


ผลของไนโตรเจนต่อปริมาณโครงสร้างเฟอร์ไรท์และความต้านทานการกัดกร่อนของแนวเชื่อม  
เหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ที่มีส่วนผสมโครเมียม 28% นิกเกิล 7%



นายไฉเชิต วงศ์ปิ่นแก้ว

สถาบันวิทยบริการ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2547

ISBN 974-53-2107-9

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECT OF NITROGEN ON FERRITE CONTENT AND CORROSION RESISTANCE OF 28Cr-7Ni  
DUPLEX STAINLESS STEEL WELDMENT



Mr. Kosit Wongpinkaw

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 2004

ISBN 974-53-2107-9

หัวข้อวิทยานิพนธ์ ผลของไนโตรเจนต่อปริมาณโครงสร้างเฟอร์ไรท์และความต้านทานการกัดกร่อนของแนวเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ที่มีส่วนผสมโครเมียม 28% นิกเกิล 7%

โดย นายโมษิต วงศ์ปิ่นแก้ว

สาขาวิชา วิศวกรรมโลหการ

อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร. กอบบุญ หล่อทองคำ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร.ดิเรก ลาวัณย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ชاکกร จารุพิสิฐธร)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(รองศาสตราจารย์ ดร.กอบบุญ หล่อทองคำ)

..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ไสว ด่านชัยวิจิตร)

โฆษิต วงศ์ปิ่นแก้ว :ผลของไนโตรเจนต่อปริมาณโครงสร้างเฟอร์ไรท์และความต้านทานการกัดกร่อนของแนวเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ที่มีส่วนผสมโครเมียม 28% นิกเกิล 7% (EFFECT OF NITROGEN ON FERRITE CONTENT AND CORROSION RESISTANCE OF 28Cr-7Ni DUPLEX STAINLESS STEEL WELDMENT)

อ. ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร.กอบบุญ หล่อทองคำ, 101 หน้า. ISBN 974-53-2107-9

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ คือ ศึกษาผลของไนโตรเจนต่อปริมาณโครงสร้างเฟอร์ไรท์และความต้านทานการกัดกร่อนของแนวเชื่อมทิกฟัลส์และชิ้นงานจำลองเชื่อมของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ที่มีส่วนผสมโครเมียม 28 เปอร์เซ็นต์ นิกเกิล 7 เปอร์เซ็นต์ และไนโตรเจน 0.0018-0.3400 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สภาวะการเชื่อมคือ กระแสฟัลส์ 140 แอมแปร์ ความถี่ฟัลส์ 1.5 รอบ/วินาที กระแสพื้น 35 แอมแปร์ ความเร็วเชื่อม 4.15 มม./วินาที และก๊าซอาร์กอนปกคลุม 15 ลิตร/นาที สภาวะจำลองเชื่อมคือ อัตราการให้ความร้อน 30 องศาเซลเซียส/วินาที อุณหภูมิสูงสุด 1300, 1325, 1350 และ 1375 องศาเซลเซียส ระยะเวลาแช่ที่อุณหภูมิ 1300 และ 1325 องศาเซลเซียส คือ 10 วินาที ที่อุณหภูมิ 1350 และ 1375 องศาเซลเซียส คือ 30 วินาที และปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ วัดความต้านทานการกัดกร่อนโดยเทคนิคโพเทนทิโอดินามิกโพลาริเซชันในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

ผลการทดลองสำหรับแนวเชื่อมทิกฟัลส์คือ ไนโตรเจนลดปริมาณโครงสร้างเฟอร์ไรท์ ในเนื้อเชื่อม แนวการหลอมเหลว และบริเวณกระทบร้อน พบการตกตะกอนของโครเมียมไนไตรด์ที่บริเวณแนวการหลอมเหลว และบริเวณกระทบร้อนของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ที่มีส่วนผสมไนโตรเจน และเหล็กที่มีส่วนผสมไนโตรเจน 0.2300 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบการตกตะกอนโครเมียมไนไตรด์สูงสุด ตะกอนโครเมียมไนไตรด์ส่งผลดักจับไฟฟ้าการกัดกร่อนอย่างมาก แต่ไม่ส่งผลต่อศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็มหรือหลุม

ผลการทดลองสำหรับเหล็กที่ผ่านการจำลองเชื่อมคือ ไนโตรเจนลดปริมาณโครงสร้างเฟอร์ไรท์ แนวโน้มปริมาณโครงสร้างเฟอร์ไรท์คล้ายกับปริมาณโครงสร้างเฟอร์ไรท์ในบริเวณแนวการหลอมเหลว แต่ไม่พบการตกตะกอนของโครเมียมไนไตรด์ ความต้านทานการกัดกร่อนแบบทั่วไปจึงมีแนวโน้มสูงกว่าแนวเชื่อม แต่ความต้านทานการกัดกร่อนแบบรูเข็มมีแนวโน้มเช่นเดียวกับแนวเชื่อม

ผลการตรวจสอบบริเวณที่ถูกการกัดกร่อนแบบรูเข็มของแนวเชื่อม พบว่าบริเวณที่มีตะกอนของโครเมียมไนไตรด์เป็นบริเวณที่เกิดการกัดกร่อน สำหรับเหล็กที่ผ่านการจำลองเชื่อมพบว่าเหล็กที่ไม่มีไนโตรเจนผสม การกัดกร่อนเกิดขึ้นที่ออสเตนไนท์แต่เหล็กที่มีไนโตรเจนผสมการกัดกร่อนเกิดขึ้นที่เฟอร์ไรท์

ภาควิชา...วิศวกรรมโลหการ.....ลายมือชื่อ.....

สาขาวิชา...วิศวกรรมโลหการ.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

ปีการศึกษา.....2547.....

# # 4470240221: MAJOR METALLURGICAL ENGINEERING

KEY WORD: DUPLEX STAINLESS STEEL / NITROGEN / WELDMENT / SIMULATED / CORROSION RESISTANCE

KOSIT WINGPINKAEW: EFFECT OF NITROGEN ON FERRITE CONTENT AND CORROSION RESISTANCE OF 28Cr-7Ni DUPLEX STAINLESS STEEL WELDMENT. THESIS ADVISOR: ASSOC. PROF. Dr-Ing. GOBBOON LOTHONGKUM, 101 pp. ISBN 974-53-2107-9

The objective of this research was to study the effect of nitrogen on ferrite content and corrosion resistance of 28Cr-7Ni and 0.0018-0.3400N duplex stainless steel weldments. The conditions of TIG pulse welding were pulse current of 140 A, base current of 30 A, pulse frequency of 1.5 /s, welding speed of 4.15 mm/s and argon flow rate of 15 l/min. The condition of simulated heat effect zone were heating rate of 30 °C/s, peak temperatures of 1300, 1325, 1350 and 1375 °C and air cooling. The holding times at 1300 and 1325 °C was 10 s and those of 1350 and 1375 °C was 30 s. The corrosion resistance was studied by potentiodynamic polarization measuring in 3.5 wt% NaCl solution at 25 °C.

The results of TIG pulse weldments showed that nitrogen decreased the delta ferrite contents of weld metal, fusion line and heat affected zone. Precipitation of Cr<sub>2</sub>N occurred in fusion line and heat affect zone. The maximum amount of Cr<sub>2</sub>N was found in duplex stainless steel alloyed with 0.2300 wt% N. Cr<sub>2</sub>N effectively decreased general corrosion resistance but has no effect on pitting potential. The result of simulated heat affected zone specimens showed that nitrogen decreased the ferrite content. The ferrite content of simulated heat affected zone specimens was nearly the same as that of fusion line, but precipitation of Cr<sub>2</sub>N was not found. General corrosion resistance of simulated heat affected zone specimen was higher than that of weldment but pitting corrosion resistance was nearly the same as that of simulated heat affected zone specimen. From metallography examination, it was found that precipitation areas of Cr<sub>2</sub>N were corroded. The simulated heat affected zone specimens alloyed without nitrogen showed that austenite was corroded, but those alloyed with nitrogen showed that ferrite was corroded.

Department...Metallurgical Engineering..... Student's signature.....

Field of studies...Metallurgical Engineering..... Advisor's signature.....

Academic year ...2004.....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ด้วยความช่วยเหลือจากหลายฝ่าย ผู้วิจัยขอกราบ  
ของพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร. กอบบุญ หล่อทองคำ ซึ่งได้กรุณาให้ความ  
ช่วยเหลือและแนะนำแนวทางที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัยด้วยดีตลอดมา ตลอดจนขอขอบพระคุณ  
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน ที่ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ ขอขอบคุณ  
บริษัท Nisshin Steel Co., Ltd. ที่ให้ความอนุเคราะห์เหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์สำหรับการวิจัยใน  
ครั้งนี้ ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาวิศวกรรมโลหการทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือจน  
งานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ทำยนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัว ที่สนับสนุนในด้านต่างๆ  
ด้วยดีตลอดมาจนสำเร็จการศึกษา และขอบคุณเพื่อนๆ ที่ให้ความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจให้แก่  
ผู้วิจัยด้วยดีเสมอมา

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญ

## หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญรูป.....	ฎ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
2. ปรีทรรศน์วรรณกรรม.....	4
2.1 เหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์.....	4
2.2 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางจุลภาค ที่บริเวณกระทบร้อนของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์.....	6
2.3 ผลของไนโตรเจนต่อความต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิม.....	7
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	10
2.5 ความสำคัญของการศึกษาโครงสร้างจุลภาคในแนวเชื่อมของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ที่มีส่วนผสมโครเมียม 28 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก นิกเกิล 7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก.....	13
3. ขั้นตอนและวิธีดำเนินการทดลอง.....	14
3.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	14
3.2 ชิ้นงานที่ใช้ในการทดลอง.....	14
3.3 ขั้นตอนการทดลอง.....	15
4. ผลการทดลองและอภิปราย.....	18
5. สรุปผลการทดลอง.....	58

## สารบัญ

	หน้า
รายการอ้างอิง.....	59
ภาคผนวก.....	60
ภาคผนวก ก.....	61
ภาคผนวก ข.....	74
ภาคผนวก ค.....	81
ภาคผนวก ง.....	84
ภาคผนวก จ.....	97
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	101



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ส่วนผสมเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์โดยทั่วไป.....	4
2.2 ส่วนผสมเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ที่กำลังพัฒนาให้มีความต้านทานการกัดกร่อนและสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น.....	4
2.3 สมบัติเชิงกลของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์บางเกรด.....	5
2.4 สมบัติที่เปลี่ยนไปตามปริมาณเฟอร์ไรท์.....	5
2.5 ส่วนผสมเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ที่ใช้ในการทดลองของ G. Huismann และ H. Hoffmeister.....	11
3.1 ส่วนผสมเคมีโดยน้ำหนักและสัดส่วนของเฟสออสเทนไนท์ของเหล็ก K1-K4 ที่ได้รับจากบริษัท Nissin steel จำกัด.....	14
3.2 สภาวะการอบชุบความร้อนเป็นเวลา 24 ชั่วโมงแล้วชุบในน้ำ เพื่อควบคุมสัดส่วนเฟสออสเทนไนท์ของเหล็ก K1-K4.....	15
3.3 ข้อกำหนดการจำลองเหล็ก K1-K4.....	16
4.1 อักษรย่อของบริเวณและโครงสร้างจุลภาคที่พบภายหลังการเชื่อมทิกพัลส์และการจำลองเชื่อม.....	19
4.2 ปริมาณเดลตาเฟอร์ไรท์ที่บริเวณต่าง ๆ ของเหล็ก K1-K4 ที่ผ่านการเชื่อมทิกพัลส์และผ่านการจำลองเชื่อม.....	37
4.3 ปริมาณออสเทนไนท์ที่บริเวณต่าง ๆ ของเหล็ก K1-K4 ที่ผ่านการเชื่อมทิกพัลส์และผ่านการจำลองเชื่อม.....	37
4.4 ค่าที่ได้จากเส้นโพลาริเซชันของเหล็ก K1-K4.....	44
4.5 สัดส่วนออสเทนไนท์ต่อเฟสเฟอร์ไรท์ของโลหะพื้น และเหล็กที่ผ่านการจำลองเชื่อม.....	46
ก.1 ปริมาณโครงสร้างออสเทนไนท์ (เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) ที่โลหะพื้นของเหล็ก K1.....	64
ก.2 ปริมาณโครงสร้างออสเทนไนท์ (เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) ที่โลหะพื้นของเหล็ก K2.....	64
ก.3 ปริมาณโครงสร้างออสเทนไนท์ (เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) ที่โลหะพื้นของเหล็ก K3.....	65
ก.4 ปริมาณโครงสร้างออสเทนไนท์ (เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) ที่โลหะพื้นของเหล็ก K4.....	65
ก.5 ปริมาณโครงสร้างออสเทนไนท์ (เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) ในเนื้อเชื่อมของเหล็ก K2.....	66
ก.6 ปริมาณโครงสร้างออสเทนไนท์ (เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) ในเนื้อเชื่อมของเหล็ก K3.....	66

## สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ก.7 ปริมาณโครงสร้างออสเตนไนท์ (เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร)ในเนื้อเชื่อมของเหล็ก K4.....	67
ก.8 ปริมาณโครงสร้างออสเตนไนท์(เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) ที่บริเวณแนวการหลอม เหลวของเหล็ก K1.....	67
ก.9 เปอร์เซนต์โครงสร้างออสเตนไนท์(เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) ที่บริเวณแนวการหลอม เหลวของเหล็ก K2.....	68
ก.10 ปริมาณโครงสร้างออสเตนไนท์(เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) ที่บริเวณแนวการหลอม เหลวของเหล็ก K3.....	68
ก.11 ปริมาณโครงสร้างออสเตนไนท์(เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) ที่บริเวณแนวการหลอม เหลวของเหล็ก K4.....	69
ก.12 ปริมาณโครงสร้างออสเตนไนท์ (เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) ที่บริเวณกระทับร้อนของ เหล็ก K1.....	69
ก.13 ปริมาณโครงสร้างออสเตนไนท์ (เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) ที่บริเวณกระทับร้อนของ เหล็ก K2.....	70
ก.14 ปริมาณโครงสร้างออสเตนไนท์ (เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) ที่บริเวณกระทับร้อนของ เหล็ก K3.....	70
ก.15 ปริมาณโครงสร้างออสเตนไนท์ (เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) ที่บริเวณกระทับร้อนของ เหล็ก K4.....	71
ก.16 ปริมาณโครงสร้างออสเตนไนท์ (เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) ที่ผ่านการจำลองเชื่อม ของเหล็ก K1.....	71
ก.17 ปริมาณโครงสร้างออสเตนไนท์ (เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) ที่ผ่านการจำลองเชื่อม ของเหล็ก K1.....	72
ก.18 ปริมาณโครงสร้างออสเตนไนท์ (เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) ที่ผ่านการจำลองเชื่อม ของเหล็ก K1.....	72
ก.19 ปริมาณโครงสร้างออสเตนไนท์ (เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) ที่ผ่านการจำลองเชื่อม ของเหล็ก K1.....	73
ข1 ข้อเสนอแนะสำหรับการเลือกขนาดกริด (Grid size selection).....	75

## สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ข.2	การประมาณค่าตัวแปร $n$ จากค่าความแม่นยำสัมพัทธ์ที่ออกแบบไว้ และจากสัดส่วนปริมาณเฟสที่สนใจ.....75
ข.3	ปริมาณโครเมียมไนไตรด์ (เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) ที่บริเวณแนวการหลอมเหลวของเหล็ก K3..... 77
ข.4	ปริมาณโครเมียมไนไตรด์ (เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) ที่บริเวณแนวการหลอมเหลวของเหล็ก K4..... 78
ข.5	ปริมาณโครเมียมไนไตรด์ (เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) ที่บริเวณกระทืบร้อนของเหล็ก K3... 79
ข.6	ปริมาณโครเมียมไนไตรด์ (เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) ที่บริเวณกระทืบร้อนของเหล็ก K4... 80

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ปริมาณเฟอร์ไรท์สูงสุดในบริเวณกระทะร้อนที่อัตราการเย็นตัวต่าง ๆ โดยวัดปริมาณเฟอร์ไรท์โดยวิธีหาปริมาณทางโลหะวิทยา.....	6
2.2 ผลของไนโตรเจนต่อเวลาการตกผลึกของสารประกอบคาร์ไบด์ ( $M_{23}C_6$ ).....	8
2.3 ผลของไนโตรเจนต่อเส้นโค้งโพลาริเซชัน.....	8
2.4 คุณสมบัติการกัดกร่อนแบบรูเข็มในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 0.5 โมล/ลิตร ที่ 600 มิลลิโวลต์ (SCE).....	9
2.5 ศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็มที่อุณหภูมิต่าง ๆ แสดงจุดสุดท้ายของศักย์ไฟฟ้าการแตกตัวของฟิล์ม (จุดเปิด) และศักย์ไฟฟ้าการเกิดรีพาสซิเวชัน (จุดปิด).....	10
2.6 ปริมาณเฟอร์ไรท์ในบริเวณกระทะร้อน ที่อัตราการเย็นตัวต่าง ๆ จากอุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส.....	11
2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไนโตรเจนในรอยเชื่อมกับปริมาณโครเมียมไนไตรด์และปริมาณเฟสออสเตนไนท์ที่พบ.....	12
3.1 พื้นที่ทดสอบการกัดกร่อน ก. เหล็กที่ผ่านการเชื่อมทิกทัลล์ ข. เหล็กที่ผ่านการจำลองเชื่อม.....	17
4.1 โครงสร้างมหภาคที่บริเวณต่าง ๆ ของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ K1 (0.0016 %N) ภายหลังการเชื่อมทิกทัลล์.....	20
4.2 โครงสร้างมหภาคที่บริเวณต่าง ๆ ของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ K2 (0.1100%N) ภายหลังการเชื่อมทิกทัลล์.....	20
4.3 โครงสร้างมหภาคที่บริเวณต่างๆของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ K3 (0.2300 %N) ภายหลังการเชื่อมทิกทัลล์.....	21
4.4 โครงสร้างมหภาคที่บริเวณต่าง ๆ ของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ K4 (0.3400 %N) ภายหลังการเชื่อมทิกทัลล์.....	21
4.5 โครงสร้างจุลภาคของบริเวณโลหะพื้นเหล็ก K1 ที่ผ่านการเชื่อมทิกทัลล์.....	22
4.6 โครงสร้างจุลภาคของบริเวณโลหะพื้นเหล็ก K2 ที่ผ่านการเชื่อมทิกทัลล์.....	22
4.7 โครงสร้างจุลภาคของบริเวณโลหะพื้นเหล็ก K3 ที่ผ่านการเชื่อมทิกทัลล์.....	23
4.8 โครงสร้างจุลภาคของบริเวณโลหะพื้นเหล็ก K4 ที่ผ่านการเชื่อมทิกทัลล์.....	23

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.9	24
4.10	24
4.11	25
4.12	25
4.13	26
4.14	26
4.15	27
4.16	27
4.17	28
4.18	28
4.19	29
4.20	29
4.21	30
4.22	30
4.23	31
4.24	31
4.25	32
4.26	33
4.27	38
4.28	39
4.29	41
4.30	43

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไนโตรเจนในโลหะพื้นและค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนของเหล็ก K1-K4.....	45
4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไนโตรเจนในโลหะพื้น และค่าอัตราการกัดกร่อนของเหล็ก K1-K4.....	47
4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไนโตรเจนในโลหะพื้นและค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของเหล็ก K1-K4.....	48
4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไนโตรเจนในโลหะพื้นและค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนขณะวัสดุเกิดฟิล์มที่ผิวของเหล็ก K1-K4.....	49
4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไนโตรเจนในโลหะพื้น (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) และค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็ม.....	50
4.36 โครงสร้างมหภาคบริเวณที่เกิดการกัดกร่อนของเหล็ก K1 ที่ผ่านการเชื่อมทิกพัลส์.....	52
4.37 โครงสร้างมหภาคบริเวณที่เกิดการกัดกร่อนของเหล็ก K2 ที่ผ่านการเชื่อมทิกพัลส์.....	52
4.38 โครงสร้างมหภาคบริเวณที่เกิดการกัดกร่อนของเหล็ก K3 ที่ผ่านการเชื่อมทิกพัลส์.....	53
4.39 โครงสร้างมหภาคบริเวณที่เกิดการกัดกร่อนของเหล็ก K4 ที่ผ่านการเชื่อมทิกพัลส์.....	53
4.40 โครงสร้างจุลภาคบริเวณที่เกิดการกัดกร่อนของเหล็ก K1 ที่ผ่านการเชื่อมทิกพัลส์.....	54
4.41 โครงสร้างจุลภาคบริเวณที่เกิดการกัดกร่อนของเหล็ก K2 ที่ผ่านการเชื่อมทิกพัลส์.....	54
4.42 โครงสร้างจุลภาคบริเวณที่เกิดการกัดกร่อนของเหล็ก K3 ที่ผ่านการเชื่อมทิกพัลส์.....	55
4.43 โครงสร้างจุลภาคบริเวณที่เกิดการกัดกร่อนของเหล็ก K4 ที่ผ่านการเชื่อมทิกพัลส์.....	55
4.44 โครงสร้างจุลภาคบริเวณที่เกิดการกัดกร่อนของเหล็ก K1 ที่ผ่านการจำลองเชื่อม.....	56
4.45 โครงสร้างจุลภาคบริเวณที่เกิดการกัดกร่อนของเหล็ก K2 ที่ผ่านการจำลองเชื่อม.....	56
4.46 โครงสร้างจุลภาคบริเวณที่เกิดการกัดกร่อนของเหล็ก K3 ที่ผ่านการจำลองเชื่อม.....	57
4.47 โครงสร้างจุลภาคบริเวณที่เกิดการกัดกร่อนของเหล็ก K4 ที่ผ่านการจำลองเชื่อม.....	57
ก.1 ตำแหน่งการวัดค่า $\lambda$ และ $(L_3)_\gamma$ จากเส้นทดสอบ.....	62
ข.1 ชนิดของกริดแบบวงกลม และสี่เหลี่ยม.....	76
ค.1 วิธีการหาค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนและกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนจากเส้นโพลาริเซชัน.....	81



## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ค.2	วิธีการหาค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็ม.....82
ค.3	วิธีการหาค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าขณะเกิดฟิล์มที่ผิว..... 82
ง.1	เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ (K1, 0.0018 wt%) ที่ผ่านการเชื่อมทิกพัลส์ ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ครั้งที่ 1.....85
ง.2	เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ (K1, 0.0018 wt%) ที่ผ่านการเชื่อมทิกพัลส์ ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ครั้งที่ 2.....85
ง.3	เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ (K1, 0.0018 wt%) ที่ผ่านการเชื่อมทิกพัลส์ ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ครั้งที่ 3.....86
ง.4	เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ (K2, 0.0018 wt%) ที่ผ่านการเชื่อมทิกพัลส์ ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ครั้งที่ 1.....86
ง.5	เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ (K2, 0.1100 wt%) ที่ผ่านการเชื่อมทิกพัลส์ ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ครั้งที่ 2.....87
ง.6	เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ (K2, 0.1100 wt%) ที่ผ่านการเชื่อมทิกพัลส์ ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ครั้งที่ 3.....87
ง.7	เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ (K3, 0.2300 wt%) ที่ผ่านการเชื่อมทิกพัลส์ ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ครั้งที่ 1.....88
ง.8	เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ (K3, 0.2300 wt%) ที่ผ่านการเชื่อมทิกพัลส์ ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ครั้งที่ 2.....88

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ง.9	เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ (K3, 0.2300 wt%) ที่ผ่านการเชื่อมทิกพัลส์ ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ครั้งที่ 3.....89
ง.10	เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ (K4, 0.3400 wt%) ที่ผ่านการเชื่อมทิกพัลส์ ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ครั้งที่ 1.....89
ง.11	เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ (K4, 0.3400 wt%) ที่ผ่านการเชื่อมทิกพัลส์ ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ครั้งที่ 2.....90
ง.12	เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ (K4, 0.3400 wt%) ที่ผ่านการเชื่อมทิกพัลส์ ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ครั้งที่ 3.....90
ง.13	เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ (K1, 0.0018 wt%) ที่ผ่านการจำลองเชื่อม ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ครั้งที่1.....91
ง.14	เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ (K1, 0.0018 wt%) ที่ผ่านการจำลองเชื่อม ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ครั้งที่2.....91
ง.15	เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ (K1, 0.0018 wt%) ที่ผ่านการจำลองเชื่อม ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ครั้งที่3.....92
ง.16	เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ (K2, 0.1100 wt%) ที่ผ่านการจำลองเชื่อม ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ครั้งที่1.....92





# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญของงานวิจัย

เหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ เป็นเหล็กกล้าไร้สนิมที่มักจะเลือกใช้งานแทนเหล็กกล้าไร้สนิมตระกูล 304 และ 316 ในกรณีที่ต้องการความต้านทานการกัดกร่อนสูงกว่าและราคาไม่แพง เนื่องจากเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ มีโครงสร้างจุลภาคประกอบด้วยเฟส 2 เฟส คือ ออสเตนไนท์ (Austenite) ซึ่งเป็นเฟสที่ให้ความเหนียวและความแกร่งสูง และเดลตาเฟอร์ไรท์ (Delta ferrite) ซึ่งเป็นเฟสที่ให้ความแข็งแรงสูง ในการผลิตเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์จะควบคุมให้มีปริมาณออสเตนไนท์และเดลตาเฟอร์ไรท์ในอัตราส่วนประมาณ 1 : 1 โดยการอบชุบความร้อนเนื่องจากทำให้เหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์มีสมบัติที่ดีทั้งในด้านความแข็งแรงและความต้านทานการกัดกร่อน ซึ่งจำเป็นอย่างมากสำหรับอุตสาหกรรมเคมีหรือปิโตรเคมีที่กระบวนการผลิตอาจอยู่ในสภาวะที่มีการกัดกร่อนอยู่ตลอดเวลาหรืออยู่ในช่วงอุณหภูมิใช้งานสูง

ในบางกรณีการขึ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ ต้องใช้การเชื่อมเพื่อประกอบเป็นอุปกรณ์เครื่องมือ จุดที่เชื่อมมักเป็นจุดที่ก่อให้เกิดความเสียหาย เนื่องจากภายหลังการเชื่อมบริเวณกระทบร้อน (heat-affected zone, HAZ) และเนื้อเชื่อม (weld) มักมีปริมาณเฟสออสเตนไนท์และเดลตาเฟอร์ไรท์ต่ำกว่า 1:1 โดยมีปริมาณเดลตาเฟอร์ไรท์เพิ่มขึ้น แม้จะใช้ลวดเชื่อมที่มีส่วนผสมเคมีเหมือนกับโลหะพื้น ส่งผลให้สมบัติทางกลและความต้านทานการกัดกร่อนลดลงแนวทางหนึ่งในการรักษาอัตราส่วนของออสเตนไนท์และเดลตาเฟอร์ไรท์ให้อยู่ที่ประมาณ 1 : 1 ทำได้โดยการผสมไนโตรเจน เพราะไนโตรเจนเป็นธาตุที่ทำให้โครงสร้างออสเตนไนท์มีเสถียรภาพเพิ่มสมบัติทางกล และเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อน [1] อย่างไรก็ตามความต้านทานการกัดกร่อนอาจลดลงได้ถ้าเกิดการตกตะกอนของโครเมียมไนไตรด์ จากการศึกษาของพรพสา [2] เรื่องผลของไนโตรเจนต่อการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ที่ผสมโครเมียม 28% นิกเกิล 7% พบว่าไนโตรเจนเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนแบบรูเข็มอย่างมาก

การศึกษาและวิจัยในที่นี้เป็นงานต่อเนื่อง โดยเป็นการศึกษาผลของปริมาณไนโตรเจนในเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ต่อปริมาณโครงสร้างเดลตาเฟอร์ไรท์ โครเมียมไนไตรด์ และความต้านทานการกัดกร่อนของแนวเชื่อมทิกทาลส์และเหล็กที่ผ่านการจำลองเชื่อม เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ผสมไนโตรเจนสูงต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 ศึกษาผลของปริมาณไนโตรเจนต่อปริมาณโครงสร้างเดลตาเฟอร์ไรท์ของแนวเชื่อมทิกพัลส์ และเหล็กที่ผ่านการจำลองเชื่อม เหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ที่มีส่วนผสม โครเมียม 28 เปอร์เซ็นต์ นิกเกิล 7 เปอร์เซ็นต์ และไนโตรเจน 0.0018-0.3400 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

1.2.2 ศึกษาความต้านทานการกัดกร่อน ของแนวเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ที่ผ่านการเชื่อมทิกพัลส์ และผ่านการจำลองเชื่อม ในสารละลายไฮเดียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

## 1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1.3.1 ตรวจสอบปริมาณโครงสร้างเดลตาเฟอร์ไรท์ในบริเวณเนื้อเชื่อม แนวการหลอมเหลว และบริเวณกระทบร้อนของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ที่ผสมโครเมียม 28 เปอร์เซ็นต์ นิกเกิล 7 เปอร์เซ็นต์ และไนโตรเจน 0.0018, 0.1100, 0.2300 และ 0.3400 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการเชื่อมด้วยวิธีทิกพัลส์ และผ่านการจำลองเชื่อม ด้วยวิธีหาปริมาณทางโลหะวิทยา

1.3.2 วัดเส้นโค้งโพลาไรเซชัน (polarization curve) ของแนวเชื่อมทิกพัลส์ เหล็กที่ผ่านการจำลองเชื่อม ในสารละลายไฮเดียมคลอไรด์ 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

1.3.3 แปลความหมายจากเส้นโพลาไรเซชันที่วัดได้เป็นความหมายการกัดกร่อน เพื่อศึกษาผลของไนโตรเจนต่อการกัดกร่อนของชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมทิกพัลส์ และเหล็กที่ผ่านการจำลองเชื่อม

1.3.4 วิเคราะห์ และสรุปผล

## 1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

1.4.1 ทราบถึงผลของไนโตรเจนต่อปริมาณโครงสร้างเดลตาเฟอร์ไรท์ การตกตะกอนของโครเมียมไนไตรด์ ความต้านทานการกัดกร่อนของแนวเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ที่ผสมโครเมียม 28 เปอร์เซ็นต์ นิกเกิล 7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

1.4.2 เป็นข้อมูลทางโลหะวิทยา สำหรับพัฒนาการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ที่  
ผสมไนโตรเจนสูง



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 2

### ปริทรรศน์วรรณกรรม

#### 2.1 เหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ [1]

##### 2.1.1 ส่วนผสมเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์

โดยทั่วไปเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์แบ่งเป็น 2 เกรดคือ เกรดทั่วไป (general grade) และเกรดพิเศษ (super grade) มีส่วนผสมดังแสดงในตาราง 2.1

ตารางที่ 2.1 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์โดยทั่วไป

เกรด	ส่วนผสม (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)			
	Cr %	Ni %	Mo %	N %
ทั่วไป	~ 22-25	~3-4	~2	~0.1-0.2
พิเศษ	~25-27	~7-8	~3	~0.2-0.3

เหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์จะประกอบด้วยโครงสร้าง 2 เฟสคือเดลตาเฟอร์ไรท์และออสเทนไนท์ โดยมีสัดส่วนประมาณ 1:1 เพื่อให้มีสมบัติทางกล และความต้านทานการกัดกร่อน นอกจากนี้ยังได้มีการพัฒนาเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ เพื่อให้มีความต้านทานการกัดกร่อนและสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น โดยการผสมธาตุต่าง ๆ ดังแสดงในตาราง 2.2

ตารางที่ 2.2 ส่วนผสมเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ที่กำลังพัฒนาให้มีความต้านทานการกัดกร่อนและสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น [1]

Composition (%)							Application
N	Ni	Cr	Mo	Cu	Mn	Si	
0.10	4.00	23.00	0.20	1.50	1.50	0.50	Improved machinability, strength
0.40	2.50	22.00	2.20	-	7.00	0.50	Low Ni; structural stability in HAZ
0.30	6.50	25.00	4.00	1.40	1.50	0.50	High Mo, N; improved corrosion resistance
0.30	7.00	27.00	3.50	1.40	1.50	0.50	High Cr, N; improved corrosion resistance
0.15	5.00	22.00	0.20	-	1.50	2.40	High Si; corrosion abrasion resistance

### 2.1.2 สมบัติเชิงกลของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์

สมบัติเชิงกลของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์บางเกรดแสดงอยู่ในตาราง 2.3

ตารางที่ 2.3 สมบัติเชิงกลของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์บางเกรด [1]

เกรด	0.2% YS (MPa)	UTS (MPa)	% El	KCV (daJ/cm <sup>2</sup> )	% เฟอร์ไรท์
Z3 CND 23-4AZ	>400	>600	>25	>140	~50
Z3 CND 22-5AZ	>480	>680	>25	>140	~50
Z3 CNDU 22-7	>380	>20	>25	>100	~50

หมายเหตุ: daJ/cm<sup>2</sup> = เดคาจูลต่อตารางเซ็นติเมตร

จากตาราง 2.3 จะเห็นว่าเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ มีค่าความเค้นแรงดึงจุดครากและความเค้นแรงดึงสูง และยังมีค่าความเหนียวที่ไม่ต่ำเกินไป ซึ่งเป็นสมบัติที่ดีของโลหะผสมสองเฟส โดยเฟสเฟอร์ไรท์จะเป็นเฟสที่ให้ความแข็งแรงสูง เฟสออสเทนไนท์เป็นเฟสที่ให้ความเหนียวและความแกร่งสูง จากการเปรียบเทียบโดยประมาณในตาราง 2.4 ซึ่งแสดงสมบัติเชิงกลที่เปลี่ยนไปตามปริมาณเฟอร์ไรท์ พบว่าการมีปริมาณเฟสเฟอร์ไรท์มากขึ้น ค่าความเค้นแรงดึงจุดครากและความเค้นแรงดึงสูงสุดจะมีค่าเพิ่มขึ้นแต่ค่าความแกร่งและเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ลดลง

ตารางที่ 2.4 สมบัติที่เปลี่ยนไปตามปริมาณเฟอร์ไรท์ [1]

เกรด	% [α] Max	0.2% YS	UTS (MPa)	%El	KCV J/cm <sup>2</sup>
ZCN 18-10 (AISI304L)	0	220	590	50	200
Z3 CNDU 21-8	65	350	670	35	180
Z5 CNDU 26-6	80	800	850	20	100

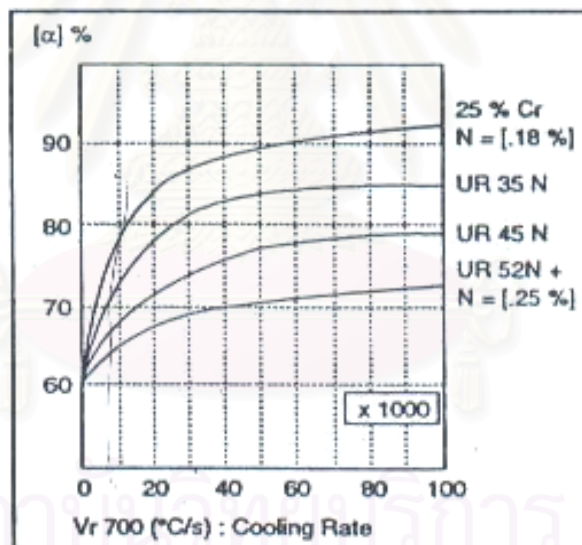


## 2.2 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคที่บริเวณกระทบบร้อนของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ [1]

การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างที่บริเวณกระทบบร้อนของการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ จะเกิดได้ 2 กรณี คือ

1. การเพิ่มปริมาณเฟสเดลตาเฟอร์ไรท์ เพราะบริเวณกระทบบร้อนมีอัตราการเย็นตัวสูง จึงมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจากเดลตาเฟอร์ไรท์เป็นออสเทนไนท์เกิดขึ้นได้น้อย ผลของอัตราการเย็นตัวต่อปริมาณเฟสเฟอร์ไรท์แสดงดังรูปที่ 2.1

2. การสลายของเฟอร์ไรท์บางส่วนเกิดเป็นสารประกอบเชิงโลหะ (intermetallic compound) ซึ่งอาจทำให้เกิดการตกตะกอนของคาร์ไบด์ (carbide) หรือ ไนไตรด์ (nitride) โดยเฉพาะในช่วงที่มีการให้ความร้อนซ้ำ (reheat) ดังนั้นจึงไม่ควรใช้พลังงานการเชื่อมสูง (heat input)



รูปที่ 2.1 ปริมาณเฟอร์ไรท์สูงสุดที่บริเวณกระทบบร้อนที่อัตราการเย็นตัวต่าง ๆ วัดโดยวิธีหาปริมาณทางโลหะวิทยา Vr700 = อัตราการเย็นตัวจากอุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส [1]

นอกจากนี้รูปที่ 2.1 แสดงให้เห็นผลของปริมาณไนโตรเจนที่ผสมอยู่ในเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ การมีปริมาณไนโตรเจนผสมอยู่สูงทำให้บริเวณกระทบบร้อนมีปริมาณเดลตาเฟอร์ไรท์ต่ำ เพราะไนโตรเจนจะเลื่อนอุณหภูมิการเปลี่ยนเฟสจากออสเทนไนท์เป็นเฟอร์ไรท์ให้สูงขึ้น

## 2.3 ผลของไนโตรเจนต่อความต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิม

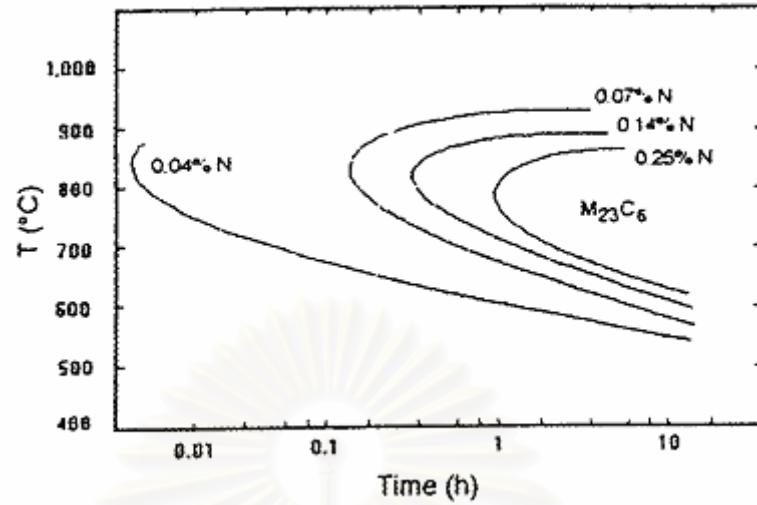
ไนโตรเจนนอกจากเป็นธาตุผสมในเหล็กกล้าไร้สนิมเพื่อเพิ่มความแข็งแรงจากกลไกการละลายแบบแทรก (interstitial solid solution) [1] และเพิ่มความต้านทานการเสียดสี (wear resistance) จากกลไกการเกิดสารประกอบไนไตรด์แล้ว ไนโตรเจนยังมีบทบาทสำคัญในการเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิม ทั้งความต้านทานการกัดกร่อนทั่วไป (general corrosion) การกัดกร่อนแบบรูเข็ม (pitting corrosion) [3-5] การกัดกร่อนภายในซอก (crevice corrosion) [6] และการกัดกร่อนที่มีความเค้น (stress corrosion cracking) [7] นอกจากนี้ไนโตรเจนยังเป็นธาตุที่ทำให้เสถียรภาพแก่เฟสออสเทนไนท์ (austenite stabilizer) [1] และมีผลต่อการเกิดเซนซิไทเซชัน (sensitization) ของเหล็กกล้าไร้สนิมอีกด้วย

นักวิจัยหลายกลุ่มได้ค้นคว้าและเสนอบทบาทต่างๆ ไปของไนโตรเจนต่อคุณสมบัติ การกัดกร่อนดังต่อไปนี้

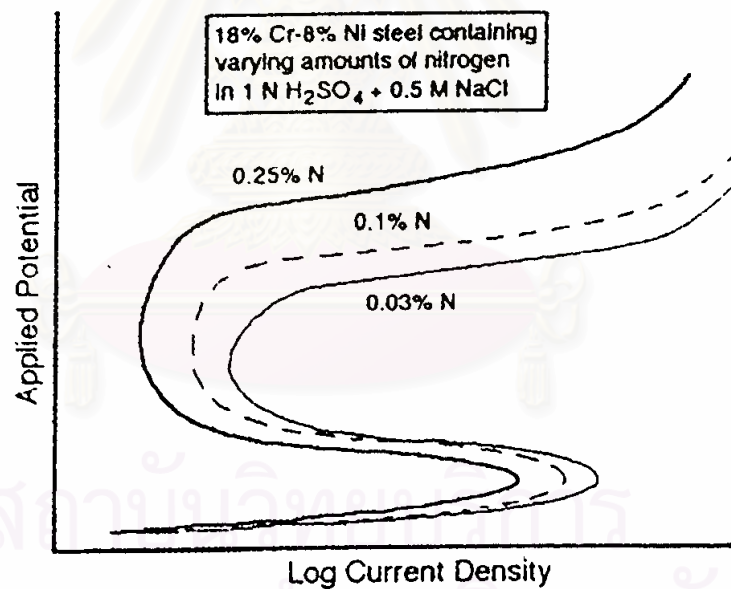
P.R. Levey และ A. Van Benekorm [8] ศึกษาผลของไนโตรเจนในเหล็กกล้าไร้สนิม ออสเทนนิติกเกรด 304 ต่อความต้านทานการกัดกร่อน โดยไนโตรเจนมีผลในการชะลอความเร็วในการเกิดเฟสที่สอง เช่น ไค (chi) และ ซิกมา (sigma) ไนโตรเจนจะชะลอการตกผลึกของสารประกอบโลหะคาร์ไบด์ ( $M_{23}C_6$ ) ดังแสดงในรูปที่ 2.2 เมื่อไนโตรเจนเพิ่มขึ้นถึง 0.14 % จะชะลอการเกิดเซนซิไทเซชัน ผู้วิจัยเสนอว่ามีการตกผลึกของโครเมียมไนไตรด์ ( $Cr_2N$ ) อย่างชัดเจนเมื่อมีไนโตรเจนมากกว่า 0.14 % แต่ถ้าปริมาณไนโตรเจนมากกว่านี้จะเป็นผลเสียเนื่องจากการขาดโครเมียมในบางพื้นที่ (localized chromium depleted zone) เพราะการตกผลึกของสารประกอบโลหะคาร์ไบด์หรือโลหะไนไตรด์

นอกจากนี้ไนโตรเจนยังมีผลในการลดอัตราการกัดกร่อนทั่วไป (general corrosion) ในกรดเข้มข้นที่มีคลอไรด์ผสมอยู่ เช่น กรดซัลฟูริกที่ผสมด้วยไฮเดียมคลอไรด์ โดยรูปที่ 2.3 แสดงเส้นโค้งโพลาไรเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 ในสารละลายกรดซัลฟูริก 1 โมลต่อลิตร และไฮเดียมคลอไรด์ 0.5 โมลต่อลิตร พบว่าไนโตรเจนลดความหนาแน่นกระแสวิกฤตของการเกิดพาสสิเวชัน ( $\text{critical density-}i_{\text{crit}}$ ) นอกจากนี้ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็ม (pitting potential) สูงขึ้นเมื่อไนโตรเจนเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามไนโตรเจนไม่มีผลต่อศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนอิสระ (free corrosion potential) โดยผู้ทำการทดลองเสนอว่าไนโตรเจนปรับปรุงพาสสิวิตีในสารละลาย





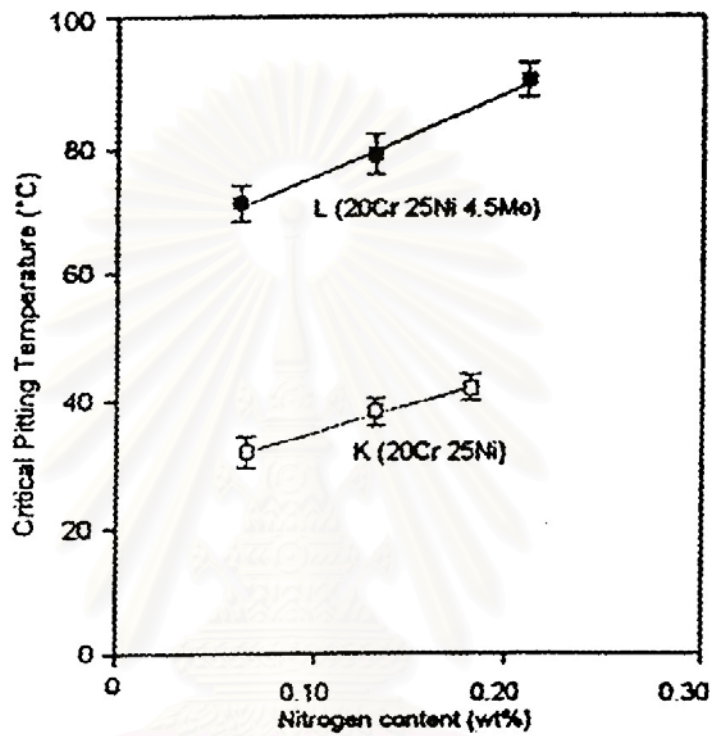
รูปที่ 2.2 ผลของไนโตรเจนต่อเวลาการตกผลึกของสารประกอบคาร์ไบด์ ( $M_{23}C_6$ ) [8]



รูปที่ 2.3 ผลของไนโตรเจนต่อเส้นโค้งโพลาไรเซชัน [8]

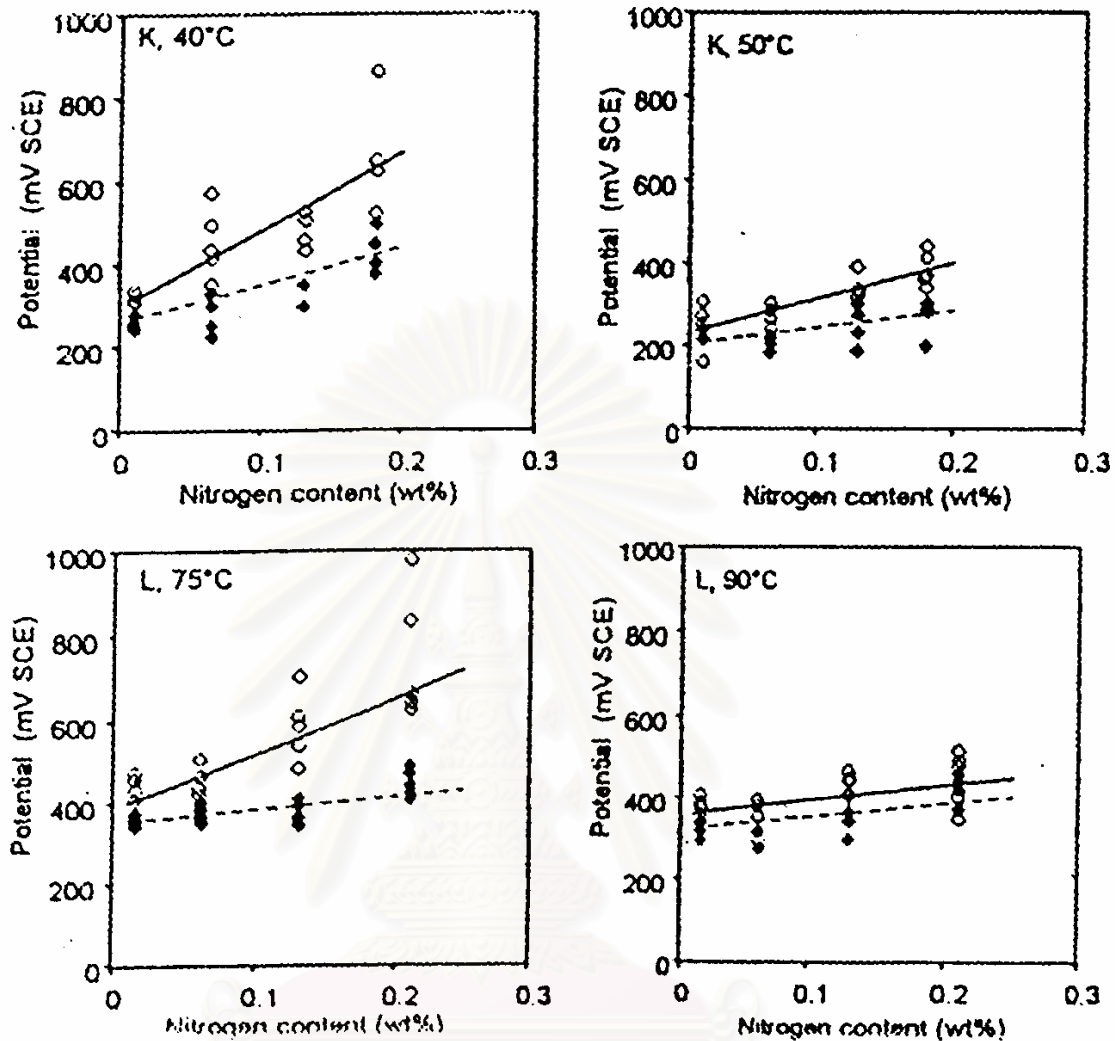
R. F. A. Jargelius-Petterson [9] ทดสอบเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดออสเทนนิติกที่มีส่วนผสม 20 % Cr-25 % Ni-0.2%N ไม่ผสมโมลิบดีนัม (K) และผสมโมลิบดีนัม (L) โดยผลการทดลองแสดงในรูปที่ 2.4 และ 2.5

ในรูปที่ 2.4 พบว่าเมื่อไนโตรเจนเพิ่มขึ้น อุณหภูมิการกัดกร่อนแบบรูเข็มก็สูงขึ้นเมื่อทดสอบในสารละลายไฮเดียมคลอไรด์ 0.5 โมลต่อลิตร โดยบังคับให้มีศักย์ไฟฟ้า 600 มิลลิโวลต์ (SCE)



รูปที่ 2.4 อุณหภูมิวิกฤติการกัดกร่อนแบบรูเข็มในสารละลายไฮเดียมคลอไรด์ 0.5 โมลต่อลิตร ที่ 600 มิลลิโวลต์ (SCE) [9]

ส่วนรูปที่ 2.5 แสดงค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็ม (pitting potential) ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ของเหล็กเกรดไม่ผสมโมลิบดีนัม (K) และผสมโมลิบดีนัม (L) พบว่ามีแนวโน้มที่เหมือนกัน คือ การเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนแบบรูเข็มเพิ่มขึ้นเมื่อไนโตรเจนเพิ่มขึ้น แม้ว่าผลต่อการกัดกร่อนจะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นก็ตาม

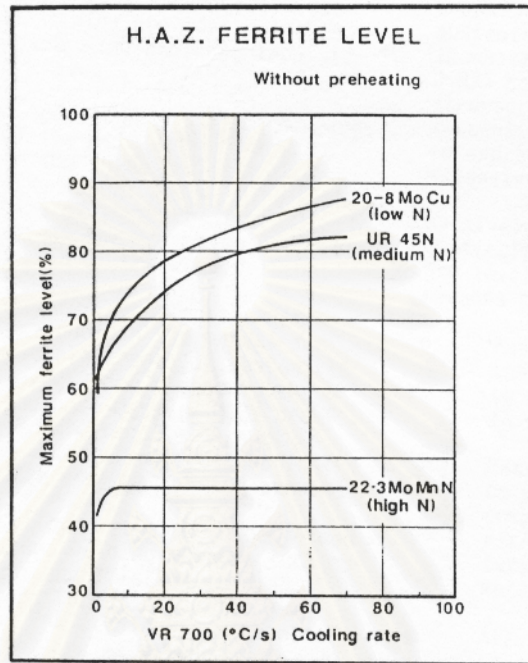


รูปที่ 2.5 ศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็มที่อุณหภูมิต่าง ๆ แสดงจุดสุดท้ายของศักย์ไฟฟ้าการแตกตัวของฟิล์ม (จุดเปิด) และศักย์ไฟฟ้าการเกิดรีพาสซิเวชัน (จุดปิด) [9]

## 2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

B. Bonnefois, P. Soullignac และ D. Catelin [10] ได้รวบรวมประโยชน์ของไนโตรเจนในการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ และพบว่าในรอยเชื่อมของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์จะมีปริมาณเดลตาเฟอร์ไรต์สูงกว่าโลหะพื้น (base metal) แม้ในการเชื่อมจะใช้ลวดเชื่อมที่มีส่วนผสมเคมีเหมือนกับโลหะพื้น ในการทดลองเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ที่ไม่มีไนโตรเจนผสมเกรด 20-8 MoCu และเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์เกรดใหม่ 22-3 Mo Mn N ที่มีปริมาณไนโตรเจนผสมสูง พบว่าเมื่อเชื่อมเหล็กทั้งสองชนิดและให้เย็นตัวลงด้วยอัตราการเย็นตัวที่เท่ากัน

เหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ที่มีปริมาณไนโตรเจนผสมสูง จะมีปริมาณเดลตาเฟอร์ไรท์ที่บริเวณ  
 กระบร้อนต่ำกว่าเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ที่มีปริมาณไนโตรเจนต่ำ ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ปริมาณเฟอร์ไรท์ในบริเวณกระบร้อน ที่อัตราการเย็นตัวต่าง ๆ จากอุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส Vr700 = อัตราการเย็นตัวจากอุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส [10]

นอกจากนี้ไนโตรเจนยังมีประโยชน์ต่อความต้านทานการกัดกร่อนแบบรูเข็มของโลหะพื้น  
 และรอยเชื่อม เพราะไนโตรเจนช่วยเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนแบบรูเข็มในออสเทนไนท์ ที่มี  
 ปริมาณโครเมียมและโมลิบดีนัมละลายอยู่น้อยกว่าเดลตาเฟอร์ไรท์

โดยที่ความต้านทานการกัดกร่อนแบบรูเข็มนั้น สามารถทำนายได้จากสมการความ  
 ต้านทานการกัดกร่อนแบบรูเข็มเทียบเท่า (pitting resistance equivalent number, PRE) โดย  
 แสดงได้ตามสมการ [10]

$$PRE = \% Cr + 3 \% Mo + 16 \% N \quad (2.1)$$

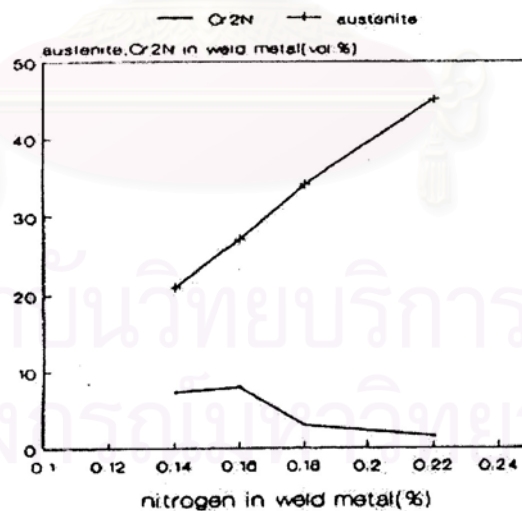
G. Huismann และ H. Hoffmeister [11] ได้ทำการทดลองเชื่อมท่อเหล็กกล้าไร้สนิม  
 ดูเพล็กซ์ที่มีส่วนผสมเคมีดังตารางที่ 2.5 ด้วยเทคนิคการเชื่อมทิกพัลส์

ตารางที่ 2.5 ส่วนผสมเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ที่ใช้ในการทดลองของ G. Huismann และ H. Hoffmeister [11]

%C	%Si	%Mn	%P	%S	%N	%Cr	%Ni	%Mo	%Cu
0.02	0.44	1.48	0.026	0.001	0.16	21.7	6.3	3.1	0.15

ผลการทดลองพบว่า เมื่อใช้ก๊าซปกคลุมรอยเชื่อมที่มีส่วนผสม 70%He 30%Ar รอยเชื่อมจะมีปริมาณไนโตรเจนละลายเพียง 0.15% และในโลหะพื้นละลายเพียง 0.14% เมื่อเพิ่มไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมรอยเชื่อม โดยควบคุมความดันย่อยของก๊าซไนโตรเจนให้อยู่ที่ 7.5 มิลลิบาร์ ทำให้โลหะพื้นและรอยเชื่อมมีไนโตรเจนละลายอยู่ 0.16% เท่ากับชิ้นงานก่อนเชื่อม และเมื่อให้ความดันย่อยของก๊าซไนโตรเจนที่ความดัน 15 และ 30 มิลลิบาร์ รอยเชื่อมมีไนโตรเจนละลายเพิ่มขึ้นเป็น 0.18% และ 0.20-0.22% ตามลำดับ

นอกจากนี้ปริมาณออสเทนไนท์ในรอยเชื่อมจะสัมพันธ์กับปริมาณไนโตรเจนที่ละลายอยู่ การใช้ความดันย่อยของก๊าซไนโตรเจนที่ 30 มิลลิบาร์ จะทำให้มีปริมาณของไนโตรเจนละลายอยู่ในรอยเชื่อม 0.20-0.22% และมีปริมาณออสเทนไนท์ในรอยเชื่อม 40-60%



รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไนโตรเจนในรอยเชื่อมกับปริมาณโครเมียมไนไตรด์และปริมาณออสเทนไนท์ที่พบ [10]

ในรอยเชื่อมและบริเวณกระทบร้อนของรอยเชื่อมจะพบการตกตะกอนของโครเมียมไนไตรด์ ( $C_2N$ ) โดยปริมาณของโครเมียมไนไตรด์จะลดลงเมื่อในรอยเชื่อมมีปริมาณไนโตรเจน

ละลายอยู่มากขึ้น ซึ่งรูปที่ 2.7 แสดงผลของปริมาณไนโตรเจนในรอยเชื่อมต่อปริมาณโครงสร้าง ออสเตนไนท์ และปริมาณโครเมียมไนไตรด์ที่พบในรอยเชื่อม

## 2.5 ความสำคัญของการศึกษาโครงสร้างจุลภาคในรอยเชื่อมของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ ที่มีส่วนผสมโครเมียม 28 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก นิกเกิล 7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

เหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ที่มีส่วนผสมโครเมียม 28 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก นิกเกิล 7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีแนวโน้มในปัจจุบันถูกพัฒนาขึ้นเป็นเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์อีกเกรดหนึ่ง ดังในตารางที่ 2.2 โดยผสมธาตุโครเมียมและไนโตรเจนสูง เพื่อปรับปรุงความต้านทานการกัดกร่อนให้สูงขึ้น โดยปกติการเชื่อมเหล็กเกรดนี้จะทำให้โครงสร้างจุลภาคในเนื้อเชื่อมและบริเวณ กระทั่งร้อนมีปริมาณเดลตาเฟอไรท์สูงขึ้น การผสมไนโตรเจนลงในเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ เป็นแนวทางหนึ่งในการรักษาปริมาณเดลตาเฟอไรท์ในเนื้อเชื่อมอยู่ในระดับที่เหมาะสม เนื่องจาก ไนโตรเจนทำให้คุณสมบัตินี้เปลี่ยนเฟสออสเตนไนท์เป็นเดลตาเฟอไรท์สูงขึ้น แต่ขณะเดียวกัน อาจเกิดสารประกอบโครเมียมไนไตรด์ในเดลตาเฟอไรท์ได้ถ้าปริมาณไนโตรเจนใน เดลตาเฟอไรท์สูงกว่าปริมาณสูงสุดที่ละลายในเดลตาเฟอไรท์ได้ ตะกอนโครเมียมไนไตรด์ทำให้ ความต้านทานการกัดกร่อนลดลง เพราะโครเมียมไนไตรด์ทำให้เกิดบริเวณขาดโครเมียมและฟิล์ม พาสซีฟของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ไม่เสถียร [13] ดังนั้นการศึกษาค้นคว้าผลของไนโตรเจนต่อปริมาณ โครงสร้างเดลตาเฟอไรท์ และความต้านทานการกัดกร่อน ของแนวเชื่อมเหล็กกล้า ไร้สนิมดูเพล็กซ์ที่มีส่วนผสมโครเมียม 28 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก นิกเกิล 7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะเป็นแนวทางในการพัฒนาค้นคว้าและวิจัยเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ต่อไป



### บทที่ 3

#### ขั้นตอนและวิธีดำเนินการทดลอง

##### 3.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- 3.1.1 เครื่องเชื่อมทิกพัลส์ชนิดกระแสไฟฟ้าคงที่ รุ่น Syncope 350 ของบริษัท Miller จำกัด
- 3.1.2 เครื่องจำลองการเชื่อม (welding simulator) ของบริษัท FUJIELECTRONIC จำกัด
- 3.1.3 กล้องจุลทรรศน์ชนิดแสง (optical microscope)
- 3.1.4 ก๊าซอาร์กอนสำหรับปกคลุมรอยเชื่อม
- 3.1.5 เครื่องโพเทนชิโอสเตด รุ่น PGSTAT 20 ของบริษัทอโตแล็บ จำกัด
- 3.1.6 สารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

##### 3.2 เหล็กที่ใช้ในการทดลอง

เหล็ก K1-K4 ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท Nisshin Steel จำกัด ซึ่งผ่านการหลอมและตีขึ้นรูปที่อุณหภูมิประมาณ 1150 องศาเซลเซียส มีส่วนผสมเคมีและปริมาณออกซิเจนไนท์ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมเคมีโดยน้ำหนักและปริมาณออกซิเจนไนท์ของเหล็ก K 1 - K 4 ที่ได้รับจากบริษัท Nissin Steel จำกัด

เหล็ก	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก									% ออกซิเจน ไนท์	
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	N	O		Al
K1	0.008	0.01	<0.01	0.003	0.0007	7.09	28.17	0.0018	0.0057	0.023	~10
K2	0.005	0.02	0.01	0.002	0.0008	7.05	28.15	0.1100	0.0039	0.014	~40
K3	0.007	0.04	0.01	0.002	0.0008	7.05	28.16	0.2300	0.0026	0.022	~52
K4	0.010	0.05	0.02	0.002	0.0010	7.04	28.24	0.3400	0.0035	0.015	~70

เนื่องจากเหล็ก K1-K4 ที่ได้รับการอนุเคราะห์ มีปริมาณออสเตนไนท์ไม่อยู่ในช่วง 40-60 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ซึ่งเป็นช่วงที่เหมาะสมทั้งด้านสมบัติทางกลและการกัดกร่อน จึงต้องผ่านกระบวนการอบชุบความร้อน (heat treatment) ที่อุณหภูมิและเวลาดังแสดงในตารางที่ 3.2 เพื่อปรับให้มีปริมาณเฟสออสเตนไนท์อยู่ประมาณ 40-60 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร เหล็กที่ผ่านการอบชุบความร้อนตามตารางที่ 3.2 เป็นเหล็กตั้งต้นสำหรับใช้ในการทดลองต่อไป

ตารางที่ 3.2 สภาวะการอบชุบความร้อนเป็นเวลา 24 ชั่วโมงแล้วชุบน้ำ เพื่อควบคุมสัดส่วนออสเตนไนท์ของเหล็ก K1-K4

เหล็ก	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ออสเตนไนท์ (เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร)
K1	950	40
K2	1000	51
K3	1050	60
K4	1100	61

### 3.3 ขั้นตอนการทดลอง

#### 3.3.1 การเชื่อมทิกพัลส์

3.3.1.1 เตรียมชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ K1, K2, K3 และ K4 ให้มีขนาด 30x40x15 มม.

3.3.1.2 ทดลองเชื่อมทิกพัลส์ผ่านชิ้นงานในข้อ 3.3.1.1 เหล็ก K1-K4 โดยไม่เติมลวดเชื่อม กำหนดกระแสพื้น (base current) 35 แอมแปร์ กระแสพัลส์ (pulse current) 135 แอมแปร์ ความถี่พัลส์ (pulse frequency) 1.5 /วินาที ความต่างศักย์ 19 โวลต์ ความเร็วการเชื่อม 4.15 มิลลิเมตร/วินาที และใช้ก๊าซอาร์กอนที่มีอัตราการไหล 15 ลิตร/นาที ปกคลุมรอยเชื่อม โดยชิ้นงานที่ถูกเชื่อมเป็นข้อ [11]

#### 3.3.2 การจำลองเชื่อม

3.3.2.1 เตรียมชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ K1, K2, K3 และ K4 ให้มีขนาด 12x12x60 มม.



3.3.2.2 จำลองเชื่อมด้วยเครื่องจำลองเชื่อมโดยใช้อัตราการให้ความร้อน 30 องศาเซลเซียส/วินาที มีเงื่อนไขการจำลองเชื่อม ดังตารางที่ 3.4 จากนั้นปล่อยให้เหล็กเย็นตัวในอากาศ

ตารางที่ 3.4 ข้อกำหนดการจำลองเชื่อมเหล็ก K1-K4

เหล็ก	อัตราการให้ความร้อน (องศาเซลเซียส/วินาที)	อุณหภูมิสูงสุด (องศาเซลเซียส)	ระยะเวลาแช่ที่ อุณหภูมิสูงสุด (วินาที)
K1	30	1300	10
K2	30	1325	10
K3	30	1350	30
K4	30	1375	30

### 3.3.2 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคเหล็กที่ผ่านการเชื่อมทิกพัลส์ และจำลองเชื่อม

3.3.2.1 ชัดผิวหน้าชิ้นงานด้วยกระดาษทรายเบอร์ 80-1200 จากนั้นขัดเงาผิวหน้าด้วยผงอลูมินา

3.3.2.2 กัดผิวหน้าชิ้นงานด้วยสารละลายที่มีส่วนผสม กลีเซอรอล 50% กรดไนตริก 25% กรดไฮโดรคลอริก 25 % โดยปริมาตร ที่อุณหภูมิประมาณ 60 องศาเซลเซียส

3.3.2.3 วัดปริมาณโครงสร้างเดลตาเฟอร์ไรท์และโครเมียมไนไตรด์ ที่บริเวณเนื้อเชื่อม (weld metal) บริเวณแนวหลอมเหลว (fusion line) และบริเวณกระทบร้อน ด้วยวิธีหาปริมาณทางโลหะวิทยา ดังแสดงในภาคผนวก ก

### 3.3.3 การตรวจสอบความต้านทานการกัดกร่อนของแนวเชื่อมทิกพัลส์และเหล็กที่ผ่านการจำลองเชื่อม

3.3.3.1 เตรียมสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

3.3.3.2 ใช้เครื่องพ่นอากาศพ่นลงในสารละลายข้อ 3.3.3.1 เป็นเวลา 5 นาที เพื่อให้อากาศอิมมิดั

3.3.3.3 ควบคุมอุณหภูมิการทดลองให้ได้เท่ากับ 25 องศาเซลเซียส

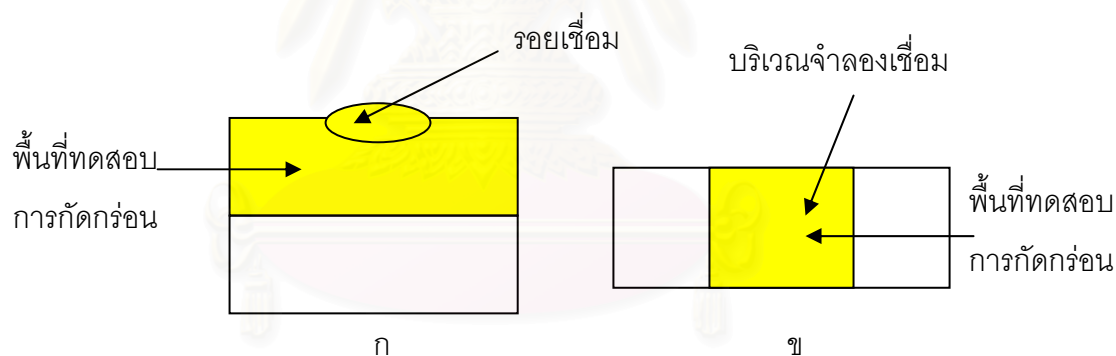
3.3.3.4 แซ่เหล็กลงในสารละลายทดลองที่มีอากาศอิ่มตัวแล้ว โดยให้เหล็กสัมผัสกับสารละลายเป็นพื้นที่ประมาณ 4 ตารางเซนติเมตร พื้นที่ทดสอบเหล็กที่ผ่านการเชื่อมทิกพัลส์และจำลองเชื่อมแสดงดังรูปที่ 3.1 โดยพื้นที่แรงงาเป็นส่วนสัมผัสกับสารละลาย

3.3.3.5 วัดเส้นโพลาริเซชันของชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมทิกพัลส์ และจำลองเชื่อม

3.3.3.6 ทดลองตามสภาวะเดิมอีกอย่างน้อย 3 ครั้ง เพื่อใช้หาค่าเฉลี่ยให้หัวข้อถัดไป

3.3.3.7 วัดค่าต่าง ๆ จากเส้นกราฟที่ได้จากการทดลอง โดยวัดค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (corrosion potential,  $E_{corr}$ ) ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (corrosion current density,  $I_{corr}$ ) ค่าอัตราการกัดกร่อน (corrosion rate,  $R_{mpy}$ ) ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าขณะวัสดุเกิดฟิล์มที่ผิว (passive current density,  $I_p$ ) และค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็ม (pitting potential,  $E_p$ ) ตัวอย่างการหาค่าต่าง ๆ เหล่านี้แสดงในภาคผนวก ค

3.3.3.8 ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคที่ถูกกัดกร่อนแบบรูเข็มด้วยกล้องจุลทรรศน์ชนิดแสง



รูปที่ 3.1 พื้นที่ทดสอบการกัดกร่อน ก.เหล็กที่ผ่านการเชื่อมทิกพัลส์ ข.เหล็กที่ผ่านการจำลองเชื่อม

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและการอภิปราย

#### 4.1 โครงสร้างจุลภาคของเหล็ก K1-K4 ที่ผ่านการเชื่อมทิกพัลส์และการจำลองเชื่อม

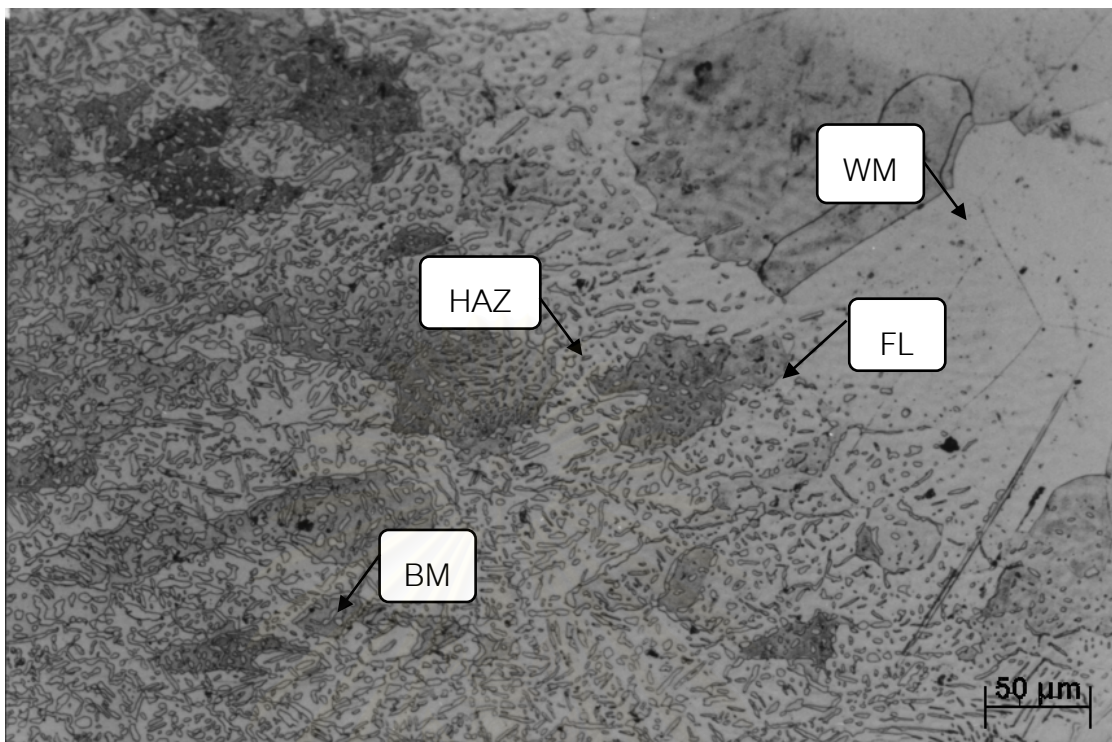
เหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ที่มีส่วนผสมโครเมียม 28 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก นิกเกิล 7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ไนโตรเจน 0.0018, 0.1100, 0.2300 และ 0.3400 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (K1-K4) ที่ผ่านการเชื่อมทิกพัลส์ และผ่านการจำลองเชื่อม พบว่ามีโครงสร้างจุลภาคที่บริเวณเนื้อเชื่อม (weld metal) ที่บริเวณแนวการหลอมเหลว (fusion line) และที่บริเวณกระทบร้อน (Heat Affected Zone) แตกต่างไปจากโลหะพื้น (base metal) รูปที่ 4.1 – 4.4 แสดงโครงสร้างมหภาคบริเวณต่าง ๆ ที่เกิดการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากการเชื่อม และ รูปที่ 4.5-4.8 แสดงโครงสร้างจุลภาคของโลหะพื้นเหล็ก K1- K4 รูปที่ 4.9-4.12 แสดงโครงสร้างที่บริเวณเนื้อเชื่อมของเหล็ก K1-K4 รูปที่ 4.13-4.16 แสดงโครงสร้างจุลภาคที่บริเวณแนวการหลอมเหลวของเหล็ก K1-K4 รูปที่ 4.17-4.20 แสดงโครงสร้างจุลภาคที่บริเวณกระทบร้อนของเหล็ก K1-K4 และรูปที่ 4.21-4.24 แสดงโครงสร้างจุลภาคของเหล็ก K1-K4 ที่ผ่านการจำลองเชื่อม จากรูปที่ 4.1- 4.24 เห็นได้ว่าโครงสร้างจุลภาคที่พบภายหลังการเชื่อมทิกพัลส์และจำลองเชื่อมมีอยู่หลายชนิด มีลำดับตลอดจนกลไกการเกิดแตกต่างกัน โดยเมื่อมีการเย็นตัวโครงสร้าง Grain Boundary Austenite (GBA) จะเกิดขึ้นมาเป็นลำดับแรกโดยโครงสร้าง GBA จะมีการเติบโตตามเกรนเดลตาเฟอร์ไรท์ จากนั้นโครงสร้าง Widmannstätten Austenite (WA) ซึ่งเป็นโครงสร้างที่เกิดและขยายตัวจากด้านข้างของเฟสเดลตาเฟอร์ไรท์พุ่งเข้าสู่ใจกลางเกรน และโครงสร้าง Inter Granular Austenite (IGA) จะเกิดขึ้นเป็นลำดับสุดท้ายโดยเป็นโครงสร้างที่มีขนาดเล็ก และกระจายตัวภายในเดลตาเฟอร์ไรท์ เนื่องจากเป็นโครงสร้างที่ต้องอาศัยแรงขับเคลื่อน (driving force) ในการเกิดสูง [12] นอกจากนี้ยังพบโครงสร้าง Partially Transformed Austenite (PTA) เป็นโครงสร้างออสเตนไนท์ที่เปลี่ยนแปลงเพียงบางส่วนเนื่องจากความร้อน โดยจะพบโครงสร้าง PTA ในเหล็กที่มีไนโตรเจนสูง เพราะไนโตรเจนทำให้อุณหภูมิการเปลี่ยนออสเตนไนท์เป็นเดลตาเฟอร์ไรท์สูงขึ้น [1] ออสเตนไนท์จึงไม่สามารถละลายได้หมดที่อุณหภูมิสูง เพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคจึงขอใช้อักษรย่อดังตารางที่ 4.1 การที่โครงสร้างจุลภาคเหล็ก K1-K4 แตกต่างกันเป็นผลจากปริมาณไนโตรเจนในโลหะพื้นต่างกัน เหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ที่มีไนโตรเจนผสมสูงภายหลังการเชื่อมทิกพัลส์และจำลองเชื่อม ปริมาณออสเตนไนท์ในเนื้อเชื่อม

สูงกว่าเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ที่มีปริมาณไนโตรเจนต่ำ เนื่องจากไนโตรเจนช่วยรักษาเสถียรภาพของออสเตนไนท์ที่อุณหภูมิสูง และทำให้อัตราการเกิดออสเตนไนท์ภายหลังการเชื่อมและจำลองเชื่อมสูงขึ้น [1,8] ซึ่งผลของไนโตรเจนต่อโครงสร้างจุลภาคของเหล็ก K1-K4 จะอธิบายโดยละเอียดในหัวข้อต่อไป

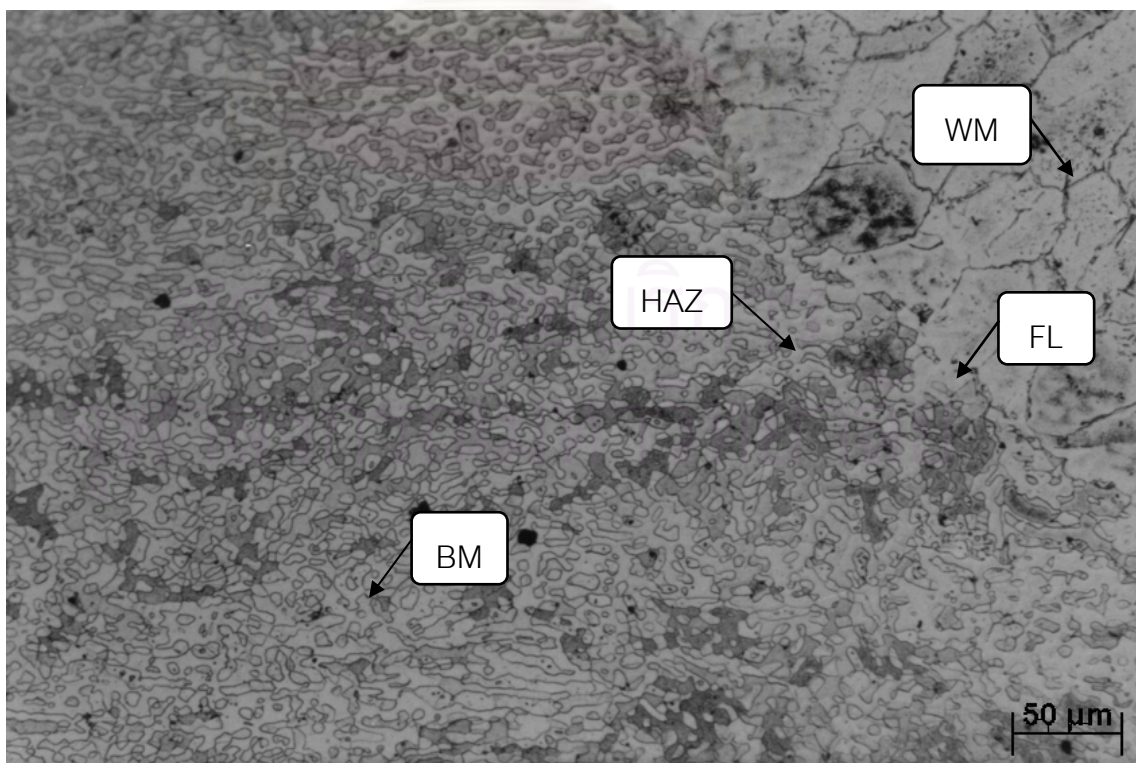
ตารางที่ 4.1 อักษรย่อของบริเวณและโครงสร้างจุลภาคที่พบภายหลังการเชื่อมทิกพัลส์ และการจำลองเชื่อม

สัญลักษณ์ที่ใช้	ความหมาย
BM	โลหะพื้น
WM	เนื้อเชื่อม
FL	แนวการหลอมเหลว
HAZ	บริเวณกระทบร้อน
GBA	Grain Boundary Austenite
IGA	Intergranular Austenite
WA	Widmannstatten Austenite
PTA	Partially transformed Austenite
$\alpha$	โครงสร้างเฟอร์ไรท์
$\gamma$	โครงสร้างออสเตนไนท์



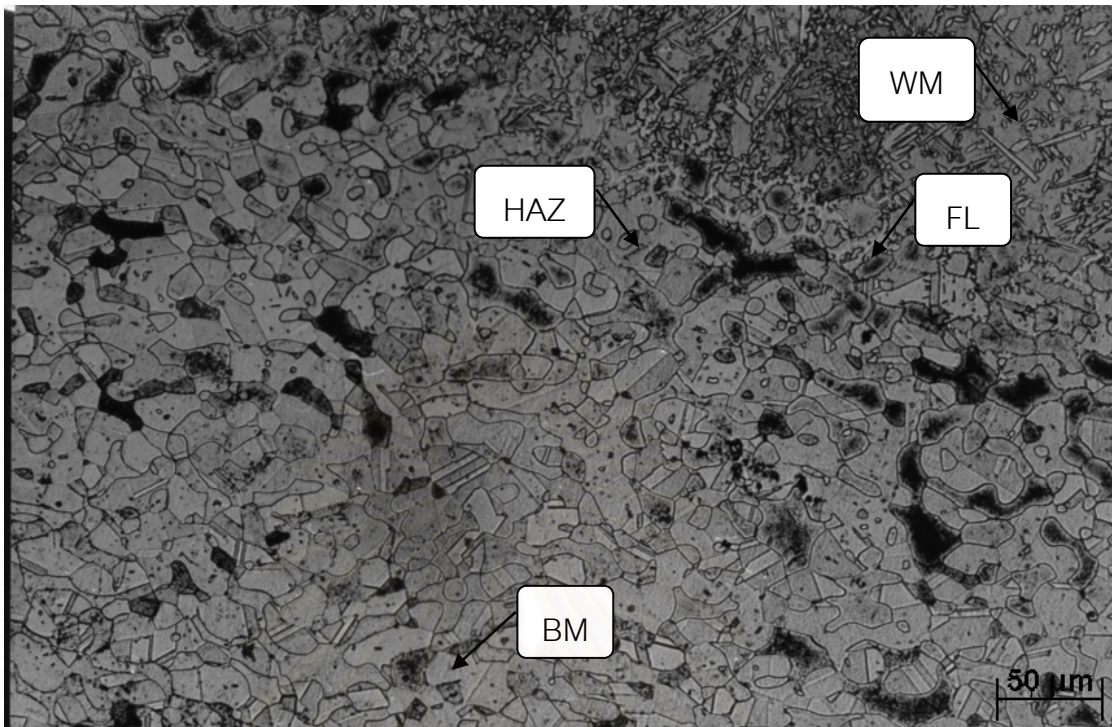


รูปที่ 4.1 โครงสร้างมหภาคที่บริเวณต่าง ๆ ของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ K1 (0.0016 %N) ภายหลังจากเชื่อมทิกพัลส์

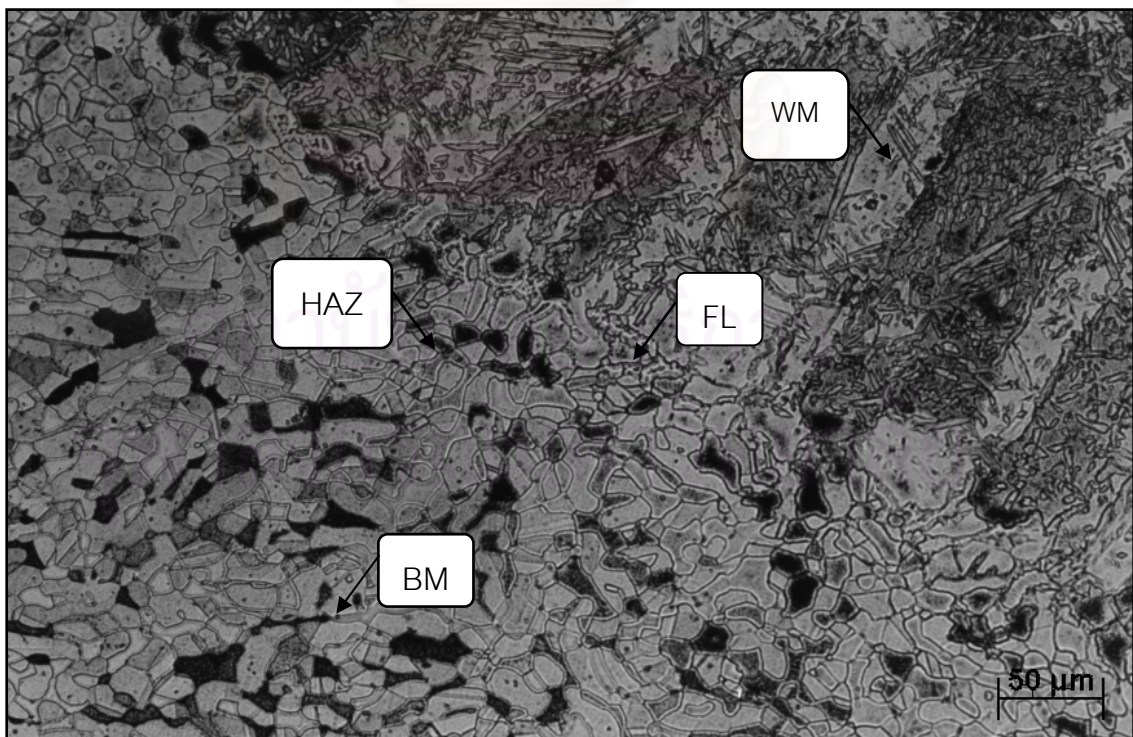


รูปที่ 4.2 โครงสร้างมหภาคที่บริเวณต่าง ๆ ของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ K2 (0.1100%N) ภายหลังจากเชื่อมทิกพัลส์

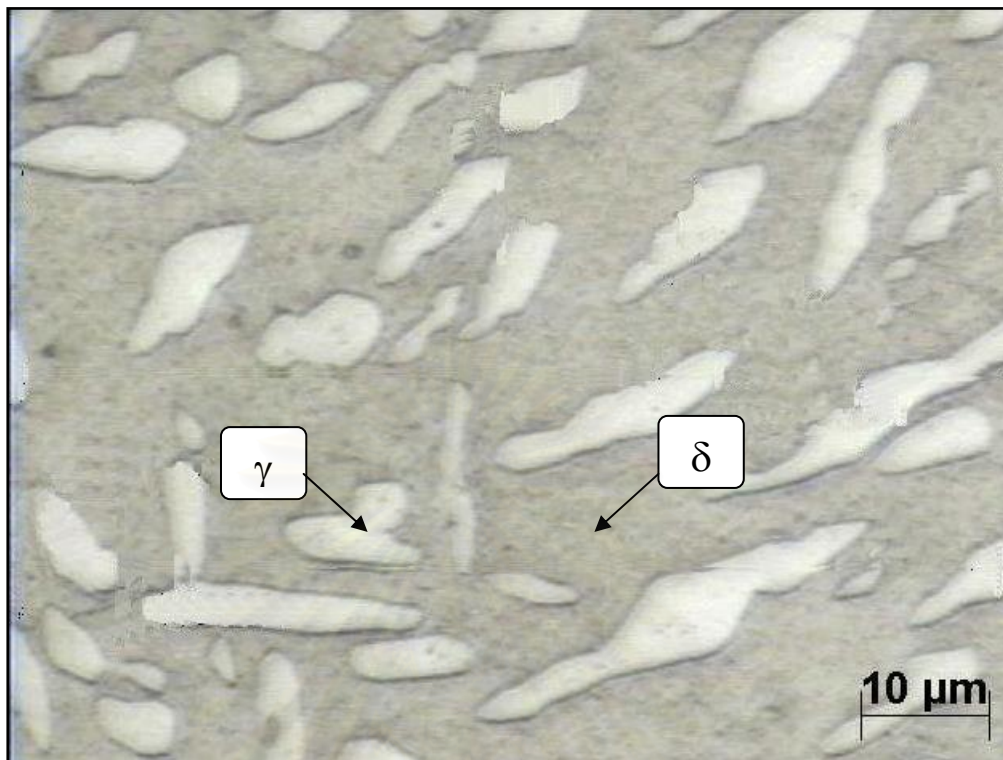




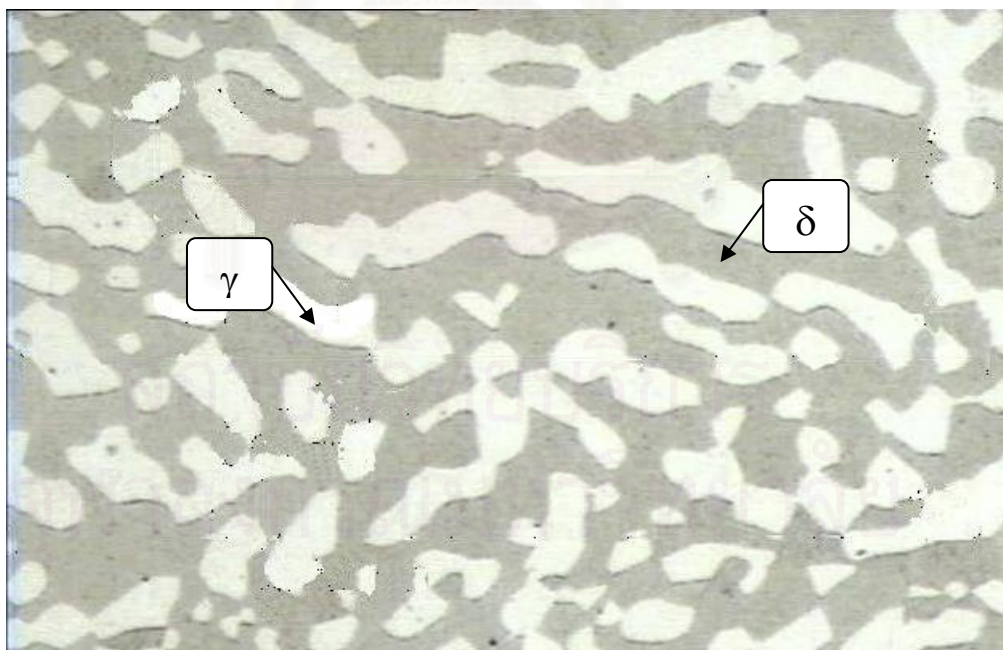
รูปที่ 4.3 โครงสร้างมหภาคที่บริเวณต่าง ๆ ของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ K3 (0.2300 %N) ภายหลังจากเชื่อมทิกพัลส์



รูปที่ 4.4 โครงสร้างมหภาคที่บริเวณต่าง ๆ ของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ K4 (0.3400 %N) ภายหลังจากเชื่อมทิกพัลส์

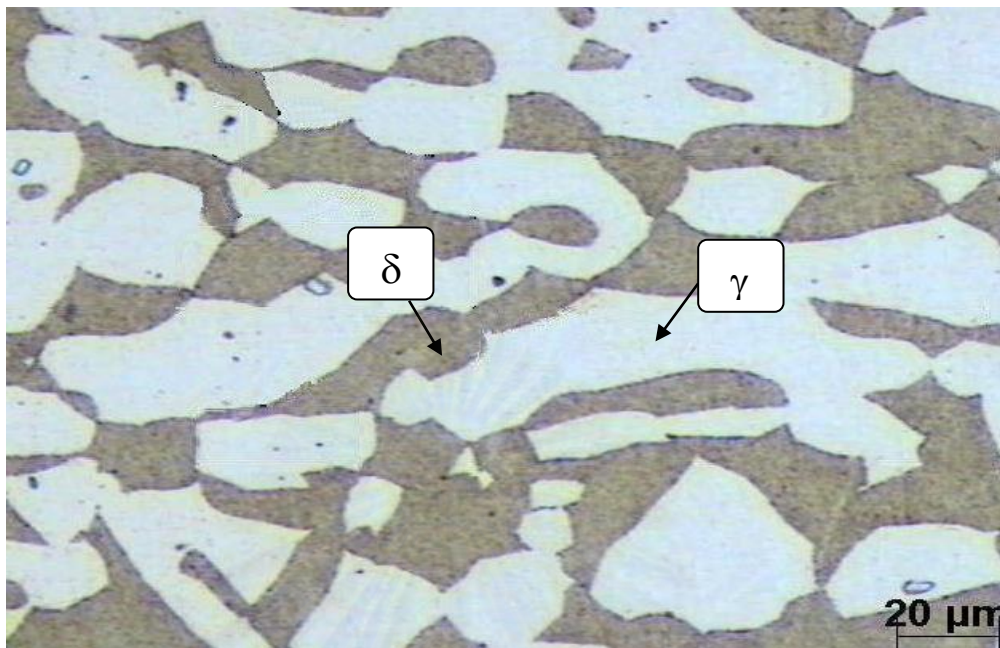


รูปที่ 4.5 โครงสร้างจุลภาคของบริเวณโลหะพื้นเหล็ก K1 ที่ผ่านการเชื่อมทิกพัลส์

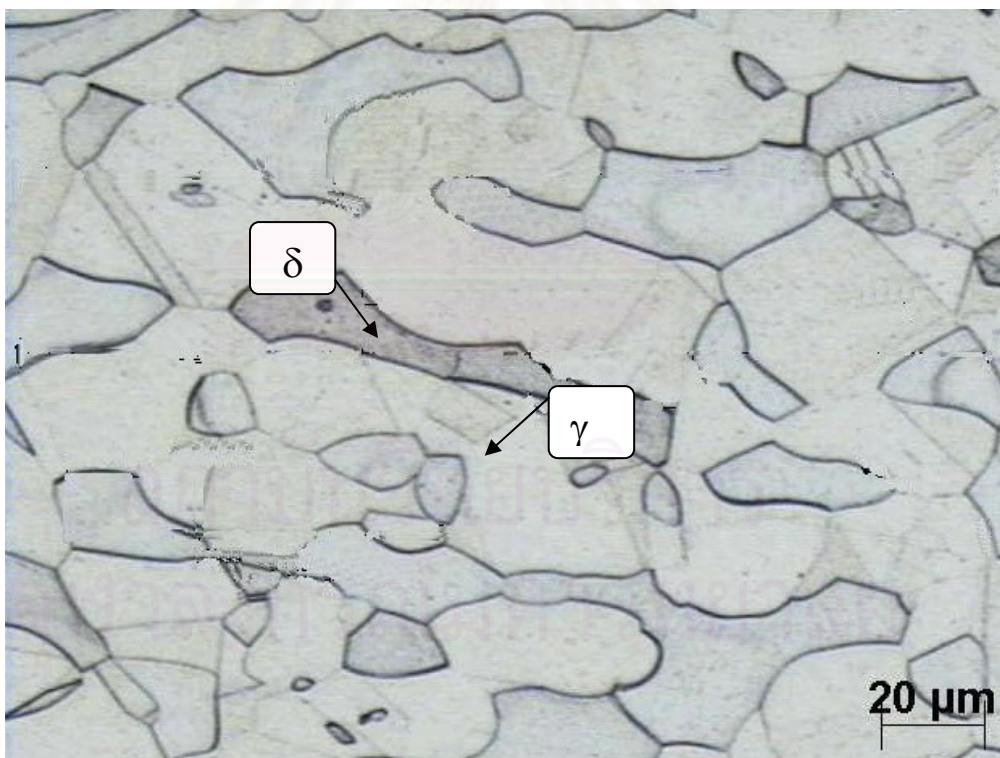


รูปที่ 4.6 โครงสร้างจุลภาคของบริเวณโลหะพื้นเหล็ก K2 ที่ผ่านการเชื่อมทิกพัลส์



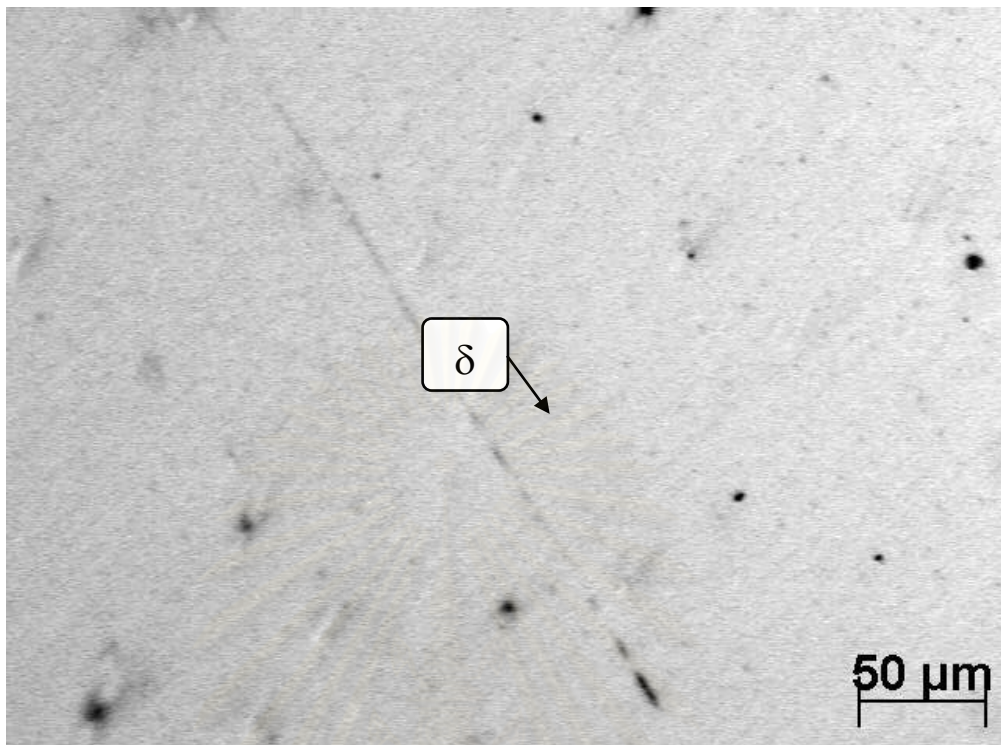


รูปที่ 4.7 โครงสร้างจุลภาคของบริเวณโลหะพื้นเหล็ก K3 ที่ผ่านการเชื่อมทิกพัลส์

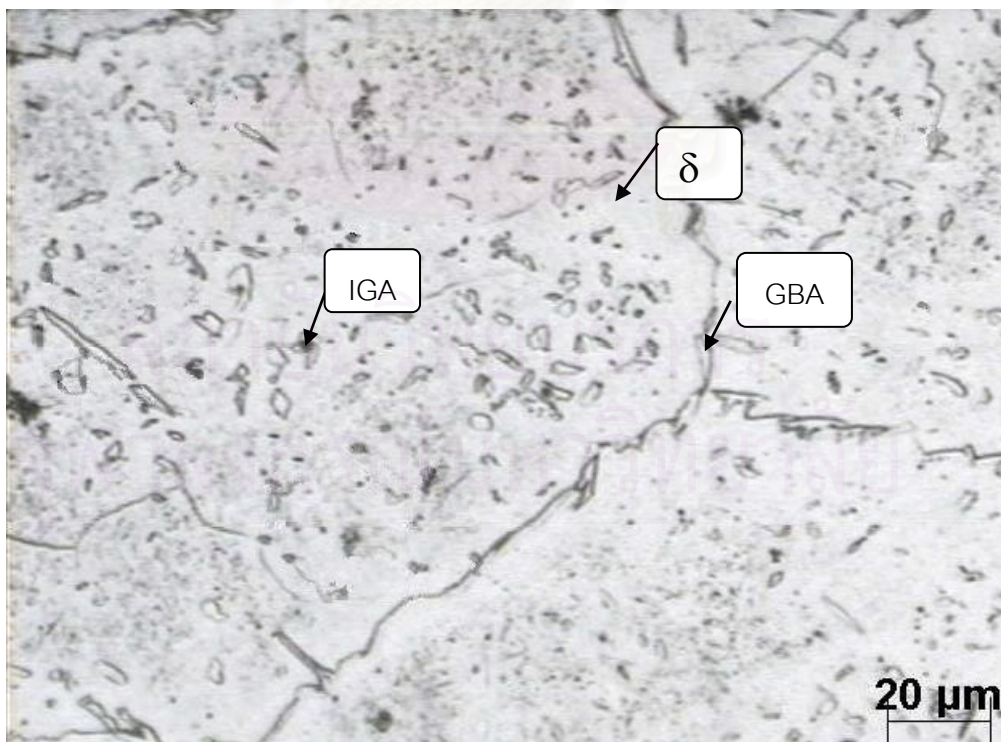


รูปที่ 4.8 โครงสร้างจุลภาคของบริเวณโลหะพื้นเหล็ก K4 ที่ผ่านการเชื่อมทิกพัลส์

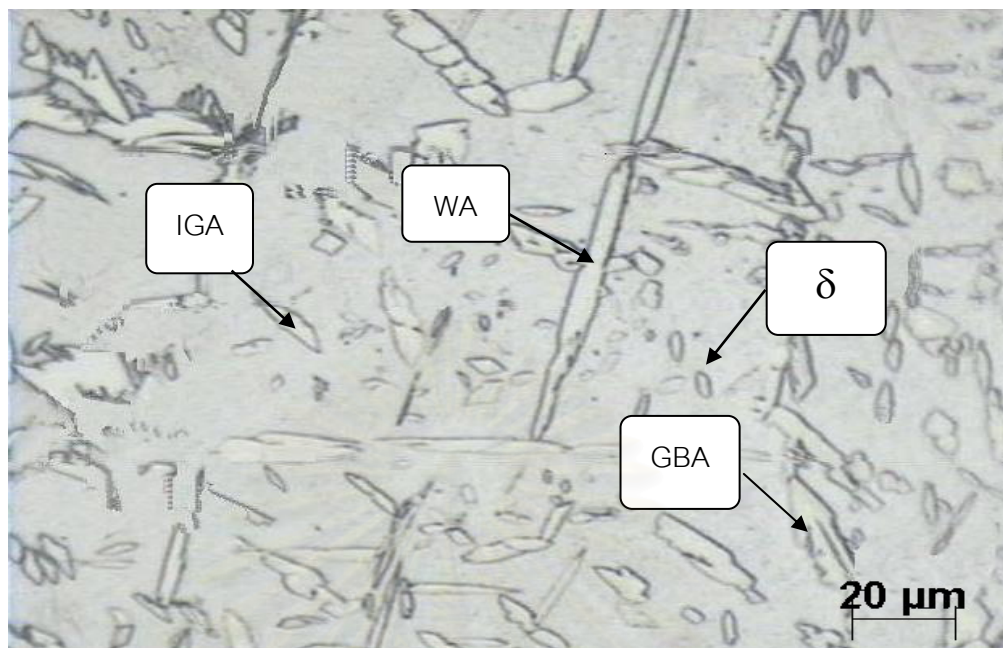




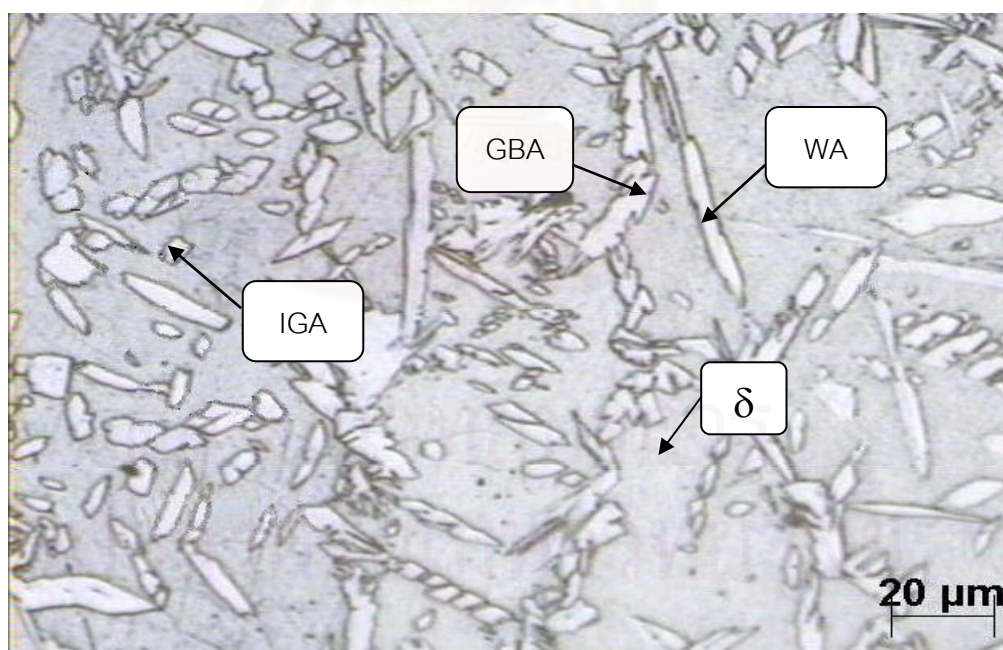
รูปที่ 4.9 โครงสร้างจุลภาคของบริเวณเนื้อเชื่อมเหล็ก K1 ที่ผ่านการเชื่อมทิกพัลส์



รูปที่ 4.10 โครงสร้างจุลภาคของบริเวณเนื้อเชื่อมเหล็ก K2 ที่ผ่านการเชื่อมทิกพัลส์

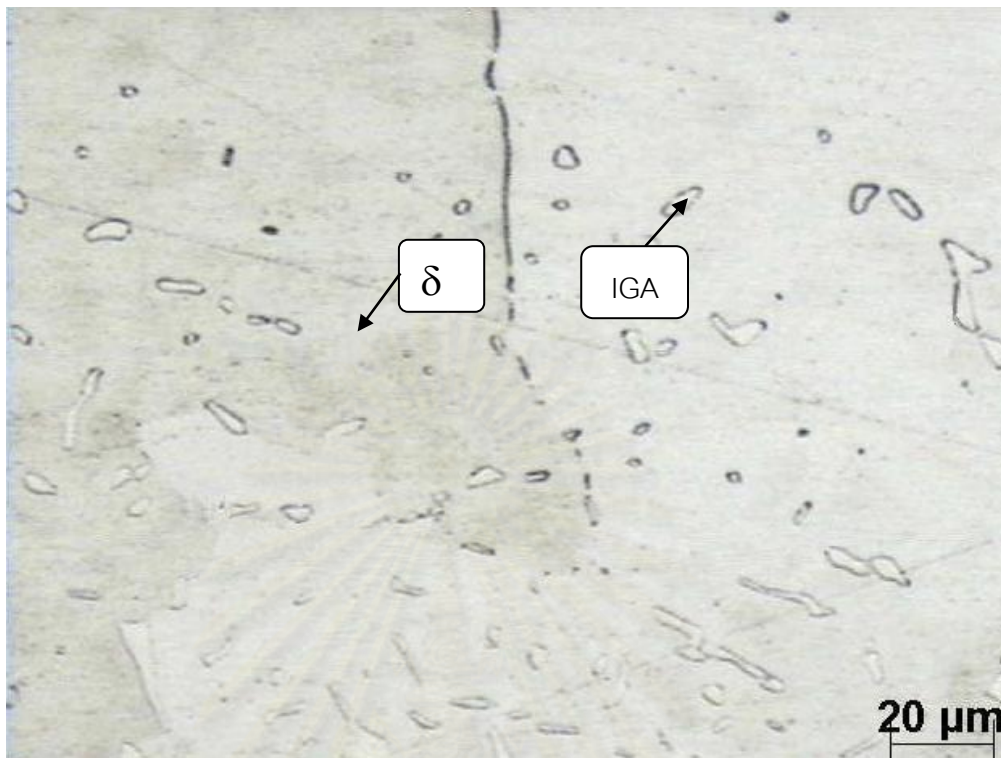


รูปที่ 4.11 โครงสร้างจุลภาคของบริเวณเนื้อเชื่อมเหล็ก K3 ที่ผ่านการเชื่อมทิกพัลส์

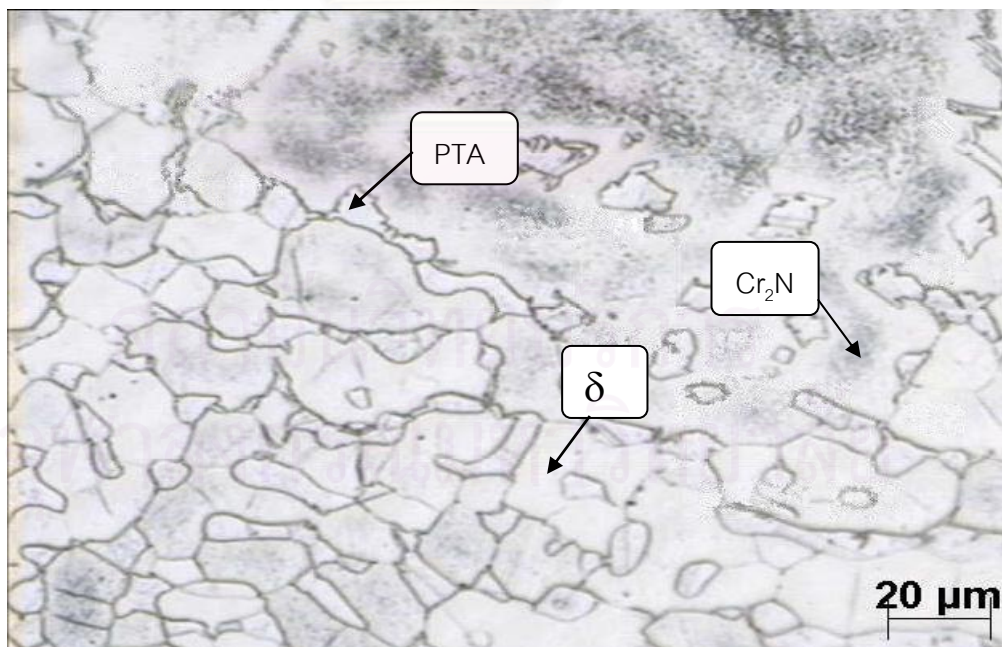


รูปที่ 4.12 โครงสร้างจุลภาคของบริเวณเนื้อเชื่อมเหล็ก K4 ที่ผ่านการเชื่อมทิกพัลส์

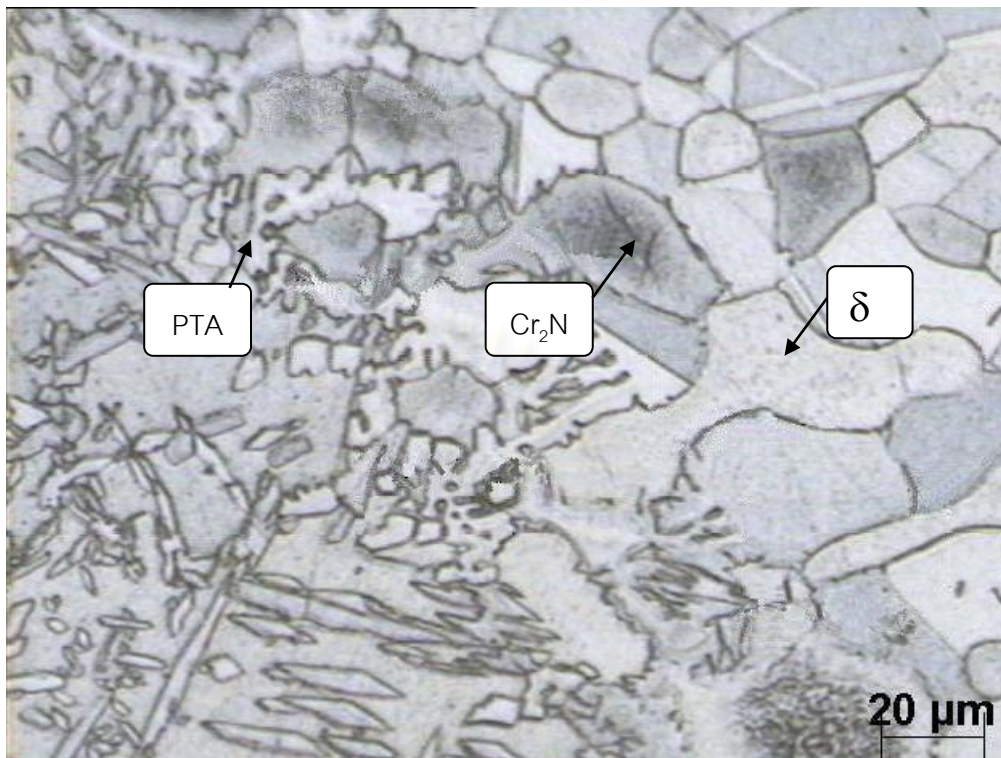




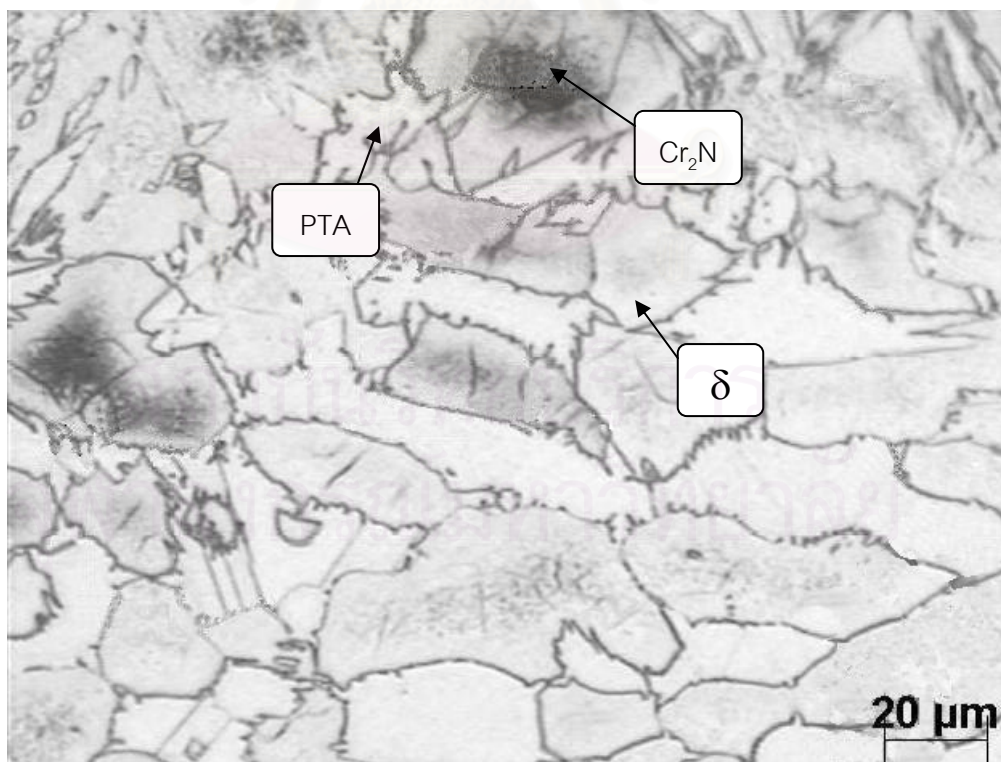
รูปที่ 4.13 โครงสร้างจุลภาคของบริเวณแนวการหลอมเหลวเหล็ก K1 ที่ผ่านการเชื่อมทิกพัลส์



รูปที่ 4.14 โครงสร้างจุลภาคของบริเวณแนวการหลอมเหลวเหล็ก K2 ที่ผ่านการเชื่อมทิกพัลส์

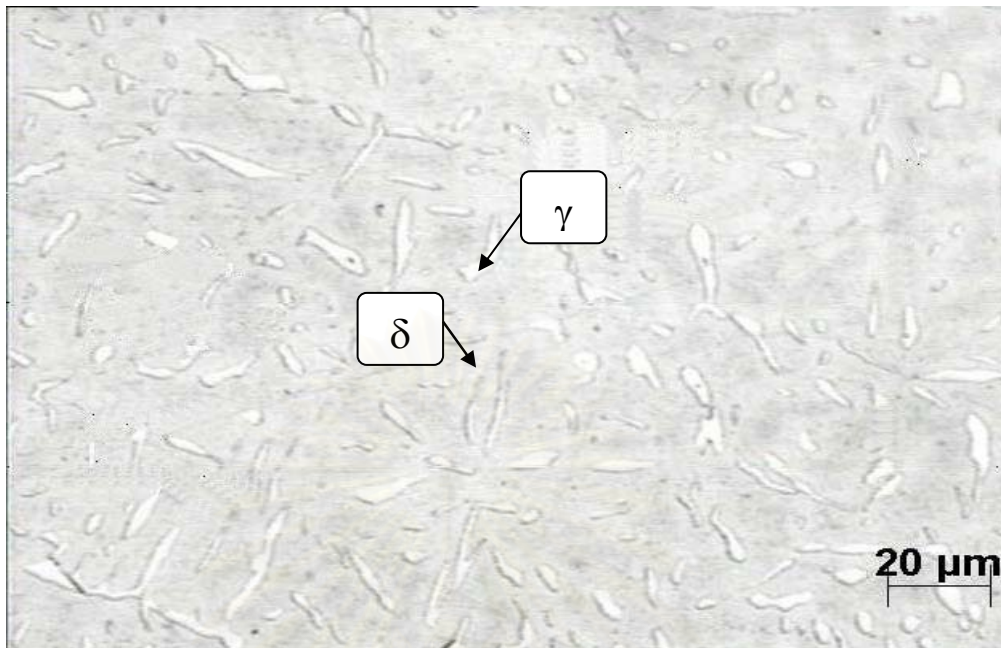


รูปที่ 4.15 โครงสร้างจุลภาคของบริเวณแนวการหลอมเหล็ก K3 ที่ผ่านการเชื่อมทิกพัลส์

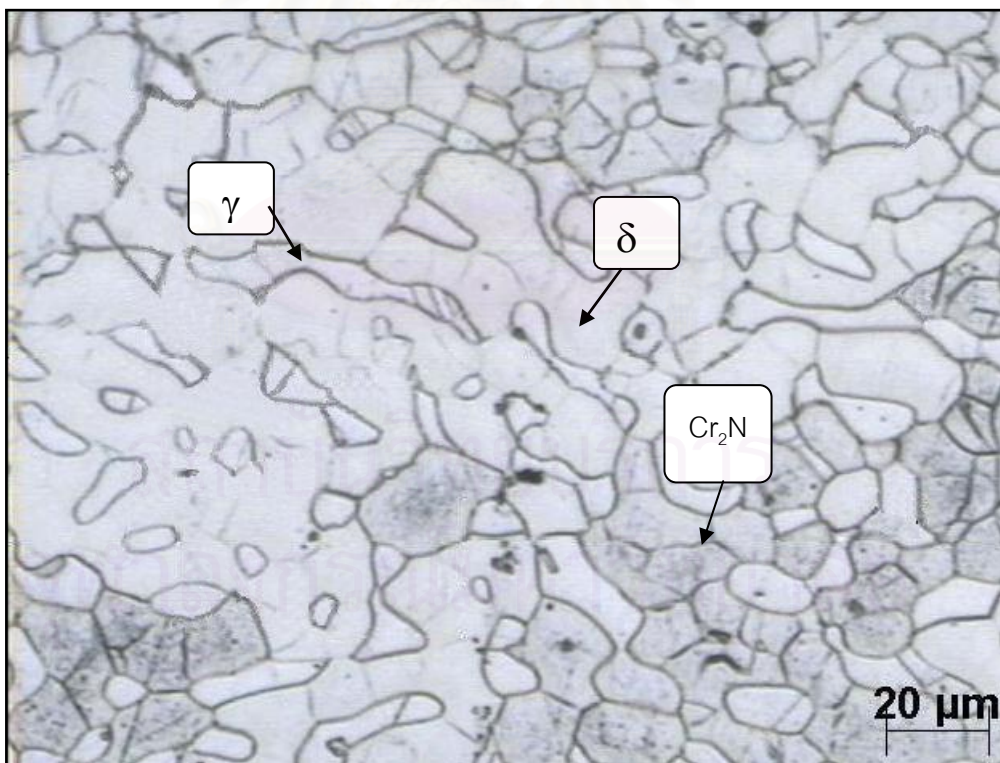


รูปที่ 4.16 โครงสร้างจุลภาคของบริเวณแนวการหลอมเหล็ก K4 ที่ผ่านการเชื่อมทิกพัลส์

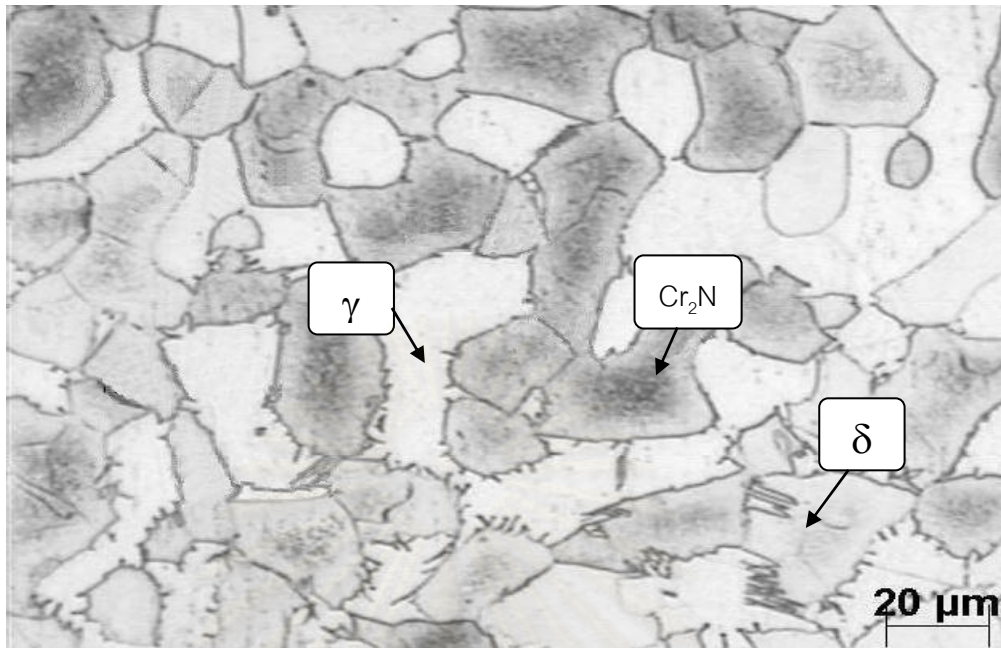




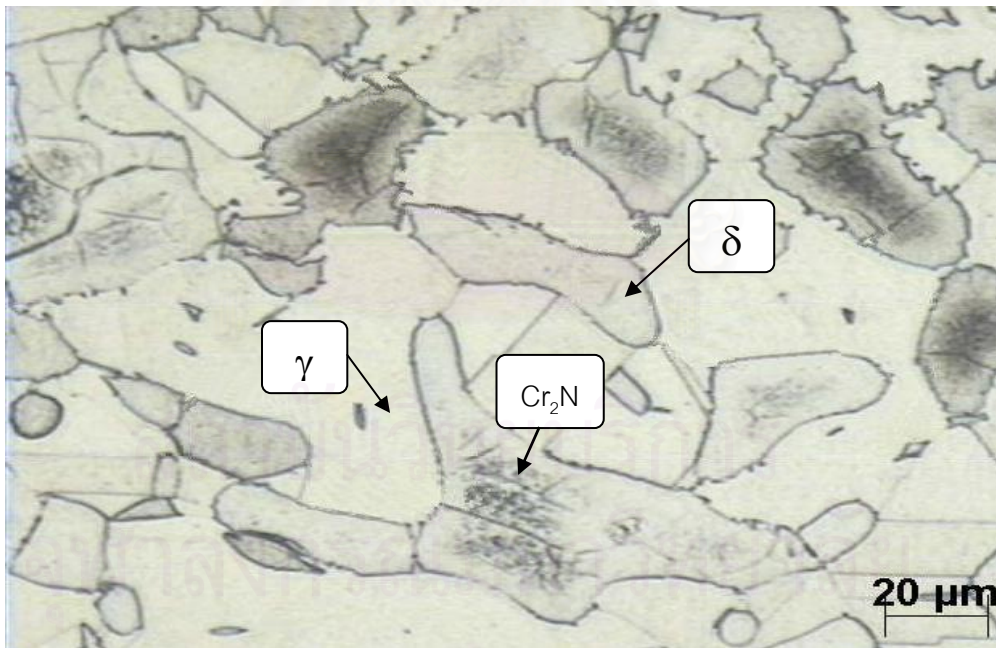
รูปที่ 4.17 โครงสร้างจุลภาคของบริเวณกระทบบร้อนเหล็ก K1 ที่ผ่านการเชื่อมทิกพัลส์



รูปที่ 4.18 โครงสร้างจุลภาคของบริเวณกระทบบร้อนเหล็ก K2 ที่ผ่านการเชื่อมทิกพัลส์

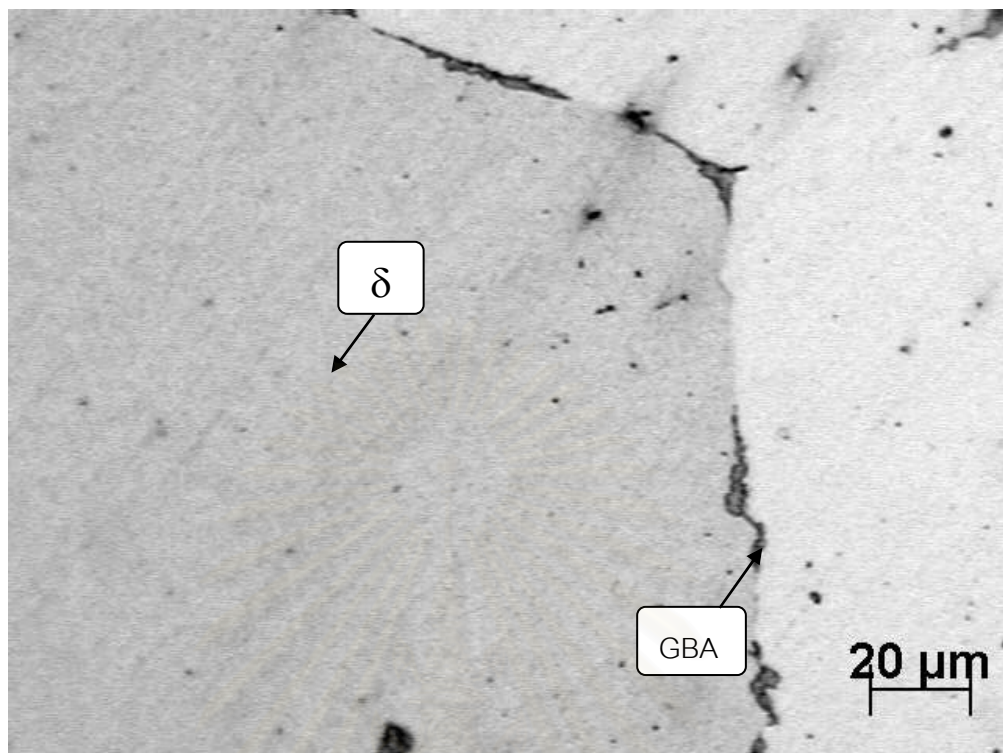


รูปที่ 4.19 โครงสร้างจุลภาคของบริเวณกระทบริ้นเหล็ก K3 ที่ผ่านการเชื่อมทิกพัลส์

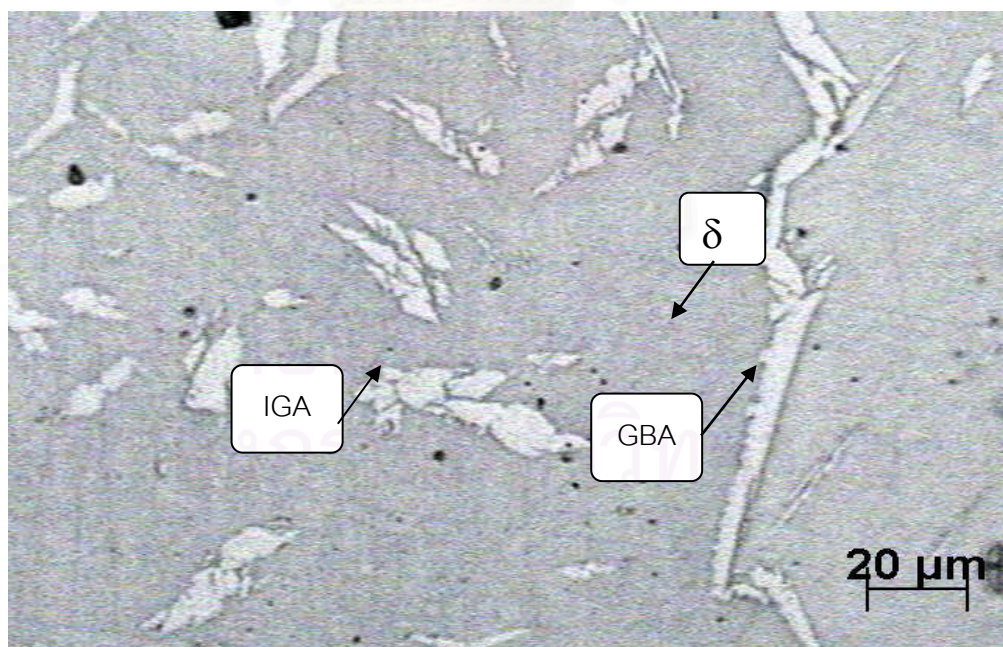


รูปที่ 4.20 โครงสร้างจุลภาคของบริเวณกระทบริ้นเหล็ก K4 ที่ผ่านการเชื่อมทิกพัลส์





รูปที่ 4.21 โครงสร้างจุลภาคของเหล็ก K1 ที่ผ่านการจำลองเชื่อม

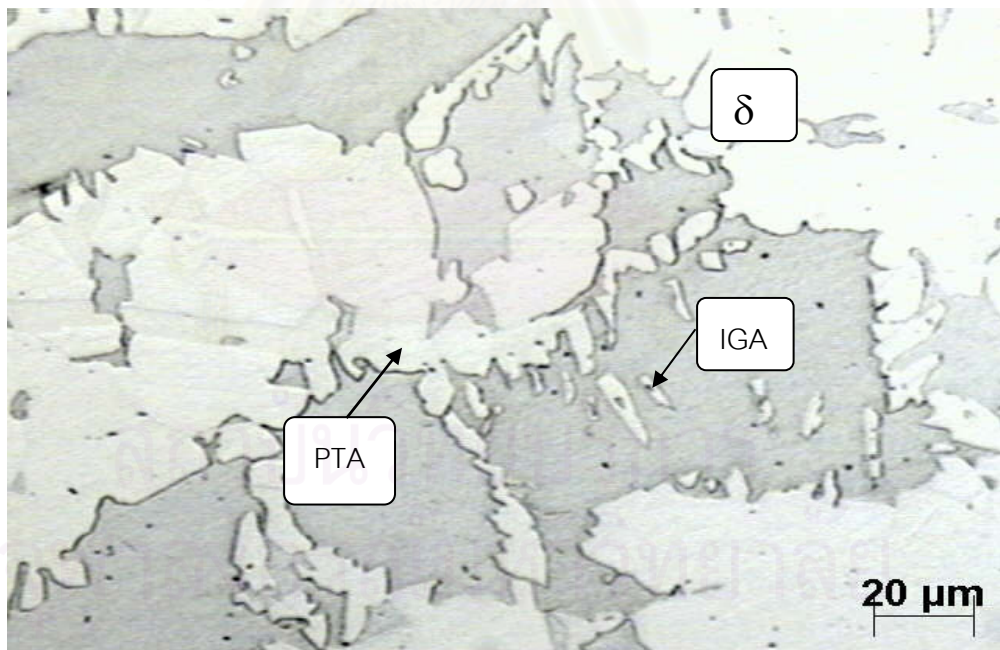


รูปที่ 4.22 โครงสร้างจุลภาคของเหล็ก K2 ที่ผ่านการจำลองเชื่อม

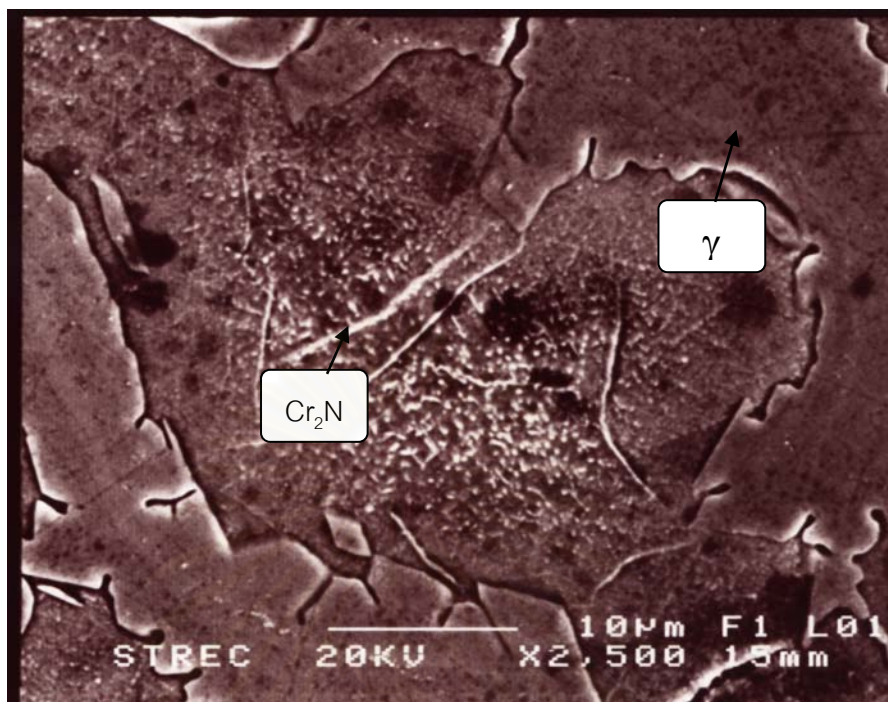




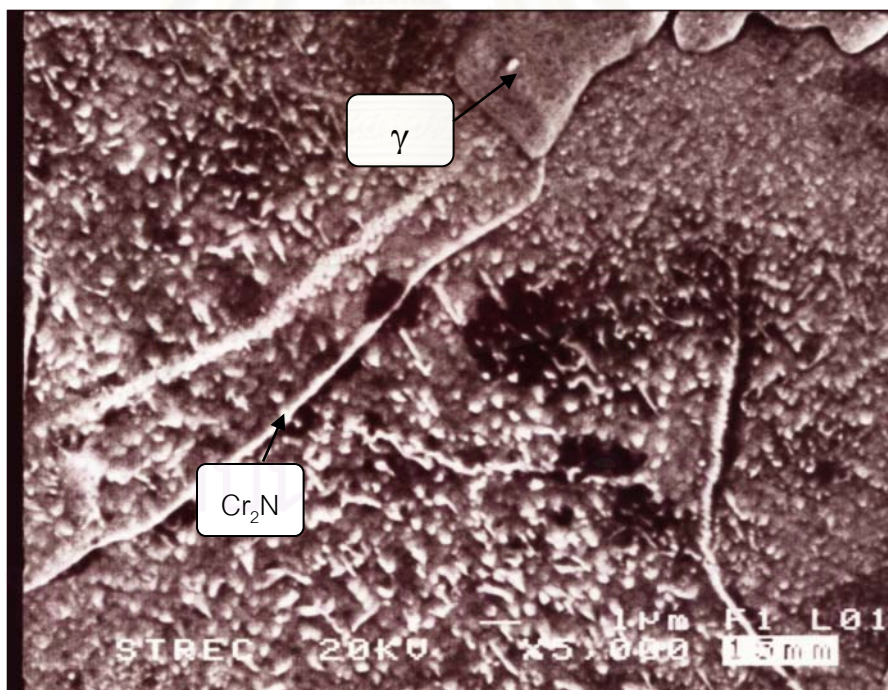
รูปที่ 4.23 โครงสร้างจุลภาคของเหล็ก K3 ที่ผ่านการจำลองเชื่อม



รูปที่ 4.24 โครงสร้างจุลภาคของเหล็ก K4 ที่ผ่านการจำลองเชื่อม



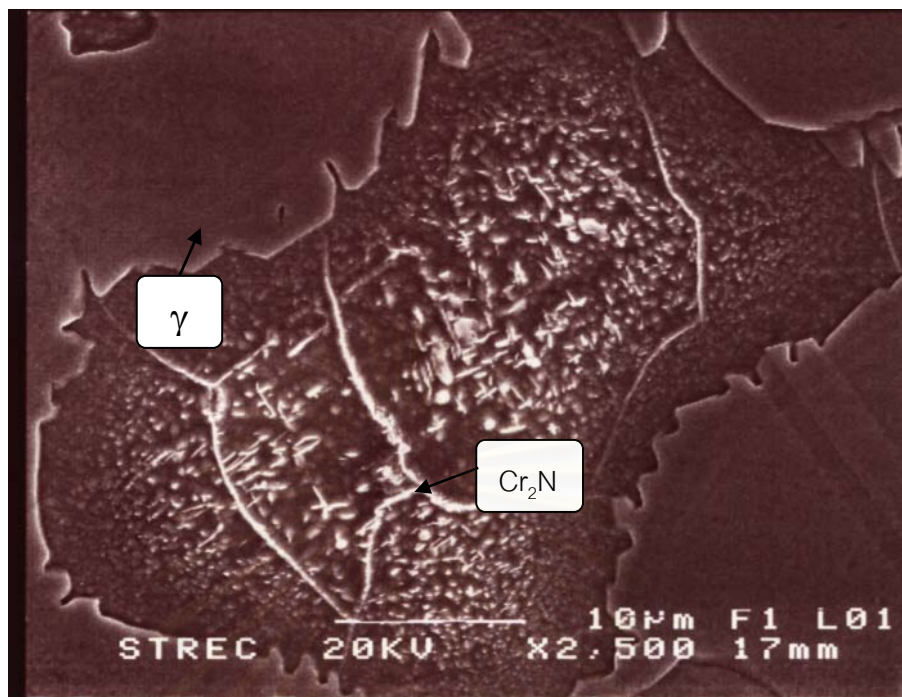
ก



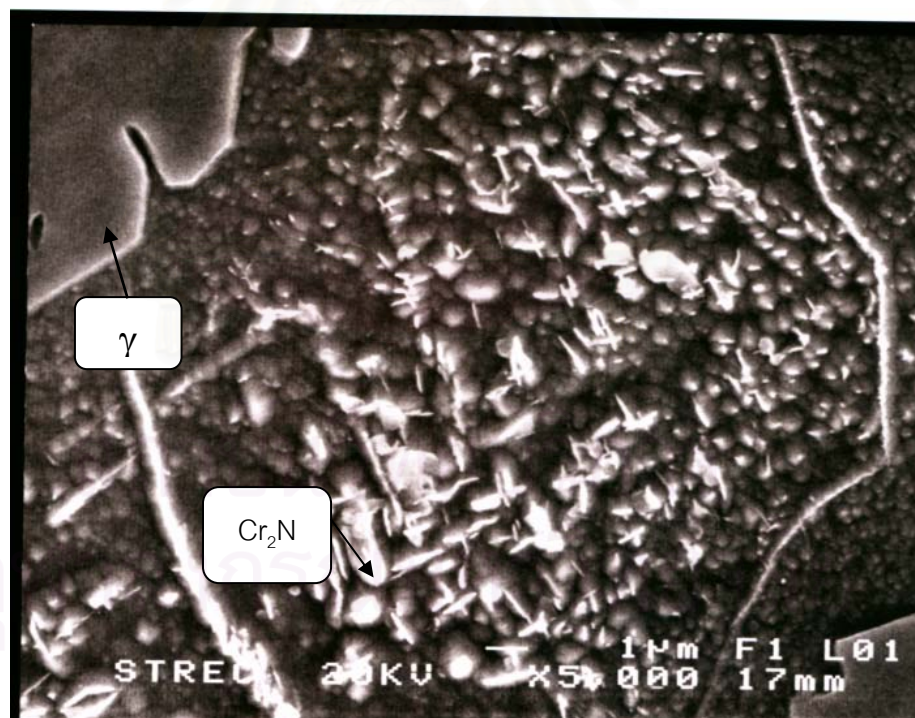
ข

รูปที่ 4.25 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดที่บริเวณเกิดตะกอนของ  
โครเมียมไนไตรด์ในเหล็ก K3 ก. กำลังขยาย 2500 เท่า, ข. กำลังขยาย 5000 เท่า





ก



ข

รูปที่ 4.26 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดที่บริเวณเกิดตะกอนของโครเมียมไนไตรด์ในเหล็ก K4 ก. กำลังขยาย 2500 เท่า, ข. กำลังขยาย 5000 เท่า

#### 4.1.1 โครงสร้างจุลภาคของเหล็ก K1-K4 ที่บริเวณโลหะพื้น

รูปที่ 4.5-4.8 แสดงโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ K1-K4 ที่บริเวณโลหะพื้น พบว่าที่บริเวณโลหะพื้นแม้ว่าผ่านการอบชุบความร้อน เพื่อให้ได้ออสเทนไนต์ประมาณ 40-60 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร แต่พบว่าขนาดของเกรนออสเทนไนต์จะมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อปริมาณไนโตรเจนที่ละลายอยู่ในเหล็กมีมากขึ้น

#### 4.1.2 โครงสร้างจุลภาคของเหล็ก K1-K4 ที่บริเวณเนื้อเชื่อม

รูปที่ 4.9-4.12 แสดงโครงสร้างจุลภาคของเหล็ก K1-K4 ที่บริเวณเนื้อเชื่อมพบว่ามีลักษณะแตกต่างกันตามปริมาณของไนโตรเจนที่ละลายอยู่ สำหรับเหล็ก K1 ที่มีปริมาณไนโตรเจนละลายอยู่ต่ำสุด ในเนื้อเชื่อมพบเพียงโครงสร้างเดลตาเฟอร์ไรท์ภายในชิ้นงานเท่านั้น เมื่อเหล็กมีปริมาณไนโตรเจนมากขึ้นจะพบออสเทนไนต์ในลักษณะต่าง ๆ เกิดขึ้น โดยเหล็ก K2 จะพบโครงสร้าง GBA และโครงสร้าง IGA กระจายอยู่ในเนื้อเชื่อม สำหรับเหล็ก K3 กับ K4 ในบริเวณเนื้อเชื่อมจะพบโครงสร้าง GBA IGA และ WA โดยที่ขนาด WA จะมีขนาดใหญ่และมีปริมาณมากขึ้นเมื่อปริมาณออสเทนไนต์สูงขึ้น

#### 4.1.3 โครงสร้างจุลภาคของเหล็ก K1-K4 ที่บริเวณแนวการหลอมเหลว

บริเวณแนวการหลอมเหลวคือบริเวณที่อยู่ระหว่างเนื้อเชื่อมและบริเวณกระทบร้อน รูปที่ 4.13-4.16 แสดงโครงสร้างจุลภาคของเหล็ก K1-K4 ที่บริเวณแนวการหลอมเหลว พบว่าปริมาณของเดลตาเฟอร์ไรท์ลดลงเมื่อเหล็กมีปริมาณไนโตรเจนเพิ่มขึ้น และลักษณะโครงสร้างออสเทนไนต์พบว่าแตกต่างตามปริมาณไนโตรเจนที่ละลายอยู่ในชิ้นงาน โดยเหล็ก K1 จะพบโครงสร้าง GBA อยู่ที่บริเวณแนวการเชื่อม สำหรับเหล็ก K2 ซึ่งมีปริมาณไนโตรเจนละลายอยู่ 0.1100 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะพบโครงสร้าง PTA ดังแสดงในรูปที่ 4.14 โครงสร้าง PTA ที่พบจะทำให้เกิดการยับยั้งการขยายตัวของเดลตาเฟอร์ไรท์ [13] ในบริเวณแนวการหลอมเหลวและนอกจากนี้พบการตกตะกอนของโครเมียมไนไตรด์จำนวนเล็กน้อย

เหล็ก K3 และ K4 บริเวณแนวการหลอมเหลว ยังคงพบโครงสร้างจุลภาคแบบ PTA เช่นเดียวกับชิ้นงาน K2 นอกจากโครงสร้าง PTA ในเหล็ก K3 และ K4 ที่บริเวณแนวการหลอมเหลวพบว่าการตกตะกอนของโครเมียมไนไตรด์จำนวนมาก รูปที่ 4.25 และรูปที่ 4.26 แสดงภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (Scanning Electron Microscope, SEM) ด้วยเทคนิค Backscattering ที่บริเวณแนวการหลอมเหลวของชิ้นงาน K3 และ K4 ซึ่งพบว่าที่บริเวณใจกลางเฟสเฟอร์ไรท์มีการตกตะกอนของโครเมียมไนไตรด์เกิดขึ้น โดยในเหล็ก K3 ซึ่งมีปริมาณไนโตรเจน 0.2300 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีการตกตะกอนของโครเมียมไนไตรด์หนาแน่นกว่าเหล็ก K4 ซึ่งมีปริมาณไนโตรเจน 0.3400 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก การที่เหล็กกล้า

ไรซินิมดูเพล็กซ์ที่มีเปอร์เซ็นต์ไนโตรเจนต่ำกว่า เกิดการตกตะกอนของโครเมียมไนไตรด์มากกว่า เหล็กกล้าไรซินิมดูเพล็กซ์ที่มีปริมาณไนโตรเจนสูงกว่า Hornig-Yih Liou [13] และคณะได้อธิบายว่า เมื่อให้ความร้อนแก่เหล็กกล้าไรซินิมดูเพล็กซ์ที่อุณหภูมิสูง (ประมาณ 1350 องศาเซลเซียส) ออสเตนไนท์จะเปลี่ยนแปลงเป็นเดลตาเฟอร์ไรท์ และเมื่อเดลตาเฟอร์ไรท์ที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงเย็นตัวลง เดลตาเฟอร์ไรท์จะเปลี่ยนแปลงกลับไปเป็นออสเตนไนท์ เหล็กกล้าไรซินิมดูเพล็กซ์ที่มีปริมาณไนโตรเจนต่ำกว่า อุณหภูมิการเปลี่ยนเดลตาเฟอร์ไรท์เป็นออสเตนไนท์จะต่ำกว่าเหล็กที่มีปริมาณไนโตรเจนสูงกว่า ดังนั้นเหล็ก K3 เดลตาเฟอร์ไรท์ที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงจำนวนมากยังคงไม่เปลี่ยนแปลงกลับไปเป็นออสเตนไนท์ และเพราะอัตราการเย็นตัวภายหลังการเชื่อมสูง จึงส่งผลให้บริเวณเดลตาเฟอร์ไรท์ที่ยังไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นออสเตนไนท์ที่อ้อมตัวรอยเชื่อมด้วยไนโตรเจน (Supersaturation of nitrogen) ที่บริเวณเดลตาเฟอร์ไรท์จึงถูกกระตุ้นให้เกิดการตกตะกอนของโครเมียมไนไตรด์ ผลการทดลองวัดปริมาณโครเมียมไนไตรด์ในรูปที่ 4.29 ยืนยันเหตุผลดังกล่าวนี้

#### 4.1.4 โครงสร้างจุลภาคของเหล็ก K1-K4 ที่บริเวณกระทะร้อน

รูปที่ 4.17-4.20 แสดงโครงสร้างจุลภาคบริเวณกระทะร้อนของเหล็ก K1-K4 พบว่ามีลักษณะโครงสร้างจุลภาคใกล้เคียงกับโลหะพื้น แต่พบว่าขนาดออสเตนไนท์ในบริเวณกระทะร้อนจะมีขนาดเล็กกว่า ในเหล็ก K3 และ K4 พบตะกอนของโครเมียมไนไตรด์บริเวณใจกลางเดลตาเฟอร์ไรท์เช่นเดียวกับบริเวณแนวการหลอมเหลวของเหล็ก K3 และ K4 นอกจากนี้ที่บริเวณกระทะร้อนของเหล็ก K2 พบการตกตะกอนของโครเมียมไนไตรด์น้อยมากกระจายอยู่ใจกลางของเดลตาเฟอร์ไรท์

#### 4.1.5 โครงสร้างจุลภาคของเหล็ก K1-K4 ที่ผ่านการจำลองเชื่อม

รูปที่ 4.21-4.24 แสดงโครงสร้างจุลภาคของเหล็ก K1-K4 ที่ผ่านการจำลองเชื่อม โดยในเหล็ก K1 พบโครงสร้าง GBA จำนวนเล็กน้อย อยู่ตามขอบเกรน และเหล็ก K2 ที่มีปริมาณไนโตรเจนละลายอยู่สูงขึ้นไปจะพบโครงสร้าง WA GBA และ IGA กระจายอยู่บนพื้นเดลตาเฟอร์ไรท์สำหรับเหล็ก K3 พบโครงสร้าง WA GBA และ IGA เช่นเดียวกับเหล็ก K2 แต่ขนาดของโครงสร้าง WA GBA และ IGA ที่พบในเหล็ก K3 มีขนาดใหญ่กว่าในเหล็ก K2 และในเหล็ก K4 ที่มีปริมาณไนโตรเจนสูงสุด พบว่าโครงสร้างภายหลังการจำลองเชื่อมเกิดโครงสร้าง PTA และ IGA



#### 4.2 ผลของไนโตรเจนต่อปริมาณโครงสร้างเฟอร์ไรต์และออสเตนไนท์ของ K1-K4 ที่ผ่านการเชื่อมทิกพัลส์ และผ่านการจำลองเชื่อม

ตารางที่ 4.2 และ 4.3 แสดงปริมาณโครงสร้างเดลตาเฟอร์ไรต์และออสเตนไนท์ที่บริเวณต่าง ๆ ของเหล็ก K1-K4 ที่ผ่านการเชื่อมทิกพัลส์ และผ่านการจำลองการเชื่อมตามลำดับ รูปที่ 4.27 และ 4.28 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไนโตรเจนที่ละลายอยู่ในเหล็ก K1-K4 กับปริมาณโครงสร้างเฟอร์ไรต์และออสเตนไนท์ที่บริเวณต่าง ๆ ที่ผ่านการเชื่อมทิกพัลส์ และจำลองเชื่อมตามลำดับ จากรูปที่ 4.27 และ 4.28 พบว่าเมื่อปริมาณไนโตรเจนในเหล็กสูงขึ้นปริมาณเดลตาเฟอร์ไรต์ที่เนื้อเชื่อม ที่บริเวณแนวการหลอมเหลว ที่บริเวณกระแทกร้อน และในเหล็กที่ผ่านการจำลองเชื่อมลดลงขณะที่ปริมาณออสเตนไนท์ที่บริเวณต่าง ๆ เพิ่มขึ้น เป็นผลจากไนโตรเจนทำให้คุณสมบัติการเปลี่ยนออสเตนไนท์เป็นเดลตาเฟอร์ไรต์ (หรือเดลตาเฟอร์ไรต์เป็นออสเตนไนท์ขณะเพิ่มอุณหภูมิ) สูงขึ้น ส่งผลให้เกิดออสเตนไนท์ภายหลังการเชื่อมมากขึ้น [1]

อย่างไรก็ตามปริมาณเฟสออสเตนไนท์ในเนื้อเชื่อม แนวการหลอมเหลว และบริเวณกระแทกร้อน น้อยกว่าในโลหะพื้นเดิมทั้งนี้อาจเป็นเพราะ ไนโตรเจนหายไประหว่างการเชื่อมและมีอัตราการเย็นตัวภายหลังการเชื่อมสูง ส่งผลให้เดลตาเฟอร์ไรต์ที่เกิดขึ้นไม่สามารถเปลี่ยนแปลงกลับเป็นออสเตนไนท์ได้ทัน การแก้ไขให้ปริมาณออสเตนไนท์ใกล้เคียงกับโลหะพื้นสามารถทำได้โดยลดอัตราการเย็นตัวภายหลังการเชื่อม ให้ต่ำเพียงพอเพื่อให้เดลตาเฟอร์ไรต์มีเวลามากพอในการเปลี่ยนกลับเป็นออสเตนไนท์ หรือการผสมไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมรอยเชื่อมเพื่อให้ไนโตรเจนละลายในแนวเชื่อมมากขึ้นและเร่งการเกิดออสเตนไนท์ เนื่องจากไนโตรเจนทำให้ออสเตนไนท์มีเสถียรภาพสูง (austenite stabilizer) [13]

สำหรับผลการทดลองการจำลองเชื่อม ซึ่งในการทดลองนี้ได้เปลี่ยนอุณหภูมิสูงสุดที่ใช้ในการจำลองการเชื่อม เพื่อให้เหล็ก K1-K4 มีโครงสร้างเป็นเดลตาเฟอร์ไรต์ทั้งหมดที่อุณหภูมิสูงสุดแล้วให้เย็นตัวในอากาศ พบว่าปริมาณออสเตนไนท์ที่พบในเหล็กผ่านการจำลองเชื่อมสูงกว่าที่พบในเนื้อเชื่อม ทั้งนี้อาจเป็นเพราะการเชื่อมทิกพัลส์ไม่มีไนโตรเจนผสมในก๊าซปกคลุมการเชื่อม จึงมีการสูญเสียไนโตรเจนในระหว่างทำการเชื่อม [11] และอัตราการเย็นตัวภายหลังการเชื่อมสูง ส่งผลให้ปริมาณออสเตนไนท์ในเนื้อเชื่อมมีน้อยกว่าที่พบในเหล็กที่ผ่านการจำลองเชื่อม ปริมาณออสเตนไนท์ของเหล็กที่ผ่านการจำลองการเชื่อมและเนื้อเชื่อมพบว่าแตกต่างกันน้อยลงเมื่อปริมาณไนโตรเจนในเหล็กมากขึ้น

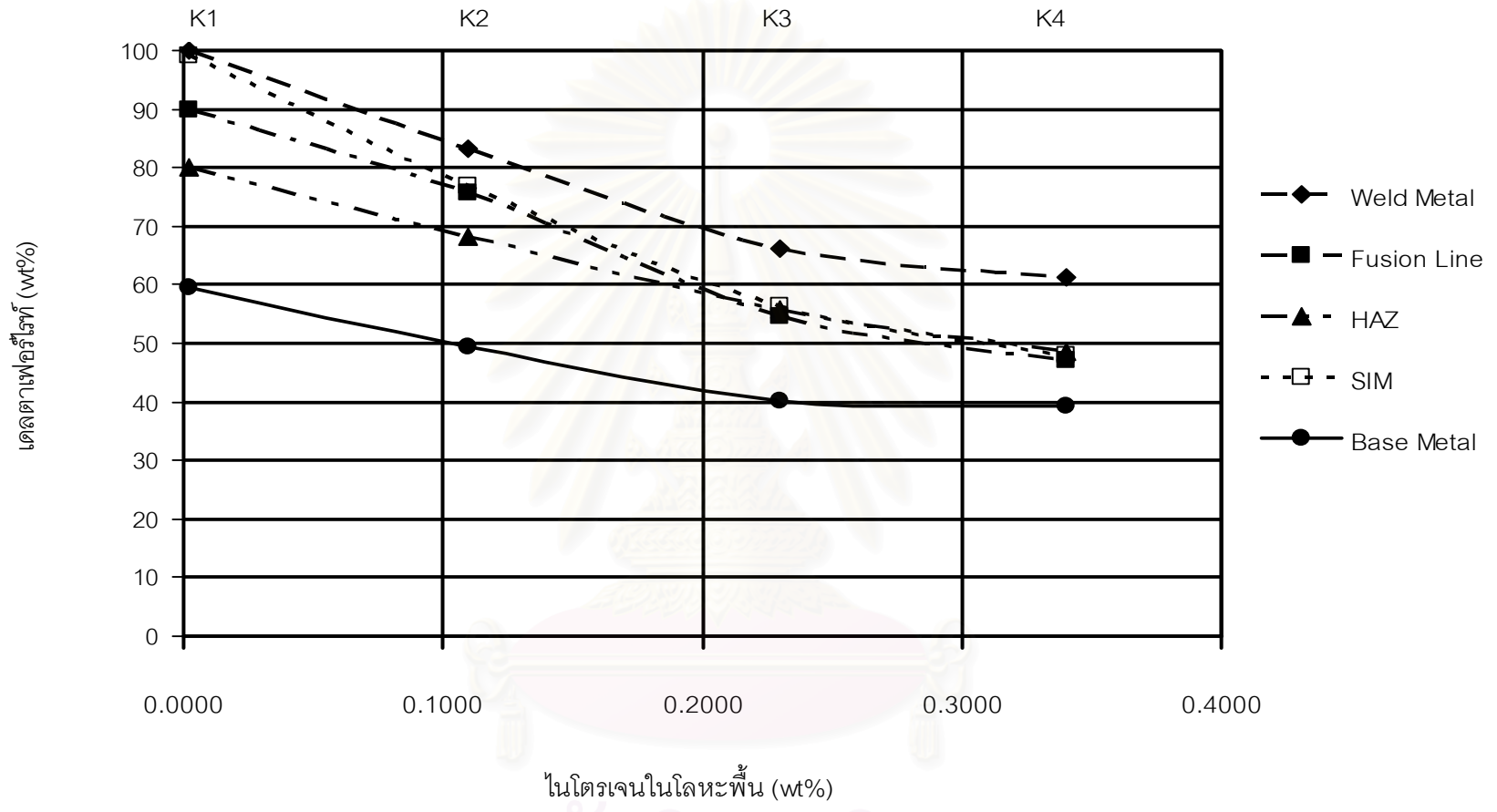
ตาราง 4.2 ปริมาณเดลตาเฟอไรท์ที่บริเวณต่าง ๆ ของเหล็ก K1-K4 ที่ผ่านการเชื่อมทิกพัลส์ และผ่านการจำลองเชื่อม

เหล็ก	ปริมาณไนโตรเจนในเหล็ก (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)	ปริมาณโครงสร้างเดลตาเฟอไรท์ (เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร)				
		โลหะพื้น	เนื้อเชื่อม	แนวการหลอมเหลว	บริเวณกระทบร้อน	ชิ้นงานที่ผ่านการจำลองการเชื่อม
K1	0.0018	60	100	90	80	99
K2	0.1100	49	83	76	68	77
K3	0.2300	40	66	55	56	56
K4	0.3400	39	61	47	49	48

ตาราง 4.3 ปริมาณออสเตนไนท์ที่บริเวณต่าง ๆ ของเหล็ก K1-K4 ที่ผ่านการเชื่อมทิกพัลส์ และผ่านการจำลองเชื่อม

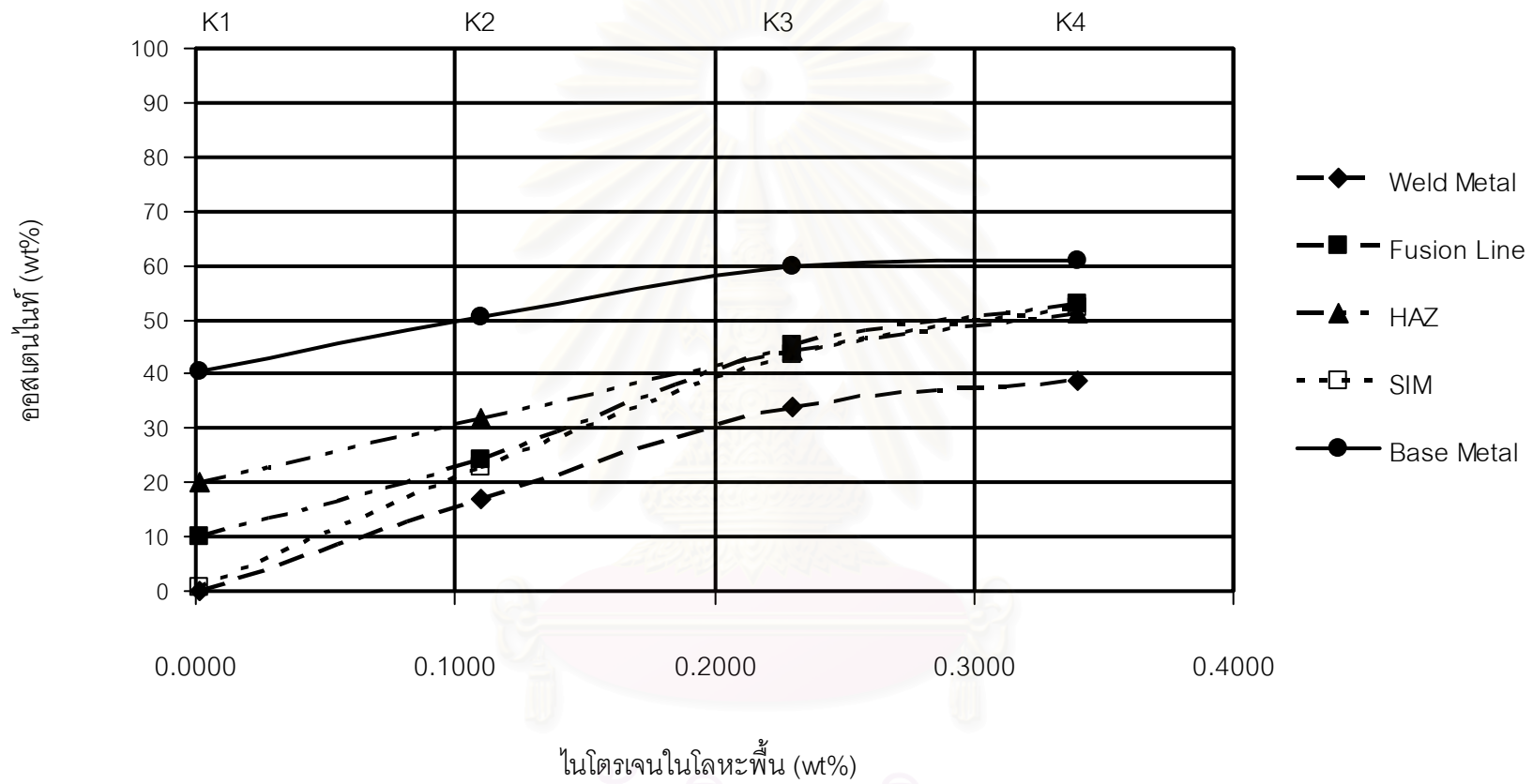
เหล็ก	ปริมาณไนโตรเจนในเหล็ก (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)	ปริมาณโครงสร้างออสเตนไนท์ (เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร)				
		โลหะพื้น	เนื้อเชื่อม	แนวการหลอมเหลว	บริเวณกระทบร้อน	ชิ้นงานที่ผ่านการจำลองการเชื่อม
K1	0.0018	40	0	10	20	1
K2	0.1100	51	17	24	32	23
K3	0.2300	60	34	45	44	44
K4	0.3400	61	39	53	51	52





รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไนโตรเจนและปริมาณเดลตาเฟอร์ไรท์ที่บริเวณต่าง ๆ ของเหล็ก K1-K4 ที่ผ่านการเชื่อมทิกพัลส์ และจำลองเชื่อม

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

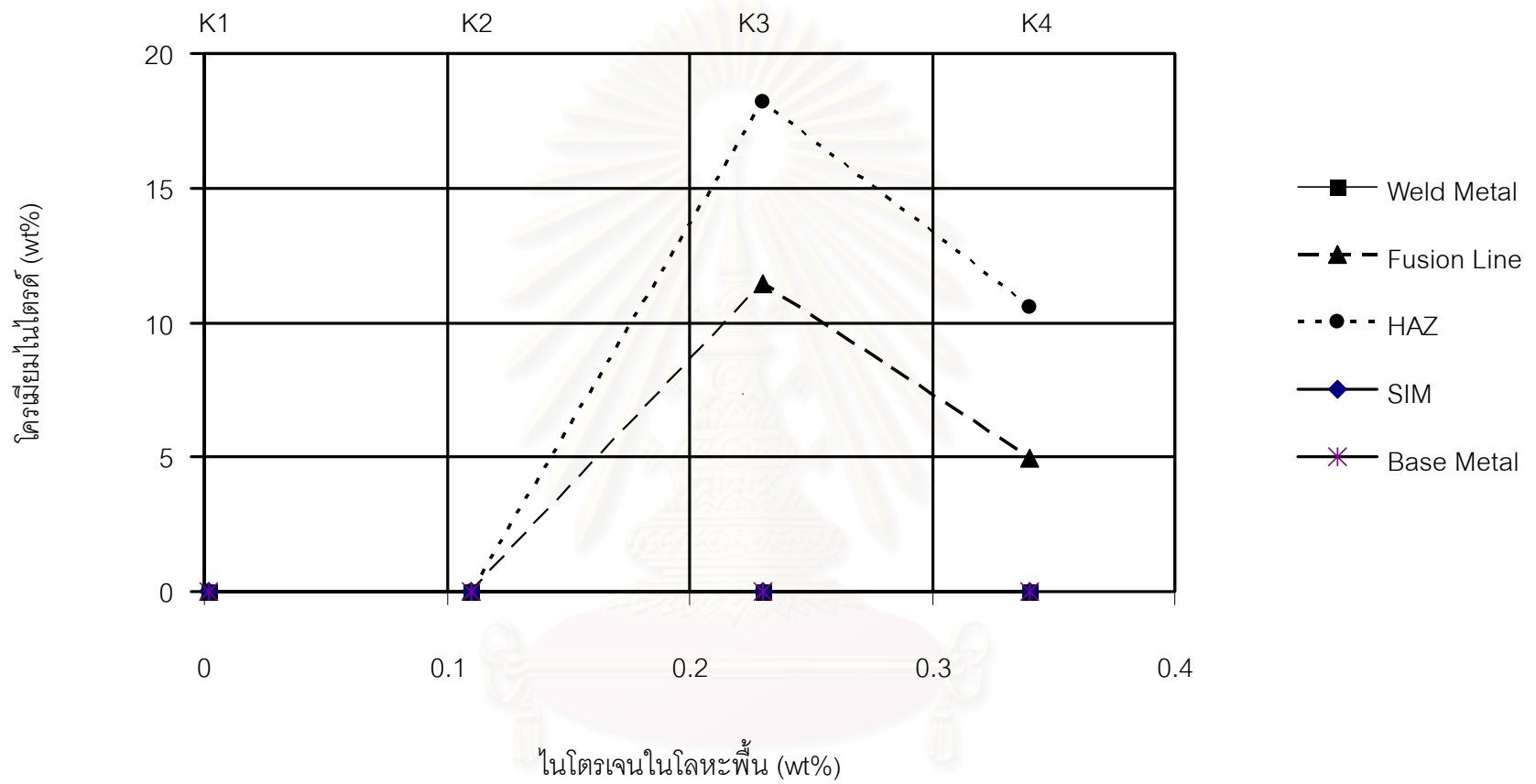


รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไนโตรเจนและปริมาณออกซิเจนไนท์ที่บริเวณต่าง ๆ ของเหล็กK1-K4 ที่ผ่านการเชื่อมทิก และจำลองเชื่อม

#### 4.3 ผลของไนโตรเจนต่อการตกตะกอนโครเมียมไนไตรด์ของเหล็ก K1-K4 ที่ผ่านการเชื่อมทิกพัลส์ และผ่านการจำลองเชื่อม

รูปที่ 4.29 แสดงเปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของโครเมียมไนไตรด์ที่บริเวณต่าง ๆ ตามลำดับ การหาเปอร์เซ็นต์โครเมียมไนไตรด์โดยปริมาตรแสดงในภาคผนวก ข ดังได้กล่าวมาว่าการตกตะกอนโครเมียมไนไตรด์พบในแนวการหลอมเหลวและบริเวณกระทันท์ร้อนเท่านั้น ไม่พบการตกตะกอนโครเมียมไนไตรด์ในเนื้อเชื่อม อาจเป็นเพราะในขณะที่เชื่อมมีการสูญเสียไนโตรเจนของเนื้อเชื่อม เพราะเป็นการเชื่อมใช้ก๊าซอาร์กอนเท่านั้น และในเนื้อเชื่อมมีขนาดเกรนอสเตนไนท์เล็กและกระจายตัวมากกว่าบริเวณแนวการหลอมเหลว และบริเวณกระทันท์ร้อน ทำให้ระยะทางการแพร่ของไนโตรเจนจากเดลตาเฟอร์ไรท์สู่ออสเตนไนท์สั้น ส่งผลให้ไม่เกิดบริเวณที่มีไนโตรเจนอิ่มตัวเลย [1]

จากรูปที่ 4.29 พบว่าการตกตะกอนของโครเมียมไนไตรด์มากที่สุดในเหล็ก K3 ซึ่งมีปริมาณไนโตรเจน 0.2300 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก การที่การตกตะกอนโครเมียมไนไตรด์ลดลงเมื่อปริมาณไนโตรเจนสูงขึ้น ได้อธิบายไว้ในหัวข้อ 4.1.3 และในเหล็ก K2 พบการตกตะกอนของโครเมียมไนไตรด์เพียงเล็กน้อยแต่ไม่สามารถตรวจวัดได้เนื่องจาก เหล็ก K2 มีปริมาณไนโตรเจนเพียง 0.1100 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก การตกตะกอนของโครเมียมไนไตรด์จะสังเกตอย่างเห็นได้ชัดเมื่อปริมาณไนโตรเจนสูงกว่า 0.1400 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก [8] เป็นที่น่าสังเกตว่าไม่พบการตกตะกอนของโครเมียมไนไตรด์ในเหล็กที่ผ่านการจำลองเชื่อม สามารถอธิบายได้ว่าเป็นผลจากการที่เหล็กที่ผ่านการจำลองเชื่อมมีอัตราการเย็นตัวต่ำกว่า เวลาที่เย็นตัวในช่วงอุณหภูมิ 800-500 องศาเซลเซียสมีค่าประมาณ 195 วินาที และเวลาเย็นตัวในช่วงอุณหภูมิ 1200-800 องศาเซลเซียส มีค่าประมาณ 50-60 วินาที ซึ่งการลดอัตราการเย็นตัวให้ต่ำเพียงพอสามารถยับยั้งการตกตะกอนของโครเมียมไนไตรด์ได้ [13] ในเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ที่มีส่วนผสมโครเมียม 26.16 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก นิกเกิล 6.77 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และไนโตรเจน 0.27 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่าเมื่ออัตราเย็นตัวในช่วงอุณหภูมิ 1200-800 องศาเซลเซียสมีค่าประมาณ 30 วินาที จะไม่พบการตกตะกอนของโครเมียมไนไตรด์ [11]



\* หมายเหตุ :ไม่สามารถตรวจสอบปริมาณตกตะกอนของโครเมียมไนไตรต์ของเหล็ก K2 ได้

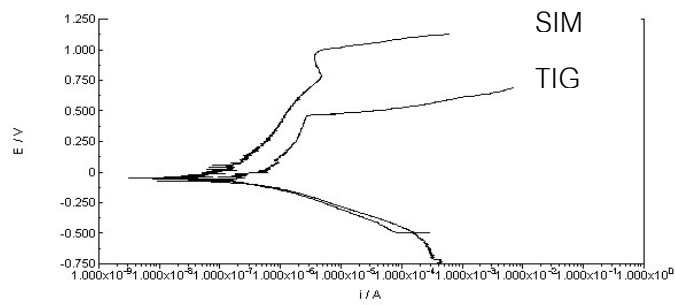
รูปที่ 4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไนโตรเจนและปริมาณโครเมียมไนไตรต์

#### 4.4 ผลการทดสอบการกักกรองของเหล็ก K1-K4 ที่ผ่านการเชื่อมทิกพัลส์ และจำลองการเชื่อม

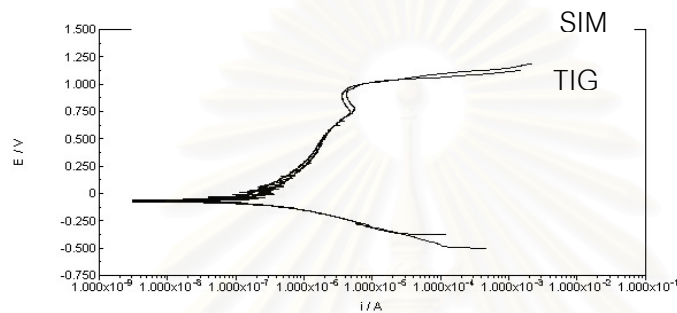
รูปที่ 4.30 แสดงตัวอย่างเส้นโพลาริเซชันของเหล็ก K1-K4 ที่ผ่านการเชื่อมทิกพัลส์ และการจำลองเชื่อม โดยวัดในสารละลายไฮเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส จากเส้นโพลาริเซชันวัดตัวแปรทางการกักกรองได้ดังแสดงในตารางที่ 4.4 การหาค่าตัวแปรต่าง ๆ แสดงในภาคผนวก ค ค่าตัวแปรการต่าง ๆ เหล่านี้นำมาสร้างความสัมพันธ์กับปริมาณไนโตรเจนในโลหะพื้น และเปรียบเทียบกับผลของการวัดของโลหะพื้นที่มีการรายงานไว้ [2] ความสัมพันธ์แสดงในรูปที่ 4.31-4.36



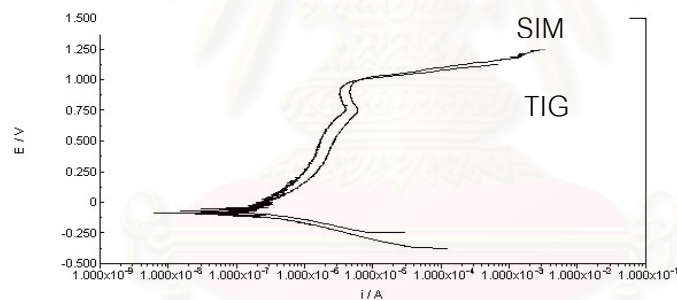
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



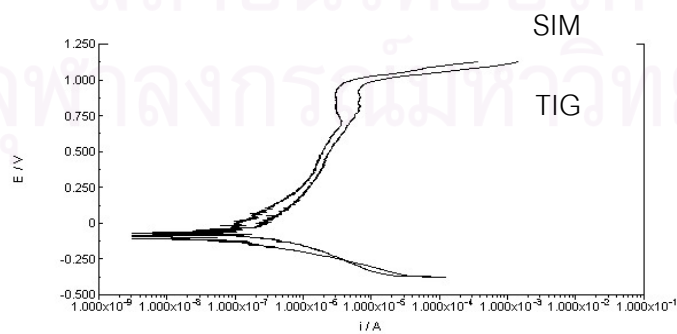
ก. K1 (0.0018 wt %)



ข. K2 (0.1100 wt %)



ค. K3 (0.2300 wt%)



ง. K4 (0.3400 wt%)

รูปที่ 4.30 ตัวอย่างเส้นโพลาริเซชันของเหล็ก K1-K4 ที่ได้จากการทดลอง

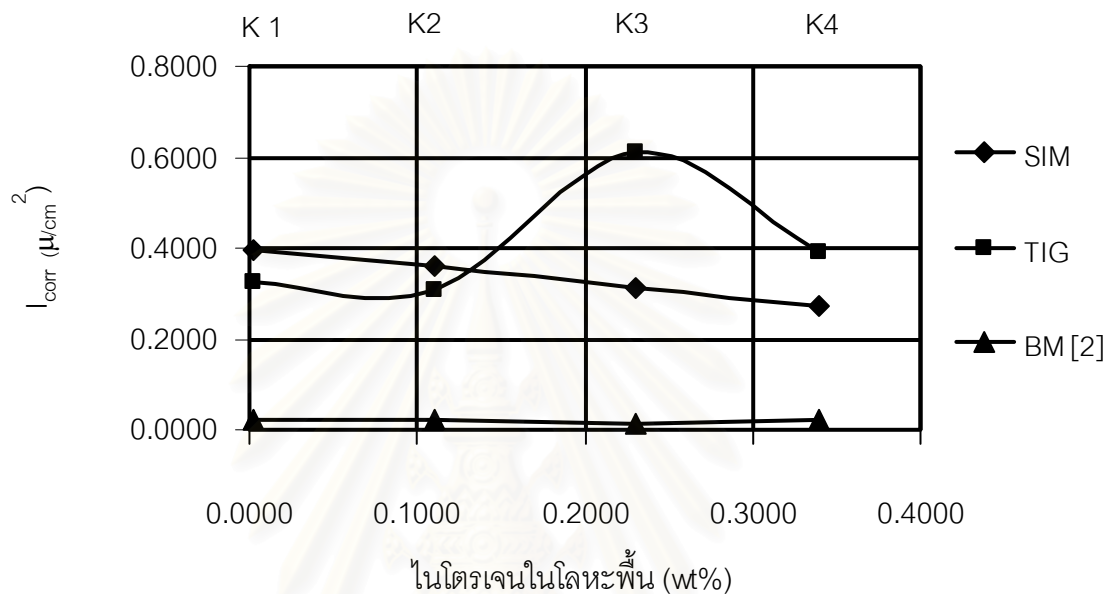
ตารางที่ 4.4 ค่าที่ได้จากเส้นโพลาร์ไอเซชันของเหล็ก K1-K4

ชิ้นงาน	ปริมาณ ไนโตรเจน	แนวเชื่อมตึก					จำลองการเชื่อม				
		$E_{corr}$	$I_{corr}$	$R_{mpy}$	$E_p$	$I_p$	$E_{corr}$	$I_{corr}$	$R_{mpy}$	$E_p$	$I_p$
K1	0.0018	-0.0550	0.3267	0.1510	0.4400	0.4148	-0.0810	0.3954	0.1827	0.9100	0.6489
K2	0.1100	-0.0377	0.3067	0.1417	0.9070	0.6678	-0.0470	0.3613	0.1670	0.9107	0.6070
K3	0.2300	-0.0920	0.6108	0.2823	0.9430	0.9785	-0.0580	0.3136	0.1450	0.9430	0.5824
K4	0.3400	-0.0743	0.3900	0.1803	0.9510	0.8388	-0.1350	0.3907	0.1806	0.9510	0.6911

- หมายเหตุ :
- $E_{corr}$  ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (โวลต์, Ag/AgCl)
  - $I_{corr}$  ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (ไมโครแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร)
  - $I_p$  ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าขณะวัสดุเกิดฟิล์มที่ผิว (ไมโครแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร)
  - $E_p$  ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็มหรือหลุม (โวลต์)
  - $R_{mpy}$  ค่าอัตราการกัดกร่อน (มิลต่อปี)



#### 4.4.1 ผลการทดสอบค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน ( $I_{corr}$ ) และ อัตราการกัดกร่อน ( $R_{mpy}$ )



รูปที่ 4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไนโตรเจนของโลหะพื้นและค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนของเหล็ก K1-K4

จากรูปที่ 4.31 พบว่าค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนของเหล็ก K3 และ K4 ที่ผ่านการเชื่อมทิกพัลส์สูงกว่าของเหล็ก K1 และ K2 แตกต่างจากโลหะพื้นและกรณีผ่านการจำลองเชื่อม ซึ่งค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนมีแนวโน้มลดลงและไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงตามลำดับเมื่อปริมาณไนโตรเจนสูงขึ้น อาจเป็นเพราะผลจากการตกตะกอนของโครเมียมไนไตรด์ในเหล็ก K3 และ K4 การตกตะกอนโครเมียมไนไตรด์ทำให้เกิดการพร่องโครเมียมบริเวณใกล้เคียงกับการตกตะกอนของโครเมียมไนไตรด์ [1] และส่งผลให้สมบัติความต้านทานการกัดกร่อนของเหล็ก K3 และ K4 ลดลง สำหรับเหล็กที่ผ่านการจำลองเชื่อม พบว่าเมื่อปริมาณไนโตรเจนสูงขึ้นค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนของเหล็ก K1-K4 มีค่าลดลงเล็กน้อย ในขณะที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนของโลหะพื้นมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก อาจอธิบายได้ว่าเป็นผลจากสัดส่วนของออกซิเจนในต่อเฟอร์ไรต์ของเหล็ก K1 และ K4 จากตารางที่ 4.5 พบว่าเหล็ก K1-K4 ที่ผ่านการจำลองเชื่อมมีสัดส่วน

ออสเตนไนท์ต่อเฟอร์ไรท์ที่ต่างกันมาก สัดส่วนของออสเตนไนท์ต่อเฟอร์ไรท์ของเหล็ก K1 - K4 ที่ผ่านการจำลองเชื่อมมีค่าใกล้เคียง 1 มากขึ้นเมื่อปริมาณไนโตรเจนสูงขึ้น ในขณะที่สัดส่วนของออสเตนไนท์ต่อเฟอร์ไรท์ที่โลหะพื้นของเหล็ก K1-K4 มีค่าแตกต่างกันน้อยมาก สัดส่วนออสเตนไนท์ต่อเฟอร์ไรท์ที่มีค่าใกล้เคียง 1 จะลดการกัดกร่อนเฉพาะที่ (localize corrosion) ของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ [1] นอกจากนี้จากตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.32 จะสังเกตได้ว่าแม้สัดส่วนของออสเตนไนท์ต่อเฟอร์ไรท์ของเหล็ก K4 ที่ผ่านการจำลองเชื่อมมีค่าใกล้เคียงโลหะพื้น แต่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนของเหล็ก K4 ที่ผ่านการจำลองเชื่อมมีค่าต่ำกว่าของโลหะพื้นมาก อาจเป็นเพราะผลจากโครงสร้าง Widmannstatten ที่พบในเหล็ก K4 ที่ผ่านการจำลองเชื่อม โครงสร้าง Widmannstatten ทำให้ความต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ลดลง [14]

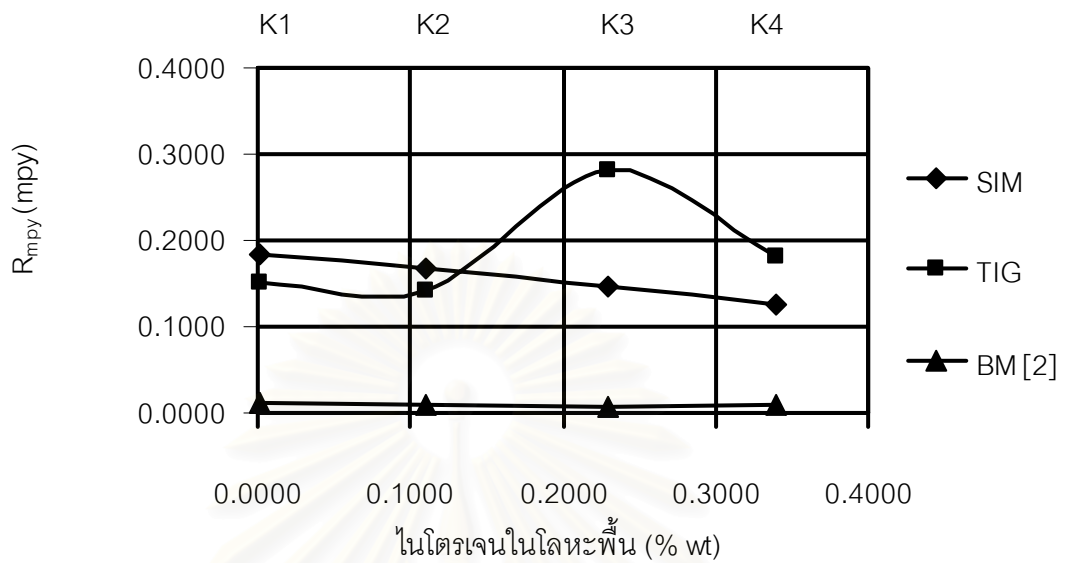
ตารางที่ 4.5 สัดส่วนออสเตนไนท์ต่อเฟอร์ไรท์ของโลหะพื้น [2] และเหล็กที่ผ่านการจำลองเชื่อม

เหล็ก	ออสเตนไนท์ : เฟอร์ไรท์	
	โลหะพื้น	ชิ้นงานจำลองการเชื่อม
K1 (0.0018 wt.%)	0.82	0.01
K2 (0.1100 wt.%)	1.00	0.30
K3 (0.2300 wt.%)	1.04	0.78
K4 (0.3400 wt.%)	1.78	1.09

จากค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนสามารถนำไปคำนวณหาอัตราการกัดกร่อนได้จากสมการ [2]

$$R_{\text{mpy}} = [0.13 * I_{\text{corr}} * e] / \rho \quad (4.1)$$

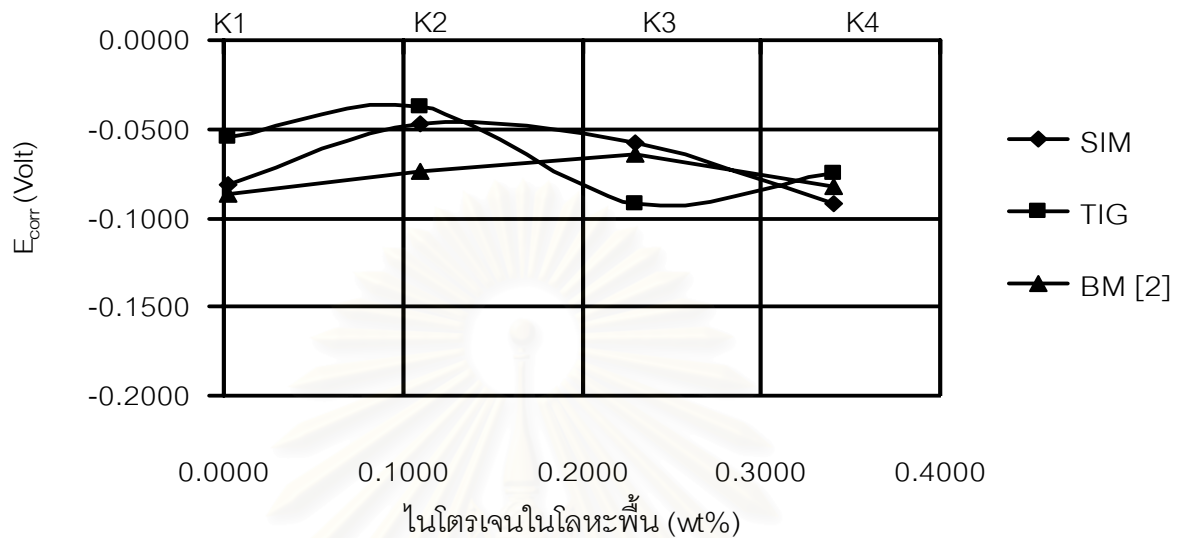
เมื่อ	$R_{\text{mpy}}$	คือ	อัตราการเกิดการกัดกร่อน (มิลต่อปี)
	$I_{\text{corr}}$	คือ	ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (ไมโครแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร)
	$e$	คือ	น้ำหนักกรัมสมมูลย์ของโลหะ ในที่นี้มีค่า 27.92
	$\rho$	คือ	ความหนาแน่นของโลหะ ในที่นี้มีค่า 7.87



รูปที่ 4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไนโตรเจนในโลหะพื้นและค่าอัตราการกัดกร่อนของเหล็ก K1-K4

รูปที่ 4.32 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการกัดกร่อนและปริมาณไนโตรเจนของเหล็ก K1-K4 ซึ่งคำนวณมาจากค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน เหล็ก K3 ที่ผ่านการเชื่อมทิกพัลส์ให้ค่าอัตราการกัดกร่อนมีค่าสูงสุด และเหล็ก K1-K4 ที่ผ่านการจำลองการเชื่อมมีแนวโน้มค่าอัตราการกัดกร่อนลดลงเมื่อปริมาณไนโตรเจนของโลหะพื้นสูงขึ้น ในขณะที่ค่าอัตราการกัดกร่อนของโลหะพื้นเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย ผลค่าอัตราการกัดกร่อนตามรูปที่ 4.32 มีลักษณะเช่นเดียวกับผลของค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (รูปที่ 4.31) ทั้งนี้เนื่องจากค่าอัตราการกัดกร่อนคำนวณมาจากค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน

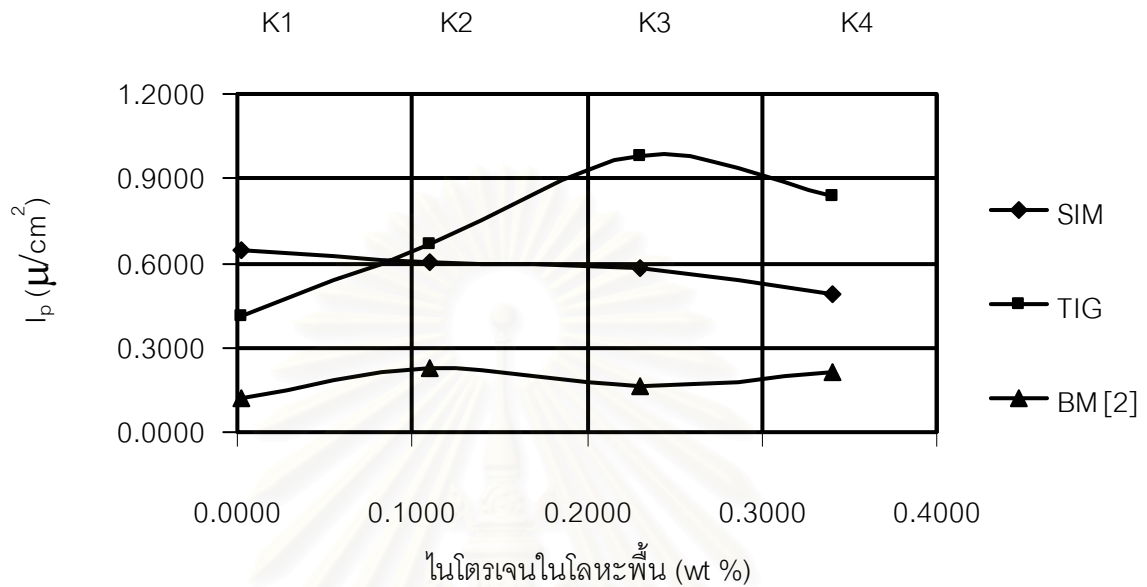
#### 4.4.2 ผลการทดสอบค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน ( $E_{corr}$ )



รูปที่ 4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไนโตรเจนในโลหะพื้นและค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของเหล็ก K1-K4

จากรูปที่ 4.33 พบว่าแนวเชื่อมทิกพัลส์เหล็ก K3 และ K4 มีค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนลดลงเมื่อเทียบกับแนวเชื่อมทิกพัลส์เหล็ก K1 และ K2 ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของแนวเชื่อมทิกพัลส์เหล็ก K3 ลดลงมากที่สุด อธิบายได้ว่าแนวเชื่อมทิกพัลส์เหล็ก K3 มีการตกตะกอนโครเมียมไนไตรด์มากที่สุด การตกตะกอนของโครเมียมไนไตรด์ทำให้เกิดบริเวณขาดโครเมียม ซึ่งเป็นจุดอ่อนของฟิล์มทำให้เหล็กบริเวณนี้ถูกกัดกร่อนได้ง่าย สำหรับกรณีของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ที่ผ่านการจำลองเชื่อม พบว่าค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนมีแนวโน้มใกล้เคียงกันกับค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของโลหะพื้น อาจเป็นเพราะเหล็กที่ผ่านการจำลองเชื่อมไม่พบตะกอนของโครเมียมไนไตรด์ ที่ส่งผลให้ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนลดลงและมีปริมาณออกซิเดชันในทีในช่วงที่เหมาะสม (40-60% โดยปริมาตร)

#### 4.4.3 ผลการทดสอบความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าขณะวัสดุเกิดฟิล์มที่ผิว ( $I_p$ )



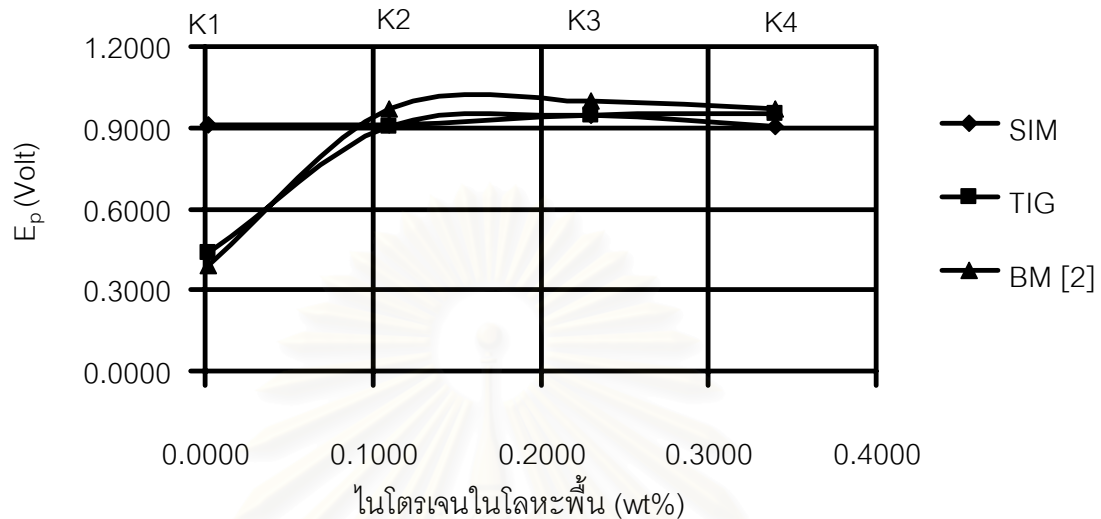
รูปที่ 4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไนโตรเจนในโลหะพื้นและค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าขณะวัสดุเกิดฟิล์มที่ผิวของเหล็ก K1-K4

รูปที่ 4.34 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าขณะเกิดฟิล์มที่ผิวและปริมาณไนโตรเจนของเหล็ก K1 – K4 ที่ผ่านการเชื่อมทิกพัลส์ ผ่านการจำลองการเชื่อม และในโลหะพื้น พบว่าค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าขณะวัสดุเกิดฟิล์มที่ผิวของเหล็ก K3 ที่ผ่านการเชื่อมทิกพัลส์มีค่าสูงสุด ค่าความหนาแน่นกระแสขณะวัสดุเกิดฟิล์มที่ผิวเป็นตัวบ่งชี้เสถียรภาพของฟิล์มพาสซีฟที่เกิดขึ้น [2] ค่ามากเสถียรภาพของฟิล์มพาสซีฟจะน้อยเพราะฟิล์มยอมให้ไอออนผ่านได้ง่าย ฟิล์มพาสซีฟของแนวเชื่อมทิกพัลส์เหล็ก K3 มีเสถียรภาพน้อยกว่าฟิล์มพาสซีฟของแนวเชื่อมทิกพัลส์เหล็ก K1, K2 และ K4 ทั้งนี้เพราะมีปริมาณตะกอนโครเมียมไนไตรด์สูงสุด การตกตะกอนของโครเมียมไนไตรด์อาจส่งผลให้ฟิล์มพาสซีฟบางตรงบริเวณขนาดโครเมียม [14]

สำหรับเหล็ก K1-K4 ที่ผ่านการจำลองเชื่อมซึ่งไม่เกิดการตกตะกอนของโครเมียมไนไตรด์ พบว่าค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าขณะวัสดุเกิดฟิล์มที่ผิวลดลงเล็กน้อย ขณะที่ในโลหะพื้นค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าขณะวัสดุเกิดฟิล์มที่ผิวมีค่าเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย ซึ่งอาจอธิบายได้ว่าเป็นผลจากสัดส่วนของออกซิเจนในท่อเฟอร์ไรต์ดังอธิบายไว้ในหัวข้อ 4.4.1 อย่างไรก็ตาม กระแสไฟฟ้าฟิล์มพาสซีฟของเหล็กที่ผ่านการจำลองเชื่อมสูงกว่าของโลหะพื้น ซึ่งหมายความว่าโครงสร้างจุลภาคจากการจำลองเชื่อมสร้างฟิล์มพาสซีฟได้ดีเท่าโลหะพื้น



#### 4.4.4 ผลการทดสอบค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็ม



รูปที่ 4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างไนโตรเจนในโลหะพื้นและค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็ม

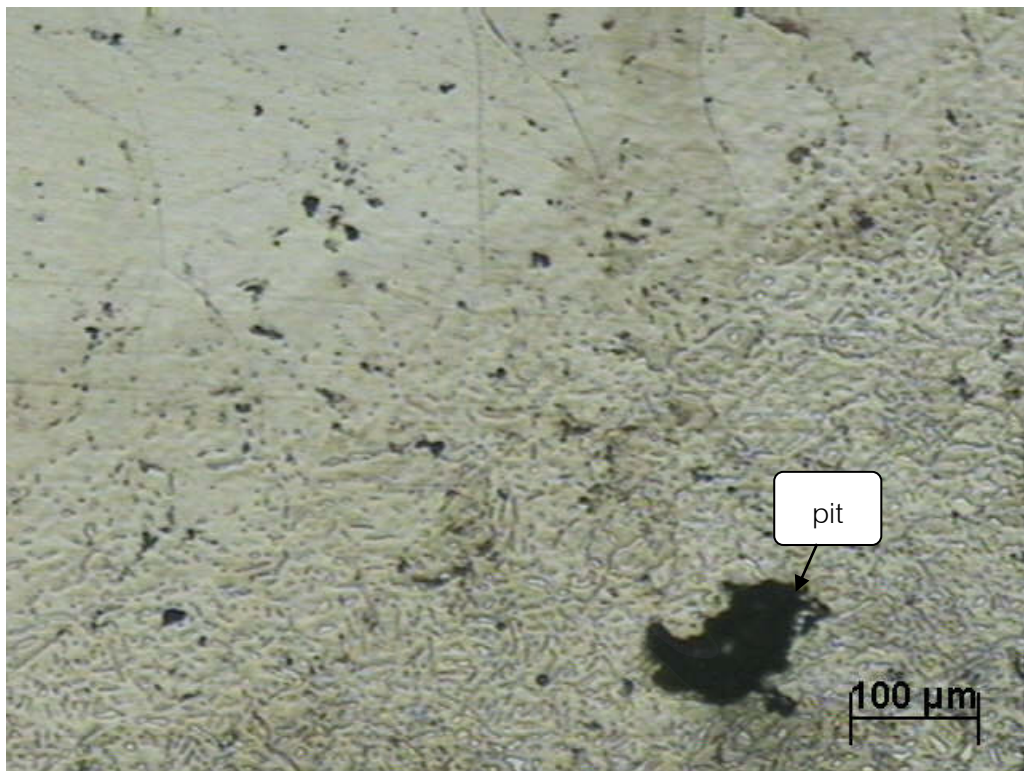
รูปที่ 4.35 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็มของเหล็ก K1 – K4 ที่ผ่านการเชื่อมทิกพัลส์ จำลองเชื่อม และโลหะพื้น พบว่าเหล็ก K1-K4 ที่ผ่านการเชื่อมทิกพัลส์และโลหะพื้น ให้ศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็มสูงขึ้นและมีค่าใกล้เคียงกัน เมื่อปริมาณไนโตรเจนมากกว่า 0.1100 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็มมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ผลการทดลองแสดงว่าไนโตรเจนช่วยเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนแบบรูเข็มของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ แต่เมื่อปริมาณไนโตรเจนสูงกว่า 0.1100 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็มเปลี่ยนแปลงน้อยมาก อาจเป็นผลจากการที่สมบัติความต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ ถูกกำหนดโดยเฟสที่อ่อนแอต่ออาการกัดกร่อน [15] เหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ที่มีไนโตรเจนตั้งแต่ 0.1100 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักขึ้นไป เฟสเดลตาเฟอร์ไรท์เป็นเฟสที่ถูกกัดกร่อน [2] การผสมไนโตรเจนเกินกว่า 0.1100 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ไนโตรเจนส่วนมากจะละลายอยู่ในออสเทนไนท์เพราะไนโตรเจนสามารถละลายในเดลตาเฟอร์ไรท์ได้เพียงประมาณ 0.05 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก [13] ดังนั้นการผสมไนโตรเจนสูงกว่า 0.1100 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จึงไม่ช่วยเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนแบบรูเข็มของเดลตาเฟอร์ไรท์ เดลตาเฟอร์ไรท์จึงถูกกัดกร่อน สำหรับเหล็ก K1 – K4 ซึ่งผ่านการจำลองเชื่อม พบว่าค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็มมีการเปลี่ยนแปลงเพียงน้อยมากเมื่อปริมาณไนโตรเจนเพิ่มขึ้น ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็มของเหล็ก K1 ที่ผ่านการจำลองเชื่อมมีค่าสูงกว่าเหล็ก K1 ที่

ผ่านการเชื่อมทิกพัลส์มาก อาจเป็นผลจากการที่เหล็ก K1 ออสเตนไนท์เป็นเฟสที่เกิดการกัดกร่อนเนื่องจากมีปริมาณโครเมียมต่ำ [2] ดังนั้นบริเวณกัดกร่อนของเหล็ก K1 ที่ผ่านการจำลองเชื่อมซึ่งมีปริมาณออสเตนไนท์ต่ำมาก (ประมาณ 1 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) จึงมีปริมาณโครเมียมเฉลี่ยสูงกว่าเหล็ก K1 ที่ผ่านการเชื่อมทิกพัลส์ทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็มสูงขึ้น

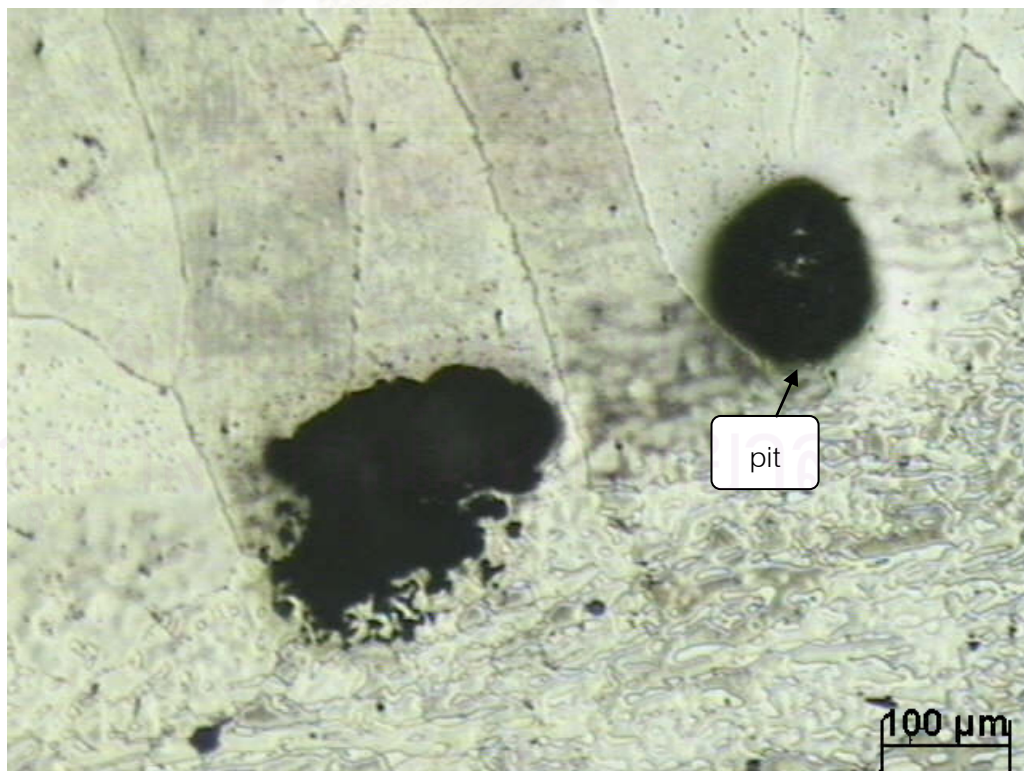
#### 4.3.5 ผลการทดสอบบริเวณที่ถูกกัดกร่อนแบบรูเข็ม

รูปที่ 4.36-4.39 แสดงโครงสร้างมหภาคบริเวณที่ถูกกัดกร่อนแบบรูเข็มของแนวเชื่อมทิกพัลส์เหล็ก K1-K4 และรูปที่ 4.40-4.43 แสดงรูปโครงสร้างจุลภาคเหล็ก K1-K4 บริเวณที่ถูกกัดกร่อนที่ขยายจากรูปที่ 4.36-4.39 ตามลำดับ เหล็ก K1-K4 มีบริเวณการกัดกร่อนที่ต่างกัน เหล็ก K1 ที่ผ่านการเชื่อมทิกพัลส์ พบว่าจะมีการกัดกร่อนที่บริเวณโลหะพื้น ในขณะที่เหล็ก K2-K4 ที่ผ่านการเชื่อมทิกพัลส์ ถูกกัดกร่อนที่บริเวณแนวการหลอมเหลวและที่บริเวณกระแทกร้อน การที่เหล็ก K1 ถูกกัดกร่อนที่บริเวณโลหะพื้น เป็นผลจากเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์เริ่มถูกกัดกร่อนตรงบริเวณที่อ่อนแอ เหล็ก K1 จะเกิดการกัดกร่อนที่โครงสร้างออสเตนไนท์เพราะออสเตนไนท์มีปริมาณโครเมียมต่ำกว่าเฟอร์ไรท์ [2] ส่วนเหล็ก K2-K4 บริเวณการกัดกร่อนจะเกิดที่แนวการหลอมเหลวและบริเวณกระแทกร้อนซึ่งพบว่ามีตะกอนของโครเมียมไนไตรด์ บริเวณที่พบการตกตะกอนของโครเมียมไนไตรด์จะเป็นจุดเริ่มต้นของการเกิดการกัดกร่อนแบบรูเข็มเพราะว่ามีบริเวณขาดโครเมียม [13]

กรณีเหล็ก K1-K4 ที่ผ่านการจำลองเชื่อมซึ่งไม่เกิดการตกตะกอนของโครเมียมไนไตรด์ บริเวณที่เกิดการกัดกร่อนแสดงในรูปที่ 4.44-4.47 พบว่าเหล็ก K1 ถูกกัดกร่อนที่บริเวณออสเตนไนท์ตามขอบเกรนเพราะออสเตนไนท์มีโครเมียมน้อยกว่าเดลตาเฟอร์ไรท์ ดังนั้นออสเตนไนท์จึงถูกกัดกร่อนเนื่องจากโครเมียมมีบทบาทสำคัญในการสร้างฟิล์มออกไซด์ของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ [2] สำหรับเหล็ก K2 - K4 พบว่าการกัดกร่อนเกิดที่บริเวณเดลตาเฟอร์ไรท์ เพราะเฟสออสเตนไนท์มีความต้านทานการกัดกร่อนสูงกว่าเดลตาเฟอร์ไรท์ เนื่องจากเมื่อเหล็กมีส่วนผสมไนโตรเจนเพิ่มขึ้น ไนโตรเจนสามารถละลายในออสเตนไนท์ได้มากกว่าเดลตาเฟอร์ไรท์และเพิ่มเสถียรภาพและความต้านทานการกัดกร่อนของออสเตนไนท์ [2]

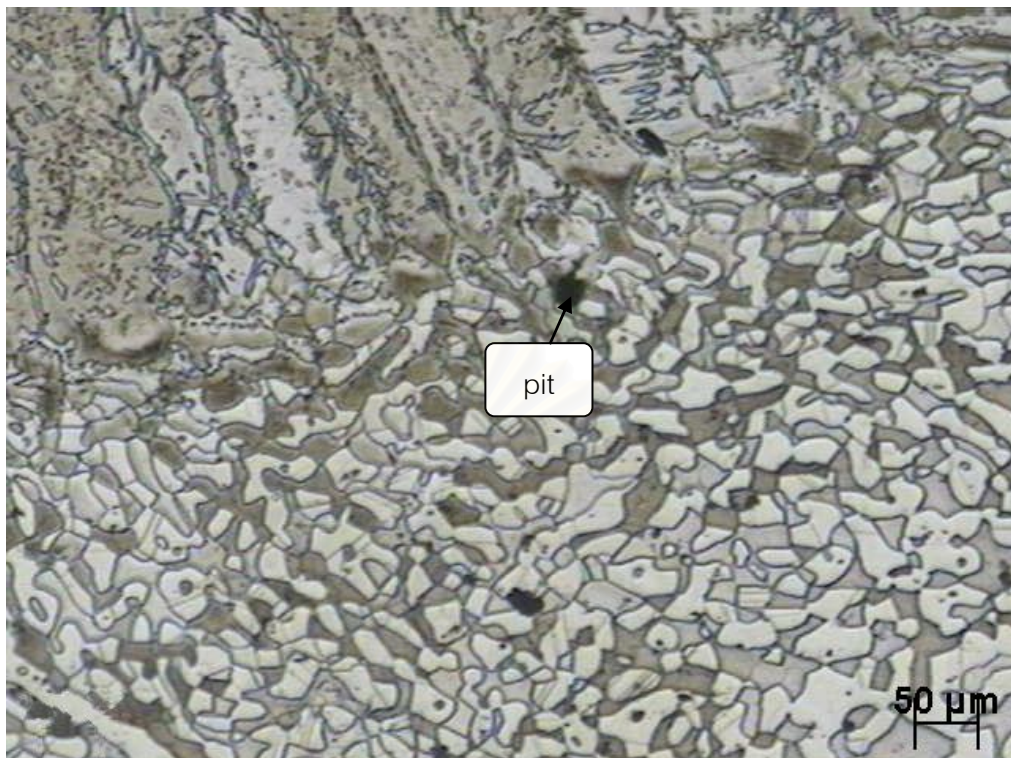


รูปที่ 4.36 โครงสร้างมหภาคบริเวณที่เกิดการกัดกร่อนของเหล็ก K1 ที่ผ่านการเชื่อมทิกพัลส์

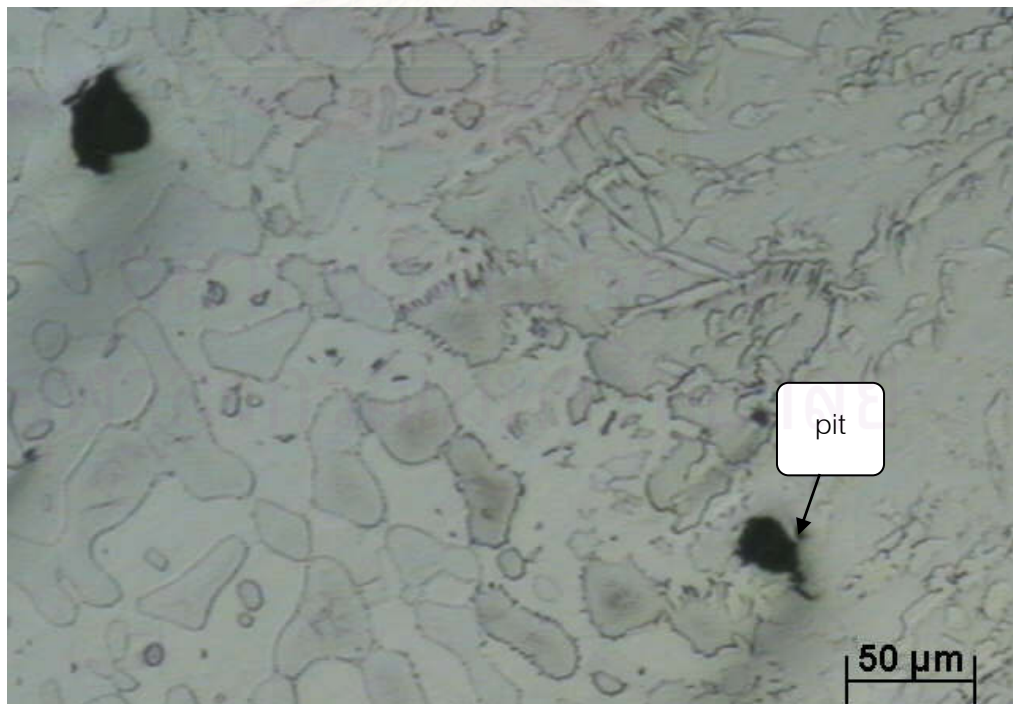


รูปที่ 4.37 โครงสร้างมหภาคบริเวณที่เกิดการกัดกร่อนของเหล็ก K2 ที่ผ่านการเชื่อมทิกพัลส์



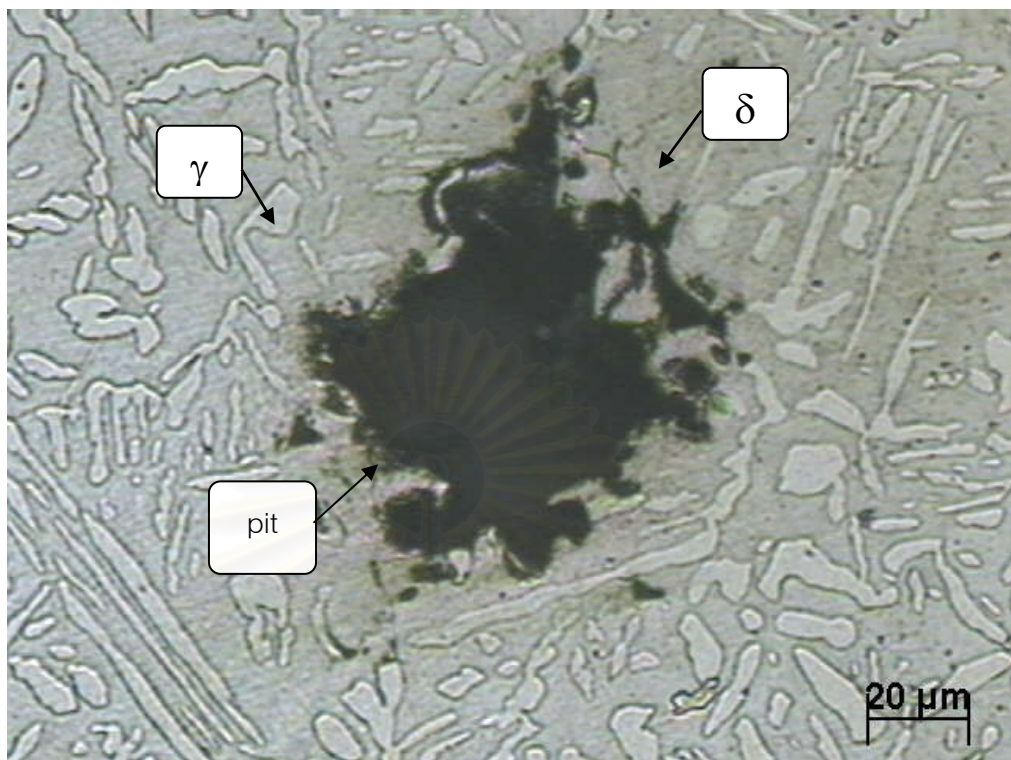


รูปที่ 4.38 โครงสร้างมหภาคบริเวณที่เกิดการกัดกร่อนของเหล็ก K3 ที่ผ่านการเชื่อมทิกพัลส์

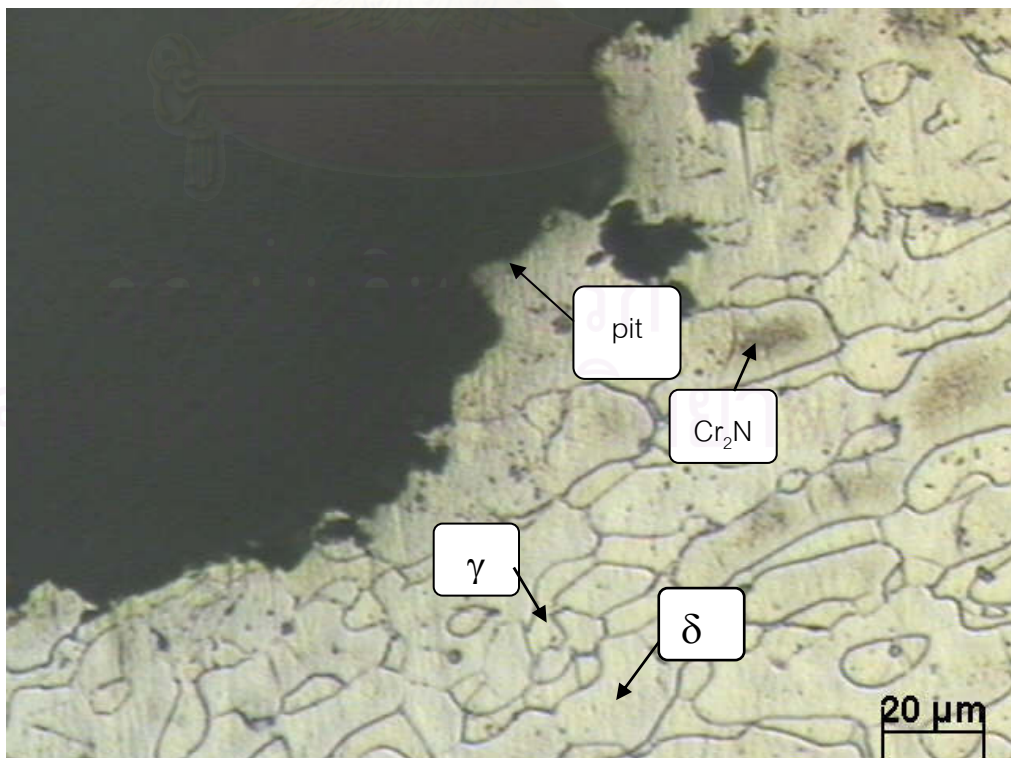


รูปที่ 4.39 โครงสร้างมหภาคบริเวณที่เกิดการกัดกร่อนของเหล็ก K4 ที่ผ่านการเชื่อมทิกพัลส์

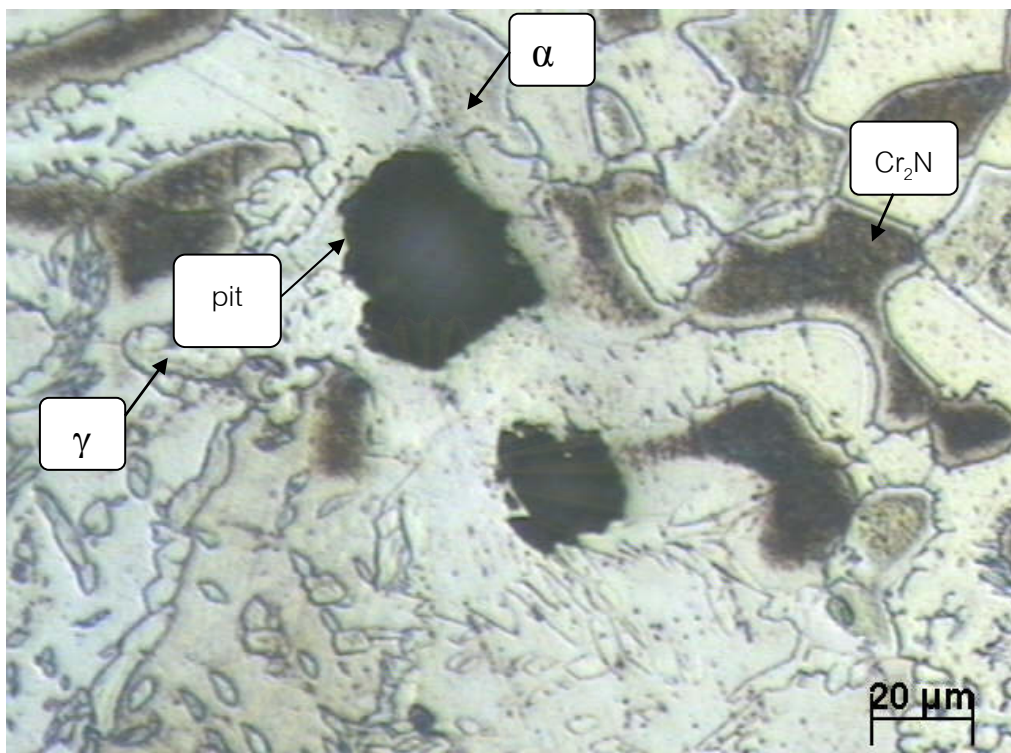




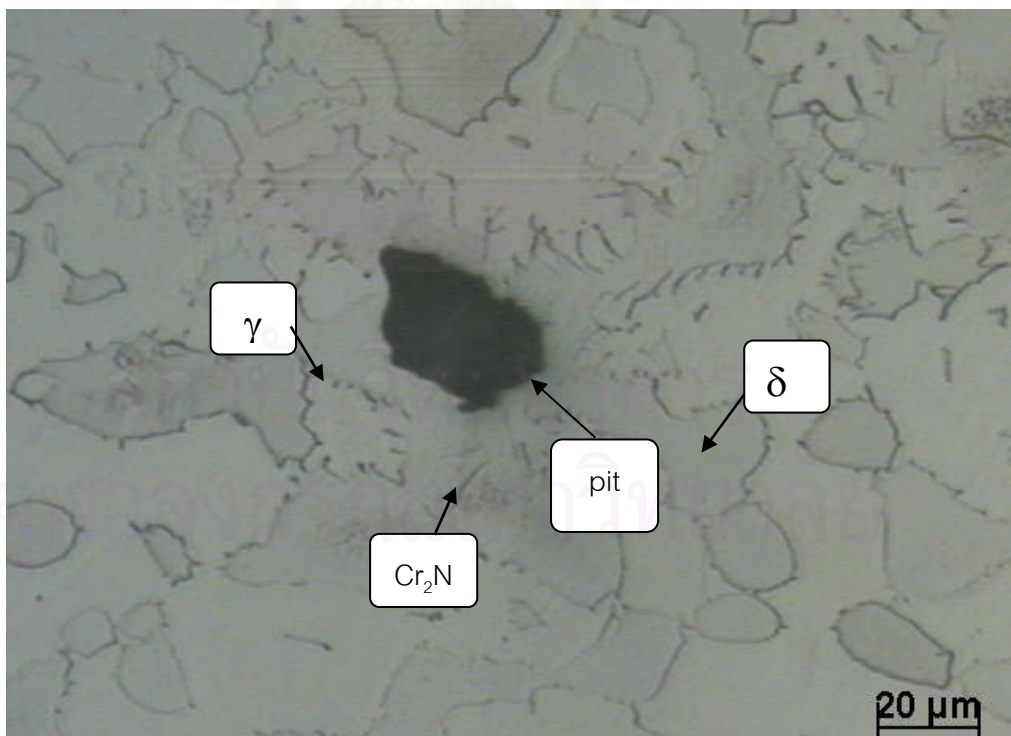
รูปที่ 4.40 โครงสร้างจุลภาคบริเวณที่เกิดการกัดกร่อนของเหล็ก K1 ที่ผ่านการเชื่อมทิกพัลส์



รูปที่ 4.41 โครงสร้างจุลภาคบริเวณที่เกิดการกัดกร่อนของเหล็ก K2 ที่ผ่านการเชื่อมทิกพัลส์

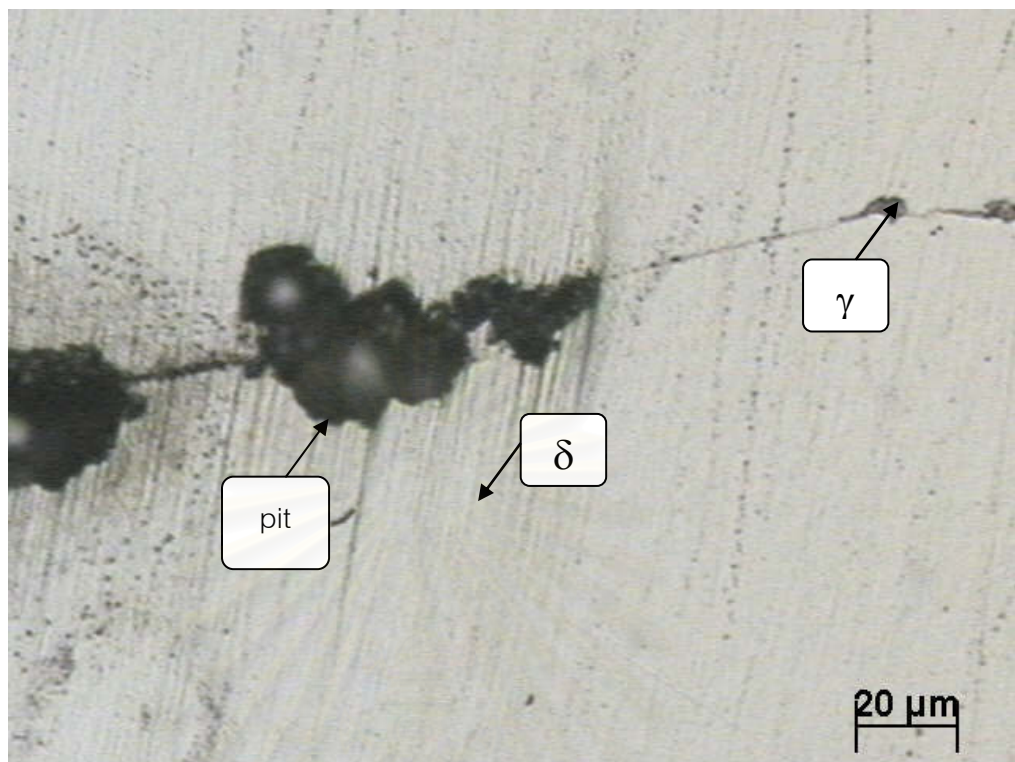


รูปที่ 4.42 โครงสร้างจุลภาคบริเวณที่เกิดการกัดกร่อนของเหล็ก K3 ที่ผ่านการเชื่อมทิกพัลส์

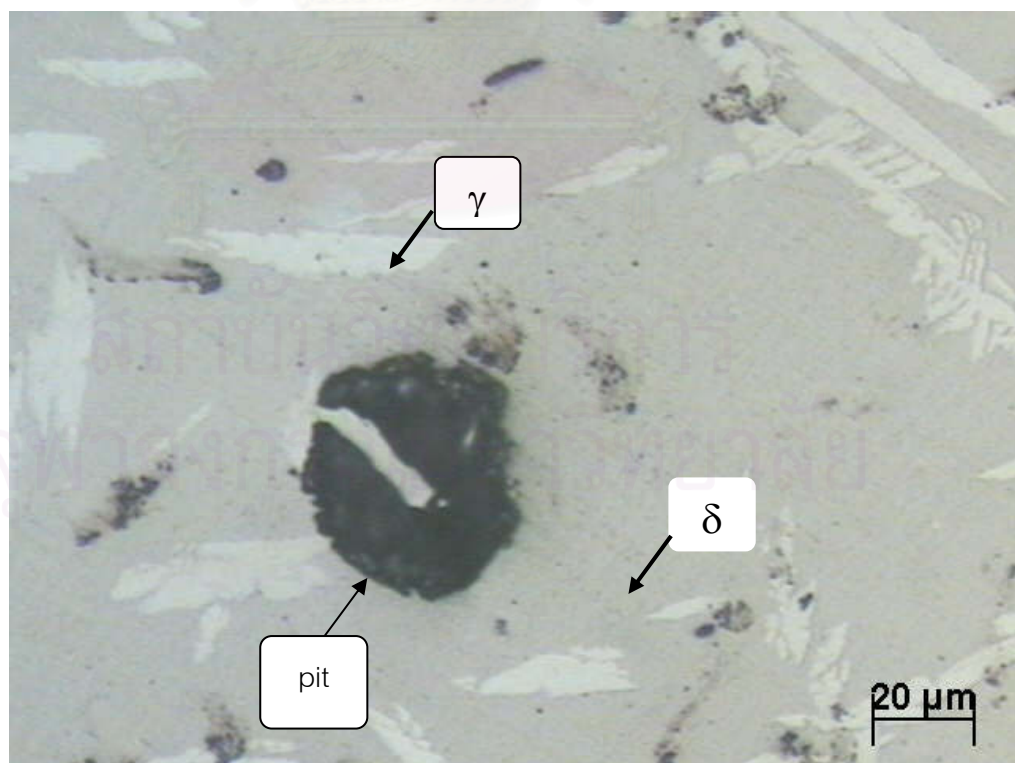


รูปที่ 4.43 โครงสร้างจุลภาคบริเวณที่เกิดการกัดกร่อนของเหล็ก K4 ที่ผ่านการเชื่อมทิกพัลส์

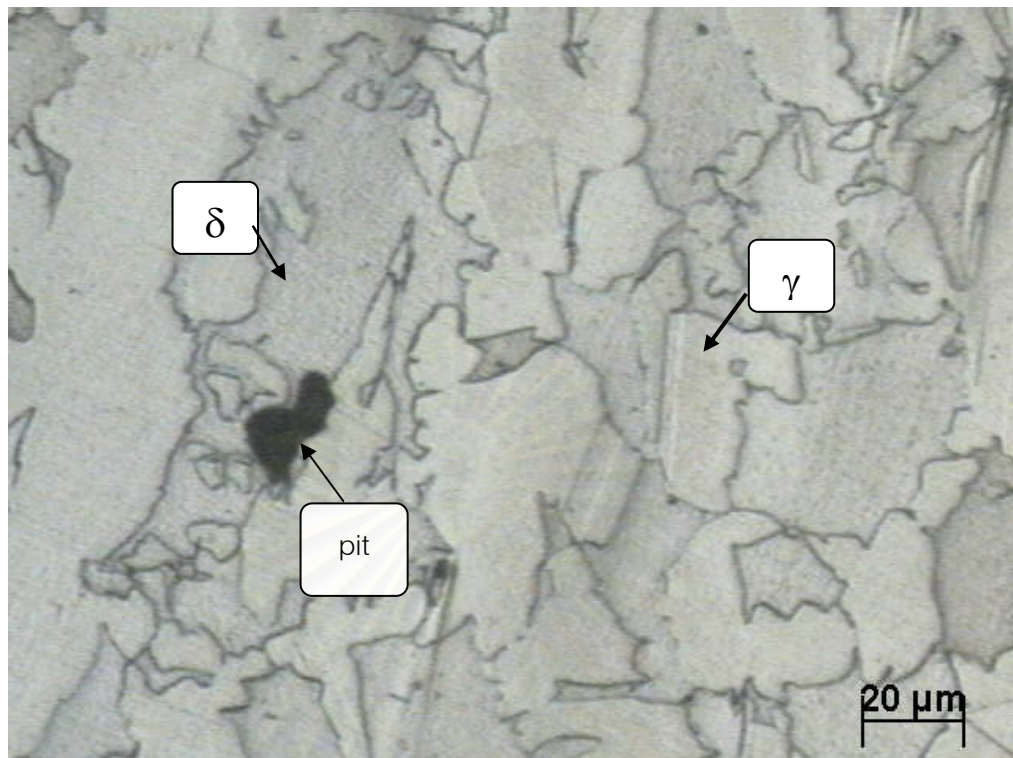




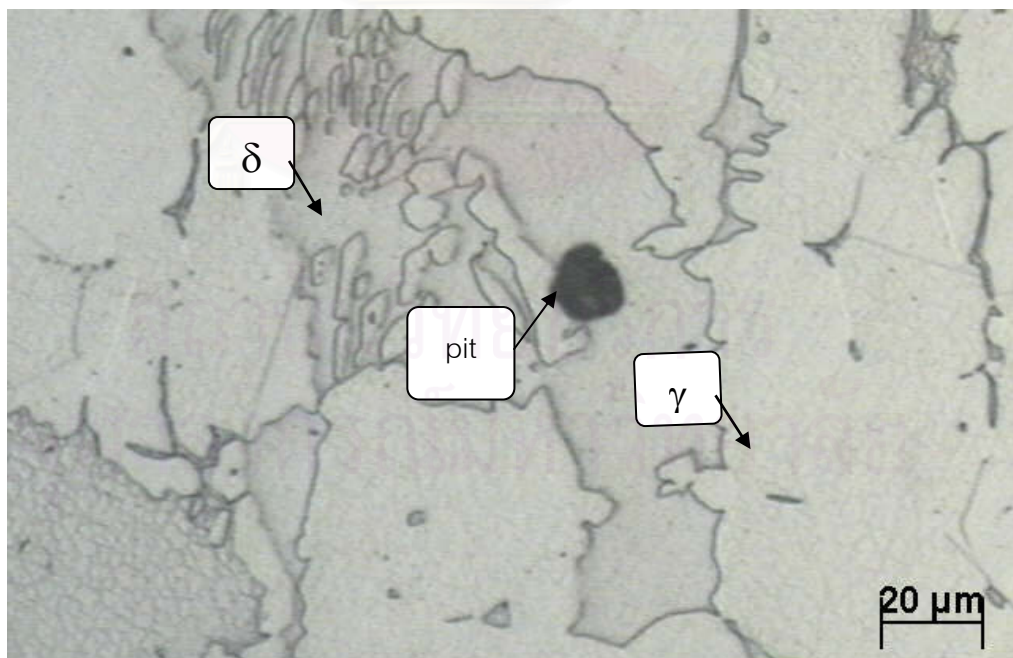
รูปที่ 4.44 โครงสร้างจุลภาคบริเวณที่เกิดการกัดกร่อนของเหล็ก K1 ที่ผ่านการจำลองเชื่อม



รูปที่ 4.45 โครงสร้างจุลภาคบริเวณที่เกิดการกัดกร่อนของเหล็ก K2 ที่ผ่านการจำลองเชื่อม



รูปที่ 4.46 โครงสร้างจุลภาคบริเวณที่เกิดการกัดกร่อนของเหล็ก K3 ที่ผ่านการจำลองเชื่อม



รูปที่ 4.47 โครงสร้างจุลภาคบริเวณที่เกิดการกัดกร่อนของเหล็ก K4 ที่ผ่านการจำลองเชื่อม



## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาผลของไนโตรเจนต่อปริมาณโครงสร้างเฟอร์ไรท์และความต้านทานการกัดกร่อนของแนวเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ที่มีส่วนผสมโครเมียม 28 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก นิกเกิล 7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

5.1 ปริมาณเฟอร์ไรท์ที่เนื้อเชื่อม แนวการหลอมเหลว และบริเวณกระทบร้อนของเหล็ก K1-K4 ที่ผ่านการเชื่อมทิกพัลส์ ลดลงเมื่อปริมาณไนโตรเจนสูงขึ้น

5.2 เหล็ก K3 ที่ผ่านการเชื่อมทิกพัลส์มีปริมาณตะกอนโครเมียมไนไตรด์ที่แนวการหลอมเหลวและบริเวณกระทบร้อนสูงสุด

5.3 ตะกอนโครเมียมไนไตรด์ทำให้สมบัติการกัดกร่อนของเหล็ก K1-K4 ลดลง เพราะเป็นจุดกำเนิดของรูเข็มตรงบริเวณนี้เกิดการพองโครเมียมใกล้กับตะกอน

5.4 การจำลองเชื่อมเหล็ก K1-K4 โดยเย็นตัวจากอุณหภูมิ 1300-1375 องศาเซลเซียส แล้วเย็นตัวในอากาศทำให้ปริมาณเดลตาเฟอร์ไรท์ลดลง และไม่เกิดการตกตะกอนโครเมียมไนไตรด์ เมื่อเทียบกับแนวเชื่อมทิกพัลส์

5.5 เหล็ก K1-K4 ที่ผ่านการจำลองการเชื่อมมีแนวโน้มความต้านทานการกัดกร่อนสูงกว่าเมื่อเทียบกับแนวเชื่อมทิกพัลส์

5.6 เหล็ก K1-K4 ที่ผ่านการจำลองการเชื่อมมีแนวโน้มความต้านทานการกัดกร่อนสูงกว่าเมื่อเทียบกับแนวเชื่อมทิกพัลส์

## รายการอ้างอิง

1. P. Lacombe, B. Baroux and G. Beranger, Stainless Steels, Les Editions de Physique Les Ulis., France, 1991.
2. พรพสา วงษ์ปัญญา. ผลของไนโตรเจนต่อความต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ที่มีส่วนผสมโครเมียม 28% นิกเกิล 7% ในสารละลายไฮเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 3.5 % โดยน้ำหนัก. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2546.
3. กัญญา ตระกูลคู่. เทคโนโลยีการกัดกร่อน, 2534.
4. ภาณุพงศ์ กอปรศรีสวัสดิ์. ผลของไนโตรเจนต่อความต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดออสเทนนิติกเกรด 304L. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2544.
5. M. G. Fontana. Corrosion Engineering. 3<sup>rd</sup> ed. McGraw-Hill Book Company. Singapore, 1987.
6. A. J. Sedriks. Corrosion of Stainless Steels. 2<sup>nd</sup> ed. John-Wiley & Sons. New York, 1996.
7. ประทีป วงศ์บัณฑิต. การสร้างแผนภูมิพอร์แบ็กซ์ของเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ในสารละลายที่มีคลอไรด์ผสม ด้วยเทคนิคทางไฟฟ้าเคมี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิตสาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2543.
8. P.R. Levey and A. van Bennekorn, A mechanistic study of the effects on nitrogen on the corrosion properties of stainless steels, Corrosion Science 51, (1995).pp 911-921.
9. 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).pp1639-1664.
10. B. Bonnefois, P. Soullignac and D. Catelin. Some beneficial effects of nitrogen alloying on the weldability of stainless steels. Proceedings of the international conference organized by The Institute of Metals and the Societe Francaise de Metallurgie and held at Lille in France, (1988). pp81-86.

11. G. Huismann and H. Hoffmeister, Investigation of TIG pulse parameter and shielding gas composition on weld bead formation and microstructure of Duplex Stainless Steel orbital TIG root welds. Laboratorium für Werkstoffkunde und Schweißtechnik Universität der Bundeswehr Hamburg, 1992.
12. V. Muthupandi, P. Bala Srinivasan, S.K. Seshadri and S. Sundaresan. Effect of weld metal chemistry and heat input on the structure and properties of duplex stainless steel welds Materials Science and Engineering A, A358(2003). pp 9-16.
13. Horng-Yih Liou, Rong-luan Hsieh and Wen-Ta Tsai. Microstructure and pitting corrosion in simulated heat affected zones of duplex stainless steels. Materials Chemistry and Physics 74, (2002). pp 33-42.
14. R.A. Parren, T. Suter, C. Solenthaler, G. Gullo, P.J. Uggowitzer, M.O. Spediell Corrosion resistance of duplex stainless steels in chloride ion containing environments: microelectrochemical method I. Precipitates free state, Corrosion Science 43, (2001). pp707-7726.
15. R.A. Parren, T. Suter, C. Solenthaler, G. Gullo, P.J. Uggowitzer, M.O. Spediell Corrosion resistance of duplex stainless steels in chloride ion containing environments: microelectrochemical method II. Influence of precipitates, Corrosion Science 43, (2001). pp 727-745.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## ภาคผนวก ก

### วิธีการหาสัดส่วนโครงสร้างออสเตนไนท์ในเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์

การหาสัดส่วนโครงสร้างออสเตนไนท์ของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ ด้วยวิธีการปริมาณทางโลหะวิทยา สามารถหาสัดส่วนได้จากภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานทดลองที่ผ่านการขัดเงาและกัดกรด วิธีการนี้เป็นการหาสัดส่วนโครงสร้างออสเตนไนท์เป็นเปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร เนื่องจากภาพโครงสร้างจุลภาคที่ได้เป็นแบบ 2 เฟส โดยเห็นโครงสร้างเฟอร์ไรท์เป็นสีเทา-ดำ และโครงสร้างออสเตนไนท์เป็นสีขาว ซึ่งสามารถหาสัดส่วนโครงสร้างออสเตนไนท์ได้จากสมการ

$$\lambda = (L_3)_\gamma [1 - (V_v)_\gamma / (V_v)_\gamma]$$

เมื่อ	$\lambda$	=	ระยะห่างของ $\gamma$ โดยเฉลี่ย
	$(V_v)_\gamma$	=	อัตราส่วนโดยปริมาตรของ $\gamma$
	$(L_3)_\gamma$	=	ระยะเฉลี่ยของ $\gamma$ ที่เส้นทดสอบลากผ่าน

การหาค่า  $\lambda$  และ  $(L_3)_\gamma$  สามารถหาได้จากการลากเส้นทดสอบตัดผ่านโครงสร้างจุลภาคที่ต้องการหาค่าสัดส่วนโดยปริมาตร (Volume fraction) ดังแสดงในรูปที่ ก.1

สิ่งที่สำคัญอีกประการหนึ่งในการหาค่าสัดส่วนโครงสร้างออสเตนไนท์ คือ ต้องพิจารณาถึงค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation) ที่เกิดขึ้นเพื่อหาขอบเขตความเชื่อมั่นสำหรับค่าสัดส่วนโครงสร้างออสเตนไนท์เฉลี่ยในชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ ดังสมการต่อไปนี้

$$S = \left\{ \frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^n [\bar{X} - X]^2 \right\}^{1/2}$$

เมื่อ	$n$	=	จำนวนครั้งการวัด
	$X$	=	ค่าจากการวัดปริมาณแต่ละครั้ง
	$\bar{X}$	=	ค่าเฉลี่ยเลขคณิตของการวัดปริมาณ

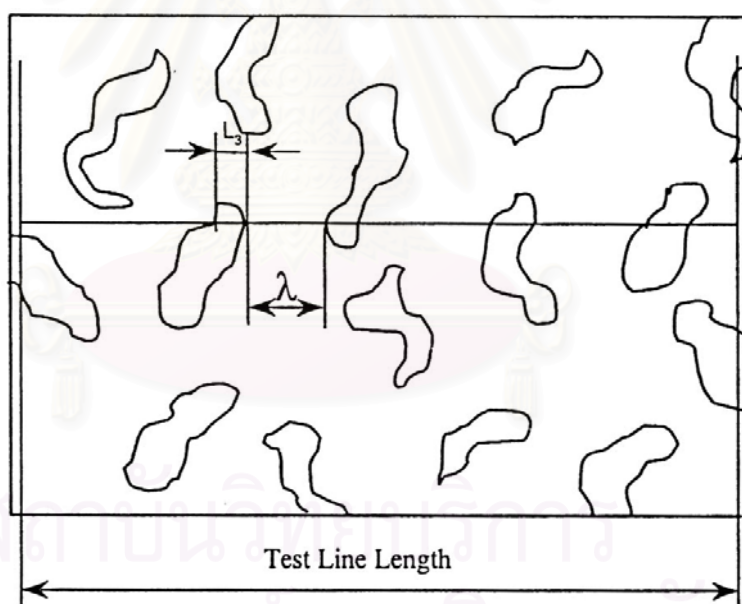
เมื่อกำหนดระดับค่าความเชื่อมั่น 95% จะได้ขอบเขตความเชื่อมั่น (CI) ของค่าเฉลี่ยสัดส่วน  
โครงสร้างออสเตนไนท์ในโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ที่ดัดสมการต่อไปนี้

$$CI = \pm 1.96 s/\sqrt{n}$$

และสัดส่วนโครงสร้างออสเตนไนท์เป็นสัดส่วนโดยปริมาตรในชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม  
ดูเพล็กซ์ที่ดัดสมการ

$$V_v = \bar{X} \pm CI$$

$$\%Error = [CI/\bar{X}] * 100$$



รูปที่ ก.1 ตำแหน่งการวัดค่า  $\lambda$  และ  $(L_3)_y$  จากเส้นทดสอบ

ตารางที่ ก.1 ปริมาณโครงสร้างออกสเตนไนท์ (เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) ที่โลหะพื้นของเหล็ก K1

19.57	53.82	64.25	24.57	41.08	37.82	49.37	52.17	47.01	30.49	43.67	50.05
44.34	28.94	48.96	32.71	37.34	37.75	50.22	44.60	48.18	34.87	56.20	39.74
34.54	33.68	36.12	41.99	67.54	33.48	28.25	39.77	27.84	44.43	47.00	30.92
53.77	41.45	33.81	45.65	49.11	46.71	24.64	40.34	47.89	34.94	51.22	25.95
20.06	30.28	23.77	53.91	40.35	32.25	46.49	41.69	42.84	41.03	42.62	48.07
46.57	53.85	52.99	29.99	28.69	24.95	56.80	38.87	33.33	54.54	41.15	28.46
52.83	35.63	38.77	54.11	51.62	22.05	45.67	28.12	34.98	33.45	49.53	39.82
25.26	56.84	38.70	28.56	33.63	30.10	26.89	49.68				

$$\Sigma X = 3708.56$$

$$\bar{X} = 40.31$$

$$n = 92$$

$$S = 10.39$$

$$CI = 1.23$$

$$\%error = 3.06$$

$$V_v = 40.31 \pm 1.23$$

ตารางที่ ก.2 ปริมาณโครงสร้างออกสเตนไนท์ (เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) ที่โลหะพื้นของเหล็ก K2

61.10	60.16	54.47	67.79	36.04	55.56	40.21	30.79	56.23	52.75	47.95	44.50
45.01	53.57	53.37	49.49	40.87	51.00	22.20	33.15	68.84	62.96	50.55	34.23
48.09	29.49	65.51	54.07	58.63	59.44	52.79	60.91	66.92	44.48	52.00	46.59
57.68	73.80	45.56	41.99	49.13	52.98	51.87	45.19	44.24	64.96	49.65	47.64
40.78	39.64	70.05	50.85	71.53	41.15	58.32	49.03	46.60	41.97	62.30	57.94
44.23	50.14	55.78	58.69	39.56	49.17	53.11	37.56	45.12	55.11	53.11	62.38
41.18	54.68	62.09	56.67	40.88	69.53	55.90	34.78	58.55	62.43	22.38	50.14
48.32	58.06	43.39	53.87	54.20	44.51	45.00	45.25				

$$\Sigma X = 4672.33$$

$$\bar{X} = 50.79$$

$$n = 92$$

$$S = 17.12$$

$$CI = 2.03$$

$$\%error = 3.72$$

$$V_v = 50.79 \pm 2.03$$

ตารางที่ ก.3 ปริมาณโครงสร้างออกสเตนไนท์ (เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) ที่โลหะพื้นของเหล็ก K3

52.57	71.59	59.89	78.60	60.44	58.26	53.16	59.87	79.39	57.96	49.15	60.37
51.16	81.60	41.05	23.69	59.95	54.20	56.42	50.80	54.17	62.24	73.71	65.58
66.93	63.49	63.29	60.26	50.83	56.69	59.21	32.24	67.98	42.56	46.88	36.35
57.91	67.52	37.45	49.55	48.83	66.35	69.67	46.71	58.86	64.21	58.75	52.66
74.78	70.63	52.00	58.62	66.65	61.98	52.30	63.56	61.32	72.33	66.65	59.23
52.46	63.73	65.89	83.22	55.60	68.08	41.90	77.72	61.13	70.24	57.73	71.22
71.82	69.69	68.39	34.93	65.41	63.47	60.67	72.35	79.25	56.75	51.44	68.27
55.80	53.54	70.50	43.06	64.78	50.94	69.17	56.05				

$$\sum X = 5496.24$$

$$\bar{X} = 59.74$$

$$n = 92$$

$$S = 18.74$$

$$CI = 2.22$$

$$\%error = 3.72$$

$$V_v = 59.74 \pm 2.22$$

ตารางที่ ก.4 เปอร์เซนต์โครงสร้างออกสเตนไนท์ (เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) ที่โลหะพื้นของเหล็ก K4

64.42	71.61	39.03	50.21	54.71	60.54	72.5	49.16	57.15	67.44	
22.83	55.14	59.02	35.48	58.32	53.41	61.66	66.27	63.79	41.99	
63.45	38.76	19.86	55.68	59.73	54.61	55.59	53.7	67.61	74.73	
44.65	36.72	34.64	66.14	51.24	63.3	74.57	55.01	60.8	50.85	
60.27	28.55	20.97	51.16	60.23	71.51	60.94	61.21	59.27	66.37	
37.67	52.26	22.1	47.9	64.02	63.84	75.77	60.86	67.36	60.14	
42.7	30.33	45.95	63.87	53.74	70.18	60.89	61.92	61.47	61.69	
48.78	23.41	43.58	75.74	60.06	65.85	70.63	62.72			

$$\sum X = 5599.3$$

$$\bar{X} = 60.81$$

$$n = 92$$

$$S = 10.05$$

$$CI = 2.05$$

$$\%error = 0.04$$

$$V_v = 60.81 \pm 2.05$$



ตารางที่ ก.5 ปริมาณโครงสร้างออกสเตนไนท์ (เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) ในเนื้อเชื่อมของเหล็ก K2

14.69	21.47	13.73	16.05	9.91	21.75	21.09	19.03	17.26	21.31	24.07	17.09
23.68	20.56	24.00	22.91	15.88	12.25	15.54	14.93	15.43	13.21	19.77	16.46
15.61	8.67	12.78	26.13	26.29	9.96	11.71	17.11	16.95	13.54	12.85	14.61
24.55	18.26	16.40	14.90	16.91	11.30	15.90	13.46	13.87	14.41	10.19	22.65
18.96	9.31	33.52	16.76	21.33	16.15	21.81	12.31	19.10	8.76	11.95	13.22
25.57	9.10	18.72	15.12	10.66	28.17	9.79	10.10	18.51	23.56	18.08	11.88
9.85	10.07	16.75	28.77	10.41	13.18	21.53	17.96	20.82	17.73	12.42	8.58
17.60	12.14	19.23	34.28	20.74	17.69	6.47	13.68				

$$\sum X = 1543.43$$

$$\bar{X} = 16.78$$

$$n = 92$$

$$S = 5.59$$

$$CI = 0.66$$

$$\%error = 3.95$$

$$V_v = 16.78 \pm 0.66$$

ตารางที่ ก.6 ปริมาณโครงสร้างออกสเตนไนท์ (เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) ในเนื้อเชื่อมของเหล็ก K3

38.39	46.90	40.81	34.25	33.98	51.53	55.58	54.22	30.17	25.72	39.93	51.66
20.26	32.84	51.97	34.44	16.78	37.00	27.66	41.80	25.55	49.88	39.62	31.13
57.30	21.46	33.99	18.95	40.16	41.03	32.56	43.83	47.64	28.79	33.95	27.85
53.59	34.29	47.00	32.77	48.86	42.54	30.84	64.70	45.94	49.29	40.33	46.73
32.33	36.51	22.14	48.78	30.44	50.05	61.26	40.06	42.12	31.15	33.30	41.25
43.38	41.59	25.43	22.71	20.58	50.54	35.21	32.95	32.60	28.71	46.58	46.69
33.15	56.00	31.16	24.84	47.22	36.99	31.64	49.72	27.14	35.00	47.50	57.63
39.62	19.90	41.98	42.29	36.51	47.32	43.94	36.24				

$$\sum X = 3558.59$$

$$\bar{X} = 38.68$$

$$n = 92$$

$$S = 10.51$$

$$CI = 1.25$$

$$\%error = 3.22$$

$$V_v = 38.68 \pm 1.25$$

ตารางที่ ก.7 ปริมาณโครงสร้างออกสเตนไนท์ (เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร)ในเนื้อเชื่อมของเหล็ก K4

19.54	18.54	44.12	40.31	33.32	48.67	62.08	38.70	31.64	47.72	24.00	28.59
51.12	33.04	33.86	30.60	38.97	40.48	30.40	18.71	29.41	40.26	23.41	29.09
18.50	23.97	32.85	28.33	20.29	50.35	64.61	14.92	22.23	40.42	38.07	31.86
54.79	48.02	9.97	26.94	56.23	57.28	44.01	19.44	12.72	31.50	25.53	34.02
27.70	28.97	36.47	36.81	29.01	51.18	29.17	24.96	38.32	32.73	33.98	18.35
27.80	30.58	25.17	33.90	55.87	43.39	39.52	17.77	32.44	21.23	36.87	21.12
29.65	43.86	29.93	38.47	47.47	36.40	46.18	35.05	12.06	33.73	33.86	30.09
16.25	26.62	29.78	28.49	33.68	51.35	39.55	31.87				

$$\begin{aligned} \Sigma X &= 3091.08 & \bar{X} &= 33.60 & n &= 92 & S &= 11.56 \\ CI &= 1.37 & \%error &= 4.08 & V_v &= 33.60 \pm 1.37 \end{aligned}$$

ตารางที่ ก.8 ปริมาณโครงสร้างออกสเตนไนท์ (เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) ที่บริเวณแนวการหลอม  
เหล็กของเหล็ก K1

10.77	9.16	17.03	6.94	7.28	10.97	3.35	3.68	6.57	6.28	12.88	11.76
15.64	10.73	11.93	8.91	12.37	9.77	11.03	12.68	4.10	8.99	4.99	5.71
8.16	9.36	8.14	6.07	2.33	6.05	13.25	6.13	10.71	6.57	15.21	11.19
27.42	8.13	19.00	4.48	4.45	11.17	26.82	5.97	3.82	3.79	4.96	6.43
22.78	17.62	23.35	6.14	6.65	2.67	10.84	9.65	6.24	5.78	8.21	6.46
8.61	13.78	9.43	7.28	14.85	2.54	3.45	13.41	4.22	10.65	3.83	17.67
22.17	15.04	16.96	13.90	5.67	2.78	16.14	9.87	8.54	7.50	16.71	10.39
7.47	3.03	31.57	12.77	9.96	7.81	15.87	13.29				

$$\begin{aligned} \Sigma X &= 936.65 & \bar{X} &= 10.18 & n &= 92 & S &= 5.90 \\ CI &= 0.70 & \%error &= 6.88 & V_v &= 10.18 \pm 0.70 \end{aligned}$$

ตารางที่ ก.9 ปริมาณโครงสร้างออกสเตนไนท์ (เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) ที่บริเวณแนวการหลอม  
 เหลวของเหล็ก K2

41.46	32.46	35.52	21.13	17.51	24.48	20.84	26.29	17.67	20.33	29.08	32.14
20.69	29.39	20.66	19.03	21.42	12.90	36.70	20.22	27.25	24.27	31.43	25.78
29.69	33.40	34.53	5.76	25.20	26.27	13.32	12.91	17.83	17.26	33.75	10.59
14.14	35.75	25.05	25.37	21.26	32.12	23.41	34.56	31.51	13.39	41.76	29.15
25.73	17.64	28.75	11.48	21.96	27.30	24.55	13.63	21.27	23.91	24.44	24.95
24.12	32.06	18.89	20.67	34.45	18.45	29.68	25.29	27.60	44.28	26.54	16.60
26.41	25.86	12.27	24.86	16.56	16.75	38.00	17.71	21.75	23.88	23.68	29.17
30.79	18.62	19.43	23.59	24.51	28.90	18.54	10.79				

$$\Sigma X = 2232.92$$

$$\bar{X} = 24.27$$

$$n = 92$$

$$S = 7.60$$

$$CI = 0.90$$

$$\%error = 3.72$$

$$V_v = 24.27 \pm 0.90$$

ตารางที่ ก.10 ปริมาณโครงสร้างออกสเตนไนท์ (เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) ที่บริเวณแนวการหลอม  
 เหลวของเหล็ก K3

58.20	47.89	54.85	43.33	51.74	44.89	44.86	36.52	45.60	39.06	47.41	45.53
52.82	50.51	66.75	64.76	47.39	51.60	42.14	36.05	37.29	26.41	48.15	20.59
45.78	35.03	46.07	70.50	55.27	42.97	55.19	51.87	33.57	42.56	36.43	39.17
69.73	64.80	43.90	45.82	48.86	56.77	56.97	60.39	34.57	36.80	51.97	49.50
52.92	63.40	34.38	32.42	50.27	31.41	46.13	28.05	41.62	45.24	37.84	44.50
37.90	44.93	46.54	33.90	25.25	40.95	45.84	48.22	55.07	60.82	25.96	41.97
67.62	48.08	57.90	54.35	63.24	46.46	41.12	45.48	45.53	38.13	26.29	37.19
44.71	22.47	42.74	40.67	50.53	35.19	39.56	39.05				

$$\Sigma X = 4186.67$$

$$\bar{X} = 45.44$$

$$n = 92$$

$$S = 10.76$$

$$CI = 1.28$$

$$\%error = 2.81$$

$$V_v = 45.44 \pm 1.28$$

ตารางที่ ก.11 ปริมาณโครงสร้างออกสเตนไนท์ (เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) ที่บริเวณแนวการหลอม  
เหล็กของเหล็ก K4

53.70	47.42	44.58	50.86	36.71	60.29	74.05	59.29	54.33	51.50	50.56	52.20
42.90	57.87	54.55	70.55	45.03	51.35	63.37	62.97	65.56	47.18	49.47	40.49
57.30	53.72	44.88	59.53	41.88	53.18	44.16	71.47	56.26	32.31	53.04	60.27
63.42	38.13	50.59	45.85	51.83	47.78	55.52	47.20	33.15	32.35	44.29	39.48
70.45	58.48	63.51	54.95	45.16	58.05	37.73	57.34	62.66	48.66	50.01	42.72
66.63	49.19	58.14	61.71	48.73	43.22	67.69	43.99	67.79	58.67	54.18	59.50
49.68	46.03	48.57	69.56	46.90	62.53	57.56	70.48	49.83	60.77	49.42	53.25
56.20	53.34	56.63	37.93	61.39	35.56	50.06	56.80				

$$\sum X = 4866.02$$

$$\bar{X} = 52.89$$

$$n = 92$$

$$S = 9.57$$

$$CI = 1.14$$

$$\%error = 2.15$$

$$V_v = 52.89 \pm 1.14$$

ตารางที่ ก.12 ปริมาณโครงสร้างออกสเตนไนท์ (เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) ที่บริเวณกระทบบร้อนของ  
เหล็ก K1

16.96	22.58	24.03	9.72	8.41	23.63	12.79	14.85	31.96	14.59	12.33	17.23
28.02	13.34	23.53	33.32	18.98	26.58	9.49	9.15	23.59	19.00	26.81	31.00
9.01	22.50	11.23	12.00	10.36	17.12	29.59	23.57	21.66	12.22	17.62	10.31
39.02	14.20	22.91	24.64	7.52	20.37	17.31	26.73	26.30	31.45	18.19	19.55
26.49	21.59	18.72	20.42	18.28	14.65	31.90	26.69	28.74	12.02	17.49	9.49
42.48	16.68	19.58	14.55	19.00	20.70	34.16	14.05	18.19	25.05	30.30	32.69
19.22	10.07	8.71	18.24	20.90	12.01	28.68	21.01	13.45	18.93	27.51	9.07
13.55	7.20	19.37	31.63	26.21	7.91	10.53	35.88				

$$\sum X = 1831.26$$

$$\bar{X} = 19.91$$

$$n = 92$$

$$S = 7.98$$

$$CI = 0.95$$

$$\%error = 4.75$$

$$V_v = 19.91 \pm 0.95$$



ตารางที่ ก.13 ปริมาณโครงสร้างออกสเตนไนท์ (เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) ที่บริเวณกระทบบร้อนของ  
เหล็ก K2

16.87	41.47	34.50	25.41	26.75	27.81	37.46	25.49	33.09	20.96	40.09	23.94
32.86	23.88	19.93	23.62	36.84	44.69	46.17	36.28	34.49	49.77	30.75	51.99
37.09	24.33	20.31	44.51	36.56	39.56	20.90	20.27	29.88	38.74	29.39	25.32
24.50	21.35	37.52	35.78	43.70	20.79	36.98	38.41	32.59	46.98	21.86	27.79
31.25	42.68	24.91	27.97	27.86	39.68	28.76	20.29	39.24	45.02	30.30	28.70
30.99	32.61	27.76	32.24	33.82	26.60	33.42	39.97	26.63	27.30	18.04	11.42
28.10	39.73	29.33	45.75	29.97	45.02	32.18	36.34	37.79	19.19	31.96	34.58
47.46	27.85	30.76	21.52	33.78	33.10	25.86	28.05				

$$\Sigma X = 2926$$

$$\bar{X} = 31.80$$

$$n = 92$$

$$S = 8.36$$

$$CI = 0.99$$

$$\%error = 3.12$$

$$V_v = 31.80 \pm 0.99$$

ตารางที่ ก.14 ปริมาณโครงสร้างออกสเตนไนท์ (เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) ที่บริเวณกระทบบร้อนของ  
เหล็ก K3

64.34	44.75	34.35	38.51	58.69	32.53	47.83	49.99	44.13	47.99	41.75	52.19
47.50	57.50	42.43	29.68	59.96	43.96	77.52	34.95	59.24	57.92	58.97	47.23
69.69	65.09	44.28	65.85	49.78	47.05	50.39	47.66	39.11	47.05	35.90	58.56
50.19	36.92	43.35	44.91	62.47	46.88	30.91	35.75	63.08	40.74	54.43	47.56
72.31	54.37	65.54	49.73	47.09	29.74	34.61	58.12	30.49	23.56	53.79	45.59
33.08	51.63	54.10	57.06	35.91	47.64	53.43	46.07	46.33	56.72	39.95	54.46
38.74	55.44	45.76	31.30	39.66	65.04	48.17	43.15	55.87	59.24	43.21	47.73
41.76	62.25	54.30	43.48	54.38	52.15	41.32	58.09				

$$\Sigma X = 4473.87$$

$$\bar{X} = 48.63$$

$$n = 92$$

$$S = 10.68$$

$$CI = 1.27$$

$$\%error = 2.61$$

$$V_v = 48.63 \pm 1.27$$

ตารางที่ ก.15 ปริมาณโครงสร้างออกสเทนไนท์ (เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) ที่บริเวณกระทบบร้อนของ  
เหล็ก K4

29.94	43.11	49.76	55.46	41.25	40.56	53.60	48.75	45.18	34.57	21.23	46.74
45.81	44.70	37.49	35.46	32.40	50.03	50.95	49.51	40.51	42.74	43.34	29.80
45.96	42.06	34.00	44.36	45.49	41.71	46.47	47.01	48.07	52.68	44.71	40.51
49.16	34.85	44.02	47.61	38.70	57.04	51.68	38.39	44.72	46.77	49.08	51.04
60.61	46.80	15.24	36.21	45.45	24.83	49.70	42.96	49.73	44.50	48.71	46.03
30.22	33.65	38.72	57.24	49.15	41.19	47.54	48.25	54.90	50.01	60.03	52.34
33.81	45.00	44.91	39.84	52.40	36.29	36.91	58.85	32.94	53.01	47.54	44.30
49.10	30.47	35.14	46.72	51.25	55.22	56.69	47.59				

$$\sum X = 4070.97$$

$$\bar{X} = 44.25$$

$$n = 92$$

$$S = 8.49$$

$$CI = 1$$

$$\%error = 2.28$$

$$V_v = 44.25 \pm 1$$

ตารางที่ ก.16 ปริมาณโครงสร้างออกสเทนไนท์ (เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) ที่ผ่านการจำลองเชื่อม  
ของเหล็ก K1

0.59	0.00	0.27	0.31	0.32	0.87	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.40
0.73	0.88	0.31	0.62	1.75	3.23	0.00	0.87	1.98	2.49	0.36	0.41
0.53	0.36	0.41	0.22	0.35	2.30	0.00	1.39	0.80	2.34	0.00	0.00
1.20	0.70	0.74	0.31	0.34	0.00	0.00	1.20	0.87	0.21	0.00	1.81
0.88	0.52	0.72	0.00	0.32	0.47	0.81	0.52	0.56	0.47	0.68	2.62
0.50	0.60	0.58	0.43	1.15	0.67	0.94	0.27	1.14	0.59	0.00	0.46
1.86	1.07	0.00	0.83	0.00	0.67	0.55	0.53	2.52	0.25	4.35	0.42
2.05	1.75	2.37	0.39	0.00	0.33	1.32	0.49				

$$\sum X = 70.12$$

$$\bar{X} = 0.76$$

$$n = 92$$

$$S = 0.82$$

$$CI = 0.1$$

$$\%error = 12.72$$

$$V_v = 0.76 \pm 0.1$$

ตารางที่ ก.17 ปริมาณโครงสร้างออกสเตนไนท์ (เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) ที่ผ่านการจำลองเชื่อม  
ของเหล็ก K2

14.37	15.96	24.07	12.49	32.27	41.14	15.54	18.92	30.26	35.47	14.65	42.25
16.23	37.18	24.28	21.08	32.79	30.91	25.54	11.45	34.81	38.28	20.46	19.60
23.25	21.37	21.90	19.47	22.36	3.58	33.55	7.51	29.84	16.46	42.92	35.17
20.88	20.04	8.77	14.97	12.55	15.14	16.99	16.59	27.59	26.47	35.79	38.66
16.43	11.43	15.64	8.27	34.92	15.85	17.44	29.61	14.63	16.96	16.55	25.04
17.43	40.67	18.85	15.00	38.25	30.77	16.13	20.16	28.43	31.05	33.51	22.95
14.59	10.19	10.68	25.49	24.66	18.38	32.14	36.32	18.81	28.31	13.79	22.95
23.32	29.61	19.90	32.86	23.45	11.15	12.88	26.70				

$$\Sigma X = 2113.97 \quad \bar{X} = 22.98 \quad n = 92 \quad S = 9.26$$

$$CI = 1.1 \quad \%error = 4.78 \quad V_v = 22.98 \pm 1.1$$

ตารางที่ ก.18 ปริมาณโครงสร้างออกสเตนไนท์ (เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) ที่ผ่านการจำลองการ  
เชื่อมของเหล็ก K3

41.59	44.53	45.55	46.81	51.17	68.35	33.40	59.39	46.19	54.96	24.52	54.63
27.47	58.00	25.27	62.16	42.88	31.34	34.27	44.86	51.76	44.77	26.10	36.29
27.35	51.73	57.94	67.90	61.81	40.78	30.57	31.52	34.50	82.22	48.47	15.01
34.21	74.13	57.46	41.54	33.99	33.45	58.29	37.53	26.82	23.23	46.11	45.59
50.03	66.46	59.50	54.26	46.45	50.10	32.36	46.64	22.89	20.03	34.83	53.76
29.55	24.52	40.59	43.17	48.48	32.80	55.93	23.48	57.34	68.40	44.94	35.94
46.27	35.57	36.22	28.87	52.65	26.19	45.59	40.56	46.41	48.49	29.05	39.30
51.15	46.91	45.94	49.75	36.95	43.07	49.38	57.89				

$$\Sigma X = 4017.07 \quad \bar{X} = 43.66 \quad n = 92 \quad S = 13.27$$

$$CI = 1.57 \quad \%error = 3.6 \quad V_v = 43.66 \pm 1.57$$

ตารางที่ ก.19 ปริมาณโครงสร้างออกสเตนไนท์ (เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) ที่ผ่านการจำลองเชื่อม  
ของเหล็ก K4

38.35	56.40	55.04	67.47	24.76	41.15	67.83	41.13	45.80	26.65	46.30	28.44
41.86	44.22	49.01	44.51	22.92	75.15	48.61	64.97	34.87	28.01	34.33	38.35
17.88	47.75	53.85	67.11	66.00	20.72	50.49	59.60	55.51	24.03	46.99	70.74
48.27	17.65	39.20	63.23	61.82	43.07	42.15	57.42	52.89	62.38	67.59	39.05
47.47	45.15	39.73	50.59	60.44	70.74	58.16	35.63	15.44	55.69	39.71	57.29
35.40	71.75	52.15	58.09	54.79	59.42	47.61	27.89	64.71	30.99	50.09	49.72
16.70	32.01	70.11	68.34	76.03	38.43	54.12	50.40	38.05	54.69	39.57	54.45
59.40	43.88	33.60	56.50	75.08	44.35	49.39	32.31				

$$\Sigma X = 4407.58$$

$$\bar{X} = 47.91$$

$$n = 92$$

$$S = 14.89$$

$$CI = 1.77$$

$$\%error = 3.69$$

$$V_v = 47.91 \pm 1.77$$

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ข

### การหาปริมาณตะกอนโครเมียมไนไตรต์ด้วยวิธี Point Counting (ASTM E562)

1. การหาสัดส่วนเชิงปริมาตร (% vol. Fraction) ของโครเมียมไนไตรต์ มีขั้นตอนดังนี้

สัญลักษณ์

$P_T$  = จำนวนจุดบนกริด

$P_i$  = จำนวนจุดที่นับได้ต่อพื้นที่ (field)

$P_{p(i)}$  =  $P_i/P_T \times 100$  คือจำนวนจุดบนกริดในแต่ละ

$P_{p(\text{average})}$  =  $1/(n-1) \sum_{i=1}^n P_{p(i)}$  คือค่าเฉลี่ยเลขคณิตของ  $P_{p(i)}$

SD. = ค่าประมาณของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

95%CI =  $\pm 1.96 S/\sqrt{n}$

t = factor ตัวคูณสำหรับหาค่า 95% CI

%RA = เปอร์เซ็นต์ความแม่นยำสัมพัทธ์ =  $(95\%CI/P_{p(\text{average})}) \times 100$

1.1 การหาปริมาณสัดส่วนเชิงปริมาตรของเฟสที่สนใจโดยประมาณเพื่อนำค่าที่ได้มาเลือกจำนวนกริด (No. of Grid), จำนวนพื้นที่ (No. of Field) และ เปอร์เซ็นต์ความแม่นยำสัมพัทธ์ที่เหมาะสมตามตารางที่ ข2

1.2 ถ่ายภาพโครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยายที่สามารถสังเกตขนาดของเฟสที่สนใจได้ชัดเจน นำกริดที่อยู่บนแผ่นพลาสติกโปร่งแสงทาบลงบนภาพถ่าย แล้วนับจำนวนจุดที่ตกลงบนเฟสที่สนใจนับ 1 เมื่อตกภายในเฟส และนับ 0.5 เมื่อตกบนขอบของเฟส

1.3 นำจำนวนจุดที่นับได้มาคำนวณหาค่าต่าง ๆ ดังนี้

1.3.1 เปอร์เซ็นต์เฉลี่ยของจุด

$$(1/n) \sum_{i=1}^n P_{p(i)} = (1/n) \sum_{i=1}^n P_i/p_T$$

1.3.2 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

$$SD. = [1/(n-1) \sum (P_{p(i)} - P_{p(\text{average})})^2]^{1/2}$$



2. การคำนวณหาค่า  $P_{p(average)}$ ,  $V_v$ , 95%CI และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation, SD.)

นับเฟสตามวิธีที่กล่าวไว้ข้างต้น โดยใช้กริดขนาด 25 และนับทั้งหมด 30 พื้นที่นำจำนวนจุดที่ได้ในแต่ละพื้นที่มาหาค่า  $P_{p_i}$  และ  $P_{p(average)}$  แล้วนำค่าที่ได้มาหาค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และ 95%CI

ตารางที่ ข1 ข้อแนะนำสำหรับการเลือกขนาดกริด (Grid size selection)

Visual Area Fraction Estimate Expressed as a Percentange	Gride Size (Number of Points, $P_t$ )
2 to 5 %	100
5 to 10 %	49
10 to 20 %	25
>20 %	16

ตารางที่ ข2 การประมาณค่าตัวแปร  $n$  จากค่าความแม่นยำสัมพัทธ์ที่ออกแบบไว้ และจากสัดส่วนปริมาณเฟสที่สนใจ

Prediction of the Number of Fields ( $n$ ) to be Observed as a Function of the Desired Relative Accuracy and of the Estimated Magnitude of the Volume Fraction of the Constituent

Amount of volume fraction, $V_v$ , in percent	33 % Relative Accuracy				20 % Relative Accuracy				10 % Relative Accuracy			
	Number of fields $n$ for a grid of $P_t =$				Number of fields $n$ for a grid of $P_t =$				Number of fields $n$ for a grid of $P_t =$			
	16	25	49	100	16	25	49	100	16	25	49	100
	points	points	points	points	points	points	points	points	points	points	points	points
2	110	75	35	20	310	200	105	50	1,250	800	410	200
5	50	30	15	8	125	80	40	20	500	320	165	80
10	25	15	10	4	65	40	20	10	250	160	85	40
20	15	10	5	4	30	20	10	5	125	80	40	20

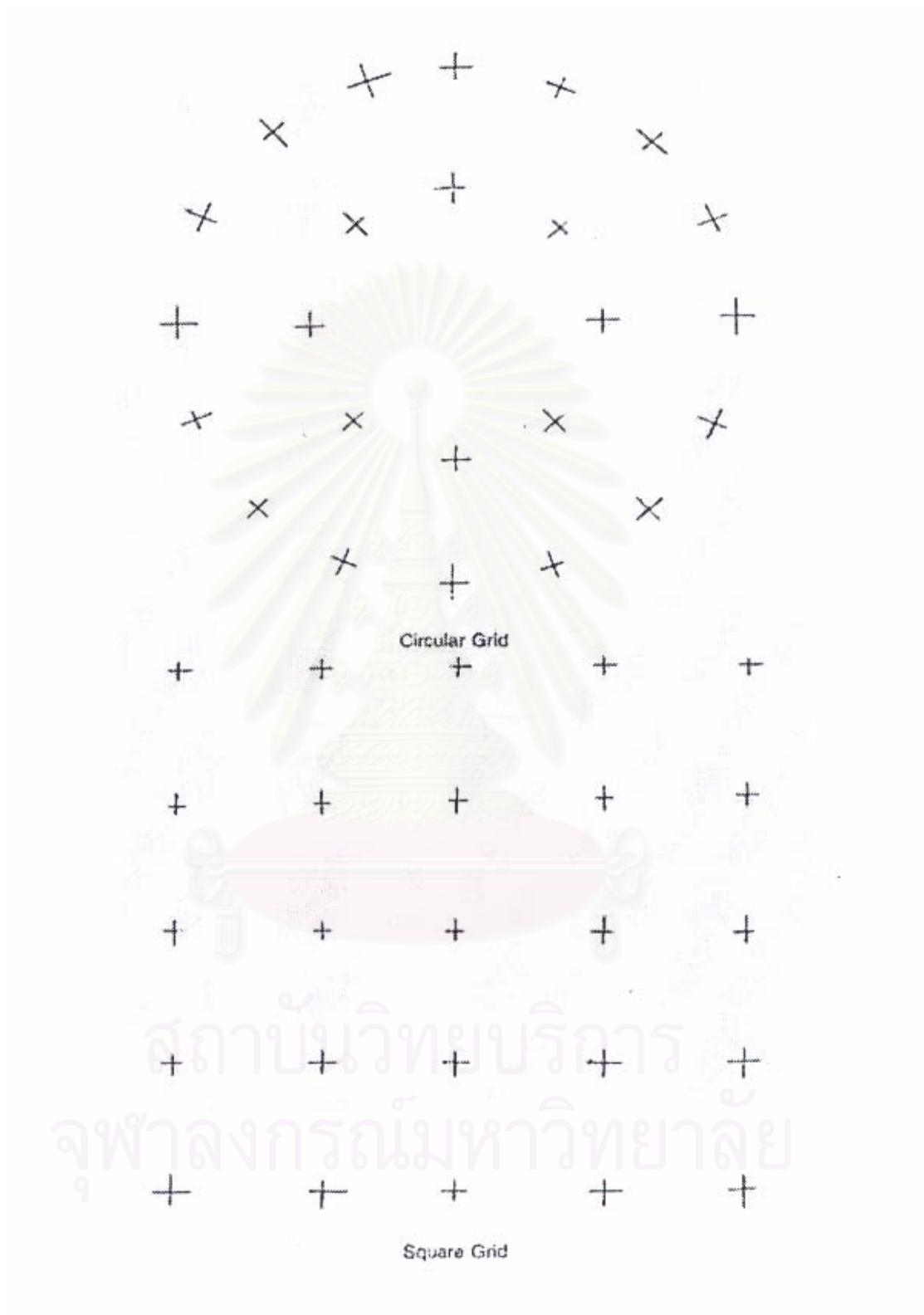
Note 1—The given values in the table above are based on the formula:

$$n = \frac{4}{E^2} \frac{100 - V_v}{V_v}$$

where:

$E = 0.01 \times \% \text{ RA}$ , and

$V_v =$  is expressed in %.



รูปที่ ๗.๑ ชนิดของกริดแบบวงกลม และสี่เหลี่ยม

ตาราง ข.3 ปริมาณโครเมียมไนไตรด์ (เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) ที่บริเวณแนวการหลอมเหลวของ  
เหล็ก K3

No.of Grid : 25	Standard Deviation (SD.) : 4.67
No.of Field : 30	95%CI : 1.71
$Pp_{(average)}$ : 11.67	$V_v$ (%) : $11.67 \pm 1.71$

Field No.	Pp	$Pp_{(i)}$	Field No.	Pp	$Pp_{(i)}$
1	4.5	18	16	3.5	14
2	3	12	17	3.5	14
3	2.5	10	18	3	12
4	5	20	19	2.5	10
5	4.5	18	20	4	16
6	3	12	21	3	12
7	1	4	22	2.5	10
8	1.5	6	23	1	4
9	4.5	18	24	1.5	6
10	2.5	10	25	1.5	6
11	2	8	26	2	8
12	2.5	10	27	1.5	6
13	4.5	18	28	3	12
14	4.5	18	29	2.5	10
15	4.5	18	30	2.5	10
			SUM	87.5	350

ตาราง ข.4 ปริมาณโครเมียมไนไตรต์ (เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) ที่บริเวณแนวการหลอมเหลวของ  
เหล็ก K4

No.of Grid : 100	Standard Deviation (SD.) : 3.05
No.of Field : 30	95%CI : 1.11
Pp <sub>(average)</sub> : 5.00	V <sub>v</sub> (%) : 5.00 ± 1.11

Field No.	Pp	Pp <sub>(i)</sub>	Field No.	Pp	Pp <sub>(i)</sub>
1	1.5	6	16	2.5	10
2	1.5	6	17	0	0
3	1	4	18	2	8
4	2	8	19	1.5	6
5	1.5	6	20	1.5	6
6	1	4	21	2	8
7	3	12	22	1.5	6
8	1.5	6	23	1	4
9	0	0	24	0.5	2
10	0	0	25	0	0
11	1.5	6	26	1	4
12	0.5	2	27	1	4
13	2	8	28	1.5	6
14	0.5	2	29	0.5	2
15	2	8	30	1.5	6
			SUM	37.5	150

ตาราง ข.5 ปริมาณโครเมียมไนไตรด์ (เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) ที่บริเวณกระทบบร้อนของเหล็ก K3

No.of Grid : 100	Standard Deviation (SD.) : 6.44
No.of Field : 30	95%CI : 2.35
$Pp_{(average)}$ : 18.20	$V_v$ (%) : $18.20 \pm 2.35$

Field No.	Pp	$Pp_{(i)}$	Field No.	Pp	$Pp_{(i)}$
1	4.5	18	16	2.5	10
2	5	20	17	5.5	22
3	6	24	18	3.5	14
4	3	12	19	4.5	18
5	5	20	20	5.5	22
6	6	24	21	5.5	22
7	8	32	22	6	24
8	3.5	14	23	3.5	14
9	7	28	24	6	24
10	6	24	25	6.5	26
11	4	16	26	5	20
12	2	8	27	2.5	10
13	2.5	10	28	5	20
14	5	20	29	3.5	14
15	2	8	30	2	8
			SUM	136.5	546



ตาราง ข.6 ปริมาณโครเมียมไนไตรด์ (เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) ที่บริเวณกระทบบร้อนของเหล็ก K4

No.of Grid : 100	Standard Deviation (SD.) : 6.17
No.of Field : 30	95%CI : 2.25
$Pp_{(average)}$ : 10.53	$V_v$ (%) : $10.53 \pm 2.25$

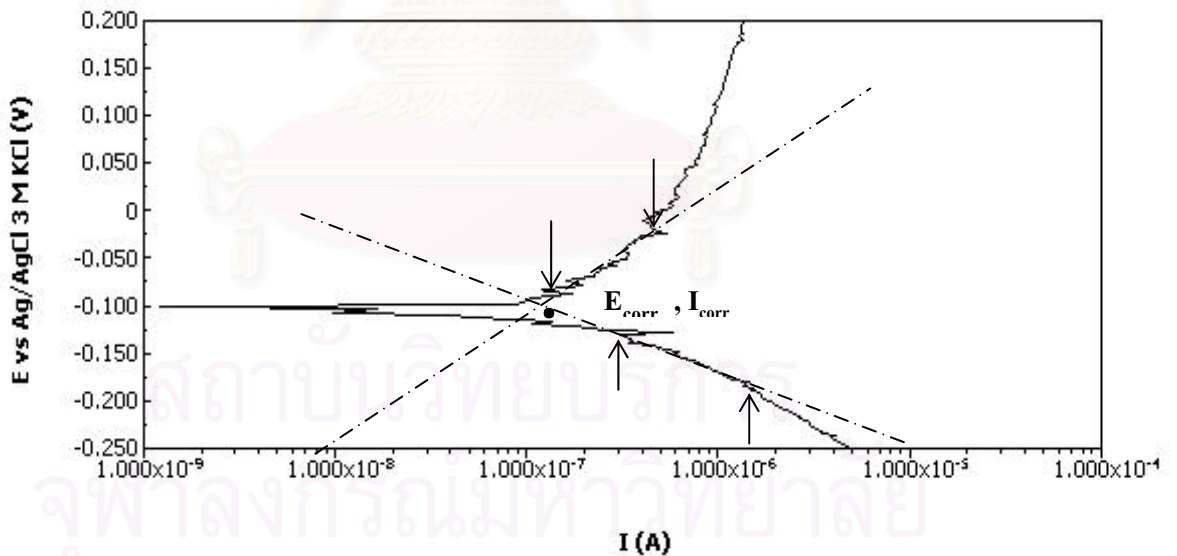
Field No.	Pp	$Pp_{(i)}$	Field No.	Pp	$Pp_{(i)}$
1	2.5	10	16	3	12
2	2.5	10	17	3	12
3	3	12	18	3	12
4	1	4	19	6.5	26
5	1	4	20	4.5	18
6	0.5	2	21	2	8
7	0	0	22	4	16
8	1	4	23	2	8
9	2	8	24	1	4
10	3.5	14	25	4	16
11	2.5	10	26	2.5	10
12	0.5	2	27	3	12
13	4	16	28	3.5	14
14	3.5	14	29	6	24
15	2.5	10	30	1	4
			SUM	79	316

## ภาคผนวก ค

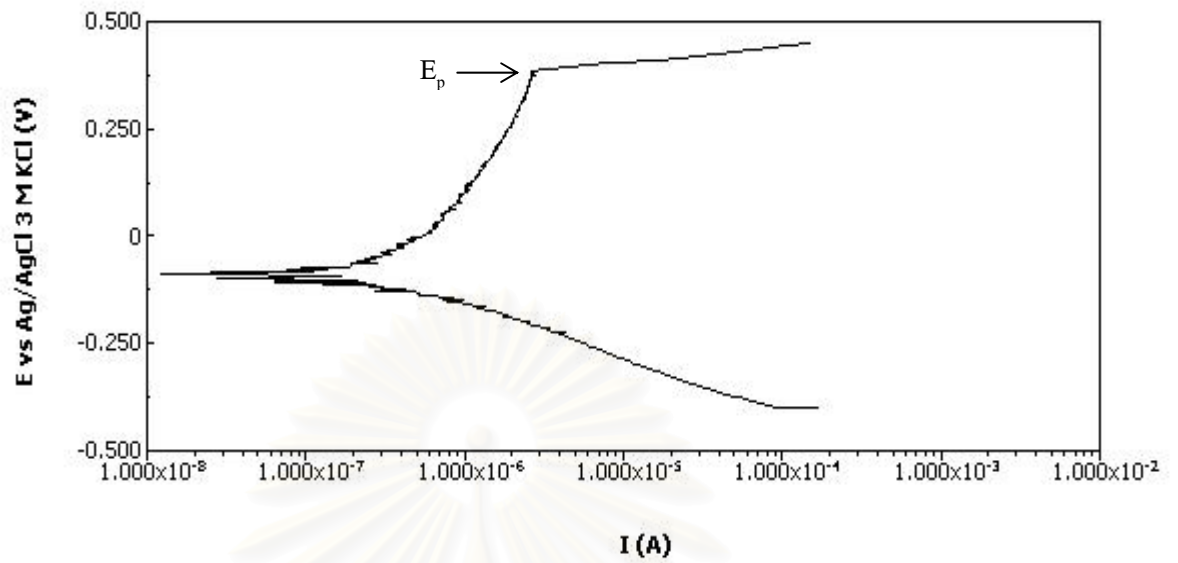
### การหาค่าตัวแปรการกัดกร่อนจากเส้นกราฟโพลาริเซชัน

ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน ( $E_{corr}$ ) และค่ากระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน ( $I_{corr}$ ) หาได้จากการใช้โปรแกรมรีเกรสชันเชิงเส้น (linear regression program) ซึ่งมีวิธีการหาโดยกำหนดตำแหน่ง 2 จุดบนบนเส้นโค้งโพลาริเซชันแล้วใช้คำสั่งทำรีเกรสชัน โปรแกรมจะทำการคำนวณเส้นตรงระหว่างจุด 2 จุด ที่กำหนดไว้ดังรูปที่ ค.1 ซึ่งแสดงจุดตัดระหว่างเส้นความชันของเส้นกราฟช่วงที่เกิดปฏิกิริยาแอโนด และเส้นความชันของเส้นกราฟช่วงที่เกิดปฏิกิริยาแคโทด โดยที่จุดตัดนี้จะสามารถหาค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนและค่ากระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนได้

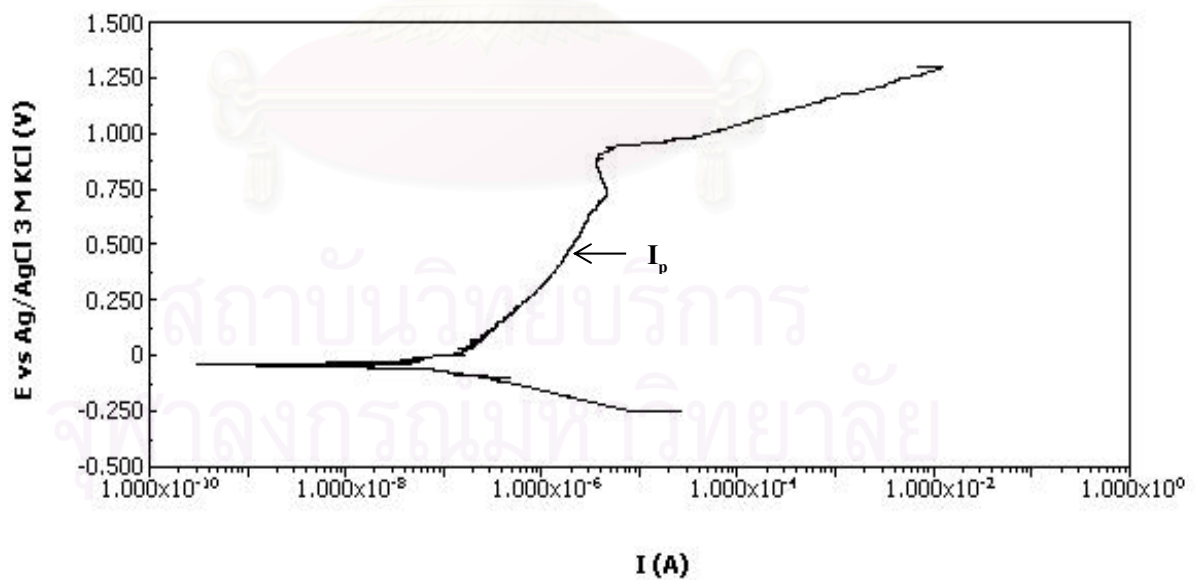
ในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงจากกระแสช่วงพาสซีฟไปเป็นกระแสช่วงทรานพาสซีฟอย่างกะทันหัน จะกำหนดให้จุดดังกล่าวเป็นค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเซิม ( $E_p$ ) ดังแสดงในรูปที่ ค.2 ส่วนค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าขณะวัสดุเกิดฟิล์มที่ผิว ( $I_p$ ) สามารถหาได้จากการนำข้อมูลช่วงพาสซีฟมาทำการคำนวณเพื่อหาค่าเฉลี่ย ดังแสดงในรูป ค.3



รูปที่ ค.1 วิธีการหาค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนและกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนจากเส้นโพลาริเซชัน



รูปที่ ค.2 วิธีการหาค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็มหรือหลุม



รูปที่ ค.3 วิธีการหาค่ากระแสไฟฟ้าขณะวัสดุเกิดฟิล์มที่ผิว

### การคำนวณอัตราการกัดกร่อน ( $R_{mpy}$ )

สามารถคำนวณหาค่าอัตราการกัดกร่อนได้จาก

$$R_{mpy} = [0.13 * I_{corr} * e] / \rho$$

เมื่อ	$R_{mpy}$	คือ	อัตราการเกิดการกัดกร่อน(มิลต่อปี)
	$I_{corr}$	คือ	ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (ไมโครแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร)
	$e$	คือ	น้ำหนักกรัมสมมูลย์ของโลหะ ในที่นี้คือ 27.92
	$\rho$	คือ	ความหนาแน่นของโลหะ ในที่นี้คือ 7.87

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ง

### เส้นโพลาริเซชันที่ได้จากการทดลอง

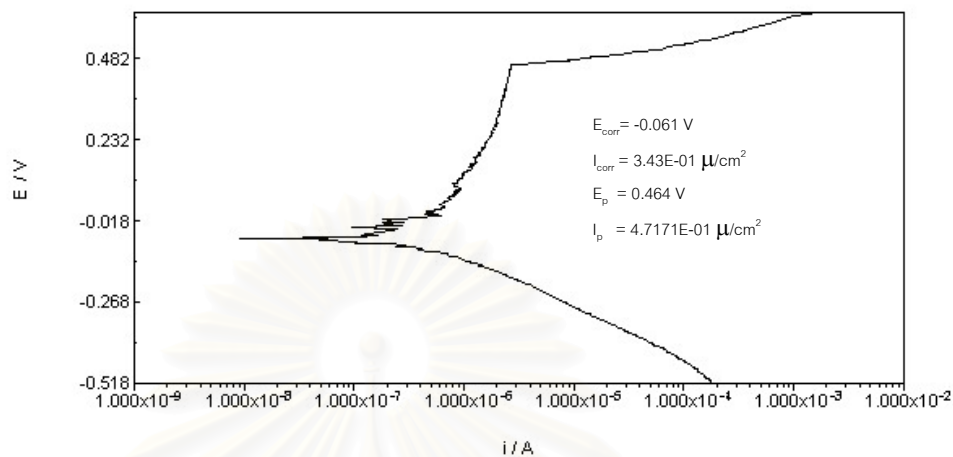
#### สภาวะที่ใช้ในการทดลอง

- เวลาที่ใช้ในการทำให้อากาศอิมิตัวในสารละลายเท่ากับ 5 นาที
- อัตราการสแกนเท่ากับ 0.1 มิลลิโวลต์ต่อวินาที
- อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองเท่ากับ 25 องศาเซลเซียส
- ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
- เวลาที่ใช้ในการจุ่มแร่ชิ้นงานก่อนการสแกนเท่ากับ 45 นาที

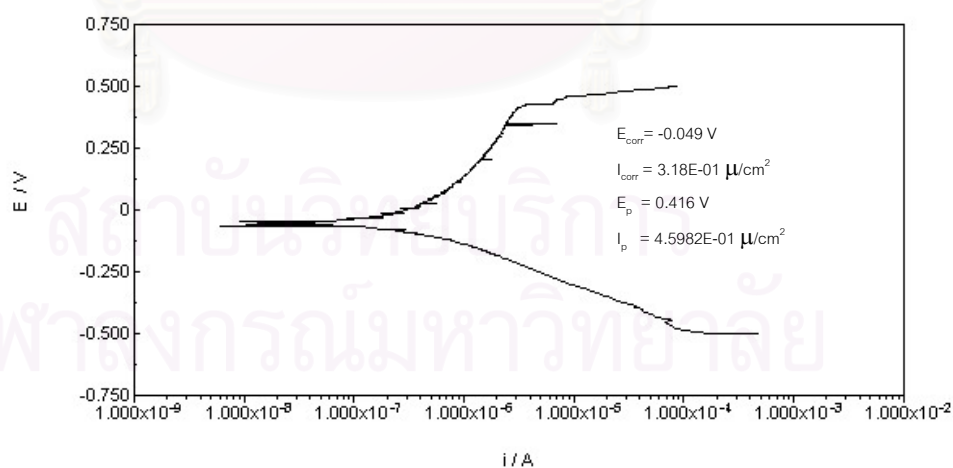


สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

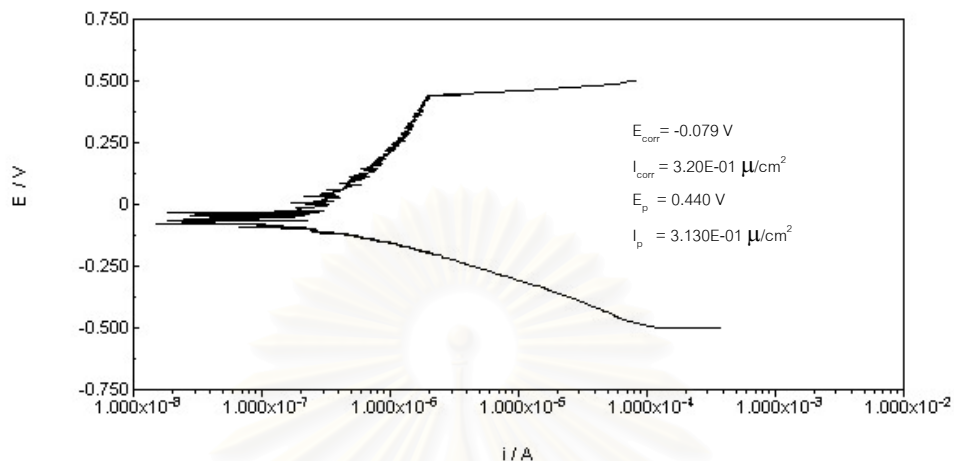




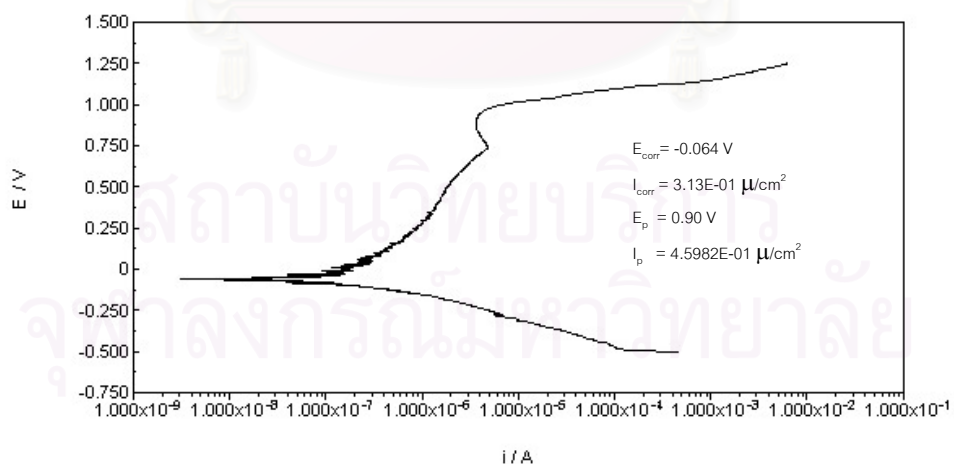
รูปที่ ง.1 เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ (K1, 0.0018 wt%) ที่ผ่านการเชื่อมทิกพัลส์ ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ครั้งที่ 1



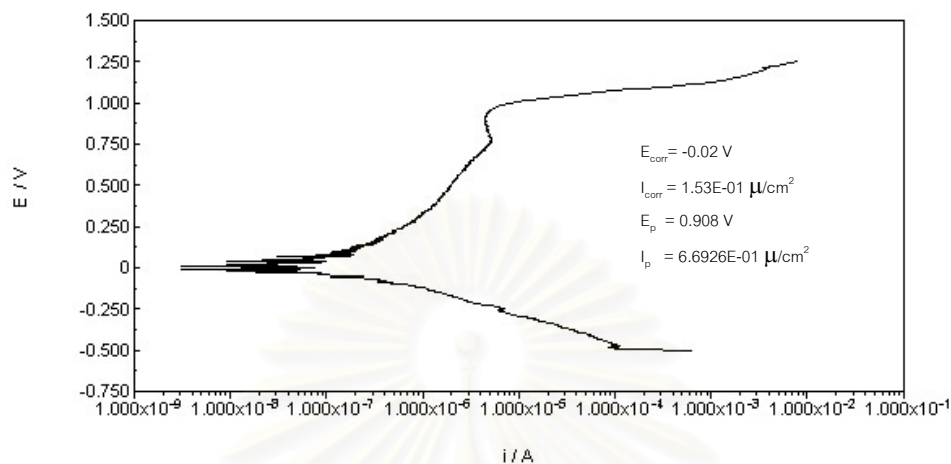
รูปที่ ง.2 เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ (K1, 0.0018 wt%) ที่ผ่านการเชื่อมทิกพัลส์ ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ครั้งที่ 2



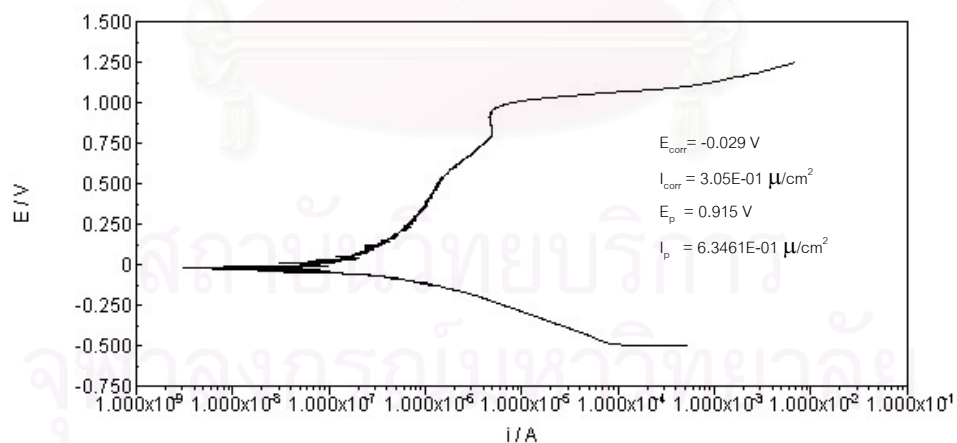
รูปที่ 3.3 เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ (K1, 0.0018 wt%) ที่ผ่านการเชื่อมทิกพัลส์ ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ครั้งที่ 3



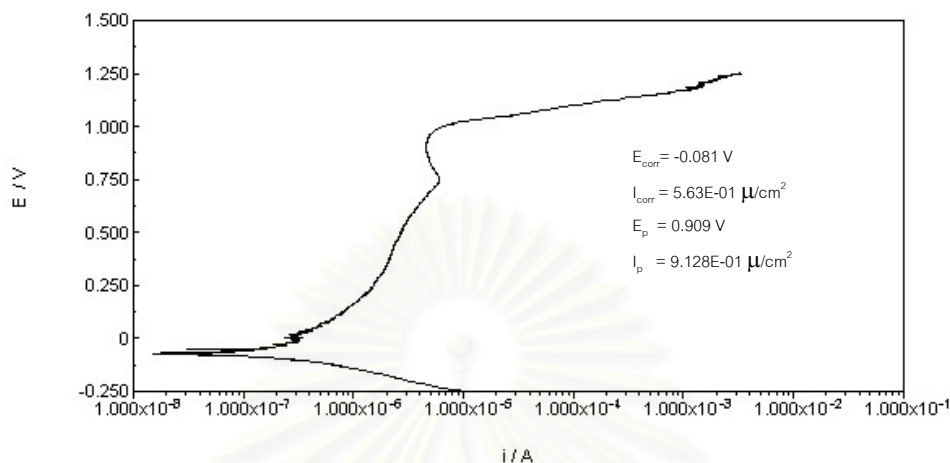
รูปที่ 3.4 เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ (K2, 0.1100 wt%) ที่ผ่านการเชื่อมทิกพัลส์ ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ครั้งที่ 1



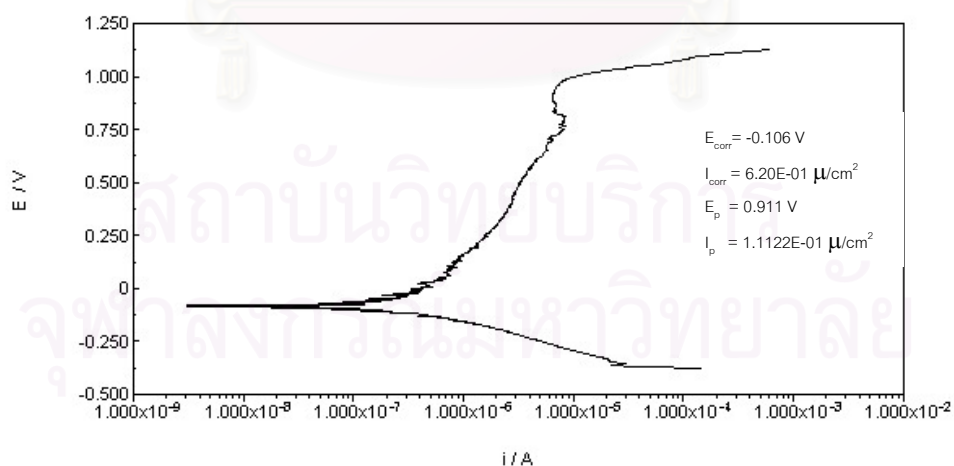
รูปที่ 5.5 เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ (K2, 0.1100 wt%) ที่ผ่านการเชื่อมทิกพัลส์ ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ครั้งที่ 2



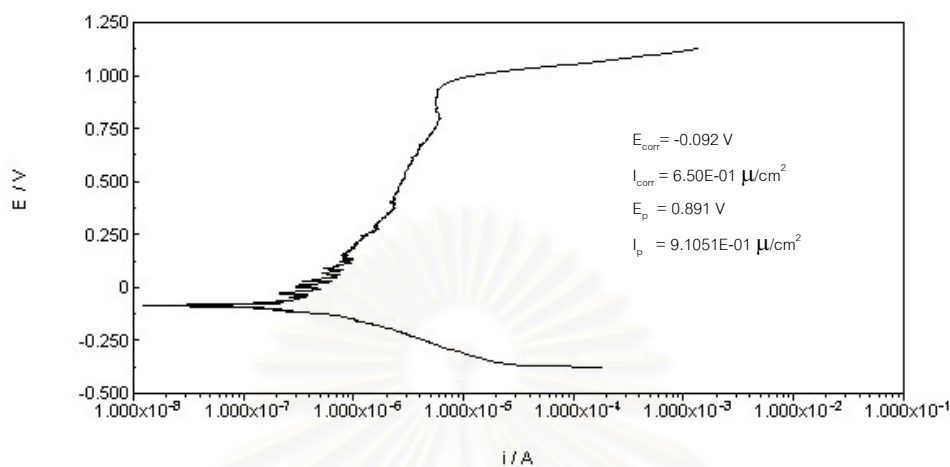
รูปที่ 5.6 เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ (K2, 0.1100 wt%) ที่ผ่านการเชื่อมทิกพัลส์ ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสครั้งที่ 3



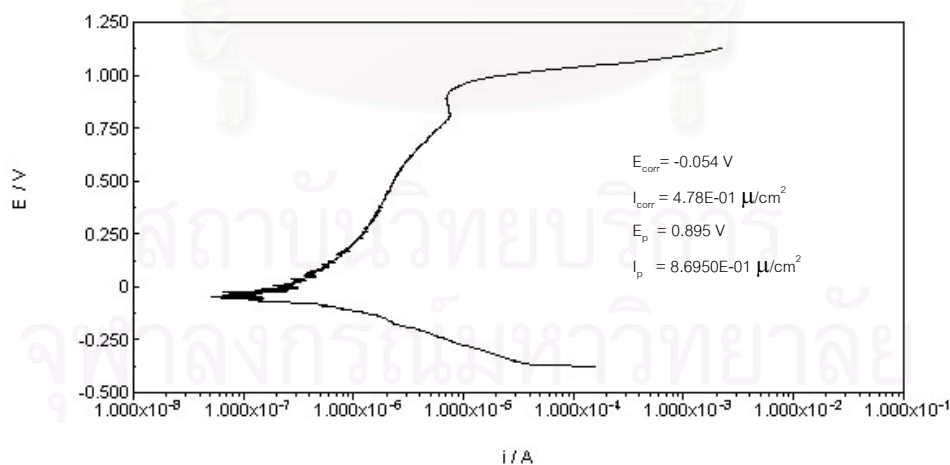
รูปที่ ๗.7 เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ (K3, 0.2300 wt%) ที่ผ่านการเชื่อมทิกพัลส์ ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ครั้งที่ 1



รูปที่ ๗.8 เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ (K3, 0.2300 wt%) ที่ผ่านการเชื่อมทิกพัลส์ ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ครั้งที่ 2

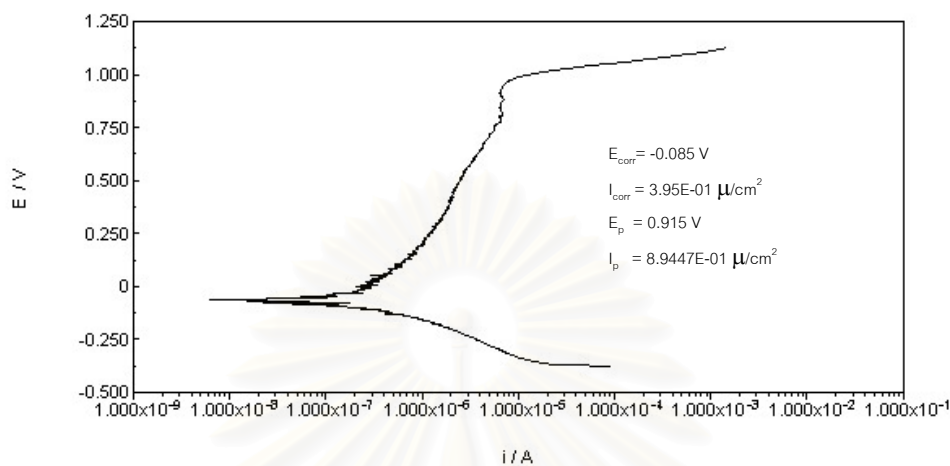


รูปที่ 9.9 เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ (K3, 0.2300 wt%) ที่ผ่านการเชื่อมทิกพัลส์ ในสารละลายไฮเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ครั้งที่ 3

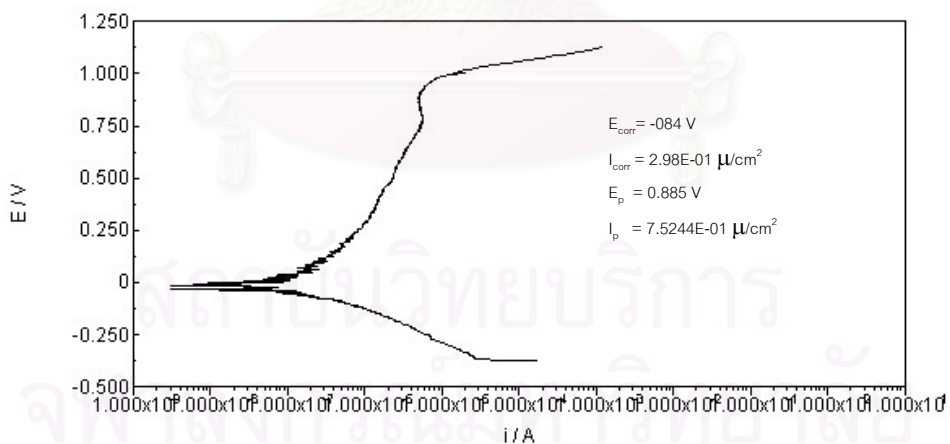


รูปที่ 9.10 เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ (K4, 0.3400 wt%) ที่ผ่านการเชื่อมทิกพัลส์ ในสารละลายไฮเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ครั้งที่ 1

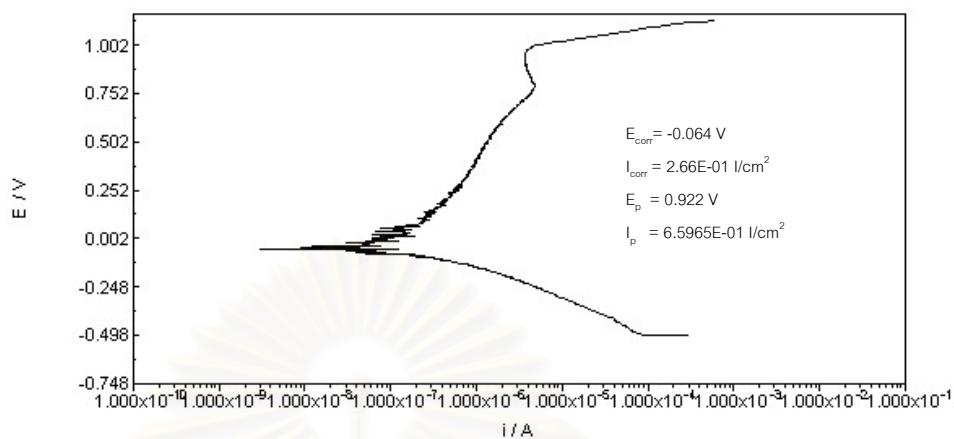




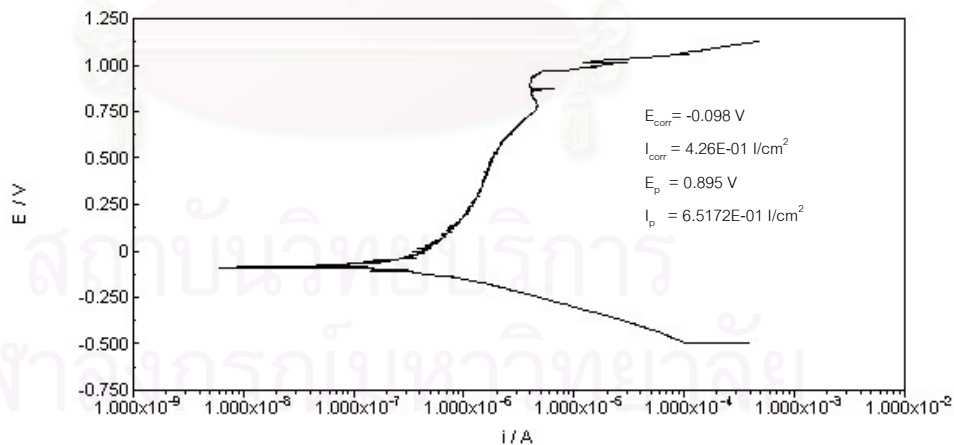
รูปที่ ง.11 เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ (K4, 0.3400 wt%) ที่ผ่านการเชื่อมทิกพัลส์ ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ครั้งที่ 2



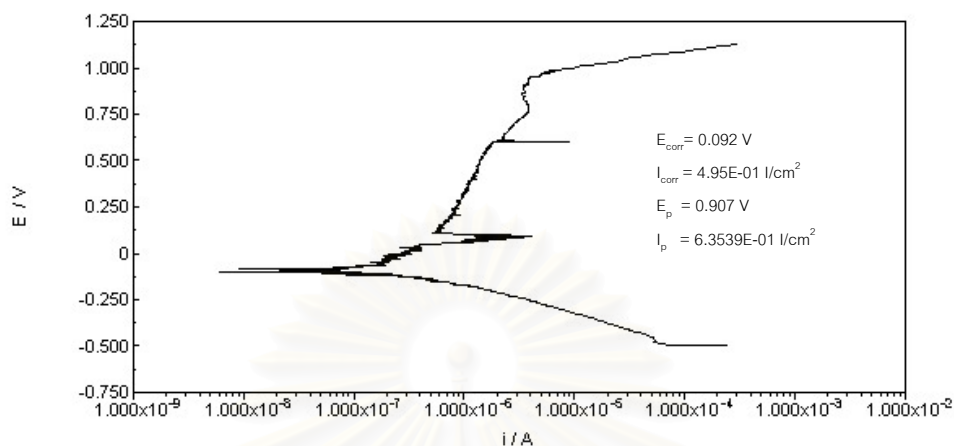
รูปที่ ง.12 เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ (K4, 0.3400 wt%) ที่ผ่านการเชื่อมทิกพัลส์ ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ครั้งที่ 3



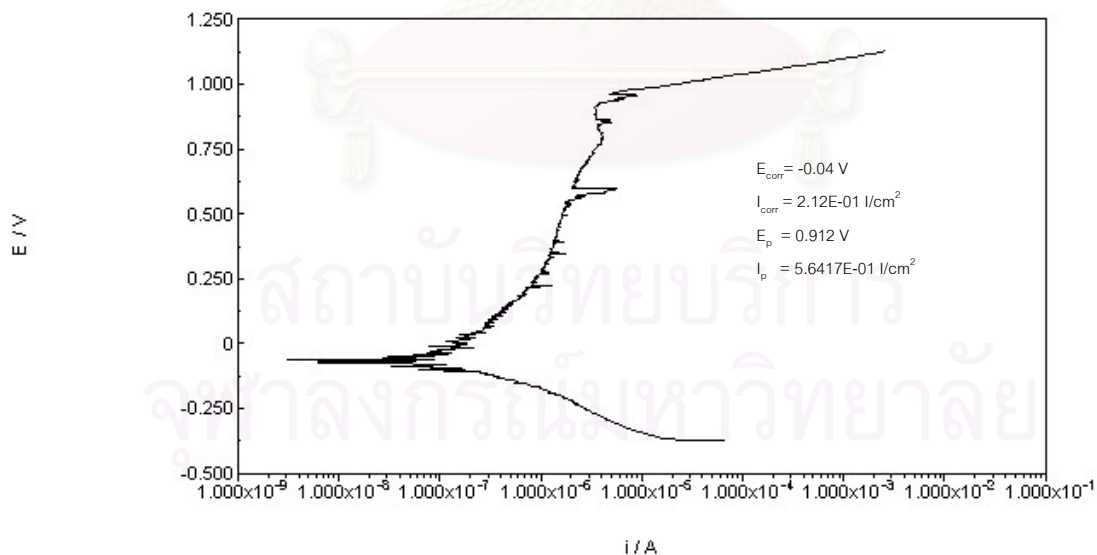
รูปที่ ง.13 เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ (K1, 0.0018 wt%) ที่ผ่านการจำลอง เชื่อม ในสารละลายไฮเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ครั้งที่ 1



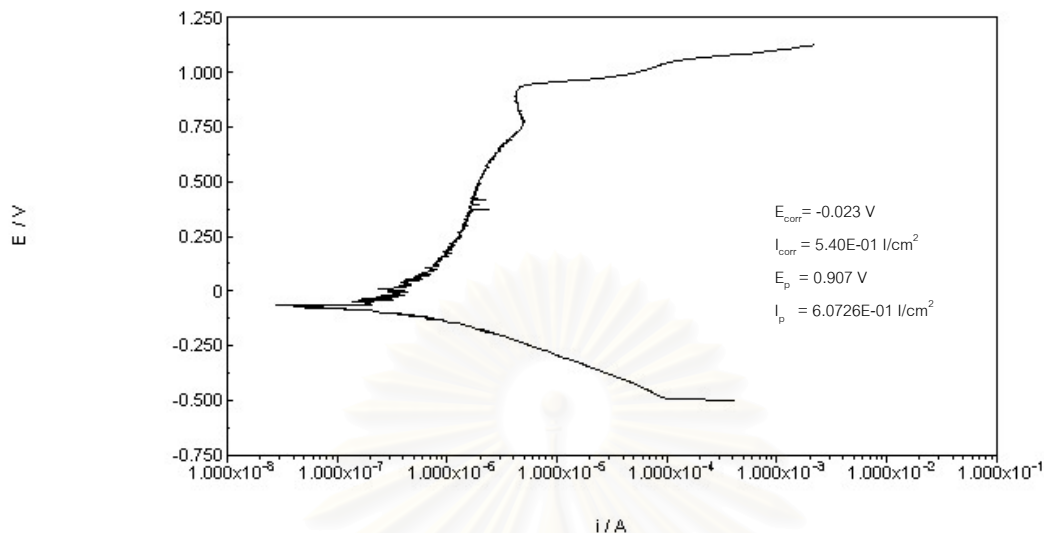
รูปที่ ง.14 เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ (K1, 0.0018 wt%) ที่ผ่านการจำลอง เชื่อม ในสารละลายไฮเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ครั้งที่ 2



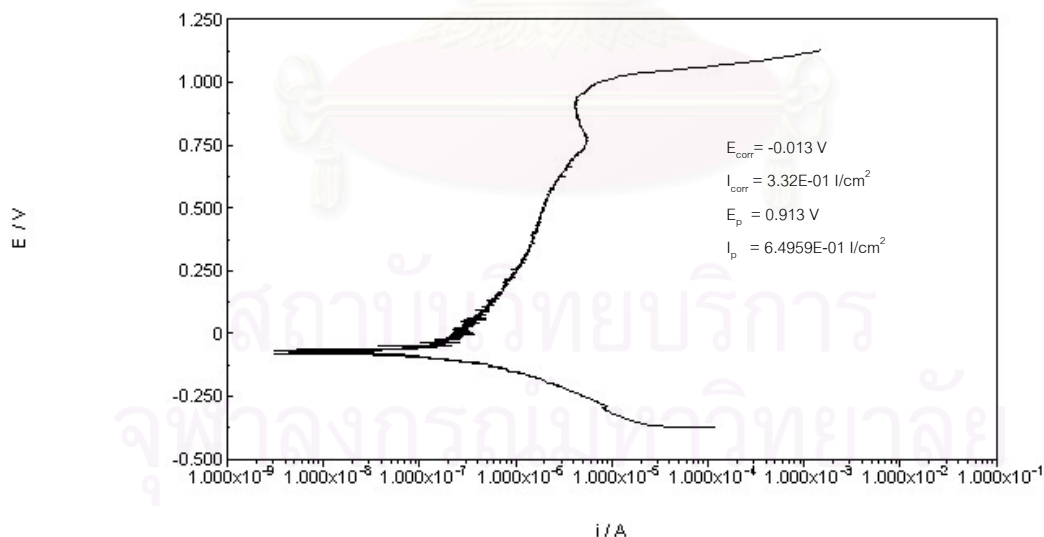
รูปที่ ง.15 เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ (K1, 0.0018 wt%) ที่ผ่านการจำลองเชื่อม ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ครั้งที่ 3



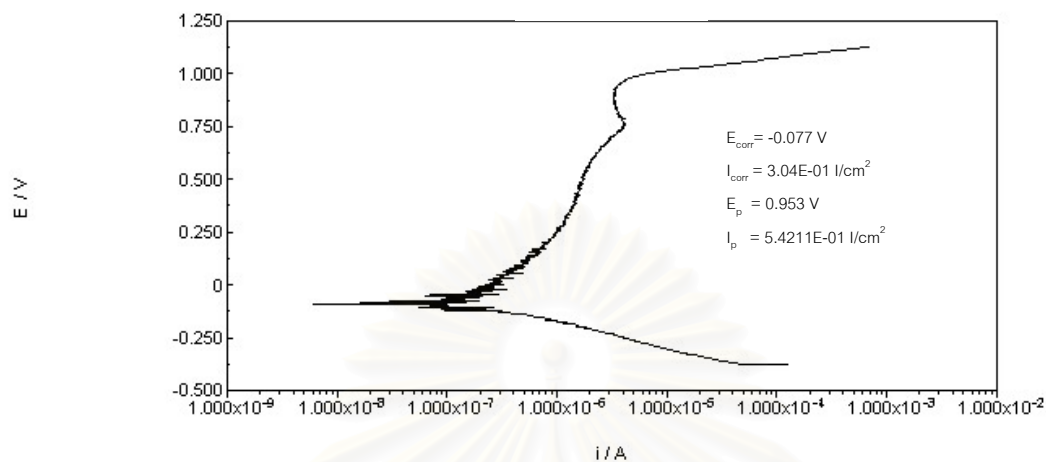
รูปที่ ง.16 เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ (K2, 0.1100 wt%) ที่ผ่านการจำลองเชื่อม ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ครั้งที่ 1



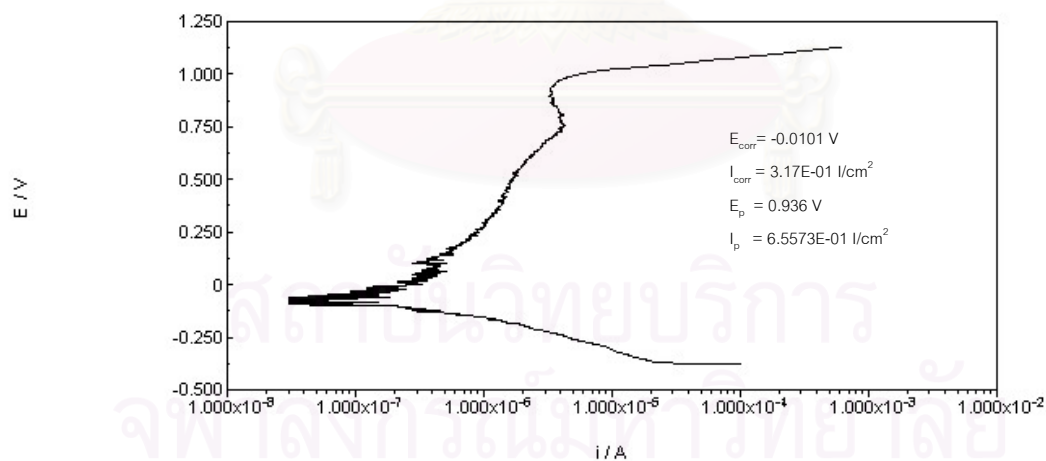
รูปที่ ง.17 เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ (K2, 0.1100 wt%) ที่ผ่านการจำลองเชื่อม ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ครั้งที่ 2



รูปที่ ง.18 เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ (K2, 0.1100 wt%) ที่ผ่านการจำลองเชื่อม ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ครั้งที่ 3

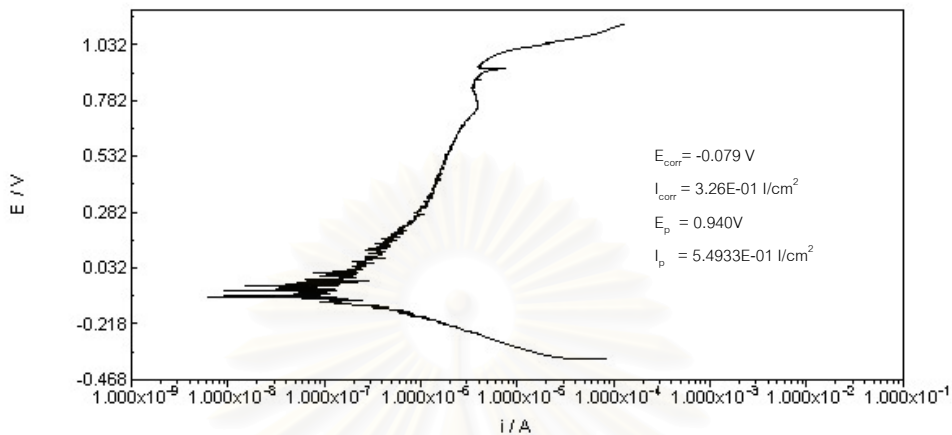


รูปที่ ง.19 เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ (K3, 0.2300 wt%) ที่ผ่านการจำลองเชื่อม ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ครั้งที่ 1

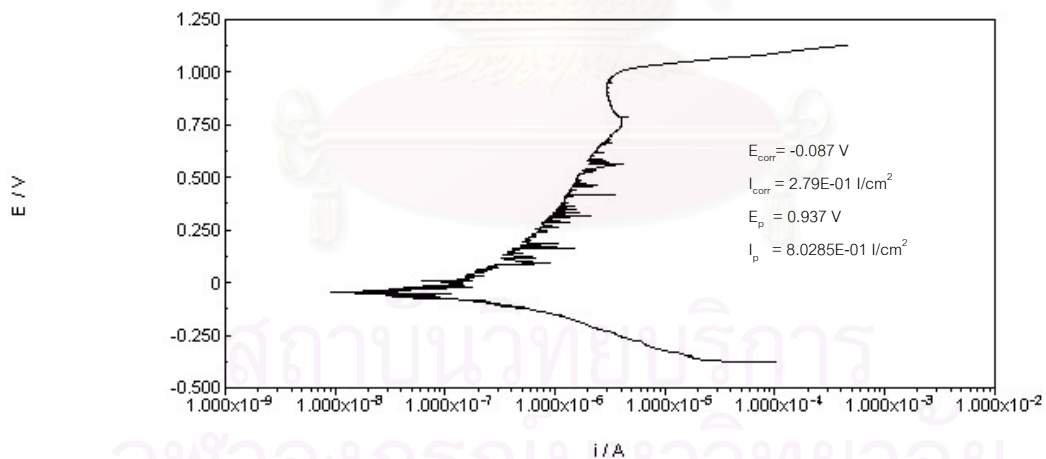


รูปที่ ง.20 เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ (K3, 0.2300 wt%) ที่ผ่านการจำลองเชื่อม ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ครั้งที่ 2

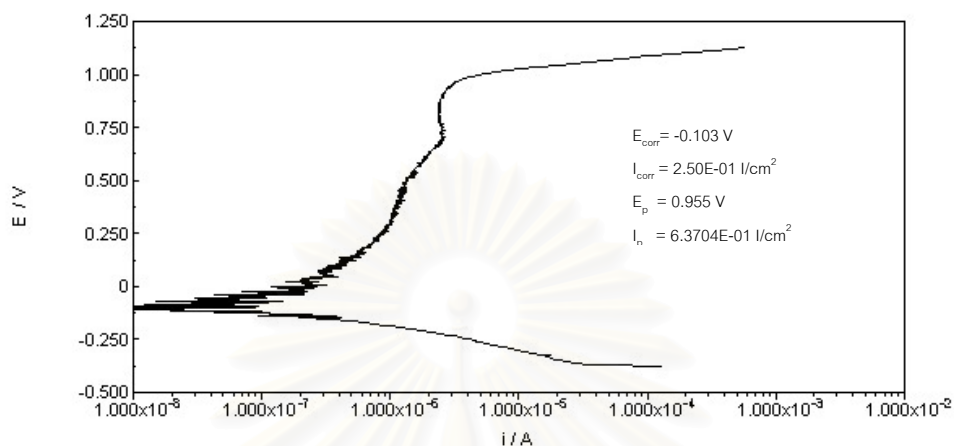




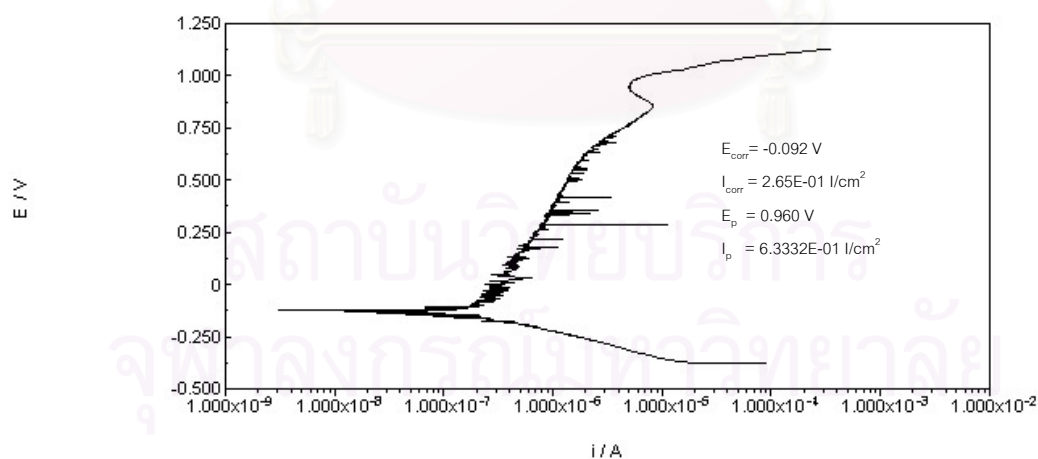
รูปที่ ง.21 เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ (K3, 0.2300 wt%) ที่ผ่านการจำลองเชื่อม ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ครั้งที่ 3



รูปที่ ง.22 เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ (K4, 0.3400 wt%) ที่ผ่านการจำลองเชื่อม ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ครั้งที่ 1



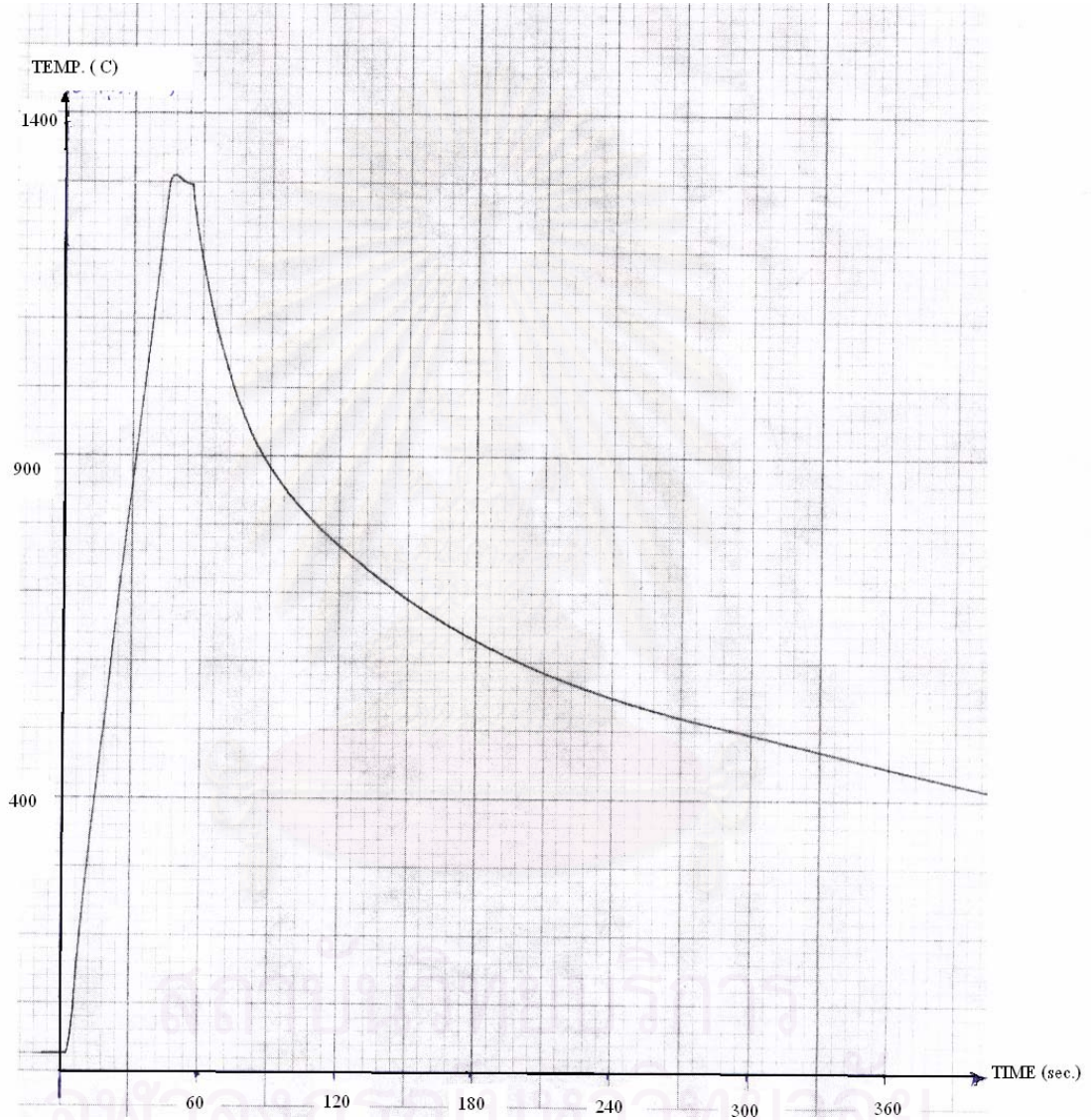
รูปที่ ง.23 เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ (K4, 0.3400 wt%) ที่ผ่านการจำลองเชื่อม ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ครั้งที่ 2



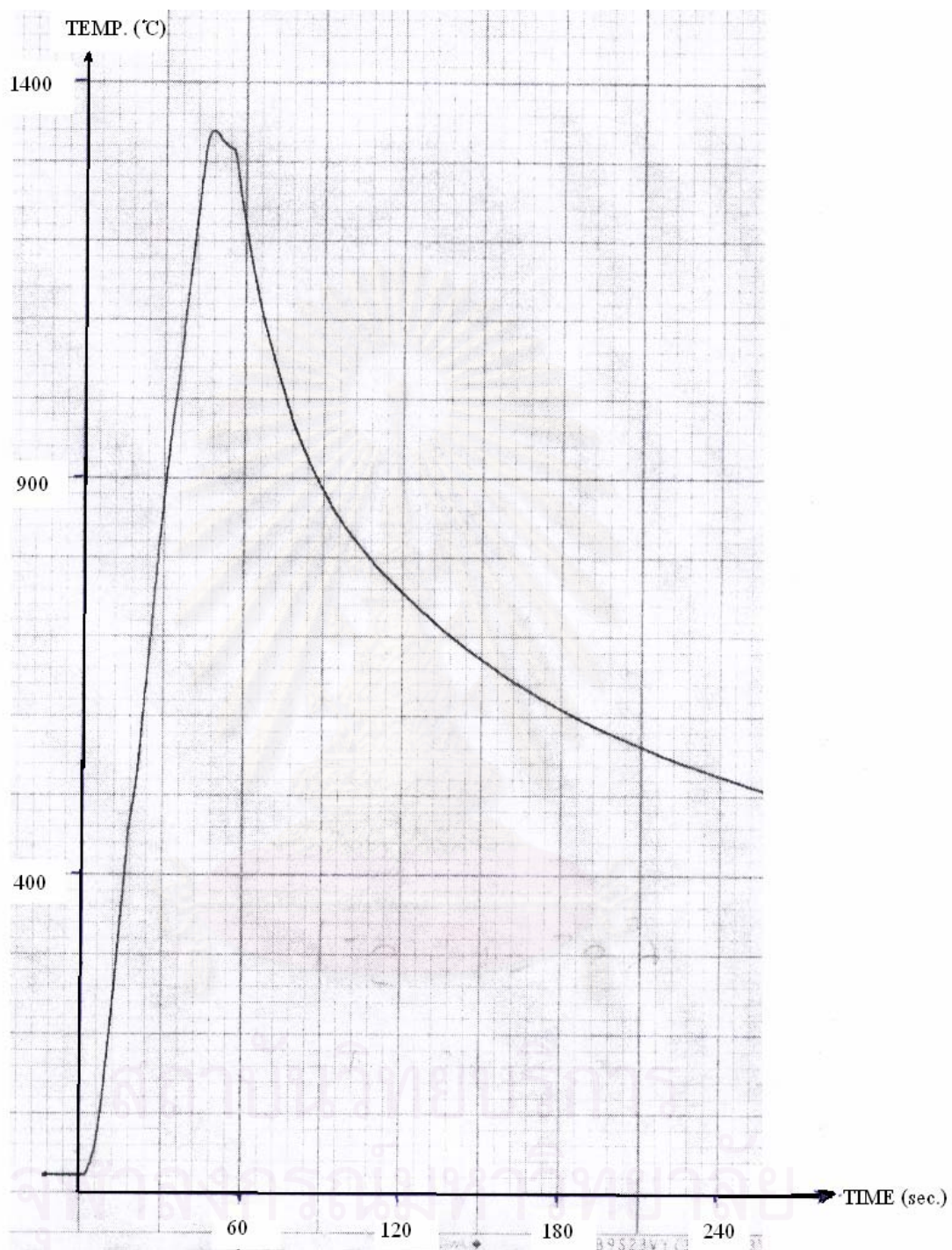
รูปที่ ง.24 เส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ (K4, 0.3400 wt%) ที่ผ่านการจำลองเชื่อม ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ครั้งที่ 3

ภาคผนวก จ

วัฏจักรความร้อนของเหล็กที่ผ่านการจำลองการเชื่อม

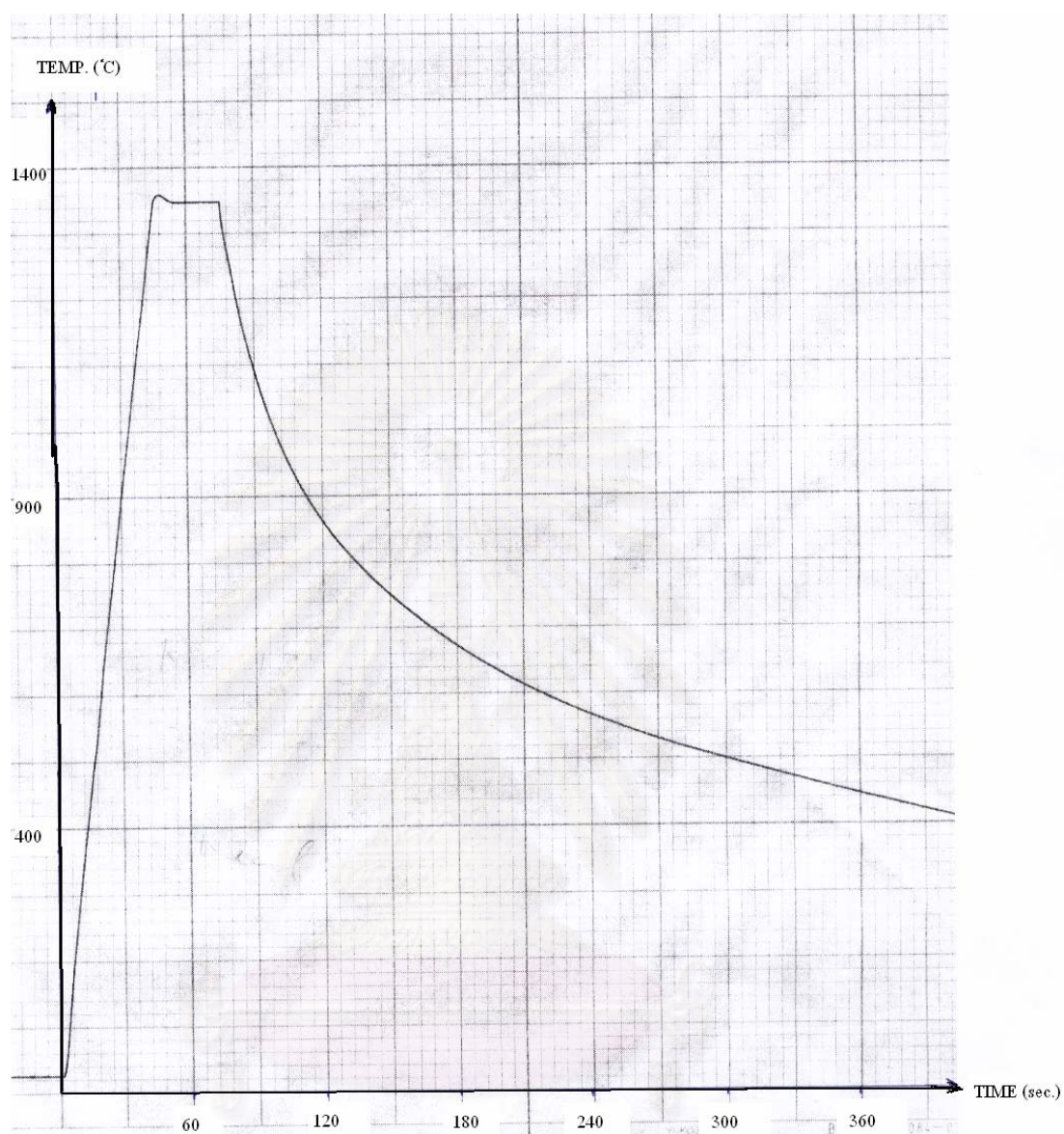


รูป จ1 วัฏจักรความร้อนของเหล็ก K1 ที่ผ่านการจำลองเชื่อม



รูป ๑2 วิถีจักรความร้อนของเหล็ก K2 ที่ผ่านการจำลองเชื่อม

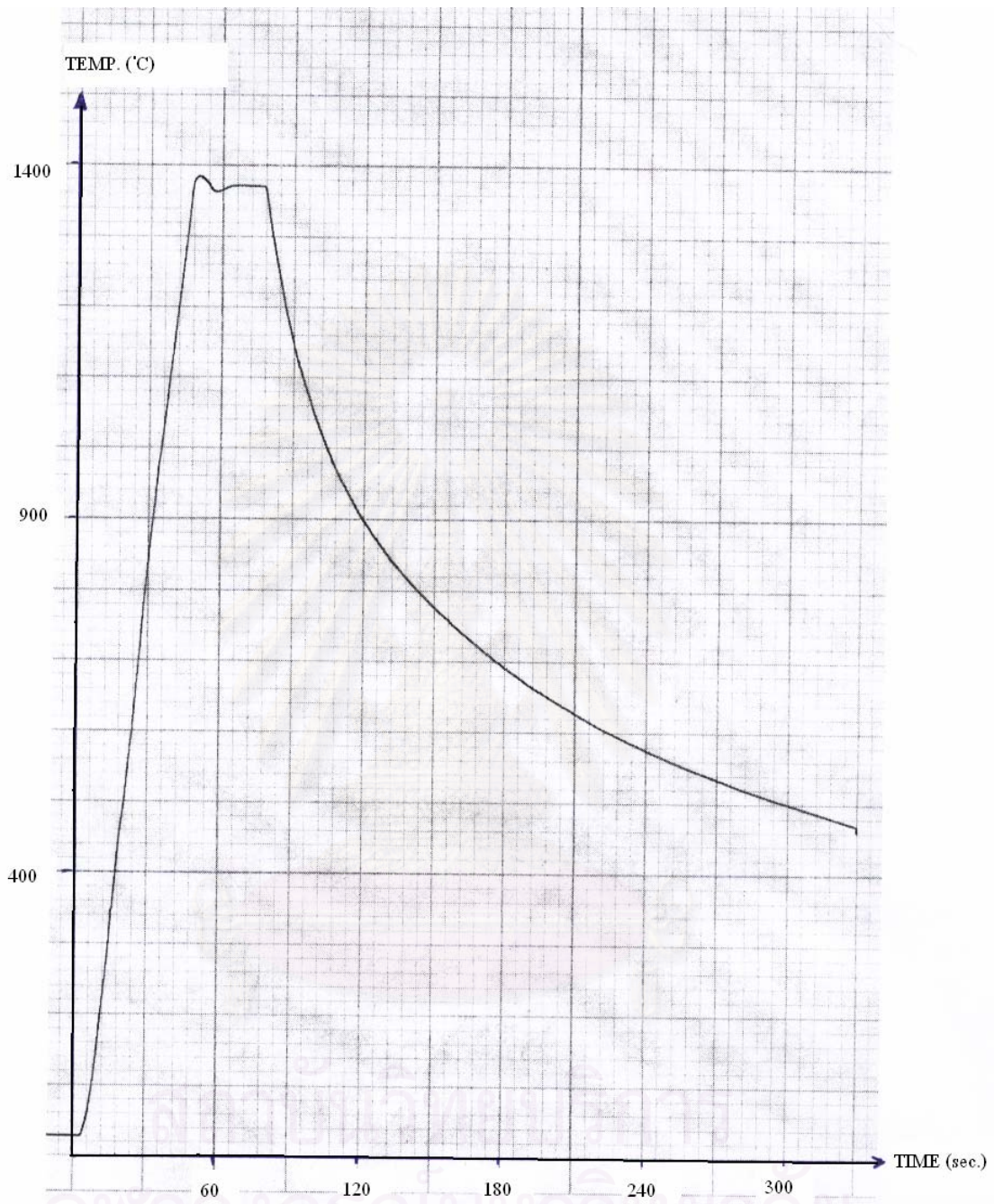




รูป ๑3 วัฏจักรความร้อนของเหล็ก K3 ที่ผ่านการจำลองเชื่อม

สถาบันวิจัยปฏิบัติการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





รูป ๑๔ วัฏจักรความร้อนของเหล็ก K4 ที่ผ่านการจำลองเชื่อม

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายโฆษิต วงศ์ปิ่นแก้ว เกิดเมื่อวันที่ 12 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2522 เริ่มเข้าศึกษา  
ระดับอุดมศึกษาที่สาขาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
ปีการศึกษา 2539 และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ปีการศึกษา 2542  
จากนั้นเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2544



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย