้งโมเมนต์ดัดมีค่าสูงสุดที่ตำแหน่งเส้นโค้งแรงเฉือนมีค่าเป็นศูนย์
- ค่าแรงเฉือนและค่าโมเมนต์ดัดมีค่าเป็นศูนย์ที่ปลายทั้งสองข้าง

ตัวอย่างที่ 4.1

เรือมีความยาว 130 เมตร เมื่อใช้ค่าน้ำหนักและค่าความลอยที่ตำแหน่งกึ่งกลางระหว่างรอยตัด เป็นค่าน้ำหนักเฉลี่ยและความลอยเฉลี่ย มีหน่วยเป็นตันต่อเมตร จะได้ดังนี้

รอยตัดที่	0.5	1.5	2.5	3.5	4.5	5.5	6.5	7.5	8.5	9.5
น้ำหนัก	75.5	110.0	126.1	125.3	88.8	106.7	96.8	120.8	124.4	103.9
ความลอย	53.3	93.3	115.5	125.3	131.5	133.3	133.3	123.3	105.7	64.9

ให้หาค่าโมเมนต์ดัดที่ตำแหน่งกึ่งกลางลำ

วิธีทำ

หาค่าของแรงเฉือนจากผลรวมความแตกต่างของน้ำหนักกับความลอยต่อหน่วยความยาวตามสมการที่ 4.1 และหาค่าโมเมนต์จากผลรวมโมเมนต์แรงเฉือนตามสมการที่ 4.2 เพื่อความสะดวกในการคำนวณ สามารถใช้ตารางการคำนวณได้ดังนี้

รอยตัดที่	**น้ำหนัก**	**ความลอย**	**ภาระ**	S_n	**พื้นที่** S_x	**พื้นที่** M_x
0	-	-	-	0	-	**0**
0.5	75.5	53.3	-22.2	-	-22.2	-
1	-	-	-	-22.2	-	22.2
1.5	111.0	93.3	-17.7	-	-62.2	-
2.0	-	-	-	-39.9	-	84.3
2.5	126.1	115.5	-10.6	-	-90.4	-
3.0	-	-	-	-50.5	-	174.7
3.5	125.3	125.3	0	-	-101	-
4.0	-	-	-	-50.5	-	275.7
4.5	88.8	131.5	42.7	-	-58.3	-
5.0	-	-	-	-7.8	-	334.0
5.5	106.7	133.3	26.6	-	11.0	-
6.0	-	-	-	18.8	-	323
6.5	96.8	133.3	36.5	-	74.1	-
7.0	-	-	-	53.3	-	249
7.5	120.8	123.3	2.5	-	113.1	-
8.0	-	-	-	57.8	-	136
8.5	124.4	105.7	-18.7	-	96.9	-
9.0	-	-	-	39	-	39
9.5	103.9	64.9	-39	-	39	-
10.0	-	-	-	0	-	0

โมเมนต์ตัดที่ตำแหน่งกึ่งกลางลำเรือ = 334.0 x 13 x 0.5 = 28 220 tm

= 276.9 MNm

การหาค่าแรงเฉือนและโมเมนต์ดัดตามตัวอย่างที่ 4.1 นี้ เป็นการแสดงให้เห็นถึงวิธีการคำนวณหาค่าโดยสรุปเท่านั้น ในทางปฏิบัติจริง การที่จะให้ได้คำตอบที่มีความละเอียดถูกต้องเชื่อถือได้นั้น การคำนวณต้องอาศัยข้อมูลจำนวนมาก และข้อมูลเหล่านี้ส่วนใหญ่จะหาได้ยาก การคำนวณออกแบบเรือจำเป็นต้องทราบค่าที่ละเอียดถูกต้อง แต่ในกรณีที่ต้องการทราบคำตอบโดยประมาณ เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบ หรือเพื่อให้เห็นภาพพจน์เกี่ยวกับแรงและโมเมนต์ที่เกิดขึ้นเนื่องจากการดัด ก็สามารถหาค่าได้โดยประมาณดังนี้

กำหนดให้โมเมนต์ดัดสูงสุดที่เกิดขึ้นเปลี่ยนแปลงโดยตรงกับระวางขับน้ำ และความยาว หรือมีความสัมพันธ์กันตามรูปของสมการ

$$M_{max} = \frac{\Delta L}{C}\ tm = \frac{\Delta L}{C} \times 9813\ Nm \qquad (4.3)$$

เมื่อ C เป็นค่าสัมประสิทธิ์ และ เป็นค่าระวางขับน้ำของเรือ

ค่าสัมประสิทธิ์ C ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ เช่น การกระจายน้ำหนัก ชนิดของเรือ การกระจายความลอย เป็นต้น ในตารางที่ 4.1 เป็นการหาค่า C โดยประมาณสำหรับเรือที่อยู่ในสภาวะปกติ

ตารางที่ 4.1 ค่าสัมประสิทธิ์ของโมเมนต์

ชนิดของเรือ	ความยาว (m)	(tonnes)	C (sagging)	C (hogging)
Czrgo	130	12 600	35	33
Tanker	160	22 500	40	95
Tanker	220	62 500	40	115
Liner	225	41 000	116	30
Liner	290	64 000	80	30

แรงเฉือนสูงสุดถือว่ามีความสัมพันธ์กับระวางขับน้ำ และในสภาวะการบรรทุกปกตินั้นจะกำหนดให้

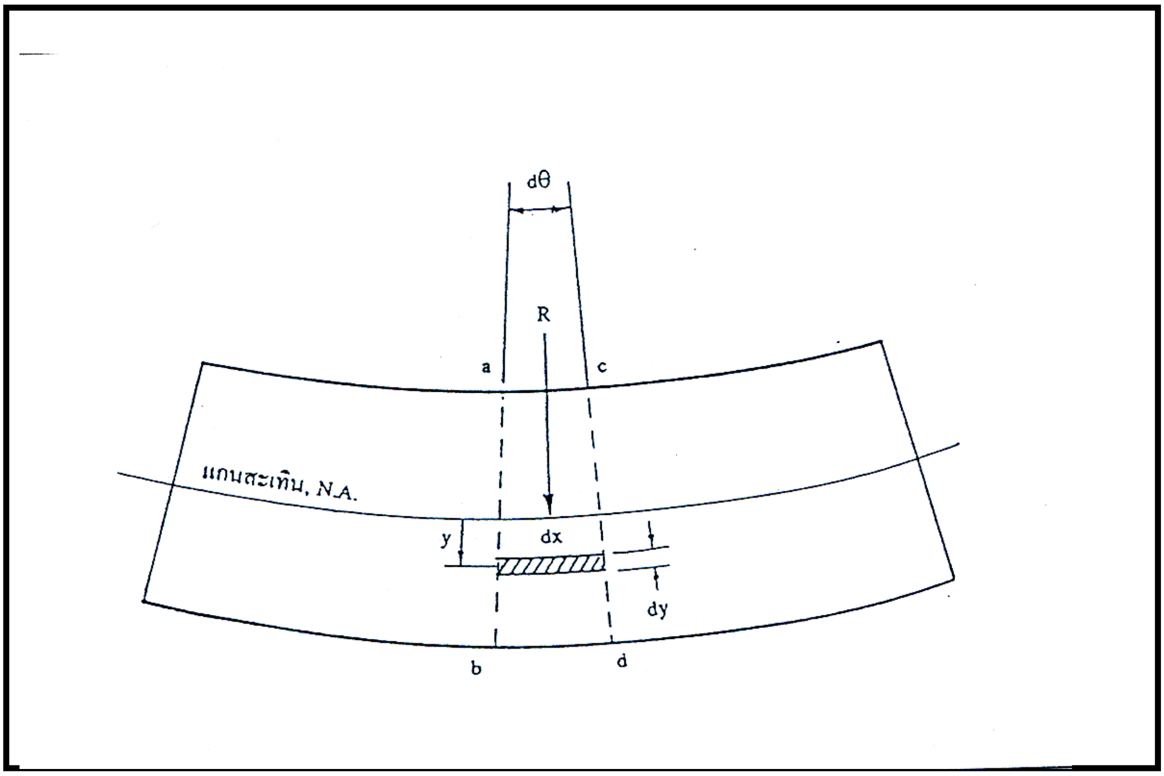
$$\textbf{แรงเฉือนสูงสุด} = \frac{\Delta}{10}\ tones = \frac{\Delta}{10} \times 9813\ N$$

แรงเฉือนสูงสุดนี้สามารถประมาณค่าได้จากค่าโมเมนต์ดัดสูงสุด คือ

$$S_{max} = \frac{C \times M_{max}}{L}\ tones = \frac{C \times M_{max}}{L} \times 9813\ N \qquad (4.4)$$

โดยที่ ค่าสัมประสิทธิ์ C มีค่าประมาณ 4

4.2 ทฤษฎีของคาน



รูปที่ 3 การโค้งงอของคาน

จากทฤษฎีความแข็งแรงของวัสดุจะได้ว่า เมื่อมีแรงหรือโมเมนต์มาทำให้วัสดุเปลี่ยนรูปก็จะเกิดความเค้นขึ้นในเนื้อวัสดุ คานเมื่อได้รับโมเมนต์ดัดจะเกิดการโค้งงอ หรือเกิดการเปลี่ยนรูป เมื่อพิจารณาลักษณะการเปลี่ยนรูปของคานตามรูปที่ 3 โดยกำหนดให้หน้าตัดของคานเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ก่อนที่คานจะเกิดการเปลี่ยนรูป หน้าตัด ab และ cd อยู่ในแนวขนานกัน โดยมีระยะห่างเท่ากับ dx และพื้นที่ทั้งสองนี้ต่างก็ตั้งฉากกับแกนสะเทิน (neutral axis) เมื่อคานเกิดการโค้งงอ พื้นที่หน้าตัดทั้งสองนี้จะเกิดการเอียงเป็นมุม และแกนสะเทินจะเปลี่ยนเป็นเส้นโค้ง โดยที่หน้าตัดทั้งสองยังอยู่ในลักษณะที่ตั้งฉากกับแกนสะเทินเหมือนเดิม ในสภาพนี้ เนื้อวัสดุที่อยู่ใต้แกนสะเทินจะยืดออกทำให้เกิดความเค้นดึง และเนื้อวัสดุที่อยู่เหนือแกนสะเทินจะไม่มีการยืดออกหรือหดสั้นลง จึงไม่มีความเค้นดึงหรือความเค้นอัดตามแนวยาวคานเกิดขึ้น ระนาบบนแกนสะเทินซึ่งไม่มีความเค้น ในแนวตั้งฉากกับพื้นที่หน้าตัดของคานนี้เรียกว่าระนาบสะเทิน (neutral plane)

ตามรูปที่ 3 กำหนดให้ R เป็นรัศมีความโค้งของแกนสะเทิน เมื่อพิจารณาชิ้นวัสดุที่มีความหนา dy ซึ่งอยู่ห่างจากแกนสะเทินเป็นระยะ y จะได้

ความยาวเดิมของชิ้นวัสดุ = dx

$$= R \times d\theta$$

ความยาวหลังจากการโค้งงอ $= (R + y) \times d\theta$

เนื่องจากความเครียด ε คือ อัตราส่วนของระยะที่เปลี่ยนไปกับความยาวเดิม ดังนั้น

$$\varepsilon = \frac{(R+y)\,d\theta - Rd\theta}{Rd\theta} = \frac{y}{R}$$

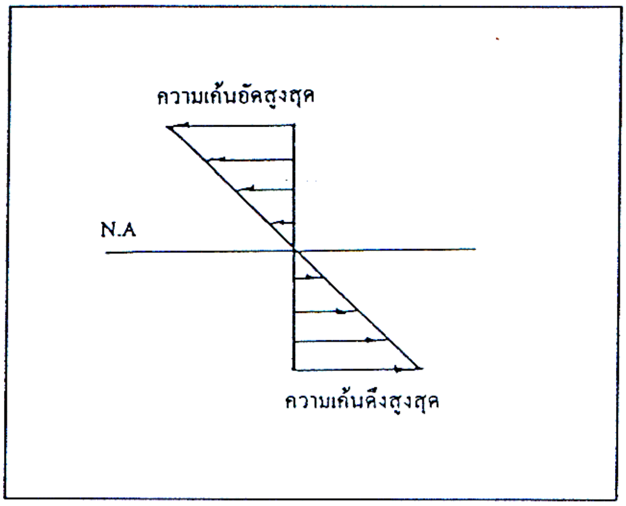
จากสมการนี้จะเห็นว่า ความเครียดเปลี่ยนแปลงโดยตรงกับระยะจากแกนสะเทิน และจากกฎของฮุค (Hook's law) ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดคือ

$$\sigma = E \quad \varepsilon$$

และถ้ามอดุลัสความยืดหยุ่น (modulus of elasticity) , E ของวัสดุมีค่าคงที่ตลอดช่วงที่มีการเปลี่ยนรูป ความเค้นดัด ที่เกิดขึ้นในเนื้อวัสดุก็คือ

$$\sigma = \frac{Ey}{R} \qquad (4.5)$$

จากสมการนี้จะได้ว่า ความเค้นดัดที่เกิดขึ้นก็เปลี่ยนแปลงโดยตรงกับระยะจากแกนสะเทิน ความเค้นดัดจะมีค่าเป็นศูนย์บนแกนสะเทิน และความเค้นดัดจะมีค่าสูงสุดที่ผิวบนและผิวล่างของคานสำหรับกรณีการโค้งงอของคานตามรูปที่ 3 ความเค้นดัดที่ผิวบนเป็นความเค้นอัด และความเค้นดัดที่ผิวล่างเป็นความเค้นดึง



รูปที่ 4 การกระจายความเค้นบนหน้าตัด

เนื่องจากคานในกรณีนี้ไม่มีแรงกระทำตามแนวราบ ผลรวมของความเค้นตามแนวราบจึงมีค่าเท่ากับศูนย์ หรือผลรวมของความเค้นดึงทั้งหมดจะเท่ากับผลรวมของความเค้นอัดทั้งหมด เมื่อนำความเค้น

ที่ตำแหน่งต่างๆ ตลอดความลึกของคานมาเขียนไดอะแกรม การกระจายความเค้นบนหน้าตัดตามรูปที่ 4 พื้นที่การกระจายความเค้นอัดส่วนบนจะมีค่าเท่ากับพื้นที่การกระจายความเค้นอัดส่วนล่าง

รูปที่ 5 แสดงรูปของหน้าตัด ตามแนวตั้งฉากกับแกนสะเทินของคานที่แสดงตามรูปที่ 4 เมื่อพิจารณาแรงตั้งฉากที่กระทำบนพื้นที่ย่อย dA = bdy ที่อยู่ห่างจากแกนสะเทินเป็นระยะ y จะได้

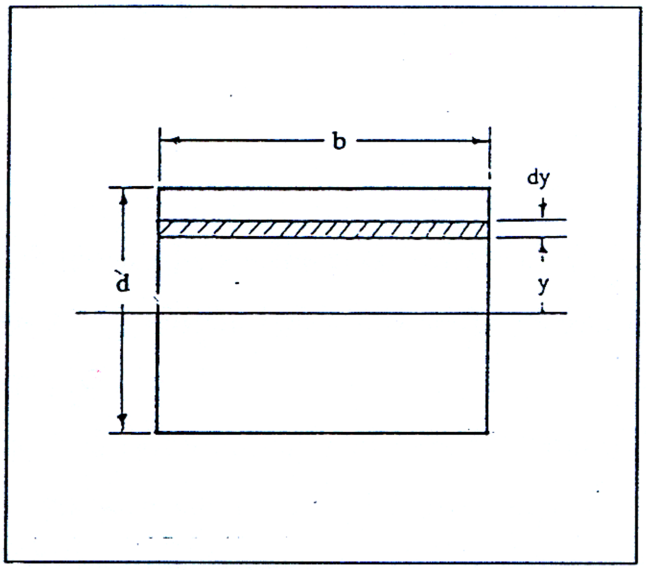
แรงบนพื้นที่ dA $= \frac{Ey}{R} \times dA$

แรงรวมบนพื้นที่ทั้งหมด $= \int \frac{Ey}{R} dA = 0$

เนื่องจาก E และ R เป็นค่าคงที่ ดังนั้น

$$\int ydA = 0$$

ค่า $\int ydA$ คือโมเมนต์ของพื้นที่รอบแกนที่ผ่านเซนทรอยด์ เมื่อจำนวนนี้มีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นแกนสะเทินจึงเป็นแกนที่อยู่ระดับเดียวกับเซนทรอยด์ของพื้นที่



รูปที่ 5 ความสมดุลของแรงบนหน้าตัด

กำหนดให้ M เป็นโมเมนต์ภายนอกบนหน้าตัดนี้ ซึ่งจะมีค่าเท่ากับผลรวมของโมเมนต์ของแรงบนพื้นที่ย่อยดังนั้น

$$M = \int \frac{Ey}{R} \times y \times dA = \int \frac{E}{R} y^2 dA$$

เนื่องจาก E และ R เป็นค่าคงที่

$$M = \frac{E}{R}\int \frac{E}{R} y^2 dA$$

ค่า $\int \frac{E}{R} y^2 dA$ คือ โมเมนต์ที่สอง หรือ โมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่รอบแกนสะเทิน (I) ดังนั้น

$$\frac{M}{I} = \frac{E}{R}$$

และจากสมการที่ 4.5 ซึ่งได้ว่า

$$\sigma = \frac{Ey}{R} \quad \text{หรือ} \quad \frac{E}{R} = \frac{\sigma}{y}$$

จากสมการทั้งสองข้างบนจะได้

$$\frac{M}{I} = \frac{E}{R} = \frac{\sigma}{y}$$

หรือ

$$\sigma = \frac{M}{I/y} \qquad (4.6)$$

ค่า I/y ในสมการที่ 4.6 นี้ เมื่อ y เป็นระยะไกลสุดจากแกนสะเทิน จะเรียกว่ามอดุลัสของหน้าตัด ซึ่งนิยมใช้ตัวย่อ Z เมื่อรูปหน้าตัดไม่สมมาตรกับแกนสะเทินของการดัดค่ามอดุลัสของหน้าตัดจะมีสองค่า

สูตรตามสมการที่ 4.6 นั้น ได้จากทฤษฎีเบื้องต้นของคาน โดยสมมุติให้คานเป็นวัสดุเนื้อสม่ำเสมอ ได้รับการดัดโดยไม่มีแรงเฉือน สูตรนี้แม้จะเป็นสูตรพื้นฐานเบื้องต้นของคาน แต่ก็นำมาใช้กันทั่วไปในงานทางวิศวกรรม แม้ว่าคานจะรับภาระในลักษณะที่ทำให้เกิดแรงเฉือนด้วย ความคลาดเคลื่อนของค่าความเค้นที่คำนวณได้จากสูตรนี้โดยทั่วไปจะยังคงอยู่ในขอบเขตที่ยอมรับได้ สำหรับกรณีการโค้งงอของเรือ การใช้สูตรนี้เพื่อหาค่าความเค้นดัดตามแนวยาวก็ถือว่าใช้ได้และเป็นที่ยอมรับกันโดยทั่วไป

4.3 มอดุลัสและความเค้นดัดของตัวเรือ

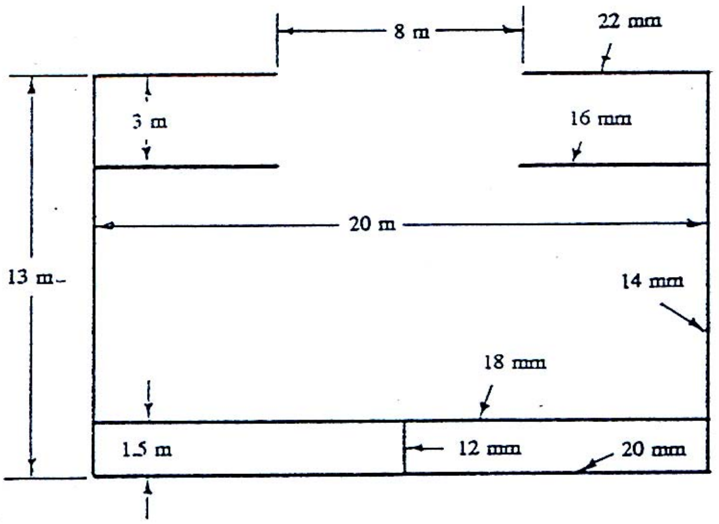
ในตอนที่ผ่านมา เป็นการศึกษาเกี่ยวกับลักษณะการเกิดแรงเฉือนและโมเมนต์ดัด เมื่อได้รับภาระตามรูปแบบต่าง ๆ และการพิจารณาความเค้นที่เกิดขึ้นเนื่องจากการโค้งงอของคาน เมื่อพิจารณาสภาพการรับภาระกระจายตลอดความยาวของเรือ ทำให้โมเมนต์ดัดเกิดขึ้นสูงสุดบริเวณกึ่งกลางลำ มอดุลัสของหน้าตัดที่บริเวณนี้จึงต้องการให้มีค่ามากที่สุด เพื่อให้เกิดความเค้นที่เหมาะสม

กับความแข็งแรงเชิงดัดของวัสดุตัวเรือ การหาค่ามอดุลัสของหน้าตัด จะพิจารณาเฉพาะชิ้นส่วนที่สามารถถ่ายทอด และกระจายความเค้นตามแนวยาวเป็นระยะทางที่ไกลพอสมควรเมื่อเทียบกับความยาวเรือ เช่น พื้นท้องเรือ ตัวเรือด้านข้าง ดาดฟ้า กงตามยาว อะเสตามยาว เป็นต้น

บริเวณกึ่งกลางลำ หรือบริเวณที่มีค่าโมเมนต์ดัดสูงสุด ความเค้นดัดจะเกิดขึ้นสูงสุดบนหน้าตัดที่มีค่ามอดุลัสของหน้าตัดต่ำสุด ดังนั้นการหาค่ามอดุลัสของหน้าตัดบริเวณกึ่งกลางลำ จะพิจารณาบริเวณที่ทำให้เกิดมอดุลัสของหน้าตัดต่ำสุด เช่นหน้าตัดที่ผ่านปากระวางของหรือช่องขนาดใหญ่บนดาดฟ้า เป็นต้น

ตัวอย่างที่ 4.2

การกระจายน้ำหนัก และการกระจายความลอยของเรือลำหนึ่ง ทำให้เกิดโมเมนต์ดัดที่ตำแหน่งกึ่งกลางลำบนผิวน้ำเรียบเท่ากับ 797 MNm โมเมนต์ดัดนี้ทำให้เรืออยู่ในสภาพตกท้องช้าง และโมเมนต์ดัดที่ตำแหน่งกึ่งกลางลำเนื่องจากคลื่นที่ทำให้เรืออยู่ในสภาพตกท้องช้างนั้นมีค่าเท่ากับ 719 MNm ให้คำนวณหาค่าความเค้นดัดสูงสุดที่เกิดขึ้น เมื่อหน้าตัดกึ่งกลางลำมีลักษณะตามรูป



วิธีทำ

เนื่องจากหน้าตัดสมมาตรกับแกนตั้งกึ่งกลางลำ การคำนวณหามอดุลัสของหน้าตัดจะกระทำเพียงซีกเดียวก่อนแล้วนำค่าที่ได้ คูณด้วย 2 เมื่อใช้ตารางการคำนวณจะได้ดังนี้

ชิ้นส่วน	ขนาด	a	y	ay	ay^2	I_x

ดาดฟ้าชั้นบน	6 x 0.022	0.132	13.0	1.716	22.308	-
ดาดฟ้าชั้นสอง	6 x 0.016	0.096	10.0	0.960	9.600	-
แผ่นตัวเรือด้านข้าง	13 x 0.014	0.182	6.5	1.183	7.689	2.563
แผ่นท้องเรือชั้นใน	10 x 0.018	0.180	1.5	0.270	0.405	-
แผ่นท้องเรือชั้นนอก	10 x 0.020	0.200	0.0	-	-	-
อะเสกลาง	1.5 x 0.012	0.009	0.75	0.007	0.005	0.001
ทั้งหมด		0.799		4.136	40.007	2.564

ระยะแกนสะเทินจากเส้นฐาน $= \frac{4.136}{0.799} = 5.18$ m

โมเมนต์ที่สองของ

ครึ่งพื้นที่รอบเส้นฐาน $= 40.007 + 2.564 = 42.571$ m^4

โมเมนต์ที่สองของ

ครึ่งพื้นที่รอบแกนสะเทิน $= 42.571 - 0.799 \times 5.18^2 = 21.132$ m^4

โมเมนต์ที่สองของพื้นที่ทั้งหมดรอบแกนสะเทิน $= 21.132 \times 2 = 42.264$ m^4

ระยะจากแกนสะเทินไปยังส่วนล่างสุดของหน้าตัด $=$ 5.18 m

ระยะจากแกนสะเทินไปยังส่วนบนสุดของหน้าตัด $=$ 13 - 5.18 = 7.82 m

มอดุลัสของหน้าตัดส่วนล่าง $= \frac{42.264}{5.18} = 8.16$ m^3

มอดุลัสของหน้าตัดส่วนบน $= \frac{42.264}{7.82} = 5.40$ m^3

เมื่อเรือลอยบนผิวน้ำเรียบ

ความเค้นในดาดฟ้า $= \frac{797}{5.4} = 147.6$ MN/m^2

ความเค้นในแผ่นท้องเรือชั้นนอก $= \frac{797}{5.4} = 97.7$ MN/m^2

ความเค้นดัดเนื่องจากคลื่น

ความเค้นในดาดฟ้า $= \frac{719}{5.4} = 133.1$ MN/m^2

ความเค้นในแผ่นท้องเรือชั้นนอก $= \frac{719}{8.16} = 88.1$ MN/m^2

ดังนั้น

ความเค้นดัดทั้งหมดที่เกิดขึ้นในดาดฟ้า $= 147.6 + 133.1 = 280.7$ MN/m^2

(ความเค้นอัด)

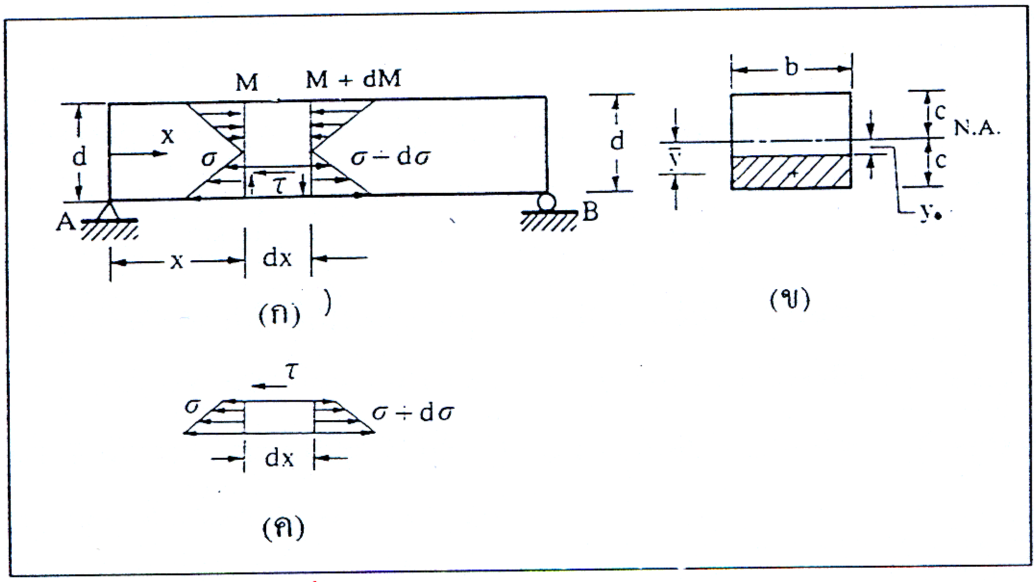
ความเค้นดัดทั้งหมดที่เกิดขึ้นในแผ่นท้องเรือชั้นนอก = 97.7 + 88.1 = 185.8 MN / m^2
(ความเค้นดึง)

การคำนวณหาโมเมนต์ที่สองของพื้นที่รอบเส้นฐาน ตามตารางในตัวอย่างที่ 4.2 นั้น หาได้จากการนำพื้นที่มาคูณกับระยะทางจากเส้นฐานถึงจุดเซนทรอยด์ของแต่ละชิ้นส่วนยกกำลังสอง แต่ค่าโมเมนต์ที่สองของพื้นที่ของแต่ละชิ้นส่วนตามความเป็นจริงนั่นจะต้องนำค่าโมเมนต์ความเฉื่อยรอบแกนสะเทินมารวมด้วย สำหรับชิ้นส่วนโครงสร้างของเรือเกือบทั้งหมด จะมีหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าซึ่งมีค่าโมเมนต์ความเฉื่อยรอบแกนสะเทินเท่ากับ $ad^2/12$ เมื่อ d เป็นความลึกตามแนวดิ่ง เมื่อพิจารณาชิ้นส่วนที่วางแบนราบ เช่น ดาดฟ้า พื้นท้องเรือชั้นนอกและชั้นใน ระยะความลึกจะเท่ากับความหนาของแผ่นเหล็กซึ่งมีค่าน้อย เมื่อเทียบกับขนาดตามแนวอื่น ดังนั้น ค่า $ad^2/1$ จะมีค่าน้อยมาก เมื่อเทียบกับผลคูณระหว่างพื้นที่กับกำลังสองของระยะจากเส้นฐานถึงจุดเซนทรอยด์ จึงไม่จำเป็นต้องนำมาพิจารณา แต่สำหรับชิ้นส่วนที่วางในแนวตั้ง เช่น ตัวเรือด้านข้าง ฝาตามยาว อะเสกลาง ซึ่งขนาดความลึกของชิ้นส่วนเหล่านี้จะมีค่ามาก ดังนั้น จึงต้องนำค่าโมเมนต์ความเฉื่อยรอบแกนสะเทินมารวมด้วย

การคำนวณหาค่ามอดุลัสของหน้าตัด ชิ้นส่วนที่นำมาพิจารณาตามตัวอย่างที่ 4.2 นั้น ได้ยกมาเพียงบางส่วนเพื่อเป็นตัวอย่างการคำนวณเท่านั้น การคำนวณโครงสร้างของเรือจริง จะต้องนำชิ้นส่วนโครงสร้างตามยาวอื่น ๆ เช่น อะเสข้าง ฝากั้นตามยาว กงตามยาว มาพิจารณาด้วย

4.4 ความเค้น

เฉือน



รูปที่ 6 การหาค่าความเฉือนบนหน้าตัดของคาน

ความเค้นเฉือนซึ่งเกิดขึ้นกับวัสดุตัวเรือ อันเนื่องมาจากแรงเฉือนที่มากระทำนั้นจะพิจารณาเช่นเดียวกับความเค้นดัดที่ได้กล่าวมาแล้ว คือสมมุติให้เรือรับภาระเหมือนคานธรรมดา เมื่อพิจารณาคานหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า มีความลึก d ความกว้าง b ตามรูปที่ 6 (ก) โมเมนต์ที่ที่หน้าตัด x มีค่าเท่ากับ M และโมเมนต์ที่หน้าตัด $x + dx$ มีค่าเท่ากับ $M + dM$ เมื่อพิจารณาที่ระดับความลึก y จากแกนสะเทิน ความเค้นที่หน้าตัด x มีค่าเท่ากับ และความเค้นที่หน้าตัด $x + dx$ มีค่าเท่ากับ ดังนั้นสมการสมดุลของแรงจะได้ว่า

$$\int_{y_0}^{c} (\sigma + d\sigma)dA - \int_{y_0}^{c} \sigma dA - \tau bdx = 0$$

เมื่อ dA คือพื้นที่หน้าตัดจากระยะ y ถึงระยะ $c = d/2$ ตามรูปที่ 6 (ข)

และเนื่องจาก $\sigma = \frac{My}{I}$ และ $\sigma + d\sigma = \frac{(M + dM)y}{I}$ เมื่อนำค่าทั้งสองนี้ไปแทนในสมการข้างบนได้

$$\int_{y_0}^{c} \frac{My}{I} dA + \tau bdx = \int_{y_0}^{c} \frac{(M + dM)y}{I} dA \quad \text{หรือ}$$

$$\tau bdx = \int_{y_0}^{c} \frac{dM \text{ x } ydA}{I}$$

เนื่องจากค่า dM และ I เป็นค่าคงที่บนหน้าตัดใด ๆ ดังนั้น

$$\tau = \frac{dM}{Ibdx} \int_{y_0}^{c} y\, dA$$

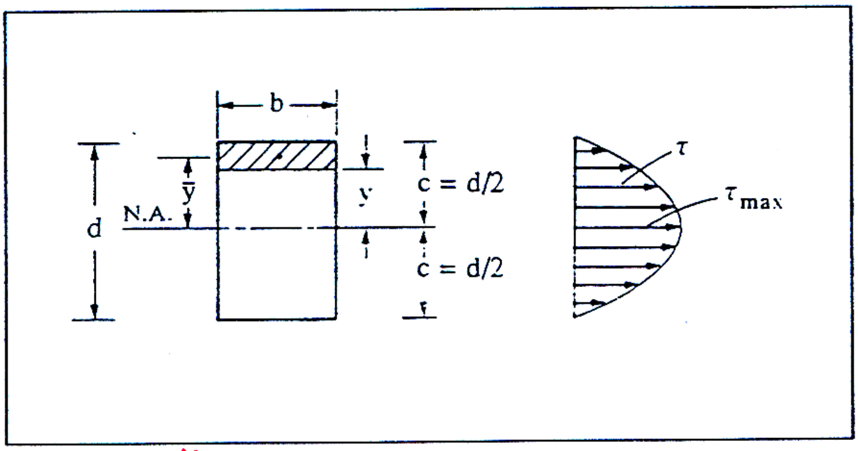
ในที่นี้ค่า dM/dx ที่ตำแหน่งหน้าตัดต่าง ๆ ก็คือค่าแรงเฉือน S ที่หน้าตัดนั้น

ค่า $\int_{y_0}^{c} y\, dA$ คือโมเมนต์ของพื้นที่ระหว่างระยะ y ถึงระยะ c ซึ่งจะมีค่าเท่ากับ Ay

เมื่อ y เป็นระยะจากแกนสะเทอนไปยังตำแหน่งเซนทรอยด์ของพื้นที่ A ซึ่งอยู่ระหว่าง y_0 กับ c ดังนั้นจากสมการข้างบนจะได้

$$\tau = \frac{SAy}{Ib}$$

เมื่อพิจารณาการกระจายความเค้นเฉือนบนหน้าตัดของคานรูปสี่เหลี่ยนผืนผ้า ซึ่งมีค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดเท่ากับ $bd^3 / 12$ จะได้ดังนี้



รูปที่ 7 การกระจายความเค้นเฉือนบนหน้าตัดของคาน

$$\tau = \frac{SAy}{Ib}$$

$$= \frac{S}{Ib} \times b\,(c-y) \times \left(y + \frac{c-y}{2}\right)$$

$$= \frac{S \times 12}{bd^3 \times b} \times b\left(\frac{d}{2} - y\right) \times \left(y + \frac{h/2 - y}{2}\right)$$

$$= \frac{6S}{bd^3}\left(\frac{d^2}{4} - y^2\right)$$

จากสมการนี้จะเห็นว่าการกระจายความเค้นเฉือนจะเป็นรูปพาราโบลา และเมื่อพิจารณาค่าความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นคือที่ตำแหน่ง $y = O$ ซึ่งเป็นตำแหน่งบนระนาบสะเทอน ดังนั้น

$$\tau = \frac{6S}{bd^3} \times \frac{d^2}{4} = \frac{3S}{2bd} \qquad (4.7)$$

ตามสภาพการรับภาระของเรือทั่วไป ตำแหน่งหน้าตัดที่เกิดแรงเฉือนสูงสุดจะอยู่ที่บริเวณหนึ่งในสี่ของความยาวเรือ จากปลายทั้งสองด้าน ดังนั้นความเค้นเฉือนสูงสุดจะอยู่บนระนาบสะเทินที่ตำแหน่งหน้าตัดนี้ ชิ้นส่วนโครงสร้างตัวเรือที่ต้องรับความเค้นเฉือนสูงสุดก็คือ ตัวเรือด้านข้างและฝากั้นตามยาว แผ่นเหล็กเหล่านี้จึงต้องมีความหนาเพียงพอที่จะไม่ทำให้ความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นมีค่าสูงเกินไป

ความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นในชิ้นส่วนโครงสร้างเรือจะมีผลกระทบต่อลักษณะการกระจายความเค้นดัดด้วย เพราะความเค้นดัดที่คำนวณได้จากสูตร $\sigma = My / I$ นั้นเป็นการสมมุติว่าคานได้รับโมเมนต์ดัดเพียงอย่างเดียว เมื่อนำแรงเฉือนเข้ามาพิจารณาด้วย การวิเคราะห์ความเค้นจะทำได้ยากขึ้น

ซึ่งจะไม่นำมากล่าวในที่นี้ แต่ผลที่เกิดขึ้นโดยทั่วไปสำหรับเรือก็คือความเค้นดัดจะมีค่าสูงกว่าค่าที่คำนวณได้จากสูตรการโค้งงอธรรมดา โดยเฉพาะบริเวณขอบมุมของลำตัวเรือ เช่นขอบดาดฟ้าและท้องเรือด้านข้าง ผลกระทบที่สำคัญอีกกรณีหนึ่งก็คือ การวิเคราะห์การสั่นสะเอนของโครงสร้าง สูตรพื้นฐานที่ได้จากทฤษฎีการโค้งงอธรรมดา ซึ่งไม่ได้นำความเค้นเฉือนมาพิจารณาด้วย จะมีผลทำให้ความถี่ของการสั่นสะเอนที่ได้จากสูตรพื้นฐานนั้นมีค่าสูงกว่าความเป็นจริงด้วย

นอกจากนี้แรงเฉือนยังเป็นผลทำให้ระยะโก่งของเรือเพิ่มขึ้นด้วย การหาระยะโก่งจากสูตรการโค้งงอธรรมดาจึงมีค่าน้อยว่าความเป็นจริง แต่โดยทั่วไปผลกระทบในส่วนนี้ถือว่ามีความสำคัญน้อย

ตัวอย่างที่ 4.3

บนหน้าตัดขวางของเรือ มีแรงเฉือนสูงสุดเท่ากับ 44.76 MN โมเมนต์รอบแกนสะเอนของหน้าตัดตัวเรือส่วนบนของแกนสะทอนทั้งหมดท่ากับ 151 000 m cm โมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดรอบแกน**สะเทิน**เท่ากับ 2 758 000 ความหนาของตัวเรือด้านข้างที่บริเวณแกนสะเทินเท่ากับ 2.14 cm ให้หาความเค้นเฉือนสูงสุด ที่เกิดขึ้นกับตัวเรือ

วิธีทำ

ความเค้นเฉื่อยสูงสุดที่เกิดขึ้นในกรณีนี้จะอยู่บนแกนสะเทิน

จากสูตร

$$\tau = \frac{SAy}{2bI}$$ ค่า 2 ในที่นี้คือคิดรวมความหนาของแผ่นเหล็กตัวเรือทั้งสองข้าง

$$= \frac{44.76 \times 151000}{2 \times 2.14 \times 2758000} = \frac{MN \times m\ cm^2}{cm \times m^2 \times cm^2} = \frac{MN}{cm \times m}$$

$$= \frac{44.76 \times 151000 \times 100}{2 \times 2.14 \times 2758000} = 57.24 \quad MN/m^2$$

4.5 ระยะโก่ง

ระยะโก่งของลำตัวเรือสามารถหาได้เมื่อทราบข้อมูลเกี่ยวกับการกระจายโมเมนต์ดัดตอลดความยาว จากทฤษฎีการโค้งงอของคาน ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดกับรัศมีการโค้งงอคือ

$$M = \frac{IE}{R} \qquad (4.8)$$

เมื่อกำหนดให้ y เป็นระยะโก่งของลำตัวเรือ โดยวัดจากเส้นตรงที่เชื่อมต่อระหว่างปลายทั้งสองด้านของแกนสะเทินตามยาวไปยังเส้นโค้งของแกนสะเทินที่ตำแหน่ง x ใด ๆ และระยะ x เป็นระยะจากกึ่งกลางลำไปยังปลายทั้งสองข้าง รัศมีเส้นโค้งของแกนสะเทินตามยาวเมื่อมีโมเมนต์ดัดมากระทำคือ

$$R = \frac{\left\{1 + (dy/dx)^2\right\}^{3/2}}{d^2y/dx^2}$$

เมื่อให้เรืออยู่ในสภาพเหมือนกับคานทั่วไป ระยะโก่งจะมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับความยาว ดังนั้นค่า $(dy/dx)^2$ จะน้อยมากเมื่อเทียบกับ 1 จึงสามารถตัดทิ้งได้ สมการข้างบนจึงสามารถปรับแต่งให้อยู่ในรูปที่ง่ายขึ้นได้คือ

$$R = \frac{1}{d^2y/dx^2} \quad \text{หรือ} \quad \frac{d^2y}{dx^2} = \frac{1}{R}$$

เมื่อแทนค่า I/R ด้วย ME/I จะได้

$$-EI\frac{d^2y}{dx^2} = M$$

สมการนี้คือสมการดิฟเฟอเรนเชียลสำหรับการโค้งงอของคานเนื่องจากโมเมนต์ดัด ผลเฉลยของสมการนี้คือ

$$y = -\iint \frac{M}{I}dxdx + Ax + B \qquad (4.9)$$

เมื่อค่า A และ B คือค่าคงที่ของการอินทิเกรต

เมื่อนำสมการนี้มาประยุกต์ใช้กับเรือ เนื่องจากการกระจายโมเมนต์ดัด และค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดตลอดความยาวเรือ ไม่เหมาะสมที่จะแสดงให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ การอินทิเกรตจึงต้องอินทิเกรตด้วยวิธีตัวเลขจากกราฟโดยการเขียนเส้นโค้ง M/I ตามแนวความยาวเรือ ค่าคงที่ A และ B หาได้จากการกำหนดเงื่อนไขที่ปลายทั้งสองด้าน เช่นเมื่อกำหนดให้ปลายทั้งสองด้านมีระยะโก่งเท่ากับศูนย์ ดังนั้น

B จะมีค่าเท่ากับศูนย์ตามเงื่อนไขนี้ หรือ

$$-\iint_L \frac{M}{EI}dxdx + AL = 0$$

จากสมการนี้จะได้ว่าค่าคงที่ A คือ

$$A = \frac{1}{L}\iint_L \frac{M}{EI}dxdx$$

ดังนั้นผลเฉลยของสมการการโค้งงอในสภาวะนี้คือ

$$y = -\iint \frac{M}{EI}dxdx + \frac{x}{L}\iint_L \frac{M}{EI}dxdx$$

ตามรูปของสมการข้างบนจะเห็นว่าระยะโก่งสูงสุดเกิดขึ้นที่ตำแหน่ง x = O หรือตำแหน่งกึ่งกลาง และเนื่องจาก E เป็นค่าคงที่ ดังนั้นระยะโก่งสูงสุด คือ

$$y_{max} = -\frac{1}{E}\iint \frac{M}{I}dxdx$$

สมการที่ 4.11 เป็นสมการที่ใช้หาระยะโก่งจากทฤษฎีการโค้งงอ โดยพิจารณาเฉพาะผลที่ได้เนื่องจากโมเมนต์ดัดเพียงอย่างเดียว นอกจากนี้แรงเฉือนก็มีผลทำให้เกิดการโก่งเช่นเดียวกัน แต่การวิเคราะห์หาระยะโก่งของเรือเนื่องจากแรงเฉือนเป็นเรื่องยาก และการประมาณค่าด้วยทฤษฎีพื้นฐานของคานก็ไม่ค่อยจะได้ผล ทั้งนี้เนื่องจากการกระจายความเค้นเฉือนบนหน้าตัดลำตัวเรือ ตามสภาพความเป็นจริงนั้นจะแตกต่างกันมากเมื่อเทียบกับลักษณะการกระจายความเค้นเฉือนบนหน้าตัดในคานที่เป็นวัสดุเนื้อเดียว

ตัวอย่างที่ 4.4

เรือมีความยาว 128 เมตร มีค่า M/I (tm/cm m) ที่รอยตัดต่าง ๆ ซึ่งมีระยะห่างเท่ากันโดยนับจากท้ายเรือไปยังหัวเรือ มีดังนี้

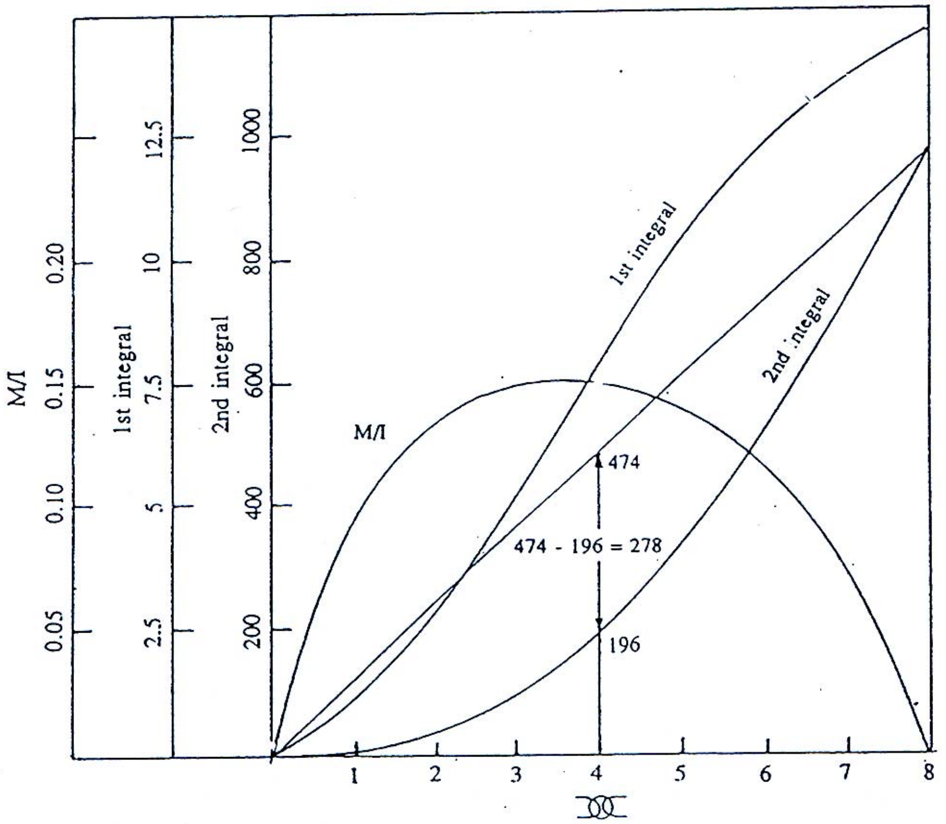
รอยตัดที่	0	1	2	3	4	5	6	7	8
M/I	0	0.093	0.135	0.150	0.156	0.145	0.119	0.078	0

ให้ประมาณค่าระยะโก่งที่ตำแหน่งกึ่งกลางลำเทียบกับแนวเส้นตรงที่ผ่านปลายทั้งสองด้านของแกนสะเทินตามยาว

กำหนดให้ E = 20.9 M/N cm

วิธีทำ

เมื่อนำข้อมูลมาเขียนเส้นโค้ง M/I และจากเส้นโค้ง M/I คำนวณหาค่า อินทิเกรตครั้งที่ 1 และอินทิเกรตครั้งที่ 2 เมื่อนำผลที่ได้มาเขียนเส้นโค้งก็จะได้ลักษณะเส้นโค้งตามรูป



		อินทิเกรตครั้งที่ 1			อินทิเกรตครั้งที่ 2	
จาก	0 - 1	16 x 0.057 = 0.912	จาก	0 – 1	16 x 0.25	= 4
	1 - 2	x 0.155 = 1.84		1 – 2	x 1.75	= 28
		ถึง 2 = 2.75			ถึง 2	= 32
	2 - 3	x 0.144 = 2.30		2 – 3	x 4.0	= 64
		ถึง 3 = 5.05			ถึง 3	= 96
	3 - 4	x 0.155 = 2.48		3 – 4	x 6.25	= 100
		ถึง 4 = 7.53			ถึง 4	= 196
	4 – 5	x 0.152 = 2.43		4 – 5	x 8.75	= 140
		ถึง 5 = 9.96			ถึง 5	= 336
	5 – 6	x 0.135 = 2.16		5 – 6	x 11.0	= 176
		ถึง 6 = 12.12			ถึง 6	= 512
	6 – 7	x 0.10 = 1.6		6 – 7	x 13.0	= 208
		ถึง 7 = 13.72			ถึง 7	= 720
	7 – 8	x 0.044 = 0.70		7 – 8	x 14.2	= 228
		ถึง 8 = 14.42			ถึง 8	= 948

การอินทิเกรตครั้งที่ 1 หรือค่า $\int \frac{M}{I} dx$ ก็คือผลรวมของพื้นที่ภายใต้เส้นโค้ง M/I โดยการหาพื้นที่ระหว่างรอยตัดต่าง ๆ ซึ่งระยะระหว่างรอยตัดมีค่าเท่ากับ 128/8 = 16 เมตร เมื่อนำระยะระหว่างรอยตัวนี้ไปคูณกับระยะแกนตั้งกึ่งกลาง (mean ordinate) ซึ่งหาได้โดยวิธีการวัดจากกราฟ ก็จะได้ค่าพื้นที่ในช่วงนั้น เมื่อนำผลคูณของแต่ละช่วงมารวมกันก็จะได้พื้นที่ทั้งหมดภายใต้เส้นโค้ง M/I จากตารางการคำนวณ พื้นที่ภายใต้เส้นโค้ง M/I ระหว่างรอยตัดที่เส้นตั้งฉากท้ายกับรอยตัดที่ 1 มีค่าเท่ากับ 16 x 0.057 = 0.912 ซึ่งค่า 0.057 ในที่นี้ก็คือค่าของ M/I ที่วัดได้ที่ตำแหน่งกึ่งกลางระหว่างรอยตัดที่เส้นตั้งฉากท้าย กับรอยตัดที่ 1 ในทำนองเดียวกันพื้นที่ระหว่างรอยตัดที่ 1 กับรอยตัดที่ 2 คือ 16 x 0.115 = 1.84 = 1.84 และค่า 0.115 นี้ก็คือค่า M/I ที่ตำแหน่งกึ่งกลางระหว่างรอยตัดที่ 1 กับรอยตัดที่ 2 ดังนั้นพื้นที่ภายใต้เส้นโค้ง M/I จากเส้นตั้งฉากท้ายถึงรอยตัดที่ 2 ก็เท่ากับ 0.912 + 1.84 = 2.75 เมื่อทำต่อไปจนถึงรอยตัดที่ 8 ก็จะได้พื้นที่ทั้งหมดภายใต้เส้นโค้ง M/I เท่ากับ 14.42

เมื่อนำค่าพื้นที่จากเส้นตั้งฉากท้ายถึงรอยตัดต่าง ๆ ไปเขียนเส้นโค้ง ก็จะได้เส้นโค้งของ 1st integral ตามรูป แล้วหาพื้นที่ภายใต้เส้นโค้ง 1st integral แบบเดียวกับการหาพื้นที่ภายใต้เส้นโค้ง M/I ก็จะได้ว่า พื้นที่ภายใต้เส้นโค้ง 1st integral ก็คือค่า

$$\iint \frac{M}{I} dx dx \text{ โดยมีหน่วยเป็น } \frac{\text{tonne} - \text{metre}}{\text{cm}^2 \times \text{m}^2} \times \text{m}^2 \Rightarrow \frac{\text{tonne} - \text{metre}}{\text{cm}^2}$$

ซึ่งจะได้ว่าพื้นที่ภายใต้เส้นโค้ง1st integral ทั้งหมด เท่ากับ948 $\frac{\text{tonne} - \text{metre}}{\text{cm}^2}$

เมื่อหาระยะโก่งของหัวเรือเมื่อเทียบกับท้ายเรือจากสูตร $y = \frac{I}{E} \iint \frac{M}{I} dx dx$

โดยที่ $E = 20.9 \frac{\text{MN}}{\text{cm}^2} = \frac{20.9}{9.813} \times 10^6 \frac{\text{tonne}}{\text{cm}^2}$

ดังนั้น $y = \frac{948}{20.9} \times \frac{9.813}{10^6} \times 100 = 44.5 \text{ cm}$

ระยะโก่งในกรณีนี้ เป็นระยะโก่งของปลายด้านหนึ่งเมื่อเทียบกับปลายอีกด้านหนึ่ง แต่การโก่งงอของลำตัวเรือที่ต้องการคือการโก่งงอเมื่อเทียบกับแนวเส้นที่เชื่อมต่อระหว่างหัวเรือกับท้ายเรือ

ดังนั้นเมื่อกำหนดให้ระยะโก่งที่หัวเรือเป็นศูนย์ เช่นเดียวกับที่ท้ายเรือ ระยะโก่งที่ตำแหน่งอื่น ๆ ก็หาได้ โดยการหาค่าความแตกต่างระหว่าง ค่า 2nd intergral ที่ตำแหน่งนั้นกับเส้นตรงที่เชื่อมต่อระหว่างตำแหน่ง 2nd intergral ที่ท้ายเรือ (= 0) กับตำแหน่ง 2nd integral ที่หัวเรือ (= 948)

จากรูประยะโก่งที่ตำแหน่งกึ่งกลางลำ เมื่อเทียบกับแนวเส้นตรงที่เชื่อมต่อระหว่างท้ายเรือกับหัวเรือจะมีค่าเท่ากับ 474 – 196 = 278 ดังนั้น

ระยะโก่งที่ตำแหน่งกึ่งกลางลำ $= \dfrac{278}{20.9} \times \dfrac{9813}{10^6} \times 100 = 13$ cm

----

บทที่ 5
คุณลักษณะของเรือ

5.1 ชนิดของเรือ

การแบ่งเรือออกเป็นชนิดนั้นอาจแบ่งได้โดยถือหลัก 4 ประการ คือ.-

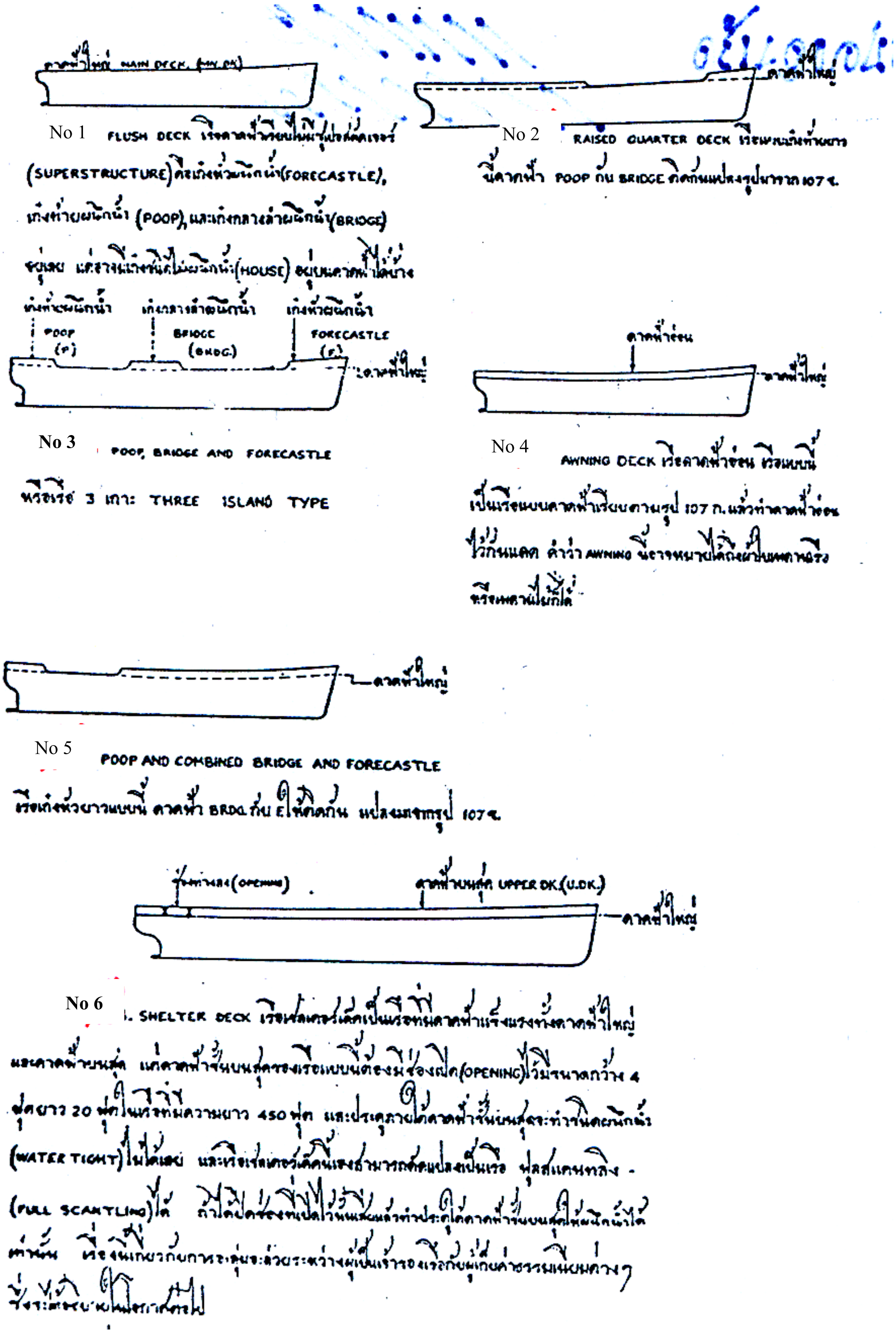
1. แบ่งตามรูปร่าง เช่น เรือดาดฟ้าเรียบ (Flusn deck) เรือ 3 เกาะ (Three Islands) เรือเก๋งหัวยาว (Poop And Combined Bridge And Forecastle) เรือเก๋งท้ายยาว (Raised Quarter Deck) เรือดาดฟ้าอ่อน (Awning Deck) เรือเซลเตอร์เดค (Shelter Deck) และเรือฟูลสแคนทลิง (Full Scantling) ดูรูปที่ 1

2. แบ่งตามความยาว วิธีนี้เป็นวิธีการของสหรัฐอเมริกา คือแบ่งออกได้เป็นเรือขนาดใหญ่และเรือขนาดเล็ก ๆ นั้น เป็นเรือที่ยาวตั้งแต่ 200 ฟุต ลงมา เรือขนาดใหญ่เป็นเรือที่ยาวกว่า 200 ฟุต ขึ้นไป

3. แบ่งตามการใช้งาน คือ เรือลำใดใช้งานอย่างไรก็เรียกอย่างนั้น เช่น เรือเดินชายฝั่ง (Coaster) เรือหางปลา (Trawler) เรือจูง (Tug) เรือดัน (Towboat) เรือขุดสันดอน (Dredger) เรือใบ (Sailboat) เรือดับเพลิง (Fire Boat) เรือบรรทุกคนโดยสาร - รถยนต์ข้ามช่องแคบ (Ferry Boat) เรือยนต์เร็ว (Motor Boat) เรือเหาะ (Planing)

4. แบ่งตามหลักวิชาไฮโดรไดนามิคส์ ได้แก่

ก) เรือธรรมดา (Displacement Type) เรือประเภทนี้มีลักษณะยาว และกว้างไม่มากเกินไป เวลาวิ่งของเรือประเภทนี้จุดศูนย์ถ่วงของเรือไม่ได้ขยับสูงขึ้น หากแต่อยู่ระดับเดิมตลอดระยะทางที่เรือวิ่งไป ยกเว้นในเวลาเรือโดนคลื่นลม ซึ่งจะทำให้จุดศูนย์ถ่วงขยับสูงขึ้น ในทางวิชาต่อเรือได้นำตัวเกณฑ์ชนิดหนึ่งเรียกว่า เรโชความเร็ว - ความยาว (Speedlength Ratio) $\frac{Vk}{\sqrt{L}}$ มาเป็นเครื่องตัดสินใจในเมื่อ Vk เป็นความเร็วน๊อต และ L คือ ความยาวที่แนวน้ำของเรือเป็นฟุต เรโชนี้ไม่มีหน่วยและ คล้ายกับ (Froude Number) $\frac{Vk}{\sqrt{gL}}$ แต่ต่างกันตรงไม่มีค่าของ g ในวงเล็บเท่านั้น ผู้คิดเรโชความเร็ว -ความยาวขึ้น คือนายพลเรือ ดี.ดับบลิว. เทเลอร์ (Admiral D.W. Taylor) บางครั้งเรียกเทเลอร์โควเชียน (Taylor Quotient) เรือธรรมดานี้มีเรโชความเร็ว - ความยากจาก 0.5 ถึง 2.5 เท่านั้น



รูปที่ 1 การแบ่งเรือตามรูปร่าง

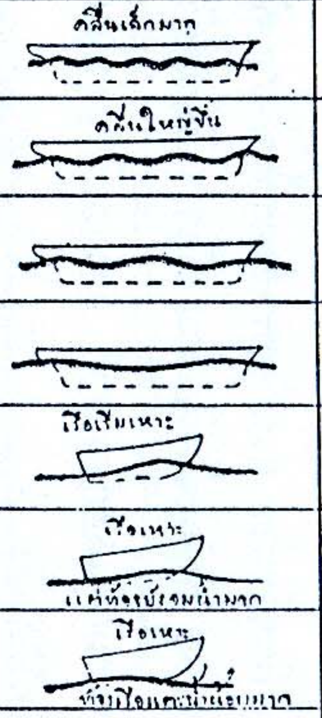
ข) เรือเหาะ (Planing Type) เรือประเภทนี้สั้นและออกจะกว้างมากผิดปกติจนดูป้อม ๆ เวลาเรือชนิดนี้วิ่งจุดศูนย์ถ่วงของเรือจะขยับสูงขึ้น ถ้าอยู่ในเรือจะรู้สึกว่าตัวขยับสูงขึ้น เมื่อเรือเร่ง

ความเร็ว ถ้าขยับสูงมากก็เรียกว่า เหาะมาก เช่น เรือประเภท ไฮโดรฟอย (Hydrofoil) เรือเหาะมีเรโช ความเร็ว - ความยาวเท่ากับ 2.5 ถึง 4

ใคร่จะนำตารางในรูปที่ 2 มาแสดงให้เข้าใจอีกเล็กน้อย เมื่อพิจารณาตารางนี้แล้ว จะเห็นว่า เรือที่มีเรโชความเร็ว - ความยาวเท่ากับ 0.5 นั้นวิ่งช้ามากไม่หนีคลื่น จึงปรากฏคลื่นหลายลูกอยู่ในช่วง ความยาวเรือ เรือประเภทนี้เรียกว่าเรือบริการ ครั้นเรโชความเร็ว - ความยาวมากขึ้นถึง 1.0 เรือเริ่มหนีคลื่น และมีชื่อว่าเรือลาดตระเวนหรือเรือสำราญ คำว่าลาดตระเวนนี้หมายถึงเรือนั้นไม่เร็วไม่ช้า มีห้อง ที่พักนอน อาหารการกิน เสบียง และน้ำมันเชื้อเพลิง พอกับการออกไปลาดตระเวน หรือออกไปหา ความสุขสำราญตากอากาศกันครั้งหนึ่ง ๆ ครั้นเรโช ความเร็วเสบียงความยาวเท่ากับ 1.35 ถึง 2.5 เรือ ยิ่งวิ่งเร็วขึ้น หนีคลื่นมากขึ้น หัวเรือยกสูงด้วยลิ่มน้ำและใต้ท้องหัวเรือไม่แตะน้ำเลย ส่วนท้องท้ายเรือ ยังจมอยู่มาก เรือพวกนี้มีชื่อว่าเรือพิฆาต หรือเรือรันอะเบ๊าท์ (Runaboat) วิ่งไปมาคล่องแคล่ว ครั้นเรโช ความเร็ว - ความยาวเท่ากับ 2.5 หรือ 4.00 เรือวิ่งหนีคลื่นจนท้ายเรือแตะน้ำอยู่เพียงเล็กน้อย ส่วนท้อง หัวเรือยกพื้นน้ำมาก ด้วยเหตุนี้ท้ายเรือจึงต้องกว้างผิดปรกติ เพื่อให้มีกำลังลอยพอ ถ้ามิฉะนั้นท้ายจะจม เรียกว่า เรือลากท้าย (Squatting) เรือจะไม่วิ่ง

นักเรียนส่วนมากมักคุ้นเคยกับรถยนต์ และงานที่ทำอยู่บนบก รถยนต์ชนิดต่าง ๆ และงาน อาจเปรียบเทียบกับเรือได้ดังนี้.-

บนบก	ท้องทะเล
รถแทรกเตอร์	เรือจูง
รถทรัคใหญ่หนัก 10 ตัน	เรือฟูลสแคนทลิง
รถทรัคขนาดเบา	เรือเซลเตอร์เดค
รถทรัคบรรทุกน้ำมัน	เรือบรรทุกน้ำมัน
รถทรัคบรรทุกถ่านหิน	เรือบรรทุกถ่านหิน
รถตู้	เรือบรรทุกคนโดยสารขนาดเล็ก
รถยนต์นั่ง	เรือย๊อช, เรือยนต์หรือเรือใบ
รถเมล์	เรือข้ามช่องแคบ, รถบรรทุกคนและ ข้ามช่องแคบ, รถบรรทุกคน
รถยนต์เมล์เดินทางไกล (Transcontinental Sleeper Buses)	เรือเดินมหาสมุทร (Transocianic Liners)



ประเภทของเรือ	อัตราส่วนความเร็ว-ความยาว $\frac{V_K}{\sqrt{L}}$	อัตราส่วนระวางขับน้ำ-ความยาว $\Delta/(\frac{L}{100})^3$	อาการกระทำของคลื่น	ชนิดของเรือ	สัมประสิทธิ์ปริซึม C_p: $\frac{\Delta}{(\frac{L}{100})^3} = 50$	สัมประสิทธิ์ปริซึม C_p: $\frac{\Delta}{(\frac{L}{100})^3} = 100$	อัตราส่วนแรงม้า-ระวางขับน้ำ $\frac{BHP}{\Delta^{7/6}}$	
เรือธรรมดา DISPLACEMENT TYPE	0.50	330	คลื่นเล็กมาก	เรือบริการ WORK BOAT HOUSE BOAT AUXILIARY	0.54	0.54	0.03	ท้องเรือกลม ROUND BOTTOM
	0.80	160	คลื่นใหญ่ขึ้น		0.53	0.53	0.20	
	1.00	110		เรือลาดตระเวน (CRUISER) เรือสำราญ (PLEASURE CRAFT)	0.52	0.52	0.50	ผสม (COMBINATION)
	1.34	70		เรือลาดตระเวนเร็ว (FAST CRUISER)	0.62	0.62	1.60	
	2.00	47	เรือเริ่มเหาะ	เรือเร็ว (RUN ABOUT) เรือพิฆาต (DESTROYER)	0.68	0.70	9	
เรือเหาะ PLANING TYPE	2.50	41	เรือเหาะ แต่ยังรับแรงน้ำมาก	เรือลาดตระเวนเร็วมาก (VERY FAST CRUISER)		-	17	CHINE
	3	38	เรือเหาะ ท้ายเรือแตะน้ำเล็กน้อย	เรือเหาะ (PLANING CRAFT)	-	-	26	ท้องเรือเหลี่ยม
	4	-			-	-	48	

ท้ายเรือแบบตัด TRANSOM STERN (rows 1.34 – 4)

รูปที่ 2 การแบ่งชั้นเรือโดยถือหลักอัตราส่วนความเร็ว – ความยาว

1. เรือจูง (Tug)

ต่อไปนี้จะได้อธิบายเรือบางชนิดเพียงย่อ ๆ เรือลากจูงนี้ใช้งานได้หลายอย่าง การต่อแข็งแรงเพื่อให้ทนทานต่องานที่จะใช้ เรือลากจูงชื่อ ดอรอที สร้างที่อู่ นิวปอตนิวส์ ใน ค.ศ.1891 ยังคงใช้การได้มาจนบัดนี้ 60 ปีเศษ

เรือลากจูงนั้นไม่ใช้บรรทุกสินค้า แต่เป็นตัวกำลังที่เคลื่อนที่ไปมาได้ งานที่จะใช้นั้นคือ ดึงดันกลับลำเรือใหญ่เพื่อเข้าอู่ ใช้ดับเพลิง และกู้เรือ (Ocean Salvage) เรือลากจูงประจำท่าเรือ (Harbor Tug) นั้น มักเป็นเรือขนาดเล็กยาวเพียง 7 ถึง 100 ฟุต มักทำหน้าที่อยู่ไม่ห่างไกลจากท่าเรือที่ตนอยู่เท่าใดนัก เรือลากจูงประจำทะเล (Seagoing Tug) มีความยาวถึง 200 ฟุต แบ่งออกเป็นสองชนิด ๆ แรกเป็นเรือลากจูงเดินทางไกลบางทีจูงเรือขุดสันดอนและเครื่องมืออื่น ๆ ไปไกลตั้งครึ่งโลก ชนิดที่สองเป็นเรือที่ใช้กู้เรือที่จมอยู่ ชนิดที่สองนี้วิ่งเร็ว และแข็งแรงมาก เรือลากจูงนี้ความเร็วเป็นสิ่งสำคัญมาก เพราะต้องวิ่งไปยังที่เกิดเหตุให้ทันเวลาแล้วยังต้องลากเรือที่ใกล้จะอับปางนั้นมายังท่าให้ทันเวลาไม่ให้เรือจมอีกด้วย เรือลากจูงมักติดเครื่องดับเพลิง, เครื่องช่วยชีวิต เครื่องมือกู้เรืออีกด้วย

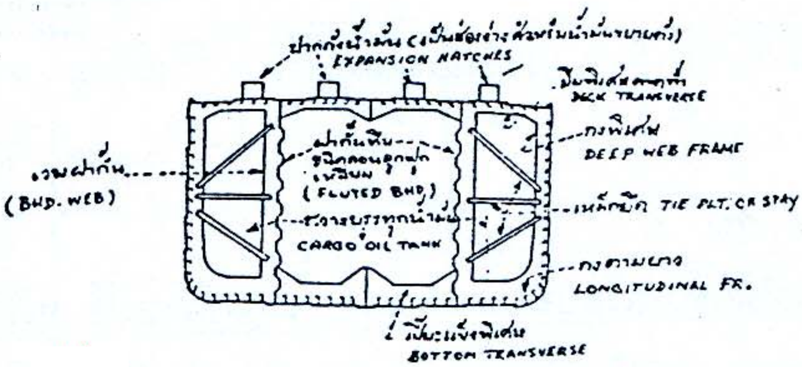
2. เรือฟูลสแคนทลิง (Full Scantling Ship)

เรือฟูลสแคนทลิงนั้นออกแบบขึ้นเพื่อบรรทุกสินค้าที่มีความแน่นสูง เช่น แร่ต่าง ๆ และกำมะถัน คำว่าฟูลสแคนทลิงหมายถึง กง แผ่นเหล็ก ฯลฯ ต่าง ๆ ต้องหนา แข็งแรง และบรรทุกกินน้ำลึกมาก

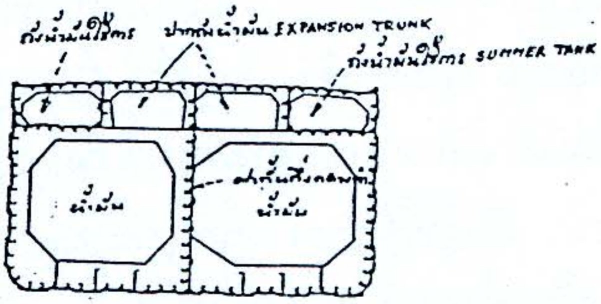
3. เรือเซลเตอร์เดค (Shelterdeck Ship)

เรือที่ตรงข้ามกับเรือฟูลสแคนทลิง คือ เรือเซลเตอร์เดค เป็นเรือที่บรรทุกสินค้าประเภทเบาแต่กินเนื้อที่มาก ถ้าผู้เป็นเจ้าของเรือต้องการต่อเรือให้บรรทุกรถยนต์ กระดาษ เครื่องเรือน ฯลฯ ขอแนะนำให้ต่อเรือแบบนี้

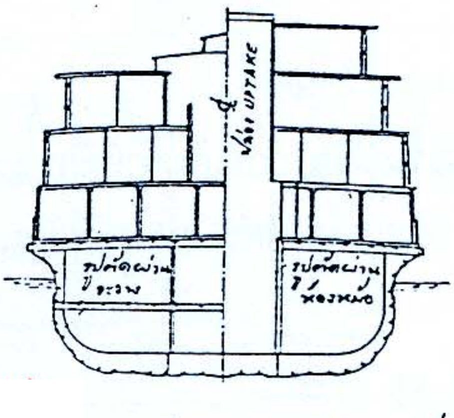
รถยนต์มีปริมาตร 220 ลบ.ฟุตต่อตัน ยางมะตอย 17 ลบ.ฟุต หนัก 1 ตัน ถ้าเอารถยนต์ลงไปบรรทุกในเรือฟูลสแคนทลิง เรือคงเต็มเสียก่อนที่จะจมลงถึงแนวน้ำบรรทุกเต็มที่ ซึ่งหมายถึงว่าได้เสียน้ำหนักสินค้าจะเอาไปขายได้หลายสิบตัน ในทางตรงข้ามถ้าเอาแท่งทองแดงบรรทุกลงในเรือเซลเตอร์เดค เรือก็จะจมลงถึงแนวน้ำบรรทุกเสียก่อนเพียงบรรทุกสินค้าได้ยังไม่ถึง 1/3 ของระวางทั้งหมด นี่ก็หมายถึงเสียระวางบรรทุกสินค้าไปอีก เพราะระวางจะเต็มเมื่อ 2/3 ของระวางทั้งหมด แต่ถ้าบรรทุกแท่งทองแดงลงในเรือฟูลสแคนทลิง และรถยนต์ลงในเรือเซลเตอร์เดค ก็จะทำให้เรือสามารถบรรทุกสินค้าได้เป็นสองเท่า กฎการคำนวณแนวน้ำบรรทุก อนุญาตให้เรือทั้งสองแบบนี้ดัดแปลงได้ คือเรือฟูลสแคนทลิงจะดัดแปลงเป็นเรือเซลเตอร์เดคก็ได้ หรือเรือเซลเตอร์เดคจะดัดแปลงเป็นเรือฟูลสแคนทลิงก็ได้



รูปที่ 3 รูปหน้าตัด (MIDSHIP SECTION) ของเรือฝากั้นคู่สมัยใหม่ (TWIN BULKHEAD TYPE)



รูปที่ 4 รูปหน้าตัด ฝากั้นทึบกลางลำ (CENTERLINE-BULKHEAD TYPE)



รูปที่ 5 รูปหน้าตัดของเรือข้ามช่องแคบเฟอร์รี่

4. เรือบรรทุกน้ำมัน (Tanker)

น้ำมันหล่อ น้ำมันเชื้อเพลิง น้ำอ้อย (Molass) และสินค้าที่มีสภาพเป็นของเหลวอื่น ๆ มักบรรทุกในเรือชนิดนี้ เรือบรรทุกน้ำมันมักมีเครื่องอยู่ทางท้ายเรือ และแยกจากถังน้ำมันสินค้า โดยทำช่องว่างกั้นไว้ (Cofferdam)

เรือบรรทุกน้ำมันเชื้อเพลิงแบ่งได้ 3 ชนิด คือ ชนิดเดินทะเล ชนิดเดินตามชายฝั่งและชนิดเดินในลำน้ำ เรือชนิดต่าง ๆ เหล่านี้มีความแตกต่างกันเล็กน้อย เว้นแต่ขนาดและการบริการ

เรือบรรทุกน้ำมันประมาณ 83 เปอร์เซ็นต์ ที่ใช้เครื่องจักรใหญ่เป็นเครื่องเผาไหม้ภายใน แต่ชาวอเมริกันที่เป็นเจ้าของเรือส่วนมากยังนิยมเครื่องจักรใหญ่ชนิดเครื่องจักรไอน้ำอยู่ ถึงแม้ว่าเครื่องจักรไอน้ำจะใช้น้ำมันเชื้อเพลิงมากกว่าเครื่องยนต์ดีเซลก็ตาม แต่น้ำมันเตามีมากราคาถูกในสหรัฐอเมริกาเมื่อเปรียบเทียบต่างประเทศ นักออกแบบต่อเรือชาวอเมริกาส่วนมากรู้สึกว่าเครื่องจักรไอน้ำนั้นเป็นที่เชื่อถือได้ว่าไม่ค่อยเสีย ไม่ต้องซ่อมบ่อย จึงไม่เพิ่มราคาเรือในภายหลังยิ่งกว่านั้นควรจำไว้ด้วยว่าความหมดเปลืองของน้ำมันเชื้อเพลิงนั้นเป็นเรื่องสำคัญอันหนึ่ง ในเรื่องสำคัญหลาย ๆ อย่างที่เกี่ยวกับราคาภายหลังจากที่ได้ใช้เครื่องจักรแล้ว

ท้องเรือบรรทุกน้ำมันไม่ต้องทำเป็นท้องสองชั้น ถ้าเรือเกิดทะลุขึ้น น้ำเข้าเรือและเข้าไปในถังน้ำมันก็กลายเป็นสินค้า รูปที่ 3 เป็นรูปตัดของเรือบรรทุกน้ำมัน แสดงให้เห็นกงตามยาว ซึ่งเป็นแบบที่ใช้อยู่ทั่วไปในการต่อเรือบรรทุกน้ำมัน ตามที่กล่าวมาแล้วแต่ตอนต้นว่าวิธีการต่อแบบนี้ให้กำลังแข็งแรงในทางยาวของเรือและกงพิเศษ (Deep Web) ที่นำมาใช้ในโครงสร้างเรือแบบนี้ไม่เป็นที่กีดขวางสินค้าประเภทน้ำมัน ฝากั้นทางยาวที่ใช้นั้นเป็นแบบสมัยใหม่ อาจใช้ฝากั้นทางยาวที่กึ่งกลางลำอันเดียวก็ได้ ดังปรากฏในรูปที่ 4 แต่เป็นแบบเก่า

5. เรือบรรทุกถ่านหิน (Collier)

เรือบรรทุกถ่านหินเป็นเรือที่ต้องออกแบบเป็นพิเศษ เพื่อบรรทุกสินค้าประเภทถ่านหินลงในระวางท้องเรือเรือบรรทุกถ่านหินบางลำมีเครื่องตักถ่านหินติดอยู่ในเรือ(Self–Unloading Collier) ส่วนอีกชนิดหนึ่งไม่มีเครื่องตักถ่านหินในตัว ต้องใช้เครื่องตักถ่านหินที่มีอยู่บนฝั่งเครื่องตักถ่านหินสมัยใหม่ต้องตักถ่านหินได้ 12,000 ตัน ในราคาไม่ถึง 4 ชั่วโมง เรือบรรทุกถ่านหินที่มีเครื่องตักในตัวเสร็จนั้นอาจตักถ่านหินขึ้น 1,000 ตันต่อชั่วโมง โดยส่งถ่านหินนั้นไปห่างจากข้างเรือถึง 100 ฟุต ห้องเครื่องจักรของเรือประเภทนี้มักอยู่ทางท้ายเรือ

6. เรือโดยสารและสินค้าขนาดกลาง

ตัวอย่างที่ดีของเรือแบบนี้ คือ เรือ เอส.เอส.เปรสิเดนท์ แจ๊คสัน ยาว 465 ฟุต กว้าง 69 ฟุต 6 นิ้ว กินน้ำลึก 26 นิ้ว 9 ฟุต มีระวางขับน้ำ 9,937 ตัน มีตันกร๊อส 9,255.86 และตันเนท 5,151 เรือนี้บรรทุกคนโดยสารได้ 96 คน มีห้องคนโดยสาร 38 ห้อง กะลาสีเรือ 122 คน พูดโดยทั่วไปและสำหรับเรือเดินสมุทรอย่างเดียวเท่านั้น ควรใช้กะลาสี 1 คน ต่อคนโดยสาร 3 คน จำนวนนี้ไม่รวมกะลาสีปากเรือและช่างกล

7. เรือย๊อท, เรือยนต์หรือเรือใบ (Yachts)

เรือย๊อทนี้เปรียบเหมือนรถยนต์ที่วิ่งไปมาตามท้องถนน เป็นเรือที่ใช้หาความสำราญในการตากอากาศ เป็นเรือที่ต่อกันขึ้นมากตามแบบมาตรฐานของโรงงาน หรือบางทีต่อตามแบบของนักต่อเรือเอกชน หรือบางทีต่อขึ้นโดยตนเอง

8. เรือลำน้ำหรือเรือข้ามอ่าว (Bay, Sound And River Vessels)

เรือประเภทนี้เป็นเรือที่วิ่งอยู่ในที่มีน้ำตื้นประมาณ 10 ถึง 15 ฟุต และเป็นเรือค่อนข้างเร็ว ใช้ใบจักร ตัวเรือเป็นเหล็กซุบเปอร์สตรัคเจอร์ ข้างบนเป็นไม้ แต่เนื่องด้วยไม้ติดไฟได้ จึงต่อมาเปลี่ยนเป็นเหล็ก ถ้าเป็นเรือที่เดินอยู่ในที่คลื่นลมไม่จัดมักต่อให้มีรูปหน้าตัด ดังในรูปที่ 5 แต่แบบนี้มีความทรงตัวไม่ค่อยดี ความสูงเมตาจีเอ็ม (Metacentric Height GM) น้อยจึงค่อนข้างโครง ฉะนั้นรูปหน้าตัดแบบนี้จึงไม่เหมาะกับเรือที่จะเดินในอ่าวหรือทะเล เพราะคลื่นลมจัด

เรือประเภทนี้มักบรรทุกผู้โดยสาร ตลอดทั้งรถยนต์ต่าง ๆ ด้วยเรือแบบนี้บางทีทำให้เป็นหัวเรือทั้งหัวและท้าย มีใบจักรและหางเสือทั้งหัว – ท้ายสะดวกในที่แคบ ๆ ไม่ต้องกลับลำ สะพานเดินเรือมีสองแห่ง สะพานเดินเรือหัวบังคับหางเสือท้าย ส่วนสะพานเดินเรือท้ายบังคับหางเสือหัว นอกจากใบจักรแล้วเรือนี้ยังใช้กังหันใบจักร (Paddle Wheel) ได้อีกในเมื่อเรือต้องการวิ่งไปในน้ำตื้น ๆ ในสหรัฐอเมริกายังมีอยู่ในแม่น้ำฮัดสัน และทะเลสาปทั้งห้า

ในแม่น้ำมิสสิสซิปปี มักเป็นกังหันใบจักรติดข้างเรือ หรือท้ายเรือ ใบจักรกระพุ้ง (Tunnel Type Propeller) นั้น ปัจจุบันนี้ใช้กันมากในเรือดันเรือพวกนี้สำคัญตรงที่ต้องกินน้ำตื้น 8 ถึง 9 ฟุต เวลาเอาของลงเรือหรือขึ้นเรือมักผูกเรือเข้ากับต้นไม้แล้วใช้บันไดพาดขึ้นลงธรรมดา แต่เรือสมัยใหม่นี้มักใช้เครื่องกว้านพิเศษขึ้น

9. เรือเดินมหาสมุทร (Large Transoceanic Vessels)

เรือประเภทนี้เดินทางไปในมหาสมุทรรอบโลก บางลำสร้างขึ้นเพื่อบรรทุกคนโดยสารโดยเฉพาะ บางลำก็ใช้บรรทุกทั้งผู้โดยสารและสินค้า ถ้าลำใดบรรทุกสินค้ามากกว่าคนโดยสารมักเรียกว่า เรือโดยสาร – สินค้าหรือเรือสินค้า (Passenger – Cargo Vessel or Cargo Vessels) ถ้าลำใดบรรทุกคนโดยสารมากกว่าสินค้า มักเรียกเรือโดยสาร (Passenger Vessels)

เรือ เอส.เอส.ควีนแมรี่ เป็นเรือบรรทุกคนโดยสารมากกว่าสินค้า เรือ เอส.เอส.อเมริกามีระวางบรรทุกสินค้าใหญ่มาก แต่ก็ยังเรียกว่า เรือเดินมหาสมุทร

เรือชนิดต่างๆ ที่กล่าวมานี้เป็นเพียงย่อ ๆ ไม่สามารถจะกล่าวให้ละเอียดในหนังสือเล่มนี้ได้ เพราะเรือแต่ละชนิดนั้นกล่าวกันอย่างละเอียดแล้วเป็นเล่ม ๆ เหมือนกัน ฉะนั้นขอให้ผู้ศึกษาได้โปรดติดตามในเล่มต่อไป

5.2 ขนาดของเรือ

ขนาดต่าง ๆ และตัวย่อที่ใช้ในทางต่อเรือนั้นมีดังต่อไปนี้.-

1. ความยาวของเรือ (Length of Ships)

1.1 ความยาวทั้งหมด (Length Over All, L.O.A. หรือ L.O.A.) คือความยาวทั้งหมด วัดสุดหัวสุดท้าย ไม่ใช้ในการคำนวณหากำลังแรงม้า ฯลฯ นอกจากจะใช้เพียงรู้ความยาวของเรือว่ายาวเท่านั้นเท่านี้หรือใช้เวลาเรือเข้าอู่หรือเทียบท่าเรือ ดูรูปที่ 6

1.2 ความยาวระหว่างเส้นฉาก Length Between Perpendicular, L.B.P. หรือ L.b.p. คือความยาวในระหว่างเส้นตั้งฉากหัวกับเส้นตั้งฉากท้าย เส้นตั้งฉากหัว (Forward Perpendiculay, F.P.) คือเส้นดิ่งที่ผ่านจุดตัดของเส้นแนวน้ำบรรทุกเต็มที่ (Designed Waterline, DWL หรือ Load Waterline, LWL) กับทวนหัวเส้นตั้งฉากท้าย (After Perpendicular, A.P.) คือเส้นดิ่งที่ผ่านเส้นศูนย์กลางของก้านหางเสือ เรือสินค้า เรือรบ หรือเรือขนาดใหญ่เล็ก ยกเว้นเรือยนต์เร็ว ใช้ความยาวเส้นตั้งฉาก เพื่อการคำนวณหาแรงม้า, ขนาดแผ่นเหล็ก หรือใช้แบ่ง 10 ส่วน 20 ส่วน ในการวางรอยตัด (Station or Section) ของเรือในเวลาเขียนลายเส้น (Lines Plan) ดูรูปที่ 6

1.3 ความยาวแนวน้ำบรรทุกเต็มที่ (Load Waterline Length, L.W.L.) คือความยาวของเรือ ณ แนวน้ำบรรทุกเต็มที่ เริ่มตั้งแต่จุดตัดของแนวน้ำบรรทุกเต็มที่กับทวนหัว ไปทางท้ายเรือจนถึงจุดตัด ส่วนท้ายเรือสุดสำหรับเรือขนาดใหญ่เล็กยกเว้นเรือยนต์เร็วนั้น ความยาวแนวน้ำบรรทุกนี้อาจสั้นกว่า หรือยาวกว่า หรือเท่ากันกับความยาวระหว่างเส้นฉากก็ได้ ในเรือยนต์เร็วนั้นมักใช้ความยาว แนวน้ำนี้แบ่ง 8 หรือ 10 ส่วน เพื่อวางรอยตัดต่าง ๆ ดูรูปที่ 6

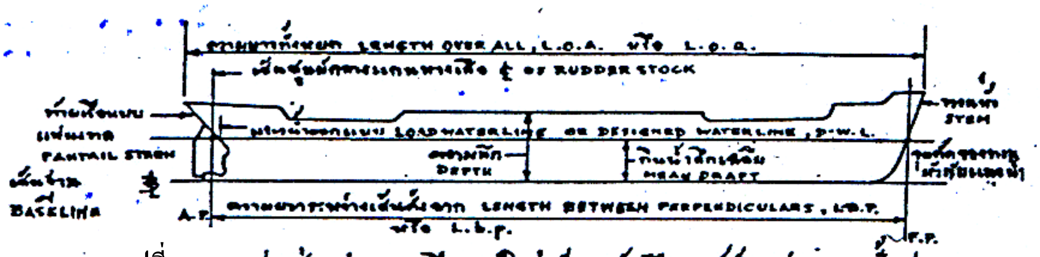
1.4 ความยาวช่วงหัว Length of Entrance, LENT ORLE

ความยาวช่วงกลาง Length of Parallel

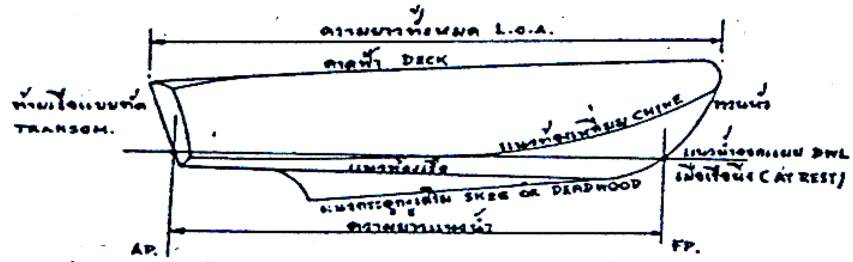
Middle Body, LX ORL $\otimes$ OR LP

ความยาวช่วงท้าย Length of Run, LRUN OR LR

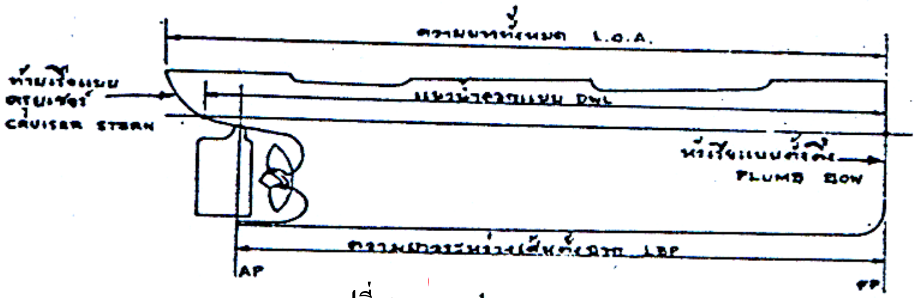
ถ้าตัดเรือทุก ๆ ชั้นแนวน้ำ จะเห็นว่าเนื้อที่แนวน้ำทุกชั้นล้อมรอบด้วยเส้นโค้งบ้าง, เส้นตรงบ้าง หรือมีแต่เส้นโค้งอย่างเดียวบ้าง สำหรับจะกล่าวต่อไปนี้เป็นเนื้อที่เฉพาะตอนแนวน้ำ



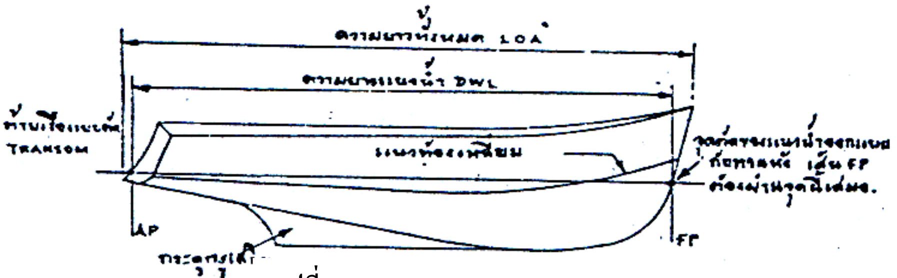
รูปที่ 1 แสดงส่วนต่าง ๆ ของเรือขนาดใหญ่ เล็ก ยกเว้นเรือยนต์เร็ว แสดง DWL สั้นกว่า LBP.



รูปที่ 2 แสดงส่วนต่าง ๆ ของเรือยนต์เร็ว ท้ายเบนออกจากหัวเรือ.



รูปที่ 3 ก. แสดง DWL ยาวกว่า LBP



รูปที่ 4 แสดงส่วนต่าง ๆ ของเรือยนต์เร็ว ท้ายเบนเข้าหาหัวเรือ

รูปที่ 6 แสดงส่วนต่าง ๆของเรือใหญ่, เล็ก และเรือยนต์เร็ว

บรรทุก ดูรูปที่ 7 บนพื้นแนวน้ำบรรทุกนี้สามารถแบ่งได้เป็นสามส่วน นับตั้งแต่หัวเรือเป็นต้นไป คือ ความยาวช่วงหัว, ช่วงกลางและช่วงท้าย ความยาวช่วงหัวนั้นนับจากหัวเรือสุด ไปจนถึงจุดที่เส้นโค้งเปลี่ยนเป็นเส้นตรงขนานกับความยาวของเรือ ความยาวช่วงกลางนับตั้งแต่จุดนี้ขนานกับความยาวของเรือเรื่อยไปจนถึงจุดเปลี่ยนเป็นเส้นโค้ง ความยาวช่วงท้ายก็เริ่มจากจุดนี้ไปจนถึงท้ายเรือสุดอันเป็นที่น้ำวิ่งมารวมกันจากกราบขวา กราบซ้าย ความยาวช่วงกลางนั้นจะปรากฏในเรือขนาดใหญ่ ๆ เท่านั้น เรือขนาดเล็กลงมาอาจมีแต่ความยาวช่วงหัวและช่วงท้ายเท่านั้น ความยาวทั้งสามช่วงนี้อาจเท่ากันหรือไม่เท่ากันก็ได้ และนิยมบอกเป็นกี่เปอร์เซ็นต์ของความยาวทั้งหมด เช่น L_E = 0.4L, L⊗ = 0.15 L L_R = 0.45 L เป็นต้น เรื่องนี้จะพบในตอนออกแบบเรือมากกว่าที่อื่น

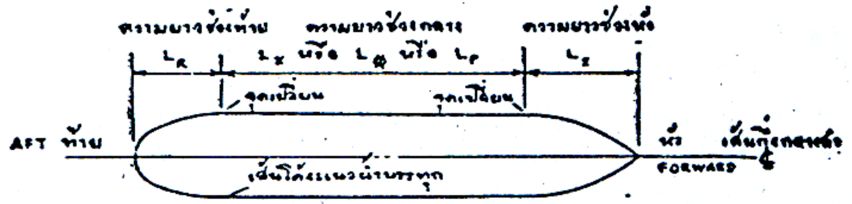
2. ความกว้างของเรือ (Breadth or Beam of Ships)

เมื่อพูดถึงความกว้างของเรือนั้นหมายถึงความกว้างของเรือ ณ ที่กึ่งกลางลำ(Amidships, ⊗หรือ $\frac{LBP}{2}$ ความกว้างที่ไม่รวมความหนาของแผ่นเหล็กตัวเรือเรียกความกว้างเส้นขอบ (Beam Moulded, Bmld หรือ B ⊗) เรือบางลำที่เข้าออกจากท่าเทียบบ่อยครั้งมักทำไม้หรือเหล็กกันกระทบไว้ ความกว้างที่วัดสุดไม้กันกระทบเรียกความกว้างทั้งหมด (Beam Over Guard) เรือขนาดใหญ่ ความกว้างของเรือมักเท่ากันตลอดความลึกของเรือ เพราะข้างเรือตั้งดิ่งขึ้นแบบกำแพง เรือพวกนี้เรียกว่าเรือข้างกำแพง (Wall Side Ship)

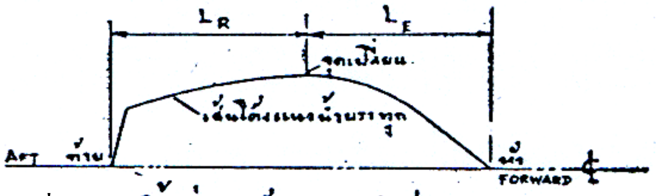
สำหรับเรือขนาดใหญ่เล็ก ยกเว้นเรือยนต์เร็ว มักทำความกว้างให้มากที่สุดที่กึ่งกลางลำ แต่เรือยนต์เร็วนั้นความกว้างมากที่สุดไม่จำเป็นต้องอยู่ที่กึ่งกลางลำเสมอไป และส่วนมากอยู่ถัดกึ่งกลางลำไปทางท้ายประมาณ 5 เปอร์เซ็นต์ ของความยาวแนวน้ำ เพราะต้องการให้เรือมีเนื้อที่ทางท้ายเรือมาก ทำให้ท้ายเรือมีความลอยสูง ท้ายเรือไม่จมลงไปในน้ำง่าย เมื่อเวลาเรือวิ่งและเหาะขึ้นเล็กน้อย หัวเรือจะเงยขึ้นด้วยลิ่มน้ำ ส่วนท้ายเรือจะถูกดกลง ถ้าท้ายเรือไม่กว้างพอจะจมลงทำให้เรือลากท้าย เรือจะไม่วิ่ง ในสมัยหนึ่งเคยเชื่อว่าความกว้างมากที่สุดควรอยู่ถัดจากกึ่งกลางลำไปทางหัวเล็กน้อย ซึ่งต่อมาได้พบว่าไม่เป็นความจริง ความกว้างที่สุดนี้คือ (Maximun Beam, Bx)

3. ความลึกของเรือ (Depth of Ships)

ความลึกของเรือเป็นระยะที่วัดในทางดิ่งจากดาดฟ้ากราบเรือหรือปากเรือ (Deck At Side, Dk @ Side) ณ กึ่งกลางลำเรือถึงท้องเรือ ความลึกที่ไม่รวมกับความหนาของแผ่นเหล็ก เรียก ความลึกเส้นขอบ (Depth Moulded, Dmld) อาจพบว่าความลึกฟรีบอร์ด (Free Board Depth $D_{f.b}$) ซึ่งเป็นความลึกที่นำไปคำนวณระยะฟรีบอร์ดของเรือ ความลึกนี้เป็นความลึกเส้นขอบบวกกับความหนาของแผ่นเหล็กสตริงเกอ ดูรูปที่ 8

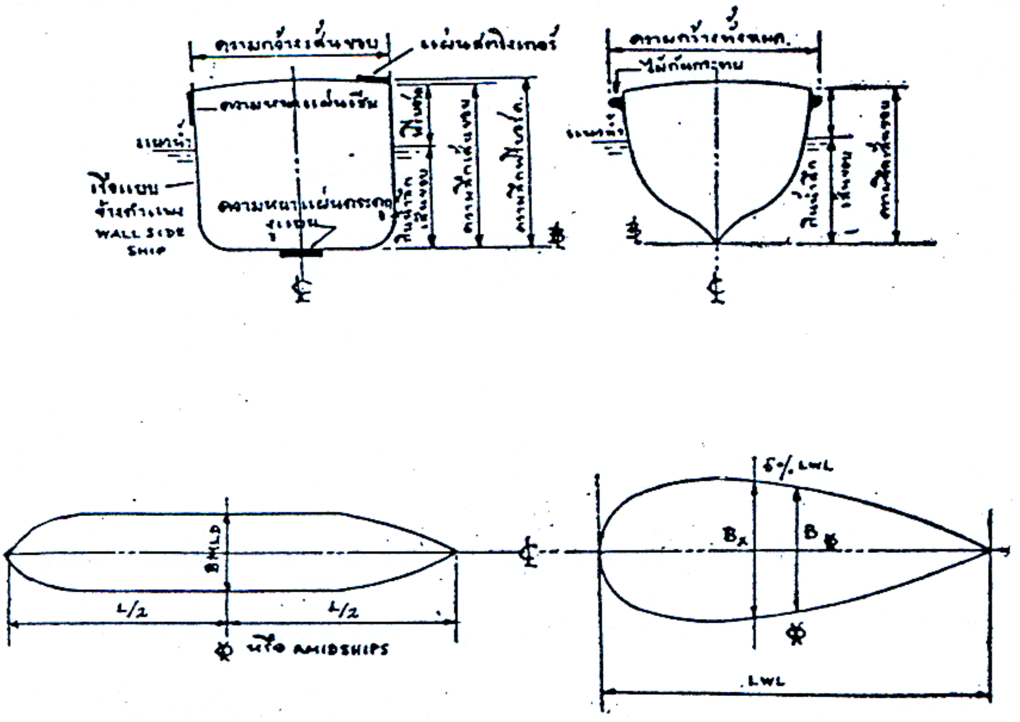


รูปที่ 1 . พื้นที่แนวน้ำบรรทุกเต็มที่ของเรือใหญ่ เล็ก



รูปที่ 2 . พื้นที่แนวน้ำบรรทุกเต็มที่ของเรือยนตร์เร็ว

รูปที่ 7 ความยาวต่างๆของเรือ



รูปที่ 8 ความกว้างของเรือ

4. ระวางขับน้ำ, กินน้ำลึก, ทริม (Displacement, Draagt, Trim)

เมื่อนำเรือลงน้ำเรือจะจมลงไปในน้ำส่วนหนึ่ง เพราะเรือเป็นของหนักย่อมไล่ที่น้ำออกไปจำนวนหนึ่ง ที่เท่ากับปริมาตรส่วนที่จมน้ำ ซึ่งเรียกว่าปริมาตรขับน้ำ (Volume of Displacement In Cubic feet, $\bigtriangledown$) เมื่อนำปริมาตรนี้ไปคิดเป็นน้ำหนักของน้ำแล้ว น้ำหนักนั้น คือน้ำหนักของเรือนั่นเองและเรียกเสียใหม่ว่าระวางขับน้ำของเรือ (Displacement In Long Ton Salt Water $\bigtriangleup$, L.T.S.W.) เช่นคิดได้ว่าส่วนหนึ่งที่จมลงไปในน้ำเท่ากับ 45,010 ลบ.ฟุต หรือ $\bigtriangledown$ = 45010 ลบ.ฟุต เรือลำนี้จะมีระวางขับน้ำเท่ากับ 45,010 ลบ.ฟุต $\times \frac{1}{35} \frac{\text{ลบ.ฟุต}}{\text{ตัน}}$ = 1,286 ตัน หรือ = 1,286 L.T.S.W.

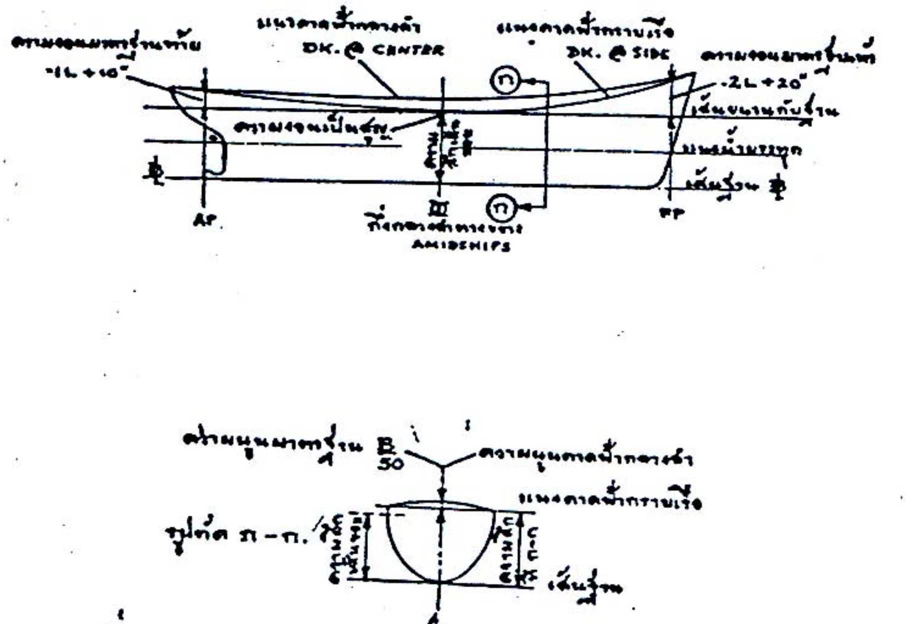
หรือสูตร $\bigtriangleup = \frac{\nabla}{35}$ สำหรับน้ำทะเลนั้นมีความแน่น 35 ลบ.ฟุต ต่อ 1 ตัน ถ้าเป็นน้ำจืดใช้ 36 ลบ.ฟุต ต่อ 1 ตัน ส่วนมากในทางต่อเรือละไว้ในฐานที่เข้าใจว่าระวางขับน้ำนั้นคิด โดยใช้ความแน่นของน้ำทะเลเสมอไป

เรือที่ลอยอยู่อาจกินน้ำหัวท้ายเท่ากัน ผลต่างของระดับน้ำหัวท้ายจึงเป็นสูญ อย่างนี้เรียกว่าทริมเป็นสูญ หรือกระดูกงูได้ระดับ (Even Keel) ถ้าเรือกินน้ำลึกหัว (Draft Forward, D_F OR H_F OR D_F) 5 ฟุต ท้ายเรือกินน้ำลึก (Draft Aft, D_A OR H_A OR D_A) 6 ฟุต เรือนี้จะมีระดับน้ำน้อยกว่าท้าย 1 ฟุต เราพูดว่าเรือนี้มีทริมท้าย 1 ฟุต (One Foot Trim Aft) เรือส่วนมากมักมีทริมท้ายเสมอ คือหัวเรือเชิดสูงสวยงามกว่าเรือหัวซุนหรือเรือที่กระดูกงูได้ระดับ เช่น เรือที่มีกินน้ำลึกหัว 6 ฟุต กินน้ำลึกท้าย 5 ฟุต เรือจะมีทริมหัว 1 ฟุต (One Foot Trim Forward) เมื่อเรือกินน้ำลึกหัวท้ายไม่เท่ากันเช่นนี้ การคำนวณมักใช้กินน้ำลึกเฉลี่ย (Mean Draft, D_M OR H_M OR D_M) เช่น เรือที่กล่าวมานั้นจะกินน้ำลึกเฉลี่ยเท่ากับ 5.5 ฟุต

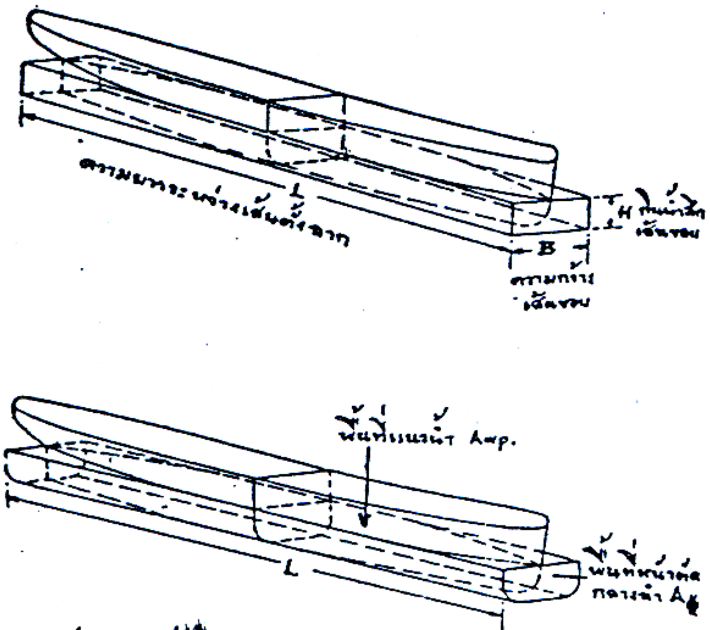
ระยะกินน้ำลึกที่ไม่รวมความหนาของแผ่นเหล็กท้องเรือเรียกกินน้ำลึกเส้นขอบ (Moulded Draft) ส่วนกินน้ำลึกที่รวมความหนาของแผ่นเหล็กท้องเรือด้วย เรียกกินน้ำลึกกระดูกงู (Keel Draft) เวลาเขียนเส้นโค้งไฮโดรสแตติค (Hydrostatic Curves) ต้องใช้กินน้ำลึกกระดูกงูนี้เขียนเสมอไป ดูรูป 8

5. ฟรีบอร์ด (Freeboard, For f.b.)

ฟรีบอร์ดเป็นผลต่างของความลึกเส้นขอบกับน้ำลึกเส้นขอบ ณ กึ่งกลางลำ หรือเป็นระยะที่ดาดฟ้ากราบเรือสูงจากแนวน้ำบรรทุกนั่นเอง ไม่ว่าเรือขนาดใดต้องมีฟรีบอร์ดพอสมควร ยิ่งเป็น



รูปที่ 9 แสดงความงอน (SHEER), ความนูนของดาดฟ้า (CAMBER)



รูปที่ 10 สัมประสิทธิ์ต่างๆของเรือ (COEFFICIENTS)

เรือใหญ่เดินอยู่ในมหาสมุทรด้วยแล้วจะต้องมีฟรีบอร์ด คำนวณตามกฎ (Load Line Regulation) ซึ่งกลวิธียาวมากจะกล่าวต่อไป

6. ความงอนและความนูนของดาดฟ้า (Sheer And Camber)

ตามที่กล่าวในเรื่องความลึกและฟรีบอร์ดของเรือ จะเห็นว่าเป็นการวัดที่กึ่งกลางลำตามยาว ดูรูปที่ 9 ถ้าลากเส้นขนานให้ห่างจากเส้นฐานขึ้นมา เท่ากับความลึกของเรือที่กลางลำนั้น จะเห็นว่าความลึกที่อยู่ถัดไปทางหัวท้ายนั้นมีมากยิ่งขึ้น ส่วนที่มากนี้เมื่อลากเส้นโค้งผ่านจะได้รูปพาราโบลา ซึ่งเรียกว่า เส้นปากเรือ หรือแนวดาดฟ้ากราบเรือ (Deck at Side) ก็ได้ระยะออร์ดิเนตจากเส้นขนาดถึงเส้นปากเรือนี้ เรียกความงอน (Sheer) ความงอนมากที่สุดอยู่ที่เส้นตั้งฉากหัวมีค่าความงอนมาตรฐาน (Standard Sheer) 0.2 L + 20” ความงอนเป็นสูญอาจอยู่ที่กึ่งกลางลำหรือถัดจากกึ่งกลางลำไปทางท้ายเล็กน้อย ความงอนท้ายเรืออยู่ที่เส้นตั้งฉากท้าย มีค่ามาตรฐานเท่ากับ 0.1 L + 10” หรือเป็นครึ่งหนึ่งของความงอนหัวนั่นเอง ค่าของ L เป็นฟุต ผลที่ได้เป็นนิ้ว เมื่อพิจารณาดูรูปที่ 9 แล้วจะเห็นว่าเราได้ความงอนถึงเส้นตั้งฉากเท่านั้น ส่วนที่ต่อออกไปจนพบกับส่วนที่ต่อออกมาของทวนหัวและทวนท้ายนั้น ลากขึ้นเองในตอนออกแบบ สุดแต่ความพอใจและการเขียนลายเส้นจะบังคับ

เมื่อพิจารณาดูรูปที่ 9 แล้วจะเห็นเส้นแนวดาดฟ้าน้ำกลางลำเส้นนี้เกิดขึ้นเพราะดาดฟ้าทางขวางของเรือไม่ได้ราบขนานกับระดับน้ำ หากแต่โค้งนูนขึ้น เมื่อดูรอยตัด (ก)-(ก) ของรูปที่ 9 แล้วมองไปทางท้าย จะเห็นดาดฟ้านูนขึ้น ค่ามาตรฐานความนูนเท่ากับ 1/50 ของความกว้างเป็นฟุต วิธีเขียนความนูนดาดฟ้าจะได้กล่าวในตอนเขียนรูปเรือ

7. น้ำหนักบรรทุกและสัมประสิทธิ์น้ำหนักบรรทุก (Deadweight And Deadweight Coefficient)

โดยลำพังของเรือนั้นย่อมมีน้ำหนักของมันเอง ซึ่งเรียกกว่าน้ำหนักเรือ (Light Ship, L.S.) อันประกอบด้วย

- น้ำหนักตัวเรือ (Steel Hull) จำว่า S
- น้ำหนักเครื่องประกอบ (Outfitting) รวมทั้งสี, ซีเมนต์ จำว่า O
- น้ำหนักเครื่องจักรดาดฟ้า (Hull Engineering) (เครื่องกว้าน) จำว่า H
- น้ำหนักเครื่องจักรใหญ่ – ช่วย (Machinery) รวมทั้งแป๊บ จำว่า M

ทั้งสี่นี้รวมเรียกน้ำหนักเรือ (L.S.) หรือจำว่าน้ำหนักเรือเท่ากับ Sohm อ่านว่า โซม ซึ่งจะทำให้จำดีขึ้น การสร้างเรือนั้นย่อมต้องให้บรรทุกสินค้าได้ ซึ่งเรียกว่าน้ำหนักบรรทุก (Deadweight, DWT) ซึ่งมีตัวประกอบดังนี้.-

- น้ำหนักสินค้าและเครื่องผูกรัด Cargo And Dunnage จำว่า C

- น้ำหนักน้ำมันเชื้อเพลิง Fuel จำว่า F
- น้ำหนักน้ำจืด Fresh Water จำว่า F
- น้ำหนักคนโดยสารและเครื่องใช้ส่วนตัว Passengers And Effects จำว่า P
- น้ำหนักเสบียงอาหาร Food And Stores จำว่า F

ทั้ง 5 รายการ เมื่อรวมแล้วเรียกน้ำหนักบรรทุก หรือจำว่าน้ำหนักบรรทุกมีส่วนประกอบ คือ CPF^3 ก็จะจำง่ายขึ้น จากนี้จะเกิดสมการ คือ.-

ระวางขับน้ำเต็มที่ = น้ำหนักเรือ + น้ำหนักบรรทุก

$\triangle$ Full = L.S. + DWT

และสัมประสิทธิ์น้ำหนักบรรทุก $C_{DWT} = \frac{DWT}{\triangle Full}$ ซึ่งเป็นตัวสำคัญควรจำไว้เพราะจะพบในตอนออกแบบเรือ

เรือสินค้าทั่วไป C_{DWT} = 0.61 ถึง 0.69

เรือบรรทุกน้ำมัน C_{DWT} = 0.70 ถึง 0.78

เรือทุ่นระเบิดและเรือบรรทุกรถยนต์คนโดยสารข้ามช่องแคบ

C_{DWT} = 0.20 ถึง 0.25

8. สัมประสิทธิ์แท่งตัน (Block Coefficient. C_B, C_B, B)

$$C_B = \frac{\text{Volume of displaceme nt}}{LxBxH} = \frac{\nabla}{LxBxH}$$ ดูรูปที่ 10

เรือโดยสารและสินค้า C_B = 0.58 ถึง 0.68

เรือบรรทุกน้ำมัน C_B = 0.69 ถึง 0.76

9. สัมประสิทธิ์รูปตัดกลางลำ (Midship Section Coefficient $C\otimes$, C_x, m)

$$C\otimes = \frac{\text{Area of Midship Section}}{BxH} = \frac{A\otimes}{BxH}$$

เรือโดยสารและสินค้า $C\otimes$ = 0.97 ถึง 0.98

เรือบรรทุกน้ำมัน $C\otimes$ = 0.98 ถึง 0.99

10. สัมประสิทธิ์รูปแนวน้ำ (Waterplane Coefficient ^{C}W.P., p)

$$^{C}W.P = \frac{\text{Area of Waterplane}}{L \times B} = \frac{AWP}{L \times B}$$

เรือโดยสารและเรือสินค้า ^{C}W.P. = 0.71 ถึง 0.763

เรือบรรทุกน้ำมัน ^{C}W.P. = 0.79 ถึง 0.836

11. สัมประสิทธิ์ปริซึมยาว (Longitudrnal Prismatic Coefficient Cp,l)

โดยมากเรียก Prismatic Coefficient เฉย ๆ

$$^{C}P = \frac{\nabla}{A\otimes \times L}$$

เรือโดยสารและสินค้า ^{C}P = 0.60 ถึง 0.69

เรือบรรทุกน้ำมัน ^{C}P = 0.70 ถึง 0.77

12. สัมประสิทธิ์ปริซึมตั้ง (Vertical Prismatic Coefficient, Z)

$$Z = \frac{\nabla}{A\ WP \times H}$$

สัมประสิทธิ์ชนิดนี้ไม่สู้สำคัญนัก จึงไม่ค่อยพบในทางคำนวณเลย สูตรทั้ง 5 นี้ มีความสัมพันธ์ ดังนี้ $b = \sqrt{1 \times Z \times m \times p}$

13. เรโชต่าง ๆ

ขนาดต่าง ๆ ที่กล่าวมาในตอนต้น ตามลำพังตัวของมันเอง ย่อมมีความสำคัญอยู่แล้ว ถ้าได้สัมพันธ์กันอีก ยิ่งมีความสำคัญมากขึ้น เรโชที่กล่าวนี้ไม่มีหน่วย (Dimension Less) และมีดังนี้.-

เรโชความยาว - ความกว้าง L/B =

เรือโดยสารและสินค้า L/B = 0.70 ถึง 7.08

เรือบรรทุกน้ำมัน L/B = 7.10 ถึง 7.20

เรโชความยาว — ความลึก L/D =

เรือโดยสารและสินค้า L/D = 13.81 ถึง 14.87

เรือบรรทุกน้ำมัน L/D = 13.21 ถึง 14.12

เรโชความยาว – กินน้ำลึก L/H =

เรือโดยสารและสินค้า L/H = } - 12.25

เรือบรรทุกน้ำมัน L/H }

เรโชความกว้าง – กินน้ำลึก B/H =

เรือโดยสารและสินค้า B/H = 2.45 ถึง 2.87

เรือบรรทุกน้ำมัน B/H = 2.36 ถึง 2.56

เรโชกินน้ำลึกและความลึก H/D =

เรือโดยสารและสินค้า H/D = 0.715 ถึง 0.838

เรือบรรทุกน้ำมัน H/D = 0.749 ถึง 0.784

เรโชระวางขับน้ำ – ความยาว $\left[\dfrac{\Delta}{\dfrac{L}{100}}\right]^3$ หรือ Fatness Rati

เรือโดยสารและสินค้า $\left[\dfrac{\Delta}{\dfrac{L}{100}}\right]^3$ = 160 - 168

เรือบรรทุกน้ำมัน $\left[\dfrac{\Delta}{\dfrac{L}{100}}\right]^3$ = 159 - 166

บทที่ 6
โครงสร้างตัวเรือ

6.1 กระดูกงู

ในสมัยก่อนเราถือกันว่ากระดูกงูเป็นกระดูกสันหลังของเรือทีเดียว ความจริงข้อนี้ยังคงเป็นความจริงอยู่จนถึงปัจจุบันนี้ เพราะกระดูกงูยึดส่วนต่าง ๆ ของท้องเรือทางขวางไว้หมด และทำการกระจายน้ำหนักที่ได้รับจากแรงภายนอกออกไปเป็นบริเวณกว้างใหญ่ ปัจจุบันนี้มีนักต่อเรือสมัยใหม่อยู่บ้าง ที่สร้างเรือขนาดใหญ่แล้วไม่ใช้กระดูกงูดังกล่าว การกระทำเช่นนี้ทำให้ได้รับความยากลำบากในการเข้าอู่ เพราะหมอนรองต้องทำขึ้นเป็นพิเศษ ฉะนั้นการต่อเรือชนิดไม่มีกระดูกงูจึงไม่แนะนำให้ถือเป็นหลักปฏิบัติ ในเรือบรรทุกน้ำมันที่สร้างโดยใช้ฝากั้นตามยาวคู่ตลอดลำ (Twin Bulkhead Tanker) อาจไม่ต้องทำกระดูกงูก็ได้ เพราะฝากั้นนั้นแข็งแรงพออยู่แล้ว เรือสินค้าทั่วไปเมื่อเข้าอู่มักใช้กระดูกงูเรือวางอยู่บนหมอน ซึ่งทำหน้าที่รับน้ำหนักเรือส่วนใหญ่ และมีหมอนรองรับที่บริเวณกระดูกงูปีก (Bilge Keel) รับน้ำหนักเรือเป็นส่วนน้อย โดยที่กระดูกงูเป็นส่วนโครงสร้างที่แข็งแรง จึงทำหน้าที่รับน้ำหนักแรงเค้นต่าง ๆ อันบังเกิดขึ้นจากตัวเรือเมื่อเรือเดินทางไปในท้องทะเล

1. กระดูกงูแท่ง (Bar Keel)

กระดูกงูแท่งชนิดนี้ในสมัยก่อนใช้กันมาก ดูรูปที่ 1 เป็นกระดูกงูที่แข็งแรงมาก ถ้าเรือ เกยตื้นซึ่งเป็นหินท้องเรือประเภทนี้ช่วยได้มาก ที่จะไม่ให้เรือได้รับความเสียหาย นอกจากนี้ยังช่วยไม่ให้เรือโคลงมาก เพราะกระดูกงูแท่งนี้ยื่นออกไปจากตัวเรือมาก ทำหน้าที่ประดุจกระดูกงูปีก แต่ข้อเสียของกระดูงูแท่งนี้ก็คือกินน้ำลึกเกินไปโดยระวางขับน้ำไม่ได้เพิ่มขึ้น ทำให้เรือเข้าไปในท่าเรือน้ำตื้นไม่ได้ ถ้าต้องการเข้าท่าเรือนั้นก็จำเป็นต้องบรรทุกสินค้าให้น้อยลงอีกอันทำให้ได้เงินน้อยลง ดังตัวอย่างง่าย ๆ ดังนี้ สมมติว่าเรือสินค้าลำนี้ยาว 400 ฟุต ซึ่งมีจำนวนตันทีทำให้เรือจมลง 1 นิ้ว ประมาณ 50 ตัน (Tons Per Inch Immersion) ซึ่งหมายความว่าเรือจะจมลง 1 นิ้ว เมื่อบรรทุกของลง 50 ตัน และเรือนี้ต้องการเข้าท่าเรือซึ่งมีน้ำตื้น แต่เรือเข้าไม่ได้เพราะกระดูกงูแท่งนั้นยื่นออกจากตัวเรือไป 8 นิ้ว ฉะนั้นในการผ่านสันดอนไปได้จะต้องทำให้เรือลอยขึ้น 8 นิ้ว นั่นคือถอนน้ำหนักสินค้าออก

$$\frac{50 \text{ ตัน}}{\text{นิ้ว}} \times 8 \text{ นิ้ว} = 400 \text{ ตัน}$$

นั่นคือต้องเสียระวางบรรทุกไป 400 ตัน ซึ่งไม่ใช่วิธีการที่ดีในด้านการค้าขายเลย ผู้เป็นเจ้าของเรือย่อมไม่ต้องการขาดทุนเช่นนั้น โดยเหตุนี้เรือกระดูกงูแท่งจึงหมดสมัยไป แต่ยังคงพบอยู่ในเรือยอทเรือขนาดเล็ก เพราะเรือเหล่านี้ไม่คำนึงถึงการกินน้ำลึกและเงิน

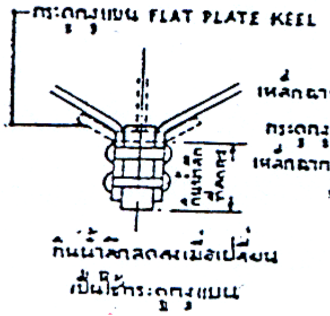
2. กระดูกงูแบน (Flat Plate Keel, FPK)

เพื่อเป็นการลดกินน้ำลึกของเรือให้น้อยลง เรือจึงหันมาใช้กระดูกงูแบน ซึ่งดูแล้วก็เหมือนกับแผ่นเหล็กตัวเรือนั่นเอง แต่เพิ่มความหนาให้มากกว่าแผ่นเหล็กตัวเรืออื่น ๆ เพื่อให้ทนทานต่อการ เข้าอู่เรือเกยตื้น กระดูกงูแบบนี้เริ่มจากทวนหัวถึงทวนท้าย ถ้าเป็นเรือต่อด้วยการย้ำหมุด กระดูกงูแบนกับแผ่นกาบอร์ด (Garboard Strake) จะต้องเกยกัน ถ้าเป็นเรือแล่นประสานก็ต่อชนกับแผ่นกาบรอร์ดตามธรรมดาแล้วแล่นภายหลัง (ดูรูปที่ 2)

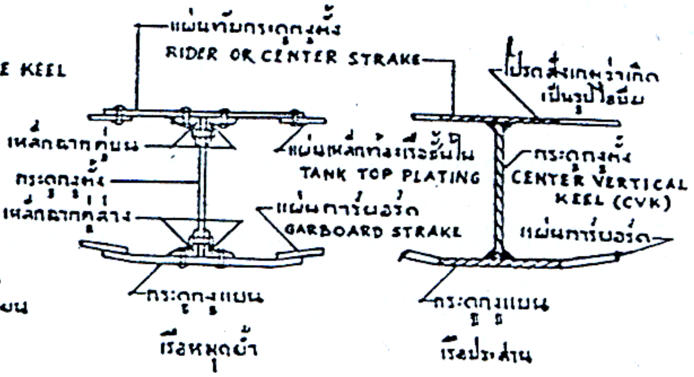
กระดูกงูแบนนี้ทำหน้าที่รับแรงเค้นอันเกิดจากตัวเรือเพียงส่วนน้อย แต่เมื่อกระดูกงูแบนรวมกับกระดูกงูตั้ง (Center Vertical Keel, CVK) และแผ่นทับกระดูกงูตั้ง (Rider or Center Strake) แล้วจะเกิดเป็นไอบีมที่มีกำลังแข็งแรง และสามารถรับแรงเค้นได้ทั้งหมด

รูปที่ 2 แสดงให้เห็นโครงสร้างของกระดูกงูแบนทั้งแบบต่อด้วยหมุดย้ำและ แล่นประสาน ถ้าเป็นหมุดย้ำ กระดูกงูแบนต่อกับกระดูกงูตั้งโดยเหล็กฉาบคู่ล่าง และกระดูกงูตั้งติดกับแผ่นทับกระดูกงูตั้งโดยเหล็กฉากคู่บน โครงสร้างแบบนี้แข็งแรงมาก ถ้าเป็นการต่อโดยแล่นประสาน ก็เลิกใช้เหล็กฉากระยะเกยต่าง ๆ ก็ไม่ต้องใช้ ซึ่งทำให้ประหยัดแผ่นเหล็ก ทำให้เรือเบาขึ้นและบรรทุกสินค้าได้มากขึ้น

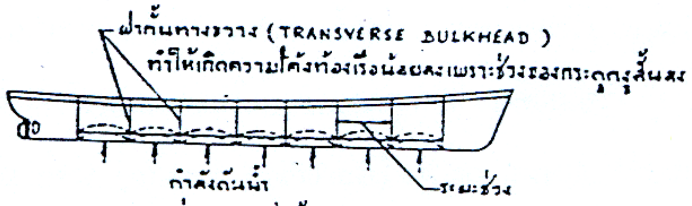
ก่อนที่จะมีการแล่นประสานเกิดขึ้นนั้น กระดูกงูตั้งวิธีแรกอาจทำเป็นช่วง ๆ (Intercostal) และเปี๊ยะ (Floors) ทำติดต่อกันทั้งกราบขวาซ้ายหรือ วิธีที่ 2 กระดูกงู อาจทำติดต่อกันจากหัวจดท้ายและเปี๊ยะกราบขวาซ้ายทำเป็นคนละชิ้นต่อกันตรงกระดูกงูตั้ง โดยใช้คลิป (Clips) วิธีทำทั้งสองอย่างนี้ทำให้ส่วนโครงสร้างอ่อนแอ เพราะการประกอบด้วยหมุดย้ำไม่แน่นจริง โดยเหตุนี้จึงต้องทำให้ความหนาของกระดูกงูตังหนามากขึ้นมากเดิม



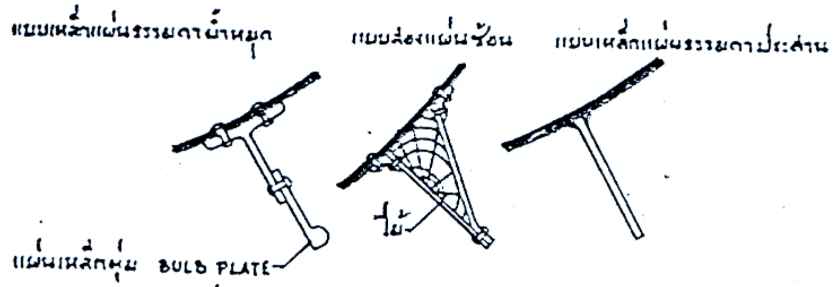
รูปที่ 1 กระดูกงูแท่ง
BAR KEEL OR HANGING KEEL)



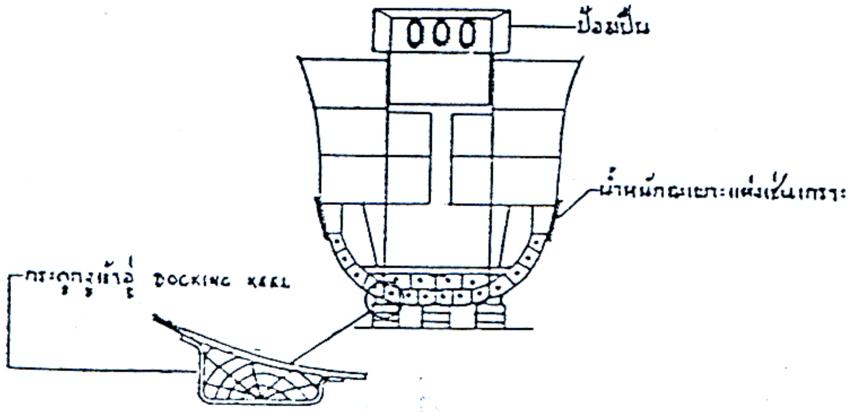
รูปที่ 2 กระดูกงูแบน
FLAT PLATE KEEL (FPK)



รูปที่ 3 ฝากั้นทางขวาง



รูปที่ 4 กระดูกงูปีกแบบต่างๆ (BILGE KEEL)



รูปที่ 5 รูปเรือประจัญบานเข้าอู่

โดยที่โมเมนต์ดัดมีมากที่สุดที่กึ่งกลางลำตามยาว จึงต้องทำให้กระดูกงูมีขนาดแข็งแรง ในบริเวณนี้ แล้วขนาดค่อย ๆ ลดลงบริเวณหัวและท้ายเรือ เพราะโมเมนต์ดัดลดน้อยลง ฝากั้นทางขวางจะทำหน้าที่ช่วยค้ำจุนกระดูกงูและท้องเรือ ดูรูปที่ 3 ฝากั้นทางขวางนี้จึงเปลี่ยนสภาพให้กระดูกงู อันเปรียบเสมือนคานอันยาวและอ่อนง่าย ให้เป็นคานที่มีช่วงรองรับสั้นและแข็งแรงขึ้น

ในการออกแบบหมุดย้ำตรงส่วนที่เปี๊ยะติดกับกระดูกงูตั้งนั้นต้องใช้ความระมัดระวังมาก ขนาดของคลิปต้องมีความหนาเท่ากับแผ่นเหล็กที่ต่อ และมีหมุดย้ำมากพอที่จะทำให้รอยต่อแข็งแรงพอ ถ้าความเค้นมากเกินไปควรใช้คลิปสองอัน การใช้เหล็กฉากสองอันนี้จะทำให้รอยต่อแข็งแรงเป็นสองเท่า

ในเรือนท้องสองชั้นและท้องเรือกั้นเป็นช่อง ๆ (Cellucar Type) มักทำให้กระดูกงูตั้ง เป็นชิ้นเดียวกันตลอด เปี๊ยะด้านบนติดเข้ากับกงปีกกลับ (Reverse Frame) ส่วนล่างของเปี๊ยะติดเข้ากับกงธรรมดาซึ่งติดอยู่กับท้องเรือ โครงสร้างนี้เมื่อพิจารณาดูแล้วจะเป็นช่อง สี่เหลี่ยมมากมาย ซึ่งประกอบด้วยเปี๊ยะ, กระดูกงูตั้ง และกงทางยาว (Longitudinals Frame, or Longitudinals) อะเล (Girders) ซึ่งมีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยม รูปหีบ เช่นนี้ ทำให้ท้องเรือแข็งแรงมาก

ถ้าเรือท้องสองชั้นแบบช่องดังกล่าวนี้แล่นติดประสานเสียให้หมด คำที่กล่าวไว้ข้างบนว่ากระดูกงูตั้งจะต้องเป็นชิ้นเดียวกันตลอด จึงหมดความหมายไป เพราะเหตุว่าเมื่อท้องเรือแล่นติดกันเป็นเนื้อเดียวก็จะมีความแข็งแรง 100 เปอร์เซ็นต์ ฉะนั้นกระดูกงูตั้งจะเป็นชิ้นเดียวกันตลอด (Continuous) หรือขาดเป็นช่วง ๆ (Intercostal) เพื่อให้เปี๊ยะผ่านก็ไม่แปลกอะไร เพราะเมื่อแล่นประสานแล้วก็เป็นเนื้อเดียวกันแข็งแรง 100 เปอร์เซ็นต์ ฉะนั้นการแล่นประสานจึงทำให้สามารถสร้างโครงสร้างใหญ่ ๆ ขึ้นได้โดยทำเป็นส่วนโครงสร้างย่อย ๆ เป็นตอน ๆ แล้วนำมาประกอบ (Subassembling) เป็นโครงสร้างใหญ่ ๆ ที่ต้องการ ภายหลังงานประกอบประเภทนี้มักทำกลับลำดับก่อนหลังซึ่งใช้อยู่ในงานปกติ ซึ่งจะทำให้ความยากลำบากในการแล่นประสานที่อยู่เหนือศีรษะเสียได้ โดยที่ประกายไฟจะไม่กระเด็นลงสู่ศีรษะของผู้ประสานอีกต่อไป เพราะงานนั้นได้ทำไว้ก่อนแล้ว โดยเอางานไว้เบื้องล่าง แล้วผู้แล่นอยู่ ข้างบน ส่วนประกอบที่ทำไว้แล้วนั้นก็พลิกกลับขึ้นมาแล้วนำไปประกอบเข้าเป็นเรือต่อไป ขนาดของส่วนหนึ่ง ๆ นี้หนักประมาณ 50 ถึง 150 ตัน งานประกอบนี้มิใช่จะต้องเป็นแต่งานทำท้องเรือเท่านั้น งานอื่น ๆ ก็ทำได้ทั้งสิ้น แฟกเตอร์ที่สำคัญในงานประกอบนี้ก็คือ เครน ที่ใช้ยกส่วนประกอบที่แล้วไปยังสถานที่ ทำกำลังสร้างเรืออู่ใหญ่มีเครนขนาดใหญ่ก็สามารถประกอบได้ส่วนหนึ่ง ๆ ได้ขนาดใหญ่ อู่เล็กก็มีเครนเล็กก็ประกอบได้ส่วนหนึ่ง ๆ ได้เล็ก

ข้อดีของงานประกอบอีกอย่างหนึ่งก็คือ สมมติว่าเรือที่กำลังต่อนั้นอยู่ที่หนึ่ง โดยปกติก็จะต้องไปทำการต่อเรือที่นั่น แต่เมื่อวิธีประกอบส่วนโครงสร้างย่อยได้เกิดขึ้นเช่นนี้ เราสามารถไปประกอบ

โครงสร้างส่วนหนึ่งส่วนใดเสียที่อื่นภายในร่มและใกล้เครื่องมือ แล้วนำเครนยกไปยังเรือนั้น ทำให้ผู้คนไม่แออัด ณ สถานที่ต่อเรือ นอกจากนั้นทำให้สร้างเรือได้เร็ว ราคาในการสร้างก็ถูกลง

ภายใต้กระดูกงูแบนนั้นมีแผ่นเหล็กกันครูด (Shoe Plate) ติดอยู่มีขนาดหนา 3 นิ้ว กว้าง 6 นิ้ว จุดประสงค์ก็เพื่อกันไม่ให้กระดูกงูแบนชำรุดเสียหายมาก เมื่อเกยตื้นและเมื่อเวลาเข้าอู่ แต่อย่างไรก็ตามเหล็กกันครูดนี้กลับทำความเสียหายให้แก่ไม้หมอนมิใช่น้อย

3. กระดูกงูปีก (Bilge Keel)

กระดูกงูปีกนี้มักติดในเรือที่มีขนาดใหญ่เพื่อกันไม่ให้เรือโคลงมาก ในขณะเดินทางไปในท้องทะเล กระดูกงูปีกนี้ทำเป็นปีกด้วยเหล็กแผ่นติดอยู่ที่ท้องเรือบริเวณส่วนโค้งของท้องเรือหรือที่ เรียกว่า บิลซ์ (Bilge) กระดูกงูปีกนี้ติดอยู่ตอนกึ่งกลางลำยาวพอสมควร เพราะบริเวณนั้นมีการกระทำของน้ำมากกว่าที่อื่น เมื่อเวลาเรือโคลงไปมา กระดูกงูปีกทำหน้าที่ลดอาการโคลงของเรือแต่ไม่ได้ เกี่ยวกับการทรงตัวของเรือ

กระดูกงูปีกนั้นมี 2 แบบใหญ่ ๆ คือกระดูกงูปีกเหล็กแผ่นธรรมดา (Flat-Plate Type) กับกระดูกงูปีกเหล็กสองแผ่นซ้อน (Filled Double-Plate Type) กระดูกงูปีกเหล็กแผ่นธรรมดาดูรูปที่ 50 ประกอบด้วยเหล็กรูปตัวที ย้ำเข้ากับตัวเรือที่ปลายเหล็กตัวที่มีแผ่นเหล็กตุ่ม (Bulb Plate) ย้ำติดอยู่ด้วยเพื่อให้กระดูกงูปีกมีความกว้างมากขึ้น แต่บัดนี้การทำได้เปลี่ยนไปใหม่คือ ประสานแผ่นเหล็กเข้ากับตัวเรือเฉย ๆ แล้วเว้า (Knotched) ตามรอยประสานของแผ่นเหล็กตัวเรือ เพื่อให้การประสานติดต่อกันตลอด กระดูกงูปีกชนิดเหล็กสองแผ่นซ้อนนั้นใช้ในเรือขนาดใหญ่มาก ๆ ประกอบด้วยเหล็กแผ่นสองแผ่นจะย้ำประสานเข้ากับตัวเรือก็ได้ ภายในแผ่นเหล็กนั้นบรรจุไม้บัลซาหรือไม้ธรรมดาเพื่อทำให้แข็งแรง ปกติใช้น้ำมันดินบรรจุไว้อีก เพื่อกันน้ำอันอาจเข้าไปอยู่ตามมุมต่าง ๆ ทำให้ผุกร่อน การป้องกันการผุกร่อนนี้เป็นสิ่งสำคัญที่สุดและต้องทำเพราะว่าภายในกระดูกงูปีกนั้น ระวังรักษาไม่ได้ภายหลังที่ได้ประกอบเข้ากับตัวเรือแล้ว

4. กำลังกดท้องเรือเมื่อเรือเข้าอู่

เมื่อเรือลอยอยู่ในน้ำนั้นกำลังดันของน้ำกระทำทั่วไปตามท้องเรือ แต่เมื่อเรือเข้าอู่แล้วไม่มีน้ำรองรับ น้ำหนักของเรือจึงไปกระทำเสียที่กระดูกงูแห่งเดียว แล้วถ่ายให้หมอนที่รองรับ หมอนรองแถวกระดูกงูปีกทำหน้าที่รับน้ำหนักของเรือเพียงส่วนน้อย เรือประจัญบาน เป็นเรือที่มีน้ำหนักเฉพาะแห่ง (Local Weight) มากเช่น เกราะ และป้อมปืนเป็นต้น ซึ่งมีเรือลอยอยู่ในน้ำก็ไม่เกิดอันตรายอะไร เพราะน้ำหนักเหล่านั้นแผ่กระจายไปทั่วลำเรือ แต่ครั้นเรือเข้าอู่น้ำหนักเหล่านี้จะกระทำลงเฉพาะที่แห่งใดแห่งหนึ่ง ถ้าการเข้าอู่นั้นทำวิธีเดียวกับเรือสินค้า ในการที่จะให้น้ำหนักกระจายทั่วไป และไม่เกิด

เสียหายแก่กระดูกงูและไม้หมอนรองรับนั้น มักใช้สร้างเรือให้มีกระดูกงูอีกสองอันขวาซ้ายของกระดูกงูกลาง กระดูกงูขวาซ้ายนี้เรียกว่า กระดูกงูเข้าอู่ (Docking Keel) จะทำหน้าที่พยุงเรืออีกส่วนหนึ่ง

ในบางเวลาเรือสินค้าต้องเข้าอู่ทั้ง ๆ ที่มีสินค้าอยู่ภายในเรือทั้งหมด หรือมีบ้างเล็กน้อยซึ่งมีเกิดขึ้นเสมอ ในกรณีเช่นนั้นต้องทำเหล็กคลิปพิเศษตามตำบลที่จะเกิดอันตราย เช่นใต้กงตามยาว และภายใต้ฝากั้นทางขวาง เพื่อพยุงน้ำหนักสินค้าเหล่านั้น บริษัทรับประกันทั่วไปไม่ยอมให้เกินกำลังกดเกิน 15 ตันต่อตารางฟุต ของเนื้อที่รองรับ การเข้าอู่นั้นทางอู่คิดว่าเข้าอู่โดยคิดจากกร๊อสตันเนช (Gross Tonnage) แต่ในกรณีที่เรือสินค้าเข้าอู่โดยมีสินค้าอยู่ในระวางทั้งหมดหรือแต่บางส่วนนั้นทางอู่คิดบวกน้ำหนักสินค้า (Cargo Tonnage) เข้ากับกร๊อสตันเนชเสียก่อน แล้วจึงคิดค่าเข้าอู่จากจำนวนกร๊อสตันเนชทั้งหมดนั้น ทั้งนี้เพื่อชดเชยค่าคลิป ซึ่งต้องทำพิเศษขึ้นนั่นเอง

6.2 เปี๊ยะและเรือท้องสองชั้น

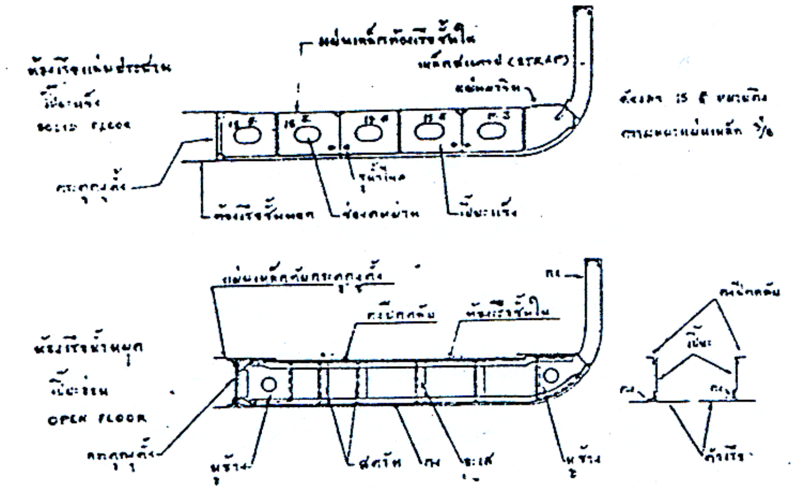
ในการออกแบบเรือนั้น โครงสร้างท้องเรือเป็นสิ่งสำคัญมาก เพราะมันทำหน้าที่เท่ากับ ปีกล่างของอะเส ในเมื่อเราถือว่าเรือเปรียบประดุจอะเสขนาดใหญ่ ท้องเรือและกระดูกงูทำหน้าที่ด้วยกันในการรับแรงเค้นอันเกิดจากตัวเรืออยู่ในอาการดุ้งและตกท้องช้าง ท้องเรือนั้นก็เหมือนกระดูกงู คือต้องทำให้แข็งแรงเพียงพอที่จะต้านทานแรงกดของน้ำ แรงกดเมื่อเรือเข้าอู่เกยตื้นและแรงกดของสินค้า

ความแข็งแรงของท้องเรือที่ต้องการนี้สามารถทำให้มากขึ้นได้ โดยใส่เปี๊ยะเข้าตามกง ทางขวาง (Transverse Frame) ดูรูปที่ 6 , 9 , 11 , 12 เมื่อพิจารณาคำว่าฟลอร์ (Floor) แล้วแปลว่าพื้นดังที่ทราบกันทั่วไป แต่ในทางเรือพื้นนี้หาได้เป็นระดับอย่างพื้นบ้านไม่ กลับเป็นในทางดิ่ง ซึ่งในภาษาไทยตรงกับคำว่า เปี๊ยะ นำมาจากภาษาจีน ถ้าแปล (Floor) ว่าพื้นแล้วคงทำให้งงไปบ้างไม่มากก็น้อยเมื่อแรกพบ เปี๊ยะนี้มีความลึกจากกงปีกกลับ (Reverse Frame) ถึงกงท้องเรือ (Frame) และยาวในทางขวางจากกราบขวาจดกราบซ้าย โดยปกติมักติดทุก ๆ ช่วงกง

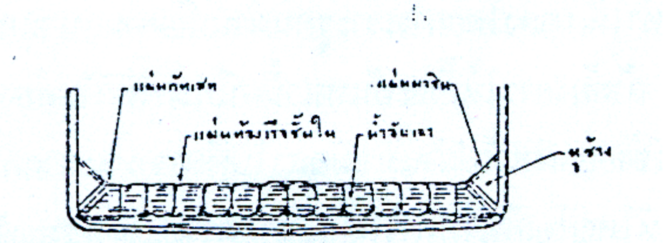
1. เปี๊ยะ (Floor)

เปี๊ยะในเรือท้องชั้นเดียว ดูรูปที่ 9 นั้นมักเป็นแผ่นเหล็กธรรมดา เรียวให้เล็กทางตอนปลายทั้งสองกราบ เพื่อให้เข้ากับท้องเรือ ถ้าเป็นเรือหมุดย้ำเปี๊ยะมักติดอยู่ในระหว่างกงปีกกลับ กับกงท้องเรือ ดูรูปที่ 6 ถ้าเป็นเรือแล่นประสาน ตอนล่างของเปี๊ยะจะแล่นติดกับเรือโดยตรง กงท้องเรือจึงหายไป ส่วนตอนบนของเปี๊ยะที่ติดกับกงปีกกลับนั้นก็ใช้แผ่นเหล็กดัดปีก (Flange Plate) หรือเหล็กเส้นทับหน้า (Faceplate) แทน

เปี๊ยะในเรือท้องสองชั้น ดูรูปที่ 10 ก็ทำด้วยแผ่นเหล็กธรรมดาเช่นเดียวกัน แต่ใต้ระวางสินค้าไม่ได้ติดทุกกง อาจเว้นสองกง แล้วจึงติดเปี๊ยะแข็ง 1 อัน (Solid Floor) ส่วนกงที่เว้นนั้นติดเปี๊ยะอ่อน (Open or Bracket Floor) ทั้งนี้เพื่อให้น้ำหนักของเรือเบา แต่กำลังคงแข็งแรงเท่าเดิม เปี๊ยะอ่อนนี้ประกอบด้วยส่วนโครงสร้างคือ กงท้องเรือ , กงปีกกลับ และที่ปลายทั้งสองยึดด้วยหูช้าง ส่วนระหว่างกลางนั้นติดด้วยเหล็กสตรัท (Strut) และเหล็กเอ็น เปี๊ยะอ่อนนี้เบากว่าเปี๊ยะแข็งประมาณ ¼ ของน้ำหนักของเปี๊ยะแข็ง การที่เรียกว่าเปี๊ยะแข็งนั้น มิได้หมายความว่าจะเป็นแผ่นเหล็กที่ไม่มีรูอะไรเลย ตรงข้ามเปี๊ยะแข็งมีช่องคนผ่าน (Lightening Hole) รูน้ำผ่าน (Limber Hole or Drain Hole) รูระบายอากาศ (Air Escape Hole)

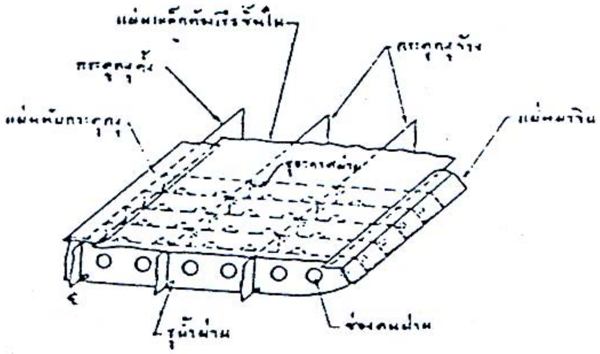


รูปที่ 6 เปี๊ยะแข็ง และ เปี๊ยะอ่อน



รูปที่ 7 น้ำอับเฉาบรรจุอยู่ในถังเป็นช่วง ๆระบบแมกคินไทร์

(Macintype System)



รูปที่ 8 ตัวเรือสองชั้นสมัยใหม่ทำเป็นช่วง (cellular)

โครงสร้างภายในเรือนั้น ความแข็งแรงของมันขึ้นอยู่กับโครงสร้างช่วย (Auxilizry Structure) อื่น ๆ ในที่นี้หมายถึงเปี๊ยะ ๆ จะแข็งแรงขึ้นอีกโดยโครงสร้างช่วย คือ กงตามยาวหรืออะเสตามยาว (Longitudinal Girders or Bottom Longitudinal Frame or Longitudinals) ซึ่งจะทำหน้าที่ มิให้เปี๊ยะบิดหรือล้มไปทางหัวหรือท้าย ในท้องเรือชั้นเดียวนั้นมีส่วนต่าง ๆ ทำหน้าที่เป็นอะเสดังนี้ กระดูกงูตั้งอีกชื่อหนึ่งคือ (Cemter Keeison) กระดูกงูข้าง (Side Leelson or Side Girder) กระดูกงู ข้างนี้อาจมีกราบละ 1 อัน หรือสองอันก็ได้แล้วแต่ขนาดของเรือ ตอนบนของกระดูกงูตั้งหรือกระดูกงูข้างนี้มีเหล็กทับกระดูกงู (Rider Plate) วางทับอยู่

ในเรือขนาดเล็ก เปี๊ยะอาจมีขนาดสั้นจนสามารถทำเป็นชิ้นเดียวได้ทั้งกราบวางกราบซ้าย และใช้กระดูกงูตั้งขาดเป็นช่วง ๆ แต่เรือส่วนมากทำเปี๊ยะกราบขวากราบซ้ายเป็นคนละส่วนต่อกันตรงกระดูกงูตั้ง ๆ เป็นชิ้นเด่ยวกันตลอด ในเรือท้องสองชั้นนั้น กระดูกงูข้างนั้นมักบรรจุเป็นช่วง ๆ ระหว่างเปี๊ยะแข็ง และไม่ตัดตรงเปี๊ยะอ่อน แต่อย่างไรก็ตามในการต่อเรือชนิดแล่นประสานสมัยใหม่กระดูกงูข้างนี้มักทำติดต่อเป็นชิ้นเดียวตลอด

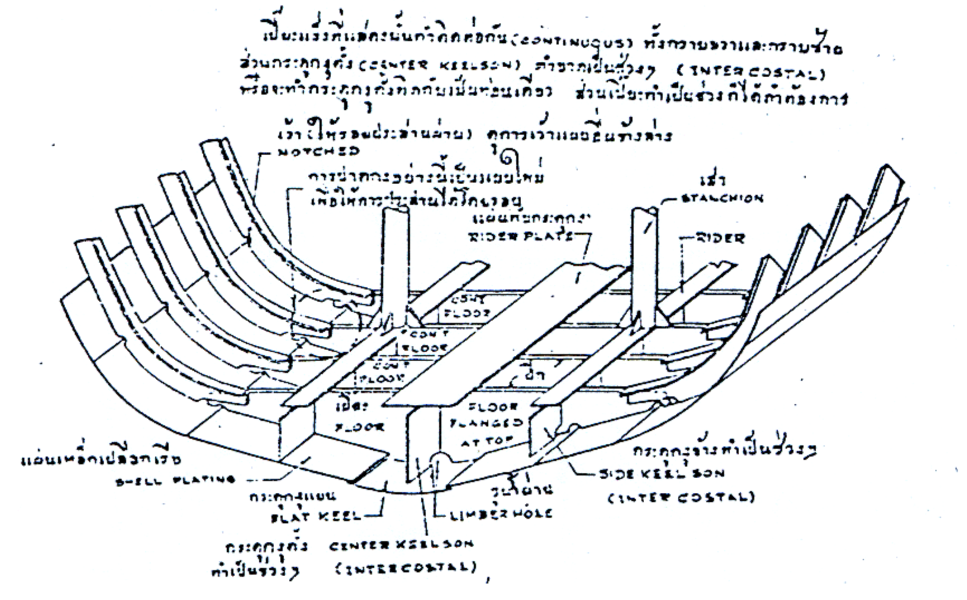
เพื่อไม่ให้เปี๊ยะแข็งงอหรือล้มในระหว่างกระดูกงูข้าง จำเป็นต้องทำให้เปี๊ยะมีความหนาและลึกพอสมควร แล้วทำให้เบาลงโดยการเจาะรูคนผ่านเสียตามแนวแกนกลาง เมื่อไม่ต้องการให้เปี๊ยะแข็งนั้นผนึกน้ำได้ ถ้าต้องการให้เปี๊ยะอันหนานี้ผนึกน้ำได้ก็ไม่ต้องเจาะรูคนผ่าน ๆ นี้เป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่งเพื่อให้คนเข้าออกผ่านไปผ่านมาเมื่อลงไปทำความสะอาดภายใต้ท้องเรือ ช่องคนผ่านนี้มีขนาดจำกัด ถ้าทำให้ใหญ่โตเกินไปทำให้เปี๊ยะขาดความแข็งแรงลงไป เปี๊ยะแข็งที่มีความหนามากและเจาะรูคนผ่านขนาดพอสมควร จะแข็งแรงทนทานต่อสนิมดีกว่าเปี๊ยะแข็ง ที่มีแผ่นเหล็กค่อนข้างบางแต่ไม่ทำช่องคนผ่านเลย

ความแข็งแรงอื่น ๆ จะต้องเสริมให้กับเปี๊ยะแข็งในบริเวณที่อยู่ในห้องเครื่องจักร และ หม้อน้ำ เพราะเปี๊ยะเหล่านั้นต้องรับน้ำหนักของเครื่องมากตลอดทั้งการสั่นสะเทือน ความชื้นและสนิม ผุกร่อนต่าง ๆ ฉะนั้นต้องทำให้เปี๊ยะแข็งนั้นหนามากกว่าปกติ และเปี๊ยะอ่อนไม่ใช้ในบริเวณนี้เลย

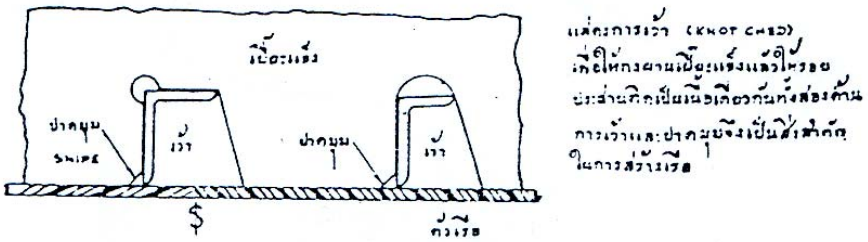
2. ท้องเรือสองชั้น (Double Bottom)

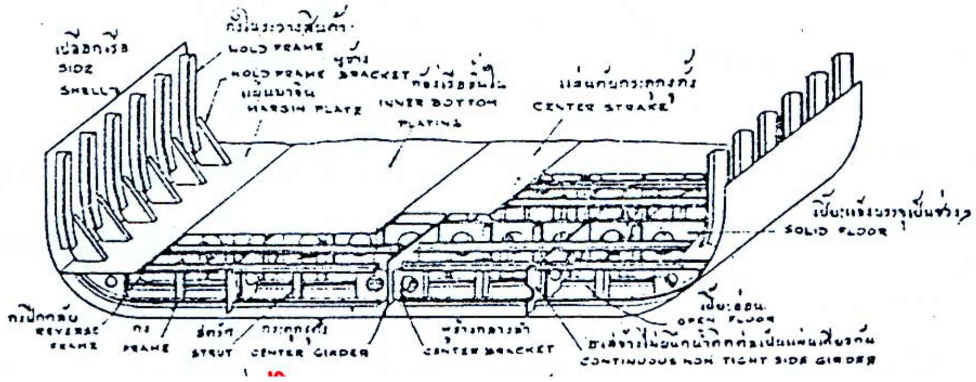
ตอนสมัยแรกที่มีการต่อเรือคงจะจำกัดได้ว่าเมื่อเรือเอาสินค้าขึ้นหมดแล้วเรือจะเบา และลอยสูงขึ้น จุดศูนย์ถ่วงของเรือสูงจากแนวน้ำในขณะนั้นมากทำให้เรือโงน (Top = Heavy) และทรงตัวไม่ดี (Unstable) เรือจึงได้รับความเสียหายเนื่องจากเรือกระแทกกับน้ำ (Pounding) และเรือพยายาม จะคว่ำอยู่เสมอ ตลอดจนการถือท้ายเรือในขณะเรือเบา ก็ถือท้ายยาก เรือพยายามที่จะวิ่งออกจากเส้นทาง โดยเหตุผลอันนี้จึงหาน้ำหนักมาถ่วงท้องเรือให้เรือกินน้ำลึกลงไปอีก น้ำหนักเหล่านี้เรียกว่า อับเฉา (Ballast)

การใช้น้ำหนักอับเฉาลงท้องเรือนั้น หลาย ๆ ปีเข้าทำให้ท้องเรือสกปรก มีกรวดมีหิน มีทรายอยู่มากมาย เพราะติดมากับน้ำหนักอับเฉาที่เอาขึ้นอยู่บนฝั่ง การเอาน้ำหนักอับเฉาขึ้น ๆ ลง ๆ นี้

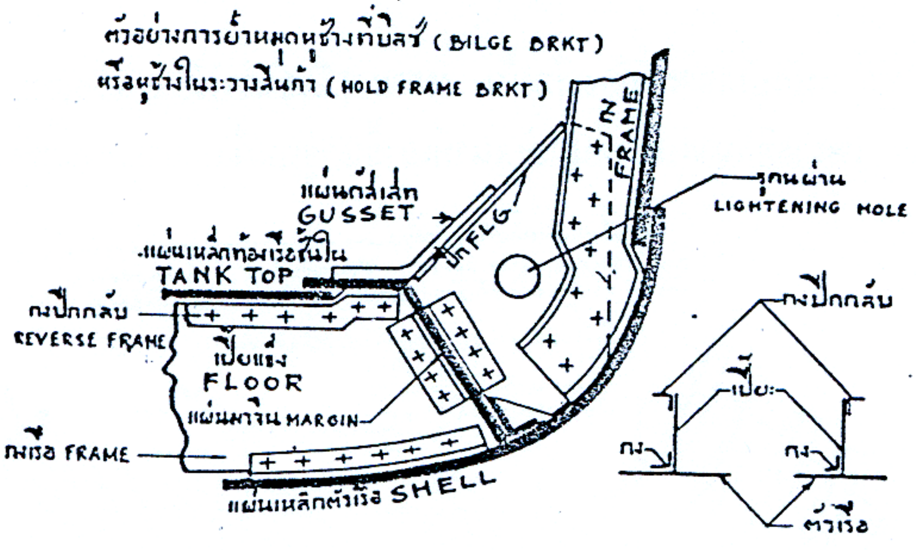


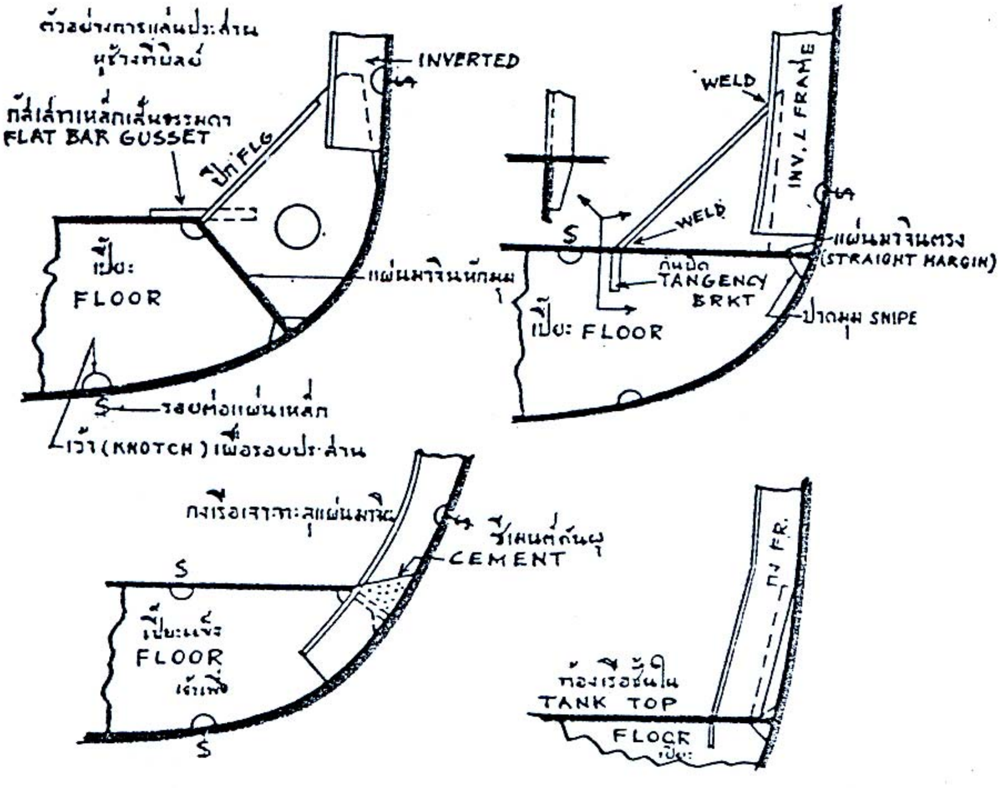
รูปที่ 9 ท้องเรือชั้นเดียว (Single Bottom)





รูปที่ 10 แสดงโครงสร้างตัวเรือสองชั้น (Double Bottom)

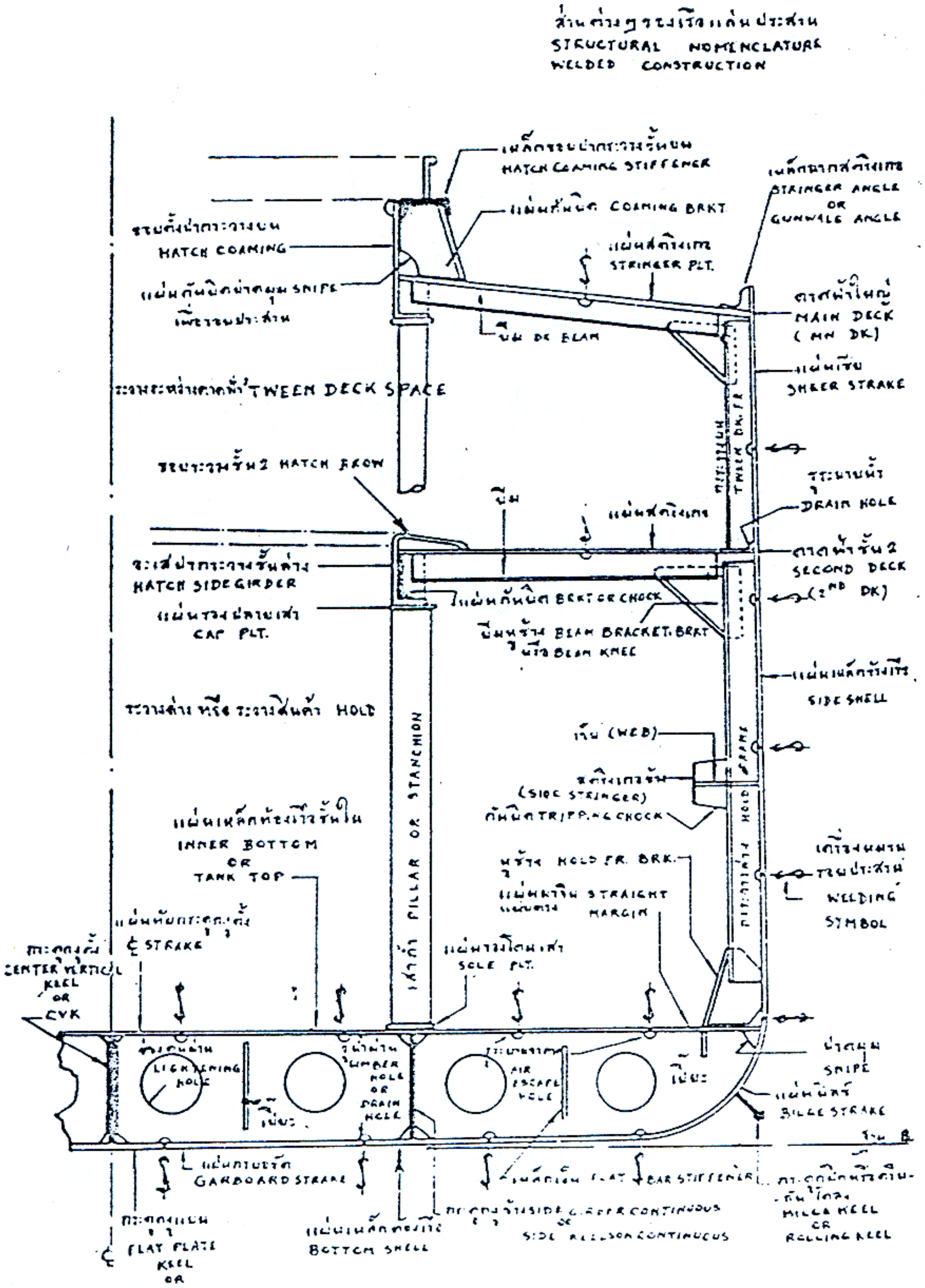




เสียเวลาในทางการค้า ต้องเอาสินค้าขึ้นจนหมดจึงจะเอาน้ำหนักอับเฉา ที่อยู่บนฝั่งลงท้องเรือได้ และต้องเอาขึ้นให้หมดเสียก่อนที่จะเอาสินค้าลง ฉะนั้นจึงทำให้เสียค่าใช้จ่ายในการจ้างคนขนอับเฉาลงเรือ ซึ่งเป็นสิ่งที่ไม่พึงประสงค์

ประมาณปี ค.ศ.1885 การใช้อับเฉาชนิดเป็นน้ำแทนอับเฉาชนิดโลหะ ซึ่งเป็นของแข็ง ได้เริ่มขึ้นโดยการใช้ถังแบบแมคคินไทร์ (Mc Intype Tank) ถังนี้อยู่ที่ท้องเรือใช้แผ่นเหล็กชนิดผนึกน้ำสร้างขึ้นบนเปี๊ยะของท้องเรือชั้นเดียว มีอะเสตามยาววางอยู่บนเปี๊ยะนั้น น้ำอับเฉาสูบใส่ลงมาในถังเหล่านี้ ทำให้เรือกินน้ำลึกลงอีก เมื่อสินค้าขึ้นหมดแล้ว ดูรูปที่ 7 เมื่อมองดูผ่าน ๆ ในสมัยนี้น่าจะปูแผ่นเหล็กบนเปี๊ยะโดยตรงก็พอ แต่นั่นทำไม่ได้เพราะมันตื้น คนลงไปทำความสะอาดเข้าออกไม่ได้และถ้าเพิ่มความลึกของเปี๊ยะขึ้นอีกให้สูงพอที่คนเข้าออกได้ ก็น่าจะทำได้ แต่โครงสร้างชนิดนี้แข็งแรงเกินความต้องการ ฉะนั้นวิวัฒนาการภายหลัง จึงเกิดมีเปี๊ยะอ่อนและเปี๊ยะแข็งขึ้น ซึ่งให้กำลังแข็งแรงพอสมควร และมีน้ำอับเฉาะจำนวนมากพอ ตลอดทั้งการเข้าออกรักษาความสะอาดก็ทำได้สะดวก

เมื่อดัดแปลงเป็นถังอับเฉาทันสมัยขึ้นแล้วการถ่ายเทเอาน้ำอับเฉาเข้าออก ก็ไม่ต้องคอยให้เสียเวลา การสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายไปโดยเปล่าประโยชน์ก็ไม่มี กำไรก็ได้สูงขึ้น



รูปที่ 12 เปี้ยะชนิดแข็ง (Solid Floor)

เรือบรรทุกน้ำมัน (Tanker) และเรือบรรทุกถ่านหิน (Collier) นั้น ทำการค้าเพียงเที่ยวเดียว คือบรรทุกสินค้าไปจำหน่ายแล้วเที่ยวกลับก็เดินทางตัวเปล่ากลับมาเอาสินค้าใหม่ การถ่ายน้ำอับเฉาเข้าออกเรืออย่างรวดเร็วนั้นต้องมีสูบน้ำพิเศษขนาดใหญ่

ถังอับเฉาแบบแมคคินไทร์ เมื่อสร้างตอนแรก ๆ มีข้อเสียดังนี้.-

1. ท้องเรือชั้นใน (Tank Top) ซึ่งขยับให้สูงขึ้นอีก 18 นิ้วนั้น ทำให้เสียเนื้อที่บรรทุกสินค้าลงไปเป็นจำนวนมาก

2. ถึงแม้จะแก้ปัญหาเรื่องการบรรทุกน้ำอับเฉาได้ก็ตาม แต่โครงสร้างนี้ไม่ได้ช่วยให้เรือมีกำลังตามยาวดีขึ้นอีกเท่าใดเลย

ต่อมาภายหลังได้มีวิวัฒนาการดีขึ้น คือทำเป๊ยะให้สูงขึ้นถึงท้องเรือชั้นในแล้วอะเสตามยาว ก็ทำเสียให้จดท้องเรือ สำหรับเรือสินค้าที่บรรทุกขาดไปก็แก้ไขแบบให้ใหญ่ออกเสียแต่แรกทำการสร้าง

จึงเห็นได้ว่าท้องเรือสองชั้นแบบใหม่นี้ให้ความปลอดภัยแก่เรือมาก ท้องเรือชั้นในนั้น ทำหน้าที่เป็นท้องเรืออีกชั้นหนึ่ง ถ้าท้องเรือชั้นนอกชำรุดเสียหายเรือไม่จมสินค้าไม่เสียหายเพราะยังมีท้องเรือชั้นในอีกชั้นหนึ่ง

ความลึกของท้องเรือสองชั้น และเป๊ยะนี้ไม่ได้บอกไว้ในกฎของสมาคมจัดชั้นเรือ แต่หาได้จากความลึกของกระดูกงู ซึ่งตั้งบอกไว้ในกฎนั้น แต่อย่างไรก็ตามความลึกนั้นต้องสูงพอที่คนจะเข้าไปทำความสะอาด เข้าออกได้สะดวก ในเรือที่บรรทุกสินค้าหนัก ๆ ในท้องเรือ เช่น แร่เหล็กดิบ ถ่านหินเป็นต้น ท้องเรือสองชั้นนั้นมักทำให้ลึกมากกว่าเรือประเภทอื่น ทั้งนี้เพื่อทำให้จุดศูนย์ถ่วงของเรือ เมื่อบรรทุกเต็มที่ แล้วสูงขึ้นอีกเล็กน้อย ซึ่งจะทำให้เรือโคลงได้จังหวะกับคลื่น และคนไม่เมาคลื่น ตลอดทั้งเรือไม่เสียหายเนื่องจากกระแทกน้ำ

รูปที่ 8 เป็นท้องเรือสองชั้นแบบช่องสมัยใหม่ คำว่า ช่อง (Cellular) เกิดจากการแบ่งช่องว่างในท้องเรือสองชั้นนั้นด้วยเป๊ยะและกระดูกงูช้างนั่นเอง ส่วนโครงสร้างเหล่านี้ทำหน้าที่เป็นกงพิเศษ ที่จะต้านทานกำลังดันของน้ำที่กระทำอยู่ที่ท้องเรือ

3. ท้องเรือชั้นใน (Inner Bottom Plating or tank top)

ท้องเรือชั้นในนั้นมักทำเป็นแผ่นเหล็กสี่เหลี่ยมผืนผ้าธรรมดามีอาณาเขตเริ่มตั้งแต่แผ่นทับกระดูกงู (Center Strake) ถึงแผ่นมาจิน (Margin Plate) ในเรือหมุดย้ำ แผ่นเหล็กท้องเรือชั้นในมักเรียงแผ่นในทางตามยาวของเรือ รอยต่อสลับกันเพื่อให้กำลังของแผ่นเหล็กแข็งแรงขึ้น

ถ้าเป็นเรือแล่นประสาน แผ่นเหล็กท้องเรือชั้นในทางขวาง ส่วนปลายรอยต่อไม่สู้สำคัญนัก ที่จะต้องสลับกันเพราะการแล่นประสานมีกำลังดีอยู่แล้ว

แผ่นเหล็กทับกระดูกงูตั้ง และกระดูกงูข้างนั้นต้องมีขนาดหนามากกว่าแผ่นเหล็กอื่น ๆ แผ่นเหล็กทับกระดูกงูนี้ทำหน้าที่เป็นปีกบนของอะเส ในเรือหมุดย้ำนั้น แผ่นมาจินมักตัดให้โค้งเป็นสันเพื่อให้แผ่นมาจินพบกับตัวเรือเป็นมุมฉาก ดูรูปที่ 8 นอกจากเสียว่าความลึกของท้องเรือสองชั้นยาวกว่ารัศมีของบิลช์ ในกรณีนี้แผ่นมาจินที่เป็นแผ่นตรง ๆ (Straight Margin) ไปจนจดแผ่นเหล็กตัวเรือ ถ้าเป็นเรือแล่นประสานแผ่นมาจินทำตรงไปพบกับแผ่นเหล็กตัวเรือเสมอ แผ่นเหล็กท้องเรือชั้นในนั้นบางกว่าแผ่นเหล็กท้องเรือชั้นนอก (Bottom Shell) แต่ถ้าอยู่ในห้องเครื่อง ห้องหม้อต้องเพิ่มความหนาขึ้นอีกเล็กน้อยกันการผุกร่อน

ท้องเรือสองชั้นกับท้องเรือชั้นในนั้นไม่เหมือนกัน สับเปลี่ยนกันไม่ได้ เพราะทั้งสองชื่อนั้นหมายถึงส่วนของเรือที่ต่างกัน ท้องเรือสองชั้นหมายถึงท้องเรือที่อยู่ในระหว่างท้องเรือชั้นในกับท้องเรือชั้นนอก ท้องเรือชั้นในหมายเฉพาะแผ่นเหล็กที่ประกอบขึ้นเป็นแผ่นเหล็กตอนบน ของท้องเรือสองชั้น

6.3 กง และ ระบบกง

ระบบกงทางขวางเป็นกงที่อยู่ทางกราบขวา และ กราบซ้าย ระยะห่างของกงชิดกันมากประมาณ 20” ถึง 48” กงทางขวางนี้ถูกค้ำจุนให้แข็งแรงโดยสตริงเกอร์ข้าง (Side Stringer) กระดูกงูข้างและกงตามยาวซึ่งอยู่บริเวณท้องเรือ ดูรูปที่ 13

ระบบกงทางยาวแตกต่างออกไปจากกงทางขวางก็คือ แผ่นเหล็กท้องเรือ , แผ่นเหล็กข้างเรือจะถูกยึดด้วยกงชนิดหนึ่ง ซึ่งวิ่งไปตามยาวหัวท้ายของเรือ เรียกว่า กงตามยาว และกงนี้ถูกค้ำจุนให้แข็งแรงขึ้นโดยเปี๊ยะแข็งพิเศษ (Bottom Transverse or Transverse Web) ซึ่งมีความลึกมากผิดปกติ และมีระยะห่างกันมากประมาณ 10 ฟุต ดูรูปที่ 16

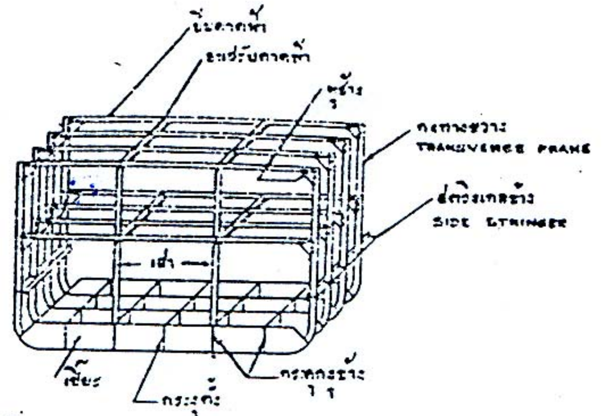
1. กงทางขวาง (Transverse Frames)

ระยะห่างของกงทางขวาง (Frame Spacing) นั้นห่างกันประมาณ 24 ” ถึง 36 ” ในเรือสินค้า สำหรับเรือรบห่างกัน 48” ระยะห่างของกงทางตอนหัวและท้ายของเรือต้องลดระยะลง เพราะเหตุว่าช่วงระยะจริง ๆ ที่รองรับเปลือกเรือนั้นยาวกว่าระยะที่วัดบนเส้นศูนย์กลาง ทั้งนี้เนื่องจากบริเวณหัวและท้ายเรือนั้นมีมุมเอียงเข้าหาเส้นศูนย์กลาง ดูรูปที่ 15 อีกประการหนึ่งแผ่นเหล็กทางตอนหัว และท้ายต้องมีสวนโครงสร้างเพิ่มเติมหรือค้ำจุนให้ต้านทานต่อแรงเค้นอันเกิดความแรงกระแทกของน้ำเวลาเรือโดนคลื่นลมจัด (Pounding Stress)

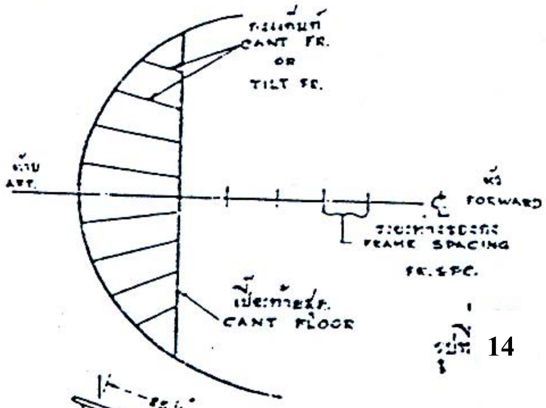
การหมายระยะห่างของกงในเรือรบต้องใช้ 48” หรือ 4 ฟุตเสมอ ทั้งนี้เพื่อช่วยให้ผู้ที่ทำการสร้างเรือมีความสะดวกขึ้นในการหมายระยะกง โดยเพียงแต่ให้หมายเลขของกง เมื่อต้องการทราบระยะก็คูณด้วย 4 ฟุต ภายหลังวิธีการอย่างนี้ไม่สะดวกต่อการสร้างเรือสินค้า เนื่องจากระยะกงต้องเปลี่ยนแปลง

ไปดังกล่าวแล้ว และในเรือรบนั้นถ้าต้องการใส่กงเพิ่มเติมลงไปอีกในระหว่างระยะ 4 ฟุตนั้นก็ใช้หมายเลขตามลำดับดังนี้ 21 ½ , 22 , 22 ½ , 23 ฯลฯ

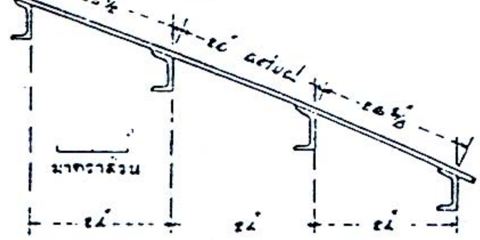
เป็นการแน่นอนทีเดียวว่าถ้าใช้ระยะกงห่างมาก ระยะช่วงรองรับเปลือกเรือก็ยาวมาก เมื่อระยะช่วงยาวขึ้น ความหนาของแผ่นเหล็กก็ต้องมากขึ้นด้วย เรือยิ่งมีขนาดใหญ่ขึ้น น้ำหนัก



รูปที่ 13 แสดงระบบกงทางขวาง (TRANSVERSE FRAMING SYSTEM)



รูปที่ 14



รูปที่ 15 ระยะที่วัดตามแผ่นเหล็กเปลือกเรือยาวกว่าระยะที่วัดตามเส้นฉากกลาง

กระทำลงบนแผ่นเหล็กตัวเรือและกงก็ยิ่งมากขึ้น ด้วยเหตุนี้จึงต้องใช้แผ่นเหล็กหนาและกงมีขนาดใหญ่ขึ้น และโดยที่แผ่นเหล็กหนาขึ้นนี้ทำให้เราใช้ระยะช่วงกงห่างกันมากขึ้นอีกด้วย เป็นการเปลืองเหล็กที่ใช้

ทำกงน้อยลงไป น้ำหนักเรือก็เบาขึ้น บรรทุกสินค้าได้มากขึ้น กำไรมากขึ้น เพื่อทำความเข้าใจให้ดีขึ้น จึงขอยกตัวอย่างดังนี้ เรือยาว 600 ฟุต ตามกฎของสมาคมจัดชั้นเรือในอเมริกา หรืออเมริกันบูโรต้องใช้ระยะช่วงกงห่างกัน 32 นิ้ว ระยะกงนี้อาจไม่ต้องใช้ตามนี้ก็ได้แต่ต้องมีการแก้ขนาดแผ่นเหล็กและอื่น ๆ บ้างเล็กน้อย ฉะนั้นจะพบว่าในเรือแล่นประสานทั้งลำยาว 600 ฟุตนี้ควรจะใช้ระยะช่วงกง 36 นิ้วดีกว่าใช้ 32 นิ้ว โดยเพิ่มความหนาของแผ่นเหล็กขึ้นอีก 0.01 นิ้ว ทุก ๆ นิ้วที่ระยะกงเพิ่มขึ้นจากระยะกงตามกฎ ในที่นี้จะต้องเพิ่มความหนาของแผ่นเหล็กขึ้นเท่ากับ (36-32) นิ้ว x 0.01 นิ้ว = .04 นิ้ว ซึ่งนำเอาไปเพิ่มจากน้ำหนักเดิมแต่โดยที่ระยะกงยาวขึ้นจำนวนกงที่ต้องใช้ก็น้อยลง น้ำหนักกงที่ลดลงไปนี้มากกว่าที่เพิ่มให้กับแผ่นเหล็ก ฉะนั้นจึงได้กำไรในการใช้เหล็กน้อยลงไป

ถ้ากงนั้นให้หมุดย้ำ การวางกงทางภาคหัวต้องหันปลายปีกเหล็กฉากไปทางท้าย (Toe Aft) และการวางกงทางภาคท้ายต้องหันปลายปีกเหล็กฉากไปทางหัว (Toe Foreward) ทั้งนี้เพื่อมิให้การทำงานลำบาก เพราะปลายปีกจะตีบลง ๆ ทางตอนหัวและท้าย ถ้าไม่ทำดังกล่าว การย้ำหมุดลำบากและไม่แน่น แต่ในเรือแล่นประสานนั้น การหันปีกเหล็กฉากไปทางใดไม่สำคัญเพราะระยะในการประสานขาเหล็กฉากเข้ากับตัวเรือนั้นเพียงพอ

2. กงทางยาว (longitudinal Frames or Longitudinals)

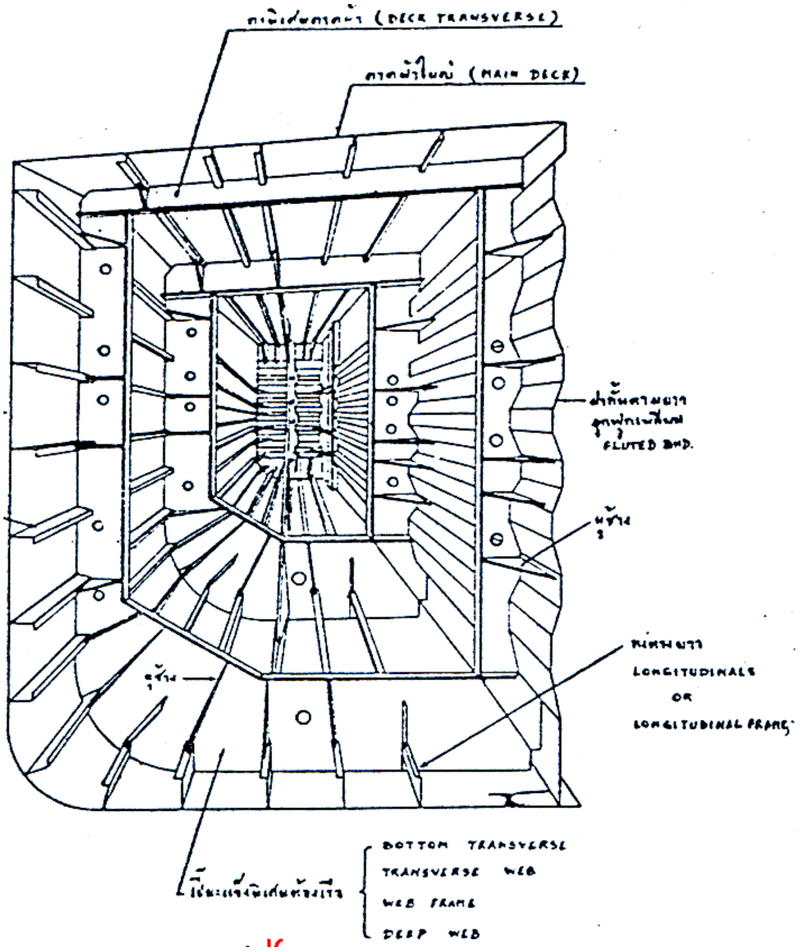
เรือที่ต่อขึ้นโดยใช้กงทางยาวนั้น ระยะกงห่างกันประมาณ 30 ถึง 60 นิ้ว กงทางยาวถูก ค้ำจุนให้แข็งแรงขึ้นโดยเปี๊ยะแข็งพิเศษ ซึ่งมีระยะห่างกัน 10 ฟุต ถึง 16 ฟุต

รูปที่ 17 เป็นแบบเรือที่ต่อกงทางยาว ชื่อแบบอิชเชอร์วูด (Isherwood Type) ซึ่งเป็นแบบจดลิขสิทธิ์โดยนักต่อเรือชาวอังกฤษชื่อเสอร์ โจเซฟ อิสเชอร์วูด (Sir Joseph Isherwood) เป็นแบบที่ไม่ใช้หูช้าง คือหูช้างที่ปลายของกงทางยาวไม่มี ซึ่งในการนี้ต้องทำให้แผ่นเหล็กในบริเวณนี้หนาผิดปกติ

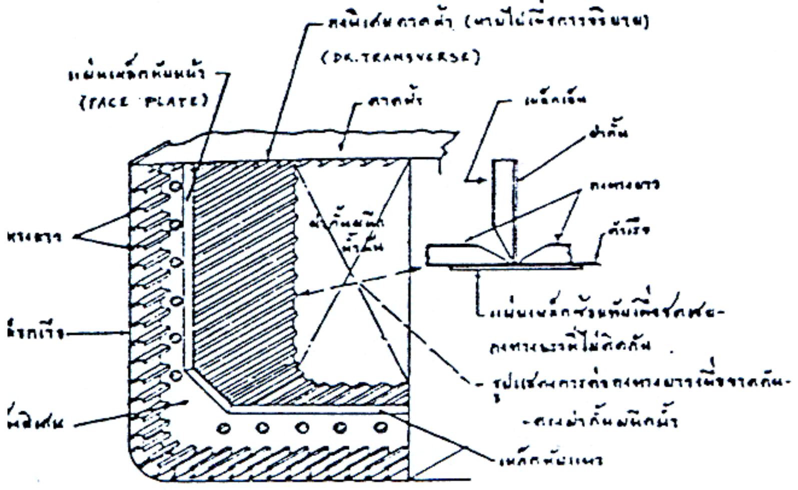
การต่อเรือโดยกงทางยาวนี้ช่วยให้เรือมีกำลังแข็งแรงแต่เปลืองเหล็กน้อย แต่เปี๊ยะแข็งพิเศษที่ค้ำจุนกงทางยาวนั้นสูงเกะกะและทำให้สินค้าเสียหายถ้านำเรือไปใช้บรรทุกสินค้า ที่ยกสินค้าขึ้นลงทางปากระวาง แต่เรือต่อโดยกงทางยาวนี้เหมาะที่จะใช้บรรทุกน้ำจืด , น้ำมัน ซึ่งการจ่ายน้ำมันนั้นดูดจากท้องเรือ หรือบางทีก็ใช้บรรทุกถ่านหิน และแร่ก็ได้ ระยะระหว่างฝากั้นผนึกน้ำหนึ่ง ๆ มีระยะยาวประมาณเท่ากับความลึกจากดาดฟ้าเรือถึงท้องเรือลำนั้นหรือประมาณ 35 ถึง 40 ฟุต

3. หน้าตัดกงแบบต่าง ๆ

ในเรือขนาดเล็กและต่อกงทางขวาง แบบย้ำหมุดมักใช้เหล็กฉากธรรมดา เหล็กฉากเหล่านี้นำมาผายปีกให้มากกว่า 90 ดีกรี แล้วนำปีกข้างหนึ่งย้ำเข้ากับแผ่นเหล็กตัวเรือ ส่วนอีกปีกหนึ่งนั้นผายจนได้แนวตั้งฉากกับเส้นศูนย์กลางเรือตามยาว ดูรูปที่ 18 การทำตามที่กล่าวมาไม่สู้จะดีถ้าเป็นเรือขนาดใหญ่ขึ้น เพราะแนวแกนกลางชิดกับเปลือกเรือมาก และตรงปลายปีกเหล็กฉากไม่มีเนื้อโลหะเพียงพอ จึงทำให้ไม่แข็งแรง ฉะนั้นถ้าเป็นเรือขนาดใหญ่ จึงใช้กงปีกกลับมาย้ำติดเข้ากับปีกเหล็กฉากอีก ดังรูปที่ 20

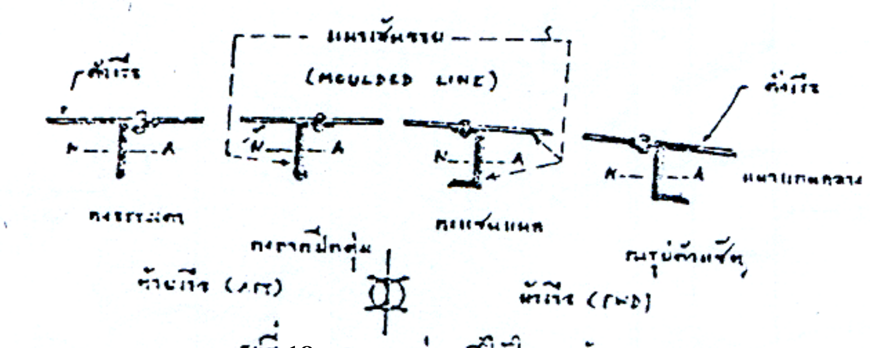


รูปที่ 16

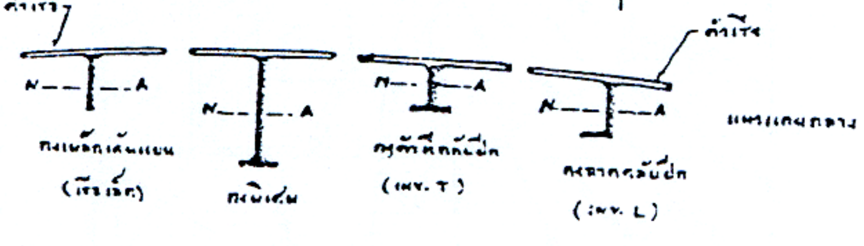


รูปที่ 17 แสดงการต่อเรือกงทางยาว ไม่มีหูช้าง

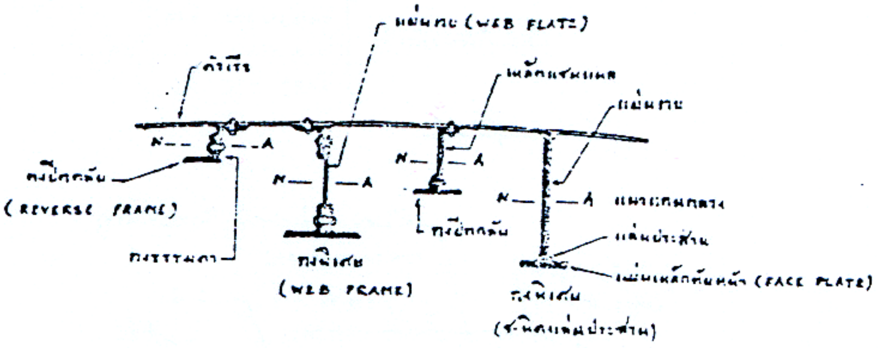
การทำเช่นนี้เท่ากับเพิ่มเนื้อโลหะให้แก่ปลายเหล็กฉากเดิม แนวแกนกลางขยับห่างออกมาจากเปลือกเรือมากขึ้น จึงทำให้กงเดิมแข็งแรงขึ้น นอกจากเหล็กฉากธรรมดาแล้วยังสามารถใช้เหล็กแชนเนล และเหล็กฉากปีกตุ่มทำกงได้เหมือนกัน คือแข็งแรงดีเท่ากันและยังลดงานหมุดย้ำอีกด้วย



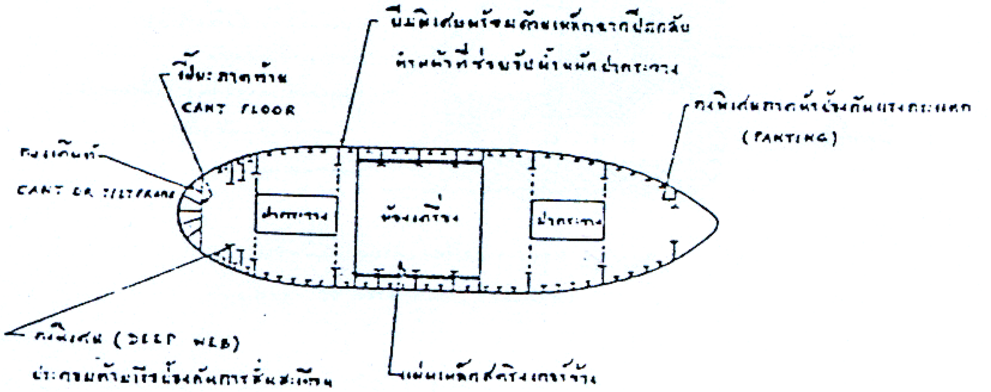
รูปที่ **18** กงแบบต่างๆ ที่ใช้ในการย้ำหมุด



รูปที่ **19** กงแบบต่างๆ ที่ใช้ในการเชื่อมประสาน



รูปที่ 20 กงพิเศษ (BUILT-UP FRAME) ชนิดย้ำหมุดและประสาน



รูปที่ 21 แสดงตำแหน่งที่ใช้กงพิเศษ (DEEP WEB FRAME)

ในงานหมุดย้ำ เหล็กฉากปีกตุ่มกับเหล็กแชนเนลเป็นรูปหน้าตัดที่เราใช้กันทั่วไปในการทำกงเรือ เหล็กแชนเนลนั้นใช้ทำกงสำคัญ ๆ ใหญ่ ๆ ส่วนเหล็กฉากปีกตุ่มนั้นใช้ทำกง ในบริเวณถังน้ำอับเฉาหัวท้าย เมื่อเปรียบเทียบเหล็กฉากปีกตุ่มกับเหล็กแชนเนลที่มีความลึกเท่ากัน เหล็กแชนเนล แข็งแรงกว่าเหล็กฉากปีกตุ่ม เหล็กฉากปีกตุ่มใช้ทำกงในบริเวณถังอับเฉาหัวท้าย ก็เนื่องด้วยเมื่อเวลาใช้สองอันโดยเอาปีกต่อกันเพื่อให้ได้ความลึกหรือกำลังที่ต้องการแล้ว ไม่เป็นสิ่งสำคัญในการลดจำนวน สินค้าใด เรือต่างประเทศที่ไม่ได้ต่อในสหรัฐอเมริกา มักชอบใช้เหล็กฉากปีกตุ่มทำกงทั่ว ๆ ไปด้วย ในงานย้ำหมุด

กงรูปหน้าตัดต่าง ๆ ที่กล่าวมาแล้วนั้นได้หมดสมัยไปเนื่องด้วยวิทยาการแล่นประสานได้เข้ามาแทนที่ ตามที่แสดงในรูปที่ 19 นั้น เป็นการใช้กงฉากหน้าตัดต่าง ๆ และแล่นประสานเข้ากับตัวเรือ

การทำกงเรือโดยแล่นประสานนี้เป็นวิธีที่ทำได้ง่าย แข็งแรงมากน้ำหนักน้อย และทำให้ราคาในการต่อเรือถูก และดูกระทัดรัดเหมาะเจาะ

4. เปี๊ยะแข็งพิเศษ (Bottom Transverse)

เปี๊ยะแข็งพิเศษนี้เทอะทะลึก เป็นกงที่สร้างขึ้นโดยใช้แผ่นเหล็กหลาย ๆ แผ่นมาประกอบ กันขึ้น ใช้ติดเข้ากับตัวเรือเพิ่มความแข็งแรงให้ ณ ตำแหน่งที่เกิดแรงเค้นมากผิดปกติ นอกจากนี้เปี๊ยะแข็งพิเศษยังช่วยค้ำจุนให้สตริงเกอร์ข้างเรือแข็งแรงขึ้นอีก สตริงเกอร์ข้างนี้ก็ทำหน้าที่ช่วยให้กงทางขวางแข็งแรงขึ้นด้วยในตัว ส่วนใหญ่ของเปี๊ยะแข็งพิเศษนี้ทำด้วยเหล็กแผ่นธรรมดาเอามาทำเป็นเวบลึก แล้วเจาะรูให้เบาตามแนวแกนกลาง ถ้าในเรือหมุนย้ำจะติดเวบลึกนี้เข้ากับตัวเรือก็ใช้เหล็กฉากธรรมดานี้ติดเข้ากับตัวเรือ แล้วนำแผ่นเหล็กธรรมดาย้ำเป็นเวบลึก แล้วนำเหล็กฉากอีก 2 อันหรืออันเดียวก็ได้มาย้ำติดกับเวบก็จะได้กงพิเศษที่แข็งแรงดังรูปที่ 20 ในรูปนี้ยังแสดงวิธีทำไว้อีกหลายวิธี ถ้าเป็นวิธีแล่นประสานก็นำเวบลึกนี้แล่นติดเข้ากับ ตัวเรือ แล้วเอาเหล็กเส้นทับหน้าแล่นติดด้านใน

เปี๊ยะแข็งพิเศษนี้ถ้าอยู่ที่ท้องเรือเรียกเปี๊ยะแข็งพิเศษอย่างเดิม ถ้าอยู่ที่ข้างเรือ เรียกใหม่อีกชื่อหนึ่งว่า กงพิเศษหรือเวบลึก (Deep Web Frame) ทำหน้าที่เป็นเข็มขัดรัดตัวเรือให้แข็งแรง สตริงเกอร์ข้างติดภายหลังกงพิเศษและติดเหนือกงทางขวาง

ขนาดและระยะห่างของเปี๊ยะแข็งพิเศษนี้ขึ้นอยู่กับระยะช่วงรองรับกับความลึกภายใต้ดาดฟ้าต่ำสุด กงพิเศษนี้ติดทุก ๆ กงทางขวางที่ 6 ที่ใดมีกงพิเศษที่นั่นไม่กงทางขวาง บางทีกงพิเศษนี้ติดที่หัวท้ายของปากระวางบรรทุกสินค้า และบีมที่นี้ต้องใช้บีมพิเศษใต้ปากระวาง (Deep Hatch End Beam) แต่กงพิเศษตรงหัวท้ายปากระวางนี้ได้หมดสมัยไป เพราะเราใช้กงธรรมดาแล้วทำการเสริมกำลังบ้าง เล็กน้อยก็มีกำลังดี และไม่เป็นการเกะกะต้องการบรรทุกสินค้าด้วย

กงพิเศษนี้ทำหน้าที่รับอาการสั่นสะเทือนอันเกิดจากใบจักรและเครื่อง ฉะนั้นทางท้ายเรือ จึงติดกงพิเศษดังกล่าว จะทำให้เรือมีคุณสมบัติสูงขึ้น และกงพิเศษนี้ก็รับกำลังอันเกิดจากการกระแทกของน้ำทางท้ายและหัวเรือด้วย

กงพิเศษนี้นำมาติดในบริเวณห้องเครื่องจักรและห้องหม้อน้ำด้วย เพื่อรับแผ่นเหล็กการที่ติดในที่นี้เป็นการจำเป็นอย่างยิ่งเพราะกำลังของเรือได้หายไปเนื่องจากดาดฟ้าในบริเวณดังกล่าวไม่มี และช่องว่างเหนือห้องเครื่องห้องหม้อน้ำกว้างมาก จึงจำเป็นต้องหาวิธีเสริมกำลังชดเชยดังกล่าวแล้ว ดูรูปที่ 21

6.4 แผ่นเหล็กตัวเรือ

แผ่นเหล็กตัวเรือเป็นแผ่นเหล็กที่กันน้ำหรือผนึกน้ำ หุ้มตัวเรือภายนอกอยู่ กงเรือทำหน้าที่ช่วยให้แผ่นเหล็กตัวเรือนี้แข็งแรงขึ้น แผ่นเหล็กตัวเรือทั้งหมดรวมกับแผ่นเหล็กดาดฟ้าและกงทางขวางในเรือสินค้านั้นจะทำหน้าที่รับแรงเค้นได้ถึง 90 เปอร์เซ็นต์ของแรงเค้นทั้งหมด แผ่นเหล็กตัวเรือในเรือบรรทุกน้ำมันและเรือรบ โดยมากถูกค้ำจุนอยู่ด้วยกงทางยาว ระบบทางยาวนี้รับแรงเค้นบางส่วนที่เกิดขึ้นและแรงเค้นส่วนที่เหลือแผ่นเหล็กตัวเรือทำหน้าที่รับไว้

เรือไม้ในสมัยโบราณนั้นกงถี่กันมาก และเปลือกเรือหนา ครั้นเมื่อนำเหล็กเข้ามาแทนไม้สามารถทำให้ช่วงกงห่างกันและแผ่นเหล็กบางลงทำให้เรือเบา บรรทุกสินค้าได้มาก

ในเรือสินค้าแผ่นเหล็กตัวเรือนั้นหนากว่าแผ่นเหล็กของเรือรบ ที่มีขนาดเท่ากัน (ยกเว้น ในที่บางแห่งที่ทำเกราะ) ทั้งนี้เนื่องจากเรือสินค้านั้นทำขึ้นไม่สู้ประณีต การระวังรักษาไม่สู้จะดีเหมือนอย่างเรือรบ เรือสินค้านั้นเวลาออกแบบ ถูกคิดว่าเป็นพาหนะทางน้ำที่ทำงานหนัก และต้องออกแบบอย่างดีตลอดทั้งอู่ที่จะซ่อมทำก็มีน้อยและอยู่ห่างไกลกัน ถ้าผู้ศึกษาทราบความคิดนี้ดีแล้ว ก็จะเห็นว่าทำไมเรือสินค้าขนาดปานกลางถึงมีรูปร่างเทอะอะในโครงสร้างบางส่วน

แผ่นเหล็กตัวเรือประกอบด้วยแผ่นเหล็กหลายแผ่น ส่วนมากเป็นแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าและเรียงตามยาวของเรือ เมื่อไม่พอก็ใช้ต่อโดยมีความกว้างเท่าเทียมกัน เมื่อสุดหัวท้ายแล้วก็เรียงอีกแผ่นหนึ่งต่อไป แผ่นเหล็กในแนวยาวตลอดลำนั้นเรียกสเตรค (Strake or Course)

ความหนาของแผ่นเหล็กเปลี่ยนแปลงไปตามความยาวและตำแหน่งต่าง ๆ ภายในเรือ เช่น แผ่นเหล็กในบริเวณหัวเรือสุด ต้องมีความหนาเป็นพิเศษ เพราะได้รับการกระแทกน้ำอย่างแรง เป็นต้น ในสมัยนี้แผ่นเหล็กบริเวณเสมอหัวเรือมักเรียงตามตั้ง เพื่อให้สมอถูกลากขึ้น อย่างเรียบร้อยไม่สะดุดตามตะเข็บเหมือนก่อน ความหนาของแผ่นเหล็กตัวเรือนี้มีความหนาตั้งแต่ ¼ นิ้ว ถึง 1 ¼ นิ้ว

1. แผ่นเหล็กตัวเรือแบบต่าง ๆ (Shell Plating)

แผ่นเหล็กตัวเรือมีอยู่ 4 แบบด้วยกัน คือเหล็กเส้น , เหล็กเรียบ , เหล็กโรล หรือเหล็กงอทางเดียว และเหล็กเฟอเนช หรือเหล็กงอสองทาง ซึ่งเป็นการเคราะห์ดีอย่างยิ่งที่แผ่นเหล็กตัวเรือส่วนมากเป็นแบบเหล็กเรียบไม่ต้องดัดกันมาก แผ่นเหล็กโรลนั้นงอทางเดียวเท่านั้น ใช้ในตอนงอโค้งของท้องเรือที่กลางลำ หรือที่เรียกว่า บิลช์ การโรลนี้อาจดัดเย็นได้ โดยไม่ต้องเผาให้ร้อนแดง แผ่นเหล็กเฟอเนชนั้นโค้งสองทาง การดัดต้องใช้ความร้อนเผา แล้วใช้ฆ้อนตีขึ้นกันรูปตามที่ต้องการ ต้องมีการเตรียมการมีเหล็กแท่นแบบตามรูปที่ต้องการ เมื่อเผาเหล็กแผ่นแบนเรียบที่ต้องการดัดวางลง แล้วใช้ถ่านสุมจนร้อนแดง แล้วใช้แท่งเหล็กขนาดใหญ่ (Ingot) กดลงโดยการยกของรอกแม่แรง และฆ้อนตีบ้าง

จนได้รูป แผ่นเหล็กเฟอเนชนี้ใช้บริเวณทวนหัวและทวนท้ายเรือ ค่าทำแพง พยายามหลีกเลี่ยงอย่าใช้ให้มากที่สุด

1.1 การกะแผ่นเหล็ก เนื่องจากระยะวัดโดยรอบจากปากเรือกราบขวาวนลงท้องเรือถึงปากเรือกราบซ้าย ซึ่งเรียกว่า เกิท (Girth) ที่กลางลำมีระยะยาวกว่าเกินที่หัวและท้ายเรือ จึงเห็นว่าถ้าเราจะกะแผ่นเหล็กให้เท่ากันกับที่กลางลำแล้วให้ขนานกันไปถึงหัวท้าย แผ่นเหล็กก็จะไปแออัดกัน ฉะนั้นจึงต้องตัดแผ่นเหล็กบางแผ่นออกเสียบ้าง แผ่นใดที่ยาวตลอดจากหัวถึงท้าย เรียกแผ่นตลอด แผ่นใดที่ ถูกตัดไม่ยาวถึงหัวท้าย เรียกแผ่นตัด ปลายแผ่นเหล็กถูกตัดไปนั้นใส่แผ่นควบ แผ่นควบนี้มีความกว้างเท่ากับความกว้างของแผ่นตลอดและแผ่นตัดรวมกัน ดูรูปที่ 22

ยังมีแผ่นเหล็กอื่น ๆ มีชื่อต่าง ๆ กันคือ แผ่นหุ้มท้องทวนท้าย แผ่นเหล็กบอสส์ และ แผ่นเหล็กออกเตอร์ แผ่นเหล็กบอสส์นั้น เป็นแผ่นเหล็กเฟอเนชชนิดหนึ่งใช้ตรงบริเวณส่วนนูนของ ทวนท้ายตรงที่เพลาใบจักรโผล่ออกมาจากตัวเรือ ดูรูปที่ 23 แผ่นออคเตอร์ก็เป็นแผ่นเหล็กเฟอเนช ชนิดหนึ่งเหมือนกัน แต่เดี๋ยวนี้หมดสมัยเสียแล้ว แผ่นเหล็กหุ้มท้องทวนท้ายนั้นทำได้จากการดัดของเครื่องจักรในโรงงาน

ตะเข็บทางขวางที่เกิดขึ้นเนื่องจากการต่อของแผ่นเหล็กในสเตรคหนึ่งนั้น เรียกตะเข็บขวาง ส่วนรอยต่อทางยาวของสเตรคต่อสเตรค เรียกตะเข็บยาว ในการต่อเรือโดยการย้ำหมุดนั้นต้องมีการเกยของแผ่นเหล็ก ขอบแผ่นเหล็กที่มองเห็นได้ เรียกเส้นทัศนวิสัย ส่วนขอบที่มองไมให็นเรียกเส้นลับตา (Moulded Edge , Sheet Lane or Landing Edge) ดูรูปที่ 22

1.2 การเรียกชื่อแผ่นเหล็ก

แผ่นเหล็กตัวเรือที่มีชื่อเรียกนั้นมีอยู่ 4 สเตรค คือ

1. แผ่นกระดูกงู Flat Plate Keel Strake
2. แผ่นกาบอร์ด Garboard Strake
3. แผ่นบิลช์ Bilge Strake
4. แผ่นเชียร์ Sheer Strake

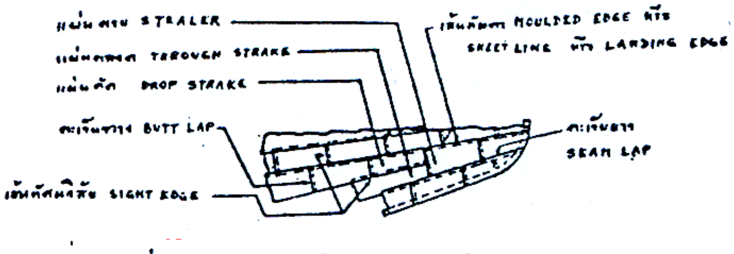
แผ่นเหล็กที่เหล็กใช้อักษรแทน เริ่มอักษร A ที่แผ่นกาบอร์ด ขึ้นไปทางปากเรือ อักษร I และอักษร O มักไม่ใช่เพราะจะซ้ำกันเลขหนึ่งกับเลขศูนย์ ดูรูปที่ 24 ส่วนแผ่นกระดูกงูนั้นใช้อักษร K

1.3 การเสริมกำลังรอยเจาะในแผ่นเหล็ก มีกฎของสมาคมจัดชั้นเรือบังคับแก่เรือที่ขึ้นกับสมาคมนี้ คือสมาคมได้ให้กฎการหาแผ่นเหล็กตัวเรือคอนกลางลำ หัวท้าย แผ่นเชียร์ และแผ่นเหล็กท้องเรือตอนหัว (Bottom Forward) และยังบังคับด้วยว่าถ้ามีช่องสำหรับเอาสินค้าออกข้างเรือ (Port)

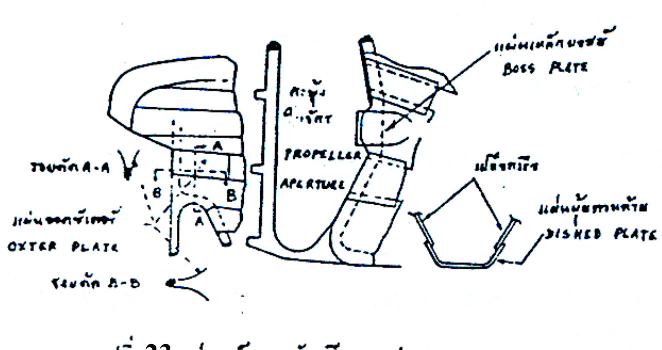
หรือช่องอื่น ๆ ก็ดีต้องทำการเสริมกำลังให้ช่องนั้นแข็งแรง โดยการใช้แผ่นเสริมขอบ (Doubing Plate or Inserted Plate) คือ จะใช้แผ่นเหล็กอีกแผ่นเหล็กอีกแผ่นหนึ่งหนาเท่าแผ่นเดิมทางลงแล้วประสานโดยรอบก็ได้ หรือเจาะบริเวณนั้นออกแล้วเอาแผ่นเหล็กที่เป็นสองเท่าของแผ่นเดิมใส่แล้วแล่นรอบก็ได้ การเสริมกำลังรอยเจาะนี้ก็เพื่อลดการเข้มข้นของแรงเค้นนั่นเอง ดูรูปที่ 21

ขอให้พิจารณาแผ่นเหล็กตัวเรือแผ่นหนึ่งตามรูปที่ 68 สมมติว่าแผ่นเหล็กนั้นมีความหนา ½ นิ้ว กว้าง 48 นิ้ว ฉะนั้นรอยหน้าตัดมีเนื้อที่เท่ากับ ½ นิ้ว x 48 นิ้ว = 24 ตร.นิ้ว สมมตุว่าแผ่นเหล็กนี้ทานกำลังได้ 30 ตัน ต่อ ตร.นิ้ว ฉะนั้นแผ่นเหล็กนี้จะถึงแรงประลัยเมื่อ 24 ตร.นิ้ว x 30 ตัน ต่อ ตร.นิ้ว = 720 ตัน ถ้าใช้ส่วนปลอดภัยเท่ากับ 4 ตามที่กล่าวมาแต่ในบทที่ 1 ก็จะได้แรงใช้คำนวณเท่ากับ $\frac{720}{4} = 180$ ตัน

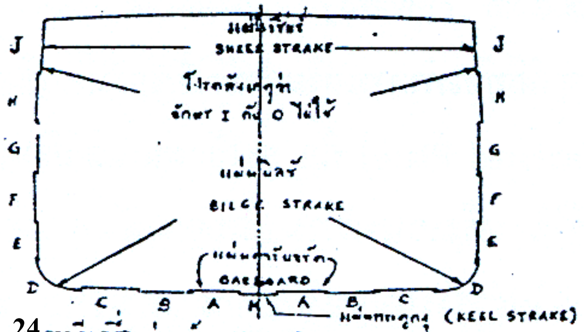
ครั้นเมื่อเจาะช่องกระจกแสงสว่างขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 24 นิ้วลงในแผ่นเหล็กตัวเรือนั้นเนื้อที่หน้าตัดจะหายไปครึ่งหนึ่ง แผ่นเหล็กนี้จะทานกำลังได้เพียง $\frac{180}{2}$ ตัน = 90 ตัน เท่านั้น เพื่อที่จะชดเชยกำลังที่สูญเสียไป เราใช้หลักเสริมขอบ ดูรูปที่ 69 ขนาดหนา ½ นิ้ว ทาบให้ขอบแผ่นเสริม



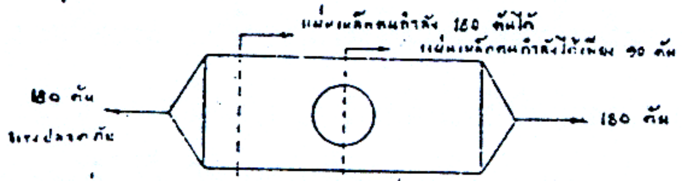
รูปที่ 22 วิธีการจัดแผ่นเหล็กตรงหัวท้ายของเรือ LAYOUT OF SHELL STRAKE



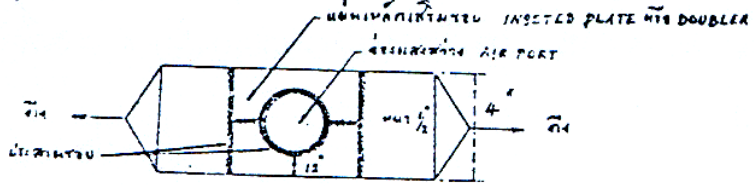
รูปที่ 23 แผ่นเหล็กตรงท้ายเรือแบบเก่า



รูปที่ 24 การเรียกชื่อแผ่นเหล็ก IDENTIFYING THE SHELL STRAKE



รูปที่ 25 แสดงการเสียกำลังของแผ่นเหล็กเนื่องจากการเจาะช่องแสงสว่าง



รูปที่ 26 การเสริมกำลังช่องเจาะต่างๆ (DOUBLERS)

ห่างจากริมช่องแสงสว่างเท่ากับ 12 นิ้ว ซึ่งจะทำการเพิ่มเนื้อที่หน้าตัดให้เท่ากับ (0.5 นิ้ว x 12 นิ้ว) + (0.5 นิ้ว x นิ้ว) = 12 ตร.นิ้ว หรือเท่ากับส่วนที่เจาะออกไป ฉะนั้นเมื่อเสริมกำลังแล้วแผ่นเหล็กจึงมีแรงใช้คำนวณ 180 ตัน ตามเดิม

กฎของสมาคมจัดชั้นเรือได้บ่งไว้ว่า ช่องที่เจาะไว้ในเปลือกเรือที่ใช้หมุดย้ำ ซึ่งถ้าลดเนื้อ ที่หน้าตัดลงมากกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ จะต้องใช้เหล็กเสริมขอบให้มีเนื้อที่หน้าตัด กลับคืนมาให้ได้ 84 เปอร์เซ็นต์ ถ้าในเรือแล่นประสาน ต้องนำกลับคืนมาให้ได้ 100 เปอร์เซ็นต์

เหตุที่นำเนื้อที่กลับมาเพียง 80 เปอร์เซ็นต์ ให้เรือหมุดย้ำนั้นก็เนื่องจากไม่สามารถจะนำกลับมาได้ 100 เปอร์เซ็นต์ เพราะ 20 เปอร์เซ็นต์ที่เสียไปแล้วก็เนื่องด้วยความแข็งแรงของแผ่นเหล็กช้ำไปในตอนกระแทกเจาะรูนั่นเอง

แผ่นเหล็กตัวเรือแถวกลางลำมักมีความหนาเท่า ๆ คน และจะค่อย ๆ ลดความหนาลงไปทางหัวท้ายเรือ เพราะน้ำหนักบรรทุกและโมเมนต์ตัดน้อย ณ บริเวณนี้ การลดขนาดความหนานั้นประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์

1.4 แผ่นเชียร์ แผ่นเชียร์เป็นแผ่นเหล็กตัวเรือเหมือนกัน มีหน้าที่ประดุจทำให้ปีกบนของอะเส (ตัวเรือ) มีความแข็งแรงขึ้น แผ่นเชียร์มักทำให้หนาเป็นพิเศษ เท่าที่สังเกตมา ถ้าทำให้แผ่นเชียร์หนามากแล้ว ควรทำให้แผ่นตัวเรือที่อยู่ถัดต่ำลงมาหนึ่งหรือสองแผ่นนั้นมีความหนาลดหลั่นลงมาด้วย เพราะเท่าที่พบนั้นถึงแม้แผ่นเชียร์จะไม่ชำรุดเพราะหนา แต่แผ่นเหล็กที่อยู่ถัดต่ำลงไปมักชำรุดเสมอ เรือรบบางลำใช้เหล็กสตีลชนิดมีกำลังดึงสูงทำแผ่นเชียร์ เพื่อทำให้น้ำหนักเรือเบาลง

ในเรือหมุดย้ำนั้นการเรียงแผ่นเหล็กต้องเรียงให้รอยตะเข็บขวาง ของสเตรดติดกันสลับกันอย่างน้อยต้องห่างกัน 2 ช่องกง รอยตะเข็บขวางของสเตรดติดกันจะอยู่ในช่องกงอันเดียวกันไม่ได้ แต่ถ้าจะทำให้เป็นอย่างนั้นต้องมีสเตรดอื่นมาขั้นอย่างน้อย 5 สเตรค ถ้ารอยตะเข็บขวางจัดได้ตามที่กล่าวแล้วความแข็งแรงของรอยหมุดย้ำจะแข็งแรง 80 เปอร์เซ็นต์ ดูรูปที่ 27 แต่ในงานแล่นประสานการจัดรอยตะเข็บให้สลับกันนั้นไม่จำเป็นเลย เพราะการแล่นประสานสามารถทำให้แข็งแรงได้ถึง 100 เปอร์เซ็นต์อยู่แล้ว

2. การประกอบแผ่นเหล็กตัวเรือ

การประกอบแผ่นเหล็กตัวเรือเข้ากับกงเรือนั้นมีวิธีทำได้หลายอย่าง ซึ่งแต่ละวิธีนั้นพยายามที่จะให้ราคาถูก เรือ เอส.เอส.ยูไนเตดสเตท (S.S. United States) นั้น ใช้วิธีการหมุดย้ำตะเข็บตามยาวเป็นระยะครึ่งหนึ่งของความยาวของเรือที่บริเวณกึ่งกลางลำตามยาว และใช้แล่นประสานทางตอนปลายอย่างไรก็ตามวิธีการประกอบแผ่นเหล็กที่จะกล่าวต่อไปนี้บางอู่ก็ยังคงใช้อยู่

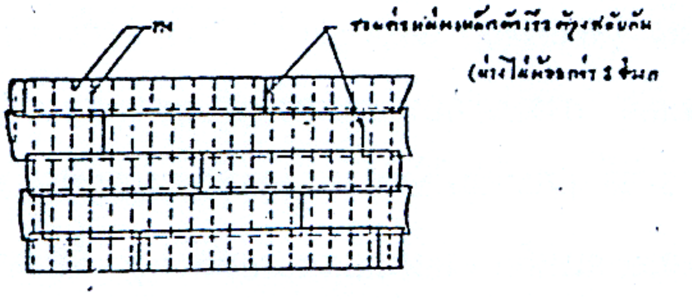
2.1 การประกอบแผ่นเหล็กแบบสลับ (In and out System) รูปที่ 28 (A) การต่อแบบนี้แผ่นเหล็กแผ่นในติดกับกง ส่วนแผ่นนอกนั้นวางทาบอยู่บนแผ่นใน โดยไม่มีการหยักขอบจึงเกิดช่องว่างขึ้นระหว่างหลังกงกับด้านในของแผ่นเหล็กแผ่นนอก ช่องว่างนี้บรรจุแผ่นรอง (Liner) ซึ่งความกว้างไม่น้อยกว่า 3 ½ เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางหมุดย้ำ ส่วนความหนานั้นหนาเท่ากับแผ่นเหล็กแผ่นใน

2.2 การประกอบแผ่นเหล็กแบบเกล็ด (Clinker System) ดูรูปที่ 28 (B) การประกอบแผ่นเหล็กตัวเรือแบบเกล็ดนี้คล้ายกับการทำฝาบ้าน เป็นแบบที่มีราคาแพงกว่าต่อแบบสลับ เพราะต้องใช้แผ่นรองเป็นจำนวนสองเท่าตลอดทั้งต้องนำแผ่นรองมาตีให้เรียว (Taper Liner) อีกประการหนึ่ง ความยาวของหมุดย้ำที่จะนำมาใช้ก็ไม่เท่ากันอีกด้วย แต่อย่างไรก็ดี อาจใช้ทำให้กับแผ่นสุดท้ายของต่อแบบสลับ โดยที่แผ่นในขาดไปแผ่นหนึ่ง

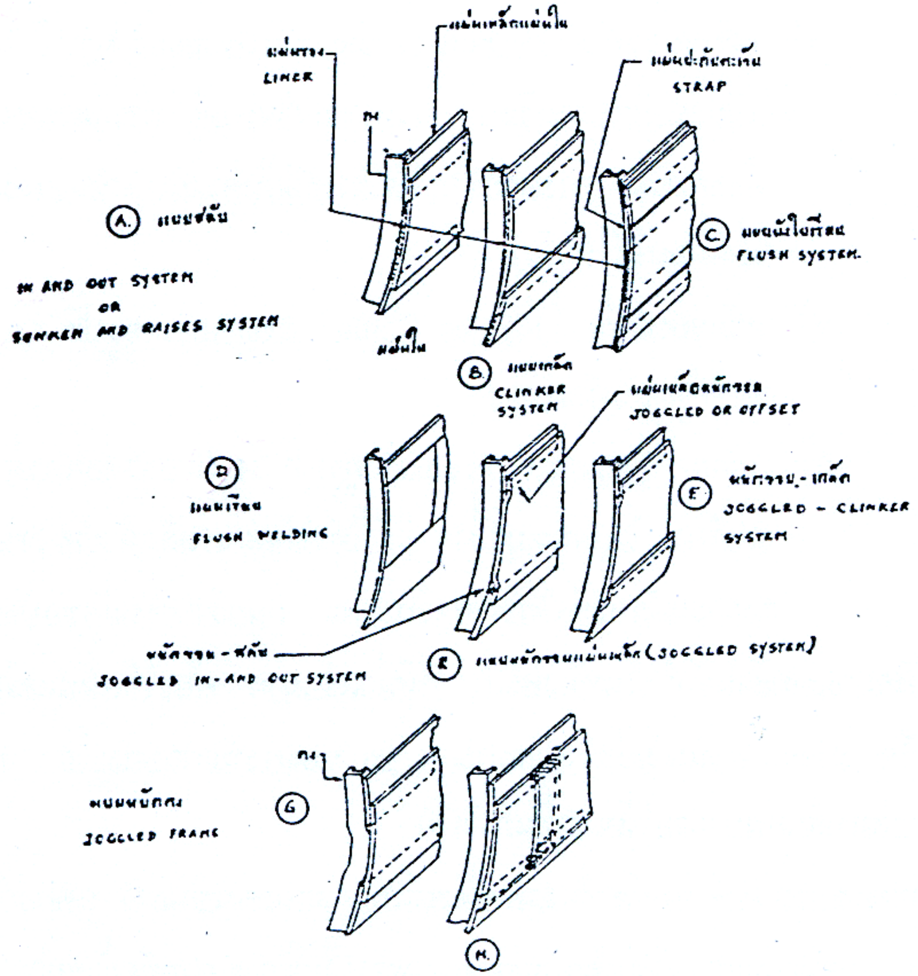
2.3 การประกอบแผ่นเหล็กแบบบังใบเรียบ (Flush System) ดูรูปที่ 28 (C) การทำแบบนี้ใช้กับเรือใบ เพื่อต้องการให้ตัวเรือเรียบสวยงาม แม้แต่ในเรือใบ การต่อบังใบเรียบนี้ก็ใช้เฉพาะส่วนเหนือ

แนวน้ำ เป็นแบบที่มีราคาแพง เพราะต้องใช้ทั้งแผ่นรองและแผ่นปะกับตะเข็บ ตะเข็บนี้ยาวติดต่อกัน แผ่นรองใส่อยู่ระหว่างกลางเหล็กปะกับ การทำที่จะให้ขอบเรียบชิดสนิทกันนั้นเป็นงานประณีตเสียเวลามาก วิธีนี้จึงหมดสมัยไป

2.4การประกอบแผ่นเหล็กแบบเรียบ (Flush Weld System) ดูรูปที่ 28 (D) มีเรือ มากมายหลายลำที่ต่อโดยใช้หมุดย้ำตามแนวตะเข็บตามยาว ส่วนตะเข็บขวางใช้แล่นประสานและมีอีกมาก ที่ใช้การแล่นประสานตามแนวตะเข็บทุกแห่ง ตลอดทั้งแผ่นเหล็กตัวเรือกับกงก็แล่นติดกันวิธีนี้ทำให้ แผ่นเหล็กตัวเรือเรียบ ไม่มีการใช้แผ่นรองเหล็กปะกับตะเข็บ และการหยัดขอบแผ่นเหล็กเลย ถ้า แผ่นเหล็กตัวเรือบางและแล่นเข้ากับกงจะเกิดเป็นแนวรอยประสานออกมาให้เห็นภายนอก อีกประการหนึ่งการแล่นปะสานทั้งหมดนั้นเมื่อแผ่นเหล็กเย็นตัวลงจะเกิดการหดตัวรอบแผ่นเหล็ก อาจทำให้รอยแล่นแตกได้



รูปที่ 27 หลักการวางแผ่นเหล็กตัวเรือ



รูปที่ 28 แสดงแบบการประกอบแผ่นเหล็กตัวเรือ

แต่ก็แก้ปัญหาตกด้วยการลำดับการประสานหรือแล่นประสานตามลำดับก่อนหลัง (Welding Sequence) วิธีนี้จึงใช้กันมาก

2.5การประกอบแผ่นเหล็กแบบหยักขอบ (Joggled Plate) ดูรูปที่ 28 (E) (F) (G) มีวิธีการทำได้ 3 วิธี และนิยมใช้กันในอู่ต่อเรือ นอกประเทศอเมริกา การหยักขอบทำให้ไม่ต้องใช้แผ่นรอง และแผ่นเหล็กทุกแผ่นสัมผัสกับหลังกง ไม่ว่าจะเป็นการหยักขอบข้างเดียวหรือสองข้างหรือหยักกง (Joggled Frame) ก็ใช้กันมาก แผ่นเหล็กถูกหยักขอบเช่นนี้จะทำให้กำลังทางยาวของตัวเรือเพิ่มขึ้น

ก) หยักขอบสลับ (Joggled in and out System) ดูรูปที่ 28 (E) แผ่นเหล็กแผ่นในเป็นแผ่นเรียบ ๆ วางทาบหลังกงอยู่ ส่วนแผ่นนอกนั้น หยักขอบทั้งสองข้าง การหยักต้องให้ได้พอดีกับความหนาของแผ่นเหล็ก แผ่นในวิธีนี้นิยมใช้ในยุโรป

ข) หยักขอบเกล็ด (Joggled Clinker System) ดูรูปที่ 28 (F) แบบนี้หยักขอบด้านบนด้านเดียว

ค) หยักกง (Joggled Frame) ดูรูปที่ 28 (G) การหยักกงนี้ นิยมใช้กันในอเมริกา ในงานหมุดย้ำ วิธีนี้ทำให้แผ่นเหล็กตัวเรือวางเรียบไปบนหลังกงการหยักกง ทำได้โดยเครื่องจักร ถูกกว่าการหยักขอบแผ่นเหล็ก

เรือที่ออกแบบสำหรับวิ่งในท้องทะเล ที่มีน้ำแข็งมาก ต้องใช้แผ่นเหล็กที่หนามาก ในบริเวณตอนหัวเรือ ยาวจากทวนหัวเข้ามาประมาณ 1/20 ของความยาวของเรือ การทำให้หนานี้อาจหมายถึงเอาแผ่นเหล็กอื่นมาตามให้หนาขึ้นก็ทำได้

ในทัศนะของอู่ซ่อมเรือ เรือที่แล่นแต่ตะเข็บขวางและตะเข็บยาว แต่กงกับแผ่นเหล็กตัวเรือใช้ย้ำหมุดนั้น เวลาซ่อมถูกกว่าเรือที่แล่นหมด เพราะวิธีนี้การเอาหมุดย้ำออก ก็ใช้แก๊สธรรมดาเป่าออกตามธรรมดา แผ่นเหล็กก็หลุดจากกง แต่ถ้าเป็นวิธีแล่นประสานทั้งหมดนั้น ต้องใช้ถากรอยประสาน ซึ่งเป็นงานยากและแพง

6.5 บีมดาดฟ้า (DECK BEAM)

บีมดาดฟ้าทำหน้าที่สำคัญ 3 ประการ คือ

1) ทำหน้าที่เป็นบีมหรือคานรับน้ำหนักบนดาดฟ้า
2) ทำหน้าที่เป็นเหล็กยึดกราบขวา กราบซ้ายของเรือ
3) ทำหน้าที่ประดุจกง ไม่ให้แผ่นเหล็กย่นเมื่อเวลาเรือเกิดบิดตัว อันเกิดจากเวลายิงปืนใหญ่ หรือเกิดจากเวลาเรือเอียงมาก ๆ เช่นในเรือใบเวลาโดนคลื่นลมจัด ๆ มักเอียงมากจนดาดฟ้าส่วนหนึ่งลงไปอยู่ในน้ำ บีมดาดฟ้าจึงทำหน้าที่ประดุจกง

1. หูช้าง (Beam Knee or Beam Bracker)

บีมรับดาดฟ้านั้นถูกยึดติดกับกงเรือโดยหูช้าง หูช้างในเรือห้องเย็นต่าง ๆ และเรือโดยสารนั้นเป็นที่รังเกียจกันว่าทำความเกะกะให้แก่สินค้าและผู้โดยสาร จึงมักไม่ทำหูช้างในเรือดังกล่าว แต่ก็ต้องมีวิธีการยึดปลายบีมให้ติดเข้ากับกงเรืออย่างแข็งแรงเท่า ๆ กับเวลามีหูช้างเหมือนกัน บีมดาดฟ้า ทำหน้าที่ไม่ให้กราบเรือแยกออกจากกัน เมื่อเวลาเรือถูกคลื่นและอยู่ในอาการตกท้องช้าง ส่วนหูช้างนั้นทำการต่อต้านกับแรงอันเกิดจากเวลาเรือโย้ไปทางขวา ซ้าย ซึ่งเรียกว่า แรงเค้นโย้ (Racking Stress) และแรงเค้นบิด (Twising Stress) เกิดเวลาเรือบิดตัว ดูรูปที่ 29 หูช้างนี้มีความลึกเป็น 2 เท่าของ ความลึกของบีมดาดฟ้า

2. หน้าที่ของบีมดาดฟ้า

เป็นหน้าที่ของบีมดาดฟ้าในการรับน้ำหนักต่าง ๆ ที่วางอยู่บนดาดฟ้า แล้วถ่ายลงสู่กงเรือ กงเรือในที่นี้ทำหน้าที่ประดุจเสา และจะถ่ายน้ำหนักนั้นลงสู่ท้องเรือโดยผ่านเปี๊ยะ ในทางกลับกันแรงดันของน้ำที่กระทำอยู่บริเวณท้องเรือนั้น จะถ่ายแรงให้กับเปี๊ยะ กงและบีมรับดาดฟ้า นอกจากนี้มีบีมดาดฟ้ายังรับน้ำหนักของแผ่นเหล็กดาดฟ้า และพื้นทางเดินต่าง ๆ ด้วย

3. หน้าตัดของบีมดาดฟ้า

หน้าตัดของบีมนี้มักใช้เหล็กฉากปีกตุ่ม เหล็กตัวทีตุ่ม และเหล็กแชนเนล เหล็กฉากธรรมดาเหมาะสำหรับเรือขนาดเล็ก ๆ

ถ้าเป็นเรือแล่นประสานก็ใช้เหล็กฉากอินเวิทเตด , เหล็กรูปทีอิเวิทเตท หรือเหล็กแผ่นธรรมดามีเหล็กเส้นทับหน้า และเหล็กรูปตัวที เป็นเหล็กที่เหมาะที่จะใช้ทำบีมที่สุด ใช้ตัดจากไอบีมตรงกึ่งกลางของเวบ การตัดนั้นจะตัดแบบลูกฟูกเหลี่ยมซึ่งจะเรียกว่า เซอเรทเตทก็ได้ การตัดแบบนี้ตัด โดยเครื่องอัตโนมัติ สมมติว่าเรามีเหล็กไอบีมลึกเพียง 18 นิ้ว ถ้าตัดกึ่งกลางธรรมดาก็จะได้รูปตัวที่มีความสูง 9 นิ้วเท่านั้น แต่เราตัดแบบดังกล่าวแล้ว จะได้ความลึกถึง 10 นิ้ว ได้กำไรความลึกขึ้นมาอีก 1 นิ้ว ดูรูปที่ 32

4. ขนาดของบีมดาดฟ้า

ขนาดของบีมนั้นขึ้นอยู่กับช่วงห่างของบีม จำนวนเสาค้ำและอะเสใต้บีม ความหนาของแผ่นเหล็กดาดฟ้า และความสูงของระวาง

บีมในระวางระหว่างดาดฟ้า (Tween – Deck Beam) นั้นทำหน้าที่รับน้ำหนักสินค้า ความแน่นของสินค้านี้ใช้ค่าเฉลี่ยประมาณ 50 ลบ. ฟุต ต่อ 1 ตัน ซึ่งจะบรรจุเต็มระวางชั้นกลาง พอดีนี่เป็นการอธิบายว่าทำไมความสนูงของดาดฟ้าเป็นตัวหาขนาดและช่วงระยะห่างของบีม

บีมนั้นมักติดทุก ๆ กง ภายใต้ดาดฟ้าที่ไม่ปูไม้นั้น เรานิยมติดบีมเพิ่มขึ้นในเมื่อต้องการให้แข็งแรงมากกว่าที่จะเพิ่มความหนาของแผ่นดาดฟ้าขึ้น บีมที่ติดเพิ่มขึ้นนี้ช่วยรับแรงเค้นอันเกิดจากตัวเรือ การติดบีมทุกกงนั้นทำให้สามาถลดความลึกของบีมลงอีกได้ ทำให้สิ่งกีดขวางเหนือศีรษะมีน้อยลงไป

บีมที่วิ่งจากกราบหนึ่งถึงอีกกราบหนึ่ง โดยไม่ขาดตอนเรียกบีมนี้ว่า บีมเต็มความกว้าง (Through Beam) บีมที่วิ่งจากกราบหนึ่งถึงอีกกราบหนึ่งแต่มีปากระวางมากั้นทำให้บีมนั้นต้องขาดเป็นสองตอน บีมนี้เรียกว่า บีมครึ่งความกว้าง (Half Beam)

5. ความนูนและความงอนของดาดฟ้า (Deck Camber And Sheer)

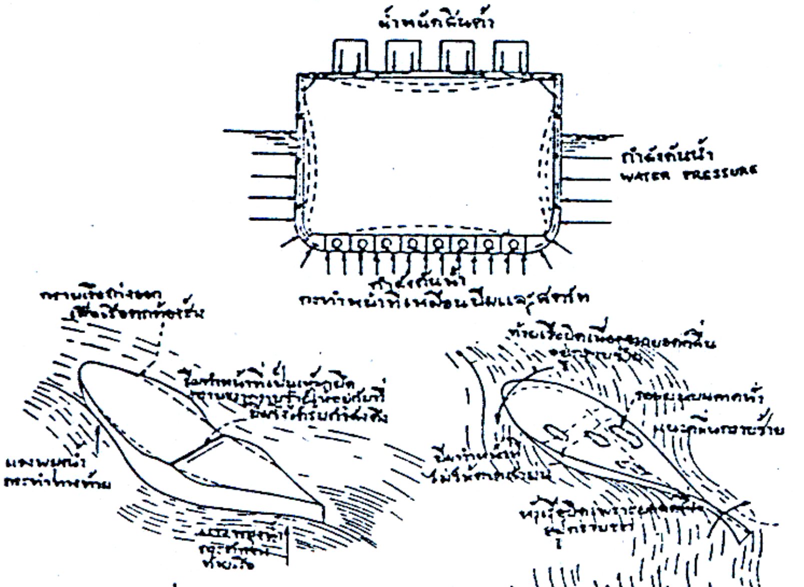
ความนูนของดาดฟ้ามีไว้เพื่อทำให้น้ำที่กระเด็นขึ้นดาดฟ้าไหลลงสู่ข้างเรือ และไหลลงรูน้ำ (Scupper) ออกนอกเรือไปโดยเร็ว ความนูนนี้เรียกอีกชื่อหนึ่งว่า (Reund of Beam) ความนูนวัดเป็นนิ้วต่อฟุตของความกว้างของเรือ ตัวอย่างเช่นดาดฟ้ามีความนูน 12 นิ้ว ต่อความกว้างของเรือ 50 ฟุต หมายความว่าเรือนั้นกว้าง 50 ฟุต และดาดฟ้าที่กึ่งกลางลำ (Deck At Center) สูงกว่าดาดฟ้าที่กราบเรือ (Deck At Side) 12 นิ้ว ดูรูปที่ 33

ความนูนนั้นวัดที่กึ่งกลางลำของเรือ ระยะสูงของความนูนแตกต่างกันออกไปไม่เหมือนกันทุกลำ เรือที่มีความนูนมากจะอนุญาตให้กินน้ำลึกได้มากกว่าเรือที่มีความนูนดาดฟ้าน้อย ซึ่งจะทราบได้เมื่อถึงตอนคำนวณระยะฟรีบอร์ด (Freeboard Regulation) ในบทต่อไป

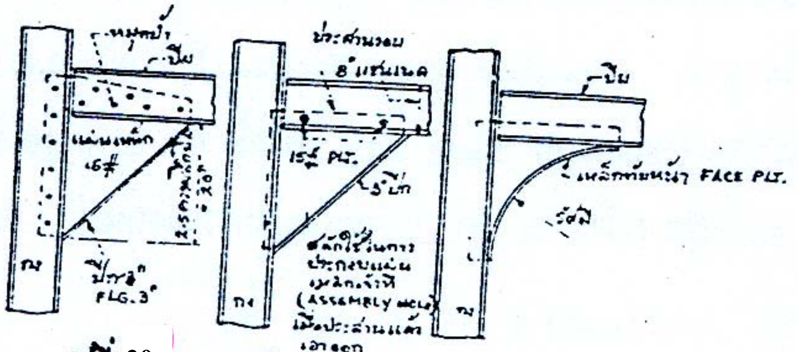
เรือส่วนมากในปัจจุบันนี้ทำดาดฟ้าชั้นล่างแบบราบ แต่ดาดฟ้าใหญ่ข้างบนสุดนั้นทำให้มีความนูนและความงอน ๆ นี้ทำให้ดาดฟ้าแห้งเร็ว ความงอนของดาดฟ้าเป็นพาราโบลิคเคิฟ ความสูงของความงอนหัวมาตรฐาน (Standard Sheer Forward) เท่ากับ 0.2 L + 20 นิ้ว ความสูงของความงอนท้ายมาตรฐาน (Standard Sheer Aft) เท่ากับ 0.1 L + 10 นิ้ว หรือเป็นครึ่งของตอนหัว เช่นเรือยาว 400 ฟุต กว้าง 55 ฟุต ความสูงของความงอนหัว จะเท่ากับ

$0.2\ L + 20 = 0.2 \times 400 + 20'' = 100$ นิ้ว

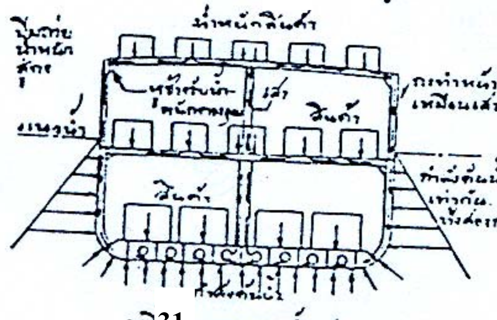
ความสูงของความงอนท้ายเท่ากับ $\frac{100}{2} = 50$ นิ้ว



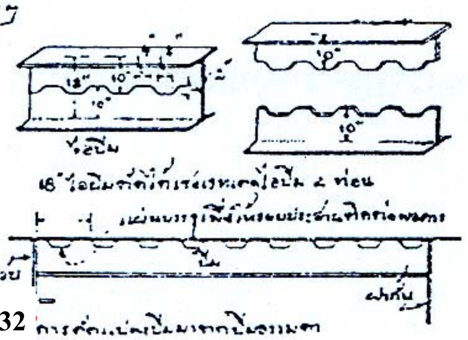
รูปที่ **29** แสดงอาการของปั้มและกงเมื่อโดนคลื่น



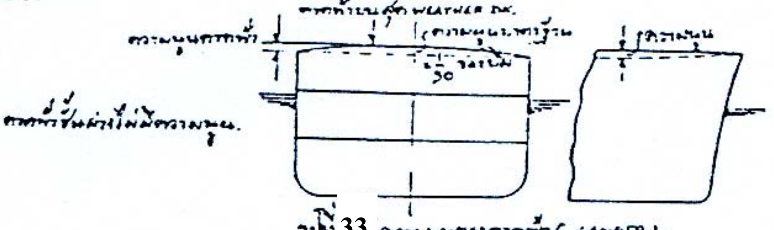
รูปที่ 30 การทำหูช้างรับปีมแบบต่างๆ



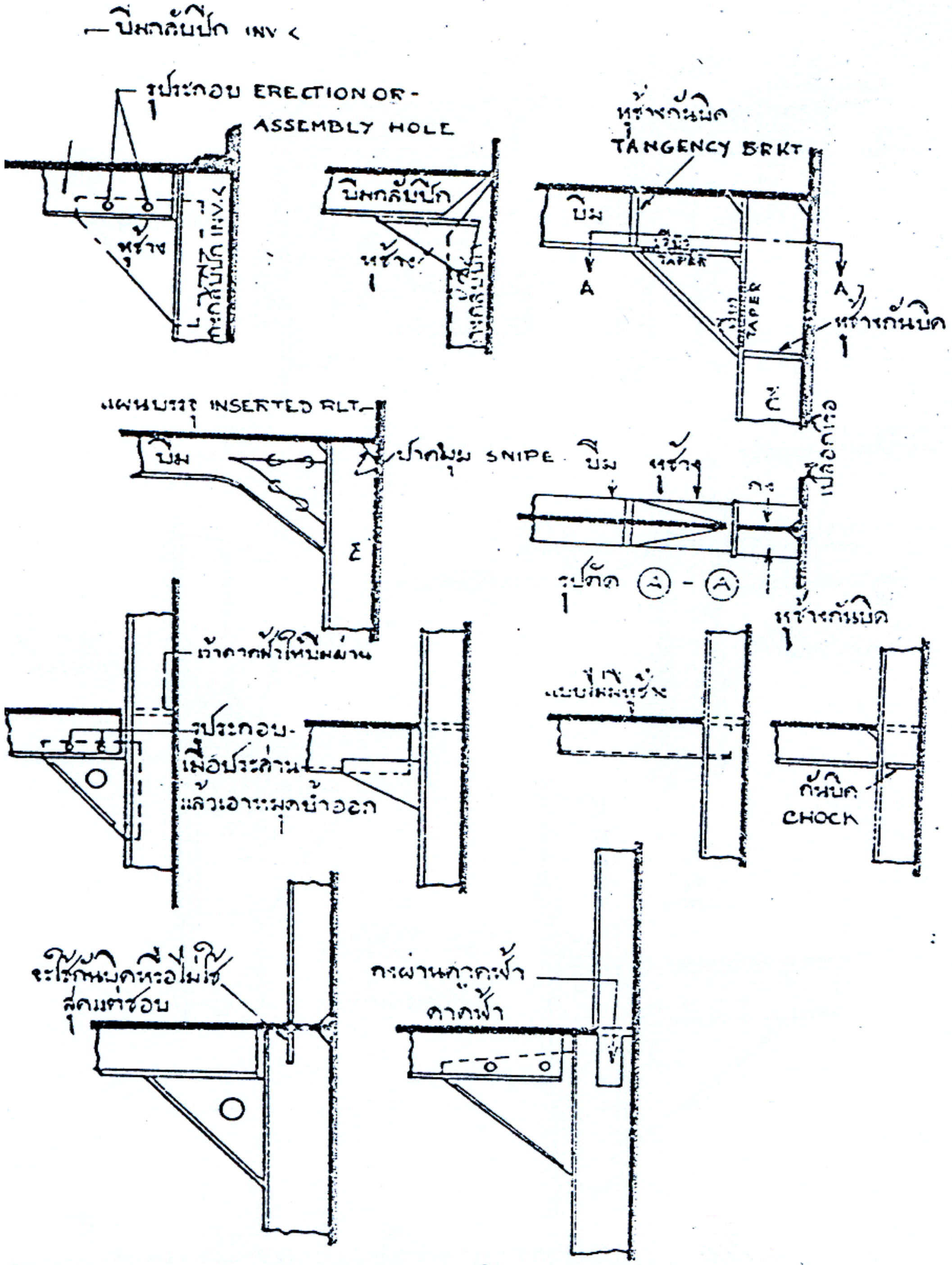
รูปที่ 31 การกระจายน้ำหนักจาก ลงสู่ท่ารับเรือ



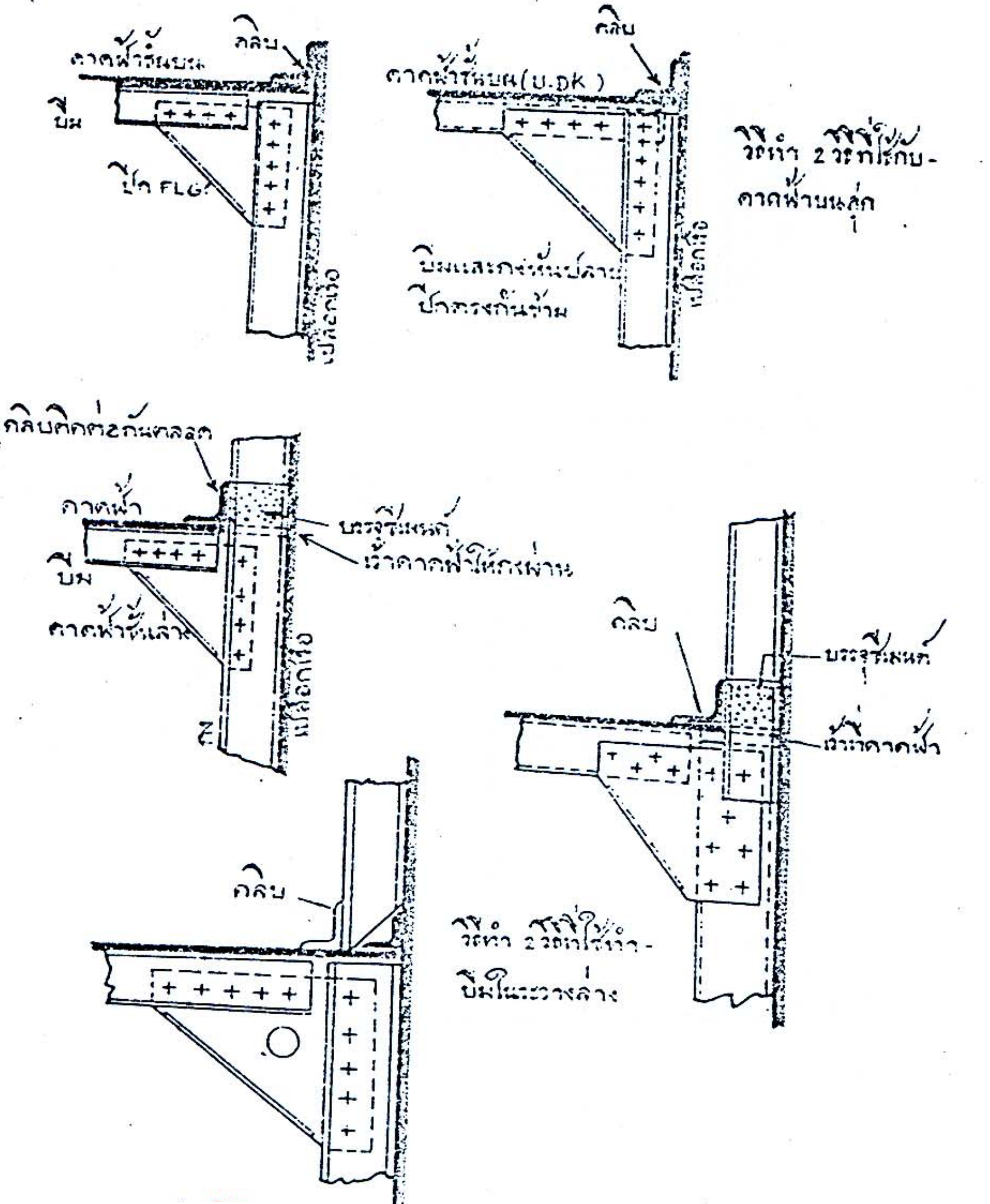
รูปที่ 32 การต่อแผ่นปีมจากปีมธรรมดา



รูปที่ 33 ความนูนของดาดฟ้า (CAMBER)



รูปที่ 34 แบบต่างๆของการทำบิมและหูช้างโดยการแล่นประสาน



รูปที่ 35 แบบต่างๆของการทำบีมและหูช้างโดยการย้ำหมุด.

ความนูนมาตรฐาน (Standard Camber)

= 1/50 x ความกว้างของเรือ

= 1/50 x 55 ฟุต

= 1.1 ฟุต

= 131/4 นิ้ว

เรือที่ออกแบบนั้น อาจมีความงอนหัวท้ายและความนูนของดาดฟ้าเท่ากันหรือมากกว่าหรือน้อยกว่าค่ามาตรฐานก็ได้ รูปที่ 30 , 34 , 35 ได้แสดงการทำบีมดาดฟ้าแบบต่าง ๆ หลายแบบ มีทั้งแบบที่ใช้กับแล่นประสานและหมุดย้ำ แบบหนึ่งแบบใดใช้ได้ทั้งสิ้น

6.6 เสาค้ำและอะเส

เสาค้ำที่ค้ำอยู่ภายใต้ดาดฟ้านั้นในภาษาอังกฤษเรียกหลายอย่าง คือ Pillars, Stanchions หรือ Columns เสาค้ำเหล่านี้ใช้ค้ำจุนอะเสตามยาว , บีมดาดฟ้า และน้ำหนักเฉพาะที่ เสาค้ำรับน้ำหนักแล้วถ่ายลังให้ท้องเรืออันเป็นเนื้อที่ส่วนใหญ่

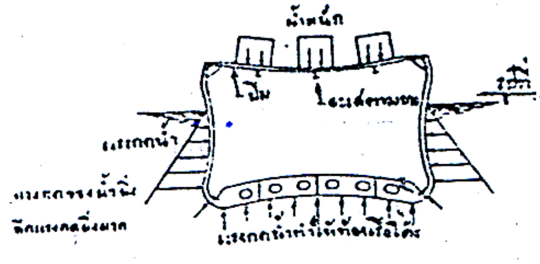
1. เสาค้ำ (Pillars)

1.1ประโยชน์ของเสาค้ำ เมื่อเสาค้ำอยู่ภายใต้บีมดาดฟ้า หรืออะเส มันไม่แต่เพียงลดระยะโค้งของบีมแต่อย่างเดียวเท่านั้น มันยังทำหน้าที่ช่วยหูช้างและกงรับน้ำหนักอีกด้วย ถ้าบีมไม่มีเสาค้ำ มันจะมีระยะโค้งดังปรากฏในรูปที่ 36 น้ำหนักสินค้าทำให้บีมโค้งลง ความโค้งนี้ทำให้เกิดอาการหมุนที่ปลายกง เนื่องจากการติดแน่นของหูช้าง น้ำหนักนั้นจะถ่ายทอดลงสู่กงและแผ่นบิลช์ของเรือ แรงกดของน้ำหนักจะทำให้ท้องเรือโค้งประกอบกับแรงกดที่กงได้รับ จากน้ำหนักดาดฟ้า ทั้งสองแรงนี้จะทำให้บริเวณบิลช์ของเรือโค้งเข้า รูปที่ 37 แสดงถึงเรือที่มีเสาค้ำเรียบร้อย ซึ่งจะช่วยไม่ให้ดาดฟ้าโค้ง

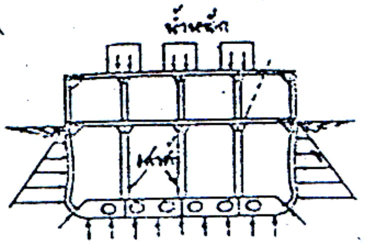
เสานั้นนอกจากจะยึดไม่ให้ดาดฟ้าหลุดออกไปแล้วยังดึงดาดฟ้าให้อยู่กับที่ด้วย เสาค้ำนี้ เมื่อติดทุก ๆ ระวางในแนวเดียวกันแล้วจะทำให้ยึดดาดฟ้าเป็นโครงที่แข็งแรง การติดเสาค้ำควรติดภายในดาดฟ้าที่มีน้ำหนักเฉพาะแห่งวางอยู่ เช่นใต้กว้านเสมอ , กว้านตั้ง , กว้านนอน , ปืน และเครื่องจักรอื่น ๆ เสาค้ำจะช่วยลดความสั่นสะเทือนอันเนื่องจากปฏิบัติงานของเครื่องจักร เสาค้ำนั้นมักติดอยู่ตอนส่วนหัวของเรือบนดาดฟ้า ในเรือที่มีความเร็วสูง เพื่อยึดดาดฟ้าเวลาถูกลมและคลื่นซัดอย่างแรง

1.2ฝากั้นบางตอน (Partial Bulkhead) ถ้าบนดาดฟ้าใดมีน้ำหนักวางอยู่มากกว่าปกติ ควรใช้ฝากั้นบางส่วนนี้แทนเสาค้ำ เพราะมีกำลังแข็งแรงดีกว่าเสาค้ำธรรมดา

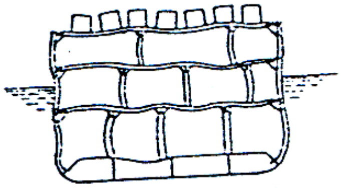
1.3การจัดเรียงเสาค้ำ การจัดเรียงเสาค้ำนั้น ต้องเรียงให้เป็นแนวเดียวกันในทางดิ่ง ถ้า ไม่ทำดังกล่าวจะเปิดโมเมนต์ดัดขึ้นในเสาค้ำนั้น และจะทำให้ประสิทธิภาพ ของเสาค้ำลดลง การสั่นสะเทือนจะเกิดขึ้นตลอดลำ ดูรูปที่ 38



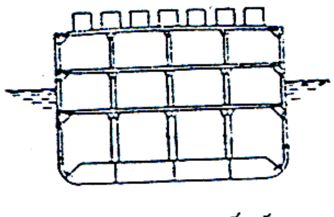
รูปที่ 36



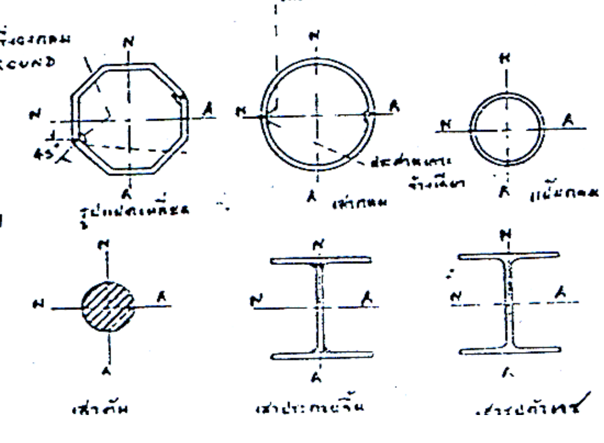
รูปที่ 37



รูปที่ 38



รูปที่ 39



รูปที่ 40

1.4ขนาดของเสาค้ำ ขนาดของเสาค้ำขึ้นอยู่กับน้ำหนักที่บรรทุกอยู่บนดาดฟ้า ตำแหน่งและความยาวของเสาค้ำนั้น ถ้าเสาค้ำอยู่ภายใต้ระวางที่บรรทุก แต่คนโดยสารอย่างเดียวก็มีขนาดเล็กหน่อย ถ้าเสาค้ำอยู่ตอนหัวเรือ เสานั้นจะได้รับน้ำหนักมาก เนื่องจากมีดาดฟ้าอีกหลายชั้นอยู่เหนือขึ้นไป เสาค้ำนี้จึงต้องมีขนาดใหญ่ขึ้น

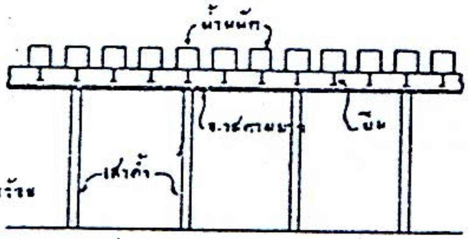
1.5เสาค้ำมีความสัมพันธ์กับการจัดห้องต่าง ๆ ภายในเรือ อู่ต่อเรือบางครั้งได้รับแบบแปลนที่จะมีการประมูลให้สร้างเรือ (Contract Plans) บางแบบแสดงการจัดห้องต่าง ๆ ดีมาก ฯลฯ และ แบบอื่นแสดงแบบการจัดเสาและอะเสดีอีกเช่นกัน ครั้นเมื่อเอาแบบแปลนทั้งสองนี้มาประกอบกันเข้าจะเห็นว่าเสาค้ำนั้นมาอยู่ตรงบันไดขึ้นลง หรือตรงกับห้องอาบน้ำ เป็นต้น ในกรณีนี้ต้องทำการเปลี่ยนแปลงเสาค้ำ และอะเส หรือจัดห้องเสียใหม่เพื่อให้ได้ตำแหน่งของเสาคต้ำและอะเสที่เหมาะ

1.6แบบต่าง ๆ ของเสาค้ำ แบบของเสาค้ำมีมากมายแต่ที่ใช้กันทั่วไปนั้นได้แสดงไว้ใน รูปที่ 40 ตามที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 1 ว่าเสาแป๊บกลมกลวง และเสากลมกลวง ที่ดัดมาจากแผ่นเหล็กนั้น ใช้ทำเสาดีและน้ำหนักเบา เสาที่มีหน้าตัดรูปตัวเอช ใช้กันมากในห้องเครื่อง เพราะตอนปลายติดเข้ากับภายใต้ดาดฟ้าง่าย แต่มักไม่ใช้ในระวางบรรทุกสินค้า เพราะขอบของตัวเอชทำความเสียหายให้แก่สินค้าที่บรรทุกลงมา เสารูปแปดเหลี่ยมตามรูป 40 เป็นเสาที่มีราคาถูกกว่าเสากลมที่ดัดมาจากแผ่นเหล็กธรรมดา ๆ ถูกกว่าเสาแป๊บกลมกลวงเพราะขึ้นรูปง่าย ฉะนั้นเสารูปแปดเหลี่ยมจึงเป็นเสาที่ใช้กันมากที่สุดในเรือสินค้าและเรือรบ

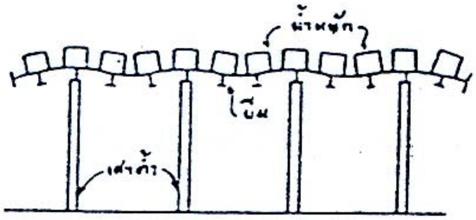
2. อะเสตามยาว (Girders)

อะเสตามยาวเป็นบีมขนาดใหญ่ที่วางอยู่ในทางยาวของเรืออยู่ใต้บีมดาดฟ้า ซึ่งวางใน ทางขวางของเรือ และอยู่เหนือปลายเสาค้ำทั้งหลาย การสร้างเรือสมัยใหม่นั้นมักทำการบากอะเสให้ เป็นร่อง เพื่อให้บีมดาดฟ้าวางอยู่ตอนส่วนบนของอะเสอย่างสนิท ถ้าภายใต้บีมดาดฟ้าไม่มีอะเสรองรับโดยมีแต่เสาค้ำ ๆ เป็นช่วง ๆ บีมใดที่มีเสาค้ำก็อยู่ได้ แต่บีมใดไม่ตรงเสาค้ำก็จะโค้งลงดังปรากฏในรูปที่ 42

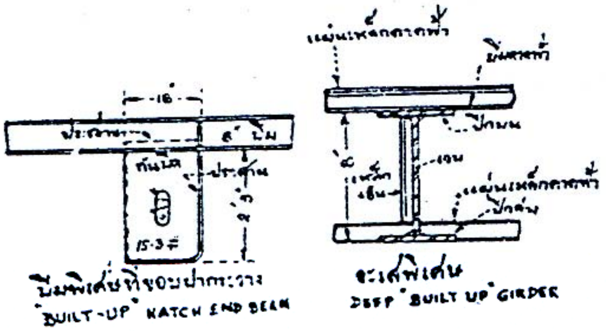
ไอบีม , เหล็กรูปตัวที , เหล็กแชนแนล และบีมพิเศษ (Built-up Section) มักนิยมนำมาใช้ทำอะเส ที่บีมพิเศษอยู่ 2 แบบที่นิยมใช้กัน ดังในรูป 43 ทั้งสองแบบเป็นวิธีแล่นประสาน



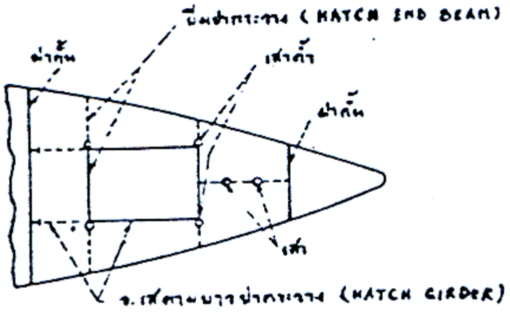
รูปที่ 41 จะเสคานยาวอาจได้ให้ยึดตรงกลางตามแนวสนิท แล้วใช้เสาค้ำจะเป็นโครงสร้างที่เรียบร้อย



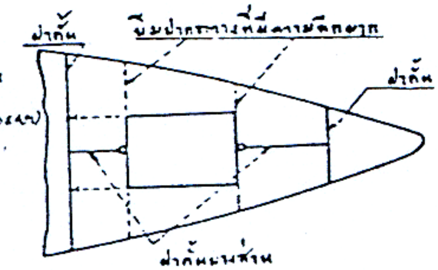
รูปที่ 42 แสดงอาการโค้งของดาดฟ้ามากเนื่องจากไม่มีจะเสรับบีมดาดฟ้า บีมโกตรงกันเสาค้ำก็ไม่โค้ง



รูปที่ 43 แสดงแบบที่นิยมของจะเสยาว



รูปที่ 44 ข. การจัดเรียงเสาค้ำไว้ตามมุมทั้งสี่ของปากระวาง

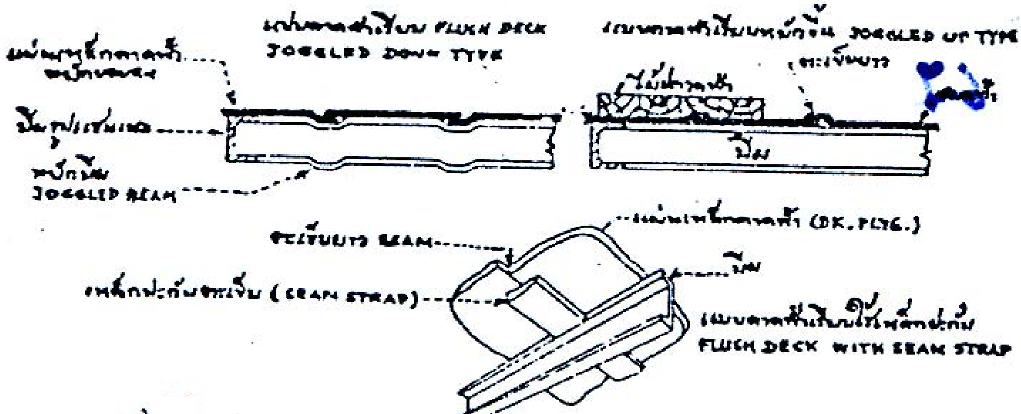


รูปที่ 45 ฝากั้นบางส่วนถูกนำมาใช้ค้ำปากระวาง ส่วนบีมปากระวางมีความลึกมาก (DEEP HATCH END BEAM) นั้นไม่มีเสาค้ำเพราะแข็งแรงมากอยู่แล้ว

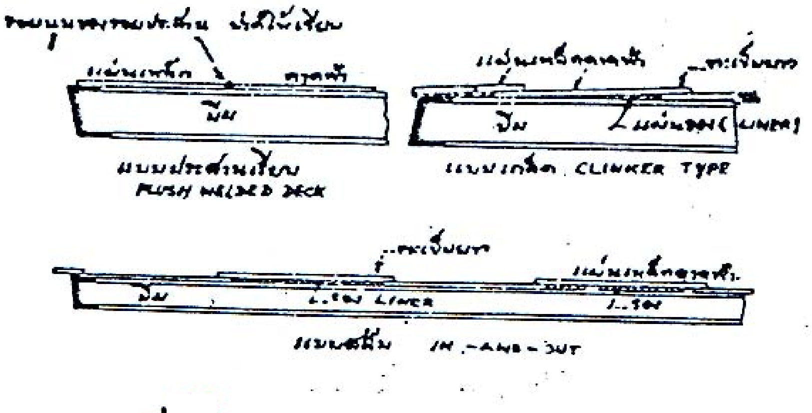
เสาค้ำและฝากั้นบางส่วนเป็นส่วนที่ใช้ค้ำจุนดีมาก แต่เป็นสิ่งกีดขวางสินค้า แต่บางทีทำให้เสานั้นถอดได้เมื่อเวลาบรรทุกและเมื่อเอาสินค้าขึ้นแล้วก็ประกอบเสาค้ำภายหลังสินค้าที่บรรทุกลงในระวาง มักใช้ลิ่มจีมเข้ากับเสาฝากั้น หรือตัวเรือเพื่อทำให้แน่น ไม่กลิ้งไปมาเวลาโดยคลื่น

การจัดเสาค้ำที่ดีต้องไม่เป็นสิ่งกีดขวางการนำสินค้าขึ้นลง ในรูปที่ 44 เป็นรูปแสดงการวางเสาค้ำที่กึ่งกลางลำ และตามมุมทั้งสี่ของปากระวาง รูปที่ 45 แสดงปากระวางถูกค้ำจุนด้วยฝากั้นบางส่วน และบีมปากระวางที่มีความลึกมาก (Deep Hatch End Beam) และไม่มีเสาค้ำตามมุมปากระวาง เป็นการแน่นอนทีเดียว ถ้าทำอะเสให้แข็งแรงเพียงพออาจไม่ต้องมีเสาค้ำเลยก็ได้

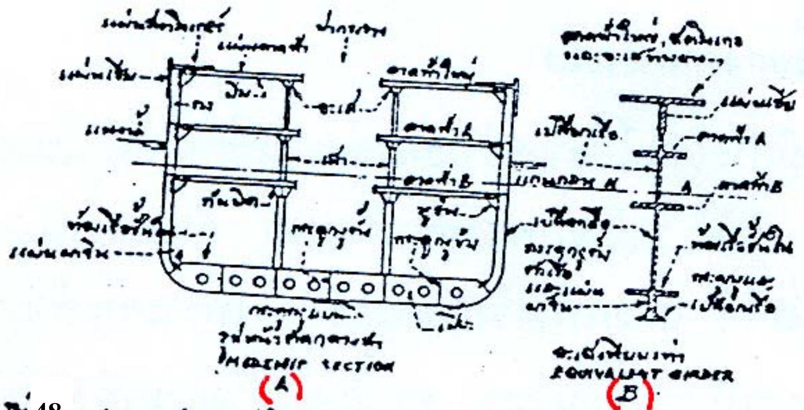
ถ้าความกว้างของเรือเพิ่มขึ้น ก็ต้องเพิ่มจำนวนเสาค้ำและฝากั้นมากขึ้น เพื่อลดระยะช่วงให้สั้นลง และลดขนาดลง



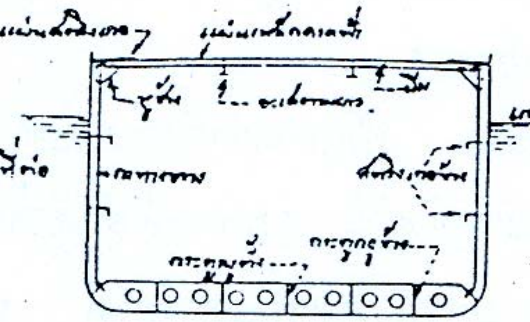
รูปที่ 46 แสดงการทำดาดฟ้าเรือให้เรียบโดยวิธีต่างๆกัน



รูปที่ 47 แบบต่างๆของดาดฟ้า



รูปที่ 48 แสดงรูปหน้าตัดกลางลำ เมื่อคิดเป็นคานเทียบเท่า



รูปที่ 49

6.7 ดาดฟ้าเรือ DECK PLATING

ดาดฟ้าเรือคือพื้นทางเดินในทางระดับ อยู่สูงจากพื้นท้องเรือชั้นในพอควร ดาดฟ้านั้นเหมือนกับพื้นบ้าน

ดาดฟ้าของเรือบางลำมีความงอน และความนูน และบางลำเรียบตลอดลำ ดาดฟ้านั้นมีอาณาเขตติดต่อกับแผ่นเหล็กเปลือกเรือทั้งกราบขวา ซ้าย และติดกับบีมรับดาดฟ้าทรังค์ชนิดสูง (Deep Trunk) และปากระวาง

1. วิธีการค้ำจุนดาดฟ้า

พื้นดาดฟ้า (Deck Plating or dk. Pltg.) นั้นรองรับอยู่ด้วยบีมรับดาดฟ้า ซึ่งมีระยะช่วงห่างกันสม่ำเสมอ ประดุจแผ่นเหล็กตัวเรือ รองรับด้วยกงเรือฉะนั้น บีมรับดาดฟ้าถูกรองรับด้วยกงที่ปลายทั้งสองและหูช้าง และบีมยังรองรับด้วยเสาค้ำ อะเส และฝากั้นตอนกลางลำอีกด้วย

2. ประโยชน์ของดาดฟ้าเรือ

ดาดฟ้ามีประโยชน์หลายอย่างสุดแต่สถานที่ที่ดาดฟ้านั้นอยู่ที่ใด ดาดฟ้าชั้นบนสุด (Upper Deck or u. dk.) ทำให้เรือมีสภาพคงทนทางทะเล (Seaworthiness) โดยทำให้ดาดฟ้าชั้นบนผนึกน้ำหรือน้ำเข้าไม่ได้ และทำให้เรือแข็งแรง เพราะดาดฟ้านี้ทำหน้าที่เหมือนปีกบนของอะเส เมื่อเปรียบเรือทั้งหมดเป็นอะเสอันใหญ่ ดาดฟ้าชั้นล่างลงมาทำหน้าที่เป็นพื้นทำงาน (Platform) เช่นวางเครื่องจักร บรรทุกสินค้าและให้ผู้โดยสารอาศัยอยู่ เรือขนาดเล็กมักปูด้วยไม้ ส่วนเรือใหญ่มักทำด้วยเหล็กเพื่อความแข็งแรง

ดาดฟ้าที่อยู่บนสุด เป็นดาดฟ้าที่ตากแดดตากลม บางทีเราเรียกว่าดาดฟ้าอากาศ (Weather Deck) นั้นมักบุด้วยไม้ ส่วนดาดฟ้าที่อยู่ชั้นล่างให้เป็นที่อาศัย มักบุด้วยแผ่นคล้ายซีเมนต์ แต่ดีกว่าซีเมนต์ มีความยืดหยุ่นและเรียบดี แต่ในเรือสมัยใหม่นี้เป็นจำนวนมากทีเดียวที่ใช้สีทาเฉย ๆ ในเรือรบมักปูด้วยแผ่นลินโนเลียม แต่เนื่องจากลินโนเลียมช่วยให้ไฟติด จึงใช้วัตถุอื่นที่ติดไฟน้อยแทน การใช้ไม้บุดาดฟ้านั้นมีข้อดีดังนี้

ก) กันความร้อนให้ห้องที่อยู่ข้างล่าง

ข) ทำให้สามารถเดินบนดาดฟ้านั้นได้ เพราะได้เอาไม้มาบุไว้เสียแล้ว ในเมืองร้อนควรบุไม้

ค) ป้องกันไม่ให้ใต้ดาดฟ้านั้นเกิดเป็นเม็ดเหงื่อหยดน้ำ

ง) ทำให้ดูสวยงามขึ้น (เฉพาะเรือโดยสาร)

3. แผ่นเหล็กดาดฟ้า

แผ่นเหล็กดาดฟ้าก็เช่นเดียวกับแผ่นเหล็กตัวเรือที่ปูในทางตามยาว แผ่นเหล็กดาดฟ้าบริเวณกลางลำมักเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ส่วนทางหัวทางท้ายทำให้เรียวลง เพื่อให้เข้ารูปกับตัวเรือในเรือหมุดย้ำ ตะเข็บตามยาวของแผ่นเหล็กมักต่อด้วยหมุดย้ำแถวเดียว ส่วนตะเข็บทางขวางนั้นมักใช้หมุดย้ำสองแถว และแผ่นเหล็กดาดฟ้ายึดกับบีมนั้นใช้หมุดย้ำแถวเดียว ในเรือแล่นประสาน รอยแล่นประสานที่ปรากฏนั้นขึ้นมักใช้มอเตอร์หินลับให้เรียบเท่าแผ่นเหล็ก

การต่อหมุดย้ำนั้น แผ่นดาดฟ้าจะเกยกันตามแบบเกล็ด หรือตามแบบสลับก็ได้ แต่แผ่น ดาดฟ้าที่ต่อเกล็ดหรือต่อสลับกันนั้นจะเอาไม้ปูไม่ได้ เพราะความหนาของไม้เท่ากัน ต้องใช้แผ่นรองงานยุ่งมาก จึงไม่เป็นที่นิยมทำกันและหันมาใช้แผ่นเหล็กแบบหยักขอบ ขอบแท่น แผ่นรองก็ไม่ต้องใช้ ถ้าแผ่นเหล็กนั้นหยักขอบลงดังในรูปที่ 46 แล้วแผ่นเหล็กดาดฟ้าก็จะเรียบเป็นผืนเดียวกันตลอดดูสวยงาม และ

ถ้าจะใช้แผ่นไม้ปูก็ได้ เพราะไม้เหล่านั้นมีความหนาเท่ากันตลอด สะดวกต่อการทำ แผ่นเหล็กดาดฟ้าหนา ๆ ต้องการต่อให้เรียบนั้นทำได้ โดยใช้แผ่นเหล็กปะกับอยู่ด้านล่างของตะเข็บ ดูรูปที่ 46 และ 47

4. แผ่นสตริงเกอ (Stringer Plate)

แผ่นสตริงเกอเป็นแผ่นเหล็กดาดฟ้าเหมือนกัน แต่เป็นแผ่นที่อยู่ติดกราบเรือ ทั้งสองกราบ เป็นแผ่นเหล็กที่หนากว่าแผ่นเหล็กดาดฟ้าธรรมดา บนแผ่นสตริงเกอนี้ มีเหล็กฉากกันเนล (Gunwale Angle) ยึดติดอยู่ด้วย ดูรูปที่ 12 ข. และรูปที่ 48 แผ่นสตริงเกอ เป็นแผ่นเหล็กกำลังอีกแห่งหนึ่ง ในบรรดาแผ่นอื่น ๆ เช่น แผ่นเชียร์ แผ่นบิลช์ แผ่นกาบอร์ด และแผ่นกระดูกงู

5. อะเสเทียบเท่า

ตามที่กล่าวมาแล้วว่าการพิจารณาความแข็งแรงของเรือทั้งหมดนั้น เราจะต้องคิดว่าเรือเปรียบประดุจบีมหรืออะเสอันใหญ่มหิมาที่ลอยอยู่บนคลื่น ซึ่งบางครั้งยอดคลื่นอยู่ที่กลางลำ ซึ่งจะทำให้บีมตุ้ง และบางครั้งยอดคลื่นอยู่ที่หัวท้ายทำให้เรือตกท้องช้าง ผู้ศึกษาจะต้องเชื่อว่าที่กล่าวนั้นเป็น ความจริง และจะได้พิจารณาต่อไป

ตามรูปที่ 48 (A) แสดงรูปหน้าตัดกึ่งกลางลำของเรือลำหนึ่ง และรูปที่ 48 (B) เป็นการเปรียบเทียบว่าเรือเปรียบเสมืออะเสเทียบเท่าซึ่งใช้เพื่อการอธิบายเท่านั้น

พิจารณารูปที่ 48 จะเห็นได้ว่าดาดฟ้าชั้นบนดาดนั้นถูกเจาะช่องใหญ่ เพื่อทำปากระวางสินค้า การทำเช่นนี้ทำให้กำลังดาดฟ้าเสียไป เพื่อให้กำลังเท่าเดิมต้องใช้แผ่นเหล็กหนากว่าแผ่นเหล็กดาดฟ้าติดรอบกราบเรือ แผ่นนี้เรียกแผ่นเหล็กสตริงเกอ

ถ้าเราทำการคำนวณเนื้อที่แผ่นสตริงเกอ , แผ่นเหล็กดาดฟ้า นับจากแผ่นสตริงเกอไปจนถึงขอบปากระวาง และเนื้อที่ของอะเสตามยาวใต้ดาดฟ้า เราจะได้เนื้อที่ปีกบนของอะเสดังปรากฏในรูปที่ 48 (B) เนื้อที่แผ่นเหล็กดาดฟ้าที่อยู่ในแนวระหว่างปากระวางต่อ ๆ กันนั้นไม่มีกำลังแข็งแรง เพราะขาดการติดต่อเป็นเนื้อเดียวกันเสียแล้วเพราะมีปากระวางมาขั้น

เราคำนวณหาเนื้อที่ดังกล่าวบนดาดฟ้า A และ B และใต้ท้องเรืออันมีแผ่นท้องเรือชั้นในกงตามยาว กระดูกงูตั้ง กระดูกงูแบน แผ่นเหล็กท้องเรือก็จะได้ดังปรากฏดังในรูป 48 (B) ส่วนเนื้อที่ในทางดิ่งอันมีแผ่นเหล็กตัวเรือทั้งสองกราบก็จะได้เนื้อที่ของเวบของอะเสโดยที่ดาดฟ้า A และ B ใกล้กับแนวแกนกลาง แผ่นเหล็กจึงไม่ต้องสู้หนามาก และไม่ได้ชื่อว่าเป็นดาดฟ้ากำลัง ดาดฟ้ากำลัง (Strength Deck) คือดาดฟ้าบนสุดที่ห่างจากแนวแกนกลางมาก ต้องมีความหนาเป็นพิเศษ

เรือ เอส.เอส.มาเจสติค (S.S. Majestic) เมื่อตอนฤดูร้อนปี ค.ศ.1924 ได้รับความเสียหายมากต้องซ่อมอยู่จากเดือนธันวาคม ค.ศ.1924 ถึงเดือนพฤษภาคม 1925 ทั้งนี้เพราะเหตุว่าเรือลำนี้ไม่ได้ เสริม

กำลังชดเชยให้ตามปากระวาง เรือลำนี้สร้างโดยนักต่อเรือชาวเยอรมัน มีปล่องสองปล่องอยู่ใกล้กราบเรือ ซึ่งมีการเจาะให้ปล่องออกค่อนข้างไปทางกราบทั้งสองแผ่นเหล็กบริเวณปล่องประมาณ 5/8 นิ้ว ซึ่งไม่ได้คิดว่ามันจะได้รับกำลังอะไรเลย แผ่นสตริงเกอหนา 2 นิ้ว และแผ่นเหล็กดาดฟ้าหนา 1 ½ นิ้ว

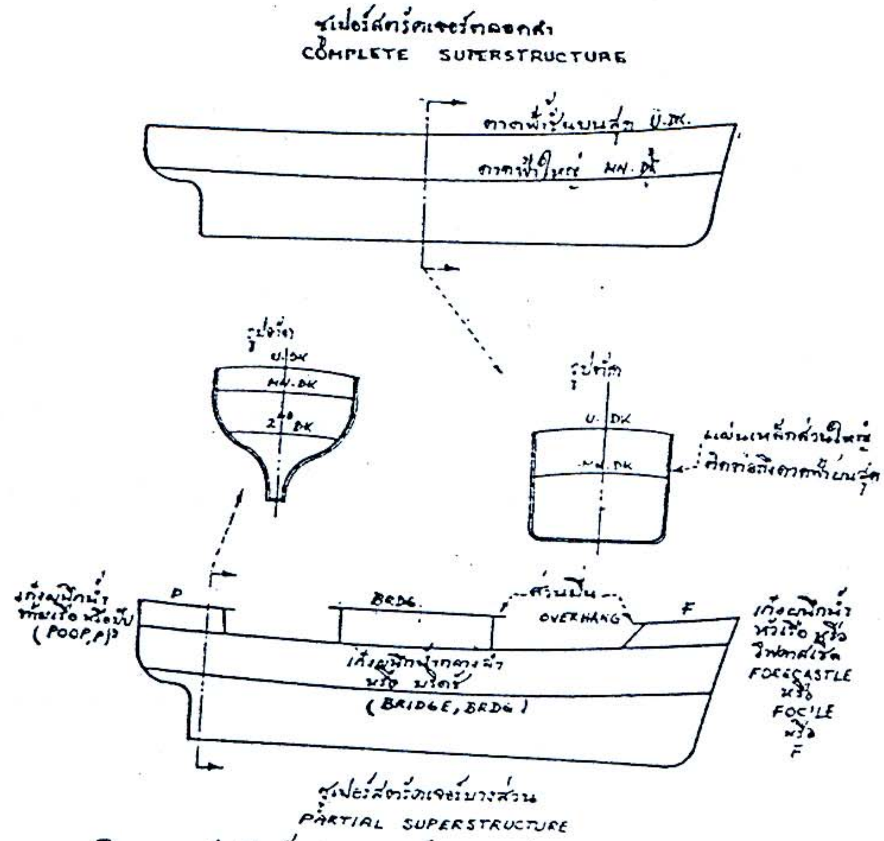
ในปี ค.ศ.1924 ฤดูร้อนพบว่ามีรอยแตกร้าวในบริเวณปล่อง ซึ่งมีแผ่นเหล็ก 5/8 นิ้ว อยู่แต่ก็ไม่ได้สนใจอะไรนึกว่าไม่สำคัญ ครั้นในระหว่างเดินทางไปในท้องทะเลเดือนธันวาคม อันเป็นเวลาที่คลื่นลมในท้องทะเลแรงจัด ขณะที่แล่นไปนั้นปรากฏเสียงดังลั่นประดุจยิงปืนใหญ่ปรากฏว่าแผ่นเหล็กแตกร้าวไปรอบเรือ แผ่นเหล็กสตริงเกอขาด

เรือจึงต้องแวะที่ เซาแทมตัน เมื่อทำการซ่อมนั้นได้เปลี่ยนแผ่นสตริงเกอใหม่ให้หนาอีกเล็กน้อย และแผ่นเสริมกำลังหรือแผ่นเสริมขอบได้ใส่เข้าตามช่องต่าง ๆ บนดาดฟ้า โดยเฉพาะตามช่องปากระวาง รายงานของเรื่องที่ใกล้จะอับปางของเรือลำนี้จะหาอ่านได้จากนิตยสารมารีนเอนยิเนียริ่ง ฉบับเดือนสิงหาคม ค.ศ.1925 แต่งโดย อี.เอลล์สเบิก

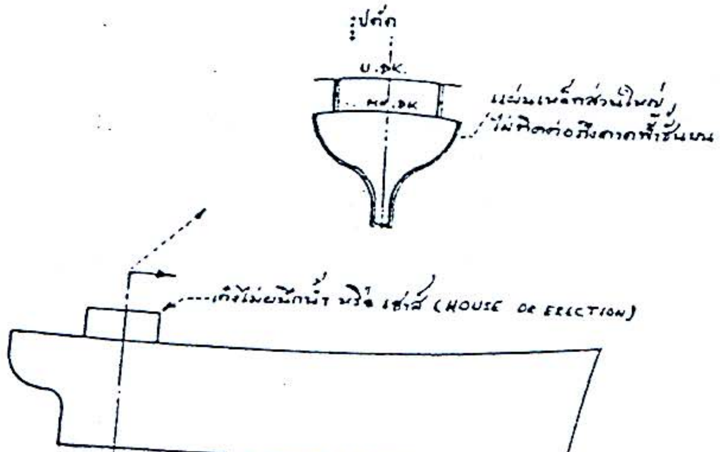
แผ่นสตริงเกอ (Stringer Plate) กับสตริงเกอข้าง (Side Stringer) นั้นอย่านำมาปะปนกัน เพราะมีความหมายคนละอย่าง สตริงเกอข้างเป็นอะเส ส่วนแผ่นสตริงเกอเป็นแผ่นเหล็กธรรมดา
ดูรูปที่ 49

6. ซูเปอร์สตรัคเจอร์ หรือ เก๋งผนึกน้ำ (Superstructure)

ถ้าเหนือดาดฟ้าใหญ่ขึ้นไปมีดาดฟ้าอีก โดยมีแผ่นเหล็กตัวเรือใหญ่ติดต่อกันขึ้นมาจนถึงดาดฟ้าชั้นบนที่กล่าวมาแล้ว เราเรียกห้องนี้ว่าซูเปอร์สตรัคเจอร์ หรือเก๋งผนึกน้ำได้ ดูรูปที่ 50 เรือที่มีซูเปอร์สตรัคเจอร์ยาวตั้งแต่หัวจดท้าย เรียกว่าเรือนั้นมีซูเปอร์สตรีคเจอร์ตลอดลำ (Complete Superstructure)



รูปที่ 50 เก๋งผนึกน้ำ หรือ ซูเปอร์สตรัคเจอร์ (SUPERSTRUCTURE)



รูปที่ 51 เก๋งไม่ผนึกน้ำ หรือเฮ้าส์ (HOUSE OR ERECTION)

ถ้ามีซูเปอร์สตรัคเจอร์ไม่ตลอดลำโดยขาดเป็นช่วง ๆ แล้วปรากฏเป็นเรือแบบ 3 เกาะคือ มีเก๋งผนึกน้ำหัว (Forecastle) เก๋งผนึกน้ำกลางลำ (Bridge) และเก๋งผนึกน้ำท้ายเรือ (Poop) เรือประเภทนี้เรียกเรือมีซูเปอร์สตรัคเจอร์บางส่วน (Partial Superstructire)

7. เฮ๊าส์ หรือ เก๋งไม่ผนึกน้ำ (House)

ถ้าเหนือดาดฟ้าขึ้นไปมีดาดฟ้าอีก แต่แผ่นเหล็กตัวเรือใหญ่ติดต่อกันขึ้นมาจนถึงดาดฟ้าดังกล่าว เราเรียกห้องนั้นว่า เฮ๊าส์หรือเก๋งไม่ผนึกน้ำ ดูรูปที่ 51

เรือใดมีซูเปอร์สตรัคเจอร์อยู่บนดาดฟ้าใหญ่ เรือลำนั้นจะอนุญาตให้บรรทุกสินค้าได้มากหรือกินน้ำลึกได้มากกว่าเรือที่ไม่มีซูเปอร์สตรัคเจอร์ หรือ มีเฮ๊าส์อยู่บนดาดฟ้าใหญ่ มีกฎการคำนวณแนวน้ำ (Load Line Regulation) ใช้ในการคำนวณแนวน้ำนี้ ซึ่งจะได้กล่าวต่อไป

6.8 ฝากั้น (BULKHEAD) และการทะลุของเรือ (DMAGE OF SHIP)

ห้องภายในเรือเกิดขึ้นโดยใช้ฝากั้นทางขวาง (Transverse Bulkhead) และฝากั้นทางยาว (Longitudinal Bulkhead) ฝากั้นมีความสำคัญ 4 ประการ

1. ทำหน้าที่ผนึกน้ำ (Watertight, W.T.) ป้องกันไม่ให้น้ำไหล จากห้องหนึ่งไปยังอีก ห้องหนึ่งได้ ในกรณีที่เรือทะลุก็ช่วยไม่ให้น้ำเข้าไปในห้องที่ยังไม่ได้ทะลุ นั่นคือป้องกันไม่ให้เรือจม
2. กั้นไฟ (Firecheck) ทำหน้าที่กั้นไม่ให้ไฟลามไปยังห้องอื่น
3. เมื่อหมดหนทางจริง ๆ ในตอนไฟไหม้ อาจเจาะตัวเรือและฝากั้น เพื่อให้เรือทะลุเป็นการดับไฟ ซึ่งจะใช้เป็นวิธีสุดท้าย
4. ทำหน้าที่ไม่ให้เรือโย้ไปทางกราบขวา กราบซ้าย (Racking) ในเวลาเรือโดนคลื่นลมจัด

ได้มีกฎหมายที่ว่าด้วยการกั้นห้อง (Flooding Calculation) เช่น กฎของสมาคมจัดชั้นเรือของอเมริกัน หรือเมริกันบูโร (American Bureau of Shipping) กองเรือรักษาฝั่งของอเมริกัน (Coast Guard) ผลการประชุมสภาซีเนทที่ 184 (Senate Report 184) , กฎการคำนวณแนวน้ำ (Load Line Regulations) และกฎสากลสวัสดิภาพท้องทะเล (International Convention For The Safety of Life at Sea) ฯลฯ เป็นต้น อันเกี่ยวกับระยะห่างของฝากั้นว่าควรเป็นเท่าใด เมื่อมีหลายกฎเช่นนี้ผู้ศึกษาอาจสงสัยว่าจะใช้กฎใดกันแน่ จึงขอแจ้งเสียให้ทราบว่า ถ้ากั้นห้องโดยใช้กฎสากลสวัสดิภาพท้องทะเลแล้ว ก็เข้ากับกฎอื่นไปเอง

1. การกั้นห้องภายในเรือ (Subdivision of Ship)

เป็นเวลานานมาแล้วที่เรามีความต้องการให้เรือไม่จมเมื่อเกิดการทะลุ และต้องการให้เรือบรรทุกคนโดยสารมีความปลอดภัยดีกว่าเรือบรรทุกสินค้า เราอาจทำให้เรือไม่จมได้โดยการกั้นห้องให้ถี่ยิบ เมื่อน้ำทะลุเข้าห้องใด ก็เสียห้องไปเล็กน้อย การกั้นห้องให้ถี่นี้ทำได้ในเรือรบ แต่ไม่ประหยัดถ้าจะทำในเรือสินค้าด้วย เจ้าของเรือต้องการให้ฝากั้นห่างกันมากที่สุดเท่าที่จะมากได้ เพื่อให้บรรทุก สินค้าต่าง ๆ ได้ทุกชนิดและบรรทุกได้มาก เรือโดยสาร เรือบรรทุกทหารตลอดทั้งผู้รับผิดชอบในการออกแบบเรือที่เกี่ยวกับชีวิต มักต้องการให้ฝากั้นชิดกันมากที่สุด เพื่อป้องกันไม่ให้จมเวลาเรือทะลุอันเกิดจากชนกัน หรือถูกลูกปืนหรือลูกระเบิดต่าง ๆ

ถ้าทำให้ฝากั้นในเรือสินค้าชิดกันมากก ๆ จริงอยู่จะทนทานต่อการจมดีขึ้น แต่การบรรทุกสินค้าไม่สะดวก ลำจำนวนสินค้าลง เรือสินค้าของชาติต่าง ๆ จึงทำระวางสินค้าให้ยาว โดยไม่คำนึงถึงความปลอดภัยของเรือว่าจะจมโดยเหตุนี้ จึงเกิดการจมกันมากขึ้น ฉะนั้นกฎสากลสวัสดิภาพท้องทะเลจึงเรียกประชุมบรรดาผู้แทนชาติต่าง ๆ ที่มีเรือเดินทะเลมาร่วมประชุม ในปี ค.ศ.1949 และ ลงชื่อผู้เห็นเป็นพยานที่จะรับไปปฏิบัติ กฎบัตรที่ออกมานั้น ไม่แต่เฉพาะกล่าวถึงระยะของฝากั้นเท่านั้นยังกล่าวถึงเครื่องมือต่าง ๆ ที่ให้ความปลอดภัย เช่น เรือช่วยชีวิต แพช่วยชีวิต วิทยุ ประตูผนึกน้ำ ฯลฯ

อนุสนธิจากการประชุมนั้น ปรากฏว่าเรือที่บรรทุกคนโดยสารมากกว่า 12 คนแล้ว จะต้องเป็นเรือชนิดหนึ่งระวาง (One-Compartment Vessel) คือเป็นเรือที่สามารถลอยอยู่ได้เมื่อ 1 ระวางเสียไปโดยน้ำทะลุเข้าเต็ม แต่ถ้าทะลุ 2 ระวาง เรือลำนี้ก็จม เรือยาว 400 ฟุต ตามแบบของยูเอส เอ็มซีต้องเป็นเรือชนิดหนึ่งระวาง เรือยาว 500 ถึง 600 ฟุต บรรทุกผู้โดยสาร 200-300 คน ต้องเป็นเรือชนิดสองระวาง (Two-Compartment Vessel) เรือยาว 800 ฟุต บรรทุกคนโดยสาร 1,000 คน ต้องเป็นเรือชนิดสามระวาง (Three-Compartment Vessel) เรือ เอส.เอส.อเมริกา เป็นเรือชนิดสามระวาง คือทะลุสามระวางแล้วเรือยังไม่จม เรือ เอส.เอ.ยูไนเตทสเตท เป็นเรือชนิดสี่ระวาง

ดูรูปที่ 52 เป็นรูปเรือสินค้าชนิดสองระวาง รูป A เป็นขณะที่เรือลอยอยู่ตามปกติ เมื่อยังไม่ได้ทะลุรูป B เรือทะลุที่ตัวเรือระหว่างฝากั้นทำให้เรือเสียความลอยไป 1 ระวาง เรือจะจมลงชุนหัวเล็กน้อย เมื่อเรือใช้ความลอยชดเชย (Regained or Reserved Buoyancy) ไปเท่ากับความลอยที่เสียไปแล้ว (Loss Buoyancy) เรือก็หยุดนิ่ง สมดุลอยู่ในตำแหน่งนั้น ครั้นต่อมาเรือทะลุอีก 1 ระวางติดกันเรือก็จะจมลงไปอีก เมื่อใช้ความลอยชดเชยเท่ากับความลดยที่เสียไปแล้วเรือก็หยดนิ่งสมดุลย์อีก และที่เรือไม่จมก็โดยที่หัวเรือลำนี้สูงพอ หัวเรือจึงยังไม่จมน้ำ ดูรูป C ครั้นต่อมาระวางที่สามทะลุอีก เรือก็จมลงไปอีก ความลอยอะไหล่หมดไม่มีอะไรมาชดเชย หัวเรือจึงจมน้ำลงไป น้ำเข้าในระวางอื่นต่อไป เรือจึง

จมลงไปในน้ำ เรือชนิดนี้เรียกเรือชนิดสองระวาง (Two-Compartment Vessel) ดูรูป D คือเรือทะลุสองระวางเรือยังไม่จม

ตามที่กล่าวมานั้นเป็นเรื่องเรือทะลุแล้วน้ำเข้าเต็มเรือจนเรือจมไปในที่สุด แต่เรื่องชนิดนี้จะเกิดขึ้นน้อยมาก เรือที่จมนั้นมักมีอาการอื่นเข้ามาแทรกทำให้ทรงตัวของเรือน้อยลง เมื่อเรือทะลุน้ำเข้าเล็กน้อย แล้วจมไปเสียก่อนที่จะเข้าเรือเต็ม โดยเหตุที่มีผิวน้ำอิสระ (Free Surface) เกิดขึ้นอย่างเช่นกรณีเรือ เอส.เอส. นอร์แมนดี เป็นต้น

2. ฝากั้นตามกฏอเมริกันบูโร

นอกจากฝากั้นผนึกน้ำธรรมดาที่ต้องการตามที่ต่าง ๆ ในเรือ โดยกฎบัตรที่กล่าวมาแล้วยังมีฝากั้นอีก 4 ชนิด ที่บังคับโดยกฎอเมริกันบูโร คือ

2.1 ฝากั้นผนึกน้ำหัวสุด (Collision Bulkhead) ฝากั้นนี้ช่วยทำให้เรือปลอดภัยเมื่อไปชนกับสิ่งหนึ่งสิ่งใดจนน้ำทะลุเข้าหัวเรือ ฝากั้นนี้จะกั้นน้ำไว้ไม่ให้ทะลุไปยังระวางอื่นได้กฎต้องการให้ฝากั้นนี้อยู่ห่างจากทวนหัวเข้ามา 1/20 ของความยาวของเรือ ดูรูปที่ 53

2.2 ฝากั้นผนึกน้ำท้ายสุด (After Peak Bulkhead) ฝากั้นนี้อยู่ท้ายสุด วางอยู่ชิดกับเพลาใบจักร และเป็นฝากั้นผนึกน้ำ ไม่ให้น้ำเข้าท้ายเรือเมื่อท้ายเรือถูกชน

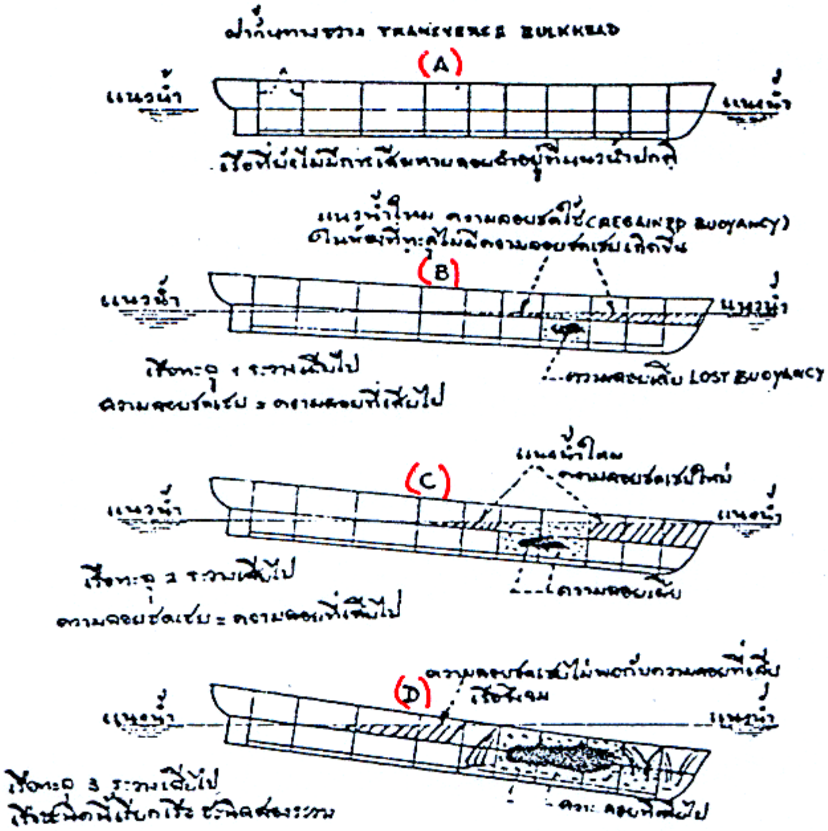
2.3 และ 4 ฝากั้นผนึกน้ำหัวห้องเครื่องจักร (Fore and After Bulkhead of Engine Room) ห้องเครื่องและห้องหม้อน้ำ ต้องมีฝากั้นผนึกน้ำทั้งหัวและท้ายและเรือ

3. แผ่นเหล็กฝากั้น (Bulkhead Plating)

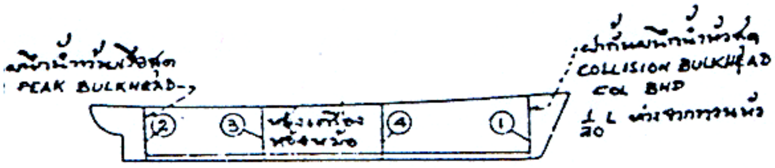
แผ่นเหล็กฝากั้นมักเรียงในทางระดับ เพราะฉะนั้นแผ่นเหล็กฝากั้นที่อยู่ใต้ท้องเรือมากที่สุดจึงต้องมีความหนากว่าแผ่นที่อยู่เหนือขึ้นมา ทั้งนี้เป็นเพราะกำลังดันของน้ำเมื่ออยู่ลึก ก็มีกำลังดันมากกว่าที่ตื้นขึ้นมา กำลังดันของน้ำนั้นมีเส้นโค้งแสดงอยู่ใน รูปที่ 55

4. เหล็กเอ็นของฝากั้น (Bulkhead Stiffener)

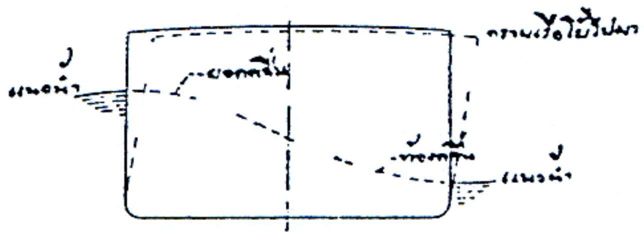
เหล็กเอ็นของฝากั้นมักเรียงในทางดิ่ง เพราะเหตุว่าระยะช่วงทางดิ่ง (ระยะจากดาดฟ้าถึงดาดฟ้า) สั้นกว่าระยะช่วงทางระดับ (กราบเรือถึงกราบเรือ) โดยที่ความกดของน้ำน้อยลง ๆ ตาม ความลึกของน้ำเหล็กเอ็นจึงเล็กลง เมื่ออยู่ดาดฟ้าเหนือขึ้นมา ดูรูปที่ 55 จะสังเกตเห็นว่าปลายเหล็กเอ็นที่อยู่ระวางล่างสุดจะมีหูช้างติดแข็งแรงแน่นหนา เรียกปลายติดหูช้าง (Bracket End) คือตอนปลายล่างติดกับแผ่นเหล็กท้องเรือชั้นใน ตอนปลายบนติดอยู่ใต้ดาดฟ้า ส่วนปลายเหล็กเอ็นที่อยู่ในระวางกลาง ๆ มักใช้เพียงเหล็กคลิป เรียกปลายติดคลิป (Clip End) คือใช้เหล็กฉากตัดสั้น ๆ แล้วเจาะรูกวดด้วยสลัก



รูปที่ 52 แสดงการทะลุของเรือชนิดสองระวาง (FLOODING OF TWO-COMPARTMENT TYPE)



รูปที่ 53 ฝากั้นผนึกน้ำทั้งสี่ ที่บังคับโดยสมาคมจัดชั้นเรือ [illegible]



รูปที่ 54 ฝากั้นทางขวาง (TRANSVERSE BHD.) ทำหน้าที่ไม่ให้ [illegible] ได้รับแรง (RACKING STRESS) อันเกิดจาก [illegible]

น๊อตสองสามตัวก็พอ และปลายเหล็กเอ็นที่อยู่ในระวางบนสุดนั้นไม่ต้องแล่นติดกับอะไรเลย ปล่อยเฉย ๆ เรียกปลายอิสระ (Free End) การติดเหล็กเอ็นนี้เป็นแบบที่ใช้อยู่ในเรือสินค้าทั่วไป

บางทีใช้เหล็กเส้นเอ็นทั้งทางนอนและทางตั้ง เพื่อทำให้ฝากั้นแข็งแรงดีขึ้น ในงานหมุดย้ำรูปหน้าตัดของเหล็กเอ็นที่จะใช้ คือ เหล็กรูปที, เหล็กแชนเนล , แผ่นเหล็กงอปีก (Flange Plate) เหล็กรูปตัวที่ปีกตุ่ม เหล็กฉากปีกตุ่ม ในงานแล่นประสานใช้เหล็กตัวทีกลับปีก เหล็กฉากกลับปีก และแผ่นเหล็กงอปีก เป็นเหล็กเอ็นของฝากั้น

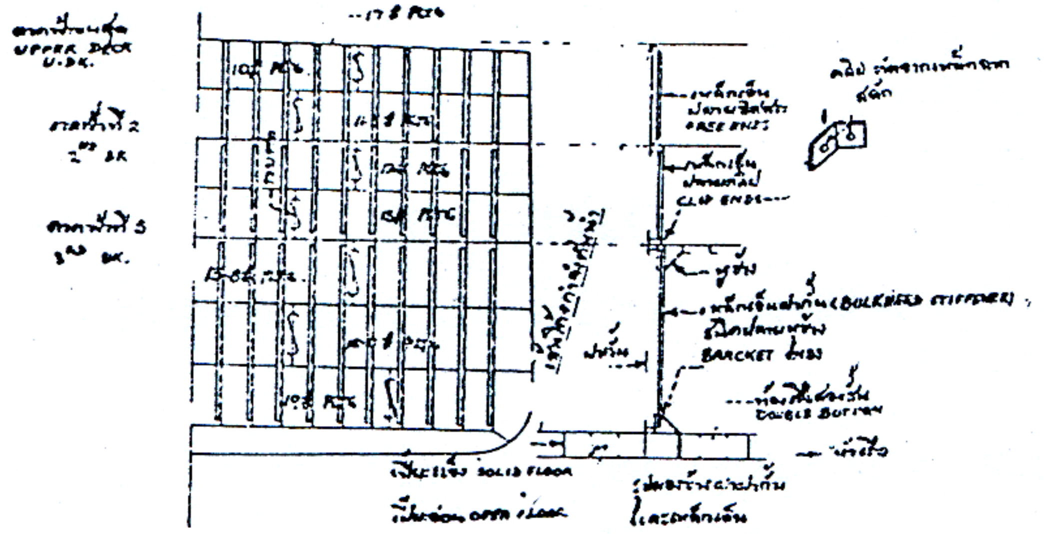
รูปที่ 56 แสดงแผ่นเหล็กแบบต่าง ๆ ใช้ทำฝากั้นแผ่นเหล็กแบบนี้มีความแข็งแรงอยู่ ในตัว จึงไม่ต้องใช้เหล็กเอ็นทำให้ประหยัดน้ำหนักได้มาก

5. ฝากั้นทางยาว (Lingitudinal Bulkhead)

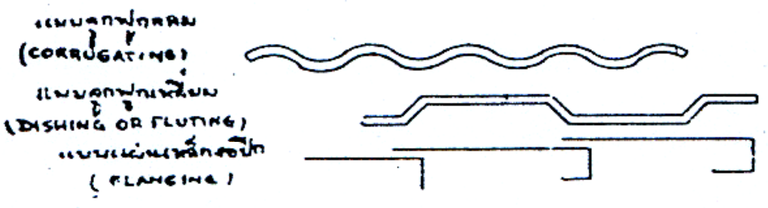
ฝากกั้นทางยาวเป็นอันตรายกับเรือสินค้าอย่างยิ่ง ถ้าติดไว้กึ่งกลางลำ (Centerline Longitudinal Bulkhead) โดยมีลิ้นผ่าน (Equalizing Pipe) ซึ่งเปิดให้น้ำผ่านจากกราบหนึ่งไปยังอีกกราบหนึ่ง ถ้าเกิดเรือรั่วขึ้นที่กราบหนึ่งกราบใด เรือ เอส.เอส.เอมเปรส ของ ไอแลนด์ ต้องคว่ำลงและเสียผู้โดยสารไป 1,000 คน เนื่องจากน้ำทะลุรั่วเข้าในห้องเครื่องหลังจากถูกชนเพราะฝากั้นทางยาวที่มีอยู่นั้นไม่มีลิ้นผ่าน เมื่อน้ำที่ทะลุเข้ามาขังอยู่ทางกราบหนึ่ง ก็เกิดโมเมนต์ทำให้เรือเอียง (Hee-Ling Moment) ถ้าโมเมนต์นี้มากกว่าโมเมนต์ทำให้เรือตั้งตรง (Righting Moment) เรือก็จะคว่ำทันที

6. ช่องว่าง (Cofferdam)

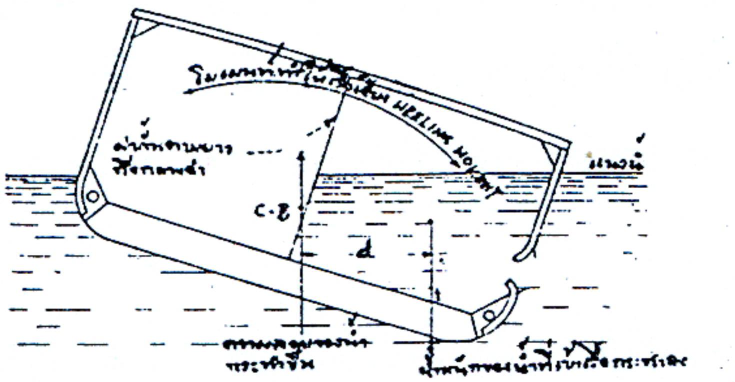
ช่องว่างนี้ทำให้มีขึ้นโดยการวางให้ฝากั้นห่างกันสองหรือสามฟุต จุดประสงค์ของ ช่องว่างก็เพื่อป้องกันมิให้น้ำมันรั่วเข้าไปยังถังน้ำที่อยู่ติดกัน อันอาจทำให้น้ำรับประทานใช้ไม่ได้ ช่องว่างนี้มักทำไว้ระหว่างฝากั้นของถังน้ำมันกับฝากั้นหน้าหรือหลังห้องหม้อห้องเครื่อง นอกจากนี้ ช่องว่างยังมีประโยชน์สำหรับลงไปตรวจดูฝากั้นทั้งสอง ถ้าเกิดการเสียหายก็จะได้เปลี่ยนเสียโดยเร็ว ถ้าระวางนั้นเป็นถังน้ำมัน อาจลงไปในช่องว่างนี้เปิดก๊อกก้นถังดูว่ามีน้ำปนมาในน้ำมันบ้างหรือเปล่าก็ได้ เพราะน้ำธรรมดาหนักกว่าน้ำมัน ๆ จึงลอยอยู่ข้างบนและน้ำอยู่ข้างล่าง เมื่อมีน้ำ ๆ จะไหลออกก่อน



รูปที่ 55 ผนังกั้นผนึกน้ำ (WATERTIGHT BULKHEAD W.T BHD และเหล็กเสริม (STIFFENER)



รูปที่ 56 แบบของแผ่นเหล็กที่ใช้ทำฝากั้นโดยไม่ต้องใช้เหล็กเสริม



รูปที่ 57 ผลอันเนื่องจากเรือจมไม่เหมือนกันทั้งสองกราบอันเกิดจาก
ฝากั้นผนึกน้ำกลางลำเรือ [illegible]
วิธีป้องกันให้เจาะรูที่ฝากั้นและติดวาล์ว หรือติดท่อปรับระดับ (EQUALIZING PIPE
OR VALVE) เมื่อเรือเกิดอุบัติเหตุ ก็เปิดวาล์วให้น้ำไหลไปทั้งสองกราบ เรือจะไม่เอียง

6.9 ทวนหัว, ทวนท้าย และ หางเสือ

ทวนหัว ทวนท้ายและหางเสือเรือ เป็นส่วนประกอบของเรือที่มีขนาดใหญ่อยู่ที่ตอนหัว และตอนท้ายของเรือ และเวลาพิจารณาก็นำมาพิจารณาร่วมกัน

ทวนหัวเป็นกงเรือที่มีขนาดใหญ่และสำคัญ สำหรับเป็นที่ต่อตอนปลายของแผ่นเหล็กตัวเรือทั้งสองกราบตอนหัวเข้าด้วยกน ตอนโคนทวนหัวติดกับกระดูกงูอย่างแข็งแรง

ทวนท้ายคงทำหน้าที่เช่นเดียวกันกับที่กล่าวมาแล้ว แต่อยู่ทางภาคท้าย ยิ่งกว่านั้นทวนท้ายยังต้องทำหน้าที่รองรับหางเสือ เพลาหางเสือของเรือทั้งใบจักรเดี่ยวและใบจักรคู่

หางเสือเรือทำหน้าที่สำคัญในการบังคับเรือให้แล่นตรงไปตามทิศทางที่ต้องการ มีรูปร่างเพรียวกว้าง ด้านหน้าของหางเสือติดกับทวนท้ายหมุนไปมาได้ ส่วนตอนบนหางเสือติดกับก้านหางเสือ ทำหน้าที่บังคับให้หางเสือหันไปมาด้วยกำลังเครื่องหางเสือ

รูปที่ 58 แสดงตำแหน่งของส่วนทั้งสามที่กล่าวมาแล้ว ซึ่งจะได้กล่าวอย่างละเอียดต่อไป

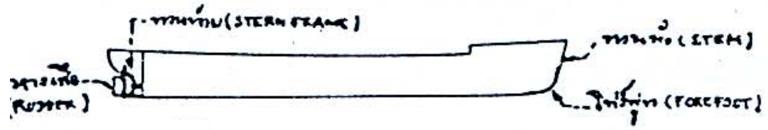
1. ทวนหัว (Stem)

ทวนหัวนี้เป็นส่วนที่ถือว่าอยู่ในทางค่อนข้างดิ่ง และยื่นออกไปทางหัวเรือเล็กน้อย ทวนหัวทำหน้าที่คล้ายกับกระดูกงู ทวนหัวให้ความแข็งแรงแก่เรือและเป็นที่แผ่นเหล็กกราบขวา กราบซ้ายมารวมกัน ทวนหัวเป็นส่วนที่จะต้องพบแรงกระแทกของน้ำก่อนอื่น เหมือนกับกระดูกงูจะพบกับการเกยตื้นก่อนส่วนอื่น จึงต้องทำให้แน่หนาแข็งแรง โดยการเสริมกำลังด้วยอกไก่ (Breast Hook) และสตริงเกอข้าง

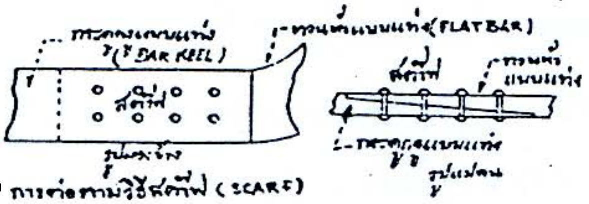
ทวนหัวแบบง่าย ๆ นั้น ทำด้วยแท่งเหล็กมีหน้าตัดเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า ซึ่งเรียกว่า ทวนหัวแบบแท่ง (Bar Stem) ส่วนล่างย้ำติดกับกระดูกงูแท่ง ทวนหัวนั้นบางทีขึ้นรูปด้วยการ เผาไฟให้ ร้อนแดงแล้วตีขึ้นรูป ซึ่งเรียกว่าฟอชจิง และตอนข้าง ๆ นั้นเซาะบ่าให้ลึกเท่ากับความหนาของแผ่นเหล็กเพื่อให้ปลายแผ่นเหล็กเข้ารูปได้เรียบในเมื่อใช้การย้ำหมุดเรียกบ่ารับปลายแผ่นเหล็ก (Rabbet) ดูรูปที่ 60

ถ้าท้องเรือใช้กระดูกงูแบน ส่วนล่างของทวนหัวที่จะนำมาต่อต้องค่อย ๆ ผายออกให้กว้าง เพื่อรับกับความกว้างของกระดูกงูแบน แต่ถ้าท้องเรือใช้กระดูกงูแท่ง ทวนหัว ก็ใช้เหล็กแท่งธรรมดาที่มีความหนาเท่ากับกระดูกงูแท่งนั้น แล้วบากรอยต่อด้วยวิธีสก๊าฟ (Scarf) ดูรูปที่ 59

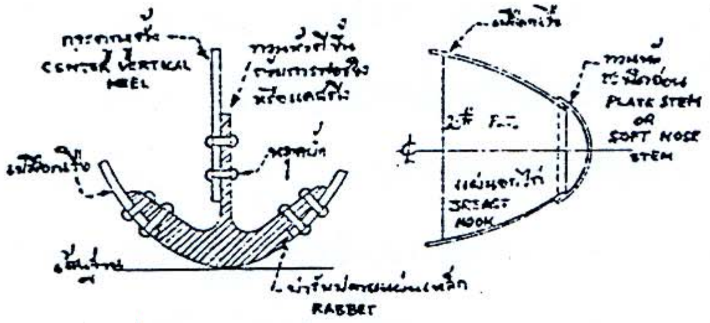
การออกแบบทวนหัวอีกแบบหนึ่งนั้น ใช้ตอนบนเป็นเหล็กแท่งฟอชจิงหรือโรล และส่วนล่างใช้เหล็กแคสติ้ง ทั้งสองส่วนต่อกันด้วยวิธีสก๊าฟ เหนือโฟฟูท (Fore Foot) เล็กน้อย รูปที่ 60 แสดงการต่อของกระดูกงูตั้งกับแผ่นเหล็กตัวเรือ เข้ากับเหล็กแคสติ้ง โดยวิธีหมุดย้ำ



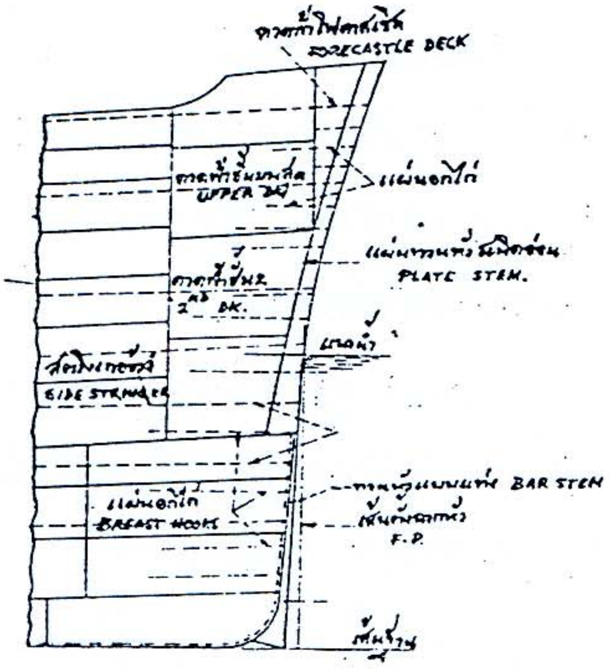
รูปที่ 58 ทวนหัว, ทวนท้าย และหางเสือ



รูปที่ 59 การต่อตามวิธีสคาร์ฟ (SCARF)



รูปที่ 60 แสดงการต่อทวนหัวกับกระดูกงู



รูปที่ 61 ทวนหัวสมัยใหม่ซึ่งใช้แผ่นต่อเข้ากับแผ่นเหล็ก

1.1ทวนหัวชนิดอ่อน (Soft Nose Stem) เรือปัจจุบันนี้มักจะใช้ทวนหัวตอนบนเป็นแบบชนิดอ่อน ทำด้วยแผ่นเหล็กธรรมดา และส่วนล่างแล่นติดกับทวนหัว ซึ่งทำด้วยเหล็กแคสติ้ง ทวนหัวชนิดอ่อนนี้ทำขึ้นโดยวิธีเฟอเนช โดยทำตอนบนกว้างและแคบตอนล่าง และเสริมกำลังด้วยแผ่นกันปิดหรือแผ่นอกไก่ก็ได้ ดูรูปที่ 60 ข้อดีของทวนหัวชนิดอ่อนก็คือทำให้เกิดเสียหายน้อยเวลาชนกัน แบบเก่าใช้ทวนหัวแบบเหล็กแท่งมักเกิดเสียหายมากเวลาชนกัน ถ้าเรือนั้นออกแบบโดยใช้ทวนหัวชนิดอ่อนและกั้นฝากั้นในเรือให้มาก จะทำให้เรือทนต่อการอับปางได้ดีในทางใช้การที่ดีนั้นทวนหัวส่วนล่างภายใต้แนวน้ำมักทำด้วยเหล็กแคสติ้งที่แข็งแรง ส่วนเหนือแนวน้ำขึ้นมาควรใช้ทวนหัวชนิดอ่อน เพราะส่วนที่จะยื่นออกไปชนได้นั้นมักเป็นส่วนเหนือน้ำรูปที่ 61 แสดงการประกอบแผ่นเหล็กและแผ่นเหล็กเสริมกำลังในเรือที่มีทวนหัวสมัยใหม่

1.2แบบต่าง ๆ ของหัวเรือ แบบหัวเรือที่ใช้ส่วนมากมีอยู่ 3 แบบ คือ แบบหัวตัด , แบบหัวแหลม และแบบเรือหัวช้อนหอย

เรือหัวตัด (Plumb Bow) ดูรูปที่ 62 (A) มักเป็นหัวเรือสินค้ามีความเอนทวนหัวน้อยที่สุด เพื่อไม่ให้ดูเป็นเรือหัวเอนกลับไปทางท้าย เรือแบบนี้มีความผายปากเรือน้อยมาก หัวเรือแบบนี้เวลาเอาสมอขึ้นมักครูดกับข้างเรือทำให้เสียหาย

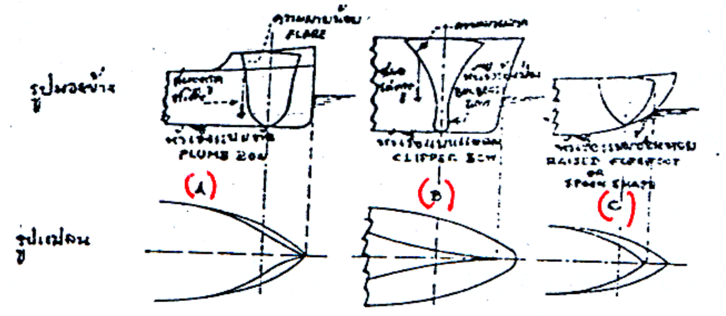
เรือหัวแหลม (Clipper Bow) เรือพวกนี้หัวงอนออกไปทางหัวอีกมาก และมีความผายปากเรือมาก ดูรูปที่ 62 (B) เวลาเอาสมอขึ้นจึงไม่สู้ทำความเสียหายให้แก่ตัวเรือนัก ความผายของปากเรือทำให้มีห้องต่าง ๆ มาก และกว้างขึ้นเพื่อติดตั้งเครื่องจักรต่าง ๆ และทำให้ดาดฟ้าแห้ง เพราะความผายของเรือไม่ทำให้น้ำกระเด็นขึ้นมา เรือบรรทุกเครื่องบินต้องสร้างให้มีความผายปากเรือมากผิดปกติ เพราะต้องการให้มีเนื้อที่ทางภาคหัวมาก เพื่อตั้งเสาค้ำพื้นดาดฟ้าลานบินดูรูปที่ 63

เรือหัวช้อนหอย (Spoon Shape or Raised Forefoot Bow) ดูรูปที่ 62 (C) หัวเรือแบบนี้ใช้มากในเรือใบ และเรือเบิกทางน้ำแข็ง (Icebraker) และยังใช้กันอยู่มากในเรือสินค้า เรือแบบนี้วิ่งเหนือคลื่นทำให้ความทนทานทะเลดี และมีความต้านทานน้อย ฉะนั้นจึงวิ่งเร็วดีกว่าเรือหัวตัด หรือหัวแหลม

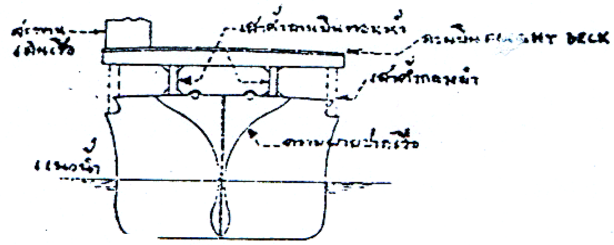
2. ทวนท้าย (Stern Frame)

ทวนท้ายก็เหมือนกับทวนหัวที่เป็นส่วนที่ตั้งอยู่ในทางดิ่งบนกระดูกงู และทำหน้าที่ ยึดปลายแผ่นเหล็กตัวเรือทางตอนท้าย ยิ่งกว่านั้นยังทำหน้าที่รับหางเสือเพลาใบจักร และรับส่วนท้ายเรือสุดอีกด้วย ฉะนั้น ทวนท้ายจึงแข็งแรงและยุ่งยากในการทำมากกว่าทวนหัว

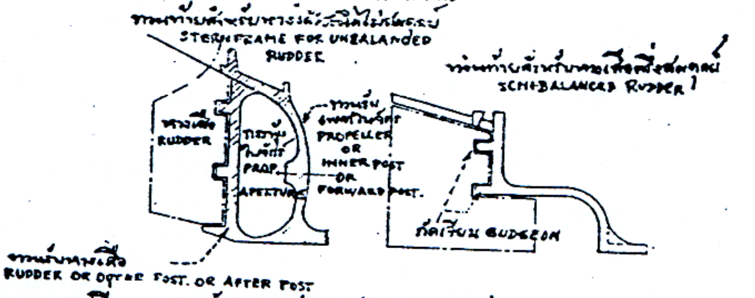
ตามที่แสดงในรูปที่ 64 ทวนท้ายของเรือใบจักรเดี่ยวประกอบด้วย ทวนรับหางเสือ (Rudder Post) และทวนรับเพลาใบจักร (Propeller Post) และส่วนช่องว่างตรงที่ใบจักรหมุนอยู่นั้นเรียก กระพุ้งใบจักร (Aperture) ทวนรับหางเสือนั้นทำการรับหางเสืออยู่ โดยมีแกนกัดเจียน (Gudgeon)



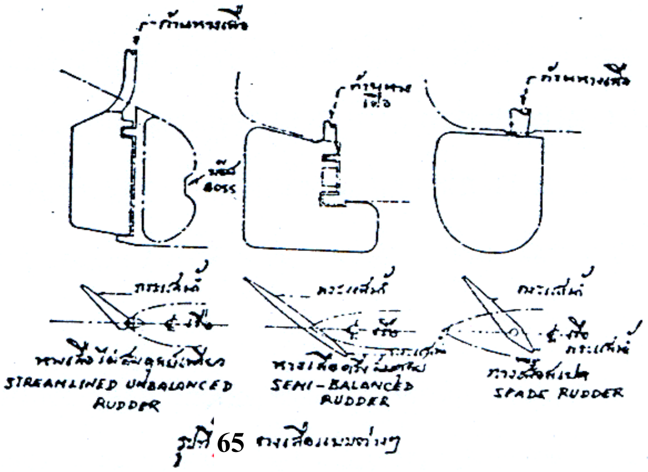
รูปที่ 62 หัวเรือแบบต่างๆ TYPICAL BOW TYPES



รูปที่ 63



รูปที่ 64 ทวนท้ายแบบต่างๆ (STERNFRAMES)



รูปที่ 65 หางเสือแบบต่างๆ

ยื่นออกมารับแง่หางเสือ (Rudderlug) ที่ยื่นออกมาจากหางเสือแล้วร้อยติดกันด้วยปิ้นหางเสือ (Pintle) แง่ยื่นไม่ได้รับน้ำหนักของหางเสือ แต่ทำหน้าที่เป็นแง่รองรับเพียงจุดหมุนเท่านั้น ในเรือขนาดใหญ่ กระพุ้งใบจักรต้องทำให้ดีเพื่อให้น้ำไหลสู่ใบจักรดีและไม่เกิดการสั่นสะเทือน อันเนื่องจากปลายใบจักรพ้นน้ำ ถ้าปล่อยใบจักรชิดกับตัวเรือมากจะทำให้ตัวเรือสั่น ฉะนั้น ระยะห่างของตัวเรือกับปลายใบจักรจึงควรใช้ประมาณ 1/6 ของเส้นผ่าศูนย์กลางใบจักรหรือประมาณ 17 % ของเส้นผ่าศูนย์กลางใบจักร บางแห่งใช้ 25 % ของเส้นผ่าศูนย์กลางใบจักร

เรือที่ใช้กระดูกงูเป็นแท่งเหล็กนั้นเมื่อจะต่อกับทวนท้ายก็ใช้ต่อโดยวิธีสค๊าฟ เหมือนทวนหัว ถ้าใช้กระดูกงูแบนตอนหน้าของทวนท้ายต้องตีให้แบนและกว้างออก เพื่อต่อกับกระดูกงูแบน และที่ทวนท้ายนั้นมักเซาะบ่ารับปลายแผ่นเหล็กด้วย ตอนบนของทวนท้ายมักทำให้ยาวไปจนจดกับ ตัวเรือและติดกับกงตอนท้ายเรือ ซึ่งเรียกว่า กงแค็นท์ (Cant Frame)

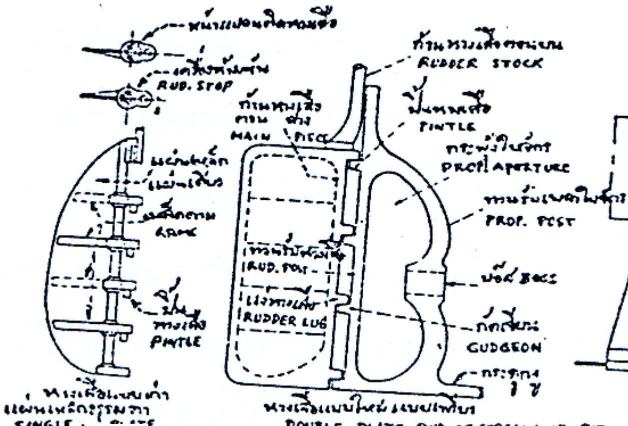
3. หางเสือ (Rudder)

หางเสือแบบแผ่นธรรมดา (Single Plate Rudder) นั้น เป็นแผ่นเหล็กที่ทำขึ้น ให้มีความกว้างความยาวพอสมควรแล้วติดกับก้านหางเสือ (Rudder Stock) โดยใช้เหล็กดามสลับกันทั้ง สองข้าง ดูรูปที่ 66 หางเสือแบบนี้ใช้ในเรือเล็ก ๆ เป็นแบบโบราณไม่สู้ดี มีความต้านทานมาก หางเสือสมัยใหม่ใช้แบบเพรียว (Streamlined Rudder)

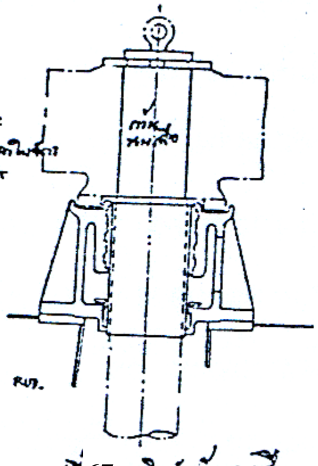
หางเสือนั้นอาจทำเป็นแบบเครื่องสมดุล (Semibalance Rudder) และ แบบไม่สมดุล (Unbalanced Rudder) หางเสือแบบครึ่งสมดุลนั้นมีส่วนหนึ่งของหางเสือยื่นออกไป ทางด้านหน้าของก้านหางเสือ ส่วนแบบไม่สมดุลนั้นไม่มีเนื้อที่ยื่นออกไปทางหน้าของก้านหางเสือดังกล่าว หางเสือแบบครึ่งสมดุลที่ใช้กันอยู่นั้นมีหลายแบบ ที่สำคัญ ๆ ได้แสดงไว้ในรูปที่ 65

จากรูปต่าง ๆ ที่แสดงนั้นจะเห็นว่าหางเสือแบบครึ่งสมดุลนั้นใช้กำลังหันไม่สู้มาก จึงใช้เครื่องหางเสือขนาดเล็กกว่า เพราะเหตุว่ากระแสน้ำกระทำแก่เนื้อที่หางเสือที่ยื่นอยู่ข้างหน้าของก้านหางเสือทำให้หางเสือหันได้เร็ว เนื้อที่ด้านหน้าแกนหางเสือนั้นมักใช้ 25 เปอร์เซ็นต์ของเนื้อที่ทั้งหมด หางเสือแบบครึ่งสมดุลมักใช้ในเรือรบและเรือสินค้าขนาดใหญ่ เพราะใช้ได้คล่องแคล่ว โดยไม่ต้องใช้เครื่องหางเสือใหญ่จนเกินไป

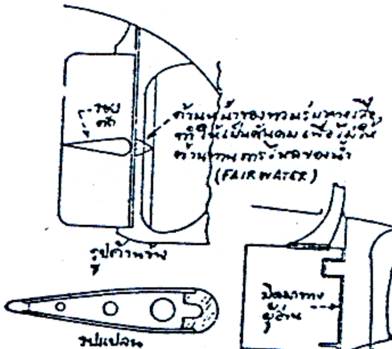
ถ้าหางเสือที่ใช้นั้นทำเป็นสองตอน ยึดติดกันด้วยหน้าแปลนและสลักน๊อตขนาดใหญ่ ซึ่งเมื่อปลดสลักน๊อตเหล่านั้นแล้ก็ยกหางเสือก็ได้ ก้านหางเสือส่วนล่างซึ่งติดกับใบหางเสือนั้น เรียกก้านหางเสือตอนล่าง และส่วนที่อยู่ตอนบนเรียกก้านหางเสือตอนบน ก้านหางเสือนี้ต้องทำด้วยเหล็กฟอชจิง ซึ่งมีราคาถูก และมีคุณภาพเหนือกว่าเหล็กแคสติ้งในการต้านทานแรงบิดดีกว่า



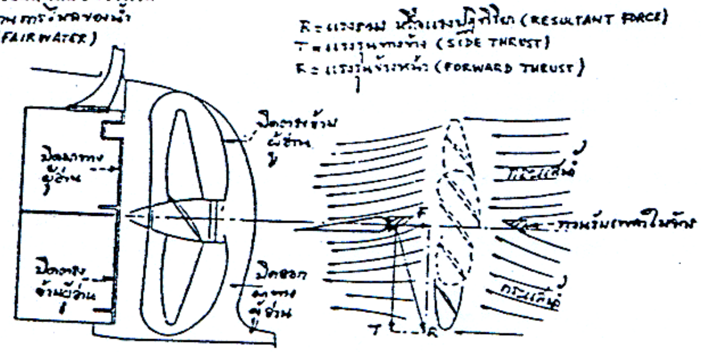
รูปที่ 66 หางเสือแบบเก่า – แบบใหม่



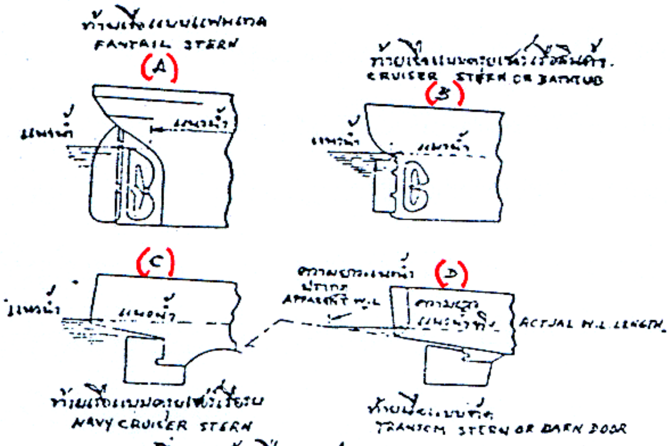
รูปที่ 67 แบริ่งหางเสือ RUDDER BEARING



รูปที่ 68 รูปตัดของหางเสือแบบเพรียว STREAMLINED OR HYDROFOIL RUDDER.



รูปที่ 69 (GOLDSCHMIDT / CONTRAGUIDE PATENT RUDDER)



รูปที่ 70 ท้ายเรือแบบต่างๆ TYPICAL STERNS

น้ำหนักของหางเสือทั้งหมดถูกรับไว้ด้วยแบริ่งกับก้านหางเสือ ซึ่งอยู่ภายในเรือติดอยู่บริเวณเปี๊ยะภาคท้าย และภายใต้แบริ่งนั้นกั้นเป็นห้องผนึกน้ำน้ำเข้ามาหล่อแบริ่งก้านหางเสือได้ แต่ เข้าเรือไม่ได้เพราะที่แบริ่งนั้นออกแบบไว้ให้มีฝาอัดก้านหางเสือด้วย ดูรูปที่ 67 ผิวหน้าของแบริ่งฉาบด้วยโลหะที่ไม่มีความฝืด และหล่อลื่นไว้อย่างดี

3.1 หางเสือชนิดแผ่นเดียวธรรมดาและสองแผ่น หางเสือนั้นสร้างกันขึ้นหลายแบบ ซึ่งขึ้นอยู่กับแบบและขนาดและการบริการของเรือลำนั้น แบบที่ง่ายที่สุดได้แก่หางเสือแผ่นเดียวธรรมดาเป็นแผ่นเหล็กหนา ตัดให้มีขนาดตามความต้องการที่จะหันเรือลำนั้นได้ ซึ่งปกติมีเนื้อที่ประมาณ 2 ถึง 3 เปอร์เซ็นต์ของเนื้อที่ผืนผ้าอันเกิดจากความยาวของเรือใต้แนวน้ำ คูณกับกินน้ำถึกของเรือลำนั้น การยึดแผ่นเหล็กเข้ากับก้านหางเสือตอนล่างโดยเหล็กเส้นปะกับสลับกันประมาณ 3 หรือ 4 อัน ดูรูป 66 หางเสือแบบนี้ไม่ดีต้องออกแรงในการหันมาก ราคาแพง น้ำหนักมาก

แบบหางเสือที่สมัยใหม่นั้นเป็นแผ่นเหล็กสองแผ่นมีโครงอยู่ตอนหัวและตอนท้าย จะย้ำแผ่นเหล็กเข้ากับโครงนี้หรือประสานก็ได้ ดูรูป 68 ในเรือสมัยใหม่ใช้แล่นประสานโดยตลอด ภายในของแผ่นเหล็กใส่เหล็กยึดให้แข็งแรง โดยที่แรงเค้นตอนปลายใบน้อยลง จึงทำให้แผ่นเหล็กในตอนนั้นบางลงได้ แผ่นเหล็กทั้งสองที่ทำหางเสือนี้ตัดเป็นรูปเพรียว ด้านหน้ากว้างแล้วเพรียวเล็กลงทางปลาย ใบหางเสือแบบนี้ลดความต้านทานลงได้ 5 เปอร์เซ็นต์

ภายในหางเสือแบบนี้จึงโปร่ง ในสมัยก่อนใช้ไม้บรรจุไว้แล้วทาด้วยเสนแดงกันผุ ต่อมา สมัยนี้คงปล่อยให้กลวงอยู่อย่างนั้น แล้วทาด้วยบิทูมินัส หางเสือขนาดใหญ่มีช่องคนผ่านเจาะไว้ให้ เข้าออกได้เพื่อตรวจความสะอาด การผุกร่อน วิธีทำหางเสือในบางกรณีทำให้มีความลอยเพียงพอ เพื่อเป็นแรงพยุงหางเสือให้ลอยขึ้น เพื่อช่วยแบริ่งที่รองรับจะไม่ได้รับน้ำหนักมากเกินไป

3.2 หางเสือคอนตรา (Goldschmidt Contraguide Rudder) แบบอื่นของหางเสือที่ใช้กันมากในขณะนี้ได้แก่หางเสือคอนตรา หางเสือแบบนี้ตอนปลายปีกแบ่งออกเป็น 2 ตอนเท่า ๆ กัน ตอนบนบิดไปทางขวา และตอนล่างบิดไปทางซ้าย ซึ่งที่ทวนรับเพลาใบจักรจะหักไปในทิศตรงข้ามกับหางเสือ กระแสน้ำที่มากระทบกับใบหางเสือมีปฏิกิริยาเร็วขึ้น ดูรูปที่ 69

มุมหางเสือนั้นใช้เพียง 30 ถึง 35 ดีกรีก็พอ การหักหางเสือเป็นมุมมาก ๆ นั้น ลดความเร็วของเรือลง แต่ไม่ได้ทำให้วงหันของเรือเล็กลงเลย ฉะนั้นที่หางเสือ จึงมีเครื่องห้ามมุมหันหางเสือ (Rudder Stop) ไม่ให้หักเกิน 33 ถึง 35 ดีกรี ดูรูปที่ 66

3.3 แบบต่าง ๆ ของท้ายเรือ (Types of Sterns) มีแบบของท้ายเรืออยู่ 4 แบบ ด้วยกันคือ ท้ายเรือแบบแฟนเทล (Fantail Stern) ท้ายเรือแบบครุยเซอเรือสินค้า (Cruiser Stern) ท้ายเรือครุยเซอเรือรบ (Navy Cruiser Stern) และท้ายเรือแบบตัด (Transom Stern) ท้ายแบบแฟนเทล

เดี๋ยวนี้หมดสมัยเสียแล้ว จะเห็นได้จากแบบเรือเก่า ๆ ดูรูป 70 (A) ท้ายเรือครุยเซอร์เรือสินค้าเป็นแบบนิยมของสมัยนี้ เพราะลดความต้านทานให้น้อยลง และเรือถือท้ายง่ายขึ้น จากการทดลองในถังทดลองที่อู่เรือนิวปอร์ตนิวส์ พบว่าท้ายเรือแบบนี้ลดความต้านทานลง 3 เปอร์เซ็นต์ การลดความต้านทานลงนี้เป็นเพราะท้ายเรือแบบนี้ เพิ่มความยาวแนวน้ำให้ยาวกว่าแบบท้ายเรือแฟนเทล ดูรูปที่ 70 (B)

ท้ายเรือแบบตัด ดูรูปที่ 70 (D) ใช้กับท้ายเรือที่มีความเร็วสูงในสหรัฐ ฯ เช่น ท้ายเรือของเรือลาดตระเวนและเรือพิฆาต และเรือยนต์เร็ว (Small High-Speed Pleasure Cruisers And Runaboats) ท้ายเรือแบบนี้กว้างและท้องเรือค่อนข้างแบน ซึ่งจะช่วยไม่ให้ท้ายเรือจมลงจนเกิดการลากท้ายเมื่อเรือวิ่งความเร็วสูง ๆ ความต้านทานตอนความเร็วสูง ๆ นี้ ลดลงถึง 3 ถึง 5 เปอร์เซ็นต์ เหตุที่ความต้านทาน ลดน้อยลงนี้ก็เนื่องจากแนวน้ำปรากฏ (APPARENT OR Effective Walerline) ที เกิดขึ้นยาวกว่า ความยาวแนวน้ำจริง ๆ ของเรือ แนวน้ำปรากฏนี้ก็คือแนวน้ำที่ยืดออกไปพบกับพริ้วน้ำที่โผล่จากท้ายเรือนั่นเอง

6.10 ฐานแท่น (Foundations)

แท่นจะเป็นตัวถ่ายน้ำหนักหรือแรงจากอุปกรณ์และเครื่องจักรที่รองรับอยู่ในยังโครงสร้างตัวเรืออย่างถูกต้องและเหมาะสม

ในการติดตั้ง จะต้องไม่ให้อุปกรณ์และเครื่องจักรติดตั้งโดยตรงกับแผ่นเหล็กตัวเรือ หรือชิ้นส่วนโครงสร้างอื่น ๆ ที่รับแรงจากคลื่น แรงระเบิดจากการยิงปืน การสั่นของเพลาใบจักร เพราะแรงเหล่านี้จะทำให้โครงสร้างตัวเรือบิด (Distortion) หรือแรงสั่นสะเทือน (Vibration) จะทำให้อุปกรณ์และเครื่องจักรเสียหาย หรือทำให้การทำงานของอุปกรณ์และเครื่องไม่สมบูรณ์

อุปกรณ์และเครื่องจักรต้องให้ได้ศูนย์ (Alignment) ซึ่งกันและกันเช่น มอเตอร์กับสูบน้ำจืด จะต้องไม่ติดตั้งบนชิ้นส่วนโครงสร้าง 2 ชิ้นที่เคลื่อนไหวไปในทิศทางที่ต่างกัน เช่น ฝากั้นกับพื้นดาดฟ้า ฝากั้นกับกงตามยาว ๆ

อุปกรณ์ที่ติดตั้งบนดาดฟ้าจะต้องมีที่ยึดด้านบนของอุปกรณ์ที่มีอัตราส่วนระหว่างความสูงต่อความกว้างต่ำสุดของฐานไม่น้อยกว่า 5 ต่อ 1 หรือมากกว่า ที่ยึดด้านบนจะต้องยอมให้อุปกรณ์เคลื่อนไหวในทางดิ่งได้บ้าง เพื่อไม่ให้อุปกรณ์ถูกยึดตรึงอยู่กับที่ระหว่างแท่นกับที่ยึด

จะต้องจัดให้มีช่องทางสำหรับเข้าไปตรวจสอบและบำรุงรักษาอุปกรณ์และเครื่องจักรต่าง ๆ ได้

วัสดุที่ใช้ในการยึดมี Locknut , Castellated nut และ Cotter pin หรือเครื่องมืออย่างอื่นที่เหมาะสม ทั้งนี้เพื่อป้องกันสลักยึด (Hold-down Bolt) มิให้คลายตัวเนื่องจากแรงกระแทกหรือแรงสั่นสะเทือน

เครื่องจักรใหญ่ที่จะต้องได้ศูนย์กับอุปกรณ์ที่นำมาต่อ เช่นเครื่องจักรใหญ่กับเฟืองทด เครื่องขับกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จะใช้ Chock Fast หรือ Machined Pad และ Shim เพื่อช่วยในการ ให้ได้ศูนย์เร็วขึ้น

จะต้องระมัดระวังเป็นพิเศษบริเวณช่องทางดูดอากาศดีของเครื่องจักรต่าง ๆ เพื่อป้องกัน ไม่ให้สิ่งของต่าง ๆ เช่นที่ยึดอุปกรณ์ตกลงไปในช่องทางดูดอากาศดี

หมายเหตุ

(1) ทร.สหรัฐ ฯ ได้จัดพิมพ์เอกสารเกี่ยวกับมาตรฐานทางทหาร MIL- STD-1689 (SH) เล่มนี้ขึ้น เพื่อให้ทราบถึงความต้องการขั้นต่ำสุดในการต่อเรือ (เฉพาะโครงสร้างตัวเรือ) ของเรือรบผิวน้ำและเรือดำน้ำที่สร้างด้วยเหล็กที่ไม่ใช่เหล็กชนิด High - yield

ความต้องการขั้นต่ำสุดในการต่อเรือ ประกอบด้วย

- การปฏิบัติในการต่อเรือ
- มาตรฐานของวัสดุ
- การออกแบบรอยต่อในการเชื่อม
- ฝีมือ
- การตรวจสอบรอยเชื่อม
- การบันทึกเกี่ยวกับการประกันคุณภาพ

ในการกำหนดความต้องการของฝ่ายเสนาธิการ (ทร.) ในการจัดหาเรือ มักจะกำหนดไว้ว่ามาตรฐานในการสร้างเรือ (การออกแบบ วัสดุ ฝีมือ และอุปกรณ์) จะต้องถูกต้องตามมาตรฐานของ ทร.สหรัฐ ฯ หรือ ทร.ของประเทศในทวีปยุโรปตะวันตก ผู้เรียบเรียงจึงขอเสนอความคิดเห็นส่วนตัวว่าน่าจะเป็นการสมควรที่ยอมรับเอกสารที่เรียบเรียงขึ้นเล่มนี้ เป็นแนวทางในการปฏิบัติเกี่ยวกับการซ่อม –สร้างเรือของ อร.ได้ ในกรณีที่ไม่ได้กำหนดมาตรฐานไว้ หรือไม่มีหลักฐานอ้างอิง

(2) American Bureau of Shipping (ABS) เป็นสมาคมแห่งประเทศสหรัฐอเมริกาที่ตั้งขึ้นเพื่อรับจดทะเบียนเรือพาณิชย์ต่าง ๆ และควบคุมการสร้างเรือให้ถูกต้องตามกฎและระเบียบที่สมาคมกำหนดขึ้น ดังนั้นวิธีการปฏิบัติและอุปกรณ์ที่ใช้ในการเชื่อม รวมทั้งคุณสมบัติของช่างเชื่อมจะต้องถูกต้องตามกฎและระเบียบของสมาคมนี้ เช่นช่างเชื่อมจะต้องผ่านการทดสอบการเชื่อมที่ ABS กำหนด และ ABS จะออกประกาศนียบัตรรับรองให้ถ้าผ่านการทดสอบ ช่างเชื่อมที่ไม่ผ่านการทดสอบก็ไม่สามารถปฏิบัติงานเชื่อมในการสร้างเรือที่ ABS รับจดทะเบียน

ตามความคิดเห็นส่วนตัวของผู้เรียบเรียง ในกรณีที่สร้างเรือและไม่ขึ้นทะเบียนกับ ABS หรือไม่ขึ้นกับมาตรฐานอื่น ๆ เจ้าของเรือควรจะมีการทดสอบช่างเชื่อมของบริษัทอู่ต่อเรือให้เป็นไปตามที่

ABS กำหนดหรือตามมาตรฐานอื่น ๆ โดยอนุโลม หรือจะกำหนดขึ้นเองก็ได้ แต่ควรจะสอดคล้องกับ ABS หรือมาตรฐานอื่น ๆ ช่างเชื่อมคนใดที่ผ่านการทดสอบจึงยอมรับให้ทำงานเกี่ยวกับการเชื่อมได้

กฎและระเบียบในการสร้างเรือพาณิชย์ จะศึกษาค้นคว้าเพิ่มเติมได้จากเอกสารอื่น ๆ ดังนี้

- Rules and Regulations for the Construction and Classification of Steel Ships ของสมาคม Lloy's Register of Shipping (LR) แห่งประเทศอังกฤษ
- Rules and Regulations for the Construction and Classification of ships ของสมาคม Nippon KaIJI Kyokai (NK) แห่งประเทศญี่ปุ่น

(3) เอกสารเกี่ยวกับมาตรฐานทางทหาร MIL-STD-248C เล่มนี้จัดพิมพ์โดย ทร.สหรัฐ ฯ เพื่อให้ทราบถึงความต้องการเกี่ยวกับวิธีการปฏิบัติและอุปกรณ์ที่ใช้ในการเชื่อม รวมทั้งคุณสมบัติของช่างเชื่อมจะต้องถูกต้องตามมาตรฐานนี้ ซึ่งส่วนมากจะมีกฎหรือหลักเกณฑ์คล้ายกับกฎและระเบียบของ ABS

ท่านที่สนใจจะศึกษาค้นคว้าเพิ่มเติมเอกสารตาม (1) , (2) และ (3) ได้ที่ห้องสมุด อร.หรือห้องสมุด อจปร.อร.

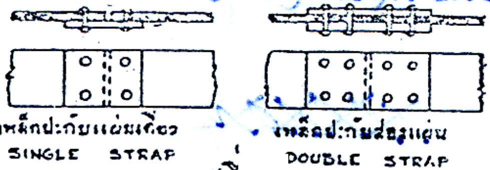
บทที่ 7
การประกอบตัวเรือ

7.1 การย้ำหมุด (Riveting)

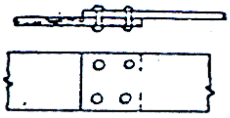
แม้ว่าการต่อแผ่นเหล็กโดยใช้หมุดย้ำจะหมดสมัย เพราะใช้วิธีแล่นประสานแทนก็ตาม แต่การต่อแผ่นเหล็กโดยวิธีหมุดย้ำยังคงสำคัญอยู่ในการต่อเรือ ดังจะปรากฏเห็นได้ในเรือ เอส.เอส.ยูไนเตดสเตท (S.S.United States) ว่าตะเข็บทางยาวแถวบริเวณกึ่งกลางลำนั้นต่อโดยหมุดย้ำทั้งสิ้น ส่วนรอยต่อทางขวางนั้นต่อโดยการแล่นประสาน หมุดย้ำทำหน้าที่ให้ความปลอดภัยแก่เรือ เพราะแผ่นเหล็กในเรือที่แล่นประสานหมดทั้งลำนั้น เมื่อเกิดการฉีกขาดของแผ่นเหล็กขึ้นมันจะฉีกตลอดไปจากกราบขวาไปกราบซ้ายเลยทีเดียว เพราะแผ่นเหล็กที่แล่นติดกันนั้นกลายเป็นเนื้อเดียวกันไปหมด แต่ถ้าแผ่นเหล็กไม่ได้ติดต่อกันเป็นเนื้อเดียวเนื่องด้วยใช้ตะเข็บหมุดย้ำแล้ว เมื่อแผ่นเหล็กฉีกขาดถึงรอยต่อหมุดย้ำ การฉีกขาดจะหยุดทันที ด้วยเหตุที่เรือที่ต่อขึ้นโดยประสานทั้งลำอย่างเช่น เรือที่ต่อในระหว่างสงครามโลกครั้งที่ 2 ก็ต้องมีการย้ำหมุดเข้ามาเกี่ยวข้อง ซึ่งเรียกว่าแผ่นกันฉีก (Stop Cracker of Crack Arrester) ไว้ที่กึ่งกลางลำ วิธีทำก็คือ ณ ที่แผ่นเชียร์กลางลำนั้นตัดแผ่นเหล็กออกให้กว้าง 1/8” ยาว 200 ฟุต (ในเรือ Liberty Ship ที่ต่อตอนสงครามโลกครั้งที่ 2) ทั้งสองกราบ แล้วเอาแผ่นเหล็กมาทาบแล้ว ย้ำหมุดตลอด ทฤษฎีนี้ก็เพื่อทำการหยุดยั้งรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้น ณ ที่หนึ่งที่ใด เมื่อฉีกมาถึงแผ่นกันฉีกนี้แล้วจะหยุดเรือบรรทุกน้ำมัน T – 2 Tanker ที่ต่อระหว่างสงครามโลกครั้งที่ 2 ใช้แล่นประสานทั้งลำแต่ก็ต้องมีแผ่นเหล็กกันฉีกหลายแห่ง ประมาณ 4 หรือ 8 แห่ง เรือที่ต่อในเร็ว ๆ นี้ส่วนมากก็ต้องมีแผ่นกันฉีกเช่นกัน แต่เปลี่ยนแปลงไปเล็กน้อย โดยใช้ตะเข็บย้ำหมุด หรือต่อโดยใช้เหล็กปะกับแล้ว ย้ำหมุดแทน รอยต่อชนิดแผ่นประกับแบบการต่อหมุดย้ำนั้นมีมาตรฐานอยู่ 2 แบบ คือ วิธีแรกใช้แผ่นปะกับ ดูรูปที่ 1 อีกวิธีหนึ่งใช้แผ่นเหล็กเกยกัน ดูรูปที่ 2

เมื่อมีรอยต่อเกิดขึ้นที่ปลายทางขวางของแผ่นเหล็ก การต่อนั้นเราเรียกว่าตะเข็บขวาง (Butt) เมื่อรอยต่อเกิดขึ้นที่ตะเข็บตามยาว เรียกรอยต่อนั้นว่าตะเข็บยาว (Seam) แผ่นเหล็กหลาย ๆ แผ่น เมื่อต่อกันเข้ามีความยาวตลอดลำเรือและมีความกว้างของแผ่นเหล็กแผ่นหนึ่ง ๆ นั้น เรียกสเตรค (Strake) ประดุจไม้กระดานข้างฝา แผ่นหนึ่ง ๆ เรียกสเตรค ในแผ่นหนึ่ง ๆ ย่อมมีกระดานต่อกันหลายแผ่นจนกว่าจะครบความยาวของบ้าน รอยต่อด้านแคบเรียกตะเข็บขวาง รอยต่อด้านยาวเรียกตะเข็บยาว สำหรับในเรือถ้านับจากกราบขวาถึงกราบซ้ายโดยนับอ้อมไปทางท้องเรือจะพบว่าเรือประกอบด้วยสเตรคหลายสเตรค

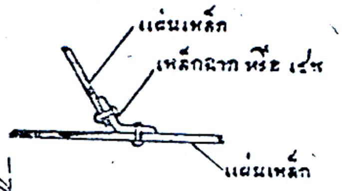
เมื่อแผ่นเหล็กสองแผ่นมาพบกันโดยเป็นมุมฉากต่อกันหรือทำมุมมากกว่า 90° แผ่นเหล็กทั้งสองจะถูกต่อด้วยเหล็กฉากหรือเชพ ดังแสดงในรูปที่ 3



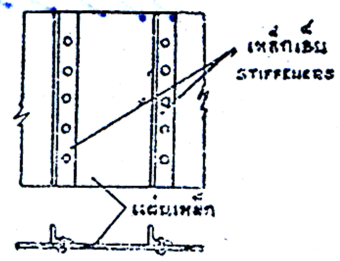
รูปที่ 1 รอยต่อปะกับ (STRAP JOINT)



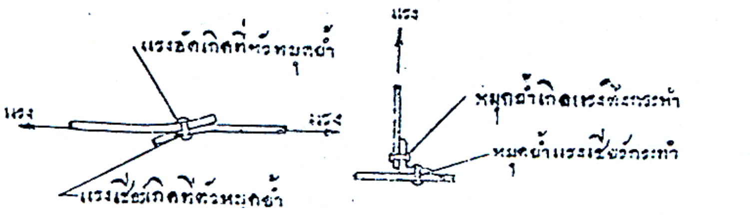
รูปที่ 2 LAP JOINT
รอยต่อเกย



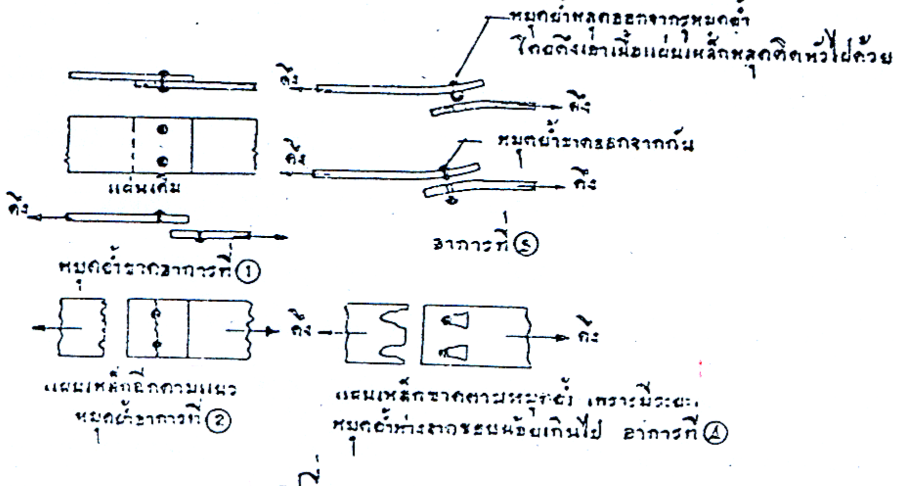
รูปที่ 3 ANGLE CONNETING TWO PLATES
แสดงเหล็กฉากต่อแผ่นเหล็กสองแผ่น



รูปที่ 4 แสดงการย้ำ



รูปที่ 5 แสดงแรงกระทำบนแผ่นเหล็กที่มีหมุดย้ำแถวเดียว



รูปที่ 6

แสดงแผ่นเหล็กฉีกขาดด้วยเหตุ 4 ประการ

รูปที่ 4 แสดงการต่อเหล็กเอ็นเข้ากับแผ่นเหล็กโดยวิธีหมุดย้ำ ขนาดและรูปร่างของเหล็กฉาก ที่จะใช้นั้นขึ้นอยู่กับความแข็งแรงที่ต้องการ

การต่อโดยหมุดย้ำนั้นจะรับแรงประเภทพื้น ๆ คือ แรงดึงเค้น, แรงอัด และแรงเชียร์ และรับโมเมนต์ดัดได้เพียงเล็กน้อย หรือถือว่าหมุดย้ำไม่ทำหน้าที่ต้านทานแรงโมเมนต์ดัดเลย ดูรูปที่ 5

ความรุนแรงของแรงอัดที่หมุดย้ำได้รับนั้นมักเรียกว่า แบริงแวลิว (Bearing Value) ส่วนแรงอัดที่กระทำบนหมุดย้ำนั้นมักเรียกว่า แบริ่ง (Bearing)

รอยหมุดย้ำนั้นจะชำรุดฉีกขาดได้โดย 4 วิธี ดูรูปที่ 6

ฉีกขาดอาการที่ 1 หมุดย้ำทุกตัวถูกตัดขาดหมด (Shear)

ฉีกขาดอาการที่ 2 แผ่นเหล็กในแนวหมุดย้ำแถวเดียวกันขาดตลอดแผ่น

ฉีกขาดอาการที่ 3 หมุดย้ำถูกดึงโดยหัวหมุดย้ำหลุดออกทางรูหมุดย้ำ หรือมิฉะนั้นหมุดย้ำขาดด้วยอีกอาการหนึ่ง

ฉีกขาดอาการที่ 4 แผ่นเหล็กบริเวณรูหมุดย้ำฉีกขาดเนื่องจากรูหมุดย้ำห่างจากขอบแผ่นเหล็กน้อยเกินไป หรือมีเนื้อที่แบริ่งรองรับน้อยเกินไป

ข้อบกพร่องแต่ละข้อทั้งสี่อย่างที่กล่าวมานี้อาจทำการแก้ไขให้รอยหมุดย้ำมีความแข็งแรงขึ้นได้ตามลำดับดังนี้

แก้การฉีกขาดของอาการที่ 1 โดยเพิ่มขนาดหมุดย้ำให้โตขึ้น หรือเพิ่มแถวหมุดย้ำให้มากขึ้น

แก้การฉีกขาดของอาการที่ 2 โดยให้หมุดย้ำมีระยะห่างกันให้มากขึ้นอีก

แก้การฉีกขาดของอาการที่ 3 โดยใช้แผ่นเหล็กให้หนาขึ้น และให้หัวหมุดย้ำให้โตขึ้นอีก

แก้การฉีกขาดของอาการที่ 4 ขั้นแรกทำแผ่นเหล็กให้หนาขึ้น เพื่อให้ได้แบริ่งแวลิวขึ้น ขั้นสองให้รูหมุดย้ำห่างจากขอบแผ่นเหล็กมากขึ้นอีกด้วย โดยใช้ระยะ 1 1/2 เท่า ของเส้นผ่าศูนย์กลางของหมุดย้ำ เป็นระยะที่ใช้การได้ดีและเป็นกฎของอเมริกาบูโรด้วย

ตามที่กล่าวมาแล้วถึงอาการฉีกขาดที่เกิดในข้อ 1 และทำการแก้ไขโดยเพิ่มขนาดหมุดย้ำให้โตขึ้น หรือเพิ่มแถวหมุดย้ำให้มากขึ้น แต่การเพิ่มแถวหมุดย้ำให้มากนี้ก็มีข้อเสียเกิดอีก คือ มันจะฉีกขาดโดยมีอาการข้อ 1 และข้อ 2 ปนกัน ดูรูปที่ 7

ในการคำนวณออกแบบรอยต่อหมุดย้ำนั้นต้องคำนวณความแข็งแรงที่อาจเกิดขึ้นทั้ง 4 อาการที่กล่าวมาแล้ว อาการใดที่ให้ความแข็งแรงน้อยที่สุดแล้วหารด้วยความแข็งแรงของแผ่นเหล็ก

อันสมบูรณ์ (Solid Plate) จะได้ประสิทธิภาพของตะเข็บนั้น ประสิทธิภาพของตะเข็บที่สูงสุดในงานหมุดย้ำต่อเรือจะให้ได้ 100 เปอร์เซ็นต์ นั้น ไม่ได้ เพราะเหตุว่าแผ่นเหล็กภายในเรือทั้งหมดถูกทำให้อ่อนแอลงเหลือเพียง 85 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากการย้ำหมุดตัวเรือเข้ากับกงเรือ ดูรูปที่ 8

การย้ำหมุดนั้น ระยะของหมุดย้ำในแถวเดียวกันซึ่งเรียกว่า พิช Pitch เป็นสิ่งสำคัญถ้าถี่เกินไปรอยต่อก็จะฉีกขาดตามอาการที่ 2 ฉะนั้นจะต้องใช้ระยะหมุดย้ำตามกฎของสมาคมจัดชั้นเรือ แต่งานต่อไปนี้พอจะถือใช้โดยประมาณ คือถ้าย้ำตัวเรือกับกงเรือ ใช้ระยะพิช 7 เท่า ของเส้นผ่าศูนย์กลางหมุดย้ำ ในงานที่ต้องการให้ผนึกน้ำมันได้ ใช้ระยะพิช 3 1/2 เท่า ของเส้นผ่าศูนย์กลางหมุดย้ำ ถ้าต้องการให้ผนึกน้ำได้ ใช้ระยะ 4 ถึง 4 1/2 เท่า ของเส้นผ่าศูนย์กลางหมุดย้ำ

เราไม่สามารถที่จะทำให้รอยต่อหมุดย้ำแน่นโดยสมบูรณ์ โดยการทำระยะหมุดย้ำให้ชิดกันมาก ๆ ฉะนั้นจึงต้องนำวิธีเหยียบตะเข็บ (Caulking) เข้ามาใช้ การเหยียบตะเข็บนี้ก็ยังต้องการให้ระยะหมุดย้ำชิดพอสมควร เพราะถ้าระยะหมุดย้ำห่างเกินไป เมื่อย้ำตะเข็บทางยาวจะพบว่าแผ่นเหล็กบิด

หลักการเหยียบตะเข็บขวางและตะเข็บยาวนั้นแสดงในรูปที่ 9

7.2 การแล่นประสาน (Welding)

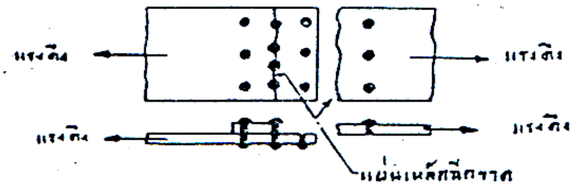
การแล่นประสานเป็นศิลปอันหนึ่งที่ทำให้โลหะสองชิ้นติดกันได้ ณ จุดหลอมละลายหรือต่ำกว่า โดยไม่ต้องใช้โลหะอื่นที่มีจุดหลอมละลายต่ำมาทำให้รอยติดต่อกัน การบัดกรีด้วยตะกั่ว (Soldering) และการเชื่อมด้วยทองเหลือง (Brazing) แตกต่างไปจากการแล่นประสานตรงที่การบัดกรีใช้ตะกั่วและการเชื่อมใช้ทองเหลือง ซึ่งเป็นโลหะที่มีเนื้ออ่อนกว่าโลหะที่จะถูกนำมาทำให้ติดกันตะเข็บหรือรอยต่อที่ติดกัน โดยการบัดกรีหรือเชื่อมจะมีความแข็งอย่างมากไม่เกินกำลังตะกั่วหรือทองเหลือง แต่รอยต่อที่ใช้แล่นประสานจะมีกำลังสูงเท่าหรือมากกว่าเนื้อโลหะที่นำมาต่อกัน

ถ้ารอยต่อนั้นทำให้ติดกันโดยทำให้โลหะร้อนถึงจุดหลอมละลายหรือสูงกว่า เราเรียกว่า ประสานละลาย (Fusion Weld) ถ้ารอยต่อนั้นทำขึ้นโดยเผาโลหะที่จะทำให้ติดกันร้อนต่ำกว่าจุดละลาย แล้วนำมาตีให้ติดกัน เรียกว่า ประสานแรงกด (Pressure Weld) หรือ (Forge Weld) ในงานเบา ๆ อาจทำได้โดยเผาให้โลหะร้อนแดงไม่ถึงละลายแล้วใช้แรงกดหรือค้อนตี วิธีนี้เรียกว่าประสานความต้านทาน (Resistance Welding)

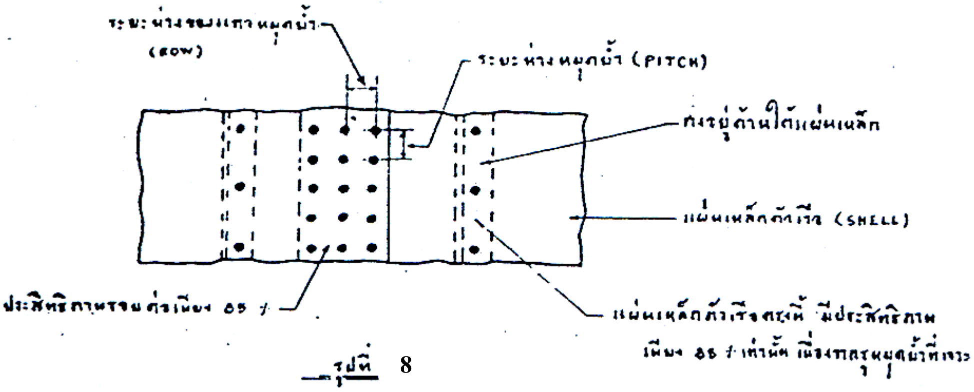
ในงานแล่นประสานการต่อเรือนั้น ต้องใช้ทุกอย่าง คือ ประสานละลาย ประสานแรงกด และประสานความต้านทาน

1. ประสานละลาย (Fusion Weld) การประสานละลายนั้น มีสาระสำคัญในการทำ คือ ต้องใส่วัตถุที่จะทำให้รอยต่อติดกันลงในรอยต่อในขณะมีความร้อนสูงพอที่จะทำให้วัตถุที่จะทำให้รอยต่อติดกันกับวัตถุที่ต้องการประสานให้ละลายติดกันเป็นเนื้อเดียว

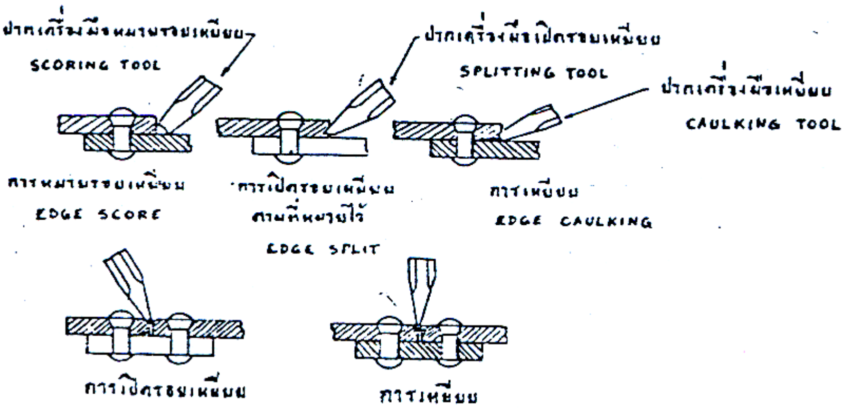
ผลที่เกิดจากการเพิ่มแถวหมุดย้ำ ทำให้มีอาการแตกหักเพิ่มอีกอาการหนึ่ง คือ แผ่นเหล็กขาดตามแนวหมุดย้ำและสลักขาดพร้อมกัน



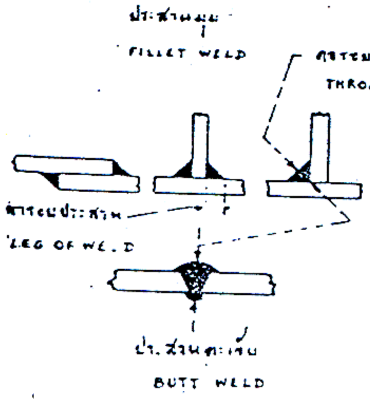
รูปที่ 7



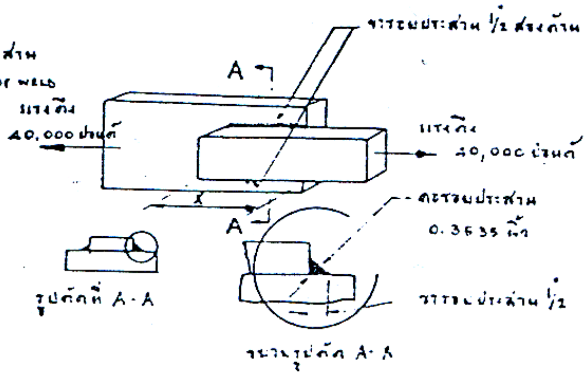
รูปที่ 8



รูปที่ 9 แสดงวิธีการเหนียนตะเข็บหมุดย้ำให้เรียบสนิท



รูปที่ 10 รอยต่อแบบต่างๆ



รูปที่ 11 ตัวอย่าง

เราสามารถทำให้ความร้อนอันสูงนี้เกิดขึ้นได้ 3 วิธี คือ.-

1) โดยไฟฟ้าสปาค (Electric arc) วิธีนี้เรียกว่า ประสานไฟฟ้า (Arc Welding)
2) โดยการเผาไหม้ของแก๊ส (Gas Combustion) วิธีนี้เรียกว่า ประสานแก๊ส (Oxyacetylene Welding)
3) โดยปฏิกิริยาทางเคมี (Chermical Reaction) วิธีนี้เรียกว่า ประสานเทอมิท (Thermit Welding)

ซึ่งจะได้อธิบายโดยละเอียดดังต่อไปนี้

1.1 ประสานไฟฟ้า ประสานไฟฟ้ายังแบ่งออกเป็น 2 วิธี คือ ประสานไฟฟ้าลวดประสาน (Metallic Arc Welding) และประสานไฟฟ้าคาร์บอนอาร์ค (Carbon Arc Welding)

ก) ประสานไฟฟ้าลวดประสาน การประสานโดยวิธีนี้ใช้ลวดประสาน เป็นตัวทำให้เกิดประกายไฟสปาค ณ ตำแหน่งรอยต่อเพื่อทำให้เกิดความร้อนสูง ในการทำนั้นคนประสานนำปลายลวดประสานไปแตะเข้ากับโลหะที่จะประสาน แล้วชักกลับออกมาให้ปลายลวดประสานห่างจากแผ่นเหล็กประมาณ 1/8 นิ้ว กระแสไฟฟ้าก็จะผ่านลวดประสานลงสู่แผ่นเหล็กนั้น ทำให้เกิดอุณหภูมิร้อนถึง 2,300° C (2.472° F) แล้วลวดประสานก็ละลายตัวลงสู่รอยประสานนั้นจนเต็ม ลวดประสานที่ใช้นี้อาจใช้ได้สองอย่างคือลวดประสานเปล่า ๆ กับลวดประสานชนิดมีฟลั๊ก (Flux) หุ้ม

จากความชำนาญได้ค้นพบว่า มีอ๊อกไซด์บางอย่าง เช่น ไทเทเนียม (Titanium) และแคลเซียมอ๊อกไซด์ (Calcium Oxide) จะช่วยทำให้เกิดปฏิกิริยากับอ๊อกซิเจนและไนโตรเจน อ๊อกซิเจนจะเปลี่ยนคาร์บอน, วิลิกอน และแมงกานีสในโลหะที่ละลายทำให้เกิดเป็นอ๊อกไซด์ลอยอยู่ตามผิวหน้าโลหะที่ละลายจะเปลี่ยนคุณสมบัติของโลหะนั้น ส่วนไนโตรเจนเมื่อถูกดูดเข้าในโลหะละลายแล้วจะทำให้โลหะตรงรอยต่อเปราะ

การใช้ลวดประสานที่มีฟลั๊กหุ้มจะทำให้เกิดอ๊อกไซด์น้อย ไนโตรเจนก็ถูกดูดน้อย จึงทำให้รอยต่อแข็งแรงกว่า

ข) ประสานไฟฟ้าคาร์บอนอาร์ค วิธีนี้ประกายไฟทำให้เกิดขึ้นโดยสปาคของแท่งถ่านคาร์บอนแล้วนำลวดประสานจี้เข้าไปในระหว่างประกายไฟ ลวดประสานก็ละลายลงสู่รอยต่อ วิธีนี้ใช้ในงานเชื่อมเหล็กหล่อ (Brazing of Cast Iron)

1.2 ประสานแก๊ส การประสานแก๊สนี้ทำโดยนำแก๊สซึ่งอาจเป็นอาซีติลินหรือ โปรเปนก็ได้ออกมาทางท่ออันหนึ่ง อีกท่อหนึ่งเป็นอ๊อกซิเจน แล้วนำมารวมที่หัวท่อแก๊สอันเดียวกัน (Torch) เมื่อจุดด้วยไม้ขีดแล้วจะลุก ให้ความร้อนสูง เมื่อต้องการประสานรอยต่อก็นำลวดประสานจี้ลงในเปลวงไฟนั้น ลวดประสานก็จะละลายลงในรอยต่อ

1.3 ประสานเทอมิท ประสานเทอมิทเป็นวิธีการแล่นประสาน โดยการใช้ความร้อนอันเกิดจากปฏิกิริยาเคมี ระหว่างผงอะลูมิเนียมอ๊อกไซด์ของเหล็กและโลหะผสม การจุดครั้งแรกใช้ผงแมงกานีส เมื่อจุดแล้วผงอะลูมิเนียมจะผสมกับอ๊อกซิเจนอันเกิดจากอ๊อกไซด์ของโลหะทำให้เกิดการละลายมีความร้อนสูงมาก

งานประสานเทอมิทนี้ใช้มากที่สุดในงานซ่อมส่วนประกอบของเรือบางส่วน ที่มีขนาดใหญ่อันทำขึ้นด้วยเหล็กฟอชจิงหรือเหล็กแคสติง เช่น ทวนหัวและทวนท้ายของเรือเป็นต้น การซ่อมทำก็ไม่ต้องถอดส่วนดังกล่าวออกมาจากตัวเรือ สามารถทำในขณะเรือเข้าอู่ วิธีการอันนี้เป็นส่วนหนึ่งที่นำไปใช้ทำลูกระเบิดเพลิงที่ใช้ในสงครามโลกครั้งที่ 2

2.2 ประสานความต้านทาน วิธีประสานความต้านทานนี้ แผ่นเหล็กที่จะนำลงประสารติดกันนั้น ต้องใช้ปากจับ จับให้แน่นแล้วใช้กระแสไฟแล่นผ่านตรงรอยต่อจนกระทั่งอ่อนน่วมแล้วใช้แรงกดจนรอยประสานติดกันสนิท วิธีประสานความต้านทานนี้ใช้ต่อแผ่นเหล็กในโรงงาน ซึ่งยังแบ่งออกเป็น 3 อย่าง คือ ประสานตะเข็บขวาง (Butt Weld) ประสานหยอด (Plug Weld) และประสานตะเข็บยาว (Seam Weld) การประสานตะเข็บขวาง นั้น นำแผ่นเหล็กตอนปลายมาชนกันเท่านั้น ส่วนประสานหยอดนั้นนำแผ่นหล็กมาเกยกันแล้วเจาะรูแผ่นใดแผ่นหนึ่งแล้วประสานหยอดลงไปในรูนั้น ถ้าทำรูชิดกันมากรอยประสานก็ติดกันไปตลอด

7.3 รอยประสานแบบต่าง ๆ (Types of Welds)

ในการประสานละลายนั้นมีแบบการประสานอยู่ 2 อย่าง คือ การประสานมุม (Fillet Weld) และประสานตะเข็บ (Butt Weld) ดูรูปที่ 10

7.4 การออกแบบรอยประสาน

การออกแบบรอยประสานนี้คำนวณขึ้นโดยตั้งข้อสมมติฐานว่าแรงที่กระทำนั้น กระทำสม่ำเสมอบนเนื้อที่คอรอยประสาน (Throat of Weld) ข้อสมมติอันนี้ไม่สู้จะถูกต้องนัก เพราะการแผ่กระจายของแรงเค้นนั้นไม่แน่นอน คอรอยประสานไม่ตั้งฉากกับแรงเค้นเสมอไป และแรงเค้นตกค้าง (Locked – up Stress) (เช่น ประสานแผ่นเหล็กในเวลาอากาศเย็นจัด แผ่นเหล็กจะหด ทำให้เกิดความเค้นตกค้าง) อาจมีอยู่ในรอยประสานนั้น แต่อย่างไรก็ตาม ข้อปลีกย่อยดังกล่าวนั้นไม่ต้องคำนึงถึง ในตอนออกแบบ เพราะจะใช้ความแข็งแรงของโลหะให้อยู่ในช่วงแรงใช้คำนวณ ซึ่งได้มาโดยการทดลองความแข็งแรงวัตถุ

แรงเค้นออกแบบสำหรับงานแล่นประสาร สำหรับเรือสินค้าใช้ดังนี้.-

แรงเชียร	=	7,950	ปอนด์ต่อตารางนิ้ว
แรงดึง	=	15,000	ปอนด์ต่อตารางนิ้ว
แรงอัด	=	15,000	ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

ตัวอย่าง เพื่อให้เข้าใจถึงการออกแบบรอยประสาน จึงขอสมมติว่า เรามีเหล็กสองแผ่นแล่นติดกันดังรูปที่ 11 โดยแล่นให้มีขารอยประสาน (Leg of Weld) 1/2 นิ้ว ทั้งสองข้าง ต้องการทราบว่าจะต้องใช้รอยประสานยาวเท่าใดจึงจะพอต้านทานกำลังดึง 40,000 ปอนด์

วิธีทำ เมื่อพิจารณาถึงรอยประสานมุมแล้วจะเห็นว่าเป็นรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่ว มีมุมยอดเป็นมุมฉาก สามเหลี่ยมชนิดนี้มีคุณสมบัติดังนี้

$$\frac{\text{ระยะดิ่งจากยอดถึงฐาน}}{\text{ด้านข้างของสามเหลี่ยม}} = \frac{\text{คอรอยประสาน (Throat)}}{\text{ขารอยประสาน (Leg)}} = 0.707$$

คอรอยประสาน = 0.707 x ขารอยประสาน

= 0.707 x 0.5 นิ้ว

= 0.3535 นิ้ว

เนื้อที่คอรอยประสานที่ต้องการเท่ากับ

$$\frac{\text{แรงดึงทั้งหมดที่ต้องการให้ทนทาน}}{\text{แรงเชียร์ออกแบบ}} = \frac{\text{40,000 »Í¹´ì}}{\text{7,950 »Í¹´ì / µÃ¹Ôé}}$$

= 5.03 ตร.นิ้ว

$$\text{ฉะนั้นความยาวของรอยประสาน x} = \frac{\text{เนื้อที่คอรอยประสาน}}{\text{คอรอยประสาน}}$$

$$= \frac{\text{5.03 ตร.นิ้ว}}{\text{0.3535 นิ้ว}}$$

= 14.22 นิ้ว

$$\text{ฉะนั้นความยาวของรอยข้างหนึ่ง} = \frac{14.22}{2} = \text{7.11 นิ้ว}$$

การประกอบโลหะสองชิ้นให้ติดกันแข็งแรง 100 เปอร์เซ็นต์ นั้นจะไม่เป็นผลสำเร็จในงานหมุดย้ำ แต่จะเป็นไปได้ในงานแล่นประสาน

เรื่องการหมุดย้ำและแล่นประสานนั้นมีเรื่องที่จะต้องศึกษาอีกมาก นักศึกษาผู้สนใจโปรดอ่านหนังสือ “Riveting And Arc Welding” แต่งโดย Rossell

7.5 การกันรั่ว (Tightness)

จะต้องป้องกันการรั่วโดยการเชื่อม ดังเช่นตัวอย่างในการเชื่อมแผ่นคอลลาร์ (Collar) ปิดรูเจาะที่ฝากั้นตามขวางเพื่อให้กงตามยาวผ่านในบริเวณที่ต้องการผนึกน้ำหรือผนึกน้ำมัน

การสกัดน้ำหรือน้ำมันโดยการเชื่อม เพื่อไม่ให้น้ำหรือน้ำมันไหลจากบริเวณหนึ่งไปยังอีกบริเวณหนึ่ง เช่น จากถังน้ำไปยังถังน้ำมันหรือถังว่าง จะต้องปฏิบัติตามรูปที่ 12 และ 13

โครงสร้างทุกชนิดที่อยู่รอบ ๆ ถังน้ำมันจะต้องมีการผนึกน้ำมัน และมีรูสกัดน้ำมัน เพื่อป้องกันไม่ให้น้ำมันไหลผ่านไปที่อื่น โดยไหลไปทางช่องว่างระหว่างชิ้นส่วน 2 ชิ้น ที่ไม่ติดกันที่เรียกว่า faying surface ถ้ามีการเจาะชิ้นส่วนโครงสร้างที่ผนึกน้ำหรือน้ำมัน จะต้องมีการทดลองรั่ว

7.6 การเจาะรู (Openings)

ขอบของรูที่เจาะจะต้องเรียบ ไม่มีรอยบาก (notch) หรือขอบของรูเจาะจะต้องไม่มีมุมกลับ (reentrant angle) ซึ่งจะเป็นตัวต้นเหตุที่จะแพร่ขยายรอยแตกให้เพิ่มขึ้น

การเจาะช่องในโครงสร้างตามยาวหลักของตัวเรือ เช่น ดาดฟ้าใหญ่ แผ่นเหล็กเปลือกเรือหรือฝากั้นตามยาว จะต้องไม่อยู่ในแนวเดียวกันตามระนาบทางขวาง ต้องกระจายออกไป แต่ถ้าความจำเป็นที่จะต้องเจาะช่องนั้นหลาย ๆ ช่อง ให้รวมช่องเหล่านั้นแล้วเจาะช่องใหญ่เพียงช่องเดียว

โดยทั่วไปรูที่เจาะต้องเป็นวงกลม ถ้าเป็นรูปอย่างอื่นมุมของรูที่เจาะต้องมน โดยมีรัศมีอย่างน้อย 1/8 ของความกว้างของรูที่เจาะ (ควรใช้ 1/4 ของความกว้าง)

7.7 รูลดน้ำหนัก (Lightening hole)

โดยทั่วไปเวบของบีมดาดฟ้า เกิร์ดเดอร์ กงตามยาว กงตามขวาง และกันอ่อนของฝากั้น ที่มีความกว้างเกิน 7 นิ้ว ควรเจาะรูลดน้ำหนัก โดยยกเว้นกรณีต่อไปนี้

ก. ชิ้นส่วนตามยาวที่ยาวต่อเนื่องและประกอบติดกับดาดฟ้าใหญ่หรือแผ่นเหล็กตัวเรือในความยาว 3/5 ของความยาวเรือเมื่อนับจากกึ่งกลางลำ (3/5 L⨂)

ข. ชิ้นส่วนที่รับกำลัง เช่น บีมดาดฟ้าและกันอ่อนที่อยู่ในแนวเดียวกันกับเสาค้ำหรือตรงบริเวณที่รับแรงเค้นมาก

7.8 การเจาะรูสำหรับ Stuffing tubes และแป๊บ

การเจาะรูชิ้นส่วนโครงสร้างต่าง ๆ เพื่อให้ Stuffing tubes และแป๊บผ่านจะต้องมีระยะห่างระหว่างรูทั้งสองอย่างน้อย 1.9 เท่า ของเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรูทั้งสองนั้น (ดูรายละเอียดจาก DDS 100 – 2)

7.9 รูระบายน้ำ

โครงสร้างที่ไม่ผนึกน้ำจะต้องเจาะรูระบายและกำหนดทางระบายน้ำเพื่อป้องกันไม่ให้น้ำและของเหลวอื่น ๆ ตกค้างอยู่ จะต้องให้น้ำและของเหลวไหลไปสู่ทางระบายน้ำและไหลออกนอกเรือได้อย่างสะดวก

ในห้องที่มีการสูบน้ำท้องเรือ พื้นที่รวมของรูระบายน้ำที่เจาะตามกงตามยาว กงตามขวาง และฟลอร์ อย่างน้อยจะต้องเท่ากับ 2 เท่า ของเส้นผ่านศูนย์กลางของแป๊บทางดูด

จำนวนและขนาดของรูระบายน้ำอาจลดลงได้ เมื่อนำเอาช่องเว้า (cutout) ที่ให้รอยเชื่อมของแผ่นเหล็กตัวเรือที่เรียกว่า Butt และ Seam ผ่านมาใช้เป็นรูระบายน้ำ (ดูรูปที่ 14)

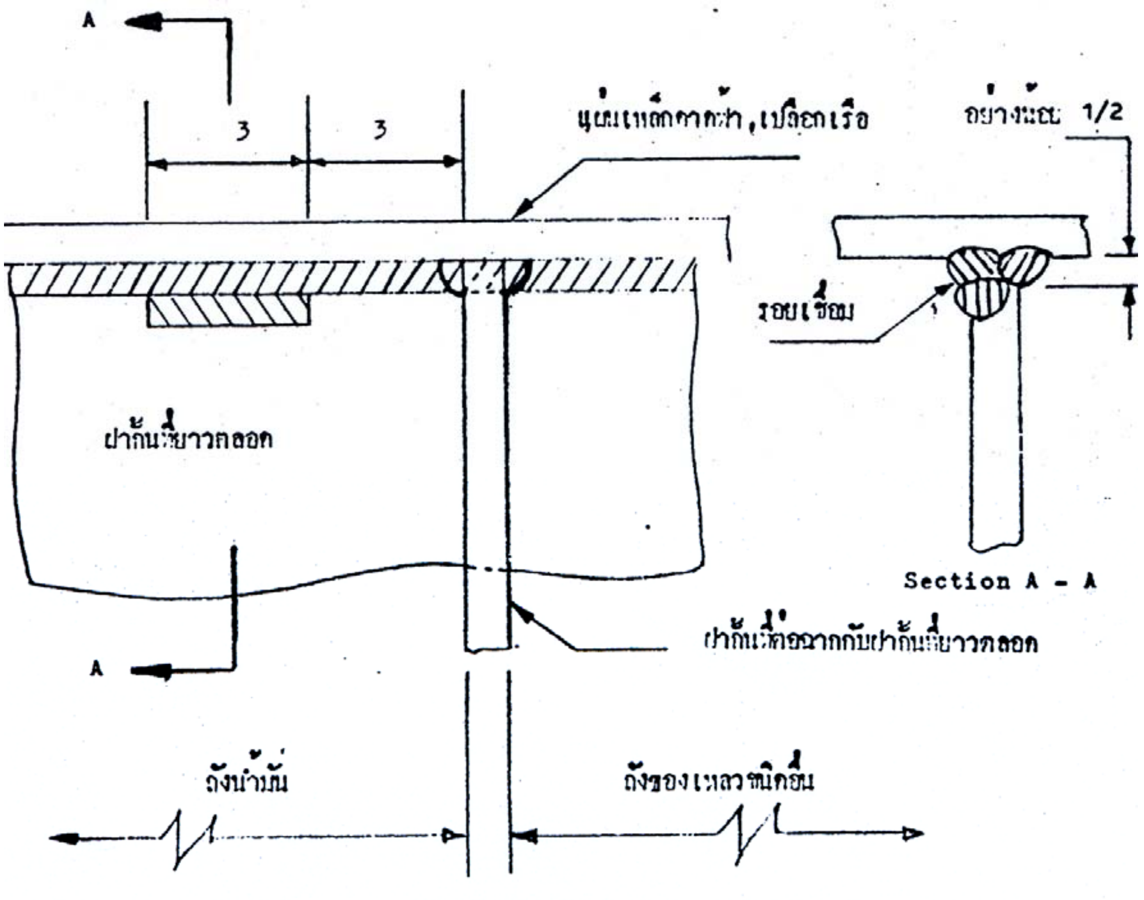
7.10 รูระบายอากาศ (Air holes)

ในถังน้ำ ถังน้ำมัน และห้องที่ติดกับท้องเรือ จะต้องมีรูระบายอากาศ เพื่อป้องกันไม่ให้อากาศหรือแก๊สรวมตัวกัน และเป็นช่องทางให้อากาศหรือแก๊สไหลไปออกที่แป๊บระบายอากาศ (ดูรูปที่ 15)

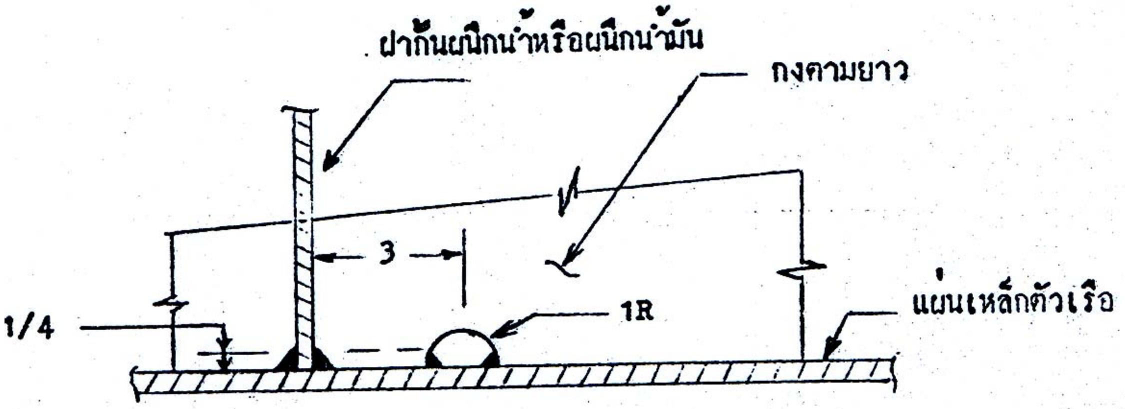
7.11 แผ่นเหล็กตัวเรือ (Shell plating)

ด้านบนสุดของแผ่นเหล็กเปลือกเรือ (side shell) แผ่นบนสุดที่เรียกว่า Sheer strake จะต้องเรียบ ไม่มีรอยตัด รอยถาก arc strike หรือสิ่งผิดปกติอื่น ๆ และต้องมนเล็กน้อย (ดูรูปที่ 16)

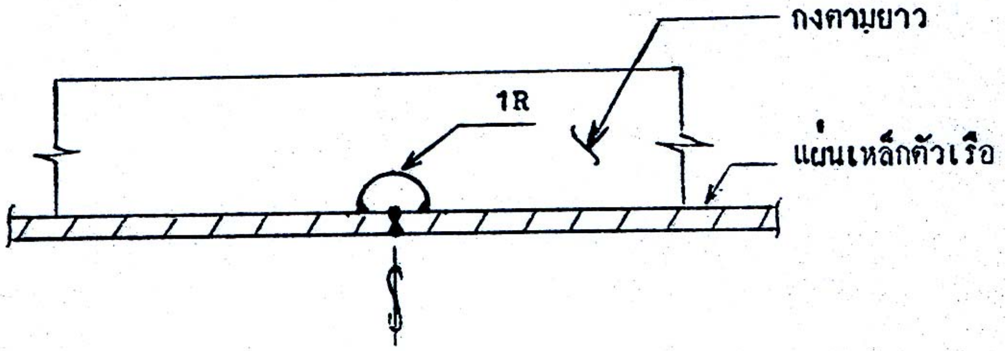
การเจาะแผ่นเหล็กตัวเรือเพื่อทำเป็น Sea chest จะต้องมีการเสริมกำลัง สำหรับ Sea chest ที่เชื่อมติดกับแผ่นเหล็กเปลือกเรือ วัสดุที่ประกอบขึ้นเป็น Sea chest อาจพิจารณาเป็นการเสริมกำลังตามที่ต้องการได้



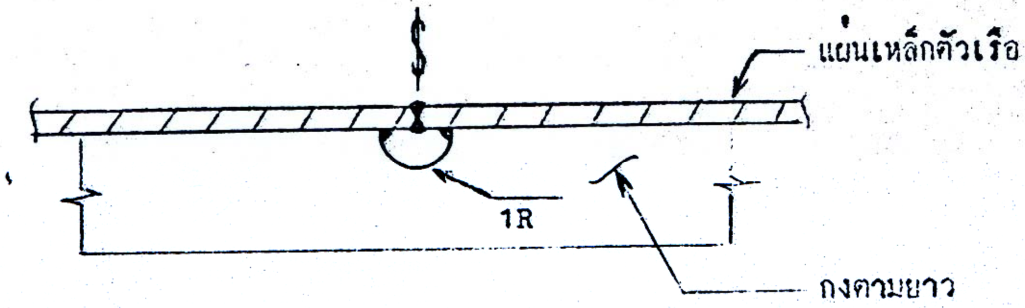
รูปที่ 12 รูสกัดน้ำ(น้ำมัน)สำหรับฝากั้นถังน้ำ(น้ำมัน)ที่ต่อขวางกัน



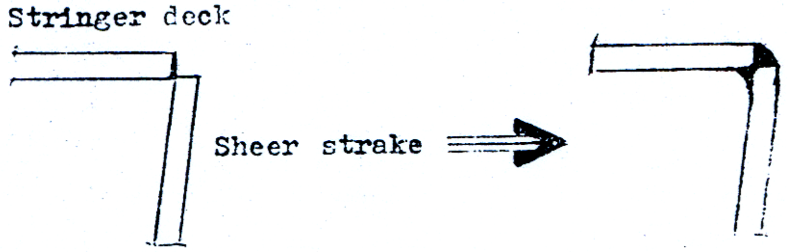
รูปที่ 13 รูสกัดน้ำหรือรูสกัดน้ำมัน



รูปที่ 14 รูระบายน้ำ



รูปที่ 15 รูระบายอากาศ



รูปที่ 16 การมน Sheer strake

สำหรับ Sea chest และช่องอื่น ๆ ที่มีความกว้างมากกว่า 12 นิ้ว จะต้องมีการเสริมกำลังด้วยแผ่นบรรจุ (insert plate) และกงเสริมพิเศษ (special framing)

ด้านนอกของแผ่นเหล็กตัวเรือที่อยู่ใต้แนวน้ำ เมื่อนำมาต่อกันก่อนการเชื่อมจะต้องเรียบ แต่เมื่อเชื่อมแล้ว ยอมให้รอยเชื่อมโค้งและมนได้ แต่ไม่จำเป็นจะต้องเรียบ

ในกรณีที่จำเป็นจะต้องปรับพื้นผิวของโครงสร้างให้เรียบ เช่น การติดตั้ง Transducer ของเครื่องหยั่งน้ำ จะต้องปรับพื้นผิวของแผ่นเหล็กตัวเรือกับ Transducer ที่ยื่นออกมาโดยการประกอบแผ่นเหล็กที่เรียกว่า fairing plate ระหว่างแผ่นเหล็กตัวเรือกับ Transducer นั้น

7.12 การประกอบโครงสร้างตัวเรือ

ในการสร้างเรือจะต้องใช้ความสามารถทั้งด้านฝีมือและวิธีการสร้างเรือที่ถูกต้อง สร้างเรือให้สง่างามและน่าเกรงขาม โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการสร้างเรือรบ ในที่นี้จะขอกล่าวถึงด้านโครงสร้างตัวเรือเท่านั้นว่า จะยอมให้บุบได้ขนาดไหนจึงจะไม่เสียความสง่างาม ยอมให้ขนาดของเรือและรูปร่างของเรือผิดได้ขนาดไหน มีหลักเกณฑ์ในการพิจารณาอย่างไร

แผ่นเหล็กตัวเรือที่บุบนั้น นอกจากจะเกิดขึ้นจากการขนย้ายแล้ว ยังเกิดขึ้นจากการเชื่อมด้วย เช่น ลำดับการเชื่อมและวิธีการเชื่อมที่ไม่ถูกต้อง

ความบุบของแผ่นเหล็กจะมากน้อยขนาดไหน จะยอมรับได้หรือไม่นั้น มีสิ่งสำคัญที่เกี่ยวข้องในการพิจารณา 2 สิ่ง คือ ความหนาของแผ่นเหล็กและระยะห่างกง (Frame spacing) หรือระยะห่างระหว่างกันอ่อน (Stiffener spacing) เช่น แผ่นเหล็กดาดฟ้า 2 แผ่น หนาเท่ากัน แต่ระยะห่างระหว่างกงไม่เท่ากัน แผ่นเหล็กดาดฟ้าที่ประกอบอยู่บนกงที่มีระยะห่างมากกว่า ก็ยอมให้บุบได้มากกว่า หรือระยะห่างระหว่างกงเท่ากัน แผ่นเหล็กที่บางกว่าย่อมยอมให้บุบได้มากกว่าแผ่นเหล็กที่หนากว่า

1. <u>ค่าความบุบที่ยอมรับได้ของโครงสร้างตัวเรือของเรือรบ</u>

1.1 กราฟที่ 1 และ 2 เป็นค่าความบุบที่ยอมรับได้ของเรือเหล็กและเรืออลูมินัม ซึ่งเป็นค่าที่ใช้กับโครงสร้างตัวเรือต่าง ๆ ดังนี้

1.1.1 แผ่นเหล็ก (อะลูมินัม) เปลือกเรือทั้งหมด

1.1.2 ดาดฟ้าใหญ่

1.1.3 โครงสร้างตัวเรือที่รับกำลังตามยาวที่อยู่ภายในระยะ 3/5 L เช่น แผ่นเหล็กเปลือกเรือชั้นใน (Inner – bottom tank top) และดาดฟ้าที่อยู่ต่ำถัดลงไปจากดาดฟ้าใหญ่ ถ้าดาดฟ้านั้นยาวต่อเนื่องกันและอยู่เหนือห้องเครื่องจักร

1.1.4 สำหรับเรือที่ต่อด้วยระบบกรงตามขวาง (transverdely framed ship) ค่าความบุบที่ยอมรับได้ตามข้อ 1.1.1, 1.1.2 และ 1.1.3 ต้องลดลงอีก 1/8 นิ้ว

1.1.5 กระบังกันคลื่น (Bulwark) และฝากั้นด้านนอกของเก๋ง

1.2 กราฟที่ 3 และ 4 เป็นค่าความบุบที่ยอมรับได้ของเรือเหล็กและเรืออะลูมินัม ซึ่งเป็นค่าที่ใช้กับโครงสร้างตัวเรือต่าง ๆ ดังนี้

1.2.1 ฝากั้นห้องพักอาศัยต่าง ๆ เช่น ห้องรับรอง ห้องทำงาน ห้องนอน ห้องรับประทานอาหาร และฝากั้นในช่องทางเดินที่เป็นส่วนของห้องพักอาศัยนั้น

1.2.2 ดาดฟ้าที่อยู่ใต้ดาดฟ้าใหญ่และเก๋ง และอยู่ในบริเวณห้องพักอาศัยต่าง ๆ ตามข้อ 1.2.1

1.2.3 ดาดฟ้าที่เปิดสู่บรรยากาศ เช่น ดาดฟ้ายก

1.2.4 ฝากั้นของถังต่าง ๆ และฝากั้นตามขวางที่สำคัญ

1.2.5 กงตามยาวที่อยู่ใต้แผ่นเหล็กเปลือกเรือชั้นใน

1.3 สำหรับฝากั้นและดาดฟ้าอื่น ๆ ค่าความบุบที่แสดงในกราฟที่ 3 และ 4 อาจจะยอมให้เพิ่มได้อีก 1/8 นิ้ว

1.4 ถ้าระยะห่างระหว่างกงหรือระหว่างกันอ่อนน้อยกว่าหรือมากกว่าค่าที่กำหนดไว้ในรูปที่ 1 ถึง 4 ให้ต่อเส้นโค้งออกไปจากเส้นโค้งเดิม

1.5 ถ้าแผ่นเหล็กหนาเกิน 1 นิ้ว ให้ใช้ค่าที่ใช้กับแผ่นเหล็กที่หนา 1 นิ้ว ในกราฟที่ 1 – 4

1.6 การวัดค่าความบุบ ให้วัดระหว่างกง 2 กง หรือระหว่างกันอ่อน 2 อัน โดยใช้เชือกขึงหรือใช้ไม้บรรทัดทาบ แล้ววัดค่าระหว่างเชือกหรือไม้บรรทัดกับแผ่นเหล็กตรงบริเวณที่บุบมากที่สุด

1.7 ค่าความบุบในกราฟที่ 1 – 4 เป็นค่าความบุบที่ยอมรับได้โดยวัดจากลายเส้นของเรือตามแบบไปในทาง + หรือ – (บุบเข้าหรือบุบออกจากลายเส้นของเรือ)

2. <u>อัตราผิดของขนาดเรือของเรือรบ</u>

อัตราผิดของขนาดเรือยอมให้ผิดจากลายเส้นของเรือตามแบบได้ไม่เกินตามค่าต่าง ๆ ดังนี้.-

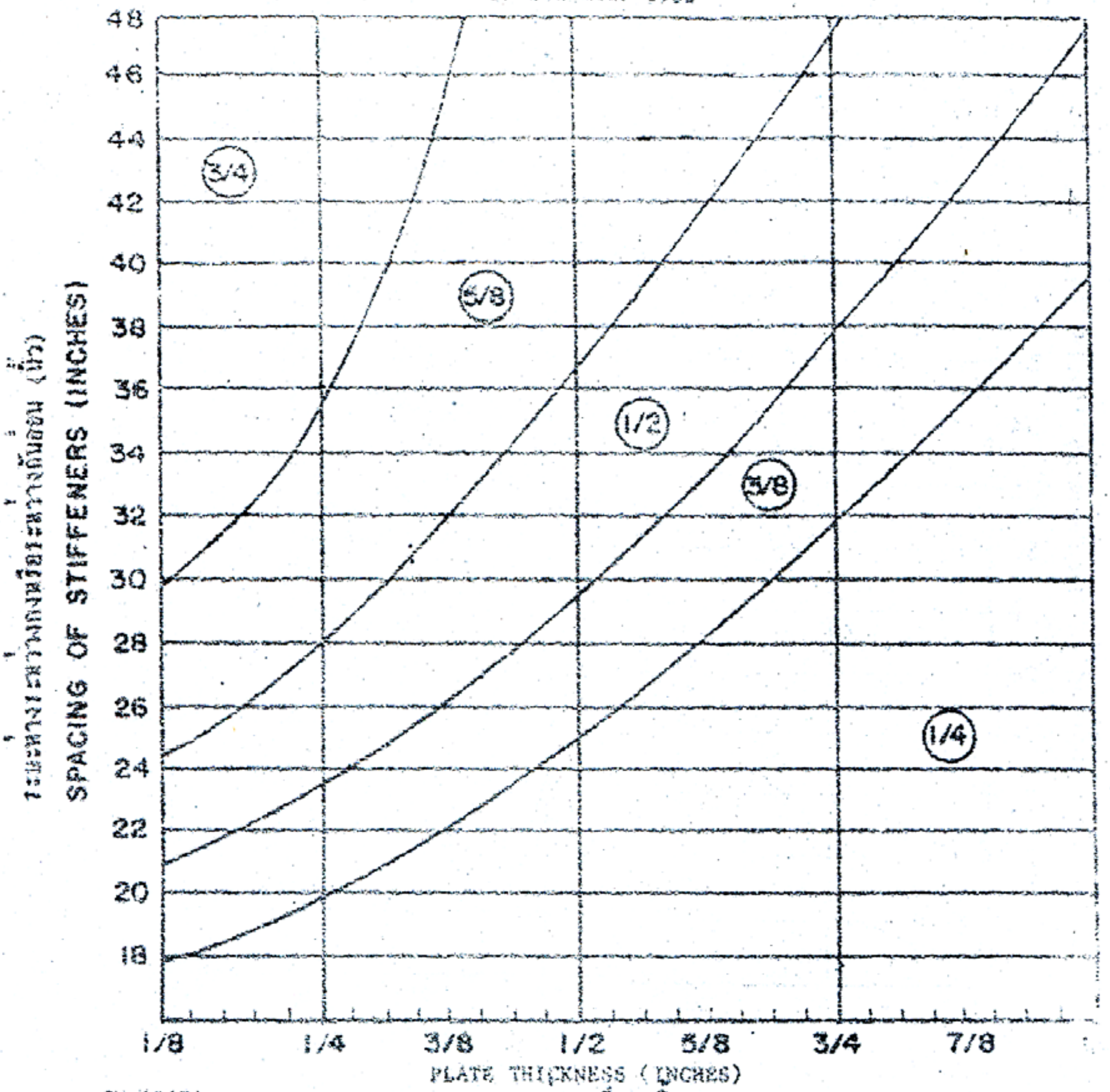
2.1 ความกว้างผิดได้ $\pm$ 1/2 นิ้ว เมื่อวัดจากระนาบตามยาวในแนวดิ่งที่อยู่กึ่งกลางลำเรือ (Vertical longitudinal center plane) แต่ยอมให้ผิดเพิ่มได้อีก 1/2 นิ้ว สำหรับเรือที่มีความกว้างมากกว่า 100 ฟุต

2.2 ความยาวผิดได้ $\pm$ 1 นิ้ว ต่อความยาวเรือ 100 ฟุต

2.3 ความกว้าง (เมื่อวัดจากกราบขวาถึงกราบซ้ายของเรือ) ผิดได้ $\pm$ 1 นิ้ว แต่ยอมให้ผิดเพิ่มได้อีก 1 นิ้ว สำหรับเรือที่มีความกว้างมากกว่า 100 ฟุต

2.4 ความสูงจากดาดฟ้าถึงดาดฟ้า ผิดได้ $\pm$ 3/8 นิ้ว และยอมให้อัตราผิดสะสมเพิ่มได้อีกไม่เกิน 1/2 นิ้ว ถ้าเรือมีความลึก (Depth) จากเส้นฐาน (Pure Ring) ถึงดาดฟ้าใหญ่เกิน 50 ฟุต

MIL-STD-1689(SH)
27 December 1988

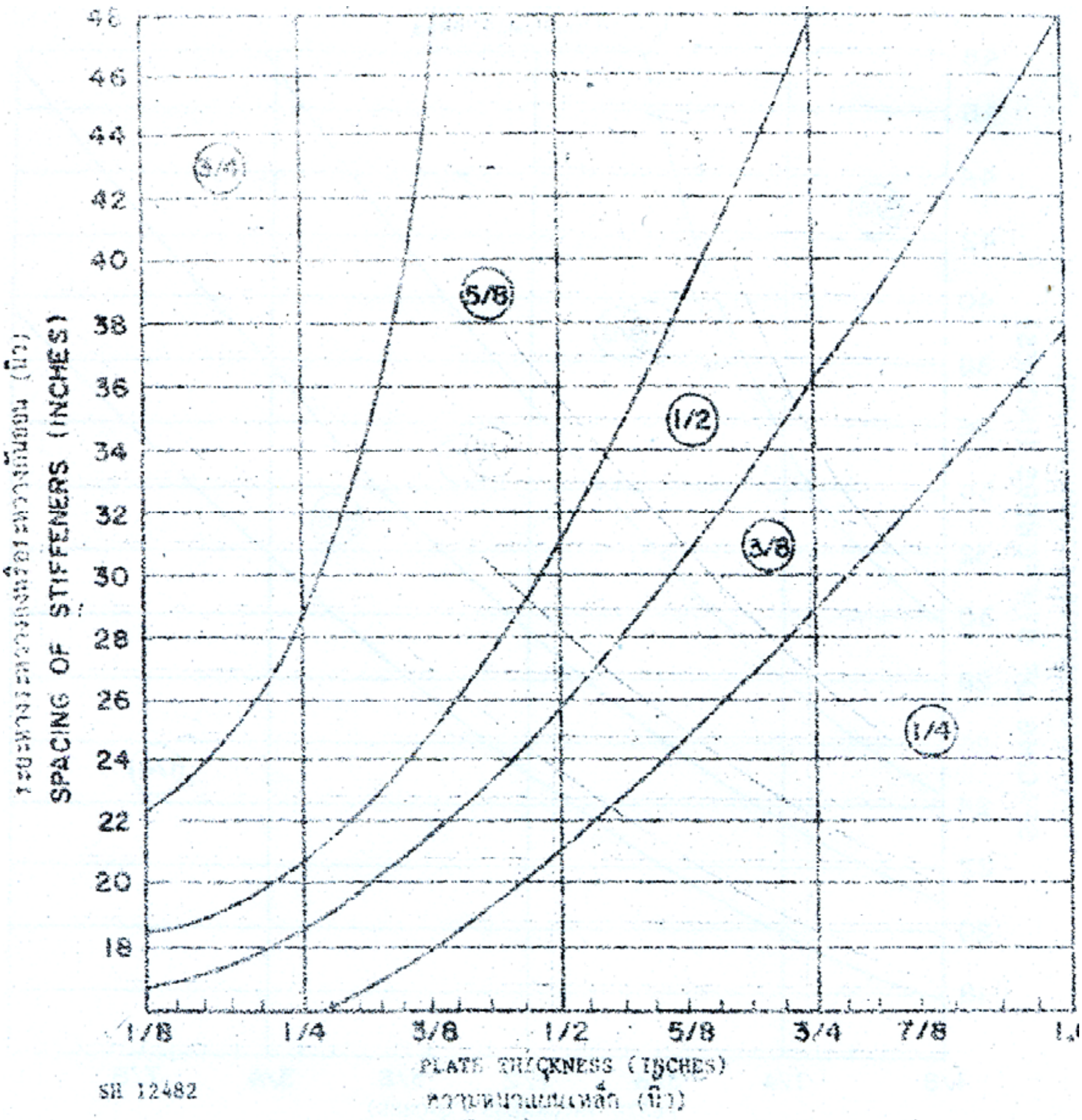


SH 12481

Applicability of tolerances

(1) Entire shell.
(2) Uppermost strength deck.
(3) Longitudinal strength structure within the midships 3/5 length which includes inner-bottom, tank top and the deck next below the uppermost strength deck if continuous above machinery spaces.
(4) In transversely framed ships, the permissible unfairness for structure noted in (1), (2) and (3) above is reduced by 1/8 inch.
(5) Bulwarks and exterior superstructure bulkheads.

กร๊าฟที่ 1 Surface ship, permissible unfairness in steel welded structure.
ค่าความนูนที่ยอมรับได้ของเรือเหล็ก

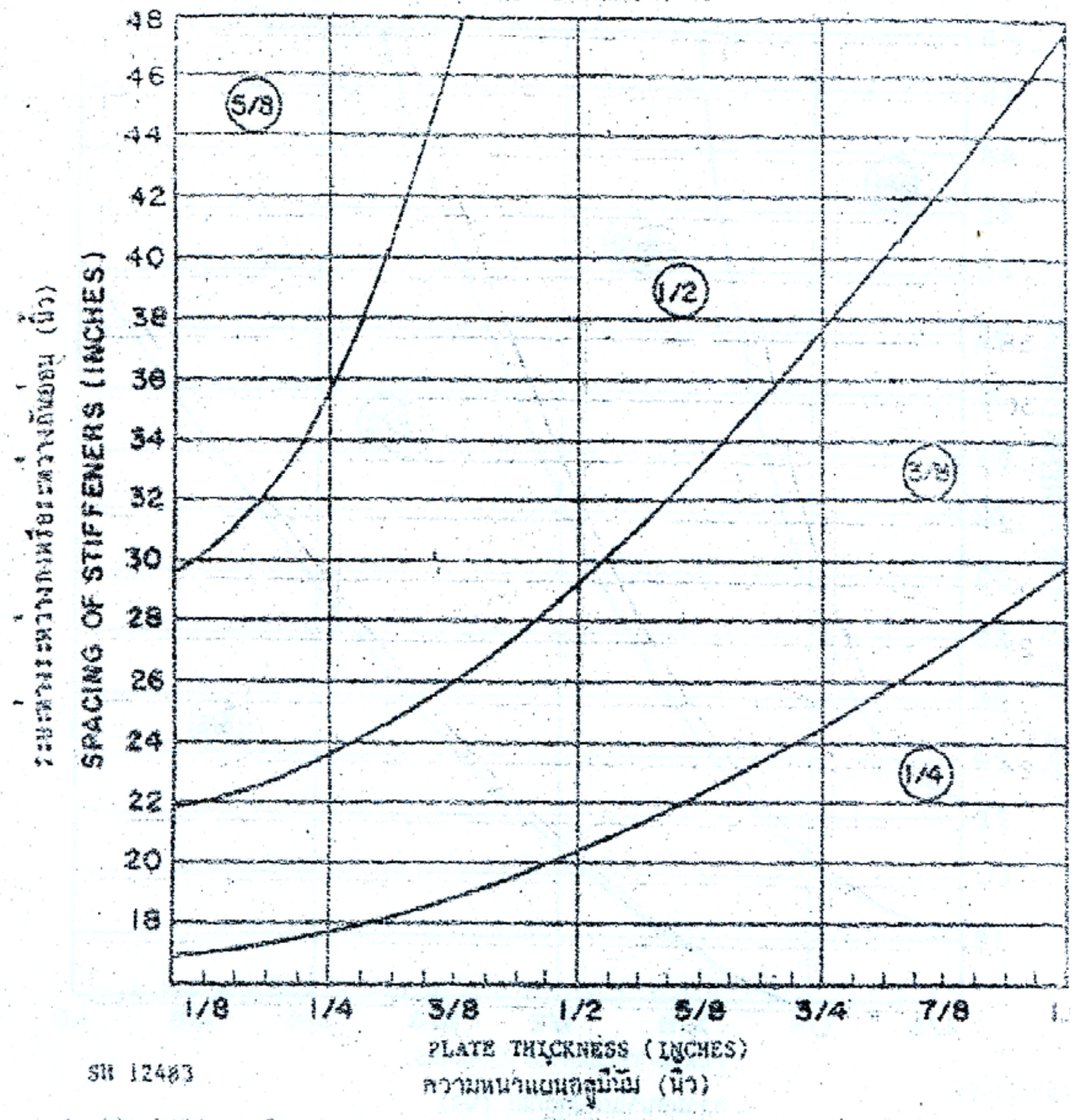


This figure is applicable to the following areas except where figure governs.

(1) Structural bulkheads forming a boundary of a living space (stateroom, office, berthing, messing, or lounge area) and passageways contiguous to such spaces.
(2) Decks within the hull and superstructure in way of the above living spaces.
(3) Decks exposed to the weather.
(4) Tank and main transverse bulkheads.
(5) Inner-bottom plate longitudinals and transverses.

กร๊าฟที่ 2 Surface ship, permissible unfairness in steel welded structure.
ค่าความนูนที่ยอมรับได้ของเรือเหล็ก

MIL-STD-1689(SH)
27 December 1983



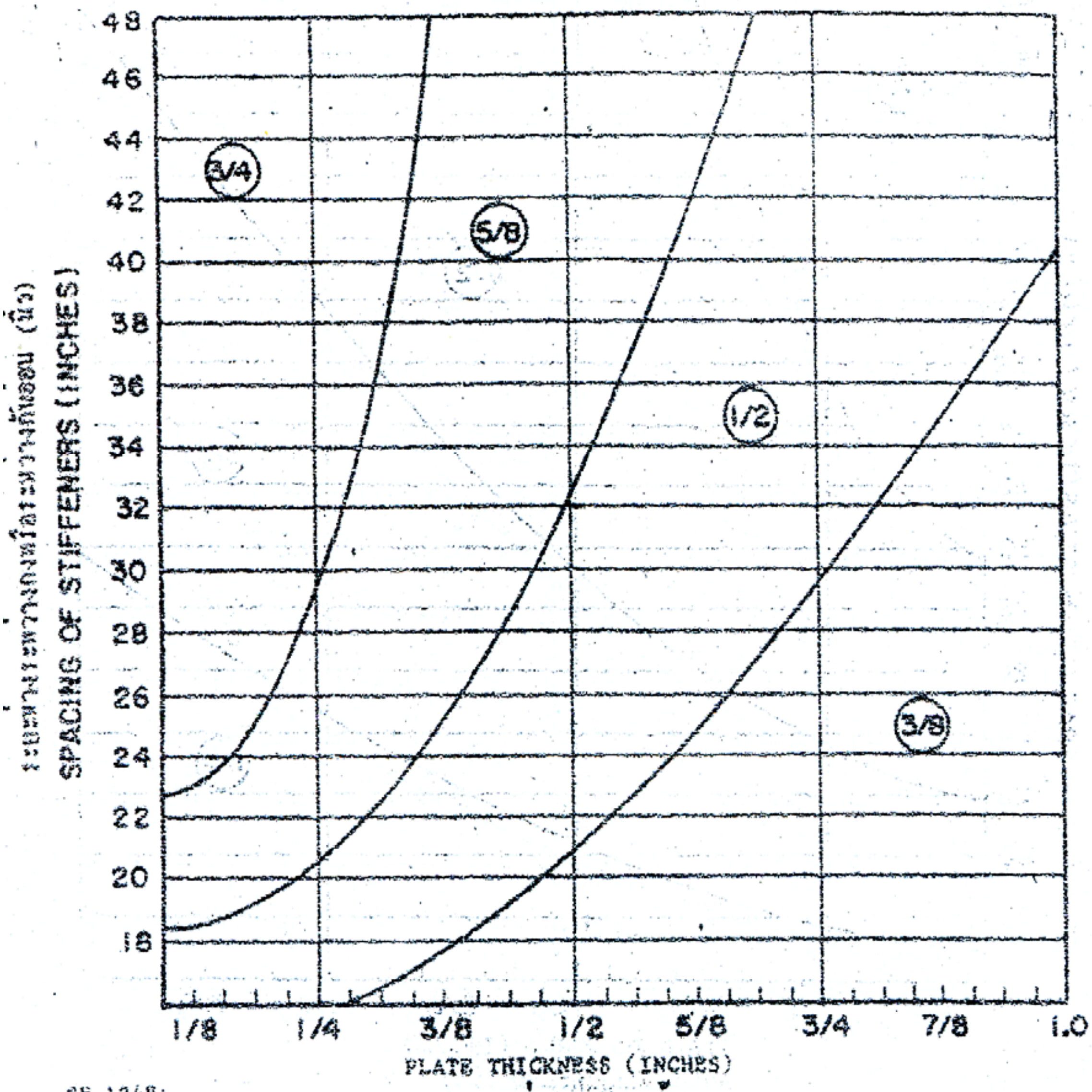
Applicability of tolerances

(1) Entire shell.
(2) Uppermost strength deck.
(3) Longitudinal strength structure within the midships 3/5 length which includes inner-bottom, tank top and the deck next below the uppermost strength deck if continuous above machinery spaces.
(4) In transversely framed ships, the permissible unfairness for structure noted in (1), (2) and (3) above is reduced by 1/8 inch.
(5) Bulwarks and exterior superstructure bulkheads.

กร๊าฟที่ 3 Surface ship permissible unfairness in aluminum welded structure.

ค่าความนูนที่ยอมรับได้ของเรืออลูมิเนียม

MIL-STD-1689(SH)
27 December 1983



SH 12486

Applicability of tolerance
This figure applies in the following areas except where figure 19 governs.

(1) Structural bulkheads forming a boundary of a living space (stateroom, office, berthing, messing, or lounge area) and passageways contiguous to such spaces.
(2) Decks within the hull and superstructure in way of the above living spaces.
(3) Decks exposed to the weather.
(4) Tank and main transverse bulkheads.
(5) Inner-bottom plate longitudinals and transverses.

กร๊าฟที่ 4 Surface ship, permissible unfairness in aluminum welded structure

ค่าความนูนที่ยอมรับได้ของเรืออลูมิเนียม

3. มาตรฐานการสร้างเรือแห่งประเทศญี่ปุ่น

ตารางที่ 1 เป็นค่าความบุบ (Unfairness) ของโครงสร้างตัวเรือ และตารางที่ 2 เป็นค่าอัตราผิดของขนาดเรือและรูปร่างเรือที่กำหนดไว้เป็นค่ามาตรฐานในการสร้างเรือแห่งประเทศญี่ปุ่น (Japanese Shipbuilding Quality Standard, JSQS) ซึ่งใช้กับเรือที่มีคุณลักษณะโดยทั่วไปดังนี้.-

3.1 เป็นเรือพาณิชย์ขนาดใหญ่ที่มีความยาวมากกว่า 100 เมตร เช่น เรือสินค้า เรือบรรทุกน้ำมัน

3.2 เป็นเรือที่ไม่ได้กำหนดความหนาของแผ่นเหล็กของโครงสร้างต่าง ๆ (ส่วนมากจะหนาเกิน 2.7 มม. สำหรับแผ่นเหล็กตัวเรือที่เรียกว่า Hull Envelois

3.3 เป็นเรือที่มีระยะห่างระหว่างกง (Frame spacing) ประมาณ 700 - 900 มม.

หมายเหตุ สำหรับรายละเอียดทั้งหมด ศึกษาได้จากหนังสือ Japanese Shipbuilding Quality Standard (JSQS) Hull Part

ตารางที่ 1

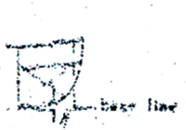
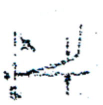
ค่าความนูน (Unfairness) ของโครงสร้างตัวเรือ

Division		Deformation			UNIT : mm
Section	Sub-section	Item	Standard Range	Tolerance limits	Remarks
Unfairness	Shell plate	Parallel part side	4	6	
		Parallel part bottom	4	6	
		Fore and aft part	5	7	
	Double bottom tank top plate		4	6	
	Bulkhead	Longi Bulk head Trans " Swash Bulkhead	6	8	
	Strength deck	Parallel part (Between 0.6L※)	4	6	
		Fore and aft part	6	9	
		Covered part	7	9	
	Second deck	Bare part	6	8	
		Covered part	7	9	
	Fore-castle deck Poop deck	Bare part	4	6	
		Covered part	7	9	
	Super Structure deck	Bare part	4	6	
		Covered part	7	9	
	Cross deck		5	7	
	House wall	Out side wall	4	6	
		Inside wall	4	6	
		Covered part	7	9	
	Interior member	Web of girder, trans	5	7	
	Floor and girder of double bottom		6	8	

ตารางที่ 2

ค่าอัตราผิดของขนาดและรูปร่างเรือ

Division		Accuracy of hull form			UNIT : mm
Section	Sub-section	Item	Standard range	Tolerance limits	Remarks
Principal Dimensions	Length	Length between Perpendiculars	± 50 Per 100m	max100	Applied to ships of 100 meters length and above. For the convenience of the measurement the point where the keel is connected to the curve of the stem may be substituted for the fore perpendicular in the measurement of the length.
		Length between Aft-perpendicular and forward bulkhead of engine room	± 25	not defined	For the accuracy in accordance with the shaft length.
	Breadth	Molded breadth Amidships	±15	not defined	Applied to ships of 15 meters breadth and above. Measured on the upper deck.
	Depth	Molded depth Amidships	±10	max10 (for minus side)	Applied to ships of 10 meters depth and above.

Division		Accuracy of hull form			UNIT : mm
Section	Sub-section	Item	Standard range	Tolerance limits	Remarks
Deformation of hull form	Flatness of Keel	Deformation for the whole length	± 25	not defined	Ups(−) and Downs(+) against the check line of keel sighting.
		Deformation for the distance between two adjacent bulkheads	± 15	not defined	Sighting by the transit or slits. Local unfairness, which see DIVISION: Deformation
	Cocking-up	Cocking-up of Fore-body 	± 30	not defined	Ups(−) and Downs(+) against the check line of the keel at the foremost frame on the flat part of the keel.
		Cocking-up of Aft-body	± 20	not defined	Ups(−) and Downs(+) against the check line of the keel at the aft-perpendicular.
	Rise of Floor	Rise of floor amidships 	± 15	not defined	The height of the lower turn of the bilge, compared with the planned height. Measured from the plane passing through the outer surface of the keel plate.

4. คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในกงต่อเรือ

Mild steel เป็นเหล็กที่นิยมใช้ในการต่อเรืออย่างกว้างขวางและถ้าเรือนั้นจดทะเบียนเรือกับสมาคมที่เกี่ยวข้องกับการต่อเรือและแยกประเภทของเรือ เช่น สมาคม Lloyd’s Register of Shipping (LR) แห่งประเทศอังกฤษ สมาคม American Bureau of Shipping (ABS) แห่งประเทศสหรัฐอเมริกา หรือสมาคม Nippon Kaijl Kyokai (NK) แห่งประเทศญี่ปุ่น เหล็กที่ใช้ในการต่อเรือจะต้องมีคุณสมบัติทางเคมีและฟิสิคส์ที่สมาคมนั้นกำหนดขึ้น ดังคุณสมบัติที่สมาคม NK กำหนดดังนี้.-

คุณสมบัติทางเคมีและฟิสิคส์ของแผ่นเหล็กที่ใช้ในการต่อเรือ (2)

ตารางที่ 3

คุณสมบัติทางเคมี

เกรด	ส่วนผสมทางเคมี (Chemical Composition %) (ก)				
	คาร์บอน (C)	ซิลิคอน(S)	แมงกานิส(MN)	ฟอสฟอรัส(P)	ซัลเฟอร์ (S)
KA	0.23 สูงสุด (ข)	0.35 สูงสุด	2.5x C ต่ำสุด (ข)	0.04 สูงสุด	0.08 สูงสุด
KB	0.21 สูงสุด	0.35 สูงสุด (ค)	0.80 ต่ำสุด (ค)	0.04 สูงสุด	0.04 สูงสุด
KD	0.21 สูงสุด	0.35 สูงสุด	0.60 ต่ำสุด	0.04 สูงสุด	0.04 สูงสุด
KE	0.18 สูงสุด	0.10 – 0.35	0.70 ต่ำสุด		

ตารางที่ 4

คุณสมบัติทางฟิสิคส์

เกรด	การทดสอบแรงดึง Yield point (กก./มม.^{2})	(Tensile toot) Tensile strength (กก./มม.^{2})	Elongation (%)
KA, KB, KD, KE	24 ต่ำสุด (ง)	41 – 50 (จ)	22 ต่ำสุด (ฉ)

หมายเหตุ

(ก) แผ่นเหล็กทุกเกรดจะต้องมีส่วนผสมของคาร์บอนรวมกัน 1/6 เท่า ของส่วนผสมแมงกานิสไม่เกิน 0.40 %

(ข) แผ่นเหล็กหนาถึง 12.5 มม. อาจยอมให้ส่วนผสมของคาร์บอนมีค่าสูงกว่านี้ได้ และส่วนผสมขั้นต่ำของแมงกานิสอาจยอมให้น้อยกว่า 2.5 เท่า ของส่วนผสมต่ำสุดของคาร์บอน โดยการยอมรับของสมาคม

(ค) ถ้าแผ่นเหล็กมีส่วนผสมของซิลิคอน 0.10 % ส่วนผสมต่ำสุดของแมงกานิสอาจลดลงเหลือ 0.60 %

(ง) สำหรับแผ่นเหล็กเกรด KA ที่มีความหนามากกว่า 25 มม. ค่า yield point เท่ากับ 22.5 กก./มม.^{2}

(จ) สำหรับแผ่นเหล็กเกรด KA ที่มีรูปร่างเป็น Shape คือมีความกว้างน้อยกว่า 300 มม. และไม่ว่าจะหนาเท่าใด ค่าสูงสุดของ Tensile strength จะไม่ถึง 50 กก./มม.^{2}

(ฉ) ค่า Elongation ต่ำสุดเปลี่ยนแปลงไปตามความหนาของแผ่นเหล็กตามตารางที่ 5

ตารางที่ 5

ค่า Elongation ต่ำสุด (%)

ความหนา t (มม.) / เกรด	t ≤ ๕	๕< t ≤ ๑๐	๑๐< t ≤ ๑๕	๕< t ≤ ๒๐	๕< t ≤ ๒๕	๕< t ≤ ๓๕	๕< t ≤ ๕๐
KA, KL, KD, KE	๑๕	๑๖	๑๗	๑๘	๑๙	๒๐	๒๑

แผ่นเหล็กที่ผ่านการทดสอบและมีคุณสมบัติตามที่สมาคมกำหนด จะต้องตราเครื่องหมายของสมาคม เช่น NK และเกรดของแผ่นเหล็กให้เห็นเด่นชัด โดยเจ้าหน้าที่ของสมาคม และบริษัทผู้ผลิตจะต้องตราเครื่องหมายต่อไปนี้ไว้ที่แผ่นเหล็กอย่างน้อย 1 แห่ง คือ

ก. ชื่อหรือเครื่องหมายของบริษัทผู้ผลิต

ข. ชื่อหรือเครื่องหมายของผู้ซื้อ (ถ้าผู้ซื้อต้องการให้ตรา)

ค. ถ้าไม่สามารถตราเครื่องหมายได้ ให้ติดเครื่องหมายอื่นแทน เช่น แผ่นป้าย

ง. ถ้าไม่สามารถตราเครื่องหมายหรือติดแผ่นป้ายตามข้อ ก. ข. และ ค. ได้ เนื่องจากแผ่นเหล็กมีขนาดเล็ก ให้ทำเครื่องหมายแล้วผูกมัดหรือติดไว้กับวัสดุนั้น ซึ่งอาจจะผูกทีละชิ้นหรือผูกรวมเป็นกองก็ได้

การเรียกชื่อแผ่นเหล็กที่ใช้ในการต่อเรือเฉพาะส่วนที่สำคัญมีดังนี้ [3]

ก. Plate เป็นแผ่นเหล็กที่มีความหนาตั้งแต่ 4.7 มม. ถึง 37.5 มม.

ข. Sheet เป็นแผ่นเหล็กที่มีความหนาน้อยกว่า 4.7 มม.

ค. Shape เป็นแผ่นเหล็กที่มีความกว้างน้อยกว่า 300 มม. โดยไม่ว่าจะหนาเท่าใด ใช้เป็นส่วนเสริมความแข็งแรงของตัวเรือตามที่ต่าง ๆ แบ่งได้ดังนี้

1) Plane angle เป็นเหล็กฉากธรรมดา ถ้าปีกทำมุมไม่เป็นมุมฉากเรียกว่า Level

2) T – Bar เป็นเหล็กรูปตัว T

3) I – Beam และ P – Beam เป็นเหล็กที่มีรูปหน้าตัดเป็นรูปตัว J และ H

4) Deep Beam เป็นเหล็กรูปตัว I, H และ T โดยเอาเหล็กมาเชื่อมติดกัน

5. <u>หน้าที่และชิ้นส่วนต่าง ๆ ของโครงสร้างตัวเรือ</u> (3)

ชิ้นส่วนต่าง ๆ ที่สำคัญของโครงสร้างตัวเรือ มีหน้าที่ดังต่อไปนี้ (ดูรูปที่ 17)

5.1 กระดูกงู (Keel) กระดูกงูถือว่าเป็นกระดูกสันหลังของเรือ เพราะกระดูกงูยึดส่วนต่าง ๆ ของท้องเรือทางขวางไว้หมด และกระจายน้ำหนักที่ได้รับจากแรงภายนอกออกไปสู่ชิ้นส่วนโครงสร้างของตัวเรือ เนื่องจากกระดูกงูเป็นโครงสร้างที่แข็งแรง จึงมีหน้าที่รับน้ำหนักเมื่อเรือเข้าอู่ และรับน้ำหนักแรงเค้นต่าง ๆ อันเกิดขึ้นจากตัวเรือเมื่อเรือเดินทางในทะเล กระดูกงูมี 4 ชนิด ด้วยกันคือ

5.1.1 กระดูกงูแท่ง (Bar Keel) เป็นกระดูกงูที่ยื่นออกไปจากตัวเรือ มีความแข็งแรงมาก มีหน้าที่ป้องกันไม่ให้ท้องเรือเสียหายเวลาเรือเกยตื้นและช่วยไม่ให้เรือโคลงมาก

5.1.2 กระดูกงูแบน (Flat Plate Keel) คือแผ่นเหล็กท้องเรือแต่มีความหนามากกว่าแผ่นเหล็กท้องเรือแผ่นอื่น ๆ เพื่อให้ทนทานต่อการเข้าอู่และเวลาเกยตื้น เมื่อมีโครงสร้างของกระดูกงูทั้ง (Centre Vertical Keel) และแผ่นทับกระดูกงูตั้ง (Rider or Centre Strnke) มาประกอบเข้าด้วยกัน จะเป็น I – Deum ที่แข็งแรง สามารถรับแรงเค้นที่เกิดขึ้นได้ทั้งหมด

5.1.3 กระดูกงูปีก (Bilge keel) ทำด้วยเหล็กมีลักษณะเป็นปีก อาจเป็นปีกชั้นเดียวหรือปีกสองชั้น ติดอยู่กับท้องเรือบริเวณส่วนโค้งของเรือ (Bilge Strake) ยาวประมาณ 1/3 ของความยาวเรืออยู่ประมาณกึ่งกลางลำ มีหน้าที่ช่วยไม่ให้เรือโคลงมาก

5.1.4 กระดูกงูตั้ง (Centre Vertical Keel) คือแผ่นเหล็กที่อยู่แนวกึ่งกลางลำเรือ ตั้งฉากกับกระดูกงูแบน เพื่อทำหน้าที่ช่วยรับน้ำหนักจากแรงกดของน้ำทางท้องเรือ และรับน้ำหนักของสิ่งของ ที่วางบนแผ่นทับกระดูกงูตั้ง นอกจากนี้ยังทำหน้าที่เสมือนคานของพื้นเรือชั้นล่างสุดของเรือที่ไม่ใช่เรือพื้นชั้นเดียวอีกด้วย โดยมีกระดูกข้างซึ่งมีลักษณะและหน้าที่คล้ายกระดูกงูตั้งแต่ไม่อยู่กึ่งกลางลำเรือ วางตั้งอยู่เป็นระยะ ๆ โค้งไปตามรูปท้องเรือ

5.2 แผ่นเหล็กตัวเรือ(Shall Platiog)คือ แผ่นเหล็กที่กันน้ำหรือผนึกน้ำ เมื่อรวมกับชิ้นส่วนโครงสร้างทั้งหมด เช่น แผ่นเหล็กดาดฟ้า กง ฝากั้น ฯลฯ จะรับแรงเค้นได้ถึง 90 % ของแรงเค้นทั้งหมด ประกอบด้วยแผ่นเหล็กหลายแผ่นซึ่งส่วนมากจะเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า และเรียงไปตามยาวของเรือ โดยมีความกว้างเท่าเทียมกัน และเรียกแผ่นเหล็กตามแนวยาวตลอดลำว่า Strake

ความหนาของแผ่นเหล็กตัวเรือเปลี่ยนแปลงไปตามความยาวและตำแหน่งต่าง ๆ ภายในเรือ เช่น แผ่นเหล็กบริเวณหัวเรือสุดต้องหนาเป็นพิเศษ เพราะต้องกระแทกน้ำอยู่เกือบตลอดเวลา และ Keel

Strake, Bilge Strake, Sheer Strake ต้องหนากว่า Garboard Strake ซึ่งแต่ละ Strake มีความหมายดังนี้

1) Keel Strake คือ แผ่นกระดูกงูแบน

2) Garboard Strake คือ แผ่นเหล็กระหว่าง Keel Strake และ Sheer Strake โดยไม่รวม Bilge Strake

3) Bilge Strake คือ แผ่นเหล็กระหว่าง Garboard Strake ตรงบริเวณส่วนโค้งของท้องเรือ

4) Sheer Strake คือ แผ่นเหล็กเปลือกเรือแผ่นบนสุดที่อยู่ติดกับ Stringer Plate

5.3 แผ่นเหล็กดาดฟ้า (Deck Plating) เหมือนกับแผ่นเหล็กตัวเรือที่ปูไปในทางตามยาวของเรือยึดติดกับแผ่นเหล็กเปลือกเรือทั้งสองกราบ ส่วนริมสุดที่ยึดติดกับแผ่นเหล็กเปลือกเรือเรียกว่า Stringer Plate ซึ่งมีความหนากว่าแผ่นเหล็กดาดฟ้า แผ่นเหล็กดาดฟ้าเปรียบเสมือนพื้นบ้าน ถ้าเป็นดาดฟ้า ชั้นบนสุด (Upper Deck) จะทำหน้าที่ผนึกน้ำและรับแรงเค้นตามยาวที่เกิดจากแรงภายนอก

5.4 กง (Frame) มี 2 ชนิด คือ

5.4.1 กงทางขวาง (Transverse Frame) เป็นกงที่อยู่ทางกราบขวาและกราบซ้ายในทางขวางกับตัวเรือ กงทางขวางนี้ถูกค้ำจุนให้แข็งแรงโดยสตริงเกอร์ข้าง (Side Stringer) และกงทางยาวซึ่งอยู่บริเวณท้องเรือ กงทางขวางนี้อยู่ติดกับแผ่นเหล็กตัวเรือเพื่อช่วยค้ำจุนให้แผ่นเหล็กตัวเรือแข็งแรงขึ้น และช่วยต้านทานแรงจากภายนอกที่มากระทำต่อตัวเรือ เพื่อไม่ให้แผ่นเหล็กตัวเรือเกิดความเสียหาย

5.4.2 กงทางยาว (Longitudinal Frame or Longitudinals) เป็นกงที่ยึดติดกับแผ่นเหล็กตัวเรือในทิศทางตามความยาวของตัวเรือ กงนี้ถูกค้ำจุนให้แข็งแรงโดย Web Frame ที่มีความลึกมาก กงทางยาวช่วยให้ตัวเรือแข็งแรงสามารถทนต่อ Bending Moment ที่เกิดจากแรงภายนอกไม่ทำให้เรือหัก

5.5 ฟลอร์ (Floor) คือ ชิ้นส่วนที่อยู่ติดกับท้องเรืออยู่ในแนวเดียวกับกงทางขวางทั้งสองกราบช่วยเสริมโครงสร้างของท้องเรือให้แข็งแรงเพื่อต้านทานแรงกดของน้ำ แรงกดเมื่อเรือเข้าอู่ เกยตื้น หรือแรงกดของอุปกรณ์ต่าง ๆ ภายในเรือ ฟลอร์นี้อาจติดอยู่ทุกกงหรือกงเว้นกง และฟลอร์มีความหนาและลึกพอสมควร แล้วเจาะรูเพื่อให้คนผ่านตามแนวแกนกลางของฟลอร์ เพื่อให้คนเข้าไปทำความสะอาดท้องเรือหรือตรวจสภาพท้องเรือ

5.6 สตริงเกอร์ข้าง (Side Stringer) คล้ายกับกงทางยาวอยู่ติดกับแผ่นเหล็กเปลือกเรือทั้งสองกราบตามแนวยาวของตัวเรือ มีหน้าที่ยึดกงทางขวางเพื่อช่วยให้แผ่นเหล็กเปลือกเรือและกงทางขวางแข็งแรงขึ้น

5.7 เกิร์ดเดอร์ (Girder) คล้ายกับกงทางยาวและบีมดาดฟ้าอยู่ตามแนวยาวของเรือใต้ดาดฟ้าและเหนือปลายเสาค้ำทั้งหลาย มีหน้าที่ไม่ให้พื้นดาดฟ้าโค้งเมื่อมีน้ำหนักวางอยู่บนดาดฟ้า

5.8 บีมดาดฟ้า (Deck Beam) คล้ายกับกงทางขวางอยู่ใต้ดาดฟ้าและยึดกับกงทางขวางด้วยหูช้าง (Beam Knee or Beam Bracket) มีหน้าที่รับน้ำหนักบนดาดฟ้าและทำหน้าที่ประดุจกงไม่ให้แผ่นเหล็กดาดฟ้าย่นเมื่อเรือเกิดการบิดตัว อันเกิดจากการยิงปืนใหญ่

5.9 ฝากั้น (Bulkhead) คือ แผ่นเหล็กที่มีเหล็กเอ็น (Stiffener) ติดอยู่ทั้งในทางตั้งและทางนอน ซึ่งเหล็กเอ็นนี้มีรูปหน้าตัดเป็นรูปตัวที รูปฉาก และรูปอื่น ๆ เพื่อทำให้ฝากั้นแข็งแรง ฝากั้นอาจวางทางขวางและทางยาวของตัวเรือ มีหน้าที่ผนึกน้ำ กั้นไฟ และไม่ให้เรือโย้ไปทางกราบขวาหรือกราบซ้าย (Racking) ในเวลาเรือโดนคลื่นลมจัด

5.10 เสาค้ำ (Pillar) คือ แป๊บเหล็กกลมกลวงหรือเสาเหล็กที่มีหน้าตัดเป็นรูปตัว H ควรติดเสาค้ำใต้บริเวณที่มีน้ำหนักเฉพาะแห่งวางอยู่ เช่น ใต้แท่นปืน ใต้เครื่องจักรต่าง ๆ เสาค้ำมีหน้าที่รับน้ำหนัก รับแรงสั่นสะเทือน แล้วถ่ายแรงเหล่านั้นลงให้กับท้องเรือ และยังช่วยไม่ให้พื้นดาดฟ้าโค้ง

6. <u>การเชื่อม</u> (Welding)[4] คือการต่อโลหะให้ติดกันโดยวิธีทางโลหะวิทยามี 3 วิธีคือ

6.1 วิธีแรงกด (Pressure Process) คือ ทำให้โลหะที่มีภาวะเป็นของแข็งอ่อนตัวด้วยความร้อน ซึ่งอุณหภูมิต่ำกว่าจุดหลอมละลาย แล้วกดอัดให้ติดกัน

6.2 วิธีหลอมละลาย (Fusion Process) คือ ทำให้โลหะร้อนถึงอุณหภูมิหลอมละลายหรือสูงกว่า แล้วให้หลอมละลายติดกันด้วยความร้อนจากแก๊ส ประกายไฟฟ้า

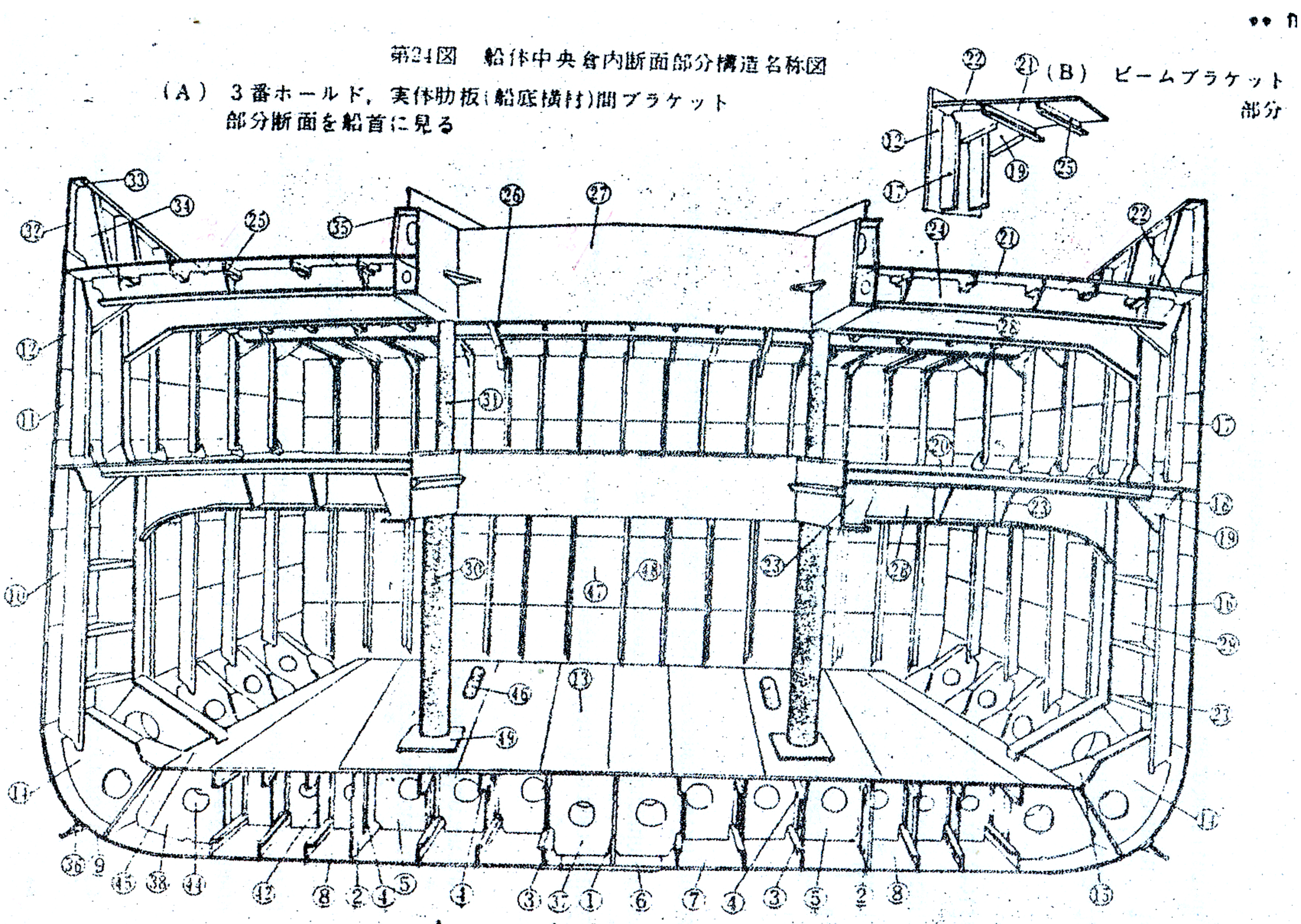
6.3 วิธีบัดกรี (Crazing Process) คือ การให้ความร้อนแก่โลหะผสมที่มีอุณหภูมิหลอมละลายต่ำกว่าโลหะที่ต้องการให้ติดกัน และใช้โลหะผสมที่ร้อนนั้นเชื่อมโลหะสองชิ้นให้ติดกัน

ในการต่อเรือส่วนมากจะใช้วิธีการต่อโลหะด้วยวิธีหลอมละลาย โดยเฉพาะเรื่องการเชื่อมไฟฟ้า (Are Welding) ชนิดใช้ลวดเชื่อม (Consumable electrode) คือ ลวดเชื่อมเป็นตัวทำให้เกิดประกายไฟฟ้า (Electric Arc) ณ ตำแหน่งรอยต่อเพื่อให้เกิดความร้อนสูง โดยช่างเชื่อมนำปลายลวดเชื่อมไปแตะกับโลหะที่ต้องการเชื่อม (Base Metal) แล้วชักกลับออกมาให้ปลายลวดเชื่อมห่างจาก Base Metal ประมาณ 3 มม. แระแสไฟก็จะผ่านลวดเชื่อมลงสู่ Base Metal นั้นทำให้เกิดความร้อนสูง แล้วลวดเชื่อมก็จะละลายลงสู่รอยเชื่อมนั้นจนเต็มทำให้ Base Metal ทั้งสองชิ้นติดกัน ลวดเชื่อมที่ใช้มี 2 ชนิด คือ ลวดเชื่อมเปล่า (Bared Wire) และลวดเชื่อมชนิดมีฟลักซ์หุ้ม (Covered electrode)

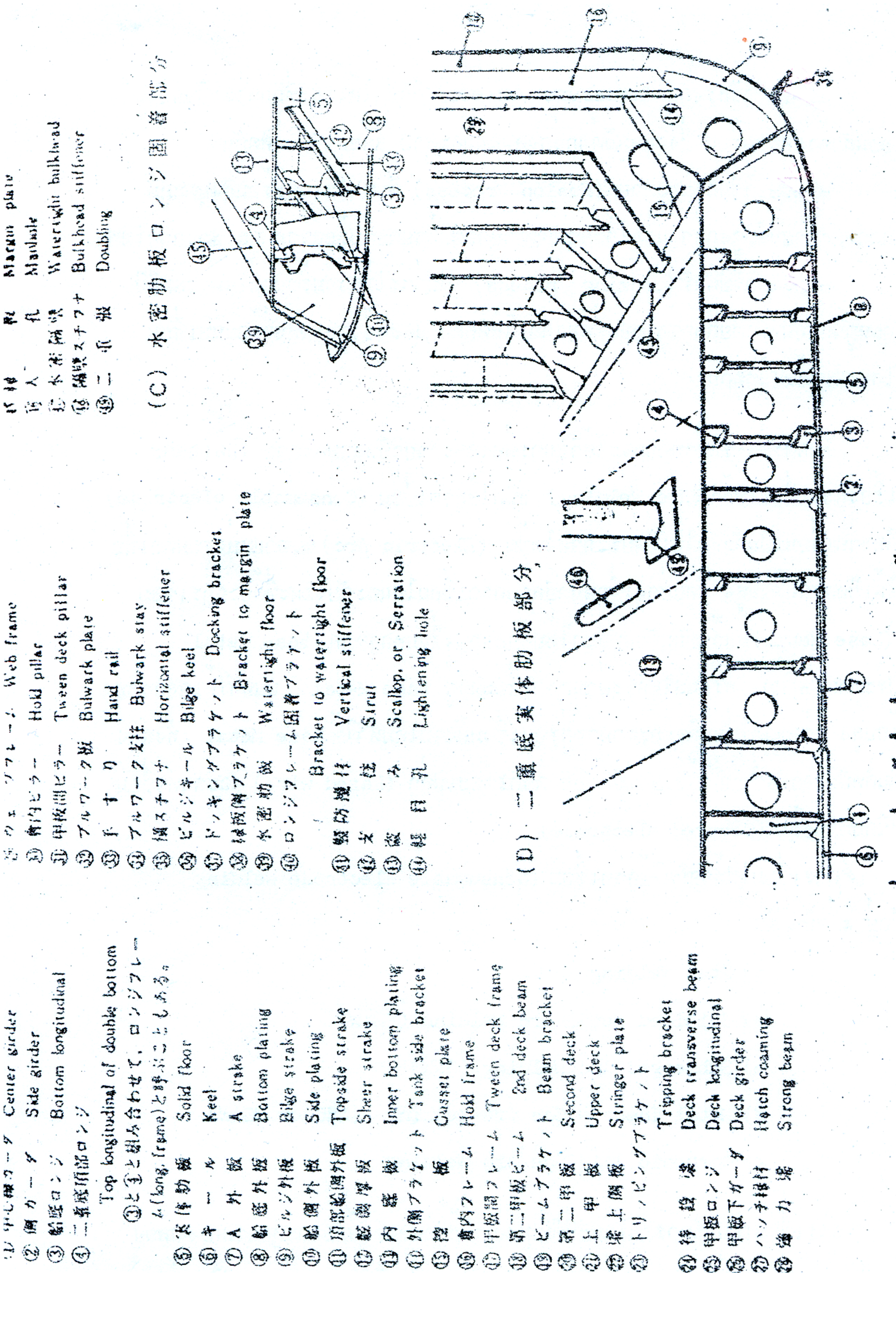
การเชื่อมไฟฟ้าชนิดใช้ลวดเชื่อม (Consumable Electrode Welding) มีอยู่ 5 ชนิด คือ

1) Stud Welding

2) Shielded Metal Arc Welding (SMAW)



รูปที่ 17 ชิ้นส่วนต่างๆของโครงสร้างตัวเรือ



รูปที่18 (ต่อ) ชิ้นส่วนต่างๆของโครงสร้างตัวเรือ

3) Submerged Arc Welding (SAW)

4) Metal Inert – Gas Arc Welding (MIG or MGAW)

5) Carbonic Acid Gas Arc Welding

การเชื่อมเป็นวิธีการต่อโลหะที่ดีที่สุดและได้ถูกนำมาใช้กับงานอุตสาหกรรมทางด้านโลหะ เช่น การต่อเรือ การก่อสร้าง การผลิตเครื่องบิน รถยนต์ เตาปฏิกรณ์ปรมาณู เครื่องใช้ไฟฟ้า ซึ่งการเชื่อมมีข้อได้เปรียบอย่างมากมาย เมื่อเปรียบเทียบกับการย้ำหมุด (Riveting) การหล่อ (Casting) และการขึ้นรูป (Forging) แต่การเชื่อมซึ่งเป็นการต่อโลหะทางโลหะวิทยาซึ่งทำให้เกิดความร้อนสูงอย่างรวดเร็ว จึงมีข้อเสียเปรียบบางประการ ดังนั้นต้องระมัดระวังเป็นอย่างมากในการเชื่อม

ข้อเสียเปรียบของการเชื่อม

1) คุณสมบัติของโลหะเปลี่ยนไป
2) เกิดการบิดตัว (Distortion) และการหดตัว (Shrinkage) ของโลหะ
3) เกิดแรงเค้นตกค้าง (Residual Stress) ในโลหะ
4) ยากต่อการตรวจสอบคุณภาพของรอยเชื่อม
5) เกิดแรงเค้นที่รอยเชื่อม

แนวของการเชื่อม (Welding Position) มี 4 แนว คือ (ดูรูปที่ 18)

1) แนวราบ (Flat)
2) แนวตั้ง (Vertical)
3) แนวระดับ (Horizontal)
4) แนวเหนือศีรษะ (Overhead)

การเชื่อมแนวเหนือศีรษะลำบากมากที่สุดใช้เวลามากกว่าการเชื่อมในแนวอื่นและผลงานที่ออกมาจะไม่แข็งแรงและสวยงาม นอกจากช่างเชื่อมที่มีความสามารถและความชำนาญสูง

แบบของการเชื่อม (Types of Weld) มีอยู่ 2 แบบ คือ

1) แบบมุม (Fillet Weld) คือ การเชื่อมโลหะสองชิ้นที่นำมาต่อกันในลักษณะเป็นมุมหรือเป็นรูปตัวที

2) แบบรอยต่อ (Lott Weld) คือ การเชื่อมโลหะสองชั้นที่มาต่อกัน ซึ่งรอยต่ออยู่ในระดับเดียวกัน

ปัจจุบันกรมอู่ทหารเรือใช้เครื่องเชื่อมในการต่อเรือ 3 ชนิด คือ

1) Shieldod Metal Arc Welding (SMAW) (ดูรูปที่ 19)
2) Submerged Arc Welding (SAW) (ดูรูปที่ 20)
3) Metal Inert-Gas Arc Welding (MGW) (ดูรูปที่ 21)

7. <u>กรรมวิธีการต่อเรือแบบดั้งเดิม</u> (Conventional Construction Process)[5]

เป็นกรรมวิธีแบบเก่าโดยนำชิ้นส่วนโครงสร้างย่อยแต่ละชิ้นส่วนที่ทำในโรงงานไปประกอบตัวเรือ (Erection) ในอู่แห้งหรือชานต่อเรือเรียงตามลำดับตั้งแต่วางกระดูกงูแล้วนำส่วนโครงสร้างอื่น ๆ เช่น ฝากั้น กงทางยาว กงทางขวาง ฟลอร์ ฯลฯ เมื่อเชื่อมชิ้นส่วนต่าง ๆ เหล่านี้ยึดติดกันจนเป็นโครงของ ตัวเรือแล้ว จึงนำแผ่นเหล็กตัวเรือ แผ่นเหล็กดาดฟ้ามาประกอบแล้วเชื่อมติดกับโครงเป็นรูปตัวเรือ (ดูรูปที่ 22) การต่อเรือแบบนี้แบ่งชั้นการทำงานออกเป็น 3 ชั้น คือ

7.1 การแปรรูปเหล็ก (Fabrication) เป็นขั้นตอนของการแปรรูปเหล็กต่าง ๆ โดยการดัดหรือตัดเป็นรูปร่างต่าง ๆ ตามไม้แบบ (Template) หรือตามแบบขยาย

7.2 การทำชิ้นส่วนย่อย (Component) คือ การนำเหล็กต่าง ๆที่ได้รับการแปรรูปแล้วมาประกอบเป็นชิ้นส่วนย่อยโดยการเชื่อม เช่น กระดูกงู ฝากั้น กงทางยาว กงขวาง ฟลอร์ ฯลฯ

7.3 การประกอบตัวเรือในอู่แห้ง (Erection) คือ การนำชิ้นส่วนย่อยของตัวเรือมาประกอบในอู่แห้งหรือชานต่อเรือ โดยนำมาประกอบเรียงตามลำดับตั้งแต่กระดูกงูจนเสร็จเป็นรูปตัวเรือ

กรรมวิธีการต่อเรือแบบดั้งเดิมมีข้อเสียหลายประการคือ

1) ต้องทำชิ้นส่วนย่อยเป็นจำนวนมากในโรงงาน ต้องใช้พื้นที่มากในการเก็บระหว่างรอนำไปประกอบในอู่ และไม่สะดวกในการทำงาน

2) สถานที่ทำงานทั้งในอู่แห้งและในเรือจำกัดและคับแคบ ไม่สะดวกในการเคลื่อนไหวและทำงาน ทำให้ผลผลิตที่ได้น้อย และคุณภาพไม่ดี

3) เสียเวลาในการเดินขึ้น – ลง และเคลื่อนย้ายอุปกรณ์และเครื่องมือต่าง ๆ ไปยังบริเวณอู่แห้ง

4) ต้องทำงานในที่สูง อาจเกิดอันตราย ทำให้ขวัญของช่างต่ำ

5) ไม่สามารถใช้อู่แห้งให้เป็นประโยชน์ในทางอื่นได้ เช่น การนำเรือเข้าอู่แห้งเพื่อซ่อมทำตัวเรือใต้แนวน้ำ

แต่กรรมวิธีการต่อเรือแบบดั้งเดิมมีข้อดีบ้าง เช่น ถ้ามีการผิดพลาดสามารถแก้ไขได้ทันท่วงทีและแก้ไขได้ง่ายกว่ากรรมวิธีการต่อเรือแบบบล๊อค (Block Construction Process)

สำหรับกรรมวิธีการต่อเรือของกรมอู่ทหารเรือตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน ใช้กรรมวิธีการต่อเรือแบบดั้งเดิม โดยนำชิ้นส่วนย่อยไปประกอบตัวเรือในอู่แห้ง ดังตัวอย่างการประกอบตัวเรือของเรือ ต.94 ของแผนกต่อเรือเหล็ก กรมโรงงาน กรมอู่ทหารเรือ ตามลำดับดังนี้

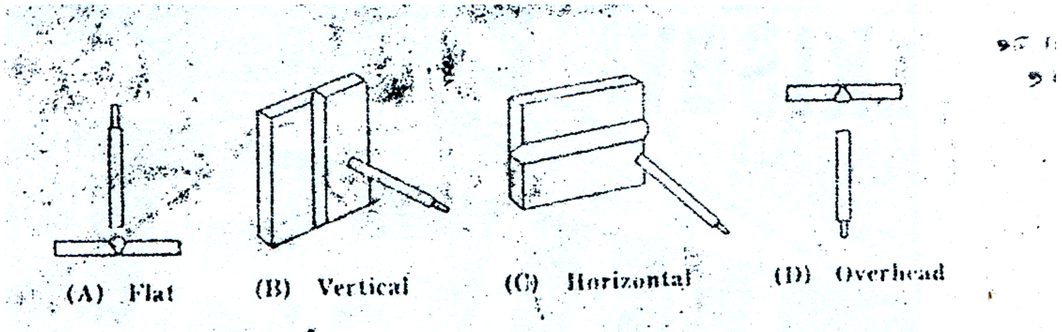
1) วางกระดูกงู

2) ประกอบฝากั้นและแผ่นบิดท้าย

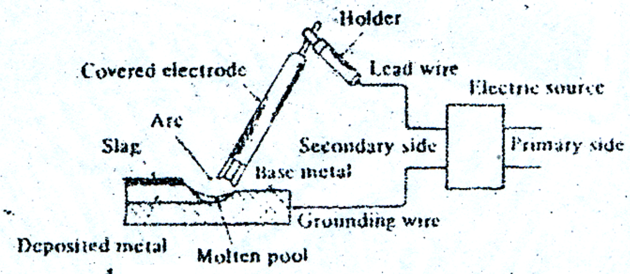
3) ประกอบกงทางขวางและกงเสริม

4) ประกอบฟลอร์

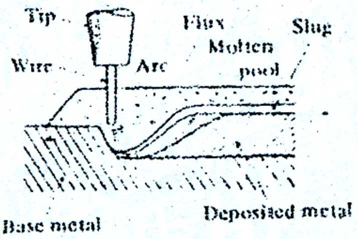
5) ประกอบกงทางยาวที่ 1,2,3,4 ตลอดลำ

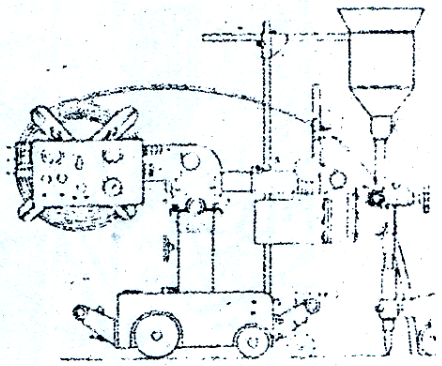


รูปที่ 18 Welding Positions



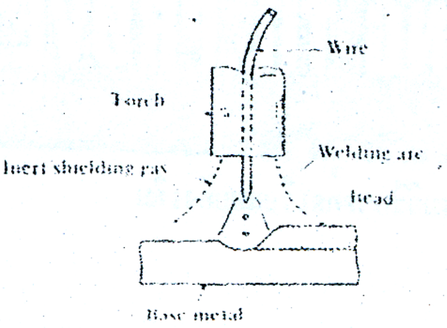
รูปที่ 19 Shielded metal arc welding

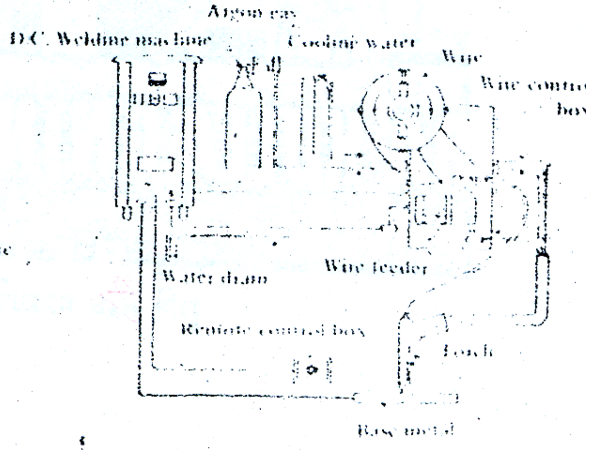




รูปที่ 20 Submerged arc welding

Welding machine of submerged arc w





รูปที่ 21 MIG welding (Semi Automatic)

รูปที่ 22 กรรมวิธีการต่อเรือแบบดั้งเดิม

6) ประกอบ Side Stringer ที่ 1 ตลอดลำ

7) ประกอบฝากั้นถังน้ำมันตามยาว

8) ประกอบคานรับพื้น

9) ประกอบฝากั้นถังน้ำ

10) ประกอบ Side Stringer ที่ 2 ตลอดลำ

11) ประกอบแผ่นเหล็กตัวเรือแผ่น A ตลอดลำ

12) ประกอบ Girder ตลอดลำ

13) ประกอบแผ่นเหล็กตัวเรือแผ่น L ตลอดลำ

14) ประกอบแผ่นเหล็กตัวเรือแผ่น C ตลอดลำ

15) ประกอบแผ่นเหล็กตัวเรือแผ่น D ตลอดลำ

16) ประกอบแผ่นเหล็กตัวเรือแผ่น E ตลอดลำ

17) ประกอบ Centre Girder ตลอดลำ

18) ประกอบพื้นดาดฟ้าตลอดลำ

19) ประกอบ Superstructure

8. กรรมวิธีการต่อเรือแบบบล๊อค (Block Construction Process)[6]

การต่อเรือแบบบล๊อค คือ การแบ่งตัวเรือออกเป็นบล๊อคเล็ก (Small block) หรือบล๊อคใหญ่ (Large block) ซึ่งขึ้นอยู่กับขีดความสามารถของอู่ต่อเรือและขนาดของเรือ การแบ่งตัวเรือออกเป็นบล๊อคเล็กเหมาะสำหรับเรือขนาดใหญ่ ซึ่งบล๊อคเล็ก คือ แผ่นเหล็กและชิ้นส่วนย่อยประกอบเข้าด้วยกันเรียบร้อย เช่น บล๊อคท้องเรือ บล๊อคเปลือกเรือ บล๊อคฝากั้น และบล๊อคดาดฟ้า ส่วนบล๊อคใหญ่ คือ การนำบล๊อคเล็กต่าง ๆ เหล่านั้นมาประกอบเข้าด้วยกัน เหมาะสำหรับเรือขนาดเล็ก ซึ่งการประกอบบล๊อคนั้นจะกระทำในโรงงาน แล้วจึงยกลงไปประกอบตัวเรือในอู่แห้ง หรือชานต่อเรือ แล้วเชื่อมบล๊อคต่าง ๆ นั้นเข้าด้วยกันจนสำเร็จเป็นตัวเรือ กรรมวิธีการต่อเรือแบบบล๊อคจะต้องดำเนินการตามลำดับดังนี้

8.1 การแบ่งบล๊อค

จุดประสงค์เบื้องต้นของการต่อเรือแบบบล๊อค คือ ลดงานที่ต้องปฏิบัติในอู่แห้งหรือชานต่อเรือ และลดเวลาในการต่อเรือซึ่งมีข้อได้เปรียบมากมายเมื่อเปรียบเทียบกับการต่อเรือแบบดั้งเดิม ดังนั้นจะต้องพิจารณาถึงขนาดของบล๊อคว่าจะแบ่งเป็นบล๊อคเล็กหรือบล๊อคใหญ่

การแบ่งเป็นบล๊อคเล็กจะมีข้อเสียเปรียบเมื่อเปรียบเทียบกับการแบ่งเป็นบล๊อคใหญ่ คือ มีงานมากกว่าในอู่แห้งหรือชานต่อเรือ แต่มีข้อได้เปรียบคือการมีความแน่นอนเกี่ยวกับมิติ (Dimension) ของบล๊อคมากกว่า และถ้ามีการแก้ไขจะกระทำได้ง่ายกว่า และเวลาที่ใช้ในการต่อเรือตั้งแต่ต้น

จะน้อยกว่าด้วย ยิ่งกว่านั้นจะแบ่งเป็นบล๊อคเล็กไม่ต้องใช้เครื่องมือขนาดใหญ่ และสามารถพลิกบล๊อคเล็กได้ง่ายกว่า

การแบ่งเป็นบล๊อคใหญ่สามารถลดงานในอู่แห้งหรือชานต่อเรือ ซึ่งตรงกับจุดประสงค์เกี่ยวกับสภาพแวดล้อมในการปฏิบัติงาน นอกจากจะได้ผลดีเกี่ยวกับการประกอบตัวเรือ (Erection) การติดตั้งส่วนอื่น ๆ และการเชื่อมแล้วยังมีผลดีต่อการทาสี การประกอบชิ้นส่วนตัวเรืออื่น ๆ และลดงานการตั้งนั่งร้าน (Scaffolding or Stage Insiallation) เนื่องจากการแบ่งเป็นบล๊อคใหญ่เป็นการเปลี่ยนงานใน อู่แห้งเป็นงานบนพื้นดินคือในโรงงาน ทำให้ได้เรือที่มีคุณภาพสูงและสามารถเร่งเวลาในการทำงานได้

แนวความคิดเก่าในการแบ่งบล๊อคก็เพื่อเพียงการสร้างตัวเรือให้ง่ายขึ้น แต่ในปัจจุบันจะต้องมีแนวความคิดเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงาน เพื่อความปลอดภัยและอนามัยของช่าง และการแบ่งบล๊อคจะมีความสำคัญต่อการต่อเรือและเป็นการแสดงถึงขีดความสามารถของอู่

การแบ่งบล๊อคจะต้องมีหลักเกณฑ์ที่พิจารณาและบล๊อคควรมีคุณสมบัติตามหลักเกณฑ์ต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

ก. <u>หลักเกณฑ์เกี่ยวกับงานในอู่แห้งหรือชานต่อเรือ</u>

1) ควรมีน้ำหนักมากที่สุด แต่ต้องใช้เครนยกได้

2) ต้องมีรูปร่างและขนาดที่ง่ายต่อการใช้เครนในการพลิก, การเคลื่อนย้ายและการประกอบ

3) แต่ละบล๊อคควรมีน้ำหนักใกล้เคียงกัน

4) ต้องง่ายต่อการวาง

5) ง่ายต่อการเชื่อม

6) มีการเชื่อมในอู่แห้งน้อยที่สุด

7) ง่ายต่อการใช้เครื่องเชื่อมอัตโนมัติ

8) ง่ายต่อการตั้งและรื้อนั่งร้าน

9) มีพื้นที่สำหรับทำงานตรงรอยต่อของบล๊อค

10) ขนาดรูปร่างของบล๊อคควรมีขนาดเท่า ๆ กัน

11) ง่ายต่อการวางบล๊อคแต่ละบล๊อค

12) มีอิสระเกี่ยวกับลำดับการประกอบบล๊อคเป็นตัวเรือ

13) รอยต่อของบล๊อคต้องเป็นเส้นตรง

14) ไม่ต้องใช้เหล็กชนิดพิเศษตรงรอยต่อของบล๊อค

15) ต้องประหยัด คือ เหลือเศษแผ่นเหล็กน้อยในการสร้างบล๊อค

16) ง่ายต่อการวางบล๊อคต่อจากบล๊อคที่วางไว้แล้ว

17) ง่ายต่อการยึดบล๊อคด้วยลวดและสิ่งค้ำจุนในกรณีที่ไม่สามารถยึดกับบล๊อคที่

วางไว้แล้ว

ข. หลักเกณฑ์เกี่ยวกับการประกอบบล๊อค

1) ง่ายต่อการประกอบและง่ายต่อการรักษารูปทรงและขนาดของบล๊อคที่ประกอบแล้ว

2) มีรูปร่างที่ง่ายต่อการประกอบแต่ละบล๊อคเข้าด้วยกัน

3) ง่ายต่อการเก็บ

4) ควรมีขนาดพอเหมาะกับเครื่องมือ พื้นที่และความสูงในโรงงานประกอบบล๊อค

5) สามารถใช้เครื่องเชื่อมอัตโนมัติได้ เพื่อประหยัดแรงงาน

6) ควรมีขนาดพอเหมาะกับเครื่องจักรและเครื่องมือของทุกโรงงานที่เกี่ยวข้อง

7) ง่ายต่อการเคลื่อนย้าย

8) ควรมีขนาดพอเหมาะกับแผ่นเหล็กขนาดมาตรฐาน

ค. หลักเกณฑ์เกี่ยวกับงานอื่น ๆ

1) ง่ายต่อการต่อบล๊อคเข้าด้วยกัน

2) ง่ายต่อการประกอบอุปกรณ์ต่าง ๆ โดยไม่เกิดความเสียหาย

3) ง่ายต่อการประกอบชิ้นส่วนอื่นบนเรือ

4) ง่ายต่อการทาสีทั้งในโรงงานและภายหลังการประกอบตัวเรือ

5) ง่ายต่อการตรวจสอบ

ง. หลักเกณฑ์เกี่ยวกับความแข็งแรง

1) ควรหลีกเลี่ยงรอยต่อตรงบริเวณที่เกิดแรงเค้นจากการเชื่อมในขั้นประกอบตัวเรือ

2) ควรหลีกเลี่ยงรอยต่อตรงบริเวณที่เกิดแรงเค้นในสภาพที่เรือเดินทางในทะเล

3) ควรหลีกเลี่ยงรอยต่อตรงบริเวณที่แรงเค้นสะสมจะเกิด

4) ควรจัดบล๊อคเพื่อให้การกระจายของแรงเค้นที่เกิดขึ้นเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ

8.2 ขั้นตอนของการต่อเรือแบบบล๊อค[7] แบ่งการทำงานออกเป็น 4 ขั้นตอน คือ

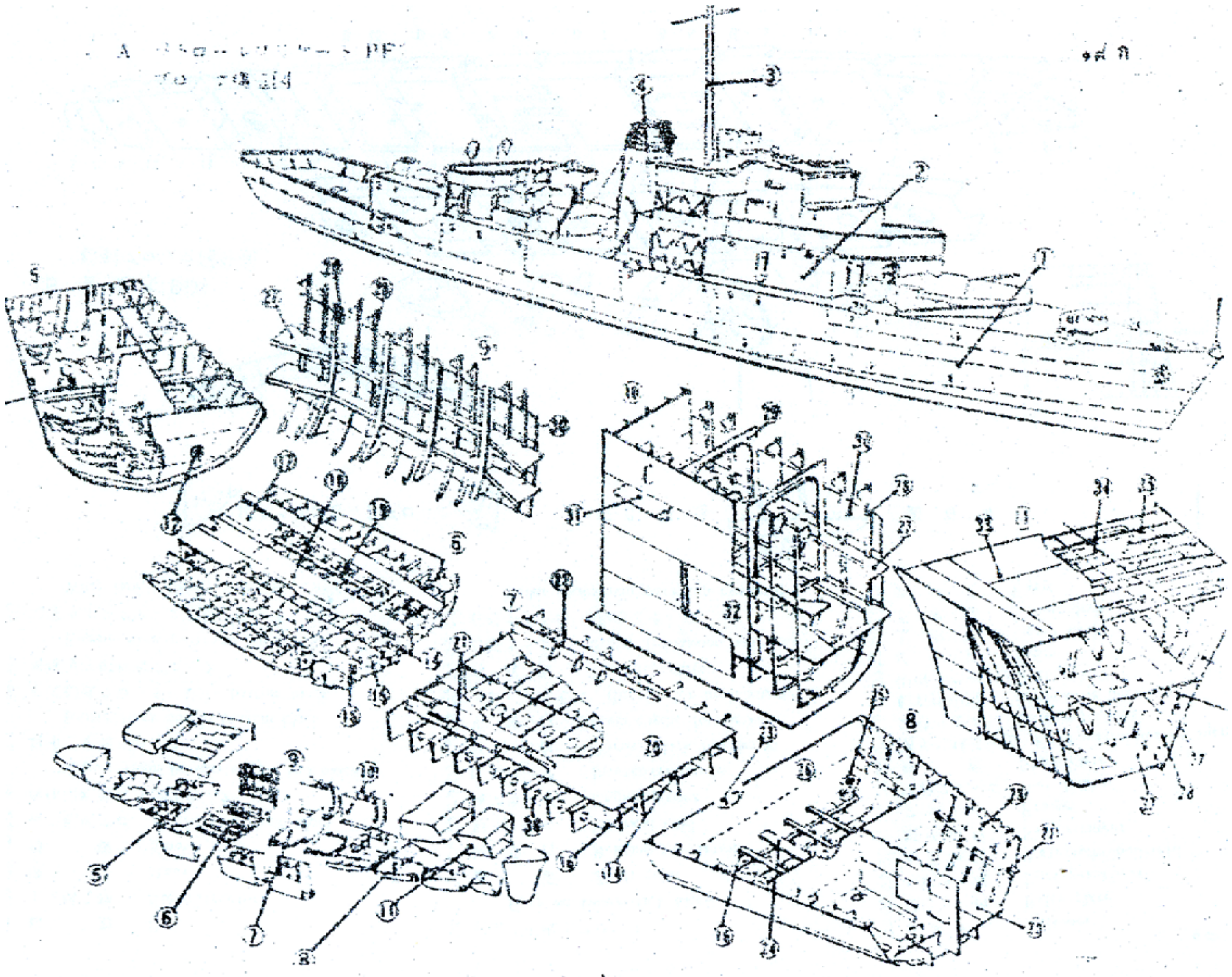
8.2.1 การแปรรูปเหล็ก (Fabrication) คือ การแปรรูปเหล็กต่าง ๆ เหมือนกับขั้นตอนของการต่อเรือแบบดั้งเดิม ซึ่งงานในขั้นตอนนี้จะประกอบด้วย

1) การขยายแบบ

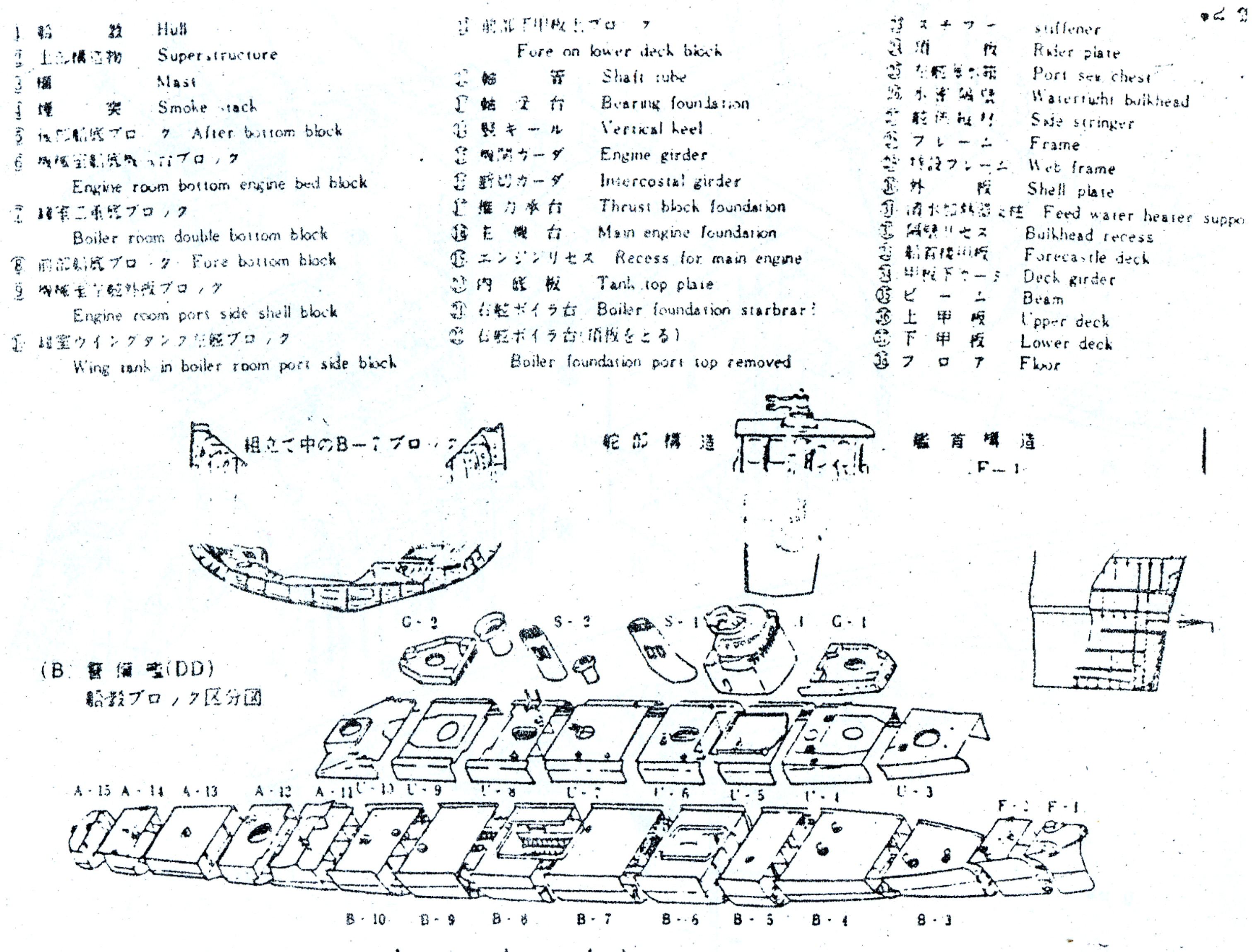
2) การทำไม้แบบ

3) การตัดแผ่นเหล็ก

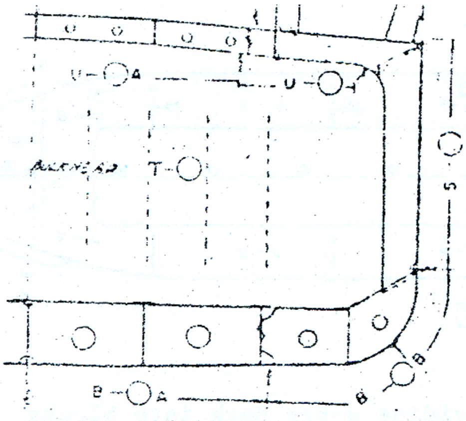
4) การดัดแผ่นเหล็ก



รูปที่ 23 ตัวอย่างการแบ่งบล็อกตัวเรือ



รูปที่ 24 ตัวอย่างการแบ่งบล็อคตัวเรือ



Remark:
The numeral in circle
denotes the block number.

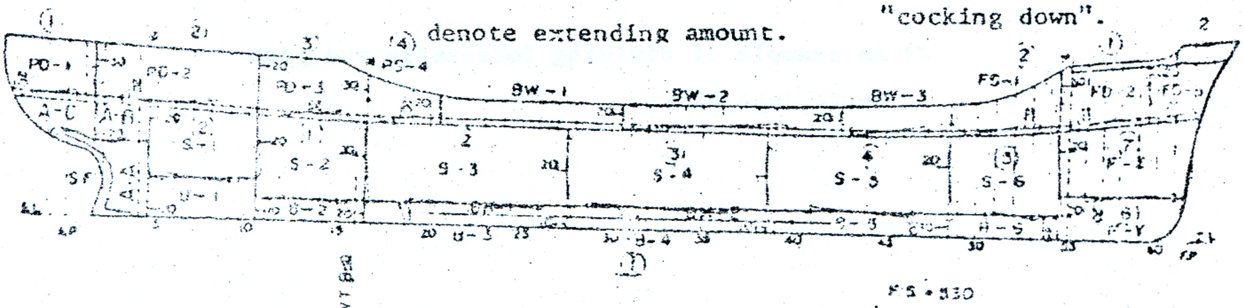
รูปที่ 25 ตัวอย่างการแบ่งบล็อกตัวเรือ

ก) An example of dividing the hull into
blocks in the midship section

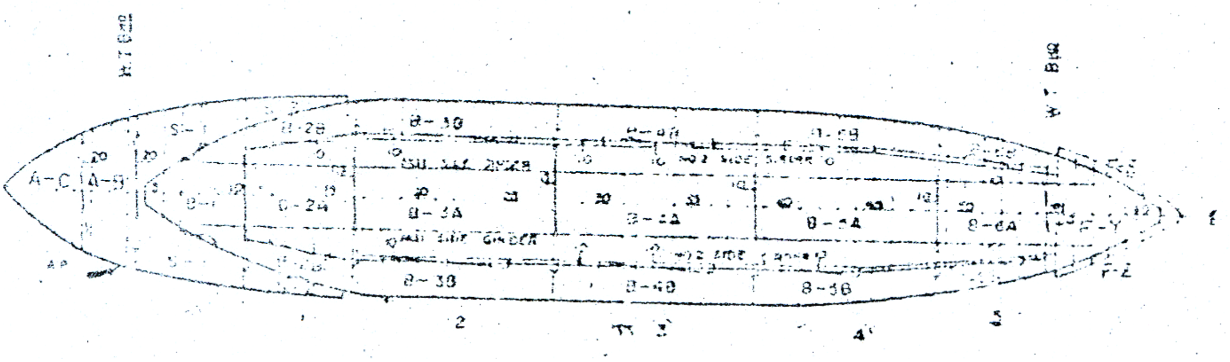
The numeral in circle
denotes erecting order.

Marks "—20, etc."
denote extending amount.

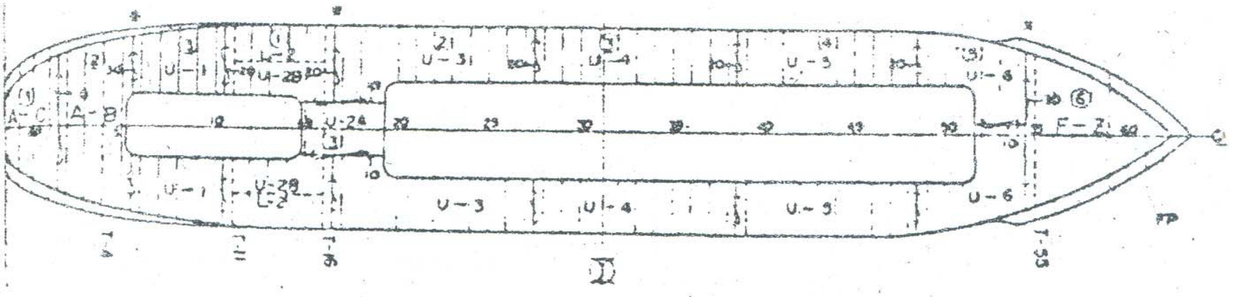
The position marked
with * represents
the position for
"cocking down".



ข) An example of dividing side shell into blocks



An example of dividing bottom shell into blocks



d) An example of dividing u-per deck into blocks

e) An example of dividing forecastle and poop decks into blocks

8.2.2 การประกอบชิ้นส่วนย่อย (Sub – Assembly) คือ การนำเหล็กที่แปรรูปแล้วมาประกอบเป็นส่วนต่าง ๆ เช่น ฟลอร์, กง, ฝากั้น, กระดูกงู ฯลฯ ซึ่งเรียกว่าบล๊อคย่อย (Sun – block) ทั้งนี้เพื่อความสะดวกในการนำบล๊อคย่อยมาประกอบเป็นบล๊อค การประกอบบล๊อคย่อยมีประโยชน์ดังนี้

1) สามารถทำบล๊อคย่อยในสถานที่อื่น ๆ ได้
2) การประกอบและการเชื่อมทำได้ง่ายขึ้น
3) ลดการทำงานในที่สูงและแคบ ทำให้การทำงานมีประสิทธิภาพดีขึ้น

8.2.3 การประกอบบล๊อค (Block Assembly) คือการนำบล๊อคย่อยและชิ้นส่วนอื่น ๆ จากการแปรรูปเหล็กมาประกอบ และเชื่อมติดกันเป็นรูปบล๊อคที่สมบูรณ์พร้อมที่จะนำไปประกอบตัวเรือในอู่แห้งหรือชานต่อเรือ

การประกอบบล๊อคจะประกอบบน Jig ซึ่งอยู่ในโรงงานหรือนอกโรงงานก็ได้ แต่ควรจะอยู่ใกล้บริเวณที่จะประกอบตัวเรือเพื่อความสะดวกในการเคลื่อนย้าย Jig ที่บล๊อควางอยู่จะเป็นตัวรับน้ำหนักและรักษารูปทรงของบล๊อคไว้

การประกอบบล๊อคมี 3 วิธีคือ

1) การประกอบโดยการแยกชิ้นส่วนโครงสร้าง (Separate skeleton assembling system) เป็นการนำบล๊อคย่อย คือชิ้นส่วนย่อย เช่น กงทางยาว กงทางขวาง ที่ประกอบแล้วหรือชิ้นส่วนที่ยังไม่ได้ประกอบมาเชื่อมกับแผ่นเหล็กที่ได้เชื่อมต่อกันแล้ว วิธีนี้ใช้ในการประกอบบล๊อคดาดฟ้าเรียบและบล๊อคเปลือกเรือทั้งแบบเรียบและโค้ง วิธีนี้มี 2 แบบ คือแบบญี่ปุ่นเรียกว่า Egg – Box Construction และแบบยุโรป เรียกว่า Line – welding type ซึ่งมีข้อแตกต่างกันดังนี้

แบบญี่ปุ่น เชื่อมต่อแผ่นเหล็กเข้าด้วยกัน และในขณะเดียวกันก็ประกอบชิ้นส่วนโครงสร้าง เช่น กงทางยาวและกงทางขวาง แล้วเชื่อมติดกันเป็นบล๊อคย่อย แล้วจึงนำบล๊อคย่อยนี้ไปประกอบและเชื่อมติดกับแผ่นเหล็ก (ดูรูปที่ 26 และรูปที่ 27)

แบบยุโรป หลังจากเชื่อมต่อแผ่นเหล็กเข้าด้วยกันแล้ว จึงนำชิ้นส่วนโครงสร้าง เช่น กงทางยาวและกงทางขวางมาประกอบและเชื่อมติดกับแผ่นเหล็กตามลำดับ (ดูรูปที่ 28)

2) การประกอบชิ้นส่วนโครงสร้างภายในก่อน (Framing precedence system) เป็นวิธีตรงข้ามกับวิธี 1) คือ ประกอบบล๊อคย่อยก่อนแล้วจึงดึงแผ่นเหล็กทีละแผ่นมาประกอบและเชื่อมติดกับบล๊อคย่อย เสร็จแล้วจึงเชื่อมต่อแผ่นเหล็กเข้าด้วยกัน วิธีนี้ใช้กับการประกอบท้องเรือสองชั้น และบล๊อคท้องเรือในส่วนหัวเรือและท้ายเรือ (ดูรูปที่ 29)

3) การประกอบบล๊อคสามมิติ (Three dimensional hull block system) เป็นการประกอบบล๊อคผสมของวิธี 1) และ 2) แต่รูปร่างของบล๊อคเป็น 3 มิติ ดังนั้นจึงต้องพิจารณาถึงความสำคัญของความแข็งแรงและการรักษารูปร่างของบล๊อคให้ถูกต้องในขณะประกอบบล๊อค ซึ่งมีวิธีและลำดับของการประกอบบล๊อคดังนี้ (ดูรูปที่ 30)

ก) ใช้แผ่นเหล็กที่ค่อนข้างเรียบของดาดฟ้าหรือเปลือกเรือเป็นฐาน

ข) จัดเตรียมและเชื่อมบล๊อคย่อยหรือชิ้นส่วนย่อยติดกับแผ่นเหล็กที่ใช้เป็นฐาน

ค) ประกอบแผ่นเหล็กเปลือกเรือที่โค้งทีละแผ่น โดยเชื่อมติดกับบล๊อคย่อยหรือชิ้นส่วนย่อยก่อน แล้วจึงเชื่อมต่อแผ่นเหล็กเปลือกเรือเข้าด้วยกัน

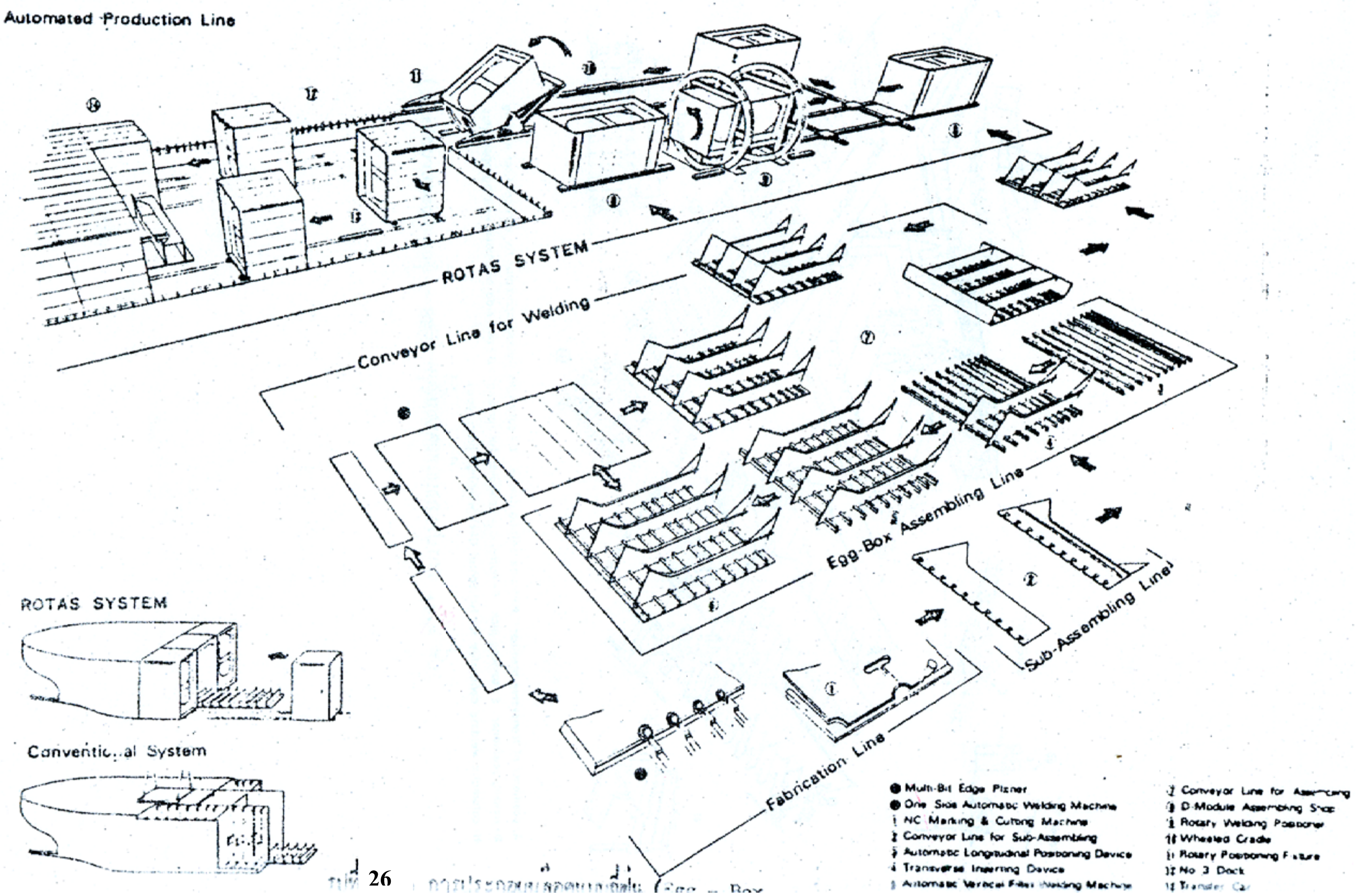
การประกอบบล็อคต้องใช้ความระมัดระวังมาก เพราะถ้ามีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้น การประกอบตัวเรือจะกระทำได้ยาก และยากต่อการแก้ไขด้วย ซึ่งข้อระมัดระวังในการประกอบบล๊อคมีดังนี้

(1) จะต้องตรวจสอบระดับของพื้นที่จะติดตั้ง Jig ให้อยู่ในแนวระดับจริง ๆ การทำ Jig จะต้องตรวจสอบอย่างถี่ถ้วนเพราะถ้า Jig ไม่ถูกต้องแล้วจะทำให้ระยะต่าง ๆ ผิดไปหมด

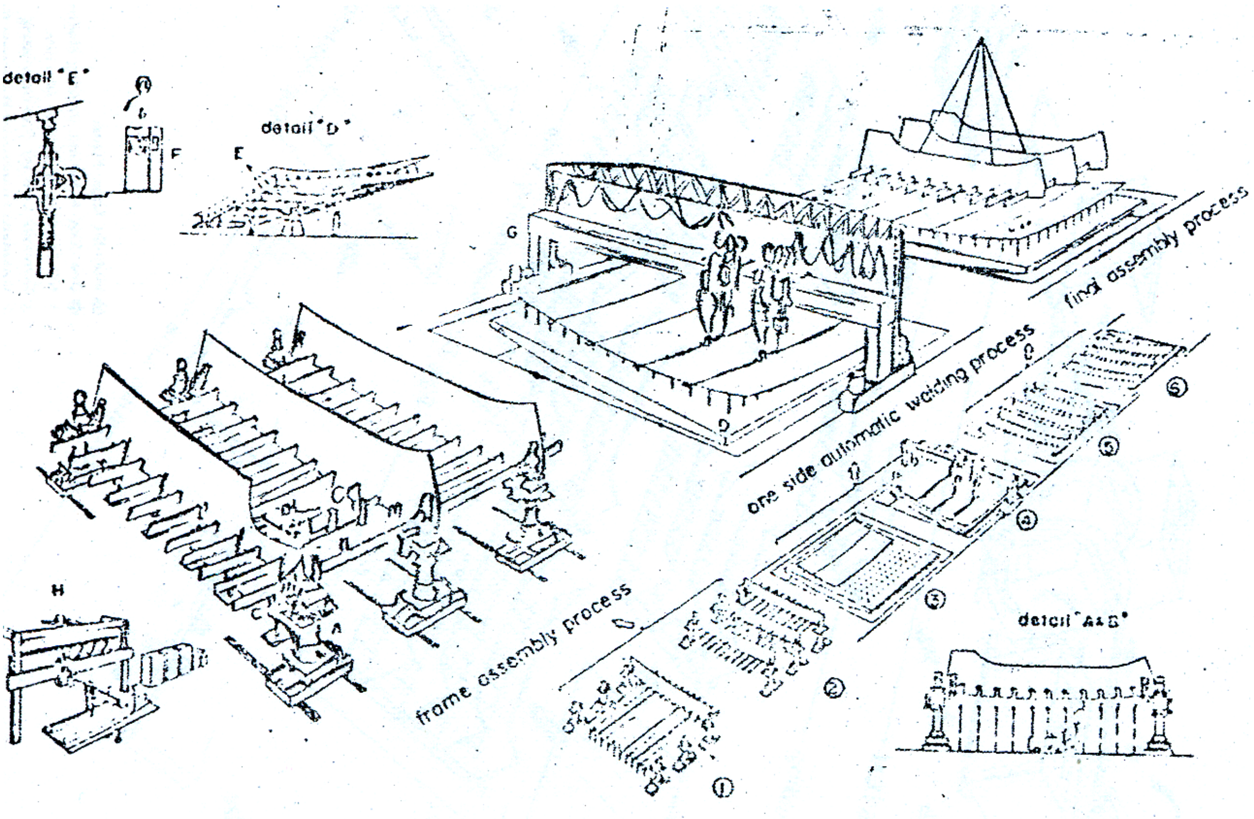
(2) เหล็กที่นำมาทำฐานของ Jig จะต้องมั่นคงแข็งแรงสามารถรับบล๊อคได้โดยไม่มีการทรุดตัว

(3) จะต้องมีการตรวจสอบ Jig อยู่เสมอว่ามีการทรุดตัวบ้างหรือเปล่า เพราะในการประกอบบล๊อคน้ำหนักของบล๊อคจะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ

The originality beyond comparison in the world
—Image-changing of Shipbuilding industry—

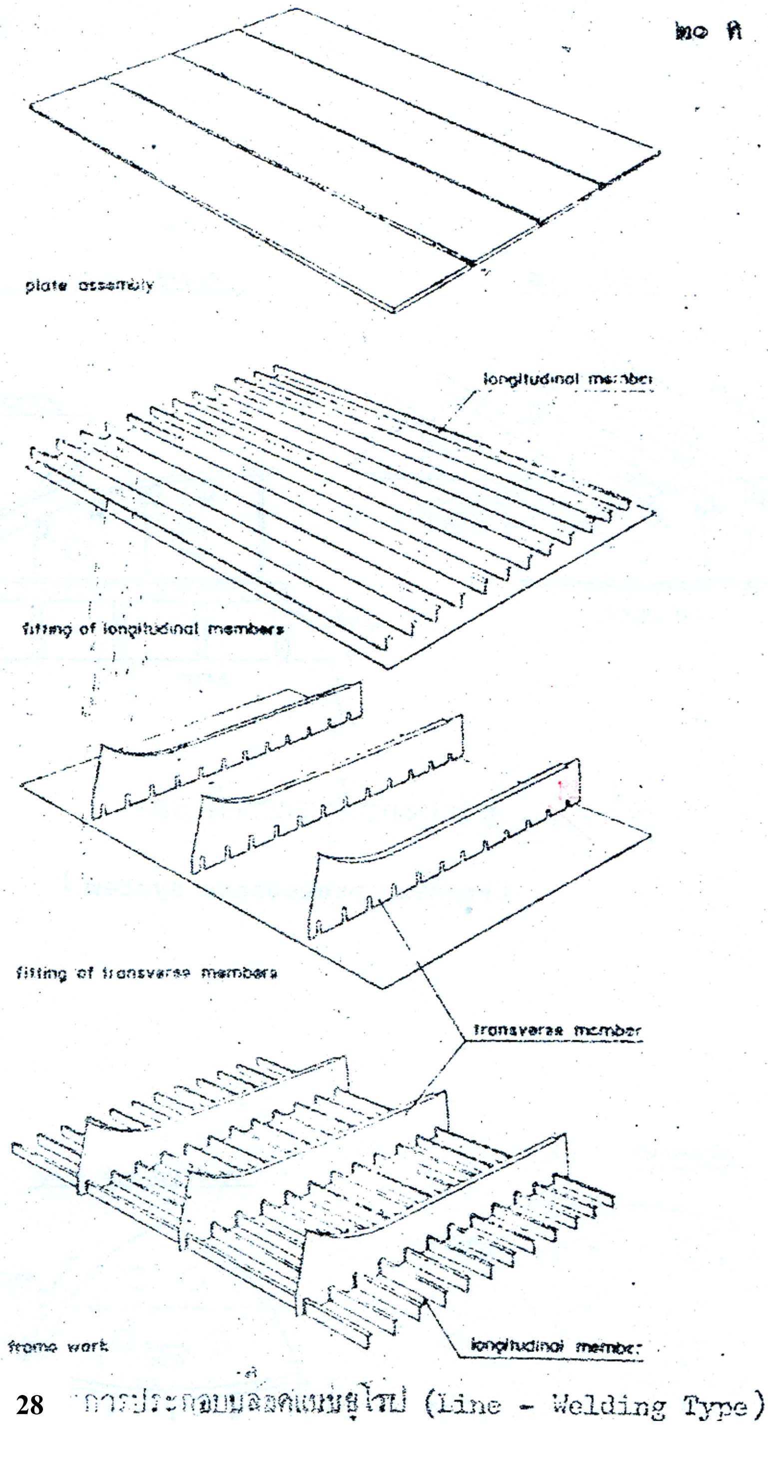


26 (Egg – Box

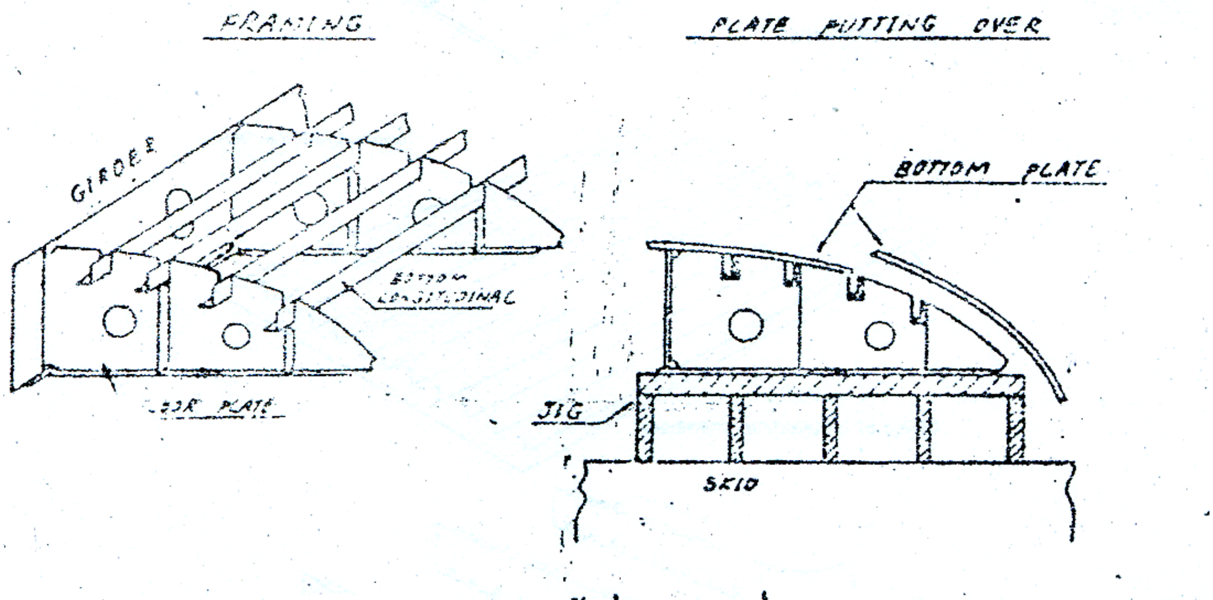


A = positioner of transverse member B = frame setting device C = automatic welding apparatus for vertical fillet welding
D = welding positioner E = forming jack F = numerical controller for forming G = one side automatic welding apparatus
H = automatic welding apparatus for horizontal fillet welding (prototype)

รูปที่ 27 การประกอบบล็อคแบบญี่ปุ่น (Egg – Box Construction)

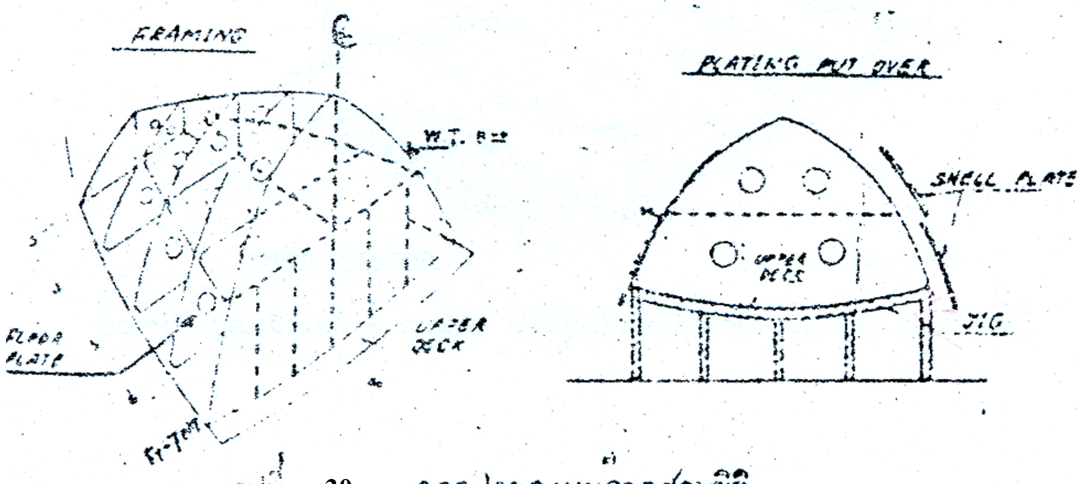


รูปที่ **28** การประกอบบล็อคแบบทั่วไป (Line - Welding Type)



รูปที่ 29 การประกอบพื้นส่วนภายในก่อน

(Praming precedence system)



รูปที่ 30 การประกอบบล็อคสามมิติ

(Assembly of three dimensional hull block)

(4) การประกอบชิ้นส่วนต่าง ๆ ภายในบล๊อค จะต้องถูกต้องตามขั้นตอน เพราะถ้าผิดขั้นตอนอาจทำให้ประกอบบล๊อคไม่ได้

(5) ตำแหน่งของชิ้นส่วนโครงสร้างต่าง ๆ จะต้องมีเครื่องหมายบอกตำแหน่งไว้ เพื่อความสะดวกในการตรวจสอบและการประกอบ เช่น ตำแหน่งของกง เส้นแนวน้ำ รอยต่อของแผ่นเหล็ก ฯลฯ

ผลผลิตของกากรประกอบบล๊อคขึ้นอยู่กับเครน พื้นที่ที่ใช้สำหรับการประกอบ (Assembling skid) เครื่องเชื่อมวัสดุ กรรมวิธีในการประกอบและช่าง เมื่อปัจจัยดังกล่าวเกื้อกูลต่อการปฏิบัติงาน การประกอบบล๊อคก็จะประสบความสำเร็จและได้ประโยชน์ดังต่อไปนี้

1) ท่าของการทำงานจะสบาย เช่น ท่าของการเชื่อมจะอยู่ในแนวราบทำให้เชื่อมได้ง่ายขึ้น การประกอบท่อทางต่าง ๆ ที่อยู่ด้านล่างของบล๊อคก็สามารถเปลี่ยนมาประกอบในท่าราบได้โดยการประกอบบล๊อคในลักษณะคว่ำ

2) การทำงานจะเป็นไปอย่างมีระบบและมีคุณภาพ

3) การทำงานจะเป็นไปอย่างต่อเนื่องและง่ายเพราะเป็นการทำงานที่คล้าย ๆ กัน

4) การทำงานจะมีประสิทธิภาพและรวดเร็วขึ้น ด้วยการนำชิ้นส่วนย่อยหรือบล๊อคย่อยจากที่ต่าง ๆ มาประกอบเป็นบล๊อคในพื้นที่ที่กำหนด

5) การเตรียมวัสดุ การจัดช่างและวิธีการในการประกอบบล๊อคจะแน่นอนทำให้มีมาตรฐานในการทำงาน และผลที่ตามมาคือได้งานที่มีคุณภาพ

6) การทำงานจะง่ายขึ้น

7) มีความปลอดภัยในการทำงาน ทำให้ได้งานที่มีคุณภาพ

8) สภาพแวดล้อมของการทำงานในโรงงานดีกว่าการทำงานในอู่แห้งหรือชานต่อเรือ

8.2.4 การประกอบตัวเรือ (Erection) ถึงแม้ว่าการเตรียมการการประกอบตัวเรือจะเป็นงานง่าย แต่ก็เป็นสิ่งที่สำคัญเพราะจะทำให้งานดำเนินไปด้วยความเรียบร้อย การเตรียมการมี 3 ขั้นตอนคือ

1) กำหนดตำแหน่งที่จะต่อเรือ

2) กำหนดเส้นอ้างอิงต่าง ๆ เพื่อใช้ในการตรวจสอบ

3) กำหนดตำแหน่งและชนิดต่าง ๆ ของหมอนไม้

การประกอบตัวเรือเป็นงานที่ต้องปฏิบัติในอู่แห้งหรือชานต่อเรือ ซึ่งงานนั้นแบ่งออกเป็น 3 ชนิด คือ

1) การจัดหมอนไม้ และการเตรียมการปล่อยเรือลงน้ำ

2) การติดตั้งและประกอบบล๊อคต่าง ๆ เข้าด้วยกันเป็นตัวเรือ

3) การเชื่อม

การทำงานในอู่แห้งและชานต่อเรือจะมีข้อเสียเปรียบดังนี้

1) บล๊อคมีน้ำหนักมากและขนาดใหญ่ ยากต่อการเคลื่อนย้าย

2) ต้องรักษารูปทรงของตัวเรือ

3) สภาพแวดล้อมในการทำงานไม่ดี เช่น

ก) อากาศจะมีผลอย่างมากต่อการทำงาน เนื่องจากเป็นงานในที่แจ้ง

ข) ไม่ค่อยปลอดภัยเนื่องจากทำงานในที่สูงและในที่คับแคบ

ค) ประสิทธิภาพและความแน่นอนในการทำงานลดลง เนื่องจากท่าทางในการทำงานไม่สบาย

ง) ความเอียงของชานต่อเรือเป็นอุปสรรคในการหาเส้นมาตรฐาน เช่น เส้นระดับและเส้นดิ่ง

4) ต้องมีแผนงานและการควบคุมที่ดีเกี่ยวกับกำหนดการและการจ่ายงานให้กับช่าง

5) มีความจำเป็นต้องใช้ช่างที่มีความชำนาญ

6) พื้นที่ในการทำงานกว้างขวาง ไม่สามารถตรวจสอบด้วยสายตาได้อย่างถูกต้อง

การประกอบตัวเรือในอู่แห้งหรือชานต่อเรือต้องระมัดระวังเกี่ยวกับ

1) การรักษารูปทรงของตัวเรือ

2) การประกอบตัวเรือและการเชื่อมต้องกระทำอย่างต่อเนื่อง

3) การพิจารณาจังหวะเวลาในการประกอบส่วนอื่น ๆของตัวเรือ

4) การทำงานให้แล้วเสร็จเป็นส่วน ๆ เช่น ถังน้ำมัน ห้องพักอาศัย เพื่อจะได้ตรวจสอบ

5) การพิจารณาถึงความปลอดภัยในการทำงานของช่าง

6) การกำหนดงานล่วงหน้าและการจ่ายงานให้กับช่างทุกวัน

ดังนั้นการประกอบตัวเรือในอู่แห้งหรือชานต่อเรือจะต้องพิจารณาถึงบล๊อคที่เป็นบล๊อคเริ่มต้นของการประกอบตัวเรือและวิธีในการประกอบตัวเรือ ดังนี้.-

ก) <u>บล๊อคเริ่มต้นของการประกอบตัวเรือ</u>[8]

(1) บล๊อคเริ่มต้นและลำดับการประกอบตัวเรือ ควรศึกษาและพิจารณาพร้อมกันกับการแบ่งบล๊อค

(2) บล๊อคเริ่มต้นควรมีความมั่นคงในอู่แห้งและง่ายต่อการรักษาอยู่ในตำแหน่งที่ถูกต้อง

(3) ถ้าระยะเวลาของการสร้างบล๊อคและการประกอบตัวเรือมากกว่าระยะเวลาที่ได้วางแผนไว้จะต้องแก้ไขโดยการเปลี่ยนบล๊อคเริ่มต้นในการประกอบตัวเรือ หรือปรับปรุงวิธีการประกอบตัวเรือโดยการใช้บล๊อคเริ่มต้นหลาย ๆ บล๊อค

(4) ควรพิจารณาว่าบล๊อคเริ่มต้นไม่ได้อยู่ในเส้นทางวิกฤติ (Critical path) ที่จะต้องให้งานแล้วเสร็จภายในระยะเวลาของการต่อเรือเท่านั้น แต่จะเป็นการแบ่งจำนวนของงานให้คงที่ตลอดระยะเวลานั้น

ข) วิธีการประกอบตัวเรือ (Erection Method)[8]

1) การประกอบตัวเรือในทางระดับ (Development in Plane)

จากบล๊อคเริ่มต้นจะประกอบเป็นรูปตัวเรือเป็นชั้น ๆ จากชั้นล่างสุดขึ้นไปถึงชั้นบนสุดตามลำดับในทิศทางหัวเรือและท้ายเรือพร้อม ๆ กัน โดยการประกอบบล๊อคท้องเรือซึ่งอยู่ในชั้นล่างสุดก่อน หลังจากนั้นจึงประกอบบล๊อคฝากั้น บล๊อคแผ่นเหล็กเปลือกเรือกราบขวา – กราบซ้าย และ บล๊อคดาดฟ้าชั้นบนสุดตามลำดับ

ข้อได้เปรียบ

(ก) มีความรวดเร็วในการประกอบบล๊อคท้องเรือเป็นรูปตัวเรือซึ่งต้องใช้ช่างเป็นจำนวนมาก ดังนั้น ภาวะงานที่ล่าช้าในช่วงก่อนและหลังปล่อยเรือลงน้ำเล็กน้อยจะหมดไป

(ข) การทำงานมีประสิทธิภาพสูงขึ้น เพราะช่างทำงานประจำที่เหมือน ๆ กันในระยะเวลาหนึ่ง

(ค) ช่างมีความปลอดภัยเพราะไม่ต้องทำงานในที่สูงและที่ต่ำสลับกัน

(ง) การทำงานในที่แจ้ง ทำให้การทำงานมีประสิทธิภาพสูงขึ้น

(จ) ไม่จำเป็นต้องใช้ช่างจำนวนมากในบริเวณที่มีการเคลื่อนไหวได้สะดวก

ข้อเสียเปรียบ

(ก) ใช้เวลานานในการประกอบตัวเรือในส่วนที่เป็นถังน้ำ ถังน้ำมันจนแล้วเสร็จ การทดลองรั่วของถัง และการเริ่มต้นประกอบชิ้นส่วนต่าง ๆ จะล่าช้า

(ข) ความแน่นอนของรูปทรงตัวเรือ โดยเฉพาะความยาวของเรือจะไม่ได้ตามแบบ คือจะสั้นเข้าเพราะเกิดการกระดกขึ้น (Cocking up) ของส่วนหัวเรือสุดและท้ายเรือสุด ถ้าลำดับของการเชื่อมรอยต่อของบล๊อคต่าง ๆ ไม่ได้มาตรฐาน

(ค) งานจะล่าช้าในฤดูฝน

(2) การประกอบตัวเรือในทางดิ่ง (Development in Cube) (ดูรูปที่ 32)

จากบล๊อคเริ่มต้น คือ บล็อคท้องเรือจะประกอบบล๊อคอื่น ๆ ติดกับบล๊อคท้องเรือในทางดิ่งจนถึงบล๊อคดาดฟ้าชั้นบนสุด ซึ่งจะเป็นตัวเรือในส่วนที่เป็นถังน้ำ ถังน้ำมันเรียบร้อยแล้วจึงประกอบบล๊อคตัวเรือในลักษณะนี้จนแล้วเสร็จในทิศทางหัวเรือและท้ายเรือ

ข้อได้เปรียบ

(ก) ใช้เวลาน้อยในการประกอบตัวเรือในส่วนที่เป็นถังน้ำมัน ถังน้ำมันจนแล้วเสร็จ ดังนั้นการทดลองรั่วของถังและการประกอบชิ้นส่วนต่าง ๆ จะไม่ล่าช้า

(ข) ง่ายต่อการติดตั้งอุปกรณ์ต่าง ๆ ภายในถัง

(ค) การกระดกขึ้น (Cocking up) ของตัวเรือส่วนหัวเรือสุดและท้ายเรือสุดจะมีค่าน้อย

ข้อเสียเปรียบ

(ก) มีความล่าช้าในการประกอบบล๊อคท้องเรือ และไม่อาจแก้ไขปัญหาภาวะของงานที่ล่าช้าในช่วงก่อนและหลังปล่อยเรือลงน้ำเล็กน้อย

(ข) สภาพการทำงานในที่สูงและที่ต่ำในเวลาเดียวกันจะเลวลงและมีอันตรายเพิ่มขึ้น

(ค) ชนิดของงานของบล๊อคท้องเรือ ฝากั้น เปลือกเรือและดาดฟ้าชั้นบนสุดจะแตกต่างกัน ทำให้เกิดความยุ่งยากในการจัดช่างให้เหมาะสมกับงาน

(3) การประกอบตัวเรือผสมในทางระดับและทางดิ่ง (Development in Plane and Cube) (ดูรูปที่ 33)

เป็นวิธีผสมของการประกอบตัวเรือในทางระดับและทางดิ่ง ซึ่งเป็นที่นิยมกันในปัจจุบัน เพราะมีความรวดเร็วในการประกอบบล๊อคท้องเรือ ไม่มีปัญหาเกี่ยวกับภาวะงานที่ล่าช้า ส่วนการประกอบบล๊อคอื่น ๆ เช่า ฝากั้น เปลือกเรือ และดาดฟ้าชั้นบนของแต่ละชั้นมีเวลาที่ห่างกันแน่นอน ถึงแม้จะมีความล่าช้าในการประกอบบล๊อคชั้นบนสุด 3 – 4 บล็อค แต่ก็มีความเหมาะสมเมื่อพิจารณาถึงการที่จะรักษาความแน่นอนเกี่ยวกับความยาวของเรือ การรักษารูปทรงของตัวเรือที่ถูกต้อง และสภาพแวดล้อมที่ดีในการทำงาน

(4) การประกอบตัวเรือที่มีบล๊อคเริ่มต้นหลาย ๆ บล็อก (ดูรูปที่ 34) มีความยุ่งยากในการพิจารณาบล๊อคเริ่มต้น แต่ก็มีหลักการทั่วไปดังนี้.-

(ก) บล๊อคเริ่มต้นควรเป็นบล๊อคที่มีความมั่นคง

(ข) ควรพิจารณาบล๊อคเริ่มต้นเพื่อที่จะได้กำหนดงานทุกชนิดให้แล้วเสร็จตามระยะเวลาที่กำหนดไว้

(ค) ถ้าการต่อเรือไม่แล้วเสร็จภายในระยะเวลาที่กำหนดเมื่อใช้บล๊อคเริ่มต้นบล๊อคเดียวจะต้องวางบล๊อคเริ่มต้นเพิ่มขึ้นอีกเพื่อให้แล้วเสร็จตามกำหนด

(ง) เป็นการยุ่งยากที่จะรักษารูปทรงของตัวเรือให้ถูกต้องในการประกอบตัวเรือที่มีบล๊อคเริ่มต้นหลาย ๆ บล็อค เนื่องจากต้องนำบล๊อคอื่นมาสอดเข้าระหว่างบล๊อคที่ประกอบแล้ว

(จ) บล๊อคเริ่มต้นควรมีเพียง 2 –3 บล๊อค

9. การกระดกขึ้น (Cocking up) ของหัวเรือและท้ายเรือ[7] (ดูรูปที่ 35)

กรรมวิธีในการต่อเรือแบบบล๊อคโดยการเชื่อม ส่วนหัวเรือและท้ายเรือจะกระดกสูงขึ้นกว่าปกติ สำหรับการประกอบตัวเรือในทางระดับ คือ การประกอบบล๊อคเป็นรูปตัวเรือเป็นชั้น ๆ จากชั้นล่างสุดขึ้นไปถึงชั้นบนสุด ค่าการกระดกขึ้นจะสูงกว่าวิธีการประกอบตัวเรือแบบอื่น ๆ ค่าการกระดกขึ้นจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับสภาพของการต่อเรือ เช่น วิธีการประกอบตัวเรือ (Erection method) ขนาดและรูปทรงของตัวเรือ โครงสร้างของตัวเรือ ระยะเวลาในการต่อ ลำดับของการเชื่อมและอื่น ๆ สิ่งที่มีผลมากที่สุดคือการเชื่อม มีวิธีแก้อยู่ 4 วิธี คือ

1) วางน้ำหนักบนหัวเรือและท้ายเรือ
2) ยึดและบังคับตัวเรือให้อยู่กับที่กับอู่แห้งหรือชานต่อเรือ
3) ลดการเชื่อมโครงสร้างส่วนหัวเรือและท้ายเรือในอู่แห้งและชานต่อเรือให้เหลือน้อยที่สุด
4) แก้ค่าของการกระดกขึ้นโดยการประกอบหัวเรือและท้ายเรือให้เอียงต่ำกว่าปกติ และค่าที่ให้เอียงต่ำกว่า ปกตินี้จะมีค่าเท่ากับการกระดกขึ้นที่หาได้จากเรือลำก่อน หรือหาได้จากการคำนวณ

วิธีแก้การกระดกขึ้น วิธี 3) และ 4) จะดีกว่าและได้ผลกว่าวิธี 1) และ 2) ค่าของการ ที่ประกอบให้หัวเรือและท้ายเรือเอียงต่ำกว่าปกตินี้เรียกว่า การกระดกลง (Cocking down) ซึ่งจะหาได้ด้วยการคำนวณตามตัวอย่างดังนี้ (ดูรูปที่ 36)

<u>ตัวอย่าง</u> สมมติว่าระยะห่างของรอยต่อระหว่างบล๊อคที่แนวดาดฟ้าชั้นบน B = 12 มม.

และมีค่าคงที่ ความลึกของเรือ D = 3,200 มม.

ระยะห่างของรอยต่อระหว่างบล๊อค

AP	ถึง	F4	FS_1	= 2,120 มม.
F 4	ถึง	F 16	FS_2	= 6,360 มม.
F 55	ถึง	FP	FS_3	= 4,380 มม.

ค่าของ Cocking down

$$C_1 = \frac{a}{D} \times FS_1 = \frac{12}{3,200} \times 2,120 = 8 \text{ มม.}$$

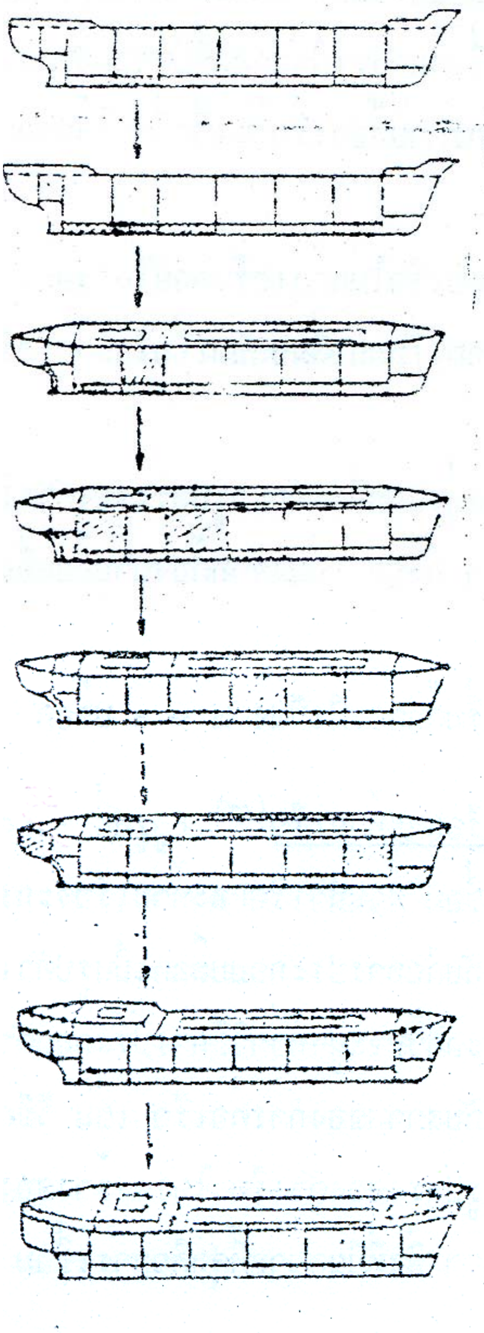
$$C_2 = \frac{a}{D} \times FS_2 = \frac{12}{3,200} \times 6,360 = 24 \text{ มม.}$$

$$C_2 = \frac{a}{D} \times FS_3 = \frac{12}{3,200} \times 4,380 = 24 \text{ มม.}$$

10. ข้อได้เปรียบและข้อเสียเปรียบของการต่อเรือแบบบล๊อคเมื่อเปรียบเทียบกับการต่อเรือแบบดั้งเดิม

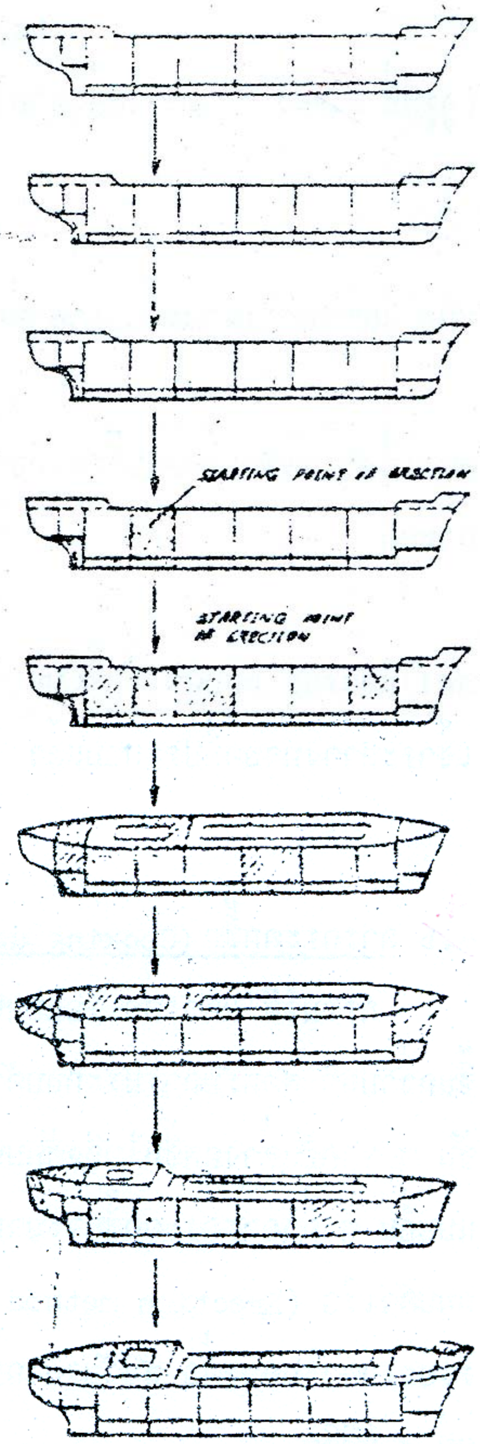
<u>ข้อได้เปรียบ</u>

1) ระยะเวลาในการต่อเรือเร็วขึ้นและผลผลิตสูงขึ้น



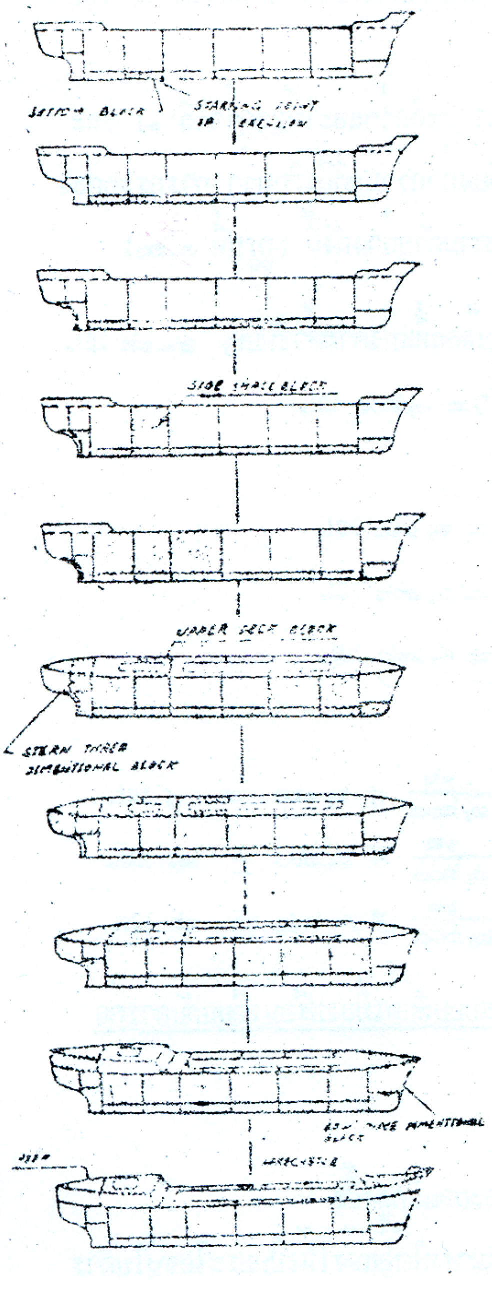
รูปที่ 31 การประกอบตัวเรือในทางระดับ

(Development in Plane)

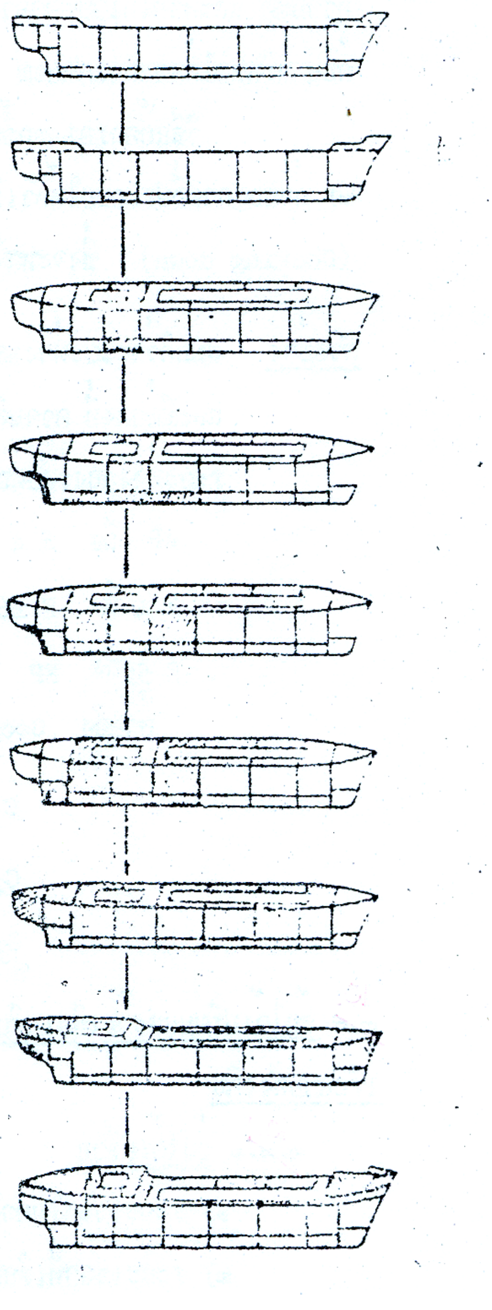


รูปที่ 32 การประกอบตัวเรือในทางดิ่ง

(Development in Cube)



รูปที่ 33 การประกอบตัวเรือในทางระดับ
และทางดิ่ง



รูปที่ 34 การประกอบตัวเรือที่มีบล็อคเริ่มต้น
หลาย ๆบล็อค

2) ระยะเวลาที่เรืออยู่ในอู่แห้งสั้น สามารถใช้อู่แห้งให้เป็นประโยชน์ในการทำงานอื่น ๆ ได้อีก เช่น การซ่อมทำตัวเรือใต้แนวน้ำ ตรวจสอบและทำความสะอาดท้องเรือ ซ่อมหรือเปลี่ยนเพลาใบจักรและใบจักร

3) การเชื่อมส่วนมากเป็นการเชื่อมในแนวราบ ทำให้เชื่อมง่ายและคุณภาพดีขึ้น

4) การควบคุมและเทคนิคในการผลิตกระทำได้อย่างใกล้ชิดและง่าย

5) สามารถจัดช่างที่มีความชำนาญได้เพียงพอให้เหมาะสมกับงาน

6) การทำงานในที่สูงและที่แคบลดลง ทำให้สภาพแวดล้อมในการทำงานดี และมีความปลอดภัยสูงขึ้น

6) สามารถประกอบท่อทางที่อยู่ติดกับด้านล่างของบล๊อคบนโดยให้บล๊อคอยู่ในลักษณะคว่ำ ทำให้ลดการทำงานในตำแหน่งเหนือศีรษะ

<u>ข้อเสียเปรียบ</u>

1) ต้องมีการตรวจสอบขนาดของบล๊อคตลอดเวลาเพื่อป้องกันความผิดพลาด มิฉะนั้นจะยากต่อการแก้ไขในขั้นประกอบตัวเรือ หรืออาจจะแก้ไขไม่ได้ต้องประกอบบล๊อคใหม่

2) รอยต่อของบล๊อคแต่ละบล๊อคเป็นเส้นตรงและอยู่ในแนวเดียวกัน ถ้าการเชื่อมรอยต่อไม่ดี จะมีจุดอ่อนของตัวเรือในเรื่องความแข็งแรง

3) ต้องมีเครื่องมือยกที่สามารถยกน้ำหนักได้มาก เช่น เครน เพื่อใช้ในการพลิกบล๊อคในโรงงานหรือยกบล๊อคไปประกอบตัวเรือในอู่แห้ง

4) ต้องมี Jig เพื่อรองรับบล๊อค

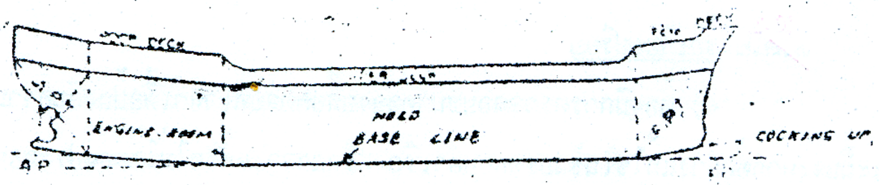
5) ต้องมีพื้นที่สำหรับวางบล๊อคที่ประกอบเสร็จแล้ว

11. มาตรฐานการต่อเรือ

การต่อเรือจะต้องมีความแน่นอน ความถูกต้อง คือมีคุณภาพที่ดีตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงปล่อยเรือลงน้ำ ถ้าคุณภาพในขั้นตอนใดขั้นตอนหนึ่งของกรรมวิธีการต่อเรือไม่ดี จะมีผลทำให้การต่อเรือดำเนินไปด้วยความลำบากและยากที่จะแก้ไขให้ดีได้ ในที่สุดอาจจะต่อเรือไม่สำเร็จ หรือแม้แต่จะสำเร็จรูปทรงหรือมิติของตัวเรือก็ไม่ได้ตามแบบ โดยเฉพาะอย่างยิ่งกรรมวิธีการต่อเรือแบบบล๊อคจะต้องมีการตรวจสอบคุณภาพอย่างละเอียดในขั้นตอนการประกอบบล๊อค

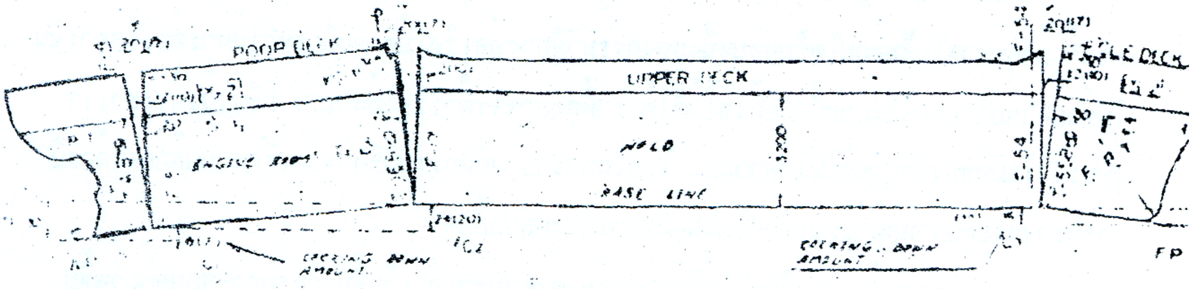
เนื่องจากกรมอู่ทหารเรือยังไม่ได้กำหนดมาตรฐานการต่อเรือขึ้น การตรวจสอบคุณภาพขึ้นอยู่กับนายช่างผู้ควบคุมแต่ละนายว่ามีความรู้ความชำนาญเพียงใด มีหลักฐานอ้างอิงมากน้อยแค่ไหน ซึ่งไม่อยู่ในแนวเดียวกันเป็นปัญหาแก่ช่างในการประกอบชิ้นส่วนตัวเรือว่า อัตราความผิดพลาดจะยอมได้แค่ไหน เพื่อช่างจะได้ติดสินใจแก้ปัญหาด้วยตนเอง ไม่ต้องมาเสียเวลาปรึกษากับนายช่างผู้ควบคุม

ดังตัวอย่างจากมาตรฐานของคุณภาพในการต่อเรือแห่งประเทศญี่ปุ่น[9] (Japanese Shipbuilding Quality Standard) ทางด้านตัวเรือซึ่งกำหนดโดยคณะกรรมการวิจัยการต่อเรือเหล็กของ Society of



รูปที่ 35 ตัวอย่างของการกระดกขึ้น

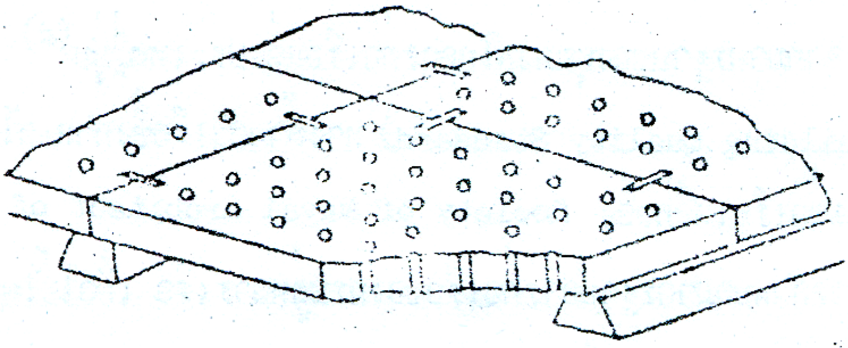
(An example for cocking up)



รูปที่ 36 ตัวอย่างของการกระดกลง

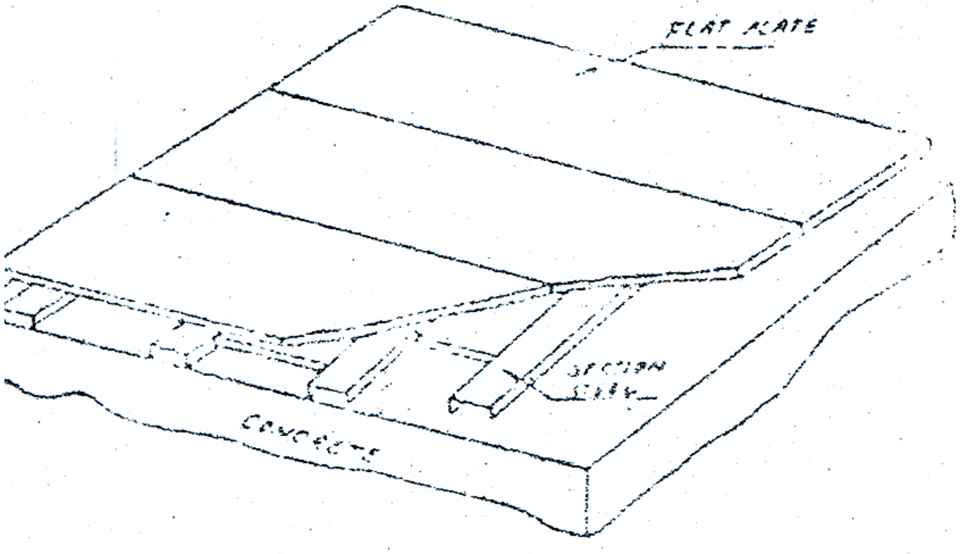
(An example of cotking down for ship of 200GT)

Naval Architect of Japan เพื่อเป็นแนวทางในการกำหนดมาตรฐานการต่อเรือของกรมอู่ทหารเรือ เพื่อใช้ในการตรวจสอบคุณภาพของการต่อเรือ

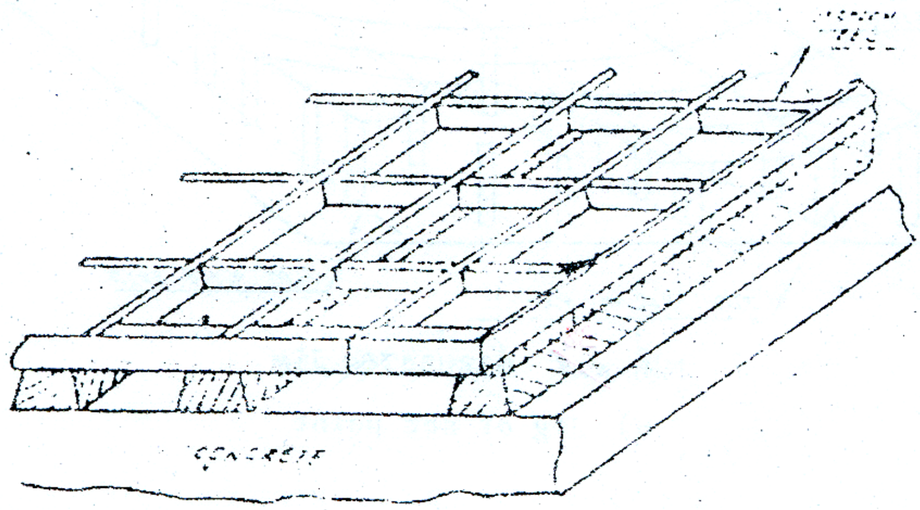


รูปที่ 37 ตัวอย่างของ Assembling Skid

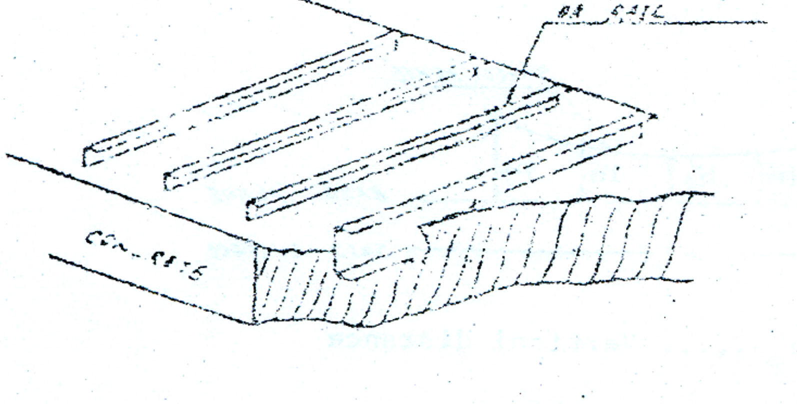
ก) Swage block



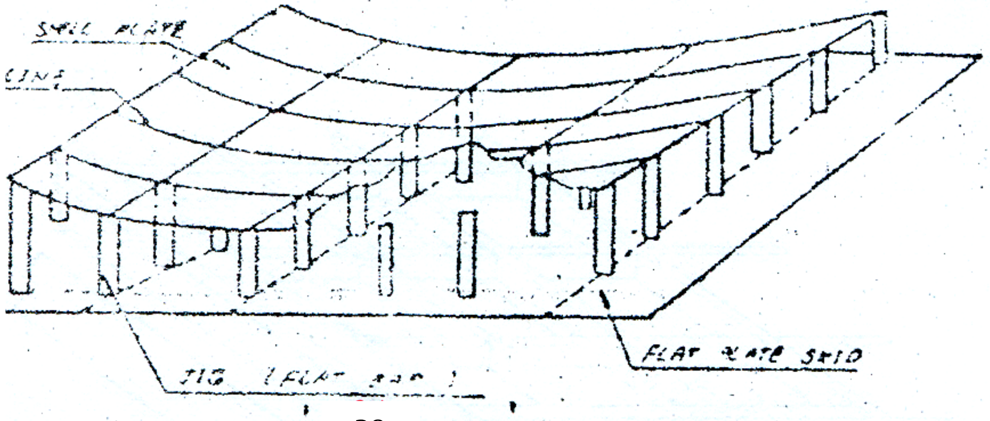
ข) Flat plate skid



c) Grating skid

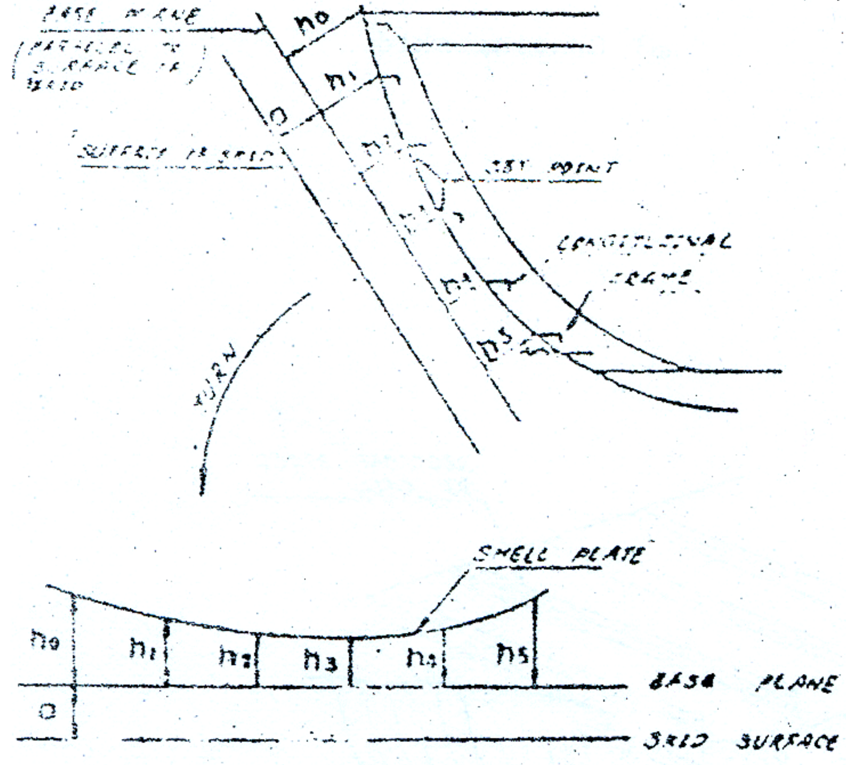


d) Rail skid



รูปที่ 38 ตัวอย่างของ Jig

ง) Jig of set point



h_o h_1 h_2 ..... Vertical distance

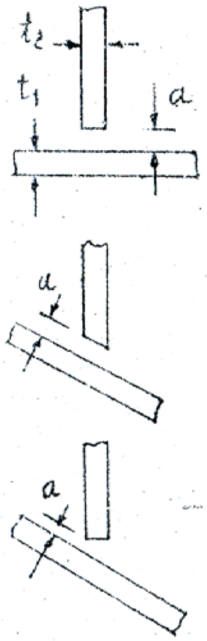
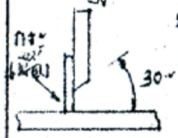
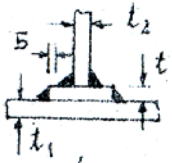
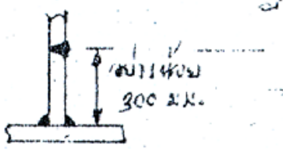
a ..... Mark line

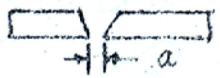
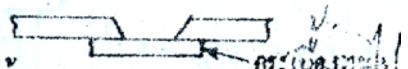
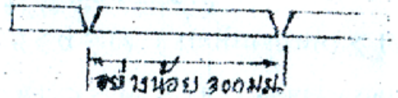
h+a ..... Height of jig (300 mm min.)

จ) Determination of heights for jig

ตารางที่ 6

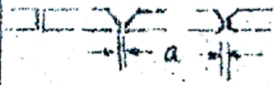
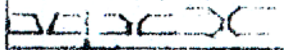
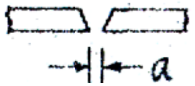
มาตรฐานคุณภาพ

เรื่อง	เรื่องย่อย	การประกอบและการแก้ไข			หน่วย : มม.
		หัวข้อ	ค่ามาตรฐาน	ค่าสูงสุดที่ยอมรับได้	หมายเหตุ
การประกอบ	การประกอบรอยต่อก่อนเชื่อม	การเชื่อมแบบต่อฉาก (ตัว "ที") 	$a \leq 2$	$a \leq 3$	1. ถ้า $3 < a \leq 5$ ให้เพิ่มขนาดของรอยเชื่อม โดยให้ได้ขนาดดังนี้ ขนาดตามที่กำหนด + (a-2) มม. 2. ถ้า $5 < a \leq 16$ (แผ่นเหล็กหนา ≥ 10 มม.) $5 < a \leq 12$ (แผ่นเหล็กหนา < 10 มม.) ให้ปฏิบัติตามรูปดังนี้  2.1 – บากเป็นมุม 30-45° – ใช้กระเบื้องทนไฟปิดด้านหลัง แล้วเชื่อม – ถอดกระเบื้องทนไฟออก ทำความสะอาดแล้วเชื่อม  2.2 ใช้วิธีสอดไส้ ตามรูป (Liner Treatment) 3. ถ้า $a > 16$ (เมื่อ $t_2 \geq 10$ มม.) หรือ $a > 12$ (เมื่อ $t_2 < 10$ มม.) ให้ปฏิบัติตามข้อ 2.2 หรือปฏิบัติตามรูป 

เรื่อง	เรื่องย่อย	การประกอบและการแก้ไข			หน่วย : มม.
		หัวข้อ	ค่ามาตรฐาน	ค่าสูงสุดที่ยอมรับได้	หมายเหตุ
การประกอบ	การประกอบรอยต่อก่อนเชื่อม	การเชื่อมแบบต่อชน (เชื่อมด้วยมือ)  a = ช่องว่าง	$2 \leq a \leq 3.5$	$a \leq 5$	๑. ถ้า $5 < a \leq 16$ – ใช้วัสดุเช่นกระเบื้องหนุนใต้ [illegible] แล้วเชื่อมทางบน – ถอดกระเบื้องหนุนใต้ออก [illegible] รอยต่อด้านล่าง แล้วเชื่อม  ๒. ถ้า $16 < a \leq 25$ – ปาดหน้างาน แล้วเชื่อมพอก – ตัดบรรจุเหมือนข้อ ๓ ๓. ถ้า $a > 25$ – ตัดบรรจุโดยมีขนาดอย่างน้อย ๓๐๐ มม. 

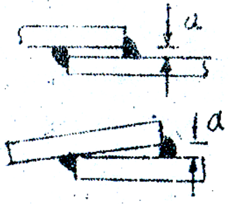
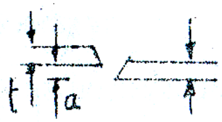
มาตรฐานคุณภาพ

๓

เรื่อง	เรื่องย่อย	การประกอบและการแก้ไข หัวข้อ	ค่ามาตรฐาน	ค่าสูงสุดที่ยอมรับได้	หน่วย : มม. หมายเหตุ
การประกอบ	การประกอบรอยต่อก่อนเชื่อม	การเชื่อมแผ่นต่อชน (เชื่อมอัตโนมัติ) 1. เชื่อมด้วย SAW ทั้งสองด้าน 	$0 < a \leq 0.8$	$a \leq 5$	- ถ้าเชื่อมแล้วทะลุให้เชื่อมปิดรอยต่อด้วย MIG หรือด้วยมือก่อน 1 เที่ยว
		2. เชื่อมด้วย SAW ด้านหนึ่ง อีกด้านหนึ่งเชื่อมด้วย MIG หรือเชื่อมด้วยมือ 	$0 < a \leq 3.5$	$a \leq 5$	- ถ้า $a > 5$ ให้ปฏิบัติตามการเชื่อมด้วยมือ
		3. เชื่อมด้วย MIG ด้านเดียว โดยมีกระเบื้องทนไฟปิดช่องว่างด้านล่าง 	$2 \leq a \leq 8$	$a \leq 16$	- ถ้า $a > 16$ ให้ปฏิบัติตามการเชื่อมด้วยมือ

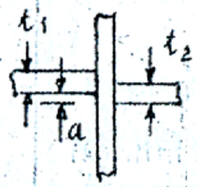
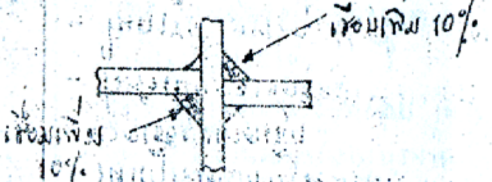
มาตรฐานคุณภาพ

๔

เรื่อง	เรื่องย่อย	การประกอบและการแก้ไข หัวข้อ	ค่ามาตรฐาน	ค่าสูงสุดที่ยอมรับได้	หมายเหตุ (หน่วย : มม.)
การประกอบ	การประกอบรอยต่อก่อนเชื่อม	การเชื่อมแนวต่อเกย (Lap Weld) 	$a \leq 2$	$a < 3$	1. ถ้า $3 < a \leq 5$ ให้เพิ่มขนาดของรอยเชื่อมอีก โดยมีขนาด ขนาดที่กำหนด + a มม. 2. ถ้า $a > 5$ ให้ประกอบใหม่
	การประกอบแผ่นเหล็กแนวต่อชน  a = ความแตกต่าง t = ความหนา (แผ่นที่บางกว่า)	ชิ้นส่วนที่สำคัญ		$a \leq 0.15t$ (สูงสุด 3 มม.)	ถ้า $a > 0.15t$ หรือ $a > 3$ ให้ประกอบใหม่
		ชิ้นส่วนอื่นๆ		$a \leq 0.2t$ (สูงสุด 3 มม.)	ถ้า $a > 0.2t$ หรือ $a > 3$ ให้ประกอบใหม่

มาตรฐานคุณภาพ

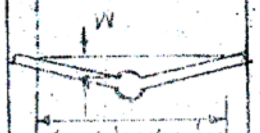
๕

เรื่อง	เรื่องย่อย	การประกอบและการแก้ไข			หน่วย : มม.
		หัวข้อ	ค่ามาตรฐาน	ค่าสูงสุดที่ยอมรับได้	หมายเหตุ
การประกอบ	การประกอบชิ้นส่วนแบบตัว "T" 	ชิ้นส่วนที่สำคัญ.		$a \leq 1/3\, t_2$	1. ถ้า $\frac{1}{3}t_2 \leq a \leq \frac{1}{2}t_2$ ให้เพิ่มขนาดของรอยเชื่อมอีก 10%  2. ถ้า $a > \frac{1}{2}t_2$ ให้ประกอบใหม่
	a = ความแตกต่าง t_1, t_2 = ความหนา $t_1 \geq t_2$	ชิ้นส่วนอื่นๆ	$a \leq 1/3\, t_2$	$a \leq 1/2\, t_2$	ถ้า $a > \frac{1}{2}t_2$ ให้ประกอบใหม่

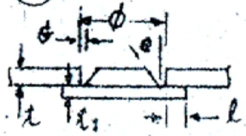
มาตรฐานคุณภาพ

เรื่อง	เรื่องย่อย	การเชื่อม: หัวข้อ	ค่ามาตรฐาน	ค่าสูงสุดที่ยอมรับได้	หน่วย : มม. หมายเหตุ
รูปร่างของตะเข็บรอยเชื่อม	ความสูง = h ความกว้าง = B มุม = θ	θ, h, B		h = ไม่ได้กำหนด B = ไม่ได้กำหนด θ ≤ 90°	- ถ้า θ > 90° ให้แก้ไขโดยการขัด หรือเชื่อมพอก ให้มุม θ ≤ 90°
	อันเดอร์คัท (เชื่อมแผ่นต่อชน)	โครงสร้างสำคัญที่อยู่ในระยะ 0.6 L ⊕ เช่นแผ่นเหล็กตัวเรือ ฝากั้นผนึกน้ำตามขวาง		d ≤ 0.5	- ถ้า d มีค่ามากกว่าค่าที่กำหนดไว้ ให้แก้ไขโดยการเชื่อมพอก ให้ใช้ลวดเชื่อมขนาดเล็ก - ไม่จำเป็นต้องขัดรอยเชื่อมพอก - ในการเชื่อมพอก High Tensile Steel ต้องเชื่อมยาวอย่างน้อย 50 มม.
		ชิ้นส่วนอื่น ๆ		d ≤ 0.8	
	อันเดอร์คัท (เชื่อมแผ่นต่อฉาก)			d d ≤ 0.8	
	ความยาวของขารอยเชื่อม (Leg length)	เมื่อเปรียบเทียบกับขนาดที่กำหนดไว้ L = Leg length l = Throat depth		l, L L ≥ 0.9 L l ≥ 0.9 l	- ถ้า L และ l มีค่าต่ำกว่าค่าที่กำหนดไว้ ให้แก้ไขโดยการเชื่อมพอก - ในการเชื่อมพอก High Tensile St... ต้องเชื่อมยาวอย่างน้อย 50 มม.

มาตรฐานคุณภาพ

เรื่อง	เรื่องย่อย	การเชื่อม: หัวข้อ	การเชื่อม: ค่ามาตรฐาน	การเชื่อม: ค่าสูงสุดที่ยอมรับได้	หน่วย : มม. หมายเหตุ
การบิดงอของแผ่นเหล็กตัวเรือบริเวณตะเข็บรอยเชื่อม	การบิดงอ	แผ่นเหล็กตัวเรือที่อยู่ในระยะ 0.6L ⊗		 ระยะห่างระหว่างกง หรือกึ่งกลางคาน W ≤ 6	- ในกรณีที่ค่า W มากกว่าค่าที่กำหนด ให้แก้ไขดังนี้ 1. ใช้วิธี Line heating 2. ตัดตะเข็บรอยเชื่อมออก, ปรับแต่งและประกอบใหม่ แล้วจึงเชื่อม
		แผ่นเหล็กตัวเรือทางด้านหัวเรือ ท้ายเรือ และโครงสร้างตามขวางที่สำคัญ		W ≤ 7	
		แผ่นเหล็กอื่นๆ		W ≤ 8	
แนวรอยเชื่อมสั้น (Short bead)	แนวรอยเชื่อมเกาะและการเชื่อมพอกแผ่นเหล็กที่แห้ง	- High tensile steel หน่วย 50 กก/มม² - เหล็กกล้าหล่อ		≥ 50	- ในกรณีที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ ให้เผารอยเชื่อมนั้นจนถึงอุณหภูมิ 100 ± 25 °ซ
		Mild Steel, เกรด E		≥ 30	- ในกรณีที่ปฏิบัติผิด ให้ขัดรอยเชื่อมออก ตรวจรอยแตกแล้ว จึงเชื่อมพอก
	การเชื่อมพอกรอยเชื่อม	- 50 HT - เหล็กกล้าหล่อ		≥ 50	

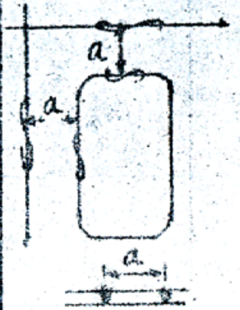
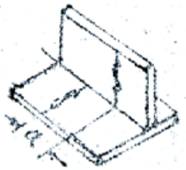
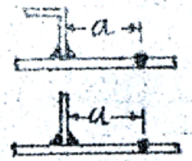
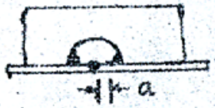
หน่วย : มม.

เรื่อง	เรื่องย่อย	การประกอบและการแก้ไข: หัวข้อ	ค่ามาตรฐาน	ค่าสูงสุดที่ยอมรับได้	หมายเหตุ
การแก้ไขเมื่อเจาะรูผิดตำแหน่ง	รูโตน้อยกว่า 200 (D < 200)	ชิ้นส่วนสำคัญ เช่น แผ่นเหล็กตัวเรือ		Ⓐ หรือ Ⓑ	- ขยายรูให้โตกว่า 75 มม. (ϕ) - ขยายรูให้โตกว่า 200 มม. (ϕ)
		ชิ้นส่วนอื่นๆ		Ⓑ Ⓒ หรือ Ⓓ	- ในกรณี Ⓑ ขยายรูให้โต...
	รูโตมากกว่าหรือเท่ากับ 200 มม. (D ≥ 200)	ชิ้นส่วนสำคัญ เช่น แผ่นเหล็กตัวเรือ		B	วิธีแก้ไข Ⓐ : ปิดด้วยแผ่น Spigot  $\theta = 30^\circ \sim 40^\circ$ $G = 4 \sim 6$ มม. $t_1 = \frac{1}{3}t \sim \frac{t}{2}$ $l = 50$ มม.
		ชิ้นส่วนอื่นๆ		Ⓑ หรือ Ⓒ	
	รู Slot, รู Scallop รู Serration			Ⓑ หรือ Ⓒ	Ⓑ : ปิดด้วยแผ่นบรรจุ Ⓒ : ปิดด้วยแผ่นปะทับ (แผ่นปะทับหนาเท่ากับแผ่นที่จะปะทับ)
					Ⓓ : ถ้าไม่สามารถขยายรูให้โตกว่า 200 มม.ได้ จะต้องใช้ลวดเชื่อมที่มีไฮโดรเจนผสมต่ำ เชื่อมหลังจากที่ได้เผา (Pre-heat) แล้วตรวจสอบรอยเชื่อมด้วยการ X-ray หรือ Ultrasonic

มาตรฐานคุณภาพ

เรื่อง	เรื่องย่อย	ความส่วยงามเรียบร้อย			หน่วย : มม.
		หัวข้อ	ค่ามาตรฐาน	ค่าสูงสุดที่ยอมรับได้	หมายเหตุ
การตัดร้อยต่อภายหลังที่ได้ตัดริมส่วนที่นำมาต่อ ตัดการงอก เช่น พุยก	บริเวณที่เห็นได้ชัด และต้องการความสวยงาม	พื้นที่ผิวด้านนอกของแผ่นเหล็กหัวเรือ ภาคน้ำ และเก๋ง	ขัดเรียบ		
	บริเวณที่เห็นได้ไม่ชัด และไม่ต้องการความสวยงามมาก	ภายในห้อง เพดาน พื้นภาคฟ้าที่มีวัสดุปูพื้น	ขัดเรียบเฉพาะบริเวณที่เห็นเป็นต่อสายตา		
พื้นที่ผิว	รอยแหว่ง (Scar)	d = ความลึก l = ความยาว ถ้า $l > 10$	$d \leq 0.8$		1. ถ้า $d < 0.07 l$ (สูงสุด 3 มม.) ให้ขัดเรียบ หรือเชื่อมพอก 2. ถ้า $d \geq 0.07 l$ ให้เชื่อมพอก
		$l \leq 10$	$d \leq 1.0$		

มาตรฐานคุณภาพ

เรื่อง	เรื่องย่อย	ระยะห่างระหว่างรอยเชื่อม			หน่วย : มม.
		หัวข้อ	ค่ามาตรฐาน	ค่าสูงสุดที่ยอมรับได้	หมายเหตุ
ระยะห่างระหว่างรอยเชื่อม	แบบต่อชนกับต่อชน (Butt w to Butt w)			$a \geqslant 30$	- โดยทั่วไปควรมีค่าอย่างน้อย 500 มม.
				$a \geqslant 0$	- ในกรณีที่รอยเชื่อมอยู่ตรงกัน ให้ a = 0 ให้ระวัง
	แบบต่อชนกับต่อฉาก (Butt w to Filled w)			$a \geqslant 10$	- โดยทั่วไปควรมีค่าอย่างน้อย 200 มม.
				$a \geqslant 5$	- โดยทั่วไปควรมีค่าประมาณ 10 มม.

บทที่ 8

การทรงตัวของเรือ

8.1 การเขียนรูปเรือ FAIRING LINES

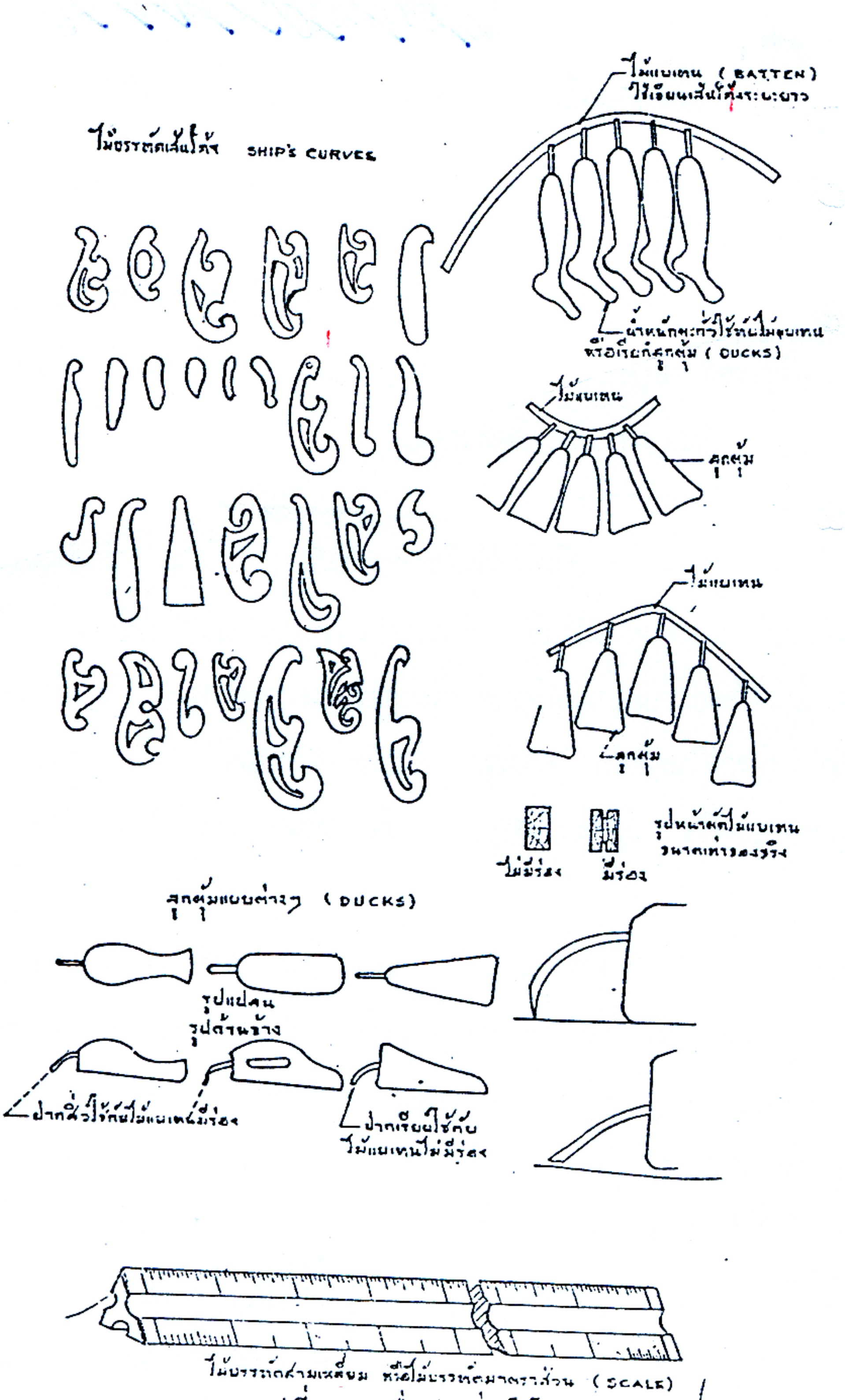
1. เครื่องมือเครื่องใช้

1.1 บรรทัดเส้นโค้ง (Ship ' s Curve) เป็นบรรทัดที่มีความโค้งต่าง ๆ เพื่อใช้เขียนรูปเรือ บางทีเรียก French Curves ดูรูปที่ 1 การที่มีเส้นโค้งรูปต่าง ๆ มากมายเช่นนี้ก็เพราะเส้นโค้งอันเดียวไม่สามารถที่จะเขียนรูปเรือได้

1.2 กระดาษเขียนแบบอย่างหนา (Drawing Paper) ถ้าใช้กระดาษอย่างหนาสีไข่ก็ยิ่งดีลบไม่เป็น ขุย เหมาะแก่ผู้หัดเขียนใหม่ ๆ ใช้เขียนด้วยดินสอ ถ้าหาไม่ได้ ใช้กระดาษขาวบางธรมดาก็ได้ ราคาถูก แต่ไม่สู้ดี สำหรับขนาดกระดาษที่จะใช้เขียนเรือลำนี้มีขนาดยาว 4 ฟุต กว้าง 14 นิ้ว ก็พอที่มีขนาดเล็กอย่างนี้เพื่อให้เหมาะแก่สภาพของโต๊ะอันเล็ก ถ้ากิจการต่อเรือในประเทศไทยขนาดใหญ่ออก การเขียนรูปขนาดเล็ก ๆ ยังใช้ไม่ได้ ต้องเขียนลง ในขนาดที่ยาว 7 ' - 6 " กว้าง 30 นิ้ว ซึ่งจัดว่าใหญ่มาก ซึ่งจำเป็นจะต้องมีโต๊ะเขียนยาว เครื่องมือต่าง ๆ ต้องมีพร้อม

1.3 กระดาษแก้วเขียนแบบ (Tracing Paper) ใช้สำหรับลงหมึกโดยทาบกระดาษแก้วนี้ลงบนกระดาษที่เขียนแบบไว้ด้วยดินสอนั้นแล้วลงหมึก จุดประสงค์ต้องการให้ลงหมึกเป็น และเพื่อพิมพ์โอซาลิดต่อไป เมื่อหัดลงหมึกชำนาญดีแล้ว จะข้ามขั้นโดยใช้เขียนด้วยดินสอลงบนกระดาษแก้วและลงหมึกเลยก็ได้

1.4 ไม้บรรทัดมาตราส่วน (Scale) ส่วนมากทำเป็นรูปสามเหลี่ยม ดูรูปที่ 1 มีมาตราส่วนบอกไว้ตั้งแต่ 3/32 " ต่อ 1 ฟุต ถึง 3 " ต่อ 1 ฟุต ซึ่งมีไว้ให้เลือกใช้ย่อ ของจริงลงให้เหมาะกับหน้ากระดาษมาตราส่วนชนิดมาตราเมตริกก็มีตั้งแต่ 1 ซม. ต่อ 100 ซม. ถึง 1 ซม. ต่อ 500 ซม. สำหรับในประเทศของเราจำเป็นต้องทราบการเขียนไว้ทั้งสองมาตราส่วน แต่ในการหัดเขียนรูปเรือตอนนี้จะใช้มาตราส่วนอังกฤษ



รูปที่ 1 เครื่องมือเครื่องใช้ในการเขียนแบบต่อเรือ

1.5 ดินสอดำ การใช้ดินสอดำนั้นต้องใช้ความแข็งอ่อนให้ถูกต้องกับเนื้อกระดาษ ความแข็งอ่อนที่ใช้กันส่วนมา คือ 2 B และ 3 H ต้องหมั่นฝนให้แหลมจึงจะได้เส้นที่สวยงาม

2. องค์ประกอบที่สำคัญของรูปเรือ

เส้นโค้งรูปเรือนี้จะเขียนขึ้นได้ต้องอาศัยส่วนสำคัญ ๆ 3 ส่วน ดังต่อไปนี้.-

2.1 รูปตัด Body PIan บางทีเรียกสเตชัน Station หรือรอยตัด Section ก็ได้แสดงรูปร่างของเรือทางขวางคล้ายแว่นขนมปังปอนด์ ซึ่งตัดขวางและตั้งฉากกับความยาว ดูรูปที่ 2

2.2 รูปแนวน้ำ (Half Breadth Plan) บางทีเรียก แสดงรูปร่างของเรือตามแนวขนานกับพื้นระดับน้ำหลายๆ ชั้น นับตั้งแต่เส้นฐานไปจนหมดความลึก ของเรือ ดูรูปที่ 2

2.3 รูปด้านข้าง Profile หรือบางทีเรียกบัทตอก (Buttock) แสดงรูปร่างของเรือโดยพื้นดิ่งขนานกับความยาวของเรือ ซอยห่างจากกึ่งกลางลำตามยาวออกไปเป็นระยะเท่า ๆ กันจนหมดความกว้างของเรือ ดูรูปที่ 2

ตามรูปที่ 2 แสดงความสัมพันธ์ของรูปตัด รูปแนวน้ำ และรูปด้านข้าง จงสังเกตว่า รูปร่าง (Shape) ของเส้นโค้งจะปรากฏในรูปหนึ่งรูปใดเพียงรูปเดียว ส่วนที่ไปปรากฏในอีกสองรูปนั้นจะบอกเพียงตำแหน่งเท่านั้น ตัวอย่างเช่นรูปร่างของรอยตัดนั้นจะปรากฏอยู่บนรูปตัด ส่วนตำแหน่งของรอยตัดต่าง ๆ จะแสดงอยู่บนอีกสองรูป คือรูปแนวน้ำกับรูปด้านข้าง ในทำนองเดียวกับรูปร่างของชั้นแนวน้ำต่าง ๆ ก็จะปรากฏอยู่บนรูปแนวน้ำ ส่วนตำแหน่งไปปรากฏอยู่บนรูปหน้าตัดกับรูปด้านข้าง สุดท้ายรูปร่างของรูปตัดด้านข้างก็ปรากฏอยู่บนรูปด้านข้าง ส่วนตำแหน่งนั้นไปปรากฏอยู่ในรูปตัดและรูปแนวน้ำ

เพื่อความสะดวกในการสร้างเรือเหล็ก รูปร่างของเรือหรือเส้นโค้งต่าง ๆ เหล่านี้เป็นขนาดที่ไม่คิดเอาความหนาของแผ่นเหล็กเปลือกเรือเข้ารวมด้วย รูปร่างของรูปตัด รูปแนวน้ำและรูปด้านข้างสามรูปนี้เพียงพอที่จะทำให้เราสามารถสร้างเรือได้

เหตุผลที่ต้องเขียนทั้งสามรูปนั้นมีดังนี้ สมมุติว่าเส้นโค้งเส้นหนึ่งที่แสดงอยู่ในรูปหนึ่งดูเรียบร้อยไม่คดโค้งไปมานั้นไม่ได้แสดงว่าอีก 2 รูป จะมีโคออร์ดิเนตตรงกันหรือเท่ากัน หรือสม่ำเสมอด้วย (Fair) ฉะนั้นจึงจำเป็นต้องเขียนรูปขึ้นอีก 2 รูป เพื่อตรวจให้ได้เส้นโค้งเรียบร้อย เมื่อพิจารณาดูรูปที่ 3 จะเห็นว่าถ้าระยะ $A_1 = A_2$ $B_1 = B_2$ และ $C_1 = C_2$ แล้วเรือลำนี้หรือลายเส้นที่เขียนขึ้นจะดูเรียบร้อยสวยงาน ให้ภาษาเทคนิคจึงเรียกว่า Fairing Lines หรือการเขียนรูปเรือที่ดีนั่นเอง

การเขียนรูปเรือนั้นมักเริ่มเขียนตั้งแต่รูปตัดก่อน โดยไม่จำเป็นต้องเขียนทุก ๆ รอยตัดเว้นเสียสองสามรอยตัดสลับกันไปก็ได้ แล้วเขียนรูปแนวน้ำและรูปด้านข้างในทำนองเดียวกัน แล้วภายหลัง

จึงเขียนรอยตัดรูปแนวน้ำ และรูปข้างที่ขาดอยู่เสียให้ครบก็จะได้รูปเรือที่เรียบร้อย วิธีการอันนี้เรียก วิธีการลองไปลองมา Trial and Error

3. ตารางออฟเซท (Table of Offsets)

การเขียนรูปเรือชั้นต้นนี้ผู้สอนจะมอบตารางออฟเซทให้กับนักเรียน ตารางออฟเซทนี้บางที มาเป็นคู่มือ รูปทวนหัว (Stern Profile) รูปทวนท้าย (Stern Profile) และรูปตัด(Body Plan) แผ่นหนึ่ง ดูรูปที่ 4 ก. อีกแผ่นหนึ่งเป็นตาราง ดูตารางที่ 2 ถ้าจะไม่ให้รูปที่ 4 ในตารางที่ 2 จะต้องเพิ่มเติมตัวเลขให้มากกว่านั้นโดยบอกความสูงของส่วนต่าง ๆ ไว้หมด ถ้าทำอย่างนี้ได้ก็ทำให้มี ออฟเซทแต่แผ่นเดียว และจากออฟเซทนี้เอง จะถูกแปลงให้เป็นรูปเรือ

การเขียนรูปเรือนั้นจำเป็นต้องเขียนย่อลงมา โดยใช้มาตราส่วนทั่งนี้เพราะเรือมีขนาดใหญ่โต เกินกว่าที่จะเขียนขนาดจริง ๆ ลงในกระดาษมาตราส่วนที่ใช้กันนั้นไม่จำกัดสุดแต่กระดาษจะใช้เขียน แต่ต้องไม่ใช้กระดาษที่เล็กเกินไป มาตราส่วนอังกฤษมักใช้ ¼ “ ＝ 1 ฟุต มาตราเมตริกมักใช้ 1 : 50 ซึ่งก็ไม่แน่นอนนักอาจใช้มาตราส่วนอื่นก็ได้ ออฟเซทที่ให้ไว้ในตารางที่ 2 นั้นเขียนด้วยมาตราส่วน 3/16” ＝ 1 ฟุต ต้องการย่อรูปให้เข้ากับโต๊ะขนาดเล็กประการหนึ่ง อีกประการหนึ่งต้องการ ฝึกให้นักเรียนใช้มาตราส่วนเป็น ตารางออฟเซทนั้นเป็นขนาดจริงของเรือ ซึ่งอาจแสดงขนาดเพียง ครึ่งหนึ่งของความกว้างของเรือ หรือจะแสดงเต็มความกว้างทั้งสองกราบก็ได้แต่ต้องบอกไว้ให้ชัดเจน สำหรับออฟเซทที่มาตราส่วนเป็นเมตริกนั้นไม่สู้จะเป็นปัญหาอะไร เพราะอ่านได้โดยตรงเป็น มิลลิเมตรทีเดียว (ในมาตราเมตริกนิยมใช้เป็นมิลลิเมตร) แต่ในมาตราส่วนที่เป็นอังกฤษ มีความยุ่งยาก เพิ่มขึ้น ขอให้ดูตัวเลขในตารางต่อไปนี้ .-

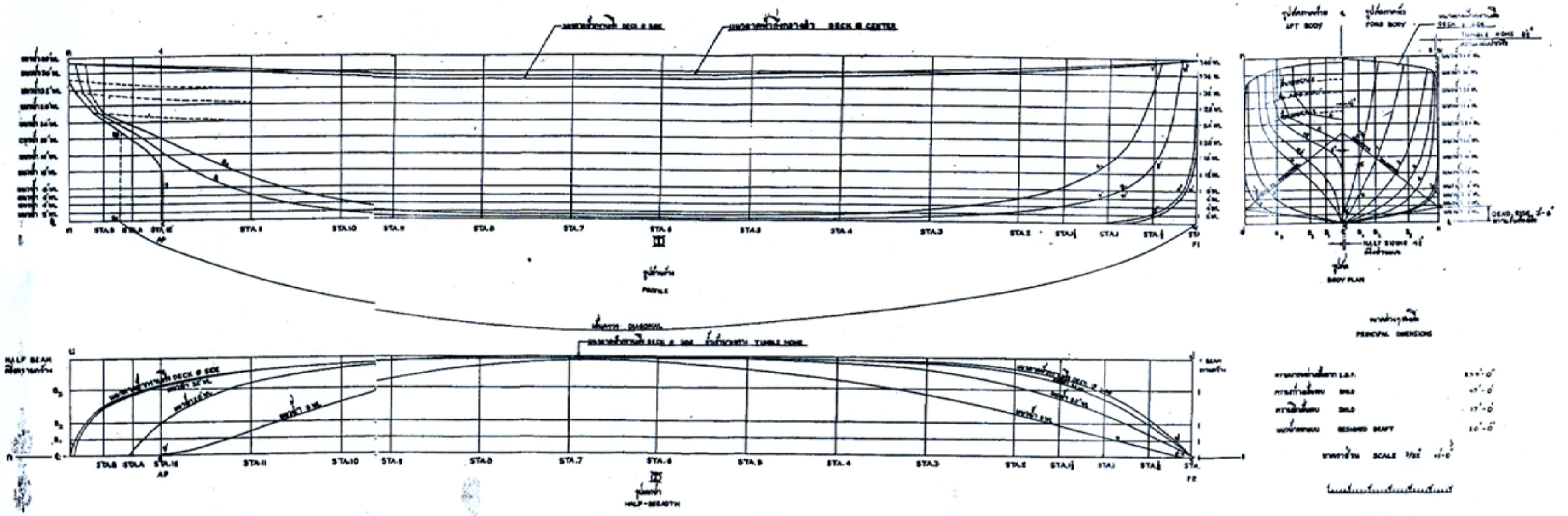
ตารางที่ 1 ตารางออฟเซท

(TABLE OF OFFSETS)

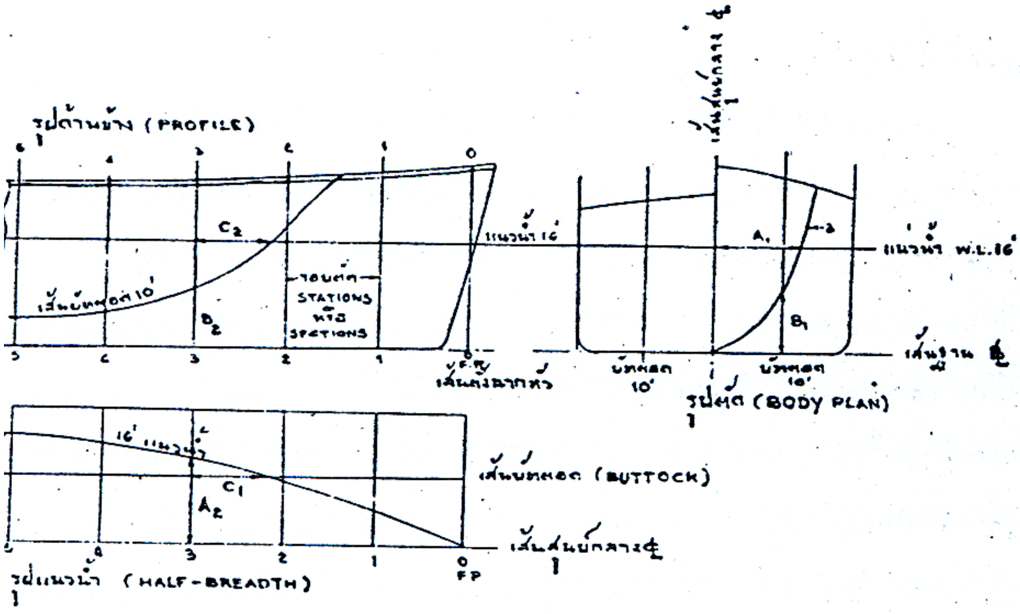
STA.	WL 1	WL 2	WL 3	WL 4	ฯลฯ
0	0-3-6	0-1-6	0-1-6	0-1-6	
½		0-2-0	0-9-4	1-5-2 →	＝1 ‘-5 2/8
1	0-8-4	1-3-4	2-5-4	ฯลฯ	
ฯลฯ					

ตัวเลขในช่องรอยตัดที่ ½ กับ*แนวน้ำ 6 นั้น มีความกว้าง 1-5-2 นั้น หมายความว่า 1 ฟุต 5 นิ้ว กับอีก 2/8 นิ้ว หรือ 1 ฟุต 5 ¼ นิ้ว ฉะนั้นเลขตัวสุดท้ายจะต้องหารด้วย 8 เสมอ ในทำนองเดียวกัน ในตารางออฟเซทรูป 118 ข. ณ ที่รอยตัดที่ 9 กับแนวน้ำที่ 40 ฟุต จะมีครึ่งความกว้างเท่ากับ 22 – 5 –2 หรือ 22' - 5 ¼" เป็นต้น

การนับรอยตัด (Station) ที่ 0 นั้น อาจนับจากทางท้ายไปทางหัว หรือทางหัวไปทางท้ายก็ได้ และจะเอาหัวเรือไว้ทางขวามือหรือซ้ายมือก็ได้ ทั้งนี้สุดแต่ความนิยม ความเคยชินของแต่ละเจ้าของประเทศที่มีกิจการต่อเรือไว้ในกำมือ สหรัฐอเมริกานิยมเอาหัวเรือไว้ทางขวามือ นับรอยตัด 0 จากหัวเรือไปทางท้าย แต่ในอังกฤษเอาหัวเรือไว้ทางซ้ายมือ และนับรอยตัด 0 จากท้ายเรือไปหัวเรือ ส่วนรอยตัดแนวน้ำ (Waterline) นั้นนับจากท้องเรือขึ้นไป จนหมดความลึกของเรือ



รูปที่ 3.26 (FAIRING LINES)



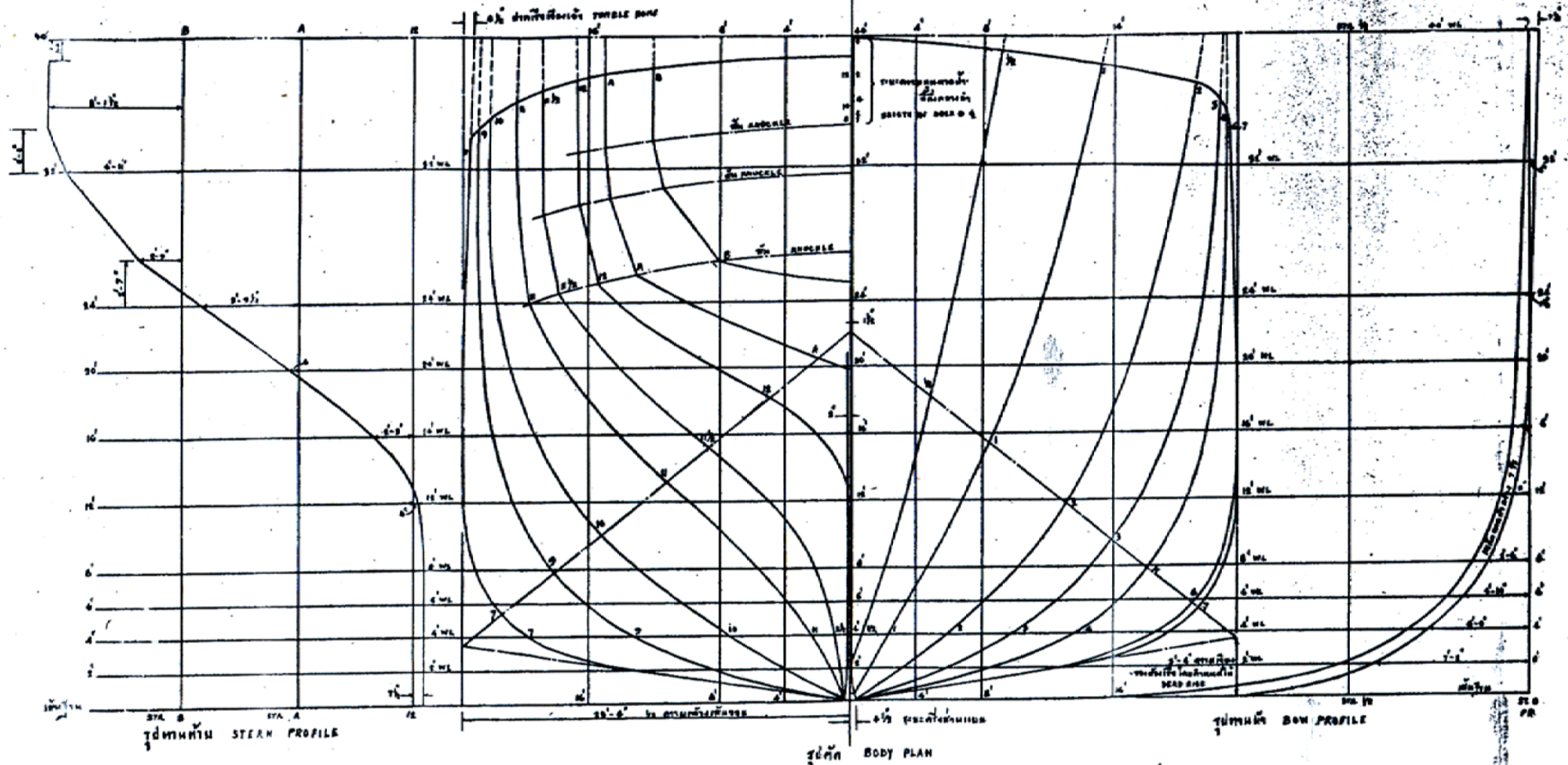
รูปที่ 3 อธิบายความหมายของคำว่าเรียบสม่ำเสมอ (FAIR) ซึ่งหมายถึง A_1-A_2, B_1-B_2 และ C_1-C_2

เมื่อมาถึงตอนนี้นักเรียนจะต้องละมือเขียนรูปเรือทันที โดยเตรียมกระดาษขาวบางยาว 4 ฟุต กว้าง 14 นิ้ว พร้อมด้วยดินสอและมาตราส่วน ดังจะมีวิธีดำเนินการเป็นขั้น ๆ ดังนี้ เพื่อแปลจากออฟเซททที่ให้ไว้ตามรูปที่ 4 ให้ได้รูปเรือตามในรูปที่ 2 นั่นเอง เมื่อนักเรียนทราบคำตอบแล้วอย่าได้ลอกแบบ เพราะจะไม่ได้ประโยชน์จากการหัดเขียนนี้ ที่จัดรูปที่ 2 ไว้ก็เพื่อให้นักเรียนเข้าใจได้ง่ายขึ้นเท่านั้น

4. การตีกริด (Construction of The Grid)

คำว่ากริดก็คือตารางนั่นเอง ประกอบไปด้วยเส้นตั้งและเส้นระดับ เช่นเส้นกึ่งกลางลำตามยาว, เส้นฐาน, เส้นแนวน้ำ, เส้นรอยตัด, และเส้นบัทตอค เป็นต้น เส้นตารางพวกนี้ให้ลงหมึกดำได้ทันที เส้นธรรมดาไม่ใช่เส้นประ เพราะไม่เปลี่ยนแปลงไปมาอีกต่อไป และกว่าแบบนี้จะเสร็จก็กินเวลาหลายสัปดาห์ ในระหว่างนั้นกระดาษอาจถูกความชื้นยืดเข้าออกทำให้ขนาดเปลี่ยนไป เมื่อตีตารางเช่นนี้แล้วจะยืดหรือหดก็เป็นไปเท่ากันหมด วิธีวัดระยะหนึ่งระยะใดก็ตามควรวัดจากเส้นกริดที่ใกล้ที่สุด เพราะเป็นระยะสั้นการยืดหดที่ผิดไปย่อมมีน้อย และการตีตารางกริดนี้ควรทำให้เสร็จภายในวันเดียวกันทั้งสามรูปคือ รูปตัด รูปด้านข้าง และรูปแนวน้ำ การตีกริดถือเป็นสิ่งสำคัญยิ่งในตอนเริ่มแรก จึงจำเป็นต้องวัดระยะทุกตำแหน่งให้แน่นอน การตีกริดมีลำดับก่อนหลังดังนี้

4.1 (ขอให้ดูรูปที่ 2 ตลอดไป) ลากเส้นตรง ก.ข. ยาว 3 ฟุต จริงลงบนกระดานเขียนแบบ ซึ่งเตรียมไว้ให้ห่างจากขอบล่างของกระดาษ 3 นิ้วจริง จุด ก. ห่างจาก



ขนาดของเรือ DIMENSIONS.		
ความยาวระหว่างเส้นฉาก	LBP	159'-0"
ความกว้าง	B. MLD	47'-0"
ความลึก	D. MLD	17'-0"

มาตราส่วน 3/16"-1'-0"

รูปที่ 4 [illegible]

ขอบซ้าย ของกระดาษ 1 นิ้ว จริง เส้น ก.ข. จะเป็นเส้นกึ่งกลางลำตามยาว C ของรูป แนวน้ำและจะถือเป็นเส้นหลักที่เส้นตรงอื่น ๆ ควรขึ้นจากเส้นนี

4.2 วางตำแหน่งของเส้นตั้งฉากท้าย (AP) ลงบนเส้น ก.ข. ห่าง 5 นิ้วจริง จากขอบซ้ายของกระดาษ และจุดนี้คือจุด ค. หรือ Sta 12

4.3 ใช้มาตราส่วน 3/32" = 1 ฟุต วัดจากจุด ค. ไปทางขวามือจนได้ 259 ฟุต ซึ่งเป็นความยาวระหว่างเส้นฉากของเรือลำนี้ แล้วหมายอักษร จ.ซึ่งจะเป็น Sta 0 และตำแหน่งเส้นตั้งฉากหัว FP ด้วย

4.4 ลากเส้นตั้งฉาก ค.ง. และ จ.ฉ. ยาว 9 นิ้วจริง แล้วตรวจสอบความยาว ง.ฉ. ให้ยาว 259 ฟุต ถ้าไม่เท่ากันต้องจักการแก้ไขเสียให้ถูก มิฉะนั้นแล้วจุดต่าง ๆ จะคลาดเคลื่อนหมด

STA. \ W.L.	℄	2	4	6	8	12	16	20	24	32	40
0	0	0	0	0	0	0	0	0-1-4	0-1-4	0-1-4	0-1-4
1/2	0	0	0-8-6	1-4-6	2-0-6	3-3-4	4-4-2	5-3-6	6-1-6	7-9-0	9-3-0
1	0	1-3-0	2-5-2	3-6-4	4-7-8	6-9-0	8-7-0	10-1-6	11-5-6	13-8-4	13-6-0
2	0-4-4	3-3-4	5-10-6	8-2-4	10-1-6	13-1-2	15-2-6	16-10-6	18-1-6	20-0-0	21-3-0
3	0-4-4	6-1-0	9-10-4	12-6-4	14-7-0	17-5-4	19-3-0	20-6-4	21-4-0	22-4-0	22-7-4
4	0-4-4	8-11-0	13-7-4	16-4-2	18-1-0	20-3-6	21-6-4	22-2-2	22-6-6	22-7-6	22-8-0
6	0-4-4	13-1-0	18-10-2	21-2-4	22-4-0	23-2-4	23-6-0	23-6-0	23-3-2	23-0-2	22-9-4
7	0-4-4	13-6-0	19-7-6	21-8-4	22-8-4	23-6-0	23-6-0	23-6-0	23-3-3	23-0-4	22-9-4
9	0-4-4	8-4-6	13-2-6	18-1-2	18-0-0	20-5-4	21-8-0	22-3-0	22-6-0	22-7-0	22-5-2
10	0-4-4	4-0-4	7-4-0	10-3-0	12-10-0	16-8-0	19-0-0	20-7-4	21-4-4	21-10-0	21-8-4
11	0-4-4	7-3-4	2-5-4	3-10-4	6-8-0	9-9-6	14-0-0	17-5-0	19-6-0	20-3-2	20-3-2
11½	0-4-4	0-8-4	1-0-6	1-5-4	2-1-6	5-0-0	9-6-4	13-11-2	17-4-6	18-9-0	18-9-4
12	0-2-0	0-2-0	0-2-0	0-2-0	0-2-0	0-2-0	2-0-6	8-3-6	14-2-2	16-8-2	16-8-2
A	0-2-0	0-2-0	0-2-0	0-2-0	0-2-0	0-2-0	0-2-0	0-10-6	10-1-0	14-9-4	15-0-0
B	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11-8-2	21-1-0

ตารางที่ 2 ตารางออฟเซ็ท (TABLE OF OFFSETS) ของเรือที่จะใช้หัดเขียน มาตราอังกฤษ

4.5 วางตำแหน่งเส้นฐาน B โดยลากเส้น ช.ซ. ขนานและห่างจากเส้น ง.ฉ. 3.75 นิ้วจริง ซึ่งถ้าใช้มาตราส่วน 3/32" = 1 ฟุต วัดแล้วจะได้ระยะ 40 ฟุตรูปนี้จะเป็นรูปด้านข้าง

4.6 ในรูปด้านข้างนี้ลากเส้นแนวน้ำ 2',4',6',8',12',16',20',24',32',40', ตามมาตราส่วน 3/32" = 1 ฟุต ความจริงแนวน้ำไม่ได้สูงถึง 40 ฟุต หากแต่เป็นเส้นช่วยในการเขียนเท่านั้น เวลาลากเส้นแนวน้ำให้ลากเลยไปถึงเส้น ค.ต. ซึ่งห่างจากเส้น ง.ช. 22 ฟุตตามมาตราส่วน เพื่อเป็นส่วนที่ใช้เขียนส่วนท้ายสุดของเรือ การซอยแนวน้ำตอนใต้ท้องเรือ ต้องซอยถี่เพราะเกี่ยวกับการคำนวณ

4.7 ในรูปแนวน้ำลากเส้น บ.ป . ขนานและห่างจากเส้นกึ่งกลางลำเรือตามยาว ค.จ. เทากับครึ่งหนึ่งของความกว้างเส้นขอบ ในที่นี้ความกว้างเส้นขอบ 47 ฟุต ครึ่งหนึ่งเท่ากับ 23.5 ฟุต แล้ววัดลงตามมาตราส่วน 3/32" = 1 ฟุต

4.8 ลากเส้นบัทตอค B_1 B_2 และ B_3 ขนานและห่างจากเส้น ค.จ. เท่ากับ 4', 8', และ 16, หรือใช้ B_1 B_2 B_3 อย่างใดอย่างหนึ่งก็ได้

4.9 เมื่อตรวจสอบขนาดความยาวต่าง ๆ ถูกต้องแน่นอนแล้วให้ลงหมึกทันที

4.10 แบ่งความยาวระหว่างเส้นฉาก ค.จ. ออกเป็นสองส่วนเท่ากัน แล้วให้เครื่องหมายซึ่งตรงกับรอยตัดที่ 6 หลังจากนั้นแบ่งออกเป็นอีกช่องละ 6 ส่วน รวมเป็น 12 ส่วนแล้วให้เครื่องหมายรอยตัด Sta 0 Sta 1…. Sta 12 นอกจากนี้แล้วทางส่วนหัวและส่วนท้ายยังซอยครึ่งลงไปอีกได้แก่ Sta ½" , Sta 1 ½" และ Sta 11 ½" รอยตัดครึ่ง ๆ พวกนี้ปรากฏ ในตอนหัวและท้ายเรือสุดเท่านั้น เกี่ยวกับการคำนวณให้ได้ผลแน่นอนขึ้น

4.11 วางรอยตัดช่วย Sta . a และ Sta. B ห่างจาก Sta 12, 6' – 10" และ 13' – 18" ตามลำดับรอยตัดทั้งสองนี้เป็นรอยตัดช่วยในการเขียนเท่านั้น อาจมีมากว่านี้ก็ได้

4.12 ตรวจสอบตำแหน่งของรอยตัดให้ถูกต้องอีกครั้งหนึ่ง แล้วลงหมึกจะเห็นว่ามีช่องว่างระหว่างรูปด้านข้างกับรูปแนวน้ำ ซึ่งจะเอาไว้เขียนรูปเส้นตรวจโดยใช้เส้น ต.ซ. เป็นเส้นหลัก

4.13 ทำการเขียนกริดของรูปตัด โดยต่อเส้น ซ.ผ.จากเส้นฐานออกไปทางขวามือจนถึงจุดผ. ยาว 6 นิ้วครึ่ง วัด ผ.ฝ. เท่ากับความกว้างของเรือทั้งหมด 47 ฟุต ตามมาตราส่วน 3/32" = ฟุต แบ่งเส้น ผฝ. ออกเป็นส่วนเท่ากันด้วยเส้นกึ่งกลางลำ แล้วสร้างรูปสี่เหลี่ยม ผฝภม. แล้วลากเส้นแนวน้ำต่าง ๆ ตลอดจนเส้นบัทตอค B_1 B_2 B_3 ซีกขวามือ ของเส้นกึ่งกลางลำให้ขื่อว่ารูปตัดภาคหัว คือรูปซีกขวามือตั้งแต่หัวเรือสุดไปถึงกึ่งลางลำจะอยู่ในที่ดังกล่าว ส่วนซีกซ้ายมือ ของเส้นกึ่งกลาง C ให้ชื่อว่ารูปตัดภาคท้าย คือรูปตัดซีกซ้ายมือตั้งแต่กึ่งกลางลำไปจนถึงท้ายเรือสุด การนับขวาหรือซ้ายมือในที่นี้ กำหนดโดยหันหน้าเข้าหาตัวเรือแล้วมองไปทางท้ายเรือ

4.14 เมื่อตรวจสอบตำแหน่งของกริดรูปตัดดีแล้วลงหมึก

4.15 ให้เครื่องหมาย ตัวเลข ตัวอักษร ให้เรียบร้อยเป็นอันเสร็จเรื่องการตีกริด

5. การเขียนรูปเรือ (Fairing The Lines)

5.1 ทำการเขียนรูปทวนหัว ทวนท้าย แนวดาดฟ้ากราบเรือลงในรูปด้านข้างโดยย่อรูปจากรูป 118 ก. ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของออฟเซท

5.2 ทำการเขียนรูปแปลนความกว้างกราบเรือลงในรูปแนวน้ำโดยย่อความกว้างกราบเรือจากรูปตัดที่ให้ไว้ในรูป ที่ 4 เช่นที่ รอยตัด ½ ความกว้างเรือจะเท่ากับ 9 ฟุต – 0 นิ้ว เป็นต้น เมื่อวัดความกว้างกราบเรือได้ทุกรอบตัดก็จะได้เส้นโค้งความกว้างปากเรือ

5.3 ในรูปตัดวัด ผ.ย. 3 ฟุต – 6 นิ้ว ตามมาตราส่วน ซึ่งจะเป็นความชันของท้องเรือเอาระยะมาจากรูป ที่ 4 กะจุด ร. ห่างจากเส้นกึ่งกลางลำ 4 1/2ระยะนี้เรียกระยะครึ่งส่วนแบน ระยะนี้เมื่อคิดทั้งสองข้างจะได้ทั้งหมด 9 นิ้ว เป็นส่วนแบนของกระดูกงูแบนที่จะวางอยู่บนหมอนรองรับกระดูกงู ซึ่งเป็นแบบที่นิยมกว่ากระดูกงูแท่ง เพราะไม่ทำให้หมอนรองชำรุด จากจุด ร. ลากเส้นประไปยังจุด ย. ทำอย่างนี้ทั้งขวาซ้าย เป็นความชันของท้องเรือเพื่อให้สิ่งต่าง ๆ ไหลมรวมกันที่กึ่งกลางลำเช่น น้ำ หรือ น้ำมัน หรือน้ำท้องเรือ เพราะตรงกลางลำนั้นเป็นที่ติดลิ้นดูด

5.4 วัดระยะ มล. 8 ½” (ทำเหมือนกันทั้งขวาซ้าย) ลากเส้นจากจุด ล. จดแนวน้ำที่ 20’ WL ระยะ 8 ½” นี้เป็นความแฟบปากเรือกันไม่ให้กราบกระทบกับทาเทียบ

5.5 วัดความหนาของทวนหัย 1 ½” ทวนท้าย 2” ลงที่เส้นกึ่งกลางลำตามยาว

5.6 จากตารางออฟเซท ตารางที่ 2 นำความกว้างตามแนวน้ำมาเขียนรูปหน้าตัดของรอยตัดต่างๆ ทุกหน้าตัด การวัดความกว้างของรอยตัด ½ ณ แนวน้ำ 24 ‘ซึ่งกว้างเท่ากับ 6 ฟุต 1 ¾ นิ้ว หรือแนวน้ำและรอยตัดอื่น ๆ นั้นทำได้ง่าย ดูรูปที่ 2 ข้อที่ยากนั้นอยู่ที่ตอนปลายทั้งสองของเส้นโค้งนั้นจะสิ้นสุด ณ ที่ใด ที่รอยตัด ½ นี้ ปลายล่างของเส้นโค้งจะสิ้นสุดที่ ส. ซึ่งตรงกับ ส’ ที่อยู่รูปด้านข้าง เพราะรอยตัด ½ ตัดทวนหัวที่ ส’ ส่วนปลายบนของเส้นโค้งจะสิ้นสุดที่ ว. ซึ่งได้มาจากความสูงของ ส’ ว ที่อยู่ในรูปด้านข้างกับ ความกว้างของ ว. ที่ห่างจากกึ่งกลางเท่ากับ 9’ – 0” ซึ่งได้มาจากรูปแนวน้ำ ฉะนั้นจุดตอนปลายด้ายบนของเส้นโค้งจึงมีวิธีเขียนยากกว่าที่อื่น และเมื่อได้ทุกจุดทุกรอยตัดแล้วก็ลากเส้นปิด ๆ ซึ่งเกิดที่หลังเส้นนี้ก็คือเส้นแนวกราบเรือนั่นเอง

5.7 เขียนรูปแนวน้ำชั้นต่าง ๆ ลงในรูปแนวน้ำ โดยวัดระยะความกว้างของชั้นแนวน้ำมาจกรูปตัดที่เรากำลังเขียนด้วยมาตราส่วน 3/32” = 1 ฟุต ไม่ใช่เอามาจากรูป ที่ 4 เหมือนตอนแรก ๆ วิธีที่ง่ายต่อการเขียนในต่างประเทศที่ทำการที่ทำการต่อเรือจริง ๆ จะมีรนกระดาษคล้ายรนเชือกริบบินผูกห่อของขวัญ อย่างใหญ่ที่สุดกว้างประมาณหนึ่งนิ้ว กระดาษนี้เรียกทิคเคอเทบ ๆ ( ) ในตอนนี้เราไม่มีกระดาษชนิดนี้ก็ใช้กระดาษชนิดอื่นไปก่อน ตัดให้ขอบตรงจริง ๆ แล้วทาบลงบนแนวน้ำที่เราต้องการเขียน เช่นจะเขียนแนวน้ำ 8” WI ให้ทำดังในรูปที่ 5 แล้วจุดด้วยดินสอดำลงบนทิคเคอเทบ แล้วเขียนเครื่องหมายกำกับรอยตัดนั้น ๆ เพื่อไม่ให้หลงเวลาจะเอาระยะเหล่านี้ไปคายลงในรูปแนวน้ำ เมื่อนำระยะไปคายแล้วลากเส้นโค้งผ่าน ซึ่งไม่ใช่ของยากอะไร ข้ออยากอยู่ที่ว่าปลายทั้งสองของแนวน้ำ 8 ฟุต จะไปตัดกับอะไร ตอนหัวเรือเส้นแนวน้ำ 8 ฟุต จะจบลงที่ ศห ซึ่งนำมาจาก

รูปด้านข้าง เพราะแนวน้ำ 8 ฟุต ในรูปด้านข้างตัดทวนหัวที่ ศห ระยะ ศ’ ห” นี้เป็นความกว้างของทวนหน้า ซึ่งมีความกว้าง 7 ½” หนา 1 ½” ตอนท้ายเรือเส้นแนวน้ำ 8 ฟุต จะจบลงที่จุด อ. ซึ่งตรงกับ อ’ ในรูปด้านข้าง เพราะเหตุว่าแนวน้ำ 8 ฟุต ตัดด้านหลังของทวนท้ายที่ อ’ และมีความหนาครึ่งหนึ่งของทวนท้าย 2” การใช้ทิคเคอเทบนั้นมีความสะดวยเพียงแต่ต้องการทราบตำแหน่งโดยไม่ต้งทราบขนาดว่ายาวกี่ฟุต

5.8 เขียนรูปบัทตอคลงในรูปด้านข้าง รูปบัทตอคนี้คือเส้นขอบที่ปรากฏขึ้นหลังจากตัดเรือออกด้วยพื้นดิ่งขนานกับความยาวของเรือ และห่างจากกึ่งกลางลำออกมาเป็นระยะพอสมควรเปรียบเปมือนรูปขอบที่เกิดจากการฝานมะม่วง ให้ห่างจากกึ่งกลางเม็ดออกมาเล็กน้อยนั่นเอง วิธีเขียนเส้นบัทตอค B_1 เอาทิคเคอเทบวางในทางดิ่งทาบเข้ากับเส้น B_1 ของรูปตัดภาคหัวภาคท้ายดังในรูปที่ 6 แล้วหมายตำแหน่งจุดที่รอยตัดต่าง ๆ ตัดกับเส้นบัทตอคลงบนทิคเคอเทบนั้น แล้วนำจุดตัดเหล่านั้นคายลงตามรอยตัดในรูปด้านข้าง เมื่อได้จุดต่าง ๆ บนรอยตัดแล้ว ยังเขียนเส้นโค้งผ่านไม่ได้ เช่นเมื่อทาบทิคเคอเทบลงบนเส้นบัทติค B_1 จะได้จุด ธ และ น นำไปคายลงที่รอยตัด ½ แล 1 ณ ที่จุด ธ’ และ น’ เราจะลากเส้นโค้งผ่าน ธ’, น’ ฯลฯ ยังไม่ได้ ยังไม่พอต้องโปรดเจคจุด พ ที่อยู่ในรูปชั้นแนวน้ำขึ้นไปปรากฏที่ พ’ เพราะจุ พ เป็นจุดตัดของแนวน้ำ 8 ฟุต กับบัทตอค B_1 สำหรับปลายสอของบัทตอคได้จากโปรเจคจุดตัด ฟ ซึ่งเป็นจุดตัดของเส้นความกว้างปากเรือกับบัทตอค B_1 ขึ้นไปตัดที่ ฟ’ ซึ่งเป็นแนวเส้นกราบเรือ เมื่อทำที่รอยตัดเส้นแนวน้ำอื่น ๆ เช่นเดียวกันแล้วก็ลากเส้นบัทตอคได้

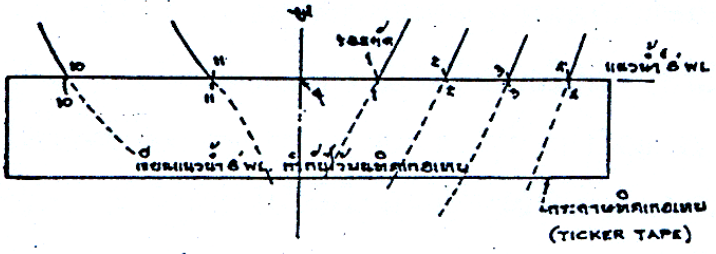
5.9 เขียนเส้นตรวจ โดยลากเส้นทะแยงมุมขึ้นในรูปตัดตามความพอใจ ไม่มีกำหนดกฏเกณฑ์ที่แน่นอนให้ตัดกับรอยตัดทุก ๆ เส้นและเป็นมุม 90 หรือใกล้เคียง แล้วเอาทิคเคอเทบวางทาบบนเส้นตรวจ แล้วหมายตำแหน่ง C ½, 1,2….. ลงบนกระดาษทิคเคอเทบนั้น แล้วนำไปถ่ายระยะลงโดยใช้เส้น B เป็นเส้นหลัก แล้วลากเส้นโค้งย่านจุดหัวของเส้นโค้ง เริ่มที่จุด ซ พอดีเพราะเส้นตรวจในรูปตัดเส้นทวนหัวในระหว่างแนวน้ำ 26 ฟุต กับ 24 ฟุต เมื่อโปรเจคลงสู่เส้นฐานจึงตรงกับจุด ซ พอดี ส่วนจุดปลายของเส้นตรวจจะตรงกับจุด ณ ซึ่งโปรเจคมาจากจุด ญ ซึ่งอยู่ในระหว่างแนวน้ำ 20 กับ 24 ฟุต อันเป็นจุดเริ่มของเส้นตรวจ เมื่อได้จุดครบแล้วก็เขียนเส้นโค้งผ่านได้ ถ้าเส้นโค้งไม่เรียบก็ให้แก้เสียใหม่

รูปทั้งหมดที่เขียนมานี้เขียนขึ้นโดยที่จุดต่าง ๆ ต้องตรงกัน เหตุนี้จึงเรียกว่า (Fair) บางที่เรียกว่ารูปลายเส้น (Lines PIan) ภายใต้รูปตัดให้บอกขนาดของเรือไว้ด้วย

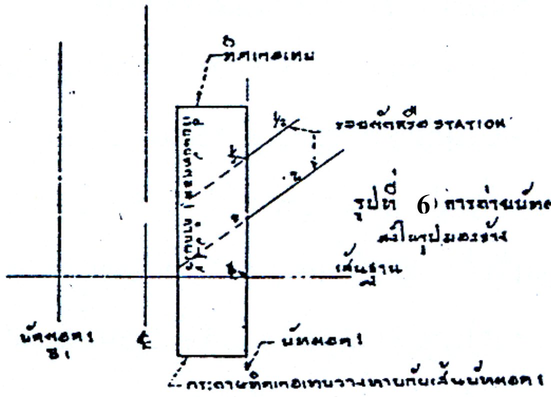
5.10 เขียนความนูนของดาดฟ้า ณ รอยตัดที่ 7 ดูรูปที่ 7 แล้วถ่ายความนูนนี้ลงบนรอยตัดอื่น ๆ ต่อไปภายหลัง วิธีเขียนความนูนดาดฟ้ามีด้วยกันหลายวิธี ในที่นี้จะนำวิธีเขียนมาแสดงวิธีด้วย

ลากเส้นตรง OB ดูรูปที่ 7 กว้างเท่ากับครึ่งความก้างของเรือ ในที่นี้เท่ากับ 23.5 ฟุต ลากเส้นตั้งฉาก OX ให้ตั้งฉากกับ OB วัดระยะ OX = $\frac{\text{ความกว้างของเรือ}}{50} = \frac{47 \times 12}{50} = 11.3$ นิ้ว เขียนวงกลมโดยใช้จุด 0 เป็นจุดศูนย์กลางรัศมี 11.3 นิ้ว เขียนวงกลม OYZ แบ่งอาร์ค XY ออกเป็น 4 ส่วนเท่ากันที่จุด b,d,f, ลากเส้น zb,zd,zf ตัด OB ที่จุด a c และ e แบ่ง OB ออกเป็น 4 เท่ากันที่ a’ c’ และ e’ วัดระยะตั้งฉาก a’ b’ = ab, c’d’ = cd และ e’ f’ = ef แล้วเขียนเส้นโค้งผ่าน X b’ d’ f’ B แล้วถ่ายเส้นโค้งไปทางกราบซ้าย

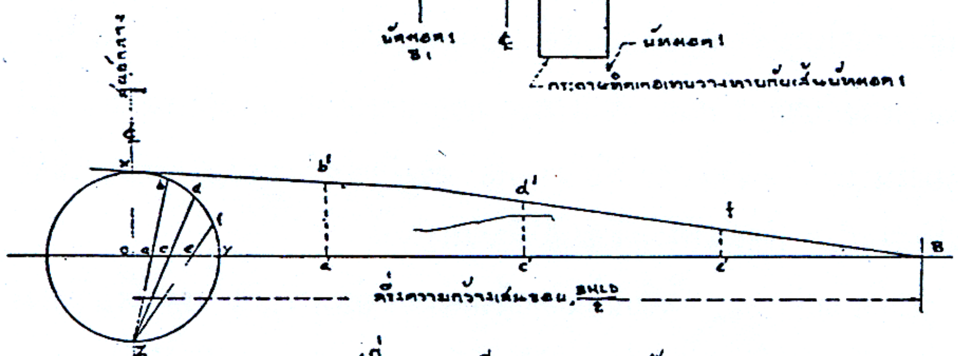
5.11 ทำการถ่ายความนูนดาดฟ้าที่รอยตัดที่ 7 นี้ไปยังรอยตัดอื่น ๆ โดยรักษาระยะความโค้งนั้นให้เท่ากับผลต่างที่กึ่งกลางลำ ดูรูปที่ 8 แต่โดยที่รูปลายเส้นนั้น มีความยุ่งอยู่แล้วจึงไม่เขียนรูปความนูนของดาดฟ้าไว้ทุกรอยตัด เป็นแต่บอกระยะความนูนของดาดฟ้าที่ตรงกึ่งกลางลำของทุก ๆ รอยตัดไว้ ในรูปตัดเท่านั้น เช่นในรูปที่ 4 จะพบความนูนของดาดฟ้าที่กลางลำ Heights Of Deck At C บอกไว้บนเส้น C ที่เขียน 2,4,6,8,10,12 ไว้นั้นหมายถึงรอยตัดต่าง ๆ ส่วนความนูนก็ใช้มาตราส่วนวัดอ่านจากรูป วัดจากแนวน้ำ 40’ WL ลงมา ฉะนั้นในรูปด้านข้างจึงปรากฏเส้นแนวดาดฟ้ากึ่งกลางลำ (Deck At Center) ขึ้นอีกเส้นหนึ่ง



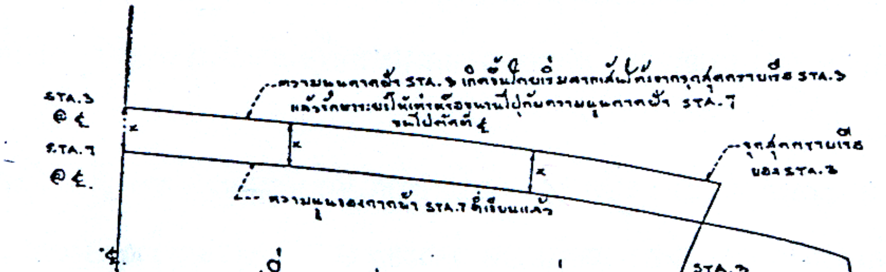
รูปที่ 5 แสดงการใช้ทิคเกอเทป (TICKER TAPE)
เพื่อความสะดวกไว้ในการเขียนแบบ
ตอนนี้เป็นการถ่ายระยะความกว้างแนวน้ำจากรูปตัด
เพื่อนำไปเขียนรูปแนวน้ำ



รูปที่ 6 การถ่ายบัทตอค มาใส่รูปมองข้าง



รูปที่ 7 การเขียนความนูนดาดฟ้า (CAMBER)



รูปที่ 8 การเขียนความนูนดาดฟ้าอื่นๆ

8.2 การคำนวณเบื้องต้น

1. การหาเนื้อที่ต่าง ๆ

1.1 เนื้อที่ของรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า Rectangular

เนื้อที่ ABCD = กว้าง x ยาว

= AB x BC ตารางหน่วย

ดูรูปที่ 9

1.2 เนื้อที่ของรูปสี่เหลี่ยมจตุรัส Square

เนื้อที่ ABCD ด้านกำลังสอง

= AB^2 ตารางหน่วย

ดูรูปที่ 9

1.3 เนื้อที่ของรูปสามเหลี่ยมใด ๆ

เนื้อที่ของสามเหลี่ยม ABC = ½ สูง x ฐาน

= ½ x h x AB ตารางหน่วย

ดูรูปที่ 9

1.4 เนื้อที่ของรูปสี่เหลี่ยมคางหมู Trapezium

เนื้อที่สี่เหลี่ยมคางหมู = ½ x สูง x (ผลบวกของด้านขนาน)

= ½ x h x (AB + DC)

ดูรูปที่ 9

1.5 เนื้อที่ของรูปสี่เหลี่ยมใด ๆ Trapezium

เนื้อที่ของรูปสี่เหลี่ยมใด ๆ = (1/2 x AF x DB) + (½ x EC x DB)

= ½ x DB x (AF + EC) ตารางหน่วย

ดูรูปที่ 9

1.6 เนื้อที่ของวงกลม Circle

เนื้อที่ของวงกลม = πR^2

กฎรูปสี่เหลี่ยมคางหมู Trapezoidal Rule ดูรูปที่ 10 จากรูปสี่เหลี่ยมคางหมู

เนื้อที่ ½ x AB x (AD + BC)

ให้ AB, BC, AB, = y_1 , y_2 และ h ตามลำดับ แล้วแทนค่า

เนื้อที่สี่เหลี่ยมคางหมู = ½ (y_1 , + y_2) h

ถ้ามีรูปสี่เหลี่ยมคางหมูอีกรูปหนึ่ง BCFE ซึ่ง BC สูงเท่ารูปเดิม และ AB == BE

ให้ FE == y

เนื้อที่สี่เหลี่ยมคางหมูรูปใหม่ = ½ (y_1 , + y_3) h

เนื้อที่สี่เหลี่ยมคางหมูสองรูปรวมกัน

= ½ (y_1 , + y_2) h + ½ (y_1 + y_3) h

= ½ h (y_1 + y_2 + y_3)

ถ้ามีอีกรูปหนึ่งก็จะกลายเป็นเนื้อทั้งหมด

= ½ (y_1 + y_2) h + ½ (y_2 + y_3) h ½ (y_3 + y_4) h

= ½ (y_1 + $2y_2$ + $2y_3$ + $2y_4$) h

= h ($\frac{y_1 + y_4}{}$ + y_2 + y_3)

ในทำนองเดียวกันถ้ามีหลาย ๆ รูปก็จะหาเนื้อที่ได้โดยกฎนี้

= h ($\frac{y_1 + y_7}{}$ + y_2 + y_3 + y_4 + y_5 + y_6 + y_7)

จากกฎรูปสี่เหลี่ยมคางหมู อาจพูดเป็นคำพูดได้ดังนี้ “ในการหาเนื้อที่ภายในเส้นโค้งโดยใช้กฎรูปสี่เหลี่ยมคางหมู ให้แบ่งฐานออกเป็นกี่ช่องตามแต่ต้องการ ให้ห่างเท่า ๆ กัน แล้วลากเส้นตั้งฉากจากฐานขึ้นไปตัดกับเส้นโค้งนั้น เอาครึ่งหนึ่งของเส้นตั้งฉากแรกและสุดท้ายกับความยาวของเส้นที่เหลือมารวมกัน คูณด้วยระยะห่างของเส้นตั้งฉาก “

1.7 กฎซิมสันที่ 1 (Simpson First Rule) ตามรูปที่ 11

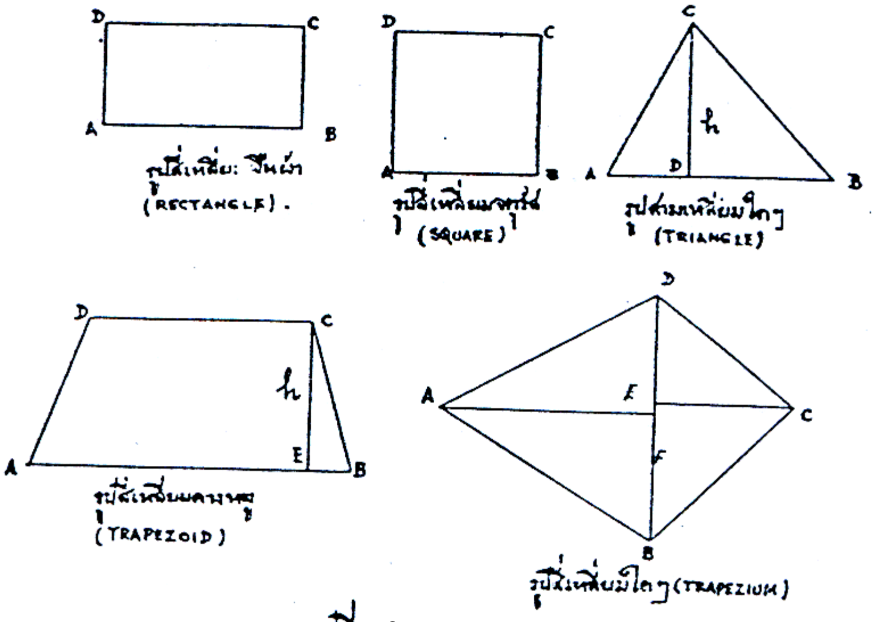
= 1/3 AE (AB + 4 FE + CB)

= 1/3 h (y_1 + $4y_2$ + y_3)

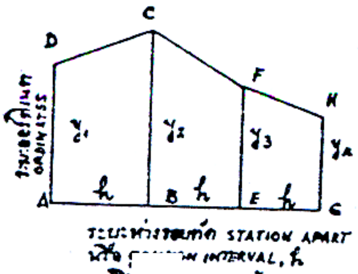
ถ้ามีอีก 2 รูปคือ 1/3 h (y_3 + $4y_4$ + y_5)

และ 1/3 h (y_5 + $4y_6$ + y_7)

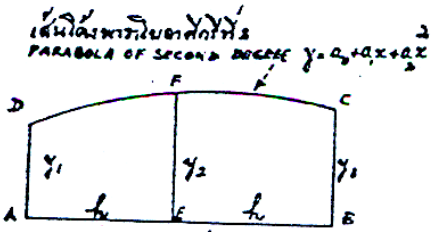
ดังนั้นเนื้อที่ทั้งหมด = 1/3 h (y_1 + $4y_2$ + $2y_3$ + $4y_4$ + $2y_5$ + $4y_6$ + y_7)



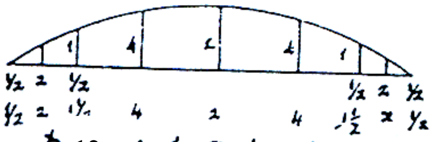
รูปที่ 9



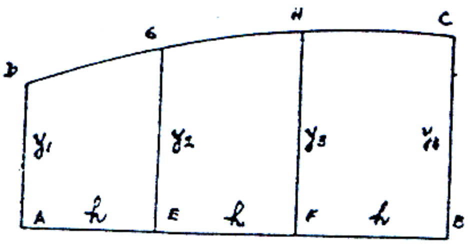
รูปที่ 10 การหาเนื้อที่โดยกฎสี่เหลี่ยมคางหมู (TRAPEZOIDAL RULE)



รูปที่ 11 การหาเนื้อที่รูปโค้งเส้นโค้งโดยกฎซิมป์สันที่ 1 (SIMPSON FIRST RULE)



รูปที่ 12 แสดงตัวคูณซิมป์สันสำหรับออร์ดิเนตที่ตั้งห่างครึ่ง



รูปที่ 13 การหาเนื้อที่รูปโค้งเส้นโค้งโดยกฎซิมป์สันที่ 2 (SIMPSON SECOND RULE)

อาจพูดเป็นคำพูดได้ดังนี้.-

ในการหาเนื้อที่ภายใต้เส้นโค้งโดยกฎของซิมสันที่ 1 ให้แบ่งฐานออกเป็นจำนวนช่องคู่เท่า ๆ กัน ให้เอาเส้นตั้งฉากหัวท้ายมาบวกกัน และบวกด้วย 2 เท่าของเส้นตั้งฉากคี่ 4 เท่า ของเส้นตั้งฉากคู่ทั้งหมดคูณด้วย 1/3 ของระยะห่างของเส้นตั้งฉาก

ส่วนมากในทางต่อเรือจะพบว่ารอยตัดทางตอนหัวและท้ายสุดของเรือต้องซอยครึ่ง เพื่อให้ได้ผลแน่นอน มิฉะนั้นเนื้อที่จะขาดไป ดูรูปที่ 12 จะพบว่าตัวคูณซิมสัน Simpson Multiplier 1 4 2 4 1 นั้นมีเพียง 5 รอยตัด ส่วนรอยตัดหัวท้ายนั้นซอยลงเป็น ½ 2 ½ ความจริงเมื่อพิจารณาดูตัวคูณ ½ 2 ½ แล้วเอาสองคูณก็จะเป็นตัวคูณ 1 4 1 ธรรมดานั่นเอง แต่การที่ทำให้เหลือตัวคูณเพียง ½ 2 ½ เท่านั้นก็เพื่อให้ระยะห่างรอยตัด h เท่าเดิม ฉะนั้นตัวคูณจะเป็น ½, 2, 1 ½, 4, 2, 4, 1 ½, 2 ½ โปรดสังเกตว่าตัวคูณนี้เริ่มต้นด้วย 1 เวลาจบต้องจบด้วย 4 1

ตัวอย่าง เส้นโค้งเส้นหนึ่งมีเส้นออร์ดิเนตห่างกัน 2 ฟุต สูง 1.45, 2.65, 4.35, 6.45, 8.50, 10.40 และ 11.85 ฟุต ตามลำดับ จงหาเนื้อที่ใต้เส้นโค้งเป็นตารางฟุต

วิธีทำ ตีตารางดังนี้ และกรอกข้อความตามตัวอย่าง

จำนวน ออร์ดิเนต	ความยาว ออร์ดิเนต	ตัวคูณ ซิมสัน	ฟังชัน เนื้อที่
1	1.45	1	1.45
2	2.65	4	10.60
3	4.35	2	8.70
4	6.45	4	25.80
5	8.50	2	17.00
6	10.40	4	41.60
7	11.85	1	11.85

ผลรวมของฟังชั่นเนื้อที่	=	117.00
ระยะห่างเส้นออรีดิเนต	=	2 ฟุต
1/3 ระยะห่างเส้นออร์ดิเนต	=	1/3 x 2 ฟุต
เนื้อที่ภายใต้เส้นโค้ง	=	2/3 x 117.00
	=	78 ตร. ฟุต

1.9 กฎซิมสันที่ 2 แบ่งเส้นโค้งออกเป็นช่องคี่ เช่น 3, 6, 9 ดูรูปที่ 13 เนื้อที่ภายใต้เส้นโค้ง

$$= 3/8\ AE\,(AD + 3\,GE + 3\,FH + CB)$$

$$= 3/8\ h\,(y_1 + 3y_2 + 3y_3 + 4y)$$

ถ้าเส้นโค้งแบ่งออกเป็น 6 เท่า คือมี ออร์ดิเนต 7 เส้น

เนื้อที่ภายใต้เส้นโค้ง $= 3/8\,h\,(y_1 + 3y_2 + 3y_3 + 2y_4 + 3y_5 + 3y_6 + y_7)$

จะเห็นตัวคูณซิมสันเป็น 1 3 3 1

1 3 3 1

1 3 3 1

1 3 3 2 3 3 2 3 3 1

ตัวอย่างใช้กฎซิมสันที่ 2 คำนวณหาเนื้อที่ภายใต้เส้นโค้งตามตัวอย่างที่แล้ว

จำนวน ออร์ดิเนต	ความยาว ออร์ดิเนต	ตัวคูณ ซิมสัน	ฟังชัน เนื้อที่
1	1.55	1	1.45
2	2.65	3	7.95
3	4.35	3	13.05
4	6.45	2	12.90
5	8.50	3	25.50
6	10.40	3	31.20
7	11.85	1	11.85

ผลรวมฟังชันเนื้อที่ = 103.90

ระยะห่างออร์ดิเนต = 2 ฟุต

3/8 ระยะห่างออร์ดิเนต = 2 x 3 x 8 = 77.92 ฟุต

ฉะนั้นเนื้อที่ใต้เส้นโค้ง = ¾ x 103.90 = 77.92 ฟุต

1.10 กฎห้า-แปด ดูรูปที่ 14 ใช้คำนวณหาเนื้อที่บางส่วนภายใต้เส้นโค้งและอยู่ในระหว่างออร์ดิเนต 2 เส้น ตามในรูปต้องการหาเนื้อที่รูป AE FD เพียงรูปเดียว มีสูตรดังนี้

เนื้อที่ AEFD $= 1/12\,h\,(5y_1 + 8y_2 - y_3)$

หรือเนื้อที่ EBCF $= 1/12\,h\,(5y_3 + 8y_2 - y_1)$

1.11 การหาเนื้อที่ภายใต้เส้นโค้งโดยแคลคูลัส ดูรูปที่ 15

เนื้อที่ของส่วนเล็ก $= y \triangle x$

เนื้อที่ภายใต้เส้นโค้งทั้งหมด $= \int y. \quad dx$

1.12 การหาเนื้อที่ภายในซึ่งล้อมรอบด้วยเส้นโค้งธรรมดา กับรัศมี 2 เส้น ดูรูปที่ 16 ตาม ในรูปเนื้อที่ POP' ซึ่งเปรียบเหมือนสามเหลี่ยม

$$= \tfrac{1}{2}.\ PP'.\ OP'$$

$$= \tfrac{1}{2} \triangle \theta \ \ r.r = \tfrac{1}{2} r^2 \triangle \theta$$

เนื้อที่ทั้งหมด $= \int \frac{r^2}{2}.\ de$

มุมเชิงวงกลม (Circular Measure Of An Angle)

มุมเชิงวงกลมคือ จำนวนดีกรี คูณด้วย $\frac{\pi}{180}$ $\left(\frac{\pi}{180} = 0.01745\right)$

มุมเชิงวงกลม 90° $\frac{\pi}{180} \times 90 = \frac{\pi}{2} = 1.5708$

มุมเชิงวงกลม 15° $\frac{\pi}{180} \times 15 = \frac{\pi}{12} = 0.26175$

มุมเชิงวงกลม 57.3°

ตัวอย่าง ให้หาเนื้อที่ล้อมรอบด้วยเส้นโค้งธรรมดา และรัศมี 2 เส้นทำมุม90° ต่อกัน รัศมีห่างกัน 15° มีค่า 0, 2.6, 5.2, 7.8, 10.5, 13.1, 15.7

มุมจาก ออร์ดิเนตที่ 1	ความยาว รัศมี	ความยาว กำลังสอง	ตัวคูณ ซิมสัน	ฟังชัน เนื้อที่
0	00	00	1	0.0
15°	2.6	6.8	4	27.2
30°	5.2	27.0	2	54.0
45°	7.8	60.8	4	243.2
60°	10.5	110.2	2	220.4
75°	13.1	171.6	4	286.4
90°	15.7	246.5	1	246.5

ผลบวกของฟังชันเนื้อที่ = 1479.7

มุมเชิงวงกลม 15 = .26175

เนื้อที่ = 1/3 x .26175 x 1479.7 x ½

= 64.5 ตารางฟุต

ตามตัวอย่างข้างบนนี้จะเห็นว่าจากสูตรการหาเนื้อที่ภายในเส้นล้อมรอบของเส้นโค้งกับรัศมี 2 เส้น คือ $\int \frac{r^2}{2} . de$ สามารถที่จะนำมาคำนวณได้โดยใช้สูตรซิมสันที่ 1

จากการเปรียบเทียบเนื้อที่ภายใต้เส้นโค้งธรรมดา = $\int y \; dx$

กับเนื้อที่ล้อมรอบด้วยเส้นโค้งและเส้นรัศมีซึ่งมีสูตร = $\int \frac{r^2}{2} . De$

จะเห็น ว่า y ตรงกับ $\frac{r^2}{2} dx$ dx ตรงกับ de

เพราะฉะนั้นแบ่งมุมที่อยู่ในระหว่างเส้นรัศมีทั้งสองออกเท่า ๆ กัน วัดความยาวของรัศมียกกำลัง 2 แล้วเอารวมกัน แล้วหารด้วย 2 คือใช้ครึ่งหนึ่งของผลบวกรัศมีกำลัง 2 แล้วคูณ ผลบวกทั้งหมดนั้นด้วย 1/3 เมื่อใช้กฎซิมสันที่ 1 แล้วคูณด้วยมุมเชิงวงกลมร่วม หรือจะใช้กฎซิมสันที่ 2 ก็ได้ตัวคูณต่าง ๆ ก็เปลี่ยนไป

2. การคำนวณหาปริมาตร

ปริมาตรของรูปกล่องสี่เหลี่ยม = กว้าง x ยาว x หนา

ปริมาตรของรูปทรงกลมตัน = $(\text{เส้นผ่าศูนย์กลาง})^3$

ปริมาตรของรูปปิรามิด = เนื้อที่ฐาน 1/3 ของสูงตั้งฉากจากฐานถึงยอด

ปริมาตรภายใต้เนื้อที่อันเป็นส่วนโค้งเช่นนี้ใช้มากในการต่อเรือ ที่สำคัญคือ ปริมาตรภายใต้แนวน้ำ ปริมาตรของห้องก็เช่นเดียวกัน ทั้งนี้เพื่อใช้บรรจุน้ำหรือน้ำมัน ในการหานั้นให้แบ่งสิ่งที่เราต้องการทราบปริมาตรด้วยพื้นที่ระยะห่างเท่ากัน พื้นที่ที่แบ่งนั้นคำนวณจากสูตรได้อธิบายมาแล้ว

พื้นที่เหล่านี้เปรียบเหมือนเส้นออร์ดิเนตของเส้นโค้งใหม่ เนื้อที่ของเส้นโค้งนั้นหาได้โดยกฎซิมสันสูตรใดสูตรหนึ่ง และเนื้อที่นี้คือปริมาตรของวัตถุนั้น

ตัวอย่าง ดูรูปที่ 17 ถังน้ำมันถังหนึ่งมีเนื้อที่หน้าตัดห่างกัน 17 ฟุต 6 นิ้ว เนื้อที่ของรูปหน้าตัดนั้นมีเนื้อที่ดังต่อไปนี้ 98, 123, 137, 135, 122 ตารางฟุตตามลำดับ จงหาปริมาตรของถังน้ำมันนั้น และน้ำหนักของน้ำมันที่บรรจุใช้ 44 ลูกบาศก์ฟุต หนัก 1 ตัน

เนื้อที่	ตัวคูณซิมสัน	ฟังชันปริมาตร
98	1	98
123	4	492
137	2	274
135	4	540
122	1	122

ผลรวมฟังชันปริมาตร = 1526

ปริมาตร = 1/3 x 17.5 x 1526 = 8901.6 ลบ.ฟุต

น้ำหนักน้ำมัน $\dfrac{8901.6 \text{ ลบ.ฟุต}}{\dfrac{44 \text{ ลบ.ฟุต}}{\text{ตัน}}}$ = 202 ตัน

เราอาจแบ่งการหาปริมาตรได้เป็น 2 วิธี คือ.-

1) แบ่งโดยพื้นตั้งฉากกับแนวน้ำบรรทุก (Section Or Station)

2) แบ่งโดยพื้นขนานกับแนวน้ำบรรทุก (Waterplane Area)

ตัวอย่าง ส่วนที่จมน้ำของเรือลำหนึ่งถูกแบ่งออกด้วยพื้นที่หน้าตัดทางดิ่งมีระยะห่างกัน 10 ฟุต และมีพื้นที่ดังต่อไปนี้ 0.3, 22.7, 48.8, 73.2, 88.4, 82.8, 58.7, 26.2, 3.9 ตร.ฟุต คำนวณตามแบบฟอร์มได้ 4052 ลบ.ฟุต

ตัวอย่าง ส่วนที่ จมน้ำของเรือลำหนึ่งถูกแบ่งออกด้วยพื้นที่ขนานกับพื้นแนวน้ำ บรรทุกมีระยะฟ่างกัน 1 ½ ฟุต มีพื้นที่ดังนี้ 994, 795, 605, 396, 231, 122, 68, 28, 8 ตารางนิ้วตามลำดับ จงหาปริมาตรเป็น ลบ.ฟุต ทำตามแบบฟอร์มได้ 4052 ลบ.ฟุต

๓. เส้นโค้งระวางขับน้ำ

ตามที่กล่าว แล้วว่า เราคำนวณเรื่องระวางขับน้ำ ถึงแนวชั้นแนวน้ำบรรทุกเต็มที่โดยที่ระดับน้ำนี้เปลี่ยนไปเรื่อย ๆ ตามจำนวนสินค้าถ่านหิน น้ำมัน ที่อยู่ในเรือ จึงเป็นการจำเป็นที่จะต้องหาวิธีคำรวณหาระวางขับน้ำ จนถึงระดับน้ำต่าง ๆ แล้วเขียนเส้นโค้งระวางขับน้ำได

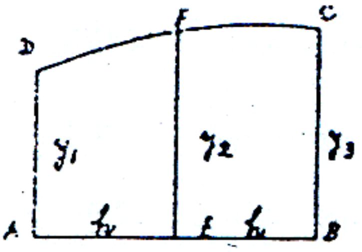
โจทย์ตัวอย่างที่สำคัญ ในการสร้างเส้นโค้งระวางขับน้ำ

เนื้อที่แนวน้ำของเรือลำหนึ่งซึ่งห่างกัน 2 มีเนื้อที่ดังต่อไปนี้.-

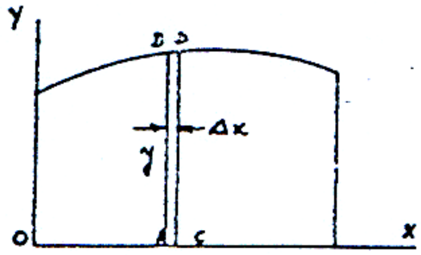
แนวน้ำ 1 …………………. 7800 ตารางฟุต

“ 2 ………………… 29800 “

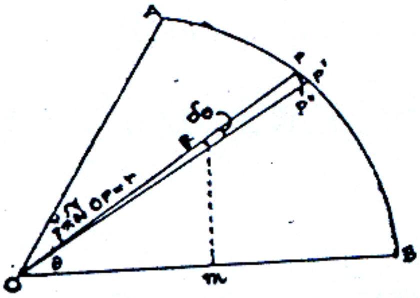
“ 3 ………………… 13920 “



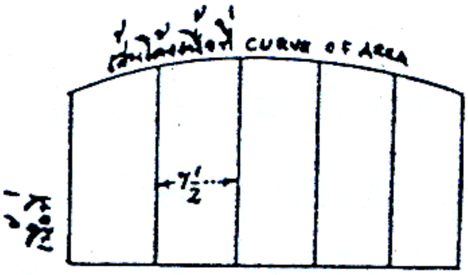
รูปที่ 14 แสดงการใช้กฎห้า-แปด
(FIVE-EIGHT RULE)



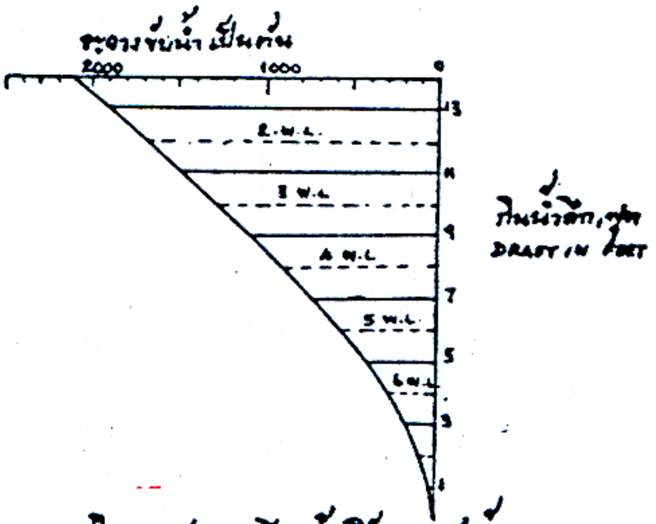
รูปที่ 15 การหาพื้นที่ภายใต้เส้นโค้ง
โดยวิธีแคลคูลัส



รูปที่ 16 การหาพื้นที่ที่ล้อมรอบด้วย
เส้นโค้งตามพิกัดรัศมี 2 เส้น.



รูปที่ 17 การหาปริมาตรภายใต้เส้นโค้งเนื้อที่



รูปที่ 18 แสดงการเขียนเส้นโค้งระวางขับน้ำ
(DISPLACEMENT CURVE)

"	4	…………………	25160	"
"	5	…………………	10920	"
"	6	…………………	17280	"
"	7	…………………	2610	"

ระยะน้ำเฉลี่ย Mean Draught ถึง L.W.L 140 " ระวางขับน้ำใต้ระดับน้ำต่ำสุด 71 ตัน จงสร้างเส้นโค้งระวางขับน้ำ

วิธีทำ (1) หาระวางขับน้ำ ถึง L.W.L. โดยซิมสันที่ 1

แนวน้ำ	เนื้อที่แนวน้ำ	ตัวคูณซิมสัน	ฟังชันปริมาตร
1	7800	1	7800
2	7450	4	29800
3	6960	2	13920
4	6290	4	25160
5	5460	2	10920
6	4320	4	17280
7	2610	1	2610

ผลรวมฟังชันปริมาตร = 107,490

ปริมาตรขับน้ำ = 1/3 x h x ผลรวมฟังชัน

= 1/3 x 2 x 107.490 ลบ.ฟุต

ระวางขับน้ำ = 1/3 x 2 x 107.490 x 1/35

= 2047 ตัน ไม่คิดเศษ

(2) ต่อไปหาระวางขับน้ำถึง 2 W.L. โดยหาระวางขับน้ำระหว่าง L.W.L. 2 W.L………

แล้วหักออกจากระวางขับน้ำทั้งหมด โดยใช้สูตร กฎห้า – แปด

เนื้อที่แนวน้ำ	ตัวคูณ	ฟังชันปริมาตร
7800	5	39,000
7450	8	59,600
6960	-1	- 6960

ผลบวกฟังชันปริมาตร 91,640

ปริมาตร = 1/12 x 91,640 x 2 ลบ.ฟุต

ระวางขับน้ำ = 1/12 x 91,640 x 2 x 1/35

= 436 ตัน ไม่คิดเศษ

ระวางขับน้ำเมื่อลอยอยู่แนวน้ำ 2. W.L.

= 2047.4 – 436 = 1611 ตัน

(3) หาระวางขับน้ำถึงแนวน้ำที่ 3 W.L. โดยใช้กฎซิมสันที่ 1

เนื้อที่แนวน้ำ	ตัวคูณ	ฟังชันปริมาตร
7800	1	7800
7450	4	29800
6960	1	6960

ผลรวมฟังชันปริมาตร 44,560

ระวางขับน้ำ = 1/3 x 2 x 44,560 x 1/35 = 848 ตัน

ระวางขับน้ำเมื่อเรือลอยอยู่แนวน้ำ 3 W.L. = 2047 – 848 ตัน

= 1199 ตัน

(4) หาระวางขับน้ำที่ 4 W.L. โดยใช้กฎซิมสันที่ 2 ใช้แนวน้ำ 4, 5, 6, และ 7W.L.

เนื้อที่แนวน้ำ	ตัวคูณซิมสัน	ฟังชันปริมาตร
7800	1	7800
7450	3	22350
6960	3	22880
6290	1	6290

ผลรวมฟังชันปริมาตร 57320

ระวางขับน้ำระหว่าง = 3/8 x 2 x 57320 x 1/35

= 1228 ตัน

ระวางขับน้ำเมื่อเรือลอย ณ แนวน้ำ = 2047 – 1228

= 819 ตัน

(5) หาระวางขับน้ำเมื่อเรือลอยถึงแนวน้ำที่ 5, ใช้แนวน้ำ 5, 6, 7, ใช้ซิมสันที่ 1

เนื้อที่แนวน้ำ	ตัวคูณ	ฟังชันปริมาตร
5460	1	5460
4320	4	17280
2610	1	2610

ผลรวมฟังชันปริมาตร 25350

ระวางขับน้ำ ณ แนวน้ำ 5W.L. = 1/3 X 2 X 25350 X 1/35 ตัน

= 482 ตัน

(6) หาระวางขับน้ำเมื่อเรือลอย ณ แนวน้ำ 6 W.L. ใช้กฎ ห้า – แปด

เนื้อที่แนวน้ำ	ตัวคูณ	ฟังชันปริมาตร
2610	5	13050
4320	8	34560
5460	-1	-5460

ผลรวมฟังชันปริมาตร 42150

ระวางขับน้ำเมื่อเรือลอย ณ แนวน้ำ 6 W.L. = 1/12 x 2 x 42150 x 1/35

= 200 ตัน

รวมผลลัพธ์ข้างบนและบวกด้วยระวางขับน้ำใต้แนวน้ำต่ำสุด 71 ตัน

ระวางขับน้ำ ณ แนว 1 W.L. …… 2074 + 71 = 2145 ตัน

“ “ 2 W.L. ……. 1611 + 71 = 1682 “

“ “ 3 W.L. ……. 1199 + 71 = 1270 “

“ “ 4 W.L. ……. 819 + 71 = 890 “

“ “ 5 W.L. ……. 482 + 71 = 553 “

“ “ 6 W.L. ……. 200 + 71 = 271 “

“ “ 7 W.L. ……. + 71 = 71 “

ต่อจากนี้นำมาเขียนเส้นโค้งระวางขับน้ำ ดูรูปที่ 18 การเขียนนั้นใช้ระยะในทางดิ่งเป็นระยะกินน้ำลึกซึ่งหมายถึงกินน้ำลึกเฉลี่ย ทางระดับใช้เป็นระวางขับน้ำ ทั้งหมดนี้ต้องย่อลง โดยใช้มาตราส่วนย่อลง เพื่อให้รูปเล็กกระทัดรัดเข้ากับหน้ากระดาษ

4. จำนวนตันที่ทำให้เรือจมลง 1 นิ้ว (Tons Per Inch Immersion)

มีความจำเป็นอยู่เสมอที่จะต้องทราบว่าเรือจมลงไปอีกเท่าใด เมื่อได้เอาน้ำหนักบรรทุกลงไปในเรือ หรือเรือจะลอยขึ้นอีกเท่าใด เมื่อเอาน้ำหนักขึ้นจากเรือ โดยที่ทราบแล้วว่าน้ำหนักระวางขับน้ำที่เพิ่มขึ้นจากระวางขับน้ำเดิม จึงเป็นน้ำหนักของ ๆ ที่บรรทุกลง

ถ้า A เป็นเนื้อที่แนวหน้า ตร.ฟุต

ดังนั้นปริมาตรระวางขับน้ำของพื้นที่แนวน้ำหนา 1 ฟุต

$= A \times 1$ ลบ.ฟุต

$= \frac{A}{35}$ ตัน น้ำเค็ม

ถ้าหนา 1 นิ้ว $= \frac{A}{35 \times 12}$ ตัน $= \frac{A}{420}$ ตัน

น้ำหนัก $\frac{A}{420}$ ตัน เป็นน้ำหนักที่ทำให้เรือจมหรือลอย 1 นิ้ว ในทำนองเดียวกัน ถ้าเราทราบจำนวนนตันที่ทำให้เรือจม 1 นิ้ว ในแนวน้ำอื่นเราก็สามารถที่จะทำหรือสร้าง เส้นโค้งจำนวนตันที่ทำให้เรือจม 1 นิ้วได้ เช่นเดียวกันกับเส้นโค้งระวางขับน้ำ

วิธีสร้างที่แนวน้ำ L.W.L. มีเนื้อที่แนวน้ำ 7800 ตร.ฟุต

(1) จำนวนตันที่ทำให้เรือจมลง 1 นิ้ว 1 W.L. = $\frac{7800}{35 \times 12}$ = 18.6

(2) 〃 〃 〃 2 W.L. = $\frac{7450}{35 \times 12}$ = 17.7

(3) 〃 〃 〃 3. W.L. = $\frac{6960}{35 \times 12}$ = 16.6

(4) 〃 〃 〃 4 W.L. = $\frac{6290}{35 \times 12}$ = 14.9

(5) 〃 〃 〃 5 W.L = $\frac{5460}{35 \times 12}$ = 13

(6) 〃 〃 〃 6 W.L = $\frac{4320}{35 \times 12}$ = 10.2

(7) 〃 〃 〃 7 W.L = $\frac{2610}{35 \times 12}$ = 6.2

จากน้ำนำมาเขียนเส้นโค้งจำนวนตันที่ทำให้เรือจม 1 นิ้ว ดูปรูปที่ 19 อ่านจำนวนตันทำให้เรือจม 1 นิ้วได้ 17 ½ ตัน ณ ที่แนวน้ำเฉลี่ย 11 ฟุต เมื่อยกน้ำหนักขึ้น 100 ตัน เรือจะลอยขึ้น = 100 17 ½ นิ้ว

= 5 ¾ นิ้ว (ใกล้เคียง)

5. เส้นโค้งเนื้อที่หน้าตัดกลางลำ (Midship Section Area Curve)

เส้นโค้งนี้เขียนขึ้นได้เช่นเดียวกับ เส้นโค้งระวางขับน้ำ หรือเส้นโค้งจำนวนตัน ทำให้เราจม 1 นิ้ว เรารู้ระยะออร์ดิเนตของส่วนที่จมกลางลำ จึงสามารถหาเนื้อที่หน้าตัดกลางลำ ถึงแนวน้ำนั้น ๆ ได้แน่นอน เช่นเดียวกับการหาระวางขับน้ำที่กล่าวมาแล้ว เนื้อที่นี้นำมาเขียนลงโดยทางระดับแทนเนื้อที่ รอยตัดกลางเป็นตารางฟุต และทางดิ่งแทนระดับน้ำ แล้วลากเส้นโค้ง ๆ นี้ให้ชื่อว่า “เส้นโค้งเนื้อที่รอยตัดกลางลำ “

6. ความแตกต่างของแนวน้ำเมื่อลอยอยู่ในน้ำเค็มและน้ำจืด

เนื่องจากความแน่นของน้ำทะเลมากกว่าความแน่นของน้ำจืดหรือน้ำหนักใน 1 คิวบิกฟุตของน้ำจืด (36 ลบ.ฟุต หนัก 1 ตัน) หนักน้อยกว่าน้ำหนักใน 1 คิวบิคฟุตของน้ำทะเล (35 ลบ.ฟุต หนัก 1 ตัน) น้ำหนักของเรือจะอยู่ในน้ำทะเลหรือน้ำจืดก็ตามต้องเท่ากัน น้ำหนักของเรือเมื่อแล่นเข้ามาในน้ำจืดไม่เปลี่ยนแปลง คือเท่าเดิม ดังนั้นเรือจึงต้องแทนที่ปริมาตรน้ำจืดมากกว่าเมื่อมันแทนที่ปริมาตรน้ำทะเล นั่นคือเพิ่มระดับน้ำขึ้นเมื่อแล่นเข้าน้ำจืด

ให้ $\triangle$	=	น้ำหนักของเรือเป็นตัน
T	=	จำนวนตันที่ทำให้เรือจม 1 นิ้ว
t	=	ผลต่างของแนวน้ำเป็นนิ้ว
1 ตัน	=	2240 ปอนด์
$\triangle$ ตัน	=	2240 x $\triangle$ ปอนด์

น้ำจืดหนัก 63 ปอนด์ใน 1 ลบ.ฟุต

“ 2240 $\triangle$ “ “ $\frac{2240}{63}\triangle$ ลบ.ฟุต

น้ำทะเล 2240 $\triangle$ “ “ $\frac{2240\triangle}{64}$ ลบ.ฟุต

ความต่างกันของปริมาตร $\frac{2240\triangle}{63} - \frac{2240\triangle}{64} = \frac{2240\triangle}{64 \times 63}$ ....(1)

และปริมาตรที่ต่างกันนี้คิดเมื่อจมไป t นิ้ว

เมื่อเรือจมลง t นิ้ว น้ำหนักเพิ่ม = T x t ตัน

น้ำทะเล 1 ตัน ใน 35 ลบ.ฟุต

“ T x t ตัน ใน 35 x T x t ลบ.ฟุต ....(2)

สมการ (1) = (2) $35 \times T.t = \dfrac{2240\,\Delta}{64 \times 63}$

$$t \text{ นิ้ว} = \frac{\Delta}{63\,T}$$

ในที่นี้ใช้น้ำหนักคิวของน้ำทะเล 64 ปอนด์ต่อ 1 ลบ.ฟุต และใช้น้ำหนักน้ำจืด 63 ปอนด์จึงลบกันเหลือ 1 ตรงตัว จึงได้สูตร $t = \dfrac{\Delta}{63\,T}$ ถ้าเราใช้น้ำหนักคิวน้ำจืดเป็น 62.25 เราจะได้ตัวเลขที่หารเปลี่ยนไปอย่างในหนังสือของท่าน แมนนิ่ง (Goerge C. Manning) เราจะได้

$t = \dfrac{\Delta}{38389}$ ซึ่งมีค่าคล้ายกัน

สำหรับน้ำทะเลดำ $t = \dfrac{\dfrac{(35390 - 35)\Delta}{W}}{35\,T}$ …………………..(3)

สำหรับกฎคำนวณแนวน้ำบรรทุก (Load Line Regulation) ให้สูตรไว้ดังนี้.-

$$t = \frac{\Delta}{40\,T} \qquad \text{.................................. (4)}$$

$$t = \frac{H}{4} \qquad \text{.................................. (5)}$$

ซึ่งมีถึง 5 สูตร จะใช้สูตรใดก็ได้

ตัวย่อมีความหามายดังต่อไปนี้ .- t = ผลต่างของแนวน้ำ เป็นนิ้ว

$\triangle$ = ระวางขับน้ำ เป็นตัน

W = ความถ่วงจำเพาะของน้ำทะเลดำ 1.00 – 1.026

H = กินน้ำลึก เป็นฟุต

ตัวอย่าง เรือลำหนึ่งมีระวางขับน้ำเต็มที่ 15.950 ตัน เมื่อกินน้ำลึก 28 ฟุต 7 ½ นิ้ว จำนวนตันทำให้เรือจม 6 นิ้ว = 56 จงหาว่าระดับน้ำเมื่ออยู่ในน้ำจืด สูงจากระดับน้ำเดิม เมื่ออยู่ในน้ำทะเลเท่าใด

$$t = \frac{\Delta}{38.89\,T} = \frac{15950}{38.89 \times 51} = 8.04 \text{ นิ้ว}$$

หรือ $t = \dfrac{\Delta}{40T} = \dfrac{15950}{40 \times 51} = 7.82$ นิ้ว

หรือ $t = \dfrac{H}{4} = \dfrac{28'\ 71/2''}{40 \times 51} = 7.16$ นิ้ว

หรือ $t = \dfrac{}{63T} = \dfrac{15950}{63 \times 51} = 4.9$ นิ้ว

7. การจมของเรือเนื่องจากห้องกลางลำรั่ว

พิจารณาถึงเรือรูปทรงหีบสี่เหลี่ยม ABCD ลอยอยู่แนวน้ำ WL เรือลำนี้มีฝากั้นทางขวาง ชนิดผนึกน้ำได้สองฝา คือ EF กับ GH เรือเกิดรั่วขึ้นในห้องระหว่างฝากั้นนี้ เรือจะจมลงอยู่แนวน้ำ W′ L′ เรือนี้มีรายการดังต่อไปนี้ ดูรูปที่ 22

เรือยาว ………………….. ….. 100 ฟุต

กว้างเส้นขอบ ………………. 20 ฟุต

ลึกเส้นขอบ …………………. 20 ฟุต

กินน้ำลึก ……………………. 10 ฟุต

ฝากั้นห่างกัน ……………….. 20 ฟุต

แนวน้ำใหม่ ………………… d ฟุต

สมมติว่าเรือนี้ลอยอยู่ในทะเล เรือลำนี้จะมีระวางขับน้ำคิดเป็นลูกบาศก์ฟุต ก่อนรั่ว

$= 10 \text{ x } 20 \text{ x } 10$ ลบ.ฟุต

$= \dfrac{100 \times 20 \times 10}{35} = \dfrac{4000}{7}$ ตัน

ต่อมาเรือได้เกิดรั่วขึ้น ทำให้เรือเสียความลอยตัว จมลงไปยังแนวน้ำใหม่ W′ L′ มีวิธีคิดสองวิธี วิธีแรกโดยถือหลักว่าระวางขับน้ำหรือความลอยของเรือก่อนหรือหลังเรือทะลุ ย่อมคงที่เท่าเดิม

ปริมาตรขับน้ำใหม่ = ปริมาตร W′MFD + ปริมาตร L MHC

$= (40 \text{ x } 20 \text{ x } d) + (40 \text{ x } 20 \text{ x } d)$

$= 1600\ d$

จากกฎที่ว่าระวางขับน้ำ หรือปริมาตรระวางขับน้ำก่อนและหลังเรือรั่วย่อมเท่ากัน

ฉะนั้น $1600\,d = 100 \text{ x } 20 \text{ x } 10$

$d = \dfrac{100 \times 20 \times 10}{1600} = 12'\ 6''$

เรือจมลงไปอีก $= (12' - 6'') - (10' - 0'') = 2' - 6''$

อีกวิธีหนึ่ง คิดโดยใช้หลักของการสูญเสียความลอย (Lost Buoyancy)

ความลอยที่สูญเสีย = แนวน้ำคงสมบูรณ์ x แนวน้ำที่เพิ่มขึ้น (x ฟุต)

$20 \times 20 \times 10 = \{ (20 \times 40) + (20 \times 40) x \}$

$= 20 \times 40 \times 2x = 1600 x$

$\frac{20 \times 20 \times 10}{1600} = X = 2\ ½'$

ถ้าในห้องที่รั่วนี้มีสินค้าอยู่ จำนวนน้ำที่รั่วเข้าไปในเรือจะน้อยกว่าน้ำที่รั่วเข้าไปในห้องซึ่งไม่มีอะไรอยู่เลย จะหาได้โดยปริมาตรของห้องซึ่งสูงถึงแนวน้ำเดิม ลบด้วยปริมาตรของสินค้า สมมติว่าห้องที่รั่วตามตัวอย่างที่กล่าวมาแล้วข้างบน มีถ่านหินชนิด 44 ลบ.ฟุต ต่อ 1 ตัน บรรจุอยู่ ถ้าน้ำหนักของถ่านหินชนิดไม่มีรอยพรุนเลย หนัก 80 ปอนด์ ต่อ 1 ลบ.ฟุต

1 ลบ.ฟุต ของถ่านหินชนิดไม่มีรอยพรุน หนัก 80 ปอนด์

1 ลบ.ฟุต ของถ่านหินที่อยู่ในห้องรั่วหนัก หนัก $\frac{2240}{44}$ ปอนด์ = 51 ปอนด์

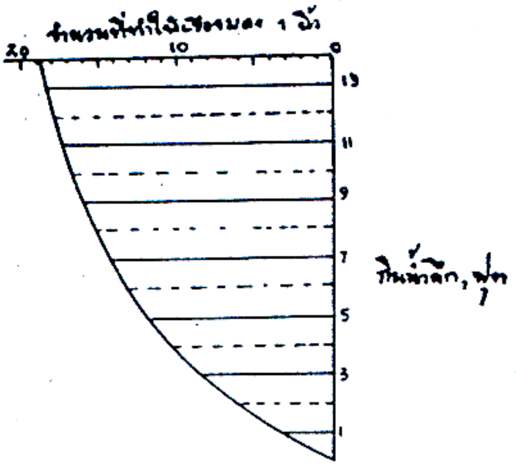
ใน 80 ปอนด์ เป็นน้ำหนักถ่านหินจริง 51 ปอนด์ ซึ่งน้ำเข้าไม่ได้ และเป็นน้ำที่เข้าได้เสีย $80 - 50 = 29$ ปอนด์ ฉะนั้น $\frac{29}{80}$ ของปริมาตรของห้องที่รั่ว เป็นส่วนที่เสียความลอย

ปริมาตรของ29 ห้องที่รั่ว $= 20 \times 10 \times 20 = 4000$ ลบ.ฟุต

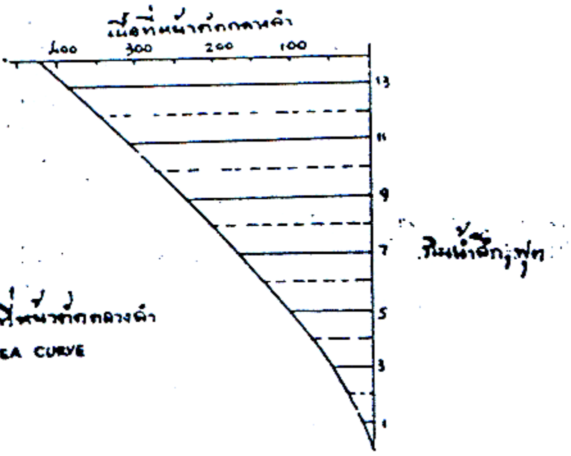
ความลอยที่เสีย ๆ $= \frac{29}{80} \times 4000 = 1450$ ลบ.ฟุต

เนื้อที่แนวน้ำภายในห้องทะลุ KMNP ตอนบน = ห่างฝากั้น x กว้าง

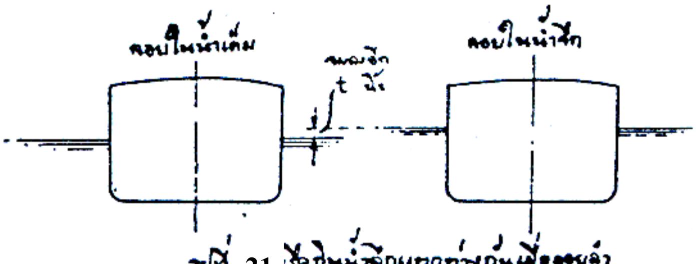
$= 20 \times 20$ ตร.ฟุต



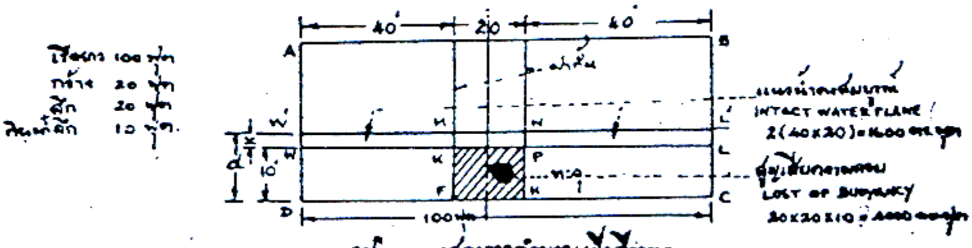
รูปที่ 19 แสดงการเขียนเส้นโค้งบอกจำนวนตันที่ทำให้เรือจมลง 1 นิ้ว (TONS PER INCH IMMERSION , T/IN)



รูปที่ 20
เส้นโค้งเนื้อที่หน้าตัดกลางลำ
MIDSHIPSECTION AREA CURVE



รูปที่ 21 เรือกินน้ำลึกแตกต่างกันเมื่อลอยลำอยู่ในน้ำที่มีความเค็มต่างกัน.



รูปที่ 22 แสดงการคำนวณเมื่อเรือทะลุ

$\therefore \frac{51}{80}$ ของเนื้อที่แนวน้ำคงสมบูรณ์ของเนื้อที่ KMNP $= \frac{51}{80} \times 20 \times 20$

= 255 ตร.ฟุต

รวมเนื้อที่แนวน้ำคงสมบูรณ์ $= W'W'MKW + L'NPL + 225$ ตร.ฟุต

$= (40 \times 20) \times (40 \times 20) + 255$ „

$= 1600 + 255$

$= 1855$

ปริมาตรคงสมบูรณ์ = 1855 X ลบ.ฟุต

กฎปริมาตรความลอยที่สูญเสีย = ปริมาตรความลอยคงสมบูรณ์

1450 = 1855 x

ส่วนที่จมลงไปอีก X $= \frac{1450}{1855} = 9.36$ นิ้ว

ต่อไปจะได้กล่าวถึงเรือรั่วที่ไม่ตรงแนวกลางลำ เช่นดังกล่าว จะเกิดการเปลี่ยนทริมด้วย

8.3 โมเมนท์ จุดศูนย์ถ่วง, จุดศูนย์กลางความลอย , ตารางคำนวณระวางขับน้ำ

1. หลักของโมเมนท์ (Principle Of Moment)

โมเมนท์ของแรงรอบเส้นตรงเส้นหนึ่ง คือผลคูนของแรงกับระยะทางตั้งฉากแนวแรงไปยังเส้นตรงเส้นนั้น (เส้นแกน) ดูรูปที่ 23

โมเมนท์ของแรง P รอบแกน O = P x D ฟุต ปอนด์ ถ้ามีแรง P' เพิ่มขึ้นอีก

โมเมนท์ของแรง P' รอบแกน O = $(P' \times D') + (P \times D)$ ฟุต ปอนด์ ซึ่ง

จะเท่ากับน้ำหนักที่ยก x ระยะทาง = w. a

$$w.a = (P' \times D') + (P \times D)$$

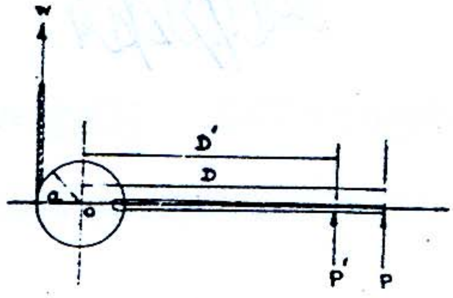
ผลบวกของโมเมนท์ของน้ำหนักต่าง ๆ รอบจุด o ดูรูปที่ 24

$$O = (w_1 \times OA) + (w_2 \times OB) + (w_3 \times OC)$$

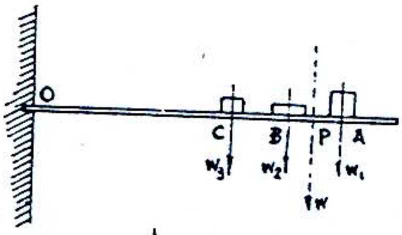
ถ้า $w = w_1 + w_2 + w_3$ สมมติให้อยู่ห่างจากจุด O เป็นระยะทาง OP

$\therefore w \times OP = (w_1 \times OA) + (w_2 \times OB) + (w_3 \times OC)$

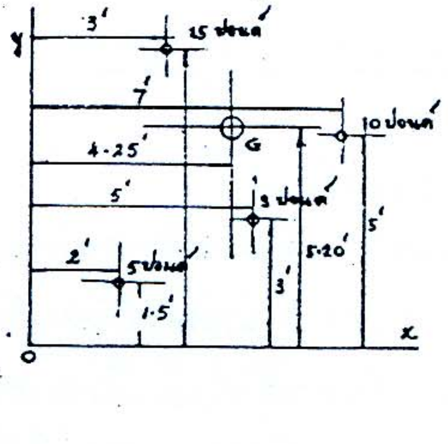
$$OP = \frac{(W_1 \times OA) + (W_2 \times OB) + (W_3 \times OC)}{W}$$



รูปที่ 23 โมเมนท์ MOMENT



รูปที่ 24 โมเมนท์ MOMENT



รูปที่ 25 จุดศูนย์ถ่วง CENTER OF GRAVITY

2. จุดศูนย์ถ่วง (Center Of Gravity)

ตามตัวอย่างข้างบน ถ้าน้ำหนัก w จำนวนเดียววางที่ตำแหน่ง P มีผลเท่ากันกับผลที่เกิดจากหนัก w_1 w_2 w_3 วางที่ A, B, C, และจุด P นั่นเรียกว่าจุดศูนย์ถ่วง (C. G.) ของน้ำหนัก w_1 w_2 w_3 ฉะนั้นจุดศูนย์ถ่วงของน้ำหนัก คือจุดหนึ่งอันเป็นที่รวมของน้ำหนักทั้งหมด ซึ่งใช้กับวัตถุทรงตันได้เช่นกัน เพราะวัตถุทรงตันประกอบด้วยอนุมากมาย ซึ่งมีน้ำหนักและตำแหน่ง เมื่อรวมกันเข้าก็มีจุด ๆ หนึ่งซึ่งเป็นศูนย์กลางความถ่วงของวัตถุนั้น

จงหา C. G. ของน้ำหนักซึ่งวางบนพื้นราบ ตามรูปที่ได้แสดงไว้นั้น เป็นโต๊ะกลมมีขาต้องการเอาขาออกใช้เชือกแขวน จุดใดจะเป็นจุดที่ใช้แขวนโดยโต๊ะไม่เอียง ดูรูปที่ 25

รูปภาพ

$w = 15 + 5 + 3 + 10 = 33$

โมเมนท์ของน้ำหนักรอบแกน OX ระยะห่างจาก OX ดูรูปที่ 25

$$= \frac{(15\times7)+(5\times3/2)+(3\times3)+(10\times5)}{33}$$

= 5.2 ฟุตจาก ox

แต่ยังไม่ทราบห่างจาก oy เท่าใด

โมเมนท์รอบแกน oy $= \dfrac{(15\times3)+(5\times2)+(3\times5)+(10\times7)}{33}$

ระยะห่างจาก oy = 4.25 ฟุต

∴ จุดศูนย์ถ่วงที่ใช้แขวนห่างจากแกน ox = 5.2 ฟุต

oy = 4.25 ฟุต

2.1 จุดศูนย์ถ่วงของรูปสามเหลี่ยมอยู่ที่จุดตัดของเส้นทะแยงมุมทั้งสอง หรืออยู่ที่ 1/3 ของเส้นมีเดียนนับจากฐาน (ดูรูปที่ 26)

2.2 จุดศูนย์ถ่วงของรูปสี่เหลี่ยมใด ๆ มีวิธีหาได้ 2 วิธี คือ.-

(1) ตามในรูปที่ 27 ABCD เป็นรูปสี่เหลี่ยมใด ลาก AC เส้นทะแยงมุมแล้วหาจุดศูนย์ถ่วง C.G. ของรูปสามเหลี่ยมทั้งสองตามข้างบนจุดศูนย์ถ่วงจะอยู่บนเส้น EF ลาก DB แล้วหาจุดศูนย์ถ่วงของรูปสามเหลี่ยมทั้งสองตามวิธีข้างบนจุดศูนย์ถ่วงจะอยู่บน

จุดตัดของ EF และ HK คือที่จุด G

(2) อีกวิธีหนึ่งที่สะดวกกว่า (ดูรูปที่ 28) ให้ ABCD เป็นรูปที่ต้องการหาจุดศูนย์ถ่วง ลากเส้นทะแยงมุม AC และ DB ตัดกันที่ E, EC ยาวกว่า AE, DE ยาวกว่า EB ตัด EC = AE ที่ H ตัด DE = EB ที่ F ลาก FH ที่จุดศูนย์ถ่วงจะอยู่ที่ 1/3

ของเส้น มีเดียน นับจากฐาน

2.3 จุดศูนย์ถ่วงของพื้นที่ราบภายใต้เส้นโค้ง ให้ AEDO (ดูรูปที่ 30) เป็นรูปพื้นที่ราบของส่วนหนึ่งเป็นเส้นโค้ง AE มีความประสงค์จะหาจุดศูนย์ถ่วงของเนื้อที่นี้โดยสัมพันธ์กับออร์ดิเนต OA

วิธีทำ (1) หาโมเมนท์ของเนื้อที่ทั้งหมดรอบแกน OA

(2) หารด้วยเนื้อที่ทั้งหมดจะได้จุดศูนย์ถ่วงจาก OA

กำหนด PQ ซึ่งมีระยะทางระดับจาก 0 = x

แล้วลากเส้นขนานกับ PQ ให้กว้าง x

∴ เนื้อที่สี่เหลี่ยมเล็ก = y. σ x

และโมเมนท์ของเนื้อที่ y. σ x จึงเป็น (y. σ x) x

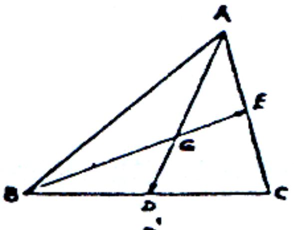
หรือโมเมนท์ทั้งหมดรอบ OA = σ x, y dx

คำนวณหาโมเมนท์เนื้อที่โดยกฎซิมสัน โดยเปรียบเทียบ x.y. เท่ากับ y

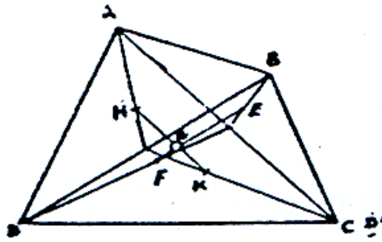
ระยะช่วงห่างกันของออร์ดิเนตที่แบ่ง = h

ตัวอย่าง เนื้อที่หน้าตัดกลางลำ มีครึ่งความกว้างห่างกัน 1 ฟุต 6 นิ้ว เริ่มแต่แนวน้ำบรรทุกมีความยาว 8.60 – 8.10 – 6.95 – 4.90 – 2.75 – 1.50 – 0.70 ฟุต ตามลำดับ จงหาเนื้อที่ของหน้าตัด และระยะจุดศูนย์ถ่วง จากแนวน้ำบรรทุก

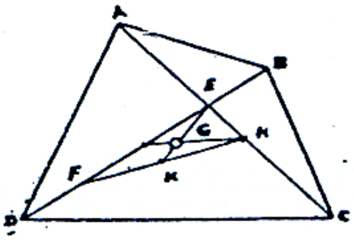
จำนวน ออร์ดิเนต	ความยาว ออร์ดิเนต	ตัวคูณ ซิมสัน	ฟังชันเนื้อที่	ตัวคูณ สำหรับโมเมนท์ จาก ออร์ดิเนต เส้นที่ 1	ฟังชันโมเมนท์
1	8.60	1	8.60	0	0
2	8.10	4	32.40	1	32.40
3	6.95	2	13.90	2	27.80
4	4.90	4	19.60	3	58.80
5	2.75	2	5.50	4	22.00
6	1.50	4	6.00	5	30.00
7	0.70	1	0.70	6	4.20



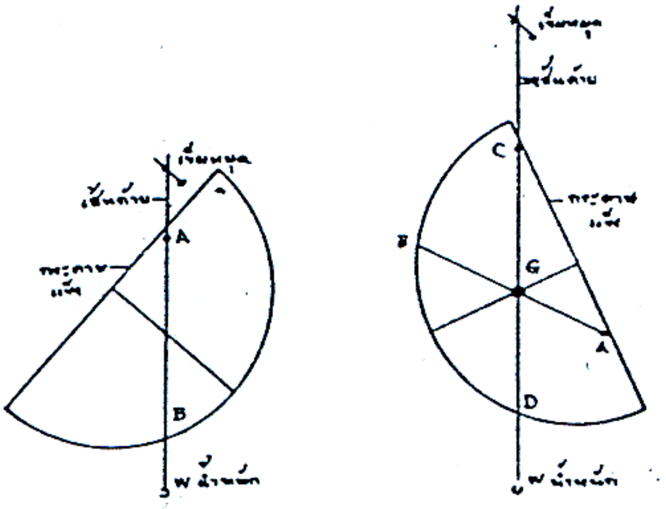
รูปที่ 26



รูปที่ 27

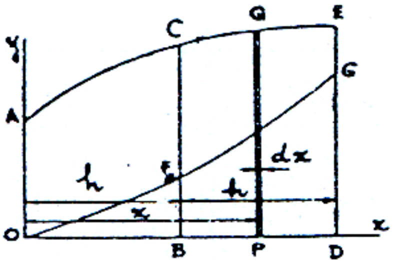


รูปที่ 28

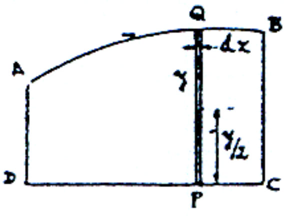


รูปที่ 29

การหาจุดศูนย์ถ่วงของรูปต่าง ๆ โดยเฉพาะรูป (ข) เป็นการหาจุดศูนย์ถ่วงด้วยการทดลอง (BY EXPERIMENT) ในรูป (ก) แขวนกระดาษซึ่งตัดขนาดตามรูปที่ต้องการ ใช้น้ำหนัก W ถ่วงให้เชือกดิ่ง แขวนให้รูปหมุนอิสระที่ A จุดศูนย์ถ่วงจะอยู่บนเส้น AB แล้วทำการแขวนตามรูป (ข) อีกครั้งหนึ่งให้รูปหมุนอิสระที่ C จุดศูนย์ถ่วงจะอยู่บนเส้น CD นั่นคืออยู่ที่จุด G ซึ่งเป็นจุดตัดของ AB และ CD.



รูปที่ 30 จุดศูนย์ถ่วงของพื้นที่ราบใต้เส้นโค้ง ACQE และโมเมนต์รอบแกนทางดิ่ง OY



รูปที่ 31 จุดศูนย์ถ่วงของพื้นที่ราบใต้เส้นโค้ง AQB และโมเมนต์รอบแกนทางนอน หรือฐาน CD หรือแอบซิสซา (ABSCISSA)

ผลรวมฟังชันเนื้อที่ 86.70 ผลรวมฟังชันโมเมนท์ 175.20

เนื้อที่ครึ่งหนึ่ง = 1/3 x 1 ½ x 86.70 = 43.35 ตร.ฟุต

เนื้อที่หน้าตัดทั้งหมด = 43.35 x 2 ตัน = 86.70 ตร.ฟุต

โมเมนท์ของครึ่งเนื้อที่รอบแนวน้ำบรรทุก = 175.20 x (1/3 x 1 ½) x 1 ½

= 43.80 x 3 = 131.40

ระยะจุดศูนย์ถ่วงของครึ่งเนื้อที่จากแนวน้ำบรรทุก = $\frac{\text{โมเมนท์เนื้อที่}}{\text{เนื้อที่}}$ = $\frac{131.0}{86.70}$

= 3.03 ฟุต

หรือจะทำเป็นเนื้อที่ทั้งหมดกับโมเมนท์ทั้งหมดก็ได้ผลเท่ากัน เมื่อต้องการจะหาศูนย์ถ่วงของเนื้อที่ใหญ่ เช่นเนื้อที่แนวน้ำของเรือ ปกติใช้หาโมเมนท์รอบเส้นออร์ดิเนตเส้นกลาง วิธีทำนี้ทำให้งานง่ายขึ้นอย่างมาก

ตัวอย่าง ระยะครึ่งออร์ดิเนตของแนวน้ำบรรทุกของเรือยาว 395 ฟุต เริ่มจากหัวเรือมีค่า 0- 10.2 – 20.0 – 27.4 – 32.1 – 23.0 – 33.8 – 31.7 – 27.6 – 9.4 ฟุต ตามลำดับจงหาเนื้อที่ของแนวน้ำบรรทุกและระยะห่างของจุดศูนย์ถ่วงจากออร์ดิเนตเส้นกลาง

ถ้ามีเนื้อที่ต่อไปทางท้ายอีก 153 ตร.ฟุต และเนื้อที่นี้มีจุดศูนย์ถ่วงห่างจากเส้นออร์ดิเนตสุดท้าย 5.6 ฟุต จงหาเนื้อที่แนวน้ำนี้ทั้งหมด และจุดศูนย์ถ่วงของเนื้อที่แนวน้ำทั้งหมด

จำนวนออร์ดิเนต	ความยาวครึ่งออร์ดิเนต	ตัวคูณซิมสัน	ฟังชันเนื้อที่	ตัวคูณสำหรับโมเมนท์จากเส้นออร์ดิเนตเส้นกลาง	ฟังชันโมเมนท์
1	0	1	0	5	0
2	10.20	4	40.80	4	163.20
3	30.00	2	40.00	3	120.00
4	27.40	4	109.60	2	219.20
5	32.10	2	64.20	1	64.20
					566.60
6	34.00	4	136.00	0	0
7	33.8	2	167.60	1	67.60
8	31.7	4	126.80	2	253.60
9	27.6	2	55.20	3	165.60
10	20.6	4	82.40	4	329.6
11	9.4	1	9.40	6	47.00

ผลรวมฟังชันเนื้อที่ 732.00 ผลรวมฟังชันโมเมนท์ 863.40

เนื้อที่ของแนวน้ำบรรทุกครึ่งหนึ่ง = 1/3 x 39.5 x 732 = 9638.06 ตร.ฟุต

เนื้อที่ทั้งหมดของแนวน้ำบรรทุก = 9638 x 2 = 19,276 ตร.ฟุต

เนื้อที่ทั้งหมดของแนวน้ำบรรทุก กับเนื้อที่ต่อท้าย = 19,276 + 153 ตร.ฟุต

= 19,429 ตร.ฟุต

จากช่อง 5 ทำให้เกิดเป็นฟังชันโมเมนท์ของส่วนตอนหัว = 566.6

และตอนท้าย = 863.4

ฟังชันโมเมนท์ที่เกินไปทางท้าย = 863.4 - 566.6 = 296.8

∴ โมเมนท์ของเนื้อที่ = (1/3 x 39.5 x 296.8) x (39.5)

ระยะของจุดศูนย์ถ่วงห่างจากออร์ดิเนตเส้นกลางไปทางท้ายเรือ

$$= \frac{\text{โมเมนท์ของเนื้อที่}}{\text{เนื้อที่}}$$

$$= \frac{(1/3 \times 39.5 \times 296.8) \times 39.5}{1/3 \times 39.5 \times 732}$$

$$= \frac{296.8 \times 39.5}{732} = 16.01$$

ให้จำตรงนี้ไว้เพราะในขั้นต่อไปต้องทำอย่างนี้ โดยถือว่าเข้าใจมาแล้ว คือการหาจุดศูนย์ถ่วงนั้นจะเท่ากับผลรวมฟังชันของโมเมนท์คูณด้วยระยะห่างของออร์ดิเนต หารด้วยผลรวมฟังชันเนื้อที่

∴ จุดศูนย์ถ่วงของเนื้อที่ต่อท้ายห่างจากออร์ดิเนตเส้นกลางไปทางท้าย

$$= \frac{395}{2} + 5.6 \text{ ฟุต}$$

$$= 203.1 \text{ ฟุต}$$

สมมติให้เนื้อที่ทั้งหมด 19429 ตร.ฟุต นั้นมีจุดศูนย์ถ่วงรวมห่างจากออร์ดิเนตเส้นกลาง x ฟุต

$$19429\, x = (19,276 \times 16.01) + (153 \times 203.1)$$

$$x = \frac{308,609 + 31,074}{19,429} = \frac{339,683}{19,429} = 17.4 \text{ ฟุต}$$

∴ จุดศูนย์ถ่วงรวมของเนื้อที่ทั้งหมดห่างจากออร์ดิเนตเส้นกลาง 17.4 ฟุต

2.4 จุดศูนย์ถ่วงของเนื้อที่ภายใต้เส้นโค้งรอบเส้นฐาน ให้ DABC เป็นเนื้อที่ภายในใต้เส้นโค้งที่เราต้องการ หาจุดศูนย์ถ่วงห่างจากฐาน DC

วิธีทำ คือ ก่อนอื่นเราต้องหาโมเมนท์ของรู้นี้รอบ DC แล้วหารด้วยเนื้อที่ตามที่กล่าวมาแล้วแต่ข้อก่อน (ดูรูปที่ 31) ที่ออร์ดิเนต PQ ลากเส้นขนานมีความกว้าง x

∴ เนื้อที่รูปเล็ก ๆ = y σ x

จุดศูนย์ถ่วงของเนื้อที่เล็ก ๆ นี้สูงจากฐาน DC = ½ y

∴ โมเมนท์ของเนื้อที่เล็ก ๆ = (y. σ x)

โมเมนท์ของเนื้อที่ทั้งหมด = ½ σy^2 dx

ตัวอย่าง ถังถ่านหินตามขวางของเรือยาวนับจากหัวไปท้าย 6 ฟุต ด้านข้างมีฝากั้นตามยาวห่างกัน 34 ฟุต ล้อมรอบอยู่ปากถังเป็นเส้นระดับ ก้นถังเป็นส่วนโค้งมีออร์ดิเนต วัดจากปากถังมีความยาว 12.5- 15.0 – 16.0 – 16.3 – 16.4 – 16.3 – 16.0 – 15.0 – 12.5 ฟุต ตามระดับเส้นแรกและเส้นสุดท้ายเป็นฝากั้น

จงหา (1) จำนวนตันของถ่านหินที่จะบรรจุในถังนี้

(2) จุดศูนย์ถ่วงของถ่านหินห่างจากปากถัง

เมื่อพิจารณาดูออร์ดิเนตสองข้างจะเห็นว่าเหมือนกัน จึงคิดเพียงครึ่งหนึ่ง แล้วเอา 2 คูณภายหลัง

ความยาวของออร์ดิเนต	ตัวคูณซิมสัน	ฟังชันเนื้อที่	ออร์ดิเนตกำลังสอง	ตัวคูณซิมสัน	ฟังชันโมเมนท์
16.4	1	16.4	269	1	269
16.3	4	65.2	266	4	1064
16.0	2	32.0	256	2	512
15.0	4	60.0	225	4	900
12.5	1	12.5	150	1	156

ผลรวมฟังชันเนื้อที่ 186.1 ผลรวมฟังชันโมเมนท์ 2901

ระยะห่างของออร์ดิเนต = $\frac{34}{8}$ = 4.25 ฟุต

เนื้อที่ทั้งหมด = 1/3 $\times$ 4.25 $\times$ 186.1 $\times$ 2 ด้าน

ปริมาตรของถัง = 1/3 $\times$ 4.25 $\times$ 186.1 $\times$ 2 $\times$ 6

= 186.1 $\times$ 17.00

ถ่านหิน 44 ลบ.ฟุต หนัก 1 ตัน

ถ่านหิน 186.1 x 17 ลบ.ฟุต = $\frac{186.1 \times 17}{44}$ = 72 ตัน

โมเมนท์ของครึ่งเนื้อที่ $= \frac{1}{2}$ (1/2 × 4.25 × 2901)

หมายเหตุ ตัวเลข ½ นั้น เป็นตัวประจำของสูตร

จุดศูนย์ถ่วงปากถัง $= \frac{\text{โมเมนท์}}{\text{เนื้อที่}} = \frac{1/2 \times 1/3 \times 4.25 \times 2901}{1/3 \times 4.25 \times 186.0}$

$= \frac{2906}{372.2}$

2.5 จงหาตำแหน่งของจุดศูนย์ถ่วงของเนื้อที่ที่ล้อมรอบด้วยเส้นโค้ง กับรัศมี 2 เส้น เรื่องนี้ได้เรียนมาแล้วถึงเรื่องวิธีหาเนื้อที่ของเนื้อที่ลักษณะนี้ (ดูรูปที่ 16) ให้ OAB เป็นเนื้อที่ที่ล้อมรอบด้วยเส้นโค้ง AB และรัศมี 2 เส้น

คือ OA OB OP = r

มุม OAP = θ

จาก OP' เป็นมุมกว้าง $d\theta$

เนื้อที่ PO P' $= \frac{1}{2}$ x สูง x ฐาน

$= 1/2 . r\ PP'$

แต่ $\frac{PP^1}{r} = d\theta$

$PP' = r. d\theta$

ฉะนั้น เนื้อที่ POP' $= 1/2\, r.\ r\, d\theta$

$= 1/2\, r^2\, d\theta$

ฉะนั้นเนื้อที่ทั้งหมด $= f 1/2\, r^2\ d\theta$

จุดศูนย์ถ่วงของสามเหลี่ยม OP P' อยู่ที่ g = 1/3 r ลาก gm ตั้งฉากกับ OB

$$\frac{gm}{go} = \frac{gm}{\frac{2}{3}r} = \sin\theta$$

$$gm = 2/3r \sin\theta$$

โมเมนท์ของเนื้อที่ OPP' = เนื้อที่ OPP ' x gm

$$= (1/2r^2 \, d\theta)(2/3r \sin\theta)$$

ฉะนั้นโมเมนท์เนื้อที่ทั้งหมด $= 1/3 \; f r^3 \sin\theta$

ซึ่งมีวิธีทำเช่นเดียวกันกับสูตรเนื้อที่ คือ

ตัวอย่าง จงหาจุดศุนย์ถ่วงของเนื้อที่อันล้อมรอบด้วยเส้นโค้งและรัศมี 2 เส้น ซึ่งรัศมี 2 เส้นยาว 10 ฟุต

จำนวน ออร์ดิเนต	ความยาวรัศมี	รัศมีกำลังสอง	ตัวคูณซิมสัน	ฟังชันเนื้อที่	รัศมีกำลังสาม	จำนวนองศาจากรัศมีเส้นแรก	ไซน์ของมุม	ผลคูณ	ตัวคูณซิมสัน	ฟังชันโมเมนท์
1	10	100	1	100	1000	0	0	0	1	0
2	10	100	4	400	1000	15	0.258	258	4	1,032
3	10	100	2	200	1000	30	0.500	500	2	1,000
4	10	100	4	400	1000	45	0.707	707	4	2,828
5	10	100	2	200	1000	60	0.866	866	2	1,732
6	10	100	4	400	1000	75	0.965	965	4	3,800
7	10	100	1	100	1000	90	1.000	1000	1	1,000

ผลรวมฟังชันเนื้อที่ 1,800 ผลรวมฟังชันโมเมนท์ 11,452

มุมเชิงวงกลม $180^{\circ} = 3.1416 = \pi$

มุมเชิงวงกลม $15^{\circ} = \frac{\pi}{180} \times 15 = \frac{3.1416}{12}$

เนื้อที่ $= 1800 \times 1/2 \times (1/3 \times \frac{3.14.6}{12}) = 78.45$ ตร.ฟุต

โมเมนท์ของเนื้อที่รอบรัศมีเส้นแรก $= 11.452 \times 1/3 \times (1/3 \times \frac{3.1416}{12})$

จุดศูนย์ถ่วงห่างจากเส้นแรก $= \dfrac{(11.452 \times 1/3 \times (1/3 \times \frac{3.1416}{12})}{1800 \times 1/2 \times (1/3 \times \frac{3.1416}{12})}$

$= \dfrac{11.452 \times 2}{1800 \times 3} = 4.42$ ฟุต

2.6 การหาจุดศูนย์ถ่วงของวัตถุทรงตันล้อมด้วยเส้นโค้งและพื้นราบ

เราทราบการหาปริมาตรของวัตถุทรงตันแล้วในการหาจุดศูนย์ถ่วง ของปริมาตรทรงตันก็คล้ายกับการหาจุดศูนย์ถ่วงเนื้อที่

ตัวอย่าง ถังถ่านหินหนึ่งมีเนื้อที่หน้าตัด 98 – 123 –137 - 135 - 122 ตร.นิ้ว ห่างกัน 17 ฟุต 6 นิ้ว จงหา ปริมาตรของถัง และจุดศูนย์ถ่วงของถังในทางตามยาวของเรือ

เนื้อที่	ตัวคูณซิมสัน	ฟังชันปริมาตร	ตัวคูณสำหรับโมเมนท์	ฟังชันโมเมนท์
98	1	98	0	0
123	4	492	1	492
137	2	274	2	548
135	4	540	3	1520
122	1	122	4	488

ผลรวมฟังชันปริมาตร 1526 รวมผลฟังชันโมเมนท์ 3148

ปริมาตร = 1/3 x 17 ½ x 1526 x ลบ.ฟุต = 8902 ลบ.ฟุต

โมเมนท์ = 1/3 x 17 ½ x 3148 x 17 ½

จุดศูนย์ถ่วงจากเนื้อที่แรก = $\dfrac{3148 \times 17\ 1/2}{1526}$ = 36.2 ฟุต

ขอแนะนำว่าเมื่อคำนวณออกมาแล้วควรได้ทำการตรวจคำตอบ ดังต่อไปนี้ ความยาวของถัง = 17' - 6 x 4 = 70 ฟุต จะเห็นว่าออร์ดิเนตทางหัวต่ำกว่าออร์ดิเนตทางท้าย ฉะนั้นจุดศูนย์ถ่วงจะอยู่ค่อนมาทางท้าย และส่วนปริมาตรของเรือ

= เนื้อที่กลางลำ x ความยาว

= 137 x 70 = 9509 ลบ.ฟุต

ปริมาตรที่คำนวณได้ = 8902 ลบ.ฟุต

สัมประสิทธิ์ = $\dfrac{8902}{9590}$ = 0.93 โดยใกล้เคียงพอที่จะเชื่อถือได้

3 จุดศูนย์กลางความลอย (Centre of Buoyancy, B)

ศูนย์กลางความลอยของเรือ คือศูนย์ลางความถ่วงของปริมาตรของส่วนที่อยู่ใต้น้ำ หรือศูนย์กลางความถ่วงของน้ำที่ถูกแทนที่ จุดศูนย์กลางความลอยนี้หาได้วิธีเดียวคือ โดยส่วนที่อยู่ใต้น้ำ

จุดศูนย์ถ่วงหาได้โดยน้ำหนักสร้างตัวเรือที่กระจายอยู่ทั่วไปในกรณีที่เรือสร้างพร้อมกัน 2 ลำ สร้างแบบเดียวกัน บรรทุกสินค้าและกินน้ำลึกเท่ากัน จะมีจุดศูนย์กลางความลอยอยู่ที่เดียวกันแต่สมมติว่าเรือทั้งสองลำนั้นบรรทุกสินค้าไม่เหมือนกัน ลำหนึ่งบรรทุกเครื่องเหล็กและของหนักต่าง ๆ ซึ่งต้องบรรทุกอยู่บริเวณใต้ท้องเรือ อีกลำหนึ่งบรรทุกของเบา ๆ เอาไว้สูงกว่าเรือลำแรก พูดได้ว่าเรือลำแรกจะมีจุดศูนย์ถ่วงต่ำกว่าเรือลำหลัง ความต่างกันระหว่างจุดศูนย์ถ่วงกับจุดศูนย์กลางความลอยนี้ควรจำใส่ใจไว้เสมอ

ความที่ได้กล่าวมาแล้วว่าจุดศูนย์กลางความลอยก็คือ จุดศูนย์ถ่วงที่อยู่ใต้แนวน้ำ ดังนั้นการคำนวณจุดศูนย์กลางความลอยจึงทำโดยวิธีเกียวกันกับจุดศูนย์ถ่วงที่กล่าวมาแล้ว จะเข้าใจได้ตามตัวอย่างข้างล่าง

3.1 จงหาตำแหน่งจุดศูนย์กลางความลอยของเรือในทางตามยาวของเรือโดยกำหนดให้เนื้อที่ตามขวางของเรือห่างระยะเท่า ๆ กัน

ตัวอย่าง ส่วนที่อยู่ใต้แนวน้ำของเรือลำหนึ่ง แบ่งออกด้วยพื้นที่หน้าตัดตามขวางของเรือ ห่างกัน 10 ฟุต เนื้อที่นั้น ๆ เริ่มจากหัวเรือไปทางท้ายเรือมีเนื้อที่ดังนี้ 0.2 – 22.7 – 48.8 – 73.2 – 84.4 – 82.8 – 58.7 – 26.2 – 3.9 ตร.ฟุต ตามลำดับ จงหาจุดศูนย์กลางความลอยสัมพันธ์กับรอยตัดกึ่งกลางลำ

จำนวน รอยตัด	เนื้อที่ หน้าตัด	ตัวคูณ ซิมสัน	ฟังชัน ปริมาตร	ตัวคูณโมเมนท์จาก รอยตัดกึ่งกลางลำ	ฟังชัน โมเมนท์
1	0.2	1	0.2	4	0.8
2	22.7	4	90.8	3	272.4
3	48.8	2	97.6	2	195.2
4	73.2	4	292.8	1	292.8
5	88.4	2	176.8	0	761.2
6	82.8	4	331.2	1	331.2
7	58.7	2	117.4	2	234.8
8	26.2	4	104.8	3	314.4
9	3.9	1	3.9	4	15.6

ผลรวมฟังชันปริมาตร 1215.5 ผลรวมฟังชันโมเมนท์ 896.0

ปริมาตรระวางขับน้ำ = 1/3 x 10 x 1215.5 = 4051.6 ลบ.ฟุต

ฟังชันโมเมนท์เกินทางภาคท้าย = 896.0 - 761.2 = 134.8

โมเมนท์ของปริมาตร = 1/3 x 10 x 134.8 x 10

$$\text{จุดศูนย์กลางความลอย} = \frac{\text{ฟังชั่นโมเมนท์ปริมาตร}}{\text{ฟังชั่นปริมาตร}}$$

$$= \frac{1/3 \times 10 \times 134.8 \times 10}{1/3 \times 10 \times 1215.5}$$

$$= \frac{134.8 \times 10}{1215.5}$$

= 11 ฟุต ไปทางท้ายของกึ่งกลางลำ

3.2 การหาตำแหน่งจุดศูนย์กลางความลอยโดยประมาณ สำหรับเรือซึ่งมีรูปร่างธรรมดา ทราบได้ว่าจุดศูนย์กลางความลอยอยู่ใต้แนวน้ำบรรทุกเต็มที่ระหว่าง 8/20 ถึง 9/20 ของระดับน้ำเฉลี่ย ส่วนสำหรับเรือใบกับเรือซึ่งมีรูปร่างผิดไปจากธรรมดา เราก็ใช้กฎนี้ไม่ได้

ตัวอย่าง เรือลำหนึ่งกินน้ำลึกเฉลี่ย 13 ฟุต 3 นิ้ว มีจุดศูนย์กลางความลอยต่ำจากแนวน้ำบรรทุกเต็มที่ 5.34 ฟุต

$$\text{คิดอัตราส่วนระดับน้ำ} = \frac{5.34}{13.25} = 0.403 = \frac{8.06}{20}$$

นี่เป็นตัวอย่างของเรือรูปร่างอ้วน

3.3 สูตรหาศูนย์กลางความลอยต่ำจากแนวน้ำบรรทุกโดยประมาณ ของท่านมอริช (Morrish)

ให้ V = ปริมาตรระวางขับน้ำถึงแนวน้ำบรรทุก ลบ.ฟุต

A = เนื้อที่แนวน้ำบรรทุก ตร.ฟุต

d = กินน้ำเฉลี่ยฟุต

$$\text{ศูนย์กลางความลอยต่ำจากแนวน้ำบรรทุก} = 1/3\left(\frac{d}{2} + \frac{V}{A}\right)$$

สูตรนี้ให้ความแน่นอนดีมาก สำหรับเรือรูปธรรมดา ในตอนแรกการออกแบบเรือควรใช้สูตรนี้หาจุดศูนย์กลางความลอย ซึ่งได้ใกล้เคียงกันมากในตอนที่เกี่ยวกับความทรงตัวของเรือก็ต้องรู้จุดศูนย์กลางความลอยก่อน โดยประมาณสูตรนี้จึงสำคัญซึ่งจะกล่าวในตอนหลัง

4. ตารางคำนวณระวางขับน้ำ (Displacement Sheet)

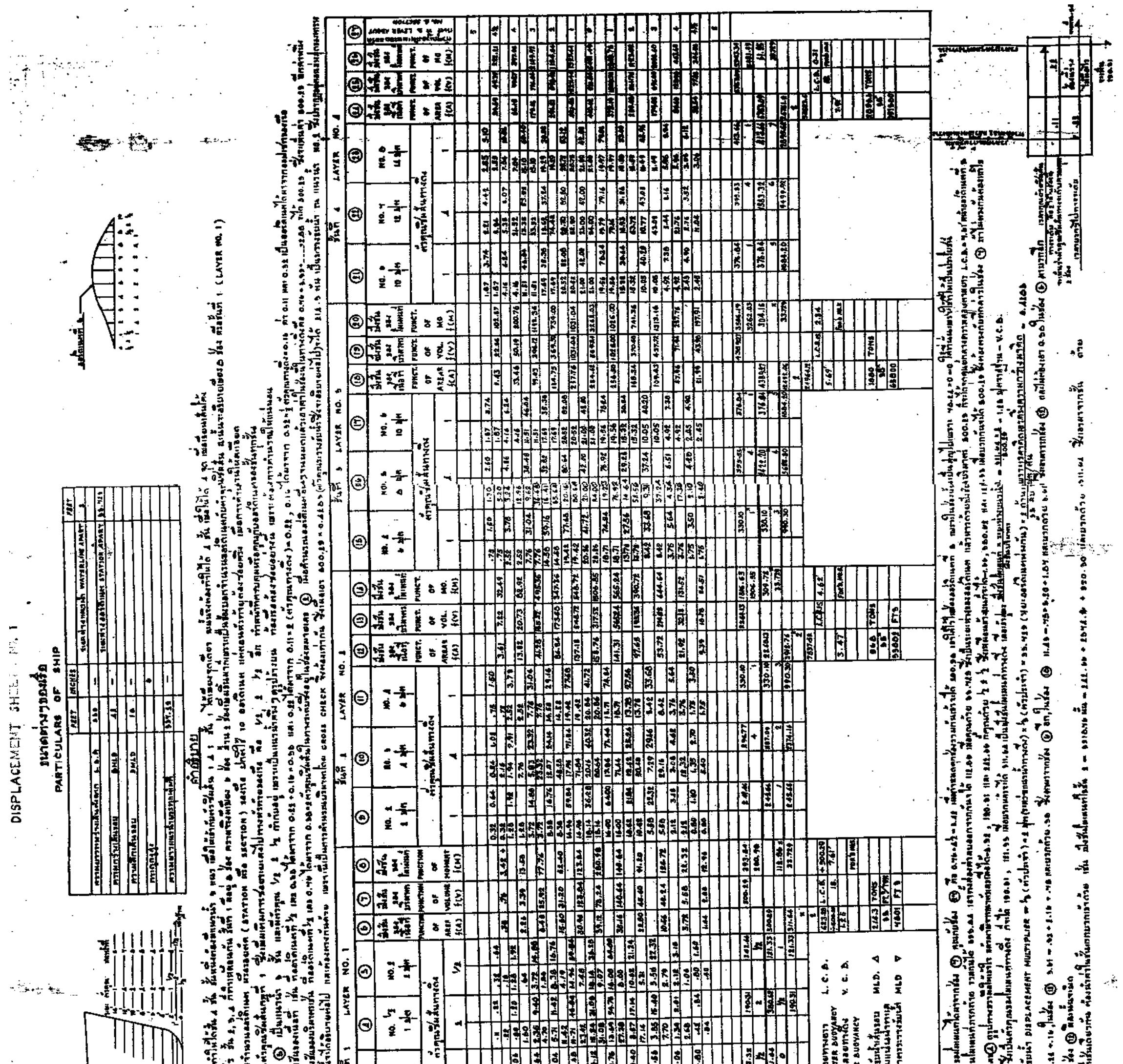
ต่อไปนี้จะได้กล่าวถึงวิธีหาระวางขับนี้ ซึ่งใช้กันอยู่เสมอในทางใช้การ ตลอดทั้งการหาตำแหน่งจุดศูนย์กลางความลอยทางดิ่ง เค บี (Vertical Centre Of Buoyancy, V.C.B หรือ KB) จุดศูนย์กลางทางลอยความยาว (Longitudinal Centre Of Buoyancy L.C.B)

การคำนวณใช้กระดาษตารางดังปรากฏอยู่แล้วในบทนี้ ตัวอย่างที่แสดงในที่นี้เป็นเรือที่มีความยาวแนวน้ำ 337.29 ฟุต กว้าง 42 ฟุต ลึก 18 ฟุต ความยาวของแนวน้ำแบ่งออกเป็น 10 ส่วน ฉะนั้นระยะออร์ดิเนตจึงห่างกัน 33.729 ฟุต ระยะออร์ดิเนตตอนหัวท้ายสุดของเรือต้องซอยครึ่งเพื่อให้การคำนวณแน่นอน ส่วนระยะแนวน้ำนั้นแบ่งออกเป็นชั้นละ 2 ฟุต ตอนท้องเรือต้องแบ่งครึ่งอีก เพื่อจุดประสงค์เดียวกันดังจะพบแนวน้ำ 1 ฟุต 2 ฟุต เป็นต้น ขอให้ดูตารางที่ 3 เพื่อความเข้าใจตอนบนของตารางมีอยู่ 27 ช่อง เพื่อทำการคำนวณให้ได้ 4 ชุด เมื่อเข้าใจการทำเพียงจุดเดียวหรือชั้นเดียวอีก 3 ชั้น หรือ 4 จุดก็เหมือนกัน ฉะนั้นชั้นที่ 1 มี 8 ช่องความจริงมีเดียง 6 ช่อง แต่เพิ่มช่องหมายเลข (1) (2) ซึ่งเป็นตัวร่วมที่ชั้นอื่น ๆ ก็ใช้เหมือนกัน ช่อง (3), (4), (5), นั้นเป็นแนวน้ำ 3 แนว เพื่อให้เข้ากับตัวคูณซิมสัน ½ , 2, ½ ซึ่งเป็นตัวคูณทางดิ่งในช่อง (2) เป็นตัวคูณซิมสันทางระดับ ระยะออร์ดิเนตในช่องแนวน้ำ 1 ฟุต กรอกไว้ดังนี้ .11, .80, 2.35, 5.17, 11.71, 15.54, 13.69, 8.57, 3.85, 1.34 และ 0.42 ซึ่งอาจใช้ตัวสีแดงหรือตัวเอนเพื่อให้แตกต่างจากตัวเลขอื่น ๆ ก็ได้ เมื่อเข้าใจแล้วการกรอกระยะออร์ดิเนตในแนวน้ำอื่น ๆ ก็เหมือนกัน เมื่อระยะออร์ดิเนตเหล่านี้ถูกคูณด้วยตัวซิมสันทางระดับก็จะได้ 0.22, 1.20, 9.40, 11.42, 46.84, 31.08, 54.76, 17.14, 15.40 , 2.10 และ 0.84 เมื่อรวมเข้าทั้งหมดจะได้ 19031 เป็นฟังชันเนื้อที่ปรากฏอยู่ตอนกลางของตารางเมื่อคูณด้วย 2 ซึ่งเป็นตัวคูณซิมสันทางดิ่งก็จะได้ 380.62 เป็นฟังชันปริมาตร เมื่อรวมฟังชันปริมาตร – 1.66, 380.62 และ 121.33 จะได้ 500.29 เป็นฟังชันปริมาตรถึงแนวน้ำ 2 ฟุต เมื่อเอาฟังชันปริมาตร 500.29 คูณกับตัวคูณระวางขับน้ำ (Displacement Multiplier) เท่ากับ 0.4283 จะได้ 500.29 x 4283 = 241.3 ตัน และปริมาตรระวางขับน้ำ (Volume Of Dispalcement) = 2143 x 35 = 7501 ลูกบาศก์ฟุต จะพบบริเวณตอนล่าง ๆ ของตารางและปริมาตรระวางขับน้ำนี้จะนำไปใช้ในตารางคำนวณแผนที่ 2 การทำตัวคูณระวางขับน้ำนั้นได้จาก 1/3 (ตัวคูณซิมสันกฎที่ 1) x 2 ฟุต (ระยะห่างแนวน้ำ) x 1/3 (ตัวคูณ ซิมสันกฎที่ 1) × 33.729 (ระยะห่างออร์ดิเนต) x 2 ด้าน (เพราะใช้ความกว้างครึ่งหนึ่งมาคิด) ×

$$\frac{1}{\text{ลบ.ฟุต / ตัน(ทำให้เป็นตัน)}} = 0.4283$$

การที่ตัวคูณประกอบด้วยตัวเลขมากมายเช่นนี้เมื่อพิจารณาดูแต่เพียง 1/3 × 2 จะเห็นว่าเป็นตัวคูณของสูตร 1 × 3 ระยะห่างแนวน้ำ × ฟังชันเนื้อที่แต่ฟังชันเนื้อที่เรายังไม่ต้องการทราบจะเก็บไว้ก่อนแล้วเพิ่มตัวคูณ 1/3 × 33.729 เข้าอีกทีหนึ่งก็จะ

ได้ตัวคูณของปริมาตรหรือระวางขับน้ำ เมื่อเอาฟังชันปริมาตรมาคูณเข้ากับตัวคูณระวางขับน้ำก็จะได้ระวางขับน้ำทันที ฟังชันปริมาตรนี้ 500.29 นี้ จะพบในช่องที่ 7 อีก ซึ่งจะต้องเท่ากันเสมอถ้าช่องที่



ตารางคำนวณระวางขับน้ำ แผ่นที่ ๒
DISPLACEMENT SHEET NO. 2

คำอธิบาย การคำนวณหารัศมีเมตาเซ็นเตอร์ทางขวาง (METACENTRIC RADIUS) BM

๑. การคำนวณคงทำเป็น 4 ชั้นตามเคย ในชั้นหนึ่งๆ มี 3 ช่อง ส่วนชั้นที่ 1 มี 5 ช่อง เพราะเพิ่มช่องจำนวนออร์ดิเนตกับตัวคูณซิมสันเพื่อให้เหมือนที่คำนวณมาในแผ่นที่ 1

๒. ช่องหมายเลข (3) เป็นออร์ดิเนตนำมาจากช่องที่ 3 ของแผ่นที่ 1 ซึ่งเป็นออร์ดิเนตของแนวน้ำ 2 ฟุต, ช่องหมายเลข (6) (9) (12) มาจากช่อง (11) (17) (23) ของแผ่นที่ 1 ตามลำดับ

๓. ช่องหมายเลข (4) ได้มาจากช่อง (3) ยกกำลังสามเพราะ $BM = \frac{I}{V} = \frac{\text{โมเมนต์อินเนอร์เชีย}}{\text{ปริมาตรระวางขับน้ำ}} = \frac{\frac{2}{3}\int y^3 dx}{V}$; y^3 คือระยะออร์ดิเนตกำลังสาม; $\frac{2}{3}$ เป็นตัวประจำ × $\frac{1}{3}$ (ตัวประจำซิมสันกฎที่ 1) × 33.729 (ระยะห่างออร์ดิเนต) = 7.495 ซึ่งจะเป็นตัวคูณของโม.อิน. ต่อไป หมายความว่า เมื่อได้ฟังชั่นกำลังสามแล้ว นำมาคูณกับ 7.495 ก็จะได้ค่าของโม.อิน. ดังในช่องหมายเลข (5) ได้ผลรวมของฟังชั่นกำลังสาม = 46,206 เมื่อคูณกับ 7.495 แล้วหารด้วย 7501 ปริมาตรระวางขับน้ำได้จากแผ่นที่ 1 ก็จะได้ BM = (46207 × 7.495) ÷ 7501 = 46.17 ฟุต

๔. ช่องหมายเลข (5) ได้จากช่องหมายเลข (4) × ตัวคูณซิมสันช่อง (2) ก็จะได้ฟังชั่นกำลังสาม (โม.อิน.)

๕. ระยะ KM = 47.42 ฟุต ได้จาก KB (V.C.B. จากแผ่น 1) + BM = 1.25 + 46.17 = 47.42 หรือเรียกจุด M เหนือจุด K

การคำนวณระยะเมตาเซ็นเตอร์ทางขวาง TRANSVERSE METACENTER

ชั้นที่ 1 LAYER 1					ชั้นที่ 2 LAYER 2			ชั้นที่ 3 LAYER 3			ชั้นที่ 4 LAYER 4		
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)
จำนวนออร์ดิเนต NO. OF ORDINATES	ตัวคูณซิมสัน SIMPSON MULTIPLIER	ออร์ดิเนตของแนวน้ำ 2 ฟุต ORDS. OF 2 FT. WL. (NO.2)	ทางขวาง TRANSVERSE: ออร์ดิเนตกำลังสาม CUBED OF ORDS.	ทางขวาง TRANSVERSE: ฟังชั่นของกำลังสาม FUNCT. OF CUBED	ออร์ดิเนตของแนวน้ำ 6 ฟุต ORDS. OF 6 FT. WL. (NO.4)	ทางขวาง TRANSVERSE: ออร์ดิเนตกำลังสาม CUBED OF ORDS.	ทางขวาง TRANSVERSE: ฟังชั่นของกำลังสาม FUNCT. OF CUBED	ออร์ดิเนตของแนวน้ำ 10 ฟุต ORDS. OF 10 FT. WL. (NO.6)	ทางขวาง TRANSVERSE: ออร์ดิเนตกำลังสาม CUBED OF ORDS.	ทางขวาง TRANSVERSE: ฟังชั่นของกำลังสาม FUNCT. OF CUBED	ออร์ดิเนตของแนวน้ำ 14 ฟุต ORDS. OF 14 FT. WL. (NO.8)	ทางขวาง TRANSVERSE: ออร์ดิเนตกำลังสาม CUBED OF ORDS.	ทางขวาง TRANSVERSE: ฟังชั่นของกำลังสาม FUNCT. OF CUBED
0	½												
½	2	.32			.75			1.87	7	14	2.55	17	34
1	1½	1.28	2	3	2.62	16	24	4.16	72	108	7.04	349	523
2	4	3.72	51	204	7.76	467	1868	11.51	1525	6100	15.10	3443	13772
3	2	8.38	588	1176	14.58	3099	6198	17.69	5536	11072	19.29	7178	14356
4	4	14.96	3348	13392	19.42	7324	29296	20.52	8640	34560	20.78	8973	35892
5	2	18.14	5969	11938	20.86	9077	18154	21.00	9261	18522	21.00	9261	18522
6	4	16.00	4096	16384	18.71	6550	26200	19.56	7484	29936	19.97	7964	31856
7	2	10.62	1198	2396	13.78	2617	5234	15.32	3596	7192	16.50	4492	8984
8	4	5.58	174	696	8.42	597	2388	10.05	1015	4060	11.49	1517	6068
9	1½	2.12	10	15	3.76	53	79	4.92	119	178	5.96	212	318
9½	2	.80	1	2	1.75	5	10	2.46	15	30	3.06	29	58
10	½												

ตัวคูณโม.อิน. $= \frac{\frac{2}{3} \times 33.729 \times 2}{3 \times 3} = 7.495$

ชั้นที่ 1 LAYER 1	ชั้นที่ 2 LAYER 2	ชั้นที่ 3 LAYER 3	ชั้นที่ 4 LAYER 4
46206 × 7.495	69461 × 7.495	181772 × 7.495	130569 × 7.495
÷ 7501	÷ 55002	÷ 66600	÷ 101560
BM = 46.17	19.79	12.43	9.64
KM = 47.42	23.26	16.42	14.55

การคำนวณระยะเมตาเซ็นเตอร์ทางยาว LONGITUDINAL METACENTER																	
		ชั้นที่ 1				ชั้นที่ 2				ชั้นที่ 3				ชั้นที่ 4			
①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪	⑫	⑬	⑭	⑮	⑯	⑰	⑱
		ทางยาว LONGITUDINAL				ทางยาว LONGITUDINAL				ทางยาว LONGITUDINAL				ทางยาว LONGITUDINAL			
ตำแหน่งออร์ดิเนต NO. OF ORDINATES	ตัวคูณของโมเมนต์รอบออร์ดิเนต ที่ 5 LEVER ABOUT NO. 5 SECTION	ฟังชั่นของออร์ดิเนต น.ท. ที่ 2 ฟุต FUNCT. OF ORDS.	ฟังชั่นเนื้อที่แนวน้ำ FUNCT. OF C.G. OF WATER PLANE	ตัวคูณโมเมนต์ MULT.	ฟังชั่นของโมเมนต์อินเนอร์เชียแนวน้ำ FUNCT. OF MO. OF IN. OF WATER PLANE	ฟังชั่นของออร์ดิเนต น.ท. ที่ 4 ฟุต FUNCT. OF ORDS.	ฟังชั่นเนื้อที่แนวน้ำ FUNCT. OF C.G. OF WATER PLANE	ตัวคูณโมเมนต์ MULT.	ฟังชั่นของโมเมนต์อินเนอร์เชียแนวน้ำ FUNCT. OF MO. OF IN. OF WATER PLANE	ฟังชั่นของออร์ดิเนต น.ท. ที่ 6 ฟุต FUNCT. OF ORDS.	ฟังชั่นเนื้อที่แนวน้ำ FUNCT. OF C.G. OF WATER PLANE	ตัวคูณโมเมนต์ MULT.	ฟังชั่นของโมเมนต์อินเนอร์เชียแนวน้ำ FUNCT. OF MO. OF IN. OF WATER PLANE	ฟังชั่นของออร์ดิเนต น.ท. ที่ 8 ฟุต FUNCT. OF ORDS.	ฟังชั่นเนื้อที่แนวน้ำ FUNCT. OF C.G. OF WATER PLANE	ตัวคูณโมเมนต์ MULT.	ฟังชั่นของโมเมนต์อินเนอร์เชียแนวน้ำ FUNCT. OF MO. OF IN. OF WATER PLANE
0	5		...	5	...			5				6				5	
1/2	4 1/2	.64	2.88	4 1/2	12.96	1.60	6.75	4 1/2	30.37	3.74	16.83	4 1/2	75.73	8.10	22.95	4 1/2	103.23
1	4	1.92	7.68	4	30.72	3.78	16.12	4	60.48	6.24	24.96	4	99.84	10.66	42.24	4	168.96
2	3	4.88	44.64	3	133.92	31.04	93.12	3	279.36	46.04	138.12	3	414.36	60.40	181.20	3	543.60
3	2	6.76	33.52	2	67.04	29.16	58.32	2	116.64	35.38	70.76	2	141.62	38.58	77.16	2	154.32
4	1	59.84	59.84	1	59.84	77.68	77.68	1	77.68	82.08	82.08	1	82.08	83.12	83.12	1	83.12
5	0	36.28	148.56	0	—	44.72	250.99	0	—	42.00	332.75	0	—	42.00	406.67	0	—
6	1	64.00	64.00	1	64.00	74.84	74.84	1	74.84	78.24	78.24	1	78.24	79.88	79.88	1	79.88
7	2	21.24	42.48	2	84.96	27.56	56.12	2	110.24	30.64	61.28	2	122.56	33.00	66.00	2	132.00
8	3	22.32	66.96	3	200.88	33.68	101.04	3	303.12	40.20	120.60	3	361.80	45.56	137.60	3	613.64
9	4	3.18	12.72	4	50.88	5.64	22.56	4	90.24	7.38	29.52	4	118.08	6.94	36.76	4	163.04
9 1/2	4 1/2	1.60	7.20	4 1/2	32.40	3.50	15.75	4 1/2	70.87	4.90	22.05	4 1/2	99.22	6.12	27.54	4 1/2	123.93
10	5	...	...	5				6				6				5	
		(A) 222.66	193.56 / 148.56 / (B) 44.0 × 33.429		I_X = 757.60 / CORR. AY^2 8.24 / I_O = 729.33 × 25580	530.10	269.51 / 250.99 / + 18.52 × 33.429		1218.84 / 1.02 / 1212.82 × 25580	546.64	311.69 / 332.75 / −21.06 × 33.429		1593.45 / 1.18 / 1592.26 × 25580	415.66	347.86 / 406.67 / 59.61 × 33.429		1945.72 / 0.59 / 1944.13 × 25580
ตัวคูณเนื้อที่ $\frac{2 \times 33.429}{3}$		222.66			7601	530.10			39082	546.64			65000	415.66			101500
= 25580		C.F.	6.25′ FWD NO. 5		BM_L = 2407.5	BEFORE NO.5			915.6′	ABAFT NO.5 1.86′			619.0′	ABAFT NO.5 1.86′			408.8′

คำอธิบาย การคำนวณหารัศมีเมตาเซ็นตริคทางยาว (LONGITUDINAL METACENTRIC RADIUS) BM_L

๑. การคำนวณนี้ทำเป็น ๔ ชั้น [illegible]

๒. ช่องหมายเลข ② เป็นตัวคูณของโมเมนต์รอบออร์ดิเนตที่ 5 เหมือนช่อง ② ในแผ่นที่ ๑

๓. ช่องหมายเลข ③ เป็นผลที่ยกมาจากช่อง 5 แผ่นที่ ๑ ซึ่งเป็นออร์ดิเนตคูณกับตัวคูณซิมสันทางระดับ [illegible]

๔. ช่องหมายเลข ④ เป็นฟังชั่นของโมเมนต์ของ น.ท. แนวน้ำที่ 2 เพื่อใช้หาจุด C.G หรือ C.F ของ น.ท. แนวน้ำได้จากช่อง ③ x ช่อง ②
ณ ออร์ดิเนตที่ 5 เป็นศูนย์เพราะ 36.28×0 = 0, ช่องข้างบนแต่ก็รวม 148.56 ซึ่งเป็นผลรวมของโม. ภาคหัว, ส่วนโมเมนต์ภาคท้ายรวมได้ 193.56
เพื่อหาโม. ภาคหัว ภาคท้ายลบกันได้ $\frac{(193.56-148.56)\times 33.429 \text{ (ระยะห่างออร์.)}}{222.66 \text{ ฟังชั่น น.ท.แนวน้ำ 2 ฟุต}} = \frac{44.0\,(B)\times 33.429}{222.66} = 6.25'$ = จุด C.G. ของแนวน้ำที่ 2 ฟุต
อยู่ห่างไปทางหัวหน้าออร์ดิเนตที่ 5 หรือจุด C.F. (CENTER OF FLOATATION) ก็ได้

๕. ช่องหมายเลข ⑤ เหมือนกับช่องหมายเลข ②

๖. ช่องหมายเลข ⑥ ได้จากช่อง ④ x ช่อง ⑤ หรือเท่ากับตัวคูณโมเมนต์ (LEVER) กำลังสองเพราะ $BM_L = \frac{2\int yx^2 dx}{V}$; x^2 = ตัวคูณโมเมนต์กำลังสอง
$y\,dx$ = เนื้อที่ ผลรวมโมเมนต์อินเนอร์เชียทั้งหมดจะได้ $757.60 = I_X$ รอบออร์ดิเนตที่ 5 ซึ่งไม่ใช่ I_O รอบจุดศูนย์กลาง C.G. หรือ C.F. จึงต้องหักออก
ด้วย AY^2 เพราะ $I_X = I_O + AY^2$ หรือ $I_O = I_X - AY^2$; CORRECTION $AY^2 = \frac{B^2}{A} = \frac{(AY)^2}{A} = \frac{(44.0)^2}{222.66} = 8.24$

๗. เลข 25580 ที่คูณ $I_O = 729.33$ นั้นเป็นตัวคูณของโมเมนต์อินเนอร์เชีย = 2 (ด้านเรือ 2 ข้าง) × $\frac{1}{3}$ ตัวประจำซิมสันกฎที่ 1 × $(33.429)^2$ ระยะออร์ดิเนตกำลังสอง
× 33.429 ซึ่งเป็นตัว h ระยะออร์ดิเนตประจำสูตรซิมสันกฎที่ 1 = $\frac{2}{3}\times(33.429)^3 = 25580$

๘. $BM_L = \frac{I_O}{V} = \frac{729.33 \text{ ฟังชั่นโม.อิน} \times 25580 \text{ ตัวคูณโมเมนต์อินเนอร์เชีย}}{7601 \text{ ปริมาตรระวางขับน้ำ}} = 2407.5$ ฟุต

กล่าวมาแล้วได้ 500.29 แต่ในช่องที่ 7 ๆ 500.00 ขอให้เข้าใจว่าไม่ทางใดก็ทางหนึ่งจะต้องผิดแน่นอนรับรองได้ ต้องแก้ไขเสียให้เท่ากัน วิธีการเช่นนี้เรียกว่าตรวจไขว้ (Cross Check) ซึ่งเมื่อพิจารณาดูแล้ววาดมโนภาพขึ้นแล้วจะเห็นว่าเราสามารถจะหาระวางขับน้ำได้โดยเริ่มจากรูปหน้าตัด

ของเรือก็ได้ หรือรูปตัวแนวน้ำของเรือก็ได้ จะหาโดยทางหนึ่งทางใดต้องได้ระวางขับน้ำเท่ากันเสมอ ช่องที่ 6 ได้มาจากผลคูณ

ของออร์ดิเนตกับตัวคูณซิมสันทางดิ่ง นั่นคือ 0.22+0.16 = 0.38 เมื่อพิจารณาแล้วจะเห็นว่า 0.38 นี้เป็นฟังชันเนื้อที่หน้าตัดของออร์ดิเนตที่ ½ และในทำนองเดียวกันฟังชันเนื้อที่หน้าตัดของออร์ดิเนตที่ 5 ก็คือ 39.12 ถ้านำไปเข้าสูตรกฎซิมสันที่ 1 คือ 1/3 x ระยะห่างแนวน้ำ × ฟังชันเนื้อที่ = 1/3 × 2 x 39.12 ก็จะได้ครึ่งหนึ่งของเนื้อที่หน้าตัดออร์ดิเนตที่ 5 = 26.08 ตร.ฟุต หรือเรียกว่าเนื้อที่หน้าตัดกึ่งกลางลำ (Amidship) ในช่องที่ 7 นั้นได้จากช่อง 6 ฟังชันเนื้อที่คูณกับตัวคูณซิมสันอีกครึ่งหนึ่งเพื่อทำให้เป็นฟังชันของปริมาตร เช่น 0.38 × 2 = 0.76 ฉะนั้นเมื่อรวมผลในช่องที่ 7 ทั้งหมดจะได้ฟังชันปริมาตร 500.29 ซึ่งจะตรงกับ 500.29 ที่กล่าวมาแล้ว หรืออยู่ใกล้ ๆ กันในตารางนั้น เมื่อเอา 500.29 × 0.4283 ตัวคูณระวางขับน้ำก็จะได้ระวางขับน้ำ 214.3 ตัน เรียกว่าระวางขับน้ำเส้นขอบ (Moulded Displacement หรือ Mld△) เป็นระวางขับน้ำที่ยังไม่ได้รวมน้ำหนักแผ่นเหล็กเป็นจำนวนตันยาวน้ำทะเล (Long Ton Salt Water L.T.S.W.) ช่องที่ 8 เป็นฟังชันของโมเมนท์ นั่นก็คือฟังชันปริมาตรช่องที่ 7 คูณกับตัวคูณโมเมนท์ในช่อง 27 เช่นที่ออร์ดิเนตอื่น ๆ ทำเช่นเดียวกันเพื่อพิจารณาตัวคูณโมเมนท์แล้วจะเห็นว่าที่ออร์ดิเนตที่ 5 นั้นเป็นสูญ ทั้งนี้ก็โดยที่เป็นโมเมนท์ในทางยาวของเรือและถือออร์ดิเนตที่ 5 เป็นจุดกึ่งกลางลำ ออร์ดิเนตที่ห่างออกไปก็มีค่าเป็น 1,2,3,4, 4 4/2 และ 5 ความจริงจะต้องมีความห่างของออร์ดิเนตคูณด้วย คือ 1 ×33.729, 3 ×33.729, 3 × 33.729, 4 × 33.729, 4 ¼ × 33.729 และ5 × 33.729 นี่แหละจึงจะเป็นระยะห่างจริงของออร์ดิเนตเหล่านั้น แต่โดยที่ระยะออร์ดิเนตนั้นเท่ากันจึงเป็นตัวร่วมเอาไปคิดในภายหลัง ฉะนั้น จึงพบว่าที่ออร์ดิเนตที่ 5 ฟังชันโมเมนท์เป็น 0 ×78.24 = 0 แต่แทนที่จะเอา 0 กรองลงในช่องนี้ เราก็เอาผลบวกโมเมนท์ภาคท้าย = 280.98 =3.42 + 13.56 + 77.76 +62.40 + 123.84 กรอกใส่ไว้แทน ส่วนโมเมนท์ภาคหัวรวมกันได้ 393.84 ภาคท้ายควรใส่อักษรย่อ a – aft และภาคหัวใช้ f = Forward กำกับไว้จะทำให้สะดวก ฉะนั้นโมเมนท์ ภาคหัวมากกว่าโมเมนท์ภาคท้าย = 394.84 – 280.98 = 112.86 เมื่อเข้าสูตรจะปรากฏดังนี้ .-

$$\text{L.C.B.} = \frac{\text{โมเมนท์ปริมาตร}}{\text{ปริมาตร}}$$

$$= \frac{1/3 \times \text{ระยะห่าง} \times \text{ฟังชั่นโมเมนท์} \times \text{ระยะห่าง}}{1/3 \times \text{ระยะห่าง} \times \text{ฟังชั่นปริมาตร}}$$

$$= \frac{\text{ฟังชั่นโมเมนท์} \times \text{ระยะห่าง}}{\text{ฟังชั่นปริมาตร}} = \frac{112.86f \times 33.729}{500.29}$$

= 7.61 ฟุต f ออร์ดิเนตที่ 5

สำหรับจุดศูนย์กลางความลอยทางดิ่ง (V.C.B.) นั้น ให้ดูตอนล่างของตารางต่อไป ต่อเมื่อไปฟังชันปริมาตร – 1.66, 380.62 และ 121.33 แล้ว ก็คูณด้วยตัวคูณโมเมนท์คือ 0 ทีเส้นฐาน, 1/2 และ 1 ระยะจริงของแนวน้ำห่างจากฐานจะต้องเป็น 1/2 ×2, 1 ×2 โดยที่แนวน้ำห่างเท่า ๆ กันจึงเอา 2 ตัวร่วมออกเสียแล้วนำมาคูณภายหลัง ฉะนั้นจะได้ฟังชันโมเมนท์ทางดิ่ง 0,190.31และ 121.33 เมื่อรวมแล้วได้ฟังชันโมเมนท์เท่ากับ 311.64

$$\text{ฉะนั้น V.C.B.} = \frac{\text{โมเมนท์ปริมาตร}}{\text{ปริมาตร}}$$

$$= \frac{1/3 \times \text{ระยะห่างแนวน้ำ} \times \text{ฟังชั่นโมเมนท์} \times \text{ระยะห่างแนวน้ำ}}{1/3 \times \text{ระยะห่างแนวน้ำ} \times \text{ฟังชั่นปริมาตร}}$$

$$= \frac{\text{ฟังชั่นโมเมนท์} \times \text{ระยะห่างแนวน้ำ}}{\text{ฟังชั่นปริมาตร}}$$

$$= \text{V.C.B.} = \frac{311.64 \times 2}{500.29} = 1.25 \text{ ฟุต จากเส้นฐาน}$$

เมื่อเข้าใจการทำชั้นที่ 1 แล้ว ชั้นที่ 2, 3 และ 4 ก็เหมือนกัน จากผลที่ได้นี้นำไปเขียนเส้นโค้งระวางขับน้ำ จุดศูนย์กลางความลอยทางดิ่งจุดศูนย์กลางความลอยทางยาวของเรือ ซึ่งจะได้กล่าวต่อไป

8.4 ความทรงของตัวเรือ (STABILITY OF SHIP)

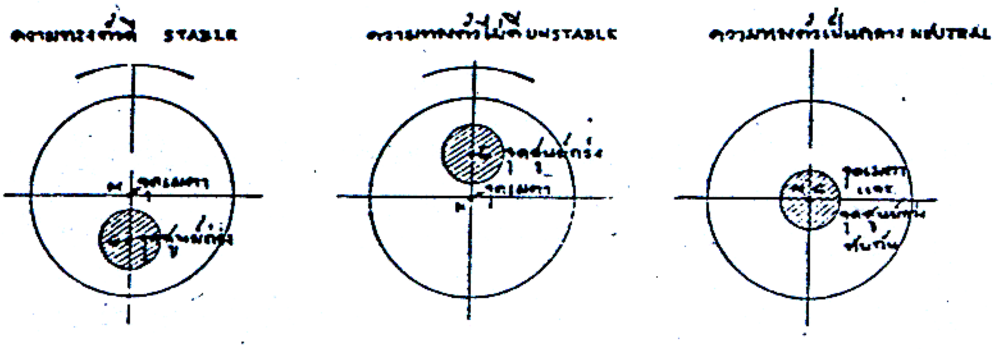
1. พฤติภาพความสมดุลย์ (Condition of Equilibrium)

1.1 ความทรงตัวสถิต (Statical Stability) ของเรือคือแรงขืนที่เรือมีอยู่ในการที่จะพยายามขืนให้เรือกลับมาอยู่ในตำแหน่งตั้งตรง หรือตำแหน่งเดิม เมื่อเรือถูกเอียงไปในทางใช้การเรือไม่สามารถจะลอยตั้งตรงอยู่ได้เพราะมีแรงภายนอกมากระทำ เช่น ลมหรือคลื่น จึงมีความสำคัญอยู่ว่าเรือจะมีพฤติภาพอย่างไร เรือจึงจะลอยปลอดภัยอยู่ได้ เมื่อมีแรงภายนอกมากระทำ บทนี้จะได้กล่าวถึงสมบัติดังกล่าว และมุมเอียงของเรือ

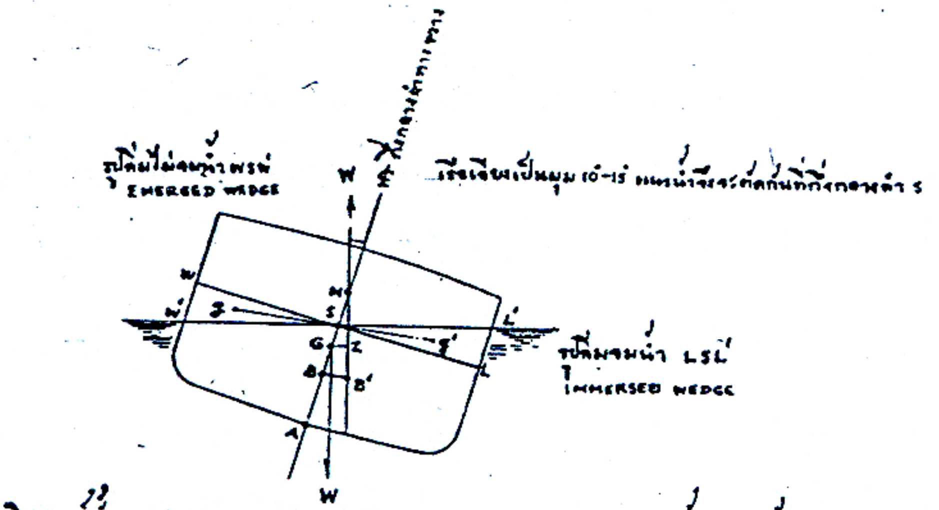
1.2 ความทรงตัวดี (Stable Equilibrium) เรือที่จะกล่าวว่ามีคุณสมบัติความทรงตัวดีนั้น หมายความว่า เมื่อเรือนั้นถูกเอียงไปเป็นมุมหนึ่ง เรือนั้นจะกลับมาอยู่ในตำแหน่งเดิม (ดูรูปที่ 32)

1.3 ความทรงตัวไม่ดี (Unstable Equilibrium) เรือที่จะกล่าวว่ามีความทรงตัวไม่ดีนั้น หมายความว่า เมื่อเรือนั้นถูกเอียงไปเป็นมุม ๆ หนึ่ง เรือนั้นจะเอียงตัวไปจากตำแหน่งเดิมจนคว่ำ

1.4 ความทรงตัวเป็นกลาง (Neutral or Indifferent Equilibrium) เรือที่จะกล่าวว่ามีความทรงตัวเป็นกลางนั้นหมายความว่า เมื่อเรือนั้นถูกเอียงไปเป็นมุมหนึ่ง ๆ เรือนั้นจะไม่เอียงต่อไปและไม่เอียงกลับมายังตำแหน่งเดิม

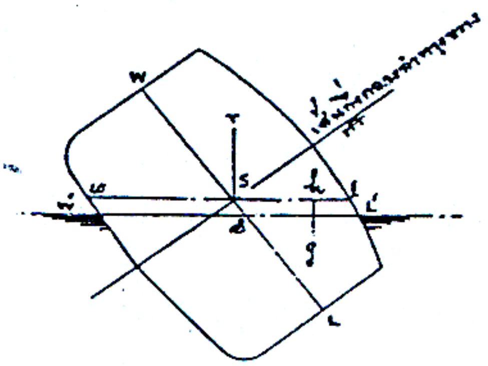


รูปที่ 32 ความทรงตัวสถิต STATICAL STABILITY



โมเมนท์ตั้งตรง (RIGHTING MO. OR MOMENT OF COUPLE) = ระวางขับน้ำ x แขนตั้งตรง RIGHTING ARM
= W x GZ

รูปที่ 33 แสดงการตั้งตรงของเรือได้เองเมื่อเรือมีความทรงตัวดี
เมื่อมีแรงภายนอกมากระทำให้เรือเอียง



รูปที่ 34 เมื่อเรือเอียงมากกว่า 15° เส้นแนวน้ำเก่า WL กับเส้นแนวน้ำใหม่ W'L'
จะไม่ตัดกากึ่งกลางลำ S แต่จะตัดที่ δ

ทั้ง 3 กรณีนี้จะทราบได้จากรูปทรงกลมซึ่งวางอยู่บนโต๊ะดังนี้.-

1) ถ้าจุดศูนย์ถ่วงของลูกกลมอยู่ใต้จุดศูนย์กลางในทางดิ่ง จะมีพฤติภาพเป็นความทรงตัวดี คือจะเอียงลูกทรงกลมไปทางใดก็ตาม ลูกทรงกลมจะกลับมาอยู่ในตำแหน่งเดิม
2) ถ้าจุดศูนย์ถ่วงอยู่เหนือจุดศูนย์กลางของลูกทรงกลมในทางดิ่ง มีพฤติภาพความทรงตัวไม่ดี คือจะเอียงต่อไปจากที่เอียงเดิม
3) ถ้าจุดศูนย์ถ่วงอยู่ตำแหน่งเดียวกับจุดศูนย์กลางทรงกลม มีความทรงตัวเป็นกลางโดยไม่กลิ้งต่อไปหรือกลิ้งกลับมาอีก ไม่ว่าจะเอียงไปอยู่ตำแหน่งใด ลูกทรงกลมก็จะอยู่ตำแหน่งนั้น

2. จุดเมตาทางขวาง (Transverse Metacenter)

ในที่นี้จะกล่าวถึงเรือเอียงทางข้างก่อน เพราะสำคัญมาก ส่วนเรือเอียงทางยาวจะได้กล่าวในบทต่อไป ในรูป 33 แหนรูปตัดทางขวางของเรือลอยลำเอียงอยู่น้อย ๆ ด้วยกำลังภายนอกเช่นลม เรือนี้มีน้ำหนักเท่าเดิม ทั้งก่อนและหลังเอียง ยิ่งกว่านั้นยังมีปริมาตรระวางขับน้ำเท่าเดิมด้วย คิดเสียว่าไม่มีน้ำหนักบนเรือโยกย้ายไปไหน ดังนั้นจุดศูนย์ถ่วงจึงอยู่ในตำแหน่งเดิม แม้ว่าระวางขับน้ำจะคงเดิม แต่รูปร่างปริมาตรใต้แนวน้ำเปลี่ยนไป ดังนั้นจุดศูนย์กลางความลอยจึงย้ายไปจากตำแหน่งเดิมด้วย ตามในรูป ดังนั้น WAL เป็นส่วนจมของเรือเมื่อเวลาเรือตั้งตรง WL เป็นแนวน้ำเวลาเรือตั้งตรง เมื่อเรือเอียงไป W' L' กลายเป็นแนวน้ำใหม่ W'AL เป็นส่วนที่จม ซึ่งมีรูปร่างเปลี่ยนไปจากรูปร่างปริมาตรเดิม แต่มีค่าเท่ากัน

ปริมาตรรูปลิ่มแทนด้วย WSW' เรียกว่ารูปลิ่มไม่จมน้ำ "Emerged" or "Out" Wedge ส่วนรูปลิ่ม LSL' เรียกว่ารูปลิ่มจมน้ำ " Immersed " or "in" เนื่องจากปริมาตรระวางขับน้ำเท่ากัน ดังนั้นปริมาตรรูปลิ่มไม่จมน้ำจึงเท่ากันกับปริมาตรรูปลิ่มจมน้ำ นั่นคือ WSW' = LSL' จุด S นั้นจะอยู่ในตำแหน่งกึ่งกลางลำเรือเฉพาะเมื่อเรือเอียงเป็นมุมน้อยมาก ในกรณีที่เรือเอียงเป็นมุมมาก ๆ จุด S จะเคลื่อนตัดออก คือไม่ได้อยู่ที่จุดกึ่งกลางดังกล่าว (ดูรูปที่ 34)

ต่อไปพิจารณาในเรื่องเรือเอียงน้อย ๆ ดังในรูป 33 ปริมาตรระวางขับน้ำใหม่คือ W'AL ซึ่งมี C.B. อยู่ที่จุด B' ตำแหน่งจุดนี้อาจคำนวณหาได้จากแบบเช่นเดียวกับจุด B เดิม แต่มีวิธีหาจุด B' ง่าย ๆ ดังต่อไปนี้

B' เป็นจุดศูนย์กลางความลอยใหม่ ความลอยจะต้องออกแรงผ่านขึ้นทางจุด B' ในขณะนั้น น้ำหนักของเรือออกแรงผ่านจุด G ของเรือ สมมติว่าแรงดิ่งที่ผ่านขึ้นทาง B' ตัดเส้นกึงกลางลำของเรือที่ M จุด จะมีแรง 2 แรงที่เท่ากันกระทำกันบนเรือ คือ

1) น้ำหนักของเรือกระทำลงในทางดิ่ง ผ่านจุดศูนย์ถ่วง

2) ความลอยกระทำขึ้นในทางดิ่งผ่านจุดศูนย์กลางความลอยใหม่

แรงทั้งสองนี้ไม่ได้กระทำกันในเส้นดิ่งเดียวกัน แรงเช่นนี้เราเรียกว่าแรงคู่ (Couple)ลาก GZ ตั้งฉากกับเส้นดิ่งที่ลากผ่าน B' แรงที่เท่ากันกระทำกันรอบ GZ (แขนตั้งตรง Arm of Couple or Righting Arm)เรียกว่าโมเมนท์ตั้งตรง (Moment of Couple or Righting Moment) = ระวางขับน้ำ × แขนตั้งตรง = W. GZ

ดูตามรูปจะเห็นแรงคู่พยายามทำให้เรือเอียงกลับไปอยู่ในตำแหน่งตั้งตรงตามเดิม ถ้าจุด G ขึ้นไปอยู่เหนือจุด M เรือจะเอียงต่อไปจนล่ม

ถ้าจุด G ทับจุด M ไม่มีแรงคู่ เรือจะไม่เอียงกลับและไม่เอียงต่อไป

ดังนั้นเรือที่ลอยลำอยู่ได้เรียบร้อยต้องมีพฤติภาพดังต่อไปนี้.-

1) น้ำหนักของน้ำที่ถูกแทนที่ = น้ำหนักของเรือทั้งหมด

2) จุดศูนย์ถ่วงกับศูนย์กลางความลอยต้องอยู่ในเส้นดิ่งอันเดียวกัน

3) จุดศูนย์ถ่วงต้องอยู่ใต้จุดเมตา

ในทางใช้การ พบว่าเรือธรรมดาทั่วไป จะมีเมตรคงที่ในระหว่างเรือเอียงเป็นมุม 10° - 15° ถ้ามากกว่านั้นจุดเมตาจะเปลี่ยนไป และเมื่อพิจารณาถึงความสัมพันธ์ของจุดเมตา กับจุดศูนย์ถ่วงแล้วจะเกิด 3 พฤติภาพคือ .-

1) ถ้าจุดศูนย์ถ่วง G ต่ำกว่าจุดเมตา M เรือมีการทรงตัวดี (Stable)

2) ถ้าจุดศูนย์ถ่วง G เหนือจุดเมตา M เรือมีความทรงตัวไม่ดี (Unstaable)

3) ถ้าจุดศูนย์ถ่วง G ทับจุดเมตา M เรือมีความเป็นกลางไม่เอียงกลับหรือเอียงต่อไป

(Neutral Or Indifferent Equilibrium)

ระยะ GM เรียกความสูงเมตาทางขวาง จีเอ็ม (Transverse Metacentric Height) เรียกทั่ว ๆ ไปว่าความสูงเมตาเฉย ๆ (Metacentric Height) ได้กล่าวแล้วว่าเมื่อเรือเอียงน้อย ๆ จุด M คงที่ในทางใช้การ $\tan\theta = \sin\theta$, θ มีค่าน้อย

ดังนั้นในสามเหลี่ยม ZGM (ดูรูปที่ 33)

$GZ = Gm. \sin\theta$

GZ = แขนตั้งตรง (Arm Of Couple Or Righting Arm) และโมเมนท์ตั้งตรง (Moment Of Couple) = $W.GM. \sin\theta$ ถ้าจุดเมตา M อยู่เหนือจุดศูนย์ถ่วง G โมเมนท์ที่เกิดจะพยายามขืนให้เรือตรง ดังนั้นโมเมนท์นี้เราเรียกว่า โมเมนท์ความทรงตัวสถิต (Moment Of Statical Stability) เมื่อเรือเอียงเป็นมุม θ มีค่า = $W.GM. \sin\theta$

ซึ่งเรียกว่า วิธีเมตาเซนตริค (Metacentric Method) ใช้หาความทรงตัวของเรือในระยะเรือเอียงระหว่าง $10^{\circ} - 15^{\circ}$ เท่านั้น ถ้าเอียงมากกว่านี้ต้องใช้วิธีแอทวูด (Attwood Method) ซึ่งจะกล่าวต่อไป

ตัวอย่าง เรือลำหนึ่งมีระวางขับน้ำ 14,000 ตัน มีความสูงเมตา 3 1/2 ฟุต ถ้าเรือลำนี้เอียง 10 เสมอ เรือลำนี้จะมีโมเมนท์ตั้งตรงหรือ โมเมนท์ความทรงตัวสถิตเท่าใด

โมเมนท์ตั้งตรง $= \triangle$ Gm. Sin θ = 14,000 x 3.5 x Sin 10° = 8506 ฟุต – ตัน

3 จุดเซนเตอร์ออฟโฟลเตชัน (Caenter Of Flotation C.F.) หรือจุดศูนย์ถ่วงของพื้นที่แนวน้ำ(Center Of Gravity Of Waterplane)

ของลอยได้ เมื่อถูกทำให้เอียงไปเล็กน้อย โดยรักษาให้ปริมาตรระวางขับน้ำเดิม เท่ากับปริมาตรระวางขับน้ำใหม่แล้ว พื้นแนวน้ำใหม่จะผ่านจุดศูนย์ถ่วงหรือจุดโฟลเตชันของพื้นแนวน้ำเก่า ตามในรูปที่ 35 รูปลิ่มส่วนจม (Immersed Wedge) SLL' เท่ากับรูปลิ่มส่วนไม่จมน้ำ (Emerged Wedge) SWW

ให้ y เป็นออร์ดิเนตของรูปลิ่มส่วนจมน้ำ

y' เป็นออร์ดิเนตของรูปลิ่มส่วนไม่จมน้ำ

$$\frac{LL'}{y} = de \qquad \therefore\ LL' = y.\,de$$

$$WW = y'.\,De$$

เนื้อที่สามเหลี่ยม $= 1/2 \times$ ฐาน $\times$ สูง

ดังนั้นเนื้อที่ของรูปลิ่มที่จมน้ำ $= 1/2 \times y.\,LL' = 1/2.y.y.de$

$= 1/2.y^2.de$

เนื้อที่ของรูปลิ่มที่ไม่จมน้ำ $= 1/2\,(y')^2\ de$

ดังนั้นปริมาตรของรูปลิ่มที่จมน้ำ $= 1/2\ f y^2.\,de\ dx$

และปริมาตรของรูปลิ่มที่ไม่จมน้ำ $= 1/2\ f(y^2)\ be\ dx$

แต่ปริมาตรทั้งสองเท่ากัน $= 1/2\ f y^2.\,de\ dx = 1/2\ f(y^2)\ be\ dx$

$= 1/2\ f y^2.\ dx = 1/2\ f(y^2)\ dx$

แต่ $1/2\ f y^2.\ dx$ เป็นโมเมนท์ของลิ่มจมน้ำรอบจุดตัด S

$1/2\ f(y^2)\ dx$ เป็นโมเมนท์ของลิ่มไม่จมน้ำรอบจุดตัด

ซึ่งเท่ากันและจุดตัดนี้ผ่านจุดศูนย์ถ่วงของพื้นที่แนวน้ำ ซึ่งเรียกว่าจุดเซนเตอร์ออฟโฟลเตชัน (Center Of Flotation) ดังนั้นไม่ว่าเรือจะเอียงในทางข้างหรือทางยาว พื้นแนวน้ำใหม่จะผ่านพื้นแนวน้ำเก่าที่จุดเซนเตอร์ออฟโฟลเตชัน

สำหรับเรือเอียงทางขวาง จุดตัดคือเส้นกึ่งกลางความยาว (Centerline) ของพื้นแนวน้ำ สำหรับเรือเอียงทางยาว จุดตัดคือจุดเซนเตอร์ออฟโฟลเตชันนั้น คำนวณได้ดังจะได้กล่าวในบทต่อไป

4. การเลื่อนของจุดศูนย์ถ่วง เนื่องจากการยกส่วนหนึ่งของน้ำหนักไปจากที่เดิม

ตามในรูปที่ 36 Pqrstu ประกอบด้วยส่วนสองส่วนคือ Pqtu และ Qrst โดยมีจุดศูนย์กลางความถ่วงอยู่ที่ g และ g' ตามลำดับ

a, a' เป็นเนื้อที่ทั้งสองรูป

$a + a' = A$

และ G เป็นจุดศูนย์ถ่วงของเนื้อที่ทั้งสอง

ดังนั้น $a \text{ x } Gg = a' \text{ x } g'G$

หรือ $= \frac{gG'}{g''G}$ หรือ $\frac{a'}{a}$

ต่อไปถ้าเนื้อที่ Qrst ถูกยกไปกอยู่ที่ Tuvw โดยมี g " เป็นจุดศูนย์ถ่วงและจุดศูนย์ใหม่ของ Pqwv คือ G'

ดังนั้น $= \frac{gG'}{g''G} = \frac{a'}{a} = \frac{gG}{g'G}$

ตามอัตราส่วนนี้จะเห็นว่าตรงกับคุณสมบัติของรูปสามเหลี่ยมที่คล้ายกัน (Similar Triangle)

ดังนั้น GG' ขนานกับ g' g "

$$\therefore \quad \frac{GG'}{g'g''} = \frac{gG}{gg'}$$

โมเมนท์รอบาจุด g เท่ากับ $a \times gG' = A \times gG$

$$= \frac{GG'}{g'g''} = \frac{a}{A}$$

หรือ GG' เป็นระยะเลื่อนของจุดถ่วง $= \frac{a}{A} \times g'g''$

อธิบายเป็นคำพูดได้ดังต่อไปนี้

เนื้อที่ทั้งหมด A คูณระยะเลื่อนของมันเท่ากับเนื้อที่เล็กคูณด้วยระยะเลื่อนของมัน

ระยะเลื่อนทางระดับ (Horizontal Shift) $A \times gG = a \times gg$ "

ระยะเลื่อนทางดิ่ง (Vertical Shift) $A \times gG = a \times gg$ "

ตัวอย่าง เรือลำหนึ่งระวางขับน้ำ W ตัน และมีน้ำหนัก w ตันอยู่บนดาดฟ้า น้ำหนักที่ถูกยกไปอีกกราบหนึ่งเป็นระยะทาง d ฟุตในรูป 150 จงหาระยะที่จุดศูนย์ถ่วงเลื่อนไปทางขวาว่าเท่าใด

ถ้า w = 70 ตัน W = 5,000 ตัน d = 30 ฟุต

จุด G จะเลื่อนไปยังจุด G' ดังนั้น GG' จะขนานกับเส้นที่เชื่อมระหว่างจุดเดิมและจุดสุดท้ายของน้ำหนัก

$$GG' \times W = w \times d$$

$$GG' = \frac{w \times d}{W} = \frac{70 \times 30}{5,000} = 0.42 \text{ ฟุต}$$

ตัวอย่าง เรือลำหนึ่งมีระวางขับน้ำ 4,000 ตัน สมมติว่าถ่านหินถูกยกออกหรือใช้ไป 100 ตันทำให้จุดศูนย์ถ่วงเลื่อนไป 18 ฟุต ตามขวางและ 4 ½ ฟุต ทางดิ่ง จงหาว่าจุดศูนย์ถ่วงของเรือจะเลื่อนไปเท่าใด ?

$$\text{จุดศูนย์ถ่วงของเรือเลื่อนไปทางระดับ} = \frac{100 \times 18}{4,000} = 0.45 \text{ ฟุต}$$

$$\text{จุดศูนย์ถ่วงของเรือเลื่อนไปทางดิ่ง} = \frac{100 \times 4.5}{4,000} = 0.11 \text{ ฟุต}$$

5. โมเมนท์อินเนอเซีย (Moment of Inertia)

ตามที่กล่าวมาแล้ว เราให้คำจำกัดความของโมเมนท์ของแรงรอบจุด ๆ หนึ่งว่า เป็นผลคูณของแรงกับระยะทางตั้งฉากจากแรงไปยังจุดนั้น หรือโมเมนท์ของเนื้อที่รอบแกน ๆ หนึ่งคือผลคูณของเนื้อที่กับระยะทางตั้งฉากจากจุดศูนย์ถ่วงไปยังแกนนั้น เราสามารถที่จะหาโมเมนท์ของเนื้อที่ขนาดใหญ่รอบแกน ๆ หนึ่งได้โดยแบ่งเนื้อที่นั้นออกเป็นส่วนเล็ก ๆ แล้วบวกโมเมนท์ส่วนเล็ก ๆ นั้นก็จะได้โมเมนท์ของเนื้อที่ทั้งหมด เราจะสังเกตได้ว่าแรงหรือเนื้อที่นั้นถูกคูณด้วยระยะทางธรรมดาเท่านั้น ต่อไปถ้าเอาระยะทางกำลัง 2 คูณ แทนโมเมนท์ที่ได้นั้น จะไม่ใช่โมเมนท์ธรรมดา อะไรจะนำมาตั้งชื่อโมเมนท์ดีกรีที่สอง (Moment of Second Degree) นี้ ชื่อนั้นเราให้ชื่อว่า โมเมนท์อินเนอเซียของเนื้อที่รอบแกนอันหนึ่ง

ในรูปที่ 38 ให้ 00 เป็นแกนและในเนื้อที่ใหญ่นั้นมีเนื้อที่เล็ก ๆ dA ระยะทาง y จากแกน 00

โมเมนท์อินเนอเซียของเนื้อที่ dA รอบแกน 00

$$= A \times y^2$$

โมเมนท์อินเนอเซียเนื้อที่ทั้งหมดรอบแกน 00

$$= \int y^2 \, dA$$

ตัวย่อของโมเมนท์อินเนอเชีย คือ I โมเมนท์อินเนอเชียของเนื้อที่พื้นราบรอบแกน ๆ หนึ่งมีค่า $= nAn^2$

A เป็นเนื้อที่ทั้งหมดของรูป

h เป็นระยะลึกตั้งฉากกับแกน

n เป็นสัมประสิทธิ์ขึ้นอยู่กับรูปร่างของรูปและตำแหน่งของแกน

ประการแรกเมื่อแกนผ่านจุดศูนย์ถ่วงและขนานกับฐานของรูปนั้น ๆ

สำหรับวงกลม $n = 1/16$ ดังนั้น $Io = 1/16\ Ah^2$

สำหรับรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า $n = 1/12$ ดังนั้น $Io = 1/12\ Ah^2$ ดูรูปที่ 152

สำหรับรูปสามเหลี่ยม $n = 1/8$ ดังนั้น $Io = 1/18\ Ah^2$ ดูรูปที่ 153

ประการที่ 2 เมื่อแกนผ่านด้านหนึ่งของรูปนั้น ๆ

สำหรับรูปสี่เหลี่ยม $n = 1/3$ ดังนั้น $Io = 1/3\ Ah^2$

สำหรับรูปสามเหลี่ยม $n = 1/3$ ดังนั้น $Io = 1/3\ Ah^2$

ตัวอย่าง สี่เหลี่ยมจตุรัสด้านยาว 2 รูป ประกอบติดกันเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า จงหาโมเมนท์อินเนอเชีย เมื่อแกนผ่านด้านร่วม

มีวิธีคิดได้ 2 วิธีคือ

1) วิธีแรกคิดว่า แกนอยู่ที่ด้านหนึ่งด้านใดของรูปหนึ่งแล้วเอา 2 คูณ

$n = 1/3,\ A = a^2,\ h^2 = a^2$

โมเมนท์อินเนอเชียรอบแกนร่วมรูปเดียว

$n = Ah^2 = 1/3 .\ a^2 .\ a^2 = 1/3\ a^4$

2) คิดว่ารูปนี้เป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า แกนผ่านจุดศูนย์ถ่วงขนานกับฐาน

$h = 2a,\ a = 2a^2,\ n = 1/12$

โมเมนท์อินเนอเชียทั้งหมด $I = 1/12 \times 2a^2 \times 4a^2 = 2/3\ a^4$

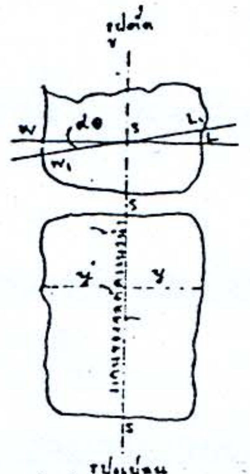
6. จงหาโมเมนท์อินเนอเชียของพื้นรอบแกน ๆ หนึ่ง ซึ่งขนานและห่างจากแกนที่ผ่านจุดศูนย์ถ่วงของพื้นที่นั้นเป็นระยะทางอันหนึ่ง โดยมีระยะห่างจากแกนทั้งสอง

สมมติว่าโมเมนท์อินเนอเชียของพื้นที่รอบแกน 00 ซึ่งผ่านจุดศูนย์ถ่วง และขนานกับฐาน

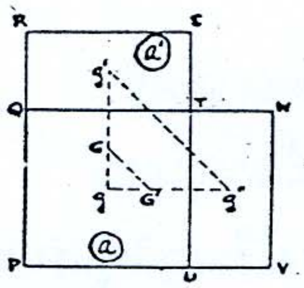
$$I = 1/12\ Ah^2$$

เนื้อที่ A นี้มีแกนห่างจากแกน 00 เท่ากับ สมมติให้ เป็นโมเมนท์อินเนอเชียทั้งหมด ดังนั้นโมเมนท์อินเนอเชียทั้งหมดรอบแกน 00

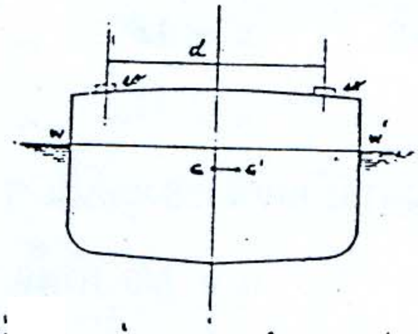
$$I = Io + Ay^2$$



รูปที่ 35 การหาจุดเซ็นเตอร์ออฟโฟลเทชั่น (CENTER OF FLOTATION) หรือ
จุดศูนย์กลางความถ่วงของพื้นที่แนวน้ำ (CENTER OF GRAVITY OF WATERPLANE)



รูปที่ 36 การเคลื่อนของจุดศูนย์ถ่วง (SHIFT) เนื่องจากการเคลื่อน หรือการโยกย้าย
เนื้อที่ หรือปริมาตร หรือ น้ำหนักไปจากที่เดิม



รูปที่ 37 การเคลื่อนของจุดศูนย์ถ่วงของเรือเนื่องจากมีการ
เคลื่อนย้ายน้ำหนักจากกราบหนึ่งไปยังอีกกราบหนึ่ง

ตัวอย่าง ในรูปที่ 40 กำหนดให้โมเมนท์อินเนอเชียของรูปสามเหลี่ยมรอบแกนที่ผ่านจุดศูนย์ถ่วงและขนานกับฐานเท่ากับ $1/18\ Ah^2$ จงหาโมเมนท์อินเนอเชียของรูปสามเหลี่ยมรอบแกนที่ผ่านฐานของรูปสามเหลี่ยมนั้น

ตามสูตร $I = Io + Ay^2$

$$= 1/18\ Ah^2 + A(\frac{h^2}{3}) = 1/18\ Ah^2 + A\frac{h^2}{9}$$

$$= 1/6\ Ah^2$$

ซึ่งตรงกับค่าของ n เมื่อแกนผ่านฐานที่กล่าวมาแล้ว

ตัวอย่าง จงหาโมเมนท์อินเนอเชียของสามเหลี่ยมซึ่งมีเนื้อที่ A มีความสูงรอบแกน ซึ่งผ่านจุดยอดและขนาดกับฐาน (ดูรูปที่ 40)

$$I = Io + Ay^2$$

$$= 1/18\ Ah^2 + A\,(2/3\,h)^2 = 1/18\ Ah^2 + 4/9\ Ah^2$$

$$= 1/2\ Ah^2$$

ตัวอย่าง (ดูรูปที่ 39) รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้ารูปหนึ่ง กว้าง 3 นิ้ว ยาก 4 นิ้ว จงเปรียบเทียบโมเมนท์อินเนอเชีย รอบแกนที่ผ่านจุดศูนย์ถ่วงและขนานกับฐานด้านยาว กับแกนที่ผ่านจุดศูนย์ถ่วงขนานกับฐานด้านสั้น

I_1 = รอบแกนที่ผ่านจุดศูนย์กลาง ขนานกับฐานด้านยาว

I_2 = รอบแกนที่ผ่านจุดศูนย์ถ่วง ขนานกับฐานด้านสั้น

$$I_1 = 1/12 \times (3 \times 4) \times 3^2 = 9$$

$$I_2 = 1/12 \times (3 \times 4) \times 4^2 = 16$$

เรโช = 9 : 16

7. หาโมเมนท์อินเนอเชียของเนื้อที่ราบส่วนหนึ่งเป็นเส้นโค้ง

ใช้รูปที่ 30 ตามในรูปหาเนื้อที่เล็ก ๆ สูง PQ = y

กว้าง dx

$\therefore$ โมเมนท์อินเนอเชียของเนื้อที่สี่เหลี่ยมผืนผ้า ydx รอบฐาน OD

$$1/3\,(y.dx) \times y^2 = 1/3\ y^3\ dx$$

ซึ่งมาจากสูตรที่กล่าวมาแล้ว คือ $I = 1/3\ Ah^3$ ในพื้นที่นี้ $y = h$

ฉะนั้น โมเมนท์อินเนอเชียทั้งหมด $= 1/3 \int y^3\ dx$

แล้วนำเข้าสูตรซิมสันดังตัวอย่าง

จำนวน ออร์ดิเนต	ครึ่งออร์ดิเนต พื้นที่แนวน้ำ	ครึ่งออร์ดิเนต กำลังสาม	ตัวคูณ ซิมสัน	ฟังชันของกำลังสาม f (MI)
1	0.05	-	1	404
2	4.65	101	4	404
3	10.05	10.15	2	2,030
4	14.30	2924	4	11,696
5	16.75	6499	2	9,398
6	17.65	5498	4	21,992
7	17.40	5268	2	10,536
8	16.20	4252	4	17,008
9	13.55	2488	2	4,976
10	9.65	899	4	3,596
11	3.65	49	1	49

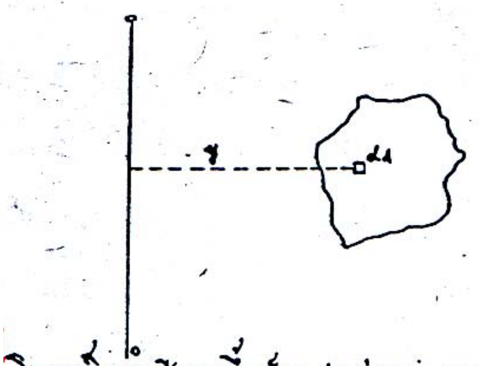
ผลรวมของฟังชันกำลังสาม 81,685

โมเมนท์อินเนอเชียรอบเส้นศูนย์กลางลำเรือทั้งสองกราบ

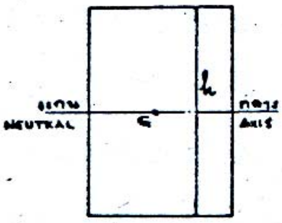
$= 2/3$ ตัวประจำสูตร $1/3 \times h \times f\,(MI)$

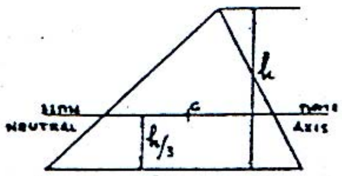
$= 2/3 \times 1/3 \times 28 \times 81.685$ นิ้ว^4 $=$ 508,262 นิ้ว^4

ครึ่งของออร์ดิเนตใส่ในช่องที่ 2 ค่ากำลัง 3 ใส่ในกล่องที่ 3 ไม่จำเป็นต้องเอาทศนิยมด้วย ในช่องที่ 3 ใช้ค่าจำนวนเต็มก็พอแล้ว ค่ากำลัง 3 เมื่อคูณด้วยตัวคูณซิมสันแล้วใส่ในช่องที่ 5 ผลบวกของผลคูณค่ากำลัง 3 ปรากฏข้างล่างตัวคูณ $1/3 \times 28$ เป็นตัวคูณซิมสัน กฎที่ 1 2/3 เป็นเทอมของ $2/3 \int y^3$ dx ดังนั้นตัวคูณจึงเป็น $1/3 \times 28 \times 2/3$ เมื่อเอาผลบวกของผลคูณกำลังสามมาคูณด้วยแล้วจะได้ค่าโมเมนท์อินเนอเชียของเนื้อที่แนวน้ำรอบแกนกึ่งกลางลำตามยาว



รูปที่ 38 โมเมนท์อินเนอร์เชียของพื้นที่เล็ก dA ห่างจากแกน OO เป็นระยะทาง y



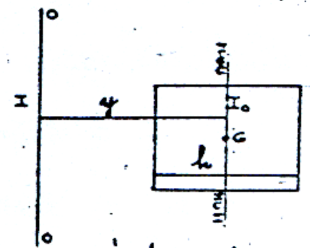


รูปที่ 39 โมเมนท์อินเนอร์เชียรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้ารอบแกนที่ผ่านจุดศูนย์ถ่วงเนื้อที่

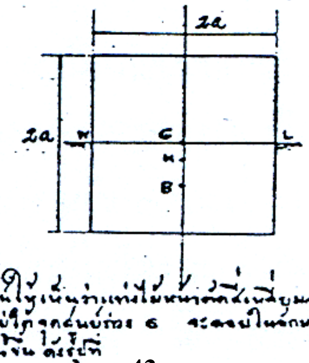
$I = \frac{1}{12} A h^2$

รูปที่ 40 โมเมนท์อินเนอร์เชียรูปสามเหลี่ยม, รอบแกนที่ผ่านจุดศูนย์ถ่วงเนื้อที่

$I = \frac{1}{18} A h^2$



รูปที่ 41 โมเมนท์อินเนอร์เชียของสี่เหลี่ยมผืนผ้ารอบแกนกลางของตัวเองและเมื่อหมุนรอบแกนภายนอก OO ซึ่งห่างจากแกนกลาง y , $I = I_0 + Ay^2$



รูปที่ 42 ท่อนไม้รูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสลอยน้ำอยู่ในลักษณะนี้มีความทรงตัวไม่ดี UNSTABLE ตำแหน่ง M อยู่ใต้จุดศูนย์ถ่วง G จะลอยในลักษณะนี้ไม่ได้ และจะคว่ำ (CAPSIZE DOWN และลอยเอาด้านข้างขึ้น ดังรูปที่ 43

8. การประมาณโมเมนท์อินเนอเชียของพื้นเนื้อที่แนวน้ำรอบแกนกึ่งกลางตามยาว

ได้ทราบแล้วว่าโมเมนท์อินเนอเชีย ของรูปซึ่งมีลักษณะแน่นอน เช่นรูปสี่เหลี่ยม เป็นต้น มีโมเมนท์อินเนอเชียรอบแกน ซึ่งผ่านจุดศูนย์ถ่วง และขนานกับฐานเท่ากับ nAh^2 ซึ่งค่าของ n เปลี่ยนไปตามแต่รูปนั้นจะเป็นรูปอะไร รูปวงกลม n = 1/6 รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า n = 1 ½ รูปสามเหลี่ยม

n = 1/18 ดังนั้นเราสามารถที่จะให้สูตรสำหรับหาโมเมนท์อินเนอเชียของพื้นที่แนวน้ำรอบแกนกึ่งกลางตามยาวได้ เพราะการหาโมเมนท์อินเนอเชียตามที่กล่าวมาแล้ว ไม่สะดวกยาวมากดังจะอธิบายต่อไปนี้ เราทราบแล้วว่าเนื้อที่แนวน้ำมีสูตร = k LB

L = ความยาว

B = ความกว้าง

K = สัมประสิทธิ์ความเพรียวของเรือ

ดังนั้นโมเมนท์อินเนอเชียของเนื้อที่แนวน้ำรอบแกนกึ่งกลางตามยาว

$$I = nLC.C^2 = nLB^3$$

n ตัวนี้เป็นสัมประสิทธิ์ใหม่เปลี่ยนแปลงไปตามรูปของเนื้อที่แนวน้ำ ถ้าเราสามารถจะหาค่าของ n สำหรับเนื้อที่แนวน้ำธรรมดาได้ จะเป็นการสะดวกในการตรวจผลการคำนวณของเราได้อย่างดี สมมติว่าแนวน้ำมีรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า ค่าของ n เป็น 0.08 แนวน้ำ มีรูปร่างเป็นรูปร่างเป็นรูปสามเหลี่ยมสองรูป n = 0.02 ค่า 2 ค่าที่กล่าวมาแล้วนั้นเป็นค่าที่มากที่สุด และน้อยที่สุด ดังนั้นพื้นที่แนวน้ำที่มีรูปร่างอื่น ๆ จะมีค่าอยู่ในระหว่างนี้ 0.03 กับ 0.08 นี้

เรือที่มีรูปร่างพื้นที่แนวน้ำเพรียวมาก n = 0.04

เรือที่มีรูปร่างพื้นที่แนวน้ำเพรียวปานกลาง n = 0.05

เรือที่มีรูปร่างพื้นที่แนวน้ำอ้วน n = 0.06

ตัวอย่าง โมเมนท์อินเนอเชียของพื้นที่แนวน้ำ ตามที่คำรวณไว้ข้างบนได้เท่ากับ 508,262 นิ้ว^4 และเรือลำนี้ยาว 280 ฟุต กว้าง 35.3 ฟุต เราจะหาสัมประสิทธิ์ได้ดังนี้.-

$$I = nLB^3$$

$$N = \frac{I}{LB^3} = \frac{508.262}{280 \times 35,3^3} = .041$$

ดังนั้นพอรู้ว่าเรือนี้มีลักษณะหัวแหลม

9. สูตรใช้สำหรับหาระยะรัศมีเมตาทางขวาง บีเอ็ม (Transverse Metacentric Radius, BM)

เรากล่าวมาแล้ว ถึงเรื่องการหาจุดศูนย์กลางความลอย ในเมื่อเราทราบส่วนที่อยู่ใต้แนวน้ำ ต่อไปนี้จะได้กล่าวถึงการหาระยะรัศมีเมตา BM เมื่อทราบเรื่องนี้แล้วเราสามารถที่จะกำหนดตำแหน่งของเมตาทางขวาง M ของเรือได้

สมมติให้ตามรูปที่ 33 เรือเอียงไปเป็นมุมเล็กน้อย (ตามในรูปมากเกินความจริง)

B = เป็นศูนย์กลางความลอยเมื่อเรือตั้งตรง (Upright Position) แนวน้ำ W.L.

B' = เป็นศูนย์กลางความลอยเมื่อเรือเอียง (Inclined Position) แนวน้ำ $W'.L'.$

v = ปริมาตรรูปลิ่มที่จมและไม่จมน้ำ SLL , WSW

V = เป็นปริมาตรระวางขับน้ำทั้งหมด

g เป็นจุดศูนย์ถ่วงของรูปลิ่มไม่จมน้ำ (Emerged Wedge)

g' เป็นจุดศูนย์ถ่วงของรูปลิ่มจมน้ำ (Immersed Wedge)

โดยใช้หลักในบทที่ 18 BB' ต้องขนานกับ gg'

$$BB' \times V = gg' \times v$$

$$BB' = \frac{gg' \times v}{V}$$

รูปร่างภายใต้แนวน้ำของระวางขับน้ำใหม่เท่ากับโยกย้ายรูปลิ่มที่ไม่จมน้ำไปเพิ่มอีกข้างหนึ่งในการที่เรือเอียงนี้มุมน้อยมาก ดังนั้น

$$\frac{BB'}{BM} = \sin\theta = \tan\theta$$

$$BB' = BM \sin\theta$$

ดังนั้นเราพอจะหาระยะรัศมีเมตา BM ถ้าเราทราบค่าของ gg' x v สำหรับ V นั้นเราทราบแล้วเพราะเป็นปริมาตรระวางขับน้ำของเรือ ในรูปที่ 43 WL และ $W'.L'.$ เป็นแนวน้ำเดิมและแนวน้ำใหม่ตัดกันที่จุด S กึ่งกลางลำเฉพาะเมื่อเรือเอียงเป็นมุมน้อย ๆ จึงคิดเสียว่า WSW' และ LSL' เป็นรูปลิ่มไม่จมน้ำ และรูปลิ่มจมน้ำได้ เส้น WW', LL' ถือเป็นเส้นตรงให้ y เป็นความยาวครึ่งหนึ่งของความกว้างของเรือ

$$WW' = LL' = y \sin\theta$$

ดังนั้น เนื้อที่ของสามเหลี่ยมรูปใดรูปหนึ่ง = 1/2 x ฐาน x สูง

$$= 1/2.\ y.y.\sin\theta = 1/2\ y^2 \sin\theta$$

ให้ gg' เป็นจุดศูนย์กลางความถ่วงองสามเหลี่ยมรูปลิ่ม WSW', LSL' ตามลำดับ ถ้า เล็กมาก $gg' = 4/3$ ของ y หรือ (2/3 y จากจุดยอด S ถึง g ของรูปสามเหลี่ยม)

โมเมนท์การโยกย้ายของเนื้อที่ (Moment or Transference of Area) WSW' ไปอยู่ LSL'

$$= \text{เนื้อที่ } WSW' \times gg'$$

$$= \tfrac{1}{2} \times y^2 \sin\theta \times 4/3\ y$$

$$= 2/3\, y^3 \sin\theta$$

ถ้าสามเหลี่ยมนั้นมีความยาวไปทางหัวทางท้าย = dx โมเมนท์การโยกย้ายของปริมาตร $= 2/3\ y^3 \sin\theta\ dx$ ถ้าปริมาตรนี้ยาวตลอดแนวน้ำและถูกโยกย้ายไปทั้งหมด ก็จะได้โมเมนท์การโยกย้ายของปริมาตรทั้หมด v ถูกย้ายไปทั้งหมดระยะ gg'

ดังนั้น $v \times gg' = 2/3 \int y^3 \sin\theta\ dx$

แต่ $v \times gg' = V \times BB' = V \times BM, \sin\theta$

$\therefore V \times DM \sin\theta = 2/3 \int y^3 \sin\theta\ dx$

$$\text{ฉะนั้น ระยะรัศมีเมตาทางขวาง } MB = \frac{2/3 \int y^3 \sin\theta\ dx}{V \times \sin\theta}$$

$$\therefore \quad BM = \frac{2/3 \int y^3\ dx}{V} = \frac{I}{V}$$

y = ระยะครึ่งความกว้างของเรือ (Semi – Ordinate)

การหาระยะรัศมีเมตา BM ทางขวางซึ่งจะนำไปเขียนเส้นโค้งไฮโดรสแตติค (Hydrostatic Curves) นั้นจะพบในตารางคำนวณระวางขับน้ำแผ่นที่ 2 (Displacement sheet No.2) และมีคำอธิบายอยู่ในแผ่นที่ 2 แล้ว เส้นโค้งระยะรัศมีเมตรา BM นี้มีลักษณะเหมือนเส้นโค้งไฮโดรสแตติค หมายเลข 10

ตัวอย่าง เรือลำเลียงลำหนึ่งมีลักษณะเป็นหีบยาว 120 ฟุต กว้าง 30 ฟุต กินน้ำลึก 10 ฟุต ให้หาระยะรัศมีเมตา BM ทางขวาง

ในกรณีนี้พื้นที่แนวน้ำ เป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า

$= 120 \times 30$ ตร.ฟุต

ต้องการทราบโมเมนท์อินเนอเชียรอบเส้นแกนกลางความยาว ใช้สูตรโมเมนท์อินเนอเชีย รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้ารอบแกนผ่านจุดกึ่งกลางขนานกับฐาน

$$I = 1/2 \times A \times h^2 = 1/2 \times 120 \times 30 \times 30^2$$

$= 270{,}000$ ฟุต^4

ปริมาตรระวางขับน้ำ $= 120 \times 30 \times 10 = 36{,}000$ ลบ.ฟุต

ระยะรัศมีเมตาทางขวาง BM $= \dfrac{I}{V} = \dfrac{I}{V} = \dfrac{270{,}000}{36{,}000} = 75$ ฟุต

ตัวอย่าง แพพอนทูนลูกหนึ่งกินน้ำลึก 20 ฟุต มีหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมคางหมูเท่ากันตลอด กว้างที่แนวน้ำ 30 ฟุต กว้างที่ฐาน 20 ฟุต ยาว 120 ฟุต จงหาระยะรัศมีเมตา BM ทางขวาง

หาโมเมนท์อินเนอเชียของพื้นแนวน้ำรอบแกนที่ผ่านจุดกึ่งกลางขนานกับฐาน

$A = 30 \times 120 = 3{,}600$ ตร.ฟุต

Nn รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า $= 1/12$

$H = 30$

$I = 1/12 \times 3600 \times 30^2 = 270{,}000$ ฟุต^4

ตัวอย่าง แพซุงแพหนึ่งมีซุงอยู่ 2 ท่อนขนานกัน ผูกห่างกัน 10 ฟุต จากศูนย์กลางถึงศูนย์กลางซุงนั้นมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 ฟุต ลอยอยู่โดยแกนกลางอยู่บนผิวน้ำให้หารัศมีเมตาบีเอ็ม

ในที่นี้ไม่ได้กำหนดความยาวให้ แต่ไม่สำคัญสมมติให้ยาว ℓ ฟุต หาโมเมนท์อินเนอเชียได้ 2 วิธี

1) ตัดพื้นที่แนวน้ำเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า $5 \times \ell$ จากเนื้อที่สี่เหลี่ยมใหญ่ $15' \times \ell$

$$I = 1/12\,(\ell \times 15)\,.\,15^2 - 1/12\,(5' \times \ell)\,5^2 = \frac{3250\,\ell}{12}$$

2) เราอาจใช้สี่เหลี่ยมผืนผ้าแยกกัน หาโมเมนท์อินเนอเชียรอบเส้นแกนกลาง 5 ฟุต จากเส้นที่ผ่านแกนกลางของสี่เหลี่ยมผืนผ้านั้น

$$I = Io + Ay^2 = 1/12\,(5 \times \ell)\,5^2 + (5 \times \ell)\,5^2 = \frac{1625\,\ell}{12}$$

สี่เหลี่ยม 2 รูป $= \dfrac{2 \times 1625\,\ell}{12} = \dfrac{3250\,\ell}{12}$

ปริมาตรระวางขับน้ำ $= \dfrac{\pi\, d^2 \times \text{ยาว}}{4 \times 2} \div \dfrac{\pi\, d^2 \times \text{ยาว}}{4 \times 2} = \dfrac{\pi\, d^2 \times \text{ยาว}}{4 \times 2}$

$= \dfrac{22}{7} \times \dfrac{1}{4}\, 5^2\, \ell = \dfrac{275\,\ell}{14}$

ระยะรัศมีเมตา BM $= \frac{I}{V} = \frac{3250\,\ell}{12} \times \frac{14}{275\,\ell}$

ตัวอย่าง แพซุง มีซุง 3 ตัน เส้นผ่าศูนย์กลาง 5 ฟุต ผูกขนานกัน กว้างทั้งหมด 25 ฟุต ลอยอยู่ผิวน้ำ ให้หาระยะรัศมีเมตาทางขวาง

ใช้ $I = Io + Ay^2$

สำหรับวงกลม 2 วงริมนอก บวกด้วย Io ของซุงท่อนกลาง

ด้านซ้าย $= Io + Ay^2 = 1/12\,(5 \times \ell)\ 5^2 + (5 \times \ell)\ 10^2$

ด้านขวา $= 1/12\,(5 \times \ell)\ 5^2 + (5 \times \ell)\ 10^2$

Io ตรงกลางรอบแกนที่ผ่านศูนย์กลาง $= 1/12\,(5 \times \ell)\ 5^2$

I ทั้งหมด $= 3 \times 1/12\,(5 \times \ell)\ 5^2 + 2\,(5 \times \ell)\ 10^2$

$$= \frac{125\,\ell}{4} + 1000\,\ell = \frac{4125\,\ell}{4}$$

ปริมาตรระวางขับน้ำ $= 3 \times 1/2 \times \frac{\pi}{4} d^2 \times \ell = 3 \times 1/2 \times \frac{22}{7} \times 1/2 \times 25\ell$

$$= \frac{33 \times 25\ell}{28}$$

ระยะรัศมีเมตา BM $= \frac{I}{V} = \frac{4125\,\ell}{4} \times \frac{38}{33 \times 25\ell} = 35$ ฟุต

10. สูตรหาระยะรัศมีเมตา BM ทางขวางโดยประมาณ

เราทราบแล้วว่า $BM = \frac{I}{V}$

และ $I = nLB^3$

$V = k.LBD.$

d = ระดับน้ำเฉลี่ย

k = สัมประสิทธิ์

ดังนั้น $BM = \frac{I}{V} = \frac{nLB^3}{k.LBD.} = a.\frac{B^2}{d}$

a = เป็นสัมประสิทธิ์ใหม่ที่ได้จาก n/k

เสอร์ วิลเลียมไวท์ ให้ค่าของ a ไว้ในระหว่าง 0.80 – 0.1 ค่าโดยปกติของเรือสินค้า = **0.09**

11. จะพิสูจน์ให้เห็นว่าแท่งไม้มีหน้าตัดเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสและความถ่วงจำเพราะ 0.5 ไม่สามารถจะ ลอยในน้ำจืดได้ในลักษณะด้านข้างขนานกับพื้นน้ำ

ซุงซึ่งมีความถ่วงจำเพาะ 0.5 ลอยในน้ำได้โดยครึ่งหนึ่งจะจมลงไปในน้ำ และจะทรงตัวดีอยู่ได้ต่อเมื่อหน้าตัดเอียงไปเอาสันข้างหนึ่งซึ่งจุดเมตาต้องอยู่เหนือจุดศูนย์ถ่วง

สมมติให้หน้าตัดของซุงในรูปที่ 42 มีด้านยาว 2a และสมมติว่าซุงลอยในลักษณะด้านข้างขนานกับผิวน้ำ ดังนั้นระดับน้ำจะเท่ากับ a ผ่านจุดศูนย์ถ่วงของซุง ศูนย์กลางความลอย = 1/2 a

$$BM = \frac{I}{V}$$

แต่ BG = 1/2 a แสดงว่าจุดเมตา m ต่ำกว่าจุดศูนย์ถ่วง C ซุงจึงลอยตั้งด้านข้างไม่ได้ จะลอยได้ต่อเมือเอามุมหนึ่งมุมใดขึ้น ดูรูปที่ 43 ซึ่งจะคำนวณได้ Bm = 0.943 a

$BG = 0.741\ a$

$I = 1/n \times A \times h$

$I = 1/12 \times (2a\sqrt{2} \times \ell) \times (2a \times \sqrt{2})^2$

$V = 1/12 \times a\sqrt{2} \times 2a\sqrt{2} \times \ell$

$$BM = \frac{1/12 \times (2a \times \sqrt{2} \times \ell) \times (2a \times \sqrt{2})^2}{1/12 \times a\sqrt{2} \times 2a \times \sqrt{2} \times \ell}$$

$$= \frac{4a}{3\sqrt{2}} = \frac{2a\sqrt{2a}}{3}$$

$\therefore BM = 0.94\ a$

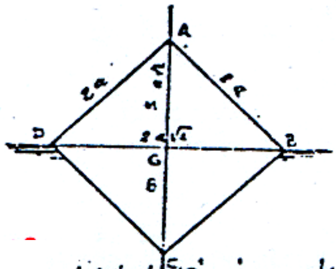
$AC = \sqrt{4a^2 + 4a^2} = \sqrt{8a^2} = 2a\sqrt{2}$

$AG = GC = a\sqrt{2} = 1.414\ a$

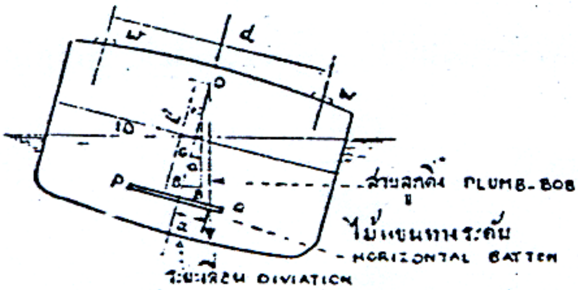
$BC = 2/3\ a\sqrt{2} = .933\ a$

$BG = .481\ a$

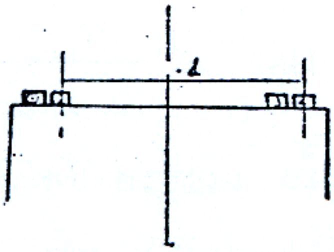
จะเห็นว่าจุดศูนย์ถ่วงอยู่ต่ำกว่าจุดเมตาเท่ากับ 0.459a แท่งไม้หรือเรือจึงตรงตัวอยู่ได้



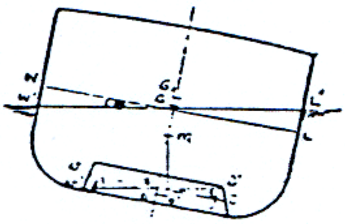
รูปที่ 43 แท่งไม้หน้าตัดสี่เหลี่ยมจตุรัสจะลอยตามมุมที่เห็น



รูปที่ 44 การทดลองเอียงเรือ(INCLINING EXPERIMENT) เพื่อหาจุดศูนย์ถ่วง(CENTER OF GRAVITY) ของเรือ $GM = \frac{w \times d}{W \times a/l}$



รูปที่ 45 การใช้น้ำหนักเอียงเรือ (BALLAST) มากกว่า 1 ก้อน



รูปที่ 46 ผิวน้ำอิสระ (FREE SURFACE) ทำให้ความทรงตัวของเรือลดน้อยลง โดยไปทำให้ระยะความสูงเมตา GM ลดลง

12. การหาระยะความสูงเมตาโดยการทดลองเอียงเรือ (Finding The Metacentric Height by Inclining Experiment)

การทดลองเอียงเรือ

เราได้กล่าวมาแล้วถึงความทรงตัวหาโดยทางเรขาคณิตอย่างล้วน ๆ เช่นสูตรที่ใช้และหลักสำคัญที่เกี่ยวข้องในการหาตำแหน่งของจุดเมตาทางขวาง m ซึ่งเป็นระยะจากจุดศูนย์กลางความลอย B สำหรับเรื่องความทรงตัวตอนนี้เราต้องทราบตำแหน่งของจุดเมตาเหนือจุดศูนย์ถ่วง G ด้วย ซึ่งจะทำได้จากการเอียงเรือเท่านั้น วิธีทำนั้นต้องใช้น้ำหนักซึ่งรู้น้ำหนักถ่วงให้เรือเอียง ครั้งแรกวางไว้กึ่งกลางลำ แล้วย้ายน้ำหนักนั้นไปอีกกราบหนึ่ง การทำเช่นนี้สามารถบอกได้ทันทีว่า จุดศูนย์ถ่วงเดิมจะย้ายไปอยู่ที่จุดศูนย์ถ่วงใหม่ เนื่องจากการย้ายน้ำหนักบนดาดฟ้าเท่าใด น้ำหนักของเรือเราคำนวณได้จนถึงแนวน้ำนั้น

จากข้อ 18.4 ทำให้เราทราบได้ว่าเมื่อเคลื่อนย้ายน้ำหนัก w ไปเป็นระยะทาง d นั้น จุดศูนย์ถ่วงของเรือจะเคลื่อนไป

$$GG' \times \triangle = w \times d$$

$$GG' = \frac{w \times d}{\Delta}$$

ในที่นี้จะเห็นว่าเรือเอียงไปเป็นมุม ๆ หนึ่ง ซึ่งจุด G' และ B' อยู่ในเส้นดิ่งเดียวกันมุมเอียงนี้น้อยมาก M จะเป็นจุดเมตา ถ้า เป็นมุมเอียงของเรือ

ระยะ M เป็นความสูงเมตา (Metacentric Height)

$$\tan\theta = \frac{GG'}{GM}$$

$$GM = \frac{GG'}{\tan\theta}$$

เอาค่า $GG' = \frac{w \times d}{\Delta}$ มาแทน $GM = \frac{w \times d}{\Delta \times \tan\theta}$

ในที่นี้เราไม่ทราบแต่ $\tan\theta$ เท่านั้น และจะหาได้ดังต่อไปนี้ เลือกหาที่สะดวก 2 หรือ 3 แห่งในเรือ เช่นที่ฝากั้น เป็นต้น ใช้ลูกดิ่ง (Plumb-Bobs Pendulumn) แขวนเข้าที่ศูนย์กลางของเรือยาวพอสมควรและมีระยะบอกว่าลูกดิ่งเอียงไปเท่าใด ตามในรูป FQ เป็นไม้แบนบอกระยะไว้ก่อนเอียงเรือ เส้นลวดผูกลูกดิ่งต้องอยู่ในแนวดิ่งจริง ๆ นั่นแสดงว่าเรือตรงดีแล้ว เมื่อใช้น้ำหนักถ่วงกราบหนึ่งกราบใดเรือจะเอียง และจะทำให้ลูกดิ่งเอียงไปเท่านั้นด้วย ถ้า เป็นระยะลูกดิ่งจาก PQ ถึงจุด O

และ aเป็นระยะที่ลูกดิ่งเลื่อนไป (Deviation หรือ Detlection) บนไม้แบนเป็นนิ้ว เราจะหาได้ดังนี้.-

$$\tan\theta = \frac{a}{\ell}$$

$$\text{ดังนั้น}\quad GM = \frac{w \times d}{\Delta \times a/\ell}$$

ในทางใช้การเป็นการสะดวกต่อการตรวจผลที่ได้รับ โดยการแบ่งน้ำหนักนั้นออกเป็น 4 ส่วนเท่ากัน 2 ส่วนต่อหนึ่งกราบ ตามในรูปที่ 45 มีวิธีทำดังนี้.-

(ก) ดูเรือให้ตั้งตรงในกรณีนี้ ลูกดิ่งจะอยู่แนวดิ่งจริง ๆ

(ข) ยกน้ำหนัก 1 กราบซ้ายไปไว้บนน้ำหนัก 3 กราบขวา เป็นระยะทาง d ก็จะวัดระยะลูกดิ่งเลื่อนได้ เมื่อเรือเอียงคงที่แล้ว

(ค) ยกน้ำหนัก 2 กราบซ้ายไปไว้บนน้ำหนัก 4 กราบขวา เป็นระยะทาง d ก็จะหาระยะลูกดิ่งเลื่อนได้

(ง) ยกน้ำหนัก 1, 2 มาไว้ที่เดิม เรือจะตั้งตรงดังกล่าว

(จ) ยกน้ำหนัก 3 จากกราบขวาไปไว้บนน้ำหนัก 1 กราบซ้าย เป็นระยะทาง d ก็จะหาระยะลุกดิ่งเลื่อนได้

(ฉ) ยกน้ำหนัก 4 กราบขวาไปไว้บนน้ำหนัก 2 กราบซ้าย เป็นระยะทาง d ก็จะหาระยะลูกดิ่งเลื่อนได้

ถ้าใช้ลูกดิ่ง 2 เส้น จะได้ผลการคำนวณถึง 8 ผลลัพธ์ ถ้าใช้ลูกดิ่ง 3 เส้น ก็จะได้ผลการคำนวณ 12 ผลลัพธ์ ซึ่งเป็นการแน่นอนดีถ้าใช้การคำนวณครึ่งเดียวอาจผิดพลาดได้

18.12.1 ข้อควรระวังในเวลาทดลองเอียงเรือ ถ้าน้ำหนักอับเฉา (Ballast) ที่ใช้ถ่วงให้เรือเอียงนั้นคำนวณไว้แล้วและน้ำหนักก้อนนี้สามารถทำให้เรือเอียงไปเป็นมุม 4 หรือ 5 ดีกรีเมื่อย้ายไปไว้อีกกราบหนึ่งเช่นนี้เราพอจะคำนวณหาระยะความสูงเมตาได้หยาบ ๆ น้ำหนักอับเฉาเช่นนี้พร้อมที่จะใช้ในการเอียงเรือ ผู้อำนวยการดูแลทั่วไปควรตรวจตราเกี่ยวกับน้ำหนักที่ใช้ถ่วง ต้องตรึงให้แน่น ท้องเรือไม่ควรมีน้ำ (Free Water) จะเกิดขึ้น

น้ำในหม้อน้ำไม่ควรมี แต่ถ้าจะมีก็ต้องมีให้เต็ม

ถ้าสามารถจะทำได้ควรเลือกทำในวันที่มีอากาศดี ลมสงบนิ่งคนที่ไม่มีหน้าที่ส่งขึ้นฝั่งให้หมด ควรตรึงเรือให้หัวหรือท้ายทวนลม ของที่เคลื่อนที่ได้เอาขึ้นบกให้หมดพร้อมด้วยรู้ตำแหน่งตลอดทั้งน้ำหนักที่นำลงมาในเรือเพื่อทำให้เรือเอียง พร้อมทั้งตำแหน่ง

ต่อไปนี้เป็นตัวอย่างผลการทดลองเอียงเรือ

รายงานการทดลองเอียงเรือ ร.ล. …………………….. วันที่……….พ.ศ. …………………
ที่ …………………………………ความแน่นอนของน้ำ ……….…………….ลบ.ฟุต ต่อ 1 วัน

กินน้ำลึกหัว …………………………………………………. 16 ฟุต 9 นิ้ว

กินน้ำลึกท้าย………………………………………………… 22 ฟุต 10 นิ้ว

ระวางขับน้ำ ณ แนวน้ำนี้……………………………………….. 5372 ตัน

ลมอ่อนเอาหัวสู้ลม

น้ำหนักที่ใช้ถ่วงให้เรือเอียงใช้	25	ตัน
ความยาวระหว่างเส้นตั้งฉาก	15	ฟุต
ระยะเลื่อนของน้ำหนักบนดาดห้า	36	ฟุต

	ระยะเลื่อนของลูกดิ่งยาว 15 ฟุต (Deviation of Pendulum)	
	หัว (Forward)	ท้าย (Aft)
ครั้งที่ 1 ยก 12 ½ ตันจาก กราบซ้ายไปกราบขวา	4 1/8“	5 1/8“
ครั้งที่ 2 ยก 12 ½ ตัน จาก กราบซ้ายไปกราบขวา	10 ¼“	4 3/8”
เอาน้ำหนักกลับมาวางกึ่งกลางลำ	เรือตรง right	เรือตรง right
ครั้งที่ 3 12 ยก ½ ตัน จาก กราบขวาไปกราบซ้าย	5 ¼“	5 1/8”
ครั้งที่ 4 ยก 12 ½ ตัน จาก กราบขวาไปกราบซ้าย	10 3/8”	10 ¼“

พฤติภาพของเรือในระหว่างการทดลองมีดังต่อไปนี้.-

- น้ำท้องเรือไม่มี (Bilges Dry)
- น้ำในถังต่าง ๆ ไม่มี
- น้ำในหม้อน้ำไม่มี น้ำเลี้ยงไม่มี น้ำในคอนเดนเซอไม่มี น้ำในหม้อกลั่นไม่มี
- คนทำงานบนเรือ 66 คน
- น้ำหนักเครื่องมือบนเรือ 5 ตัน
- เสากระโดรเรียบร้อย (มีเครื่องครบ)
- เรือโบ๊ตไม่มีบนเรือใหญ่
- ถังน้ำมันมีน้ำมันเต็ม
- สมอและโซ่เรียบร้อย
- ไม่มีเสบียงและสินค้า
- กระซับช่างกลมีครึ่งหนึ่ง
- ตัวเรือเรียบร้อย

ตามการทดลองหาดิวิเอชั่นเฉลี่ย 1/2 (10 ½ + 10 3/8) = 10 5/6 "

= 10.312 นิ้ว

$$GM = \frac{w \times d}{W \times a / \ell} = \frac{25 \times 36 \times 15 \times 12}{5372 \times 10.312} \text{ ฟุต}$$

= 2.92 ฟุต

18.12.2 คุณสมบัติของระยะสูงเมตา เราได้กล่าวถึงเรื่องการหาระยะสูงเมตามาแล้วว่าในบทนี้คุณสมบัติของระยะสูงเมตาขึ้นอยู่กับเหตุ 2 ประการคือ

1) ตำแหน่งของาจุด G

2) ตำแหน่งของจุด M

1) ตำแหน่งของจุด G ขึ้นอยู่กับการกระจายของน้ำต่าง ๆ ภายในเรือตลอดทั้งส่วนโครงสร้างและสินค้าภายในเรือ

2) ตำแหน่งของจุด M ขึ้นอยู่กับรูปร่างของเรือแต่อย่างเดียว และหาตำแหน่งได้ โดยตารางคำนวณทั้งสองแผ่นที่กล่าวมาแล้ว

ตารางที่ 4

ตารางต่อไปนี้ให้ค่าของระยะสูงเมตาของเรือแต่ละชนิดเมื่อบรรทุกเต็มที่

เรือชนิดต่าง ๆ	ความสูงเมตา จีเอ็ม. ฟุต
เรือประจัญบาน (Battle Ships)	6 - 8
เรือบรรทุกเครื่องบิน (Fleet Aircraft Carriers)	6.5 - 8.5
เรือลาดตระเวน (Cruisers)	3 - 5
เรือพิฆาต (Destroyers)	2 - 3
เรือปืนรักษาฝั่ง (Monitors)	12 - 15
เรือเดินมหาสมุทร (Large Liners)	2 - 4
เรือสินค้า (Cargo Vessels)	1 - 3
เรือจูง (Tugs)	1.25 - 1.5
เรือใบ (Sailing Vessels)	2.5 - 3.5

ความสูงเมตา GM ที่ให้กับเรือลำนั้นนำมาจากเรือต่าง ๆ ที่สร้างสำเร็จแล้ว เรือที่ได้ชื่อว่า “ ทื่อ” (Stiff) หมายความว่าเรือลำนั้นเอียงไปมายากเมื่อมีแรงภายนอกมากระทำ เช่นลมที่กระทำกับใบเรือ เรือที่โครงยากเช่นนี้ต้องมีระยะสูงเมตา สูง ซึ่งเราจะสังเกตุเห็นได้จากสมการของโมเมนท์ความทรงตัวสถิต (Moment of statical Stability) คือ $\triangle \times$ GM sin θ , ,$\triangle$ เป็นระวางขับน้ำหรือน้ำหนักของเรือเป็นต้น, เป็นมุมเอียงน้อย ๆ โมเมนท์อันนี้พยายามที่จะทำให้เรือตั้งตรง ซึ่งขึ้นอยู่กับความยาวของความสูงเมตา GMโดยตรง เรือที่ได้ชื่อว่าไหวตัวง่าย (Crank Ship) คือเรือที่เอียงง่าย ๆ เรืออย่างนี้ความสูงเมตาต้องไม่มากไม่น้อยจนเกินไป

ดังนั้นจึงมีพฤติภาพที่ขัดกัน 2 ประการคือ .-

1) ความสูงเมตา GM ต้องสูงพอเพื่อที่จะให้เรือนั้นสามารถต่อต้านการเอียงเนื่องจากแรกภายนอกมากระทำ เช่น ลม ต้องมีความสูงเมตาสูงพอที่เรือจะได้ไม่เอียงง่าย
2) ความสูงเมตา GM ต้องสูงพอประมาณ เพื่อทำให้เรือนั้นมั่นคงไม่โครงง่ายในท้องทะเล เรือที่มีความสูงเมตามาก จะกลับคืนมาจากตำแหน่งเอียงมายังตำแหน่งเดิมทันที เรือที่มีความสูงเมตาน้อยพอสมควรนั้นมีความสะดวกสบาย เมื่ออยู่ในท้องทะเลอันมีคลื่นเพราะไม่โครงและไม่แข็งทื่อ

ในกรณีของเรือใบมักทำให้มีความสูงเมตา GM 3 – 3 1/2 ฟุต สำหรับงานธรรมดาเพื่อเรือจะ ได้ไม่เอียงมากเนื่องจากลมแรง เรือที่บรรทุกสินค้าเบา ๆ เช่น ขนสัตว์ จะทำให้จุดศูนย์ถ่วงของ

เรือสูงในกรณีนี้ควรใช้น้ำหนักถ่วงไว้ใต้ท้องเรือ เพื่อทำให้จุดศูนย์ถ่วงของเรือต่ำ ซึ่งความสูงเมตาจะยาวขึ้น เรือจะมั่นคงเพราะการเอียงยากขึ้น

เรือสินค้าที่บรรทุกสินค้าเบา ๆ เช่น ขนสัตว์ อาจมีความสูงเมตาเพียง 1 ฟุตได้ อย่างไรก็ตามยังเคยมีบันทึกเกี่ยวกับเรือเดินทางไกล ซึ่งมีความสูงเมตาน้อยกว่า 1 ฟุต จากบันทึกนั้นว่าสบายและมีคุณค่าในทางทะเล มิสเตอร์เดนนี่ อ้างว่าเรือสินค้าชนิดเป็นเรือไอน้ำ ยาว 320 ฟุต บรรทุกสินค้าชนิดเบา มีความสูงเมตาเพียง 0.6 ฟุต เรือลำนี้มีบรรทุกตามรายงานของท่านผู้บังคับการว่าเรือนี้น่าชมเชยเมื่อแล่นอยู่ในท้องทะเล ไม่โครง สะดวกสบายทุกวิถีทาง

13. ผลเกิดขึ้นแก่ความทรงตัวสถิตเนื่องจากมีผิวน้ำอิสระ (Free Surface) ไหลไปมาในเรือ

ตามข้ออ้างในเรื่องการทดลองเอียงเรือหาตำแหน่งของจุดศูนย์ถ่วงของเรือนั้นจะเห็นได้ว่าให้ตรวจดูเป็นพิเศษเรื่องผิวน้ำอิสระที่ไหลไปมาได้เมื่อทำการเอียงเรือเช่น น้ำท้องเรือ น้ำในหม้อน้ำ น้ำในถังรับประทานน้ำที่ไหลไปมาได้นั้น เราเรียกว่า ผิวน้ำอิสระ หมายความว่าไหลไปมาได้อย่างสะดวก สำหรับน้ำในหม้อน้ำเราสามารถจะเอาออกเสียให้หมด หรือทำให้เต็มก็ได้ น้ำในถังก็เช่นเดียวกัน ซึ่งเมื่อทำให้เต็มหรือเอาออกหมดแล้วก็เปรียบเหมือนของแข็งมีจุดศูนย์ถ่วง ณ ตำแหน่งหนึ่งคงที่ แต่ถ้าน้ำในถังนั้นมีอยู่ไม่เต็ม หรือมีน้ำอยู่ใต้ท้องเรือจะปรากฏผลต่อความทรงตัวของเรือโดยจะทำให้ค่าของความสูงเมตา GM ลดน้อยลง ซึ่งจะได้พิสูจน์ให้เห็น ดังต่อไปนี้ (รูปที่ 159) สมมติว่าในถังมีน้ำไม่เต็ม มีผิวน้ำอิสระ W เมื่อเรือยังไม่เอียง และเมื่อเรือเอียงไปเป็นมุมเล็ก ๆ ผิวอิสระนี้ก็จะเปลี่ยนไปเป็น w ซึ่งขนานกับแนวน้ำ $W' L'$ ใหม่ด้วย

ในปริมาตรของลิ่ม wsw' และ = และมีจุดศูนย์ถ่วงเป็น และ ตามลำดับ

b เป็นจุดศูนย์ถ่วงของน้ำในถังทั้งหมดเมื่อผิวน้ำอิสระเป็น เรือยังไม่เอียง

b เป็นจุดศูนย์ถ่วงของน้ำในถังทั้งหมดเมื่อผิวน้ำอิสระเป็น เมื่อเรือเอียงแล้ว

Vo เป็นปริมาตรของน้ำในถังนั้น

ตามข้อ 18.4 bb' ขนานกับ gg'

$$\text{ฉะนั้น} \quad bb' = \frac{vo \times gg'}{Vo}$$

เราคิดหาโมเมนท์การโยกย้าย (Moment of Transference) เช่นเดียวกับรูปลิ่มใหญ่ ตามที่กล่าวมาแล้วในข้อ 18.9 ดังนั้นโมเมนท์การโยกย้ายของรูปลิ่มเล็ก ๆ

$$vo \times gg' = i \times \theta$$

i = โมเมนท์อินเนอเชียของผิวน้ำอิสระของน้ำในถังรอบแกนกึ่งกลาง ความยาวของเรือ (Fore And Aft Axis)

= เชิงมุม (Circular Measure)

แทนค่าในสมการข้างบน $bb' = \frac{i \times \theta}{Vo}$

ลากเส้นดิ่งใหม่จาก b' ตัดเส้นกึ่งกลางลำเรือตามขวางที่ m

$$bb = bm \times \theta$$

$$\therefore \quad bm \times \theta = \frac{i \times \theta}{Vo}$$

$$bm = I / Vo$$

ถ้าน้ำในถังเป็นของแข็งหรือเต็มถังไม่ไหลไปมา จุด b เป็นจุดศูนย์ถ่วงของน้ำจะไม่เปลี่ยนไปจากเดิมเลย แต่ในที่นี้น้ำหนักของน้ำกระทำผ่านจุ b' ในแนว mb' ซึ่งเท่ากับน้ำหนักของน้ำไปกระทำที่จุด m และจุดศูนย์ถ่วงของเรือ G ก็จะเลื่อนขึ้นไปอยู่ใหม่คือ Go

ถ้า Wo เป็นน้ำหนักของน้ำในถังเป็นตัน $= \frac{Vo}{35}$ (น้ำเค็ม)

$$w \times GGo = Wo \times bm$$

$$= \frac{Vo}{35} \times bm$$

$$GGo = \frac{Vo}{35} \times \frac{bm}{w} = \frac{Vo}{V} \times bm$$

$$Bm = \frac{i}{Vo} \quad \ldots\ldots\ldots..$$

$$GGo = \frac{Vo}{V} \times \frac{i}{Vo} = \frac{i}{V}$$

การสูญเสียความสูงเมตา (Lost Of Metacentric Height) ในโมเมนท์ความทรงตัวใหม่เมื่อเรือมีผิวน้ำอิสระ

$$= w \times GoM \ \sin\theta$$

$$= w \times (GM - GGo) \ \sin\theta$$

$$= w \times (GM - i/V) \ \sin\theta$$

ความสูงของเมตาลดลงโดยเท่ากับ $\frac{i}{V}$ เราจะสังเกตได้ในที่นี้ว่าจำนวนน้ำมากหรือน้อย ไม่ได้มาเกี่ยวข้องกับการลดความสูงเมตาเลย แต่สิ่งนั้นคือโมเมนท์อินเนอเชียของพื้นที่ผิวน้ำอิสระที่ไหลไปมาได้นั่นเอง

ดังนั้นความจำเป็นที่จะกำจัดน้ำที่ไหลไปมาได้ก็เป็นที่แจ้งชัดอยู่แล้ว จำนวนน้ำน้อยแต่มีเนื้อที่ผิวหน้าน้ำไหลไปมาได้มาก จะมีผลต่อการสูญเสียระยะสูงเมตา GM มากกว่าจำนวนน้ำมากแต่มีพื้นผิวหน้าน้ำไหลไปมาได้น้อย ถ้าของเหลวนั้นไม่ใช่น้ำจืด หรือน้ำเค็ม ต้องใช้ความถ่วงจำเพราะมาเกี่ยวข้องด้วยดังนี้ การสูญเสียความสูงเมตา $= \frac{Pi}{V}$

P เป็นความถ่วงจำเพาะของของเหลวนั้น

V เป็นปริมาตรระวางขับน้ำทั้งหมด

ตัวอย่าง เรือลำหนึ่งเป็นท้องเรือ 2 ชั้น มีห้องอยู่กลางลำ ยาว 60 ฟุต กว้าง 30 ฟุต มีน้ำทะเลอยู่เล็กน้อย ระวางขับน้ำทั้งหมด 9,100 ตัน จุดศูนย์กลางความถ่วงของเรือ 0.26 ฟุต ใต้แนวน้ำ จงหาว่าความสูงเมตาเดิมลดลงเนื่องจากพื้นที่ผิวหน้าน้ำที่ไหลไปมาได้ว่าเท่าใด ?

ในที่นี้กำหนด ให้ศูนย์กลางความถ่วงของเรือไว้ด้วย จุดนี้จะเคลื่อนตัวขึ้นเท่าใด เนื่องจากน้ำที่มีพื้นผิวไหลไปมาได้

การสูญเสียระยะสูงเมตา $= GGo = \frac{i}{V}$

i โมเมนท์อินเนอเชียรอบแกนที่ผ่านจุดศูนย์ถ่วงขนานกับฐาน

$= 1/2\ Ah^2 = 1/12 \times 60 \times 30 \times 30^2$

$= 5 \times 30^2$

ปริมาตรระวางขับน้ำ $V = 30 \times 9100$ ลบ.ฟุต

ฉะนั้นการสูญเสียระยะสูงเมตร $= I / V$

$= \frac{5 \times 30 \times 30}{35 \times 9,100}$

$= 0.424$ ฟุต

8.5 จุดเมตาทางยาว, ระยะรัศมีเมตาทางยาว และ การเปลี่ยนทริม

LONGITUDINAL METACENTER,LONGITUDINAL METACENTRIC RADIUS, CHANGE OF TRIM

ต่อไปนี้จะพูดถึงการเอียงของเรือในทางตามยาว ความลำบากในการกำหนด จุดศูนย์ถ่วงของเรือในทางตามยาวไม่เหมอนกับทางตามขวาง การคำนวณหาจุดศูนย์กลางความลอยทางยาวนั้นทำได้โดยตารางคำนวณแผ่นที่ 1 ตามที่กล่าวมาแล้ว

เรากล่าวในบทที่แล้วในการเอียงเรือทางขวาง โดยใช้น้ำหนักถ่วงทางกราบหนึ่งกราบใดในทำนองเดียวกันนี้ เราอาจเอียงเรือในทางยาวได้ โดยใช้น้ำหนักถ่วงทางหัวเรือทางท้ายและให้อยู่ในแถวกระดูกงู ก่อนจะกล่าวต่อไปควรทราบถึงเรื่องทริมของเรือเสียก่อน ทริมเรือคือ ผลต่างของระดับ

น้ำหัวท้ายเรือลำหนึ่งออกแบบให้กินน้ำหัวเรือ 12 ฟุต กินน้ำท้ายเรือ 15 ฟุต เราพูดว่าเรือลำนั้นมีทริม 3 ฟุตท้าย

คำจำกัดความของจุดเมตาทางยาว ก็เช่นเดียวกับจุดเมตาทางขวาง ตามในรูปที่ 47 ณ แนวน้ำหนึ่งของเรือให้

WL เป็นเส้นแนวน้ำของเรือ

B เป็นจุดศูนย์กลางความลอย (Center of Bouyancy)

BM_L เป็นเส้นดิ่งผ่านจุด B หรือเป็นระยะรัศมีเมตาทางยาว

สมมติว่าทริมเรือเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย เรือก็ยังมีปริมาตรขับน้ำเท่าเดิม B' เป็นศูนย์กลางความลอยใหม่เมื่อเรือเอียงไปทางหัว และ $B'M_L$ เป็นเส้นดิ่งผ่านจุ ด B' ตัดเส้น BM_L ที่ M_L จุด M_L นี้เรียกว่าจุดเมตาทางยาว (Longitudinal Metacentric Height)

1. สูตรสำหรับหาระยะรัศมีเมตาทางยาว (Longitudinal Metacenter, BM_L)

ตามในรูปที่ 48 เป็นรูปด้านข้างและแนวน้ำของเรือลอยอยู่แนวน้ำเดิม WL และแนวน้ำใหม่ $W'L'$

ทริมเดิม	$= AW - BL$
ทริมใหม่	$= AW' - BL'$
ดังนั้น การเปลี่ยนทริมทั้งหมด	$= (AW - BL) - (AW' - BL')$
	$= (AW - AW') \quad (BL' - BL)$
	$= WW' - LL'$

ให้เป็นคำจำกัดความได้ว่า การเปลี่ยนแปลงของทริมก็คือผลบวกของการเปลี่ยนแปลงของกินน้ำลึกหัวและท้าย การเปลี่ยนทริมอาจสมมติว่า เนื่องจากการเลื่อนน้ำหนักจากท้ายไปหัวเอียงไปเล็กน้อย ระวางขับน้ำคงที่จุดตัดของแนวน้ำใหม่ $W'L'$ กับน้ำน้ำเก่า WL จะตัดกันที่จุดศูนย์ถ่วงของพื้นที่แนวน้ำ (The C.G.of Waterplane) หรือ (Center of Flotation C.F.) จุดศูนย์ถ่วงของพื้นที่นี้ต้องอยู่ถัดจากจุดกึ่งกลางทางยาวไปทางท้ายนิดหน่อย และนี่เป็นเหตุให้เกิดความยุ่งยากในการคำนวณหาระยะรัศมีเมตาทางยาว ยิ่งกว่าระยะรัศมีเมตาทางขวาง ซึ่งในกรณีหลังนี้จุดศูนย์ถ่วงพื้นที่อยู่ที่กึ่งกลางลำเรือพอดี ในรูปที่ 48 กำหนดให้.-

B เป็นจุดศูนย์กลางของเมื่อลอยอยู่แนวน้ำ WL เดิม

B' เป็นจุดศูนย์กลางความลอยของเรือเมื่อลอยอยู่แนวน้ำใหม่ $W'L'$

F เป็นจุดตัดของเส้นแนวน้ำเดิมกับแนวน้ำใหม่ WL , $W'L'$

v เป็นปริมาตรของส่วนที่จม FLL' (Immersed Wedge) หรือส่วนที่ไม่จมน้ำ FWW (Emerged Wedge)

gg' เป็นจุดศูนย์กลางความถ่วงของรูปลิ่มทั้งสองตามลำดับ

V เป็นปริมาตรระวางขับน้ำเป็น ลบ.ฟุต

θ เป็นมุมเอียงของเรือระหว่างเส้นแนวน้ำเก่าและใหม่ ซึ่งเท่ากับมุมในระหว่าง BM_L และ $B'M_L$ มุมนี้สมมติว่าเล็กมาก ตามหลัก ว่าด้วยกฎการเลื่อนของจุดศูนย์กลางความถ่วง

ดังนั้น $v.\ gg' = VBB'$

$$BB' = \frac{v.gg'}{V}$$

แต่ $BB' = BM\ \theta$ (θ เป็นมุมเชิงวงกลม Circular Measure)

$$\therefore \quad BM.\theta = \frac{v.gg'}{V}$$

ในสมการนี้เราไม่รู้ค่า $v.\ gg'$ หรือค่าของโมเมนท์การโยกย้ายของลิ่ม (Moment of Transference of Wedge) อย่างเดียวเท่านั้น

ดังนั้นที่จุด P เลือกเนื้อที่ทางขวางเล็ก ๆ ที่ลิ่ม FLL'

ความกว้างไปทางท้าย = dx

ความกว้างตามขวางของลำเรือ = 2 y

ระยะครึ่งหนึ่งของความกว้างตามขวาง = y

จุด P ห่างจาก F = x

ความสัมพันธ์ของเนื้อที่รูปสามเหลี่ยม มีดังนี้

$$\frac{\text{ด้านตั้ง}}{\text{ด้านนอน}} = \frac{\text{ระยะ } PP}{x} = \theta$$

ระยะ $PP = x.\theta$ = ความลึกของเนื้อที่เล็ก ๆ

ดังนั้นปริมาตรของรูปสามเหลี่ยมเล็ก ๆ = ความกว้างลำเรือ $\times$ ความหนา $\times\ \theta$

ความลึกของเนื้อที่เล็ก ๆ = $2\ y.\ dx.\ x\theta$

= $2\ y.\ x\theta.\ dx.$

โมเมนท์ของปริมาตรทั้งหมดรอบแกนขวาง FF = ปริมาตรเล็ก ๆ $\times$ ระยะทาง

= $2\ y.\ x\theta.\ dx.\ x$

$$= 2y\,x^2\ \theta.\ dx$$

โมเมนท์ของปริมาตรทั้งหมดรอบแกนขวาง FF $= 2\,\theta\, f\, y\, x^2\, dx$

= โมเมนท์การโยกย้าย

$= v.gg$ (θ คงที่)

แทนค่า BM $\theta = \dfrac{'\ v.gg'}{V} = \dfrac{2\,\theta\, f\, yx^2\ dx}{V}$

$$BM = \frac{2\ f\, yx^2\ dx}{V}$$

จะเห็นว่าสมการ $2\ f\ y\ dx$ เป็นเนื้อที่ของเนื้อที่แนวน้ำทั้งหมด และ x^2 เป็นระยะทางกำลังสอง ดังนั้น $2\, f\, y\, dx.\ x^2$ จึงเป็นโมเมนท์อินเนอเชียของเนื้อที่น้อย ๆ รอบแกน FF

ถ้า Io = โมเมนท์อินเนอเชียของเนื้อที่รอบแกนทางขวาง FF ซึ่งผ่านจุดศูนย์ถ่วงพื้นที่

ฉะนั้นสมการข้างบนจะกลายเป็น $BM = \dfrac{Io}{V}$

ในการหาโมเมนท์อินเนอเชียของพื้นที่แนวน้ำรอบแกนทางขวาง FF ที่ผ่านจุดศูนย์ถ่วงของพื้นที่มีดังนี้.-

ครั้งแรกหาโมเมนท์อินเนอเชียรอบจุดกึ่งกลางลำตามยาวธรรมดา สมมติว่าได้เท่ากับ I

ถ้า y เป็นระยะจากจุดศูนย์ถ่วงพื้นที่แนวน้ำถึงกึ่งกลางลำตามยาว

$$I\boxtimes = Io + Ay^2$$

$$Io = I\boxtimes \times Ay^2$$

ดังจะเข้าใจดังตัวอย่างต่อไปนี้.-

จำนวนออร์ดิเนต	ครึ่งออร์ดิเนตพื้นที่แนวน้ำ	ตัวคูณซิมสัน	ฟังชันของเนื้อที่	ตัวคูณสำหรับโมเมนท์	ฟังชันของโมเมนท์	ตัวคูณสำหรับโมเมนท์อินเนอเชีย	ฟังชันของโมเมนท์อินเนอเชีย
1	0.0	½	0.00	5	00.0	5	0.00
1 ½	1.37	2	2.74	4 ½	12.33	4 ½	55.49
2	2.67	1 ½	4.10	4	16.04	4	64.16
3	4.87	4	19.48	3	58.44	3	175.32
4	6.31	2	12.92	2	25.24	2	50.48
5	6.85	4	27.40	1	27.40	1	27.40
					139.45		
6	7.21	2	14.42	0	0	0	-
7	7.15	4	28.60	1	28.60	1	28.60
8	6.87	2	13.74	2	27.48	2	54.96
9	6.33	4	25.32	3	75.96	3	227.88
10	5.08	1 ½	7.62	4	30.4	4	121.92
10 ½	3.56	2	7.12	4 ½	32.04	4 ½	141.18
11	0.71	½	0.35	5	1.75	5	8.75

ผลรวมฟังชันของเนื้อที่ 163.42 196.31

139.45 959.14

ออร์ดิเนตห่าง 7.1 ฟุต ระวางขับน้ำ 91.6 ตัน ในน้ำทะเล จงหาระยะรัศมีเมตาทางยาว

เนื้อที่ = $1/3 \times 7.1 \times 163.42 \times 2$ (ด้าน) = 773.5 ตร.ฟุต

C.F. = ระยะของศูนย์ถ่วงพื้นที่แนวน้ำห่างจากออร์ดิเนตที่ 6 กึ่งกลางลำไปทางท้าย

$$= \frac{\text{โมเมนท์}}{\text{เนื้อที่}} = \frac{1/3 \times 7.1 \times 56.86 \times 2 \times 7.1}{1/3 \times 7.1 \times 163.42 \times 2}$$

$$= \frac{56.86 \times 7.1}{163.42} = 2.47 \text{ ฟุต}$$ = ระยะ a ในรูปที่ 48

นับสเตชันหรือรอยตัดจากทางหัวเรือไปทางท้ายเรือ

ช่อง 4 แสดงโดยเนื้อที่ = $2 \int ydx$

ช่อง 6 แสดงโดยโมเมนท์ = $2 \int yx\ dx$

ช่อง 5 โดยที่ 7.1 เป็นตัวร่วมจึงถอดออกไว้แล้วนำมาคูณภายหลัง

ตัวคูณที่แท้เป็น 5×7.1 , 4.5×7.1 …………..ฯลฯ

ช่องที่ 7 แสดงโดยโมเมนท์อินเนอเชีย = $2 \int yx^2 \, dx$

ในช่องสุดท้ายโมเมนท์อินเนอเชียรวมกันทั้งหมดรอบแกนออร์ดิเนตที่ 6 = 959.14 ทั้งหมดนี้ต้องคูณโดย

1) 1/3 ของระยะห่างของออร์ดิเนต 7.1 เพื่อให้เข้ากฎซิมสัน
2) คูณด้วย 7.1 กำลังสอง เป็นโมเมนท์อินเนอเชีย
3) คูณด้วย 2 ทั้งสองข้าง

ดังนั้น โมเมนท์อินเนอเชียรอบแกนทางขวาง FF คือ Io ย่อมน้อยกว่าโมเมนท์อินเนอเชียรอบออร์ดิเนตที่ 6 กึ่งกลางลำ

$$= 959.14 \times 1/3 \times 7.1 \times (7.1)^2 \times_2 = 228{,}585 = I ☒$$

โมเมนท์อินเนอเชียรอบแกนทางขวาง FF คือ Io ย่อมน้อยกว่าโมเมนท์อินเนอเชียรอบออร์ดิเนตที่ 6 กึ่งกลางลำ

$$I ☒ = Io + Ay^2$$

$$I ☒ = 228{,}858 \quad Io \ A = 773.5 \quad y = 2.74 = C.F.$$

$$Ay^2 = 77.35 \times 2.47^2$$

$$Io \ ☒ \ I - Ay^2 = 228.585 - (77.35 \times 2.47)^2$$

$$= 224{,}139 \text{ ฟุต}^4$$

ระวางขับน้ำถึงแนวน้ำนี้ 91.6 ตัน

$$= 91.6 \times 35 \text{ ลบ.ฟุต}$$

$$= 3206 \text{ ลบ.ฟุต}$$

ฉะนั้น $BM_L = \dfrac{Io}{V} = \dfrac{224{,}139}{3206} = 69.9$ ฟุต

จงสังเกตว่ารัศมีเมตาทางขวาง $BM = \dfrac{I}{v}$

= โมเมนท์อินเนอเชียของเนื้อที่แนวน้ำรอบแกนตามยาว ส่วนรัศมีเมตาทางยาว = $\dfrac{Io}{V}$

Io = โมเมนท์อินเนอเชียของเนื้อที่แนวน้ำรอบแกนทางขวางที่ผ่านจุดศูนย์ถ่วงของพื้นที่ ซึ่งไม่ได้อยู่กึ่งกลางลำตามยาว แต่อยู่ค่อนไปทางท้าย

2. สูตรหาระยะรัศมีเมตาทางยาวโดยประมาณ

สูตรต่อไปนี้ตั้งขึ้นโดยท่านนอร์แมนด์ (M.J.A NORMAND, M.I.N.A.) ซึ่งให้ความสะดวกและได้ผลดีในทางใช้การ ให้

L เป็นความยาว ณ แนวน้ำเป็นฟุต

B เป็นความกว้างที่กลางลำเป็นฟุต

V เป็นระวางขับน้ำ ลบ.ฟุต

A เป็นเนื้อที่ของแนวน้ำ ตร.ฟุต

BM_L เป็นรัศมีเมตาทางยาง

$$BM_L = 0.0735 \frac{A^2 \times L}{C \times V}$$

ตามตัวอย่างข้างบน ความกว้าที่กลางลำ 14.42 ฟุต แล้วใช้สูตรได้ BM_L = 67.5 ฟุต ใกล้เคียง เมื่อเปรียบกับ 69.9 แล้วอาจเป็นผลที่พึงพอใจ สูตรประมาณการหาระยะรัศมีเมตาทางยาวโดยประมาณนี้ใช้ในตอนเริ่มแรก การออกแบบและให้ผลอย่างใกล้เคียงสูตรนี้ยังใช้ตรวจคำตอบได้อีกด้วย นอกจากนี้ยังมีสูตรหนึ่งที่ใช้ในการหาค่าระระรัศมีเมตาทางยาวโดยประมาณสูตรนั้นเป็นสูตรคล้ายกับที่หาระยะรัศมีเมตาทางขวางที่กล่าวมาแล้ว โมเมนต์อินเนอเชียของเนื้อที่แนวน้ำรอบแกน

$FF = n' \times L^3 \times B$ n = สัมประสิทธิ์ที่คล้ายกับข้อ 18.10

ปริมาตรระวางขับน้ำ = $k \times L \times B \times D$

ระยะรัศมีเมตาทางยาวโดยประมาณ $= BM_L = \dfrac{n' \times L^3 \times B}{k \times L \times B \times D}$

ค่าของ b นั้นท่านเสอร์ วิลเลียมไวท์ กำหนดให้ใช้ 0.075

3. การเพิ่มระวางขับน้ำเนื่องจากการเปลี่ยนทริมท้าย 12 นิ้ว (Addition to Displacement Dueto 12 " Change of Trim Aft)

ระวางขับน้ำที่เขียนเป็นเส้นโค้งขึ้นตามที่กล่าวมาแล้ว ซึ่งให้ชื่อว่าเส้นโค้งไฮโครสแตติคนั้น มีข้อสมมติฐาน คือ แนวน้ำเป็นแนวน้ำเฉลี่ย และเส้นแนวน้ำเก่าเมื่อเรือไม่มีทริมหรือทริมเป็นศูนย์กับแนวน้ำใหม่เมื่อเรือมีทริมตัดกันที่กึ่งกลางลำตามยาว ( ) เสมอ ดูรูปที่ 49

แต่ถ้าเรือมีทริมมากกว่าปกติ พฤติภาพดังกล่าวนั้นจะไม่เป็นไปตามที่กล่าวแล้ว ตรงข้ามเส้นแนวน้ำใหม่จะตัดกับแนวน้ำเดิมที่จุดศูนย์ถ่วงพื้นที่แนวน้ำ (Center of Flotation) ตามในรูปที่ 49 เส้น WL เป็นเส้นแนวน้ำเดิมเมื่อทริมเป็นศูนย์, $W'L'$ เป็นเส้นแนวน้ำใหม่ที่เกิดทริมมากผิดปกติ

ตัดกันที่ S วิธีคิดลากเส้นแนวน้ำ W $^{"}$L$^{"}$ ให้ขนานกับแนวน้ำ W$'$ L$'$ และผ่านจุด F ซึ่งเป็นจุดศูนย์ถ่วงพื้นที่แนวน้ำ

จำนวนตันที่ทำให้เรือจมลงไปเป็นเนื้อที่สี่เหลี่ยม W$^{"}$ W$'$ L$'$ L$^{"}$ ซึ่งเรียกว่า การจม (Sindage) เป็นระยะ Z นิ้ว หรือเรียกว่าการเพิ่มระวางขับน้ำ

= จำนวนตันที่ทำให้เรือจม 1 นิ้ว x Z นิ้ว

= T / IN. Z

= T / IN. SF tan

= $T / IN\ \overline{CF}\ \tan$

= $T / IN\ \overline{CF}\ \frac{LL''}{L}$

= $T / M\ \overline{CF}\ \frac{TRIM}{L}$

เมื่อทริมเท่ากับ 12$''$

ฉะนั้น การเพิ่มระวางขับน้ำเนื่องจากเปลี่ยนทริมด้วย

= $T/IN.\ \overline{CF}.\ 12/L$

เส้นโค้งนี้มีลักษณะเหมือนเส้นโค้งไฮโดรสแตติค

4. โมเมนท์เปลี่ยนทริม 1 นิ้ว เนื่องจากเคลื่อนย้ายน้ำหนักบนเรือไปทางตามยาวของเรือ (Moment to Change Trim One Inch)

การเปลี่ยนทริมนี้เกิดจากการเคลื่อนย้ายน้ำหนักบนเรือไปทางยาวของเรือหรือเท่ากับการเอียงเรือตามยาวตามในรูปที่ 50 ให้เราลำหนึ่งลอยอยู่ที่ระดับน้ำเดิม WL เมื่อเลื่อนน้ำหนัก w จากท้ายเรือไปทางหัวเรือเป็นระยะ d ระดับน้ำ W$'$ L$''$ ใหม่จะเกิดขึ้นตัดกันที่จุดศูนย์กลางความถ่วงของพื้นที่แนวน้ำหรือที่จุด F

จุด G เป็นจุดศูนย์ถ่วงของเรือทั้งหมดเดิม

B เป็นศูนย์กลางความลอยเดิน

G$'$ W$'$ L$'$ เป็นเป็นศูนย์ถ่วงของเรือทั้งหมดใหม่

B$'$ เป็นศูนย์กลางความลอยใหม่

เส้นดิ่งที่ผ่านจุด GM_L และ G$'$B$'$ ตัดกันที่จุดเมตา M_L ทำมุม O ลากเส้นขนานกับแนวน้ำเดิม W$'$ C เส้น GG$'$ จะขนานกับระยะเคลื่อนน้ำหนัก w ไปทางหัว

$$\therefore W \times GG' = w \times d$$

$$GG' = \frac{w \times d}{W}$$

CL = WW การเปลี่ยนทริม (Charge of Trim) = WW" + LL

= CL = x

มุมระหว่าง $W^{|}L^{|}$ กับ WL คือมุมระหว่าง $W^{|}L^{|}$ กับ $W^{|}C$

$$\text{ฉะนั้น} \quad \tan\theta = \frac{\text{การเปลี่ยนทริม}}{\text{ความยาวเรือ}} = \frac{CL}{LENGTH} = x/L$$

$$\text{และ} \quad \tan\theta = \frac{GG^{|}}{GM_L}$$

$$\text{ฉะนั้น} \quad \frac{GG^{|}}{GM_L} = \frac{X}{L} = \frac{w \times d}{W \times GM_L}$$

$$\text{ฉะนั้น} \quad x = \frac{w \times d \times L}{W \times GM_L}$$

ถ้าการเปลี่ยนทริม x = 1 นิ้ว หรือ 1/12 ฟุต

$$\text{ฉะนั้น} \quad 1/12 = \frac{w \times d \times L}{W \times GM_L}$$

$$\frac{W \times GM_L}{12\,L} = w \times d \quad \text{ฟุต - ตัน}$$

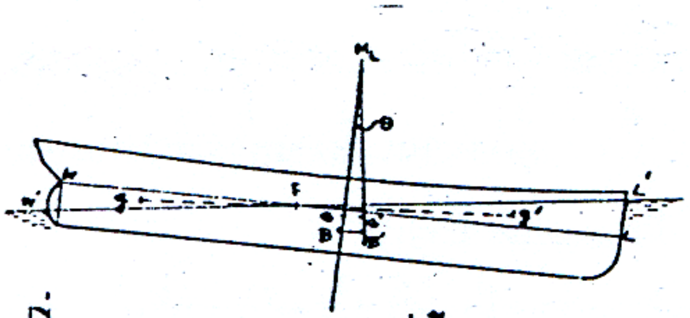
=โมเมนท์เปลี่ยนทริม 1 นิ้ว (Maoment to Change Trim 1 Inch) ระยะความสูงเมตาทางยาว GM_L นั้นถือว่าเท่ากับระยะรัศมีเมตา BM_L ซึ่งหาได้จากเส้นโค้งไฮโครสแตติคบางครั้งเราถือเสียว่าความสูงเมตาทางยาว GM_L นี้ยาวเท่ากับความยาวของเรือ ฉะนั้นสูตรโมเมนท์เปลี่ยนทริม นิ้ว จึงเหลือเพียง 1/12 ของระวางขับน้ำของเรือเท่านั้น

ตัวอย่าง เรือลำหนึ่งยาว 300 ฟุต มีระวางขับน้ำ 2,200 ตัน มีระยะสูงเมตา GM_L 490 ฟุต จงหาการเปลี่ยนทริมเนื่องจากการเลื่อนน้ำหนัก 5 ตัน จงหาหัวไปท้ายเป็นระยะทาง 200 ฟุต โมเมนท์การเปลี่ยนทริม 1 นิ้ว (Mo. To Change Trim 1 Inch)

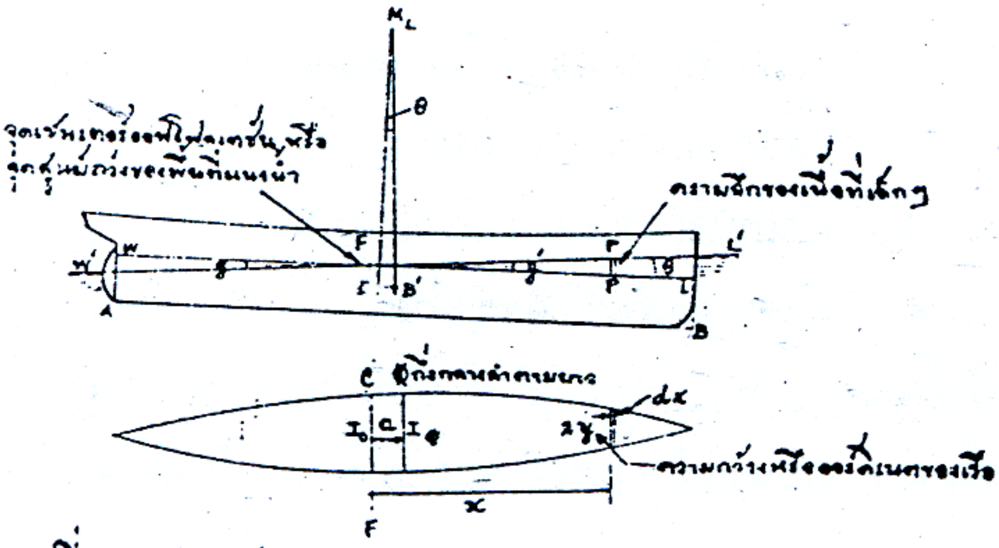
$$\frac{W \times GM_L}{12\,L} = \frac{2200 \times 490}{12 \times 300} = 300 \quad \text{ฟุต – ตัน ต่อ 1 นิ้ว}$$

และโมเมนท์ภายหลังที่เคลื่อนน้ำหนัก 5 ตันไปทางท้ายเป็นระยะ 200 ฟุต

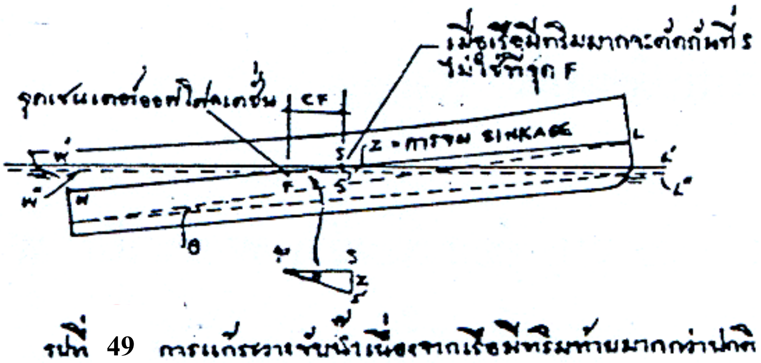
= 5 x 200 = 1000 ฟุต - ตัน



รูปที่ 47 จุดเมตาทางยาว M_L และรัศมีเมตาทางยาว BM_L



รูปที่ 48 การพิสูจน์ว่าระยะรัศมีเมตาทางยาว $BM_L = \frac{I_F}{\nabla}$



รูปที่ 49 การแก้ระวางขับน้ำเนื่องจากเรือมีทริมท้ายมากกว่าปกติ
ADDITION TO Δ DUE TO 12" CHANGE TRIM AFT

การเปลี่ยนทริมท้าย (Change of Trim Aft) = $\dfrac{1000}{200}$ = 3 1/2 นิ้ว

หรือทำสูตร $X = \dfrac{w \times d \times L \times 12}{W \times GM_L} = \dfrac{5 \times 200 \times 300 \times 12}{2200 \times 490}$ = 3 1/3”

5. สูตรประมาณสำหรับโมเมนต์เปลี่ยนทริม 1 นิ้ว (Moment to Change Trim 1 Inch)

ตามสูตรของนอร์แมนด์ที่หาความสูงของ GM_L โดยประมาณมีสูตรดังนี้.-

BM_L (ประมาณ) $= 0.0735 \dfrac{A^2 \times L}{B \times V}$

และโมเมนท์เปลี่ยนทริม 1 นิ้ว $= \dfrac{W \times GM_L}{12\,L}$

แต่ $W = \dfrac{V}{35}$

และสมมติเสียว่า $GM_L = BM_L$

$\therefore \quad BM_L = BM_L = 0.0735 \dfrac{A^2 \times L}{B \times V}$

โมเมนท์เปลี่ยนทริม 1 นิ้ว $= \dfrac{V}{35} \times \dfrac{1}{12\,L} \times \dfrac{(0.0735 \times A^2 \times L}{B \times V}$

$= 0.000175 \dfrac{A^2}{B}$

สมมติว่าเนื้อที่แนวน้ำบรรทุก (Area of L.W.P.) A = 773.5 ตร.ฟุต

ความกว้าง (Breadth) B = 14.42 ฟุต

ดังนั้นโมเมนท์เปลี่ยนทริม 1 นิ้ว $= 0.000175 \dfrac{A^2}{B}$

$= 0.000175 \times \dfrac{773.5^2}{14.42}$ = 7.26 ฟุต-ตัน

เมื่อได้การเปลี่ยนทริม 3 1/2 นิ้วแล้ว แบ่งออกเป็น 2 ส่วน ๆ หนึ่งบวกเข้ากับแนวน้ำท้ายอีกครึ่งหนึ่งลบออกจากแนวน้ำหัว สุดแต่กรณี สมมติว่าหัวเรือกินน้ำลึก 12 ฟุต 3 นิ้ว ท้ายกินน้ำลึก 14 ฟุต 9 นิ้ว แนวน้ำใหม่จะเป็น

12" 3" - 1 2/3" = 12" 1 1/3" หัว

14" 9" + 1 2/3" = 14" 10 2/3" ท้าย

ตามในรูปที่ 50 จะเห็นว่าจุดเซนเตอร์ออฟโฟลเตชัน หรือจุดศูนย์ถ่วงพื้นที่แนวน้ำไม่ได้อยู่กึ่งกลางลำตามยาว ดังนั้น WW' ไม่เท่ากับ LL' ดังนั้น เราเอาการเปลี่ยนทริมมาหารด้วย 2 แล้วบวกหรือลบเข้าทางหัวหรือท้ายนั้นไม่ถูก ซึ่งเราจะทำให้ถูกต้องดังต่อไปนี้

ในรูปสามเหลี่ยม FWW' กับสามเหลี่ยม นั้น FLL ซึ่งเหมือนกัน

$\therefore \quad \frac{WW'}{WF} = \frac{LL'}{LF}$ และสามเหลี่ยมทั้งสองนี้เหมือนกันสามเหลี่ยมใหญ่ W' CL'

$$\text{ฉะนั้น } \tan\theta = \frac{WW'}{WF} = \frac{LL'}{LF} = \frac{CL'}{W'L} = \frac{\text{การเปลี่ยนทริม}}{\text{ความยาว}}$$

$$WW' = \frac{WF}{\text{ความยาวเรือ}} \times \text{การเปลี่ยนทริม}$$

$$LL' = \frac{LF}{\text{ความยาว}} \times \text{การเปลี่ยนทริม}$$

ถอดออกเป็นความได้ว่า อัตราส่วนของการเปลี่ยนทริมทางหัวหรือทางท้ายคือ อัตราส่วนระหว่างระยะทางห่างจากจุดเซนเตอร์ออฟโฟลเตชันไปทางหัวหรือท้าย กับความยาวของเรือ

ดังนั้นการเปลี่ยนทริมน้อยก็จะไม่เกิดผลแก่ระดับน้ำหัวท้ายเท่าใดนัก แต่สำหรับการเปลี่ยนทริมที่มาก ๆ จึงจะเกิดผลแก่ระดับน้ำ

ตัวอย่าง ตามตัวอย่างที่กล่าวมาแล้ว ถ้าเลื่อนน้ำหนัก 50 ตันไปทางท้ายเรือ 100 ฟุต จะเกิดโมเมนท์เปลี่ยนทริม

$= 50 \times 100$ ฟุต – ตัน = 500 ฟุต - ตัน

และเกิดการเปลี่ยนทริม $\frac{5000}{300}$ = 16 2/3 นิ้ว

และจุดเซนเตอร์ออฟโฟลเตชันห่างจากจุดกึ่งกลางลำตามยาวของเรือไปทางท้าย = 12 ฟุต

ดังนั้น แนวน้ำจะเพิ่มขึ้นทางท้ายเรือ $= \frac{138}{300} \times 16\ 2/3$ นิ้ว

= 7 2/3 นิ้ว

แนวน้ำลดลงทางหัว $= \frac{162}{300} \times 16\ 2/3$ นิ้ว

= 9 นิ้ว

ดังนั้นแนวน้ำหัว 12' 3" - 9" = 11' 6"

แนวน้ำท้าย 14' 9" + 7 2/3" = 15' 4 2/3"

เป็นคำตอบที่ถูกต้อง

6. ผลที่เกิดขึ้นแก่ทริมเนื่องจากการบรรทุกของลงในเรือพอสมควร

ถ้ามีความต้องการจะวางน้ำหนักลงในเรือโดยไม่ต้องการให้ทริมเปลี่ยนแปลง เราต้องวางน้ำหนักลงไปโดยให้แรงที่กระทำผ่านศูนย์กลางความลอย กระทำขึ้นในแนวเดียวกับแรงที่เกิดขึ้นจากน้ำหนักที่วางลงไป สมมติให้เรือลำหนึ่งลอยลำอยู่ ณ แนวน้ำอันหนึ่ง แล้วลองนึกวาดภาพเรือจมลงไปเล็กน้อย โดยแนวน้ำใหม่ W' L' ขนานกับแนวน้ำเดิม WL ความลอยที่เพิ่มขึ้นจะมีรูปร่างเท่ากับชั้นน้ำ WW' LL' แรงกระทำขึ้นของความลอยที่เพิ่มขึ้นนี้จะกระทำขึ้นที่จุดศูนย์ถ่วงของแนวน้ำเดิม จุดนั้นคือจุดเซนเตอร์ออฟโฟลเตชัน (Center of Flotation) ดังนั้นเมื่อต้องการวางน้ำหนักจำนวนหนึ่งลงในเรือโดยไม่ต้องการให้เกิดการเปลี่ยนทริม เราต้องวางน้ำหนักนั้นลงในทางดิ่งเหนือหรือใต้จุดเซนเตอร์ออฟโฟลเตชันเรือจะจมลงไป ณ แนวน้ำหนึ่ง ซึ่งขนานกับแนวน้ำเดิมระยะที่เรือจมลงไปเท่าใดเราทราบได้จากจำนวนตันที่ทำให้เรือจมลง 1 นิ้ว (Tons per Inch Immersion) สมมติให้ว่าเรือลำหนึ่งกินน้ำลึกหัว 13 ฟุต ท้าย 15 ฟุต จำนวนตันที่ทำให้เรือจมลง 1 นิ้วเท่ากับ 20 ตัน ถ้าวางน้ำหนัก 55 ตัน ลงบนหรือใต้จุดเซนเตอร์ออฟโฟลเตชัน เรือจะจมลงไปอีก $\frac{55}{20}$ = 2 3/4 นิ้ว แนวน้ำหัวจะกลายเป็น 13 ฟุต 2 3/4 นิ้ว แนวน้ำท้ายจะกลายเป็น 15 ฟุต 2 3/4 นิ้ว

ถ้าเราวางน้ำหนักลงในเรือที่แห่งอื่น ที่มิใช่บนหรือใต้จุดเซนเตอร์ออฟโฟลเตชัน จะเกิดการเปลี่ยนทริมขึ้น จะเกิดทริมหัวหรือท้ายสุดแล้วแต่น้ำหนักจะวางลง

ในการคำนวณหาแนวน้ำใหม่อันเนื่องจากการวางน้ำหนักลงที่หนึ่งที่ใดที่ไม่ใช่บนจุดเซนเตอร์ออฟโฟลเตชันเราทำเป็น 2 ขั้น คือ.-

1) วาดภาพว่าน้ำหนักนั้นวางบนจุดเซนเตอร์ออฟโฟลเตลันแล้วจมลงไปเท่าใด
2) วาดภาพว่าน้ำหนักนั้นถูกย้ายจากจุดเซนเตอร์ออฟโฟลเตชันไททางหัว หรือทางท้ายเรือ แล้วคิดหาการเปลี่ยนทริมและแนวน้ำใหม่ต่อไป

ตัวอย่าง เรือลำหนึ่งกินน้ำหัวลึก 12 ฟุต 3 นิ้ว ท้าย 14 ฟุต 6 นิ้ว จำนวนตัน ทำให้เรือจม 1 นิ้ว = 20 เรือยาว 300 ฟุต จุดเซนเตอร์ออฟโฟลเตชัน ห่างจากจุดกึ่งกลางลำตามยาว 12 ฟุต ไปทางท้าย โมเมนท์เปลี่ยนทริม 300 ฟุต – ตัน วางน้ำหนัก 30 ตัน ห่างจากหัวเรือสุด 20 ฟุต ให้หาแนวน้ำใหม่

ขั้นที่ 1 หาว่าเรือจมลงไปเท่าใดเมื่อวางน้ำหนัก 30 ตัน ลงที่จุดเซนเตอร์ออฟโฟลเตชันหรือจุดศูนย์ถ่วงของพื้นที่แนวน้ำ จะทำให้เรือจมลงหัวท้ายเท่ากัน

จำนวนตันที่ทำให้เรือจมลง 1 นิ้ว = 20

เมื่อวางน้ำหนัก 30 ตัน เรือจมลงไป = 30 / 20 = 3/2 = 1 1/2"

ฉะนั้น ระดับน้ำหัวใหม่ 12' 3" + 1 1/2" = 12' 4 1/2"

และระดับน้ำท้ายใหม่ 14' 6" + 1 ½" = 14' 7 1/2"

ขั้นที่ 2 คิดว่าย้ายน้ำหนัก 30 ตัน จากจุดเซนเตอร์ออฟโฟลเตชันไปทางหัว 142 ฟุตหรือห่างจากหัวเรือ 20 ฟุต เกิดโมเมนท์ทางหัวเรือ 30 x 142 ฟุต – ตัน โจทย์กำหนดโดเมนท์เปลี่ยนทริม 300 ฟุต - ตัน

ฉะนั้นเปลี่ยนทริมหัวเรือ $= \dfrac{30 \times 142}{300} = 14\ 1/2''$

ทริมเพิ่มทางหัว $= \dfrac{162}{300} \times 14\ 1/2'' = 7\ 3/4''$

ทริมลดลงทางท้าย $= \dfrac{138}{300} \times 14\ 1/2'' = 6\ 1/2''$

แนวน้ำใหม่ $= 21'\ 4\ 1/2'' + 7\ 3/4'' = 13\ \ 1/4''$

แนวน้ำท้ายเรือใหม่ $= 14'\ 7\ 1/2'' - 6\ 1/2''$

7. ผลที่เกิดแก่ทริม เนื่องจากการบรรทุกน้ำหนักลงในเรือมาก

ในกรณีนี้ข้อสมมติที่ใช้พิจารณาเนื่องการวางน้ำหนักลงในเรือเป็นจำนวนพอสมควรตามที่กล่าวมาแล้วไม่ใช่ต่อไป แต่จะพิจารณาดังต่อไปนี้.-

1) การเปลี่ยนจำนวนตันทำให้เรือจมลง 1 นิ้ว ในขณะเรือจมลงไปในน้ำ
2) จุดเซนเตอร์ออฟโฟลเตชัน ไม่ได้คงอยู่ในตำแหน่งเดิม
3) การเพิ่มน้ำหนักมาก ๆ ลงในเรือจะเปลี่ยนตำแหน่งที่ของจุดศูนย์ถ่วงของเรือ
4) รูปร่างปริมาตรขับน้ำจะเปลี่ยนตำแหน่งที่ของจุดศูนย์กลางความลอย และเปลี่ยนค่าของระยะรัศมีเมตา BM ด้วย
5) ค่าของโมเมนท์เปลี่ยนทริม 1 นิ้ว เปลี่ยนไปด้วย

พิจารณาตามข้อ 1 เราสามารถประมาณว่าเรือจมลงไปเท่าใด เมื่อวางน้ำหนักลงไปและทราบจำนวนตันทำให้เรือจม 1 นิ้ว ณ แนวน้ำเดิมนั้น เมื่อทราบว่าเรือจมลงไปเท่าใด เราจะได้แนวน้ำใหม่ ที่แนวน้ำใหม่นี้เราทราบจำนวนตันทำให้เรือจม 1 นิ้ว จากเส้นโค้งไฮโดรสแตติคแล้วนำจำนวนตันทำให้เรือจมลง 1 นิ้ว ทั้งสองมาบวกวกกันแล้วหารด้วย 2 เป็นค่าเฉลี่ยแล้วนำไปหารน้ำหนักที่วางลงในเรือ ใหม่จะได้แนวน้ำที่เพิ่มขึ้นนอย่างถูกต้อง เช่นเรือลำหนึ่งกินน้ำลึก 22' 2" ที่แนวน้ำนั้นมีจำนวนตันที่ทำให้เรือจมลง 1 นิ้ว เท่ากับ 44.5 ให้หาแนวน้ำใหม่เมื่อวางน้ำหนัก 750 ลงไป

ครั้งแรกประมาณว่าเรือจมลงไปเท่าใด

เราทราบว่า 44.5 ตัน ทำให้เรือจม 1 นิ้ว

ฉะนั้น 750 ตัน ทำให้เรือจม $\frac{750}{44.5}$ = 17 นิ้วใกล้เคียง ฉะนั้นแนวน้ำใหม่เป็น $22' \; 2'' + 17'' = 23' \; 7''$ ณ แนวน้ำนี้ พบจำนวนตันทำให้เรือจมลง 1 นิ้ว จากเส้นโค้งไฮโดรสแตติค เท่ากับ 45.7 ตันต่อนิ้ว

ฉะนั้นจำนวนตันทำให้เรือจม 1 นิ้ว เฉลี่ย = 1/2 (44.5 - 45.7) = 45.1

แนวน้ำที่จมลงไปที่ถูกต้อง $= \frac{750}{45.1} = 16.63 = 16 \; 5/8''$

และแนวน้ำใหม่จะเท่ากับ $= 22' \; 2'' + 16 \; 5/8'' = 23' \; 6 \; 5/8''$

พิจารณาตามข้อ 2 ที่ว่าจุดเซนเตอร์ออฟโฟลเตชันไม่คงที่นั้นจะหาได้ดังนี้.-

ตามข้อ 1 นั้น เราทราบแนวน้ำเดิมและแนวน้ำใหม่ เขียนลงในเส้นโค้งไฮโดรสแตติคก็จะพบจุดเซนเตอร์ออฟโฟลเตชันของแนวน้ำทั้งสองแบ่งครึ่งจุดกึ่งกลางนั้นจะเป็นจุดเซนเตอร์ออฟโฟลเตชันของชั้นน้ำที่เพิ่มขึ้น

พิจารณาตามข้อ 3 เราสามารถหาจุดศูนย์ถ่วงของเรือใหม่ได้ เนื่องจากการวางน้ำหนักลงอีก สมมติตามตัวอย่างที่กล่าวมาแล้ว น้ำหนัก 750 ตัน วางลงให้ศูนย์ถ่วงของมันอยู่ใต้จุดศูนย์ของเรือ 16 ฟุต สมมติว่าระวางขับน้ำของเรือก่อนเอาของลงเป็น 9,500 ตัน (ดูรูปที่ 47)

$$ww \times gg' = W \times GG'$$

$$\frac{w \times gg'}{W} = GG'$$

GG' จุดศูนย์ถ่วงของเรือเลื่อนลง $= \frac{750 \times 16}{9500}$

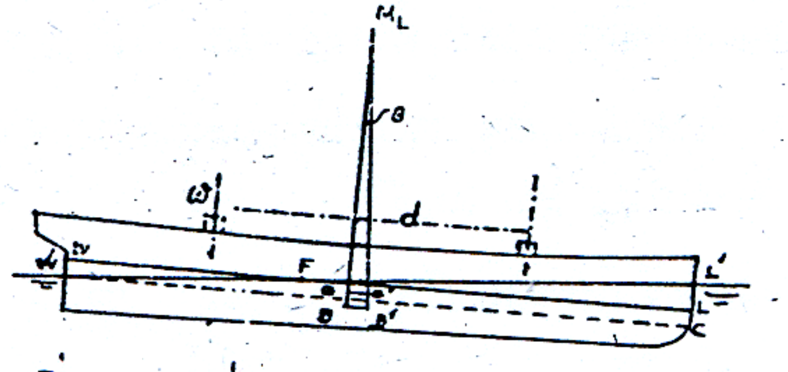
$= 1.17$ ฟุต

สำหรับการพิจารณาตามข้อ 3 และ 4 นั้น ก็เป็นความจริงและจะอ่านค่าของระยะรัศมีเมตาและโมเมนท์การเปลี่ยนทริม 1 นิ้ว ได้จากเส้นโค้งไฮโดรสแตติค ซึ่งสมมติว่าอ่านได้ 950 ตัน ฟุต – ตัน

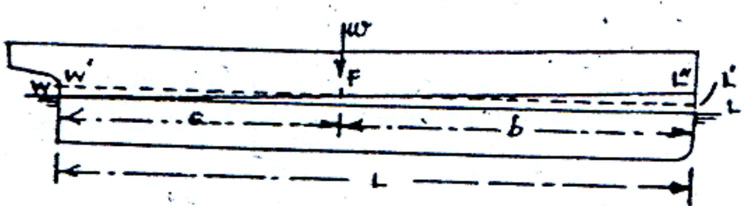
ต่อไปเราต้องสมมติว่ายกเคลื่อนน้ำหนัก 750 ตันนี้ไปจากจุดเซนเตอร์ออฟโฟลเตชันซึ่งวางไว้เดิมไปยังตำแหน่งที่มันควรจะเป็น เราจะได้โมเมนท์เปลี่ยนทริม ทางหัวหรือทางท้าย สมมติว่าน้ำหนัก 750 ตัน เคลื่อนไป 50 ฟุต ทางหัว

โมเมนท์เปลี่ยนทริมไปทางหัวเรือ = 750 x 50 ฟุต - ตัน

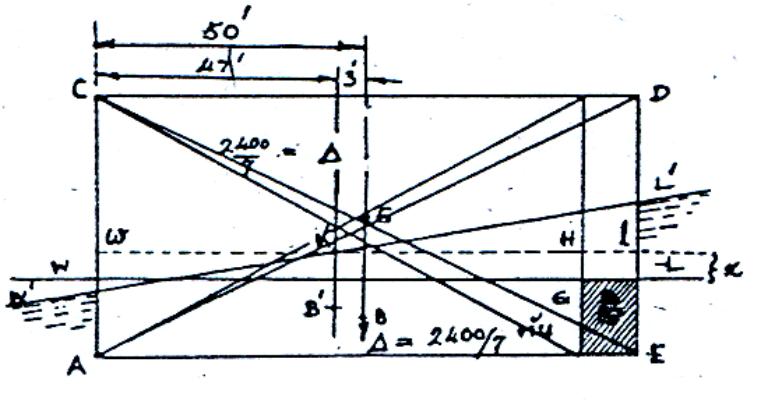
= 37,500 ฟุต - ตัน



รูปที่ 50 การเปลี่ยนทริมเนื่องจากการเลื่อนน้ำหนักบนเรือ



รูปที่ 51 การวางน้ำหนักบนเรือโดยให้กินน้ำท้ายคงที่ และเปลี่ยนเฉพาะกินน้ำลึกหัวอย่างเดียว



รูปที่ 52 การทะลุของเรือที่ไม่ใช่ห้องกึ่งกลางลำทางยาว ซึ่งทำให้เกิดทริมด้วย.

ดังนั้น การเปลี่ยนทริมทางหัวประมาณ $= \frac{37,500}{950} = \frac{\text{ฟุต - ตัน}}{\text{ฟุต ตัน / นิ้ว}}$

$= 39\ 1/2$ นิ้ว

8. หาตำแหน่งวางสิ่งของลงในเรือโดยต้องการให้แนวน้ำท้ายคงที่ไม่ว่าจะวางของนั้นอยู่บนเรือหรือเอาขึ้นแล้ว

ในรูปที่ 51 สมมติว่าเรือลอยอยู่ที่แนวน้ำ WL ถ้าน้ำหนัก w วางลงโดยให้จุดศูนย์ถ่วงของมันอยู่ที่จุดเซนเตอร์ออฟโฟลเตชัน C.F. แล้วเรือจะจมลงโดยเส้นแนวน้ำใหม่ W' L' จะขนานกับ WL เดิมซึ่งได้กล่าวมาแล้ว แต่ต่อไปนี้ถ้าแนวน้ำท้ายมากอยู่แล้วและเราต้องการให้แนวน้ำหัวเปลี่ยนแต่อย่างเดียว เราก็จะทำได้ ทั้งนี้หมายความว่าต้องการให้หัวเรือจมลง เป็นระยะทริม $WW' + LL'$ หรือจมลงโดยท้ายเรือไม่เปลี่ยนแปลง เราจะวางน้ำหนักหรือถอนน้ำหนักที่ใด เราทำได้ตามตัวอย่างต่อไปนี้.-

สมมติว่าเรือลำหนึ่งยาว 205 ฟุต ระวางขับน้ำ 522 ตัน (ไม่มีถ่านหินในเรือ) จุดเซนเตอร์ออฟโฟลเตชันห่างจากเส้นตั้งฉากท้าย 104.3 ฟุต ระยะรัศมีเมตาทางยาว Long. BM = 644 ฟุต ระยะสูงเมตาทางยาว Long. BM = 611.5 ฟุต จำนวนตันทำให้เรือจม 1 นิ้ว = 11.4 จะใช้ถ่านหินหนัก 57 ตัน ลงที่ใดจึงจะไม่ทำให้ระดับน้ำท้ายเปลี่ยนแปลง

วิธีทำ (1) หาโมเมนท์เปลี่ยนทริม 1 นิ้ว

$$= \frac{W \times GM_L}{12\ L} = \frac{522 \times 611.5}{12 \times 205} = 140 \text{ ฟุต - ตัน}$$

(2) สมมติบรรจุถ่านหินลงที่จุดเซนเตอร์ออฟโฟลเตชันซึ่งจะทำให้เรือจมลงหัวท้าย เท่ากัน หาระยะนี้เสียก่อน โจทย์กำหนดให้จำนวนตันที่ทำให้เรือจมลง 1 นิ้ว = 11.4

เมื่อใส่ถ่านหิน 57 ตัน จะทำให้เรือจมลง $= \frac{57}{11.4}$ นิ้ว = 5 นิ้ว ทั้งหัวทั้งท้ายเท่ากัน เมื่อไม่ต้องการให้ท้ายจมอีก 5 นิ้ว ก็ต้องทำให้หัวจมลงอีก 5 นิ้ว รวมทางหัวจมลง 10 นิ้ว

ดังนั้นต้องใส่ถ่านหินลงทางหัว หรือย้ายถ่านหินจากจุดเวนเตอร์ออฟโฟลเตชันไปทางหัวเป็นระยะทางอันหนึ่งเพื่อให้หัวเรือจมลง 10 นิ้ว

เพราะว่าโมเมนท์เปลี่ยนทริม 1 นิ้ว = 140 ฟุต - ตัน

ฉะนั้นโมเมนท์เปลี่ยนทริม 10 นิ้ว = 1,400 ฟุต - ตัน

สมมติว่าให้เคลื่อนจากจุดเซนเตอร์ออฟโฟลเตชันไปทางหัวเรือ d ฟุต หัวเรือจมลง 10 นิ้ว

$$\therefore \quad d \times 57 = 1400$$

$$d = \frac{1400}{57}$$

$$= 24.6 \text{ ฟุต}$$

ต้องใส่ถ่านหินห่างจากเส้นตั้งฉากท้ายเรือ 104.3 + 24.6 ฟุต จึงจะทำให้ระดับน้ำท้ายเรือคงที่

9. การเปลี่ยนแปลงทริมอันเกิดจากเรือรั่วที่ห้องที่ไม่ได้อยู่กึ่งกลางลำ

ตามที่กล่าวมาแล้วนั้น เป็นเรื่องเรือรั่วที่ห้องกลางลำไม่มีการเปลี่ยนแปลงทริม นอกจากแนวน้ำเพิ่มขึ้นอีกเท่านั้น

สำหรับในบทนี้เรือไม่ได้รั่วที่ห้องกลางลำจึงให้เกิดการเปลี่ยนทริมขึ้น จะเข้าใจดังต่อไปนี้ เรือลำเลียงลำหนึ่งทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า ยาว 100 ฟุต กว้าง 40 ฟุต ลึก 10 ฟุต อยู่ในทะเลกินน้ำลึก 3 ฟุต ถูกชนที่หัวเรือทะลุน้ำเข้าห้องได้ห้องหนึ่ง ฝากั้นห้องนั้นอยู่ห่างจากหัวเรือ 6 ฟุต จงหาทริมใหม่ของเรือ

ให้ AECD รูปที่ 52 เป็นรูปเรือลำเลียงดังกล่าวเริ่มวิธีทำเป็น 2 ขั้น จะสะดวกกว่า

1) หาจำนวนจมน้ำเฉลี่ย (Mean Sinkage) อันเนื่องจากการสุญเสียความลอย

2) หาการเปลี่ยนทริม (Change of Trim) ที่เกิดขึ้น

วิธีทำข้อ 1 เรือลำเลียงลำนี้เมื่อถูกชนจะสูญเสียความลอยไป ซึ่งแสดงด้วยเส้นแลเงา และสมมติว่าเรือจมลงไปโดยแนวน้ำใหม่ขนานกับแนวน้ำเก่าคือ wl ขนานกับ WL เดิม ดังนั้นปริมาตรที่เพิ่มขึ้นจะเท่ากับปริมาตรที่ลดลง

ดังนั้นปริมาตรของส่วนที่เพิ่มขึ้น wG = ปริมาตร GE ซึ่งจะคำนวณหาระยะ ป ที่เรือจมลงไปได้ระหว่าง wl กับ WL

ปริมาตร wG $= 94 \times 40$ ลบ.ฟุต ปริมาตรที่เพิ่มขึ้น

ปริมาตรของ GE $= 6 \times 3 \times 40$ ลบ.ฟุต ปริมาตรที่สูญเสียไป

ปริมาตรทั้งสองเท่ากัน $94 \times 40 = 6 \times 3 \times 40$

ฉะนั้นเรือจมลงอีก $x = \frac{6 \times 3 \times 40}{94 \times 40} = \frac{18}{94}$ ฟุต

$= 2\ 1/2$ นิ้ว

วิธีทำข้อ 2 ขั้นนี้จะหาการเปลี่ยนทริม

ปริมาตรระวางขับน้ำเดิม $= 3 \times 100 \times 40$ ลบ.ฟุต

ระวางาขับน้ำของเรือนี้ $= \frac{3 \times 100 \times 40}{35} = \frac{2400}{7}$ ตัน

ซึ่งน้ำหนักของเรือ $\frac{2400}{7}$ ตันนี้ กระทำที่จุดศูนย์ถ่วง ซึ่งห่างจากหัวเรือท้าย 50 ฟุต แต่เมื่อเรือลำนี้ทะลุจะทำให้สูญเสียความลอย และจุดศูนย์กลางความลอยจะเลื่อนไปอยู่ห่างจากท้ายสุด 47 ฟุต จุดนั้นคือจุด B' ดังนั้นในที่นี้น้ำหนักของเรือจะกระทำลงโดยผ่านจุดศูนย์ถ่วงของเรือและแรงทำให้เรือลอยจะกระทำขึ้นโดยผ่านจุด B' ซึ่งไม่ใช่ในแนวเส้นดิ่งอันเดียวกันจะเกิดแรงคู่ควบขึ้น

โมเมนท์แรงควบ = แรง $\times$ ระยะทาง = ระวางขับน้ำ $\times$ ระยะทาง

$$= \frac{2400}{7} \times 3 \text{ ฟุต - ตัน}$$

แรงนี้พยายามทำให้หัวเรือจมในการที่จะหาจำนวนทริมที่เกิดจากหาโมเมนท์เปลี่ยนทริม 1 นิ้ว

$$= \frac{W \times GM_L}{12L} = \frac{2400}{7} \times GM_L \times \frac{1}{12 \times 100} = 2/7 \ GM_L$$

สมมติให้ GM_L เท่ากับ BM_L เสีย

$$\text{แต่ } BM_L = \frac{Io}{V}$$

I = โมเมนท์อินเนอเชียของแนวน้ำคงสมบูรณ์ (Intact Water Plane) รอบแกนทางขวางที่ผ่านจุดศูนย์ถ่วงของพื้นที่แนวน้ำ

V = ปริมาตรระวางขับน้ำเป็น ลบ.ฟุต

$I = 1/2 \text{ x A x } h^2$

$$I = 1/12 \text{ x } (94 \text{ x } 40) \text{ x } 94^2$$

$$V = 12{,}000$$

$$BM_L = 1/12 \times \frac{94^3 \times 40}{12000} = \frac{40 \times 94^3}{144{,}000} \text{ ฟุ}$$

ที่ทำมาแล้ว โมเมนท์การเปลี่ยนทริม 1 นิ้ว

$$= 2/7 \times BM_L = 2/7 \times \frac{40 \times 94^3}{144{,}000} = 66 \text{ ฟุต - ตัน}$$

ฉะนั้นโมเมนท์คู่ขนาน $\frac{2400}{7}$ ฟุต - ตัน จึงทำให้เปลี่ยนทริม

$$= \frac{2400}{7 \times 66} = 15 \ 1/2"$$

เส้นแนวน้ำ $W'L'$ จะผ่านจุดศูนย์ถ่วงของแนวน้ำ wl ที่ K เพราะฉะนั้น เรโชในการ

เปลี่ยนทริม = $\frac{47}{100}$ กับ $\frac{53}{100}$

แนวน้ำท้ายลด = $\frac{47}{100} \times 15\ 1/2''$ = 7 1/4 นิ้ว

แนวน้ำหัวเพิ่ม = $\frac{53}{100} \times 15\ 1/2''$ = 8 1/4 นิ้ว

แนวน้ำหัวเป็น $3'\ 00'' + 8\ 1/4'' + 2\ 1/4'' = 3'\ 10\ 1/8''$

แนวน้ำท้ายเป็น เป็น $3'\ 00'' - 7\ 1/4'' + 2\ 1/4'' = 2'\ 7''$

การเปลี่ยนทริมเนื่องจากการผ่านจากน้ำเค็มไปน้ำจืดหรือตรงข้าม ถ้าจุดเซนเตอร์ออฟโฟลเตชัน อยู่ในแนวเส้นดิ่งเหนือจุดศูนย์กลางความลอยจะไม่เกิดการเปลี่ยนทริมเลย

ถ้า W เป็นระวางขับน้ำของเรือ

V, V เป็นปริมาตรระวางขับน้ำในน้ำเค็มและน้ำจืดตามลำดับ

(35 ลบ.ฟุต, 35.6 ลบ.ฟุต ต่อ 1 ตัน ตามลำดับ)

$\therefore V = 35\ W,\ V' = 35.6\ W$

$V' - V$ = (ปริมาตรระวางขับน้ำในน้ำจืดมากกว่า)

เรือลอย ณ แนวน้ำหนึ่ง WL ในน้ำทะเล ซึ่งจุด B และจุด G จะอยู่ในเส้นดิ่งอันเดียวกัน สมมติว่าเรือแล่นเข้าน้ำจืดเรือจะจมลงอยู่ ณ แนวน้ำ $W'L'$ ซึ่งขนานกับแนวน้ำเดิม จุดศูนย์ถ่วงจะเคลื่อนไปทางท้ายเป็นระยะ $\frac{V}{V+v} \times b$

b = ระยะห่างในทางตามยาวของจุดศูนย์ถ่วงพื้นที่แนวน้ำกับศูนย์กลางความลอย

และโมเมนท์ทำให้ทริมเปลี่ยน $= W \times \frac{V}{V+v} \times b$

ตัวอย่าง เรือลำหนึ่งมีหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ยาว 300 ฟุต กว้าง 30 ฟุต อยู่ในน้ำทะเลกินน้ำลึก 15 ฟุต หัว 20 ฟุต ท้าย จงหาแนวน้ำหัวท้ายเมื่อเรือเข้าน้ำจืด

ส่วนที่จมของเรือ = $\frac{W}{63\,T}$ = 3.34 นิ้ว

ปริมาตรของชั้นแนวน้ำที่จม = 300 x 30 x 3.34 x 1/12 = 2505 ลบ.ฟุต

ระยะห่างทางยาวของจุดศูนย์ถ่วงพื้นที่แนวน้ำกับศูนย์กลางความลอย

= 7.15 ฟุต (โจทย์บอกให้)

โมเมนท์เปลี่ยนทริม 1 นิ้ว = 525 ฟุต - ตัน (บอกให้)

W = 4500 ตัน

V = 157,500 v = 2505

∴ C. B. เคลื่อนไปทางหัว (ในกรณีนี้) $= \frac{2505}{160005} \times 7.15 = 0.11$ ฟุต

(V + v = 160005)

จุดศูนย์ถ่วงเคลื่อนไปทางท้าย = 0.11 ฟุต

โมเมนท์ทำให้เปลี่ยนทริมไปทางท้าย = $45000 \times .011 = 495$ ฟุต - ตัน

ฉะนั้นทริมเปลี่ยน $= \frac{495}{525} = 1''$ ปริมาตร จมทางหัว 05"

จมทางท้าย 05" ระดับน้ำใหม่หัวเป็น 15' + 3.34" - 0.5" 2.84"

ระดับน้ำใหม่ท้าย 20' + 3.34" - 0.5" = 20' 3.84"

8.6 ความทรงตัวสถิต (STATICAL STABILITY)

เส้นโค้งความทรงตัว (CURVES OF STABILITY)

การคำนวณเส้นโค้งความทรงตัว (CALCULATIONS FOR CURVES OF STABILITY) และความทรงตัวพลวัด (DYNAMICAL STABILITY)

1. ความทรงตัวสถิตเมื่อเรือเอียงเป็นมุมมาก ๆ (Statical Stability7 At Large Angles Of Inclination)

ตามที่กล่าวมาแล้วถึงการเอียงของเรือนั้นเป็นแต่เอียงไปเป็นมุมเล็ก ๆ จาก 10 ดีกรีและไม่เกิน 15 ดีกรี และสูตรที่ใช้ในการหาโมเมนท์ตั้งตรงหรือโมเมนท์ความทรงตัวสถิตนั้น ใช้สูตรตามวิธีเมตาเซนตริค (Metacentric Method) ตามที่กล่าวแล้ว ครั้นเรือเอียงมากกว่า 10 ถึง 15 ดีกรี จะใช้วิธีนี้ไม่ได้ วิธีใหม่นี้คือวิธีของแอทวูด (Attwood Method)

เมื่อพิจารณาตามรูปที่ 53 ซึ่งเป็นรูปหน้าตัดของเรือลำหนึ่ง และเอียงอยู่เป็นมุมมากกว่า 15 ดีกรี ในที่นี้ให้เอียงเท่ากับ θ ดีกรี WL เป็นเส้นแนวเดิม จุด B เป็นจุดศูนย์กลางความลอยเดิม เมื่อเรือเอียงไปแล้วจะลอยที่แนวน้ำ W' L' ซึ่งจะตัดกับเส้นแนวน้ำเดิมที่จุด S ซึ่งไม่ได้อยู่บนเส้นกึ่งกลางลำเหมือนเมื่อเรือเอียงเป็นมุมน้อย ๆ ปริมาตร SWW' เป็นปริมาตรไม่จมน้ำ และ SLL' เป็น

ปริมาตรจมน้ำ จุด g, g' เป็นจุดศูนย์กลางความถ่วงของรูปลิ่มทั้งสองตามลำดับ ปริมาตรใต้แนวน้ำเมื่อเรือเอียง W' ALL' คงเท่าเดิม นั่นคือปริมาตรของรูปลิ่ม ทั้งสองนี้คงเท่ากันอีก และให้ v เป็นปริมาตรของรูปลิ่มทั้งสองนั้น จุด B' เป็นจุดศูนย์กลางความลอยเมื่อเรือเอียงไปอยู่ที่แนวน้ำ W' L' ความลอยจึงกระทำขึ้นและผ่านจุด B' และตัดกับเส้นกึ่งกลางที่จุดเมตา M และน้ำหนักของเรือหรือระวางขับน้ำของเรือจะกระทำลงผ่านจุด G ซึ่งเป็นจุดศูนย์กลางความถ่วงของเรือ ลาก GZ และ BR ตั้งฉากกับแนวแรงความลอย ที่กระทำผ่านจุด B' และลาก gh, g' h' ตั้งฉากกับเส้นแนวน้ำใหม่ W' L' ฉะนั้นโมเมนท์ตั้งตรงหรือโมเมนท์ความทรงตัวสถิต (Moment Of Staticrl Stabiliyt) จะเท่ากับระวางขับน้ำคูณกับระยะ GZ หรือ . GZ เมื่อพิจารณาตามรูปที่ 53 จะพบว่า

$$GZ = BR - BP$$

$$= BR - BG, \sin \theta$$

ฉะนั้นโมเมนท์ความทรงตัวสถิต $\triangle$ (BR – BG. Sin θ) ซึ่งในรูปนี้มีสิ่งเดียวที่เราไม่รู้นั่นคือระยะ BR แต่มีวิธีหาโดยหลักของโมเมนท์การโยกย้ายของปริมาตร (Moment of transference of Wedge) ตามที่กล่าวแล้ว

$$\nabla . BR = v.hh'$$

$$BR = \frac{v.hh'}{\nabla}$$

ฉะนั้นโมเมนท์ความทรงตัวสถิตเมื่อเรือเอียงเป็นมุม θ จึงเท่ากับ

$$\triangle \left(\frac{v.hh'}{\nabla} - BG. \sin \theta \right)$$

ซึ่งสูตรนี้เรียกสูตรตามวิธีของแอทวูด (Attwood Method ระยะแขนตั้งตรงหรือระยะคูณโมเมนท์ (Righting Arm Or Lever), $GZ = \frac{v.hh'}{\nabla} - BG. \sin \theta$

ถ้าจุดศูนย์ถ่วง G อยู่ใต้จุดศูนย์กลางความลอย B แล้ว $GZ = \frac{v.hh'}{\nabla} + BG. \sin \theta$

ถ้าเราต้องการจะทราบระยะแขนตั้ง GZ เมื่อเรือเอียงไปเป็นมุม O ดีกรี แล้วเราต้องรู้รายการดังนี้

1) ตำแหน่งของจุดศูนย์กลางความลอย B ของเมื่อเรือตอนตั้งตรง

2) ตำแหน่งของจุดศูนย์ถ่วง G ของเรือนั้น

3) ปริมาตรระหว่างขับน้ำ, ∇

4) ค่าโมเมนท์การโยกย้ายปริมาตรรูปลิ่มนั่นคือ v. hh'

ค่าโมเมนท์การโยกย้ายปริมาตรรูปลิ่มประการสุดท้ายนี้ต้องใช้เวลาคำนวณยุ่งยากมาก ซึ่งจะอธิบายอย่างละเอียดต่อไป

2. เส้นโค้งความทรงตัวสถิต (Curve Of Statical Stability)

ความยาวของระยะแขนตั้งตรง GZ ซึ่งได้รับจากวิธีของแอทวูดก็ดีหรือ วิธีเมตาเซนตริคก็ดี ย่อมเปลี่ยนแปลงไปตามมุมเอียง O ของเรือ จะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจนมากทุ่ด และเมื่อเรือเอียงต่อไป ค่าของ GZ จะลดน้อยลง ๆ จนเป็นสูญ และเป็นลบต่อไป ซึ่งโมเมนท์ในตอนนี้ไม่ใช่โมเมนท์ตั้งตรงเหมือนชื่อเสียแล้ว แต่กลับเป็นโมเมนท์ช่วยให้เรือคว่ำเร็วขึ้น (Upsetting Couple) พิจารณาตัวอย่างเรือ เอช. เอม. เอส. กัปตัน (H.M.S. Captain) ซึ่งมีระยะแขนตั้งตรง GZ ดังต่อไปนี้.-

เมื่อมุมเอียง	7	ดีกรี	GZ = 4 1/2	นิ้ว	เมื่อมุมเอียง	35	ดีกรี	GZ	= 7 1/2	นิ้ว
”	14	”	GZ = 8 ½	”	”	42	”	GZ	= 5 1/4	”
”	21	”	GZ = 10 ½	”	”	49	”	GZ	= 2	”
”	28	”	GZ = 10	”	”	54 1/2	”	GZ	= สูญ	”

ต่อไปนำค่าของ GZ ไปเขียนลงในรูปที่ 54 โดยใช้มาตราส่วนพอสมควร ใช้ระยะออร์ดิเนตเป็นระยะ GZ ระยะทางระดับเป็นมุมเอียงของเรือเป็นดีกรี (Angle Of Heel Or Inclination) เส้นโค้งที่เขียนขึ้นนี้เป็นเส้นโค้งความทรงตัวสถิต (Curve Of Statical Stabitity) จากเส้นโค้งนี้จะหาค่าของ GZ ได้ทุก ๆ มุมเดียงของเรือ เส้นโค้ง A ในรูปที่ 54 เป็นเส้นโค้งความทรงตัวของเรือ เอช. เอม. เอส. กัปตัน มุมเอียงที่มีค่าของระยะ GZ มากที่สุด (Maximum Righting Lever) เรียกมุมของความทรงตัวมากที่สุด (Angle Of Maximum Stability) มุมที่เส้นโค้งความทรงตัวผ่านเส้นฐานเรียกมุม ของการหมดความทรงตัว (Angle Of Vanishing Stability) และจำ จำนวนดีกรีทั้งหมดเรียกระยะของความทรงตัว (Range of Stability) ถ้าเรือถูกทำให้เอียงต่อไปเพราะหลังจากเรือหมดระยะความทรงตัวแล้วเรือไม่กลับตั้งตรงเอง แต่จะเอียงต่อไปเพราะระยะ GZ เป็นลบ โมเมนท์ที่เกิดขึ้นกลายเป็นโมเมนท์ทำให้เรือคว่ำ ไม่ใช่โมเมนท์ทำให้เรือตั้งตรง ในรูปที่ 54 นั้นได้มีเส้นโค้งความทรงตัวของเรือ เอช. เอม. เอส. มอนาค (H.M.S. Mornarch) อีกเส้นหนึ่ง คือเส้นโค้งซึ่งมีระยะแขนตั้งตรง GZ และมุมเอียงของเรือดังต่อไปนี้

เมื่อมุมเอียง	7	ดีกรี	ระยะ GZ 4	นิ้ว	เมื่อมุมเอียง	42	ดีกรีระยะ GZ 22	นิ้ว
“	14	“	“ GZ 8 1/2	“	“	49	“ GZ 20	“
“	21	“	“ GZ 12 1/2	“	“	54 1/2	“ GZ 17 1/2	“
“	28	“	“ GZ 18 1/4	“	“	69 1/2	“ GZ สูญ	“
“	35	“	“ GZ 21 3/4	“				

จะเห็นว่าเส้นโค้งความทรงตัว B นี้มีระยะของความทรงตัวยาวกว่าเส้นโค้ง A ค่าของแขนตั้งตรง GZ ยาวกว่าเรือ เอช.เอม.เอส. มอนาค จึงเป็นเรือที่มีความทรงตัวดีกว่าเรือ เอช.เอม.เอส. กัปตัน

ย้อนกลับไปยังสูตรของแอทวูด ในการหาระยะแขนตั้งตรงเมื่อเรือเอียงเป็นมุม θ ดีกรี

$GZ = \frac{v.hh''}{\nabla}$ - BG. Sin θ จะเห็นว่าสูตรนี้มีสองส่วนด้วยกัน ส่วนแรกเป็นส่วนที่เกี่ยวกับเรขาคณิต และขึ้นอยู่กับรูปร่างของเรือ (Form of Ship) แต่อย่างเดียว ส่วนที่สองคือ BG.Sin θ นั้นขึ้นอยู่กับตำแหน่งของจุดศูนย์ถ่วงของเรือ นั่นก็คือขึ้นอยู่กับน้ำหนักทุกชิ้น ที่ประกอบเป็นลำเรือ และน้ำหนักต่าง ๆ ที่บรรทุก ฉะนั้นจึงจะกล่าวถึงสองกรณีต่อไปคือ

(ก) อิทธิพลของรูปร่างของเรือที่มีต่อเส้นโค้งความทรงตัว

(ข) อิทธิพลของจุดศูนย์ถ่วงของเรือที่มีต่อเส้นโค้งความทรงตัว

2.1 อิทธิพลของรูปร่างของเรือที่มีต่อเส้นโค้งความทรงตัวนั้น ได้แก่กินน้ำลึก ความกว้างและฟรีบอร์ดของเรือ เพื่อความสะดวกจะถือว่ากินน้ำลึกของเรือคงที่ และความกว้างกับฟรีบอร์ดของเรือเปลี่ยนแปลงไป และเพื่อความง่ายต่อการอธิบาย จึงขอสมมติว่าเรือนี้มีลักษณะเป็นรูปหีบ ซึ่งมีจุดศูนย์กลางความถ่วงคงที่เสมอ เรือรูปหีบมีขนาดดังนี้

กินน้ำลึก	Draught	21	ฟุต
ความกว้าง	Beam	50 1/2	ฟุต
ฟรีบอร์ด	Freeboard	6 1/2	ฟุต

จากเรือรูปหีบที่มีขนาดดังกล่าวแล้วคำนวณหาเส้นโค้งได้ดังปรากฏในรูปที่ 55 เส้นโค้งจะเห็นว่ากราบเรือ (Deck Edge) เริ่มจมน้ำเมื่อเรือเอียงไปเพียง 14 ½ ดีกรี และจากนี้เส้นโค้งนี้จะค่อย ๆ เพิ่มความสูงขึ้น และแล้วลดลงปรากฏว่ามุมของการหมดความทรงตัว (Angle of Banishing Stability) เพียง 35 ดีกรีเท่านั้น

ครั้นเมื่อเพิ่มความกว้างของเรือรูปหีบที่กล่าวแล้วให้กว้างออกไปอีก 4 ½ ฟุต แต่อย่างเดียว ขนาดเรือรูปหีบจึงปรากฏดังนี้

กินน้ำลึก .... 21 ฟุต

ความกว้าง .... 55 ฟุต

ฟรีบอร์ด .... 6 1/2 ฟุต

และแล้วนำไปคำนวณหาเส้นโค้งความทรงตัวจะปรากฏตามเส้นโค้ง B ในรูปที่ 55 จะเห็นว่ามุมของการหมดความทรงตัวเพิ่มขึ้นเป็น 45 ดีกรี มากกว่าเส้นโค้ง Aถึง 7 ดีกรี แม้ว่าจุดศูนย์ถ่วงของเรือจะ

คงที่ ฉะนั้นในการเพิ่มความกว้างจะทำให้ความสูงเมตา จีเอ็ม สูงขึ้นด้วย ทั้งนี้เป็นเพราะจุดเมตาขยับสูงขึ้นไปนั่นเอง เมื่อพิจารณาดูลักษณะเส้นโค้ง B แล้วจะเห็นว่ามุมชัน (Slope) มากกว่ามุมชันของเส้นโค้ง A

ในคราวนี้จะได้เพิ่มระยะฟรีบอร์ดของเรือรูปหีบอีก 4 1/2 ฟุต แต่อย่างเดียว ซึ่งปรากฏดังนี้

กินน้ำลึก	....	21 ฟุต
ความกว้าง	....	50 1/2 ฟุต
ฟรีบอร์ด	....	11 ฟุต

และเมื่อนำไปหาเส้นโค้งความทรงตัวแล้วจะปรากฏดังเส้นโค้ง C ซึ่งแตกต่างไปจากเส้นโค้ง Aและ Bมาก มุมของการหมดความทรงตัวเส้นโค้ง C เป็น 72 ดีกรี มุมเอียงที่กราบเรือเริ่มจมน้ำของเส้นโค้ง A กับเส้นโค้ง C นั้นเท่ากันเมื่อ 14 1/2 ดีกรี

สรุปความได้ว่าในการเพิ่มขนาดเรือคือความกว้าง และฟรีบอร์ดทำให้มีอิทธิพล กับเส้นโค้งความทรงตัวดังต่อไปนี้

(ก) ในการเพิ่มความกว้างนั้นจะเพิ่มความทรงตัวเริ่มต้น (Initial Stability) ให้ดียิ่งขึ้น ฉะนั้นมุมชันจึงมากในตอนเริ่มต้นมุมเอียงของเรือ แต่ไม่มีอิทธิพลทำให้มุมของการหมดความทรงตัวเพิ่มมากขึ้น

(ข) ในการเพิ่มระยะฟรีบอร์ดนั้นไม่มีอิทธิพลต่อความทรงตัวเริ่มต้น แต่ทำให้มุมของการหมดความทรงตัวเพิ่มขึ้น

2.2 อิทธิพลของจุดศูนย์ถ่วงของเรือที่มีต่อเส้นโค้งความทรงตัว

ในตอนนี้จะพิจารณาถึงสิ่งที่มีอิทธิพลต่อเส้นโค้งความทรงตัว อันเนื่องมาจากตำแหน่งของจุดศูนย์ถ่วงของเรือ ถ้าจุดศูนย์ถ่วงของเรือ G อยู่สูงกว่าจุดศูนย์กลางความลอย B ซึ่งตามปกติย่อมเป็นเช่นนี้เสมอ ระยะแขนตั้งตรง Righting Arm, GZ จะเท่ากับ $\frac{v.hh'}{\nabla}$ ลบออกเสียด้วย BG.Sin θ ฉะนั้นค่าของ BG.Sin θ จะมาขึ้นเมื่อเรือเอียงเป็นมุมมากขึ้น ๆ และ BG.Sin θ จะเท่ากับ 1 เมื่อเรือเอียงไปเป็นมุม 90 ดีกรี ฉะนั้นค่าของระยะแขนตั้งตรง G Z จะน้อยลงเมื่อ BG.Sin θ มีค่ามากขึ้น ถ้าสมมติว่าเส้นโค้ง C ในรูปที่ 55 ซึ่งเป็นเส้นโค้งความทรงตัวของเรือ ซึ่งมีระยะกินน้ำลึก 21 ฟุต ความกว้าง 50 ½ ฟุต และฟรีบอร์ด 11 ฟุตนี้ มีระยะ BG = 2 ฟุต เมื่อเรือเอียงเป็นมุม θ = 30 ดีกรี ค่าของ BG. Sin θ = 2 ฟุต x Sin 30 ดีกรี = 2 ฟุต $\times$ 1/2 = 1 ฟุต นั่นคือค่าของ GZ จะลดลงอีก 1 ฟุต เมื่อเรือเอียง 30 ดีกรี โดยการทำวิธีนี้เราเขียนเส้นโค้งใหม่จะได้ดังเส้นโค้ง D รูปที่ 55 ซึ่งมุมหมดความทรงตัวของเส้นโค้งเท่ากั้บ 72 ดีกรี ครั้นจุดศูนย์กลางความถ่วง G สูงขึ้น มีอิทธิพล

ทำให้ระเยแขนตั้งตรงน้อยลงดังปรากฏในเส้นโค้ง D ซึ่งเหลือมุมหมดความทรงตัวเพียง 53 ดีกรี เท่านั้น

โดยปกติเส้นโค้งความทรงตัว (Curves of Stability) นี้มักเขียนขึ้นโดยใช้เส้นออร์ดิเนต เป็นระยะแขนตั้งตรง (Righting Arm)ไม่ใช่โมเมนท์ตั้งตรง (Righting Moment) เมื่อต้องการจะหาโมเมนท์ตั้งตรง ณ จุด มุมเอียงใด ๆ ก็เอาระยะแขนตั้งตรงนั้นคูณด้วยระวางขับน้ำในขณะนั้น แต่ว่าโดยแท้จริงแล้วเส้นโค้งความทรงตัวต้องใช้ออร์ดิเนตเป็นโมเมนท์ตั้งตรง ซึ่งจะให้มโนภาพที่ถูกต้องกับความจริง ตามในรูปที่ 56 เป็นเส้นโค้งของความทรงตัวของเรือลำหนึ่ง เมื่อระวางขับน้ำไม่เท่ากันสองกรณี เส้นโค้ง Aเป็นเส้นโค้งที่มีระยะแขนตั้งตรงเมื่อเรือมีระวางขับน้ำ 1,500 ตัน Light Condition ส่วนโค้ง B นั้นเป็นส่วนโค้งที่มีระยะแขนตั้งตรงเมื่อเรือมีระวางขับน้ำ 3,500 ตัน Load Condition แต่เมื่อพิจารณาดูรูปที่ 56 แล้วทำให้เราคิดว่าในเมื่อกรณี A ระวางขับน้ำ 1,500 ตัน นั้นมีความทรงตัวดีกว่าเรือในกรณี B ระวางขับน้ำ 3,500 ตัน ทั้งนี้เพราะรูปเส้นโค้ง A ใหญ่กว่าเส้นโค้ง B แต่ตามในรูปที่ 57 เราใช้เส้นออร์ดิเนตเป็นโมเมนท์ตั้งตรงแทนที่จะเป็นระยะแขนตั้งตรง รูปจะกลับกันทั้ง ๆ ที่เป็นเรือลำเดียวกัน ดังที่กล่าวมาแล้ว จะเห็นว่าเส้นโค้ง A ซึ่งเป็นโมเมนท์ตั้งตรงในขณะเรือมีระวางขับน้ำเบา 1,500 ตันรูปเล็กกว่าเส้นโค้ง B ซึ่งเป็นโมเมนท์ตั้งตรงในขณะเรือมีระวางขับน้ำหนัก 3,500 ตัน ฉะนั้นรูปที่ 57 ซึ่งใช้ออร์ดิเนตเป็นโมเมนท์ตั้งตรงจึงให้มโนภาพที่ถูกต้องกว่า เรือเมื่อมีระวางขับน้ำบรรทุกที่มีความทรงตัวดีกว่าเมื่อระวางขับน้ำเบากว่า

จากเส้นโค้งความทรงตัวนี้พอจะประมวลสิ่งสำคัญได้ดังนี้.-

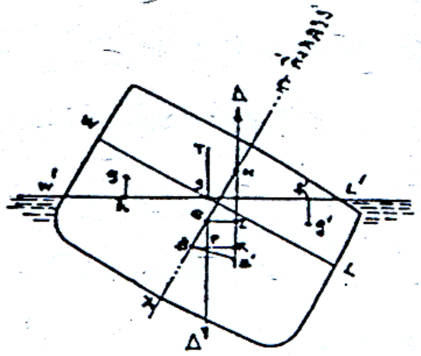
(ก) มุมชันของเส้นสัมผัสเส้นโค้ง (Inclination of the Tangent) เริ่มตั้งต้นที่จุดตัดออริจิน (Origin)

(ข) มุมเอียงของเรือเมื่อมีค่าระยะแขนตั้งตรงมากที่สุด

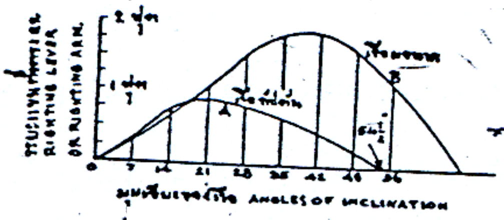
(ค) ระยะของความทรงตัว (Range of Stability)

มุมชันของเส้นสัมผัสเส้นโค้งนั้นหาได้วิธีง่าย ๆ คือ ณ ที่มุมเชิงวงกลม (Circular Measure) เท่ากับหนึ่งนั้น ตรงกับมุม 57.3 ดีกรี ณ ที่มุม 57.3 ดีกรี นี้ลากเส้นตั้งฉากขึ้นไปจากเส้นฐาน และวัดความยาวเท่ากับระยะสูงเมตาจีเอ็ม (Metacentric Height GM) แล้วลากจากจุดออริจินมายังปลายเส้นซึ่งมีความสูงเท่ากับระยะเมตาจีเอ็มนี้ เส้นโค้งความทรงตัวตอนมุมเอียงน้อย ๆ จะเดินตามเส้นสัมผัสนี้ พอกราบเรือเริ่มจมน้ำเส้นโค้งความทรงตัวจะเบนออกจากเส้นสัมผัสดังในรูปที่ 58

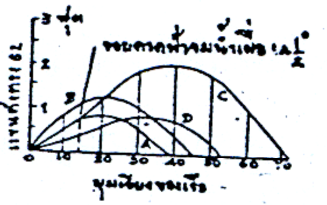
เหตุผลที่กล่าวแล้วพิสูจน์ได้ดังนี้ ณ มุมเอียงของเรือน้อย ๆ θ ดีกรี $GX = GM. \theta$ ในที่นี้ θ เป็นมุมเชิงวงกลม



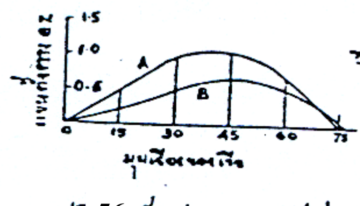
รูปที่ 53 แสดงจุดหน้าที่ของเรือ ตำแหน่งเอียงเป็นมุมมากกว่า 10–15 ดีกรี (รูป 5 ในจุดบนเส้นกึ่งกลางลำเหมือนเมื่อเรือเอียงเป็นมุมน้อยๆ)



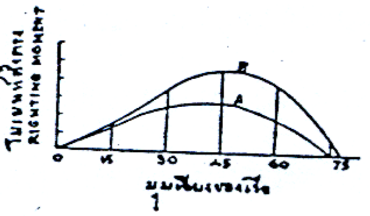
รูปที่ 54 เส้นโค้งความทรงตัวสถิต CURVE OF STATICAL STABILITY



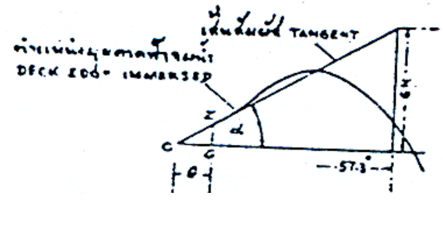
รูปที่ 55 แสดงเส้นโค้งความทรงตัวแบบต่างๆ เนื่องจากการเพิ่มความกว้างและฟรีบอร์ดของเรือ



รูปที่ 56 เส้นโค้งความทรงตัวที่เขียนโดยใช้ค่าเป็นแขนตั้งตรง



รูปที่ 57 เส้นโค้งความทรงตัวที่เขียนโดยใช้ค่าเป็นโมเมนต์ตั้งตรง



รูปที่ 58 เส้นสัมผัสของเส้นโค้งความทรงตัวช่วยในการเขียนเส้นโค้งนี้เป็นอันมาก.

ถ้า a เป็นมุมที่ OM กระทำกับฐานแล้ว tan $\alpha = \frac{GZ}{\theta}$ ดูรูปที่ 271 ฉะนั้นเมื่อนำ GZ = GM. θ มาแทนค่าจะเห็นว่า tam α = GM

๓. ตัวอย่างเส้นโค้งความทรงตัว

ในรูปที่ 59 นั้นได้นำเส้นโค้งความทรงตัวของเรือต่าง ๆ มาแสดง ขณะเมื่อเรือนั้นบรรทุกเต็มที่

เส้นโค้ง A เป็นเส้นโค้งความทรงตัวของเรือลาดตระเวนลำหนึ่งมีระวางขับน้ำเต็มที่ 10,000 ตัน และมีความสูงเมตาจีเอ็ม 404 ฟุต ระยะของความทรงตัว (Range of Stability) ประมาณ 89 ดีกรี

เส้นโค้ง B เป็นเส้นโค้งความทรงตัวของเรือมอนิเตอร์ (Monitor) ซึ่งเป็นเรือปืนขนาดใหญ่มีเกราะให้เป็นเรือรักษาฝั่ง เรือนี้มีระวางขับน้ำ 9,000 ตัน มีระยะฟรีบอร์ดน้อย มีความสูงเมตาจีเอ็ม 18 ฟุต ระยะความทรงตัว 70 ดีกรี

เส้นโค้ง C เป็นเส้นโค้งความทรงตัวของเรือเชลเตอร์เดค (Shelter Deck Cargo Vessel) มีความสูงเมตาจีเอ็ม 2 ฟุตเศษ ระยะความทรงตัวมากกว่า 80 ดีกรี

เส้นโค้ง D เป็นเส้นโค้งความทรงตัวของเรือโดยสารสินค้าลำหนึ่งมีระวางขับน้ำ 37,000 ตัน มีความสูงเมตาจีเอ็ม 4.9 ฟุต ระยะความทรงตัวมากกว่า 90 ดีกรี

ในรูปที่ 60 เป็นเส้นโค้งความทรงตัวของเรือเชลเตอร์เดคเมื่อมีระวางขับน้ำเบา (Light) ระวางขับน้ำเมื่อเอาสินค้าขึ้นหมดแล้วถ่วงท้อง (Bailast) และระวางขับน้ำเต็มที่ (Loaded) รวมสามกรณีด้วยกันคือระวางขับน้ำ 5,500, 7,300 และ 15,000 ตัน และความสูงเมตาจีเอ็ม 4.4, 5.7 และ 2.0 ฟุต ตามลำดับ จากเส้นโค้งทั้งสามนี้จะพบว่าความทรงตัวเมื่อเรือเบานั้นไม่ดี และจะค่อยดีขึ้นเมื่อเรือมีระวางขับน้ำมากขึ้น ๆ

ในรูปที่ 61 แสดงเส้นโค้งความทรงตัวของเรือซึ่งมีความทรงตัวไม่ดี ในตอนเรือเอียงมุมเล็กน้อยตอนแรก (Initial Stability) ทั้งนี้เนื่องมาจากตำแหน่งจะศูนย์ถ่วงของเรือ เส้นโค้ง A มีความสูงเมตาจีเอ็ม 0.6 ฟุต ระยะความทรงตัว 71 ดีกรี ถ้าขยับให้จุดศูนย์ถ่วงสูงขึ้น 0.6 ฟุต ระยะความสูงเมตาจีเอ็มจะเป็นสูญ ระยะแขนตั้งตรง GZ จะถูกลดลงเท่ากับ 0.6 Sin θ และแล้วจะได้เส้นโค้งใหม่คือเส้นโค้ง B ซึ่งมีระยะความทรงตัวลดลงเหลือ 66 ดีกรี ถ้าขยับให้จุดศูนย์ถ่วงของเรือสูงขึ้นไปอีก 0.6 ฟุต ความสูงเมตาจีเอ็มจะเป็น – 0.6 ฟุต (Negative GM) เรือจึงอยู่ในพฤติภาพทรงตัวไม่ดี (Unstable Equiplibrium) เส้นโค้งความทรงตัวจะเพิ่มที่จุดออริจิน ทำมุมกับเส้นฐาน $\alpha = \tan\frac{-10.6}{57.3}$ เรือจะเอียงไป 10 ดีกรี แล้วจุดศูนย์ถ่วงของเรือกับจุดศูนย์กลางความลอยใหม่จะมาอยู่ในเส้นดิ่ง เดียวกัน เรือจะหยุดเอียงและจะมีความทรงตัวดีต่อไป ความสูงจีเอ็มจะเป็นบวก (Positive

GM) เรือลักษณะอย่างนี้เหมาะที่จะใช้ในที่ที่มีคลื่นลมสงบ ถ้านำไปใช้ในท้องเรือทะเล ต้องมีถังอับเฉาถ่วงท้องเรือ เพื่อให้เรือมีความทรงตัวดี เรือในลักษณะอย่างนี้ตรงกับเส้นโค้งความทรงตัว B และ C

บางครั้งในการออกแบบเรืออาจมีความทรงตัวดังเส้นโค้ง C ตามในรูปที่ 61 ต่อไปนี้จะกล่าวถึงเรือชื่อ เอส. เอส. ลิโอ (S.S.Leo) ซึ่งจมเมื่อปี ค.ศ. 1895 เรือลำนี้ออกจากท่าเรือไปโดยบรรทุกข้าวบาเลย์และข้าวสาลี มีถ่านหิน 40 ตัน อยู่บนดาดฟ้าระยะฟรีบอร์ดของเรือลำนี้ค่อนข้างมาก ไม่มีน้ำหนักอับเฉาในเรือนี้เลย เมื่อออกจากท่าไปเรือลำนี้เอียง 10 ดีกรี ทั้งกราบขวากราบซ้าย ซึ่งแสดงว่าเรือลำนี้มีความสูงเมตาจีเอ็มเป็นลบ นอกจากนี้บังมีน้ำท้องเรืออิสระ (Bilge Water) ซึ่งวิ่งไปมาเวลาเรือเอียงไปกราบหนึ่งกราบใด และน้ำท้องเรือนี้ไม่สามารถจะสูบขึ้นได้เพราะสูบไม่ถึง เมื่อเรือเอียงกราบขวา (Starboard) ช่างกลก็พยายามแต่งเรือให้คืนตั้งตรงโดยใช้ถ่านหินถังขวา (Starboard Bunker)แต่นี่เป็นการกระทำที่ผิด เพราะเท่ากับเป็นการยกตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของเรือให้สูงขึ้น (BG มากขึ้น) ทำให้ระยะแขนตั้งตรง GZ น้อยลงอีก เรือยิ่งกลายเป็นสภาพที่มีความทรงตัวเลวลงทุกที ในขณะนั้นลมและคลื่นได้ตีมาทางกราบขวา เรือจึงเอียงไปทางกราบซ้าย ซึ่งทำให้เรือเอียงไปมากกว่าเดิม และน้ำเริ่มเข้าเรือทางกราบซ้ายและเรือจมไปในที่สุด วิธีแก้ที่ถูกนั้นไม่มีวิธีใดนอกจากสูบน้ำอับเฉาลงท้องเรือ ซึ่งจะทำให้จุดศูนย์ถ่วงของเรือต่ำลง เรือจะมีความทรงตัวดีขึ้น

เรือบางลำอาจเดินทางไปได้ซึ่งในขณะนั้นมีความสูงเมตาจีเอ็มเป็นบวกเล็กน้อย และเนื่องจากการใช้ถ่านหินหมดเปลืองไปในระหว่างการเดินทางเรือนั้นจะกลายเป็นมีความสูงเมตาจีเอ็มเป็นลบ แล้วเรือก็เอียงกราบใดกราบหนึ่งได้โดยไม่รู้ตัวเรือที่แล่นอยู่ในท้องทะเลและมีความสบาย ไม่โคลงมากนั้นเนื่องจากเรือนั้นมีความสูงเมตาจีเอ็มน้อยหรือไม่มากจนเกินไป เรือใดมีความสูงเมตาจีเอ็มสูงมากเรือนั้นจะกลายเป็นเรือแข็งทื่อ (Stiff) ไม่สบายเวลาอยู่ในทะเล แต่ถ้ามีความสูงเมตาจีเอ็มน้อยไปก็อาจเกิดอันตรายเมื่อความสูงเมตาจีเอ็ม กลายเป็นลบได้ง่าย ๆ ความสูงเมตาจีเอ็มที่ดีคือไม่มากไม่น้อยเกินไปเรือประจัญบานพฤติภาพของความทรงตัวเป็นสิ่งสำคัญยิ่ง ต้องเป็นเรือที่มีระยะฟรีบอร์ดมาก เพื่อให้มีระยะความทรงตัวมากคือเอียงเป็นมุมมาก ๆ ได้ เรือประเภทนี้มีจุดศูนย์ถ่วงของเรือค่อนข้างสูง เนื่องจากมีของหนักในที่สูงเป็นจำนวนมากเช่นเกราะ ป้อม และปืนใหญ่ ฉะนั้นเวลาออกแบบเรือนี้ต้องมีความสูงเมตาจีเอ็มมาก เส้นโค้งความทรงตัวของเรือที่มีรูปหน้าตัด เป็นวงกลมเช่นเรือดำน้ำนั้น คำนวณได้ง่าย ๆ เพราะเมื่อพิจารณาดูรูปที่ 62 แล้ว จุดเมตาจีเอ็มของเรือก็คือจุดศูนย์กลางของวงกลมนั่นเอง ซึ่งแน่นอนจุดเมตาจีเอ็มนี้เป็นจุดตัดของแรงกระทำ ของความลอยที่ผ่านจุดศูนย์กลางความลอย B' กับเส้นกึ่งกลางลำนั่นเอง ระยะแขนตั้งตรง $GZ = Gm. \sin \theta$ จุด G คือศูนย์กลางความถ่วงของเรือ สมมติว่าความสูงเมตาจีเอ็มเท่ากับ 2 ฟุต ฉะนั้นระยะแขนตั้งตรง GZ = 0, 1.0, 1.73, 2.0, 1.73, 1.0 เมื่อคิดว่ามุมเอียงของเรือเพิ่มขึ้นทีละ 30 ดีกรี ระยะแขนตั้งตรง GZ

มากที่สุดเมื่อมุมเอียง 90 ดีกรี ระยะความทรงตัว 180 ดีกรี เส้นโค้งความทรงตัวนี้แสดงในรูปที่ 63 และเส้นโค้งความทรงตัวชนิดเดียวกันนี้สำหรับเรือดำน้ำแท้ ๆ ก็จะมีลักษณะดังกล่าวแล้ว

4. การคำนวณเส้นโค้งความทรงตัว (Calculations for Curves of Stability)

การคำนวณหาเส้นโค้งความทรงตัวของเรือนั้นในปัจจุบันจนี้ได้หันมาใช้เครื่องมืออินติเกรเตอร์ (Integrator) ช่วยในการคำนวณช่วยลดความยุ่งยากและทำให้รวดเร็วขึ้นมาก แต่อย่างไรก็ตามจะได้กล่าวถึงวิธีคำนวณหาเส้นโค้งต่าง ๆ ซึ่งได้เคยใช้กันมาก่อนเครื่องมืออินติเกรเตอร์คือ.-

วิธีที่ 1 วิธีของบลอม (Blom 's Mechanical Method)

วิธีที่ 2 วิธีของบานส์ (Barnes' Method)

วิธีที่ 3 วิธีโดยตรง (Direct Method) (บางทีใช้สำหรับตรวจสอบวิธีอื่น)

วิธีที่ 4 วิธีแอมสเลอร์อินติเกรเตอร์ (Amsler 's Integrator and Crosscurves of Stability)

วิธีที่ 5 วิธีของฮอค (Hok 's Method)

ในการสร้างเส้นโค้งความทรงตัวนั้นจำเป็นต้องตั้งข้อสมมติขึ้นดังนี้.-

(ก) สมมติว่าตัวเรือและดาดฟ้าทั้งหมดผนึกน้ำตลอดเวลาที่เรือเอียงไป

(ข) สมมติว่าจุดศูนย์ถ่วงของเรือคงที่ตลอดเวลา และในเวลาสร้างเส้นโค้งจำเป็นต้องสมมติจุดหมุนของเรือขึ้นจุดหนึ่งซึ่งถือว่าเป็นจุดศูนย์ถ่วงของเรือขณะนั้น ในเวลาใช้การต้องคำนวณไปหาจุดศูนย์ถ่วงของเรือจริงอีกครั้งหนึ่ง

(ค) สมมติว่า ทริมเรือคงที่ตลอดเวลา

4.1 การเขียนเส้นโค้งความทรงตัวสถิตโดยวิธีของบลอม (Blom 's mechanical Method)

ในตอนเขียนรูปลายเส้นของเรือนั้นเราจะได้รูปหน้าตัดของเรือ (Blom 's Plan) จากรูปเหล่านั้นวาดลงด้วยกระดาษบางเอาแต่ขอบเฉพาะส่วนที่อยู่ใต้แนวน้ำ หมายเส้นศูนย์กลางทุกหน้าตัดแล้วใช้กาวอย่างบางทาให้ติดกันแน่นทุก ๆ หน้าตัด น้ำหนักทั้งหมดนี้สมมติเป็นน้ำหนักหรือระวางขับน้ำของเรือลำนั้น ต่อไปสมมติว่าเรือเอียงครั้งละ θ ดีกรี แต่ละครั้งจะเกิดรูปลิ่มจมน้ำ และไม่จมน้ำเกิดขึ้นดังในรูปที่ 53 ต่อไปตัดรูปลิ่ม W's W' ซึ่งเป็นรูปลิ่มที่ไม่จมน้ำ ย้ายเอาไปไว้ ณ ตำแหน่ง LsL' แล้วชั่งน้ำหนักให้ได้เท่ากับครั้งแรก การตัดนั้นควรตัดเหนือเส้นแนวใหม่เล็กน้อย หลักใหญ่ในตอนที่จะทำนี้ก็คือ พยายามหาเส้นดิ่งซึ่งผ่านจุดศูนย์กลางความลอยเมื่อเรือเอียงไป θ ดีกรีแล้วหรือพยายามหาจุด B' นั่นเอง และเส้นดิ่งนี้จะตั้งฉากกับเส้นแนวน้ำใหม่ W'L' ฉะนั้นถ้าเราหาจุด B' ได้เราก็หาระยะแขนตั้งตรง GZ ได้ ในการหาจุดศูนย์ถ่วงของเรือ G กับจุดศูนย์กลางความลอยเก่า B และ B' นี้เราทำได้โดยการทดลองแขวน (Experiment) ดังได้กล่าวไว้แล้ว เมื่อได้จุดต่าง ๆ หมดแล้ว

ก็ลากเส้นตั้งฉากกับเส้นแนวน้ำใหม่ $W^{'}L^{'}$ ให้ผ่านจุดศูนย์กลางความลอย $B^{'}$ จากนี้ลากเส้นระยะแขนตั้งตรง GZ, BR และ $BB^{'}$ ณ มุมเอียง θ ดีกรี ฉะนั้นเมื่อเอียงเรือไปจนครบที่ต้องการแล้ว ก็สามารถสร้างเส้นโค้งความทรงตัวได้ มุมเอียงช่วงหนึ่ง ๆ ใช้ประมาณ 10 ดีกรี

4.2 การเขียนเส้นโค้งความทรงตัวสถิตโดยวิธีของบานส์ (Branes Method)

วิธีสร้างเส้นโค้งความทรงตัวของบานส์นี้ ต้องใช้ตาราง 2 ตารางด้วยกัน ตารางแรกเรียกตารางเบื้องต้นของการคำนวณ (Preliminary Table) ตารางที่สองเรียกตารางรวม (Combination Table) เมื่อพิจารณารูปที่ 64 เป็นรูปหน้าตัดของเรือลำหนึ่งซึ่งเอียงอยู่เป็นมุมθ ดีกรี WL เป็นเส้นแนวน้ำ เมื่อเรือตั้งตรง (Upright Waterline) $W^{'}L^{'}$ เป็นแนวน้ำเมื่อเรือเอียงไปเป็นมุมน้อย ๆ เส้นแนวน้ำทั้งสองจะตัดกันที่กึ่งกลางลำดังที่กล่าวมาแล้ว แต่เมื่อเรือเอียงไปเป็นมุมมากกว่า 10 – 15 ดีกรี แนวน้ำทั้งสองจะตัดกันที่จุด s เล็กตามในรูปที่ 64 ซึ่งไม่ได้อยู่ที่กึ่งกลางลำดังกล่าวแล้ว ถ้าลากเส้นแนวน้ำสมมติ wl (Assumed water Plane) ให้ผ่านจุด S ซึ่งอยู่บนเส้นกึ่งกลางลำจะเห็นว่าปริมาตรรูปลิ่มสมมติ WSw และ LSI บางทีก็ใหญ่ บางทีก็เล็กกว่าปริมาตรเดิม ซึ่งเมื่อเอาปริมาตรรูปลิ่มสมมติทั้งสองหักออกจากกันแล้วหารด้วยเนื้อที่แนวน้ำสมมติ wl ก็จะได้ความหนาของชั้นแนวน้ำสมมติ ซึ่งจะเป็นวิธีที่ทำให้เรากำหนดเส้นแนวน้ำใหม่ $W^{'}L^{'}$ ได้ถูกต้อง โดยถือหลักว่าถ้าปริมาตรรูปลิ่มจมน้ำมากกว่าปริมาตรรูปลิ่มไม่จมน้ำ อัตราแก้ต้องเอาชั้นแนวน้ำสมมติไปหักออก ถ้าปริมาตรรูปลิ่มไม่จมน้ำมากกว่าปริมาตรรูปลิ่มจมน้ำ อัตราแก้ต้องเอาชั้นแนวน้ำสมมติไปบวกเข้า

ในการที่จะหาปริมาตรรูปลิ่มทั้งสองคือ SwW และ SIL นั้นจำเป็นต้องดำเนินการดังต่อไปนี้ ใช้พื้นที่ทางรัศมี (Radial Planes) โดยให้ห่างกันเป็นมุมช่วงละเท่า ๆ กัน (Angular Interval Apart)ซึ่งแต่ละพื้นที่รัศมีนั้นมีสูตรเนื้อที่เท่ากับ $\frac{1}{2} f\, y^2\, dx$ นั่นคือครึ่งหนึ่ง ของระยะออร์ดิเนตหรือความกว้างของรูปลิ่มกำลังสอง เป็นตัวตั้งแล้วคูณด้วยตัวคูณซิมสัน ก็จะได้พื้นที่รัศมีแต่เป็นพื้นที่พื้นเดียวเท่านั้น ต้องคำนวณทุกพื้นที่รัศมีทำมุมห่างกันเช่น 10 ดีกรี จนครบแล้วนำพื้นที่ทางรัศมีที่หาได้นั้นมาคูณด้วยตัวคูณซิมสันอีกโดยใช้มุมเชิงวงกลม (Circular Measure) เป็นระยะห่างของมุม (Angular Interval) ผลที่ได้รับเป็นปริมาตรของรูปลิ่ม ณ มุมเอียงหนึ่ง ๆ เช่นมุมเอียง 30 ดีกรี ถ้าจะให้ได้ทุกมุมเอียงของเรือก็ต้องคำนวณอย่างนี้อีก ซึ่งจะเห็นว่าเป็นงานที่ยืดยาว

สูตรพื้นที่ตามที่กล่าวมาแล้วนั้นพิสูจน์ได้ดังนี้ เมื่อพิจารณาดูรูปที่ 130 หน้า 151 จะพบว่ารูปลิ่มที่กำลังกล่าวนี้มีลักษณะคล้อยรูปที่ 16 และพิสูจน์ได้ว่าเนื้อที่หน้าตัดเท่ากับ $\frac{1}{2} f\, y^2\, d\theta$ ถ้าใช้ r = y ก็จะเปลี่ยนไปคือ $\frac{1}{2} f\, y^2\, d\theta$ เมื่อพิจารณารูปที่ 16 แล้วนึกว่ารูปลิ่มนี้มีความหนาเท่ากับ dx

ฉะนั้นรูปปริซึมความยาวของรูปลิ่ม = $\frac{1}{2} \int y^2 \, d\theta . dx$ เมื่อคิดตลอดความยาวก็จะได้ $\frac{1}{2} \int\int y^2 \, dx \, d\theta$ หรือ $\int (\frac{1}{2} \int y^2 .dx).d\theta$ ซึ่ง $\frac{1}{2} \int y^2 .dx$ ให้ชื่อว่าพื้นที่ทางรัศมี (Radial Plane)

เมื่อคำนวณปริมาตรทั้งสองแล้วนำมาหักออกจากกันนำเนื้อที่แนวน้ำสมมติ มาหารก็จะได้ความหนาของชั้นแนวน้ำสมมตินี้ วิธีดำเนินการดังนี้ ทำตารางเบื้องต้นของการคำนวณ (Preli Minaty Table) ตารางหนึ่งใช้สำหรับมุมเอียงของเรือเพียงมุมเดียว ในตารางนี้มีสองส่วนคือรูปลิ่มไม่จมน้ำและรูปลิ่มจมน้ำ ตารางที่ 5เป็นตัวอย่างของการคำนวณเส้นโค้งของเรือ เมื่อเรือเอียงไปเป็นมุม 30 ดีกรี ความยาวของออร์ดิเนต ของแนวน้ำทางรัศมีทุก ๆ หน้าตัดจนหมดความยาวของเรือ ได้กรอกไว้ในตาราง เมื่อคูณด้วยตัวคูณซิมสันก็จะได้ฟังชันของออร์ดิเนตหรือฟังชันของพื้นที่แนวน้ำทางรัศมีนั้น ในที่นี้เมื่อเรือเอียง 30 ดีกรี ฟังชันเนื้อที่ของปริมาตรรูปลิ่มจมน้ำเท่ากับ 550.3 และปริมาตรของรูปลิ่มไม่จมน้ำได้เท่ากับ 477.3 สำหรับกำลังสองและกำลังสามของออร์ดิเนตก็กรอกในช่องต่อ ๆ ไป เมื่อคูณกับตัวคูณซิมสันแล้วรวมกันก็จะได้ฟังชันของออร์ดิเนตกำลังสองของรูปลิ่มจมน้ำ 17,878 และของรูปลิ่มไม่จมน้ำ 14,250 ฟังชันออร์ดิเนตกำลังสามของรูปลิ่มจมน้ำ 597,810 และฟังชันออร์ดิเนตกำลังสามของรูปลิ่มไม่จมน้ำ 454,620 เมื่อเอาฟังชันของออร์ดิเนตกำลังสามของรูปลิ่มทั้งสองรวมกันจะได้ 1,052,430 ดังปรากฏท้ายตารางเบื้องต้นของการคำนวณ

ต่อไปนี้จะได้กล่าวถึงตารางที่ 5 แผ่นที่ 2 เป็นตารางที่คำนวณเส้นโค้งความทรงตัวของเรือเมื่อเรือเอียง 30 ดีกรี ในตารางนี้ต้องนำผลที่ได้มาจากตารางเบื้องต้นกรอกลง คือนำฟังชันของเส้นออร์ดิเนตกำลังหนึ่ง กำลังสอง และกำลังสามกรอกลง เมื่อนำตัวคูณซิมสันแล้วก็จะได้ฟังขันต่าง ๆ ในกรณีนี้ปริมาตรของรูปลิ่มจมน้ำมากกว่าปริมาตรรูปลิ่มไม่จมน้ำเป็นจำนวน 7,820 ลูกบาศก์ฟุต (หลังจากตัวคูณ 0.5817 แล้ว) ด้านใต้ของตารางนี้ได้แสดงวิะคำนวณความหนาของชั้นแนวน้ำสมมติ คือคำนวณได้เนื้อที่ชั้นแนวน้ำสมมติเท่ากับ 20,550 ตารางฟุต เมื่อนำไปหารปริมาตรรูปลิ่มที่เกิน 7,820 ลูกบาศก์ฟุตแล้วจะได้ความหนาชั้นแนวน้ำสมมติเท่ากับ 0.38 ฟุต ซึ่งทำให้สามารถเขียนแนวน้ำที่ถูกต้องได้

ต่อไปนี้คำนวณหาโมเมนท์การโยกย้ายของรูปลิ่ม (Moment of Transference of the Wedges), v. hh' ซึ่งปรากฏในสูตรตามวิธีแอทวูด โมเมนท์นั้นหมุนรอบแกน ST และแก้อัตราผิดในภายหลัง การหาโมเมนท์การโยกย้ายของรูปลิ่มดำเนินการดังนี้ ในช่องกำลังสามของออร์ดิเนตนั้นคูณด้วยตัวคูณซิมสันและคูณด้วยโคไซน์ (Cosine) ของมุมเอียงของเรือ 30 ดีกรีก ก็จะได้ฟังชันของโมเมนท์การโยกย้ายของรูปลิ่ม ผลบวกของฟังชันของโมเมนท์เท่ากับ 8,745,300 เมื่อคูณด้วยตัวคูณสำหรับโมเมนท์ 0.3878 ซึ่งทำไว้ตอนกลางของหน้ากระดาษนี้แล้ว ก็จะได้โมเมนท์ซึ่งยังไม่ได้แก้อัตราผิด 3,391,400 ฟุตยูนิต

สำหรับหลักการที่นำมานี้พิสูจน์ได้ดังต่อไปนี้ พิจารณารูปหน้าตัดของลิ่ม SILรูปที่ 65 ลากเส้นตั้งฉาก ST ตั้งฉากกับ SI สิ่งที่ต้องการในขณะนี้คือโมเมนท์รูปลิ่มรอบแกน ST แล้วอินติเกรทตลอดความยาว ในรูปหน้าตัดรูปลิ่มนั้น พิจารณาเนื้อที่เล็ก ๆ SPP' มุม P'SP = d O มุม P'SI= O

เนื้อที่รูปสามเหลี่ยม SPP' $= \frac{1}{2} \times$ สูง $\times$ ฐาน $= \frac{1}{2} \times PP'.y = \frac{1}{2}.yd\theta.y = \frac{1}{2}y^3 d\theta$, SP = y

จุดศูนย์ถ่วงของรูปลิ่ม SPP $^{2'}$ จากแกน ST = 2/3 y cos θ ฉะนั้นโมเมนท์รูปหน้าตัดเล็ก ๆ S'PP' รอบแกน ST

= ระยะทาง x เนื้อที่หน้าตัดรูปลิ่ม

$= 2/3\ y \cos\theta\ .\ \frac{1}{2}y^2 d\theta$

$= 1/3\ y^3 \cos\theta\ .\ d\theta$

ฉะนั้นโมเมนท์รูปหน้าตัด SIL รอบแกน ST $= 1/3 \quad f\, y^3 \cos\theta . d\theta$ และในที่สุดโมเมนท์รูปลิ่มที่มีหน้าตัด SIL รอบแกน ST ตลอดความยาวเรือ

$= \int \left(1/3 \int y^3 \cos\theta . d\theta \right) dx$

$= 1/3 \iint y^3 \cos \theta\ .\ d\ \theta$

นั่นคือคำนวณค่าของ $1/3 \int y^3 \cos\theta . d\theta$ สำหรับพื้นที่ทางรัศมีขณะมุมเอียงมุมหนึ่งแล้วทำการอินติเกรทไปตลอดมุมเอียงของเรือ

เมื่อกล่าวถึงได้โมเมนท์ซึ่งยังไม่ได้แก้อัตราผิด 3,391,400 ฟุต-ยูนิทแล้ว ต่อไปต้องคำนวณอัตรผิดมาแก้ เมื่อได้ปริมาตรรูปลิ่มเท่ากับ 7,820 ลบ.ฟุต แล้วหาจุดศูนย์ถ่วงของพื้นที่ทางรัศมีได้เท่ากับ 1.77 ฟุต เมื่อนำปริมาตร 7,820 ลบ.ฟุต คูณกับจุดศูนย์ถ่วงจะได้ 13,900 ฟุต-ยูนิท ซึ่งเป็นอัตราแก้และจะเป็นบวกหรือลบนั้นให้พิจารณาดังต่อไปนี้

ถ้าปริมาตรรูปลิ่มไม่จมน้ำมากกว่า และจุดศูนย์ถ่วงอยู่บนด้านรูปลิ่มไม่จมน้ำ อัตราแก้ของชั้นแนวน้ำเป็นลบ

ถ้าปริมาตรรูปลิ่มไม่จมน้ำมากกว่า และจุดศูนย์ถ่วงอยู่บนด้านรูปลิ่มไม่จมน้ำ อัตราแก้ของชั้นแนวน้ำเป็นบวก

ในกรณีที่กำลังกล่าวอยู่นี้ อัตราแก้ชั้นแนวน้ำจึงเป็นลบ – 13,900 เพราะเหตุว่าปริมาตรรูปลิ่มจมน้ำมากกว่าและจุดศูนย์ถ่วงอยู่บนด้านรูปลิ่มจมน้ำ เมื่อแก้อัตราผิดสำหรับชั้นแนวน้ำแล้วได้โมเมนท์การโยกย้ายปริมาตรรูปลิ่ม = 3,377,500 ในที่นี้โจทย์กำหนดปริมาตรระวางขับน้ำ Volume of Displacement = 398,090 ลบ.ฟุต และระยะ BG = 11.90 ฟุต Sin 30' = 0.5 เมื่อทำตามสูตรของแอทวูด ก็จะได้

ตารางที่ 5

ตารางเบื้องต้นของการคำนวณเส้นโค้งความทรงตัว
PRELIMINARY TABLE FOR STABILITY

รูปพื้นที่แนวน้ำเมื่อเรือเอียง 30 ดีกรี WATER SECTION INCLINED AT 30 ดีกรี

จำนวนหน้าตัด NUMBER OF SECTION	ความยาวเส้นออร์ดิเนท ORDINATES	ตัวคูณซิมสัน SIMPSON MULTIPLIERS	ฟังก์ชันของออร์ดิเนท FUNCTION OF ORDINATES	กำลังสองของออร์ดิเนท SQUARES OF ORDINATE	ตัวคูณซิมสัน SIMPSON MULTIPLIERS	ฟังก์ชันของออร์ดิเนทกำลังสอง FUNCTIONS OF SQUARES	กำลังสามของออร์ดิเนท CUBES OF ORDINATES	ตัวคูณซิมสัน SIMPSON MULTIPLIERS	ฟังก์ชันของออร์ดิเนทกำลังสาม FUNCTION OF CUBES
รูปลิ่มจมน้ำ IMMERSED WEDGE									
1	4.5	½	2.2	20	½	10	90	½	50
2	18.4	2	36.8	339	2	678	6,230	2	12,460
3	28.6	1	28.6	818	1	818	23,390	1	23,390
4	33.8	2	67.6	1142	2	2284	38,610	2	77,220
5	35.5	1	35.5	1260	1	1260	44,740	1	44,740
6	35.6	2	71.2	1267	2	2534	45,120	2	90,240
7	35.6	1	35.6	1267	1	1267	45,120	1	45,120
8	35.6	2	71.2	1267	2	2534	45,120	2	90,240
9	35.6	1	35.6	1267	1	1267	45,120	1	45,120
10	35.6	2	71.2	1267	2	2534	45,120	2	90,240
11	33.8	1	33.8	1142	1	1142	38,610	1	38,610
12	26.9	2	53.8	724	2	1448	19,460	2	38,920
13	14.3	½	7.2	205	½	102	2,920	½	1,460
			550.3			17,878			597,810
รูปลิ่มไม่จมน้ำ EMERGED WEDGE									
1	4.7	½	2.3	22	½	11	100	½	50
2	13.8	2	27.6	190	2	380	2,630	2	5,260
3	21.4	1	21.4	458	1	458	9,800	1	9,800
4	27.3	2	54.6	745	2	1490	20,350	2	40,700
5	32.8	1	32.8	1076	1	1076	35,290	1	35,290
6	36.7	2	73.4	1347	2	2694	49,430	2	98,860
7	38.2	1	38.2	1459	1	1459	55,740	1	55,740
8	36.5	2	73.0	1332	2	2664	48,630	2	97,260
9	33.6	1	33.6	1129	1	1129	37,930	1	37,930
10	29.3	2	58.6	858	2	1716	25,150	2	50,300
11	23.8	1	23.8	566	1	566	13,480	1	13,480
12	16.9	2	33.8	286	2	572	4,830	2	9,660
13	6.4	½	4.2	71	½	35	590	½	290
			472.3			14,250	รูปลิ่มไม่จมน้ำ		454,620
							รูปลิ่มจมน้ำ		+ 597,810
							ผลบวกของฟังก์ชันของลิ่มทั้งสอง		1,052,430

ตารางเบื้องต้นของการคำนวณเส้นโค้งความทรงตัว PRELIMINARY TABLE FOR STABILITY

คำนวณระยะแขนตั้งตรง GZ เมื่อเรือเอียง 30 ดีกรี CALCULATION FOR GZ AT 30°									
รูปลิ่มจมน้ำ IMMERSED WEDGE									
มุมเอียงของระนาบตัดตามรัศมี INCLINATIONS OF RADIAL PLANES	ฟังก์ชั่นของออร์ดิเนตของระนาบรัศมี FUNCTION OF ORDINATES OF RADIAL PLANES	ฟังก์ชั่นของออร์ดิเนตกำลังสอง FUNCTION OF SQUARES OF ORDINATES	ตัวคูณซิมสัน SIMPSON MULTIPLIERS	ฟังก์ชั่นของออร์ดิเนตกำลังสอง เพื่อหาปริมาตรรูปลิ่ม FUNCT. VOLUME OF WEDGES VOLUME OF WEDGES	ผลบวกของฟังก์ชั่นของออร์ดิเนตกำลังสามของรูปลิ่มทั้งสอง SUMS OF FUNCT. OF CUBES OF ORD. FOR BOTH WEDGES	ตัวคูณซิมสัน SIMPSON MULTIPLIERS	ผลคูณของผลบวกของฟังก์ชั่นของออร์ดิเนตกำลังสามของรูปลิ่มทั้งสอง PRODUCTS OF SUMS OF FUNCT OF CUBES FOR BOTH WEDGES	ค่าโคไซน์ของมุมเอียง COSINES OF INCLINATION OF RADIAL PLANES	ฟังก์ชั่นของออร์ดิเนตกำลังสามเพื่อหาโมเมนต์ของรูปลิ่ม FUNCTIONS OF CUBES FOR MOMENTS OF WEDGES
0	—	15,340	1	15,340	974,400	1	974,400	.8660	843,800
10	—	15,760	4	63,040	990,200	4	3,960,800	.9397	3,722,000
20	—	16,840	1½	25,260	1,034,300	1½	1,551,400	.9848	1,527,800
25	—	17,700	2	35,400	1,066,800	2	1,133,600	.9962	1,125,500
30	550.3	17,880	½	8,940	1,052,400	½	526,200	1.0000	526,200

ฟังก์ชั่นปริมาตรรูปลิ่มจมน้ำ 147,980
ฟังก์ชั่นปริมาตรรูปลิ่มไม่จมน้ำ 134,530
13,450
ตัวคูณ* 0.5817
ปริมาตรของชั้นแนวน้ำ 7,820 ลบ.ฟุต

8,745,300
ตัวคูณ* 0.3878
โมเมนต์ยังไม่ได้แก้ผิด 3,391,400
อัตราแก้สำหรับชั้นแนวน้ำ 13,900
3,377,500
ปริมาตรระวางขับน้ำกำหนดให้ 398,090
BR = 8.48
BG SIN 30° = 5.95
GZ = 2.53

หมายเหตุ ความห่างหน้าตัดตามยาว = 30 ฟุต
มุมเรเดียนของ 10° = 0.1745
* ตัวคูณสำหรับปริมาตร = ½ × 2 ด้าน × (⅓ × 30) × (⅓ × .1745) = 0.5817
* 〃 〃 โมเมนต์ = ⅓ × 2 ด้าน × (⅓ × 30) × (⅓ × .1745) = 0.3878
BG = 11.90; SIN 30° = 0.5; BG SIN θ = 5.95 ฟุต

รูปลิ่มไม่จมน้ำ EMERGED WEDGE				
0	—	15,340	1	15,340
10	—	15,160	4	60,640
20	—	14,770	1½	22,150
25	—	14,640	2	29,280
30	477.3	14,250	½	7,120
				134,530

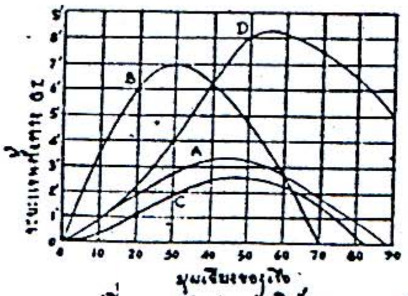
เนื้อที่และจุดศูนย์ถ่วง C.G. ของพื้นที่ทางรัศมี
AREA AND C.G. OF RADIAL PLANE

	ฟังก์ชั่นเนื้อที่	ฟังก์ชั่นโมเมนต์
รูปลิ่มจมน้ำ	550.3	17,080
รูปลิ่มไม่จมน้ำ	477.3	14,150
	1027.6	3,630

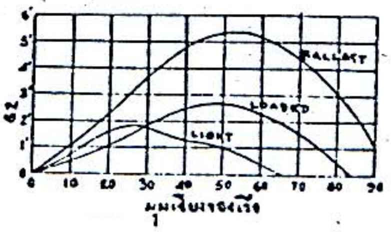
เนื้อที่ = 1027.6 × 2 × (⅓ × 30)
= 20,550 ตร.ฟุต

จุดศูนย์ถ่วงของพื้นที่ทางรัศมีบนด้านรูปลิ่มจมน้ำ = $\frac{3630}{1027.6} \times \frac{1}{2}$ = 1.77 ฟุต

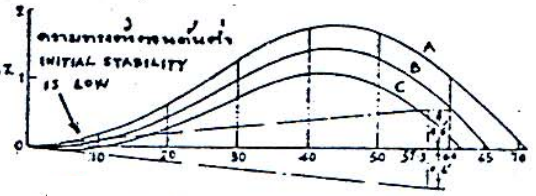
ความหนาของชั้นแนวน้ำ = $\frac{7820}{20{,}550}$ = 0.38 ฟุต



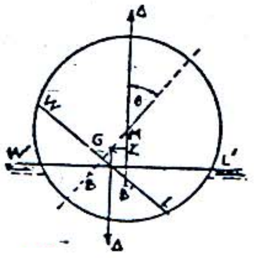
รูปที่ 12 ตัวอย่างเส้นโค้งความทรงตัว



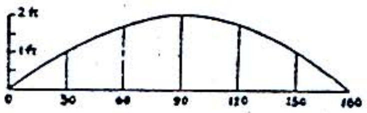
รูปที่ 60 เส้นโค้งความทรงตัวเปลี่ยนไปตามสภาพของการบรรทุก.



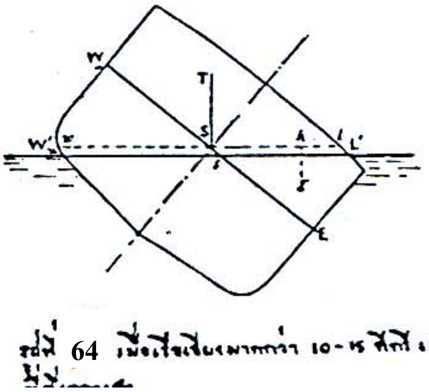
รูปที่ 61 ผลอันเกิดจากการยกจุดศูนย์ถ่วงให้สูงขึ้น



รูปที่ 62 จุดต่าง ๆ ของเรือที่มีหน้าตัดกลม (CIRCULAR SECTION) เช่นเรือดำน้ำ



รูปที่ 63 เส้นโค้งความทรงตัวของเรือที่มีหน้าตัดเป็นวงกลม



รูปที่ 64 เมื่อเรือเอียงมากกว่า 10-15 องศา แนวน้ำจะไม่ตัดกัน

ระยะแขนตั้งตรง GZ $= \frac{v.hh'}{\nabla}$ - BG Sin θ

$= \frac{3,377,500}{398,090}$ - (11.90 x 0.5)

= 2.53 ฟุต

เมื่อคำนวณระยะแขนตั้งตรง GZ ทุกมุมเอียงของเรือก็ทำให้สามารถสร้างเส้นโค้งความทรงตัวของเรือได้

วิธีของบานส์นี้ เมื่อสมัยก่อนใช้กันมาก ต่อมาสมัยนี้เมื่อมีเครื่องมืออินติเกรเตอร์เข้ามาใช้ วิธีของบานส์จึงไม่มีใครใช้อีกเพราะยืดยาว ถ้าเกิดการผิดพลาดขึ้นต้องตรวจค้นกันตั้งแต่ต้นวิธีโดยเครื่องมืออินติเกรเตอร์นั้นสั้นและง่าย ทำได้ทุกระวางขับน้ำ การคำนวณเส้นโค้งความทรงตัวทุกชั้นระวางขับน้ำเป็นสิ่งจำเป็นยิ่ง ซึ่งจะได้กล่าวต่อไป

4.3 การเขียนเส้นโค้งความทรงตัวโดยวิธีโดยตรง (Triangular of Direct Method)

วิธีนี้ใช้สำหรับเป็นวิธีตรวจสอบวิธีอื่นได้ การทำใช้รูปตัด (Body Plan) ซึ่งได้มาจากรูปลายเส้น แล้วเขียนลงบนกระดาษเมื่อเวลาตั้งตรงต่อไปเอียงเรือไปตามมุมที่ต้องการ เมื่อทำการหาเนื้อที่หน้าตัดรูปลิ่ม Sil ทุก ๆ หน้าตัด เช่นในรูปที่ 64 และหาจุดศูนย์กลางความถ่วงทุกหน้าตัดแล้วก็จะได้ระยะ Sh การทำอย่างนี้ให้ทำทั้งรูปลิ่มจมน้ำและรูปลิ่มไม่จมน้ำ ผลการคำนวณนำลงในตารางดังนี้

ตารางที่ 6

จำนวน หน้าตัด Number Of Section	เนื้อที่ Area	ตัวคูณซิมสัน Simpson 's Multipliers	ผลคูณสำหรับ ปริมาตร Products for Volume	ระยะแขน เอส เอช Sh	ผลคูณสำหรับ โมเมนท์ รอบแกน ST
1	A_1	1	A_1	x_1	A_1 x_1
2	A_2	4	$4A_2$	x_2	$4A_2$ x_2
etc	etc	etc	etc	etc	Cet
			S_1		M_1

ปริมาตรของรูปลิ่ม = S_1 x 1/3 x ระยะห่างของหน้าตัด

โมเมนท์ของรูปลิ่มรอบแกน ST = M_1 x 1/3 x ระยะห่างของหน้าตัด

เมื่อคำนวณปริมาตรรูปลิ่มทั้งสอง เนื้อที่แนวน้ำทางรัศมี แล้วก็สามารถหาปริมาตรของชั้นแนวน้ำ (Volume of The Layer) และโมเมนท์การโยกย้ายของรูปลิ่ม ซึ่งยังไม่ได้แก้อัตราผิด การแก้อัตราผิดนี้ดำเนินการเหมือนวิธีของบานส์ทุกอย่าง และการดำเนินการถึงขั้นสุดท้าย ก็เหมือนกับวิธีของบานส์เช่นเดียวกัน

ต่อไปนี้เป็นตัวอย่างการเขียนเส้นโค้งความทรงตัวโดยวิธีตรง เรือรูปหีบลำหนึ่ง(Box Shaped Vessel) มีความยาว 200 ฟุต ความกว้าง 60 ฟุต กินน้ำลึก 24 ฟุต ระยะฟรีบอร์ด 8 ฟุต จุดศูนย์ถ่วงของเรือเหนือกระดูกงู KG = 22 ฟุต ให้คำนวณ และสร้างเส้นโค้งความทรงตัวของเรือรูปหีบนี้ แนะนำให้หาตามตำแหน่งต่อไปนี้ เมื่อมุมเอียง 30 ดีกรี เมื่อกราบเรือจมน้ำเมื่อมุมเอียง 90 ดีกรี กระแสtan αใช้สูตรแอทวูด (Attwood s Firnyka) $GZ = \frac{v.hh'}{\nabla}$ - BG. Sin θ ซึ่งเทอมแรกขึ้นอยู่กับขนาดของเรือ เทอมที่สองขึ้นอยู่กับตำแหน่ง จุดศูนย์ถ่วง G ของเรือฉะนั้นถ้าจุด G ของเรือขึ้นอยู่ที่ G' อัตราแก้ของ GZ ก็คือ BG, Sin θ GG'. Sin θ เมื่อดำเนินการหาเส้นโค้งความทรงตัวเสร็จแล้ว ให้พิจารณาว่า ถ้าขยับน้ำหนัก 425 ตันให้สูงขึ้นมา 20 ฟุต จะมีผลกระทบกระเทือนต่อเส้นโค้งความทรงตัวอย่างไรบ้าง ให้เขียนเส้นโค้งความทรงตัวใหม่ในรูปเดียวกับรูปแรก

วิธีดำเนินการ เขียนรูปเรือด้วยสเกลโตพอสมควร ดังปรากฏในรูปที่ 66

เมื่อเรือเอียงมุม 15 ดีกรี (W_1L_1)

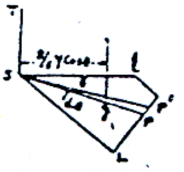
เนื้อที่หน้าตัดรูปลิ่มจมน้ำ OLL_1	= เนื้อที่หน้าตัดรูปลิ่มไม่จมน้ำ OWW_1
	= 1/2 × สูง × ฐาน = 1/2 × 8 × 30
	= 120 ตร.ฟุต
ปริมาตรรูปลิ่มรูปเดียว v	= เนื้อที่หน้าตัด × ความยาว
	= 120 × 200 – 24000 ลบ.ฟุต
ระยะแขน hh'	= 39.5 ฟุต วัดออกมาจากรูป
ปริมาตรระวางขับน้ำ	= 60 × 24 × 200 = 288,000 ลบ.ฟุต
โมเมนท์การโยกย้ายรูปลิ่ม v. hh'	= 24,000 × 39.5 = 948,000 ฟุต^4

(ปริมาตรรูปลิ่มทั้งสองไม่มีอะไรต้องแก้ไข)

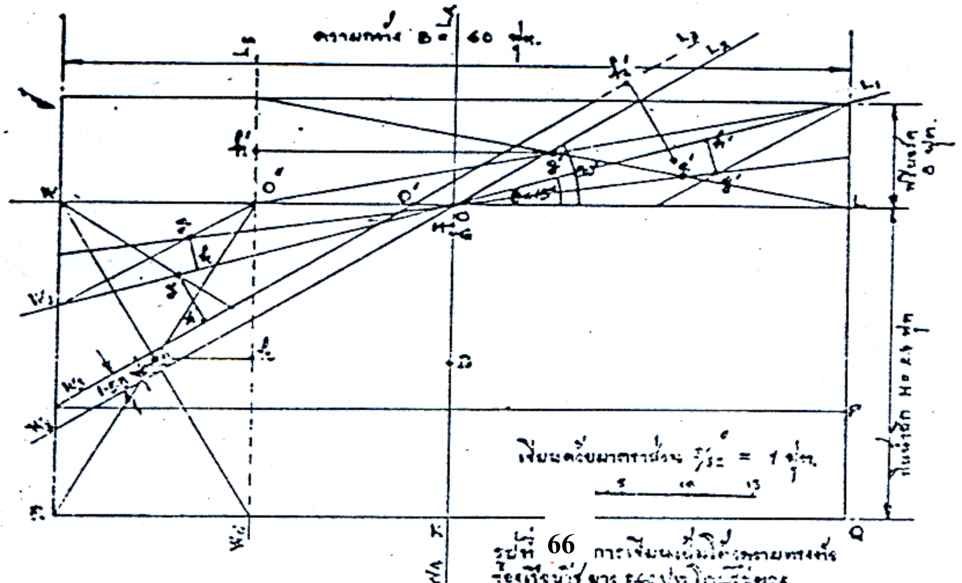
$$BR = \frac{v.hh'}{\nabla} = \frac{948,000}{288,000} = 3.30 \text{ ฟุต}$$

BG.Sin 15 = 10 x .258 = 2.58 ฟุต

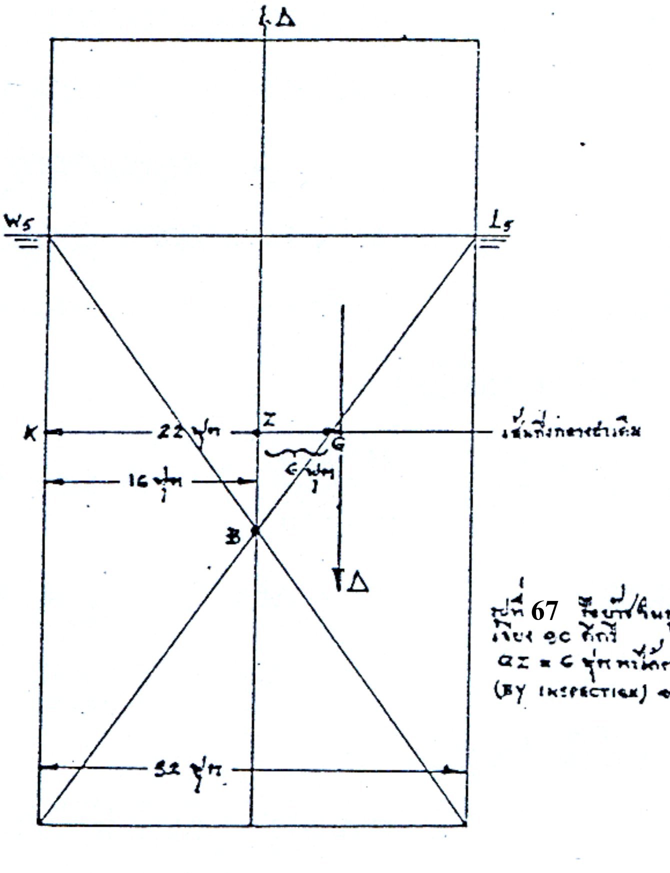
GZ = 0.72 ฟุต ณ = 15̊



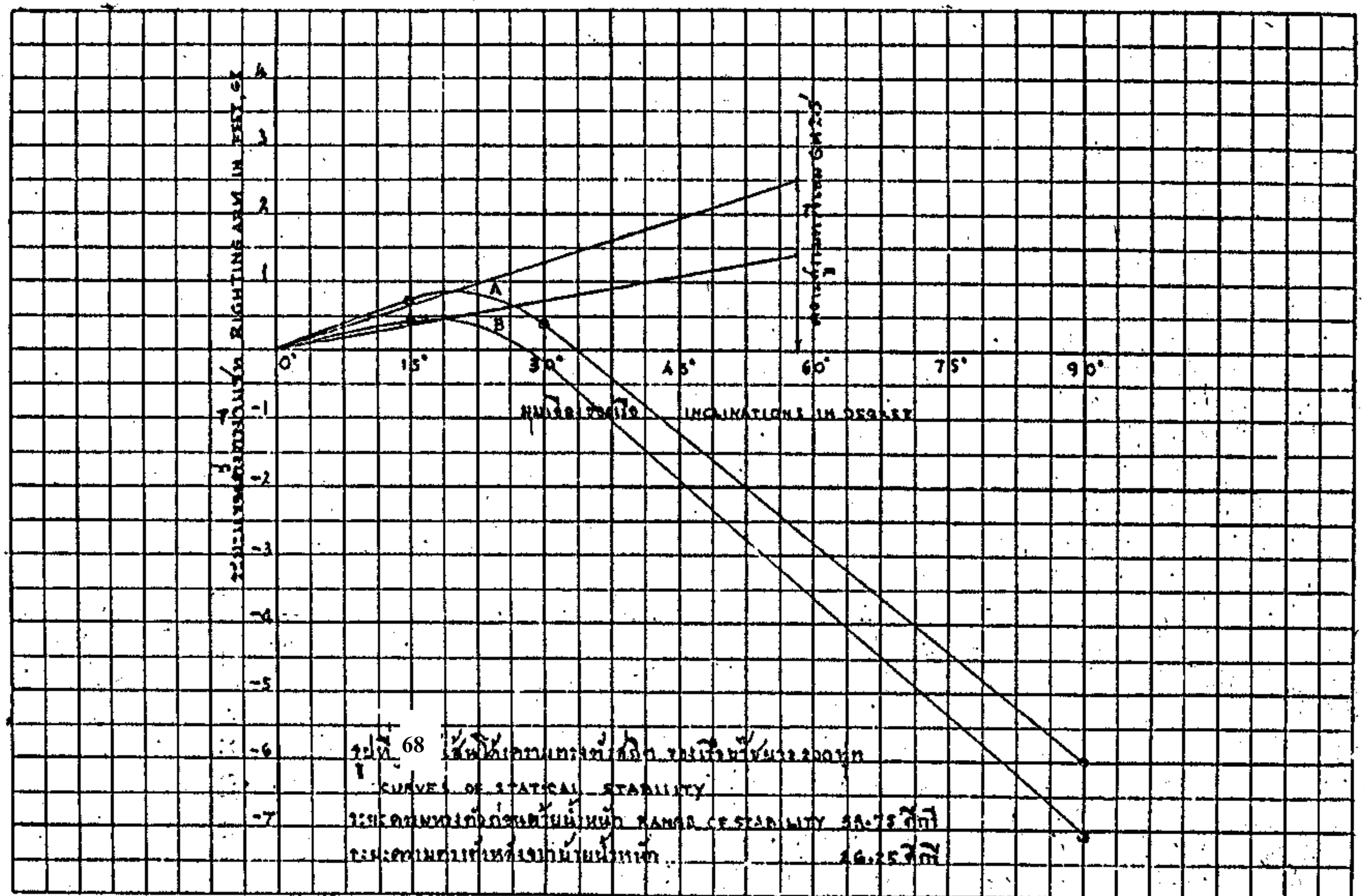
รูปที่ 65 แสดงกฎพิกัดสูงสุด การหาเนื้อที่หน้าตัดรูปลิ่ม SLPL และโมเมนต์รอบแกน ST



รูปที่ 66 การเขียนเส้นโค้งความทรงตัว ของเรือบรรทุก 540 ฟุต โดยวิธีตรง



รูปที่ 67 ซึ่งประกอบกับรูปที่ 66
เขียน GC ดังนี้
GZ = 6 ฟุต หาได้จากการวัดโดยตรง
(BY INSPECTION) อย่างง่ายๆ



รูปที่ 68

CURVES OF STATICAL STABILITY

RANGE OF STABILITY 58.75

16.25

เมื่อเรือเอียงเป็นมุม 30 ดีกรี (W_2L_2)

ปริมาตรลิ่มจมน้ำ = ความยาว x เนื้อที่หน้าตัดคางหมู $OLL_1 L_2$

= 200 × 1/2 × 8 × (16.33 + 30)

= 37,064 ลบ.ฟุต

ปริมาตรรูปลิ่มไม่จมน้ำ = ความยาว × เนื้อที่สามเหลี่ยม OWW_2

= 200 × (1/2 × 17.5 × 30)

= 52,500 ลบ.ฟุต

ฉะนั้นปริมาตรรูปลิ่มไม่จมน้ำมากกว่า = 52,500 - 37,064 = 15,434 ลบ.ฟุต

เนื้อที่แนวน้ำ W_2L_2 = W_2L_2 วัดออกมา x ความยาว

= 50.5 ฟุต x 200 ฟุต

= 10,100 ตร.ฟุต

ความหนาของชั้นแนวน้ำ = $\dfrac{\text{ปริมาตรรูปลิ่มที่เกิน}}{\text{เนื้อที่แนวน้ำ } W_2L_2}$

= $\dfrac{\text{15.434 ลบ.ฟต}}{\text{10,100 ตร.ฟุต}}$

= 1.53 ฟุต

ในอัตราที่แก้ของชั้นแนวน้ำเป็นบวกตามกฎที่กล่าวไว้ในข้อ 20.4.2 การเขียนเส้นโค้งตามวิธีของบานส์ ฉะนั้นในที่นี้จึงนำขึ้นแนวน้ำ 1.53 ฟุต ไปบวกเข้าอีก ดังปรากฏในรูปเป็นแนวน้ำ W_3L_3 เมื่อเขียนแนวน้ำ W_3L_3 แล้วทำการหาจุดศูนย์ถ่วงหน้าตัดสามเหลี่ยม $WO'W_3$ และหน้าตัดสี่เหลี่ยมคางหมู $LO'L_3L_1$ ตามวิธีที่ทดลองที่กล่าวมาแล้ว ในที่สุดวัดระยะ hh' ได้เท่ากับ 36.5 ฟุต

ปริมาตรรูปลิ่ม v = ปริมาตรรูปลิ่มสามเหลี่ยม $WO'W_3$

= ปริมาตรรูปลิ่มคางหมู $LO'L_3L_1$

= 1/2 × สูง × ฐาน × ยาว

= 1/2 × 16 × 27 × 200 = 43,200 ลบ.ฟุต

$$BR = \frac{v.hh'}{\nabla} = \frac{43.200 \times 36.5}{288,000} = 5.48 \text{ ฟุต}$$

(∇ = ปริมาตรระวางขับน้ำเท่าเดิมคือ 288,000 ลบ.ฟุต)

BG. Sin 30 = 10×0.5 = 5.00 ฟุต

GZ = 0.48 ฟุต ณ θ = 30°

เมื่อเรือเอียงเป็นมุม 90 ดีกรี (W_4L_4)

เมื่อเรือเอียงไปเป็นมุม 90 ดีกรี เรือจะมีแนวน้ำที่ W_4L_4

ปริมาตรรูปลิ่มไม่จมน้ำ Wokr = $30 \times 24 \times 200$ = 144,000 ลบ.ฟุต

ปริมาตรรูปลิ่มจมน้ำ $LO_4' L_1L$ = $303 \times 8 \times 200$ = 48,000 ลบ.ฟุต

ฉะนั้นปริมาตรรูปลิ่มไม่จมน้ำมีมากกว่า 96,000 ลบ.ฟุต

เนื้อที่แนวน้ำ W_4L_4 = 32×200 ตร.ฟุต

= 6400 ตร.ฟุต

ฉะนั้นความหนาของชั้นแนวน้ำ = $\frac{96{,}000}{6{,}400}$ = 15 ฟุต

อัตราแก้เป็นบวกตามเหตุผลดังกล่าวมาแล้ว

เมื่อเขียนแนวน้ำใหม่จะได้แนวน้ำ W_5L_5 ซึ่งห่างจาก W_4L_4 เท่ากับ 15 ฟุต ระยะ hh' ของรูปลิ่มทั้งสองเท่ากับ 16 ฟุตจะคำนวณหรือวัดออกมาก็ได้เท่ากัน

v = WO" W_5R = $25 \times 15 \times 200$ = 72,000 ลบ.ฟุต

$$BR = \frac{}{\nabla} = \frac{72.000 \times 16}{288{,}000}$$

= 40 ฟุต

BG. Sin 90 = 10 x 1 = 10.0 ฟุต

GZ = - 6.0 ฟุต ณ θ = 90°

การคำนวณ GZ เมื่อเรือเอียงไป 90 ดีกรี นี้จะทำโดยวิธีตรวจสอบธรรมดา (By Inspection) ก็ได้ดังปรากฏในรูปที่ 67 ก็จะได้ระยะ GZ = 6 ฟุต เหมือนกัน เมื่อได้ผลของ GZ ตามมุมต่าง ๆแล้วก็นำไปเขียนเส้นโค้ง A ดังปรากฏในรูปที่ 68

ต่อไปคำนวณรัศมีเมตา $BM = \frac{I}{\nabla}$ I = โมเมนท์อินเนอร์เชียของเนื้อที่แนวน้ำ

$$I = 1/12 \times A \times h^2 = 1/12 \times (60 \times 200) \times (60)^2 \text{ ฟุต}^4$$

∇ = ปริมาตรระวางขับน้ำ = 60 x 24 x 200 ลบ.ฟุต

$$BM = \frac{1 \times 60^3 \times 200}{12 \times 60 \times 24 \times 200} = 12.5 \text{ ฟุต}$$

KB = 12.0 ฟุต

BM = 12.5 ฟุต

ฉะนั้น KM = 24.5 ฟุต

โจทย์กำหนด KG = 22.0 ฟุต

ฉะนั้น GM = 2.5 ฟุต

ในการเลื่อนน้ำหนัก w = 425 ตันขึ้นเป็นระยะ 20 ฟุต นั้นทำให้จุดศูนย์ถ่วง จุด G เลื่อนขึ้นอยู่ที่ G

$$GG' \times \Delta = w \times d$$

$$GG' = \frac{w \times d}{\Delta} - \frac{525 \times 20}{\frac{288{,}000}{35}} = 1.03 \text{ ฟุต}$$

ฉะนั้น $GG' \text{ Sin } 15^\circ = 1.03 \times .258 = 0.266$ ฟุต

$GG' \text{ Sin } 30^\circ = 1.03 \times .50 = 0.615$ ฟุต

$GG' \text{ Sin } 90^\circ = 1.03 \times 1 = 1.03$ ฟุต

ฉะนั้นระยะแขนตั้งตรง GZ หลังจากเคลื่อนย้ายน้ำหนัก 425 ตัน ขึ้นมาในที่สูงจะเหลือ

ณ มุม 15 ดีกรี GZ เหลือ 0.720 − .266 = 0.454 ฟุต

ณ มุม 30 ดีกรี GZ เหลือ 0.480 − .615 = −135 ฟุต

ณ มุม 30 ดีกรี GZ เหลือ −6.0 − −1.03 = −7.03

GM เหลือ 2.50 - 1.03= 1.47 ฟุต

แล้วนำไปเขียนเส้นโค้งความทรงตัว B ในรูปที่ 68

4.4 การเขียนเส้นโค้งความทรงตัวสถิตตามวิธีของแอมสเลอร์อินติเกรเตอร์ (Amsler's Integrator and Cross Curves of Stability)

เครื่องมือแอมเลอร์อินติเกรเตอร์นั้น เป็นเครื่องมือที่ใช้กันมาก ประดิษฐ์ขึ้นโดยท่านศาสตราจารย์แอมสเลอร์ ตามในรูปที่ 69 เป็นไดอาแกรมแสดงรูปเครื่องมือนี้ ซึ่งมีสองชิ้นใหญ่ ๆ คือ BB เป็นแท่งเหล็กหนาประมาณ 1/4 นิ้ว กว้างประมาณ 4 นิ้ว ยาวตั้งแต่ 3 ฟุต ถึง 6 ฟุต บนแท่งเหล็กนี้มีร่องยาวตลอดความยาว สำหรับวงล้อที่อยู่บนอีกชิ้นหนึ่งเคลื่อนไปมา อีกชิ้นหนึ่งนั้นเป็นส่วนที่จะต้องนำมาวางบนแท่งเหล็ก BB ดังกล่าวแล้ว โดยให้วงล้อวิ่งอยู่ในร่อง ล้อนี้มีอยู่ 2 ล้อด้วยกัน เมื่อก้าน T ซึ่งมีปลายอยู่ที่จุด S เคลื่อนไปตามรูป วง A จะอ่านค่า (Reading) ของเนื้อที่ วง M จะอ่านค่าของโมเมนท์รอบแกน x – x และวง I จะอ่านค่าของโมเมนท์อินเนอร์เชียรอบแกน x-x ในขณะเดียวกัน ในขณะที่ชิ้นที่สองกำลังเคลื่อนอยู่นั้นน้ำหนัก M จะทำหน้าที่ถ่วงให้เคลื่อนที่ไปมาอย่างสม่ำเสมอกัน

ในการวางเครื่องมืออินติเกรเตอร์นั้นต้องวางให้เหล็กแท่ง BB ขนานและห่างจากแกน x - x เท่านั้น ในตอนหาเส้นโค้งความทรงตัวนี้วงอ่านค่าของโมเมนท์อินเนอร์เชียยังไม่ได้ใช้ ใช้เพียงสองวงเท่านั้นคือ วงเนื้อที่ กับวงโมเทนท์

จากรูปที่ 69 สมมติว่า M' LM'' W เป็นรูปหน้าตัดของเรือลำหนึ่งซึ่งเอียงเป็นมุม 30 ดีกรี แกนของโมเมนท์คือเส้นที่ผ่านจุด S ตั้งฉากกับแนวน้ำที่เรือเอียง เส้นแกนนั้นคือ ST สิ่งที่ต้องการหาในตอนนี้ก็คือเส้นดิ่งที่ลากผ่านจุดศูนย์กลางความลอย B' เมื่อตอนเรือเอียงและตั้งฉากกับเส้นแนวน้ำเมื่อเรือเอียง W' L' การทำให้เอาปลายของอินติเกรเตอร์ลากไปตามเส้นขอบรูปหน้าตัด ซึ่งในขณะนี้คือรูป W' LM'' ซึ่งจะหาเนื้อที่โมเมนท์เนื้อที่รอบแกน ST เมื่อคูณด้วยตัวคูณซิมสันและทำทุก ๆ หน้าตัดก็จะได้ระวางขับน้ำของเรือในขณะเอียง โมเมนท์ของระวางขับน้ำนั้นรอบแกน ST เมื่อนำโมเมนท์ตั้งหารด้วยระวางขับน้ำก็จะได้ระยะของจุดศูนย์กลางความลอย B' ห่างจากแกน ST หรือระยะ SZ นั่นเอง ตารางต่อไปนี้เป็นตัวอย่างแสดงการดำเนินงานหาเส้นโค้งความทรงตัว

ตารางที่ 7

ณ มุมเอียงของเรือ 30 ดีกรี								
	เนื้อที่				โมเมนท์			
จำนวนหน้าตัด SECTIONS	ผล การอ่าน	ผลต่าง	ตัวคูณ ซิมสัน	ผลคูณของ ปริมาตร	การอ่าน	ผลต่าง	ตัวคูณ ซิมสัน	ผลคูณของ โมเมนท์
อ่านครั้งแรก......	3,146	-	-	-	3900	-	-	-
หน้าตัด 1 และ 17	3,210	64	1	64	3910	- 10	1	- 10
หน้าตัด 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14 ,และ 16	8,859	5649	4	22596	3124	786	4	3144
หน้าตัด 3, 5, 7, 9, 11, 14 และ 15....	14,345	5486	2	10972	2381	743	2	1486
				33,632				4620

ตัวคูณสำหรับระวางขับน้ำ = 0.02

(Multiplier For Displacement)

ตัวคูณสำหรับโมเมนท์ = 0.2133

(Multiplier For Moment)

ระวางขับน้ำ = 33,632 × .02 = 676.6 ตัน

โมเมนท์ = 4620 × 0.2133 = 985.4 ตัน

ระยะเอสแซท SZ = 1.46 ฟุต

ในที่นี้ความยาวของเรือถูกแบ่งออกเป็น 16 ส่วนเท่า ๆ กัน และใช้ตัวคูณซิมสันกฎที่ 1 ฉะนั้นระยะห่างของหน้าตัดเท่ากับ 8.75 ฟุต ตัวคูณของเครื่องมืออินติเกรเตอร์นั้นไม่เหมือนกันทุกเครื่อง สำหรับเครื่องที่ใช้ในขณะนี้ ตัวคูณสำหรับเนื้อที่เท่ากับ 15/1000 สำหรับโมเมนท์ 40/1000 และเนื่องจากรูปหน้าตัดของเรือนี้ถูกเขียนขึ้นด้วยมาตราส่วน 1/4 นิ้ว= 1 ฟุต ฉะนั้น จะต้องคูณตักคูณของเนื้อที่ด้วย $(4)^2$ = 16 และคูณตัวตัวคูณของโมเมนท์ด้วย $(4)^3$= 64 ฉะนั้นตัวคูณของเนื้อที่ 15/1000 × 16 × (1/3 × 8.75) × 1/35 = 0.02

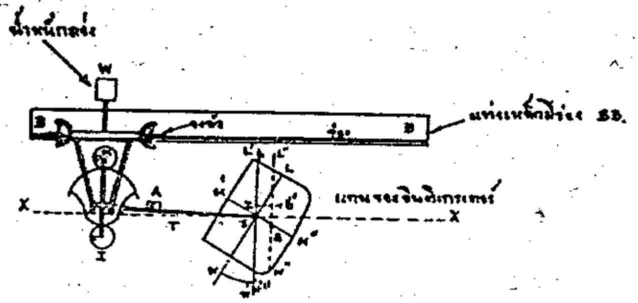
ตัวคูณสำหรับโมเมนท์ = 15/1000 × 16 × (1/3 × 8.75) × 1/35 = 0.2133 ตามที่คำนวณแล้วได้ระวางขับน้ำ 672.6 ตัน เป็นระวางขับน้ำเต็มที่ที่แนวน้ำ WL เอียงเป็นมุม 30 ดีกรี แลฟะได้ระยะ SZ 1.46 ฟุตนั้น เมื่อคำนวณ ณ มุมเอียงเรืออื่น ๆ แล้วเขียนเส้นโค้งความทรงตัวก็จะได้เส้นโค้งความทรงตัว ณ ระวางขับน้ำคงที่จำนวนเดียว ซึ่งยังไม่พอที่จะนำไปใช้คำนวณจำเป็น

ตัวคำนวณเส้นโค้งความทรงตัว ณ ระวางขับน้ำอื่น ๆ อีก เช่น ระวางขับน้ำที่แนวน้ำ W" L" ในรูปที่ 69 ณ มุมเอียงต่าง ๆ กัน ในการทำอย่างนี้ทำให้ได้เส้นโค้งใหม่คือเส้นระดับเป็นระวางขับน้ำของเรือ ระยะออร์ดิเนตเป็นระยะ SZ ณ มุมคงที่เช่น 10 ดีกรี 20 ดีกรี ฯลฯ

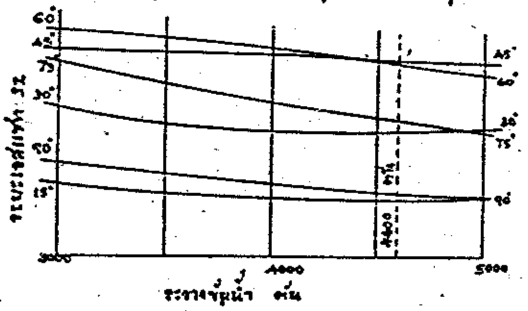
ในรูปที่ 70 จะเห็นเส้นระดับเป็นระวางขับน้ำตั้งแต่ 3,000, 4,000 และ 5,000 ตัน และเส้นออร์ดิเนตเป็นระยะ SZ ณ มุมต่าง ๆ เส้นโค้งใหม่นี้เรียกเส้นโค้งความทรงตัวคร๊อสเคิฟ (Cross Curves of Stability) ซึ่งสามารถอ่านระยะ SZ ได้ไม่ว่าจะเป็นที่ระวางขับน้ำเท่าใด

ตามที่กล่าวมานี้ถ้าพิจารณาให้ดีจะเห็นว่าเราพยายามจะหาระยะแขนตั้งตรง GZ ไม่ใช่ SZ แต่กับหาระยะ SZ ออกมาทั้งนี้ก็เนื่องจากว่าในการทำเส้นโค้งความทรงตัวคร๊อสเคิฟนี้ เรายังไม่รู้ว่าจุดศูนย์ถ่วง G ของเรือจริง ๆ นั้นอยู่ที่ใด จึงต้องใช้ S เป็นจุดที่สมมติให้เป็นจุดศูนย์ถ่วงของเรือ

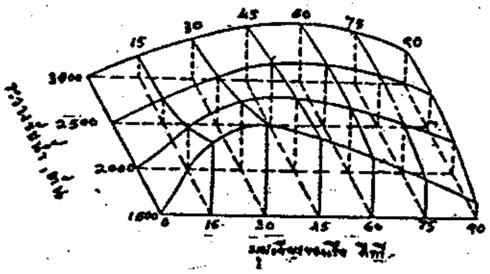
รูปที่ 69 เครื่องมือแอมสเลอร์อินติเกรเตอร์
AMSLER'S INTEGRATOR



รูปที่ 70 เส้นโค้งความทรงตัวครอสเคิฟ CROSS CURVES OF STABILITY
แกนสมมุติ ASSUMES AXIS อยู่ที่แนวน้ำบรรทุก



รูปที่ 71 ตัวอย่างเส้นโค้งความทรงตัวครอสเคิฟอีกแบบหนึ่ง



ระยะแขนตั้งตรงที่ปรากฏในเส้นโค้งความทรงตัวคร๊อสเคิฟจึงเป็นระยะ SZ เมื่อจะใช้การจริง ๆ ต้องเปลี่ยนเป็นระยะแขนตั้งตรง GZ โดยทราบความสูงเมตา GM ฉะนั้นในเส้นโค้งความทรงตัวคร๊อสเคิฟจริง ๆ จะต้องบอกว่าจุด S เป็นแกนสมมติ (Assumed Axis) อยู่ที่ใด ห่างจากเส้นฐานหรือแนวน้ำใดเท่าใด มิฉะนั้นแล้วเส้นโค้งนั้นใช้ไม่ได้ เพราะจะคำนวณไปหาระยะแขนตั้งตรง GZ ไม่ได้ ซึ่งจะได้พบในตอนว่าด้วยการใช้เส้นโค้งต่อไป การแก้นั้นถ้าจุดศูนย์ถ่วงของเรือ G อยู่ต่ำกว่าจุดสมมติ S ระยะแขนตั้งตรง GZ – SZ + GS.Sin θ และถ้าจุดศูนย์ถ่วงของเรือ G อยู่สูงกว่าจุดสมมติ S ระยะแขนตั้งตรง GZ – SZ + SG.Sin θ ในรูปที่ 71 เป็นเส้นโค้งความทรงตัวคร๊อสเคิฟอีกแบบหนึ่ง แต่ที่นิยมเขียนนั้นใช้รูปที่ 70 ซึ่งในสภาพความเป็นจริงแล้ว แน่นอนทีเดียวว่ามีขนาดใหญ่กว่านี้หลายเท่านัก

ต่อไปนี้เป็นตัวอย่างการเขียนเส้นโค้งความทรงตัวคร๊อสเคิฟ (Cross Curves of Stability) ของเรือบ๊าชลำหนึ่ง ซึ่งมีความยาว 200 ฟุต กว้าง 40 ฟุต ความลึก 30 ฟุต กินน้ำลึกเต็มที่ 20 ฟุต สมมติว่าแกนสมมติ (Assumed Axis) หรือจุดศูนย์ถ่วงสมมติ (S) KS = 15 ฟุต(ไม่ใช่จุดศูนย์ถ่วงG แท้) รัศมีของบิลช์ (Bilge Radius) 8 ฟุต ใช้น้ำทะเล 35 ลบ.ฟุต ต่อ 1 ตัน และสมมติว่าหน้าตัดของเรือเท่ากันตลอดความยาว ในการนี้ให้เขียนเส้นโค้งความทรงตัวคร๊อสเคิฟเมื่อเรือเอียง 30, 60 และ 90 ดีกรี ใช้เส้นสัมผัสช่วยในการสร้างเส้นโค้ง แนะนำให้เขียนเส้นโค้งเมื่อแนวน้ำ 14, 20 และ 26 ฟุต และระวางขับน้ำระหว่าง 3,000 ตัน ถึง 6,000 ตัน

วิธีดำเนินการเขียนรูปหน้าตัดของเรือดังปรากฏในรูปที่ 72 เขียนด้วยมาตราส่วน 1/4 นิ้ว = 1 ฟุต เขียนเพียงรูปเดียวเพราะที่รอยตัดอื่น ๆ เท่ากันหมด ฉะนั้นถ้าเป็นเรือที่หน้าตัดไม่เท่ากันทุกรอยตัดก็ต้องเขียนรูปหน้าตัดทั้งหมดในที่นี้เป็นการสมมติแบบฝึกหัดที่ง่ายที่สุด แต่การดำเนินงานยังยืดยาวถึงเพียงนี้ ฉะนั้นถ้าเป็นงานของเรือจริง ๆ แล้วจะยืดยาวยุ่งยากสักเท่าใด

เมื่อเขียนรูปหน้าตัดรูปที่ 72 แล้วเขียนเส้นแนวน้ำ 14, 20, 26 และ 28 ฟุต แต่ละแนวน้ำลากแนวน้ำเอียง 30 ดีกรี 60 ดีกรี และ 90 ดีกรี ให้อักษร $W_1 L_1$, $W_2 L_2$,………….ฯลฯ หมายระยะจุดศูนย์ถ่วงสมมติ S สูงจากกระดูกงู K, SK = 15 ฟุต ซึ่งถ้าไม่พอใจใช้ KS = 30 ฟุต หรือเท่าใดก็ได้แต่ต้องหมายเหตุไว้ในแผ่นที่เขียนเส้นโค้งคร๊อสเคิฟนั้น เพราะจะได้ทำกลับไปหาจุดศูนย์ถ่วงจริง G ของเรือไม่เมื่อทราบความสูงเมตาจีเอ็มซึ่งจะได้พบและเข้าใจในตอน ว่าด้วยการใช้เส้นโค้งคร๊อสเคิฟนี้ เมื่อได้จุด S แล้วลากเส้นตรงผ่านจุด S ให้ตั้งฉากกับแนวน้ำ 30 และ 60 ดีกรี เส้นนี้จะเป็นแกนสมมติ (Assumed Axis) เมื่อเวลาตั้งศูนย์ตอนใช้เครื่องมืออินติเกรเตอร์ เส้นแกนสมมตินี้จะต้องวางทาบไปกับเส้น x - x ในรูปที่ 69 นั่นคือเส้นแกนสมมติ กับแกน x - x จะต้องตั้งฉากกับเส้นแนวน้ำที่เอียงเสมอไป ระยะ SZ ที่เราได้นี้จะตั้งฉากกับแกน x – x

ระยะ SZ = $\dfrac{\text{โมเมนท์}}{\text{ระวางขับ}}$

เครื่องมือแอมเลอร์อินติเกรเตอร์ที่ใช้นี้เป็นแบบหมายเลข 627 มีใช้อยู่ที่แผนกต่อเรือกองแผนการช่าง กรมอู่ทหารเรือ ซื้อมาเมื่อปี พ.ศ. ๒๕๐๓ สั่งผ่านทูต ทร. ใน สรอ. ราคา 775 เหรียญอเมริกัน เข้าใจว่าจะมีอันเดียวในประเทศไทย มีตัวประจำดังต่อไปนี้

		มาตราอังกฤษ		มาตราเมตริก	
เนื้อที่	A	= 0.04 a	$น^2$	0.24 a	$ซม^2$
โมเมนท์	M	= 0.16 M	$น^3$	2.4 M	$ซม^3$
โมเมนท์อินเนอเชีย	I	2.56 a – 0.81	$น^4$	32 (3 a – i) × n^4	

สูตรและตัวประจำข้างบนนั้นใช้กับรูปที่เขียนขึ้นด้วยมาตราส่วนเต็มตัว ถ้ารูปนั้นเขียนด้วยมาตราส่วนย่อ เช่น n นิ้ว = 1 ฟุต และ 1 ซม = n ซม เช่นนี้แล้วต้องใช้สูตรดังต่อไปนี้

		มาตราอังกฤษ		มาตราเมตริก	
เนื้อที่	A	= .04 a × $1/n^2$	$ฟ^2$	0.24 a × n^2	$ซม^2$
โมเมนท์	M	= 0.16 M × $1/n^2$	$ฟ^3$	2.4 M × n^3	$ซม^3$
โมเมนท์อินเนอเชีย	I	= (2.56 a – 0.8I) × $1/n^4$	$ฟ^4$	32 (3 a – I) n^4	$ซม^4$

วิธีดำเนินขึ้นต่อไป ทำตารางที่ 8 ณ แนวน้ำ 14 ฟุต เมื่อเอียง 30 ดีกรี ผลการอ่านเนื้อที่ได้ 6605, 7427 และ 8246 ซึ่งมีผลต่างเท่ากับ 819 และ 822 ในที่นี้ใช้ 822 = a นำไปเข้าสูตรจะได้เนื้อที่ 532.68 ฟุต ตัดทศนิยมทิ้งเสียเหลือ 532 ตร.ฟุต เท่ากันทุกหน้าตัด เมื่อเอาตัวคูณซิมสันคูณแล้วบวกลงในทางดิ่งจะได้ฟังชันปริมาตรเท่ากับ 15960 เมื่อหาระวางขับน้ำก็จะได้ 3050 ตัน การดำเนินการต่อไป ณ แนวน้ำอื่นก็เหมือนกัน สำหรับโมเมนท์นั้นอ่านได้ 25416, 25509 และ 25602 ซึ่งได้ผลต่างเฉลี่ย 93 เมื่อเข้าสูตรหาโมเมนท์แล้วได้ 952 ฟุตกำลังสาม เท่ากันทุกหน้าตัด เมื่อเอาตัวคูณซิมสันคูณแล้วจะบวกกันจะได้ ฟังชันโมเมนท์ 28560

ระยะแขนตั้งตรงสมมติ SZ $= \dfrac{f(V}{f(M)} = \dfrac{28560}{15960} = 1.8$ ฟุต

ระวางขับน้ำ = 1/3 × ระยะห่างหน้าตัด × f (V) × 1/35

$= 1/3 \times \dfrac{200}{10} \times 15960 \times 1/35 = 3050$ ตัน

ดำเนินการไปจนครบมุมเอียง 30, 60 และ 90 ดีกรี ดังปรากฏในตารางที่ 8 สำหรับที่ปรากฏใน ตารางที่ 9 นั้นเป็นการคำนวณหาเส้นสัมผัส tan θ ซึ่งสัมผัสกับเส้นโค้งต่าง ๆ ที่ได้เพื่อช่วยให้การเขียนเส้นโค้งสะดวกขึ้น

เมื่อได้ผลการคำนวณหมดทุกอย่างแล้วให้ดำเนินการเขียนเส้นคค้งความทรงตัวคร๊อสเคิฟ ดังปรากฏในรูปที่ 73 เป็นอันจบวิธีสร้างเส้นโค้งความทรงตัวคร๊อสเคิฟ

5. เส้นสัมผัสเส้นโค้งคร๊อสเคิฟ (Tangent To A cross Curve)

ตามที่ทราบแล้วว่า เส้นโค้งความทรงตัวคร๊อสเคิฟนั้น เส้นฐานเป็นระวางขับน้ำ และ ออร์ดิเนตเป็นระยะ SZ ฉะนั้นสโลป (Slope) หรือเส้นสัมผัสจะมีค่าเท่ากับ $\tan\theta = \dfrac{dSZ}{d\Delta}$ ถ้า M เป็นโมเมนท์ตั้งตรง (Rightiong Moment) , ตัน – ฟุต หรือ M = Δ . SZ หรือ SZ = $\dfrac{M}{\Delta}$

$$\tan\theta = \frac{d}{d\Delta}\left(\frac{M}{\Delta}\right) = \frac{1}{\Delta}\frac{dM}{d\Delta} - \frac{M}{\Delta^2} = \frac{1}{\Delta}\left(\frac{dM}{d\Delta} - \frac{M}{\Delta}\right)$$

$$\tan\theta = \frac{1}{\Delta}\left(\frac{dM}{d\Delta} - SZ\right)$$

dM นั้นเป็นโมเมนท์ตั้งตรงที่มีค่าน้อย ๆ เมื่อระวางขับน้ำเพิ่มขึ้น ฉะนั้น $\dfrac{dM}{d\Delta}$ เป็นระยะจุดศูนย์ถ่วง C.G. ของพื้นที่ทางรัศมีห่างจากแกน ST = Sg ฉะนั้น tan θ = 1 (Sg – SZ)

ถ้า r_1 r_2 เป็นออร์ดิเนตของพื้นที่ทางรัศมีของรูปลิ่มจมน้ำ และรูปลิ่มไม่จมน้ำ และโดยการดำเนินการคล้ายกันกับที่ทำมาจะได้ระยะ

$$Sg = \frac{1}{2}\,\frac{\int\left(r_1^2 - r_2^2\right)dx}{\int\left(r_1 - r_2\right)dx}$$

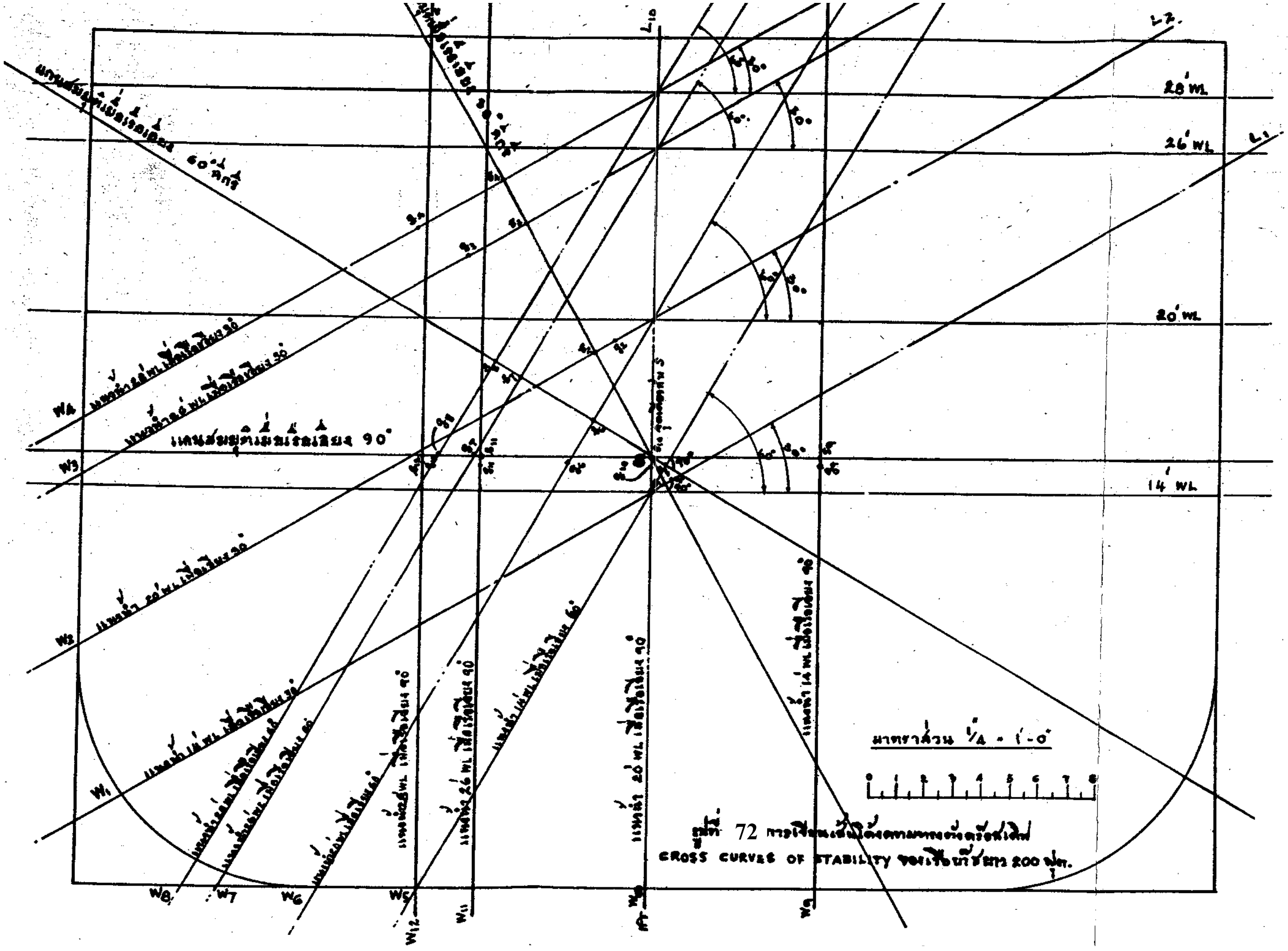
ถ้า Sg > SZ และจุด g อยู่ทางขวามือของ S แล้ว tan θ เป็นบวก

ถ้า Sg อยู่ทางซ้ายมือของ S แล้ว tan θ เป็นลบ

ถ้า SG < SZ ค่า tan θ เป็นลบ

6. ความทรงตัวพลวัติ (Dynamical Stability)

ความทรงตัวพลวัตเป็นงานที่เรือกระทำในระยะทางอันหนึ่ง เป็นผลคูณของน้ำหนัก



รูปที่ 72 การเขียนเส้นโค้งแสดงความทรงตัวตามขวาง
CROSS CURVES OF STABILITY ของเรือบรรทุกยาว 200 ฟุต.

ตารางที่ 8

มุมเอียงของเรือ θ = 30 ดีกรี

แนวน้ำ 18 ฟุต

ตำแหน่งของหมู่ตัด	ตัวคูณซิมป์สัน	เนื้อที่: ผลการอ่านจากอินติเกรเตอร์ a	เนื้อที่: ผลต่างเฉลี่ย a	เนื้อที่หมู่ตัด A	ผลคูณในซิมป์สัน f(v)	โมเมนต์: ผลการอ่านจากอินติเกรเตอร์ m	โมเมนต์: ผลต่างเฉลี่ย m	โมเมนต์ M	ผลคูณในโมเมนต์ f(M)
0	1				532				952
1	4				2128				3808
2	2	8244 7422 6600	822	532	1064	25694 25601 25508	93	952	1904
3	4				2128				3808
4	2	เท่า	เท่า	เท่า	1064	เท่า	เท่า	เท่า	1904
5	4	กัน	กัน	กัน	2128	กัน	กัน	กัน	3808
6	2	ทุก	ทุก	ทุก	1064	ทุก	ทุก	ทุก	1904
7	4	หมู่	หมู่	หมู่	2128	หมู่	หมู่	หมู่	3808
8	2	ตัด	ตัด	ตัด	1064	ตัด	ตัด	ตัด	1904
9	4			ไม่ต้อง	2128			ไม่	3808
10	1			คิด	532			ต้อง	952
								คิด	
				f(v) =	15960			f(M) =	28560

$\Sigma X = \frac{f(M)}{f(v)} = \frac{28560}{15960} = 1.8$ ฟุต

$\Delta = \frac{1}{3} \times 20 \times 15960 \times \frac{1}{35} = 3040$ ตัน

แนวน้ำ 20 ฟุต

ตำแหน่งของหมู่ตัด	ตัวคูณซิมป์สัน	เนื้อที่: ผลการอ่านจากอินติเกรเตอร์ a	เนื้อที่: ผลต่างเฉลี่ย a	เนื้อที่หมู่ตัด A	ผลคูณในซิมป์สัน f(v)	โมเมนต์: ผลการอ่านจากอินติเกรเตอร์ m	โมเมนต์: ผลต่างเฉลี่ย m	โมเมนต์ M	ผลคูณในโมเมนต์ f(M)
0	1				752				1139
1	4				3008				4556
2	2	10430 9270 8057	1160	752	1504	16723 26611 26500	112	1139	2278
3	4				3008				4556
4	2				1504				2278
5	4				3008				4556
6	2				1504				2278
7	4				3008				4556
8	2				1504				2278
9	4				3008				4556
10	1				752				1139
				f(v) =	22560			f(M) =	34170

$\Sigma X = \frac{34170}{22560} = 1.5$ ฟุต

$\Delta = \frac{1}{3} \times 20 \times 22560 \times \frac{1}{35} = 4297$ ตัน

แนวน้ำ 22 ฟุต

ตำแหน่งของหมู่ตัด	ตัวคูณซิมป์สัน	เนื้อที่: ผลการอ่านจากอินติเกรเตอร์ a	เนื้อที่: ผลต่างเฉลี่ย a	เนื้อที่หมู่ตัด A	ผลคูณในซิมป์สัน f(v)	โมเมนต์: ผลการอ่านจากอินติเกรเตอร์ m	โมเมนต์: ผลต่างเฉลี่ย m	โมเมนต์ M	ผลคูณในโมเมนต์ f(M)
0	1				955				990
1	4				3820				3960
2	2	11774 10300 8826	1474	955	1910	23478 23381 23284	97	990	1980
3	4				3820				3960
4	2				1910				1980
5	4				3820				3960
6	2				1910				1980
7	4				3820				3960
8	2				1910				1980
9	4				3820				3960
10	1				955				990
				f(v) =	28650			f(M) =	29700

$\Sigma X = \frac{29700}{28650} = 1.04$ ฟุต

$\Delta = \frac{1}{3} \times 20 \times 28650 \times \frac{1}{35} = 5457$ ตัน

แนวน้ำ 24 ฟุต

ตำแหน่งของหมู่ตัด	ตัวคูณซิมป์สัน	เนื้อที่: ผลการอ่านจากอินติเกรเตอร์ a	เนื้อที่: ผลต่างเฉลี่ย a	เนื้อที่หมู่ตัด A	ผลคูณในซิมป์สัน f(v)	โมเมนต์: ผลการอ่านจากอินติเกรเตอร์ m	โมเมนต์: ผลต่างเฉลี่ย m	โมเมนต์ M	ผลคูณในโมเมนต์ f(M)
0	1				1010				825
1	4				4040				3300
2	2	7728 6169 4781	1559	1010	2020	16208 16127 16046	81	825	1650
3	4				4040				3300
4	2				2020				1650
5	4				4040				3300
6	2				2020				1650
7	4				4040				3300
8	2				2020				1650
9	4				4040				3300
10	1				1010				825
				f(v) =	30300			f(M) =	24750

$\Sigma X = \frac{24750}{30300} = 0.817$ ฟุต

$\Delta = \frac{1}{3} \times 20 \times 30300 \times \frac{1}{35} = 5771$ ตัน

หมายเหตุ
ผลการอ่านจากอินติเกรเตอร์หมายเลข 427 ที่มีขาที่ติดแขนกลางไว้ตามตำแหน่งของท่อจุด ตร.ฟ.

เนื้อที่ $A = 0.0405\,a \times 1/n^2$ ตร.ฟ.
มาตราส่วน $1/4 = 1'-0"$; $n = 1/4$; ถ้า $1/16$; $n^2 = 1/16$
a = ผลต่างเฉลี่ยของเนื้อที่
∴ $A = 0.0405 \times 16 = 0.648\,a$
เช่น a = 822 ; A = 0.648 × 822 = 532.66 ตร.ฟุต ≈ 532 เมื่อตัดเศษทิ้ง

โมเมนต์ $M = 0.16\,m \times 1/n^3$
m = ผลต่างเฉลี่ยของโมเมนต์
M = 10.24 m ฟุตกำลังสาม
เช่น m = 93
M = 10.24 × 93 = 952.32 ≈ 952 เมื่อตัดเศษทิ้ง

แล้วนำมาเขียนเป็นเส้นโค้งในรูปที่ 186

ตารางที่ 8 (ต่อ)

มุมเอียงของเรือ θ = 40 [illegible]

แนวน้ำ 14 ฟุต

		เนื้อที่ a	a	A	f(V)	โมเมนต์ m	m	M	f(M)
0	1				405				72
1	4				1620				288
2	2	2783 3114 1281	681	405	810	11352 4454 11544	2	72	144
3	4				1620				288
4	2				810				144
5	4				1620				288
6	2				810				144
7	4				1620				288
8	2				810				144
9	4				1620				288
10	1				405				72
				f(V)	12150			f(M)	2160

$SZ = \frac{2160}{12150} = .178$ ฟุต

$\Delta = \frac{1}{3} \times 20 \times 12150 \times \frac{1}{35} = 2320$ ตัน

แนวน้ำ 20 ฟุต

		เนื้อที่ a	a	A	f(V)	โมเมนต์ m	m	M	f(M)
0	1				582				41
1	4				2328				164
2	2	6423 3517 2608	909	582	1164	11441 11899 11893	4	41	82
3	4				2329				164
4	2				1164				82
5	4				2328				164
6	2				1164				82
7	4				2328				164
8	2				1164				82
9	4				2328				164
10	1				582				41
				f(V)	17458			f(M)	1230

$SZ = \frac{1230}{17458} = 0.071$ ฟุต

$\Delta = \frac{1}{3} \times 20 \times 17458 \times \frac{1}{35} = 3325$ ตัน

แนวน้ำ 24 ฟุต

		เนื้อที่ a	a	A	f(V)	โมเมนต์ m	m	M	f(M)
0	1				760				-31
1	4				3040				-124
2	2	7924 6646 5453	1188	760	1520	12437 12441 12445	-3	-31	-62
3	4				3040				-124
4	2				1520				-62
5	4				3040				-124
6	2				1520				-62
7	4				3040				-124
8	2				1520				-62
9	4				3040				-124
10	1				760				-31
				f(V)	22800			f(M)	-930

$SZ = \frac{-930}{22800} = -.04$ ฟุต

$\Delta = \frac{1}{3} \times 20 \times 22800 \times \frac{1}{35} = 4330$ ตัน

แนวน้ำ 28 ฟุต

		เนื้อที่ a	a	A	f(V)	โมเมนต์ m	m	M	f(M)
0	1				825				-51
1	4				3300				-204
2	2	14330 9048 7188	1281	825	1650	12904 12910 12915	-5	-51	-102
3	4				3300				-204
4	2				1650				-102
5	4				3300				-204
6	2				1650				-102
7	4				3300				-204
8	2				1650				-102
9	4				3300				-204
10	1				825				-51
				f(V)	24750			f(M)	-1530

$SZ = \frac{-1530}{24750} = -.06$ ฟุต

$\Delta = \frac{1}{3} \times 20 \times 24750 \times \frac{1}{35} = 4700$ ตัน

[illegible]

ตารางที่ 8 (ต่อ)

[illegible] 6 × 60 [illegible]

แนวน้ำ 14 ฟุต

[illegible]	[illegible]	เนื้อที่: [illegible]	เนื้อที่: a	เนื้อที่: A	เนื้อที่: f(V)	โมเมนต์: [illegible]	โมเมนต์: m	โมเมนต์: M	โมเมนต์: f(M)
0	1				564				1570
1	4				2256				6280
2	2	3758 1994	540	564	1128	15417 16471	154	1570	3140
3	4	1608			2256	16471			6280
4	2				1128				3140
5	4				2256				6280
6	2				1128				3140
7	4				2256				6280
8	2				1128				3140
9	4				2256				6280
10	1				564				1570
				f(V)	16920			f(M)	47100

$SZ = \frac{47100}{16920} = 2.78$ ฟุต

$\Delta = \frac{1}{3} \times 20 \times 16920 \times \frac{1}{35} = 3224$ ตัน

แนวน้ำ 10 ฟุต

[illegible]	[illegible]	เนื้อที่: [illegible]	เนื้อที่: a	เนื้อที่: A	เนื้อที่: f(V)	โมเมนต์: [illegible]	โมเมนต์: m	โมเมนต์: M	โมเมนต์: f(M)
0	1				670				1470
1	4				2680				5880
2	2	3757 1734	1043	670	1340	27179 27035	144	1470	2940
3	4	2691			2680	26891			5880
4	2				1340				2940
5	4				2680				5880
6	2				1340				2940
7	4				2680				5880
8	2				1340				2940
9	4				2680				5880
10	1				670				1470
				f(V)	20100			f(M)	44100

$SZ = \frac{44100}{20100} = 2.19$ ฟุต

$\Delta = \frac{1}{3} \times 20 \times 20100 \times \frac{1}{35} = 3830$ ตัน

แนวน้ำ 18 ฟุต

[illegible]	[illegible]	เนื้อที่: [illegible]	เนื้อที่: a	เนื้อที่: A	เนื้อที่: f(V)	โมเมนต์: [illegible]	โมเมนต์: m	โมเมนต์: M	โมเมนต์: f(M)
0	1				770				1200
1	4				3080				4800
2	2	7183 5702	1202	770	1540	17732 17615	117	1200	2400
3	4	4649			3080	17499			4800
4	2				1540				2400
5	4				3080				4800
6	2				1540				2400
7	4				3080				4800
8	2				1540				2400
9	4				3080				4800
10	1				770				1200
				f(V)	23100			f(M)	36000

$SZ = \frac{36000}{23100} = 1.56$ ฟุต

$\Delta = \frac{1}{3} \times 20 \times 23100 \times \frac{1}{35} = 4400$ ตัน

แนวน้ำ 25 ฟุต

[illegible]	[illegible]	เนื้อที่: [illegible]	เนื้อที่: a	เนื้อที่: A	เนื้อที่: f(V)	โมเมนต์: [illegible]	โมเมนต์: m	โมเมนต์: M	โมเมนต์: f(M)
0	1				805				1010
1	4				3220				4040
2	2	7471 7235	1236	805	1610	21372 21277	99	1010	2020
3	4	5979			3220	21174			4040
4	2				1610				2020
5	4				3220				4040
6	2				1610				2020
7	4				3220				4040
8	2				1610				2020
9	4				3220				4040
10	1				805				1010
				f(V)	24150			f(M)	30300

$SZ = \frac{30300}{24150} = 1.25$ ฟุต

$\Delta = \frac{1}{3} \times 20 \times 24150 \times \frac{1}{35} = 4600$ ตัน

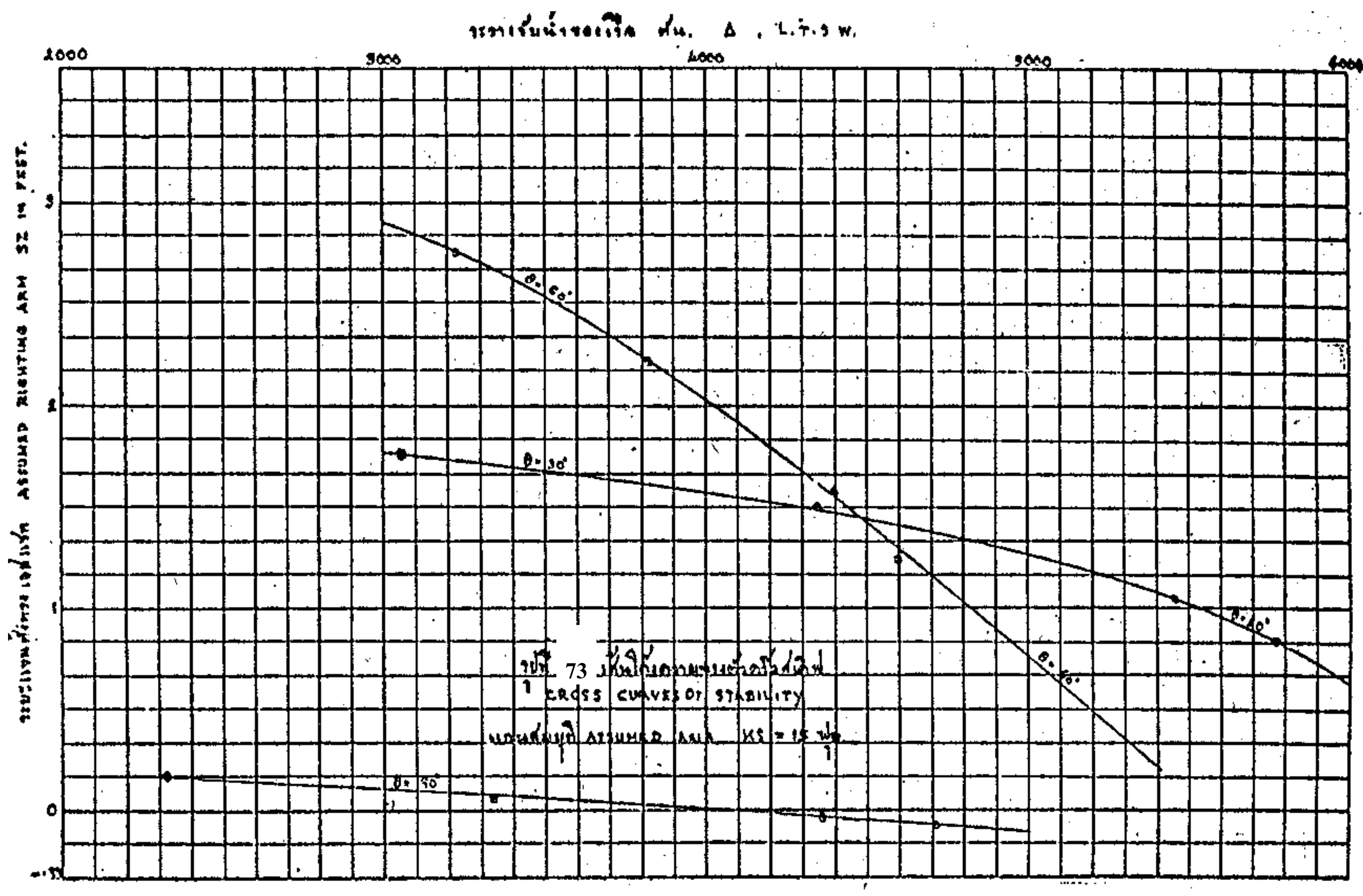
[illegible]

ตารางที่ 9

[illegible] TANGENT TO CROSS CURVES

	[illegible]	Δ	Sg		SZ	Sg - SZ	tan θ = $\frac{1}{Δ}$ (Sg - SZ)	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	14'	3090	.33'	[illegible]	1.8'	- 1.47	$\frac{1.47}{3090}$ = .00048 [illegible]			-
	20'	4330	.78'	[illegible]	1.5'	- .750	$\frac{0.75}{4330}$ = .00017 [illegible]			-
	24'	5450	2.35'	✓	1.06'	+ 1.29	$\frac{1.29}{5450}$ = .00023 [illegible]		-	
	28'	3779	2.5'	✓	.815'	+ 1.68	$\frac{1.68}{3779}$ = .00044 [illegible]		-	
[illegible]	14'	3110	0 [illegible]		2.78'	- 2.78	$\frac{2.78}{3110}$ = .00086 [illegible]			-
	20'	3820	1.78'	✓	2.20'	- .45	$\frac{0.45}{3820}$ = .00011 [illegible]			-
	24'	4400	3.25'	✓	1.56'	+ 1.69	$\frac{1.69}{4400}$ = .00038 [illegible]		-	
	28'	4600	3.75'	✓	1.26'	+ 2.49	$\frac{2.49}{4600}$ = .00054 [illegible]		-	
[illegible]	14'	2320	.33'	✓	.178'	+ .152	$\frac{.152}{2320}$ = .000065 [illegible]		-	
	20'	3325	.33'	✓	.071'	+ .259	$\frac{.259}{3325}$ = .000078 [illegible]		-	
	24'	4350	.31'	✓	- .06'	+ .37	$\frac{.37}{4350}$ = .000085 [illegible]		-	
	28'	4700	.31'	✓	- .06'	+ .37	$\frac{.37}{4700}$ = .000079 [illegible]		-	

[illegible]
[illegible]



Δ, L.T.S W.
2000
3000
4000
5000
6000
ASSUMED RIGHTING ARM SZ IN FEET.
3
2
1
0
θ = 60°
θ = 30°
θ = 90°
θ = 80°
θ = 10°
CROSS CURVES OF STABILITY
ASSUMED AXIS KS = 15 ฟุต

รูปที่ 73

ของเรือกับระยะที่เรือถูกยกขึ้นไประยะหนึ่ง เช่นเดียวกับแรงม้าที่ออกแรง 3,000 ปอนด์ ไปเป็นระยะทาง 1 ไมล์ จะเกิดงาน

$$30000 \times 1760 \times 3 \quad = \quad 15,840,000 \text{ ฟุต – ปอนด์}$$

ในทำนองเดียวกันถ้าน้ำหนักถูกยก งานก็คือน้ำหนักคูณกับระยะยกในกรณีของเรือ เมื่อเรือเอียงไปก็ต้องเกิดงานจำนวนหนึ่งคือผลคูณของน้ำหนักเรือแรงภายนอกที่ทำให้เรือเอียง กับระยะที่ถูกยกเรือนี้ไม่จำเป็นต้องทราบแรงภายนอกก็ทำได้ โดยพิจารณาดังต่อไปนี้

เมื่อเรืออยู่นิ่ง (At Rest) เรามีแรงกระทำในทางดิ่ง 2 แรงคือ

1 น้ำหนักของเรือกระทำลงในทางดิ่งผ่านจุดศูนย์ถ่วงของเรือ

2 ความลอยของเรือกระทำขึ้นในทางดิ่งเดียวกัน ผ่านจุดศูนย์กลางความลอย

น้ำหนักของเรือ ระวางขับน้ำของเรือ และความลอยของเรือนั่นมีค่าเท่ากัน เมื่อเรือเอียงไปนั้นน้ำหนักและความลอยคงกระทำที่จุดศูนย์ถ่วงและศูนย์กลางความลอยตามลำดับ จุดศูนย์ถ่วงของเรือจะขยับตัวสูงขึ้น แต่จุดศูนย์กลางความลอยขยับต่ำลงไป ฉะนั้นน้ำหนักของเรือจึงขยับสูงขึ้นไปเท่ากับระยะที่จุดศูนย์ถ่วงของเรือขยับขึ้น และความลอยของเรือขยับต่ำลงไป เท่ากับระยะที่จุดศูนย์กลางความลอยต่ำลงไป งานที่เกิดขึ้นจึงเท่ากับน้ำหนักของเรือคูณด้วยระยะ ที่จุดศูนย์ถ่วงขยับสูงขึ้นบวกด้วยความลอยของเรือคูณด้วยระยะที่จุดศูนย์กลางความลอยต่ำลง หรือ งานที่เรือทำ = น้ำหนักของเรือ $\times$ ระยะเรือที่ขยับสูงขึ้น

7. สูตรของมอสเลย์ (Moseley Formula) ใช้หาความทรงตัวพลวัต ณ มุมเอียงของเรือต่าง ๆ

ตามในรูปที่ 74 เป็นรูปหน้าตัดของเรือลำหนึ่งถูกเอียงไปโดยแรงภายนอกเป็นมุม θ จุดg, g' เป็นจุดศูนย์ถ่วงของรูปลิ่มทั้งสอง gh, $g'h'$ เป็นเส้นตั้งฉากกับแนวน้ำใหม่ $W'L'$ จุดอื่น ๆ มีความหมายเหมือนกับที่กล่าวมาแล้ว ระยะ BR และ GZ ลากตั้งฉากกับเส้นดิ่ง ที่ผ่านจุดศูนย์กลางความลอย B' และตั้งฉากกับเส้นแนวน้ำใหม่ $W'L'$

ระยะทางดิ่งระหว่าง, จุดศูนย์ถ่วงกับจุดศูนย์กลางความลอยเมื่อเรือเอียงไปเป็นมุม θ นั้นเท่ากับ B’Z

ระยะทางดิ่งเดิมเมื่อเรือตั้งตรงระหว่างจุดศูนย์ถ่วง กับจุดศูนย์กลางความลอยนั้นเท่ากับ BG

ฉะนั้นระยะที่เรือขยับสูงขึ้น (Vertical Srparation) = B’Z - BG ฉะนั้นความทรงตัวพลวัต (Dynamical Stabity)

= น้ำหนักเรือ $\times$ ระยะที่เรือขยับสูงขึ้น

= $\triangle.$ (B’Z - BG)

$$B'Z = B'R + RZ = B'R - BG.\ \cos\theta$$

ถ้าสมมติให้ v เป็นปริมาตรรูปลิ่มใดรูปลิ่มหนึ่ง และ ∇ เป็นปริมาตรระวางขับน้ำของเรือ ฉะนั้นหลักของโมเมนท์การโยกย้ายที่กล่าวแล้ว จึงนำมาใช้อีกดังนี้

$$V\ (gh + g'h') \qquad \nabla = \quad .\ B'R$$

$$B'R = \frac{V\ (gh + g'h')}{\nabla}$$

เมื่อแทนค่า B'R ลงในสมการข้างบนจะได้

$$B'Z = \frac{V\ (gh + g'h')}{\nabla} - BG.\ \cos\theta$$

ความทรงตัวพลวัต $= \Delta\left[\frac{V\ (gh + g'h')}{\nabla} - BG\,(1 - \cos\theta)\right]$

และสูตรนี้เรียกอีกชื่อหนึ่งว่าสูตรของมอสเลย์ (Moseley's Formula) ซึ่งมีความคล้ายคลึงกับสูตรของแอทวูดที่กล่าวมาแล้ว

8. การพิสูจน์ว่าความทรงพลวัตของเรือลำหนึ่ง เมื่อเอียงไปเป็นมุม ๆ หนึ่งเท่ากับเนื้อที่ภายใต้เส้นโค้งความทรงตัวสถิต ณ มุมเอียงขณะนั้น (ระยะออร์ดีเนตของเส้นโค้ง ความทรงตัวสถิตนี้เป็นโมเมนต์ตั้งตรง)

เมื่อพิจารณาดูรูปที่ 53 เป็นหน้าตัดของเรือและเอียงอยู่เป็นมุม ดีกรี และคิดว่าเรือลำนี้เอียงต่อไปอีกเป็นมุมเล็ก ๆ จะทำให้จุดศูนย์กลางความเลื่อนไปที่จุด ดูรูปที่ 74 ระยะ B'B" นั้นขนานกับแนวน้ำ W'L' จุด B" ไม่เปลี่ยนระดับสูงหรือต่ำไปจากจุด B' เพราะเป็นมุมเอียงเล็กน้อย ลากเส้นดิ่ง B"Z' ให้ผ่านจุด B" แล้วลาก GZ' ซึ่งเป็นระยะแขนตั้งตรงใหม่ตั้งฉากกับเส้นดิ่งนี้ มุม ZGZ' = dθ และระยะเรือที่ขยับสูงขึ้นจาก Z ถึง Z (Vertical Separation) = GZ. dθ ฉะนั้นงานที่ทำโดยเรือเมื่อเรือได้เอียงไปจากมุม θ ถึง θ + dθ เท่ากับความทรงตัวพลวัต = $\triangle$ (GZ.dθ)

ต่อไปนี้พิจารณาถึงเส้นโค้งความทรงตัวสถิตของเรือนี้ เมื่อเรือเอียงเป็นมุม θ นั้น ระยะแขนตั้งตรงคือ GZ ต่อไปคิดถึงเรือเอียงไปอีก dθ ระยะแขนตั้งตรงจะสูงขึ้นไปเอียงเล็กน้อย และเส้นฐานของความโค้งความทรงตัวสถิตนั้นเป็นมุมเอียงของเรือซึ่งจะเพิ่มอีก ฉะนั้นเนื้อที่ภายใต้เส้นโค้งนับตั้งแต่เรือเอียงอีก dθ เท่ากับ GZ.dθ

แต่ถ้าระยะออร์ดิเนตของเส้นโค้งความทรงตัวสถิตเป็นโมเมนท์ตั้งตรงเนื้อที่ใต้เส้นโค้งนั้นก็ต้องคูณด้วยระวางขับน้ำ $\triangle$ อีกครั้งหนึ่ง ฉะนั้น เนื้อที่ภายใต้เส้นโค้งความทรงตัวสถิต $\triangle$ =

GZ.dθ ฉะนั้น ความทรงตัวพลวัตก็คือเนื้อที่ภายใต้เส้นโค้งความทรงตัวสถิต ณ มุมเอียงนั้น ๆ ซึ่งเป็นสิ่งที่ต้องการพิสูจน์แล้ว

ตัวอย่างเรือลำหนึ่งที่มีรูปหน้าตัดเป็นวงกลม และลอยอยู่โดยมีเส้นแนวน้ำผ่านจุดศูนย์กลางพอดี จุดเมตาเซนเตอร์เอ็มของเรือนี้อยู่ที่จุดศูนย์กลางพอดี สมมติจุด G เป็นจุดศูนย์กลางความถ่วง และ B เป็นจุดศูนย์กลางความลอย เมื่อเรือเอียงไปเป็นมุม 90 ดีกรี จุด G จะขยับขึ้นไปอยู่บนเส้นแนวน้ำ แต่จุด B ยังคงที่อยู่อย่างเดิม ฉะนั้นความทรงตัวพลวัตเมื่อเรือเอียงไปเป็นมุม 90 ดีกรี เท่ากับ $\triangle$. GM

ต่อไปคิดหาเส้นโค้งความทรงตัวสถิตของเรือลำนี้ จะเห็นว่าระยะออร์ดิเนต ของเส้นโค้งนี้เท่ากับ $\triangle$. GM เมื่อเรือเอียงไปเป็นมุมเท่าใดก็เอามุมนั้นแทนค่า สมมติว่ามุมเอียงเป็นมุมห่างกันทุก ๆ 15 ดีกรี ระยะแขนตั้งตรงจะเท่ากับ$\triangle$ 0.258$\triangle$ GM, 0.5$\triangle$ GM. 0.707$\triangle$ GM, 0.866 $\triangle$ GM, 0.965 $\triangle$ GM, และ 1.0$\triangle$ GM, เมื่อนำไปเขียนเส้นโค้งความทรงตัวสถิตแล้วหาเนื้อที่ภายใต้เส้นโค้งนั้นจะได้เท่ากับ พอดี ซึ่งเท่ากับความทรงตัวพลวัตที่กล่าวไว้ข้างบนพอดี โปรดสังเกตว่าระยะห่างของมุม (Angular Interval) นั้น ต้องคิดเป็นมุมเชิงวงกลม (Curcular Measure) หาใช่เป็นดีกรีเช่นมุมวงกลมของ 15 = 0.2618

ฉะนั้นความทรงตัวพลวัต ณ มุมเอียงมุมหนึ่ง (Dynamical Stability) จึงขึ้นอยู่กับเนื้อที่ภายใต้เส้นโค้งความทรงตัวสถิต (Staical Stability) ณ มุมเอียงมุมนั้น ฉะนั้นเนื้อที่ภายใต้เส้นโค้งความทรงตัวสถิตจึงเป็นสิ่งสำคัญพอ ๆ กับมุมเอียงของเรือที่จะบอกถึงว่า เรือนั้นมีความทรงตัวดีเลวอย่างไร เพราะเนื้อที่ภายใต้เส้นโค้งมากก็แสดงความทรงตัวพลวัตดี แรงภายนอกเช่นคลื่นลมนั้นต้องมีแรงมากพอที่จะยกให้เรือเอียงพลิกคว่ำไป

9. การเขียนเส้นโค้งความทรงตัวสถิตโดยวิธีฮอค (Hok's Method of Obtaining A Curve of Stability)

วิธีนี้ใช้อินติเกรเตอร์เฉพาะวง A หาเนื้อที่แต่อย่างเดียวเท่านั้น วิธีดำเนินการในวิธีนี้ต้องทำการหาเส้นโค้งความทรงตัวเสียก่อนทุก ๆ ระวางขับน้ำของเรือ และจากนี้ต้องทำย้อนกลับไปหาเส้นโค้งความทรงตัวสถิต เส้นโค้งความทรงตัวพลวัตเป็นส่วนทั้งหมด (Integral) ของเส้นโค้งความทรงตัวสถิต ฉะนั้น เส้นโค้งความทรงตัวสถิตจึงเป็นดิฟเฟอเรนเชี่ยล (Differentin) ของเส้นโค้งความทรงตัวพลวัต ถ้า H คือความทรงตัวพลวัต ณ มุมเอียง θ

$$H = \leq {}_0\triangle \quad GZ\ d\theta$$

ฉะนั้นระยะแขนตั้งตรง $GZ = \frac{1}{\triangle} \quad \frac{dH}{d\theta}$

ในรูปที่ 75 เป็นรูปหน้าตัดของเรือลำหนึ่งเอียงอยู่เป็นมุม θ ดีกรี ซึ่งเราสามารถหาระวางขับน้ำตามชั้นแนวน้ำต่าง ๆได้ และสามารถเขียนเป็นเส้นโค้งระวางขับน้ำ(Curveof Displacement) ได้ในที่สุด ณ เส้นแนวน้ำ wl เราสามารถหาระวางขับน้ำได้เท่ากับ ตัน ซึ่งมีปริมาตร$\triangle$ระวางขับน้ำเท่ากับ ลูกบาศก์ฟุต$\bigtriangledown$เนื้อที่เส้นโค้งระวางขับน้ำ owl หารด้วยระวางขับน้ำ owl จะเป็นระยะทางของจุดศูนย์กลางความลอยต่ำจากแนวน้ำ wl

ฉะนั้น ระยะจุดศูนย์กลางความลอย wb = owl $\div$ wl เนื้อที่เหนือเส้นโค้งระวางขับน้ำ owl หาได้ด้วยเครื่องมืออินเกรเตอร์วง A ตามในรูปที่ 69 จุดศูนย์ถ่วง G นั้นสมมติขึ้น, จุด B' เป็นจุดศูนย์กลางความลอยเมื่อเรือเอียงไป, B เป็นจุดศูนย์กลางความลอย เมือเรือตั้งตรงฉะนั้นความทรงตัวพลวัต (Dynamical Stability) เท่ากับ $\triangle$(B'Z - BG) ระยะ B'Z - BG เป็นระยะที่เรือขยับสูงขึ้น (Vertical Separation) และวัดเอามาได้จากรูปโดยตรง โดยการทำตามลักษณะนี้ทุกมุมเอียงของเรือก็สามารถสร้างเส้นโค้งความทรงตัวพลวัตได้โปรดสังเกตว่าระวางขับน้ำ นั้$\triangle$คงที่ตลอด เวลาอาจตัดเอาออกเสียได้ ถ้า h เป็นค่าของ BZ –BG แล้วความทรงตัวพลวัตH = $\triangle$. h เมื่อเรือเอียงเป็นมุม 10, 20, 30 ดีกรี - - - ฯลฯ และถ้า h_{10} , h_{20}, h_{30} - - - ฯลฯ เป็นระยะแขนตั้งตรงเมื่อมุมเอียง 10, 20, 30, ดีกรี - - - แล้วจะได้ h_{10} = 1/12 (0.1745) ((5 x 10) + (8 x GZ_{10}) – GZ_{20})

(0.1745 เป็นมุมเชิงวงกลมของ 10 ดีกรี)

ดำเนินตามกฎห้า – แปด

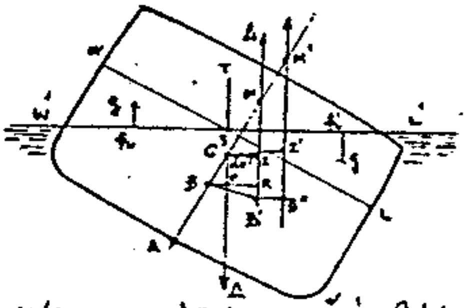
และ h_{20} = 1/3 (0.1745) (0 + (4 x GZ_{10}) x GZ_{20})

ดำเนินการตามกฎซิมสันที่ 1

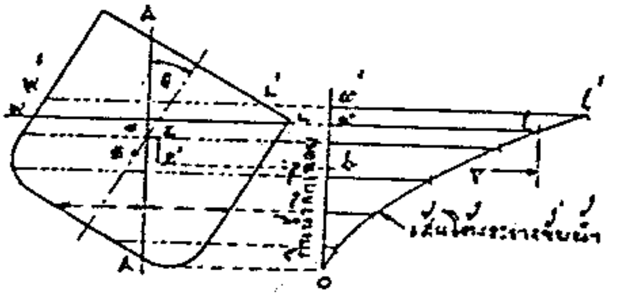
จากสมการทั้งสองนั้นสามารถหาระยะแขนตั้งตรง GZ_{10} และ GZ_{20} ได้และเมื่อดำเนินการตามซิมสันกฎที่ 2 ก็สามารถหาค่า

H_{30} = 3/8 (0.1745) (0 + 3GZ_{10} + GZ_{20} + GZ_{30})

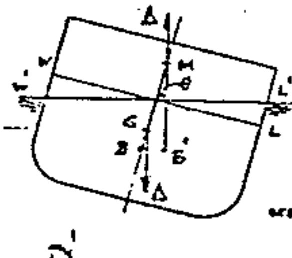
โดยแทนค่า GZ_{10} , GZ_{20} ซึ่งรู้แล้วก็จะได้ GZ_{30} จึงเห็นว่าสามารถหาระยะแขนตั้งตรง GZ ได้ทุกมุม ฉะนั้นเส้นโค้งความทรงตัวสถิตของระวางขับน้ำอันหนึ่งก็สามารถหาได้ เมื่อหาเส้นโค้งความทรงตัวสถิตทุกระวางขับน้ำก็จะได้เส้นโค้งความทรงตัวคร๊อสเคิฟ (โดยปกติ $h_{10} = \frac{1}{2} GZ_{10} \times 0.1745$ ซึ่งเป็นเนื้อที่ของสามเหลี่ยม เพราะเส้นโค้งตอนติดกับออร์จินนั้น เส้นโค้ง เป็นลักษณะเส้นตรง) เมื่อได้เส้นโค้งความทรงตัวคร๊อสเคิฟแล้วอย่าลืมบอกไว้ถึงตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงที่สมมติขึ้นเพราะจะต้องนำไปแก้หาจุดศูนย์ถ่วงจริงดังได้อธิบายแล้ว



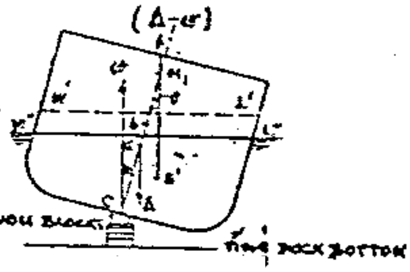
รูปที่ 74 [illegible] ที่มุมเอียงเท่ากัน



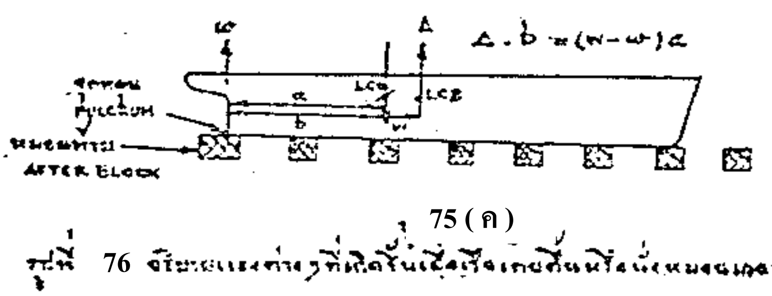
รูปที่ 75 การสร้างเส้นโค้ง [illegible] (HOK'S METHOD)



รูปที่ 75 (ก)



75 (ข)



75 (ค)

รูปที่ 76 อธิบายแรงต่างๆ ที่เกิดขึ้นเมื่อเรือเกยตื้นหรือนั่งหมอนเคลาเรือ

10. การเสียความทรงตัวเนื่องจากเรือเกยตื้น (Loss to Stability Due to Grounding)

เมื่อตอนนำเรือเข้าอู่นั้นไม้ค้ำยัน (Shores) ยังไม่สามารถจะค้ำยันเรือได้จนกว่ากระดูกงูจะนั่งบนหมอน (Blocks) หมดทุกอัน สมมติว่าในขณะนั้นเรือมีทริมท้าย หมอนอันท้ายจะได้รับการสัมผัสของกระดูกงูเป็นอันแรก และก่อนที่หมอนอันต่อ ๆ ไปจะสัมผัสกับทองเรือและก่อนที่เสาค้ำจะค้ำหมดนั้น หมอนอันสุดท้ายจะมีปฏิกิริยากับน้ำหนักเรือ ซึ่งถ้าหมอนนี้ไม่แข็งแรงพออาจจะทำให้เรือตกหมอนเกิดความเสียหายแกเรือที่จะพลิกเอียงซึ่งเกิดมีขึ้นบ่อย ๆ

ในรูปที่ 76 สมมติว่ารูป (ก.) เป็นหน้าตัดของเรือลำหนึ่งเอียงอยู่เป็นมุมเล็กน้อย ในรูป (ข.) เป็นรูปที่เรือกำลังนั่งบนหมอน น้ำหนัก w จะเป็นน้ำหนักที่หมอนได้รับในขณะหนึ่งซึ่งที่ระดับน้ำ W' L' แห้งลงไปจนถึงระดับน้ำ W" L" เนื่องจากการสูบน้ำออกจากอู่ ถ้า M_1 เป็นจุดเมตาของเรือเมื่อแนวน้ำ W" L"

โมเมนท์ตั้งตรงเมื่อ $= ((\triangle - w)\, GM_1 - w.\, OG)\, \text{Sin}\ \theta$

เรือเอียง ดีกรี $= (\triangle .\, GM_1 - w.GM_1 - w.\, OG)\, \text{Sin}\ \theta$

$= (\triangle .\, GM_1 - w.oM_1)\, \text{Sin}\ \theta$

$= (GM_1 - \frac{w.}{\Delta}.oM_1)\, \triangle\, \text{Sin}\ \theta$

ฉะนั้นค่า $GM_1 - \frac{w.}{\Delta}.oM_1$ เป็นความสูงเมตาแท้จริง (Virtual Metacentric Height) ซึ่งจะต้องเป็นบวก เรือจึงจะปลอดภัย ไม่โงนคว่ำ

ในการหาน้ำ นั้นดำเนินการดังนี้ .-

ก.) คำนวณหา w อย่างแน่นอน โดยปกติเรือต่าง ๆ ย่อมมีเส้นโค้งไฮโดรสแตติคอยู่แล้ว ซึ่งในที่นี้ย่อมอ่านระวางขับน้ำและจุดศูนย์กลางความลอยตามยาวในขณะเรือลอย ปกติได้ในตอนเรือนั่งหมอนท้ายนั้นเรือมีสมการเกิดขึ้นดังนี้

โมเมนท์ของความลอยตัวรอบหมอนท้าย = โมเมนท์ของน้ำหนักของเรือรอบหมอนท้ายนั้น

ตามรูป (ค.) เป็นรูปทางข้างของเรือ ขณะนั่งหมอน ให้ทำการเขียนเส้นแนวน้ำขนานกับเส้นฐานเป็นจำนวนเส้นพอสมควรทุก ๆ แนวน้ำที่เขียนขึ้นนี้คำนวณหาระวางขับน้ำ และตำแหน่งจุดศูนย์กลางความลอย (Longitudinal C.B.) แล้วเขียนเส้นโค้งโมเมนท์ของความลอยรอบหมอนท้ายเรือในทางระดับ ส่วนทางดิ่งเป็นกินน้ำลึกของเรือ การเขียนให้เขียนตามมาตราส่วนและในรูปเดียวกันนี้เขียนโมเมนท์ของน้ำหนักเรือรอบหมอนท้ายเรือ เส้นโค้งทั้งจะตัดกันที่จุด ๆ หนึ่งอย่างแน่นอน จุดนั้นจะตรงกับกินน้ำลึก ซึ่งจะเป็นน้ำลึกเมื่อเรือจะเริ่มนั่งหมอน เมื่อเอาระวางขับน้ำเดิมลบด้วยระวางขับน้ำเมื่อตอนนั่งหมอนก็จะได้น้ำหนัก w ซึ่งเป็นน้ำหนักที่หมอนท้ายจะได้รับไว้ (Pressure On The Blocks)

ข.) การคำนวณน้ำหนัก w โดยประมาณ สมมติว่าเรือที่เข้าอู่นั้นมีทริมท้าย t ฟุตระยะจากหมอนสุดท้ายถึงจุดเซนเตอร์ออฟโฟลเตชันเท่ากับ b ฟุต เมื่อเรือลอยอยู่นั้น สมมติให้ Q เป็นแรงที่หมอนสุดท้ายพอที่จะทำให้สภาพทริมเป็นศูนย์ หรือท้องเรือได้ระดับ (Even Keel), ถ้า M เป็นโมเมนท์ที่ทำให้เรือเปลี่ยนทริม 1 นิ้ว (Moment To Change Trim 1 Inch) จะเกิดสมการตอนท้องเรือได้ระดับดังนี้

$$Q.b = M. 12\,t \qquad \text{ฟุต – ตัน}$$

$$Q = \frac{12Mt}{b} \text{ ตัน}$$

แรง Q เป็นแรงที่ทำให้ระวางขับน้ำของเรือลดน้อยลง และจำนวนกินน้ำลึกของเรือจะลดลง $\frac{Q}{12T} = \frac{Mt}{bT}$ ฟุต ในเมื่อ T เป็นจำนวนตันที่ทำให้เรือจมลง 1 นิ้ว (Tons Per Inch Immersion) แต่อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนทริมและกินน้ำลึกเฉลี่ยเพิ่มขึ้นเป็นจำนวน $\frac{tc}{L}$ ฟุต ในเมื่อ c ฟุตเป็นระยะของจุดเซนเตอร์ออฟโฟเตชัน ห่างจากจุดกึ่งกลางลำ (Amidships) ไปทางท้ายเรือ ถ้า x เป็นกินน้ำลึกที่หัวเรือสุด เมื่อเรือกำลังลอยอยู่ ฉะนั้นกินน้ำลึกเฉลี่ยเมื่อท้องเรือกลับนั่งหมอนเท่ากับ

$$x + t/2 + tc/L – Mt/bT$$

11. ความทรงตัวของเรือช่วยชีวิตที่ไม่ล่ม (Stability of Self – righting Lifeboats)

ความทรงตัวของเรือชนิดนี้มีหลายอย่างที่น่าสนใจ ดังคุณสมบัติต่อไปนี้

1) มีถังผนึกน้ำความลอยอะไหล่ขนาดใหญ่ ซึ่งทำให้เรือไม่จมเมื่อเวลาล่ม

2) น้ำที่เข้าเรือเวลาเรือล่มจะถูกทำให้ออกไปจากเรือเอง

3) น้ำที่เข้ามาในเรือเวลาเรือล่มไม่สามารถทำให้ความทรงตัวของเรือเสียไปเลย

4) เรืออยู่ในสภาพความทรงตัวไม่ดี (Unstable) เมื่อเรือคว่ำพลิกท้องขึ้นจึงพยายามที่จะพลิกตั้งตัวขึ้นเอง

1) ในการที่เรือต้องมีถังผนึกน้ำขนาดใหญ่เป็นส่วนที่ทำให้มีความลอยอะไหล่มากนั้น ต้องทำถังผนึกน้ำอยู่ทางหัวและท้าย โดยทำหัวและท้ายมีความงอน (Sheer) มาก ถังลอยนี้ยังใส่ไว้ตามท้องเรืออีกด้วย ดูรูปที่ 77 จำนวนความลอยอะไหล่นี้ต้องมีปริมาตรกว่าปริมาตรระวางขับน้ำของเรือมาก จึงจะทำให้เรือไม่จมเมื่อคว่ำลง ถังลอยตอนหัวท้ายทำให้เรือตั้งลำขึ้นเอง

2) ดาดฟ้าเรือโบตทำให้สูงจากแนวน้ำพอสมควร ที่ดาดฟ้ากลางลำมีลิ้นอัตโนมัติ 8 ลิ้น ทำหน้าที่ขับน้ำให้ออกทางท้องเรือเอง และขับออกทางเดียว น้ำเข้ามาในเรือไม่ได้การขยับขึ้น ๆ ลง ๆ ของเรือนั้นจะทำให้ลิ้นอัตโนมัติทำงานดูดน้ำจากดาดฟ้าออกไปทางท้องเรือเอง

3) น้ำที่อยู่บนดาดฟ้าทำให้ความทรงตัวเสียเนื่องจาก

ก) จะทำให้จุดศูนย์ถ่วงแท้ C.C. ของเรือสูงขึ้น

ข) ทำให้จุดศูนย์ถ่วงแท้ (Virtual C.C.) สูงกว่าจุดศูนย์ถ่วงจริง (Actual C.C.) ทั้งนี้เนื่องจากผิวน้ำอิสระ (Free Surface) ในการที่จะป้องกันสาเหตุนี้เพื่อให้เรือมีความทรงตัวดี (Stable)

ค) ทำกระดูกงูด้วยเหล็กเพื่อดึงจุดศูนย์ถ่วงให้ต่ำ

ง) ถังลอยหัวท้ายต้องทำให้แข็งแรงเพื่อไม่ให้เกิดการแตกทะลุน้ำเข้าได้

ด้วยเหตุนี้เมื่อเรือคว่ำพลิกท้องแล้วเรือจะตั้งลำได้เองเพราะความสูงเมตา GM เป็นบวกแม้จะมีน้ำบนดาดฟ้าเรือก็จะไม่มีโอกาสที่จะมีความสูงเมตาลบไปได้

4. ตามในรูปที่ 78 เป็นรูปที่แสดงเรือพลิกคว่ำเอาท้องขึ้น แต่เรือมีความทรงตัวไม่ดี (Unstable) ในสภาพอย่างนี้พยายามที่จะพลิกตั้งตรงเองอยู่เสมอ (Self - Righting) ทั้งนี้เพราะเหตุว่าเมื่อเวลาจมคว่ำแล้วนั้นจุดศูนย์ถ่วงของเรือ G อยู่สูงกว่าจากจุดเมตา M ของเรือเพราะกระดูกเป็นเหล็กจุดG จึงอยู่สูงมาก เมื่อเป็นเช่นนี้เรือจึงพลิกตั้งขึ้นเอง

เรือประเภทนี้ได้ทำการทดลองแล้ว ได้ทำการติดเสากระโงและติดใบที่กราบเรือ ใช้น้ำหนักถ่วงไว้แทนเพื่อต้องการให้เรือเอียง เมื่อเรือพลิกคว่ำละโซ่สมอเลื่อนออกจากเรือไป เรือก็พลิกตั้งตรงขึ้นเอง

12. อาการเอียงของเรือเมื่อตอนยิงปืน (Heel Produced by Gun Fire)

พิจารณาดูรูที่ 79 ในกรณีนี้ต้องใช้หลักการของโมเมนท์ตัม (Principle of Momentum) ถ้า w เป็นน้ำหนักของหัวกระสุน (Projectile) รวมทั้งดินระเบิดด้วย (Charge)$\triangle$ เป็นระวางขับน้ำของเรือ v เป็นความเร็วของหัวกระสุน เมื่อปืนยิงออกไปแล้วเรือจะมีความเร็วถอยหลัง V ถ้า I เป็นปฏิกิริยาอิมพัลส์ (Impulse Reaction) ของน้ำซึ่งกระทำ ณ จุด ๆ หนึ่งอยู่ระหว่างต่ำกว่าครึ่งของกินน้ำลึกเล็กน้อย เราจะได้สมการดังนี้

$$I = \frac{w}{g}..v - \frac{\Delta}{g}v$$

$\frac{w}{g}.v$ เป็นโมเมนท์ตัมเนื่องจากการยิงปืน $\frac{\Delta}{g}.v$ เป็นโมเมนท์ตัมของเรือในการยิงปืนนี้จะทำให้เรือหมุนรอบจุดศูนย์ถ่วง G ดังปรากฏในรูปที่ 79 โมเมนท์ตัมมุม (Angular Momentum) ของเรือเท่ากับ $\frac{\triangle}{g} \quad k^2 \quad \frac{d\theta}{dt}$ และนำไปเข้าสมการกับโมเมนท์ตัม ที่ทำให้เรือหมุน (Moment of Momentum Causing The Rotation)

$$\frac{w}{g} vG.A + I.HG = \frac{\Delta}{g} k^2 \frac{d\theta}{dt}$$

$$\frac{w}{g} v.AH \qquad = \frac{\Delta}{g} \left(k^2 \frac{d\theta}{dt} + v.\ HG \right)$$

V ซึ่งเป็นความเร็วถอยหลังของเรือนั้นน้อยมากจึงตัดทิ้งเสียได้

$$\frac{w}{g} v.AH = \frac{\Delta}{g} k^2 \frac{d\theta}{dt}$$

k^2 เป็นตัวประจำได้จากระยะเวลาการโคลง (Period of Rolling, T)

$$T \quad = \quad 2\pi \sqrt{\frac{k^2}{g.GM}}$$

พลังงานจนเริ่มต้น (Initial Kineticenergy) ของเรือเท่ากับ $\frac{1}{2} \frac{\Delta}{g} k^2 (\frac{d\theta}{dt})^2$ ถ้า θ เป็นมุมเอียงของเรือ เนื่องจากการยิงปืนแล้วนำไปเข้าสมการกับความทรงตัวพลวัต (Dynamical Stability) เมื่อเรือเอียง θ ดีกรี และสมมติว่าความต้านทานของเรือน้อยมากตัดทิ้งเสียงได้ ความทรงตัวพลวัตเท่าเนื้อที่ภายใต้เส้นโค้งความทรงตัวสถิตตอนใกล้ออริจิน ซึ่งถือเป็นสามเหลี่ยม

$$= \frac{1}{2} \times \text{สูง} \times \text{ฐาน} \times \triangle$$

$$= \frac{1}{2} .GZ.\ \theta . \triangle \ (\theta \text{ เป็นมุมเชิงวงกลม })$$

$$= \frac{1}{2} .GM.\ \theta .\ \theta . \triangle$$

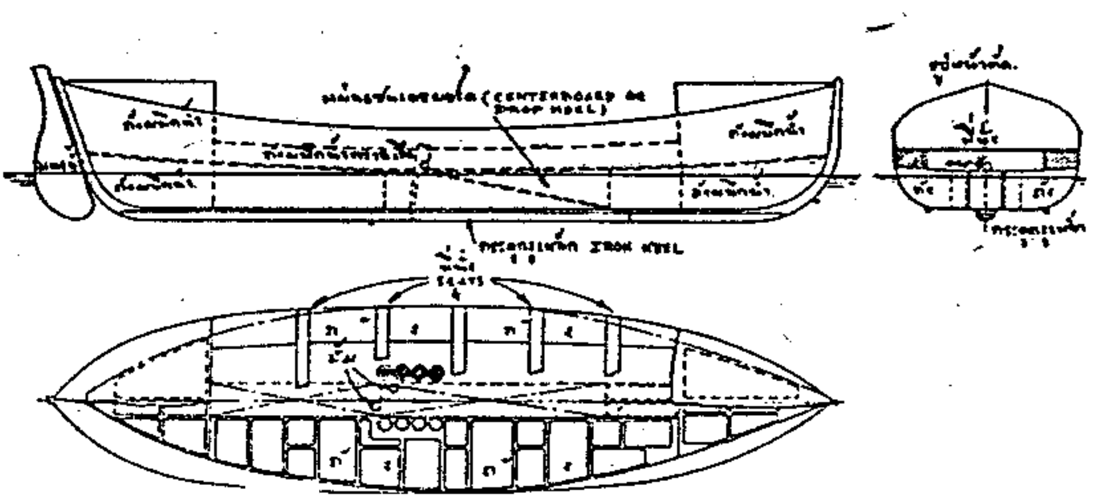
$$= \frac{1}{2} \triangle .\ GM.\ \theta^2$$

$$\text{ฉะนั้น } \theta^2 \quad = \frac{k^2}{g.GM} \left[\frac{d\theta}{dt} \right]^2 = \frac{k^2}{g.GM} \left[\frac{w.}{\triangle} \times \frac{v.AH}{k^2} \right]$$

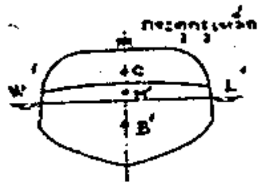
$$\text{หรือ } \theta \quad = \frac{w}{\Delta} \times \frac{v.AH.}{k} \frac{1}{\sqrt{g.GM}} = \frac{w}{\triangle} \times \frac{v.AH \times 2\pi}{g.GM.T} \times \text{ มุมเชิงวงกลม}$$

$$\theta \quad = \frac{w.}{\triangle} \times \frac{v.AH}{g.GmT} \times 360 \text{ ดีกรี ต่อ 1 กระบอก}$$

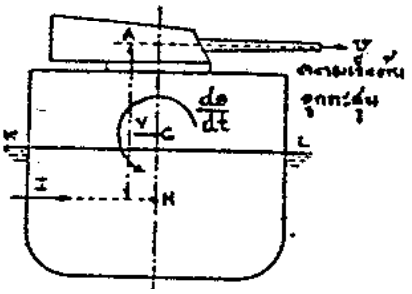
ตัวอย่าง เรือปืนลำหนึ่งมีปืนขนาดใหญ่เท่ากับ 8 กระบอก ยิงพร้อมกันทางกราบขวา ซึ่งสูง 25 ฟุต จากแนวน้ำจุดH ซึ่งเป็นจุดที่ปฏิกิริยาของน้ำกระทำกับเรืออยู่ที่ 13 ฟุต นับจากแนวน้ำถ้าหัวกระสุนและดิน w หนัก 1,100 ปอนด์ ความเร็วของหัวกระสุน v เท่ากับ 3,000 ฟุตต่อวินาที ระยะสูงเมตา



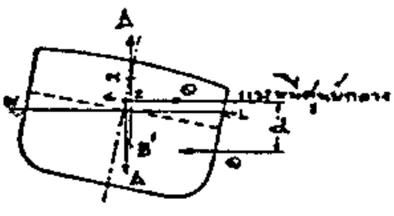
รูปที่ 77 เรือโบทที่ไม่ล่ม STABILITY OF SELF-RIGHTING LIFEBOATS.



รูปที่ 78 แสดงความทรงตัวไม่ดี (UNSTABLE)
ของเรือโบทเมื่อตอนคว่ำ ซึ่งพยายามพลิกกลับ



รูปที่ 79 อาการเอียงของเรือ
เมื่อยิงปืน.



รูปที่ 80 อาการเอียงของเรือ
เมื่อเลี้ยวหักเห

GM 5 ฟุต ระวางขับน้ำของเรือ$\triangle$ = 18,000 ตัน ระยะเวลาการโคลง T = 16 วินาทีให้หามุมเอียงของเรือเมื่อยิงปืนแล้วทั้งแปดกระบอก

วิธีทำ $$\theta = \frac{w.}{\Delta}\times\frac{v.AH}{g.GmT}\times 360 \text{ ดีกรี ต่อ 1 กระบอก}$$

$$= \frac{1100}{18.000\times 2240}\;\frac{3000\times 13\times 8 \text{ กระบอก}}{32.2\times 5\times 16}\times 360$$

$$= 3\frac{1}{2} \text{ ดีกรี}$$

ฉะนั้น เมื่อปืนยิงพร้อมกัน 8 กระบอกเรือเอียง 3 ½ ดีกรี

13. การเอียงของเรือเมื่อเข้าวงหัน (Angle of Heel of A vessel When Turning)

ตอนหักหางเสือหมดครั้งแรก เรือจะเอียงไปทางที่เรือเลี้ยว เช่นหักหางเสือขวาเรือจะเอียงขวา หรือเอียงเข้า (Inward Heel) หาศูนย์กลางวงหัน ซึ่งเป็นอยู่ชั่วขณะหนึ่ง เพราะแรงที่กระทำบนหางเสือในตอนนั้นกระทำ ณ จุดศูนย์กลางความกด (Center of Pressure or Center Of Lateral, CLR) ของหางเสือซึ่งต่ำจากจุดศูนย์กลางความกดของตัวเรือจึงเกิดมีระยะห่างและมีโมเมนท์เกิดขึ้น แต่ครั้นเรือแล่นเข้าวงหันแล้ว แรงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal Force) เกิดขั้นเรือจึงเอียงออกนอกวงหัส (Outward Heel) ทั้งนี้เพราะแรงหนีศูนย์กลาง กระทำที่จุดศูนย์กลางความกดของเรือ (CLR) โมเมนท์ที่เกิดจากผลคูณของแรงหนีศูนย์กลางกับระยะของจุดศูนย์กลางความถ่วง C.G.ไปยังจุด CLR เป็นโมเมนท์ที่ทำให้เรือเอียง

ตามในรูปที่ 80 แรงหนีศูนย์กลาง Q ซึ่งเกิดจากน้ำหนักของเรือ $\triangle$ ตัน เคลื่อนตัวไปตามวงหันอันมีรัศมีวงหัน R ฟุต ด้วยความเร็ว v ฟุตต่อนาที จะเกิดแรงหนีศูนย์กลาง Q = $\frac{\Delta}{g}$

ทำให้เกิดโมเมนท์แรงคู่ (Moment of The Couple) เท่ากับ $\frac{\Delta}{g}.\frac{v^2}{R}.d$ โมเมนท์แรงคู่นี้เท่ากับโมเมนท์คตวามทรงตัวสถิต (Moment of Statical Stability) $\triangle$. GM.Sin θ

$$\triangle.\ GM.Sin\ \theta = \frac{\Delta}{g}\times\frac{v^2}{R}.d$$

$$Sin\ \theta = \frac{1}{32.2}.\frac{v^2}{R}.\frac{d}{GM}$$

$$= 0.089\left(\frac{V^2}{R}\frac{d}{GM}\right)$$

V = ความเร็วเป็นนอต

R = รัศมีวงหันเป็นฟุต

GM = ความสูงเมตาจีเอ็ม เป็นฟุต

b = ระยะของจุดศูนย์กลางความกดของเรือ (Center of Pressure หรือ Center of Lateral Resistance) ที่ต่ำจากจุดศูนย์ถ่วงของเรือ (Center of Gravity) เป็นฟุต

เมื่อพิจารณาแล้วจะเห็นว่าเรือจะเอียงมากนั้นขึ้นอยู่กับ

1) ความเร็วของเรือ
2) รัศมีวงหันที่แคบ
3) ความสูงเมตาจีเอ็มน้อย

ตัวอย่าง เรือลำหนึ่งมีเส้นผ่าศูนย์กลางยุทธวิธี (Tactical Diame Ter) 463 หลา เมื่อความเร็วเรือ 15 นอต เรือกินน้ำลึก 27 ฟุต ความสูงเมตาจีเอ็ม 3.5 ฟุต ให้หาว่า เรือเอียงเป็นมุมเท่าใดในตอนเลี้ยว

วิธีทำ V = 15 นอต R = $\frac{463}{2}$ หลา

= 695 ฟุต

GM = 3.5 ฟุต d = 13 ฟุต โดยประมาณ

$$\text{Sin } \theta = 0.089 \left(\frac{V^2}{R} \bullet \frac{d}{GM} \right)$$

$$= 0.089 \left(\frac{15^2}{695} \bullet \frac{13}{3.5} \right)$$

$$\text{Sin } \theta = 0.107$$

$$\theta = 6 \text{ ดีกรี (ประมาณ)}$$

ตัวอย่าง เรือลำหนึ่งมีระวางขับน้ำ 20,000 ตัน มีความยาวระหว่างเส้นตั้งฉาก 1,000 ฟุต ความเร็ว 30 นอต ความสูงเมตาจีเอ็ม 12 ฟุต สมมติให้รัศมีของวงหันเท่ากับ 1.5 เท่า ของความยาวเรือ จุดศูนย์ถ่วงของเรือเหนือเส้นฐาน 38 ฟุต กินน้ำลึก 33 ฟุต ให้หามุมเอียงของเรือเมื่อเข้าวงหัน

วิธีทำ

สมมติว่า KB = $\frac{1}{2}$ × กินน้ำลึก = $\frac{1}{2}$ × 33 = 16.5 ฟุต

KG = 3.8 ฟุต

∴ BG = 21.5 ฟุต

BG = d = ระยะจุดศูนย์ถ่วงของเรือถึงจุดศูนย์กลางความกด

(สมมติว่าจุดศูนย์กลางความกด CLR อยู่ที่เดียวกับจุดศูนย์กลางความลอย)

$$\text{Sin } \theta = 0.89 \left(\frac{V^2}{R} \bullet \frac{d}{GM} \right)$$

$$\text{Sin } \theta = 0.089 \left(\frac{30^2}{15 \times 1000} \bullet \frac{21.5}{12} \right) = 0.095$$

$$\theta = 5\tfrac{1}{2} \text{ ดีกรี}$$

ฉะนั้น เมื่อเรือเข้าวงหันเรือจะเอียง 5½ ดีกรี

8.7 การใช้เส้นโค้งไฮโดรสแตติค (HYDROSTATICS CURVES) และเส้นโค้งความทรงตัวครอสเคิฟ (CROSS CURVES OF STABILITY)

1. การใช้เส้นโค้งไฮโดรสแตติคเคิฟ

การใช้เส้นโค้งไฮโดรสแตติคเคิฟที่จะแสดงการใช้ในที่นี้ เป็นเส้นโค้งประจำเรือ ยู.เอส เกียริง ซึ่งมีความยาว 383 ฟุต การใช้เส้นโค้งนั้นเป็นสิ่งสำคัญมากกว่าการสร้างเส้นโค้ง ซึ่งได้กล่าวไว้แล้ว การสร้างและใช้ทั้งสองอย่างนั้นเป็นหน้าที่ของนักต่อเรือโดยเฉพาะ แต่การใช้เส้นโค้งเป็นแต่อย่างเดียวเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับท่านที่ทำหน้าที่เกี่ยวกับเรือในด้านธุระทั่ว ๆ ไป ฉะนั้นกัปตันเรือ, ต้นเรือ, ต้นกล, รองต้นกลเรือ จึงจำเป็นต้องใช้เส้นโค้งนี้ให้เป็นเพื่อการปลอดภายของเรือท่านเอง

ตัวอย่าง เรือพิฆาต DD 7710 ลำหนึ่งกินน้ำลึกท้าย 13 – 6” กินน้ำลึกหัว 10 – 0” เมื่อเกิดชนกันขึ้นทำให้ขึ้นทำให้ข้างเรือแตกยาว 40 ฟุต กว้าง 15 ฟุต ห้องนี้มีฝากั้นอยู่ที่กลางลำตามยาวและน้ำเข้าได้อย่างสบาย (Free Communication With Sea) น้ำหนังของน้ำที่เข้ามาเป็นจำนวน 120 ตัน จุดศูนย์กลางความถ่วงของน้ำ 8 ฟุต จากกระดูกงูและ 7 ฟุต ห่างจากเส้นกึ่งกลางลำตามยาวของเรือ ไปทางกราบขวา และ 80 ฟุต ห่างจากกึ่งกลางลำตามขวาง (Amidships) ไปทางหัวเรือ ให้หาระวางขับน้ำการกินน้ำลึกหัวท้ายเมือเรือทะลุแล้ว (ดูรูปที่ 81)

วิธีทำ กินน้ำลึก 13′ – 6” +
กินน้ำลึก 12′ – 0” } ทริมท้าย = 1’ – 6” = 1.5’

2) 25′ - 6″

กินน้ำลึกเฉลี่ย 12 – 9"

จากเส้นโค้งไฮโดรสแตติคของเรือพิฆาต ที่กินน้ำลึกเฉลี่ย 12′ – 9" อ่านระวางขับน้ำจากเส้นโค้งหมายเลข (1) △ S.W. = 2925 ตัน ซึ่งยังไม่ใช้ระวางขับน้ำที่แท้จริงของเรือนี้ ต้องแก้ทริมอีกโดยอ่านจากเส้นโค้ง (13) ซึ่งมีชื่อว่า การเพิ่มระวางขับน้ำอันเนื่องจาการเปลี่ยนทริมท้าย 1 ฟุต อ่านได้ 990 ตัน

มาตราส่วน 100 ตัน 2 ตัน

เปลี่ยนทริมท้าย 1 ฟุต เพิ่ม $\frac{2}{100} \times 990$ = 19.8 ตัน

เปลี่ยนทริมท้าย 1.5 ฟุต เพิ่ม = 19.8 × 1.5 ตัน

= 29.6 ตัน

ระวางขับน้ำที่แท้จริง = 2925 + 29.6 = 2954.6 ตัน

ตอบ ระวางขับน้ำเมื่อกินน้ำท้าย = 13′ – 6" } = 2954.6 ตัน
กินน้ำหัว = 12′ – 0"

จากเส้นโค้งหมายเลข (6) CF $\frac{1130 \text{ ตัน}}{100 \text{ ตัน} / 2 \text{ ฟุต}}$ = 22.6 ฟุต ทางท้ายรอยตัดที่ 10(⊠)

" " " (7) T / IN = $\frac{1400 \text{ ตัน} =}{100 \text{ ตัน} / 2 \text{ ตัน}}$ = 28.0 ตัน

" " " (12) MT/1" = $\frac{630 \text{ ตัน}}{100 \text{ ตัน} / 100 \text{ ฟุต.ตัน}}$ = 630 ฟุต . ตัน

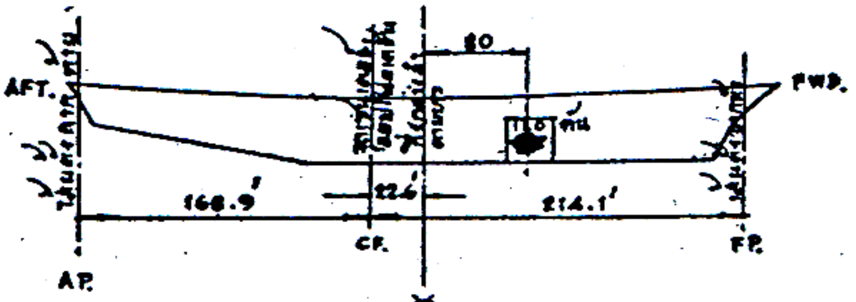
เนื่องจากน้ำเข้าเป็นจำนวน 120 ตัน เพื่อความสะดวกในการติดตามทางทฤษฎี คือการติดตอนนี้ต้องแบ่งออกเป็น 2 คอน คือ .-

(1) คิดว่าน้ำหนักวางที่จุดเซนเตอร์ออฟโฟลเตชัน และจนหัวท้ายเท่ากัน

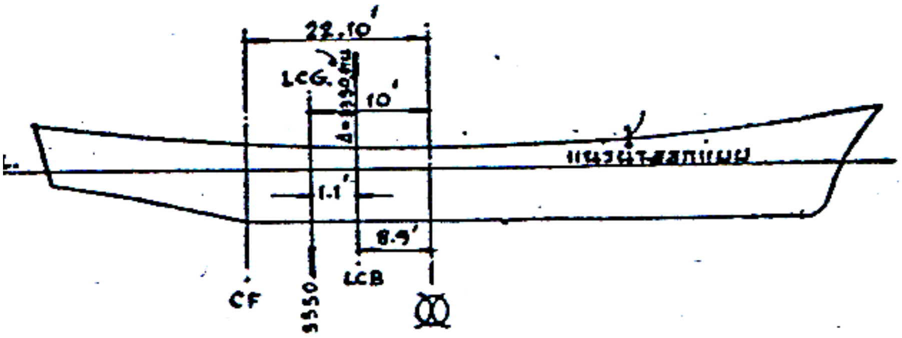
(2) แล้วคิดว่า ได้เคลื่อนน้ำหนักนั้นจากจุดเซนเตอร์ออฟโฟลเตชันไปหัวหรือท้าย เป็นระยะทางเท่าใด จะเกิดทริมมิ่งโมเมนท์

∴ การจมของเรือ (Sinage) = $\frac{120 \text{ ตัน}}{28 \text{ ตัน} / \text{นิ้ว}}$

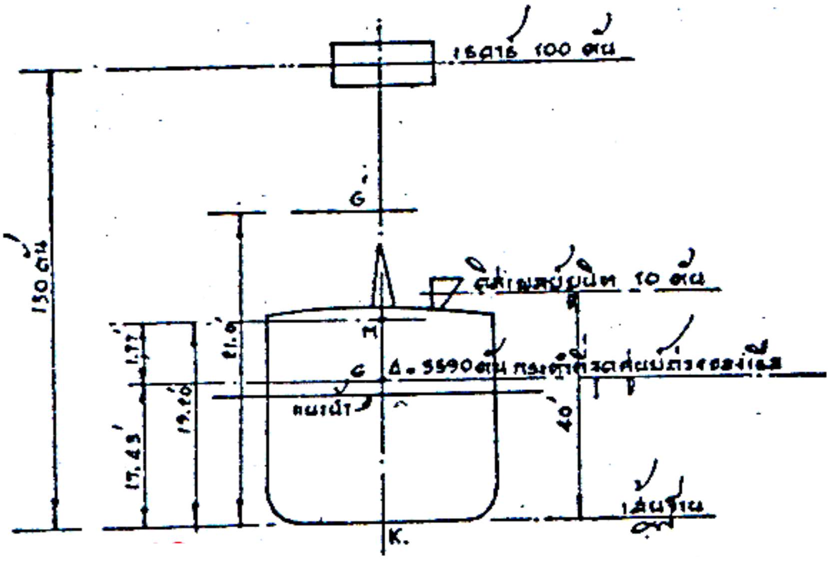
= 4.285 (จมหัวท้ายเท่ากัน)



รูปที่ 81 เรือกระดกลงหัวทำให้เรือเกิดทริม.



รูปที่ 82 เรือที่ไม่มีจุด LCG และ LCB เป็นเส้นดิ่งเดียวกัน จะทำให้เรือเกิดทริมแล้ว LCG. และ LCB จะมาอยู่ในเส้นดิ่งเดียวกัน เรียกว่าเรือสมดุลย์ (EQUILIBRIUM.)



รูปที่ 83 แสดงการคำนวณการทรงตัวของเรือ
TOP HEAVY.

ฉะนั้นกินน้ำลึกท้ายขณะนี้ = 13' - 6" + 4.285"

กินน้ำลึกหัวขณะนี้ = 12' – 0" + 4.285"

แต่น้ำหนัก 120 ตันนี้อยู่ที่ 80 ' ทางหน้ารอยตัดที่ 10 คือไม่ได้อยู่ที่เซนเตอร์ออฟโฟลเตชันและไม่ได้อยู่ที่รอยตัดที่ 10 ที่เดียว

ฉะนั้น 120 ตัน ห่างจาก CF = 22.6 + 80 = 102.6 ฟุต

TM = ทริมมิ่งโมเมนท์ (Trimming Moment) = น้ำหนัก x ระยะทาง

= 120 ตัน x 102.6 ฟุต

$$\text{ทริม} = \frac{TM}{MT/1''} = \frac{120 \times 102.6 \text{ ฟุต.ตัน}}{630 \text{ ฟุต.ตัน / นิ้ว}}$$

∴ ทริม	= 19.5"	เปลี่ยนทริม (Change Trim Aft)
L	= 383'	
L/2	= 191.5'	$\frac{168.9}{383} \times 19.5'' = -8.58''$
จุด CF ทางท้าย ☒	= 22.6'	เปลี่ยนทริมหัว (Change Tim Forward)
ระยะ CF ถึง FP	= 214.1	$\frac{214.1}{383} \times 19.5'' = 10.92''$
ระยะ CF ถึง AP	= 1689	
L	= 383.0'	

กินน้ำลึกสุดท้าย

ท้าย = 13' 6 "+ 4.285" – 8.58" = 13' 1.7 " = 13' 2"

หัว = 12 ' 0" + 4.285" + 10.92" = 13' 3.2" = 13' 3"

ตัวอย่าง เรือพิฆาต DD 710 เมื่อตอนออกแบบนั้นเรือถูกเขียนขึ้นโดยให้มีกระดูกงูเป็นเส้นระดับ (Even Keel) มีแนวน้ำออกแบบ (Designed Waterline DWL) 14' – 0" ครั้นเมื่อนำเรือลงน้ำแล้วปรากฏว่าเรือมีจุดศูนย์ถ่วงของเรือหางยาว (Longitudinal C.G.) 10'– 10" ไป ทางท้ายของจุดกึ่งกลางลำตามยาว ซึ่งไม่ได้อยู่ในแนวเส้นดิ่งเดียวกับศูนย์กลางความลอยทางยาว (LCB) จึงทำให้เรือเกิดทริมขึ้น ให้คำนวณแนวน้ำหัวท้ายเมื่อเรือลอยน้ำอยู่ในขณะนั้น ดูรูปที่ 82

วิธีทำ จากเส้นไฮโดรสแตติค เส้นหมายเลข (1) และที่กินน้ำเฉลี่ย

14' – 0" พบระวางขับน้ำ = 3350 L.T.S.W.

พบ LCB เส้นโค้งหมายเลข (4) = $\frac{445 \text{ ตัน}}{100 \text{ ตัน / 2 ฟุต}}$ ทางท้าย ☒

= 8.90 ฟุต ทางท้าย ✠

พบ เส้นโค้งหมายเลข (6) = $\frac{1110 \text{ ตัน}}{100 \text{ ตัน} / 2\text{ฟุต}}$ ทางท้าย ✠

= 22.10 ฟุต ทางท้าย ✠

และพบโมเมนท์เปลี่ยนทริม 1 นิ้ว

MT / 1” เส้น (12) = $\frac{640 \text{ ตัน}}{100 \text{ ตัน}/100 \text{ ฟุต-ตัน}}$

= 650 ฟุต ตัน

LCB = 8.9 ทางท้าย ✠

LCG = 10.0 ทางท้าย ✠

ระยะห่างของ LCB กับ LCG (Lever)

LVR = 1.1 ทางท้าย ✠

ทริมมิ่งโมเมนท์ (Trimming Moment), TM = ระวางขับน้ำ x LVR

= 3350 × 1.1

= 3685 ฟุต – ตัน

∴ เรือจะเกิดทริมทางท้าย = $\frac{TM}{TM / 1”}$ = $\frac{3685 \text{ ฟุต - ตัน}}{640 \text{ ฟุต- ตัน / นิ้ว}}$

= 5.75 นิ้วทางท้าย ✠

L = 383'.0

L/2 = 191.5'

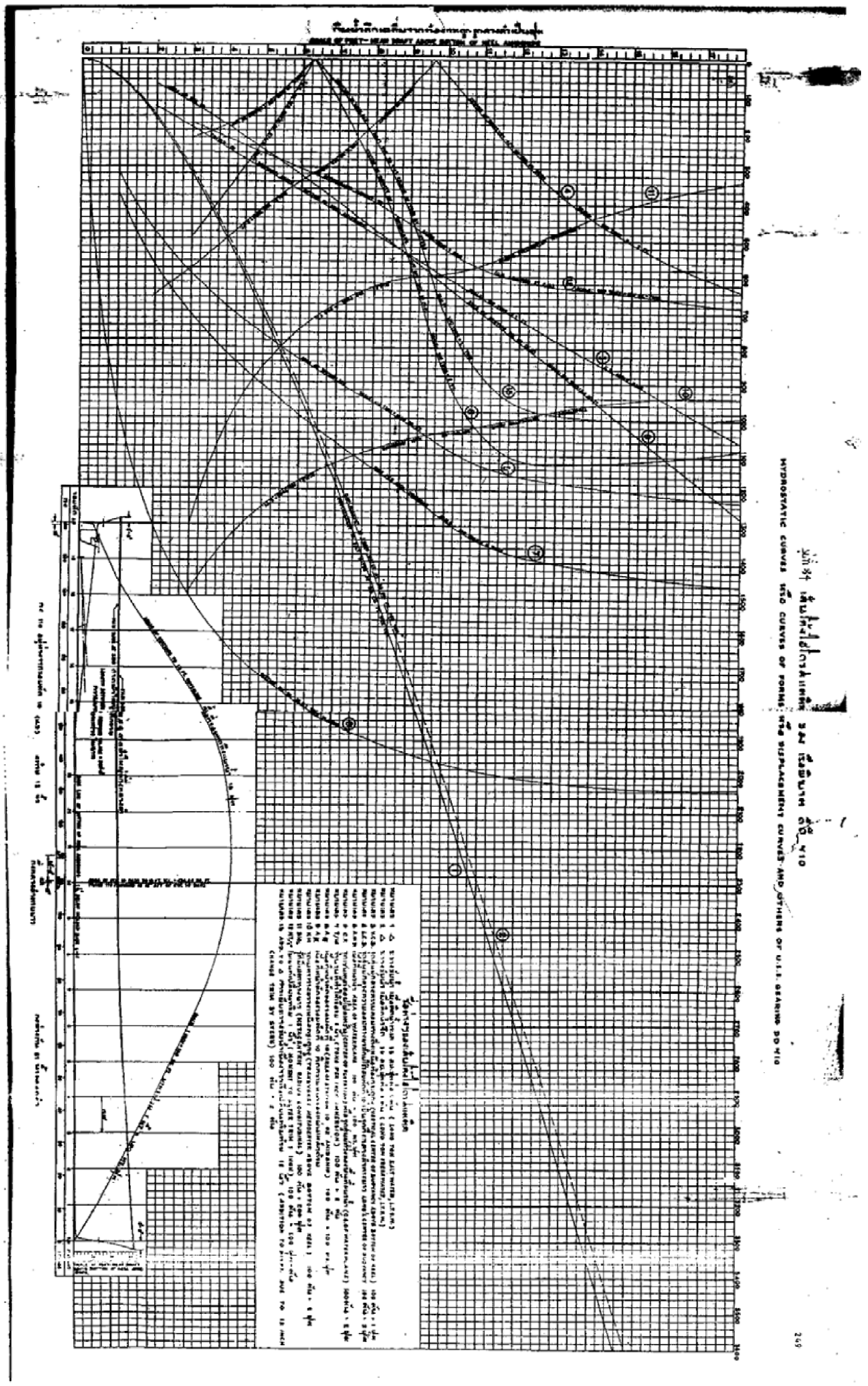
จุด CF ทางท้าย = 22.1'

ระยะ CF ถึง FP = 213.6'

ระยะ CF ถึง AP = 169.4

เปลี่ยนทริมทางท้าย = $\frac{169.4}{383} \times 5.75" = 2.54"$

เปลี่ยนทริมทางหัว = $\frac{213.6}{383} \times 5.75" = -3.21$


HYDROSTATIC CURVES หรือ CURVES OF FORMS หรือ DISPLACEMENT CURVES AND OTHERS OF U.S.S. GEARING DD 710

กินน้ำลึกสุดท้าย

ท้าย = 14' + 2.54" = $2\ \frac{1}{2}$

หัว = 14' - 3.21" = 13' - 9"

ตอบ

ตัวอย่าง เรือพิฆาต DD 710 ยาว LBP = 383 – 0" ต้องการติดสายอากาศเรดาร์แบบ SA – 3 ซึ่งมีสายอากาศหนัก 100 ตัน ติดอยู่ที่ปลายเสากระโดงสูงจากเส้นฐาน ใต้กระดูกงู 150 ฟุต ดิสเพล์ยูนิท หนัก 10 ตัน อยู่สูงจากเส้นฐานใต้กระดูกงู 40 ฟุต ขณะนั้นเรือนี้กินน้ำลึกหัว 13 ฟุต ท้าย 15 ฟุต ให้ตรวจสอบว่าเรือพิฆาต DD 710 นี้จะติดเรดาร์ดังกล่าวได้หรือไม่

โดยที่เรือนี้ไม่มีผลการเอียงเรือ (Resi;t of Inclininh Rxprtiment) ติดมากับตอนรับเรือด้วยจึงทำให้ไม่สามารถหาระยะสูงเมตา (Metacentric Hight GM), ฉะนั้นให้ประมาณโดยสูตรของบานาบี

$$GM = \sqrt{\frac{v}{100 \times L}}$$

(โจทย์นี้ไม่เป็นความจริง ต้องการฝึกหัดบางสิ่งบางอย่างเท่านั้น)

วิธีทำ ดูรูปที่ 84 กินน้ำ Ha = 13 } ทริม $2' - 0''$ ท้าย

กินน้ำหัว HF = 15

กินน้ำเฉลี่ย Hm = 2 $\overline{)28}$

เส้นโค้งหมายเลข (1) $\triangle$ = 3350 L.T.S.W.

เส้นโค้งหมายเลข (13) การเพิ่มระวางขับน้ำ = $\frac{100 \text{ ตัน}}{100 \text{ ตัน} / 2 \text{ ตัน}}$

= 20 ตัน - / 12 $''$

$2' - 0''$

ฉะนั้นเพิ่มระวางขับน้ำ = 20×2 = 40 ตัน

ระวางขับน้ำที่ถูกต้อง = 3350 + 40 ตัน

= 3390 ตัน

เส้นโค้งหมายเลข 10 KM = $\frac{960 \text{ ตัน}}{100 \text{ ตัน} / 2 \text{ ฟุต}}$

ระยะสูงเมตา $GM = \frac{\sqrt{V}}{100 \times L} = \frac{\sqrt{35\ \Delta}}{100 \times L} = \frac{\sqrt{35 \times 3390}}{100 \times 383}$

ระยะสูงเมตา GM = 1.77 ฟุต

$$\text{จุดศูนย์ถ่วงของเรือใหม่} = \frac{\text{ผลบวกของโมเมนท์ของน้ำหนักต่างๆรอบเส้นฐาน}}{\text{ผลบวกของน้ำหนักทั้งหมด}}$$

$$= \frac{(100 \times 150) + (10 \times 40) + (3390 \times 17.43)}{100 + 10 + 3390}$$

$$\therefore \quad \text{KG ใหม่} = \frac{47787}{3500} \text{ ฟุต}$$

$$= 21.00 \text{ ฟุต}$$

ซึ่งแสดงว่าจุดศูนย์ถ่วงของเรือใหม่เลื่อนขึ้นไปอยู่สูงกว่าจุดเมตา M เดิม เป็นระยะ 21.0 ฟุต - 19.2 ฟุต = - 1.8 ฟุต หรือระยะสูงเมตา GM เป็นลบ - 1.8 ฟุต

เรืออยู่ในสภาพที่ทรงตัวไม่ดี (Unstable) ถ้าติดน้ำหนักต่าง ๆดังกล่าวลงเรือ เรือจะคว่ำทันที (Capsize Down)

2. การใช้เส้นโค้งความทรงตัวคร๊อสเคิฟ

การใช้เส้นโค้งความทรงตัวกคร๊อสเคิฟที่แสดงการใช้ในที่นี้เป็นเส้นโค้งประจำเรือ ยู เอส เกียริง ซึ่งมีความยาว 383 ฟุต เช่นเดียวกับที่แสดงการใช้เส้นโค้งไฮโดรสแตติค ความสำคัญในการใช้นั้นจะเห็นจากตัวอย่างต่อไปนี้ .-

ตัวอย่าง เรือพิฆาต ยู เอส เกียริง DD 710 ยาว 383 ฟุต กินน้ำลึกเฉลี่ย H_m = 13 ฟุต 6 นิ้ว จุดศูนย์ถ่วงของเรือสูงรากฐาน KG = 16 ฟุต ในขณะนั้นเรือไม่เอียงกราบใด (Nolist) ถ้าเคลื่อนน้ำหนัก 75 ตันไปทางกราบขวาเป็นระยะ 15 ฟุต ให้หาว่าเรือลำนี้จะเอียงกี่ดีกรีระยะความทรงตัว ( ) จะเหลือเท่าใด โดยใช้เส้นโค้งความทรงตัวคร๊อสเคิฟของเรือ ยู เอส เกียริง ในรูป 86 และเส้นโค้งไฮโดรสแตติคประกอบการคำนวณ

วิธีทำ จากเส้นโค้งไฮโดรสแตติค ณ แนวน้ำเฉลี่ย 13 – 6 อ่านเส้นโค้งหมายเลข 1

ระวางขับน้ำ Δ = 3180 L.T.S.W.

เส้นโค้งหมายเลข 10 จุดเมตาเหนือฐาน KM = 968 ตัน, สเกล 2 ฟุต ต่อ 100 ตัน

$\therefore$ KM = 19.36 ฟุต

โจทย์กำหนดให้ KM = <u>16.00¿Øµ</u>

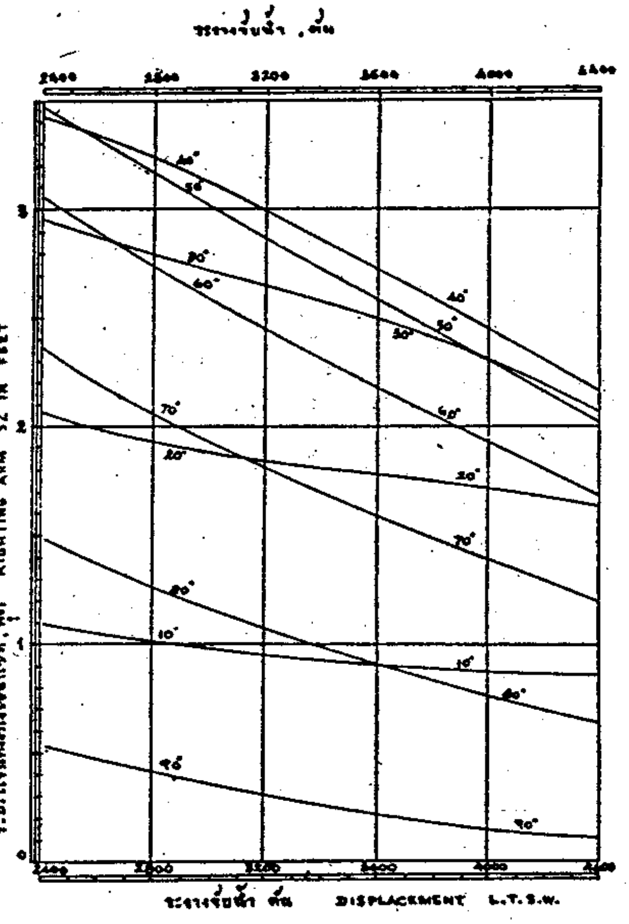
ฉะนั้นความสูงเมตาจีเอ็ม GM = <u>3.36¿Øµ</u>

การเลื่อนน้ำหนัก 75 ตันไประยะ 65 ฟุต จะทำให้จุด G เลื่อนไปที่ G_1 ดูรูปที่ 87

$$GG_1 \text{ x} = \text{W x d}$$

$$GG_1 \quad x \quad = \quad \frac{wxd}{\triangle} = \frac{75x\,15}{3180} = \ 0.354 \text{ ฟุต}$$

การเลื่อนนี้ ระยะ GG_1 จะขนานกับ gg_1 ซึ่งเป็นจุดศูนย์ถ่วงของรูปลิ่มจมน้ำและไม่จมน้ำทั้งสอง เนื่องจากการเอาน้ำหนัก 75 ตันมาวางที่กราบขวา ดูรูปที่ 87 และจุดต่าง ๆ จะปรากฏดังในรูป 88 จากเส้นโค้งความทรงตัวครือสเคิฟของเรือ ยู เอส เกียริง อ่านได้ค่าดังต่อไปนี้



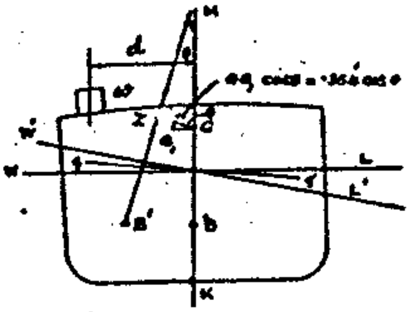
รูปที่ 86 เส้นโค้งความทรงตัวครือสเคิฟของเรือพิฆาต ยู.เอส. เกียริง (CROSS CURVES OF STABILITY OF U.S. GEARING DD710 CLASS DESTROYER.) ดูการใช้บทที่ ๒ แกนสมมุติ ASSUMED AXIS อยู่ที่ 14 ฟุตเหนือกระดูกงู หรือ KS = 14 ฟุต ถ้า KG ของเรือจริงมากกว่า KS ; GZ = SZ - GS.sinθ ถ้า KG ของเรือจริงน้อยกว่า KS, GZ = SZ + GS.sinθ

อ่าน ณ ระวางขับน้ำ $\triangle$ = 3180 L.T.S.W.					
มุมเอียง θ	ระยะ SZ ฟุตจากเส้นโค้งเมื่อยังไม่ได้แก้แกนสมมติ KS = 14 ฟุต	อัตราแก้เป็น – GS.Sin θ หรือ – 2 Sin θ	ระยะ GZ ฟุตเมื่อแก้มาเป็นของจริง	ระยะ GZ ลดลงเท่ากับ GG Cos θ หรือ 0.354 Cos θ	ระยะ GZ ใหม่เมื่อย้ายน้ำหนักแล้ว
20°	1.85	- .684	1.17	.33	.84
40°	3.10	- 1.284	1.72	.27	1.45
60°	2.46	- 1.732	0.73	.18	.55
80°	1.07	- 1.968	- 0. 89	.062	- .83

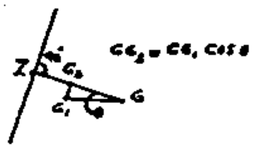
ระยะ ได้จากเส้นโค้งคร๊อสเคิฟ เช่น $\theta = 20^{\circ}$ อ่าน SZ = 1.85 ฟุต โดยที่จุด S เป็นจุดศูนย์ถ่วงสมมติหรือแกนสมมติในตอนสร้างเส้นโค้งคร๊อสเคิฟ จึงต้องแก้ไปเป็นระยะ SZ จริงของเรือ ดูรูปที่ 89 และ 90 ในที่นี้จุด G อยู่สูงกว่าจุด S เท่ากับ 16 – 14 = 2 ฟุต หรือ GS = 2 ฟุต อัตราแก้จึงเท่ากับ $- 2 \times \text{Sin} \ \theta$ ซึ่ง ณ มุม 20 อัตราแก้เท่ากับ - 2 x Sin 20° = - 0.684 ฟุต ฉะนั้น GZ = 1.85 – 0.684 ฟุต = 1.17 ฟุต เมื่อคำนวณทุกมุมเอียงของเรือแล้วจะได้ GZ = 1.17, 1.72 และ – 0.9 ฟุต แล้วนำไปเขียนเส้นโค้งความทรงตัวสถิตดังปรากฏในรูปที่ 91

เมื่อเคลื่อนน้ำหนัก 75 ตันไปทางกราบขวา 15 ฟุต ทำให้จุดศูนย์ถ่วงจริงของเรือ G เลื่อนไปที่ G_1 , GG_1 = 0.354 ฟุต ตามที่คำนวณแล้ว ฉะนั้นระยะ GZ เดิมก็ต้องลดน้อย เท่ากับ GG_1 Cos θ เขียนลงในรูป 202 จะอ่านมุมเอียงกราบขวาของเรือได้ 6 ดีกรี ระยะความทรงตัวเหลือ 62 ดีกรี ระยะหมดความทรงตัวเหลือ 67.5 ดีกรี

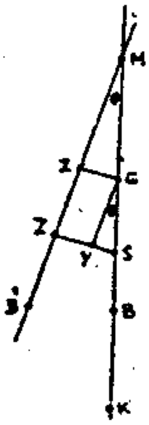
ตัวอย่าง เรือพิฆาต ยู เอส เกียริง DD 710 ยาว 383 ฟุต มีระวางขับน้ำ 3010 ตัน จุดศูนย์ถ่วงเรือเหนือฐาน หรือระยะเคจี KG = 17 ฟุต ผลกระทบกระเทือน ต่อจุดศูนย์ถ่วงอันเนื่องจากผิวน้ำอิสระ (Free Surface) = 0.5 ฟุต เรือลำนี้เกิดทะลุที่ห้อง ๆ หนึ่งมีความยาว 35 ฟุต กว้าง 17 ฟุต ไปในทางตามยาว น้ำทะเลเข้าได้ 100 ตัน จุดศูนย์กลางของน้ำทะเลอยู่ที่ 8.5 ฟุต จากเส้นศูนย์กลาง และ 8 ฟุตเหนือฐาน ให้คำนวณหาความทรงตัวสถิตจากเส้นโค้งคร๊อสเคิฟ และเส้นโค้งไฮโดรสแตติค



รูปที่ 87 การเคลื่อนย้ายของจุดศูนย์ถ่วง G เนื่องจากการเคลื่อนย้ายน้ำหนักทางขวางของเรือ GG_1 ขนานกับ gg₁

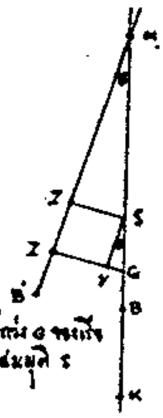


รูปที่ 88 รูปขยายของรูปที่ 87



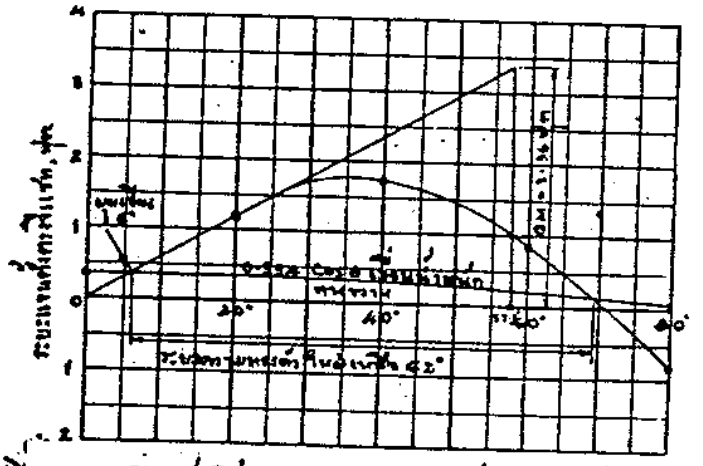
รูปที่ 89 ตำแหน่ง G ของเรืออยู่สูงกว่าจุดศูนย์ถ่วงเริ่มแรก S หรือ KG > KS

$GZ = SZ - SY = SZ - GS.\sin\theta$



รูปที่ 90 จุดศูนย์ถ่วง G ของเรืออยู่ต่ำกว่าจุดศูนย์ถ่วงเริ่มแรก S หรือ KG < KS

$GZ = SZ + GY = SZ + GS.\sin\theta$



รูปที่ 91 การเขียนเส้นโค้งความยาวแขนคานตั้งตรงที่หักจากเส้นโค้งตรงเดิม ให้หมายตำแหน่ง 57.3° แล้วลากเส้นตั้งฉาก 3.36 ฟุต แล้วต่อเส้นตรงไปยังจุดศูนย์ เพื่อช่วยการสร้าง เพราะเส้นโค้งตอนต้นเป็นเส้นตรง

วิธีทำ ดูรูปที่ 92 จุด ของเรือเมื่อแก้ผิวน้ำอิสระแล้ว (Virtual KG) = 17 + 0.5 = 17.5 ฟุต

เมื่อน้ำเข้าเรือ 100 ตัน จุดศูนย์ถ่วงจะเลื่อนลงเป็นระยะ GG'

$$GG' \times \triangle = W \times d$$

$$GG = \frac{100 \text{ ตัน}}{3010} \times \frac{(17-8)}{100} = \frac{100 x 9}{3110}$$

$$= 0.29 \text{ ฟุต}$$

ผิวน้ำอิสระที่กระทบกระเทือนจุด G จะลดลงเป็นเรโช $= 0.50 \times \frac{3010}{3110}$

$= .484$

น้ำที่เข้าเรือนั้นมีการไหลติดต่อกับทะเลได้อย่างสบาย (Fluctuate) ผิวน้ำอิสระในตอนนี้

$$= \frac{i}{\triangledown} + \frac{Ay}{\triangledown}^{2}$$

$$= 1/2 \times \frac{35 \times 17^{3}}{3110 \times 35} + \frac{(17X35) \times (8.5^{2})}{3110 \times 35}$$

$$= 0.132 + .395 \text{ ฟุต}$$

$$= 0.527 \text{ ฟุต}$$

รวมความกระทบกระเทือนของผิวน้ำอิสระทั้งหมดเท่ากับ 0.484 + 0.527 = 1.011 ฟุต น้ำที่เข้าเรือมากนั้นเท่ากับ 100 ตัน เลื่อนมาทางกราบขวา (Shift of Weight) จุดศูนย์ถ่วงเรือจะเคลื่อนไปทางขวาเท่ากับ

$$GG_1 = \frac{W \times d}{\triangle} = \frac{100 \times 8.5}{3110}$$ ดูรูปที่ 94

ฉะนั้น จุดศูนย์ถ่วงโดยแท้ของเรือ Virtual KG = 17.00 – 0.29 + 1.011

∴ KG = 17.72 ฟุต

ระยะ KM จากเส้นโค้งไฮโดรสแตติค KM = 19.80 ฟุต

ความสูงเมตาจีเอ็ม GM = 2.12 ฟุต

เมื่อได้ความสูงเมตาจีเอ็ม GM = 2.12 ฟุต แล้วนำไปเขียนเส้นโค้งความทรงตัวสถิตตามในรูปที่ 93 จุด G สูงกว่า S หรือ GS = 17.0 – 14 = 3.0 ฟุต ฉะนั้นอัตราแก้ของ เท่ากับ - 3.0 $\sin\theta$

อ่าน ณ ระวางขับน้ำ $\triangle$ = 3180 L.T.S.W. (มือน้ำเข้าเรือแล้ว)					
มุมเอียง θ	SZ ฟุต	อัตราแก้เป็น -3.0 Sin θ	GZ ฟุต	ระยะลดเมื่อเคลื่อนย้ายน้ำหนักทางขวาง .274 Cos θ	ระยะลดเมื่อเกิดผิวน้ำอิสระ 1.011 x Sin θ
20°	1.85	- 1.02	.83	.25	.34
40°	3.05	- 1.92	1.13	.21	.65
60°	2.50	- 2.58	- 0.08	.13	.87
80°	1.10	- 2.94	- 1.84	.04	.99

ระยะลดของ GZ เมือเคลื่อนย้ายน้ำหนัก (เมื่อน้ำเข้า) = GG_2 Cos θ

= .274 Cos θ

ดูรูปที่ 94

ระยะลดของ GZ เมื่อเกิดผิวน้ำอิสระ = GG_3 Cos θ ดูรูปที่ 94

= 1.011 Cos θ

เมื่อนำไปเขียนลงในเส้นโค้งรูปที่ 93 แล้วจะเห็นว่าเมื่อน้ำเข้าในเรือ 100 ตันนั้น เรือจะเอียงประมาณ 7.0 ดีกรี และระยะความทรงตัวคงเหลือ 50 ดีกรี

ตัวอย่าง เรือพิฆาต ยูเอส เกียริง ยาว 383 ฟุต กินน้ำลึกท้าย 13 ฟุต 6 นิ้ว กินน้ำหัว 12 ฟุต มีจุดศูนย์ถ่วงเหนือฐาน KG = 17.6 ฟุต เกิดลนกันขึ้นมีความเสียหายดังนี้ตัวเรือทะลุน้ำเข้าได้อย่างสะดวก (Free Communication With The Sea) ห้องนั้นมีอาณาเขตยาว 40 ฟุต กว้าง 15 ฟุต สามด้านที่อยู่ในเรือเป็นฝากั้นทางขวางหัวท้ายห้องและฝากั้นตามยาวอยู่กึ่งกลางลำตามยาว น้ำที่เข้าเรือ 120 ตัน จุดศูนย์ถ่วงของน้ำที่เข้ามาสูงจากกระดูกงู 8 ฟุต และห่างจากศูนย์กลาง 7 ฟุต และห่างจากกึ่งกลางลำทางขวาง (Amidships) 80 ฟุต ไปทางหัวเรือให้คำนวณหา

ก. กินน้ำลึกหัวท้ายครั้งสุดท้าย

ข. ความเอียงของเรือเมื่อน้ำเข้าแล้ว

ค. เขียนเส้นโค้งความทรงตัวสถิต บอกระยะความทรงตัว (Range of Stability) และระยะแขนตั้งตรงมากที่สุด (MAX. Tighting Arm)

ใช้เส้นโค้งไฮโดรสแตติคและเส้นโค้งความทรงตัวครีสเคิฟของเรือลำนี้

วิธีทำ ดูรูปที่ 95

กินน้ำลึกท้าย 13′ - 6″

กินน้ำลึกหัว 12′ - 0″

} ทริม 1′ – 6″ = 18″

กินน้ำเฉลี่ย $2 \overline{)25' - 6''}$

$12' - 9'' = 12.75$ ฟุต

จากเส้นโค้งไฮโดรสแตติคอ่านระวางขับน้ำ $\triangle = 1925$ L.T.S.W.

อัตราแก้ของระวางขับน้ำจากเส้นโค้งหมายเลข 13 $= \dfrac{990}{100} \times 2$

$= 19.8$ ตัน ทริมท้าย 12 นิ้ว

ทริมท้าย 18 นิ้ว เพิ่ม $= \dfrac{19.8}{12} \times 18 = 29.6$ L.T.S.W.

ฉะนั้นระวางขับน้ำถูกต้องของเรือ $= 2925 + 29.6$

$= \underline{\underline{2954}}.6$ L.T.S.W.

และจากเส้นโค้งไฮโดรสแตติคอ่านเส้นโค้งได้อีกดังนี้

เส้นโค้งหมายเลข 6 CF $= \dfrac{1130}{100} \times 2 = 22.6$ ฟุต ทางท้ายของรอยตัดที่ 10

“ “ 7 Z / IN $= \dfrac{1400}{100} \times 2 = 28$ ตัน ต่อ 1 นิ้ว

เส้นโค้งหมายเลข 12 MT / 1 $= \dfrac{630}{100} \times 100 = 630$ ฟุต - ตัน / นิ้ว

การจมของเรือ Sinkage $\dfrac{\text{น.น.น้ำที่เข้าเรือ}}{\text{T / IN}} = \dfrac{\text{120 ตัน}}{\text{28 ตัน/นิ้ว}}$

$= 4.285$ นิ้ว

เมื่อพิจารณากินน้ำลึกในตอนนี้จะได้

กินน้ำลึกท้าย = 13 ฟุต 6 นิ้ว + 4.285 นิ้ว

กินน้ำลึกหัว = 12 ฟุต 0 นิ้ว + 4.285 นิ้ว

แต่น้ำหนัก 120 ตันอยู่ที่ 80 ฟุต ห่างจากกึ่งกลางลำหรือรอยตัดที่ 10 ไปทางหัว

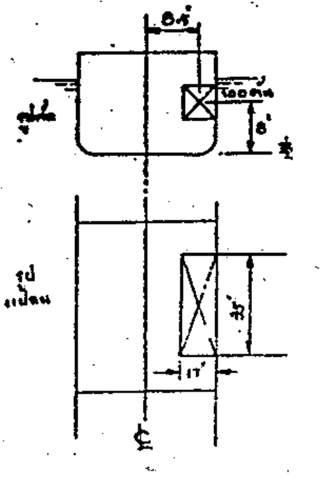
ระยะ CF = 22.6 ฟุต ทางท้ายรอยตัดที่ 10

ตำแหน่งของน้ำ 120 ตัน = $\underline{80.0}$ ฟุต ห่างจากรอยตันที่ 10 ไปทางหัว

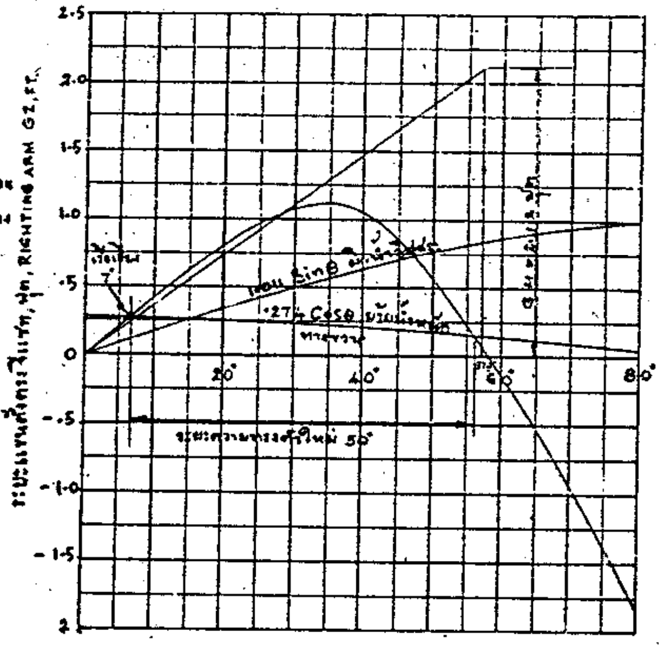
ระยะแขน = $\underline{\underline{102.6}}$ ฟุต

เกิดโมเมนท์ (Triming Moment) = TM = น้ำหนัก × ระยะแขน

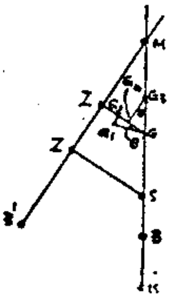
= 120 ตัน × 102.6 ฟุต



รูปที่ 92 โจทย์ทะลุน้ำเข้าเรือ 100 ตัน



รูปที่ 93 การเคลื่อนย้ายน้ำหนักทางขวาง และผิวน้ำอิสระกระทบกระเทือนความทรงตัวของเรือ



$GG_2 = GG_1 \cos\theta = .274 \cos\theta$

$GG_4 = GG_3 \sin\theta = 1.011 \sin\theta$

รูปที่ 94 การเคลื่อนย้ายของจุดต่าง ๆ เมื่อเวลาเคลื่อนย้ายน้ำหนักทางขวางของเรือ

เกิดทริม Trim $= \dfrac{TM}{MT/1''} = \dfrac{120 \times 102.6}{630} =$ 19.5 นิ้ว

LBP = 383$'$ เปลี่ยนทริมท้าย $= \dfrac{168.9}{383} \times$ 19.5 นิ้ว $= -\ 8.85''$

$\frac{LBP}{2}$	= 191.5	เปลี่ยนทริมหัว = $\frac{214.5}{383} \times 19.5$ นิ้ว = $10.95''$
CF aft O	= $\underline{22.6'}$	<u>กินน้ำลึกครั้งสุดท้าย</u>
CF ot FP	= $\underline{\underline{214.1'}}$	ท้าย = $13' - 6'' + 4.285'' - 88.5'' = 13' - 2''$
CF to AP	= $\underline{\underline{168.9'}}$	หัว = $12' - 0'' + 4.285'' + 10.92'' = 13' - 3''$
LBP	= $383'$	

เมื่อน้ำเข้าเรือ 12 ตัน จะดึงจุดศูนย์ถ่วงของเรือเดิมลงมาอยู่ที่ G'

$$GG' \times \triangle = w \times d$$

$$GG' = \frac{w \times d}{\triangle} = \frac{120 \times (17.6 - 8)}{2954.6 + 120}$$

ผิวน้ำอิสระจะทำให้จุด G ขยับสูงขึ้น

$$= \frac{I}{\nabla} + \frac{A y^2}{\nabla} = 1/12 \text{ x } \frac{15^3 \times 40}{3076.6 \times 35} + \frac{(40 \times 15) \times (7.5)^2}{3076.6 \times 35}$$

เมื่อน้ำเข้าเรือ 120 ตัน ในทางขวางทำให้จุด G เลื่อนไปทางขวาง (Transverse shift) G_1

$$GG_1 = \frac{W \times d}{\triangle} = \frac{120 x 7.5}{3076.6} = 17.65 \text{ ฟุต}$$

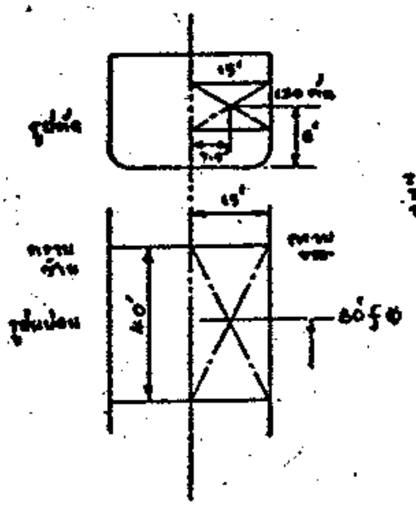
ฉะนั้นจุดศูนย์ถ่วงของเรือครั้งสุดท้าย

KG = 17.6 - 0.37 + 0.42 = 17.65 ฟุต

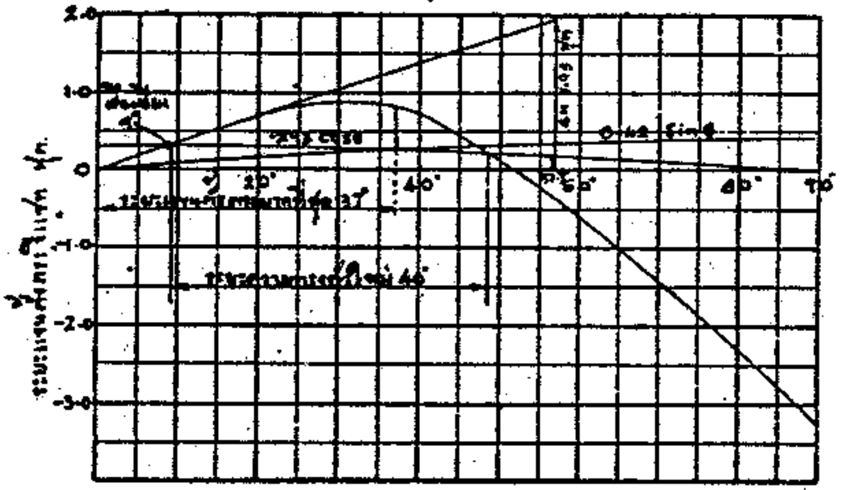
KM จากเส้นโค้งไฮโดรแตติค = $\underline{19.60}$ ฟุต

ความสูงเมตาจีเอ็ม GM = 1.95 ฟุต

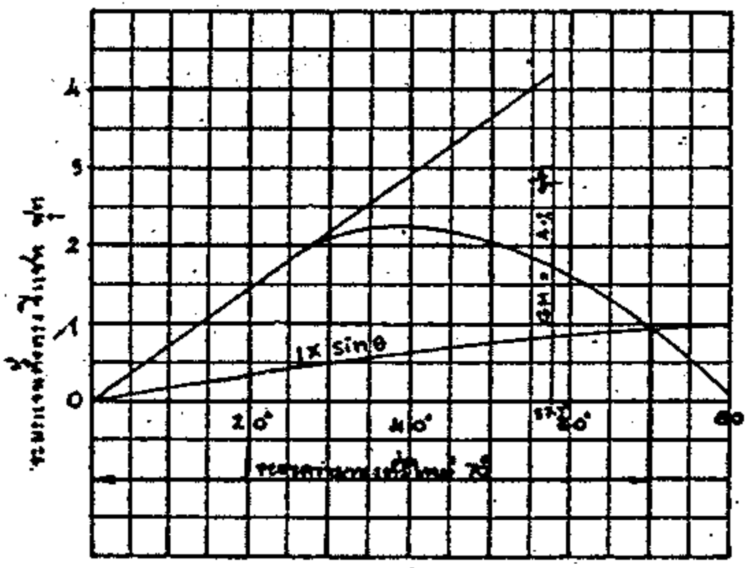
อ่านเมื่อระวางขับน้ำ 3076.6 L.T.S.W. (มือเรือทะลุแล้ว)					
มุมเอียง θ	จากเส้นโค้ง KS = 14🕯	อัตราแก้เป็น - SG Sin θ - 3.6 Sin θ	GZ ของเรือ	ระยะลดเมื่อเคลื่อนน้ำหนัก .293 Cos θ	ระยะลดเมื่อเกิดผิวน้ำอิสระ .42 Sin θ
20°	1.85	- 1.23	.62	.275	.143
40°	3.05	- 2.31	.78	.2233	.27
60°	2.55	- 3.12	- .57	.146	.364
80°	1.15	- 3.54	- 2.39	.051	.41
90°	0.35	- 3.60	- 3.25	0	.42



รูปที่ 95



รูปที่ 96



รูปที่ 97

ผลที่ได้ในตารางนั้นนำไปเขียนเส้นโค้งความทรงตัวดังปรากฏในรูปที่ 96 และอ่านระยะความทรงตัวใหม่ (Range of Stabiliy) ได้ = 40 ดีกรี

ระยะแขนตั้งตรงมากที่สุด Max Righting Arm = 37 ดีกรี

ตัวอย่าง เรือพิฆาต ยูเอส เกียริง DD 710 ยาว 383 ฟุต มีระวางขับน้ำ L.T.S.W. กินน้ำลึกหัวท้ายเท่ากัน (Even Keel) และมีจุดศูนย์ถ่วงเหนือเส้นฐาน KG = 15 ฟุต ให้เขียนเส้นโค้งความทรงตัวสถิตจากเส้นโค้งความทรงตัวคร๊อสเคิฟ โดยให้มีอัตราแก้ผิวน้ำอิสระ (Free Surface Correction)1 ฟุต

วิธีทำ จะเห็นว่าแกนสมมติในเส้นโค้งคร๊อสเคิฟ KS = 14 ฟุต ตามโจทย์กำหนดให้ KG = 15 ฟุต ฉะนั้นจุดศูนย์ถ่วงของเรือจริงสุงกว่าจุดศูนย์ถ่วงสมมติ = 14 – 15 = 1 ฟุต อัตราแก้จะเป็น SG. Sin θ หรือ

$1 \times \text{Sin}\ \theta = \text{Sin}\ \theta$ อัตราแก้สำหรับผิวน้ำอิสระ $1 \times \text{Sin}\ \theta = \text{Sin}\theta$

อ่านเมื่อระวางขับน้ำ 3250 L.T.S.W.				
มุมเอียง $\theta°$	SZ จากเส้นโค้ง	อัตราแก้ Sin θ	GZ ของเรือจริง	อัตราแก้สำหรับผิวน้ำอิสระ Sin θ
20°	1.8	.34	1.46	.34
40°	2.95	.64	2.31	.64
80°	1.09	.985	.105	.985

KM จากเส้นโค้งไฮโดรสแตติค = 19.2 ฟุต

KG ตามโจทย์กำหนด = 15.0 ฟุต

GM = 4.2 ฟุต

แล้วนำไปเขียนเส้นโค้งความทรงตัวสถิต ดังปรากฏในรูปที่ 97 ระยะความทรงตัว

ระยะความทรงตัว (Range) 70 ดีกรี

8.8 กรอสตันเนช เนสตันเนช (GROSS AND NET TONNAGE CALCULATION)

จุดประสงค์ของการคำนวณตันเนช (Tonnage) ก็เพื่อให้ทราบปริมาตรของระวางบรรทุก เพื่อทำการเสียภาษีค่าธรรมเนียมผ่านประตูน้ำ ค่าธรรมเนียมเข้าอู่และค่าธรรมเนียมในการเทียบท่าเป็นต้น

คำว่า ตันเนช นี้ทำความเข้าใจผิดให้แก่ผู้พบปะอยู่เสมอ โดยเอาไปปะปนกับระวางขับน้ำ (Tons Displacement) และน้ำหนักบรรทุก (Dead Weight, Tons) ซึ่งมีหน่วยเป็น 2240 ปอนด์ต่อ 1 ตัน ความจริงในสมัยโบราณใช้ตันเบอเด้น (Tons Burden) มาก่อนตันเนช ซึ่งดูเหมือนก็จะดีแล้ว แต่เหตุใดจึงได้กลับมาใช้คำตันเนชอีกก็ไม่มีใครทราบ ซึ่งเพิ่งใช้เมื่อเร็ว ๆ มานี้ ซึ่งตันเนชนั้นหมายถึงปริมาตรภายในของเรือในหน่วยของ 100 ลูกบาศก์ฟุต ต่อหนึ่งตัน

การที่จะวัดปริมาตรของเรือนั้น จำเป็นต้องจำกัดเสียก่อนว่าจะใช้วัดปริมาตรใต้ดาดฟ้าใดและดาดฟ้านั้นให้ชื่อว่าดาดฟ้าตันเนช (Tonnage Deck)ในเรือซึ่งมีตั้งแต่สามหรือมากกว่าสามดาดฟ้าขึ้นไป ดาดฟ้าตันเนชจะอยู่ที่ดาดฟ้าที่สองนับจากท้องเรือขึ้นไป สำหรับเรือที่มีเพียงสองดาดฟ้าหรือดาดฟ้าเดียว ดาดฟ้าตันเนชคือดาดฟ้าชั้นบนสุด (Uppermost Deck)

ตันเนชทั้งหมด (Total Tonnage, T .T.) คือจำนวนปริมาตรภายใต้ดาดฟ้าตันเนชทั้งหมด ในหน่วยของ 100 ลูกบาศก์ฟุตต่อตัน หรือจะพูดให้ละเอียดลงไปก็คือปริมาตรทั้งหมดภายใต้ดาดฟ้าดังต่อไปนี้.-

1) ปริมาตรใต้ดาดฟ้าตันเนช (The Under- Deck Tonnage)
2) ปริมาตรที่อยู่ในระวางระหว่างดาดฟ้า (The Tween Deck Tonnage)
3) ปริมาตรภายในห้องที่ผนึกน้ำที่อยู่เหนือดาดฟ้าชั้นบนสุด
   (Tonnage of Enclosed Spaces Above Upper Deck)
4) ปริมาตรภายในปากระวางที่ใหญ่เกินกว่าปกติ
   (Excess Volume of Hatchways)

กร๊อสตันเนช (Gross Tonnage, G.T.) คือปริมาตรทั้งหมด (T.T.) เมื่อคิดเป็นตันแล้วหักเสียด้วยปริมาตรที่เพิ่มความปลอดภัยให้แก่เรือ ซึ่งเรียกว่า ตันเนชความปลอดภัย (Exempted Spaces)ซึ่งเรียกว่า ตันเนช ความปลอดภัย

กร๊อสตันเนช = ตันเนชทั้งหมด – ตันเนชความปลอดภัย

G.T. = T.T. Exempted Spaces

ตันเนชความปลอดภัย (Exempted Spaces) คือห้องต่าง ๆ ที่ให้ความปลอดภัยแก่เรือได้แก่

1) ถังอับเฉาท้องเรือ (Ballast Tanks) ของเรือท้องสองชั้น

2) อับเฉาหัว (Forepeak Tank)

3) อับเฉาท้าย (Afterpeak Tank)

4) ห้องที่ติดตั้งเครื่องจักรบางอย่าง เช่นเครื่องทำความเย็น เครื่องไฟฟ้า ฉุกเฉิน ฯลฯ

5) ห้องถือท้าย และเป็นที่พักผ่อนของเจ้าหน้าที่ (Wheel House)

6) ห้องครัว ห้องทำขนมปัง (Cooking And Baking)

7) ห้องดับไอ เช่น ดับไอเครื่องทำความเย็น (Cooking And Baking)

8) ห้องส้วม หรือห้องส่วนตัวของนายทหาร, ลูกเสือ และคนโดยสาร (Closet And Poom)

9) ช่องแสงสว่าง และช่องระบายอากาศ (Light And Air Space, L & A)

10) ช่องทางเดิน (Companion Ways)

ห้องต่าง ๆ ทั้งหมดนี้ให้ความปลอดภัยแก่เรือ อยู่บนดาดฟ้าชั้นบนสุด

เน๊ทตันเนช (Net Tonnage, N.T.) คือกร๊อสตันเนชหักออกเสียด้วยระวางที่เรียกชื่อว่า ตันเนชที่ใช้ในการเดินเรือ (Deducted Space) คือระวางที่ไม่มีประโยชน์ในการหารเงิน (Nonearning Money Spaces) แต่เป็นประโยชน์ในการเดินเรือ

เน๊ทตันเนช = กร๊อสตันเนช – ตันเนชที่ใช้ในการเดินเรือ

N.T. = G.T. – Deducted Spaces

ตันเนชที่ใช้ในการเดินเรือ (Deducted Space) คือห้องที่เป็นประโยชน์ในการเดินเรือ

1) ห้องเครื่องจักร (Manchinery) รวมทั้งถังน้ำมันที่ใช้ (Bimler) (ไม่ใช่น้ำมัน สินค้า Cargo Oil)

2) ห้องกะลาสี (Crew Spaces)

3) ห้องกัปตันเรือ (Captain's Room)

4) ห้องเครื่องจักรถือท้าย (Steering Gear Space)

5) ห้องโซ่ และห้องเครื่องกว้านสมอ (Chain Locker And Capstan or Windlass)

6) ห้องเก็บเชือกเสาเพลาใบ (Boatswain Store)

7) ห้องแผนที่ (Chrt House)

8) ห้องหม้อน้ำ (Boiler Room)

9) ห้องวิทยุ (Radio House)

10) ห้องเก็บใบเฉพาะในเรือใบ (Sail Store)

จึงสรุปเป็นสูตรได้ดังนี้ .-

เน็ทตันเนช = ตันเนชทั้งหมด - ตันเนชความปลอดภัย - ตันเนชใช้ในการเดินเรือ

ตัวอย่าง เรือสินค้าเครื่องจักรไอน้ำลำหนึ่งมีดาดฟ้าดังนี้ ดาดฟ้าใหญ่ ดาดฟ้าเซลเตอร์ มีช่องเปิด (Opening) บนดาดฟ้านี้ และดาดฟ้าโฟคาสเซล หัวเรือสุด และมีช่องเปิดบนดาดฟ้านี้ให้คำนวณตันเนชจากราชการที่ประมาณไว้ดังต่อไปนี้ .-

ความจุภายใต้ดาดฟ้า 5,090 ตัน ความจุในห้องผนึกน้ำที่อยู่ในระหว่างดาดฟ้าตอนหัว 34 ตัน ห้องเสบียงที่ผนึกน้ำในระวางระหว่างดาดฟ้า 36 ตัน ความจุในห้องผนึกน้ำที่อยู่ในระวางระหว่างดาดฟ้าตอนท้าย 109 ตัน ห้องเครื่องหางเสือในระวางระหว่างดาดฟ้าตอนท้าย 25 ตัน ความจุใต้ดาดฟ้าโฟคาสเซิลไม่ผนึกน้ำ 54 ตัน เฮ้าส์ที่ผนึกน้ำอยู่บนดาดฟ้าโฟคาสเซิล 4 ตัน เฮ้าส์บนดาดฟ้าทั้งหมด 282 ตัน (รวมห้องถือท้ายและห้องครัวทหาร) ปากระวางบนดาดฟ้าใหญ่ (Main DK. Hatchchway) 19 ตัน ห้องเครื่องจักรใหญ่ 697 ช่องแสงสว่างและอากาศ L & A 36 และ 54 ตัน ห้องกลางกะลาสีเรือ 350 ตัน ห้องเกี่ยวกับการเดินเรือ (Navigating) 25 ตัน ห้องเชือกเสาเพลาใบ 58 ตัน อับเฉาท้าย 62 ตัน อับเฉาหัว 46 ตันน้ำทะเล จากตัวเลขเหล่านี้ให้คำนวณตันเนชของเรือตามธรรมเนียมของอังกฤษ

วิธีทำ รวมกร๊อสตันเนช ได้ดังนี้ .-

ความจุภายใต้ดาดฟ้า Under DK. .... 5,090 ตัน

ความจุในห้องผนึกน้ำที่อยู่ในระวางกลางตอนหัว

(Closed SPC. Tween DK FWD) (Stores) .... 34 ตัน

ความจุภายในห้องผนึกน้ำที่อยู่ในระวางกลางตอนท้าย

(Ckosed SPC. Tween DK AFT) (Stores) .... 109 ตัน

เฮ้าส์ผนึกน้ำบนดาดฟ้าโฟคาสเซิล Ciosed House IN Fouke .... 4 ตัน

เฮ้าส์บนดาดฟ้าทั้งหมด Totak DK House .... 282 ตัน

ห้องเสบียงที่ผนึกกน้ำในระวางกลาง Closed SPC. Store Room .... 36 ตัน

กร๊อสตันเนช GT. = 5,555 ตัน

ปากระวางดาดฟ้าใหญ่ H.W .... 19 ตัน

$\frac{1}{2}$ % ของ G.T. $\frac{1}{2} \times \frac{1}{100} \times 5555$ .... 27.7 ตัน

แสดงว่าปากระวางดาดฟ้าไม่มากเกินกว่าที่อนุญาตให้ 27.7 ตัน จึงไม่มีส่วนเกินนำไปเพิ่มกับกร๊อสตันเนชที่คิดไว้ แต่ถ้าปากระวางใหญ่เกินกว่า $\frac{1}{2}$ % G.T. ต้องเอาส่วนที่เกินไปบวกกับกร๊อสตันเนชที่คิดไว้

ต่อไปหาตันเนชที่ใช้ในการเดินเรือ (Deduvtible Spaces)

น้ำทะเลถังอับเฉาหัว (Fore Peak S.W.) .... 46 ตัน

ถ้าอับเฉาหัวเป็นน้ำจืดไม่ใช่น้ำทะเล จำนวน 46 ตัน จะเป็นตันเนชความปลอดภายตามธรรมเนียมของอังกฤษ แต่ในที่นี้เป็นน้ำทะเลจึงเป็นตันเนชที่ใช้ในการเดินเรือ

ห้องเครื่องหางเสือในระวางกลางท้ายเรือ

(Steering Gear SPC. IN Tween DK. AFT .... 25 ตัน

ห้องกะลาสีเรือ .... 350 ตัน

ห้องเกี่ยวกับการเดินเรือ .... 25 ตัน

ห้องเชื่อกเสาเพลาใบ (Bosum Store ใช้ 1 % G.T.) 55.55 ตัน

ฉะนั้นตันเนชที่ใช้ในการเดินเรือ DED 501.55

กร๊อสตันเนช GT	=	5555.00	ตัน
ตันเนชที่ใช้ในการเดินเรือ DED	=	510.55	ตัน
x	=	5053.45	ตัน

ที่ให้ว่า x = 5053.45 ตัน นั้น เพราะจะต้องตรวจต่อไป และตอนนี้ยังไม่ใช่เน๊ทตันเนช เพราะตันเนชที่ใช้ในการเดินเรือที่เป็นของห้องเครื่องจักรยังไม่ได้นำมาหัก และการหักก็ไม่เหมือนกับอย่างอื่นต้องนำบริมาตรของห้องเครื่อง (Volume of Engine Room, V.E.R.) กับ G.T. มาเปรียบเทียบกันแล้วดูตัวเกณฑ์ส่วนลดสำหรับเครื่องจักร (Prp[eller {pwer Allpwamce, P.P.A.) หรือ (Deductible For Macju Space) ได้เท่าใด ดูได้ดังต่อไปนี้.-

ตัวเกณฑ์ส่วนลดสำหรับห้องเครื่องจักร

V.E.R. $\times 1\frac{3}{4}$	32 % G .T.	$1\frac{3}{4}$ V.E.R.
	13 %	20 %

ถ้า $\frac{V.E.R.}{G.T.}$ = 13 % ใช้ PPA = V.E.R. $\times \frac{3}{4}$

ถ้า $\frac{V.E.R.}{G.T.}$ อยู่ในระหว่าง 13 % ถึง 20 % ใช้ PPA 32 % F.T.

ถ้า $\frac{V.E.R.}{G.T.}$ มากกว่า 20 % ใช้ P.P.A. $1\frac{3}{4} \times$ V.E.R.

$\therefore$ ตามตัวอย่างนี้ $\frac{V.E.R.}{G.T.} = \frac{697}{5555}$ = 12.5 % V.E.R.

P.P.A. = $1\frac{3}{4}$ V.E.R.

$\therefore$ P.P.A. = 1.75 x 697 = 1220 ตัน

ซึ่งนำไปหักออกจาค่าของ x ที่ได้ไว้

x = 5053.45 ตัน

ส่วนลดสำหรับห้องเครื่องจักร P.P.A. = 1220.00 ตัน

ฉะนั้นเน๊ทตันเนช N.T. = 3833.45 ตัน ตอบ

ตัวอย่าง เรือฟูลสแคนทลิง (Full Acantling Ahip) ลำหนึ่งถูกดัดแปลงเป็นเรือเชลเตอร์เดค (Open Shelter Deck Ship) โดยการทำช่องเปิด (Tonnage Opening) ไว้บนดาดฟ้าใหญ่ และประตูต่าง ๆ ที่อยู่ในระวางระหว่างดาดฟ้า (Tween Deck) ทำให้ผนึกไม่ได้ให้คำนวณเน๊ทตันเนช ก่อนและหลังการดัดแปลงโดยกำหนดให้ตามขนบธรรมเนียมของอเมริกัน

	รายการก่อน ดัดแปลง	รายการหลัง ดัดแปลง
กร๊อสตันเนช	12,000 ตัน	?
บริมาตรของห้องที่อยู่ในระวางระหว่างดาดฟ้า	200,000 ลบ.ฟุต	?
บริมาตรในห้องกะลาสี	50,000 ลบ.ฟุต	50,000 ลบ.ฟุต
บริมาตรในห้องเครื่องจักร	140,000 ลบ.ฟุต	140,00 ลบ.ฟุต
เน๊ทตันเนช ———	?	?

วิธีทำ

ก่อนดัดแปลง

G.T. = 12,000 ตัน

บริมาตรห้องที่อยู่ในระวางหว่างดาดฟ้า = $\frac{200,000}{100}$ = 2,000 ตัน

บริมาตรในห้องกะลาสี = $\frac{50,000}{100}$ = 500 ตัน

บริมาตรในห้องเครื่องจักรใหญ่ = $\frac{140,000}{100}$ = 1,400 ตัน

$\frac{V.E.R.}{G.T.} = \frac{1,400}{12,000}$ = 11.6 % < 13 %

ใช้ตัวเกณฑ์ส่วนลดสำหรับเครื่องจักร = 1 3/4 V.E.R.

= 1.75 x 1,450

= 2,450 ตัน

ฉะนั้นตันเนชที่ใช้ในการเดินเรือ = 500 + 2,450

= 2,950 ตัน

ฉะนั้นเน๊ทตันเนช = 12,000 – 2,950

= 9,050 ตัน <u>ตอบ</u>

หลังดัดแปลง

เมื่อเรือดัดแปลงเป็นเซลเตอร์เดคแล้ว ตามกฎอนุญาตให้บริมาตรห้องที่อยู่ในระวาง ระหว่างดาดฟ้ากลายเป็นตันเนชความปลอดภัยได้ทันที ตามธรรมเนียมของอเมริกัน

∴ กร๊อสตันเนชใหม่ = กร๊อสตันเนชเก่า - ตันเนชความปลอดภัย

= 12,000 -2,000

= 10,000 ตัน

$$\frac{\text{V.E.R}}{\text{กร๊อสตันเนชใหม่}} \quad \frac{1,400}{10,000} = 14\,\% > 13\%$$

∴ ใช้ตัวเกณฑ์ลดส่วยสำหรับเครื่องจักร = 23 %

= 23 % x 10,000

= 3,200 ตัน

∴ ตันเนชที่ใช้ในการเดินเรือทั้งหมด = 3,200 + 500

= 3,700 ตัน

∴ เน๊ทตันเนชใหม่ = 10,000 - 3,700 ต

= 6,300 ตัน <u>ตอบ</u>

8.9 การคำนวณแนวน้ำบรรทุกของเรือ (LOAD LINE CALCULATIONS FREEBOARD CALCULATIONS)

การคำนวณแนวน้ำบรรทุกเต็มที่ของเรือนั้นหาได้จากทำการคำนวณระยะฟรีบอร์ด ซึ่งเป็นระยะที่ดาดฟ้าฟรีบอร์ดห่างจากแนวน้ำบรรทุกเต็มที่เท่าใด ระยะฟรีบอร์ดเป็นสิ่งที่ใช้วัด เกี่ยวกับเรื่องความปลอดภัยของเรือ ในสมัยก่อนวิธีทำไม่สู้จะตรงกันนัก ในระหว่างประเทศหนึ่ง ๆ มาปัจจุบันนี้ได้มีแบบฟอร์มเกิดขึ้น และมีหลักเหมือน ๆ กันทั้งในอังกฤษและอเมริกา ข้อบังคับในการคิดแนวน้ำบรรทุกหรือฟรีบอร์ดนี้ ใน สรอ. ได้จัดพิมพ์ขึ้นโดย เทรเชอรี่ดีพาทเมนท์ ยู ในเตทสเตท โคสการ์ด (Treasury Department, United States Coast Guard) เรียกชื่อว่ากฎการคำนวณแนวน้ำบรรทุก (Load Line Regulation) กฎข้องบังคับนี้ควบคุมไปถึงบรรดาเรือต่าง ๆ ทั้งที่วิ่งอยู่ในและนอกประเทศ เรือที่วิ่งอยู่นอกประเทศได้แก่เรือเครื่องไอน้ำ (Steamers) เรือใบ (Sailing Ships) เรือเครื่องไดน้ำบรรทุกไม้บนดาดฟ้า (Steamer Carrying Timber Deck Cargo) เรือบรรทุกน้ำมัน (Tankers) ส่วนเรือที่เดินอยู่ในประเทศหรือตามชายฝั่งได้แก่เรือเครื่องจักรไอน้ำบรรทุกถ่านหิน (Steamer Colliers) เรือจูง (Tugs) เรือดัน (Tower Barges) และเรือบาชที่มีเครื่องวิ่งได้เอง (Self Propelled Barges)ในการคำนวณแนวน้ำบรรทุกของเรือชนิดต่าง ๆ ที่กล่าวมานั้นมีหลักเหมือนกันหมด

ประการแรกต้องทำการคำนวณแนวน้ำบรรทุกเขตอากาศร้อน (หรือ) เสียก่อน ต่อไปก็หาแนวน้ำบรรทุกเขตอากาศอื่น ๆ (Seasonal & Zonal Draft) ต่อไปได้ โดยแความผิดเล็กน้อย ๆ

ในการคำนวณนั้น เราถือเรือมาตรฐานเป็นหลักแล้วแก้ความผิดเอาจากมาตรฐานเพื่อหาสิ่งที่เราต้องการให้แก่เรือลำใหม่ของเรา เรือมาตรฐานนั้นมีรายการต่าง ๆ ดังนี้ .-

1) มีสัมประสิทธิ์แห่งตัน 0.68 (Block) เมื่อกินน้ำลึก 85 % ของความลึกเส้นขอบ (Mld. Depth)

2) เรโชของความยาว (Length) กับความลึกเส้นขอบ (Depth) = 15 หรือ L/D = 15

3) ความนูนดาดฟ้า (Camber) = 1/50 ของความกว้างเส้นขอบ (Beam)

4) ความงอนของดาดฟ้าฟรีบอร์ดที่กราบเรือ (Sheer of Freeboard Deck @ Side) ต้องเป็นไปตามที่ให้ไว้ในตารางที่ 10 ซึ่งเรียกว่าความงอน

มาตร ฐาน (Standard Sheer)

ตารางที่ 10

ตารางความงอนมาตรฐาน (Standard Sheer)		
รอยตัดต่าง ๆ STATIONS	ระยะออร์ดิเนต ความงอน ORDINATES	ตัวคูณซิมสัน MULTIPLIERS
A.P.	0.1 L + 10	1
1/6 L จาก A.P.	0.0445 L + 4.45	4
1/3 L จาก A.P.	0.011 L + 1.1	2
⊗	0	4
1/3 L จาก F.P.	0.022 L + 2.2	2
1/6 L จาก F.P.	0.089 L + 8.9	4
F.P.	0.2 L + 20	1

5) เรือตามมาตรฐานชนิดเครื่องไอน้ำนั้น มีฟรีบอร์ดเขตอากาศร้อนน้อยที่สุด (Basic Minimum Summer Freeboard For Steamers) มากน้อยเปลี่ยนแปลงไปตามความยาวของเรือ ตามตารางที่ 11

6) เป็นเรือที่มีซูเปอร์สตรัคเจอร์ตลอดลำ (Complete Superstructure) เรือที่มีซูเปอร์สตรัคเจอร์ตลอดลำหรือพูดว่ามีความยาวของซูเปอร์สตรัคเจอร์ประ สิทธิผล () เท่ากับ 1.0 L นั้นมีส่วนที่จะลดปรีบอร์คได้ดังนี้ .-

เรือยาว 80 ฟุต ลดได้ 14 นิ้ว

เรือยาว 280 ฟุต ลดได้ 34 นิ้ว

เรือยาว 400 ฟุต ลดได้ 42 นิ้ว

ตารางที่ 11

80	8.0		420	77.8
90	9.0		430	80.9
100	10.0		440	84.0
110	11.0		450	87.1
120	12.0		460	90.2
130	13.0		470	93.3
140	14.2		480	96.3
150	15.5		490	99.3
160	16.9		500	102.3
170	18.3		510	105.2
180	19.8		520	108.1
190	20.0		530	110.9
200	23.1		540	113.7
210	24.8		550	116.4
220	26.6		560	119.1
230	28.5		570	121.8
240	30.3		580	124.4
250	32.3		590	127.0
260	34.4		600	129.5
270	36.5		610	132.0
280	38.7		620	134.4
290	41.0		630	136.8
300	43.4		640	139.1
310	45.9		50	141.4
320	48.4		660	143.7
330	51.0		670	145.9
340	53.7		680	148.1
350	56.5		690	150.2
360	59.4		700	152.3
370	62.4		710	154.4
380	65.4		720	156.3
390	68.4		730	158.5
400	71.5		740	160.5
410	74.6		750	162.5

ความยาวอื่น ๆ หาส่วนลดโดยใช้วิธีอินเตอร์โปเลชัน ถ้าเรือใดมีความยาวซูเปอร์สตรัคเจอร์ไม่ตลอดลำ (Partial Superstructure) จะมีอัตราส่วนลดฟรีบอร์ดตามเปอร์เซ็นต์ดัง ตาราที่ 12

ตารางที่ 12

ซูเปอร์สตรัคเจอร์	0	0.1L	0.2L	0.3L	0.4L	0.5L	0.6L	0.7L	0.8L	0.9L	1.0L
ของเรือทุกชนิดที่มีโฟคาสเซิล และมีมีสะพานทอดจากโฟคาสเซิลถึงบริช	% 0	% 5	% 10	% 15	% 23.5	% 32	% 46	% 63	% 75.3	% 87.7	% 100
ของเรือทุกชนิดที่มีโฟคาสเซิล และมีสะพานทอดจากโฟคาสเซิลถึงบริช	0	6.3	12.7	19	27.5	36	46	63	75.3	87.7	100

ตัวอย่าง เรือเครื่องจักรไอน้ำ (Steamer) ลำหนึ่งมีความยาว 460 ฟุต ความกว้าง 60′– 10″ ความลึก 38.06 ฟุต ความนูนดาดฟ้า 15.25 นิ้ว ระวางขับน้ำ เมื่อเรือกินน้ำลึก 32.30 ฟุต เท่ากับ 17,500 ตันความยาวของซูเปอร์สตรัคเจอร์ (Length of Superstructure) มีดังนี้โฟคาสเซิล (Foc′ lc) ยาว 35 ฟุต บริช (Brdg) 100 ฟุต ปู๊ป (Poop) ยาว 50 ฟุต ความงอนของเรือจริง ๆ (Actual Sheer) มีดังนี้ .-

		AP	=	50″
1/6 L	จาก	AP	=	22.50″
1/3 L	จาก	AP	=	5.00″
		⊗	=	0
1/3 L	จาก	FP	=	11″
1/6 L	จาก	FP	=	45.00″
		FP	=	100″

ให้คำนวณระยะฟรีบอร์ดของเรือลำนี้ .-

วิธีทำ ชั้นที่ 1 คำนวณอัตราแก้สัมประสิทธิ์แท่งตัน (Coefficient Correction, C_b)

หาสัมประสิทธิ์แท่งตัน $C_b = \dfrac{35\times\Delta}{LBH} = \dfrac{17{,}500 \text{ ตัน} + 35\dfrac{\text{ลบ.ฟุต}}{\text{ตัน}}}{460\times 60.83\times 32.30}$

$= 0.68$

ฉะนั้นเรือลำนี้มีสัมประสิทธิ์แท่งตันเท่ากับเรือมาตราฐาน จึงไม่ต้องมีการแก้ว เพราะเท่ากับ 1 พอดี ดูการคำนวณข้างล่าง และถ้าสัมประสิทธิ์แท่งตันที่ได้นี้น้อยกว่า 0.68 ก็ไม่ต้องแก้เหมือนกัน จะมีการแก้ก็ต่อเมื่อสัมประสิทธิ์แท่งตันได้นี้มากกว่า 0.68 เท่านั้น

สูตร อัตราแก้สัมประสิทธิ์แท่งตัน $= \dfrac{Cb + .68}{1.36} = \dfrac{.68 + .68}{1.36} = 1.0$

เปิดหาระยะฟรีบอร์ดเขตอากาศร้อนจากตารางของเรือเครื่องจักรไอน้ำในตารางที่ 11 ที่เรือยาว 460 ฟุต จะได้ระยะฟรีบอร์ดน้อยที่สุดเท่ากับ 90.2 นิ้ว เมื่อเอาอัตราแก้สัมประสิทธิ์แท่งตันมาแก้แล้วจะได้ 90.2 × 1 = 90.2 นิ้ว ซึ่งเท่าเดิม เพราะอัตราแก้เทากับ 1.0

ขอให้สังเกตดูว่าการแก้ของสัมประสิทธิ์แท่งตันนี้ไม่เหมือนกับใครคือคูณ นอกนั้นใช้บวกกับลบและต้องทำในโอกาสแรกที่ได้ระยะฟรีบอร์ดน้อยที่สุ มาจากตาราง

ชั้นที่ 2 คำนวณอัตราแก้ความลึกของเรือ (Depth Correction) สูตรอัตราแก้

ความลึกของเรือ $= \left(D - \dfrac{L}{15}\right) R$

D = ความลึกของเรือที่ใช้คำนวณฟรีบอร์ด (Actual Freeboard Fepth)

L = ความยาวของเรือ (Length of Ship)

ถ้า $L > 390$ ใช้ $R = 3$

ถ้า $L < 390$ ใช้ $R = \dfrac{L}{130}$

ฉะนั้น อัตราแก้ความลึกเท่ากับ (นิ้ว $38.06 - \dfrac{460}{15} x\, 3 = 22.20$ นิ้ว

การที่จะดูว่าเป็นบวกหรือลบให้ดู

ถ้า D (ของเรือจริง) $> \dfrac{L}{15}$ อัตราแก้เป็น +

ถ้า D (ของเรือจริง) $< \dfrac{L}{15}$ อัตราแก้เป็น -

$\therefore$ อัตรามาแก้ความลึกในตอนนี้เป็น + 22.20 นิ้ว

ขั้นที่ 3 คำนวณอัตราแก้ซูเปอร์สตรัคเจอร์ (Superstructure Correction)

โฟคาสเซิล	FOC LE	ยาว	35	ฟุต	ความยาวของซูเปอร์สตรัคเจอร์ (Length of dSuperstructure)
บริช	BRDG	ยาว	100	ฟุต	
ปู๊ป	POOP	ยาว	50	ฟุต	
	รวม	185	ฟุต		

สมมติว่าในห้องโฟคาสวเซิล บริช และปู๊ปนั้นมีประตูปิด (Closing Appliances) อย่างแน่นหนาชนิดผนึกน้ำได้ ฉะนั้นความยาวซูเปอร์สตรัคเจอร์นี้จึงได้ประสิทธิผล 100 เปอร์เซ็นต์ (ถ้าการผนึกน้ำไม่ดี ก็ประสิทธิผลไม่ได้ 100 % จะเป็นเท่าใดนั้น ต้องทำการศึกษาต่อไปอีก ซึ่งไม่สามารถกล่าวละเอียดในหนังสือนี้ได้)

ฉะนั้น ความยาวประสิทธิผล (Effective Length, E) = S = 185 ฟุต

$$\therefore \frac{E}{L} = \frac{185}{460} \times 100 = 40\ \% \quad \text{หรือ} \quad 0.4\ L$$

ฉะนั้น เรือลำนี้มีความยาวซูเปอร์สตรัคเจอร์ประสิทธิผล (Effective Length) 0.4 Lจึงมีอัตราส่วนลดฟรีบอร์ดได้เยง 27.5 % ซึ่งได้มาจากฎข้อ 6 ของเรือมาตรฐาน

เรือนี้ซึ่งยาว 460 ฟุต มีอัตราส่วนลดฟรีบอร์ด 42 นิ้ว เมื่อความยาวซูเปอร์สครัคเจอร์ประสิทธิผล 1.0 L แต่เรือนี้มีความยาวซูเปอร์สตรัคเจอร์ประสิทธิผล 0.4 L จึงมีอัตราส่วนลดฟรีบอร์ด = 27.5% ของ 42 นิ้ว = - 121.55 นิ้วเท่านั้น

ฉะนั้น อัตราส่วนลดฟรีบอร์ดเนื่องจากมีซูเปอร์สตรัคเจอร์ไม่ตลอดลำ = - 11.55 นิ้ว

ขั้นที่ 4 คำนวณอัตราแก้ความงอนของดาดฟ้า (Sheer Correction) ก่อนอื่นหาความงอนมาตรฐาน (Standard Sheer) แล้วเปรียบเทียบกับความงอนดาดฟ้าของเรื่อจริง (Actual Sheer)

รอยตัดต่าง ๆ STA.	สูตรความงอน มาตราฐาน Standard Sheer	ออร์ดิเนตความงอนมาตรฐาน Standard Sheer	ตัวคูณซิมสัน SM	ฟังชันออร์ดิเนตความงอนมาตรฐาน (S)	ออร์ดิเนตความงอนจริง Actual Sheer	ฟังชันออร์ดิเนตความงอน (S)
AP	.1 L + 10	56	1	56	50	50.00
$\frac{1}{6}$ L From AP	.0445L + 4.45	24.92	4	99.68	22.50	90.00
$\frac{1}{3}$ L From AP	0.011L + 1.1	6.16	2	12.32	5.00	10.
⊠	0	0	4	0	0	0
$\frac{1}{3}$ L From FP	0.022L + 2.2	12.32	2	24.64	11	22
$\frac{1}{6}$ L From FP	0.089 + 8.9	49.84	4	199.36	45	180
FP	0 2L + 20	112.0	1	112.00	100	100.00
			18	504.00		452.00
				28.00		25.12

$\therefore$ d , ความงอนเฉลี่ย (Mean Sheer) ต่างกัน 28.00 – 25.12

= 2.88 นิ้ว

สูตรอัตราแก้ความงอนดาดาฟ้า $= d\left(.75 - \frac{S}{2L}\right)$

$$= 2.88 \times \left(.75 - \frac{185}{2 \times 460}\right)$$

$$= 2.88 \times 0.55 = 1.58''$$

ถ้าความงอนมาตรฐาน > ความงอนจริง อัตราแก้เป็น +

ถ้าความงอนมาตรฐาน < ความงอนจริง อัตราแก้เป็น -

ที่นี้ความงอนจริง < ความงอนมาตรฐาน อัตราแก้เป็น + 1.58"

ขั้นที่ 5 คำนวณอัตราแก้ความนูนดาดฟ้า (Camder Correction)

ความนูนดาดฟ้ามาตรฐาน Standard Camber = $\frac{\text{บีมของเรือเป็นนิ้ว}}{50}$

$= \frac{60.89 x 12}{50}$ = 14.60 นิ้ว

ความนูนดาดฟ้าจริงของเรือ Actual Camber = 15.25 นิ้ว

ผลต่าง = 0.65 นิ้ว

สูตรอัตราแก้ความนูนดาดฟ้า =

$\frac{\text{ผลต่าง}}{4} \times \left(\frac{\text{ความยาวของเรือที่ไม่ถูกปกคลุมด้วยซูเปอร์สตรัคเจอร์}}{\text{ความยาวของเรือ}} \right)$

$= \frac{5.65}{4} \times \left(\frac{460 - 185}{460} \right)$

= 0.10"

ความนูนมาตรฐาน	>	ความนูนจริง	อัตราแก้เป็น +
ความนูนมาตรฐาน	<	ความนูนจริง	อัตราแก้เป็น -

∴ อัตราแก้ความนูนดาดฟ้า = -0.10"

รวมอัตราแก้ของฟรีบอร์ดทั้งหมด

1. อัตราแก้ความลึกของเรือ = 22.20 นิ้ว
2. อัตราแก้ซูเปอร์สตรัคเจอร์ = 11.50 นิ้ว
3. อัตราแก้ความงอนดาดฟ้า = 1.58 นิ้ว
4. อัตราแก้ความนูนดาดฟ้า = - 0.10 นิ้ว

= 12.13 นิ้ว

ระยะฟรีบอร์ดที่แก้สัมประสิทธิแท่งตันแล้ว = 90.20 นิ้ว

อัตราแก้ทั้งหมด = 12.13 +

ฉะนั้นฟรีบอร์ดที่น้อยที่สุดในเขตอากาศร้อน = 102.33

= 8' - 6 3/8"

∴ กินน้ำลึกเต็มที่เมื่อลอยลำอยู่ในที่เขตอากาศร้อน =

ความลึกของเรือ - ฟรีบอร์ดที่น้อยที่สุดในเขตอากาศร้อน

= (38' 3/4 ") - (8' 6 3/8")

= 29' 6 3/8"

= 29.53'

ชั้นที่ 6 อัตราแก้แนวน้ำในเขตอากาศต่าง ๆ (Zeasonal And Zonal Correction)

เขตฤดูหนาว (Winter, W.) $= \frac{29.53}{4}$ (ฟุต)

= - 7.38" = 7 1/4 "

เขตอบอุ่น (Tropical , T.) $= \frac{29.53}{4}$ = 7 1/4 "

เขตน้ำจืด (Fresh Water, F.) $= \frac{29.53}{4}$ = 7 1/4 "

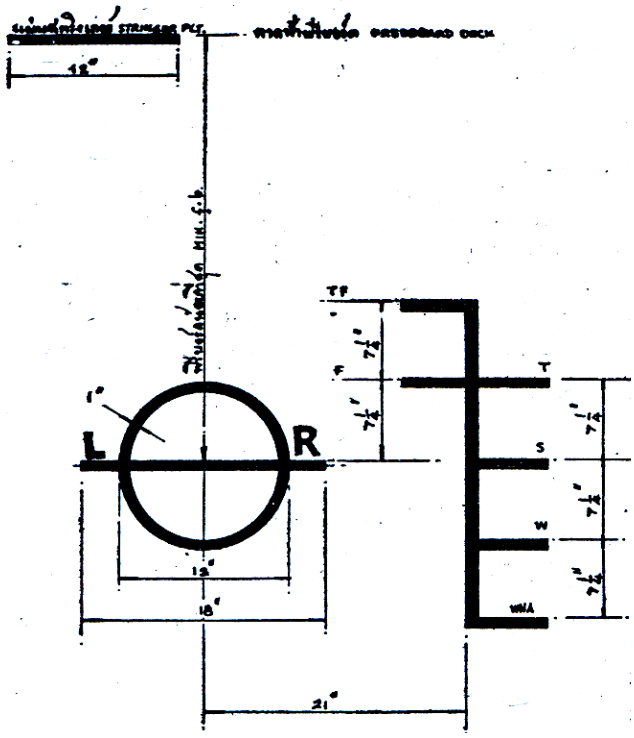
เขตอบอุ่น – น้ำจืด (Trpical Fresh Water, TF.) = 7 1/4 " + 7 1/4 " = 14 1/4 "

เขตทะเลแอตแลนติค (Winter North Atiantic) เขตฤดูร้อน ทั้งนี้เพราะเรือยาวกว่า 330 ฟุต

แนวน้ำบรรทุกในเขตต่าง ๆ

เขตร้อน	8' – 6 3/8"	29' – 6 3/8"
เขตหนาว	9'- 1 5/8"	28′ - 11 1/8"
เขตอบอุ่น	7'– 11 1/8"	30' – 1 5/8"
เตน้ำจืด	7' – 11 1/8"	30'– 1 5/8"
เขตอบอุ่น - น้ำจืด	7' –3 7/8"	30'– 8 7/8"

แล้วนำไปเขียนเครื่องหมายที่ข้างเรือ เรียกว่าเครื่องหมายปริมซัล ดูรูปที่ 98



รูปที่ 98 การคำนวณแนวน้ำบรรทุก (LOAD LINE CALCULATION) ในเขตอากาศต่าง ๆ และการเขียนเครื่องหมายปริมซัล (PLYMSOLL MARK) วิธีเขียนต้องตอกตัวเรือให้เป็นรอย แล้วทาสี

8.10 หางเสือ, การทดลองความเร็ว

เมื่อเรือเคลื่อนไปข้างหน้า หางเสือทำหน้าที่บังคับเรือให้ตรง หรือหันหัวเรือไปทางขวา หรือทางซ้าย การบังคับหางเสือเช่นนั้นทำให้หางเสือเรือต้านทานน้ำและเกิดแรงกดบนหางเสือนั้น แรงจำนวนนี้ต้องทำการคำนวณให้ได้ตลอดทั้งตำแหน่งที่แรงกระทำด้วยเพื่อ

ก) กำหนดขนาดของเครื่องถือท้าย (Zteering Gear) ได้ถูกต้อง ในการที่ จะส่งกำลับบิดหรือหมุนหางเสือได้เพียงพอ

ข) กำหนดขนาดเนื้อที่ของหางเสือ ก้านหางเสือ (Rudder Stock) และปิ้นร้อยหางเสือ (Pintle) ให้มีขนาดโตเพียงพอ

1. แรงที่กระทำบนพื้นที่ราบ เพื่อให้เข้าใจถึงแรงต่าง ๆ ที่กระทำบนหางเสือเรือ จำเป็นจะต้องนำตัวอย่างพื้นที่ราบแบนธรรมดามากล่าว ตามในรูปที่ 99 เป็นแผ่นเหล็กหางเสือธรรมดาอยู่ในน้ำหักเป็นมุมกับทิศทางของน้ำไหล θ ดีกรี ทางด้านหลังของแผ่นหางเสือนั้น กระแสน้ำไหลไปไม่ถึงและจะเกิดกระแสน้ำวนหรือการไหลไม่เป็นระเบียบ (Turbulent Flow) ผลที่เกิดขึ้นคือกำลังกด (Pressure) จะเกิดทางตอนหน้าของหางเสือนี้ ส่วนด้านหลังจะเกิดกำลังดูด (Suction) แรงกดทั้งหมดที่กระทำบนหางเสือนี้จึงเท่ากับผลบวกของกำลังดูดทั้งสองที่กล่าวมาแล้ว

แรงรวม (Resultant Force), F นั้นไม่ใช่ทิศทางของกระแสน้ำที่ไหลเสมอไปและสามารถแยกออกได้สองแรงคือ แรงตั้งฉากกับด้านหน้าหางเสือ (Normal Force), Q และแรงขนานกับด้านหน้าหางเสือ (Parallel Force), D

นักปราชญ์หลายท่านได้ทำการทดลองพบว่าแรงตั้งฉาก Q นี้ เปลี่ยนไปไม่ใช่เฉพาะมุมหางเสือ θ ที่เปลี่ยนไปเท่านั้น หากแต่ขึ้นอยู่กับแฟกเตอร์ต่อไปนี้.-

ก) เนื้อที่ของหางเสือ

ข) รูปร่างลักษณะของหารเสือ

ค) ความเร็วของกระแสน้ำที่ผ่านหางเสือ กำลังสอง

ง) ความแน่นของน้ำ

สำหรับหางเสือรูปร่างเป็นแผ่นเหล็กธรรมดาที่หักทำมุม 90 ดีกรี กับกระแสน้ำที่ไหลผ่านหางเสือ จะเกิดแรงตั้งฉาก Q ดังนี้.-

$$Q = K_1.P.A.V^2. \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (1)$$

k_1. เป็นตัวประจำขึ้นอยู่กับมุมหางเสือ θ กับรูปร่างหางเสือ

ในรูปที่ 100 เป็นตัวอย่างการเขียนเส้นโค้งค่าประจำ k_1. ซึ่งเปลี่ยนไปตามมุมหางเสือตอนมุมหางเสือน้อย ๆ เช่น a ดีกรีนั้น ค่าของ k_1 เปลี่ยนค่อนข้างเป็นปฏิภาคกับมุมหางเสือ ครั้นมุมหางเสือมากขึ้นเป็น B ดีกรี k_1 ค่างของ จะเริ่มตก เรียกว่า สตอลของหางเสือ (Stalling)

ค่าของมุมหางเสือ a ดีกรีนี้ขึ้นอยู่กับรูปร่างของหางเสือ และโดยเฉพาะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนแอสเปค (Aspect Ratio) ซึ่งเป็นอัตราส่วนของด้านตั้ง (Length) กับด้านนอน (Breadth) ของหางเสือในที่นี้คือ AB รูปที่ 99 หางเสือเรือรบมักทำมุมหันหางเสือมากที่สุด 35 ดีกรี

จากสมการ (1) ที่กล่าวมาแล้วอาจเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$Q = K'.A.V^2 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (2)$$

or

$$Q = K.A.V^2\,\theta \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (3)$$

k' , k เป็นตัวประจำของรูปร่างหางเสือ

ท่าน อาร์. อี. ฟรู๊ด (R.E. Froude) ได้กำหนดค่า ในสมการ (2) ดังปรากฏ ในตาราต่อไปนี้ ในเมื่อแรง Q เป็นปอนด์ A เป็นเนื้อที่ ตร.ฟุต ความเร็ว V เป็นฟุตต่อวินาที และมุมหางเสือ θ เป็นเดียน

ตารางที่ 13

อัตราส่วนเอสเปค Aspectratio	10	15	20	30	40
½ ตื้น – กว้าง	.035	0.46	0.70	1.25	1.28
1 สี่เหลี่ยมจตุรัส	0.43	0.66	0.93	1.32	1.51
2 ลึก - แคบ	0.54	0.85	0.92	0.85	0.93

2. จุดศูนย์กลางความกด (Center of Pressure)

จุดศูนย์กลางความกดเป็นจุดอยู่บนหางเสือเป็นตำแหน่งที่แรงรวม กระทำอยู่บนหางเสือนั้น จุดนี้ไม่อยู่ไปทางท้ายเรือเกินไปเหมือนจุดศูนย์กลางความถ่วง – เนื้อที่หางเสือ (Center of Gravity) เพราะเหตุว่าขอบนำของหางเสือได้รับแรงกดมากกว่าขอบตาม

จุดศูนย์กลางความกดจะอยู่ประมาณ 0.2 เท่าของความกว้างหรือด้านนอนของหางเสือ โดยนับจากขอบนำไปทางท้ายเรือ ทั้งนี้เมื่อหางเสือหันไปเพียง 1 หรือ 2 ดีกรีเท่านั้น แต่ถ้ามุมหัน θ มากขึ้น จุดศูนย์ความกดจะเลื่อนไปทางท้ายเรือ สำหรับหางเสือเป็นรูปสี่เหลี่ยมจตุรัส แผ่นเหล็กธรรมดา จุดนี้อยู่ที่ 0.4 ของความกว้างเมื่อมุมหัน 15° และ 0.40 เท่าของความกว้างเมื่อมุมหัน 30 ตัวเกณฑ์นี้ท่านอาร์.อี.ฟรู๊ด กำหนดให้ ท่านจัสเสล (Jpessel) ได้ประดิษฐ์สูตรเอมไพลิกัล สำหรับหาจุดศูนย์กลางความกดห่างจากขอบนำดังต่อไปนี้ .-

$$0.195 + 0.305 \text{ Sin } \theta$$

3. แรงกระทำบนหางเสือ และจุดศูนย์กลางความกด

แรงตั้งฉากกับหางเสือ Q ที่ท่าน อาร์. ดับบลิว. แอลกอน (Gawm) ได้กำหนดไว้ให้นั้น Q เป็นปอนด์ A เป็นเนื้อที่หางเสือเป็น ตร.ฟุต เป็นความเร็วเรือฟุตต่อวินาที และ θ เป็นมุมหันหางเสือ ดีกรี สำหรับหางเสือใบเดียวที่อยู่กลางลำ ในเรือ 2 ใบจักร

$$Q = 0.030 \text{ A V}^2 \theta$$

สำหรับหางเสือสองใบที่อยู่หลังใบจักรในเรือ 2 ใบจักร

เรือเดินหน้า $= 0.041 \text{ A V}^2 \theta$

เรือถอยหลัง $= 0.037 \text{ A V}^2 \theta$

สำหรับหางเสือ 1 ใบอยู่กึ่งกลางลำในเรือใบจักรเดียว

$$Q = 0.035 \theta$$

จุดศูนย์กลางความกดนั้น ท่านอาร์.ดับบลิว.แอล กอน ได้ให้ไว้ดังนี้ หางเสือรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า จุดศูนย์กลางความกด 0.35 ของความกว้างของหางเสือ นับจากขอบนำไปทางท้าย ถ้าหางเสือนั้นอยู่ข้างหลังคลีบ (Fin) เช่นคลีบที่ทวนรับเพลาใบจักร คลีบนี้ทำเป็นรูปตัววีดังในรูปที่ 101 ถ้าข้างหน้าของหางเสือไม่มีอะไรอยู่ชิดเหมือนในรูปที่ 102 จุดศูนย์กลางความกดจะอยู่ที่ 0.31 ของความกว้างหางเสือ เวลาเรือเดินถอยหลัง ใช้ 0.31 ทั้งสองกรณีที่กล่าวมาแล้ว และขอบนำก็กลายเป็นขอบตามไป

4. แรงบิดหางเสือ และหางเสือสมดุลย์ (Rudder Torques And Balanced Rudders)

ผลคูณของแรงตั้งฉาก Q ที่กระทำบนหางเสือกับระยะทางจุดศูนย์กลางความกดห่างจากขอบนำนั้น เรียกแรงบิด (Net Torque) ซึ่งเครื่องถือท้ายจะเป็นผู้ทำการส่งกำลังให้ในการที่จะให้ได้แรงบิดหางเสือมากที่สุดพิจารณาแฟกเตอร์ลองประการต่อไปนี้.-

ก) การสูญเสียความฝืด อันเนื่องจากแบริ่ง และปิ้นร้อยหางเสือ ฯลฯ

ข) การคิดแรงบิดหางเสือมากที่สุดต้องคิดเมื่อเรือถอยหลังเต็มที่ และมุมหันมากที่สุด

การคำนวณอย่างนี้จะทำให้ได้ก้านหางเสือและปิ้นร้อยหางเสือใหญ่โตมาก ถ้าหางเสือนั้นเป็นแบบไม่สมดุลย์ (Unbalanced Rudder) คือเนื้อที่ทั้งหมดอยู่ภาคท้ายของแกนหมุมหรือก้านหางเสือทั้งสิ้น การที่จะลดแรงบิดหางเสือลงนั้นในเรือที่มีความเร็วสูงใช้หางเสือแบบสมดุลย์ (Balanced Rudder) คือหางเสือส่วนหนึ่งของหางเสือทั้งหมดอยู่ข้างหน้าของแกนหมุน หรือก้านหางเสือ ในการออกแบบนั้นต้องออกแบบให้จุดศูนย์กลางความกดอยู่ไปทางหน้าแกนหมุน หรือก้านหางเสือเล็กน้อย เมื่อหางเสือมีมุมหันเล็กน้อย จุดศูนย์กลางความกดจะเลื่อนไปทางท้ายเรือเอง เมื่อมุมหันสูงขึ้น และจะไปอยู่หลังหรือท้ายแกนหมุนเมือมุมหัน 8° ถึง 15° ไปจนถึง 35° ทั้งนี้หมายความว่า

ก) เครื่องหางเสือต้องทำการขืนหางเสือ แทนที่จะใช้แรงบิดหันหางเสือเมื่อมุมหันน้อย ๆ

ข) หางเสือพยายามเลี้ยงตัวเองเมื่อมุมหันมากถึงจำนวนหนึ่ง นั่นคือจุดศูนย์กลางความกด เคลื่อนตัวไปทางท้ายเรือและมาหยุดอยู่ที่แกนหมุนหรือก้านหางเสือ

ข) ระยะห่างของจุดศูนย์กลางความกดจากแกนหมุนเมื่อมุมหัน 35° น้อยกว่านั่นคือ จะใช้เครื่องหางเสือเล็กลงได้

5. ขนาดของก้านหางเสือ (Diameter of Rudder Stock)

ตามในรูปที่ 103 เป็นหางเสือสมดุลย์ ไม่มีส่วนรองรับตอนล่างหางเสือ หรือเรียกว่าหางเสือสเปด (Spade Rudder) เป็นหางเสือที่ไม่แต่จะได้รับแรงบิด (Torque) อย่างเดียว หากแต่ยังได้รับโมเมนท์ดัดอีกด้วย (Bending Moment)

ถ้าแรงบิดหางเสือ (Tprqie)	=	T	ตัน – นิ้ว
ขนาดก้านหางเสือ	=	d	นิ้ว
แรงเค้นมากที่สุด	=	f	ตันต่อ ตร. นิ้ว

$$T = 1/16\ \pi\ fd^3$$

เลือกหาเส้นผ่าศูนย์กลางก้านหางเสือ เพื่อให้ได้แรงเค้นภายในความปลอดภัยเช่น 5 ตันต่อ ตร. นิ้วของเหล็กแคสสตีล

ตัวอย่าง เรือลำหนึ่งมีเนื้อที่หางเสือเรือ 243 ตร. ฟุต จุดศูนย์กลางความกดประมาณ 6.12 ฟุต ไปทางท้ายของก้านหางเสือเมื่อมุมหันของหางเสือ 35 ดีกรี ถ้าเรือนี้มีความเร็ว 19 นอต และหางเสือนี้อยู่ที่กึ่งกลางลำมีใบเดียว ในเรือสองใบจักร ให้คำนวณหาขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางก้านหางเสือ ใช้โลหะคสสตีลโมเมนท์ดัดไม่ต้องคิด

วิธีทำ

แรงตั้งฉากกับหางเสือ Q $= 0.03\ A V^2 \theta$

$= 0.03 \times 243 \times (19x \frac{6080}{3600}) \times 35$ ปอนด์

Q = 117.3 ตัน

แรงบิดหางเสือ (Torque or Twisting Moment)

= แรงตั้งฉากกับหางเสือ ระยะศูนย์กลางความกดถึงก้านหางเสือ

= $117.3 \times 6.12 \times 12$ ตัน – นิ้ว

ฉะนั้น $T = 1/16\ \pi\ fd^3 = 117.3\ x\ 6.12\ x\ 12$

$$d = \frac{3\sqrt{117.3x\,6.12x\,12x\,12x\,16^{1}\hat{O}\acute{e}}}{\pi\ f}$$

ใช้แรงเค้นปลอดภัย f = 5 ตันต่อ ๕

$$d = \frac{3\sqrt{117.3x\,6.12x\,12x\,12x\,16}}{\pi\ 5}$$

= 20.62 นิ้ว

6. โรเมนท์ดัดบนก้านหางเสือ และแรงบนปิ้นร้อยหางเรือ

หางเสือเรือนั้นอาจรองรับอยู่ด้วยกานหางเสือแต่อย่างเดียวโดยไม่ต้องมีแบริ่ง รองรับอยู่ตอนส่วนล่างของหางเสืออีก ในกรณีเช่นนี้ก้านหางเสือจะได้รับโมเมท์ดัดมากมาย นอกเหนือไปจากแรงบิดที่ได้รับอยู่แล้ว ในทางตรงข้ามหางเสือนี้อาจมีที่รองรับเพิ่มขึ้นอีก นั่นคือปิ้นร้อยหางเสือ (Pintles) ฉะนั้นจึงควรจะทราบว่าควรจะให้ก้านหางเสือได้รับโมเมนท์ดัดเท่าใด และให้ปิ้นร้อยหางเสือได้รับเท่าใดเสียก่อน

ก) พิจารณาตามรูปที่ 104 ไม่มีปิ้นร้อยหางเสือเลย จุดศูนย์กลางความกดอยู่ห่างจากคอก้านหางเสือเป็นระยะ แรงตั้งฉาก Q ฉะนั้นโมเมท์ดัดจะเกิดเท่ากับ Qy ซึ่งจะต้องเพิ่มเข้ากับแรงบิดหางเสือ

ข) พิจารณาตามรูปที่ 105 หางเสือไม่สมดุลย์ มีปิ้นร้อยหางเสือหลายอัน ปัญหานี้ไม่หาโดยทฤษฎี แต่หางดังข้อสมมติต่อไปนี้ . –

1. ถ้าหางเสือถูกแบ่งออกด้วยเนื้อที่เล็ก ๆ ทางระดับตรงตามปิ้นร้อยหางเสือ ๆ นั้นจะได้รับแรงกดส่วนบนและครึ่งหนึ่งของแรงกดส่วนล่าง
2. โมเมนท์ดัดที่เกิดขึ้นบนก้านหางเสือถูกตัดทิ้งไปได้

ค) พิจารณาตามรูปที่ 106 โดยให้มีปิ้นร้อยหางเสือที่ตอนใต้หางเสือแห่งเดียวถ้าหางเสือมีเนื้อที่หน้าตัดใกล้รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ก็คิดเสียว่าก้านหางเสือนั้นเป็น บีมที่มีแรงกดเฉลี่ยตลอดบีมกระทำอยู่ และปลายก้านหางเสือนั้นอาจคิดว่า ปล่อยอิสระ (Free) หรือยึดติดแน่น (Rigid)

	โมเมนท์ดัดที่ก้านหางเสือ	แรงบนปิ้นร้อยหางเสือ
ปลายก้านหางเสือยึดติดแน่น	$\frac{Q1}{8}$	$\frac{3Q}{8}$
ปลายก้านหางเสือปล่อยอิสระ	สูญ	$\frac{Q}{2}$

คำตอบที่ถูกต้องของโมเมท์ดัดและแรงกดบนปิ้นร้อยหางเสือนั้นจะอยู่ในระหว่างค่าของกรณีทั้งสอง

ง) พิจารณาตามรูปที่ 107 โดยคิดว่ามีปิ้นร้อยหางเสืออันเดียวแต่ไม่ใช่ที่ตอนใต้หางเสือ จึงคิดได้เสมือนมีรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าสองรูปมีแรงกระทำตั้งฉาก กับหางเสือ

Q_1 Q_2 และความลึก 1_1 และ 1_2

ฉะนั้น โมเมนท์ดัดและแรงจะเกิดดังต่อไปนี

	โมเมนท์ดัดที่ ก้านหางเสือ	แรงบนปิ้น ร้อยหางเสือ
ปลายก้านหางเสือยึดติดแน่น	$\frac{1}{4}Q_2 1_1 - \frac{1}{8}Q_1 1_1$	$Q_2\left(\frac{3\ 1_2}{4\ 1_1}+1\right)+\frac{3}{8}Q_1$
ปลายก้านหางเสือปล่อยอิสระ	สูญ	$Q_2\left(\frac{1_2}{2\ 1_1}+1\right)+\frac{1}{2}Q_1$

คำตอบที่ถูกต้องใช้กรณีที่มีอันตรายที่สุด

7. โมเมนท์ดัดและแรงบิดหางเสือรวมกัน

โมเมนท์ดัดและแรงบิดรวมกัน $= M + \sqrt{M^2 + T^2}$

$$H = \text{แรงบิด} = \frac{\pi}{16} f \quad d^3$$

$$M = \text{โมเมนท์ดัด}$$

ถ้านำแรงบิด $\frac{\pi}{16} f \quad d^3$ เท่ากับ $M + \sqrt{M^2 + T^2}$ ก็จะหาเส้นผ่าศูนย์กลางของก้านหางเสือที่ใหญ่พอที่จะรับกำลังแรงบิดและโมเมนท์ดัดของหางเสือ

8. ความแข็งแรงของปิ้นร้อยหางเสือ (Pintles)

ถ้า d เป็นเส้นผ่าศูนย์กลางของปิ้นร้อยหางเสือ 1 เป็นความลึกของปิ้นร้อยหางเสือตรงส่วนที่อยู่ในแบริ่งรองรับ ดูรูปที่ 108 แรงกดตั้งฉาก Q ที่กระทำบนหางเสือหารด้วย d x 1 จะต้องอยู่ใน ระหว่า 2 ½ ตัน ต่อ ตร. นิ้ว จึงจะปลอดภัย ข้องมูลนี้นำมาจากความชำนาญ นั้นมากกว่า 1 เล็กน้อย

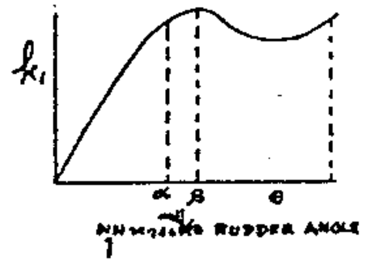
$$\frac{Q}{d\,1} = 2.5$$

9. ปรากฏการณ์ของเรือในตอนเลี้ยว (Turning)

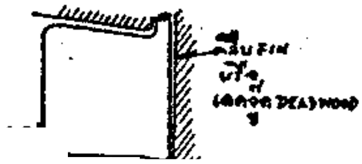
เมื่อหางเสือเรือถูกหักไปทางขวาง แรงรวม F จะกระทำบนหางเสือ ดูรูปที่ 109 แรงร่วมทางขวางของแรง F นี้จะทำให้เรือตกไปทางซ้าย แต่การตกไปทางซ้ายนั้นน้อย เพราะความต้านทานของน้ำมีมาก F_1 ซึ่งจะทำการต้านเรือที่จุด E ซึ่งเป็นจุดศูนย์กลางความต้านทาง ทางขวาง (Center of Lateral Resistance, CLR) เมื่อแรง F และ F_1 กระทำพร้อมกันเรือจะหมุนให้หัวเรือไปทางขวา แรงในทางตามยาวของ F, F_1 จะถูกต้านทานด้วยความต้านทาง จะทำให้เรือมีความเร็วช้าลง จุดศูนย์ถ่วง (Center of Gravity, G) ของเรือจะเคลื่อนตัวไปเป็นวงก้นหอย (Spiral Path) ซึ่งเรียกว่าวงหัน (Turning Circle) ϕ นศูนย์กลางความยาวของเรือทำมุมกันเส้นสัมผัสของวงหันเล็กน้อย โดยหัวเรืออยู่ในวงหันเป็นมุม ซึ่งเรียกว่ามุมตก (Drift Angle)

ในรูปที่ 110 แสงการหันของเรือในขณะหนึ่งจุด C เป็นจุดศูนย์กลางสมนัย (Corres Ponding Center) ของส่วนโค้งสั้น ๆ เส้น CO ลากตั้งฉากกับเส้นกึ่งกลางลำตามยาว ฉะนั้นมุม GCO จะเท่ากับ ϕ ด้วย ยิ่งกว่านั้นผู้สังเกตการณ์ยืนที่จุด 0 และทุก ๆ จุดจาก 0 ไปทางท้ายเรือ จะปรากฏเหมือนกับเคลื่อนไปทางกราบซ้าย และทุก ๆ จุดจากจุด 0 ไปทางหัวเรือจะปรากฏเหมือนกับเคลื่อนไปทางขวา จุด 0 จึงถูกเรียกเป็นจุดหมุน (Pivoting Point) เพราะเหตุว่าเรือปรากฏว่าหมุนรอบจุด 0 นี้

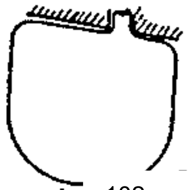
รูปที่ 99 แรงที่กระทำบนหางเสือชนิดแผ่นเหล็กแบบธรรมดา



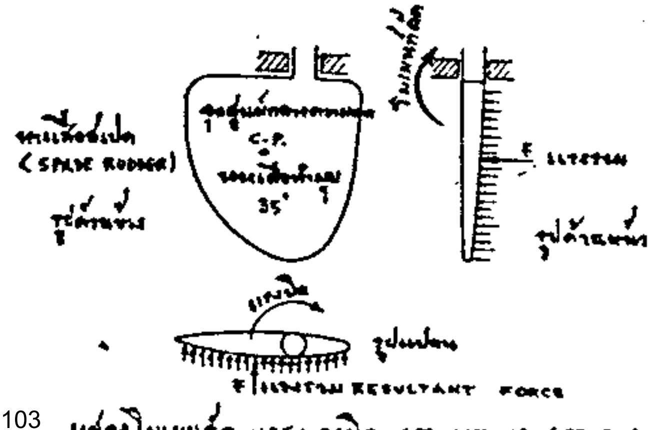
รูปที่ 100 การเปลี่ยนแปลงค่าของ k_1



รูปที่ 101 หางเสือไม่สมดุลย์
UNBALANCED RUDDER



รูปที่ 102 หางเสือสมดุลย์
BALANCE RUDDER



รูปที่ 103 แสดงโมเมนต์ และแรงบิด (TWISTING ACTION) กระทำบนหางเสือ

ในรูปที่ 111 แสดงตัวอย่างวงหันระยะ A เรียกระยะเข้าวงหัน (Asvance) เป็นระยะทางที่มากที่สุดที่จุดศูนย์ถ่วงของเรือ G เคลื่อนตัวไปในทิศหรือเข็มเดิมจากเวลาเริ่มหักหางเสือไปทางขวาหมดระยะ เรียกเส้นผ่าศูนย์กลางยุทธวิธี (Tactical Diameter) เป็นระยะที่มากที่สุดที่จุดศูนย์ถ่วงของเรือเคลื่อนไปเป็นมุมฉากกับทิศทางเดิม บางที่เรียกระยะทางระหว่างทิศทางเดิมของเรือกับทิศทางที่เรือหมุนไป 108 ดีกรี

โดยปกริตระยะเข้าวงหัน A กันเส้นผ่าศูนย์กลางยุทธวิธี D นั้น บอกเป็นจำนวนเท่าของความยาวระหว่างเส้นฉากของเรือ เรือที่ดีต้องมีวงหันดังลักษณะต่อไปนี้ คือ มีเส้นผ่าศูนย์กลางยุทธวิธีเป็น 4 เท่าของความยาวของเรือหรือน้อยกว่าเล็กน้อย ระยะทางเข้าวงหันเป็น 3 เท่าของความยาวของเรือ เมื่อความเร็วปานกลาง และเป็น 4 ถึง 5 เท่าของความยาวของเรือ เมื่อความเร็วสูงขึ้น ๆ

เมื่อเรือเลี้ยวนั้นจะเกิดความเร็วมุม (Angular Celocity) รอบจุดหมุน 0 ถ้าเราจับที่จุดหนึ่งจุดใดภายในเรือเช่นที่จุดหนึ่งห่างจาก 0 เป็นระยะ 1 และมีเนื้อที่ A ความเร็วของเรือผ่านไปในน้ำเนื่องจากความเร็วมุมเท่ากับ $\frac{1D\theta}{dt}$ และความต้านทานเปลี่ยน $A1x\,(\frac{d\theta}{dt})^2$ และโมเมนท์รอบจุด 0 จะเป็น $A1^3\,(\frac{d\theta}{dt})^2$ จึงเห็นว่าโมเมนท์เปลี่ยนเป็นกำลังสาม ของความยาวและกำลังสามของความยาวและกำลังสองของความเร็วมุม

จะเห็นจากสมการข้างบนว่า เนื้อที่ภายใต้แนวน้ำนั้นตัดทิ้งไปเสียได้ ถ้าระยะทาง 1 มากที่สุดเพราะจะทำให้ความต้านทางของน้ำที่กระทำการขัดขวางความเร็วมุมของเรือนั้นน้อยลงมากมาย มีวิธีการทำคือลดกระดูกงูเสริม (Deadwood) หรือตัดท้ายเรือให้เป็นหน้าตัดทางดิ่ง

แต่อย่างไรก็ตามการตัดกระดูกงูเสริมมากเกินไปอาจทำให้เกิดผลเสียคือ ขาดคุณสมบัติการรักษาทิศหัวเรือให้ตรง ทำให้ต้องใช้หางเสือบ่อย ๆ (Dynamical Instability of Steering) เรื่องนี้จึงเป็นเรื่องลำบาก เพราะเรือที่มีคุณสมบัติรักษาทิศหัวเรือดีโดยไม่ต้องใช้หางเสือบ่อย ๆ นั้น เวลาหันไม่ค่อยดี

10. ขนาดหางเสือ

เนื้อที่หางเสือที่ดีนั้นต้องมีอัตราส่วนดังต่อไปนี้

$$\frac{\text{เรโชวงเนื้อที่โปรเจคเตดถายใต้แนวน้ำหรือความยาวแนวน้ำ x กินน้ำลึก}}{\text{เนื้อที่หางเสือ}}$$

48 ถึง 69

เรือ เอช. เอ็ม. เอส. เนลสัน	=	61
เรือ เอช. เอ็ม. เอส. คิงยอร์ช 5	=	61

เรือ เอช. เอ็ม. เอส. ลีนเดอ	=	56
เรือ เอช. เอ็ม. เอส. อาร์คโรยัล	=	69
เรือพิฆาต	=	48

บางแห่งใช้ $\frac{\text{เนื้อที่หางเสือ}}{\text{เนื้อที่โปรเคเตดใต้แนวน้ำ}}$ = 2 ถึง 3 เปอร์เซ็นต์

11. หัน (การทดลองหาวง Turning Circle Trials)

การทดลองหาวงหันของเรือนี้ควรทำเป็นทางการ ทั้งนี้เพื่อได้ซึ่งข้อมูลต่าง ๆ เพื่อนำไปใช้ในการออกแบบเรือลำต่อ ๆ ไป และเพื่อให้ได้ข้อมูลสำหรับเป็นประโยชน์ แก่นายทหารประจำเรือเกี่ยวกับการใช้เรือ และเพื่อทดลองเครื่องหางเสือ

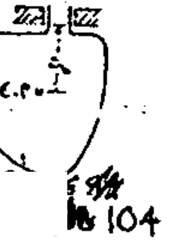
ต่อไปนี้เป็นวิธีการที่ใช้ในการหาวงหันของเรือ ดูรูปที่ 112 ภายในเรือเลือกหาที่ที่สะดวกทางตอนหัว 1 แห่ง ทางท้าย 1 แห่ง รวม 2 แห่งด้วยกัน รู้ระยะหางระหว่างจุดทั้งสองนั้นตามในรูปที่ 112 จุด A และ B เป็นจุดที่เลือกขึ้นและรู้ระยะห่าง ณ ตำแหน่งทั้งสองนี้ทำวงกลมใช้ในการแบริ่งกับแพถ่วงน้ำหนัก ปักธงซึ่งจะทิ้งไว้ในรูปนั้น คือจุด 0 สมมติว่าแพนี้ลอยอยู่เฉย ๆ เมื่อสัมพันธ์กับเรือ

นำเรือเข้ามาเพื่อแล่นรอบแพ 0 นำเข้ามาให้ใกล้ที่สุดที่คาดหมายว่าวงหันควรจะเป็นเท่าใดเมื่อเข้ามาใกล้แล้วให้สัญญาณเตรียมพร้อมที่จะหันหางเสือขวาหมด (ประมาณ 35^0) เมื่อหักหางเสือขวาหมดแล้วให้สัญญาณ จนเข็มเรือในขณะนั้นจับเวลา วัดมุม OAC และมุม QBA บันทึกไว้ ด้วยมุมที่วัดไว้นี้กับระยะ AB ที่ทราบแล้วสามารถหารูปสามเหลี่ยม OAB ได้ นั่นคือหาตำแหน่งของเรืออันสัมพันธ์กับแพ 0 ได้ การให้สัญญาณจดบันทึกเข็มเรือ จับเวลา วัดมุมดังกล่าวคงทำไปอีกทุก ๆ ปอยท์ (45^0) นั่นคือวัดเมื่อ 4, 8, 12, 16, 20, 24, 28, และ 32 ปอยท์ (360^0) ซึ่งถือว่าเรือวิ่งครบรอบวงหันแล้ว จะได้รูปสามเหลี่ยมจำนวน 9 รูป เมื่อเขียนด้วยมาตราส่วนก็จะได้ทิศทางของเรือที่แล่นไปตามวงหัน (Advance) และสั้นผ่าศูนย์กลาง ยุทธวิธี (Tactical Diameter)

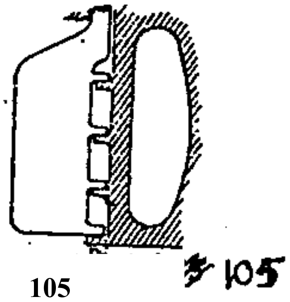
การหาวงหันนี้ควรทำทั้งเรือหันขวา (Starboard Circle) และเรือหันซ้าย (Port Circle) เพื่อให้ได้ผลทั้งหางเสือขวาและหางเสือซ้ายหมด ในการนี้ต้องใช้แพดังกล่าวแล้วสองแพ ทิ้งไว้ห่างกัน 2 – 3 ไมล์ เมื่อเรือเสร็จนำวงหันขวาแล้ว ก็ออกแล่นตรงไปเข้าวงหันซ้าย ดังในรูปที่ 113

12. การทดลองหาความเร็วเรือ (Speed Trial)

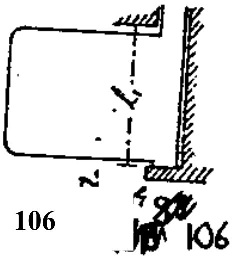
การทดลองหาความเร็วเรือเป็นอีกสิ่งหนึ่งที่จะต้องทำในการวิ่งทดลองนี้ให้วิ่งจากความเร็วต่ำ



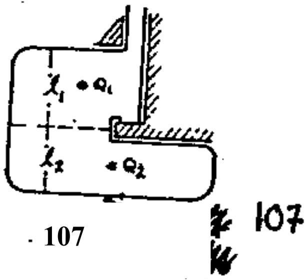
104



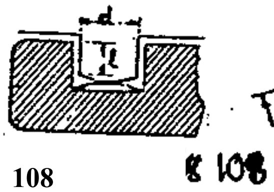
105



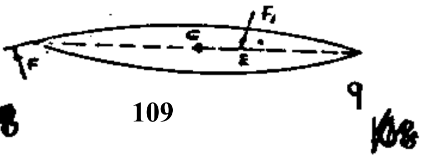
106



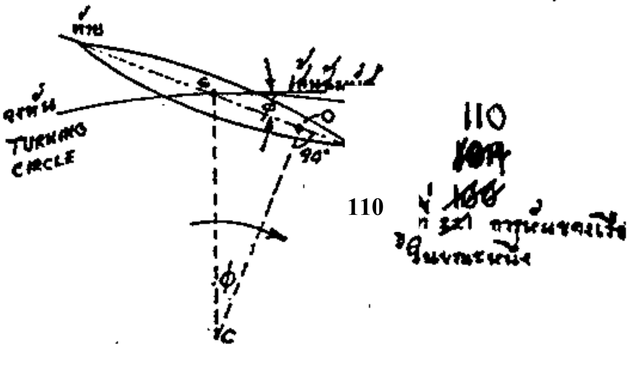
107



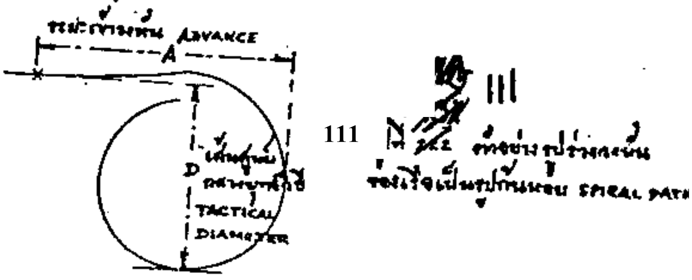
108



109



110



111

ไปหาความเร็วสูง เพื่อนำไปเขียนเส้นโค้งโดยใช้ความเร็วของเรือเป็นเส้นฐาน สัมพันธ์กับแรงม้า จำนวนรอบตลอดทั้งความหมดเปลือง ซึ่งใช้เป็นเส้นตั้ง ปกติการวิ่งทดลองความเร็วนี้ มักกระทำที่หลักไมล์ (A Measured – Mile Course) ดูรูปที่ 114 AB และ CD เป็นหลักไมล์สองคู่ห่างกัน 6,080 ฟุต ซึ่งเรียกว่าไมล์ทะเล (Sea Mile) นาฬิกาโครนอมมิเตอร์ (Chronometer Stop Watch) ในการที่จะกำจัดผลอันเกิดจากกระแสน้ำในขณะที่ทำกรทดลองนั้นต้องใช้วิ่งทดลองอย่างน้อย 4 เที่ยว คือทวนน้ำสองเที่ยว ตามน้ำสองเที่ยว แล้วใช้ค่าเฉลี่ยของ เฉลี่ย (Mean of Means) เช่นสมมติว่าความเร็วที่ทอลองมีดังนี้ 15.13, 14.61, 15.66, และ 14.11 นอต ค่าเฉลี่ยของเฉลี่ยคำนวณได้ดังนี้

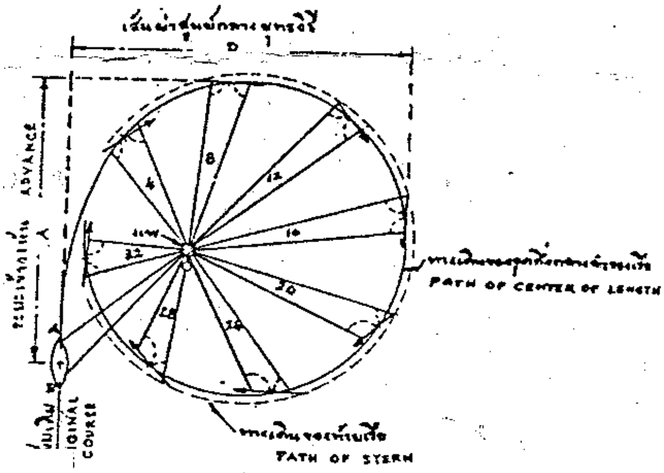
ความเร็ว	ค่าเฉลี่ยครั้งแรก x 2	ค่าเฉลี่ยครั้งที่สอง x 4	ค่าเฉลี่ยของเฉลี่ย x 8
15.13			
14.61	= 29.74	= 60.11	= 120.05
15.66	= 30.27	= 60.04	
14.11	= 29.77		

ฉะนั้น ความเร็วเฉลี่ย = 120.05 ÷ 8 = 15.006 นอต หรือจะทำโดยใช้ตัวคูณซิมสัน กฎที่ 2 ก็ได้

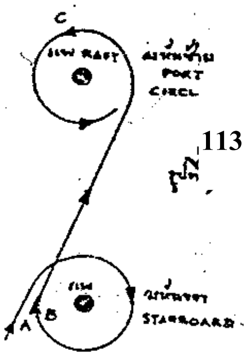
ความเร็ว	ตัวคูณซิมสัน กฎที่ 2	ฟังชันของความเร็ว
15.13	1	15.13
14.61	3	43.83
15.66	3	46.98
14.11	1	14.11

8) 120.05

ความเร็วเฉลี่ย 15.006 นอต



112 (TURNING CIRCLE TRIALS)



113

114