

การศึกษาผลกระทบของไนโตรเจนในก๊าซปฏิกลุมอาร์กอนที่มีต่อปริมาณคลอโรฟิลล์
ในกระบวนการเชื่อมตึก เหล็กกล้าไร้สนิมอสเทนนิติก เกรด 304 L



นายณัฐ มาตรการชัยภูมิ

สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

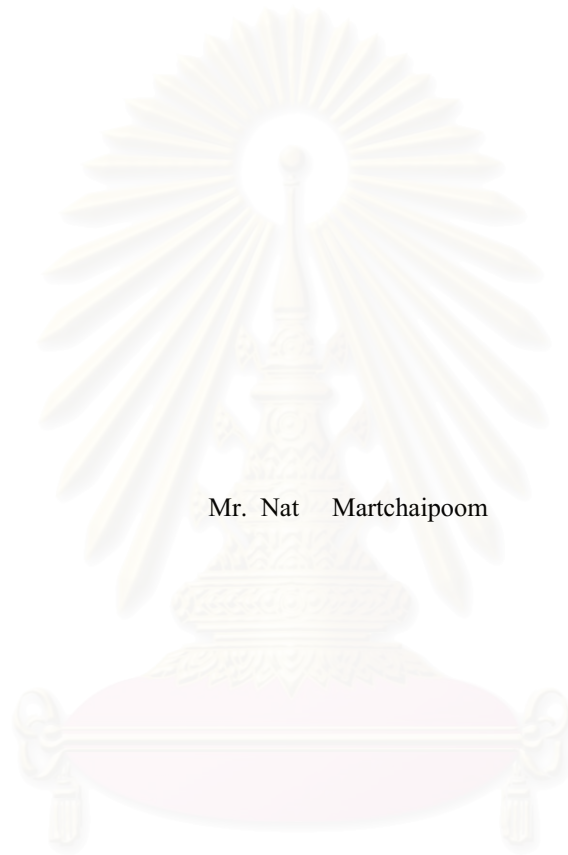
สาขาวิชา วิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2549

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A STUDY ON THE EFFECT OF NITROGEN IN ARGON AS A SHIELDING GAS
ON DELTA-FERRITE CONTENT IN TIG WELDMENT PROCESS OF 304 L
AUSTENITIC STAINLESS STEEL



Mr. Nat Martchaipoom

สถาบันวิทยบริการ

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
For the Degree of Master of Engineering Program in Industrial Engineering

Department of Industrial Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2006

Copyright of Chulalongkorn University

ณัฐ มาตรการชัยภูมิ : การศึกษาผลกระทบของไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอนที่มีต่อปริมาณ
เคลต้าเฟอร์ไรท์ในกระบวนการเชื่อมทิก เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก เกรด 304 L.

(A STUDY ON THE EFFECT OF NITROGEN IN ARGON AS A SHIELDING
GAS ON DELTA-FERRITE CONTENT IN TIG WELDMENT PROCESS OF 304
L AUSTENITIC STAINLESS STEEL) อ.ที่ปรึกษา : ผศ.ดร.สมชาย พัวจินดาเนตร,
อ.ที่ปรึกษาร่วม : รศ.ดร.กอบบุญ หล่อทองคำ, 119 หน้า.

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือ ศึกษาผลของไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอนต่อปริมาณ
เคลต้าเฟอร์ไรท์ในเนื้อเชื่อมจากกระบวนการเชื่อมทิกพัลส์ของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก
เกรด 304 L ชนิดแผ่นหนา 4 มิลลิเมตร โดยอ้างอิงลักษณะรอยเชื่อมตามมาตรฐาน DIN 8563
ใช้ค่าพารามิเตอร์การเชื่อมคือ กระแสพัลส์ 130 แอมแปร์ กระแสเบส 70 แอมแปร์ ความถี่พัลส์
2 พัลส์ต่อวินาที ความต่างศักย์ 14 โวลต์ ความเร็วเชื่อม 3.4 มิลลิเมตรต่อวินาที %ontime 45
เปอร์เซ็นต์ อัตราการไหลของก๊าซปกคลุมด้านบนรอยเชื่อม 16 ลิตรต่อนาที และของก๊าซปกคลุม
ด้านล่างรอยเชื่อม 8 ลิตรต่อนาที ใช้ก๊าซไนโตรเจนผสมก๊าซอาร์กอนเท่ากับ 0 ถึง 10, 15, 20,
25, 30, 35, 40 และ 100 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร

ผลการทดลองเชื่อมทิกพัลส์ พบว่า การใช้ก๊าซไนโตรเจนผสมในก๊าซปกคลุมอาร์กอน 0 - 9
เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร รอยเชื่อมจะมีผิวมันวาวและไม่มีข้อบกพร่องของรอยเชื่อมได้แก่ รูพรุน
(visible pore), แสตก (visible slag inclusion) และ สะเก็ดเชื่อม (spatter) เมื่อเชื่อมโดยใช้ก๊าซ
อาร์กอนเป็นก๊าซปกคลุม 100 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร พบว่ามีปริมาณเคลต้าเฟอร์ไรท์ในเนื้อเชื่อม
14.39 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร การผสมไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอนปริมาณ 9 เปอร์เซ็นต์
โดยปริมาตร ทำให้ปริมาณเคลต้าเฟอร์ไรท์ในเนื้อเชื่อมลดลงเหลือ 4.09 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร
สำหรับรอยเชื่อมที่มีข้อบกพร่องจะได้ออกมาจากการใช้ก๊าซไนโตรเจนผสมก๊าซปกคลุมอาร์กอนที่ปริมาณ
10, 15, 20, 25, 30, 35, 40 และ 100 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร การผสมไนโตรเจนในก๊าซปก
คลุมอาร์กอนปริมาณ 100 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ทำให้เนื้อเชื่อมมีออสเทนไนท์ 100 เปอร์เซ็นต์
โดยปริมาตร เมื่อพิจารณาผลของปริมาณไนโตรเจนในเนื้อเชื่อม พบว่า เมื่อไนโตรเจนละลายใน
เนื้อเชื่อมมากขึ้น ส่งผลให้ปริมาณเคลต้าเฟอร์ไรท์ลดลง แต่เพิ่มความแข็งที่ผิวรอยเชื่อม

ภาควิชา.....วิศวกรรมอุตสาหกรรม.....

สาขาวิชา.....วิศวกรรมอุตสาหกรรม.....

ปีการศึกษา.....2549.....

ลายมือชื่อนิสิต.....*nk*.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....*su*.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....*Rown Phm*.....



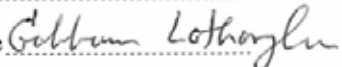
4670677021 : MAJOR INDUSTRIAL ENGINEERING

KEY WORD : NITROGEN,SHIELDING GAS,DELTA-FERRITE,304L AUSTENITIC STAINLESS STEEL

NAT MARTCHAIPOOM : A STUDY ON THE EFFECT OF NITROGEN IN ARGON AS A SHIELDING GAS ON DELTA-FERRITE CONTENT IN TIG WELDMENT PROCESS OF 304 L AUSTENITIC STAINLESS STEEL. THESIS ADVISOR : ASST.PROF. SOMCHAI PUAJINDANETR, Ph.D., THESIS CO-ADVISOR : ASSOC.PROF KOBBOON LOTHONGKUM, Ph.D, 119 pp.

This objective of this study was to investigate the effect of nitrogen in argon as a shielding gas on delta-ferrite content in TIG-pulse weldments of the AISI 304 L austenitic stainless steel plate with 4-mm thickness. The weld bead profile was inspected corresponding to the DIN 8563 . The welding parameters were 130 A of pulse current, 70 A of base current, 2 pulse/sec of frequency, 14 of voltage, 3.4 mm/s of welding speed, 45% of % ontime, 16 l/min of shielding gas flow rate, and 8 l/min of backing gas flow rate. Adding nitrogen in argon as a shielding gas were zero to 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40 and 100 percent by volume.

The experimental results showed that adding nitrogen in argon as a shielding gas between 0-9 percent by volume, weldment defects such as visible pore, visible slag inclusion and spatter were not found. Welding with argon as a shielding gas 100 percent by volume resulted that weld microstructure composed of delta-ferrite 14.39 percent by volume. But welding with argon as a shielding gas with nitrogen 9 percent by volume resulted that weld microstructure composed of delta-ferrite 4.09 percent by volume. Incompletely weldments were found by using nitrogen in argon 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40 and 100 percent by volume. Adding nitrogen 100 percent by volume caused weld microstructure composed of austenite 100 percent by volume in fusion zone area. When nitrogen in weldments increased, the amount of delta-ferrite decreased. However, surface hardness of weldments increased.

Department.....INDUSTRIAL ENGINEERING	Student's signature..... 
Field of study.....INDUSTRIAL ENGINEERING	Advisor's signature..... 
Academic year.....2006	Co-advisor's signature..... 

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ดีด้วยได้รับความอนุเคราะห์จาก ผศ.ดร.สมชาย พัวจินดาเนตร ซึ่งเป็นผู้กรุณาให้คำปรึกษาตลอดเวลาที่ข้าพเจ้าทำการวิจัย ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง ขอขอบคุณ รศ.ดร.กอบบุญ หล่อทองคำ เป็นผู้ให้ความรู้และวิทยาการใหม่ๆทางด้านวิศวกรรมโลหการ ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกๆ ท่าน ที่กรุณาให้คำแนะนำ ข้อคิดเห็นในการทำวิจัย ตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ของเนื้อหาการวิจัยจนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณพี่นุช ครูเสณีย์ ครูชัยฤทธิ์ และเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ทุกคนในห้องปฏิบัติการ การกั๊กกร่อน สำหรับความช่วยเหลือในการทำการทดลอง จนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณพี่ช้าง พี่แนน พี่เอ้ และพนักงานห้องเคมีวิเคราะห์ในบริษัท นครไทยสตรีปมิล จำกัด(มหาชน)ทุกท่าน ที่กรุณาให้การช่วยเหลือในการทำการทดลอง และสอนการใช้เครื่องมือต่างๆอย่างดี

ขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ และน้องๆ ทั้งในห้องปฏิบัติการชั้น 5 และ ในภาควิศวกรรมอุตสาหกรรมทุกคน สำหรับความห่วงใย กำลังใจ และความช่วยเหลือทุกๆ อย่างตลอดช่วงการทำวิทยานิพนธ์

ท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่เป็นกำลังใจและสนับสนุนในทุกๆ ด้าน ตลอดจนกระทั่งข้าพเจ้าสำเร็จการศึกษามาด้วยดี

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูป.....	ฉ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ภาพรวมสภาวะการตลาดของอุตสาหกรรมเหล็ก.....	1
1.2 เหล็กกล้าไร้สนิม.....	5
1.3 ภาพรวมสภาวะการตลาดของเหล็กกล้าไร้สนิมของโลก.....	7
1.4 อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไร้สนิมรุดเย็นในประเทศไทย.....	8
1.5 เหล็กกล้าไร้สนิมรุดเย็นกับการใช้งาน.....	9
1.6 ความสำคัญของงานวิจัย.....	14
1.7 วัตถุประสงค์.....	15
1.8 ขอบเขตการศึกษา.....	15
1.9 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	15
2 ปรีทรรศน์วรรณกรรม.....	16
2.1 อิทธิพลของแก๊สปกคลุม.....	16
2.2 ผลของลักษณะการแข็งตัวของน้ำโลหะรอยเชื่อมต่อ โครงสร้างจุลภาค.....	19
2.3 ผลของส่วนผสมทางเคมีต่อโครงสร้างจุลภาค.....	22
2.4 ผลของการเติมไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอน.....	24
2.5 มาตรฐานรอยเชื่อม DIN 8563.....	29
3 วัสดุและวิธีการทดลอง.....	32
3.1 วัสดุและอุปกรณ์.....	32
3.2 วิธีการเตรียมชิ้นงานและตรวจสอบส่วนผสมทางเคมี.....	35
3.3 วิธีการทดลอง.....	37

บทที่		
	3.4	วิธีการตรวจสอบชิ้นงานภายหลังการเชื่อม..... 37
	3.5	ตัวแปรสำหรับการทดลองเชื่อม..... 39
	3.6	แผนภูมิขั้นตอนการทดลอง..... 40
4		ผลการทดลองและการอภิปราย..... 41
	4.1	รอยเชื่อมของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก เกรด304L..... 41
	4.2	โครงสร้างจุลภาคของเนื้อโลหะรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม ออสเทนนิติก เกรด304L.....57
	4.3	การละลายของไนโตรเจนในเนื้อโลหะ..... 76
	4.4	ผลของไนโตรเจนที่ละลายในเนื้อโลหะต่อปริมาณ เคลด้าเฟอร์ไรท์..... 79
	4.5	ความแข็งผิวชิ้นงาน..... 82
5		สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ..... 89
	5.1	สรุปผลการทดลอง..... 89
	5.2	ข้อเสนอแนะ..... 90
	5.3	ข้อจำกัดของการทดลอง..... 90
		รายการอ้างอิง..... 91
		ภาคผนวก
		ภาคผนวก ก..... 94
		ภาคผนวก ข..... 114
		ภาคผนวก ค..... 118
		ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์..... 119

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ข้อมูลสถิติการผลิต นำเข้า ส่งออกและการบริโภคเหล็ก ของประเทศไทย.....	4
1.2 แสดงคุณสมบัติและตัวอย่างการใช้งานของเหล็กกล้าไร้สนิม.....	10
2.1 คุณสมบัติของแก๊สปกคลุมที่ใช้สำหรับการเชื่อมทิก.....	17
2.2 มาตรฐานรอยเชื่อม DIN 8563 สำหรับการเชื่อม แบบหลอมละลาย.....	30
3.1 ส่วนผสมทางเคมีเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด 304 L ที่ใช้ในการทดลอง.....	36
3.2 ค่าโครเมียมเทียบเท่า และนิกเกิลเทียบเท่าของเหล็กกล้าไร้สนิม ออสเทนนิติกเกรด 304 L.....	36
4.1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ สำหรับการเชื่อมทิก.....	42
4.2 รอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด 304 L ที่ผ่านมาตรฐาน DIN 8563.....	44
4.3 รอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด 304L ที่ไม่ผ่านมาตรฐาน DIN 8563.....	46
4.4 โครงสร้างจุลภาคเนื้อโลหะรอยเชื่อมบริเวณหลอมละลาย (Fusion Zone).....	48
4.5 โครงสร้างจุลภาคเนื้อโลหะรอยเชื่อมบริเวณกระทบร้อน (Heat Affected Zone : HAZ).....	66
4.6 ไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอนและปริมาณไนโตรเจน ในเนื้อโลหะ (Wt.%) ที่ผ่านมาตรฐานการเชื่อม DIN 8563.....	77
4.7 ไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอนและปริมาณไนโตรเจน ในเนื้อโลหะ (Wt.%) ที่ผ่านมาตรฐานการเชื่อม DIN 8563.....	78
4.8 ปริมาณไนโตรเจนในเนื้อโลหะ (Wt.%) และ ปริมาณเคลดดำเฟอร์ไรท์ (Vol.%) ที่ผ่านมาตรฐานการเชื่อม DIN 8563.....	80
4.9 ปริมาณไนโตรเจนในเนื้อโลหะ (Wt.%) และ ปริมาณเคลดดำเฟอร์ไรท์ (Vol.%) ที่ไม่ผ่านมาตรฐานการเชื่อม DIN 8563.....	81
4.10 ปริมาณไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอน (Vol.%) และ ค่าความแข็ง (HRD.) ที่ผ่านมาตรฐานการเชื่อม DIN 8563.....	83

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.11 ปริมาณไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอน(Vol.%) และ ค่าความแข็ง (HRD.) ที่ไม่ผ่านมาตรฐานการเชื่อม DIN 8563.....	85
4.12 ตารางสรุปผลกระทบของการเติมไนโตรเจนในก๊าซปกคลุม อาร์กอน รอยเชื่อมผ่านมาตรฐาน DIN 8563.....	87
4.13 ตารางสรุปผลกระทบของการเติมไนโตรเจนในก๊าซปกคลุม อาร์กอน รอยเชื่อมไม่ผ่านมาตรฐาน DIN 8563.....	88



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 การบริโภคเหล็กสำเร็จรูปของโลก.....	2
1.2 ผลผลิตเหล็กกล้าของโลก.....	3
1.3 ปริมาณการบริโภคเหล็กแผ่นโดยรวมของประเทศไทย.....	4
1.4 ราคาเหล็กกล้าไร้สนิมรีดเย็น เกรด 304.....	7
1.5 ปริมาณการใช้เหล็กกล้าไร้สนิมรีดเย็นในประเทศไทย.....	8
1.6 ราคาเหล็กกล้าไร้สนิมในประเทศไทย.....	9
2.1 ภาพตัดในแกนแนวตั้งของระบบสมดุลสามเฟสของ Fe-Cr-Ni ที่ตำแหน่ง 70% Fe.....	21
2.2 ลักษณะของเคลด้าเฟอร์ไรท์ที่เกิดขึ้นในเนื้อโลหะรอยเชื่อม เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก ก. Vermicular Ferrite ข. Lathy Ferrite ค. Acicular Ferrite ง. Globular Ferrite.....	26
2.3 การแตกร้าวขณะร้อน (Hot crack) ของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก เกรด 316LN และ 316 N (a) 316 LN ไม่มีการเติมไนโตรเจน (b) 0.14% ไนโตรเจน 316 LN (c) 0.19 % ไนโตรเจน 316 LN (d) 316 L ไม่มีการเติมไนโตรเจน (e) 0.14% ไนโตรเจน 316 L (f) 0.19 % ไนโตรเจน 316 L.....	27
2.4 ผลของไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมต่อไนโตรเจนที่ละลายในเนื้อโลหะ รอยเชื่อม เหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์.....	28
3.1 เครื่องเชื่อม Miller/Syncrowave 350 Ampere Constant Current AC/DC Arc Welding.....	33
3.2 ชุดจับยึดชิ้นงานทดลองและชุดป้อนแก๊สปกคลุมด้านล่าง.....	33
3.3 แผนภาพแสดงการควบคุมอัตราการไหลของแก๊สปกคลุมด้านบนและ ด้านล่าง.....	34

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
3.4	ชุดควบคุมอัตราการไหลของแก๊สปกคลุมด้านบนและด้านล่าง..... 35
3.5	โครงสร้างจุลภาคโลหะพื้นเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก เกรด 304L (กำลังขยาย 200 เท่า) (กัดด้วยสารเคมีที่มีส่วนผสมของ $H_2O : HCl : HNO_3$ เป็นอัตราส่วน 3:5:1 โดยปริมาตรเรียงตามลำดับ เป็นเวลา 1.30 นาที)..... 36
4.1	ความสัมพันธ์ระหว่าง ปริมาณเคลด้าเฟอร์ไรท์บริเวณ Fusion Zone และ ปริมาณก๊าซไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอน ที่ผ่านมาตรฐาน DIN 8563..... 60
4.2	ความสัมพันธ์ระหว่าง ปริมาณเคลด้าเฟอร์ไรท์บริเวณ Fusion Zone และ ปริมาณก๊าซไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอน ที่ไม่ผ่านมาตรฐาน DIN 8563..... 61
4.3	ความสัมพันธ์ระหว่าง ปริมาณเคลด้าเฟอร์ไรท์บริเวณ HAZ และ ปริมาณก๊าซไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอนที่ผ่านมาตรฐาน DIN 8563..... 65
4.4	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ปริมาณเคลด้าเฟอร์ไรท์บริเวณ HAZ และปริมาณก๊าซไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอน ที่ไม่ผ่านมาตรฐาน DIN 8563..... 65
4.5	เปรียบเทียบปริมาณเคลด้าเฟอร์ไรท์ระหว่างบริเวณ Fusion Zone และ HAZ..... 76
4.6	ความสัมพันธ์ของไนโตรเจนในก๊าซปกคลุม (Vol.%) ปริมาณไนโตรเจน ในเนื้อโลหะรอยเชื่อม (Wt.%) ที่ผ่านมาตรฐานการเชื่อม DIN 8563..... 77
4.7	ความสัมพันธ์ของไนโตรเจนในก๊าซปกคลุม (Vol.%) ปริมาณไนโตรเจน ในเนื้อโลหะรอยเชื่อม (Wt.%) ที่ไม่ผ่านมาตรฐานการเชื่อม DIN 8563..... 78
4.8	ความสัมพันธ์ของปริมาณไนโตรเจนในเนื้อโลหะรอยเชื่อม(Wt.%) และ ปริมาณเคลด้าเฟอร์ไรท์ (Vol.%) ที่ผ่านมาตรฐานการเชื่อม DIN 8563..... 81
4.9	ความสัมพันธ์ของปริมาณไนโตรเจนในเนื้อโลหะรอยเชื่อม (Wt.%) และ ปริมาณเคลด้าเฟอร์ไรท์ (Vol.%) ที่ไม่ผ่านมาตรฐานการเชื่อม DIN 8563..... 82
4.10	ความสัมพันธ์ของปริมาณไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอน (Vol.%) และค่าความแข็ง (HRD.) ที่ผ่านมาตรฐานการเชื่อม DIN 8563..... 84
4.11	ความสัมพันธ์ของปริมาณไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอน (Vol.%) และค่าความแข็ง (HRD.) ที่ไม่ผ่านมาตรฐานการเชื่อม DIN 8563..... 85

บทที่ 1

บทนำ

1. บทนำ

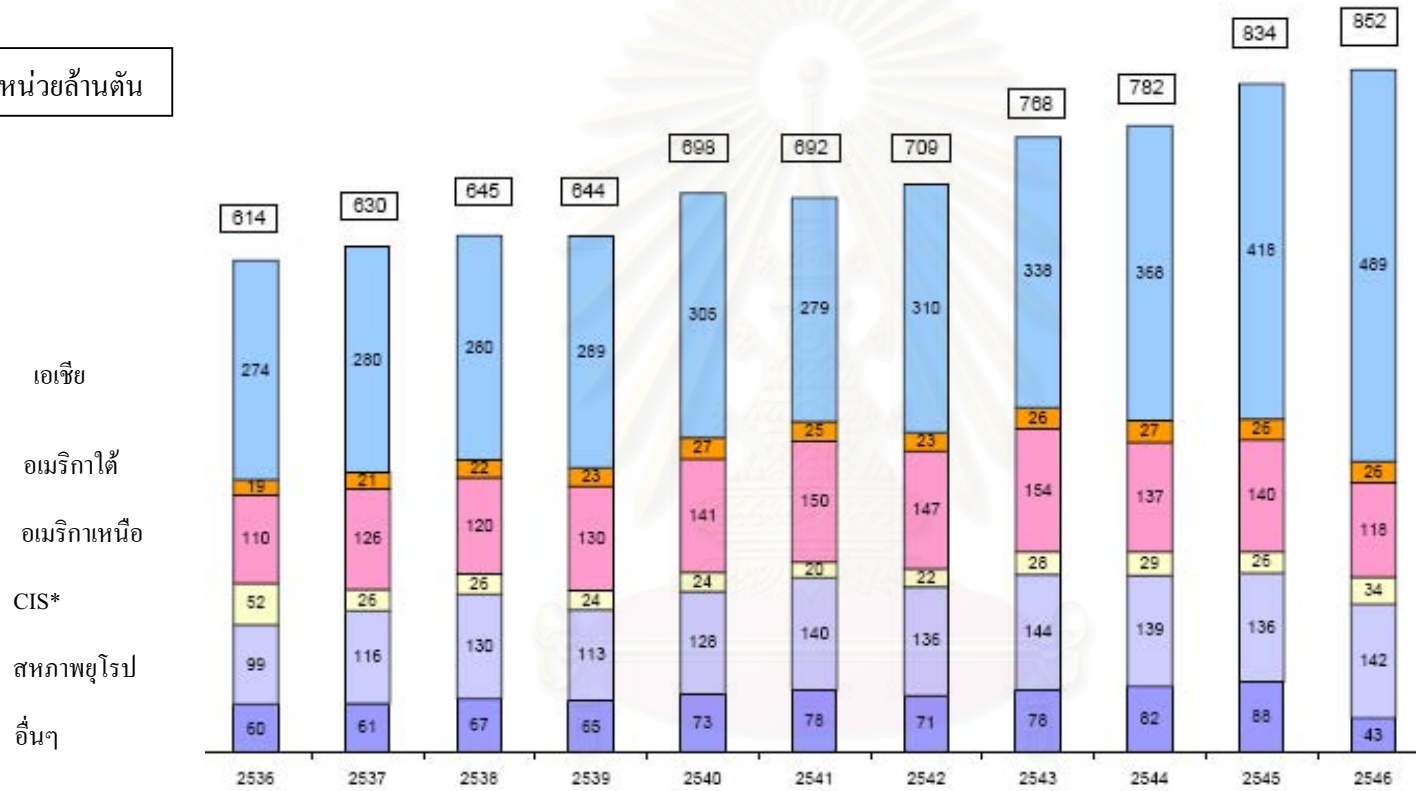
ในปัจจุบันอุตสาหกรรมของประเทศไทยกำลังพัฒนาอย่างรวดเร็ว มีโครงการของรัฐบาลต่างๆ เกิดขึ้นมากมาย ไม่ว่าจะเป็นโครงการสนามบินสุวรรณภูมิ โครงการที่จะพัฒนาประเทศไทยให้ป็นศูนย์กลางการผลิตรถยนต์แห่งภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ เป็นต้น ซึ่งโครงการเหล่านี้จะผลักดันให้ประเทศไทยก้าวขึ้นจากประเทศกำลังพัฒนากลายเป็นประเทศที่พัฒนาอย่างเต็มตัว วัตถุดิบสำคัญที่ใช้เป็นรากฐานในการผลิตของอุตสาหกรรมในประเทศไทยคือ อุตสาหกรรมการผลิตเหล็ก เหล็กที่ใช้ในงานโครงสร้างส่วนใหญ่จะเป็นเหล็กกล้าที่มีคาร์บอนต่ำกว่า 2%

1.1 ภาพรวมสถานะการตลาดของอุตสาหกรรมเหล็ก

อุตสาหกรรมเหล็กในโลกมีการขยายตัวอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะอุตสาหกรรมเหล็กของประเทศในภูมิภาคเอเชียที่การผลิตเหล็กมีอัตราการเจริญเติบโตโดยเฉลี่ยร้อยละ 10 ต่อปีนับตั้งแต่ปี 2543 และการบริโภคเหล็กในภูมิภาคเอเชียในปี 2546 มีการเจริญเติบโตเพิ่มขึ้นร้อยละ 17 เมื่อเทียบกับปี 2545 คิดเป็นสัดส่วนการบริโภคเหล็กสูงถึงร้อยละ 57 ของการบริโภคเหล็กของโลกในปี 2546 โดยเป็นการ บริโภคเหล็กของประเทศจีนร้อยละ 63 ของการบริโภคเหล็กในภูมิภาคเอเชียแสดงดังรูปที่ 1.1 และรูปที่ 1.2

สำหรับการบริโภคเหล็กในประเทศไทย มีการเจริญเติบโตสูงถึงร้อยละ 9.1 เมื่อเทียบกับปี 2545 คิดเป็นปริมาณการบริโภค 10.97 ล้านตัน เป็นการผลิตในประเทศ 7.50 ล้านตัน เพิ่มขึ้นจากปี 2545 ถึงร้อยละ 12 และเป็นการนำเข้า 4.93 ล้านตัน เพิ่มขึ้นด้วยอัตราร้อยละ 8 โดยส่วนใหญ่ เป็นการนำเข้าเหล็กเกรดคุณภาพสูง หรือเกรดพิเศษที่ยังไม่มีการผลิตในประเทศเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมยานยนต์ และเครื่องใช้ไฟฟ้าเป็นส่วนใหญ่ เป็นการส่งออก 1.46 ล้านตัน ซึ่งมีการขยายตัวเพิ่มขึ้นจากปี 2545 ถึงร้อยละ 17 การขยายตัวของการส่งออกดังกล่าวส่วนใหญ่เกิดจากการส่งออกผลิตภัณฑ์เหล็กทรงยาวไปยังประเทศเพื่อนบ้าน และการส่งออกเหล็กแผ่นรีดร้อนและรีดเย็นไปยังประเทศจีน มาเลเซียและอินโดนีเซียแสดงดังรูปที่ 1.3 และ ตารางที่

หน่วยล้านตัน

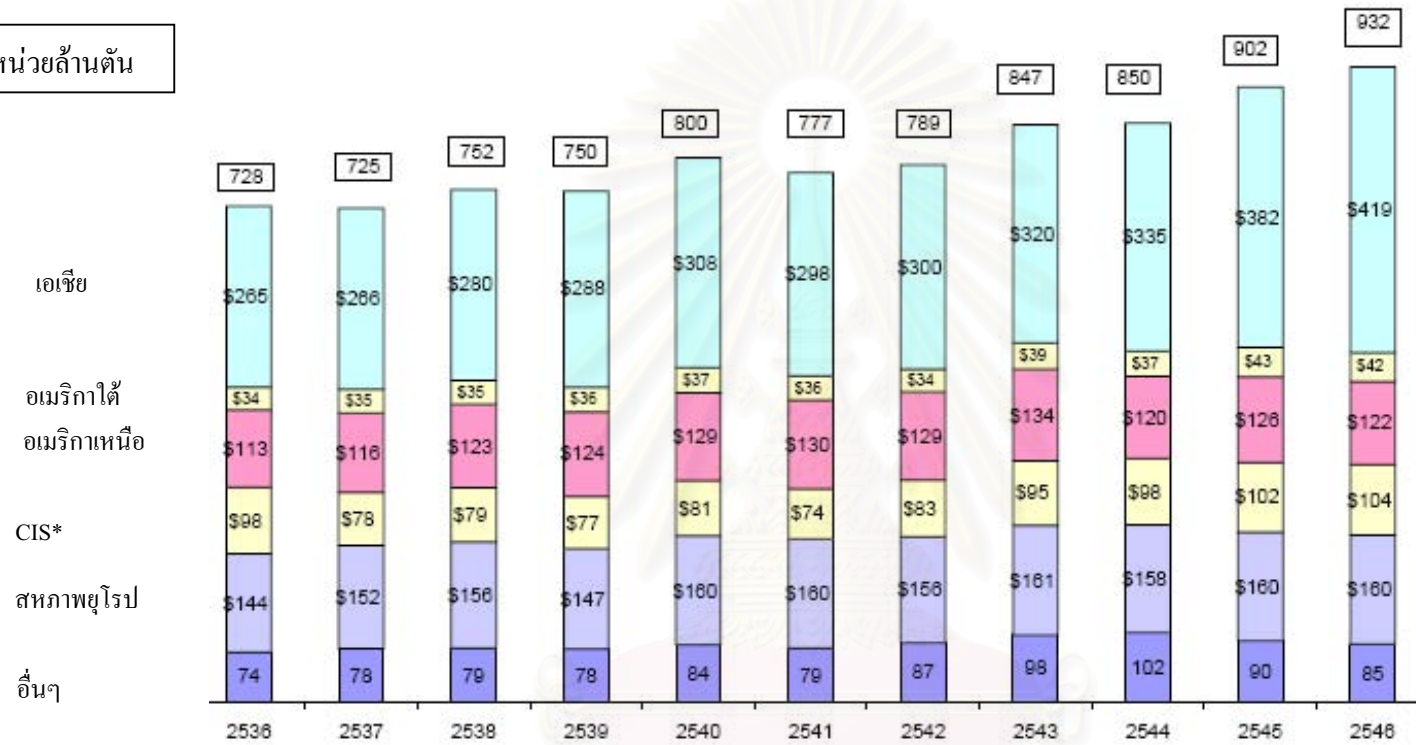


* หมายถึง CIS คือ เครื่องจักรเอกราชหลังการล่มสลายของสหภาพโซเวียต

รูปที่ 1.1 การบริโภคเหล็กสำเร็จรูปของโลก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

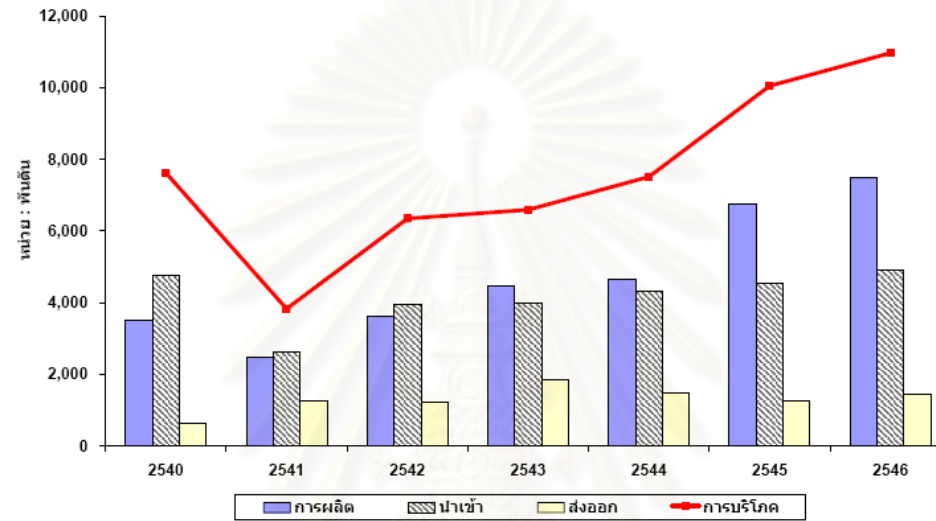
หน่วยล้านตัน



* หมายเหตุ CIS คือ เครื่องจักรเกษตรหลังการล่มสลายของสหภาพโซเวียต

รูปที่ 1.2 ผลผลิตหลักของโลก

สถาบันวิจัยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 1.3 ปริมาณการบริโภคหลักแผ่นดินโดยรวมของประเทศไทย

ตารางที่ 1.1 ข้อมูลสถิติการผลิต นำเข้า ส่งออกและการบริโภคหลักของประเทศไทย

ปี	2535	2536	2537	2538	2539	2540	2541	2542	2543	2544	2545	2546
การผลิต	1,921	2,386	2,114	3,487	3,685	3,505	2,469	3,635	4,451	4,652	6,747	7,497
นำเข้า	5,830	5,627	6,172	6,205	5,902	4,761	2,629	3,942	3,998	4,337	4,549	4,925
ส่งออก	175	255	301	635	800	647	1,271	1,233	1,858	1,474	1,247	1,455
การบริโภค	7,576	7,757	7,985	9,057	8,788	7,618	3,827	6,344	6,592	7,515	10,049	10,967

1.2 เหล็กกล้าไร้สนิม

เหล็กกล้าไร้สนิม หมายถึง เหล็กกล้าที่ผสมโครเมียมอย่างน้อย 10.5% ทำให้มีคุณสมบัติต้านทานการกัดกร่อน โดยเหล็กกล้าไร้สนิมจะสร้างฟิล์มโครเมียมออกไซด์ที่บางและแน่นที่ผิว ซึ่งจะปกป้องเหล็กกล้าจากบรรยากาศภายนอก กลุ่มเหล็กกล้าไร้สนิมแบ่งตามลักษณะโครงสร้างจุลภาค ได้ดังนี้

1. เหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก (Ferritic stainless steel)
2. เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก (Austenitic stainless steel)
3. เหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก (Martensitic stainless steel)
4. เหล็กกล้าไร้สนิมอบชุบแข็งด้วยการตกผลึก (Precipitation-hardening stainless steel)
5. เหล็กกล้าไร้สนิมคูเพล็กซ์ (Duplex stainless steel)

เหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก (Ferritic stainless steel)

เหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติกที่ใช้กันมากจะผสมโครเมียม (Cr) ประมาณ 12% หรือ 17% (ช่วงของส่วนผสมของ $Cr \pm 1\%$) มีนิเกิลน้อยมาก (มากับวัตถุดิบ) เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้จะมีโครงสร้างจุลภาคเป็นเฟอร์ไรต์และมีคุณสมบัติที่แม่เหล็กสามารถดูดติดได้ มีค่าความต้านทานแรงดึงที่จุดคราก (Yield strength) และค่าความต้านทานแรงดึง (Tensile strength) ปานกลาง มีค่าความยืด (Elongation) สูง เช่น เกรด 430, 409 เหล็กกล้าไร้สนิมชนิดเฟอร์ริติกมีราคาถูกกว่าเมื่อเทียบกับกลุ่มออสเทนนิติก แต่อาจพบปัญหาเรื่องเกรนหยาบ (Grain coarsening) และสูญเสียความแกร่ง (Toughness) หลังการเชื่อม การใช้งาน เช่น ชิ้นส่วนเครื่องซักผ้า ชิ้นส่วนระบบท่อไอเสีย และในบางเกรดจะผสมโครเมียมสูงเพื่อใช้กับงานที่ต้องทนอุณหภูมิสูง

เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก (Austenitic stainless steel)

เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกที่ใช้กันมากจะผสมโครเมียมประมาณ 17% (ช่วงของส่วนผสมของ $Cr \pm 1\%$) และนิเกิล (Ni) ประมาณ 9% (ช่วงของส่วนผสมของ $Ni \pm 1\%$) เหล็กกลุ่มนี้บางเกรดจะผสมโครเมียมและนิเกิลเพิ่มเพื่อให้สามารถทนต่อการเกิดออกซิเดชันที่อุณหภูมิสูง ทำให้สามารถใช้เป็นส่วนประกอบของเตาหลอม ในด้านคุณสมบัติเชิงกล เหล็กกลุ่มออสเทนนิติกจะมีค่าความต้านทานแรงดึงที่จุดคราก (Yield strength) ใกล้เคียงกับของกลุ่มเฟอร์ริติก แต่จะมีค่าความต้านทานแรงดึง (Tensile strength) และค่าความยืด (Elongation) สูง

กว่าจึงสามารถขึ้นรูปได้ดีมาก เนื่องจากคุณสมบัติโดยรวมค่อนข้างเป็นที่ยอมรับได้ จึงเป็นเกรดที่นิยมใช้กัน เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้มีคุณสมบัติที่แม่เหล็กไม่ดูดติด (ในสภาพผ่านการอบอ่อน) เช่น เกรด 304L, 316L, 321, 301 การใช้งาน เช่น หม้อ ช้อน ถาด โรงงานอุตสาหกรรมเคมี

เหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติค (Martensitic stainless steel)

เหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติค จะผสมโครเมียมประมาณ 11.5 - 18% เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้มีคาร์บอนเหมาะสมและสามารถชุบแข็งได้ เหล็กกล้ากลุ่มนี้มีค่าความต้านทานแรงดึงที่จุดคราก (Yield strength) และความต้านทานแรงดึง (Tensile strength) สูงมาก แต่จะมีค่าความยืด (Elongation) ต่ำ เช่น เกรด 420 การใช้งาน เช่น ใช้ทำเครื่องมือตัดชิ้นส่วน มีด

เหล็กกล้าไร้สนิมอบชุบแข็งด้วยการตกผลึก (Precipitation-hardening stainless steel)

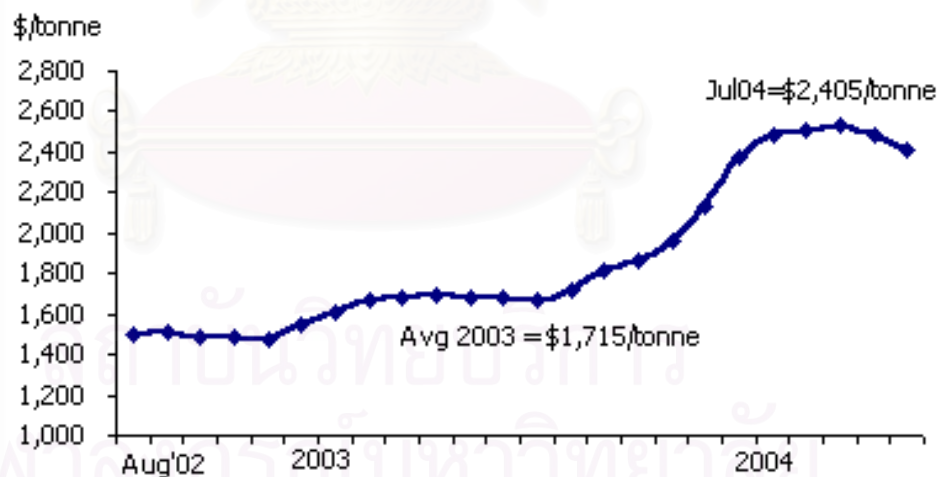
เหล็กกล้าไร้สนิมอบชุบแข็งด้วยการตกผลึก มีโครเมียมผสมประมาณ 15 - 18% และนิกเกิลอยู่ประมาณ 3 - 8% เหล็กกล้ากลุ่มนี้สามารถอบชุบแข็งได้ จึงเหมาะสำหรับทำแกน ปัม หัววาล์ว ตัวอย่างเกรดของเหล็กกลุ่มนี้ เช่น PH13 - 9Mo, AM - 350

เหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ (Duplex stainless steel)

เหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ จะมีโครงสร้างผสมระหว่างออสเทนไนต์และเฟอร์ไรท์ มีโครเมียมผสมประมาณ 21 - 28% และนิกเกิลประมาณ 3 - 7.5% เหล็กกล้ากลุ่มนี้จะมีค่าความต้านทานแรงดึงที่จุดครากสูงและค่าความยืดสูง จึงเรียกได้ว่ามีทั้งความแข็งแรงและความเหนียว (Ductility) สูงมักจะเลือกใช้งานแทนเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 304 และ 316 ในกรณีที่ต้องการความต้านทานการกัดกร่อนสูงกว่าและราคาไม่แพง ประกอบด้วยเฟส 2 เฟส คือ ออสเทนไนต์ (Austenite) และเดลตาเฟอร์ไรท์ (Delta ferrite) ในการผลิตเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์จะควบคุมให้มีปริมาณออสเทนไนต์และเดลตาเฟอร์ไรท์ในอัตราส่วนประมาณ 1 : 1 โดยการอบชุบความร้อนเพื่อทำให้เหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์มีสมบัติที่ดีทั้งในด้านความแข็งแรงและความต้านทานการกัดกร่อน ซึ่งจำเป็นอย่างมากสำหรับอุตสาหกรรมเคมีหรือปิโตรเคมีที่กระบวนการผลิตอาจอยู่ในสถานะที่มีการกัดกร่อนอยู่ตลอดเวลาหรืออยู่ในช่วงอุณหภูมิใช้งานสูง

1.3 ภาพรวมสถานะการตลาดของเหล็กกล้าไร้สนิมของโลก

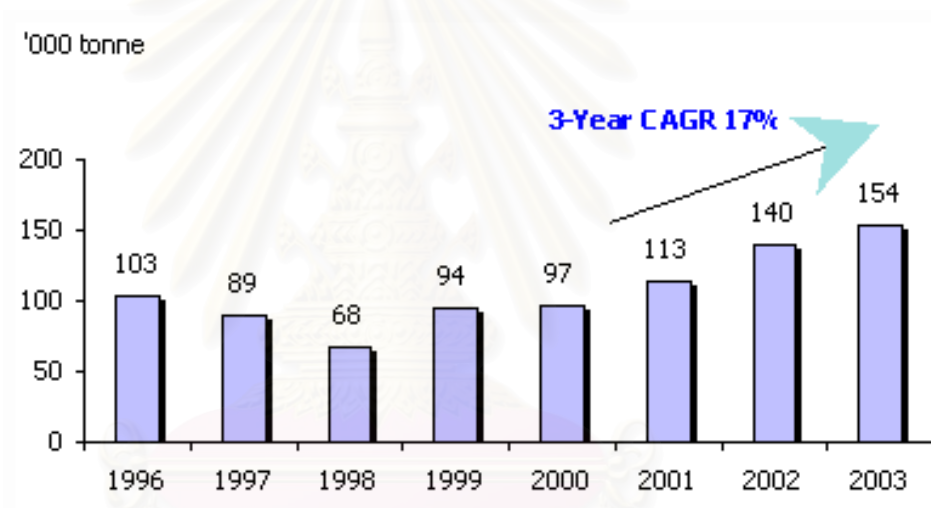
อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไร้สนิมรีดเย็นในตลาดโลกกำลังอยู่ในช่วงขยายตัวภายหลังจากการฟื้นตัวทางเศรษฐกิจของประเทศต่างๆ ทำให้การบริโภคเหล็กกล้าไร้สนิมรีดเย็นเพิ่มสูงขึ้น โดยตั้งแต่ปี 2543 เศรษฐกิจโลก และ ในภูมิภาคเอเชียได้เติบโตขึ้นมาก ทำให้การเติบโตของปริมาณการใช้เหล็กกล้าไร้สนิมรีดเย็นทั่วโลกมีอัตราการเติบโตเฉลี่ย 5.99% ต่อปี ตั้งแต่ปี 2543-2546 และประเมินกันว่าในช่วงปี 2547-2551 ความต้องการใช้เหล็กกล้าไร้สนิมรีดเย็นทั่วโลกจะมีการเติบโตอย่างต่อเนื่องในอัตราการเติบโตเฉลี่ยประมาณ 5% ต่อปี ในปัจจุบันปริมาณความต้องการบริโภคเหล็กกล้าไร้สนิมรีดเย็นทั่วโลกมีการขยายตัวอย่างต่อเนื่อง ในขณะที่ผู้ประกอบการผลิตเหล็กรายใหญ่ของโลกมีการชะลอการผลิตลงตั้งแต่ในช่วงเกิดวิกฤตเศรษฐกิจ ส่งผลให้ราคาเหล็กกล้าไร้สนิมรีดเย็นในตลาดโลกปรับตัวสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ราคาเหล็กกล้าไร้สนิมรีดเย็นเกรด 304 เดือน ก.ค. 2547 อยู่ที่ระดับ 2,405 เหรียญ/ตัน เทียบกับราคาเฉลี่ยในปี 2546 อยู่ที่ 1,715 เหรียญ/ตันแสดงดังรูปที่ 1.4



รูปที่ 1.4 ราคาเหล็กกล้าไร้สนิมรีดเย็น เกรด 304

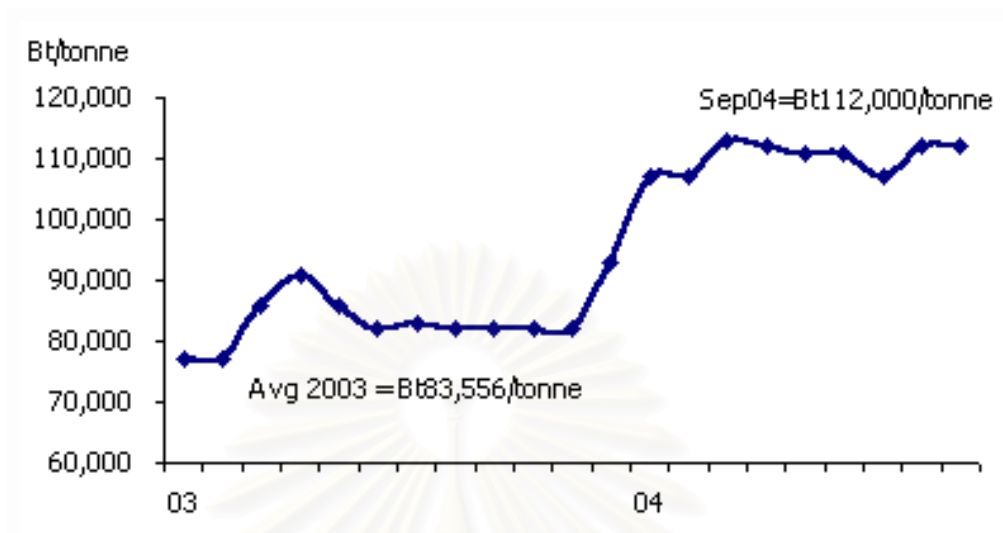
1.4 อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไร้สนิมรีดเย็นในประเทศไทย

อุตสาหกรรมเหล็กกล้าไร้สนิมรีดเย็นในประเทศไทยมีการปรับตัวขึ้นในทิศทางเดียวกับภาวะอุตสาหกรรมเหล็กกล้าไร้สนิมรีดเย็นในตลาดโลก ทั้งนี้เป็นผลมาจากการฟื้นตัวของเศรษฐกิจโดยรวมของประเทศ ซึ่งการเติบโตในช่วงสามปีที่ผ่านมาเมื่ออัตราการขยายตัวเฉลี่ยเท่ากับ 17% ผู้ระดับ 154,000 ตัน ในปี 2546 เนื่องจากเหล็กกล้าไร้สนิมรีดเย็นเป็นวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตสำหรับหลายอุตสาหกรรมต่อเนื่อง อาทิเช่น อุตสาหกรรมเครื่องใช้ในครัวเรือน อุตสาหกรรมก่อสร้าง อุตสาหกรรมผลิตท่อ อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ อุตสาหกรรมขนส่ง และ อุตสาหกรรมรถยนต์แสดงดังรูปที่ 1.5



รูปที่ 1.5 ปริมาณการใช้เหล็กกล้าไร้สนิมรีดเย็นในประเทศไทย

สำหรับราคาขายเหล็กแผ่นไร้สนิมในประเทศไทย จากข้อมูลของกระทรวงพาณิชย์ ราคาเหล็กแผ่นไร้สนิม ขนาด 4x8 ฟุต หนา 2 มม. หนัก 47.2 กก./แผ่น ในเดือน ก.ย. 2547 ปรับตัวเพิ่มขึ้น 112,000 บาท/ตัน ซึ่งยังต่ำกว่าเพดานราคาของกระทรวงพาณิชย์ซึ่งกำหนดไว้ที่ 115.79 บาท/กก. และ สูงกว่าราคาเฉลี่ยในปี 2546 ซึ่งอยู่ที่ระดับ 83,556 บาท/ตัน หรือ เพิ่มขึ้น 34% นับว่าเป็นการปรับตัวที่สอดคล้องกับการปรับตัวสูงขึ้นของราคาเหล็กกล้าไร้สนิมรีดเย็นในตลาดโลก และ ความความต้องการที่ขยายตัวของตลาดภายในประเทศ แสดงดังรูปที่ 1.6



รูปที่ 1.6 ราคาเหล็กกล้าไร้สนิมในประเทศไทย

1.5 เหล็กกล้าไร้สนิมรีดเย็นกับการใช้งาน

เหล็กกล้าไร้สนิมรีดเย็นนับเป็นวัสดุที่มีประโยชน์ใช้สอยไร้ขีดจำกัด ด้วยคุณสมบัติเด่น เช่น ไม่เป็นสนิม ง่ายต่อการเชื่อมต่อ ง่ายต่อการขึ้นรูป ค่าบำรุงรักษาต่ำ และสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ จึงทำให้เป็นวัสดุที่ใช้ในหลายอุตสาหกรรมต่อเนื่อง

- อุตสาหกรรมครัวเรือนและอาหาร เช่น งาน ชาม หม้อ อุปกรณ์เตรียมอาหาร ภาชนะหุงต้ม อุปกรณ์อาหาร อ่างล้างจาน เครื่องล้างจาน เครื่องซักผ้า แท็งก์น้ำ เป็นต้น
- อุตสาหกรรมก่อสร้าง เช่น งานตกแต่งภายนอกและภายใน ด้านหน้าอาคาร หลังคา ทางเข้าอาคาร กรอบประตูหน้าต่าง ท่อ เป็นต้น
- อุตสาหกรรมรถยนต์ เช่น อุปกรณ์ถุงลมนิรภัย ระบบท่อไอเสีย คอนเวอเตอร์ ท่อไอดี กันชน ฝาครอบล้อ เครื่องประดับยนต์ และ ส่วนตกแต่งอื่นๆ
- อุตสาหกรรมคมนาคมขนส่ง เช่น สร้างตู้รถโดยสาร ตู้คอนเทนเนอร์ แทงค์ขนส่งน้ำมันหรือเคมีภัณฑ์ต่างๆ

การนำเหล็กกล้าไร้สนิมรีดเย็นไปใช้งานแสดงได้ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 1.2 แสดงคุณสมบัติและตัวอย่างการใช้งานของเหล็กกล้าไร้สนิม

กลุ่ม	เกรด	ด้านทานการกัดกร่อน	ขึ้นรูป	เชื่อม	คุณสมบัติ	ตัวอย่างการใช้งาน
เฟอร์ริติก	430	ปานกลาง	ปานกลาง	ปานกลาง	ผสมโครเมียมประมาณ 17% มีนิคเกิลต่ำมาก มีแนวโน้มที่จะเปราะเมื่อต้องเชื่อมแบบที่มีกรหลอมละลาย	งานทางสถาปัตยกรรมภายใน งานตกแต่ง เครื่องใช้ภายในบ้าน เครื่องซักผ้า เครื่องครัว ซ็อน
เฟอร์ริติก	430Ti	กลาง	ดี	ดีมาก	คือ เกรด 430 ที่ผสมไทเทเนียมทำให้เชื่อมและขึ้นรูปเย็นได้ดี	เครื่องใช้ภายในบ้าน อ่างล้างจาน ท่อ
เฟอร์ริติก	409	ปานกลาง	ดี	ดี	เป็นเหล็กกล้าโครเมียม 12% ที่ผสมไทเทเนียม ทนความร้อนและการเกิดออกซิเดชัน ง่ายต่อการขึ้นรูปและเชื่อม	ระบบท่อไอเสียรถยนต์
เฟอร์ริติก	444	ดี	ดี	ดีมาก	เป็นเกรดที่มีคาร์บอนต่ำ ($C \leq 0.03\%$) ผสมโมลิบดีนัมและไทเทเนียม มีความต้านทานต่อการกัดกร่อนแบบ Pitting Corrosion ,Crevice Corrosion , Intergranular Corrosion	แทงก์น้ำร้อน (Hot water tanks) อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (Heat exchanger)
ออสเทนนิติก	304	ดี	ดีมาก	ดี	เป็นเกรดที่นิยมใช้กันมากที่สุด มีความต้านทานต่อการกัดกร่อนดี สามารถขึ้นรูปเย็นและเชื่อมได้ดี	เครื่องใช้ในบ้าน ภาชนะเครื่องครัว เครื่องหุงต้มความดัน แท็งก์น้ำ อ่าง ซ้อม ส้อม อุตสาหกรรมอาหาร

ตารางที่ 1.2 (ต่อ)แสดงคุณสมบัติและตัวอย่างการใช้งานของเหล็กกล้าไร้สนิม

กลุ่ม	เกรด	ต้านทานการกัดกร่อน	ขึ้นรูป	เชื่อม	คุณสมบัติ	ตัวอย่างการใช้งาน
ออสเทนนิติก	304L	ดี	ดีมาก	ดีมาก	เป็นเกรด 304 ที่ผสมคาร์บอนต่ำ ($C \leq 0.03\%$) ใช้เมื่อต้องการความต้านทานการกัดกร่อนตามขอบเกรน โดยเฉพาะโครงสร้างหนาที่ต้องผ่านการเชื่อม	อุปกรณ์ในโรงงานอุตสาหกรรมเคมีและอุตสาหกรรมอาหารที่ต้องการใช้งานเหล็กที่หนาโดยไม่ต้องทำ sensitization
ออสเทนนิติก	302	ดี	ดีมาก	ดี	ผสมนิกเกิลน้อยกว่าเกรด 304	สปริง
ออสเทนนิติก	301	ดี	ดีมาก	ดี	ผสมโครเมียมและนิกเกิลต่ำ มีความแข็งแรงสูงเมื่อผ่านการรีดเย็น	งานชิ้นส่วนรถบรรทุก รถไฟ (Rail carriages and wagons) สปริง สายพานลำเลียง
ออสเทนนิติก	303	ดี	ดีมาก	ดี	เติมซัลเฟอร์เพื่อเพิ่มความสามารถในการกลึงไส แต่ความต้านทานต่อการกัดกร่อนน้อยกว่า 302	งานที่ต้องทำการกลึงไส
ออสเทนนิติก	310	ดี	ดีมาก	ดี	เป็นเกรดที่ผสมโครเมียม ($Cr \sim 25\%$) และนิกเกิล ($Ni \sim 20\%$) สูง	ส่วนประกอบของเตาและอุปกรณ์ที่ทนทานต่ออุณหภูมิ 900-1100°C

ตารางที่ 1.2 (ต่อ)แสดงคุณสมบัติและตัวอย่างการใช้งานของเหล็กกล้าไร้สนิม

กลุ่ม	เกรด	ต้านทานการกัดกร่อน	ขึ้นรูป	เชื่อม	คุณสมบัติ	ตัวอย่างการใช้งาน
ออสเทนนิติก	310S	ดี	ดีมาก	ดี	ส่วนผสมเดียวกับเกรด 310 แต่มีคาร์บอนต่ำกว่า	ใช้ในงานที่ต้องการความต้านทานการกัดกร่อนต่อกรดในตริก
ออสเทนนิติก	316	ดีมาก	ดี	ดี	ผสม โมลิบดีนัมเพื่อเพิ่มความต้านทานต่อการกัดกร่อน	อุปกรณ์ที่ใช้งานทางทะเล สามารถเชื่อมที่ความหนาไม่เกิน 3 มม. โดยไม่ต้องทำการปรับปรุงด้วยความร้อน (Heat treatment) หลังการเชื่อม
ออสเทนนิติก	316L	ดีมาก	ดี	ดีมาก	ส่วนผสมเดียวกับเกรด 316 แต่มีคาร์บอนผสมอยู่ต่ำกว่า	ใช้ในงานที่ต้องเชื่อมเหล็กหนาโดยไม่ให้เกิดการกัดกร่อนแบบขอบเกรน (Intergranular corrosion)
ออสเทนนิติก	316Ti	ดีมาก	ดี	ดีมาก	ส่วนผสมเดียวกับเกรด 316 แต่มีไทเทเนียมผสมเพิ่ม	งานที่ต้องการความทนทานต่อการกัดกร่อนแบบขอบเกรน (Intergranular corrosion) และต้องการความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูง
ออสเทนนิติก	317	ดีมาก	ดี	ดี	ผสมโครเมียมประมาณ 19% นิกเกิลประมาณ 13% โมลิบดีนัมประมาณ 3-4%	ใช้ทำอุปกรณ์ตามโรงงานทางเคมีที่ต้องการความต้านทานการกัดกร่อนสูงกว่า 316 โดยเฉพาะที่ต้องสัมผัสกับน้ำทะเล

ตารางที่ 1.2 (ต่อ)แสดงคุณสมบัติและตัวอย่างการใช้งานของเหล็กกล้าไร้สนิม

กลุ่ม	เกรด	ต้านทานการกัดกร่อน	ขึ้นรูป	เชื่อม	คุณสมบัติ	ตัวอย่างการใช้งาน
ออสเทนนิติก	321	ดี	ดีมาก	ดีมาก	ผสมโครเมียมประมาณ 18% นิกเกิลประมาณ 10% ไทเทเนียมประมาณ 0.5%	ทำท่อ แท็งก์ ชิ้นส่วนเครื่องบินไอพ่น งานเชื่อมในอุตสาหกรรมเคมี เหมาะกับงานที่ใช้ที่อุณหภูมิสูงถึง 800 °C
ออสเทนนิติก	347	ดี	ดีมาก	ดีมาก	เติมไนโอเบียมและแทนทาลัม	ท่อ
มาร์เทนซิติก	420	ปานกลาง	ปานกลาง	ปานกลาง	ชุบแข็งโครเมียม 13%	เครื่องมือตัดชิ้นส่วน มีด ช้อนส้อม ปืน และ valve shafts.
มาร์เทนซิติกและตะกอน	PH 17-4				age-hardening by copper	งานด้านอากาศยานและนิวเคลียร์ แม่พิมพ์สำหรับพลาสติก valves และ fittings

1.6 ความสำคัญของงานวิจัย

ในปัจจุบันนี้มีการนำเหล็กกล้าไร้สนิมไปใช้ในอุตสาหกรรมกันอย่างกว้างขวาง เช่น อุตสาหกรรมอาหาร โรงไฟฟ้า โรงงานเคมี อุตสาหกรรมน้ำมัน-ปิโตรเลียม และอุตสาหกรรม การขนส่ง เป็นต้น อย่างไรก็ตาม การนำเหล็กกล้าไร้สนิมไปใช้งานในบางกรณีต้องผ่าน กระบวนการเชื่อม (Welding) มีผลทำให้โครงสร้างจุลภาคของเนื้อโลหะที่เกิดการหลอมละลาย และถูกความร้อนเกิดการเปลี่ยนแปลงได้ ด้วยเหตุนี้ จำเป็นต้องศึกษาถึงวิธีการควบคุมคุณสมบัติ บริเวณหลอมละลาย (Fusion Zone) และบริเวณกระทบร้อน (Heat Affected Zone) ให้มี คุณสมบัติใกล้เคียงกับเนื้อโลหะพื้น (Base Metal)

ในอุตสาหกรรมนั้นมีการใช้เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกกันอย่างกว้างขวาง เกรดที่มีการใช้มาก เช่น 304, 308, 310, 304 L และ 316 L เป็นต้น สำหรับเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด 304 L นั้น มีการใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมอาหารที่ต้องการใช้งานเหล็กที่ หนาโดยไม่ต้องทำ Sensitization รวมไปถึงอุตสาหกรรมเคมี ทำหม้อความร้อน และ อุตสาหกรรมนิวเคลียร์ ซึ่งในการประกอบชิ้นส่วนและอุปกรณ์ต่างๆ ของเหล็กกล้าไร้สนิม ออสเทนนิติก 304 L นั้น เมื่อต้องผ่านกระบวนการเชื่อม จะทำให้ปริมาณของเฟสออสเทนไนท์ และเฟสเดลต้าเฟอร์ไรท์เปลี่ยนแปลงไป ถ้ามีการเย็นตัวของเนื้อโลหะรอยเชื่อมที่ไม่เหมาะสม จะทำให้ปริมาณเดลต้าเฟอร์ไรท์เพิ่มขึ้นมากกว่า 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร จากการศึกษาของ HULL พบว่า เดลต้าเฟอร์ไรท์ที่เหมาะสมควรอยู่ในช่วง 5-10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร จะช่วย เพิ่มความต้านทานการเกิดรอยแตกเร็ววขณะร้อนให้สูงขึ้น แนวทางหนึ่งในการลดการเกิดเดลต้า เฟอร์ไรท์ คือ การเติมไนโตรเจนในแก๊สปกคลุมเพราะไนโตรเจนเป็นธาตุที่ทำให้โครงสร้าง ออสเทนไนท์มีเสถียรภาพ เพิ่มสมบัติทางกล และเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนของออสเทน ไนท์ได้

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของไนโตรเจนในแก๊สปกคลุมการเชื่อมทิก(TIG) ต่อปริมาณ โครงสร้างเดลต้าเฟอร์ไรท์ของเนื้อโลหะรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก 304L และใช้ แก๊สปกคลุมมีอัตราส่วนของไนโตรเจนและอาร์กอน 0-10, 15, 20, 25, 30, 35, 40 และ 100 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร เพื่อหาอัตราส่วนของไนโตรเจนในแก๊สปกคลุมอาร์กอนที่ทำให้เกิด เดลต้าเฟอร์ไรท์ในแนวเชื่อม ให้อยู่ระหว่าง 5-10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร จะพิจารณารอยเชื่อมที่ ต่อเมื่อ รอยเชื่อมนั้นต้องผ่านเกณฑ์มาตรฐานรอยเชื่อม DIN 8563 เป็นสำคัญ

1.7 วัตถุประสงค์

งานวิจัยมีวัตถุประสงค์ ดังนี้

1. ศึกษาผลของไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอนที่มีต่อปริมาณ โครงสร้างเคลตาเฟอร์ไรท์ของแนวเชื่อมทิก เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก 304 L
2. ศึกษาการเติมไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอน โดยรอยเชื่อมที่ได้ต้องผ่านมาตรฐานรอยเชื่อม DIN 8563 เป็นสำคัญ

1.8 ขอบเขตของการศึกษา

งานวิจัยมีขอบเขตการศึกษา ดังนี้

1. เชื่อมทิกพัลส์เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก 304 L ใช้ก๊าซปกคลุมที่มีอัตราส่วนของไนโตรเจนผสมอยู่ในอาร์กอน 0-10, 15, 20, 25, 30, 35, 40 และ 100 เปอร์เซ็นต์ โดยปริมาตร
2. ตรวจสอบปริมาณ โครงสร้างเคลตาเฟอร์ไรท์ในบริเวณเนื้อเชื่อม ได้แก่ บริเวณหลอมละลาย(Fusion Zone) บริเวณกระทบร้อน (Heat Affected Zone) ของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก 304 L ด้วยวิธีหาปริมาณทางโลหะวิทยา
3. รอยเชื่อมที่เหมาะสมจะพิจารณาเมื่อผ่านมาตรฐานรอยเชื่อม DIN 8563 เป็นสำคัญ

1.9 ประโยชน์ที่ได้รับ

งานวิจัยมีประโยชน์ที่ได้รับ ดังนี้

1. ทราบผลของไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอนต่อปริมาณ โครงสร้างเคลตาเฟอร์ไรท์ในแนวเชื่อมทิกของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก 304 L
2. เป็นข้อมูลทางโลหะวิทยาสำหรับพัฒนาการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก 304 L ต่อไป

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

ปริทรรศน์วรรณกรรม

เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง คือ มาตรฐานรอยเชื่อม DIN 8563 และการปริทรรศน์วรรณกรรม คือ อิทธิพลของตัวแปรการเชื่อมต่อการเกิดรอยเชื่อม และโครงสร้างจุลภาคของเนื้อโลหะรอยเชื่อม ซึ่งทั้งหมดแบ่งออกเป็น 5 บทย่อยๆ ด้วยกันคือ

- 2.1 อิทธิพลของแก๊สปกคลุม
- 2.2 ผลของลักษณะการแข็งตัวของน้ำโลหะรอยเชื่อม ต่อโครงสร้างจุลภาค
- 2.3 ผลของส่วนผสมทางเคมีต่อโครงสร้างจุลภาค
- 2.4 ผลของการเติมไนโตรเจนในแก๊สปกคลุมอาร์กอน
- 2.5 มาตรฐานรอยเชื่อม DIN 8563 จะกล่าวถึงมาตรฐานนี้เป็นมาตรฐานที่ใช้ตรวจสอบ และรับประกันคุณภาพรอยเชื่อมและ กระบวนการเชื่อม

2.1. อิทธิพลของแก๊สปกคลุม

กรรมวิธีการเชื่อมทิกมีการใช้แก๊สเฉื่อย (Inert gas) เป็นแก๊สปกคลุมเพื่อป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและควบคุมคุณภาพของรอยเชื่อม บางกรณีผสมรีดิวซิงแก๊ส (Reducing gas) เช่น ไฮโดรเจนในแก๊สปกคลุมอาร์กอนทำให้เพิ่มความเร็วเชื่อมได้สูงขึ้น เนื่องจากแก๊สไฮโดรเจนเพิ่มศักย์การอาร์ค (Arc Voltage) และการนำความร้อน (Thermal Conductivity) แต่เมื่อผสมแก๊สไฮโดรเจนปริมาณมากจะก่อให้เกิดโพรง (Porosity) ขึ้นในเนื้อโลหะรอยเชื่อมได้ ฉะนั้นการเลือกใช้แก๊สปกคลุมที่เหมาะสมสำหรับการเชื่อมทิก จึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง

ONSOIEN et al. (ค.ศ. 1998) ศึกษาผลของแก๊สไฮโดรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอนสำหรับการเชื่อมทิก ต่อลักษณะรอยเชื่อม (Bead Morphology) และคุณสมบัติของการอาร์ค (Arc Characteristic) โดยการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก เกรด 304 ใช้แก๊สปกคลุมอาร์กอนผสมแก๊สไฮโดรเจน 1 2 3 และ 4 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร พบว่า เมื่อปริมาณแก๊สไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นทำให้ศักย์การอาร์คและความต้านทานการอาร์คเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากแก๊สปกคลุมอาร์กอนผสมแก๊สไฮโดรเจนมีประจุไฟฟ้า น้อยกว่าแก๊สปกคลุมอาร์กอนบริสุทธิ์ และแก๊สไฮโดรเจนมีค่าการนำความร้อนมากกว่าแก๊สอาร์กอน ทำให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ Arc Column มีขนาดเล็กลง นอกจากนี้เมื่อปริมาณแก๊สไฮโดรเจนในแก๊สปกคลุมอาร์กอนมีค่าเพิ่มมากขึ้น ทำให้อัตราส่วนของความกว้างต่อรอยซึมลึกของรอยเชื่อมมีค่าลดลง

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของแก๊สปกคลุมที่ใช้สำหรับการเชื่อมทิก

แก๊สปกคลุม	Thermal Conductivity 10^3 (W/m. $^{\circ}$ K)	Ionization Potential (eV)	ความหนาแน่น (Kg/m 3)
อาร์กอน	45.9	15.75	1.784
ฮีเลียม	354.0	24.85	0.178
ไฮโดรเจน	448.0	13.59	0.083
ไนโตรเจน	64.7	14.54	1.161
ออกซิเจน	71.0	13.61	1.326
คาร์บอนไดออกไซด์	58.2	14.0	1.977

เนื่องด้วยการทดลองนี้มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณแก๊สไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอนสำหรับการเชื่อมทิก โดยปกติแก๊สไนโตรเจนสามารถละลายในน้ำโลหะได้ในสถานะอะตอม (Atomic State) แสดงด้วยสัญลักษณ์ $[N]$ และเมื่อปริมาณการละลายของไนโตรเจนในน้ำโลหะเกินขีดจำกัด (Solubility Limit) ก่อให้เกิดฟองแก๊สขึ้นในน้ำโลหะได้ เป็นสาเหตุของการเกิดโพรงในเนื้อโลหะรอยเชื่อม สมการการละลายของไนโตรเจนในน้ำโลหะแสดงดังสมการที่ 2.1 และ 2.2

$$\frac{1}{2}(N_2)_g \leftrightarrow [N] \quad 2.1$$

และสมการของ Sievert's law แสดงได้ดังนี้

$$[\%N] = K_N \sqrt{P_{N_2}} \quad 2.2$$

จากสมการที่ 2.2 เมื่อเพิ่มความดันย่อย (Partial Pressure) ของแก๊สไนโตรเจน ทำให้ปริมาณไนโตรเจนในเนื้อโลหะเพิ่มขึ้น

OGAWA, SUZUKI และ ZAIZEN (ค.ศ. 1984) ศึกษาความสามารถในการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมอสเตนนิกที่มีไนโตรเจนเป็นส่วนผสม ต่อการเกิดโพรง รอยร้าว (Cracking) และคุณสมบัติการคืบ (Creep Properties) ด้วยวิธีการเชื่อมทิกใช้แก๊สปกคลุม

อาร์กอนบริสุทธิ์และแก๊สอาร์กอนผสมไนโตรเจน พบว่าเมื่อปริมาณไนโตรเจนในเนื้อโลหะรอยเชื่อมเพิ่มขึ้นก่อให้เกิดปัญหาคือ 1. เกิดโพรงเพิ่มขึ้น 2. เกิดรอยแตกร้าวขณะร้อน (Hot Cracking) เพิ่มมากขึ้นจากการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก เกรด 304 ใช้แก๊สปกคลุมอาร์กอนผสมแก๊สไนโตรเจน 25% โดยปริมาตรพบว่า เนื้อโลหะรอยเชื่อมมีโพรงเกิดขึ้นและเมื่อเปลี่ยนแปลงปริมาณแก๊สไนโตรเจน ผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอน ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณไนโตรเจนในเนื้อโลหะรอยเชื่อม ซึ่งปริมาณไนโตรเจนในเนื้อโลหะรอยเชื่อมที่เพิ่มขึ้น จะช่วยเพิ่มความต้านทานการเกิดแตกร้าวของรอยเชื่อม

RAMIREZ, HAN และ LIU (ค.ศ. 1994) ศึกษาผลของตัวแปรการเชื่อมและอัตราการแข็งตัวของน้ำโลหะ ต่อการเกิดโพรงในเนื้อโลหะรอยเชื่อมนิกเกิล-ทองแดง โดยการเชื่อมทิก ใช้แก๊สปกคลุมอาร์กอนผสมแก๊สไนโตรเจน 0.2 ถึง 6 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร พบว่า เมื่อความเร็วเชื่อมเพิ่มขึ้นและใช้แก๊สปกคลุมอาร์กอนผสมแก๊สไนโตรเจนเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดโพรงในเนื้อโลหะรอยเชื่อมเพิ่มมากขึ้น

KUJANPAA, KARJALAINEN, และ SIKANEN (ค.ศ. 1984) ศึกษาผลของแก๊สปกคลุมต่อการเกิดรอยบกพร่อง (Discontinuity) ของเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316 โดยการเชื่อมทิก ใช้แก๊สปกคลุมด้านบนเป็นแก๊สผสมระหว่างแก๊สอาร์กอนกับแก๊สไฮโดรเจน แก๊สฮีเลียมกับแก๊สอาร์กอน แก๊สอาร์กอนกับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และแก๊สอาร์กอนบริสุทธิ์ ตามลำดับ อัตราการไหล 8 ลิตรต่อนาที แก๊สปกคลุมด้านหลัง (Trail Shielding) มีอัตราการไหล 8 ลิตรต่อนาที ส่วนแก๊สปกคลุมด้านล่าง (Root Shielding) ใช้แก๊สอาร์กอนบริสุทธิ์และแก๊สไนโตรเจนผสมแก๊สไฮโดรเจน อัตราการไหล 8 ลิตรต่อนาที พบว่า รอยบกพร่องที่เกิดขึ้นในเนื้อโลหะรอยเชื่อม มี 3 ชนิด คือ รอยแตก โพรงตรงกลาง (Center cavity) และรอยกินลึก (Undercut) แต่ไม่เกิดรูพรุนขึ้นในเนื้อโลหะรอยเชื่อม ปริมาณรอยบกพร่องเหล่านี้สามารถทำให้ลดลง โดยใช้แก๊สปกคลุมด้านบนเป็นแก๊สผสมระหว่างแก๊สอาร์กอนกับแก๊สไฮโดรเจนหรือแก๊สฮีเลียมกับอาร์กอน เนื่องจากแก๊สผสมทั้งสองชนิดนี้ทำให้การเชื่อมได้รอยเชื่อมที่ซึมลึกสมบูรณ์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.2 ผลของลักษณะการแข็งตัวของน้ำโลหะรอยเชื่อม ต่อโครงสร้างจุลภาค

ลักษณะการแข็งตัว (Solidification Mode) ของน้ำโลหะรอยเชื่อม มีผลต่อการเกิดโครงสร้างจุลภาคของเนื้อโลหะรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก ลักษณะการแข็งตัวของน้ำโลหะรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก สามารถแบ่งออกมาได้ 3 ประเภทดังนี้

- ลักษณะการแข็งตัวแบบ Primary Austenitic โครงสร้างจุลภาคของเนื้อโลหะรอยเชื่อมเป็นออสเทนไนท์ และบางครั้งมีเฟอไรท์เกิดขึ้นเล็กน้อย
- ลักษณะการแข็งตัวแบบ Primary Ferritic โครงสร้างจุลภาคของเนื้อโลหะรอยเชื่อมเป็นแบบคูเพิลิกซ์ ประกอบด้วยเฟอไรท์และออสเทนไนท์ โดยมีปริมาณเฟอไรท์ในโครงสร้างจุลภาคมากกว่าประเภทที่ 1 และประเภทที่ 3
- ลักษณะการแข็งตัวแบบ Primary Austenitic หรือ Primary Ferritic โครงสร้างจุลภาคของเนื้อโลหะรอยเชื่อมเป็นแบบคูเพิลิกซ์ โดยมีปริมาณเฟอไรท์น้อยกว่าประเภทที่ 2

SOUTALA, TAKALO และ MOISIO (ค.ศ. 1980) ศึกษาลักษณะการแข็งตัวของน้ำโลหะรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก ใช้การเชื่อมพลาสมา พบว่า เนื้อโลหะรอยเชื่อมมีปริมาณเคลต้าเฟอไรท์เพิ่มขึ้น และโครงสร้างจุลภาคของเนื้อโลหะรอยเชื่อมที่เกิดขึ้นจะสัมพันธ์กับอัตราส่วนของค่าโครเมียมเทียบเท่าต่อนิกเกิลเทียบเท่า กล่าวคือเมื่อค่าโครเมียมเทียบเท่าต่อนิกเกิลเทียบเท่ามีค่าต่ำ (ประมาณ 1.51) เคลต้าเฟอไรท์ในเนื้อโลหะรอยเชื่อม จะเกิดแบบเวอร์มิคูลาร์เฟอไรท์ (Vermicular-Ferrite) แต่เมื่อค่าโครเมียมเทียบเท่าต่อนิกเกิลเทียบเท่ามีค่าเพิ่มขึ้น (ประมาณ 1.70-1.95) เคลต้าเฟอไรท์เกิดเป็นแบบแลทซ์เฟอไรท์ (Lathy Ferrite)

DAVID, VITEK และ HEBBLE (ค.ศ. 1987) ศึกษาผลของการแข็งตัวของน้ำโลหะอย่างรวดเร็ว ต่อการเกิดโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก ใช้วิธีการเชื่อมเลเซอร์ เชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก เกรด 316 พบว่า ปริมาณเคลต้าเฟอไรท์ในเนื้อเชื่อมจะลดลง เมื่ออัตราการเย็นตัวเพิ่มขึ้นและมีโอกาสเกิดโครงสร้างออสเทนนิติกได้ทั้งหมด เมื่ออัตราการเย็นตัวต่ำกว่าอัตราการเย็นตัววิกฤต (Critical Cooling Rate) ซึ่งอัตราการเย็นตัวจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วเชื่อมเพิ่มขึ้น ดังนั้นปริมาณเคลต้าเฟอไรท์จะลดลงเมื่อความเร็วเชื่อมเพิ่มขึ้น

การแบ่งขอบเขตของการเกิดลักษณะการแข็งตัว ของน้ำโลหะรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกแบบ Primary Austenitic และการแข็งตัวแบบ Primary Ferritic โดยใช้อัตราส่วนค่าโครเมียมเทียบเท่าต่อนิกเกิลเทียบเท่า พบว่า สมการของแฮมมาร์ (Hammar's Equation) สามารถใช้อธิบายการแบ่งขอบเขตลักษณะการแข็งตัวของเนื้อโลหะรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก

อุณหภูมิ 300 ที่ผ่านการเชื่อมทิก (อัตราการเย็นตัว = $103\text{ }^{\circ}\text{C/s}$) ได้อย่างเหมาะสม โดยสมการของค่าโครเมียมเทียบเท่าและนิกเกิลเทียบเท่าแสดงได้ดังนี้

$$Cr_{eq} = \%Cr + 1.37\%Mo + 1.5\%Si + 2\%Nb + 3\%Ti \quad 2.3$$

$$Ni_{eq} = \%Ni + 0.31\%Mn + 22\%C + 14.2\%N + \%Cu \quad 2.4$$

เมื่ออัตราส่วนค่าโครเมียมเทียบเท่าต่อนิกเกิลเทียบเท่า มากกว่าหรือเท่ากับ 1.5 ($Cr_{eq}/Ni_{eq} \geq 1.5$) น้ำโลหะรอยเชื่อมจะเกิดลักษณะการแข็งตัวแบบ Primary Ferritic ได้มากขึ้น

ข้อเสียประการหนึ่งของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกที่ผ่านกระบวนการเชื่อมแบบหลอมละลาย (Fusion Welding) คือ เกิดรอยแตกร้าวขณะร้อนได้ง่าย ซึ่งทำให้ลดลงได้ โดยการเลือกใช้เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกที่มีส่วนผสมทางเคมีทำให้น้ำโลหะรอยเชื่อมเกิดลักษณะการแข็งตัวแบบ Primary Ferritic ซึ่งทำให้น้ำโลหะรอยเชื่อมมีปริมาณเคลด้าเฟอร์ไรท์เพิ่มขึ้น เนื่องจากสารเจือปนซัลเฟอร์และฟอสฟอรัส ละลายในโครงสร้างเฟอร์ไรท์ได้มากกว่าโครงสร้างออสเทนไนท์

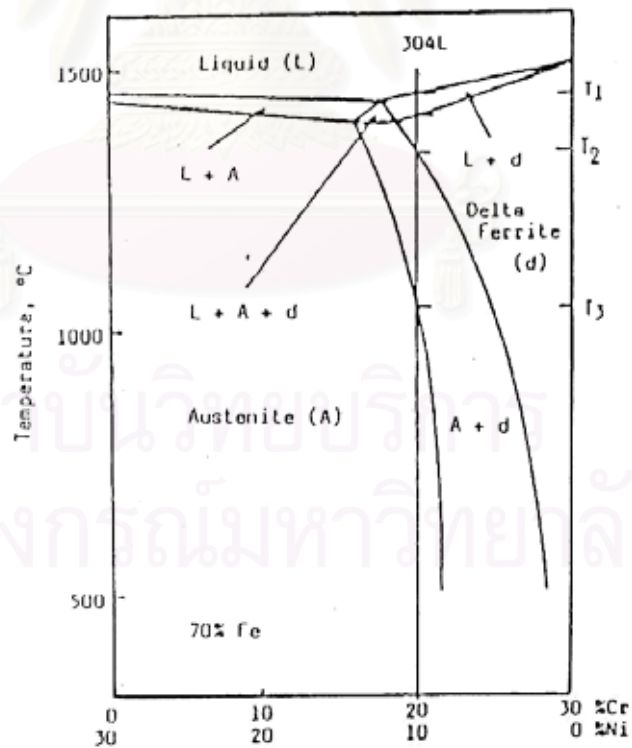
จากการศึกษาของ KUJANPAA et al. (ค.ศ. 1987) พบว่าการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด 316 สามารถทำให้น้ำโลหะรอยแตก ร้าวขณะร้อนลดลง ควรมีอัตราส่วนค่าโครเมียมเทียบเท่าต่อนิกเกิลเทียบเท่ามากกว่า 1.5 หรือ มีปริมาณซัลเฟอร์ร่วมกับฟอสฟอรัสน้อยกว่า 0.03 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก

KUJANPAA, DAVID และ WHITE (ค.ศ. 1986) ได้ศึกษาการแตกร้าวขณะร้อนของน้ำโลหะรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด 304, 309, 310 และ 316 พบว่า รอยแตกเกิดขึ้นในทิศทางเดียวกับการแข็งตัวของน้ำโลหะรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก พบในน้ำโลหะรอยเชื่อมที่เกิดการแข็งตัวแบบ Primary Austenitic มากกว่า Primary Ferritic ผู้วิจัยยังพบว่า ที่ผิวรอยแตกมีปริมาณซัลเฟอร์มากกว่าบริเวณอื่น และรอยแตกร้าวจะพบในบริเวณรอยต่อของเกรนออสเทนไนท์กับออสเทนไนท์มากกว่ารอยต่อของเกรนเฟอร์ไรท์กับออสเทนไนท์

จุดอ่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมประการหนึ่ง คือ มีความไวต่อการแตกร้าวขณะร้อน (Hot Cracking) ซึ่งสามารถลดลงได้โดยการทำให้เกิดโครงสร้างผสม พบว่า ส่วนผสมที่ประกอบด้วยเคลด้าเฟอร์ไรท์ประมาณ 5 – 10 % โดยปริมาตรสามารถลดความไวต่อการแตกร้าวลงได้ เพราะกำมะถันละลายในเฟอร์ไรท์ได้มากกว่าออสเทนไนท์ จากการศึกษาพบว่า ที่มาของ

โครงสร้างเฟอร์ไรท์ก็เป็นตัวแปรที่สำคัญอีกประการหนึ่ง คือ เฟอร์ไรท์ที่มีคุณสมบัติดังกล่าว ต้องเกิดมาจากกระบวนการที่เรียกว่า Primary Ferrite Solidification Mode

จากข้อสรุปดังกล่าว เมื่อมาพิจารณาในรายละเอียดของการเย็นตัวของเหล็กกล้าไร้สนิม ออสเทนนิติกเกรด 304 L โดยพิจารณาจากภาพตัดในแนวตั้งของแผนภูมิสมดุลสามเฟสของ Fe-Cr-Ni ที่ตัดที่ตำแหน่ง 70% Fe ดังรูปที่ 2.1 พบว่า การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจากโลหะเหลว จะเกิดโครงสร้างจุลภาคเฟอร์ไรท์ขึ้น เมื่อน้ำโลหะเย็นตัวลงมาที่อุณหภูมิ T_1 และจะเกิดโครงสร้างจุลภาคออสเทนไนท์ตามมา เมื่อการเย็นตัวของน้ำโลหะมาถึงอุณหภูมิ T_2 แต่การเกิดโครงสร้างในลักษณะดังกล่าวจะเกิดขึ้นได้ ก็ต่อเมื่อน้ำโลหะมีอัตราการเย็นตัวช้ามากๆ เท่านั้น ซึ่งไม่สามารถเกิดขึ้นได้สำหรับงานเชื่อมปกติ โดยเฉพาะการเชื่อมโลหะแผ่นบางอัตราการเย็นตัวของโลหะรอยเชื่อมจะรวดเร็วมากและมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคของเนื้อโลหะ รอยเชื่อม ซึ่งไม่เป็นไปตามระบบสมดุล ดังนั้นการเพิ่มไนโตรเจนในก๊าซหุ้มปกคลุมเป็นการเพิ่มความเสถียรของการเกิดโครงสร้างออสเทนไนท์ จึงเป็นอีกวิธีหนึ่งที่สามารถควบคุมปริมาณของโครงสร้างเฟอร์ไรท์ได้



รูปที่ 2.1 ภาพตัดในแกนแนวตั้งของระบบสมดุลสามเฟสของ Fe-Cr-Ni ที่ตำแหน่ง 70% Fe

2.3 ผลของส่วนผสมทางเคมีต่อโครงสร้างจุลภาค

การศึกษาโครงสร้างจุลภาคของเนื้อโลหะรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก ถือได้ว่าเป็นเรื่องสำคัญ เนื่องจากเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกที่ผ่านกระบวนการเชื่อมแบบหลอมละลาย มีโอกาสเกิดโครงสร้างจุลภาคแบบคูเพอไลท์ได้ ปัจจัยสำคัญที่ทำให้เนื้อโลหะรอยเชื่อมมีโครงสร้างจุลภาคแตกต่างกัน คือส่วนผสมทางเคมีของเนื้อโลหะรอยเชื่อม ฉะนั้นก่อนปฏิบัติการเชื่อมโลหะชนิดใด ผู้ควบคุมการเชื่อมควรรู้ส่วนผสมทางเคมีของโลหะชนิดนั้นก่อน เพื่อเลือกกรรมวิธีการเชื่อมที่เหมาะสม เพื่อให้ได้โครงสร้างจุลภาคของเนื้อโลหะรอยเชื่อมที่ดี อิทธิพลของส่วนผสมทางเคมีต่อโครงสร้างจุลภาคของเนื้อโลหะรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก แบ่งออกได้ 2 กลุ่ม คือ

- กลุ่มที่มีผลต่อโครงสร้างจุลภาคในลักษณะเดียวกับโครเมียม เรียกว่า Ferrite Former เป็นกลุ่มที่ช่วยเพิ่มเสถียรภาพของการเกิดผลึกโครงสร้างแบบเฟอร์ไรท์ โดยมีโครงสร้างผลึกเป็น Body Center Cubic (BCC) ธาตุในกลุ่มนี้ได้แก่ โครเมียม โมลิบดีนัม ซิลิกอน และไนโอเบียม
- กลุ่มที่มีผลต่อโครงสร้างจุลภาคในลักษณะเดียวกับนิกเกิล เรียกว่า Austenite Former เป็นกลุ่มที่ช่วยเพิ่มเสถียรภาพของการเกิดผลึกโครงสร้างแบบออสเทนไนท์ โดยมีโครงสร้างผลึกเป็น Face Center Cubic (FCC) ธาตุในกลุ่มนี้ได้แก่ นิกเกิล คาร์บอน ไนโตรเจน และแมงกานีส

อิทธิพลของธาตุ 2 กลุ่มนี้ สามารถแสดงในสมการที่ 2.5 และ 2.6

$$\text{Chromium Equivalent } (Cr_{eq}) = \%Cr + \%Mo + 1.5\%Si + 0.5\%Nb \quad 2.5$$

$$\text{Nickel Equivalent } (Ni_{eq}) = \%Ni + 30\%C + 30\%N + 0.5\%Mn \quad 2.6$$

แก๊สไนโตรเจนที่ผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอนที่ใช้สำหรับการเชื่อมทิกนั้นเป็นธาตุในกลุ่ม Austenite Former ทำให้เกิดผลึกโครงสร้างออสเทนไนท์เพิ่มขึ้นและเคลด้าเฟอร์ไรท์ลดลง ดังนั้นการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก จำเป็นต้องควบคุมปริมาณเคลด้าเฟอร์ไรท์ในเนื้อโลหะรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกให้เหมาะสม จากการศึกษาของ HULL พบว่าปริมาณเคลด้าเฟอร์ไรท์ที่เหมาะสมควรอยู่ในช่วง 5-10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ซึ่งช่วยเพิ่มความต้านทานการเกิดรอยแตกเร็ววขณะร้อนให้สูงขึ้น เนื่องจากซัลเฟอร์และฟอสฟอรัสละลายได้

ดีในโครงสร้างเฟอร์ไรท์ และเคลต้าเฟอร์ไรท์ช่วยเพิ่มคุณสมบัติความแข็งแรง (Strength) ในขณะที่ความแกร่ง (Toughness) และการยืดตัว (Ductility) ลดลงไม่มากนัก ตลอดจนช่วยลดปัญหาการกัดกร่อนของเนื้อโลหะรอยเชื่อมด้วย เมื่อปริมาณเคลต้าเฟอร์ไรท์ในเนื้อโลหะรอยเชื่อมมีมากกว่า 10เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ทำให้เกิดโครงสร้างตาข่ายเคลต้าเฟอร์ไรท์และเกิดการกัดกร่อนในบริเวณตามแนวขอบตาข่ายระหว่างรอยต่อของเคลต้าเฟอร์ไรท์กับออสเทนไนท์ และเมื่อนำไปใช้งานที่อุณหภูมิประมาณ 600 – 900 องศาเซลเซียส พบว่าเคลต้าเฟอร์ไรท์สามารถเปลี่ยนเป็นซิกมาเฟส (Sigma-Phase) ได้ ซึ่งมีคุณสมบัติเปราะ ทำให้มีโอกาสเกิดรอยแตกร้าวได้มากขึ้น SIEWART et al. (ค.ศ. 1988) ได้เสนอสมการที่ใช้คำนวณหาปริมาณเคลต้าเฟอร์ไรท์ที่เกิดขึ้นในเนื้อโลหะรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก เกรด 316 ดังแสดงในสมการที่ 2.7

$$\%Delta - ferrite = 3(Cr_{eq} - 0.93Ni_{eq} - 6.7) \quad 2.7$$

สารเจือปนเป็นสาเหตุหนึ่งของการเกิดปัญหาการแตกร้าวในเนื้อโลหะรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเพิ่มขึ้น ดังนั้นเมื่อปริมาณสารเจือปนมากขึ้นเนื้อโลหะรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกจำเป็นต้องมีปริมาณเคลต้าเฟอร์ไรท์เพิ่มมากขึ้น

จากการศึกษาของ BROOKS และ LAMBERT, JR (ค.ศ. 1978) เกี่ยวกับผลของฟอสฟอรัส ซัลเฟอร์ และปริมาณเคลต้าเฟอร์ไรท์ ต่อการเกิดการแตกร้าวของเนื้อโลหะรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด 309 พบว่า เมื่อปริมาณซัลเฟอร์และฟอสฟอรัสเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดการแตกร้าวเพิ่มมากขึ้น และเมื่อปริมาณเคลต้าเฟอร์ไรท์เพิ่มขึ้น ทำให้การเกิดรอยแตกร้าวลดลง และเมื่อผลรวมของซัลเฟอร์กับฟอสฟอรัสเพิ่มขึ้น 0.01 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะต้องเพิ่มปริมาณเคลต้าเฟอร์ไรท์ขึ้นประมาณ 4 FN (Ferrite Number) เพื่อป้องกันการเกิดรอยแตกร้าวของเนื้อโลหะรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก

ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเคลต้าเฟอร์ไรท์ในรูปแบบของเฟอร์ไรท์นัมเบอร์และเปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร (Vol.%) แสดงในสมการที่ 2.8 และ 2.9

- ในช่วงปริมาณเฟอร์ไรท์น้อยกว่า 7% โดยปริมาตร

$$FerriteNumber(FN) = \%Ferrite \quad 2.8$$

- ในช่วงปริมาณเฟอร์ไรท์ 7% ถึง 14% โดยปริมาตร

$$FerriteNumber(FN) = 1.285x\%Ferrite$$

2.9

องค์ประกอบสำคัญที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณเคลด้าเฟอร์ไรท์ในเนื้อโลหะรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก คือ ธาตุส่วนผสมทางเคมี การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเฟอร์ไรท์ ลักษณะเฟอร์ไรท์ และอัตราการเย็นตัวของเนื้อโลหะรอยเชื่อม เป็นต้น David (ค.ศ. 1981) ศึกษาเกี่ยวกับลักษณะของเคลด้าเฟอร์ไรท์ และการเปลี่ยนแปลงปริมาณเคลด้าเฟอร์ไรท์ ในเนื้อโลหะรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก พบว่าลักษณะของเคลด้าเฟอร์ไรท์ที่เกิดขึ้นในเนื้อโลหะรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก สามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ชนิดคือ

- **Vermicular Morphology** พบในเนื้อโลหะรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก ที่เกิดเป็นโครงสร้างคูเปลล์ที่มีปริมาณเฟอร์ไรท์นัมเบอร์ตั้งแต่ 9 ถึง 12 (รูปที่ 2.2 ก.)
- **Lathy Morphology** พบในเนื้อโลหะรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก ที่เกิดเป็นโครงสร้างคูเปลล์ที่มีปริมาณเฟอร์ไรท์นัมเบอร์ตั้งแต่ 13 ถึง 15 (รูปที่ 2.2 ข.)
- **Acicular Morphology** เคลด้าเฟอร์ไรท์ที่เกิดขึ้นมีลักษณะคล้ายกับเข็มมีการเรียงตัวแบบไม่เป็นระเบียบ ค่าเฉลี่ยของปริมาณเฟอร์ไรท์นัมเบอร์ของการเกิดเฟอร์ไรท์ชนิดนี้เท่ากับ 14 จะพบเฟอร์ไรท์ชนิดนี้เมื่อเนื้อโลหะรอยเชื่อมมีค่าโครเมียมเทียบเท่าต่อนิกเกิลเทียบเท่ามากกว่า 2 (รูปที่ 2.2 ค.)
- **Globular Morphology** เคลด้าเฟอร์ไรท์ชนิดนี้ไม่ได้เกิดจากการแข็งตัวของเนื้อโลหะรอยเชื่อม แต่เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของเคลด้าเฟอร์ไรท์เมื่อผ่านกระบวนการทางความร้อน มีค่าเฉลี่ยของปริมาณเฟอร์ไรท์นัมเบอร์เท่ากับ 10 (รูปที่ 2.2 ง.)

2.4 ผลของการเติมไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอน

ก๊าซเฉื่อยสำหรับปกคลุมได้แก่ อาร์กอน (Ar) ฮีเลียม (He) และคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) นั้น โดยทั่วไปนิยมก๊าซอาร์กอนเป็นส่วนมาก เพราะหาซื้อได้ง่าย ก๊าซอาร์กอนมีน้ำหนักมากกว่าก๊าซฮีเลียมและให้ผลต่อการเชื่อมดีในอัตราการไหลต่ำ ก๊าซอาร์กอนมีความต้านทานอาร์คน้อยกว่าฮีเลียม ระยะอาร์คเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย เปลวอาร์คไม่ขาดตอน ในงานบางอย่างนิยมใช้ก๊าซอาร์กอนผสมกับฮีเลียมหรืออาร์กอนกับคาร์บอนไดออกไซด์

KIKUCHI et al. (ค.ศ. 1996) กล่าวถึงการเชื่อมมิก (MIG) เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด 316 L ภายใต้สภาวะบรรยากาศความดันไนโตรเจน ทดลองเชื่อมที่ความเร็ว 3.3 มม.

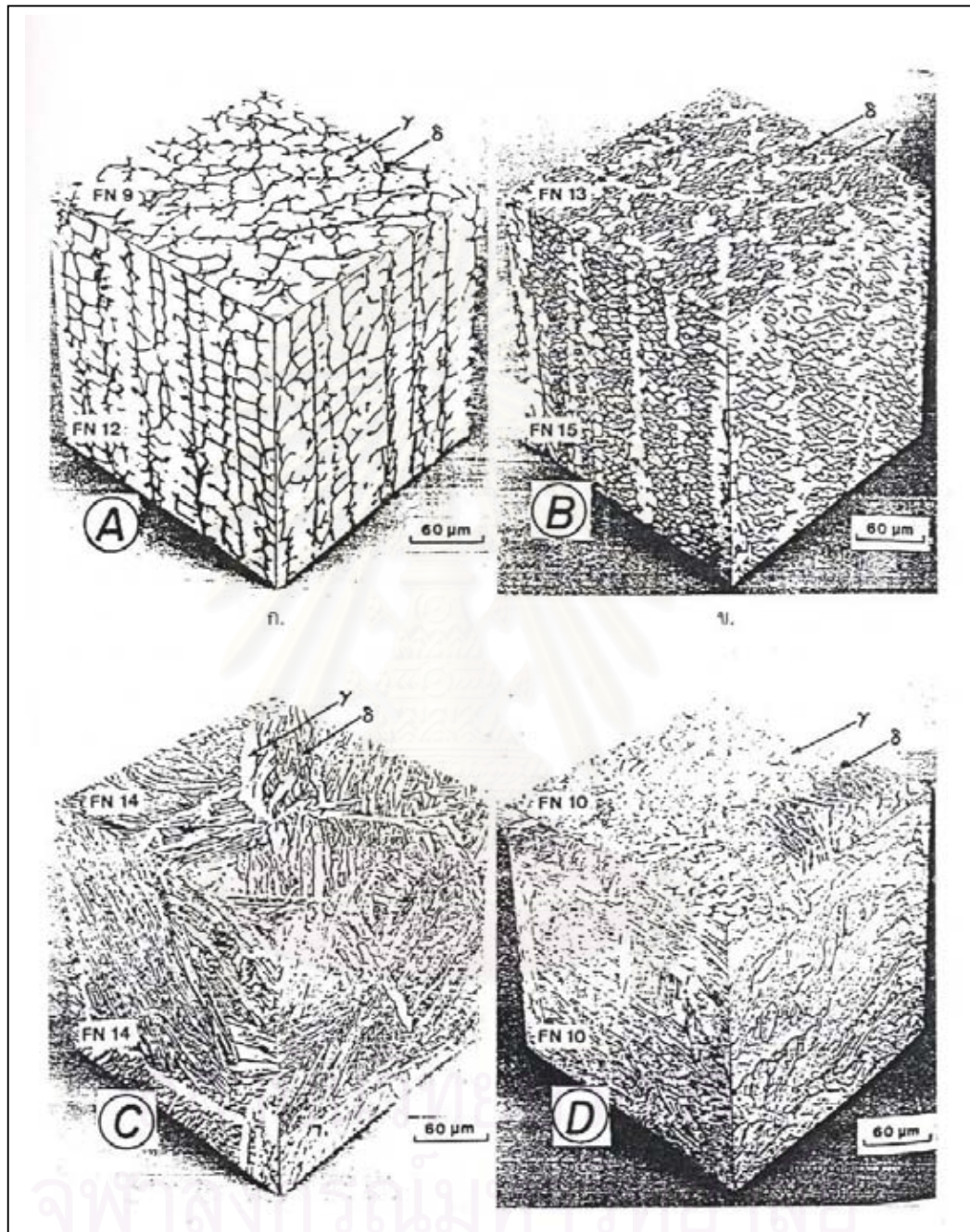
ต่อวินาที กระแส 200–260 แอมแปร์ ระยะอาร์ค 10 มม. พบว่า มีไนโตรเจนละลายในเนื้อโลหะเพิ่มมากขึ้น มีไนโตรเจนประมาณ 0.6 และ 2.4 เปอร์เซ็นต์โดยมวลสามารถละลายในบ่อน้ำโลหะได้ และที่ความดัน 6 MPa และ 3 MPa ไนโตรเจนสามารถเปลี่ยนโครงสร้างจุลภาคให้ละเอียดมากขึ้น

Lin และ Chen (ค.ศ. 2001) ศึกษาการใช้ไนโตรเจนผสมก๊าซปกคลุมอาร์กก่อนเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก เกรด 316L และ 310 การเชื่อมทิก พบว่าการเติมไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอน 4 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ให้อัตราส่วนความลึกต่อความกว้าง (D/W) มีค่าต่ำที่สุด นอกจากนี้ ยังพบอีกว่า การเติมไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอนจะช่วยเพิ่มอุณหภูมิให้บ่อน้ำโลหะหลอมเหลว อุณหภูมิขณะอาร์คจะเพิ่มสูงขึ้น มีผลทำให้มีอัตราการเย็นตัวช้าลง

Shankar et al. (ค.ศ. 2003) ศึกษาการเติมไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอนของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316L (ไนโตรเจน 0.036%) และ เกรด 316 LN (ไนโตรเจน 0.073%) พบว่า ไนโตรเจนสามารถละลายในเนื้อโลหะได้ถึง 0.04–0.19 เปอร์เซ็นต์ ไนโตรเจนมีผลต่อการแตกหักของชิ้นงานโดยมีปัจจัยที่เกี่ยวข้อง คือ ปริมาณของฟอสฟอรัส (P) และ ซัลเฟอร์ (S) ดังรูปที่ 2.3

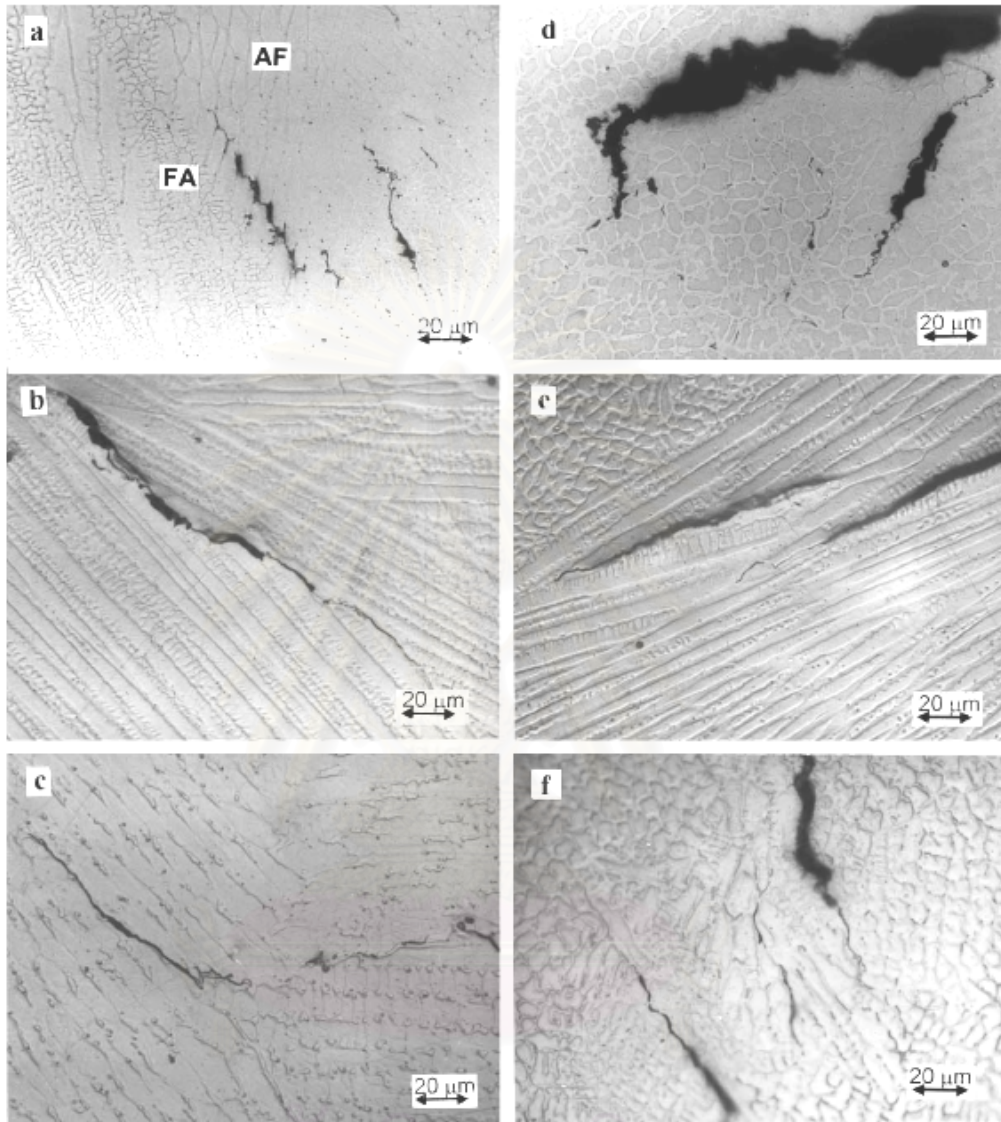
Tseng และ Chou (ค.ศ. 2003) ศึกษาผลของไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอนที่มีผลต่อการบิดเบี้ยวเชิงมุม (angular distortion) ของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก เกรด 304 และ 310 พบว่าการเติมไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอนจะทำให้ชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อม มีการบิดเบี้ยวเชิงมุมเพิ่มมากขึ้นกว่าการไม่เติมไนโตรเจนในก๊าซปกคลุม ปริมาณเคลดดำเฟอร์ไรท์ในเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด 304 ลดลงเมื่อเติมไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอน มีการบิดเบี้ยวเชิงมุม (angular distortion) การหดตัวแนวขวาง (Transverse shrinkage) และการหดตัวแนวตั้ง (Longitudinal shrinkage) รวมด้วย เมื่อเติมไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอน ทำให้ปริมาณความร้อน (Heat input) บริเวณเนื้อโลหะรอยเชื่อมเพิ่มมากขึ้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



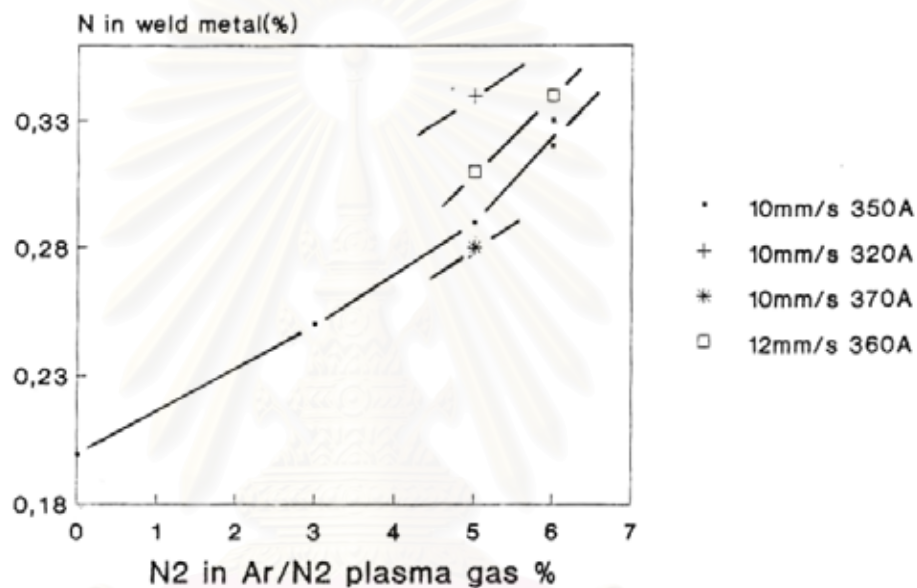
รูปที่ 2.2 ลักษณะของเซลล์เฟอร์ไรท์ที่เกิดขึ้นในเนื้อโลหะรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมอสเทนนิติก

ก. Vermicular Ferrite ข. Lathy Ferrite ค. Acicular Ferrite และ ง. Globular Ferrite



รูปที่ 2.3 การแตกร้าวขณะร้อน ของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด 316LN และ 316 N (a) 316LN ไม่มีการเติมไนโตรเจน (b) 0.14% ไนโตรเจน 316LN (c) 0.19% ไนโตรเจน 316LN (d) 316L ไม่มีการเติมไนโตรเจน (e) 0.14% ไนโตรเจน 316L (f) 0.19% ไนโตรเจน 316L

Hoffmeister, Dietrich and Huisman (ค.ศ. 2003) ศึกษาการเชื่อมพลาสมารอยเชื่อมรูปตัว U ท่อเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ เชื่อมในทิส 12-6 นาฬิกา เหล็กหนา 7 มิลลิเมตร พบว่าเมื่อเติมไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอน 5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร กระแส 360 แอมแปร์ ความเร็วเชื่อม 12 มิลลิเมตรต่อวินาที สามารถให้อัตราความลึกต่อความกว้าง (D/W) ที่ดี ไนโตรเจนสามารถละลายในเนื้อโลหะรอยเชื่อมดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ผลของไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมต่อไนโตรเจนที่ละลายในเนื้อโลหะรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์

HERTZMAN (ค.ศ. 2001) ศึกษาผลของไนโตรเจนต่อการเกิดเคลดดำเฟอร์ไรต์และสมมูลไนโตรเจนในกระบวนการเชื่อมทิก เหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ พบว่า ปริมาณความร้อน (Heat input) ที่ให้ในงานเชื่อมนั้น มีข้อควรพิจารณา 2 ประการคือ

- บริเวณกระทบร้อน(HAZ) ต้องมีอัตราการเย็นตัวช้าเพียงพอที่จะทำให้เกิดออสเทนไนท์
- บริเวณกระทบร้อน(HAZ) ต้องมีอัตราการเย็นตัวเร็วเพียงพอที่จะหลีกเลี่ยงสารประกอบเชิงโลหะ(Intermetallic phase)

ในขณะอาร์ค ภายในบ่อน้ำโลหะหลอมเหลวจะมีการเปลี่ยนแปลงไนโตรเจนระหว่างพลาสมากับบ่อน้ำโลหะและระหว่างก๊าซปกคลุมกับบ่อน้ำโลหะ

Hertzman et al. (ค.ศ. 1996) ศึกษาผลกระทบของก๊าซปกคลุมต่อค่าพารามิเตอร์สำหรับงานเชื่อม และคุณสมบัติด้านทานการกัดกร่อนในเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ เหล็กกล้าไร้สนิมซูเปอร์ดูเพล็กซ์ และเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก พบว่า มีไนโตรเจนแลกเปลี่ยนกันระหว่างอาร์ค บ่อน้ำโลหะ และก๊าซปกคลุม ปริมาณไนโตรเจนในบ่อน้ำโลหะจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อมีไนโตรเจนปริมาณมากทำปฏิกิริยากับอาร์ค แต่ถ้าทิ้งไว้นานเกินไป จะมีไนโตรเจนบางส่วนหนีออกไปจากก๊าซปกคลุมเช่นกัน

ประสงค์ ชะอุ่มใบ (พ.ศ. 2539) ศึกษาผลของตัวแปรในการเชื่อมทิก อันประกอบด้วยความเร็วเชื่อม กระแสไฟฟ้าพัลส์ กระแสไฟฟ้าเบส ความถี่พัลส์ และค่า % ontime ภายใต้ก๊าซปกคลุมอาร์กอน และอัตราส่วนผสมก๊าซไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอน 1 2 และ 3 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร เชื่อมบนเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด 304 L ความหนา 3 มิลลิเมตร พบว่า ก๊าซไนโตรเจนที่ผสมในก๊าซปกคลุมอาร์กอน มีผลต่อการลดปริมาณเคลดดำเฟอร์ไรท์ ปริมาณไนโตรเจน 3 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรในก๊าซปกคลุมอาร์กอน สามารถลดปริมาณเคลดดำเฟอร์ไรท์ในเนื้อโลหะเชื่อมเหลือเพียง 12 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร

เอกรัตน์ ไวยนิษฐ์ (พ.ศ. 2542) ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรการเชื่อมทิกสำหรับเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด 316L ชนิดแผ่นหนา 3 มิลลิเมตร ตัวแปรการเชื่อมทิกที่ศึกษาคือความเร็วเชื่อม กระแสไฟฟ้าพัลส์ กระแสไฟฟ้าเบส ความถี่พัลส์ และค่า % ontime ใช้แก๊สปกคลุมอาร์กอนผสมไนโตรเจน 0-4 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร อัตราการไหลของแก๊สปกคลุมด้านบนและด้านล่างรอยเชื่อม 8 ลิตร/นาที พบว่า การเพิ่มไนโตรเจนในอาร์กอน จะช่วยลดค่ากระแสไฟฟ้าพัลส์ที่ตำแหน่งการเชื่อม 6 และ 12 นาฬิกา การศึกษาโครงสร้างจุลภาคของเนื้อเชื่อมพบโครงสร้างเคลดดำเฟอร์ไรท์และออสเทนไนท์ มีปริมาณเคลดดำเฟอร์ไรท์อยู่ระหว่าง 6-10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร

2.5 มาตรฐานรอยเชื่อม DIN 8563

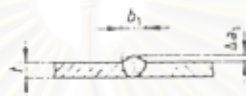
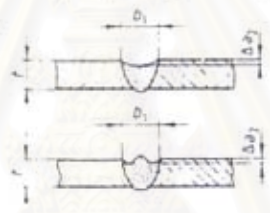


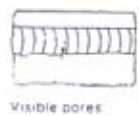
ในมาตรฐานรอยเชื่อม DIN 8563 ที่จะนำมากล่าวในส่วนนี้นั้น จะยกมาในส่วนที่สำคัญ และเกี่ยวข้องกับการศึกษาในครั้งนี้เท่านั้น มาตรฐานนี้เป็นมาตรฐานที่ใช้ตรวจสอบและรับประกันคุณภาพรอยเชื่อมและกระบวนการเชื่อม แบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ

ส่วนที่ 1 กล่าวถึงหลักการทั่วไป สำหรับกระบวนการเชื่อม


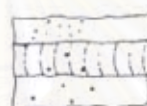
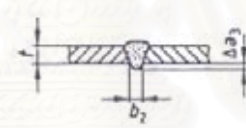

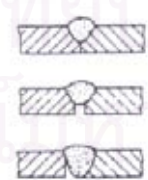

ส่วนที่ 2 กล่าวถึงความต้องการในกระบวนการเชื่อม เพื่อให้สามารถรักษาคุณสมบัติที่ดีของรอยเชื่อมตามที่ต้องการ

ส่วนที่ 3 กล่าวถึงการประกันคุณภาพการเชื่อมโลหะ ที่ใช้กรรมวิธีการเชื่อมแบบหลอมละลาย (Fusion Welded Joint) ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 มาตรฐานรอยเชื่อม DIN 8563 สำหรับการเชื่อมแบบหลอมละลาย

ลำดับที่	ลักษณะรอยบกพร่อง	ระดับคุณภาพ
1.	<p>Excess weld metal Δa_1</p> 	$\Delta a_1 \leq 1 + 0.15b_1$
2.	<p>Incompletely filled groove Δa_2</p> 	$\Delta a_2 \leq 0.1 + 0.07t$
3.	<p>b) for welds made from one side (root side)</p> 	$e \leq 0.25 + 0.1t$
4.	<p>Undercuts</p> 	ให้เกิดได้เล็กน้อย
5.	<p>Visible pores</p>  <p>Visible pores</p>	ไม่อนุญาตให้เกิด

ตารางที่ 2.2(ต่อ) มาตรฐานรอยเชื่อม DIN 8563 สำหรับการเชื่อมแบบหลอมละลาย

ลำดับที่	ลักษณะรอยบกพร่อง	ระดับคุณภาพ
6.	<p>Visible slag inclusions</p> 	ไม่อนุญาตให้เกิด
7.	<p>Spatter</p> 	ให้เกิดได้เล็กน้อย
8.	<p>Excessive penetration Δa_3</p> 	$\Delta a_3 \leq 1 + 0.15b_2$
9.	<p>Root concavity</p> 	ให้เกิดได้เล็กน้อย
10.	<p>Lack of fusion at root of weld</p> 	ไม่อนุญาตให้เกิด
11.	<p>Shrinkage groove</p> 	ให้เกิดได้เล็กน้อย

บทที่ 3

วัสดุ และ วิธีการทดลอง

3.1 วัสดุและอุปกรณ์

เครื่องมือที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย

3.1.1 เครื่องเชื่อมไฟฟ้าแบบทิก

3.1.2 ชุดจับยึดชิ้นงานทดลอง

3.1.3 ชุดควบคุมส่วนผสมแก๊สปกคลุม

3.1.1 เครื่องเชื่อมไฟฟ้าแบบทิก

เครื่องเชื่อมไฟฟ้าที่ใช้คือ Miller/Syncrowave 350 Ampere Constant Current AC/DC Arc Welding ปรับการเชื่อมเป็นแบบชนิด Pulse Current DC Straight Polarity (อิเล็กโทรดเป็นขั้วลบ) ดังรูปที่ 3.1 อิเล็กโทรดที่ใช้เป็นทั้งสแตนเลสผสมทอเรียมออกไซด์ (ThO₂) 2 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.4 มิลลิเมตร มุมแหลมปลายอิเล็กโทรด (Tip Angle) 60 องศา และระยะห่างระหว่างปลายอิเล็กโทรดกับชิ้นงานทดสอบ (Arc Length) 2 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางของหัวเซรามิกรอบอิเล็กโทรดทั้งสแตนเลส (Weld Torch-Vertical Orifice) มีขนาด 11 มิลลิเมตร อิเล็กโทรดยื่นออกมาจากหัวเซรามิก (Electrode Strikeout) 4 มิลลิเมตร หัวเชื่อมทำมุมกับชิ้นงานทดลอง 75 องศา ใช้น้ำระบายความร้อนในระหว่างการเชื่อม

3.1.2 ชุดจับยึดชิ้นงานเพื่อใช้ในการเชื่อม

ชิ้นงานทดลองถูกยึดด้วยสกรูบนแท่นจับยึด แท่นจับยึดสามารถเคลื่อนที่ไปมาบนเพลานำขับเคลื่อนของสกรูที่ต่อเข้ากับมอเตอร์ที่สามารถปรับความเร็วรอบได้ด้วยการควบคุมความถี่ของ Inverter การเคลื่อนที่ของแท่นจับยึดชิ้นงานทดลองมีความเร็วอยู่ในช่วง 0 ถึง 12.8 มิลลิเมตรต่อวินาที

บนชุดจับยึดชิ้นงานทดลองนี้ได้ติดตั้งชุดป้อนแก๊สปกคลุมด้านล่างของชิ้นงานทดลอง (Root Shield Gas) ชุดจับยึดชิ้นงานทดลอง และชุดป้อนแก๊สปกคลุมแสดงดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.1 เครื่องเชื่อม Miller/Syncrowave 350 Ampere Constant Current AC/DC Arc Welding

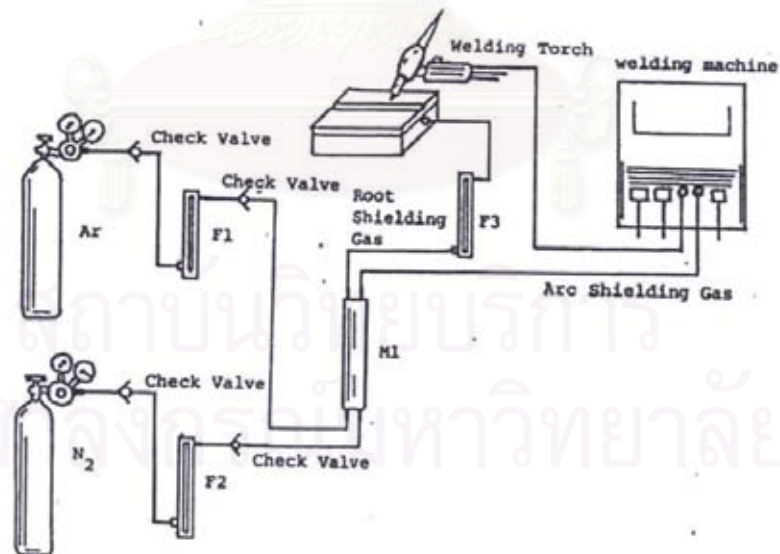


รูปที่ 3.2 ชุดจับยึดชิ้นงานทดลองและชุดป้อนแก๊สปกคลุมด้านล่าง

3.1.3 ชุดควบคุมส่วนผสมแก๊สปกคลุมและปริมาณแก๊สปกคลุม

การไหลของแก๊สปกคลุมแต่ละชนิดสามารถควบคุม โดยการปรับเรกกูเลเตอร์ (Regulator) ที่ต่อเข้ากับถังแก๊สหลังจากนั้นแก๊สจะผ่านเข้ามายังชุดควบคุมอัตราการไหลโดยใช้มาโนมิเตอร์ (Manometer) ของแก๊สแต่ละชนิดเพื่อควบคุมอัตราการไหลให้เหมาะสมกับเงื่อนไขการทดลอง สำหรับมาโนมิเตอร์ที่ใช้ควบคุมการไหลของแก๊สอาร์กอนกำหนดให้เป็น F_1 มีอัตราการไหล 25 ลิตรต่อนาทีและของแก๊สไนโตรเจนกำหนดให้เป็น F_2 มีอัตราการไหล 1 ลิตรต่อนาทีแก๊สทั้งสองชนิดนี้เมื่อไหลออกจากมาโนมิเตอร์ จะเข้าสู่ถังผสมแก๊ส ส่วนหนึ่งไหลไปยังเครื่องเชื่อมเพื่อควบคุมอัตราการไหลของแก๊สปกคลุมที่หัวเชื่อม ส่วนที่เหลือไหลไปยังชุดควบคุมอัตราการไหลที่ใช้เป็นแก๊สปกคลุมด้านล่างซึ่งควบคุมโดยมาโนมิเตอร์ กำหนดเป็น F_3 มีอัตราการไหล 25 ลิตรต่อนาที

การควบคุมอัตราการไหลทำได้โดยหมุนปรับมาโนมิเตอร์ทั้ง 3 ตัว แก๊สปกคลุมด้านบน 16 ลิตรต่อนาทีและแก๊สปกคลุมด้านล่าง 8 ลิตรต่อนาที (หมุนปรับมาโนมิเตอร์ F_3) ในกรณีที่ใช้แก๊สไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอนจะต้องหมุนปรับมาโนมิเตอร์ F_2 ให้ได้ปริมาณแก๊สไนโตรเจน ตามที่ต้องการ ดังแสดงในรูปที่ 3.3 และ รูปที่ 3.4



รูปที่ 3.3 แผนภาพแสดงการควบคุมอัตราการไหลของแก๊สปกคลุมด้านบนและด้านล่าง



รูปที่ 3.4 ชุดควบคุมอัตราการไหลของแก๊สปกคลุมด้านบนและด้านล่าง

ในการศึกษาครั้งนี้ใช้แก๊สปกคลุมคือ แก๊สอาร์กอนบริสุทธิ์ 99.995 เปอร์เซ็นต์ และแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์ 99.99 เปอร์เซ็นต์

3.2 วิธีการเตรียมชิ้นงานและตรวจสอบส่วนผสมทางเคมี

แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก เกรด 304L หนา 4 มิลลิเมตร ตัดให้ได้ขนาด 150 x 150 มิลลิเมตร การตัดชิ้นงานต้องระวังไม่ให้เกิดความร้อนจนทำให้โครงสร้างจุลภาคเปลี่ยนแปลง ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานมีดังนี้

1. นำชิ้นงานที่ตัดได้ตามที่กำหนด
2. ทำความสะอาดชิ้นงานทดลองให้ปราศจากสิ่งสกปรกและคราบไขมัน โดยการใช้อะซิโตนเช็ดทำความสะอาด แล้วทิ้งไว้ประมาณ 12 ชั่วโมงก่อนเชื่อม

หลังจากนั้น ตัดแบ่งชิ้นงานส่วนหนึ่งนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Optical Emission Spectrometer ได้ส่วนผสมทางเคมีดังตารางที่ 3.1 ผลการวิเคราะห์แสดงดังภาคผนวก ง. และนำมาคำนวณหาค่าโครเมียมเทียบเท่า (Cr_{eq}) และนิกเกิลเทียบเท่า (Ni_{eq}) จากส่วนผสมทางเคมีที่ทราบตามสมการ 2.5 และ 2.6 ตามลำดับ ดังตารางที่ 3.2

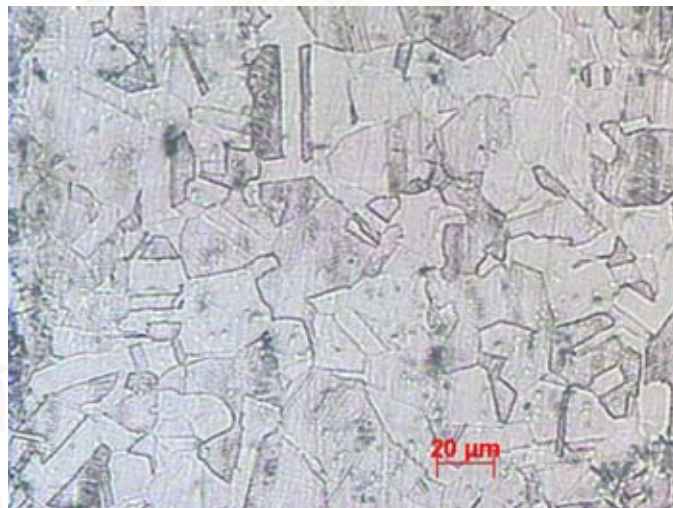
ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมทางเคมีเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก เกรด 304 L ที่ใช้ในการทดลอง

ปริมาณธาตุ(% โดยน้ำหนัก)										
C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	V	N*
0.010	0.422	1.40	0.044	0.012	18.37	0.215	8.28	0.36	0.071	0.044

*=LECO 400

ตารางที่ 3.2 ค่าโครเมียมเทียบเท่า และนิกเกิลเทียบเท่าของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก เกรด 304 L

Cr _{eq}	Ni _{eq}	Cr _{eq} /Ni _{eq}	% Ferrite
19.22	10.60	1.81	7.98



รูปที่ 3.5 โครงสร้างจุลภาคโลหะพื้นเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก เกรด 304L (กำลังขยาย 200 เท่า) (กัดด้วยสารเคมีที่มีส่วนผสมของ H₂O : HCl : HNO₃ เป็นอัตราส่วน 3:5:1 โดยปริมาตรตามลำดับ เป็นเวลา 1.30 นาที)

3.3 วิธีการทดลอง

1. นำชิ้นงานตัวอย่างมาวิเคราะห์หาส่วนผสมทางเคมี
2. เตรียมชิ้นงานทดลองขนาด 150 x 150 มิลลิเมตร ตามรายละเอียดในข้อ 3.2
3. เตรียมความพร้อมของอุปกรณ์ เครื่องมือการทดลอง หาพารามิเตอร์ที่จะใช้ทดลองให้มีความเหมาะสม
4. นำชิ้นงานทดลองมายึดเข้ากับชุดจับยึด ระยะห่างระหว่างชิ้นงานกับปลายอิเล็กโทรดควรมีระยะ 2 – 3 มิลลิเมตรแล้วขันสกรูให้แน่น
5. เชื่อมชิ้นงานการทดลองตลอดแนวโดยมีตัวแปรตามข้อ 3.5 ควรให้มีความยาวของรอยเชื่อมประมาณ 100 – 120 มิลลิเมตร รอยเชื่อมต้องมีลักษณะยาวต่อเนื่องกันไป ไม่ติดขัด
6. ตรวจสอบรอยบกพร่องตามมาตรฐาน DIN 8563 พิจารณา 3 ปัจจัย คือ 1. อนุญาตให้เกิด Visible Pore 2. อนุญาตให้เกิด Visible Slag และ 3. อนุญาตให้เกิด Spatter ได้เล็กน้อย
7. นำชิ้นงานทดลอง ไปวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคตามรายละเอียดข้อ 3.4.2
8. นำชิ้นงานทดลอง ไปวิเคราะห์หาปริมาณ ไนโตรเจนตามรายละเอียดข้อ 3.4.3
9. นำชิ้นงานทดลองจากข้อ 3.4.2 ไปทดสอบความแข็งที่ผิว
10. วิเคราะห์ผลการทดลอง
11. สรุปผลการทดลอง

3.4 วิธีการตรวจสอบชิ้นงานภายหลังการเชื่อม

3.4.1 การคัดเลือกชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐาน DIN 8563

นำชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อม มาตรวจสอบตามมาตรฐาน DIN 8563 โดยไม่อนุญาตให้เกิด Visible pores, Visible slag inclusions และ อนุญาตให้เกิด Spatter ได้เล็กน้อย

3.4.2 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของเนื้อโลหะรอยเชื่อม

เตรียมชิ้นงานทดลอง ไปวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคและวัดปริมาณเดลต้าเฟอร์ไรท์ ในบริเวณหลอมละลาย (Fusion Zone) และบริเวณกระทบร้อน (HAZ) จากภาพถ่ายที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์ ขั้นตอนการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคมีดังนี้

1. ตัดรอยเชื่อมในทิศทางตั้งฉากกับรอยเชื่อมยาวประมาณ 10 มิลลิเมตรและมีความกว้าง 10 มิลลิเมตร

2. นำรอยเชื่อมไปกัดในส่วนที่หลอมละลาย ให้ผิวเรียบเป็นเนื้อเดียวกับโลหะพื้น และทำตัวเรือนเพื่อตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค
3. ชัดด้วยกระดาษทรายตั้งแต่เบอร์ 240 จนกระทั่งถึงเบอร์ 1200 และขัดด้วยผงอลูมินา (Al_2O_3) แล้วล้างทำความสะอาดด้วยน้ำและแอลกอฮอล์ เป่าลมร้อนให้แห้งอย่างรวดเร็ว
4. กัดกรดชิ้นงานทดสอบด้วยสารเคมีที่มีส่วนผสม $H_2O: HCl : HNO_3$ เป็นอัตราส่วน 3:5:1 โดยปริมาตรตามลำดับ เป็นเวลา 1.30 นาที ล้างทำความสะอาดด้วยน้ำและแอลกอฮอล์ เป่าลมร้อนให้แห้งอย่างรวดเร็ว
5. ใช้กล้องจุลทรรศน์ถ่ายภาพเพื่อ วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคบริเวณหลอมละลาย (Fusion zone) บริเวณกระทบร้อน (HAZ) ตรวจสอบปริมาณเคลดดำเฟอร์ไรต์โดยการคำนวณทาง Quantitative Metallography และนำค่าที่ได้มาคำนวณค่าทางสถิติ โดยกำหนดระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ค้างในภาคผนวก ก.

3.4.3 การตรวจสอบวิเคราะห์ปริมาณธาตุไนโตรเจน

นำชิ้นงานทดลองมาวิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจน เมื่อใช้แก๊สไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอนในปริมาณแตกต่างกัน มีขั้นตอนดังนี้

1. ใส ตัด เนื้อ โลหะรอยเชื่อมในทิศทางตามรอยเชื่อมให้ได้เศษประมาณ 1 กรัม
2. ทำความสะอาดเศษโลหะให้ปราศจากคราบไขมัน
3. วิเคราะห์หาปริมาณไนโตรเจนด้วยเครื่อง LECO 400 Oxygen-Nitrogen Analyzer

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.5 ตัวแปรสำหรับการทดลองเชื่อม

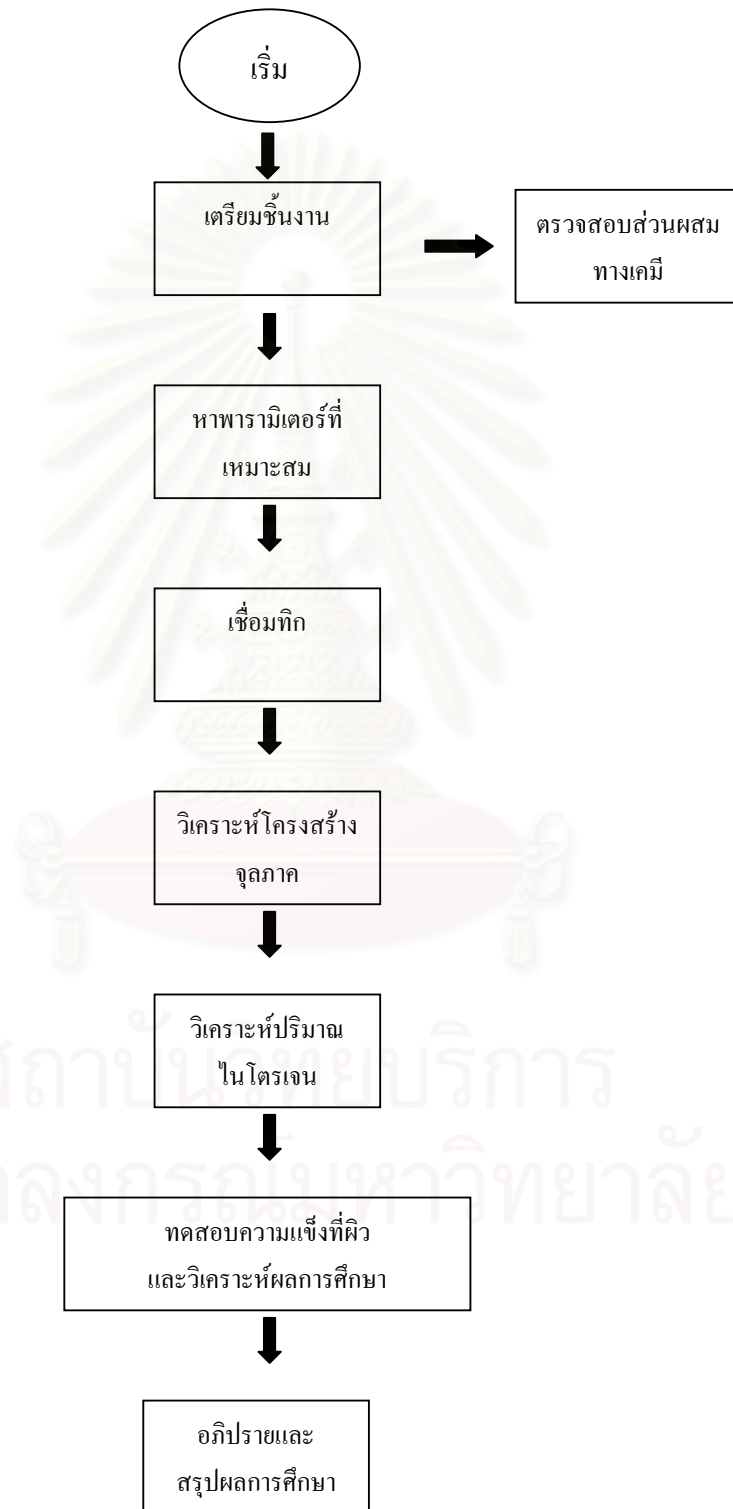
3.5.1 ตัวแปรผันแปร

ปริมาณแก๊สในโตรเจนที่ผสมในแก๊สปก คลุมอาร์กอน (เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร)	0-10,15,20,25,30,35,40 และ 100
--	--------------------------------

3.5.2 ตัวแปรคงที่

กระแสไฟฟ้าพัลส์	130 แอมแปร์
กระแสไฟฟ้าเบส	70 แอมแปร์
วิธีการเชื่อม	ทิก
ลวดเชื่อม	ไม่ใช่
กระแสไฟฟ้าเชื่อม	กระแสไฟฟ้าตรง อิเล็กโทรดเป็นขั้วลบ
ระยะอาร์ค	2 - 3 มิลลิเมตร
อิเล็กโทรด	ทั้งสแตนผสมทอเรียม 2 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก เส้นผ่านศูนย์กลาง 2.4 มิลลิเมตร มุมปลาย 60 องศา
แก๊สปกคลุม	แก๊สอาร์กอนบริสุทธิ์ 99.995 เปอร์เซนต์เปลี่ยนแปลงปริมาณแก๊สในโตรเจนผสมแก๊สปกคลุม
อัตราการไหลแก๊สปกคลุมด้านบน	16 ลิตรต่อนาที
อัตราการไหลแก๊สปกคลุมด้านล่าง	8 ลิตรต่อนาที
หัว Torch	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง Orifice 11 มิลลิเมตร ระบายความร้อนด้วยน้ำ
ระยะการยื่นของอิเล็กโทรด(Strick out)	4 มิลลิเมตร
หัว Torch ทำมุมกับชิ้นงานทดลอง	75 องศา
ความถี่พัลส์	2 รอบต่อวินาที
ความเร็วเชื่อม	3.4 มิลลิเมตรต่อวินาที
% ontime	45 เปอร์เซนต์

3.6 แผนภูมิขั้นตอนการทดลอง



บทที่ 4

ผลการทดลองและการอภิปราย

การทดลองนี้ หัวตัวแปรการเชื่อมทิกที่เหมาะสมกับเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก 304 L เพื่อใช้สำหรับการทดลองต่อไป

4.1 รอยเชื่อมของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก เกรด 304L

ประสงค์ ชะอุ่มใบ ได้สรุปไว้ว่า ในการเชื่อมทิกเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก เกรด 304L ในการเชื่อมแบบต่อชนเหล็กหนา 3 มิลลิเมตร ความเร็วเชื่อม 3.4 มิลลิเมตรต่อวินาที ก๊าซปกคลุมด้านบน 16 ลิตรต่อนาที ก๊าซปกคลุมด้านล่าง 8 ลิตรต่อนาที มีความเหมาะสมเพียงพอ จึงนำมาใช้ในการทดลองนี้ การเชื่อมทิกเหล็กกล้าไร้สนิมที่คืนัน ควรจะต้องรักษาการอาร์ค การหลอมละลายของบ่อน้ำโลหะ โดยปราศจากการอาร์คที่แรงเกินไปและไม่ต่ำจนอาร์คดับในระหว่างการเชื่อม ทำให้เกิดการหลอมละลายไม่สมบูรณ์ (Lack of fusion) และ อาร์คส่าย (Arc Wandering) เมื่อทดลองเชื่อม ก๊าซปกคลุมอาร์คก่อน 100 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร มีกระแสพัลส์ 130 แอมแปร์ กระแสเบส 70 แอมแปร์ ความถี่พัลส์ 2 พัลส์ต่อวินาที ความต่างศักย์ 14 โวลต์ ความเร็วเชื่อม 3.4 มิลลิเมตรต่อวินาที %ontime 45 เปอร์เซ็นต์ ก๊าซปกคลุมด้านบน 16 ลิตรต่อ นาที ก๊าซปกคลุมด้านล่าง 8 ลิตรต่อนาที พบว่ามีรอยเชื่อมสมบูรณ์ไม่เกิด Visible pores, Visible slag inclusions และ Spatter ตามมาตรฐาน DIN 8563 จึงใช้ค่าความถี่พัลส์ 2 พัลส์ต่อวินาทีและ %ontime 45 เปอร์เซ็นต์ เป็นมาตรฐานในการเชื่อมต่อไป

จากผลการทดลองที่ได้ เมื่อเติมก๊าซในโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์คก่อนในส่วนผสม ต่างๆกัน พบว่า ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงกระแสพัลส์ กระแสเบส และความต่างศักย์ มากนัก พารามิเตอร์อื่นๆ ถูกควบคุมให้เป็นค่าคงที่ คือ ความถี่พัลส์ 2 พัลส์ต่อวินาที ความเร็วเชื่อม 3.4 มิลลิเมตรต่อวินาที และ %ontime 45 เปอร์เซ็นต์ จากการทดลอง เมื่อเติมก๊าซในโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์คก่อนปริมาณ 30 35 40 และ 100 เปอร์เซ็นต์ ทำให้น้ำโลหะกระจายออกมาก และหัวเชื่อมติดกับโลหะพื้นบ่อยครั้ง ได้รอยเชื่อมที่ไม่สมบูรณ์เนื่องจากรอยเชื่อมขาดความต่อเนื่องเป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งไม่ผ่านมาตรฐาน DIN 8563 ดังตารางที่ 4.1






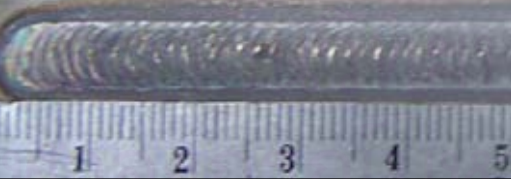
ตารางที่ 4.1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ สำหรับการเชื่อมทิก

ลำดับ	%N ₂ ในอาร์กอน	กระแสพัลส์ (A)	กระแสเบส (A)	ความถี่พัลส์ (พัลส์/วินาที)	ความต่างศักย์ (V)	ความเร็วเชื่อม (มม./วินาที)	% on time	หมายเหตุ
1	0	130	70	2	14	3.4	45	
2	1	131	80	2	14	3.4	45	
3	2	130	80	2	14	3.4	45	
4	3	130	80	2	14	3.4	45	
5	4	130	80	2	14	3.4	45	
6	5	127	83	2	14	3.4	45	
7	6	132	80	2	14	3.4	45	
8	7	132	80	2	14	3.4	45	
9	8	132	77	2	14	3.4	45	
10	9	130	77	2	14	3.4	45	
11	10	130	78	2	14	3.4	45	
12	15	130	78	2	14	3.4	45	
13	20	140	70	2	14	3.4	45	
14	25	130	80	2	15	3.4	45	
15	30	125	85	2	15	3.4	45	น้ำโลหะกระจายมากและหัวเชื่อมติดกับ โลหะพื้น
16	35	125	83	2	18	3.4	45	น้ำโลหะกระจายมากและหัวเชื่อมติดกับ โลหะพื้น
17	40	125	80	2	18	3.4	45	น้ำโลหะกระจายมากและหัวเชื่อมติดกับ โลหะพื้น
18	100	118	70	2	18	3.4	45	น้ำโลหะกระจายมากและหัวเชื่อมติดกับ โลหะพื้น

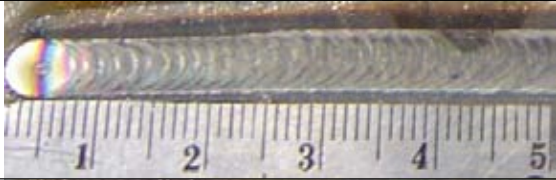
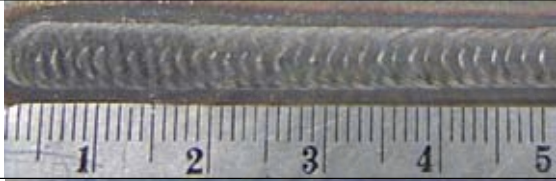

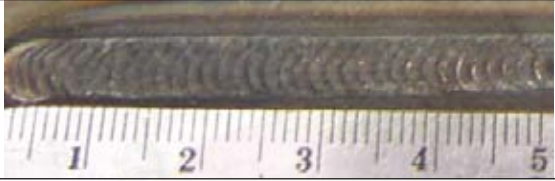
ผลของการเติมก๊าซไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอนในปริมาณ 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 และ 9 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร พบว่า รอยเชื่อมมีผิวรอยเชื่อมสวยงาม มัน วาว ไม่เกิด defect ผ่านมาตรฐาน DIN 8563 แสดงดังตารางที่ 4.2

ผลของการเติมก๊าซไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอนในปริมาณ 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40 และ 100 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร พบว่า เมื่อเติมก๊าซไนโตรเจน 10 เปอร์เซ็นต์ เกิดการหลอมละลายไม่สมบูรณ์ จากหนังสือ การเชื่อมโลหะด้วยวิธีการทิก ได้กล่าวไว้ว่า การหลอมละลายไม่สมบูรณ์อาจมีสาเหตุเกิดมาจากขณะที่ทำการเชื่อมนั้น เกิดการจ่อหัวเชื่อมไว้นานเกินไป ทำให้เกิดแอ่งน้ำโลหะในรอยเชื่อมและน้ำโลหะในบริเวณข้างเคียงไหลเข้ามาแทนที่ในช่องว่างนั้น ไมทัน ซึ่งมีสาเหตุมาจากระยะอาร์คที่ห่างเกินไป หรือ กระแสสูงเกินไป จึงเกิดเป็น Visible Pore บริเวณกลางรอยเชื่อม เมื่อเติมก๊าซไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอน 15 เปอร์เซ็นต์ รอยเชื่อมมีสีดำไม่มันวาว อีกทั้งมี Slag ปกคลุมอยู่ที่ผิวรอยเชื่อม มีสาเหตุมาจาก มีออกซิเจนเข้าไปในบ่อน้ำโลหะหลอมเหลว ปริมาณก๊าซปกคลุมอาร์กอนไม่เพียงพอที่จะป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน จากตารางที่ 2.2 ไนโตรเจนมีความหนาแน่น 1.161 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร อาร์กอนมีความหนาแน่น 1.784 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ไนโตรเจนมีความหนาแน่นน้อยกว่าอาร์กอนส่งผลให้มีความสามารถในการปกคลุมบ่อน้ำโลหะรอยเชื่อมได้น้อยกว่า จึงสามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ เมื่อเติมก๊าซไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอน 20 เปอร์เซ็นต์ รอยเชื่อมเกิด Visible Pore ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 3 มิลลิเมตร รอยเชื่อมมีสีดำ และเกิด Slag ทั่วไปตามแนวเชื่อม เมื่อเติมก๊าซไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอน 25 เปอร์เซ็นต์ รอยเชื่อมเกิด Slag ตามแนวเชื่อม และรอยเชื่อมมีสีดำ ไม่มันวาว เมื่อเติมก๊าซไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอน 30 เปอร์เซ็นต์ รอยเชื่อมเกิด Slag ตามแนวเชื่อมและรอยเชื่อมมีสีดำ ไม่มันวาว เมื่อเติมก๊าซไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอน 35 40 และ 100 เปอร์เซ็นต์ พบว่า รอยเชื่อมนอกจากจะเกิด Slag ที่ผิวชิ้นงานแล้ว ยังสามารถเกิดการกระจายของน้ำโลหะหลอมเหลว (Spatter) ด้วย และรอยเชื่อมที่ได้มีลักษณะเป็นวงรีซ้อนทับกัน ไม่เป็นวงกลมซ้อนทับกัน ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ Yasushi et al. ที่ทดลองเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิค เกรด 316L ที่สภาวะความดันไนโตรเจนตั้งแต่ 1.0 – 6.0 MPa พบว่า มีรูปร่างของรอยเชื่อมมีลักษณะใกล้เคียงกันกับการทดลอง รอยเชื่อมที่อยู่ในสภาวะความดันไนโตรเจนสูง จะมีลักษณะเป็นวงรี และมีสีดำคล้ายๆกัน แสดงดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.2 รอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด 304L ที่ผ่านมาตรฐาน DIN 8563

ลำดับ	รอยเชื่อม	เปอร์เซ็นต์ไนโตรเจน (โดยปริมาตร)	ลักษณะรอยเชื่อม
1		0	ผิวรอยเชื่อม มัน วาว ไม่เกิด defect
2		1	ผิวรอยเชื่อม มัน วาว ไม่เกิด defect
3		2	ผิวรอยเชื่อม มัน วาว ไม่เกิด defect
4		3	ไม่เกิด defect
5		4	ไม่เกิด defect
6		5	ไม่เกิด defect

ตารางที่ 4.2(ต่อ) รอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด 304L ที่ผ่านมาตรฐาน DIN 8563

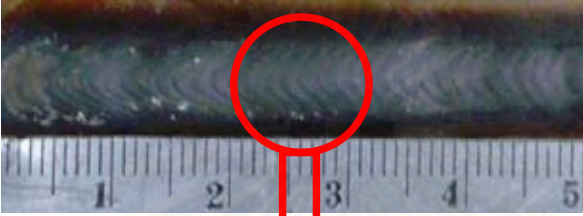
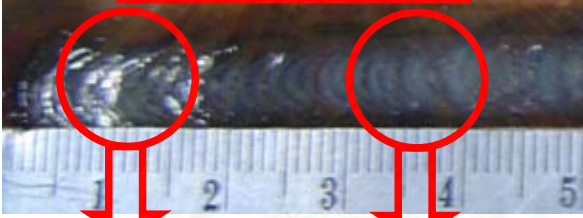
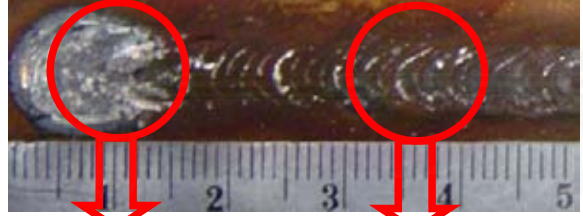
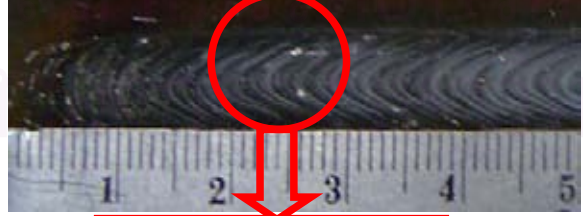
ลำดับ	รอยเชื่อม	เปอร์เซ็นต์ ไนโตรเจน (โดยปริมาตร)	ลักษณะรอยเชื่อม
7		6	ไม่เกิด defect
8		7	ไม่เกิด defect
9		8	ไม่เกิด defect
10		9	ไม่เกิด defect

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

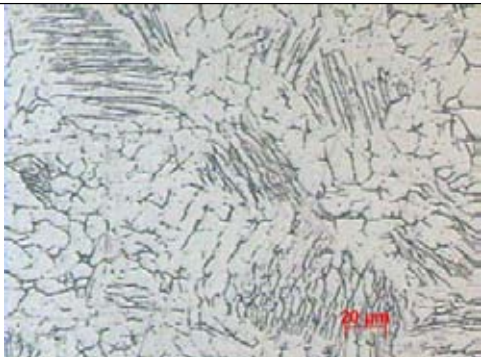
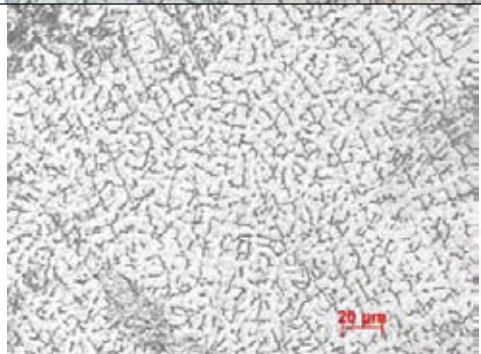
ตารางที่ 4.3 รอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด 304L ที่ไม่ผ่านมาตรฐาน DIN 8563

ลำดับ	รอยเชื่อม	เปอร์เซ็นต์ ไนโตรเจน (โดยปริมาตร)	ลักษณะรอยเชื่อม
1	 <p>Visible pore</p>	10	เกิด Visible Pore ขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลาง 1.5 มิลลิเมตร บริเวณ กลางรอยเชื่อม
2	 <p>รอยเชื่อมมีสีดำ และมี slag</p>	15	รอยเชื่อมมีสีดำ และ เกิด Visible Slag Inclusion
3	 <p>Visible pore และมี slag</p>	20	เกิด Visible Pore ขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตร เกิด Visible Slag Inclusion
4	 <p>มี slag</p>	25	เกิด Visible Slag Inclusion

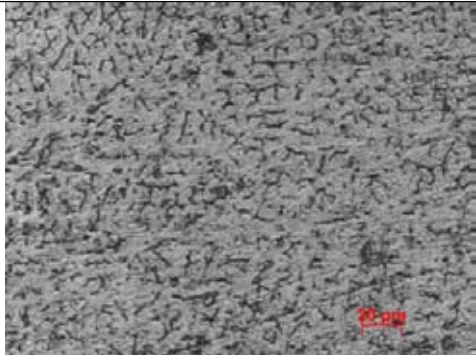
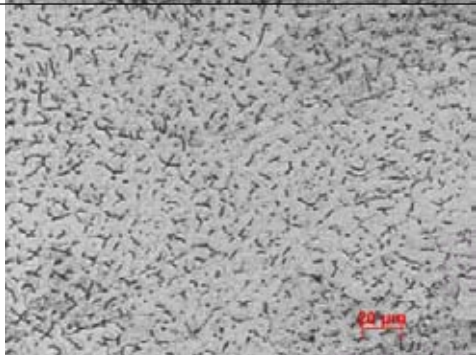
ตารางที่ 4.3 (ต่อ) รอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด 304L ที่ไม่ผ่านมาตรฐาน DIN 8563

ลำดับ	รอยเชื่อม	เปอร์เซ็นต์ ไนโตรเจน (โดยปริมาตร)	ลักษณะรอย เชื่อม
5	 <p data-bbox="581 762 930 835">รอยเชื่อมมีสีดำ และมี slag</p>	30	เกิด Visible Slag Inclusion
6	 <p data-bbox="492 1066 678 1140">Spatter</p> <p data-bbox="695 1066 1044 1140">รอยเชื่อมมีสีดำ และมี slag</p>	35	เกิด Visible Slag Inclusion และ เกิด Spatter มาก
7	 <p data-bbox="492 1375 678 1449">Spatter</p> <p data-bbox="695 1375 1044 1449">รอยเชื่อมมีสีดำ และมี slag</p>	40	เกิด Visible Slag Inclusion และ เกิด Spatter มาก
8	 <p data-bbox="557 1675 906 1749">รอยเชื่อมมีสีดำ และมี slag</p>	100	เกิด Visible Slag Inclusion

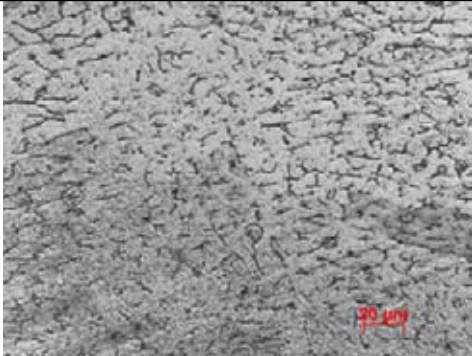
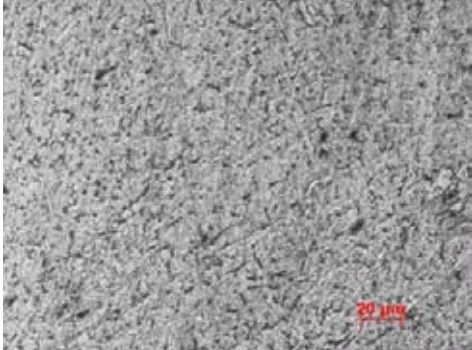
ตารางที่ 4.4 โครงสร้างจุลภาคเนื้อโลหะรอยเชื่อมบริเวณหลอมละลาย (Fusion Zone)

ลำดับ	โครงสร้างจุลภาค (กำลังขยาย 200 เท่า)	เปอร์เซ็นต์ ในโตรเจน (โดยปริมาตร)	เปอร์เซ็นต์ เคลต้าเฟอร์ไรท์ (โดยปริมาตร)	ลักษณะของ เคลต้าเฟอร์ไรท์	ความหนาแน่น ของเคลต้าเฟอร์ ไรท์	inclusion
1		0	14.39	เกาะกันเป็นกลุ่มก้อน	สูง	ไม่มี
2		1	11.70	กระจายตัวออกเป็นสาย สั้น	สูง	ไม่มี

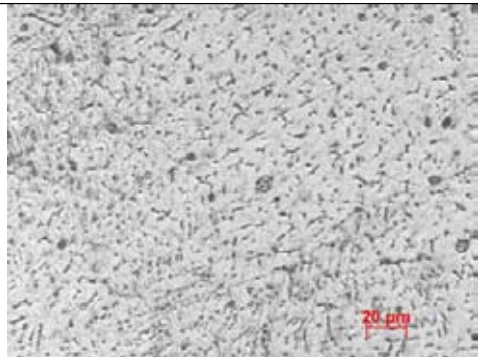
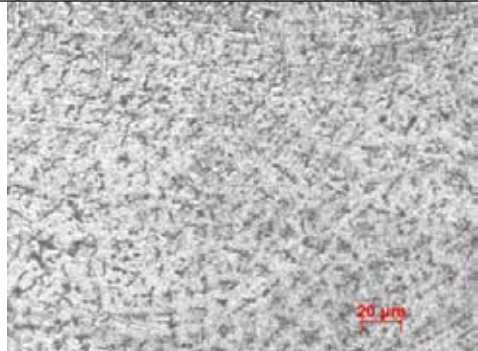
ตารางที่ 4.4(ต่อ) โครงสร้างจุลภาคเนื้อโลหะรอยเชื่อมบริเวณหลอมละลาย (Fusion Zone)

ลำดับ	โครงสร้างจุลภาค (กำลังขยาย 200 เท่า)	เปอร์เซ็นต์ ไนโตรเจน(โดย ปริมาตร)	เปอร์เซ็นต์ เคลต้าเฟอร์ไรท์ (โดยปริมาตร)	ลักษณะของ เคลต้าเฟอร์ไรท์	ความหนาแน่นของ เคลต้าเฟอร์ไรท์	inclusion
3		2	8.70	กระจายตัวออกเป็นสาย สั้น	สูง	ไม่มี
4		3	7.48	กระจายตัวออกเป็นสาย สั้น	ปานกลาง	ไม่มี

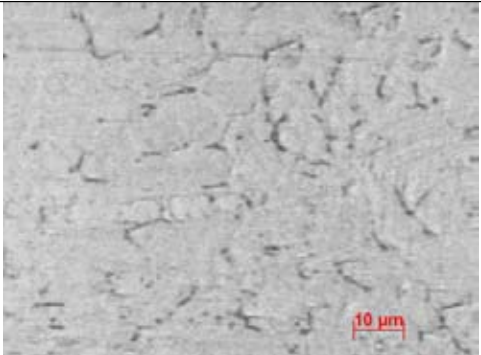
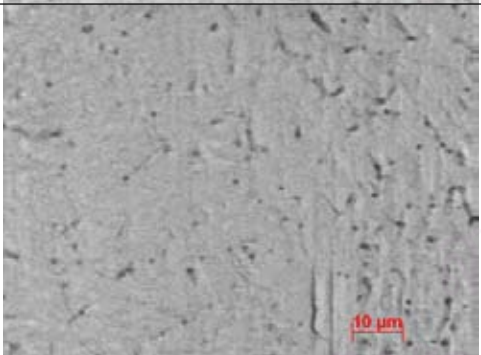
ตารางที่ 4.4(ต่อ) โครงสร้างจุลภาคเนื้อโลหะรอยเชื่อมบริเวณหลอมละลาย (Fusion Zone)

ลำดับ	โครงสร้างจุลภาค (กำลังขยาย 200 เท่า)	เปอร์เซ็นต์ ไนโตรเจน(โดย ปริมาตร)	เปอร์เซ็นต์ เคลต้าเฟอร์ไรท์ (โดยปริมาตร)	ลักษณะของ เคลต้าเฟอร์ไรท์	ความหนาแน่นของ เคลต้าเฟอร์ไรท์	inclusion
5		4	7.80	กระจายตัวออกเป็นสาย สั้น	ปานกลาง	ไม่มี
6		5	6.42	กระจายตัวออกเป็นสาย สั้น	ต่ำ	มีเล็กน้อย

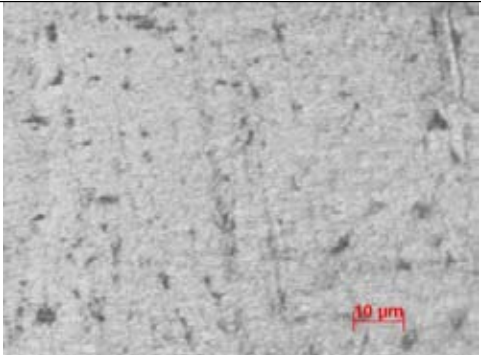

ตารางที่ 4.4(ต่อ) โครงสร้างจุลภาคเนื้อโลหะรอยเชื่อมบริเวณหลอมละลาย (Fusion Zone)

ลำดับ	โครงสร้างจุลภาค (กำลังขยาย 200 เท่า)	เปอร์เซ็นต์ ไนโตรเจน(โดย ปริมาตร)	เปอร์เซ็นต์ เคลต้าเฟอร์ไรท์ (โดยปริมาตร)	ลักษณะของ เคลต้าเฟอร์ไรท์	ความหนาแน่นของ เคลต้าเฟอร์ไรท์	inclusion
7		6	5.86	กระจายตัวออกเป็นสาย สั้นๆ และมีขนาดเล็กกล	ต่ำ	ปานกลาง
8		7	7.58	กระจายตัวออกเป็นสาย สั้นและมีขนาดเล็กกล	ต่ำ	ปานกลาง

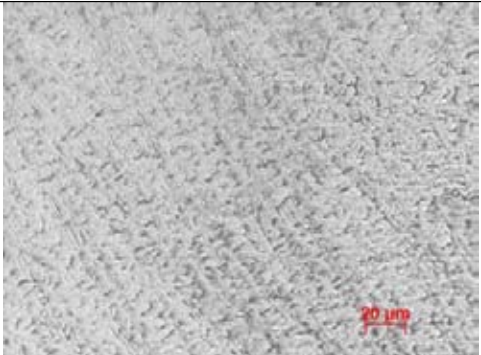

ตารางที่ 4.4(ต่อ) โครงสร้างจุลภาคเนื้อโลหะรอยเชื่อมบริเวณหลอมละลาย (Fusion Zone)

ลำดับ	โครงสร้างจุลภาค (กำลังขยาย 500 เท่า)	เปอร์เซ็นต์ ไนโตรเจน(โดย ปริมาตร)	เปอร์เซ็นต์ เคลต้าเฟอร์ไรท์ (โดยปริมาตร)	ลักษณะของ เคลต้าเฟอร์ไรท์	ความหนาแน่นของ เคลต้าเฟอร์ไรท์	inclusion
9		8	4.99	กระจายตัวออกเป็นสาย สั้นๆ และมีขนาดเล็กลง	ต่ำมาก	มีเล็กน้อย
10		9	4.09	กระจายตัวออกเป็นสาย สั้นและมีขนาดเล็กลง	ต่ำมาก	ปานกลาง

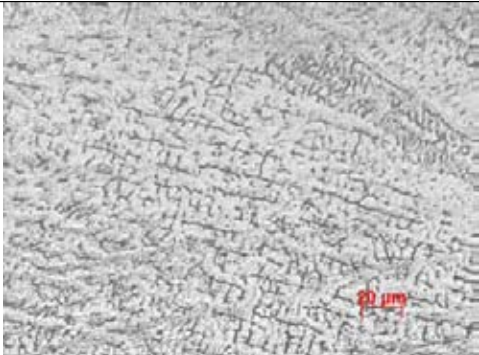
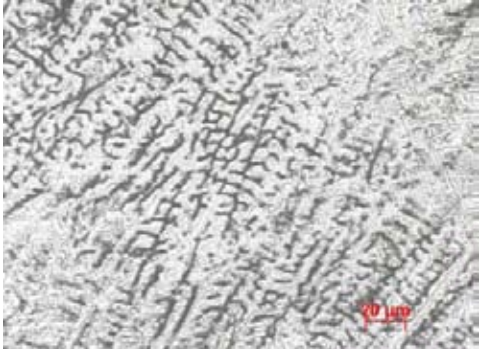
ตารางที่ 4.4(ต่อ) โครงสร้างจุลภาคเนื้อโลหะรอยเชื่อมบริเวณหลอมละลาย (Fusion Zone)

ลำดับ	โครงสร้างจุลภาค (กำลังขยาย 500 และ 200 เท่า)	เปอร์เซ็นต์ ไนโตรเจน(โดย ปริมาตร)	เปอร์เซ็นต์ เคลต้าเฟอร์ไรท์ (โดยปริมาตร)	ลักษณะของ เคลต้าเฟอร์ไรท์	ความหนาแน่นของ เคลต้าเฟอร์ไรท์	inclusion
11		10	4.13	กระจายตัวออกเป็นสาย สั้นๆ และมีขนาดเล็กกล	ต่ำมาก	ปานกลาง
12		15	8.71	กระจายตัวออกเป็นสาย สั้น มีขนาดยาวมากขึ้น	ปานกลาง	มีเล็กน้อย



ตารางที่ 4.4(ต่อ) โครงสร้างจุลภาคเนื้อโลหะรอยเชื่อมบริเวณหลอมละลาย (Fusion Zone)

ลำดับ	โครงสร้างจุลภาค (กำลังขยาย 200 เท่า)	เปอร์เซ็นต์ ไนโตรเจน(โดย ปริมาตร)	เปอร์เซ็นต์ เคลต้าเฟอร์ไรท์ (โดยปริมาตร)	ลักษณะของ เคลต้าเฟอร์ไรท์	ความหนาแน่นของ เคลต้าเฟอร์ไรท์	inclusion
13		20	7.59	กระจายตัวออกเป็นสาย สั้นๆ และมีขนาดเล็กกลอง	ปานกลาง	ไม่มี
14		25	12.52	เกาะกันเป็นกลุ่มมาก ขึ้น ขนาดยาวมากขึ้น	ปานกลาง	ไม่มี

ตารางที่ 4.4(ต่อ) โครงสร้างจุลภาคเนื้อโลหะรอยเชื่อมบริเวณหลอมละลาย (Fusion Zone)

ลำดับ	โครงสร้างจุลภาค (กำลังขยาย 200 เท่า)	เปอร์เซ็นต์ ไนโตรเจน(โดย ปริมาตร)	เปอร์เซ็นต์ เคลต้าเฟอร์ไรท์ (โดยปริมาตร)	ลักษณะของ เคลต้าเฟอร์ไรท์	ความหนาแน่นของ เคลต้าเฟอร์ไรท์	inclusion
15		30	13.14	เกาะกันเป็นกลุ่มมาก ขึ้น ขนาดยาวมากขึ้น	มาก	ไม่มี
16		35	13.19	เกาะกันเป็นกลุ่ม ขนาดยาวมากขึ้น	มาก	ไม่มี

ตารางที่ 4.4(ต่อ) โครงสร้างจุลภาคเนื้อโลหะรอยเชื่อมบริเวณหลอมละลาย (Fusion Zone)

ลำดับ	โครงสร้างจุลภาค (กำลังขยาย 200 เท่า)	เปอร์เซ็นต์ ไนโตรเจน(โดย ปริมาตร)	เปอร์เซ็นต์ เคลด้าเฟอร์ไรท์ (โดยปริมาตร)	ลักษณะของ เคลด้าเฟอร์ไรท์	ความหนาแน่นของ เคลด้าเฟอร์ไรท์	inclusion
17		40	12.56	เกาะกันเป็นกลุ่มมากขึ้น ขนาดยาวมากขึ้น	มาก	สูง
18		100	0	ไม่มีเคลด้าเฟอร์ไรท์	-	มีเล็กน้อย

4.2 โครงสร้างจุลภาคของเนื้อโลหะรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด 304L

การเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคของโลหะพื้น กล่าวคือ โครงสร้างจุลภาคของเนื้อโลหะรอยเชื่อมเกิดโครงสร้างเซลล์เฟอร์ไรท์ขึ้นที่อุณหภูมิสูง และที่อุณหภูมิต่ำเกิดโครงสร้างออสเทนไนท์ โดยทั่วไปการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก ควรควบคุมปริมาณเซลล์เฟอร์ไรท์ให้อยู่ในช่วง 5 ถึง 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร การทดลองนี้เป็นการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด 304L โดยเติมก๊าซไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอน 0-10, 15, 20, 25, 30, 35, 40 และ 100 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ตรวจสอบชิ้นงานว่าสามารถผ่านมาตรฐาน DIN 8563 หรือไม่ หลังจากนั้นนำชิ้นงานทั้งหมด มาวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคที่เกิดขึ้นในเนื้อโลหะรอยเชื่อม เพื่อศึกษารูปร่างการเกิดเซลล์เฟอร์ไรท์ และวัดปริมาณเซลล์เฟอร์ไรท์ใน 2 บริเวณ คือ บริเวณหลอมละลาย (Fusion Zone) และ บริเวณกระทบร้อน (Heat Affected Zone : HAZ) ด้วยวิธี Quantitative Metallography แสดงดังภาพผนวก ก.

4.2.1 โครงสร้างจุลภาคของเนื้อโลหะรอยเชื่อมบริเวณหลอมละลาย (Fusion Zone)

จากการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของเนื้อโลหะรอยเชื่อมบริเวณหลอมละลาย พบว่า เมื่อเติมก๊าซไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอนปริมาณ 0 ถึง 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร นั้น เซลล์เฟอร์ไรท์ที่เกิดขึ้นในเนื้อโลหะรอยเชื่อมเป็นชนิดเวอร์มิคิวลาเฟอร์ไรท์ (Vermicular Ferrite) และเมื่อเติมก๊าซไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอนปริมาณ 15, 20, 25, 30, 35, 40 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร เซลล์เฟอร์ไรท์ที่เกิดขึ้นในเนื้อโลหะรอยเชื่อมเป็นชนิดแลททิเฟอร์ไรท์ (Lathy Ferrite) ดังตารางที่ 4.4

จากการวิเคราะห์ปริมาณเซลล์เฟอร์ไรท์(เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) ในเนื้อโลหะรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก เกรด 304L ที่ผ่านการเชื่อมทิก พบว่า เมื่อใช้ก๊าซปกคลุมอาร์กอน 100 เปอร์เซ็นต์มีปริมาณเซลล์เฟอร์ไรท์ 14.39 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ลักษณะของเซลล์เฟอร์ไรท์เกาะกันเป็นกลุ่มก้อน กระจายอยู่ทั่วไป มีความหนาแน่นของเซลล์เฟอร์ไรท์สูง เมื่อเติมก๊าซไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอน 1 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร มีปริมาณเซลล์เฟอร์ไรท์ลดลงเหลือ 11.70 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ลักษณะของเซลล์เฟอร์ไรท์กระจายตัวออกเป็นสายสั้นๆ หลงเหลือเซลล์เฟอร์ไรท์เกาะกันเป็นกลุ่มอยู่บ้าง แต่เป็นจำนวนไม่มากนัก มีความหนาแน่นของเซลล์เฟอร์ไรท์สายสั้นๆสูง เมื่อเติมก๊าซไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอน 2 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร มีปริมาณเซลล์เฟอร์ไรท์ลดลงเหลือ 8.70 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร

ลักษณะของเคลือบเฟอร์ไรท์กระจายตัวออกเป็นสายสั้นๆกว่าเดิมเล็กน้อย มีความหนาแน่นของเคลือบเฟอร์ไรท์สูง เมื่อเติมก๊าซไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอน 3 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร มีปริมาณเคลือบเฟอร์ไรท์ลดลงเหลือ 7.48 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ลักษณะของเคลือบเฟอร์ไรท์กระจายตัวออกเป็นสายสั้นๆกว่าเดิมเล็กน้อย มีความหนาแน่นของเคลือบเฟอร์ไรท์ปานกลาง ไม่เกิด inclusion เมื่อเติมก๊าซไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอน 4 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร มีปริมาณเคลือบเฟอร์ไรท์ลดลงเหลือ 7.80 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ลักษณะของเคลือบเฟอร์ไรท์กระจายตัวออกเป็นสายสั้นๆ มีความหนาแน่นของเคลือบเฟอร์ไรท์ลดลงเล็กน้อย ไม่เกิด inclusion เมื่อเติมก๊าซไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอน 5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร มีปริมาณเคลือบเฟอร์ไรท์ลดลงเหลือ 6.42 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ลักษณะของเคลือบเฟอร์ไรท์กระจายตัวออกเป็นสายสั้นๆกว่าเดิม มีความหนาแน่นของเคลือบเฟอร์ไรท์ลดลงมาก และเริ่มเกิด inclusion เล็กน้อย เมื่อเติมก๊าซไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอน 6 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร มีปริมาณเคลือบเฟอร์ไรท์ลดลงเหลือ 5.86 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ลักษณะของเคลือบเฟอร์ไรท์กระจายตัวออกเป็นสายสั้นๆกว่าเดิม เคลือบเฟอร์ไรท์มีขนาดเล็ก ความหนาแน่นของเคลือบเฟอร์ไรท์ต่ำ และมีเกิด inclusion เยอะมากขึ้น เมื่อเติมก๊าซไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอน 7 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร มีปริมาณเคลือบเฟอร์ไรท์เพิ่มขึ้นเล็กน้อยเป็น 7.58 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ลักษณะของเคลือบเฟอร์ไรท์กระจายตัวออกเป็นสายสั้นๆ เคลือบเฟอร์ไรท์มีขนาดไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก ความหนาแน่นของเคลือบเฟอร์ไรท์ต่ำ และเกิด inclusion เยอะมากขึ้นกว่าเดิมเล็กน้อย เมื่อเติมก๊าซไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอน 8 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร มีปริมาณเคลือบเฟอร์ไรท์ลดลงเหลือ 4.99 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ลักษณะของเคลือบเฟอร์ไรท์กระจายตัวออกเป็นสายสั้นๆ เคลือบเฟอร์ไรท์มีขนาดเล็กมาก ความหนาแน่นของเคลือบเฟอร์ไรท์ต่ำมาก และมีเกิด inclusion เล็กน้อย เมื่อเติมก๊าซไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอน 9 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร มีปริมาณเคลือบเฟอร์ไรท์ลดลงเหลือเพียง 4.09 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ซึ่งเป็นปริมาณเคลือบเฟอร์ไรท์ที่ต่ำที่สุดที่สามารถทำได้ในการทดลองนี้ และรอยเชื่อมก็สามารถผ่านมาตรฐานการเชื่อม DIN 8563 ได้ ลักษณะของเคลือบเฟอร์ไรท์กระจายตัวออกเป็นสายสั้นๆมากขึ้น เคลือบเฟอร์ไรท์มีขนาดเล็กมาก ต้องเพิ่มกำลังขยายของกล้องจุลทรรศน์มากขึ้นจึงจะสามารถเห็นได้ชัดเจน ความหนาแน่นของเคลือบเฟอร์ไรท์ต่ำมาก และเกิด inclusion ปานกลาง

เมื่อเติมก๊าซไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอน 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรเป็นต้นไป เป็นรอยเชื่อมที่ไม่ผ่านมาตรฐาน DIN 8563 พบว่ามีปริมาณเคลือบเฟอร์ไรท์เพิ่มขึ้นเป็น 4.13 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ลักษณะของเคลือบเฟอร์ไรท์กระจายตัวออกเป็นสายสั้นๆ ความหนาแน่นของเคลือบเฟอร์ไรท์ต่ำมาก และเกิด inclusion ปานกลาง เมื่อเติมก๊าซไนโตรเจนในก๊าซปกคลุม

อาร์กอน 15 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรเป็นต้นไป มีปริมาณเคลด้าเฟอร์ไรท์เพิ่มขึ้นเป็น 8.71 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ลักษณะของเคลด้าเฟอร์ไรท์กระจายตัวออกเป็นสายยาวมากขึ้น ความหนาแน่นของเคลด้าเฟอร์ไรท์ปานกลาง และเกิด inclusion เล็กน้อย เมื่อเติมก๊าซไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอน 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร มีปริมาณเคลด้าเฟอร์ไรท์ 7.59 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ลักษณะของเคลด้าเฟอร์ไรท์กระจายตัวออกเป็นสายยาวมากขึ้น ความหนาแน่นของเคลด้าเฟอร์ไรท์ปานกลาง และไม่เกิด inclusion เมื่อเติมก๊าซไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอน 25 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร มีปริมาณเคลด้าเฟอร์ไรท์เพิ่มขึ้นเป็น 12.52 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ลักษณะของเคลด้าเฟอร์ไรท์เริ่มเกาะกันเป็นกลุ่ม มีขนาดยาวมากขึ้น ความหนาแน่นของเคลด้าเฟอร์ไรท์ปานกลาง และไม่เกิด inclusion เมื่อเติมก๊าซไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอน 30 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร มีปริมาณเคลด้าเฟอร์ไรท์เพิ่มขึ้นเป็น 13.14 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ลักษณะของเคลด้าเฟอร์ไรท์เกาะกันเป็นกลุ่ม มีขนาดยาวมากขึ้น ความหนาแน่นของเคลด้าเฟอร์ไรท์มาก และไม่เกิด inclusion เมื่อเติมก๊าซไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอน 35 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร มีปริมาณเคลด้าเฟอร์ไรท์ 13.19 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ลักษณะของเคลด้าเฟอร์ไรท์เกาะกันเป็นกลุ่ม มีขนาดยาวมากขึ้น ความหนาแน่นของเคลด้าเฟอร์ไรท์มาก และไม่เกิด inclusion เมื่อเติมก๊าซไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอน 40 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร มีปริมาณเคลด้าเฟอร์ไรท์ลดลงเล็กน้อยเป็น 12.56 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ลักษณะของเคลด้าเฟอร์ไรท์เกาะกันเป็นกลุ่ม ความหนาแน่นของเคลด้าเฟอร์ไรท์มาก และเกิด inclusion สูง เมื่อใช้ก๊าซไนโตรเจน 100 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร มีปริมาณเคลด้าเฟอร์ไรท์ลดลงมากจนเกือบจะไม่มีเลย และเกิด inclusion เล็กน้อย

เติมไนโตรเจนปริมาณ 0 ถึง 9 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร เป็นรอยเชื่อมผ่านมาตรฐาน DIN 8563 แสดงดังรูปที่ 4.1 จากการวิเคราะห์โดยใช้กราฟ จะเห็นได้ว่า ปริมาณเคลด้าเฟอร์ไรท์ในบริเวณ Fusion Zone มีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัด เมื่อลากเส้นสมมติตัดผ่าน จะได้สมการดังนี้ แสดงดังภาคผนวก ก.

$$Y = -0.92X + 12.03; R^2 = 0.80$$

Y คือ ปริมาณเคลด้าเฟอร์ไรท์โดยปริมาตร (Vol.%)

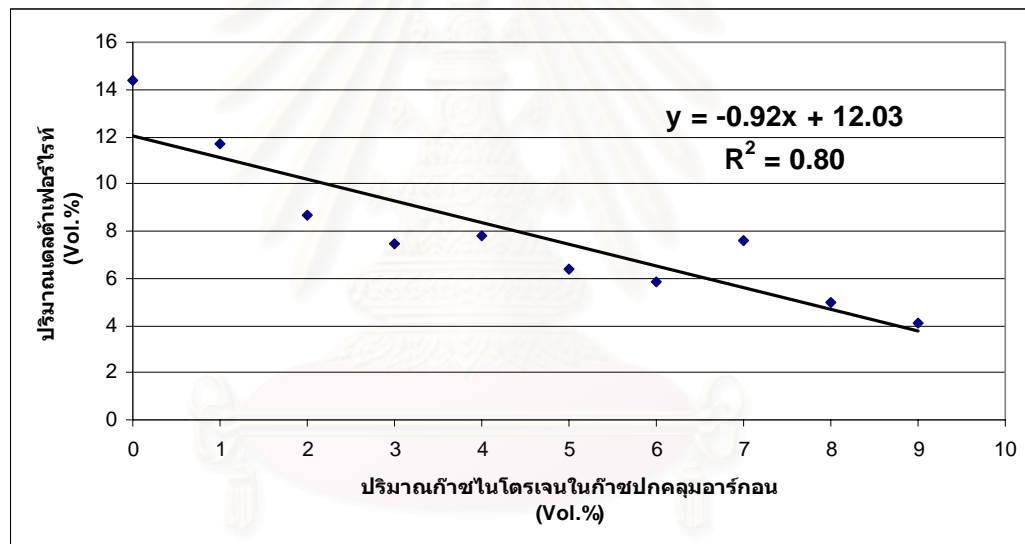
X คือ ปริมาณก๊าซไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอนโดยปริมาตร (Vol.%)

เติมไนโตรเจนปริมาณ 10, 15, 20, 25, 30, 35 และ 40 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร เป็นรอยเชื่อมไม่ผ่านมาตรฐาน DIN 8563 แสดงดังรูปที่ 4.2 จากการวิเคราะห์โดยใช้กราฟ จะเห็นว่า ปริมาณเคลือบเฟอร์ไรต์ในบริเวณ Fusion Zone มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อลากเส้นสมมติตัดผ่าน จะได้สมการดังนี้

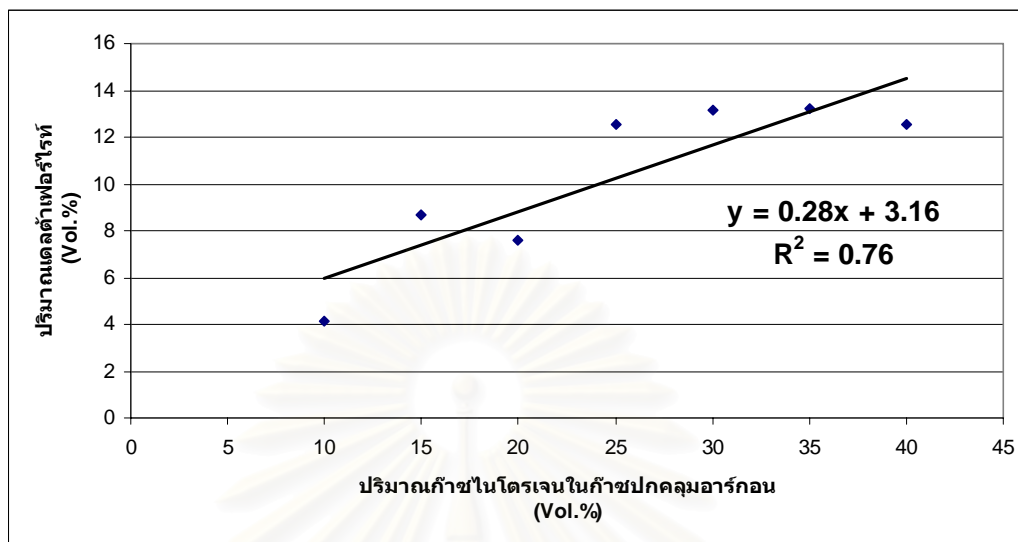
$$Y = 0.28X + 3.16; R^2 = 0.76$$

Y คือ ปริมาณเคลือบเฟอร์ไรต์โดยปริมาตร (Vol.%)

X คือ ปริมาณก๊าซไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอนโดยปริมาตร (Vol.%)



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง ปริมาณเคลือบเฟอร์ไรต์บริเวณ Fusion Zone และ ปริมาณก๊าซไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอน ที่ผ่านมาตรฐาน DIN 8563



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง ปริมาณแคลต์เฟอร์ไรท์บริเวณ Fusion Zone และ ปริมาณก๊าซในโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอน ที่ไม่ผ่านมาตรฐาน DIN 8563

เมื่อพิจารณาบริเวณหลอมละลาย (Fusion Zone) ของรอยเชื่อมที่ผ่านมาตรฐาน DIN 8563 พบว่า เมื่อเติมไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอน เพิ่มมากขึ้น ทำให้ปริมาณแคลต์เฟอร์ไรท์ลดลง มีสาเหตุมาจาก เมื่อเติมไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอนนั้น ไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมสามารถละลายลงในเนื้อโลหะรอยเชื่อมได้ ซึ่งคุณสมบัติของไนโตรเจนนั้นเป็นธาตุที่ทำให้ ออสเตนไนท์มีความเสถียร (Austenite stabilizer) ทำให้เกิดผลึกโครงสร้างออสเตนไนท์เพิ่มขึ้น และแคลต์เฟอร์ไรท์ลดลง ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิจัยอื่นๆที่กล่าวมาข้างต้น

เมื่อพิจารณาบริเวณหลอมละลาย (Fusion Zone) ของรอยเชื่อมที่ไม่ผ่านมาตรฐาน DIN 8563 พบว่า เมื่อเติมไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอนเพิ่มมากขึ้น ทำให้ปริมาณแคลต์เฟอร์ไรท์เพิ่มขึ้น มีสาเหตุมาจาก การเติมไนโตรเจนในปริมาณที่มากเกินไป ทำให้เกิด defect ชนิด Visible slag inclusion และ Spatter เนื่องจากไนโตรเจนมีความหนาแน่นน้อยกว่าอาร์กอนส่งผลให้มีความสามารถในการปกคลุมบ่อน้ำโลหะรอยเชื่อมได้น้อยกว่า จึงสามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ นอกจากนี้การเกิด slag จะป้องกันไม่ให้ไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมละลายในเนื้อโลหะได้มากขึ้น เนื่องจาก slag จะอยู่บริเวณผิวเนื้อโลหะรอยเชื่อม จะกีดกันไม่ให้อะตอมไนโตรเจนสัมผัสกับน้ำโลหะด้วยเช่นกัน

4.2.2 โครงสร้างจุลภาคของเนื้อโลหะรอยเชื่อมบริเวณกระทบร้อน (Heat Affected Zone : HAZ)

จากการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของเนื้อโลหะรอยเชื่อมบริเวณกระทบร้อน พบว่า เมื่อเติมก๊าซไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอนที่ส่วนผสมต่างๆกัน ลักษณะของเคลด้าเฟอร์ไรท์เกาะกันเป็นกลุ่มก้อน โดยเมื่อเชื่อมทิกภายใต้ก๊าซปกคลุมอาร์กอน 100 เปอร์เซ็นต์ พบว่า มีปริมาณเคลด้าเฟอร์ไรท์เป็น 12.02 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ลักษณะของเคลด้าเฟอร์ไรท์เกาะกันเป็นกลุ่ม ความหนาแน่นของเคลด้าเฟอร์ไรท์สูง และไม่เกิด inclusion เมื่อเติมก๊าซไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอน 1 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร มีปริมาณเคลด้าเฟอร์ไรท์เพิ่มขึ้นเป็น 13.69 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ลักษณะของเคลด้าเฟอร์ไรท์เกาะกันเป็นกลุ่ม ความหนาแน่นของเคลด้าเฟอร์ไรท์สูง และไม่เกิด inclusion เมื่อเติมก๊าซไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอน 2 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร มีปริมาณเคลด้าเฟอร์ไรท์เพิ่มขึ้นเป็น 14.16 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ลักษณะของเคลด้าเฟอร์ไรท์มีการกระจายตัวออกเป็นสายเล็กๆ แต่ก็ยังมีบางส่วนที่เกาะกันเป็นกลุ่มอยู่บ้าง ความหนาแน่นของเคลด้าเฟอร์ไรท์ปานกลาง และไม่เกิด inclusion เมื่อเติมก๊าซไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอน 3 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร มีปริมาณเคลด้าเฟอร์ไรท์เพิ่มขึ้นเป็น 14.38 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ลักษณะของเคลด้าเฟอร์ไรท์เกาะกันเป็นกลุ่ม ความหนาแน่นของเคลด้าเฟอร์ไรท์สูง และไม่เกิด inclusion เมื่อเติมก๊าซไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอน 4 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร มีปริมาณเคลด้าเฟอร์ไรท์เพิ่มขึ้นเป็น 14.34 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ลักษณะของเคลด้าเฟอร์ไรท์เกาะกันเป็นกลุ่ม ความหนาแน่นของเคลด้าเฟอร์ไรท์สูง และไม่เกิด inclusion เมื่อเติมก๊าซไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอน 5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร มีปริมาณเคลด้าเฟอร์ไรท์เพิ่มขึ้นเป็น 15.28 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ลักษณะของเคลด้าเฟอร์ไรท์เกาะกันเป็นกลุ่ม ความหนาแน่นของเคลด้าเฟอร์ไรท์ลดลงเล็กน้อย และไม่เกิด inclusion เมื่อเติมก๊าซไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอน 6 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร มีปริมาณเคลด้าเฟอร์ไรท์เพิ่มขึ้นเป็น 16.16 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ลักษณะของเคลด้าเฟอร์ไรท์เกาะกันเป็นกลุ่ม ความหนาแน่นของเคลด้าเฟอร์ไรท์ปานกลาง และเริ่มมี inclusion เล็กน้อย เมื่อเติมก๊าซไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอน 7 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร มีปริมาณเคลด้าเฟอร์ไรท์ 16.09 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ลักษณะของเคลด้าเฟอร์ไรท์เกาะกันเป็นกลุ่ม ความหนาแน่นของเคลด้าเฟอร์ไรท์ปานกลาง และเกิด inclusion เล็กน้อย เมื่อเติมก๊าซไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอน 8 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร มีปริมาณเคลด้าเฟอร์ไรท์เพิ่มขึ้นเป็น 18.88 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ลักษณะของเคลด้าเฟอร์ไรท์เกาะกันเป็นกลุ่ม ความหนาแน่นของเคลด้าเฟอร์ไรท์สูง และเกิด inclusion เพิ่มขึ้นกว่าเดิม เมื่อเติมก๊าซไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอน 9 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร มีปริมาณเคลด้าเฟอร์ไรท์ 16.78 เปอร์เซ็นต์โดย

ปริมาตร ลักษณะของเคลด้าเฟอร์ไรท์เกาะกันเป็นกลุ่ม ความหนาแน่นของเคลด้าเฟอร์ไรท์ปานกลาง และเกิด inclusion ปานกลาง

จะสังเกตได้ว่า เมื่อเติมก๊าซไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอน ตั้งแต่ 0 ถึง 9 เปอร์เซ็นต์ โดยปริมาตร ซึ่งเป็นรอยเชื่อมที่ผ่านมาตรฐาน DIN 8563 นั้น มีปริมาณเคลด้าเฟอร์ไรท์เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ตั้งแต่ 12.02 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรซึ่งเป็นปริมาณที่น้อยที่สุด จนถึง 18.88 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ซึ่งเป็นปริมาณที่มากที่สุด แสดงดังตารางที่ 4.5 เมื่อเติมก๊าซไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอนตั้งแต่ 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรเป็นต้นไป เป็นรอยเชื่อมที่ไม่ผ่านมาตรฐาน DIN 8563 พบว่า เมื่อเติมก๊าซไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอน 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร มีปริมาณเคลด้าเฟอร์ไรท์ 12.26 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ลักษณะของเคลด้าเฟอร์ไรท์เกาะกันเป็นกลุ่ม ความหนาแน่นของเคลด้าเฟอร์ไรท์สูง และเกิด inclusion ปานกลาง เมื่อเติมก๊าซไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอน 15 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร มีปริมาณเคลด้าเฟอร์ไรท์ 12.47 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ลักษณะของเคลด้าเฟอร์ไรท์เกาะกันเป็นกลุ่ม ความหนาแน่นของเคลด้าเฟอร์ไรท์ต่ำ และเกิด inclusion สูง เมื่อเติมก๊าซไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอน 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร มีปริมาณเคลด้าเฟอร์ไรท์ 10.45 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ลักษณะของเคลด้าเฟอร์ไรท์เริ่มกระจายตัวออกเป็นสายสั้นๆ ความหนาแน่นของเคลด้าเฟอร์ไรท์ต่ำ และเกิด inclusion สูง เมื่อเติมก๊าซไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอน 25 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร มีปริมาณเคลด้าเฟอร์ไรท์ 10.29 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ลักษณะของเคลด้าเฟอร์ไรท์กระจายตัวออกเป็นสายสั้นๆ ความหนาแน่นของเคลด้าเฟอร์ไรท์ต่ำ และเกิด inclusion สูง เมื่อเติมก๊าซไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอน 30 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร มีปริมาณเคลด้าเฟอร์ไรท์เพิ่มขึ้นเป็น 14.24 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ลักษณะของเคลด้าเฟอร์ไรท์เกาะกันเป็นกลุ่ม ความหนาแน่นของเคลด้าเฟอร์ไรท์สูง และเกิด inclusion สูง เมื่อเติมก๊าซไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอน 35 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร มีปริมาณเคลด้าเฟอร์ไรท์ 11.76 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ลักษณะของเคลด้าเฟอร์ไรท์เกาะกันเป็นกลุ่ม ความหนาแน่นของเคลด้าเฟอร์ไรท์ปานกลาง และเกิด inclusion ปานกลาง เมื่อเติมก๊าซไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอน 40 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร มีปริมาณเคลด้าเฟอร์ไรท์ 12.52 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ลักษณะของเคลด้าเฟอร์ไรท์เกาะกันเป็นกลุ่ม ความหนาแน่นของเคลด้าเฟอร์ไรท์สูง และเกิด inclusion สูง และเมื่อเชื่อมทิกโดยใช้ก๊าซไนโตรเจนเป็นก๊าซปกคลุมอาร์กอน 100 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร มีปริมาณเคลด้าเฟอร์ไรท์ลดลงเหลือเพียง 2.54 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร เกิดโครงสร้างเคลด้าเฟอร์ไรท์น้อยมาก ความหนาแน่นของเคลด้าเฟอร์ไรท์ต่ำมาก และเกิด inclusion สูง

เติมไนโตรเจนปริมาณ 0 ถึง 9 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร เป็นรอยเชื่อมผ่านมาตรฐาน DIN 8563 แสดงดังรูปที่ 4.3 จากการวิเคราะห์โดยใช้กราฟ จะเห็นว่า ปริมาณเคลดดำเฟอร์ไรท์ ในบริเวณ Fusion Zone มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อลากเส้นสมมติตัดผ่าน จะได้สมการดังนี้

$$Y = 0.58X + 12.58 : R^2 = 0.84$$

Y คือ เปอร์เซ็นต์เคลดดำเฟอร์ไรท์โดยปริมาตร (Vol.%)

X คือ ปริมาณก๊าซไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอนโดยปริมาตร (Vol.%)

เติมไนโตรเจนปริมาณ 10, 15, 20, 25, 30, 35 และ 40 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร เป็นรอยเชื่อมไม่ผ่านมาตรฐาน DIN 8563 แสดงดังรูปที่ 4.4 จากการวิเคราะห์โดยใช้กราฟ จะเห็นว่า ปริมาณเคลดดำเฟอร์ไรท์ในบริเวณ Fusion Zone ไม่มีความสัมพันธ์กับปริมาณก๊าซไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอน อย่างมีนัยสำคัญ เมื่อลากเส้นสมมติตัดผ่าน จะได้สมการดังนี้

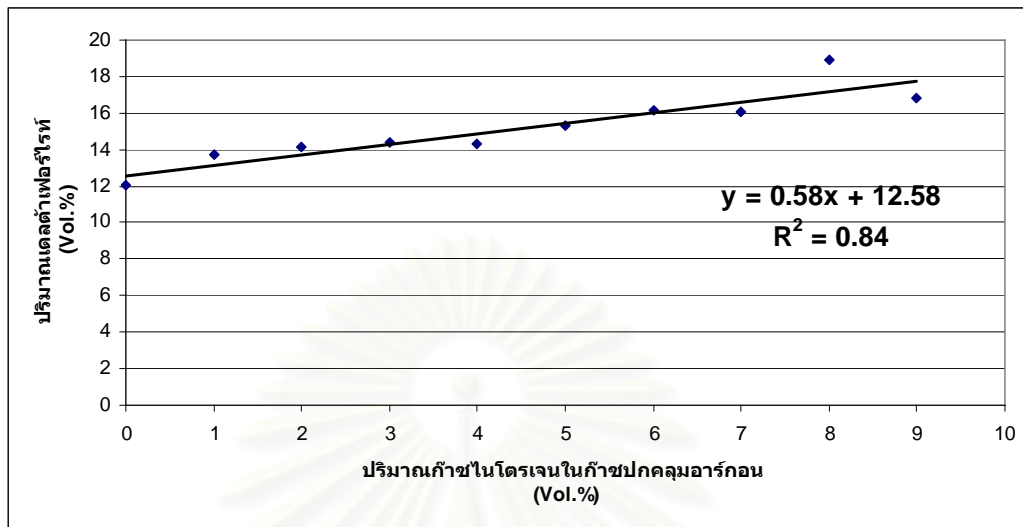
$$Y = 0.02X + 11.44 : R^2 = 0.03$$

Y คือ เปอร์เซ็นต์เคลดดำเฟอร์ไรท์โดยปริมาตร (Vol.%)

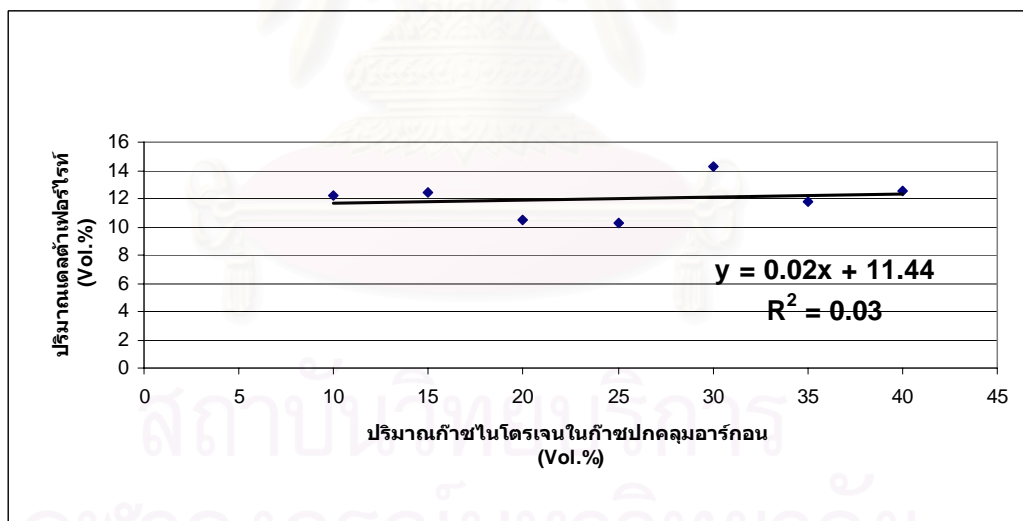
X คือ ปริมาณก๊าซไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอนโดยปริมาตร (Vol.%)

เนื่องจาก ค่า R^2 มีค่าต่ำมาก จึงไม่เหมาะสมที่จะนำไปใช้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง ปริมาณเคลดดำเฟอร์ไรท์บริเวณ HAZ และปริมาณก๊าซไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอนที่ผ่านมาตรฐาน DIN 8563

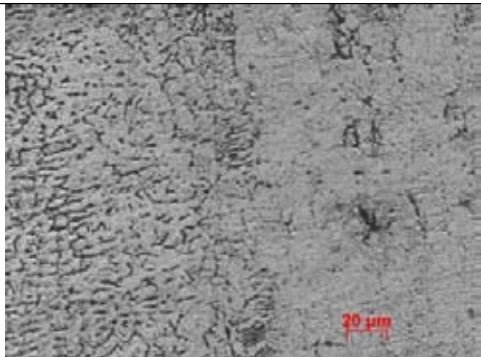
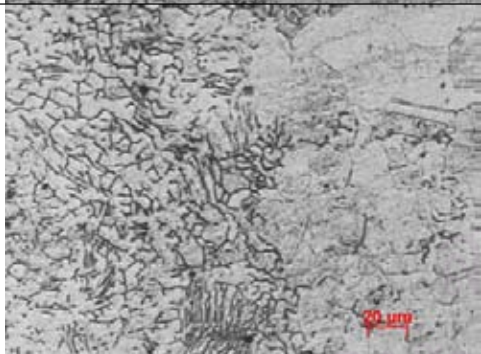


รูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ปริมาณเคลดดำเฟอร์ไรท์บริเวณ HAZ และปริมาณก๊าซไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอนที่ไม่ผ่านมาตรฐาน DIN 8563

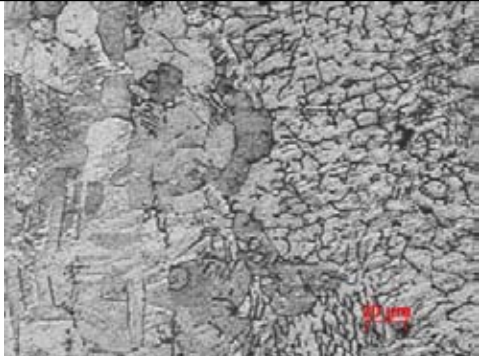
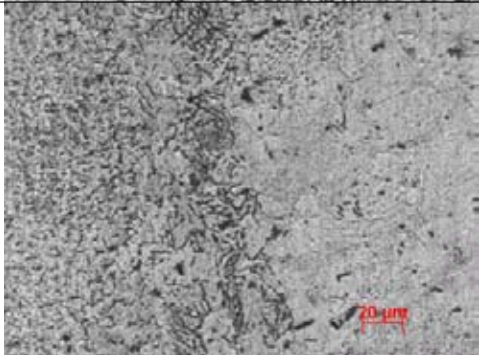
ตารางที่ 4.5 โครงสร้างจุลภาคเนื้อโลหะรอยเชื่อมบริเวณกระทบร้อน (Heat Affected Zone : HAZ)

ลำดับ	โครงสร้างจุลภาค (กำลังขยาย 200 เท่า)	เปอร์เซ็นต์ ไนโตรเจน (โดยปริมาตร)	เปอร์เซ็นต์ คาร์บอน (โดยปริมาตร)	ลักษณะของ คาร์บอน	ความหนาแน่นของ คาร์บอน	inclusion
1		0	12.02	เกาะกันเป็นกลุ่มก้อน	สูง	ไม่มี
2		1	13.69	เกาะกันเป็นกลุ่มก้อน	สูง	ไม่มี

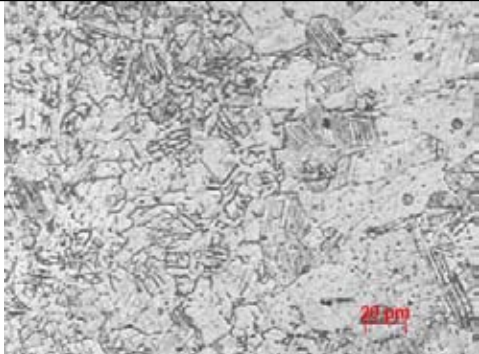
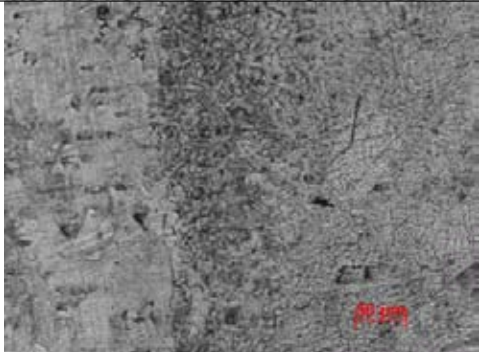
ตารางที่ 4.5(ต่อ) โครงสร้างจุลภาคเนื้อโลหะรอยเชื่อมบริเวณกระทบร้อน (Heat Affected Zone : HAZ)

ลำดับ	โครงสร้างจุลภาค (กำลังขยาย 200 เท่า)	เปอร์เซ็นต์ ไนโตรเจน (โดยปริมาตร)	เปอร์เซ็นต์ เคลต้าเฟอร์ไรท์ (โดยปริมาตร)	ลักษณะของ เคลต้าเฟอร์ไรท์	ความหนาแน่นของ เคลต้าเฟอร์ไรท์	inclusion
3		2	14.16	เกาะกันเป็นกลุ่มก้อน มีบางส่วนกระจายตัว ออกเป็นสายสั้นๆ	ปานกลาง	ไม่มี
4		3	14.38	เกาะกันเป็นกลุ่มก้อน	สูง	ไม่มี

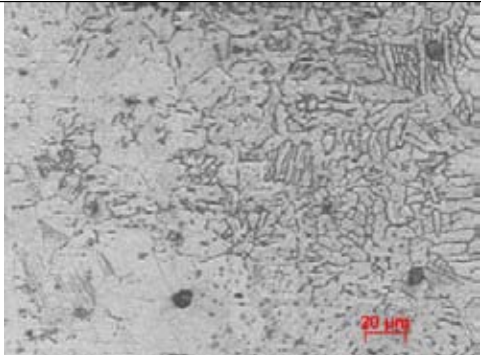

ตารางที่ 4.5(ต่อ) โครงสร้างจุลภาคเนื้อโลหะรอยเชื่อมบริเวณกระทบร้อน (Heat Affected Zone : HAZ)

ลำดับ	โครงสร้างจุลภาค (กำลังขยาย 200 เท่า)	เปอร์เซ็นต์ ไนโตรเจน (โดยปริมาตร)	เปอร์เซ็นต์ เคลต้าเฟอร์ไรท์ (โดยปริมาตร)	ลักษณะของ เคลต้าเฟอร์ไรท์	ความหนาแน่นของ เคลต้าเฟอร์ไรท์	inclusion
5		4	14.34	เกาะกันเป็นกลุ่มก้อน	สูง	ไม่มี
6		5	15.28	เกาะกันเป็นกลุ่มก้อน	ปานกลาง	ไม่มี

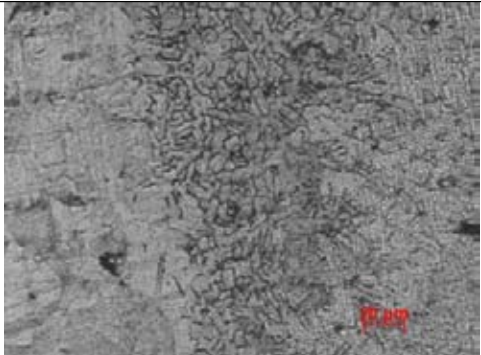
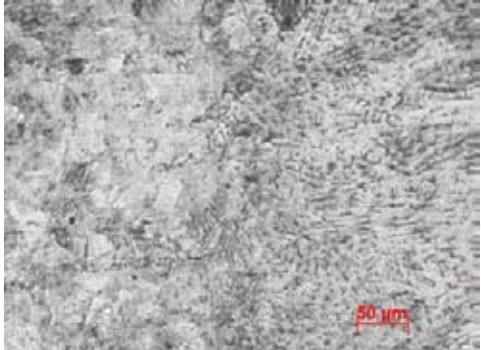
ตารางที่ 4.5(ต่อ) โครงสร้างจุลภาคเนื้อโลหะรอยเชื่อมบริเวณกระทบร้อน (Heat Affected Zone : HAZ)

ลำดับ	โครงสร้างจุลภาค (กำลังขยาย 200 เท่า และ 100 เท่า)	เปอร์เซ็นต์ ไนโตรเจน (โดยปริมาตร)	เปอร์เซ็นต์ เคลต้าเฟอร์ไรท์ (โดยปริมาตร)	ลักษณะของ เคลต้าเฟอร์ไรท์	ความหนาแน่นของ เคลต้าเฟอร์ไรท์	inclusion
7		6	16.16	เกาะกันเป็นกลุ่มก้อน	ปานกลาง	มีเล็กน้อย
8		7	16.09	เกาะกันเป็นกลุ่มก้อน	ปานกลาง	มีเล็กน้อย

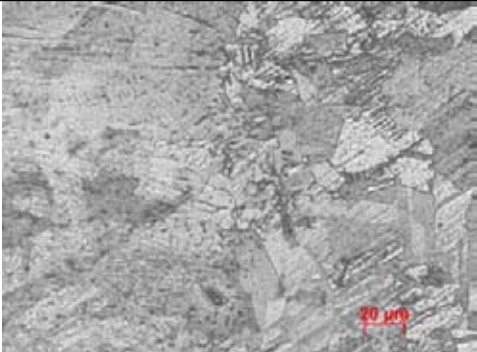
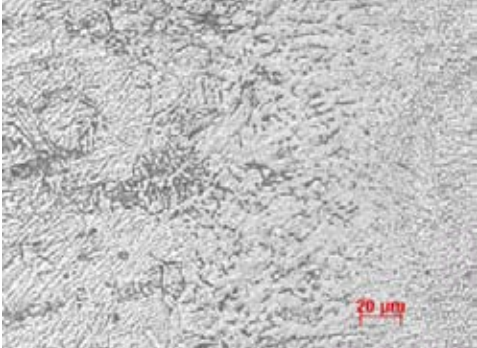
ตารางที่ 4.5(ต่อ) โครงสร้างจุลภาคเนื้อโลหะรอยเชื่อมบริเวณกระทบร้อน (Heat Affected Zone : HAZ)

ลำดับ	โครงสร้างจุลภาค (กำลังขยาย 200 เท่า)	เปอร์เซ็นต์ ไนโตรเจน (โดยปริมาตร)	เปอร์เซ็นต์ เคลต้าเฟอร์ไรท์ (โดยปริมาตร)	ลักษณะของ เคลต้าเฟอร์ไรท์	ความหนาแน่นของ เคลต้าเฟอร์ไรท์	inclusion
9		8	18.88	เกาะกันเป็นกลุ่มก้อน	สูง	ปานกลาง
10		9	16.78	เกาะกันเป็นกลุ่มก้อน	ปานกลาง	ปานกลาง

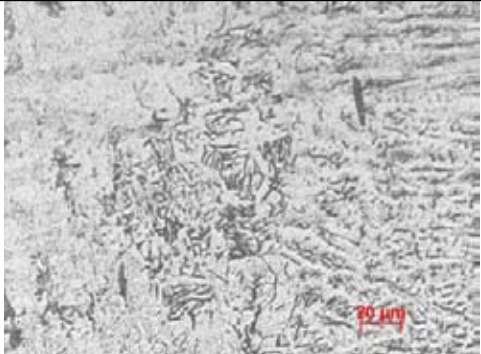
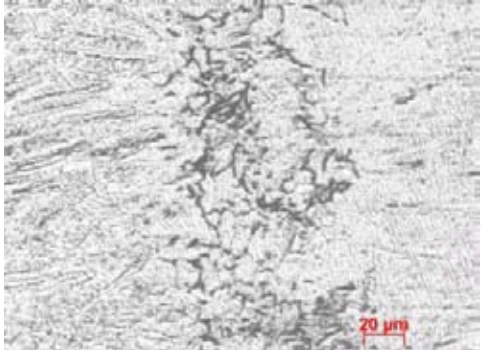
ตารางที่ 4.5(ต่อ) โครงสร้างจุลภาคเนื้อโลหะรอยเชื่อมบริเวณกระทบร้อน (Heat Affected Zone : HAZ)

ลำดับ	โครงสร้างจุลภาค (กำลังขยาย 200 เท่า และ 100 เท่า)	เปอร์เซ็นต์ ไนโตรเจน (โดยปริมาตร)	เปอร์เซ็นต์ เคลต้าเฟอร์ไรท์ (โดยปริมาตร)	ลักษณะของ เคลต้าเฟอร์ไรท์	ความหนาแน่นของ เคลต้าเฟอร์ไรท์	inclusion
11		10	12.26	เกาะกันเป็นกลุ่มก้อน	สูง	ปานกลาง
12		15	12.47	เกาะกันเป็นกลุ่มก้อน	ต่ำ	สูง

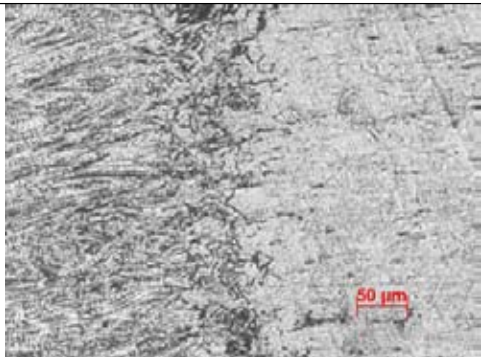

ตารางที่ 4.5(ต่อ) โครงสร้างจุลภาคเนื้อโลหะรอยเชื่อมบริเวณกระทบร้อน (Heat Affected Zone : HAZ)

ลำดับ	โครงสร้างจุลภาค (กำลังขยาย 200 เท่า)	เปอร์เซ็นต์ ไนโตรเจน (โดยปริมาตร)	เปอร์เซ็นต์ เคลต้าเฟอร์ไรท์ (โดยปริมาตร)	ลักษณะของ เคลต้าเฟอร์ไรท์	ความหนาแน่นของ เคลต้าเฟอร์ไรท์	inclusion
13		20	10.45	กระจายออกเป็นสาย สั้นๆ	ต่ำ	สูง
14		25	10.29	กระจายออกเป็นสาย สั้นๆ	ต่ำ	สูง

ตารางที่ 4.5(ต่อ) โครงสร้างจุลภาคเนื้อโลหะรอยเชื่อมบริเวณกระทบร้อน (Heat Affected Zone : HAZ)

ลำดับ	โครงสร้างจุลภาค (กำลังขยาย 200 เท่า)	เปอร์เซ็นต์ ไนโตรเจน (โดยปริมาตร)	เปอร์เซ็นต์ เคลต้าเฟอร์ไรท์ (โดยปริมาตร)	ลักษณะของ เคลต้าเฟอร์ไรท์	ความหนาแน่นของ เคลต้าเฟอร์ไรท์	inclusion
15		30	14.24	เกาะกันเป็นกลุ่มก้อน	สูง	สูง
16		35	11.76	เกาะกันเป็นกลุ่มก้อน และโครงสร้างเคลต้า เฟอร์ไรท์ที่มีขนาด ใหญ่ขึ้น	ปานกลาง	ปานกลาง

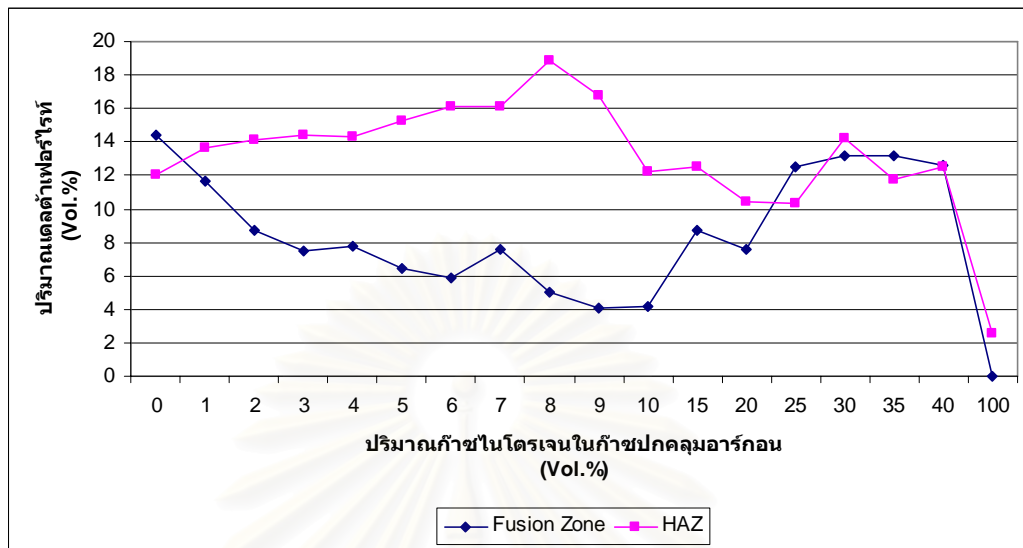
ตารางที่ 4.5(ต่อ) โครงสร้างจุลภาคเนื้อโลหะรอยเชื่อมบริเวณกระทบร้อน (Heat Affected Zone : HAZ)

ลำดับ	โครงสร้างจุลภาค (กำลังขยาย 100เท่าและ200 เท่า)	เปอร์เซ็นต์ ไนโตรเจน (โดยปริมาตร)	เปอร์เซ็นต์ เคลด้าเฟอร์ไรท์ (โดยปริมาตร)	ลักษณะของ เคลด้าเฟอร์ไรท์	ความหนาแน่นของ เคลด้าเฟอร์ไรท์	inclusion
17		40	12.52	เกาะกันเป็นกลุ่มก้อน	สูง	สูง
18		100	2.54	เกิดโครงสร้างเคลด้า เฟอร์ไรท์น้อยมาก	ต่ำมาก	สูง

เมื่อพิจารณาบริเวณกระทบร้อน (HAZ) ของรอยเชื่อมที่ผ่านมาตรฐาน DIN 8563 พบว่า เมื่อเติมไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอน เพิ่มมากขึ้น ทำให้ปริมาณเคลดดำเฟอร์ไรต์เพิ่มขึ้น มีสาเหตุมาจาก ไนโตรเจนช่วยเพิ่มปริมาณความร้อน (Heat input) ให้กับบริเวณเนื้อโลหะรอยเชื่อม (เมื่อพิจารณาค่า Thermal Conductivity ของไนโตรเจนมีค่า 64.7 ซึ่งมากกว่าของอาร์กอนที่มีค่า 45.9) โลหะหลอมเหลวจะมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น เมื่อมีการเย็นตัวจะใช้เวลาในการเย็นตัวไม่เหมาะสม เคลดดำเฟอร์ไรต์จึงมีโอกาสก่อกตัวเป็นรูปร่าง ทำให้มีปริมาณเคลดดำเฟอร์ไรต์เพิ่มขึ้น จากหนังสือ Metallurgy of welding ได้กล่าวไว้ว่า เมื่อปริมาณเคลดดำเฟอร์ไรต์เพิ่มมากขึ้นจะทำให้มีโอกาสเกิดการแตกร้าวขณะร้อน (Hot Crack) เพิ่มขึ้น โดยการแตกร้าวนั้นมักจะเกิดตามขอบเกรนและวิ่งเข้าไปในบริเวณกระทบร้อน

เมื่อพิจารณาบริเวณกระทบร้อน (HAZ) ของรอยเชื่อมที่ไม่ผ่านมาตรฐาน DIN 8563 พบว่า ไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอน ไม่มีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญ กับปริมาณเคลดดำเฟอร์ไรต์ อาจมีสาเหตุมาจาก การเติมไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอนในปริมาณที่มากเกินไป ทำให้ขาดคุณสมบัติของก๊าซปกคลุมที่ต้องช่วยปกคลุมรอยเชื่อมจากสภาพแวดล้อมภายนอก จนเกิด Slag ปริมาณมาก ไนโตรเจนมีความหนาแน่นน้อยกว่าอาร์กอนส่งผลให้มีความสามารถในการปกคลุมบ่อน้ำโลหะรอยเชื่อมได้น้อยกว่า จึงสามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้

เมื่อเปรียบเทียบปริมาณเคลดดำเฟอร์ไรต์ทั้งบริเวณ Fusion Zone และ HAZ จะเห็นได้ว่า มีเพียง 4 ส่วนผสมที่ปริมาณเคลดดำเฟอร์ไรต์ในบริเวณ Fusion Zone มากกว่า บริเวณ HAZ นั่นคือการเติมไนโตรเจน 0, 25, 35 และ 40 ในก๊าซอาร์กอนโดยปริมาตร ดังรูปที่ 4.5 โดยปกติแล้ว ปริมาณเคลดดำเฟอร์ไรต์ในบริเวณ Fusion Zone จะน้อยกว่าในบริเวณ HAZ เนื่องจาก บริเวณ Fusion Zone เป็นบริเวณที่มีการอาร์คโดยตรง โลหะพื้นจะถูกทำให้หลอมเหลว ก๊าซไนโตรเจนสามารถละลายในน้ำโลหะได้ในสถานะอะตอม ทำให้ก๊าซไนโตรเจนสามารถละลายได้ดีในบริเวณ Fusion Zone ทำให้มีปริมาณเคลดดำเฟอร์ไรต์น้อยกว่าบริเวณ HAZ แต่ที่การเติมไนโตรเจน 25, 35 และ 40 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร นั้น ความหนาแน่นของปริมาณเคลดดำเฟอร์ไรต์ ณ จุดที่เลือกมานั้น มีมากกว่า อาจเป็นเพราะบริเวณนั้นมีการอัตราเย็นตัวของเนื้อโลหะเร็วกว่าบริเวณข้างเคียง ทำให้มีโอกาสเกิดเคลดดำเฟอร์ไรต์หนาแน่นกว่าบริเวณอื่นๆ ซึ่งมีโอกาสเกิดขึ้นได้ ผลต่างระหว่างปริมาณเคลดดำเฟอร์ไรต์บริเวณ Fusion Zone มีค่ามากกว่า HAZ เป็นจำนวน 2.43, 1.43 และ 0.04 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ตามลำดับ



รูปที่ 4.5 เปรียบเทียบปริมาณเคลด้าเฟอร์ไรท์ระหว่างบริเวณ Fusion Zone และ HAZ

4.3 การละลายของไนโตรเจนในเนื้อโลหะ

ผลการวิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจนในแก๊สปกคลุมและปริมาณไนโตรเจนที่ละลายอยู่ในเนื้อโลหะรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก เกรด 304 L แสดงดังภาคผนวก ข. เติมแก๊สไนโตรเจนในแก๊สปกคลุมอาร์กอน ตั้งแต่ 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 และ 9 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรแสดงดังตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.6จากการวิเคราะห์โดยใช้กราฟ จะเห็นได้ว่า เมื่อเติมไนโตรเจนในแก๊สปกคลุมอาร์กอนเพิ่มขึ้นส่งผลให้มีไนโตรเจนละลายในเนื้อโลหะเพิ่มมากขึ้นเช่นกัน เมื่อลากเส้นสมมติตัดผ่าน จะได้สมการดังนี้

$$Y = 0.0033X + 0.05; R^2 = 0.81$$

Y คือ ไนโตรเจนในเนื้อโลหะ (Wt.%)

X คือ ปริมาณไนโตรเจนในแก๊สปกคลุม (Vol.%)

ส่วนการวิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจนในแก๊สปกคลุมอาร์กอน ตั้งแต่ 10, 15, 20, 25, 30, 35 และ 40 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรแสดงดังตารางที่ 4.7 และรูปที่ 4.7 จากการวิเคราะห์โดยใช้กราฟ จะเห็นได้ว่า จะเห็นได้ว่า เมื่อเติมไนโตรเจนในแก๊สปกคลุมอาร์กอนไม่มีความสัมพันธ์กับไนโตรเจนละลายในเนื้อโลหะอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อลากเส้นสมมติตัดผ่าน จะได้สมการดังนี้

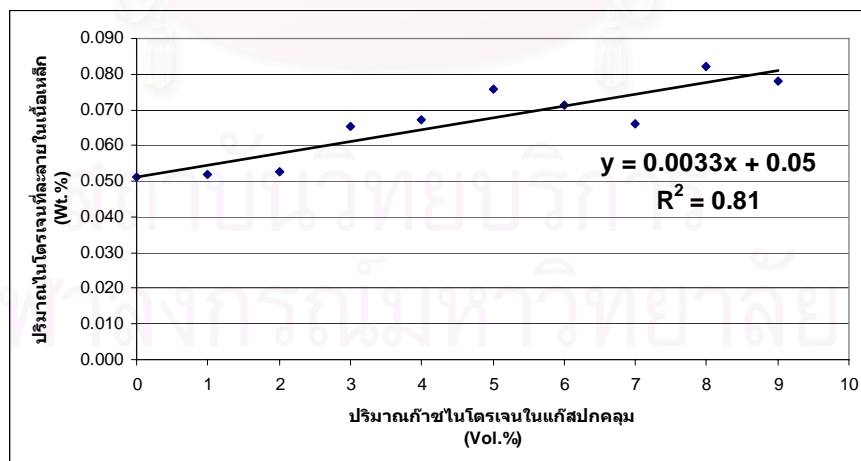
$$Y = 0.0009X + 0.07 : R^2 = 0.21$$

Y คือ ไนโตรเจนในเนื้อโลหะ (Wt.%)

X คือ ปริมาณไนโตรเจนในก๊าซปกคลุม (Vol.%)

ตารางที่ 4.6 ไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอนและปริมาณไนโตรเจนในเนื้อโลหะ(Wt.%) ที่ผ่านมาตรฐานการเชื่อม DIN 8563

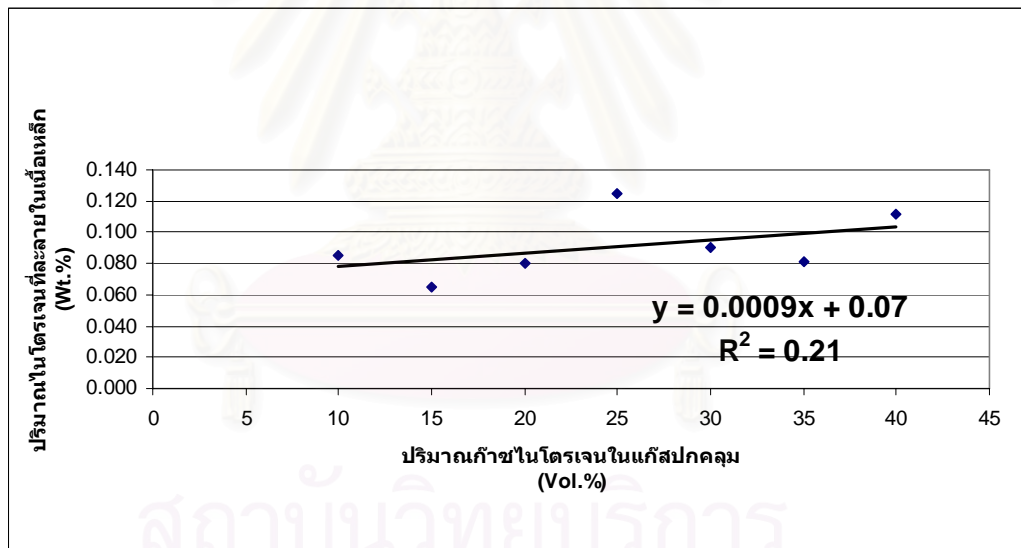
ไนโตรเจนใน ก๊าซปกคลุม (Vol.%)	ไนโตรเจนใน เนื้อโลหะ (Wt.%)	ไนโตรเจนใน ก๊าซปกคลุม (Vol.%)	ไนโตรเจนใน เนื้อโลหะ (Wt.%)
โลหะพื้น	0.044	5	0.076
0	0.051	6	0.071
1	0.052	7	0.066
2	0.053	8	0.082
3	0.065	9	0.078
4	0.067		



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ของไนโตรเจนในก๊าซปกคลุม(Vol.%) กับปริมาณไนโตรเจนในเนื้อโลหะรอยเชื่อม(Wt.%) ที่ผ่านมาตรฐานการเชื่อม DIN 8563

ตารางที่ 4.7 ไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอนและปริมาณไนโตรเจนในเนื้อโลหะ(Wt.%) ที่ไม่ผ่านมาตรฐานการเชื่อม DIN 8563

ไนโตรเจนใน ก๊าซปกคลุม (Vol.%)	ไนโตรเจนใน เนื้อโลหะ (Wt.%)	ไนโตรเจนใน ก๊าซปกคลุม (Vol.%)	ไนโตรเจนใน เนื้อโลหะ (Wt.%)
10	0.085	30	0.09
15	0.065	35	0.081
20	0.081	40	0.111
25	0.125	100	0.175



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ของไนโตรเจนในก๊าซปกคลุม(Vol.%) กับ ปริมาณไนโตรเจนในเนื้อโลหะรอยเชื่อม(Wt.%) ที่ไม่ผ่านมาตรฐานการเชื่อม DIN 8563

ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของไนโตรเจนในก๊าซปกคลุม กับ ปริมาณไนโตรเจนในเนื้อโลหะรอยเชื่อม(Wt.%) ที่ผ่านมาตรฐานการเชื่อม DIN 8563 พบว่า การเติมไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอน สามารถช่วยเพิ่มปริมาณไนโตรเจนในเนื้อโลหะรอยเชื่อมได้สอดคล้องกับการทดลองของ OGAWA et al. มีสาเหตุมาจาก ไนโตรเจนสามารถละลายเข้าไปในเนื้อโลหะ เป็น

การละลายชนิดการละลายแบบแทรกที่ (Interstitial solid solution) จะเกิดขึ้นเมื่อธาตุที่ละลายเข้าไปนั้น มีอะตอมขนาดเล็ก

ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของไนโตรเจนในก๊าซปกคลุม กับ ปริมาณไนโตรเจนในเนื้อโลหะรอยเชื่อม (Wt.%) ที่ไม่ผ่านมาตรฐานการเชื่อม DIN 8563 พบว่า การเติมไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอนไม่มีความสัมพันธ์กับปริมาณไนโตรเจนที่ละลายในเนื้อโลหะรอยเชื่อม เป็นเพราะ การเติมไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอนในปริมาณที่มากเกินไป ทำให้ขาดคุณสมบัติของก๊าซปกคลุมที่ต้องช่วยปกคลุมรอยเชื่อมจากสภาพแวดล้อมภายนอก จนเกิด Slag ปริมาณมาก ไนโตรเจนมีความหนาแน่นน้อยกว่าอาร์กอนส่งผลให้มีความสามารถในการปกคลุมบ่อน้ำโลหะรอยเชื่อมได้น้อยกว่า จึงสามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้

ในการทดลองนี้เมื่อเชื่อมทิกโดยการใช้อากาศปกคลุมอาร์กอนบริสุทธิ์พบว่า ปริมาณไนโตรเจนในเนื้อโลหะรอยเชื่อมสูงกว่าโลหะพื้น (ปริมาณไนโตรเจนของโลหะพื้นมีค่าเท่ากับ 0.044 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แต่ปริมาณไนโตรเจนในเนื้อโลหะรอยเชื่อมเท่ากับ 0.051 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) อาจเป็นเพราะในขณะที่เชื่อมทิกจะมีก๊าซไนโตรเจนจากสภาวะแวดล้อม ถูกดูดซับเข้าไปในเนื้อโลหะรอยเชื่อมได้ดังรูปที่ 4.8

4.4 ผลของไนโตรเจนที่ละลายในเนื้อโลหะต่อปริมาณเคลด้าเฟอร์ไรท์

ผลการวิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจนที่ละลายอยู่ในเนื้อโลหะรอยเชื่อม และปริมาณเคลด้าเฟอร์ไรท์ของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก เกรด 304L เติมก๊าซไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอน ตั้งแต่ 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 และ 9 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรแสดงดังตารางที่ 4.8 และรูปที่ 4.8 จากการวิเคราะห์โดยใช้กราฟ จะเห็นได้ว่า เมื่อไนโตรเจนในเนื้อโลหะเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ปริมาณเคลด้าเฟอร์ไรท์ลดลง เมื่อลากเส้นสมมติตัดผ่าน จะได้สมการดังนี้

$$Y = -248.82X + 24.35: R^2 = 0.80$$

Y คือ ปริมาณเคลด้าเฟอร์ไรท์ (Vol.%)

X คือ ไนโตรเจนในเนื้อโลหะ (Wt.%)

ส่วนการวิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอน ตั้งแต่ 10, 15, 20, 25, 30, 35 และ 40 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรแสดงดังตารางที่ 4.9 และรูปที่ 4.9 จากการวิเคราะห์โดยใช้

กราฟ จะเห็นได้ว่า เมื่อไนโตรเจนในเนื้อโลหะไม่มีความสัมพันธ์กับปริมาณเคลด้าเฟอร์ไรต์อย่างมีนัยสำคัญ เมื่อลากเส้นสมมติตัดผ่าน จะได้สมการดังนี้

$$Y = 78.76X + 03.08: R^2 = 0.21$$

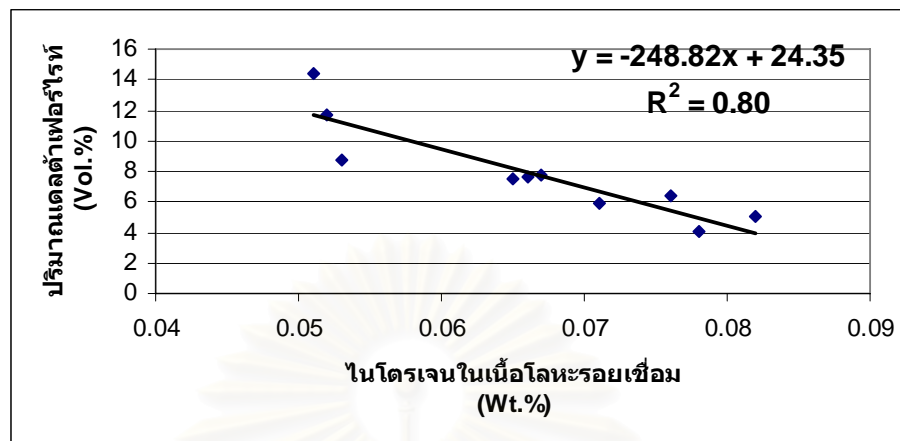
Y คือ ปริมาณเคลด้าเฟอร์ไรต์ (Vol.%)

X คือ ไนโตรเจนในเนื้อโลหะ (Wt.%)

เนื่องจาก ค่า R^2 มีค่าต่ำมาก จึงไม่เหมาะสมที่จะนำไปใช้

ตารางที่ 4.8 ปริมาณไนโตรเจนในเนื้อโลหะ (Wt.%) และ ปริมาณเคลด้าเฟอร์ไรต์ (Vol.%) ที่ผ่านมาตรฐานการเชื่อม DIN 8563

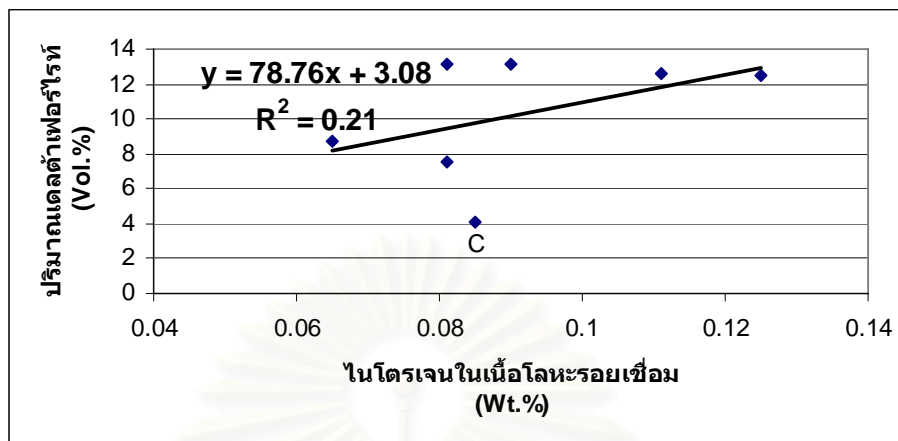
ไนโตรเจนใน ก๊าซปกคลุม (Vol.%)	ไนโตรเจน ในเนื้อโลหะ (Wt.%)	ปริมาณเคลด้า เฟอร์ไรต์ (Vol.%)
โลหะพื้น	0.044	-
0	0.051	14.39
1	0.052	11.70
2	0.053	8.70
3	0.065	7.48
4	0.067	7.80
5	0.076	6.42
6	0.071	5.86
7	0.066	7.58
8	0.082	4.99
9	0.078	4.09



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ของปริมาณไนโตรเจนในเนื้อโลหะรอยเชื่อม (Wt.%) และปริมาณเดลต้าเฟอร์ไรท์ (Vol.%) ที่ผ่านมาตรฐานการเชื่อม DIN 8563

ตารางที่ 4.9 ปริมาณไนโตรเจนในเนื้อโลหะ (Wt.%) และ ปริมาณเดลต้าเฟอร์ไรท์ (Vol.%) ที่ไม่ผ่านมาตรฐานการเชื่อม DIN 8563

ไนโตรเจนใน แก๊สปกคลุม (Vol.%)	ไนโตรเจน ในเนื้อโลหะ (Wt.%)	ปริมาณเดลต้า เฟอร์ไรท์ (Vol.%)
10	0.085	4.13
15	0.065	8.71
20	0.081	7.59
25	0.125	12.52
30	0.090	13.14
35	0.081	13.19
40	0.111	12.56
100	0.175	0.00



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ของปริมาณไนโตรเจนในเนื้อโลหะรอยเชื่อม (Wt.%) และปริมาณเดลต้าเฟอร์ไรท์ (Vol.%) ที่ไม่ผ่านมาตรฐานการเชื่อม DIN 8563

ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของปริมาณไนโตรเจนในเนื้อโลหะรอยเชื่อม (Wt.%) และปริมาณเดลต้าเฟอร์ไรท์ (Vol.%) ที่ผ่านมาตรฐานการเชื่อม DIN 8563 พบว่า มีความสอดคล้องกันคือ ปริมาณไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอนที่เพิ่มขึ้นนั้น ทำให้ปริมาณไนโตรเจนในเนื้อโลหะเพิ่มมากขึ้น ซึ่งส่งผลให้ปริมาณเดลต้าเฟอร์ไรท์ในเนื้อโลหะรอยเชื่อมลดลง นั่นหมายความว่า อะตอมของไนโตรเจนสามารถละลายลงในเนื้อโลหะรอยเชื่อมได้ โดยไม่เกิด defect อื่นๆ ตามมา

แต่ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของปริมาณไนโตรเจนในเนื้อโลหะรอยเชื่อม (Wt.%) และปริมาณเดลต้าเฟอร์ไรท์ (Vol.%) ที่ไม่ผ่านมาตรฐานการเชื่อม DIN 8563 พบว่า ปริมาณไนโตรเจนในเนื้อโลหะรอยเชื่อมไม่มีความสัมพันธ์กับปริมาณเดลต้าเฟอร์ไรท์อย่างมีนัยสำคัญ เหตุผลเพราะการเติมไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอนในปริมาณที่มากเกินไป จนเกิด Slag ปริมาณมากนั่นเอง

4.5 ความแข็งผิวชิ้นงาน

หลังจากผ่านกระบวนการเชื่อมโดยเติมไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอน วัดความแข็งของชิ้นงานโดยเครื่องวัดความแข็งร็อคเวลล์ ใช้หัวเพชรน้ำหนักรวด 100 กิโลกรัม อยู่ในระดับ Hardness Rockwell Scale D (HRD.) ความแข็งผิวของโลหะพื้นมีค่า 27.33 HRD.

ผลการวิเคราะห์ค่าความแข็งของชิ้นงานและการเติมไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอน รอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก เกรด 304L เติมก๊าซไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอน ตั้งแต่ 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 และ 9 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรแสดงดังตารางที่ 4.9 และรูปที่ 4.9 จากการวิเคราะห์โดยใช้กราฟ จะเห็นได้ว่า ไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอนไม่มีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญต่อความแข็งผิวของชิ้นงาน เมื่อลากเส้นสมมติตัดผ่าน จะได้สมการ ดังนี้

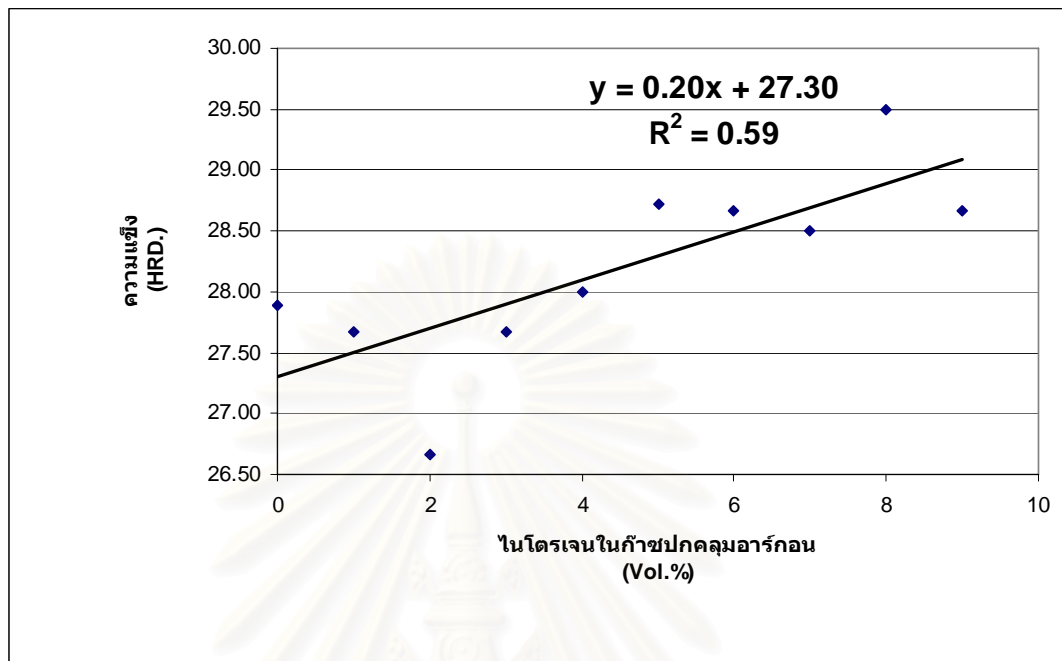
$$Y = 0.20X + 27.30 : R^2 = 0.59$$

Y คือ ปริมาณไนโตรเจนในก๊าซปกคลุม (Vol.%)

X คือ ความแข็ง (HRD.)

ตารางที่ 4.10 ปริมาณไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอน (Vol.%) และ ค่าความแข็ง (HRD.) ที่ ผ่านมาตรฐานการเชื่อม DIN 8563

ไนโตรเจนใน ก๊าซปกคลุม (Vol.%)	จุดกึ่งกลางรอยเชื่อม Center line (HRD.)			3 มม. ทางซ้าย จาก Center line (HRD.)			3 มม. ทางขวา จาก Center line (HRD.)			เฉลี่ย
	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
0	26	26	27	27	29.5	29	28	29.5	29	27.89
1	26.5	27	27	27	28.5	28.5	28.5	28	28	27.67
2	26.5	26	27	26.5	27	28	26.5	24	28.5	26.67
3	26	26.5	27	28	28.5	28	28.5	28	28.5	27.67
4	28	27	27	28	28.5	27.5	29	28	29	28.00
5	27	29	28.5	28	29	29	29	29.5	29.5	28.72
6	28	27	29.5	28	29.5	29	28.5	29	29.5	28.67
7	29.5	28.5	28.5	27.5	28.5	28	28.5	29.5	28	28.50
8	30	28.5	30.5	28	30	28.5	29.5	30.5	30	29.50
9	29	30	29.5	29	28.5	28	27	28	29	28.67



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ของปริมาณไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอน (Vol.%) และค่าความแข็ง (HRD.) ที่ผ่านมาตรฐานการเชื่อม DIN 8563

ส่วนการวิเคราะห์ค่าความแข็งของชิ้นงานและการเติมไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอน ตั้งแต่ 10, 15, 20, 25, 30, 35 และ 40 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม ออสเทนนิติก เกรด 304L แสดงดังตารางที่ 4.11 และรูปที่ 4.11 จากการวิเคราะห์โดยใช้กราฟ จะเห็นได้ว่า จะเห็นได้ว่า ไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอนไม่มีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญความแข็งผิวของชิ้นงาน เมื่อลากเส้นสมมติตัดผ่าน จะได้สมการดังนี้

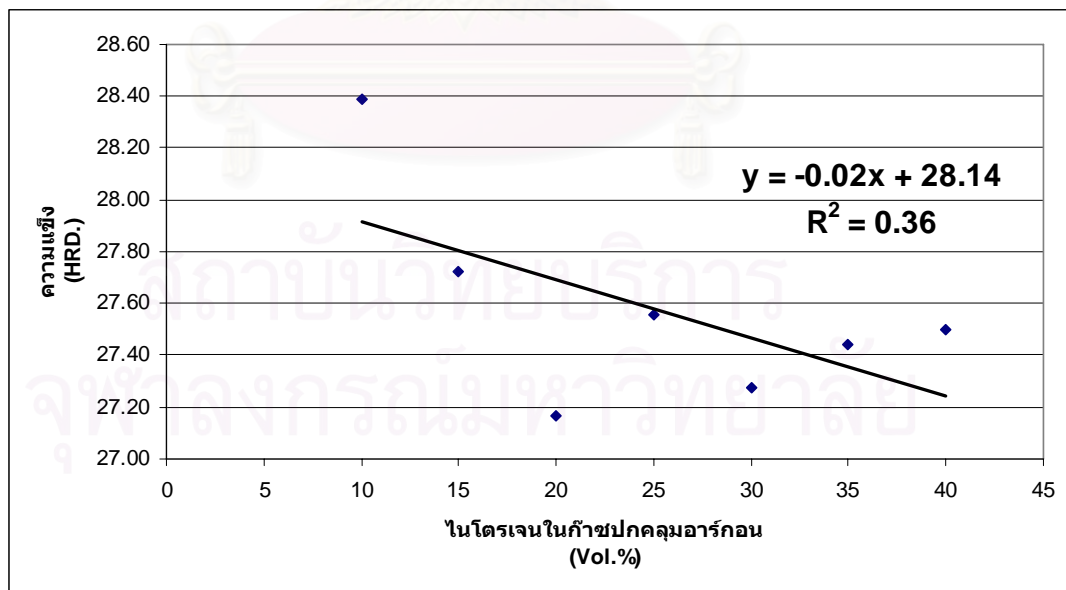
$$Y = -0.02X + 28.14; R^2 = 0.36$$

Y คือ ปริมาณไนโตรเจนในก๊าซปกคลุม (Vol.%)

X คือ ความแข็ง (HRD.)

ตารางที่ 4.11 ปริมาณไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอน (Vol.%) และ ค่าความแข็ง (HRD.) ที่ไม่ผ่านมาตรฐานการเชื่อม DIN 8563

ไนโตรเจน ในก๊าซปก คลุม (Vol.%)	จุดกึ่งกลางรอยเชื่อม Center line (HRD.)			3 มม. ทางซ้าย จาก Center line (HRD.)			3 มม. ทางขวา จาก Center line (HRD.)			เฉลี่ย
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
	10	29.5	26.5	29	29	29.5	29	27	28	
15	28.5	26	28	28	27.5	27	30	28.5	26	27.72
20	25	29	28.5	25	28	26.5	27	27.5	28	27.17
25	28	28.5	25	28	27.5	27	27	28	29	27.56
30	29	27	26.5	27	27.5	27	27	29	25.5	27.28
35	25	27.5	27.5	27	28	27.5	27.5	29	28	27.44
40	26	25.5	26.5	27.5	27	27.5	29	29	29.5	27.50
100	34	29	34	27	29	29	29	30	29	30.00



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ของปริมาณไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอน (Vol.%) และค่าความแข็ง (HRD.) ที่ไม่ผ่านมาตรฐานการเชื่อม DIN 8563

ผลการวิเคราะห์ค่าความแข็งของชิ้นงานและการเติมไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอน รอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก เกรด 304L ที่ผ่านมาตรฐานการเชื่อม DIN 8563 และ ไม่ผ่านมาตรฐานการเชื่อม DIN 8563 ถึงแม้ว่า ไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอนจะไม่มี ความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญความแข็งผิวของชิ้นงาน แต่ค่าความแข็งโดยเฉลี่ยของรอยเชื่อมโดย ส่วนใหญ่แล้ว มีค่ามากกว่าค่าความแข็งของโลหะพื้น อาจมีสาเหตุมาจาก หลังจากผ่าน กระบวนการเชื่อมโดยเติมไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอนนั้น ไนโตรเจนสามารถละลายเข้าไป ในเนื้อโลหะ เป็นการละลายชนิดการละลายแบบแทรกที่ (Interstitial solid solution) จะเกิดขึ้น เมื่อธาตุที่ละลายเข้าไปนั้น มีอะตอมขนาดเล็ก (มีอยู่ 4 ธาตุ คือ ไฮโดรเจนมีขนาดรัศมีของ อะตอม 0.12 นาโนเมตร ออกซิเจนมีขนาดรัศมีของอะตอม 0.14 นาโนเมตร ไนโตรเจนมีขนาด รัศมีของอะตอม 0.15 นาโนเมตร และคาร์บอนมีขนาดรัศมีของอะตอม 0.16 นาโนเมตร) เมื่อ ไนโตรเจนละลายเข้าไปแทรกที่แล้วนั้น จะทำให้โลหะมีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้น เพราะ ธาตุ ไนโตรเจนเมื่อแทรกที่อยู่ระหว่างอะตอมของธาตุอื่น ๆ นั้น เมื่ออะตอมของธาตุต่างๆเกิดการเลื่อน (Slip plane) เนื่องจากโดนแรงกระทำจากภายนอก ธาตุไนโตรเจนจะช่วยขัดขวางการเลื่อน ระหว่างอะตอม ทำให้ต้องออกแรงมากขึ้น เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า Solid solution hardening ซึ่ง สอดคล้องกับการทดลองของ Tseng, Chou ซึ่งทดลองเติมไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอน ตั้งแต่ 0 – 15% เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด 304 และ 310 พบว่า ช่วยทำให้ความแข็ง ที่ผิวชิ้นงานเพิ่มขึ้นจาก 180 Hv เป็น 230 Hv สำหรับเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 304 และ 167 Hv เป็น 210 Hv สำหรับเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 310

จากการทดลองทั้งหมด สามารถสรุปความสัมพันธ์ระหว่างไนโตรเจนในก๊าซปกคลุม อาร์กอน ต่อปริมาณเคลดดำเฟอร์ไรต์ในบริเวณ Fusion Zone และ HAZ ต่อปริมาณไนโตรเจนที่ ละลายในเนื้อโลหะ และค่าความแข็งผิวชิ้นงาน สำหรับรอยเชื่อมที่ผ่านมาตรฐาน DIN 8563 นั้น ได้ดังตารางที่ 4.12 ส่วนการเติมไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอน สำหรับรอยเชื่อมที่ไม่ผ่าน มาตรฐาน DIN 8563 นั้น สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.13

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.12 ตารางสรุปผลกระทบของการเติมไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอน รอยเชื่อมผ่านมาตรฐาน DIN 8563

การทดลอง	สมการ	R^2	ค่า Y	ค่า X	สาเหตุ	เทียบกับผลงานวิจัยอื่นๆ
โครงสร้างจุลภาคบริเวณ Fusion Zone	$Y = -0.92X + 12.03$	0.80	ปริมาณเคลด้าเฟอร์ไรท์	ไนโตรเจนในก๊าซปกคลุม	ไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมละลายในเนื้อโลหะ	1. สอดคล้องกับ Y.C. Lin และ P.Y.Chen 2. สอดคล้องกับ Hoffmeister et al. 3. สอดคล้องกับ Hertzman
โครงสร้างจุลภาคบริเวณ HAZ	$Y = 0.58X + 12.58$	0.84	ปริมาณเคลด้าเฟอร์ไรท์	ไนโตรเจนในก๊าซปกคลุม	ไนโตรเจนช่วยเพิ่มค่าความร้อน ทำให้มีการเย็นตัวไม่เหมาะสม	1. สอดคล้องกับ Y.C. Lin และ P.Y.Chen 2. สอดคล้องกับ Tseng และ Chou
ไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมต่อไนโตรเจนในเนื้อโลหะ	$Y = 0.0033X + 0.05$	0.81	ไนโตรเจนในเนื้อโลหะ	ไนโตรเจนในก๊าซปกคลุม	ไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมละลายในเนื้อโลหะ	1. สอดคล้องกับ Y.C. Lin และ P.Y.Chen 2. สอดคล้องกับ Tseng และ Chou 3. สอดคล้องกับ KIKUCHI
ไนโตรเจนในเนื้อโลหะต่อเคลด้าเฟอร์ไรท์	$Y = -248.82X + 24.35$	0.80	ปริมาณเคลด้าเฟอร์ไรท์	ไนโตรเจนในเนื้อโลหะ	ไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมละลายในเนื้อโลหะ	1. สอดคล้องกับ KIKUCHI 2. สอดคล้องกับ Hoffmeister et al.
ไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมต่อความแข็งผิว	$Y = 0.20X + 27.30$	0.59	ไนโตรเจนในก๊าซปกคลุม	ความแข็งผิว	เกิด Solid solution Hardening	สอดคล้องกับ Tseng และ Chou

ตารางที่ 4.13 ตารางสรุปผลกระทบของการเติมไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอน รอยเชื่อมไม่ผ่านมาตรฐาน DIN 8563

การทดลอง	สมการ	R^2	ค่า Y	ค่า X	สาเหตุ	เทียบกับผลงานวิจัยอื่นๆ
โครงสร้างจุลภาคบริเวณ Fusion Zone	$Y = 0.28X + 3.16$	0.76	ปริมาณเคลดดำ เฟอร์ไรต์	ไนโตรเจนใน ก๊าซปกคลุม	เติมไนโตรเจนมากเกินไป เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน	สอดคล้องกับ Hertzman
โครงสร้างจุลภาคบริเวณ HAZ	$Y = 0.02X + 11.44$	0.03	ปริมาณเคลดดำ เฟอร์ไรต์	ไนโตรเจนใน ก๊าซปกคลุม	เติมไนโตรเจนมากเกินไป เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน	สอดคล้องกับ Hertzman
ไนโตรเจนในก๊าซปกคลุม ต่อไนโตรเจนในเนื้อโลหะ	$Y = 0.0009X + 0.07$	0.21	ไนโตรเจนใน เนื้อโลหะ	ไนโตรเจนใน ก๊าซปกคลุม	เติมไนโตรเจนมากเกินไป เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน	สอดคล้องกับ Hertzman
ไนโตรเจนในเนื้อโลหะต่อ เคลดดำเฟอร์ไรต์	$Y = 78.76X + 03.08$	0.21	ปริมาณเคลดดำ เฟอร์ไรต์	ไนโตรเจนใน เนื้อโลหะ	เติมไนโตรเจนมากเกินไป เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน	สอดคล้องกับ Hertzman
ไนโตรเจนในก๊าซปกคลุม ต่อความแข็งผิว	$Y = -0.02X + 28.14$	0.36	ไนโตรเจนใน ก๊าซปกคลุม	ความแข็งผิว	เกิด Solid solution Hardening	สอดคล้องกับ Tseng และ Chou

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

ผลการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเตนนิติก เกรด 304L หนา 4 มิลลิเมตร ด้วยวิธีการเชื่อมทิก เติมก๊าซไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอน ตั้งแต่ 0-10, 15, 20, 25, 30, 35, 40 และ 100 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ผลการทดลองสรุปได้ดังนี้

1. รอยเชื่อมที่ผ่านมาตรฐาน DIN 8563 คือ รอยเชื่อมที่เติมก๊าซไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอนตั้งแต่ 0 เปอร์เซ็นต์จนถึง 9 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร
2. รอยเชื่อมที่ไม่ผ่านมาตรฐาน 8563 คือ รอยเชื่อมที่เติมก๊าซไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอน 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40 เปอร์เซ็นต์และ 100 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร
3. ไนโตรเจนเป็นธาตุที่ทำให้โครงสร้างออสเตนไนท์เสถียร การเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเตนนิติก เกรด 304 L ปริมาณเคลด้าเฟอร์ไรท์ในเนื้อโลหะรอยเชื่อมลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณก๊าซไนโตรเจนผสมในก๊าซปกคลุมอาร์กอนเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากเป็นการเพิ่มปริมาณการละลายของไนโตรเจนในเนื้อโลหะ
4. บริเวณหลอมละลาย (Fusion Zone) ของรอยเชื่อมที่ผ่านมาตรฐาน DIN 8563 พบว่า เมื่อเติมก๊าซไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอน 9 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ทำให้ปริมาณเคลด้าเฟอร์ไรท์ลดลงเหลือ 4.09 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร
5. บริเวณหลอมละลาย (Fusion Zone) ของรอยเชื่อมที่ไม่ผ่านมาตรฐาน DIN 8563 พบว่า เมื่อเติมก๊าซไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอน 100 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ทำให้ปริมาณเคลด้าเฟอร์ไรท์ลดลงต่ำที่สุด คือ ไม่มีเคลด้าเฟอร์ไรท์
6. บริเวณกระทบร้อน (Heat Affected Zone) ของรอยเชื่อมที่ผ่านมาตรฐาน DIN 8563 พบว่า เมื่อเติมก๊าซไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอนเพิ่มขึ้น ทำให้ปริมาณเคลด้าเฟอร์ไรท์เพิ่มขึ้น เพราะไนโตรเจนช่วยเพิ่มปริมาณความร้อน (Heat input) ให้กับบริเวณเนื้อโลหะรอยเชื่อม
7. ปริมาณเคลด้าเฟอร์ไรท์เพิ่มขึ้น ทำให้มีโอกาสเกิดการแตกร้าาขณะร้อน (Hot Crack) เพิ่มขึ้น แนวทางหนึ่งที่จะช่วยลดโอกาสเกิดการแตกร้าาขณะร้อน คือ การเติมไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมในปริมาณที่เหมาะสม

8. ไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอนทำให้มีปริมาณไนโตรเจนละลายในเนื้อโลหะเพิ่มมากขึ้น
9. ปริมาณไนโตรเจนละลายในเนื้อโลหะเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ปริมาณเคลด้าเฟอร์ไรต์ลดลง
10. ในการทดลองนี้ เมื่อพิจารณาจากปริมาณเคลด้าเฟอร์ไรต์บริเวณหลอมละลาย (Fusion Zone) และการเกิด Inclusion เป็นเกณฑ์ อาจจะเสนอได้ว่า การเติมไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอนที่เหมาะสมที่สุด คือ 5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร

5.2 ข้อเสนอแนะ

ผลการศึกษาในที่นี้สามารถใช้เป็นข้อมูล การเติมไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอนที่มีต่อปริมาณเคลด้าเฟอร์ไรต์ในกระบวนการเชื่อมทิกเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก เกรด 304 L ได้ และสามารถนำไปเป็นข้อมูลเบื้องต้น สำหรับการเติมไนโตรเจนในเหล็กกล้าไร้สนิมอื่นๆต่อไป เนื่องจากการทดลองนี้ยังต้องการข้อมูลเพิ่มเติมดังนี้

1. ศึกษาอัตราการเย็นตัวของเนื้อโลหะรอยเชื่อม ที่จะส่งผลต่อการเกิดเคลด้าเฟอร์ไรต์ทั้งในบริเวณหลอมละลาย (Fusion Zone) และบริเวณกระทบร้อน (HAZ)
2. ศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของไนโตรเจนและอาร์กอนต่อโครงสร้างจุลภาคของเนื้อโลหะรอยเชื่อม เพื่อหาอัตราการไหลของก๊าซปกคลุมที่เหมาะสม

5.3 ข้อจำกัดของการทดลอง

จากผลการทดลองที่ผ่านมาพบว่า การเติมไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอนสามารถเติมไนโตรเจนได้ตั้งแต่ 0 - 40 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ขาดการศึกษาในช่วงระหว่าง 40 - 100 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรสาเหตุเกิดจากข้อจำกัดของเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง เนื่องจากเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการเชื่อมทิกนั้น สามารถเติมไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอนได้ในช่วงที่กำหนดเท่านั้น ไม่สามารถทำการทดลองนอกเหนือจากช่วงที่กำหนดได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

- Hull F.C., Effect of Delta Ferrite on hot cracking of stainless steel. Welding Journal 46 (September 1967):399s-409s.
- Quality assurance of welding operation. DIN 8563 part 3, October 1985.
- Onsoien, M.; Peters, R.; Olson, D.L; and Liu, S. Effect of hydrogen in an argon GTAW shielding gas: Arc characteristics and bead morphology. Welding Journal 76 (January 1998):8s-17s.
- Castro, R.; and De Cadenet, J. J. Welding metallurgy of stainless steel and heat resistance steels. Translated to English by Jain, R.C. London:Cambridge University Press, 1975.
- Ogawa, T.; Suzuki, K.; and Zaizen, T. The Weldability of Nitrogen-Containing Austenitic Stainless Steel:Part II Porosity, Cracking and Creep Properties. Welding Journal 63 (July 1984):213s-223s.
- Raamirez, J. E.; Han, B.; and Liu, S. Effect of welding variables and solidification substructure on weld metal porosity. Metallurgical and Materials Transactions A 25 A (1994): 2285-2294.
- Kujanpaa, V. P.; Karjawainen, L. P.; and Sikanen, H. A. V. Role of shielding gases in discontinuity formation in GTA welding of austenitic stainless steel strips. Welding Journal 63 (May 1984): 150s-155s.
- Kujanpaa, V. P.; David, S. A.; and White, C.L. Formation of hot cracks in austenite stainless steel welds-solidification cracking. Welding Journal 65 (August 1986): 203s-212s.
- Sutala, N.; Takalo, T.; and Moisio, T. Ferrite-Austenite solidification mode in austenitic stainless steel welds, Metallurgical Transaction A 11A (1980):717-725.
- David, S. A.;Vitek, J. M.; and Hebble, T. L. Effect of rapid solidification on stainless steel weld metal microstructures and it's implications on the Schaeffler diagram. Welding Journal 66 (October 1987): 289s-300s.

- Kujanpaa, V. P. Welding discontinuities in austenitic stainless steel sheets-Effect of impurities and solidification mode. Welding Journal 63 (December 1984): 369s-375s.
- Kujanpaa, V. P.; Karjawainen, L. P.; and Sikanen, H. A. V. Weld discontinuities in austenitic stainless steel sheets: Role of steel type. Welding Journal 66 (June 1987): 155s-161s.
- Sutala, N. Effect of solidification conditions on the solidification mode in austenitic stainless steels. Metallurgical Transaction A 14A (1983) : 191-197.
- Sutala, N. Effect of manganese and nitrogen on the solidification mode in austenitic steels welds. Metallurgical Transaction A 13A (1982) : 2121-2130.
- Kujanpaa, V. P. Weld defects in austenitic stainless steel sheets-Effect of welding parameters. Welding Journal 62 (February 1983): 45s-52s.
- Lippold, J. C.; and Savage, W.F. Solidification of austenitic stainless steel weldments : Part III-The effect of solidification behavior on hot cracking susceptibility. Welding Journal 61 (February 1983): 45s-52s.
- Delong, W.T. Ferrite in austenitic stainless steel weld metal. Welding Journal 53 (July 1974): 273s-286s.
- Siewert, T. A.; Mc Cowan, C. N.; and Olson, D. L. Ferrite number prediction to 100 FN in stainless steel weld metal, Welding Journal 67 (December 1988): 289s-298s.
- Brooks, J. A.; and Lambert, Jr., F.J. The effects of phosphorus, sulfur and ferrite content on weld cracking of type 309 stainless steel. Welding Journal 57 (May 1978): 139s-143s.
- David, S. A. Ferrite morphology and variations in ferrite content in austenitic stainless steel welds. Welding Journal 60 (April 1981): 63s-71s.
- Yasushi KIKUCHI, Fukuhisa MATSUDA, Takatoshi OKABE and Makoto OHTA. Nitrogen content of 316L welds metal and its fine particle by means of High-pressure MIG arc welding. ISIJ International, Vol. 36(1996). No. 7 pp. 977-982.
- Y.C. Lin, P.Y. Chen. Effect of nitrogen content and retained ferrite on the residual stress in austenitic stainless steel weldments. Material science and engineering A307(2001) 165-171.

- V. Shankar , T.P.S. Gill, S.L. mannan , S. Sundaresan. Effect of nitrogen addition on microstructure and fusion zone cracking in type 316L stainless steel weld metals. Material science and engineering A343(2003) 170-181.
- H.Hoffmeister, S. Dietrich and G. Huismann. Effect of plasma gas compositions on achievable welding speeds at Duplex Stainless Steel pipe orbital plasma keyhole welding. Metallurgical Transaction A Volume 34 No. 8 ,August 2003.
- K.H. Tseng, C.P. Chou. The study of nitrogen in argon on the angular distortion of austenitic stainless steel weldments. Journal of materials Processing Technology ,142 (2003) 139-144.
- Staffan HERTZMAN. The influence of nitrogen on microstructure and properties of highly alloyed stainless steel welds. ISIJ International, Vol. 41(2001). No. 6 pp. 580-589.
- Staffan HERTZMAN, Rachel JARGELIS PETERSSON, Roland BLOM, Esa KIVINEVA, Jan ERIKSSON. Influence of shielding gas composition and welding parameters on the N-content and Corrosion Properties of welds in N-alloyed stainless steel grades. ISIJ International, Vol. 36(1996). No. 6 pp. 968-976.
- ประสงค์ ชะอุ่มไพบ. ผลของพารามิเตอร์การเชื่อมพัลส์ทิก และส่วนผสมของแก๊สปกคลุม ต่อ ลักษณะรอยเชื่อมและ โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก เกรด 304L ในตำแหน่งการเชื่อมที่แตกต่างกัน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2539.
- เอกรัตน์ ไวยนิตย์. อิทธิพลของตัวแปรในการเชื่อมทิกพัลส์และส่วนผสมของแก๊สปกคลุมต่อ ลักษณะการเกิดรอยเชื่อมและ โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก เกรด 316L ในตำแหน่งการเชื่อม 6 นาฬิกา 8 นาฬิกา 9 นาฬิกา 10 นาฬิกา และ 12 นาฬิกา. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2542.
- สถาบันพัฒนาอุตสาหกรรมเครื่องจักรกลและโลหะการ , การเชื่อมโลหะด้วยวิธีการ TIG , กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม , 2535.
- P.LACOMBE, B. BAROUX, G.BERANGER. Stainless steels Volume 1 .ISBN 2-86883-189-3.pp 19-23.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

วิธีการหาสัดส่วนโครงสร้างเซลล์ตัวเฟอร์ไรท์ในเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก 304 L

การหาสัดส่วนโครงสร้างเซลล์ตัวเฟอร์ไรท์ของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด 304L ด้วยวิธีการปริมาณทางโลหะวิทยา สามารถหาสัดส่วนได้จากภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานทดลองที่ผ่านการขัดเงาและกัดกรด วิธีการนี้เป็นการหาสัดส่วนโครงสร้างเซลล์ตัวเฟอร์ไรท์เป็นเปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร เนื่องจากภาพโครงสร้างจุลภาคที่ได้เป็นแบบ 2 เฟส โดยเห็นโครงสร้างเซลล์ตัวเฟอร์ไรท์เป็นเส้นสีเทา-ดำ และโครงสร้างออสเทนไนท์เป็นพื้นสีขาว ซึ่งสามารถหาสัดส่วนโครงสร้างเซลล์ตัวเฟอร์ไรท์ได้จากสมการ

$$(V_v)_\gamma = (L_3)_\gamma / (\lambda + (L_3)_\gamma)$$

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

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

สิ่งที่สำคัญอีกประการหนึ่งในการหาค่าสัดส่วนโครงสร้างเซลล์ตัวเฟอร์ไรท์ คือ ต้องพิจารณาถึงค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation) ที่เกิดขึ้นเพื่อหาขอบเขตความเชื่อมั่นสำหรับค่าสัดส่วนโครงสร้างเซลล์ตัวเฟอร์ไรท์เฉลี่ยในชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด 304 L ดังสมการต่อไปนี้

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

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

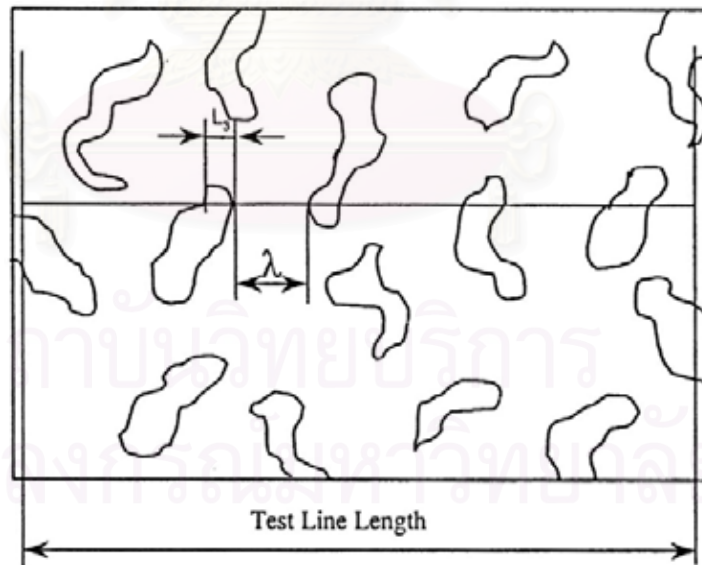
เมื่อกำหนดระดับค่าความเชื่อมั่น 95% จะได้ขอบเขตความเชื่อมั่น (CI) ของค่าเฉลี่ย สัดส่วนโครงสร้างเคลือบเฟอร์ไรท์ในโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด 304 L ดังสมการต่อไปนี้

$$CI = \pm 1.96 \frac{S}{\sqrt{n}}$$

และสัดส่วนโครงสร้างเคลือบเฟอร์ไรท์เป็นสัดส่วนโดยปริมาตรในชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด 304 L ได้ดังสมการ

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

$$\%Error = \frac{CI}{\bar{X}} \times 100$$



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

ตารางที่ ก.1 ปริมาณโครงสร้างเคลือบเฟอร์ไรท์(เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) ของเหล็กเหล็กกล้าไร้
สนิมออสเทนนิติกเกรด 304 L ใช้แก๊สปกคลุม Ar 100% บริเวณ HAZ

11.50	11.00	11.00	11.00	11.50	11.00	12.00	17.00
12.50	13.50	11.00	15.50	10.50	9.50	12.00	13.00
8.50	10.50	13.50	11.50	10.00	15.00	12.00	15.50
8.50	11.00	16.00	12.50	10.50	12.50	13.50	10.50
7.00	11.00	13.50	12.00	10.50	12.50	16.00	9.50
11.50	10.50	16.00	11.00	11.50	13.50	14.50	11.50

$$\sum X = 577 \quad \bar{X} = 12.02 \quad n = 48 \quad S = 2.14$$

$$CI = 0.61 \quad \%Error = 5.03 \quad V_v = 12.02 \pm 0.61$$

ตารางที่ ก.2 ปริมาณโครงสร้างเคลือบเฟอร์ไรท์(เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) ของเหล็กเหล็กกล้าไร้
สนิมออสเทนนิติกเกรด 304 L ใช้แก๊สปกคลุม Ar 100% บริเวณ Fusion Zone

15.00	16.00	10.00	16.50	16.00	10.00	16.50	14.50
16.00	14.50	15.00	14.50	14.50	15.00	14.00	13.00
14.00	17.00	13.50	14.50	17.00	13.50	16.00	14.50
12.00	13.00	14.00	13.00	13.00	14.00	16.00	13.50
12.00	15.50	16.00	14.50	15.50	16.00	16.50	16.00
13.50	10.50	16.00	13.50	10.50	16.00	14.50	14.50

$$\sum X = 690.5 \quad \bar{X} = 14.39 \quad n = 48 \quad S = 1.78$$

$$CI = 0.50 \quad \%Error = 3.50 \quad V_v = 14.39 \pm 0.50$$

ตารางที่ ก.3 ปริมาณโครงสร้างเคลดดำเฟอร์ไรท์(เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) ของเหล็กเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด 304 L ใช้แก๊สปกคลุม Ar+N₂ 1% บริเวณ HAZ

16.00	12.50	15.45	12.94	16.00	12.50	15.45	12.94
13.50	13.64	12.73	12.94	13.50	13.64	12.73	12.94
16.00	13.64	13.53	12.35	16.00	13.64	13.53	12.35
11.00	14.55	12.94	12.94	11.00	14.55	12.94	12.94
15.00	11.82	15.88	12.94	15.00	11.82	15.88	12.94
12.50	15.45	12.35	15.88	12.50	15.45	12.35	15.88

$$\sum X = 656.96 \quad \bar{X} = 13.69 \quad n = 48 \quad S = 1.46$$

$$CI = 0.41 \quad \%Error = 3.01 \quad V_v = 13.69 \pm 0.41$$

ตารางที่ ก.4 ปริมาณโครงสร้างเคลดดำเฟอร์ไรท์(เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) ของเหล็กเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด 304 L ใช้แก๊สปกคลุม Ar+N₂ 1% บริเวณ Fusion Zone

11.50	8.50	13.00	15.50	11.00	11.50	13.50	10.00
13.50	12.50	11.00	12.00	11.50	11.00	12.00	10.50
12.00	10.00	14.50	15.50	10.50	9.50	11.50	12.00
9.00	12.50	8.50	11.50	10.00	15.00	12.00	10.50
12.00	12.00	12.00	12.50	10.50	12.50	9.00	11.50
10.50	18.00	10.50	12.00	10.50	12.50	12.00	10.50

$$\sum X = 561.50 \quad \bar{X} = 11.70 \quad n = 48 \quad S = 1.85$$

$$CI = 0.52 \quad \%Error = 4.481 \quad V_v = 11.70 \pm 0.52$$

ตารางที่ ก.5 ปริมาณโครงสร้างเคลดดำเฟอร์ไรท์(เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) ของเหล็กเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด 304 L ใช้แก๊สปกคลุม Ar+N₂, 2% บริเวณ HAZ

14.97	15.65	11.56	13.61	16.33	16.33	12.93	13.61
15.65	17.01	12.93	14.97	12.93	16.33	14.29	11.56
16.33	11.56	12.93	14.97	11.56	12.93	16.33	16.33
16.33	16.33	12.93	14.97	12.93	11.56	13.61	13.61
13.61	16.33	14.29	11.56	17.01	12.93	13.61	13.61
13.61	12.93	16.33	16.33	11.56	12.93	13.61	13.61

$$\sum X = 679.59 \quad \bar{X} = 14.16 \quad n = 48 \quad S = 1.73$$

$$CI = 0.49 \quad \%Error = 3.45 \quad V_v = 14.16 \pm 0.49$$

ตารางที่ ก.6 ปริมาณโครงสร้างเคลดดำเฟอร์ไรท์(เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) ของเหล็กเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด 304 L ใช้แก๊สปกคลุม Ar+N₂, 2% บริเวณ Fusion Zone

11.00	8.00	6.00	7.65	8.50	8.00	8.50	8.50
10.00	8.00	8.82	8.82	8.00	9.50	8.00	9.00
7.50	9.50	7.06	11.50	8.50	10.00	9.50	6.50
8.50	8.50	11.76	10.00	9.00	8.50	8.00	6.00
8.00	9.00	8.82	7.50	9.00	10.50	8.00	7.50
9.50	6.50	11.76	8.00	10.00	8.50	9.50	9.00

$$\sum X = 417.71 \quad \bar{X} = 8.70 \quad n = 48 \quad S = 1.33$$

$$CI = 0.38 \quad \%Error = 4.31 \quad V_v = 8.70 \pm 0.38$$

ตารางที่ ก.7 ปริมาณโครงสร้างเคลือบเฟอร์ไรท์(เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) ของเหล็กเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด 304 L ใช้แก๊สปกคลุม Ar+N₂ 3% บริเวณ HAZ

12.78	16.54	12.78	17.29	13.53	15.04	14.29	12.03
15.04	14.29	12.03	12.35	13.53	12.03	17.29	12.78
12.03	17.29	12.78	13.53	12.94	12.03	17.29	18.80
12.03	17.29	18.80	10.59	15.29	11.28	18.05	12.94
11.28	18.05	18.80	14.71	15.29	14.29	11.28	15.29
14.29	11.28	19.55	12.35	12.78	16.54	12.78	15.29

$$\sum X = 690.43 \quad \bar{X} = 14.38 \quad n = 48 \quad S = 2.46$$

$$CI = 0.70 \quad \% Error = 4.84 \quad V_v = 14.38 \pm 0.70$$

ตารางที่ ก.8 ปริมาณโครงสร้างเคลือบเฟอร์ไรท์(เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) ของเหล็กเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด 304 L ใช้แก๊สปกคลุม Ar+N₂ 3% บริเวณ Fusion Zone

6.00	9.00	8.50	5.50	7.00	7.50	9.00	7.00
5.50	10.00	7.50	5.00	8.50	9.00	8.00	8.00
7.00	7.50	9.00	7.00	6.50	6.50	9.00	9.00
8.50	9.00	8.00	8.00	7.50	5.50	8.00	8.00
6.50	6.50	9.00	6.00	9.00	8.50	5.50	5.50
7.50	5.50	8.00	5.50	10.00	7.50	5.00	8.50

$$\sum X = 359 \quad \bar{X} = 7.48 \quad n = 48 \quad S = 1.38$$

$$CI = 0.39 \quad \% Error = 5.22 \quad V_v = 7.48 \pm 0.39$$

ตารางที่ ก.9 ปริมาณโครงสร้างเคลือบเฟอร์ไรท์(เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) ของเหล็กเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด 304 L ใช้แก๊สปกคลุม Ar+N₂ 4% บริเวณ HAZ

10.59	12.94	16.47	14.12	12.94	16.47	14.12	14.12
10.59	12.94	16.47	14.12	12.94	16.47	14.12	18.82
12.94	11.76	14.12	18.82	11.76	14.12	15.29	20.00
11.76	11.76	15.29	20.00	11.76	15.29	9.41	17.65
17.65	15.29	9.41	17.65	15.29	9.41	15.29	14.12
14.12	14.12	15.29	14.12	14.12	15.29	14.12	12.94

$$\sum X = 688.24 \quad \bar{X} = 14.34 \quad n = 48 \quad S = 2.56$$

$$CI = 0.73 \quad \% Error = 5.06 \quad V_v = 14.34 \pm 0.73$$

ตารางที่ ก.10 ปริมาณโครงสร้างเคลือบเฟอร์ไรท์(เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) ของเหล็กเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด 304 L ใช้แก๊สปกคลุม Ar+N₂ 4% บริเวณ Fusion Zone

9.00	8.00	6.50	8.00	8.00	8.00	6.50	8.00
7.50	9.00	6.00	7.50	8.00	9.00	6.00	9.50
6.50	9.50	8.00	6.00	6.50	9.50	8.00	8.00
7.50	8.00	7.50	8.50	7.50	8.00	7.50	8.50
7.50	8.50	8.00	6.50	7.50	8.50	8.00	8.00
7.00	8.00	8.50	9.00	7.00	8.00	8.50	6.50

$$\sum X = 374.50 \quad \bar{X} = 7.80 \quad n = 48 \quad S = 1.45$$

$$CI = 0.41 \quad \% Error = 5.25 \quad V_v = 7.80 \pm 0.41$$

ตารางที่ ก.11 ปริมาณโครงสร้างเคลดดำเฟอร์ไรท์(เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) ของเหล็กเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด 304 L ใช้แก๊สปกคลุม Ar+N₂ 5% บริเวณ HAZ

14.16	15.93	16.33	17.69	12.93	17.01	12.94	15.29
15.04	13.27	12.93	16.33	16.33	14.97	14.71	15.29
16.81	16.81	12.93	13.61	16.33	16.33	14.71	18.05
17.70	14.16	12.93	17.01	12.93	16.33	14.12	15.04
15.93	16.81	12.93	17.01	14.29	15.65	14.12	14.29
16.81	16.33	12.93	17.01	14.97	17.01	15.29	15.04

$$\sum X = 733.28$$

$$\bar{X} = 15.28$$

$$n = 48$$

$$S = 1.54$$

$$CI = 0.44$$

$$\% Error = 2.85$$

$$V_v = 15.28 \pm 0.44$$

ตารางที่ ก.12 ปริมาณโครงสร้างเคลดดำเฟอร์ไรท์(เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) ของเหล็กเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด 304 L ใช้แก๊สปกคลุม Ar+N₂ 5% บริเวณ Fusion Zone

7.00	7.00	7.50	6.50	8.00	6.00	6.50	6.50
7.50	7.50	8.00	6.50	8.00	8.50	6.00	6.00
8.00	8.00	6.00	6.00	6.00	5.50	6.50	5.50
8.00	9.00	6.50	5.50	3.00	5.50	5.00	3.00
6.00	7.50	5.00	3.00	3.50	6.50	8.00	5.50
7.00	7.00	8.00	5.50	5.00	6.00	6.50	8.00

$$\sum X = 308$$

$$\bar{X} = 6.42$$

$$n = 48$$

$$S = 1.43$$

$$CI = 0.40$$

$$\% Error = 6.29$$

$$V_v = 6.42 \pm 0.40$$

ตารางที่ ก.13 ปริมาณ โครงสร้างเคลือบเฟอร์ไรท์(เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) ของเหล็กเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด 304 L ใช้แก๊สปกคลุม Ar+N₂ 6% บริเวณ HAZ

10.83	13.33	20.83	13.33	20.00	15.83	14.17	15.83
14.17	17.50	14.17	17.50	16.67	15.00	20.83	13.33
18.33	15.83	18.33	15.83	14.17	18.33	14.17	17.50
16.67	15.00	16.67	15.00	15.00	15.83	18.33	15.83
15.00	19.17	15.00	19.17	17.50	15.00	16.67	14.17
15.83	14.17	15.83	14.17	17.50	19.17	15.00	18.33

$$\sum X = 775.83 \quad \bar{X} = 16.16 \quad n = 48 \quad S = 2.14$$

$$CI = 0.60 \quad \% Error = 3.74 \quad V_v = 16.16 \pm 0.60$$

ตารางที่ ก.14 ปริมาณ โครงสร้างเคลือบเฟอร์ไรท์(เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) ของเหล็กเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด 304 L ใช้แก๊สปกคลุม Ar+N₂ 6% บริเวณ Fusion Zone

4.00	6.50	6.00	5.50	4.50	3.00	6.00	5.50
6.50	6.50	7.00	6.50	4.50	3.50	7.00	6.50
6.50	7.00	6.50	6.00	6.50	7.00	6.50	6.00
6.50	6.00	7.00	6.00	7.50	7.00	6.50	6.00
6.00	3.00	3.50	5.50	6.00	7.00	4.00	6.50
5.50	3.50	6.50	8.00	5.50	6.50	6.50	4.50

$$\sum X = 281.50 \quad \bar{X} = 5.86 \quad n = 48 \quad S = 1.21$$

$$CI = 0.34 \quad \% Error = 5.84 \quad V_v = 5.86 \pm 0.34$$

ตารางที่ ก.15 ปริมาณโครงสร้างเคลือบเฟอร์ไรท์(เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) ของเหล็กเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด 304 L ใช้แก๊สปกคลุม Ar+N₂, 7% บริเวณ HAZ

17.50	16.50	16.00	14.00	17.00	18.50	17.50	16.00
15.00	19.50	17.50	17.00	13.00	16.00	18.50	16.50
15.50	19.50	17.00	17.00	15.50	14.50	15.00	14.00
14.00	18.00	18.00	16.00	18.00	17.00	13.50	16.00
16.00	14.50	15.50	16.00	13.00	13.00	14.00	16.00
16.00	18.50	16.00	14.50	14.50	15.50	16.00	19.00

$$\sum X = 772.50 \quad \bar{X} = 16.09 \quad n = 48 \quad S = 1.71$$

$$CI = 0.48 \quad \% Error = 3.00 \quad V_v = 16.09 \pm 0.48$$

ตารางที่ ก.16 ปริมาณโครงสร้างเคลือบเฟอร์ไรท์(เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) ของเหล็กเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด 304 L ใช้แก๊สปกคลุม Ar+N₂, 7% บริเวณ Fusion Zone

7.00	8.00	9.00	6.00	9.00	8.00	7.50	8.50
6.00	9.00	7.00	5.50	9.50	6.50	8.50	9.00
7.50	7.00	8.00	6.50	6.00	8.00	9.00	6.00
8.50	6.00	9.00	6.50	7.00	9.00	7.00	5.50
9.00	7.50	8.50	7.00	6.50	7.00	8.00	6.50
7.00	8.50	9.00	8.50	9.00	6.00	9.00	6.50

$$\sum X = 364 \quad \bar{X} = 7.58 \quad n = 48 \quad S = 1.18$$

$$CI = 0.33 \quad \% Error = 4.39 \quad V_v = 7.58 \pm 0.33$$

ตารางที่ ก.17 ปริมาณโครงสร้างเคลือบเฟอร์ไรท์(เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) ของเหล็กเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด 304 L ใช้แก๊สปกคลุม Ar+N₂ 8% บริเวณ HAZ

16.96	19.64	15.18	14.29	14.29	19.64	15.18	14.29
23.21	21.43	25.00	19.64	18.75	21.43	25.00	19.64
24.11	16.07	20.54	19.64	15.18	16.07	20.54	21.43
15.18	21.43	23.21	21.43	25.00	21.43	23.21	14.29
14.29	14.29	24.11	16.07	14.29	14.29	24.11	18.75
19.64	18.75	15.18	21.43	19.64	18.75	15.18	15.18

$$\sum X = 906.25 \quad \bar{X} = 18.88 \quad n = 48 \quad S = 3.57$$

$$CI = 1.01 \quad \% Error = 5.34 \quad V_v = 18.88 \pm 1.01$$

ตารางที่ ก.18 ปริมาณโครงสร้างเคลือบเฟอร์ไรท์(เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) ของเหล็กเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด 304 L ใช้แก๊สปกคลุม Ar+N₂ 8% บริเวณ Fusion Zone

4.55	4.55	3.03	5.05	5.00	3.50	6.50	5.50
6.57	5.56	3.54	4.55	3.00	6.50	7.00	3.50
7.07	3.54	6.57	5.50	4.50	3.50	5.00	6.50
5.05	6.57	7.07	3.50	5.00	5.00	4.50	7.00
4.55	3.54	5.05	6.50	4.50	3.00	5.00	7.50
5.05	5.05	4.55	3.50	5.50	3.50	4.50	4.50

$$\sum X = 239.51 \quad \bar{X} = 4.99 \quad n = 48 \quad S = 1.26$$

$$CI = 0.36 \quad \% Error = 7.13 \quad V_v = 4.99 \pm 0.36$$

ตารางที่ ก.19 ปริมาณ โครงสร้างเคลือบเฟอร์ไรท์(เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) ของเหล็กเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด 304 L ใช้แก๊สปกคลุม Ar+N₂ 9% บริเวณ HAZ

16.84	16.84	20.00	16.84	20.00	14.74	12.63	14.74
17.89	18.95	29.47	18.95	29.47	16.84	20.00	16.84
21.05	14.74	26.32	14.74	17.89	18.95	29.47	18.95
12.63	13.68	21.05	13.68	21.05	14.74	26.32	14.74
13.68	8.42	13.68	8.42	12.63	13.68	21.05	13.68
14.74	12.63	14.74	12.63	13.68	8.42	13.68	8.42

$$\sum X = 805.26 \quad \bar{X} = 16.78 \quad n = 48 \quad S = 5.19$$

$$CI = 1.47 \quad \% Error = 8.75 \quad V_v = 16.78 \pm 1.47$$

ตารางที่ ก.20 ปริมาณ โครงสร้างเคลือบเฟอร์ไรท์(เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) ของเหล็กเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด 304 L ใช้แก๊สปกคลุม Ar+N₂ 9% บริเวณ Fusion Zone

4.88	3.41	5.37	4.88	4.88	3.41	5.37	4.39
2.44	6.34	3.41	4.39	2.93	3.41	3.41	7.80
4.39	1.95	6.34	5.37	4.39	4.88	1.95	4.39
1.95	4.39	6.83	3.41	4.88	4.39	3.41	2.93
4.39	1.46	1.95	3.90	4.39	4.88	1.95	1.95
5.37	4.39	4.39	3.41	5.37	4.39	2.93	4.39

$$\sum X = 196.10 \quad \bar{X} = 4.09 \quad n = 48 \quad S = 2.54$$

$$CI = 0.72 \quad \% Error = 7.55 \quad V_v = 4.09 \pm 0.72$$

ตารางที่ ก.21 ปริมาณ โครงสร้างเตลด้าเฟอร์ไรท์(เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) ของเหล็กเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด 304 L ใช้แก๊สปกคลุม Ar+N₂ 10% บริเวณ HAZ

13.33	10.00	16.00	8.67	12.67	14.67	13.33	15.33
13.33	12.67	14.67	14.67	9.33	13.33	12.67	13.33
10.67	9.33	13.33	15.33	10.67	12.67	9.33	11.33
15.33	10.67	12.67	13.33	12.67	9.33	9.33	10.00
13.33	12.67	9.33	11.33	16.00	9.33	8.67	12.67
11.33	16.00	9.33	10.00	16.00	14.67	14.67	9.33

$$\sum X = 588.67 \quad \bar{X} = 12.26 \quad n = 48 \quad S = 2.32$$

$$CI = 0.66 \quad \% Error = 5.34 \quad V_v = 12.26 \pm 0.66$$

ตารางที่ ก.22 ปริมาณ โครงสร้างเตลด้าเฟอร์ไรท์(เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) ของเหล็กเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด 304 L ใช้แก๊สปกคลุม Ar+N₂ 10% บริเวณ Fusion Zone

4.55	4.55	3.03	3.03	3.00	3.50	3.00	5.50
5.05	5.56	3.54	2.02	3.00	6.50	5.00	3.50
6.06	3.54	2.53	5.50	4.50	3.50	5.00	2.50
5.05	2.02	7.07	3.50	2.50	5.00	4.50	3.50
4.55	3.54	5.05	2.50	4.50	3.00	5.00	3.50
5.05	5.05	4.55	3.50	5.50	3.50	4.50	4.50

$$\sum X = 198.35 \quad \bar{X} = 4.13 \quad n = 48 \quad S = 1.46$$

$$CI = 0.41 \quad \% Error = 10.03 \quad V_v = 4.13 \pm 0.41$$

ตารางที่ ก.23 ปริมาณ โครงสร้างเคลดต่ำเฟอร์ไรท์(เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) ของเหล็กเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด 304 L ใช้แก๊สปกคลุม Ar+N₂ 15% บริเวณ HAZ

8.67	7.33	12.00	9.33	12.67	14.67	8.67	18.00
17.33	14.00	12.00	7.33	12.00	10.67	10.67	16.67
19.33	12.00	16.00	14.00	12.00	9.33	12.67	10.67
14.67	8.67	18.00	12.00	16.00	7.33	12.00	9.33
10.67	10.67	16.67	8.67	18.00	14.00	12.00	7.33
9.33	12.67	10.67	10.67	19.33	12.00	16.00	14.00

$$\sum X = 598.67 \quad \bar{X} = 12.47 \quad n = 48 \quad S = 3.35$$

$$CI = 0.95 \quad \% Error = 7.61 \quad V_v = 12.47 \pm 0.95$$

ตารางที่ ก.24 ปริมาณ โครงสร้างเคลดต่ำเฟอร์ไรท์(เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) ของเหล็กเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด 304 L ใช้แก๊สปกคลุม Ar+N₂ 15% บริเวณ Fusion Zone

8.00	8.00	8.00	9.50	9.50	8.00	9.50	6.50
5.33	9.00	9.00	10.50	10.50	9.00	10.50	8.50
10.00	9.50	9.50	6.50	9.50	9.50	6.50	8.00
9.33	10.50	10.50	8.50	10.50	10.50	9.00	9.00
6.00	6.50	6.50	8.00	6.50	6.50	9.50	9.50
8.00	8.50	9.00	9.00	8.50	9.00	10.50	10.50

$$\sum X = 418.17 \quad \bar{X} = 8.71 \quad n = 48 \quad S = 1.41$$

$$CI = 0.40 \quad \% Error = 4.59 \quad V_v = 8.71 \pm 0.40$$

ตารางที่ ก.25 ปริมาณ โครงสร้างเคลือบเฟอร์ไรท์(เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) ของเหล็กเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด 304 L ใช้แก๊สปกคลุม Ar+N₂, 20% บริเวณ HAZ

7.69	12.82	11.11	12.22	8.97	8.89	10.00	11.54
11.54	11.54	7.78	11.11	11.54	10.00	6.67	10.26
10.26	12.82	8.89	7.78	11.54	11.11	13.33	8.97
8.97	8.89	10.00	8.89	12.82	11.11	12.22	11.54
11.54	10.00	6.67	10.00	11.54	7.78	11.11	11.54
11.54	11.11	13.33	10.26	12.82	8.89	7.78	12.82

$$\sum X = 501.54 \quad \bar{X} = 10.45 \quad n = 48 \quad S = 1.79$$

$$CI = 0.51$$

$$\% Error = 4.85$$

$$V_v = 10.45 \pm 0.51$$

ตารางที่ ก.26 ปริมาณ โครงสร้างเคลือบเฟอร์ไรท์(เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) ของเหล็กเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด 304 L ใช้แก๊สปกคลุม Ar+N₂, 20% บริเวณ Fusion Zone

6.50	6.50	6.00	9.00	9.00	7.50	8.50	8.00
5.00	9.00	9.00	7.00	8.50	7.00	6.50	10.00
6.00	7.00	7.50	8.50	6.50	9.00	9.00	9.50
7.50	8.50	7.00	6.50	5.00	6.50	9.50	10.00
7.00	6.50	9.00	5.00	6.00	9.00	10.50	6.50
9.00	5.00	6.50	6.00	9.00	7.00	6.50	9.50

$$\sum X = 364.50$$

$$\bar{X} = 7.59$$

$$n = 48$$

$$S = 1.50$$

$$CI = 0.42$$

$$\% Error = 5.58$$

$$V_v = 7.59 \pm 0.42$$

ตารางที่ ก.27 ปริมาณ โครงสร้างเคลดต่ำเฟอร์ไรท์(เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) ของเหล็กเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด 304 L ใช้แก๊สปกคลุม Ar+N₂, 25% บริเวณ HAZ

8.67	9.33	8.67	11.33	10.67	14.00	12.00	9.33
11.33	10.67	11.33	10.00	8.00	9.33	12.00	10.67
10.00	8.00	14.67	8.67	10.67	10.00	10.00	8.00
8.67	10.67	8.67	8.00	14.00	8.67	8.67	10.67
8.00	9.33	14.00	10.67	10.67	11.33	8.00	14.00
10.67	12.00	8.67	9.33	10.00	10.67	10.67	10.67

$$\sum X = 494.00 \quad \bar{X} = 10.29 \quad n = 48 \quad S = 1.77$$

$$CI = 0.50 \quad \% Error = 4.87 \quad V_v = 10.29 \pm 0.50$$

ตารางที่ ก.28 ปริมาณ โครงสร้างเคลดต่ำเฟอร์ไรท์(เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) ของเหล็กเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด 304 L ใช้แก๊สปกคลุม Ar+N₂, 25% บริเวณ Fusion Zone

18.00	12.00	18.00	10.50	12.00	11.00	11.50	12.50
9.00	12.50	13.00	15.50	11.00	11.50	11.00	12.00
14.50	12.50	11.00	12.00	15.50	10.50	9.50	18.00
15.00	10.00	14.50	15.50	11.50	10.00	15.00	13.00
11.50	12.50	8.50	11.50	12.50	10.50	12.50	11.00
15.50	12.00	12.00	12.50	12.00	10.50	12.50	14.50

$$\sum X = 601.00 \quad \bar{X} = 12.52 \quad n = 48 \quad S = 2.24$$

$$CI = 0.63 \quad \% Error = 5.06 \quad V_v = 12.52 \pm 0.63$$

ตารางที่ ก.29 ปริมาณ โครงสร้างเคลดต่ำเฟอร์ไรท์(เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) ของเหล็กเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด 304 L ใช้แก๊สปกคลุม Ar+N₂ 30% บริเวณ HAZ

16.67	17.33	16.67	11.33	13.33	14.67	18.00	13.33
16.67	18.00	13.33	13.33	10.00	12.00	16.67	13.33
16.67	16.67	13.33	12.67	16.00	17.33	13.33	10.00
16.67	13.33	10.00	12.67	12.67	14.67	12.67	13.33
14.67	12.67	16.00	16.67	16.67	12.00	12.67	12.67
12.00	12.67	12.67	13.33	16.67	17.33	16.67	11.33

$$\sum X = 683.33 \quad \bar{X} = 14.24 \quad n = 48 \quad S = 2.28$$

$$CI = 0.65 \quad \% Error = 4.54 \quad V_v = 14.24 \pm 0.65$$

ตารางที่ ก.30 ปริมาณ โครงสร้างเคลดต่ำเฟอร์ไรท์(เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) ของเหล็กเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด 304 L ใช้แก๊สปกคลุม Ar+N₂ 30% บริเวณ Fusion Zone

12.09	13.19	17.03	11.54	14.84	13.74	12.09	13.19
15.93	17.03	12.64	10.99	13.19	10.99	15.93	17.03
9.34	12.64	13.74	11.54	9.89	13.74	9.34	12.64
13.19	13.74	13.19	11.54	13.19	13.19	13.19	13.74
11.54	13.19	12.09	12.64	11.54	19.78	11.54	13.19
17.03	12.09	12.64	12.09	9.34	14.29	17.03	11.58

$$\sum X = 630.81 \quad \bar{X} = 13.14 \quad n = 48 \quad S = 2.47$$

$$CI = 0.70 \quad \% Error = 5.32 \quad V_v = 13.14 \pm 0.70$$

ตารางที่ ก.31 ปริมาณ โครงสร้างเคลือบเฟอร์ไรท์(เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) ของเหล็กเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด 304 L ใช้แก๊สปกคลุม Ar+N₂ 35% บริเวณ HAZ

8.00	14.86	8.78	16.22	16.89	16.67	14.97	8.84
10.67	8.78	8.11	12.84	13.33	16.67	8.84	8.16
9.33	14.19	10.81	11.49	13.33	14.67	14.29	10.88
12.00	8.78	9.46	13.51	10.00	12.24	8.84	9.52
8.67	11.49	10.81	12.84	16.00	17.69	11.56	10.88
11.49	10.14	8.11	12.84	12.67	14.97	10.20	8.16

$$\sum X = 564.50 \quad \bar{X} = 11.76 \quad n = 48 \quad S = 2.80$$

$$CI = 0.79 \quad \% Error = 6.74 \quad V_v = 11.76 \pm 0.79$$

ตารางที่ ก.32 ปริมาณ โครงสร้างเคลือบเฟอร์ไรท์(เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) ของเหล็กเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด 304 L ใช้แก๊สปกคลุม Ar+N₂ 35% บริเวณ Fusion Zone

17.22	12.78	11.11	16.67	12.78	12.22	9.44	14.44
12.78	13.89	11.67	13.89	11.67	15.00	13.89	12.22
13.89	13.33	11.67	13.89	11.11	13.33	11.11	16.11
13.33	12.22	12.78	13.89	11.67	10.00	13.89	9.44
12.22	12.78	12.22	13.33	11.67	13.33	13.33	17.22
17.22	11.67	10.56	12.22	12.78	11.67	20.00	17.78

$$\sum X = 633.33 \quad \bar{X} = 13.19 \quad n = 48 \quad S = 2.19$$

$$CI = 0.62 \quad \% Error = 4.70 \quad V_v = 13.19 \pm 0.62$$

ตารางที่ ก.33 ปริมาณ โครงสร้างเคลดต่ำเฟอร์ไรท์(เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) ของเหล็กเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด 304 L ใช้แก๊สปกคลุม Ar+N₂ 40% บริเวณ HAZ

8.18	10.00	12.73	9.23	11.00	14.00	12.00	17.14
8.18	10.00	12.73	9.23	11.00	14.00	12.00	22.86
10.00	9.09	10.91	12.31	10.00	12.00	13.00	24.29
9.09	9.09	11.82	13.08	10.00	13.00	8.00	21.43
13.64	16.25	6.15	15.00	13.00	8.00	18.57	17.14
10.91	10.91	10.00	12.00	12.00	13.00	17.14	15.71

$$\sum X = 600.81 \quad \bar{X} = 12.52 \quad n = 48 \quad S = 3.83$$

$$CI = 1.08 \quad \% Error = 8.67 \quad V_v = 12.52 \pm 1.08$$

ตารางที่ ก.34 ปริมาณ โครงสร้างเคลดต่ำเฟอร์ไรท์(เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) ของเหล็กเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด 304 L ใช้แก๊สปกคลุม Ar+N₂ 40% บริเวณ Fusion Zone

16.85	11.50	10.00	15.00	12.43	11.89	9.71	13.68
12.64	12.50	10.50	12.50	11.35	14.59	14.29	11.58
13.74	12.00	10.50	13.51	10.81	13.71	11.43	15.26
12.00	11.00	11.50	13.51	11.35	10.29	14.29	8.95
11.00	11.50	11.00	12.97	11.35	13.71	12.63	16.32
15.50	10.50	9.50	11.89	12.43	12.00	18.95	16.84

$$\sum X = 602.97 \quad \bar{X} = 12.56 \quad n = 48 \quad S = 2.10$$

$$CI = 0.60 \quad \% Error = 4.74 \quad V_v = 12.56 \pm 0.60$$

ตารางที่ ก.35 ปริมาณ โครงสร้างเคลดดำเฟอร์ไรท์(เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) ของเหล็กเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด 304 L ใช้แก๊สปกคลุม N_2 100% บริเวณ HAZ

2.67	0.00	2.67	1.33	4.00	4.00	3.50	2.50
2.00	0.00	2.67	0.00	4.67	4.67	1.50	3.00
4.00	0.00	1.33	0.00	4.00	4.67	0.00	3.50
2.67	1.33	2.00	4.67	4.67	4.00	0.00	2.50
3.33	4.00	5.33	3.33	2.67	4.00	0.00	4.00
1.33	3.33	2.67	0.00	2.00	3.00	1.50	3.00

$$\sum X = 122.00$$

$$CI = 0.47$$

$$\bar{X} = 2.54$$

$$\% Error = 8.42$$

$$n = 48$$

$$S = 1.65$$

$$V_v = 2.54 \pm 0.47$$

ตารางที่ ก.36 ปริมาณ โครงสร้างเคลดดำเฟอร์ไรท์(เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) ของเหล็กเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด 304 L ใช้แก๊สปกคลุม N_2 100% บริเวณ Fusion Zone

ไม่มีเคลดดำเฟอร์ไรท์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข.

การวิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจนในเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก เกรด 304 L

การวิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจน แบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ การวิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจนในเนื้อโลหะพื้น และการวิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจนในเนื้อโลหะรอยเชื่อม วิเคราะห์ด้วยเครื่อง LECO 400 (Oxygen-Nitrogen Analyzer) ผลการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ ข.1

ตารางที่ ข.1 ปริมาณไนโตรเจนในเนื้อโลหะพื้น

ครั้งที่	น้ำหนักทดสอบ (กรัม)	ปริมาณไนโตรเจน (กรัม)	ปริมาณไนโตรเจน (% wt.)
1	0.134	0.005	0.037
2	0.522	0.027	0.051
		เฉลี่ย	0.044

การวิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจนในเนื้อโลหะรอยเชื่อม เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก เกรด 304 L เมื่อผสมก๊าซไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอนที่อัตราส่วน 0-10, 15, 20, 25, 30, 35, 40 และ 100 เปอร์เซ็นต์ ผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ ข.2

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.2 ปริมาณไนโตรเจน (%wt) ในเนื้อโลหะรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก เกรด 304 L เมื่อผสมก๊าซไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอนที่อัตราส่วน 0-10, 15, 20, 25, 30, 35, 40 และ 100 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

ไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอน	ครั้งที่วัด	น้ำหนักทดสอบ (กรัม)	ปริมาณไนโตรเจน (กรัม)	ปริมาณไนโตรเจน (% wt.)	ปริมาณไนโตรเจนเฉลี่ย (% wt.)
0	1	0.505	0.02579	0.051	0.051
	2	0.124	0.00635	0.051	
1	1	0.117	0.00610	0.052	0.052
	2	0.183	0.00947	0.052	
2	1	0.237	0.01252	0.053	0.053
	2	0.246	0.0129	0.052	
3	1	0.130	0.00879	0.068	0.065
	2	0.132	0.00828	0.063	
4	1	0.107	0.00754	0.070	0.067
	2	0.130	0.00832	0.064	
5	1	0.134	0.01065	0.079	0.076
	2	0.131	0.00941	0.072	
6	1	0.129	0.00902	0.070	0.071
	2	0.143	0.01038	0.073	

ตารางที่ ข.2(ต่อ) ปริมาณไนโตรเจน (%wt) ในเนื้อโลหะรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก เกรด 304 L เมื่อผสมก๊าซไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอนที่อัตราส่วน 0-10, 15, 20, 25, 30, 35, 40 และ 100 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

ไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอน	ครั้งที่วัด	น้ำหนักทดสอบ (กรัม)	ปริมาณไนโตรเจน (กรัม)	ปริมาณไนโตรเจน (% wt.)	ปริมาณไนโตรเจนเฉลี่ย (% wt.)
7	1	0.149	0.00981	0.066	0.066
	2	0.134	0.00892	0.067	
8	1	0.184	0.01422	0.077	0.082
	2	0.113	0.00981	0.087	
9	1	0.186	0.01405	0.076	0.078
	2	0.191	0.01544	0.081	
10	1	0.115	0.00995	0.087	0.085
	2	0.204	0.01698	0.083	
15	1	0.244	0.0158	0.065	0.065
	2	0.168	0.01101	0.066	
20	1	0.103	0.00872	0.085	0.081
	2	0.151	0.01153	0.076	

ตารางที่ ข.2(ต่อ) ปริมาณไนโตรเจน (%wt) ในเนื้อโลหะรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก เกรด 304 L เมื่อผสมก๊าซไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอนที่อัตราส่วน 0-10, 15, 20, 25, 30, 35, 40 และ 100 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

ไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอน	ครั้งที่วัด	น้ำหนักทดสอบ (กรัม)	ปริมาณไนโตรเจน (กรัม)	ปริมาณไนโตรเจน (% wt.)	ปริมาณไนโตรเจนเฉลี่ย (% wt.)
25	1	0.133	0.01741	0.131	0.125
	2	0.123	0.01467	0.119	
30	1	0.159	0.01358	0.085	0.090
	2	0.140	0.01328	0.095	
35	1	0.166	0.01346	0.081	0.081
	2	0.163	0.01315	0.081	
40	1	0.136	0.01474	0.108	0.111
	2	0.127	0.01446	0.114	
100	1	0.168	0.03057	0.182	0.175
	2	0.150	0.02514	0.168	

ภาคผนวก ก.

การสร้างเส้นกราฟที่เหมาะสมด้วยวิธีเส้นกำลังสองน้อยที่สุด (Linear Least Square Method Fitting Curve)

จากข้อมูลที่ได้จากการทดลองที่เป็นลักษณะกระจาย(Scattering) ทำให้เห็นแนวโน้มของกราฟค่อนข้างลำบาก จากหนังสือสถิติทางวิศวกรรมของ ศ.ดร.ศิริจันทร์ ทองประเสริฐ ได้กล่าวถึงการสร้างเส้นกราฟด้วยวิธีเส้นกำลังสองน้อยที่สุด จะสามารถเห็นแนวโน้มของข้อมูลได้ง่ายขึ้น โดยข้อมูลที่ได้จากการทดลองเป็นลักษณะคู่ลำดับ $(X_1, Y_1), (X_2, Y_2), (X_3, Y_3), \dots, (X_n, Y_n)$ มีสมการคือ

$$Y = a_0 + a_1 X$$

ซึ่งค่าคงที่ a_0 และ a_1 คำนวณโดยการแก้สมการดังนี้

$$\begin{aligned}\sum Y &= a_0 N + a_1 \sum X \\ \sum XY &= a_0 \sum X + a_1 \sum X^2\end{aligned}$$

โดยค่าคงที่ a_0 และ a_1 สามารถคำนวณหาได้จากสูตร

$$a_0 = \frac{(\sum Y)(\sum X^2) - (\sum X)(\sum XY)}{N \sum X^2 - (\sum X)^2}$$

$$a_1 = \frac{N(\sum XY) - (\sum X)(\sum Y)}{N \sum X^2 - (\sum X)^2}$$

เมื่อกำหนดค่า a_0 และค่า a_1 ได้แล้วนำไปแทนในสมการ $Y = a_0 + a_1 X$ และเมื่อแทนค่าตัวแปรอิสระ(X) ลงในสมการจะได้ค่าตัวแปรตาม(Y) ทำเช่นนั้นจนได้ค่าตัวแปรอิสระครบทุกตัว ซึ่งก็จะได้กราฟเส้นตรงที่เหมาะสมของชุดของมูลนั้น

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายณัฐ มาตรชัยภูมิ เกิดเมื่อวันที่ 16 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2523 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2545 และได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2546



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย