

# หัวใจของสมุททานุภาพใต้สมุทร ราชนาวีไทย

นาวาเอก สมศักดิ์ กงโชติ  
รองผู้อำนวยการอุทการเรือธนบุรี กรมอุทการเรือ

ว่าที่ เรือโท ธิติภูมิ สังข์สนิก  
ประจำแผนกทดสอบวัสดุ กองควบคุมคุณภาพ กรมพิชิตนการช่าง กรมอุทการเรือ

พลทหาร กัชร ธีวานันท์  
พลทหารประจำ อุทการเรือธนบุรี กรมอุทการเรือ

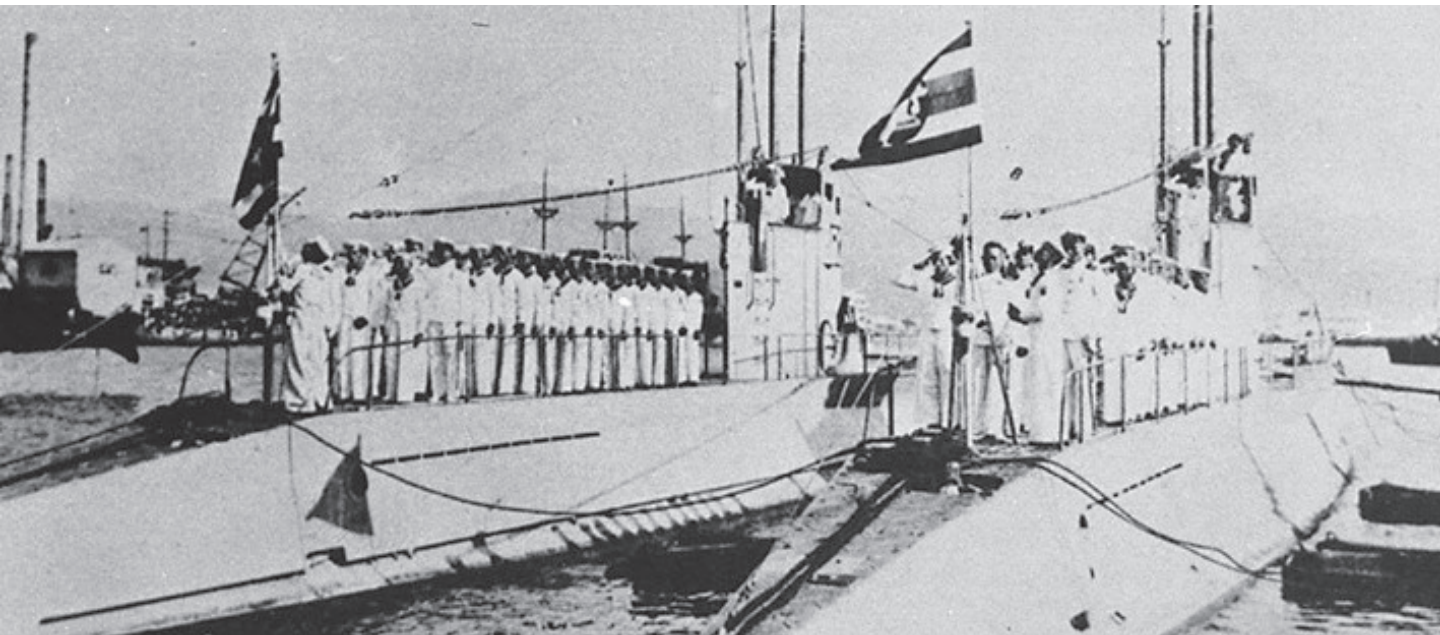
กองทัพเรือไทยมีความต้องการกำลังรบทางเรือหรือนาวิกานุภาพใต้น้ำที่สำคัญนอกเหนือจากทุ่นระเบิดใต้น้ำ คือ เรือดำน้ำ เพื่อเพิ่มขีดความสามารถของสมุททานุภาพ ในมิติใต้น้ำ เมื่อกองทัพเรือได้รับมอบเรือดำน้ำเข้าประจำการแล้ว การบำรุงรักษาจะเป็นหน้าที่ของหน่วยเทคนิคต่าง ๆ ซึ่งในส่วนของกรมอุทการเรือ ต้องรับผิดชอบการซ่อมบำรุงในระบบ ตัวเรือ กลจักร ไฟฟ้า เพื่อให้เรือดำน้ำมีความพร้อม โดยเฉพาะระบบขับเคลื่อนของเรือดำน้ำ ซึ่งเป็นระบบหลักที่ทำให้เรือดำน้ำ สามารถปฏิบัติการในภารกิจต่าง ๆ ได้

จะเห็นได้ว่าการปฏิบัติการของเรือดำน้ำ จำเป็นต้องใช้ระบบขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้า โดยมีต้นกำเนิดพลังงานคือ แบตเตอรี่ ซึ่งเป็นระบบสำคัญของเรือดำน้ำ การเตรียมความพร้อมในด้านนี้ จึงมีความจำเป็นต้องเรียนรู้และศึกษาทำความเข้าใจ เพื่อพัฒนาขีดความสามารถและเตรียมความพร้อม การซ่อมบำรุงเรือดำน้ำในอนาคต แบตเตอรี่จึงมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง นั่นก็คือ “หัวใจของสมุททานุภาพใต้สมุทร ราชนาวีไทย”

## สมุทรภาพ [๑]

สมุทรภาพ (Sea Power) มีต้นกำเนิดมาจากแนวความคิดของ พลเรือตรี อัลเฟรด เทเยอร์ มาฮาน (Rear Admiral Alfred Thayer Mahan) โดยท่านได้ทำการศึกษาและวิเคราะห์ประวัติศาสตร์ การก้าวขึ้นมาเป็นมหาอำนาจโลกของประเทศอังกฤษโดยใช้กำลังทางเรือเป็นหลัก แล้วเปรียบเทียบถึงขีดความสามารถของสหรัฐ ฯ ในยุคต่อมา ซึ่งก้าวขึ้นมาเป็นมหาอำนาจของโลกด้วยปัจจัยสมุทรภาพต่าง ๆ ซึ่งมีคล้ายคลึงกับประเทศอังกฤษ โดยสมุทรภาพถือหลักสำคัญว่า มหาอำนาจทางทะเลจะเหนือกว่ามหาอำนาจทางบก องค์ประกอบของสมุทรภาพ (Components of Sea Power) ประกอบด้วย ๖ องค์ประกอบหลักคือ

๑. นาวิกานุภาพ (Naval Power) หรือกำลังทางเรือ ๒. กองเรือสินค้า (Merchant Fleet) ๓. ฐานทัพและท่าเรือ (Naval Bases and Harbors) ๔. ฐานสร้างเรือ/ซ่อมเรือ (Shipyards/Dockyards) ๕. พาณิชยกรรมและการติดต่อระหว่างประเทศ (Commercial Establishments and Contacts) ๖. องค์บุคคล (Personnel) หากพิจารณานาวิกานุภาพ (Naval Power) ที่เป็นเครื่องมือในการที่จะได้มา ซึ่งองค์ประกอบของการขยายดินแดนตามทฤษฎีและหลักการของสมุทรภาพ รวมทั้งใช้ในการรักษาผลประโยชน์ ของชาติทางทะเลอีกทั้งยังใช้ในการป้องปรามและแก้ไขความขัดแย้งด้วยกำลังอีกด้วย ปัจจุบันกำลังรบทางเรือมิได้มีเพียงเรือรบผิวน้ำเช่น ในยุคของมาฮาน เท่านั้น กำลังรบทางเรือหรือนาวิกานุภาพในปัจจุบันประกอบด้วย เรือผิวน้ำ เรือดำน้ำ อากาศนาวิ และทหารนาวิกโยธิน



## การปฏิบัติหน้าที่ในระหว่างสงครามอินโดจีน

วีรประวัติของเรือดำน้ำซุสต์เรือหลวงมัจฉาณุ ได้สร้างวีรกรรมครั้งสำคัญให้ต้องเป็นที่จดจำต่อภารกิจในการช่วยปกป้องรักษา อธิปไตยของชาติ จากการถูกรุกรานของฝรั่งเศส ในกรณีพิพาทอินโดจีน กล่าวคือ ภายหลังกองเรือรบฝรั่งเศสพ่ายแพ้ต่อมหาซีเยอรมัน เมื่อต้นสงครามโลกครั้งที่ ๒ ไทยได้เรียกร้องต่อฝรั่งเศสขอคืนแดนที่ถูกล้อมกลับคืน ทำให้ถูกตอบกลับด้วยการโจมตีทางอากาศที่จังหวัดนครพนม ไทยจึงส่งกำลังพลทางบก และอากาศ เข้ายึด และโจมตีที่มั่นสำคัญของกำลังพลฝรั่งเศสในลาว และกัมพูชา ส่วนทางทะเลนั้น ฝรั่งเศสได้ส่งกำลังพลทางเรือจากฐานทัพเรือเรียม เข้าลิดรอนทำลายกำลังทางเรือของไทย เกิดเป็นยุทธนาวีเกาะช้าง เมื่อวันที่ ๑๗ มกราคม ๒๔๘๔

ต่อมาหลังจากเรือหลวงธนบุรีและเรือตอร์ปิโดถูกเรือรบฝรั่งเศสยิงจมแล้วเรือดำน้ำทั้ง ๔ ลำได้ไปลาดตระเวนเป็น ๔ แนว อยู่บริเวณหน้าฐานทัพเรือเรียมของอินโดจีนฝรั่งเศส ใช้เวลาอยู่ใต้น้ำทั้งสิ้นลำละ ๑๒ ชั่วโมงขึ้นไป คือระหว่าง ๐๖.๐๐ - ๑๘.๐๐ น. กลางคืนแล่นลาดตระเวนบนผิวน้ำนับเป็นปฏิบัติการดำที่นานที่สุดนับแต่เริ่มตั้งหมวดเรือดำน้ำมา ซึ่งยังปรากฏจากหลักฐานของฝ่ายฝรั่งเศสในการรบที่เกาะช้างว่า ฝรั่งเศสมีความหวั่นเกรงเรือดำน้ำทั้ง ๔ ลำของไทยมาก จึงเดินเรือเลาะมาตามชายฝั่งของเวียดนาม และกัมพูชาเพื่อลดความเสี่ยงที่จะปะทะกับเรือดำน้ำไทย และภายหลังกองเรือรบปะทะกับกำลังทางเรือของไทยก็ต้องรีบเดินทางกลับ เพราะเกรงว่าเรือดำน้ำของไทยอยู่ในพื้นที่ปฏิบัติการ ทำให้ภารกิจในการควบคุมทางทะเลด้านตะวันออกของอ่าวไทยไม่บรรลุผล นอกจากนี้เรือรบของฝรั่งเศสยังถูกเรือดำน้ำของไทยติดตามไปจนถึงฐานทัพเรือเรียมจากนั้นมาก็ไม่ปรากฏเรือรบของฝรั่งเศสออกมาปฏิบัติการอีกเลย ซึ่งแสดงให้เห็นถึงศักยภาพการป้องปรามของเรือดำน้ำที่แม้ไม่ปรากฏตัวให้เห็น แต่มีผลคุกคามต่อข้าศึกได้ทุกพื้นที่

## ยุคหลังสงครามโลกครั้งที่ ๒

ต่อมาวันที่ ๓๐ พฤศจิกายน พ.ศ. ๒๔๙๔ เรือดำน้ำทั้ง ๔ ลำ ถูกปลดระวางประจำการ เนื่องจากขาดแคลนชิ้นส่วนอะไหล่หลังจากญี่ปุ่นพ่ายแพ้สงครามโลกครั้งที่ ๒ ทำให้ไม่ได้รับอนุญาตให้จำหน่ายอาวุธยุทโธปกรณ์ และกรมอุทการเรือรวมทั้งภาคเอกชนของไทยไม่สามารถผลิตแบตเตอรี่สำหรับใช้ประจำเรือได้ รวมเวลารับใช้กองทัพเรือ ๑๒ ปีเศษ หลังจากนั้น เรือทั้ง ๔ ลำ ได้จอดคู่เทียบติดกันลอยอยู่ในแม่น้ำเจ้าพระยา บริเวณท่าหน้าโรงพยาบาลศิริราชอยู่อีกเป็นเวลานานกระทั่ง ได้ขายเรือดำน้ำทั้ง ๔ ลำ ให้บริษัทปูนซีเมนต์ คงเหลือแต่ท่อเรือดำน้ำและอาวุธบางชิ้น เช่น ปืน และกลองส่อง กองทัพเรือจึงได้สร้างสะพานเดินเรือจำลองขึ้น และนำอาวุธมาติดตั้งไว้เป็นอนุสรณ์ จัดแสดงไว้ที่หน้าพิพิธภัณฑ์ทหารเรือ หน้าโรงเรียนนายเรือ จังหวัดสมุทรปราการ จะเห็นว่าการที่กองทัพเรือไม่สามารถผลิตแบตเตอรี่และอะไหล่บางส่วน ทำให้มีผลกระทบโดยตรงต่อการบำรุงรักษาเรือดำน้ำในครั้งนั้นได้

## การเตรียมตัวเพื่อพัฒนาขีดความสามารถการซ่อมบำรุงเรือดำน้ำของไทย [๓]

หลังจากการปลดประจำการเรือดำน้ำทั้ง ๔ ลำ ความพยายามของกองทัพเรือไทยยังมีอย่างต่อเนื่องที่จะเสนอโครงการจัดหาเรือดำน้ำ กลับเข้าประจำการอีกครั้งหนึ่งเพื่อเสริมสมุททานุภาพในมิติใต้น้ำ ตั้งแต่ปี ๒๕๒๘ จนเมื่อวันที่ ๑๘ เม.ย. ๒๕๖๐ รัฐบาลได้มีมติเห็นชอบจัดซื้อเรือดำน้ำ หยวนคลาส เอส ๒๖ ที จำนวน ๑ ลำ วงเงิน ๑.๓๕ หมื่นล้านบาท และมีแผนจะจัดซื้อเพิ่มอีก ๒ ลำในอนาคต โดยเรือดำน้ำแรกจะเข้าประจำการในกองทัพเรือไทยในอีก ๒ ปีข้างหน้า ช่วงเวลานี้จึงเป็นเวลาที่เหมาะสมที่สุด ที่กรมอุทการเรือจะพัฒนาขีดความสามารถในการซ่อมทำเพื่อรองรับการเข้าประจำการของเรือดำน้ำ รวมทั้งเตรียมเพิ่มขีดความสามารถในการผลิตอะไหล่ต่าง ๆ โดยเฉพาะแบตเตอรี่ของเรือดำน้ำ เพื่อเป็นการพึ่งพาตนเองและลดปัญหาที่อาจเกิดขึ้นเหมือนครั้งในอดีตที่ผ่านมา

ดังนั้นการเริ่มต้นในองค์ความรู้ด้านองค์บุคคล องค์ความรู้ด้านวิชาการ และการจัดเตรียมเครื่องมือและพื้นที่การซ่อมบำรุงจึงมีความจำเป็นที่จะต้องเร่งดำเนินการควบคู่กันไป ซึ่งการเรียนรู้เบื้องต้นต่อไปนี้จะทำให้เป็นจุดเริ่มต้นของการซ่อมบำรุงเรือดำน้ำของกองทัพเรือไทยในอนาคตต่อไป

## หัวใจของระบบขับเคลื่อนของเรือดำน้ำ

นักออกแบบเรือดำน้ำมีความพยายามที่จะสร้างระบบขับเคลื่อนใต้น้ำที่ช่วยให้เรือดำน้ำสามารถปฏิบัติการใต้น้ำได้ต่อเนื่องโดยไม่จำเป็นต้องอาศัยอากาศบนผิวน้ำมาตั้งแต่การพัฒนาเรือดำน้ำยุคแรก จนกระทั่งในช่วงปลายศตวรรษที่ ๑๙ ได้มีการใช้แบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด เป็นแหล่งเก็บพลังงานในการขับเคลื่อนเรือดำน้ำใต้น้ำด้วยมอเตอร์ไฟฟ้า แต่เรือดำน้ำในสมัยนั้นยังคงต้องลอยลำบนผิวน้ำเพื่อเดินเครื่องชาร์จแบตเตอรี่เป็นประจำ ในช่วงต้นสงครามโลกครั้งที่ ๒ เยอรมนีได้ทดลองระบบขับเคลื่อนที่ใช้เชื้อเพลิง Hydrogen Peroxide และแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดที่ไม่ต้องใช้ออกซิเจนจากภายนอก ซึ่งช่วยให้เรือดำน้ำทำความเร็วใต้น้ำได้สูงมาก แต่ยังมีปัญหาเรื่องระยะเวลาปฏิบัติการใต้น้ำที่สั้นเกินไป จนกระทั่งในช่วงปลายสงครามโลกครั้งที่ ๒ เยอรมนีได้เริ่มใช้ท่อ Snorkel สำหรับดูดอากาศบนผิวน้ำ ช่วยให้สามารถเดินเครื่องยนต์ชาร์จแบตเตอรี่ได้ขณะดำอยู่ใต้น้ำ แต่การใช้ท่อ Snorkel ยังคงจำกัดความเสี่ยงของเรือดำน้ำให้อยู่ใกล้ผิวน้ำ และต้องใช้ท่อโผล่ขึ้นเหนือผิวน้ำ ซึ่งอาจถูกตรวจจับได้จากเรดาร์

การพัฒนาาระบบขับเคลื่อนที่ไม่ต้องใช้ออกซิเจนบนผิวน้ำจึงยังคงเดินทางต่อไป หลังสงครามโลกครั้งที่ ๒ สิ้นสุดลง โดยฝ่ายสัมพันธมิตรที่ชนะสงคราม ได้แก่ สหรัฐ, อังกฤษ, และโซเวียต ได้นำเทคโนโลยีเรือดำน้ำของเยอรมนีไปพัฒนาต่อยด้วยตัวเอง แต่สหรัฐฯ กับโซเวียตหันไปพัฒนาระบบขับเคลื่อนพลังงานนิวเคลียร์ ซึ่งเป็นระบบขับเคลื่อนเรือดำน้ำที่ไม่ต้องใช้ออกซิเจนจากเหนือผิวน้ำอย่างแท้จริง ทำให้การพัฒนาาระบบขับเคลื่อนใต้น้ำ และการวิจัยแบตเตอรี่สำหรับเรือดำน้ำ ในชาติมหาอำนาจทางทหารทั้งสอง ถูกลดความสำคัญลง

ระบบ AIP (Air Independent Propulsion) ในเรือดำน้ำดีเซล-ไฟฟ้า เริ่มมีการใช้งานจริงในช่วงปลายศตวรรษที่ ๒๐ โดยเป็นการเก็บออกซิเจนเหลวในเรือเพื่อไปใช้เผาไหม้หรือทำปฏิกิริยาเคมีเพื่อสร้างกระแสไฟฟ้าใต้น้ำ แบ่งออกได้เป็นระบบ ๓ ประเภทที่มีการใช้งานในปัจจุบัน ได้แก่ ระบบกังหันไอน้ำ, ระบบ Stirling Engine, และระบบ Fuel Cell โดยทั้ง ๓ ระบบพึ่งพาแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด เป็นแหล่งจัดเก็บพลังงาน ซึ่งเรือดำน้ำ ของกองทัพเรือไทย ทางจีนได้เสนอระบบ AIP แบบสเตอร์ลิง

ระบบ Stirling Engine มีใช้ในเรือดำน้ำของสวีเดน ญี่ปุ่น จีน และไทยในอนาคต ใช้การเผาไหม้เชื้อเพลิงกับออกซิเจนจากถังออกซิเจนเหลวเพื่อสร้างความร้อนให้กับของเหลวในวงจร Stirling ซึ่งไปขับเคลื่อนลูกสูบเพื่อสร้างกระแสไฟฟ้า แล้วจัดเก็บในแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด ระบบ Stirling Engine มีความซับซ้อนน้อยกว่าระบบกังหันไอน้ำ แต่ให้กำลังต่ำกว่า และมีความเสี่ยงปฏิบัติการที่จำกัด (ยิ่งความลึกมากขึ้นจะทำให้ประสิทธิภาพลดลง)

อย่างไรก็ตาม การพัฒนาระบบขับเคลื่อนของเรือดำน้ำ ที่เป็นอาวุธทางยุทธศาสตร์ จึงมีความจำเป็นจะต้องซ่อนพราง ให้ดำอยู่ใต้น้ำให้นานที่สุดเท่าที่ทำได้ จึงได้มีการพัฒนาในการใช้ความร้อนจากพลังงานนิวเคลียร์ มาเป็นแหล่งกำเนิดพลังงานให้กับเรือดำน้ำในเวลาต่อมา

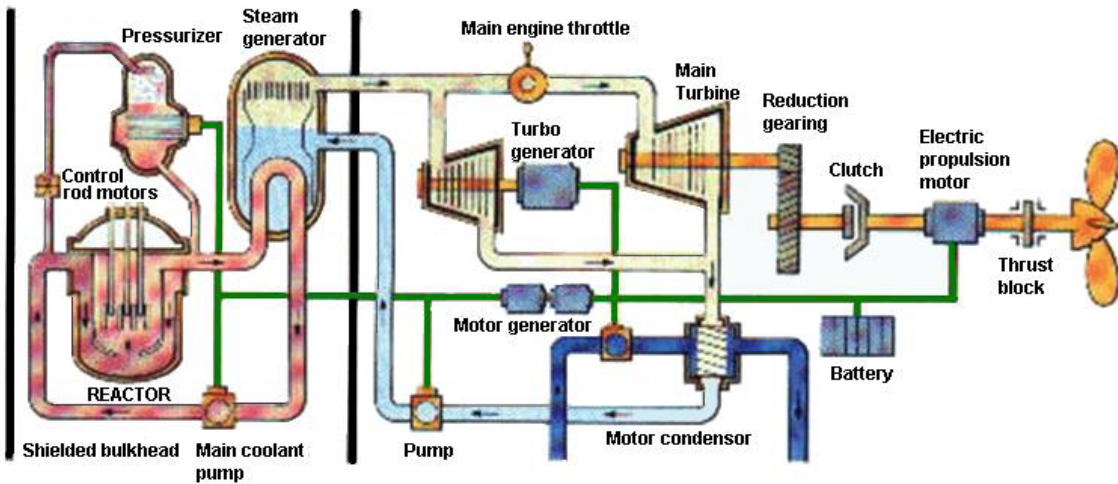
ระบบขับเคลื่อนของเรือดำน้ำนิวเคลียร์มี ๒ รูปแบบคือ

๑. ใช้พลังงานจากเตาปฏิกรณ์นิวเคลียร์ทดแทนเครื่องปั่นไฟจากน้ำมันดีเซล โดยสร้างพลังงานไฟฟ้า ไปเก็บยังแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด แล้วใช้มอเตอร์ไฟฟ้าขับเคลื่อนใบจักร มีข้อดีคือเสียงที่เงียบ แต่ทำความเร็วได้ต่ำ

๒. ใช้ไอน้ำแรงดันสูงจากเตาปฏิกรณ์นิวเคลียร์ขับเคลื่อนใบจักรโดยตรง โดยมีแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด และมอเตอร์ไฟฟ้าเป็นระบบสำรอง มีข้อดีคือทำความเร็วได้สูงกว่าระบบในข้อ ๑ แต่เสียงดังกว่า

โดยในปัจจุบันได้มีการผนวกทั้ง ๒ ระบบเข้าด้วยกันเรียกว่า Pressurized - water Naval Nuclear Propulsion System แล้วเลือกใช้ การขับเคลื่อนโดยมอเตอร์ไฟฟ้าขณะต้องการความเงียบและใช้ไอน้ำแรงดันสูงขับเคลื่อนขณะต้องการทำความเร็ว

### Pressurized-water Naval Nuclear Propulsion System



ดังนั้นไม่ว่าเรือดำน้ำจะใช้เทคโนโลยีการขับเคลื่อนอย่างไร จะเห็นได้ว่า สิ่งสำคัญที่สุดที่นับว่าเป็นหัวใจของระบบขับเคลื่อนของเรือดำน้ำนั้นก็คือ “แบตเตอรี่” นั่นเอง

# “แบตเตอรี่”

## หัวใจสำคัญของเรือดำน้ำ

พลังงานไฟฟ้า ไปเก็บยังแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด แล้วใช้มอเตอร์ไฟฟ้าขับเคลื่อนเพลาใบจักร มีข้อดีคือเสียงที่เงียบ แต่ทำความเร็วได้ต่ำ

๒. ใช้ไอน้ำแรงดันสูงจากเตาปฏิกรณ์นิวเคลียร์ขับเคลื่อนเพลาใบจักรโดยตรง โดยมีแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด และมอเตอร์ไฟฟ้าเป็นระบบสำรอง มีข้อดีคือทำความเร็วได้สูงกว่าระบบในข้อ ๑ แต่เสียงดังกว่า

โดยในปัจจุบันได้มีการผนวกทั้ง ๒ ระบบเข้าด้วยกันเรียกว่า เรียกว่า Pressurized – water Naval Nuclear Propulsion System แล้วเลือกใช้ การขับเคลื่อนโดยมอเตอร์ไฟฟ้าขณะต้องการความเงียบและใช้ไอน้ำแรงดันสูงขับเคลื่อนขณะต้องการทำความเร็ว

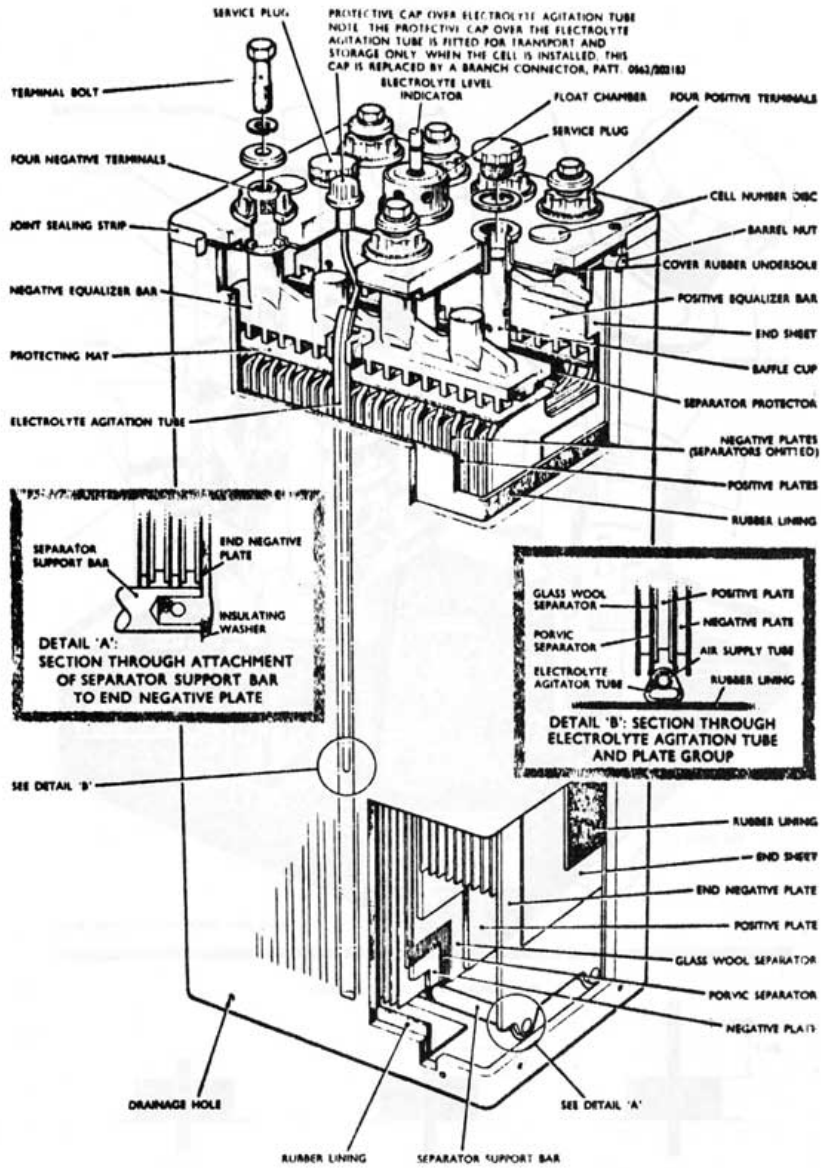


เรือดำน้ำชั้น Soryu ชื่อ Taigei ของประเทศญี่ปุ่น เรือดำน้ำลำแรก  
ของโลกที่ปิดเผยว่าใช้แบตเตอรี่ลิเธียมไอออน

แบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด ถูกใช้ในเรือดำน้ำอย่างแพร่หลายทั่วโลก มาเป็นเวลานาน เมื่อเปรียบเทียบกับแบตเตอรี่ชนิดอื่น ๆ ที่ถูกคิดค้นขึ้นภายหลัง หากพิจารณาในหลาย ๆ ปัจจัย อาทิ ความหนาแน่นของพลังงาน อายุการใช้งาน ราคา โดยเฉพาะอย่างยิ่งเรื่องความปลอดภัย ที่มีการวิจัยมาเป็นเวลานานและมีเอกสารทางวิชาการจำนวนมาก รับรองความปลอดภัยของใช้ แบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด ในสภาวะใต้น้ำ แบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด จึงยังเป็นทางเลือกที่เหมาะสมที่สุดในปัจจุบัน



องค์ประกอบของแบตเตอรี่ตะกั่ว - กรด ประกอบด้วย



ภาพแสดงองค์ประกอบแบตเตอรี่เรือดำน้ำชนิดตะกั่ว-กรดของสหรัฐ

๑. แผ่นธาตุบวก (Positive Plate) หมายถึง สารที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาทำด้วยตะกั่วไดออกไซด์ (PbO<sub>2</sub>)

๒. แผ่นธาตุลบ ( Negative Plate ) หมายถึง สารที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาทำด้วยตะกั่วพรุน (Spongy Lead )

๓. แผ่นกั้น ( Separator ) หมายถึง แผ่นที่อยู่ระหว่างแผ่นธาตุบวกกับแผ่นธาตุลบ เพื่อป้องกันไม่ให้นำแผ่นธาตุทั้งสองชนิดติดต่อกันเกิดการลัดวงจร

๔. ขั้วแบตเตอรี่ (Pole) หมายถึง แท่งตะกั่วยื่นออกมาจากฝาครอบทั้ง ๒ ขั้ว คือขั้วบวกและขั้วลบมีสัญลักษณ์มองเห็นได้ที่ฝาครอบหรือขั้วอย่างชัดเจน

๕. เปลือกหม้อ (Container) หมายถึง ภาชนะบรรจุส่วนต่างๆ ของเซลล์แบตเตอรี่ เช่น แผ่นธาตุบวก แผ่นธาตุลบ แผ่นกั้นและน้ำกรดไว้ภายใน

๖. ฝาครอบแบตเตอรี่ (Cover) หมายถึง ฝาครอบแบตเตอรี่ทำหน้าที่ ป้องกันมิให้น้ำกรดหกออกจากแบตเตอรี่และป้องกันสิ่งแปลกปลอมต่างๆ จากภายนอกไม่ให้ตกลงไปในแบตเตอรี่

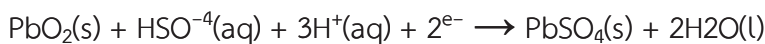
๗. ฝาปิด (Plug) หมายถึง ช่องในฝาครอบแบตเตอรี่ที่ทำไว้เพื่อการเติมน้ำมันอิเล็กโทรไลต์ ขณะปฏิบัติการบำรุงรักษาจากนี้จะต้องมีช่องสำหรับระบายแก๊สที่เกิดขึ้นภายในแบตเตอรี่ให้ระเหยออกไปได้ด้วย

การปล่อยประจุ ในสภาวะดีสชาร์จ, ทั้งแผ่นบวกและแผ่นลบกลายเป็นตะกั่วซัลเฟต (PbSO<sub>4</sub>), และอิเล็กโทรไลต์สูญเสียกรดซัลฟูริกทำให้มันเจือจางลงอย่างมากและส่วนใหญ่กลายเป็นน้ำ. ขบวนการดีสชาร์จถูกขับเคลื่อนโดยการไหลของอิเล็กตรอนจากแผ่นลบผ่านทางวงจรภายนอกกลับเข้าสู่เซลล์ที่แผ่นบวก.

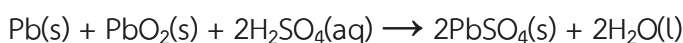
ปฏิกิริยาแผ่นลบ:



ปฏิกิริยาแผ่นบวก:



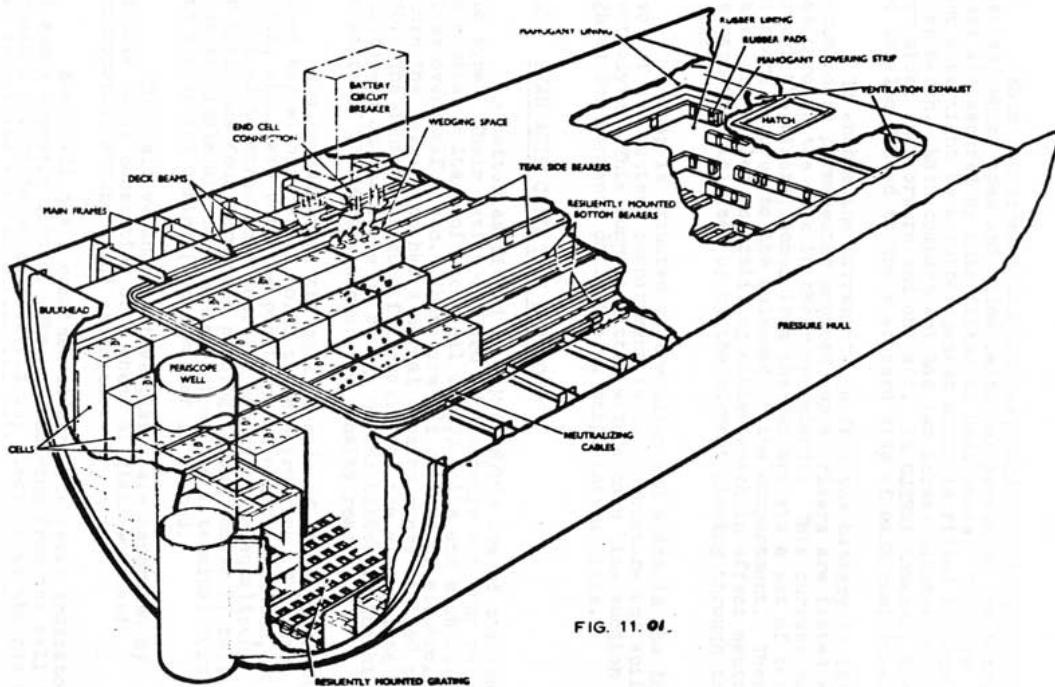
ปฏิกิริยาทั้งหมดสามารถเขียนเป็น



ผลรวมของมวลโมเลกุลของสารตั้งต้นเป็น ๖๔๒.๖ g/mol, ดังนั้นในทางทฤษฎีเซลล์สามารถผลิตสองหน่วย faradays ของประจุ (๑๙๒,๙๗๑ คูลอมป์) จาก ๖๔๒.๖ กรัมของสารตั้งต้น, หรือ ๘๓.๔ แอมแปร์ชั่วโมงต่อกิโลกรัม (หรือ ๑๓.๙ แอมแปร์ชั่วโมงต่อกิโลกรัม สำหรับแบตเตอรี่ ๑๒ โวลต์) สำหรับเซลล์ ๒ โวลต์, ตัวเลขนี้เป็น ๑๖๗ วัตต์-ชั่วโมงต่อกิโลกรัมของสารตั้งต้น, แต่เซลล์ตะกั่วกรดในทางปฏิบัติให้เพียง ๓๐-๔๐ วัตต์-ชั่วโมงต่อกิโลกรัมของแบตเตอรี่ เนื่องจากมวลของน้ำและส่วนประกอบอื่นๆ

การเคลื่อนที่ของไอออน ในระหว่างการดีสชาร์จ,  $H^+$  ที่ผลิตขึ้นบนแผ่นลบและจากสารละลายอิเล็กโทรไลต์จะเคลื่อนที่ไปที่แผ่นบวกซึ่งเป็นจุดที่มันจะถูกกิน, ในขณะที่  $H_2SO_4$  จะถูกกินที่ทั้งสองแผ่น การย้อนกลับเกิดขึ้นในระหว่างการชาร์จ การเคลื่อนที่นี้อาจจะโดยการไหลของโปรตอนโดยการขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้าหรือโดยกลไกของ Grotthuss (อังกฤษ: Grotthuss mechanism) หรือโดยการแพร่กระจายผ่านสื่อ, หรือโดยการไหลของสื่ออิเล็กโทรไลต์เหลว เนื่องจากความหนาแน่นจะมีมากขึ้นเมื่อความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกสูงขึ้น, ของเหลวจะมีแนวโน้มที่จะไหลเวียนโดยการพาความร้อน จะเห็นในกระบวนการทำงานของแบตเตอรี่จะมีการสร้างก๊าซไฮโดรเจน ซึ่งเป็นอันตรายต่อกำลังพลประจำเรือ ดังนั้นจึงต้องมีระบบระบายอากาศที่มีประสิทธิภาพ เพื่อไม่ให้ก๊าซไฮโดรเจน สะสมภายในตัวเรือเกิน ๔% ซึ่งจะเป็นอันตรายกับกำลังพลบนเรือ และกระบวนการดังกล่าวยังสร้างพลังงานร้อนขึ้นที่ตัวแบตเตอรี่ จึงต้องมีระบบหล่อเย็นของแบตเตอรี่เช่นกัน เพื่อควบคุมอุณหภูมิและอัตราการเกิดปฏิกิริยาภายในเซลล์ไฟฟ้าเคมีของแบตเตอรี่ให้มีความเหมาะสม

## ห้องแบตเตอรี่ [๕]



ภาพแสดงองค์ประกอบห้องแบตเตอรี่เรือดำน้ำของสหรัฐ

แบตเตอรี่ของเรือดำน้ำปกติติดตั้งอยู่ ๒ ส่วนคือ ๑. ตั้งอยู่ใต้พื้นที่พักผ่อนของกำลังพล ๒. ตั้งอยู่ภายใต้ห้องควบคุม โดยภายในห้องแบตเตอรี่ส่วนต่าง ๆ ของจะถูกเคลือบด้วยยางชนิดพิเศษเพื่อป้องกันตัวเรือโลหะจากกรดและไอกรดของแบตเตอรี่ ทุกส่วนในห้องเก็บแบตเตอรี่ต้องเป็นฉนวนไฟฟ้าเพื่อป้องกันไฟฟ้าว

ต้องมีโครงสร้างซับแรงจะถูกสร้างมาเพื่อลดแรงสั่นสะเทือนของแบตเตอรี่ เพื่อป้องกันการเคลื่อนไหวของแบตเตอรี่ระหว่างอยู่ในทะเลจะมีไม้กั้นแบตเตอรี่ให้อยู่กับที่ในห้องเก็บแบตเตอรี่จะมีการเก็บแบตเตอรี่เป็นชั้นเพื่อประหยัดพื้นที่ และมีถาดรองรับให้สามารถไถเคลื่อนย้ายภายในห้องเพื่อให้ช่างเข้าบำรุงอย่างทั่วถึงและว่องไว ห้องแบตเตอรี่ทุกห้องต้องมีประตูกันน้ำไว้อยู่ประมาณสองถึงสามบาน สายไฟที่ออกมาจากแบตเตอรี่จะต้องเป็นสายไฟเคลือบขนวนสนามแม่เหล็กเพื่อกันสนามแม่เหล็กจากสายไฟแรงสูงจากแบตเตอรี่ จะมีท่อระบายน้ำอยู่ชั้นล่างสุดของเรือดำน้ำเพื่อระบายความชื้นและสารเคมีจากแบตเตอรี่



ภาพแสดงแบตเตอรี่เรือดำน้ำตราอักษร Hawker สำหรับกองทัพเรือสหรัฐ ฯ

## การปฏิบัติงาน

การชาร์จ : การชาร์จแบตเตอรี่เรือดำน้ำมี ๓ ลักษณะคือ

๑. การชาร์จเพื่อใช้งาน : คือการชาร์จเพื่อให้มีไฟฟ้าเพียงพอสำหรับการปฏิบัติการกิจ
๒. การชาร์จปกติ : คือการชาร์จเพื่อกระตุ้นให้ภาพรวมของแบตเตอรี่อยู่ในสถานะชาร์จสูงสุด ตามคู่มือการใช้แบตเตอรี่เรือดำน้ำชนิดตะกั่ว-กรดของสหรัฐฯ ให้ดำเนินการชาร์จปกติทุกวงรอบ ๒ สัปดาห์ โดยแต่ละครั้งให้ชาร์จแบตเตอรี่จนถึงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (Voltage) ๕๖๐ v แล้วชาร์จต่ออีก ๕ ชั่วโมง

๓. การชาร์จจูนแรง (Equalizing Charge) : คือการชาร์จเพื่อกระตุ้นให้เซลล์ไฟฟ้าเคมีทุกเซลล์ในแบตเตอรี่อยู่ในสถานะชาร์จสูงสุด ตามคู่มือการใช้แบตเตอรี่เรือดำน้ำชนิดตะกั่ว-กรดของสหรัฐฯ ให้ดำเนินการชาร์จจูนแรง ทุกวงรอบ ๑ เดือน โดยแต่ละครั้งให้ชาร์จแบตเตอรี่จนถึงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (Voltage) ๕๖๐ v แล้วชาร์จต่ออีก ๗-๑๐ ชั่วโมง โดยระหว่างการดำเนินการให้ค่าความหนาแน่น และ อุณหภูมิของแบตเตอรี่อย่างใกล้ชิด

การดิสชาร์จทุกวงรอบ ๔ เดือน ในสภาวะการทำงานปกติของเรือดำน้ำเป็นไปได้น้อยมากที่แบตเตอรี่ เรือดำน้ำจะอยู่ในสถานะต่ำที่สุด ดังนั้นเพื่อให้ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีในเซลล์สมบูรณ์ตามคู่มือการใช้แบตเตอรี่เรือดำน้ำชนิดตะกั่ว-กรด ของสหรัฐฯ กำหนดให้ดำเนินการดิสชาร์จแบตเตอรี่ให้อยู่ในสถานะต่ำสุดทุกวงรอบ ๔ เดือน

## การบำรุงรักษาตามวงรอบ

๑. การตรวจแบบสุ่มคือ การสุ่มตรวจความหนาแน่นและอุณหภูมิของแบตเตอรี่ โดยสุ่มเลือกหนึ่งตัวต่อหนึ่งชุดที่สามารถเข้าถึงง่ายที่สุด เพื่อประเมินสถานะของแบตเตอรี่ทั้งหมดในเรือ สถิตินี้จะถูกบันทึกและแสดงอย่างชัดเจนในห้องควบคุม เพื่อให้ลูกเรือทราบสถานะของแบตเตอรี่

การตรวจแบบสุ่มจะต้องดำเนินการแก้ไขต่อไป

๑.๑ หากเรือเทียบท่าจะต้องตรวจสอบทุกวงรอบ ๑๒ ชั่วโมง

๑.๒ หากเรือวิ่งต้องตรวจสอบทุกวงรอบ ๔ ชั่วโมง

๑.๓ ก่อนชาร์จแบตเตอรี่

๑.๔ ก่อนเทียบท่า

๑.๕ เวลาทำการชาร์จจูนแรง (Equalizing Charge) และ การดิสชาร์จทุกวงรอบ ๔ เดือน

๒. การตรวจอย่างละเอียด จะมีการตรวจสอบความหนาแน่นและอุณหภูมิแบตเตอรี่ทุกตัวในระบบทุกเดือนหรือระหว่าง ๑๒ ถึง ๒๔ ชั่วโมง หลังมีการชาร์จจูนแรง (Equalizing Charge) กระบวนการนี้เพื่อตรวจสอบว่าแบตเตอรี่ทุกตัวมีค่าใกล้เคียงกัน แบตเตอรี่ที่มีค่าต่ำกว่าปกติจะต้องถูกนำไปตรวจสอบ

## วิธีเติมสารละลายอิเล็กโทรไลต์

เป็นเรื่องปกติที่แบตเตอรี่จะมีการปล่อยก๊าซไฮโดรเจนและออกซิเจน ก๊าซพวกนี้เกิดมาจากปฏิกิริยาเคมีของน้ำในแบตเตอรี่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์หลังใช้งานแบตเตอรี่ได้ช่วงหนึ่ง เกณฑ์วัดระดับสารละลายอิเล็กโทรไลต์จะต่ำลงและต้องมีการเติม การเติมสารละลายอิเล็กโทรไลต์จะเกิดขึ้น ๑๒ ถึง ๒๔ ชั่วโมงหลังการชาร์จ เนื่องจากเวลาชาร์จจะทำให้เกิดก๊าซและจะทำให้ระดับสารละลายอิเล็กโทรไลต์สูงขึ้น หลัง ๑๒ ถึง ๒๔ ชั่วโมงจะทำให้ระดับสารละลายอิเล็กโทรไลต์กลับมามั่นคงและจะทำให้มีการเติมสารละลายอิเล็กโทรไลต์ในระดับที่เหมาะสมได้ การดำเนินการปฏิบัติการเติมสารละลายอิเล็กโทรไลต์ปกติ จะมีชาร์จจูนแรง (Equalizing Charge) และตรวจสภาพแบตเตอรี่อย่างละเอียด หลังจากเติมสารละลายอิเล็กโทรไลต์เสร็จจะมีการทำการชาร์จปฏิบัติการ ประมาณ ๑ ถึง ๒ ชั่วโมงเพื่อให้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ มีคุณสมบัติที่ดี สารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้เติมจะเป็นน้ำที่ออกมาจากเครื่องทำน้ำกลั่นและต้องถูกทดสอบด้วยซิลเวอร์ในเตรตก่อนที่จะมีการเติม

## ทดสอบไฟรั่ว

การทดสอบที่ชื่อ Milliamp leak test เป็นการทดสอบซึ่งจะมีขึ้นทุกอาทิตย์กับแบตเตอรี่ทุกตัว การทดสอบนี้เป็นการหาจุดที่มีไฟรั่วและจะทำให้สามารถหาตำแหน่งที่ไฟรั่วได้

## ตรวจจุดเชื่อมต่อสายไฟ

การทดสอบที่ชื่อ Torque test เป็นการตรวจความแน่นของสายไฟแบตเตอรี่โดยใช้ประแจวัดแรงบิดให้ได้ ๙๕ ถึง ๑๐๐ lb/ft การตรวจนี้จะทำทุก ๖ เดือนเพื่อเช็คว่ามีโบลท์ตัวไหนที่หลวมซึ่งจะทำให้เกิดความร้อนได้

## ทดสอบมิลลิโวลต์ดรอพเทส

เป็นการทดสอบแรงต้านทานระหว่างขั้วแบตเตอรี่และสายต่อระหว่างแบตเตอรี่ จะมีการทดสอบเวลาแบตเตอรี่มีการย้ายแบตเตอรี่เข้าหรือออก เวลาทดสอบต้องมีการดิสชาร์จอย่างน้อย ๑,๐๐๐ แอมป์และมีการคลาดเคลื่อนได้ ๑ มิลลิโวลต์ต่อ ๑๐๐ แอมป์ในสายต่อระหว่างแบตเตอรี่

## ทำความสะอาดเป็นประจำ

ทำความสะอาดหยดสารละลายอิเล็กโทรไลต์สนิมจากแบตเตอรี่และสายไฟอย่างสม่ำเสมอ

## ข้อกำหนดการทำงานภายในห้องแบตเตอรี่เรือดำน้ำ

๑. ห้ามสูบบุหรี่หรือบริเวณห้องแบตเตอรี่และเหนือห้องแบตเตอรี่
๒. ใส่เสื้อคลุมแขนและขาอย่างมิดชิด
๓. ห้ามนำเหล็กทุกชนิดเข้าไปเด็ดขาด
๔. เครื่องมือทุกชนิดต้องเป็นฉนวนไฟฟ้า
๕. แบตเตอรี่ไม่มีการใช้การอยู่
๖. ระบบระบายอากาศต้องทำงาน
๗. ต้องใช้แผ่นยางรองหากมีงานที่ต้องนั่งหรือนอนทับแบตเตอรี่

จะเห็นว่าขั้นตอนการปฏิบัติงานและการบำรุงรักษาตามวงรอบของแบตเตอรี่เรือดำน้ำค่อนข้างละเอียดอ่อนและซับซ้อน ซึ่งล้วนแล้วแต่เป็นภาระงานของกำลังพลประจำเรือ แต่การดำเนินการทุกขั้นตอนล้วนมีความสำคัญทั้งในแง่ความปลอดภัย และแง่อายุการใช้งานของแบตเตอรี่ โดยจากสถิติของแบตเตอรี่เรือดำน้ำชนิดตะกั่ว-กรด ตราอักษร Hawker ซึ่งใช้ในเรือดำน้ำของสหรัฐฯ มีอายุการใช้งาน ๕ - ๑๐ ปี ขึ้นอยู่กับสภาพการปฏิบัติงานและการบำรุงรักษา

## แนวทางการพัฒนาเพื่อให้กรมอู่ทหารเรือสามารถซ่อมคืนสภาพและสร้างแบตเตอรี่แบบตะกั่ว-กรด สำหรับเรือดำน้ำ

### แนวทางการซ่อมคืนสภาพแบตเตอรี่ชุดเดิม [๖]

แบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด จะสูญเสียความสามารถในการรับประจุเมื่อถูกดิสชาร์จเป็นเวลานานเกินไป เนื่องจาก การตกผลึกของตะกั่วซัลเฟต พวกมันสร้างกระแสไฟฟ้าผ่านปฏิกิริยาเคมีซัลเฟตสองต่อ ตะกั่วและตะกั่วไดออกไซด์ซึ่งเป็นวัสดุที่ใช้งานอยู่บนแผ่นแบตเตอรี่, จะทำปฏิกิริยากับกรดซัลฟูริกในอิเล็กโทรไลต์เพื่อก่อตัวเป็นตะกั่วซัลเฟต ตะกั่วซัลเฟตตอนแรกจะก่อตัวในสภาวะสัณฐาน และสามารถย้อนกลับไปเป็นตะกั่ว ตะกั่วไดออกไซด์และกรดกำมะถันได้อย่างง่ายดายเมื่อแบตเตอรี่ชาร์จประจุเข้าไปใหม่ แต่เมื่อแบตเตอรี่ผ่านวงจรการชาร์จและการดิสชาร์จหลายครั้ง ตะกั่วซัลเฟตบางส่วนจะไม่ได้รวมตัวกับอิเล็กโทรไลต์และค่อย ๆ แปลงเป็นรูปแบบผลึกที่เสถียรที่ไม่ละลายในระหว่างการชาร์จประจุกต่อไป ดังนั้น แผ่นตะกั่วที่ทำปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีจะลดปริมาณลงเรื่อย การผลิตไฟฟ้าจะลดลงเมื่อเวลาผ่านไป

Sulfation จะเกิดขึ้นในแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด เมื่อพวกมันได้รับประจุไม่เพียงพอในระหว่างการดำเนินการตามปกติ มันขัดขวางการชาร์จไฟ การสะสมของซัลเฟตก็ขยายออกไปอย่างสุดขีด ทำให้แผ่นแตกและทำลายแบตเตอรี่ ในที่สุดพื้นที่แผ่นของแบตเตอรี่ไม่สามารถที่จะจ่ายกระแสจนทำให้ความจุของแบตเตอรี่ลดลงอย่างมาก นอกจากนี้ในส่วนของซัลเฟต (ของตะกั่วซัลเฟต) จะไม่ได้กลับไปทีอิเล็กโทรไลต์เพื่อเป็นกรดซัลฟูริก Sulfation สามารถหลีกเลี่ยงได้หากแบตเตอรี่ถูกชาร์จใหม่อย่างเต็มที่ทันทีหลังจากการดิสชาร์จ แบตเตอรี่ที่เกิดซัลเฟชันจะแสดงความต้านทานภายในที่สูงและมีผลต่อวงจรการชาร์จ เป็นผลให้ใช้เวลาในการชาร์จนาน มีประสิทธิภาพน้อยลงและการชาร์จไม่สมบูรณ์และอุณหภูมิของแบตเตอรี่สูงขึ้น จึงเป็นเหตุผลว่าทำไมแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด จึงมีอายุการใช้งานจำกัด

เป็นกระบวนการของการย้อนกลับของ Sulfation ของแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด Desulfation สามารถทำได้โดยจ่ายกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสองของแบตเตอรี่ เพื่อทำการละลายผลึกซัลเฟตที่เกิดขึ้นบนแผ่น แต่กระบวนการ Desulfation จะไม่ได้ผลหากแผ่นตะกั่วภายใน แบตเตอรี่เสียหายไปมากจากการใช้งานที่ไม่เหมาะสม หรือแผ่นงอเนื่องจากอุณหภูมิสูงเกินหรือการชาร์จมากเกินไป.



จะเห็นว่าหากกรรมอยู่ทหารเรือมี องค์บุคคล คือกำลังพลที่มีความสามารถและเข้าใจ กระบวนการ Desulfation องค์วัตถุ คืออุปกรณ์เครื่องมือสำหรับกระบวนการ Desulfation และ องค์ยุทธวิธี คือ ความรู้ความเข้าใจกระบวนการ Desulfation แล้ว จะทำให้กรรมอยู่ทหารเรือสามารถ ซ่อมคืนสภาพแบตเตอรี่เรือดำน้ำ ซึ่งจะเป็นการลดการพึ่งพาอะไหล่ชิ้นส่วนประกอบเหล่านี้ จากต่างประเทศลง



ภาพแสดงขีดความสามารถของโรงงานแบตเตอรี่ทหาร กรมการอุตสาหกรรมทหาร ในปัจจุบัน

## แผนทางการผลิตแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด สำหรับเรือดำน้ำ [๗]

การผลิตแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด ประกอบด้วยส่วนประกอบสำคัญ คือ

๑. การผลิตแผ่นธาตุ (Plates) ในแบตเตอรี่มี ๒ ชนิด คือแผ่นธาตุบวก(Positive Plate) และแผ่นธาตุลบ (Negative Plate) โดยแผ่น ธาตุบวกทำจากตะกั่วเปอร์ออกไซด์ ( $PbO_2$ ) และแผ่นธาตุลบทำจากตะกั่ว (Pb) วางเรียงสลับกัน จนเต็ม พอดีในแต่ละเซลล์ แล้วกันไม่ให้แตะกัน ด้วยแผ่นกัน

๒. การผลิตแผ่นกัน (Separators) ทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้แผ่นธาตุบวกและแผ่นธาตุลบ แตะกันทำให้เกิดการลัดวงจรขึ้น ซึ่งแผ่นกันนี้ทำจากไฟเบอร์กลาสหรือยางและอาจรวมถึง โพลีเมอร์ที่มีความยืดหยุ่นและมีรูพรุน เพื่อให้น้ำกรดสามารถไหลถ่ายเทไปมาได้ และมีขนาด กว้างยาวเท่ากับแผ่นธาตุบวกและธาตุลบ

๓. การผลิตน้ำกรดหรือน้ำยาลีอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) ที่ใช้กับแบตเตอรี่ชนิด ตะกั่ว-กรด หรือกรดซัลฟิวริก ( $H_2SO_4$ ) ผสมกับน้ำบริสุทธิ์ ( $H_2O$ ) ให้ได้ความเข้มข้นประมาณ ๑.๒๕๐ - ๑.๓๐๐ ขึ้นอยู่กับการออกแบบและประเภทการใช้งาน

๔. การผลิตเปลือกหรือฝาปิด (Container and Cover) เป็นภาชนะบรรจุกลุ่มแผ่นธาตุ แบตเตอรี่ ซึ่งมักทำจากยางหรือพลาสติกที่ทนกรดซัลฟิวริก

จะเห็นว่าการผลิตแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด สำหรับเรือดำน้ำนั้น หากพิจารณาที่ตัว แบตเตอรี่อย่างเดียวเป็นเทคโนโลยีที่ไม่ซับซ้อนและคาดว่ามีภาคเอกชนภายในประเทศ ซึ่งมี เทคโนโลยีเพียงพอที่จะสนับสนุน

กรมอุทกหารเรือในการดำเนินการดังกล่าว เพียงแต่ส่วนประกอบอื่นที่ประกอบมากับระบบ แบตเตอรี่ เช่น ระบบควบคุมการชาร์จ ระบบระบายอากาศ ระบบระบายความร้อน ระบบแสดง ค่าพลังงาน เมื่อกองทัพเรือได้รับมอบเรือดำน้ำเข้าประจำการแล้ว กรมอุทกหารเรือต้องเร่งศึกษา อุปกรณ์ประกอบต่าง ๆ ที่อยู่ในระบบแบตเตอรี่ แล้วนำมาบูรณาการเข้ากับองค์ความรู้การผลิต แบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด ซึ่งสามารถผลิตได้ในประเทศไทย เพื่อให้กรมอุทกหารเรือสามารถผลิต แบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด สำหรับเรือดำน้ำ ได้ในที่สุด

## กรมอุทการเรือกับสมุททานุภาพใต้สมุทรของราชนาวีไทย

การซ่อมบำรุงเรือดำน้ำ โดยเฉพาะแบตเตอรี่ภายในเรือดำน้ำ หากกรมอุทการเรือไม่สามารถทำได้เองแล้ว จะต้องจัดซื้อจากต่างประเทศ ทำให้มีค่าใช้จ่ายในการดูแลรักษาสูงมาก และอาจจะต้องนำเรือไปเข้าบำรุงรักษาในอุโมงค์ในต่างประเทศ ทำให้กองทัพเรือขาดมั่นคงทางยุทธศาสตร์และยุทธวิธี เนื่องจากเรือดำน้ำนั้นถือเป็นอาวุธทางยุทธศาสตร์ที่เป็นชั้นความลับสุดยอด เพื่อเป็นการเสริมให้เห็นถึงสมุททานุภาพในมิติใต้น้ำของประเทศไทยให้มีความมั่นคง

ดังนั้นกรมอุทการเรือ ซึ่งต้องเป็นหน่วยเทคนิคที่รับผิดชอบการบำรุงเรือดำน้ำรวมถึงการซ่อมบำรุงรักษาแบตเตอรี่ของเรือดำน้ำ เมื่อองค์ความรู้ของบุคคล องค์กร วัสดุ และองค์ยุทธวิธี ของกรมอุทการเรือ มีความเชี่ยวชาญในเรื่องดังกล่าวแล้ว จะเป็นการพัฒนาขีดความสามารถของกรมอุทการเรือ ให้สามารถซ่อมบำรุงและผลิตแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด ของเรือดำน้ำ เพื่อให้กองทัพเรือไทยมีขีดความสามารถในการพึ่งพาตนเอง ลดการพึ่งพาต่างประเทศ และเป็นการเพิ่มความมั่นคงของการป้องกันประเทศทางทะเล ทำให้ประชาชนเห็นถึงความสำคัญและความเข้มแข็งของกำลังรบใต้น้ำของเรือดำน้ำของไทยที่เคยทำให้ข้าศึกศัตรู ได้เกรงกลัว ในครั้งอดีตที่เคยปกป้องอธิปไตยทางทะเลของไทย แสดงให้เห็นถึงสมุททานุภาพของประเทศไทยที่มีกำลังทางเรือหรือนาวีกาญจนาภที่แข็งแกร่งในทุกมิติ ในการปกป้องประเทศและปกป้องผลประโยชน์ของชาติทางทะเลของไทยได้อย่างมั่นคงตลอดไป

## เอกสารอ้างอิง

- [๑] Alfred Thayer Mahan. The Influence of Sea Power upon History, ๑๖๖๐-๑๗๘๓ (London: Dover Publications, ๑๙๘๗). p. ๒๖-๓๒.
- [๒] บทความจากเว็บ navy๒๔.org บทความชื่อเรือดำน้ำ ไทยในอดีต <http://navy๒๔.org/๘๐-ปี-เรือดำน้ำ-ไทย/>
- [๓] บทความจาก <https://www.thairath.co.th/news/local/bangkok/๑๙๑๗๙๕๗>
- [๔] Germanischer Lloyd Aktiengesellschaft. Rules for Classification and Construction Naval Ship Technology, ๒ Sub-Surface Ships, ๑ Submarines ๒๐๐๘
- [๕] C.F. 'O' CLASS SUBMARINES Training notebook Electrical
- [๖] Equalize charging can prevent sulfation if performed prior to the lead sulfate forming crystals. Broussely, Michel; Pistoia, Gianfranco, ed. (๒๐๐๗). Industrial applications of batteries: from cars to aerospace and energy storage. Elsevier. pp. ๕๐๒-๓ . ISBN ๐-๔๔๔-๕๒๑๖๐-๗.
- [๗] Linden, David; Reddy, Thomas B., ed. (๒๐๐๒). Handbook Of Batteries (๓rd ed.). New York: McGraw-Hill. p. ๒๓.๕. ISBN ๐-๐๗-๑๓๕๗๗๘-๘



# บริษัท เซเวนไค้คส์ จำกัด SEVENOAKS CO.,LTD.

☎ 086-3117103 **HOT LINE**  
☎ 02-178-2256-9  
☎ 02-178-2260  
✉ sales@sevenoaks.co.th  
🌐 www.sevenoaks.co.th

เรายินดีให้บริการทางด้านวิศวกรรม ระบบไฟฟ้าและแสงสว่าง  
ระบบปรับอากาศและเครื่องเย็น รวมถึงงานระบบดับเพลิงทุกชนิด  
บริการจัดหา ซ่อมปรับปรุง พร้อมติดตั้งเครื่องยนต์ เครื่องไฟฟ้า  
เครื่องจักรกล ยานพาหนะ เครื่องทุ่นแรง  
รวมถึงวัสดุอุปกรณ์และอะไหล่ (Spare Parts) ทุกชนิด

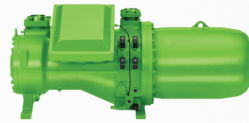
**BETA MARINE**



**YANMAR**  
marine



Marine Generating Set & Marine Engine



Marine Air Conditioning System

**alamarin-jet**



Waterjets Propulsion



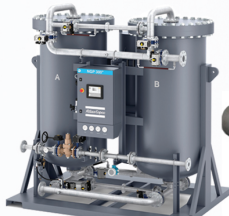
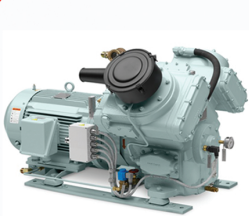
Marine Pump



Heat Exchanger, Fuel Oil Purifier  
Lube Oil Purifier, Ballast Treatment  
Bilge Water Treatment



Main Switchboard  
& Marine Cables



**Atlas Copco**

Marine Air Compressor & Nitrogen Generator

**DAMEN**



Rigid Hull Inflatable Boat (RHIB)  
Inboard/Outboard



Marine Crane

**NAIAD**  
DYNAMICS



Ride Control Systems and Active Fin Stabilizers



24/12 หมู่ที่ 13 ถนนกิ่งแก้ว ตำบลราชาเทวะ อำเภอบางพลี จังหวัดสมุทรปราการ 10540

# THAILAND EXCLUSIVE DISTRIBUTOR



MARINE REDUCTION GEAR UNITS  
SHAFT LINE BEARINGS



WATER MIST FIRE PROTECTION SYSTEM



SILVERLINE  
WATER LUBRICATED BEARINGS



PROPELLER SHAFT SYSTEM



CONTROLLABLE PITCH PROPELLERS



ENGINE COUPLINGS AND DAMPERS



HEAT EXCHANGER & OIL COOLER



AIR DEHYDRATORS



FLEXIBLE COUPLINGS,  
RESILIENT & SHOCK MOUNTINGS



COOLANT PREHEATING UNIT



HIGH PRESSURE AIR COMPRESSORS



REXROTH PNEUMATIC  
MARINE CONTROL SYSTEM



บริษัท ยาสีท จำกัด

**YASITH CO., LTD.**

31/1 Soi Bangna-Trad 30, Bangna Tai,  
Bangna, Bangkok 10260

Tel: +66 (0) 2 399 1311

Fax: +66 (0) 2 399 0311

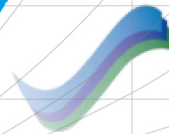
[www.yasith.co.th](http://www.yasith.co.th)



Your Most Reliable Supplier



WÄRTSILÄ



HATLAPA  
MARINE EQUIPMENT



**THAI KOLON CO.,LTD.** Since 1984

**Ship Machinery & Marine Equipments Supplier**  
Authorized Distributor in Thailand



**Head Office**

413 Moo 4, Soi Sitthichai,  
Taiban Road, Amphur Muang,  
Samutprakarn 10280 , Thailand  
Tel: +66(0)2-755-2710-15 Ext. 370  
E-mail: thaikolon@thaikolon.co.th

**Phuket Branch**

33/7 Moo5, Thepkasattri Rd.,  
Tambol Koh Keaw, Amphur Muang,  
Phuket 83000 , Thailand.  
Tel: +66(0)76-377-693 to 4  
Tel: +66(0)63-205-7521  
E-mail: phuket@thaikolon.co.th

[WWW.THAIKOLON.CO.TH](http://WWW.THAIKOLON.CO.TH)



# P.S. ADVANCED CO., LTD.



**Consilium**  
Fire Alarm Systems/Radar Systems



**Evac**  
Sewage Systems



**BLÜCHER**  
**GEBERIT**  
Marine Pipes and Drains



**KROSYS**  
(Pacmar)  
Fin Stabilizer



**IR**  
Ingersoll Rand  
Air Compressor



**FLENDER**  
Coupling



**Carlyle**  
Air Conditioning

## Various

- Purifiers/Separators
- Main&Aux. Engines
- Electricals
- Pneumatics
- Valves
- Filters
- Pumps
- etc.

บริษัท พี.เอส. แอ็ดวานซ์ จำกัด  
187/20 หมู่ที่ 1 ถนนเสรีไทย แขวงคลองกุ่ม  
เขตบึงกุ่ม กรุงเทพมหานคร 10240  
โทรศัพท์ : 0-2732-6895 โทรสาร : 0-2732-6821

P.S. Advanced Co., Ltd.  
187/20 Moo 1, Serithai Road, Kwaeng Klongkhum,  
Khet Buengkhum, Bangkok 10240 Thailand  
Tel: 66-2732-6895 Fax : 66-2732-6821

E-mail : info@psadvanced.co.th

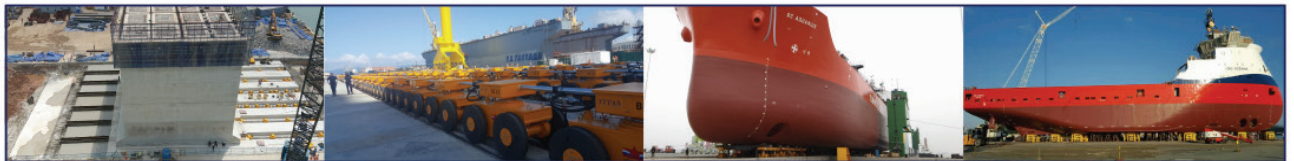
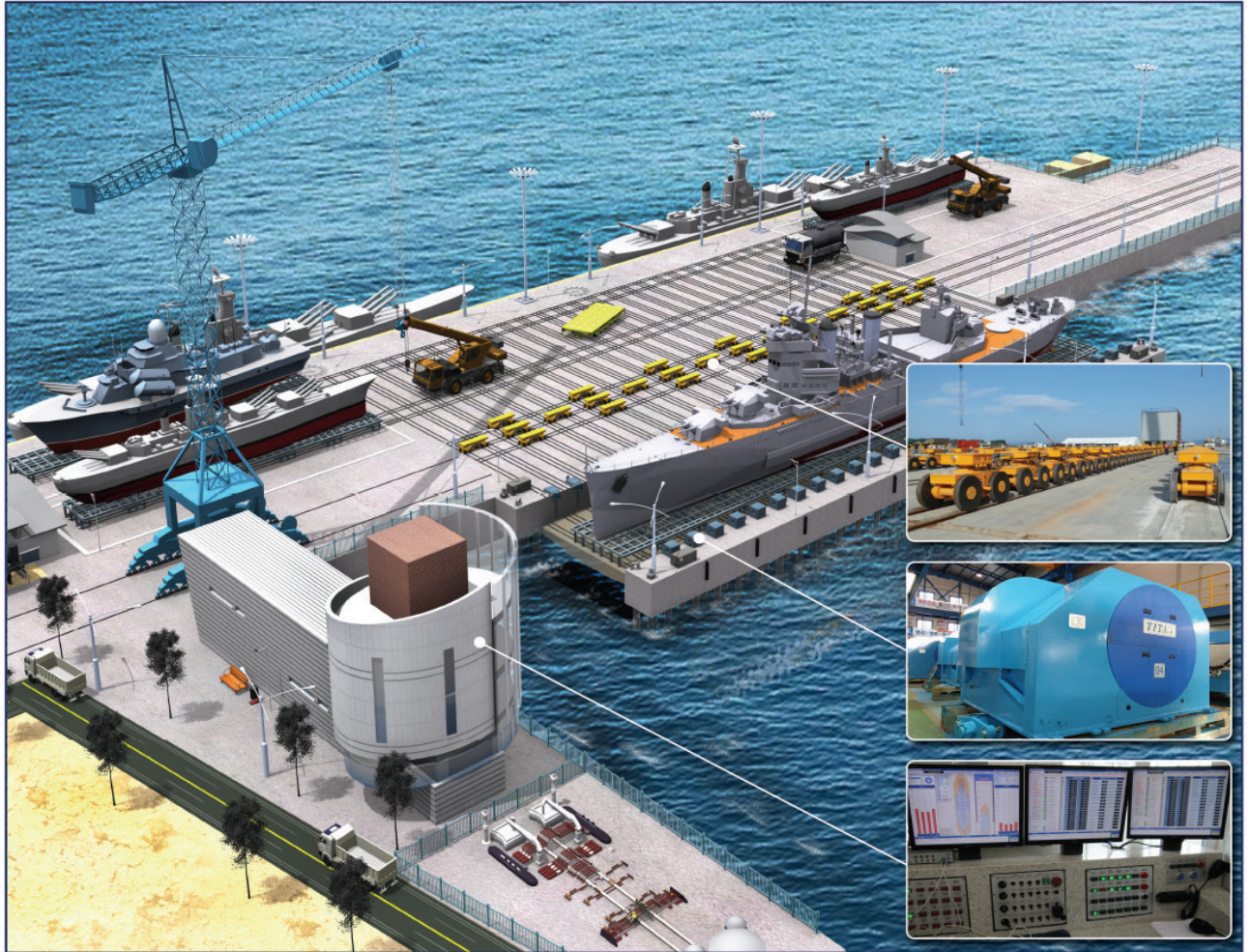




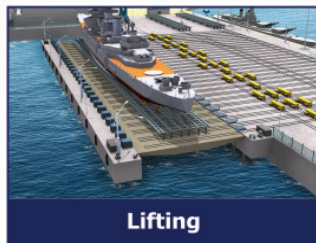
PETE AND FRIEND CO.,LTD



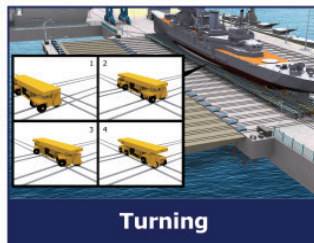
# SHIPLIFT & TRANSFER SYSTEM



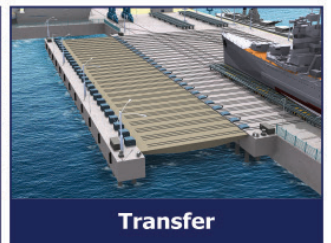
Access to platform



Lifting



Turning



Transfer

PETE AND FRIEND CO., LTD. (HEAD OFFICE) THAILAND

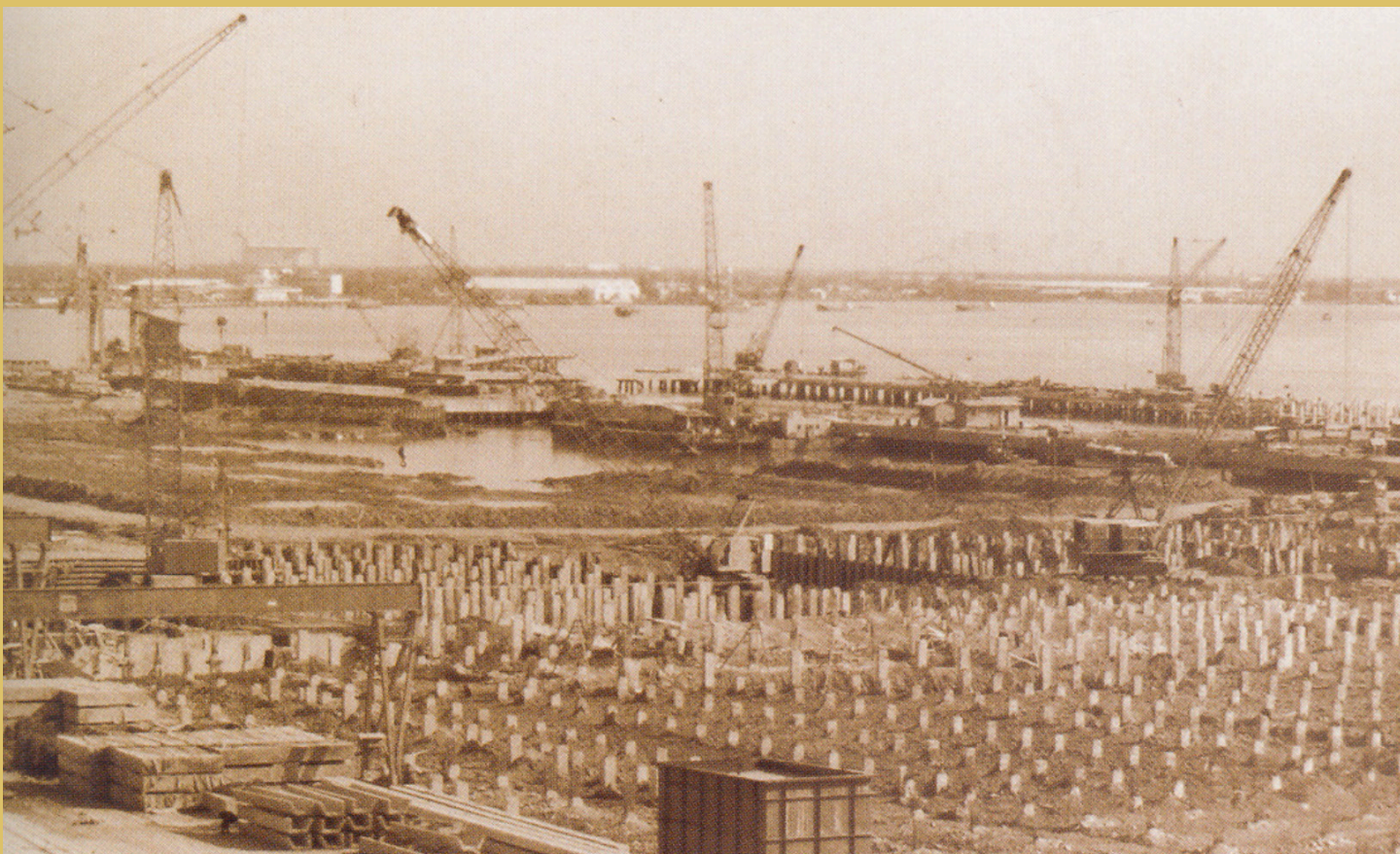
WORKING DAYS : MONDAY TO FRIDAY 08.00 AM - 05.00 PM

MOBILE NUMBER : +66(0) 95-740-7404 PHONE NUMBER: +66(0) 2-880-9511 FAX : +66(0) 2-880-9512

E MAIL : T.WORAYUTTHAKARN\_PETE\_F@YAHOO.COM

๑๓๑ ปี  
ที่มุ่งมั่น  
สู่ภารกิจที่ท้าทาย

การก่อสร้างบริเวณที่ตั้งอาคารโรงงาน  
อู่ทหารเรือพระจุลจอมเกล้า  
ราวปี ๒๕๒๒ เนื่องจากเป็นพื้นที่  
อาณาบริเวณปากแม่น้ำการก่อสร้าง  
อาคารโรงงาน จึงต้องมีการลงเข็ม  
อย่างแข็งแรงเนื่องจากต้องรับน้ำหนัก  
มหาศาลของเครื่องจักรกลนานาชนิด



# ระบบป้องกันการกัดกร่อน ด้วยกระแสไฟฟ้าสำหรับตัวเรือเหล็ก (ICCP)

ท้าวเอก ดิเรก ขจรรัตน์  
ประจำกรมกำลังพลทหารเรือ



## ๑. ความเป็นมา

บทความนี้จะกล่าวถึงโครงการวิจัยซึ่งได้รับการสนับสนุนงบประมาณจาก วท.กท. ที่กำลังดำเนินการอยู่ ใช้ชื่อโครงการวิจัยและพัฒนาระบบป้องกันการกัดกร่อนด้วยกระแสไฟฟ้าสำหรับโครงสร้างและตัวเรือเหล็กใต้ทะเล (Impress Current Cathodic Protection (ICCP) for Ship Hull and Immersed Seawater Steel Structure) ระยะเวลาโครงการฯ ๒ ปี (งป.๖๓ – ๖๔) ซึ่งปัจจุบันได้ดำเนินการวิจัยมากกว่า ๑ ปีแล้ว ทั้งนี้ในแผนงาน (Road Map) ที่ได้นำเสนอ วท.กท. ตั้งแต่เมื่อเสนอโครงการฯ ถูกออกแบบไว้ให้เป็นโครงการต่อเนื่อง ๓ ระยะ ดังนี้

ระยะที่ ๑ พัฒนาระบบ ICCP ในห้องทดลองกับโมเดลจำลองการกัดกร่อน (งป.๖๓ – ๖๔)

ระยะที่ ๒ นำระบบ ICCP ที่พัฒนาขึ้นในระยะที่ ๑ ไปทดลองใช้ในสภาพจริงกับตัวเรือหรือโครงสร้างจำลอง

ระยะที่ ๓ นำผลการวิจัยไปสู่สายการผลิตเพื่อนำไปใช้กับเรือและโครงสร้างเหล็กที่ใช้ราชการอยู่จริง

## โครงการนี้เป็นระยะที่ ๑ ซึ่งมีขอบเขตของงานวิจัยดังนี้

๑. สร้างโมดูลจำลองการเกิดการกัดกร่อน (Corrosion Control Simulator Module: CSM) จำนวน ๑ โมดูล

ด้วยว่าความรุนแรงของการกัดกร่อน (Corrosion Intensity) แปรผันตามปัจจัยทางกายภาพของน้ำทะเล ได้แก่ อุณหภูมิ ความเค็ม ความเป็นกรด-ด่าง มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความต้านทานไฟฟ้าของน้ำทะเล (Seawater Electrical Resistance) และปัจจัยสิ่งแวดล้อมอื่น ๆ ได้แก่ ความเร็วสัมพัทธ์ของกระแส น้ำ และการ Coating ซึ่งปัจจัยเหล่านี้จะต้องนำมาพิจารณาในการออกแบบระบบ ICCP ดังนั้นเพื่อให้ได้ข้อมูลและเกิดความเข้าใจเชิงลึกถึงพฤติกรรม (Behavior) การแปรผัน (Variation) และความรุนแรง (Intensity) ของการกัดกร่อนจากการเปลี่ยนแปลงปัจจัยต่างๆ ที่สามารถเกิดขึ้นได้ในสภาพสิ่งแวดล้อมการใช้งานจริง จึงต้องสร้างโมดูลจำลองการเกิดการกัดกร่อน (Corrosion Control Simulator Module: CSM) เพื่อจำลองการกัดกร่อนที่สามารถควบคุมสภาพแวดล้อมต่าง ๆ ได้ โดย CSM มีลักษณะเป็นอ่างบรรจุน้ำทะเล ติดตั้งอุปกรณ์ทางไฟฟ้าและอุปกรณ์ทางกลที่จำเป็นในการจำลองต่าง ๆ ได้แก่ เครื่องวัดทางไฟฟ้าต่าง ๆ เช่น แอมป์มิเตอร์ โวลต์มิเตอร์ ปั๊มน้ำเพื่อสร้างการไหลเวียนของน้ำทะเล ชุดจ่ายไฟและชุดควบคุม (Power Supply and Control Unit) จุดติดตั้ง Anode อิเล็กโทรดอ้างอิง (Reference Electrode) และ Sensor ต่าง ๆ เช่น Temp Sensor, Salinity Sensor, Flow Rate Sensor เป็นต้น

๒. ข้อมูลในข้อ ๑ จะถูกนำมาพิจารณาประกอบการออกแบบและสร้างต้นแบบระบบ Impress Current Cathodic Protection (ICCP) และทดสอบทดลองการทำงานกับ CSM จำนวน ๑ ระบบ

## ๒. หลักการและเหตุผล

ก่อนที่กล่าวถึงรายละเอียดขั้นตอนการวิจัย จะขอกล่าวถึงภาพกว้างของการป้องกันการกัดกร่อนที่มีอยู่ใน ทร. พอสังเขป ตัวเรือเหล็ก (Steel Ship Hull) ใต้แนวน้ำสามารถเกิดการกัดกร่อน (Corrosion) ได้เนื่องจากปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมี (Electrochemical Reaction) ที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติระหว่างน้ำทะเลและตัวเรือเหล็ก ซึ่งการกัดกร่อนนี้หากปล่อยให้เกิดขึ้นเป็นเวลานาน โดยไม่ได้รับการป้องกันจะทำให้เกิดการผุกร่อน เกิดความเสียหายต่อเรือ นอกจากเรือแล้ว ทร. มีรางยกเรือ (Slip Way) ที่มีส่วนประกอบที่เป็นโครงสร้างเหล็กใต้ทะเล (Immersed Seawater

Steel Structure) สำหรับนำเรือขึ้นมาซ่อมทำตัวเรือได้แนวหน้าและการซ่อมทำเพลลาและใบจักรเรือ ที่ต้องได้รับการป้องกันการกัดกร่อนเช่นเดียวกับเรือ เพื่อดำรงสภาพความพร้อมใช้ราชการ ซ่อมทำเรือ

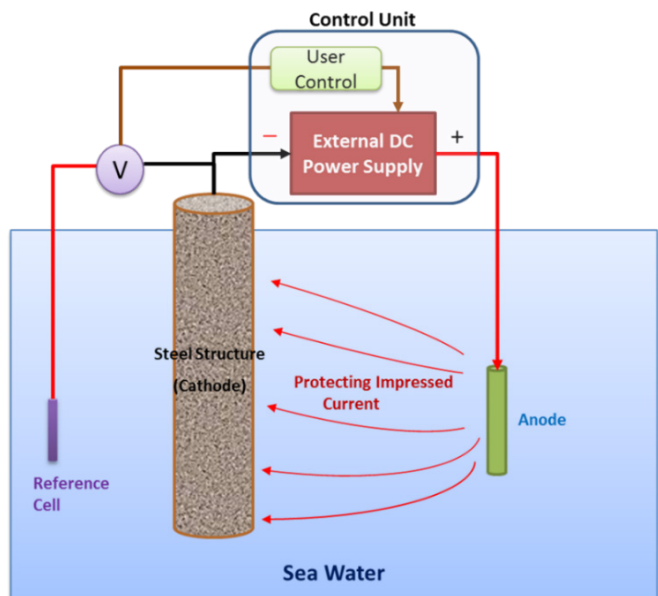
การป้องกันการกัดกร่อนของตัวเรือ และรางยกเรือในปัจจุบันสามารถกระทำได้ใน ๓ ลักษณะ ได้แก่ การทาสีกันสนิม (Coating) การใช้ระบบสังกะสีกันกร่อน (Sacrificial Anode Cathodic Protection: SACP) และการใช้ระบบกระแสไฟฟ้ากันกร่อน (Impressed Current Cathodic Protection: ICCP) แต่แต่ละลักษณะมีประสิทธิภาพและข้อดี-ข้อเสียต่างกัน โดยในปัจจุบันระบบ ICCP เป็นเทคโนโลยีสำหรับการป้องกันการกัดกร่อนที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย ทั้งในเรือสินค้า เรือรบ และโครงสร้างเหล็กใต้ทะเล เนื่องจากเมื่อพิจารณาในแง่ของความสะดวกในการติดตั้ง ประสิทธิภาพ การบำรุงรักษาและงบประมาณในการบำรุงรักษาในระยะยาวแล้ว มีข้อได้เปรียบ กว่าอีก ๒ วิธี อย่างไรก็ตามระบบ ICCP ต้องการเทคโนโลยีและการออกแบบที่ซับซ้อนกว่า

การป้องกันการกัดกร่อนของตัวเรือและโครงสร้างเหล็กใต้ทะเลด้วยวิธีการทาสีกันสนิม (Coating) เป็นวิธีการพื้นฐานสำหรับการป้องกันการกัดกร่อน โดยวิธีการนี้เป็นการป้องกันการกัดกร่อนโดยไม่ให้เหล็ก (Bare Steel) สัมผัสกับน้ำทะเลโดยตรง ซึ่งสීමีการเสื่อมสภาพไปตามเวลาขึ้นอยู่กับคุณภาพของสี กระบวนการเตรียมพื้นผิวและการทาสี ประกอบกับอาจเกิดการชำรุดขณะการใช้งานทำให้สีหลุดร่อนออกก่อนเวลาทำให้เนื้อเหล็กสัมผัสกับน้ำทะเลโดยตรงซึ่งจะทำให้เกิดการกัดกร่อน ณ จุดที่ชำรุด ดังนั้นวิธีการใช้สังกะสีแอโนดกันกร่อน (SACP) จึงเป็นมาตรการที่ใช้ควบคู่กันในกรณีที่สีกันสนิมไม่สมบูรณ์หรือชำรุดจากการใช้งาน อย่างไรก็ตามวิธี SACP มีข้อด้อย ๒ ประการคือ ประการแรก ด้วยหลักการทำงานของระบบ SACP สังกะสีแอโนดนั้นเมื่อใช้งานไปเรื่อยๆจะสลายตัวเนื่องจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ ๑ ทำให้ต้องมีการเปลี่ยนสังกะสีแอโนดซึ่งวงรอบการเปลี่ยนขึ้นอยู่กับสภาพการกัดกร่อนและขนาดของตัวสังกะสีซึ่งโดยปกติไม่เกิน ๑-๒ ปี ประการที่สองอำนาจการป้องกันครอบคลุมบริเวณไม่กว้าง จึงต้องใช้จำนวนสังกะสีแอโนดจำนวนมากและในกรณีของรางยกเรือการเปลี่ยนตัวสังกะสีแอโนดนั้นทำได้ยากเนื่องจากต้องทำได้น้ำ



รูปที่ ๑ การสลายตัวของสังกะสีกันกร่อน ในระยะเวลาการใช้งาน

ระบบ ICCP โดยหลักการแล้วมีลักษณะคล้ายกับระบบ SACP ที่ว่าทั้ง ๒ ระบบ ใช้หลักการป้องกันการกัดกร่อนด้วยกระแสไฟฟ้าหากแต่แหล่งกำเนิดของกระแสไฟฟ้านั้นต่างกัน กล่าวคือ เมื่อเกิดสภาพการกัดกร่อนสังกะสีจะปล่อยกระแสไฟฟ้าออกมาด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมีซึ่งผลจากกระบวนการนี้สังกะสีไอออนจะเกิดการสลายตัวหรือเสียสละตัวเอง เป็นที่มาของคำว่า Sacrificial Anode และปริมาณกระแสไฟฟ้าจะถูกควบคุมและจำกัดด้วยขนาดและคุณสมบัติของสังกะสีไอออน (Self-regulated)

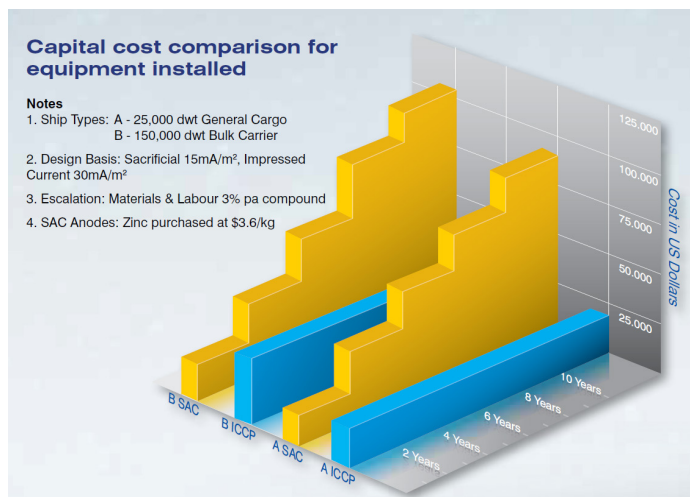


รูปที่ ๒ หลักการทำงานพื้นฐานของระบบ Impressed Current Cathodic Protection (ICCP)

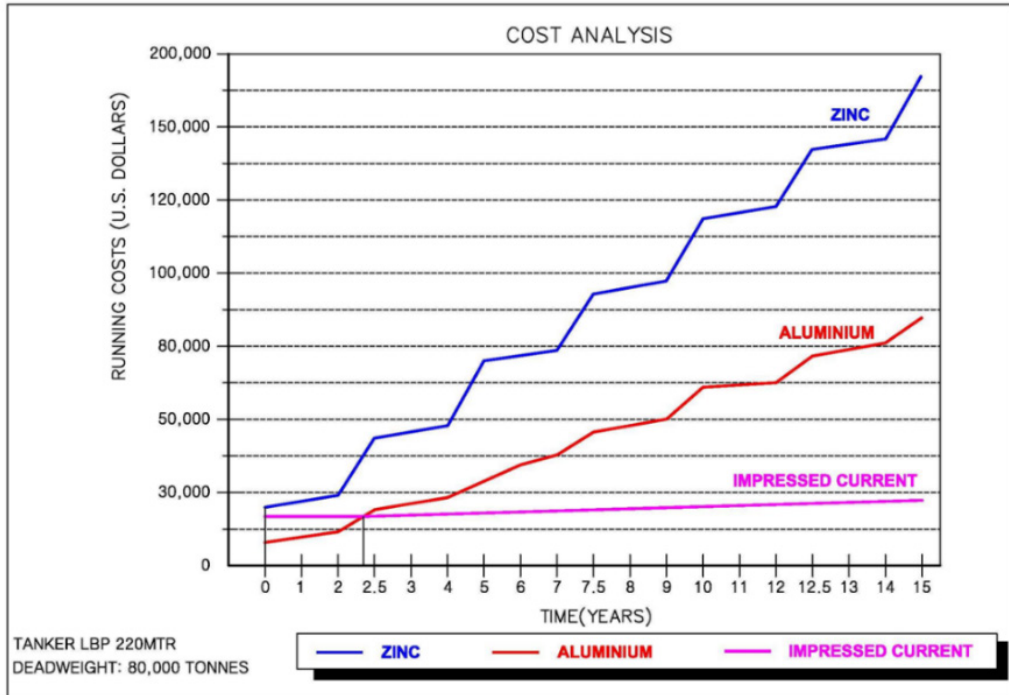
ในขณะที่ระบบ ICCP ดังแสดงในรูปที่ ๒ ใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงจากภายนอก (External DC Power Supply) ซึ่งสามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าได้มากเท่าที่ต้องการและแผ่กระจาย การป้องกันได้กว้างทำให้ใช้จำนวน Anode น้อยกว่าวิธี SACP มาก โดยปริมาณกระแสไฟฟ้า สามารถควบคุมจากภายนอกตามความต้องการของผู้ใช้ แบบ Manual และแบบ Automatic และทำให้ตัว Anode ที่ใช้สลายตัวน้อยมากขณะปล่อยกระแสไฟฟ้าซึ่งโดยปกติวงจรรอบการเปลี่ยน ทดแทนของ Anode มีระยะเวลาตั้งแต่ ๑๐ ปีขึ้นไป ขึ้นอยู่กับการออกแบบและชนิด Anode ที่เลือกใช้ นอกจากนี้จุดเด่นที่สำคัญอันหนึ่งของระบบ ICCP ที่ระบบ SACP ไม่สามารถทำได้ คือ ICCP สามารถถูกโปรแกรมให้มีการป้องกันแบบเกินเกณฑ์เล็กน้อย (Programmable Small Over Protection) ด้วยเหตุนี้ทำให้ระบบ ICCP มีข้อได้เปรียบกว่าระบบ SACP อย่างชัดเจนและ นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายสำหรับเรือรบ เรือสินค้า โครงสร้างเหล็กใต้น้ำ ท่อเหล็กใต้ดิน เป็นต้น สำหรับ ทร. ปัจจุบันระบบ ICCP มีใช้กับรางยกเรือที่ฐานทัพเรือพังงา และมีใช้กับเรืออย่างน้อย ๔ ลำ

ผู้ผลิตระบบ ICCP ที่ติดตั้งอยู่ใน ร.ล.กระบี่ ร.ล.ประจวบคีรีขันธ์ และ ร.ล.ภูมิพลอดุลยเดช ได้ทำการวิเคราะห์ด้านค่าใช้จ่าย (Cost Analysis) ในการติดตั้งระบบ ICCP เปรียบเทียบกับ ระบบ SACP ทั้งแบบที่ใช้สังกะสี (Zinc) และแบบที่ใช้อะลูมิเนียม (ไม่ได้กล่าวถึง ณ ที่นี้) ไว้ใน ช่วงระยะ ๑๐ ปี ดังแสดงในรูปที่ ๓ และ ๔ ซึ่งมีความสอดคล้องกันคือ ค่าใช้จ่ายเบื้องต้นเมื่อเวลา ติดตั้งสำหรับเรือสร้างใหม่ ระบบ ICCP มีค่าใช้จ่ายสูงกว่า อย่างไรก็ตามเมื่อเวลาผ่านไปในช่วง ๑๐ ปี ค่าใช้จ่ายของระบบ ICCP คงที่หรือเพิ่มขึ้นในอัตราที่ต่ำมากในขณะที่ค่าใช้จ่ายของระบบ SACP เพิ่มขึ้นเป็นขั้นบันไดและในปีที่ ๑๐ ค่าใช้จ่ายสูงกว่าระบบ ICCP ประมาณ ๕ - ๖ เท่า

รูปที่ ๓ การวิเคราะห์ค่าใช้จ่าย (Cost Analysis) เปรียบเทียบระหว่างระบบ ICCP และ SACP: ที่ท่าเรือทหารจาก ผู้ผลิตระบบ ICCP ที่ติดตั้งใน ร.ล.กระบี่ และ ร.ล.ประจวบคีรีขันธ์





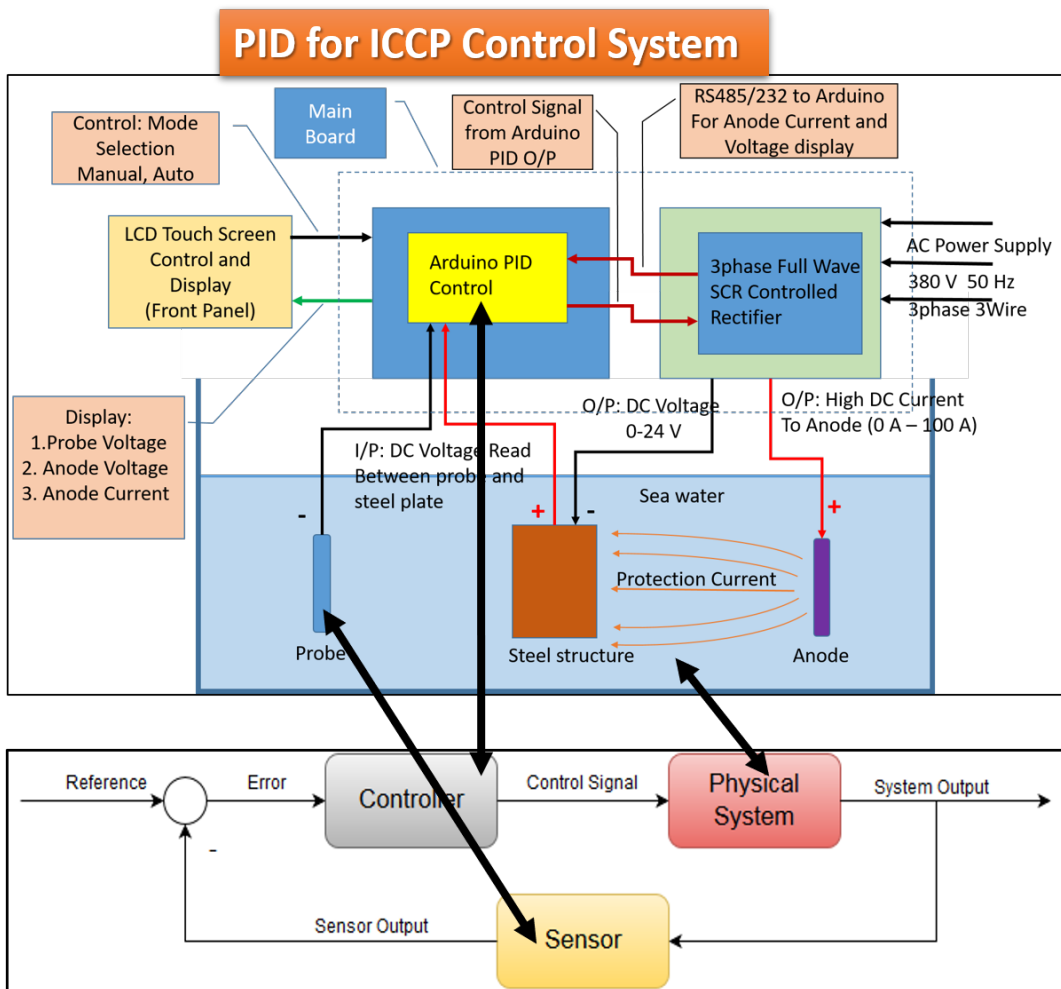


รูปที่ ๔ การวิเคราะห์ค่าใช้จ่าย (Cost Analysis) เปรียบเทียบระหว่างระบบ ICCP และ SACP: ที่มาเลเซีย จากผู้ผลิตระบบ ICCP ที่ติดตั้งใน ส.อ.ภูมิลวดอุยเคย

ด้วยประสิทธิภาพที่ดีในการป้องกันการกัดกร่อนและความต้องการการบำรุงรักษา ค่อนข้างต่ำ ทำให้เรือที่สร้างใหม่ของ ทร. ติดตั้งระบบ ICCP และคาดว่าในอนาคตเรือและ รางยกเรือจะใช้ระบบ ICCP แม้กระทั่งเรือและรางยกเรือที่ใช้งานอยู่ก็สามารถเปลี่ยนมาใช้ระบบ ICCP ได้ อย่างไรก็ตามการจัดหาใหม่สำหรับเรือทุกลำและรางยกเรือทั้งหมดเป็นงบประมาณ จำนวนไม่น้อยเพราะเป็นการจัดหาจากต่างประเทศ จึงไม่ง่ายที่ ทร. โดย อร. จะดำเนินการ จัดหาได้ครบถ้วน ทางคณะทำงานวิจัยฯ เห็นว่าระบบ ICCP เป็นระบบที่โดยหลักการแล้ว ไม่ซับซ้อนมากนัก หากมีการศึกษาวิจัยและพัฒนาอย่างจริงจัง สามารถสร้างต้นแบบระบบ ป้องกันการกัดกร่อนที่มีประสิทธิภาพ ออกแบบตรงตามความต้องการใช้งาน (Customized Design) และการซ่อมบำรุงได้เอง และสามารถใช้วัสดุภายในประเทศในการผลิตและการซ่อม บำรุงได้ อีกทั้งเป็นการส่งเสริมการวิจัยพัฒนาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพยุทธโธปกรณ์ของกองทัพเพื่อ การพึ่งพาตนเองและเพิ่มพูนองค์ความรู้ (Know how) ให้กับบุคลากรของ ทร.

### ๓. แนวคิดการออกแบบระบบ ICCP (ICCP system Conceptual Design)

รูปที่ ๕ แสดง Concept Design ของระบบ ICCP ซึ่งมีแนวทางจากการรวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูลจากต้นแบบ System Diagram และแบบ Wiring Diagram ระบบ ICCP ที่มีใช้อยู่แล้ว ของ ร.ล.ภูมิพลอดุลยเดช และชุด ร.ล.กระบี่ โดยระบบออกแบบให้มีทั้งโหมด Manual และ Auto ประกอบไปด้วยส่วนสำคัญหลักดังนี้



รูปที่ ๕ แสดง Conceptual Design ของระบบ ICCP

๑) Mainboard ประกอบไปด้วย ๒ ส่วนหลักได้แก่

ก) ชุด Rectifier แบบ Full-wave SCR controlled Rectifier (FSR) ซึ่งต้องการ Input เป็นระบบไฟฟ้ากระแสสลับ ๓๘๐V ๓เฟส ๕๐Hz เพื่อแปลงระบบไฟฟ้ากระแสสลับเป็น ไฟฟ้ากระแสตรงที่ปรับแรงดันและกระแสทางออกได้ (Controllable Voltage and Current) ระหว่าง ๐-๒๔ VDC และ ๐-๑๐๐ A ด้วยการควบคุม Firing angle ที่ขา Gate ของ Silicon Controlled Rectifier (SCR) หรือ Thyristor ทั้ง ๖ ตัว

ข) Arduino Microcontroller PID (AR PID) สำหรับ Auto โหมด AR PID รับ Input มาจาก Probe ซึ่งในที่นี้คือค่าแรงดันไฟฟ้าระหว่าง Reference Electrode กับชุดเหล็กทดลอง (Steel Test Set) ซึ่งจากนี้จะเรียกว่า Reference Voltage (VRef) แล้วนำมาแสดงผลที่หน้าจอ และประมวลผลแบบ PID (Proportional, Integral and Derivative ) Close-loop Control Scheme เพื่อ output ค่า Firing angle ที่เหมาะสมผ่าน Pulse Width Modulation (PWM) pin ของ Arduino ไปที่ขา Gate ของ Thyristor ทั้ง ๖ ตัว สำหรับ Manual โหมด Gate ของ Thyristor ทั้ง ๖ ตัวจะรับค่า Firing Angle มาจากผู้ใช้งาน (User) จากการปรับ Potentiometer ในขณะเดียวกัน AR PID จะอ่านค่า Voltage และ Current Output ของ FSR แล้วนำมาแสดงผลที่หน้าจอ AR PID

๒) Reference Electrode (Probe) เป็นส่วนที่วัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเทียบกับชุดเหล็กทดลอง VRef โดยขั้วบวกต่อกับชุดเหล็กทดลอง และขั้วลบต่อกับ Reference Electrode เพื่อเป็น Input ให้กับ AR PID ซึ่งในการประมวลผล PID ต้องมีการกำหนดค่าแรงดันไฟฟ้าไว้ก่อน (Set Voltage) ซึ่งค่าแรงดันไฟฟ้าที่เหมาะสม เช่น Zinc Reference Electrode ค่าที่ใช้อยู่ระหว่าง ๐-๒๒๐ mV

๓) Anode เป็นส่วนที่ปล่อยกระแสไฟฟ้า (Impressed Current) ไปยังชุดเหล็กทดลอง เพื่อให้แรงดันไฟฟ้าระหว่าง Reference Electrode กับ ชุดเหล็กทดลองใกล้เคียงกับค่าแรงดันไฟฟ้าที่กำหนดไว้ (Set Voltage) มากที่สุดกล่าวคืออยู่ย่านเบี่ยงเบนที่กำหนดไว้ เช่น  $\pm 5\%$  จากค่า Set Voltage เป็นต้น

๔) จอแสดงผล (Display Module) จะแสดงผลค่าแรงดันไฟฟ้าระหว่าง Reference Electrode กับชุดเหล็กทดลอง ค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสด้านที่ FCR ป้อนไปที่ Anode

การเทียบเคียง Concept Design ของระบบ ICCP กับระบบ PID Control Scheme เริ่มจากเมื่อ Sensor หรือ Probe หรือ Reference Electrode อ่านค่า VRef AR PID ก็ทำการเปรียบเทียบกับค่า Set Voltage (Reference) ซึ่งจะได้ค่า error มาแล้วค่า error จะถูกส่งเข้าประมวลผลด้วย AR PID Close-loop Control Scheme ซึ่งจะได้ Output เป็น Control Signal ออกมา ซึ่ง Control Signal นี้ก็คือ Firing Angle ที่ส่งไปยัง Physical System ในที่นี้หมายถึง

ตั้งแต่ขา Gate ของ Thyristor ของ Full-wave SCR Controlled Rectifier (FCR) แล้วส่ง DC impressed Current ไปยัง Anode ออกไปที่ขั้วต่อเหล็กทาสอง ทำให้ VRef ที่ Reference Electrode อ่านได้เปลี่ยนไปก็ส่งไปเปรียบเทียบกับค่า Set Voltage แล้วได้ค่า error ระบบจะดำเนินเป็น loop เช่นนี้ไปจนค่า error เข้าใกล้ศูนย์ (๐) หรืออยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดไว้ระบบจึงหยุดการจ่ายกระแสไฟฟ้า

#### ๔. ข้อพิจารณาการออกแบบระบบ ICCP (Design Criteria of ICCP System)

การออกแบบระบบ ICCP มีข้อพิจารณาหลักๆ ดังนี้

๔.๑ อายุการใช้งานของระบบ (Design Life) ซึ่งกำหนดด้วยการเลือกประเภทวัสดุของ Anode เนื่องจากวัสดุที่สามารถนำมาใช้เป็นอานอดมีให้เลือกได้หลายประเภท โดยพิจารณาจากความสามารถในการจ่ายกระแสไฟฟ้าต่อพื้นที่ (Current Density) และอัตราการสึกกร่อน (Consumption Rate) ตัวอย่างวัสดุที่เลือกใช้เป็นอานอดแสดงในตารางที่ ๑ จากตารางจะเห็นว่า Pt on Ti หรือ Platinum-coated Titanium ให้ค่า Current Density สูงสุดอยู่ในช่วง ๕๔๐-๑๐๘๐ A/m<sup>2</sup> และมีอัตราการสึกกร่อนต่ำสุด คือ ๖ mg/A-yr ในขณะที่ Graphite มีค่า Current Density ต่ำกว่ามาก คือ ๑๐.๘ - ๔๐ A/m<sup>2</sup> และมีอัตราการสึกกร่อนค่อนข้างสูงกว่ามาก คือ ๐.๒๓ - ๐.๔๕ kg/A-yr อย่างไรก็ตามราคาของ Pt on Ti ก็สูงกว่ามากเช่นกัน ฉะนั้นการเลือกอานอดให้เหมาะสมกับขนาดของระบบและอายุการใช้งานจึงอาจไม่ตายตัว เช่น เรือขนาดใหญ่อาจเลือกใช้อานอดที่มี Current Density ไม่สูงก็ได้แต่จำนวนจะมากกว่า Titanium อานอดและอายุการใช้งานสั้นกว่าแต่มีค่าใช้จ่ายต่ำกว่ามาก ดังนั้นนอกจากพิจารณาทางด้านทางเทคนิคแล้วก็ต้องพิจารณาเรื่องด้านทางงบประมาณควบคู่กันไปเพื่อการออกแบบเปรียบเทียบ (Design Trade-off)

๔.๒ ความต้องการกระแสไฟฟ้าสูงสุด (Maximum Desired Current) พิจารณาจากพื้นที่ของเหล็กใต้แนวน้ำทะเลที่ต้องการป้องกันประกอบกับการเลือกประเภทของอานอดซึ่งต้องมีคุณสมบัติที่มีความต้านทานต่ำ และทนทานต่อความเสียหายทางกายภาพได้ดี ซึ่งจะสัมพันธ์โดยตรงกับข้อ ๔.๑

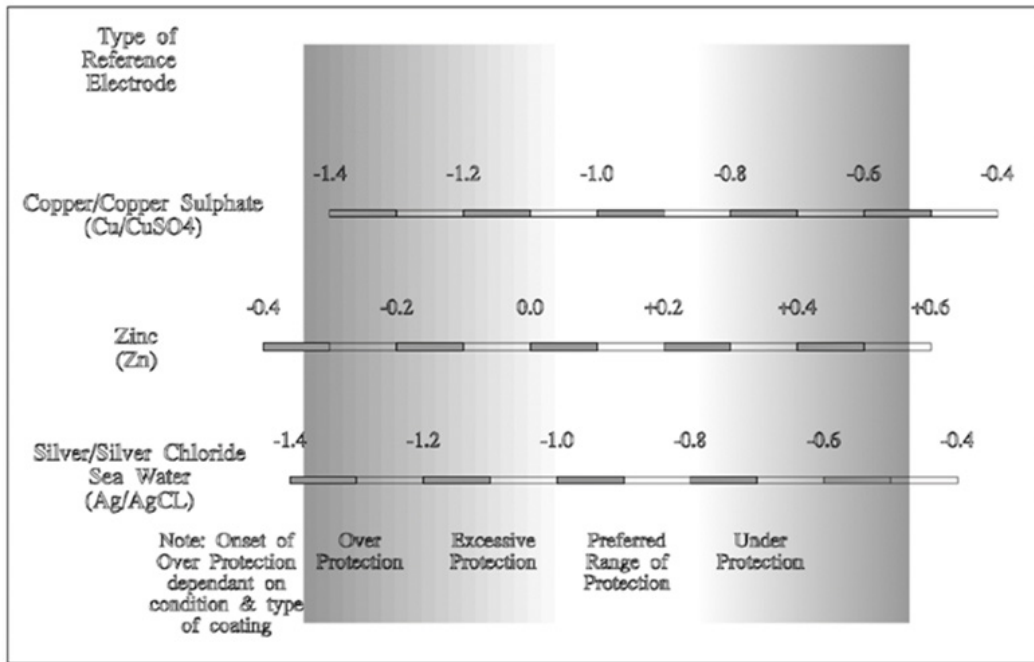
Anode Material	Current Density (A/m <sup>2</sup> )	Consumption rate per A-yr
Pt on Ti	540 - 1080	6 mg
Lead Silver	160 - 220	0.045 - 0.09 kg
Graphite	10.8 - 40	0.23 - 0.45 kg
High Silicon Cast iron	10.8 - 40	0.23 - 0.45 kg

ตารางที่ ๑ แสดง Typical Anode Current Density และอัตราการสึกกร่อน (Consumption Rate)

APPROXIMATE CURRENT REQUIREMENTS FOR CATHODIC PROTECTION OF STEEL	
Environmental Conditions	Current Density
	mA/m <sup>2</sup>
Immersed in Seawater	
Stationary	
Well coated	1 to 2
Poor or old coating	2 to 20
Uncoated	20 to 30
Low velocity	
Well coated	2 to 5
Poor or old coating	5 to 20
Uncoated	50 to 150
Medium velocity	
Well coated	5 to 7
Poor or old coating	10 to 30
Uncoated	150 to 300
High velocity	
Poor coating or uncoated	250 to 1000

ตารางที่ ๒ แสดงค่าประมาณ Required Current Density สำหรับสภาพของ Coating และความเร็วสัมพัทธ์กับน้ำทะเลต่างๆ

๔.๓ สภาพสิ่งแวดล้อม (Environment Conditions) ได้แก่ สภาพการ Coating ของพื้นผิวเหล็ก ที่ต้องการป้องกันและความเร็วสัมพัทธ์ของน้ำทะเล (Velocity) ตารางที่ ๒ แสดงค่าประมาณ ความต้องการ Current Density เพื่อยืนยันว่าเหล็กได้รับการป้องกันแล้วสำหรับความเร็วสัมพัทธ์ (Velocity) แบ่งออกเป็น ๔ กรณี ได้แก่ ไม่มีความเร็วสัมพัทธ์ (Stationary) ความเร็วต่ำ (Low Velocity) และ ความเร็วปานกลาง (Low Velocity) และความเร็วสูง (High Velocity) และ สภาพการ Coating ๓ กรณี ได้แก่ Well Coated, Poor or Old Coated และ Uncoated (Bare Steel) จะเห็นว่าค่า Current Density ที่ต้องการจะมีค่าสูงสุดสำหรับความเร็วสูงสุดและเหล็กที่ไม่มีการ Coating และต่ำสุดเมื่อไม่มีความเร็วและเหล็กที่มีการ Coating ที่ดี (Well Coated) โครงการนี้ จะทำการจำลองสภาพการ Coating ในลักษณะต่าง ๆ กันและจำลองความเร็วสัมพัทธ์ให้สอดคล้อง กับความเร็วการใช้เรือให้ครอบคลุมให้มากที่สุด เพื่อนำข้อมูลไปใช้ในการออกแบบระบบ ICCP ให้สามารถรองรับการใช้เรือในลักษณะต่าง ๆ ได้



รูปที่ ๓ แสดง Reference Electrode Voltage สำหรับ Reference Electrode

๔.๔ แรงดันไฟฟ้าของอิเล็กโทรดอ้างอิง (Reference Electrode Voltage: VRef) เป็นตัวบ่งชี้ว่าระบบได้ให้กระแสไฟฟ้า Current Density ที่ต้องการเพื่อยืนยันการเกิดการป้องกันแล้ว ดังนั้นการออกแบบในทางปฏิบัติจะใช้ VRef เป็นตัวเกณฑ์และเป็น Input ของระบบ ICCP ดังที่กล่าวแล้วในแนวคิดการออกแบบระบบ ICCP ซึ่งโดยทั่วไปสำหรับระบบ ICCP ที่ใช้สำหรับน้ำทะเลจะใช้ Reference Electrode อยู่ ๒ แบบด้วยกันคือ Zinc (Zn) และ Silver/Silver Chloride (Ag/AgCl) ซึ่งความแตกต่างหลักอยู่ที่อายุการใช้งานของ Ag/AgCl จะยาวนานกว่าหรือสึกหรอน้อยกว่าแต่มีราคาแพงกว่า และ ย่านการวัดแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการกำหนดในระบบ (Set Voltage) จะแตกต่างกัน ซึ่งการกำหนด Set Voltage ของ Reference Electrode นี้จะแบ่งการป้องกันการกัดกร่อนออกแบบ ๔ ย่าน ได้แก่ Under Protection, Preferred Range of Protection, Excessive Protection และ Over Protection ดังแสดงในตารางที่ ๓ โดยย่าน Preferred Range of Protection ของ Zn และ Ag/AgCl คือ ๐ ถึง +๒๒๐ mV และ -๑๐๐๐ ถึง -๘๐๐ mV ตามลำดับ ทั้งนี้การกำหนด Set Voltage จะเลือกกำหนดค่าเดียวซึ่งขึ้นอยู่กับประเภทและสภาพของการ Coating

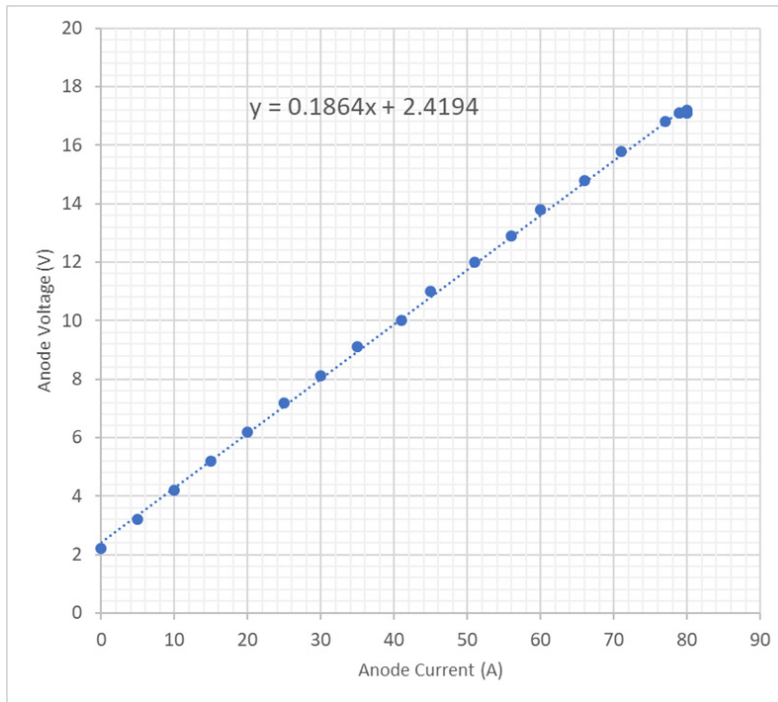
## ๕. การรวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูลระบบ ICCP ของเรือ

เพื่อรวบรวมข้อมูลระบบ ICCP ที่มีใช้อยู่ในเรือนำไปประกอบการออกแบบระบบ ICCP ทางคณะทำงานวิจัยฯได้ทำการทดสอบเดินระบบ ICCP ใน Mode Manual ของ ร.ล.ภูมิลล อุดุลยเดช ร.ล.กระบี่ และ ร.ล.ประจวบคีรีขันธ์ ขณะเรือจอดเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าของแอโนด (Anode Current and Anode Voltage) และแรงดันไฟฟ้าของ Reference Electrodes ที่สามารถนำไปเทียบเคียงในทางทฤษฎีและเป็นแนวทางในการเขียนโปรแกรมควบคุมระบบ ICCP ให้เกิดมีความสัมพันธ์ในลักษณะเดียวกันได้ ซึ่งผลการทดสอบในเรือทั้ง ๓ ลำ ได้ผลไปในลักษณะเดียวกันแต่นำเสนอข้อมูลของ ร.ล.ประจวบคีรีขันธ์เพียงลำเดียว ดังแสดงในตารางที่ ๓ ซึ่งเมื่อนำมาพล็อตกราฟจะสามารถวิเคราะห์ความสัมพันธ์ได้ชัดเจนขึ้น ดังแสดงในรูปที่ ๗ และ ๘

Manual Mode	Anode Voltage (V)	Anode Current (A)	Ref Electrode 1 (mV)	Ref Electrode 2 (mV)	Shaft Grounding Current (A)
0%	2.2	0	-20	-10	0.97
10%	4.2	10	-145	-140	1.68
20%	6.2	20	-250	-245	2.76
30%	8.1	30	-325	-320	4.1
40%	10	41	-380	-375	5.75
50%	12	51	-415	-415	7.86
60%	13.8	60	-455	-450	9.51
70%	15.8	71	-485	-485	11.67
80%	17.2	80	-510	-505	13.38
90%	17.1	80	-500	-500	13.33
100%	17.1	80	-495	-495	13.63

ตารางที่ ๓ แสดงค่าการวัดค่าต่างๆจากระบบ ICCP ใน Manual Mode ของ ร.ล.ประจวบคีรีขันธ์

รูปที่ ๗ แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Anode Current และ Anode Voltage ซึ่งเมื่อพิจารณากราฟและสมการที่ได้จากการทำ Linear Regression (Fit Curve) แบบเชิงเส้นซึ่งมีรูปแบบทั่วไปคือ  $y = mx + c$  ซึ่ง  $m$  คือค่า ความชัน (Slope) ของกราฟและค่า  $c$  คือค่าจุดตัดแกน  $y$  ค่า  $m$  เท่ากับ ๐.๑๘๖๔ และค่า  $c$  เท่ากับ ๒.๔ ตามลำดับเมื่อพิจารณาแล้วค่า  $m$  ในสมการก็คือค่าความต้านทานไฟฟ้าของระบบตามกฎของโอห์ม  $V = IR$  และเมื่อทำการแปลงค่าความนำไฟฟ้าของน้ำทะเลที่อุณหภูมิประมาณ ๓๐๐ ซึ่งมีค่าประมาณ ๕.๑ S/m จะได้ค่าความต้านทานเท่ากับ ๐.๑๘๖  $\Omega \cdot m$  ซึ่งสอดคล้องกับค่าที่ได้จากกราฟ (๐.๑๘๖๔)

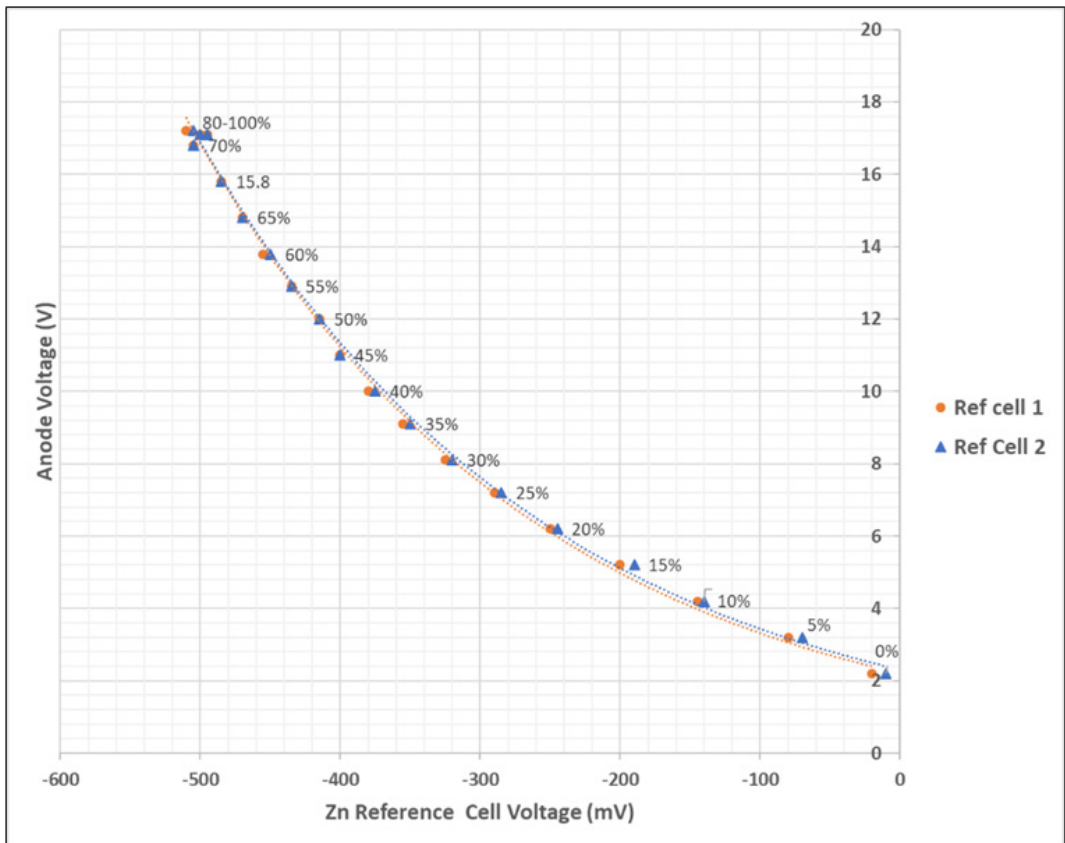


รูปที่ ๓ กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Anode Current 11a: Anode Voltage ระบบ ICCP ของ S.A.ประจวบฯ

รูปที่ ๘ แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าของอิเล็กโทรดอ้างอิง (Reference Electrode Voltage) ซึ่งมี ๒ ชุด (Ref Electrode ๑ และ Ref Electrode ๒) กับ Anode Voltage โดย Ref Electrode เป็น Zinc (Zn) ซึ่งปกติจะตั้งค่า Set Voltage ไว้ที่ +๒๐๐ mV ซึ่งหมายความว่าเมื่ออยู่ใน Automatic Mode หากค่า Ref Electrode Voltage ที่อ่านได้ลดลง (More negative) จาก +๒๐๐ เช่น ๕๐ mV, ๐ mV -๒๐ mV เป็นต้น Controller ของ ICCP จะไม่จ่ายกระแสไปที่ Anode ซึ่งจากตารางที่ ๓ Ref Electrode ๑ อ่านได้ -๒๐ mV Ref Electrode ๒ อ่านได้ -๑๐ mV กระแสที่ Anode เท่ากับ ๐ A ในทางกลับกันหาก ค่า Ref Electrode Voltage ที่อ่านได้เพิ่มขึ้น (Less Negative) จาก +๒๐๐ mV เช่น ๒๕๐ mV, ๓๐๐ mV เป็นต้น ระบบจะจ่ายกระแสไฟฟ้า (Anode Current) เพื่อให้ Ref Electrode Voltage กลับมาอยู่ที่ค่า +๒๐๐ mV ใน Manual Mode เมื่อปรับ Voltage Anode เพิ่มจาก ๐% (๒ V) ไปจนถึง ๑๐๐% (๑๗ V) จะเห็นว่าค่าแรงดัน Zn Ref Electrode Voltage ที่อ่านได้จะมีค่าเป็นลบมากขึ้น (More Negative) จาก ๐ mV ไปจนถึงประมาณ -๕๐๐ mV และระบบจ่ายกระแสสูงสุดที่ ๘๐ A โดยลักษณะความสัมพันธ์เป็นแบบแปรผกผันตรงแบบ Exponential โดยกระแสไฟฟ้าของ Anode ก็จะแปรผกผันแบบ Exponential เช่นเดียวกันเนื่องจากเราทราบแล้วว่า Anode Voltage และ Anode Current มีความสัมพันธ์ตรงแบบเชิงเส้น (Proportional Linearity)



อย่างไรก็ตามสถานะที่ค่า Ref Electrode Voltage จะอ่านได้เป็นค่าบวกมากกว่า +๒๐๐ mV ซึ่งจะชี้ว่าเกิดการกัดกร่อนจะไม่ปรากฏเมื่อทำการทดสอบในขณะเรือจอด (Stationary) และเมื่อตัวเรือใต้เหน้ามีการทำสีไว้ดีแล้ว เนื่องจากการทาสี (Coating) ถือว่าเป็นการป้องกันการกัดกร่อนวิธีหนึ่งด้วยอยู่แล้ว จึงต้องทดสอบขณะเรือเดินซึ่งไม่สะดวกในทางปฏิบัติและไม่สามารถควบคุมปัจจัยอื่น ๆ ได้มากนัก แต่สามารถทำได้ในห้องทดลองด้วยโมดูลจำลองการกัดกร่อน โครงการฯ นี้จะทำการจำลองให้เกิดสถานะการกัดกร่อนกล่าวคือ Ref Electrode Voltage อ่านได้เป็นค่าบวกมากกว่า +๒๐๐ mV มาก ๆ ในสภาพการ Coating ต่าง ๆ และรวบรวมข้อมูลประกอบการออกแบบได้รอบด้านมากยิ่งขึ้น



รูปที่ ๘ กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Zn Reference Electrode Voltage ทั้งสอง Electrode กับแรงดันไฟฟ้าของ Anode ระบบ ICCP s.a.ปรจวบฯ

## ๖. การสร้างโมดูลจำลองการกัดกร่อน (Corrosion Control Simulation Module: CSM)

รูปที่ ๑๐ แสดงแบบ ๓-D ของโมดูลจำลองการกัดกร่อน (Corrosion Control Simulation Module: CSM) ซึ่งมีส่วนประกอบหลักๆ อยู่ ๖ ส่วนด้วยกันได้แก่

๑) ตัวถังมีขนาดประมาณ ๑.๒ x ๑.๒ x ๑.๒ เมตร ทำด้วยวัสดุที่เป็นฉนวนที่บดหล่อเสริมโครงสร้างเหล็ก มีช่องกระจกใส (Glass view) ขนาด ๕๐ x ๕๐ ซม. เพื่อให้มองเห็นภายในตัวถังจากด้านนอกได้ ตั้งอยู่บนฐานแท่นเหล็กที่สามารถเคลื่อนย้ายได้ ถึงจะบรรจุน้ำทะเลประมาณ ๑ ลูกบาศก์เมตร

๒) ระบบปั้มน้ำสำหรับสร้างกระแสไฟฟ้าไหลวนในระบบปิดเพื่อให้เกิดความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างชุดเหล็กทดลอง (Steel Test Set) พร้อม Sensor วัดอัตราการไหลของน้ำทะเลในท่อ

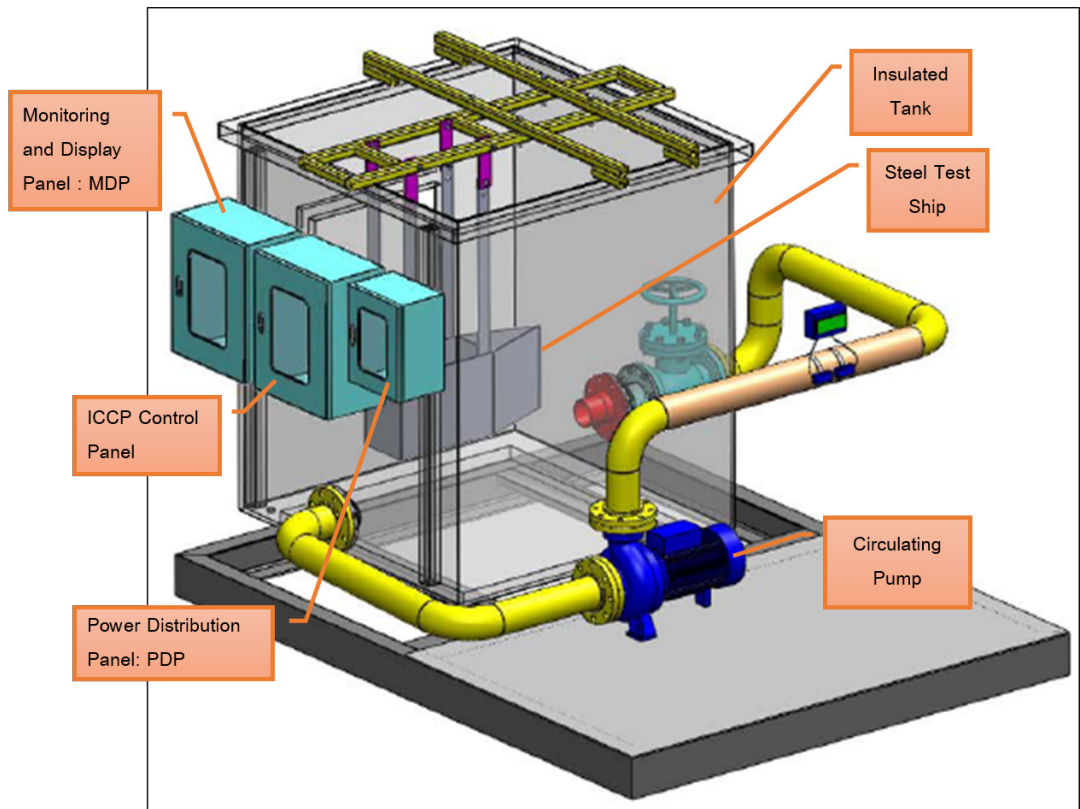
๓) ชุดเหล็กทดลอง (Steel Test Set) ที่ยึดติดกับโครงสร้างเหล็กด้านบนปากถังผ่านแผ่นฉนวนเพื่อไม่ให้ความต่อเนื่องทางไฟฟ้า (Electrical Discontinuity) ระหว่างชุดเหล็กทดลองกับโครงสร้างเหล็กด้านบน โดยชุดเหล็กทดลองจะเป็นเหล็กที่ใช้สร้างเรือมีทั้งที่เป็นเหล็ก Mild Steel และเหล็ก High Tensile

๔) ตู้ Monitoring and Display Panel (MDP) ประกอบด้วยชุด Sensors สำหรับตรวจวัดค่าทางสมุทรศาสตร์ของน้ำทะเลได้แก่ อุณหภูมิ ความเค็ม ความนำไฟฟ้า และค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) และแสดงที่จอแสดงผลหน้าตู้ Monitoring Panel รวมทั้งแสดงค่าทางไฟฟ้าได้แก่ ค่าแรงดันไฟฟ้าระหว่าง Reference Electrode และชุดเหล็กทดลองและค่าความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างน้ำทะเลกับชุดเหล็กทดลอง

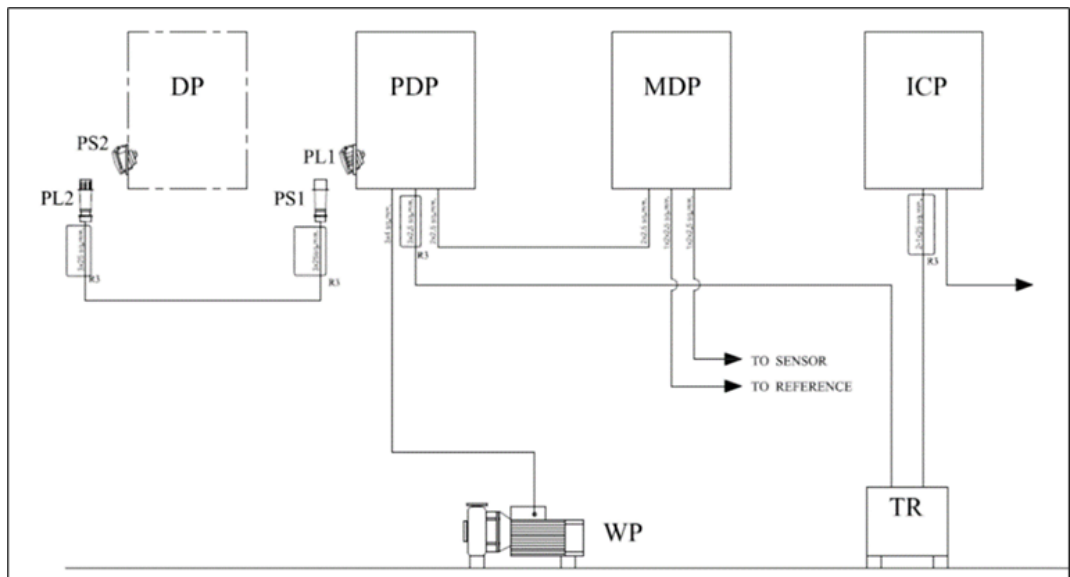
๕) ตู้ ICCP Control Panel ที่จะพัฒนาเป็นต้นแบบแล้วนำมาทดสอบการใช้งานกับ CSM

๖) ตู้ Power Distribution Panel (PDP)

ความก้าวหน้าการสร้างโมดูลจำลองการกัดกร่อน CSM แสดงในรูปที่ ๑๒



รูปที่ ๑๐ แสดงส่วนประกอบของ โมดูลจำลองการกัดกร่อน (Corrosion Control Simulation Module: CSM)



รูปที่ ๑๑ แสดง Wiring Diagram ของตู้ Panel ต่างๆที่ติดตั้งกับหัวถังของโมดูลจำลองการกัดกร่อน CSM

รูปที่ ๑๑ แสดง Single Line Diagram ของตู้ Panel ต่าง ๆ ที่จะติดตั้งกับตัวถังของโมดูลจำลองการก่อกวน CSM ประกอบด้วย ๓ ตู้ ได้แก่ ตู้ Power Distribution Panel (PDP) ซึ่งจะรับไฟ ๓๘๐V ๓phase ๕๐Hz มาจากตู้จ่ายไฟของโรงงาน (DP) เป็นลักษณะ Power Plug จากตู้ PDP นี้จะจ่ายไฟให้ ๓ ส่วนด้วยกัน ได้แก่ ๑) ไฟ ๓๘๐V ๓phase ไปที่มอเตอร์ปั้มน้ำทะเล (WP) ๒) ที่หม้อแปลงเพื่อลดระดับแรงดันไฟฟ้า (Step Down) จ่ายให้ตู้ ICP และ ๓) ไฟ ๒๒๐V ๑ phase ไปที่ MDP (Monitoring and Display Panel) เพื่อจ่ายโหลดให้กับระบบการตรวจวัดและแสดงผล



ก)



ข)



ค)



ง)

รูปที่ ๑๒ แสดงความก้าวหน้าการสร้างโมดูลจำลองการก่อกวน CSM ก) ตัวถังของมอเตอร์เรือเหล็ก ข) และ ค) โครงสร้างฐานกันเหล็ก ง) ติดตั้งกับฐานกัน ง) ติดตั้งบนน้ำและท่อทาง และ ฉ) ชุดเหล็กจำลอง (Steel Test Set)



จ)



ข)

รูปที่ ๑๒ (ต่อ) แสดงความก้าวหน้าการสํารวจโมดูลจำลองการกักต้อน CSM ก) ตัวถังอนุพลหล่อเสริมเหล็ก ข) และ ค) โครงสร้างฐานแท่นเหล็ก ง) ติดตั้งถังฐานแท่น จ) ติดตั้งบันไดและท่อกวาง และ: ฉ) ชุดเหล็กจำลอง (Steel Test Set)

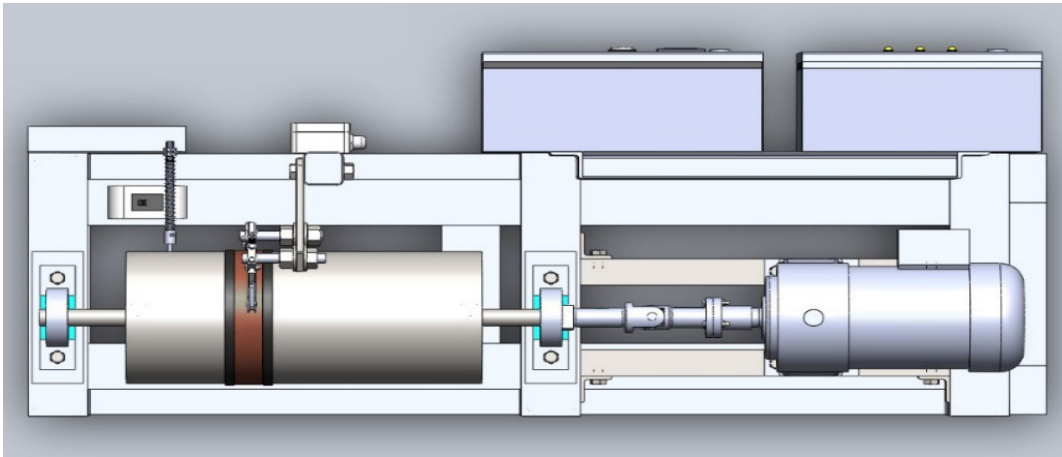
## ๗. สรุป

ปัจจุบันโครงการวิจัยฯ สามารถดำเนินไปตามแผนงานได้ค่อนข้างดีแม้ได้รับผลกระทบจาก COVID-๑๙ ทำให้เกิดความล่าช้าในการดำเนินงานอยู่บ้าง อย่างไรก็ตามคาดว่าโมดูลจำลองการกักต้อน CSM จะพร้อมสำหรับการจำลองการกักต้อนได้ภายใน พ.ย.๖๓ โดยจะดำเนินการจำลองการกักต้อนในสภาวะต่าง ๆ อย่างน้อย ๓-๔ เดือน ขณะเดียวกันการออกแบบระบบ ICCP การเขียนแบบ การเขียนโปรแกรมควบคุมและแสดงผล และสร้างต้นแบบก็ดำเนินการควบคู่กันไป เพื่อว่าเมื่อการจำลองฯ ดำเนินการเรียบร้อยและได้ข้อมูลที่ต้องการแล้วจะเป็นเวลาเดียวกันกับที่ต้นแบบระบบ ICCP สร้างเสร็จ และสามารถทดสอบทดลองการทำงานของระบบกับ CSM ได้ ซึ่งตามแผนงานอยู่ประมาณ ก.พ.๖๔ หลังจากนั้นจะเป็นทดลองการทำงานอย่างต่อเนื่องและปรับแต่ง แกะไขข้อบกพร่องให้เกิดความเสถียรของระบบต่อไปและสรุปปิดโครงการใน ต.ค.๖๔

คณะทำงานโครงการฯ มีความตั้งใจและมั่นใจว่าองค์ความรู้ที่เกิดจากการค้นคว้าวิจัย ทดลองอย่างจริงจังจะนำไปสู่ผลผลิตต้นแบบระบบ ICCP และปรับปรุงพัฒนาแก้ไขข้อบกพร่อง ทดสอบการทำงานจนสามารถนำไปใช้งานได้จริงและเข้าสู่การผลิตตามแผนงานระยะ ๒ และ ๓ แม้กระทั่งต่อยอดต่อไปได้อย่างเป็นรูปธรรม และหวังว่าบทความนี้จะเป็ประโยชน์สำหรับผู้เกี่ยวข้องและผู้สนใจ

# Shaft Grounding Device (SGD) สำหรับติดตั้งที่เพลลาใบจักรเรือ

นาวาเอก ดิเรก ขจรรัตน์  
ประจำกรมกำลังพลทหารเรือ



## ๑. กล่าวนำ

กรมอุทการเรือได้รับอนุมัติให้ดำเนินการวิจัย โดยทุน ทร.ในหัวข้อ โครงการวิจัยและพัฒนาอุปกรณ์ Shaft Grounding Device (SGD) สำหรับติดตั้งที่เพลลาใบจักรเรือ ระยะเวลา ดำเนินโครงการ ๑ ปี (งป.๖๓) โดยมี น.อ.ดิเรก ขจรรัตน์ เป็นนายทหารโครงการฯ ซึ่งโครงการฯ มีวัตถุประสงค์และขอบเขตการวิจัยดังนี้

### วัตถุประสงค์

๑. เพื่อพัฒนาต้นแบบอุปกรณ์ Shaft Grounding Device พร้อมระบบแจ้งเตือน
๒. สร้างองค์ความรู้ (Know How) อุปกรณ์ Shaft Grounding Device พร้อมระบบแจ้งเตือนที่เกิดจากการวิจัย

### ขอบเขตการวิจัย

๑. สร้างและทดลองอุปกรณ์ Shaft Grounding Device บนโรงงาน (ห้องทดลอง)
๒. วางแผนการติดตั้งทดสอบ Shaft Grounding Device บนเรือ

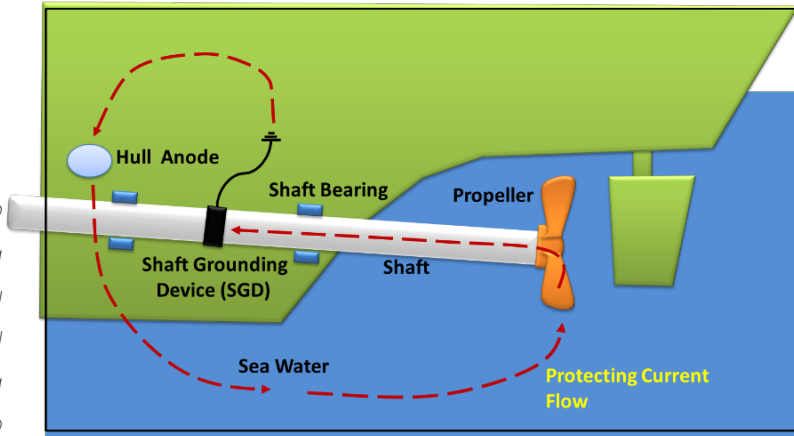
คณะทำงานฯ ได้ดำเนินการวิจัยตามวัตถุประสงค์และขอบเขตของการวิจัยเรียบร้อยแล้ว และเห็นว่าควรนำผลผลิตและความรู้ความเข้าใจจากงานวิจัยนี้มาเผยแพร่เพื่อเป็นประโยชน์ต่อผู้เกี่ยวข้องและผู้สนใจ

## ๒. ความเป็นมาของการวิจัย

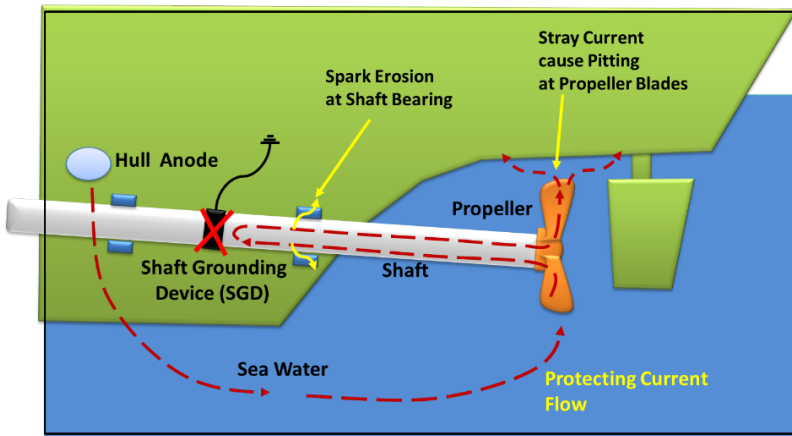
ปัจจุบันเรือใน ทร. ใช้ระบบป้องกันการกัดกร่อนที่เรียกว่าคาโทดิกโพรเทคชั่น (Cathodic Protection: CP) ซึ่งแบ่งออกเป็น ๒ แบบ ได้แก่ แบบใช้สังกะสีกันกร่อน (Sacrificial Anode) และแบบใช้กระแสไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายภายนอก (Impressed Current) โดยจุดประสงค์เพื่อป้องกันไม่ให้ตัวเรือใต้แนวน้ำ (Ship Hull) เพลลา (Shaft) และใบจักรเรือ (Propeller) เกิดการกัดกร่อน ตัวอาโนดซึ่งติดตั้งอยู่ที่ตัวเรือ (Hull Anode) มีหน้าที่จ่ายกระแสไฟฟ้าป้องกัน (Protection Current) ไปยังตัวเรือ ทำให้ตัวเรือได้รับการป้องกัน แต่การที่เพลลาและใบจักรเรือจะได้รับการป้องกันด้วยนั้น เพลลาและใบจักรเรือต้องเชื่อมต่อทางไฟฟ้า (Electrical Bonding) กับตัวเรือ ไม่ว่าจะ CP จะเป็นแบบใดก็ตาม ในกรณีเรือจอด (เพลลาไม่หมุน) น้ำหนักเพลลาที่กดลงบนแบร์ริงรองรับเพลลา (Shaft Bearing) จะทำให้เพลลาและตัวเรือต่อเชื่อมทางไฟฟ้าผ่านทางแบร์ริงรองรับเพลลา อย่างไรก็ตามเมื่อเพลลาหมุนเพลลาจะยกตัวขึ้นและด้วยฟิล์มน้ำมันหล่อลื่น (Oil film) ทำให้เพลลาและตัวเรือไม่เชื่อมต่อทางไฟฟ้า (Insulated) (เกิดความต้านทานทางไฟฟ้าระหว่างแบร์ริงรองรับเพลลากับเพลลา) ดังนั้นเพลลาและใบจักรเรือจะไม่ถูกปกป้องจากระบบ CP ส่งผลให้เพลลาและใบจักรเรือเกิดการกัดกร่อนและเกิดความเสียหายต่อแบร์ริงรองรับเพลลาได้ (Shaft Bearing)

Shaft Grounding Device (SGD) เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เชื่อมต่อทางไฟฟ้าระหว่างเพลลาใบจักรและตัวเรือ เพื่อให้เพลลาและใบจักรได้รับการป้องกันจากระบบป้องกันการกัดกร่อน CP ตลอดเวลา SGD ติดตั้งอยู่ที่เพลลาใบจักรส่วนที่อยู่ในตัวเรือ หลักการทำงานพื้นฐานคือ ต้องไม่มีการขาดตอน (Electrical Discontinuity) ของการไหลของกระแสไฟฟ้าป้องกัน (Protecting Current Flow) ในวงจรไฟฟ้า (Close Circuit loop) ที่ไหลออกจาก Hull Anode สู่ น้ำทะเล (Electrolyte) เข้าสู่ใบจักรเรือ เพลลาและผ่าน SGD ลงตัวเรือและกลับเข้าสู่ Hull Anode ดังแสดงในรูปที่ ๑ SGD ต้องดำรงการเชื่อมต่อทางไฟฟ้าตลอดเวลาเพื่อให้กระแสไฟฟ้าป้องกันไหลได้อย่างสะดวกหรืออีกนัยหนึ่งให้เกิดความต้านทานทางไฟฟ้าน้อยที่สุดหรือเกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าตกคร่อมระหว่างรอยต่อให้น้อยที่สุดนั่นเอง

รูปที่ ๑ แสดงเส้นทางการไหลของกระแสไฟฟ้าป้องกัน (Protecting Current Flow) ในวงจรระบบ Cathodic Protection จาก Hull Anode thru Shaft Grounding Device ลงสู่ตัวเรือ



เมื่อ SGD ชำรุดทำให้ความต่อเนื่องทางไฟฟ้า (Electrical continuity) ระหว่างเพลลาใบจักรและตัวเรือบกพร่องหรือเสียไปโดยสิ้นเชิง กระแสไฟฟ้าจะพยายามมองหาทางไหลลงเรือทางอื่นที่สะดวกที่สุด (ความต้านทานน้อยที่สุด) ดังแสดงในรูปที่ ๒ ซึ่งไม่ใช่เส้นทางที่ต้องการให้ไปอันจะก่อให้เกิดความเสียหายแก่เรือใน ๒ ประการหลัก ๆ ประการแรก กระแสไฟฟ้าไหลผ่านทางแปรงรองรับเพลลาซึ่งเมื่อมีความต่างศักย์หรือกระแสมากพอทำให้ฟิล์มน้ำมันบาง ๆ (Oil Film) ในแปรงสูญเสียบรรยากาศและเป็นฉนวนและกลายเป็นตัวนำไฟฟ้า (Electrical Breakdown)

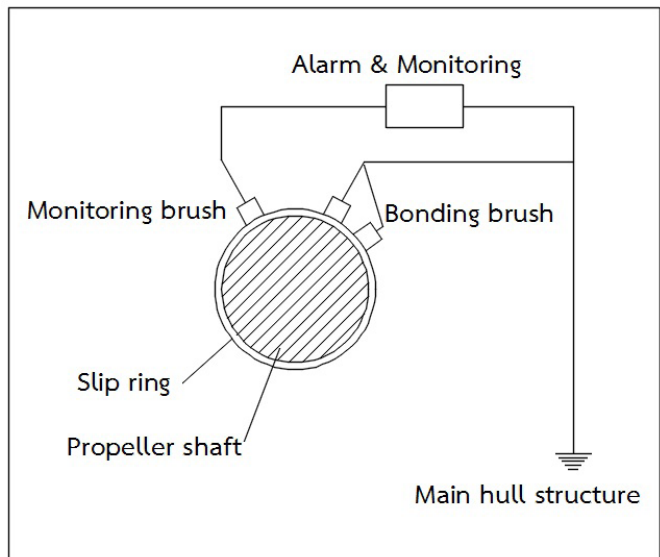


รูปที่ ๒ แสดงเส้นทางการไหลของกระแสไฟฟ้าป้องกัน (Protecting Current Flow) เมื่อ Shaft Grounding Device ชำรุดหรือไม่มีการติดตั้งซึ่งก่อให้เกิดความเสียหายต่อเรือ



### ๓. หลักการของ Shaft Grounding Device

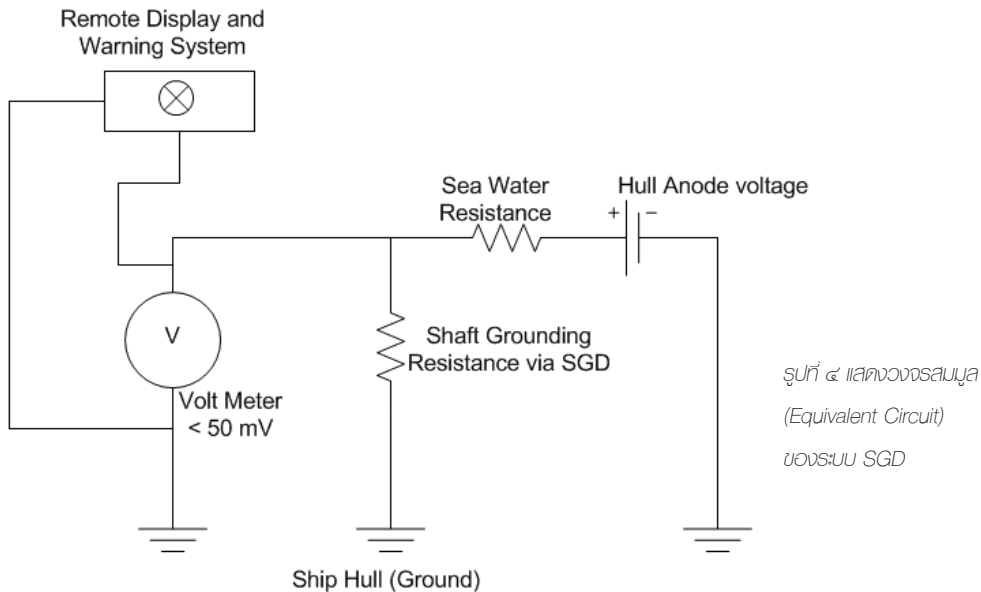
ชุดอุปกรณ์ Shaft Grounding Device (SGD) ประกอบไปด้วยเข็มขัดรัดเพลลา (Slip Ring) แปรงถ่าน (Brush) ตัวจับยึดแปรงถ่าน (Brush Holder) และ มิลลิโวลต์มิเตอร์ (Millivolt Meter) โดย Brush จะมี ๒ ส่วน ได้แก่ Bonding Brush ซึ่งทำหน้าที่เป็นจุดเชื่อมเพื่อให้เกิดความต่อเนื่องทางไฟฟ้า (Electrical Continuity) จากเพลลา สู่ตัวเรือและ Monitoring Brush ทำหน้าที่เป็นจุดสำหรับการอ่านค่าแรงดันไฟฟ้า (Electrical Potential) ที่ตกคร่อมที่หน้าสัมผัสระหว่าง Brush และ Slip Ring ด้วยชุด Monitoring and Alarm Unit แบบองค์ประกอบและการเชื่อมต่อของระบบ SGD แสดงในรูปแบบที่ ๓ และ แบบวงจรสมมูลของระบบ SGD แสดงในรูปแบบที่ ๔ ตามลำดับ



รูปที่ ๓ แบบองค์ประกอบ  
(Schematic Diagram) ของ  
SUU Shaft Grounding

เมื่อกระแสไฟฟ้าที่จ่ายออกมาจากระบบป้องกันการกัดกร่อน Cathodic Protection วิ่งผ่านเพลลาและผ่านลงตัวเรือ (Main Hull Structure) ผ่านอุปกรณ์ SGD เกิดเป็น Close Circuit ทำให้ใบจักรและเพลลาใบจักรได้รับการปกป้องซึ่งเป็นที่ต้องการ กระแสไฟฟ้าจะไหลผ่านจุดเชื่อมต่อ (Bonding Point) ระหว่าง Bonding Brush และ Slip Ring รัดเพลลาที่หมุน Bonding Point นี้จะต้องดำรงความต่อเนื่องทางไฟฟ้าไว้อย่างดีตลอดเวลา (Electrical Continuity Integrity) เพื่อให้กระแสไฟฟ้าไหลลงตัวเรือแบบไม่ติดขัด ซึ่งหากไม่มี Bonding Brush จะทำให้วงจรขาดช่วง (Open Circuit) ส่งผลต่อความล้มเหลวของความต่อเนื่องทางไฟฟ้า (Electrical Continuity Failure) ทำให้เพลลาใบจักรและใบจักรเรือถูกตัดขาดจากระบบป้องกันการกัดกร่อน (Insolated) และเป็นสาเหตุหนึ่งของการกัดกร่อนและความเสียหายของ Bearing รองรับเพลลา

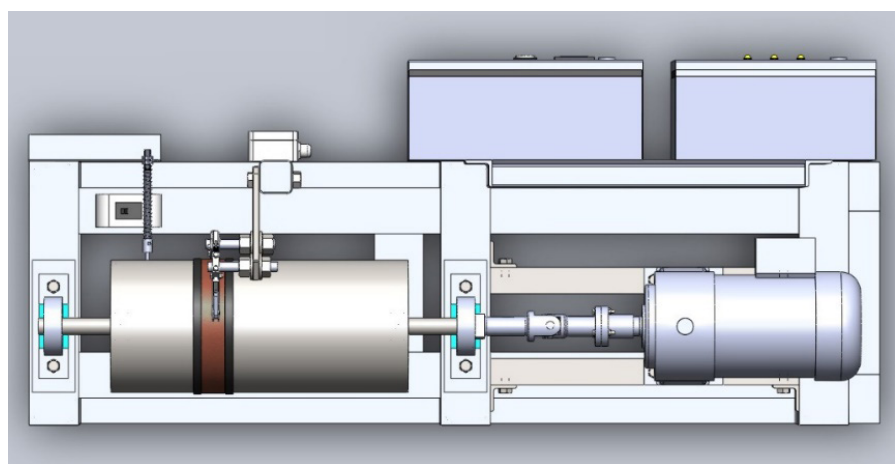
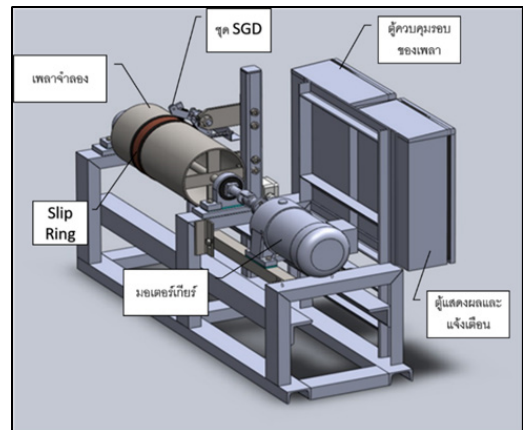
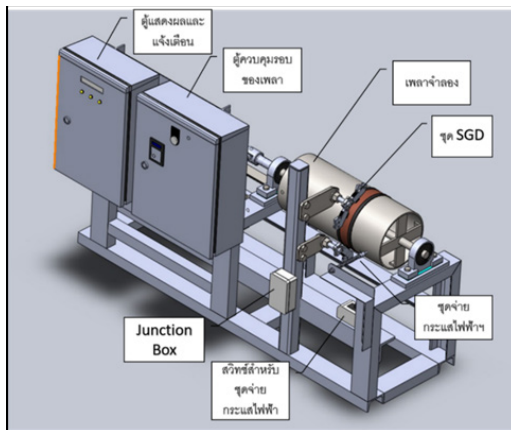
Slip Ring ทำด้วยโลหะที่มีความต้านทานต่ำไม่เกิน ๑๐ ไมโครโอห์มเมตร มีหน้าที่เชื่อมต่อทางไฟฟ้าจากเพล่าใบจักรแล้วส่งต่อผ่านทางแปรงถ่าน (Brush) ไปสู่ Slip Ring ซึ่งทั้ง Brush และ Slip Ring นี้ ทำด้วยวัสดุโลหะที่ทำให้เกิดหน้าที่สัมผัสที่ดี (Low-Resistance Contact) ระหว่างกันขณะที่เพล่าหมุน ทำให้เกิดความต้านทานระหว่างเพล่าและตัวเรือนน้อยซึ่งควรไม่เกิน ๑๐ มิลลิโอห์ม (๐.๐๑ โอห์ม) ความต้านทานสายไฟจากตัว Brush Holder ถึงตัวเรือต้องไม่เกิน ๕ มิลลิโอห์ม (๐.๐๐๕ โอห์ม)



ตัวจับยึดแปรงถ่านซึ่งทำด้วยทองเหลือง (Brass) ทำหน้าที่เป็นช่องใส่แปรงถ่านและมีสปริง (Spring) ทำหน้าที่ให้หน้าสัมผัสแปรงถ่านแนบอยู่บน Slip Ring เมื่อแปรงถ่านมีการสึกหรอเนื่องจากการเสียดสี Millivoltmeter มีหน้าที่ตรวจวัดความต่างศักย์ไฟฟ้า (Voltage) ระหว่างเพล่า (ผ่านอุปกรณ์ SGD) และตัวเรือ (Ship Hull) โดยย่านที่ถือว่าปกติอยู่ระหว่าง ๕ mV – ๕๐ mV แต่ยอมให้ได้สูงสุดได้ไม่เกิน ๘๐ mV ซึ่งหมายความว่าเมื่อ Voltage ระหว่างเพล่ากับตัวเรือเพิ่มมากขึ้นเป็นสัญญาณว่าเกิดความต้านทานไฟฟ้า (Resistance) มากขึ้นระหว่างเพล่ากับตัวเรือซึ่งเมื่อเกิน ๘๐ mV ระบบจะส่งสัญญาณเตือน (Alarm) ไปยังห้องควบคุมเครื่องจักร โดยสาเหตุอาจเกิดจากหน้าสัมผัสระหว่างแปรงถ่านและแผ่น Slip Ring ไม่เรียบ หรือแปรงถ่านสึกหรอและต้องมีการเปลี่ยนทดแทน หรือเกิดจาก Slip Ring ไม่สะอาดเกิดเป็นสนิม เป็นต้น

## ๔. การออกแบบและการสร้างชุดจำลองการทำงานของ SGD

ชุดจำลองการทำงานของ SGD ได้ถูกออกแบบและสร้างขึ้นเพื่อจำลองสภาพการทำงาน ของ SGD บนเพลาลำลอง ด้วยการจำลองสภาพการไหลของกระแสไฟฟ้าที่อาจจะเกิดขึ้นจาก สภาพการใช้งานจริง ชุดจำลองประกอบด้วย ๒ ส่วนหลัก ส่วนแรกได้แก่ ส่วนที่เป็นโครงสร้าง ซึ่งประกอบด้วย ชุดเพลลาและมอเตอร์เกียร์ทด ชุดจ่ายกระแสไฟฟ้าจำลอง (Simulated Current) ตู้ควบคุมรอบเพลลา ตู้แสดงผลและควบคุมการจ่ายกระแสไฟฟ้าจำลอง ส่วนที่สองเป็นส่วนของชุด SGD ซึ่งประกอบไปด้วยตัวจับยึดแปรงถ่าน (Brush Holder) ตัวแปรงถ่าน (Brush) และ Slip ring รัตเพลลา



รูปที่ ๕ แสดง 3D Modeling ของชุดจำลอง การทำงานของ SGD

การทำงานของชุดจำลองการทำงานของ SGD ใช้ต้นกำลังจากมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับแบบมีเฟืองทด ส่งกำลังผ่าน Universal joint สู่เพลล่าที่ออกแบบให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับเพลล่าใบจักรของเรือจริง และออกแบบชุดควบคุมการหมุนให้สามารถปรับความเร็วรอบของการหมุน ให้อยู่ในย่านการใช้งานของเพลล่าใบจักรของเรือ นอกจากนี้ยังออกแบบให้สามารถติดตั้งอุปกรณ์ SGD ให้ใกล้เคียงกับการติดตั้งในเรือจริง โดยการทดสอบการวัดแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมหน้าสัมผัสจะมีชุดจ่ายกระแสไฟฟ้ากระแสตรงที่ทำหน้าที่จำลองกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากระบบป้องกันกักร่อนคาโทดิกโปรเทคชั่น (Cathodic Protection Current) 3-D Model ของชุดจำลองการทำงานของ SGD แสดงในรูปแบบที่ ๕

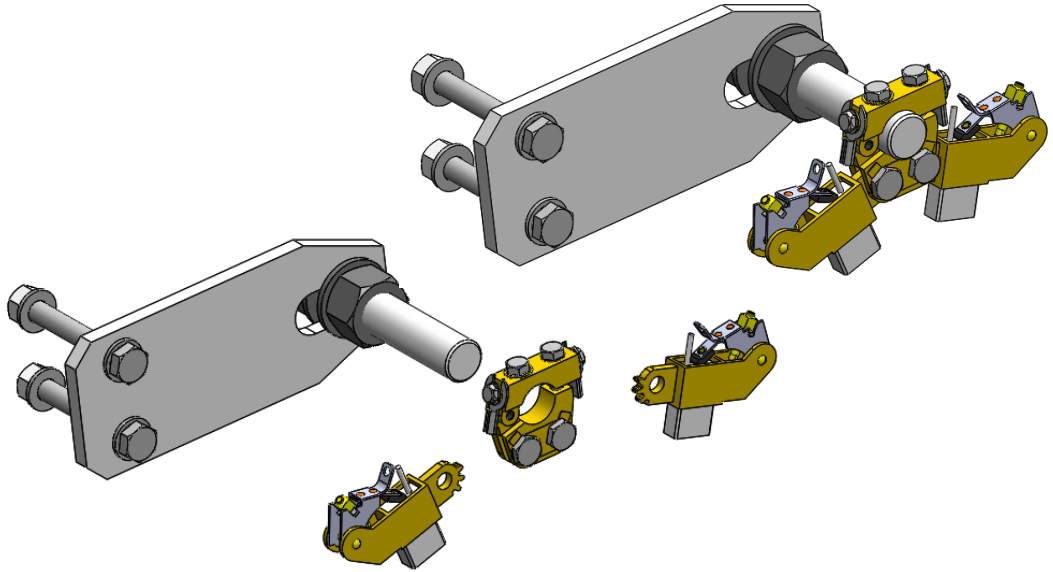
## รายละเอียดแบบส่วนประกอบชุด Shaft Grounding Device

การออกแบบชุด SGD พิจารณาจากต้นแบบการสำรวจระบบ SGD ที่มีอยู่ในเรือต่าง ๆ ผสมผสานกันโดยมีหลักการออกแบบให้ผลิตได้ง่ายและติดตั้งง่ายกับโครงสร้างของเรือและใช้วัสดุที่ทนต่อการกัดกร่อนและสนิม ดังแสดงแบบ 3-D Model และแบบการผลิตของ SGD ในรูปที่ ๖-๙ โดยมีส่วนประกอบหลักอยู่ ๓ ส่วนคือ

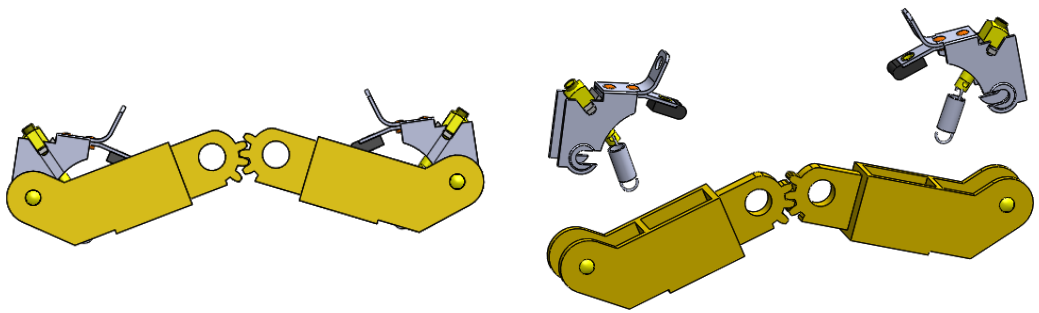
๑. แปรงถ่าน (Brush) ทำหน้าที่ เชื่อมต่อทางไฟฟ้าจากเข็มรัดเพลล่า (Slip Ring) กับตัวเรือ โดย Slip Ring ทำจากโลหะเงินผสมทองแดง (Silver alloy) และทองแดง และ Brush ทำจากผสม Silver Graphite และ Carbon

๒. ชุดจับยึดแปรงถ่าน (Brush Holder Set) ทำหน้าที่ เป็นช่องใส่แปรงถ่าน และกดแปรงถ่าน ให้แนบติดกับ Slip Ring ตลอดเวลาโดยใช้สปริงมีส่วนประกอบที่สำคัญ ๒ ส่วนคือ ช่องใส่แปรงถ่าน จำนวน ๒ ตัว ทำด้วยทองเหลือง และชุดกดแปรงถ่าน จำนวน ๒ ชุด ทำด้วยสแตนเลส

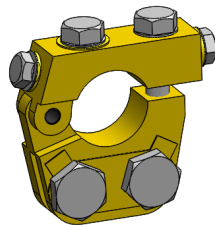
๓. ชุดเชื่อมต่อกับชุดจับยึดแปรงถ่าน (Support Brush Holder Set) ทำด้วยทองเหลือง ทำหน้าที่จับยึดชุด Support Brush Holder Set และยึดเพลล่าของชุดยึดติดกับตัวเรือ



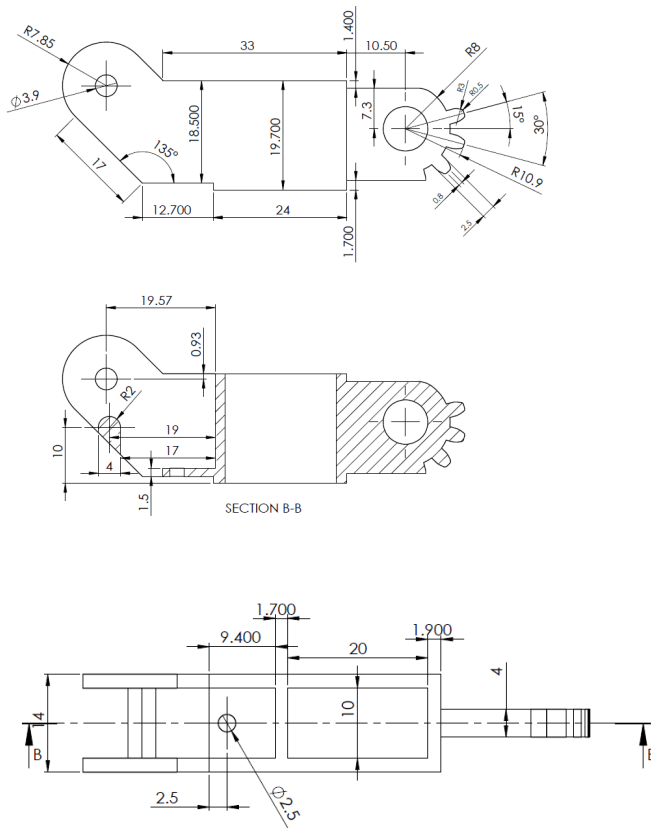
รูปที่ ๖ ส่วนประกอบของชุดจับยึด Shaft Grounding Device



รูปที่ ๗ ชุดจับยึดแปรงถ่าน (Brush Holder)



รูปที่ ๘ ชุดเชื่อมต่อกับชุดจับยึดแปรงถ่าน



รูปที่ ๙ ตัวอย่างแบบการผลิต (Production Drawing) ชิ้นส่วนหนึ่งของอุปกรณ์ SGD

การสร้างและการประกอบชุดจำลองการทำงาน SGD แสดงในรูปที่ ๑๐ เริ่มตั้งแต่การสร้างโครงสร้างเหล็ก การติดตั้งมอเตอร์ และเพลายาวประมาณ ๑ เมตร การหาศูนย์ การติดตั้งแผ่น Slip Ring การประกอบชุด SGD การปรับแต่งระยะห่าง การปรับแต่งค่าสปริงแรงกดแปรปรวน การเดินสายไฟ การตรวจวัดค่า Insulation และติดตั้งตู้จ่ายไฟ (Power Panel) และตู้คอนโทรล (Control Panel) โดยส่วนประกอบต่าง ๆ ภายในตู้แสดงในรูปที่ ๑๑ บอร์ดควบคุมกระแสไฟฟ้า จำลองและการวัดแรงดันตกคร่อม การแจ้งเตือน ใช้การเขียนโปรแกรมลงใน Microcontroller Arduino เพื่อการเฝ้าตรวจ แจ้งเตือนและแสดงผล (Monitoring Alarm and Display)



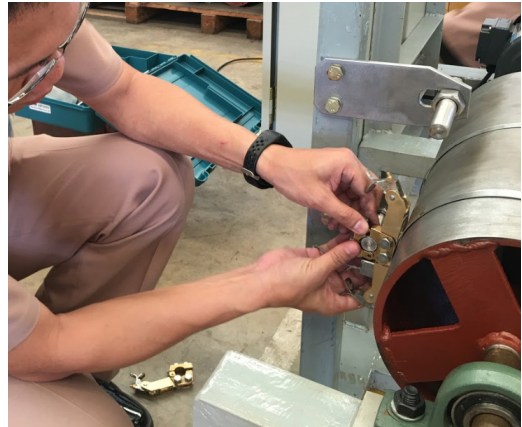
ก)



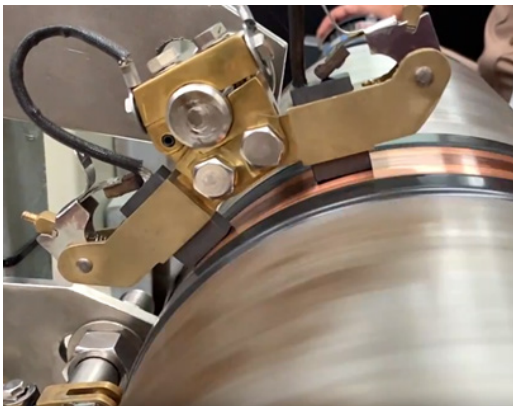
ข)



ค)



ง)



จ)

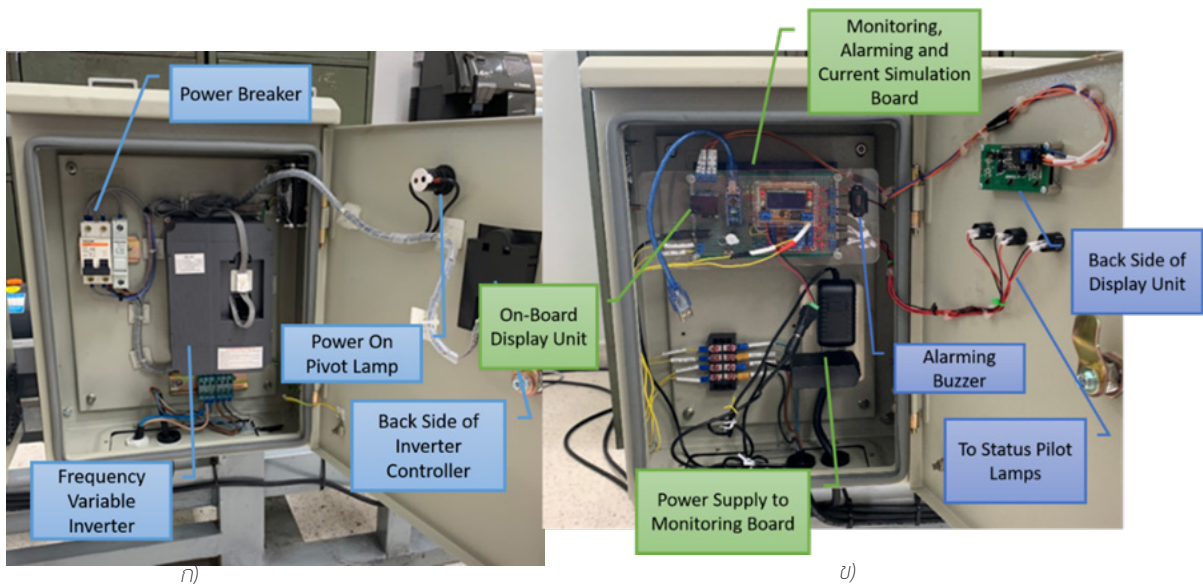


ฉ)

รูปที่ ๑๐ ขั้นตอนการสร้างชุดจำลองการทำงานของ SGD ก) โครงสร้างและชุดเพล่าประกอบมอเตอร์ ข) ติดตั้งตู้จ่ายไฟและตู้คอนโทรล ค) ติดตั้งเข็มขัดรัดเพล่า (Slip Ring) ง) ติดตั้งอุปกรณ์ SGD จ) ติดตั้งชุด SGD เรียบร้อยและทดสอบเพล่า และ ฉ) ประกอบชุดจำลองการทำงานของ SGD เสร็จสมบูรณ์

ภายในตู้จ่ายไฟ (Power Panel) มีอุปกรณ์สำคัญหลัก ๆ อยู่ ทั้ง ๔ ส่วน ได้แก่ ๑) Power Circuit Breaker ที่รับไฟฟ้า ๒๒๐ V ๕๐ Hz ๑ เฟส และจ่ายให้กับ Frequency Inverter ๒) Frequency Inverter ๗๕๐ W ๒๒๐ V ๓ เฟส ๐-๕๐ Hz ซึ่งจะจ่ายไฟให้มอเตอร์ ๓) Power On Pilot Lamp ๔) ชุดควบคุม Inverter

ภายในตู้คอนโทรล (Control Panel) มีอุปกรณ์สำคัญหลัก ๆ อยู่ ๖ ส่วน ได้แก่ ๑) ส่วน Monitoring, Displaying and Alarming Circuit ซึ่งเป็นแผงบอร์ดหลัก (Main Board) ที่ทำหน้าที่อ่านค่าแรงดันที่วัดได้แล้วแสดงผลแบบ Real Time ด้วย Programmable Digital Millivoltmeter ๒) จอแสดงผลแบบ Digital (Digital Display Screen) ๓) ไฟแสดงสถานะของการทำงาน (Pilot Lamp) ที่หน้าตู้ ๔) Alarming Buzzer สำหรับส่งเสียงเตือนเมื่อสถานการณ์ทำงานอยู่ขั้นสีแดง ซึ่งต้องได้รับการตรวจสอบและแก้ไข ๕) โมดูลบอร์ดสำหรับจ่ายกระแสไฟฟ้าจำลอง (Simulating Current Module) ซึ่งเป็นกระแสไฟฟ้าที่ไหลจากเพล่าไปสู่ชุด SGD แผงบอร์ดหลัก ๖) เป็นส่วน Digital On-Board Display



รูปที่ ๑๑ ก) แสดงอุปกรณ์ต่างๆภายในตู้จ่ายไฟ (Power Panel) ข) แสดงอุปกรณ์ต่างๆภายในตู้คอนโทรล (Control Panel)



## ๕. การทดสอบทดลอง

เกณฑ์การทดสอบทดลองชุดจำลองการทำงาน SGD ที่สร้างขึ้นมีอยู่ ๓ เกณฑ์ ได้แก่ การวัดความต้านทานไฟฟ้าของวงจร การวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าตกคร่อมหน้าสัมผัสและกระแสไฟฟ้าที่ยอมให้ไหลผ่านวงจร SGD (Current Tolerance: CT) รวมทั้งการทดสอบความถูกต้องของการวัด

### ๕.๑ วัดค่าความต้านทาน ความต่างศักย์ และ กระแสไฟฟ้า ของวงจร SGD

การวัดความต้านทานของวงจรSGDแบ่งออกเป็น ๔ กรณีโดยปรับแรงกดสปริงไว้ที่ระยะ ๑๒ mm แบ่งตามชนิดวัสดุที่ใช้สำหรับ Slip Ring ได้แก่ เงินผสมทองแดง (Silvery Alloy) และทองแดง (Copper) และวัสดุที่ใช้ทำแปรงถ่าน (Brush) ได้แก่ Silver Graphite และ Carbon ซึ่งวงจร SGD ที่มีความต้านทานน้อยสุดคือกรณีที่ใช้ Slip Ring เป็น Silver alloy และแปรงถ่านเป็น Silver Graphite โดยมีความต้านทานของวงจรเท่ากับ ๓.๕๐ มิลลิโอห์ม (๐.๐๐๓๕ โอห์ม) ต่ำกว่าเกณฑ์คือ ๑๐ มิลลิโอห์ม (๐.๐๑ โอห์ม)

การทดลองจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าไปในวงจรเพื่อวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าแล้วนำมาคำนวณความต้านทานเพื่อเปรียบเทียบค่าที่วัดได้ทั้ง ๔ กรณี นอกจากนี้ยังสามารถคำนวณค่ากระแสไฟฟ้า CT ได้ ซึ่งเมื่อนำค่าแรงดันไฟฟ้าที่ ๘๐ mV ตามค่าการออกแบบมาเป็นเกณฑ์สามารถหาค่ากระแส CT ซึ่งกรณีที่มีความต้านทานต่ำสุดจะได้ค่ากระแส CT มากกว่า ๒๒ A ซึ่งกระแสไฟฟ้าที่จ่ายจากระบบ ICCP (Impressed Current Cathodic Protection) มีค่าสูงสุด ๒๐ A ที่จะไหลผ่านอุปกรณ์ SGD ลงตัวเรือ (ข้อมูลจากการวัดกระแสไฟฟ้าที่อุปกรณ์ SGD ของ ร.ล.ภูมิพลอดุลยเดช เมื่อเดินระบบ ICCP) แสดงว่าระบบ SGD ที่สร้างขึ้นนี้สามารถรองรับกระแสไฟฟ้าได้ดี

### ๕.๒ ทดสอบความถูกต้องการตรวจวัดความต่างศักย์ไฟฟ้า

การทดสอบความถูกต้องการวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าแบ่งเป็น ๒ ส่วนได้แก่ ส่วนที่ ๑ คือ ความถูกต้องของการแสดงผลและส่งสัญญาณเตือนและแสดงไฟเตือนได้ถูกต้องยอมรับได้ โดยระบบแจ้งเตือนสามารถแจ้งเตือนทั้ง ๓ ระดับ กล่าวคือ ปกติ (ไฟเขียว) เฝ้าระวัง (ไฟส้ม) และอันตราย (ไฟแดง) ได้ถูกต้องเฉลี่ย ๙๘ เปอร์เซ็นต์ ส่วนที่ ๒ คือ การวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าเทียบกับมัลติมิเตอร์ที่ได้รับการสอบเทียบแล้ว (Calibrated Multi-meter) โดยทำการวัดค่าความต่างศักย์ที่รอบเพลตต่างๆ เริ่มตั้งแต่หยุดนิ่ง (๐ RPM) ไปจนถึงความเร็วสูงสุด ๓๐๐ RPM (๕๐ Hz) โดยเพิ่มรอบครั้งละ ๓๐ RPM ผลของการทดสอบได้ค่าผิดพลาดสัมบูรณ์เฉลี่ย (Mean Absolute Error) เท่ากับ ๔ เปอร์เซ็นต์ อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ (ต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนดไว้ ๕ เปอร์เซ็นต์)

## ๖. สรุปและแนวคิดต่อยอด

ชุดจำลองการทำงานของ Shaft Grounding Device (SGD) และตัวอุปกรณ์ SGD ได้ถูกออกแบบ ผลิตและทดสอบทดลองตามวัตถุประสงค์ของโครงการวิจัยเรียบร้อยแล้ว ซึ่งคณะทำงานฯ ได้สรุปประโยชน์ที่ได้รับ ๒ ประการหลัก ดังนี้

๑) คณะทำงานฯ ได้สร้างองค์ความรู้จากการ เก็บข้อมูล ออกแบบ ผลิต ชุดจำลองการทำงานของ SGD ซึ่งเมื่อทำการทดสอบทดลอง ปัญหาหรือข้อขัดข้องทางเทคนิคใด ๆ ที่มีได้คาดการณ์ไว้ก่อนก็สามารถที่จะตัดแปลงแก้ไขให้ได้ตามเป้าหมายได้โดยง่าย เนื่องจากไม่มีข้อจำกัดของเวลาและพื้นที่ปฏิบัติงานที่คับแคบ เปรียบเทียบกับการติดตั้งจริงที่เรือซึ่งมีสภาพพื้นที่และเวลาที่จำกัดไม่สะดวกต่อการเปลี่ยนแปลงแก้ไข ทั้งการทดสอบวัสดุต่าง ๆ ที่สามารถนำมาใช้สร้างอุปกรณ์ SGD การปรับแก้โปรแกรมควบคุมและแสดงผลของอุปกรณ์ SGD ว่าสามารถอ่านค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าได้ถูกต้องและมีค่าผิดพลาดเพียงในระดับที่ยอมรับได้ นอกจากนี้ คณะทำงานฯ ได้พัฒนาทักษะและฝึกฝนการติดตั้งการปรับแต่งตัวอุปกรณ์ SGD จนเกิดความชำนาญและสามารถถ่ายทอดให้กับผู้อื่นได้

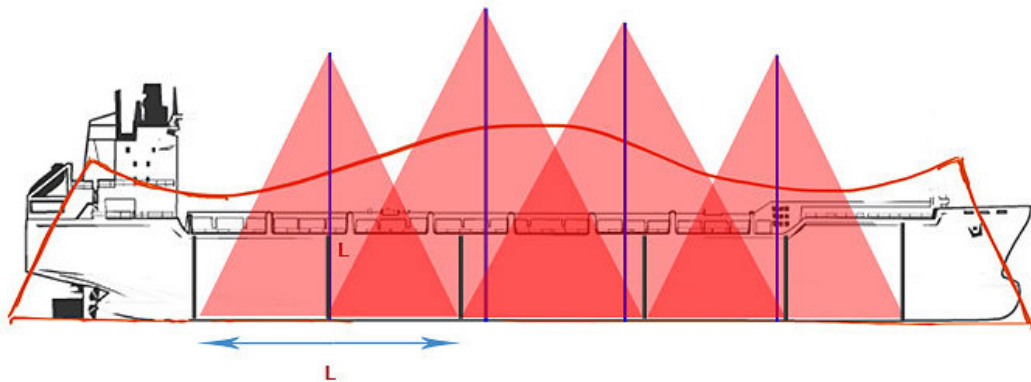
๒) ได้มีโอกาสเผยแพร่ข้อมูลและสร้างความตระหนักถึงความสำคัญของอุปกรณ์ Shaft Grounding Device ต่อระบบป้องกันการกัดกร่อน Cathodic Protection ของเรือ ทั้งที่เป็นแบบสังกะสีกันกร่อนและแบบ Impressed Current

เมื่อได้ทดสอบทดลองการทำงานของ SGD ในห้องทดลอง (ในโรงงาน) ทั้ง ๔ กรณีแล้ว ซึ่งได้ข้อสรุปว่า Brush และ Slip Ring ที่ให้ผลดีที่สุดคือ Silver Graphite และ Silver Alloy แล้วลำดับต่อไปคือการนำอุปกรณ์ SGD พร้อมชุด Monitoring and Alarming ที่พัฒนาขึ้นนี้ไปติดตั้งเพื่อทดสอบกับเพลานำเรือ ซึ่งด้วยข้อจำกัดต่าง ๆ โครงการนี้ยังไม่ได้ดำเนินการติดตั้งอุปกรณ์ SGD ทดสอบการใช้งานในเรือ อย่างไรก็ตามคณะทำงานฯ ได้สำรวจพื้นที่ติดตั้งและวางแนวทางการดำเนินการติดตั้งทดสอบในสภาวะแวดล้อมและข้อกำหนดที่แตกต่างกันตามขนาดและลักษณะของเรือไว้แล้ว เพื่อว่าเมื่อทดสอบการทำงานในเรือจนได้ผลดีแล้วก็สามารถเข้าสู่การผลิตใช้เองได้ใน ทร. ต่อไป

# การวิเคราะห์เสถียรภาพ การทรงตัวยามเสียหายเชิงความน่าจะเป็น (Probabilistic Damage Stability Analysis)

ชวาเอก ปริญญ์ กัณอญ์

นายกการแผนงาน กองโรงงานเรือเหล็ก อุทการเรือพระจุลจอมเกล้า กรมอุทการเรือ



## บทนำ

เสถียรภาพการทรงตัวยามเสียหาย (Damage Stability) เป็นคุณสมบัติเบื้องต้นที่มีความสำคัญอย่างยิ่ง ที่เรือทุกลำต้องได้รับการคำนวณและวิเคราะห์ตั้งแต่ช่วงเริ่มต้นของการออกแบบรวมถึงต้องได้รับการปรับปรุงอย่างสม่ำเสมอตลอดระยะเวลาของการสร้างเรือเพื่อให้ข้อมูลต่างๆ ของคุณสมบัตินี้เป็นไปอย่างถูกต้องและครบถ้วน อย่างไรก็ตาม หลักการของคุณสมบัตินี้มีความเชื่อมโยงไปถึงทฤษฎีต่างๆ ที่เกี่ยวข้องมากมายที่มีความซับซ้อนต่อการทำความเข้าใจและการคำนวณ รวมไปถึงสำหรับผู้ทำงานเกี่ยวข้องโดยตรงกับความปลอดภัยของการปฏิบัติงานทางเรือ โดยจากการจัดการรณรงค์ Concentrated Inspection Campaign on Tanker Damage Stability ที่จัดโดย Paris MOU และ Black Sea MOU พบว่า ๑๖.๒% ของเรือ Tankers ที่ผ่านการตรวจสอบจากการรณรงค์นี้ ผู้ปฏิบัติงานบนเรือไม่สามารถยืนยันได้ว่าเรือของตนมีคุณสมบัติถูกต้องเป็นไปตามกฎของเสถียรภาพการทรงตัวยามเสียหาย ซึ่งนับว่าเป็นตัวเลขที่ค่อนข้างสูงที่บ่งชี้ว่า หัวข้อของคุณสมบัตินี้ยังมีผู้ที่ไม่เข้าใจหลักการอยู่เป็นจำนวนมาก บทความนี้มีจุดมุ่งหมายสร้างความเข้าใจเบื้องต้นเกี่ยวกับเสถียรภาพการทรงตัวยามเสียหายรวมถึงกระบวนการในการวิเคราะห์ด้วยวิธีเชิงกำหนด และเชิงความน่าจะเป็น ซึ่งเป็นประเด็นหลักที่จะได้รับการอธิบายในบทความนี้ต่อไป

## หลักการทั่วไปของเสถียรภาพการทรงตัวยามเสียหาย (Damage Stability Overview)

เมื่อพิจารณาถึงกรณีการจมของเรือไททานิค คำถามแรกที่กัปตันถามกับนาวาสถาปนิกที่กำลังกางแบบแปลนแล้วพิจารณาค่าความเสี่ยงก็คือ มีเวลาเท่าไรในการอพยพผู้คนบนเรือก่อนที่เรือจะจมลงก้นทะเล คำถามนี้เป็นสิ่งที่แสดงให้เห็นว่า คุณสมบัติในการลอยตัวอย่างมีเสถียรภาพเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงเมื่อเรือเกิดอุบัติเหตุต้องเรือแตกและมีน้ำไหลท่วมเข้ามาในตัวเรือ เพื่อให้สามารถป้องกันและรักษาชีวิตบนเรือให้ได้มากที่สุด คุณสมบัตินี้ต้องใกล้เคียงกับเสถียรภาพการทรงตัวในยามปกติ (Intact Stability)

เพื่อให้การทำความเข้าใจเสถียรภาพการทรงตัวยามเสียหาย (Damage Stability) เป็นไปได้โดยสะดวก ให้สมมติกรณีตัวอย่างขึ้นมาเป็นเรือบรรทุกสินค้าทั่วไป ๒ ลำ ที่มีขนาดและรูปทรงเดียวกันทุกประการ ลำที่หนึ่งมีระวางบรรทุก ๑ ระวาง ในขณะที่ลำที่สองมีระวางบรรทุก ๒ ระวาง คำถามพื้นฐานคำถามแรกคือ ลำใดมีความปลอดภัยมากกว่า คำตอบสำหรับคำถามนี้สามารถวิเคราะห์ได้โดยง่ายคือ ลำที่สองจะมีความปลอดภัยมากกว่า เนื่องจากหากเรือประสบอุบัติเหตุตัวเรือแตก ๑ จุด น้ำไหลเข้าท่วมเรือ ลำที่หนึ่งจะมีน้ำเข้าท่วมระวางได้เต็มระวาง ๑๐๐% ในขณะที่ลำที่สองน้ำจะเข้าท่วมแค่เพียง ๕๐% ในระวางที่อยู่ในรอยแตกเท่านั้น กล่าวคือ ยิ่งเรือมีการแบ่งห้องแบ่งระวางมากเท่าไรก็จะยิ่งปลอดภัยจากการจมเมื่อเกิดรอยแตคน้ำไหลเข้าท่วมมากเท่านั้น

แต่อย่างไรก็ตาม การออกแบบเรือให้มีการแบ่งห้องมากๆ ไม่สามารถเป็นไปได้อย่างไร้ข้อจำกัดในทางปฏิบัติ เพราะจะส่งผลกระทบต่อความยากในการออกแบบ และต้นทุนในการสร้างเรือที่การแบ่งห้องมาก ๆ ขึ้นมา หรือการออกแบบและสร้างเรือที่มีการแบ่งห้องระวางน้อยเกินไปก็จะส่งผลกระทบต่อความปลอดภัยในกรณีอุบัติเหตุ น้ำเข้าท่วมเรือ ประเด็นคำถามที่ต้องนำมาพิจารณาในการออกแบบเรือให้มีความปลอดภัยจากเหตุการณ์ข้างต้นคือ ควรมีการแบ่งห้องระวางมากน้อยเพียงใดเพื่อให้เรือมีความปลอดภัยจากอุบัติเหตุ น้ำเข้าเรือ

ในเรือขนส่งผู้โดยสาร ได้มีการกำหนดให้เรือกลุ่มนี้ต้องปฏิบัติตามข้อบังคับของเสถียรภาพการทรงตัวยามเสียหายเชิงความน่าจะเป็น (Probabilistic Damage Stability: PDS) ตั้งแต่วันที่ ๑ ตุลาคม ค.ศ. ๑๙๗๐ หลังจากที่มีการบังคับใช้ IMO Resolution A.๒๖๕ (VIII) หลังจากนั้นได้มีการบังคับใช้กับเรือขนส่งสินค้าระวางแห่งทั่วไปที่สร้างหลังจากปี ค.ศ. ๑๙๙๒ และท้ายที่สุด ภายหลังจากการดำเนินการให้ครอบคลุมความปลอดภัยอย่างเหมาะสมของ IMO ได้มีการบังคับใช้ข้อบังคับเกณฑ์ของ PDS สำหรับเรือโดยสารและเรือสินค้าทุกประเภทที่สร้างเสร็จตั้งแต่วันที่ ๑ มกราคม ค.ศ. ๒๐๐๙ ตาม SOLAS Chapter II-๑ Part B-๑

นอกเหนือจากการประเมินเสถียรภาพการทรงตัวยามเสียหายเชิงความน่าจะเป็น (PDS) และ ยังมีข้อบังคับที่นิยมใช้อีกหนึ่งระบบคือ เสถียรภาพการทรงตัวยามเสียหายเชิงกำหนด (Deterministic Damage Stability: DDS) ซึ่งใน DDS นี้ ขอบเขตของความเสียหาย (Damage Extent) จะเป็นตัวกำหนดจุดที่จะสร้างฝากระั้นน้ำ (Watertight Bulkhead) อย่างไรก็ตาม ในกรณีของ PDS จะไม่มีการกำหนด Damage Extent ขึ้นมา ทำให้นาวาสถาปนิกผู้ออกแบบเรือสามารถจัดวางฝากระั้นน้ำได้อย่างยืดหยุ่นมากขึ้น ซึ่งในบทความหัวข้อนี้จะมุ่งเน้นอธิบายถึงแนวความคิดของ PBS

ในการออกแบบเรือเบื้องต้น กระบวนการในการประมาณการเสถียรภาพการทรงตัวยามเสียหาย และการกำหนดปริมาณการแบ่งห้องระวาง สามารถทำได้ ๓ กระบวนการ โดยทั้ง ๓ กระบวนการมีจุดมุ่งหมายเดียวกันเพื่อให้เรือสามารถลอยตัวและมีเสถียรภาพการทรงตัวได้ชั่วคราวที่เพียงพอให้เรือสามารถเดินทางไปถึงที่หมายเพื่อเข้ารับการซ่อมทำ เมื่อมีความเสียหายเกิดขึ้นกับตัวเรือและมีน้ำเข้าท่วมเรือ

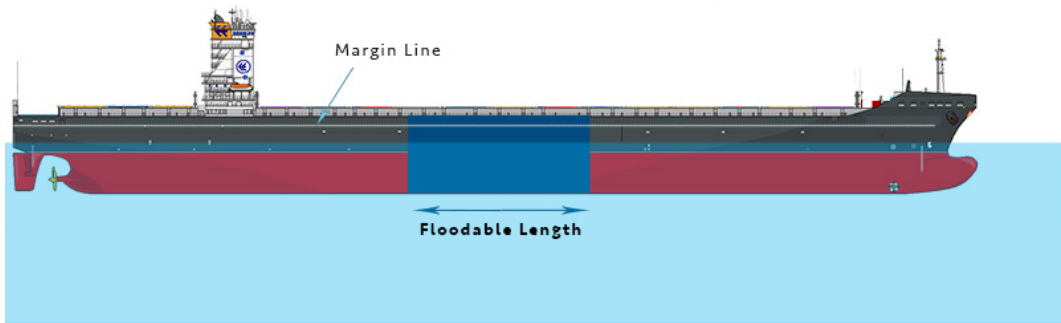
## ๑. Floodable Length and Factor of Subdivision

วิธีนี้เป็นวิธีดั้งเดิมตามทฤษฎีและยังคงมีความสำคัญและจำเป็นที่จะต้องทำความเข้าใจก่อนวิธีอื่น ๆ เนื่องจากเป็นพื้นฐานทางทฤษฎีที่จะปูพื้นฐานสู่ความเข้าใจในหลักการของเสถียรภาพการทรงตัวยามเสียหาย

ในวิธีการนี้ จำนวนการแบ่งห้องระวาง (Number of Subdivisions) ที่ต้องการได้รับการคำนวณจากการหา Floodable Length ตลอดความยาวของลำเรือ

Floodable Length คือความยาวที่มากที่สุดของห้องระวางหนึ่งห้องที่หากเกิดสถานการณ์น้ำท่วมจะทำให้เรือจมลงไปจนถึงระดับ Margin Line (ระดับแนวหน้าสูงสุดที่เรือยังสามารถลอยได้อย่างปลอดภัยโดยน้ำไม่ท่วมคาดฟ้าหลักของเรือ)

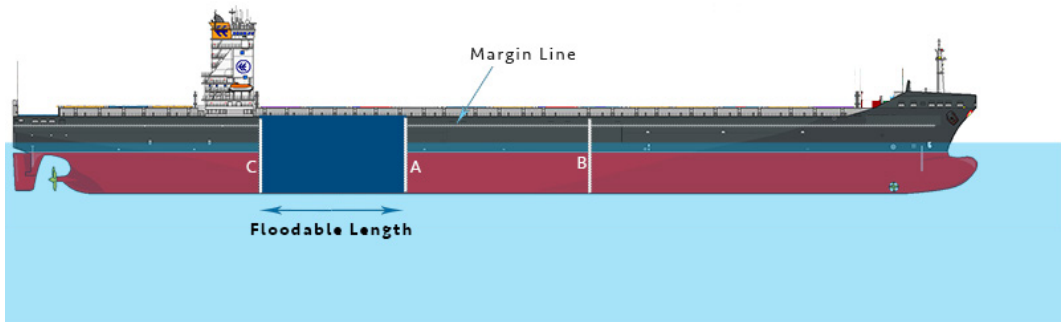
ยกตัวอย่างเมื่อมีการออกแบบเรือใหม่หนึ่งลำ นาวาสถาปนิกผู้ออกแบบจะกำหนดห้องระวางขึ้นมาโดยมีฝากระั้นน้ำ (Bulkheads) เป็นตัวแบ่งห้องระวางนั้น ๆ ตาม รูปที่ ๑ (ในกรณีนี้ กำหนดให้ฝากระั้นน้ำของห้องระวางห้องแรกนี้เรียกว่าฝากระั้น A และ B)



รูปที่ ๑: ตัวอย่างการแบ่งห้องระวาง ๑

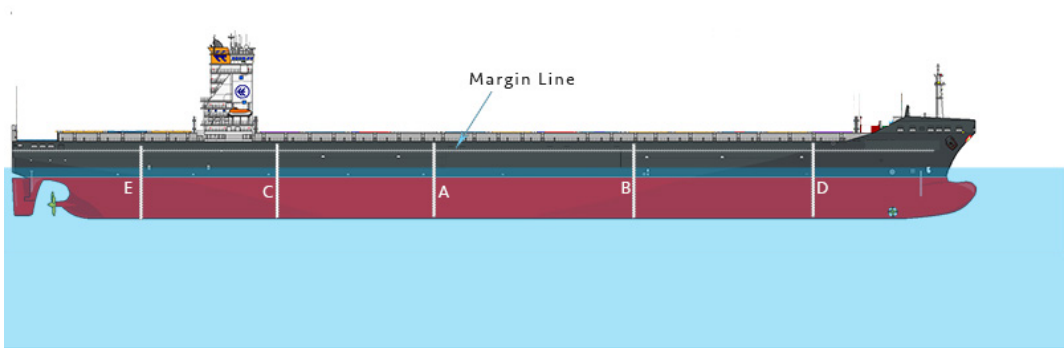
ความยาวของห้องระวางนี้ (Length AB) ถูกกำหนดภายใต้เงื่อนไขที่ว่า หากน้ำไหลเข้าท่วมห้องนี้จนเต็มห้อง เรือจะจมลงไปถึงจุดที่ Margin Line กำลังจะเริ่มจม ความยาวของห้องระวางดังกล่าวคือ Floodable Length ของจุดนั้น

จากนั้นในการแบ่งห้องระวางห้องต่อไป เช่น การแบ่งห้องต่อไปทางด้านท้ายของ Midship ฝากันตัวต่อไปถูกกำหนดไว้ที่จุด C ในกรณีนี้เช่นเดียวกับกรณีห้องระวางแรก (AB) หากห้องระวาง AC ถูกน้ำท่วมจนเต็มห้อง เรือจะจมลงไปถึงจุดที่ Margin Line กำลังจะเริ่มจม และความยาวของห้องระวางนี้จะถูกกำหนดให้เป็น Floodable Length ของห้องระวาง AC



รูปที่ ๒: ตัวอย่างการแบ่งห้องระวาง ๒

ในแนวทางเดียวกัน นาวาสถาปนิกสามารถแบ่งห้องระวางห้องอื่น ๆ ได้ตลอดความยาวของลำเรือ บนพื้นฐานที่ความยาวของ Floodable Length แต่ละห้องต้องไม่ทำให้เรือจมเกินแนว Margin Line หากเกิดเหตุการณ์น้ำท่วม

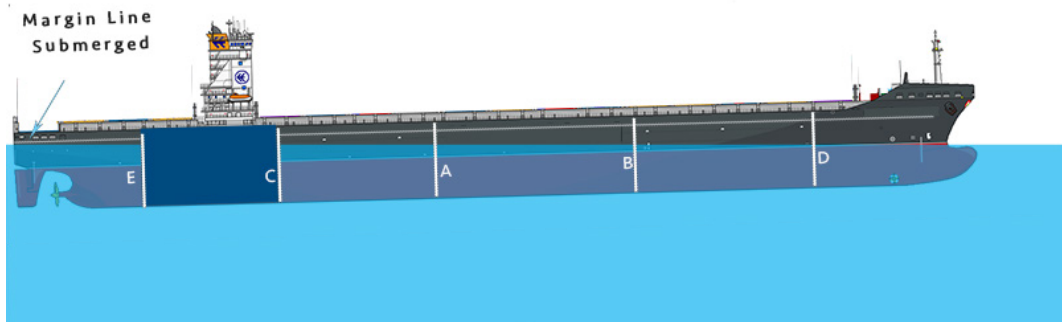


รูปที่ ๓: ตัวอย่างการแบ่งห้องระวาง ๓

เมื่อทำการคำนวณหา Floodable Length สิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงถึงอีกประการหนึ่งคือ น้ำที่ท่วมในห้องระวางนั้น ๆ ต้องท่วมเต็มตลอดความกว้างของลำ ถึงแม้ว่าจะมีการวางแผนให้มีฝากระั้นน้ำตามแนว Centerline ก็ตาม (Centerline Bulkhead)

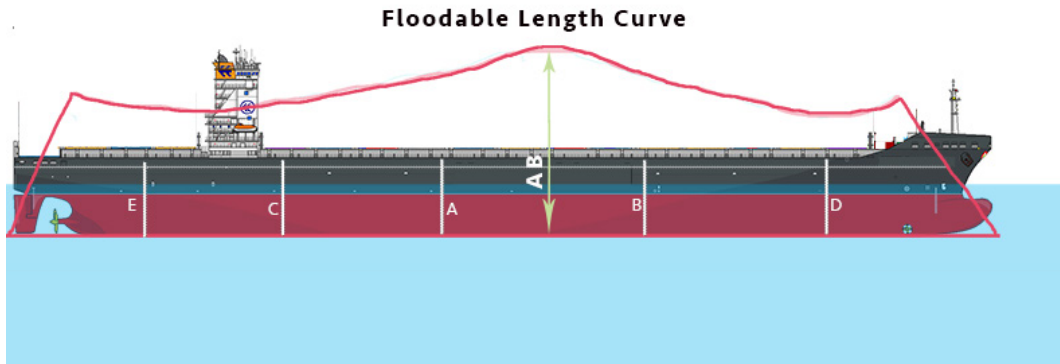
### Floodable Length Curve

จากการออกแบบห้องระวางตามตัวอย่างข้างต้น เรือลำนี้จะไม่มีการจมและยังคงมีเสถียรภาพหากห้องระวางห้องใดห้องหนึ่ง (เพียงห้องเดียว) ถูกน้ำเข้าท่วมจนเต็มห้อง ข้อสังเกตที่สำคัญอีกประการหนึ่งคือ Floodable Length ที่บริเวณกลางลำจะมีความยาวสูงกว่าบริเวณหัวเรือและท้ายเรือ เนื่องจากหากน้ำท่วมห้องระวางบริเวณกลางลำ เรือจะเกิดมุม Trim ขนาดเล็ก ส่งผลให้สามารถขยายความยาวของ Floodable Length ได้โดยไม่กระทบต่อการจมจนถึง Margin Line ในขณะที่น้ำที่ท่วมห้องระวางบริเวณใกล้หัวเรือและท้ายเรือ จะส่งผลกระทบต่อการ Trim ของเรือ ทำให้มีการจมไปจนถึง Margin Line ได้ง่ายขึ้น Floodable Length ที่บริเวณนี้จึงยาวนานน้อยกว่าบริเวณกลางลำ กล่าวโดยภาพรวมคือ Floodable Length มีความยาวแตกต่างกันตลอดลำเรือภายใต้เงื่อนไขจากผลกระทบของมุม Trim และการจมจนถึง Margin Line



รูปที่ ๔: ตัวอย่างการแบ่งห้องระวาง ๔

Floodable Length Curves คือกราฟที่นำเสนอ Floodable Length ตลอดความยาวของลำเรือ โดยข้อมูลบนกราฟนี้ได้มาจากการพล็อตความยาวของ Floodable Length ในแนวตั้งฉากกับความยาวของเรือ ณ จุดนั้น โดยแบ่งความยาวของห้องระวางในระดับ Infinitesimal จะทำให้ได้กราฟในลักษณะตาม รูปที่ ๕



รูปที่ ๕: ตัวอย่างการแบ่งห้องระวาง ๕

## การประเมินเสถียรภาพการทรงตัวยามเสียหาย (Damage Stability Compliance) โดยวิธี

### Floodable Curve

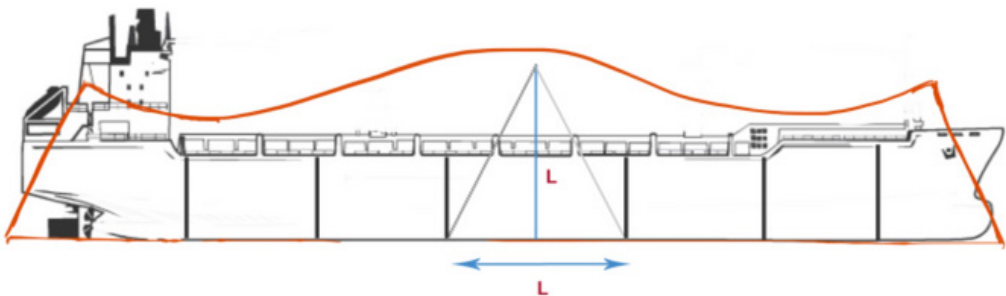
เรือทุกลำที่จะทำการประเมินเสถียรภาพการทรงตัวยามเสียหายโดยวิธีการนี้ จะต้องมียข้อมูลเบื้องต้นของ Floodable Length Curve โดยข้อกำหนดขององค์กรทางด้านความปลอดภัยของกิจกรรมทางทะเล และสถาบันจัดชั้นเรือต่าง ๆ มีเนื้อหาโดยสรุปว่า “เรือควรสามารถลอยตัวได้อย่างมีเสถียรภาพเมื่อตกอยู่ในสถานการณ์น้ำท่วมเต็ม ๑ ห้องระวาง (หรือ ๒ หรือ ๓ ห้อง สุดแล้วแต่จะกำหนดในรายละเอียด)”

ในการประเมินและตรวจสอบว่าเรือที่ออกแบบมีคุณสมบัติเป็นไปตามข้อบังคับของเสถียรภาพการทรงตัวหรือไม่ Floodable Length Curve จะถูกพล็อตซ้อนลงไปในรูปแบบเรือ



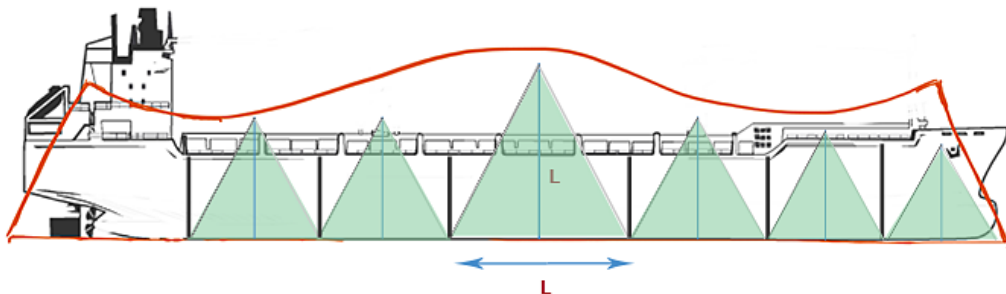
จากนั้น การตรวจสอบเสถียรภาพการทรงตัวยามเสียหายจะดำเนินการที่ละห้องระวาง ความยาวของห้องระวางแต่ละห้องจะถูกพล็อตในแนวตั้งที่บริเวณกึ่งกลางห้องระวางนั้นๆ หากความยาวของห้องที่พล็อตขึ้นไปอยู่ต่ำกว่า Floodable Length Curve ห้องระวางนี้จะมีคุณสมบัติเป็นตามข้อบังคับของเสถียรภาพการทรงตัวยามเสียหายตามมาตรฐาน ๑ Compartment

### Compliance with damage stability (Floodable Length Curve)



รูปที่ ๖: ตัวอย่างการแบ่งห้องระวาง ๖

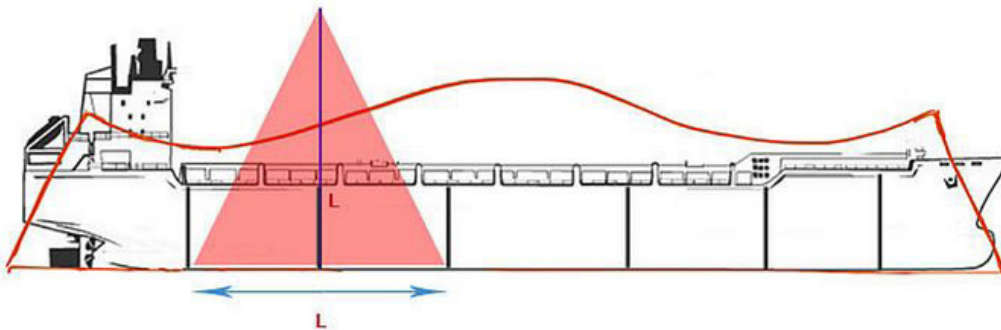
เมื่อพล็อตในลักษณะเดียวกันตลอดลำเรือ และความสูงของสามเหลี่ยมของห้องต่างๆ ไม่สูงเกิน Floodable Length สามารถสรุปได้ว่าเรือลำนี้ได้รับการออกแบบให้เป็นไปตามข้อบังคับเสถียรภาพการทรงตัวยามเสียหายตามมาตรฐาน ๑ Compartment



รูปที่ ๖: ตัวอย่างการแบ่งห้องระวาง ๖

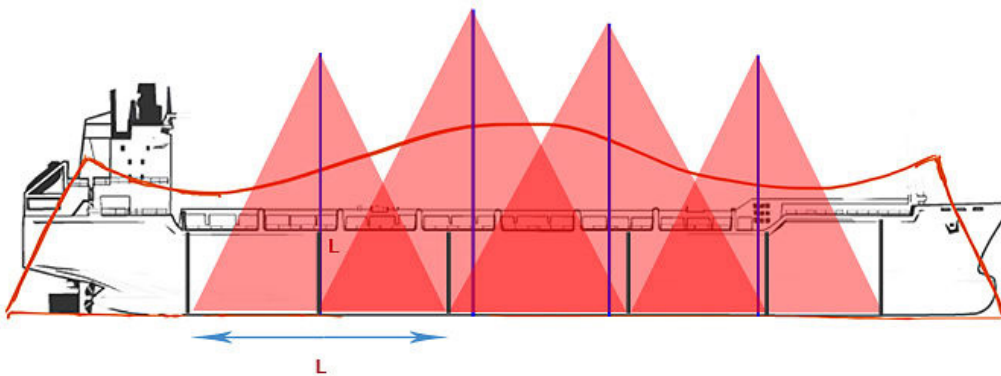
จากนั้นหากต้องการตรวจสอบคุณสมบัติในข้อบังคับตามมาตรฐาน ๒ Compartments ให้พล็อตความยาวของห้องระวาง ๒ ห้องติดกันในลักษณะวิธีเดียวกับที่ได้ดำเนินการในมาตรฐาน ๑ Compartment

### Damage stability compliance (Two compartment standard)



รูปที่ ๘: ตัวอย่างการแปลงห้องระวาง ๘

และดำเนินการพล็อตในลักษณะเดียวกันตลอดลำเรือ

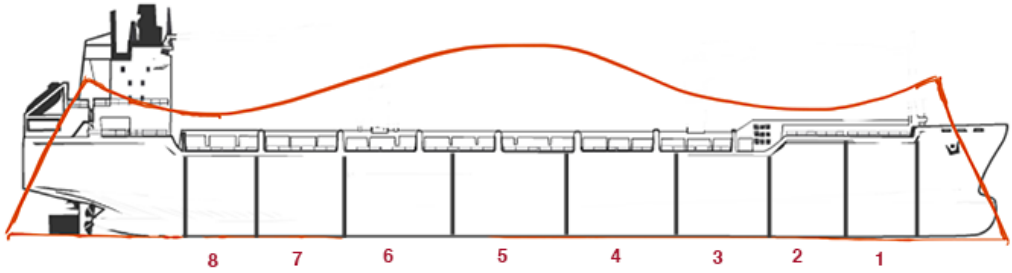


รูปที่ ๙: ตัวอย่างการแปลงห้องระวาง ๘

จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่า ความสูงของความยาวของ ๒ ห้องระวางต่อเนื่องกันมีระดับสูงกว่า Floodable Length Curve ทำให้สามารถสรุปได้ว่า เรือลำนี้ไม่ได้รับการออกแบบให้เป็นไปตามข้อบังคับเสถียรภาพ

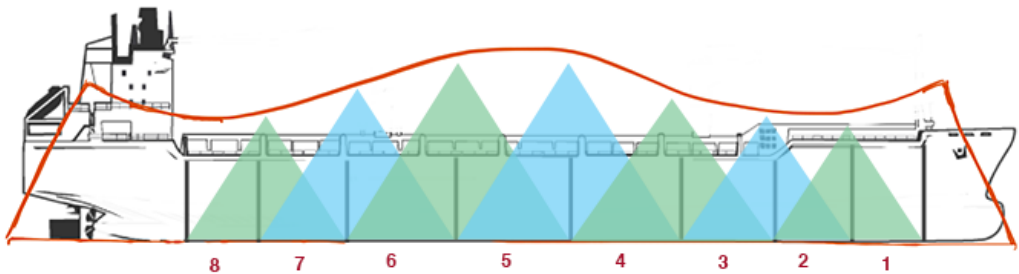
## การทรงตัวตามเสถียรภาพตามมาตรฐาน ๒ Compartments

หากต้องการปรับปรุงให้การออกแบบเรือเป็นไปตามมาตรฐาน ๒ Compartments เรือลำนี้ต้องได้รับการออกแบบให้มีห้องระวางเพิ่มมากขึ้น กล่าวคือให้แต่ละห้องระวางมีความยาวห้องลดลง ส่งผลให้ความสูงของสามเหลี่ยมความยาว ๒ ห้องที่พลีตจะอยู่ต่ำกว่า Floodable Length Curve ตามตัวอย่างการแบ่งห้องระวางใน รูปที่ ๑๐



รูปที่ ๑๐: ตัวอย่างการแบ่งห้องระวาง ๑๐

เมื่อพลีตความยาว ๒ ห้องระวางลงไปจะได้ผลลัพธ์ตาม รูปที่ ๑๑



รูปที่ ๑๑: ตัวอย่างการแบ่งห้องระวาง ๑๑

โดยสามารถสรุปได้ว่า หากมีการออกแบบแบ่งห้องระวางเพิ่มมากขึ้น เรือลำนี้จะเป็นไปตามข้อบังคับเสถียรภาพการทรงตัวตามเสถียรภาพแบบ ๒ Compartments ซึ่งหากต้องการออกแบบให้เรือมีความปลอดภัยมากยิ่งขึ้น สามารถใช้มาตรฐาน ๓ หรือ ๔ Compartments โดยอาจส่งผลให้เรือมีห้องระวางที่มากขึ้นและมีต้นทุนในการสร้างสูงขึ้น จึงต้องมีการพิจารณาออกแบบให้เหมาะสมมากที่สุด

## Damage Stability: Probabilistic Damage Assessment

การคำนวณเสถียรภาพการทรงตัวยามเสียหายโดยการประเมินความเสียหายเชิงความน่าจะเป็น (Probabilistic Damage Assessment) เป็นข้อบังคับที่ถูกระบุโดย SOLAS Chapter II-๑ Part B ที่บังคับใช้ในเรือสินค้าที่มีความยาวมากกว่า ๘๐ เมตรขึ้นไป และในเรือบรรทุกผู้โดยสารทุกชนิด

กระบวนการนี้ใช้แนวความคิดของความน่าจะเป็นในการยืนยันและรับรองว่าเรือจะสามารถอยู่รอดได้อย่างปลอดภัยภายหลังจากเกิดความเสียหายกับห้องระวางต่าง ๆ โดยในการดำเนินการของกระบวนการนี้ จะมีปัจจัย

### ความน่าจะเป็น (Probability Factors) ๒ ปัจจัยเข้ามาเกี่ยวข้องคือ

ความน่าจะเป็นที่ห้องระวางเฉพาะเจาะจงห้องใดห้องหนึ่งจะเกิดความเสียหายเมื่อเกิดอุบัติเหตุ (Factor “p”)

ความน่าจะเป็นที่เรือจะสามารถอยู่รอดจากการจมได้เมื่อห้องระวางนั้นเกิดน้ำไหลเข้าท่วม (Factor “s”)

โดยทั้งสองปัจจัยนี้จะถูกกำหนดให้เป็นความต้องการพื้นฐานในการออกแบบเรือสินค้าและเรือผู้โดยสารตามที่กำหนดในรายละเอียดของข้อบังคับ และเมื่อทำการคูณปัจจัยทั้งสอง ( $p \times s$ ) จะทำให้ได้ผลลัพธ์ออกมาเป็นความน่าจะเป็นในการอยู่รอดจากการจมจากกรณีความเสียหายนั้น ๆ

เมื่อพิจารณาตัวอย่างของเรือ ๘ ห้องระวางที่ได้กำหนดไว้ในกระบวนการที่หนึ่ง ผลลัพธ์จากการคำนวณการอยู่รอดจากการจมตามมาตรฐาน ๑, ๒ และ ๓ Compartments แสดงให้เห็นใน ตารางที่ ๑ - ตารางที่ ๓ ตามลำดับ

Flooded Compartment	Probability of Flooding	Probability of Surviving this Damage	Probability of Surviving This Damage Case
1	$P_1$	$S_1$	$P_1 \times S_1$
2	$P_2$	$S_2$	$P_2 \times S_2$
3	$P_3$	$S_3$	$P_3 \times S_3$
4	$P_4$	$S_4$	$P_4 \times S_4$
5	$P_5$	$S_5$	$P_5 \times S_5$
6	$P_6$	$S_6$	$P_6 \times S_6$
7	$P_7$	$S_7$	$P_7 \times S_7$
8	$P_8$	$S_8$	$P_8 \times S_8$
Probability of Surviving Flooding of 1 Compartment			Sum of Probabilities of 1 Compartment

ตารางที่ ๑

Flooded Compartment	Probability of Flooding	Probability of Surviving this Damage	Probability of Surviving This Damage Case
1 & 2	$P_{1&2}$	$S_{1&2}$	$P_{1&2} \times S_{1&2}$
2 & 3	$P_{2&3}$	$S_{2&3}$	$P_{2&3} \times S_{2&3}$
3 & 4	$P_{3&4}$	$S_{3&4}$	$P_{3&4} \times S_{3&4}$
4 & 5	$P_{4&5}$	$S_{4&5}$	$P_{4&5} \times S_{4&5}$
5 & 6	$P_{5&6}$	$S_{5&6}$	$P_{5&6} \times S_{5&6}$
6 & 7	$P_{6&7}$	$S_{6&7}$	$P_{6&7} \times S_{6&7}$
7 & 8	$P_{7&8}$	$S_{7&8}$	$P_{7&8} \times S_{7&8}$
Probability of Surviving Flooding of 1 Compartment			Sum of Probabilities of 2 Compartments

ตารางที่ ๒

Flooded Compartment	Probability of Flooding	Probability of Surviving this Damage	Probability of Surviving This Damage Case
1 & 2 & 3	$P_{1&2&3}$	$S_{1&2&3}$	$P_{1&2&3} \times S_{1&2&3}$
2 & 3 & 4	$P_{2&3&4}$	$S_{2&3&4}$	$P_{2&3&4} \times S_{2&3&4}$
3 & 4 & 5	$P_{3&4&5}$	$S_{3&4&5}$	$P_{3&4&5} \times S_{3&4&5}$
4 & 5 & 6	$P_{4&5&6}$	$S_{4&5&6}$	$P_{4&5&6} \times S_{4&5&6}$
5 & 6 & 7	$P_{5&6&7}$	$S_{5&6&7}$	$P_{5&6&7} \times S_{5&6&7}$
6 & 7 & 8	$P_{6&7&8}$	$S_{6&7&8}$	$P_{6&7&8} \times S_{6&7&8}$
Probability of Surviving Flooding of 1 Compartment			Sum of Probabilities of 3 Compartments

ตารางที่ ๓

ทั้งสามกรณี ค่าของ  $s$  มีค่าเท่ากับ ๐ หรือ ๑ เท่านั้น จากการที่หากพิจารณาความเสียหายที่เกิดขึ้นจากอุบัติเหตุ เรือจะ “รอด” (Probability = ๑) หรือ “ไม่รอด” (Probability = ๐) จากการจมเท่านั้น ซึ่งถ้าหากเรือในตัวอย่างมีห้องระวางเพียง ๓ ห้อง จะไม่มีความจำเป็นที่จะต้องพิจารณาความน่าจะเป็นของการรอดจากการจมตามมาตรฐาน ๔ Compartments หรือมากกว่านั้น เนื่องจากค่าของความน่าจะเป็นจะมีค่าเท่ากับ ๐ เท่านั้น

การคำนวณความน่าจะเป็นตามตัวอย่างในรูป จะถูกดำเนินการตามระยะกั้นน้ำลึกทั้ง 3 ระยะ  
สำหรับ Deepest Subdivision Draught:

$$A_S = A_{S_1} + A_{S_2} + A_{S_3} + \dots$$

โดยที่

- $A_S$ : Probability of Survival at Deepest Subdivision Draught (ds)
- $A_{S_1}$ : Probability of Survival at Draught (ds) with 1 Compartment Flooding
- $A_{S_2}$ : Probability of Survival at Draught (ds) with 2 Compartments Flooding
- $A_{S_3}$ : Probability of Survival at Draught (ds) with 3 Compartments Flooding

สำหรับ Light Service Draught:

$$A_L = A_{L_1} + A_{L_2} + A_{L_3} + \dots$$

โดยที่

- $A_L$ : Probability of Survival at Light Service Draught (dl)
- $A_{L_1}$ : Probability of Survival at Draught (dl) with 1 Compartment Flooding
- $A_{L_2}$ : Probability of Survival at Draught (dl) with 2 Compartments Flooding
- $A_{L_3}$ : Probability of Survival at Draught (dl) with 3 Compartments Flooding

และสุดท้ายสำหรับ Partial Subdivision Draught:

$$A_p = A_{p_1} + A_{p_2} + A_{p_3} + \dots$$

โดยที่

- $A_p$ : Probability of Survival at Partial Subdivision Draught (dl)
- $A_{p_1}$ : Probability of Survival at Draught (dp) with 1 Compartment Flooding
- $A_{p_2}$ : Probability of Survival at Draught (dp) with 2 Compartments Flooding
- $A_{p_3}$ : Probability of Survival at Draught (dp) with 3 Compartments Flooding

### 3. Damage Stability Compliance: Probabilistic Method

ในกระบวนการที่สามนี้เป็นกรรมวิธีในการตรวจสอบคุณสมบัติการเป็นไปตามข้อบังคับของเสถียรภาพการทรงตัวยามเสียหาย จากที่กำหนดไว้ใน SOLAS Chapter II-1 Part B-1 Regulation 6 เรือลำหนึ่งจะมีคุณสมบัติเสถียรภาพการทรงตัวยามเสียหายเมื่อ Attained Sub-division Index มีค่ามากกว่า Required Subdivision Index

$$A > R$$

#### Attained Subdivision Index

จากกฎข้อบังคับของ SOLAS Attained Subdivision Index สามารถคำนวณได้จากสูตร:

$$A = 0.4A_s + 0.4A_p + 0.2A_l$$

#### Required Subdivision Index

SOLAS Chapter II-1 Reg 7 กำหนดสูตรในการคำนวณหา Required Subdivision Index ซึ่งสูตรเหล่านี้มีความแตกต่างกันตามประเภทและขนาดของเรือ

สำหรับเรือสินค้าที่มีความยาว  $L > 100 \text{ m}$

$$R = 1 - \frac{128}{L + 152}$$

สำหรับเรือสินค้าที่มีความยาว  $80 \text{ m} < L < 100 \text{ m}$



$$R = 1 - \left( \frac{1}{1 + \frac{L}{100} \times \frac{R_0}{1 - R_0}} \right)$$

โดยที่  $R_0$  คือค่า  $R$  ที่หามาได้จากกรณี  $L > 100 m$

สำหรับเรือขนส่งผู้โดยสาร

$$R = 1 - \frac{5000}{L + 2.5N + 15225}$$

$$N = N_1 + 2N_2$$

$N_1$  คือจำนวนคนที่สามารถลงเรือช่วยชีวิตได้พอดี

$N_2$  คือจำนวนคน (รวมถึงลูกเรือ) ที่เรือสามารถบรรทุกได้นอกเหนือจากจำนวนใน  $N_1$

ค่าที่คำนวณได้จากสูตรทางด้านบน จะเป็นค่าต่ำสุดของ Subdivision Index หากค่าของ Attained Subdivision Index ที่คำนวณออกมาน้อยกว่าค่าของ Required Subdivision Index เรือลำดังกล่าวต้องได้รับการจัดแบ่งห้องระวางใหม่อีกครั้งโดยเพิ่มห้องระวางเพื่อให้ค่าของ Attained มากกว่าของ Required

## บทสรุป

การคำนวณและประเมินเสถียรภาพการทรงตัวยามเสียหายเชิงความน่าจะเป็น (Probabilistic Damage Stability: PDS) มีพื้นฐานการประเมินอยู่บนความน่าจะเป็นของความเสียหายและความอยู่รอดภายหลังจากเกิดความเสียหาย ซึ่ง PDS นี้จะช่วยให้เกิดความยืดหยุ่นกับनावस्थाปนिकผู้ออกแบบเรือในการกำหนดจุดวางฝากันน้ำ เนื่องจากไม่มีข้อจำกัดของขอบเขตความเสียหายที่ต้องกำหนดขึ้นในกระบวนการของเสถียรภาพการทรงตัวยามเสียหายเชิงกำหนด (Deterministic Damage Stability: DDS) และมีการบังคับอย่างทั่วถึงในเรือเกือบทุกประเภทที่สร้างเสร็จตั้งแต่ปี ค.ศ. ๒๐๐๙ จึงเป็นหัวข้อสำคัญอีกหัวข้อหนึ่ง ที่नावस्थाปนिकควรศึกษาให้เข้าใจทั้งในส่วนของ การออกแบบและการสร้าง รวมไปถึงการนำไปใช้ในการปฏิบัติงานของผู้ใช้งานเช่นกัน

### เอกสารอ้างอิง

- Jassan, Rajeev. “A Complete Guide to Understand Damage Stability Better”.  
<https://www.myseatime.com/blog/detail/damage-stability>
- Djupvik, Ole Martin. “Probabilistic Damage Stability: Maximizing the Attained Index by Analyzing the Effects of Changes in the Arrangement for Offshore Vessels”.  
Master Thesis, Norwegian University of Science and Technology.
- Biran, Adrain. “Ship Hydrostatics and Stability”. Elsevier Editorial, Burlington, MA.  
๒๐๐๓

