



วารสารกรมอุทกหารเรือ

ISSN : 0857-4766





รอบปีที่ผ่านมา

นาวาโท สุमितร์ ชอบสะอาด

ประจำแผนกวิเคราะห์ทำงานช่าง กองควบคุมคุณภาพ

กรมพัฒนาการช่าง กรมอุทกทหารเรือ

Email : sumit.c@navy.mi.th

กล่าวนำ

กรมอุทกทหารเรือเป็นหน่วยงานทางวิศวกรรมแห่งหนึ่งของกองทัพเรือ และของประเทศที่มีประวัติมายาวนานนับตั้งแต่รัชสมัยพระบาทสมเด็จพระจุลจอมเกล้าเจ้าอยู่หัว รัชกาลที่ 5 ตราบจนปัจจุบันบทบาทของกรมอุทกทหารเรือ ในช่วงที่ผ่านมามีผลงานทั้งงานซ่อมและงานสร้างเรือ รวมทั้งงานวิจัยในแขนงต่าง ๆ ทั้งทางด้านการสร้างเรือ และพลังงานทดแทน ซึ่งนับได้ว่ามีส่วนสำคัญที่ช่วยสร้างเสริมความเจริญก้าวหน้าให้แก่กองทัพเรือ และประเทศชาติ โดยเฉพาะอย่างยิ่งงานในด้านวิศวกรรมการสร้างเรือ และซ่อมเรือนั้น กรมอุทกทหารเรือ นับเป็นหน่วยงานที่มีองค์ความรู้ที่สมบูรณ์มากที่สุดหน่วยงานหนึ่งในประเทศ ในวาระแห่งการสถาปนากรมอุทกทหารเรือ ปีที่ 117 ใน 9 มกราคม 2550 นี้ ขอนำผลงานที่น่าภาคภูมิใจของกรมอุทกทหารเรือในช่วง 2 - 3 ปีที่ผ่านมา นำมาเสนอ

ภารกิจการซ่อมเรือ

จากข้อความที่ติดอยู่ภายในห้องอาหารนายทหารสัญญาบัตร อาคารกองบังคับการ กรมอุทการเรือที่มีผู้รับออกต่อ ๆ กันมาว่าเป็นพระดำรัสของพลเรือเอก พระเจ้าบรมวงศ์เธอ พระองค์เจ้า อาภากรเกียรติวงศ์ กรมหลวงชุมพรเขตอุดมศักดิ์ ที่ว่า **“ธรรมดามีเรือแล้วต้องซ่อมได้เอง เป็นหลักของยุทธศาสตร์ ถ้าซ่อมไม่ได้เองก็ไม่ควรจะมี”** นั้น ทำให้ภารกิจที่น่าจะถือได้ว่าเป็น ภารกิจหลักที่มีความสำคัญที่สุดของกรมอุทการเรือก็คือการซ่อมบำรุงเรือของกองทัพเรือให้มีสภาพ พร้อมใช้งานได้ตามภารกิจที่ได้รับมอบหมาย อย่างไรก็ตามการซ่อมเรือตามวงรอบโดยปกตินั้น เป็นที่ ทราบกันดีโดยทั่วไปอยู่แล้ว ซึ่งผู้ที่สนใจในรายละเอียดสามารถสอบถามข้อมูลได้จากหน่วยงานของ กรมอุทการเรือ ที่รับผิดชอบโดยตรง ผลงานการซ่อมบำรุงของกรมอุทการเรือที่จะนำมากล่าวในที่นี้ ก็คือการซ่อมเรือพระราชพิธี เพื่อใช้ในการจัดขบวนเรือพระราชพิธีในงานฉลองสิริราชสมบัติครบ 60 ปี

การซ่อมเรือพระราชพิธี

เนื่องในปี 2549 เป็นปีที่พระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัวทรงครองสิริราชสมบัติครบ 60 ปี รัฐบาลจึงได้จัดให้มีการเฉลิมฉลองเนื่องในโอกาส อันเป็นมหามงคลนี้ กองทัพเรือได้รับมอบหมาย ให้ดำเนินการจัดเตรียมบุคลากร และสถานที่เพื่อใช้ การเฉลิมฉลองดังกล่าว กรมอุทการเรือก็มีส่วนร่วม ในการจัดงานด้วยเช่นกัน โดยที่ภารกิจของกรมอุ ทการเรือในการนี้คือการซ่อมเรือพระราชพิธี ให้พร้อมสำหรับการจัดขบวนเรือพระราชพิธีใน งานฉลองสิริราชสมบัติครบ 60 ปี จำนวน 54 ลำ จัดสร้างไปปะเทียบเรือบริเวณจุดต่าง ๆ ตามเส้นทาง ของขบวนเรือ รวมทั้งจัดวางหุ่นจอดเรือตาม ที่ได้รับการร้องขออีกด้วย แต่ภารกิจที่สร้างความ ภาคภูมิใจให้แก่ช่างของกรมอุทการเรือก็คือการ ซ่อมทำเรือพระราชพิธีทั้ง 54 ลำ โดยเฉพาะ อย่างยิ่งการซ่อมทำเรือสำคัญ 4 ลำ คือ เรือ พระที่นั่งสุพรรณหงส์ เรือพระที่นั่งนารายณ์ ทรงสุบรรณ รัชกาลที่ 9 เรือพระที่นั่งอนันตนาคราช และเรือพระที่นั่งอเนกชาติภุชงค์ จากผลงาน การซ่อมทำ และการบริหารการซ่อมทำของกรมอุ ทการเรือ ส่งผลให้การจัดขบวนเรือพระราชพิธี ของกองทัพเรือเป็นไปด้วยความเรียบร้อย ยิ่งใหญ่งดงาม สมพระเกียรติ



รูปที่ 1-2 การซ่อมทำเรือพระราชพิธี



รูปที่ 3 การขนย้ายเรือพระราชพิธี

ภารกิจการสร้างเรือ

นอกเหนือจากภารกิจในการซ่อมเรือ กรมอุทการเรือยังมีการกิจที่สำคัญและเป็นที่เชิดหน้าชูตาไม่เพียงเฉพาะกรมอุทการเรือเท่านั้น แต่ยังเป็นผลงานที่สร้างชื่อเสียงให้แก่กองทัพเรือด้วยนั่นคือภารกิจการสร้างเรือ ซึ่งกรมอุทการเรือมีขีดความสามารถอย่างพร้อมมูลทั้งในด้านบุคลากร ซึ่งมีความรู้ทางด้านวิศวกรรมต่อเรือ และวิศวกรรมเครื่องกลเรือ (Naval Architecture & Marine Engineering) มากที่สุดในประเทศไทยและด้านองค์ความรู้รวมถึงเครื่องมือเฉพาะทางที่ใช้ในการสร้างเรือต่าง ๆ ผลงานการสร้างเรือของกรมอุทการเรือที่ผ่านไปได้แก่ เรือตรวจการณ์ใกล้ฝั่งชุด ต.91 - ต.99 เรือตรวจการณ์ปราบเรือดำน้ำชุดเรือหลวงล่องลม เรือกวาดทุ่นระเบิดน้ำตื้น เรือลากจูงชุดเรือหลวงแสงสาร เรือพระที่นั่งนารายณ์ทรงสุบรรณ รัชกาลที่ 9 และเรือตรวจการณ์ปืนชุดเรือหลวงศรีราชา ที่กรมอุทการเรือได้ออกแบบเองทั้งหมด ในรอบปีที่ผ่านมากรมอุทการเรือได้ดำเนินการสร้างเรือที่นับได้ว่าเป็นความภาคภูมิใจของกรมอุทการเรือขึ้นมาอีกซึ่งก็คือการสร้างเรือตรวจการณ์เฉลิมพระเกียรติ ชุด ต.991 และเรือประมงพื้นบ้าน (เรือหัวโทง)

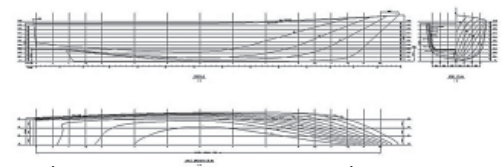
การสร้างเรือตรวจการณ์ใกล้ฝั่ง (ต.991)

เรือตรวจการณ์ใกล้ฝั่งชุดเรือ ต.991 เป็นพระราชดำริของพระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัว ทรงเล็งเห็นว่ากองทัพเรือควรจะดำเนินการต่อเรือชุด ต.91 เพิ่มเติมเพื่อเป็นการพัฒนาขีดความสามารถในการต่อเรือของกองทัพเรือให้สูงขึ้น และได้มีพระราชกระแสรับสั่งแก่ผู้บังคับหมู่เรือรักษาการณ์วังไกลกังวล และผู้เข้าเฝ้าฯ ณ วังไกลกังวล เกี่ยวกับการใช้เรือของกองทัพเรือเมื่อวันที่ 15 เมษายน 2545 ความว่า **“เรือรบขนาดใหญ่มีราคาแพงและมีค่าใช้จ่ายในการปฏิบัติงานสูง กองทัพเรือจึงควรใช้เรือที่มีขนาดเหมาะสม และสร้างได้เอง ซึ่งเมื่อสร้างเรือตรวจการณ์ใกล้ฝั่งชุดเรือ ต.91 ได้แล้ว ควรขยายแบบเรือให้ใหญ่ขึ้นและสร้างเพิ่มเติม”** กับได้มีพระราชดำรัสในโอกาสวันเฉลิมพระชนมพรรษา 5 ธันวาคม 2546 เกี่ยวกับเศรษฐกิจพอเพียงโดยได้ทรงยกตัวอย่างโครงการต่อเรือตรวจการณ์ใกล้ฝั่งชุดเรือ ต.91 ที่กองทัพเรือได้สร้างขึ้นในอดีตด้วย

เมื่อวันที่ 31 มีนาคม 2546 กองทัพเรือได้รับอนุมัติจากกระทรวงกลาโหม ให้ดำเนินโครงการ จัดทำเรือตรวจการณ์ใกล้ฝั่ง เป็นโครงการเริ่มใหม่ เพื่อทดแทนเรือตรวจการณ์ใกล้ฝั่งชุดเรือ ต.11 ซึ่ง มีแผนจะปลดประจำการ 6 ลำ โดยจะสร้างคราวละ 1 ลำ แต่รัฐบาลโดยคณะรัฐมนตรีเห็นความสำคัญของโครงการฯ จึงได้อนุมัติให้กองทัพเรือดำเนินโครงการสร้างเรือตรวจการณ์ใกล้ฝั่งพร้อมกัน 3 ลำ ในวงเงินรวมประมาณ



รูปที่ 4 พระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัว ทรงพระกรุณาโปรดเกล้าฯ ให้คณะผู้บัญชาการทหารเรือ (พลเรือเอก ชุมพล บัจจุสานนท์) เฝ้าทูลละอองธุลีพระบาทกราบบังคมทูลรายงานครั้งที่ 1 เมื่อวันที่ 19 กุมภาพันธ์ 2547



รูปที่ 5 ลายเส้นเรือตรวจการณ์ใกล้ฝั่งชุดเรือ ต.991



รูปที่ 6 พระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัว ทรงพระกรุณาโปรดเกล้าฯ ให้คณะผู้บัญชาการทหารเรือ (พลเรือเอก สามภพ อัมระปาล) เฝ้าทูลละอองธุลีพระบาทกราบบังคมทูลรายงานครั้งที่ 2 เมื่อวันที่ 21 กรกฎาคม 2548

1,912 ล้านบาท ระยะเวลาดำเนินการรวม 3 ปี ตั้งแต่ปีพุทธศักราช 2548 - 2550 เพื่อน้อมเกล้าฯน้อมกระหม่อมถวายพระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัว เนื่องในโอกาสมหามงคล เฉลิมพระชนมพรรษา 80 พรรษา 5 ธ.ค. 2550 กองทัพเรือจึงได้ดำเนินโครงการสร้างเรือตรวจการณ์ใกล้ฝั่งเฉลิมพระเกียรตินี้จำนวน 3 ลำโดยให้กรมอุทการเรือดำเนินการสร้างเองจำนวน 1 ลำ และให้ ๒ ต่อเรือเอกชนภายในประเทศที่มีขีดความสามารถดำเนินการสร้างอีก 2 ลำ กรมอุทการเรือ จึงได้ดำเนินการออกแบบเรือ ต.991 โดยปรับปรุงจากแบบเรือชุด ต.99 ให้มีขนาดใหญ่ขึ้นอีก 10 เปอร์เซ็นต์ คณะผู้ออกแบบได้ขอพระราชทานพระบรมราชวโรกาสเฝ้าทูลละอองธุลีพระบาททกราบบังคมทูลรายงานการออกแบบในเบื้องต้นเมื่อวันที่ 19 กุมภาพันธ์ 2547 โดยคุณลักษณะโดยทั่วไปของเรือตรวจการณ์ใกล้ฝั่งชุดเรือ ต.991 คือมีระวางขับน้ำ ปกติ 170 ตัน เต็มที่ 185 ตัน ความยาวตลอดลำ 38.7 เมตร มีความกว้าง 6.46 เมตร ความเร็วสูงสุดต่อเนื่อง ไม่น้อยกว่า 27 นอต ระยะปฏิบัติการ ไม่น้อยกว่า 1,500 ไมล์ และสามารถปฏิบัติการในทะเลต่อเนื่องไม่น้อยกว่า 7 วัน

พระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัวทรงมีพระบรมราชวินิจฉัยเกี่ยวกับการออกแบบของเรือซึ่งคณะวิศวกรเจ้าหน้าที่ของกรมอุทการเรือได้ดำเนินการปรับปรุง แล้วดำเนินการส่งแบบเรือที่ผ่านการแก้ไขตามพระบรมราชวินิจฉัยแล้วไปทำการทดสอบที่สถาบัน Hamburg Ship Model Basin (HSVA-Hamburgische Schiffbau-Versuchsanstalt GmbH) และขอพระราชทานพระบรมราชวโรกาสเฝ้าทูลละอองธุลีพระบาททกราบบังคมทูลรายงานผลการทดสอบอีกครั้งหนึ่งเมื่อวันที่ 21 กรกฎาคม 2548

จากการเข้าเฝ้าฯ ในครั้งที่สองนี้ กรมอุทการเรือได้จัดพิธีวางกระดูกงูเรือขึ้นในวันที่ 9 กันยายน 2548 ณ อุ้งแห่งหมายเลข 1 อุ้งทหารเรือธนบุรี ซึ่งพระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัวทรงพระกรุณาโปรดเกล้าฯ เสด็จพระราชดำเนินมาทรงวางกระดูกงูด้วยพระองค์เอง ซึ่งนับเป็นพระมหากุณาธิคุณต่อกองทัพเรือ และกรมอุทการเรือเป็นล้นพ้น การดำเนินการก่อสร้างเรือตรวจการณ์ใกล้ฝั่งชุด เรือ ต.991 มีความก้าวหน้าตามลำดับ ซึ่งผู้ที่สนใจสามารถติดตามความก้าวหน้าได้จาก website <http://www.navy.mi.th /sctr/ship/>



รูปที่ 7 พระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัวทรงเจิมกระดูกงูเรือ ต.991 ณ อุ้งหมายเลข 1 อุ้งทหารเรือธนบุรี เมื่อวันที่ 9 กันยายน 2548



รูปที่ 8 พระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัว ทอดพระเนตรนิทรรศการของกรมอุทการเรือ ในการเสด็จพระราชดำเนินทรงวางกระดูกงูเรือ ต.991 เมื่อวันที่ 9 กันยายน 2548



รูปที่ 9-11 ความก้าวหน้าในการดำเนินการก่อสร้างเรือตรวจการณ์ใกล้ฝั่ง ต.991 ของกรมอุทการเรือ

การสร้างเรือประมงพื้นบ้าน (เรือหัวโทง)

จากเหตุการณ์ภัยพิบัติคลื่นยักษ์สึนามิที่สร้างความเสียหายทั้งชีวิต และทรัพย์สินให้แก่ราษฎรในจังหวัดทางฝั่งทะเลอันดามัน ซึ่งส่วนใหญ่ประกอบอาชีพประมง ทำให้เรือประมงได้รับความเสียหายจนราษฎรไม่สามารถประกอบอาชีพได้ดั้งเดิม สมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารี ทรงพระกรุณาโปรดเกล้าฯ ให้มูลนิธิชัยพัฒนาดำเนินการจัดสร้างเรือเพื่อมอบให้แก่ราษฎรที่ประสบภัยดังกล่าว มูลนิธิชัยพัฒนาและสภาอากาศไทย จึงขอความอนุเคราะห์กองทัพเรือ โดยกรมอุทกหารเรือให้ดำเนินการออกแบบและสร้างเรือต้นแบบเรือประมงพื้นบ้านพระราชทาน (เรือหัวโทง) ร่วมกับกรมประมง และวิทยาลัยเทคโนโลยีและอุตสาหกรรมต่อเรือพระนครศรีอยุธยา โดยกำหนดให้กรมอุทกหารเรือสร้าง จำนวน 30 ลำ และวิทยาลัยเทคโนโลยีและอุตสาหกรรมต่อเรือพระนครศรีอยุธยาดำเนินการสร้างจำนวน 30 ลำ เรือประมงพื้นบ้านนี้มีขนาดความยาว 10.00 เมตร กว้าง 2.10 เมตร ลึก 0.80 เมตร รวมทั้งให้กรมอุทกหารเรือพัฒนาเรือต้นแบบร่วมกับกรมประมงเพื่อจัดสร้างและมอบให้แก่ประชาชนต่อไป

อุทกหารเรือธนบุรี กรมอุทกหารเรือดำเนินการสร้างเรือประมงพื้นบ้านด้วยไฟเบอร์กลาส ตัวเรือ ทำจากโพลีเอสเตอร์ เรซิน สลับกับการวางด้วยเส้นใยแก้วขนาดต่าง ๆ เป็นชั้น ๆ จำนวน 7 ชั้น วัสดุที่ใช้สร้างเรือเป็นวัสดุที่ได้รับการรับรองตามมาตรฐานของสมาคมจัดชั้นเรือ Lloyd's Register of Shipping Classification Society เรือประมงพื้นบ้านนี้ออกแบบให้ใช้งานได้อเนกประสงค์ มีรูปทรงเหมือนเรือประมงพื้นบ้านซึ่งทำด้วยไม้มีท้องกลม ด้านข้างเสริมกระดูกงูปีกเพื่อลดอาการโคลงของเรือ สามารถทนต่อคลื่นทะเลในระดับ 2 มีห้องลอยบริเวณหัวเรือและท้ายเรือเพื่อป้องกันเรือจมนกรบมนโดยรอบสอดไส้ด้วยไม้เพื่อเพิ่มความแข็งแรงของตัวเรือให้มากขึ้น ตัวเรือด้านนอกเคลือบด้วยเจลโค้ตผสมสีทนกรด ต่าง และสารเคมี รวมทั้งสามารถป้องกันการดูดซึมของน้ำไม่ให้รั่วผ่านชั้นไฟเบอร์กลาสตัวเรือได้ เรือประมงพื้นบ้านนี้กำหนดให้มีอายุการใช้งานนานกว่า 15 ปี



รูปที่ 12 พิธีปล่อยเรือประมงพื้นบ้าน แต่งตั้งประธานมูลนิธิชัยพัฒนา บริเวณบ้านชาวน้ำ อำเภอดุสิตบุรี จังหวัดพังงา เมื่อ 12 พฤษภาคม 2548



รูปที่ 13 สมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารี ทอดพระเนตรนิทรรศการการสร้างเรือประมงพื้นบ้าน บริเวณบ้านชาวน้ำ อำเภอดุสิตบุรี จังหวัดพังงา 12 พฤษภาคม 2548 โดยมี พลเรือโท ชูศักดิ์ เสนานิกรม เจ้ากรมอุทกหารเรือ (ในขณะนั้น) กราบบังคมทูลรายงาน



รูปที่ 14 การสร้างเรือประมงพื้นบ้าน (เรือหัวโทง) ณ อุทกหารเรือธนบุรี



รูปที่ 15 เรือประมงพื้นบ้าน (เรือหัวโทง) ณ อุทกหารเรือธนบุรี

ภารกิจด้านงานวิจัย

นอกเหนือจากภารกิจในการซ่อม สร้างเรือแล้ว กรมอุทกหารเรือยังให้ความสำคัญกับงานวิจัย และพัฒนาในด้านต่าง ๆ เนื่องจากกรมอุทกหารเรือมีบุคลากรที่มีความรู้ความสามารถในสาขาวิชาต่าง ๆ ที่หลากหลาย งานวิจัยที่สร้างชื่อเสียงให้แก่กรมอุทกหารเรือคืองานวิจัยด้านพลังงานทดแทน ทั้งในส่วนของน้ำมันเชื้อเพลิงไบโอดีเซล และการใช้ก๊าซธรรมชาติกับรถยนต์ดีเซล

พลังงานทดแทน

ปัจจุบันพลังงานที่ใช้เป็นส่วนใหญ่ในประเทศคือการใช้ น้ำมันเชื้อเพลิงประเภทต่าง ๆ ซึ่งนับวันจะมีราคาสูงขึ้นทำให้รัฐต้องเสียเงินตราที่จะต้องนำเข้าจากต่างประเทศเป็นจำนวนมาก น้ำมันเชื้อเพลิง นับเป็นยุทธปัจจัยที่สำคัญต่อภารกิจของกองทัพเรือเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะปริมาณความต้องการ น้ำมันเชื้อเพลิงของกองทัพเรือในแต่ละปีมีสูงถึงกว่า 37 ล้านลิตรต่อปี ทำให้กองทัพเรือต้องใช้งบประมาณในการจัดหา น้ำมันเชื้อเพลิงในปริมาณที่สูงตามไปด้วย วิศวกรของกรมอุทกหารเรือจำนวนหนึ่ง จึงได้ริเริ่มโครงการวิจัยเพื่อหาพลังงานทดแทนการใช้น้ำมัน หรือใช้น้ำมันในปริมาณที่ลดลง จากแนวความคิดดังกล่าวจึงนำไปสู่โครงการวิจัยและพัฒนา น้ำมันเชื้อเพลิงไบโอดีเซลของกองทัพเรือจนมีผลงาน คือ สูตรน้ำมันไบโอดีเซลแบบต่าง ๆ (B20, B40 และ B100), การสร้างเครื่องต้นแบบระบบผลิตไบโอดีเซลสำหรับชุมชน (แบบ Batch ขนาด 50 - 6,000 ลิตรต่อวัน) การสร้างเครื่องผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่อง (Continuous Bio-Diesel Process Plant) และโครงการวิจัยการใช้ก๊าซธรรมชาติ ร่วมกับน้ำมันไบโอดีเซลในเวลาต่อมา ซึ่งประสบผลสำเร็จด้วยดี สร้างชื่อเสียงให้แก่กรมอุทกหารเรือ และกองทัพเรือเป็นอย่างมาก จากผลสำเร็จดังกล่าว กรมอุทกหารเรือได้ให้การสนับสนุนหน่วยงานทั้งภาครัฐ และเอกชนในการจัดสร้างเครื่องต้นแบบผลิตไบโอดีเซลและการพัฒนาพลังงานทดแทน

การสร้างเครื่องต้นแบบระบบผลิตไบโอดีเซล ในโครงการส่วนพระองค์ สวนจิตรลดา

กรมอุทกหารเรือ ร่วมกับ บริษัท ราชาน้ำมันไบโอดีเซล จำกัด ได้จัดสร้างเครื่องต้นแบบระบบผลิตไบโอดีเซล ขนาด 1,000 ลิตร/ครั้ง ติดตั้ง ณ อาคารไบโอดีเซล สวนจิตรลดา พระราชวังดุสิต สำหรับใช้ในโครงการแปรรูปน้ำมันพืชที่ใช้แล้วจากโรงอาหารในพระราชวัง มาผลิตเป็นไบโอดีเซล ด้วยกระบวนการทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน (Transesterification) เพื่อใช้ทดแทนน้ำมันดีเซล (ปี 2547)



รูปที่ 16 อาคารไบโอดีเซล โครงการส่วนพระองค์ สวนจิตรลดา



รูปที่ 17 เครื่องผลิตไบโอดีเซล ณ อาคารไบโอดีเซล โครงการส่วนพระองค์ สวนจิตรลดา

การสร้างเครื่องผลิตน้ำมัน Bio-Diesel แบบเคลื่อนที่ ณ จังหวัดเชียงใหม่

กรมอุทการเรือ ร่วมกับกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน ดำเนินการออกแบบและติดตั้งระบบผลิตน้ำมันไบโอดีเซล ระดับชุมชน ขนาด 2,000 ลิตร/ครั้ง จำนวน 1 ชุด ติดตั้ง ณ อาคารวิจัยและพัฒนาสาธิตไบโอดีเซล จังหวัดเชียงใหม่ เพื่อใช้สำหรับเป็นโครงการนำร่อง ในการพัฒนาอุตสาหกรรมไบโอดีเซลในชุมชน ของจังหวัดเชียงใหม่ และติดตั้งหัวจ่ายน้ำมันให้บริการ น้ำมันดีเซลผสมไบโอดีเซลสูตร B5 (ไบโอดีเซล 5% ผสมกับดีเซล 95%) ที่จังหวัดเชียงใหม่ นับเป็นอีกตัวอย่างหนึ่งของโครงการนำร่องการประยุกต์ใช้พลังงานทดแทน ในการนำเชื้อเพลิงไบโอดีเซลไปใช้ในชุมชน และช่วยลดปัญหามลพิษในชุมชนได้อีกทางหนึ่ง (ปี 2547)

สร้างต้นแบบผลิตไบโอดีเซลชุมชน ขนาด 6,000 ลิตร/วัน

กรมอุทการเรือ ได้สร้างต้นแบบระบบผลิตไบโอดีเซล แบบชุมชนขนาด 6,000 ลิตร/วัน จำนวน 1 ชุด แล้วเสร็จ เมื่อเดือนกันยายน 2549 ทำการติดตั้งที่โรงงานเครื่องกล แผนกโรงงานเครื่องกล กองโรงงาน อุทการเรือธนบุรี กรมอุทการเรือ เพื่อทดลองผลิตน้ำมันเชื้อเพลิงไบโอดีเซล โดยใช้วัตถุดิบที่ได้รับการสนับสนุนน้ำมันปาล์มจากกรมศุลกากร จำนวน 56 ตัน สำหรับใช้ทดสอบกับรถยนต์ร่วมโครงการวิจัย



รูปที่ 18 โครงการนำร่องการสาธิตการใช้ไบโอดีเซลที่เชียงใหม่



รูปที่ 19 อาคารวิจัยพัฒนาและสาธิตไบโอดีเซล จังหวัดเชียงใหม่



รูปที่ 20 หัวจ่ายน้ำมันไบโอดีเซล ณ กรมอุทการเรือ



รูปที่ 21 ระบบผลิตไบโอดีเซลขนาด 6,000 ลิตร/วัน ณ กรมอุทการเรือ



รูปที่ 22 ถังเก็บน้ำมันไบโอดีเซล ณ กรมอุทการเรือ

การติดตั้งอุปกรณ์การใช้ก๊าซ NGV ร่วมกับ DIESEL ให้กับรถยนต์โดยสารปรับอากาศขนาดใหญ่ ของฐานทัพเรือสัตหีบ

กรมอุทหาเรือ ได้ทดสอบใช้ก๊าซธรรมชาติ (NGV) ร่วมดีเซลกับเครื่องยนต์ดีเซลในยานพาหนะและยุทโธปกรณ์ต่าง ๆ ของกองทัพอเรือ และเอกชน โดยได้ทดลองติดตั้งอุปกรณ์การใช้ก๊าซธรรมชาติ (NGV) ร่วมดีเซลให้กับรถยนต์โดยสารปรับอากาศขนาดใหญ่ของฐานทัพเรือสัตหีบ จำนวน 2 คันแล้วเสร็จ เมื่อเดือนตุลาคม 2549 ผลการทดลอง สามารถประหยัดค่าใช้จ่ายได้ประมาณ 30% ในการใช้เชื้อเพลิงร่วมระหว่างก๊าซธรรมชาติกับน้ำมันดีเซล

สร้างต้นแบบอุปกรณ์ขนส่งก๊าซธรรมชาติให้กับ บริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน) เพื่อติดตั้งใช้เป็นเชื้อเพลิงในเรือเฟอร์รี่

กรมอุทหาเรือ ให้การสนับสนุนบุคลากรในการออกแบบ พร้อมจัดสร้างต้นแบบอุปกรณ์ขนส่งก๊าซธรรมชาติ PACK GAS NGV จำนวน 8 ชุด ซึ่งใน 1 ชุด จะมีถังก๊าซบรรจุจำนวน 16 ถัง ให้แก่ บริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน) เพื่อติดตั้งใช้งานในเรือเฟอร์รี่ ที่ท่าเรือแหลมฉบัง จังหวัดตราด เมื่อเดือนพฤศจิกายน 2549 ผลการทดลอง สามารถประหยัดค่าใช้จ่ายได้ประมาณ 30% ในการใช้เชื้อเพลิงร่วมระหว่างก๊าซธรรมชาติกับน้ำมันดีเซลในเรือเฟอร์รี่

นอกจากนี้กรมอุทหาเรือ ยังได้รับเกียรติ จากหน่วยงานต่าง ๆ เชิญไปให้ความรู้ในด้านพลังงานทดแทน ด้วยการจัดนิทรรศการ และสาธิตการผลิตไบโอดีเซลในงานต่าง ๆ เช่น



รูปที่ 23 ติดตั้งระบบควบคุมการจ่ายก๊าซธรรมชาติ (NGV)



รูปที่ 24 ติดตั้งถังก๊าซธรรมชาติ (NGV)



รูปที่ 25 ชูถังก๊าซธรรมชาติ PACK GAS NGV ใช้งานในเรือเฟอร์รี่



รูปที่ 26 ติดป้ายโครงการชูถังก๊าซธรรมชาติ PACK GAS NGV ใช้งานในเรือเฟอร์รี่

การจัดนิทรรศการในงาน วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี แห่งชาติ ประจำปี 2549

กรมอุทกหารเรือ ได้นำผลงาน
โครงการวิจัยและพัฒนา น้ำมันเชื้อเพลิง
ไบโอดีเซลของกองทัพเรือ เข้าร่วมจัด
แสดงในงานวิทยาศาสตร์ และ
เทคโนโลยีแห่งชาติ ประจำปี 2549
ระหว่าง 11 - 22 สิงหาคม 2549 ณ
อาคาร 105 ศูนย์นิทรรศการและการ
ประชุมไบเทค บางนา กรุงเทพฯ



รูปที่ 27-28 แสดงผลงานโครงการวิจัย
และพัฒนา น้ำมันเชื้อเพลิงไบโอดีเซล ณ
ศูนย์นิทรรศการและการประชุมไบเทค
บางนา กรุงเทพฯ

การจัดนิทรรศการในงาน ครบรอบ 100 ปี โรงเรียน นายเรือ

กรมอุทกหารเรือ ได้นำผลงาน
โครงการวิจัยและพัฒนา การใช้ก๊าซ
ธรรมชาติ (NGV) กับเครื่องยนต์ดีเซล
ที่ใช้ในยานพาหนะและยุทโธปกรณ์ต่าง
ๆ ของกองทัพเรือ และโครงการวิจัย
และพัฒนา น้ำมันเชื้อเพลิงไบโอดีเซล
ของกองทัพเรือ ไปร่วมจัดนิทรรศการ
ด้านวิศวกรรม เนื่องในโอกาสครบรอบ
100 ปี โรงเรียนนายเรือ ที่โรงเรียน
นายเรือ จังหวัดสมุทรปราการ ระหว่าง
วันที่ 13 - 20 พฤศจิกายน 2549



รูปที่ 29 บอร์ดแสดงพร้อมเครื่องสาธิตระบบ
ผลิตไบโอดีเซล



รูปที่ 30 เจ้าหน้าที่บรรยายสรุปการผลิตไบโอดีเซล

ภารกิจพิเศษ

นอกเหนือจากภารกิจในการซ่อมเรือ สร้างเรือ และงานวิจัยแล้ว กรมอุตุนิยมวิทยายังได้รับมอบหมายจากกองทัพเรือ และหน่วยงานอื่น ๆ อีก ก็คือภารกิจในการช่วยเหลือผู้ประสบภัยพิบัติจากการเกิดคลื่นยักษ์สึนามิ ณ ฟังทะเลทางด้านทะเลอันดามัน การปฏิบัติงานของกรมอุตุนิยมวิทยาที่สมควรนำมากล่าวในที่นี้คือ การกู้เรือหลวงกระบะบุรี และการกู้เรือประมง ณ บ้านน้ำเค็ม

การกู้เรือหลวงกระบะบุรี

จากเหตุการณ์ภัยพิบัติคลื่นยักษ์สึนามิ ในช่วงปลายปี 2547 ที่ส่งผลให้เกิดความเสียหายกับพื้นที่บริเวณชายฝั่งทะเลทางด้านทะเลอันดามัน ซึ่งคร่าชีวิตผู้คน และทรัพย์สินไปเป็นจำนวนมาก กองทัพเรือเป็นหน่วยงานหนึ่งซึ่งได้รับผลกระทบ จากกรณีดังกล่าวด้วยเช่นกัน โดยฐานทัพเรือพังงา และเรือที่จอดเทียบท่าอยู่ ณ ฐานทัพเรือพังงาได้รับความเสียหายมากน้อยแตกต่างกันไป เรือที่ได้รับความเสียหายมากที่สุด ณ ที่นั่นคือเรือหลวงกระบะบุรี ซึ่งถูกคลื่นซัดให้มาเกยหาดอยู่หน้าศูนย์อนุรักษ์อุทยานใต้น้ำจุฬารามณ์ บริเวณอำเภอทับละมุ จังหวัดพังงา ตำแหน่งที่เรือเกยตื้น คือ แลติจูด $8^{\circ} 34.3'$ เหนือ ลองจิจูด $98^{\circ} 13.3'$ ตะวันออก เรือตั้งอยู่บนหาดทรายในลักษณะที่พื้นท้องเรือตั้งอยู่บนหาดทรายที่แบนราบ ทิศหัวเรือ 194° กราบขวาของเรืออยู่ทางด้านทะเล กราบซ้ายอยู่ทางบก เรือเอียงกราบขวาเป็นมุมประมาณ 3° ตอนน้ำลงเรือจะนั่งอยู่บนหาด ท้ายเรือและใบจักรส่วนบนมองเห็นได้ชัด ใบจักรส่วนล่างจมทราย ขณะน้ำขึ้น โดมโซนาร์ที่หัวเรือจะจมน้ำ ท้ายเรือน้ำจะขึ้นเกือบท่วมใบจักร จากเหตุการณ์ดังกล่าวกองทัพเรือได้สั่งการให้กรมอุตุนิยมวิทยาเป็นผู้ดำเนินการพิจารณากู้เรือหลวงกระบะบุรี ในช่วงแรกได้มีหน่วยงานจากต่างประเทศเสนอตัวเพื่อทำการกู้เรือ แต่ผู้เชี่ยวชาญจากต่างประเทศนั้นได้ตั้งราคาในการปฏิบัติงานไว้สูงมาก (ประมาณ 1.2 - 2 ล้านดอลลาร์สหรัฐ) พลเรือโท ชูศักดิ์ เสนานุกรม



รูปที่ 31 เรือหลวงกระบะบุรีติดตื้น ณ อำเภอทับละมุ จังหวัดพังงา



รูปที่ 32 เรือหลวงกระบะบุรีติดตื้น (มองจากด้านบน)



รูปที่ 33 การกู้เรือหลวงกระบะบุรี ของบริษัทอยู่กรุงเทพ (การขุดพื้นที่บริเวณท้ายเรือ)

เจ้ากรมอุทกหารเรือในขณะนั้น ได้พิจารณาแล้ว เห็นว่าการกู้เรือหลวงกระบรีในครั้งนี ควรจะใช้ บริษัทภายในประเทศไทย เพื่อแสดงให้เห็นว่า คนไทยมีขีดความสามารถทางด้านวิศวกรรมที่ ก้าวหน้าทัดเทียมกับประเทศอื่น ๆ รวมทั้ง เป็นการรักษางบประมาณที่จะต้องใช้ในการกู้เรือ อีกทางหนึ่ง ด้วยราคาที่ต่ำกว่าบริษัทอยู่กรุงเทพ เพื่อทำการกู้เรือในครั้งนี ต่ำกว่าที่บริษัทผู้ เชี่ยวชาญจากต่างประเทศมาก

ขั้นตอนของการกู้เรือหลวงกระบรีในครั้งนี สรุปลงได้โดยย่อ คือ การติดตั้งแพ (Pontoon) ข้าง เรือทั้งกราบขวาและซ้ายข้างละ 5 ลูก เพื่อเพิ่ม กำลังลอยของเรือ และทำการขุดพื้นที่โดยรอบที่ เรือนั่งแท่นอยู่ให้เป็นอ่าง (Basin) ข้างเรือทาง กราบซ้าย เพื่อให้มีพื้นที่ในการรองรับการ เคลื่อนที่ของเรือทางด้านข้างใน ลักษณะเดียวกัน กับการปล่อยเรือลงน้ำทางด้านข้าง (Side Launching) เมื่อเรือสามารถลอยตัวในอ่างได้แล้ว ก็ทำการขุดร่องน้ำในแนวเดียวกันกับ Basin ตรง บริเวณหัวเรือเพื่อให้สามารถทำการลากเรือออก จากพื้นที่ที่เรือเกยตื้นได้

ในการกู้เรือหลวงกระบรีในครั้งนี เป็นผล งานของวิศวกรไทยทั้งหมดตั้งแต่การคำนวณการ เลื่อนของเรือ (ซึ่งเป็นนายทหารเรือ) การคำนวณ ลักษณะการรับน้ำหนักของดิน (อาจารย์จาก สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย - Asian Institute of Technology: AIT) การกำหนดพื้นที่ในการ ขุด การควบคุมงาน (อดีตนายทหารเรือ) และ เจ้าหน้าที่ปฏิบัติงาน ซึ่งจากผลของงานที่สามารถ กู้เรือหลวง กระบรีจากการติดตื้นมาลอยลำเทียบท่า ฐานทัพเรือพังงาได้อีกครั้งภายในเวลาที่กำหนด แสดงให้เห็นถึงขีดความสามารถของวิศวกรไทย ได้เป็นอย่างดี รวมทั้งแสดงให้เห็นว่าวิสัยทัศน์ และ การตัดสินใจของกรมอุทกหารเรือ ในกรณีนี้ถูกต้อง แม่นยำ และทันต่อเหตุการณ์ ซึ่งจะเป็น บรรทัดฐานให้แก่งานประเภทนี้ต่อไปในอนาคต



รูปที่ 34 การประกอบติดตั้งแพ (Pontoon) ข้างเรือเพื่อช่วยการลอย



รูปที่ 35 การขุดดินรอบ ๆ บริเวณข้างเรือ กราบขวา



รูปที่ 36 โครงสร้างป้องกันใบจักรขวา-ซ้าย และครีบลดอาการโคลง



รูปที่ 37 เรือหลวงกระบรีกำลังแล่นกลับเข้าเทียบท่าภายหลังการกู้เรือแล้วเสร็จ

การกู้เรือประมงบ้านน้ำเค็ม

จากเหตุการณ์ภัยพิบัติในกรณีเดียวกันนั้น กรมอุทกหารเรือ ได้รับมอบหมายจากรัฐบาลให้ทำการช่วยเหลือประชาชนที่ประสบเคราะห์กรรม ณ หมู่บ้านน้ำเค็ม ตำบลบางม่วง และตำบลตะกั่วป่า จังหวัดพังงา โดยกรมอุทกหารเรือได้มอบหมายให้อุทกหารเรือธนบุรีจัดชุดเจ้าหน้าที่เข้าทำการกู้เรือประมงของชาวบ้านที่ถูกคลื่นยักษ์ซัดขึ้นมาติดตื้นบนชายฝั่ง โดยการปฏิบัติงานในครั้งนี อุตกหารเรือธนบุรีได้จัดข้าราชการ และลูกจ้างจากกองโรงงานเข้าช่วยเหลือในการกู้เรือประมงของชาวบ้านระหว่างวันที่ 31 ธันวาคม 2547 - 14 มกราคม 2548 โดยใช้อุปกรณ์ และเครื่องมือต่าง ๆ จากอุทกหารเรือธนบุรีร่วมกับหน่วยงานในพื้นที่ ซึ่งราษฎรที่หมู่บ้านน้ำเค็มนี้มีเรือประมงอยู่ประมาณ 100 ลำ แต่เมื่อเกิดภัยพิบัติขึ้นนั้น เรือประมงจำนวนประมาณ 40 - 50 ลำ ได้ลอยขึ้นมาทับอยู่บนบ้านเรือนของราษฎร ส่วนหนึ่งได้ลอยไปติดอยู่ในป่าโกงกาง และอีกส่วนหนึ่งได้จมลงในบริเวณร่องน้ำ ภารกิจของกรมอุทกหารเรือในครั้งนี้คือการช่วยกู้เรือที่ติดอยู่บนบ้านเรือนของราษฎร เพื่อให้สามารถค้นหา และช่วยเหลือผู้ประสบเคราะห์กรรมจากภัยพิบัติ ที่ติดอยู่ในบ้านเรือนได้ ซึ่งจากผลการปฏิบัติงานเจ้าหน้าที่ของอุทกหารเรือธนบุรีที่สามารถกู้เรือให้แก่ชาวบ้านได้รวมจำนวน 42 ลำ รวมระยะเวลาที่ปฏิบัติงาน ในพื้นที่ทั้งสิ้น 15 วัน



รูปที่ 38 สภาพเรือประมง ณ บ้านน้ำเค็ม



รูปที่ 39 การกู้เรือประมง ณ บ้านน้ำเค็ม



รูปที่ 40 การดำเนินงานของเจ้าหน้าที่กรมอุทกหารเรือ

สรุป

จากผลงานของกรมอุทการเรือจะเห็นได้ว่าในรอบปีที่ผ่านมา กรมอุทการเรือได้ปฏิบัติหน้าที่ในหลาย ๆ ด้าน ทั้งทางด้านงานประจำในการซ่อมและสร้างเรือของกองทัพเรือให้พร้อมปฏิบัติราชการในด้านการป้องกันประเทศตามที่ได้รับมอบหมาย รวมทั้งด้านงานวิจัยต่าง ๆ ทั้งทางด้านพลังงานทดแทน และด้านวิศวกรรม ตลอดจนภารกิจพิเศษที่ได้รับมอบหมายจากกองทัพเรือไม่ว่าจะเป็นการกู้เรือหลวงกระบะบุรี หรือการช่วยเหลือประชาชนผู้ประสบภัยพิบัติ สิ่งเหล่านี้นับเป็นเครื่องแสดงให้เห็นว่ากรมอุทการเรือ เป็นหน่วยงานที่มีขีดความสามารถในการปฏิบัติงานสูง สามารถปฏิบัติภารกิจต่าง ๆ ได้เป็นอย่างดีซึ่งนับจากอดีตตั้งแต่แรกเริ่มตั้งกรมอุทการเรือ จวบจนถึงปัจจุบัน คงเป็นบทพิสูจน์ได้ว่ากรมอุทการเรือเป็นอีกหน่วยงานทางช่างที่เป็นหลักให้แก่ กองทัพเรือ และประเทศไทย ซึ่งความภาคภูมิใจนี้ จะยังคงอยู่กับกรมอุทการเรือไปอีกนานเท่านาน

กรมอุทการเรือ	เมื่อแรกตั้ง
อยู่ชิดวังกลางราช	อาณาจักร
รากช่างกลหยั่งลง	มันคงนั้ก
เป็นการช่างฯ แรกหลัก	ของแผ่นดิน
เชี่ยวชาญของชนชาติ	ต้องมาก่อน
พระผู้นำปวงนิกร	ทรงถวิล
เร่งให้รากงานช่าง	หยั่งลงดิน
พรรคกลืนสนองตอบ	พระเมตตา

พลเรือโท ทำนุ เนตรโรจน์ : ผู้ประพันธ์

บรรณานุกรม

เอกสารที่ยังไม่ได้จัดพิมพ์

คณะวิจัยพลังงานทดแทนของกองทัพเรือ, รายงานความก้าวหน้าโครงการวิจัยพลังงานทดแทนของกองทัพเรือ, กรมพัฒนาการช่าง กรมอุทกทหารเรือ, 2548

คณะกรรมการตรวจรับพัสดุการจ้างชุดร่องน้ำ และลากจูง เรือหลวงกระบี่ ออกจากการติดตื้น, เอกสารกรณีศึกษาการกู้ ร.ล.กระบี่, กรมแผนการช่าง กรมอุทกทหารเรือ, 2548.

อินเทอร์เน็ต

“ความก้าวหน้าการสร้างเรือตรวจการณ์ใกล้ฝั่ง” <http://www.navy.mi.th/sctr/ship/> (9 August 2006)

สัมภาษณ์

นาวาเอก สุรพงษ์ อำนรรฆสรเดช เกี่ยวกับการปฏิบัติงาน ณ บ้านน้ำเค็ม

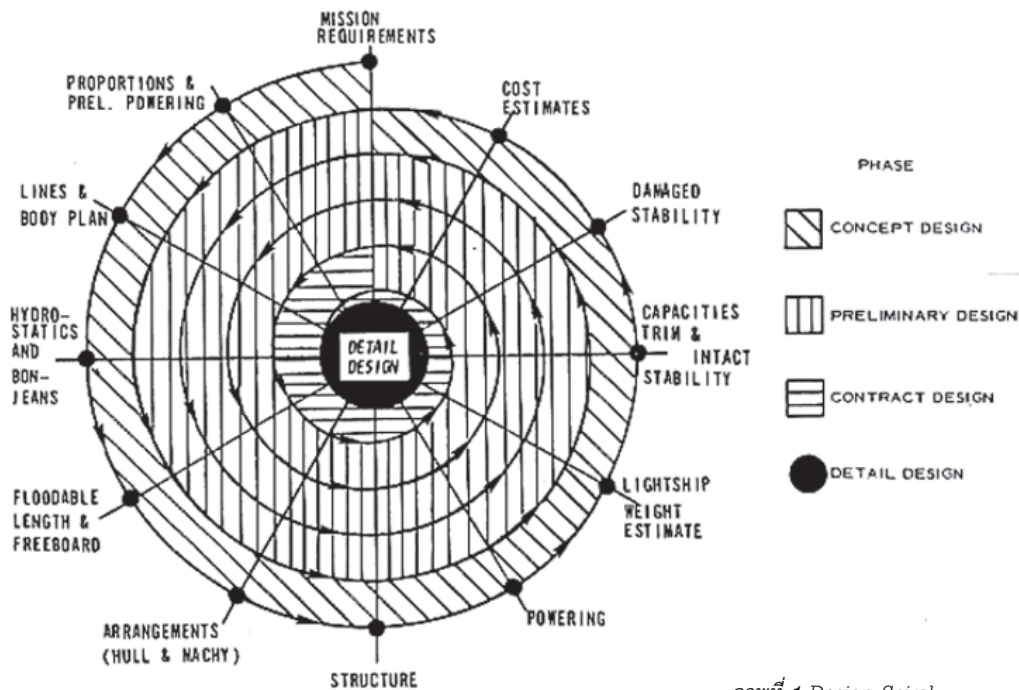
บทคัดย่อ

การกำหนดความต้องการเรือของเจ้าของเรือ หรือผู้ใช้เรือ เพื่อให้ผู้กำหนดคุณลักษณะเฉพาะ ผู้ออกแบบเรือและผู้ต่อเรือ จะต้องดำเนินการให้บรรลุเป้าหมาย ซึ่งจะประกอบด้วยคุณลักษณะ และสมรรถนะด้านต่าง ๆ บทความนี้จะขอเสนอเฉพาะ คุณลักษณะและสมรรถนะที่มีผลเกี่ยวเนื่องกับเครื่องต้นกำลังขับเคลื่อนของเรือ ซึ่งมักจะเป็นปัญหาในการออกแบบเรือให้มีความเร็วสูงสุดที่เหมาะสมกับกำลังของเครื่องยนต์ และระยะเวลาปฏิบัติการที่ความเร็วเดินทางหรือความเร็วมัธยัสถ์ เหล่านี้มีปัจจัยที่ต้องนำมาพิจารณาตามกรรมวิธีการทำซ้ำแล้วซ้ำอีกในลักษณะก้นหอย (Design Spiral) ของการออกแบบเรือ โดยมีหัวข้อสำคัญที่เกี่ยวข้องในการนี้ คือ Powering, Weight Estimation, Capacity, Trim และ Intact Stability ความเข้าใจในการนำหลักการที่ถูกต้องจะทำให้สามารถใช้งานเครื่องยนต์ และระบบขับเคลื่อน ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

นาวาเอก ศราวุธ วงศ์เงินยวง

ผู้อำนวยการกองวิจัยและพัฒนา กรมพัฒนาการช่าง กรมอุทกหารเรือ

E-mail : swny1976@yahoo.com



ภาพที่ 1 Design Spiral

เครื่องต้นกำลังขับเคลื่อนกับสมรรถนะของเรือ

“ความต้องการทางยุทธการเป็นสิ่งที่ต้องปฏิบัติ แต่หากมีขีดจำกัดทางเทคนิคทำให้ไม่สามารถตอบสนองความต้องการทางยุทธการ จำเป็นต้องลดความต้องการทางยุทธการ”

กล่าวนำ

การออกแบบเรือให้มีความเหมาะสมกับความต้องการใช้เรือ จะต้องมีหลักการและวิธีดำเนินการตามขั้นตอนที่ถูกต้อง โดยกรรมวิธีซ้ำแล้วซ้ำอีก (Iterative Process) ในลักษณะกันหอย (Design Spiral) จนในที่สุดได้ทุกอย่างเป็นที่พอใจถูกต้องตามความต้องการ หรือให้ผลดีที่สุด (Optimum) โดยควรที่จะมีการรวบรวมจัดทำฐานข้อมูลเรือ การคำนวณออกแบบ และแบบเรือต้นแบบที่จำเป็น สำหรับการออกแบบและการสร้างเรือที่มีขั้นตอนต่าง ๆ ตั้งแต่การออกแบบจนถึงสร้างเสร็จ ในขั้นการออกแบบขั้นพื้นฐาน (Basic Design) สามารถกำหนดรูปแบบหลักของระบบเรือ (Platform System) และระบบอาวุธ (Weapon System) สำหรับเรือรบ หรือ ระบบลำเลียงสินค้า (Handling System) สำหรับเรือสินค้า หรือ ระบบอื่น ๆ ตามประเภทของเรือ นั้น ๆ เพื่อให้เรือลำใหม่มีสมรรถนะ และขีดความสามารถตามความต้องการใช้เรือในขั้นตอนต่าง ๆ ของการต่อเรือ จะต้องทำการทบทวนตรวจสอบข้อมูลการดำเนินการตลอดระยะเวลาการสร้างเรือจนถึงการส่งมอบ โดยคำนึงถึงหลักการออกแบบเรือ ที่ผู้ออกแบบเรือและผู้ที่เกี่ยวข้องจะต้องนำมาดำเนินการให้ครบถ้วนประกอบด้วยงานที่ต้องดำเนินการใน 12 หัวข้อ (ภาพที่ 1 Design Spiral)¹

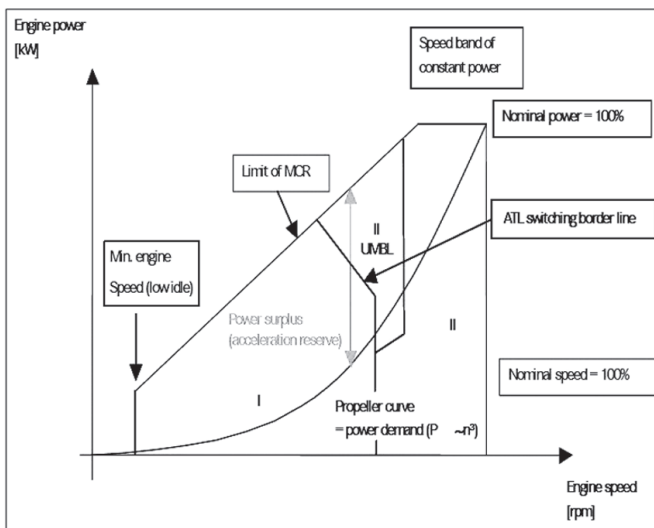
¹ ศราวุธ วงศ์เงินยวง, ญัฐกร สุพัฒนะกรกิจ และ พงศ์สรร ถวิลประวัตติ, “นวัตกรรมการออกแบบเรือ (Ship Design Innovation)”, ME-NETT 18th, ขอนแก่น ประเทศไทย, 18-20 ตุลาคม, 2547.

หลักการและทฤษฎี

บทความนี้จะขอเสนอในส่วนกำลังขับเคลื่อนของเครื่องยนต์ที่ติดตั้งบนเรือที่จะมีผลเกี่ยวข้องกับผลกระทบอย่างไรต่อความเร็วเรือและรัศมีปฏิบัติการของเรือ ซึ่งเป็นเพียงหัวข้อบางส่วนของ การออกแบบคือ Powering, Weight Estimation, Capacity, Trim และ Intact Stability ข้อมูลพื้นฐานสำคัญของระบบเรือ (Platform System) ที่มีผลกระทบต่อเนื่องถึงสมรรถนะด้านความเร็วและระยะปฏิบัติการของเรือที่จะได้รับไว้ใช้ในการปฏิบัติการ มีทฤษฎีที่เป็นหลักการสำคัญที่จะนำเสนอพอสังเขป ซึ่งเป็นสิ่งจำเป็นต่อการพิจารณาออกแบบระบบขับเคลื่อนเรือ ในหัวข้อ คุณสมบัติของเครื่องยนต์ขับเคลื่อนเรือ ระบบขับเคลื่อนเรือ และการจับคู่เครื่องขับเคลื่อนกับใบจักร

1. คุณสมบัติของเครื่องยนต์ขับเคลื่อนเรือ (Engine Performance)

เครื่องยนต์ขับเคลื่อนเรือ ประเภทเครื่องยนต์ดีเซลที่มีใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบันเป็นเครื่องยนต์ที่ใช้ในเรือประเภทต่าง ๆ เครื่องยนต์แต่ละตราอักษรจะมีเอกสารประกอบ ที่แสดงข้อมูลคุณสมบัติ การออกแบบ การใช้งาน และการคำนวณค่าต่าง ๆ เช่น กำลังผลิต ความเร็วรอบ ความหมดเปลือง ขนาด น้ำหนัก เครื่องประกอบ การสึกหรอ ระบบควบคุม และอื่น ๆ เหล่านี้จะเป็นประโยชน์



ภาพที่ 2 ลักษณะ Engine Performance Diagram

อย่างยิ่ง เมื่อนำมาใช้ประกอบในการพิจารณาและวิเคราะห์ความเหมาะสมในการใช้งาน ในที่นี้ขอเสนอข้อมูลสำคัญจากการคำนวณที่แสดงให้ทราบถึงสมรรถนะของเครื่องยนต์ (Engine Performance) ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบ (RPM) และกำลังขับ (Kw) เพื่อให้นำไปใช้ได้อย่างถูกต้องตามภาพที่ 2 ลักษณะ Engine Performance Diagram แสดงย่านการทำงานของเครื่องยนต์ที่สามารถใช้งานได้ที่อยู่ในกรอบพื้นที่รูปที่เกือบจะเป็นสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า ซึ่ง ณ ตำแหน่งปลายสุดที่รอบสูงสุดของเครื่องยนต์แต่ละตราอักษรจะมีแนวกำลังสูงสุดคงที่และมีรอบสูงขึ้นได้มากหรือน้อย (Speed Band of Constant Power) หรืออาจไม่มีในบางเครื่องยนต์ โดยย่านของการใช้งานที่มีประสิทธิภาพจะแสดงด้วยเส้นโค้งความต้องการพลังงานของใบจักรในแนวทแยง (Propeller Demand Curve) ส่วนที่อยู่เหนือเส้นนี้จะเป็นกำลังสำรองสำหรับอัตราเร่งของเครื่องยนต์ (Acceleration Reserve) ดังนั้นการกำหนดความต้องการกำลังขับที่เป็นค่าการคำนวณความต้องการกำลังขับที่ใบจักรเรือ (Propeller Delivery Power, P_D) ที่มีความสัมพันธ์ของกำลังขับในระบบเพลลาใบจักรที่ต้องนำมาพิจารณาประกอบกับขีดความสามารถของเครื่องยนต์ เหล่านี้เป็นสิ่งที่ผู้ออกแบบระบบขับเคลื่อนจะต้องพิจารณาอย่างรอบคอบและถูกต้อง เพื่อให้การใช้งานเครื่องยนต์อยู่ในย่านการทำงานที่เหมาะสม

2. ระบบขับเคลื่อนเรือ (Propulsion System)

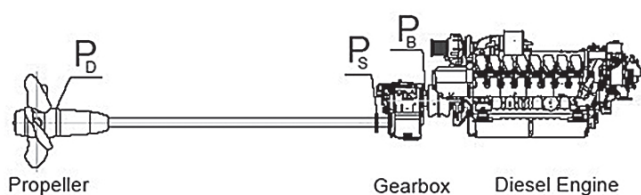
ระบบขับเคลื่อนเป็นระบบสำคัญของเรือ มีส่วนประกอบหลักคือ เครื่องต้นกำลังขับ (Prime Mover) เกียร์ (Gear) เพลา (Shaft) และใบจักร (Propeller) หรืออุปกรณ์ขับเคลื่อน (Propulsor) สำหรับเรือที่ใช้เครื่องยนต์ดีเซลขับเคลื่อนมีการประกอบกันของส่วนประกอบ ตามภาพที่ 3 ซึ่งเรือแต่ละลำจะมีระบบขับเคลื่อนอย่างน้อย 1 ชุด ที่เรียกว่า 1 เพลาใบจักร ส่วนเครื่องต้นกำลังขับใน 1 ชุดเพลาใบจักรสามารถมีได้มากกว่า 1 เครื่อง ขึ้นอยู่กับความต้องการของการออกแบบ ตัวอย่างเช่น เรือฟรีเกต ชุดเรือหลวงเจ้าพระยา ขับเคลื่อนด้วยเพลาใบจักร 2 ชุด แต่ละชุดมีเครื่องต้นกำลังขับ 2 เครื่อง เป็นต้น

การคำนวณค่ากำลังขับเคลื่อนในระบบเพลาใบจักรมีค่าต่าง ๆ ดังนี้ Brake Power, P_B เป็นกำลังขับที่ท้ายเครื่องยนต์ Shaft Power, P_S เป็นกำลังขับที่ออกจากเกียร์เข้าเพลาใบจักร และ Delivery Power, P_D เป็นกำลังขับที่ส่งถึงใบจักร ซึ่งจะต้องเอาชนะค่าความต้านทาน (Resistance, R_T) ที่เกิดขึ้น ณ ความเร็วต่าง ๆ ของเรือ ซึ่งสัมพันธ์โดยตรงกับค่าพลังงานที่เรียกว่า Effective Power, P_E

ค่าประสิทธิภาพในระบบเพลาใบจักร

$$\eta_G = \text{Gear Efficiency}, P_S/P_B$$

$$\eta_S = \text{Shaft Efficiency}, P_D/P_S$$



ภาพที่ 3 การประกอบกันของอุปกรณ์ระบบขับเคลื่อน

3. การจับคู่เครื่องขับเคลื่อนกับใบจักร (Engine and Propeller Matching)

อุปกรณ์ขับเคลื่อน (Propulsor) เป็นอุปกรณ์ที่เปลี่ยนพลังงานกลจากการหมุนของเพลาเป็นแรงผลัก (Thrust) ให้เรือเคลื่อนที่ไปด้วยความเร็วที่ต้องการ ที่เรียกว่า ใบจักรเรือ ซึ่งมีหลายลักษณะในรูปแบบต่าง ๆ เช่น Fixed Pitch Propeller (FPP), Controllable Pitch Propeller (CPP), Twin Propeller, Podded Propeller, Cycloidal Propeller เป็นต้น การเลือก

ใช้ใบจักรชนิดใด ๆ เหล่านี้ จะต้องพิจารณาให้ความต้องการกำลังขับของใบจักรอยู่ในย่านการทำงานที่เหมาะสมของเครื่องขับเคลื่อน ตามที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 1

ค่าการคำนวณเลือกใบจักรที่เหมาะสม ในที่นี้เป็นการนำเสนอข้อมูลของใบจักรแบบ FPP ซึ่งเป็นพื้นฐานที่จะนำไปประยุกต์ใช้กับใบจักรรูปแบบอื่น ๆ ด้วยคุณลักษณะเฉพาะของใบจักรแต่ละชุดจะแสดงค่าผลการคำนวณคุณสมบัติด้วยเส้นโค้ง K_T , K_Q และ ETAO ซึ่งเป็นค่าความสัมพันธ์กับค่า J ตามภาพที่ 4 ที่จะสามารถนำไปคำนวณหาความต้องการกำลังขับของใบจักร Delivery Power, P_D และความสามารถในการผลักเรือ (Thrust, T) ที่สัมพันธ์โดยตรงกับค่า Effective Power, P_E ที่คำนวณได้ด้วยวิธีการหลากหลายวิธี ผู้ออกแบบจำเป็นต้องเลือกหาวิธีที่ให้ผลใกล้เคียงมากที่สุด โดยก่อนสร้างเรือจริงจะมีขั้นตอนทดลองลากเรือจำลองที่ความเร็วต่าง ๆ (Model Tank Test) ซึ่งเป็นการจำลองรูปทรงตัวเรือลดขนาดตามอัตราส่วนที่เหมาะสมกับขนาดของถังทดลอง เป็นการวัดค่าแรงต้านทานเรือ (Ship Resistance, R_T) เพื่อทราบค่า Effective Power ดังตัวอย่างในภาพที่ 5 เป็นผลการทดลองจากสถาบัน HSVA ประเทศสหพันธ์สาธารณรัฐเยอรมัน สำหรับเรือตรวจการณ์ใกล้ฝั่งลำใหม่² ผลที่ได้จะนำไปใช้ในการเลือกใบจักรที่สามารถผลิตแรงผลัก (Thrust) ตามที่ต้องการ ซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่ากำลังของเครื่องยนต์ (Break Power, P_B)

² ศรารัฐ วงศ์เงินยวง, นาวาเอก. "การออกแบบเรือตรวจการณ์ใกล้ฝั่ง" วารสารกรมอุทการเรือ ฉบับพิเศษ มกราคม 2547. หน้า 129 - 134.

ค่าสัมประสิทธิ์ใบจักร

K_T = Thrust Coefficient, K_Q = Torque Coefficient, J = Advance Coefficient

$$K_T = \frac{T}{\rho \cdot n^2 \cdot D^4}; K_Q = \frac{Q}{\rho \cdot n^2 \cdot D^5}; J = \frac{V_A}{n \cdot D}$$

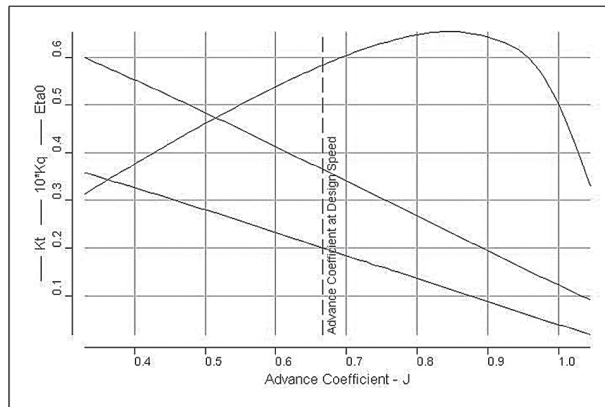
ETAO, (η_o) = Open water Efficiency

เมื่อ T คือ แรงผลักดันน้ำของใบจักร

Q คือ แรงบิดของใบจักร n คือ จำนวนรอบของใบจักร

V_A คือ ความเร็วรุดหน้า [V_A = Ship..Speed - Wake..Velocity]

D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางใบจักร ρ คือ ความหนาแน่นของของเหลว



ภาพที่ 4 ลักษณะของเส้นโค้งประสิทธิภาพใบจักรเรือ

ค่าความสัมพัทธ์ของความต้านทานเรือ

$$C_T = \frac{R_T}{\frac{1}{2} \cdot \rho V^2 S}$$

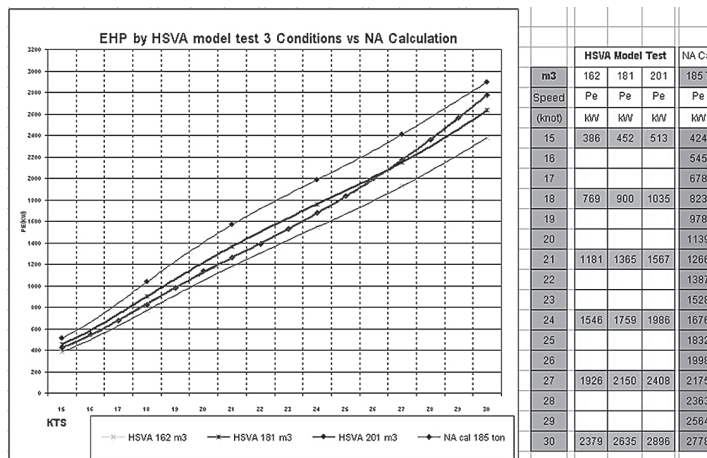
เมื่อ C_T = Total Resistance Coefficient

R_T = ความต้านทานรวม (N)

ρ = ความหนาแน่นของน้ำ (kg/m^3)

V = ความเร็วเรือ (m/s)

S = พื้นที่ผิวเปียก (m^2)

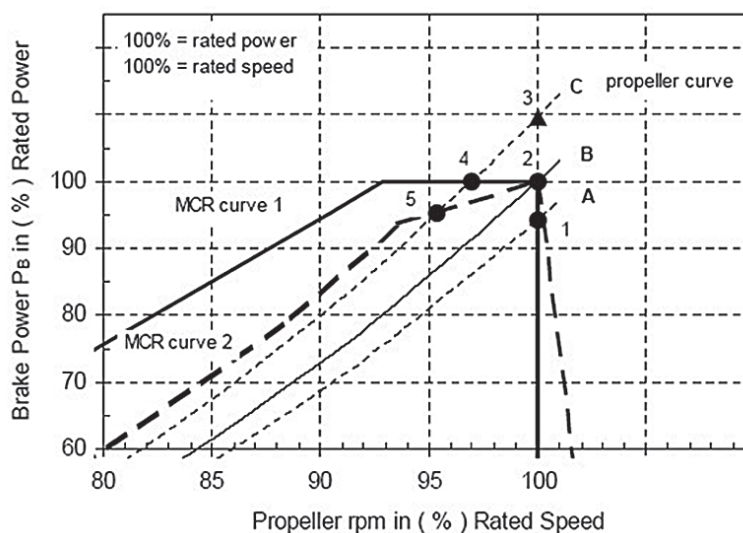


ภาพที่ 5 ค่าความต้านทานเรือผลจากการทดลองลากเรือจำลองที่ 3 ระวังขับน้ำ และการคำนวณ

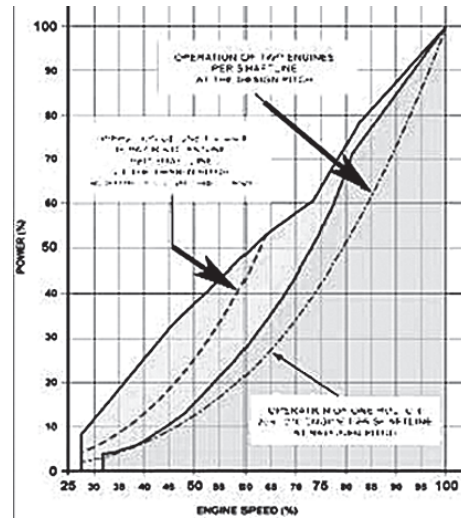
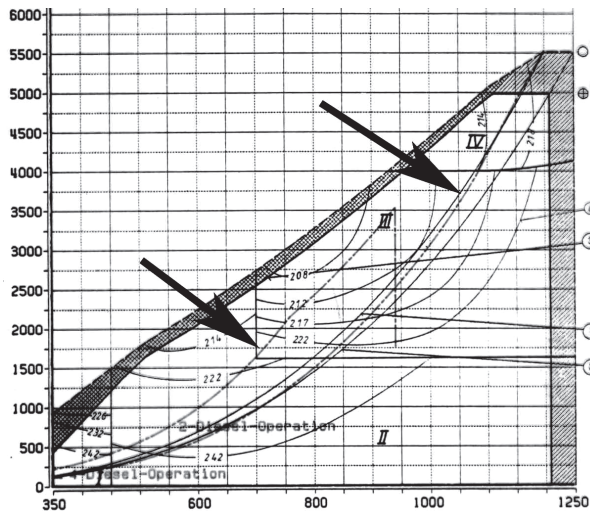
การประยุกต์ใช้งาน

การนำความสัมพันธ์ที่เกี่ยวเนื่องกันระหว่างเครื่องยนต์และใบจักร เพื่อใช้ติดตั้งบนเรือให้สามารถขับเคลื่อนเรือให้ชนะแรงต้านทานที่ความเร็วต่าง ๆ ตามภาพที่ 6 แสดงถึงเส้นโค้งความต้องการพลังงานของใบจักรที่มีการเปลี่ยนแปลง (A, B, C) เนื่องจาก ระดับกินน้ำลึก สภาพอากาศ หรือการเกิดเพรียงที่ทำให้เส้นโค้งใบจักรเปลี่ยนจาก A ไปถึง C มีผลโดยตรงต่อรอบสูงสุดของเครื่องยนต์ ซึ่งหมายถึงความเร็วสูงสุดของเรือจะลดลง ณ จุดหมายเลข 4 และ 5 ทั้งไม่สามารถไปถึงได้ ณ จุด 3 มีเพียงระหว่างจุด 1 และ 2 ที่เครื่องยนต์ทั้งสอง (MCR Curve 1 and 2) สามารถใช้งานได้อย่างเหมาะสม ดังนั้นการกำหนดความเร็วสูงสุดของเรือจำเป็นต้องมีข้อมูลความต้องการกำลังขับของใบจักร และขีดความสามารถของเครื่องยนต์ที่ถูกต้อง เพื่อใช้ในการพิจารณาออกแบบ หรือกำหนดสมรรถนะความเร็วสูงสุดที่ย่านการทำงานที่มีประสิทธิภาพสูงของเครื่องยนต์ที่เลือกใช้ติดตั้งให้กับเรือที่จะสร้างขึ้นใช้อย่างเหมาะสม ในทำนองเดียวกันความเร็วเรือเท่าใดที่จะทำให้เรือสามารถเดินทางไปได้ตามระยะปฏิบัติการมีความจำเป็นที่จะต้องอยู่ในย่านการทำงานของเครื่องยนต์ที่คงประสิทธิภาพด้วยเช่นกัน สิ่งทีกล่าวมานี้จะทำให้ลดการสูญเสียที่ไม่จำเป็นในการซ่อมบำรุง อีกทั้งการกำหนดความต้องการเครื่องจักรขับเคลื่อนที่ความเร็วสูงสุดจะต้องทำงานที่ความสามารถสูงสุดของเครื่องยนต์ (Max Speed @ 100 % MCR) มีความเหมาะสมหรือไม่

การใช้งาน Engine Performance Diagram ตามภาพที่ 7 เป็นตัวอย่างการคำนวณออกแบบระบบขับเคลื่อนของเรือฟรีเกต ระบายขับน้ำประมาณ 2,000 ตัน จะเห็นได้ว่าเส้นโค้งแสดงความต้องการกำลังขับเคลื่อนของเครื่องยนต์ภาพละ 2 เส้น (ชี้ด้วยลูกศร) กรณีใช้เครื่องยนต์ขับ 2 เครื่อง และเครื่องยนต์ขับ 1 เครื่อง ต่อเพลลา ในภาพทางซ้ายสามารถใช้งานได้ทั้ง 2 กรณี เมื่อเทียบกับเครื่องยนต์ในภาพทางขวาที่ต้องเพิ่มพื้นที่ของ Engine Performance Diagram กรณีเครื่องยนต์ขับ 1 เครื่อง เส้นโค้งความต้องการพลังขับเคลื่อน อีกทั้งการเปลี่ยนแปลงความต้องการพลังงานจะเพิ่มมากขึ้นอีกจากระดับกินน้ำลึก สภาพอากาศ และการเกิดเพรียง



ภาพที่ 6 การเปลี่ยนแปลงความต้องการพลังงานใบจักร



ภาพที่ 7 ตัวอย่าง Engine Performance Diagram ของเครื่องยนต์
ดีเซลขนาด 5,000 - 6,000 Kw

ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อกำลังขับเคลื่อนเรือ

1. **ระวางขับน้ำ (Displacement)** ที่มีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นหรือลดลง เป็นผลทำให้พื้นที่ผิวเปียกใต้แนวน้ำเปลี่ยนแปลง ถ้าเปลี่ยนแปลงไปในทางเพิ่มขึ้น จะทำให้ความต้านทานของเรือเพิ่มขึ้นเช่นกัน จะเห็นได้ชัดเจนในภาพที่ 5 เส้นบนสุดเป็นค่า Effective Power, P_E ที่ระวางขับน้ำออกแบบ 205 ตัน เมื่อเรือมีน้ำหนักมาก ฤ ความเร็วเท่ากันจะมีความต้องการกำลังขับเคลื่อนที่มากขึ้น ดังนั้นการตรวจสอบและควบคุมน้ำหนักในงานออกแบบต่อเรือ จะเป็นผลโดยตรงต่อความต้องการกำลังขับเคลื่อนของ เครื่องจักรใหญ่เรือที่มากขึ้น หรือจะต้องลดความเร็วสูงสุดของเรือ

2. **ทริม (Trim)** การเปลี่ยนแปลงทริมจะมีผลในการเปลี่ยนแปลงพื้นที่ผิวเปียกใต้แนวน้ำเช่นเดียวกับระวางขับน้ำ ซึ่งจะมีผลกระทบที่ทำให้ค่าความต้านทานเรือเพิ่มขึ้น การจัดการภาระที่เปลี่ยนแปลงภายในเรือ (Variable Load) เช่น น้ำมันเชื้อเพลิง น้ำจืด และ อมกัณฑ์ ที่ดีควรต้องรักษาสมดุล เพื่อมิให้เรือเกิดการเปลี่ยนแปลงทริมมากเกินไปจนความจำเป็น ทั้งอาจมีผลถึงการทรงตัวของเรือ (Stability)

3. **ความสกปรกของท้องเรือ (Fouling)** ในการออกแบบเรือและ ทดลองเรือจำลอง สภาพของท้องเรือ ใต้แนวน้ำจะสะอาดเป็นผิวเรียบ ดังนั้นในการสร้างเรือจริงส่วนของ ท้องเรือจะต้องราบเรียบ จะต้องมีความระมัดระวังในการเล่นประสาน และการทาสีป้องกันเพรียง ท้องเรือที่ สกปรกมาก ๆ ทำให้ความต้านทาน ของเรือเพิ่มขึ้นอย่างมาก ผู้ที่เคยใช้ เรือจะทราบดีเมื่อเครื่องยนต์ไม่สามารถใช้งานที่รอบสูงสุด (Overload)

4. **ความต้านทานลม (Wind Resistance)** โดยทั่วไปใน การทดลองเรือจำลองเพื่อหาความ ต้านทานของเรือ แต่ในเรือจริงจะมี โครงสร้างเหนือดาดฟ้าเป็นตัวปะทะ ลม ในกรณีที่ลมพัดมายังหัวเรือ และ

มีความเร็วประมาณ 1 ถึง 2 เท่าของความเร็วเรือ จะทำให้มีค่าความต้านทานของเรือที่เกิดจากลมประมาณ 10 ถึง 20 เปอร์เซ็นต์ ของความต้านทานที่เกิดจากน้ำ ปัจจุบันการทดลองแบบจำลองเรือสามารถจำลองสภาพแวดล้อมได้ เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการออกแบบต่อเรือ

5. ลักษณะของพื้นที่ใช้งาน ในการออกแบบเรือเพื่อนำไปใช้งานในพื้นที่ต่าง ๆ จะต้องคำนึงถึงสภาพของพื้นที่ปฏิบัติการ เช่น ในพื้นที่ที่มีคลื่นลมจัดจะทำให้ความต้านทานเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังลดประสิทธิภาพของใบจักรลงในพื้นที่น้ำตื้น น้ำที่ไหลรอบ ๆ ตัวเรือจะถูกจำกัดด้วยตัวเรือและพื้นท้องทะเล จะทำให้ความเร็วของน้ำเพิ่มขึ้น และเกิดความแตกต่างทางความกดดัน อันเป็นเหตุให้คลื่นมีความสูงมากกว่าปกติ ดังนั้นความต้านทานจากการสร้างคลื่นจึงเพิ่มขึ้นมา นอกจากนี้ยังมีผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการไหลของน้ำบริเวณชั้นขีดผิวที่เพิ่มขึ้นมาอีกด้วย โดยปกติจะทำการทดลองแบบจำลองหาค่าผลกระทบเหล่านี้สำหรับงานวิจัย

ด้วยปัจจัยที่เป็นผลกระทบต่อกำลังขับเคลื่อนเรือ ทำให้ค่าความต้านทานเรือเพิ่มสูงขึ้นโดยไม่มีเหตุจำเป็นต้องหลีกเลี่ยง การต่อเรือที่มีประสิทธิภาพในการใช้งาน การใช้กำลังขับเคลื่อนของเครื่องจักรที่ติดตั้งเพื่อให้เรือสามารถทำความเร็วสูงสุดได้ตามที่กำหนดในย่านการใช้งานที่เหมาะสม อีกทั้งปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิงที่มีอยู่อย่างจำกัดภายในเรือจะต้องเดินทางได้ด้วยความเร็วและระยะปฏิบัติการตามความต้องการของผู้ใช้เรือ เหล่านี้จะต้องพิจารณาควบคุมและตรวจสอบให้ถูกต้องครบถ้วน

สรุป

การออกแบบต่อเรือเพื่อให้ได้เรือที่มีคุณสมบัติเหมาะสมตามความต้องการ มีขั้นตอนที่ต้องดำเนินการอยู่หลายส่วน บทความนี้ได้มุ่งเน้นเฉพาะความต้องการกำลังขับเคลื่อน ด้วยทฤษฎีและหลักการที่ได้กล่าวพอสังเขปของระบบขับเคลื่อนเรือ ในส่วนเครื่องจักรขับเคลื่อน และใบจักร การประยุกต์ใช้คุณสมบัติของเครื่องยนต์ขับเคลื่อนกับอุปกรณ์ขับเคลื่อนเรือ ที่จะต้องทำงานร่วมกันได้อย่างถูกต้อง ซึ่งจะทำให้การใช้งานของเครื่องยนต์อยู่ในย่านการทำงานในที่ที่เหมาะสม ทั้งจะสามารถนำไปใช้ในการกำหนดความต้องการคุณลักษณะเฉพาะของระบบขับเคลื่อน พร้อมทั้งปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลกระทบโดยตรงต่อกำลังขับเคลื่อนของเรือ ที่ทำให้ความต้านทานเรือเปลี่ยนแปลง เหล่านี้จะมีผลต่อความเร็วสูงสุดระยะปฏิบัติการ และการทรงตัวของเรือต่อไป

เอกสารอ้างอิง

- ศรารุท วงศ์เงินยวง, นาวาเอก, “การออกแบบเรือตรวจการณ์ใกล้ฝั่ง” วารสารกรมอุทกหารเรือ ฉบับพิเศษ มกราคม 2547. หน้า 129 - 134.
- ศรารุท วงศ์เงินยวง, ณัฐกร สุปัทฒนะกรกิจ และ พงศ์สรร ฤวิลประวัตติ, “นวัตกรรมการออกแบบเรือ (Ship Design Innovation)”, ME-NETT 18th, ขอนแก่น, 18 - 20 ตุลาคม, 2547.
- Carlton, J.S., Marine Propellers and Propulsion. Oxford: Butterworth-Heinemann Ltd., Oxford, 1994.
- Gillmer, Thomas and Johnson, Bruce. Introduction to Naval Architecture. Annapolis: Naval Institute Press, 1985.
- HSVA Report, “Model Test for 38 m Patrol Ship” HAMVURGISCHE SCHIFFBAU-VERSUCH ANSTANT, THE HAMBURG SHIP MODEL BASIN, HSVA Model No. 4341, Report WP113/04, Dec. 2004.
- MTU Friedrichafen GmbH, June 2003 Rev. 1.0, Chapter 6.1 - 6.4. Parsons, M.G. Power Prediction Program, University of Michigan.
- Ship System Technology. Technical Project Guide Marine Application Part 1 General: MTU Friedrichafen GmbH.

บทคัดย่อ

โดยทั่วไปแล้วความเร็วเรือถือว่าเป็นความต้องการหลักของเจ้าของเรือทุกคน เป็นที่ทราบกันดีว่าปัจจัยที่เป็นตัวกำหนดความเร็วของเรือประกอบด้วย เรือ เครื่องยนต์ และใบจักร จากข้อมูลเหล่านี้ผู้ออกแบบสามารถที่จะคำนวณหาค่าลิ่งเครื่องที่ความเร็วเรือต่าง ๆ ได้ อย่างไรก็ตามการจะหาข้อมูลทางเทคนิคมาให้ได้อย่างครบถ้วนนั้นเป็นไปได้ยากโดยเฉพาะกับเรือที่อยู่ระหว่างการออกแบบหรือเรือเก่าที่ใช้งานมานานแล้ว บางครั้งผู้ออกแบบหรือเจ้าของเรืออาจมีข้อมูลอยู่ในมือเพียงบางส่วนเท่านั้น แต่ต้องการประมาณการอย่างรวดเร็วและสมเหตุสมผลในการปฏิบัติงาน บทความนี้จึงขอนำเสนอหลักการหนึ่งที่เรียกว่า กฎของใบจักร ซึ่งเป็นวิธีที่พัฒนามาจากทฤษฎีและไม่จำเป็นต้องใช้ข้อมูลมากนัก แต่สามารถช่วยให้เข้าใจถึงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังของเครื่องกับความเร็วเรือ ชี้นำแนวโน้มที่อาจเกิดขึ้นกับระบบขับเคลื่อนและเป็นข้อมูลช่วยในการตัดสินใจในการเลือกเครื่องยนต์และใบจักรได้เป็นอย่างดี โดยจะแสดงให้เห็นว่า การใช้กฎของใบจักรอย่างถูกวิธี จะทำให้สามารถช่วยลดเวลาการหาข้อมูลและความซับซ้อนในการคำนวณลงได้ ในขณะที่ให้ผลออกมาใกล้เคียงกับความเป็นจริงในระดับที่น่าพอใจตลอดจนสามารถนำไปสู่ข้อสรุปต่าง ๆ ได้อย่างถูกต้องไม่ว่าระบบขับเคลื่อนบนเรือนั้น จะใช้เครื่องยนต์แบบใดเป็นเครื่องจักรใหญ่ก็ตาม

นาวาเอก ดร. พัลลภ เข้มนั่งาน

รองผู้อำนวยการกองวิชาวิศวกรรมเครื่องกลเรือ ฝายศึกษา โรงเรียนนายเรือ

E-mail : pkmeng@yahoo.com



การนำกฎของใบจักรมาใช้งานทางปฏิบัติ (Practical Use of Propeller Law)

บทนำ

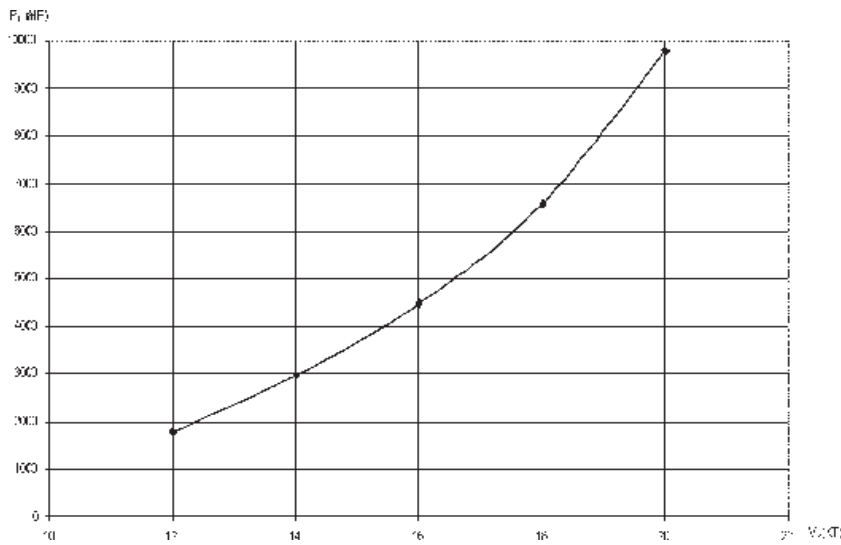
ความต้องการทราบค่ากำลังของเครื่องที่ต้องใช้เพื่อให้เรือสามารถแล่นไปได้ที่ความเร็วต่าง ๆ นั้น ถือว่ามีความสำคัญอย่างยิ่งทั้งกับเรือใหม่และเรือเก่าที่ใช้งานแล้ว ในการออกแบบสร้างเรือใหม่ขั้นตอนของการหากำลังที่ต้องใช้ในการขับเคลื่อนเรือจะเป็นตัวตัดสินที่สำคัญว่าระบบขับเคลื่อนที่ติดตั้งบนเรือควรมีรูปแบบเป็นอย่างไร สามารถที่จะบอกให้ทราบได้ว่าเครื่องจักรใหญ่ควรเป็นชนิดและจำนวนเท่าใด จำนวนเพลาคควรมีกี่เพล่า หรือในกรณีของเรือเก่าที่ใช้งานมาแล้วเมื่อถึงเวลาหนึ่งเจ้าของอาจมีความต้องการที่จะเปลี่ยนเครื่องจักรใหญ่ใหม่ทำให้ยากทราบว่าจะเลือกเครื่องยนต์ตัวใหม่เมื่อลงติดตั้งแล้วขีดความสามารถด้านความเร็วของเรือจะเปลี่ยนไปอย่างไร ในทางเทคนิคแล้วระบบขับเคลื่อนที่ประกอบด้วยใบจักร เพล่า เกียร์ และเครื่องยนต์นั้น จะสามารถผลิตกำลังขับเคลื่อนออกมาได้เท่ากับจุดที่เส้นความต้องการของเรือตัดกับเส้นกำลังที่เครื่องจักรใหญ่สามารถให้ได้ ยิ่งไปกว่านั้นความรู้ที่ได้มาจากเส้นทั้งสองนี้ยังทำให้ผู้ออกแบบและผู้ใช้งานสามารถที่จะตอบคำถามอื่น ๆ ที่เกี่ยวกับพฤติกรรมของเรือได้อีกด้วย ตัวอย่างเช่น ถ้าเรือตรวจการณ์ลำหนึ่งมี

ความเร็วสูงสุดเท่ากับ X kt แล้วความเร็วเดินทางควรมีค่าเท่าใด เป็นต้น อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าเส้นกำลังที่เครื่องจักรใหญ่สามารถให้ได้จะหามาได้จากผู้ผลิตเครื่องยนต์ การหาเส้นความต้องการของเรืออาจต้องประสบกับความยุ่งยากอยู่ไม่น้อย เนื่องจากในการคำนวณจำเป็นต้องรู้ข้อมูลการทำงานของอุปกรณ์หลายส่วนด้วยกันจึงจะสามารถดำเนินการได้ไม่ว่าจะเป็นส่วนของตัวเรือหรือใบจักร ข้อมูลเหล่านี้สามารถหามาได้ทั้งจากผลการทดลองหรือจากผู้ผลิตอุปกรณ์ แต่ในโลกของความเป็นจริงแล้วเป็นการยากที่จะหาข้อมูลที่ต้องการสมบูรณ์ได้อย่างครบถ้วน บางครั้งแทบหามาไม่ได้เลยเพราะว่าต้องลงทุนค่อนข้างสูงเพื่อทำการทดลองเป็นการเฉพาะ หรือข้อมูลได้สูญหายไปแล้วสำหรับเรือเก่าที่ใช้งานมานาน

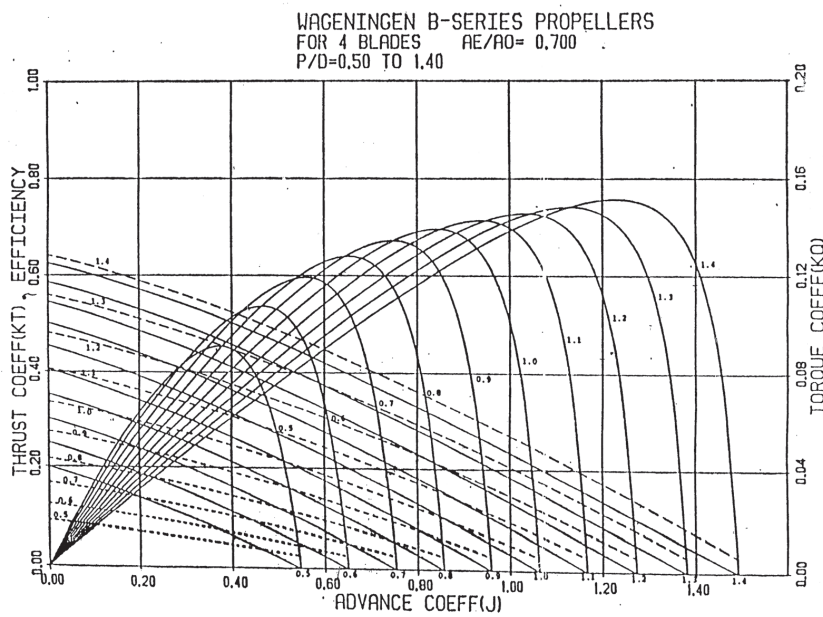
บทความฉบับนี้จัดทำขึ้นโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อที่จะเสนอทางเลือกในการประมาณการกำลังเครื่องที่เรือต้องการ ณ ความเร็วต่าง ๆ ในกรณีที่มีผู้ออกแบบ หรือเจ้าของเรืออาจมีข้อมูลอยู่ในมือเพียงบางส่วนเท่านั้น เนื่องจากไม่สามารถหาข้อมูลได้หรือไม่คุ้มค่าในการจัดหา หรือในบางครั้งอาจต้องการทราบเพียงแค่ประมาณการกำลังเรืออย่างรวดเร็วแต่ต้องการคำตอบที่สมเหตุและผล ซึ่งปัญหาที่กล่าวมานี้สามารถพบได้บ่อยครั้งในการปฏิบัติงานจริง การนำเสนอจะเริ่มต้นจากขั้นตอนของการเลือกใบจักร การหาขนาดของเครื่องยนต์ดีเซลมาที่จะมาติดตั้ง การหาจุดเหมาะสมในการทำงานของใบจักรและเครื่องยนต์ (Matching Point) โดยการทำตัวอย่างการออกแบบเบื้องต้นของระบบขับเคลื่อน ของเรือสินค้าลำหนึ่งเพื่อให้ง่ายแก่การเข้าใจ และสุดท้ายจะกล่าวถึงหลักการที่เรียกว่า “กฎของใบจักร” ซึ่งเป็นที่รู้จักกันในหมู่วิศวกรต่อเรือ วิศวกรเครื่องกลเรือ และผู้ผลิตอุปกรณ์ระบบขับเคลื่อนเรือ โดยจะแสดงให้เห็นถึงที่มา ประโยชน์ และข้อจำกัด เพื่อให้ผู้สนใจเกิดความเข้าใจและสามารถนำไปใช้งาน ได้ถูกต้องตามหลักการ

การหาค่ากำลังเครื่องที่ความเร็วออกแบบ

เป็นที่รู้กันดีว่าหลังจากที่ผู้ออกแบบเรือได้กำหนดรูปแบบของตัวเรือที่ตรงกับความต้องการใช้งานได้แล้ว การคำนวณหาค่าความต้านทานของเรือ (Resistance) ก็สามารถกระทำได้ทั้งจากการนำเรือจำลองไปทดลองลากในถังทดลอง หรือหาจากข้อมูลที่ได้จากการจัดทำไว้แล้วในรูปแบบที่รู้จักกันในชื่อของ Ship Resistance Series ซึ่งมีอยู่มากมายหลาย Series ขึ้นอยู่กับประเภทของเรือ และจากความต้านทานนี้เองทำให้สามารถหาค่ากำลังที่เรือต้องการเพื่อที่จะทำให้มันสามารถแล่นไปได้ด้วยความเร็วต่าง ๆ ได้ หรือพูดอีกอย่างหนึ่งคือ การหาค่า Effective Horsepower (EHP), P_E นั้นเอง ตัวอย่างเช่น เรือสินค้า (Cargo Ship) ลำหนึ่ง มีความยาว (L) 528.5 ft มีความกว้าง (B) 76 ft กินน้ำลึก (T) 27 ft ระบายขับน้ำ 18,674 LT ผลจากการทดลองลากเรือจำลองพบว่าความต้านทานของเรือซึ่งนำเสนออยู่ในรูปของ EHP vs Speed (EHP Curve) เป็นไปตามที่เห็นในรูปที่ 1



รูปที่ 1



รูปที่ 2

เมื่อทราบว่าเป็นเรือต้องการกำลังเท่าใดแล้ว สิ่งก็ตามมาก็คือ ต้องทราบว่าใบจักรที่เป็นตัวให้กำลังแก่เรือเพื่อให้เรือสามารถแล่นไปได้ด้วยความเร็วที่ต้องการนั้นทำงานอย่างไร ข้อมูลของใบจักรมักจะถูกนำเสนออยู่ในรูปของ Open Water Curve [1] คล้ายดังที่เห็นในรูปที่ 2 ซึ่งเป็นคุณลักษณะของใบจักรที่มี 4 ปีก แบบ Wageningen B4-70 ที่ถูกเลือกมาใช้กับเรือสินค้าลำนี้ สำหรับในทางปฏิบัติแล้วไม่ว่าใบจักรที่ใช้งานจริงจะเป็นแบบใดก็ตามข้อมูลดังกล่าวถือว่ามีความจำเป็นอย่างยิ่งต้องเรียกหาจากผู้ผลิตให้ได้ ไม่เช่นนั้นแล้วการเลือกขนาดของระบบขับเคลื่อนหรือการประมาณการความเร็วของเรือก็ทำได้ดีที่สุดในแง่การคาดเดาเท่านั้น นอกเหนือจากข้อมูลจากกราฟทั้งสองแล้ว ยังทราบอีกว่า ค่าความเร็วออกแบบของเรือ (Design Speed) กำหนดไว้ที่ 18 kt เส้นผ่าศูนย์กลางของใบจักรเท่ากับ 22 ft ส่วนค่าสัมประสิทธิ์ต่าง ๆ ของตัวเรือและใบจักรมีค่าดังนี้ $(1-w) = 0.71$, $(1-t) = 0.81$ และ $\eta_R = 1.03$ เมื่อได้ข้อมูลที่จำเป็นทั้งหมดแล้ว ผู้ออกแบบสามารถคำนวณหาหลักเกณฑ์ของใบจักรและขนาดของกำลังเครื่องจักรใหญ่สำหรับระบบขับเคลื่อนของเรือที่ความเร็วออกแบบได้แล้ว ด้วยการนำข้อมูลของใบจักรจากรูปที่ 2 รวมกับความสัมพันธ์ของตัวแปรต่อไปนี้

$$\eta_H = \frac{1-t}{1-w}$$

$$EHP = \frac{R_T V_S}{550}$$

$$T = \frac{R_T}{1-t}$$

$$V_A = (1-w)V_S$$

$$\frac{K_T}{J^2} = \frac{T}{\rho V_A^2 D^2}$$

- เมื่อ η_H = ประสิทธิภาพของตัวเรือ
 R_T = ความต้านทานของเรือ (lbs)
 T = แรงผลักดันของใบจักร (lbs)
 V_A = ความเร็วน้ำเข้าสู่ใบจักร (ft/s)
 K_T = Thrust Coefficient ของใบจักร
 J = Advance Coefficient
 D = เส้นผ่าศูนย์กลางกลางของใบจักร (ft)
 ρ = ความหนาแน่นของน้ำ
 η_o = ประสิทธิภาพของใบจักร
 $\eta_D = \eta_o \eta_R \eta_H$
 η_P = ความเร็วรอบของใบจักร (RPM)
 P_D = กำลังที่เพลาส่งให้กับใบจักรหรือ Delivered Horsepower

พบว่า ค่า K_T ที่เรือต้องการจากใบจักรที่ค่า J ต่าง ๆ เป็นไปตามตารางที่ 1

J	K_T
0.6	0.118
0.7	0.161
0.8	0.210
0.9	0.266
1.0	0.328

ตารางที่ 1

P_D	J	η_o	N_P (RPM)	η_D	P_D (HP)
0.6	0.48	0.55	123	0.65	10,153
0.8	0.60	0.63	98	0.74	8,919
1.0	0.73	0.65	80	0.76	8,684
1.2	0.82	0.63	72	0.74	8,919
1.4	0.90	0.62	65	0.73	9,041

ตารางที่ 2

เมื่อนำไปพลอตบนกราฟและอ่านค่าที่จุดตัดจะสามารถหาค่า P_D ออกมาเป็นไปตามที่เห็นในตารางที่ 2 ซึ่งจะทำให้สามารถกำหนดลักษณะของใบจักรที่ต้องการออกมาได้ สังเกตดูจะพบว่า ค่า Pitch Ratio (P/D) ทุกค่าในตารางที่ 2 สามารถทำให้เรือแล่นไปได้ด้วยความเร็ว 18 kt แต่ค่ากำลังที่ใบจักรแต่ละใบต้องการจากระบบส่งกำลังหรือเพลานั้นจะมีขนาดไม่เท่ากัน ซึ่งจะส่งผลทำให้ขนาดของเครื่องจักรใหญ่ที่จะนำมาติดตั้งก็มีขนาดต่างกันตามไปด้วย (สมมติว่าใบจักรทุกใบได้ถูกตรวจสอบแล้วว่าไม่ทำให้เกิดปรากฏการณ์ Cavitation) ดังนั้นใบจักรที่จะทำให้เครื่องจักรใหญ่ที่ติดตั้งบนเรือมีขนาดเล็กที่สุดได้แก่ ใบที่มีค่า (P/D) = 1.0 ความเร็วรอบของใบจักรเท่ากับ 80 RPM และขนาดของเครื่องจักรใหญ่ที่ควรนำมาติดตั้งบนเรือสามารถหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$P_S = \frac{P_D}{\eta_S \eta_B} \quad \text{หรือ} \quad \text{Shaft Horsepower}$$

$$P_B = \frac{P_S}{\eta_G} \quad \text{หรือ} \quad \text{Brake Horsepower (BHP)}$$

ซึ่งถ้าให้ $\eta_S \eta_B = 0.98$ สำหรับในกรณีที่เครื่องจักรใหญ่ติดตั้งอยู่ที่บริเวณท้ายเรือ และ $\eta_G = 0.97$ ในกรณีที่ติดตั้งพร้อมเกียร์ที่มี Thrust Bearing อยู่ภายใน จะให้ค่ากำลังของเครื่องจักรใหญ่ที่ทำให้เรือแล่นได้ 18 kt เท่ากับ 9,135 BHP ยิ่งไปกว่านั้นหลังจากเลือกค่า Pitch Ratio ของใบจักรที่จะใช้กับเรือลำนี้แล้ว ค่ากำลังเครื่องที่เรือต้องการเพื่อให้สามารถแล่นไปได้ที่ความเร็วอื่น ๆ นอกเหนือจากความเร็วออกแบบ 18 kt ก็สามารถคำนวณออกมาได้ตามตารางที่ 3

V_K (kt)	P_D (HP)	P_B (HP)	N_P (RPM)
12	2,308	2,428	52
14	3,846	4,046	61
16	5,921	6,229	72
18	8,684	9,135	80
20	13,243	13,931	94

ตารางที่ 3

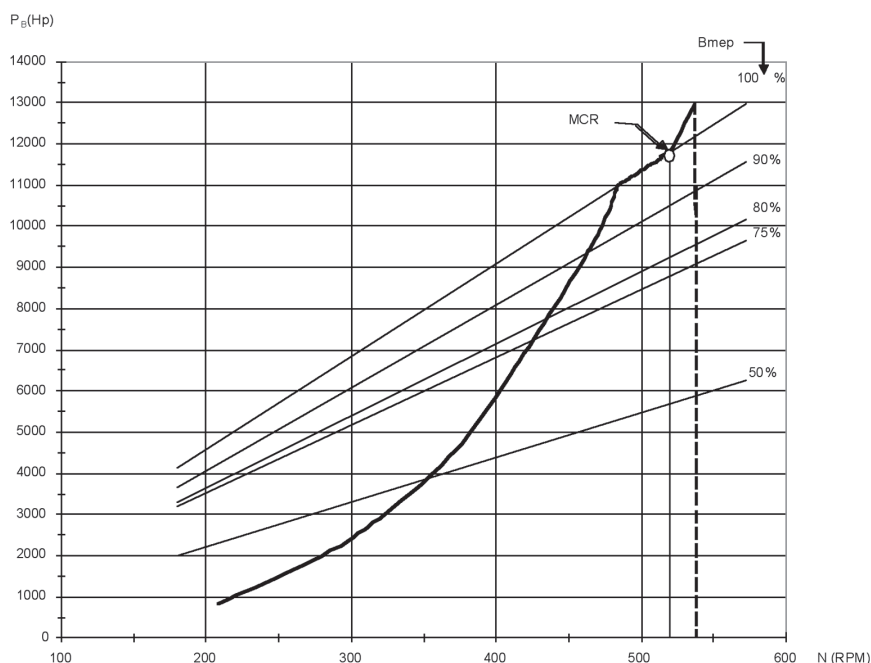
ค่า N_P ที่เห็นในตารางก็คือ ค่าความเร็วรอบของใบจักร เพราะฉะนั้นถ้าคูณด้วย Gear Ratio แล้วก็จะได้ค่าความเร็วรอบของเครื่องยนต์ที่ต้องใช้ในการหมุนใบจักรเพื่อให้ได้ความเร็วเรือที่ต้องการ เมื่อนำเอาค่าในตารางที่ 3 ไปพลอตก็จะได้เส้นความต้องการกำลังเครื่องของตัวเรือหรือพูดอีกอย่างก็คือ เส้นการทำงานของใบจักร (Propeller Curve) ออกมานั่นเอง [2]

การเลือกเครื่องยนต์เซลเป็นเครื่องจักรใหญ่

เครื่องจักรใหญ่เปรียบได้กับผู้สนองความต้องการกำลังของเรือ ผู้ผลิตเครื่องยนต์ดีเซลจะกำหนดหรือแนะนำขีดความสามารถของเครื่องยนต์ที่ความเร็วรอบเครื่องต่าง ๆ มาให้เพื่อที่ผู้ใช้หรือผู้ออกแบบสามารถเลือกใช้ให้เหมาะสมกับภารกิจของเรือหรือที่รู้จักกันว่าค่า Power Rating นั้นเอง ค่าดังกล่าวนี้เป็นตัวบ่งบอกถึงระยะเวลาที่เครื่องยนต์จะสามารถทำงานได้นานมากน้อยเท่าใดที่ความเร็วรอบเครื่องสูงสุด (Maximum RPM) ซึ่งโดยทั่วไปแบ่งได้เป็น 3 แบบ คือ

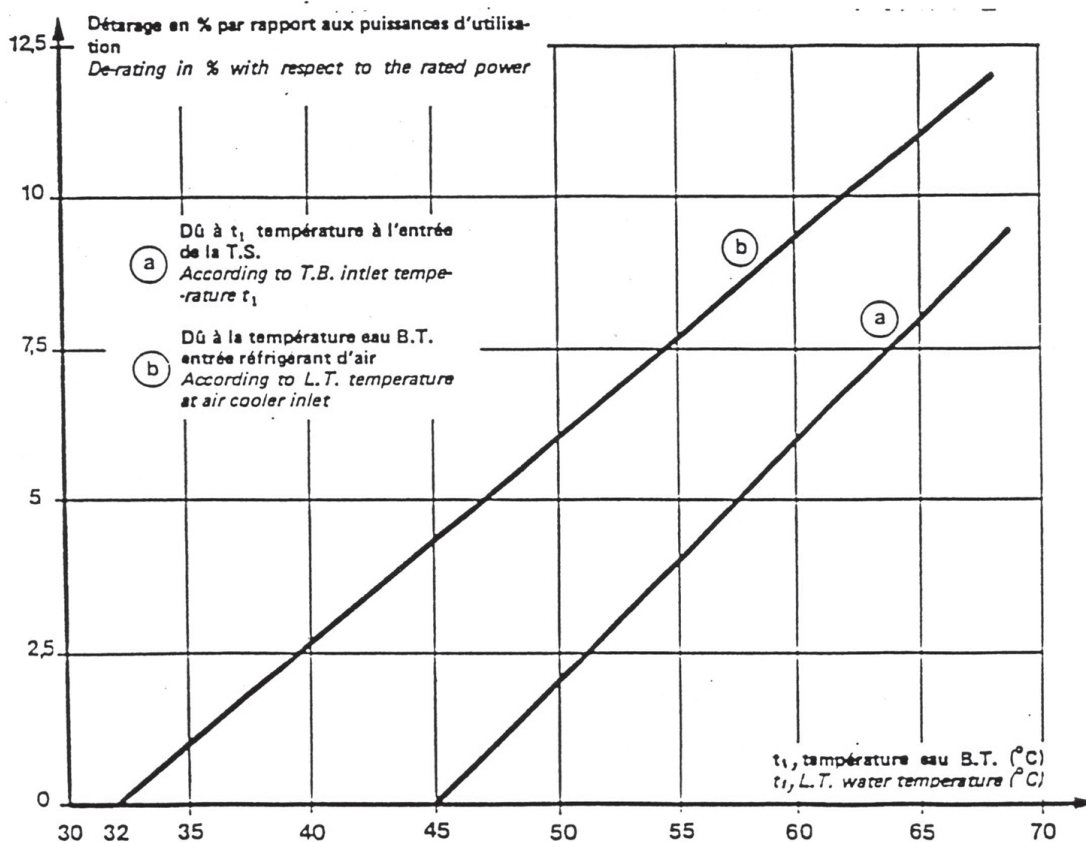
1. Light Duty หรือ Maximum Power Output เป็นค่ากำลังที่เครื่องสามารถทำงานที่ Maximum RPM ได้ไม่เกิน 2 ชม. ในทุก 6 ชม. ของช่วงการทำงานหรือไม่เกิน 500 ชม. ต่อปี จะเป็นค่ากำลังของเครื่องที่สูงที่สุดที่สามารถทำได้ เหมาะกับเรือสำราญหรือเรือเร็วขนาดเล็ก
2. Medium Duty หรือ Intermittent Power Output เป็นค่ากำลังเครื่องที่สามารถทำงานที่ Maximum RPM ได้ไม่เกิน 6 ชม. ในทุก 12 ชม. ของการทำงาน เหมาะที่จะใช้กับเรือใช้สอย (Workboat)
3. Continuous Duty หรือ Maximum Continuous Power (MCR) เป็นค่ากำลังของเครื่องที่สามารถทำได้ขณะใช้งานที่ประมาณ 90% ของ Maximum RPM แต่เครื่องจะสามารถทำงานที่จุดนี้ได้อย่างต่อเนื่อง ไม่จำเป็นต้องมีระยะผ่อนเหมือนกับค่า Rating ทั้งสองแบบที่กล่าวมาแล้ว

สำหรับเรือใช้งานขนาดใหญ่หรือเรือรบที่ต้องเดินทางเวลานานในทะเลแล้ว Rating แบบที่ 3 ถือว่ามีความเหมาะสมมากที่สุด อย่างไรก็ตามการทำ Power Rating ยังไม่จบอยู่เพียงแค่นี้ บ่อยครั้งที่มีความเข้าใจกันว่า พอทราบ Rating ที่จะใช้กับเรือแล้วก็ไม่ใช่เรื่องยากที่จะเลือกเครื่องยนต์ดีเซลเพื่อมาใช้เป็นเครื่องจักรใหญ่ เพราะเพียงแค่เอาค่ากำลังเครื่องที่เรือต้องการ มาดูให้ตรงกับข้อมูลจากผู้ผลิตก็น่าจะพอแล้ว แต่ในความเป็นจริงวิศวกรต่อเรือหรือวิศวกรเครื่องกลเรืออาจจะต้องมาทำการปรับแต่ง Power Rating ต่ออีกทอดหนึ่งโดยพิจารณาถึงปัจจัยการนำเครื่องไปใช้ให้เหมาะกับงานเฉพาะนั้น ๆ อีกหลายประการ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในเรื่องของสภาพแวดล้อมที่เครื่องยนต์ต้องเผชิญ กำลังเครื่องที่ควรเพื่อไว้สำหรับการเปลี่ยนแปลงในอนาคต ตลอดจนอายุการใช้งานและการบำรุงรักษาเครื่อง



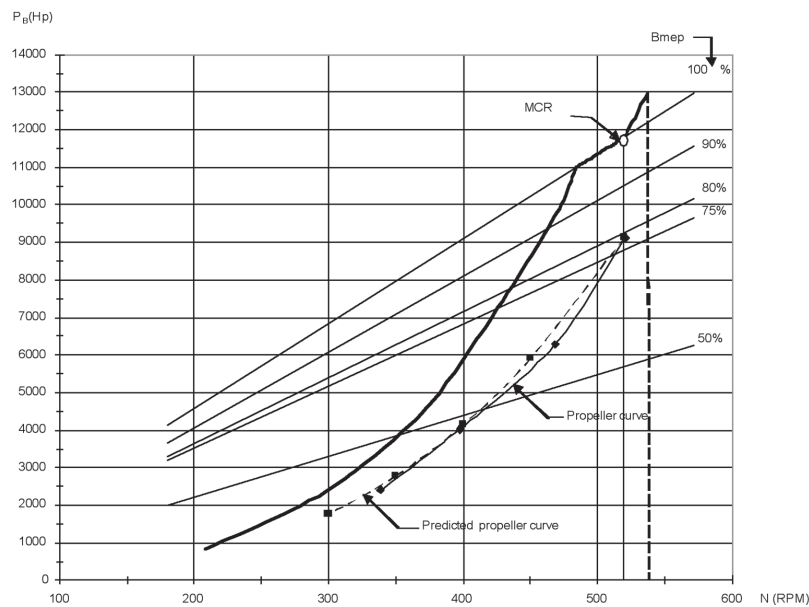
รูปที่ 3

สภาพแวดล้อมมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งต่อกำลังที่เครื่องผลิตออกมาได้ในขณะทำงานจริง ทั้งนี้เนื่องจากค่า Power Rating ที่ผู้ผลิตให้มานั้นได้มาจากการทดลองในสภาพแวดล้อมหนึ่งซึ่งตามปกติจะเป็นไปตามมาตรฐานที่องค์กรต่างๆกำหนดขึ้น เช่น SAE J1349, ISO3046/1 หรือ DIN6271 เป็นต้น ตัวอย่างเช่นเครื่องยนต์ดีเซลแบบ Medium Speed ที่มีชื่อเสียงตราอักษรหนึ่งที่ถูกนำมาพิจารณาเพื่อใช้กับเรือสินค้าลำนี้มีข้อมูลการทำงานจริงตามที่ได้เห็นในรูปที่ 3 โดยที่ผู้ผลิตกำหนดให้อุณหภูมิของอากาศเข้า Turbocharger ไม่เกิน 32 องศา C และอุณหภูมิน้ำเข้าดับความร้อนของ Air Cooler ไม่เกิน 45 องศา C แต่หากในการใช้งานจริงปรากฏว่า อุณหภูมิของน้ำมีค่าประมาณ 35 องศา C และอุณหภูมิของอากาศประมาณ 50 องศา C แล้ว ผู้ออกแบบจะต้องปรับลดกำลังเครื่องลง (Derating) ตามข้อมูลที่ผู้ผลิตกำหนดให้ในรูปที่ 4 ซึ่งพบว่ามีความเท่ากับ 3% ดังนั้น เส้นการทำงานของเครื่องในรูปที่ 3 ที่ค่า % BMEP ต่างๆจะต้องถูกปรับลดลงด้วยจำนวนดังกล่าวนี้ แทนที่เครื่องยนต์ที่เลือกไว้ใช้กับเรือจะมีค่า Rating ตามที่ผู้ผลิตบอกมา ที่ MCR เท่ากับ 11,796 HP @ 520 RPM ก็จะทำให้กำลังที่ผลิตได้เพียง 11,442 HP @ 520 RPM เท่านั้น จากตัวอย่างที่กล่าวมาสามารถเห็นได้ชัดว่า สภาพแวดล้อมส่งผลต่อการทำงานของเครื่องเป็นอย่างมาก และหากในกรณีที่ไม่สามารถหาข้อมูลเพื่อการทำ Derating จากผู้ผลิตได้ ก็สามารถนำวิธีมาตรฐานสำหรับการ Derating เครื่องดีเซลที่ SNAME [3] แนะนำมาใช้งานได้ ในเอกสารของผู้ผลิตเครื่องยนต์บางบริษัทอาจกล่าวอ้างว่าไม่จำเป็นต้องมีการ Derating เครื่องของตนถ้าสภาพแวดล้อมการใช้งานผิดไปจากค่ามาตรฐาน (Standard Operating Conditions) ไม่มากไปกว่าช่วงที่กำหนดให้ แต่เป็นที่ทราบกันดีว่า การใช้เครื่องในลักษณะเช่นนั้นก็จะทำให้ค่า MTBO หรืออายุการใช้งานของเครื่องลดลงด้วยเช่นกัน



รูปที่ 4

ในระหว่างที่เรือใช้งานไปได้ช่วงระยะเวลาหนึ่งอาจมีความจำเป็นต้องมีการเปลี่ยนแปลงตัวเรือหรือปรับปรุงอุปกรณ์บนเรือ ทำให้น้ำหนักหรือทริมเรือเปลี่ยนไป ส่งผลกระทบกับความต้านทานของเรือไม่ว่าจะเป็นเรือรบหรือเรือสินค้า ทำให้จำเป็นต้องมีการเผื่อค่าที่เรียกว่า Operating Margin เอาไว้ด้วย ซึ่งโดยปกติมีค่าอยู่ที่ประมาณ 10-15% ของกำลังเครื่อง ยิ่งไปกว่านั้นบางรายอาจทำการเผื่อค่า Hull Service Margin [4] เพิ่มเอาไว้ในกรณีที่ตัวเรืออาจเกิดความสกรปรกในขณะที่ใช้งานนานอีก 5-10% เป็นผลให้ค่าที่เผื่อไว้ทั้งหมดอาจมีค่าสูงถึง 20-25% ก็เป็นได้อย่างเช่น ในกรณีเรือของ U.S. Navy [5] ผลของการเผื่อกำลังเครื่องไว้ในลักษณะเช่นนี้นั้นนอกจากจะช่วยทำให้เรือสามารถรักษาความเร็วที่ตั้งใจไว้ได้เกือบตลอดการใช้งานในอนาคตแล้ว ยังจะช่วยลดความเสียหายและค่าบำรุงรักษาในระยะยาวลงอีกด้วย เพราะเป็นการติดตั้งเครื่องที่มีกำลังมากแต่นำมาใช้งานที่เบา ถึงแม้ว่าการลงทุนครั้งแรก (Initial Cost) จะสูงกว่าบ้างก็ตาม สำหรับเรือสินค้าในบทความนี้จะขอใช้ค่า Margin รวมเท่ากับ 20 % ส่งผลทำให้เครื่องดีเซลที่ต้องนำมาติดตั้งบนเรือจะต้องสามารถผลิตกำลังได้ทั้งหมดเท่ากับ 10,962 HP ($9,135 \times 1.20$) และจะเห็นได้ว่า สามารถนำเครื่องยนต์ดีเซลในรูปที่ 3 มาติดตั้งบนเรือสินค้าได้ โดยมีกำลังเครื่องเกินกว่าค่าที่ต้องการไปเพียง $11,442 - 10,962 = 480$ HP ถือว่ามีความเหมาะสมและยอมรับได้



รูปที่ 5

รูปที่ 5 เป็นการแสดงให้เห็นถึงจุด Matching Point ระหว่างเรือและเครื่องยนต์ที่ระวางขับน้ำและความเร็วเรือออกแบบที่กำหนดไว้ 18 kt ซึ่งได้มาจากการนำเอาเส้นการทำงานของใบจักรจากตารางที่ 3 (โดยการนำเอาค่า Gear Ratio = $520/80 = 6.5$ คูณกับ N_u ก่อน) มาพลอตลงบนเส้นกราฟแสดงการทำงานของเครื่องยนต์ นอกจากนั้นแล้วผลที่ได้จากกราฟนี้ร่วมกับข้อมูลในตารางที่ 3 จะทำให้ทราบถึงความสัมพันธ์ระหว่างเรือและเครื่องยนต์ที่ความเร็วอื่น ๆ ด้วย ที่เรียกกันว่าจุด Off-Design Condition ตัวอย่างเช่น ต้องใช้ความเร็วรอบเครื่องเท่าใดถึงจะทำให้เรือแล่นไปได้ที่ความเร็ว 12 kt เป็นต้น หากว่าในอนาคตเกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้นกับความต้านทานหรือระวางขับน้ำของเรือ หรือมีการเปลี่ยนใบจักร ก็จะเป็นผลให้เส้นการทำงานของใบจักรเปลี่ยนไปโดยการขยับขึ้นหรือขยับลงทั้งเส้น

ถ้าต้องทราบความสัมพันธ์ใหม่ระหว่างเรือและเครื่องยนต์ก็จำเป็นที่จะต้องหาเส้นการทำงานของใบจักรเส้นใหม่มาพลอตลงบนเส้นกราฟการทำงานของเครื่องยนต์เหมือนเช่นเคย ด้วยการเริ่มการคำนวณที่กล่าวมาข้างบนทั้งหมดตั้งแต่การทำ EHP Curve เส้นใหม่ของเรือเลย

กฎของใบจักร (Propeller Law)

จากขั้นตอนการเลือกเครื่องยนต์และใบจักรที่เหมาะสม(Matching Point) เพื่อให้เรือสามารถทำความเร็วที่ต้องการได้ จะเห็นว่า ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับความต้านทานของเรือหรือ EHP Curve มีความสำคัญมาก (เพื่อนำไปใช้ในการหาเส้นการทำงานของใบจักร) โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่ต้องการทราบการทำงานของเรือนอกเหนือจากจุดความเร็วเรือที่ตั้งใจออกแบบเอาไว้ในกรณีนี้จำเป็นต้องมีข้อมูล EHP Curve ที่สมบูรณ์ทั้งเส้นตลอดย่านความเร็วที่สนใจ ค่าถามที่เกิดขึ้นก็คือ ถ้าข้อมูลดังกล่าวมีไม่ครบถ้วนจะสามารถศึกษาหรือทราบการทำงานของจุด Off-Design Condition ต่าง ๆ นี้ได้อย่างไร

ในกรณีของเรือผิวน้ำ (Displacement Ship) ที่มีค่า Speed-Length Ratio ต่ำกว่า 1 ซึ่งเป็นค่าของเรือส่วนใหญ่ที่ใช้งานกันอยู่ในน่านน้ำของประเทศไทย เรามีทางเลือกอีกทางที่สามารถนำมาใช้ประมาณการเส้นการทำงานของใบจักรนี้ได้ โดยเริ่มจากการพิจารณาถึงค่าจำกัดความเกี่ยวกับใบจักรของเรือที่รู้จักกันข้างล่างนี้เสียก่อน กล่าวคือ

$$K_Q = \frac{Q}{\rho D^5 n^2} \quad \text{บ่งบอกถึงค่าแรงบิด (Torque) ที่ต้องให้กับใบจักร}$$

$$K_T = \frac{T}{\rho D^4 n^2} \quad \text{บ่งบอกถึงค่าแรงผลัก (Thrust) ที่ใบจักรผลิตได้}$$

$$J = \frac{V_A}{nD} \quad \text{บ่งบอกถึงความเร็วของน้ำเข้าสู่ใบจักร}$$

เมื่อ n = ความเร็วรอบของใบจักร (RPS)

นอกจากนั้นแล้วจากการสังเกตเรือผิวน้ำโดยทั่วไปพบว่า ความต้านทานของเรือแปรผันโดยตรงกับความเร็วเรือยกกำลังสอง รวมทั้งถ้าสมมติให้ค่า $(1-w)$ และ $(1-t)$ เปลี่ยนแปลงไปกับความเร็วเรือไม่มากนักทำให้คิดว่าเป็นค่าคงที่ได้แล้วผลที่ได้คือ ค่าแรงผลักดันที่เกิดจากใบจักร (T) และความเร็วเรือ (V) จะมีความสัมพันธ์กันดังนี้

$$T \propto V^2 \propto K_T n^2 \quad \text{และ} \quad V^2 \propto J^2 n^2$$

เมื่อนำความสัมพันธ์ทั้งสองมาหารกันจะได้ผลออกมาว่า

$$\frac{K_T}{J^2} = \text{Constant}$$

และเมื่อดูกราฟการทำงานของใบจักรในรูปที่ 2 จะพบว่า สมการนี้เป็นจริงได้เมื่อ K_T และ J มีค่าคงที่ ซึ่งจะทำได้ความสัมพันธ์ตามมาคือ

$$n \propto V$$

$$\text{และ } P_T \propto V^3 \propto n^3$$

สมการข้างบนนี้มีชื่อเรียกว่า “กฎของใบจักรหรือ Propeller Law” ซึ่งบอกให้ทราบว่า กำลังที่ใบจักรใช้ในการขับเคลื่อนเรือแปรผันโดยตรงกับค่าความเร็วเรือหรือความเร็วรอบยกกำลังสาม กฎนี้มีประโยชน์มากสำหรับช่วยในการตัดสินใจเลือกเครื่องยนต์ในขณะเริ่มต้นของการออกแบบระบบขับเคลื่อนและใช้ได้กับเครื่องจักรใหญ่ทุกชนิดทุกประเภท นอกจากนั้นแล้วยังสามารถเห็นสมการนี้ได้บ่อยครั้งบนกราฟแสดงการทำงานของเครื่องยนต์ที่ผู้ผลิตนำเสนอในชื่อของ Cubic Law หรือ Propeller Curve นั้นเอง สำหรับเรือประเภทอื่น ๆ ที่อยู่นอกเหนือช่วง Speed-Length Ratio ที่กำหนดไว้ ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังกับความเร็วเรือก็เป็นไปในรูปแบบคล้ายคลึงกันเพียงแต่ว่า ค่าของกำลังอาจจะต้องหาจากการทดลองซึ่งโดยส่วนใหญ่มีค่าอยู่ระหว่าง 2.2-3.0 และค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 2.7 [6]

ประโยชน์ของกฎของใบจักร

กฎของใบจักรถึงแม้ว่าจะพัฒนาขึ้นมาจากทฤษฎีและการสังเกตการณ์แต่ก็มีประโยชน์อยู่หลายประการ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในเรื่องการประมาณการความสัมพันธ์ระหว่างเรือและเครื่องจักรใหญ่เมื่อข้อมูลที่มีอยู่ค่อนข้างจำกัด ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากเรือใหม่ยังมีข้อมูลไม่เพียงพอหรือเรือเก่าแต่ข้อมูลเดิมไม่มีอยู่ อีกทั้งยังสามารถช่วยลดภาระการคำนวณซึ่งมีความยุ่งยากค่อนข้างมากตามที่เราเห็นไปแล้วในหัวข้อที่ผ่านมาในกรณีที่ไม่มีความจำเป็นที่จะต้องใช้คำตอบที่ถูกต้องแม่นยำมากนัก หรือต้องการความรวดเร็วในการตัดสินใจ ตัวอย่างในทางปฏิบัติได้แก่

1. กรณีข้อมูลความต้านทานเรือหรือค่า EHP มีไม่ครบทุกความเร็ว หรือที่มีอยู่ไม่ตรงกับความเร็วที่ต้องการ เราสามารถใช้กฎของใบจักรมาช่วยได้ เช่น สมมติในกรณีที่ยกตัวอย่างกล่าวคือ ทราบข้อมูลการทำงานของเรือสินค้าเพียงแค่จุดเดียวที่ความเร็วเรือ 18 kt ว่ามีค่า EHP เท่ากับ 6,600 HP ถ้าต้องการประมาณค่า EHP Curve ที่เหลือก็สามารถทำได้ด้วยการใช้กฎของใบจักรและความสัมพันธ์ที่ว่า

$$P_E \propto P_T \propto P_D \propto P_B$$

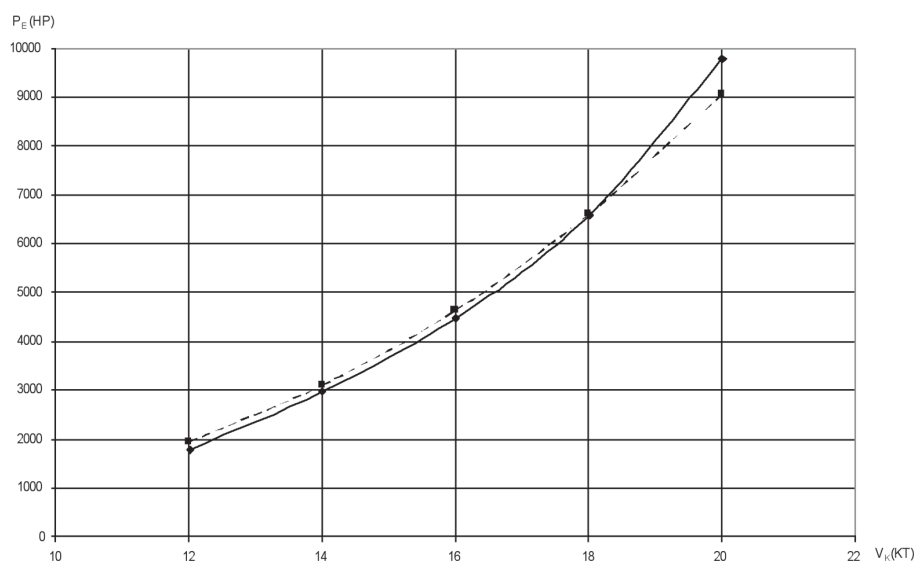
ดังนั้น
$$\frac{P_E}{P_{E0}} = \left(\frac{V}{V_0} \right)^3$$

เมื่อดำเนินการออกมาแล้วจะได้ค่าตามตารางที่ 4

V_K (kt)	True P_E (HP)	Predicted P_E (HP)
12	1,800	1,955
14	3,000	3,105
16	4,500	4,635
18	6,600	6,600
20	9,800	9,053

ตารางที่ 4

เมื่อนำเอาผลที่ได้มาพลอตและเปรียบเทียบกับ EHP Curve จริงของเรือในรูปที่ 1 จะได้ออกมาตามที่ได้เห็นในรูปที่ 6 ซึ่งจะเห็นได้ว่า เส้นโค้งทั้งสองมีความใกล้เคียงกันเพียงพอที่จะนำไปใช้งาน สามารถช่วยลดเวลาหรือการลงทุนในการหาข้อมูลได้ และหากมีข้อมูลหลายจุดก็จะมีเพิ่มความถูกต้องมากขึ้นตามไปด้วย



รูปที่ 6

2. กรณีที่ต้องการหาเส้นการทำงานของใบจักรเพื่อใช้ในการตัดสินใจเลือกจุด Matching Point หรือเพื่อศึกษาการทำงานของระบบขับเคลื่อนที่ Off-Design Conditions แต่ทราบค่ากำลังเครื่องที่ต้องใช้ที่ค่าความเร็วเรือหรือความเร็วรอบเพียงค่าเดียวเท่านั้น การหาเส้นโค้งที่ต้องการนี้จะทำได้โดยการใช้กฎของใบจักรในรูปของสมการข้างล่างนี้

$$\frac{P_B}{P_{B0}} = \left(\frac{V}{V_0} \right)^3 = \left(\frac{n}{n_0} \right)^3$$

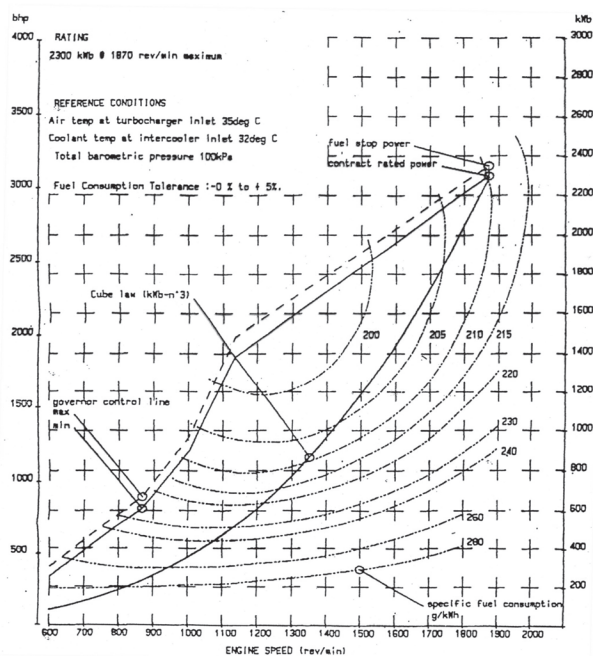
เช่นเดียวกันกับกรณีแรกเมื่อใช้ข้อมูลที่จุดความเร็วเรือ 18 kt มาใช้ในการคำนวณจะได้ผลตาม ตารางที่ 5

N_E (RPM)	P_B (HP)
300	1,755
350	2,784
400	4,154
450	5,912
520	9,135

ตารางที่ 5

นำค่าไปพลอตเพื่อเปรียบเทียบกับเส้นการทำงานของใบจักรจริง ผลที่ออกมาจะได้เป็นเส้น Predicted Propeller Curve ในรูปที่ 5 ซึ่งถือว่าอยู่ในเกณฑ์ดี เมื่อได้เส้นการทำงานของใบจักรนี้มาแล้ว ก็สามารถจะนำไปช่วยในการทำนายการทำงานของระบบขับเคลื่อนและช่วยผู้ออกแบบในการตัดสินใจได้เป็นอย่างดี เช่น ในกรณีของเรือที่ต้องมีการกำหนดทั้งค่าความเร็วสูงสุดและค่าความเร็วเดินทาง หลังจากกำหนดความเร็วสูงสุดของเรือได้โดยใช้วิธีการ Matching ดังที่กล่าวไปแล้ว การกำหนดค่าความเร็วเดินทางนั้นก็ทำได้ไม่ยาก เพราะถ้าหากไม่มีการกำหนดเงื่อนไขอื่นๆ เอาไว้แล้ว ส่วนใหญ่มักจะเลือกใช้จุดที่เส้นการทำงานของใบจักรผ่านย่านที่มีการอัตรากินน้ำมันต่ำสุดเพื่อเป็นการประหยัดค่าน้ำมัน ดังตัวอย่างในรูปที่ 7 จะพบว่า ค่าความเร็วรอบเครื่องที่ความเร็วเดินทางควรจะอยู่ที่ย่านประมาณ 1,450-1750 RPM

นอกจากนั้นแล้วถ้าสังเกตดูรูปที่ 7 จะเห็นว่า มีประเด็นที่น่าสนใจมาก กล่าวคือการ Matching ทำในลักษณะที่ไม่มีการเผื่อ Margin เอาไว้เลย รวมทั้งเส้นการทำงานของเครื่องยนต์ที่มีลักษณะลาดชันมาก สมมติว่าระวางขับน้ำของเรือเปลี่ยนไปหรือไม่เป็นไปตามที่คำนวณไว้เพียงเล็กน้อย หรือท้องเรือสกปรก ตลอดจนสภาพแวดล้อมไม่เป็นไปตามที่ผู้ผลิตกำหนด สิ่งที่จะเกิดขึ้นคือเส้นการทำงานของใบจักรจะขยับสูงขึ้นไปทั้งสิ้น ทำให้จุดตัดระหว่างใบจักรกับเครื่องยนต์เปลี่ยนไปอยู่ที่จุดใหม่ ซึ่งความเร็วรอบจะต่ำกว่า MCR ส่งผลให้เครื่องผลิตกำลังได้น้อยลงกว่าเดิม เรือจะไม่สามารถทำความเร็วได้ และเครื่องอาจจะเกิดความเสียหายได้ในระยะยาว ในกรณีเช่นนี้ความถูกต้องของเส้นการทำงานของใบจักรหรือการเผื่อ Margin นับว่ามีความสำคัญอย่างมาก เพราะจะช่วยให้สามารถรักษาความเร็วเรือที่ต้องการไว้ได้และยืดอายุการใช้งานของเครื่องอีกด้วย



รูปที่ 7

3. กรณีที่ต้องการเปลี่ยนเครื่องจักรใหญ่ของเรือเก่าที่ใช้งานมาแล้ว โดยทั่วไปการทำงานของเครื่องยนต์ใหม่กับเก่าจะไม่เหมือนกัน ผู้ใช้เรืออาจต้องการทราบว่า จากจำนวนเครื่องยนต์ใหม่ที่มีให้เลือกมากมายและมีขนาดกำลังทั้งมากและน้อยกว่าของเครื่องเดิม จะทำให้ความเร็วเรือเปลี่ยนไปมากขึ้นหรือน้อยลงเท่าใดคุ้มค่าการลงทุนในการเปลี่ยนเครื่องหรือไม่ การตัดสินใจสามารถกระทำได้ด้วยการทำ Matching แต่จะอย่างไรถ้ามีข้อมูลของเรือเดิมเพียงว่า ที่ความเร็วเรือเท่ากับ x kt จะต้องใช้กำลังเครื่องเท่ากับ y HP @ z RPM เท่านั้น หนทางหนึ่งก็คือ ใช้กฎของใบจักรหาเส้นการทำงานของใบจักรออกมาแล้วพลอตลงในข้อมูลของเครื่องยนต์ใหม่ เพื่อหาค่าความเร็วเรือที่เครื่องยนต์ใหม่จะสามารถเสนอให้ได้ เหตุที่ทำเช่นนี้ได้ก็เพราะว่าเส้นโค้งการทำงานของใบจักรหรือความต้องการของเรือจะไม่เปลี่ยนไป ตราบเท่าที่ความต้านทานและระวางขับน้ำของเรือไม่เปลี่ยนแปลง

สรุป

การหาค่ากำลังเครื่องเพื่อให้เรือแล่นได้ด้วยความเร็วที่ต้องการเป็นขั้นตอนที่สำคัญของการออกแบบระบบขับเคลื่อน การคำนวณอาจส่งผลถึงประสิทธิภาพในการทำงานของเรือโดยเฉพาะอย่างยิ่งในเรื่องของความเร็วเรือและกำลังเครื่องที่ต้องนำลงติดตั้ง เมื่อข้อมูลที่จำเป็นต้องนำมาใช้ในการคำนวณหรือประมาณการหาได้ยากหรือไม่ครบสมบูรณ์ บางครั้งแทบเป็นไปได้ในการที่จะหา มาให้ได้ทั้งหมดตามที่ต้องการ ทางเลือกทางหนึ่งสำหรับการออกแบบเบื้องต้นก็คือ การใช้กฎของใบจักร ซึ่งจะทำให้ผู้ออกแบบหรือแม้แต่เจ้าของเรือสามารถเข้าใจถึงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังเครื่องและความเร็วเรือหรือความเร็วรอบได้เป็นอย่างดี รวมทั้งยังเป็นเครื่องมือช่วยในการตัดสินใจต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับระบบขับเคลื่อนได้ในระดับหนึ่ง โดยไม่ต้องใช้วิธีการทางวิศวกรรมที่ซับซ้อน ถ้าหากผู้นำมาใช้มีความเข้าใจและคำนึงถึงข้อจำกัดของกฎของใบจักรแล้ว จะสามารถช่วยลดความยุ่งยากในการหาข้อมูลและการคำนวณลงได้ วิธีนี้มีพื้นฐานมาจากหลักการทางทฤษฎีที่เชื่อถือได้สามารถประมาณการคำตอบได้ใกล้เคียงกับค่าจริง โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับเรือแบบ Displacement Type ที่มีค่า Speed-Length Ratio ต่ำกว่า 1 สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับงานได้ทั้งในกรณีของเรือเก่าและเรือที่กำลังสร้างใหม่

เอกสารอ้างอิง

- [1.] Bernitsas, M.M., Ray, D. and Kinley, P. K_T , K_Q and Efficiency Curves for the Wageningen B-Series Propellers. Michigan: University of Michigan, Department of Naval Architecture and Marine Engineering.
- [2.] Woodward, John B. Matching Engine and Propeller. Report #142, Michigan: University of Michigan, Department of Naval Architecture and Marine Engineering, 1976.
- [3.] Panel M -15. Marine Diesel Power Plant Performance Practices. SNAME, 1975.
- [4.] Woodward, John B. Low Speed Marine Diesel. New York: John Wiley & Sons Inc., 1981.
- [5.] Kehoe, Capt. and others "The Impact of Design Practices on Ship Size and Cost", **Naval Engineers Journal**: April, 1982 p. 68-86.
- [6.] Gerr, Dave. Propeller Handbook. London: International, 1989.

บทคัดย่อ

ปัจจุบันนี้มีหลากหลายเทคนิคและวิธีการในการผลิตไบโอดีเซล ไม่ว่าจะเป็นระบบผลิตแบบ Batch Reactor ซึ่งอาศัยการผสมกวนด้วยใบพัดหรือการผสมด้วยการสูบลมด้วยบี้ม การใช้เทคนิคการผสมด้วยการไหลแบบ Plug Flow ร่วมกับการสั่นของคลื่นหรือเรียกอีกอย่างว่า Oscillatory Flow Reactors ในระบบ Continuous Process และระบบแบบ Supercritical Process ซึ่งเป็นระบบที่มีราคาสูงเกินไปสำหรับประเทศไทย ในบทความนี้จะเป็นการนำเสนอเทคโนโลยีการผลิตไบโอดีเซล ที่กรมอุทกหารเรือมีใช้อยู่ และเทคนิคอื่น ๆ ที่ได้ทำการพัฒนาและวิจัยขึ้นมา และวิธีการอื่น ๆ ที่น่าสนใจ จากต่างประเทศ เครื่องผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องซึ่งกรมอุทกหารเรือกำลังทำการวิจัยอยู่นี้ เป็นเครื่องปฏิกรณ์อีกรูปแบบหนึ่งประกอบด้วยชั้นของแผ่นออริฟิส วางเรียงซ้อนกันเป็นชั้น ๆ ระยะห่างเท่า ๆ กัน (Orifice Plate Baffles) การเคลื่อนตัวแบบคลื่น (Oscillatory Motion) จะเกิดขึ้นไปพร้อมกับการไหลของของไหลในกระบวนการก่อให้เกิดเป็นรูปแบบการไหลซึ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายเทมวลและความร้อน (Heat and Mass Transfer) ในขณะเดียวกับการคงสภาพการไหลแบบ Plug Flow ไว้ เทคนิคดังกล่าว จะสามารถช่วยลดระยะเวลาการทำปฏิกิริยาของน้ำมัน เพิ่มปริมาณการผลิตให้สูงขึ้นกว่าระบบเดิมหลายสิบเท่าตัว และทำให้ได้น้ำมันไบโอดีเซลที่มีคุณภาพสูงกว่า และ ตรงตามมาตรฐานคุณภาพน้ำมันไบโอดีเซลที่ยอมรับเป็นสากลเช่นกัน

นาวาตรี ดร. ชลัมภ์ โสมาภา

นายทหารนักเรียนโรงเรียนเสนาธิการทหารเรือ

สถาบันวิชาการทหารเรือชั้นสูง รุ่นที่ 67

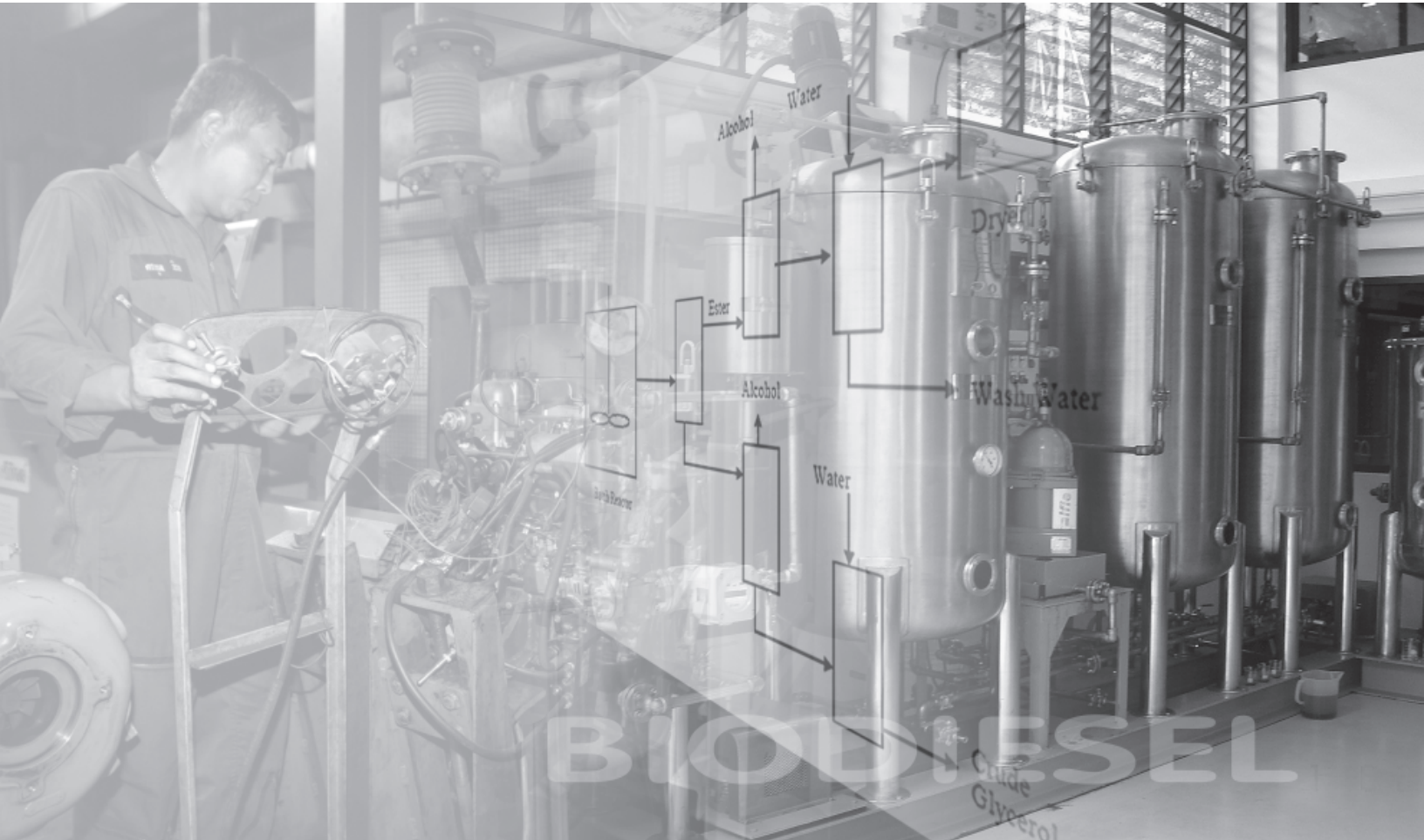
E-mail : chalums@yahoo.co.uk

นาวาเอก ดร.สมัย ใจอินทร์

ประจำกรมอุทกหารเรือ ช่วยปฏิบัติราชการ

กรมพัฒนาการช่าง กรมอุทกหารเรือ

E-mail : samai.j@navy.mi.th



เทคโนโลยีการผลิตไบโอดีเซล

(The Production of Biodiesel Using Various Techniques)

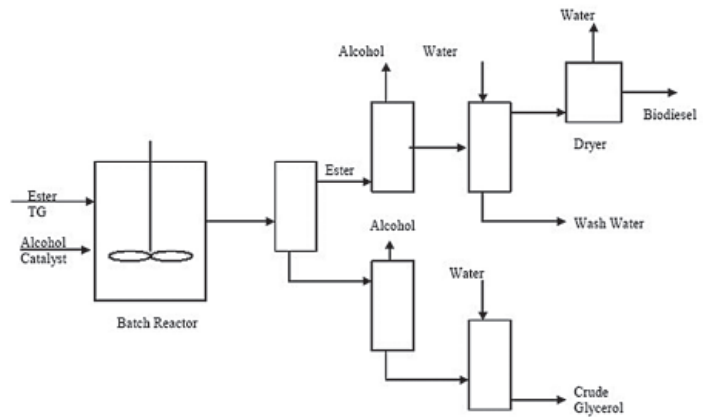
บทนำ

ในการผลิตน้ำมันดีเซลจากพืชหรือการทำไบโอดีเซลนั้น ขั้นตอนหรือกระบวนการการผลิตที่มีความสำคัญอย่างหนึ่ง คือขั้นตอนการทำปฏิกิริยากวนสารละลาย ที่จะนำมาทำไบโอดีเซลซึ่งได้แก่ สารละลายแอลกอฮอล์ (อาจเป็นเมทิลแอลกอฮอล์ หรือ เอทิลแอลกอฮอล์) + กรดหรือด่าง (เช่น ด่างโซเดียมไฮดรอกไซด์, NaOH หรือโปแตสเซียม ไฮดรอกไซด์, KOH) และ น้ำมันพืช หรือน้ำมันใช้แล้ว หลักการทำงานของระบบดังปฏิกิริยาซึ่งกำลังใช้อยู่ในปัจจุบัน เป็นหัวใจสำคัญของการทำให้เกิดปฏิกิริยา Transesterification หรือปฏิกิริยาจากการผสมกันของสารละลาย เมทานอล + โซเดียมไฮดรอกไซด์ (เรียกอีกอย่างว่า เมทอกไซด์) กับน้ำมันที่จะกลายมาเป็นไบโอดีเซล เช่น น้ำมันปาล์ม น้ำมันมะพร้าว หรือน้ำมันที่ผ่านการใช้แล้ว เช่น น้ำมันที่ผ่านการใช้ทอดไก่ หรือ ปาท่องโก๋ เป็นต้น

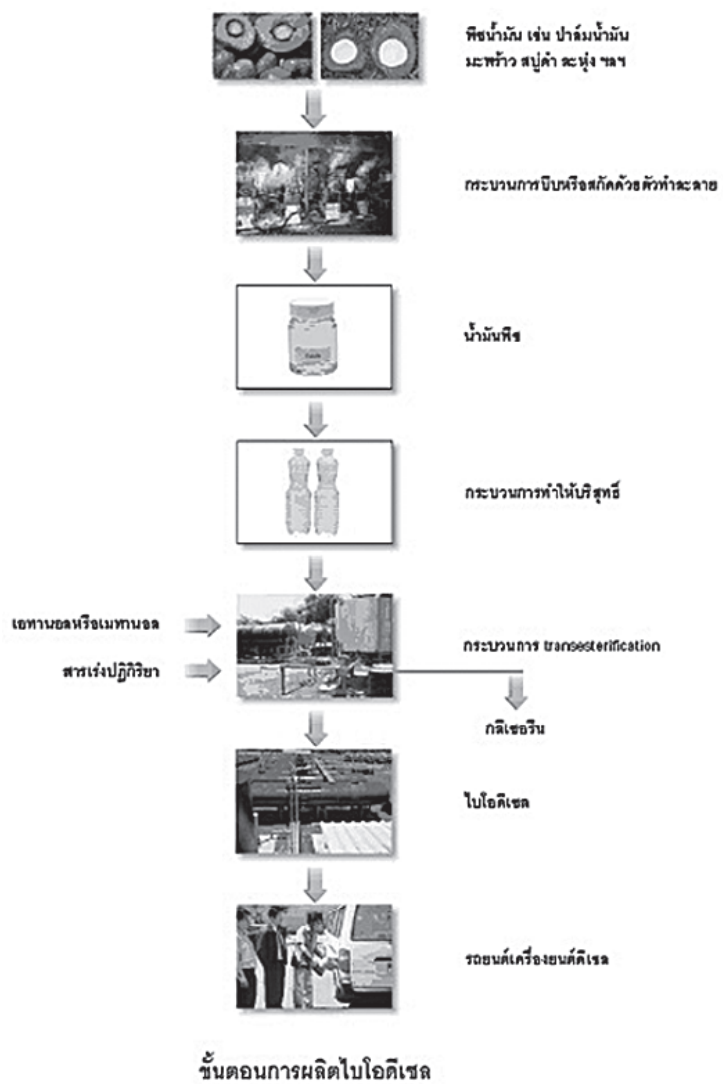
ระบบผลิตชนิดกึ่งปฏิบัติการ (Batch Processing)

วิธีการที่ง่ายและสะดวกที่สุด ในการผลิตเอสเทอร์คือการผลิตโดยใช้ระบบปฏิบัติการแบบถังกวน (Stirred Tank Reactor) โดยสัดส่วนของแอลกอฮอล์ต่อน้ำมันพืชจากส่วนใหญ่ที่ทำกันอยู่ที่ 4 : 1 ถึง 20 : 1 (โมล : โมล) และที่ทำกันแพร่หลายอยู่ที่อัตราส่วน 6 : 1 และถึงปฏิบัติการที่ใช้ อาจจะมีการใช้ Reflux Condenser (อุปกรณ์กลั่นไอระเหยของแอลกอฮอล์) ร่วมด้วย สำหรับอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาปกติแล้วอยู่ที่อุณหภูมิ 65 °C หรือบางแห่งมีการใช้ความร้อนตั้งแต่ 25 °C ถึง 85 °C เป็นต้น ส่วนสารเร่งปฏิกิริยานั้นทั่วไปจะใช้ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide) หรือ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Potassium hydroxide) มีสัดส่วนอยู่ที่ประมาณ 0.3% ถึง 3 %

ในการเริ่มต้นของการทำปฏิกิริยา จะต้องทำการผสมคลุกเคล้ากันของน้ำมันสารเร่งปฏิกิริยาและแอลกอฮอล์อย่างทั่วถึง จนเมื่อปฏิกิริยาเสร็จสิ้นสมบูรณ์จึงปล่อยให้กลีเซอริน ตกตะกอน เอสเทอร์ที่ได้จะอยู่ที่ระหว่าง 85% ถึง 94% ส่วนอีกวิธีการหนึ่งสามารถทำปฏิกิริยาแบบสองขั้นตอน (Two-Step Reaction) กล่าวคือมีการแยกกลีเซอรินออกมาก่อนในระหว่างกระบวนการ ซึ่งวิธีนี้จะช่วยเพิ่มปริมาณเอสเทอร์ที่ได้เกินกว่า 95 % อีกสิ่งหนึ่งที่จะช่วยเสริมให้ปฏิกิริยามีความสมบูรณ์เพิ่มขึ้นคือการใช้อุณหภูมิ และอัตราส่วนระหว่างสารเร่งปฏิกิริยาต่อแอลกอฮอล์ ที่สูงขึ้นกว่าเดิมได้เช่นกัน ปกติแล้วเวลาที่ใช้ในการ ทำปฏิกิริยาจะอยู่ระหว่าง 20 นาที ถึง 1 ชั่วโมง



ภาพ Flow diagram แสดงกระบวนการแบบ Batch



จากรูป ในขั้นตอนแรกน้ำมันพืชถูกสูบเข้าไปในระบบ แล้วตามด้วยสารเร่งปฏิกิริยาและแอลกอฮอล์ จากนั้นจึงทำการกวนในระบบเพื่อทำปฏิกิริยา หลังจากเสร็จสิ้นการทำปฏิกิริยาอย่างสมบูรณ์แล้ว จึงปล่อยสารผสมของน้ำมันและแอลกอฮอล์ + สารเร่งปฏิกิริยาทิ้งไว้เพื่อให้เกิดการแยกชั้นกันของเอสเทอร์ดิบและกลีเซอริน ในบางระบบสำหรับขั้นตอนนี้ สารผสมนี้อาจจะถูกสูบเข้าสู่ถังตกตะกอน หรือสูบเข้าสู่เครื่องแยกของเหลว (Centrifugal Separator) ต่อไปก็ได้เช่นกัน ส่วนการแยกแอลกอฮอล์ออกจากกลีเซอรินและเอสเทอร์ จะใช้ระบบ Evaporator หรือ ระบบ Flash ก็ได้ จากนั้นทำเอสเทอร์ให้เป็นกลางด้วยการล้างด้วยน้ำอุ่นที่มีความเป็นกรดเล็กน้อย เพื่อช่วยในการล้างเมทิลแอลกอฮอล์และเกลือ ที่ยังคงตกค้างอยู่ในเอสเทอร์ แล้วจึงส่งเอสเทอร์หรือไบโอดีเซลที่แห้งแล้ว เข้าสู่ถังเก็บต่อไป สำหรับกลีเซอรินก็ทำแบบเดียวกันคือนำไปผ่านกระบวนการล้างด้วยน้ำ แล้วจึงส่งเข้ากระบวนการทำให้บริสุทธิ์ต่อไป



ระบบผลิตไบโอดีเซลโดยใช้น้ำมันพืชใช้แล้วเป็นวัตถุดิบ
ณ โครงการสวนพระองค์ สวนจิตรลดา

สำหรับการทำไบโอดีเซลจากไขมันสัตว์ระบบจะต้องมีการดัดแปลงเล็กน้อย โดยต้องเพิ่มระบบการทำเอสเทอร์ฟิเคชันด้วยกรด (Acid Esterification Vessel) และมีถังเก็บสำหรับสารเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรด (Acid Catalyst) วัตถุดิบที่ใช้ควรทำให้ความชื้นลดลง (ให้มีความชื้นสูงสุดแค่ 0.4 %) และกรอกก่อนทำการสูบเข้าสู่ถังเอสเทอร์ฟิเคชัน (Esterification Vessel) จากนั้นจึงเติมสารละลายผสมระหว่างกรดซัลฟูริก + เมทานอล และจึงทำการกวนคลุกเคล้าให้เข้ากัน โดยมีอุณหภูมิในระบบเหมือนกับในกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน บางระบบอาจทำปฏิกิริยาภายใต้ความดันหรือ อาจมีการเติมตัวทำละลายอื่นร่วมด้วยก็ได้ กระบวนการแบบนี้จะคงยังไม่เกิดกลีเซอริน

ถ้าต้องการทำการ Treatment แบบ 2 ขั้นตอนด้วยกรด (Two-Step Acid Treatment) ต้องทำการกวนจนกระทั่งเกิดการแยกตัวของเมทานอล และกำจัดเมทานอลออกไปแล้วจึงเติมสารผสมระหว่างเมทานอลและกรดซัลฟูริกใหม่ และทำการกวนสารอีกครั้งหนึ่ง เมื่อการแปรรูปของกรดไขมันเป็นเมทิลเอสเทอร์ถึงจุดสมดุลแล้ว จึงแยกสารผสมของเมทานอล/น้ำ/กรด ด้วยการปล่อยให้ตกตะกอนแยกชั้นออกมา หรือแยกด้วยเครื่องแยกก็ได้ ส่วนน้ำมันที่ผ่านการ Treatment แล้วในถังสามารถนำไปผ่านกระบวนการทำให้เป็นกลางหรือ ส่งต่อเข้าสู่กระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน เพื่อทำการแปรรูป เป็นไบโอดีเซลต่อไป

การผสมกันเกิดขึ้นจากการกวนของไบพัตซึ่งติดกับมอเตอร์ โดยอาจมีไบพัตมากกว่า 1 ตัวก็ได้ ภายใต้อุณหภูมิ 60-70 °C หลังจากที่ทำปฏิกิริยากันแล้ว จะทำให้เกิดการแยกตัวของสารผสม ทำให้ได้กลีเซอริน (Glycerine) และเมทิลเอสเทอร์ (Methyl Ester) ออกมา จากนั้น จึงนำเมทิลเอสเทอร์ที่ได้มาผ่านกระบวนการ ที่เรียกว่า 'Wash' ซึ่งจะเป็นการทำให้สารเมทานอลที่ยังตกค้างสลายตัวไป และได้น้ำมันไบโอดีเซลซึ่งพร้อมที่จะนำไปผสมกับน้ำมันดีเซลที่จำหน่ายในท้องตลาด ในสัดส่วนต่าง ๆ เพื่อใช้กับรถยนต์ตามต้องการ



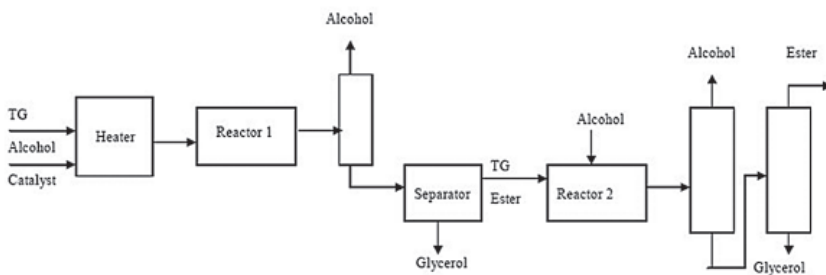
ระบบผลิตไบโอดีเซลแบบกึ่งต่อเนื่อง
ของกรมอุทการเรือ ใช้น้ำมันปาล์มเป็น
วัตถุดิบ

จะเห็นว่า กลไกหลักในการก่อให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมี เพื่อให้ได้ไบโอดีเซลนั้น คือ ความร้อน การกวน และคลุกเคล้ากันของสาร ซึ่งถ้ามีการผสมที่ดีนั้น ก็จะเป็นผลดีต่อการเกิดปฏิกิริยาทางเคมี

ระบบผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่อง (Continuous Process Systems)

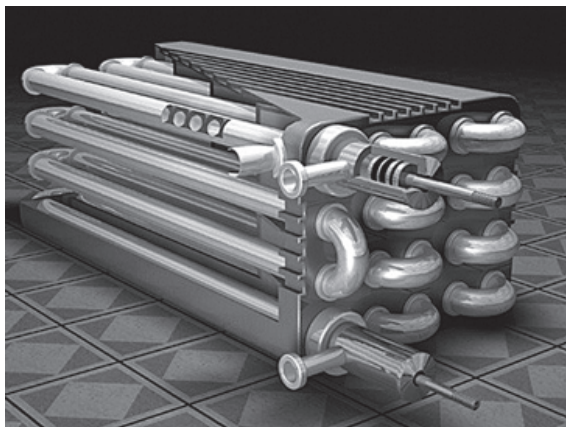
คณะวิจัยของกรมอุทการเรือ ได้ทำการศึกษาวิจัยถึงการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบผลิตไบโอดีเซล โดยมีระบบที่อาจแตกต่างออกไปจากเดิม หรือวิธีการอื่น ๆ ที่มีความเป็นไปได้ในการเร่งกระบวนการผลิตให้สูงขึ้น ซึ่งจากการทำ Literature Review บทความเอกสารของในประเทศ และต่างประเทศ ได้พบหลากหลายวิธีการ ไม่ว่าจะเป็นการนำคลื่น Ultrasonic Wave มาช่วยในการเร่งกระบวนการทำปฏิกิริยาหรือแม้แต่การใช้ Ultrasonic Wave ในการช่วยเร่งการตกตะกอนของกลีเซอริน และกระบวนการผลิตไบโอดีเซลแบบ Supercritical Pressure ซึ่งวิธีการดังกล่าวนี้ทั้งหมด ถึงแม้จะสามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีเป็นไบโอดีเซลได้อย่างรวดเร็วสูงเพียงใดก็ตาม แต่อุปสรรคยังคงมีอยู่ที่ค่าใช้จ่ายที่สูงมาก ไม่คุ้มค่าต่อการลงทุนเพื่อสร้างเป็นต้นแบบสำหรับชุมชน ทางเลือกของระบบผลิตที่มีความเป็นไปได้สูงในการนำมาประยุกต์ใช้เพื่อชุมชน คือ ระบบปฏิกรณ์โดยอาศัยการไหลแบบ Plug Flow ร่วมกับการสั่นของคลื่นความถี่ต่ำของ Oscillator จึงเป็นที่มาของการวิจัยระบบผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่อง ซึ่งเพิ่มเติมเข้ามาในโครงการวิจัยและพัฒนาของกรมอุทการเรือ

ระบบผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่อง (Continuous Process Systems) เป็นอีกหนึ่งรูปแบบที่แตกต่างของกระบวนการแบบ Batch คือ กระบวนการผลิตแบบต่อเนื่องโดยการใช้ถังปฏิกรณ์วางเรียงต่อกันแบบอนุกรม (Continuous Stirred Tank Reactors, CSTRs) ระบบแบบ CSTRs สามารถปรับเปลี่ยน ปริมาตรหรือ ปริมาณของของเหลว เพื่อให้มี Residence Time ใน CSTRs สูงขึ้น ทำให้การเกิดปฏิกิริยาในถังสมบูรณ์ขึ้น เมื่อกระบวนการใน CSTRs1 จบสิ้นลงและได้คัดแยก กลีเซอรินออกไปแล้ว จึงส่งต่อเข้าสู่ CSTRs 2 เพื่อทำปฏิกิริยากันอีกครั้ง แต่ในขั้นที่ 2 นี้จะค่อนข้างรวดเร็ว ซึ่งสามารถทำให้เกิดความสมบูรณ์ของปฏิกิริยา ได้สูงถึง 98 %



ภาพ Flow diagram แสดงกระบวนการแบบต่อเนื่อง

สิ่งสำคัญในการออกแบบระบบ CSTR คือ การฉีดส่วนผสมเข้าไปในระบบอย่างถูกต้อง และต้องทำให้แน่ใจว่าอัตราการอินพุต ของสารมีสัดส่วนคงที่อย่างต่อเนื่องด้วยตลอดเวลา ปัจจุบันมีหลายวิธีการในการผสมของเหลวอย่างรุนแรง ไม่ว่าจะเป็นการใช้ปั๊มชนิดทอยโซ่ง หรือ เครื่อง Mixer ชนิดต่าง ๆ กัน เพื่อให้เกิดกระบวนการทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน แทนวิธีการกวนทำให้เกิดปฏิกิริยาในถังแบบที่ใช้กันทั่วไป สามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาขึ้นในรูปแบบท่อได้ มีลักษณะการทำงานกล่าวคือของเหลวผสม ที่จะทำปฏิกิริยาเคลื่อนที่ผ่านเครื่องปฏิกรณ์ในรูปแบบการไหลแบบ Plug Flow อย่างต่อเนื่อง มีการผสมหรือสั่นในทิศทางแนวแกน ซึ่งเราเรียกระบบนี้ว่า “Plug-Flow Reactor” (PFR) การทำงานเหมือนกับต่อระบบ CSTRs ขนาดเล็กเข้าด้วยกันแบบอนุกรม

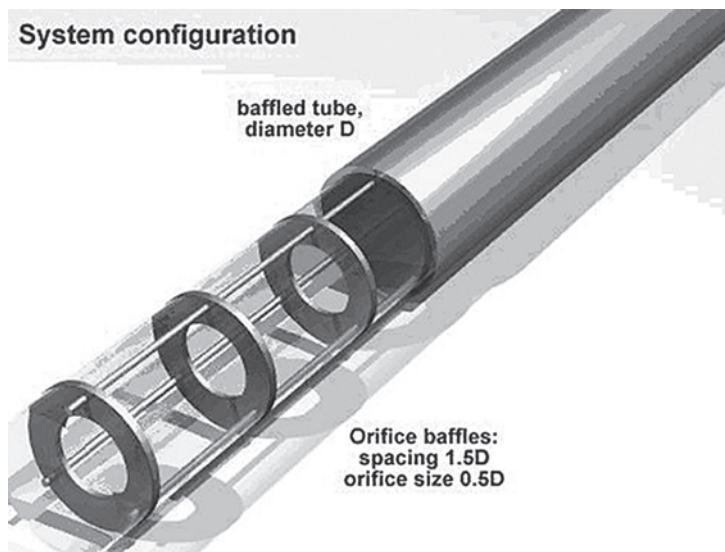


ภาพ กราฟิกแสดงระบบปฏิกรณ์แบบ Plug Flow

ข้อดีของการใช้ระบบแบบต่อเนื่องชนิด Plug Flow คือ มี Residence Time ที่สั้นแค่ 6 ถึง 10 นาที ปฏิกิริยาเกือบมีความสมบูรณ์แล้ว นอกจากนี้ ระบบแบบ PFRs ยังสามารถแบ่งออกเป็นขั้นตอนเพื่อให้เกิดการแยกตัวของกลีเซอริน โดยปกติแล้ว การปฏิบัติงานของระบบแบบนี้ ควรจะเพิ่มอุณหภูมิ และความดันให้สูงขึ้นด้วยเพื่อเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยา

ระบบผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่อง ซึ่งกรมอุตสาหกรรมเรือทำการวิจัยและพัฒนาขึ้นมีลักษณะเด่นคือ การนำเทคนิคการผสมอย่างปั่นป่วนโดยการไหลของ Mixture แบบ Plug Flow ระบบนี้เป็นอีกรูปแบบหนึ่งของการผสมของของไหลหรือสารละลายเพื่อให้เกิดการคลุกเคล้าเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาการแยกตัวของกลีเซอริน และเมทิลเอสเตอร์ โดยการทำให้ของไหลเกิดการสั่นด้วยความถี่ต่ำ (Low Frequency Oscillation) ร่วมกับการทำให้ของไหลไหลผ่าน Orifice Plate ซึ่งวางเรียงซ้อนกันเป็นจำนวนมาก ทำให้เกิดกระแสน้ำวนเล็ก ๆ ขึ้นจำนวนมากภายในแต่ละช่องระหว่าง Orifice Plate เหล่านั้น ขณะที่ของไหลกำลังไหลผ่านไป ทฤษฎีที่นำมาประยุกต์ใช้ คือ ทฤษฎีการผสมของไหลแบบสั่น หรือภาษาอังกฤษเรียกว่า Oscillatory Flow Mixing หรือ OFM จะเกิดขึ้นเมื่อของไหลภายในท่อถูกทำให้เกิดการสั่น (Oscillate) ด้วยความถี่ระหว่าง 0.5 ถึง 15 Hz ด้วยแอมพลิจูดขนาด 1 ถึง 100 มม. ภายใน Baffled Tube (ท่อซึ่งมีแผ่นโลหะ Orifice Plate กลมกั้นเป็นชั้น ๆ อยู่ภายใน)

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจากการเคลื่อนตัวของของไหลแบบ Oscillatory ผ่าน Baffled Tube แต่ละตัว จะทำให้เกิดกระแสวนขึ้น (Vortices) จำนวนมาก ซึ่งกระแสวนเล็ก ๆ เหล่านี้ จะช่วยให้การคลุกเคล้าตัวของของไหลเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ ภายในช่องว่างระหว่าง Orifice Plate เหล่านั้น จากรูปภาพที่แสดงถึงโครงสร้างของกระแสวนที่เกิดขึ้นในช่องว่างระหว่าง Baffle ภายในท่อ ด้วยจำนวนช่องที่ทำให้การผสมมีจำนวนมากกว่าความยาวของท่อ จึงทำให้มีการคลุกเคล้าที่มีประสิทธิภาพภายในท่อทั้งระบบหลักการง่าย ๆ เช่นนี้ สามารถนำมาใช้แทนการผสมสารด้วยเครื่องกวนด้วยใบพัดได้อีก ทั้งสามารถทำให้การผสมดำเนินไปได้อย่างรวดเร็วและต่อเนื่อง



ท่อ Baffled Tube และ Orifice Plate ภายในท่อทำปฏิกิริยา

การเลือกรูปทรงของ Baffle ปกติแล้วต้องพิจารณาให้ มีค่า Frictional Loss ที่ต่ำที่สุด แต่ขณะเดียวกันควรให้ ประสิทธิภาพการผสมสูงสุด แผ่น Baffles จะถูกวางเรียงซ้อน โดยมีระยะห่างเท่า ๆ กัน อยู่ในช่วง 1 - 2 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของของท่อที่ใช้ ค่า Fractional Baffle Open Area, S ควรจะอยู่ในช่วง 0.2 - 0.5 ซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแผ่น Orifice จากรูปด้านบนแสดงถึงขนาด รูปทรงมาตรฐาน ซึ่งมีระยะห่างระหว่าง Baffles เท่ากับ 1.5 ของขนาดท่อ และ มีขนาดของ Baffle Orifice เป็นครึ่งหนึ่งของท่อ จึงได้ค่า $S = 0.25$



กระแสวนภายในแต่ละช่องว่างของท่อ

เพื่อเป็นการกำหนดคุณลักษณะของการผสมในเครื่องปฏิกรณ์ชนิดนี้ จึงต้องกำหนดตัวแปรไร้มิติ คือ Net Flow Reynolds Number, Re_n และ Oscillatory Reynolds Number, Re_o ดังนี้

$$Re_o = \frac{x_o \omega d \rho}{\mu} \quad (1)$$

$$Re_n = \frac{\rho d u}{\mu} \quad (2)$$

สำหรับการสั่นของคลื่นจะเป็นลักษณะ Sinusoidal Oscillation โดยที่ x_o คือ แอมพลิจูดของการสั่น Centre-to-peak, ω คือ ความถี่ของการสั่น (Frequency of Oscillation), d คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ (Tube Diameter), ρ คือ ความหนาแน่น (Density) และ μ คือ

ความหนืด (Viscosity) Re_o มีค่าคล้ายคลึงกับค่าสำหรับ Steady Flows ยกเว้นเทอมของ Velocity ที่ใช้ในสมการ คือ ค่า Velocity สูงสุดของการสั่นแบบ Sinusoidal Oscillation

มีข้อแตกต่างของการไหลในลักษณะ Steady Flows กับ Oscillatory Flows โดยการไหลแบบ Steady Flows จะเกิดการเปลี่ยนรูปแบบการไหลเป็น Turbulence ขึ้นเมื่อค่า $Re = 2100$ ในขณะที่การเกิด Flow Separation ของ Oscillatory Flows เกิดขึ้นเมื่อค่า Re_o อยู่ที่ช่วงระหว่าง 50 -100 ส่วนค่า Net Flow Reynolds Number, Re_n คือ ค่าการไหลภายนอกโดยรวมโดยที่ u ความเร็วของของไหลภายนอกซึ่งขึ้นอยู่กับ Throughput

สามารถเชื่อมโยงความสัมพันธ์ระหว่าง Oscillatory Flow และ Net Flow ได้ค่าอัตราส่วนของความเร็ว หรือ Velocity Ratio ได้ดังนี้

$$\psi = \frac{Re_o}{Re_n} = \frac{x_o \omega}{u} = \frac{2\pi f x_o}{u} \quad (3)$$

โดยทฤษฎีแล้วค่า ψ ควรมีค่าสูงกว่า 2 เพื่อที่จะเกิด Vortex ขึ้นในการไหลของ Oscillatory Flow ได้อย่างครบวงจร และ หัวใจสำคัญของการผสมแบบ Oscillatory Flow Mixing คือ ความสามารถในการควบคุม Intensity ของการผสมได้อย่างแน่นอน ด้วยการเปลี่ยนแปลงความถี่ (Frequency) และ แอมพลิจูด (Amplitude) ซึ่งจะทำให้ได้สภาพของการผสมที่หลากหลาย ตั้งแต่การผสมแบบ “Soft Mixing” ที่มี Re_o อยู่ในช่วง 50-500 จนถึงการผสมที่รุนแรงกว่าที่อาจมี Re_o ที่สูงกว่า 5,000 ปกติแล้วในระหว่างกระบวนการปฏิกริยา ค่า ψ ควรจะอยู่ในช่วงระหว่าง 2-6 เพื่อการผสมแบบ Plug Flow ที่ถูกต้อง

ความสามารถในการผลิตไบโอดีเซลได้อย่างต่อเนื่องนี้เป็นข้อได้เปรียบที่เหนือกว่า ระบบแบบถังกวน ในเรื่องของปริมาณการผลิตที่รวดเร็วกว่า และการผสมคลุกเคล้าตัวของสารที่มีประสิทธิภาพ ระบบผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่อง ซึ่งกรมอุตสาหกรรมกำลังวิจัยและพัฒนาอยู่ขณะนี้อยู่ในขั้นทดลอง และ กำลังดำเนินการผลิตต้นแบบอยู่ ซึ่งคาดว่าจะสามารถขยายขนาดของระบบให้มีกำลังการผลิตที่สูงขึ้นต่อไป



ข้อดีของการใช้ระบบ OFM มีดังนี้

1) ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการส่งถ่ายมวลและความร้อน (Heat and Mass Transfer) คุณภาพของกระบวนการผสมทั้งหมดนี้จะถูกควบคุม จากการ Oscillate ภายในท่อ ไม่ใช่จากแค่การไหลผ่านไปของของไหลเท่านั้น

2) การผสมจะเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพก็ต่อเมื่อของไหลมีอัตราการไหลต่ำ (Low Bulk Flowrate) ระบบ OFM สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับงานได้หลายด้านที่เกี่ยวข้องกับการผสม เช่น การใช้ใน Chemical and Process Engineering และ ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตไบโอดีเซล เป็นต้น

3) เป็นการผสมและทำปฏิกริยากันได้อย่างทั่วถึง (Uniformity of Mixing) เพราะกระแสวนหรือ Vortex ที่เกิดขึ้นในกระบวนการทำปฏิกริยาดำเนินไป

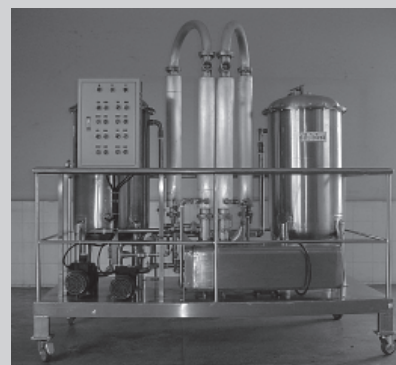
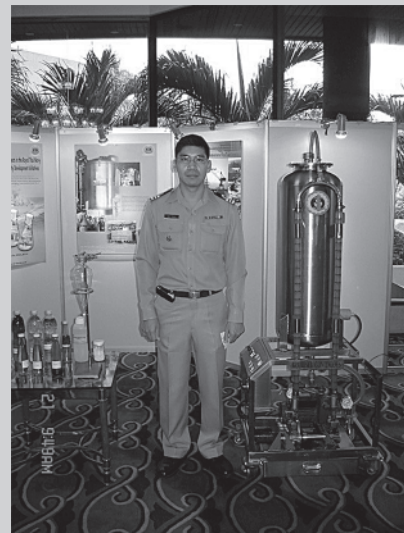
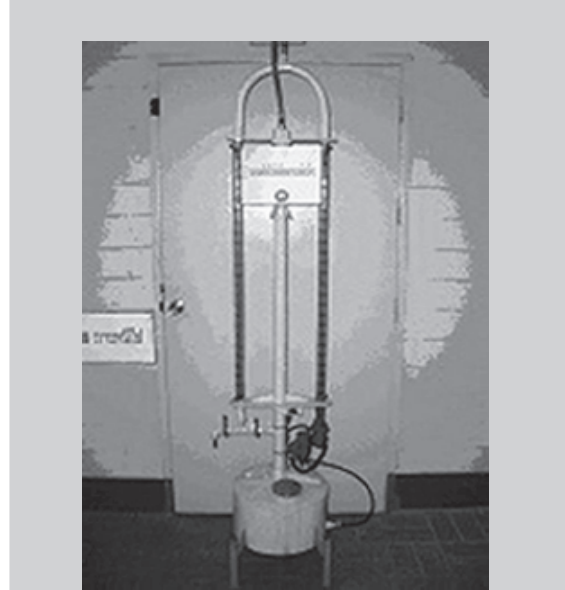
พร้อมกับการไหลผ่านท่อ ทั้งความเร็ว (Velocities) และ ความเครียด (Strain Rates) อัตราความเครียดเท่ากันในทิศ Radial และ Axial Directions ทำให้ได้ผลผลิตที่มีการผสมอย่างเป็น Uniformity

4) เหมาะสำหรับการผสมแบบ Two-Phase Mixing ซึ่งสารทั้งสองชนิดผสมเข้ากันได้ยาก (Immiscible Reactants) โดยธรรมชาติ

5) เมื่อนำมาใช้ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซล ทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีที่สมบูรณ์ในกระบวนการ Transesterification ช่วยทำให้เกิดการแยกตัวระหว่างไบโอดีเซลและกลีเซอริน อย่างสมบูรณ์ (Complete Chemical Reaction) ส่งผลให้กระบวนการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ (Biodiesel Purification) สามารถทำได้ง่ายขึ้น และได้ไบโอดีเซลที่มีความบริสุทธิ์สูงขึ้นเช่นกัน

การสร้างแบบจำลอง

ในเบื้องต้นของการวิจัยระบบผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องมีการสร้างแบบจำลองหรือ Model ขึ้นมาเพื่อการพิสูจน์ทฤษฎี ศึกษาวิเคราะห์ความเป็นไปได้ของระบบผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องแบบใหม่โดยใช้วัสดุอุปกรณ์ที่หาได้ง่ายภายในกรมอุทกหารเรือ สามารถนำมาประยุกต์ใช้ ทดลองได้อย่างรวดเร็ว มีความสะดวกในการทดลองและสาธิต จากนั้นจึงทำการขยายขนาดกำลังการผลิต จากเดิมที่ใช้ท่อปฏิกิริยาขนาด 1 นิ้ว เป็นการใช้ท่อขนาด 2 นิ้ว และมีความยาวท่อสูงขึ้นกว่าเดิม ซึ่งจะทำให้มีกำลังการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลสูงขึ้นและมีคุณภาพดีด้วยเช่นเดียวกัน



ระบบผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่อง

ระบบผลิตไบโอดีเซลแบบอื่นๆ

ระบบผลิตไบโอดีเซลจากกรดไขมันอิสระสูง (High Free Fatty Acid Systems)

กรดไขมันอิสระสูง จะเกิดเป็นสบู่เมื่อทำปฏิกิริยากับตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเบสในระบบเร่งปฏิกิริยาด้วยเบส (Base Catalyzed System) ปริมาณกรดไขมันอิสระสูงสุดที่สามารถยอมรับได้ในระบบ ควรต่อน้อยกว่าร้อยละ 2 หรือ จะดียิ่งขึ้นถ้ามีน้อยกว่าร้อยละ 1 (ในการใช้วัตถุดิบที่มีกรดไขมันอิสระสูง) แต่เมื่อใช้วิธีการดังกล่าว ในการทำให้กรดไขมันอิสระมีความบริสุทธิ์ โดยใช้ระบบเอสเทอร์ฟิเคชันด้วยกรด (Acid Esterification) โดยการเติมสารที่มีฤทธิ์เป็นกรด (Caustic) ลงไปในวัตถุดิบเป็นผลให้สบู่ถูกแยกออกมาด้วยการใช้เครื่องแยก (Centrifuge) วิธีการดังกล่าว เราเรียกว่า “Caustic Stripping”

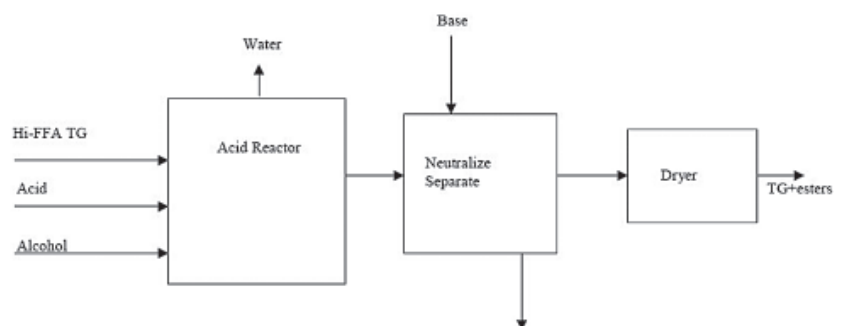
ไตรกลีเซอไรด์บางส่วนหลุดไปกับสบู่ระหว่างกระบวนการ “Caustic Stripping” ส่วนผสมของสบู่สามารถทำให้เป็นกรดอ่อน ๆ เพื่อดึงกรดไขมันและน้ำมันที่สูญเสียไปกลับคืนมาได้ โดยการทำปฏิกิริยาในถังปฏิกรณ์ต่างหากได้ จากนั้นจึงทำน้ำมันที่บริสุทธิ์แล้ว ให้ปราศจากน้ำแล้วจึงส่งต่อเข้าสู่ระบบทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน (Transesterification Unit) เพื่อผ่านกระบวนการอื่น ๆ ต่อไป

อย่างไรก็ตามแทนที่จะมีการสูญเสียกรดไขมันอิสระที่ถูกแยกออกไปในลักษณะนี้ สามารถทำการแปรรูปเป็นเมทิลเอสเทอร์ได้โดยกระบวนการเอสเทอร์ฟิเคชันด้วยกรด ตามที่บรรยายไว้ข้างต้น กระบวนการ Acid Catalyzed สามารถนำมาใช้ได้โดยตรงกับการทำเอสเทอร์ฟิเคชันกับกรดไขมันอิสระในวัตถุดิบที่มี FFA สูง วัตถุดิบที่มีราคาถูกกว่า เช่น ไขมันสัตว์ไขมันหมู ก็ถูกจำแนกไว้ว่ามี FFA สูงเช่นกัน ไม่เกิน 15 % แต่บางครั้งก็อาจเกินมาตรฐานนี้ได้

กระบวนการเอสเทอร์ฟิเคชันด้วยกรดโดยตรง กับกรดไขมันอิสระสูง จำเป็นต้องทำการกำจัดน้ำออกไปในระหว่างการทำปฏิกิริยา มิฉะนั้นแล้วกระบวนการเกิดปฏิกิริยาจะไม่สมบูรณ์ นอกจากนี้ อัตราส่วนระหว่าง High Alcohol ต่อ FFA ปกติแล้วจะอยู่ระหว่าง 20 : 1 และ 40 : 1 และการทำเอสเทอร์ฟิเคชันโดยตรง อาจจำเป็นต้องใช้ปริมาณสารเร่งปฏิกิริยากรดสูง ซึ่งจะมีปริมาณเท่าไรนั้นขึ้นอยู่กับกระบวนการทางเคมีที่ใช้

ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันระหว่าง FFAs กับเมทานอลทำให้เกิดน้ำ ซึ่งเป็น By product จำเป็นต้องถูกกำจัดออกไป แต่สารที่ผสมกันระหว่างเอสเทอร์และไตรกลีเซอไรด์นั้น สามารถนำมาใช้โดยตรงในระบบ Base Catalyzed ซึ่งน้ำที่เกิดขึ้น สามารถแยกออกไปโดยกระบวนการทำให้เป็นไอ (Vaporization) การตกตะกอน (Settling) หรือด้วยการเหวี่ยงแยก (Centrifugation) ในลักษณะสารผสมของเมทานอล-น้ำ และด้วยระบบกระแสไหลสวนทางแบบต่อเนื่อง (Counter-Current Continuous-Flow Systems) จะช่วยในการล้างน้ำออกไปด้วยกระแสของเมทานอลกรด

จากรูปข้างล่างแสดงถึงกระบวนการ Acid Catalyzed และกระบวนการเอสเทอร์ฟิเคชันโดยตรง

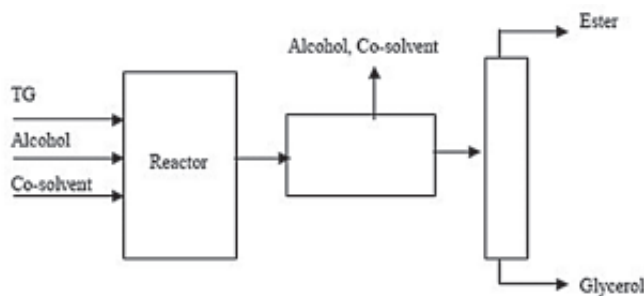


Acid Catalyzed Direct Esterification process

ระบบแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโดยกระบวนการ Biox Co-Solvent

ทางเลือกการใช้ Co-Solvent เป็นอีกวิธีการหนึ่ง เพื่อแก้ปัญหาการเกิดปฏิกิริยาที่ช้า อันเนื่องมาจาก ความสามารถในการผสมที่ต่ำของแอลกอฮอล์ในไตรกลีเซอไรด์เฟส วิธีการนี้เหมาะสมสำหรับการผลิตในเชิงพาณิชย์ เรียกว่า กระบวนการ “Biox Process” สำหรับกระบวนการนี้ เป็นการใช้ Co-Solvent และสาร Tetrahydrofuran (THF) เพื่อช่วยในการละลายในเมทานอล ผลที่ได้คือการเกิดปฏิกิริยาที่รวดเร็ว ภายในช่วง 5 ถึง 10 นาที ที่ดียิ่งกว่า นั้นหลังการเกิดปฏิกิริยา จะไม่มีตะกอนของตัวเร่งปฏิกิริยาหลงเหลืออยู่ทั้งในเอสเทอร์ และ กลีเซอรอลเฟส สาเหตุหนึ่งที่ต้องเลือกใช้ THF เป็น Co-Solvent เพราะมีอุณหภูมิจุดเดือดใกล้เคียงกับเมทานอลมาก เมื่อปฏิกิริยาเสร็จสิ้นสมบูรณ์แล้ว สามารถดึงเมทานอลส่วนเกินและ THF Co-Solvent กลับคืนมาได้ในขั้นตอนเดียวกัน นอกจากนี้ ในกระบวนการของระบบดังกล่าว ใช้อุณหภูมิแค่ 30°C ซึ่งไม่สูงมากนัก

เฟสการแยกตัวของ Ester-Glycerol มีความสะอาดและผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่ได้ไม่มีน้ำ และตัว Catalyst หลงเหลืออยู่ อย่างไรก็ตามขนาดปริมาตรของอุปกรณ์ต้องมีขนาดใหญ่ขึ้น แม้จะมีปริมาณการผลิตที่เท่ากัน ทั้งนี้ เพราะมีการเติม Co-Solvent เพิ่มเข้าไป ซึ่ง Co-Solvent ชนิดใดที่เป็นอันตราย และ/หรือ เป็นมลพิษทางอากาศ ต้องมีอุปกรณ์เครื่องมือชนิดพิเศษที่สามารถป้องกันการรั่วไหลของทั้งระบบรวมถึง ระบบ Recovery และ Recycling เมทานอล/Cosolvent ซึ่งจะคอยควบคุมการรั่วไหลของมลพิษต่าง ๆ ได้ และในขั้นตอนสุดท้ายต้องทำการแยก Co-Solvent ออกจากกลีเซอริน และไบโอดีเซล ให้หมดก่อนนำไปใช้งาน



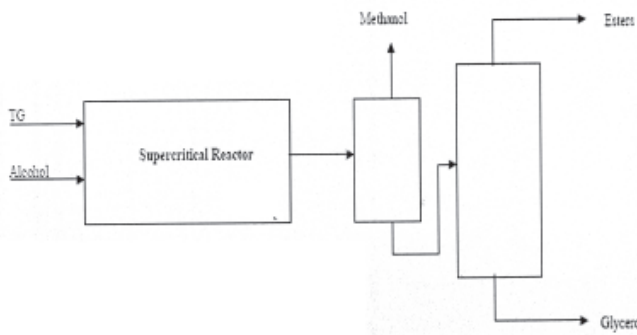
กระบวนการ Biox Co-Solvent Process

ระบบแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา โดยกระบวนการ Supercritical Esterification

ระบบผลิตไบโอดีเซลชนิดนี้ ใช้หลักการทางเทอร์โมไดนามิกส์ร่วมกับตัวกล่าวคือ เมื่อของเหลวหรือก๊าซ อยู่ภายใต้อุณหภูมิและความดันเกินจุดวิกฤต (Critical Point) คุณสมบัติของของไหลจะมีการเปลี่ยนแปลง กล่าวคือสภาพที่เป็นของเหลวและก๊าซร่วมกันอยู่ จะหมดไป เหลือแต่สภาพที่เป็นของเหลวปรากฏอยู่ กลุ่มสารละลายที่ประกอบด้วย Hydroxyl (OH) เช่น น้ำหรือแอลกอฮอล์ จะกลายเป็น Super-acids

ระบบผลิตชนิด Non-Catalytic มีการใช้อัตราส่วนระหว่างแอลกอฮอล์และน้ำมันที่สูงถึง 42 : 1 ภายใต้สภาพ Supercritical (ที่อุณหภูมิ 350 ถึง 400° C และ ที่ความดันสูงกว่า 80 atm หรือ 1200 psi) ปฏิกิริยาจะเสร็จสิ้นสมบูรณ์ภายใน 4 นาที อย่างไรก็ตามค่าใช้จ่ายในการติดตั้ง และ ปฏิบัติงานมีราคาสูงกว่า และมีการใช้พลังงานที่ค่อนข้างสูง

ตัวอย่างของระบบการทำงานชนิดนี้มีสาธิตอยู่ที่ประเทศญี่ปุ่น ซึ่งมีการใช้เมทานอลจำนวนมากกับน้ำมันพืชหลากหลายชนิด ทำปฏิกิริยาภายใต้อุณหภูมิและความดันสูงในช่วงระยะเวลาสั้น ๆ ผลที่ได้รับคือปฏิกิริยาที่รวดเร็วสามารถแยกเอสเทอร์ และกลีเซอรอล ภายใน 3 - 5 นาที อย่างไรก็ตามถึงแม้ผลที่ได้จะน่าดึงดูดในการผลิตเชิงพาณิชย์ แต่การขยายสเกลให้มีขนาดใหญ่ขึ้นไม่เป็นเรื่องง่ายนัก

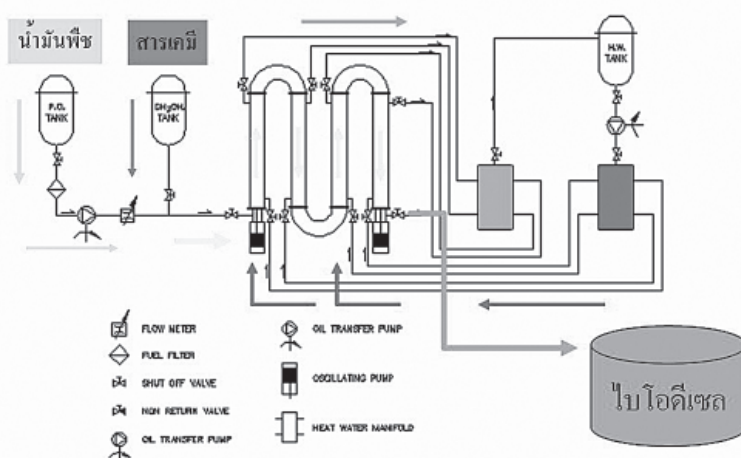


กระบวนการ Supercritical Esterification Process

ปกติแล้วคุณภาพของกลีเซอรินที่ได้ และคุณค่าในเชิง Coproduct เป็นตัวแปรทางเศรษฐศาสตร์ ที่สำคัญอันหนึ่ง กลีเซอรินที่ได้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล จะมีปริมาณอยู่ที่ 50% หรือน้อยกว่า และยังมีสิ่งปลอมปนอื่น ๆ อีก เช่น น้ำ เกลือ เมทานอล เมทิลเอสเทอร์ และกลีเซอไรด์อื่นที่ไม่ทำปฏิกิริยา รวมทั้งมี สี กลิ่น และสารประกอบอื่น ๆ รวมอยู่ด้วย ปกติเราเรียกรวม ๆ ว่าเป็น “Biodiesel Crude” ซึ่งมีราคาต่ำมาก เมื่อทำการแยกน้ำและเมทานอลออกไป จะทำให้มีปริมาณกลีเซอรินสูงขึ้นถึง 88% ซึ่งจะเป็นการเพิ่มมูลค่าของกลีเซอรินดิบได้ โดยเฉพาะเมื่อสามารถกำจัดเกลือ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง เกลือกำมะถัน หรือ เกลือโปแตสเซียม จะช่วยเพิ่มความบริสุทธิ์ ของกลีเซอรินดิบที่ผลิตได้

แนวทางในการขยายผล

สามารถขยายขนาดของระบบผลิตน้ำมันไบโอดีเซลแบบต่อเนื่อง ให้มีขนาดที่ใหญ่ขึ้นได้จาก 1 นิ้ว เป็น 2-4 นิ้ว เพื่อเพิ่มปริมาณการผลิตน้ำมันไบโอดีเซล ขณะนี้ทางกรมอุตสาหกรรมเรือกำลังสร้างต้นแบบของระบบซึ่งใช้ท่อขนาด 2 นิ้ว จะมีกำลังการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลสูงกว่าโมเดลถึง 2 เท่า



ผังระบบผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องของกรมอุตสาหกรรมเรือ

ระบบของต้นแบบนี้จะใช้ ลูกสูบจำนวนสองตัวทำหน้าที่เป็น Oscillator มีเครื่องทำความร้อนอยู่รอบนอกท่อซึ่งจะช่วยรักษาอุณหภูมิของน้ำมันให้คงที่ตลอดเวลาที่ 60-70°C ในอนาคตระบบแบบต่อเนื่องนี้ จะถูกนำมาใช้ในกระบวนการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลของกองทัพเรือ ซึ่งจะช่วยร่นระยะเวลาการผลิต แต่เพิ่มประสิทธิภาพในการผสมให้ดีขึ้น สามารถแทนที่ระบบถังกวนแบบเดิมได้

การใช้ระบบการผสมแบบ Plug Flow โดยการใช้ Oscillatory Flow Reactor สามารถควบคุมการผสมได้ดีกว่าแบบการผสมโดยใช้ถังปฏิกรณ์แบบ Batch อีกทั้งยังมีความยืดหยุ่นสูงกว่า สามารถนำเทคโนโลยีนี้ไปประยุกต์ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมให้ได้รับประโยชน์อย่างเต็มที่ในอุตสาหกรรมทางเคมีอื่น ๆ ไม่จำกัดเฉพาะกระบวนการผลิตน้ำมันไบโอดีเซล ซึ่งโดยปกติแล้วโรงงานอุตสาหกรรมส่วนใหญ่จะใช้ถังผสมแบบ Batch ซึ่งมีประสิทธิภาพไม่สูงนัก ตัวอย่างเช่น กระบวนการในอุตสาหกรรมขนาด 2 ตัน/ชั่วโมง ในรอบการทำงาน 12 ชั่วโมง จะต้องใช้ขนาดของ Reactor ที่มีขนาด 24 เมตร³ ซึ่งส่งผลต่อความจำเป็นต้องใช้เครื่องมือ อุปกรณ์ทำความร้อน และอุปกรณ์อื่น ๆ ต้องมีขนาดใหญ่ เป็นการสิ้นเปลืองโดยไม่จำเป็น แต่ถ้าใช้ระบบ Continuous Process ซึ่งต้องการช่วงเวลาในการทำปฏิกิริยาเพียงแค่ 2 ชั่วโมง และต้องการปฏิกรณ์ขนาดแค่ 4 เมตร³ ซึ่งทำให้ลดขนาด และความสิ้นเปลืองได้อย่างมีนัยสำคัญ

สรุป

กล่าวโดยสรุปคือมีหลากหลายทางเลือกในกระบวนการผลิตไบโอดีเซล ซึ่งเทคโนโลยีต่าง ๆ เหล่านี้ สามารถนำมาใช้ร่วมกันได้ ภายใต้สภาพการทำงาน และการใช้วัตถุดิบที่แตกต่างกัน ในการตัดสินใจว่าจะใช้เทคโนโลยีแบบไหน ขึ้นอยู่กับกำลังการผลิตที่ต้องการ ชนิด และคุณภาพของวัตถุดิบที่จะนำมาใช้ หรือวิธีการดึงแอลกอฮอล์ และตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ใหม่ ซึ่งปัจจัยหลักจริง ๆ ในการผลิตไบโอดีเซล คือราคาของวัตถุดิบ อย่างไรก็ตามกระบวนการเกิดปฏิกิริยาบางระบบเท่านั้น ที่สามารถจัดการกับวัตถุดิบที่มีความแตกต่างในด้านคุณภาพและคุณสมบัติได้ในขณะที่บางระบบไม่สามารถทำได้ นอกจากนี้การใช้แนวทางที่แตกต่างกันในกระบวนการเอสเทอร์ฟิเคชัน ส่งผลให้มีความต้องการระบบการผลิตที่แตกต่างกัน เช่น ความต้องการการใช้น้ำ หรือระบบปฏิบัติการที่ไม่เหมือนกัน โดยทั่วไประบบผลิตที่มีกำลังการผลิตไม่สูงมาก และใช้วัตถุดิบที่มีคุณภาพต่าง ๆ กัน ควรใช้ระบบการผลิตแบบถังกวน (Batch Systems) สำหรับระบบผลิตแบบต่อเนื่อง หรือ Continuous Systems เหมาะสำหรับการผลิตที่สูงขึ้น ซึ่งส่งผลให้มีความต้องการเจ้าหน้าที่จำนวนมากขึ้น และต้องการวัตถุดิบที่มีคุณภาพคงที่มากกว่า

เอกสารอ้างอิง

1. คณะกรรมาธิการพลังงาน สภาผู้แทนราษฎร “พลังงานทดแทน เอทานอล และ ไบโอดีเซล”, หนังสือเฉลิมพระเกียรติ พระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัว เนื่องในวโรกาสวันเฉลิมพระชนมพรรษา 5 ธันวาคม 2545
2. A.P.Harvey, M.R.Mackley and P.Stonestreet, “Operation and Optimisation of an Oscillation Flow Continuous Reactor (OFR)”, Department of Chemical Engineering, University of Cambridge
3. A.P.Harvey and M.R.Mackley, “Intensification of Two-Phase Liquid Batch Reactions Using Continuous Oscillatory Flow Reactors”, Department of Chemical Engineering, University of Cambridge
4. J.Van Gerpen, B.Shanks, and R.Pruszko, “Biodiesel Production Technology”, Aug 2002-Jan 2004, Subcontract Report, National Renewable Energy Laboratory, U.S.Department of Energy
5. J.Van Gerpen, B.Shanks, and R.Pruszko, “Biodiesel Analytical Methods”, Aug 2002- Jan 2004, Subcontract Report, National Renewable Energy Laboratory, U.S.Department of Energy
6. <http://www.cheng.cam.ac.uk>
7. http://www.crduk.com/Products_OF%20Large.html

บทคัดย่อ

การใช้ Wing-in-ground vehicles (WIG) หรือยานบินเบาอากาศ นั้น มีการประดิษฐ์คิดค้นมานานแล้วตั้งแต่ ในช่วง ค.ศ. 1950 s โดย นักวิทยาศาสตร์ชาวรัสเซีย มีหลักการทำงานโดยอาศัยแรงยกหรือ Lift ที่ เกิดขึ้นจากการที่ Downwash ของยานบินถูกบล็อกขณะที่ยานบิน บินอยู่เหนือผิวน้ำที่ระดับความสูงไม่เกิน 1 ช่วง Wingspan ยานเบาอากาศ ในอดีตมีการใช้เพื่อวัตถุประสงค์หลักในการสงคราม เช่น การลำเลียงพล การลาดตระเวนตรวจการณ์ แม้แต่การโจมตีทางอากาศ ซึ่งยานเบาอากาศ ที่ออกแบบขึ้นมาในยุคนั้นมีขนาดใหญ่พอ ๆ กับเรือรบหนึ่งลำ แต่สามารถ ขับเคลื่อนด้วยความเร็วที่สูงกว่าเรือและยานพาหนะทางน้ำอื่น ๆ หลายเท่า ถึงปัจจุบันมีการนำเทคโนโลยีใช้ WIG มาใช้ในยานเบาอากาศที่มีขนาดเล็กลงกว่าแต่ก่อนมาก มีจุดประสงค์สำหรับขนส่งทางทะเล และเพื่อการพักผ่อน ในบทความนี้ จะกล่าวถึงประวัติความเป็นมาหลักการทำงาน วิวัฒนาการ จนถึงปัจจุบัน ข้อดีและปัญหาของการนำไปใช้งานจริง และจะกล่าวถึง ยานบิน WIG ที่กำลังมีการพัฒนาขึ้นสำหรับใช้ในทางทหารของประเทศสหรัฐอเมริกา

นาวาตรี ดร. ชลัมภ์ โสมาภา
นายทหารนักเรียนโรงเรียนเสนาธิการทหารเรือ
สถาบันวิชาการทหารเรือชั้นสูง รุ่นที่ 67
E-mail : chalums@yahoo.co.uk



เทคโนโลยียานบินเบาะอากาศ (Wing-In-Ground Vehicles)

บทนำ

ยานบินเบาะอากาศ หรือ Wing-In-Ground Craft (WIG) และเรียกอีกอย่างว่า Ekranoplan และ Ground Effect Machine (GEM) คือยานพาหนะที่มีความเร็วสูง และสามารถบินในระดับต่ำ ซึ่งใช้ปรากฏการณ์ Ground Effect ช่วยในการขับเคลื่อน ผลจาก Ground Effect ให้ผลอย่างเต็มที่ ที่ระยะความสูงเท่ากับหนึ่งช่วง Chord ของปีกจากพื้นดิน และช่วยทำให้ค่า Lift-Drag Ratio มีประสิทธิภาพสูงขึ้น

ในฐานะที่เป็นเครื่องมือสำหรับการขนส่ง อาจกล่าวได้ว่าคุณลักษณะของยาน WIG มีสถานะอยู่ระหว่างเรือกับเครื่องบิน กล่าวคือความเร็วในการเคลื่อนที่ของยาน WIG มีค่าสูงกว่าเรือเร็วทุกชนิด ในขณะที่ค่าใช้จ่าย มีราคาถูกกว่าเครื่องบินทั่วไป ข้อดีอีกอย่างของยานบินเบาะอากาศ WIG คือ ความสามารถสะเทินน้ำสะเทินบก (Amphibious Properties) นอกจากนั้น ยังสามารถทำการ Take Off และ Landing บนพื้นผิวเรียบได้เกือบทุกชนิด เช่น บนพื้นดิน พื้นน้ำ แม้แต่บนหิมะ และ บนน้ำแข็ง ยาน WIG ที่ใช้สำหรับการทหารยังสามารถบินได้ต่ำเพื่อหลบรัศมีของเรดาร์ ทำใหยานบินชนิดนี้ปลอดภัยจากอาวุธทางทหาร เช่น Mine-Torpedo Weapons การใช้เทคนิค Ground Effect ที่จริงแล้วสามารถพบเห็นได้จากธรรมชาติ เช่น นก และ Flying Fish เมื่อเคลื่อนที่อยู่ในระยะใกล้ผิวน้ำ ใช้พลังงานน้อยกว่าการเคลื่อนที่ไปข้างหน้า

ด้วยลักษณะพิเศษหลายประการของ ยาน WIG ทำให้เหมาะต่อการปฏิบัติงาน หลากหลายหน้าที่ มีการศึกษาการใช้ยาน WIG สำหรับการปฏิบัติงานช่วยเหลือผู้ประสบภัยทาง ทะเล และกำลังอยู่ในขั้นตอนแรกของโครงการ ฐานการปล่อยยานอวกาศจากพื้นทะเล นอกจากนี้ กลุ่ม Boeing Phantom Works ได้เริ่มโครงการการสร้างยานบินเบาอากาศ ซึ่ง สามารถบรรทุกกำลังพล และน้ำหนัก ได้อย่าง มหาศาล เพื่อใช้ในการทหารและการพาณิชย์

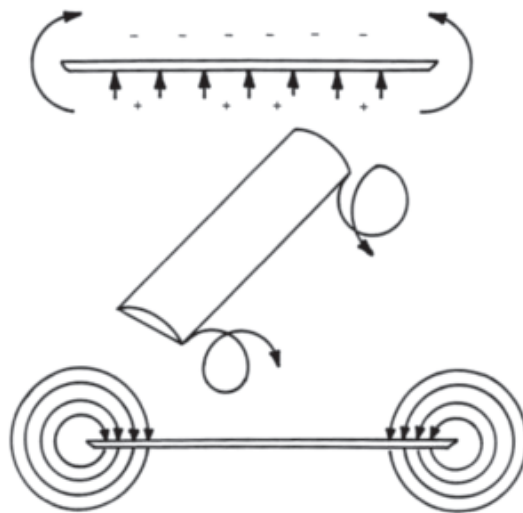


ยานบินเบาอากาศ Ekranoplan Orlyonok

กฎการเกิด Ground Effect

เพื่อที่จะเข้าใจว่า Ground Effect คืออะไร ทำงานได้อย่างไร สิ่งแรกที่ควรต้องเข้าใจ คือ หลักพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับ คุณสมบัติทาง Aerodynamics ของปีกเครื่องบิน คือเมื่อเกิด แรงยก หรือ Lift ขึ้นที่ปีกเครื่องบิน จะทำให้เกิดกลุ่มก้อนของอากาศที่หมุนตัว (Swirling Masses of Air) ที่ปลายปีกเครื่องบินทั้งสองข้าง เป็นที่ทราบดีว่า Lift นั้นเกิดขึ้นจากการที่ความดันอากาศ ที่พื้นผิวส่วนบนของปีกเครื่องบิน ต่ำกว่าความดันที่เกิดขึ้นข้างใต้ปีก ความแตกต่างระหว่างความดันทั้งสองส่วนนี้ ทำให้เกิด Lift อย่างไรก็ตามสภาวะดังกล่าวก่อให้เกิดผลที่สำคัญตามมา กล่าวคือ อากาศที่มีความดันสูงกว่า ณ ตำแหน่งใต้ปีกเครื่องบิน เกิดการไหลวนรอบปลายปีกเครื่องบินทั้งสองข้าง เข้าหาความดันอากาศที่ต่ำกว่าที่อยู่ด้านบน สภาวะเช่นนี้ก่อให้เกิดสิ่งที่เราเรียกว่า “Wingtip Vortex” ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ธรรมชาติที่เกิดขึ้นเป็นปกติ ตามหลักวิชา Aerodynamics

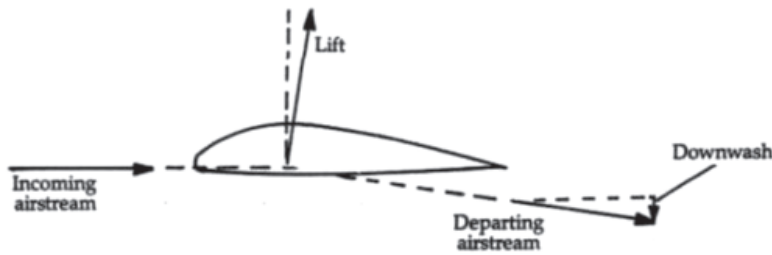
ในขณะที่เครื่องบินเคลื่อนที่ไปข้างหน้า Vortex ที่เกิดขึ้นคงอยู่ดังนั้นจึงทำให้เกิดร่องรอยทางยาว ตามหลังปีกเครื่องบิน เหตุผลดังกล่าว Vortex จึงถูกเรียกว่า “Trailing Vortex” Trailing Vortex ดังกล่าวเกิดขึ้นที่ปลายทั้งสองข้างของปีกเครื่องบิน และหมุนในทิศทางตรงกันข้ามกันเข้าหาตัวเครื่องบิน



การเกิด Trailing Vortices เนื่องจากความแตกต่างกันของความดันระหว่างพื้นผิวด้านบน และ ด้านล่างของปีกเครื่องบิน

ผลกระทบที่เกิดขึ้นจาก Trailing Vortex คือ ทำให้เกิดการหักเหของการไหลของอากาศ ที่ด้านหลังของปีกกลาง จึงเป็นที่มาของคำว่า “Downwash” ซึ่งเป็นกระแสการไหลของอากาศ ซึ่งถูกเหนี่ยวมาและหักเหลงและยังมีผลทำให้ค่า Lift ของปีกเครื่องบินลดลงด้วย

เพื่อเป็นการชดเชยค่า Lift ที่สูญเสียไป ปีกเครื่องบินจึงต้องมี Angle of Attack ที่สูง ซึ่งการเพิ่ม Angle of Attack นี้ จะไปเพิ่มแรงฉุดลากหรือ Drag ที่เกิดขึ้นจากปีกได้ เราเรียก Drag ชนิดนี้ว่า “Induced Drag”



ผลกระทบจาก Downwash ซึ่งทำให้ Lift ลดลงและ Drag เพิ่มขึ้น

เมื่อมาวิเคราะห์ว่าเกิดอะไรขึ้นเมื่อเครื่องบินกำลังบินต่ำลงใกล้พื้นดิน ปรากฏการณ์ดังกล่าวสามารถสังเกตเห็นได้บ่อยครั้งที่สุด ขณะที่เครื่องบินกำลังทำการลงจอด โดยตัวนักบินเองจะรู้สึกถึง อากาศ “Floating” หรือ การถูกยกตัวขึ้นจาก “Cushion of Air” หรือที่เราเรียกเป็นภาษาไทยว่า “เบาะอากาศ” ซึ่งเกิดขึ้นระหว่างปีกเครื่องบินและพื้นดิน ผลจากพฤติกรรมทางฟิสิกส์นี้จะเพิ่มแรงยก (Lift) ที่เกินความต้องการ ทำให้นักบินรู้สึกลำบากในการลงจอด

อย่างไรก็ตาม ในความเป็นจริงแล้ว “Cushion of Air” ที่รู้สึกว่าจะช่วยยกเครื่องให้ลอยขึ้นได้นั้น ไม่มีอยู่จริง สิ่งที่เกิดขึ้นตามหลักกลศาสตร์ของของไหล คือว่า Trailing

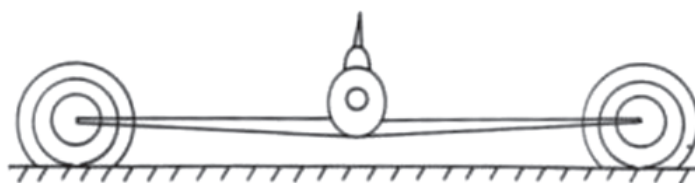
Vortices ที่เกิดขึ้น ถูก Block ไปบางส่วน และทำให้ปริมาณ Downwash ที่เกิดขึ้นจากปีกเครื่องบิน หายไปหรือลดลงไป Downwash ที่ลดลงจึงส่งผลให้ เกิดการเพิ่มขึ้นของ Effective Angle of Attack ของปีกเครื่องบิน จึงทำให้เกิดแรง Lift มากขึ้น และมี Drag ลดลงน้อยกว่าที่ควรจะเป็นตามปกติ ปรากฏการณ์ดังกล่าวเราเรียกว่า “Ground Effect” ดังแสดงในภาพข้างล่าง



Vortices fully formed at altitude

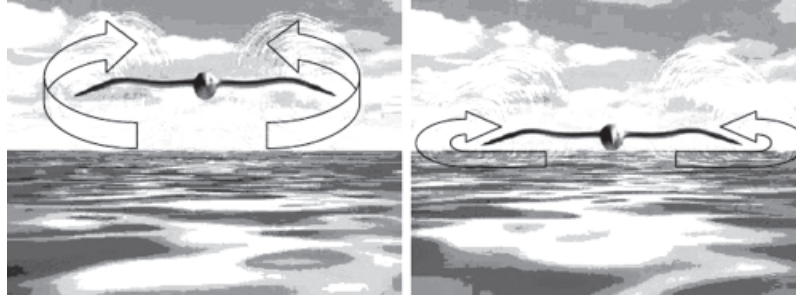


Vortices "compressed" near the ground



Vortices "blocked" by the ground

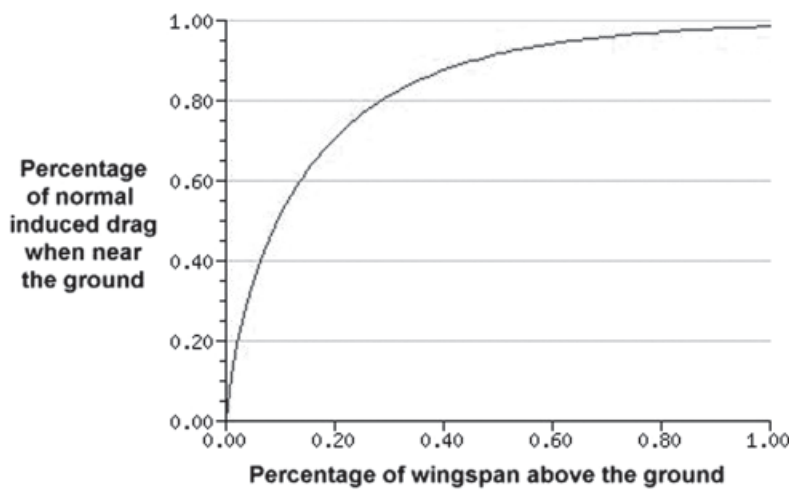
Ground Effect และ ผลกระทบต่อ Trailing Vortices



WIV = การเกิดความเปลี่ยนแปลงของ Airflow รอบปีกยานบินเนื่องจากการเข้าใกล้พื้นผิวน้ำ

ข้อดีจากปรากฏการณ์ Ground Effect บางประการซึ่งมีนัยสำคัญมากขึ้นเมื่อเครื่องบินมีความเร็วเพิ่มสูงขึ้นเรียกว่า “Ram Pressure” ขณะที่ระยะห่างระหว่างปีกและพื้นดินลดลง อากาศที่กำลังไหลผ่านเข้ามา จะถูกกระแทกเข้ากับพื้นผิวทั้งสอง และจะถูกกดมากยิ่งขึ้นกว่าเดิม ซึ่งส่งผลให้ความดันที่ใต้พื้นที่ปีกเครื่องบินสูงขึ้น ทำให้ได้ Lift เพิ่มมากกว่าเดิม

ผลกระทบจากปรากฏการณ์ Ground Effect เพิ่มมากขึ้นอีกเมื่อปีกเครื่องบินเข้าใกล้พื้นดิน ดังแสดงในกราฟข้างล่าง ปรากฏการณ์ Ground Effect ปกติแล้วจะหายไปเมื่อเครื่องบินอยู่ในระดับที่สูงกว่า 1 ช่วง Wingspan เหนือพื้นดิน อย่างไรก็ตาม กิตติที่ความสูง 1/10 Wingspan จากพื้นดิน ค่า Induced drag จะถูกทำให้ลดลงไปถึงครึ่งหนึ่ง

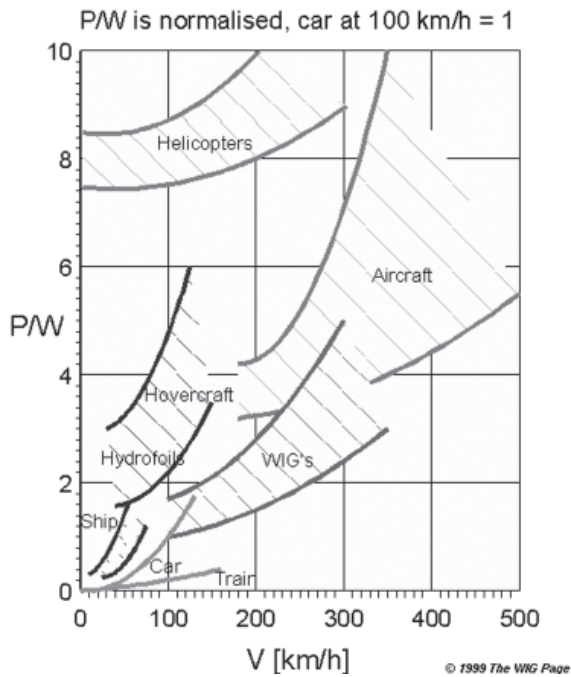


ค่า Induced Drag ที่ลดลงเนื่องจากปรากฏการณ์ Ground Effect

เมื่อได้ศึกษาถึงข้อดีเหล่านี้ พบว่าอากาศยานที่ปฏิบัติการในสภาพ Ground Effect มีแนวโน้มที่จะมีประสิทธิภาพสูงกว่าเครื่องบินที่กำลังปฏิบัติการที่อยู่ในระดับสูงจากพื้นดิน ประสิทธิภาพเชิง Aerodynamic ของเครื่องบินแสดงด้วย

ค่าหนึ่งที่เราเรียกว่า “Lift-to-Drag Ratio” หรือ L/D Ratio ถ้าหากเครื่องบินที่กำลังบิน อยู่ในแนวระดับ ด้วยความเร็วคงที่ ปราศจากความเร่ง ณ ขณะนั้นค่าแรงยก หรือ Lift ของเครื่องบินมีค่าเท่ากับน้ำหนักของเครื่องบิน และปริมาณค่าของ Thrust ที่ต้องการมีค่าเท่ากับแรงจุด หรือ Drag ที่เกิดขึ้น ดังนั้นค่า L/D Ratio คือค่าของปริมาณน้ำหนักของยานที่สามารถบรรทุกขึ้นตามขนาดของแรงผลัก Thrust ที่ส่งมา ยิ่งค่า L/D Ratio ของยานพาหนะสูงขึ้น ประสิทธิภาพย่อมสูงขึ้นตามไป โดยปกติแล้วค่า L/D Ratio สำหรับเครื่องบินทั่วไป และชนิด Subsonic อยู่ในช่วงระหว่าง 15 ถึง 20 จากการเปรียบเทียบ ยานบินเบาอากาศในทาง ทฤษฎีสามารถให้ L/D Ratio ได้ถึง 25 หรือ 30

Required power for different transport modes



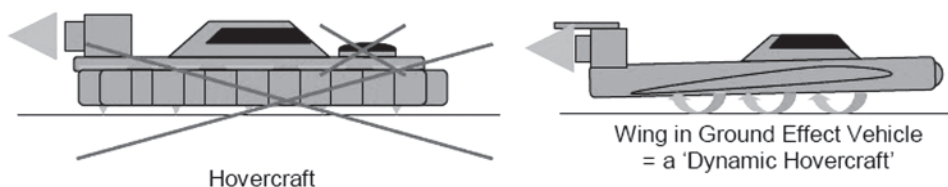
กราฟเปรียบเทียบ Power/Weight Ratio ต่อความเร็ว (Velocity, km/h)

ต้นกำเนิดการเกิดยานบินเบาะอากาศ

ถึงแม้ว่าจะมีการค้นพบปรากฏการณ์ Ground Effect มานานแล้วตั้งแต่ยุคเริ่มบุกเบิกการบิน แต่โดยทั่วไปนักบินส่วนใหญ่จะเห็น Ground Effect เป็นเพียงแค่สิ่งอันน่ารำคาญที่ส่งผลกระทบต่ออาการเครื่องบินในระหว่างการ Take Off และ Landing เท่านั้น ไม่นานต่อมานักวิจัยหลายคนเริ่มตระหนักว่าปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นดังกล่าว สามารถนำมาใช้ให้เกิดประโยชน์ในการผลิตยานบินที่มีประสิทธิภาพสูง ซึ่งเรียกกันต่อมาว่ายานบินเบาะอากาศ (WIG Vehicles) การริเริ่มบุกเบิกงานวิจัยเกี่ยวกับยานบินเหล่านี้ทำในเยอรมนีตะวันตก และสหภาพโซเวียต (ในขณะนั้น)

อาจกล่าวได้ว่านักวิจัยที่มีชื่อเสียงที่สุดทางด้านนี้ในยุคนั้นคือ นายรอสติสลาฟ อเล็กซ์ (Rostislav Alexeiev) หัวหน้าสถาบัน "Central Hydrofoil Design Bureau" ของกลุ่มสหภาพโซเวียต

ช่วง ค.ศ. 1950s - 1970s นายอเล็กซ์ เริ่มต้นอาชีพจากการพัฒนาไฮโดรฟอยล์ (Hydrofoils) ซึ่งติดตั้งเข้ากับเรือชนิดต่าง ๆ ใต้แนวน้ำของปีกเครื่อง เมื่อเรือเคลื่อนที่ไปข้างหน้าแรงยกจะเกิดขึ้นที่ปีกของยานทำให้เกิดการดึงตัวเรือขึ้นและพ้นจากน้ำ ช่วยให้นานแล่นไปด้วยความเร็วที่สูงกว่า แต่ต่อมา นายอเล็กซ์ ตระหนักว่าไฮโดรฟอยล์แล่นไปได้ด้วยความเร็วสูงได้เนื่องจาก Drag ที่เกิดขึ้นด้วยความหนาแน่นของน้ำที่ยานบินสัมผัสไปจะไม่เป็นการดีกว่าหรือ หากจะยกยานพาหนะทั้งลำขึ้นจากผิวน้ำและช่วยทำให้แล่นไปด้วยความเร็วที่สูงกว่าเดิมหลายเท่าด้วยความคิดดังกล่าวจึงนำมาสู่ยานพาหนะทางน้ำชนิดใหม่ที่มีปีกบินอยู่เหนือผิวน้ำ เป็นยานพาหนะที่มีขนาดใหญ่เท่ากับเรือหนึ่งลำ และสามารถแบกรับน้ำหนักได้อย่างมหาศาล และยังสามารถเคลื่อนที่ไปด้วยความเร็วเท่ากับเครื่องบิน



The WIG - a 'Dynamic' hovercraft, without skirt or lift engines

ข้อดีอีกประการหนึ่งของยานพาหนะนี้คือสามารถบินในระดับต่ำและต่ำกว่าระยะการตรวจจับของเรดาร์ของฝ่ายตรงข้าม นายอเล็กซ์ ให้ฉายายานบินรุ่นใหม่ของเขาว่า “Ekranoplan” เป็นภาษารัสเซีย แปลว่า “Screen Plane” ยานที่เขาออกแบบรุ่นแรก ๆ กำหนดหมายเลขไว้ภายใต้ ชื่อชุด SM ซึ่งเป็นตัวย่อของ “Samorodnaya Model” ซึ่งแปลว่า “Self Sustained Craft”

นายอเล็กซ์ ได้ทำการประดิษฐ์และพัฒนาต้นแบบไว้จำนวนมาก การทดลองเสร็จสิ้นลง ในปี ค.ศ. 1965 ในรูปแบบ KM (KM เป็นชื่อย่อที่ใช้เรียกยานบินเบาะอากาศ Ekranoplan) ที่สมบูรณ์ ซึ่งเป็นยาน WIG ที่มีขนาดใหญ่ที่สุดเท่าที่เคยมีการสร้างขึ้นมา ทำการบินครั้งแรกในวันที่ 18 ตุลาคม ค.ศ. 1966 โดยที่ ยานบินเบาะอากาศ KM ขับเคลื่อนด้วยเครื่องยนต์เทอร์โบเจตขนาดมโหฬาร จำนวน 10 เครื่อง และมีน้ำหนัก 540 ตัน เครื่องยนต์ 8 เครื่อง ถูกติดตั้งใกล้กับส่วนหัวของยานบิน เพื่อให้แรงผลักดันที่เกิดขึ้น เกิดการหักเหได้ปีกทำให้เกิดแรงยกเบาะอากาศในช่วงเริ่มต้นของการ Take Off และสามารถยกยาน KM จากผิวน้ำเมื่อยานบินเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงอย่างเพียงพอแล้ว จนมีแรงยกที่ปีกทั้งสองข้างเต็มที่ที่จะรักษาระดับการบินให้อยู่เหนือผิวน้ำ แรงผลักดันจึงถูกเปลี่ยนทิศสู่ท้ายยาน เพื่อเพิ่มความเร็วให้กับยาน

แม้ นายอเล็กซ์ จะเสียชีวิตไปในปี ค.ศ. 1980 แต่หน่วยงานออกแบบของเขายังคงดำเนินการสร้าง และทำการทดสอบยานบินเบาะอากาศ Ekranoplans จนถึงช่วงการล่มสลายของสหภาพโซเวียต “The Lun” คืออีกหนึ่งรูปแบบของยาน WIG ที่ประสบความสำเร็จสูงสุด ซึ่งมีการออกแบบคล้ายคลึงกับยาน KM แต่มีข้อแตกต่างคือขนาดที่เล็กลง และสร้างขึ้นมาเพื่อสำหรับการติดตั้ง Anti-Ship Cruise Missiles สำหรับใช้ในการโจมตีกองเรือรบของสหรัฐอเมริกา ด้วยความเร็วสูง

อย่างไรก็ตาม ด้วยการเปลี่ยนแปลงของกระแสทางการเมือง และเศรษฐกิจซึ่งย่ำแย่ของสหภาพโซเวียต เป็นสาเหตุ



ยานบินเบาะอากาศ KM Ekranoplan

ในช่วงนั้น ยาน KM ได้รับการดัดแปลงหลายครั้ง เพื่อการศึกษาและประเมินผลกระทบของพื้นฐานการออกแบบ เมื่อยานมีรูปแบบที่ต่างกันการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวได้แก่ การปรับเปลี่ยน Wingspan จาก 105 ฟุต (32 เมตร) เป็น 131 ฟุต (40 เมตร) และ เพิ่มขนาดความยาวของลำตัวยานบินจาก 302 ฟุต (92 เมตร) เป็น 347 ฟุต (106 เมตร) ยาน KM ถูกตั้งชื่อเล่นอีกด้ยว่า “The Caspian Sea Monster” โดยผู้สังเกตการณ์ชาวอเมริกันที่สังเกตเห็นยานบินจากเครื่อง “Satellite Surveillance” ยานบินนี้ปลดประจำการในปี ค.ศ. 1980 เมื่อเกิดอุบัติเหตุการตกของยานในระหว่างการ Take Off

ทำให้โครงการ Ekranoplan ต้องชะงักลง และไม่เกิดโครงการ ยานบิน Lun ลำที่สองขึ้น แต่องค์กร Alexeiev Design Bureau ยังคงปฏิบัติงานอยู่ และพยายามเสนอการออกแบบใหม่สำหรับการใช้งานสำหรับพลเรือน แต่อย่างไรก็ตาม ขณะนั้นยังไม่มีตลาดเข้ามารองรับการผลิตยานบินเบาะอากาศ



ยานบินเบาอากาศ Lun Ekranoplan
มีการติดตั้ง Missile Launchers บนตัวยาน

ยานบินเบาอากาศสำหรับอนาคต

ยานบินเบาอากาศ “The Pelican”

เมื่อเร็ว ๆ นี้ บริษัท Boeing มีความสนใจในเทคโนโลยีของ WIG และได้เสนอโครงการยานบินเบาอากาศขนาดใหญ่ ที่ตรงกับความต้องการยานพาหนะขนส่งทางไกล (Long-Range Vehicle Transport) ของกองทัพกองทัพอากาศสหรัฐอเมริกา เรียกว่า “The Pelican” ซึ่งยานบินลำนี้จะมี ความยาวช่วง Wingspan ถึง 500 ฟุต (153 เมตร) สามารถ บรรทุกน้ำหนักได้สูงถึง 2,800,000 ปอนด์ (1,270,060 กิโลกรัม) และบินในระดับต่ำ 20 ฟุต (6 เมตร) เหนือผิวน้ำ และสามารถบินอยู่สูงจากพื้นดินได้ถึง 20,000 ฟุต (6,100 เมตร) แต่มีข้อแตกต่างจากแนวความคิดของไซเวียต คือว่า ยานบิน Pelican นี้จะไม่ Take Off ขึ้นจากผิวน้ำ แต่จะ Take Off จาก Runway บนบกโดยมีล้อยานบิน 76 ล้อ และ Landing Gear ที่สมบูรณ์



ยานบินเบาอากาศ Boeing Pelican

จากรูป ส่วนที่เป็นปีกของ ยานจะมีลักษณะเอียงลง ซึ่งจะช่วย เพิ่มประสิทธิภาพของการเกิด Ground Effect สำหรับการขับเคลื่อน จะใช้ เครื่องยนต์ Advanced Turboprop ลีเครื่องบิน Pelican จะมี Cargo Deck สองชั้น สำหรับชั้นล่างไว้ สำหรับการเก็บสินค้าและสิ่งของ ขนาดใหญ่ รวมถึงรถถัง 17 คัน ขณะที่ชั้นบนมีไว้สำหรับบรรทุก กองพลและเป็นที่พักกระสุน ยานบิน Pelican นี้ จะมีพื้นที่ปีก รวมแล้ว เกินกว่าหนึ่งเอเคอร์ ซึ่งจะสามารถในการบรรทุกได้ถึง 3,000 ตัน ในระหว่างการบินขึ้นสู่อากาศ

ที่จริงแล้วยานบิน Pelican เปรียบเสมือนว่าเป็นส่วนขยายของ งานที่นายอเล็กซ์ ได้ริเริ่มไว้ ถ้าหาก ยานบิน Pelican มีขนาดเท่ากับ ยาน KM แล้ว อาจเล็กเกินไป ซึ่งจะไม่สามารถได้รับประโยชน์จาก Ground Effect ได้อย่างเต็มที่เลย ข้อได้เปรียบสำคัญที่สุดของยานบิน เบาอากาศ WIG คือ ความสามารถ ที่จะเคลื่อนย้ายน้ำหนักมาก ๆ ด้วย ยานที่มีขนาดของ Wingspan ที่เล็ก และปีกที่มีค่า Aspect Ratio ที่ต่ำ ในขณะที่ยังคงไว้ซึ่งประสิทธิภาพทาง Aerodynamics ที่ดีเยี่ยม บริษัท Boeing ได้อ้างว่า ยานบินเบาอากาศ สามารถทำการขนส่งน้ำหนักขนาด 750 ตัน ในระยะทางไกลกว่า 10,000 ไมล์ทะเล (18,530 กิโลเมตร) เมื่อ บินอยู่โดยอาศัย Ground Effect Mode แต่หากบินไปโดยปราศจาก การใช้ Ground Effect แล้ว จะ สามารถบรรทุกน้ำหนักที่เท่ากัน ไปไกลได้แค่ 6,500 ไมล์ทะเล (12,045 กิโลเมตร)

ดังนั้นจะเห็นได้ชัดว่าเทคโนโลยี WIG ไม่ใช่ของใหม่ มีการนำมาใช้งานมาแล้วพอสมควร ปรากฏการณ์ Ground Effect มีข้อดีคือว่าด้วยพื้นที่ของปีกที่เท่ากัน เมื่อยานบินเบาะอากาศบินอยู่ที่ระดับใกล้เคียงกับพื้นดิน จะเกิดแรงยกมากกว่าเครื่องบินที่กำลังบินอยู่ที่ระดับที่สูง หรืออีกนัยหนึ่งสามารถกล่าวได้ว่าน้ำหนักบรรทุกที่เท่ากัน สามารถขนส่งด้วยยานบินที่มีขนาดของปีกเล็กกว่ามาก ซึ่งส่งผลให้ยานพาหนะมีขนาดเล็กกว่า เบากว่า และมีประสิทธิภาพที่สูงกว่า จึงไม่เป็นที่แปลกใจเลยว่า ยาน WIG ที่ได้รับการแนะนำมากที่สุด จะเป็นยานบินเบาะอากาศที่ควรมีขนาดใหญ่ เช่น ยาน Pelican ของบริษัท Boeing

อย่างไรก็ตามยานบินเบาะอากาศขนาดเล็กถูกสร้างขึ้นมาและใช้บินกันเป็นจำนวนมาก มากกว่า ยานบินเบาะอากาศขนาดใหญ่อย่าง KM ผู้ผลิตทั่วโลกโดยเฉพาะในประเทศเยอรมนี ได้ทำการสร้างยานบินเบาะอากาศ สำหรับการโดยสารขนาดเล็กจำนวนมาก ตัวอย่างที่มีใช้อยู่ เช่น รุ่น L-325 ขนาดสำหรับผู้โดยสาร 4 คน สร้างโดย บริษัท American Company Flarecraft



ยานบินเบาะอากาศ Flarecraft L-325

การพัฒนาอากาศยานเบาะอากาศโดย Fischer Flugmechanik/AFD Airfoil Development GmbH

ตลอดเวลาหลายปีในการวิจัยและการออกแบบพัฒนาต้นแบบ กลุ่ม Fischer Flugmechanik/AFD Airfoil Development GmbH ได้ทำการพัฒนาเทคโนโลยี WIG เป็นยานพาหนะทางน้ำ โดยมีการเปิดตัว ยานบินเบาะอากาศ ชื่อว่า “Airfish AF (FS8)” ซึ่งสามารถบรรทุกผู้โดยสารได้ 8-10 คน เมื่อปี ค.ศ. 2001 เป็นยาน WIG ลำแรกของโลกที่ได้รับ “Certificate of Class”

จาก Germanischer Lloyd (ธันวาคม ค.ศ. 2001) และจาก Lloyd’s Register (พฤษภาคม ค.ศ. 2002) ซึ่ง ยานบินเบาะอากาศชนิดนี้จะเข้าสู่สายการผลิตต่อไป ในช่วงการพัฒนาปรับปรุงแนวคิดของ FF/AFD ได้รับการพัฒนาจากรูปแบบการเป็น “Initial Sea-Skimming Aircraft” ซึ่ง ยานบินเบาะอากาศนี้ไม่สามารถทำการบินโดยอิสระ (Free Flight) แต่มีค่ากำลังงานต่อประสิทธิภาพ (the Power-Efficiency) ที่ดี อีกทั้งมีรูปแบบยานบินเบาะอากาศที่เรียบง่ายประหยัด สร้างขึ้นเพื่อการปฏิบัติงานแบบเดียวกับการขนส่งทางเรือ



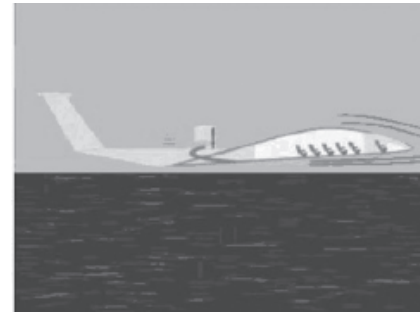
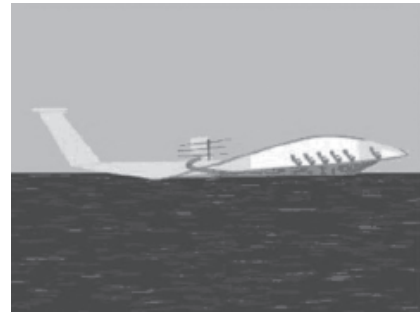
Airfish 8/Flightship 8, สามารถบรรทุกผู้โดยสารได้ 8 คน
เริ่มทำการบินในปี ค.ศ. 2001

ยานบินเบาอากาศชนิด FF/AFD ได้พัฒนาเทคโนโลยี WIG ออกเป็นสองรุ่น โดยรุ่นแรกเรียกว่า 'Airfish' และรุ่นที่สองเรียกว่า 'Hoverwing'

เทคโนโลยียานบินเบาอากาศโดยใช้ "Hoverwing" Concept

การทำให้ยานบิน WIG แล่นไปอย่างมีประสิทธิภาพกับการทำให้ยานบิน Take Off จากผิวน้ำ อย่างมีประสิทธิภาพนั้นมีความแตกต่างกัน กล่าวคือค่ากำลังงานที่ต้องใช้ในการ Take Off ยาน WIG มีค่าสูงกว่าค่ากำลังงานที่ต้องใช้ในการทำให้ยาน WIG เคลื่อนที่ไปข้างหน้าอย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นเพื่อเป็นการแก้ปัญหาดังกล่าว กลุ่มวิจัย FF/AFD จึงนำมาซึ่งแนวคิดการใช้ 'HOVERWING' สาเหตุที่เรียก 'Hoverwing' เพราะในระหว่างการ Take Off ของยานมีการใช้ 'Retractable Skirts' ซึ่งจะช่วยในการสร้างเบาอากาศสถิต (คล้ายกับที่เกิดขึ้นกับยาน Hovercraft) เกิดขึ้นระหว่าง Twin Elements ของลำตัวยานบิน WIG (ลำตัวยานมีรูปร่างแนวเดียวกับ Catamaran) ดังนั้นจึงช่วยลดกำลังงานรวมที่ต้องใช้ในการเร่งความเร็วทะเลยานจากผิวน้ำเข้าสู่การบินเสียบผิวน้ำ เข้าสู่การใช้ Ground-Effect Mode ได้อย่างราบเรียบไม่มีการสะดุด และมีประสิทธิภาพสูง

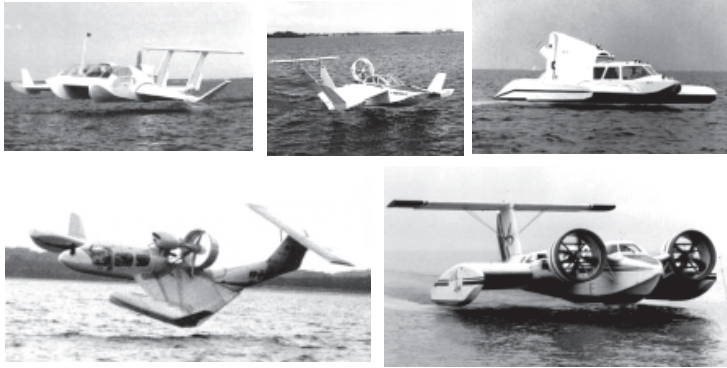
ค่า Lift/Drag Ratio ที่เพิ่มขึ้นด้วยระบบดังกล่าวช่วยทำให้ลดการ Mismatch ระหว่างกำลังงานการ Take Off และ การงานในการขับเคลื่อนไปข้างหน้า และยังช่วยลดความต้องการกำลังงาน ที่ต้องติดตั้งลงกว่า 45 % ในเบื้องต้นของการเคลื่อนที่ กระแสจากใบพัดประมาณ 7 % ถูกทำให้หักเห และพุ่งเข้าสู่ระหว่าง Catamaran Hulls เพื่อช่วยให้เกิดเบาอากาศสถิต (Static Air Cushion) ซึ่งจะช่วยรับน้ำหนัก 80% ของน้ำหนักยานบิน ขณะที่ยาน WIG กำลังเร่งเครื่องเพื่อ Take



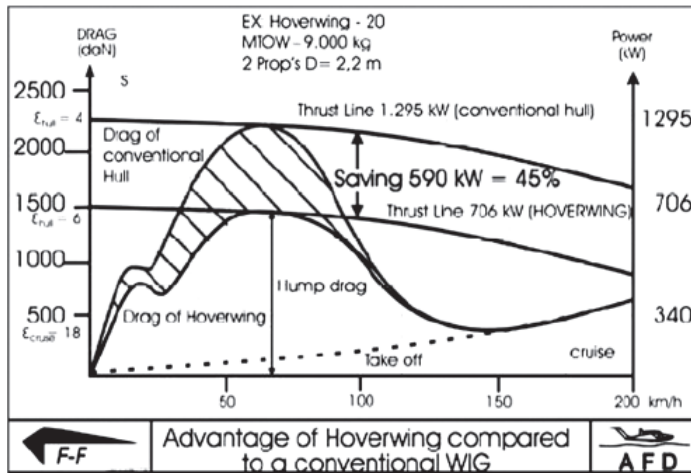
ภาพแสดง Retractable SES air cushion as craft ช่วยในการปรับสภาพการเคลื่อนที่จาก "Hovercraft"/step-taxi mode (บน) เข้าสู่ WIG mode (ล่าง)

Off แรงดันอากาศจลน์ (Dynamic Air Pressure) จะไหลเข้าแทนที่แรงดันอากาศสถิต (Static Air Pressure) จากนั้นจึงทำการพับเก็บ Sealing Skirts ด้วยระบบอัตโนมัติ ปิด Diversion Ducts แล้วจึงทะเลยานจากผิวน้ำ เข้าสู่การบินเสียบผิวน้ำเข้าสู่ Ground-Effect Mode ได้อย่างราบเรียบและต่อเนื่อง ระบบดังกล่าว ยังทำให้การขับเคลื่อนดำเนินไปอย่างมีประสิทธิภาพโดยเฉพาะใน 'Step-Taxi Mode' ซึ่งจะมีปีกคอยช่วย ในการเคลื่อนตัวที่ความเร็วต่ำกว่าความเร็วการ Take Off เมื่อทำการผสมรูปร่างตัวเรือแบบ Catamaran Hull เข้ากับ ลำตัวยาน WIG ที่มีลักษณะแบบ Body/Lifting Body Shape แล้ว ลำตัวยานแบบ Hoverwing จะมีส่วนร่วมกับแรง Lift ที่เกิดขึ้นในระหว่าง Ground

Effect ถึง 40% ในขณะที่เดียวกันจะช่วยให้มี Internal Payload Volume สูงขึ้นด้วย



รูปยาน WIG ขนาดเล็กแบบต่างๆ



สามารถลดกำลังงานที่ติดตั้งได้อย่างมีนัยสำคัญ
เมื่อใช้หลักการ 'Hoverwing'



ยานบินเบาะอากาศ HW2VT แสดงการสาธิต เมื่อปี ค.ศ. 1997

คุณลักษณะของยาน ข้อดี และ การใช้งานของ ยานบินเบาะอากาศ แบบ 'Hoverwing'

'Hoverwing' มีความมุ่งหมายสำหรับการใช้งานแบบ Medium/Short-Range เช่น แม่น้ำ ชายฝั่งทะเล ระหว่างเกาะแก่ง การขนส่งในเขตสามเหลี่ยมปากแม่น้ำ และทุกแห่ง

ทั่วโลก ในสภาพท้องทะเลที่มี Sea-State ที่เหมาะสม ด้วยความสัมพันธ์ระหว่าง Span และ Wave Clearance ทำให้ขอบเขตของการปฏิบัติงานในพื้นที่ต่างๆ ขึ้นอยู่กับขนาดของยานบินเบาะอากาศเอง ตัวอย่างของพื้นที่ดังกล่าว เช่น อ่าวเม็กซิโก เขตแคริบเบียน เอเชียตะวันออกเฉียงใต้ เขตเมดิเตอร์เรเนียน รวมถึง ระยะทางหลายพันไมล์ของแม่น้ำสายหลักต่างๆ ของแต่ละภูมิภาค

ข้อดีของยานบินเบาะอากาศที่อาศัยหลักการ 'Hoverwing' ได้แก่

- ความเร็วการขับเคลื่อนที่สูง ไม่ต่ำกว่า 90 - 100 นอต

- ความสามารถในการครอบคลุมพื้นที่กว้างขวางในระยะเวลานั้นๆ ด้วยความเร็วเทียบเคียงได้กับเฮลิคอปเตอร์ / เครื่องบินขนาดเล็ก

- การบินใน Cruise Mode ที่ไม่สัมผัสกับน้ำ

- ไม่รับผลกระทบจากผิวน้ำ ไม่ก่อให้เกิดการเผาผลาญ ทำให้ลูกเรือไม่เกิดอาการเหนื่อยอ่อน

- No Wake/wash
- ไม่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมทางน้ำ (No Environmental Damage)

- ความง่ายและสะดวก
- ค่าบำรุงรักษาต่ำ (Low Maintenance)

- Low Training Requirement

- ประสิทธิภาพ (Efficiency)
- การบริโภคพลังงานที่ต่ำ (Low Power Consumption)

- ราคาเชื้อเพลิงต่ำ (Low Fuel Cost)

- ค่าบำรุงรักษาต่ำ (Low Maintenance)

- ราคาถูก (เมื่อเทียบกับราคาเครื่องบินหรือเฮลิคอปเตอร์)

- เป็นประสบการณ์การเดินทางอันแปลกใหม่สำหรับผู้โดยสาร

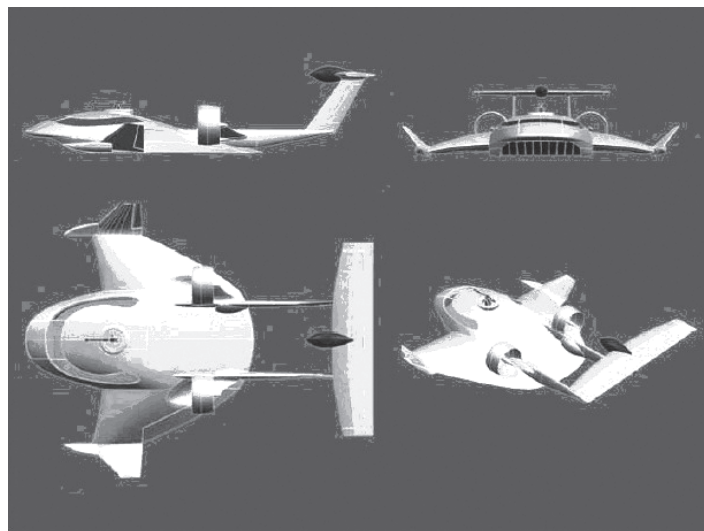
ข้อเสนอแนะในการนำไปใช้งานต่าง ๆ

- Passenger Ferry/Water Taxi - การบริการขนส่งระหว่างชุมชน
 - Freight/Workboat - เช่น การขนส่งสินค้าและพัสดุไปรษณีย์ที่ต้องการความเร่งด่วน
 - Tour Boat - เช่น การพาผู้โดยสารจากเรือท่องเที่ยวไปยังสถานที่อื่นที่อยู่ห่างไกลออกไปในระยะเวลาสั้น ๆ
 - Resort Boat
 - Dive Boat

ศักยภาพการนำไปใช้ในทางทหาร (Paramilitary Potential)

นอกจากการนำยาน WIG ไปใช้ในภารกิจภาคพลเรือนแล้ว กลุ่ม AFD/FF/Hypercraft กำลังทำการศึกษาวิจัยการนำเทคโนโลยียาน WIG มาใช้ในการทหาร ด้วยข้อดีหลายอย่างดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ยานบินเบาอากาศสามารถให้การตอบสนองได้อย่างรวดเร็ว (Rapid Response) ความทนทาน (Endurance) ความสามารถในการพรางตัว (Stealth) และความสามารถในการสกัดกั้นยับยั้งยานพาหนะทางน้ำอื่น ๆ (Capability to Intercept Other Marine Vessels) นอกจากนี้ยัง

มีศักยภาพในการทำงานด้านสนับสนุนการปฏิบัติงานตามแนวชายฝั่ง (Littoral Operations) การตรวจจับการลักลอบสิ่งเสพติด (Drug-Running Interdiction) การปราบปรามโจรสลัด (Anti-piracy) การลาดตระเวนแนวชายฝั่ง (Border Patrol) การค้นหาและช่วยเหลือผู้ประสบภัย (Search and Rescue) การเคลื่อนย้ายผู้บาดเจ็บ (Medevac) การสอดส่อง ดูแลสิ่งแวดล้อมและมลพิษ (Pollution/Environment Monitoring) การขนส่ง รวมถึงการปฏิบัติการพิเศษทางทหาร (Special Operations) เป็นต้น



ภาพกราฟิกยานบินเบาอากาศ Hoverwing 20-Mil ใช้ในการทหาร

ผลกระทบจากขนาดของยานบินเบาอากาศ

ด้วยข้อดีดังกล่าวมาข้างต้นนั้น เพราะสาเหตุใดเราจึงไม่เห็นยาน WIG ขนาดเล็ก ประสบความสำเร็จในเชิงธุรกิจมากนัก ในขณะที่การปรับปรุงในด้านประสิทธิภาพซึ่งทำให้ยาน WIG ขนาดใหญ่ มีความน่าดึงดูดใจ และน่าสนใจมากกว่าเมื่อกล่าวถึงการใช้งานในทะเล แม้ว่าค่า Induced Drag จะลดลง และมีแรงยกต่อน้ำหนัก (Lift/Drag Ratio) เพิ่มขึ้นจากปีกของยานบินขนาดเล็ก แต่ข้อได้เปรียบของยานบินที่เกิดขึ้นไม่มากนัก กล่าวคือขณะที่ยานบินกำลังปฏิบัติการใกล้พื้นน้ำค่า Induced Drag จะลดลง ซึ่งเป็นจุดเด่นของยานบินชนิดนี้ แต่ในขณะเดียวกันค่า Drag รูปแบบอื่นจะเพิ่มขึ้นที่สำคัญที่สุด ยานบิน WIG จะต้องประสบกับปัญหาการเกิดค่า Skin Friction Drag ที่สูงขึ้น

สาเหตุหลัก ๆ คืออากาศใกล้ระดับพื้นผิวทะเลมีความหนาแน่นสูงกว่าอากาศที่อยู่ในระดับบริเวณที่สูงขึ้นไป ซึ่งจุดเสียดังกล่าวจะมีผลต่อยานเบาอากาศที่มีขนาดใหญ่กว่า เพราะการลดลงของ Induced Drag จะมีนัยสำคัญกว่า แต่สำหรับยานเบาอากาศขนาดเล็ก การลดลงของ Induced Drag และการเพิ่มขึ้นของ Skin Friction Drag จะมีค่าใกล้เคียงกันมาก ดังนั้นประสิทธิภาพโดยรวมของยานบิน WIG ขนาดเล็ก เพิ่มขึ้นแต่เพียงเล็กน้อย

ที่ยิ่งกว่านั้น Drag ที่เกิดขึ้นจากอากาศที่มีความหนาแน่นที่ระดับความสูงต่ำ ยังจำกัดความเร็วสูงสุดของยานบินนั้น ดังนั้น ยาน WIG ต้องใช้เวลาในการเดินทางมากกว่าเครื่องบินปกติที่บินในระดับสูงกว่าในระยะทางเท่ากัน อย่างไรก็ตาม ข้อเสียดังกล่าวส่งผลกระทบต่อยาน WIG ขนาดใหญ่กว่า เพราะมีแนวโน้มว่าจะถูกใช้สำหรับการขนส่งสินค้าขนาดใหญ่ ซึ่งสามารถยอมสละในเรื่องความเร็วลง กล่าวโดยสรุปคือ สำหรับยาน WIG ขนาดเล็ก จะมีประสิทธิภาพน้อยกว่ายาน WIG ที่มีขนาดใหญ่กว่า และยังได้รับผลกระทบจากสภาพอากาศได้ง่าย

บทสรุป

รูปแบบของยาน WIG ซึ่งสามารถปฏิบัติงานในระยะใกล้กับผิวน้ำอย่างมีประสิทธิภาพ และประสบความสำเร็จ ยังคงเป็นปัญหาที่ท้าทายสาเหตุหนึ่ง ซึ่งยังคงทำให้เกิดความกังวลจากผู้โดยสารคือนอกจากตัวยาน WIG จะมีรูปลักษณะที่แปลกแหวกแนวแล้ว บางครั้งก็เกิดความผิดพลาดทำให้เกิดการตกของยานบิน WIG ที่ผลิตโดยผู้ผลิตรุ่นใหม่ในระหว่างขั้นตอนการทดสอบ ซึ่งเกิดขึ้นเป็นระยะ ๆ ด้วยสาเหตุอันเนื่องมาจากความไม่พร้อมทางการเงิน งบประมาณ และขาดประสบการณ์ก่อนการพยายามทดลองบินจริงด้วย Full-Scale Flights ดังนั้นการทำ Mathematical Modeling ของยาน WIG จึงเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่ง

อย่างไรก็ตาม ด้วยข้อดีของยานบินเบาอากาศเหล่านี้ เช่น สามารถใช้ในลักษณะเป็น Ferry, Water Taxi, Resort Craft และการประยุกต์ใช้งานด้านอื่น ๆ รวมถึงการใช้งานในเขตพื้นที่ที่จำเป็น ต้องรักษาสภาพแวดล้อม และในเขตพื้นที่ซึ่งยากต่อการเข้าถึง ดังที่กล่าวมาแล้ว นอกจากนี้เทคโนโลยียานบินเบาอากาศยังเป็นทางเลือกหนึ่งสำหรับการทหาร หากสร้างขึ้นมาด้วยเทคโนโลยีที่เหมาะสม มีความปลอดภัย สร้างความเชื่อมั่นในการปฏิบัติงานสำหรับผู้ใช้และผู้โดยสารแล้ว ยานบินเบาอากาศจะเป็นสิ่งที่น่าสนใจ และอาจเหมาะสมในการใช้งานยิ่งกว่าเรือหรือเครื่องบินอีกด้วยเช่นกัน

ข้อมูลอ้างอิง

- Nikolai Kornev and Konstantin Matveev, "Complex Numerical Modeling of Dynamics and Crashes of Wing-In-Ground Vehicles" 41st Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 6-9 January 2003, Reno, Nevada
- Klaus Matjasic, Fischer Flugmechanik/AFD Airfoil Development GmbH, Germany, "Re-Defining Sea Level : The Hoverwing Wing In Ground Effect Vehicle", Paper for The Hovercraft Society, Air Cushion Technology Conference & Exhibition, England, 14th & 15th October 2003.
- John D. Anderson, Jr., "Fundamentals of Aerodynamics", McGraw-Hill International Editions, Mechanical Engineering Series, 1985.
- <http://www.aerospaceweb.org/question/aerodynamics/q0130.shtml>
- <http://www.se-technology.com/wig/>
- <http://dynlab.mpe.nus.edu.sg/mpelsb/aeg/WIG/ATSNGH.pdf>
- <http://www.dsto.defence.gov.au/publications/2058/DSTO-GD-0201.pdf>

บทคัดย่อ

ความเสียหายที่เกิดขึ้นในงานโครงสร้าง บางครั้งยังแก้ไข
ปัญหาไม่ถูกจุด กล่าวคือเมื่อมีความเสียหายเกิดขึ้นที่ชิ้นส่วนใด ก็จะทำให้
การเปลี่ยนชิ้นส่วนนั้น ซึ่งเมื่อเวลาผ่านไป ชิ้นส่วนดังกล่าวยังคงเสียหาย
เช่นเดิม ทั้งนี้เกิดจากความไม่เข้าใจในพลศาสตร์ของโครงสร้างที่
เกี่ยวข้องกับการสั่นสะเทือน การวิเคราะห์และการทดสอบทางโมดัล
จะทำให้ทราบถึงตำแหน่งที่มีโอกาสจะเกิดความเสียหายที่เป็นจุดใน
โครงสร้าง หลักการวิเคราะห์โมดัล คือการสังเคราะห์องค์ประกอบ
หลักที่จะอธิบายพฤติกรรมของระบบนั้น ๆ ออกมา โดยในงานระบบ
ทางกลมีข้อมูลทางโมดัลคือ ค่าความถี่ธรรมชาติ ค่าอัตราส่วนการหน่วง
และรูปร่างการสั่น การให้ได้องค์ประกอบทั้ง 3 ค่า จะต้องทำการทดสอบ
โครงสร้างและผ่านการคำนวณ เพื่อให้ได้ข้อมูลที่ต้องการออกมาจาก
โครงสร้างก่อนจะนำมาพิจารณาในการแก้ไขโครงสร้าง เพื่อป้องกัน
ความเสียหายในการใช้งาน

นาวาตรี สมนึก พงษ์สิน

ประจำแผนกวิเคราะห์งานช่าง

กองควบคุมคุณภาพ กรมพัฒนาการช่าง กรมอุทการเรือ

E-mail : somnuek31@yahoo.com

นาวาโท สุमितร์ ขอบสอาด

ประจำแผนกวิเคราะห์งานช่าง

กองควบคุมคุณภาพ กรมพัฒนาการช่าง กรมอุทการเรือ

E-mail : sumit.c@navy.mi.th



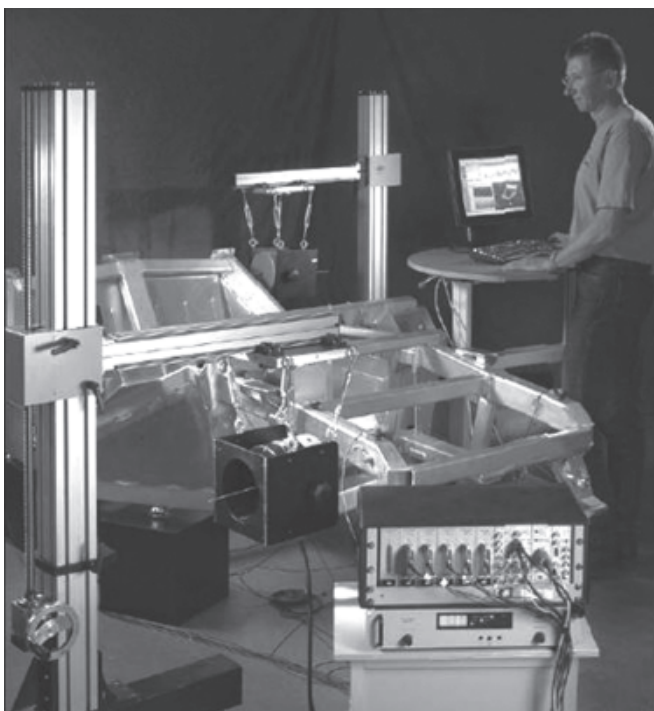
การวิเคราะห์และการทดสอบทางโมดัล ในโครงสร้างทางกล (Experimental Modal Analysis in Mechanical Structure)

บทนำ

เมื่อพูดถึงการวิเคราะห์และการทดสอบทางโมดัล (Modal analysis) หลายคนอาจจะไม่เข้าใจว่าเป็นการทดสอบอะไร ใช้กับงานด้านไหน จึงขอแนะนำเผยแพร่ความรู้ทางด้านการวิเคราะห์โมดัล เพื่อให้ทราบและเข้าใจในการวิเคราะห์ด้านนี้มากขึ้น ซึ่งส่วนใหญ่ใช้ในขั้นตอน การออกแบบงานโครงสร้าง งานการผลิต และงานวิเคราะห์ป้องกันความเสียหายซึ่งในต่างประเทศเป็นที่นิยมใช้อย่างแพร่หลาย หากพูดถึงการวัดการสั่นสะเทือนหลายคนจะทราบดีว่าเป็นการทำอะไร การวิเคราะห์โมดัลก็ถือเป็นศาสตร์แขนงหนึ่งของการสั่นสะเทือนที่จะใช้วิเคราะห์เพื่อออกแบบในงานโครงสร้างต่าง ๆ เช่น โครงสร้างอาคาร โครงสร้างรถยนต์ เครื่องบิน คอมพิวเตอร์ เป็นต้น ในบทความนี้ จะกล่าวถึงหลักการวิเคราะห์โมดัล และเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์โมดัลพอสังเขป ส่วนรายละเอียด ท่านผู้อ่านที่สนใจสามารถอ่านศึกษาเพิ่มเติมได้ตามเอกสารอ้างอิงหรือสอบถามจากผู้เขียนได้โดยตรง

ความสำคัญของการวิเคราะห์โมดัล

ความเสียหายที่เกิดขึ้นในโครงสร้างบางครั้งวิศวกรยังไม่สามารถแก้ไขปัญหาก็ได้ถูกจุด กล่าวคือถ้ามีความเสียหายซ้ำเกิดขึ้นที่ชิ้นส่วนใด ก็จะทำให้การเปลี่ยนชิ้นส่วนนั้น เมื่อเวลาผ่านไปชิ้นส่วนนั้นก็ยังคงเสียหายอยู่เหมือนเดิมเนื่องจากไม่ได้แก้ไขที่ต้นเหตุของปัญหา ซึ่งอาจเกิดจากความไม่เข้าใจในพลศาสตร์ของโครงสร้างที่เกี่ยวข้องกับการสั่นสะเทือน ดังนั้นหากเราเข้าใจโหมดการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นก็อาจจะทำให้เราสามารถแก้ไขปัญหาความเสียหายที่เกิดขึ้นเนื่องจากการสั่นสะเทือนได้ถูกต้อง ในการทำงานจริงของโครงสร้างนอกจากจะรับภาระสถิต (Static Load) แล้วโครงสร้างยังจะต้องรับภาระพลวัต (Dynamic Load) ที่มีผลต่อความเสียหายของโครงสร้างเช่นกัน เนื่องจากภาระพลวัต มีความไม่แน่นอนเปลี่ยนแปลงไป-มาตลอดเวลา เช่น แรงปะทะของลมต่อตึกสูง แรงของคลื่นปะทะตัวเรือ แรงสั่นสะเทือนของพื้นถนนต่อโครงสร้าง เป็นต้น การป้องกันความเสียหายของโครงสร้างต่อภาระพลวัต จึงจำเป็นต้องวิเคราะห์หาปัญหาที่เกี่ยวข้องกับการสั่นสะเทือนที่จะมีผลกระทบต่อความแข็งแรงของโครงสร้าง เพื่อจะได้ทราบถึงตำแหน่งความเสียหายของโครงสร้าง หรือบริเวณที่มีโอกาสที่จะเกิดความเสียหายมากที่สุด ลักษณะรูปแบบการสั่น การตัดตัวของโครงสร้างในรูปแบบต่าง ๆ ซึ่งหากว่าเราทราบตำแหน่งหรือลักษณะการตัดตัว

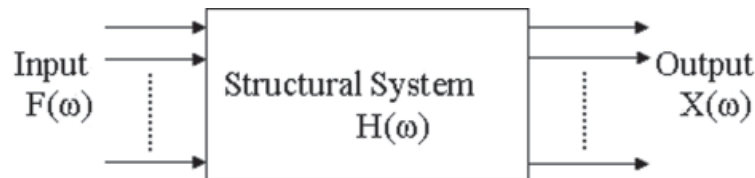


รูปที่ 1 การทดสอบโมดัล

ก็จะสามารถแก้ไขและป้องกันความเสียหายได้อย่างถูกต้อง การวิเคราะห์โมดัลเป็นการสังเคราะห์องค์ประกอบที่จะอธิบายพฤติกรรมของระบบโครงสร้างนั้นให้ออกมา โดยการทดสอบโครงสร้างและเก็บข้อมูลโมดัลโดยตรงจากโครงสร้างขณะที่กำลังทำงาน ซึ่งการวิเคราะห์โมดัลจะช่วยให้อธิบายพฤติกรรมของโครงสร้างต่อภาระทางพลวัตที่กระทำ นอกจากนี้ การวิเคราะห์โมดัลยังช่วยให้วิศวกรพิสูจน์ยืนยันโครงสร้างที่ออกแบบไว้ว่าเป็นไปตามที่จำลอง หรือคำนวณไว้เพียงใด และสามารถนำเอาข้อมูลจากการวิเคราะห์นี้มาแก้ไขแบบจำลองให้ถูกต้องใกล้เคียงกับสภาวะการทำงานจริง โดยปกติแล้วการวิเคราะห์โมดัลจะกระทำเมื่อโครงสร้าง หรืออุปกรณ์ได้ถูกสร้างขึ้นมาใช้งานแล้ว โดยเรียกว่าการทดสอบทางโมดัล (Experimental Modal Analysis-EMA) แต่การวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ (Finite Element Analysis-FEA) จะกระทำในขั้นตอนของการออกแบบเลย ซึ่งทั้งสองวิธีนี้สามารถใช้ควบคู่กันเพื่อให้โครงสร้างมีความปลอดภัยสูงสุด

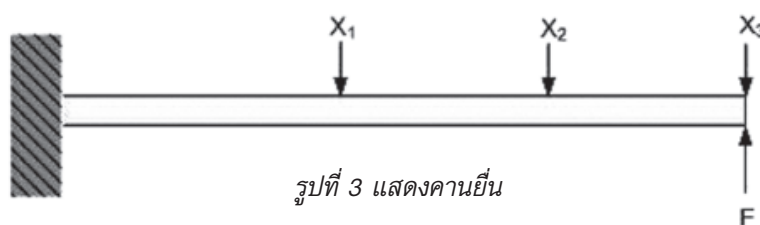
หลักการวิเคราะห์โมดัล

หลักการพื้นฐานอย่างง่าย ๆ สำหรับการวิเคราะห์โมดัลก็คือ การนำเอาข้อมูลผลการตอบสนองของระบบ (Frequency Response Function) ที่มีต่อแรงกระตุ้น (Excitation Force) มาแยกเป็นส่วนประกอบในรูปของโหมดของการสั่นสะเทือนต่าง ๆ



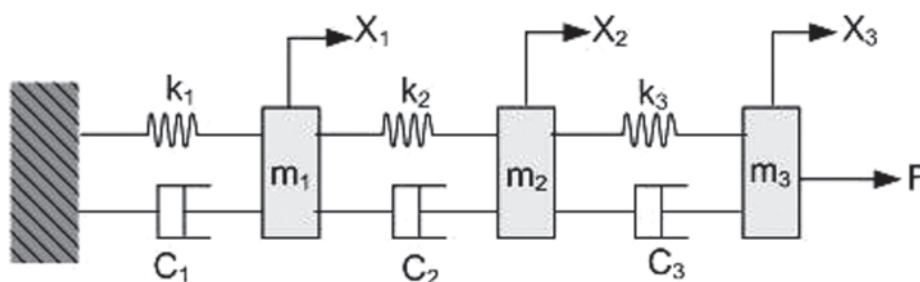
รูปที่ 2 หลักการวิเคราะห์ของโมดัล

การสั่นสะเทือนในโครงสร้างนั้น ๆ เกิดจากการสั่นหลาย ๆ โหมด (Mode) รวมอยู่ด้วยกัน ถ้าความถี่ของแรงกระตุ้นไปตรงกับความถี่ธรรมชาติ (Natural Frequency) ของโหมดใดโหมดหนึ่งจะทำให้เกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่า Resonance และส่งผลให้ส่วนประกอบของโหมดนั้น ๆ เด่นออกมา การวิเคราะห์โมดัลเป็นกระบวนการวิเคราะห์ที่จะทำการแยกการตอบสนองของระบบโดยรวมออกมาในรูปสมการของการเคลื่อนที่ย่อย ๆ เสมือนเป็น 1 Degree-Of-Freedom (1-DOF) หลาย ๆ สมการ ซึ่งสมการดังกล่าวจะเป็นชุดสมการที่แยกเป็นอิสระต่อกัน เพื่อให้เกิดความเข้าใจหลักการวิเคราะห์โมดัลยิ่งขึ้น จะยกตัวอย่างการวิเคราะห์เป็นคานายื่นที่มีปลายด้านหนึ่งถูกยึดติดกับผนัง ซึ่งคานานี้มีความเป็นมวล สปริง และความหน่วงในเนื้อวัสดุ ถ้ามีแรงกระทำ (F) ที่ด้านปลายของคานายื่น จะเกิดการเคลื่อนที่ที่ปลายคานายื่น และส่งผลให้การเคลื่อนที่ไปยังส่วนอื่น ๆ ของคานาโดยส่งผ่านในเนื้อวัสดุ คานายื่นนี้พิจารณาการเคลื่อนที่ 3 ตำแหน่งซึ่งมีระยะการเคลื่อนที่ไม่เท่ากัน เป็นระยะ x_1 , x_2 , x_3 ดังแสดงตามรูปที่ 3



รูปที่ 3 แสดงคานายื่น

พิจารณาการเคลื่อนที่ของบริเวณคานายื่นตามรูปที่ 3 และแทนทั้งสามตำแหน่งของคานาด้วยก้อนมวล ต่อกับสปริงและตัวหน่วง จะได้ตามรูปที่ 4



รูปที่ 4 แสดงมวลก้อนระบบ

จากรูปที่ 4 สามารถเขียนเป็นสมการการเคลื่อนที่ของระบบในรูปแบบเมตริกซ์ได้

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = \{F\} \quad (1)$$

โดยที่ [m] = เมตริกซ์มวลของระบบ (Mass Matrix)

[c] = เมตริกซ์ค่าความหน่วงของระบบ (Damping Matrix)

[k] = เมตริกซ์ค่าความแข็งสปริงของระบบ (Stiffness Matrix)

ผลการตอบสนองของระบบในสมการที่ 1 คือ $x(t)$ ซึ่งจะสัมพันธ์กับ Normal Mode, $\{u\}_i$ และ Normal Decoupled Coordinate, q_i คือ

$$\{x(t)\} = \sum_{r=1}^n \{u\}_r q_r(t) \quad (2)$$

การแยกสมการเป็นสมการย่อยใช้คุณสมบัติเชิงตั้งฉากของเวกเตอร์เจาะจง (Orthogonal Properties Of Mode Shape) คือ

$$\{u\}_i^T [M] \{u\}_j = \begin{cases} 0, & i \neq j \\ 1, & i = j \end{cases}$$

$$\{u\}_i^T [K] \{u\}_j = \begin{cases} 0, & i \neq j \\ \omega^2, & i = j \end{cases}$$

เมื่อนำสมการที่ 2 ไปแทนในสมการที่ 1 และอาศัยคุณสมบัติเชิงตั้งฉากของเวกเตอร์เจาะจงจะได้ความสัมพันธ์ของข้อมูลของแรงที่ป้อนใส่ระบบ (Input) และผลตอบสนองของระบบ (Output) คือ

$$H_{ij}(\omega) = \sum_{r=1}^N \frac{U_{rj} U_{ri}}{\omega_r^2 - \omega^2 + j2\zeta\omega_r\omega} \quad (3)$$

โดยที่

ω_r = ความถี่ธรรมชาติที่ฐานนิยม r

ζ = แפקเตอร์ตัวหน่วง

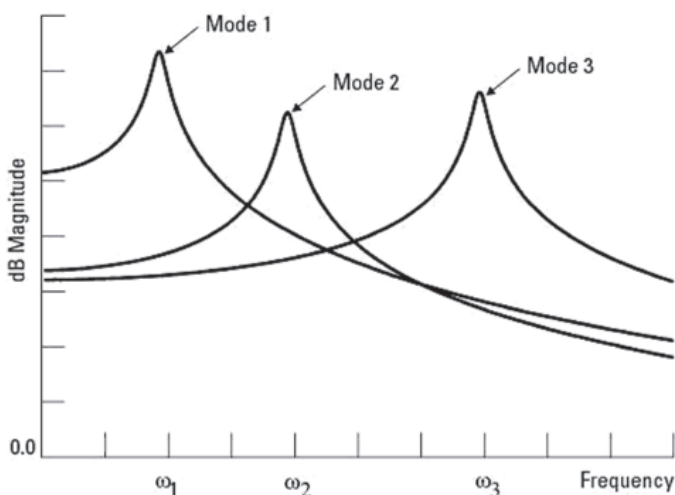
U_{ri} = เวกเตอร์เจาะจงของฐานนิยมที่ r เมื่อวัดที่จุด i

H_{ij} = ฟังก์ชันถ่ายโอน

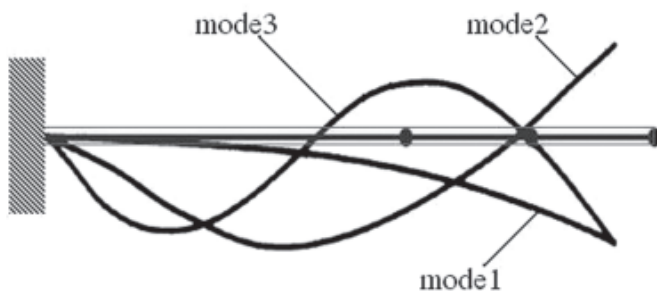
เราเรียกสมการที่ 3 ว่าฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบ (Transfer Function) ซึ่งจะมีข้อมูลที่ป้อนหรือกระตุ้นใส่ระบบกับข้อมูลที่เป็ผลตอบสนองของระบบเท่านั้น โดยการวัดการตอบสนองของระบบสามารถวัดออกมาในลักษณะการขจัด

ความเร็ว หรือความเร่ง ซึ่งถ้าเป็นผลการเปรียบเทียบผลตอบสนองการขจัดกับการกระตุ้นจะเรียกว่า Receptance แต่ถ้าเป็นผลการเปรียบเทียบระหว่างผลตอบสนองความเร็วกับการกระตุ้นเรียกว่า Mobility ส่วนผล การเปรียบเทียบผลตอบสนองความเร่งกับการกระตุ้นเรียกว่า Inertance และฟังก์ชันถ่ายโอนมี คุณสมบัติเฉพาะ (Characteristic) ของระบบหนึ่ง ๆ โดยไม่ขึ้นกับภาระที่กระทำ ซึ่งฟังก์ชันถ่ายโอน ในสมการที่ 3 นี้จะได้จากข้อมูลการทดสอบโครงสร้าง ส่วนข้อมูลที่เรากำลังต้องการทราบคือตัวแปรในทางขวามือของสมการ และตัวแปรเหล่านี้มีความสัมพันธ์กับคุณสมบัติของวัสดุคือ มวล (Mass), ความแข็งตึงของสปริง (Stiffness), และสัมประสิทธิ์การหน่วง (Damping Coefficient) เมื่อนำข้อมูลในสมการที่ 3 มาแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดการสั่นกับค่าความถี่ธรรมชาติ จะได้กราฟฟังก์ชันถ่ายโอน ดังแสดงในรูปที่ 5 ที่มีค่าความถี่ธรรมชาติของคานยื่น ω_1, ω_2 และ ω_3 ซึ่งการวิเคราะห์ที่โมดัลในเชิงความถี่จะสังเคราะห์องค์ประกอบหลักของระบบออกมาจากฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบ 3 อย่างคือ (ก) ค่าความถี่ธรรมชาติ ซึ่งเป็นค่าที่แสดงตำแหน่งเกิดการตอบสนองสูงสุดของการสั่น (ข) อัตราส่วนความหน่วง จะ

แสดงในรูปของความแหลมคม (Sharpness) ของกราฟฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบ และ (ค) รูปร่างการสั่นสะเทือน (Mode Shape) ของระบบซึ่งจะแสดงถึงตำแหน่งที่มีการตัดตัวของระบบโครงสร้าง ดังแสดงในรูปที่ 6 องค์ประกอบดังกล่าวนี้จะอธิบายพฤติกรรม การสั่นสะเทือนของโครงสร้างต่อแรงที่กระตุ้น ซึ่งจะช่วยให้วิศวกรทราบสภาวะการตอบสนองของโครงสร้าง ความถี่ธรรมชาติ การสั่นที่อาจจะก่อให้เกิดความเสียหายต่อการใช้งาน โดยในการแก้ไขปัญหาคือการสั่นสะเทือนของโครงสร้างนั้นมีหลายวิธี เช่น การติดตั้งอุปกรณ์ลดการสั่นเข้ากับชุดโครงสร้าง การควบคุมโหมด การสั่นสะเทือนของโครงสร้าง ซึ่งการทราบฟังก์ชันตอบสนองของระบบจะช่วยให้วิศวกรพิจารณาหาตำแหน่งที่เหมาะสมในการควบคุมการสั่น หรือการเปลี่ยนแปลงแก้ไขโครงสร้าง เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาการสั่นสะเทือนที่จะทำให้เกิดความเสียหายของโครงสร้างในการใช้งาน ส่วนกระบวนการหา เพื่อให้ได้องค์ประกอบทั้ง 3 อย่างนี้เป็นรายละเอียดย่อยลงไปอีก ผู้เขียนไม่ขอกล่าวไว้ในที่นี้ผู้สนใจสามารถศึกษาได้จากเอกสารอ้างอิง



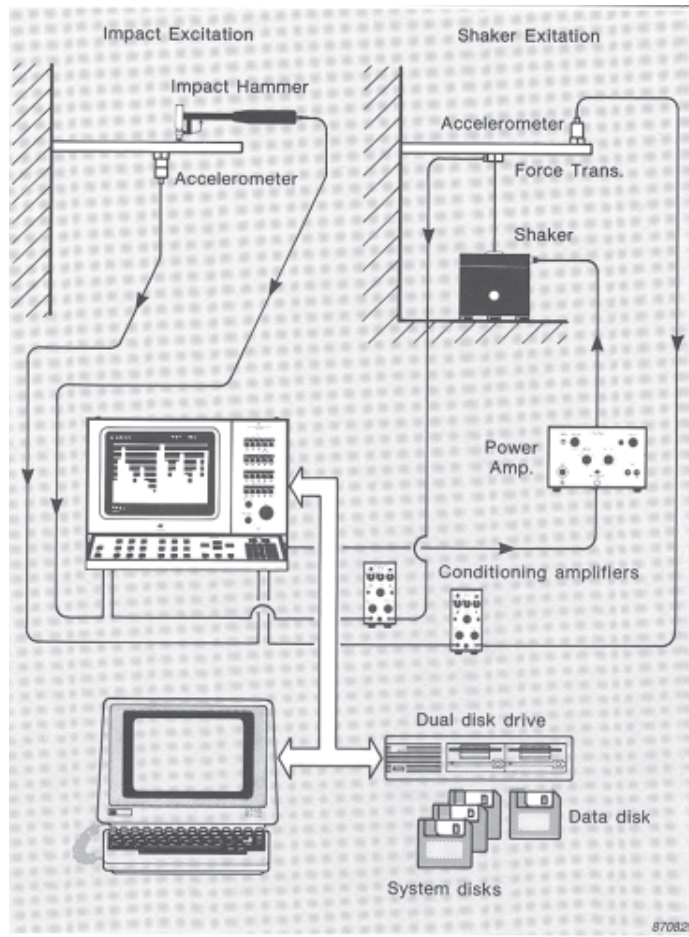
รูปที่ 5 แสดงฟังก์ชันถ่ายโอนของคานยื่น



รูปที่ 6 แสดงรูปร่างการสั่นของคานยื่น

เครื่องมือวิเคราะห์โมดัล

การวิเคราะห์ทางโมดัลนั้นเป็นการหาข้อมูลและวัดการตอบสนองของระบบไปหาค่าความถี่ธรรมชาติ และรูปร่างการสั่นของระบบ จึงจำเป็นต้องวัดสัญญาณจากระบบคือสัญญาณเข้า (Input Signal) และสัญญาณการตอบสนอง ของระบบ (Output Signal) แล้วนำค่าทั้ง 2 ไปคำนวณทางคณิตศาสตร์ ให้ออกมาในรูปฟังก์ชันถ่ายโอน แล้วนำฟังก์ชันการตอบสนองนี้ไปประมาณหาพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของระบบโครงสร้าง การป้อนสัญญาณเข้า โดยการกระตุ้นซึ่งทำได้ หลายลักษณะ เช่น การกระตุ้นเป็นระลอก (Impulse) ซึ่งกระตุ้นโดยการเคาะด้วยค้อน หรืออาจจะเป็น การกระตุ้นโดยสัญญาณแบบไม่เจาะจง (Random Noise) เครื่องมือ และอุปกรณ์ในการวิเคราะห์โมดัลจะเป็นไปตามรูปที่ 7



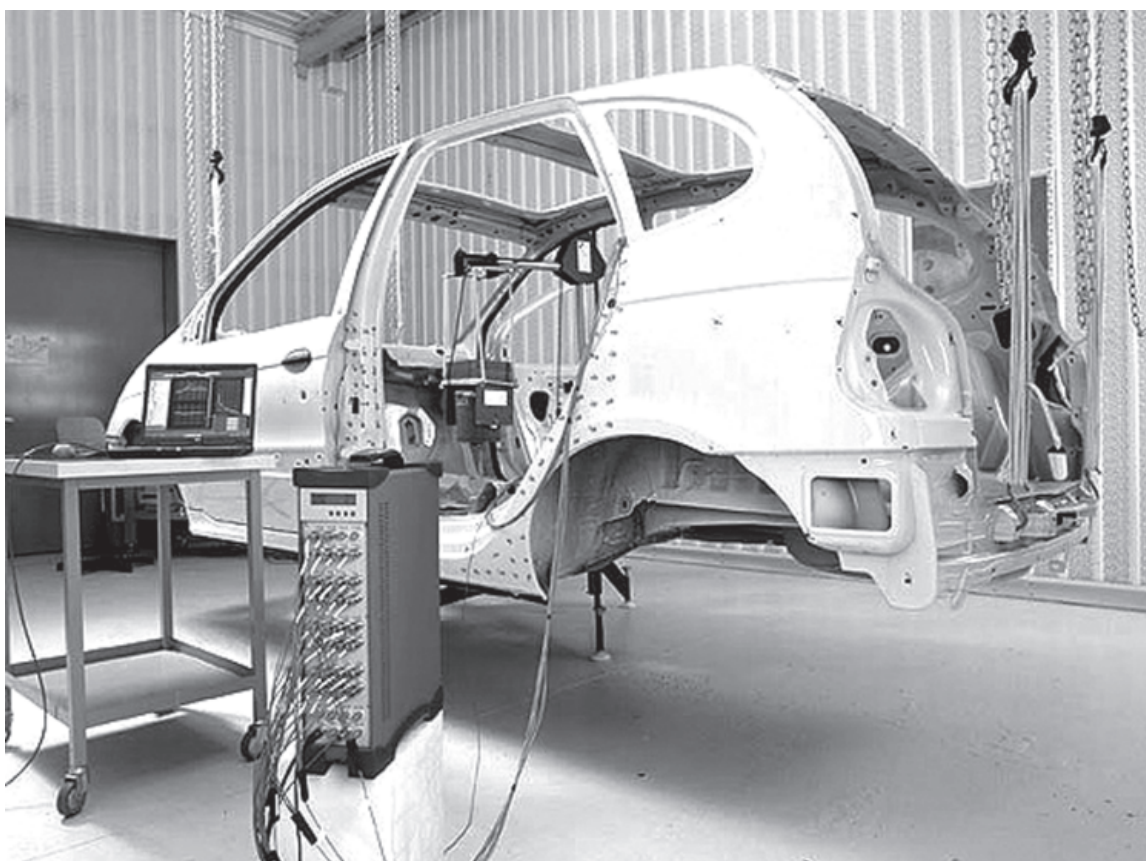
รูปที่ 7 แสดงการวิเคราะห์โมดัล

อุปกรณ์ที่ใช้จะแบ่งออกเป็น

1. เครื่องวิเคราะห์สัญญาณ (Signal Analyzer) จะทำหน้าที่รับสัญญาณเข้าและสัญญาณออกที่ส่งมาจากอุปกรณ์ขยายสัญญาณ และแปลงค่าจาก Time Domain ไปเป็น Frequency Domain โดยใช้หลักการของการแปลงฟูเรียร์ (Fast Fourier Transform, FFT) ทำเป็นฟังก์ชันถ่วงอินแล้วแสดงผลพ้อยในเทอมของความถี่
2. อุปกรณ์ขยายสัญญาณ (Charge Amplifier) จะทำหน้าที่ช่วยขยายสัญญาณ และกรองสัญญาณรบกวนทิ้ง และทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณจากชุดอุปกรณ์หยังสัญญาณทางออกที่ส่งมาแบบอัตราเร่ง ให้อยู่ในรูปความเร็วและระยะทางการเคลื่อนที่ได้
3. อุปกรณ์หยังสัญญาณ (Accelerometer) จะทำหน้าที่ในการแปลงแรงที่กระทำกับระบบให้เป็นแรงดันทางไฟฟ้า และเปลี่ยนจากการตอบสนองในรูปอัตราเร่งความเร็ว และ

ระยะทางการเคลื่อนที่ ให้อยู่ในรูปแรงดันไฟฟ้า

4. อุปกรณ์เครื่องเขย่า (Shaker) อุปกรณ์นี้จะทำหน้าที่เป็นตัวกำเนิดแรงให้กระทำกับระบบเป็นสัญญาณเข้าที่โครงสร้าง โดยรับสัญญาณจากชุดกำเนิดสัญญาณ (Generator) และทำการเขย่าตามลักษณะตามสัญญาณที่ส่งมา ชุดเครื่องเขย่านี้ประกอบด้วย ชุดกำเนิดสัญญาณ ทำหน้าที่สร้างสัญญาณและชุดขยายสัญญาณ ทำหน้าที่ขยายสัญญาณให้กับอุปกรณ์เครื่องเขย่าและควบคุมขนาดของแรงให้มากขึ้นน้อยตามความต้องการ



รูปที่ 8 แสดงการทดสอบโมเดลโครงสร้างรถ

การประยุกต์ใช้งานของโมดัล

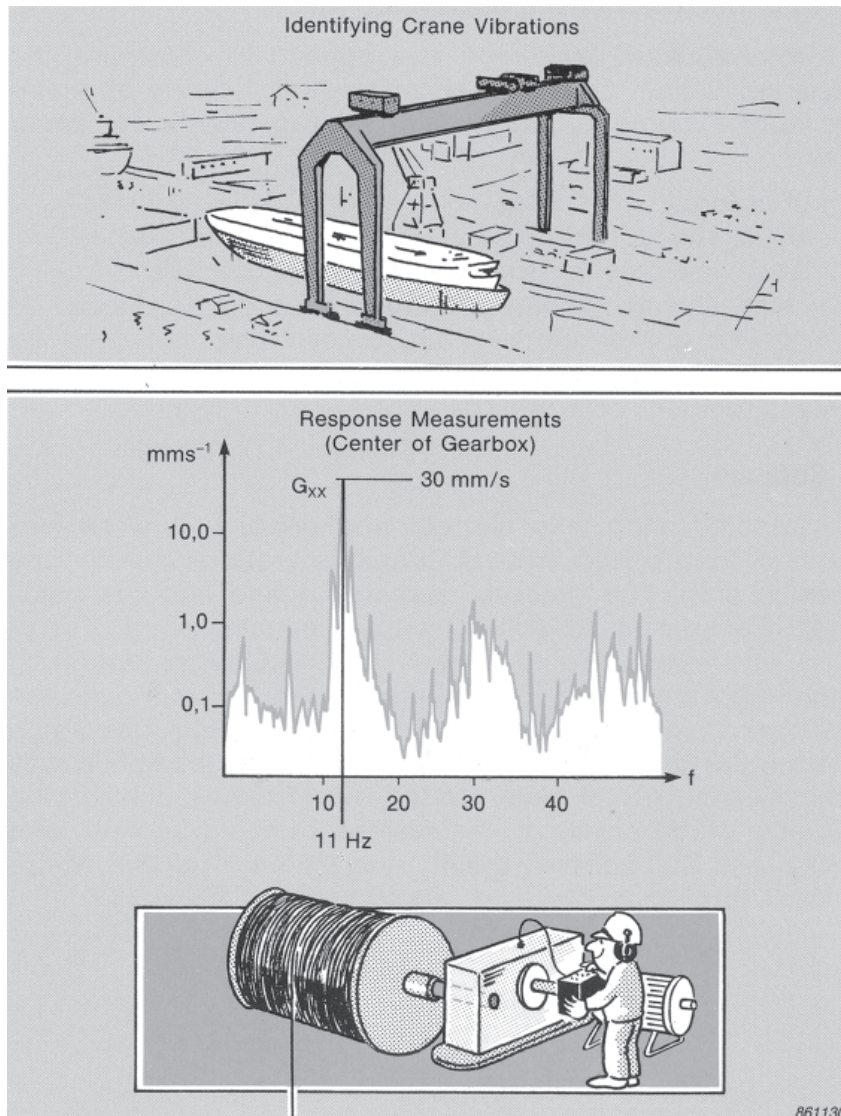
การประยุกต์ใช้งานของโมดัลมีมากมายหลายอย่าง ในที่นี้จะขอยกตัวอย่างใน 2 กรณีคือ

1. การสั่นสะเทือนของเครนอุ้งเรือ

อุ้งเชื่อมเรือแห่งหนึ่งประสบปัญหาเกี่ยวกับการสั่นสะเทือนของ Gantry Crane ที่ใช้งานอยู่ในปัจจุบัน ซึ่งขณะใช้งานจะเกิดการสั่นสะเทือนอย่างรุนแรงกับโครงสร้าง ฝ่ายผลิตของอุ้งตกอยู่ในสภาวะที่ลำบากในการตัดสินใจดำเนินการอย่างหนึ่งอย่างใดเพื่อการซ่อมบำรุง ซึ่งหากเครนดังกล่าวไม่สามารถใช้งานได้แล้วจะส่งผลกระทบต่อกิจการของบริษัทเป็นอย่างมาก การซ่อมบำรุงจะต้องแก้ไข้ปัญหาให้ได้ที่สาเหตุโดยตรง โดยใช้เวลาในการซ่อมบำรุงไม่นาน วิศวกรผู้รับผิดชอบจึงตัดสินใจประยุกต์ใช้การวิเคราะห์โมดัลในการแก้ปัญหา

ในขั้นตอนแรก วิศวกรจะต้องตรวจสอบให้พบแหล่งที่ทำให้เกิดการสั่นสะเทือนขึ้นเสียก่อน จากการตรวจวัดการสั่นสะเทือนพบว่า การสั่นสะเทือนจะเกิดขึ้นเมื่อใช้งานกว้าน

ในกรณีใช้งานหุยก (Hoisting) ขึ้น-ลง เมื่อตรวจสอบอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องแล้วพบว่าแหล่งที่มาของการสั่นสะเทือนเกิดจากชุดเกียร์ของกว้านนั่นเอง เมื่อตรวจสอบการตอบสนองของกว้าน (FRF) ในขณะที่ทำงาน ณ ตำแหน่งกึ่งกลางของชุดเกียร์ พบว่าความถี่ที่ทำให้เกิดการสั่นสะเทือนสูงที่สุดอยู่ที่รอบการใช้งาน 660 รอบ/นาที (11 Hz) ซึ่งตรงกับรอบการทำงานของ Gearwheel (รูปที่ 9)



รูปที่ 9 แสดงการวิเคราะห์เครื่องเรือ

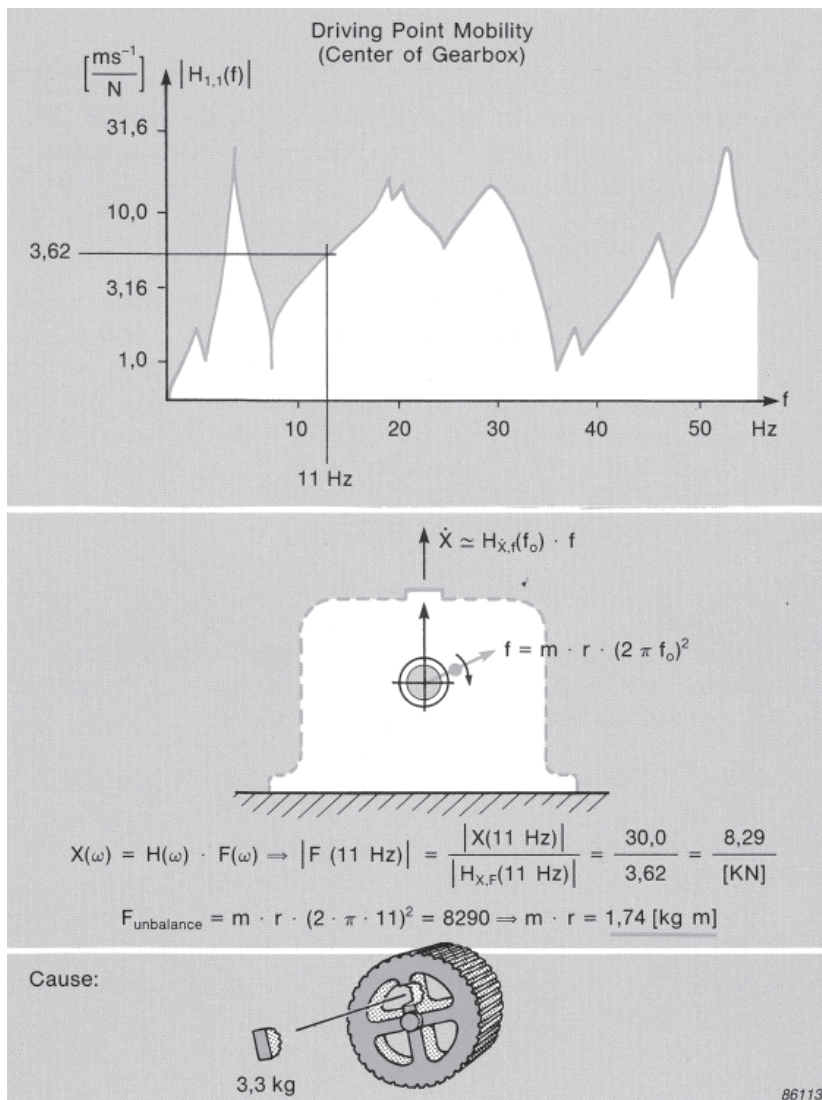
ปัญหาต่อไปที่ต้องพิจารณา ก็คือการสั่นสะเทือนที่สร้างปัญหาในครั้งนี้นี้เกิดขึ้นมาจากสาเหตุอะไร ? ระหว่าง (ก) แรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากการทำงานของชุดเกียร์มีค่าสูงเกินไป ? หรือ (ข) แรงที่มากกระทำ มีความถี่ตรงกับความถี่ธรรมชาติของชุดเกียร์ ? (ปรากฏการณ์ Resonance) เพื่อที่จะหาสาเหตุของปัญหาในครั้งนี้นี้ วิศวกรที่รับผิดชอบได้ทำการตรวจสอบทางโมดัลด้วยการใช้ Exciter กระตุ้นที่ส่วนบนของชุดเกียร์ และตรวจวัดค่า Mobility ที่อุปกรณ์ Shaft Bearing ของ Gearwheel ที่เป็นปัญหา ดังในรูป 9 ซึ่งฟังก์ชันถ่ายโอน (FRF) แสดงให้เห็นว่าไม่มีปรากฏการณ์ Resonance เกิดขึ้นที่ความถี่ 11 Hz ดังนั้นสาเหตุของการสั่นสะเทือนจึงเกิดขึ้นมาจากแรงที่เป็นผลจากการ

ทำงานของชุดเกียร์ มีค่าสูง ซึ่งแรงดังกล่าวได้รับการวิเคราะห์ร่วมกับผลการตรวจวัดการ สั่นสะเทือน แล้วพบว่าเป็นปัญหาที่เกิดจากการหมุนที่ไม่สมดุล (Force Vibrations Due To Rotating Unbalance) เมื่อวิศวกรสามารถรู้ถึงต้นเหตุของปัญหาแล้ว ต่อไปก็ทำการแก้ปัญหาด้วยการวิเคราะห์เพื่อหาค่ามวลที่ทำให้เกิดการไม่สมดุลดังกล่าว เมื่อพิจารณาให้

Shaft Bearing ของชุดเกียร์เป็นแบบ Single Input - Single Output (SISO) แล้ว เราสามารถที่จะวิเคราะห์หาค่าขนาดของแรง (Magnitude) ที่เกิดขึ้นได้จากสมการความสัมพันธ์ระหว่าง Input (F) ซึ่งคือแรงที่กระทำ, Output (X) ซึ่งในกรณีนี้คือ Mobility และฟังก์ชันถ่ายโอน (Frequency Response Function - FRF หรือ H) ได้ดังสมการ (4) คือ

$$F(\omega) = \frac{X(\omega)}{H(\omega)} \quad (4)$$

จากการตรวจวัดพบว่าแรงที่เกิดจากการไม่สมดุลมีค่าเท่ากับ 8.29 kN ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการโดยใช้ค่าของฟังก์ชันถ่ายโอน (FRF) ที่ความถี่ 11 Hz และค่า Mobility ที่ตรวจวัดได้ จากนั้นจะสามารถคำนวณได้ว่ามวลที่ไม่สมดุล มีค่าเท่ากับ 1.74 kg-m. จากสมการ พื้นฐานดังในรูปที่ 10



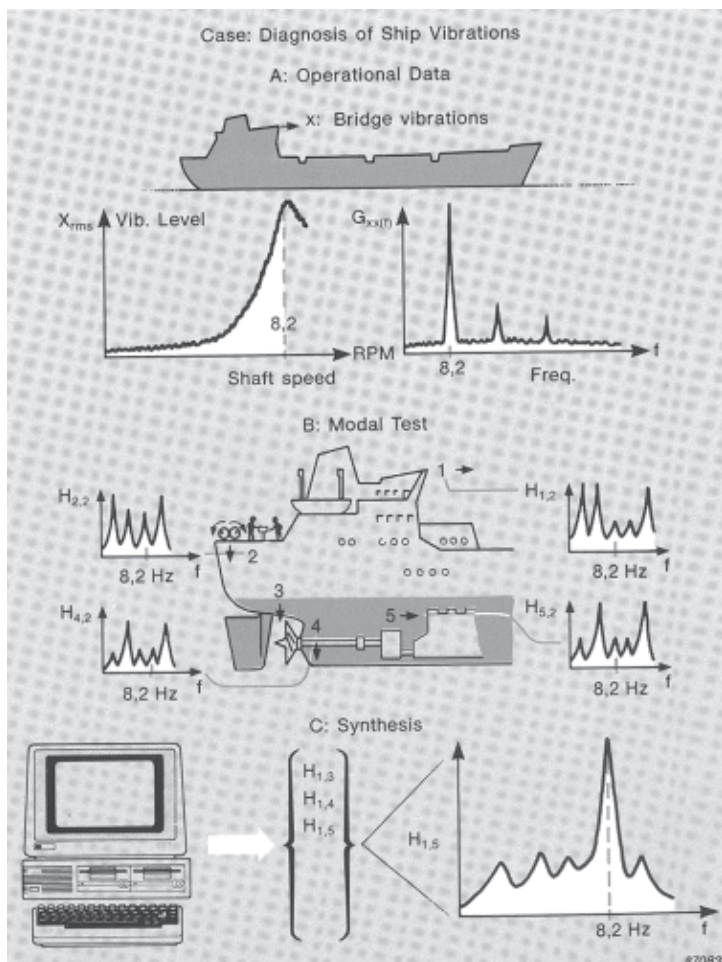
รูปที่ 10 แสดงการคำนวณหาค่ามวลไม่สมดุล

เมื่อสามารถตรวจสอบ และวิเคราะห์หาสาเหตุต่าง ๆ ของปัญหาที่เกิดจากการสั่นสะเทือนได้แล้ว ฝ่ายผลิตได้ตกลงใจที่จะทำการซ่อมบำรุง โดยกำหนดไว้ว่าจะทำการซ่อมทำให้แล้วเสร็จในช่วงเวลาเพียง 1 กะ (1 Working Shift) ของการทำงาน ฝ่ายซ่อมบำรุงที่ทำหน้าที่ในการถอดประกอบ และฝ่ายที่ทำหน้าที่ในการถ่วงสมดุลได้ช่วยกันดำเนินการแก้ไขจนสามารถประกอบอุปกรณ์เข้าที่เพื่อใช้งานได้ภายในเวลา 8 ชั่วโมงเท่านั้น ซึ่งจากการใช้งานพบว่าปัญหาการสั่นสะเทือนที่เคยเกิดขึ้นไม่ปรากฏขึ้นอีกเลย สิ่งที่น่าสนใจอีกอย่างหนึ่งก็คือ การที่วิศวกรพิจารณาหาค่ามวลที่ไม่สมดุลแบบ SISO นั้น ในทางการคำนวณจะได้ค่าที่ยาบพอสมควร แต่จากการตรวจสอบพบว่าค่ามวลที่ไม่สมดุล

ที่คำนวณได้นั้นเกือบเท่ากับมวลที่ไม่สมดุลจริง ซึ่งแรงแบบไม่สมดุลที่สร้างปัญหานั้นเกิดจากการแตกหักของมวลขนาดเท่ากับ 3.3 kg ซึ่งมีระยะห่างจากจุดศูนย์กลางของเพลากับ 0.53 เมตร (คำนวณตามสมการจะได้ค่าเท่ากับ 1.749 kg-m. เมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณได้ก่อนนี้ซึ่งเท่ากับ 1.74 kg-m.)

2. การสั่นสะเทือนของโครงสร้างตัวเรือ

ในการปฏิบัติงานของเรือลำหนึ่งภายใต้สภาวะของการใช้งานอุปกรณ์ต่าง ๆ ตามปกติพบว่าสะพานเดินเรือประสบกับปัญหาอันเกิดมาจากการสั่นสะเทือนอย่างรุนแรง (คล้าย ๆ กับปัญหาการสั่นสะเทือนของ ร.ล.มงกุฎราชกุมาร) การวิเคราะห์การสั่นสะเทือนด้วยวิธีการวิเคราะห์โมดัลพบว่า การตอบสนองจะมีค่าสูงขึ้น



รูปที่ 11 การสั่นสะเทือนของโครงสร้างตัวเรือ

เปลี่ยนแปลงอย่างมากตามรอบการหมุนของเพลาเรือ (รูปที่ 11) จากการวิเคราะห์ต่อไปพบว่าแรงการสั่นสะเทือนมีผลอย่างมากมาจากแรงที่เกิดจากการหมุนของใบจักร (Propeller Blade-Passing Frequency) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าปัญหาการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นนั้นเป็นผลมาจากใบจักรของเรือ

ปัญหาต่อไปที่วิศวกรต้องวิเคราะห์ก็คือส่วนใดของเรือที่เป็นส่วนที่ส่งผ่านแรงการสั่นสะเทือนจากใบจักรดังกล่าวมายังโครงสร้างตัวเรือจนกระทั่งสร้างปัญหาขึ้นที่สะพานเดินเรือ ซึ่งส่วนนี้น่าจะมีความถี่ธรรมชาติตรงกับรอบการทำงานดังกล่าวและทำให้เกิดปรากฏการณ์ Resonance เกิดขึ้น (ในกรณีนี้เจ้าของเรือไม่ยอมเปลี่ยนใบจักรเพื่อแก้ไขปัญหา) วิศวกรได้ศึกษาโครงสร้างของเรือและพบว่าอุปกรณ์ที่สามารถถ่ายแรงได้ประกอบด้วย (ก) stem bearing (2-DOF), (ข) thrust bearing (1-DOF), (ค) ชุดเกียร์ (2-DOF) หรือ (ง) แรงดันของน้ำที่กระทำกับตัวเรือใต้แนวน้ำอันเป็นผลมาจากการทำงานของใบจักร

ในการตรวจวัดเพื่อวิเคราะห์หาตำแหน่งของการส่งถ่ายแรงดังกล่าว วิศวกรตกลงใจใช้การตรวจวัดโมดัล โดยการติดตั้ง

ชุดอุปกรณ์กระตุ้น (Exciter) ไว้ที่คาดฟ้าท้ายเรือ ซึ่งอุปกรณ์ดังกล่าวจะทำงานครอบคลุมช่วงการทำงานของอุปกรณ์ในขณะที่ทำการตรวจวัดฟังก์ชันถ่ายโอนระหว่างชุดอุปกรณ์กระตุ้น และอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่สงสัย (ก - ง) จากการตรวจวัดและวิเคราะห์ พบว่าไม่มีฟังก์ชันถ่ายโอนของอุปกรณ์ใดแสดงว่ามีปรากฏการณ์ Resonance เกิดขึ้นเลย แม้ว่าวิศวกรจะไปทำการตรวจวัด ณ สะพานเดินเรือก็ตาม วิศวกรจึงได้ทำการศึกษาโครงสร้างอีกครั้งและได้ข้อสรุปว่า แรงที่จะส่งผลให้เกิดการสั่นสะเทือนที่สะพานเดินเรื่อนั้นจะต้องเป็นแรงที่เกิดขึ้นจากส่วนล่างซึ่งติดกับเพลาใบจักรเท่านั้น วิศวกรจึงทำการวิเคราะห์โมดัลใหม่อีกครั้ง แต่ในครั้งนี้จะทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบ ระหว่างสะพานเดินเรือและอุปกรณ์ที่สงสัย ซึ่งพบว่าฟังก์ชันถ่ายโอนระหว่างสะพานเดินเรือ และ Thrust Bearing แสดงให้เห็นว่ามี Mobility สูงมากที่ความถี่ 8.2 Hz (รูป 11)

เมื่อสามารถตรวจพบส่วนที่ส่งถ่ายการสั่นสะเทือนซึ่งแสดงปรากฏการณ์ Resonance แล้ว วิศวกรจึงทำการเปลี่ยน Thrust Bearing ใหม่ให้มีค่าความแข็ง (Stiffness) เพิ่มขึ้น ซึ่งลดค่า Mobility ที่ตรวจวัดได้ลงถึง 5 เท่า ซึ่งเมื่อตรวจวัดค่าการสั่นสะเทือน ณ สะพานเดินเรือแล้วก็สามารถลดขนาดของการสั่นสะเทือนลงได้ประมาณ 5 เท่าเช่นกัน และสะพานเดินเรือก็ไม่ประสบกับการสั่นสะเทือนอย่างรุนแรงดังที่เคยปรากฏมาก่อนอีกเลย

สรุป

การวิเคราะห์โมดัลถือเป็นการวิเคราะห์ที่มีความสำคัญต่อการออกแบบและป้องกันความเสียหายต่องานโครงสร้าง โดยจะทำให้ทราบถึงพฤติกรรมการตอบสนองของระบบต่อการสั่นสะเทือน และทำให้ทราบตำแหน่งที่มีโอกาสจะเกิดความเสียหายในโครงสร้าง และยังสามารถนำไปพิสูจน์ยืนยันผลของการจำลองทางคณิตศาสตร์ในการทำงานจริง ซึ่งหลักการจะเป็นการสังเคราะห์องค์ประกอบหลักที่จะอธิบายพฤติกรรมของระบบนั้น ๆ ออกมาคือ ค่าความถี่ธรรมชาติ ค่าอัตราส่วนการหน่วง และรูปร่างการสั่น โดยองค์ประกอบทั้ง 3 ค่านี้มีความสัมพันธ์กับคุณสมบัติของวัสดุ ซึ่งการจะได้องค์ประกอบนี้มาจะต้องทำการวัดข้อมูลที่ป้อนให้กับระบบกับผลการตอบสนองของระบบโครงสร้างนำมาผ่านการคำนวณทางคณิตศาสตร์และแสดงผลการตอบสนองระบบในรูปฟังก์ชันถ่ายโอน ซึ่งการวิเคราะห์จะต้องมีความเข้าใจพื้นฐานทางพลศาสตร์ของระบบโครงสร้างประกอบกับการพิจารณาในการแก้ไขโครงสร้างเพื่อป้องกันความเสียหายในการใช้งาน

เอกสารอ้างอิง

- D. J. Ewins, *“Modal Testing : Theory and Practice”*, Research Studies Press Ltd., Letchworth, Herts, 1984.
- Daniel J.Inman. *“Engineering Vibration”*, Prentice Hall International Inc, 1994.
- Jimin He and Zhi-Fang Fu, *“Modal Analysis”*, Oxford, Butterworth-Heinemann, 2001.
- Ole Dossing, *“Structural Testing : Part 1 Mechanical Mobility Measurements”*, Copenhagen, Bruel & Kjaer, 1988.
- Ole Dossing, *“Structural Testing : Part 2 Modal Analysis and Simulation”*, Copenhagen, Bruel & Kjaer, 1988.

บทคัดย่อ

เมื่อชิ้นงานถูกตีขึ้นรูปนั้นความสามารถหรือขีดจำกัดในการตีขึ้นรูปก็คือการแตกหัก โดยเฉพาะการแตกหักแบบเหนียว สำหรับบทความนี้จะกล่าวถึงเกณฑ์การแตกหักที่จะนำมาใช้ทำนายพฤติกรรมของการแตกหักที่เกิดขึ้นในงานตีขึ้นรูป โดยจะมีวัสดุที่ศึกษา 3 ชนิด ได้แก่ เหล็ก ทองเหลือง และ อะลูมิเนียม โดยรูปร่างชิ้นงานทรงกระบอกตันที่มีขีดจำกัดสัดส่วนรูปร่าง 0.5, 1.0 และ 1.5 ทำการทดลองจริงด้วยการตีขึ้น และศึกษาพฤติกรรมของการแตกหักตลอดจนความสามารถในการขึ้นรูปของวัสดุแต่ละชนิด ภายใต้เงื่อนไขของความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นในการตีขึ้นรูปตามปกติ พร้อมกันนั้นก็ใช้วิธีการจำลองการตีขึ้นรูป โดยอาศัยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์ แล้วศึกษาพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจากการทำแบบจำลองการตีขึ้นรูปซึ่งเป็นงานตีขึ้นรูปเย็น แล้วใช้โปรแกรมทางไฟไนต์เอลิเมนต์ทำนายการแตกหักที่เกิดขึ้นจากการจำลอง ซึ่งในงานวิจัยนี้ เราจะใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์เชิงพาณิชย์ชื่อ DEFORM_2D ซึ่งมีความสามารถในการไหลตัวของโลหะในงานขึ้นรูปโลหะ โดยใช้เกณฑ์การแตกหักของ Cockroft and Latham และ Oyane ที่มีอยู่ในโปรแกรม เป็นเกณฑ์ที่ใช้ในการทำนายการแตกหักที่เกิดขึ้นในการทดลองนี้ เมื่อนำผลจากการคำนวณที่ได้จากการทดลองเปรียบเทียบกับผลการจำลองพบว่าเกณฑ์การแตกหักของ Cockroft and Latham ทำนายการแตกของชิ้นงานทองเหลืองคลาดเคลื่อนมากกว่าของ Oyane ส่วนชิ้นงานเหล็กกับอะลูมิเนียม ความแม่นยำในการทำนายใกล้เคียงกัน

คำหลัก การตีขึ้นรูป / การทำนายการแตกหัก /
เปรียบเทียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

เรือเอก บพิท ทศเทพพิทักษ์

ประจำแผนกวิชาการ กองวิจัยและพัฒนา กรมพัฒนาการช่าง กรมอุทกศาสตร์เรือ

E-mail : borpitt@yahoo.com

ดร.สุรศักดิ์ สุรนันทชัย

ผู้อำนวยการศูนย์เทคโนโลยี CAD/CAM/CIM คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี

E-mail : surasak.sur@kmutt.ac.th

พลเรือตรี เอกชัย ตรุศรบรรจง

ผู้จัดการฝ่ายบรรจุภัณฑ์ บริษัท ไทยเอเชีย แปซิฟิค บริวเวอรี่ จำกัด

E-mail : ekachai@tapb.co.th



การทำนายการแตกหักด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ (Prediction of Fracture Initiation in Forged Product Using Finite Element Method)

บทนำ

สำหรับบทความนี้จะกล่าวถึงการแตกหักที่เกี่ยวข้องในงานตีขึ้นรูป (Upsetting) ในกรณีการแตกหักแบบต่าง ๆ เพื่อค้นหาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการแตกหัก ซึ่งสอดคล้องกับพฤติกรรมของวัสดุแต่ละแบบ เนื่องจากทฤษฎีที่ว่าด้วยการแตกหักนั้นมีหลายทฤษฎี ซึ่งต้องเลือกใช้ให้เหมาะสมกับสถานการณ์บ่อยครั้งที่การประเมินความเสียหายที่ได้จากการคำนวณผิดพลาด เนื่องจากการเลือกใช้ทฤษฎีที่ไม่สอดคล้องกับสถานการณ์จริง ดังนั้นความรู้พื้นฐานในทฤษฎีต่าง ๆ จึงมีความจำเป็นในการที่เราจะสามารถทำนายการเกิดการแตกหักของชิ้นงานที่ถูกตีขึ้นรูปในแบบ Upsetting (ตีขึ้น) ได้

โดยในการทดลองจริงนั้น จะกระทำชิ้นงานในลักษณะตีขึ้นแล้วเปรียบเทียบกับโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ มาช่วยในการวิเคราะห์ผลจากการทดลอง และรวบรวมข้อมูลที่ได้จากการทดลองจริง กับโปรแกรมมาประมวลผล เพื่อเปรียบเทียบหาข้อสรุปในการทำนายการเกิดการแตกหักก่อนที่จะทำการผลิตชิ้นงานจริง

การแตกหักในกระบวนการตีขึ้นรูป (Ductile Fracture in Cold Forging)

การแตกหักแบบเหนียวในกระบวนการตีขึ้นรูปเย็น แบ่งได้ 3 แบบ มีการแตกร้าวที่ผิว (Free Surface Cracks), การแตกร้าวที่เกิดขึ้นภายใน (Internal Cracks) และสุดท้ายการร้าวที่ผิวโดยการสัมผัสกับเครื่องมือ (Tool Contacting Surface Cracks) ในที่นี้จะพิจารณาการแตกที่เกิดขึ้นจากการแตกร้าวที่ผิวเท่านั้น การแตกร้าวที่ผิวจะสังเกตได้ในงานขึ้นรูปแบบตีขึ้น และตีหัวยื่น (Heading) เพราะว่าจะเกิดความเค้นบีบทางด้านแรงดึง (Tensile Hoop Stress) ขึ้นในระหว่างการเสียรูป ดังแสดงในรูป 1 และจะเกิดขึ้นในกระบวนการอัดขึ้นรูปแท่งกลมแบบเดินหน้า (Forward Bar Extrusion) อันเนื่องมาจาก การหล่อลื่นที่ไม่ดีระหว่างชิ้นงาน และแม่พิมพ์



รูปที่ 1 แสดงภาพการแตกร้าวที่ผิวในกระบวนการตีขึ้นรูป

1. การทำนายการแตกหักที่เกิดขึ้นในกระบวนการขึ้นรูปโลหะ (Fracture Prediction in Metal Forming)

ในที่นี้จะกล่าวถึงการวิเคราะห์การแตกหักแบบเหนียว (Ductile Fracture) เท่านั้น สำหรับปรากฏการณ์การแตกหักแบบเหนียวนั้น เป็นส่วนหนึ่งของกระบวนการเสียรูปแบบพลาสติก (Plastic Deformation) ในโลหะซึ่งสามารถที่จะเกิดขึ้นได้ทั้งในการอัดขึ้นรูป (Extrude) และการตีขึ้นรูป (Forge) เกณฑ์การแตกหักที่ใช้ทำนายการแตกหักแบบเหนียวในกระบวนการขึ้นรูปโลหะนั้น มีหลายเกณฑ์ ที่สามารถที่จะทำนายได้ว่า เมื่อไหร่ที่โลหะจะเปลี่ยนรูปแล้วเกิดการแตกหัก ดังนั้นในที่นี้จะกล่าวถึงความสัมพันธ์ของเกณฑ์การแตกหักที่ใช้ทำนาย โดยอาศัยการค้นคว้าข้อมูลจากหนังสือ, งานวิจัย และบทความต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง โดยจะเน้นเกณฑ์การแตกหักในลักษณะที่เราสามารถที่จะทำนายได้ว่าเมื่อไหร่ที่โลหะจะเปลี่ยนรูป และเกิดการแตกหักในกระบวนการขึ้นรูป

เพื่อที่จะแก้ปัญหาในการแตกหักในการขึ้นรูปโลหะ โดยปราศจากการแตก และการแพร่กระจายของรอยแตก ในการพิจารณาการแตกหักของวัสดุในงานวิจัยนี้ จะมีเกณฑ์ที่พิจารณา 2 ข้อ คือ

1.1 รูปแบบของการแพร่กระจายรอยแตก (Void Growth Models)

นี่คือพื้นฐานของการสังเกตปรากฏการณ์ในระดับจุลภาคของการแตกหัก ซึ่งก็คือรูปแบบของ Holes Growing ที่เกิดขึ้นในโลหะ ที่จะนำไปสู่การแตก (Crack) นี่ก็คือกระบวนการของการแตกหักเสียหาย การวัดคุณสมบัติของการแตกหัก โดยการดูผลรวมของ Plastic Strain Path จนกระทั่งมันถึงค่าวิกฤติ นั้นหมายถึงวัสดุก็จะเริ่มเกิดการแตกขึ้น สำหรับเกณฑ์ที่จะนำมาใช้ในการทำนายการแตกหัก คือเกณฑ์ของ Oyane ดังมีรายละเอียด ดังนี้

Oyane และเพื่อนร่วมงาน [1-2] ได้เสนอการพัฒนาส่วนประกอบในการแตกหัก ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อผลรวมปริมาณความเค้น ถึงจุดวิกฤตที่วัสดุจะเป็นอิสระได้ นี่เป็นเกณฑ์การแตกหักที่สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\int_0^{\bar{\epsilon}_f} \left[1 + \frac{\sigma_H}{A\sigma} \right] g d\bar{\epsilon} = G \quad (1)$$

เมื่อ A = Material Constant

G = Critical Damage Value

1.2 เกณฑ์การแตกหักที่เกิดจากการตั้ง โดยการสังเกต (Empirical or Semi- Empirical Rule)

การค้นคว้าหาเกณฑ์การแตกหักบนพื้นฐานของกฎที่ตั้งขึ้น โดยการสังเกตและจากประสบการณ์ ไม่ตามทฤษฎีนั้น จะถูกใช้มากกว่าการสังเกตจากการทดลอง หรือการวิเคราะห์ที่ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ การแตกหักแบบเหนียวของของแข็งบางชนิด ขึ้นอยู่กับว่าในอดีตเคยได้รับภาระมากมาแล้ว นั่นก็คือบทสรุปของเกณฑ์ที่ถูกตั้งขึ้นของวัสดุที่ได้รับความเครียดมากเกินไป ต่อมา Cockcroft and Latham [1-2] ได้เริ่มงานในการค้นคว้าอย่างมีเหตุผลมีผลของเกณฑ์การแตกหักนี้ พวกเขาได้เพิ่มการทดลองแรงดึงของวัสดุชิ้นงานที่สมมาตรรอบแกน และได้ผสมผสานเกณฑ์การแตกหักนี้ โดยอาศัยเกณฑ์การแตกหักของ Maximum Tensile Stress

$$\int_0^{\bar{\epsilon}_f} \sigma^* \cdot d\bar{\epsilon} = C_2 \quad (2)$$

เมื่อ C_2 = Material Constant

σ^* = Maximum Principal Tensile Stress

2. จุดวิกฤติของการแตกหักเสียหาย

2.1 ค่าของการแตกหัก (Damage Value)

เกณฑ์การแตกหักแบบเหนียวที่กล่าวมาทั้งหมด จะเป็นตัวแทนของรูปแบบเงื่อนไข [3] ดังนี้

$$\int F(\text{deformation history}) d\bar{\epsilon} = C \quad (3)$$

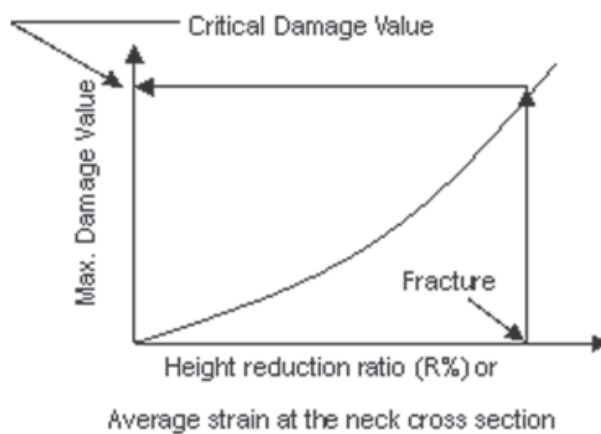
เมื่อ $\bar{\epsilon}$ คือ Effective Strain

C คือ Damage Value

ค่าของการแตกหักนี้ คือค่าตรงจุดที่เกิดการเสีรูปของชิ้นงาน และสามารถหาได้จากการอินทิเกรตสมการที่ (3) เป็นค่าสมมุติที่บอกปริมาณของความเสียหาย จะไม่ลดลงในระหว่างกระบวนการตีขึ้นรูปเย็นอย่างต่อเนื่องกัน โดยปราศจากการอบอ่อนระหว่างกระบวนการ ดังนั้น การอินทิเกรตสมการการแตกหักแบบเหนียวนี้ ค่าที่ได้จะมากกว่าศูนย์เสมอ

2.2 ค่าวิกฤติของการแตกหัก (Critical Damage Value)

สมมุติฐานพื้น ๆ ของเกณฑ์การแตกหักแบบเหนียว ในรูปแบบของสมการ (3) ก็คือการแตกหักแบบเหนียวจะเกิดขึ้น เมื่อค่าสูงสุดของการแตกหัก (Maximum Damage Value) ในชิ้นงานเกินค่าวิกฤติ หรือ Critical Damage Value สำหรับวัสดุที่มีเนื้อเดียวกัน ค่าของ Critical Damage Value สามารถที่จะพิจารณาได้จากค่าคงที่วัสดุ (Material Constant) ก็เปรียบเสมือนกับค่า Yield Stress หรือ Tensile Strength ดังนั้นความแตกต่างของเกณฑ์การแตกหักแบบเหนียวนำไปสู่ความแตกต่างของค่า Damage Value ค่า Critical Damage Value ก็มีลักษณะเช่นเดียวกัน ที่จะให้ความแตกต่างของเกณฑ์การแตกหักแบบเหนียว ซึ่งก็คือความแตกต่างกันของชนิดวัสดุด้วย

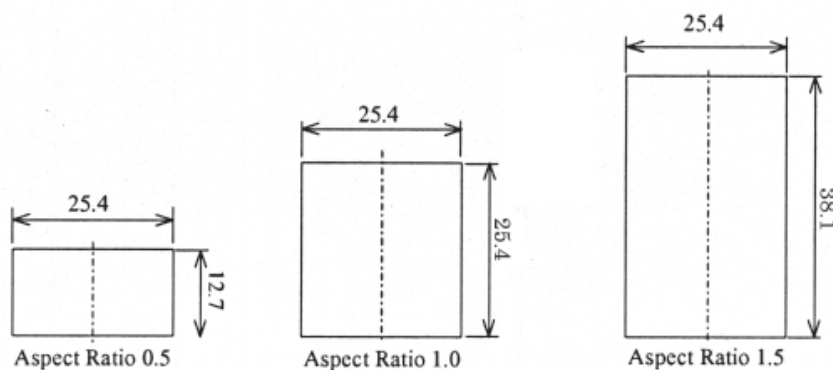


รูปที่ 2 ไดอะแกรมเกณฑ์การแตกหักแบบเหนียว

ขั้นตอนการวิจัย

1. การทดลองตีขึ้นชิ้นงาน

จะทำการตีขึ้นชิ้นงานทรงกระบอก ที่มีขีดจำกัดสัดส่วนของรูปร่าง (Aspect Ratio) 3 ขนาด คือ 0.5, 1.0 และ 1.5 ดังแสดงในรูปที่ 3 โดยมีชนิดของวัสดุชิ้นงาน 3 ชนิด คือ อะลูมิเนียม, ทองเหลือง และเหล็ก

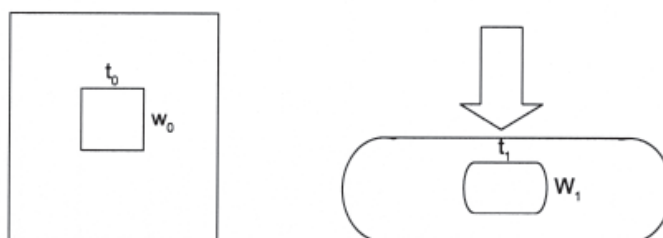


รูปที่ 3 ลักษณะของชิ้นทดสอบ

ในการทดลองดัดจะใช้เครื่องไฮดรอลิคเพรส ขนาด 150 ตัน ก่อนทำการทดลองจะทำตารางสี่เหลี่ยมไว้ที่ตรงกลางของชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 4 เพื่อวัดความเปลี่ยนแปลงของขนาดตารางทุกครั้งที่เกิดการลดลงของความสูงชิ้นงาน ที่ลดลงไปครั้งละ 10% ของความสูง ทั้งนี้ก็เพื่อคำนวณหาค่าความเครียดในแนวเส้นรอบวงและแนวแกน ตามสมการที่ 4 และ 5 จนกระทั่งชิ้นงานเกิดการแตกชั้นแล้วบันทึกเปอร์เซ็นต์การลดลงของความสูงที่จุดแตกหัก

$$\varepsilon_z = \ln \left[\frac{t}{t_0} \right] \quad (4)$$

$$\varepsilon_z = \ln \left[\frac{t}{t_0} \right] \quad (5)$$



รูปที่ 4 ลักษณะของการทดลองดัด โดยแสดงการตีตาราง เพื่อวัดค่าความเครียด

หลังจากนั้น ก็จะทำกรคำนวณเพื่อหาตัวคูณการแตกหักโดยใช้ข้อมูลจากการทดลอง ด้วยเกณฑ์การแตกหักของ Cockroft & Latham และ Oyane และนำข้อมูลจากการทดลอง และจากการจำลองด้วยโปรแกรมมาทำการเปรียบเทียบกัน

2. คุณสมบัติทางกลของวัสดุ

การทดสอบหาค่าคุณสมบัติทางกลของวัสดุทั้ง 3 ชนิด ที่ใช้ในที่นี้คือ เหล็ก, ทองเหลือง และ อะลูมิเนียม ซึ่งคุณสมบัติทางกลเป็นแบบยืดหยุ่น-พลาสติก โดยใช้การทดสอบแรงดึง ตามมาตรฐาน ASTM และใช้เครื่องทดสอบแรงดึงแบบ Universal Testing Machine (UTM.) โดยใช้ความเร็วในการดึง 10 มิลลิเมตรต่อนาที ต่อชิ้นงาน จุดประสงค์เพื่อทำให้ทราบถึงพฤติกรรมของวัสดุ เพื่อสามารถนำมาเขียนโมเดลทางคณิตศาสตร์ของวัสดุได้ ในรูปของสมการความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดเชิงยกกำลัง [4] คือ

$$\sigma = K\varepsilon^n \quad (6)$$

ค่า n คือ เลขยกกำลังของความเครียดเชิง และค่า K คือสัมประสิทธิ์ความแข็งแรงของวัสดุ สำหรับการกำหนดคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการจำลองด้วยโปรแกรม DEFORM_2D จะกำหนดให้เป็นแบบยืดหยุ่น-พลาสติก จากการทดสอบจะได้ความสัมพันธ์ของสมการความเค้นและความเครียดเชิงยกกำลังดังนี้

เหล็ก : $\sigma = 1554 \epsilon_p^{0.2613}$

อะลูมิเนียม : $\sigma = 245 \epsilon_p^{0.1736}$

ทองเหลือง : $\sigma = 602 \epsilon_p^{0.1248}$

3. การทดลองหาสัมประสิทธิ์ความเสียหาย

ในการทดสอบเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายนี้จะใช้วิธีการกดวงแหวน (Ring Compression Test) [5] โดยจะทำการทดสอบวัสดุที่ใช้ในการทำการทดลองทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ เหล็ก, ทองเหลือง และอะลูมิเนียม ทั้งนี้เพื่อให้ทราบถึงสภาวะในการทดลองที่ยื่นขึ้นรูปจริง ๆ ว่า ค่าของความเสียหายที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการนั้น มีสัมประสิทธิ์ความเสียหายเกิดขึ้นเท่าใด จากการทดสอบการกดวงแหวนเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายของวัสดุชิ้นงานทั้ง 3 ชนิด จะได้อัตราสัมประสิทธิ์ความเสียหายระหว่างผิวชิ้นงานกับผิวของแม่พิมพ์ ดังนี้

ทองเหลือง มีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายเฉลี่ย = 0.73

อะลูมิเนียม มีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายเฉลี่ย = 0.81

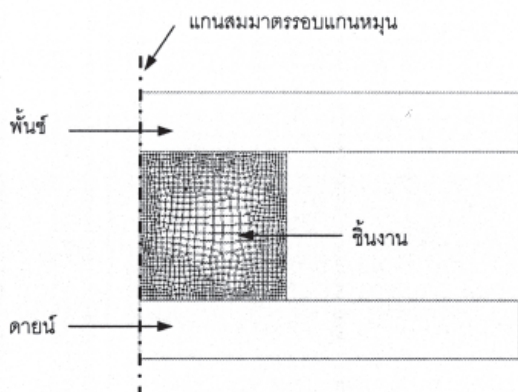
เหล็ก มีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายเฉลี่ย = 0.67

4. การจำลองการตีขึ้นด้วยโปรแกรมทางด้านไฟไนต์เอลิเมนต์

โปรแกรม DEFORM_2D เป็นโปรแกรมทางด้านไฟไนต์เอลิเมนต์ในเชิงพาณิชย์ สามารถให้ผลการทดลองรูปแบบการไหลตัวของวัสดุที่แตกต่างกัน โดยแบบจำลองที่ใช้แทนพฤติกรรมทางกลของวัสดุจะใช้แบบจำลองแบบวัสดุแข็งเกร็ง-พลาสติกสมบูรณ (Rigid-Viscoplastic Flow Model) ตามทฤษฎีของ ฟอน มิเชล (Von Mises Theory) ในการอธิบายและทำนายผลกระทบที่เกิดกับวัสดุในกระบวนการผลิต สามารถที่จะกำหนดแม่พิมพ์ให้เป็นแบบวัสดุแข็งเกร็ง (Rigid) หรือ อีลาสติก (Elastic) ก็ได้ DEFORM_2D ถูกนำไปใช้อย่างกว้างขวาง และได้ผลดีในอุตสาหกรรมการขึ้นรูปโลหะ เพื่อที่จะทำการจำลองการเปลี่ยนแปลงวัสดุ สามารถทำนายพฤติกรรมในการไหลตัวของวัสดุและการเติมแต่ง แม่พิมพ์, ทำนายการเกิดการสึกหรอของแม่พิมพ์ (Die Wear), ทำนายการแตกหัก, พังของแม่พิมพ์ หรือชิ้นงาน, ตรวจสอบข้อบกพร่องในการไหลของวัสดุ, ตรวจสอบการแตกหักแบบเหนียวระหว่างกระบวนการ เหล่านี้เป็นต้น

4.1 แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Model)

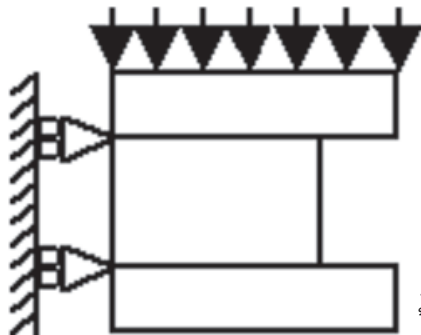
แบบจำลองที่สร้างขึ้นดังรูปที่ 5 จะมีขนาดและสัดส่วนไปตามขีดจำกัดสัดส่วนรูปร่างต่าง ๆ



รูปที่ 5 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ สมมาตร 1 ใน 2 ส่วน

4.2 การกำหนดเงื่อนไขขอบ (Boundary Condition)

การกำหนดรูปแบบของสมมาตรรอบแกนของชิ้นงานจำลอง 1 ใน 2 ส่วน ดังแสดงดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ในการกำหนดเงื่อนไขขอบ

4.3 การกำหนดรูปแบบของความเสียดทาน (Friction Model)

สำหรับการกำหนดรูปแบบของความเสียดทาน ในการจำลองตีขึ้นรูปนั้น จะใช้รูปแบบของแรงเสียดทานจากแรงเฉือน (Shear Friction Model, m) ดังสมการที่ 7

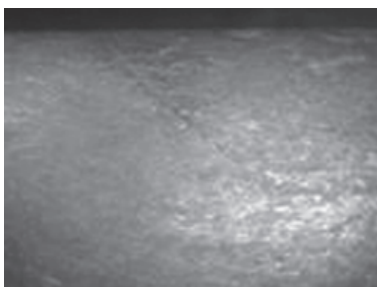
$$\tau = mk \quad (7)$$

เมื่อ m คือ ค่าตัวประกอบความเสียดทานเฉือน (Friction Shear Factor) และ k คือ ความเค้นเสียรูปจากการเฉือนของวัสดุ เพราะว่าในการขึ้นรูปโลหะก่อนนั้น จะเกิดความดันที่จุดสัมผัสระหว่างชิ้นงานกับแม่พิมพ์สูง ที่จุดสัมผัสความดันสูง กฎของคูลอมบ์จะทำนายค่าความเค้นเสียดทาน ได้ใหญ่กว่าความแข็งแรงทางด้านแรงเฉือนของชิ้นงาน และความเสียดทานยึดติด (Sticking) ก็มากกว่าสี่เท่า สำหรับกฎของคูลอมบ์จะใช้ในงานขึ้นรูปโลหะแผ่นที่ความดันที่ผิวสัมผัสไม่สูงมากนัก

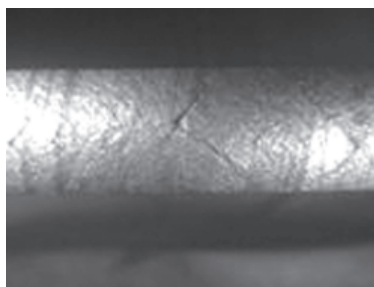
ผลการทดลอง

1. ผลการทดลองตีขึ้นรูป

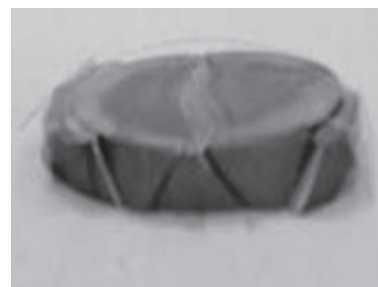
สำหรับผลของการทดลองจริงจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนที่ทำการทดลองตีขึ้นรูปชิ้นงานหาผล การทดลองเพื่อเปรียบเทียบกับผลการทำการจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ และส่วนที่สองก็คือทำการทดลองเพื่อหาตัวแปรที่จำเป็นต้องใช้ในการจำลอง เพื่อให้เกิดสภาวะของการจำลองเหมือนจริงให้มากที่สุด ไม่ว่าจะเป็นการทดลองเพื่อหาค่าคุณสมบัติทางกลของวัสดุ, หาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างผิวสัมผัสของชิ้นงานกับแม่พิมพ์ และการเปรียบเทียบความหยาบผิว และสารหล่อลื่นเพื่อดูผลที่เกิดขึ้นว่าที่สภาวะในการทดลองต่าง ๆ มีผลแตกต่างจากการทดลองอย่างไร



ก) เหล็ก



ข) อะลูมิเนียม

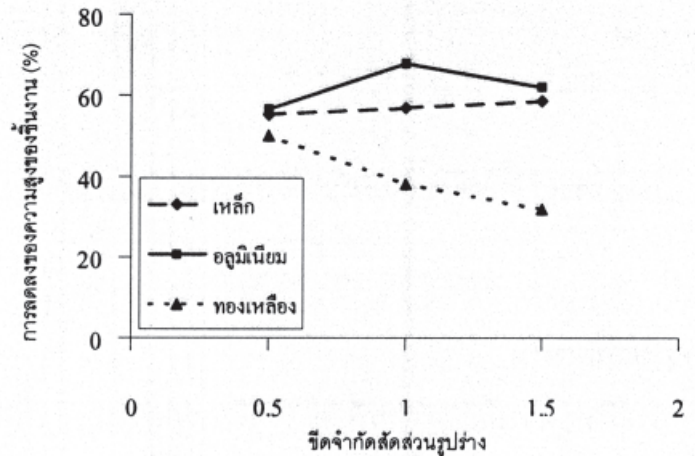


ค) ทองเหลือง

รูปที่ 7 แสดงภาพที่ชิ้นงานเริ่มแตกของวัสดุชนิดต่าง ๆ

ชนิดวัสดุ	ขีดจำกัดสัดส่วนรูปร่าง	ความสูงของชั้นงานที่ลดลงที่จุดแตกหัก (%)
เหล็ก	0.5	55.3
	1.0	57
	1.5	58.8
อลูมิเนียม	0.5	56.7
	1.0	68
	1.5	62
ทองเหลือง	0.5	50
	1.0	38
	1.5	32

ตารางที่ 1 สรุปผลการทดลองที่ย่น

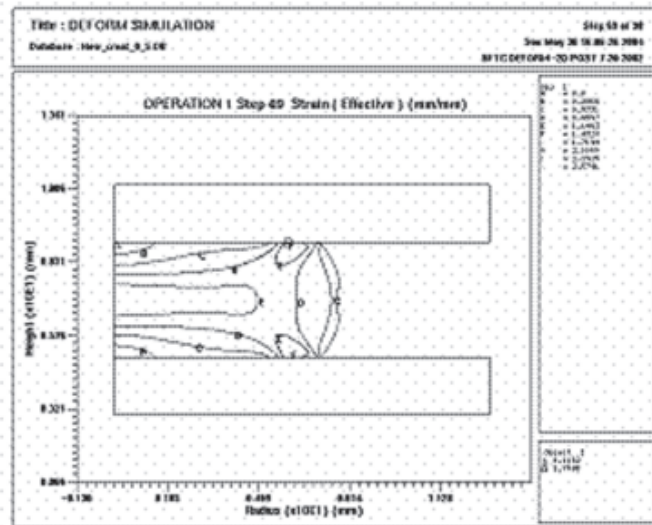


รูปที่ 8 กราฟเปรียบเทียบขีดจำกัดสัดส่วนรูปร่างกับเปอร์เซ็นต์ลดลงที่จุดแตกหัก

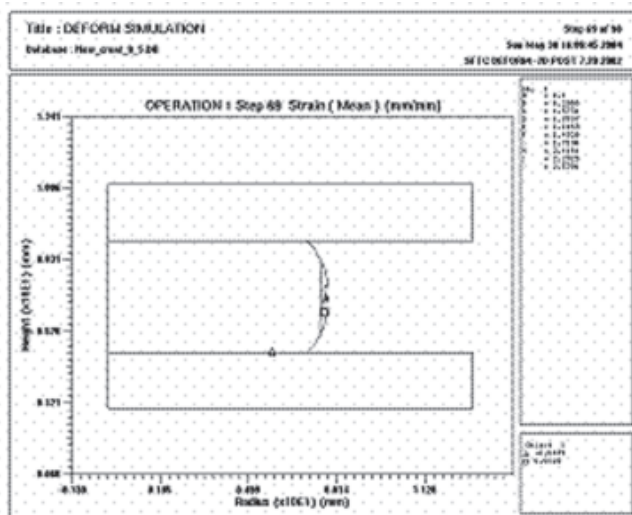
จากผลการทดลองในการตียนชั้นงานจริงนั้น ดังแสดงในตารางที่ 1 และ ในรูปที่ 6 และ 7 จะเห็นว่าความสามารถในการตียนชั้นรูปของอะลูมิเนียมจะมากที่สุด รองลงมาจะเป็นเหล็ก และสุดท้ายก็คือทองเหลือง และสำหรับเหล็กขีดความสามารถในการตียนจะเพิ่มขึ้นตามค่าของขีดจำกัดสัดส่วนรูปร่างที่เพิ่มขึ้น ซึ่งตรงกันข้ามกับทองเหลืองซึ่งจะมีขีดความสามารถต่ำลง เมื่อค่าของขีดจำกัดสัดส่วนรูปร่างเพิ่มขึ้น ส่วนของอะลูมิเนียมจะมีความสามารถในการขึ้นรูปดีที่สุดที่ขีดจำกัดสัดส่วนรูปร่าง เท่ากับ 1.0 เมื่อเราพิจารณาคุณสมบัติทางกลของวัสดุทั้ง 3 ชนิด พบว่าเปอร์เซ็นต์การยึดตัวของทองเหลืองมีมากที่สุด ซึ่งน่าที่จะทำให้ความสามารถในการขึ้นรูปดีที่สุด แต่ไม่สอดคล้องกับผลจากการตียนชั้นรูปจริง ดังนั้นจากการศึกษาข้อมูลทางด้านโลหะวิทยา “พบว่าทองเหลืองเป็นธาตุผสมระหว่างทองแดงกับสังกะสี ซึ่งสังกะสีนั้น มีคุณสมบัติทำให้ทองเหลืองมีความแข็งแรงดี และความเหนียวสูง และคุณสมบัตินี้จะดีขึ้นเรื่อย ๆ ตามปริมาณสังกะสีที่เพิ่มขึ้น แต่เมื่อปริมาณสังกะสีมีมากเกินไป จะพบว่าความเหนียวจะลดลงอย่างมาก ทำให้มีความเปราะมากขึ้นรับแรงกดได้น้อยลง แต่ความแข็งแรง ดียังไม่ลดลงมากนัก” [7] นั้นเป็นสาเหตุที่ทำให้ทองเหลืองมีความสามารถในการรับแรงกดได้น้อยมากส่วนของอะลูมิเนียมมีความหนาแน่นของโมเลกุลต่ำ ทำให้ความสามารถในการรับแรงกดอัดได้ดี เมื่อรับแรงดีก็จะขาดเร็วกว่าเหล็ก แต่ที่ขีดจำกัดสัดส่วนรูปร่างสูง ๆ อะลูมิเนียมจะมีความสามารถในการขึ้นรูปต่ำลง เพราะอะลูมิเนียมมีความอ่อนตัวสูง ทำให้เกิดระนาบเลื่อนของโมเลกุลได้ง่ายกว่าเหล็ก ซึ่งมีความแข็งแรงสูง และความหนาแน่นของโมเลกุลก็สูงกว่าอะลูมิเนียม [8]

2. ผลการจำลองด้วยโปรแกรม DEFORM_2D

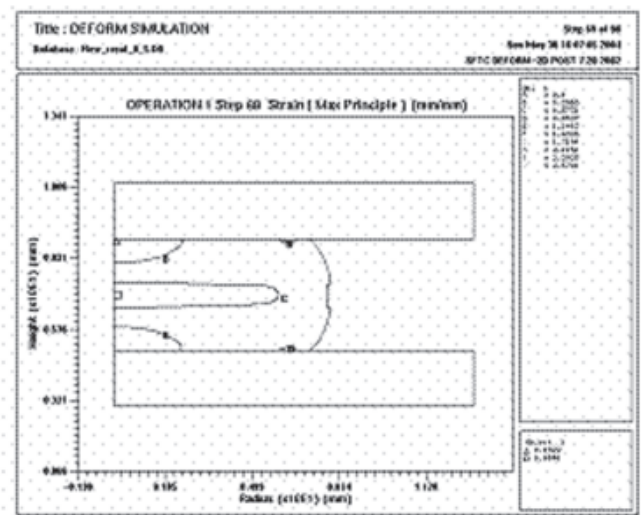
จากผลการจำลองตียนชั้นรูปชั้นงาน เราได้พิจารณาความเครียดที่เกิดขึ้นบนชั้นงาน พบว่าภายในเนื้อวัสดุมีการกระจายตัวของค่าความเครียดเฉลี่ย (Distribution of Mean Stress) การกระจายตัวของค่าความเครียดสูงสุด (Distribution of Maximum Stress) และการกระจายตัวของค่าความเครียดสมมูล (Distribution of Effective Stress) ซึ่งค่าความเครียดเหล่านี้ เป็นตัวแปรที่สำคัญของสมการเกณฑ์ความเสียหายที่ใช้ในการจำลองการตียนชั้นรูป นอกจากนี้จากการจำลองยังพบว่ามีลักษณะการกระจายตัวของความเค้นที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะที่เหมือนกันไม่ว่าจะเลือกใช้วัสดุชนิดใดก็ตาม ดังแสดงในรูปที่ 8 ถึง 10



รูปที่ 9 ภาพแสดงค่าความเครียดสมมูล ที่ได้จากการจำลองของวัสดุเหล็ก



รูปที่ 10 ภาพแสดงค่าความเครียดเฉลี่ย ที่ได้จากการจำลองของวัสดุเหล็ก



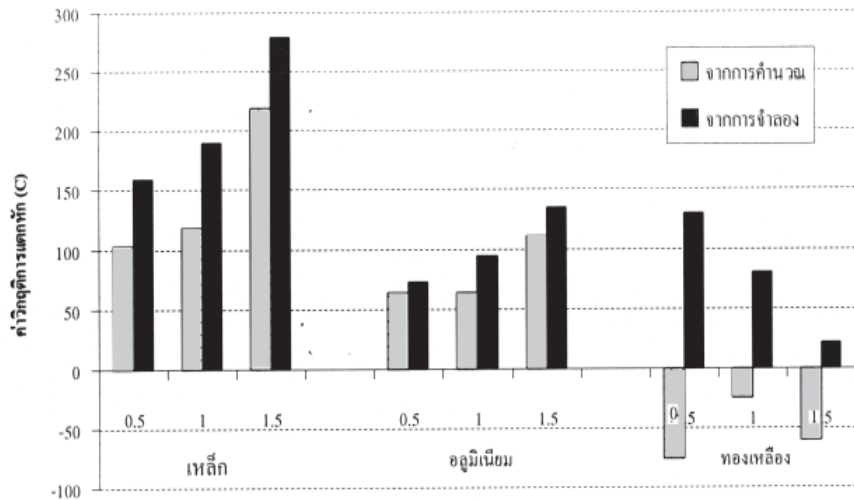
รูปที่ 11 ภาพแสดงค่าความเครียดสูงสุด ที่ได้จากการจำลองของวัสดุเหล็ก

3. วิเคราะห์ผลการเปรียบเทียบ

สำหรับหัวข้อนี้ จะเป็นการเปรียบเทียบกันระหว่างผลจากการคำนวณค่าวิกฤติการแตกหัก กับผลจากการจำลอง เพื่อหาค่าวิกฤติการแตกหัก ซึ่งจะสามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 11 และ 12

จากการพิจารณาเกณฑ์ความเสียหายทั้ง 2 แบบ ของผลจากการจำลองการตีขึ้นรูป และผลจากการคำนวณจากการทดลองจริง สามารถแบ่งกลุ่มของชนิดของเกณฑ์ความเสียหาย โดยอาศัยแนวคิดพื้นฐานของการหาสมการเกณฑ์ความเสียหาย ออกได้เป็น 2 กลุ่มคือ

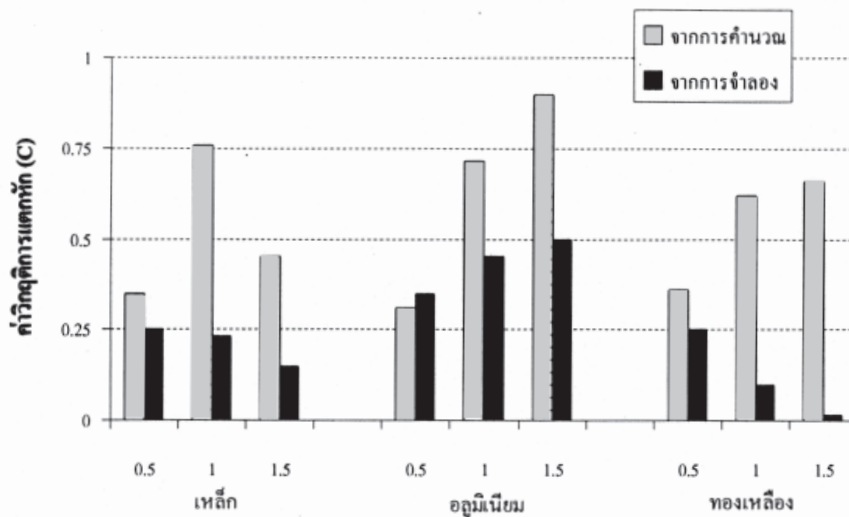
Cockroft & Latham



ขีดจำกัดส่วนรูปร่าง

รูปที่ 12 กราฟแสดงค่าเปรียบเทียบค่าวิกฤติการแตกหัก จากการคำนวณและการจำลอง โดยพิจารณาจากเกณฑ์การแตกหักของ Cockroft & Latham

Oyane



ขีดจำกัดตัดส่วนรูปร่าง

รูปที่ 13 กราฟแสดงค่าเปรียบเทียบค่าวิกฤติการแตกหัก จากการคำนวณและการจำลอง โดยพิจารณาจากเกณฑ์การแตกหักของ Oyane

3.1 เกณฑ์การแตกหักของ Cockroft & Latham จะอยู่ในกลุ่มที่เกณฑ์ความเสียหาย ตั้งอยู่บนสมมุติฐานที่ว่าวัสดุจะเกิดการแตกหักเมื่องานจากการเสียรูปมีค่าจนถึงค่าวิกฤติหรือเรียกว่าทฤษฎี Empirical Plastic Work Theory [1] และจากการเปรียบเทียบผลจากการจำลองและผลจากการคำนวณ โดยใช้เกณฑ์ความเสียหายของ Cockroft & Latham ให้ผลการเปรียบเทียบของการทำนายการเกิดการแตกของชิ้นงานทองเหลืองผิดพลาดค่อนข้างมาก ดังที่ได้กล่าวไว้ในรูปที่ 11

3.2 เกณฑ์การแตกหักของ Oyane จะจัดอยู่ในกลุ่มที่เกณฑ์ความเสียหายตั้งอยู่บนสมมุติฐานที่ว่า ภายในเนื้อวัสดุจะมีโพรงขนาดเล็กอยู่ภายใน และการแตกหักจะเกิดเมื่อโพรงภายในขยายตัวจนมาพบกันหรือเรียกว่าทฤษฎี Void Growth Theory^[1] และจากการเปรียบเทียบผล จากการจำลองและผลจากการคำนวณ ดังแสดงในรูปที่ 12 มีค่าแตกต่างของผลการเปรียบเทียบไม่มากเท่าใด เมื่อเปรียบเทียบกับผลจากเกณฑ์การแตกหักของ Cockroft & Latham

สำหรับผลการทดลองที่แตกต่างกัน ของการคำนวณค่าวิกฤติของการแตกหักจริง กับการจำลองด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์นั้น เนื่องมาจากว่าในการทดลองจริง ๆ นั้น ค่าความเสียหายที่เกิดขึ้นในกระบวนการระหว่างผิวสัมผัสของชิ้นงานกับแม่พิมพ์ มีค่าไม่คงที่ตลอดทั้งกระบวนการอันเกิดมาจากเศษวัสดุที่ตกค้าง หรือไม่มีความหยาบของผิวแม่พิมพ์ที่เพิ่มมากขึ้น อีกทั้งแม่พิมพ์จำลองนั้น เราได้สมมุติให้เป็นวัสดุแข็งเกร็ง (Rigid Body) เหตุผลอีกอย่างก็คือว่าในการจำลองด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ DEFORM_2D นั้น ชิ้นงานจำลองนั้น มีคุณสมบัติเป็นเนื้อเดียวกันตลอด ทั้งยังต่อเนื่องกัน และเป็นไอโซทรอปิก ซึ่งในความเป็นจริงนั้นเนื้อวัสดุปกติจะมีช่องว่าง (Void) อันเกิดจากกระบวนการผลิตอยู่แล้ว ซึ่งช่องว่างเหล่านี้จะเป็นจุดวิกฤติที่จะทำให้เกิดรอยแตกเริ่มต้น (Crack Growth) เมื่อได้รับแรงกระทำจากภายนอก^[9] อีกทั้งในขณะที่เราทำการจำลองนั้น ค่าความเสียหายที่เกิดขึ้น ก็จะไม่คงที่ตลอดทั้งกระบวนการ สมมุติว่าเราให้ค่าความเสียหายมีค่าเท่ากับ 0.5 ตั้งแต่กระบวนการเริ่มต้นจนจบ ค่าความเสียหายจะคงที่ตลอด แต่ในความเป็นจริงนั้น ค่าความเสียหายจะไม่คงที่ เนื่องจากความร้อน หรือเศษของโลหะเล็ก ๆ ที่เกิดจากความสึกหรอของแม่พิมพ์กับชิ้นงาน ทั้งหมดที่กล่าวมานี้เป็นส่วนหนึ่งที่ทำให้ค่าวิกฤติที่คำนวณได้จากการทดลองนั้น มีความแตกต่างกับการจำลองด้วยโปรแกรม DEFORM_2D

ส่วนสำคัญอีกส่วนหนึ่ง ที่ทำให้ผลการทดลองมีความคลาดเคลื่อน ก็คือ ความเร็วในการขึ้นรูประหว่างการทดลองกับการจำลองนั้น จะต้องมีความเร็วเท่า ๆ กัน แต่ในงานวิจัยนี้ เราใช้เครื่องไฮดรอลิคเพรส ซึ่งจะไม่สามารถควบคุมความเร็วในการขึ้นรูปได้ จะเป็นการควบคุมความดันที่เป็นแรงกดที่กระทำต่อชิ้นงาน ทั้งที่เราทราบว่า ความเร็วในการขึ้นรูปเป็นตัวแปรที่มีผลต่อการขึ้นรูปโลหะ^[10] นอกจากนี้ความคลาดเคลื่อนอีกส่วนหนึ่งมาจาก การทดสอบหาค่าคุณสมบัติทางกลของวัสดุ ในงานวิจัยนี้ จะใช้วิธีทดสอบแรงดึง ทั้ง ๆ ที่ในการตีขึ้นรูปนี้ ชิ้นงานจะได้รับแรงกดนำที่จะใช้วิธีหาค่าคุณสมบัติทางกลด้วยการทดสอบแรงกดมากกว่า แต่ด้วยเหตุผลที่เราไม่สามารถควบคุมการทดลอง การกดชิ้นงานให้มีความแม่นยำและเที่ยงตรงได้ สิ่งทีกล่าวมานี้ เป็นปัจจัยที่มีส่วนสำคัญ ในการทำให้ผลการทดลองนี้คลาดเคลื่อนไปค่อนข้างมาก

สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองพบว่า เราสามารถใช้โปรแกรมทางการค้า DEFORM_2D ในการทำนายการแตกหักของชิ้นงานที่ขึ้นรูปโดยวิธีตีขึ้นได้ โดยอาศัยเกณฑ์การแตกหัก ตามรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. เกณฑ์การแตกหักของ Cockroft & Latham

จากผลการทดลอง พบว่าเราสามารถที่จะใช้โปรแกรม DEFORM_2D ในการทำนายการแตกหักชิ้นงานวัสดุเหล็ก และอะลูมิเนียมที่ขึ้นรูปด้วยวิธีตีขึ้น โดยอาศัยเกณฑ์การแตกหักของ Cockroft & Latham ซึ่งจะให้ค่าคลาดเคลื่อนจากผลการทดลองจริงโดยเฉลี่ยประมาณ 31.5% สำหรับเหล็ก

และ 20.8% สำหรับอะลูมิเนียม ที่ทุก ๆ ชนิดจำกัดสัดส่วนรูปร่าง ส่วนวัสดุของเหลือนั้น เกณฑ์การแตกหักของ Cockroft & Latham จะให้ผลที่คลาดเคลื่อนจากการทดลองจริงมาก จึงไม่ควรที่จะใช้เกณฑ์การแตกหักของ Cockroft & Latham ทำนายการแตกหักของชิ้นงานของเหลือนที่ขึ้นรูปด้วยวิธีดัดขึ้น โดยอาศัยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ DEFORM_2D และ สำหรับผลที่ให้ค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด ก็คือ วัสดุอะลูมิเนียม ที่ชนิดจำกัดสัดส่วนรูปร่าง 0.5

2. เกณฑ์การแตกหักของ Oyane

สำหรับเกณฑ์การแตกหักของ Oyane นั้น จากการเปรียบเทียบผลการจำลองกับผลจากการทดลอง จะเห็นว่า ให้ค่าคลาดเคลื่อนโดยเฉลี่ยของการทำนายการแตกหักของชิ้นงานวัสดุเหล็ก และ อะลูมิเนียม ที่ทุก ๆ ชนิดจำกัดสัดส่วนรูปร่าง เท่ากับ 54.6% และ 30.7% ตามลำดับ แต่สำหรับของเหลือนั้นคลาดเคลื่อนโดยเฉลี่ยประมาณ 70.7% ถึงแม้ว่า จะให้ค่าคลาดเคลื่อนได้ดีมากกว่าเกณฑ์การแตกหักของ Cockroft & Latham ก็ตาม แต่ก็ยังมีค่ามาก และสำหรับผลที่ให้ค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด ก็คือ วัสดุอะลูมิเนียม ที่ชนิดจำกัดสัดส่วนรูปร่าง 0.5 เช่นเดียวกับ Cockroft & Latham

เราสามารถที่จะใช้โปรแกรม DEFORM_2D ในการทำนายการแตกหักของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยวิธีดัดขึ้นได้ แต่ว่าเราจำเป็นต้องเพื่อค่าคลาดเคลื่อนที่ได้จากงานนี้ลงไปด้วย ก็จะทำให้การทำนายการแตกหักใกล้เคียงกับการขึ้นรูปชิ้นงานจริง ๆ ได้ ทั้งนี้ ก็เพื่อที่จะลดความสูญเสียจากการขึ้นรูปชิ้นงานจริง ๆ แต่เราก็ต้องทราบว่าศาสตร์ในการทำนายการแตกหักนั้นมีหลายรูปแบบของสมการและผลการทดลองที่แตกต่างกัน ของการทดลองหาค่าวิกฤติของการแตกหักจริง กับการจำลองด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์นั้น เนื่องมาจากว่าสมการที่กำหนดเกณฑ์การแตกหักแต่ละเกณฑ์นั้นมีลักษณะ และความเหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้ที่แตกต่างกัน ตามสภาวะเงื่อนไขของแต่ละกระบวนการขึ้นรูป

เอกสารอ้างอิง

- [1.] Suranuntchai, S. 2001. Fracture Prediction in Metal Forming Operations, Engineering Journal of Siam University, Volume 6, Year 3, July-December 2001: 28-33.
- [2.] Gouveia, B.P.P.A., Rodrigues, J.M.C. and Martins, P.A.F. 1995. Fracture Prediction in Bulk Metal Forming. Journal of Materials Processing Technology, 101: 361-372.
- [3.] Kim, H., Yamanaka, M. and Altan, T. 1995. Prediction and Elimination of Ductile Fracture in Cold Forgings Using FEM Simulation. The Ohio State University, Ohio, pp. 1-5.
- [4.] Robert, K. 1989. Materials Testing for the Metal Forming Industry, Springer, New York, pp. 21-36.
- [5.] American Society for Testing and Material. 1978. Standard Test Methods for Compression Testing of Metallic Materials, Book of ASTM Standards, Vol. 3.01, Easton, p. 266.
- [6.] Avizur, B., Van Tyne C.J. and Umana C. 1977. Analytical Determination of the Sensitivity of the Ring Test as an Experimental Study of Friction. Proceedings of the 18th International Machine Tool Design and Research Conference, London, UK, September 1977.
- [7.] สุวรรณ สุนทรรัตน์. 2529. โลหะวิทยาทางกายภาพสำหรับวิศวกร ทองแดงและทองแดงผสม. สำนักพิมพ์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพฯ, หน้า 15-20.
- [8.] Dieter, G.E. 1988. Mechanical Metallurgy, McGraw-Hill, Singapore, p.546.
- [9.] สุธีระ ประเสริฐสุรพร. 2542. การแตกหักในอุณหภูมิสูง. วารสารเทคโนโลยี. ปีที่ 19, ฉบับที่ 11: 16-18.
- [10.] Edward, M. 1991. Metalworking Science and Engineering, McGraw-Hill, New York, pp. 198-205.

บทคัดย่อ

การกัดกร่อนเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้เครื่องจักร อุปกรณ์ ตลอดจนสิ่งก่อสร้างต่าง ๆ ที่เป็นโลหะและมีการใช้งานในน้ำเกิดการชำรุดเสียหายก่อนเวลาอันควร กองทัพเรือเป็นหน่วยงานที่มีความจำเป็นต้องปฏิบัติการกิจต่าง ๆ เกี่ยวข้องกับน้ำอยู่ตลอดเวลา ดังนั้นการชำรุดเสียหายอันเนื่องมาจากการกัดกร่อนของตัวเรือรบ อุปกรณ์ และท่อทางต่าง ๆ ที่มีการสัมผัสโดยตรงกับน้ำจึงเป็นสิ่งที่ไม่สามารถจะหลีกเลี่ยงได้ อย่างไรก็ตามการกัดกร่อนเป็นสิ่งที่สามารถคาดเดาและสามารถป้องกันได้ การป้องกันการกัดกร่อนให้ได้ผลดีจะต้องทราบถึงสภาพแวดล้อมของการใช้งานและรูปแบบของการกัดกร่อนที่เกิดขึ้น เพื่อที่จะได้เลือกวิธีการป้องกันการกัดกร่อนที่ถูกต้องและเหมาะสมที่สุด โลหะกันกร่อน (Sacrificial anodes) เป็นวิธีที่นิยมสำหรับป้องกันการกัดกร่อนของโลหะที่มีการใช้งานสัมผัสกับน้ำตลอดเวลา โลหะกันกร่อนที่นิยมนำมาใช้ในการป้องกันการกัดกร่อนของโลหะต่าง ๆ ได้แก่ สังกะสีกันกร่อน (Zinc anode) อะลูมิเนียมกันกร่อน (Aluminium anode) และแมกนีเซียมกันกร่อน (Magnesium anode) ซึ่งการใช้งานของโลหะกันกร่อนแต่ละประเภทก็มีความเหมาะสมต่อการใช้งานที่แตกต่างกันออกไป

นาวาตรี ดร.พินัย มุ่งสันติสุข

รักษาราชการ หัวหน้านายช่างโรงงานหล่อหลอมและไม้แบบ แผนกโรงงานเครื่องกล
กองโรงงาน อุทการเรือธนบุรี กรมอุทการเรือ

E-mail : pinai.m@navy.mi.th



การกัดกร่อนและการป้องกัน (Corrosion and Prevention)

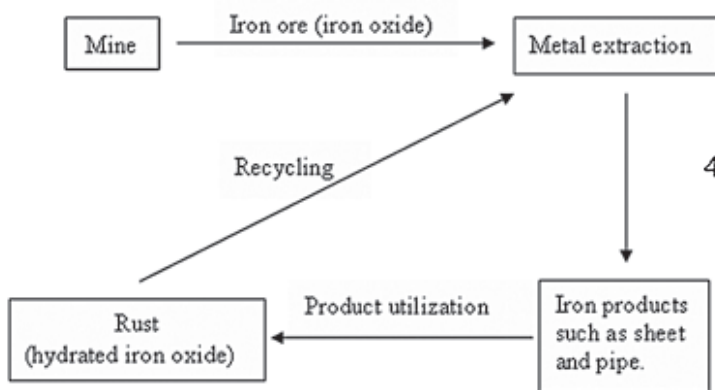
บทนำ

การกัดกร่อน (Corrosion) คือ ปฏิกิริยาเคมี (Chemical reaction) หรือ ปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า (Electrochemical reaction) ระหว่างวัสดุและสิ่งแวดล้อม ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เกิดการเสื่อมสภาพของวัสดุ การกัดกร่อนสามารถเกิดได้กับวัสดุทุกชนิด เช่น พลาสติก เซรามิก ไม้ โลหะ ฯลฯ แต่เมื่อก้าวถึงการกัดกร่อน เรามักจะคุ้นเคยและนึกถึงการกัดกร่อนของโลหะเป็นอย่างแรก โดยเฉพาะอย่างยิ่ง เหล็ก (Fe) เช่น สนิมที่เกิดขึ้นในท่อน้ำประปาที่ทำจากเหล็ก การผุกร่อนของตัวถังรถยนต์ หรือการผุกร่อนของตัวเรือเหล็กในน้ำทะเล เป็นต้น

การกัดกร่อนเป็นหนึ่งในสาเหตุสำคัญที่ก่อให้เกิดความเสียหายต่อทรัพย์สินเป็นอย่างมาก และในบางครั้งความเสียหายที่เกิดขึ้นอาจจะเป็นสาเหตุทำให้เกิดการสูญเสียชีวิตของมนุษย์ได้ หากการกัดกร่อนเกิดกับสิ่งก่อสร้างที่มีมนุษย์พักอาศัยหรือทำงานอยู่ และการกัดกร่อนดังกล่าวก่อให้เกิดการชำรุดเสียหายแก่สิ่งก่อสร้างนั้น ๆ เช่น สะพาน เรือ เครื่องบิน หรือ อาคารต่าง ๆ การเสื่อมสลายของวัสดุอันเนื่องมาจากการกัดกร่อนเป็นสิ่งที่ไม่สามารถจะหลีกเลี่ยงได้ แต่การป้องกันไม่ให้วัสดุเกิดการกัดกร่อนหรือเกิดช้าลงเป็นสิ่งที่สามารถกระทำได้ ดังนั้น การศึกษาถึงสาเหตุของการกัดกร่อน และการเลือกวิธีการป้องกันการกัดกร่อนที่เหมาะสมจึงเป็นสิ่งสำคัญ

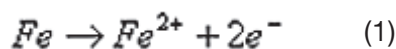
ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับการกัดกร่อน

โลหะที่ถูกนำมาใช้งานในด้านต่าง ๆ เกิดจากการนำสินแร่ที่ขุดได้จากพื้นโลกมาถลุงจนได้โลหะบริสุทธิ์แล้วจึงนำโลหะบริสุทธิ์ไปใช้งาน หรือนำโลหะบริสุทธิ์ที่ได้ไปเจือด้วยธาตุต่าง ๆ เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของโลหะชนิดนั้น ๆ ให้ได้ตามที่ต้องการก่อนที่จะนำไปใช้งาน ฉะนั้นอาจจะกล่าวได้ว่าจากเดิม สินแร่ที่เป็นสภาพเสถียรถูกนำไปถลุงจนได้โลหะบริสุทธิ์ที่ไม่เสถียร ดังนั้นโลหะบริสุทธิ์ที่ไม่มีเสถียรภาพจึงพยายามที่จะกลับคืนสู่สภาพเดิมที่มีเสถียรภาพมากกว่า ดังตัวอย่างของเหล็กในรูปที่ 1



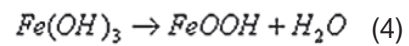
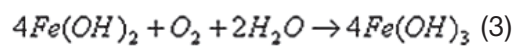
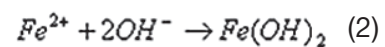
รูปที่ 1 วัฏจักรการผลิตและการใช้งานของเหล็ก

กระบวนการเกิดการกัดกร่อนเบื้องต้นสามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 2 โดยบริเวณที่มีค่าศักย์ไฟฟ้า (potential) ต่ำกว่าจะเกิดการกัดกร่อน และเราเรียกบริเวณดังกล่าวว่า anode โดยโลหะบริเวณดังกล่าวจะมีการสูญเสีย อิเล็กตรอน (e⁻) อันเนื่องมาจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation reaction or anodic reaction) ดังตัวอย่างตามสมการที่ 1 (ในที่นี้จะใช้เหล็กเป็นตัวอย่างสำหรับการกัดกร่อนแบบต่าง ๆ เนื่องจากเหล็กเป็นโลหะที่ใช้กันแพร่หลายมากที่สุด)

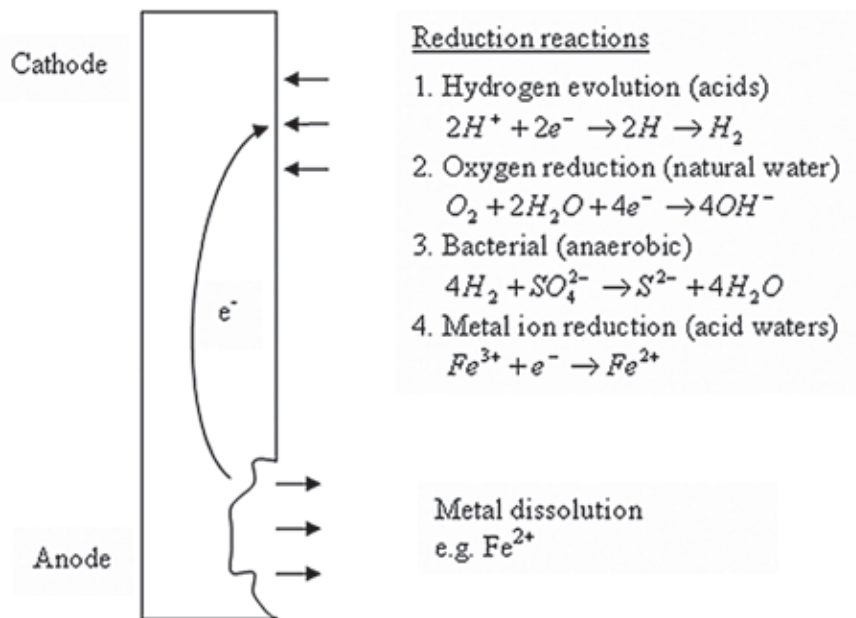


อิเล็กตรอนที่เกิดจากสมการที่ 1 จะเคลื่อนที่ไปยังบริเวณที่มีค่าศักย์ไฟฟ้าสูงกว่า หรือ cathode และอิเล็กตรอนดังกล่าวจะถูกใช้ในปฏิกิริยารีดักชัน (reduction reaction or cathodic reaction)

ในสารละลายที่มีฤทธิ์เป็นกรด โลหะจะเกิดการกัดกร่อนไปพร้อม ๆ กับการเกิดขึ้นของก๊าซไฮโดรเจนดังปฏิกิริยาที่ 1 (รูปที่ 2) สำหรับเหล็กที่ถูกใช้งานในน้ำที่มีสภาพเป็นกลาง หรือมีความเป็นกรดหรือด่างเล็กน้อย (pH ~ 6.5-8.5) เช่น น้ำในแม่น้ำ หรือน้ำประปา ปฏิกิริยารีดักชันจะเป็นไปตามปฏิกิริยาที่ 2 (รูปที่ 2) และการกัดกร่อนจะเกิดขึ้นพร้อม ๆ กับการเกิดขึ้นของ FeOOH (hydrated ferric oxide) หรือ Fe₂O₃ (สนิมแดง) อันเนื่องมาจากการทำปฏิกิริยากันระหว่างปฏิกิริยาออกซิเดชัน



ในบางกรณีเราจะพบว่า โลหะที่ใช้งานอยู่ในน้ำเสียหรือน้ำที่ไม่มีออกซิเจนละลายอยู่เลยก็ยังคงมีการเกิดการกัดกร่อนเกิดขึ้น การกัดกร่อนดังกล่าวสามารถอธิบายได้ดังสมการที่ 3 (รูปที่ 2) โดยจะมีแบคทีเรียบางประเภท ซึ่งสามารถดำรงชีวิตอยู่ได้โดยปราศจากออกซิเจน แบคทีเรียดังกล่าวสามารถใช้ไฮโดรเจนในการดำรงชีวิต และจะทำให้ SO₄²⁻ ที่ละลายอยู่ในน้ำเปลี่ยนเป็น S²⁻ (ปฏิกิริยาที่ 3 ในรูปที่ 2) ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากปฏิกิริยารีดักชันนั่นเอง โดยปกติแล้วน้ำตามแหล่งน้ำธรรมชาติต่าง ๆ จะมีปริมาณซัลเฟตละลายอยู่เพียงพอที่จะทำให้เกิดการกัดกร่อนได้ แม้จะปราศจากออกซิเจนก็ตาม



รูปที่ 2 ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของโลหะในกระบวนการเกิดการกัดกร่อนเบื้องต้น

รูปแบบของการกัดกร่อน

การกัดกร่อนมีอยู่หลายรูปแบบด้วยกัน โดยการกัดกร่อนสามารถจำแนกออกได้ตามรูปร่างและลักษณะของการเกิดการกัดกร่อนดังแสดงให้เห็นรูปที่ 3 และรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. การกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอ (Uniform Corrosion)

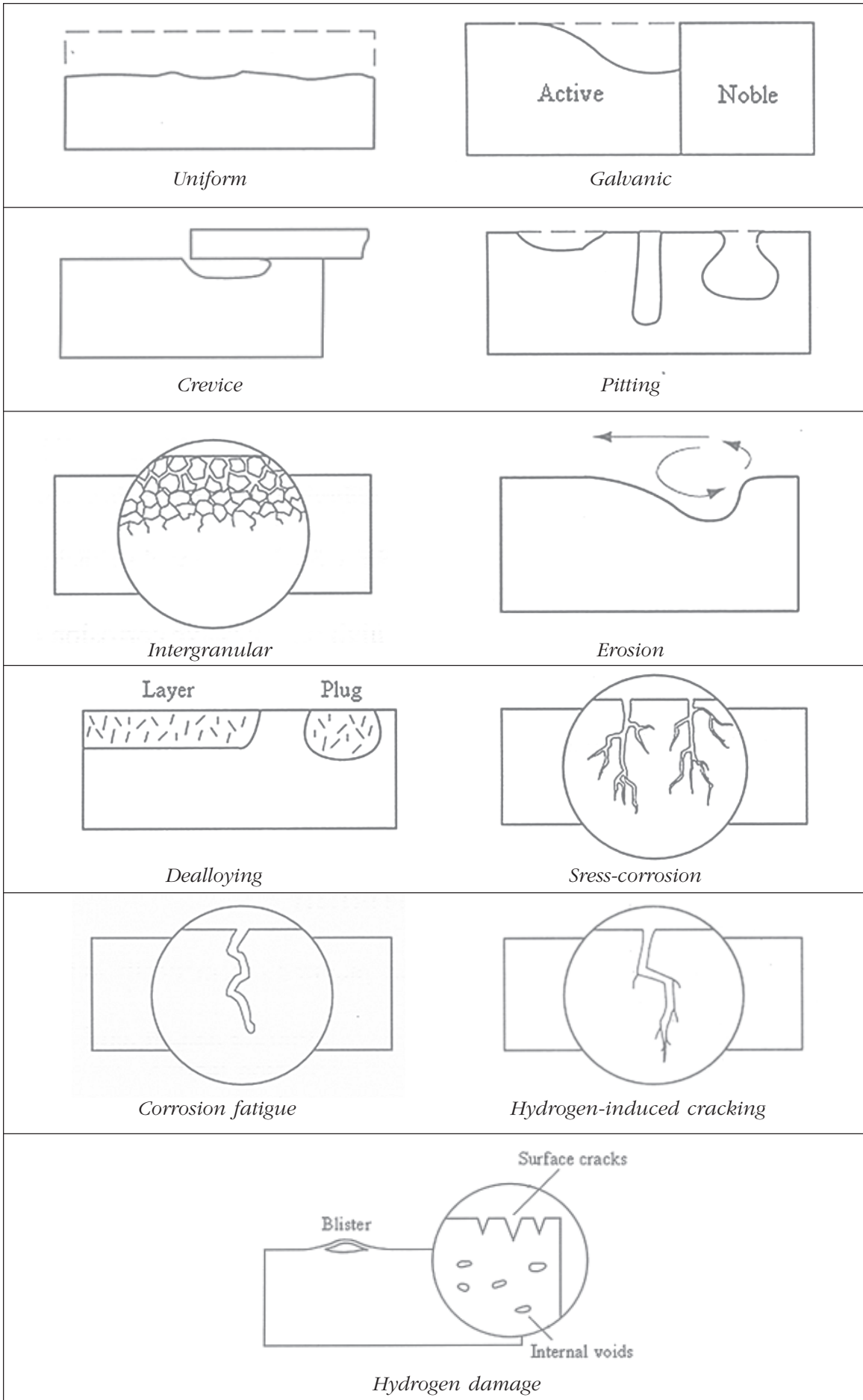
การกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอเป็นรูปแบบที่พบบ่อยมากที่สุด โดยการกัดกร่อนจะเกิดขึ้นตลอดทั่วผิวหน้าของโลหะ การกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอมักเกิดจากโลหะถูกใช้งานและสัมผัสกับน้ำ สารกัดกร่อนหรือความชื้นอย่างสม่ำเสมอเท่ากันตลอดทั่วพื้นผิว และตลอดพื้นผิวของโลหะที่ถูกกัดกร่อนจะมีความเปลี่ยนแปลงไปจากพื้นผิวเดิมโดยเฉลี่ยไม่แตกต่างกันมากนัก กล่าวคือความหนาของโลหะจะลดลงในระดับที่ใกล้เคียงกัน การกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอเป็นรูปแบบการกัดกร่อนที่สามารถคาดคะเนได้ล่วงหน้าว่าจะจะเป็นไปในทิศทางใด ทำให้สามารถวางแผนป้องกันหรือเปลี่ยนวัสดุได้ทันทั่วทั้ง ดังนั้นการกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอจึงไม่น่าเป็นห่วงมากนัก การกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอสามารถป้องกันได้

โดยการเลือกใช้วิธีใดวิธีหนึ่ง หรือใช้หลายวิธีร่วมกัน ดังตัวอย่างต่อไปนี้

- เลือกใช้วัสดุให้เหมาะสมกับสภาพแวดล้อม
- การเคลือบผิว (coating) ด้วยวิธีต่าง ๆ ตัวอย่างเช่น แผ่นเหล็กอาบสังกะสี
- การป้องกันโดยวิธี cathodic protection
- เติมสารยับยั้ง (inhibitors) เพื่อลดความรุนแรงของสารกัดกร่อน

2. การกัดกร่อนแบบกัลวานิก (Galvanic Corrosion)

การกัดกร่อนแบบนี้เกิดจากโลหะสองชนิดที่มีค่าศักย์ไฟฟ้า (potential) ต่างกัน มาสัมผัสกันในสารละลายที่เป็นตัวนำไฟฟ้า และมีฤทธิ์กัดกร่อน (corrosive electrolyte) โดยโลหะที่มีค่าศักย์ไฟฟ้าต่ำกว่าจะเป็นแอโนด (anode) และถูกกัดกร่อน ส่วนโลหะที่มีค่าศักย์ไฟฟ้าสูงกว่าจะเป็นแคโทด (cathode) และได้รับการป้องกันจากแอโนดทำให้ไม่เกิดการ



รูปที่ 3 รูปแบบการกัดกร่อนประเภทต่าง ๆ

กัดกร่อน การพิจารณาว่าโลหะชนิดใดจะถูกกัดกร่อนเมื่อโลหะสองชนิดมาสัมผัสกันในสารละลายชนิดหนึ่ง ๆ จะสามารถทราบได้จากอนุกรมกัลวานิก (Galvanic series) ในสารละลายนั้น ๆ สำหรับตารางที่ 1 เป็นอนุกรมกัลวานิกในน้ำทะเล โดยโลหะที่อยู่ใกล้ Anodic end มากกว่าจะถูกกัดกร่อน ส่วนโลหะที่อยู่ใกล้ Cathodic end มากกว่าจะได้รับการป้องกันจากการกัดกร่อน การป้องกันการกัดกร่อนแบบกัลวานิกสามารถทำได้ดังต่อไปนี้

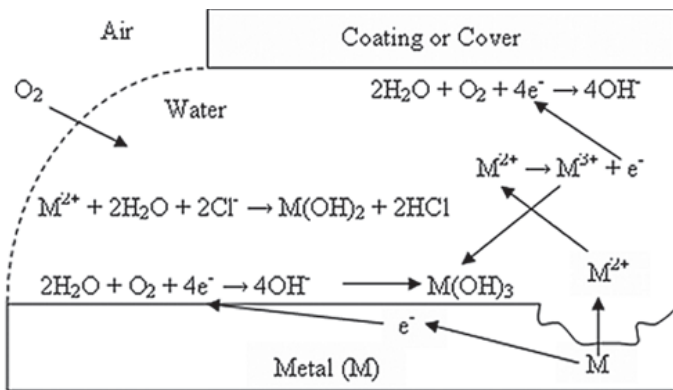
- พยายามเลือกใช้โลหะที่อยู่ใกล้กันในอนุกรมกัลวานิกให้มากที่สุด
- หลีกเลี่ยงการใช้งานแอโนดที่มีขนาดเล็กร่วมกับแคโทดที่มีขนาดใหญ่ (area effect) เพราะทำให้เกิดการกัดกร่อนอย่างรวดเร็ว เช่น ควรเลือกใช้สลักที่เป็นเหล็กกล้าไร้สนิมในการยึดแผ่นเหล็ก
- ใช้ฉนวนกันหรือทอหุ้มโลหะตัวใดตัวหนึ่งเพื่อป้องกันโลหะสัมผัสกัน
 - การเคลือบผิว (coating) ด้วยวิธีต่าง ๆ แต่ต้องคอยระวังและซ่อมแซมผิวที่เคลือบไว้อย่างสม่ำเสมอ โดยเฉพาะอย่างยิ่งบริเวณที่เป็นแอโนดเพื่อป้องกันการกัดกร่อนที่อาจจะเกิดขึ้นอันเนื่องมาจาก area effect
 - เติมสารยับยั้ง (inhibitors) เพื่อลดความรุนแรงของสารกัดกร่อน
 - ออกแบบให้ชิ้นส่วนที่เป็นแอโนดสามารถเปลี่ยนได้โดยง่าย หรือออกแบบให้มีความหนาเพิ่มขึ้นเพื่อให้ชิ้นงานมีอายุการใช้งานยาวนานขึ้น
 - ติดตั้งโลหะชนิดที่สามที่เป็นแอโนดมากกว่าเข้ากับโลหะทั้งสองชนิด

ตารางที่ 1 อนุกรมกัลวานิกในน้ำทะเล
(Galvanic Series in Seawater)

Cathodic end (least easily corroded)	
	↑
	Platinum
	Gold
	Graphite
	Titanium
	Silver
	zirconium
AISI Type 316, 317 stainless steel (passive)	
AISI Type 304 stainless steel (passive)	
AISI Type 430 stainless steel (passive)	
	nickel (passive)
	copper-nickel (70-30)
	bronzes
	copper
	brasses
	nickel (passive)
	naval brass
	tin
	lead
AISI Type 316, 317 stainless steel (active)	
AISI Type 304 stainless steel (active)	
	cast iron
	steel or iron
	aluminium alloy 2024
	cadmium
	aluminium alloy 1100
	zinc
	magnesium and magnesium alloys
	↑
Anodic end (most easily corroded)	

3. การกัดกร่อนในที่อับ (Crevice Corrosion)

การกัดกร่อนชนิดนี้เป็นการกัดกร่อนเฉพาะที่ และมักจะเกิดขึ้นในบริเวณที่เป็นมุมอับต่าง ๆ ที่มีการขังตัวของสารกัดกร่อน ความชื้น และสิ่งสกปรก เช่น รอยแตก รอยแยก หลุม บริเวณหมุดย้ำ บริเวณสลัก หรือบริเวณหน้าแปลน เป็นต้น การกัดกร่อนในที่อับนี้อาจจะกล่าวได้ว่าเป็นการกัดกร่อนแบบกัลวานิกอีกรูปแบบหนึ่งที่เกิดจากความเข้มข้นของสารละลายบนพื้นผิวที่แตกต่างกัน เช่น ความเข้มข้นของเกลือ (C1) ความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออน (pH) หรือความเข้มข้นของออกซิเจน (O₂) เป็นต้น สำหรับกรณีที่พบได้บ่อยคือความแตกต่างกันของปริมาณออกซิเจน โดยบริเวณที่ไม่มีออกซิเจนหรือมีออกซิเจนปริมาณน้อยกว่าจะเป็นแอโนดและเกิดการกัดกร่อน บริเวณที่มีออกซิเจนมากกว่าจะเป็นแคโทดและได้รับการปกป้อง ตัวอย่างตามธรรมชาติที่สามารถพบเห็นการกัดกร่อนในที่อับ ได้แก่ ตัวเรือเหล็กบริเวณที่มีเพรียงเกาะโดยบริเวณที่เพรียงเกาะอยู่จะเกิดการกัดกร่อน รูปที่ 4 แสดงตัวอย่างรูปแบบหนึ่งของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในการกัดกร่อนแบบมุมอับ



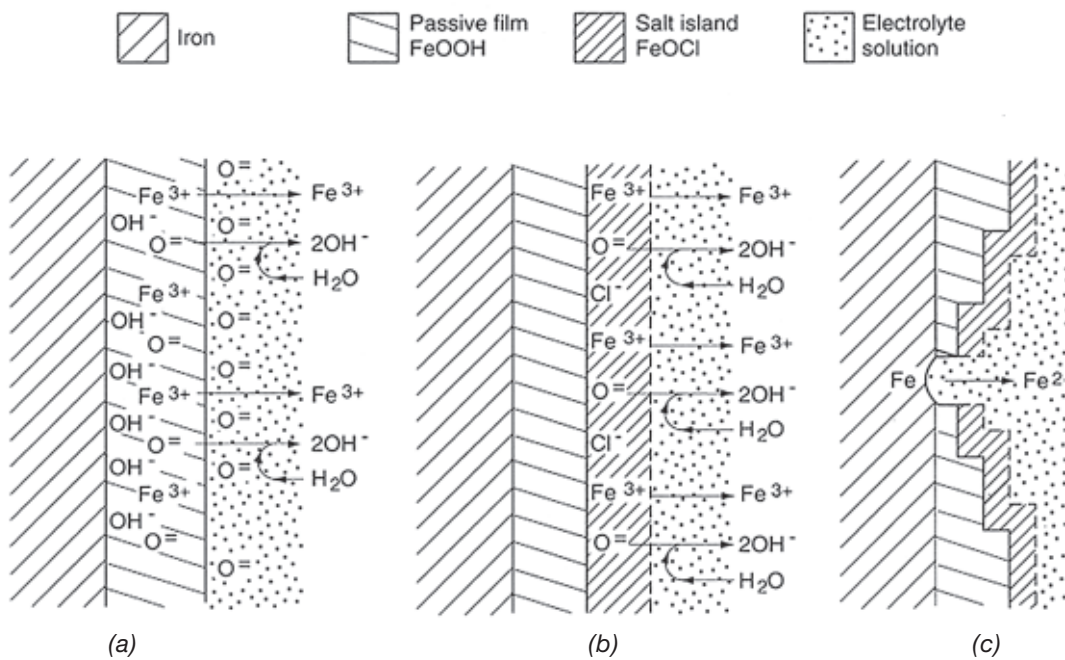
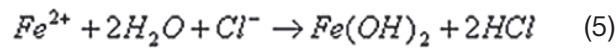
รูปที่ 4 การเกิดการกัดกร่อนในที่อับ

4. การกัดกร่อนแบบหลุม (Pitting Corrosion)

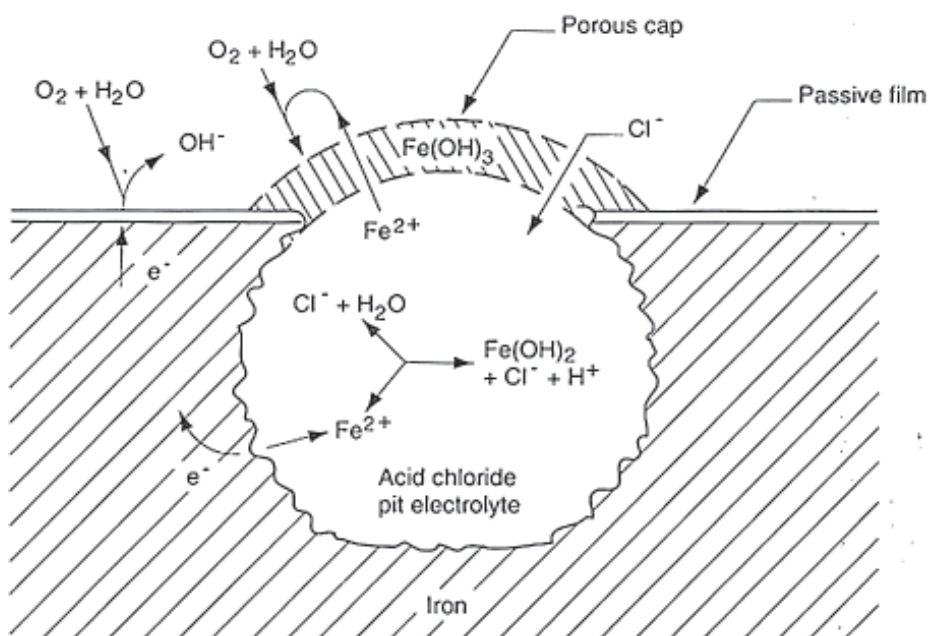
การกัดกร่อนชนิดนี้เป็นการกัดกร่อนเฉพาะที่อีกรูปแบบหนึ่งที่มีอันตรายเป็นอย่างมาก การกัดกร่อนสามารถเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วและไม่สามารถคาดเดาอัตราเร็วของการกัดกร่อนได้ การกัดกร่อนจะเกิดเริ่มต้นจากหลุมหรือโพรงเล็ก ๆ บนพื้นผิวของโลหะ ซึ่งมีสาเหตุมาจากการหลุดร่อน หรือแตกออกของออกไซด์ฟิล์ม (protective oxide film) ทำให้สารกัดกร่อนสามารถแทรกตัวเข้าไปตามรอยแตกและสัมผัสกับ

เนื้อโลหะได้โดยตรง การกัดกร่อนจะไม่ขยายตัวให้เห็นชัดเจนบนพื้นผิวโลหะเหมือนกับการกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอ แต่จะขยายตัวลึกลงไปใต้พื้นผิวของโลหะ ซึ่งขั้นตอนการขยายตัวของสารกัดกร่อนนี้อาจจะมีการกัดกร่อนในที่อับ (Crevice Corrosion) เกิดขึ้นร่วมด้วยการขยายตัวของสารกัดกร่อนใต้พื้นผิวของโลหะนี้เองที่ทำให้เราไม่สามารถมองเห็นและคาดคะเนได้ว่าเครื่องจักรและอุปกรณ์ต่าง ๆ จะเกิดการชำรุดเสียหายขึ้นเมื่อใด ตัวอย่างการกัดกร่อนแบบหลุมที่มักจะพบได้บ่อย ๆ คือ การใช้งานของโลหะไร้สนิมในสารละลายที่มีส่วนประกอบของคลอไรด์ไอออน (Cl⁻) เช่น น้ำทะเล เป็นต้น

รูปที่ 5 แสดงถึงกลไกเริ่มต้นในการเกิดการกัดกร่อนแบบหลุมของเหล็ก ในสารละลายที่ไม่มีส่วนประกอบของ Cl⁻ (5a) และในสารละลายที่มีส่วนประกอบของ Cl⁻ (5b) เช่น น้ำทะเล สำหรับรูปที่ 6 แสดงถึงการขยายตัวของสารกัดกร่อนแบบหลุมภายใต้รอยแตกของ passive film จะเห็นได้ว่าเมื่อเหล็กหรือเหล็กกล้าไร้สนิมถูกนำไปใช้งานในสารละลายที่มี Cl⁻ ละลายอยู่ การกัดกร่อนจะเกิดรุนแรงมากขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อ passive film ของเหล็กแตกหรือหลุดร่อนออก การกัดกร่อนภายใต้รอยแตกจะรุนแรงมากขึ้นอันเนื่องมาจากกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ที่เกิดขึ้นในระหว่างการกัดกร่อน ดังสมการที่ 5



รูปที่ 5 (a) การกัดกร่อนอย่างช้า ๆ ของเหล็กในสารละลายที่ประกอบด้วย Cl⁻, (c) สารกัดกร่อนแทรกตัวเข้าตามรอยแตกของ passive film และกัดกร่อนเนื้อเหล็กโดยตรง (ที่มาของภาพ: Principles and Prevention of Corrosion, 2nd ed., หน้า 213)



รูปที่ 6 กระบวนการที่เกิดขึ้นระหว่างการขยายตัวของการกัดกร่อนแบบหลุม (ที่มาของภาพ : Principles and Prevention of Corrosion, 2nd ed., หน้า 214)

จะเห็นได้ว่าการกัดกร่อนในที่อับและการกัดกร่อนแบบหลุมมีกลไกในการเกิดการกัดกร่อนที่คล้ายคลึงกัน ดังนั้นการป้องกันการกัดกร่อนทั้งสองแบบจึงสามารถใช้วิธีที่เหมือนกันได้ เช่น

- หลีกเลี่ยงการใช้งานในสารกัดกร่อนที่มีความเข้มข้น และ/หรือ อุณหภูมิสูง
- ออกแบบอุปกรณ์ให้มีการถ่ายเทของเหลวได้ดี เพื่อป้องกันการขังตัวของของเหลว
- ทำความสะอาดพื้นผิวของอุปกรณ์บ่อย ๆ ทุกครั้งที่มีโอกาส เพื่อกำจัดสารตกค้างต่าง ๆ
- เลือกใช้วัสดุที่มีความต้านทานต่อการกัดกร่อนในที่อับและแบบหลุมที่สูงขึ้น เช่น เหล็กกล้าไร้สนิมที่มีส่วนผสมของ โครเมียม (Cr) นิกเกิล (Ni) โมลิบดีนัม (Mo) และ ไนโตรเจน (N) มากขึ้น
- เลือกใช้การเชื่อมยึดแทนการใช้หมุดย้ำหรือสลัก
- ใช้การป้องกันแบบ Cathodic Protection

5. การแตกหักที่มีอิทธิพลมาจากสภาพแวดล้อม (Environmentally Induced Cracking)

การแตกหักดังกล่าวอาจให้คำจำกัดความได้ว่า “เป็นการแตกหักแบบเปราะของวัสดุอันเป็นผลเนื่องมาจากการใช้งานวัสดุในสภาพแวดล้อมที่มีฤทธิ์กัดกร่อน (Corrosive Environment) ภายใต้ความเค้นแบบแรงดึง (Applied Tensile Stress)” วัสดุที่ปกติมีการแตกหักแบบเหนียวอาจจะเกิดการแตกหักแบบเปราะได้ ถ้าถูกนำไปใช้งานในสภาพแวดล้อมของการกัดกร่อนที่เหมาะสม ตัวอย่างเช่น การใช้งานเหล็กกล้าไร้สนิมในสารละลายคลอไรด์ การใช้งานทองเหลืองในการละลายแอมโมเนีย และการใช้งานเหล็กกล้าคาร์บอนในสารละลายไนเตรท เป็นต้น การแตกหักดังกล่าวสามารถแบ่งออกได้หลายรูปแบบขึ้นอยู่กับประเภทของแรงและสภาพแวดล้อมกัดกร่อนที่ทำให้เกิดการแตกหัก ได้แก่

- การแตกหักอันเนื่องมาจากการกัดกร่อนร่วมกับความเค้น (Stress Corrosion Cracking, SCC)
- การแตกหักอันเนื่องมาจากการกัดกร่อนร่วมกับความล้า (Corrosion Fatigue Cracking, CFC)
- การแตกหักอันเนื่องมาจากไฮโดรเจนร่วมกับ

ความเค้น (Hydrogen Induced Cracking, HIC)

การป้องกันการแตกหักที่มีอิทธิพลมาจากสภาพแวดล้อมเป็นสิ่งที่ยากลำบากเนื่องจากความหลากหลายของแรงที่มากระทำ และสภาพแวดล้อมที่โลหะถูกนำไปใช้งาน จึงไม่สามารถกล่าวได้ทั้งหมดในที่นี้ แต่สามารถกล่าวอย่างย่อ ๆ ในที่นี้ได้ เช่น

- พยายามกำจัดหรือลดความรุนแรงของสภาพแวดล้อมที่ใช้งานอยู่ เช่น สารกัดกร่อนต่าง ๆ หรือ แหล่งกำเนิดของไฮโดรเจน
- เลือกวัสดุที่มีความต้านทานต่อสภาพแวดล้อมที่ใช้งาน
- ลดระดับความเค้นที่ใช้งานลงให้อยู่ในระดับที่ปลอดภัย หรือเปลี่ยนวัสดุที่มีคุณสมบัติทางกลที่เหมาะสมกับการใช้งานให้มากขึ้น

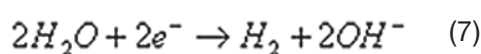
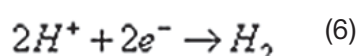
- ลดความเค้นตกค้างแรงดึงในโลหะโดยการทำ Shotpeening

- ใช้การป้องกันแบบ Cathodic Protection (ยกเว้นในกรณีของ HIC)

6. การเสียหายอันเนื่องมาจากไฮโดรเจน (Hydrogen Damage)

เนื่องจากอะตอมของไฮโดรเจนมีขนาดเล็กมาก ดังนั้นไฮโดรเจนจึงสามารถแพร่เข้าไปในเนื้อโลหะ หรือแม้กระทั่งแพร่เข้าไปในโครงสร้างผลึก (Crystal Structure) ของโลหะชนิดต่าง ๆ ได้เกือบทุกชนิด ไฮโดรเจนเมื่อแพร่เข้าไปในเนื้อโลหะจะทำให้โลหะสูญเสียความเหนียว (ductility) และทำให้โลหะเกิดการแตกหักแบบเปราะได้ นอกจากนี้ไฮโดรเจนที่แพร่เข้าไปในเนื้อโลหะอาจจะรวมตัวกันเกิดเป็นก๊าซไฮโดรเจนทำให้เกิดช่องว่างเล็ก ๆ ขึ้นภายในเนื้อโลหะ

(Internal Voids) หรือทำให้เกิดการโป่งพองของผิวโลหะ (Surface Blisters) ได้ ตัวอย่างการเสียหายอันเนื่องมาจากไฮโดรเจนได้แก่ การสูญเสียธาตุคาร์บอนในเหล็กกล้า (Decarburization) โดยไฮโดรเจนจะเข้าทำปฏิกิริยากับสารประกอบคาร์บอน (Carbides) ในเหล็กกล้า (Steel) เกิดเป็นก๊าซมีเทน (CH_4) เมื่อเหล็กกล้าสูญเสีย คาร์บอนไปทำให้ความแข็งแรงของเหล็กกล้าต่ำลง การเกิดของไฮโดรเจนสามารถเกิดได้จากหลายสาเหตุ เช่น กระบวนการทางความร้อน (Heat Treating) การเชื่อม (Welding) กระบวนการผลิตต่าง ๆ (Manufacturing Processes) การทำความสะอาดพื้นผิวของโลหะ (Cleaning and Pickling) หรือ ปฏิกิริยารีดักชันของไฮโดรเจนหรือน้ำดังสมการที่ 6 และ 7 เป็นต้น



รูปที่ 7 Hydrogen blister in a carbon steel plate removed from a petroleum process stream (ที่มาของภาพ: Corrosion Engineering, 3rd ed., หน้า 143)

7. การกัดกร่อนตามขอบเกรน (Intergranular Corrosion)

เป็นการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นตามขอบเกรนซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากสิ่งแปลกปลอมต่าง ๆ (Reactive Impurities) ที่แยกตัวออกมาอยู่ตามขอบเกรน (Grain Boundary Segregation) เช่น ในกรณีของเหล็กกล้าคาร์บอน (Carbon steel) ที่มีการแยกตัวของ คาร์บอน (C) ไนโตรเจน (N) และ ฟอสฟอรัส (P) มาอยู่ตามขอบเกรน ทำให้ตามขอบเกรนมีความอ่อนไหวต่อการกัดกร่อนมากขึ้น จนสามารถทำให้เกิดการแตกหักตามขอบเกรนอันเนื่องมาจากการกัดกร่อนร่วมกับความเค้นแรงดึง (Intergranular Stress Corrosion Cracking) ได้ หรือในกรณีของโลหะที่มี

ออกไซด์ฟิล์มในการป้องกันการกัดกร่อนโลหะดังกล่าว อาจจะมีการสูญเสียธาตุผลมบางตัวที่มีผลต่อการสร้างออกไซด์ฟิล์ม ทำให้ความต้านทาน ต่อการกัดกร่อนตามขอบเกรนลดลงจนทำให้เกิดการกัดกร่อนตามขอบเกรนได้ ตัวอย่างที่พบเห็นได้บ่อยคือ การกัดกร่อนตามขอบเกรนของเหล็กกล้าไร้สนิมแบบออสเทนนิติก (Austenitic Stainless Steel) ที่มีการสูญเสียธาตุโครเมียม (Cr) อันเนื่องมาจากโครเมียมทำปฏิกิริยาคาร์บอนได้เป็นโครเมียมคาร์ไบด์ (ส่วนมากจะเป็น Cr_7C_3) อยู่ตามขอบเกรน ทำให้ตามขอบเกรนมีปริมาณโครเมียมลดลง จนสูญเสียความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อน การเกิดของโครเมียมคาร์ไบด์ จะเกิดเมื่อเหล็กกล้าไร้สนิมแบบออสเทนนิติก ผ่านกระบวนการทางความร้อนหรือถูกใช้งานในช่วงอุณหภูมิประมาณ $415\text{--}815^\circ\text{C}$

การสูญเสียธาตุโครเมียมในเหล็กกล้าไร้สนิมแบบออสเทนนิติกดังกล่าวเรียกว่า Sensitization การเชื่อมในเหล็กกล้าไร้สนิมแบบออสเทนนิติกก็เป็นอีกสาเหตุหนึ่งของการเกิด Sensitization เช่น กันการป้องกันการเกิด Sensitization สามารถกระทำได้หลายวิธีด้วยกัน ยกตัวอย่างเช่น

- ลดปริมาณธาตุคาร์บอนลงให้เหลือน้อยกว่า 0.03%
- เติมธาตุบางตัวลงไปเพื่อให้ไปรวมตัวกับคาร์บอนแทนโครเมียม เช่น ไททาเนียม (Ti) หรือ ไนโอเบียม (Nb) เป็นต้น
- ให้ความร้อนแก่ชิ้นงานจนสูงเกินกว่า 815°C จนโครเมียมคาร์ไบด์แตกตัวและละลายกลับเข้าไปในเนื้อเหล็ก จากนั้นทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว เพื่อ

ป้องกันโครเมียมและคาร์บอน กลับมารวมตัวกันอีกครั้ง ยกเว้นกรณีที่มีการผสม Ti หรือ Nb ในชิ้นงานไม่จำเป็นต้องทำให้ชิ้นงานเย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว

- หลีกเลี่ยงการใช้งานสภาวะแวดล้อมที่มีการกัดกร่อนรุนแรง

8. การกัดกร่อนอันเนื่องมาจากการสูญเสียธาตุผสม (Dealloying)

การกัดกร่อนชนิดนี้มักจะเกิดกับโลหะผสมที่มีการนำโลหะที่อยู่ห่างกันค่อนข้างมากในอนุกรมกัลวานิกมาผสมกันโลหะที่มีความต้านทานต่อการกัดกร่อนน้อยกว่า (อยู่ใกล้ Anodic end มากกว่า) มีแนวโน้มที่จะละลายหายไปจากโลหะผสม ทำให้โลหะที่เหลืออยู่มีสภาพเป็นรูพรุนและมีความแข็งแรงน้อยลง ความรุนแรงของการกัดกร่อนชนิดนี้จะเพิ่มมากขึ้น ถ้าถูกนำไปใช้งานในสภาพแวดล้อมที่มีการกัดกร่อนรุนแรง เช่น น้ำทะเล

Graphitic Corrosion เป็นการกัดกร่อนที่มักจะเกิดขึ้นกับเหล็กหล่อเทาที่มีโครงสร้างทางจุลภาคของแกรไฟท์เป็นลักษณะโครงข่ายต่อเนื่องกัน (a continuous graphite network) เช่นการสูญเสียธาตุเหล็กในท่อเหล็กหล่อที่ถูกฝังไว้ใต้ดินเป็นเวลาหลายปี โดยแกรไฟท์ (graphite) จะเป็นแคโทด ส่วนเหล็กจะเป็นแอโนด และถูกกัดกร่อนหายไป เหลือไว้แต่โครงข่ายแกรไฟท์ ที่มีความแข็งแรงต่ำ ทำให้ท่อเหล็กหล่อสูญเสียความแข็งแรงอย่างรวดเร็ว และชำรุดเสียหายในที่สุด

Dezincification เป็นการสูญเสียธาตุสังกะสี (Zn) ในทองเหลือง (brasses, Cu-Zn alloys) การเกิด dezincification ของทองเหลือง จะสามารถเกิดได้กับการใช้งานในหลาย ๆ ประเภทด้วยกัน แต่จะมีความรุนแรงมากเมื่อถูกนำไปใช้งานในน้ำที่มี CO₂ และ/หรือ สารประกอบคลอไรด์ ละลายอยู่ในปริมาณมาก ทองเหลืองที่มีปริมาณสังกะสีผสมอยู่น้อยกว่า 15% จะมีความต้านทาน dezincification ได้ดี สำหรับการป้องกันการสูญเสียสังกะสีในทองเหลืองเกรด Cu-30Zn สามารถทำได้โดยการเติมดีบุก (Sn) 1% และเติมสารหนู (As) พลวง (Sb) หรือ ฟอสฟอรัส (P) อย่างใดอย่างหนึ่งลงไปเล็กน้อย เช่น Inhibited admiralty brass (Cu-28Zn-1Sn-0.6As)

9. การกัดกร่อนอันเนื่องมาจากสารกัดกร่อนที่มีความเร็ว (Erosion-Corrosion)

เป็นการกัดกร่อนที่เกิดจากสารกัดกร่อนที่มีความเร็วสูงไหลผ่านพื้นผิวของโลหะ สารกัดกร่อน ที่มีความเร็วสูงจะกัดเซาะและทำลาย protective film ของโลหะ ทำให้สารกัดกร่อนสามารถสัมผัสเนื้อโลหะโดยตรง การกัดกร่อนประเภทนี้จะมีความรุนแรงมากขึ้นในบริเวณท่อหรืออุปกรณ์ต่าง ๆ ที่มีการเปลี่ยนทิศทางหรือความเร็วของของไหล และทำให้เกิดการไหลแบบปั่นป่วน (turbulence) เช่น ข้องอ (elbows) เครื่องกังหัน (turbines) และ เครื่องสูบน้ำ (pumps) เป็นต้น สารกัดกร่อนที่มีสารแขวนลอยต่าง ๆ เช่น ทราย ตะกอน หรือเศษโลหะ ก็จะทำให้การกัดกร่อนมีความรุนแรงเพิ่มขึ้นเช่นกัน การป้องกันการกัดกร่อนสามารถทำได้โดยพิจารณาถึงสาเหตุของการกัดกร่อน เช่น ออกแบบอุปกรณ์ เพื่อให้ของไหลมีความเร็วลดลงและมีการไหลที่ราบเรียบมากขึ้น ใช้ตัวกรองเพื่อแยกสารแขวนลอยออก หรือเลือกใช้วัสดุที่มีความต้านทานต่อสารกัดกร่อน เพื่อให้ protective film ไม่ถูกกัดเซาะออกไปง่ายจนเกินไป

โลหะกันกร่อน (Sacrificial Anodes)

การป้องกันการกัดกร่อนสามารถกระทำได้หลายวิธีขึ้นอยู่กับรูปแบบของการกัดกร่อนที่เกิดขึ้น รวมไปถึงสภาพแวดล้อมที่ใช้งานด้วยเช่นกัน การป้องกันการกัดกร่อนเบื้องต้นได้กล่าวไปบ้างแล้ว ในการกัดกร่อนแต่ละหัวข้อ จากรูปแบบการกัดกร่อนที่กล่าวมาแล้ว จะเห็นได้ว่ามีสิ่งหนึ่งที่คล้ายกัน คือ โลหะที่ถูกกัดกร่อนจะมีการสูญเสียอิเล็กตรอน อันเนื่องมาจากปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าเข้ามาเกี่ยวข้องอยู่ด้วย ตลอดเวลาไม่มากนักน้อย ซึ่งจากสาเหตุดังกล่าวนี้เอง ทำให้การใช้โลหะกันกร่อนในการป้องกันการกัดกร่อนเป็นวิธีที่สะดวกง่าย และต้นทุนต่ำ โดยโลหะกันกร่อนจะทำหน้าที่เป็นตัวสูญเสียอิเล็กตรอนแทน ทำให้โลหะที่ใช้งานอยู่ได้รับการปกป้องและไม่เกิดการกัดกร่อนหรือเกิดซัลฟ ซึ่งก็ขึ้นอยู่กับว่าปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าที่เกิดขึ้นมีส่วนร่วมต่อการกัดกร่อนมากเพียงใด

จากข้อได้เปรียบดังกล่าวข้างต้น กองทัพเรือจึงมักจะใช้โลหะกันกร่อนในการป้องกันการกัดกร่อนของตัวเรือ เครื่องจักร และอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่มีการสัมผัสกับน้ำอยู่ตลอดเวลา โลหะกันกร่อนที่ใช้งานมีอยู่หลายชนิดด้วยกัน ได้แก่ สังกะสีกันกร่อน (zinc anode) อะลูมิเนียมกันกร่อน (aluminium anode) และแมกนีเซียมกันกร่อน (magnesium anode) ซึ่งโลหะกันกร่อนแต่ละประเภทมีความเหมาะสมต่อการใช้งานที่แตกต่างกันออกไป ตารางที่ 2 แสดงถึงโลหะกันกร่อนประเภทต่าง ๆ และคุณสมบัติของโลหะกันกร่อนแต่ละชนิด

ตารางที่ 2 คุณสมบัติต่าง ๆ ของโลหะกันกร่อนแต่ละชนิด

Alloy	Anode potential (V vs. Ag/AgCl/Seawater)	Max current capacity (Ah/Kg)
Al-Zn-Hg	- 1.00 to - 1.05	2,830
Al-Zn-Sn	- 1.00 to - 1.10	2,600
Al-Zn-In	- 1.00 to - 1.15	2,700
Zn-Al-Cd	- 1.05	780
Mg-Mn	- 1.70	1,230
Mg-Al-Zn	- 1.50	1,230

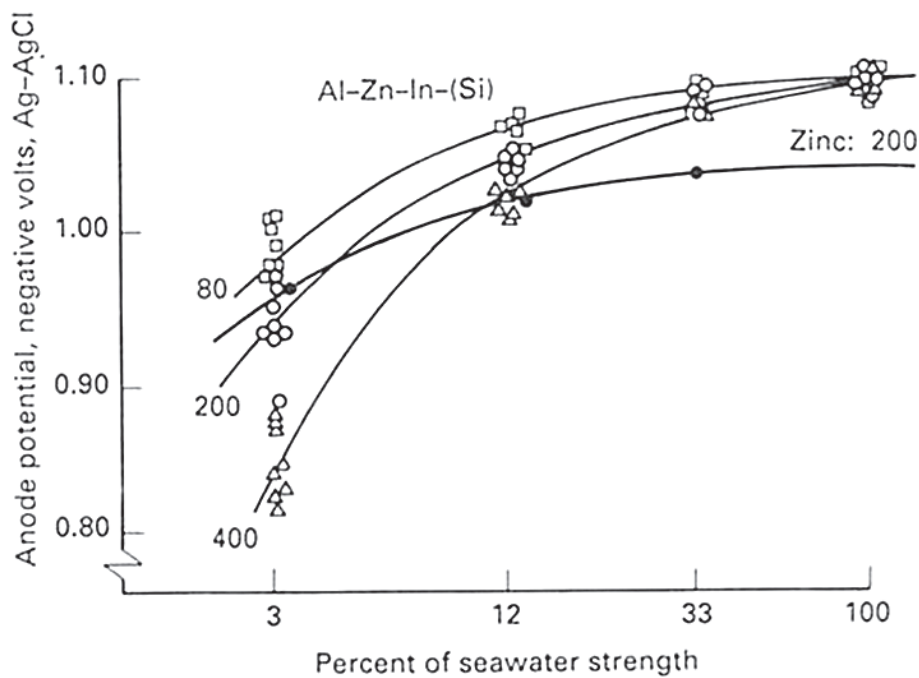
จากตารางที่ 2 จะเห็นว่าโลหะกันกร่อนจะมีคุณสมบัติที่สำคัญอยู่สองประการด้วยกัน คือ anode potential และ current capacity สำหรับค่า anode potential จะเป็นตัวบ่งชี้ถึงความสามารถในการจ่ายกระแสเพื่อป้องกันการกัดกร่อนของโลหะเป้าหมาย เช่น ในกรณีของแมกนีเซียมกันกร่อน ที่มีค่า anode potential ต่ำที่สุด (more negative) จะมีแรงดันไฟฟ้าขับเคลื่อน (driving voltage) สูงที่สุด ทำให้แมกนีเซียมกันกร่อน สามารถป้องกันกัดกร่อนของโลหะได้เป็นอย่างดี ถึงแม้ว่าโลหะดังกล่าวจะใช้งานในสภาพแวดล้อมที่มีการนำไฟฟ้าต่ำ เช่น ในน้ำจืดหรือในดิน ส่วนค่า current capacity จะเป็นตัวบ่งชี้ถึงความสามารถในการจ่ายกระแสที่ต่อเนื่องและคงที่ (steady delivery of current) ของโลหะกันกร่อน ดังนั้นถ้าต้องการป้องกันการกัดกร่อนที่ต่อเนื่องยาวนาน อะลูมิเนียมกันกร่อนจะเหมาะสมที่สุดเนื่องจากมีค่าความจุของกระแส (current capacity) สูงสุด

จะเห็นได้ว่า anode potential เป็นคุณสมบัติที่สำคัญที่สุดของโลหะกันกร่อนในการป้องกันการกัดกร่อน อย่างไรก็ตามการเลือกใช้โลหะกันกร่อน จำเป็นต้องพิจารณาถึงองค์ประกอบหลาย ๆ อย่างด้วยกัน เช่น ประสิทธิภาพ (efficiency) ความจุกระแส (current capacity) สภาพแวดล้อมที่จะนำไปใช้งาน ราคา รวมถึงคุณสมบัติด้านต่าง ๆ ของโลหะกันกร่อน เป็นต้น ยกตัวอย่าง หากต้องการป้องกันการกัดกร่อนของเหล็กในแม่น้ำเจ้าพระยา แมกนีเซียมกันกร่อนจะเหมาะสมที่สุด เพราะน้ำจืดมีความต้านทานไฟฟ้าสูง การเลือกใช้งานโลหะกันกร่อนจึงพิจารณาจาก anode potential เป็นหลัก นอกจากนี้ อะลูมิเนียมกันกร่อน และสังกะสีกันกร่อน เมื่อใช้งานในน้ำจืดจะเกิดฟิล์มที่เป็นฉนวนขึ้นปกคลุมผิว ทำให้โลหะกันกร่อนทั้งสองชนิดสูญเสียคุณสมบัติในการป้องกันการกัดกร่อน

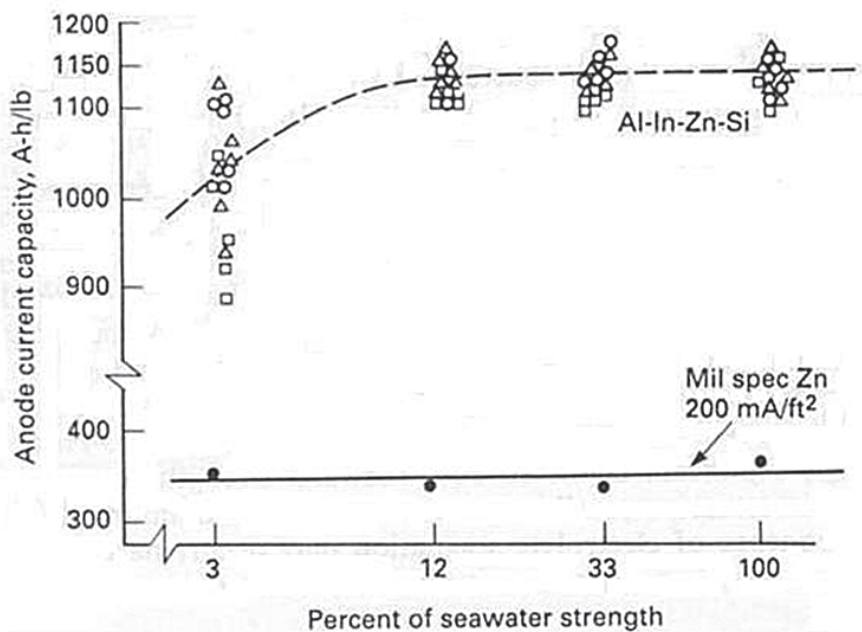
สำหรับการป้องกันการกัดกร่อนในน้ำทะเล ควรพิจารณาเลือกใช้อะลูมิเนียมกันกร่อนหรือสังกะสีกันกร่อน เนื่องจากแมกนีเซียมกันกร่อนมีประสิทธิภาพในการป้องกันการกัดกร่อนประมาณ 50-60% เท่านั้น กล่าวคือ

แมกนีเซียมกันกร่อน จะถูกใช้ ในการป้องกันการกัดกร่อนเพียง 50-60% โดยน้ำหนักเท่านั้น ส่วนที่เหลือจะถูกกัดกร่อนและละลายหายไปใต้น้ำทะเล แต่ในขณะที่อะลูมิเนียมกันกร่อน และสังกะสีกันกร่อน มีประสิทธิภาพอย่างต่ำ 90% จึงมีความเหมาะสมที่จะใช้ใต้น้ำทะเลมากกว่า นอกจากนี้ อะลูมิเนียมกันกร่อน และสังกะสีกันกร่อน ยังมีราคาถูกกว่าด้วย

ส่วน การป้องกันการกัดกร่อนของโลหะในน้ำกร่อย นอกจากจะพิจารณาถึง anode potential และ anode current capacity แล้ว ยังจำเป็นต้องพิจารณาถึงความเข้มข้นของน้ำทะเล (seawater strength) ด้วย เนื่องจากเมื่อความเข้มข้นของน้ำทะเลลดลง คุณสมบัติในการป้องกันการกัดกร่อนของสังกะสีกันกร่อน และอะลูมิเนียมกันกร่อน จะลดลงด้วย ดังตัวอย่างตามรูปที่ 8 และ 9 ดังนั้นการตรวจสอบระดับความเข้มข้นของน้ำทะเล (percent of seawater strength) ในพื้นที่น้ำกร่อยจึงเป็นสิ่งที่จะต้องพิจารณาก่อนการเลือกใช้โลหะกันกร่อน สำหรับน้ำกร่อยที่มีระดับความเข้มข้นของน้ำทะเลต่ำ แมกนีเซียมกันกร่อน จะเป็นตัวเลือกที่เหมาะสมที่สุด



รูปที่ 8 ค่าศักย์ไฟฟ้าของอะลูมิเนียมกันกร่อนและสังกะสีกันกร่อนในน้ำที่มีระดับความเข้มข้นของน้ำทะเลระดับต่างๆ, Current densities (mA/ft^2): 400 (Δ); 200 (\circ); 80 (\square) (ที่มาของภาพ: Corrosion, Vol. 2, Corrosion Control, 3Rev. ed., หน้า 10:41)



รูปที่ 9 ค่าความจุของอะลูมิเนียมกันกร่อนและสังกะสีกันกร่อนในน้ำที่มีระดับความเข้มข้นของน้ำทะเลระดับต่าง ๆ, Current densities (mA/ft^2): 400 (Δ); 200 (\circ); 80 (\square) (ที่มาของภาพ : Corrosion, Vol. 2, Corrosion Control, 3Rev. ed., หน้า 10:42)

เอกสารอ้างอิง

- [1.] D. A. Jones, Principles and Prevention of Corrosion, 2nd ed., New Jersey, Prentice-Hall, Inc., 1996.
- [2.] G. Butler and H. K. C. Ison, Corrosion and its Prevention in Waters, New York, Reinhold Publishing Corporation, 1966.
- [3.] L. L. Shreir, R. A. Jarman and G. T. Burstein, Corrosion, Vol. 2, Corrosion Control, 3Rev. ed., Oxford, Butterworth-Heinemann Ltd., England, 1995.
- [4.] M. G. Fontana, Corrosion Engineering, 3rd ed., Singapore, McGraw-Hill, Inc., 1987.
- [5.] M. L. Free, เอกสารประกอบการสอนวิชา Corrosion Engineering, Department of Metallurgical Engineering, University of Utah, Utah, 2003.

บทคัดย่อ

สิ่งสำคัญในการผลิตชิ้นงานที่ได้จากการหล่อขึ้นรูป คือ ต้องทราบว่าธาตุแต่ละชนิดมีบทบาทหรือส่งผลอย่างไรต่องานหล่อ สำหรับโลหะกลุ่มทองแดงผสมโดยเฉพาะอย่างยิ่งบรอนซ์แมงกานีส พบว่าปริมาณของธาตุเหล็กนั้นมีอิทธิพล อย่างมากต่อสมบัติเชิงกลที่ได้ภายหลังจากการหล่อ (As cast) ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้ จะนำวัสดุที่ใช้ผลิตในภาคอุตสาหกรรมจริง ได้แก่ Cartridge brass โลหะปรับส่วนผสมหรือ Master alloys และธาตุผสม (Alloying elements) อื่น ๆ นำมาหลอมเพื่อทำเป็นชิ้นงานทดสอบ ตามมาตรฐาน JIS H 5102 Class 2^[1] โดยปรับเปลี่ยนปริมาณของเหล็กในอยู่ในช่วง 0.0-2.5% โดยน้ำหนักแล้วดูว่าจะส่งผลอย่างไรต่อโครงสร้างทางจุลภาค ขนาดของเกรน และสมบัติเชิงกล ซึ่งจากการศึกษาพบว่าเมื่อมีการเติมเหล็กลงไปในส่วนผสมจะเกิดการจับตัวกับธาตุอื่น เกิดเป็น สารละลายของแข็ง (Solid solution) ตกผลึกและกระจายตัวอยู่ทั่วไปในโครงสร้าง มีส่วนให้อัตราการเย็นตัวของโลหะผสมสูงขึ้น ขนาดเกรนที่ได้จึงเล็กลง และส่งผลให้สมบัติเชิงกลของชิ้นงานทดสอบที่ได้สูงขึ้นตามไปด้วย

เรือโท เสริมศักดิ์ ศรีหิรัญ

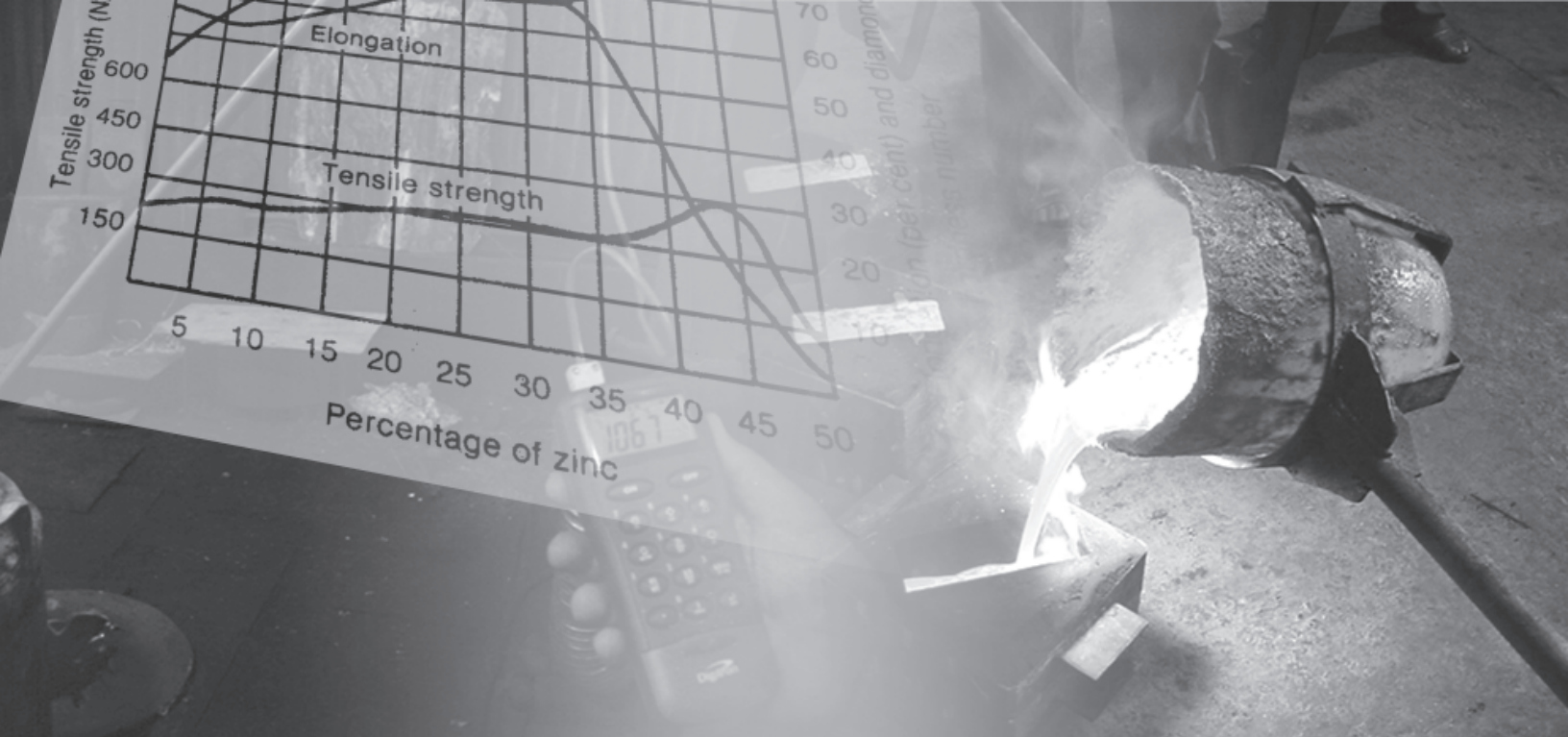
ประจำกองโครงการและงบประมาณ อุทการเรือพระจุลจอมเกล้า
ช่วยปฏิบัติราชการ อุทการเรือธนบุรี กรมอุทการเรือ

E-mail : srihirun9@yahoo.com

ดร.พงษ์ศักดิ์ ถึงสุข

อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี

E-mail : ptuengsook@yahoo.com



อิทธิพลของเหล็กที่มีต่อบรอนซ์แมงกานีสหล่อ

บทนำ

บรอนซ์แมงกานีส หรือทองเหลืองด้านทานแรงดึงสูงเป็นวัสดุทางวิศวกรรมอีกชนิดหนึ่งที่มีความนิยมใช้งานกันอย่างแพร่หลาย เหมาะกับงานที่ต้องการความแข็งแรงสูง ทั้งความต้านทานต่อแรงดึง ความแข็ง และอัตราการยืดตัวที่จุดแตกหัก จึงมักนิยมนำมาใช้ทำอุปกรณ์จำพวก ใบจักรเรือ เฟือง แบริ่ง แกนวาล์ว และชิ้นส่วนอุปกรณ์อื่น ๆ อีกมากมาย ซึ่งในการนำไปใช้งานนั้นนอกจากส่วนผสมทางเคมีแล้วสมบัติเชิงกลก็ยังเป็นสิ่งสำคัญที่ถูกนำมาพิจารณาควบคู่ไปด้วย ดังนั้นเพื่อให้ได้สมบัติที่ติดตั้งแล้ว จึงจำเป็นที่จะต้องมีการควบคุมโครงสร้างให้เป็นไปตามที่กำหนด ซึ่งก็เป็นที่รู้กันโดยทั่วไปว่าโลหะผสมโดยส่วนมากที่มีโครงสร้างละเอียดจะทำให้มีสมบัติเชิงกลดีขึ้น วิธีการหนึ่งที่เป็นที่นิยมคือการเติมธาตุที่มีอิทธิพลในการปรับโครงสร้างลงไป ทั้งนี้ในการเลือกเอาธาตุชนิดใดมาใช้ก็ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมทั้งในด้านของบทบาทของธาตุ ความสะดวกในการจัดหา หรือความคุ้มค่าในเชิงเศรษฐศาสตร์ พบว่าเหล็กเป็นธาตุหนึ่งที่ทำได้ง่าย ราคาถูก และที่สำคัญมีอิทธิพลในการปรับเปลี่ยนโครงสร้างทางจุลภาคและสมบัติเชิงกล หากไม่มีเหล็กหรือมีผลมอยู่ในปริมาณที่น้อยเกินไปจะทำให้โครงสร้างที่ได้หยาบและส่งผลให้สมบัติเชิงกลนั้นด้อยลง แต่หากมีอยู่ในปริมาณที่มากเกินไปก็จะทำให้เหล็กเกิดการรวมตัวกับธาตุอื่นเป็นสารประกอบเชิงซ้อน เกิดเป็นจุดแข็ง (Hard Spot) ภายในเนื้อโลหะแล้วจะทำให้สมบัติเชิงกลเสียไป ดังนั้นหากมีการควบคุมให้เหล็กอยู่ในปริมาณที่พอดีจะทำให้ได้งานที่มีคุณภาพอันเป็นการพัฒนาประสิทธิภาพในการผลิตให้สูงขึ้น

โลหะทองแดงผสม (Copper base alloys)

ในการใช้งานปกติมักไม่นิยมนำทองแดงบริสุทธิ์มาใช้งานโดยตรง ยกเว้นในกรณีที่ต้องการสมบัติเฉพาะของทองแดงบริสุทธิ์เท่านั้น ดังนั้นจึงต้องมีการปรับปรุงหรือเพิ่มคุณสมบัติของทองแดงเพื่อให้ได้สมบัติตามที่ต้องการ สำหรับเทคนิคการผสมธาตุเป็นจุดเริ่มต้นที่ทำให้เกิดโลหะผสมของทองแดงขึ้นมาอีกมากมายหลายชนิด ซึ่งแต่ละชนิดก็มีลักษณะและสมบัติเชิงกลที่แตกต่างกันไป ในการนำไปใช้งานก็สามารถเลือกได้ตามความเหมาะสม โดยปกติแล้วได้จัดออกเป็น 4 กลุ่ม ดังนี้

กลุ่มที่ 1 ได้แก่ โลหะผสมระหว่างทองแดงกับสังกะสีหรือทองเหลือง (Brasses) โดยมีปริมาณสังกะสีตั้งแต่ 10% ขึ้นไป ส่วนใหญ่การใช้งานมักมีสังกะสีไม่เกิน 40% ซึ่งหากเกิน 60% แล้วจะส่งผลทำให้ได้โครงสร้างที่ซับซ้อน สมบัติเชิงกลลดลง ทำให้การนำไปใช้งานถูกจำกัดมากขึ้น

ทองเหลืองยังสามารถแบ่งกลุ่มย่อยออกไปได้ตามลักษณะโครงสร้างจุลภาค ดังนี้

ก. ทองเหลืองแอลฟา (α - Brass) ผสมสังกะสีสูงถึง 36% แบ่งออกเป็นกลุ่มย่อยได้อีก 2 กลุ่ม

1. ทองเหลือง Yellow alpha brass ผสมสังกะสี 20 - 36%

2. ทองเหลือง Red brass ผสมสังกะสี 5 - 20%

ข. ทองเหลืองแอลฟา-เบต้า (α - β Brass) ผสมสังกะสี 38 - 46%

กลุ่มที่ 2 ได้แก่ โลหะผสมระหว่างทองแดงกับธาตุอื่น ๆ เช่น ดีบุก ซิลิกอน อะลูมิเนียม และ เบริลเลียม แบ่งออกได้หลายประเภท ขึ้นอยู่กับชนิดของธาตุผสม

1. บรอนซ์ดีบุก
2. บรอนซ์อะลูมิเนียม
3. บรอนซ์ซิลิกอน
4. บรอนซ์เบริลเลียม
5. บรอนซ์แมงกานีส หรือทองเหลืองด้านทาน

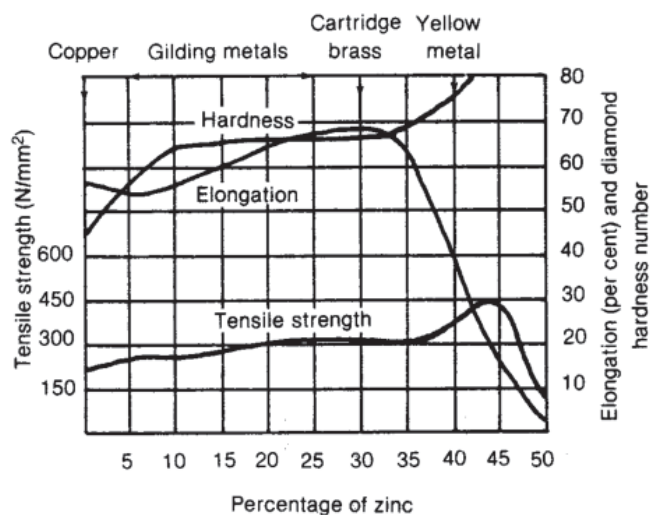
แรงดึงสูง

กลุ่มที่ 3 ได้แก่ โลหะผสมระหว่างทองแดงกับนิกเกิล เรียกชื่อ โลหะผสมกลุ่มนี้ว่า Cupro - Nickels

กลุ่มที่ 4 ได้แก่ โลหะผสมระหว่างทองแดงกับนิกเกิล และสังกะสี เรียกชื่อโลหะผสมนี้ว่า Nickel Silver หรือ German Silvers

สมบัติเชิงกลของทองเหลือง

พบว่าสังกะสีมีบทบาทสำคัญในการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงกลของทองเหลือง กล่าวคือ สามารถเพิ่มความแข็งแรง ความเหนียว และความแข็ง โดยสังกะสีสามารถละลายในทองแดง และอยู่ในรูปสารละลายของแข็ง (Solid solution) แต่ทั้งนี้การละลายของสังกะสีนั้นมีขอบเขตจำกัดอยู่ช่วงหนึ่ง หากเลยจุดดังกล่าวนี้ไปแล้ว สังกะสีจะละลายรวมกับทองแดงเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนขึ้นมา ซึ่งสารประกอบเชิงซ้อนดังกล่าวจะมีลักษณะที่แข็งและเปราะ ในช่วงนี้ความแข็งแรงกับความเหนียวจะค่อย ๆ ลดลง มีแต่ความแข็งเท่านั้นที่ยังคงเพิ่มขึ้น ซึ่งค่าของสมบัติเชิงกลที่สัมพันธ์กับปริมาณสังกะสี ดังได้แสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่าง Mechanical properties และ ปริมาณของสังกะสี [2]

พลกระทบของธาตุที่มีต่อโลหะฐานทองแดง

สาเหตุที่ต้องมีการเติมธาตุผสม (Alloying Elements) ลงในงานหล่อโลหะฐานทองแดงมีจุดประสงค์หลายประการซึ่งก็ขึ้นอยู่กับสมบัติและลักษณะการใช้งาน ธาตุแต่ละชนิดจะมีอิทธิพลต่อโลหะผสมแตกต่างกันไป สำหรับธาตุที่ผสมลงไป สามารถสรุปบทบาทได้ดังนี้

อะลูมิเนียม (Aluminum) จะผสมเข้าไปเท่าที่จำเป็น เช่น ในงานหล่อทองเหลืองด้วยแม่พิมพ์เทหล่อ (Die casting brass) ไม่สมควรที่จะให้มีอะลูมิเนียมอยู่เลย เนื่องจากทำให้สูญเสียสมบัติด้านการหล่อ ถึงแม้ว่าการเติมจะช่วยให้ การไหลดีขึ้นหรือมีสีลันที่สวยขึ้นก็ตาม ที่เป็นเช่นนี้เนื่อง มาจากผลของออกไซด์ของอะลูมิเนียม ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญประการหนึ่งที่ทำให้เกิดรูพรุนในเนื้องาน และเกิดสาร มลทิน (Inclusions) อันส่งผลให้งานหล่อมีเนื้อไม่แน่นและทำให้สมบัติเชิงกลที่ได้เสียไป

เหล็ก (Iron) มีส่วนช่วยในการเข้าไปปรับเนื้อโลหะให้มีขนาดเกรนที่ละเอียด (Grain refiner) โดยเฉพาะชิ้นงานที่มีหน้าตัดใหญ่ อีกทั้งยังมีผลต่อการเพิ่มความแข็งแรง และยังทำให้สามารถทนต่อแรงดึง ได้สูงขึ้นอีกด้วย แต่ถ้าหากผสมเหล็กมากเกินไปจะทำให้เกิดจุดแข็งขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในงานที่มีโบรอนผสมอยู่

ตะกั่ว (Lead) เป็นธาตุที่ช่วยในการปรับปรุงความสามารถในการ machining แต่จะต้องมีการควบคุมให้อยู่ในปริมาณที่เหมาะสม เนื่องจากตะกั่วอาจเกิดการแยกตัว (Segregate) โดยไม่ละลายในทองเหลืองแต่จะแยกตัวออกมาเป็นอนุภาคกลม ๆ แล้วกระจายตัวอยู่ทั่วไปในเนื้องาน

แมงกานีส (Manganese) เป็นตัวไล่แก๊สออกซิเจนในน้ำโลหะ อีกทั้งมีส่วนช่วยเพิ่มความแข็งแรง โดยไม่ทำให้สมบัติด้านความเหนียวลดลง และอาจเกิดการจับตัวกับเหล็กเป็นสารประกอบได้อีกด้วย

นิกเกิล (Nickel) เป็นธาตุที่เพิ่มสมบัติในปรับแต่งด้วยเครื่องมือกล เพิ่มความ ทนทานต่อการกัดกร่อนให้สูงขึ้น อีกทั้งยังเป็นตัวที่ทำให้เกรนละเอียดอีกด้วย

ฟอสฟอรัส (Phosphorus) เป็นธาตุที่มักจะเข้าไปรวมตัวกับเหล็ก มีส่วนทำให้ความแข็งแรงสูงขึ้น อีกทั้งยังเป็นธาตุที่ยับยั้งการขยายตัวของเกรน และทำให้สมบัติในการไหลตัวดีขึ้น

ซิลิกอน (Silicon) เป็นธาตุที่ทำให้สมบัติด้านการหล่อหลอมแย่ง แต่จะไปช่วยในการปรับปรุงสมบัติทางด้านการทนต่อการผุกร่อนได้ดีขึ้น โดยเฉพาะทำให้เกิดการแตกร้าภายในโครงสร้าง (Intergranular attack)

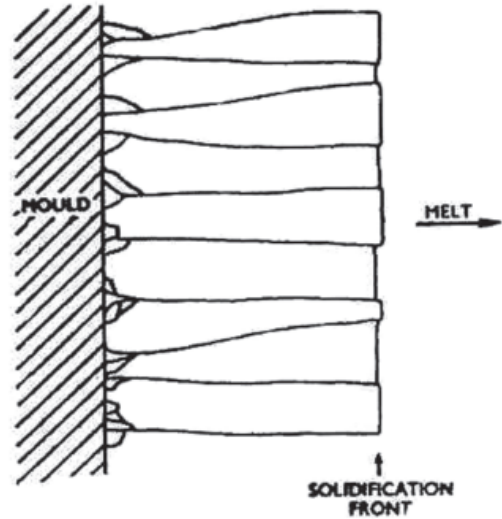
ดีบุก (Tin) ช่วยเพิ่มความแข็งแรง ทนต่อแรงดึง แต่จะทำให้ความเหนียวลดลง ดีบุกยังเป็นธาตุที่ผสมไปเพื่อลดการสูญเสียธาตุสังกะสี อีกทั้งยังช่วยปรับปรุงความทนทานต่อการผุกร่อน และทำให้การไหลตัวดีขึ้น

นอกจากธาตุตามที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น พบว่ายังมีธาตุอื่น ๆ เช่น แอนติโมนี อาเซนิก และบิสมัท ซึ่งส่วนมากเป็นพวกที่ส่งผลเสียมากกว่าให้ประโยชน์ ต้องมีการควบคุมให้มีปริมาณต่ำกว่า 0.01% ยกเว้นในบางกรณี เช่น ยอมให้มีธาตุอาเซนิกผสมอยู่ได้ถึง 0.05% เพื่อไปช่วยยับยั้งการเกิด Dezincification เป็นต้น

บรอนซ์แมงกานีส (Manganese Bronze)

พบว่าบรอนซ์แมงกานีส มีความแข็งแรงสูงกว่าบรอนซ์ดีบุก อีกทั้งมีสมบัติในการหล่อหลอมที่ดีกว่า แต่สามารถที่จะนำไปอบชุบได้ บรอนซ์แมงกานีสเป็นโลหะผสม จัดอยู่ในกลุ่มที่มีช่วงการแข็งตัวแคบ ลักษณะการแข็งตัวจะเป็นแบบ Shell Formation โดยการแข็งตัวจะเริ่มจากใจกลางของนิวเคลียสบริเวณส่วนบนหรือใกล้กับผนังแบบ และก่อตัวไปด้านหน้าสู่บริเวณส่วนที่ร้อนของชิ้นงาน ดังที่ได้แสดงในรูปที่ 2

สำหรับมาตรฐานของญี่ปุ่น JIS H 5102 ได้กำหนดมาตรฐานของการหล่อไว้หลายชั้นคุณภาพตามส่วนผสมทางเคมี สมบัติเชิงกลและลักษณะการใช้งาน เนื่องจากบรอนซ์แมงกานีสมีทั้งความเค้นแรงดึง อัตราการยึดตัวอยู่ในเกณฑ์สูง ซึ่งความแข็งแรงที่ได้ในบางเกรดเทียบเท่าได้กับเหล็ก mild steel อีกทั้งยังมีความต้านทานต่อการกัดกร่อนดีภายใต้สภาวะการใช้งานในทะเล ดังที่ได้แสดงในตารางที่ 1



รูปที่ 2 การแข็งตัวแบบ Short freezing range ของบรอนซ์แมงกานีส [3]

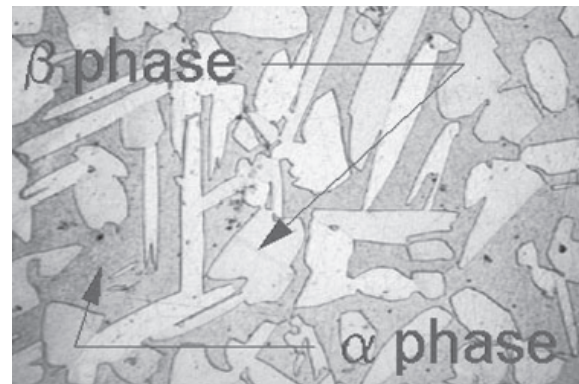
ตารางที่ 1 การเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของวัสดุเมื่อนำไปใช้งานในสภาวะ Marine Environment [4]

Strengths	Yield/Proof Stress(N/ mm2)	UTS (N/ mm2)
Mild steel	250	400
High Tensile Steel	1000	1500
Stainless Steel 316	325	575
Aluminium-cast-LM4	85	250
Aluminium-plate/bar	80-250	140-400
Copper-plate/wire-C101	200	300
Brass-cast SCB4	90	280
Brass-plate/rod-common brass CZ108	340	470
Brass-plate/rod-naval brass CZ112	300	440
Brass-plate/rod-high tensile brass CZ114	285	510
Bronze-cast-gunmetal LG2	115	240
Bronze-cast-Phosphor bronze PB1	145	250
Bronze-cast-Aluminium bronze AB2	275	680
Bronze-plate/rod-Phosphor bronze PB102	345	485
Bronze-plate/rod-Aluminium bronze CA104	385	720

บรอนซ์แมงกานีสนั้นจะสูญเสียความแข็งแรงได้อย่างรวดเร็วเมื่อถูกความร้อน ดังนั้นจึงเหมาะที่จะนำไปใช้งานที่อุณหภูมิไม่เกิน 200° C คุณสมบัติทางกลของทองเหลืองกลุ่มนี้สามารถเกิดขึ้นได้สูงสุดโดยไม่ต้องนำไปอบ และยังสามารถนำไปผลิตชิ้นงานหล่อที่มีรูปร่างบางและซับซ้อนได้เป็นอย่างดี

โลหะวิทยาของบรอนซ์แมงกานีส

โครงสร้างจุลภาคประกอบด้วย เฟสแอลฟา กับ เฟสเบต้า คล้ายคลึงกับทองเหลือง 60/40 แมงกานีสที่ผสมลงไปจะละลายได้ใน เฟสแอลฟา ส่งผลให้ความแข็งแรงเพิ่มขึ้น เหล็กละลายในเฟสแอลฟาได้น้อยมากที่อุณหภูมิปกติ จึงมักแยกตัวออกมาและตกผลึกอยู่ทั่วไป อาจรวมตัวกับอะลูมิเนียม ให้สารประกอบเชิงโลหะตกผลึกในเฟสแอลฟา หรือเฟสเบต้า มีส่วนช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับโลหะผสม ในกรณีของอะลูมิเนียมละลายได้ในเฟสแอลฟาบางส่วน แต่ถ้ามีปริมาณมากก็จะถูกผลักให้มารวมกับเหล็ก จากรูปที่ 3 พบว่าโครงสร้างประกอบไปด้วย เฟสแอลฟา ที่ก่อตัวขึ้นมีลักษณะเป็นรูปในลักษณะของ Widmanstatten pattern ยื่นออกมาจากบริเวณขอบเกรน โดยเป็นผลมาจาก



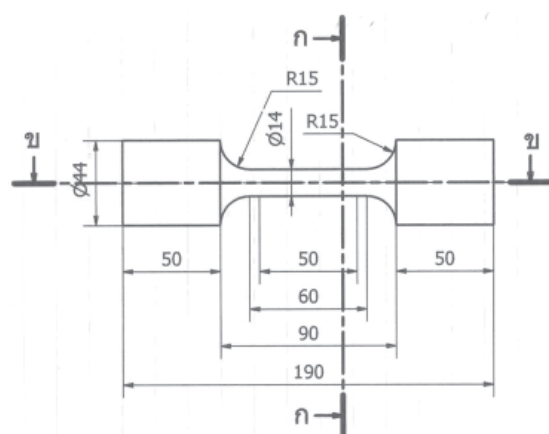
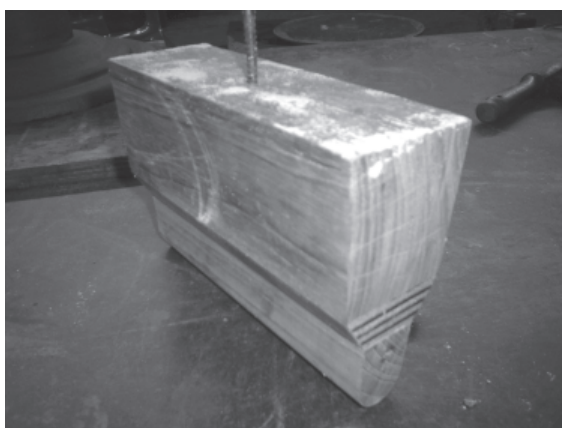
รูปที่ 3 โครงสร้างของทองเหลือง 60/40 ที่หล่อด้วยแบบทราย^[5]

Stress-relief effect คล้ายคลึงกับ Bainite reaction ของเหล็กกล้าคาร์บอน โดยมีโครงสร้างเบต้าเป็นโครงสร้างพื้น และมีเฟสของเหล็กที่ตกผลึกออกมาให้เห็นกระจายอยู่ทั่วไป

ระเบียบวิธีวิจัย

การออกแบบแบบหล่อและชิ้นงานสำหรับทดสอบ

เริ่มต้นด้วยการทำแบบจำลองให้มีขนาดตามที่ระบุไว้ในมาตรฐาน JIS H 5102 จากนั้นนำไปปรับแต่งให้ได้ตามมาตรฐาน JIS Z 2201 No.4 ดังแสดงในรูป 4 สำหรับการหล่อแบบ Sand Mould Casting เพื่อที่จะได้นำไปตรวจสอบต่อไป



รูปที่ 4 แบบจำลอง และมิติของชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐาน JIS Z 2201 No.4

สำหรับวัตถุดิบที่ใช้ในการทดลองประกอบไปด้วย ทองเหลืองประเภท Cartridge Brass สังกะสี อะลูมิเนียม เพอโรแมงกานีส ทองแดง โลหะปรับส่วนผสม และเศษเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ โดยนำวัตถุดิบแต่ละชนิดมาชั่งให้ได้น้ำหนักตามที่กำหนดไว้ แต่จะมีเฉพาะธาตุเหล็กซึ่งก็คือ เศษเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (แล้วศึกษาผลที่ได้ภายหลังจากที่ได้เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณ)

การทดลองผลิตบรอนซ์แมงกานีส

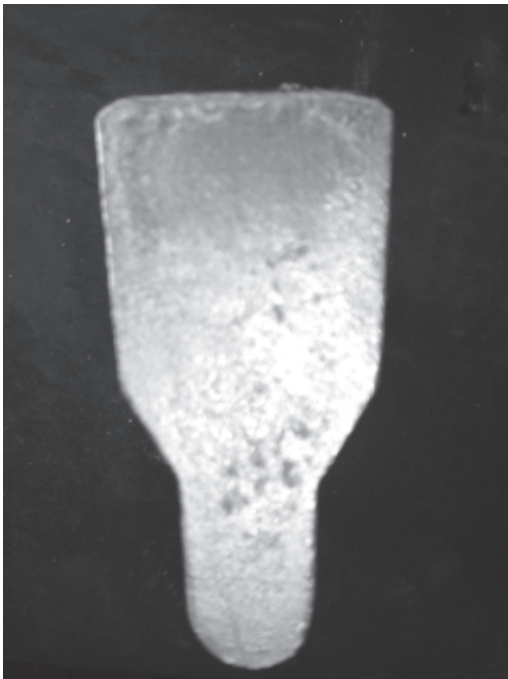
ภายหลังจากที่เตรียมวัตถุดิบและอุปกรณ์ต่าง ๆ เรียบร้อยแล้ว จะดำเนินการหลอมและหล่อซึ่งขั้นตอนต่าง ๆ นั้นได้แสดงไว้ในรูปที่ 5



รูปที่ 5 ก. การบรรจุวัตถุดิบและหลอมบรอนซ์



รูปที่ 5 ข. การควบคุมอุณหภูมิของน้ำโลหะหลอมเหลวก่อนที่จะเทลงแบบ



รูปที่ 5 ค. ชิ้นงานภายหลังแกะแบบและนำไปปรับแต่งตามมาตรฐาน JIS H 5102

รูปที่ 5 ขั้นตอนการทดลองผลิตบรอนซ์แมงกานีส

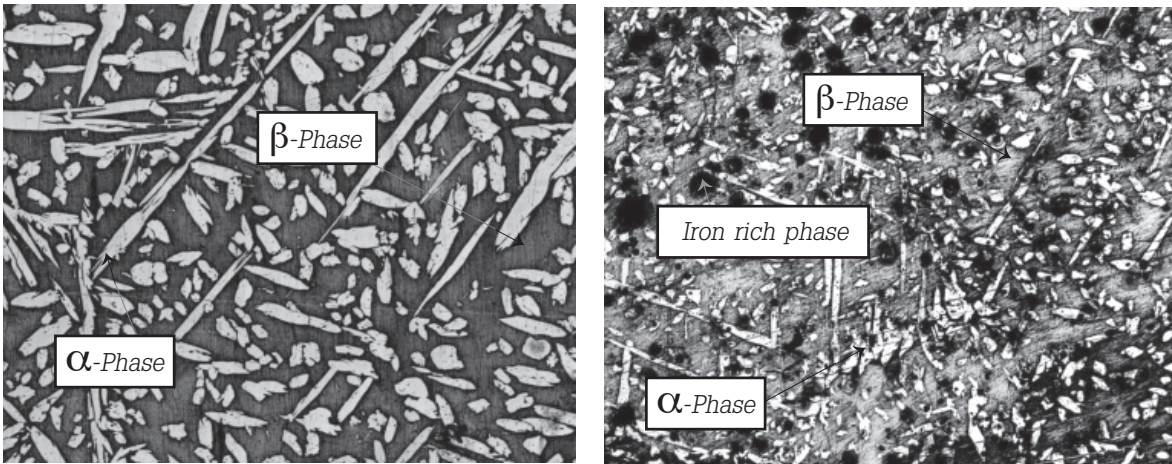
ผลการวิจัยและอภิปรายผล

ชิ้นงานบรอนซ์แมงกานีสหล่อหลังจากที่ได้นำไปตรวจสอบส่วนผสมทางเคมี โดยใช้เครื่อง Optical Emission spectrometer รุ่น ARL 3460 จากบริษัท Thermo Electron Corporation พบว่า ได้ผลดังที่ได้แสดงในตารางที่ 2 ซึ่งจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่ามีแต่ปริมาณของเหล็กเท่านั้นที่มีการเปลี่ยนแปลง ส่วนธาตุอื่นนั้นจะกำหนดไว้ให้อยู่ในปริมาณที่ใกล้เคียงกัน

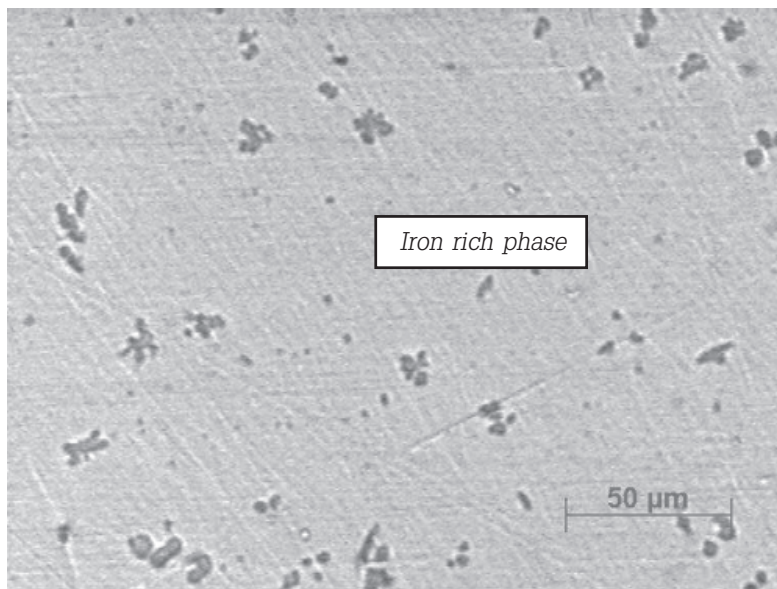
ตารางที่ 2 ส่วนผสมทางเคมีของชิ้นงานตัวอย่างแมงกานีสบรอนซ์

ตัวอย่างชิ้นงาน แมงกานีสบรอนซ์หล่อ	%Cu	%Zn	%Al	%Mn	%Fe	%Sn	%Ni	%Pb	%Si
1. Bronze 0.00Fe	57.29	40.25	0.95	0.34	0.06	0.01	0.00	0.04	0.00
2. Bronze 0.50Fe	57.60	40.68	0.99	0.35	0.55	0.01	0.00	0.04	0.00
3. Bronze 1.00Fe	57.31	39.97	0.85	0.40	1.06	0.01	0.00	0.04	0.00
4. Bronze 1.50Fe	57.19	39.88	0.96	0.38	1.57	0.01	0.00	0.04	0.00
5. Bronze 2.00Fe	57.18	39.27	0.95	0.34	2.10	0.01	0.00	0.03	0.00
6. Bronze 2.50Fe	57.41	39.35	0.98	0.34	2.47	0.01	0.00	0.02	0.00

เมื่อพิจารณาภาพถ่ายโครงสร้างทางจุลภาคพบว่าชิ้นงานตัวอย่างที่ไม่มีเหล็ก จะมีลักษณะคล้ายคลึงกับทองเหลือง 60/40 ทั่วไป แต่เมื่อมีการเติมเหล็กลงไปจะพบว่าเหล็กจะเริ่มตกตะกอนและกระจายตัวอยู่ทั่วไปในโครงสร้าง ดังที่ได้แสดงในรูปที่ 6 โดยอนุภาคของเหล็ก (Iron rich phase) ที่แยกตัวออกมานั้นจะมีรูปร่างเหมือนกลีบดอกไม้ (Rosette shape) ดังที่ได้แสดงในรูปที่ 7 ซึ่งอนุภาคเหล็กจะมีจำนวนมากขึ้นตามปริมาณของเศษเหล็กที่ใส่ลงไป

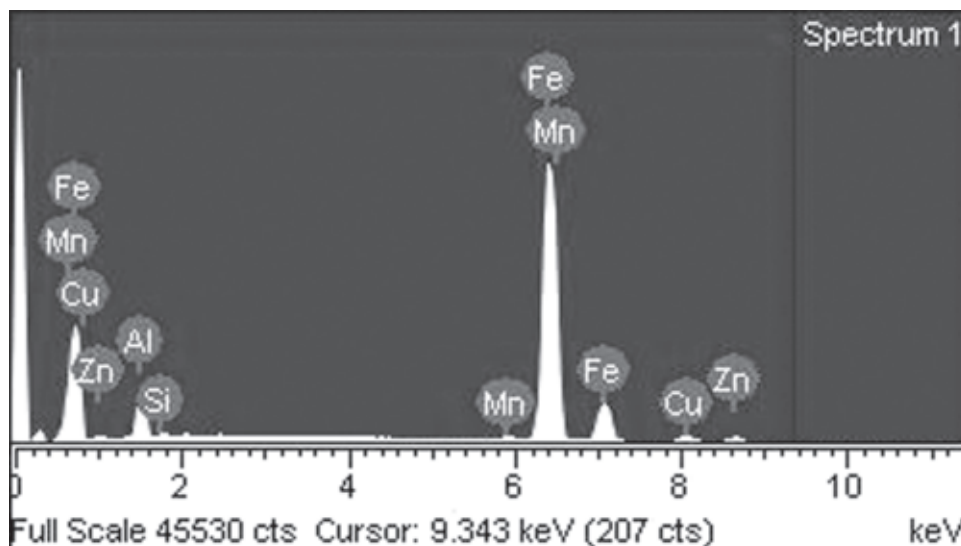


รูปที่ 6 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานตัวอย่างที่มีปริมาณเหล็กอยู่ 0.06% และ 2.5%



รูปที่ 7 อนุภาคของเหล็กที่แยกตัวออกมา

จากการศึกษาพบว่าอนุภาคของเหล็กที่แยกตัวออกมานั้นประกอบด้วยธาตุหลายชนิดรวมตัวกันเป็นสารประกอบเชิงโลหะ (Intermetallic compound) ดังที่ได้แสดงในรูปที่ 8



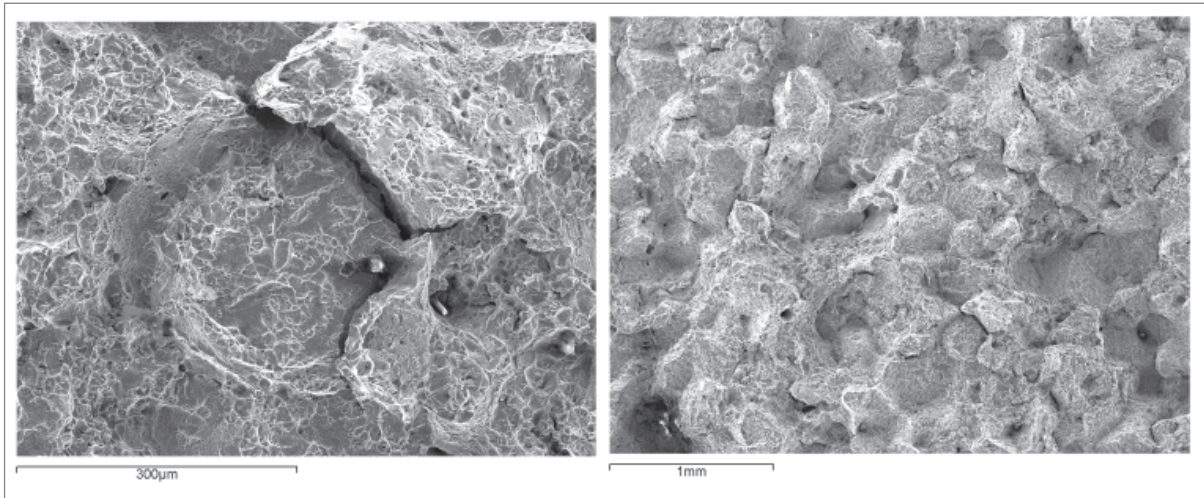
รูปที่ 8 กราฟวิเคราะห์เชิงปริมาณองค์ประกอบของธาตุใน Iron rich phase ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวด (SEM) โดยใช้เทคนิค EDS

จากรูปที่ 6 จะเห็นความเปลี่ยนแปลงของเฟสต่างๆ ของชิ้นงานตัวอย่างเมื่อมีการเติมเหล็กลงไปในส่วนผสม และเมื่อนำไปวัดหาขนาดเกรน พบว่าหากไม่มีการเติมเหล็ก เกรนที่วัดได้จะมีขนาดใหญ่มากโดยในการทดลองจะวัดได้อยู่ที่ 3.4 มม. แต่เมื่อเติมเหล็กลงไปจะทำให้ขนาดเกรนลดลงไปเรื่อยๆ กระทั่งเติมเหล็กลงไปประมาณ 2.47% ขนาดเกรนที่วัดได้จะอยู่ที่ 0.21 มม. ส่วนผลการทดสอบสมบัติเชิงกลนั้นได้แสดงไว้ในตารางที่ 3 พบว่าในตอนแรกโครงสร้างที่ประกอบไปด้วย α - Phase และ β - Phase มีขนาดเกรนที่ใหญ่มาก ส่งผลให้สมบัติเชิงกลที่ได้มีค่าที่ต่ำมาก

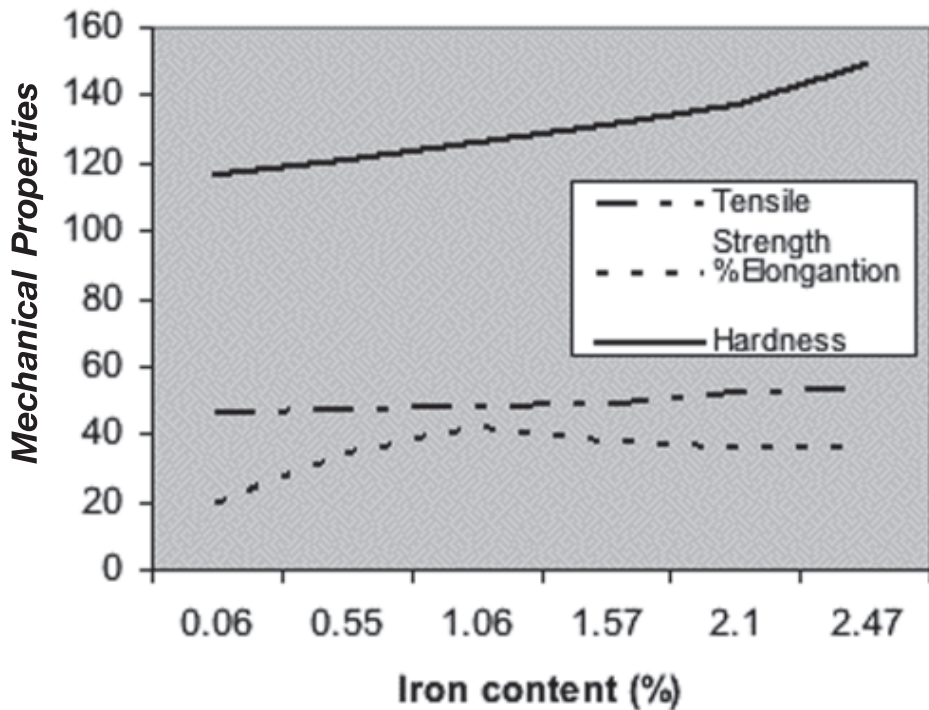
ตารางที่ 3 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของตัวอย่างชิ้นงาน

ชิ้นงานตัวอย่าง	คุณสมบัติเชิงกล		
	Tensile Strength (kg.mm ²)	% Elongation	ค่าความแข็ง Brinell Hardness
1. Bronze 0.00Fe	46.61	20	116
2. Bronze 0.50Fe	47.12	34	121
3. Bronze 1.00Fe	48.26	42	126
4. Bronze 1.50Fe	49.12	38	131
5. Bronze 2.00Fe	52.32	36	137
6. Bronze 2.50Fe	53.46	36	149

และเมื่อนำรอยแตกที่ได้จากการทดสอบแรงดึงไปตรวจสอบร่องรอยการแตกหักด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกาว (SEM) ดังที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 9 พบว่าการแตกจะเกิดบริเวณขอบเกรน (Intergranular cracking) แต่เมื่อภายหลังจากการเติมเหล็กลงไปปริมาณที่มากขึ้น จะเห็นได้ว่าเกรนมีความละเอียดมากขึ้น ทำให้โครงสร้างมีความแข็งแรง การแตกบริเวณขอบเกรนลดลงและมีพื้นที่ในการรับแรงมากขึ้น ส่งผลให้สมบัติเชิงกลที่ได้สูงขึ้นตามไปด้วย ดังที่ได้แสดงในรูปที่ 10



รูปที่ 9 ภาพถ่ายจาก SEM แสดงถึงการแตกตามขอบเกรนและขนาดของเกรนที่ลดลงของชิ้นงานทดสอบที่มีเหล็ก 0.06% และ 1.06% ที่กำลังขยาย 15X



รูปที่ 10 กราฟแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเหล็กและสมบัติเชิงกล

ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเหล็กที่มี ต่อbronzeในเบงกาปีสหล่อ

จากผลการทดลองนั้นจะเห็นได้ว่าเมื่อมีการเติมเหล็กลงไปในส่วนผสม เหล็กนั้นจะมีบทบาทในอันที่จะทำให้สมบัติต่าง ๆ เปลี่ยนไป หากชิ้นงานนั้นไม่มีเหล็กอยู่เลย หรือมีอยู่ในปริมาณที่น้อยมาก โครงสร้างจุลภาคที่ได้ภายหลังจากการเย็นตัวจะประกอบไปด้วย α - Phase และ β - Phase มีขนาดเกรนที่ใหญ่มาก ซึ่งตรงบริเวณขอบเกรนที่มีความแข็งแรงต่ำ หากมีการนำไปรับแรงพบว่าจะทำให้เกิดการแตกหักแบบ Intergranular cracking อย่างเห็นได้ชัด และเมื่อนำไปทดสอบสมบัติเชิงกลจะได้ค่าที่ต่ำมาก ต่อมาเมื่อเติมเหล็กลงไป ทำให้ α - Phase ที่ขอบเกรนบางลงและมีการกระจายตัวใน β - Phase มากขึ้น พร้อมกับปรากฏอนุภาคเหล็กที่ตกผลึกออกมา ซึ่งอนุภาคเหล็กนอกจากเป็นสารละลายของแข็งที่มีส่วนเพิ่มความแข็งแรงแล้ว ยังทำให้อัตราการเย็นตัวของโลหะสูงขึ้น ทำให้เกรนมีขนาดเล็กลง และส่งผลให้สมบัติเชิงกลที่ได้สูงขึ้น แต่เมื่อเติมเหล็กลงไปมากขึ้น

กลับพบว่าสมบัติเชิงกลบางส่วนเปลี่ยนไป นั่นคือ ค่า Tensile strength และ Hardness สูงขึ้น แต่ค่าของ Elongation กลับลดลง ทั้งนี้ น่าจะเป็นผลมาจากการที่อนุภาคเหล็กมีขนาดใหญ่และกระจายตัวมากขึ้น จากอัตราการเย็นตัวที่สูงขึ้น บริเวณที่เป็นรอยต่อระหว่างอนุภาคเหล็กกับเฟสที่อนุภาคนั้นตกผลึกอยู่เกิดความเครียดมากขึ้น ทำให้ความแข็งแรงลดลง ประกอบกับขณะที่อุณหภูมิของน้ำโลหะลดลงธาตุบางชนิดจับตัวกับเหล็กเป็นสารประกอบเชิงซ้อน (Intermetallic compound) แล้วทำให้เกิดเป็นจุดแข็งหรือ Hard spot ซึ่งผลที่เกิดขึ้นนี้ทำให้สูญเสียสมบัติด้านความเหนียวไป

สรุป

ปริมาณของเหล็กที่เติมลงไปมีบทบาทอย่างมากในควบคุมสมบัติต่าง ๆ โดยส่งผลให้เฟสแอลฟาที่มีขนาดเล็กลง และมีการกระจายตัวดีขึ้น อีกทั้งช่วยยับยั้งไม่ให้เฟสเบต้าเกิดการขยายตัว รวมทั้งเมื่อเหล็กนั้นเกิดการจับตัวเป็นอนุภาคตกผลึกและกระจายตัวอยู่ภายในโครงสร้าง ทำให้มีอัตราการเย็นตัวสูงขึ้นจึงทำให้เกรนมีความละเอียดมากขึ้น สมบัติเชิงกลที่ได้จึงสูงขึ้นตามไปด้วย

เอกสารอ้างอิง

- [1.] Japanese Standard Association, 1977, "Nonferrous Materials and Metallurgy", Metal Handbook , Vol. 8, 9th ed., pp. 157-161.
- [2.] มนัส สติรจินดา, 2536, "โลหะทองแดง", โลหะนอกกลุ่มเหล็ก, พิมพ์ครั้งที่ 1, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, หน้า 67-95.
- [3.] ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, "โลหะทองแดงผสม", เทคนิคการควบคุมและปรับปรุงคุณภาพงานหล่อของทองแดงผสม, สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, หน้า 20-32.
- [4.] West, E.G., 1982, "Copper Alloy Systems", Copper and its Alloys, West Ellishorwood Limited., pp. 125-130.
- [5.] Metal Engineer Co., Ltd., 2000, Brass, Available : <http://Siamglobe.com> [2006, October 3]

บทคัดย่อ

ฉนวนเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของมอเตอร์ในเรือ สภาพของฉนวนสามารถแสดงอายุการใช้งานของมอเตอร์ ถ้าฉนวนอยู่ในสภาพที่ดี มอเตอร์นั้นสามารถที่จะใช้งานได้เป็นระยะเวลาาน เช่นเดียวกัน ถ้าฉนวนอยู่ในสภาพที่ไม่ดี มอเตอร์นั้นก็มีแนวโน้มที่จะใช้งานได้อีกไม่นานก็จะต้องทำการซ่อมทำ

บทความนี้จะบรรยายถึง สาเหตุการเสื่อมสภาพของฉนวน การกำหนดค่าการทนอุณหภูมิของฉนวนอุณหภูมิกับอายุการใช้งานของมอเตอร์ ดรรชนีความต้านทานฉนวน (Polarization index: PI) ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของฉนวนที่เปลี่ยนแปลงกับอายุการใช้งานของฉนวน และการวิเคราะห์ค่า PI ซึ่งเป็นอัตราส่วนค่าความต้านทานที่วัดได้ในแต่ละเฟสกับกราวด์ ที่เวลา 1 นาที และ 10 นาที ค่าที่ได้ถ้าน้อยกว่า 2 แสดงว่าฉนวนนั้นมีความชื้นสูง แต่ถ้าค่าที่ได้มากกว่า 5 แสดงว่าฉนวนนั้นกรอบแห้ง เพราะ ค่าที่เหมาะสมควรอยู่ระหว่าง 2-5 ซึ่งในเรือรบเมื่อใช้งานเป็นระยะเวลาาน สภาพแวดล้อมโดยเฉพาะอุณหภูมิจะเปลี่ยนไป ก็ทำให้ฉนวนเสื่อมสภาพ และอายุการใช้งานของฉนวนสั้นลง ดังนั้นการวัดค่า PI ของมอเตอร์ในเรือ ก็สามารถทำนายสภาพฉนวนของมอเตอร์ในเรือได้ และถ้ามีการเก็บข้อมูลล่วงหน้าหลายครั้ง ความถูกต้องในการทำนายก็จะมีมากขึ้น และสามารถนำไปวางแผนในการซ่อมทำเรือ ในแนวทางปัจจุบันโดยการตรวจสอบสภาพเครื่องจักร (Condition Assessment) เพื่อทำนายความเสียหายที่จะเกิดขึ้นในอนาคตได้

นาวาเอก ประจักษ์ พูลสวัสดิ์ และคณะ

แผนกไฟฟ้า กองควบคุมคุณภาพ ฐานราชนาวีมหิตลอดุลยเดช กรมอุทกศาสตร์เรือ

E-mail : poolsa@thaimail.com



การใช้ค่า Polarization Index ทำนายสภาพฉนวนมอเตอร์ในเรือ

บทนำ

ฉนวนจัดได้ว่าเป็นหัวใจของมอเตอร์เนื่องจากเป็นสิ่งที่จะมีผลต่ออายุการใช้งานและความจำเป็นในการบำรุงรักษามอเตอร์ เมื่อฉนวนของขดลวดที่พันอยู่บนมอเตอร์เสียหาย มอเตอร์ก็จะเสียหายตามไปด้วย ฉนวนของมอเตอร์ไฟฟ้าสมัยใหม่ มีความน่าเชื่อถือสูงมาก ถ้าใช้งานที่อุณหภูมิแวดล้อมไม่เกินค่าที่ออกแบบไว้ ไม่เกินพิกัดทางด้านไฟฟ้า ไม่มีการใช้งานในทางที่ผิดทางกลหรือทางเคมี เช่น มีไอของสารเคมีในพื้นที่ติดตั้งใช้งาน ฉนวนของมอเตอร์อาจมีอายุการใช้งานยาวนานถึง 100,000 ชั่วโมงทำงาน นั่นคือใช้งานได้นานถึง 20 ปี หากใช้งานปีละ 5,000 ชั่วโมง

หน้าที่หลักของฉนวนมอเตอร์คือแยกส่วนประกอบทางไฟฟ้าต่าง ๆ ที่ประกอบเป็นมอเตอร์ออกจากกัน และเพื่อปกป้องส่วนประกอบของมอเตอร์จากสภาวะแวดล้อมต่าง ๆ เช่น ฝุ่น สารเคมี และรวมไปถึงปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการใช้งานของมอเตอร์อันได้แก่ ความร้อน และการสั่นสะเทือน ชนิดของฉนวนที่นำมาใช้งานกับมอเตอร์นั้น มิได้ขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมในการใช้งานเท่านั้น แต่ยังขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของวัสดุที่นำมาใช้ทำฉนวนเอง

สาเหตุการเสื่อมสภาพของฉนวน

1. สภาพอุณหภูมิแวดล้อมที่ค่อนข้างสูง (อุณหภูมิของอากาศรอบ ๆ ตัวมอเตอร์สูงเกินกว่า 40 °C หรือ 104 °F) จะก่อให้เกิดการเสื่อมสภาพและทำให้อายุการใช้งานของมอเตอร์สั้นลงอย่างรวดเร็ว ดังตารางที่ 1 นอกจากนี้มันยังจะลดความหนืดของไขที่ใช้กับแบร็ง ซึ่งทำให้ขีดความสามารถในการหล่อลื่นของแบร็งลดน้อยลง

อุณหภูมิแวดล้อม (°C)	อายุการใช้งานของฉนวน (ชม.)
30	250,000
40	125,000
50	60,000
60	30,000

ตารางที่ 1 อุณหภูมิแวดล้อมและอายุการใช้งานของฉนวน

2. พวกสารกัดกร่อน เช่น สารเคมีต่าง ๆ จะทำให้ฉนวนและชิ้นส่วนที่ไม่ได้รับการห่อหุ้มแบร็งและแกนเพลลาต่าง ๆ เกิดการสึกกร่อน ซึ่งในที่สุดจะทำให้มอเตอร์ใช้งานไม่ได้

3. พวกสารแข็ง เช่น ทรายและฝุ่น จะเสียดสีกับผิวชิ้นส่วนโลหะทำให้ฉนวนเกิดการกัดกร่อนและก่อให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับแบร็ง รวมทั้งแหวนและ bearing commutator ของมอเตอร์

4. ฝุ่นละออง ผง เขม่าต่าง ๆ อาจจะไปปกคลุมชิ้นส่วนสำคัญของมอเตอร์ ซึ่งทำให้การระบายอากาศเกิดการอุดตัน และทำให้การระบายความร้อนเป็นไปได้ยาก

5. ความชื้น ไม่ว่าจะเกิดขึ้นเนื่องจากฝน หรือในที่ที่มีความชื้นสูงจะทำให้อายุการใช้งานของขดลวดสั้นลง และยังก่อให้เกิดสนิมขึ้นกับชิ้นส่วนที่เป็นโลหะ

6. แรงทางเครื่องกลที่เกิดขึ้น ไม่ว่าจะเกิดขึ้นจากแรงกระแทกหรือแรงสั่นสะเทือนจะทำให้ฐานที่ตั้งของมอเตอร์, กรอบของมอเตอร์, แกนเพลลาหรือชิ้นส่วนอื่น ๆ เกิดการแตกหัก นอกจากนี้ยังทำให้แปรงถ่านเกิดการหลวม ทำให้แบร็งเสียหาย และทำให้ขั้วต่อสายหลวมหลุด

7. การนำมอเตอร์ไปใช้งานในที่สูง ในที่สูงเกินกว่าระดับ 3,300 ฟุต เหนือระดับน้ำทะเลจะก่อให้เกิดความร้อนสูงเนื่องจากในบริเวณดังกล่าวนั้นจะมีอากาศอยู่เบาบาง จึงทำให้การระบายความร้อนลดลงมาก

การกำหนดค่าการทนอุณหภูมิของฉนวน

ฉนวนของมอเตอร์ถูกกำหนดประเภทตามอัตราการทนทานต่ออุณหภูมิ โดยใช้ตัวอักษร A, B, F และ H อักษรแต่ละตัว จะเป็นการกำหนดถึงอุณหภูมิที่เป็นองศาเซลเซียสที่เป็นอุณหภูมิสูงสุดสำหรับการใช้งานของฉนวนดังตารางที่ 2

Class ของฉนวน	อัตราการทนอุณหภูมิ
A	105 °C
B	130 °C
F	155 °C
H	180 °C

ตารางที่ 2 อัตราการทนต่ออุณหภูมิของฉนวน

ดังนั้นฉนวนตามประเภทต่าง ๆ ดังกล่าวนั้นจะเป็นตัวกำหนดอุณหภูมิสูงสุดสำหรับการใช้งานของมอเตอร์ จุดที่มีอุณหภูมิสูงสุดของขดลวดที่ใช้พันมอเตอร์จะอยู่ที่จุดกึ่งกลางของขดลวดที่พันของมอเตอร์ อุณหภูมิดังกล่าวนี้จะเป็นผลมาจากปัจจัยหลาย ๆ อย่างที่ก่อให้เกิดความร้อนขึ้นในขดลวด อันได้แก่ อุณหภูมิสภาพแวดล้อม อุณหภูมิของมอเตอร์ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากความต้านทาน และค่าอุณหภูมิที่ยอมให้อุณหภูมิที่ศูนย์กลางของขดลวดนี้สูงขึ้นกว่าปกติดังตารางที่ 3

Class ของฉนวน	อุณหภูมิ (°C)	ช่วงค่าอุณหภูมิแปรผัน		
		มอเตอร์แบบเปิด	มอเตอร์แบบ TEFC	มอเตอร์แบบ TENV
A	105	5	5	0
B	130	10	10	5
F	155	10	10	5
H	180	15	15	5

ตารางที่ 3 ค่าอุณหภูมิเฉพาะจุด และช่วงการเปลี่ยนแปลงที่ยอมให้ได้ (hot spot temperature)

- หมายเหตุ**
- TENV (Totally Enclosed Non-ventilated)
 - TEFC (Totally Enclosed Fan-cooled)

วัสดุต่าง ๆ ที่นำมาใช้งานกับฉนวนประเภทต่าง ๆ และการใช้งานของมอเตอร์ประเภทนั้น ๆ มีดังต่อไปนี้

1. Class A วัสดุที่ใช้ทำฉนวน จะประกอบด้วยกระดาษหรือแผ่นฟิล์ม polyester ฉนวนที่ใช้กับมอเตอร์ขนาดเล็ก ที่มีค่าแรงม้าเป็นเพียงเศษส่วน (fractional horsepower) เช่น 1/8, 1/6, 1/3 ซึ่งแรงม้าที่ใช้ขึ้นอยู่กับมอเตอร์ประเภทต่าง ๆ เช่น สวานไฟฟ้า เครื่องดูดฝุ่น หรือเครื่องใช้ไฟฟ้าขนาดเล็ก

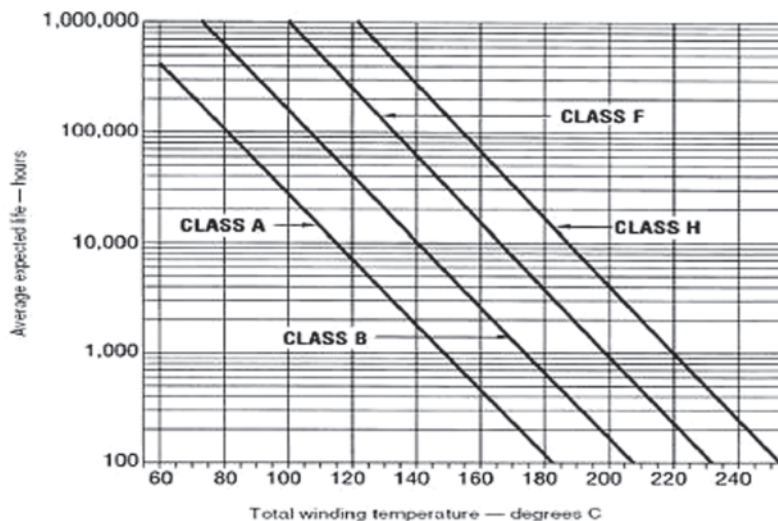
2. Class B ฉนวนที่ใช้จะเป็นพวก polyester mat หรือ polyester film เคลือบด้วยสาร epoxy มอเตอร์ที่ใช้สารพวกนี้ได้แก่ มอเตอร์สำเร็จรูปที่ใช้กับเครื่องปรับอากาศ และมอเตอร์ขนาดเล็กที่มีค่าแรงม้าเป็นเศษส่วน

3. Class F ฉนวนที่ใช้จะเป็นสารประกอบประเภท polyester เสริมด้วยกระดาษไฟเบอร์ มอเตอร์หลายๆชนิดทุกวันนี้จะใช้ฉนวนประเภทนี้เพื่อยืดอายุการใช้งานให้มีความคงทนสูงมากขึ้น มอเตอร์ที่ใช้ฉนวนประเภทนี้ได้แก่มอเตอร์ที่ใช้งานอุตสาหกรรม เช่น ใช้สำหรับคอมเพรสเซอร์ ปั๊ม หรือพัดลม

4. Class H ใช้ส่วนประกอบของวัสดุต่างๆ เช่น กระดาษไฟเบอร์ฟิล์ม polyester หรือ aramid fiber paper ฉนวนประเภทนี้เหมาะสำหรับมอเตอร์ที่ใช้งานหนัก ต้องทนอุณหภูมิสูงและต้องสามารถไว้วางใจได้เป็นอย่างดีได้แก่มอเตอร์ที่ใช้งานในอุตสาหกรรมก่อสร้าง อุตสาหกรรมหนัก หรือใช้สำหรับการขนส่ง

อุณหภูมิกับอายุการใช้งานของมอเตอร์

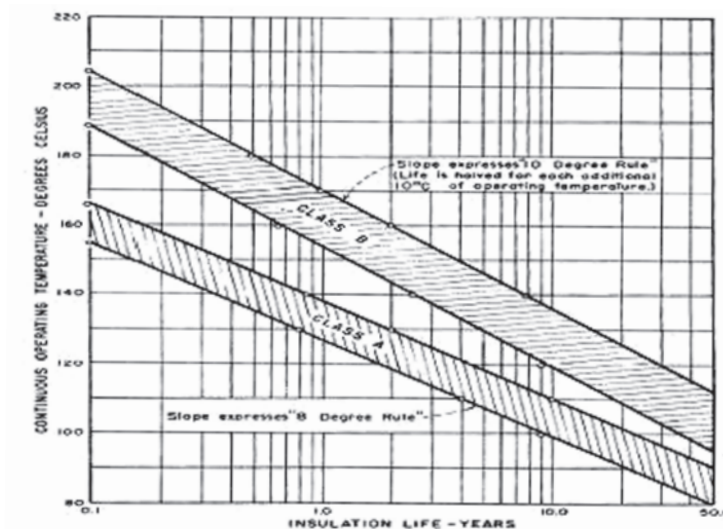
แม้ว่าปัจจัยเกี่ยวกับแรงทางด้านเครื่องกลและปัจจัยสภาพแวดล้อม จะมีผลต่ออายุการใช้งานของฉนวน ซึ่งย่อมส่งผลต่ออายุการใช้งานของมอเตอร์ด้วย อย่างไรก็ตามปัจจัยที่สำคัญที่สุดที่ก่อให้เกิดผลกระทบต่ออายุการใช้งานของมอเตอร์ก็คือ ความร้อนนั่นเอง วัสดุที่ใช้ทำฉนวนประเภทหนึ่งจะมีอายุการใช้งานหรืออยู่ได้นานเพียงใดนั้น ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิการใช้งานและช่วงที่มันได้รับความร้อนนั้น กล่าวคือถ้าอุณหภูมิขณะใช้การสูงขึ้น อายุการใช้งานของฉนวนจะสั้นลง ทำให้อายุการใช้งานของมอเตอร์สั้นลงตามไปด้วย ดังกราฟรูปที่ 1



รูปที่ 1 อุณหภูมิขณะใช้การกับอายุการใช้งานของฉนวน

ปกติแล้วฉนวนของมอเตอร์ควรมีอายุการใช้งานอยู่ในช่วงประมาณ 20 ปี ถ้ามอเตอร์นั้นทำงานอยู่ในสภาวะแวดล้อมที่มันได้รับการออกแบบไว้ สำหรับการพิจารณาว่าฉนวนของมอเตอร์จะมีอายุการใช้งานได้นานเพียงใดสำหรับงานแต่ละประเภทนั้นสามารถตั้งกฎได้อย่างง่ายๆดังต่อไปนี้คือ [1]

“เมื่อเพิ่มอุณหภูมิของฉนวนเพิ่มขึ้นทุกๆ 10 องศา อายุการใช้งานของฉนวนจะสั้นลงครึ่งหนึ่ง หรือเมื่อลดอุณหภูมิการใช้งานของฉนวนลง 10 องศา อายุการใช้งานของมอเตอร์ก็เพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่า นั่นเอง” ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 กราฟแสดงอายุการใช้งานของฉนวนและอุณหภูมิ

อย่างไรก็ตามยังมีปัจจัยอื่นๆอีกที่มีผลกระทบต่ออายุการใช้งานของฉนวน เช่น ถ้ามอเตอร์เกิดเดิน ๆ หยุด ๆ บ่อยครั้งก็จะมีกระแสที่มีจำนวนมากในตอนที่มีมอเตอร์กำลังทำงาน (inrush current) ไหลเข้าไปในมอเตอร์และทำให้เกิดความร้อนมากยิ่งขึ้น แม้ว่ากระแสดังกล่าวนั้นจะมีมากเพียงชั่วขณะเท่านั้น แต่ถ้ามอเตอร์ถูกใช้งานในลักษณะเช่นนี้หลาย ๆ ครั้งในแต่ละวัน หรือถ้ามอเตอร์ทำงานกับโหลดหนัก ๆ และต้องมีการสตาร์ทต่อย่อย ๆ ก็ควรจะพิจารณาถึงฉนวนที่ดี เป็นพิเศษ

การเสียดสภาพของฉนวนของชุดขดลวดของมอเตอร์จะไม่แสดงผลออกมา เมื่อมอเตอร์ถูกเก็บไว้ไม่ได้ใช้งาน แต่มอเตอร์จะทำงานไม่ได้เมื่อถึงเวลาที่เราจะใช้งาน ด้วยเหตุนี้มอเตอร์ที่ต้องทำงานในจุดที่สำคัญจึงต้องมีการทดสอบสภาพฉนวนเป็นประจำอย่างสม่ำเสมอ เพื่อประเมินคุณภาพของฉนวนด้วยโปรแกรมการทดสอบ ในลักษณะนี้ฉนวนที่มีคุณภาพลดลงจะถูกตรวจพบและได้รับการแก้ไขล่วงหน้าเพื่อป้องกันการเสียดสภาพในระหว่างการใช้งาน

วิธีการทดสอบสภาพฉนวนมอเตอร์

การปรับปรุงสภาพฉนวนของมอเตอร์ อาจใช้การอ่านค่าตัวเลขที่ระบุสภาพฉนวนทันทีถ้าค่าที่อ่านได้ต่ำกว่าเกณฑ์ที่ตั้งไว้ เช่น ถ้าค่าความต้านทานฉนวนมีค่าต่ำกว่า 1 เมกะโอห์ม ต้องรี้อชุดขดลวดออกแล้วพันใหม่ อย่างไรก็ตามในทางที่ดีที่สุดแล้วการตัดสินใจควรใช้ข้อมูลที่วัดได้อย่างสม่ำเสมอ ซึ่งเป็นข้อมูลที่มีลักษณะบอกถึงแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงสภาพฉนวน วิธีนี้จะวัดสภาพฉนวนเป็นระยะ ๆ อย่างสม่ำเสมอ แล้วดูความสัมพันธ์ของค่าที่วัดได้ครั้งหลังสุดเทียบกับค่าก่อน ๆ หากค่าที่วัดได้ครั้งหลังสุดแตกต่างไปจากค่าก่อน ๆ มากก็ต้องดำเนินการแก้ไข

การทดสอบสภาพฉนวนมอเตอร์ที่ให้ผลในลักษณะเอาไปใช้งานการบำรุงรักษาแบบทำนาย มี 5 วิธี คือ

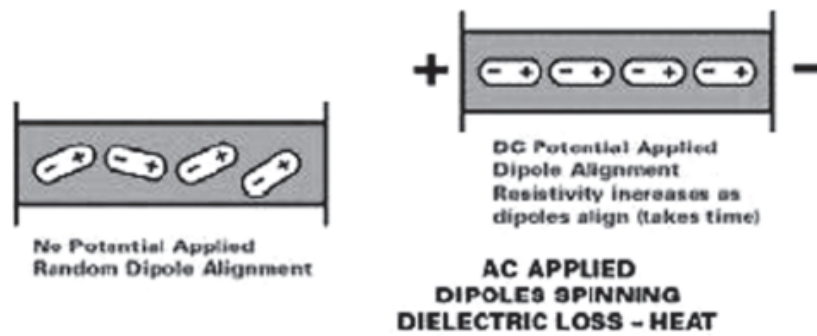
1. การทดสอบความต้านทานฉนวน
2. การทดสอบการดูดกลืนของไดอิเล็กตริกหรือการทดสอบหาตรรกษณ์ความต้านทานฉนวน
3. การทดสอบศักย์สูงกระแสตรง

4. การทดสอบตัวประกอบกำลัง
5. การทดสอบเปรียบเทียบเสิร์จ

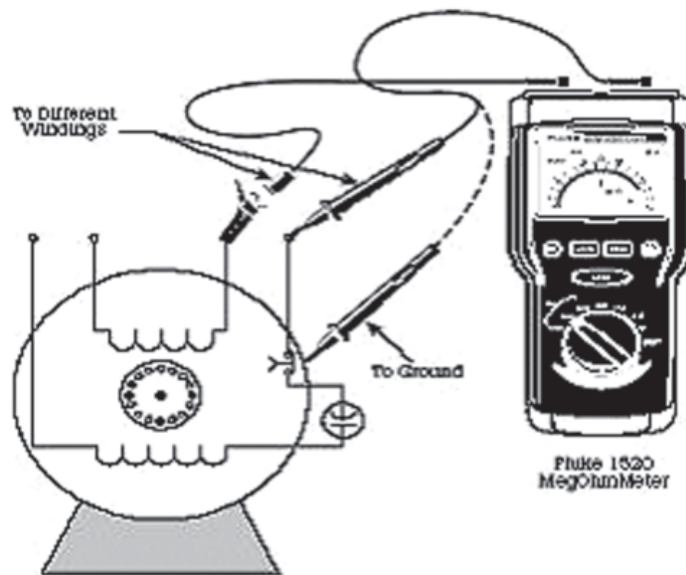
ในบทความนี้จะนำเสนอการทดสอบหาตรรกษณ์ความต้านทานฉนวนเท่านั้น

การทดสอบหาตรรกษณ์ความต้านทานฉนวน (Polarization Index: PI)

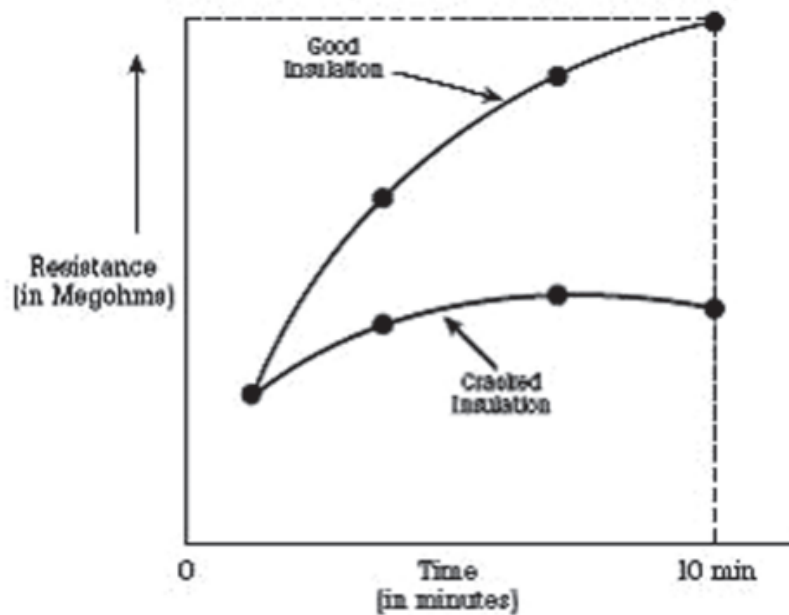
Polarization Index (PI) แปลว่าตรรกษณ์การกลับขั้ว ซึ่งหมายถึงการนำการกลับขั้วของโมเลกุลของฉนวนที่เกิดจากการจ่ายแรงดันให้กับฉนวนในขณะที่ทดสอบมาพิจารณา ดังรูปที่ 3 การทดสอบนี้ เป็นการทดสอบขยายผลการทดสอบความต้านทานฉนวนจะใช้เครื่องมือวัดค่า PI ลักษณะดังรูปที่ 4 โดยการอ่านค่าความต้านทานฉนวน 2 ค่า คือค่าที่เวลา 1 นาที และ 10 นาที นับตั้งแต่เริ่มป้อนแรงดันให้กับฉนวน ดังรูปที่ 5 แล้วนำมาหาตรรกษณ์ความต้านทานฉนวน (PI) จาก [4]



รูปที่ 3 ลักษณะโมเลกุลของฉนวนเมื่อจ่ายแรงดัน



รูปที่ 4 ลักษณะการวัดค่าความต้านทานฉนวน



รูปที่ 5 ค่าความต้านทานฉนวนที่ 1 นาที และที่ 10 นาที

โดยที่

$$PI = \frac{IR(10min)}{IR(1min)} \quad (1)$$

PI คือ ดรรชนีความต้านทานฉนวน

$IR(10min)$ คือ ค่าความต้านทานฉนวนที่ 10 นาที

$IR(1min)$ คือ ค่าความต้านทานฉนวนที่ 1 นาที

โดยค่าแรงดันที่ใช้ทดสอบเมื่อเทียบกับพิกัดแรงดันของมอเตอร์เป็นดังตารางที่ 4 [6]

พิกัดแรงดันมอเตอร์ (AC)	แรงดันทดสอบ (DC)
<1000	500
1,000-2,500	500-1,000
2,501-5,000	1,000-2,500
5,001-12,000	2,500-5,000
>12,000	5,000-10,000

ตารางที่ 4 ค่าแรงดันที่ใช้ทดสอบในการวัดค่า PI

จากนั้นนำค่า PI ที่ได้ไปเทียบค่าในตารางที่ 5 ซึ่งแสดงค่าต่ำสุดที่ยอมรับได้สำหรับการทดสอบแบบ PI -Test ตามมาตรฐาน [5] ได้กำหนดค่า PI ต่ำสุดที่ยอมรับได้อย่างอิงกับชนิดของฉนวนเครื่องจักร

CLASS ของฉนวน	ค่า PI
A	1.5
B	2.0
F	2.0
H	2.0

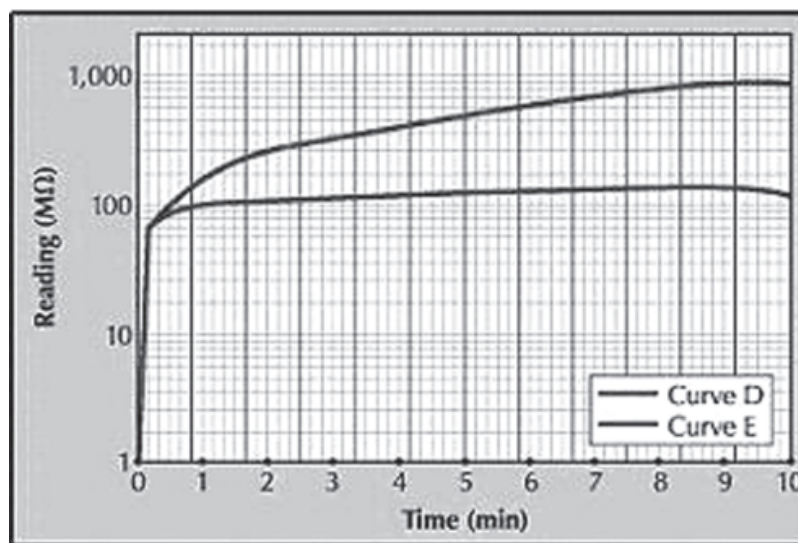
ตารางที่ 5 เกณฑ์การทดสอบค่า PI

การวิเคราะห์ค่า PI

จากหัวข้อที่ผ่านมาเราได้ทราบถึงความหมาย ขั้นตอน รวมทั้งวิธีการในการหาตรวจเช็คความต้านทานฉนวน (PI) ต่อไปจะเป็นการวิเคราะห์ค่า PI เพื่อที่จะทำนายสภาพฉนวนของมอเตอร์ ดังนี้

1. เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้กับฉนวนเป็นเวลานาน ๆ โมเลกุลของฉนวนจะมีสภาพเป็นขั้วบวกขั้วลบเกิดขึ้น มีผลทำให้อ่านค่าความต้านทานฉนวนได้สูงขึ้นดังกราฟรูปที่ 6

- กราฟเส้นบน (D) คือลักษณะฉนวนของขดลวดอยู่ในสภาพที่ดี
- กราฟเส้นล่าง (E) คือลักษณะฉนวนของขดลวดอยู่ในสภาพที่ไม่ดี



รูปที่ 6 กราฟแสดงค่าความต้านทานฉนวนที่อ่านได้เทียบกับเวลา

2. ถ้าฉนวนของขดลวดอยู่ในสภาพที่ดี และแห้งสนิทค่าที่วัดได้มักจะเกิน 20,000 MW ภายใน 10 นาที [4]

3. สภาพของฉนวนและค่า PI ที่คำนวณได้จากการวัด

สภาพของฉนวน	ค่า PI
อันตราย	< 1.0
เลว	1.0 - 1.4
มีปัญหา	1.5 - 1.9
พอใช้	2.0 - 2.9
ดี	3.0 - 4.0
ดีเยี่ยม	> 4.0
กรอบ แห้ง เปราะ	> 5.0

ตารางที่ 6 สภาพฉนวนกับค่า PI

4. การวัดค่าความต้านทานฉนวนควรวัดที่อุณหภูมิแวดล้อมและแรงดันทดสอบเดียวกัน

ตัวอย่างการหาอายุการใช้งานของมอเตอร์/ฉนวน

ตัวอย่าง ต้องการคำนวณอายุการใช้งานของมอเตอร์เครื่องทางเสื่อที่ 2 ร.ล.กระบรี ที่ใช้ฉนวนคลาส A ซึ่งสามารถใช้งานที่อุณหภูมิสูงสุดได้อย่างต่อเนื่องโดยไม่เกิดความเสียหายได้ไม่เกิน 105 °C ตามตาราง ที่ 2 จะมีอายุการใช้งานได้นานเท่าใดหากถูกใช้ที่

- อุณหภูมิ 90 °C
- อุณหภูมิ 97 °C
- อุณหภูมิ 150 °C
- อุณหภูมิ 200 °C

ขั้นตอนที่ 1 หาค่า PI จากข้อมูลที่ได้จากการวัดค่าความต้านทานฉนวน

เฟส	ค่าความต้านทานฉนวนที่ 1 นาที ($M\Omega$)	ค่าความต้านทานฉนวนที่ 10 นาที ($M\Omega$)	ค่า PI
G-U	1860	>2000	1.075
V-G	>2000	>2000	1.0
W-G	1660	1730	1.04

ตารางที่ 7 แสดงค่า PI ที่คำนวณได้จากมอเตอร์เครื่องทางเสื่อที่ 2 ร.ล.กระบรี

จากค่า PI ที่คำนวณได้ พบว่าต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนดนั่นคือ ค่า PI ของฉนวนคลาส A เท่ากับ 1.5 ดังตารางที่ 5 ซึ่งแสดงว่าขดลวดอยู่ในสภาพที่ไม่ดี ควรเปลี่ยนในโอกาสแรก

ขั้นตอนที่ 2 คำนวณหาอายุการใช้งานของฉนวนได้จาก [3]

$$T_{life} = 72 \times 10^3 \times e^{-0.09\theta} \quad (2)$$

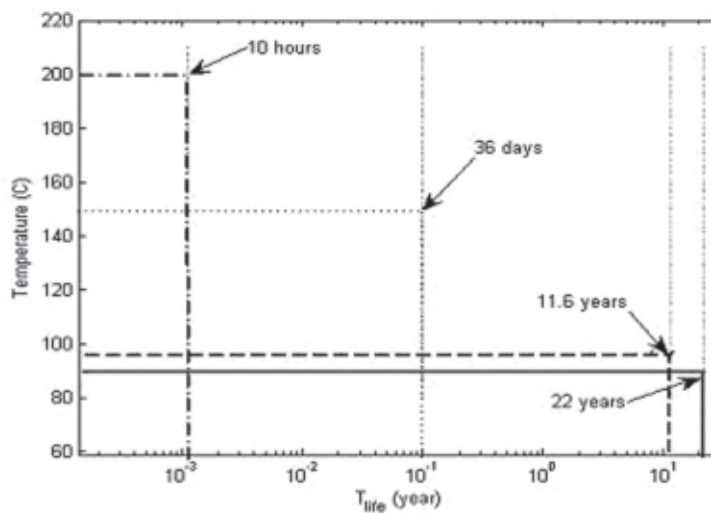
โดยที่

T_{life} = อายุการใช้งานของฉนวน (ปี)

θ = อุณหภูมิขณะถูกใช้งานของฉนวน ($^{\circ}\text{C}$)

e = 2.718

เมื่อแทนค่า $\theta = 90^{\circ}\text{C}$ ใน (2) จะพบว่า T_{life} มีค่าประมาณ 22 ปี และหากถูกใช้ที่อุณหภูมิ 97°C ก็พบว่าอายุการใช้งานจะลดลงเหลือเพียงครึ่งชีวิตคือ 11.6 ปี และจะเหลือเพียง 36 วัน หากถูกใช้งานที่อุณหภูมิ 150°C และจะไหม้ภายในไม่เกิน 10 ชั่วโมง เมื่อถูกใช้ที่อุณหภูมิ 200°C ดังกราฟ รูปที่ 7



รูปที่ 7 กราฟชีวิตที่อุณหภูมิต่าง ๆ ของฉนวนคลาส A ($^{\circ}\text{C}$) เทียบกับ เวลา (ปี)

ขั้นตอนที่ 3 สรุปและวิเคราะห์ผล

จากการหาอายุการใช้งานฉนวนของมอเตอร์เครื่องหางเสือที่ 2 ร.ล.กระบุรี พบว่า การคำนวณค่า PI โดยวัดค่าความต้านทานของฉนวนระหว่างเฟสเทียบกับกราวด์ จะได้ค่าต่ำกว่าเกณฑ์ แสดงว่าขดลวดอยู่ในสภาพที่ไม่ดี ควรเปลี่ยนในโอกาสแรก และต่อมาเราคำนวณหาอายุการใช้งานของฉนวนจากสูตรใน (2) โดยการเพิ่มอุณหภูมิ ขณะถูกใช้งานพบว่า อายุการใช้งานของฉนวนลดลงค่อนข้างมาก จากกราฟรูปที่ 7 ที่อุณหภูมิ 200°C อายุการใช้งานของฉนวนมีเพียง 10 ชั่วโมง ซึ่งเป็นสัญญาณที่อันตรายมาก แต่ทั้งนี้ยังมีปัจจัยอื่นๆอีกมากมายที่เป็นสาเหตุการเสื่อมสภาพของฉนวนมอเตอร์ ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น

บทสรุป

จากบทความข้างต้น จะเห็นได้ว่า อุณหภูมิที่ฉนวนเปลี่ยนแปลงสูงขึ้นเพียง 7°C จะส่งผลให้อายุการใช้งานของฉนวนเหลือเพียงครึ่งหนึ่ง ในเรื่อบเมื่อใช้งานเป็นระยะเวลานาน สภาพแวดล้อมโดยเฉพาะอุณหภูมิจะเปลี่ยนไป ซึ่งจะส่งผลให้อุณหภูมิที่ฉนวนเปลี่ยนไปด้วย นอกจากนี้ ความชื้น สารกัดกร่อน ฝุ่นละออง ผง และเขม่า ก็ทำให้ฉนวนเสื่อมสภาพ และอายุการใช้งานของฉนวนสั้นลงได้เช่นเดียวกัน

การหาตรรกษณ์ตรวจสอบสภาพฉนวน (PI) เป็นเพียงวิธีการเบื้องต้นที่สามารถบอกสภาพของฉนวนว่าสภาพดีหรือไม่ แต่ถ้าจะให้ผลในลักษณะนำไปใช้งานในการวางแผนการซ่อมทำเรือโดยการตรวจสอบสภาพเครื่องจักร (Condition Assessment) เพื่อทำนายความเสียหายที่จะเกิดขึ้นในอนาคต จะต้องอาศัยการเก็บข้อมูลเป็นเวลานานและหลายครั้ง ซึ่งสิ่งที่สำคัญที่สุดคือต้องมีการควบคุมพารามิเตอร์อื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องในการวัด เช่น สภาพแวดล้อม แรงดันที่ใช้ทดสอบ และความชำนาญที่เหมือนกันหรือใกล้เคียงกัน ก็จะส่งผลให้การทำนายนั้นถูกต้องหรือใกล้เคียงความเป็นจริงมากที่สุด

เอกสารอ้างอิง

- [1.] ศุภรัตน์ พัฒนพงศ์ไพศาล, “ฉนวนสำหรับมอเตอร์”, 70 เรื่องนำรู้เทคนิคไฟฟ้า, เอ็มแอนดีอี , กรุงเทพฯ, 233-236, 2521.
- [2.] วีระศักดิ์ พิรักษา, “อุณหภูมิจากผู้คุมชะตาชีวิตของมอเตอร์ไฟฟ้า”, รวมบทความจากวารสารเทคนิคไฟฟ้า ชุดที่ 6, เอ็มแอนดีอี , กรุงเทพฯ, 145-151, 2546.
- [3.] C Yung, “Use Polarization Index Test to Determine Condition/Health of Motor Insulation”, Currents, Volume 38, No. 9, September 2000.
- [4.] ANSI/IEEE 43-2000 : Recommended Practice for testing resistance of rotating machinery.
- [5.] ANSI/IEEE 95-1977 : Recommended Practice for testing of large Ac rotating machinery with direct voltage.
- [6.] ANSI/IEEE 432-1992 : Guide for insulation maintenance for rotating electrical machinery (5-1,000 horse power).



บทคัดย่อ

วัสดุเพียโซอิเล็กทริกสามารถเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกลได้ และในทางกลับกันสามารถเปลี่ยนพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าได้ ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในหลายด้าน เช่น แหล่งจ่ายแรงดันขนาดสูง เซ็นเซอร์ และ แอ็คทูเอเตอร์ บทความนี้นำเสนอคุณสมบัติ สมการ และแบบจำลองของเพียโซอิเล็กทริกส์ทรานสดิวเซอร์ รวมถึง การนำเซ็นเซอร์เพียโซอิเล็กทริกและเทคนิค acoustic emission มาประยุกต์ใช้ในการตรวจสอบสภาพโครงสร้างและผิวของเรือ เพื่อหาจุดที่มีความเสียหาย

เรือเอก โชค แก้วมัญชุช่วย
อาจารย์ ฝ้ายศึกษา โรงเรียนนายเรือ
E-mail : chok_rtn@yahoo.com



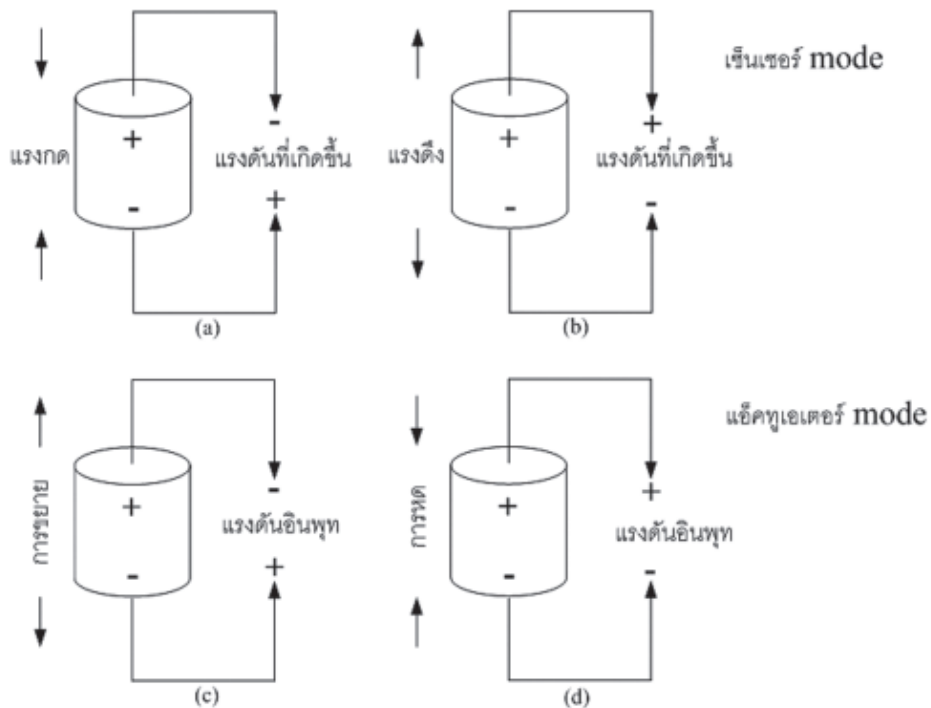
เทคโนโลยี Piezoelectric ในการตรวจสอบสภาพรอยแตกของตัวเรือ

บทนำ

การบำรุงรักษาและการตรวจสอบความพร้อมของเรือรบในราชนาวีไทย เป็นเรื่องที่สำคัญมาก เนื่องจากเรือรบเป็นหัวใจสำคัญของกองทัพเรือในการปกป้องอธิปไตยของชาติ อย่างไรก็ตาม การตรวจและบำรุงรักษาเรือรบตามวงรอบนั้น เป็นงานที่ใช้เวลาและบุคลากรเป็นจำนวนมาก บางครั้งอาจใช้เวลาเป็นปี บทความนี้นำเสนอแนวทางการตรวจสอบสภาพพื้นผิวและโครงสร้างของเรือโดยการใช้เซ็นเซอร์ที่มีส่วนประกอบของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก ซึ่งสามารถตรวจจับสัญญาณความผิดปกติที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างภายในของโลหะผิวเรือหรือโครงสร้างของเรือ ซึ่งอาจเกิดจากการใช้งานเป็นเวลานาน การกระแทก และการสึกหรอจากสิ่งแวดล้อม ข้อได้เปรียบของเทคนิคการตรวจจับแบบนี้คือการตรวจและวิเคราะห์โดยไม่จำเป็นต้องถอดหรือแยกชิ้นส่วนของเรือมาวิเคราะห์ที่อู่หรือโรงงาน สามารถติดตั้งระบบการตรวจจับไว้ที่พื้นผิวของเรือได้ตลอดเวลา ซึ่งทำให้ลดค่าใช้จ่ายและสามารถทราบถึงข้อผิดพลาด ความเสียหายของโครงสร้างเรือล่วงหน้า ก่อนที่จะเกิดความเสียหายรุนแรง เทคโนโลยีการตรวจสอบโครงสร้างแบบ real time นี้ได้ถูกนำมาติดตั้งบนเครื่องบินรบสมัยใหม่ เช่น Eurofighter, the Joint Strike Fighter และ F-22 โดยเครื่องบินเหล่านี้จะติดตั้งระบบ Health Usage Monitoring Systems (HUMS) ซึ่งจะบันทึกค่าความเค้น ความเครียด และความเร่งของชิ้นส่วนอุปกรณ์ที่สำคัญต่าง ๆ ข้อมูลเหล่านี้มีความสำคัญเป็นอย่างมากและบ่งบอกถึงสถานภาพของยานพาหนะขณะปฏิบัติงาน

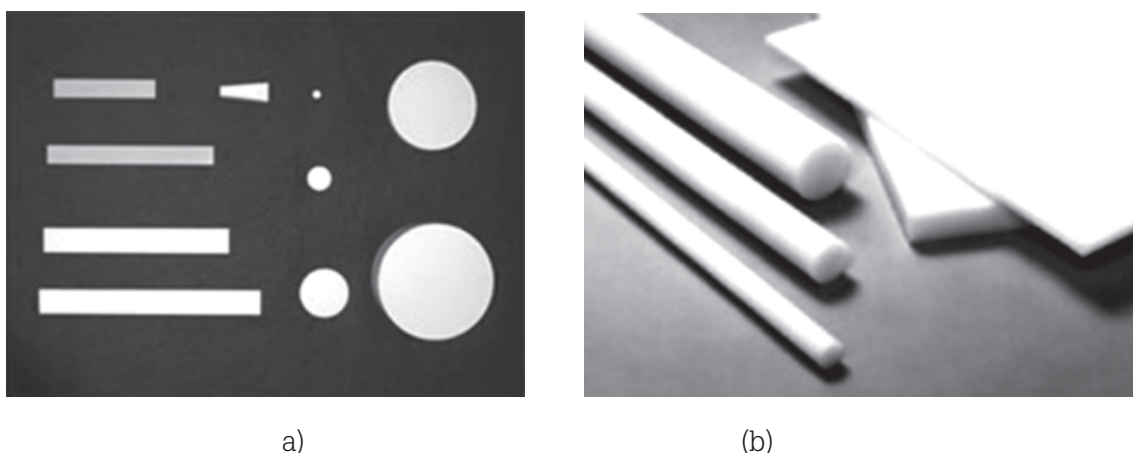
วัสดุเพียโซอิเล็กทริก

ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectricity) เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นโดยการที่วัสดุที่มีคุณสมบัติเป็นคริสตัล (เช่น quartz) สามารถสร้างสนามไฟฟ้าได้ เมื่อถูกแรงบีบหรือแรงดึงยืด ในทางกลับกัน วัสดุที่มีคุณสมบัติเป็นเพียโซอิเล็กทริกก็สามารถสร้างแรงยึดหดหรือลั่นไหวได้เมื่อผิวสัมผัสถูกต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟ ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกได้ถูกค้นพบครั้งแรกโดย Jacques and Pierre Curie ในปี ค.ศ. 1880 โดยพบว่าวัสดุคริสตัลที่ไม่สมมาตรในเชิงโมเลกุล มีความสามารถในการสร้างขั้วไฟฟ้าเมื่อถูกบีบ ซึ่งการบีบหรือกระแทกไปบนผิวของวัสดุจะทำให้เกิดการสะสมประจุบวกบนพื้นผิวด้านหนึ่งของวัสดุและประจุลบอีกด้านหนึ่ง ซึ่งจะเห็นว่าวัสดุเพียโซอิเล็กทริกมีคุณสมบัติในการเปลี่ยนพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า หรือจากพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล [1]



รูปที่ 1 mode การทำงานของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก

ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกสามารถพบได้ในวัสดุที่มีโครงสร้างเป็นคริสตัล เช่น สังกะสี, โซเดียมคลอไรด์, โบเรอไซด์, ทอมาไลต์, ควอทซ์, คาลาไมน์, และ ทอพาช [2] อย่างไรก็ตาม ในปัจจุบัน ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก สามารถสร้างขึ้นได้ด้วยวัสดุสังเคราะห์ ดังนั้นคุณสมบัติต่าง ๆ ของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกสามารถถูกออกแบบได้ตามความต้องการของวิศวกรและสามารถนำไปประยุกต์ใช้ให้ตรงกับงานต่าง ๆ ได้อย่างเหมาะสม วัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่สังเคราะห์สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ lead zirconate titanate (LZT) และ polyvinylidene fluoride (PVDF) ดังที่แสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 วัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่ได้จากการสังเคราะห์ (a) PZT (b) PVDF

วัสดุเพียโซอิเล็กทริก ถูกนำมาใช้ประโยชน์ในด้านวิศวกรรมอย่างมากมาย โดยเริ่มพัฒนาในระหว่างสงครามโลกครั้งที่ 1 วัสดุเพียโซอิเล็กทริกถูกออกแบบเพื่อใช้สร้างสัญญาณอัลตราซาวด์ โดยการนำเอาวัสดุที่มีคุณสมบัติเพียโซอิเล็กทริก สองแผ่นประกบเข้ากับแผ่นเหล็ก หลังจากนั้นต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟฟ้า ซึ่งจะทำให้แผ่นเพียโซอิเล็กทริกสั่นและสร้างเสียงที่มีความถี่ในช่วงอัลตรา ต่อมาอุปกรณ์นี้ได้ถูกนำมาใช้ในระบบโซนาร์ของเรือดำน้ำ [3] ในช่วงสงครามโลกครั้งที่ 2 การพัฒนาในเชิงทหารทำให้เทคโนโลยีเพียโซอิเล็กทริกถูกประยุกต์ใช้ในการสื่อสาร มีการพัฒนาเครื่องรับโทรศัพท์ที่ใช้วัสดุเพียโซอิเล็กทริก โดยเปลี่ยนสัญญาณไฟฟ้าที่ส่งมาตามสายเป็นการสั่นของแผ่นฟิล์มเพียโซอิเล็กทริก

ในปัจจุบันการพัฒนาเทคโนโลยีเพียโซอิเล็กทริกกำลังมุ่งไปที่การสร้างวัสดุอัจฉริยะ (Smart material) ซึ่งจะเห็นได้ในรูปแบบของเซ็นเซอร์, แอ็คทูเอเตอร์, ระบบควบคุม, และแหล่งกำเนิดพลังงานต่างๆ ถูกพัฒนาโดยมีส่วนประกอบหลักเป็นวัสดุเพียโซอิเล็กทริก นอกจากนี้การพัฒนาเทคโนโลยีชิปขนาดเล็กลง (MEMS) ซึ่งมีส่วนประกอบของทั้งเซ็นเซอร์และแอ็คทูเอเตอร์ได้นำเอาวัสดุเพียโซอิเล็กทริกมาประยุกต์ใช้

วัสดุเพียโซอิเล็กทริกสามารถแบ่งได้ 3 ประเภทตามการประยุกต์ใช้งาน ดังต่อไปนี้

1 แหล่งจ่ายแรงดันสูง

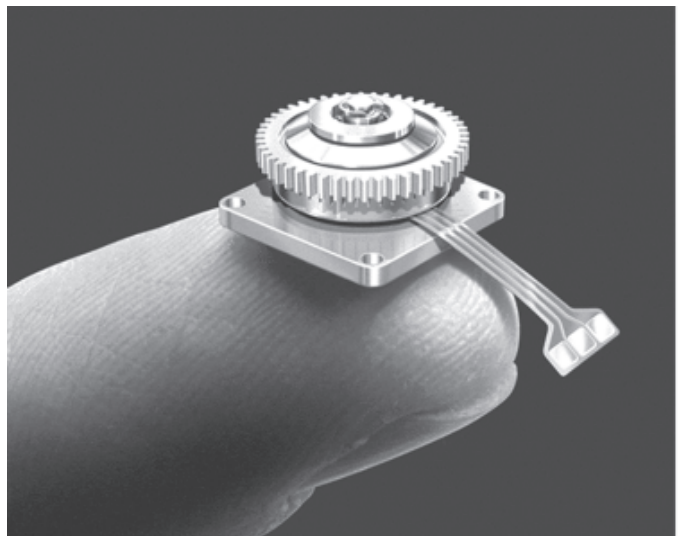
วัสดุเพียโซอิเล็กทริกสามารถสร้างแรงดันที่ชั่วได้หลายพันโวลต์ เมื่อถูกการกระแทกอย่างแรงโดยตรง ตัวอย่างที่เห็นได้ชัดของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกประเภทนี้คือ การใช้เป็นเครื่องจุดไฟสำหรับเครื่องทุ้มหรือบุหรี่ นอกจากนี้ยังมีการนำมาประยุกต์ใช้ทางด้านการทหารคือการใช้วัสดุเพียโซอิเล็กทริกในการสร้างสัญญาณพัลส์กำลังสูงเป็นกิโลวัตต์ (Piezoelectric pulse generator) เพื่อใช้เป็นสัญญาณที่มีประโยชน์ต่อการตรวจจับวัตถุระเบิด ซึ่งสัญญาณพัลส์ (pulse) นี้จะสามารถสร้างได้โดยการต่อวงจรเพียโซอิเล็กทริกเข้ากับสปาร์คแก๊ป (Spark gap) [4] นอกจากนี้ยังมีการทำวิจัยการเปลี่ยนพลังงานที่เกิดจากการกระแทกของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกมาเป็นพลังงานไฟฟ้า ตัวอย่างเช่นการนำเอาวัสดุเพียโซอิเล็กทริกมาประกอบเข้ากับร่องเท้าบูทของทหาร

2 เพียโซอิเล็กทริกเซ็นเซอร์

เพียโซอิเล็กทริกเซ็นเซอร์เป็นอุปกรณ์ที่เปลี่ยนแรงดัน แรงตึง เป็นสัญญาณไฟฟ้า ซึ่งสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้หลายด้าน เพียโซอิเล็กทริกเซ็นเซอร์สามารถออกแบบให้รับสัญญาณกลได้หลายทิศทางเช่น แรงบีบ แรงบิด แรงหมุน ซึ่งทำให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์หรือเครื่องมือที่เราต้องการวัดได้อย่างง่ายดาย ตัวอย่างของการนำเพียโซอิเล็กทริกมาใช้คือ ไมโครโฟน ซึ่งมีส่วนประกอบของเพียโซอิเล็กทริกเซ็นเซอร์ที่รับสัญญาณเสียงแล้วนำมาแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้าเพื่อนำไปขยายต่อไป นอกจากนี้เพียโซอิเล็กทริกเซ็นเซอร์ยังได้ถูกนำมาใช้ในระบบควบคุมอิเล็กทรอนิกส์ของรถยนต์สมัยใหม่

3 เพียโซอิเล็กทริกแอคทูเอเตอร์

เพียโซอิเล็กทริกแอคทูเอเตอร์ คืออุปกรณ์ที่สามารถเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้าให้เป็นการหดหรือการขยายตัวของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก ตัวอย่างของอุปกรณ์ชนิดนี้เช่น ระบบควบคุมการไหลของหมึกในเครื่องพิมพ์แบบ inkjet, นอกจากนี้วัสดุเพียโซอิเล็กทริกสามารถถูกออกแบบให้สร้างแรงหมุนได้เช่น มอเตอร์เพียโซอิเล็กทริก [5] ซึ่งการหมุนของมอเตอร์ชนิดนี้มีความละเอียดสูงมากสามารถนำมาใช้แทน step motor ได้เป็นอย่างดี มอเตอร์เพียโซอิเล็กทริกถูกใช้ในระบบอิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ ที่ต้องการความละเอียดสูง เช่น ระบบโฟกัสอัตโนมัติของกล้องถ่ายรูป, และระบบควบคุมการหมุนของฮาร์ดดิสก์ของคอมพิวเตอร์ ในระบบเครื่องยนต์ดีเซลแบบคอมมอนเรล วัสดุเพียโซอิเล็กทริกถูกออกแบบให้เป็นหัวฉีด แทนการใช้หัวฉีดแบบโซเลนอยด์



รูปที่ 3 มอเตอร์เพียโซอิเล็กทริก

กฎที่เกี่ยวข้องกับเพียโซอิเล็กทริก

การวิเคราะห์การทำงานของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกมีหลักการพื้นฐานดังต่อไปนี้

1. Piezoelectric Constants

วัสดุเพียโซอิเล็กทริกมีคุณสมบัติต่าง ๆ ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะ สามารถแสดงได้เป็นค่าคงที่เฉพาะตัวขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ โดยคุณลักษณะของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกจะขึ้นอยู่กับทิศทางของขั้วไฟฟ้า สัญญาณที่แสดงคุณลักษณะทางไฟฟ้าหรือทางกลของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกจะถูกกำกับด้วยเครื่องหมายใต้ตัวอักษร 2 ตัว ซึ่งแสดงถึงทิศทางของการกระทำและการตอบสนองของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก โดยทิศทางจะแสดงเป็นตัวเลข 1, 2, และ 3 ซึ่งหมายถึงแกน x, y, และ z ตามลำดับ

a) ค่าสัมประสิทธิ์ความตึงของเพียโซอิเล็กทริก, d แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยืดหดที่เกิดขึ้น และ แรงดันไฟฟ้าที่ต่อเข้ากับวัสดุ วัสดุที่มีค่าสัมประสิทธิ์ d สูง จะเหมาะต่อการใช้งานด้านแอ็คทูเอเตอร์

$$d_{ij} = \frac{\text{strain develop}}{\text{applied field}} \quad (1)$$

b) ค่าสัมประสิทธิ์แรงดันไฟฟ้าของเพียโซอิเล็กทริก, g แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่เกิดขึ้นกับแรงกลที่กระทำกับวัสดุ วัสดุที่มีค่าสัมประสิทธิ์ g สูงเหมาะต่อการใช้งานด้านเซ็นเซอร์

$$g_{ij} = \frac{\text{electrical field develop}}{\text{applied stress}} \quad (2)$$

c) ค่าสัมประสิทธิ์ในการเปลี่ยนพลังงานของเพียโซอิเล็กทริก, k บ่งบอกถึงประสิทธิภาพในการแปลงพลังงาน ซึ่งมีค่าเท่ากับรากของอัตราส่วนพลังงานที่ถูกสร้างขึ้นต่อพลังงานที่ใส่

$$k_{ij} = \sqrt{\frac{\text{mechanical energy stored}}{\text{electrical energy applied}}} \text{ or } k_{ij} = \sqrt{\frac{\text{electrical energy stored}}{\text{mechanical energy applied}}} \quad (3)$$

2. สมการเพียโซอิเล็กทริก

ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกเป็นการที่รวมเอาทั้งปรากฏการณ์ทางไฟฟ้าและทางกลเข้ามาเกี่ยวข้องกัน โดยสมการทางไฟฟ้าที่อธิบายเกี่ยวกับเรื่องประจุไฟฟ้าสะสมบนวัสดุที่วางขั้วขนานกันคือ

$$D = \epsilon E \quad (4)$$

ส่วนสมการทางกลคือ

$$S = sT \quad (5)$$

เมื่อทำเอาความสัมพันธ์ทั้งสอง มารวมกันจะได้สมการเพียโซอิเล็กทริก [1]

$$\{S\} = [s^E]\{T\} + [d_e]\{E\} \quad (6)$$

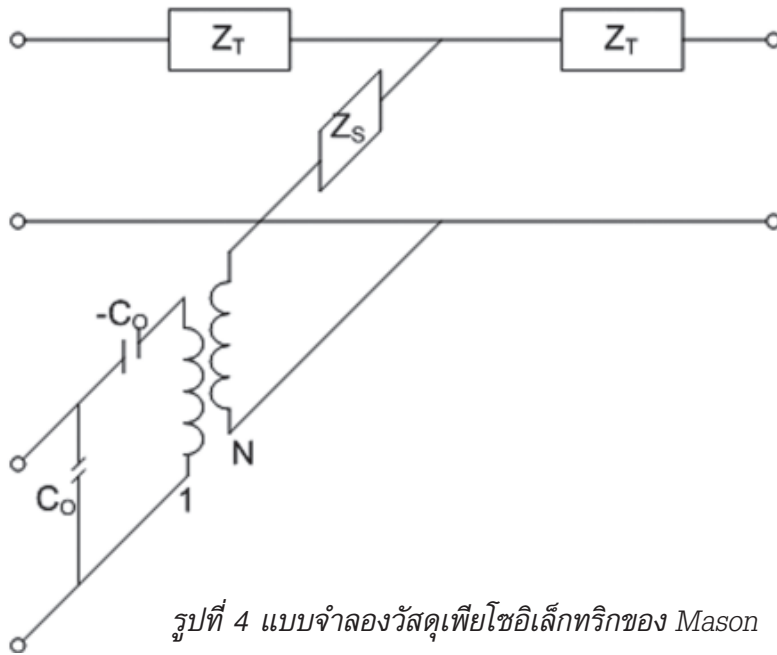
และ

$$\{D\} = [d]\{T\} + [\epsilon^T]\{E\} \quad (7)$$

โดย d คือค่าสัมประสิทธิ์ความตึง, และตัวยก E หมายถึงการที่วัสดุเพียโซอิเล็กทริกต่อกับแหล่งจ่ายแรงดันคงที่หรือไม่ได้ต่อกับแหล่งจ่ายแรงดัน; ตัวยก T หมายถึงวัสดุเพียโซอิเล็กทริกถูกบีบด้วยแรงบีบคงที่หรือไม่ได้ถูกบีบ; และ ตัวใต้ตัวอักษร t หมายถึง แมทริกซ์ทรานสโพสด์ ทฤษฎีและสมการเพียโซอิเล็กทริกสามารถศึกษาเพิ่มเติมได้ที่ [2]

3. แบบจำลองของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกทรานสดิวเซอร์

ในการวิเคราะห์เพื่อหาค่าแรงหรือแรงดันที่เกิดที่ขั้วของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกเป็นเรื่องที่ยุ่งยากเนื่องจากการวิเคราะห์สมการที่เกี่ยวข้องทั้งทางไฟฟ้าและทางกล การวิเคราะห์ยังรวมถึงการคำนวณเมตริกซ์ขนาดใหญ่และสมการการเคลื่อนที่ของคลื่น จึงจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องมีแบบจำลอง (Simulation model) ที่สามารถใช้คอมพิวเตอร์และซอฟต์แวร์ในการคำนวณได้ แบบจำลองที่เป็นที่ยอมรับและใช้กันอย่างแพร่หลาย คือแบบจำลองของ Mason [6] ซึ่งเป็นการจำลองวัสดุเพียโซอิเล็กทริกโดยแยกพอร์ตทางไฟฟ้า (Electrical port) กับพอร์ตทางกลหรือทางเสียง (Acoustic port) ออกจากกันอย่างเด่นชัด ดังแสดงในรูปที่ 4



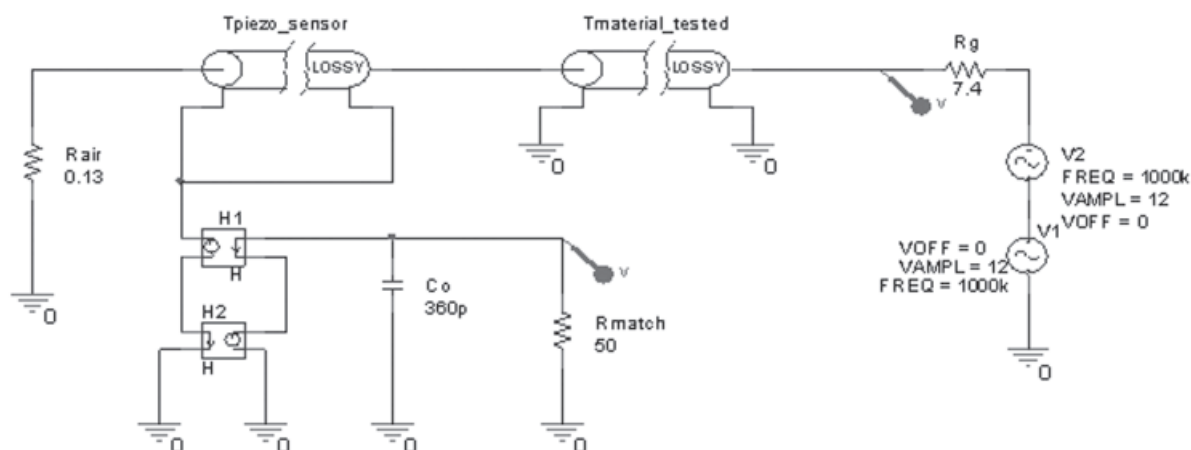
รูปที่ 4 แบบจำลองวัสดุเพียโซอิเล็กทริกของ Mason

จากรูปจะเห็นว่า พอร์ตทางไฟฟ้าจะต่อเข้าตรงกลางของพอร์ตทางเสียง ซึ่งพอร์ตทางเสียงมีค่าอิมพีแดนซ์ Z_T สองตัว แสดงถึงหน้าสัมผัสของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก ถ้าพอร์ตทางเสียงด้านใดด้านหนึ่งเป็น short circuit จะหมายถึงหน้าสัมผัสด้านนั้นไม่ได้ยึดติดกับวัสดุใด ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของแบบจำลอง Mason แสดงในตาราง 1

$C_o = \frac{\epsilon_{33}^s A}{t}$	$N = C_o h$
$Z_o = \rho A v^D$	$\Gamma = \frac{\omega}{v^D}$
$Z_T = iZ_o \tan(\Gamma t / 2)$	$Z_s = -iZ_o \csc(\Gamma t)$

ตาราง 1 พารามิเตอร์ของโมเดลของ Mason

แบบจำลอง ของ Mason สามารถคำนวณโดยใช้คอมพิวเตอร์ซอฟต์แวร์ทางไฟฟ้า เช่น Orcad PSpice [7] ในการวิเคราะห์ รูปที่ 5 แสดงแบบจำลองโดยใช้ Orcad PSpice



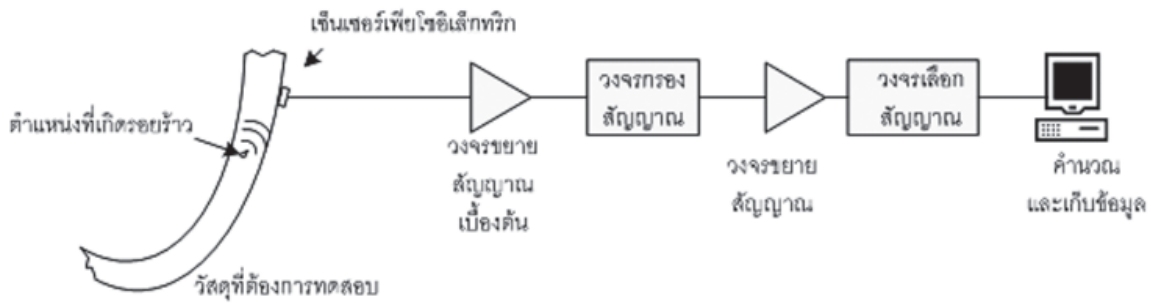
รูปที่ 5 แบบจำลองเซ็นเซอร์เพียโซอิเล็กทริก โดยใช้ซอฟต์แวร์ Orcad PSpice

ในพอร์ตทางไฟฟ้า แบบจำลองประกอบด้วย ซึ่งเป็นค่าความเป็นตัวเก็บประจุของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก และ source controller 2 ตัว ทำหน้าที่จำลองสมการการเกี่ยวเนื่องทางไฟฟ้าและทางกลของวงจร ส่วนพอร์ตทางเสียงของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกและวัสดุที่ต้องการทดสอบ จะถูกจำลองด้วยแบบจำลองของสายส่ง (transmission line model) ซึ่งจะให้ค่าความละเอียดสูงเนื่องจากเป็นแบบจำลองแบบ distributed โดยขั้นตอนและวิธีการสร้างแบบจำลองสามารถอ่านเพิ่มเติมได้ที่[8]

การประยุกต์ใช้งานวัสดุเพียโซอิเล็กทริกในการตรวจสภาพพื้นผิวของเรือ

1. ระบบ Acoustic emission

วัสดุเพียโซอิเล็กทริก สามารถใช้ตรวจจับสภาพของพื้นผิววัสดุ โดยใช้เทคนิคตรวจจับการปล่อยคลื่นความเค้น (Acoustic emission) ของวัสดุ [9] เนื่องจาก วัสดุมีการเปลี่ยนแปลงของความเครียด (Stress redistribution) ตัวอย่างที่เห็นได้ชัดคือ เมื่อเรือแล่นผ่านคลื่นที่มีความรุนแรงสูง การปะทะของคลื่นกับโครงสร้างของตัวเรืออาจจะทำให้ลำตัวเรือมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (Elastic deformation), และการเปลี่ยนแปลงของความเครียดและพลังงานความเค้น (Elastic strain energy) ในโครงสร้าง ซึ่งเมื่อถึงจุดที่พลังงานคลื่นมีความรุนแรงจนทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงแบบถาวรในระดับอนุภาคของโครงสร้าง จะส่งผลให้เกิดการปล่อยพลังงานความเค้นออกมาในรูปแบบการแพร่ของคลื่นเสียง การแพร่ของคลื่นนี้ เมื่อแอมพลิจูดสูงถึงระดับหนึ่งจะสามารถตรวจจับได้ด้วยเซ็นเซอร์เพียโซอิเล็กทริก โดยทั่วไปความถี่ของคลื่นนี้จะอยู่ที่ระดับ 30 kHz ถึง 30 MHz การออกแบบการวางเซ็นเซอร์ตั้งแต่ 3 ตัวขึ้นไป (Triangulation) ยังช่วยให้สามารถระบุตำแหน่งที่เกิดความเสียหายได้อีกด้วย ขั้นตอนของระบบตรวจจับสภาพโครงสร้างของพื้นผิวเรือ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6

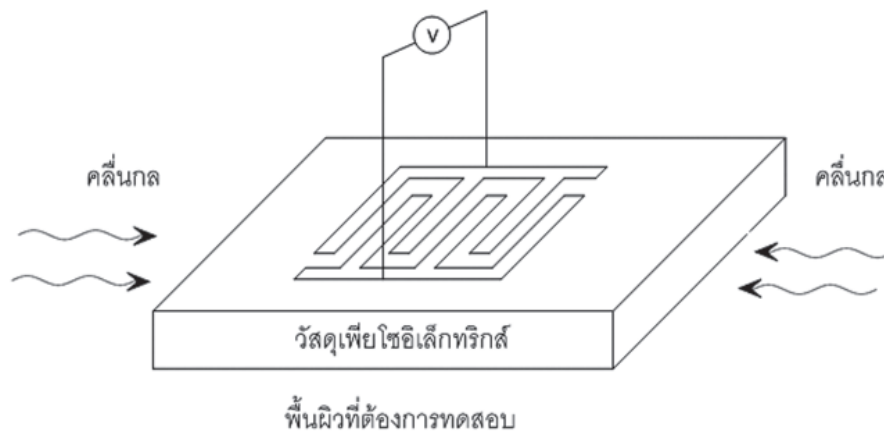


รูปที่ 6 ระบบ Acoustic emission ในการตรวจสอบสภาพพื้นผิวและโครงสร้างเรือ

เซ็นเซอร์เพียโซอิเล็กทริกจะถูกนำมาพินกับพื้นผิวที่ต้องการตรวจ ตามรูปที่ 7 เซ็นเซอร์เพียโซอิเล็กทริกมีความไว ต่อสัญญาณคลื่นถึง 1000 V ต่อ 1 mm สัญญาณคลื่นที่มีแอมพลิจูด 0.1 pm เซ็นเซอร์จะสร้างสัญญาณแรงดัน 100 mV



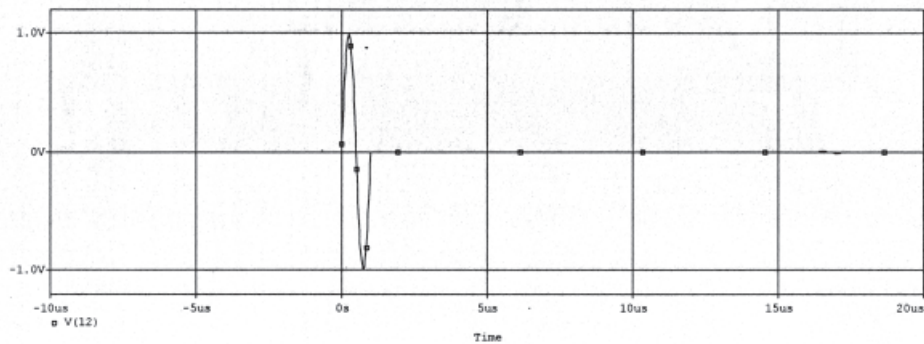
(a)



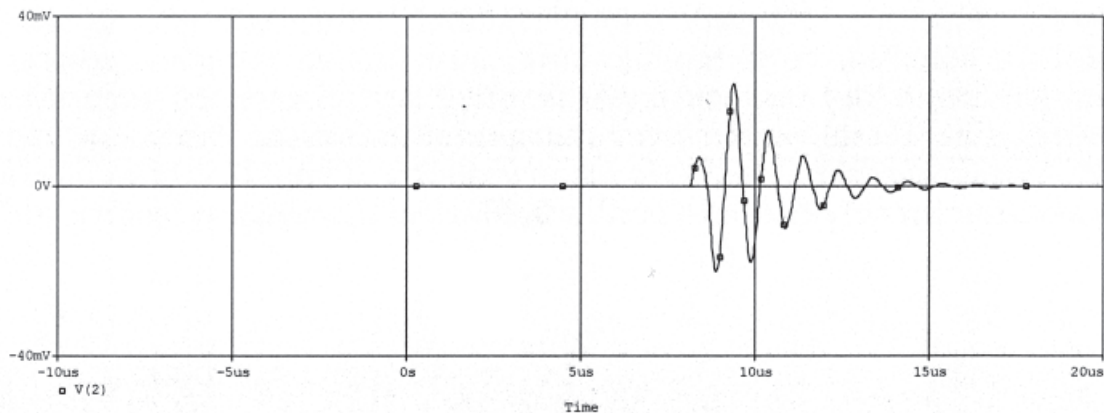
(b)

รูปที่ 7 (a) เซ็นเซอร์เพียโซอิเล็กทริกที่ใช้ในระบบ Acoustic emission (b) ภาพจำลองการทำงาน

ตัวอย่างสัญญาณที่เซ็นเซอร์เพียโซอิเล็กทริกวัดได้ ซึ่งอ่านค่าแรงดันได้เป็นมิลลิโวลต์ โดยใช้แบบจำลองของ Mason model และซอฟต์แวร์ Orcad PSpice เป็นดังรูปที่ 8



(a)



(b)

รูปที่ 8 (a) การจำลองการเกิดคลื่นความเค้นที่วัสดุ

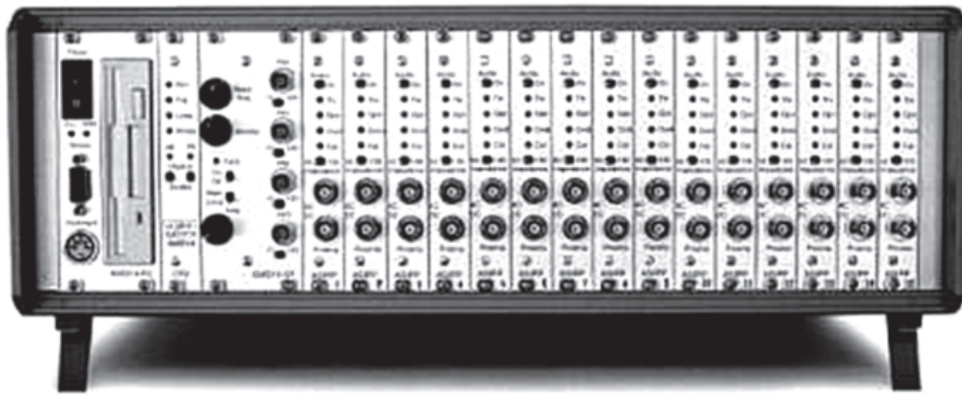
(b) การตอบสนองของเซ็นเซอร์เพียโซอิเล็กทริก

รูปที่ 8 แสดงถึงการตอบสนองของเซ็นเซอร์เพียโซอิเล็กทริกต่อการเกิดคลื่นความเครียดในตัววัสดุ การตอบสนองมีแอมพลิจูดสูงสุดที่ประมาณ 24 mv และล่าช้าไปประมาณ 8 μ s จากเวลาที่เกิดคลื่นความเค้น

2. การวิเคราะห์สัญญาณ

ขั้นตอนที่สำคัญในการวัดความเสียหายของเรืออยู่ที่การวิเคราะห์และประมวลผลสัญญาณ (Signal processing) ที่ตรวจจับได้โดยเซ็นเซอร์เพียโซอิเล็กทริก เนื่องจากสัญญาณที่ได้รับมีขนาดเล็ก และการวางเซ็นเซอร์อาจจะมีระยะทางไกลจากจุดวิเคราะห์สัญญาณ จึงจำเป็นต้องมีวงจรขยายสัญญาณ เพื่อที่จะสามารถขับสัญญาณผ่านสายเคเบิลก่อนเข้าสู่วงจรกรองสัญญาณได้ วงจรกรองสัญญาณทำหน้าที่แยกสัญญาณที่เกิดจากความเค้นที่ปล่อยมาจากโครงสร้างของวัสดุออกจากสัญญาณรบกวนภายนอกซึ่งได้แก่ เสียงฝน หรือ เสียงการเคลื่อนไหวของมอเตอร์เรือ โดยสัญญาณรบกวนนี้จะขึ้นอยู่กับธรรมชาติของตำแหน่งที่วางเซ็นเซอร์ ดังนั้นวงจรกรองสัญญาณที่ติดตั้งตามตำแหน่งต่างๆ ของเรือ จะมีความสามารถในการกรองสัญญาณรบกวนที่ความถี่แตกต่างกันไป

สัญญาณที่ผ่านจากวงจรกรองสัญญาณจะถูกนำมาขยายอีกครั้ง และนำเข้าสู่วงจรแปลงสัญญาณอะนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล ก่อนนำเข้าสู่คอมพิวเตอร์เพื่อวิเคราะห์ ขั้นตอนและอุปกรณ์ในการวิเคราะห์สามารถออกแบบเองเพื่อให้เหมาะสมกับลักษณะของงาน อย่างไรก็ตาม อุปกรณ์วิเคราะห์สัญญาณ acoustic emission ดังรูปที่ 9 มีจำหน่ายแบบสำเร็จรูป ซึ่งเป็นระบบ acoustic emission ที่สามารถรองรับสัญญาณจากเซ็นเซอร์ได้ถึง 15 ตัว และมีการรวมการวัดและวิเคราะห์ไว้ในโมดูลเดียว ซึ่งสะดวกและรวดเร็วในการเคลื่อนย้าย [10]



รูปที่ 9 ระบบวิเคราะห์สัญญาณ Acoustic emission AMSY4 ของบริษัท Vallen ประเทศเยอรมันนี

สรุป

เทคโนโลยีเพียโซอิเล็กทริกมีประโยชน์มากมาย วัสดุเพียโซอิเล็กทริกมีคุณสมบัติในการเปลี่ยนพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า ซึ่งในปัจจุบันถูกนำมาประยุกต์ใช้ในหลายด้าน เช่น แหล่งจ่ายพลังงานแรงดันสูง เซ็นเซอร์ที่มีความไวมาก และแอ็คทูเอเตอร์ที่มีความละเอียดขนาดไมโครเมตร ในทางทหาร การบำรุงรักษา ยุทธโธปกรณ์เป็นเรื่องที่สำคัญ บ่งบอกถึงสภาพความพร้อมในการรบและปกป้องอธิปไตยของชาติ กองทัพเรือมีเรือรบหลายลำ มีการบำรุงรักษาอย่างสม่ำเสมอ การนำวัสดุเพียโซอิเล็กทริก มาใช้ในการตรวจจับและहारอยแตก ร้าว รอยร้าว หรือความล้าของเหล็ก ในลำเรือ จะช่วยให้สามารถตรวจพบปัญหาแต่เนิ่น ๆ และยังสามารถช่วยประหยัดงบประมาณในการซ่อมบำรุงของกองทัพเรือ

เอกสารอ้างอิง

- [1.] A. Ballato, "Piezoelectricity: history and new thrusts," IEEE Trans. Ultrasonics Symposium, vol. 1, pp. 575-583, 1996.
- [2.] W. G. Cady, Piezoelectricity: an Introduction to the Theory and Applications of Electromechanical Phenomena in Crystals. New York: McGraw-Hill, 1946.
- [3.] M. A. Kettatni, Direct Energy Conversion. Reading, MA: Addison-Wesley Publishing Company, 1970, pp. 327-365.
- [4.] C. Keawboonchuay, and T. G. Engel, "Design, modeling, and implementation of a 30 kW piezoelectric pulse generator, IEEE Trans. Plasma Science, vol. 30, no. 2, pp. 679-686, Apr. 2002
- [5.] AlliedSignal Aerospace, Kansas City Division
- [6.] W. P. Mason, "Electromechanical Transducers and Wave Filters," Princeton, NJ: Van Nostrand, 1948.
- [7.] OrCad PSpice A/D, version 9.2, OrCad inc., 13211 SW 68th Parkway Suite 200, Portland, OR 97223.
- [8.] A. Püttmer, P. Hauptmann, R. Lucklum, O. Krause, and B. Henning, "SPICE model for lossy piezoceramic transducers," IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr., vol. 44, no. 1, pp. 60-66, January 1997.
- [9.] M. Huang, L. Jiang, P. K. Liaw, C. R. Brooks, R. Seeley, and D. L. Klarstrom, "Using acoustic emission in fatigue and fracture materials research," Journal of Material Science, vol. 50, no. 11, Nov. 1998.
- [10.] Vallen-Systeme GmbH, PO-Box 34 82055 Icking, Munich.