

ผลของไนโตรเจนต่อความต้านทานการกัดกร่อนของ  
เหล็กกล้าไร้สนิมชนิดออสเทนนิติกเกรด 304L



นาย ภาณุพงศ์ กอปรศรีสวัสดิ์

สถาบันวิทยบริการ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ

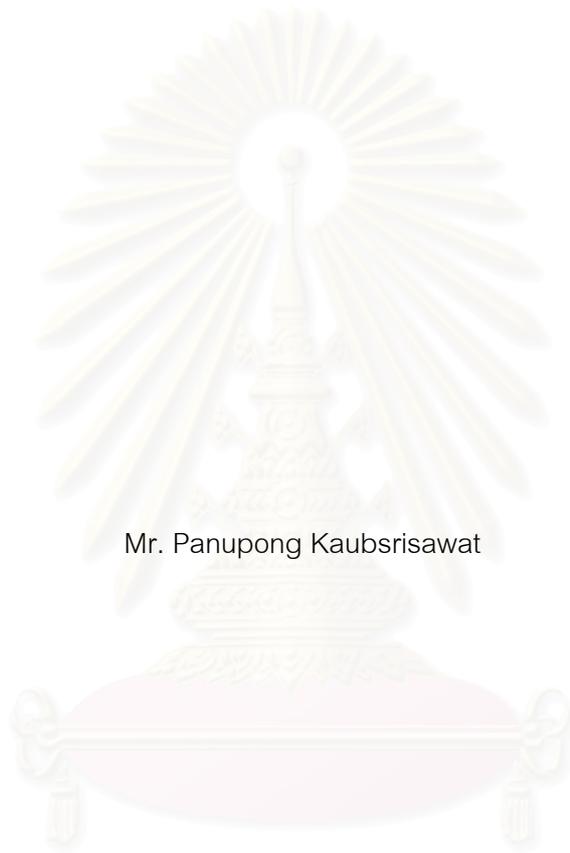
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2543

ISBN 974-346-374-7

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECT OF NITROGEN ON CORROSION RESISTANCE  
OF AUSTENITIC STAINLESS STEEL 304L



Mr. Panupong Kaubrisawat

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

Department of Metallurgical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2000

ISBN 974-346-374-7

หัวข้อวิทยานิพนธ์ ผลของไนโตรเจนต่อความต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิม  
ชนิดออสเทนนิติกเกรด 304L  
โดย นาย ภาณุพงศ์ กอปรศรีสวัสดิ์  
ภาควิชา วิศวกรรมโลหการ  
อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กอบบุญ หล่อทองคำ

---

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง  
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะ  
วิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์  
..... ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประสงค์ ศรีเจริญชัย)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กอบบุญ หล่อทองคำ)

..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ชاکกร จารุพิสิษฐ)

..... กรรมการ  
(อาจารย์ ดร. เอกสิทธิ์ นิสารัตนพร)

ภาณุพงศ์ กอบศรีสวัสดิ์ : ผลของไนโตรเจนต่อความต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดออสเทนนิติก (EFFECT OF NITROGEN ON CORROSION RESISTANCE OF AUSTENITIC STAINLESS STEEL 304L) อ. ที่ปรึกษา : ผศ.ดร. กอบบุญ หล่อทองคำ ; 55 หน้า. ISBN 974-346-374-7.

ไนโตรเจนถูกผสมในเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเพื่อเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนในสารละลายที่รุนแรง เช่น ในสารละลายคลอไรด์ แต่กลไกการเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนของไนโตรเจนยังคงไม่ชัดเจน งานวิจัยนี้ศึกษาผลของไนโตรเจนต่อพฤติกรรมการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดออสเทนนิติกเกรด 304L ที่มีไนโตรเจนผสม 0.02, 0.10 และ 0.21% โดยน้ำหนัก ในสารละลายที่มีไฮเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 5 กิโลโมลต่อลูกบาศก์เมตร pH ระหว่าง 1-2 และอุณหภูมิระหว่าง 20-40 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นสารละลายจำลองสารละลายจริงของการกัดกร่อนในหลุม (pitting corrosion) และ การกัดกร่อนในซอก (crevice corrosion) โดยการศึกษาใช้เทคนิคทางไฟฟ้าเคมีและการตรวจสอบชิ้นงานทางจุลภาคและมหภาคภายหลังการทดลอง

การเพิ่มปริมาณไนโตรเจนในเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดออสเทนนิติกเกรด 304L จะลดขนาดเกรนแต่เพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนโดยเฉพาะอย่างยิ่งช่วงพาสซีเวชัน ในสารละลายไฮเดียมคลอไรด์ 5 กิโลโมลต่อลูกบาศก์เมตรที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส pH 2 ที่สารละลายเดียวกัน แต่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียสและ pH 1 ที่มีสภาพการกัดกร่อนรุนแรงมากขึ้น พบว่าไนโตรเจนไม่มีผลต่อการกัดกร่อนเนื่องจากไม่เกิดพาสซีฟฟิล์ม ในสารละลายความเข้มข้นเดียวกัน เมื่ออุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส pH 2 ที่ศักย์ไฟฟ้าพาสซีฟ คือ 100 มิลลิโวลต์ และ ศักย์ไฟฟ้าทรานพาสซีฟ คือ 800 มิลลิโวลต์เทียบกับขั้วไฟฟ้าอ้างอิงซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์ พบว่าตัวอย่างที่มีไนโตรเจนผสมสูงกว่าจะมีผิวที่ถูกกัดกร่อนเรียกว่า อาจเป็นเพราะไนโตรเจนลดปริมาณดิสโลเคชัน ที่ศักย์ไฟฟ้าพาสซีฟ 100 มิลลิโวลต์ ตัวอย่างที่มีไนโตรเจนผสมมากกว่าจะมีอัตราการขยายตัวของผิวที่ถูกกัดกร่อนและจำนวนรูพรุนบนผิวที่ถูกกัดกร่อนน้อยกว่า ที่ศักย์ไฟฟ้าทรานพาสซีฟ 800 มิลลิโวลต์ ไนโตรเจนจะเพิ่มอัตราการกัดกร่อน การเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด 304L ด้วยไนโตรเจนอาจเนื่องมาจากกลไกการเกิดแอมโมเนียและการสะสมไนโตรเจนที่พาสซีฟฟิล์ม

ภาควิชา \_\_\_\_\_ วิศวกรรมโลหการ \_\_\_\_\_ ลายมือชื่อนิสิต \_\_\_\_\_

สาขาวิชา \_\_\_\_\_ วิศวกรรมโลหการ \_\_\_\_\_ ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา \_\_\_\_\_

ปีการศึกษา 2543 \_\_\_\_\_ ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม \_\_\_\_\_

# 4070372021: MAJOR METALLURGICAL ENGINEERING

KEYWORDS: NITROGEN / PITTING CORROSION / ANODIC DISSOLUTION / pH / CHLORIDE / CORRODED AREA / PASIVE FILM

PANUPONG KAUBSRISAWAT : EFFECT OF NITROGEN ON CORROSION RESISTANCE OF AUSTENITIC STAINLESS STEEL 304L  
: THESIS ADVISOR : ASSIST. PROF. GOBBOON LOTHONGKUM, Dr.-Ing.  
ISBN 974-346-374-7

Nitrogen is added in austenitic stainless steel in order to increase the corrosion resistance in severe environment such as in chloride solutions. There are many studies about effect of nitrogen on improving corrosion resistance but the mechanisms are still not clear. This research investigates the effect of nitrogen on the corrosion resistance of 304L austenitic stainless steels with 0.02, 0.10 and 0.21 wt% N in the 5 kmol/m<sup>3</sup> sodium chloride with pH 1-2 and 20-40°C. These conditions simulate the conditions of pitting and crevice corrosion. Electrochemical techniques, macroscopic and microscopic observation were used to clarify the results.

Increasing nitrogen content in 304L austenitic stainless steel reduces grain size but improves corrosion resistance in the 5 kmol/m<sup>3</sup> sodium chloride solution with pH 2 and 30°C. In the same solution with pH 1 and 40°C, which is more severe environment, nitrogen has not affected on corrosion resistance because there is no passive film formed. In the same solution with pH 2 and 30°C, at the passive potential of 100 mV and transpassive potential of 800 mV (Ag/AgCl), the samples with higher nitrogen content shows smoother corroded surfaces. This may be because nitrogen decreases dislocation density. At the exposure potential of 100 mV, which is in the passive region, nitrogen reduces the corrosion growth rate and number of pits. At the transpassive exposure potential of 800 mV, nitrogen has slightly negative effect on corrosion resistance. Ammonium formation and nitrogen enrichment in the passive film are two mechanisms suggested to be responsible in these effects.

ภาควิชา \_\_\_\_\_ วิศวกรรมโลหการ \_\_\_\_\_ ลายมือชื่อ นิสิต \_\_\_\_\_

สาขาวิชา \_\_\_\_\_ วิศวกรรมโลหการ \_\_\_\_\_ ลายมือชื่อ อาจารย์ที่ปรึกษา \_\_\_\_\_

ปีการศึกษา \_\_\_\_\_ 2543 \_\_\_\_\_ ลายมือชื่อ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม \_\_\_\_\_

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดีด้วยความช่วยเหลือของผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กอบบุญ หล่อทองคำ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่าง ๆ ในการวิจัยนี้ด้วยดี อีกทั้งติดต่อประสานงานในการขอทุนทำวิจัยที่บริษัท KAWASAKI STEEL CORPORATION เมืองจิบะ ประเทศญี่ปุ่น ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประสงค์ ศรีเจริญชัย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ชาคกร จารุพิสิฐธร และ อาจารย์ ดร.เอกสิทธิ์ นิสารัตนพร คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้ให้คำแนะนำอันเป็นประโยชน์ ขอขอบคุณ คุณ T. Obara, คุณ T. Narutani, และคุณ M. Arai แห่ง Technical Research Laboratory ของ KAWASAKI STEEL CORPORATION ที่ติดต่อประสานงาน KOLAS program รวมทั้ง คุณ T. Ujiro, คุณ S. Satoh และ คุณ Y. Yazawa ที่ช่วยให้คำปรึกษาอันมีค่าในงานวิจัยครั้งนี้ ขอขอบคุณ คุณชองทอง จรัสสิงห์ เจ้าหน้าที่ห้องสมุดประจำภาควิชาที่ให้ความช่วยเหลืออย่างดีเสมอ ท่านอาจารย์และเจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาวิศวกรรมโลหการ รวมถึงเพื่อน พี่ น้อง ทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือและให้กำลังใจโดยตลอดจนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จด้วยดี เนื่องจากทุนวิจัยบางส่วนได้รับการสนับสนุนจากสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) ผู้วิจัยจึงขอขอบคุณมาที่นี้ด้วย

ทำยนี้ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอขอบพระคุณบิดามารดา ซึ่งสนับสนุนด้านการเงินและให้กำลังใจเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ซ
สารบัญรูป.....	ฅ
บทที่	
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 ส่วนผสมทางเคมีของชิ้นงาน.....	15
3.3 การทดลองทางไฟฟ้าเคมี.....	16
3.4 การตรวจสอบทางจุลภาค.....	18
4 ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง.....	19
4.1 ผลกระทบของไนโตรเจนต่อโครงสร้างทางจุลภาค.....	19
4.2 ผลกระทบของไนโตรเจนต่อเส้นโค้งโพลาริเซชัน.....	20
4.3 ผลกระทบของไนโตรเจนต่อบริเวณที่ถูกกัดกร่อน.....	22
4.4 ผลกระทบของไนโตรเจนต่อการขยายตัวของผิวที่ถูกกัดกร่อนตามแนวพื้นผิวชิ้นงาน.....	32
5 สรุปผลการทดลอง.....	36
รายการอ้างอิง.....	37
ภาคผนวก ก.....	41
ภาคผนวก ข.....	45
ภาคผนวก ค.....	54
ประวัติผู้เขียน.....	55

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกทั้งสามที่ใช้ในการทดลอง วิเคราะห์ส่วนผสมด้วยเครื่อง emission spectroscopy.....	15
ก.1 ตัวอย่างข้อมูลดิบแสดงการวัดเส้นโค้งโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมที่ผสมไนโตรเจนทั้ง 3 เกรด ในสารละลายไฮเดียมคลอไรด์ 5 กิโลโมลต่อลูกบาศก์เมตร pH 2 ที่ 30 องศาเซลเซียส ซึ่งแสดงในรูป 4.2ค โดยแสดงค่าศักย์ไฟฟ้าเทียบกับ Ag/AgCl และ ความหนาแน่นกระแสที่วัดได้ (มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร).....	41
ข.1 ตัวอย่างข้อมูลดิบของการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นกระแสเมื่อเวลาเปลี่ยนไปของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกในสารละลายไฮเดียมคลอไรด์ 5 กิโลโมลต่อลูกบาศก์เมตร pH 2 ที่ 30 องศาเซลเซียส เมื่ออัตราการเพิ่มกระแสไฟฟ้าเป็น 100 มิลลิโวลต์ต่ออนาที ที่ศักย์ไฟฟ้า -300 มิลลิโวลต์จาก รูปที่ 4.3ก โดยแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการทดลองและความหนาแน่นกระแส (มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร) ที่วัดได้ของตัวอย่างเหล็กทั้ง 3 ชนิด.....	45

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	ผลของไนโตรเจนต่อความเร็วในการตกผลึกของ สารประกอบโลหะคาร์ไบด์ ( $M_{23}C_6$ )..... 4
2.2	ผลของไนโตรเจนต่อเส้นโค้งโพลาไรเซชัน..... 4
2.3	อุณหภูมิวิกฤติการเกิดการกัดกร่อนแบบรูพรุนในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 0.2M ที่ 600 มิลลิโวลต์(SCE)..... 5
2.4	ศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนรูพรุนที่อุณหภูมิต่าง ๆ แสดงจุดสุดท้ายของศักย์ไฟฟ้าการแยกตัวของฟิล์ม (จุดเปิด) และศักย์ไฟฟ้าการเกิดรีพาสซิเวชัน(จุดปิด) ..... 5
2.5	ความหนาแน่นกระแสของโลหะผสมที่ถูกโพลาไรซ์ที่ 500 มิลลิโวลต์ (SCE) ใน กรดไฮโดรคลอริก 0.1 โมลาร์ +โซเดียมคลอไรด์ 0.4 โมลาร์ เมื่อเวลาเปลี่ยนไป a) 22 องศาเซลเซียส b) 22 องศาเซลเซียส c) 65 องศาเซลเซียส..... 7
2.6	ลำดับของการเกิดรีพาสซิเวชันและการแตกตัวของโลหะผสมไนโตรเจนและโมลิบดีนัมเมื่ออยู่ในสารละลายคลอไรด์ที่เป็นกรด..... 10
2.7	สมมติฐานการเกิดหลุมโดยกลไกการลดความต่างศักย์ไฟฟ้าภายในพาสซีฟฟิล์มเนื่องจากการแยกตัวเป็นประจุลบของไนโตรเจน..... 11
2.8	ปริมาณไนโตรเจนในผิวเหล็กกล้าไร้สนิม Fe-17Cr-13Ni-0.15N ที่ความลึกต่าง ๆ ภายหลังจากทำพาสซิเวชันที่ 650 มิลลิโวลต์ (SHE) ทดสอบด้วย XPS..... 13
3.1	กระบวนการทางความร้อนในการเตรียมชิ้นงานที่นำมาใช้ในการทดลอง..... 14
3.2	ลักษณะของชิ้นงานที่นำมาใช้ในการทดลอง..... 15
3.3	รูปของเครื่องโพเทนชิโอสแตทที่ใช้ในการทดลอง..... 16
3.4	วงจรควบคุมทางไฟฟ้าของเครื่องโพเทนชิโอสแตท..... 17
4.1	โครงสร้างของเหล็กกล้าไร้สนิมที่นำมาใช้ในการทดลอง กำลังขยาย 100 เท่า..... 19
4.2ก	เส้นโค้งโพลาไรเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมที่ผสมไนโตรเจนในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 5 กิโลโมลต่อลูกบาศก์เมตร pH 1 ที่ 40 องศาเซลเซียส..... 20
4.2ข	เส้นโค้งโพลาไรเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมที่ผสมไนโตรเจนในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 5 กิโลโมลต่อลูกบาศก์เมตร pH 1 ที่ 30 องศาเซลเซียส..... 20
4.2ค	เส้นโค้งโพลาไรเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมที่ผสมไนโตรเจนในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 5 กิโลโมลต่อลูกบาศก์เมตร pH 2 ที่ 30 องศาเซลเซียส..... 21
4.2ง	เส้นโค้งโพลาไรเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมที่ผสมไนโตรเจนในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 5 กิโลโมลต่อลูกบาศก์เมตร pH 2 ที่ 20 องศาเซลเซียส..... 21

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า	
4.3ก	การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นกระแสเมื่อเวลาเปลี่ยนไปของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดออสเตนนิติกในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 5 กิโลโมลต่อลูกบาศก์เมตร pH 2 ที่ 30 องศาเซลเซียส เมื่ออัตรา การเพิ่มกระแสไฟฟ้าเป็น 100 มิลลิโวลต์ต่อนาที ที่ศักย์ไฟฟ้า -300 และ 100 มิลลิโวลต์ (Ag/AgCl).....	23
4.3ข	การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นกระแสเมื่อเวลาเปลี่ยนไปของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดออสเตนนิติกในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 5 กิโลโมลต่อลูกบาศก์เมตร pH 2 ที่ 30 องศาเซลเซียส เมื่ออัตรา การเพิ่มกระแสไฟฟ้าเป็น 1000 มิลลิโวลต์ต่อนาที ที่ศักย์ไฟฟ้า 100 และ 800 มิลลิโวลต์ (Ag/AgCl).....	23
4.4	น้ำหนักที่ลดลงที่เวลาต่าง ๆ ของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดออสเตนนิติกผสมไนโตรเจน ในสารละลาย โซเดียมคลอไรด์ 5 กิโลโมลต่อลูกบาศก์เมตร pH 2 ที่ศักย์ไฟฟ้า -300, 100 และ 800 มิลลิโวลต์ (Ag/AgCl).....	24
4.5	รูปของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดออสเตนนิติกที่ผสมไนโตรเจนภายหลังทดสอบที่ศักย์ไฟฟ้า -300 มิลลิโวลต์ (Ag/AgCl) ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 5 กิโลโมลต่อลูกบาศก์เมตร pH 2 ที่ 30 องศา เซลเซียส.....	25
4.6	รูปของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดออสเตนนิติกที่ผสมไนโตรเจนภายหลังทดสอบที่ศักย์ไฟฟ้า 100 มิลลิโวลต์ (Ag/AgCl) ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 5 กิโลโมลต่อลูกบาศก์เมตร pH 2 ที่ 30 องศา เซลเซียส.....	26
4.7	รูปของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดออสเตนนิติกที่ผสมไนโตรเจนภายหลังทดสอบที่ศักย์ไฟฟ้า 800 มิลลิโวลต์ (Ag/AgCl) ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 5 กิโลโมลต่อลูกบาศก์เมตร pH 2 ที่ 30 องศา เซลเซียส.....	26
4.8	การเปลี่ยนแปลงของบริเวณที่ถูกกัดกร่อนเมื่อเวลาเปลี่ยนไปของเหล็กกล้าไร้สนิมที่ผสมไนโตรเจน ที่ศักย์ไฟฟ้า -300, 100 และ 800 มิลลิโวลต์ (Ag/AgCl).....	27
4.9ก	ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของผิวเหล็กกล้าไร้สนิม ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 5 กิโลโมลต่อลูกบาศก์เมตร pH 2, 30 องศาเซลเซียส ที่ศักย์ไฟฟ้า -300 มิลลิโวลต์.....	29
4.9ข	ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของผิวเหล็กกล้าไร้สนิม ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 5 กิโลโมล ต่อลูกบาศก์เมตร pH 2, 30 องศาเซลเซียส ที่ศักย์ไฟฟ้า 100 มิลลิโวลต์ .....	30
4.9ค	ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของผิวเหล็กกล้าไร้สนิม ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 5 กิโลโมล ต่อลูกบาศก์เมตร pH 2, 30 องศาเซลเซียส ที่ศักย์ไฟฟ้า 800 มิลลิโวลต์ .....	31
4.10	ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของผิวที่รอยต่อระหว่างบริเวณที่ถูกกัดกร่อนและไม่ถูก กัดกร่อนของชิ้นงานแสดงกลไกการขยายตัวของผิวที่ถูกกัดกร่อน.....	33

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.11	แผนภาพ Pourbaix แสดงสถานะของไนโตรเจนที่ศักย์ไฟฟ้าและ pH ต่าง ๆ.....	34
4.12	แผนภาพแสดงสมมติฐานของการแตกตัวของ $N_2O$ ในระหว่างการดูดซับของคลอไรด์.....	34
4.13	ภาพจำลองการเกิด etch pit บนผิวที่ถูกกัดกร่อนที่มีดีสโลเคชัน	35



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## คำอธิบายคำย่อ

คำย่อ	ความหมาย
$I_{crit}$	ความหนาแน่นกระแสวิกฤตการเกิดพาสซีเวชัน (critical current density)
$I_{pass}$	ความหนาแน่นกระแสพาสซีฟ (passive current density)
$E_{corr}$	ศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (corrosion potential)
$E_{pp}$	ศักย์ไฟฟ้าของการเกิดการกัดกร่อนแบบหลุม (pitting potential)
SEM	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (scanning electron microscope)
304L	เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด AISI 304L
HR	การรีดร้อน (hot rolling)
AC	การเย็นตัวในอากาศ (air cool)
CR	การรีดเย็น (cold rolling)

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความสำคัญของงานวิจัย

จุดประสงค์ในการผสมไนโตรเจนในเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกแทนที่คาร์บอน คือ ลดปัญหาการเกิดเซนซิไทเซชัน (sensitization) หรือป้องกันการตกผลึกของคาร์ไบด์ที่ขอบเกรนโดยไม่ทำให้ความแข็งแรงของเหล็กลดลง การตกผลึกของคาร์ไบด์ที่ขอบเกรนเป็นสาเหตุของการกัดกร่อนระหว่างเกรน (intergranular corrosion) โดยการผสมไนโตรเจนจะไม่ทำให้ความแข็งแรงของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกลดลง อย่างไรก็ตามผลดีของการผสมไนโตรเจนมิใช่ลดการเกิดเซนซิไทเซชันเพียงอย่างเดียว ไนโตรเจนยังเป็นตัวสร้างเสถียรภาพของเฟสออสเทนไนท์ (austenite stabilizer) นอกจากนี้ บทบาทอันโดดเด่นอีกอย่างหนึ่งของไนโตรเจนซึ่งเป็นที่สนใจของนักวิจัยในปัจจุบันก็คือ การปรับปรุงความต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดออสเทนนิติก

ผลของไนโตรเจนในเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดออสเทนนิติก ต่อการปรับปรุงคุณสมบัติการกัดกร่อน เป็นที่สนใจของนักวิจัยในช่วง 40 ปีที่ผ่านมา นักวิจัยหลายกลุ่มได้พยายามเสนอกฎการปรับปรุงความต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกที่ผสมไนโตรเจน แต่ยังคงมีข้อโต้แย้งซึ่งแม้แต่ปัจจุบันก็ยังคงสรุปเป็นทฤษฎีที่แน่นอนไม่ได้

การทดลองนี้เป็นแนวทางใหม่ในการศึกษากลไกความต้านทานการกัดกร่อนของไนโตรเจนในเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดออสเทนนิติก โดยศึกษาโครงสร้างของการกัดกร่อน อัตราการเติบโตของพื้นที่ที่ถูกกัดกร่อน และน้ำหนักที่ลดลงของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304L ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้น 5 กิโลโมลต่อลูกบาศก์เมตรและมีความเป็นกรดสูง (pH 1-2) สภาพนี้เป็นภาวะจำลองสภาพให้ใกล้เคียงกับสภาพการกัดกร่อนแบบหลุม (pitting corrosion) หรือการกัดกร่อนในซอก (crevice corrosion) การศึกษาอาศัยเทคนิคทางไฟฟ้าเคมี (electrochemical technique) ข้อสรุปที่ได้จากการทดลองนี้อาจมีความสัมพันธ์สอดคล้องและอาจจะใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นในการทำนายสภาพการกัดกร่อนแบบหลุมและในซอกได้

## 1.2 วัตถุประสงค์

1. ศึกษาผลของปริมาณไนโตรเจนต่อความต้านทานการกัดกร่อนเฉพาะที่ (localized corrosion) ของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304L ในสารละลายกรดที่มีความเข้มข้นไฮเดียมคลอไรด์ 5 กิโลโมลต่อลูกบาศก์เมตร โดยใช้เทคนิคการวัดทางไฟฟ้าเคมี
2. ศึกษากลไกการเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนของไนโตรเจนต่อความต้านทานการกัดกร่อนเฉพาะที่ในเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304L ในสารละลายกรดที่มีความเข้มข้นไฮเดียมคลอไรด์ 5 กิโลโมลต่อลูกบาศก์เมตร โดยตรวจสอบพื้นผิวของบริเวณที่ถูกกัดกร่อน

## 1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1. วัดเส้นโค้งโพลาไรเซชัน (polarization curve) ของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด 304L ที่มีปริมาณไนโตรเจน 0.02% 0.10% และ 0.21% โดยน้ำหนัก ในสารละลายไฮเดียมคลอไรด์ 5 กิโลโมลต่อลูกบาศก์เมตรที่ pH ระหว่าง 0-2 และ อุณหภูมิระหว่าง 20-40 องศาเซลเซียส เพื่อหาสภาพที่เหมาะสมในการทดลอง
2. เมื่อได้สภาวะที่เหมาะสมตามข้อ 1 นั่นคือที่ pH 2 และ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ชี้นงานจะทำการทดลอง exposure test ที่ความต่างศักย์ต่าง ๆ เพื่อศึกษาบริเวณที่ถูกกัดกร่อน
3. ตรวจสอบพื้นที่ที่ถูกกัดกร่อนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน เปรียบเทียบบริเวณที่ถูกกัดกร่อนของเหล็กทั้งสามเกรดที่ผสมไนโตรเจนต่างกัน
4. วัดขนาดบริเวณที่ไม่ถูกกัดกร่อนด้วยเครื่องอิมเมจอะนาไลเซอร์เพื่อเปรียบเทียบอัตราการขยายตัวของบริเวณที่ถูกกัดกร่อน
5. วัดอัตราการลดลงของน้ำหนักชิ้นงานที่สภาพการทดลองแตกต่างกัน
6. วิเคราะห์และสรุปผลของไนโตรเจนต่อกลไกและอัตราการกัดกร่อนในเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304L

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบถึงผลของปริมาณไนโตรเจนต่อความต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด 304L
2. ทำนายกลไกของไนโตรเจนต่อการต้านทานการกัดกร่อนจากผลที่สอดคล้องจากการทดลองนี้ และเปรียบเทียบกับกลไกที่ได้มีผู้เสนอมาก่อน
3. เป็นข้อมูลเบื้องต้นในการพัฒนาเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีการผสมไนโตรเจน แทนที่การผสมนิกเกิลในสภาพการกัดกร่อนที่รุนแรง

## บทที่ 2

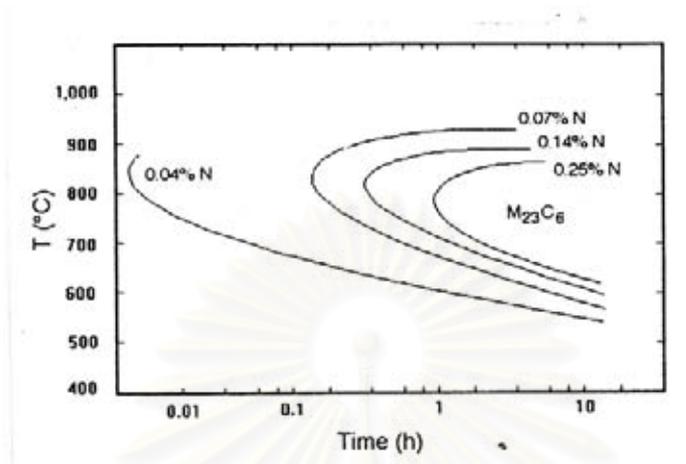
### การศึกษาข้อมูลเบื้องต้น

ไนโตรเจนนอกจากเป็นธาตุที่ผสมในเหล็กกล้าไร้สนิมเพื่อเพิ่มความแข็งแรงของวัสดุจากกลไก interstitial solid solution<sup>1</sup> และเพิ่มความต้านทานการเสียดสี (wear resistance) จากกลไกการพอร์มสารประกอบไนไตรต์แล้ว ไนโตรเจนยังมีบทบาทสำคัญในการเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิม ทั้งความต้านทานการกัดกร่อนทั่วไป (general corrosion) การกัดกร่อนแบบหลุม (pitting corrosion)<sup>2-4</sup> การกัดกร่อนภายในซอก (crevice corrosion)<sup>5</sup> และการกัดกร่อนที่มีความเค้น (stress corrosion cracking)<sup>6</sup> นอกจากนี้ไนโตรเจนยังเป็นธาตุที่ทำให้เสถียรภาพแก่เฟสออสเตนไนท์ (austenite stabilizer)<sup>1</sup> และมีผลต่อการเกิดเซนซิไทเซชัน (sensitization) ของเหล็กกล้าไร้สนิมอีกด้วย

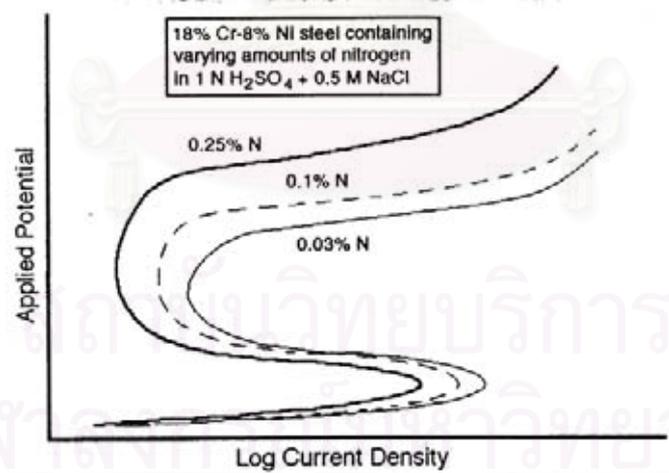
นักวิจัยหลายกลุ่มได้ค้นคว้าและเสนอบทบาทที่ ๗ ไปของไนโตรเจนต่อคุณสมบัติการกัดกร่อนดังต่อไปนี้

P.R. Levey และ A. Van Benekom<sup>1</sup> ศึกษาผลของไนโตรเจนในเหล็กกล้าไร้สนิมออสเตนนิติกเกรด 304 ต่อความต้านทานการกัดกร่อน โดยไนโตรเจนมีผลในการชะลอความเร็วในการเกิดเฟสที่สอง เช่น ไค (chi) และ ซิกมา (sigma) ไนโตรเจนจะชะลอการตกผลึกของสารประกอบโลหะคาร์ไบด์ ( $M_{23}C_6$ ) ดังแสดงในรูป 2.1 พบว่าเมื่อไนโตรเจนเพิ่มขึ้นถึง 0.14% จะชะลอการเกิดเซนซิไทเซชัน โดยผู้วิจัยเสนอว่ามีการตกผลึกของโครเมียมไนไตรต์ ( $Cr_2N$ ) อย่างชัดเจนเมื่อมีไนโตรเจนมากกว่า 0.14% แต่ถ้าปริมาณไนโตรเจนมากกว่านี้จะเป็นผลเสียเนื่องจากการขาดโครเมียมในบางพื้นที่ (localized chromium depleted)

นอกจากนี้ไนโตรเจนยังมีผลในการลดอัตราการกัดกร่อนทั่วไป (general corrosion) ในกรดเข้มข้นที่มีคลอไรด์ผสมอยู่ เช่นกรดซัลฟูริกที่ผสมด้วยโซเดียมคลอไรด์ โดยรูปที่ 2.2 แสดงเส้นโค้งโพลาไรเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 ในสารละลายกรดซัลฟูริก 1 นอร์มอล และ โซเดียมคลอไรด์ 0.5 โมลต่อลิตร พบว่าไนโตรเจนลดความหนาแน่นกระแสวิกฤติของการเกิดพาสซีเวชัน (critical current density- $i_{crit}$ ) และ ความหนาแน่นกระแสพาสซีฟ (passive current density- $i_{pass}$ ) นอกจากนี้ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบหลุม (pitting potential) ก็สูงขึ้นเมื่อไนโตรเจนเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามไนโตรเจนไม่มีผลต่อศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนอิสระ (free corrosion potential) โดยผู้ทำการทดลองเสนอว่าไนโตรเจนปรับปรุงพาสซีวิตีในสารละลาย



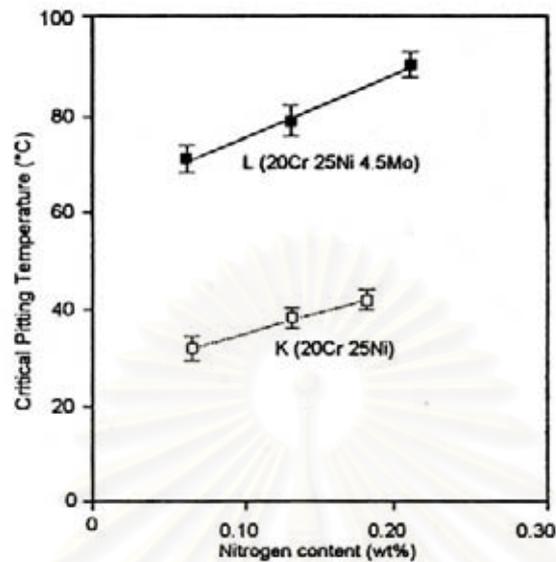
รูปที่ 2.1 ผลของไนโตรเจนต่อเวลาในการตกผลึกของสารประกอบคาร์ไบด์ ( $M_{23}C_6$ )<sup>(1)</sup>



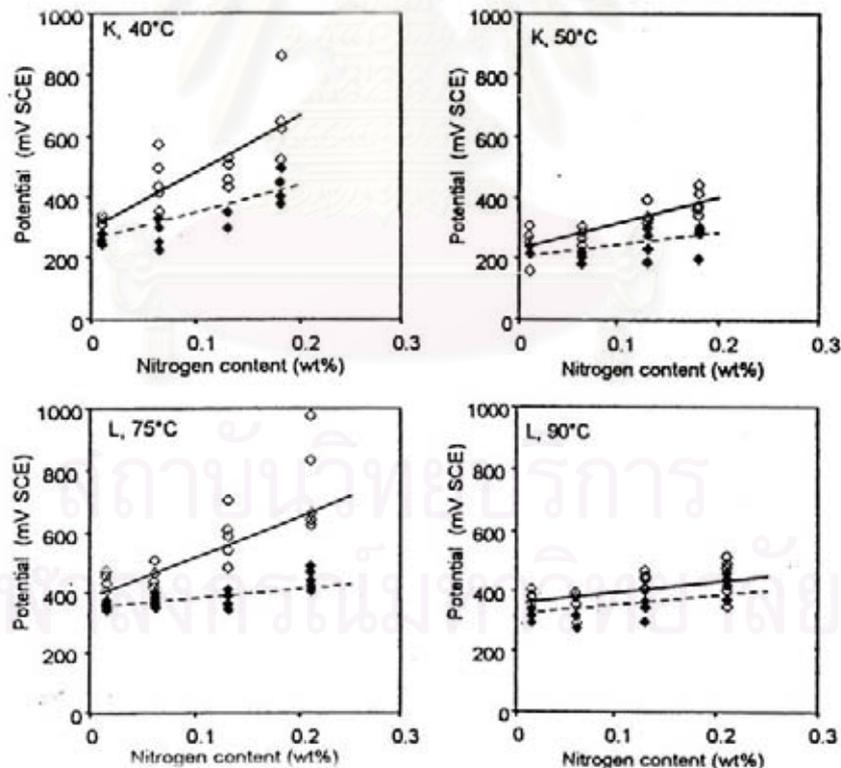
รูปที่ 2.2 ผลของไนโตรเจนต่อเส้นโค้งโพลาไรเซชัน<sup>(1)</sup>

R.F.A. Jargelius-Petterson<sup>2</sup> ทดสอบเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดออสเทนนิติกที่มีส่วนผสม 20%Cr-25%Ni-0.2N ที่ไม่มีโมลิบดีนัม (เกรด K) และ ผสมโมลิบดีนัม (เกรด L) โดยผลการทดลองแสดงในรูปที่ 2.3 และ 2.4

ในรูปที่ 2.3 พบว่าเมื่อไนโตรเจนเพิ่มขึ้น คุณหมุมิในการเกิดการกัดกร่อนแบบหลุม (pitting corrosion) ก็สูงขึ้นเมื่อทดสอบในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 0.2 โมล/ลิตร โดยบังคับให้มีศักย์ไฟฟ้า 600 มิลลิโวลต์ (SCE)



รูปที่ 2.3 คุณหมุมิวิกฤติการเกิดการกัดกร่อนแบบรูพรุนในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 0.5 โมล/ลิตร ที่ 600 มิลลิโวลต์ (SCE)<sup>(2)</sup>



รูปที่ 2.4 ศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบหลุมที่คุณหมุมิต่าง ๆ แสดงจุดสุดท้ายของศักย์ไฟฟ้าการแตกตัวของฟิล์ม (จุดเปิด) และศักย์ไฟฟ้าการเกิดรีพาสสิเวชัน (จุดปิด)<sup>(2)</sup>

ส่วนรูปที่ 2.4 แสดงค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบหลุม (pitting potential) ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ของเหล็กเกรด K และ L พบว่ามีแนวโน้มที่เหมือนกัน คือ การเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนแบบหลุมเพิ่มขึ้นเมื่อไนโตรเจนเพิ่มขึ้น แม้ว่าผลต่อการกัดกร่อนจะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นก็ตาม

I. Olefjord และ L. Wegrelius<sup>7</sup> ศึกษาเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดออสเตนนิติก Fe-20Cr-20Ni-6Mo-0.011N และ Fe-20Cr-20Ni-6Mo-0.2N ซึ่งถูกโพลารไรซ์ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 0.1 โมลาร์ + โซเดียมคลอไรด์ 0.4 โมลาร์ ที่ 500 มิลลิโวลต์ (SCE) ที่ 22 และ 65 องศาเซลเซียส ดังแสดงความสัมพันธ์ของกระแสกับเวลาในรูปที่ 2.5

จากรูป 2.5a และ 2.5 b ที่อุณหภูมิ 22 องศาเซลเซียส พบว่ากระแสของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดออสเตนนิติก Fe-20Cr-20Ni-6Mo-0.011N และ Fe-20Cr-20Ni-6Mo-0.2N มีค่าใกล้เคียงกัน มีการแกว่งของกระแสแสดงถึงการเริ่มเกิดหลุม (pit initiation) และ รีพาสซิเวชัน (repassivation) แต่ในเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีปริมาณไนโตรเจนมากกว่าจะมีการแกว่งของกระแสน้อยกว่า

จากรูป 2.5c ที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส แสดงให้เห็นว่าเหล็กกล้าไร้สนิมที่ผสมไนโตรเจนผสมอยู่ถูกพาสซิเวต แต่ความหนาแน่นของกระแสจะสูงกว่าที่อุณหภูมิ 22 องศาเซลเซียสและแสดงลักษณะการเกิดขึ้นของหลุม (pit initiation) และ รีพาสซิเวชัน (repassivation) ให้เห็น อย่างไรก็ตาม เหล็กกล้าไร้สนิมที่มีปริมาณไนโตรเจนน้อยกว่า เกิดพาสซิเวชันในช่วง 10 วินาทีแรก หลังจากนั้นกระแสเพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากการเกิดและขยายตัวของหลุม (pit growth)

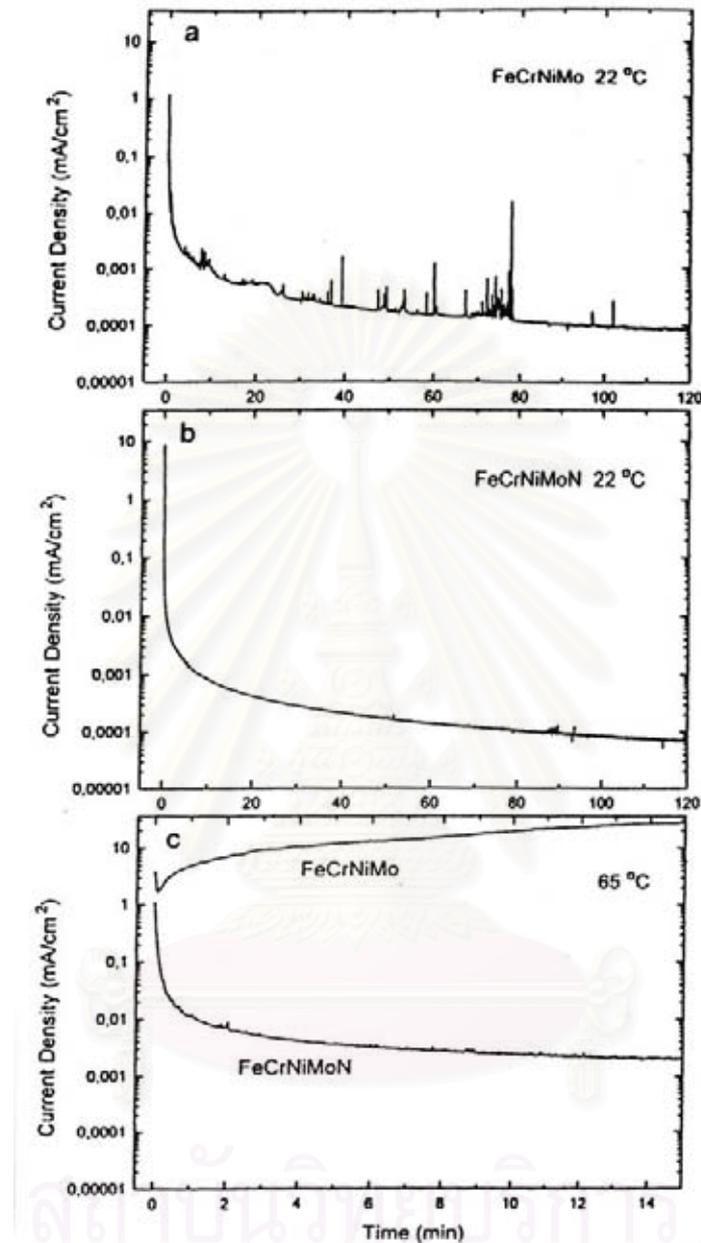
จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา มีการเสนอกลไกการเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมที่ผสมไนโตรเจนด้วยดังนี้

### 1. กลไกการเกิดแอมโมเนียมไอออนโดยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี (electrochemical ammonium formation)

Osozawa และ Okato<sup>8</sup> เป็นนักวิจัยกลุ่มแรกที่พบแอมโมเนียมไอออนในสารละลายที่ได้จากการทำทดลองการกัดกร่อนแบบหลุมของเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีไนโตรเจนผสมในสารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์ (FeCl<sub>3</sub>) 20% โดยน้ำหนัก ทั้งสองเสนอว่า ไนโตรเจนในเหล็กกล้าไร้สนิมละลายและทำปฏิกิริยากับโปรตอนที่อยู่ในหลุม (pit) ซึ่งจะทำให้ pH ภายในหลุมเพิ่มขึ้น และเป็นสาเหตุให้เหล็กกล้าไร้สนิมเกิดรีพาสซิเวชัน โดยปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีของการละลายไนโตรเจนลงในสารละลาย คือ



ผลการทดลองของ R.F.A. Jargelius-Petterson<sup>2</sup> ก็ยืนยันว่าพบ NH<sub>4</sub><sup>+</sup> ในสารละลายที่ทำการทดลองและ ความเข้มข้นแอมโมเนียมไอออนในสารละลายจะเพิ่มขึ้นเมื่อศักย์ไฟฟ้าสูงขึ้น แอมโมเนียมไอออนหรือแอมโมเนียถูกตรวจพบทั้งในช่วงศักย์ไฟฟ้าที่เป็นแอคทีฟ (active potential) พาสซีฟ (passive potential) และทรานพาสซีฟ (transpassive)



รูปที่ 2.5 ความหนาแน่นกระแสของโลหะผสมที่ถูกโพลารไรซ์ที่ 500 มิลลิโวลต์ (SCE) ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 0.1 โมลาร์ + โซเดียมคลอไรด์ 0.4 โมลาร์ เมื่อเวลาเปลี่ยนไปในอุณหภูมิ a) 22 องศาเซลเซียส b) 22 องศาเซลเซียส c) 65 องศาเซลเซียส<sup>(7)</sup>

## 2. กลไกการเกิดไนเตรต (nitrate formation)

เป็นที่ทราบกันดีว่าไนเตรตยับยั้งและชะลอการกัดกร่อน Truman<sup>9</sup> เชื่อว่าเกิดไนเตรตระหว่างการละลายของเหล็กกล้าไร้สนิมจะยับยั้งการเติบโตของหลุม (pit growth) ส่วน K. Mudali<sup>4,10</sup> เสนอว่า  $\text{NH}_4^+$  จากสมการที่ 2.1 สามารถฟอร์มตัวเป็นสารยับยั้ง (inhibiting species) พวกไนเตรต เช่น  $\text{NO}_2^-$  หรือ  $\text{NO}_3^-$  ดังสมการ



บทบาทของไนเตรตในการยับยั้งการกัดกร่อนในสารละลายที่เป็นกรดด้วยการทำปฏิกิริยากับโปรตอนเพื่อฟอร์มตัวเป็นแอมโมเนียมไอออน การบริโภคโปรตอนทำให้ความเป็นกรดของสารละลายลดลงดังแสดงในสมการ 2.3



## 5. การเกิดแอมโมเนียมไอออนจากการละลายของไนไตรด์ (Ammonium formation from nitride dissolution)

Willenbruch, Clayton<sup>11</sup> และคณะศึกษาผลของไนไตรด์ต่อคุณสมบัติการต้านทานการกัดกร่อนโดยสร้างผิวที่เป็นไนไตรด์ขึ้นบนโครเมียม เหล็ก นิกเกิล และ โมลิบดีนัมที่มีความบริสุทธิ์สูง และบนผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304, 317L, 904L และ Al-6X โดยกระบวนการ cathodically charging ในสารละลายโซเดียมไนเตรต ( $\text{NaNO}_3$ ) ที่อุณหภูมิห้อง และใช้ XPS ตรวจสอบผิวไนไตรด์ นักวิจัยกลุ่มนี้สรุปว่า ผลของการสร้างผิวไนไตรด์ ให้ผลต้านทานการกัดกร่อนที่ใกล้เคียงกับผลของการละลายไนโตรเจนในโลหะผสม ดังนั้นพวกเขาจึงสรุปว่าไนโตรเจนปรับปรุงคุณสมบัติการต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากการเกิดสารประกอบไนไตรด์ระหว่างกระบวนการกัดกร่อน โครเมียมไนไตรด์จะช่วยสร้างพาสซีฟฟิล์ม โดยทำให้เกิดการสะสมของ  $\text{Cr}^{3+}$  ที่ผิวโลหะ ดังสมการ



Willenbruch และ คณะ<sup>11</sup> จึงเสนอว่าไนไตรด์น่าจะเป็นตัวทำให้เกิดพาสซีฟฟิล์มโดยมีกลไกต่าง ๆ ที่สรุปได้ดังนี้

- การเกิดพาสซีฟเวชันของเหล็กกล้าไร้สนิมผสมไนโตรเจนสูง และ เหล็กกล้าไร้สนิมที่มีผิวไนไตรด์จะเป็นผิวสองชั้น (duplex kinetic barrier) คือผิวชั้นนอกที่เป็นฟิล์มออกไซด์และผิวชั้นในเป็นสารประกอบไนไตรด์แบบแทรก (interstitial nitride) ที่เป็นไนไตรด์ของโครเมียม โมลิบดีนัม และนิกเกิล อย่างไรก็ตามนักวิจัยบางกลุ่มได้ผลที่ตรงกันข้าม โดยไม่พบนิกเกิลในพาสซีฟฟิล์ม โดยพบนิกเกิลปริมาณเพียงเล็กน้อยที่รอยต่อของผิวโลหะและพาสซีฟฟิล์ม ในขณะที่นักวิจัยบางกลุ่มพบไนโตรเจนในรูปไม่มีพันธะหรือไม่อยู่ในรูปของไนไตรด์

- ไนไตรด์ที่เกิดขึ้นส่งเสริมการแสดงตัวเป็นอะโนดิก (anodic activity) ของเหล็กและเหล็กกล้าไร้สนิมที่ผ่านการทำไนไตรด์หรือผสมไนโตรเจน โดยทำให้เกิดการละลายของเหล็กเฉพาะที่ (selective dissolution)

- ไนไตรด์ที่ฟอร์มตัวบนโลหะนิกเกิลบริสุทธิ์ไม่มีอิทธิพลต่อความเร็วการกัดกร่อนอะโนดิก (anodic kinetic) แต่ผู้วิจัยกลับสรุปว่านิกเกิลมีความสำคัญในฐานะที่เป็นส่วนประกอบของสารประกอบไนไตรด์ ในเหล็กกล้าไร้สนิมโดยคาดว่านิกเกิลเพิ่มความแข็งแรงของพันธะของโลหะ (intermetallic bonding) ระหว่างโครเมียมกับโมลิบดีนัม

- โมลิบดีนัมมีส่วนในการสร้าง สารประกอบโลหะ (intermetallic compound) ของโคโรเนียมและนิกเกิลที่มีเสถียรภาพขึ้นระหว่างพาสซีฟฟิล์มและเนื้อโลหะในเหล็กกล้าที่มีไนโตรเจนต่ำและเหล็กที่มีไนโตรเจนผสมอยู่สูง โมลิบดีนัมช่วยสร้างไนไตรด์ขึ้นระหว่างผิวพาสซีฟฟิล์มและเนื้อโลหะ โดยมีการสร้างพันธะ Mo-Ni แทนที่จะเป็นพันธะ Cr-Ni

- Lu และคณะ<sup>12</sup> พบว่าโมลิบดีนัมมีปริมาณเล็กน้อยที่พาสซีฟฟิล์มและในชั้นงานที่มีไนโตรเจนสะสมซึ่งขัดแย้งกับผลการวิจัยก่อนหน้านี้ที่พบว่าโมลิบดีนัมสะสมที่ฟิล์มออกไซด์

#### 4. ทฤษฎีกลไกการสะสมที่ผิว (surface enrichment theories)

กลไกการสะสมของไนโตรเจนระหว่างพาสซีฟฟิล์มและผิวโลหะมีการรายงานในหลายๆ งานวิจัย Bandy, Lu และ Clayton<sup>13</sup> เป็นกลุ่มแรกที่เสนอทฤษฎีการสะสมที่ผิวโดยได้ทำการพาสซีเวตโลหะผสม 30-C ในสารละลายกรดซัลฟูริก 0.5 โมลาร์ (Ar-saturated) ที่ศักย์ไฟฟ้า 0.5 V(SCE) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อวิเคราะห์ด้วย Auger electron และ x-ray photoelectron analysis (XPS) พบว่ามีการสะสมของไนโตรเจนที่ผิวซึ่งสรุปได้ว่า

- ส่วนนอกของฟิล์มเป็นส่วนผสมของ Cr-Fe-Ni oxide (หรือ Hydroxide) แต่ตรวจไม่พบโมลิบดีนัมทั้งที่มีโมลิบดีนัมผสมถึง 6% โดยน้ำหนัก

- ไนโตรเจนสะสมอยู่ในช่วง 3 นาโนเมตรจากผิวโลหะโดยมีปริมาณไนโตรเจนมากกว่าในเนื้อโลหะพื้นถึง 7 เท่า

- ประมาณ 75% ของไนโตรเจนที่สะสมอยู่ภายใน 1 นาโนเมตร ถัดจาก รอยต่อระหว่างผิวโลหะและฟิล์มออกไซด์ อยู่ในรูปสารละลายของแข็ง (solid solution)

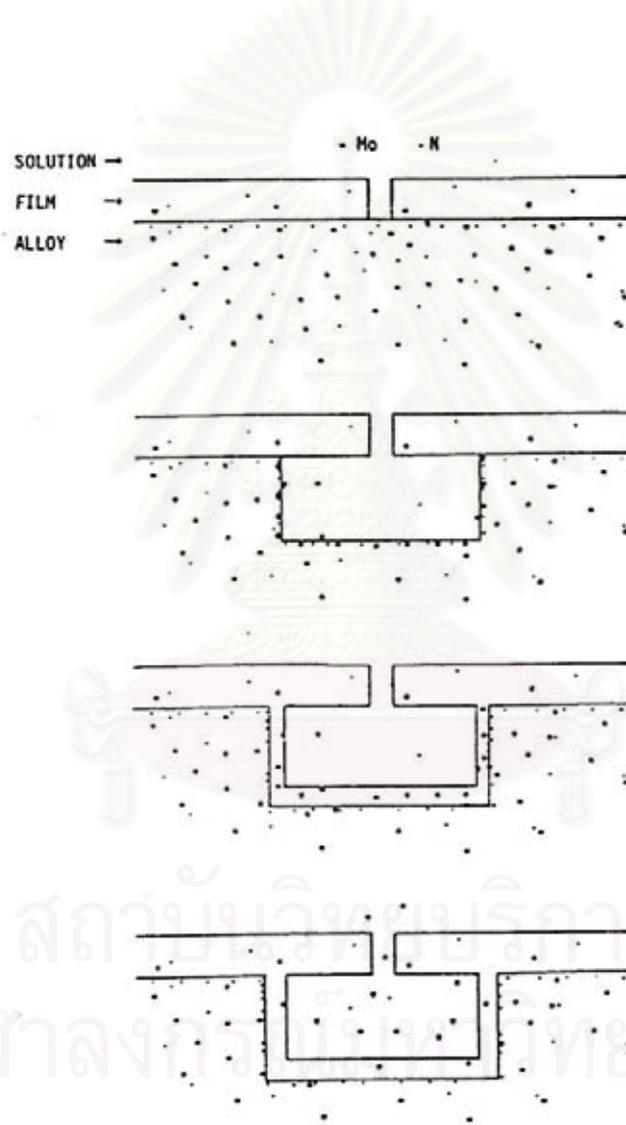
- พบว่ามีการแยกตัว (segregate) หรือดูดซับ (adsorb) ไนโตรเจนใกล้ ๆ รอยต่อระหว่างผิวโลหะกับฟิล์มออกไซด์เนื่องจากการละลายของโลหะแบบเลือก (selective removal)

- ไม่พบไนโตรเจนในรูปที่ถูกออกซิไดซ์หรือถูกรีดิวซ์ ( $\text{NO}_2$  หรือ  $\text{NH}_4^+$ ) ในฟิล์มออกไซด์ หรือ ในเนื้อโลหะ แต่พบไนโตรเจนในรูปที่ไม่มีประจุซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีการเกิดแอมโมเนีย

อย่างไรก็ตามการทดลองต่อมาของ Clayton<sup>14</sup> พบว่ามีการสะสมของไนโตรเจนที่ฟิล์มออกไซด์และในเนื้อโลหะแต่อยู่ในรูปประจุลบ เช่น ในรูปไนไตรด์ โดยพบว่าในระบบ Ni-Mo-N มีการเกิดไนไตรด์ที่ผิวในรูปของ  $\text{Ni}_2\text{Mo}_3\text{N}$

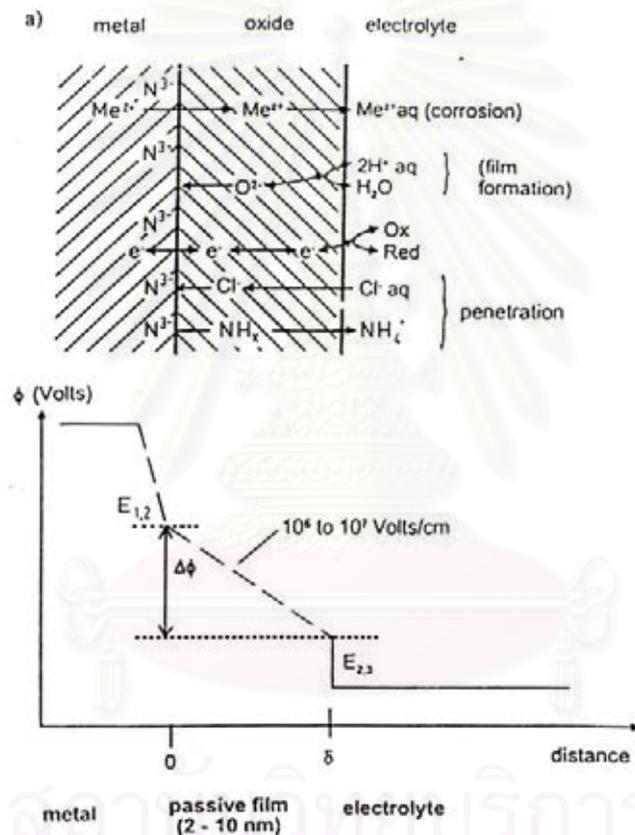
Olefjord และ Wagrelius<sup>7</sup> ทดสอบชั้นของสารประกอบโลหะ (intermetallic layer) ที่เกิดขึ้นที่ผิวโลหะใต้ฟิล์มพาสซีฟด้วย XPS โดยเชื่อว่าเกิดสารประกอบโลหะ (intermetallic layer) มีผลในการปรับปรุงความต้านทานการกัดกร่อน Olefjord และ Wagrelius เสนอว่าไนโตรเจนเพิ่มความแข็งแรงแก่พันธะระหว่าง Ni-Mo และ Ni-Cr และพบว่าไนโตรเจนที่อยู่ระหว่างผิวโลหะและพาสซีฟฟิล์มจะมีประมาณ 10-12% ของปริมาณที่ผิวนอก (atomic layer) แต่แย้งว่าไม่มีการเกิดโคโรเนียมไนไตรด์ และ  $\text{Ni}_2\text{Mo}_3\text{N}$  เนื่องจากปริมาณ Mo ที่วัดได้น้อยมาก

R.C. Newman และ คณะ<sup>13</sup> ศึกษาเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดออสเทนนิติกที่มี 6% โมลิบดีนัม และ 0.45% N ใน สารละลายกรดซัลฟูริก 0.5 โมลาร์ และ สารละลายกรดไฮโดรคลอริก 0.5 โมลาร์ + โซเดียมคลอไรด์ 2 โมลาร์ พบว่าไนโตรเจนสามารถเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนโดยเฉพาะในช่วงพาสซีฟ (passive dissolution) โดยนักวิจัยคณะนี้เสนอกลไกการต้านทานการกัดกร่อนของไนโตรเจนในเหล็กกล้าไร้สนิมว่าทั้งโมลิบดีนัมและไนโตรเจนจะสะสมที่ผิวใหม่ภายหลังการกัดกร่อนแบบเลือก (selective dissolution) ซึ่งทำให้เกิดรีพาสซีเวชัน (repassivation) และทำให้เกิดพาสซีฟฟิล์ม เมื่อฟิล์มเกิดขึ้นครั้งแรกจะมีโมลิบดีนัมผสมอยู่ และต่อมาโมลิบดีนัมในพาสซีฟฟิล์มจะลดลง ไนโตรเจนจะมีการแยกตัวระหว่างผิวโลหะและพาสซีฟฟิล์มและมีการละลายในช่วงแอคทีฟเกิดเป็น  $\text{NH}_4^+$  รูปที่ 2.6 แสดงกลไกตามแนวคิดของ R.C. Newman และ คณะ



รูปที่ 2.6 ลำดับของการเกิดรีพาสซีเวชันและการแยกตัวของโลหะผสมไนโตรเจนและโมลิบดีนัมเมื่ออยู่ในสารละลายคลอไรด์ที่เป็นกรด<sup>(13)</sup>

Grabke<sup>15</sup> เสนอบทบาทของไนโตรเจนที่สะสมระหว่างผิวโลหะและฟิล์มต่างออกไป เมื่อเปรียบเทียบผลวิเคราะห์ ผิวโลหะที่เกิดการแยกตัว (segregation) ของ ผลึกเดี่ยวของ FeN ในอุณหภูมิสูงด้วย AES, XPS และ LEED พบว่า ไนโตรเจนที่เป็นส่วนประกอบของสารที่เกิดระหว่างผิวโลหะและฟิล์มออกไซด์มีประจุเป็นลบ เขาจึงเสนอว่าไนโตรเจนลดความแตกต่างของความต่างศักย์ (potential gradient) ของฟิล์มลง และ ผลัก อิออนของคลอไรด์ โดยไนโตรเจนจะแยกตัวเป็น N<sup>-</sup> ภายหลังการแตกตัวของฟิล์มโดยมีสมมติฐานแสดงในรูป 2.7 นอกจากนี้ไนโตรเจนที่มีประจุเป็นลบอาจทำปฏิกิริยาโดยตรงเป็นแอมโมเนียมาจากสมการ



รูปที่ 2.7 สมมติฐานการเกิดหลุมโดยกลไกการลดความต่างศักย์ไฟฟ้าภายในพาสซีฟฟิล์มเนื่องจากการแยกตัวเป็นประจุลบของไนโตรเจน<sup>(15)</sup>

## 5. การแยกตัวแบบอะโนดิก (anodic segregation)

จากการทดลองของ Clayton และคณะ<sup>16</sup> ที่ทำการวิเคราะห์ผิวที่งานเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 และ 317L ที่ผ่านกระบวนการพาสซีเวชัน ด้วย XPS ในศักย์ไฟฟ้าช่วงที่เกิดการกัดกร่อนทั่วไป (active corrosion) และการกัดกร่อนในช่วงพาสซีฟ (passive corrosion) ในสารละลายกรดซัลฟูริก ความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ พบว่าไนโตรเจนในเหล็กกล้าไร้สนิมเกิดปรากฏการณ์แยกตัวแบบอะโนดิก (anodic segregation) คือกระบวนการที่ธาตุ 1 ชนิดหรือมากกว่ามีการสะสมมากขึ้นเมื่อมีการละลายแบบอะโนดิก (anodic dissolution) และเป็นผลให้เกิดกระบวนการสร้างผิวที่เป็นเฟสใหม่ที่มีคุณสมบัติต่างออกไป

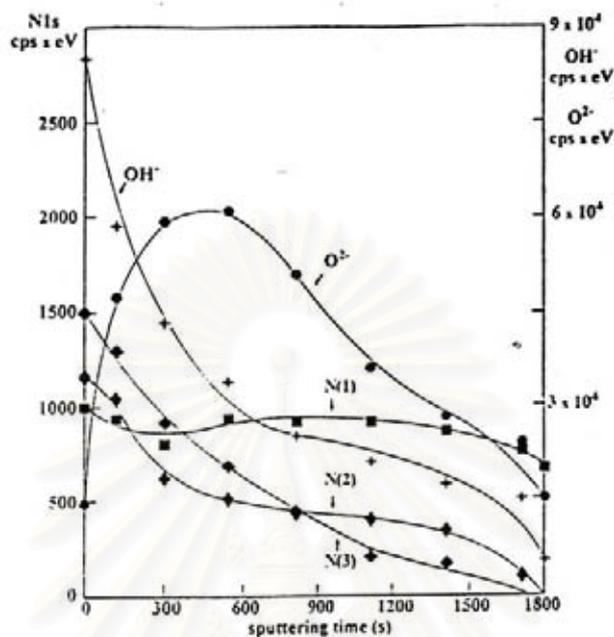
ในกรณีเหล็กกล้าไร้สนิมที่ผสมไนโตรเจน พบว่าบริเวณผิวใหม่ที่เกิดขึ้นมีไนโตรเจนสะสมมากโดยอยู่ในรูปของไนไตรต์ และการเกิดขึ้นของไนไตรต์ขึ้นอยู่กับความยากง่ายของการเกิด  $\text{NH}_3$  และ  $\text{NH}_4^+$  ในระหว่างการเกิดผิวใหม่ที่สัมผัสกับสารละลาย ซึ่งผลการทดลองนี้ขัดแย้งกับผลการวิเคราะห์ XPS ที่มีผู้วิจัยมาก่อนหน้าและกล่าวว่าจะไม่พบไนไตรต์ที่ผิวแต่พบไนโตรเจนในรูปที่ไม่มีประจุ

Clayton และ Martin<sup>16</sup> เสนอว่า ไนโตรเจนแยกตัวแบบอะโนดิกที่ทุก ๆ ศักย์ไฟฟ้าในช่วงแอคทีฟ พาสซีฟ และทรานพาสซีฟ ระหว่างการเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้า (potentiodynamic scan) ในช่วงพาสซีฟ ผิวหน้าของเหล็กจะเกิดการสะสมของ  $\text{NH}_4^+$  แต่ยังไม่ยืนยันว่าบริเวณใดที่เกิดการสะสมของไนโตรเจนเหล่านี้ แม้ว่าจะมีการพบไนโตรเจนที่ผิวบนสุดของฟิล์มออกไซด์ ในตัวฟิล์มออกไซด์และภายใต้ฟิล์มออกไซด์ การเกิด  $\text{NH}_4^+$  และ  $\text{NH}_3$  ขัดแย้งกับผลของงานวิจัยที่เขาทำก่อนหน้านี้ซึ่งพบไนโตรเจนที่ผิวโลหะในรูปที่ไม่มีประจุ ในช่วงทรานพาสซีฟ พบว่ามีการดูดซับไนโตรเจนและมีปริมาณ  $\text{NH}_3$  ลดลง

Bandy<sup>17</sup> และคณะเสนอเหตุผลสองประการเพื่อยืนยันว่าเกิดการสะสมของไนโตรเจนและโมลิบดีนัมระหว่างการละลายของผิว เนื่องจากธาตุทั้งสองมีเสถียรภาพทางเทอร์โมไดนามิกส์มากกว่าเหล็กและเป็นระบบที่ใช้หลายอิเล็กตรอน (multi electron process) จึงมีการละลายที่ช้ากว่า

Newman และ Shahrabi<sup>18</sup> เชื่อว่าปฏิกิริยาการละลายของไนโตรเจนเป็นปฏิกิริยาคาโทดิก ไนโตรเจนจะสะสมอยู่บริเวณผิวที่ถูกละลาย โดยอยู่บริเวณที่เป็นแอคทีฟ (active surface site) เช่น kink, step sites และ stiffle active dissolution

A. Sadough Vanini และคณะ<sup>19</sup> ทำการทดลองเพื่อศึกษาพาสซีฟฟิล์มของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด ออสเทนนิติกเกรด Fe-17Cr-13Ni-0.15N และ Fe-18Cr-10Ni ในสารละลายกรดซัลฟูริก 0.5 โมลาร์ โดยวิเคราะห์ผิวด้วย XPS ภายหลังจากการทำพาสซีเวชัน พบว่าเกิดไนโตรเจนสะสมที่ผิวเนื่องจากการแยกตัวแบบอะโนดิก (anodic segregation) ระหว่างการละลายและพาสซีเวชันของเหล็กกล้าไร้สนิมที่ผสมไนโตรเจน ดังแสดงในรูปที่ 2.8 N(1) คือปริมาณไนโตรเจนที่มีอยู่ในเนื้อโลหะ N(2) คือ ไนโตรเจนที่อยู่ในรูป N-H หรือ N-O ส่วน N(3) คือปริมาณไนโตรเจนที่อยู่ในรูป  $\text{NH}_4^+$  โดยตรวจพบไนโตรเจนที่อยู่ในรูป N(2) และ N(3) บนผิว เหล็กกล้าไร้สนิมที่ผสมไนโตรเจนภายหลังจากการทำพาสซีเวชันเท่านั้น ส่วนเหล็กกล้าที่ไม่มีไนโตรเจนผสมอยู่ พบไนโตรเจนในรูป N(2) และ N(3) ปริมาณน้อยมาก คาดว่าไนโตรเจนนี้มาจากไนโตรเจนที่มีอยู่เล็กน้อยในเนื้อเหล็กและในสารละลายอิเล็กโทรไลต์



รูปที่ 2.8 ปริมาณไนโตรเจนในผิวเหล็กกล้าไร้สนิม Fe-17Cr-13Ni-0.15N ที่ความลึกต่าง ๆ ภายหลังจากทำพาสซีวชันที่ 650 มิลลิโวลต์ (SHE) ทดสอบด้วย XPS<sup>(19)</sup>

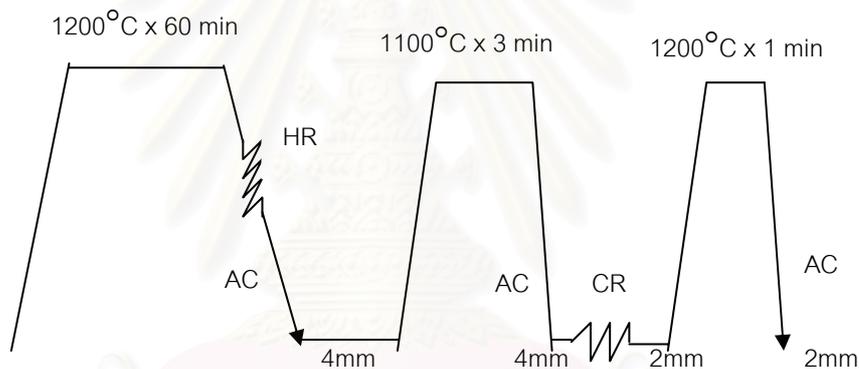
### บทที่ 3

#### ขั้นตอนและวิธีดำเนินการทดลอง

##### 3.1 การเตรียมชิ้นงานทดสอบ

3.1.1 เตรียมเหล็กกล้าไร้สนิมทั้งสามเกรดจากเตาหลอมไฟฟ้าให้มีส่วนผสมเดียวกันยกเว้นปริมาณไนโตรเจนต่างกันเป็น 0.02% 0.10% และ 0.21% โดยน้ำหนัก ไนโตรเจนถูกผสมในเหล็กโดยการพ่นก๊าซไนโตรเจนขณะที่เหล็กเป็นของเหลว วัดปริมาณไนโตรเจนด้วยเครื่อง emission spectroscopy เมื่อได้ส่วนผสมที่ต้องการแล้วเหล็กกล้าไร้สนิมจะถูกหล่อให้เป็นแท่งขนาด 120x120x250 มิลลิเมตร

3.1.2 แท่งเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกทั้งสามเกรดถูกนำมารีดร้อน รีดเย็นและผ่านกรรมวิธีทางความร้อนดังรูปที่ 3.1 จนได้แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีความหนา 2 มิลลิเมตร



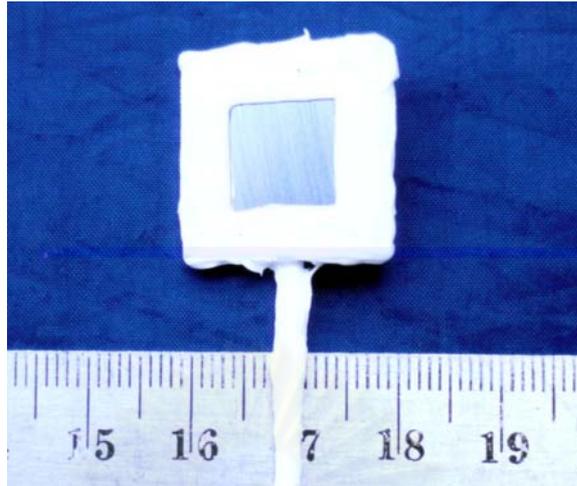
รูปที่ 3.1 กระบวนการทางความร้อนในการเตรียมชิ้นงานที่นำมาใช้ในการทดลอง

3.1.3 แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมด้านที่จะถูกนำมาทดสอบจะถูกขัดผิวออกประมาณ 0.5 มิลลิเมตรเพื่อกำจัดความบกพร่องและออกไซด์ที่เกิดขึ้นที่ผิวเหล็กกล้า

3.1.4 แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมจะถูกตัดให้มีขนาด 20x20 มิลลิเมตร หนา 2 มิลลิเมตร

3.1.5 ด้านที่จะถูกนำมาทดสอบการกัดกร่อน จะถูกขัดด้วยกระดาษทรายจนถึงเบอร์ 800 อีกด้านหนึ่งจะถูกขัดจนถึงเบอร์ 220 ชิ้นงานจะถูกทำความสะอาดในอะซิโตนด้วยเครื่องล้างอัลตราโซนิก (ultrasonic cleaner) เพื่อกำจัดไขมันบนผิวชิ้นงาน แล้วนำมาชั่งน้ำหนักก่อนทำการทดสอบ

3.1.6 ด้านหลังของชิ้นงานที่ถูกขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 220 ถูกเชื่อมกับลวดเหล็กกล้าไร้สนิมด้วยวิธีการเชื่อมแบบจุด (spot welding) เพื่อเป็นตัวนำไฟฟ้า และทำความสะอาดอีกครั้งด้วยเครื่องล้างอัลตราโซนิกในอะซิโตน



รูปที่ 3.2 ลักษณะของชิ้นงานที่นำมาใช้ในการทดลอง

3.1.6 ชิ้นงานจะถูกผูกด้วยลวดที่ขนาด 10x10 มิลลิเมตรด้วยซิลิโคนซีล ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ก่อนจะนำมาทดลองทางไฟฟ้าเคมี

### 3.2 ส่วนผสมทางเคมีของชิ้นงาน

ชิ้นงานของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดออสเทนนิติกทั้ง 3 เกรด ถูกนำไปวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีด้วยเครื่อง emission spectroscopy โดยส่วนผสมทางเคมีของเหล็กทั้งสามชนิด แสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมทางเคมี (%โดยน้ำหนัก) ของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด 304L และ เกรดที่ใช้ในการทดลอง วิเคราะห์ส่วนผสมด้วยเครื่อง emission spectroscopy

Steel	C	Si	Mn	P	S	Al	Ni	Cr	N	Mo	Q	Fe
A	0.008	0.490	1.01	0.028	0.006	0.008	12.09	18.04	0.022	0.001	0.0058	bal
B	0.011	0.510	1.01	0.027	0.005	0.006	11.89	18.11	0.1032	0.006	0.0024	bal
C	0.012	0.554	1.03	0.029	0.006	0.025	12.15	18.03	0.2127	0.009	0.0033	bal
304L*	0.03	1.0	2.0	0.045	0.030	-	8-12	18-20	-	-	-	bal

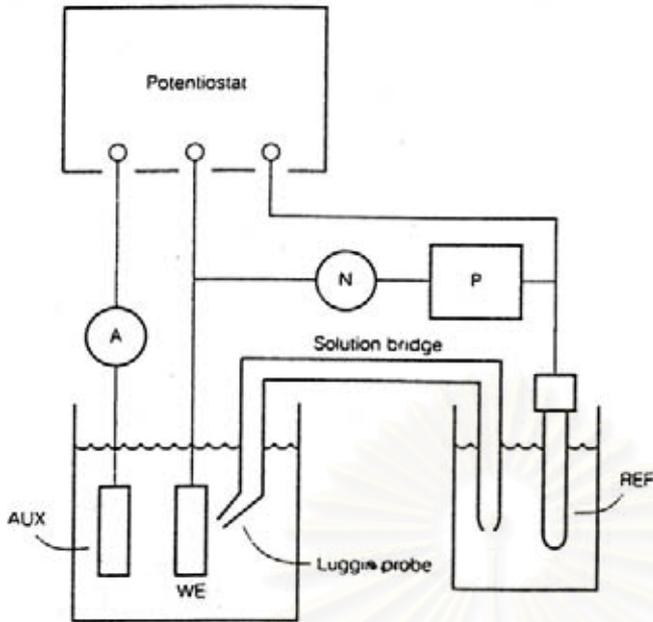
\* Source: Specialty Steel Industry of United States, Washington, D.C.

### 3.3 การทดลองทางไฟฟ้าเคมี

การทดลองนี้ชิ้นงานจะถูกบังคับกับความต่างศักย์ไฟฟ้า และกระแสในวงจรไฟฟ้าเคมีด้วยเครื่องโพเทนชิโอสแตท (potentiostat) แสดงดังรูป 3.3 โดยชิ้นงานจะถูกต่อเป็นวงจรดังแสดงในรูปที่ 3.4 ขั้วไฟฟ้าซิลเวอร์-ซิลเวอร์คลอไรด์ เป็นขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (reference electrode) สำหรับวัดความต่างศักย์ และ แผ่นแพลตินัมเป็นขั้วเคาเตอร์ (counter electrode) สำหรับวัดกระแส อัตราการเพิ่มความต่างศักย์ (scan rate) ในการทดลองนี้เป็น 100 มิลลิโวลต์ต่อนาที ยกเว้นกรณีที่เหล็กกล้าไร้สนิมมีอัตราการกัดกร่อนสูงมากอัตราการเพิ่มความต่างศักย์จะเพิ่มเป็น 1000 มิลลิโวลต์ต่อนาที



รูปที่ 3.3 รูปของเครื่องโพเทนชิโอสแตทที่ใช้ในการทดลอง



-AUX (auxiliary electrode)

แผ่นแพลตตินัม

-WE (working electrode)

ชิ้นงานการทดลอง

-REF (reference electrode)

ซิลเวอร์-ซิลเวอร์คลอไรด์

รูปที่ 3.4 วงจรควบคุมทางไฟฟ้าของเครื่องโพเทนชิโอสแตท

การทดลองทางไฟฟ้าเคมี แบ่งเป็น 2 ส่วน คือ

3.3.1 การทดลองหาเส้นโค้งโพลาริเซชันในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 5 กิโลโมลต่อลูกบาศก์เมตร ที่อุณหภูมิ 20, 30 และ 40 องศาเซลเซียส และ pH 1, 1.5 และ 2 โดยใช้กรดซัลฟูริกเข้มข้นปรับค่า pH จุดประสงค์ของการทดลองนี้เพื่อหาสภาพของสารละลายที่เหมาะสมสำหรับการทดลองขั้นต่อไป อุณหภูมิและ ค่า pH ของสารละลายถูกปรับเพื่อเปลี่ยนแปลงความรุนแรงของสภาพการกัดกร่อน

หลังจากนั้นชิ้นงานถูกต่อเข้ากับวงจรทางไฟฟ้าเคมีดังรูปที่ 3.4 ชิ้นงานจะถูกบังคับให้มีความต่างศักย์  $-700$  มิลลิโวลต์เทียบกับขั้วไฟฟ้าอ้างอิงซิลเวอร์-ซิลเวอร์คลอไรด์ เป็นเวลา 10 นาที เพื่อกำจัดฟิล์มออกไซด์ จากนั้น ชิ้นงานจะถูกบังคับให้อยู่ในวงจรเปิด (open circuit) เพื่อวัดค่าศักย์ไฟฟ้าก่อก่อน ( $E_{\text{corr}}$ ) เป็นเวลา 10 นาที เมื่อได้ค่า  $E_{\text{corr}}$  แล้ว เพิ่มศักย์ไฟฟ้าขึ้นด้วยอัตรา 100 มิลลิโวลต์ต่อนาที การทดลองนี้สิ้นสุดเมื่อความต่างศักย์ของชิ้นงานมีค่าเป็น 1200 มิลลิโวลต์เทียบกับขั้วไฟฟ้าอ้างอิงซิลเวอร์-ซิลเวอร์คลอไรด์

เมื่อได้เส้นโค้งโพลาริเซชันแล้ว หาสภาพที่เหมาะสมที่สุดในที่นี้คือ ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และ pH 2 เนื่องจากเป็นสภาวะที่เหล็กกล้าไร้สนิมทั้งสามชนิดแสดงเส้นโค้งโพลาริเซชันที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน สภาพนี้ถูกนำไปทดสอบในขั้นต่อไป

3.3.2 การทดสอบการกัดกร่อนเป็นการบังคับความต่างศักย์ของชิ้นงานที่ค่าความต่างศักย์คงที่ระยะเวลาต่าง ๆ ตามความเหมาะสม โดยความต่างศักย์นี้เลือกจากบริเวณที่มีความแตกต่างสูงสุดของเส้นโค้งโพลาริเซชันในช่วง แอคทีฟ (active region) พาสซีฟ (passive region) และ ทรานพาสซีฟ (transpassive region) นั่นคือที่ความต่างศักย์  $-300$ , 100 และ 800 มิลลิโวลต์เทียบกับขั้วไฟฟ้าอ้างอิงตามลำดับ

วิธีการทดสอบนี้ทำเช่นเดียวกับการทดลองเพื่อหาเส้นโค้งโพลาริเซชัน นั่นคือชิ้นงานจะถูกบังคับให้มีความต่างศักย์เป็น  $-700$  มิลลิโวลต์ เป็นเวลา  $10$  นาทีเพื่อกำจัดฟิล์มออกไซด์ และวัดค่า  $E_{\text{corr}}$  โดยเปิดวงจร เมื่อได้ค่า  $E_{\text{corr}}$  แล้วศักย์ไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นจากค่านี้ด้วยอัตรา  $100$  มิลลิโวลต์ต่อนาที เมื่อศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นถึงค่าที่กำหนดคือ  $-300$ ,  $100$  และ  $800$  มิลลิโวลต์เทียบกับขั้วอ้างอิง ชิ้นงานจะถูกทดสอบที่ศักย์ไฟฟ้าจะคงที่เป็นระยะเวลาต่าง ๆ กัน ตั้งแต่  $0$  วินาที ถึง  $180$  นาที แล้วแต่ความเหมาะสมของชิ้นงาน

หลังจากผ่านการทดสอบการกัดกร่อนแล้ว ชิ้นงานจะถูกล้างด้วยน้ำ แล้วเป่าให้แห้ง เอาซิลิโคนที่ใช้ผนึกชิ้นงานออก ซึ่งน้ำหนักชิ้นงานภายหลังการทดลองเพื่อหาน้ำหนักที่ลดลงของชิ้นงาน จากนั้นชิ้นงานถูกนำมาถ่ายรูปเพื่อคำนวณบริเวณของผิวที่ไม่ถูกกัดกร่อนด้วยวิธีวิเคราะห์ภาพถ่าย (image analysis)

### 3.4 การตรวจสอบทางจุลภาค

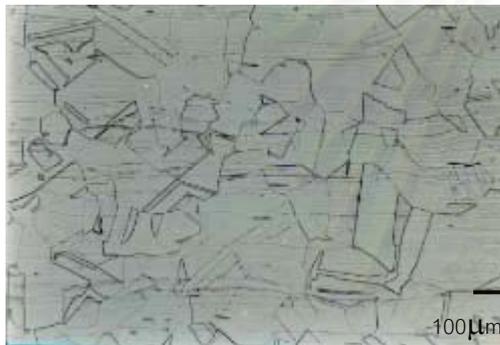
ทำการวิเคราะห์ชิ้นงานภายหลังการทดสอบการกัดกร่อนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) เพื่อตรวจสอบบริเวณที่ถูกกัดกร่อนและ รอยต่อระหว่างบริเวณที่ถูกกัดกร่อนและไม่ถูกกัดกร่อน ที่กำลังขยาย  $1000$  เท่า เพื่อทำนายกลไก และการขยายตัวของบริเวณที่ถูกกัดกร่อน

## บทที่ 4

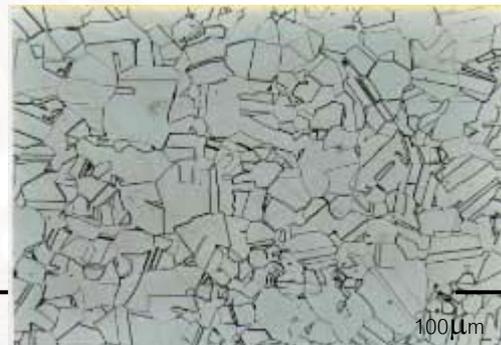
### ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

#### 4.1 ผลกระทบของไนโตรเจนต่อโครงสร้างจุลภาค

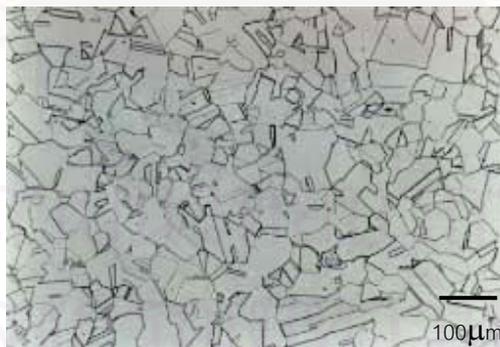
เมื่อปริมาณไนโตรเจนที่ผสมในเหล็กกล้าไร้สนิมเพิ่มขึ้นขนาดของเกรนภายหลังจากกระบวนการรีดร้อนและรีดเย็นตามรูป 3.1 จะเล็กลงดังแสดงในรูปที่ 4.1 ทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจากกลไกการเกิดสารประกอบของเฟสที่มีไนโตรเจนเป็นส่วนผสม เช่น ไครเมียมนไนไตรด์ สารประกอบไนไตรด์นี้จะชะลอการขยายตัวของเกรนที่อุณหภูมิการอบก่อนรีดร้อนตามกลไกเหมือนเข็มที่ปักที่ขอบเกรน (pinning effect) ขนาดเกรนของเหล็กกล้า A, B และ C ตามมาตรฐาน JIS G0551 เป็น 4.61, 6.47 และ 6.85 หน่วย ตามลำดับ



เหล็กกล้าไร้สนิม A (0.02 wt%N)



เหล็กกล้าไร้สนิม B (0.10 wt%N)

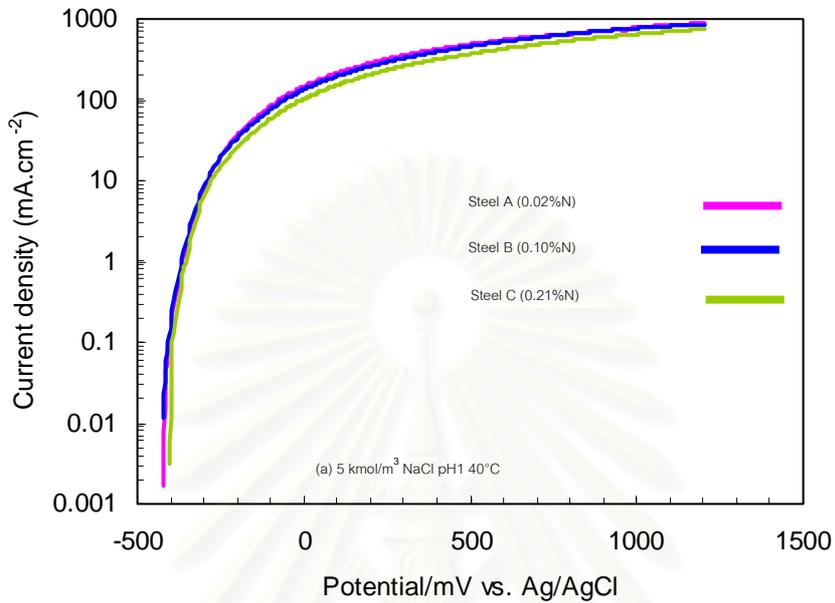


เหล็กกล้าไร้สนิม C (0.21 wt%N)

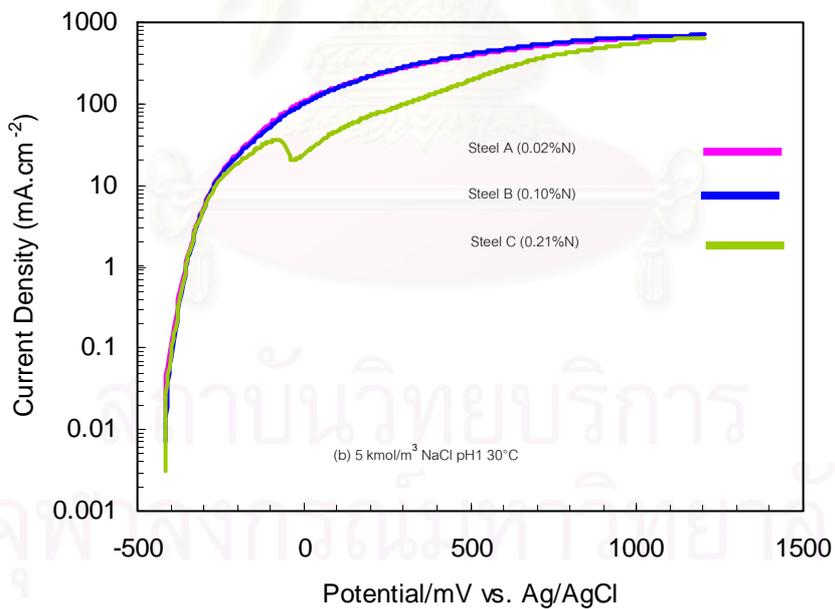
รูปที่ 4.1 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าไร้สนิมที่นำมาใช้ในการทดลอง กำลังขยาย 100 เท่า

#### 4.2 ผลกระทบของไนโตรเจนต่อเส้นโค้งโพลาริเซชัน

เส้นโค้งโพลาริเซชันของเหล็กทั้งสามชนิดที่วัดในสารละลายไฮเดียมคลอไรด์เข้มข้น 5 กิโลโมลต่อลูกบาศก์เมตร ที่อุณหภูมิ 20-40 องศาเซลเซียส และ pH 1-2 แสดงในรูปที่ 4.2ก-4.2ง จะเห็นผลของไนโตรเจนต่อเส้นโค้งโพลาริเซชันของเหล็กกล้าทั้งสามชนิดอย่างชัดเจน

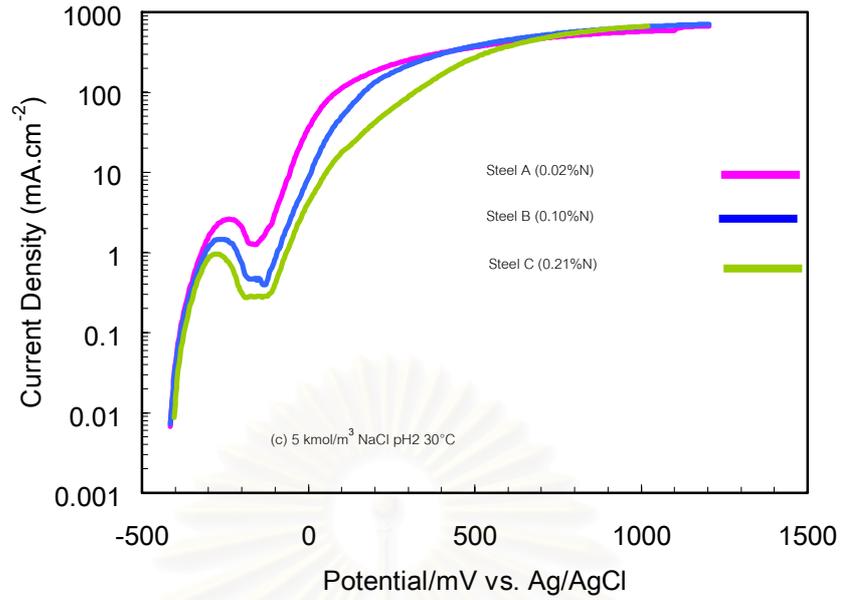


ก. pH 1 40 °C

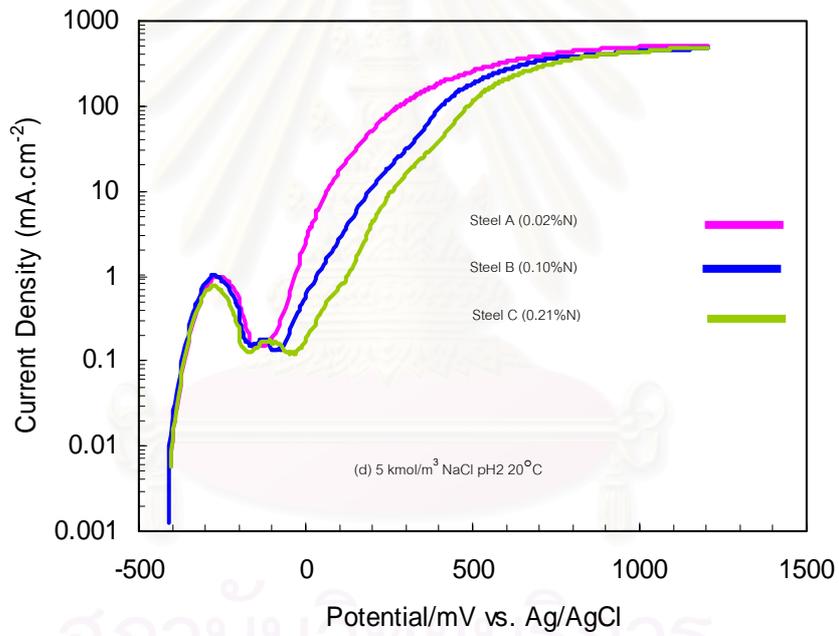


ข. pH 1 30 °C

รูปที่ 4.2 ก, ข เส้นโค้งโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมที่ผสมไนโตรเจน ในสารละลายไฮเดียมคลอไรด์ 5 กิโลโมลต่อลูกบาศก์เมตร



ก. pH 2 30 °C



ข. pH 2 20 °C

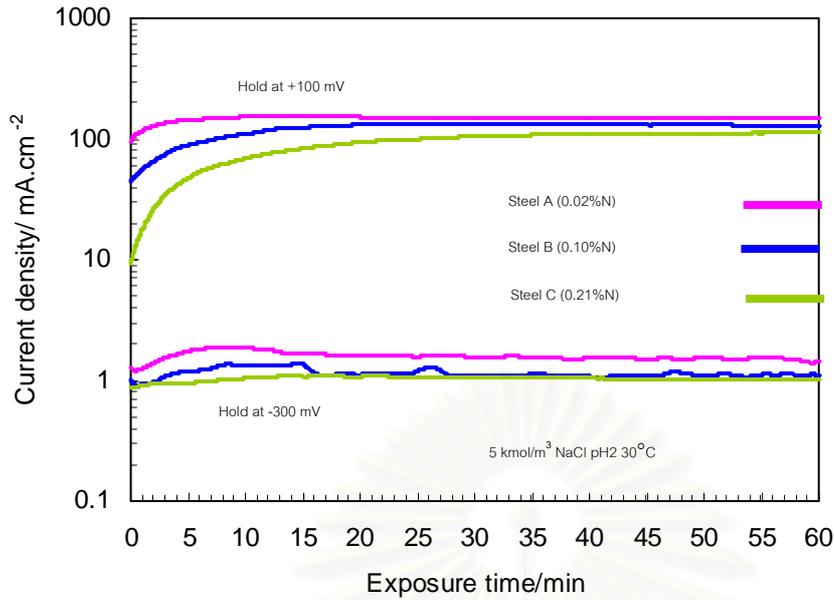
รูปที่ 4.2 ค, ง เส้นโค้งโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมที่ผสมไนโตรเจน ในสารละลายไฮเดียมคลอไรด์ 5 กิโลโมลต่อลูกบาศก์เมตร

เส้นโค้งโพลาริเซชัน ที่สารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 5 กิโลโมลต่อลูกบาศก์เมตร pH 1 อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส อันเป็นสภาพที่มีความรุนแรงการกัดกร่อนสูงที่สุดในการทดลองชุดนี้แสดงในรูปที่ 4.2ก ที่สภาพการทดลองนี้ ไนโตรเจนไม่มีผลต่อพฤติกรรมการกัดกร่อนของเหล็กทั้งสามเกรด เส้นโค้งโพลาริเซชันของเหล็กทั้งสามเกรดเกือบจะทับเป็นเส้นเดียวกัน ที่สารละลายเดียวกัน pH1 อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นสภาพการกัดกร่อนที่รุนแรงน้อยกว่า เส้นโค้งโพลาริเซชันในสภาพนี้แสดงในรูป 4.2ข เหล็กชนิด C ที่มีปริมาณไนโตรเจนสูงที่สุดเริ่มมีการเกิดขึ้นของบริเวณที่เป็นช่วงพาสซีฟ ในขณะที่เหล็กเกรด A และ B ที่มีปริมาณไนโตรเจนน้อยกว่า ลักษณะเส้นโค้งโพลาริเซชันเป็นใกล้เคียงกับกรณีแรกคือไม่มีความแตกต่างกันมากนัก

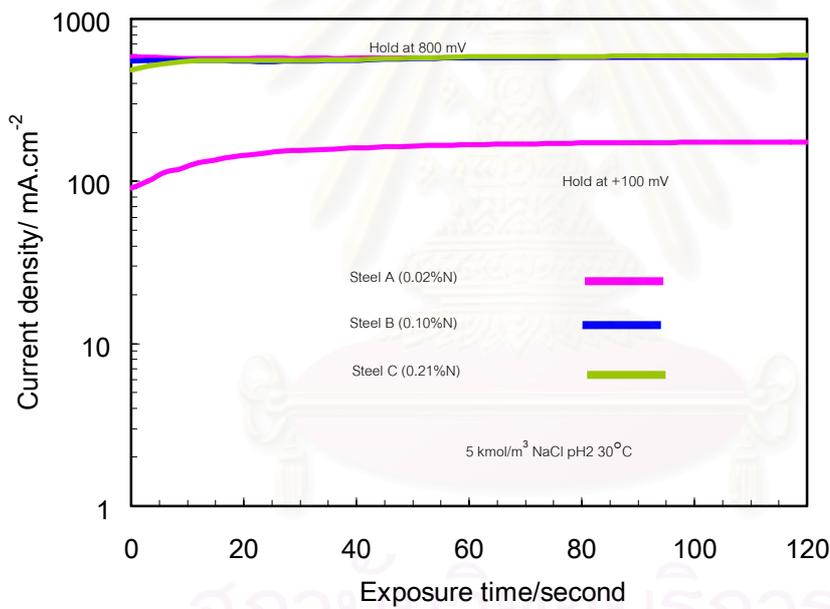
เส้นโค้งโพลาริเซชันที่สารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 5 กิโลโมลต่อลูกบาศก์เมตร pH 2 อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียสแสดงในรูปที่ 4.2ค ในสภาพนี้มีความรุนแรงการกัดกร่อนน้อยกว่า 2 สภาพที่กล่าวมา เหล็กกล้าทั้งสามเกรดแสดงช่วงพาสซีฟ พฤติกรรมการกัดกร่อนของเหล็กกล้าชนิด A แตกต่างกับเหล็กกล้าชนิด B และ C ซึ่งมีปริมาณไนโตรเจนอยู่มากกว่า โดยเฉพาะในช่วง ศักย์ไฟฟ้า  $-250$  ถึง  $700$  มิลลิโวลต์ ไนโตรเจนมีผลในการเลื่อนค่าความต่างศักย์แรกที่เกิดพาสซีฟ (primary passive potential) ไปในทิศทางที่มีเสถียรภาพมากขึ้น นอกจากนี้การเพิ่มปริมาณไนโตรเจนจะลดกระแสพาสซีฟ (passive current density) และขยายช่วงพาสซีฟอย่างไรก็ตาม ไนโตรเจนเกือบจะไม่มีผลที่ศักย์ไฟฟ้าต่ำ (น้อยกว่า  $-250$  มิลลิโวลต์) และที่ศักย์ไฟฟ้าสูง (มากกว่า  $700$  มิลลิโวลต์) แทบไม่ต่างกันเมื่อปริมาณไนโตรเจนเพิ่มขึ้น รูปที่ 4.2ง แสดงเส้นโค้งโพลาริเซชันของเหล็กในสารละลายที่ pH 2 อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นสภาพที่มีการกัดกร่อนน้อยที่สุดในการทดลองนี้ พบว่าเส้นโค้งโพลาริเซชันของเหล็กทั้งสามเกรดแสดงช่วงพาสซีฟที่มีเสถียรภาพมากขึ้น อย่างไรก็ตามปริมาณไนโตรเจนในเหล็กกล้าไร้สนิมที่เพิ่มขึ้นได้ขยายช่วงพาสซีฟ และ ศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบหลุม ( $E_{pp}$ ) ไปในทางที่มีเสถียรภาพมากขึ้น ในกรณีนี้ ไนโตรเจนไม่มีผลต่อ ศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน ( $E_{corr}$ ) ความหนาแน่นกระแสพาสซีฟ ( $I_{pass}$ ) และ ความหนาแน่นกระแสที่ความต่างศักย์สูง

#### 4.3 ผลกระทบของไนโตรเจนต่อบริเวณที่ถูกกัดกร่อน

จากผลการทดลองผลกระทบของไนโตรเจนต่อเส้นโค้งโพลาริเซชัน. ในหัวข้อ 4.2 เลือกสภาพการทดลองการทดลองในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 5 กิโลโมลต่อลูกบาศก์เมตร pH 2 อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียสถูกเป็นสภาพที่ใช้ในการทดลองแบบความต่างศักย์คงที่ เพราะให้ความแตกต่างของเส้นโค้งโพลาริเซชันมากที่สุด ศักย์ไฟฟ้าที่ทำการทดสอบคือ  $-300$ ,  $100$  และ  $800$  มิลลิโวลต์ เพื่อตรวจสอบคุณสมบัติการกัดกร่อนในช่วง แอคทีฟ (active region) พาสซีฟ (passive region) และทรานพาสซีฟ (transpassive region) โดยวัดค่าความหนาแน่นกระแส (current density) น้ำหนักที่ลดลงจากการกัดกร่อน (weight loss) โครงสร้างของบริเวณที่ถูกกัดกร่อน (morphology of corroded area) และขนาดของบริเวณที่ถูกกัดกร่อนเพื่อใช้ในการศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อน ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 4.3, 4.4, 4.5 และ 4.6 ตามลำดับ

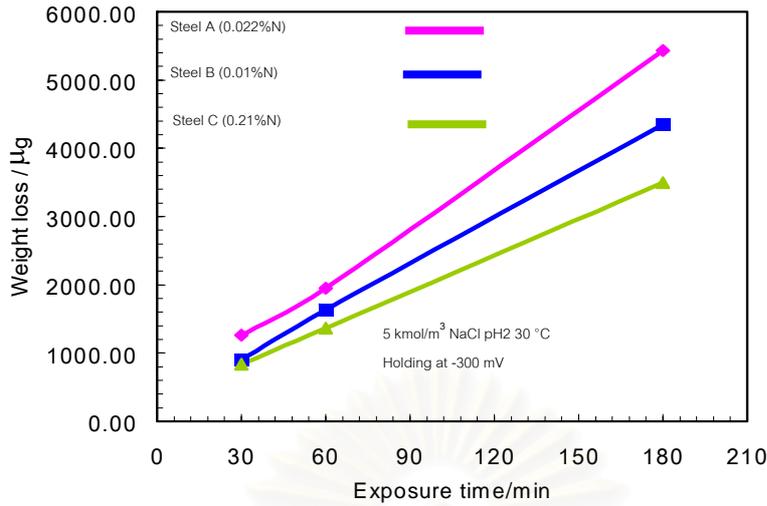


ก. ศักย์ไฟฟ้า -300 และ 100 มิลลิโวลต์ (Ag/AgCl) อัตราเพิ่มกระแสไฟฟ้าเป็น 100 มิลลิโวลต์ต่อ นาที

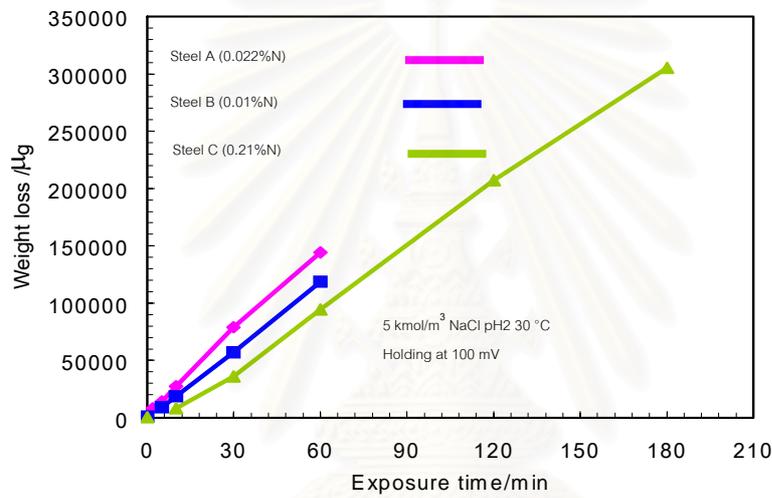


ข. ศักย์ไฟฟ้า 100 และ 800 มิลลิโวลต์ (Ag/AgCl) อัตราเพิ่มกระแสไฟฟ้าเป็น 1000 มิลลิโวลต์ต่อ นาที

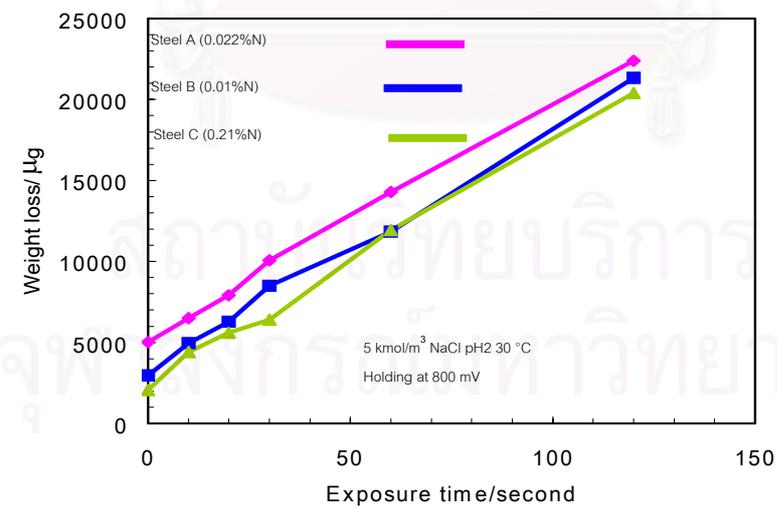
รูปที่ 4.3ก, ข การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นกระแสเมื่อเวลาเปลี่ยนไปของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด ออสเทนนิติกในสารละลายไฮเดียมคลอไรด์ 5 กิโลโมลต่อลูกบาศก์เมตร pH 2-3 องศาเซลเซียส ที่ ศักย์ไฟฟ้าต่าง ๆ



ก. ศักย์ไฟฟ้า -300 มิลลิโวลต์



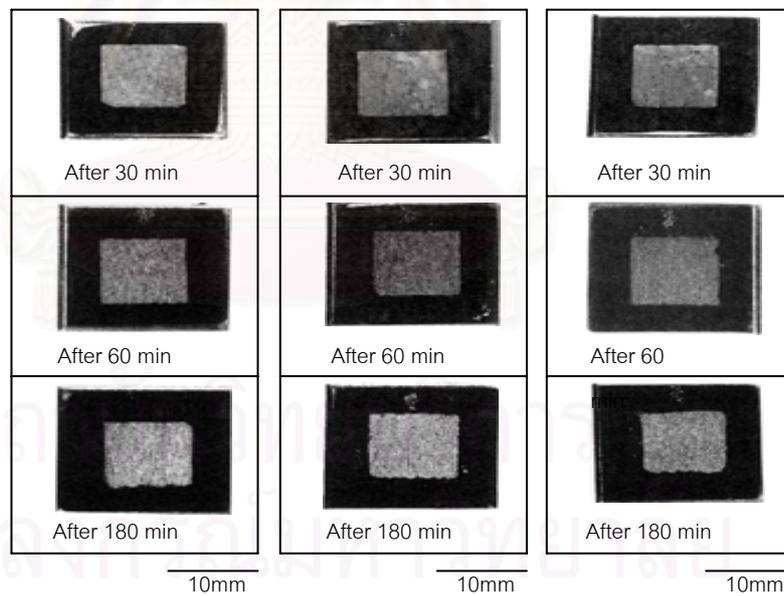
ข. ศักย์ไฟฟ้า 100 มิลลิโวลต์



ค. ศักย์ไฟฟ้า 800 มิลลิโวลต์

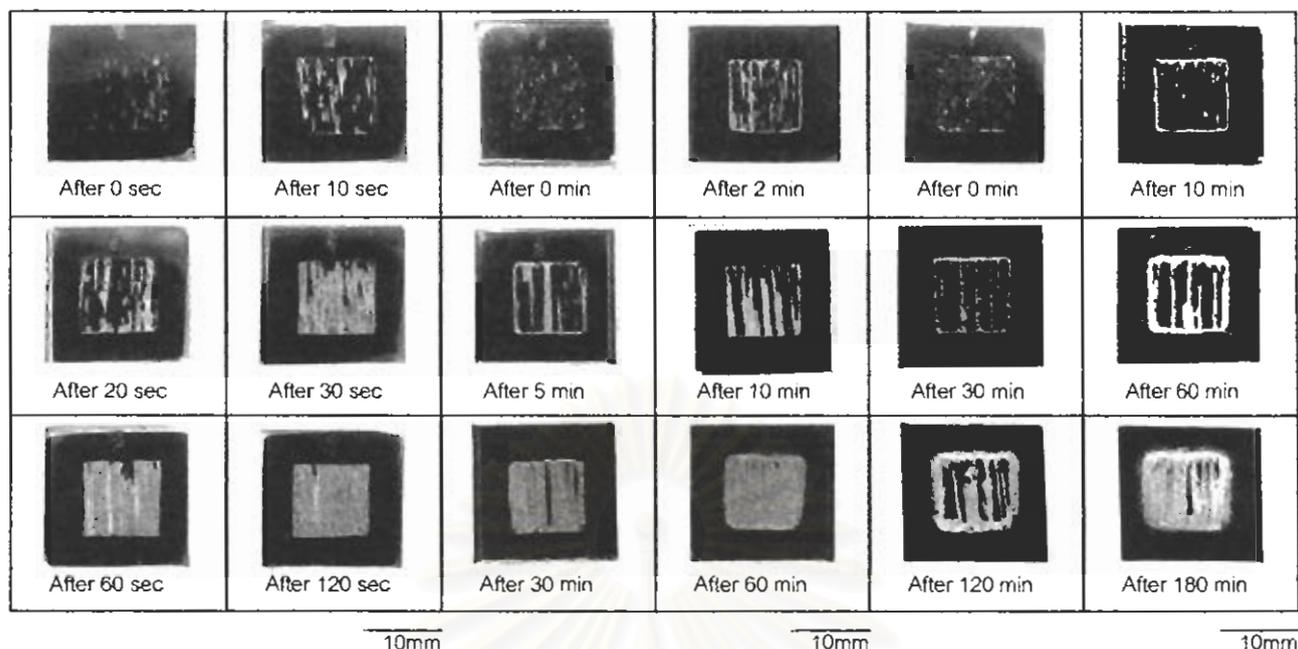
รูปที่ 4.4 ก, ข และ ค น้ำหนักที่ลดลงที่เวลาต่าง ๆ ของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดออสเตนนิติกผสมไนโตรเจน (Ag/AgCl) ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 5 กิโลโมลต่อลูกบาศก์เมตร pH2 ที่ศักย์ไฟฟ้า -300, 100 และ 800 มิลลิโวลต์ (Ag/AgCl)

รูปที่ 4.3 และ 4.4 แสดงการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นกระแส และปริมาณการลดลงของน้ำหนักชิ้นงานของเหล็กกล้าไร้สนิมทั้ง 3 เกรดซึ่งมีปริมาณไนโตรเจนต่างกันที่เวลาต่าง ๆ ในรูปที่ 4.3k เมื่อชิ้นงานถูกบังคับให้มีศักย์ไฟฟ้า  $-300$  มิลลิโวลต์ ซึ่งเป็นช่วงแอคทีฟ (active region) ความหนาแน่นกระแสของเหล็กกล้าไร้สนิมทั้งสามเกรดมีค่าเกือบจะคงที่เมื่อเวลาผ่านไป อย่างไรก็ตามพบว่าเหล็กกล้าไร้สนิม A ที่มีปริมาณไนโตรเจนต่ำที่สุดมีความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงที่สุดและมีปริมาณการกัดกร่อน(สูญเสียน้ำหนัก) สูงสุดดังรูปที่ 4.4k และค่าทั้งสองมีค่าลดลงเมื่อปริมาณไนโตรเจนในเหล็กกล้าไร้สนิมเพิ่มมากขึ้น ที่ศักย์ไฟฟ้า  $100$  มิลลิโวลต์ จากรูปที่ 4.3k ความหนาแน่นกระแสของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด B และ C ที่มีไนโตรเจนผสมอยู่ จะเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ จนความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าคงที่ในเวลา  $20$  และ  $60$  นาทีตามลำดับ ในขณะที่เหล็กกล้าไร้สนิม A ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าจะคงที่ในเวลา  $5$  นาทีเมื่อเริ่มการทดลองเช่นเดียวกันกับการทดลองที่ศักย์ไฟฟ้า  $-300$  มิลลิโวลต์ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและอัตราการกัดกร่อนลดลงเมื่อปริมาณไนโตรเจนในเหล็กกล้าไร้สนิมเพิ่มขึ้น ที่ศักย์ไฟฟ้า  $800$  มิลลิโวลต์ (รูปที่ 4.3ข) เนื่องจากเป็นความต่างศักย์และสภาพการกัดกร่อนที่รุนแรง ดังนั้นอัตราการเพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้าในช่วงก่อนการวัดความหนาแน่นกระแสที่เพิ่มจาก  $100$  มิลลิโวลต์ เป็น  $1000$  มิลลิโวลต์ต่ออนาที ที่ศักย์ไฟฟ้านี้ไนโตรเจนแทบจะไม่มีผลต่อความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของเหล็กกล้าทั้งสามเกรดมีค่าใกล้เคียงกันมาก แม้ว่าเหล็กกล้าไร้สนิม C แสดงการเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า แต่จะคงที่ในเวลาสั้น ๆ (น้อยกว่า  $1$  นาที) ในขณะที่เหล็กกล้าไร้สนิม A และ B คงที่ตั้งแต่เริ่มทดลอง เมื่อพิจารณาถึงปริมาณการลดลงของน้ำหนักที่เวลาต่าง ๆ (รูปที่ 4.4ค) ไนโตรเจนในเหล็กกล้าไร้สนิมแสดงผลเสียเล็กน้อยต่อความต้านทานการกัดกร่อนที่ศักย์ไฟฟ้า  $800$  มิลลิโวลต์



(a) Steel A (0.02%N) (b) Steel B (0.10%N) (c) Steel C (0.21%N)

รูปที่ 4.5 แสดงลักษณะชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดออสเทนนิติก A, B และ C ภายหลังทดสอบที่ศักย์ไฟฟ้า  $-300$  มิลลิโวลต์ (Ag/AgCl) ในสารละลายไฮเดียมคลอไรด์  $5$  กิโลโมลต่อลูกบาศก์เมตร pH  $2$  ที่  $30$  องศาเซลเซียส ที่เวลาต่าง ๆ

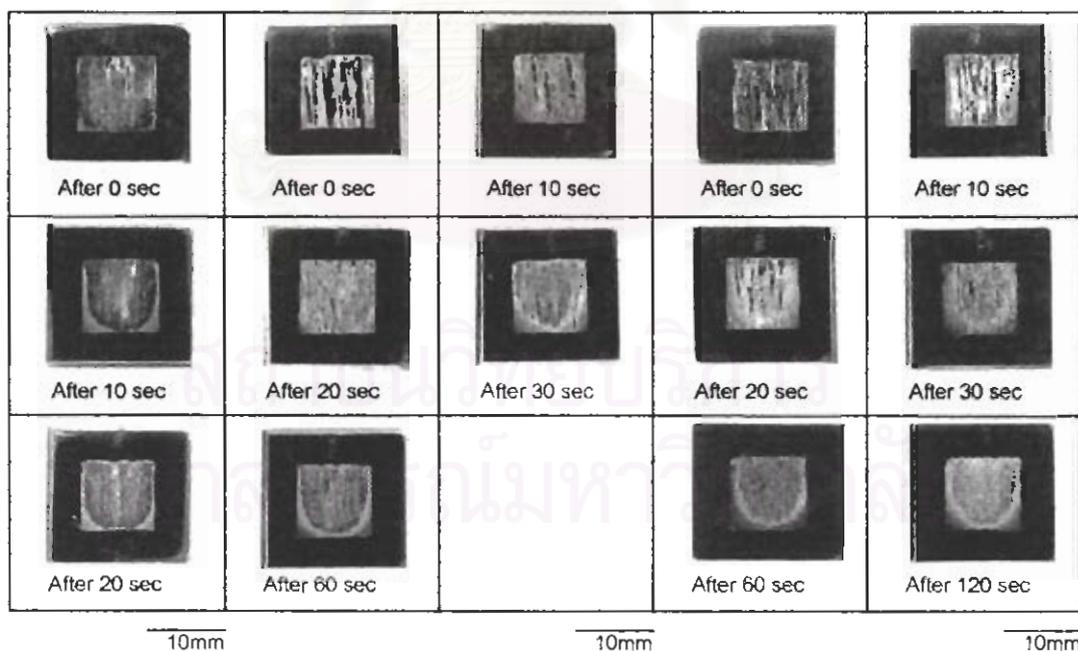


(a) Steel A (0.02%N)

(b) Steel B (0.10%N)

(c) Steel C (0.21%N)

รูปที่ 4.6 แสดงลักษณะชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดออสเทนนิติก A, B และ C ภายหลังจากทดสอบที่ศักย์ไฟฟ้า 100 มิลลิโวลต์ (Ag/AgCl) ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 5 กิโลโมลต่อลูกบาศก์เมตร pH 2 ที่ 30 องศาเซลเซียส ที่เวลาต่าง ๆ

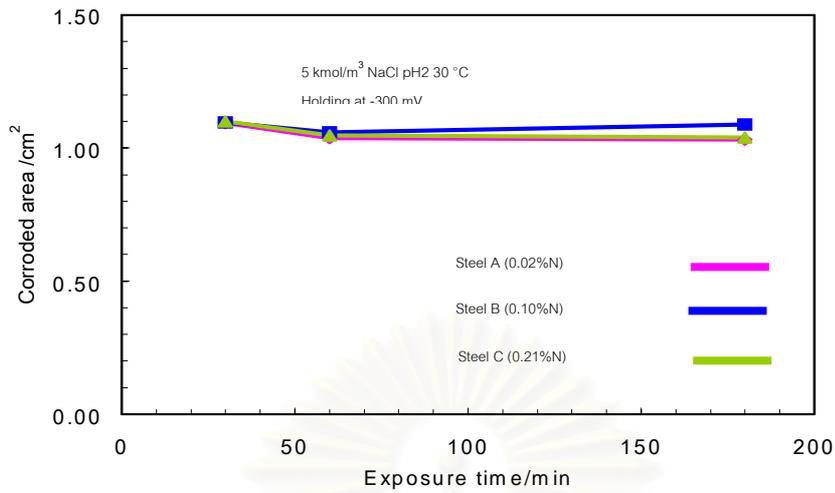


(a) Steel A (0.02%N)

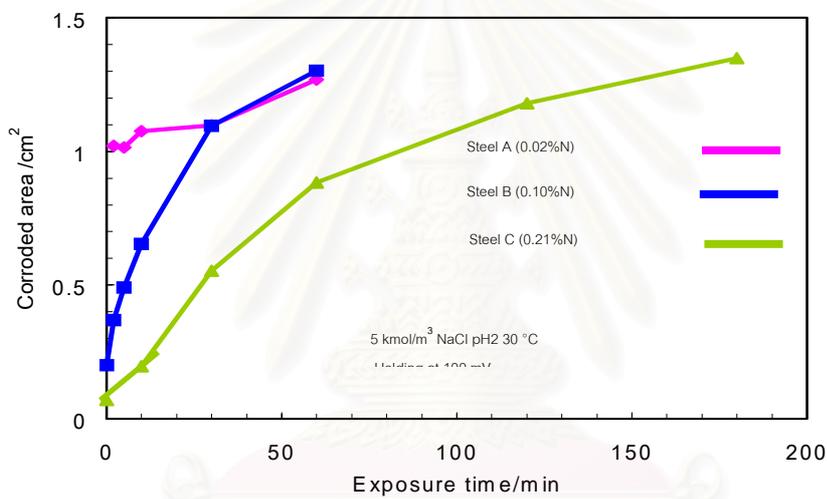
(b) Steel B (0.10%N)

(c) Steel C (0.21%N)

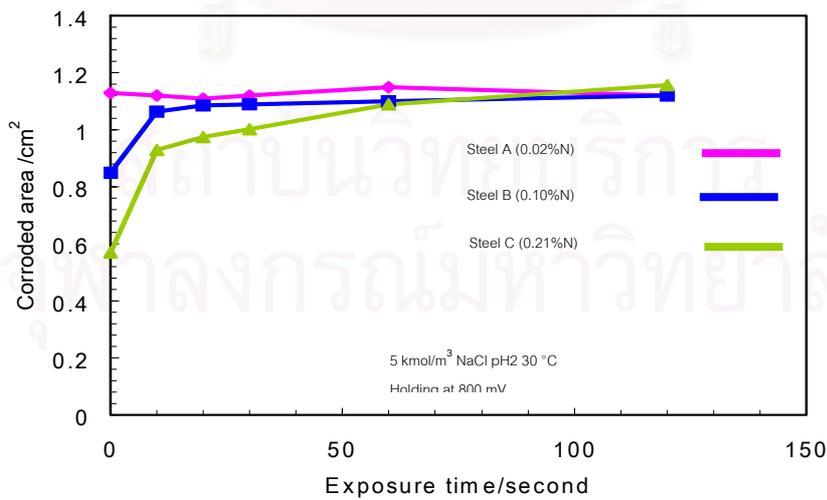
รูปที่ 4.7 แสดงลักษณะชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดออสเทนนิติก A, B และ C ภายหลังจากทดสอบที่ศักย์ไฟฟ้า 800 มิลลิโวลต์ (Ag/AgCl) ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 5 กิโลโมลต่อลูกบาศก์เมตร pH 2 ที่ 30 องศาเซลเซียส ที่เวลาต่าง ๆ



ก. ศักย์ไฟฟ้า -300 มิลลิโวลต์



ข. ศักย์ไฟฟ้า 100 มิลลิโวลต์



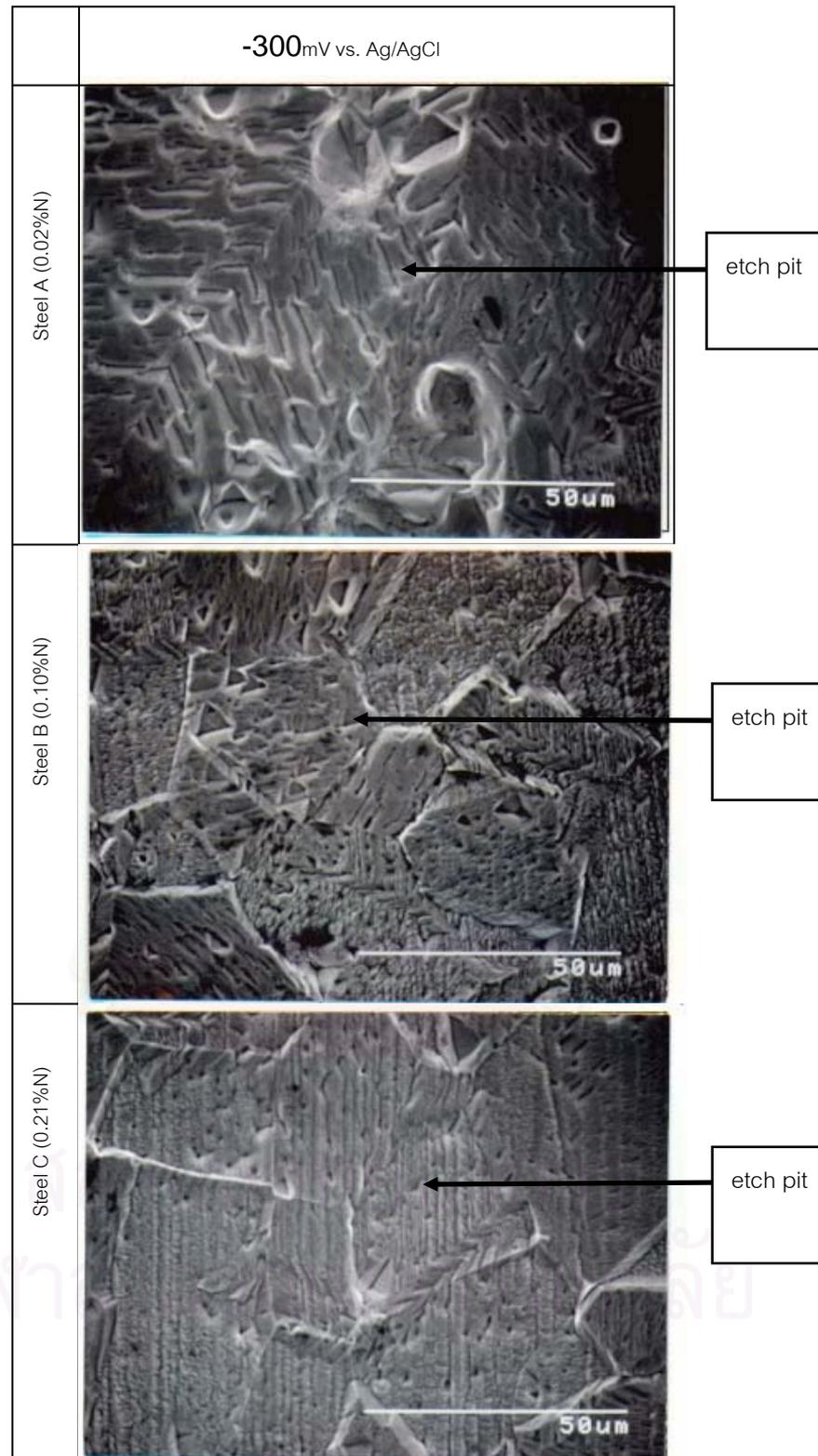
ค. ศักย์ไฟฟ้า 800 มิลลิโวลต์

รูปที่ 4.8 การเปลี่ยนแปลงของบริเวณที่ถูกกัดกร่อนเมื่อเวลาเปลี่ยนไปของเหล็กกล้าไร้สนิมที่ผสมไนโตรเจนที่ศักย์ไฟฟ้า -300, 100 และ 800 มิลลิโวลต์ (Ag/AgCl)

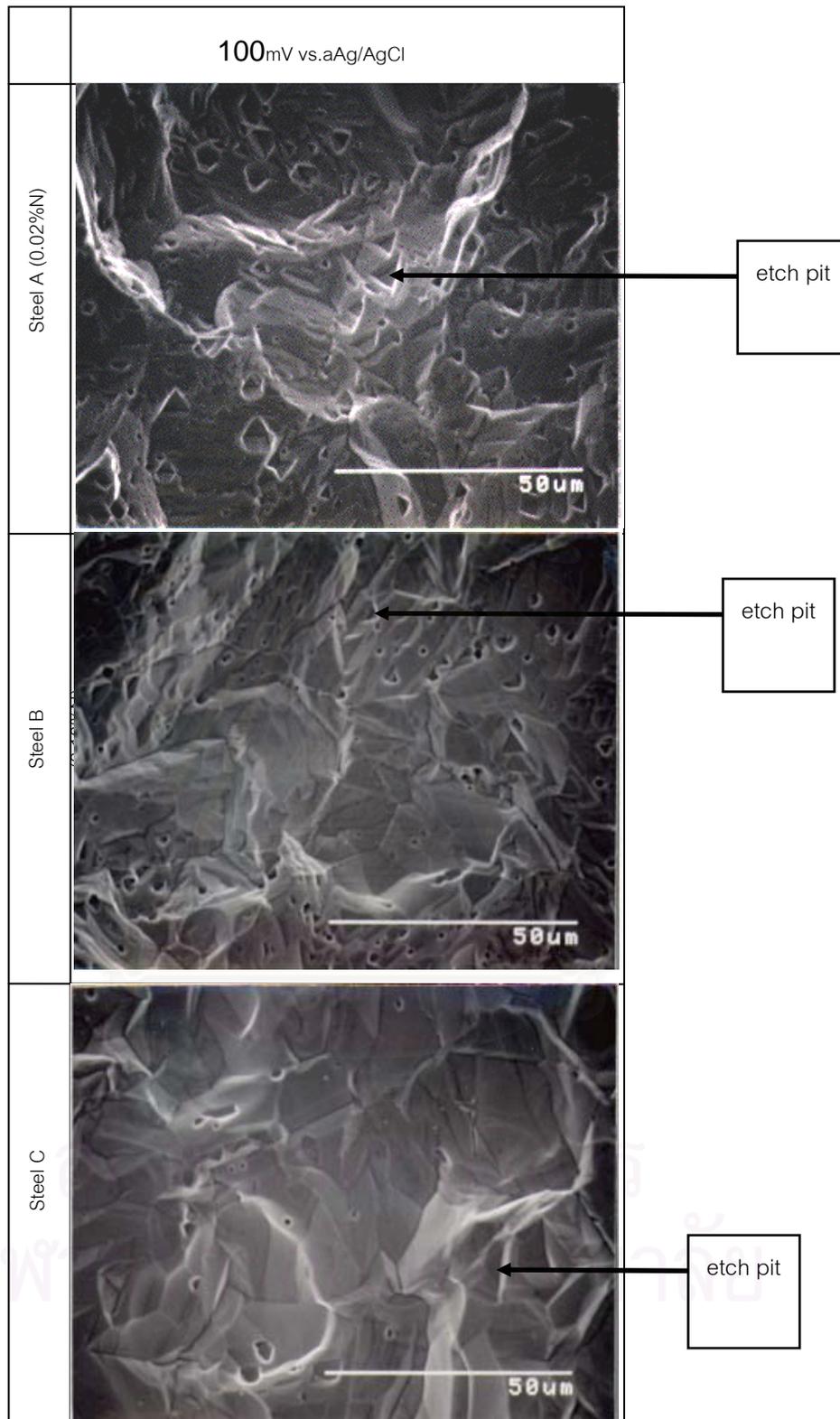
การเปลี่ยนแปลงของลักษณะเส้นโค้งของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเทียบกับเวลาที่แสดงในรูปที่ 4.3 มีความสัมพันธ์กับพื้นที่ที่ถูกกัดกร่อนและไม่ถูกกัดกร่อนของชิ้นงาน รูปของชิ้นงานภายหลังการทดลองความต่างศักย์ -300, 100 และ 800 มิลลิโวลต์ ที่เวลาต่าง ๆ แสดงในรูปที่ 4.5, 4.6 และ 4.7 ตามลำดับ โดยรูปที่ 4.5, 4.6 และ 4.7 แสดงลักษณะการเกิดและขยายตัวของบริเวณที่ถูกกัดกร่อนตามผิวของชิ้นงาน ผิวส่วนที่เป็นสีดำแสดงบริเวณที่ยังไม่ถูกกัดกร่อน ส่วนสีขาวแสดงบริเวณที่ถูกกัดกร่อน และ รูปที่ 4.8 แสดงขนาดพื้นที่ที่ถูกกัดกร่อนที่ศักย์ไฟฟ้า -300, 100 และ 800 มิลลิโวลต์ที่เวลาต่าง ๆ

ในรูปที่ 4.5 แสดงชิ้นงานของเหล็กกล้าไร้สนิมทั้งสามถูกทดลองที่ศักย์ไฟฟ้า -300 มิลลิโวลต์ บริเวณของชิ้นงานที่สัมผัสกับสารละลายถูกกัดกร่อนอย่างสม่ำเสมอ ซึ่งเป็นการกัดกร่อนทั่วไป (general corrosion) และไม่พบส่วนที่ไม่เกิดการกัดกร่อน รูปที่ 4.8ก แสดงถึงพื้นที่ที่ถูกกัดกร่อนมีค่าค่อนข้างคงที่ ซึ่งสอดคล้องกับเส้นโค้งโพลาไรเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมทั้งสามเกรดดังแสดงในรูปที่ 4.2ค ในรูปที่ 4.6 แสดงชิ้นงานภายหลังการทดลองที่ศักย์ไฟฟ้า 100 มิลลิโวลต์ ที่เป็นศักย์ไฟฟ้าช่วงพาสซีฟ (passive region) เหล็กกล้าไร้สนิม A ที่มีปริมาณไนโตรเจนน้อยที่สุดมีการขยายตัวของบริเวณที่ถูกกัดกร่อนเร็วที่สุด และอัตราการขยายตัวของบริเวณที่ถูกกัดกร่อนจะช้าลงเมื่อปริมาณไนโตรเจนเพิ่มขึ้น จากรูปที่ 4.8ข พบว่าเวลาในการทดลองที่ทำให้พื้นที่ที่สัมผัสสารละลายถูกกัดกร่อนมีขนาด 1 ตารางเซนติเมตร สำหรับเหล็กกล้าไร้สนิม A, B และ C เป็น 1 นาที 25 นาที และ 85 นาทีตามลำดับ ส่วนรูปของชิ้นงานภายหลังการทดลองที่ศักย์ไฟฟ้า 800 มิลลิโวลต์นั้น แสดงในรูปที่ 4.7 เนื่องจากเป็นความต่างศักย์ที่สภาพการกัดกร่อนสูง อัตราการเพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้าก่อนการทดลองที่ศักย์ไฟฟ้าคงที่ที่จะเป็น 1000 มิลลิโวลต์ต่อนาที ที่สภาพนี้ในโตรเจนแทบจะไม่มีผลต่อลักษณะการกัดกร่อน อัตราการขยายตัวของพื้นที่ที่ถูกกัดกร่อนสูงมาก จากรูป 4.8ค โดยเวลาในการทดลองที่ทำให้บริเวณที่สัมผัสสารละลายถูกกัดกร่อนมีขนาด 1 ตารางเซนติเมตรสำหรับเหล็กกล้าไร้สนิม A, B และ C เป็น 0, 5 และ 30 วินาทีตามลำดับ เนื่องจากพาสซีฟฟิล์มถูกทำลายอย่างรวดเร็วที่ศักย์ไฟฟ้านี้ เมื่อพิจารณาเส้นโค้งโพลาไรเซชันในรูปที่ 4.2 ค พบว่าเป็นการกัดกร่อนในช่วง ทรานพาสซีฟ (transpassive region) ซึ่งเป็นศักย์ไฟฟ้าที่พาสซีฟฟิล์มไม่มีเสถียรภาพ

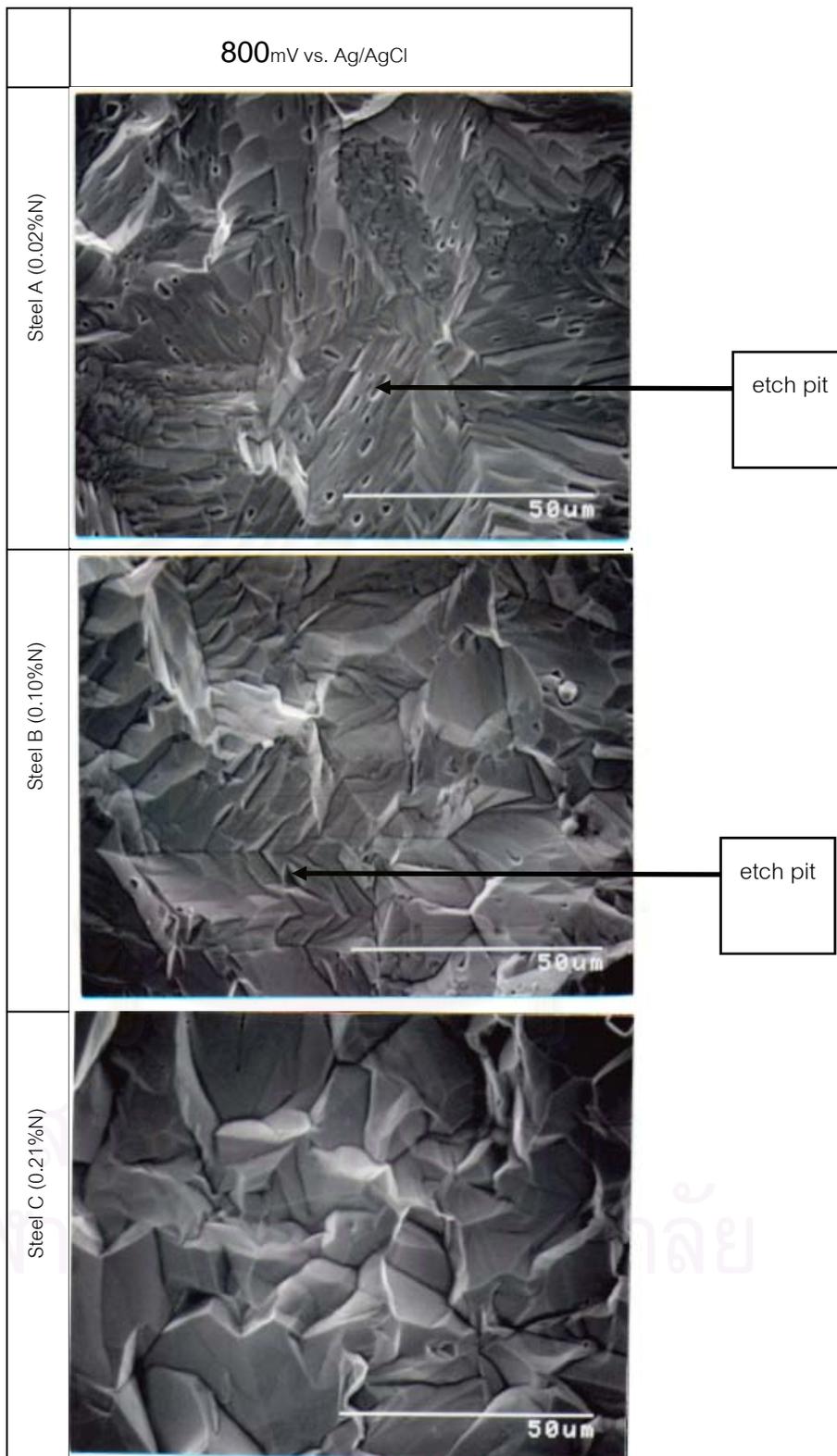
ลักษณะของพื้นผิวที่ถูกกัดกร่อนที่ศักย์ไฟฟ้าต่าง ๆ แสดงในรูปที่ 4.9 ก-ค ซึ่งเป็นช่วงแอคทีฟ (active region) ที่ศักย์ไฟฟ้า -300 มิลลิโวลต์ แสดงในรูปที่ 4.9 ก บริเวณที่ถูกกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมทั้งสามชนิดมีลักษณะเป็นระดับขั้น ตามขอบเกรน ภายในประกอบด้วย etch pit จำนวนมาก เป็นหลุมที่มีรูปร่างแตกต่างกัน เนื่องจากอัตราการกัดกร่อนจะแตกต่างกันตามทิศทางผลึก (crystallographic) ของแต่ละเกรน เหล็กกล้าไร้สนิม A ที่มีไนโตรเจนน้อยที่สุดแสดงขนาด etch pit ที่มีขนาดใหญ่กว่า และ จำนวนน้อยกว่าเมื่อเทียบกับเหล็กกล้าไร้สนิม B และ C ที่มีปริมาณไนโตรเจนสูงกว่า ที่ศักย์ไฟฟ้า 100 มิลลิโวลต์ที่เป็นช่วงพาสซีฟ โครงสร้างของบริเวณที่ถูกกัดกร่อนซึ่งไม่มีพาสซีฟฟิล์มปกคลุมแสดงในรูปที่ 4.9 ข จากรูปแสดงการกัดกร่อนแตกต่างกันตามทิศทางผลึก (crystallographic) ของแต่ละเกรนเช่นเดียวกับกรณีศักย์ไฟฟ้า -300 มิลลิโวลต์ เหล็กกล้าไร้สนิม A แสดงให้เห็นผิวที่ขรุขระ มี etch pit ขนาดเล็กจำนวนมากตรงบริเวณที่ถูกกัดกร่อนบนผิวเกรน ในขณะที่เหล็กกล้าไร้สนิม B ผิวที่ถูกกัดกร่อนไม่ขรุขระมากนัก มี etch pit ขนาดใหญ่จำนวนเล็กน้อยบนผิวเกรน ส่วนเหล็กกล้าไร้สนิม C บริเวณที่ถูกกัดกร่อนเป็นผิวเรียบ และมี etch pit อยู่่น้อยมาก ผลการทดลองนี้แสดงว่าการเพิ่มปริมาณไนโตรเจนมีผลในการลดจำนวนของ etch pit และ ความขรุขระของผิวที่ถูกกัดกร่อนภายหลัง



รูปที่ 4.9 ก ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของผิวเหล็กกล้าไร้สนิม A, B และ C ในสารละลายไฮเดียมคลอไรด์ 5 กิโลโมลต่อลูกบาศก์เมตร NaCl pH 2.30 องศาเซลเซียส ที่ศักย์ไฟฟ้า -300 มิลลิโวลต์



รูปที่ 4.9ข ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของผิวเหล็กกล้าไร้สนิม A, B และ C ในสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 5 กิโลโมลต่อลูกบาศก์เมตร NaCl pH 2.30 องศาเซลเซียส ที่ศักย์ไฟฟ้า 100 มิลลิโวลต์



รูปที่ 4.9ค ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของผิวเหล็กกล้าไร้สนิม A, B และ C ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 5 กิโลโมลต่อลูกบาศก์เมตร NaCl pH 2.30 องศาเซลเซียส ที่ศักย์ไฟฟ้า 800 มิลลิโวลต์

การแตกของพาสซีฟฟิล์ม ที่ศักย์ไฟฟ้า 800 มิลลิโวลต์ที่เป็นช่วงทรานพาสซีฟ ซึ่งเป็นสภาวะการกัดกร่อนรุนแรง ลักษณะผิวเหล็กกล้าไร้สนิมหลังจากการทดลองแสดงในรูปที่ 4.9 ค ผลการทดลองคล้ายกับที่ศักย์ไฟฟ้า 100 มิลลิโวลต์ เหล็กกล้าไร้สนิมทั้งสามเกรดถูกกัดกร่อนตามทิศทางของเกรน จำนวน etch pit ลดลงเมื่อปริมาณไนโตรเจนในเหล็กกล้าไร้สนิมเพิ่มมากขึ้น ในกรณีของเหล็กกล้าไร้สนิม C ไม่พบ etch pit บนผิวที่ถูกกัดกร่อน

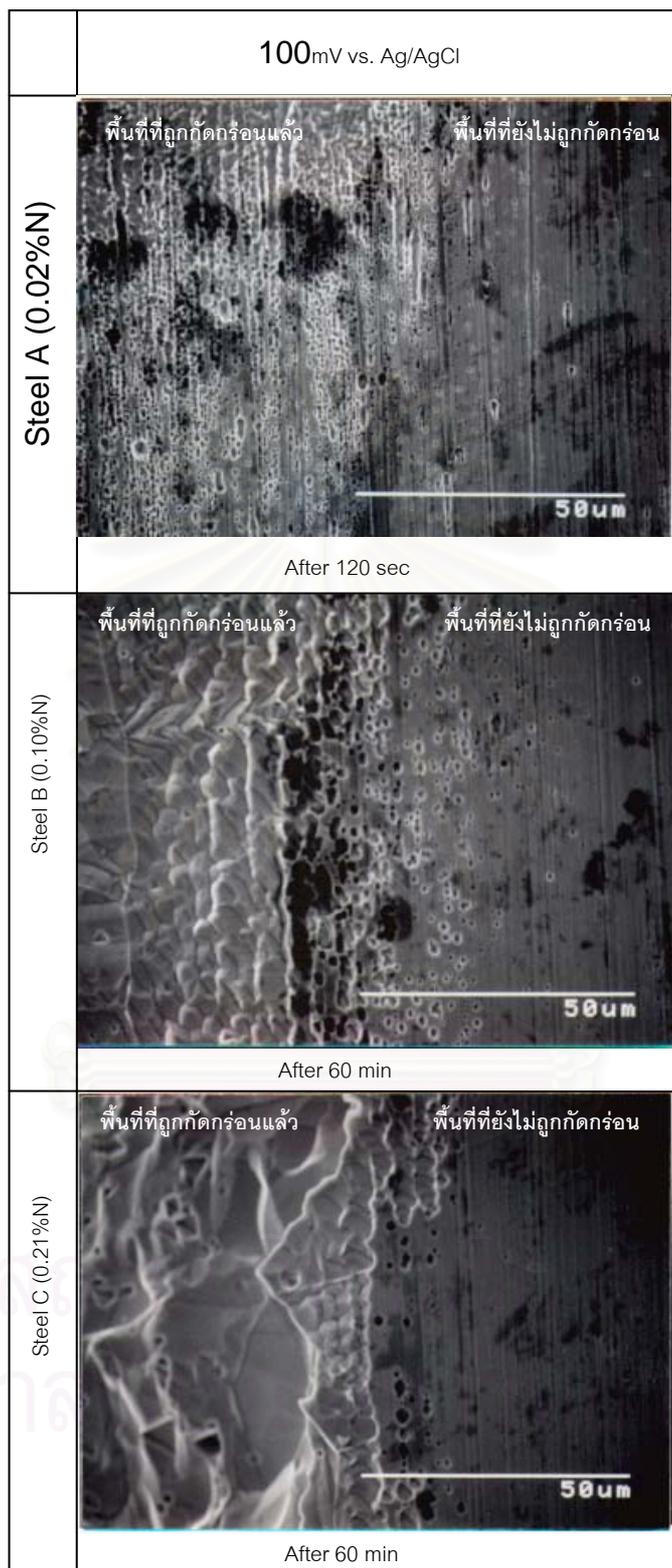
#### 4.4 ผลกระทบของไนโตรเจนต่อการขยายตัวของผิวที่ถูกกัดกร่อนตามแนวพื้นผิวชิ้นงาน

ตามที่กล่าวในหัวข้อ 4.3 ไนโตรเจนมีผลอย่างชัดเจนต่อการชะลอการเติบโตของบริเวณที่ถูกกัดกร่อนตามแนวผิวของชิ้นงานที่ศักย์ไฟฟ้า 100 มิลลิโวลต์ ดังแสดงในรูปที่ 4.6 และ 4.8 ข บริเวณรอยต่อระหว่างบริเวณที่ถูกกัดกร่อนและไม่ถูกกัดกร่อนถูกตรวจสอบโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) เพื่อศึกษาผลของไนโตรเจนในพาสซีฟฟิล์ม ในที่นี้แสดงรอยต่อของบริเวณที่ถูกกัดกร่อนและไม่ถูกกัดกร่อน ของเหล็กกล้าไร้สนิม A, B และ C ที่ศักย์ไฟฟ้า 100 มิลลิโวลต์ (รูปที่ 4.10) เป็นตัวอย่างกรณีศึกษา

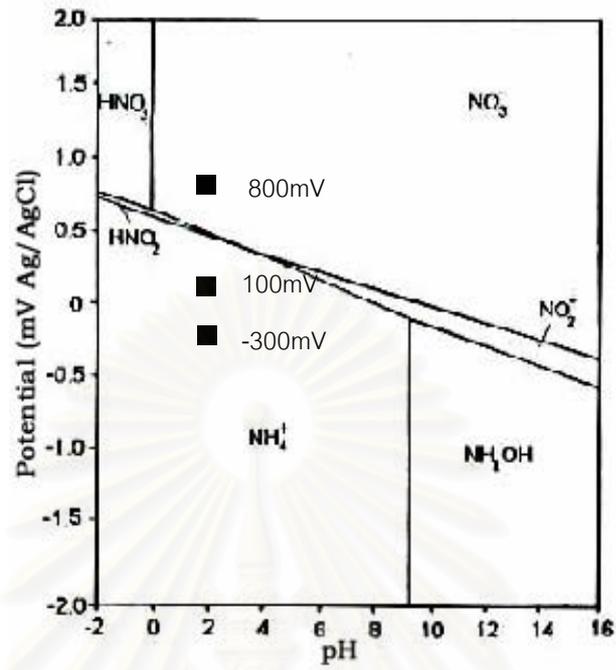
ที่ศักย์ไฟฟ้า 100 มิลลิโวลต์ บริเวณรอยต่อระหว่างพื้นที่ที่ถูกกัดกร่อนและไม่ถูกกัดกร่อนในรูปที่ 4.10 เหล็กกล้าไร้สนิม A แสดงการเติบโตของบริเวณที่ถูกกัดกร่อนไปยังบริเวณที่ไม่ถูกกัดกร่อนด้วยกลไกการเกิดหลุม (pitting mechanism) โดยมีการสังเกตเห็นหลุมเล็ก ๆ จำนวนมากในบริเวณที่ยังไม่ถูกกัดกร่อนเนื่องจากพาสซีฟฟิล์มถูกทำลาย เมื่อเปรียบเทียบกับเหล็กกล้าไร้สนิม B และ C ซึ่งมีไนโตรเจนปริมาณมากขึ้น จำนวนหลุมและความกว้างของบริเวณที่มีหลุมเกิดขึ้นลดลงอย่างมาก แสดงว่าไนโตรเจนในเหล็กกล้าไร้สนิมนี้มีผลในการเพิ่มความแข็งแรงแก่พาสซีฟฟิล์มโดยลดจำนวนหลุมที่เกิดขึ้นบนบริเวณที่ยังไม่ถูกกัดกร่อน

จากผลการทดลองข้างต้น ไนโตรเจนมีผลในการปรับปรุงความต้านทานการกัดกร่อนอย่างชัดเจนที่ศักย์ไฟฟ้า 100 มิลลิโวลต์ ซึ่งเป็นช่วงที่เกิดพาสซีฟฟิล์ม (passive film) ไนโตรเจนจะเพิ่มความแข็งแรงของพาสซีฟฟิล์มทำให้ชะลอการเติบโตของบริเวณที่ถูกกัดกร่อน และลดจำนวนหลุมที่เกิดขึ้นในบริเวณที่ยังไม่ถูกกัดกร่อนที่ศักย์ไฟฟ้า -300 มิลลิโวลต์ซึ่งเป็นศักย์ไฟฟ้าต่ำที่ไม่มีผลของพาสซีฟฟิล์ม ไนโตรเจนมีผลเล็กน้อยในการเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อน ส่วนที่ศักย์ไฟฟ้า 800 มิลลิโวลต์ ซึ่งเป็นศักย์ไฟฟ้าในช่วงทรานพาสซีฟ ไนโตรเจนแทบไม่มีผลต่อความต้านทานการกัดกร่อนแต่อาจมีผลเสียเล็กน้อย

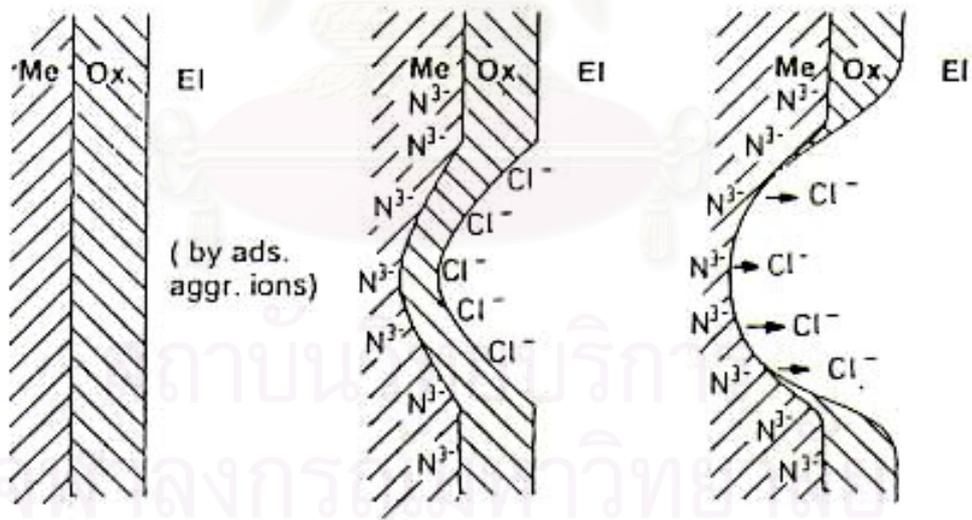
จาก Pourbaix diagram<sup>(24)</sup> ของไนโตรเจนในรูปที่ 4.11 เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองนี้ซึ่งทำการทดลองที่ศักย์ไฟฟ้า -300, 100 และ 800 มิลลิโวลต์เทียบกับขั้วไฟฟ้าอ้างอิงซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์ และแสดงด้วยจุด A, B และ C ในรูปตามลำดับ ที่ศักย์ไฟฟ้า -300 และ 100 มิลลิโวลต์ ซึ่งไนโตรเจนมีผลในการเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อน สถานะของไนโตรเจนมีเลขออกซิเดชันเป็น -3 แต่ที่ศักย์ไฟฟ้า 100 มิลลิโวลต์ซึ่งมีผลอย่างชัดเจนเนื่องมาจากที่ศักย์ไฟฟ้านี้มีเกิดพาสซีฟฟิล์มขึ้น ในขณะที่ศักย์ไฟฟ้า 800 มิลลิโวลต์ ซึ่งเป็นบริเวณที่พาสซีฟฟิล์มไม่มีเสถียรภาพและไนโตรเจนมีเลขออกซิเดชันเป็น +5 ไนโตรเจนค่อนข้างแสดงถึงผลเสียต่อความต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมที่ศักย์ไฟฟ้านี้



รูปที่ 4.10 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของผิวที่รอยต่อระหว่างบริเวณที่ถูกกัดกร่อนและไม่ถูกกัดกร่อนของชิ้นงาน แสดงกลไกการขยายตัวของผิวที่ถูกกัดกร่อน



รูปที่ 4.11 แผนภาพโพเบ (Pourbaix) แสดงสถานะของไนโตรเจนที่ศักย์ไฟฟ้าและ pH ต่าง ๆ<sup>(29)</sup>



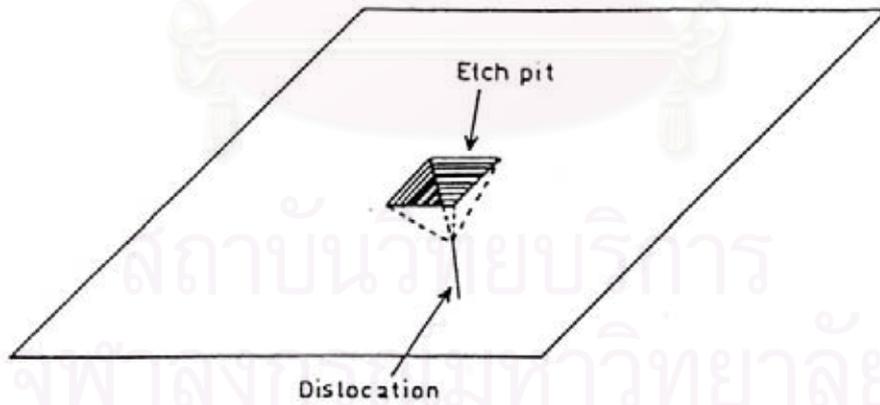
รูปที่ 4.12 แผนภาพแสดงสมมติฐานของการแยกตัวของ N<sup>3-</sup> ในระหว่างการดูดซับของคลอไรด์<sup>(15)</sup>

ที่ศักย์ไฟฟ้า  $-300$  และ  $100$  มิลลิโวลต์ ไนโตรเจนในเหล็กกล้าไร้สนิมซึ่งอยู่ในรูปสารละลายของแข็งแบบแทรก อาจแยกตัวออกเป็นไนโตรด้อยู่ที่รอยต่อของผิวโลหะกับออกไซด์<sup>(15)</sup> โดยไนโตรดเหล่านี้ อาจจะทำปฏิกิริยาโดยตรงกับโปรตอนในสารละลายเป็นไอออนของแอมโมเนียซึ่งควบคุมไม่ให้ pH เฉพาะที่ (localized pH) ที่ผิวของชิ้นงานลดลงอย่างรวดเร็วดังสมการ



แผนภาพแสดงสมมติฐานการเกิดขึ้นของพาสซีฟฟิล์มแสดงในรูปที่ 4.12 ซึ่งมีการแยกตัวของไนโตรดที่รอยต่อของผิวโลหะกับออกไซด์ ซึ่งไนโตรดนี้เองมีประจุไฟฟ้าชนิดเดียวกับไอออนของคลอไรด์ในสารละลายที่ทำลายชั้นพาสซีฟฟิล์ม การเกิดขึ้นของไนโตรดจะลดความแตกต่างของสนามไฟฟ้าโดยมีผลในการผลักไอออนของคลอไรด์ออกจากหลุม นอกจากนี้ อาจมีการทำปฏิกิริยาตามสมการที่ 1 เพื่อเพิ่ม pH ในหลุมอีกด้วย ซึ่งเป็นการลดความรุนแรงของการกัดกร่อนลง และกลไกทั้งสองนี้เป็นกลไกที่ส่งเสริมการเกิดรีพาสซีเวชัน (repassivation) ของพาสซีฟฟิล์มในเหล็กกล้าที่มีไนโตรเจนผสมอยู่<sup>(15)</sup>

ผลของไนโตรเจนต่อการเปลี่ยนแปลงพื้นผิวของบริเวณที่ถูกกัดกร่อนยังคงไม่ชัดเจน ไนโตรเจนมีผลในการลดการเกิด etch pit ของชิ้นงานที่ทุก ๆ ศักย์ไฟฟ้าที่ทำการทดลองในกรณีที่ไม่ได้ผลของพาสซีฟฟิล์ม เนื่องจากการเกิด etch pit อาจมีผลมาจากข้อบกพร่องในผลึกของเหล็ก ดังนั้นอาจจะเป็นไปได้ที่ไนโตรเจนในเหล็กกล้าไร้สนิมจะปรับปรุงข้อบกพร่องในเหล็กที่เป็นจุดกำเนิดของ etch pit ดังแสดงในรูป 4.13<sup>(30)</sup>



รูปที่ 4.13 ภาพจำลองการเกิด etch pit บนผิวที่ถูกกัดกร่อนที่มีดิสโลเคชัน<sup>(30)</sup>

อย่างไรก็ตามควรมีการศึกษาผลของไนโตรเจนต่อความสมบูรณ์ของผลึกโดยอาศัย TEM (Transmission Electron Microscopy) เพื่อยืนยันสมมติฐานนี้ต่อไป

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

5.1 การเติมไนโตรเจนในเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดออสเตนนิติกจะลดขนาดเกรนของออสเตนไนท์ลง โดยขนาดของเกรนอ้างอิงจาก JIS G0551 จะลดจาก 4.61 หน่วย ในเหล็กกล้าไร้สนิม A (0.02%N) เป็น 6.47 หน่วย ในเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด B (0.10%N) และเป็น 6.85 หน่วย สำหรับเหล็กกล้าไร้สนิม C (0.21%N)

5.2 ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 5 กิโลโมลต่อลูกบาศก์เมตร pH 1 ที่ 40 องศาเซลเซียส ไนโตรเจนในเหล็กกล้าไร้สนิมไม่มีผลต่อความต้านทานการกัดกร่อน แต่ผลของไนโตรเจนในเหล็กกล้าไร้สนิมจะชัดเจนในสารละลาย pH 2 ที่ 30 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นสภาพที่มีพาสซีฟฟิล์มเกิดขึ้น

5.3 การทดลองในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 5 กิโลโมลต่อลูกบาศก์เมตร pH 2 ที่ 30 องศาเซลเซียส เมื่อศักย์ไฟฟ้าของชิ้นงานถูกบังคับเป็น -300 มิลลิโวลต์เทียบกับขั้วไฟฟ้าอ้างอิงซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์ ซึ่งเป็นสภาพที่อยู่ในช่วงแอคทีฟ ไนโตรเจนจะลดอัตราการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมลง ลักษณะของการกัดกร่อนจะเกิดทั่วทั้งพื้นผิวชิ้นงานที่สัมผัสกับสารละลายโดยเป็นการกัดกร่อนแบบทั่วไป ในสภาพการทดลองนี้เชื่อว่ากลไกเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนคือ ไนโตรเจนแยกตัวเป็นไนไตรต์และทำปฏิกิริยาเป็นแอมโมเนียมไอออนและลดความรุนแรงของสารละลาย

5.4 การทดลองในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 5 กิโลโมลต่อลูกบาศก์เมตร pH 2 ที่ 30 องศาเซลเซียส เมื่อศักย์ไฟฟ้าของชิ้นงานถูกบังคับเป็น 100 มิลลิโวลต์เทียบกับขั้วไฟฟ้าอ้างอิงซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์ ไนโตรเจนมีผลอย่างชัดเจนในการลดอัตราการกัดกร่อน ไนโตรเจนที่เพิ่มขึ้นในเหล็กกล้าไร้สนิมจะเพิ่มความแข็งแรงแก่พาสซีฟฟิล์ม และชะลออัตราการเติบโตของบริเวณที่ถูกกัดกร่อนตามแนวผิวของชิ้นงาน นอกจากนี้บนผิวที่ยังมีพาสซีฟฟิล์มปกคลุม ไนโตรเจนยังลดจำนวนหลุมที่เกิดจากการกัดกร่อนบนผิวด้านที่ยังไม่ถูกกัดกร่อนอีกด้วย นอกจากกลไกการทำปฏิกิริยาเป็นแอมโมเนียมไอออนของไนโตรเจนแล้ว เชื่อว่าไนโตรเจนในสภาพการทดลองนี้ส่งเสริมให้มีการเกิดรีพาสซีเวชันของพาสซีฟฟิล์มจากกลไกการแยกตัวเป็นไนไตรต์และลดความเข้มข้นของสนามไฟฟ้าบนพาสซีฟฟิล์ม

5.5 การทดลองในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 5 กิโลโมลต่อลูกบาศก์เมตร pH 2 30 องศาเซลเซียส เมื่อศักย์ไฟฟ้าของชิ้นงานถูกบังคับเป็น 800 มิลลิโวลต์เทียบกับขั้วไฟฟ้าอ้างอิงซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์ ไนโตรเจนเพิ่มอัตราการกัดกร่อนในเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีไนโตรเจนมากกว่า เชื่อว่าไนโตรเจนที่ศักย์ไฟฟ้านี้มีเลขออกซิเดชันเป็น +5 ซึ่งไม่มีผลต่อการลด pH ของสารละลายที่ผิวชิ้นงาน

5.6 ผลกระทบของไนโตรเจนต่อพื้นผิวที่ถูกกัดกร่อนยังคงไม่ชัดเจน ที่ศักย์ไฟฟ้าของชิ้นงาน -300 มิลลิโวลต์เทียบกับขั้วไฟฟ้าอ้างอิงซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์ ลักษณะของ etch pit ที่พบบริเวณกัดกร่อนไม่แตกต่างกันมากนักแต่ปริมาณลดลงเมื่อไนโตรเจนในเหล็กกล้าไร้สนิมเพิ่มมากขึ้น เช่นเดียวกับที่ศักย์ไฟฟ้า 100 และ 800 มิลลิโวลต์เทียบกับขั้วไฟฟ้าอ้างอิงซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์ และพบว่าผิวที่ถูกกัดกร่อนของตัวอย่างที่มีไนโตรเจนมากกว่าจะเรียบกว่าและมีปริมาณ etch pit น้อยกว่า ซึ่งไนโตรเจนอาจจะมีผลลดความหนาแน่นของดิสโลเคชัน

### รายการอ้างอิง

1. P. R. Levey and A. van Bennekom, A mechanistic study of the effects on nitrogen on the corrosion properties of stainless steels, Corrosion 51,12 (December,1995): 911-921.
2. R. F. A. Jargelius-Petterson, Electrochemical in investigation of the influence of nitrogen alloying on pitting corrosion of austenitic stainless steels, Corrosion Science 41(1999): 1639-1664.
3. S. J. Pawel, E. E. Stansbury and C. D. Lundin, Role of nitrogen in the pitting resistance of cast duplex CF-type stainless steels, Corrosion 45,2 (February,1989): 125-133.
4. U. Kamachi Mudali, R. K. Dayal, T. P. S. Gill and J. B. Gnanamoorthy, Pitting corrosion resistance of nitrogen-added type 304 stainless steel weld metal with different heat input, Corrosion 46,6 (June 1990): 454-460.
5. Shigeki Azuma, Hideaki Miyuki and Takao Kudo, Effect of alloying nitrogen on crevice corrosion of austenitic stainless steel, ISIJ International 36,7,(1996): 793-798.
6. Wen-Ta, Tsai, Brigitte Reynders, Martin Stratmann and H. J. Grabke, The effect of applied potential on the stress corrosion cracking behavior of high nitrogen steels, Corrosion Science 34,10 (1993): 1647-1656.
7. I. Olefjord and L. Wegrelius, The influence of nitrogen on the passivation of stainless steels, Corrosion Science 38,7 (1996): 1203-1220.
8. K. Osozawa, N. Okato, Effect of alloying elements, especially nitrogen, on the initiation of pitting in stainless steel, passivity, and its breakdown on iron-base alloys, NACE, (1976): 135.
9. J.E. Truman, in: Proc.UK Corrosion (1987), Brighton: 111-128
10. U. Kamachi Mudali, B. Reynders, M. Stratmann, Localised corrosion behaviour of Fe-N model alloys, Corrosion Science 41,(1999): 179-189.
11. R.D. Willenbrich, C.R. Clayton, M. Oversluizen, D. Kim and Y. Lu, Corrosion Science 31, (1990):179
12. Y.C. Lu, R. Bandy, C.R. Clayton, R.C. Newman, J. Electrochem Soc 130, 8(1983): 1774
13. R. C. Newman, Y. C. Lu, R. Bandy and C. R. Clayton, Mechanism of passivation in stainless steels containing high concentration of nitrogen, International Congress on Metallic Corrosion 3 (June,1984), National research council Canada: 394-399.

14. G. P. Halada, D. Kim and C. R. Clayton, Influence of nitrogen on electrochemical passivation of high-nickel stainless steels and thin molybdenum-nickel films, Corrosion 52,1 (January,1996): 36-46.
15. H. J. Grabke, The role of nitrogen in the corrosion of iron and steels (review), ISIJ International 36,7 (1996): 777-786.
16. C.R. Clayton and K.G. Martin, Evidence of anodic segregation of nitrogen in high-nitrogen stainless steels and its influence on passivity, HNS 88,London
17. R. Bandy, Y.CI Lu, R.C. Newman and C.R. Clayton, Proc Electrochemical Society 84, 9(1984): 471-481
18. R. C. Newman and T. Shahrabi, The effect of alloyed nitrogen or dissolved nitrate ions on the anodic behaviour of austenitic stainless steel in hydrochloric acid, Corrosion Science 27,8 (1987): 827-838.
19. A. Sadough Vanini, J. -P. Audouard and P. Marcus, Corrosion Science 36,11 (1994): 1825-1834.
20. Claes-Olof A. Olsson, The influence of nitrogen and molybdenum on passive films formed on the austeno-ferritic stainless steels 2205 studied by AES and XPS, Corrosion Science, 37,3 (1995): 467-479.
21. T. A. Mozhi, W. A. T. Clark, K. Nishimoto, W. B. Johnson and D. D. Macdonald, The effect of nitrogen on the sensitization of AISI 304 stainless steel, Corrosion 41,10 (October, 1985): 555-559.
22. M. B. Ives, Y. C. Lu and J. L. Luo, Cathodic reaction involved in metallic corrosion in chlorinated saline environments, Corrosion Science 32,1 (1991): 91-102.
23. C. -C. Huang, W. T. Tsai and J. T. Lee, Electrochemical and surface studies on the passivity of nitrogen and molybdenum containing laser clad alloys in 3.5 wt% NaCl solution, Corrosion Science 37,5 (1995): 769-780.
24. S. D. Chyou and H. C. Shih, The effect of nitrogen on the corrosion of plasma-nitrided 4140 steel, Corrosion 47,1 (January, 1991): 31-34.
25. A. A. Hermas, K. Ogura, S. Takagi and T. Adachi, Effects of alloying additions on corrosion and passivation behaviors of type 304 stainless steel, Corrosion 51,1, (January, 1995), 3-10.
26. K. Doss, R. Brooks and C. R. Clayton, Structural and compositional transition in the passive films formed on 304 stainless steel, International Congress on Metallic Corrosion 1 (June, 1984), National research council Canada: 38-142.

27. R. Sabot, R. Devaux, A. M. de Becdelievre and C. Duret-Thual, The resistance to localized corrosion in neutral chloride medium of an AISI 304L stainless steel implanted with nitrogen and neon ions, Corrosion Science 33,7 (1992): 1121-1134.
28. B. S. Covino, Jr., S. D. Cramer, J. H. Russell and J. W. Simmons, Corrosion and polarization behavior of sensitized high-nitrogen stainless steels, Corrosion 53,7 (July,1997): 525-536.
29. M. Pourbaix, Atlas of electrochemical equilibria in aqueous solutions , London, England, Pergamon Press, 1966
30. L.L. Shreir, R.A. Jarman and G.T. Burstein, Corrosion Vol.1 Metal/Environment Reactions, London, England, Butterworth Heinemann, 1995 N. Sridhar, J. Kolts Effects of nitrogen on the selective dissolution of a duplex stainless steel, Corrosion, 43,11 (November, 1987): 646-651.
31. H. Tsuge, Y. Tarutani, and T. Kudo, The effect of nitrogen on the localized corrosion resistance of duplex stainless steel simulated weldments, Corrosion 44,5 (May, 1988): 305-314.
32. T. Ujio, and S. Satoh, Effect of Nitrogen of corrosion behavior of stainless steel solutions with low pH and a high concentration of chloride, Zairyo-to-Kankyo, 47,1998:577-583



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ก

## ตัวอย่างข้อมูลดิบของแผนภาพในการทดลองหาเส้นโค้งโพลาไรเซชัน

ตารางที่ ก.1 ตัวอย่างข้อมูลดิบแสดงการวัดเส้นโค้งโพลาไรเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมที่ผสมไนโตรเจนทั้ง 3 เกรด ในสารละลายไฮเดียมคลอไรด์ 5 กิโลโมลต่อลูกบาศก์เมตร pH 2 ที่ 30 องศาเซลเซียส ซึ่งแสดงในรูป 4.2 ค โดยแสดงค่า ศักย์ไฟฟ้าเทียบกับ Ag/AgCl และ ความหนาแน่นกระแสที่วัดได้ (มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร)

ศักย์ไฟฟ้า (mV)	Steel A	Steel B	Steel C	ศักย์ไฟฟ้า (mV)	Steel A	Steel B	Steel C
-414	0.00668	0.0072	0.00437	-197	1.92	0.65	0.411
-408	0.0175	0.0169	0.0143	-193	1.74	0.562	0.347
-403	0.0299	0.0284	0.0261	-187	1.56	0.507	0.305
-398	0.0457	0.042	0.0401	-183	1.39	0.481	0.289
-393	0.0637	0.0582	0.0568	-178	1.3	0.463	0.273
-388	0.0867	0.0773	0.0777	-173	1.29	0.467	0.264
-383	0.113	0.1002	0.1024	-168	1.28	0.467	0.257
-378	0.145	0.126	0.132	-163	1.25	0.47	0.258
-374	0.181	0.158	0.167	-157	1.25	0.474	0.26
-368	0.224	0.192	0.207	-153	1.29	0.453	0.261
-363	0.272	0.231	0.252	-148	1.39	0.474	0.249
-358	0.327	0.276	0.306	-143	1.49	0.435	0.236
-353	0.393	0.326	0.365	-138	1.52	0.402	0.213
-348	0.461	0.381	0.431	-133	1.63	0.394	0.185
-343	0.544	0.442	0.505	-128	1.74	0.395	0.188
-338	0.63	0.509	0.587	-123	1.96	0.448	0.195
-333	0.73	0.585	0.677	-118	2.08	0.52	0.215
-328	0.834	0.664	0.777	-113	2.2	0.614	0.229
-323	0.953	0.748	0.879	-108	2.5	0.689	0.254
-318	1.06	0.838	0.984	-103	2.84	0.752	0.263
-313	1.19	0.925	1.09	-98	3.29	0.879	0.289
-308	1.32	1.028	1.2	-93	3.72	1.009	0.32
-303	1.47	1.11	1.3	-88	4.31	1.11	0.371
-298	1.62	1.19	1.4	-83	4.85	1.29	0.419
-293	1.74	1.26	1.48	-78	5.49	1.48	0.482
-288	1.87	1.34	1.55	-73	6.29	1.67	0.549
-283	2.01	1.4	1.6	-68	7.21	1.87	0.632
-278	2.12	1.44	1.64	-63	8.32	2.1	0.71
-273	2.23	1.46	1.65	-58	9.33	2.37	0.809
-268	2.34	1.47	1.65	-53	10.74	2.66	0.925
-263	2.39	1.47	1.64	-48	12.5	3	1.042
-258	2.46	1.47	1.61	-43	14	3.37	1.16
-253	2.53	1.46	1.56	-38	16	3.79	1.3
-248	2.57	1.43	1.51	-33	17.9	4.23	1.47
-243	2.58	1.42	1.45	-28	20.2	4.67	1.66
-238	2.61	1.35	1.36	-23	22.7	5.17	1.85
-233	2.58	1.31	1.26	-18	24.9	5.82	2.06
-228	2.59	1.27	1.15	-13	27.5	6.46	2.31
-223	2.55	1.2	1.03	-8	30.5	7.25	2.55
-218	2.46	1.09	0.9	-3	33.6	8.09	2.83
-213	2.4	0.99	0.732	3	37.3	8.98	3.17
-208	2.25	0.867	0.615	8	40.5	10.09	3.5
-203	2.13	0.768	0.507	13	44.3	11.4	3.84

ศักย์ไฟฟ้า (mV)	Steel A	Steel B	Steel C	ศักย์ไฟฟ้า (mV)	Steel A	Steel B	Steel C
18	48	12.9	4.25	308	256	223	85.6
23	51.5	14.4	4.69	312	260	227	88.2
28	55.1	15.9	5.17	318	263	231	90.7
33	59.7	17.6	5.68	323	266	235	93.6
38	63.3	19.6	6.25	328	269	239	96.3
43	67.4	21.4	6.81	333	271	244	98.8
48	71.6	23.6	7.39	337	274	248	101.8
53	75.2	25.6	8.02	343	277	251	104.8
58	79.6	27.9	8.58	348	280	256	108
63	83.3	30.3	9.21	353	283	260	110
68	87.4	32.8	9.85	358	286	264	114
73	91.6	35.2	10.49	363	289	268	118
78	95.4	37.6	11.2	368	291	272	121
83	98.9	40.5	11.9	373	294	277	125
88	103	43	12.7	378	297	281	129
93	106.7	45.3	13.6	383	300	285	133
98	110	48.3	14.5	388	303	290	138
103	114	51	15.6	393	306	294	142
108	118	53.7	16.4	398	308	299	146
113	122	56.8	17.1	403	312	304	151
118	125	60.1	18.1	408	314	308	156
123	129	63.5	18.9	413	317	312	161
128	133	67.1	19.7	418	320	316	166
133	136	70.7	20.6	423	323	320	170
138	140	74.6	21.4	429	326	324	176
143	143	78.6	22.5	434	328	328	181
148	147	82.9	23.5	438	331	332	187
153	150	88.1	24.6	443	334	336	191
158	154	92.7	26.7	448	337	340	197
163	157	97.3	28	453	340	344	202
168	161	101.9	29.6	458	342	348	209
173	164	106.5	30.7	463	345	352	214
178	168	111	32	468	349	356	220
183	171	117	33.5	474	351	359	225
188	175	121	35	478	354	363	231
192	179	125	36.6	483	357	366	236
197	182	130	38.2	488	360	369	242
203	186	135	39.9	493	363	373	248
207	189	139	41.7	499	366	376	252
212	193	144	43.6	503	369	380	258
218	196	148	45.4	508	371	383	263
222	200	152	47	513	374	387	269
228	203	156	48.9	518	377	391	273
232	207	160	51.1	523	380	395	279
237	210	163	52.9	528	382	399	285
243	214	167	54.9	534	385	402	290
247	217	171	56.8	539	388	406	295
252	221	175	59.1	543	391	410	301
257	224	179	61.7	548	393	413	306
263	228	184	63.6	553	396	416	310
268	231	188	65.9	558	398	420	315
273	234	192	67.9	563	401	424	321
277	238	197	70.4	568	404	427	326
283	241	201	72.7	574	406	431	331
288	244	206	75.1	578	409	435	335
293	247	210	77.6	583	411	438	340
298	250	214	79.8	588	414	441	345
303	253	219	82.4	594	416	445	350

ศักย์ไฟฟ้า (mV)	Steel A	Steel B	Steel C	ศักย์ไฟฟ้า (mV)	Steel A	Steel B	Steel C
599	419	448	355	889	544	609	582
604	421	452	360	894	546	611	584
609	424	455	365	899	547	613	586
614	427	458	370	904	549	615	589
619	429	461	375	909	550	618	596
624	432	464	379	914	552	620	601
628	435	468	385	919	553	622	604
634	437	471	390	924	554	624	607
639	439	474	395	929	556	625	609
644	442	477	399	934	558	627	612
648	445	479	403	939	558	629	615
653	447	482	408	944	560	631	617
659	450	485	413	949	561	633	619
664	452	488	418	954	562	635	621
668	455	492	423	959	564	637	624
674	457	496	428	964	565	639	626
679	459	499	434	969	566	641	629
684	462	501	437	974	568	643	632
688	464	504	442	979	569	644	634
694	466	508	446	985	570	646	635
699	469	511	450	990	571	647	637
703	471	514	453	994	572	649	639
708	474	517	457	999	574	651	641
714	476	520	460	1004	575	653	643
719	479	522	464	1009	576	655	645
724	480	525	468	1015	577	657	648
729	483	528	472	1020	578	659	650
734	485	531	476	1024	580	661	653
739	487	535	479	1029	581	662	654
744	490	538	483	1035	582	664	656
749	492	541	487	1040	583	665	659
754	494	543	491	1044	583	667	662
759	496	546	495	1049	584	668	663
764	499	548	499	1055	585	670	665
769	500	551	503	1060	586	671	670
774	502	554	507	1065	587	673	680
779	504	556	511	1070	588	674	678
784	507	559	515	1074	589	675	679
789	508	562	518	1080	590	677	681
794	510	564	521	1084	590	679	683
799	512	567	525	1089	591	681	684
804	514	569	528	1094	591	682	686
809	516	572	532	1100	592	683	687
814	519	574	536	1104	613	684	691
819	520	577	540	1109	633	685	693
824	522	579	543	1115	634	687	695
829	524	582	547	1120	643	688	696
834	526	584	550	1125	647	689	698
839	528	586	553	1129	650	690	699
844	529	589	555	1134	653	691	700
850	531	591	558	1140	655	692	702
854	533	594	561	1145	657	693	703
859	535	596	564	1149	659	694	704
864	537	598	568	1154	660	696	705
869	538	601	572	1159	662	697	706
874	540	603	574	1164	663	698	707
879	541	605	577	1170	664	699	708
884	542	607	580	1174	666	700	709

ศักย์ไฟฟ้า (mV)	Steel A	Steel B	Steel C
1180	667	701	710
1184	668	702	711
1190	669	703	712
1194	671	704	713
1200	671	705	714
1205	672	707	714



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ข

## ตัวอย่างข้อมูลดิบของแผนภาพในการทดลองศักย์ไฟฟ้าคงที่

ตารางที่ ข.1 ตัวอย่างข้อมูลดิบของการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นกระแสเมื่อเวลาเปลี่ยนไปของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 5 กิโลโมลต่อลูกบาศก์เมตร pH 2 ที่ 30 องศาเซลเซียส เมื่ออัตราการเพิ่มกระแสไฟฟ้าเป็น 100 มิลลิโวลต์ต่ออนาที ที่ศักย์ไฟฟ้า -300 มิลลิโวลต์ จาก รูปที่ 4.3ก โดยแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการทดลองและความหนาแน่นกระแส (มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร)ที่วัดได้ของตัวอย่างเหล็กทั้ง 3 ชนิด

เวลา(นาท)	Steel A	Steel B	Steel C	เวลา(นาท)	Steel A	Steel B	Steel C	เวลา(นาท)	Steel A	Steel B	Steel C
0	1.3	1.02	0.879	1.8	1.36	0.96	0.934	3.6	1.61	1.14	0.956
0.05	1.26	0.99	0.875	1.85	1.37	0.96	0.935	3.65	1.61	1.14	0.955
0.1	1.25	0.97	0.872	1.9	1.37	0.96	0.936	3.7	1.62	1.14	0.955
0.15	1.23	0.96	0.871	1.95	1.38	0.96	0.937	3.75	1.62	1.15	0.954
0.2	1.21	0.95	0.872	2	1.39	0.97	0.938	3.8	1.63	1.15	0.953
0.25	1.21	0.94	0.873	2.05	1.4	0.97	0.938	3.85	1.63	1.15	0.952
0.3	1.2	0.93	0.875	2.1	1.41	0.98	0.939	3.9	1.64	1.15	0.952
0.35	1.2	0.93	0.876	2.15	1.41	0.98	0.939	3.95	1.64	1.16	0.952
0.4	1.2	0.92	0.879	2.2	1.42	0.99	0.939	4	1.65	1.16	0.952
0.45	1.19	0.92	0.881	2.25	1.43	0.99	0.939	4.05	1.65	1.16	0.951
0.5	1.2	0.92	0.878	2.3	1.44	1	0.939	4.1	1.66	1.16	0.951
0.55	1.2	0.92	0.879	2.35	1.44	1	0.939	4.15	1.66	1.16	0.951
0.6	1.2	0.92	0.881	2.4	1.45	1	0.939	4.2	1.66	1.17	0.95
0.65	1.21	0.92	0.885	2.45	1.46	1.01	0.94	4.25	1.67	1.17	0.951
0.7	1.21	0.92	0.887	2.5	1.46	1.01	0.941	4.3	1.68	1.17	0.951
0.75	1.22	0.92	0.891	2.55	1.47	1.02	0.942	4.35	1.68	1.17	0.952
0.8	1.22	0.92	0.893	2.6	1.48	1.02	0.943	4.4	1.68	1.17	0.952
0.85	1.23	0.92	0.897	2.65	1.48	1.03	0.944	4.45	1.69	1.17	0.952
0.9	1.24	0.92	0.899	2.7	1.49	1.04	0.945	4.5	1.69	1.18	0.953
0.95	1.24	0.92	0.903	2.75	1.5	1.04	0.946	4.55	1.7	1.18	0.954
1	1.25	0.93	0.906	2.8	1.5	1.04	0.948	4.6	1.7	1.18	0.956
1.05	1.25	0.93	0.908	2.85	1.51	1.05	0.948	4.65	1.71	1.18	0.958
1.1	1.26	0.93	0.91	2.9	1.52	1.05	0.95	4.7	1.71	1.17	0.958
1.15	1.27	0.93	0.913	2.95	1.53	1.06	0.95	4.75	1.72	1.17	0.959
1.2	1.27	0.93	0.916	3	1.53	1.06	0.951	4.8	1.72	1.17	0.959
1.25	1.28	0.94	0.917	3.05	1.54	1.07	0.951	4.85	1.72	1.17	0.959
1.3	1.29	0.94	0.919	3.1	1.55	1.08	0.952	4.9	1.73	1.17	0.96
1.35	1.29	0.94	0.92	3.15	1.55	1.09	0.953	4.95	1.73	1.17	0.96
1.4	1.3	0.94	0.923	3.2	1.56	1.09	0.953	5	1.74	1.18	0.96
1.45	1.31	0.94	0.924	3.25	1.56	1.1	0.954	5.05	1.74	1.18	0.96
1.5	1.32	0.94	0.925	3.3	1.57	1.1	0.954	5.1	1.75	1.18	0.96
1.55	1.32	0.95	0.927	3.35	1.58	1.11	0.955	5.15	1.75	1.18	0.961
1.6	1.33	0.95	0.929	3.4	1.58	1.12	0.955	5.2	1.75	1.18	0.961
1.65	1.34	0.95	0.93	3.45	1.59	1.12	0.956	5.25	1.76	1.18	0.962
1.7	1.35	0.95	0.931	3.5	1.6	1.13	0.956	5.3	1.76	1.18	0.962
1.75	1.36	0.95	0.933	3.55	1.6	1.13	0.956	5.35	1.77	1.18	0.962

เวลา(นาที)	Steel A	Steel B	Steel C	เวลา(นาที)	Steel A	Steel B	Steel C	เวลา(นาที)	Steel A	Steel B	Steel C
5.4	1.77	1.19	0.962	7.85	1.87	1.33	1.007	10.3	1.85	1.34	1.05
5.45	1.77	1.19	0.962	7.9	1.87	1.34	1.008	10.35	1.85	1.34	1.052
5.5	1.77	1.19	0.961	7.95	1.87	1.34	1.01	10.4	1.85	1.34	1.052
5.55	1.78	1.2	0.961	8	1.87	1.34	1.011	10.45	1.85	1.34	1.053
5.6	1.78	1.2	0.962	8.05	1.87	1.35	1.012	10.5	1.85	1.34	1.054
5.65	1.78	1.2	0.963	8.1	1.87	1.35	1.014	10.55	1.85	1.33	1.054
5.7	1.78	1.2	0.964	8.15	1.87	1.35	1.016	10.6	1.84	1.33	1.055
5.75	1.79	1.2	0.966	8.2	1.87	1.35	1.017	10.65	1.84	1.33	1.055
5.8	1.79	1.2	0.968	8.25	1.87	1.35	1.018	10.7	1.84	1.33	1.056
5.85	1.79	1.2	0.969	8.3	1.87	1.35	1.018	10.75	1.83	1.33	1.057
5.9	1.8	1.2	0.97	8.35	1.87	1.36	1.019	10.8	1.83	1.33	1.057
5.95	1.8	1.2	0.971	8.4	1.87	1.36	1.019	10.85	1.83	1.33	1.057
6	1.8	1.2	0.972	8.45	1.87	1.36	1.019	10.9	1.83	1.33	1.058
6.05	1.8	1.2	0.973	8.5	1.87	1.36	1.019	10.95	1.82	1.33	1.059
6.1	1.81	1.21	0.974	8.55	1.87	1.36	1.019	11	1.82	1.33	1.06
6.15	1.81	1.21	0.975	8.6	1.87	1.36	1.019	11.05	1.82	1.33	1.061
6.2	1.81	1.21	0.976	8.65	1.87	1.36	1.02	11.1	1.82	1.33	1.062
6.25	1.81	1.22	0.977	8.7	1.87	1.36	1.02	11.15	1.81	1.33	1.062
6.3	1.82	1.22	0.978	8.75	1.87	1.36	1.021	11.2	1.81	1.33	1.062
6.35	1.82	1.22	0.979	8.8	1.87	1.36	1.022	11.25	1.81	1.33	1.062
6.4	1.82	1.23	0.979	8.85	1.87	1.35	1.022	11.3	1.81	1.33	1.062
6.45	1.83	1.23	0.979	8.9	1.86	1.35	1.023	11.35	1.8	1.33	1.062
6.5	1.83	1.23	0.979	8.95	1.86	1.35	1.024	11.4	1.8	1.33	1.062
6.55	1.83	1.24	0.979	9	1.86	1.35	1.024	11.45	1.8	1.33	1.063
6.6	1.84	1.24	0.98	9.05	1.86	1.35	1.025	11.5	1.8	1.33	1.063
6.65	1.84	1.24	0.981	9.1	1.86	1.34	1.025	11.55	1.79	1.33	1.062
6.7	1.84	1.25	0.983	9.15	1.86	1.34	1.026	11.6	1.79	1.33	1.062
6.75	1.84	1.25	0.985	9.2	1.86	1.34	1.027	11.65	1.79	1.33	1.062
6.8	1.85	1.25	0.987	9.25	1.86	1.33	1.027	11.7	1.79	1.33	1.062
6.85	1.85	1.25	0.988	9.3	1.86	1.33	1.028	11.75	1.79	1.33	1.062
6.9	1.85	1.25	0.989	9.35	1.86	1.33	1.029	11.8	1.79	1.32	1.063
6.95	1.85	1.25	0.989	9.4	1.86	1.32	1.029	11.85	1.79	1.32	1.064
7	1.85	1.25	0.989	9.45	1.86	1.32	1.03	11.9	1.79	1.32	1.065
7.05	1.86	1.26	0.99	9.5	1.86	1.32	1.031	11.95	1.79	1.32	1.065
7.1	1.86	1.26	0.99	9.55	1.86	1.32	1.031	12	1.79	1.32	1.066
7.15	1.86	1.26	0.991	9.6	1.86	1.31	1.033	12.05	1.79	1.32	1.067
7.2	1.86	1.26	0.992	9.65	1.86	1.31	1.034	12.1	1.78	1.32	1.068
7.25	1.86	1.27	0.993	9.7	1.86	1.31	1.035	12.15	1.78	1.32	1.07
7.3	1.87	1.27	0.993	9.75	1.86	1.31	1.036	12.2	1.78	1.32	1.07
7.35	1.87	1.28	0.993	9.8	1.86	1.32	1.036	12.25	1.78	1.32	1.071
7.4	1.87	1.28	0.994	9.85	1.86	1.32	1.037	12.3	1.77	1.31	1.071
7.45	1.87	1.29	0.995	9.9	1.86	1.32	1.038	12.35	1.77	1.31	1.072
7.5	1.87	1.29	0.996	9.95	1.86	1.32	1.039	12.4	1.77	1.31	1.073
7.55	1.87	1.3	0.998	10	1.86	1.32	1.04	12.45	1.77	1.31	1.074
7.6	1.87	1.3	1	10.05	1.86	1.33	1.041	12.5	1.76	1.31	1.075
7.65	1.87	1.31	1.001	10.1	1.86	1.33	1.043	12.55	1.76	1.31	1.075
7.7	1.87	1.32	1.003	10.15	1.85	1.33	1.045	12.6	1.76	1.31	1.077
7.75	1.87	1.32	1.004	10.2	1.85	1.34	1.047	12.65	1.75	1.31	1.078
7.8	1.87	1.33	1.005	10.25	1.85	1.34	1.048	12.7	1.75	1.31	1.078

เวลา(นาที)	Steel A	Steel B	Steel C	เวลา(นาที)	Steel A	Steel B	Steel C	เวลา(นาที)	Steel A	Steel B	Steel C
12.75	1.74	1.31	1.079	15.2	1.69	1.33	1.078	17.65	1.63	1.11	1.087
12.8	1.74	1.31	1.079	15.25	1.69	1.33	1.078	17.7	1.63	1.11	1.088
12.85	1.73	1.31	1.08	15.3	1.69	1.31	1.078	17.75	1.63	1.12	1.089
12.9	1.73	1.31	1.08	15.35	1.69	1.3	1.078	17.8	1.63	1.12	1.089
12.95	1.72	1.31	1.08	15.4	1.69	1.29	1.078	17.85	1.63	1.12	1.09
13	1.72	1.31	1.08	15.45	1.69	1.27	1.079	17.9	1.63	1.12	1.091
13.05	1.71	1.31	1.08	15.5	1.69	1.26	1.08	17.95	1.63	1.13	1.092
13.1	1.71	1.31	1.081	15.55	1.69	1.25	1.08	18	1.63	1.13	1.093
13.15	1.71	1.31	1.081	15.6	1.68	1.24	1.081	18.05	1.63	1.13	1.093
13.2	1.7	1.31	1.081	15.65	1.68	1.22	1.082	18.1	1.63	1.13	1.093
13.25	1.7	1.31	1.082	15.7	1.68	1.21	1.083	18.15	1.63	1.13	1.093
13.3	1.7	1.31	1.083	15.75	1.68	1.2	1.084	18.2	1.63	1.13	1.093
13.35	1.69	1.31	1.083	15.8	1.68	1.19	1.085	18.25	1.64	1.14	1.091
13.4	1.69	1.32	1.084	15.85	1.68	1.18	1.086	18.3	1.64	1.14	1.09
13.45	1.69	1.32	1.085	15.9	1.68	1.18	1.086	18.35	1.64	1.14	1.088
13.5	1.68	1.32	1.085	15.95	1.67	1.17	1.087	18.4	1.64	1.14	1.086
13.55	1.68	1.32	1.085	16	1.67	1.16	1.087	18.45	1.64	1.15	1.083
13.6	1.68	1.32	1.085	16.05	1.67	1.16	1.088	18.5	1.64	1.15	1.082
13.65	1.68	1.33	1.085	16.1	1.67	1.15	1.088	18.55	1.64	1.15	1.08
13.7	1.68	1.33	1.085	16.15	1.67	1.14	1.088	18.6	1.64	1.15	1.079
13.75	1.68	1.33	1.085	16.2	1.67	1.14	1.088	18.65	1.64	1.15	1.078
13.8	1.68	1.34	1.086	16.25	1.67	1.13	1.088	18.7	1.64	1.15	1.077
13.85	1.68	1.34	1.086	16.3	1.66	1.12	1.088	18.75	1.64	1.15	1.076
13.9	1.68	1.34	1.085	16.35	1.66	1.12	1.088	18.8	1.64	1.15	1.077
13.95	1.68	1.34	1.085	16.4	1.66	1.11	1.088	18.85	1.64	1.15	1.076
14	1.68	1.35	1.085	16.45	1.66	1.11	1.088	18.9	1.64	1.15	1.075
14.05	1.68	1.35	1.085	16.5	1.66	1.1	1.088	18.95	1.64	1.15	1.074
14.1	1.68	1.35	1.085	16.55	1.66	1.1	1.089	19	1.64	1.15	1.073
14.15	1.68	1.36	1.084	16.6	1.66	1.1	1.089	19.05	1.64	1.14	1.072
14.2	1.68	1.36	1.084	16.65	1.66	1.09	1.09	19.1	1.64	1.14	1.071
14.25	1.68	1.37	1.084	16.7	1.66	1.09	1.091	19.15	1.64	1.14	1.07
14.3	1.69	1.37	1.084	16.75	1.65	1.09	1.092	19.2	1.64	1.14	1.069
14.35	1.69	1.37	1.084	16.8	1.65	1.09	1.093	19.25	1.64	1.14	1.069
14.4	1.69	1.37	1.084	16.85	1.65	1.09	1.093	19.3	1.64	1.14	1.068
14.45	1.69	1.37	1.084	16.9	1.65	1.09	1.093	19.35	1.64	1.14	1.068
14.5	1.69	1.37	1.085	16.95	1.65	1.1	1.094	19.4	1.64	1.13	1.067
14.55	1.69	1.37	1.084	17	1.65	1.1	1.093	19.45	1.64	1.13	1.067
14.6	1.69	1.38	1.084	17.05	1.65	1.1	1.093	19.5	1.64	1.13	1.066
14.65	1.69	1.38	1.084	17.1	1.64	1.1	1.093	19.55	1.64	1.13	1.066
14.7	1.69	1.38	1.083	17.15	1.64	1.11	1.092	19.6	1.64	1.12	1.065
14.75	1.69	1.37	1.083	17.2	1.64	1.11	1.092	19.65	1.64	1.12	1.065
14.8	1.69	1.37	1.082	17.25	1.64	1.11	1.091	19.7	1.64	1.12	1.066
14.85	1.69	1.37	1.081	17.3	1.64	1.11	1.09	19.75	1.64	1.12	1.067
14.9	1.69	1.37	1.08	17.35	1.64	1.11	1.089	19.8	1.64	1.12	1.069
14.95	1.69	1.36	1.08	17.4	1.64	1.11	1.088	19.85	1.64	1.12	1.07
15	1.69	1.36	1.079	17.45	1.64	1.11	1.088	19.9	1.64	1.12	1.072
15.05	1.69	1.36	1.078	17.5	1.64	1.11	1.087	19.95	1.64	1.12	1.073
15.1	1.69	1.35	1.078	17.55	1.63	1.11	1.087	20	1.64	1.12	1.074
15.15	1.69	1.34	1.078	17.6	1.63	1.11	1.087	20.05	1.64	1.12	1.075

เวลา(นาที)	Steel A	Steel B	Steel C	เวลา(นาที)	Steel A	Steel B	Steel C	เวลา(นาที)	Steel A	Steel B	Steel C
20.1	1.64	1.12	1.076	22.55	1.62	1.13	1.079	25	1.57	1.19	1.062
20.15	1.63	1.12	1.078	22.6	1.62	1.13	1.078	25.05	1.57	1.2	1.062
20.2	1.63	1.12	1.079	22.65	1.62	1.13	1.077	25.1	1.57	1.2	1.062
20.25	1.63	1.13	1.08	22.7	1.61	1.13	1.075	25.15	1.57	1.21	1.062
20.3	1.63	1.13	1.081	22.75	1.61	1.13	1.074	25.2	1.57	1.22	1.063
20.35	1.63	1.13	1.082	22.8	1.61	1.12	1.073	25.25	1.58	1.22	1.063
20.4	1.63	1.13	1.083	22.85	1.61	1.12	1.072	25.3	1.58	1.23	1.064
20.45	1.63	1.13	1.084	22.9	1.61	1.12	1.071	25.35	1.58	1.24	1.065
20.5	1.63	1.13	1.084	22.95	1.61	1.13	1.071	25.4	1.58	1.24	1.066
20.55	1.63	1.13	1.085	23	1.61	1.13	1.07	25.45	1.58	1.25	1.067
20.6	1.63	1.13	1.085	23.05	1.61	1.13	1.07	25.5	1.59	1.25	1.067
20.65	1.63	1.13	1.086	23.1	1.61	1.13	1.069	25.55	1.59	1.25	1.069
20.7	1.63	1.13	1.086	23.15	1.61	1.13	1.068	25.6	1.59	1.26	1.07
20.75	1.63	1.13	1.086	23.2	1.6	1.13	1.068	25.65	1.59	1.26	1.07
20.8	1.63	1.13	1.087	23.25	1.6	1.13	1.067	25.7	1.59	1.27	1.071
20.85	1.63	1.13	1.087	23.3	1.6	1.13	1.067	25.75	1.6	1.27	1.071
20.9	1.63	1.13	1.088	23.35	1.6	1.13	1.067	25.8	1.6	1.28	1.072
20.95	1.63	1.13	1.089	23.4	1.6	1.14	1.066	25.85	1.6	1.28	1.073
21	1.63	1.13	1.089	23.45	1.6	1.14	1.066	25.9	1.6	1.28	1.073
21.05	1.63	1.13	1.09	23.5	1.6	1.14	1.066	25.95	1.6	1.29	1.073
21.1	1.62	1.13	1.091	23.55	1.6	1.14	1.066	26	1.6	1.29	1.074
21.15	1.62	1.13	1.091	23.6	1.6	1.14	1.066	26.05	1.61	1.29	1.074
21.2	1.62	1.12	1.091	23.65	1.59	1.14	1.066	26.1	1.61	1.29	1.074
21.25	1.62	1.12	1.091	23.7	1.59	1.14	1.065	26.15	1.61	1.29	1.074
21.3	1.62	1.12	1.091	23.75	1.59	1.15	1.064	26.2	1.61	1.29	1.074
21.35	1.62	1.12	1.091	23.8	1.59	1.15	1.064	26.25	1.61	1.29	1.074
21.4	1.62	1.12	1.091	23.85	1.59	1.15	1.064	26.3	1.61	1.29	1.074
21.45	1.62	1.12	1.091	23.9	1.59	1.15	1.064	26.35	1.61	1.28	1.074
21.5	1.62	1.13	1.091	23.95	1.59	1.16	1.064	26.4	1.61	1.28	1.074
21.55	1.62	1.13	1.092	24	1.59	1.16	1.064	26.45	1.61	1.27	1.074
21.6	1.62	1.13	1.092	24.05	1.59	1.16	1.065	26.5	1.61	1.27	1.073
21.65	1.62	1.13	1.093	24.1	1.59	1.16	1.065	26.55	1.61	1.26	1.073
21.7	1.62	1.14	1.093	24.15	1.59	1.16	1.065	26.6	1.61	1.26	1.072
21.75	1.62	1.14	1.093	24.2	1.59	1.16	1.065	26.65	1.61	1.25	1.072
21.8	1.62	1.15	1.093	24.25	1.59	1.16	1.064	26.7	1.61	1.25	1.072
21.85	1.62	1.15	1.092	24.3	1.59	1.16	1.064	26.75	1.61	1.24	1.071
21.9	1.62	1.15	1.092	24.35	1.58	1.16	1.064	26.8	1.61	1.24	1.07
21.95	1.62	1.15	1.091	24.4	1.58	1.16	1.065	26.85	1.61	1.23	1.07
22	1.62	1.15	1.089	24.45	1.58	1.16	1.065	26.9	1.61	1.22	1.069
22.05	1.62	1.15	1.088	24.5	1.58	1.16	1.065	26.95	1.61	1.22	1.069
22.1	1.62	1.15	1.087	24.55	1.58	1.16	1.064	27	1.61	1.21	1.067
22.15	1.62	1.15	1.085	24.6	1.57	1.16	1.063	27.05	1.61	1.2	1.065
22.2	1.62	1.15	1.084	24.65	1.57	1.16	1.062	27.1	1.61	1.2	1.064
22.25	1.62	1.14	1.084	24.7	1.57	1.17	1.062	27.15	1.61	1.18	1.063
22.3	1.62	1.14	1.083	24.75	1.57	1.17	1.062	27.2	1.61	1.18	1.062
22.35	1.62	1.14	1.082	24.8	1.57	1.17	1.061	27.25	1.61	1.17	1.06
22.4	1.62	1.14	1.082	24.85	1.57	1.18	1.061	27.3	1.61	1.16	1.058
22.45	1.62	1.13	1.08	24.9	1.57	1.18	1.062	27.35	1.61	1.16	1.057
22.5	1.62	1.13	1.079	24.95	1.57	1.19	1.062	27.4	1.61	1.15	1.056

เวลา(นาที)	Steel A	Steel B	Steel C	เวลา(นาที)	Steel A	Steel B	Steel C	เวลา(นาที)	Steel A	Steel B	Steel C
27.45	1.61	1.14	1.054	29.9	1.54	1.12	1.064	32.35	1.57	1.11	1.06
27.5	1.61	1.14	1.053	29.95	1.54	1.12	1.063	32.4	1.57	1.11	1.06
27.55	1.6	1.13	1.052	30	1.54	1.12	1.063	32.45	1.57	1.11	1.06
27.6	1.6	1.13	1.051	30.05	1.54	1.12	1.062	32.5	1.57	1.11	1.06
27.65	1.6	1.12	1.051	30.1	1.54	1.11	1.061	32.55	1.57	1.11	1.06
27.7	1.6	1.12	1.051	30.15	1.54	1.11	1.061	32.6	1.57	1.11	1.06
27.75	1.6	1.11	1.051	30.2	1.54	1.11	1.06	32.65	1.57	1.11	1.059
27.8	1.6	1.11	1.051	30.25	1.54	1.11	1.059	32.7	1.58	1.11	1.059
27.85	1.6	1.11	1.051	30.3	1.54	1.11	1.058	32.75	1.58	1.11	1.059
27.9	1.6	1.11	1.051	30.35	1.55	1.11	1.057	32.8	1.58	1.11	1.058
27.95	1.6	1.1	1.051	30.4	1.55	1.1	1.056	32.85	1.58	1.11	1.058
28	1.6	1.1	1.053	30.45	1.55	1.1	1.056	32.9	1.58	1.1	1.057
28.05	1.6	1.1	1.053	30.5	1.55	1.1	1.055	32.95	1.58	1.1	1.056
28.1	1.6	1.1	1.054	30.55	1.55	1.1	1.056	33	1.58	1.1	1.056
28.15	1.6	1.1	1.055	30.6	1.55	1.1	1.056	33.05	1.58	1.1	1.055
28.2	1.59	1.09	1.057	30.65	1.55	1.1	1.056	33.1	1.58	1.1	1.054
28.25	1.59	1.09	1.058	30.7	1.55	1.1	1.055	33.15	1.58	1.1	1.053
28.3	1.59	1.09	1.059	30.75	1.55	1.1	1.055	33.2	1.58	1.1	1.052
28.35	1.59	1.09	1.059	30.8	1.55	1.1	1.055	33.25	1.58	1.1	1.051
28.4	1.59	1.09	1.06	30.85	1.55	1.1	1.055	33.3	1.58	1.1	1.05
28.45	1.59	1.1	1.06	30.9	1.55	1.1	1.055	33.35	1.58	1.1	1.049
28.5	1.59	1.1	1.06	30.95	1.55	1.1	1.055	33.4	1.58	1.11	1.049
28.55	1.59	1.1	1.06	31	1.55	1.1	1.055	33.45	1.58	1.11	1.047
28.6	1.59	1.1	1.06	31.05	1.55	1.1	1.055	33.5	1.58	1.11	1.047
28.65	1.59	1.1	1.06	31.1	1.55	1.1	1.055	33.55	1.58	1.11	1.046
28.7	1.59	1.1	1.061	31.15	1.55	1.1	1.055	33.6	1.58	1.11	1.044
28.75	1.59	1.11	1.061	31.2	1.55	1.1	1.055	33.65	1.58	1.11	1.043
28.8	1.59	1.11	1.062	31.25	1.55	1.09	1.055	33.7	1.58	1.11	1.042
28.85	1.59	1.11	1.062	31.3	1.55	1.09	1.055	33.75	1.58	1.11	1.041
28.9	1.59	1.11	1.062	31.35	1.55	1.09	1.055	33.8	1.58	1.11	1.041
28.95	1.59	1.11	1.062	31.4	1.55	1.1	1.055	33.85	1.58	1.11	1.04
29	1.58	1.11	1.062	31.45	1.55	1.1	1.055	33.9	1.57	1.11	1.04
29.05	1.58	1.11	1.062	31.5	1.56	1.1	1.055	33.95	1.57	1.1	1.04
29.1	1.58	1.11	1.062	31.55	1.56	1.1	1.056	34	1.57	1.1	1.039
29.15	1.58	1.11	1.062	31.6	1.56	1.1	1.056	34.05	1.57	1.1	1.04
29.2	1.57	1.11	1.062	31.65	1.56	1.1	1.056	34.1	1.57	1.1	1.04
29.25	1.57	1.11	1.061	31.7	1.56	1.1	1.056	34.15	1.57	1.1	1.04
29.3	1.56	1.11	1.061	31.75	1.56	1.1	1.057	34.2	1.57	1.1	1.04
29.35	1.56	1.11	1.061	31.8	1.56	1.1	1.057	34.25	1.56	1.1	1.04
29.4	1.56	1.11	1.061	31.85	1.56	1.1	1.058	34.3	1.56	1.1	1.04
29.45	1.56	1.11	1.061	31.9	1.56	1.1	1.058	34.35	1.56	1.11	1.041
29.5	1.55	1.11	1.062	31.95	1.56	1.1	1.059	34.4	1.56	1.11	1.041
29.55	1.55	1.11	1.062	32	1.56	1.1	1.059	34.45	1.55	1.11	1.042
29.6	1.55	1.11	1.063	32.05	1.56	1.1	1.06	34.5	1.55	1.11	1.043
29.65	1.55	1.11	1.063	32.1	1.57	1.1	1.06	34.55	1.55	1.12	1.044
29.7	1.54	1.11	1.064	32.15	1.57	1.1	1.06	34.6	1.55	1.12	1.044
29.75	1.54	1.11	1.064	32.2	1.57	1.1	1.06	34.65	1.54	1.12	1.045
29.8	1.54	1.12	1.064	32.25	1.57	1.1	1.06	34.7	1.54	1.12	1.045
29.85	1.54	1.12	1.064	32.3	1.57	1.1	1.06	34.75	1.54	1.13	1.046

เวลา(นาที)	Steel A	Steel B	Steel C	เวลา(นาที)	Steel A	Steel B	Steel C	เวลา(นาที)	Steel A	Steel B	Steel C
34.8	1.54	1.13	1.046	37.25	1.53	1.09	1.049	39.7	1.52	1.08	1.044
34.85	1.54	1.13	1.047	37.3	1.53	1.09	1.049	39.75	1.52	1.08	1.044
34.9	1.54	1.13	1.047	37.35	1.53	1.09	1.049	39.8	1.53	1.08	1.043
34.95	1.54	1.14	1.047	37.4	1.53	1.09	1.049	39.85	1.53	1.08	1.043
35	1.54	1.14	1.047	37.45	1.52	1.09	1.048	39.9	1.53	1.08	1.042
35.05	1.54	1.14	1.047	37.5	1.52	1.09	1.049	39.95	1.53	1.08	1.042
35.1	1.54	1.15	1.047	37.55	1.52	1.09	1.049	40	1.53	1.08	1.042
35.15	1.54	1.15	1.047	37.6	1.52	1.09	1.049	40.05	1.53	1.07	1.042
35.2	1.54	1.15	1.047	37.65	1.51	1.09	1.049	40.1	1.53	1.07	1.042
35.25	1.54	1.15	1.047	37.7	1.51	1.09	1.05	40.15	1.53	1.07	1.041
35.3	1.54	1.15	1.047	37.75	1.51	1.09	1.051	40.2	1.53	1.07	1.041
35.35	1.54	1.15	1.048	37.8	1.5	1.09	1.051	40.25	1.53	1.07	1.04
35.4	1.54	1.15	1.048	37.85	1.5	1.09	1.051	40.3	1.53	1.07	1.04
35.45	1.54	1.15	1.048	37.9	1.5	1.09	1.051	40.35	1.53	1.07	1.04
35.5	1.54	1.15	1.048	37.95	1.49	1.09	1.052	40.4	1.53	1.07	1.039
35.55	1.54	1.15	1.047	38	1.49	1.09	1.052	40.45	1.53	1.07	1.039
35.6	1.53	1.15	1.047	38.05	1.49	1.09	1.051	40.5	1.53	1.07	1.039
35.65	1.53	1.15	1.046	38.1	1.49	1.09	1.051	40.55	1.53	1.07	1.039
35.7	1.53	1.15	1.046	38.15	1.48	1.1	1.05	40.6	1.53	1.07	1.039
35.75	1.53	1.15	1.045	38.2	1.48	1.1	1.049	40.65	1.54	1.07	1.038
35.8	1.53	1.15	1.045	38.25	1.48	1.1	1.049	40.7	1.54	1.07	1.038
35.85	1.53	1.15	1.045	38.3	1.48	1.1	1.048	40.75	1.54	1.07	1.038
35.9	1.53	1.14	1.044	38.35	1.48	1.1	1.047	40.8	1.54	1.07	1.038
35.95	1.53	1.14	1.045	38.4	1.48	1.1	1.047	40.85	1.54	1.07	1.038
36	1.53	1.14	1.045	38.45	1.48	1.1	1.046	40.9	1.54	1.07	1.039
36.05	1.53	1.13	1.046	38.5	1.48	1.1	1.045	40.95	1.53	1.06	1.039
36.1	1.53	1.13	1.047	38.55	1.48	1.1	1.045	41	1.53	1.06	1.039
36.15	1.53	1.13	1.047	38.6	1.48	1.11	1.045	41.05	1.53	1.06	1.039
36.2	1.54	1.12	1.048	38.65	1.48	1.11	1.045	41.1	1.53	1.06	1.039
36.25	1.54	1.12	1.049	38.7	1.48	1.11	1.045	41.15	1.53	1.06	1.039
36.3	1.54	1.12	1.049	38.75	1.48	1.1	1.045	41.2	1.53	1.06	1.039
36.35	1.54	1.11	1.05	38.8	1.48	1.1	1.045	41.25	1.53	1.06	1.039
36.4	1.54	1.11	1.051	38.85	1.49	1.1	1.045	41.3	1.53	1.06	1.038
36.45	1.54	1.11	1.051	38.9	1.49	1.09	1.045	41.35	1.53	1.06	1.037
36.5	1.54	1.11	1.051	38.95	1.49	1.09	1.045	41.4	1.53	1.07	1.037
36.55	1.54	1.11	1.051	39	1.49	1.09	1.044	41.45	1.53	1.07	1.036
36.6	1.54	1.11	1.051	39.05	1.5	1.09	1.044	41.5	1.53	1.07	1.036
36.65	1.54	1.11	1.05	39.1	1.5	1.08	1.043	41.55	1.53	1.07	1.034
36.7	1.54	1.11	1.05	39.15	1.5	1.08	1.043	41.6	1.53	1.07	1.034
36.75	1.54	1.11	1.049	39.2	1.5	1.08	1.043	41.65	1.53	1.07	1.033
36.8	1.54	1.11	1.049	39.25	1.5	1.08	1.044	41.7	1.53	1.07	1.033
36.85	1.54	1.11	1.049	39.3	1.51	1.08	1.044	41.75	1.53	1.07	1.032
36.9	1.54	1.1	1.049	39.35	1.51	1.08	1.045	41.8	1.53	1.07	1.032
36.95	1.54	1.1	1.049	39.4	1.51	1.08	1.045	41.85	1.53	1.08	1.031
37	1.54	1.1	1.049	39.45	1.51	1.08	1.045	41.9	1.53	1.08	1.031
37.05	1.54	1.09	1.049	39.5	1.51	1.08	1.045	41.95	1.53	1.08	1.031
37.1	1.54	1.09	1.049	39.55	1.52	1.08	1.045	42	1.52	1.08	1.03
37.15	1.54	1.09	1.049	39.6	1.52	1.08	1.045	42.05	1.53	1.08	1.03
37.2	1.54	1.09	1.049	39.65	1.52	1.08	1.045	42.1	1.52	1.08	1.03

เวลา(นาที)	Steel A	Steel B	Steel C	เวลา(นาที)	Steel A	Steel B	Steel C	เวลา(นาที)	Steel A	Steel B	Steel C
42.15	1.52	1.08	1.03	44.6	1.51	1.1	1.019	47.05	1.52	1.16	1.023
42.2	1.52	1.08	1.031	44.65	1.51	1.1	1.018	47.1	1.52	1.16	1.024
42.25	1.52	1.08	1.031	44.7	1.51	1.09	1.018	47.15	1.52	1.17	1.024
42.3	1.52	1.08	1.031	44.75	1.51	1.09	1.017	47.2	1.51	1.17	1.025
42.35	1.52	1.08	1.032	44.8	1.51	1.09	1.017	47.25	1.51	1.17	1.025
42.4	1.52	1.08	1.032	44.85	1.51	1.09	1.017	47.3	1.51	1.18	1.025
42.45	1.52	1.08	1.033	44.9	1.51	1.09	1.017	47.35	1.51	1.18	1.025
42.5	1.52	1.08	1.033	44.95	1.51	1.08	1.017	47.4	1.51	1.18	1.025
42.55	1.52	1.08	1.033	45	1.51	1.08	1.018	47.45	1.5	1.18	1.025
42.6	1.52	1.08	1.033	45.05	1.51	1.08	1.017	47.5	1.5	1.18	1.025
42.65	1.52	1.08	1.032	45.1	1.51	1.08	1.017	47.55	1.5	1.18	1.025
42.7	1.52	1.08	1.032	45.15	1.51	1.08	1.017	47.6	1.5	1.18	1.025
42.75	1.52	1.08	1.031	45.2	1.51	1.08	1.017	47.65	1.49	1.18	1.025
42.8	1.52	1.09	1.03	45.25	1.51	1.08	1.017	47.7	1.49	1.17	1.025
42.85	1.52	1.09	1.029	45.3	1.51	1.08	1.016	47.75	1.49	1.17	1.025
42.9	1.52	1.09	1.028	45.35	1.51	1.08	1.016	47.8	1.49	1.17	1.024
42.95	1.52	1.09	1.027	45.4	1.51	1.08	1.015	47.85	1.49	1.17	1.024
43	1.52	1.1	1.026	45.45	1.51	1.08	1.015	47.9	1.48	1.16	1.023
43.05	1.52	1.1	1.026	45.5	1.51	1.08	1.015	47.95	1.48	1.16	1.023
43.1	1.52	1.1	1.025	45.55	1.51	1.08	1.014	48	1.48	1.16	1.023
43.15	1.52	1.1	1.025	45.6	1.51	1.08	1.014	48.05	1.48	1.16	1.023
43.2	1.52	1.1	1.025	45.65	1.51	1.08	1.014	48.1	1.48	1.16	1.023
43.25	1.52	1.1	1.025	45.7	1.51	1.08	1.014	48.15	1.48	1.15	1.023
43.3	1.52	1.1	1.025	45.75	1.51	1.08	1.015	48.2	1.48	1.15	1.022
43.35	1.52	1.1	1.026	45.8	1.51	1.09	1.015	48.25	1.48	1.15	1.022
43.4	1.52	1.1	1.026	45.85	1.51	1.09	1.015	48.3	1.48	1.15	1.021
43.45	1.52	1.1	1.027	45.9	1.51	1.09	1.016	48.35	1.48	1.15	1.02
43.5	1.52	1.1	1.028	45.95	1.52	1.09	1.016	48.4	1.48	1.14	1.02
43.55	1.52	1.1	1.029	46	1.52	1.09	1.017	48.45	1.48	1.14	1.02
43.6	1.52	1.1	1.029	46.05	1.52	1.1	1.017	48.5	1.49	1.14	1.02
43.65	1.52	1.09	1.03	46.1	1.52	1.1	1.017	48.55	1.49	1.14	1.019
43.7	1.52	1.09	1.031	46.15	1.52	1.1	1.018	48.6	1.49	1.14	1.019
43.75	1.52	1.09	1.031	46.2	1.52	1.1	1.018	48.65	1.49	1.14	1.019
43.8	1.52	1.09	1.032	46.25	1.52	1.11	1.019	48.7	1.5	1.14	1.019
43.85	1.52	1.09	1.032	46.3	1.52	1.11	1.019	48.75	1.5	1.13	1.019
43.9	1.52	1.08	1.032	46.35	1.52	1.11	1.02	48.8	1.5	1.13	1.019
43.95	1.52	1.08	1.032	46.4	1.52	1.12	1.02	48.85	1.5	1.13	1.019
44	1.51	1.08	1.032	46.45	1.52	1.12	1.02	48.9	1.5	1.13	1.019
44.05	1.51	1.08	1.032	46.5	1.52	1.12	1.021	48.95	1.51	1.13	1.019
44.1	1.51	1.09	1.031	46.55	1.52	1.12	1.021	49	1.51	1.12	1.02
44.15	1.51	1.09	1.03	46.6	1.52	1.13	1.021	49.05	1.51	1.12	1.02
44.2	1.51	1.09	1.03	46.65	1.52	1.13	1.021	49.1	1.51	1.11	1.021
44.25	1.51	1.09	1.028	46.7	1.52	1.13	1.021	49.15	1.52	1.11	1.022
44.3	1.51	1.09	1.026	46.75	1.52	1.14	1.021	49.2	1.52	1.11	1.023
44.35	1.51	1.1	1.025	46.8	1.52	1.14	1.022	49.25	1.52	1.11	1.024
44.4	1.51	1.1	1.024	46.85	1.52	1.14	1.022	49.3	1.52	1.1	1.026
44.45	1.51	1.1	1.022	46.9	1.52	1.15	1.022	49.35	1.53	1.1	1.026
44.5	1.51	1.1	1.02	46.95	1.52	1.15	1.022	49.4	1.53	1.1	1.027
44.55	1.51	1.1	1.02	47	1.52	1.16	1.022	49.45	1.53	1.1	1.029

เวลา(นาที)	Steel A	Steel B	Steel C	เวลา(นาที)	Steel A	Steel B	Steel C	เวลา(นาที)	Steel A	Steel B	Steel C
49.5	1.53	1.1	1.029	51.95	1.5	1.14	1.017	54.4	1.53	1.09	1.016
49.55	1.53	1.1	1.03	52	1.5	1.14	1.017	54.45	1.53	1.09	1.017
49.6	1.54	1.1	1.03	52.05	1.5	1.14	1.016	54.5	1.53	1.1	1.017
49.65	1.54	1.1	1.031	52.1	1.5	1.14	1.016	54.55	1.53	1.1	1.017
49.7	1.54	1.1	1.032	52.15	1.5	1.13	1.015	54.6	1.53	1.1	1.017
49.75	1.54	1.1	1.032	52.2	1.5	1.13	1.015	54.65	1.53	1.1	1.017
49.8	1.54	1.1	1.033	52.25	1.5	1.13	1.015	54.7	1.53	1.11	1.017
49.85	1.54	1.1	1.033	52.3	1.5	1.12	1.015	54.75	1.53	1.11	1.016
49.9	1.54	1.1	1.033	52.35	1.5	1.12	1.016	54.8	1.53	1.11	1.016
49.95	1.54	1.1	1.033	52.4	1.5	1.11	1.016	54.85	1.53	1.11	1.016
50	1.54	1.1	1.033	52.45	1.5	1.11	1.016	54.9	1.53	1.11	1.016
50.05	1.54	1.09	1.033	52.5	1.5	1.11	1.017	54.95	1.53	1.12	1.016
50.1	1.54	1.09	1.033	52.55	1.5	1.1	1.019	55	1.53	1.12	1.015
50.15	1.54	1.09	1.032	52.6	1.5	1.1	1.02	55.05	1.53	1.12	1.015
50.2	1.54	1.09	1.031	52.65	1.5	1.1	1.021	55.1	1.53	1.12	1.015
50.25	1.54	1.09	1.031	52.7	1.5	1.09	1.022	55.15	1.53	1.12	1.014
50.3	1.54	1.09	1.031	52.75	1.49	1.09	1.024	55.2	1.53	1.13	1.014
50.35	1.54	1.09	1.03	52.8	1.5	1.09	1.025	55.25	1.52	1.13	1.015
50.4	1.54	1.1	1.03	52.85	1.49	1.09	1.026	55.3	1.52	1.13	1.015
50.45	1.54	1.1	1.03	52.9	1.5	1.09	1.027	55.35	1.52	1.13	1.016
50.5	1.54	1.1	1.03	52.95	1.5	1.08	1.028	55.4	1.52	1.13	1.016
50.55	1.54	1.1	1.03	53	1.5	1.08	1.029	55.45	1.52	1.13	1.017
50.6	1.54	1.1	1.03	53.05	1.5	1.08	1.029	55.5	1.52	1.13	1.017
50.65	1.54	1.11	1.03	53.1	1.5	1.08	1.03	55.55	1.52	1.13	1.018
50.7	1.53	1.11	1.03	53.15	1.5	1.08	1.03	55.6	1.52	1.13	1.018
50.75	1.53	1.11	1.03	53.2	1.5	1.08	1.03	55.65	1.52	1.13	1.018
50.8	1.53	1.12	1.03	53.25	1.5	1.08	1.029	55.7	1.52	1.13	1.019
50.85	1.53	1.12	1.03	53.3	1.5	1.08	1.029	55.75	1.52	1.13	1.019
50.9	1.53	1.12	1.03	53.35	1.5	1.08	1.028	55.8	1.52	1.12	1.02
50.95	1.53	1.12	1.029	53.4	1.5	1.07	1.027	55.85	1.52	1.12	1.02
51	1.53	1.12	1.029	53.45	1.5	1.07	1.026	55.9	1.52	1.12	1.021
51.05	1.53	1.12	1.029	53.5	1.51	1.07	1.026	55.95	1.52	1.12	1.022
51.1	1.53	1.12	1.028	53.55	1.51	1.07	1.025	56	1.52	1.12	1.023
51.15	1.53	1.12	1.027	53.6	1.51	1.07	1.023	56.05	1.52	1.12	1.023
51.2	1.53	1.12	1.026	53.65	1.51	1.07	1.023	56.1	1.52	1.11	1.024
51.25	1.52	1.13	1.025	53.7	1.51	1.07	1.022	56.15	1.52	1.11	1.024
51.3	1.52	1.13	1.024	53.75	1.51	1.07	1.021	56.2	1.52	1.11	1.024
51.35	1.52	1.13	1.024	53.8	1.51	1.07	1.02	56.25	1.52	1.11	1.025
51.4	1.52	1.13	1.024	53.85	1.52	1.07	1.02	56.3	1.52	1.11	1.025
51.45	1.52	1.13	1.024	53.9	1.52	1.07	1.019	56.35	1.52	1.11	1.026
51.5	1.52	1.14	1.023	53.95	1.52	1.07	1.019	56.4	1.52	1.12	1.027
51.55	1.51	1.14	1.023	54	1.52	1.07	1.018	56.45	1.52	1.12	1.027
51.6	1.51	1.14	1.023	54.05	1.52	1.08	1.017	56.5	1.52	1.12	1.029
51.65	1.51	1.14	1.023	54.1	1.52	1.08	1.017	56.55	1.52	1.12	1.029
51.7	1.51	1.14	1.022	54.15	1.52	1.08	1.016	56.6	1.52	1.12	1.03
51.75	1.51	1.15	1.021	54.2	1.52	1.08	1.016	56.65	1.52	1.13	1.031
51.8	1.51	1.15	1.02	54.25	1.52	1.09	1.016	56.7	1.52	1.13	1.032
51.85	1.51	1.15	1.019	54.3	1.52	1.09	1.016	56.75	1.52	1.13	1.032
51.9	1.5	1.15	1.018	54.35	1.53	1.09	1.016	56.8	1.52	1.13	1.032

เวลา(นาที)	Steel A	Steel B	Steel C	เวลา(นาที)	Steel A	Steel B	Steel C
56.85	1.52	1.14	1.032	59.3	1.4	1.12	1.026
56.9	1.52	1.14	1.032	59.35	1.4	1.12	1.026
56.95	1.51	1.14	1.032	59.4	1.4	1.13	1.026
57	1.51	1.14	1.032	59.45	1.4	1.13	1.027
57.05	1.51	1.14	1.031	59.5	1.4	1.13	1.027
57.1	1.51	1.14	1.031	59.55	1.4	1.13	1.027
57.15	1.51	1.14	1.03	59.6	1.4	1.13	1.028
57.2	1.51	1.14	1.03	59.65	1.4	1.13	1.028
57.25	1.5	1.14	1.03	59.7	1.41	1.12	1.028
57.3	1.5	1.14	1.03	59.75	1.41	1.12	1.027
57.35	1.5	1.14	1.03	59.8	1.41	1.12	1.027
57.4	1.5	1.14	1.03	59.85	1.42	1.12	1.027
57.45	1.5	1.14	1.03	59.9	1.42	1.12	1.026
57.5	1.49	1.13	1.03	59.95	1.43	1.12	1.026
57.55	1.49	1.13	1.03	60	1.43	1.12	1.026
57.6	1.49	1.13	1.03	60.05	1.43	1.12	1.026
57.65	1.49	1.13	1.03				
57.7	1.49	1.13	1.03				
57.75	1.49	1.13	1.03				
57.8	1.49	1.13	1.03				
57.85	1.48	1.12	1.03				
57.9	1.48	1.12	1.03				
57.95	1.48	1.12	1.03				
58	1.48	1.12	1.03				
58.05	1.48	1.12	1.029				
58.1	1.48	1.12	1.029				
58.15	1.48	1.12	1.029				
58.2	1.47	1.11	1.029				
58.25	1.47	1.11	1.029				
58.3	1.47	1.11	1.028				
58.35	1.47	1.11	1.028				
58.4	1.47	1.11	1.028				
58.45	1.47	1.11	1.027				
58.5	1.46	1.11	1.027				
58.55	1.46	1.11	1.026				
58.6	1.45	1.11	1.026				
58.65	1.45	1.11	1.025				
58.7	1.45	1.11	1.025				
58.75	1.44	1.11	1.025				
58.8	1.44	1.11	1.024				
58.85	1.43	1.11	1.023				
58.9	1.43	1.11	1.023				
58.95	1.42	1.11	1.022				
59	1.42	1.12	1.023				
59.05	1.42	1.12	1.023				
59.1	1.41	1.12	1.023				
59.15	1.41	1.12	1.024				
59.2	1.41	1.12	1.025				
59.25	1.4	1.12	1.025				

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ค

### การวัดขนาดเกรนออสเตนไนท์โดยมาตรฐาน JIS G0551

ตามมาตรฐาน JIS G0551 กำหนดวิธีการวัดและคำนวณขนาดเกรนออสเตนไนท์โดยการนับปริมาณเกรนของออสเตนไนท์ที่มีอยู่ในพื้นที่ 1 ตารางมิลลิเมตร ดังแสดงในตารางที่

ตาราง ค1 Grain size number

Grain size number (N)	Number of Grain size per 1 mm <sup>2</sup>	Mean area of grain size (mm <sup>2</sup> )
-3	1	1
-2	2	0.5
-1	4	0.25
0	8	0.125
1	16	0.0625
2	32	0.0312
3	64	0.0156
4	128	0.00781
5	256	0.00390
6	512	0.00195
7	1024	0.00098
8	2048	0.00049
9	4096	0.000244
10	8192	0.000122

หรือคำนวณจากสูตร  $n = 2^{N+3}$

เมื่อ  $n$  คือ จำนวนเกรนในพื้นที่ 1 ตารางมิลลิเมตร

$N$  คือ grain size number

## ประวัติผู้เขียน

นายภาณุพงศ์ กอปรศรีสวัสดิ์ เกิดวันที่ 21 ตุลาคม พ.ศ. 2519 ที่เขตบางคอแหลม กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโลหการ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2540 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโลหการ ที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ.2540



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย