

อิทธิพลของไนโตรเจนต่อการสุกก่อนแบบรูปทรงของรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม  
ออสเทนนิติกเกรด 304 และ 316L ในสารละลายมาตรฐาน NACE  
และสารละลายไฮเดียมคลอไรด์ 3.5 % โดยน้ำหนัก

นางสาว กนกวรรณ แสงเกียรติยุทธ



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2541

ISBN 974-331-123-8

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECTS OF NITROGEN ON PITTING CORROSION OF 304 AND 316L  
AUSTENITIC STAINLESS STEEL WELD METALS IN NACE  
AND 3.5 Wt% NaCl SOLUTION

Miss Kanokwan Saengkietiyut

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 1998

ISBN 974-331-123-8

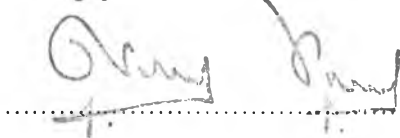
หัวข้อวิทยานิพนธ์ อิทธิพลของไนโตรเจนต่อการสุกของแบบรูปของรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม  
ออสเทนนิติกเกรด 304 และ 316L ในสารละลายมาตรฐาน NACE และ  
สารละลายไฮโดรเจนคลอไรด์ 3.5 % โดยน้ำหนัก

โดย นางสาว กนกวรรณ แสงเกียรติยุทธ

ภาควิชา วิศวกรรมโลหการ

อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กอบบุญ หล่อทองคำ

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยนี้เป็นส่วนหนึ่ง  
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต



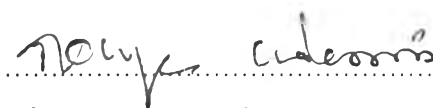
(ศาสตราจารย์ นายแพทย์ศุภวัฒน์ ชูติวงศ์)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



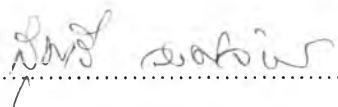
ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ฉัตรชัย สมศิริ)



อาจารย์ที่ปรึกษา  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กอบบุญ หล่อทองคำ)



กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ชاکกร จารุพิสิฐธร)



กรรมการ  
(อาจารย์ ดร.สุมาลี วงศ์จันทร์)

กนกวรรณ แสงเกียรติยุทธ : อิทธิพลของไนโตรเจนต่อการกัดกร่อนแบบรูพรุนของรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด 304 และ 316L ในสารละลายมาตรฐาน NACE และสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3.5% โดยน้ำหนัก (EFFECTS OF NITROGEN ON PITTING CORROSION OF 304 AND 316L AUSTENITIC STAINLESS STEEL WELD METALS IN NACE AND 3.5 Wt% NaCl SOLUTION) อ. ที่ปรึกษา : ผศ. ดร. กอบบุญ หล่อทองคำ ; 60 หน้า.  
ISBN 974-331-123-8.

การเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมโดยวิธีใช้แก๊สปกคลุมจะใช้ไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอนเพื่อควบคุมปริมาณของเดลด้าเฟอร์ไรท์ให้อยู่ในช่วง 5-10% โดยปริมาตร ป้องกันการแตกร้าวขณะร้อนและการกัดกร่อนแบบโครงสร้างตาข่ายของเดลด้าเฟอร์ไรท์ งานวิจัยนี้ศึกษาอิทธิพลของไนโตรเจนต่อการกัดกร่อนแบบรูพรุนของรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด 304 และ 316L ที่เกิดจากการเชื่อมแบบทิกพัลส์ โดยใช้แก๊สปกคลุมอาร์กอนและแก๊สอาร์กอนผสมแก๊สไนโตรเจนในอัตราส่วน 1-4% โดยปริมาตร ในสารละลายมาตรฐาน NACE และสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3.5% โดยน้ำหนัก โดยการวัดเส้นโพลาริเซชันและศึกษาผลของโครงสร้างจุลภาคที่เกิดจากการเชื่อมต่อการกัดกร่อนแบบรูพรุน

การเพิ่มปริมาณส่วนผสมของแก๊สไนโตรเจนในแก๊สปกคลุมอาร์กอนในการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด 304 และ 316L จะทำให้ปริมาณการละลายของไนโตรเจนในรอยเชื่อมเพิ่มขึ้น โดยการละลายของไนโตรเจนจะขึ้นกับธาตุที่ผสมอยู่ในรอยเชื่อม ปริมาณไนโตรเจนในรอยเชื่อมเพิ่มขึ้นจะทำให้เส้นโพลาริเซชันของรอยเชื่อมเคลื่อนไปในทิศทางเพิ่มค่าศักย์ไฟฟ้า ทั้งในกรณีการวัดเส้นโพลาริเซชันในสารละลายมาตรฐาน NACE และสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3.5% โดยน้ำหนัก คือทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้าของการเกิดรูพรุนเพิ่มขึ้น แต่ค่าความหนาแน่นของกระแสในช่วงพาสซีฟลดลง สารละลายมาตรฐาน NACE จะมีผลต่อค่าศักย์ไฟฟ้าของการเกิดรูพรุน และค่าความหนาแน่นของกระแสในช่วงพาสซีฟมากกว่าสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3.5% โดยน้ำหนัก เพราะมีความเป็นกรดและปริมาณเกลือโซเดียมคลอไรด์สูงกว่า การกัดกร่อนแบบรูพรุนของรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด 304 และ 316L เกิดขึ้นที่บริเวณขอบเกรนออสเทนไนท์กับเดลด้าเฟอร์ไรท์เนื่องจากบริเวณขอบเกรนมีพลังงานสูงเกิดการตกผลึกของสารประกอบโครเมียมไนไตรด์ได้ง่ายทำให้บริเวณข้างเคียงมีปริมาณโครเมียมที่จำเป็นแก่การเกิดฟิล์มน้อยกว่า 13% การกัดกร่อนแบบรูพรุนจะขยายตัวเข้าสู่โครงสร้างออสเทนไนท์

ภาควิชา ..... วิศวกรรมโลหการ  
สาขาวิชา ..... วิศวกรรมโลหการ  
ปีการศึกษา ..... 2541

ลายมือชื่อนิสิต ..... กนกวรรณ แสงเกียรติยุทธ  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ..... *กอบบุญ หล่อทองคำ*  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

# # 3970009921 : MAJOR METALLURGICAL ENGINEERING

KEY WORD: NITROGEN / PITTING CORROSION / AUSTENITIC STAINLESS STEEL / NACE / NaCl / WELD METALS

KANOKWAN SAENGIETIYUT: EFFECTS OF NITROGEN ON PITTING CORROSION OF 304 AND 316L AUSTENITIC STAINLESS STEEL WELD METALS IN NACE AND 3.5 Wt% NaCl SOLUTION. THESIS ADVISOR : ASSIST. PROF. GOBBOON LOTHONGKUM, Ph.D. 60 pp. ISBN 974-331-123-8.

In TIG welding of austenitic stainless steel nitrogen is mixed with argon shielding gas in order to control delta ferrite contents of weld metal between 5-10% by volume to prevent hot cracking and corrosion network of the delta ferrite. This research studied the effects of nitrogen on pitting corrosion of the 304 and 316L austenitic stainless steel weld metals produced by TIG pulse welding. Argon and argon with nitrogen 1-4% by volume were used as shielding gas. The polarization curves of weld metals were measured in the standard NACE and 3.5 Wt% NaCl solutions. Microstructure responsibility for pitting corrosion was also studied.

Increasing nitrogen contents in argon shielding gas for TIG pulse welding of the 304 and 316L austenitic stainless steel will increase the nitrogen contents in weld metals. Increasing nitrogen contents of weld metal will shift the polarization curves measured in the standard NACE and 3.5 Wt% NaCl solutions to positive potentials. Pitting potentials increase and the passive current density decrease when nitrogen contents of weld metal increase. The NACE solution has more effects on the pitting potentials and passive current density than 3.5 Wt% NaCl solution because the NACE solution has lower pH and higher NaCl contents than 3.5 Wt% NaCl solution. Pitting corrosion of the 304 and 316L austenitic stainless steel weld metals was found at the austenite and delta ferrite interfaces and propagated to austenite phases.

ภาควิชา..... วิศวกรรมโลหการ  
สาขาวิชา..... วิศวกรรมโลหการ  
ปีการศึกษา..... 2541

ลายมือชื่อนิสิต..... กนกวรรณ ละเอียดจันทร์  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา..... *Toyus Udomni*  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม..... -



## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีด้วยความช่วยเหลือของ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กอบบุญ หล่อทองคำ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่าง ๆ ในการวิจัยด้วยดีมาตลอด ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ฉัตรชัย สมศิริ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ชากร จารุพิสิฐธร และ อาจารย์ ดร.สุมาลี วงศ์จันทร์ คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้ให้คำแนะนำอันเป็นประโยชน์ ขอขอบคุณบริษัท พัฒน์กล จำกัด (มหาชน) ที่ให้ความอนุเคราะห์เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด 304 และ 316L สำหรับงานวิจัยในครั้งนี้ ขอขอบคุณอาจารย์ ดร.อรรณพ ชัยลภากุล และเจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องโพเทนชิโอสแตท ขอขอบคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประสงค์ ศรีเจริญชัย , นายเสนีย์ มณีเพชร ท่านอาจารย์และเจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาวิศวกรรมโลหการ รวมถึงเพื่อน ๆ พี่ ๆ ทุกคนที่ได้ให้ความช่วยเหลือจนงานวิจัยในครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี และเนื่องจากทุนการวิจัยทั้งหมดได้รับการสนับสนุนจากสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช) ผู้วิจัยจึงขอขอบคุณมา ณ ที่นี้ด้วย

ท้ายนี้ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณ บิดา-มารดา ซึ่งสนับสนุนในด้านการเงินและให้กำลังใจเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญรูป.....	ฎ
อธิบายคำย่อ.....	ด
<b>บทที่</b>	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตของการศึกษา.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
2 การศึกษาข้อมูลเบื้องต้น.....	3
3 ขั้นตอนและวิธีดำเนินการทดลอง.....	14
3.1 การเตรียมชิ้นงานทดสอบ.....	14
3.2 การวิเคราะห์หาส่วนผสมทางเคมี.....	16
3.3 การทดลองทางไฟฟ้าเคมี.....	16
3.4 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค.....	19
4 ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง.....	20
4.1 การละลายของไนโตรเจนในรอยเชื่อม.....	20

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.2 การวิเคราะห์เส้นโพลาริเซชันของรอยเชื่อม.....	24
4.2.1 ผลการวัดเส้นโพลาริเซชันของรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม ออสเทนนิติกเกรด AISI 304 และ AISI 316L ที่ปริมาณ ไนโตรเจนต่าง ๆ กัน ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3.5% โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 26°C.....	25
4.2.2 ผลการวัดเส้นโพลาริเซชันของรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม ออสเทนนิติกเกรด AISI 304 และ AISI 316L ที่ปริมาณ ไนโตรเจนต่าง ๆ กัน ในสารละลายมาตรฐาน NACE ที่ อุณหภูมิ 26 °C .....	31
4.3 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค.....	38
บทที่	
5 สรุปผลการทดลอง.....	43
รายการอ้างอิง.....	44
ภาคผนวก ก. ....	48
ภาคผนวก ข. ....	49
ภาคผนวก ค. ....	50
ภาคผนวก ง. ....	51
ภาคผนวก จ. ....	54
ภาคผนวก ฉ. ....	58
ภาคผนวก ช. ....	59
ประวัติผู้เขียน.....	60



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ผลการใช้แก๊สไนโตรเจนเป็นแก๊สปกคลุมด้านหลังแทนแก๊สอาร์กอน ต่อบริเวณที่เกิดการกัดกร่อนของรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทน นิติกเกรด AISI 316 ด้วยวิธีการเชื่อมแบบทิก โดยทดสอบการกัด กร่อนในกรดออกซาลิก ด้วยวิธีimmersion corrosion test .....	6
3.1 แสดงส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด AISI 304 และAISI 316Lที่ใช้ในการทดลอง วิเคราะห์ด้วยเครื่อง emission spectroscopy.....	16
4.1 ค่าความเป็นกรดต่างก่อนและหลังการวัดเส้นโพลาริเซชัน และผลการ วิเคราะห์ไอออนที่เกิดขึ้นภายหลังการวัดเส้นโพลาริเซชันของรอยเชื่อม เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด AISI 304 ในสารละลายโซเดียม คลอไรด์ 3.5 %โดยน้ำหนักที่ปริมาณไนโตรเจนต่าง ๆ กัน.....	30
4.2 ค่าความเป็นกรดต่างก่อนและหลังการวัดเส้นโพลาริเซชัน และผลการ วิเคราะห์ไอออนที่เกิดขึ้นภายหลังการวัดเส้นโพลาริเซชันของรอยเชื่อม เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด AISI 316L ในสารละลายโซเดียม คลอไรด์ 3.5 %โดยน้ำหนักที่ปริมาณไนโตรเจนต่าง ๆ กัน.....	30
4.3 ค่าความเป็นกรดต่างก่อนและหลังการวัดเส้นโพลาริเซชันและผลการ วิเคราะห์ไอออนที่เกิดขึ้นภายหลังการวัดเส้นโพลาริเซชันของรอยเชื่อม เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรดAISI 304 ในสารละลายมาตรฐาน NACEที่ปริมาณไนโตรเจนต่าง ๆ กัน.....	36
4.4 ค่าความเป็นกรดต่างก่อนและหลังการวัดเส้นโพลาริเซชันและผลการ วิเคราะห์ไอออนที่เกิดขึ้นภายหลังการวัดเส้นโพลาริเซชันของรอยเชื่อม เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด AISI 316Lในสารละลายมาตรฐาน NACE ที่ปริมาณไนโตรเจนต่าง ๆ กัน.....	36

## สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
<p>ก.1 ค่าตัวแปรในการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด AISI 304 และ AISI 316L ด้วยวิธีการเชื่อมแบบทิกพัลส์ โดยใช้แก๊สปกคลุมอาร์กอนและแก๊สอาร์กอนผสมแก๊สไนโตรเจนในอัตราส่วน1-4%โดยปริมาตร.....</p>	48
<p>ข.1 ส่วนผสมทางเคมีของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด AISI 304 (%โดยน้ำหนัก).....</p>	49
<p>ข.2 ส่วนผสมทางเคมีของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด AISI 316L (%โดยน้ำหนัก).....</p>	49
<p>ค.1 ปริมาณไนโตรเจนในรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด AISI 304 และ AISI 316L.....</p>	50
<p>ง.1 แสดงค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (<math>E_{cor}</math>) ค่าศักย์ไฟฟ้าของการเกิดรูพรุน (<math>E_p</math>) และค่าความหนาแน่นของกระแสในช่วงพาสซีฟ (<math>I_p</math>) ของรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด AISI 304 ที่ปริมาณไนโตรเจนต่าง ๆ กัน ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3.5 %โดยน้ำหนักที่อุณหภูมิ 26° C.....</p>	51
<p>ง.2 แสดงค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (<math>E_{cor}</math>) ค่าศักย์ไฟฟ้าของการเกิดรูพรุน (<math>E_p</math>) และค่าความหนาแน่นของกระแสในช่วงพาสซีฟ (<math>I_p</math>) ของรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด AISI 304 ที่ปริมาณไนโตรเจนต่าง ๆ กัน ในสารละลายมาตรฐาน NACE ที่อุณหภูมิ 26° C.....</p>	52
<p>ง.3 แสดงค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (<math>E_{cor}</math>) ค่าศักย์ไฟฟ้าของการเกิดรูพรุน (<math>E_p</math>) และค่าความหนาแน่นของกระแสในช่วงพาสซีฟ (<math>I_p</math>) ของรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด AISI 316L ที่ปริมาณไนโตรเจนต่าง ๆ กัน ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3.5 %โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 26° C.....</p>	52

## สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ง.4	
แสดงค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน ( $E_{cor}$ ) ค่าศักย์ไฟฟ้าของการเกิด รูพรุน ( $E_p$ ) และค่าความหนาแน่นของกระแสในช่วงพาสซีฟ ( $I_p$ ) ของรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด AISI 316L ที่ ปริมาณไนโตรเจนต่าง ๆ กัน ในสารละลายมาตรฐาน NACE ที่อุณหภูมิ 26°C .....	53

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	อิทธิพลของธาตุผสมในเหล็กต่อการละลายของแก๊สไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 1600 °C ความดันแก๊สไนโตรเจน 1 บรรยากาศ ..... 3
2.2	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไนโตรเจนในแก๊สปกคลุมอาร์กอน (%โดยปริมาตร)กับปริมาณไนโตรเจนในเนื้อเชื่อม(%โดยน้ำหนัก) ของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกที่มีโมลิบดีนัมผสม และ ไม่มีโมลิบดีนัมผสม..... 4
2.3	ปริมาณธาตุไนโตรเจนในเนื้อเชื่อมเป็นฟังก์ชันของความดันย่อยแก๊สไนโตรเจนที่ใช้เป็นแก๊สปกคลุม..... 5
2.4	ความสัมพันธ์ของปริมาณเฟอร์ไรต์กับปริมาณธาตุไนโตรเจนในเนื้อเชื่อม..... 5
2.5	อิทธิพลของความร้อนในการเชื่อม ด้วยวิธีการเชื่อมแบบใต้ฟลักซ์ (submerged arc welding) ต่อค่าศักย์ไฟฟ้าวิกฤตของการเกิดรูพรุน(vs SCE) ของรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด AISI 316L..... 7
2.6	ผลของความร้อนในการเชื่อมต่อปริมาณไนโตรเจนในรอยเชื่อมของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด AISI 304 ที่เปอร์เซ็นต์ไนโตรเจนในแก๊สปกคลุมอาร์กอนต่าง ๆ .....8
2.7	ผลของความร้อนในการเชื่อมต่อค่าศักย์ไฟฟ้าวิกฤตของการเกิดรูพรุนในเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด AISI 304 ที่เปอร์เซ็นต์ไนโตรเจนในแก๊สปกคลุมอาร์กอนต่าง ๆ กัน..... 9
2.8	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไนโตรเจน (%โดยน้ำหนัก) กับค่าศักย์ไฟฟ้าวิกฤตของการเกิดรูพรุนของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก..... 10
2.9	ผลของไนโตรเจนต่อเส้นโพลาริเซชันของเนื้อเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด AISI 309 (โลหะ A)และเกรด AISI 316L (โลหะ B)..... 11

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า	
2.10	เส้นโพลีไครเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด AISI 304 ที่มีปริมาณไนโตรเจน 0.03-0.25 %โดยน้ำหนัก ในสารละลาย 1N H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> + 0.5 M NaCl.....	12
2.11	เส้นโพลีไครเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก ที่ปริมาณไนโตรเจนต่าง ๆ กัน ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 5 kmol/m <sup>3</sup> .....	13
3.1	ลักษณะแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมที่ผ่านการเชื่อม ด้วยวิธีแบบทิกพัลส์ เพื่อใช้เตรียมชิ้นงานทดสอบ.....	14
3.2	ลักษณะรอยเชื่อมภาคตัดขวาง เพื่อใช้เป็นแนวทางในการเตรียมชิ้นงานทดสอบ.....	15
3.3	ลักษณะรอยเชื่อมที่ถูกตัดออกมาเพื่อใช้เตรียมชิ้นงานทดสอบต่อไป.....	15
3.4	เซลไฟฟ้าเคมีที่ใช้ทดสอบหาเส้นโพลีไครเซชัน.....	17
3.5	เครื่องโพเทนชิโอสแตท.....	18
3.6	ขั้วไฟฟ้าซิลเวอร์-คลอไรด์ และขั้วไฟฟ้าแพลทินัม.....	18
3.7	แสดงตัวอย่างโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกชนิดแผ่นเกรด AISI 304 และ AISI 316L.....	19
4.1	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแก๊สไนโตรเจนในแก๊สปกคลุมอาร์กอน (%โดยปริมาตร)กับปริมาณไนโตรเจนในรอยเชื่อม (%โดยน้ำหนัก) ของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด AISI 304 และ AISI 316L ด้วยวิธีทิกพัลส์.....	21
4.2	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไนโตรเจนในรอยเชื่อมกับค่าความดันย่อยของแก๊สไนโตรเจนในแก๊สปกคลุมอาร์กอนของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด AISI 304 และ AISI 316L .....	23
4.3	ตัวอย่างลักษณะชิ้นงานทดสอบภายหลังการทดลองวัดเส้นโพลีไครเซชัน.....	24

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไนโตรเจนในรอยเชื่อม(%โดยน้ำหนัก) กับค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด AISI 304 และ AISI 316L ในสารละลายไฮเดียมคลอไรด์ 3.5 %โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 26°C ความเป็นกรดต่าง 6.55.....	25
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไนโตรเจนในรอยเชื่อม (%โดยน้ำหนัก) กับค่าศักย์ไฟฟ้าของการเกิดรูพรุนของรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด AISI 304 และ AISI 316L ในสารละลายไฮเดียมคลอไรด์ 3.5 %โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 26°C ความเป็นกรดต่าง 6.55.....	26
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไนโตรเจนในรอยเชื่อม (%โดยน้ำหนัก) กับค่าความหนาแน่นของกระแสในช่วงพาสซีฟของรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด AISI 304 และ AISI 316L ในสารละลายไฮเดียมคลอไรด์ 3.5 %โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 26°C ความเป็นกรดต่าง 6.55.....	27
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไนโตรเจนในรอยเชื่อม (%โดยน้ำหนัก) กับค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด AISI 304 และ AISI 316L ในสารละลายมาตรฐาน NACE ที่อุณหภูมิ 26°C ความเป็นกรดต่าง 3.06 .....	31
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไนโตรเจนในรอยเชื่อม (%โดยน้ำหนัก) กับค่าศักย์ไฟฟ้าของการเกิดรูพรุนของรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด AISI 304 และ AISI 316L ในสารละลายมาตรฐาน NACE ที่อุณหภูมิ 26°C ความเป็นกรดต่าง 3.06.....	32
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไนโตรเจนในรอยเชื่อม (%โดยน้ำหนัก) กับค่าความหนาแน่นของกระแสในช่วงพาสซีฟของรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด AISI 304 และ AISI 316L ในสารละลายมาตรฐาน NACE ที่อุณหภูมิ 26°C ความเป็นกรดต่าง 3.06.....	33

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า	
4.10	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไนโตรเจนในรอยเชื่อม (%โดยน้ำหนัก) กับค่าศักย์ไฟฟ้าของการเกิดรูพรุนของรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด AISI 304 และ AISI 316L ในสารละลายมาตรฐาน NACE และสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3.5 %โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 26°C.....	34
4.11	เปรียบเทียบค่าศักย์ไฟฟ้าวิกฤตของการเกิดรูพรุนกับปริมาณไนโตรเจนในรอยเชื่อม (%โดยน้ำหนัก) ที่ได้จากการทดลองกับผลงานของ U.Kamachi และคณะ.....	37
4.12	โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด AISI 304 และ AISI 316L ที่ 1 %ไนโตรเจนในแก๊สปกคลุมอาร์กอนที่กำลังขยาย 500 เท่า.....	38
4.13	เปรียบเทียบผลของไนโตรเจนต่อโครงสร้างเดลต้าเฟอไรท์ในรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด AISI 304 และ AISI 316L ที่กำลังขยาย 200 เท่า.....	39
4.14	ภาพตัวอย่างโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด AISI 304 และ AISI 316L ภายหลังจากการวัดเส้นโพลาริเซชัน ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) ที่กำลังขยาย 1000 เท่า.....	41
4.15	การขยายตัวของบริเวณที่ถูกกัดกร่อนในรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด AISI 316L ที่ 3 %ไนโตรเจนในแก๊สปกคลุมอาร์กอน หลังจากผ่านการทำปฏิกิริยากับสารละลายมาตรฐาน NACE ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน(SEM) ที่กำลังขยาย 1000 เท่า.....	42
จ.1	ผลการวัดเส้นโพลาริเซชันของเนื้อโลหะเดิมและรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด AISI 304 ที่ปริมาณไนโตรเจนต่าง ๆ กัน ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3.5 %โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 26°C ความเป็นกรดต่าง 6.55.....	54

## สารบัญญรูป(ต่อ)

รูปที่		หน้า
จ.2	ผลการวัดเส้นโพลาไรเซชันของเนื้อโลหะเดิมและรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด AISI 316L ที่ปริมาณไนโตรเจนต่าง ๆ กัน ในสารละลายไฮเดียมคลอไรด์ 3.5 %โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 26°C ความเป็นกรดต่าง 6.55.....	55
จ.3	ผลการวัดเส้นโพลาไรเซชันของเนื้อโลหะเดิมและรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด AISI 304 ที่ปริมาณไนโตรเจนต่าง ๆ กัน ในสารละลายมาตรฐานNACE ที่อุณหภูมิ 26°C ความเป็นกรดต่าง 3.06.....	56
จ.4	ผลการวัดเส้นโพลาไรเซชันของเนื้อโลหะเดิมและรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด AISI 316L ที่ปริมาณไนโตรเจนต่าง ๆ กัน ในสารละลายมาตรฐานNACE ที่อุณหภูมิ 26°C ความเป็นกรดต่าง 3.06.....	57
ฉ.1	แสดงค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน ( $E_{cor}$ ) ค่าศักย์ไฟฟ้าของการเกิดรูพรุน ( $E_p$ ) และค่าความหนาแน่นของกระแสในช่วงพาสซีฟ ( $i_p$ ) จากเส้นโพลาไรเซชัน.....	58
ช.1	แสดงตำแหน่งการวัดค่า $\lambda$ และ $(L_3)_\alpha$ จากเส้นตัดผ่านโครงสร้างจุลภาคที่สนใจ.....	59



## คำอธิบายคำย่อ

คำย่อ	ความหมาย
$E_{cor}$	ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (corrosion potential)
$E_p$	ค่าศักย์ไฟฟ้าของการเกิดรูพรุน (pitting potential)
$I_p$	ค่าความหนาแน่นของกระแสในช่วงพาสซีฟ (passive current density)
304B	เนื้อโลหะเดิมของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 304
304	รอยเชื่อมของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 304
316LB	เนื้อโลหะเดิมของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 316L
316L	รอยเชื่อมของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 316L
ES	เครื่องวัดสเปกตรัมทางเคมี (emission spectroscopy)
Ieco	เครื่องวัดปริมาณไนโตรเจน (Ieco ce400 oxygen-nitrogen analyzer)
SEM	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (scanning electron microscope)
v	ความเร็วในการเชื่อม
$I_{base}$	กระแสไฟฟ้าเบส
$I_{pulse}$	กระแสไฟฟ้าพัลส์
$t_{base}$	เวลาในช่วงกระแสเบส
$t_{pulse}$	เวลาในช่วงกระแสพัลส์
f	ความถี่พัลส์