

อิทธิพลของอุณหภูมิและความเข้มข้นของสารละลายผสม  
ระหว่างกรดไฮโดรคลอริกและโซเดียมคลอไรด์ต่อการผุกร่อน  
ภายใต้ความเค้นของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 316 L



นายสุรชัย นุ่มสารพัดนึก

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ  
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2540

ISBN 974 - 638 - 076 -1

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

INFLUENCE OF TEMPERATURE AND CONCENTRATION OF  
HYDROCHLORIC ACID PLUS SODIUM CHLORIDE SOLUTION  
ON STRESS CORROSION CRACKING OF AISI 316 L STAINLESS STEEL

Mr. Surachai Numsarapatnuk

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering in Metallurgical Engineering

Department of Metallurgical Engineering

Graduate School

Chulalongkorn University

Academic Year 1997

ISBN 974-638-076-1

หัวข้อวิทยานิพนธ์      อิทธิพลของอุณหภูมิและความเข้มข้นของสารละลายผสมระหว่าง  
กรดไฮโดรคลอริกและโซเดียมคลอไรด์ ต่อการผุกร่อนภายใต้ความเค็ม  
ของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 316 L

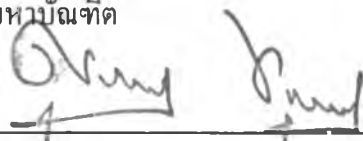
โดย                              นายสุรชัย นุ่มสารพัฒน์

ภาควิชา                        วิศวกรรมโลหการ

อาจารย์ที่ปรึกษา            อาจารย์ ดร. กอบบุญ หล่อทองคำ

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม      ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ชاکกร จารุพิสิษฐ

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยนี้เป็นส่วนหนึ่ง  
ของการศึกษาตามหลักสูตรมหาบัณฑิต



คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

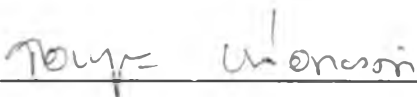
(ศาสตราจารย์ นายแพทย์ สุภวัฒน์ ชูติวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.ฉัตรชัย สมศิริ)



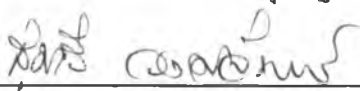
อาจารย์ที่ปรึกษา

(อาจารย์ ดร. กอบบุญ หล่อทองคำ)



อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ชاکกร จารุพิสิษฐ)



กรรมการ

(อาจารย์ ดร. สุมาลี วงศ์จันทร์)



กรรมการ

(อาจารย์ ดร. ไสว คำนชัยวิจิตร)

สรุป นุ่มสารพัดนึก : อิทธิพลของอุณหภูมิและความเข้มข้นของสารละลายผสมระหว่างกรดไฮโดรคลอริกและ โซเดียมคลอไรด์ต่อการผุกร่อนภายใต้ความเค้นของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 316L ( INFLUENCE OF TEMPERATURE AND CONCENTRATION OF HYDROCHLORIC ACID PLUS SODIUM CHLORIDE SOLUTION ON STRESS CORROSION CRACKING OF AISI 316 L STAINLESS STEEL ) อ. ที่ปรึกษา : ดร. กอบบุญ หล่อทองคำ อ. ที่ปรึกษาร่วม : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ชاکกร จารุพิสิษฐ ; 58 หน้า. ISBN 974 - 638 - 076 - 1

งานวิจัยนี้ศึกษาลักษณะของการผุกร่อนภายใต้ความเค้นของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316L ในสารละลายผสมระหว่างกรดไฮโดรคลอริก (0 - 10 โมล/ลิตร) และเกลือโซเดียมคลอไรด์ (0 - 6 โมล/ลิตร) ที่อุณหภูมิ 32°C , 42°C , 55°C และ 75°C โดยทำการทดสอบด้วยวิธี U - bend test และวัดเส้นโพลาริเซชันด้วยเครื่องโพเทนทีโอสเตด ผลการทดลองนำเสนอในรูปแบบของแผนภูมิการผุกร่อนภายใต้ความเค้น (SCC diagram) กราฟอัตราการผุกร่อน และกราฟเส้นโพลาริเซชัน พบว่า ที่อุณหภูมิ 32°C เมื่อความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออน และคลอไรด์ไอออนในสารละลายผสมเพิ่มขึ้น ลักษณะของการผุกร่อนจะรุนแรงขึ้นและแบ่งออกได้เป็น 3 ช่วง คือ ช่วงไม่สังเกตเห็นการผุกร่อน ช่วงการผุกร่อนแบบรูพรุนและการผุกร่อนทั่วไปแบบสม่ำเสมอ และช่วงการผุกร่อนทั่วไปแบบไม่สม่ำเสมอ แต่ไม่สังเกตเห็นรอยแตกร้าว การทดลองที่อุณหภูมิ 42°C, 55°C, 75°C ได้ผลเช่นเดียวกับที่อุณหภูมิ 32°C แต่การผุกร่อนจะรุนแรงกว่าเมื่อเปรียบเทียบที่ความเข้มข้นเดียวกัน การเพิ่มความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออนและคลอไรด์ไอออน และอุณหภูมิ มีผลทำให้เสถียรภาพของฟิล์มพาสซีฟบนผิวเหล็กกล้าไร้สนิมเกรดนี้ลดลง

เมื่อเปรียบเทียบผลของการผุกร่อนภายใต้ความเค้นของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316L กับเกรด 304 ในสภาวะการทดสอบวิธี U - bend test และในสารละลายผสมระหว่างกรดไฮโดรคลอริกและเกลือโซเดียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้นเดียวกัน พบว่า เหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316L จะไม่เกิดรอยแตกร้าว เป็นเพราะว่าเหล็กกล้าไร้สนิมเกรดนี้มีความต้านทานต่อการผุกร่อนภายใต้ความเค้นดีกว่า เนื่องจากอิทธิพลของการเติมธาตุ Mo ช่วยทำให้ฟิล์มพาสซีฟมีเสถียรภาพดีกว่า

จากการวัดเส้นโพลาริเซชันที่อุณหภูมิ 30°C พบว่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าพาสซีฟ ( $I_p$ ) สูงขึ้น เมื่อความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออนและคลอไรด์ไอออนสูงขึ้น แสดงว่า ฟิล์มพาสซีฟมีเสถียรภาพลดลง ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิจัยนี้ และเมื่อเปรียบเทียบเส้นโพลาริเซชัน ของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรดนี้กับเกรด 304 L พบว่าเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316L มีช่วงพาสซีฟที่กว้างกว่าและมีศักย์ไฟฟ้าของการผุกร่อน ( $E_{CORR}$ ) สูงกว่าเกรด 304L แสดงว่าฟิล์มพาสซีฟของมันแข็งแรงกว่า

ภาควิชา.....วิศวกรรมโลหการ  
สาขาวิชา.....  
ปีการศึกษา.....2540

ลายมือชื่อนิติ.....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

## C718225 : MAJOR METALLURGICAL ENGINEERING  
KEY WORD: STRESS CORROSION CRACKING / AISI 316L / HYDROCHLORIC ACID / SODIUM CHLORIDE

SURACHAI NUMSARAPATNUK : INFLUENCE OF TEMPERATURE AND CONCENTRATION OF HYDROCHLORIC ACID PLUS SODIUMCHLORIDE SOLUTION ON STRESS CORROSION CRACKING OF AISI 316 L STAINLESS STEEL, THESIS ADVISOR : Dr.- Ing GOBBOON LOTHONGKUM  
THESIS COADVISOR : ASST. PROF. CHARKORN JARUPISITTHORN ; 58 pp., ISBN 974 - 638 - 076 - 1

The corrosion modes of the AISI 316L austenitic stainless steel were investigated in HCl (0 – 10 M) + NaCl (0 – 6 M) solutions at temperature of 32°C, 42°C, 55°C and 75°C. using U- bend test. SCC diagrams, corrosion rate curves and polarization curves of the AISI 316L were established. It was found that at temperature of 32°C as the concentrations of H<sup>+</sup> and Cl<sup>-</sup> in the solutions were increased, the corrosion of metal was more severe, and the corrosion modes could be classified as relatively no corrosion, pitting corrosion and uniform corrosion, and non-uniform corrosion. But no crack was found. Similar corrosion modes were obtained at other temperatures and corrosion of metal was more severe at higher temperature. It could be concluded that H<sup>+</sup> and Cl<sup>-</sup> concentration and solution temperature affected corrosion modes of AISI 316L under bending stress, due to the decrease of passive film stability

Comparing with AISI 304 at the same conditions, AISI 316L showed higher SCC resistance as no crack was observed. Due to the effect of Molybdenum addition, higher passive film stability was obtained.

Polarization curves measured at mixed solution temperature of 30°C exhibited that passive current density (I<sub>p</sub>) increased with the increasing H<sup>+</sup> and Cl<sup>-</sup> concentration, indicating that passive film stability decreased, which corresponded to this work. Also, the passive range of AISI 316L was found to be wider than that of AISI 304L. Corrosion potential (E<sub>CORR</sub>) of AISI 316L was higher than that of 304L. The passive film of AISI 316L was stronger than that of AISI 304L. Following the above explanation, stainless Steel AISI 316L in the test apparently contained no crack.

ภาควิชา..... วิศวกรรมโลหการ  
สาขาวิชา.....  
ปีการศึกษา..... 2540

ลายมือชื่อนิสิต..... สิริชัย ชุ่มชื่นพดปล  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา..... ภาณุพงศ์ แฉ่งทอน  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ ท่านอาจารย์ ดร. กอบบุญ หล่อทองคำ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ชاکกร จารุพิสิษฐ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้ความเมตตากรุณาให้คำปรึกษา ข้อคิดเห็น ในการดำเนินงานวิจัย และตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์ มาโดยตลอด จนกระทั่งงานวิจัยครั้งนี้สำเร็จลุล่วงตรงตามวัตถุประสงค์

ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. ฉัตรชัย สมศิริ หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมโลหการและประธานคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ตลอดจนท่านอาจารย์ ดร. สุมาลี วงศ์จันทร์ ท่านอาจารย์ ดร. ไสว คำนชัยวิจิตร กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ให้ความสนใจพร้อมคำแนะนำต่องานวิจัยฉบับนี้ รวมทั้งคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมโลหการทุกท่าน ที่ได้ช่วยอบรมสั่งสอนวิชาการสาขาโลหการ นอกจากนี้ผู้เขียนขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมโลหการทุกท่าน ที่ให้ความสะดวกในการปฏิบัติงานวิจัย การประสานงาน ติดต่อสอบถาม เจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์ด้านการวิเคราะห์แผ่นเหล็กทดสอบ กองทุนโลหการ สวทช. ที่ให้ทุนอุดหนุนงานวิจัยครั้งนี้ อาจารย์และนิสิตนักศึกษาศาสนาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้เครื่องโพเทนทีโอสแตด ในการทำการทดลอง ณ ศูนย์นวัตกรรมเทคโนโลยีไทย - ฝรั่งเศส ตลอดจนเพื่อนนักศึกษาภาควิชาวิศวกรรมโลหการทุก ๆ ท่าน ที่ให้กำลังใจพร้อมให้ความช่วยเหลือตลอดมา ผู้เขียนขอระลึกพระคุณของท่านทั้งหลายตลอดไป

สุดท้ายที่จะลืมมิได้ ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณบิดาและมารดา ผู้ให้กำเนิดอบรมเลี้ยงดู ส่งเสริมการศึกษาเป็นอย่างดีเสมอมา จนสามารถสำเร็จการศึกษา

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	จ
กิตติกรรมประกาศ .....	ฉ
สารบัญ .....	ช
สารบัญตาราง .....	ซ
สารบัญรูป .....	ฅ
คำอธิบายคำย่อ .....	ฐ
บทที่	
1 บทนำ .....	1
1.1 ความสำคัญของงานวิจัย .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ .....	3
1.3 ขอบเขตการศึกษา .....	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	4
2 การปรีทัศน์วรรณกรรม .....	5
3 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการทดลอง .....	25
4 ผลการทดลองและอภิปราย .....	30
4.1 ผลของอุณหภูมิและความเข้มข้นสารละลายผสมระหว่างกรดไฮโดรคลอริก และเกลือ โซเดียมคลอไรด์ต่อลักษณะการสุกร่อน .....	30
4.2 ผลการวัดเส้น โพลาริเซชันต่อพฤติกรรมการสุกร่อนภายใต้ความเค้น .....	42
4.3 ผลของอุณหภูมิและความเข้มข้นสารละลายผสมระหว่างกรดไฮโดรคลอริก และเกลือ โซเดียมคลอไรด์ต่ออัตราการสุกร่อน .....	48
5 สรุปผลการทดลอง .....	53
รายการอ้างอิง .....	54
ภาคผนวก .....	55
ประวัติผู้เขียน .....	58

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า	
2.1	แสดงส่วนผสมของฟิล์มพาสซีฟที่ผิวเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด 304 หลังจาก จุ่มในสารละลายผสมระหว่างคลอไรด์อออนรวม 1.5 โมล/ลิตรและ ไฮโดรเจนอออน 0.5 โมล/ลิตร เป็นเวลา 2 วัน วิเคราะห์โดยเครื่องเอ็กซ์เรย์ โฟโตอิเล็กตรอนสเปกโตสโคปี.....	18
3.1	แสดงส่วนผสมทางเคมี (ร้อยละ) ของเหล็กทดสอบ .....	25
3.2	แสดงคุณสมบัติเชิงกลของเหล็กทดสอบ.....	26



## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 แสดงแผนภาพของเวกเนอร์ เป็นความสัมพันธ์ของปัจจัย 4 ประการต่อการ หุกร่อนภายใต้ความเค้น ส่วนที่แรงงา คือ ส่วนที่จะเกิดการหุกร่อน.....	2
1.2 กราฟความต้านทานการหุกร่อนภายใต้ความเค้น ของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด ออสเตนนิติกเกรดต่าง ๆ ใน $MgCl_2$ , 42% โดยน้ำหนัก ขณะเคือด ( $154^{\circ}C$ ).....	3
2.1 แสดงอัตราการหุกร่อนที่เพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้นสารละลายผสมระหว่างกรด ไฮโดรคลอริกและเกลือโซเดียมคลอไรด์เพิ่มขึ้น ทดสอบที่อุณหภูมิห้อง.....	5
2.2 แสดงแผนภาพการหุกร่อนภายใต้ความเค้น ช่วงความเข้มข้นต่าง ๆ ของสารละลาย ผสมระหว่างกรดไฮโดรคลอริก และเกลือโซเดียมคลอไรด์ ที่ทำให้เกิดการหุกร่อน ภายใต้ความเค้นของเหล็กกล้าไร้สนิม 304.....	6
2.3 แสดงเส้นโพลาริเซชันขั้วบวกและลบของเหล็กกล้าไร้สนิม 304 ในสารละลายผสม ระหว่างกรดไฮโดรคลอริก = 0.1 โมล/ลิตรคงที่ และเกลือโซเดียมคลอไรด์ ที่ความ เข้มข้นต่าง ๆ.....	7
2.4 แสดงศักย์ไฟฟ้า ( $E_{sc}$ ) ที่ทำให้เกิดการหุกร่อนบนเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 ในสารละลายผสมระหว่างกรดไฮโดรคลอริกและเกลือโซเดียมคลอไรด์.....	8
2.5 แสดงแผนภาพลักษณะการหุกร่อนกับความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออนและคลอไรด์ ไอออน.....	9
2.6 แสดงลักษณะรอยแตกแบบผ่าเกรน ทดสอบที่อุณหภูมิห้อง.....	9
2.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก และอัตราการหุกร่อน ของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเตนนิติกเกรด 304.....	10
2.8 แสดงค่าศักย์ไฟฟ้า (E) บนเหล็กกล้าไร้สนิมออสเตนนิติกเกรด 304 ที่ทำให้เกิด การหุกร่อนภายใต้ความเค้น ในกรดไฮโดรคลอริก.....	11
2.9 แสดงเส้นโพลาริเซชันขั้วบวกและลบของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเตนนิติกเกรด 304 ในกรดไฮโดรคลอริก ที่มีความเข้มข้นต่าง ๆ.....	11
2.10 แสดงลักษณะ ขนาดชั้นทดสอบ และกราฟระหว่างการบีดตัวกับเวลาในกรดไฮโดร คลอริก หรือกรดซัลฟูริก 0.82 โมล/ลิตร ที่ $80^{\circ}C$ ที่ความเค้นแรงดึงที่ 473 เมกะปาสกาล.....	13
2.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ (T) กับค่าเวลาที่แตกหัก ( $t_r$ ) และ ค่า $i_m$ (อัตราการบีดตัวคงที่) ของเหล็กกล้าไร้สนิม 304 และ 316 ที่แรงดึงที่ 437 เมกะปาสกาล ในกรดไฮโดรคลอริก 0.82 โมล/ลิตร.....	14

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.12 แสดงความไม่สัมพันธ์กันระหว่างอัตราส่วน $\mu_r$ กับอุณหภูมิ ชนิดของเหล็ก (316/304) และ ค่า pH ในกรดไฮโดรคลอริกและกรดซัลฟูริก 0.82 โมล/ลิตร ที่แรงดึงคงที่ 437 เมกะปาสกาล.....	15
2.13 แผนภูมิการหุ่ร่อนภายใต้ความเค้นของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด 304 ในสารละลายผสมระหว่างกรดไฮโดรคลอริกและเกลือโซเดียมคลอไรด์ ทดสอบด้วยวิธี SSRT ที่อุณหภูมิห้อง.....	16
2.14 แสดงกราฟระหว่างความเค้นแรงดึงกับเวลาแตกหัก ของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด 304 ในสารละลายผสมระหว่างกรดไฮโดรคลอริกและเกลือโซเดียมคลอไรด์ เปรียบเทียบกับในอากาศ โดยวิธี SSRT ที่อุณหภูมิห้อง.....	17
2.15 แสดงผลของไฮโดรเจนไอออนและคลอไรด์ไอออนต่อเวลาการแตกหัก ( $t_r$ ) ของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด 304 ในสารละลายผสมระหว่าง กรดไฮโดรคลอริก และเกลือ โซเดียมคลอไรด์ ทดสอบโดยวิธี SSRT ที่อุณหภูมิห้อง.....	18
2.16 ภาพถ่ายด้วยกล้อง TEM แสดง โครงสร้างมาร์เทนไซต์ และ รอยแตกบนเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด 304 ในสารละลายผสมระหว่างคลอไรด์ไอออน 1.5 โมล/ลิตร และไฮโดรเจนไอออน 1.0 โมล/ลิตร หลังทำ SSRT ที่อัตราการขีดตัว $2.5 \times 10^{-3}$ มม./วินาที.....	20
2.17 แสดงการเปลี่ยนแปลงของความเค้น – ความเครียด และ $E_{scc}$ ในระหว่างทำการทดสอบ SSRT ในสารละลายมาตรฐานกับในน้ำมันซิลิโคน.....	21
2.18 แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่า $e_{scc}$ และ $E_{scc}$ ที่ความเข้มข้นของไทโอซัลเฟตไอออน ( $S_2O_3^{2-}$ ) ต่าง ๆ ตั้งแต่ 0 - 1 โมล/ลิตร ในสารละลายมาตรฐานโซเดียมคลอไรด์ 20% โซเดียมคลอไรด์ 3%.....	22
2.19 แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่า $e_{scc}$ และ $E_{scc}$ ที่ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ ต่าง ๆ ในสารละลายมาตรฐาน.....	22
2.20 แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่า $e_{scc}$ , $N_c$ และ $E_{scc}$ ที่ค่า pH ต่าง ๆ (1-9) ในสารละลายมาตรฐาน.....	23
3.1 แสดงการแซ่ขึ้นทดสอบในสารละลายผสมระหว่างกรดไฮโดรคลอริก และเกลือโซเดียมคลอไรด์ในขวดชมพู ปริมาตร 1 ลิตร ทดสอบที่อุณหภูมิห้องในวิธี U-bend test.....	27

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.2	แสดงขั้นตอนการนำชิ้นงานเข้าเตาอบและเทอร์โมมิเตอร์ เพื่อวัดอุณหภูมิเตา..... 27
3.3	แผนผังแสดงขั้นตอนการทดลอง..... 29
4.1	แผนภูมิแสดงลักษณะการสุกก่อนภายใต้ความเค้นของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด 316 L ในสารละลายผสมระหว่างกรดไฮโดรคลอริกและเกลือโซเดียมคลอไรด์ที่อุณหภูมิ 32°C ..... 33
4.2	ภาพถ่ายด้วยเครื่อง SEM แสดง ลักษณะการสุกก่อนภายใต้ความเค้นของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด 316 L ที่บริเวณผิวส่วนโค้งชิ้นงานรูปตัวยูในสารละลายผสมระหว่างกรดไฮโดรคลอริก 0.1 โมล/ลิตร และ เกลือโซเดียมคลอไรด์ 4.9 โมล/ลิตร ที่อุณหภูมิห้อง..... 34
4.3	แผนภูมิแสดงลักษณะการสุกก่อนภายใต้ความเค้นของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด 316 L ในสารละลายผสมระหว่างกรดไฮโดรคลอริกและเกลือโซเดียมคลอไรด์ที่อุณหภูมิ 42°C..... 35
4.4	แผนภูมิแสดงลักษณะการสุกก่อนภายใต้ความเค้นของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด 316 L ในสารละลายผสมระหว่างกรดไฮโดรคลอริกและเกลือโซเดียมคลอไรด์ที่อุณหภูมิ 55°C..... 36
4.5	แผนภูมิแสดงลักษณะการสุกก่อนภายใต้ความเค้นของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด 316 L ในสารละลายผสมระหว่างกรดไฮโดรคลอริกและเกลือโซเดียมคลอไรด์ที่อุณหภูมิ 75°C..... 37
4.6	ภาพถ่ายด้วยเครื่อง SEM แสดง ลักษณะการสุกก่อนภายใต้ความเค้นของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด 316 L ที่บริเวณผิวส่วนโค้งชิ้นงานรูปตัวยูในสารละลายผสมระหว่างกรดไฮโดรคลอริก 0.1 โมล/ลิตร และ เกลือโซเดียมคลอไรด์ 3.9 โมล/ลิตร ที่อุณหภูมิ 42°C ..... 38
4.7	ภาพถ่ายด้วยเครื่อง SEM แสดง ลักษณะการสุกก่อนภายใต้ความเค้นของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด 316 L ที่บริเวณผิวส่วนโค้งชิ้นงานรูปตัวยูในสารละลายผสมระหว่างกรดไฮโดรคลอริก 0.1 โมล/ลิตรและเกลือโซเดียมคลอไรด์ 4.9 โมล/ลิตรที่อุณหภูมิ 55°C..... 39
4.8	ภาพถ่ายด้วยเครื่อง SEM แสดงลักษณะการสุกก่อนภายใต้ความเค้นของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด 316 L ที่บริเวณผิวส่วนโค้งชิ้นงานรูปตัวยูในสารละลาย

## คำอธิบายคำย่อ

คำย่อ	คำเต็ม	ความหมาย
SCC	Stress corrosion cracking	รอยแตกจากการผุกร่อนภายใต้ความเค้น
NDT	Non - destructive testing	วิธีทดสอบแบบไม่ทำลายชิ้นงาน
$E_{CORR}$	Corrosion potential	ศักย์ไฟฟ้าของการผุกร่อน
$E_{SCC}$	SCC potential	ศักย์ไฟฟ้าของการผุกร่อนภายใต้ความเค้น
NHE	Standard hydrogen electrode	อิเล็กโทรดมาตรฐานไฮโดรเจน
SHE	Standard hydrogen electrode	อิเล็กโทรดมาตรฐานไฮโดรเจน
SSRT	Slow strain rate test	วิธีทดสอบการผุกร่อนโดยใช้แรงดึงที่อัตราความเครียดต่ำ
$\sigma_{CON}$	Constant stress	ความเค้นคงที่
$\epsilon_{SCC}$	SCC strain	ค่าความเครียดที่ทำให้เกิดการผุกร่อนภายใต้ความเค้น
TG SCC	Transgranular SCC	รอยแตกจากการผุกร่อนภายใต้ความเค้นแบบผ่าเกรน
$N_C$	Number of crack	จำนวนรอยแตก
AIISI	American Iron and Steel Institute	สถาบันเหล็กและเหล็กกล้าอเมริกา
ASTM	American Society for Testing and Materials	สมาคมตรวจสอบวัสดุอเมริกา
U - Bend Test	U - bend test	วิธีทดสอบการผุกร่อนโดยมีความเค้นคงที่ด้วยการดัดชิ้นทดสอบเป็นรูปตัว U
SCE	Saturated calomel electrode	อิเล็กโทรดมาตรฐานชนิดคาโลเมล
SEM	Scanning electron microscope	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด
XPS	X - ray photoelectron spectroscopy	เครื่องเอกซเรย์โฟโตอิเล็กตรอนสเปกโตรสโกปี
$I_p$	Passive current	กระแสไฟฟ้าของฟิล์มพาสซีฟ