

การกัดกร่อน ของข้อต่อทรานซิชัน ในงานต่อเรือ

ณัฐรัตน์ เก่งกล้า¹ นภฉัตร ธารีลาภ² *นาวาโท เสวียง เกื่อนบุญ³

บทคัดย่อ

กรมอุทการเรือพบปัญหาการกัดกร่อนของข้อต่อทรานซิชันซึ่งใช้เป็นตัวกลางสำหรับการเชื่อมต่อลำเรือที่ทำจากเหล็กและส่วนบนของเรือที่ทำจากอะลูมิเนียม โดยการกัดกร่อนเกิดขึ้นมากในชั้นกลางหรือชั้นของ AA1050 ในข้อต่อทรานซิชัน งานวิจัยนี้จึงทำการศึกษากการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นในข้อต่อทรานซิชัน โดยผลการศึกษาพบว่าเมื่อมีการเชื่อมข้อต่อทรานซิชันกับลำเรือและส่วนบนของเรือ จะทำให้สารประกอบกึ่งโลหะ (Intermetallic compound) ที่มีอยู่ในบริเวณรอยต่อระหว่างชั้น AA1050 และ เหล็ก มีปริมาณเพิ่มมากขึ้น สำหรับการกัดกร่อนของข้อต่อทรานซิชันที่เกิดขึ้นในชั้น AA1050 นั้นมีทั้งการกัดกร่อนแบบหลุม (Pitting corrosion) และการกัดกร่อนแบบกัลวานิกบริเวณรอยต่อระหว่างชั้น AA1050 และ เหล็ก เมื่อเปรียบเทียบการกัดกร่อนแบบกัลวานิกบริเวณรอยต่อที่มีและไม่มีสารประกอบกึ่งโลหะพบว่าการกัดกร่อนของชั้น AA1050 ในบริเวณที่มีสารประกอบกึ่งโลหะ เกิดขึ้นช้ากว่าบริเวณที่ไม่มี เนื่องจากสารประกอบกึ่งโลหะมีศักย์ไฟฟ้าเคมีระหว่างอะลูมิเนียมและเหล็กจึงสามารถลดผลกัลวานิกระหว่างอะลูมิเนียมและเหล็กลงได้อย่างไรก็ตามเมื่อการกัดกร่อนเกิดขึ้นในชั้น AA1050 แล้วจะขยายตัวจนเกิดการกัดกร่อนทั้งชั้นและนำไปสู่ความเสียหายได้

ที่มาและความสำคัญ

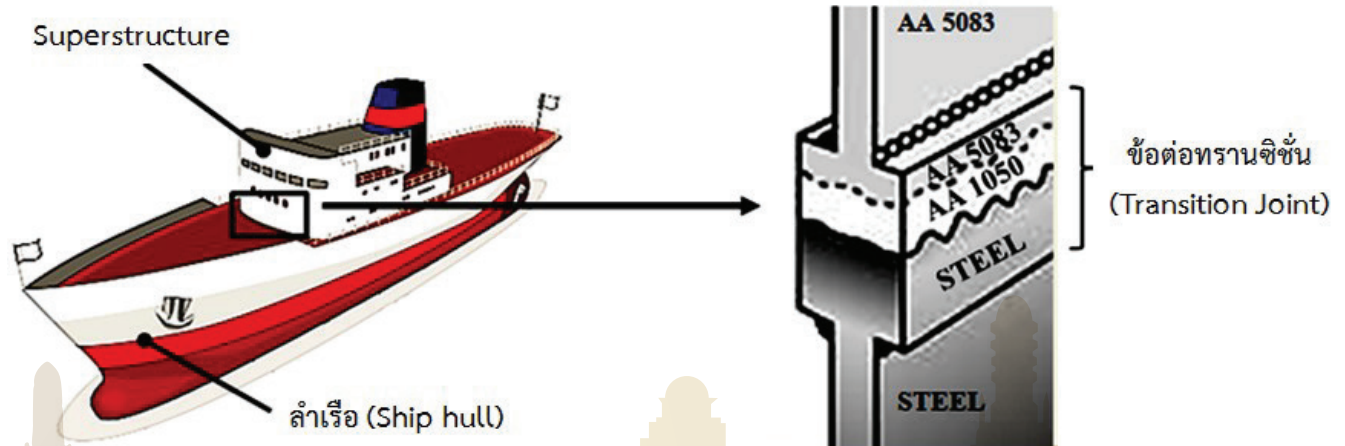
ข้อต่อทรานซิชัน หรือ Transition joint เป็นข้อต่อที่ใช้เป็นตัวกลางสำหรับต่อลำเรือที่ทำด้วยเหล็ก (Ship hull) เข้ากับโครงสร้างส่วนบนของเรือ (Superstructure) ที่ทำจากอะลูมิเนียม-แมกนีเซียม เกรด AA5083 ในการต่อระหว่างเหล็กและอะลูมิเนียม โดยตรงนั้นทำได้ยาก อีกทั้งยังเกิดปัญหาด้านการกัดกร่อนแบบกัลวานิก (Galvanic corrosion) เนื่องจากความแตกต่างของศักย์ไฟฟ้าเคมีระหว่างเหล็กและอะลูมิเนียม ดังนั้นในการต่อเรือจึงใช้ข้อต่อดังกล่าวเป็นตัวกลางสำหรับการต่อลำเรือและโครงสร้างส่วนบนของเรือ ข้อต่อทรานซิชันประกอบด้วยชั้นของโลหะ 3 ชั้นได้แก่ ชั้นของเหล็ก ชั้นของอะลูมิเนียมเกรด AA1050 และ ชั้นของโลหะผสมอะลูมิเนียม-แมกนีเซียมเกรด AA5083 (รูปที่ 1) โดยชั้นของเหล็กจะเชื่อมกับลำเรือที่ทำด้วยเหล็ก ชั้นของอะลูมิเนียม-แมกนีเซียมเกรด AA5083 เชื่อมกับโครงสร้างส่วนบนของเรือ ส่วนอะลูมิเนียมเกรด AA1050 ซึ่งเป็นชั้นกลางของข้อต่อเป็นอะลูมิเนียมเกรดที่มีศักย์ไฟฟ้าเคมีระหว่างเหล็กและอะลูมิเนียม จึงสามารถลดปัญหาการกัดกร่อนแบบกัลวานิกระหว่างโลหะทั้งสองชนิดลง และยังเพิ่มความสามารถการยึดติดของรอยเชื่อมด้วยเหตุดังกล่าวข้อต่อทรานซิชันจึงมีความสำคัญในอุตสาหกรรม การต่อเรือเป็นอย่างมากซึ่งเมื่อทำการเชื่อมต่อข้อต่อดังกล่าวเข้ากับโครงสร้างเรือแล้วจะมีการทำสีที่บริเวณข้อต่อทั้งหมด

* Corresponding Author : napachat.tar@kmutt.ac.th

¹ นักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุ คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

² อาจารย์สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุ คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

³ หัวหน้าโรงหล่อหลอมและไม้แบบ แผนกโรงงานเครื่องกล กองโรงงาน อุทการเรือธนบุรี กรมอุทการเรือ



รูปที่ 1(ก) ส่วนประกอบของเรือ [1]และ (ข) ส่วนประกอบของข้อต่อทรานซิชัน และการเชื่อมต่อของข้อต่อทรานซิชันกับส่วนประกอบของเรือ [2]

อย่างไรก็ตาม กรมอุทกหารเรือ ได้พบปัญหาการกัดกร่อนของข้อต่อทรานซิชัน (รูปที่ 2) โดยเฉพาะบริเวณที่สึเคลือบเกิดการหลุดลอก การกัดกร่อนพบทั้งในชั้น AA5083 และชั้น AA1050 โดยในชั้น AA1050 จะเกิดการกัดกร่อนมากที่สุดจนแทบไม่เหลือเนื้อวัสดุ เมื่อสำรวจจรรยาบรรณ ไม่พบรายงานวิจัยเกี่ยวกับการกัดกร่อนของข้อต่อทรานซิชันพบเพียงงานวิจัย [3-4] ที่รายงานว่าความร้อนจากการเชื่อมเป็นปัจจัยหนึ่งที่กำหนดโครงสร้างจุลภาค และสมบัติทางกลของข้อต่อ เนื่องจากความร้อนทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสารประกอบกึ่งโลหะ (Intermetallic compound, IMC) ที่มีอยู่ในข้อต่อทรานซิชันกล่าวคือ เมื่อใช้ความร้อนในการเชื่อมสูงทำให้เฟสกึ่งโลหะเกิดการขยายตัว และอาจเกิดเป็นเฟสกึ่งโลหะชนิดอื่น ๆ ซึ่งส่งผลต่อสมบัติทางกลนอกจากนี้ลำดับการเชื่อมยังมีผลดังกล่าวเช่นเดียวกัน เนื่องจากเหล็กมีการกักเก็บความร้อน (Thermal barrier) มากกว่าอะลูมิเนียม ความร้อนดังกล่าวจึงทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของเฟสกึ่งโลหะได้เช่นเดียวกัน อย่างไรก็ตามยังไม่มีจรรยาบรรณในด้านการกัดกร่อน ดังนั้นในงานวิจัยนี้ จึงทำการศึกษาการกัดกร่อนของข้อต่อทรานซิชันที่มีการเชื่อมเปรียบเทียบกับที่ไม่มีการเชื่อม



รูปที่ 2 ข้อต่อทรานซิชันที่เสียหาย

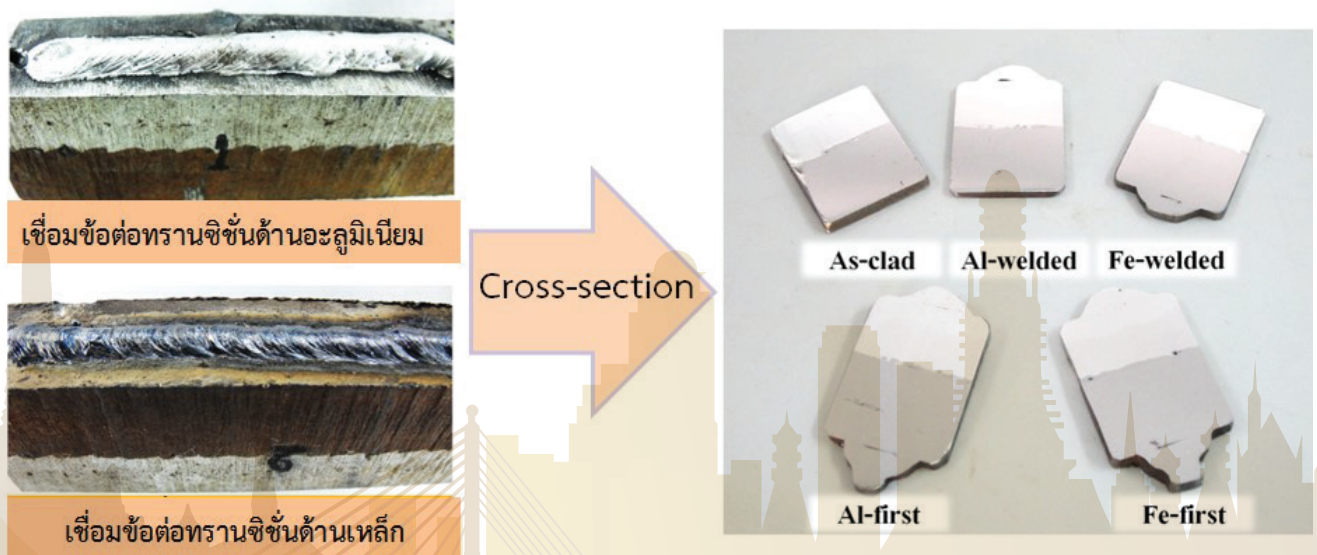


วิธีการทดลอง

ในงานวิจัยนี้มีการดำเนินงานดังนี้

1. ศึกษาโครงสร้างจุลภาคและองค์ประกอบทางเคมีของข้อต่อทรานซิชันที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน (As-clad) ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
2. ดำเนินการเชื่อมแบบต่าง ๆ โดยช่างเชื่อมของกรมอุทหรารเรือตามสภาวะการเชื่อมจริงในการต่อเรือ
 - เชื่อมข้อต่อทรานซิชันเฉพาะด้านเหล็ก (Fe-welded)
 - เชื่อมข้อต่อทรานซิชันเฉพาะด้านอะลูมิเนียม (Al-welded)
 - เชื่อมข้อต่อทรานซิชันด้านอะลูมิเนียมก่อนด้านเหล็ก (Al-first)
 - เชื่อมข้อต่อทรานซิชันด้านเหล็กก่อนด้านอะลูมิเนียม (Fe-first)

โดยการเชื่อมข้อต่อทรานซิชันกับอะลูมิเนียมจะใช้วิธีการเชื่อมอาร์คโลหะหรือการเชื่อมมิก (Metal Inert Gas; MIG) ในขณะที่การเชื่อมต่อกับเหล็กใช้วิธีการเชื่อมอาร์คด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ (Shielded Metal Arc Welding; SMAW) แล้วทำภาคตัดขวาง (Cross-section) เพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาคและองค์ประกอบทางเคมีของข้อต่อทรานซิชันที่ผ่านการเชื่อมเปรียบเทียบกับที่ยังไม่มีการเชื่อมด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



รูปที่ 3 การเตรียมชิ้นงานทดสอบ

3. ศึกษาผลของเฟสกึ่งโลหะ (Intermetallic compound) ที่เกิดจากการเชื่อมต่อการกัดกร่อนของข้อต่อทรานซิชัน ด้วยวิธีการดังต่อไปนี้

3.1 ทดสอบการกัดกร่อนโดยวิธีการแช่ (Immersion test)

ทำการแช่ชิ้นงานทดสอบในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์เป็นเวลา 24 ชั่วโมงเพื่อศึกษาจุดเริ่มต้นของการกัดกร่อนและแช่ชิ้นงานทดสอบในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ความเข้มข้น 5 โมลาร์เป็นเวลา 130 วัน เพื่อศึกษาการกัดกร่อนในระยะยาว

3.2 ศึกษาการกัดกร่อนด้วยเทคนิคทางไฟฟ้าเคมี

เพื่อให้ทราบถึงการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นในบริเวณรอยต่อระหว่างชั้น AA1050 กับ เหล็ก (Al/Fe Interface) ผู้วิจัยจึงใช้เทคนิคโพเทนทิโอสแตติก (Potentiostatic) โดยจ่ายศักย์ไฟฟ้าคงที่ที่ 0.5 โวลต์ เป็นเวลา 2 5 และ 10 นาที ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนัก และ จ่ายศักย์ไฟฟ้าคงที่ที่ 1 มิลลิโวลต์ ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก เป็นเวลา 3 นาที เพื่อศึกษาจุดเริ่มต้นของการกัดกร่อนโดยในการศึกษาใช้ขั้วอ้างอิงมาตรฐานชนิดเงิน/เงินคลอไรด์ (Ag/AgCl) และใช้แพลทินัมเป็นขั้วร่วม

3.3 ตรวจสอบความเป็นแคโทด-แอโนดภายในข้อต่อทรานซิชันด้วยวิธีการ Cerium decoration

นำชิ้นงานจุ่มลงในสารละลายผสมระหว่างโซเดียมคลอไรด์ 0.1 โมลาร์กับซีเรียม (III) ไนเตรต เฮกซะไฮเดรต ($Ce(NO_3)_3 \cdot 6H_2O$) ความเข้มข้น 4 มิลลิโมลาร์ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยโซเดียมคลอไรด์จะทำให้โลหะเกิดการกัดกร่อน (เป็นแอโนด) ดังสมการที่ (1) ส่วนในบริเวณที่เกิดปฏิกิริยารีดักชันจะเกิดเป็นไฮดรอกไซด์ (OH^-) ดังสมการที่ (2) จากนั้น OH^- จะปฏิกิริยากับ Ce ในสารละลายเกิดเป็นซีเรียมไฮดรอกไซด์ ($Ce(OH)_3$) เคลือบบนบริเวณที่เกิดปฏิกิริยารีดักชันหรือบริเวณแคโทดดังสมการที่ (3)



ปฏิกิริยาออกซิเดชัน (โลหะกัดกร่อน) : $M \rightarrow M^{n+} + ne^-$ (1)

ปฏิกิริยารีดักชัน: $O_2 + 2H_2O + 4e^- \rightarrow 4OH^-$ (2)

ปฏิกิริยารวม: $3OH^- + Ce(NO_3)_3 \cdot 6H_2O \rightarrow Ce(OH)_3 + 3NO_3^- + 6H_2O$ (3)

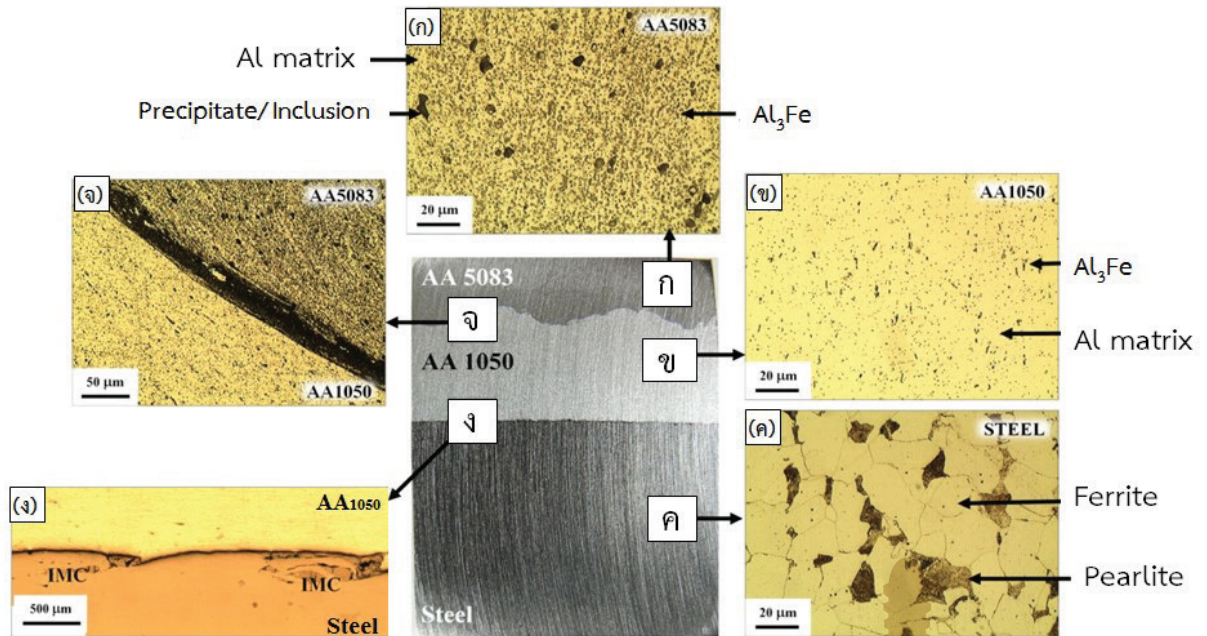
จากนั้นนำชิ้นงานทดสอบไปศึกษาสัณฐานวิทยาและวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค SEM-EDS โดยบริเวณที่ตรวจพบซีเรียมจะเป็นบริเวณที่เป็นแคโทด ส่วนบริเวณที่ไม่พบซีเรียมจะเป็นแอโนด

ผลการทดลอง

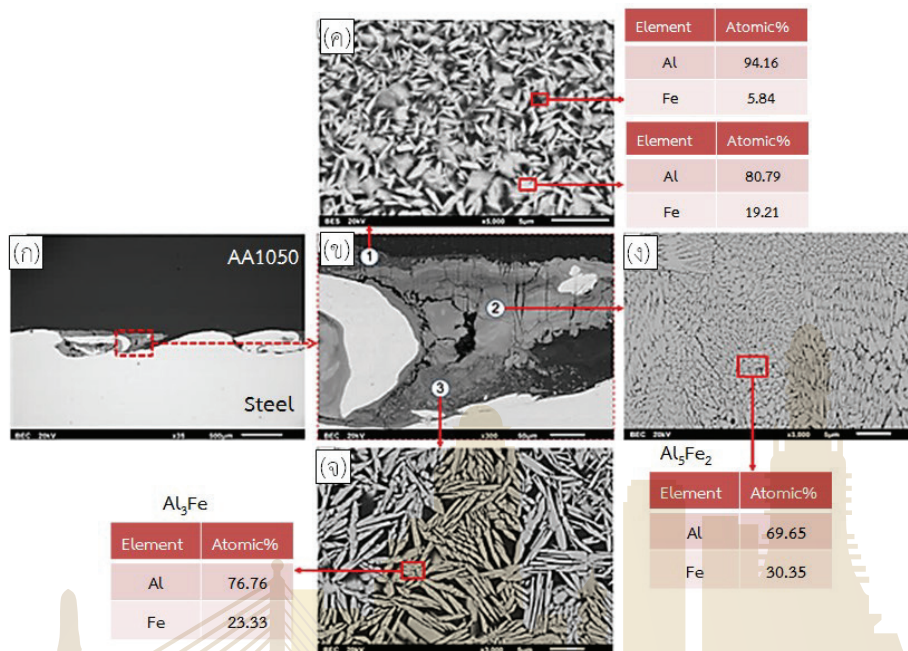
1 การศึกษาโครงสร้างจุลภาคและองค์ประกอบทางเคมีของข้อต่อทรานซิชัน (As-clad)

รูปที่ 4 แสดงโครงสร้างจุลภาคของข้อต่อทรานซิชันในบริเวณต่างๆ ได้แก่

- (1) ชั้นของ AA5083 ประกอบด้วยอนุภาค Al_3Fe และพรีซิพิต (Precipitate) สีดำขนาดใหญ่ที่ประกอบด้วยซิลิกอนอะลูมิเนียม และแมกนีเซียมกระจายตัวอยู่ในเมทริกซ์อะลูมิเนียม (รูปที่ 4(ก))
- (2) ชั้น AA1050 ประกอบด้วยอนุภาค Al_3Fe ที่มีสีดำกระจายอยู่ในเมทริกซ์อะลูมิเนียมที่มีสีขาว (รูปที่ 4(ข))
- (3) ชั้นเหล็ก มีโครงสร้างที่ประกอบด้วยเฟสเฟอร์ไรต์ (Ferrite phase) ที่มีสีขาว แทรกด้วยเฟสเพิร์ลไลต์ (Pearlite) ที่มีสีดำ (รูปที่ 4(ค))
- (4) บริเวณรอยต่อระหว่างชั้น AA1050 และ เหล็ก จะสังเกตพบลักษณะที่เป็นคลื่น (Ripple) ที่มีสารประกอบกึ่งโลหะ (IMC) อยู่ซึ่ง IMC นี้ จะเกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่อได้รับความร้อน และส่งผลกับสมบัติของข้อต่อทรานซิชันในงานวิจัยนี้จึงสนใจการเปลี่ยนแปลงในบริเวณนี้เป็นหลัก (รูปที่ 4(ง))
- (5) บริเวณรอยต่อระหว่างชั้น AA5083 และ AA1050 ที่มีลักษณะเป็นคลื่น เมื่อตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคไม่พบ IMC ดังที่พบในบริเวณรอยต่อระหว่างชั้น AA1050 และเหล็ก (รูปที่ 4(จ))



รูปที่ 4 โครงสร้างภาคตัดขวางของข้อต่อทรานซิชัน (ก) AA5083 (ข) AA1050 (ค) Steel (ง) รอยต่อระหว่าง AA1050/Steel (Al/Fe Interface) และ (จ) รอยต่อระหว่าง AA5083/AA1050



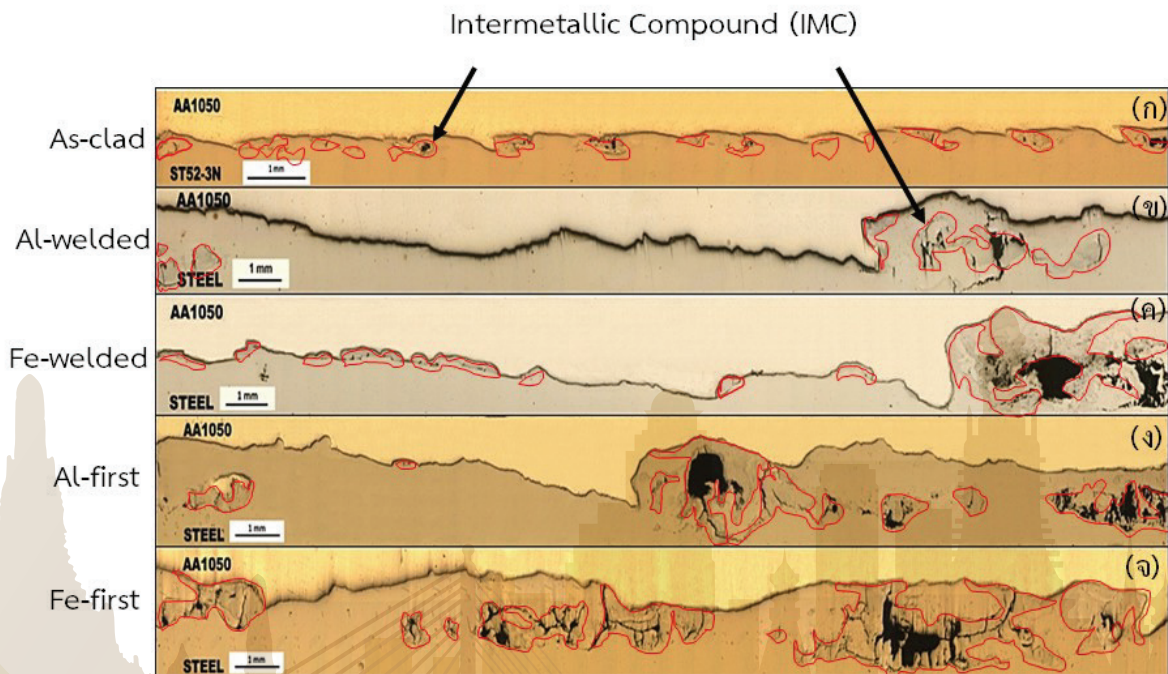
รูปที่ 5 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของ IMC ในข้อต่อทรานซิชันที่ยังไม่ผ่านการเชื่อม

เมื่อตรวจสอบ IMC บริเวณรอยต่อระหว่างชั้นของ AA1050 และเหล็กในรูปที่ 5(ก) (ข) ด้วย Backscattered electron (BSE) พบว่า IMC มีสีที่แตกต่างกันแสดงว่ามีองค์ประกอบทางเคมีที่ต่างกัน โดยบริเวณหมายเลข (รูปที่ 5(ค)) ซึ่งอยู่ติดกับชั้นอะลูมิเนียม เมื่อตรวจสอบจะพบผลึกสีขาวขนาดเล็กบนพื้นสีดำ เมื่อวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค EDS พบว่าบริเวณผลึกสีขาวประกอบด้วย Al 80.79 at% และ Fe 19.21 at% ส่วนพื้นสีดำเป็นอะลูมิเนียม ส่วนบริเวณหมายเลข ซึ่งอยู่ตอนกลางของ ripple มีลักษณะเป็นแถบขนาดใหญ่สีเทาอ่อนที่ประกอบด้วยแท่งยาวสีเทาอ่อนเป็นส่วนใหญ่ ดังรูปที่ 5(ง) เมื่อตรวจสอบแท่งสีเทาอ่อนประกอบด้วยธาตุ Al 69.65at% และ Fe 30.35at% หรือมีสัดส่วนอะตอมระหว่าง Al : Fe เป็น 2.5:1 ซึ่งน่าจะเป็น IMC ชนิด Al_5Fe_2 ดังที่มีรายงานไว้ก่อนหน้านี้ [4] และบริเวณหมายเลข ซึ่งอยู่ตอนล่าง (ดังรูปที่ 5(จ)) มีลักษณะเป็นแถบขนาดใหญ่สีเทาประกอบด้วยแท่งเรียวยาวสีเทาบนพื้นสีดำ เมื่อตรวจสอบแท่งสีเทาประกอบด้วย Al 76.67 at% และ Fe 23.33 at% หรือมีสัดส่วนอะตอมระหว่าง Al : Fe เป็น 3 : 1 ซึ่งน่าจะเป็น IMC ชนิด Al_3Fe ดังที่รายงานไว้ในงานวิจัยของ Tricarico และคณะ [4]

2 ภาคตัดขวางและโครงสร้างจุลภาคของข้อต่อทรานซิชันที่ผ่านการเชื่อมในลักษณะต่างๆ

ในงานวิจัยนี้ทดลองเชื่อมข้อต่อทรานซิชัน 4 แบบ ได้แก่ ข้อต่อทรานซิชันซึ่งเชื่อมเฉพาะด้านอะลูมิเนียม (Al-welded) ข้อต่อทรานซิชันเชื่อมเฉพาะด้านเหล็ก (Fe-welded) ข้อต่อทรานซิชันที่เชื่อมทั้ง 2 ด้าน แต่มีการเชื่อมในด้านอะลูมิเนียมก่อน (Al-first) และมีการเชื่อมด้านเหล็กก่อน (Fe-first) โดยภาคตัดขวางของข้อต่อทรานซิชันที่ผ่านการเชื่อมเปรียบเทียบกับข้อต่อทรานซิชันที่ยังไม่ผ่านการเชื่อม (As-Clad) แสดงในรูปที่ 6 จะเห็นว่าบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นอะลูมิเนียม AA1050 และเหล็ก (Al/Fe Interface) ของข้อต่อที่ผ่านการเชื่อมประกอบด้วย IMC (วงสีแดง) ที่มีขนาดใหญ่กว่าที่พบในข้อต่อที่ยังไม่ผ่านการเชื่อม โดยข้อต่อที่ผ่านการเชื่อมด้านเดียว (ทั้งชั้นงาน Al-welded และ Fe-welded) จะปรากฏ IMC ขนาดใหญ่อยู่ที่ด้านใดด้านหนึ่งของชั้นงานที่เหลือจะเป็นการกระจายตัวของ IMC ขนาดเล็กส่วนชั้นงานข้อต่อทรานซิชันที่ผ่านการเชื่อมทั้ง 2 ด้าน พบ IMC ขนาดใหญ่กระจายอยู่ตลอดแนว ทั้งนี้เป็นผลจากการได้รับความร้อนที่มากกว่าการเชื่อมด้านเดียว โดยเมื่อข้อต่อได้รับความร้อนจากการเชื่อมอะตอมของอะลูมิเนียมและเหล็กสามารถแพร่ข้ามกันได้มากขึ้น ทำให้ IMC มีขนาดใหญ่และหนามากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับรายงานการวิจัยก่อนหน้านี้ที่รายงานว่า เมื่อได้รับความร้อน IMC จะมีความหนาและขยายตัวเพิ่มมากขึ้น [4]





รูปที่ 6 โครงสร้างจุลภาคของข้อต่อทรานซิชัน (ก) ก่อนเชื่อม (ข) เชื่อมอะลูมิเนียมด้านเดียว (ค) เชื่อมเหล็กกล้าด้านเดียว (ง) เชื่อมด้านอะลูมิเนียมก่อน และ (จ) เชื่อมด้านเหล็กกล้าก่อน

โดยผลการเปลี่ยนแปลงของ IMC บริเวณ Al/Fe interface เมื่อมีการเชื่อมชิ้นงานแบบต่างๆ เปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ไม่ผ่านการใช้งานแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 การเปรียบเทียบความยาว ความหนา และร้อยละ โดยพื้นที่ IMC ในรอยต่อทรานซิชันที่ไม่มีและมีการเชื่อมแบบต่าง

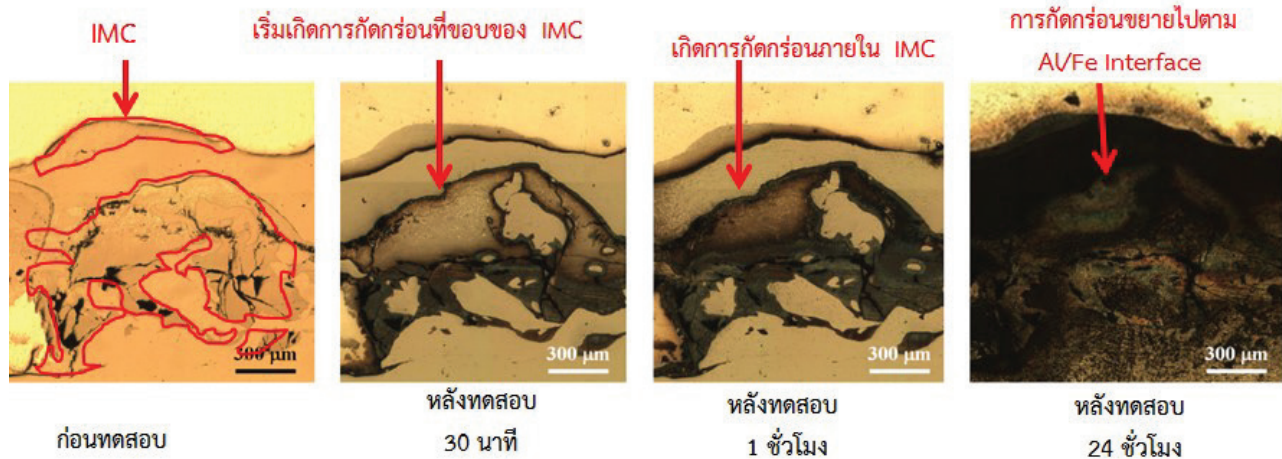
ชิ้นงาน	ความหนาเฉลี่ยของ IMC (mm)	ร้อยละความยาว IMC รวมใน Interface	ปริมาณ IMC (% โดยพื้นที่)	ร้อยละการเพิ่มขึ้นของพื้นที่ IMC เทียบกับ As-clad
As-clad	0.3	20.8 ± 7.4	2.7 ± 0.1	-
Al-welded	1.1 ± 0.1	26.4 ± 9.2	6.5 ± 1.9	141
Fe-welded	1.0 ± 0.3	21.2 ± 1.4	8.1 ± 1.4	200
Al-first	1.4 ± 0.4	48.6 ± 16.6	14.7 ± 1.3	444
Fe-first	1.7 ± 0.2	49.5 ± 4.4	20.6 ± 3.6	663

จากตารางจะเห็นว่าในชิ้นงาน Al-welded และ Fe-welded ซึ่งเป็นการเชื่อมด้านเดียวมีการขยายตัวของ IMC เพิ่มขึ้นร้อยละ 141 และ 200 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับข้อต่อที่ยังไม่มีการเชื่อมทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากข้อต่อทรานซิชันได้รับความร้อนต่างกัน โดยชิ้นงาน Al-welded ใช้เทคนิคการเชื่อมอาร์คโลหะ (MIG) ที่สามารถเชื่อมอย่างรวดเร็วและให้ความร้อนประมาณ 350°C ซึ่งมีอุณหภูมิน้อยกว่าชิ้นงาน Fe-welded ที่เชื่อมด้วยเทคนิคการเชื่อมอาร์คโดยใช้โอเลคโตรดหุ้มฟลักซ์ (SMAW) ที่ต้องใช้เวลาร่วมนานกว่าและได้รับความร้อนประมาณ 700°C อีกทั้ง อะลูมิเนียมสามารถพาความร้อนออกไปได้เร็ว จึงมีการสะสมความร้อนภายในชิ้นงานน้อยกว่า อัตราการแพร่ของอะลูมิเนียมเข้าไปสะสมใน IMC จึงน้อยกว่าชิ้นงาน Fe-welded ผลดังกล่าวสอดคล้องกับในงานวิจัยก่อนหน้านั้น [5-6] ที่พบว่าอัตราการแพร่ของอะตอมธาตุที่เข้าไปสะสมใน IMC จะขึ้นกับอุณหภูมิที่ได้รับ

เมื่อพิจารณาข้อต่อทรานซิชั่นที่มีการเชื่อมทั้ง 2 ด้าน โดยเชื่อมด้านอะลูมิเนียมก่อน (Al-first) และการเชื่อมด้านเหล็กกล้าก่อน (Fe-first) จะเห็นว่าปริมาณ IMC เพิ่มขึ้นคิดเป็นร้อยละ 444 และ 663 ตามลำดับซึ่งการที่ Fe-first มีปริมาณ IMC เพิ่มขึ้นมากกว่าชิ้นงาน Al-first เนื่องจากการเชื่อมเหล็กนั้นต้องใช้ความร้อนในการเชื่อมสูงใช้เวลานานในการเย็นตัว จึงทำให้เกิดการสะสมความร้อนในข้อต่อทรานซิชั่นความร้อนดังกล่าวจะไปกระตุ้นให้อะตอมของธาตุอะลูมิเนียมในชิ้น AA1050 ซึ่งมีการนำความร้อน (Thermal Conductivity) สูงกว่าเหล็กกล้า [7-8] และมีการแพร่ (Diffusion) ดีกว่าอะตอมของธาตุเหล็ก สามารถแพร่เข้ามารวมตัวกับเหล็กใน เกิดเป็น IMC ที่มีปริมาณหรือขยายตัวเพิ่มขึ้น จากนั้นความร้อนจะถูกส่งผ่านไปยังด้านอะลูมิเนียม และเย็นตัวในที่สุดเมื่อทำการเชื่อมด้านอะลูมิเนียมในเวลาต่อมา ความร้อนจากการเชื่อมจะส่งผลให้ IMC มีการขยายตัวเช่นกัน แต่การส่งผ่านความร้อนจากอะลูมิเนียมไปยังด้านเหล็ก จะเกิดขึ้นช้า เพราะเหล็กมีการนำความร้อนน้อยกว่าอะลูมิเนียม หรือ เป็น Thermal Barrier ดังนั้นความร้อนจึงยังสะสมอยู่ภายใน โดยเฉพาะบริเวณ Al/Fe interface ทำให้เกิด IMC มากขึ้นหรือมีการขยายตัวเพิ่มมากขึ้น โดยเมื่อวิเคราะห์ห้องค์ประกอบทางเคมีของ IMC เหล่านี้พบว่ายังคงเป็น IMC ชนิด Al_5Fe_2 และ Al_3Fe เหมือนกับที่พบในข้อต่อทรานซิชั่นที่ยังไม่ผ่านการเชื่อม ซึ่งการเปลี่ยนแปลงโดยการขยายตัวของ IMC บริเวณ Al/Fe interface นี้อาจส่งผลกระทบต่อสมบัติด้านการกักความร้อนของข้อต่อทรานซิชั่นซึ่งจะได้กล่าวถึงในหัวข้อต่อไป

3 การกักความร้อนของข้อต่อทรานซิชั่นเมื่อทดสอบด้วยวิธีการแช่ในสารละลาย NaCl

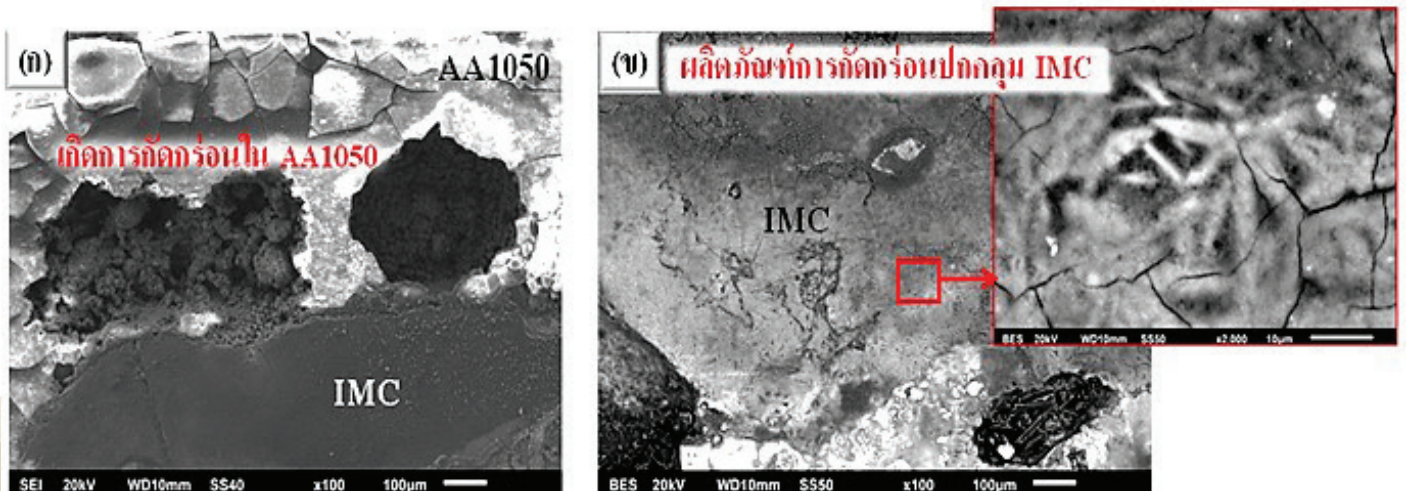
ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาการกักความร้อนของข้อต่อทรานซิชั่นที่ยังไม่ผ่านการเชื่อมและที่มีการเชื่อมแบบต่างๆ ด้วยวิธีการแช่ (Immersion) ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 0.1 โมลาร์ ซึ่งผลการทดลองในรูปที่ 7 พบว่าหลังทดสอบชิ้นงานเป็นเวลา 30 นาที พบว่าบริเวณ Al/Fe Interface เกิดการกักความร้อนขึ้น ทั้งในบริเวณที่มีและไม่มี IMC หากพิจารณาในบริเวณที่มี IMC พบการกักความร้อนเริ่มขึ้นที่ขอบของ IMC (เส้นสีดำ) เป็นที่แรก เนื่องจากบริเวณดังกล่าวเป็นบริเวณรอยต่อระหว่าง IMC กับเมทริกซ์โลหะที่อยู่ล้อมรอบและเมื่อทดสอบเป็นเวลา 1 ชั่วโมง จะเห็นการกักความร้อนเกิดขึ้นที่ IMC และเมื่อทดสอบเป็นเวลานานขึ้น จะเห็นการกักความร้อนในทุกบริเวณมากขึ้น ตามลำดับ



รูปที่ 7 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงของข้อต่อทรานซิชั่นที่ผ่านการเชื่อมทั้ง 2 ด้าน หลังทดสอบในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ เป็นเวลา 30 นาที 1 และ 24 ชั่วโมง



เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคลอไรด์เป็น 5 โมลาร์และทดสอบชิ้นงานนานขึ้นเป็น 130 วัน จะพบการกัดกร่อนเกิดมากขึ้น โดยพบการกัดกร่อนในชั้นของ AA1050 ในลักษณะการเสี้ยวโลหะเป็นหลุม (รูปที่ 8 (ก)) ในขณะที่ IMC มีผลิตภัณฑ์การกัดกร่อนปกคลุมอยู่ (รูปที่ 8 (ข)) ซึ่งอาจเกิดการกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอภายใน IMC

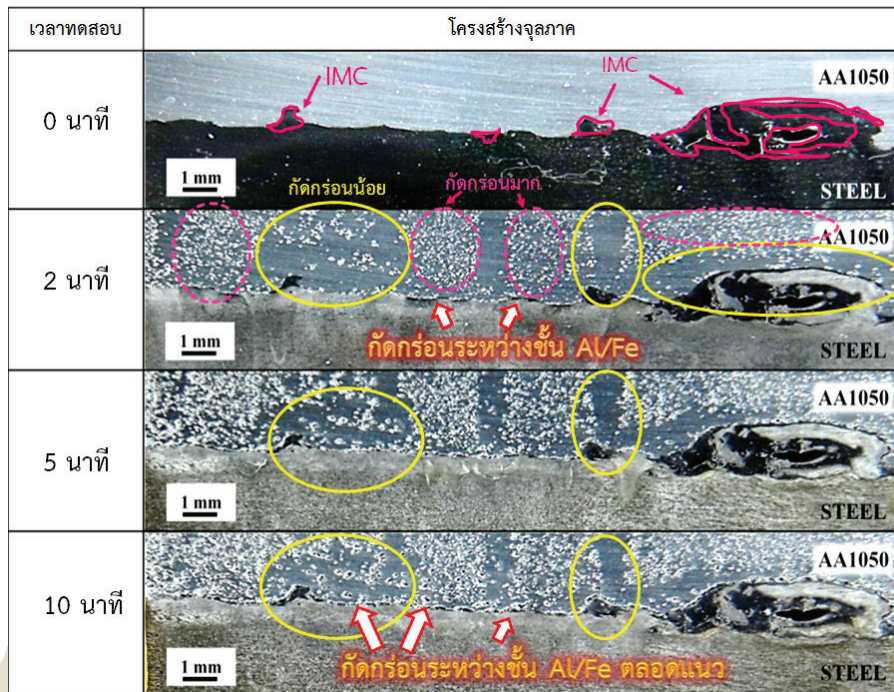


รูปที่ 8 (ก) การกัดกร่อนในชั้นของ AA1050 ในบริเวณที่ติดกับ IMC และ (ข) ผลิตภัณฑ์การกัดกร่อนที่ปกคลุมอยู่บน IMC ของข้อต่อทรานซิชันที่ผ่านการเชื่อมทั้ง 2 ด้าน หลังแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 5 โมลาร์เป็นเวลา 130 วัน

เพื่อเป็นการตรวจสอบว่า IMC มีผลต่อการกัดกร่อนของข้อต่อทรานซิชันอย่างไร จึงมีการศึกษาการกัดกร่อนด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีดังรายละเอียดในหัวข้อต่อไป

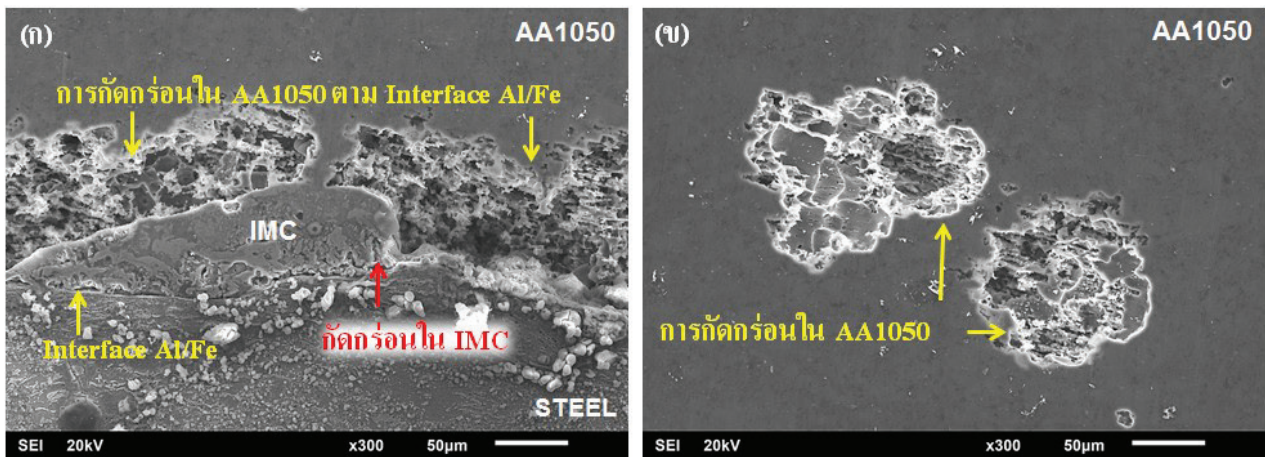
4 การศึกษาการกัดกร่อนบริเวณ Al/FeInterface ด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี

สำหรับในงานวิจัยนี้ได้ทำการเร่งการกัดกร่อนของ TJ ในบริเวณ Al/Fe Interface ด้วยเทคนิค Potentiostatic โดยการจ่ายศักย์ไฟฟ้าคงที่ที่ 0.5 โวลต์ ในสารละลาย 3.5%NaCl เพื่อศึกษาบริเวณเริ่มต้นของการเกิดการกัดกร่อนในชั้น AA1050 ผลการทดลองพบการกัดกร่อนแบบหลุมหรือ Pitting corrosion เกิดขึ้นทั่วไปในชั้น AA1050 โดยการกัดกร่อนที่พบในชั้นของ AA1050 นี้จะเกิดขึ้นน้อย ในบริเวณใกล้เคียงกับ IMC (วงสี่เหลี่ยม) ในขณะที่บริเวณอื่นซึ่งไม่มี MC (วงเส้นประสีชมพู) พบการกัดกร่อนเกิดขึ้นมาก



รูปที่ 9 ภาพถ่ายของรอยต่อทรานซิชันที่ผ่านการเชื่อมทั้ง 2 ด้าน เมื่อมีการจ่ายศักย์ไฟฟ้าคงที่ที่ 0.5 โวลต์ ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 เป็นเวลาต่างๆ

หลังทดสอบผู้วิจัยได้นำชิ้นงานไปตรวจสอบด้วย SEM พบการกัดกร่อนในชั้นของ AA1050 และโดยรอบ IMC ในขณะที่ IMC พบการกัดกร่อนเพียงเล็กน้อย



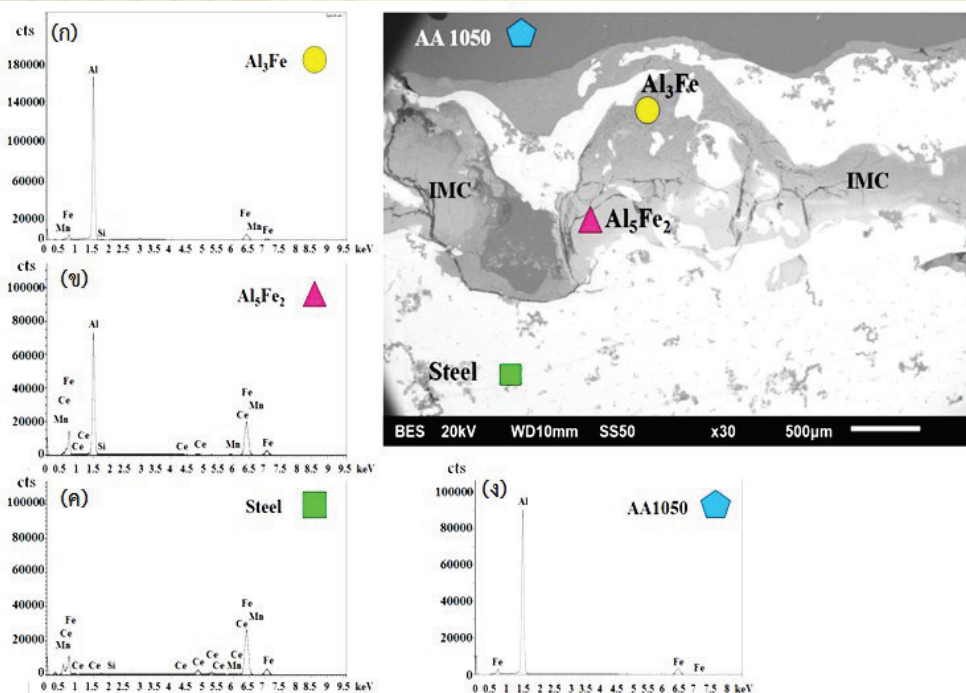
รูปที่ 10 การกัดกร่อน (ก) บริเวณรอยต่อที่มี IMC และ (ข) ภายในชั้น AA1050 ของข้อต่อทรานซิชันที่ผ่านการเชื่อมทั้ง 2 ด้าน หลังจ่ายศักย์ไฟฟ้า 1 มิลลิโวลต์ ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 1 เป็นเวลา 3 นาที



จากผลการทดลองพบการกัดกร่อนแบบหลุมในชั้นของ AA1050 ซึ่งการกัดกร่อนนี้เกิดขึ้นจากไอออนคลอไรด์จากสิ่งแวดล้อมการกัดกร่อน(ในที่นี้คือสารละลาย)ทำลายฟิล์มป้องกัน (Passive film) บนผิว AA1050 จึงทำให้เกิดการกัดกร่อนขึ้น ในขณะที่การกัดกร่อนที่เกิดขึ้นบริเวณรอยต่อระหว่าง AA1050 กับ เหล็ก โดยเฉพาะบริเวณที่ไม่มี IMC เป็นบริเวณที่มีความแตกต่างทางศักย์ไฟฟ้าเคมีระหว่างเหล็กและอะลูมิเนียมมาก จึงเป็นแรงผลักดัน(Driving force) ให้เกิดการกัดกร่อนขึ้น ในขณะที่บริเวณที่มี IMC ผลของกัลวานิก (Galvanic effect) อาจมีน้อยกว่าจึงทำให้เกิดการกัดกร่อนช้ากว่า ส่วน IMC นั้นพบเพียงผลิตภัณฑ์การกัดกร่อนปกคลุมซึ่งคาดว่า IMC เกิดการกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอ ส่วนเหล็กยังไม่พบการสูญเสียเนื้อโลหะอย่างชัดเจน เพื่อความเข้าใจมากขึ้นผู้วิจัยจึงตรวจสอบความเป็นแคโทด-แอโนดของข้อต่อทรานซิชันในบริเวณที่ประกอบด้วย AA1050 IMC และเหล็กในหัวข้อต่อไป

5 การตรวจสอบความเป็นแคโทดและแอโนดด้วยวิธี Cerium Decoration

ในการศึกษาทำการตรวจสอบความเป็นแอโนด-แคโทดของ AA1050-IMC-Steel ของข้อต่อทรานซิชันในบริเวณ Al/Fe Interface ด้วยวิธี Cerium Decoration ซึ่งผลการทดสอบในรูปที่ 11 จะเห็นว่าบริเวณชั้นเหล็กมีสีขาว (รูปที่ 11(ค)) เนื่องจากการ Deposit ของซีเรียมในบริเวณดังกล่าวซึ่งแสดงว่าในบริเวณนั้นเป็นแคโทด (เกิดการกัดกร่อนยาก) เมื่อเปรียบเทียบกับ IMC ในบริเวณใกล้เคียงกัน สำหรับความเป็นแคโทด-แอโนดของ IMC ชนิดต่าง ๆ นั้น เมื่อตรวจสอบ IMC ชนิด Al_5Fe_2 ด้วย EDS จะพบสัญญาณของซีเรียม (รูปที่ 11(ข))



รูปที่ 11 องค์ประกอบทางเคมีที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ในบริเวณ IMC และบริเวณใกล้เคียงของข้อต่อทรานซิชันที่ผ่านการเชื่อมหลังแช่ในสารละลายผสมระหว่างโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์และสารประกอบซีเรียม เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

ในขณะที่ IMC ชนิด Al_3Fe ไม่พบสัญญาณของซีเรียม (รูปที่ 11(ก)) จึงเป็นไปได้ว่า IMC ชนิด Al_3Fe มีความเป็นแอโนดมากกว่า Al_5Fe_2 ทำให้ Al_3Fe สามารถเกิดการกัดกร่อนได้ง่ายกว่า Al_5Fe_2 สำหรับชั้น AA1050 นั้นไม่พบการเกาะของซีเรียมเลย (รูปที่ 11(ง)) ดังนั้นจากผลของ Cerium Decoration จึงเรียงลำดับความเป็นแอโนดหรือความไวต่อการเกิดการกัดกร่อน ได้เป็น $AA1050 > Al_3Fe > Al_5Fe_2 >$ เหล็กกล้า ซึ่งสอดคล้องกับค่าศักย์ไฟฟ้าเคมีตามมาตรฐาน ASTM G69 [9] ของโลหะดังกล่าว ที่มีค่าศักย์ไฟฟ้าเคมีมาตรฐานของเหล็กกล้า IMC (ชนิด Al_3Fe) และ AA1050 เท่ากับ -0.49 - 0.56 และ - 0.73 โวลต์ ตามลำดับ โดยจะเห็นว่าเหล็กกล้ามีค่าศักย์ไฟฟ้าเคมีมาตรฐานสูงสุด จึงมีความเป็นแคโทดมากที่สุด และจากผลการทดลองก่อนหน้านี้ที่พบว่าการกัดกร่อนบริเวณ Al/Fe Interface ที่ไม่มี IMC เกิดขึ้นก่อนบริเวณที่มี IMC สามารถอธิบายได้ว่า

กรณีที่ไม่มี IMC ชั้นของเหล็กกล้าและ AA1050 อยู่ติดกันจึงมีความแตกต่างของศักย์ไฟฟ้าเคมีเท่ากับ +0.24 โวลต์ สำหรับกรณีที่มี IMC (Al_3Fe) อยู่ระหว่างชั้นของเหล็กกล้าและ AA1050 ความต่างศักย์ไฟฟ้าเคมีระหว่าง IMC ชนิด Al_3Fe (-0.56 V) กับชั้น AA1050 (-0.73 V) มีค่าเท่ากับ +0.17 โวลต์ ด้วยผลความต่างศักย์ทางไฟฟ้าเคมีของ AA1050 และ เหล็กกล้า ที่มีมากกว่าความต่างศักย์ทางไฟฟ้าเคมีระหว่าง AA1050 และ IMC จึงเป็นแรงผลักดัน (Driving force) ทำให้ AA1050 ที่อยู่ติดกับเหล็กเกิดการกัดกร่อนได้ง่ายกว่าที่อยู่ติดกับ IMC โดยลักษณะเช่นนี้จะเกิดขึ้นกับกรณีที่มี IMC เป็นชนิด Al_5Fe_2 ด้วยเพราะ IMC จะมีค่าศักย์ไฟฟ้าเคมีอยู่ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้าเคมีของธาตุเหล็กและอะลูมิเนียมที่เป็นส่วนประกอบ ดังนั้น IMC จึงสามารถหน่วงการกัดกร่อนได้เนื่องจากทำหน้าที่ลดผลของกัลวานิกระหว่างเหล็กและอะลูมิเนียม อย่างไรก็ตาม เมื่อเกิดการกัดกร่อนขึ้นแล้ว การกัดกร่อนจะมีการขยายตัวไปตามรอยต่อระหว่าง Al/Fe ในขณะที่ผิวชั้นของ AA1050 ก็ยังคงเกิดการกัดกร่อนอย่างต่อเนื่องเมื่อเชื่อมต่อทรานซิสชันใช้งานในสิ่งแวดล้อมที่ทำให้เกิดการกัดกร่อน ด้วยเหตุผลดังกล่าว จึงทำให้ความเสียหายที่เกิดขึ้นเป็นความเสียหายในชั้น AA1050 เป็นหลักดังในรูปที่ 2

สรุปผลการทดลอง

1. เมื่อมีการเชื่อมต่อทรานซิสชันเข้ากับลำเรือและส่วนบนของเรือ จะทำให้มีการขยายตัวของสารประกอบกึ่งโลหะเพิ่มมากขึ้น ซึ่งไม่ส่งผลต่อการกัดกร่อนมากนัก
2. การกัดกร่อนของข้อต่อทรานซิสชันเกิดขึ้นที่ชั้น AA1050 มีการกัดกร่อน 2 รูปแบบได้แก่ (1) การกัดกร่อนแบบหลุม (Pitting corrosion) และ (2) การกัดกร่อนแบบกัลวานิกบริเวณรอยต่อระหว่างชั้น AA1050 และชั้นเหล็ก เนื่องจากความแตกต่างระหว่างศักย์ไฟฟ้าเคมีของชั้นโลหะทั้งสองชนิด โดยหากบริเวณนั้นมีเฟสกึ่งโลหะอยู่ จะทำให้ผลของกัลวานิกลดลง เนื่องจาก IMC มีค่าศักย์ไฟฟ้าเคมีอยู่ระหว่าง AA1050 และเหล็กกล้า จึงทำให้การกัดกร่อนของชั้น AA1050 ในบริเวณที่มี IMC เกิดขึ้นช้ากว่าบริเวณที่ไม่มี IMC อย่างไรก็ตามการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นในชั้น AA1050 สามารถเกิดได้ต่อเนื่องหากอยู่ในสิ่งแวดล้อมที่ทำให้เกิดการกัดกร่อน

ข้อเสนอแนะ

ข้อต่อทรานซิสชันเป็นตัวกลางที่ใช้ในการต่อลำเรือเข้ากับส่วนบนของตัวเรือ ซึ่งมีการใช้งานในบรรยากาศดังนั้นสิ่งแวดล้อมที่ทำให้เกิดการกัดกร่อน (Corrosive environment) ของข้อต่อทรานซิสชันคือ บรรยากาศน้ำทะเลดังนั้นเพื่อป้องกันข้อต่อทรานซิสชันจากสิ่งแวดล้อมที่ทำให้เกิดการกัดกร่อนจึงควรเคลือบสี และซ่อมบำรุงไม่ให้สีที่เคลือบไว้นั้นหลุดลอก ซึ่งจะสามารถป้องกันการกัดกร่อนที่จะเกิดขึ้นกับข้อต่อทรานซิสชันได้



เอกสารอ้างอิง

1. [Online]Ship, Available:<https://en.wikipedia.org/wiki/Ship> [cited on : 10 November 2016]
2. [Online]Triclad, Available: <http://www.triclad.com> [cited on : 10 November 2016]
3. Tricarico, L. and Spina, R., 2010, "Experimental Investigation of Laser Beam Welding of Explosion-Welded Steel/Aluminum Structural Transition Joints", *Materials & Design*, Vol. 31, No. 4, pp. 1981-1992
4. Tricarico, L., Spina, R., Sorgente, D., and Brandizzi, M., 2009, "Effects of Heat Treatments on Mechanical Properties of Fe/Al Explosion-Welded Structural Transition Joints", *Materials & Design*, Vol. 30, No. 7, pp. 2693-2700
5. Bina, M.H., Dehghani, F. and Salimi, M., 2013, "Effect of Heat Treatment on Bonding Interface in Explosive Welded Copper/Stainless Steel", *Materials and Design*, Vol. 45, pp. 504-509.
6. Bataev, I.A., Bataev, A.A., Mali, V.I. and Pavliukova, D.V., 2012, "Structural and Mechanical Properties of Metallic-intermetallic Laminate Composites Produced by Explosive Welding and Annealing", *Materials and Design*, Vol. 35, pp. 225-234.
7. Callister, W.D. and Rethwisch, D.G., 2012, *Fundamentals of Materials Science and Engineering: An Integrated Approach 4th ed.*, Wiley, USA, pp. 875-879.
8. Gale, W.F. and Totemeier, T.C., 2004, *Smithells Metals Reference Book 8th ed.*, Elsevier's Science & Technology, UK, pp.1072-1085.
9. Vargel, C., 2004, *Corrosion of Aluminium*, Elsevier, USA, pp.81-230.

การทดสอบ และทดลองยานใต้น้ำ

คณะวิจัย กองเรือดำน้ำ กองเรือยุทธการ และอุราชนาวิมิตตลอดอุยเดช กรมอุทหารเรือ

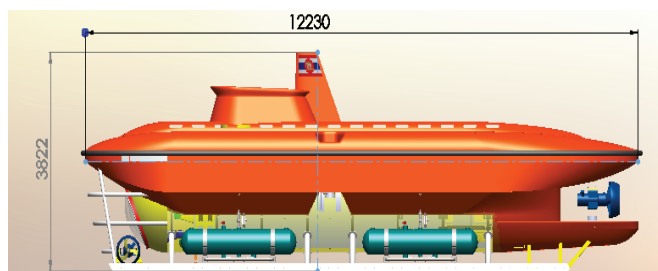
โครงการวิจัยยานใต้น้ำนี้ได้รับอนุมัติและได้รับงบประมาณสนับสนุนเป็นจำนวนทั้งสิ้น 30 ล้านบาท จากสำนักวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีกลาโหม หรือ สวท.กท. (ในปัจจุบันเปลี่ยนเป็น วท.กท.) จำนวน 25 ล้านบาท และจากสำนักพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ หรือ สวทช. จำนวน 5 ล้านบาท โดยสำนักงานวิจัยและพัฒนาการทางทหารกองทัพเรือ (สวท.ทร) กองทัพเรือ เป็นเจ้าของโครงการ พลเรือตรี พงศ์สรร ฤวิลประวัตติ (ยศขณะนั้น) เป็นนายทหารโครงการ และ พลเรือตรี มนต์ชัย กาทอง เป็นนายทหารโครงการคนปัจจุบัน

โดยมีระยะเวลาวิจัยตั้งแต่ปีงบประมาณ 2549 – 2555 ปัจจุบัน สวท.ทร.ได้ส่งมอบยานใต้น้ำให้กับ กองเรือดำน้ำ (กตน.) ตั้งแต่ 1 ต.ค. 2558 กตน. ได้งบประมาณในการบำรุงรักษาและฝึกการใช้งานยานใต้น้ำ

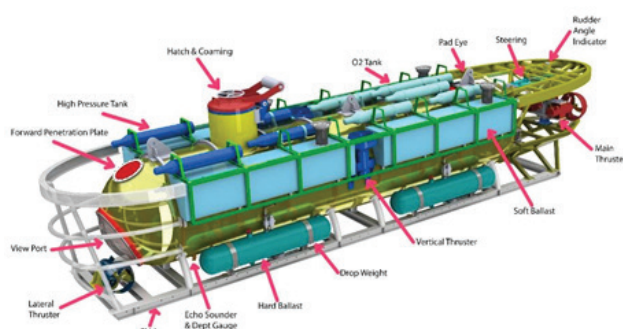


จากผลการวิจัยจะทำให้กองทัพเรือได้รับยานใต้น้ำที่ใช้สำหรับการฝึกให้กำลังพลมีความคุ้นเคยกับการปฏิบัติงานใต้น้ำ และ องค์ความรู้ใน ด้านที่เกี่ยวข้อง ที่สามารถนำไปสู่การสร้างเรือดำน้ำและยานใต้น้ำ ที่ใช้งานทั้งในด้านการทหารและงานทางพลเรือน ในประเทศไทย การขับและการทดสอบยานใต้น้ำดำเนินการโดยนักวิจัยของกองทัพเรือ ซึ่งกระบวนการทดสอบจัดทำตามมาตรฐาน ABS Underwater Vehicle วัตถุประสงค์ในการทดสอบเพื่อตรวจสอบการทำงานของอุปกรณ์ต่างๆ สามารถทำงานในขณะที่อยู่ใต้น้ำได้อย่างปกติ การฝึกอยู่ในระบบปิดใต้น้ำ ที่สามารถดำรงชีวิตได้อย่างปลอดภัย มีระบบจ่ายออกซิเจน ระบบกำจัด คาร์บอนไดออกไซด์และรักษาความดันภายในยานให้เท่ากับความดันบรรยากาศ รวมถึงการเดินเรือและสื่อสารใต้น้ำ

การทดสอบและทดลองครั้งนี้ได้ดำเนินการร่วมกันระหว่าง นักวิจัย กองเรือดำน้ำ อุราชนาวิมิตตลอดอุยเดช และหน่วยเรือต่าง ๆ ที่สนับสนุน เครื่องมือและเจ้าหน้าที่ในการทดสอบ



รูปที่ 1 แสดงขนาดยานใต้น้ำ



รูปที่ 2 แสดงอุปกรณ์ยานใต้น้ำ

1. คุณสมบัติขยานใต้น้ำ

1.1 คุณสมบัติทั่วไป ผนังรับแรงดันทำจากวัสดุ Lloyd Grade A ทหนา 15 มม. สามารถปฏิบัติการใต้น้ำได้ 50 เมตร มีผู้ปฏิบัติงาน 3-5 นาย ระบายขับน้ำ 27 ตัน สามารถเคลื่อนที่ใต้น้ำได้ 5 นอต ขับเคลื่อนโดยใช้ Thruster ขนาด 5 และ 11.5 Kw ระยะเวลาในการปฏิบัติงาน 5 ชม. มีน้ำหนักบรรทุกทุก 1300 กก. (รวมผู้ปฏิบัติงาน)

1.2 ต้นกำลังขับเคลื่อน Power Source ใช้แบตเตอรี่ ตะกั่วกรด ระบบหลัก ขนาด 480 VDC- 150 Ah แบตเตอรี่ควบคุมหลัก ขนาด 25 VDC- 200 Ah และแบตเตอรี่ฉุกเฉิน ขนาด 24 VDC- 200 Ah

1.3 ระบบถังอับเฉา จำนวน 4 ถัง 330 ลิตร ต่อถัง

1.4 ระบบอากาศกำลังดันสูง ประกอบด้วย ถังจ่ายอากาศกำลังดันสูงหลัก 150 Liters@150bar ถังอากาศอัดกำลังดันสูงสำรอง 50 Liters@150bar

1.5 ระบบดำรงชีวิต ประกอบด้วย ถังจ่ายออกซิเจนหลัก 100 Liters@150bar, ถังจ่ายออกซิเจนสำรอง 300 Liters@150bar ระบบดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ CO₂ Absorbent System 0.125 cu.m ระบบดำรงชีวิตฉุกเฉิน Emergency Life Support Minimum 72 Hrs./Persons ในห้องผู้ปฏิบัติงานมีระบบแสดงผลสภาวะอากาศในห้องผู้โดยสาร O₂, CO₂, Temp., Humidity, H₂ และเครื่องวัดความดันบรรยากาศ

1.6 ระบบไฟฟ้า สื่อสารและเดินเรือ ประกอบด้วย วิทยุสื่อสาร VHF เครื่องหยั่งน้ำ เข็มทิศแม่เหล็ก เครื่องวัดมุมเอียงของยาน 1 ชุด เครื่องโทรศัพทใต้น้ำ ไฟแสงสว่างภายในไฟแสงสว่างภายนอก

1.7 ระบบฉุกเฉิน ประกอบด้วย ระบบถังตม้น้ำหนักถ่วงฉุกเฉินขนาด 480 Kg. อุปกรณ์ช่วยชีวิตฉุกเฉิน เสื้อชูชีพ, หน้ากากหายใจ , ชุดประณพพยาบาลเบื้องต้น, ถังดับเพลิง ระบบจ่ายไฟฟ้า ฉุกเฉิน 24 VDC

2. ผู้ปฏิบัติงานขยานใต้น้ำ

จากการถ่ายทอดเทคโนโลยี นำมาสู่การดำเนินฝึกบุคลากร ตามข้อกำหนด ABS Underwater Vehicle ซึ่งได้กำหนดว่าผู้ที่จะทำการขับขานใต้น้ำ ต้องผ่านการดำน้ำแบบ Scuba และมีสุขภาพแข็งแรง สามารถปฏิบัติงานในที่แคบได้ การฝึกบุคลากร และดำเนินการฝึกการใช้งานอุปกรณ์ทุกชนิดที่อยู่ในยานฯ เพื่อให้สามารถใช้งานอุปกรณ์ได้ถูกต้อง นอกจากนี้ทำการฝึกการแก้ไขสภาวะฉุกเฉินใต้น้ำ ได้แก่ อุปกรณ์ต่างๆ ชาร์จไฟใหม่ น้ำรั่วเข้ายานฯ ของไหลกำลังสูงรั่วเข้ายาน เป็นต้น

ในการขับขาน ฯ แต่ละครั้งจะมีผู้ปฏิบัติงานจำนวน 4 นาย ประกอบด้วย

- 2.1 ผู้ควบคุมขาน ทำหน้าที่ ตรวจสอบความพร้อมขานฯ ปฏิบัติตามภารกิจที่ได้รับมอบหมายสั่งการการแก้ไขปัญหากรณีฉุกเฉินต่างๆ
- 2.2 เจ้าหน้าที่ขับขานฯ ทำหน้าที่ ควบคุมระบบถังอับเฉา ควบคุม Thruster ดำเนินการตามผู้ควบคุมขานฯ สั่งการ
- 2.3 เจ้าหน้าที่ควบคุมระบบไฟฟ้า ทำหน้าที่ควบคุมระบบไฟฟ้าแรงสูง ระบบดำรงชีวิต รายงานสภาวะขานฯ ได้แก่ อุณหภูมิ ความดัน ปริมาณแก๊สระเบิด ออกซิเจน และคาร์บอนไดออกไซด์ ให้กับผู้ควบคุมขานฯ
- 2.4 เจ้าหน้าที่สื่อสาร ทำหน้าที่ติดต่อสื่อสาร ข่าย VHF และ Underwater Telephone และเป็นผู้ควบคุมตม้น้ำหนักถ่วงฉุกเฉิน (Drop Weight)



3. การเตรียมการก่อนการทดสอบ

ก่อนทำการทดสอบยานฯ ต้องทำการตรวจสอบระบบและอุปกรณ์ต่างๆ ภายในและภายนอกยานฯ สามารถทำงานได้ปกติ ตารางการตรวจสอบ และเกณฑ์การตรวจสอบสามารถดูได้จากคู่มือการใช้งานยานใต้น้ำขนาดเล็ก โดยในการตรวจสอบก่อนการทำทุกครั้งจะแบ่งการตรวจสอบออกเป็น 2 ช่วง ดังนี้

3.1 การเตรียมการ 2 วันก่อนการดำ จะทำการตรวจสอบระบบอากาศกำลังดันสูง และอากาศอัดกำลังดันสูงสำรอง ระบบออกซิเจนหลักและฉุกเฉิน ตรวจสอบ และชาร์จแบตเตอรี่ 480 VDC . 24 VDC และ 24 VDC จุกเงิน

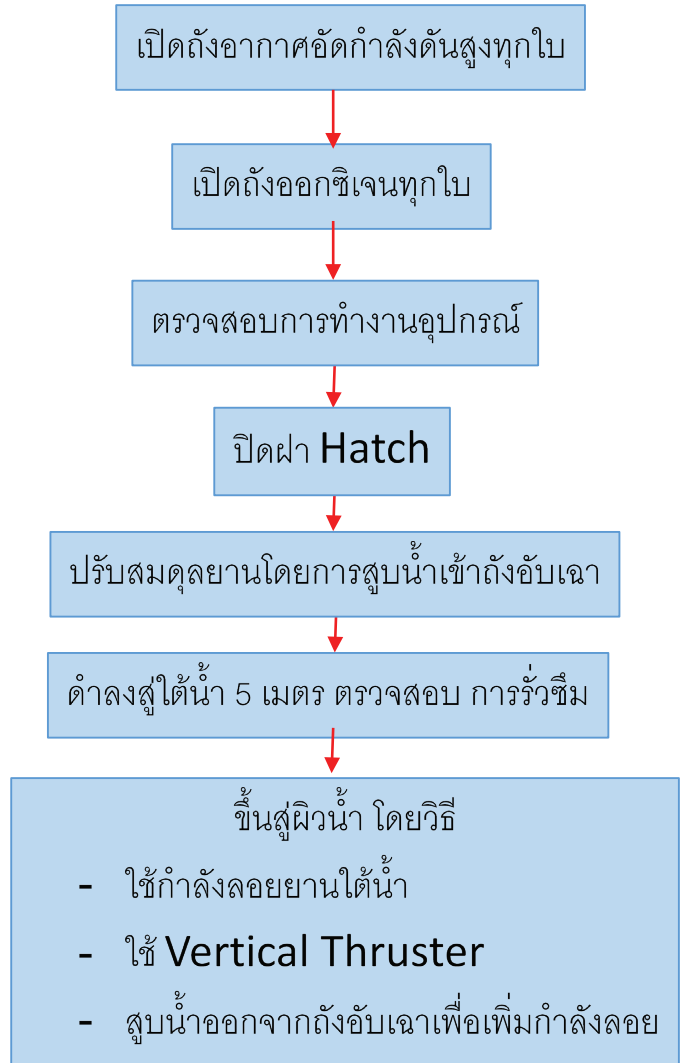
3.2 การเตรียมการ 1 วันก่อนการดำ จะทำการตรวจสอบ ระบบถังอับเฉา ระบบดำรงค์ชีวิต ระบบไฟฟ้าต่างๆ ภายในและภายนอกเรือ ระบบเดินเรือ และสื่อสาร ระบบจุกเงิน และระบบ Thruster ทำการบรรจวนสาร อุปกรณ์การทดสอบ ให้กับผู้ที่เกี่ยวข้องได้ถึงการปฏิบัติในการทดสอบ และการแก้ไขปัญหา หากเกิดกรณีฉุกเฉินต่างๆ

3.3 วันทดสอบดำ ทำการเปลี่ยนสารกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ (Soda lime) ตรวจสอบอุปกรณ์ตามข้อ 1 และ 2 ทุกหัวข้ออีกครั้ง โดย ผู้ควบคุมจะมีรายการตรวจสอบ (Check list) อุปกรณ์ที่ต้องตรวจสอบ ก่อนทดสอบดำ

4. การขั้ยานใต้น้ำ

การขั้ยานใต้น้ำ เริ่มจากการปรับสมดุลขั้ยานใต้น้ำ โดยการสูบน้ำเข้า ถังอับเฉา (Ballast Tank) ให้กำลังลอยเหลือประมาณ 1 – 5 เปอร์เซ็นต์ การสูบน้ำเข้าถังอับเฉา จะทำเป็นคู่ แบบทะแยงถ้าสูบน้ำเข้าถัง หน้าซ้าย ต้องทำการสูบน้ำเข้าถังหลังขวา ทำนองเดียวกันถ้าสูบน้ำเข้าถังหน้าขวา ก็ต้องสูบน้ำเข้าถังหลังซ้าย ตามรูปที่ 3-5

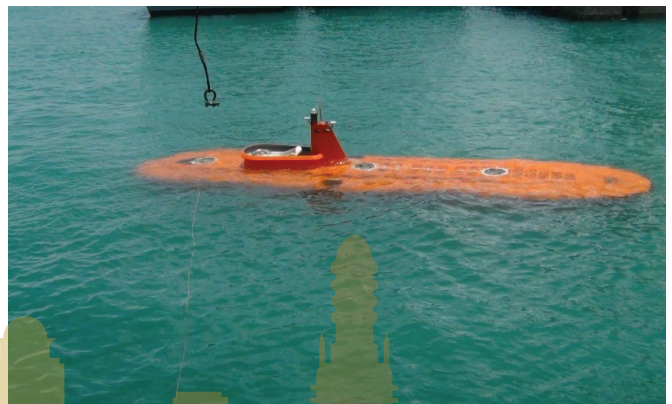
- การควบคุมทิศทางยานมีหลักการดังนี้ (ตามรูปที่ 6)
- การเคลื่อนที่ไปข้างหน้าและถอยหลัง ใช้ Main Thruster
- การเคลื่อนที่ขึ้นลงแนวตั้ง ใช้ Vertical Thruster
- การเลี้ยวซ้าย-ขวา เมื่อยานหยุดนิ่ง หรือ เลี้ยวแบบกระทันหัน ใช้ Lateral Thruster
- การเลี้ยวซ้าย-ขวา ในหว่างเดินทางจะใช้ Steering



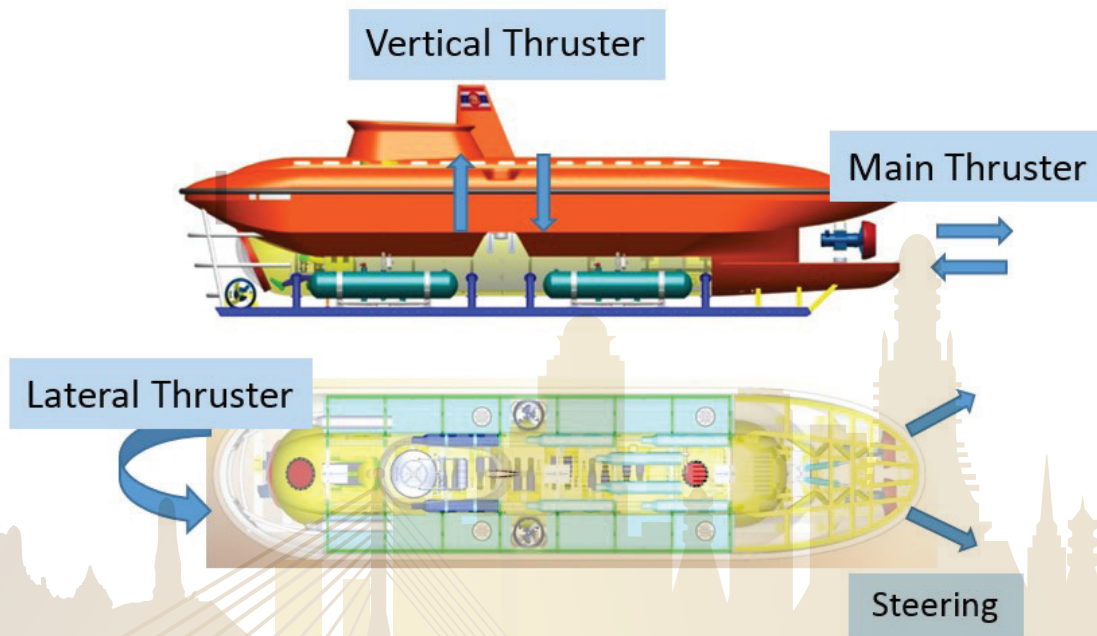
รูปที่ 3 แสดงขั้นตอนการดำ



รูปที่ 4 แสดงระดับน้ำก่อนสูบน้ำเข้าถังอับเฉา



รูปที่ 5 แสดงสถานะขั้ยานหลังจากสูบน้ำเข้าถังอับเฉา



รูปที่ 6 แสดงการทิศทางการเคลื่อนที่เมื่อควบคุม Thruster

5. การทดสอบการทำงานของยานใต้น้ำขณะอยู่บนน้ำท่า (Harbor Acceptance Test) และในทะเล (Sea Trial)

5.1 การเตรียมการก่อนการทดสอบการทำงานของยานใต้น้ำขนาดเล็ก

การทดสอบยานใต้น้ำได้ดำเนินการทั้งการทดลองขณะที่ยานยังอยู่ในโรงงาน และยานต้องอยู่ในน้ำ โดยเมื่อทำการทดลองขณะที่ยานอยู่ในน้ำจะต้องเตรียมอุปกรณ์และเครื่องมือ ตลอดจนเจ้าหน้าที่พิเศษต่าง ๆ เพื่อสนับสนุนการทดลองดังนี้

- เจ้าหน้าที่ประดาน้ำ 3 นาย ด้วยอุปกรณ์สำหรับดำน้ำจำนวน 3 ชุด (อย่างน้อย หากมีการทดสอบที่สำคัญจะต้องใช้มากกว่า 3 นาย)
- เครื่องประจําอู่เรือ ขนาด 75 ตัน
- เจ้าหน้าที่พยาบาลพร้อมรถฉุกเฉินที่มีความรู้ทางด้านเวชศาสตร์ใต้น้ำ (Underwater Medicine)
- รถหัวลากใช้ย้ายยานไปยังบริเวณที่จะปล่อยยาน
- เจ้าหน้าที่เชือกเรือและการอู่ 6 นาย
- เรือลากจูง จำนวน 1 ลำ
- ลูกเรือ 4 นาย
- เจ้าหน้าที่ติดต่อสื่อสาร ระหว่างบกกับยานใต้น้ำ 2 นาย
- สารกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ (Sodalime) 1 ถัง

5.2 การทดสอบดําลงใต้น้ำโดยใช้ระบบลอย - จม

การทดสอบดําลงใต้น้ำมีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบการทำงานของระบบลอย - จมว่าจะสามารถทำงานได้ตามที่ออกแบบ/คำนวณไว้หรือไม่ โดยคณะนักวิจัย ๆ ได้ออกแบบให้ยานใต้น้ำสามารถเติมน้ำเข้าสู่ถังอับเฉาหลักได้ภายในเวลาไม่เกิน 20 นาที การทดสอบดำเนินการโดย

- นำยานใต้น้ำลงน้ำโดยยังไม่เติมน้ำในถังอับเฉาหลัก
- เริ่มเติมน้ำเข้าถังอับเฉาหลักพร้อมทั้งจับเวลาจนน้ำเต็มถัง
- ตรวจสอบปริมาณน้ำในถังอับเฉาหลักแต่ละถัง

ตารางที่ 1 การจับเวลาการปล่อยน้ำเข้า

เวลา	การดำเนินการ	ปริมาณน้ำในถังอับเฉาหลัก (ลิตร)			
		ขวาหน้า	ขวาหลัง	ซ้ายหน้า	ซ้ายหลัง
1025	เริ่มการทดลอง	0	0	0	0
1045	เลิกการทดลอง	200	200	200	200

จากการทดลองพบว่ายานใต้น้ำ ๆ สามารถเติมน้ำเข้าสู่ถังอับเฉาหลักได้เต็มทั้ง 4 ถัง ภายในเวลา 20 นาที



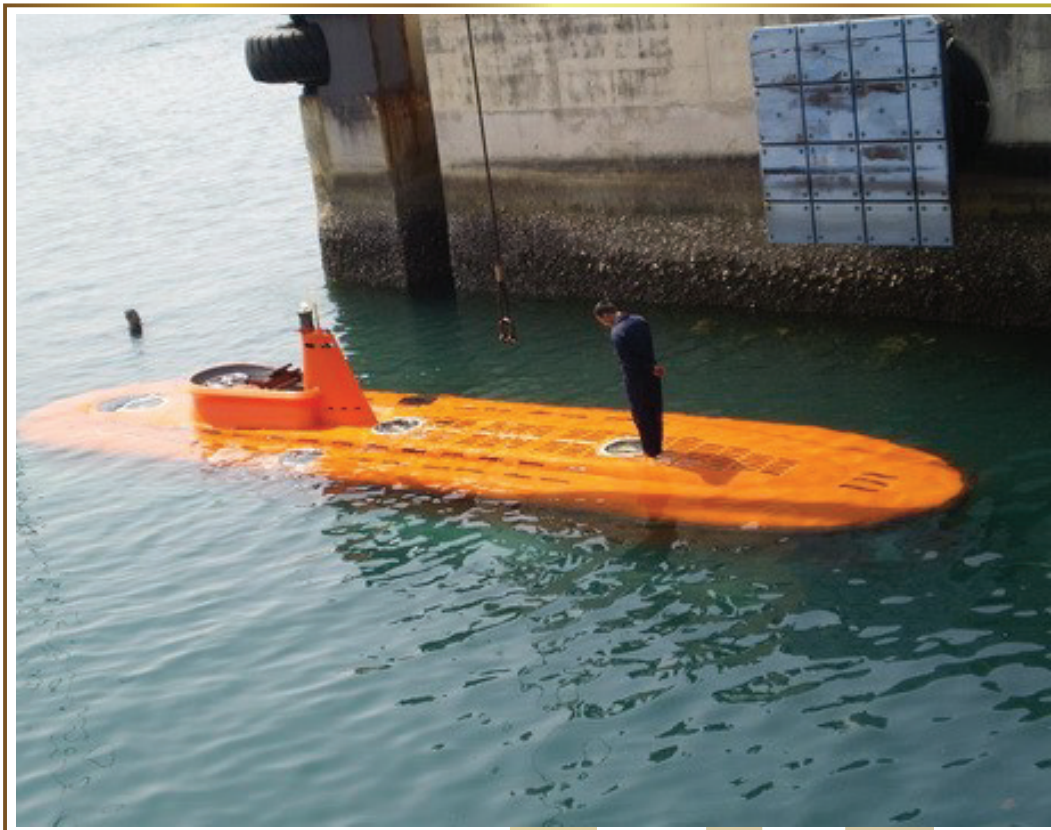
5.3 การทดลองดำลงใต้น้ำ และลอยขึ้นสู่ผิวน้ำ โดยใช้ Vertical Thruster

การทดลองมีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบการทำงานของ Thruster เพื่อป้องกันการจม/ลอยของยานใต้น้ำว่าจะสามารถทำงานได้ตามที่ออกแบบ/คำนวณไว้หรือไม่

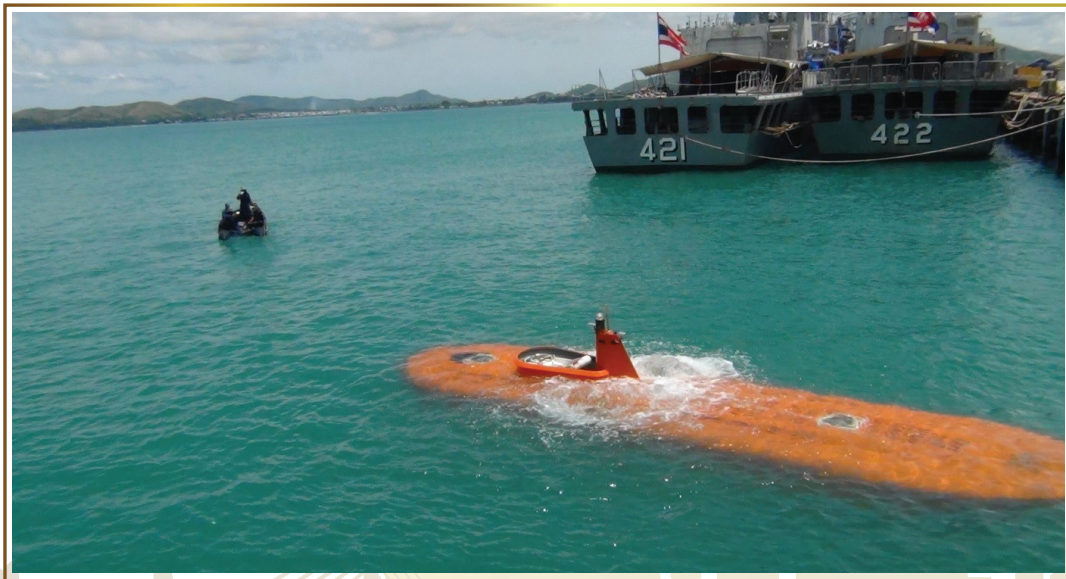
ตารางที่ 2 การทดสอบการดำน้ำ และลอยขึ้นสู่ผิวน้ำ โดยใช้ Vertical Thruster

เวลา	การดำเนินการ	Vertical Thruster	ความลึกของการดำ (m.)
1150	เริ่มการทดลอง	Off	0.0
1153	เดิน Thruster ผลักยานลงใต้น้ำ	On	7.4
1155	หยุด Thruster	Off	10.0
1156	เดิน Thruster ยกยานขึ้นจากใต้น้ำ	On	10.0
1200	ยานลอยตัวขึ้น	On	6.5
1210	ยานขึ้นสู่ผิวน้ำ	Off	0.0

จากการทดลองพบว่าเมื่อเดิน Thruster ผลักยานลงใต้น้ำ ยานใต้น้ำจะสามารถดำได้ลึก 10 เมตร ในเวลาประมาณ 5 นาที และเมื่อเดิน Thruster ผลักยานใต้น้ำ ๑ ให้ขึ้นสู่ผิวน้ำในระยะทางเท่า ๆ กันจะใช้เวลาประมาณ 15 นาที หรือกล่าวได้ว่ายานใต้น้ำจะใช้เวลาในการลอยขึ้นสู่ผิวน้ำเป็น 3 เท่าของเวลาที่ใช้ในการดำลงใต้น้ำที่ระยะทางเท่ากัน



รูปที่ 7 การทดสอบระบบลอย - จม



รูปที่ 8 การทดสอบดำน้ำและลอยขึ้นสู่ผิวน้ำด้วย Vertical Thruster

5.4 การทดสอบระบบลอยตัวฉุกเฉินด้วยการทิ้งตุ้มน้ำหนัก (Emergency Drop – Weight)

การทดสอบระบบลอยตัวฉุกเฉินมีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจสอบการทำงานของระบบตุ้มน้ำหนัก โดยการออกแบบยานใต้น้ำนั้น คณะนักวิจัย ๓ ออกแบบให้ยานใต้น้ำมีแรงลอยตัวเป็นบวก (Positive Buoyancy) ในการดำลงใต้น้ำอาศัยการเพิ่มน้ำเข้าไปใน Ballast Tank แล้วเดิน Thruster ให้กดยานลงใต้น้ำ ในกรณีที่เกิดความเสียหายขณะที่ยานอยู่ใต้น้ำนั้น คณะนักวิจัย ๓ ได้ออกแบบระบบลอยตัวฉุกเฉินโดยการปลดน้ำหนักจำนวน 10 ตัน ออกจากตัวยานซึ่งจะทำให้ยานมีกำลังลอยเป็นบวกเพิ่มขึ้น สามารถเอาชนะน้ำหนักของยานที่ประกอบด้วยน้ำหนักยานและน้ำหนักน้ำในถังอับเฉาจะทำให้ยานใต้น้ำสามารถลอยขึ้นผิวน้ำได้

ตารางที่ 3 การทดสอบระบบลอยตัวฉุกเฉิน

เวลา	การดำเนินการ	ความลึก (ม.)	หมายเหตุ
1125	ยานจมลงใต้น้ำ	0	
1154	ยานถึงตำแหน่งทดสอบ	4	
1255	ปล่อย Drop Weight	4	เจ้าหน้าที่อยู่ที่ตัวยาน 4 นาย และเมื่อปล่อย ตุ้มน้ำหนัก หัวเรือยกท่ามุม 45 องศา
1258	ยานขึ้นสู่ผิวน้ำ	0	ใช้เวลา 22 วินาที

จากการทดสอบระบบลอยตัวฉุกเฉินพบว่าเมื่อปล่อยตุ้มน้ำหนักแล้ว กำลังลอยของยานใต้น้ำมีค่าเป็นบวก (Positive Buoyancy) และยานใต้น้ำสามารถลอยขึ้นสู่ผิวน้ำได้ตามที่ได้ออกแบบ/คำนวณไว้



5.5 การทดลองแล่นบนผิวน้ำ

การทดลองให้ยานใต้น้ำแล่นบนผิวน้ำเป็นการทดสอบระบบขับเคลื่อนของยานใต้น้ำ และระบบบังคับยานใต้น้ำ พร้อมกับวัดความเร็วของยาน โดยใช้พื้นที่บริเวณหน้าท่าเทียบเรืออู่ราชานาวีมหิตลอดุลยเดช แล่นมีความลึกประมาณ 10 – 15 เมตร ระยะทางประมาณ 200 เมตร โดยมีเจ้าหน้าที่ประจำยานจำนวน 5 นาย จากการทดสอบยานใต้น้ำได้ผลดังนี้



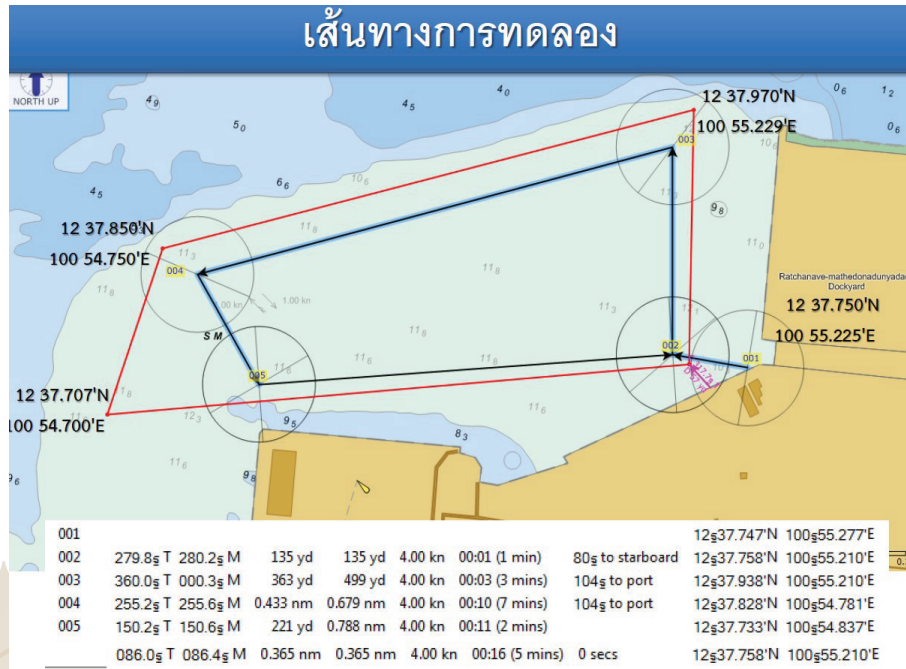
รูปที่ 9 ตู้มน้ำหนัก

ตารางที่ 4 การทดลองแล่นบนผิวน้ำ

เวลา	การดำเนินการ	ปริมาณ (%)			อุณหภูมิอากาศ (C)	แรงดันไฟฟ้า (V)		กำลังดันใน Air Bottle	
		O ₂	CO ₂	H ₂		428	24	Main	Back Up
1330	เริ่มการทดลอง	20.9	470	4	31.8	500	26	90	138
1335	ทดลอง Thruster 20%	-	-	-	-	-	-	-	-
1420	ทดลอง Thruster 40%	20.9	920	0	-	-	-	-	-
1425	ทดลอง Thruster 60%	-	-	-	26.9	490	-	-	-
1435	ทดลอง Thruster 80%	20.9	-	-	-	-	-	-	-
1445	ทดลอง Thruster 100%	20.9	-	-	30.0	488	-	-	-
1540	ทดลอง Thruster 50%	20.9	1400	3	23.9	85	-	-	-
1550	เลิกการทดลอง	20.9	2080	2	23.6	452	24	30	-



รูปที่ 10 สภาพยานใต้น้ำเมื่ออยู่บนผิวน้ำ หลังจากปล่อยตู้มน้ำหนัก



รูปที่ 11 แผนที่เดินเรือยานใต้น้ำที่ระดับความลึก 10 เมตร (ความลึก ณ เวลาที่ทดสอบ)

การทดสอบหาความเร็วการเล่นบนผิวน้ำของยานใต้น้ำ

สามารถทำได้โดยนำยานใต้น้ำเล่นในระยะเวลาที่กำหนดและจับเวลาที่ใช้ในการเล่นตามระยะทางที่กำหนดนั้น โดยคณะนักวิจัยฯ ได้ทำการทดสอบหาความเร็วด้วยการเล่นที่ระยะทาง 200 เมตร จำนวน 5 ครั้ง ที่การทำงานของ Main Thruster 100% เพื่อหาค่าเฉลี่ยของความเร็วในการเล่นบนผิวน้ำ ซึ่งได้ผลการทดลองดังนี้

ตารางที่ 5 การทดสอบหาความเร็วการเล่นบนผิวน้ำ

เวลา	การดำเนินการ	การทดสอบ		ความเร็ว	
		ระยะทาง (เมตร)	เวลา (วินาที)	เมตร /วินาที	นอต
1610	การทดลองครั้งที่ 1	200	132	1.515	2.95
1620	การทดลองครั้งที่ 2	200	133	1.504	2.92
1630	การทดลองครั้งที่ 3	200	132	1.515	2.95
1640	การทดลองครั้งที่ 4	200	130	1.538	2.99
1650	การทดลองครั้งที่ 5	200	132	1.515	2.95
	ค่าเฉลี่ย			1.518	2.95

จากการทดลองพบว่าเรือสามารถเล่นบนผิวน้ำได้ความเร็วสูงสุดประมาณ 1.518 เมตร/วินาที หรือประมาณ 2.95 นอต





รูปที่ 12 การแล่นบนผิวน้ำ

5.6 การทดลองแล่นใต้น้ำ

การทดลองแล่นยานใต้น้ำใต้น้ำเป็นการทดสอบยานใต้น้ำในลักษณะการใช้งานจริง โดยใช้พื้นที่บริเวณหน้าท่าเทียบเรืออุทยานวามิตลอดยุคเดช พื้นที่ที่ใช้ทดลองมีความลึกประมาณ 8 – 12 เมตร ระยะทางประมาณ 200 เมตร โดยมีเจ้าหน้าที่ประจำยานจำนวน 5 นาย จากการทดสอบยานใต้น้ำสามารถดำลง และแล่นใต้น้ำตามระยะทางที่ทดสอบได้

ตารางที่ 6 การทดลองแล่นใต้น้ำ

เวลา	การดำเนินการ	ปริมาณ (%)			อุณหภูมิอากาศ (C)	แรงดันไฟฟ้า (V)		กำลังดันในถึงอากาศ		หมายเหตุ
		O ₂	CO ₂	H ₂		480	24	Main	Back Up	
0930	เริ่มการทดลอง	20.9	470	4	31.8	500	26	90	138	แล่นบนผิวน้ำ
0950	ทดลอง Thruster 20%	-	-	-	-	498	24	-	-	แล่นบนผิวน้ำ
1020	ทดลอง Thruster 40%	20.9	920	0	-	-	24	-	-	แล่นใต้น้ำ
1055	ทดลอง Thruster 60%	-	-	-	26.9	490	24	-	-	แล่นใต้น้ำ
1135	ทดลอง Thruster 80%	20.9	-	-	-	-	24	-	-	แล่นใต้น้ำ
1200	ทดลอง Thruster 100%	20.9	-	-	30.0	488	24	-	-	แล่นใต้น้ำ
1230	เลิกการทดลอง	20.9	2080	2	23.6	460	24	30	-	แล่นบนผิวน้ำ

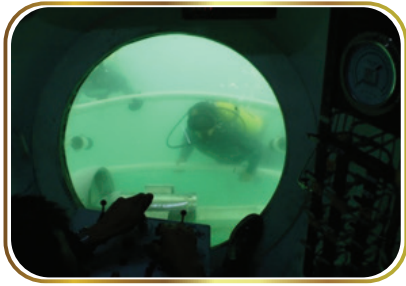
การทดลองหาความเร็วการแล่นใต้น้ำของยานใต้น้ำ

สามารถทำได้โดยนำยานใต้น้ำแล่นในระยะเวลาที่กำหนดและจับเวลาที่ใช้ในการแล่นตามระยะทางที่กำหนดนั้นเหมือนกับที่ทดลองความเร็วการแล่นบนผิวน้ำ โดยคณะนักวิจัยได้ทำการทดลองหาความเร็วด้วยการแล่นที่ระยะทาง 200 เมตร จำนวน 5 ครั้ง โดยใช้กำลังสูงสุดของ Main Thruster เพื่อหาค่าเฉลี่ยของความเร็วในการแล่นใต้น้ำ ซึ่งได้ผลจากการทดลองดังนี้

ตารางที่ 7 การทดลองหาความเร็วการเล่นใต้น้ำ

เวลา	การดำเนินการ	การทดสอบ		ความเร็ว	
		ระยะทาง (เมตร)	เวลา (วินาที)	เมตร /วินาที	นอต
1330	การทดลองครั้งที่ 1	200	175	1.143	2.22
1340	การทดลองครั้งที่ 2	200	176	1.136	2.21
1350	การทดลองครั้งที่ 3	200	175	1.143	2.22
1400	การทดลองครั้งที่ 4	200	174	1.149	2.23
1410	การทดลองครั้งที่ 5	200	175	1.143	2.22
ค่าเฉลี่ย				1.143	2.22

จากการทดลองพบว่าเรือสามารถเล่นใต้น้ำได้ความเร็วสูงสุดประมาณ 1.143 เมตร/วินาที หรือประมาณ 2.22 นอต



รูปที่ 13 ภาพถ่ายนักดำน้ำที่อยู่ภายนอกยานขณะทดลองเล่นใต้น้ำ



รูปที่ 14 สภาพยานก่อนสูบน้ำเข้าถังอับเฉา



รูปที่ 15 แสดงยานใต้น้ำที่ความลึก 0.5 เมตร



รูปที่ 16 แสดงภาพยานใต้น้ำขณะดำที่ความลึก 5 เมตร



6. ผลการทดสอบยานใต้น้ำสามารถสรุปได้ดังนี้

- 6.1 การทดสอบการทำงานอุปกรณ์เมื่ออยู่ใต้น้ำ สามารถทำงานได้ปกติ
- 6.2 การทดสอบการดำรงชีวิตอยู่ใต้น้ำ ปริมาณออกซิเจน คาร์บอนไดออกไซด์ ความดันบรรยากาศ อยู่ในเกณฑ์ปกติ
- 6.3 ระบบจมนลอย สามารถปรับแต่งสมดุลยยานฯ ได้ตามน้ำหนักบรรทุกที่ลงไป
- 6.4 ระบบเดินเรือสื่อสาร สามารถติดต่อได้ทั้ง วิทยุ VHF และ โทรศัพท์ใต้น้ำ เมื่อทำการหมุน Vertical Thruster ทำให้การรบกวนสัญญาณโทรศัพท์ใต้น้ำ
- 6.5 ระบบลอยตัวฉุกเฉิน สามารถขึ้นสู่น้ำ หลังจากปล่อยตุ้มน้ำหนัก 22 วินาที และสามารถเปิดฝา Hatch ได้อย่างปลอดภัย
- 6.6 การเดินเรือ ผิวน้ำและใต้น้ำ สามารถที่ความเร็วสูงสุด ประมาณ 3 นอต ที่ความเร็ว 1000 รอบต่อนาที ไม่สามารถทำความเร็วสูงสุดใต้น้ำได้เนื่องจากสนามทดสอบมีระยะสั้นเกินไป ไม่ปลอดภัยที่จะทำการทดสอบที่ความเร็วสูงสุด



รูปที่ 17 พลเรือตรี ภาณุ บุญยะวิโรจ
ผู้บัญชาการกองเรือดำน้ำ กองเรือยุทธการ
(ตำแหน่งในขณะนั้น)
เข้าร่วมทดสอบยานใต้น้ำ

จากการทดสอบและทดลองทำให้เราทราบถึงขีดความสามารถของยานใต้น้ำที่ได้ทำการศึกษาและวิจัย อีกทั้งกองเรือดำน้ำได้ส่งเจ้าหน้าที่เข้าร่วมทำการฝึกการถ่ายทอดองค์ความรู้ในการขับยานใต้น้ำ รวมถึงการซ่อมทำอุปกรณ์ใต้น้ำตามวงรอบการทำงานก่อนที่จะทำการทดสอบในแต่ละครั้ง องค์ความรู้ที่ได้จากการซ่อมทำและการฝึกจะเป็นความรู้พื้นฐานในการพัฒนาศาสตร์ใต้น้ำในประเทศไทยต่อไป



รูปที่ 18 ภายในยานใต้น้ำ

เอกสารอ้างอิง

- มนต์ชัย กาทอง, พลเรือตรี. “การสร้างยานใต้น้ำขนาดเล็ก” เอกสารวิจัยของคณะนักวิจัยเสนอสำนักงานวิจัยและพัฒนาการทางทหารกองทัพเรือ, 2556.
- อรรถสิทธิ์ พงษ์เกษตรกรรม, นาวาโท. “คู่มือการใช้งานยานใต้น้ำขนาดเล็ก”. 2557
- American Bureau of Shipping. Rules for Building and Classing Underwater Vehicles, System and Hyperbaric Facilities 2002. Houston 2002.