

การแตกร้าวจากความเค้นร่วมกับการกัดกร่อนของนิกเกิลอะลูมิเนียมบรอนซ์ ในน้ำ ทะเลปนเปื้อนแอมโมเนีย

Stress-corrosion cracking of nickel-aluminum bronze under ammonia-polluted seawater

วิษพงศ์ โสฐ* และ ชาวสวน กาญจน์มัย

คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ 99 ม.18 ต.คลองหนึ่ง อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี 12120

*โทรศัพท์: +66-02-564-3001 ต่อ 3255, โทรสาร: +66-02-564-3010

E-mail address: witchapong.s@gmail.com (วิษพงศ์ โสฐ)

บทคัดย่อ

ชิ้นส่วนทางวิศวกรรมจะมีตำหนิและความไม่ต่อเนื่องภายในโครงสร้างอยู่เสมอ ภายใต้ภาระทางกลและสภาพกัดกร่อนระหว่างการใช้งาน รอยร้าวสามารถเกิดและขยายตัวจากตำหนิและความไม่ต่อเนื่อง ของชิ้นส่วนทางวิศวกรรมเหล่านี้ ซึ่งเรียกว่า การแตกร้าวจากความเค้นร่วมกับการกัดกร่อน (stress corrosion cracking หรือ SCC) ซึ่งค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้น (stress intensity factor หรือ K) เป็นค่ากลศาสตร์การแตกหักแบบยืดหยุ่นเชิงเส้น (linear-elastic fracture mechanics) ที่สามารถใช้แสดงสภาพความรุนแรงที่ปลายรอยร้าวได้ ภายใต้สภาพแวดล้อมกัดกร่อน K_{ISCC} ถูกนิยามเป็น ขีดจำกัดของ K ที่เริ่มเกิดการแตกร้าวจากความเค้นร่วมกับการกัดกร่อน โดย K_{ISCC} เป็นพารามิเตอร์สำคัญที่ใช้ในการออกแบบ กำหนดขอบเขตการใช้งาน และ ทำนายอายุการใช้งานของชิ้นส่วนทางวิศวกรรมภายใต้กัดกร่อน วัสดุผสม nickel-aluminum bronze (NAB) เป็นวัสดุที่ถูกใช้งานอย่างแพร่หลายในทะเล เช่น วาล์ว ใบจักรเรือ ปัมป์ เพลลา หรือ ระบบแลกเปลี่ยนความร้อน เนื่องจากวัสดุ NAB เป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงทนทาน และมีสมบัติต้านทานการกัดกร่อนที่ดี แต่ในปัจจุบัน ยังไม่มีการศึกษาถึง การแตกร้าวจากความเค้นร่วมกับการกัดกร่อนของ NAB ภายใต้ น้ำทะเลปนเปื้อนแอมโมเนีย (NH_3) ดังนั้นในการวิจัยนี้ได้ศึกษาผลกระทบของน้ำทะเลปนเปื้อนแอมโมเนีย ต่อ K_{ISCC} ของ NAB โดยน้ำทะเลปนเปื้อนแอมโมเนียได้จาก ของผสมระหว่างน้ำทะเลสังเคราะห์ (artificial seawater) กับ แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (ammonium hydroxide) การหา K_{ISCC} ทำโดยใช้การทดสอบแบบ โมเมนต์ดัด 4 จุด (4-points bending test หรือ 4PBT) การวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบทางเคมี และการขยายตัวของรอยร้าว ประกอบกับ K_{ISCC} ที่ได้จากการทดสอบ ถูกใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมและกลไก การแตกร้าวจากความเค้นร่วมกับการกัดกร่อนของ NAB

AMM-201

คำหลัก: การแตกร้าวจากความเค้นร่วมกับการกัดกร่อน; ค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้น; บรอนซ์; น้ำทะเล; แอมโมเนีย

Abstract

For engineering components with crack-like defects, the growth of cracks from these defects is possible under the combination between corrosive environment and service load, i.e. a stress corrosion cracking (SCC). As a linear-elastic fracture mechanics parameter, the stress intensity factor under opening mode (K_I) can be applied to characterize the severity at crack tip. The K_{ISCC} is defined as a threshold K_I for susceptibility to stress-corrosion cracking. Nickel-aluminum bronze (NAB) is a copper-based alloy, which has a good combination of mechanical properties and corrosion resistance. It has been widely used in a variety of marine applications, e.g. valves, propeller blades, pumps, shafts, heat exchangers. However, limited amount of works have been done on the K_{ISCC} of NAB in polluted seawater with ammonia. In the present study, the K_{ISCC} of NAB alloy in artificial seawater, and a mixture between artificial seawater and ammonium hydroxide were determined using 4-point bending technique (4PBT). The results were correlated with the analysis of corrosion products and crack paths, and then the fracture behavior and mechanism were discussed.

Keywords: stress corrosion cracking; stress intensity factor; bronze; seawater; ammonia

1. บทนำ

วัสดุผสม nickel-aluminum bronze (NAB) เป็นวัสดุผสมที่มีทองแดงเป็นองค์ประกอบหลัก โดยมีอะลูมิเนียม 10-11.5%, นิกเกิล 3-5.5%, และ เหล็ก 3-5% ของน้ำหนักวัสดุ โดยที่อะลูมิเนียมช่วยเพิ่มความแข็งแรงและเพิ่มคุณสมบัติในการขึ้นรูปที่ดีขึ้นให้กับวัสดุ นิกเกิลช่วยเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อน เพิ่มความเค้นคราก และ ทำให้โครงสร้างในระดับจุลภาคของวัสดุมีความเสถียรมากขึ้น ส่วนเหล็กช่วยทำให้เกรนของวัสดุมีความละเอียด และ เพิ่มความต้านทานแรงดึง [1] นอกจากการควบคุมองค์ประกอบของวัสดุผสม NAB แล้ว การทำกระบวนการทางความร้อน (heat treatment) ยังสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้งาน โดยเฉพาะการต้านทานการกัดกร่อน [2] วัสดุผสม NAB ที่ได้จากการหล่อและการใช้แรงทางกลขึ้นรูป มีสมบัติทางกลและความต้านทานการกัดกร่อนที่สูง ถูกใช้งานอย่างแพร่หลายกับ อุปกรณ์หรือเครื่องมือที่ใช้

ในทะเล เช่น วาล์ว ใบจักรเรือ ปัมป์ เพลลา และ อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน เป็นต้น [3]

เมื่อนำวัสดุผสม NAB ไปใช้งานในน้ำทะเล เกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีขึ้นระหว่างวัสดุผสม NAB กับน้ำทะเล ส่งผลให้เกิดการสูญเสียมวลและการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกลและเคมีที่ผิว โดยเรียกว่า การกัดกร่อน ซึ่งจัดเป็นความเสียหายหลักที่เกิดขึ้นกับวัสดุผสม NAB Wharton et al. [4] ได้ทำการวิเคราะห์พฤติกรรมการกัดกร่อนของวัสดุผสม NAB ที่ได้จากการหล่อและการใช้แรงทางกลขึ้นรูป ด้วยการทดสอบในน้ำทะเลด้วยวิธี electrochemical techniques และ วิธี immersion testing พบว่า อัตราการกัดกร่อนขึ้นอยู่กับ surface film ของวัสดุ องค์ประกอบของน้ำทะเล องค์ประกอบของวัสดุ พื้นผิว รูปทรงของ electrode/electrolyte การไหลเวียนของ electrolyte ของเสียจากการกัดกร่อน และ ระยะเวลา Al-Hashem และ Riad [5] ได้ทำการศึกษาผลกระทบของการกัดกร่อนแบบ

AMM-201

cavitation ที่มีต่อโครงสร้างในระดับจุลภาคของวัสดุผสม NAB ภายใต้สภาพแวดล้อมน้ำทะเล โดยใช้อุปกรณ์กำเนิดอัลตราโซนิกส์ขนาด 20 kHz พบว่า รอยร้าวเกิดขึ้นที่พื้นผิวรอยต่อระหว่างเฟส α -Cu กับ intermetallic κ precipitates ในขณะที่เฟส κ precipitates และเฟสที่ไม่มี precipitates ปะปนอยู่ไม่พบความเสียหายจากการกัดกร่อน ในเฟส α -Cu เกิดรอยร้าวขนาด 5-10 μm โดยเฉพาะในบริเวณใกล้กับ κ precipitates ซึ่งรอยร้าวเหล่านี้เกิดขึ้นจากการกัดกร่อนแบบ selective และ ความเค้น Schüssler และ Exner [6-7] ได้ศึกษาการกัดกร่อนจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีในวัสดุผสม NAB ที่ได้จากการหล่อขึ้นรูป โดยศึกษาภายใต้สภาพแวดล้อมน้ำทะเลสังเคราะห์ และ น้ำทะเลสังเคราะห์ปนเปื้อนซัลไฟด์ พบว่า ชั้นของอะลูมิเนียมที่พื้นผิวของวัสดุ NAB ทำหน้าที่ปกป้องโครงสร้างของวัสดุผสม NAB จากสภาพแวดล้อม (protective layer) ส่วนภายใต้สภาพแวดล้อมแบบน้ำทะเลสังเคราะห์ปนเปื้อนซัลไฟด์ ซัลไฟด์ที่เจือปนอยู่ในน้ำทะเลเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการกัดกร่อนขึ้นกับวัสดุผสม NAB ส่งผลให้เกิดความเสียหายจากการกัดกร่อน ที่ชั้นการกัดกร่อน (corrosion layer) ที่เกิดขึ้นที่พื้นผิววัสดุผสม NAB ประกอบไปด้วย copper sulphide เป็นหลัก

Koul และคณะ [8] ได้ทำการศึกษาการแตกร้าวจากความเค้นร่วมกับการกัดกร่อนของวัสดุผสม NAB ในน้ำทะเลผสมแอมโมเนีย ที่อัตราส่วน 5:1 พบว่า แอมโมเนียส่งผลให้ความต้านทานการแตกร้าวจากความเค้นร่วมกับการกัดกร่อนของวัสดุผสม NAB ลดลง

โดยทั่วไป ชิ้นส่วนทางวิศวกรรมจะประกอบด้วยความไม่ต่อเนื่อง หรือ ตำหนิขนาดเล็ก ซึ่งอาจเกิดระหว่างกระบวนการผลิต และ/หรือ ระหว่างการใช้งาน การนำชิ้นส่วนทางวิศวกรรมที่มีตำหนิ มารับภาระทางกลภายใต้สภาพแวดล้อมกัดกร่อน อาจส่งผลให้เกิดความเสียหายจากการขยายตัวของรอยร้าวจากตำหนิ

เหล่านี้ ซึ่งเรียกว่า การแตกร้าวจากความเค้นร่วมกับการกัดกร่อน (stress corrosion cracking หรือ SCC) ถ้ารอยร้าวที่เกิดขึ้นในชิ้นส่วนทางวิศวกรรม อยู่ภายใต้สภาพการครากขนาดเล็ก (small-scale yielding) ค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นภายใต้รูปแบบภาระเปิด (stress intensity factor under opening mode หรือ K_I) สามารถใช้เป็นค่ากลศาสตร์การแตกหักแบบอีลาสติกเชิงเส้น (linear-elastic fracture mechanics parameter) แสดงความรุนแรงที่เกิดขึ้นที่ปลายรอยร้าว K_I ขึ้นกับ ความยาวรอยร้าว รูปทรงชิ้นส่วนทางวิศวกรรม และ ความเค้นที่มากระทำ K_I ที่มีค่าต่ำที่สุด ที่ทำให้รอยร้าวไม่เกิดและขยายตัวภายใต้สภาพแวดล้อมกัดกร่อน หรือ ไม่เกิดการแตกร้าวจากความเค้นร่วมกับการกัดกร่อน เรียกว่า ขอบเขตตัวประกอบความเข้มของความเค้นของ การแตกร้าวจากความเค้นร่วมกับการกัดกร่อน (threshold stress intensity factor of stress corrosion cracking หรือ K_{ISCC}) ค่า K_{ISCC} ถูกใช้ในการกำหนดขอบเขตการใช้งาน และ ทำนายอายุการใช้งาน ของชิ้นส่วนทางวิศวกรรม ภายใต้สภาพแวดล้อมกัดกร่อน

กรมอุทกหารเรือเป็นองค์กรหนึ่งที่อยู่ภายใต้การควบคุมของกองทัพเรือ มีหน้าที่อำนวยความสะดวก ประสานงาน แนะนำ กำกับ การ และดำเนินการเกี่ยวกับการซ่อม สร้างดัดแปลง ทดสอบ วิจัยและพัฒนา เกี่ยวกับเรือ อากาศยาน ยานรบ มีที่ตั้งอยู่บริเวณตอนล่างของแม่น้ำเจ้าพระยา กรมอุทกหารเรือประสบปัญหาเกี่ยวกับใบจักรเรือที่สร้างขึ้นจากวัสดุผสม NAB ซึ่งเป็นวัสดุที่ใช้กับเรือเดินสมุทรอย่างแพร่หลายในประเทศต่างๆทั่วโลก แต่เมื่อกรมอุทกหารเรือได้นำใบจักรเรือที่สร้างจากวัสดุ NAB มาใช้ในในประเทศไทย พบว่า วัสดุชนิดนี้เกิดความเสียหายขึ้น ตัวอย่างใบจักรเรือที่เกิดความเสียหาย แสดงดังภาพที่ 1 สาเหตุของความเสียหายนี้ อาจเกิดจากการที่วัสดุผสม NAB เป็นวัสดุที่มีความอ่อนไหวอย่างมากต่อสารแอมโมเนีย (ammonia) ซึ่งพบสาร

AMM-201

ประเภทนี้จาก ผลิตภัณฑ์ชะล้างทำความสะอาด ปู่ และมูลของสิ่งมีชีวิต จากรายงานสถานการณ์มลพิษของประเทศไทย ของกรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม [9] พบว่าบริเวณตอนล่างของแม่น้ำเจ้าพระยา มีปริมาณของแอมโมเนียที่สูงกว่าระดับทั่วไปมาก จึงมีความเป็นไปได้ที่ ความเสียหายของใบจักรเรืออาจเกิดจากการแตกร้าจากความเค้นร่วมกับการกัดกร่อน ภายใต้สภาพแวดล้อมน้ำทะเลปนเปื้อนแอมโมเนีย

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษา การแตกร้าจากความเค้นร่วมกับการกัดกร่อน ของวัสดุผสม NAB ในห้องปฏิบัติการ ภายใต้สภาพแวดล้อมอากาศ น้ำทะเลสังเคราะห์ และ น้ำทะเลสังเคราะห์ปนเปื้อนแอมโมเนีย เทคนิคโมเมนต์ดัดแบบ 4 จุด (4-point bending technique หรือ 4PBT) ถูกใช้ในการสร้างภาระทางกลให้กับชิ้นทดสอบ ค่า K_{ISCC} อัตราการขยายตัวของรอยร้า (da/dt) ทิศทางการขยายตัวของรอยร้า พื้นผิวการแตกหัก และ องค์ประกอบทางเคมีของรอยกัดกร่อน ถูกใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมและกลไกของ การแตกร้าจากความเค้นร่วมกับการกัดกร่อน ของวัสดุผสม NAB โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อ (1) พิสูจน์ยืนยันถึงสาเหตุของความเสียหาย และ (2) กำหนดเป็นข้อมูลชี้ดจำกัดในการใช้งานวัสดุผสม NAB



ภาพที่ 1 ใบจักรเรือที่ได้รับความเสียหาย

2. ขั้นตอนการวิจัย

2.1 วัสดุ

วัสดุผสม NAB ที่ใช้ในการสร้างชิ้นงานทดสอบ ได้รับมาจากกรมอุทกหารเรือ โดยรายละเอียดขององค์ประกอบทางเคมี และสมบัติทางกล แสดงดังตารางที่ 1 และ 2 ตามลำดับ โครงสร้างจุลภาคของ NAB แสดงดังภาพที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของเฟสต่างๆ ถูกวิเคราะห์ด้วยวิธี Energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS analysis) ดังแสดงในตารางที่ 3 โดยวัสดุผสม NAB ประกอบด้วยเฟสหลักทั้งหมด 5 เฟส ดังนี้

α : FCC copper-rich solid solution

K_I : globular or rosette shape of iron-rich (Fe_3Al)

K_{II} : dendritic rosettes unevenly distribute within α -phase

K_{III} : lamellar of nickel-rich ($NiAl$) grows normal to α -phase, and around K_I -phase

K_{IV} : fine precipitate of iron-rich within α -phase

ตารางที่ 1 องค์ประกอบเคมีของโลหะผสม NAB

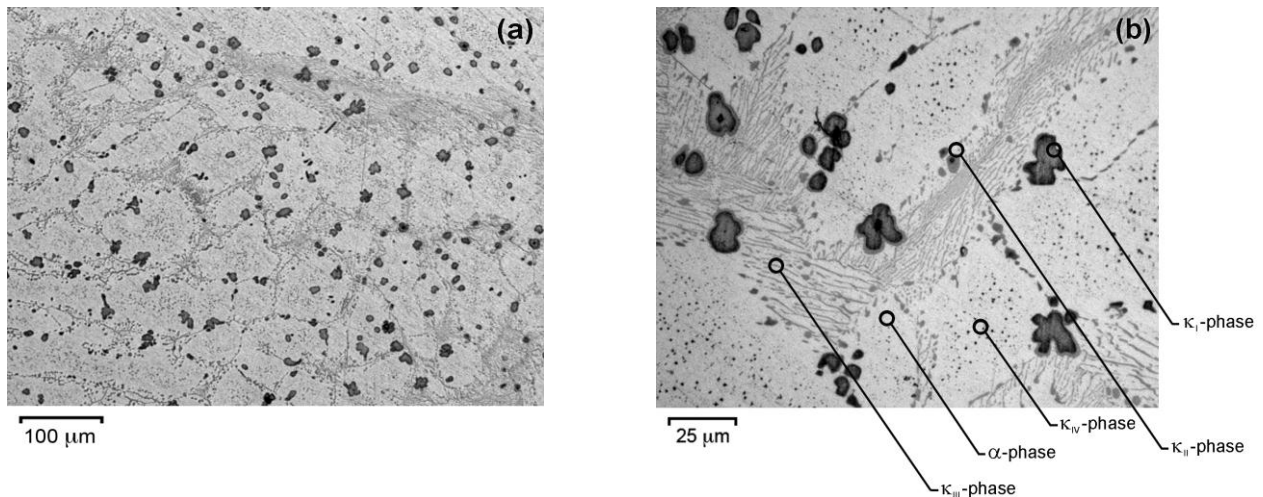
NAB	Al%	Ni%	Fe%	Mn%	Cu%
Present	9.5	4.3	4.6	1.1	80.5
C95800*	9.0	4.0	4.0	1.5	81.5

*ASM handbook

ตารางที่ 2 สมบัติทางกลของโลหะผสม NAB

คุณสมบัติทางกล	NAB
Tensile strength (MPa)	547
Yield strength (MPa)	220
Modulus of elasticity (GPa)	116
Ductility (%)	25

AMM-201



ภาพที่ 2 โครงสร้างในระดับจุลภาคของ NAB (a) กำลังขยายต่ำ (b) กำลังขยายสูง

ตารางที่ 3 องค์ประกอบทางเคมีในเฟสต่างๆของ NAB

เฟส	องค์ประกอบทางเคมี(wt. %)						
	Ni	Al	Fe	Mn	Cu	C	O
α	2.22	6.01	1.59	0.91	77.27	11.22	0.78
κI	12.4	10.99	54.77	1.82	11.29	4.82	2.56
κII	26.43	17.33	19.65	1.88	25.54	8.83	-
κIII	27.37	22.78	11.27	1.45	25.7	7.62	3.81
κIV [9]	4.0±1.0	20.0±3.0	62.0±4.0	1.5±0.3	13.0±1.0	-	-

2.2 ขั้นตอนทดสอบการแตกหักจากความเค้นร่วมกับการกัดกร่อน

ขั้นตอนทดสอบแบบ single-edge notch bending (SENB) ถูกสร้างขึ้นจากโลหะผสม NAB เพื่อใช้ทดสอบการแตกหักจากความเค้นร่วมกับการกัดกร่อน ขนาดของชิ้นงาน SENB สร้างตามมาตรฐาน ISO7539-6 [11] แสดงในภาพที่ 3 โดยชิ้นงาน SENB สามารถสร้างความเค้นขนาดสูงจากโมเมนต์ดัด ชิ้นงาน SENB ถูกขึ้นรูปด้วยกระบวนการกัดเซาะโลหะด้วยตัวนำไฟฟ้า (electric discharged machine หรือ EDM) รอยร้าวเริ่มต้นของชิ้นงาน SENB สร้างโดยใช้เทคนิคโมเมนต์ดัดแบบ 4 จุด (4PB jig) ด้วยภาระแบบวงรอบจากเครื่องทดสอบการล้า (Instron:

ElectroPuls E10000) ที่ความถี่ 20 Hz และอัตราส่วนความเค้น $R = 0.1$ ค่า K ที่เกิดขึ้นที่ปลายรอยร้าวของชิ้นงาน SENB สามารถคำนวณได้จากสมการ [12]

$$K = F(\alpha) \cdot \frac{3 P(S-d)}{2 BW^2} \cdot \sqrt{\pi a} \quad (1)$$

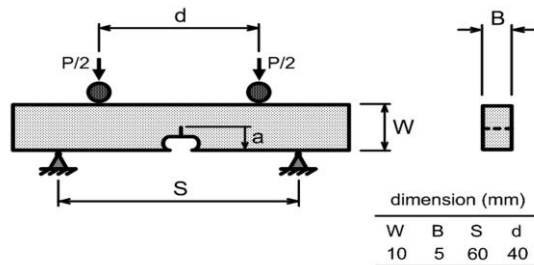
$$F(\alpha) = 1.122 - 1.121\alpha + 3.740\alpha^2 + 3.873\alpha^3 - 19.05\alpha^4 + 22.55\alpha^5 \quad (2)$$

$$\alpha = \frac{a}{W} \quad (3)$$

เมื่อ a คือ ความยาวเฉลี่ยของรอยร้าวทั้งสองด้านของชิ้นงาน, P คือ ภาระที่ชิ้นงานได้รับ, B คือ

AMM-201

ความหนาของชิ้นงาน, W คือ ความกว้างของชิ้นงาน, S คือ ระยะห่างของตำแหน่งภาระด้านล่างของ 4PB jig, และ d คือ ระยะห่างของตำแหน่งภาระด้านบนของ 4PB jig



ภาพที่ 3 รูปร่างและขนาดชิ้นงาน SENB

บริเวณพลาสติกภายใต้ภาระแบบวงรอบ (cyclic plastic zone หรือ r_c) ที่ปลายรอยร้าวของชิ้นงาน SENB ถูกควบคุมขณะสร้างรอยร้าวเริ่มต้นเพื่อลดผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงขนาดแบบพลาสติกต่อการแตกร้าวจากความเค้นร่วมกับการกัดกร่อน โดยบริเวณพลาสติกต้องมีขนาดเล็กกว่าความหนาของชิ้นงาน ความยาวรอยร้าว และ/หรือพื้นที่รับแรง ขนาดของบริเวณพลาสติก คำนวณได้จาก [13]

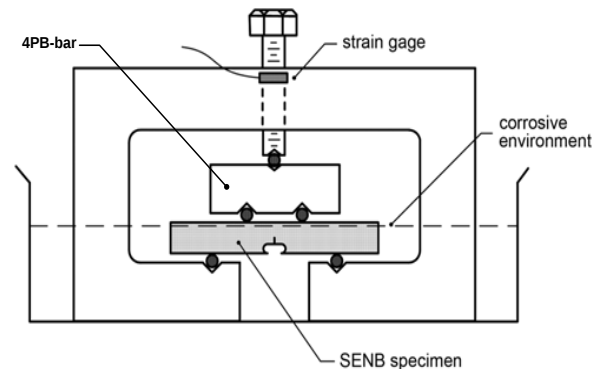
$$r_c(\theta) = \frac{\Delta K^2}{16\pi\sigma_y^2} \left(\frac{3}{2} \sin^2 \theta + (1-2\nu)^2 (1 + \cos \theta) \right) \quad (4)$$

เมื่อ θ คือ ขนาดมุมในระบบพิกัดเชิงขั้วที่ปลายรอยร้าว, ν คือ อัตราส่วนปัวซอง ในงานวิจัยนี้ รอยร้าวเริ่มต้นถูกสร้างขึ้นด้วย $\Delta K_I = 11 \text{ MPa.m}^{1/2}$ ดังนั้นขนาดของบริเวณพลาสติก มีขนาดเป็น $51.4 \mu\text{m}$ ซึ่งเล็กกว่า ความหนาของชิ้นงาน ความยาวรอยร้าว และ/หรือ พื้นที่รับแรง

2.3 การทดสอบการแตกร้าวจากความเค้นร่วมกับการกัดกร่อน

การศึกษาการแตกร้าวจากความเค้นร่วมกับการกัดกร่อนของโลหะผสม NAB ทำโดยใช้

เทคนิคโมเมนต์ดัดแบบ 4 จุด (4PBT) ระบบทดสอบ 4PB jig แสดงดังภาพที่ 4 ถูกออกแบบและสร้างด้วยเหล็กกล้าไร้สนิม 304 การเปลี่ยนแปลงขนาดของชิ้นทดสอบ SENB กระทำโดยใช้การเคลื่อนที่ของสลักเกลียว



ภาพที่ 4 ระบบทดสอบการแตกร้าวเนื่องจากความเค้นร่วมกับการกัดกร่อน 4PB-jig

แรงต้านของชิ้นทดสอบ (P) ถูกวัดด้วยเกจวัดความเครียด (strain gauge) แบบ full bridge ที่ติดตั้งบน 4PB jig โดยมีการสอบเทียบกับอุปกรณ์วัดแรง (load cell) ขนาด 1 kN (Kyowa: LMA-A-1kN) ก่อนการใช้ ความยาวรอยร้าว (crack length หรือ a) ถูกวัดด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่มีความละเอียด $10 \mu\text{m}$

การทดสอบการแตกร้าวจากความเค้นร่วมกับการกัดกร่อนของโลหะผสม NAB ทำตามมาตรฐาน ISO 7539-6 [10] การเปลี่ยนแปลงขนาดของชิ้นทดสอบ SENB ถูกกระทำโดยใช้การเคลื่อนที่ของสลักเกลียว ภายใต้สภาพแวดล้อมกัดกร่อน จนค่า K เริ่มต้น (initial stress intensity factor หรือ K_I) มีขนาดสูงกว่า K_{ISCC} การเปลี่ยนแปลงขนาดของชิ้นทดสอบ SENB ถูกรักษาให้คงที่ แรงต้านของชิ้นทดสอบ (P) และความยาวรอยร้าว (a) ระหว่างการทดสอบ ถูกใช้ในการคำนวณ K และ อัตราการขยายตัวของรอยร้าว (da/dt) ค่า K และ da/dt มีขนาดลดลงตามความยาวของรอยร้าวที่เพิ่มขึ้น จนในที่สุด K มีขนาด

AMM-201

เท่ากับ K_{ISCC} และ รอยร้าวหยุดขยายตัว หรือ มีอัตราการขยายตัวต่ำกว่า 3.6×10^{-4} มม./ชั่วโมง [10] วิธีการนี้ เรียกว่า การทดสอบแบบการลดลงของ K

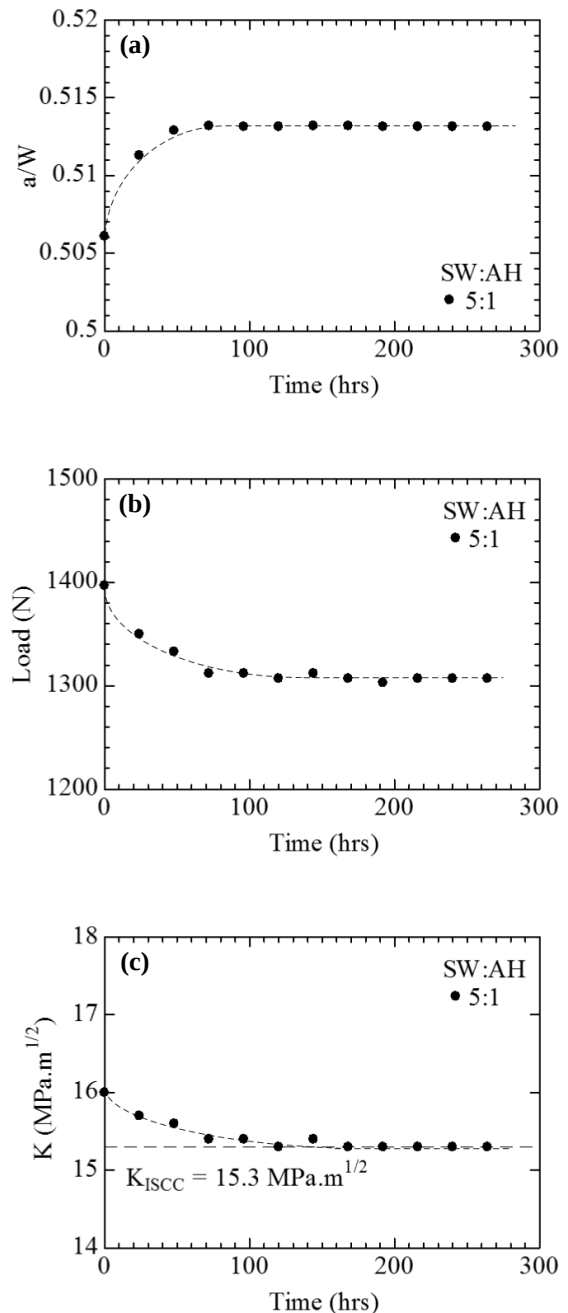
ภายหลังจากรอยร้าวหยุดขยายตัว หรือ K มีขนาดเท่ากับ K_{ISCC} การเปลี่ยนแปลงขนาดของชิ้นทดสอบ SENB ถูกเพิ่มขึ้น ด้วยการเพิ่มการเคลื่อนที่ของสลักเกลียว ภายใต้สภาพแวดล้อมกัดกร่อน ซึ่งค่า K และ da/dt มีขนาดเพิ่มขึ้นตามการเปลี่ยนแปลงขนาดของชิ้นทดสอบที่เพิ่มขึ้น จนในที่สุด K มีขนาดเท่ากับ ความทนทานการแตกร้าว (fracture toughness หรือ K_{IC}) ของวัสดุ และ ชิ้นทดสอบ SENB แตกหัก วิธีการนี้ เรียกว่า การทดสอบแบบการเพิ่มขึ้นของ K

การศึกษาการแตกร้าวจากความเค้นร่วมกับการกัดกร่อนของโลหะผสม NAB ทำภายใต้ น้ำทะเลสังเคราะห์ (artificial seawater หรือ SW) และ น้ำทะเลสังเคราะห์ผสมด้วยแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (artificial seawater : ammonium hydroxide หรือ SW:AH) ที่อัตราส่วน 5:1 และ 10:1 โดยน้ำทะเลสังเคราะห์ผสมขึ้นตามมาตรฐาน ASTM D1141 [14] ระหว่างการทดสอบการแตกร้าวจากความเค้นร่วมกับการกัดกร่อน สภาพแวดล้อมถูกควบคุมให้ไหลเวียนตลอดเวลาด้วยเครื่อง magnetic stirrer และ ควบคุมอุณหภูมิระหว่างการทดสอบเป็น $30 \pm 2^\circ\text{C}$

3. ผลการวิจัยและการวิเคราะห์

3.1 การขยายตัวของรอยร้าวและการเปลี่ยนแปลงแรง

การทดสอบการแตกร้าวจากความเค้นร่วมกับการกัดกร่อน แบบการลดลงของ K พบว่า การขยายตัวของรอยร้าวและการเปลี่ยนแปลงแรง ภายใต้สภาพแวดล้อมกัดกร่อนต่างๆ แสดงพฤติกรรมเช่นเดียวกัน โดยตัวอย่างการขยายตัว

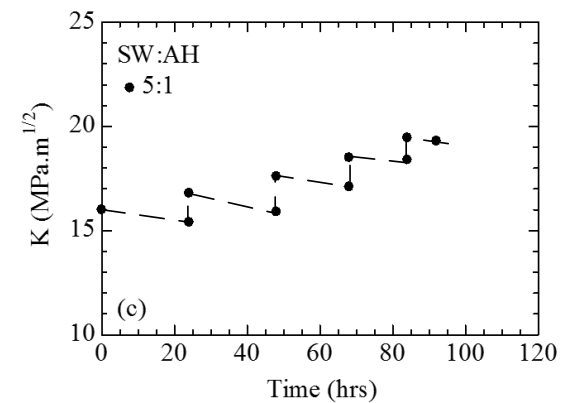
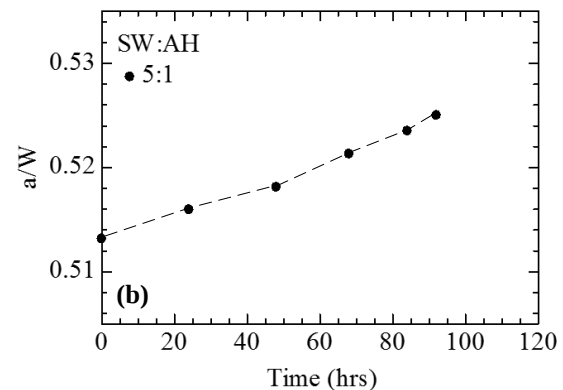
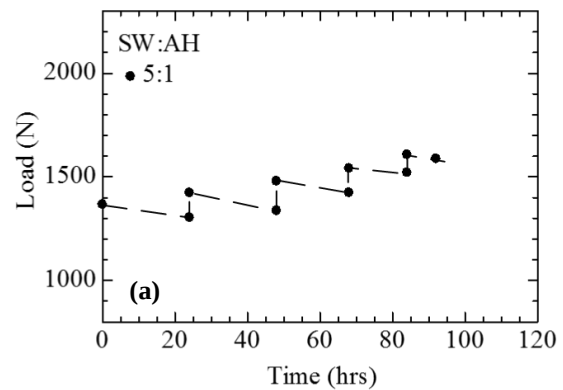


ภาพที่ 6 การทดสอบ SCC แบบการลดลงของ K ที่สภาพแวดล้อม SW:AH อัตราส่วน 5:1 ภาพ (a) ความสัมพันธ์ระหว่าง รอยร้าว กับ เวลา ภาพ (b) ความสัมพันธ์ระหว่าง แรง กับ เวลา ภาพ (c) ความสัมพันธ์ระหว่าง K กับ เวลา

AMM-201

ของรอยร้าวและการเปลี่ยนแปลงแรง ที่ได้จากวิธีการทดสอบแบบการลดลงของ K ภายใต้สภาพแวดล้อม SW:AH อัตราส่วน 5:1 แสดงดังภาพที่ 6a และ 6b ตามลำดับ ขนาดของรอยร้าวเพิ่มขึ้นตามเวลา โดยหยุดขยายตัวหลังจากเวลาผ่านไป 100 ชั่วโมงโดยประมาณ ส่งผลให้แรงต้านของชิ้นทดสอบลดลงตามเวลา จนกระทั่งมีขนาดคงที่หลังจาก 100 ชั่วโมงโดยประมาณ การเพิ่มขึ้นของความยาวรอยร้าว เป็นผลมาจากความเค้นและการกัดกร่อนที่ปลายรอยร้าว ในช่วง 100 ชั่วโมงแรก ความเค้นและการกัดกร่อนมีความรุนแรงพอที่จะทำให้รอยร้าวเกิดการขยายตัว แต่ความเค้นลดลงตามการขยายตัวของรอยร้าวที่เพิ่มขึ้น ในที่สุดความเค้นลดลง จนกระทั่งความเสียหายที่เกิดจากความเค้นร่วมกับการกัดกร่อนไม่สูงพอที่จะทำให้รอยร้าวขยายตัวต่อไป ความสัมพันธ์ระหว่างค่า K และเวลาในการทดสอบแบบการลดลงของ K แสดงดังภาพที่ 6c โดยขนาดรอยร้าวและแรงต้านเมื่อรอยร้าวหยุดขยายตัว ถูกใช้ในการคำนวณ K_{ISCC}

การทดสอบการแตกร้าจากความเค้นร่วมกับการกัดกร่อน แบบการเพิ่มขึ้นของ K ถูกกระทำภายหลัง การทดสอบการแตกร้าจากความเค้นร่วมกับการกัดกร่อน แบบการลดลงของ K โดยการขยายตัวของรอยร้าวและการเปลี่ยนแปลงแรง ภายใต้สภาพแวดล้อมกัดกร่อนต่างๆ แสดงพฤติกรรมเช่นเดียวกัน ตัวอย่างการเปลี่ยนแปลงแรง และการขยายตัวของรอยร้าว จากการทดสอบแบบการเพิ่มขึ้นของ K ภายใต้สภาพแวดล้อม SW:AH อัตราส่วน 5:1 แสดงดังภาพที่ 7a และ 7b ตามลำดับ ขนาดแรงที่มากกระทำและขนาดของรอยร้าวเพิ่มขึ้นตามเวลา จนกระทั่งชิ้นทดสอบเกิดการแตกหัก ขนาดรอยร้าวและแรงเมื่อชิ้นทดสอบเกิดการแตกหัก ถูกใช้ในการคำนวณ K_{IC} ความสัมพันธ์ระหว่างค่า K และเวลาแสดงดังภาพที่ 7c



ภาพที่ 7 การทดสอบ SCC แบบการเพิ่มขึ้นของ K ที่สภาพแวดล้อม SW:AH อัตราส่วน 5:1 ภาพ (a) ความสัมพันธ์ระหว่าง แรง กับ เวลา ภาพ (b) ความสัมพันธ์ระหว่าง รอยร้าว กับ เวลาภาพ (c) ความสัมพันธ์ระหว่าง K กับ เวลา

AMM-201

3.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง K กับ da/dt

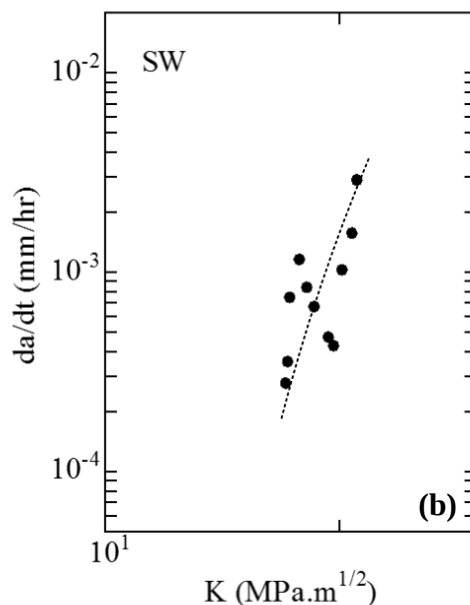
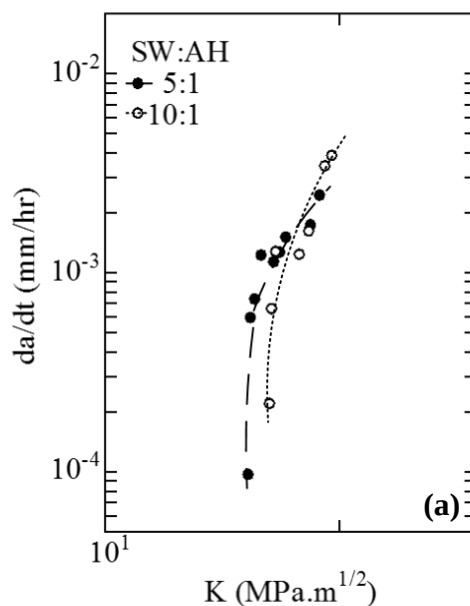
ความสัมพันธ์ระหว่าง K กับ da/dt ที่สภาพแวดล้อมต่างๆ แสดงดังภาพที่ 8 คือ รอยร้าวหยุดขยายตัว หรือมีอัตราการขยายตัว (da/dt) ต่ำกว่า 3.6×10^{-4} มม./ชั่วโมง ค่า K ที่ปลายรอยร้าวมีค่าเท่ากับ K_{ISCC} ของวัสดุผสม NAB ภายใต้สภาพแวดล้อม SW:AH อัตราส่วน 5:1 และ 10:1 วัสดุผสม NAB มี K_{ISCC} เป็น $15.3 \text{ MPa.m}^{1/2}$ และ $16.3 \text{ MPa.m}^{1/2}$ ตามลำดับ ในขณะที่ วัสดุผสม NAB ภายใต้สภาพแวดล้อม SW มี K_{ISCC} เป็น $17.2 \text{ MPa.m}^{1/2}$ ผลที่เกิดขึ้นแสดงให้เห็นว่าวัสดุผสม NAB มีความอ่อนไหวต่อสภาพแวดล้อมแบบน้ำทะเลปนเปื้อนแอมโมเนีย

ที่อัตราการขยายตัวของรอยร้าว (da/dt) ที่สูงกว่า 3.6×10^{-4} มม./ชั่วโมง รอยร้าวขยายตัวอย่างต่อเนื่องจากความเค้นร่วมกับการกัดกร่อนจนกระทั่งเกิดความเสียหายสุดท้าย เมื่อค่า K ที่ปลายรอยร้าวมีค่าเท่ากับ K_{IC} ของวัสดุผสม NAB โดยความสัมพันธ์ระหว่าง K กับ da/dt แสดงดังสมการ

$$\frac{da}{dt} = C(K)^m \quad (5)$$

เมื่อ C คือ ค่าคงที่ และ m คือ เลขชี้กำลังของฟังก์ชันลอการิทึม ค่า C และ m ของวัสดุผสม NAB แสดงดังตารางที่ 4 ระหว่างการทดสอบการแตกร้าวจากความเค้นร่วมกับการกัดกร่อน แบบการเพิ่มขึ้นของ K ขนาดแรงที่มากระทำและขนาดของรอยร้าวเพิ่มขึ้นตามเวลา ส่งผลให้ผลกระทบของความเค้นต่อการขยายตัวของรอยร้าวเพิ่มขึ้น ในขณะที่ผลกระทบของสภาพแวดล้อมกัดกร่อนต่อการขยายตัวของรอยร้าวเท่าเดิม จนในที่สุดการขยายตัวของรอยร้าวถูกควบคุมด้วยความเค้น ดังนั้น K_{IC} ที่สภาพแวดล้อมต่างๆ จึงมีขนาดใกล้เคียงกัน โดย K_{IC} มีค่าประมาณ $20.4\text{-}21.4 \text{ MPa.m}^{1/2}$ สำหรับสภาพแวดล้อมน้ำทะเลสังเคราะห์ปนเปื้อนแอมโมเนีย และ 21.5

$\text{MPa.m}^{1/2}$ สำหรับสภาพแวดล้อมน้ำทะเลสังเคราะห์



ภาพที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่าง da/dt กับ K ภายใต้สภาพแวดล้อม (a) SW: AH อัตราส่วน 5:1, 10:1 และ (b) SW

AMM-201

ตารางที่ 4 ค่าคงที่การขยายตัวของรอยร้าว
เนื่องจากความเค้นร่วมกับการกัดกร่อนในวัสดุ
ผสม NAB

สภาพแวดล้อม	C (mm/hr)	m
SW:AH 5:1	3.213×10^{-11}	6.17
SW:AH 10:1	1.597×10^{-16}	10.35
SW	1.426×10^{-15}	9.18

4. สรุป

จากผลการวิจัย การแตกร้าจากร่วมเค้น
ร่วมกับการกัดกร่อน ของวัสดุผสม NAB พบว่า

(1) วัสดุผสม NAB มีความอ่อนไหวต่อ
สภาพแวดล้อมแบบน้ำทะเลปนเปื้อนแอมโมเนีย
ดังนั้นใบจักรเรือสามารถเกิดความเสียหาย จาก
การแตกร้าจากร่วมเค้นร่วมกับการกัดกร่อน
เมื่อถูกใช้งานบริเวณตอนล่างของแม่น้ำเจ้าพระยา
ซึ่งมีปริมาณของแอมโมเนียที่สูงกว่าระดับทั่วไป

(2) รอยร้าวขยายตัวหยุดขยายตัว หรือมี
อัตราการขยายตัว (da/dt) ต่ำกว่า 3.6×10^{-4} มม./
ชั่วโมง เมื่อค่า K ที่ปลายรอยร้าวมีค่าเท่ากับ K_{ISCC}
ภายใต้สภาพแวดล้อม SW:AH อัตราส่วน 5:1 และ
10:1 วัสดุผสม NAB มี K_{ISCC} เป็น $15.3 \text{ MPa.m}^{1/2}$
และ $16.3 \text{ MPa.m}^{1/2}$ ตามลำดับ ในขณะที่วัสดุ
ผสม NAB ภายใต้สภาพแวดล้อม SW มี K_{ISCC}
เป็น $17.2 \text{ MPa.m}^{1/2}$ ค่า K_{ISCC} สามารถใช้ในการ
ออกแบบชิ้นส่วนทางวิศวกรรม หรือ ใช้กำหนด
ขีดจำกัดในการใช้งานวัสดุทางวิศวกรรม ภายใต้
สภาพแวดล้อมแบบน้ำทะเลปนเปื้อนแอมโมเนียได้

บรรณานุกรม

[1] H.I. Meigh, Cast and Wrought Aluminium
Bronzes - Properties, Processes and
Structure., Institute of Materials, London,
2000.

- [2] H.S. Campbell, Aluminium bronze corrosion
resistance guide, Copper Development
Association, UK, 1981.
- [3] A.H. Tuthill, Materials Performance, 26 (1987)
12-22.
- [4] J.A. Wharton, R.C. Barik, G. Kear, R.J.K.
Wood, K.R. Stokes, F.C. Walsh, Corrosion
Science, 47 (2005) 3336–3367.
- [5] A. Al-Hashem, W. Riad, Materials
Characterization, 48 (2002) 37-41.
- [6] A. Schüssler, H.E. Exner, Corrosion Science,
34 (1993) 1793-1802.
- [7] A. Schüssler, H.E. Exner, Corrosion Science,
34 (1993) 1803-1815.
- [8] Michelle Koul, Jennifer Gaies, An
Environmentally Assisted Cracking Evaluation
of UNS C64200 (Al-Si-Bronze) and UNS
C63200 (Ni-Al-Bronze)
- [9] นายรังสรรค์ ปิ่นทอง และคณะ, รายงาน
สถานการณ์มลพิษของประเทศไทยปี 2549, กรม
ควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและ
สิ่งแวดล้อม
- [10] E.A. Culpan, G. Rose, British Corrosion
Journal, 14 (1979) 160-166.
- [11] ISO 7539-6 : Corrosion of metals and alloys
- Stress corrosion cracking, Part 6 :
Preparation and use of pre-cracked
specimens, ISO Standards, 1989
- [12] I. Murakami, Stress Intensity Factors
Handbook, Pergamon Press, New York,
1987.
- [13] S. Suresh, Fatigue of materials, 2 ed.,
Cambridge University Press, Cambridge,
1998.
- [14] ASTM D1141-08: Standard practice for the
preparation of substitute ocean water,
Volume 11.02, Annual Book of ASTM
Standards, 2004.