

ผลของไนโตรเจนและไฮโดรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอนต่อลักษณะรอยเชื่อมและปริมาณ
เดลตา-เฟรไรต์ในรอยเชื่อมทิกพัลส์ ของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 316L



นาย บัญญาศักดิ์ ภาคยปีตินันท์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2552

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECTS OF NITROGEN AND HYDROGEN IN ARGON SHIELDING GAS ON WELD
BEAD PROFILE AND THE AMOUNT OF DELTA-FERRITE IN PULSED TIG WELDS OF
AISI 316L STAINLESS STEEL



Mr. Panyasak Phakpeetinan

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

Department of Metallurgical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2009

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

ผลของไนโตรเจนและไฮโดรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอนต่อ
ลักษณะรอยเชื่อมและปริมาณเตลตา-เฟอไรต์ในรอยเชื่อม
ทิกทัลล์ ของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 316L

โดย

นาย ปัญญาศักดิ์ ภาคย์ปีตินันท์

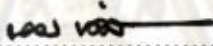
สาขาวิชา

วิศวกรรมโลหการ

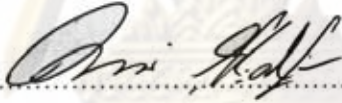
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

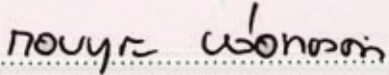
รองศาสตราจารย์ ดร. กอบบุญ หล่อทองคำ


คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต



..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศนिरุญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(อาจารย์ ดร. มาวิน สุประดิษฐ์ ณ อยุธยา)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร. กอบบุญ หล่อทองคำ)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สุวันชัย พงษ์สุกิจวัฒน์)


..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร. เอกรัตน์ ไวยนิตย์)

ศูนย์วิทยุโทรพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปัญญาศักดิ์ ภาคยปีตินันท์ : ผลของไนโตรเจนและไฮโดรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอนต่อลักษณะรอยเชื่อมและปริมาณเดลตา-เฟร์ไรต์ในรอยเชื่อมทิกพัลส์ ของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 316L (EFFECTS OF NITROGEN AND HYDROGEN IN ARGON SHIELDING GAS ON WELD BEAD PROFILE AND THE AMOUNT OF DELTA-FERRITE IN THE PULSED TIG WELDS OF AISI 316L STAINLESS STEEL) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
หลัก : รองศาสตราจารย์ ดร. กอบบุญ หล่อทองคำ, 92 หน้า.

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ คือศึกษาผลของก๊าซไนโตรเจน 1%, 2%, 3% และ 4% โดยปริมาตร (v/v) และก๊าซไฮโดรเจน 1%, 5% และ 10%(v/v) ที่ผสมในก๊าซปกคลุมอาร์กอนต่ออัตราส่วนรอยซึมลึกและความกว้าง และปริมาณเดลตา-เฟร์ไรต์ของเนื้อโลหะเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิต เกรด 316L แผ่นหนา 6 มิลลิเมตร ตรวจสอบข้อบกพร่องรอยเชื่อมตามมาตรฐาน DIN 8563 BS เชื่อมที่ตำแหน่งทำราบ ด้วยระยะอาร์ก 2 มิลลิเมตร ใช้อิเล็กโทรดทั้งสแตนเลส 2% ทอเรียบออกไซด์ เส้นผ่านศูนย์กลาง 2.4 มิลลิเมตร ปลายอิเล็กโทรดทำมุม 60° และระยะห่างของหัวเชื่อมทำมุม 75° จากแนวตั้ง หัวอิเล็กโทรดเป็นลบ ก๊าซปกคลุมด้านบนมีอัตราไหล 15 ลิตรต่อนาที และก๊าซปกคลุมด้านล่างมีอัตราไหล 10 ลิตรต่อนาที ใช้ไฟฟ้ากระแสตรง กระแสไฟฟ้าพัลส์ 130 แอมแปร์ และกระแสไฟฟ้าเบส 61 แอมแปร์ ความถี่พัลส์ 5 เฮิรตซ์ 65% on-time ความเร็วเชื่อม 2, 3, 4, 5, 6 และ 7 มิลลิเมตรต่อวินาที ผลการทดลองพบว่า เมื่อก๊าซไฮโดรเจนในก๊าซปกคลุมเพิ่มขึ้นปริมาตรของเนื้อโลหะเชื่อมเพิ่มขึ้น แต่ความเร็วเชื่อมเพิ่มขึ้นปริมาตรเนื้อโลหะเชื่อมลดลง อัตราส่วนรอยซึมลึกต่อความกว้างเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มก๊าซไฮโดรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอน ที่ความเร็วเชื่อมมากกว่า 3 มิลลิเมตรต่อวินาทีและปริมาณก๊าซไฮโดรเจน 5% และ 10%(v/v) ในก๊าซปกคลุมอาร์กอนอัตราส่วนรอยซึมลึกต่อความกว้างมีแนวโน้มคงที่ ที่ความเร็วเชื่อม 5 ถึง 7 มิลลิเมตรต่อวินาทีอัตราส่วนรอยซึมลึกต่อความกว้างมีแนวโน้มคงที่สำหรับทุกส่วนผสมก๊าซปกคลุม การเชื่อมด้วยก๊าซผสมไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอนไม่ส่งผลกระทบต่ออัตราส่วนรอยซึมลึกต่อความกว้าง การเชื่อมด้วยก๊าซผสมไฮโดรเจน 10%(v/v) ในก๊าซปกคลุมอาร์กอนที่ความเร็ว 2 มิลลิเมตรต่อวินาทีส่งผลให้เกิดรอยบกพร่องแบบ incompletely filled groove และ excessive penetration เมื่อเพิ่มส่วนผสมก๊าซไฮโดรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอน ปริมาณเดลตา-เฟร์ไรต์ในเนื้อโลหะเชื่อมเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มส่วนผสมก๊าซไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอนและเพิ่มความเร็วเชื่อมปริมาณเดลตา-เฟร์ไรต์ในเนื้อโลหะเชื่อมลดลง ขนาดเกรนออสเทนิตในเนื้อโลหะเชื่อมเมื่อเชื่อมด้วยก๊าซไฮโดรเจน 5%(v/v) และ 10%(v/v) ผสมในก๊าซปกคลุมอาร์กอนใหญ่กว่าเมื่อเชื่อมด้วยก๊าซไฮโดรเจน 1%(v/v) ผสมในก๊าซปกคลุมอาร์กอน การเพิ่มส่วนผสมก๊าซไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอนส่งผลเพิ่มปริมาณไนโตรเจนในเนื้อโลหะเชื่อม แต่การเพิ่มส่วนผสมก๊าซไฮโดรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอนส่งผลลดปริมาณไนโตรเจนในเนื้อโลหะเชื่อม การเพิ่มความเร็วเชื่อมไม่มีผลต่อการละลายไนโตรเจนในเนื้อโลหะเชื่อม

ภาควิชา วิศวกรรมโลหการ

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมโลหการ

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ปีการศึกษา...2552

4970785421 : MAJOR METALLURGICAL ENGINEERING

KEYWORDS :TIG PULSE/SHIELDING GAS/DELTA FERRITE/AUSTENITIC STAINLESS STEEL

PANYASAK PHAKPEETINAN : EFFECTS OF NITROGEN AND HYDROGEN IN ARGON SHIELDING GAS ON WELD BEAD PROFILE AND THE AMOUNT OF DELTA-FERRITE IN PULSED TIG WELDS OF AISI 316L STAINLESS STEEL

ADVISOR: ASSOC. PROF. GOBBOON LOTHONGKUM, Dr.-Ing, 92 pp.

The objectives of this work were to investigate effects of 1%, 2%, 3% and 4%(v/v) nitrogen and 1%, 5% and 10%(v/v) hydrogen in argon shielding gas on weld bead profile and the amount of delta-ferrite in pulsed TIG welds of AISI 316L stainless steel. The weld defects were checked based on DIN 8563 BS. The specimens were prepared from a plate with a thickness of 6 mm. The welding was performed at the flat position with arc length of 2 mm. The flow rate of upper shielding gas was 15 l/min and that of lower shielding gas was 10 l/min. The tungsten electrode was 2% thorium oxide with angle tip 60° and 2.4-mm. in diameter. The angle torch was set at 75° from the vertical. The direct current electrode negative polarity was used. The welding pulsed and base currents were 130 A and 61 A, respectively. The frequency and on-time were fixed at 5 Hz and 65%, respectively. The welding speeds were varied from 2, 3, 4, 5, 6 and 7 mm. /sec. It was found that increasing hydrogen in shielding gas increased the volume of weld metal but increasing welding speeds decreased the volume of weld metal. The D/W ratios increased when increasing hydrogen in argon shielding gas. For welding speed over 3 mm. /sec, the D/W ratios tend to be constant when the 5% and 10%(v/v) hydrogen were mixed in argon shielding gas. At the welding speeds from 5 to 7 mm./sec, the D/W ratios were constant for all shielding gas. Mixing nitrogen in argon shielding gas had no influence on the D/W ratios and weld bead. Welding with 10% (v/v) hydrogen in argon shielding gas at welding speed of 2 mm./sec resulted in incompletely filled groove and excessive penetration in weld metal. When increasing hydrogen in argon shielding gas, the delta-ferrite of weld metal increased. However, increasing nitrogen in shielding gases and increasing welding speeds, the delta-ferrite of weld metal decreased. The grain size of austenite in weld metal when welding with 5% (v/v) and 10% (v/v) hydrogen in argon shielding gas was higher than when welding with 1% (v/v) hydrogen in argon shielding gas. Increasing nitrogen in argon shielding gas resulted in increasing nitrogen content of weld metal. However, increasing hydrogen in argon shielding gas resulted in decreasing the nitrogen content of weld metal. Increasing welding speeds had no influence on nitrogen content of weld metal.

Department : METTALLURGICAL ENGINEERING

Student's Signature

Field of Study : METTALLURGICAL ENGINEERING

Advisor's Signature

Academic Year : 2009

Prak Pak.

Gobboon Lothongkum

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ดีด้วยความช่วยเหลือและการสนับสนุนของ รองศาสตราจารย์ ดร. กอบบุญ หล่อทองคำ อาจารย์ที่ปรึกษาและเป็นผู้จัดหาทุนวิจัย ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ที่สนับสนุนทุนวิจัยบางส่วน ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติและบริษัท SIWA TESTING INSPECTION & CONSULTING CO., LTD ที่อนุเคราะห์การใช้เครื่องมือวิเคราะห์ชิ้นงานทดสอบ คณะวิศวกรรมศาสตร์และมูลนิธิศิษย์เก่าจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในพระบรมราชูปถัมภ์ ที่สนับสนุนทุนการศึกษา อาจารย์ ธีเรศ ตาปิงและคุณชัยฤทธิ์ ขวัญกลับ เจ้าหน้าที่ภาควิชา วิศวกรรมอุตสาหการ เจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมเคมี เจ้าหน้าที่วิศวกรรมแหล่งน้ำ ที่ช่วยเหลือ แนะนำงานเทคนิคต่าง ๆ

ข้าพเจ้าใคร่ขอกราบขอบพระคุณ นางอารีย์รัตน์ วงศ์นิม มารดาของข้าพเจ้าที่สนับสนุน การเงินและให้กำลังใจแก่ข้าพเจ้าจนสำเร็จการศึกษา

หากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นประโยชน์แก่ผู้สนใจและวงการที่เกี่ยวข้อง ข้าพเจ้าขอมอบ คุณงามความดีแด่ผู้มีพระคุณทุกท่านที่ข้าพเจ้าได้กล่าวถึงในที่นี้

ศูนย์วิทยุทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ทัวไป.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 รูปร่างและลักษณะของรอยเชื่อม.....	3
2.2 ผลของตัวแปรการเชื่อมทิกพัลส์ต่อการเกิดเนื้อโลหะเชื่อม.....	6
2.3 อิทธิพลของตัวแปรการเชื่อมทิกต่อการเกิดรอยเชื่อมและโครงสร้างจุลภาคของเนื้อโลหะเชื่อม.....	8
2.4 การแข็งตัวของน้ำโลหะเชื่อมต่อโครงสร้างจุลภาคของเนื้อโลหะเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิต.....	13
2.5 ผลของส่วนผสมเคมีต่อโครงสร้างจุลภาคของเนื้อโลหะเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิต.....	15
2.6 มาตรฐานรอยเชื่อม DIN 8563 BS.....	16
บทที่ 3 อุปกรณ์ เครื่องมือการทดลอง และวิธีการทดลอง.....	19
3.1 อุปกรณ์ เครื่องมือการทดลอง.....	19
3.2 การเตรียมชิ้นงานสำหรับการทดลอง.....	22
3.3 ตัวแปรในการทดลองเชื่อม.....	23
3.4 ขั้นตอนการทดลอง.....	24
3.5 การตรวจสอบรอยเชื่อม.....	25

บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง.....	28
4.1 ผลของก๊าซไนโตรเจนและก๊าซไฮโดรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอนต่อข้อบกพร่องรอยเชื่อมตามมาตรฐาน DIN 8563 ระดับ BS.....	28
4.2 ผลของความเร็วเชื่อมและปริมาณก๊าซไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอนที่ผสมก๊าซไฮโดรเจนต่อรูปร่างของรอยเชื่อม.....	31
4.3 ผลของความเร็วเชื่อมและปริมาณก๊าซไฮโดรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอนต่อรูปร่างของรอยเชื่อม.....	34
4.4 ผลของก๊าซไนโตรเจนและก๊าซไฮโดรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอน ต่อปริมาณเดลตา-เฟร์ไรต์ของเนื้อโลหะเชื่อม.....	37
4.5 ผลของปริมาณก๊าซไนโตรเจนและก๊าซไฮโดรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอนต่อปริมาณเดลตา-เฟร์ไรต์ในเนื้อโลหะเชื่อมและขนาดเกรนออกสเตไนต์.....	41
4.6 ผลของก๊าซไนโตรเจนกับก๊าซไฮโดรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอนและความเร็วเชื่อมต่อปริมาณการละลายไนโตรเจนในเนื้อโลหะเชื่อม.....	44
4.7 การเปรียบเทียบผลทดลองกับงานวิจัยอื่น.....	46
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	48
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	48
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	49
รายการอ้างอิง.....	50
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก.....	55
ภาคผนวก ข.....	56
ภาคผนวก ค.....	58
ภาคผนวก ง.....	64
ภาคผนวก จ.....	70
ภาคผนวก ฉ.....	73
ภาคผนวก ช.....	75
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	77

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	มาตรฐานรอยเชื่อม DIN 8563 ระดับ BS สำหรับการเชื่อมแบบต่อชนด้วยวิธีเชื่อมแบบหลอมละลาย.....	17
3.1	ส่วนผสมเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิตเกรด 316L.....	22
3.2	ค่าเทียบเท่าโครเมียมและนิกเกิล ของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิตเกรด 316L...	23
3.3	ตัวแปรคงที่.....	23
3.4	ตัวแปรการทดลอง.....	24
ก.1	คุณสมบัติของก๊าซปกคลุมที่ใช้สำหรับการเชื่อมทิก.....	55
ง.1	ผลของความเร็วเชื่อมและปริมาณก๊าซไฮโดรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอนต่อรอยซึมลึกของเนื้อโลหะเชื่อม.....	64
ง.2	ผลของความเร็วเชื่อมและปริมาณก๊าซไฮโดรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอนต่อความกว้างของเนื้อโลหะเชื่อม.....	64
ง.3	ผลของความเร็วเชื่อมและปริมาณก๊าซไฮโดรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอนต่ออัตราส่วนรอยซึมลึกต่อความกว้างของเนื้อโลหะเชื่อม.....	65
ง.4	ผลของปริมาณก๊าซไฮโดรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอน ที่ผสมก๊าซไฮโดรเจน 1 เปอร์เซ็นต์ ต่อรอยซึมลึกของเนื้อโลหะเชื่อม.....	65
ง.5	ผลของปริมาณก๊าซไฮโดรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอน ที่ผสมก๊าซไฮโดรเจน 1 เปอร์เซ็นต์ ต่อความกว้างของเนื้อโลหะเชื่อม.....	66
ง.6	ผลของปริมาณก๊าซไฮโดรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอน ที่ผสมก๊าซไฮโดรเจน 1 เปอร์เซ็นต์ ต่ออัตราส่วนรอยซึมลึกต่อความกว้างของเนื้อโลหะเชื่อม.....	66
ง.7	ผลของปริมาณก๊าซไฮโดรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอน ที่ผสมก๊าซไฮโดรเจน 5 เปอร์เซ็นต์ ต่อรอยซึมลึกของเนื้อโลหะเชื่อม.....	67
ง.8	ผลของปริมาณก๊าซไฮโดรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอน ที่ผสมก๊าซไฮโดรเจน 5 เปอร์เซ็นต์ ต่อความกว้างของเนื้อโลหะเชื่อม.....	67
ง.9	ผลของปริมาณก๊าซไฮโดรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอน ที่ผสมก๊าซไฮโดรเจน 5 เปอร์เซ็นต์ ต่ออัตราส่วนรอยซึมลึกต่อความกว้างของเนื้อโลหะเชื่อม.....	68
ง.10	ผลของปริมาณก๊าซไฮโดรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอน ที่ผสมก๊าซไฮโดรเจน 10 เปอร์เซ็นต์ ต่อรอยซึมลึกของเนื้อโลหะเชื่อม.....	68

ง.11	ผลของปริมาณก๊าซไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอน ที่ผสมก๊าซไฮโดรเจน 10 เปอร์เซ็นต์ ต่อความกว้างของเนื้อโลหะเชื่อม.....	69
ง.12	ผลของปริมาณก๊าซไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอน ที่ผสมก๊าซไฮโดรเจน 10 เปอร์เซ็นต์ ต่ออัตราส่วนรอยเชื่อมลึกต่อความกว้างของเนื้อโลหะเชื่อม.....	69
ด.1	ผลของปริมาณก๊าซไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอนต่อเดลตา-เฟร์ไรต์ของเนื้อโลหะเชื่อมเมื่อผสมกับก๊าซไฮโดรเจน 1 เปอร์เซ็นต์.....	73
ด.2	ผลของปริมาณก๊าซไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอนต่อเดลตา-เฟร์ไรต์ของเนื้อโลหะเชื่อมเมื่อผสมกับก๊าซไฮโดรเจน 5 เปอร์เซ็นต์.....	73
ด.3	ผลของปริมาณก๊าซไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอนต่อเดลตา-เฟร์ไรต์ของเนื้อโลหะเชื่อมเมื่อผสมกับก๊าซไฮโดรเจน 10 เปอร์เซ็นต์.....	74
ช.1	ปริมาณไนโตรเจนและออกซิเจนในเนื้อโลหะพื้น.....	75
ช.2	ปริมาณไนโตรเจนและออกซิเจนในเนื้อโลหะเชื่อม เมื่อใช้ก๊าซไฮโดรเจนผสมในก๊าซปกคลุมอาร์กอนที่มีก๊าซไนโตรเจน 2 เปอร์เซ็นต์ และความเร็ว 3 มิลลิเมตรต่อวินาที.....	75
ช.3	ปริมาณไนโตรเจนและออกซิเจนในเนื้อโลหะเชื่อม เมื่อใช้ก๊าซไนโตรเจนผสมในก๊าซปกคลุมอาร์กอนที่มีก๊าซไฮโดรเจน 5 เปอร์เซ็นต์ และความเร็ว 3 มิลลิเมตรต่อวินาที.....	75
ช.4	ผลของความเร็วเชื่อมต่อปริมาณไนโตรเจนและออกซิเจนในเนื้อโลหะเชื่อม เมื่อใช้ก๊าซไฮโดรเจน 5 เปอร์เซ็นต์ และก๊าซไนโตรเจน 2 เปอร์เซ็นต์ ผสมในก๊าซปกคลุมอาร์กอน.....	76

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	พื้นที่หน้าตัดของรอยเชื่อม.....	4
2.2	วัฏจักรความร้อนของการเชื่อมอาร์กในเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ.....	4
2.3	แรงขับต่าง ๆ (Driving forces) ในปอลิโหะของการเชื่อมทิกพัลส์	5
2.4	ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าพัลส์และจุดหลอมละลายที่เกิดขึ้นเป็นรอยเชื่อม.....	6
2.5	แผนภาพแสดงชนิดรอยบกพร่องที่เกิดขึ้นสัมพันธ์กับความเร็วเชื่อมกับกระแสไฟฟ้าเชื่อม ของการเชื่อมแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิต์ โดยวิธีเชื่อมทิกพัลส์.....	8
2.6	ความสัมพันธ์ของปริมาณเดลตา-เฟอไรต์ กับปริมาณไนโตรเจนในเนื้อโลหะเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิต์.....	10
2.7	การเปลี่ยนแปลงปริมาณไนโตรเจนในเนื้อโลหะเชื่อม โดยวิธีเชื่อมทิกที่ใช้ก๊าซไนโตรเจนผสมในก๊าซปกคลุมอาร์กอน.....	11
2.8	อิทธิพลของปริมาตรไฮโดรเจนในอาร์กอนต่อปริมาตรของเนื้อโลหะเชื่อม.....	12
2.9	โครงสร้างมหภาคเนื้อโลหะเชื่อมที่ใช้ก๊าซไฮโดรเจนผสมในก๊าซอาร์กอน.....	12
2.10	โครงสร้างมหภาคเนื้อโลหะเชื่อมที่ใช้ก๊าซปกคลุมต่างกัน.....	13
2.11	แผนภูมิสมมติสองมิติ (Pseudobinary) ของ Fe-Cr-Ni ที่ 70% Fe	13
2.12	ลักษณะการแข็งตัวของน้ำโลหะเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิต์เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนค่าโครเมียมเทียบเท่าต่อนิกเกิลเทียบเท่า.....	14
2.13	แผนภูมิ Schaeffler Diagram แสดงอิทธิพลของส่วนผสมเคมี ต่อโครงสร้างจุลภาคของเนื้อโลหะเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิต์.....	15
3.1	เครื่องเชื่อม Miller / Syncrowave 350 Ampere Constant Current AC / DC Arc Welding.....	19
3.2	ชุดจับยึดชิ้นงานที่ใช้ในการทดลอง และชุดป้อนก๊าซปกคลุมด้านล่าง.....	20
3.3	แผนภูมิการควบคุมก๊าซปกคลุมด้านบนและด้านล่างชิ้นงานทดลอง.....	21
3.4	โครงสร้างจุลภาคเนื้อโลหะพื้นของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิต์ 316L.....	22
3.5	การเตรียมชิ้นงานสำหรับตรวจสอบโครงสร้างของเนื้อโลหะเชื่อม.....	25
3.6	ชุดเครื่องมือวัดปริมาณเดลตา-เฟอไรต์ในรอยเชื่อม.....	26

3.7	Oxygen-Nitrogen Analyzer ของ HORIBA รุ่น EMGA 620W.....	27
4.1	ตัวอย่างข้อบกพร่องของรอยเชื่อมเมื่อใช้ก๊าซปกคลุมอาร์กอนผสมก๊าซไฮโดรเจน 10 เปอร์เซ็นต์ และก๊าซไนโตรเจน 0, 2 และ 4 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเร็วเชื่อม 2 มิลลิเมตร ต่อวินาที.....	28
4.2	ผลของความเร็วเชื่อมและปริมาณก๊าซไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอนที่ผสมก๊าซไฮโดรเจน 5 เปอร์เซ็นต์ ต่อรูปร่างรอยเชื่อม.....	31
4.3	ผลของความเร็วเชื่อมและปริมาณก๊าซไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอนที่ผสมก๊าซไฮโดรเจน 5 เปอร์เซ็นต์ ต่อรอยขี้มดึกของเนื้อโลหะเชื่อม.....	32
4.4	ผลของความเร็วเชื่อมและปริมาณก๊าซไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอนที่ผสมก๊าซไฮโดรเจน 5 เปอร์เซ็นต์ ต่อความกว้างของเนื้อโลหะเชื่อม.....	32
4.5	ผลของความเร็วเชื่อมและปริมาณก๊าซไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอนที่ผสมก๊าซไฮโดรเจน 5 เปอร์เซ็นต์ ต่ออัตราส่วนรอยขี้มดึกต่อความกว้างของเนื้อโลหะเชื่อม.....	33
4.6	ผลของความเร็วเชื่อมและปริมาณก๊าซไฮโดรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอนต่อรูปร่างรอยเชื่อม.....	34
4.7	ผลของความเร็วเชื่อมและปริมาณก๊าซไฮโดรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอนต่อรอยขี้มดึกของเนื้อโลหะเชื่อม.....	35
4.8	ผลของความเร็วเชื่อมและปริมาณก๊าซไฮโดรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอนต่อความกว้างของเนื้อโลหะเชื่อม.....	36
4.9	ผลของความเร็วเชื่อมและปริมาณก๊าซไฮโดรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอนต่ออัตราส่วนรอยขี้มดึกต่อความกว้างของเนื้อโลหะเชื่อม.....	36
4.10	ผลของความเร็วเชื่อมและปริมาณก๊าซไฮโดรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอนต่อปริมาณเดลตา-เฟร์ไรต์ในเนื้อโลหะเชื่อม.....	37
4.11	ผลของความเร็วเชื่อมและปริมาณก๊าซไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอน ที่ผสมก๊าซไฮโดรเจน 1 เปอร์เซ็นต์ ต่อปริมาณเดลตา-เฟร์ไรต์ในเนื้อโลหะเชื่อม	38
4.12	ผลของความเร็วเชื่อมและปริมาณก๊าซไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอน ที่ผสมก๊าซไฮโดรเจน 5 เปอร์เซ็นต์ ต่อปริมาณเดลตา-เฟร์ไรต์ในเนื้อโลหะเชื่อม.....	39
4.13	ผลของความเร็วเชื่อมและปริมาณก๊าซไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอน ที่ผสมก๊าซไฮโดรเจน 10 เปอร์เซ็นต์ ต่อปริมาณเดลตา-เฟร์ไรต์ในเนื้อโลหะเชื่อม.....	39

4.14	ผลของปริมาณก๊าซไฮโดรเจนและความเร็วต่อปริมาณเดลตา-เฟร์ไรต์ในเนื้อโลหะเชื่อม ที่ใช้ก๊าซไนโตรเจน 2 เปอร์เซนต์ ในก๊าซปกคลุมอาร์กอน.....	41
4.15	ผลของปริมาณก๊าซไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอนที่ผสมก๊าซไฮโดรเจน 5 เปอร์เซนต์ ต่อปริมาณเดลตา-เฟร์ไรต์ในเนื้อโลหะเชื่อม ที่ความเร็วเชื่อม 3 มิลลิเมตรต่อวินาที.....	42
4.16	ผลของก๊าซไฮโดรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอนต่อปริมาณเดลตา-เฟร์ไรต์ในเนื้อโลหะเชื่อมและขนาดเกรนออสเทนิต์ ที่ความเร็วเชื่อม 3 มิลลิเมตรต่อวินาที.....	43
4.17	ผลของปริมาณก๊าซไฮโดรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอนต่อปริมาณไนโตรเจนในเนื้อโลหะเชื่อม เมื่อผสมก๊าซไนโตรเจน 2 เปอร์เซนต์ ที่ความเร็วเชื่อม 3 มิลลิเมตรต่อวินาที	44
4.18	เปรียบเทียบปริมาณการละลายไนโตรเจนในเนื้อโลหะเชื่อมของงานวิจัยนี้กับ J.F Lancaster.....	44
4.19	ผลของความเร็วเชื่อมต่อปริมาณไนโตรเจนในเนื้อโลหะเชื่อม ที่ใช้ก๊าซไฮโดรเจน 5 เปอร์เซนต์ และก๊าซไนโตรเจน 2 เปอร์เซนต์ ผสมในก๊าซปกคลุมอาร์กอน.....	45
4.20	ปริมาณไนโตรเจนในเนื้อโลหะเชื่อมของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิต์ เปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่น.....	46
ข.1	ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอนต่อพื้นที่ได้กราฟจากเทคนิคก๊าซโครมาโตกราฟี.....	56
ข.2	ความสัมพันธ์ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอนกับสเกลมาโนมิเตอร์ F3.....	56
จ.1	หลักการพื้นฐานการวัดปริมาณเดลตา-เฟร์ไรต์ในเนื้อโลหะเชื่อมด้วยเครื่อง Feritscope MP3C.....	70

คำอธิบายคำย่อและสัญลักษณ์

คำย่อ - สัญลักษณ์	คำเต็ม	ความหมาย
Ip	Peak Pulse Current	กระแสไฟฟ้าพัลส์
Ib	Base Current	กระแสไฟฟ้าเบส
tp	Pulse Current Duration	ช่วงเวลากระแสไฟฟ้าพัลส์
tb	Base Current Duration	ช่วงเวลากระแสไฟฟ้าเบส
T	Period of Cycle	ช่วงเวลาระหว่างกระแสไฟฟ้าพัลส์
Im	Average Current	ค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ย
Irms	Root Mean Square Current	กระแสไฟฟ้าเฉลี่ยค่ากลางเรขาคณิต
Vs	Welding Speed	ความเร็วเชื่อม
Ar	Argon Gas	ก๊าซปกคลุมอาร์กอน
Ar+H2	Argon Shielding Gas Mixed with Hydrogen	ก๊าซปกคลุมอาร์กอนผสม ก๊าซไฮโดรเจน
Ar+H2+N2	Argon Shielding Gas Mixed with Hydrogen and Nitrogen	ก๊าซปกคลุมอาร์กอนผสม ก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซไนโตรเจน
W	Width of Weld Metal	ความกว้างเนื้อโลหะเชื่อม
D	Depth of Weld Metal	รอยซึมลึกเนื้อโลหะเชื่อม
Δa_1	Excessive Weld Metal	เนื้อโลหะเชื่อมส่วนเกิน
Δa_2	Incompletely Filled Groove	รอยเชื่อมที่ไม่สมบูรณ์

Δa_3	Excessive Penetration	รอยกินลึก
Creq	Chromium Equivalent	ค่าโครเมียมเทียบเท่า
Nieq	Nickel Equivalent	ค่านิกเกิลเทียบเท่า



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ในอุตสาหกรรมการผลิตทั้งขนาดเล็ก ขนาดกลาง และขนาดใหญ่ ได้นำเหล็กต่างๆ มาใช้ในกระบวนการผลิต หลายชนิดด้วยกัน เช่น เหล็กกล้าคาร์บอน เหล็กกล้าผสม และเหล็กกล้าไร้สนิมหรือเหล็กกล้าสเตนเลส เป็นต้น เหล็กกล้าไร้สนิมเป็นเหล็กที่สำคัญและที่ใช้กันแพร่หลายในกระบวนการผลิต เนื่องจากเหล็กกล้าชนิดนี้มีลักษณะพิเศษเป็นสภาวะที่เรียกว่า พาสซีฟ (passive state) [1-2] สภาวะนี้ช่วยป้องกันการกัดกร่อนจากสภาพแวดล้อม เพราะเหล็กชนิดนี้มีธาตุโครเมียมผสมอยู่มาก ทำให้โครเมียมทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในสภาพบรรยากาศ เกิดเป็นชั้นฟิล์มโครเมียมออกไซด์ปกคลุมที่ผิวหน้าเหล็กกล้าไร้สนิม

เนื่องจากเหล็กกล้าไร้สนิมมีลักษณะเด่นคือ สามารถป้องกันการกัดกร่อนจากสภาพแวดล้อมได้ ดังนั้นอุตสาหกรรมมากมาย จึงนำเหล็กกล้าชนิดนี้มาใช้ในกระบวนการผลิตกันแพร่หลาย เช่น อุตสาหกรรมปิโตรเลียม อุตสาหกรรมเคมี อุตสาหกรรมด้านพลังงาน อุตสาหกรรมเกี่ยวกับสิ่งแวดล้อม อุตสาหกรรมอาหารและยา เหล็กกล้าไร้สนิมที่นำมาใช้ในอุตสาหกรรมเหล่านี้ได้แก่ เหล็กกล้าไร้สนิมเฟร์ไรต์ ออสเทนไนต์ มาร์เทนไซต์ ดิวเพล็กซ์ และพีเฮช [3] เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนต์นิยมใช้กันแพร่หลาย เพราะทนต่อสภาพการกัดกร่อนได้ดี มีคุณสมบัติทางกลค่อนข้างดี โดยเฉพาะการขึ้นรูปและการเชื่อมง่ายกว่าชนิดอื่น ตัวอย่างเหล็กเกรดนี้ได้แก่ 304 304L 308 310 316 316L เป็นต้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนต์ เกรด 316L เป็นเหล็กที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวาง ทั้งที่อุณหภูมิต่ำและอุณหภูมิสูง [4-7]

การเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมแผ่นหนา เนื่องจากวิธีการเชื่อมทิกพัลส์จะช่วยลดปัญหาเรื่องการแตกร่อน จึงนิยมใช้เชื่อมทีวแรก แล้วเชื่อมตามด้วย MIG หรือ MAG [1-2,7,8] วิธีการเชื่อมทิกพัลส์มีตัวแปรที่สำคัญหลายตัวแปร เช่น ชนิดก๊าซปกคลุม กระแสพัลส์ กระแสเบส ความเร็วเชื่อม ความถี่ ค่า %On Time เป็นต้น ในงานวิจัยนี้จะศึกษาที่ก๊าซปกคลุมอาร์กอนที่ผสมกับก๊าซไฮโดรเจน และก๊าซไนโตรเจน บทบาทของก๊าซไฮโดรเจนจะให้ความร้อนระหว่างการเชื่อมสูงเพราะมีค่าความนำความร้อนสูง ส่งผลให้สามารถเพิ่มความเร็วการเชื่อม ลดเวลาการเชื่อมและต้นทุนการผลิต ปริมาณไนโตรเจนที่มีอยู่ในเนื้อโลหะพื้นไม่มีผลกระทบต่อการแข็งตัวของน้ำโลหะในระหว่างการเชื่อม [9-11] ในงานวิจัยนี้ใช้ก๊าซไนโตรเจนผสมกับก๊าซปกคลุมอาร์กอน

เพื่อควบคุมปริมาณเดลตา-เพิร์ไรต์ ในเนื้อโลหะเชื่อมให้อยู่ในช่วงปริมาณที่เหมาะสม คือ 3-10 เปอร์เซ็นต์ เพื่อลดการแตกร้าวขณะร้อน [5, 8, 12-13]

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อศึกษาผลของก๊าซไนโตรเจนและก๊าซไฮโดรเจนที่ผสมในก๊าซปกคลุมอาร์กอนต่ออัตราส่วนรอยขี้ผึ้งและความกว้าง ปริมาณเดลตา-เพิร์ไรต์ในเนื้อเชื่อมของเหล็กกล้าไร้สนิม ออสเทนไนต์ เกรด 316L ตรวจสอบข้อบกพร่องให้เป็นไปตามมาตรฐาน DIN 8563 ชั้นคุณภาพ BS

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษาหาสัดส่วนส่วนก๊าซผสมระหว่างก๊าซไฮโดรเจน 1, 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์ และ/หรือ ก๊าซไนโตรเจน 1, 2, 3 และ 4 เปอร์เซ็นต์ โดยปริมาตรในก๊าซอาร์กอน ความเร็วเชื่อม สำหรับการเชื่อมทิกพัลส์ที่เหมาะสม เพื่อเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนต์ 316L แผ่นหนา 6 มิลลิเมตร โดยไม่เติมลวดเชื่อม ที่ตำแหน่งท่าราบ และตรวจสอบข้อบกพร่องรอยเชื่อมตามมาตรฐาน DIN 8563 ชั้นคุณภาพ BS

2. ศึกษาปริมาณเดลตา-เพิร์ไรต์ในเนื้อโลหะเชื่อมที่ได้จากข้อ 1

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้สัดส่วนส่วนก๊าซผสมระหว่างก๊าซไฮโดรเจน 1, 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์ และ/หรือ ก๊าซไนโตรเจน 1, 2, 3 และ 4 เปอร์เซ็นต์ โดยปริมาตรในก๊าซอาร์กอน ความเร็วเชื่อม สำหรับการเชื่อมทิกพัลส์ที่เหมาะสม เพื่อเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนต์ 316L แผ่นหนา 6 มิลลิเมตร โดยไม่เติมลวดเชื่อม ที่ตำแหน่งท่าราบ และรอยเชื่อมสมบูรณ์ไร้ข้อบกพร่องตามมาตรฐาน DIN 8563 ชั้นคุณภาพ BS

2. เพื่อเป็นข้อมูลเบื้องต้นสำหรับการเชื่อมจริงด้วยก๊าซปกคลุม 3 ชนิด คือ ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และอาร์กอน

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

กระบวนการเชื่อมทิก เป็นกระบวนการเชื่อมอาร์กที่ความร้อนเกิดขึ้นระหว่างอิเล็กโทรด และชิ้นงาน ในระหว่างการเชื่อมก๊าซปกคลุมจะป้องกัน อิเล็กโทรด บ่อโลหะเหลว และบริเวณ ผลกระทบความร้อน (Heat Affected Zone: HAZ) จากบรรยากาศที่อยู่ล้อมรอบขณะทำการเชื่อม เพื่อไม่ให้เกิดออกซิเดชันกับชิ้นงาน ก๊าซปกคลุมที่ใช้ส่วนใหญ่จะเป็นก๊าซเฉื่อย หรือก๊าซที่ผสมใน ก๊าซเฉื่อย เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการเชื่อม กระบวนการเชื่อมที่ประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม ได้แก่ การเชื่อมด้วยมือ การเชื่อมแบบกึ่งอัตโนมัติ และการเชื่อมแบบอัตโนมัติ วัสดุที่นำมาเชื่อม เช่น เหล็กกล้าคาร์บอน เหล็กกล้าไร้สนิม อลูมิเนียม ทองแดง นิกเกิลอัลลอย ไททาเนียมอัลลอย เป็นต้น วัสดุที่ยากต่อการเชื่อม ได้แก่ ตะกั่วและสังกะสี เพราะมีจุดหลอมเหลวต่ำ การปรับลักษณะ การเชื่อมมีด้วยกันสามลักษณะ [14] ได้แก่

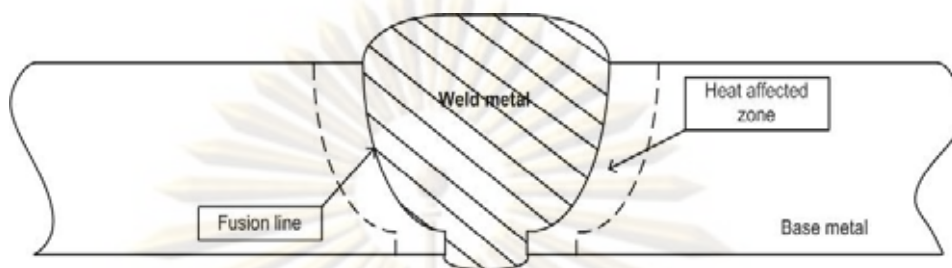
1) ไฟฟ้ากระแสตรงอิเล็กโทรดเป็นลบ (Direct Current Electrode Negative: DCEN) การปรับตั้งลักษณะการเชื่อมแบบนี้ ความร้อนจะไหลผ่านอิเล็กโทรดประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์ และไหลผ่านชิ้นงาน 70 เปอร์เซ็นต์ ทำให้รอยเชื่อมที่ได้มีรอยซึมลึกสูงแต่ความกว้างต่ำ วิธีนี้จะเหมาะสำหรับงานที่ต้องการรอยซึมลึกสูง

2) ไฟฟ้ากระแสตรงอิเล็กโทรดเป็นบวก (Direct Current Electrode Positive: DCEP) ลักษณะการปรับตั้งแบบนี้จะตรงข้ามกับแบบที่หนึ่ง คือ ความร้อนจะไหลผ่านอิเล็กโทรด 70 เปอร์เซ็นต์ และไหลผ่านชิ้นงาน 30 เปอร์เซ็นต์ ทำให้รอยเชื่อมที่ได้มีรอยซึมลึกที่ต่ำ แต่ความกว้างสูง วิธีการนี้เหมาะสำหรับการเชื่อมชิ้นงานบาง

3) กระแสสลับ (Alternating Current) การปรับตั้งลักษณะการเชื่อมแบบนี้ความร้อน จะไหลผ่านอิเล็กโทรดและชิ้นงานเท่ากัน คือ 50 เปอร์เซ็นต์ รอยซึมลึกและความกว้างของ รอยเชื่อมที่ได้ จะอยู่ตรงกลางระหว่างรอยเชื่อมของสองแบบข้างต้น วิธีนี้เหมาะสำหรับการ เชื่อม อลูมิเนียม ทองแดง เพราะช่วยในการกำจัดออกไซด์จากผิวหน้าของชิ้นงาน

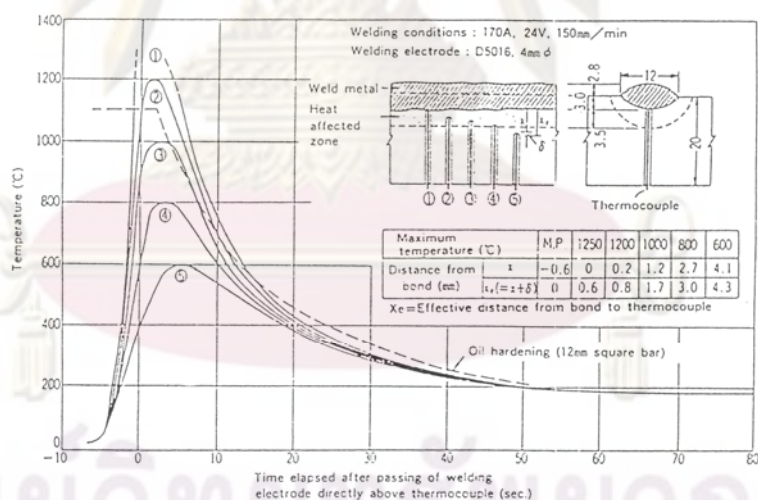
2.1 รูปร่างและลักษณะของรอยเชื่อม

การอาร์กของอิเล็กโทรดที่บริเวณเนื้อโลหะเชื่อมของวัสดุ ทำให้เนื้อโลหะมีอุณหภูมิสูงจึง เกิดเป็นส่วนต่าง ๆ ขึ้นภายในวัสดุที่มีการเชื่อม ได้แก่ เนื้อโลหะเชื่อม บริเวณผลกระทบความร้อน



รูปที่ 2.1 พื้นที่หน้าตัดของรอยเชื่อม

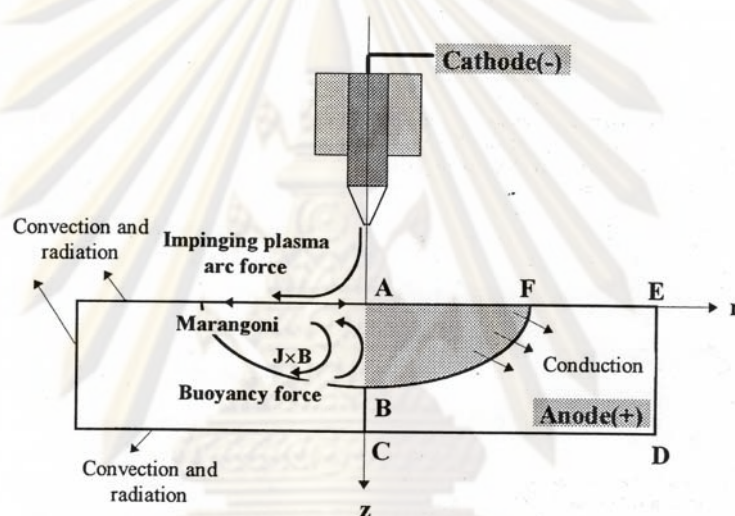
รูปที่ 2.2 แสดงวัฏจักรความร้อนของการเชื่อมอาร์ค จากกราฟจะเห็นว่าใช้เทอร์โมคอปเปอร์ วัดอุณหภูมิที่เนื้อโลหะเชื่อม ที่บริเวณผลกระทบทางความร้อน และที่เนื้อโลหะพื้น เปรียบเทียบกับเวลา ผลที่ออกมาคืออัตราการเย็นตัวทุกจุดจะลดลงอย่างรวดเร็ว



รูปที่ 2.2 วัฏจักรความร้อนของการเชื่อมอาร์คในเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ [15]

จากการศึกษาของ W.H. Kim และ S.J. Na [16] เรื่องการไหลของความร้อนและโลหะเหลวในบ่อน้ำโลหะเชื่อมด้วยการเชื่อมทิกพัลส์ การทดลองใช้เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนต์ AISI 304 เป็นชิ้นงานเพื่อพิจารณาแรงขับ (Driving forces) ต่าง ๆ ที่มีผลต่อบ่อโลหะเหลวในระหว่างการเชื่อม ได้แก่

- 1) Electromagnetic หรือ Lorentz force เกิดจากความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า เชื่อมต่อสนามแม่เหล็ก
- 2) ความตึงผิว (Surface tension) หรือ Marangoni force เกิดจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกับความตึงผิวของบ่อโลหะเหลว
- 3) Impinging plasma arc force หรือ Gas drag force เกิดจากโมเมนตัมของพลาสมา (Plasma jet momentum) บนผิวของบ่อโลหะเชื่อม
- 4) แรงลอยตัว (Buoyancy force) ขึ้นกับอุณหภูมิของบ่อโลหะเหลว



รูปที่ 2.3 แรงขับต่าง ๆ (Driving forces) ในบ่อโลหะของการเชื่อมทิกพัลส์ [16]

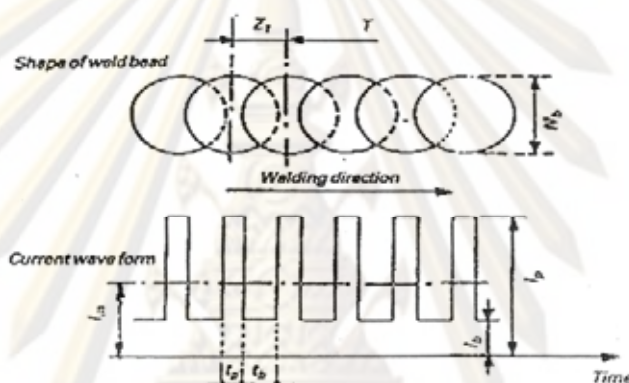
รูปที่ 2.3 แสดงแรงขับต่าง ๆ ในบ่อโลหะเชื่อมที่เกิดขึ้นจากการเชื่อมทิกพัลส์ โดยความตึงผิว (Surface tension) หรือ Marangoni force ส่งผลกับการเปลี่ยนรูปร่างของโลหะเชื่อมมากที่สุดในระหว่างการเชื่อม [11, 16] คือ การเปลี่ยนแปลงความตึงผิวต่ออุณหภูมิจะเพิ่มขึ้น $(\partial\gamma/\partial T) > 0$ เมื่อมีธาตุบางชนิดผสม เช่น ซัลเฟอร์ ออกซิเจน และเซเลเนียม ทำให้การเปลี่ยนแปลงความตึงผิวต่อรัศมีลดลง $(\partial\gamma/\partial r) < 0$ รูปร่างของโลหะเชื่อมจึงมีรอยซึมลึกสูงและแคบ Electromagnetic force ทำให้น้ำโลหะไหลวนรอบแกนกลางแนวอาร์ก Impinging Plasma arc force จะผลักรน้ำโลหะจากตรงกลางของบ่อโลหะเชื่อมไปสู่ขอบของรอยเชื่อม แรงลอยตัว (Buoyancy force) ทำให้ทิศทางของน้ำโลหะไหลออกสู่ด้านนอกของรอยเชื่อม

2.2 ผลของตัวแปรการเชื่อมทิกพัลส์ต่อการเกิดเนื้อโลหะเชื่อม [9]

ตัวแปรในการเชื่อมเป็นปัจจัยสำคัญสำหรับการเชื่อมด้วยทิกพัลส์ เนื่องจากจะมีผลต่อเนื้อโลหะเชื่อมและโครงสร้างจุลภาค ดังนั้นผู้ปฏิบัติจะต้องทำความเข้าใจกับตัวแปรต่าง ๆ ก่อน

2.2.1 ตัวแปรการเชื่อมทิกพัลส์ (GTAW – P)

ในการเชื่อมทิกพัลส์ [9] โลหะที่หลอมละลายจะอยู่ในช่วงกระแสไฟฟ้าพัลส์ และโลหะที่เย็นตัวจะอยู่ในช่วงกระแสไฟฟ้าเบสดังรูปที่ 2.4 ซึ่งแสดงลักษณะของกระแสไฟฟ้าพัลส์และจุดหลอมละลายที่เกิดขึ้นเป็นรอยเชื่อม



รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าพัลส์และจุดหลอมละลายที่เกิดขึ้นเป็นรอยเชื่อม [9]

ความสัมพันธ์ของตัวแปรการเชื่อมแบบพัลส์สามารถแสดงได้ ดังสมการต่อไปนี้ [9]

อัตราส่วนระหว่างค่ากระแสไฟฟ้าเบสต่อกระแสไฟฟ้าพัลส์ (RE)

$$RE = I_b / I_p \quad 2.1$$

อัตราส่วนระหว่างช่วงเวลากระแสไฟฟ้าพัลส์ต่อระยะเวลาครบรอบ (RI)

$$RI = t_p / T \quad 2.2$$

ความถี่พัลส์ (F_p)

$$F_p = 1 / T \quad 2.3$$

ค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ย (I_m)

$$I_m = (I_p t_p + I_b t_b) / T \quad 2.4$$

กระแสไฟฟ้าเฉลี่ยค่ากลางเรขาคณิต (I_{rms}, I_e)

$$I_{rms}(I_e) = \sqrt{[(I_p^2 t_p + I_b^2 t_b) / T]} \quad 2.5$$

ค่าพลังงานที่ใช้สำหรับการหลอมละลายเนื้อโลหะ (P_e)

$$P_e = V \times I_e \quad 2.6$$

ปริมาณความร้อนที่ถูกใช้สำหรับการหลอมละลายเนื้อโลหะ (W_s)

$$W_s = (\eta \times P_e) / V_s \quad 2.7$$

η = ค่าประสิทธิภาพ

V_s = ความเร็วเชื่อม

กระแสไฟฟ้าพัลส์ และกระแสไฟฟ้าเบส

การเชื่อมควรให้กระแสไฟฟ้าเบสอยู่ในระดับต่ำสุด แต่ต้องคงความเสถียรภาพไว้สำหรับการอาร์ก คือเลือกให้ต่ำกว่ากระแสไฟฟ้าพัลส์ประมาณ 2 ถึง 3 เท่า แต่ต้องคำนึงถึงโลหะที่เชื่อมด้วย เพราะถ้าหากกระแสไฟฟ้าเบสสูงเกินไป จะทำให้เกิดการสะสมปริมาณความร้อนในเนื้อโลหะเชื่อม และจะก่อให้เกิดรอยกินลึกด้านหลังของรอยเชื่อมได้

ช่วงระยะเวลาและความถี่ของกระแสไฟฟ้าพัลส์

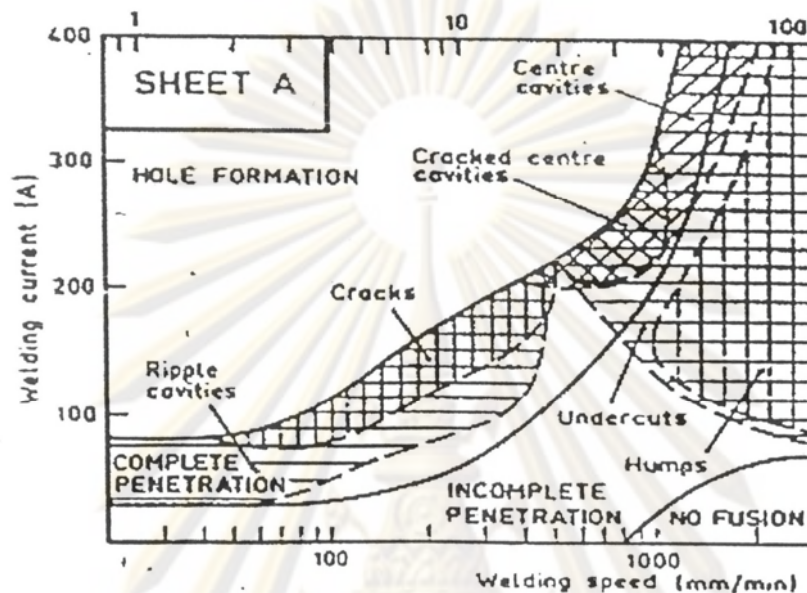
ช่วงระยะเวลาและกระแสไฟฟ้าพัลส์ต้องพิจารณาถึงความหนา และการนำความร้อนของโลหะ หากเป็นโลหะที่นำความร้อนต่ำ ควรใช้ช่วงเวลากะแสพัลส์สูง และความถี่สูง เพื่อการเย็นตัวของโลหะในช่วงเวลากะแสพัลส์เพิ่มขึ้น จึงทำให้ขนาดเกรนนั้นลดลง แต่ถ้าเป็นโลหะที่นำความร้อนสูงก็ควรใช้ช่วงเวลากะแสพัลส์ที่ต่ำ

ความเร็วเชื่อม

ความเร็วเชื่อมมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของเนื้อโลหะเชื่อม คือเมื่อความเร็วเชื่อมสูง จะทำให้การสะสมความร้อนในเนื้อโลหะเชื่อมลดลง ส่งผลให้พื้นที่หน้าตัดของเนื้อโลหะเชื่อมน้อยลง อัตราส่วนรอยซึมลึกต่อความกว้างลดลง และทำให้เกิดรอยกินลึกเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน

2.2.2 ความเร็วเชื่อม และกระแสไฟฟ้าเชื่อม

จากการศึกษาของ Kujapaa V.P. [17] เกี่ยวกับลักษณะรอยบกพร่องในเนื้อโลหะเชื่อมของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิต พบว่ากระแสไฟฟ้าเชื่อมที่สูงทำให้ปริมาตรบ่อโลหะเหลวมีขนาดเพิ่มมากขึ้น กระแสไฟฟ้าเชื่อมที่สูงและความเร็วต่ำทำให้เกิดรอยแตก และโพรงตรงกลางของเนื้อโลหะเชื่อม ทำให้ลักษณะของบ่อโลหะเหลวเปลี่ยนจากรูปทรงไข่ไปเป็นรูปร่างทรงกลม ส่งผลให้เกิดการแยกตัวของสารเจือปนและเกิดเป็นรอยแตกในเนื้อโลหะเชื่อม การเพิ่มระดับกระแสไฟฟ้าเชื่อมไม่มีผลกับการเปลี่ยนชนิดของรอยบกพร่อง แต่ทำให้รอยบกพร่องมีขนาดและปริมาณเพิ่มขึ้นที่ความเร็วเชื่อมต่ำจะเกิดรอยแตก ความเร็วเชื่อมที่สูงขึ้นจะมีรอยบกพร่องแบบโพรงตรงกลาง



รูปที่ 2.5 แผนภาพแสดงชนิดรอยบกพร่องที่เกิดขึ้นในเนื้อโลหะเชื่อมที่สัมพันธ์กับกระแสไฟฟ้าเชื่อมและความเร็วเชื่อม ของการเชื่อมแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนต์ โดยวิธีเชื่อมทิกพัลส์ [17]

2.3 อิทธิพลของตัวแปรการเชื่อมตักต่อการเกิดรอยเชื่อมและโครงสร้างจุลภาคของเนื้อโลหะเชื่อม

การเชื่อมทิกเป็นกรรมวิธีที่ใช้ก๊าซเฉื่อย (Inert Gas) มาช่วยปกคลุมชิ้นงาน เพื่อป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในระหว่างการเชื่อม ก๊าซเฉื่อยที่นิยมใช้ได้แก่ ก๊าซอาร์กอน ก๊าซไฮโดรเจน ก๊าซฮีเลียม แต่ที่นิยมใช้กันมาก คือ ก๊าซอาร์กอน เนื่องจากมีน้ำหนักมากกว่าก๊าซทั้งสองที่กล่าวไว้ข้างต้น สำหรับการทดลองในครั้งนี้ จะผสมก๊าซไฮโดรเจนเข้าไปเพื่อให้อาร์กอนสูงขึ้น ทำให้สามารถเพิ่มความเร็วในการเชื่อมได้ เนื่องจากก๊าซไฮโดรเจนมีค่าการนำความร้อนสูง เมื่อผสมกับก๊าซอาร์กอนแล้วจึงมีผลต่อค่าความร้อน (Heat Input) และลักษณะของเนื้อโลหะเชื่อมทั้งขนาดและรูปร่าง ทำให้อุตสาหกรรมสามารถลดต้นทุนการผลิตได้

จากการศึกษาของ M. Du Toit and P.C. Pistorius [10] เรื่องการควบคุมไนโตรเจนระหว่างการเชื่อมอาร์กของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนต์ โดยการเชื่อมทิกที่ใช้ก๊าซไนโตรเจนผสมในก๊าซปกคลุมอาร์กอน ไนโตรเจนสามารถละลายในโลหะเหลวได้ในระดับอะตอม จนถึงปริมาณ



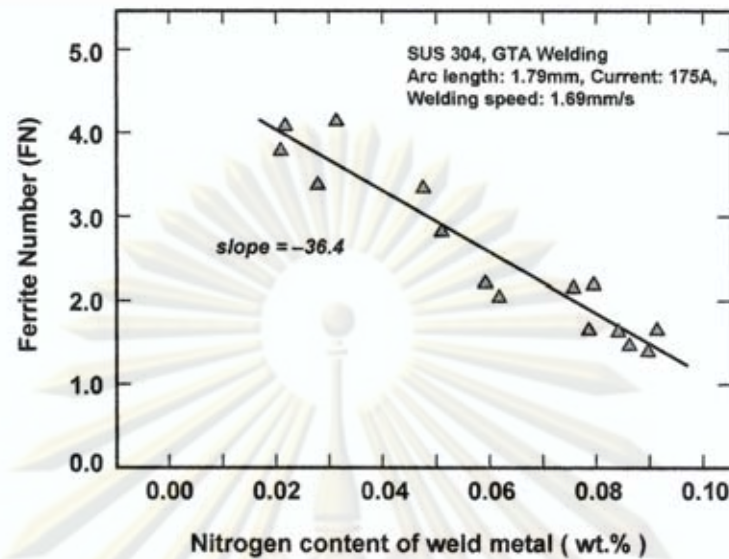
ความสามารถการละลายของไนโตรเจนในเหล็กสามารถอธิบายได้ด้วย Sievert's law ความเข้มข้นของไนโตรเจน [N] ในโลหะเหล็กมีความสัมพันธ์ เป็นสัดส่วนกับรากที่สองของความดันย่อย (Partial Pressure) ตามสมการที่ 2.9

$$[N] = K \sqrt{p_{N_2}} \quad 2.9$$

จากสมการพบว่าเมื่อเพิ่มความดันย่อย (Partial Pressure) ของก๊าซไนโตรเจน จะทำให้ปริมาณไนโตรเจนในเนื้อโลหะเพิ่มขึ้น การเพิ่มความดันย่อยนี้ทำให้ลดการสูญเสียไนโตรเจนและป้องกัน การเกิดรูพรุนระหว่างการเชื่อม

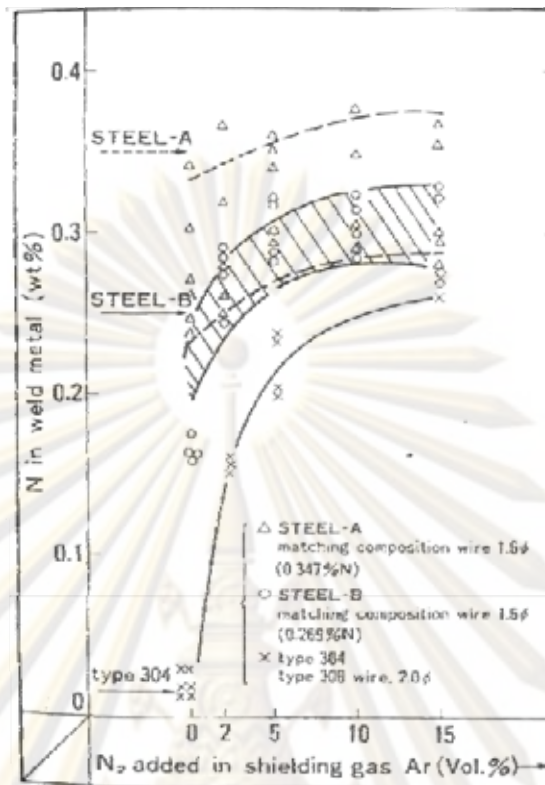
จากการศึกษาของ R.K Okagawa, R.D.Dixon และ D.L.Olson [5] เรื่องอิทธิพลของไนโตรเจนต่อโครงสร้างจุลภาคในเนื้อโลหะเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิต์ เกรด 304L จากการเชื่อมทิก โดยการผสมไนโตรเจนจาก 0 ถึง 5 เปอร์เซ็นต์ พบว่าไนโตรเจนมีผลต่อการกระจายตัวของปริมาณเดลตา-เฟร์ไรต์ แต่ปริมาณของไนโตรเจนในเนื้อโลหะพื้นไม่มีผลต่อพฤติกรรมทางแข็งตัวของเนื้อโลหะเชื่อม รูปที่ 2.6 แสดงปริมาณของเดลตา-เฟร์ไรต์กับปริมาณไนโตรเจนในเนื้อโลหะเชื่อม จากรูปจะเห็นว่าเมื่อปริมาณไนโตรเจนในเนื้อโลหะเชื่อมเพิ่มขึ้น ปริมาตรของเดลตา-เฟร์ไรต์ จะลดลงอย่างต่อเนื่อง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ของปริมาณเดลตา-เฟอไรต์ กับปริมาณไนโตรเจนในเนื้อโลหะเชื่อม เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิต์ [18]

จากการศึกษาของ T. Ogawa, K. Suzuki และ T. Zaizen [6] เรื่องความสามารถในการเชื่อมด้วยวิธีการเชื่อมทิกของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิต์ เกรด 304 ที่ผสมไนโตรเจน ส่งผลต่อการเกิดโพรง รอยแตก (Cracking) และลดคุณสมบัติการคืบ (Creep Properties) ผลปรากฏว่าเมื่อปริมาณไนโตรเจนในเนื้อโลหะเชื่อมเพิ่มขึ้น มีแนวโน้มที่จะเกิดรูพรุนและเพิ่มการเกิดรอยแตก ร้อน รูปที่ 2.7 แสดงการละลายไนโตรเจนในเนื้อโลหะเชื่อม เมื่อผสมก๊าซไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอนเพิ่มขึ้น พบว่าปริมาณไนโตรเจนในเนื้อโลหะเชื่อมเพิ่มขึ้น เมื่อผสมก๊าซไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอนเพิ่มขึ้น ความสามารถในการละลายไนโตรเจนในเนื้อโลหะเชื่อม จะขึ้นอยู่กับส่วนผสมอัลลอยที่แตกต่างกันในเนื้อโลหะเชื่อม จากการทดลองใช้ก๊าซไนโตรเจน 25 เปอร์เซ็นต์ ในก๊าซปกคลุมอาร์กอนเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิต์เกรด 304 พบว่ามีหลุมและรูพรุนขนาดใหญ่ในเนื้อโลหะเชื่อม แต่เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิต์ เกรด 310S ไม่ปรากฏทั้งหลุมและรูพรุนเนื่องจากมีโครเมียมผสมอยู่ 24.90 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร

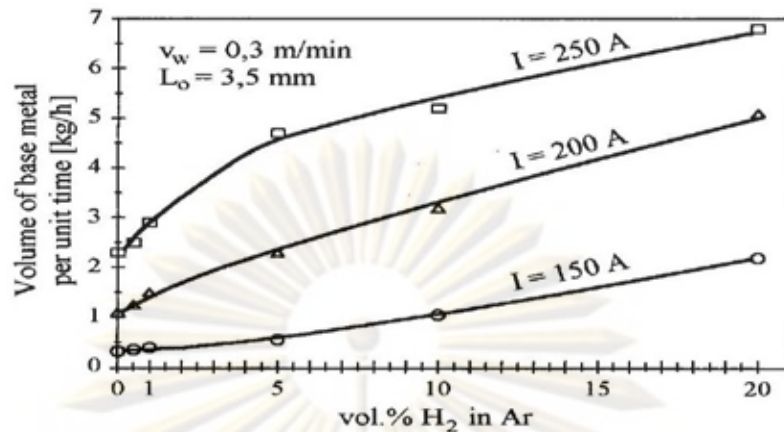


รูปที่ 2.7 การเปลี่ยนแปลงปริมาณไนโตรเจนในเนื้อโลหะเชื่อม โดยวิธีเชื่อมทิก ที่ใช้ก๊าซไนโตรเจนผสมในก๊าซปกคลุมอาร์กอน (กระแสไฟฟ้าเชื่อม 250 แอมแปร์ ความเร็วในการเชื่อม 15 เซนติเมตรต่อนาที อัตราการไหลก๊าซปกคลุม 15 ลิตรต่อนาที) [6]

จากการศึกษาของ Janez Tušek [19] ที่ทดลองเชื่อมทิกโดยใช้ก๊าซไฮโดรเจนผสมก๊าซปกคลุมอาร์กอน ที่เปลี่ยนแปลงส่วนผสมไฮโดรเจนจาก 0.5, 1, 5, 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์ เชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิต 18-8 ปรากฏว่ารอยซึมลึกมากกว่าการใช้ก๊าซอาร์กอนบริสุทธิ์ 3 ถึง 5 เท่า โดยที่ตัวแปรยังคงเดิม

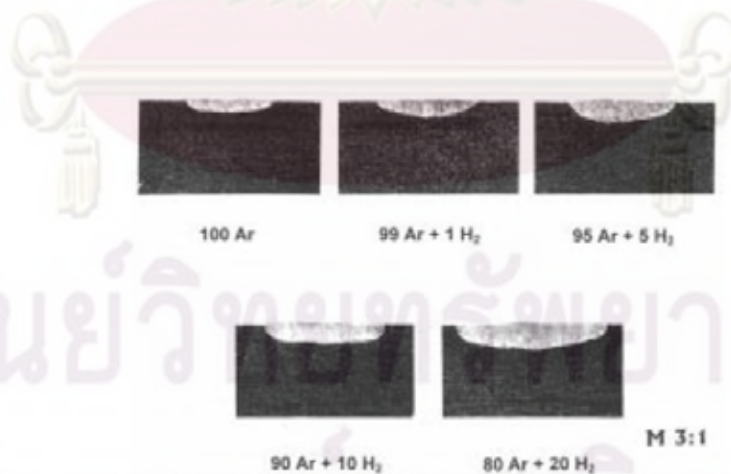
ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



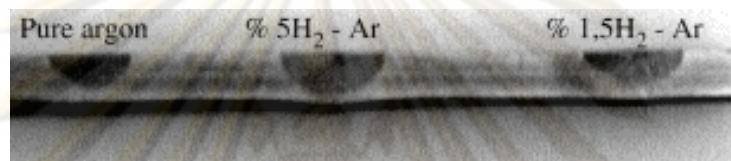
รูปที่ 2.8 อิทธิพลของปริมาณไฮโดรเจนในอาร์กอนต่อปริมาณของเนื้อโลหะเชื่อม (Speed = 0.3 m/min, L = 3.5 mm, austenitic stainless steel, electrode negative) [19]

จากรูปที่ 2.8 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณเนื้อโลหะเชื่อม ต่อหน่วยเวลากับปริมาณก๊าซไฮโดรเจนที่ผสมกับก๊าซปกคลุมอาร์กอนในการเชื่อมทิก เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติคดลอง เปรียบเทียบกับกระแสที่ต่างกันคือ 150, 200 และ 250 แอมแปร์ ผลปรากฏว่าเมื่อผสมก๊าซไฮโดรเจนมากขึ้น ปริมาณของเนื้อโลหะเชื่อมก็เพิ่มขึ้น โดยที่พารามิเตอร์ตัวอื่นคงเดิม เช่น ความเร็วเชื่อม ความยาว และขั้วอิเล็กโทรด เป็นต้น รูปร่างของเนื้อโลหะเชื่อมแสดงตามรูปที่ 2.9 ที่ใช้กระแส 200 แอมแปร์ ในการเชื่อมชิ้นงาน



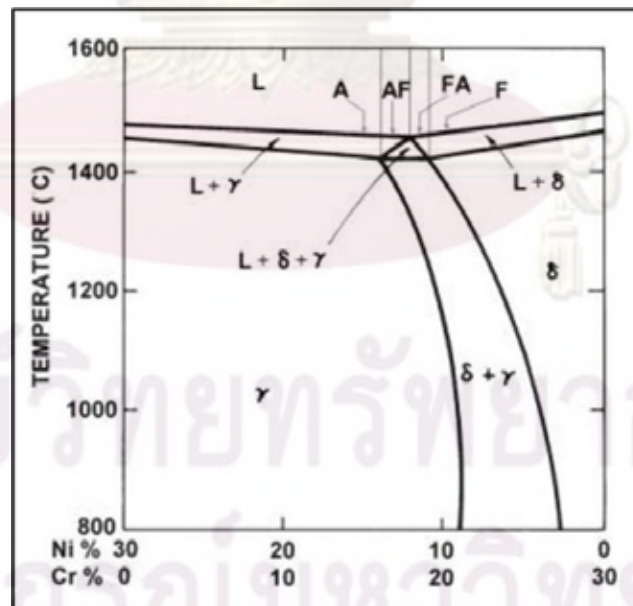
รูปที่ 2.9 โครงสร้างมหภาคเนื้อโลหะเชื่อมที่ใช้ก๊าซไฮโดรเจนผสมในก๊าซอาร์กอน [19]

จากการศึกษาของ Ahmet Durgutlu [20] ผลกระทบของไฮโดรเจนผสมกับก๊าซปกคลุมอาร์กอนในการเชื่อมทิกต่อเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิต์ 316L ในการทดลองใช้ก๊าซอาร์กอนบริสุทธิ์และก๊าซไฮโดรเจน 1.5 กับ 5 เปอร์เซ็นต์ ผสมกับก๊าซปกคลุมอาร์กอน ผลปรากฏว่า เมื่อผสมก๊าซไฮโดรเจนมากขึ้นรอยเชื่อมลึกและความกว้างก็เพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2.10 และการใช้ก๊าซไฮโดรเจน 1.5 เปอร์เซ็นต์ ผสมกับก๊าซปกคลุมอาร์กอนให้คุณสมบัติทางกลดีกว่าการใช้ก๊าซไฮโดรเจน 5 เปอร์เซ็นต์ ผสมกับก๊าซปกคลุมอาร์กอน และขนาดเกรนเฉลี่ยของเนื้อโลหะเชื่อมเพิ่มขึ้นตามปริมาณของก๊าซไฮโดรเจน



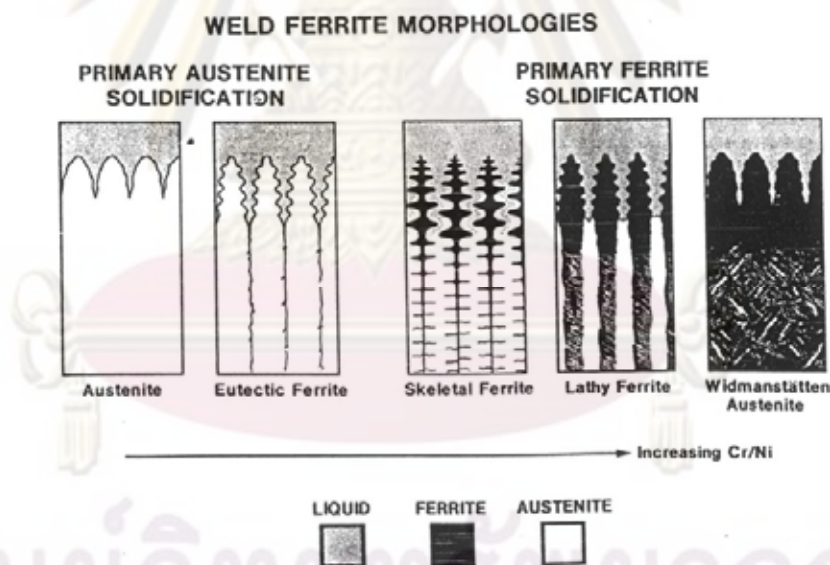
รูปที่ 2.10 โครงสร้างมหภาคเนื้อโลหะเชื่อมที่ใช้ก๊าซปกคลุมต่างกัน [20]

2.4 การแข็งตัวของน้ำโลหะเชื่อม ต่อโครงสร้างจุลภาคของเนื้อโลหะเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิต์



รูปที่ 2.11 แผนภูมิผสมมติสองมิติ (Pseudobinary) ของ Fe-Cr-Ni ที่ 70% Fe [21]

โครงสร้างที่แข็งตัวของ การเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม สามารถเกิดได้ทั้งออสเทนไนต์ และเฟอไรต์ ตามปฏิกิริยาเพอริเทกติก (peritectic) ($\delta + L \leftrightarrow \gamma$) และปฏิกิริยายูเทกติก (eutectic) ($L \leftrightarrow \gamma + \delta$) ขึ้นกับส่วนผสมของธาตุที่ผสมในเหล็กกล้าไร้สนิม รูปที่ 2.11 แสดงแผนภูมิสมมติของ Fe-Cr-Ni ที่ 70% Fe ใช้แผนภาพนี้อธิบายการแข็งตัวตามส่วนผสม ได้แก่ austenitic mode (A), primary austenite (AF), primary ferrite (FA) และ ferritic mode (F) การแข็งตัวใน austenitic mode จะไม่เปลี่ยนแปลงโครงสร้างเมื่ออุณหภูมิ ต่ำลงมาจนถึงอุณหภูมิห้อง ในขณะที่การแข็งตัวแบบ primary austenite จะเกิดเป็น ferrite ตามขอบเกรน และการแข็งตัวแบบ primary ferrite กับ ferritic mode จะผ่านช่วงที่เกิดโครงสร้าง δ -ferrite และ γ -austenite ทำให้เกิดเป็นโครงสร้าง skeletal ferrite, lathy ferrite และ widmanstätten austenite ลักษณะการแข็งตัวของน้ำโลหะเชื่อม มีผลต่อการเกิดโครงสร้างจุลภา ในเนื้อโลหะเชื่อม โครงสร้างจุลภาคจะเกิดขึ้นเป็นลักษณะใดนั้น สามารถทำนายได้จากสัดส่วน Cr_{eq}/Ni_{eq} และอัตราการเย็นตัวของโลหะ

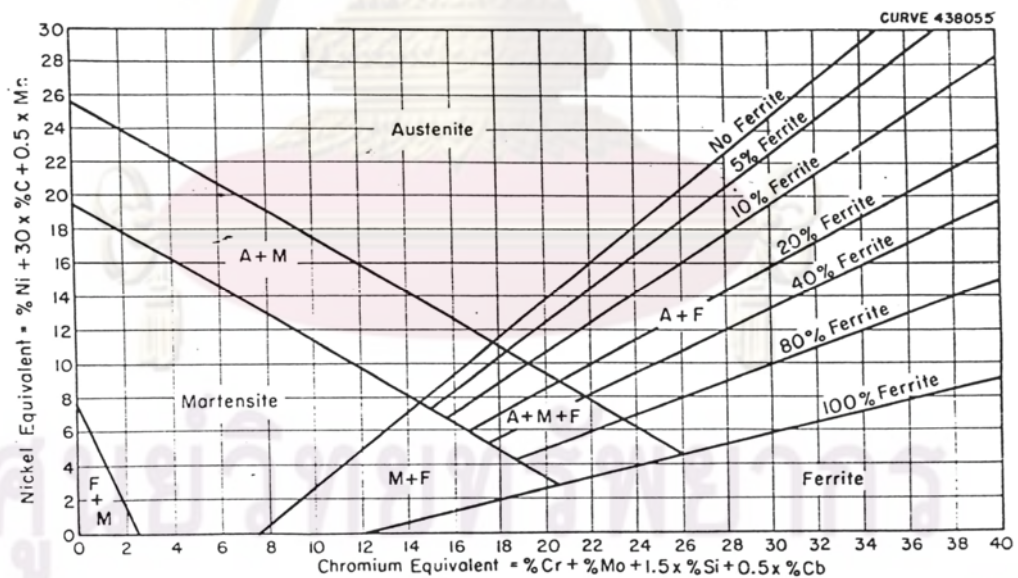


รูปที่ 2.12 ลักษณะการแข็งตัวของน้ำโลหะเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนต์เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนค่าโครเมียมเทียบเท่าต่อนิกเกิลเทียบเท่า [4]

จากรูปที่ 2.12 จะเห็นว่าเมื่ออัตราส่วนค่าโครเมียมเทียบเท่าต่อค่านิกเกิลเทียบเท่าเพิ่มขึ้น จะมีแนวโน้มเกิดการแข็งตัวแบบ primary ferrite (FA) ที่อัตราส่วน 1.5 และที่อัตราส่วน 1.9-2.0 จะเป็น ferritic mode การเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมจะต้องการ การแข็งตัวแบบ primary ferrite (FA)

2.5 ผลของส่วนผสมเคมี ต่อโครงสร้างจุลภาคของเนื้อโลหะเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม ออสเทนไนต์

ในปี 1947-1949 Schaeffler [12,22] ได้ศึกษาผลของสัดส่วนโครเมียม-นิกเกิล และส่วนผสมโมลิบดีนัมต่อโครงสร้างจุลภาคของเนื้อโลหะเชื่อม และได้แสดงออกมาเป็นแผนภูมิ ดังรูปที่ 2.13 โดยพิจารณาผลของ โครเมียม โมลิบดีนัม ซิลิคอน ไนโอเบียม นิกเกิล คาร์บอน และแมงกานีส ต่อโครงสร้างจุลภาคในเนื้อโลหะเชื่อม ธาตุผสมทั้งหมดนี้ได้จัดเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ทำให้เฟอไรต์เสถียรภาพ (Ferrite stabilizer) เป็นกลุ่มค่าโครเมียมเทียบเท่า (chromium equivalent) และกลุ่มที่ทำให้ออสเทนไนต์เสถียรภาพ (Austenite stabilizer) เป็นกลุ่มค่านิกเกิลเทียบเท่า (nickel equivalent) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเทียบเท่าโครเมียมกับค่าเทียบเท่านิกเกิลกับโครงสร้างจุลภาคแสดงในแผนภูมิเชฟเลอร์ (Schaeffler) แสดงในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 แผนภูมิเชฟเลอร์แสดงผลของส่วนผสมเคมี ต่อโครงสร้างจุลภาคของเนื้อโลหะเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนต์ [12]

จากแผนภูมิพบว่า ผลของส่วนผสมเคมีต่อโครงสร้างจุลภาคของเนื้อโลหะเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิต์แบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ

กลุ่มที่ทำให้โครงสร้างเฟอไรต์เสถียรภาพจะอยู่ในกลุ่มของ Chromium Equivalent (สมการ 2.10) เรียกว่า Ferrite Stabilizer ที่มีโครงสร้างผลึกเป็น Body Centered Cubic (BCC) ธาตุในกลุ่มนี้ได้แก่ โครเมียม โมลิบดีนัม ซิลิคอน และไนโอเบียม

กลุ่มที่ทำให้โครงสร้างออสเทนิต์เสถียรภาพจะอยู่ในกลุ่มของ Nickel Equivalent (สมการ 2.11) เรียกว่า Austenite Stabilizer ที่มีโครงสร้างผลึกเป็น Face Centered Cubic (FCC) ธาตุในกลุ่มนี้ได้แก่ นิกเกิล คาร์บอน ไนโตรเจน และแมงกานีส อิทธิพลของธาตุ 2 กลุ่มนี้สามารถแสดงในสมการที่ 2.10 และ 2.11

$$C_{req} = \% Cr + \% Mo + 1.5\% Si + 0.5\% Nb \quad 2.10$$

$$N_{ieq} = \% Ni + 30\% C + 0.5\% Mn \quad 2.11$$

การศึกษาของ F.C Hull [12] เรื่องผลกระทบของเดลตา-เฟอไรต์ ต่อการแตกร้อนของเหล็กกล้าไร้สนิม พบว่าเนื้อโลหะเชื่อมที่มีปริมาณเดลตา-เฟอไรต์ 5 ถึง 10 เปอร์เซ็นต์ สามารถต้านทานการแตกร้อนได้ดีกว่าแบบที่มีการแข็งตัวเป็นออสเทนิต์ หรือ เฟอไรต์เพียงอย่างเดียว เพราะซัลเฟอร์และฟอสฟอรัส สามารถละลายได้ดีในโครงสร้างเฟอไรต์และเดลตา – เฟอไรต์ จึงไม่เกิดการแยกตัวเป็นสารประกอบ ที่เป็นสาเหตุหนึ่งของการแตกร้อน และนอกจากนี้ F.C. Hull จัดให้ไนโตรเจนควรอยู่ในกลุ่มที่มีบทบาทเดียวกับคาร์บอน คือกลุ่มของนิกเกิลเทียบเท่า

2.6 มาตรฐานรอยเชื่อม DIN 8563 BS

มาตรฐานที่ใช้ในการตรวจสอบและประกันคุณภาพรอยเชื่อม และกระบวนการเชื่อมจะยกมาเฉพาะส่วนที่สำคัญ โดยแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ

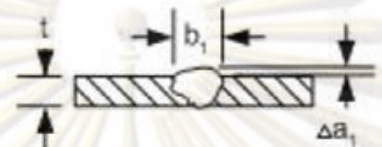
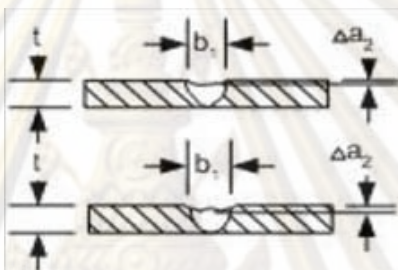

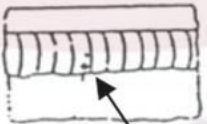
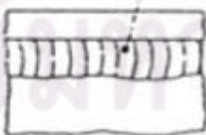
ส่วนที่ 1 กล่าวถึงหลักการทั่วไปของกระบวนการเชื่อม






ส่วนที่ 2 กล่าวถึงความต้องการในกระบวนการเชื่อม เพื่อให้สามารถรักษาคุณสมบัติที่ดีของรอยเชื่อมตามที่ต้องการ

ส่วนที่ 3 กล่าวถึงการประกันคุณภาพของการเชื่อมโลหะที่ใช้วิธีการเชื่อมแบบหลอมละลาย (Fusion Welded Joint)

ในการศึกษาครั้งนี้ พิจารณาลักษณะรอยเชื่อมโดยเฉพาะข้อบกพร่องตามมาตรฐาน DIN 8563 ส่วนที่ 3 ซึ่งสอดคล้องกับการเชื่อมเหล็กแผ่น และคุณภาพรอยเชื่อมระดับ BS ความหนาชิ้นงานอยู่ไม่เกิน 6 มิลลิเมตร เป็นลักษณะเงื่อนไขการตรวจสอบรอยเชื่อมภายนอก

ตารางที่ 2.1 มาตรฐานรอยเชื่อม DIN 8563 ระดับ BS สำหรับการเชื่อมแบบต่อชนด้วยวิธีเชื่อมแบบหลอมละลาย [23]

ลำดับที่	ลักษณะรอยบกพร่อง	ระดับคุณภาพ
1.	Excess weld metal 	$\Delta a_1 \leq 1 + 0.15b_1$
2.	Incompletely filled groove Δa_2 	$\Delta a_2 \leq 0.1 + 0.07t$
3.	Undercuts 	ให้เกิดได้เล็กน้อย
4.	Visible pores  visible pores	ไม่อนุญาตให้เกิด
5.	Visible slag inclusions  Slag inclusions	ไม่อนุญาตให้เกิด

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

จากการศึกษาข้อมูลผลงานวิจัยเรื่องการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิต์ด้วย
 ก๊าซปกคลุมที่ผสมกัน 3 ก๊าซ คือ อาร์กอน ไนโตรเจน และไฮโดรเจน ยังไม่มีรายงานการวิจัย
 โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเชื่อมด้วยวิธีทิกพัลส์ การศึกษาทดลองในครั้งนี้จะเป็นประโยชน์แก่วงการ
 วิชาการและอุตสาหกรรมในประเทศไทย สามารถเป็นข้อมูลที่จะถ่ายทอดไปยังนักวิจัยรุ่นต่อไป
 เพื่อพัฒนาความรู้ทางด้านนี้ให้แก่การศึกษา และอุตสาหกรรมไทย

บทที่ 3

อุปกรณ์ เครื่องมือการทดลอง และวิธีการทดลอง

3.1 อุปกรณ์ เครื่องมือการทดลอง

เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง ประกอบด้วย

3.1.1 เครื่องเชื่อมไฟฟ้าแบบทิกพัลส์

3.1.2 ชุดจับยึดชิ้นงานเพื่อใช้ในการเชื่อม

3.1.3 ชุดควบคุมส่วนผสมก๊าซปกคลุม

3.1.1 เครื่องเชื่อมไฟฟ้าแบบทิกพัลส์

การทดลองใช้เครื่องเชื่อมไฟฟ้า Miller / Syncrowave 350 Ampere Constant Current AC/DC Arc Welding และปรับการเชื่อมแบบ อิเล็กโทรดเป็นขั้วลบ (Pulse Current DC Electrode Negative) รูปที่ 3.1 แสดงเครื่องเชื่อม อิเล็กโทรดที่ใช้เป็นทั้งสแตนที่มีส่วนผสมของ ทอเรียมออกไซด์ 2 เปอร์เซนต์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.4 มิลลิเมตร ปลายอิเล็กโทรดทำมุม (Tip Angle) 60 องศา เส้นผ่านศูนย์กลางของหัวเชรามิกครอบขั้วทั้งสแตน (Weld Torch Vertical Orifice) มีขนาด 11 มิลลิเมตร และระยะห่างระหว่างปลายอิเล็กโทรดกับชิ้นงานทดสอบ (Arc Length) 2 มิลลิเมตร ระยะห่างของขั้วเชื่อม (Torch) กับชิ้นงานทดสอบ 5 มิลลิเมตรและ ทำมุม 75 องศาจากแนวตั้ง ขั้วเชื่อมที่ใช้เป็นแบบระบายความร้อนด้วยน้ำ

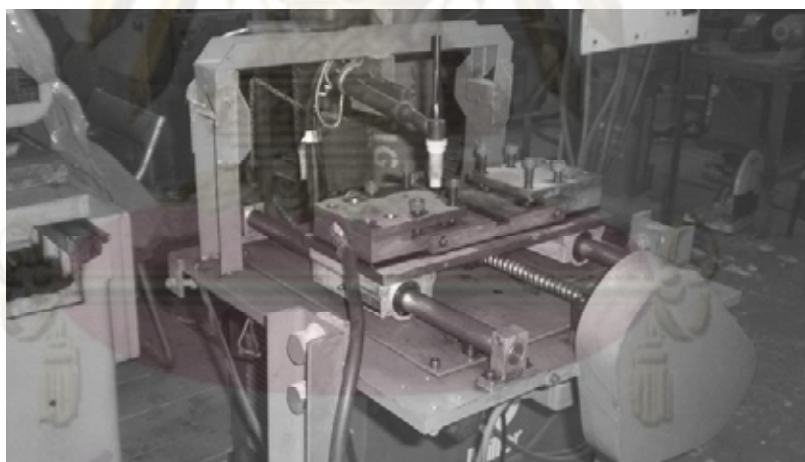


รูปที่ 3.1 เครื่องเชื่อม Miller / Syncrowave 350 Ampere Constant Current AC / DC Arc Welding

3.1.2 ชุดจับยึดชิ้นงานเพื่อใช้ในการเชื่อม

รูปที่ 3.2 แสดงชุดจับยึดชิ้นงานและชุดป้องกันก๊าซปกคลุมด้านล่างได้ออกแบบ และสร้างขึ้น โดยผู้วิจัยของห้องปฏิบัติการการกัดกร่อน ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ โดยชุดจับยึดที่ออกแบบจะสามารถจับชิ้นงานเชื่อมได้ ในลักษณะการเชื่อมแนวนอน แนวตั้ง และแนวเหนือศีรษะ ชิ้นงานทดสอบยึดด้วยสกรูบนแท่นจับชิ้นงาน ที่เคลื่อนที่ไปและกลับบนเพลานำ ชิ้นงานทดสอบจะขับเคลื่อนด้วยสกรู ที่ต่อเข้ากับชุดมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ 220/380 V 50 Hz 4P ขนาด 0.37 kw. ประกอบเข้ากับเกียร์ทดขนาดอัตราทด 15.6 : 1 และปรับความเร็วรอบมอเตอร์ด้วยชุด Inverter ที่สามารถปรับความเร็วรอบของมอเตอร์ได้ตั้งแต่ 0 ถึง 1500 รอบต่อนาที สามารถควบคุมการเคลื่อนที่ของชุดจับยึดชิ้นงานได้ตั้งแต่ 0 ถึง 12.8 มิลลิเมตรต่อวินาที

ด้านบนของโต๊ะจับชิ้นงานได้ติดตั้งแผ่นเบกาไลต์ เพื่อป้องกันคลื่นความถี่ไฟฟ้าจากมอเตอร์ไปรบกวนคลื่นความถี่และกระแสไฟฟ้าเชื่อมระหว่างการเชื่อม ด้านล่างของฐานจับยึดชิ้นงานทดสอบจะติดตั้งชุดป้องกันก๊าซปกคลุม สำหรับปกคลุมด้านล่างของชิ้นงานทดสอบระหว่างการเชื่อม (Root Shielding Gas)



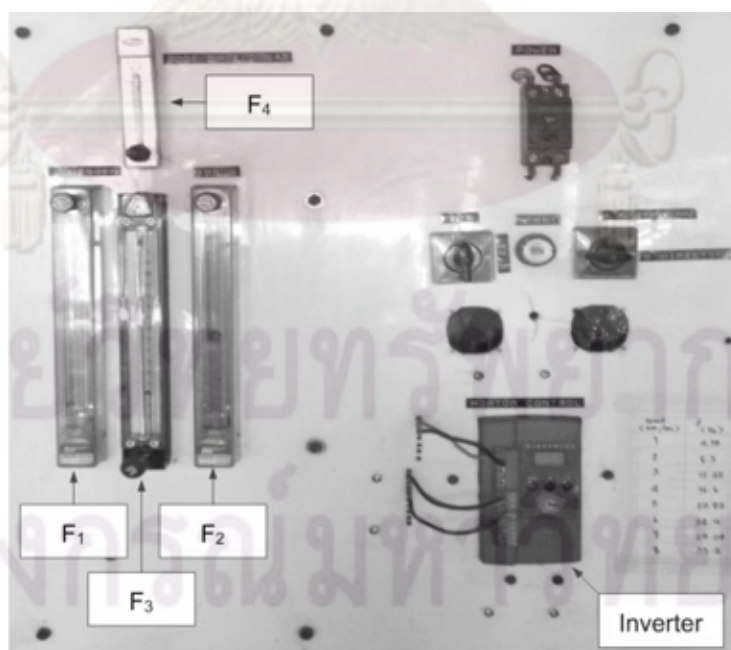
รูปที่ 3.2 ชุดจับยึดชิ้นงานที่ใช้ในการทดลอง และชุดป้องกันก๊าซปกคลุมด้านล่าง

3.1.3 ปริมาณก๊าซปกคลุมและชุดควบคุมส่วนผสมก๊าซปกคลุม

ก๊าซปกคลุมที่ใช้ในการศึกษาแบ่งออกเป็นสองส่วน คือ ก๊าซปกคลุมด้านบนและก๊าซปกคลุมด้านล่าง ก๊าซทั้งสองส่วนจะมาจากถังผสมเดียวกัน ก๊าซปกคลุมด้านล่างสามารถไหลเข้าปกคลุมชิ้นงานได้ตลอดเวลา แต่ก๊าซปกคลุมด้านบนจะไหลผ่านหัวเชื่อมได้ก็ต่อเมื่อมีการอาร์ก

ของอิเล็กทรอนิกส์แล้วเท่านั้น ดังนั้นในช่วงเวลาเริ่มต้นของการอาร์กประมาณ 1-2 วินาที ด้านบนของชิ้นงานจึงไม่มีการไหลของก๊าซปกคลุม

ก๊าซปกคลุมที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่ ก๊าซอาร์กอนบริสุทธิ์ 99.99 เปอร์เซ็นต์ ก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ 99.99 เปอร์เซ็นต์ และก๊าซไฮโดรเจนบริสุทธิ์ 99.99 เปอร์เซ็นต์ ก๊าซปกคลุมทั้งสามนี้จะถูกควบคุมการไหลด้วยวาล์วและวัดอัตราการไหลด้วยมาโนมิเตอร์ มีการติดตั้งวาล์วกักเก็บควบคุมการไหลย้อนกลับทั้งด้านเข้าและด้านออก ก่อนการถูกผสมเข้าด้วยกัน มาโนมิเตอร์ 2 (F2) เป็นตัวควบคุมก๊าซอาร์กอนบริสุทธิ์ที่มีอัตราการไหลสูงสุด 25 ลิตรต่อนาที มาโนมิเตอร์ 1 (F1) เป็นตัวควบคุมก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่มีอัตราการไหลสูงสุด 2 ลิตรต่อนาที มาโนมิเตอร์ 3 (F3) เป็นตัวควบคุมก๊าซไฮโดรเจนบริสุทธิ์ที่มีอัตราการไหลสูงสุด 5.0 ลิตรต่อนาที และมาโนมิเตอร์ 4 (F4) เป็นตัวควบคุมก๊าซปกคลุมหลังการผสมแล้วมีอัตราการไหล 25 ลิตรต่อนาที รูปที่ 3.3 แสดงชุดควบคุมก๊าซปกคลุมทั้งสามชนิดจะผ่านชุดมาโนมิเตอร์ ตามสัดส่วนของการทดลอง เพื่อผสมกันในถังผสมแล้วแยกออกไปที่ด้านล่าง 10 ลิตรต่อนาที จากการวัดอัตราการไหลด้วยมาโนมิเตอร์ 4 และปริมาตรก๊าซที่เหลือ 15 ลิตรต่อนาที จะไหลไปยังหัวเชื่อมด้านบน ก๊าซไฮโดรเจนจะถูกปรับและวัดอัตราการไหลด้วยมาโนมิเตอร์ 3 ให้ได้สัดส่วนในก๊าซผสม 1, 5, และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร และก๊าซไนโตรเจนจะถูกปรับและวัดอัตราการไหลด้วยมาโนมิเตอร์ 2 ให้ได้สัดส่วนก๊าซผสม 1, 2, 3 และ 4 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร



รูปที่ 3.3 แผนภูมิการควบคุมก๊าซปกคลุมด้านบนและด้านล่างชิ้นงานทดลอง

3.2 การเตรียมชิ้นงานสำหรับการทดลอง

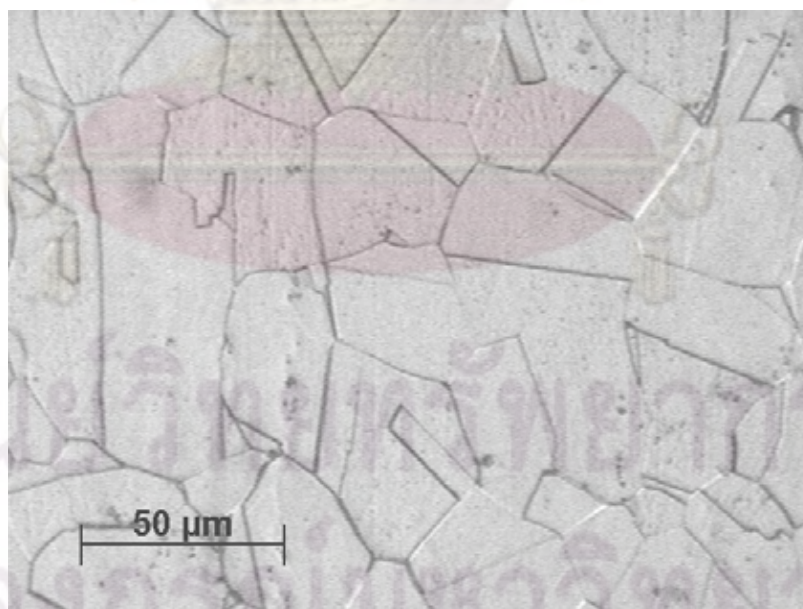
เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนต์เกรด 316L แผ่นหนา 6 มิลลิเมตร ถูกตัดให้ได้ขนาด 100 x 150 มิลลิเมตร ทำความสะอาดด้วยการขัดผิวด้วยตะไบละเอียด ล้างคราบไขมันและคราบสิ่งสกปรกด้วยอะซิโตน ส่วนผสมเคมีของชิ้นงานตัวอย่างแสดงตามตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนต์เกรด 316L วิเคราะห์ด้วยเครื่อง Optical emission spectrometer

ปริมาณธาตุ (% โดยน้ำหนัก)									
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	N*	Fe
0.018	0.34	1.7	0.032	0.004	17.28	10.02	2.01	0.061	balance

* หมายเหตุ Oxygen-Nitrogen Analyzer ของ HORIBA รุ่น EMGA 620W

โครงสร้างจุลภาคในเนื้อโลหะพื้นของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนต์ 316L จะเป็นออสเทนไนต์ทั้งหมด แสดงในรูปที่ 3.4 โดยสารละลาย กรดไฮโดรคลอริก (HCL) 30 มิลลิลิตร + กรดไนตริก 15 มิลลิลิตร + กลีเซอรอล 45 มิลลิลิตร กัดเป็นเวลา 90 วินาที



รูปที่ 3.4 โครงสร้างจุลภาคเนื้อโลหะพื้นของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนต์ 316L

ส่วนผสมเคมีจากตารางที่ 3.1 นำมาคำนวณค่าโครเมียมและนิกเกิลเทียบเท่า ตามสมการที่ 2.10 และ 2.11 เพื่อทำนายปริมาณของเดลตา-เฟอไรต์ ที่จะได้หลังการแข็งตัวของเนื้อโลหะเชื่อม ผลการคำนวณแสดงตามตารางที่ 3.2 ได้สัดส่วนของค่าโครเมียมเทียบเท่าต่อค่านิกเกิลเทียบเท่า เท่ากับ 1.73 มากกว่า 1.5 ดังนั้นการแข็งตัวมีแนวโน้มเป็นแบบ primary ferrite [4]

ตารางที่ 3.2 ค่าโครเมียมและนิกเกิลเทียบเท่า ของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติกเกรด 316L

Cr _{eq}	Ni _{eq}	Cr _{eq} /Ni _{eq}	% เฟอไรต์
19.80	11.40	1.73	5-10

3.3 ตัวแปรการทดลองเชื่อม

ตัวแปรการเชื่อมจะแบ่งออกเป็นสองกลุ่ม คือ ตัวแปรคงที่ ตามตารางที่ 3.3 และ ตัวแปรการทดลองดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.3 ตัวแปรคงที่

วิธีการเชื่อม	ทิกพัลส์
ลวดป้อนเติม	ไม่ใช้
ตำแหน่งเชื่อม	ท่าราบ
กระแสไฟฟ้าเชื่อม	ไฟฟ้ากระแสตรง อิเล็กโทรดเป็นขั้วลบ
ระยะอาร์ก	2 มิลลิเมตร
อิเล็กโทรด	EWTh 2 เส้นผ่านศูนย์กลาง 2.4 มิลลิเมตร มุมปลาย 60 องศา
อัตราการไหลก๊าซปกคลุมด้านบน	15 ลิตรต่อนาที
อัตราการไหลก๊าซปกคลุมด้านล่าง	10 ลิตรต่อนาที
หัว Torch	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง Orifice 11 มิลลิเมตร ระบายความร้อนด้วยน้ำ
ระยะการยื่นของอิเล็กโทรด (Strick out)	5 มิลลิเมตร
หัว Torch ทำมุมกับชิ้นงานทดลอง	75 องศา
ความถี่พัลส์	5 เฮิรตซ์
% On-time	65 เปอร์เซ็นต์

กระแสไฟฟ้าเบส	61 แอมแปร์
กระแสไฟฟ้าเชื่อม	130±5 แอมแปร์

ตารางที่ 3.4 ตัวแปรการทดลอง

ความเร็วเชื่อม	2, 3, 4, 5, 6 และ 7 มิลลิเมตรต่อวินาที
ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนที่ผสมในก๊าซปกคลุม	1, 5, และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร
ปริมาณก๊าซไนโตรเจนที่ผสมในก๊าซปกคลุม	0, 1, 2, 3 และ 4 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร

3.4 ขั้นตอนการทดลอง

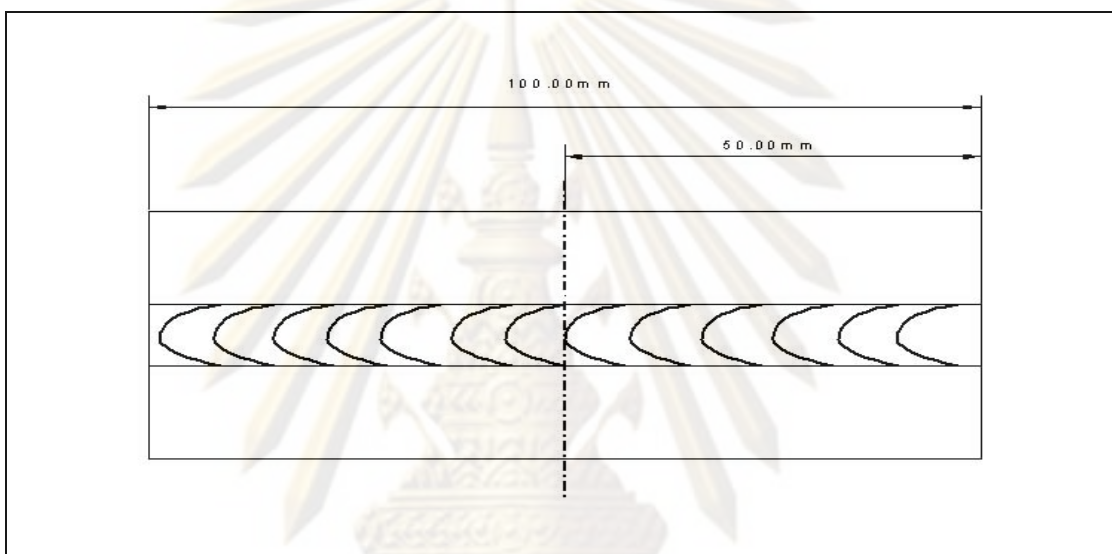
- 3.4.1 เตรียมชุดควบคุมการผสมก๊าซ
- 3.4.2 ตรวจสอบการไหลของก๊าซด้วยฟองสบู่บันทึกผล
- 3.4.3 ตรวจสอบส่วนผสมก๊าซด้วยเครื่อง Gas Chromatography ของ SHIMADZU รุ่น GC-8A ตามภาคผนวก ข
- 3.4.4 นำชิ้นงานไปตรวจสอบส่วนผสมเคมีและปริมาณไนโตรเจน
- 3.4.5 เตรียมชิ้นงานทดลอง 100 X 150 มิลลิเมตร แล้วขัดสิ่งสกปรกด้วยหินเจียรนัย และล้างคราบสิ่งสกปรกด้วยอะซิโตน
- 3.4.6 เชื่อมชิ้นงานด้วยก๊าซไฮโดรเจน 1, 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์ ที่ผสมกับก๊าซปกคลุมอาร์กอน ที่ความเร็ว 2, 3, 4, 5, 6 และ 7 มิลลิเมตรต่อวินาที ประมาณ 18 ชิ้นงาน
- 3.4.7 เชื่อมชิ้นงานด้วยก๊าซไนโตรเจน 1, 2, 3, และ 4 เปอร์เซ็นต์ กับก๊าซไฮโดรเจน 1, 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์ ที่ผสมกับก๊าซปกคลุมอาร์กอน ที่ความเร็ว 2, 3, 4, 5, 6 และ 7 มิลลิเมตรต่อวินาที จนครบทุกตัวแปร ประมาณ 72 ชิ้นงาน
- 3.4.8 นำชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมมาตัดแบ่งเป็น 25 X 100 มิลลิเมตร เพื่อไปฉายรังสีเอกซ์ตามตัวอย่างการตรวจสอบในภาคผนวก ค
- 3.4.9 นำชิ้นงานที่ผ่านการฉายรังสี มาตรวจวัดปริมาณเดลตา-เฟอร์ไรต์ด้วยเครื่อง Feritscope MP3C ของ Fischer ตามผลการวัดในภาคผนวก ง
- 3.4.10 นำชิ้นงานที่ผ่านการตรวจวัดปริมาณเดลตา-เฟอร์ไรต์ มาตัดเพื่อดูรูปร่างและวัดขนาดรอยซึมลึกกับความกว้างของเนื้อโลหะเชื่อม
- 3.4.11 นำชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมไปตรวจสอบปริมาณไนโตรเจนในเนื้อโลหะเชื่อมด้วยเครื่อง Oxygen-Nitrogen Analyzer ของ HORIBA รุ่น EMGA 620W ตามตัวอย่างผลการวัดในภาคผนวก ช

3.4.12 วิเคราะห์ผลการทดลอง เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ และสรุปผลการทดลอง

3.5 การตรวจสอบรอยเชื่อม

3.5.1 การตรวจสอบเนื้อโลหะเชื่อมด้วยวิธีฉายรังสีเอ็กซ์

นำชิ้นงานทดสอบที่ผ่านการเชื่อมและผ่านการตรวจสอบด้วยสายตา ไปฉายรังสี เพื่อให้แน่ใจว่าเนื้อโลหะเชื่อม ไม่เกิดรูพรุน และเป็นไปตามมาตรฐาน DIN 8563 ระดับ BS



รูปที่ 3.5 การเตรียมชิ้นงานสำหรับตรวจสอบโครงสร้างมหภาคของเนื้อโลหะเชื่อม

3.5.2 การตรวจสอบโครงสร้างมหภาคของเนื้อโลหะเชื่อม

นำชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมแล้วมาตัดตรงกลาง ตามรูปที่ 3.5 ในระหว่างการตัดต้องระวังไม่ให้เกิดความร้อนขึ้นกับเนื้อโลหะเชื่อม หลังจากตัดชิ้นงานเสร็จแล้วนำชิ้นงานไปขึ้นรูปสำหรับขัดด้วยเรซิน ขัดชิ้นงานด้วยกระดาษทรายน้ำเบอร์ 80 ถึง เบอร์ 1000 ให้ผิวเรียบ แล้วกัดด้วยสารละลาย คอปเปอร์ซัลเฟต (Copper (II) sulfate) 20 กรัม + กรดไฮโดรคลอริก (HCL) 100 มิลลิลิตร + น้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร เป็นเวลา 30 วินาที เพื่อดูรูปร่างของรอยเชื่อม หลังจากนั้นบันทึกภาพด้วยกล้องถ่ายภาพมหภาค (Light Stereo Microscopy) กำลังขยาย 5 เท่า พร้อมทั้งสเกลไม้บรรทัดที่กำลังขยายเดียวกัน เพื่อวัดความกว้างและรอยซึมลึกด้วยโปรแกรม Microsoft Visio

3.5.3 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของเนื้อโลหะเชื่อม

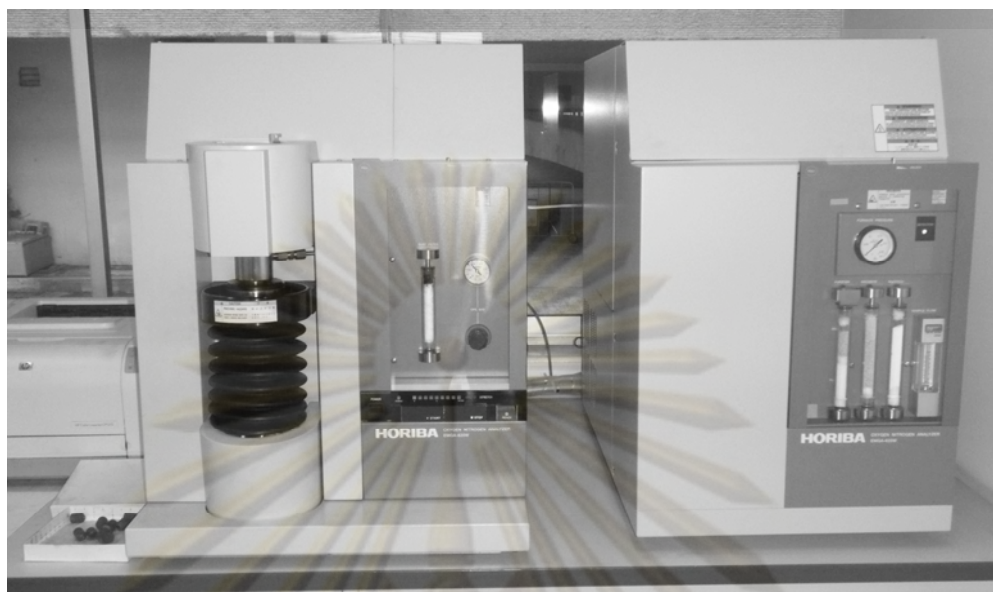
นำชิ้นงานทดลองที่ผ่านการเชื่อมไปวัดปริมาณเดลตา-เฟอไรต์ในเนื้อโลหะเชื่อมตามภาคผนวก ข ด้วยเครื่อง Feritscope MP3C ของ Fischer ดังแสดงในรูปที่ 3.6 และนำชิ้นงานที่ผ่านการวัดอัตราส่วนความลึกต่อความกว้างตามหัวข้อ 3.4.1 มาขัดกระดาษทรายเบอร์ 1200 ถึง 2000 และขัดด้วยผงอลูมิน่า (Al_2O_3) แล้วกัดด้วยสารละลาย กรดไฮโดรคลอริก (HCL) 30 มิลลิลิตร + กรดไนตริก 15 มิลลิลิตร + กลีเซอรอล 45 มิลลิลิตร เป็นเวลา 90 วินาที หลังจากนั้นจึงถ่ายภาพโครงสร้างจุลภาคด้วยเครื่อง Image Analyzer



รูปที่ 3.6 ชุดเครื่องมือวัดปริมาณเดลตา-เฟอไรต์ในเนื้อโลหะเชื่อม (Feritscope MP3C)

3.5.4 การตรวจปริมาณไนโตรเจนในเนื้อโลหะเชื่อม

นำชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อม มาชุดด้วยเครื่องกัดให้เนื้อเชื่อมและเนื้อโลหะพื้นเป็นเศษเล็กให้ได้น้ำหนักขึ้นละประมาณ 1 กรัม เพื่อไปวิเคราะห์ผลด้วยเครื่อง Oxygen-Nitrogen Analyzer ของ HORIBA รุ่น EMGA 620W ดังแสดงในรูปที่ 3.7 และผลการวิเคราะห์ตามที่แสดงในภาคผนวก ข



รูปที่ 3.7 Oxygen-Nitrogen Analyzer ของ HORIBA รุ่น EMGA 620W

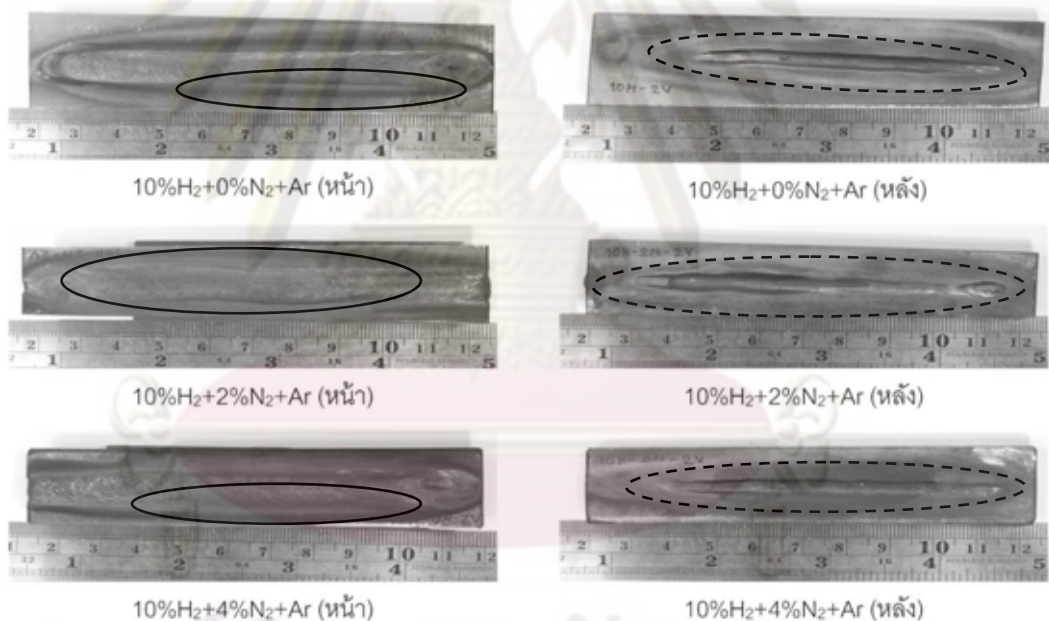
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

ผลการทดลอง และอภิปรายผลการทดลอง

ชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมต้องนำไปตรวจสอบข้อบกพร่องก่อนการศึกษาค้นคว้าผลของก๊าซไนโตรเจนและก๊าซไฮโดรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอนต่อรูปร่างและโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิต์ เกรด 316L

4.1 ผลของก๊าซไนโตรเจนและก๊าซไฮโดรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอนต่อข้อบกพร่องรอยเชื่อมตามมาตรฐาน DIN 8563 ระดับ BS



รูปที่ 4.1 ตัวอย่างข้อบกพร่องของรอยเชื่อมเมื่อใช้ก๊าซปกคลุมอาร์กอนผสมก๊าซไฮโดรเจน 10 เปอร์เซ็นต์ และก๊าซไนโตรเจน 0, 2 และ 4 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเร็วเชื่อม 2 มิลลิเมตรต่อวินาที

จากตัวอย่างการตรวจสอบข้อบกพร่องตามมาตรฐาน DIN 8563 ระดับ BS เมื่อใช้ก๊าซปกคลุมอาร์กอนผสมก๊าซไฮโดรเจน 10 เปอร์เซ็นต์ และก๊าซไนโตรเจน 0, 2 และ 4 เปอร์เซ็นต์

ที่ความเร็วเชื่อม 2 มิลลิเมตรต่อวินาที ดังรูปที่ 4.1 พบว่าเกิดข้อบกพร่องแบบ Incompletely filled groove ที่ด้านหน้ารอยเชื่อมตามที่ปรากฏในวงรีเส้นเต็ม กับ Excessive penetration ที่ด้านหลังรอยเชื่อมตามที่ปรากฏในวงรีเส้นประ และ Root concavity เนื่องจากว่าก๊าซไฮโดรเจนมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนสูง และมีค่าไอออนในเซชันต่ำ จึงทำให้เกิดพลาสมาได้ง่ายและปริมาณความร้อนสูง ส่งผลให้เกิดการหลอมละลายของโลหะเหลวมาก

การตรวจสอบข้อบกพร่องรอยเชื่อมด้วยรังสีเอกซ์และสายตา สรุปผลการตรวจสอบข้อบกพร่องในรอยเชื่อมทั้งหมดทุกส่วนผสมก๊าซปกคลุมได้ดังในตารางที่ 4.1 ถึง 4.3 แนวโน้มพบว่าที่ความเร็วเชื่อม 6 และ 7 มิลลิเมตร/วินาที มักจะเกิดข้อบกพร่องแบบรูพรุน ที่ความเร็วเชื่อมสูงปริมาณความร้อนเชื่อม (Heat input) ต่ำ อัตราการแข็งตัวและเย็นตัวเร็ว [24] ส่งผลให้ฟองก๊าซไฮโดรเจนที่ออกมาจากน้ำโลหะไม่สามารถหนีออกจากเนื้อเชื่อมได้ทันก่อนการแข็งตัวทั้งหมด ฟองก๊าซจึงกลายเป็นรูพรุน ที่ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนสูง 10 เปอร์เซ็นต์ ดังตารางที่ 4.3 พบว่าที่ความเร็วเชื่อม 2 มิลลิเมตรต่อวินาที เกิดข้อบกพร่องแบบ Incompletely filled groove, Concavity และ Excessive penetration เพราะปริมาณความร้อนเชื่อมสูงมาก เกิดการหลอมละลายเนื้อโลหะมาก อัตราการแข็งตัวและเย็นตัวต่ำ แรงโน้มถ่วงทำให้โลหะเหลวเคลื่อนตัวไม่อยู่ในบ่อหลอมเหลวจึงเกิดเป็นข้อบกพร่อง

ตารางที่ 4.1 ผลของปริมาณก๊าซในโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอนต่อข้อบกพร่องของโลหะเชื่อมเมื่อผสมกับก๊าซไฮโดรเจน 1 เปอร์เซ็นต์

ความเร็วเชื่อม (มม./วินาที)	ข้อบกพร่อง				
	0 %N ₂	1 %N ₂	2 %N ₂	3 %N ₂	4 %N ₂
2	X	+			
3				X	
4					
5					
6	X	+			
7	X				

หมายเหตุ X รูพรุน (porosity) + Lack of fusion • Incompletely filled groove * Excessive Penetration ◊ Concavity ▽ Undercut

ตารางที่ 4.2 ผลของปริมาณก๊าซไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอนต่อข้อบกพร่องของโลหะเชื่อมเมื่อผสมกับก๊าซไฮโดรเจน 5 เปอร์เซ็นต์

ความเร็วเชื่อม (มม./วินาที)	ข้อบกพร่อง				
	0 %N ₂	1 %N ₂	2 %N ₂	3 %N ₂	4 %N ₂
2					
3					
4					
5	X				
6	X				
7	X				

หมายเหตุ X รูพรุน (porosity) + Lack of fusion • Incompletely filled groove * Excessive Penetration ◇ Concavity ▽ Undercut

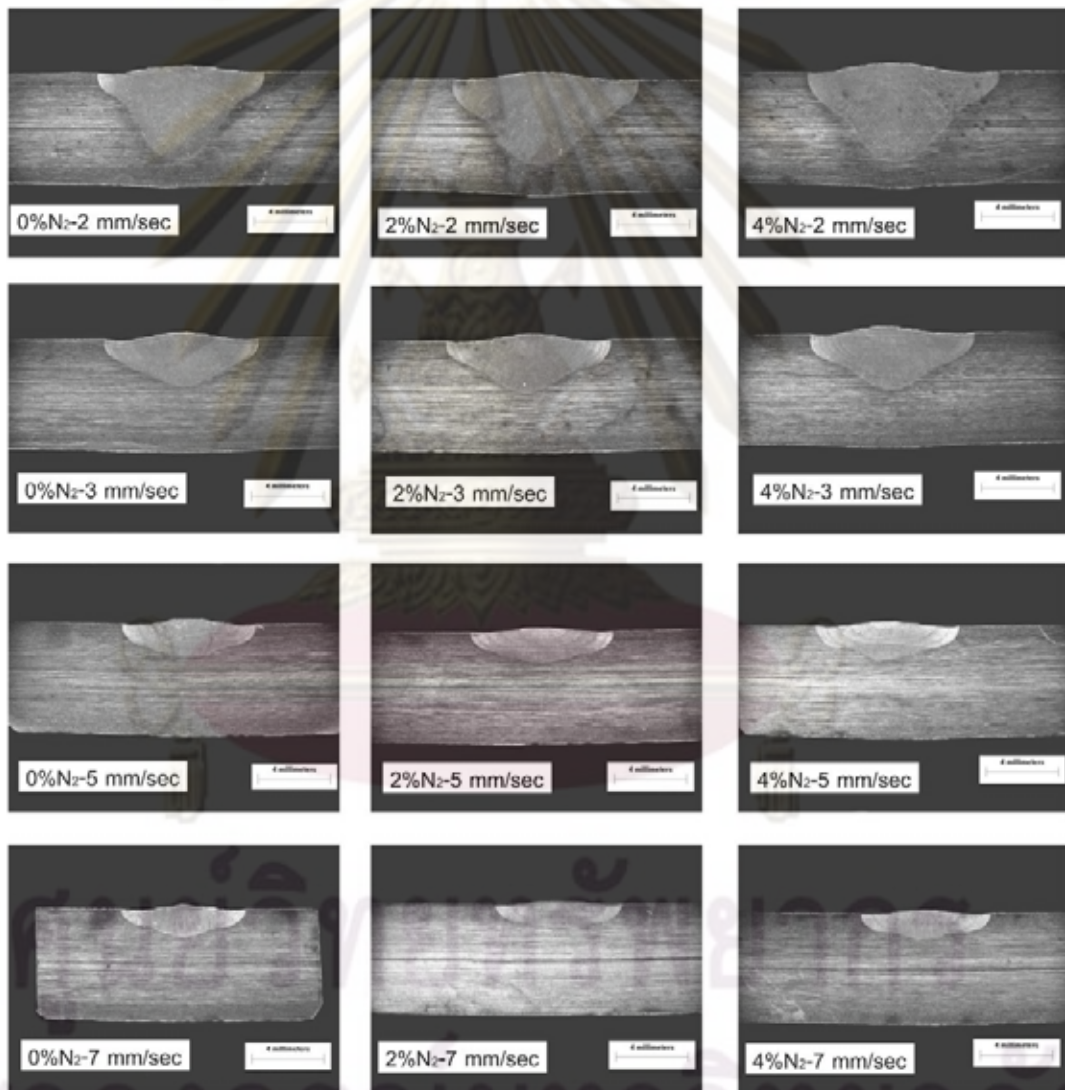
ตารางที่ 4.3 ผลของปริมาณก๊าซไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอนต่อข้อบกพร่องของโลหะเชื่อมเมื่อผสมกับก๊าซไฮโดรเจน 10 เปอร์เซ็นต์

ความเร็วเชื่อม (มม./วินาที)	ข้อบกพร่อง				
	0 %N ₂	1 %N ₂	2 %N ₂	3 %N ₂	4 %N ₂
2	•*◇	•*◇	•*◇	•*◇	•*◇
3		X			
4					
5					
6	X	▽	+		
7					

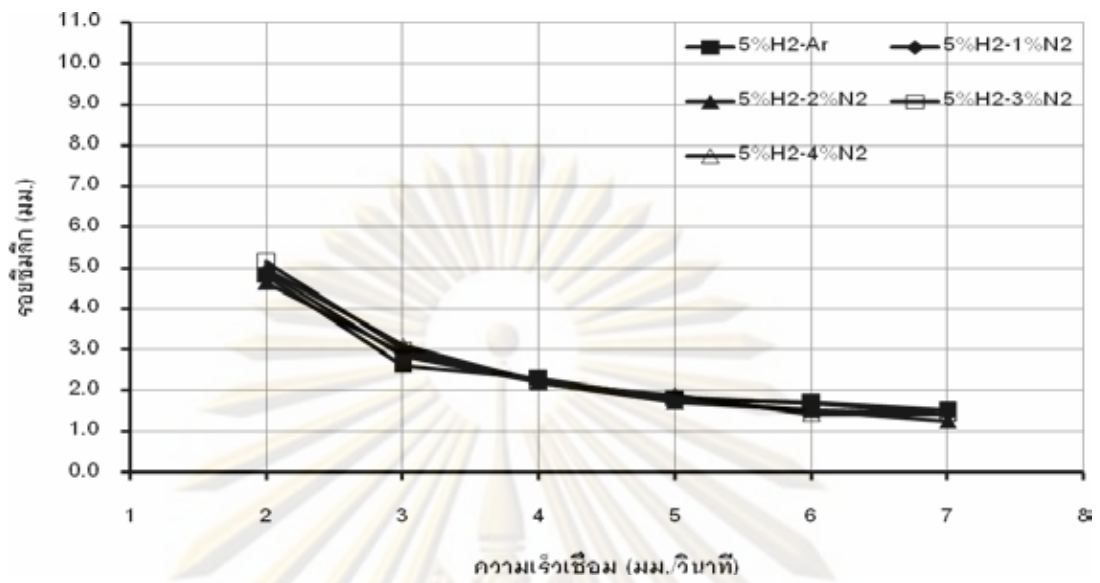
หมายเหตุ X รูพรุน (porosity) + Lack of fusion • Incompletely filled groove * Excessive Penetration ◇ Concavity ▽ Undercut

4.2 ผลของความเร็วจี้อและปริมาณก๊าซไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอนที่ผสมก๊าซไฮโดรเจนต่อรูปร่างของรอยเชื่อม

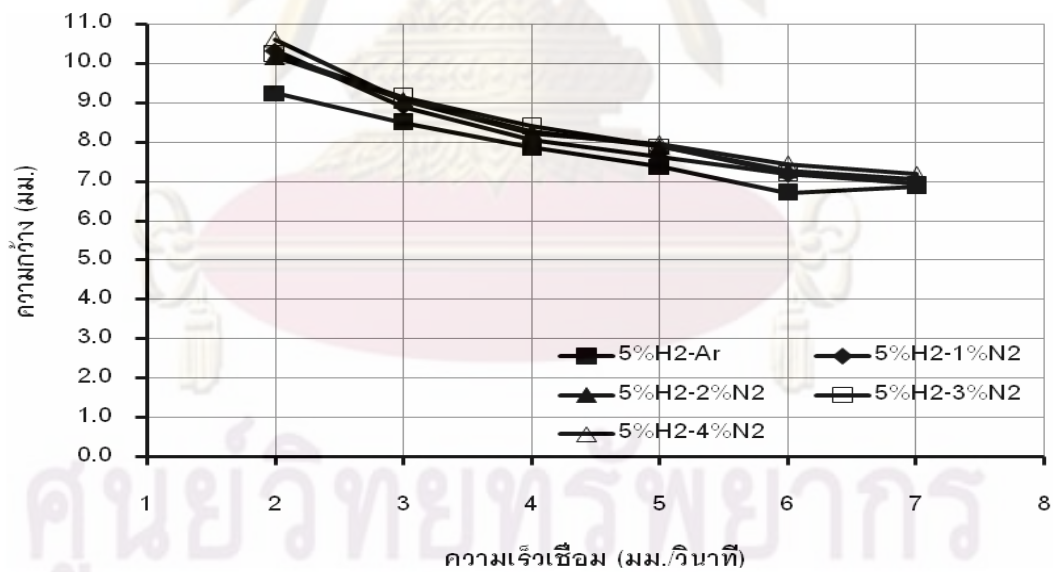
รูปที่ 4.2 แสดงผลของความเร็วจี้อและปริมาณก๊าซไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอนที่ผสมก๊าซไฮโดรเจน 5 เปอร์เซ็นต์ ต่อรูปร่างของรอยเชื่อม ปรากฏว่าก๊าซไนโตรเจนไม่มีผลต่อรูปร่างของรอยเชื่อม แต่การเพิ่มความเร็วจี้อทำให้ปริมาณเนื้อโลหะเชื่อมลดลง เพราะปริมาณความร้อนเชื่อมที่ใช้สำหรับการหลอมละลายเนื้อโลหะเชื่อมที่ความเร็วเชื่อมสูงมีปริมาณลดลง



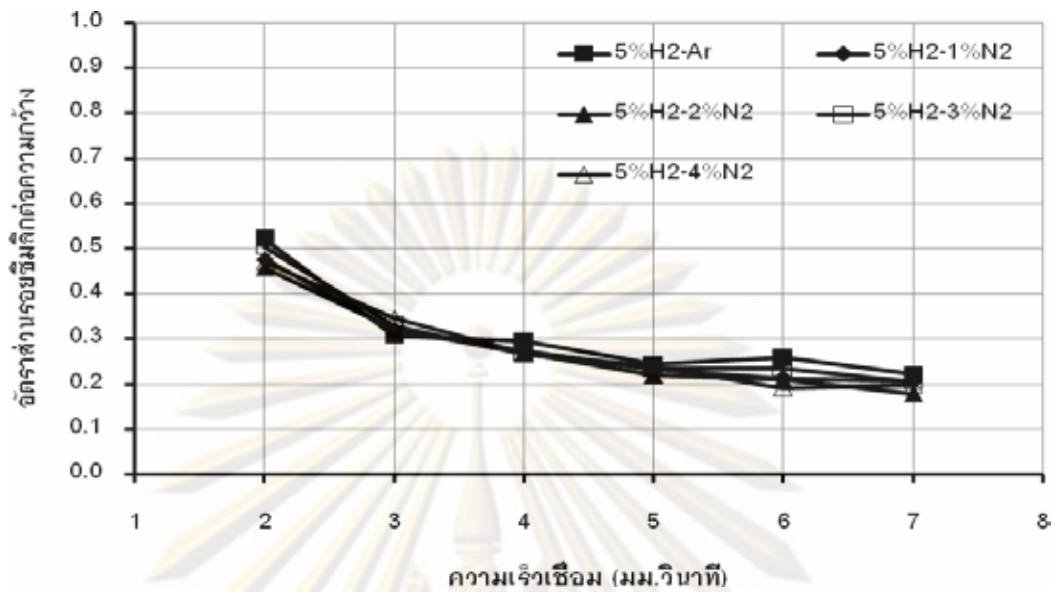
รูปที่ 4.2 ผลของความเร็วจี้อและปริมาณก๊าซไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอนที่ผสมก๊าซไฮโดรเจน 5 เปอร์เซ็นต์ ต่อรูปร่างรอยเชื่อม



รูปที่ 4.3 ผลของความเร็วจเชื่อมและปริมาณก๊าซไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอนที่ผสมก๊าซไฮโดรเจน 5 เปอร์เซ็นต์ ต่อรอยซึมลึกของเนื้อโลหะเชื่อม



รูปที่ 4.4 ผลของความเร็วจเชื่อมและปริมาณก๊าซไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอนที่ผสมก๊าซไฮโดรเจน 5 เปอร์เซ็นต์ ต่อความกว้างของเนื้อโลหะเชื่อม



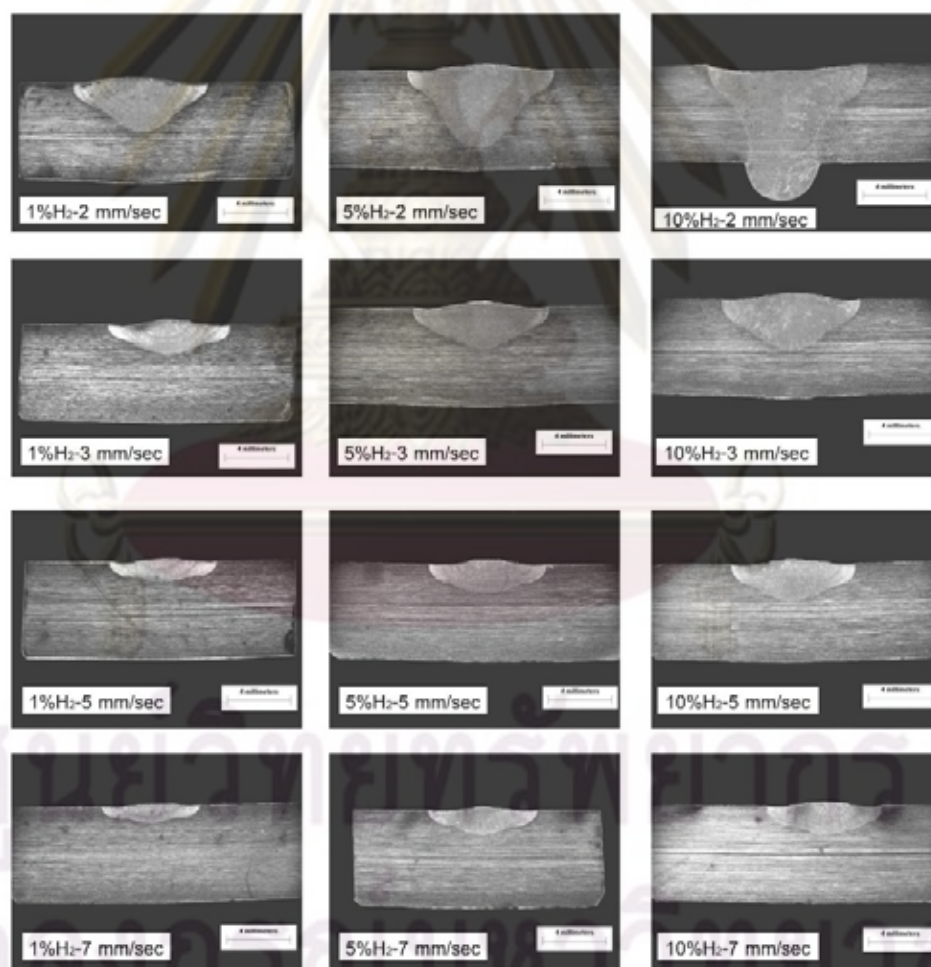
รูปที่ 4.5 ผลของความเร็วเชื่อมและปริมาณก๊าซไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอนที่ผสมก๊าซไฮโดรเจน 5 เปอร์เซ็นต์ ต่ออัตราส่วนรอยเชื่อมต่องามกว้างของเนื้อโลหะเชื่อม

ผลของปริมาณก๊าซไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอน ที่ผสมก๊าซไฮโดรเจน 5 เปอร์เซ็นต์ ต่อรูปร่างของรอยเชื่อม ปรากฏว่าก๊าซไนโตรเจนไม่มีผลต่อรอยเชื่อมลึก ความกว้าง และอัตราส่วนรอยเชื่อมต่องามกว้างของเนื้อโลหะเชื่อม เนื่องจากก๊าซไฮโดรเจนมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนมากกว่าก๊าซไนโตรเจน ทำให้มีอิทธิพลต่อรูปร่างของรอยเชื่อมมากกว่าก๊าซไนโตรเจน ตามที่แสดงในภาคผนวก ค แต่ความเร็วเชื่อมที่เพิ่มขึ้นทำให้รอยเชื่อมลึก ความกว้าง และอัตราส่วนรอยเชื่อมต่องามกว้างของเนื้อโลหะเชื่อมลดลง โดยพิจารณาว่าการเปลี่ยนแปลงความเร็วเชื่อมจาก 2 ถึง 7 มิลลิเมตรต่อวินาที และที่ก๊าซไนโตรเจน 2 เปอร์เซ็นต์ ผสมกับก๊าซไฮโดรเจน 5 เปอร์เซ็นต์ ในก๊าซปกคลุมอาร์กอน พบว่ารอยเชื่อมลึกของเนื้อโลหะเชื่อมลดลงจาก 4.64 ถึง 1.52 ตามรูปที่ 4.3 ความกว้างของเนื้อโลหะเชื่อมลดลงจาก 10.16 ถึง 7.05 มิลลิเมตร ตามรูปที่ 4.4 และอัตราส่วนรอยเชื่อมต่องามกว้างของเนื้อโลหะเชื่อมลดลงจาก 0.46 ถึง 0.18 ตามรูปที่ 4.5

รูปที่ 4.8 แสดงผลของความเร็วเชื่อมและปริมาณก๊าซไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอนที่ผสมก๊าซไฮโดรเจน 5 เปอร์เซ็นต์ ต่ออัตราส่วนรอยเชื่อมต่องามกว้างของเนื้อโลหะเชื่อม พบว่าที่ความเร็วเชื่อม 2 และ 3 มิลลิเมตรต่อวินาที มีอัตราส่วนรอยเชื่อมต่องามกว้างสูงกว่าอัตราส่วนรอยเชื่อมต่องามกว้างที่ความเร็วเชื่อมอื่น ที่ความเร็วเชื่อมนี้ พบว่า รูปร่างของรอยเชื่อมมีความลึกและแคบ เพราะทิศทางของความร้อนเคลื่อนที่จากขอบด้านนอกมาสู่แกนกลางของรอยเชื่อม ทำให้ Marangoni force มีแนวโน้มเป็นบวก แต่ที่ความเร็วเชื่อม 4 ถึง 7

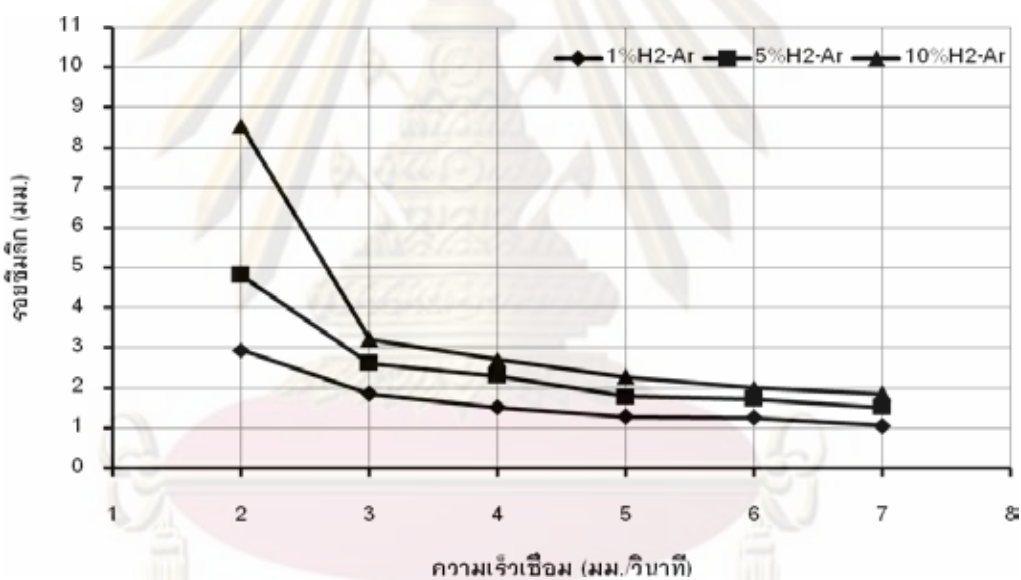
มิลลิเมตรต่อนาที่ รูปร่างของรอยเชื่อมเปลี่ยนแปลงเป็นตื้นและกว้าง เพราะทิศทางของความร้อนเคลื่อนที่จากแกนกลางมาสู่ขอบด้านนอกของรอยเชื่อม ทำให้ Marangoni force มีแนวโน้มเป็นลบ ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับผลงานการวิจัยของ Shanping Lu และคณะ [11,25-28] ได้รายงานผลการทดลองว่า เมื่อความเร็วเชื่อมสูงขึ้นทำให้อัตราส่วนรอยซึมลึกต่อความกว้างของรอยเชื่อมลดลง ที่ความเร็วเชื่อม 5, 6 และ 7 มิลลิเมตรต่อวินาที อัตราส่วนรอยซึมลึกต่อความกว้างของรอยเชื่อมเริ่มคงที่

4.3 ผลของความเร็วเชื่อมและปริมาณก๊าซไฮโดรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอนต่อรูปร่างของรอยเชื่อม

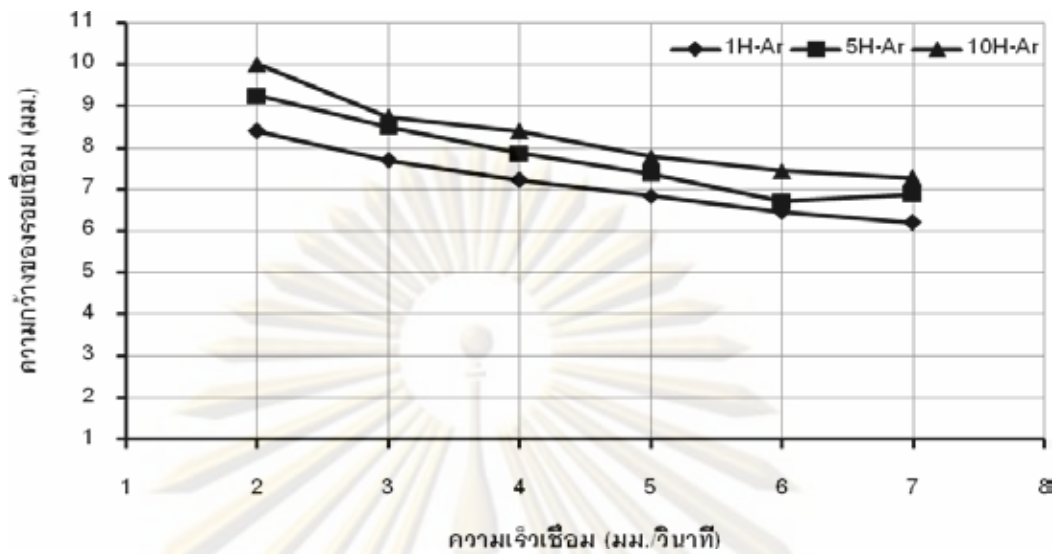


รูปที่ 4.6 ผลของความเร็วเชื่อมและปริมาณก๊าซไฮโดรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอนต่อรูปร่างของรอยเชื่อม

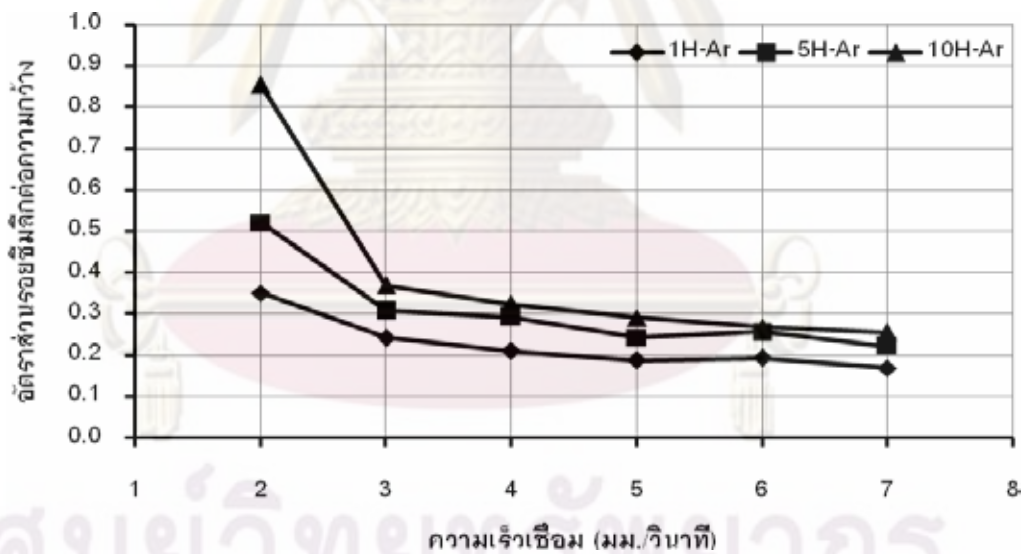
รูปที่ 4.6 แสดงรูปร่างของเนื้อโลหะเชื่อมเมื่อผสมก๊าซไฮโดรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอน เนื้อโลหะเชื่อมและรอยเชื่อมลึกเพิ่มขึ้นเนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของ ก๊าซไฮโดรเจนสูง จึงทำให้ความร้อนเข้าสู่เนื้อโลหะมากและการหลอมละลายของโลหะเหลว ในขณะที่เชื่อมจึงเพิ่มขึ้น ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับผลของ Ahmet Durgutlu [20] ทดลองเชื่อม เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนต์ 316L ด้วยการผสมก๊าซไฮโดรเจน 1.5 และ 5 เปอร์เซ็นต์ ใน ก๊าซปกคลุมอาร์กอน และ Janez Tušek [19] ที่ทดลองเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนต์ 18-8 ด้วยการผสมก๊าซไฮโดรเจน 0.5, 1, 5, 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์ ในก๊าซปกคลุมอาร์กอน แต่เมื่อ ความเร็วเชื่อมเพิ่มขึ้น ปรากฏว่าปริมาณของเนื้อโลหะเชื่อมลดลงในทุกก๊าซปกคลุม เนื่องจาก ปริมาณความร้อนที่ใช้สำหรับการหลอมละลายเนื้อโลหะเชื่อมที่ความเร็วเชื่อมสูงน้อยกว่า ที่ความเร็วเชื่อมต่ำ



รูปที่ 4.7 ผลของความเร็วเชื่อมและปริมาณก๊าซไฮโดรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอนต่อรอยเชื่อมลึกของเนื้อโลหะเชื่อม



รูปที่ 4.8 ผลของความเร็วจเชื่อมและปริมาณก๊าซไฮโดรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอนต่อความกว้างของเนื้อโลหะเชื่อม



รูปที่ 4.9 ผลของความเร็วจเชื่อมและปริมาณก๊าซไฮโดรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอนต่ออัตราส่วนรอยขี้มดึกต่อความกว้างของเนื้อโลหะเชื่อม

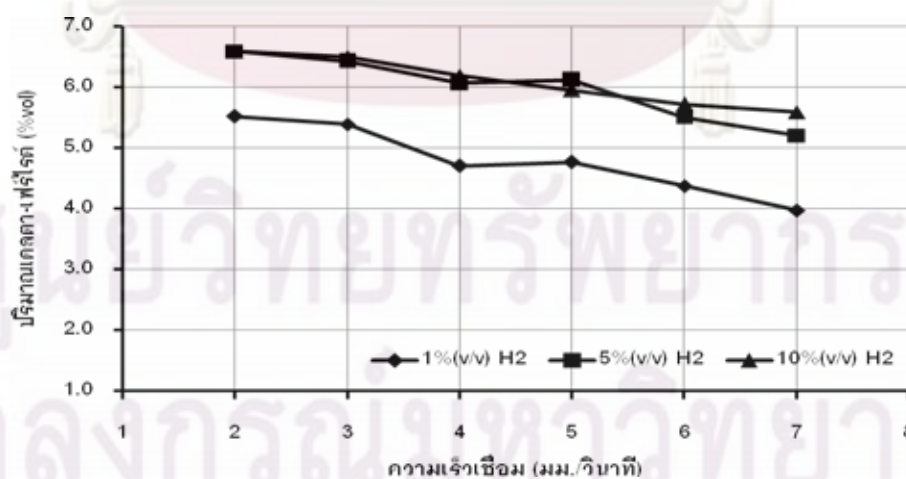
จากผลการทดลอง เมื่อผสมก๊าซไฮโดรเจน 1, 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์ ในก๊าซปกคลุมอาร์กอนที่ความเร็วเชื่อม 2 มิลลิเมตรต่อวินาที พบว่าผลของความเร็วจเชื่อมและปริมาณก๊าซไฮโดรเจน ในก๊าซปกคลุมอาร์กอนต่อรอยขี้มดึกของเนื้อโลหะเชื่อม มีรอยขี้มดึกเพิ่มขึ้นอย่าง

ชัดเจน โดยสังเกตค่าการวัดรอยซึมลึกที่เพิ่มจาก 2.94, 4.81 และ 8.54 มิลลิเมตร ตามรูปที่ 4.7 รูปที่ 4.8 แสดงผลของความเร็วเชื่อมและปริมาณก๊าซไฮโดรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอนต่อความกว้างของเนื้อโลหะเชื่อม จะเห็นว่าความกว้างของเนื้อโลหะเชื่อมเพิ่มจาก 8.40, 9.25 และ 10.00 มิลลิเมตร เมื่อนำรอยซึมลึกและความกว้างทำเป็นอัตราส่วนรอยซึมลึกต่อความกว้าง พบว่าอัตราส่วนรอยซึมลึกต่อความกว้างของเนื้อโลหะเชื่อมเพิ่มขึ้นจาก 0.35, 0.52 และ 0.85 ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.9 ซึ่งแสดงผลของความเร็วเชื่อมและปริมาณก๊าซไฮโดรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอนต่ออัตราส่วนรอยซึมลึกต่อความกว้างของเนื้อโลหะเชื่อม

เมื่อเปลี่ยนแปลงความเร็วเชื่อมจาก 2 ถึง 7 มิลลิเมตรต่อวินาที พบว่ารอยซึมลึกของเนื้อโลหะเชื่อมจะลดลงเมื่อความเร็วเชื่อมเพิ่มขึ้น โดยพิจารณาในรูปที่ 4.2 เมื่อใช้ก๊าซไฮโดรเจน 5 เปอร์เซ็นต์ ผสมในก๊าซปกคลุมอาร์กอน พบว่ารอยซึมลึกลดลงจาก 4.81 ถึง 1.52 มิลลิเมตร ในรูปที่ 4.3 พบว่าความกว้างของเนื้อโลหะเชื่อมลดลงจาก 9.25 ถึง 6.88 มิลลิเมตร และอัตราส่วนรอยซึมลึกต่อความกว้างของเนื้อโลหะเชื่อมลดลงจาก 0.52 ถึง 0.22 ดังแสดงในรูปที่ 4.9

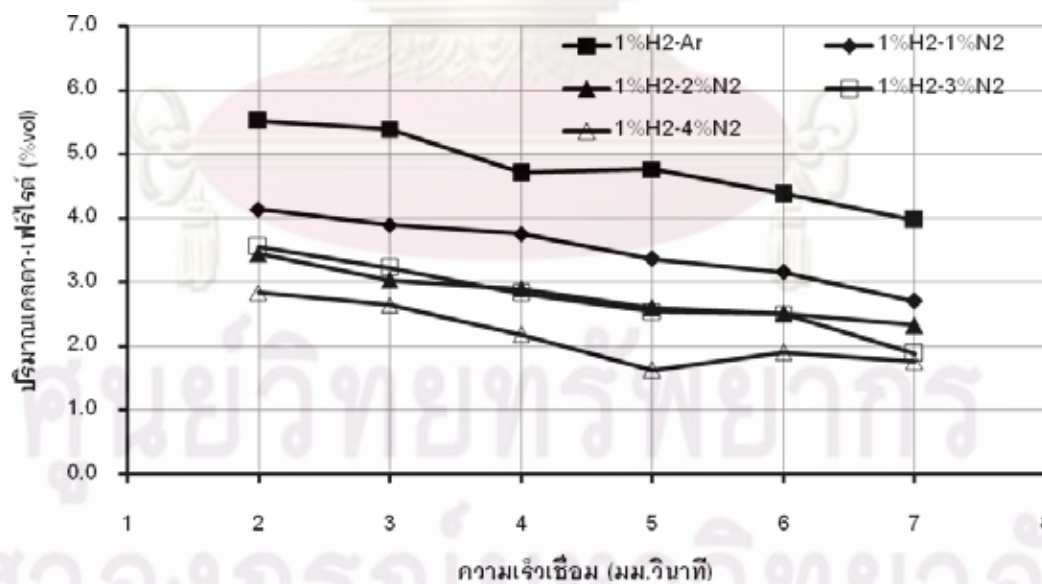
เมื่อใช้ก๊าซไฮโดรเจน 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์ ผสมในก๊าซปกคลุมอาร์กอน ที่ความเร็วเชื่อม 3 ถึง 7 มิลลิเมตรต่อวินาที พบว่าอัตราส่วนรอยซึมลึกต่อความกว้างของเนื้อโลหะเชื่อมเริ่มคงที่ตามรูปที่ 4.9

4.4 ผลของก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซไฮโดรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอน ต่อปริมาณเดลตา-เฟร์ไรต์ของเนื้อโลหะเชื่อม

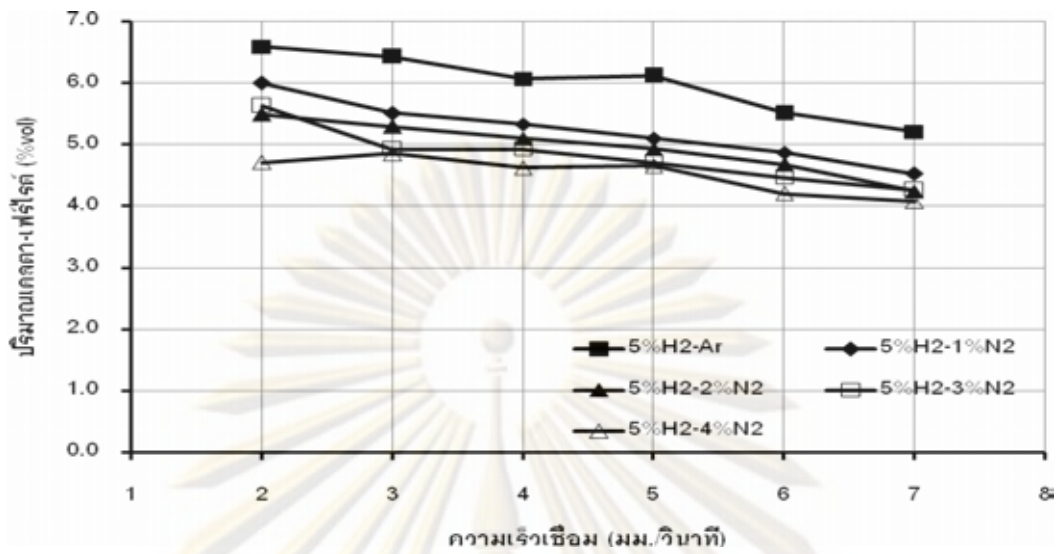


รูปที่ 4.10 ผลของความเร็วเชื่อมและปริมาณก๊าซไฮโดรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอนต่อปริมาณเดลตา-เฟร์ไรต์ในเนื้อโลหะเชื่อม

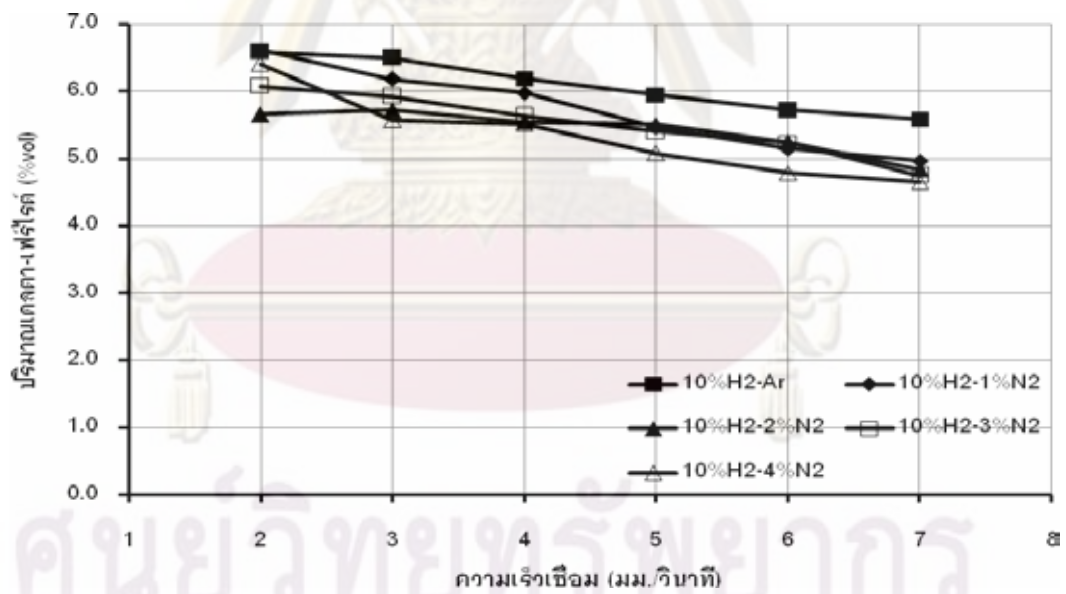
รูปที่ 4.10 แสดงผลของความเร็วเชื่อมและปริมาณก๊าซไฮโดรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอน ต่อปริมาณเดลตา-เฟร์ไรต์ในเนื้อโลหะเชื่อม จะเห็นว่าปริมาณเดลตา-เฟร์ไรต์ในเนื้อโลหะเชื่อม เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณก๊าซไฮโดรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอน พิจารณาที่ความเร็วเชื่อม 3 มิลลิเมตรต่อวินาที เมื่อใช้ก๊าซไฮโดรเจน 1, 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์ ผสมในก๊าซปกคลุมอาร์กอน ปริมาณเดลตา-เฟร์ไรต์เพิ่มขึ้นจาก 5.39, 6.34 และ 6.50 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เนื่องจากว่า ก๊าซไฮโดรเจนมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนสูง ทำให้ปริมาณความร้อนเชื่อมสูง ส่งผลให้อัตราการเย็นตัวของบ่อน้ำโลหะเชื่อมต่ำ ทำให้นิวเคลียสของเดลตา-เฟร์ไรต์สามารถเกิดได้มาก เพราะปริมาณความร้อนในบ่อน้ำโลหะเชื่อมสูง แต่ปริมาณเดลตา-เฟร์ไรต์ในเนื้อโลหะเชื่อมจะ ลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อความเร็วเชื่อมเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาการผสมก๊าซไฮโดรเจน 5 เปอร์เซ็นต์ใน ก๊าซปกคลุมอาร์กอน ที่ความเร็วเชื่อม 2 ถึง 7 มิลลิเมตรต่อวินาที ปริมาณเดลตา-เฟร์ไรต์ลดลงจาก 6.59 ถึง 5.21 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เนื่องจากมีปริมาณความร้อนเชื่อมในบ่อน้ำโลหะที่ความเร็ว เชื่อมสูงลดลง ทำให้อัตราการเย็นตัวของบ่อน้ำโลหะเชื่อมสูง ส่งผลให้นิวเคลียสของ เดลตา-เฟร์ไรต์สามารถเกิดได้น้อยกว่าที่ความเร็วเชื่อมต่ำ ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัย ของ N. Suutala [24] พบว่าเมื่อความเร็วเชื่อมสูงขึ้นเดลตา-เฟร์ไรต์ลดลง เพราะอัตราการเย็นตัว สูงขึ้น



รูปที่ 4.11 ผลของความเร็วเชื่อมและปริมาณก๊าซไฮโดรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอน ที่ผสม ก๊าซไฮโดรเจน 1 เปอร์เซ็นต์ ต่อปริมาณเดลตา-เฟร์ไรต์ในเนื้อโลหะเชื่อม



รูปที่ 4.12 ผลของความเร็วเชื่อมและปริมาณก๊าซไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอน ที่ผสมก๊าซไฮโดรเจน 5 เปอร์เซ็นต์ ต่อปริมาณเดลตา-เฟร์ไรต์ในเนื้อโลหะเชื่อม



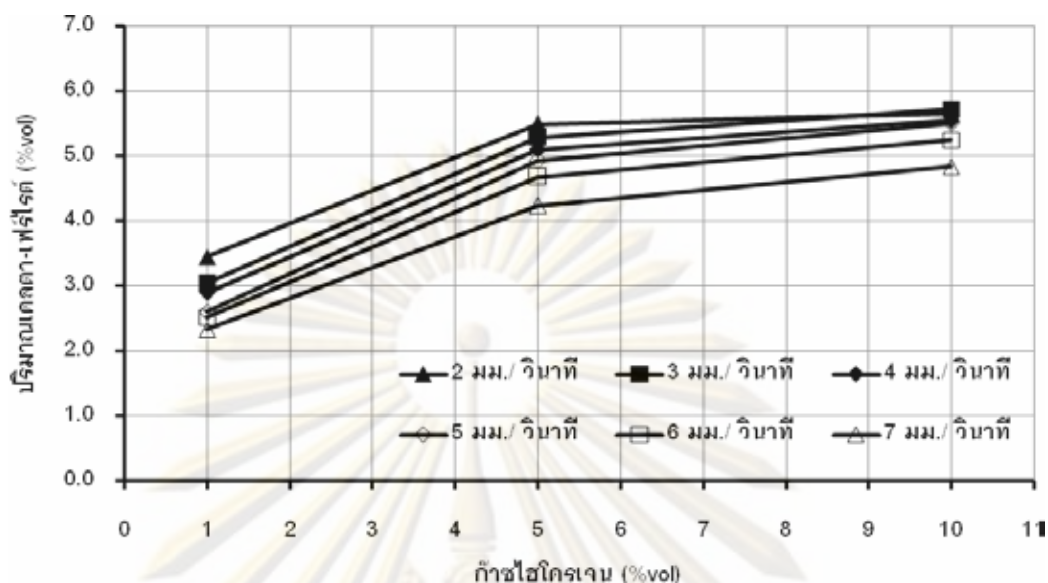
รูปที่ 4.13 ผลของความเร็วเชื่อมและปริมาณก๊าซไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอน ที่ผสมก๊าซไฮโดรเจน 10 เปอร์เซ็นต์ ต่อปริมาณเดลตา-เฟร์ไรต์ในเนื้อโลหะเชื่อม

รูปที่ 4.11 แสดงผลของความเร็วเชื่อมและปริมาณก๊าซไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอน ที่ผสมก๊าซไฮโดรเจน 1 เปอร์เซ็นต์ ต่อปริมาณเดลตา-เฟร์ไรต์ในเนื้อโลหะเชื่อม ปรากฏว่า ปริมาณ

เดลตา-เฟร์ไรต์ในเนื้อโลหะเชื่อมลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณก๊าซไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอน ดังที่ความเร็วเชื่อม 3 มิลลิเมตรต่อวินาที การเพิ่มไนโตรเจน 0 ถึง 4 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณเดลตา-เฟร์ไรต์ลดลงจาก 5.39 ถึง 2.65 เปอร์เซ็นต์ ผลการทดลองเหมือนกับรูปที่ 4.12 และ 4.13 ที่เพิ่มก๊าซไฮโดรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอนเป็น 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากไนโตรเจนเป็นธาตุที่ทำให้อสเทไนต์เสถียรภาพ ผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยของ R.K Okagawa กับคณะ [5] และอื่น ๆ [6-8,13,18,29] พบว่าเมื่อปริมาณก๊าซไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอนสูงขึ้นปริมาณเดลตา-เฟร์ไรต์จะลดลง

เมื่อความเร็วเชื่อมเพิ่มขึ้น ค่าปริมาณของเดลตา-เฟร์ไรต์ลดลง ดังแสดงในรูปที่ 4.11 ที่แสดงผลของความเร็วเชื่อมและใช้ก๊าซไฮโดรเจน 1 เปอร์เซ็นต์ผสมก๊าซปกคลุมอาร์กอนไม่ผสมก๊าซไนโตรเจน จะเห็นว่าปริมาณเดลตา-เฟร์ไรต์ ลดลงจาก 5.52 ถึง 3.98 ในช่วงความเร็วเชื่อม 2 ถึง 7 มิลลิเมตรต่อวินาที ตามลำดับ ผลการทดลองนี้ให้ผลเช่นเดียวกันกับการผสมก๊าซไฮโดรเจน 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์ในก๊าซปกคลุมอาร์กอน ตามที่แสดงในรูปที่ 4.12 และ 4.13 ตามลำดับ เนื่องจากความเร็วเชื่อมเพิ่มขึ้น ทำให้ปริมาณความร้อนเชื่อม (Heat input) ในเนื้อโลหะเชื่อมลดลง ส่งผลให้อัตราการเย็นตัว (Cooling rate) สูง จึงมีช่วงเวลาในการเกิดเดลตา-เฟร์ไรต์ลดลง ผลการทดลองสอดคล้องกับผลการศึกษาของ N.Suutala [24] รายงานว่าเมื่อเพิ่มความเร็วเชื่อมในการเชื่อม ทำให้ปริมาณเดลตา-เฟร์ไรต์ลดลง

จากผลการทดลองได้พบข้อมูลเพิ่มเติมคือในรูปที่ 4.12 และ 4.13 พบว่าปริมาณก๊าซไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอน ที่ผสมก๊าซไฮโดรเจน 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์มีผลต่อปริมาณเดลตา-เฟร์ไรต์ในเนื้อโลหะเชื่อมน้อยกว่าที่ผสมก๊าซไฮโดรเจน 1 เปอร์เซ็นต์ (รูปที่ 4.11) แสดงว่าปริมาณความร้อนเชื่อม (Heat input) ที่ได้จากก๊าซไฮโดรเจนมีอิทธิพลต่อการเกิดเดลตา-เฟร์ไรต์ในเนื้อโลหะเชื่อมมากกว่าอิทธิพลของก๊าซไนโตรเจนต่อความเสถียรภาพของอสเทไนต์



รูปที่ 4.14 ผลของปริมาณก๊าซไฮโดรเจนและความเร็วต่อปริมาณเดลตา-เฟร์ไรต์ในเนื้อโลหะเชื่อมที่ใช้ก๊าซไนโตรเจน 2 เปอร์เซ็นต์ ในก๊าซปกคลุมอาร์กอน

รูปที่ 4.14 แสดงผลของปริมาณก๊าซไฮโดรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอนผสมก๊าซไนโตรเจน 2 เปอร์เซ็นต์และความเร็วเชื่อมต่อปริมาณเดลตา-เฟร์ไรต์ในเนื้อโลหะเชื่อม พบว่าเมื่อผสมก๊าซไฮโดรเจนจาก 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์ในก๊าซปกคลุมอาร์กอนผสมก๊าซไนโตรเจน 2 เปอร์เซ็นต์ ที่ทุกความเร็วปริมาณเดลตา-เฟร์ไรต์เริ่มคงที่

4.5 ผลของปริมาณก๊าซไนโตรเจนและก๊าซไฮโดรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอนต่อปริมาณเดลตา-เฟร์ไรต์ในเนื้อโลหะเชื่อมและขนาดเกรนออสเทนไนต์

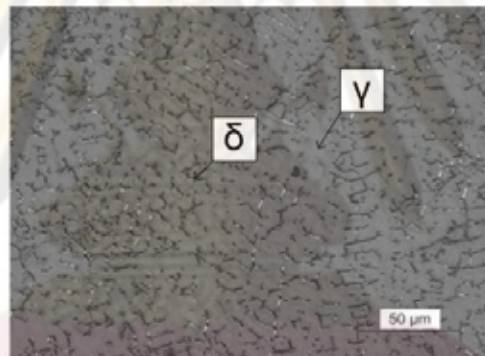
รูปที่ 4.15 แสดงผลของปริมาณก๊าซไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอนต่อการกระจายตัวเดลตา-เฟร์ไรต์ในเนื้อโลหะเชื่อม จะเห็นว่าปริมาตรเดลตา-เฟร์ไรต์ลดลงเมื่อใช้ก๊าซไนโตรเจนจาก 0, 2 และ 4 เปอร์เซ็นต์ ผสมในก๊าซปกคลุมอาร์กอน ตามรูปที่ 4.15ก, ข และ ค ตามลำดับ

ผลของปริมาณก๊าซไฮโดรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอนต่อการกระจายตัวเดลตา-เฟร์ไรต์ในเนื้อโลหะเชื่อม แสดงในรูปที่ 4.16 จะเห็นว่าเมื่อปริมาณก๊าซไฮโดรเจนสูงขึ้นถึง 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์ในก๊าซปกคลุมอาร์กอน ปริมาณเดลตา-เฟร์ไรต์มีแนวโน้มลดลง มีการกระจายตัวตามขอบเกรนคล้ายกัน และขนาดเกรนของเนื้อโลหะเชื่อมโตขึ้น เนื่องจากก๊าซไฮโดรเจนมีค่านำความร้อนสูง ทำให้ปริมาณความร้อนเชื่อม (Heat input) สูง เป็นสาเหตุให้ช่วงเวลาในการแข็งตัวของ

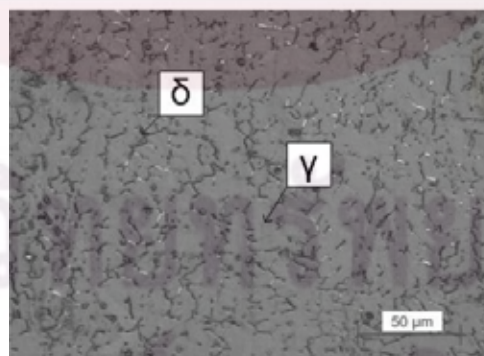
โลหะนานมากขึ้น การเปลี่ยนแปลงจากเดลตา-เฟอไรต์เป็นออสเทนไนต์มากขึ้น ขนาดเกรนออสเทนไนต์โตขึ้น จำนวนขอบเกรนที่โครงสร้างเดลตา-เฟอไรต์อยู่ลดลง ปริมาณเดลตา-เฟอไรต์จึงลดลง ผลวิจัยนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Ahmet [20] ที่พบว่าการผสมก๊าซไฮโดรเจน 5 เปอร์เซ็นต์ในก๊าซปกคลุมอาร์กอน เกรนมีขนาดโตกว่าที่มีก๊าซไฮโดรเจนผสมปริมาณต่ำกว่า



ก) ก๊าซไฮโดรเจน 0 เปอร์เซ็นต์

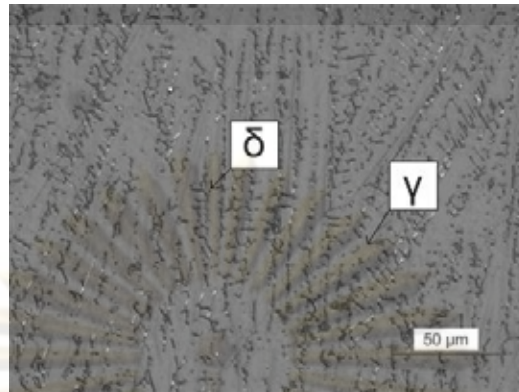


ข) ก๊าซไฮโดรเจน 2 เปอร์เซ็นต์

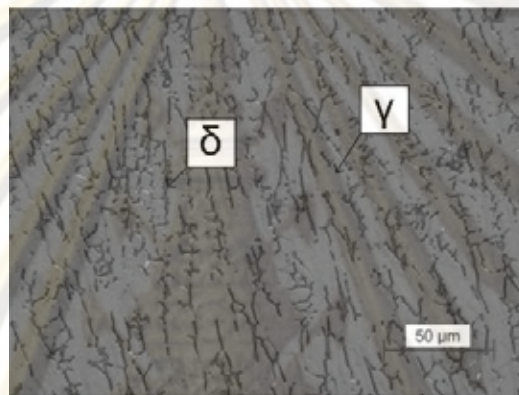


ค) ก๊าซไฮโดรเจน 4 เปอร์เซ็นต์

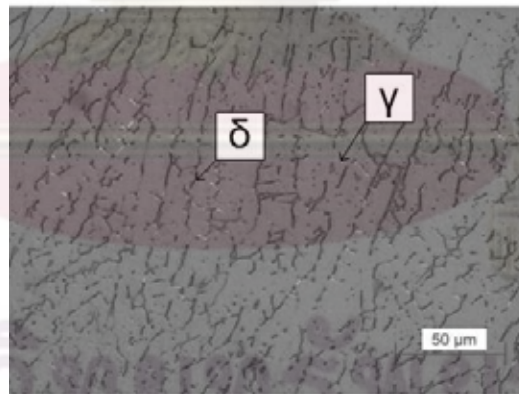
รูปที่ 4.15 ผลของปริมาณก๊าซไฮโดรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอนที่ผสมก๊าซไฮโดรเจน 5 เปอร์เซ็นต์ ต่อปริมาณเดลตา-เฟอไรต์ในเนื้อโลหะเชื่อม ที่ความเร็วเชื่อม 3 มิลลิเมตรต่อวินาที



ก) ก๊าซไฮโดรเจน 1 เปอร์เซ็นต์



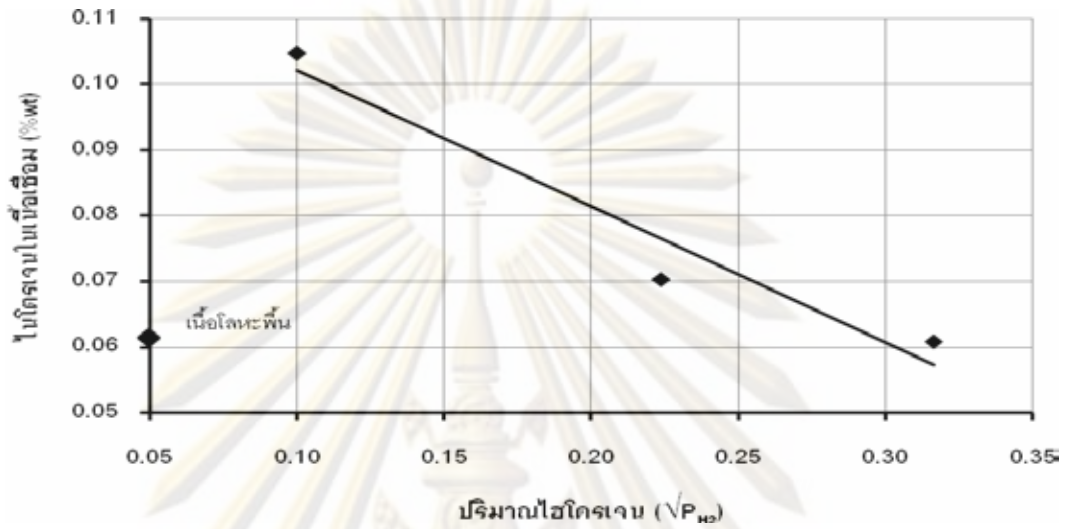
ข) ก๊าซไฮโดรเจน 5 เปอร์เซ็นต์



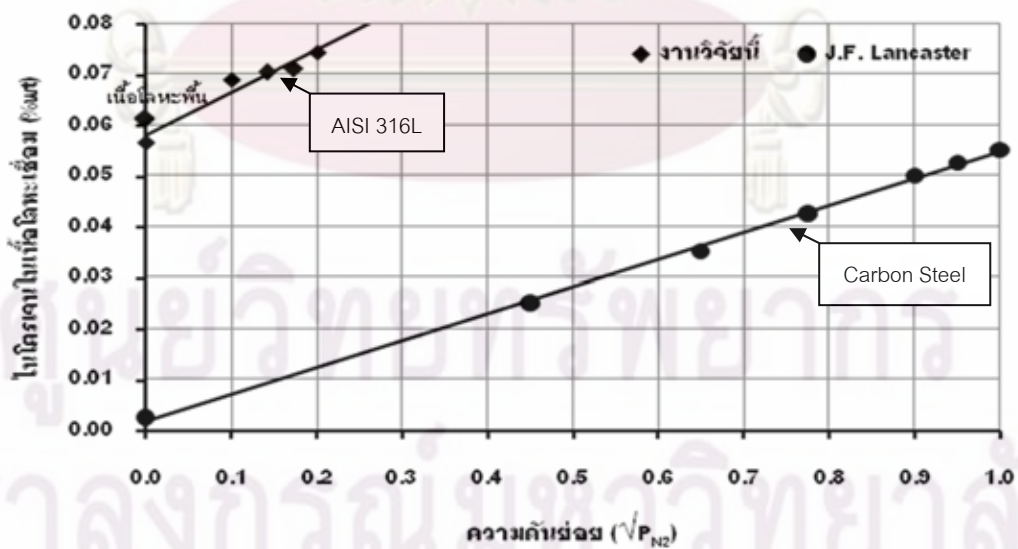
ค) ก๊าซไฮโดรเจน 10 เปอร์เซ็นต์

รูปที่ 4.16 ผลของก๊าซไฮโดรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอนต่อปริมาณเดลตา-เฟอไรต์ในเนื้อโลหะเชื่อมและขนาดเกรนออกสเตไนต์ ที่ความเร็วเชื่อม 3 มิลลิเมตรต่อวินาที

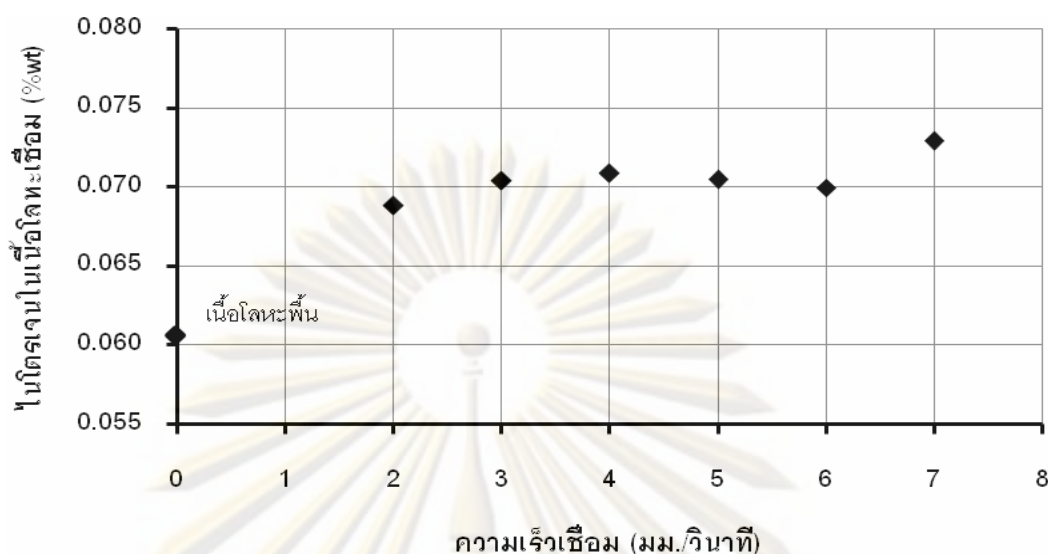
4.6 ผลของก๊าซไนโตรเจนกับก๊าซไฮโดรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอนและความเร็วเชื่อมต่อปริมาณการละลายไนโตรเจนในเนื้อโลหะเชื่อม



รูปที่ 4.17 ผลของปริมาณก๊าซไฮโดรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอนต่อปริมาณไนโตรเจนในเนื้อโลหะเชื่อม เมื่อผสมก๊าซไนโตรเจน 2 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเร็วเชื่อม 3 มิลลิเมตรต่อวินาที



รูปที่ 4.18 เปรียบเทียบปริมาณการละลายไนโตรเจนในเนื้อโลหะเชื่อมของงานวิจัยนี้กับ J.F Lancaster [14]



รูปที่ 4.19 ผลของความเร็วเชื่อมต่อปริมาณไนโตรเจนในเนื้อโลหะเชื่อม ที่ใช้ก๊าซไฮโดรเจน 5 เปอร์เซ็นต์ และก๊าซไนโตรเจน 2 เปอร์เซ็นต์ ผสมในก๊าซปกคลุมอาร์กอน

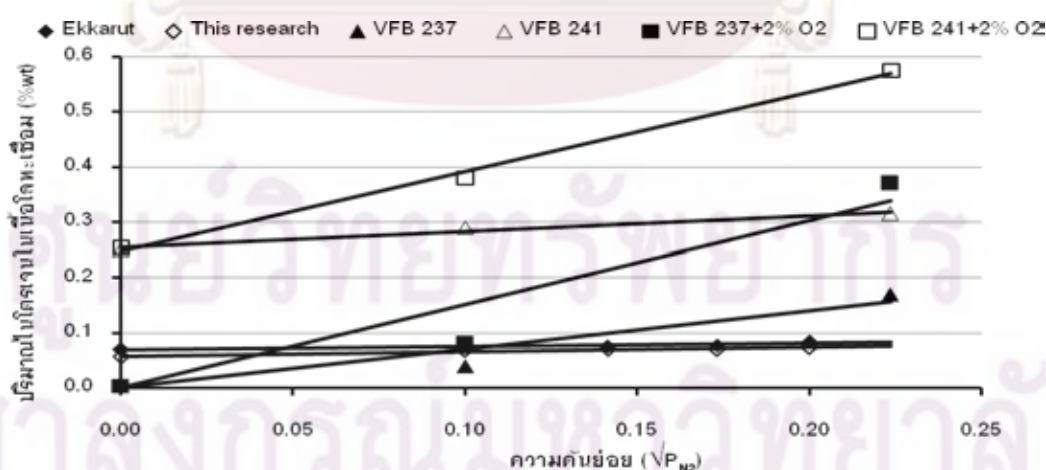
จากผลการทดลองเมื่อปริมาณก๊าซไฮโดรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอนที่ผสมก๊าซไนโตรเจน 2 เปอร์เซ็นต์ สูงขึ้น ปริมาณไนโตรเจนในเนื้อโลหะเชื่อมลดลง ดังในรูปที่ 4.17 เมื่อพิจารณาปริมาณการละลายไนโตรเจนในเนื้อโลหะเชื่อมกับปริมาณก๊าซไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอนที่ผสมก๊าซไฮโดรเจน 5 เปอร์เซ็นต์ ตามรูปที่ 4.18 พบว่าปริมาณการละลายเพิ่มขึ้น คือจาก 0.057 เปอร์เซ็นต์ เป็น 0.074 เปอร์เซ็นต์ ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ T. Ogawa กับคณะ [7] และ M. Du TOIT กับคณะ [31] คือ เมื่อเพิ่มปริมาณก๊าซไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอนเพิ่มขึ้น ทำให้ปริมาณไนโตรเจนในเนื้อโลหะเชื่อมเพิ่มขึ้น ดูเหมือนว่าผลการทดลองในรูปที่ 4.18 เป็นไปตามตามกฎของ Sievert แม้ว่าการละลายจะไม่เป็น ณ สมดุล เปรียบเทียบกับการละลายของไนโตรเจนในเหล็กกล้าคาร์บอน (J.F. Lancaster [30]) พบว่าเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนต์สามารถละลายไนโตรเจนได้สูงกว่า

ผลการเพิ่มความเร็วในการเชื่อมตามรูปที่ 4.19 พบว่า ปริมาณไนโตรเจนในเนื้อโลหะเชื่อมเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจาก 0.069 เปอร์เซ็นต์ เป็น 0.073 เปอร์เซ็นต์ เมื่อความเร็วเชื่อมเปลี่ยนจาก 2 มิลลิเมตรต่อวินาที ถึง 7 มิลลิเมตรต่อวินาที อาจกล่าวได้ว่าการละลายของไนโตรเจนในเนื้อโลหะเชื่อม ไม่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงความเร็ว ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับรายงานการวิจัยของ Insu Woo และ Yasushi Kikuchi [18] ที่กล่าวว่าความเร็วเชื่อมเพิ่มขึ้นมีผลต่อรูปร่างของเนื้อโลหะเชื่อมเท่านั้น แม้ว่าจะมีการเพิ่มปริมาณไนโตรเจนในเนื้อโลหะเชื่อม

4.7 การเปรียบเทียบผลทดลองกับงานวิจัยอื่น

เมื่อนำผลจากข้อ 4.6 เปรียบเทียบกับผลงานวิจัยอื่น ตามรูปที่ 4.20 จะพบความแตกต่าง ดังนี้คือ เปรียบเทียบกับการทดลองของเอกรัตน์ [2] เชื้อมเห็ดกกล้าไร้สนิมออสเทไนต์ เกรด 316L ที่ตำแหน่ง 6 นาฬิกา พบว่าปริมาณไนโตรเจนในเนื้อโลหะเชื่อม มากกว่าการทดลองนี้เล็กน้อย แต่แนวโน้มและความชันของกราฟการละลายไนโตรเจนในเนื้อโลหะเชื่อมคล้ายกัน เนื่องจากการทดลองนี้ใช้ก๊าซไฮโดรเจนที่เป็นก๊าซในกลุ่มรีดิคซ์ ผสมในก๊าซปกคลุมอาร์กอน ส่งผลให้ไนโตรเจนสามารถละลายในโลหะเหลวได้น้อยตามรายงานบททวนผลงานวิจัยโดย Insu Woo [18] และเอกสารงานเชื่อมโดย J.F. Lancaster [30]

เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองของ M. Du TOIT [31] ตามที่แสดงในรูปที่ 4.20 ทดลอง เชื้อมเห็ดกกล้าไร้สนิมออสเทไนต์ เกรด 310 ที่มีไนโตรเจน 0.002 เปอร์เซ็นต์ (VFB 237) และ ไนโตรเจน 0.280 เปอร์เซ็นต์ (VFB 241) ด้วยก๊าซไนโตรเจนผสมในก๊าซปกคลุมอาร์กอน พบว่า ไนโตรเจนสามารถละลายในเนื้อโลหะเชื่อมได้มากกว่างานวิจัยนี้และงานวิจัยของเอกรัตน์ นอกจากนี้ได้ทดลองเชื่อมด้วยก๊าซไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอน ที่ผสมก๊าซออกซิเจน 2 เปอร์เซ็นต์ (VFB 237+2%O₂ และ VFB 241+2%O₂) ปรากฏว่าไนโตรเจนสามารถละลายในเนื้อโลหะเชื่อมเห็ดกกล้าไร้สนิมออสเทไนต์ เกรด 310 ได้มากกว่าก๊าซปกคลุมอื่น เนื่องจากธาตุที่ผสมในเหล็ก เช่น โครเมียม ซิลิคอน และแมงกานีส ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนเป็นโครเมียมออกไซด์ ซิลิคอนออกไซด์ และแมงกานีสออกไซด์ ปกคลุมที่ผิวบ่อโลหะเหลวไนโตรเจนจึงถูกกักเก็บในเนื้อโลหะเชื่อมได้มาก



รูปที่ 4.20 ปริมาณไนโตรเจนในเนื้อโลหะเชื่อมของเห็ดกกล้าไร้สนิมออสเทไนต์ เปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่น

จากการเปรียบเทียบผลการละลายไนโตรเจนในเนื้อโลหะเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม
ออสเทนไนต์ อาจสามารถกล่าวได้ว่า กลุ่มก๊าซแอ็กทีฟ เช่น ก๊าซออกซิเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์
ช่วยให้ไนโตรเจนสามารถละลายในเนื้อโลหะเชื่อมได้สูงกว่า กลุ่มก๊าซรีดิวิง เช่น ก๊าซไฮโดรเจน



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

ผลการทดลองเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนต์ 316L ด้วยวิธีเชื่อมทิกพัลส์ โดยผสมก๊าซไนโตรเจนและก๊าซไฮโดรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอน ด้วยความเร็วเชื่อม 2-7 มิลลิเมตรต่อวินาที สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

5.1.1 การใช้ก๊าซปกคลุมอาร์กอนผสมก๊าซไฮโดรเจน ที่ความเร็วเชื่อม 6 และ 7 มิลลิเมตรต่อวินาที มีแนวโน้มเกิดข้อบกพร่องแบบรูพรุนขึ้น แต่เมื่อใช้ก๊าซปกคลุมอาร์กอนที่ผสมก๊าซไฮโดรเจน 10 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเร็วเชื่อม 2 มิลลิเมตรต่อวินาที พบรอยบกพร่องแบบ Incompletely filled groove, Excessive penetration และ Root concavity

5.1.2 ก๊าซไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอนที่ผสมก๊าซไฮโดรเจน ไม่มีผลต่อรอยขี้มด ความกว้าง และอัตราส่วนรอยขี้มดต่อความกว้างของเนื้อโลหะเชื่อม

5.1.3 เมื่อปริมาณก๊าซไฮโดรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอนเพิ่มขึ้น รอยขี้มด ความกว้าง และอัตราส่วนรอยขี้มดต่อความกว้างของเนื้อโลหะเชื่อมสูงขึ้น แต่ที่ปริมาณก๊าซไฮโดรเจน 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์ ในก๊าซปกคลุมอาร์กอน และความเร็วเชื่อมมากกว่า 3 มิลลิเมตรต่อวินาที อัตราส่วนรอยขี้มดต่อความกว้างของเนื้อโลหะเชื่อมมีแนวโน้มคงที่

5.1.4 ความเร็วเชื่อมเพิ่มขึ้น ส่งผลให้รอยขี้มด ความกว้าง และอัตราส่วนรอยขี้มดต่อความกว้างลดลง แต่ที่ความเร็วเชื่อม 5, 6 และ 7 มิลลิเมตรต่อวินาที อัตราส่วนรอยขี้มดต่อความกว้างของเนื้อโลหะเชื่อมเริ่มคงที่

5.1.5 เมื่อปริมาณก๊าซไฮโดรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอนเพิ่มขึ้นจาก 1 ถึง 5 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณเดลตา-เฟอไรต์ในเนื้อโลหะเชื่อมเพิ่มขึ้น แต่เมื่อปริมาณก๊าซไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นจาก 5 ถึง 10 เปอร์เซ็นต์ในก๊าซปกคลุมอาร์กอน ปริมาณเดลตา-เฟอไรต์ในเนื้อโลหะเชื่อมมีแนวโน้มคงที่

5.1.6 เมื่อปริมาณก๊าซไนโตรเจนเพิ่มขึ้นจาก 1 ถึง 4 เปอร์เซ็นต์ ในก๊าซปกคลุมอาร์กอน ปริมาณเดลตา-เฟอไรต์ในเนื้อโลหะเชื่อมลดลง

5.1.7 การใช้ก๊าซไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอนที่ผสมก๊าซไฮโดรเจน 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์ มีผลต่อการลดปริมาณเดลตา-เฟอไรต์ในเนื้อโลหะเชื่อมน้อยกว่าการใช้ก๊าซไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอนที่ผสมก๊าซไฮโดรเจน 1 เปอร์เซ็นต์

5.1.8 เมื่อปริมาณก๊าซไฮโดรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอนที่เพิ่มขึ้น ขนาดเกรนออกสเตนไนต์โตขึ้น เนื่องจากปริมาณความร้อนเชื่อมสูง

5.1.9 เมื่อปริมาณก๊าซไฮโดรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอนเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ปริมาณไนโตรเจนในเนื้อโลหะเชื่อมลดลง

5.1.10 เมื่อปริมาณก๊าซไนโตรเจนเพิ่มขึ้นจาก 1 ถึง 4 เปอร์เซ็นต์ในก๊าซปกคลุมอาร์กอน ปริมาณไนโตรเจนในเนื้อโลหะเชื่อมเพิ่มขึ้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

ผลการทดลองเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออกสเตนไนต์ เกรด 316L ด้วยวิธีเชื่อมทิกพัลส์ โดยการใช้ก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซไนโตรเจนผสมก๊าซปกคลุมอาร์กอน คาดว่าสามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นในการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออกสเตนไนต์และเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดอื่นๆ ในอุตสาหกรรมได้ เนื่องจากการทดลองนี้เป็นเพียงข้อมูลเบื้องต้น จึงยังต้องการการทดลองเพิ่มเติมเพื่อให้ได้ข้อมูลที่สมบูรณ์ยิ่งขึ้น ได้แก่

5.2.1 การศึกษาผลการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของก๊าซปกคลุม ต่อโครงสร้างจุลภาค และข้อบกพร่องของเนื้อโลหะเชื่อม

5.2.2 การศึกษาผลของก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอน ที่ตำแหน่งการเชื่อมอื่น เช่น ตำแหน่ง 9 และ 12 นาฬิกา เป็นต้น

5.2.3 การศึกษาลักษณะเดียวกันโดยใช้เหล็กกล้าไร้สนิมเกรดอื่น

รายการอ้างอิง

- [1] ประสงค์ ชะอู่มี. ผลของพารามิเตอร์ในการเชื่อมทิกฟัลส์และส่วนผสมของก๊าซปกคลุมต่อลักษณะการเกิดรอยเชื่อมและโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิตเกรด 304L ในลักษณะการเชื่อมที่แตกต่างกัน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2539.
- [2] เอกรัตน์ ไวยนิตย์. อิทธิพลของตัวแปรในการเชื่อมทิกฟัลส์และส่วนผสมของแก๊สปกคลุมต่อลักษณะการเกิดรอยเชื่อม และโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิตเกรด 316L ในตำแหน่งการเชื่อม 6, 8, 9, 10 และ 12 นาฬิกา. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2542.
- [3] ASM Specialty Handbook, Stainless Steels. edited by Davis, J.R. 1994.
- [4] Brooks, J.A., Thompson, A. W., And Williams, J.C. A Fundamentals Study of the Beneficial Effects of Delta Ferrite in Reducing Weld Cracking. Welding Research Supplement. (March 1984): 71s-83s.
- [5] Okagawa, R.K., Dixon, R.D., and Olson, D.L. The Influence of Nitrogen from Welding on Stainless Steel Weld Metal Microstructures. Welding Research Supplement. (August 1983): 204s-208s.
- [6] Ogawa, T., Suzuki, K., and Zaizen, T., The weld ability of Nitrogen-Containing Austenitic Stainless Steel: Part II-Porosity, Cracking and Creep Properties. Welding Research Supplement. (July 1984): 213s-223s.
- [7] Ogawa, T., and Koseki, T., Weld ability of Newly Developed Austenitic Alloys for Cryogenic Service: Part II High-Nitrogen Stainless Steel Weld Metal. Welding Research Supplement. (January 1988): 8s-17s.
- [8] Phakpeetinan, P., Sornsuwit, N., Chandra-ambhorn, S., Lothongkum, G., Effects of TIG Pulse Welding Parameters and Nitrogen Gas Mixed in Argon Shielding Gas on Weld Bead Formation and Microstructure of Weld Metals of AISI 304L Stainless Steels at the 10-h Welding Position. 86th AWS Annual Convention in Dallas, Texas, USA. (April 26-28), 2005.

- [9] Cornu, J., Advanced Welding Systems : TIG and related processes. Translated to English by Weston, J. Berlin: JFS (Publications), 1988.
- [10] Du Toit, M., and Pistorius., Nitrogen Control During Autogenous Arc Welding of Stainless Steel — Part 1: Experimental Observations. Welding Research Supplement (August 2003): 219s-224s.
- [11] Shanping, Lu., Hidetoshi, Fujii., and Kiyoshi, Nogi., Influence of welding parameters and shielding gas composition on GTA weld shape. ISIJ International, Volume 45, No. 1, 2005: 66-70.
- [12] Hull, F.C., Effect of Delta ferrite on the Hot Cracking of Stainless Steel. Welding Research Supplement. (September 1967): 399s-408s.
- [13] Lothongkum, G., Chaumbai, P., Bhandhubanyong, P., TIG pulse welding of 304L austenitic stainless steel in flat, vertical and overhead positions. Journal of Materials Processing Technology [online]. 1999. Available from: <http://www.sciencedirect.com>.
- [14] Gas Tungsten Arc Welding. Metals Handbook 9th edition, Volume 6: Welding, Brazing and Soldering. pp 182-213.
- [15] คณะนย วรรณโท. การอบชุบเหล็กกล้าด้วยความร้อนบทบาทของงานเชื่อมโลหะที่มีต่อการอบชุบโลหะ. พิมพ์ครั้งที่ 1, กรุงเทพมหานคร: สถาบันพัฒนาอุตสาหกรรมเครื่องจักรกลและโลหะการ, 2533.
- [16] Kim, W.-H., Na, S.-J., Heat and Fluid in Pulsed Current GTA weld pool. International Journal of Heat and Mass Transfer 41. (1998) pp 3213-3227.
- [17] Kujanpaa, V.P., Weld defects in Austenitic Stainless Steel sheets : Effect of Welding Parameters. Welding Journal 62. (February 1983): 45s-52s.
- [18] Insu Woo and Yasushi Kikuchi, Weldability of High Nitrogen Stainless Steel. ISIJ International, Volume 42, No. 12, (2002): 1334-1343.
- [19] Janez Tušek., Experimental Investigation of Gas Tungsten Arc Welding and Comparison with Theoretical Predictions. IEEE Transactions on Plasma Science, Vol. 28, No.5, (October 2000): 1688-1693.
- [20] Ahmet Durgutlu., Experimental Investigation of the Effect of Hydrogen in Argon as a Shielding Gas on TIG Welding of Austenitic Stainless Steel. Materials and Design 25 [online] 2004. Available from: <http://www.sciencedirect.com>.

- [21] Shankar, V., Gill, T.P.S., Mannan S.L., and Sundaresan, S., Effect of Nitrogen Addition on Microstructure and Fusion Zone Cracking in Type 316L Stainless Steel Weld Metals. Materials Science and Engineering A343 (2003): 170-181.
- [22] Delong, W.T., Ostrom, G. A., and Szumachowski, E.R., Measurement and Calculation of Ferrite In Stainless- Steel Weld Metal. Welding Research Supplement. (November 1956): 521s-528s.
- [23] Deutches Institut für Normung e.V., quality and testing, 3th edition. DIN Handbook 8: Welding 1 Standard dealing with filler metal, manufacture. pp 154-178. Beuth Verlag, Germany: 1991.
- [24] Suutala, N., Effect of Solidification Conditions on the Solidification Mode in Austenitic Stainless Steels. Metallurgical Transaction A, Volume 14A. (February 1983): 191-197.
- [25] Shanping, Lu., Hidetoshi, Fujii., and Kiyoshi, Nogi., Marangoni convection and weld shape variations in Ar-O₂ and Ar-CO₂ shielded GTA welding. Materials science and engineering A 380. (2004): 290-297.
- [26] Shanping, Lu., Hidetoshi, Fujii., Kiyoshi, Nogi., Sensitivity of Marangoni convection and weld shape variations to welding parameters in O₂-Ar shielded GTA welding. Scripta Materialia 51. [online] 2004, Available from: <http://www.sciencedirect.com>
- [27] Shanping, Lu., Hidetoshi, Fujii., and Kiyoshi, Nogi., Marangoni convection in weld pool in CO₂-Ar shielded gas thermal arc welding. Metallurgical and Materials Transactions A, Volume 35A. (September 2004): 2861-2867.
- [28] Shanping, Lu., Hidetoshi, Fujii., Kiyoshi, Nogi., Effects of CO₂ shielding gas additions and welding speed on GTA weld shape. Journal of Materials Science 40. (2005): 2481-2485.
- [29] Lothongkum, G., Viyanit, E., Bhandhubanyong, P., Study on the Effects of Pulsed TIG Welding Parameters on Delta-Ferrite Content, Shape Factor and Bead Quality in Orbital Welding of AISI 316L Stainless Steel Plate. Journal of Materials Processing Technology 110 [online] 2001, Available from: <http://www.sciencedirect.com>.

[30] Lancaster, J.F., Welding Metallurgy, 6th Edition, Chapman & Hall: Cambridge, U.K., 1999.

[31] Du Toit, M., and Pistorius., The Influence of Oxygen on the Nitrogen Content of Autogenous Stainless Steel Arc Welds. Welding Research Supplement. (August 2007): 222s-230s.



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

คุณสมบัติของก๊าซปกคลุมที่ใช้สำหรับการเชื่อมทิก

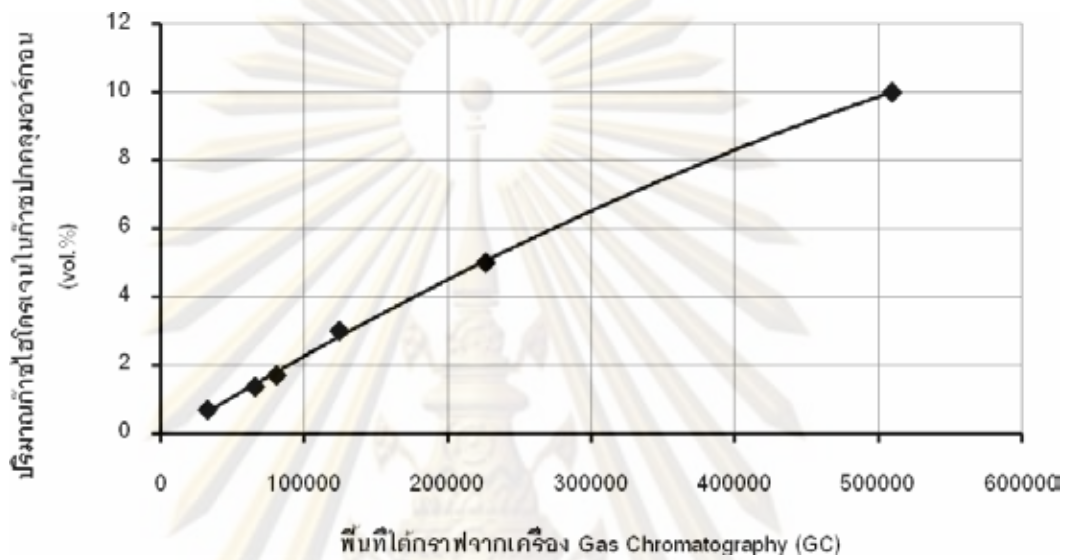
ตารางที่ ก.1 คุณสมบัติของก๊าซปกคลุมที่ใช้สำหรับการเชื่อมทิก [2,19]

ก๊าซ	ความนำความร้อน $\times 10^3$ (W/m K)	ศักย์การเกิดไอออน (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	14.00	1.977

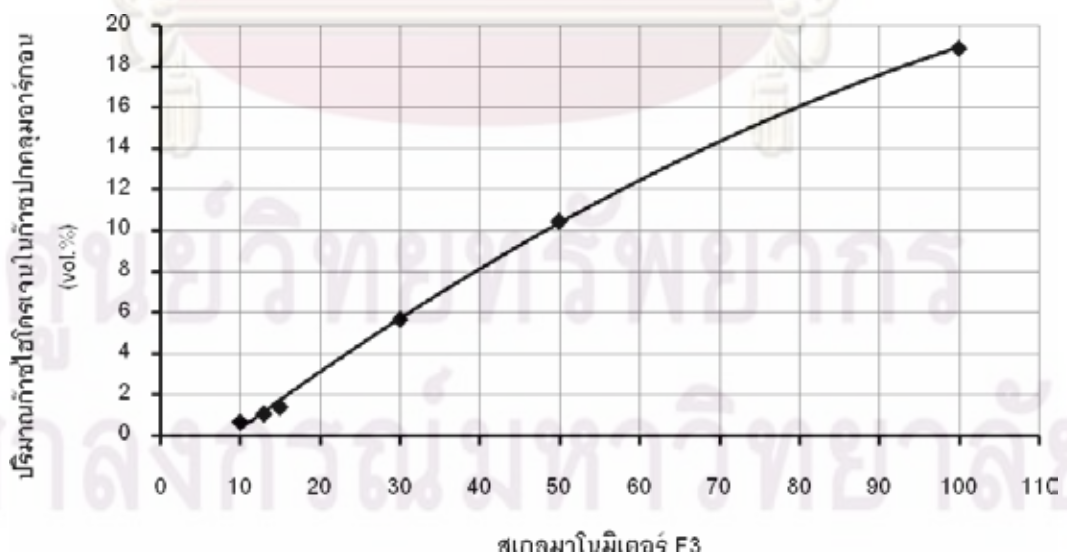
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข

การปรับตั้งสัดส่วนผสมของก๊าซปฏิกลุ่มที่มาโนมิเตอร์และตรวจสอบด้วยเทคนิคก๊าซโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography; GC)



รูปที่ ข.1 ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนในก๊าซปฏิกลุ่มอาร์กอนต่อพื้นที่ใต้กราฟจากเทคนิคก๊าซโครมาโทกราฟี



รูปที่ ข.2 ความสัมพันธ์ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอนกับสเกลมาโนมิเตอร์ F3

ภาคผนวก ข (ต่อ)

เพื่อการปรับตั้งสัดส่วนของก๊าซปกคลุมให้ถูกต้อง ในการทดลองนี้ได้ตรวจสอบสัดส่วนการผสมก๊าซโดยมีขั้นตอนดังนี้

1. ตรวจสอบอัตราการไหลของก๊าซที่ควบคุมด้วยมาโนมิเตอร์ โดยใช้เทคนิคการวัดอัตราการไหลด้วยฟองสบู่ทดสอบที่อุณหภูมิห้อง (ประมาณ 30° C)
2. ปรับสัดส่วนก๊าซด้วยมาโนมิเตอร์ตามสัดส่วนที่ต้องการในการทดลอง
3. นำสัดส่วนก๊าซที่ผสมตามข้อ 2 มาทดสอบสัดส่วนก๊าซด้วยเทคนิคก๊าซโครมาโตกราฟี (Gas Chromatography; GC) ซึ่งมีกราฟมาตรฐาน ดังรูปที่ ข.1
4. นำสัดส่วนก๊าซที่ได้จากเทคนิคก๊าซโครมาโตกราฟีมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณก๊าซไฮโดรเจนที่ผสมก๊าซปกคลุมอาร์กอนกับสเกลมาโนมิเตอร์ ตามรูปที่ ข.2

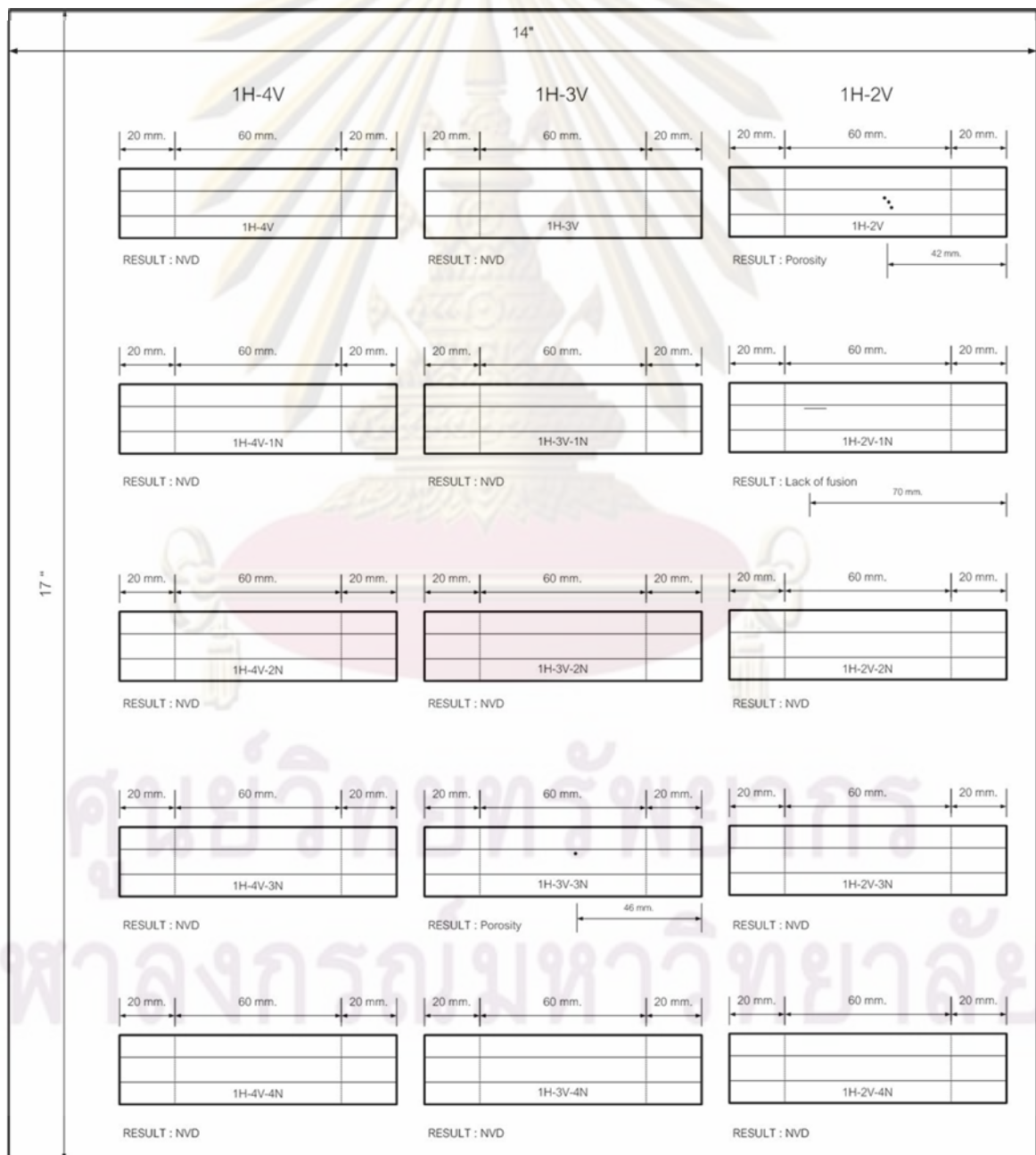
ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ค

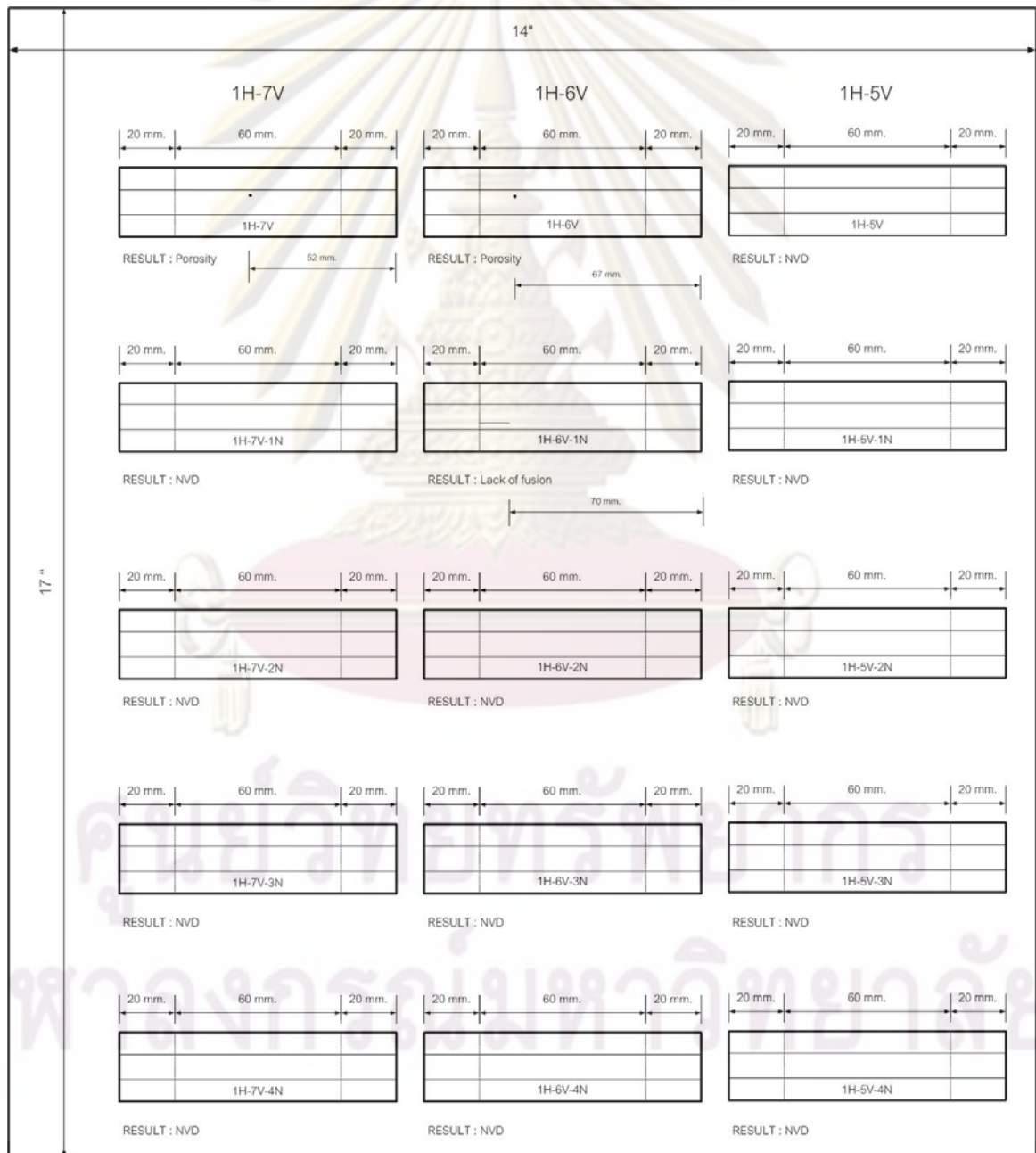
ผลการตรวจสอบรอยเชื่อมด้วยการฉายรังสีเอ็กซ์

Report No : 1/6	Place : Siwa Testing Inspection & Consulting Co., LTD
Date : March 11, 2009	Standard : DIN 8563 BS
Source of Radiation : X-Ray 110 kV	Material : AISI 316L
Film : Kodak-AA 14"X17"	Thickness : 6 mm.



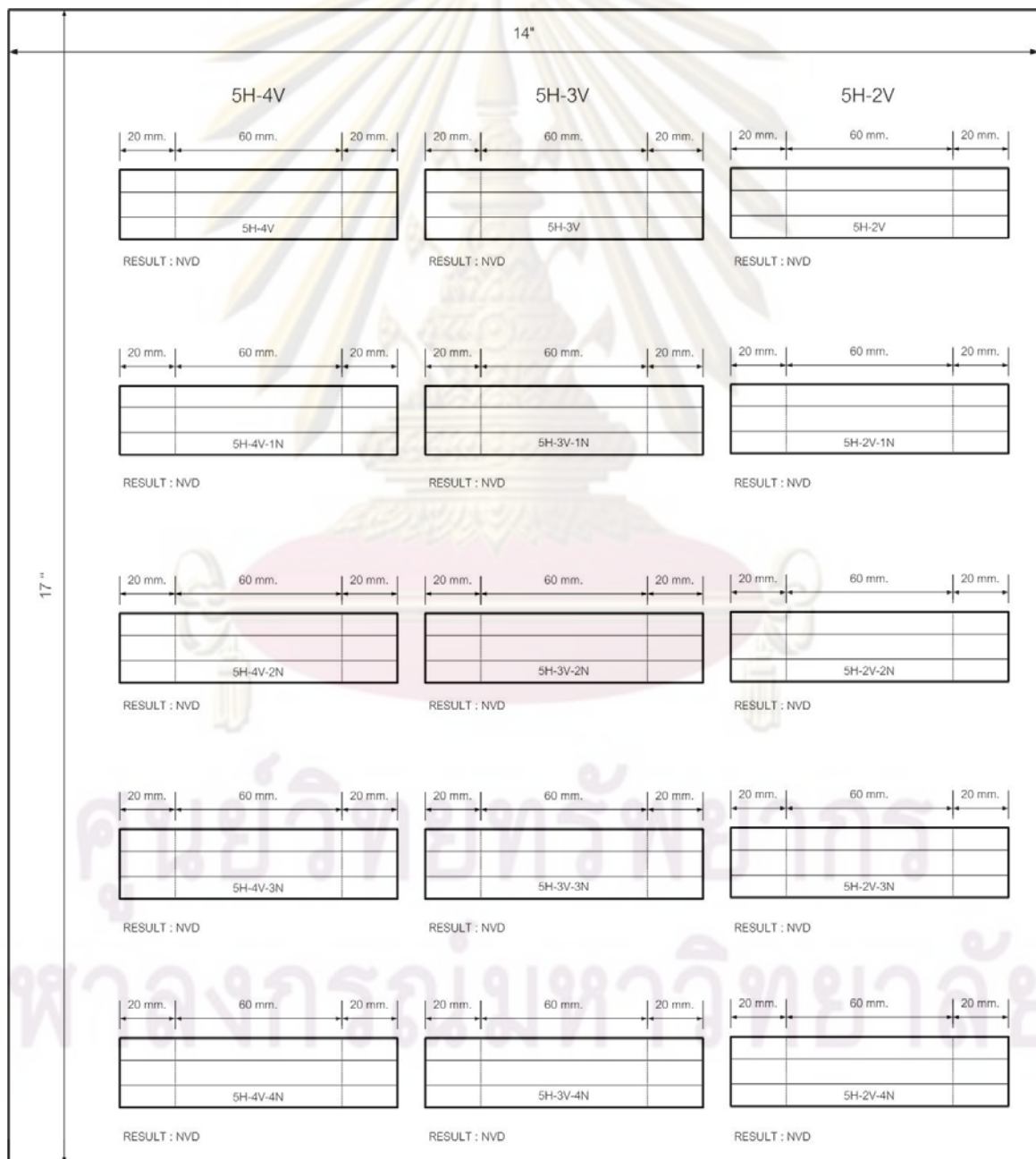
ภาคผนวก ค (ต่อ)

Report No : 2/6	Place : Siwa Testing Inspection & Consulting Co., LTD
Date : March 11, 2009	Standard : DIN 8563 BS
Source of Radiation : X-Ray 110 kV	Material : AISI 316L
Film : Kodak-AA 14"X17"	Thickness : 6 mm.



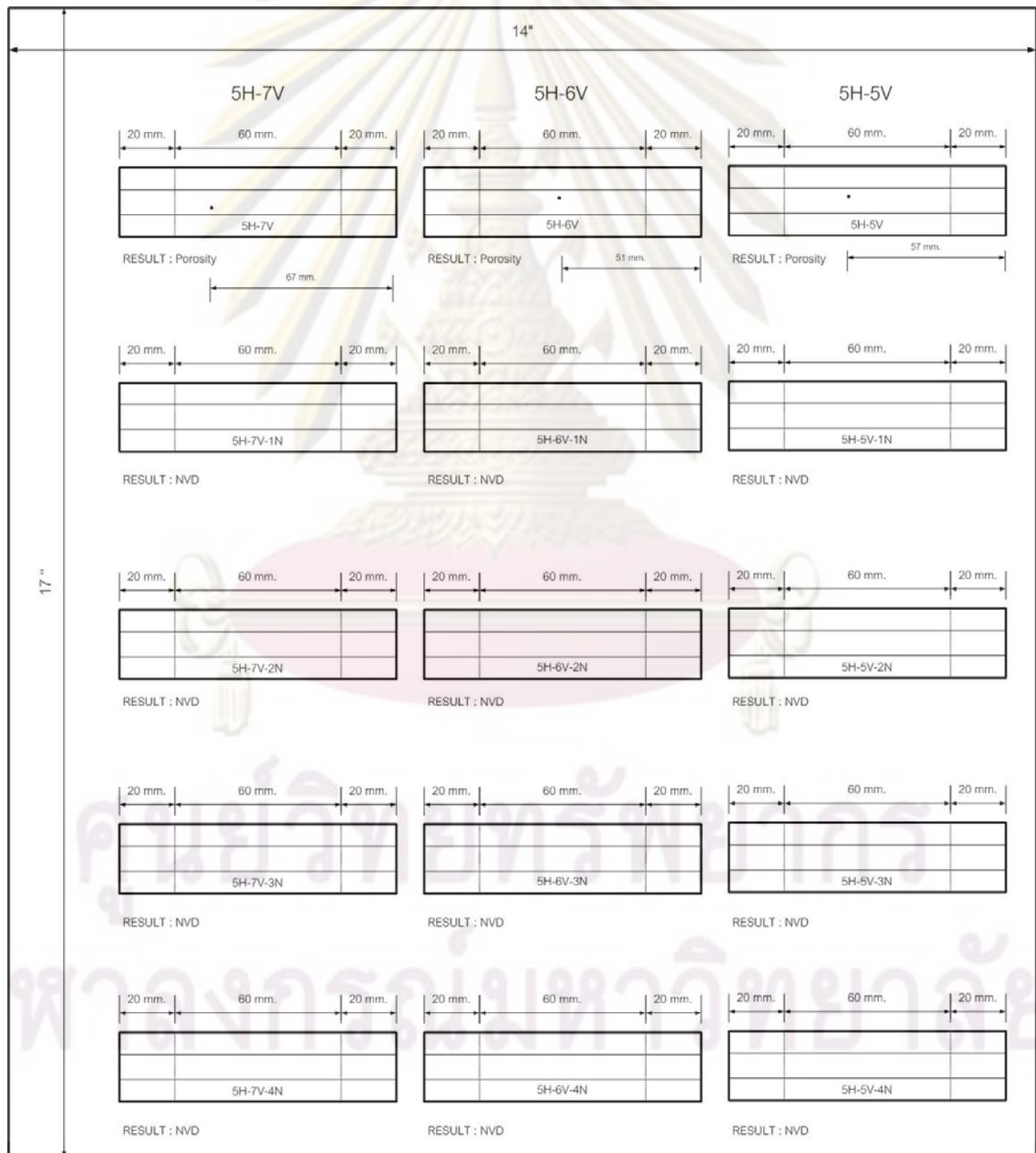
ภาคผนวก ค (ต่อ)

Report No : 3/6	Place : Siwa Testing Inspection & Consulting Co., LTD
Date : March 11, 2009	Standard : DIN 8563 BS
Source of Radiation : X-Ray 110 kV	Material : AISI 316L
Film : Kodak-AA 14"X17"	Thickness : 6 mm.



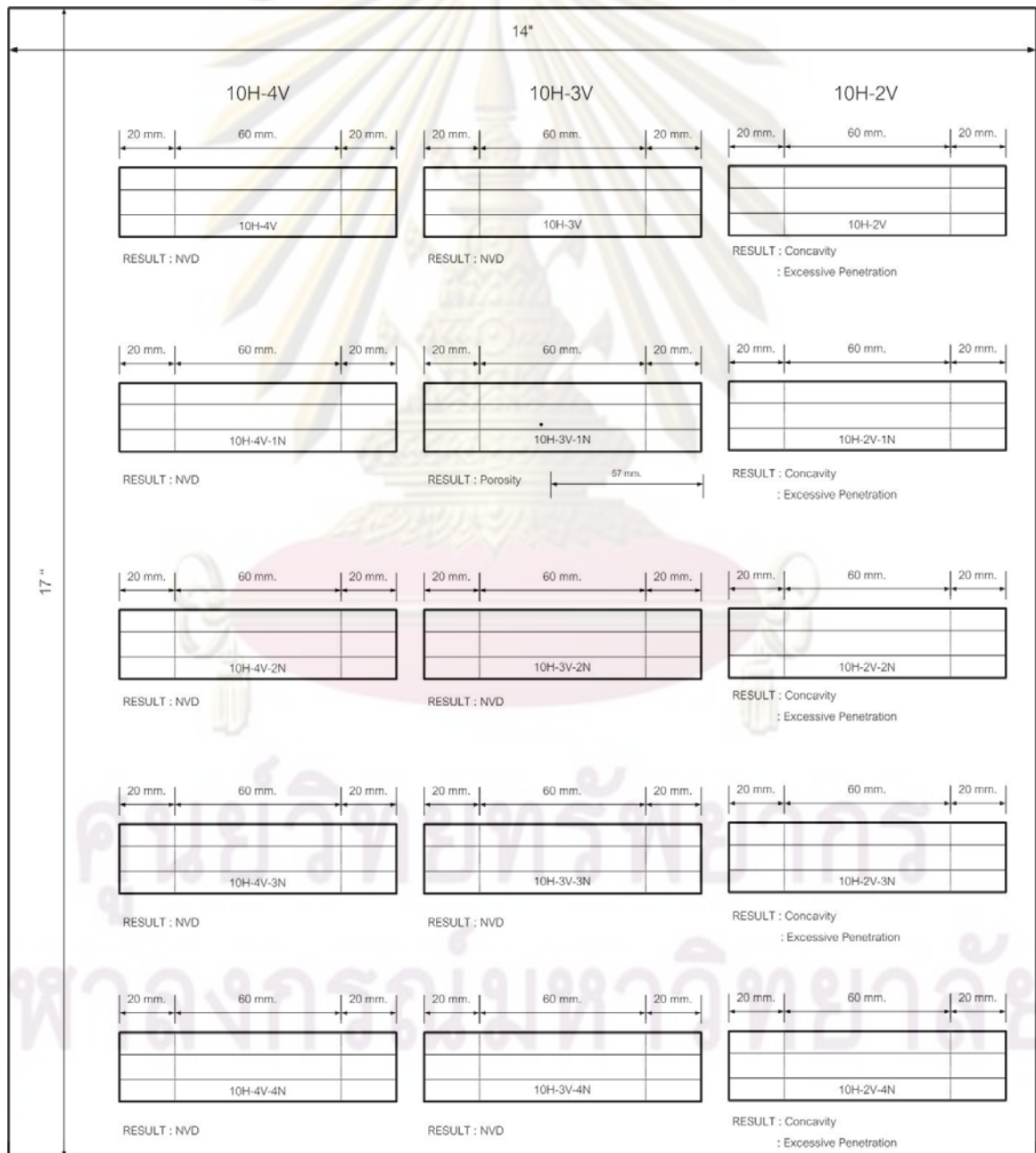
ภาคผนวก ค (ต่อ)

Report No : 4/6	Place : Siwa Testing Inspection & Consulting Co., LTD
Date : March 11, 2009	Standard : DIN 8563 BS
Source of Radiation : X-Ray 110 kV	Material : AISI 316L
Film : Kodak-AA 14"X17"	Thickness : 6 mm.



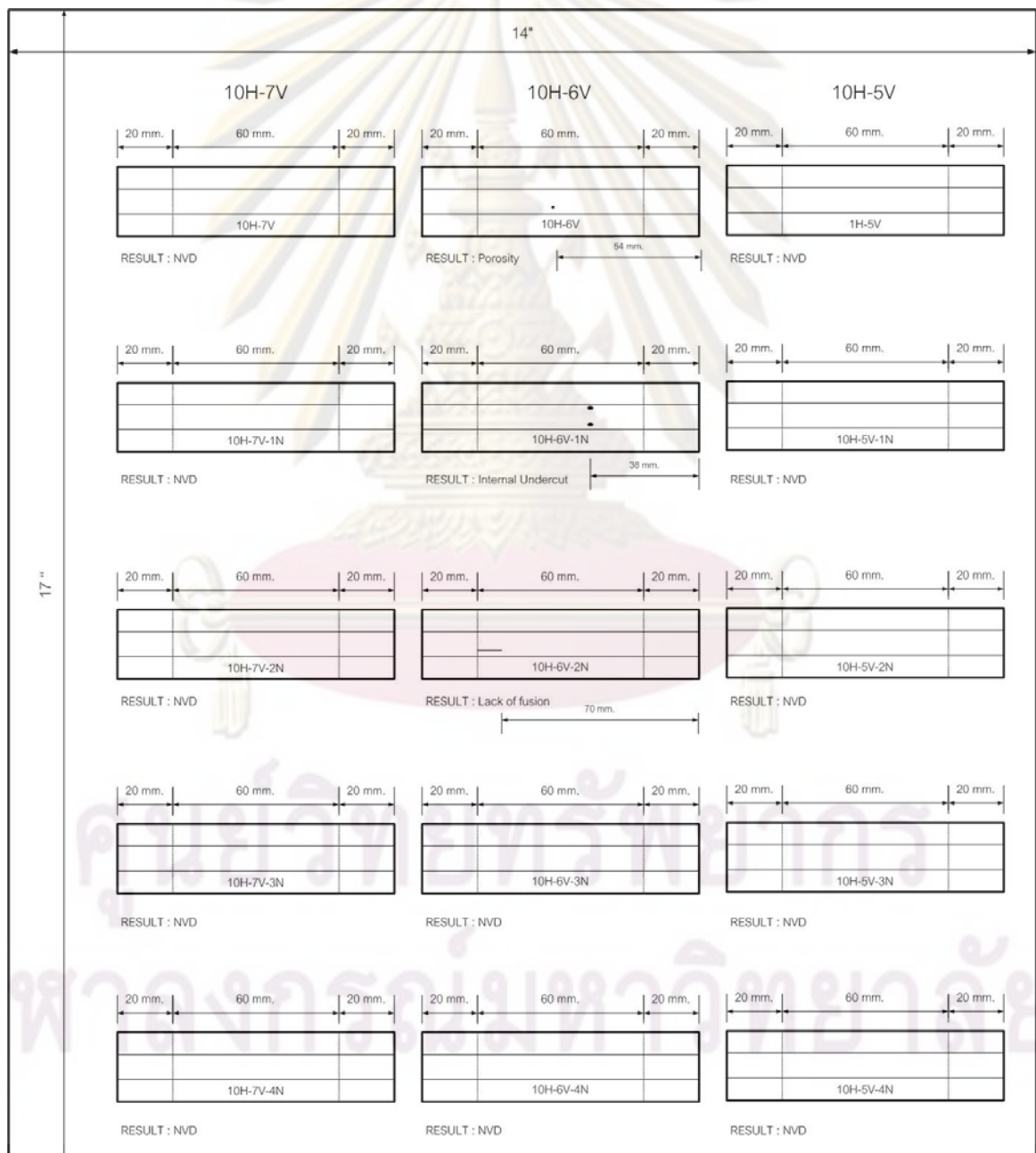
ภาคผนวก ค (ต่อ)

Report No : 5/6	Place : Siwa Testing Inspection & Consulting Co., LTD
Date : March 11, 2009	Standard : DIN 8563 BS
Source of Radiation : X-Ray 110 kV	Material : AISI 316L
Film : Kodak-AA 14"X17"	Thickness : 6 mm.



ภาคผนวก ค (ต่อ)

Report No : 6/6	Place : Siwa Testing Inspection & Consulting Co., LTD
Date : March 11, 2009	Standard : DIN 8563 BS
Source of Radiation : X-Ray 110 kV	Material : AISI 316L
Film : Kodak-AA 14"X17"	Thickness : 6 mm.



ภาคผนวก ง

รอยซึมลึก ความกว้าง และ อัตราส่วนรอยซึมลึกต่อความกว้างของ รอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนต์ เกรด 316L

ตารางที่ ง.1 ผลของความเร็วเชื่อมและปริมาณก๊าซไฮโดรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอนต่อรอยซึมลึกของเนื้อโลหะเชื่อม

ความเร็วเชื่อม (มม./วินาที)	รอยซึมลึก (มม.)		
	1%H ₂ -Ar	5%H ₂ -Ar	10%H ₂ -Ar
2	2.94	4.81	8.54
3	1.86	2.61	3.22
4	1.52	2.30	2.71
5	1.28	1.79	2.27
6	1.25	1.72	2.00
7	1.05	1.52	1.86

ตารางที่ ง.2 ผลของความเร็วเชื่อมและปริมาณก๊าซไฮโดรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอนต่อความกว้างของเนื้อโลหะเชื่อม

ความเร็วเชื่อม (มม./วินาที)	ความกว้าง (มม.)		
	1%H ₂ -Ar	5%H ₂ -Ar	10%H ₂ -Ar
2	8.40	9.25	10.00
3	7.69	8.50	8.74
4	7.22	7.86	8.40
5	6.84	7.38	7.79
6	6.47	6.71	7.45
7	6.20	6.88	7.28

ภาคผนวก ง (ต่อ)

ตารางที่ ง.3 ผลของความเร็วเชื่อมและปริมาณก๊าซไฮโดรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอนต่ออัตราส่วนรอยซึมลึกต่อความกว้างของเนื้อโลหะเชื่อม

ความเร็วเชื่อม (มม./วินาที)	อัตราส่วนรอยซึมลึกต่อความกว้าง		
	1%H ₂ -Ar	5%H ₂ -Ar	10%H ₂ -Ar
2	0.35	0.52	0.85
3	0.24	0.31	0.37
4	0.21	0.29	0.32
5	0.19	0.24	0.29
6	0.19	0.26	0.27
7	0.17	0.22	0.26

ตารางที่ ง.4 ผลของปริมาณก๊าซไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอน ที่ผสมก๊าซไฮโดรเจน 1 เปอร์เซ็นต์ ต่อรอยซึมลึกของเนื้อโลหะเชื่อม

ความเร็วเชื่อม (มม./วินาที)	รอยซึมลึก (มม.)				
	0 %N ₂	1 %N ₂	2 %N ₂	3 %N ₂	4 %N ₂
2	2.94	2.88	2.90	3.12	2.91
3	1.86	1.89	1.83	1.93	1.96
4	1.52	1.93	1.59	1.52	1.52
5	1.28	1.32	1.32	1.35	1.38
6	1.25	1.18	1.18	1.18	1.11
7	1.05	0.94	1.01	0.91	1.05

ภาคผนวก ง (ต่อ)

ตารางที่ ง.5 ผลของปริมาณก๊าซไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอน ที่ผสมก๊าซไฮโดรเจน 1 เปอร์เซ็นต์ ต่อความกว้างของเนื้อโลหะเชื่อม

ความเร็วเชื่อม (มม./วินาที)	ความกว้าง (มม.)				
	0 %N ₂	1 %N ₂	2 %N ₂	3 %N ₂	4 %N ₂
2	8.40	8.98	9.01	9.25	9.89
3	7.69	7.96	8.37	8.20	8.57
4	7.22	7.89	7.96	7.55	7.96
5	6.84	6.88	7.42	7.18	7.35
6	6.47	6.67	7.08	6.84	7.15
7	6.20	6.40	6.54	6.54	6.71

ตารางที่ ง.6 ผลของปริมาณก๊าซไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอน ที่ผสมก๊าซไฮโดรเจน 1 เปอร์เซ็นต์ ต่ออัตราส่วนรอยซึมลึกต่อความกว้างของเนื้อโลหะเชื่อม

ความเร็วเชื่อม (มม./วินาที)	อัตราส่วนรอยซึมลึกต่อความกว้าง				
	0 %N ₂	1 %N ₂	2 %N ₂	3 %N ₂	4 %N ₂
2	0.32	0.32	0.34	0.29	0.32
3	0.24	0.22	0.24	0.23	0.24
4	0.24	0.20	0.20	0.19	0.24
5	0.19	0.18	0.19	0.19	0.19
6	0.18	0.17	0.17	0.16	0.18
7	0.15	0.15	0.14	0.16	0.15

ภาคผนวก ง (ต่อ)

ตารางที่ ง.7 ผลของปริมาณก๊าซไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอน ที่ผสมก๊าซไฮโดรเจน 5 เปอร์เซ็นต์ ต่อรอยซึมลึกของเนื้อโลหะเชื่อม

ความเร็วเชื่อม (มม./วินาที)	รอยซึมลึก (มม.)				
	0 %N ₂	1 %N ₂	2 %N ₂	3 %N ₂	4 %N ₂
2	4.81	4.91	4.64	5.15	4.98
3	2.61	2.84	2.91	3.01	3.11
4	2.30	2.20	2.20	2.23	2.20
5	1.79	1.76	1.72	1.83	1.89
6	1.72	1.52	1.52	1.69	1.42
7	1.52	1.42	1.25	1.42	1.42

ตารางที่ ง.8 ผลของปริมาณก๊าซไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอน ที่ผสมก๊าซไฮโดรเจน 5 เปอร์เซ็นต์ ต่อความกว้างของเนื้อโลหะเชื่อม

ความเร็วเชื่อม (มม./วินาที)	ความกว้าง (มม.)				
	0 %N ₂	1 %N ₂	2 %N ₂	3 %N ₂	4 %N ₂
2	9.25	10.33	10.16	10.23	10.61
3	8.50	8.91	9.08	9.15	9.05
4	7.86	8.06	8.27	8.40	8.23
5	7.38	7.62	7.89	7.89	7.96
6	6.71	7.18	7.28	7.22	7.45
7	6.88	6.94	7.05	6.94	7.18

ภาคผนวก ง (ต่อ)

ตารางที่ ง.9 ผลของปริมาณก๊าซไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอน ที่ผสมก๊าซไฮโดรเจน 5 เปอร์เซ็นต์ ต่ออัตราส่วนรอยขีดต่อความกว้างของเนื้อโลหะเชื่อม

ความเร็วเชื่อม (มม./วินาที)	อัตราส่วนรอยขีดต่อความกว้าง				
	0 %N ₂	1 %N ₂	2 %N ₂	3 %N ₂	4 %N ₂
2	0.52	0.48	0.46	0.50	0.47
3	0.31	0.32	0.32	0.33	0.34
4	0.29	0.27	0.27	0.27	0.27
5	0.24	0.23	0.22	0.23	0.24
6	0.26	0.21	0.21	0.23	0.19
7	0.22	0.20	0.18	0.20	0.20

ตารางที่ ง.10 ผลของปริมาณก๊าซไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอน ที่ผสมก๊าซไฮโดรเจน 10 เปอร์เซ็นต์ ต่อรอยขีดของเนื้อโลหะเชื่อม

ความเร็วเชื่อม (มม./วินาที)	รอยขีด (มม.)				
	0 %N ₂	1 %N ₂	2 %N ₂	3 %N ₂	4 %N ₂
2	8.54	7.35	7.28	6.54	6.94
3	3.22	3.28	3.25	3.05	3.38
4	2.71	2.40	2.50	2.57	2.33
5	2.27	2.03	1.93	2.06	2.20
6	2.00	1.86	1.79	1.37	1.86
7	1.86	1.59	1.62	1.52	1.69

ภาคผนวก ง (ต่อ)

ตารางที่ ง.11 ผลของปริมาณก๊าซไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอน ที่ผสมก๊าซไฮโดรเจน 10 เปอร์เซ็นต์ ต่อความกว้างของเนื้อโลหะเชื่อม

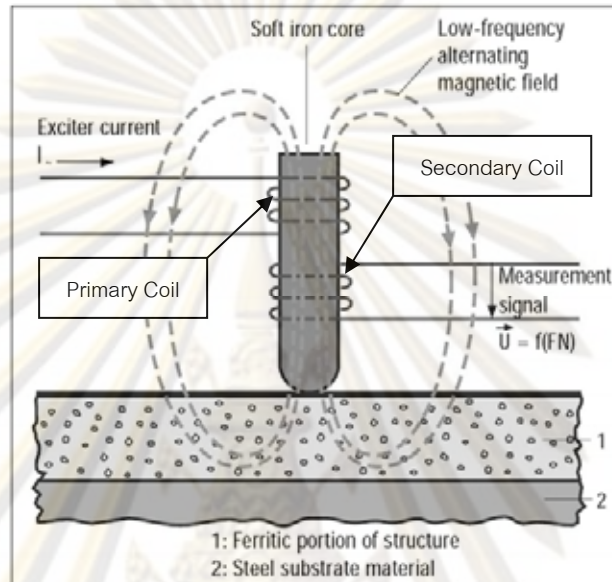
ความเร็วเชื่อม (มม./วินาที)	ความกว้าง (มม.)				
	0 %N ₂	1 %N ₂	2 %N ₂	3 %N ₂	4 %N ₂
2	10.00	11.01	11.15	11.11	12.06
3	8.74	9.32	9.59	9.49	9.89
4	8.40	8.57	9.01	8.54	8.64
5	7.79	8.30	8.30	8.47	8.44
6	7.45	7.86	7.89	8.13	7.79
7	7.28	7.38	7.62	7.62	7.45

ตารางที่ ง.12 ผลของปริมาณก๊าซไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอน ที่ผสมก๊าซไฮโดรเจน 10 เปอร์เซ็นต์ ต่ออัตราส่วนรอยซึมลึกต่อความกว้างของเนื้อโลหะเชื่อม

ความเร็วเชื่อม (มม./วินาที)	อัตราส่วนรอยซึมลึกต่อความกว้าง				
	0 %N ₂	1 %N ₂	2 %N ₂	3 %N ₂	4 %N ₂
2	0.67	0.65	0.59	0.58	0.67
3	0.35	0.34	0.32	0.34	0.35
4	0.28	0.28	0.30	0.27	0.28
5	0.24	0.23	0.24	0.26	0.24
6	0.24	0.23	0.17	0.24	0.24
7	0.22	0.21	0.20	0.23	0.22

ภาคผนวก จ

หลักการและวิธีการวัดปริมาณเดลตา-เฟร์ไรต์ด้วยเครื่อง Feritscope MP3C ของ Fischer



รูปที่ จ.1 หลักการพื้นฐานการวัดปริมาณเดลตา-เฟร์ไรต์ในเนื้อโลหะเชื่อมด้วยเครื่อง Feritscope MP3C

หลักการวัดเดลตา-เฟร์ไรต์ในเนื้อโลหะเชื่อมของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิตและดูเพล็กซ์อาศัยแรงเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กระหว่างโครงสร้าง 2 เฟส คือ ferromagnetic phase และ non-ferromagnetic phase โครงสร้างเดลตา-เฟร์ไรต์ในเนื้อโลหะเชื่อม และ sigma phase เป็น ferromagnetic phase แต่โครงสร้างออสเทนิต คาร์ไบด์ และ inclusion เป็น non-ferromagnetic phase

เครื่อง Feritscope MP3C วัดเดลตา-เฟร์ไรต์ด้วยวิธีเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กตามรูปที่ จ.1 สนามแม่เหล็กถูกสร้างขึ้นจากขดลวดปฐมภูมิ (Primary Coil) เพื่อไปเหนี่ยวนำเดลตา-เฟร์ไรต์ในเนื้อโลหะเชื่อมให้เกิดสนามแม่เหล็ก สนามแม่เหล็กที่ถูกเหนี่ยวนำจะแปรผันตามสัดส่วนของเดลตา-เฟร์ไรต์ ขดลวดทุติยภูมิ (Secondary Coil) จะวัดปริมาณความเข้มข้นสนามแม่เหล็กที่ถูกเหนี่ยวนำ

ภาคผนวก จ (ต่อ)

ขั้นตอนการวัดเดลตา-เฟอร์ไรต์ด้วยเครื่อง Feritscope MP3C เป็นดังนี้

1. ทำความสะอาดชิ้นงานทดสอบด้วยอะซิโตน
2. เปิดเครื่องตามคู่มือ
3. เลือก mode การวัดแบบ percent ferrite หรือ ferrite number ในที่นี้เลือก mode การวัดแบบ percent ferrite
4. ทำการ calibrate เครื่อง โดยนำ probe ไปวัดค่า percent ferrite ที่แท่งมาตรฐาน (calibration sample)
5. ให้ probe วัดตั้งฉากกับแท่งมาตรฐานทุกครั้งที่ทำกรวัด
6. ใช้ probe และที่แท่งมาตรฐานปรับค่า percent ferrite ที่อ่านจากเครื่อง ให้ตรงกับค่าของแท่งมาตรฐาน ทำจนครบทุกแท่ง
7. ทำการวัดเดลตา-เฟอร์ไรต์ในเนื้อโลหะเชื่อม โดยให้ probe ตั้งฉากกับรอยเชื่อมทุกครั้ง
8. บันทึกค่าการวัดและคำนวณค่าเฉลี่ยที่ความเชื่อมั่น 95 % ตามสมการด้านล่าง

สมการด้านล่างเป็นการประมาณค่าปริมาตรของเดลตา-เฟอร์ไรต์ในเนื้อโลหะเชื่อม ของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิต AISI 316L จากเครื่อง Feritscope MP3C ที่กำหนดค่าความเชื่อมั่นที่ 95 %

ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) เพื่อหาขอบเขตความเชื่อมั่นของค่าเดลตา-เฟอร์ไรต์เฉลี่ยในเนื้อโลหะเชื่อม

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad \text{จ.1}$$

กำหนดค่าความเชื่อมั่นที่ 95 % แล้วจะได้ขอบเขตความเชื่อมั่น (CL)

$$CL = \pm 1.96 \frac{S}{\sqrt{n}} \quad \text{จ.2}$$

ภาคผนวก จ (ต่อ)

$$\% \text{ vol} = \bar{x} \pm CL \quad \text{จ.3}$$

$$\text{Error \%} = \frac{CL}{\bar{x}} \times 100 \quad \text{จ.4}$$



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก จ

ผลการวัดปริมาณเดลตา-เฟอร์ไรต์ด้วยเครื่อง Feritscope MP3C ของ Fischer

ตารางที่ จ.1 ผลของปริมาณก๊าซไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอนต่อเดลตา-เฟอร์ไรต์ของเนื้อโลหะเชื่อมเมื่อผสมกับก๊าซไฮโดรเจน 1 เปอร์เซ็นต์

ความเร็วเชื่อม (มม./วินาที)	เดลตา-เฟอร์ไรต์ (% โดยปริมาตร)				
	0 %N ₂	1 %N ₂	2 %N ₂	3 %N ₂	4 %N ₂
2	5.52	4.14	3.45	3.56	2.84
3	5.39	3.9	3.04	3.23	2.65
4	4.71	3.76	2.9	2.83	2.19
5	4.77	3.37	2.6	2.54	1.63
6	4.38	3.16	2.52	2.51	1.91
7	3.98	2.71	2.33	1.89	1.76

ตารางที่ จ.2 ผลของปริมาณก๊าซไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอนต่อเดลตา-เฟอร์ไรต์ของเนื้อโลหะเชื่อมเมื่อผสมกับก๊าซไฮโดรเจน 5 เปอร์เซ็นต์

ความเร็วเชื่อม (มม./วินาที)	เดลตา-เฟอร์ไรต์ (% โดยปริมาตร)				
	0 %N ₂	1 %N ₂	2 %N ₂	3 %N ₂	4 %N ₂
2	6.59	6.00	5.49	5.63	4.71
3	6.43	5.51	5.29	4.92	4.85
4	6.07	5.33	5.10	4.92	4.62
5	6.12	5.10	4.93	4.71	4.65
6	5.51	4.87	4.68	4.46	4.20
7	5.21	4.52	4.24	4.26	4.07

ภาคผนวก จ (ต่อ)

ตารางที่ จ.3 ผลของปริมาณก๊าซไนโตรเจนในก๊าซปกคลุมอาร์กอนต่อเดลตา-เฟร์ไรต์ของเนื้อโลหะเชื่อมเมื่อผสมกับก๊าซไฮโดรเจน 10 เปอร์เซ็นต์

ความเร็วเชื่อม (มม./วินาที)	เดลตา-เฟร์ไรต์ (% โดยปริมาตร)				
	0 %N ₂	1 %N ₂	2 %N ₂	3 %N ₂	4 %N ₂
2	6.59	6.61	5.66	6.08	6.41
3	6.50	6.18	5.72	5.93	5.57
4	6.19	5.98	5.55	5.64	5.52
5	5.95	5.47	5.51	5.41	5.08
6	5.72	5.15	5.25	5.24	4.79
7	5.59	4.97	4.84	4.75	4.65

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข

การวิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจนในเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนต์ เกรด 316L

การวิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจนในเนื้อโลหะเชื่อม ทำโดยใช้เครื่อง Oxygen-Nitrogen Analyzer ของ HORIBA รุ่น EMGA 620W

ตารางที่ ข.1 ปริมาณไนโตรเจนและออกซิเจนในเนื้อโลหะพื้น

น้ำหนักทดสอบ (กรัม)	ปริมาณไนโตรเจน (wt.%)	ปริมาณออกซิเจน (wt.%)
0.5239	0.060	0.030

ตารางที่ ข.2 ปริมาณไนโตรเจนและออกซิเจนในเนื้อโลหะเชื่อม เมื่อใช้ก๊าซไฮโดรเจนผสมในก๊าซปกคลุมอาร์กอนที่มีก๊าซไนโตรเจน 2 เปอร์เซ็นต์ และความเร็ว 3 มิลลิเมตรต่อวินาที

ปริมาณก๊าซไฮโดรเจน (vol.%)	น้ำหนักทดสอบ (กรัม)	ปริมาณไนโตรเจนในเนื้อโลหะเชื่อม (wt.%)	ปริมาณออกซิเจนในเนื้อโลหะเชื่อม (wt.%)
1	0.5132	0.105	0.051
5	0.3874	0.070	0.065
10	0.5077	0.061	0.036

ตารางที่ ข.3 ปริมาณไนโตรเจนและออกซิเจนในเนื้อโลหะเชื่อม เมื่อใช้ก๊าซไนโตรเจนผสมในก๊าซปกคลุมอาร์กอนที่มีก๊าซไฮโดรเจน 5 เปอร์เซ็นต์ และความเร็ว 3 มิลลิเมตรต่อวินาที

ปริมาณก๊าซไนโตรเจน (vol.%)	น้ำหนักทดสอบ (กรัม)	ปริมาณไนโตรเจนในเนื้อโลหะเชื่อม (wt.%)	ปริมาณออกซิเจนในเนื้อโลหะเชื่อม (wt.%)
0	0.4954	0.057	0.043
1	0.0655	0.069	0.026
2	0.3874	0.070	0.064
3	0.5549	0.071	0.046
4	0.4015	0.074	0.044

ภาคผนวก ข (ต่อ)

ตารางที่ ข.4 ผลของความเร็วเชื่อมต่อปริมาณไนโตรเจนและออกซิเจนในเนื้อโลหะเชื่อม เมื่อใช้
ก๊าซไฮโดรเจน 5 เปอร์เซ็นต์ และก๊าซไนโตรเจน 2 เปอร์เซ็นต์ ผสมในก๊าซปกคลุม
อาร์กอน

ความเร็วเชื่อม (มม./วินาที)	น้ำหนักทดสอบ (กรัม)	ปริมาณไนโตรเจนใน เนื้อโลหะเชื่อม (wt.%)	ปริมาณออกซิเจนใน เนื้อโลหะเชื่อม (wt.%)
2	0.5197	0.069	0.050
3	0.3874	0.070	0.065
4	0.5821	0.071	0.046
5	0.4426	0.070	0.052
6	0.5468	0.070	0.024
7	0.5129	0.073	0.018

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

- Name** Mr. Panyasak Phakpeetinan
- Address** 59/8 Village No.7, Rawai Sub-District, Maung District, Phuket Province,
83130 Thailand
Tel +66-76-388-415
e-mail: pop_keepwalk@hotmail.com
- Education**
- Certificate of Vocational Education in Trade and Industry (Auto Mechanics Technology), Phuket Technical College, Phuket, Thailand
 - Diploma of Vocational Education in Trade and Industry (Auto Mechanics Technology), Phuket Technical College, Phuket, Thailand
 - Bachelor of Industrial Technology in Production Technology, King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok, Bangkok, Thailand
- Skill** Auto CAD 2D, Auto CAD 3D and Mechanical Desktop 6
- Experience** Siwa Testing Inspection & Consulting Co., Ltd., Bangkok, Thailand.
(NDE Engineer)
- Conference**
- *“Effects of TIG Pulse Welding Parameters and Nitrogen Gas Mixed in Argon Shielding Gas on Weld Bead Formation and Microstructure of Weld Metals of AISI 304L Stainless Steels at 10-h Welding Position”* presented to the 86th AWS Annual Convention at Dallas, Texas., USA, in 2005
 - *“Effects of nitrogen and hydrogen in argon shielding gas on weld bead profile and the delta-ferrite content of pulsed TIG welds of AISI 316L stainless steel”* presented to the 2nd South-east Asia International Welding Congress at Bangkok, Thailand on 25-26 February 2010.