

ผลของกระแสไฟฟ้าเชื่อมพัลส์สูงสุดและส่วนผสมของแก๊สปกคลุมต่อโครงสร้างจุลภาค
สมบัติทางกล และความเค้นตกค้างของเนื้อโลหะรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมอสเทนดิก



นายประกาศศักดิ์ เพ็ชรอาภรณ์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2556

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR) are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

EFFECTS OF PEAK PULSED CURRENT AND SHIELDING GAS COMPOSITION ON
MICROSTRUCTURE, MECHANICAL PROPERTIES AND RESIDUAL STRESS OF WELDED
AUSTENITIC STAINLESS STEEL



Mr. Pragassak Petarporn

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

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 2013

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

ผลของกระแสไฟฟ้าเชื่อมพัลส์สูงสุดและส่วนผสมของแก๊สปกคลุมต่อโครงสร้างจุลภาค สมบัติทางกล และความเค้นตกค้างของเนื้อโลหะรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก

โดย

นายประกาศศักดิ์ เพ็ชรอาภรณ์

สาขาวิชา

วิศวกรรมโลหการ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ ดร.กอบบุญ หล่อทองคำ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

ดร.เอกรัตน์ ไวยนิตย์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธัชชาย เหลืองวรรณนท์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์ ดร.กอบบุญ หล่อทองคำ)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ดร.เอกรัตน์ ไวยนิตย์)

.....กรรมการ

(อาจารย์ ดร.มาวิน สุประดิษฐ์ ณ อยุธา)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ดร.อำนวยการศักดิ์ เจียรไพโรจน์)

ประกาศศักดิ์ เพ็ชรอาภรณ์ : ผลของกระแสไฟฟ้าเชื่อมพัลส์สูงสุดและส่วนผสมของแก๊สปกคลุมต่อโครงสร้างจุลภาค สมบัติทางกล และความเค้นตกค้างของเนื้อโลหะรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก. (EFFECTS OF PEAK PULSED CURRENT AND SHIELDING GAS COMPOSITION ON MICROSTRUCTURE, MECHANICAL PROPERTIES AND RESIDUAL STRESS OF WELDED AUSTENITIC STAINLESS STEEL) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร.กอบบุญ หล่อทองคำ, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: ดร.เอกรัตน์ ไวยนิตย์, 81 หน้า.

งานวิจัยนี้ศึกษาอิทธิพลของกระแสไฟฟ้าเชื่อมพัลส์สูงสุดและส่วนผสมของแก๊สปกคลุมในการเชื่อมทิกพัลส์แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก เกรด 304, 202 และ D7 หนา 2 มิลลิเมตร ด้วยกระแสไฟฟ้าเชื่อมพัลส์สูงสุด 130 และ 160 แอมแปร์ กับแก๊สไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอน 0, 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ต่อโครงสร้างจุลภาค สมบัติความต้านทานแรงดึง และความเค้นตกค้างของเนื้อโลหะรอยเชื่อม ผลการทดลองพบว่าการเพิ่มกระแสไฟฟ้าเชื่อมพัลส์สูงสุด และปริมาณแก๊สไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอน ทำให้อุณหภูมิสูงสุดและปริมาณความร้อนการเชื่อมเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความเค้นตกค้างเพิ่มขึ้น ซึ่งจะมีค่าลดลงเมื่อระยะห่างจากกลางแนวเชื่อมเพิ่มขึ้น ปริมาณความร้อนจากการเพิ่มกระแสไฟฟ้าเชื่อมพัลส์สูงสุดส่งผลลดค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดและค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว โครงสร้างจุลภาคของเนื้อโลหะรอยเชื่อมประกอบด้วยออสเทนิต และเดลต้าเฟร์ไรต์ การเพิ่มกระแสไฟฟ้าเชื่อมพัลส์สูงสุดทำให้ระยะห่างระหว่างแกนเดลต้าเฟร์ไรต์มากขึ้น เดลต้าเฟร์ไรต์มีสัณฐานแบบแลทธิ เมื่อปริมาณแก๊สไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอน 0 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร และมีสัณฐานแบบเวอร์มิคูลาร์ เมื่อปริมาณแก๊สไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอน 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ปริมาณเดลต้าเฟร์ไรต์ลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณไนโตรเจนในเนื้อโลหะรอยเชื่อมที่เป็นผลจากการเพิ่มปริมาณแก๊สไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาควิชา วิศวกรรมโลหการ

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมโลหการ

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ปีการศึกษา 2556

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

5370278321 : MAJOR METALLURGICAL ENGINEERING

KEYWORDS: TIG PULSE / SHIELDING GAS / RESIDUAL STRESS / AUSTENITIC
STAINLESS STEEL

PRAGASSAK PETARPORN: EFFECTS OF PEAK PULSED CURRENT AND SHIELDING GAS COMPOSITION ON MICROSTRUCTURE, MECHANICAL PROPERTIES AND RESIDUAL STRESS OF WELDED AUSTENITIC STAINLESS STEEL. ADVISOR: ASSOC. PROF. GOBBOON LOTHONGKUM, Ph.D., CO-ADVISOR: EKKARUT VIYANIT, Ph.D., 81 pp.

This research examines the effects of peak pulse current and shielding gas composition on the microstructure, the tensile properties and residual stress of the two mm. thick, TIG-pulsed-welded 304, 202 and D7 austenitic stainless steel plates. The stainless steel specimens were prepared by peak pulse currents of 130 and 160 A under the argon shielding gas containing nitrogen 0, 5 and 10 percent by volume. The results showed that the increase in the peak pulse current and the nitrogen content in argon shielding gas raised the peak temperature and the heat input during welding process, resulting in the increasing residual stress, which decreased with increasing distance from the weld center. The amount of additional heat input due to the increase in peak pulse current caused significant reduction in the tensile strength and the percent elongation. The microstructure of weld metal consists of austenite and deltaferrite. By increasing the peak pulse current, the arm spacing of deltaferrite was enlarged. The deltaferrite morphology consists of both lathy and vermicular morphologies when welding in pure argon shielding gas. However, as the nitrogen content in argon shielding gas increases to 5 and 10 percent by volume, the deltaferrite morphology becomes singly vermicular. The amount of deltaferrite decreased with increasing nitrogen content in the weld metal, which increase with higher nitrogen addition in argon shielding gas.

Department: Metallurgical Engineering Student's Signature

Field of Study: Metallurgical Engineering Advisor's Signature

Academic Year: 2013 Co-Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีจากความอนุเคราะห์ของที่อาจารย์ปรึกษา วิทยานิพนธ์ทั้งสองท่าน คือ รองศาสตราจารย์ ดร. กอบบุญ หล่อทองคำ และดร. เอกรัตน์ ไวยนิตย์ ที่กรุณาอบรมให้ความรู้ คำแนะนำข้อคิดเห็นแก่ข้าพเจ้า ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธาชาย เหลืองวรรณัท อาจารย์ ดร. มาวิน สุประดิษฐ์ ณ อยุธยา และดร.อำนวยการศักดิ์ เจียรไพโรจน์ คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาช่วยให้คำแนะนำข้อคิดเห็นในการทำวิจัย ตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ของเนื้อหาการทำวิจัยจนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณพี่ๆทุกท่าน ที่ห้องปฏิบัติการวิเคราะห์ความเสียหายและการกัดกร่อนของวัสดุ และศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) อย่างยิ่ง ที่ให้ความอนุเคราะห์เก็บข้อมูลให้คำแนะนำ และอื่นๆ อีกมากอย่างดีมากมาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัว สำหรับพระคุณอันล้นพ้นสำหรับโอกาสในการศึกษา กำลังใจและกำลังสนับสนุนที่ดีตลอดมา

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 วรรณกรรมปริทัศน์.....	3
2.1 ผลของส่วนผสมทางเคมีต่อโครงสร้างจุลภาคของเนื้อโลหะรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม ออสเทนิติก	3
2.2 การแข็งตัวของน้ำโลหะเชื่อม ต่อโครงสร้างจุลภาคในเนื้อโลหะรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม ออสเทนิติก	7
2.3 ผลของตัวแปรเชื่อมทิกพัลส์ต่อการเกิดเนื้อโลหะรอยเชื่อม.....	10
2.4 ผลของการผสมแก๊สไนโตรเจนในแก๊สปกคลุมอาร์กอน	15
2.5 ผลของการเชื่อมต่อความเค้นตกค้าง.....	19
บทที่ 3 ระเบียบวิธีการวิจัย	21
3.1 อุปกรณ์และสารเคมี	21
3.2 การเตรียมชิ้นงาน	21
3.3 การเชื่อมทิกพัลส์.....	22
3.4 การทดสอบความเค้นตกค้าง.....	24
3.5 การทดสอบแรงดึง	24
3.6 การตรวจสอบรอยเชื่อม.....	25
บทที่ 4 ผลการทดลองและการอภิปราย	27
4.1 ผลของกระแสไฟฟ้าเชื่อมพัลส์สูงสุด และส่วนผสมของแก๊สไนโตรเจนในแก๊สปกคลุม อาร์กอน ต่อวัฏจักรความร้อน	27

4.2 ผลของกระแสไฟฟ้าเชื่อมพัลส์สูงสุด และส่วนผสมของแก๊สไนโตรเจนในแก๊สปกคลุมอาร์กอน ต่อรูปร่างของรอยเชื่อม	34
4.3 ผลของกระแสไฟฟ้าเชื่อมพัลส์สูงสุด และส่วนผสมของแก๊สไนโตรเจนในแก๊สปกคลุมอาร์กอน ต่อปริมาณไนโตรเจนในเนื้อโลหะรอยเชื่อม.....	36
4.4 ผลของกระแสไฟฟ้าเชื่อมพัลส์สูงสุด และส่วนผสมของแก๊สไนโตรเจนในแก๊สปกคลุมอาร์กอนต่อโครงสร้างจุลภาค	39
4.5 ผลของกระแสไฟฟ้าเชื่อมพัลส์สูงสุด และส่วนผสมของแก๊สไนโตรเจนในแก๊สปกคลุมอาร์กอน ต่อความเค้นตกค้าง	47
4.6 ผลของกระแสไฟฟ้าเชื่อมพัลส์สูงสุด และส่วนผสมของแก๊สไนโตรเจนในแก๊สปกคลุมอาร์กอน ต่อสมบัติความต้านทานแรงดึง	52
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	62
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	62
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	62
รายการอ้างอิง	64
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	81

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 สมบัติแรงดึง และสมบัติความทนต่อการกระแทก เปรียบเทียบระหว่าง วิธีการเชื่อมทิกพัลส์ (PCGTAW) กับวิธีการเชื่อมทิก (CCGTAW).....	11
ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมทางเคมีของชิ้นงานทดลอง.....	22
ตารางที่ 3.2 ตัวแปรคงที่สำหรับการเชื่อมทิกพัลส์.....	23
ตารางที่ 3.3 ตัวแปรทดลองสำหรับการเชื่อมทิกพัลส์.....	24
ตารางที่ 4.1 ความสามารถในการละลายของไนโตรเจนในน้ำโลหะผสมเหล็ก-โครเมียม-นิกเกิล ที่ผสมแมงกานีส และโมลิบดีนัม.....	39
ตารางที่ 4.2 ค่าอัตราส่วนของโครเมียมเทียบเท่าต่อนิกเกิลเทียบเท่า.....	46
ตารางที่ 4.3 ค่าความเค้นตกค้างก่อนการเชื่อม.....	48
ตารางที่ 4.4 ค่ามอดุลัสของยังของชิ้นงานทดลอง.....	52
ตารางที่ 4.5 ค่าพลังงานการจัดเรียงตัวผลึก.....	53
ตารางที่ ก.1 สมบัติของแก๊สปกคลุม.....	70
ตารางที่ ข.1 โครงสร้างจุลภาคเนื้อโลหะรอยเชื่อมที่กำลังขยาย 200 เท่า.....	67

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 แผนภูมิสมดุโครสร้างจุลภาคของเหล็กโครเมียมที่อุณหภูมิต่างๆ.....	3
รูปที่ 2.2 แผนภูมิซูทาล่าแสดงอิทธิพลของส่วนผสมทางเคมี ต่อโครสร้างจุลภาคของเนื้อโลหะรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม	4
รูปที่ 2.3 ผลของไนโตรเจนและคาร์บอนต่อสภาวะการเกิดโครสร้างจุลภาคอสเทนไนต์และเฟร์ไรต์	6
รูปที่ 2.4 แผนภูมิสมมุติสองมิติ (Pseudobinary) ของ เหล็ก-โครเมียม-นิกเกิล ที่ 70 เปอร์เซนต์ เหล็ก	9
รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ของตัวแปรเชื่อมทิกฟัสและจุดหลอมละลาย โดยที่ Z_1 เป็นระยะห่างระหว่างจุดหลอมละลาย และ N_0 เป็นความกว้างของรอยเชื่อม	10
รูปที่ 2.6 ผลของค่ากระแสไฟฟ้าเชื่อมต่อลักษณะรอยเชื่อม.....	13
รูปที่ 2.7 ผลของช่วงเวลาฟัสต่อลักษณะรอยเชื่อม	14
รูปที่ 2.8 ผลของความเร็วเชื่อมต่อลักษณะรอยเชื่อม.....	14
รูปที่ 2.9 ผลของแก๊สไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอนต่อ ก.ปริมาณความร้อนในระหว่างการเชื่อม ข.อุณหภูมิสูงสุดในขณะเชื่อม	17
รูปที่ 2.10 ผลของปริมาณไนโตรเจนในเนื้อโลหะรอยเชื่อมต่อปริมาณเฟร์ไรต์ตกค้างและการบิดเบี้ยวเชิงมุม	18
รูปที่ 2.11 ผลของความเค้นตกค้าง ก. เมื่อผสมแก๊สไนโตรเจนในแก๊สปกคลุมอาร์กอน ข. เมื่อระยะห่างจากศูนย์กลางแนวเชื่อมของเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316L เพิ่มขึ้น.....	19
รูปที่ 2.12 การกระจายตัวของความเค้นตกค้าง.....	20
รูปที่ 3.1 ตำแหน่งติดตั้งเทอร์โมคัปเปิล	22
รูปที่ 3.2 การติดตั้งชิ้นงานกับชุดจับยึด	23
รูปที่ 3.3 เครื่องวัดความเค้นตกค้างด้วยรังสีเอ็กซ์.....	24
รูปที่ 3.4 ชิ้นงานทดลองภายหลังการเชื่อม	25
รูปที่ 3.5 ชิ้นงานทดลองความต้านทานแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM E8	25
รูปที่ 4.1 ผลของปริมาณแก๊สไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอน ต่อวัฏจักรความร้อนในการเชื่อมแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมอสเทนติก เกรด 304 หนา 2 มิลลิเมตร ที่กระแสไฟฟ้าเชื่อมฟัสสูงสุด ก. 130 แอมแปร์ ข. 160 แอมแปร์.....	28

รูปที่ 4.2 ผลของปริมาณแก๊สไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอน และกระแสไฟฟ้าเชื่อมพัลส์สูงสุด ต่ออุณหภูมิสูงสุด	29
รูปที่ 4.3 ลักษณะอาร์กพลาสมาของเหล็กกล้าไร้สนิมอสเทนติก เกรด 304	30
รูปที่ 4.4 ผลของปริมาณแก๊สไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอน และกระแสไฟฟ้าเชื่อมพัลส์สูงสุด ต่อความกว้างของอาร์กพลาสมา.....	31
รูปที่ 4.5 ผลของปริมาณแก๊สไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอน และกระแสไฟฟ้าเชื่อมพัลส์สูงสุด ต่อความต่างศักย์การอาร์ก	31
รูปที่ 4.6 ผลของปริมาณแก๊สไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอน และกระแสไฟฟ้าเชื่อมพัลส์สูงสุด ต่อปริมาณความร้อนในระหว่างการเชื่อม	32
รูปที่ 4.7 ผลของปริมาณแก๊สไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอน และกระแสไฟฟ้าเชื่อมพัลส์สูงสุด ต่ออัตราการเย็นตัวของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมอสเทนติกทั้ง 3 เกรด ที่ความหนา 2 มิลลิเมตร.....	33
รูปที่ 4.8 ผลของปริมาณแก๊สไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอน และกระแสไฟฟ้าเชื่อมพัลส์สูงสุด ต่อรูปร่างของรอยเชื่อมของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมอสเทนติกทั้ง 3 เกรด หนา 2 มิลลิเมตร	35
รูปที่ 4.9 ผลของปริมาณแก๊สไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอน และกระแสไฟฟ้าเชื่อมพัลส์สูงสุด ต่อพื้นที่เนื้อโลหะรอยเชื่อมของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมอสเทนติกทั้ง 3 เกรด หนา 2 มิลลิเมตร.....	36
รูปที่ 4.10 ผลของปริมาณแก๊สไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอน ต่อปริมาณไนโตรเจนในเนื้อ โลหะรอยเชื่อม	37
รูปที่ 4. 11 ปริมาณการเพิ่มขึ้นของไนโตรเจนในเนื้อโลหะรอยเชื่อม.....	38
รูปที่ 4.12 โครงสร้างจุลภาคโลหะพื้นของเหล็กกล้าไร้สนิมอสเทนติก ก. เกรด 304 ข. เกรด 202 ค. เกรด D7 (กำลังขยาย 200 เท่า)	40
รูปที่ 4.13 โครงสร้างจุลภาคเนื้อโลหะรอยเชื่อมของเหล็กกล้าไร้สนิมอสเทนติก เกรด D7 ที่ปริมาณแก๊สไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุม 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร เชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้าเชื่อม พัลส์สูงสุด ก. 130 แอมแปร์ ข. 160 แอมแปร์ (กำลังขยาย 200 เท่า)	41
รูปที่ 4. 14 ผลของปริมาณแก๊สไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอน และกระแสไฟฟ้าเชื่อมพัลส์ สูงสุด ต่อระยะห่างระหว่างแกนเดนไดรต์	43
รูปที่ 4.15 โครงสร้างจุลภาคเนื้อโลหะรอยเชื่อมของเหล็กกล้าไร้สนิมอสเทนติก เกรด 304 ที่ กระแสไฟฟ้าเชื่อมพัลส์สูงสุด 160 แอมแปร์ ปริมาณแก๊สไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอน ก. 0 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ข. 5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ค. 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร (กำลังขยาย 200 เท่า).....	44

รูปที่ 4.16 ผลของปริมาณแก๊สไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอน และกระแสไฟฟ้าเชื่อมพัลส์
สูงสุด ต่อปริมาณเตลต้าเฟร์ไรต์..... 45

รูปที่ 4.17 โครงสร้างจุลภาคเนื้อโลหะรอยเชื่อมของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก เกรด 202 ที่
กระแสไฟฟ้าเชื่อมพัลส์สูงสุด 160 แอมแปร์ ปริมาณแก๊สไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอน
10 เปอร์เซนต์โดยปริมาตร (กำลังขยาย 200 เท่า) 47

รูปที่ 4.18 ผลการวัดความเค้นตกค้างโดยเครื่องวัดความเค้นตกค้างด้วยรังสีเอกซ์แสดงความสัมพันธ์
ระหว่างระยะห่างระหว่างระนาบ (d) กับ มุมยิงรังสีเอกซ์ (ψ)..... 47

รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นตกค้าง กับระยะห่างจากกลางแนวเชื่อมของแผ่นเหล็กกล้า
ไร้สนิมออสเทนิติก เกรด 304 หนา 2 มิลลิเมตร ที่กระแสไฟฟ้าเชื่อมพัลส์สูงสุด 130 แอมแปร์..... 49

รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นตกค้าง กับระยะห่างจากกลางแนวเชื่อมของแผ่นเหล็กกล้า
ไร้สนิมออสเทนิติก เกรด 304 หนา 2 มิลลิเมตร ที่กระแสไฟฟ้าเชื่อมพัลส์สูงสุด 160 แอมแปร์..... 50

รูปที่ 4.21 ผลของปริมาณแก๊สไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอน และกระแสไฟฟ้าเชื่อมพัลส์
สูงสุด ต่อปริมาณความเค้นตกค้างที่ระยะห่างจากกลางแนวเชื่อม 5 มิลลิเมตร..... 51

รูปที่ 4.22 กราฟความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียดของโลหะพื้นเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก เกรด
304, 202 และ D7 53

รูปที่ 4. 23 ผลการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ของชิ้นงานทดลองโลหะพื้นเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติกทั้ง 3
เกรด ที่ไม่ผ่านการทดสอบสมบัติความต้านทานแรงดึง 54

รูปที่ 4. 24 ผลการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ของชิ้นงานทดลองโลหะพื้นเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติกทั้ง 3
เกรด ที่ผ่านการทดสอบสมบัติความต้านทานแรงดึง 55

รูปที่ 4.25 ผลของปริมาณแก๊สไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอน และกระแสไฟฟ้าเชื่อมพัลส์
สูงสุด ต่อค่าความเค้นจุดคราก 55

รูปที่ 4.26 ผลของปริมาณแก๊สไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอน และกระแสไฟฟ้าเชื่อมพัลส์
สูงสุด ต่อค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด 57

รูปที่ 4.27 ผลของปริมาณแก๊สไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอน และกระแสไฟฟ้าเชื่อมพัลส์
สูงสุด ต่อค่าเปอร์เซ็นต์การยึดตัว..... 57

รูปที่ 4.28 ชิ้นงาน ภายหลังจากการทดสอบความต้านทานแรงดึงของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก
เกรด 304 ที่กระแสไฟฟ้าเชื่อมพัลส์สูงสุด ก. 130 แอมแปร์ ข. 160 แอมแปร์..... 58

รูปที่ 4.29 พื้นผิวรอยแตกของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก เกรด 304 หนา 2 มิลลิเมตร ที่
กระแสไฟฟ้าเชื่อมพัลส์สูงสุด 160 แอมแปร์ ปริมาณไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอน
10 เปอร์เซนต์โดยปริมาตร 59

รูปที่ 4.30 พื้นผิวรอยแตกของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมอสเทนติก เกรด 202 หนา 2 มิลลิเมตร ที่
กระแสไฟฟ้าเชื่อมพัลส์สูงสุด 160 แอมแปร์ ปริมาณไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอน
10 เปอร์เซนต์โดยปริมาตร 60

รูปที่ 4.31 พื้นผิวรอยแตกของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมอสเทนติก เกรด D7 หนา 2 มิลลิเมตร ที่
กระแสไฟฟ้าเชื่อมพัลส์สูงสุด 160 แอมแปร์ ปริมาณไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอน
10 เปอร์เซนต์โดยปริมาตร 61

รูปที่ ก.1 เปรียบเทียบค่าความจุความร้อนของแก๊สอาร์กอนกับแก๊สไนโตรเจนที่อุณหภูมิต่างๆ 70

รูปที่ ค.1 ผลการวัดความเค้นตกค้างโดยเครื่องวัดความเค้นตกค้างด้วยรังสีเอกซ์แสดงความสัมพันธ์
ระหว่างระยะห่างระหว่างระนาบ (d) กับ มุมยิงรังสีเอกซ์ (ψ) ที่ความชันเฉลี่ยเป็นบวก 78

รูปที่ ค.2 ผลการวัดความเค้นตกค้างโดยเครื่องวัดความเค้นตกค้างด้วยรังสีเอกซ์แสดงความสัมพันธ์
ระหว่างระยะห่างระหว่างระนาบ (d) กับ มุมยิงรังสีเอกซ์ (ψ) ที่ความชันเฉลี่ยเป็นลบ 78

รูปที่ ง.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นตกค้าง กับระยะห่างจากกลางแนวเชื่อมของแผ่นเหล็กกล้าไร้
สนิมอสเทนติกเกรด 202 หนา 2 มิลลิเมตร ที่กระแสไฟฟ้าเชื่อมพัลส์สูงสุด ก. 130 ข. 160
แอมแปร์ 79

รูปที่ ง.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นตกค้าง กับระยะห่างจากกลางแนวเชื่อมของแผ่นเหล็กกล้าไร้
สนิมอสเทนติก เกรด D7 หนา 2 มิลลิเมตร ที่กระแสไฟฟ้าเชื่อมพัลส์สูงสุด ก. 130 ข. 160
แอมแปร์ 80

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ตั้งแต่อดีตถึงปัจจุบัน เหล็กกล้าคาร์บอนถูกใช้กันอย่างกว้างขวาง แต่การนำเหล็กกล้าคาร์บอนไปใช้งานมักเกิดปัญหาการกัดกร่อนโดยเฉพาะในบรรยากาศที่มีความชื้น จึงมีการหันมาใช้เหล็กกล้าไร้สนิมในงานที่ต้องการความต้านทานต่อการกัดกร่อน ทำให้เหล็กกล้าไร้สนิมเป็นวัสดุที่ได้รับความนิยมสำหรับทำเป็นชิ้นส่วนของเครื่องจักรในระบบการผลิต การขนส่งทางท่อ และการกักเก็บ เนื่องจากมีสมบัติที่ดีหลายประการ โดยเฉพาะอย่างยิ่งความต้านทานต่อการกัดกร่อน แม้จะอยู่ในที่มีความชื้นหรือสารละลายที่มีฤทธิ์กัดกร่อน เมื่อเทียบกับเหล็กกล้าทั่วไปซึ่งจะเกิดการกัดกร่อนได้ง่ายในบรรยากาศที่มีความชื้น เนื่องจากเหล็กกล้าไร้สนิมมีการเติมธาตุโครเมียมอย่างน้อยที่สุด 10.5 เปอร์เซ็นต์โดยมวล ซึ่งธาตุโครเมียมจะไปทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศเกิดเป็นฟิล์มบางๆ ของโครเมียมออกไซด์บนผิวเหล็กกล้าไร้สนิม ช่วยทำหน้าที่ปกป้อง ไม่ให้สิ่งแวดล้อมสัมผัสกับเนื้อเหล็ก เกิดปฏิกิริยาการกัดกร่อนสูญเสียเนื้อเหล็ก โดยส่วนผสมของธาตุผสมที่แตกต่างกันจะเป็นตัวกำหนดเกรดเหล็กกล้าไร้สนิม เหล็กกล้าไร้สนิมเกรดที่ได้รับความนิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย คือ เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก เกรด 304 โดยที่เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก เกรด 304 จะมีการผสมนิกเกิลอย่างน้อย 8 เปอร์เซ็นต์โดยมวล เพื่อให้โครงสร้างออสเทนิติกเสถียร จึงทำให้เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก เกรดนี้มีราคาแพงเมื่อเทียบเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก เกรด 200 ที่ใช้แมงกานีสผสมแทนนิกเกิล เพื่อให้โครงสร้างออสเทนิติกเสถียร จึงมีการหันมาใช้เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก เกรด 200 ทดแทนการใช้เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก เกรด 304 ที่มีราคาแพง ในปัจจุบันมีการพัฒนาเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก เกรด 200 โดยเติมคอปเปอร์ลงไปเพื่อเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนทั่วไป [1-3] อย่างไรก็ตามการนำเหล็กกล้าไร้สนิมไปใช้งานจำเป็นต้องผ่านกระบวนการขึ้นรูปที่มีตัวกั้นอยู่หลายวิธี เพื่อให้ได้ลักษณะชิ้นงานตามที่ต้องการ หนึ่งในนั้นคือการขึ้นรูปด้วยการเชื่อม แต่ความร้อนที่เกิดขึ้นในระหว่างการเชื่อมทำให้โครงสร้างจุลภาคของเนื้อเหล็กกล้าไร้สนิมบริเวณที่เกิดการหลอมละลายและบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนเกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้นได้ และเกิดความเค้นตกค้างขึ้นภายหลังการเชื่อม

การเชื่อมที่ถูกนำมาใช้เชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมวิธีหนึ่งคือการเชื่อมทิกพัลส์ (Pulse TIG) เนื่องจากการเชื่อมด้วยวิธีทิกพัลส์จะช่วยลดปริมาณความร้อนในระหว่างการเชื่อม ซึ่งส่งผลช่วยปรับปรุงสมบัติทางกล การเชื่อมด้วยวิธีนี้ในระหว่างการเชื่อมจะมีการใช้แก๊สปกคลุม (Shielding gas) บริเวณแนวเชื่อม เพื่อป้องกันการเกิดออกไซด์เช่นโดยแก๊สเฉื่อยที่นิยมใช้กันจะเป็นแก๊สอาร์กอนที่มีความบริสุทธิ์ 99.95 เปอร์เซ็นต์ หรือแก๊สอาร์กอนผสมกับแก๊สชนิดอื่น เพื่อปรับปรุงความลึกและความกว้างแนวเชื่อม โครงสร้างจุลภาค และลดต้นทุนการผลิต หนึ่งในแก๊สที่ถูกนำมาผสมกับแก๊สปกคลุมอาร์กอนในการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติกคือแก๊สไนโตรเจนเพื่อปรับปรุงความต้านทานต่อการกัดกร่อนแบบเฉพาะที่ [4] นอกจากนี้แก๊สไนโตรเจนมีสมบัติแตกต่างจากแก๊สอื่นตรงที่แก๊สไนโตรเจนมีสมบัติทำให้โครงสร้างออสเทนิติกเสถียรจึงถูกนำมาใช้ประโยชน์ ในการควบคุม

ปริมาณเดลต้าเพอร์ไรต์ในเนื้อโลหะรอยเชื่อมของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก [5-8] จากปัญหาที่กล่าวมา ทำให้แนวคิดของงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นศึกษาโครงสร้างจุลภาค และสมบัติทางกลหลังการเชื่อมของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก เกรด 200 ใหม่ เมื่อมีการผสมแก๊สไนโตรเจนในแก๊สปกคลุมอาร์กอน เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานในการพิจารณาเลือกใช้เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก เกรด 200 ใหม่

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาผลของกระแสไฟฟ้าเชื่อมสูงสุด (Peak current) และส่วนผสมแก๊สไนโตรเจนในแก๊สปกคลุมอาร์กอน ของกระบวนการเชื่อมทิกพัลส์ (TIG pulse welding) ต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะรอยเชื่อม โครงสร้างจุลภาค และสมบัติทางกลของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก เกรด 304, 202 และ D7
2. เพื่อวัดค่าความเค้นตกค้างบริเวณแนวเชื่อมของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติกที่ผ่านการเชื่อมในข้อ 1

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษาผลของกระแสไฟฟ้าเชื่อมสูงสุดเมื่อใช้แก๊สไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอน 0, 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร สำหรับการเชื่อมทิกพัลส์แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก เกรด 304, 202 และ D7 หนา 2 มิลลิเมตร
2. วัดปริมาณไนโตรเจนในเนื้อโลหะรอยเชื่อม
3. วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค และปริมาณเดลต้าเพอร์ไรต์ ในเนื้อโลหะรอยเชื่อม
4. ทดสอบความต้านทานแรงดึงของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติกที่ผ่านการเชื่อม
5. วิเคราะห์ค่าความเค้นตกค้างของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติกที่ผ่านการเชื่อม

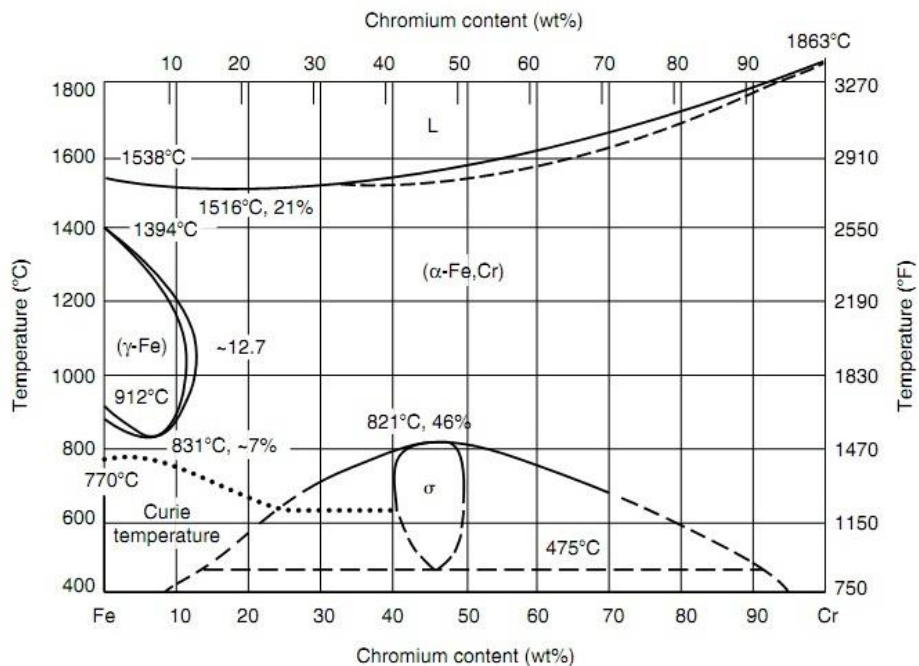
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถทราบอิทธิพลของปริมาณความร้อน (Heat input) และแก๊สปกคลุมต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาค และสมบัติทางกลของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติกภายหลังการเชื่อมด้วยเทคนิคทิกพัลส์
2. สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นตกค้างในบริเวณแนวเชื่อม กับการแปรเปลี่ยนค่าปริมาณความร้อน และชนิดของแก๊สปกคลุมที่ใช้ในการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก
3. เป็นข้อมูลทางเทคนิคสำหรับการพิจารณาเลือกใช้เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก เกรดใหม่ที่สามารรถนำมาทดแทนเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก เกรด 304

บทที่ 2 วรรณกรรมปริทัศน์

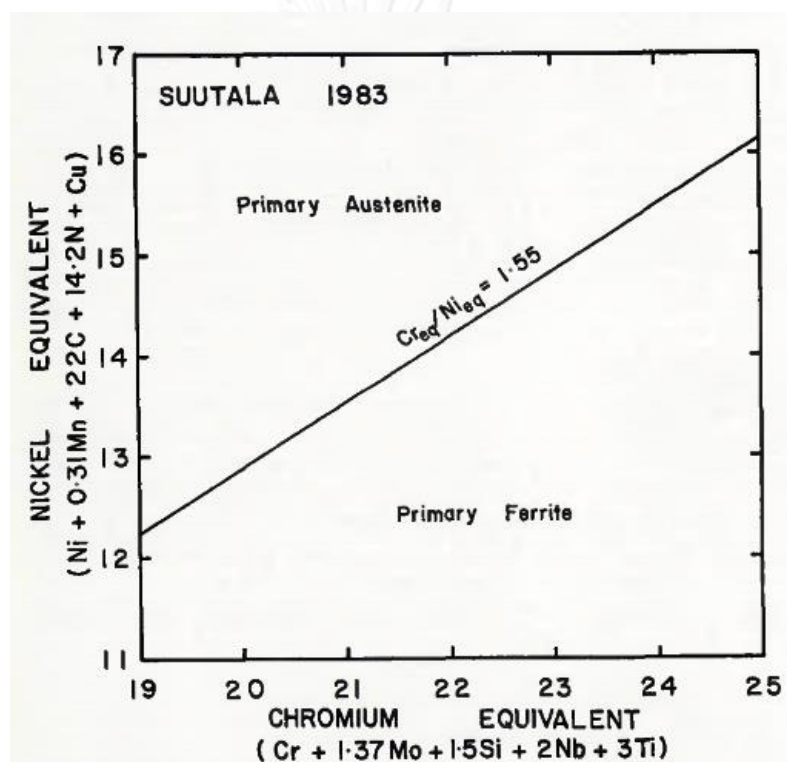
2.1 ผลของส่วนผสมทางเคมีต่อโครงสร้างจุลภาคของเนื้อโลหะรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม ออสเทนิติก

เหล็กกล้าไร้สนิมถูกจัดอยู่ในกลุ่มเหล็กกล้าผสมสูง (High alloy steel) เนื่องจากมีการผสมธาตุอื่นในเหล็กเกินกว่า 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เพื่อปรับปรุงสมบัติ ธาตุผสมหลักที่ทำให้เหล็กกล้าไร้สนิมทนต่อการกัดกร่อนคือ โครเมียมโดยต้องมีโครเมียมน้อย 10.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก การผสมโครเมียมจะทำให้โครงสร้างจุลภาคของเหล็กเปลี่ยนแปลงตามรูปที่ 2.1 ซึ่งเป็นแผนภูมิสมดุลของเหล็กกับโครเมียมที่อุณหภูมิต่างๆ [9] จะเห็นว่าเมื่อผสมโครเมียมลงในเหล็กมากขึ้นจะทำให้โครงสร้างออสเทนิตของเหล็กที่เกิดช่วงอุณหภูมิ 912 – 1394 °C ลดลง จนผสมโครเมียมถึง 12.7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะไม่เกิดโครงสร้างออสเทนิตขึ้นในที่สุดเหลือเพียงแต่โครงสร้างเฟอร์ไรต์ที่อุณหภูมิสูง และที่อุณหภูมิต่ำกว่า 821 องศาเซลเซียส ส่วนผสมโครเมียม 20 ถึง 80 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะเกิดเฟสซิกมา (σ) นอกจากนี้ยังมีการผสมธาตุอื่นเพื่อปรับปรุงสมบัติต่างๆอีก การผสมธาตุอื่นในเหล็กจะทำให้โครงสร้างจุลภาคในเนื้อเหล็กเปลี่ยนแปลงไปด้วย และเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้เนื้อโลหะรอยเชื่อมมีโครงสร้างจุลภาคที่แตกต่างกัน ดังนั้นจึงควรมีความเข้าใจผลของส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิม



รูปที่ 2.1 แผนภูมิสมดุลโครงสร้างจุลภาคของเหล็กโครเมียมที่อุณหภูมิต่างๆ [9]

การคาดการณ์โครงสร้างจุลภาคในเนื้อโลหะรอยเชื่อมของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก สามารถคาดการณ์ได้จากแผนภูมิซูทาล่า [10, 11] ที่ตัดแปลงมาจากแผนภูมิเซฟเฟลอร์ ซึ่งจะเหมาะกับเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติกผสมแมงกานีส และไนโตรเจนในปริมาณสูง ถ้าใช้แผนภูมิเซฟเฟลอร์ หรือเดอลองจะมีความคลาดเคลื่อนสูง โดยแผนภูมิซูทาล่ามีการอธิบายผลของไนโตรเจน และคอปเปอร์ที่มีผลต่อค่า निकิลเทียบเท่า ซึ่งมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคของเนื้อโลหะรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แผนภูมิซูทาล่าแสดงอิทธิพลของส่วนผสมทางเคมี ต่อโครงสร้างจุลภาคของเนื้อโลหะรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม [11]

จากแผนภูมิพบว่า มีการแบ่งผลของส่วนผสมทางเคมีต่อโครงสร้างจุลภาคของเนื้อโลหะรอยเชื่อมออกเป็น 2 กลุ่ม คือ

1. กลุ่มโครเมียมเทียบเท่า (Chromium equivalent) เป็นกลุ่มของธาตุที่ผลต่อโครงสร้างจุลภาคเช่นเดียวกับโครเมียมที่ทำให้โครงสร้างเฟร์ไรต์เสถียร (Ferrite stabilizer) ซึ่งมีโครงสร้างผลึกแบบ Body Center Cubic (BCC) ธาตุในกลุ่มนี้ได้แก่ โครเมียม โมลิบดีนัม ซิลิกอน ไนโอเบียม วาเนเดียม และอลูมิเนียม ดังแสดงในสมการ 2.1

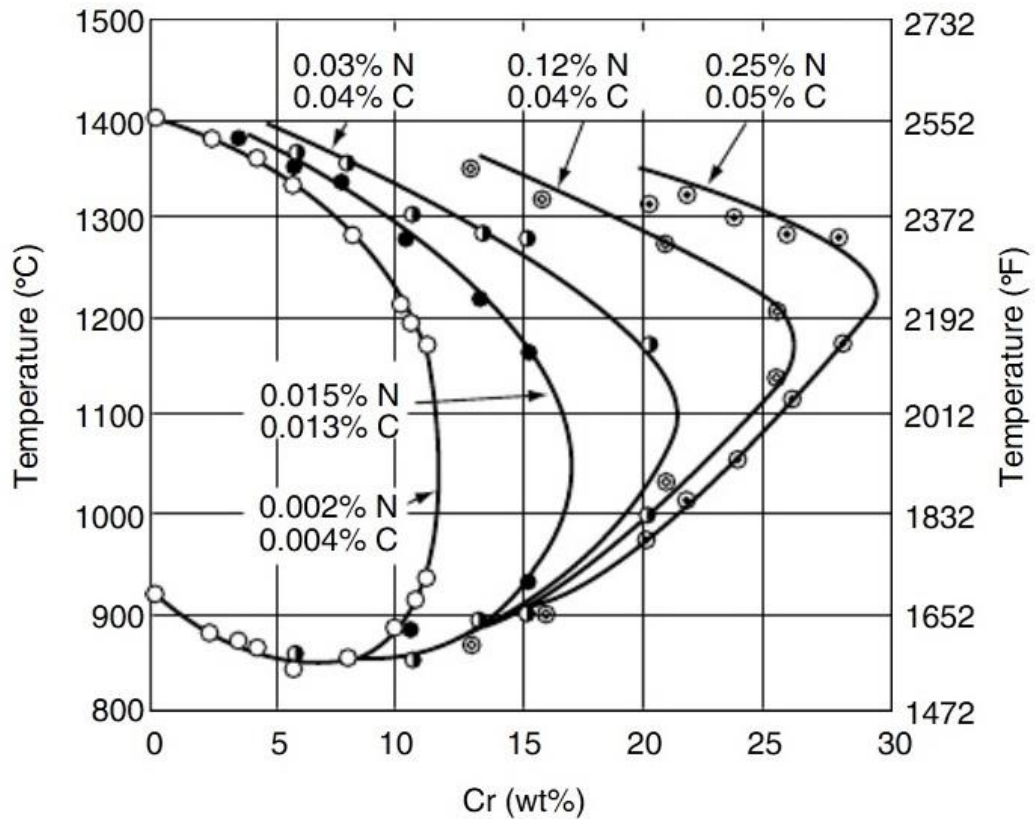
2. กลุ่มนิกเกิลเทียบเท่า (Nickel equivalent) เป็นกลุ่มของธาตุที่มีผลต่อโครงสร้างจุลภาค เช่นเดียวกับนิกเกิลที่ทำให้โครงสร้างออสเทนไนต์เสถียร (Austenite stabilizer) ซึ่งมีโครงสร้างผลึกแบบ Face Center Cubic (FCC) ธาตุในกลุ่มนี้ได้แก่ นิกเกิล คาร์บอน แมงกานีส คอปเปอร์ ไนโตรเจน ดังแสดงในสมการ 2.2

สมการของซูทาล่า [11] แสดงอิทธิพลของส่วนผสมทางเคมีต่อโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าไร้สนิม

$$Cr_{eq} = \%Cr + 1.5\%Si + 2\%Nb + 1.37\%Mo + 3\%Ti \quad 2.1$$

$$Ni_{eq} = \%Ni + 0.31\%Mn + 22\%C + 14.2\%N + \%Cu \quad 2.2$$

จากสมการของซูทาล่าจะเห็นว่าไนโตรเจนถูกจัดอยู่ในกลุ่มที่ช่วยทำให้โครงสร้างออสเทนไนต์เสถียรเหมือนกับคาร์บอน ทำให้เส้นแบ่งเขตระหว่างโครงสร้างจุลภาคออสเทนไนต์กับโครงสร้างเฟร์ไรต์เลื่อนไปในส่วนผสมโครเมียมสูงขึ้น เมื่อผสมไนโตรเจนหรือคาร์บอนสูงขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2.3 ดังนั้นการที่จะผสมแก๊สไนโตรเจนในแก๊สปกคลุมอาร์กอนสำหรับเชื่อมทิก จะทำให้เกิดโครงสร้างจุลภาคออสเทนไนต์เพิ่มขึ้น ในทางกลับกันจะทำให้ปริมาณเดลต้าเฟร์ไรต์ในเนื้อโลหะรอยเชื่อมลดลง [5-8] สำหรับเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนติกมีความจำเป็นที่จะต้องควบคุมปริมาณเดลต้าเฟร์ไรต์ในเนื้อโลหะรอยเชื่อมให้เหมาะสมจากการศึกษาของ F.C. HULL [12] เกี่ยวกับผลของเดลต้าเฟร์ไรต์ต่อการเกิดรอยแตกกร่อนขณะร้อน (Hot cracking) ของเหล็กกล้าไร้สนิม พบว่าการแข็งตัวที่มีปริมาณเดลต้าเฟร์ไรต์ในเนื้อโลหะรอยเชื่อมอยู่ 5 ถึง 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร จะต้านทานการเกิดรอยแตกขณะร้อนได้ดีกว่าการแข็งตัวที่มีแต่โครงสร้างออสเทนไนต์ เนื่องจากซิลเฟอร์และฟอสฟอรัสที่เป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดรอยแตกขณะร้อนมีความสามารถละลายในโครงสร้างเฟร์ไรต์ และเดลต้าเฟร์ไรต์ได้ดีกว่าในโครงสร้างออสเทนไนต์ จึงไม่เกิดการแยกตัวเป็นสารประกอบ ถ้าปริมาณเดลต้าเฟร์ไรต์ในเนื้อโลหะรอยเชื่อมมากกว่า 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร จะเกิดโครงสร้างตาข่ายของเดลต้าเฟร์ไรต์ ส่งผลให้ความต้านทานการกัดกร่อนของเนื้อโลหะรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมลดลง และเมื่อนำไปใช้งานที่อุณหภูมิ 600 ถึง 900 องศาเซลเซียส [13] พบว่าเดลต้าเฟร์ไรต์สามารถเปลี่ยนเป็นซิกมาเฟสได้ ซึ่งมีสมบัติแข็งและเปราะจึงมักเป็นเหตุทำให้เกิดการแตกร้าวของเนื้อโลหะรอยเชื่อมนอกจากนี้โครงสร้างตาข่ายของเดลต้าเฟร์ไรต์ที่ไม่ต่อเนื่องจะมีความต้านทานต่อการแตกร้าวจากความเค้นร่วมกับการกัดกร่อนดีกว่าการมีโครงสร้างตาข่ายของเดลต้าเฟร์ไรต์แบบต่อเนื่อง [14]



รูปที่ 2.3 ผลของไนโตรเจนและคาร์บอนต่อสภาวะการเกิดโครงสร้างจุลภาคอสเทนไนต์และเฟร์ไรต์ [10]

เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติกนอกจากจะสามารถเกิดโครงสร้างเดลต้าเฟร์ไรต์ได้แล้ว ยังสามารถเกิดโครงสร้างมาร์เทนไซต์ได้ด้วย หากมีการเย็นตัวอย่างรวดเร็วจนถึงอุณหภูมิเริ่มเกิดโครงสร้างมาร์เทนไซต์ (M_s) ซึ่งส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติกจะส่งผลต่ออุณหภูมิเริ่มเกิดโครงสร้างมาร์เทนไซต์ ดังแสดงในสมการ 2.3 [15]

$$M_s (^\circ\text{C}) = 1302 - 42\%Cr - 61\%Ni - 31\%Mn - 28\%Si - 1667(\%C + \%N) \quad 2.3$$

จากสมการจะพบว่า การผสมธาตุต่างๆ ลงในเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติกจะส่งผลต่ออุณหภูมิเริ่มเกิดโครงสร้างมาร์เทนไซต์ลง หากคำนวณค่าอุณหภูมิเริ่มเกิดโครงสร้างมาร์เทนไซต์ของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติกจะพบว่า มีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง ดังนั้นจึงไม่พบโครงสร้างมาร์เทนไซต์ในเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติกที่อุณหภูมิห้อง แต่เมื่อเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติกที่ถูกเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกหรือเปลี่ยนรูปถาวรจะสามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคจากโครงสร้างอสเทนไนต์เป็นโครงสร้างจุลภาคมาร์เทนไซต์ได้ที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิเริ่มเกิดโครงสร้างจุลภาคมาร์เทนไซต์

เนื่องจากความเครียดทำให้การจัดเรียงอะตอมเปลี่ยนแปลงไป โดยมีตัวแปรที่สำคัญคือ ค่าพลังงานการจัดเรียงผลึก (stacking fault energy, SFE) ถ้ามีค่าพลังงานการจัดเรียงตัวผลึกต่ำแสดงว่าการจัดเรียงอะตอมไม่หนาแน่น เพียงใช้ความเครียดน้อยก็สามารถเปลี่ยนโครงสร้างจุลภาคออสเทนไนต์เป็นโครงสร้างจุลภาคมาร์เทนไซต์ได้ สมการ 2.4 เป็นสมการประมาณค่าพลังงานการจัดเรียงตัวผลึก

$$\text{SFE (mJ/m}^2\text{)} = 25.7 + 2(\%Ni) + 410(\%C) - 0.9(\%Cr) - 77(\%N) - 13(\%Si) - 1.2(\%Mn) \quad 2.4$$

2.2 การแข็งตัวของน้ำโลหะเชื่อม ต่อโครงสร้างจุลภาคในเนื้อโลหะรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนติก

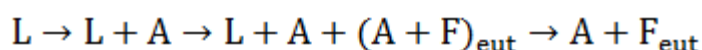
ที่อุณหภูมิห้องโครงสร้างจุลภาคของเนื้อโลหะรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนติกขึ้นอยู่กับทั้งลักษณะการแข็งตัว และการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างในระหว่างการเย็นตัว โดยการแข็งตัวจะเริ่มจากออสเทนไนต์ปฐมภูมิ หรือ เฟร์ไรต์ปฐมภูมิ ขึ้นอยู่กับส่วนผสมทางเคมี ลักษณะการแข็งตัว และการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างในระหว่างการเย็นตัวที่เป็นไปได้ของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนติกมีด้วยกัน 4 ลักษณะ ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ลักษณะ A และ AF การแข็งตัวจะเริ่มจากออสเทนไนต์ปฐมภูมิ และลักษณะ FA และ F การแข็งตัวจะเริ่มจากเฟร์ไรต์ปฐมภูมิ ดังนี้ [10, 16]

ลักษณะ A การแข็งตัวของน้ำโลหะเชื่อมเริ่มจากออสเทนไนต์ปฐมภูมิ และยังคงเป็นโครงสร้างออสเทนไนต์จนถึงอุณหภูมิห้อง มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคระหว่างการแข็งตัวดังนี้



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ลักษณะ AF การแข็งตัวของน้ำโลหะเชื่อมเริ่มจากออสเทนไนต์ปฐมภูมิ และเกิดโครงสร้างเฟร์ไรต์ที่ขอบเกรนออสเทนไนต์ก่อนจะสิ้นสุดการแข็งตัวด้วยปฏิกิริยายูเทกติก มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคระหว่างการแข็งตัวดังนี้

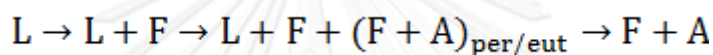


ลักษณะ FA การแข็งตัวของน้ำโลหะเชื่อมเริ่มจากเฟร์ไรต์ปฐมภูมิ และเกิดโครงสร้างออสเทนไนต์ที่ขอบเกรนเฟร์ไรต์ในก่อนจะสิ้นสุดการแข็งตัวด้วยปฏิกิริยาเพริเทกติก-ยูเทกติก เมื่อการแข็งตัวสิ้นสุดสมบูรณ์จะประกอบไปด้วยโครงสร้างเดนไดรต์ของเฟร์ไรต์กับออสเทนไนต์ระหว่างเดนไดรต์ โดย

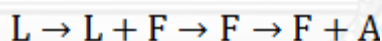
ลักษณะของเฟอไรต์ และปริมาณของออสเทนไนต์ขึ้นกับอัตราการเย็นตัว และอัตราส่วนของโครเมียมเทียบเท่ากับนิกเกิลเทียบเท่าดังนี้

- อัตราการเย็นตัวปานกลาง และ/หรือ อัตราส่วนของโครเมียมเทียบเท่ากับนิกเกิลเทียบเท่าต่ำ แต่ยังคงอยู่ในช่วง FA เฟอไรต์จะเกิดแบบเวอร์มิคิวลาร์เฟอไรต์ (Vermicular Ferrite)
- อัตราการเย็นตัวสูง และ/หรือ อัตราส่วนของโครเมียมเทียบเท่ากับนิกเกิลเทียบเท่าสูงแต่ยังคงอยู่ในช่วง FA เฟอไรต์จะเกิดแบบแลทธีเฟอไรต์ (Lathy Ferrite)
- อัตราการเย็นตัวสูงมาก เฟอไรต์จะเปลี่ยนเป็นออสเทนไนต์ทั้งหมด โดยการเปลี่ยนเฟสแบบแมสซิฟ (Massive transformation)

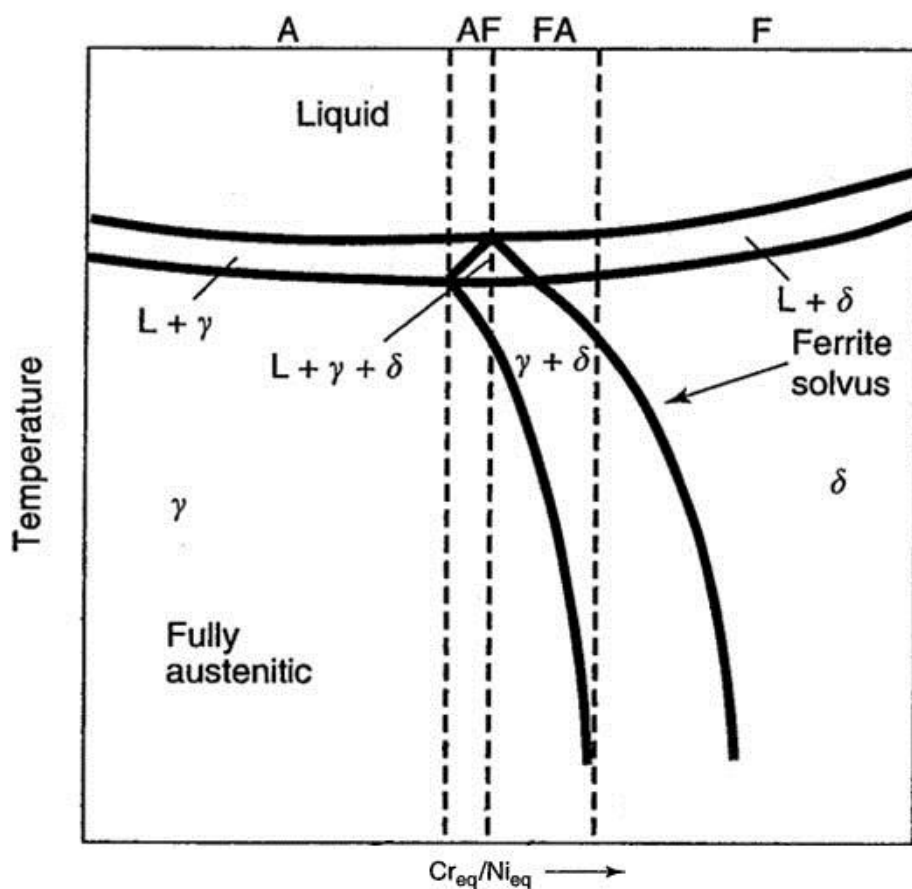
โดยมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคระหว่างการแข็งตัวดังนี้



ลักษณะ F การแข็งตัวน้ำโลหะเชื่อมเริ่มจากเฟอไรต์จนถึงสิ้นสุดการแข็งตัว และเมื่อเนื้อโลหะรอยเชื่อมเย็นตัวต่ำกว่าเส้นโซลิวัสของเฟอไรต์จะเกิดโครงสร้างออสเทนไนต์ที่ขอบเกรนเฟอไรต์ โดยปริมาณของออสเทนไนต์ขึ้นกับอัตราการเย็นตัว และอัตราส่วนของโครเมียมเทียบเท่ากับนิกเกิลเทียบเท่า ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคระหว่างการแข็งตัวดังนี้



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



รูปที่ 2.4 แผนภูมิสมมติสองมิติ (Pseudobinary) ของ เหล็ก-โครเมียม-นิกเกิล ที่ 70 เปอร์เซ็นต์ เหล็ก [10]

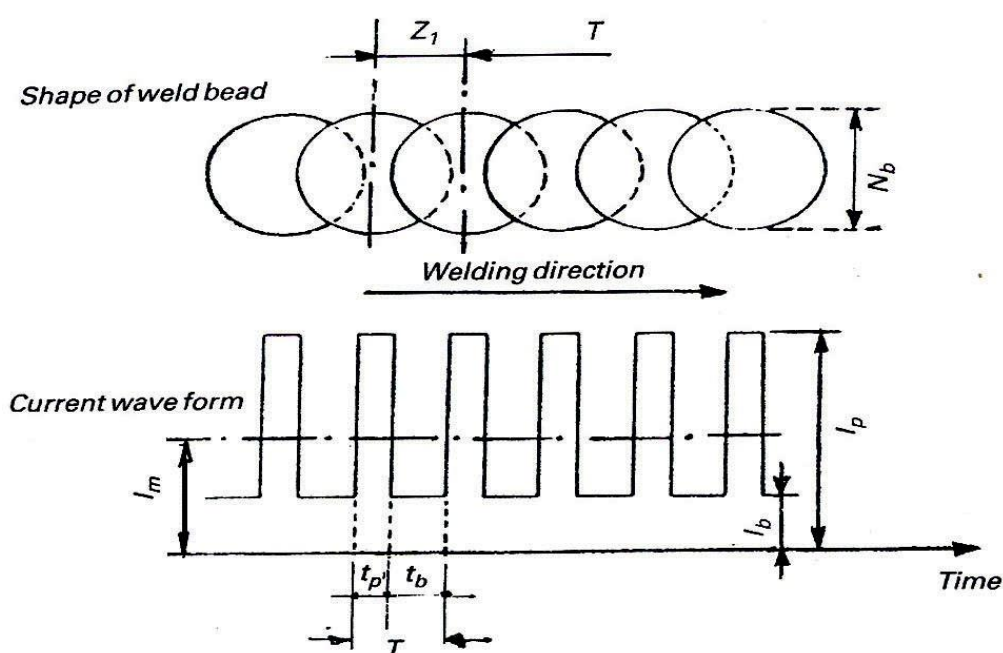
N. Suutala [17] ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการแข็งตัว และโครงสร้างจุลภาคในเนื้อโลหะ รอยเชื่อมของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนติก และเฟอร์ริติก-ออสเทนติก พบว่าการมีโครงสร้างเฟร์ไรต์อยู่ ยังไม่ใช่งื่อนไขสำคัญที่สุดที่จะลดความไวในการเกิดรอยแตกขณะร้อนในเนื้อโลหะรอยเชื่อม แต่ เงื่อนไขที่สำคัญที่สุดสำหรับป้องกันการเกิดรอยแตกขณะร้อนคือต้องเริ่มการแข็งตัวจากเฟร์ไรต์ปฐม ภูมิ ถ้าเกิดไม่เป็นไปตามเงื่อนไขทั้งสองเหล็กกล้าไร้สนิมจะไวต่อการเกิดรอยแตกขณะร้อน และยังมี การศึกษาของ N. Suutala, T. Takalo และ T. Moissio [18] เกี่ยวกับการแข็งตัวแบบเฟร์ไรต์-ออสเท ไนต์ของน้ำโลหะรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนติก พบว่าโครงสร้างจุลภาคในเนื้อโลหะรอยเชื่อม มีความสัมพันธ์กับอัตราส่วนของโครเมียมเทียบเท่าต่อนิกเกิลเทียบเท่า โดยเมื่ออัตราส่วนของ โครเมียมเทียบเท่าต่อนิกเกิลเทียบเท่ามีค่าต่ำ ประมาณ 1.5 เดลต้าเฟร์ไรต์ในเนื้อโลหะรอยเชื่อมจะ เกิดแบบเวอร์มิคูลาร์เฟร์ไรต์ และถ้าอัตราส่วนของโครเมียมเทียบเท่าต่อนิกเกิลเทียบเท่ามีเพิ่มขึ้น ประมาณ 1.70 ถึง 1.95 เดลต้าเฟร์ไรต์จะเกิดแบบแลทธิเฟร์ไรต์

S.A. David, J.M. Vitek และ T.L. Hebble [19] ศึกษาผลของการแข็งตัวอย่างรวดเร็วต่อ โครงสร้างจุลภาคในเนื้อโลหะรอยเชื่อมของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนติก โดยการเชื่อมเหล็กกล้าไร้

สนิมออสเทนิติกเกรด 316 พบว่าเคลต้าเฟอไรต์ลดลงเมื่ออัตราการเย็นตัวเพิ่มขึ้น และอาจเกิดโครงสร้างออสเทนิต์ทั้งหมดได้ถ้าอัตราการเย็นตัวสูงกว่าอัตราการเย็นตัววิกฤต

2.3 ผลของตัวแปรเชื่อมทิกพัลส์ต่อการเกิดเนื้อโลหะรอยเชื่อม

วิธีการเชื่อมทิกพัลส์เป็นวิธีการเชื่อมที่ประยุกต์มาจากวิธีการเชื่อมทิก ต่างกันตรงที่วิธีการเชื่อมทิกพัลส์จะมีการสลับกระแสไฟฟ้าเชื่อม ระหว่างกระแสไฟฟ้าพัลส์สูงสุด (Pulse current, I_p) ในช่วงเวลาพัลส์ (Pulse time, t_p) ที่เกิดการหลอมละลายของโลหะ กับ กระแสไฟฟ้าเบส (Base current, I_b) ในช่วงเวลาเบส (Base time, t_b) ที่เกิดการเย็นตัวของน้ำโลหะ ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ของตัวแปรเชื่อมทิกพัลส์และจุดหลอมละลาย โดยที่ Z_1 เป็นระยะห่างระหว่างจุดหลอมละลาย และ N_b เป็นความกว้างของรอยเชื่อม [20]

การสลับกระแสไฟฟ้าในวิธีการเชื่อมทิกพัลส์เพื่อลดปริมาณความร้อนในระหว่างการเชื่อม ซึ่งส่งผลช่วยปรับปรุงสมบัติทางกล ดังการศึกษาของ A.K. Lakshminarayanan, K. Shanmugam, V. Balasubrama [21] เกี่ยวกับผลของวิธีการเชื่อมอาร์กแบบอัตโนมัติ ต่อความต้านทานแรงดึง (Tensile) และสมบัติทนต่อการกระแทก (Impact Properties) ของเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก เกรด 409 โดยเปรียบเทียบระหว่างวิธีการเชื่อมทิก กับวิธีการเชื่อมทิกพัลส์ พบว่าวิธีการเชื่อมทิกพัลส์จะทำให้ได้ความแข็งแรงจุดคราก (Yield strength) ความต้านทานแรงดึง (Tensile strength) และความต้านทานแรงดึงที่มีรอยบาก (Notch tensile strength) สูงกว่าเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก เกรด 409 ที่ไม่ได้ผ่านการเชื่อม และที่ผ่านวิธีการเชื่อมทิก วิธีการเชื่อมทิกพัลส์ยังได้เปอร์เซ็นต์การยืดตัว (Elongation) ความแกร่งต่อแรงกระแทก และความแข็งแบบวิกเกอร์ส (Vicker hardness) สูงกว่า

วิธีการเชื่อมทิก ดังแสดงในตารางที่ 2.1 เนื่องจากวิธีการเชื่อมทิกพัลส์มีปริมาณความร้อนในระหว่าง การเชื่อมต่ำกว่าวิธีการเชื่อมทิกจึงให้ขนาดเกรนเฉลี่ยบริเวณหลอมเหลวของวิธีการเชื่อมทิกพัลส์มี ขนาดเกรนเฉลี่ยเล็กกว่าขนาดเกรนเฉลี่ยบริเวณหลอมเหลวของวิธีการเชื่อมทิกซึ่งจะส่งผลต่อสมบัติทาง กลต่างๆ ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ N. KARUNAKARAN และ V. BALASUBRAMANIAN [22] ที่ เปรียบเทียบวิธีการเชื่อมทิก กับวิธีการเชื่อมทิกพัลส์ของโลหะผสมอลูมิเนียม พบว่าการใช้วิธีการเชื่อม ทิกพัลส์จะได้สมบัติแรงดึง (Tensile property) และความแข็งที่สูงกว่าวิธีการเชื่อมทิกขณะที่มีความ เค้นตกค้าง (Residual stress) น้อยกว่า

ตารางที่ 2.1 สมบัติแรงดึง และสมบัติความทนต่อการกระแทก เปรียบเทียบระหว่าง วิธีการ เชื่อมทิกพัลส์ (PCGTAW) กับวิธีการเชื่อมทิก (CCGTAW) [21]

Joint	Yield strength/MPa	Tensile strength/MPa	Elongation/%	Notch tensile strength/MPa	Notch strength ratio	Impact toughness/J
Base metal	359	524	12	576	1.10	22
CCGTAW	510	600	4.5	667	1.01	10
PCGTAW	550	650	6.2	689	1.06	15

วิธีการเชื่อมทิกพัลส์จะมีตัวแปรในการเชื่อมเพิ่มมาจาก วิธีการเชื่อมทิก เพื่อให้ได้ลักษณะรอยเชื่อม และโครงสร้างจุลภาคของเนื้อโลหะรอยเชื่อมตามต้องการ จึงควรทำความเข้าใจความสัมพันธ์ของตัวแปรในการเชื่อมทิกพัลส์ดังนี้ [20]

อัตราส่วนระหว่างค่ากระแสไฟฟ้าเบสต่อค่ากระแสไฟฟ้าพัลส์ (RE)

$$RE = \frac{I_b}{I_p} \quad 2.6$$

เวลาที่สลับระหว่างกระแสไฟฟ้าพัลส์กับกระแสไฟฟ้าเบสครบ 1 รอบ (T)

$$T = t_p + t_b \quad 2.7$$

อัตราส่วนระหว่างช่วงพัลส์ต่อเวลาครบรอบ (RI, %on time)

$$RI = \frac{t_p}{T} \quad 2.8$$

ความถี่ (F)

$$F = \frac{1}{T} \quad 2.9$$

ค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ย (I_m)

$$I_m = \frac{I_p t_p + I_b t_b}{T} \quad 2.10$$

กระแสไฟฟ้าเฉลี่ยค่ากลางเรขาคณิต (I_{rms}, I_e)

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{I_p^2 t_p + I_b^2 t_b}{T}} \quad 2.11$$

ค่าพลังงานที่ใช้สำหรับการหลอมละลายเนื้อโลหะ (P_e)

$$P_e = V \times I_{rms} \quad 2.12$$

ปริมาณความร้อนในระหว่างการเชื่อม (H)

$$W_s = \frac{\eta \times P_e}{V_s} \quad 2.13$$

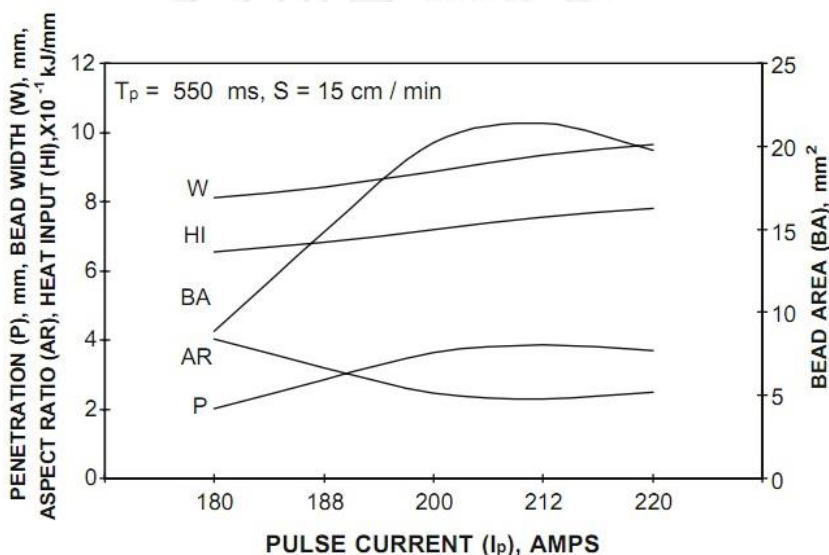
โดยที่ η = ค่าประสิทธิภาพ, V_s = ความเร็วเชื่อม

แทนค่าสมการ 2.11 และ 2.12 ในสมการ 2.13 จะได้

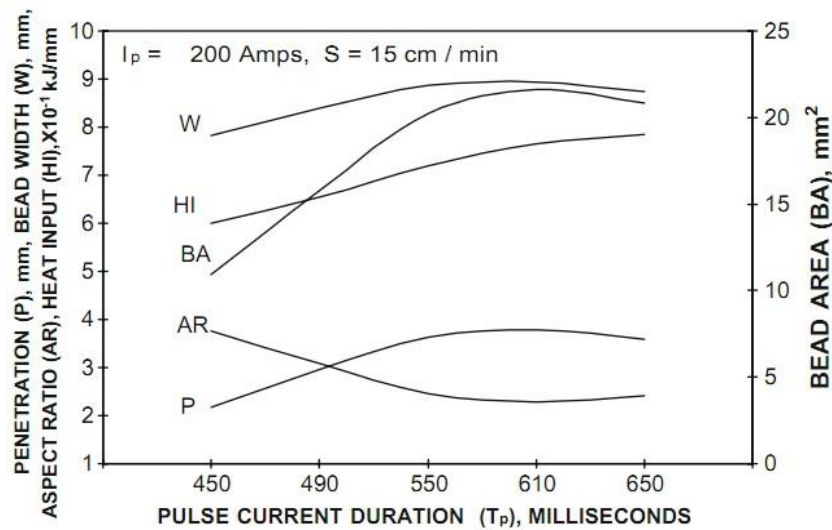
$$H = \frac{\eta \times V \times \sqrt{\frac{I_p^2 t_p + I_b^2 t_b}{T}}}{V_s} \quad 2.14$$

จากสมการ 2.14 จะเห็นได้ว่าตัวแปรในการเชื่อมทุกตัวล้วนส่งผลต่อปริมาณความร้อนในระหว่างการเชื่อมทั้งสิ้นดังนั้นจึงควรเข้าใจถึงผลของตัวแปรในการเชื่อมต่อการเกิดเนื้อโลหะรอยเชื่อม

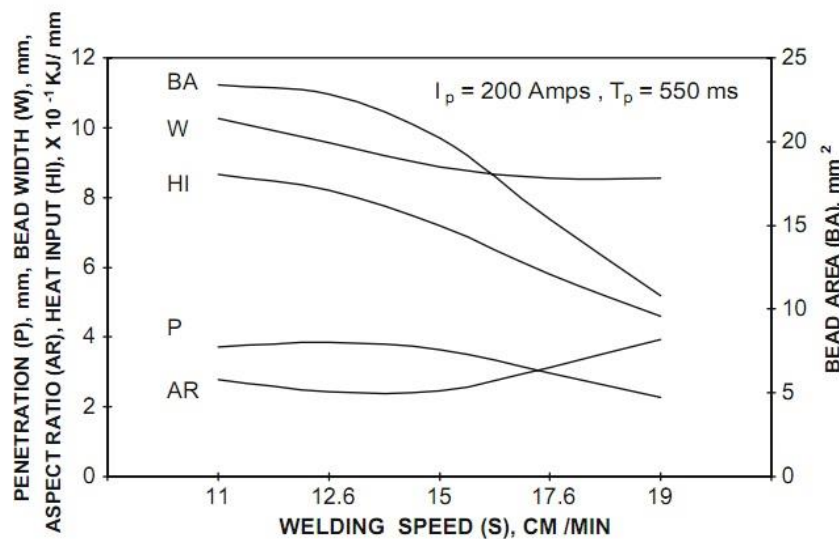
P. K. Giridharan และ N. Murugan [23] ศึกษาเกี่ยวกับการเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการเชื่อมทิกพัลส์สำหรับการเชื่อมแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติกเกรด 304L โดยให้อัตราส่วนค่ากระแสไฟฟ้าเบสต่อค่ากระแสไฟฟ้าพัลส์ และความถี่ที่ 0.2 และ 1 เฮิรตซ์ ตามลำดับพบว่าเมื่อเพิ่มค่ากระแสไฟฟ้าพัลส์ และเวลาพัลส์ จะส่งผลให้ปริมาณความร้อนในระหว่างการเชื่อม (H) ความกว้างรอยเชื่อม (W) พื้นที่รอยเชื่อม (BA) และรอยซึมลึก (P) เพิ่มขึ้นแต่อัตราส่วนความกว้างต่อรอยซึมลึก (AR) ลดลง ดังแสดงในรูปที่ 2.6 และ 2.7 แต่การเพิ่มความเร็วเชื่อมผลที่ได้จะกลับกัน กล่าวคือปริมาณความร้อนในระหว่างการเชื่อม ความกว้างรอยเชื่อม พื้นที่รอยเชื่อม และรอยซึมลึก ลดลง แต่อัตราส่วนความกว้างต่อรอยซึมลึกเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.8 โดยที่ผลของความเร็วมุมจะส่งผลต่อลักษณะรอยเชื่อมมากที่สุดรองลงมาคือค่ากระแสไฟฟ้าพัลส์ และช่วงเวลาพัลส์



รูปที่ 2.6 ผลของค่ากระแสไฟฟ้าเชื่อมต่อลักษณะรอยเชื่อม [23]



รูปที่ 2.7 ผลของช่วงเวลาพัลส์ต่อลักษณะรอยเชื่อม [23]



รูปที่ 2.8 ผลของความเร็วเชื่อมต่อลักษณะรอยเชื่อม [23]

เอกรัตน์ ไวยนิตย์ [24] ศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลของตัวแปรการเชื่อมทิกพัลส์ของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก เกรด 306L พบว่าถ้าให้ตัวแปรในการเชื่อมอื่นๆคงที่ การเชื่อมที่ใช้กระแสไฟฟ้าเบสต่ำเกินไปจะทำให้การอาร์กดับ การเชื่อมที่ใช้กระแสไฟฟ้าเบสสูงเกินไปทำให้การอาร์กมีความรุนแรง โดยที่กระแสไฟฟ้าเบส 61 แอมแปร์ จะมีการอาร์กที่สม่ำเสมอ และถ้าให้ตัวแปรในการเชื่อมอื่นๆคงที่ การเพิ่มความถี่พัลส์จาก 1 ถึง 4 เฮิร์ตซ์ จะทำให้รอยซึมลึกและความกว้างของรอยเชื่อมมีแนวโน้มลดลง แต่อัตราส่วนรอยซึมลึกต่อความกว้างของรอยเชื่อมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และเริ่มคงที่ในช่วงความถี่พัลส์ 5 ถึง 10 เฮิร์ตซ์ ขณะที่การเพิ่มความถี่เชื่อมจะทำให้ความกว้างรอยเชื่อมลดลง แต่ถ้าใช้ความเร็วเชื่อมถึง 7 มิลลิเมตรต่อวินาที จะเกิดรอยบกพร่องแบบ Slag inclusion ในการเชื่อมที่ตำแหน่ง 6 นาฬิกา

R. Sudhakaran และคณะ [25] ศึกษาผลของตัวแปรในการเชื่อมทิกต่อลักษณะรอยเชื่อมของเหล็กกล้าสนิมอสเทนติก เกรด 202 พบว่ากระแสไฟฟ้าเชื่อม และอัตราการไหลของแก๊สที่เพิ่มขึ้นส่งผลเพิ่มอัตราส่วนรอยซึมลึกต่อความกว้างของรอยเชื่อม แต่ความเร็วเชื่อม และการมุมหัวเชื่อมที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่ออัตราส่วนรอยซึมลึกต่อความกว้างของรอยเชื่อม

Subodh Kumar และ A.S. Shahi [26] ศึกษาผลของปริมาณความร้อนในระหว่างการเชื่อมทิกต่อโครงสร้างจุลภาค และสมบัติทางกล ของการเชื่อมทิกในเหล็กกล้าไร้สนิมอสเทนติก เกรด 304 โดยใช้ปริมาณความร้อนในระหว่างการเชื่อมที่ต่ำ (2.563 กิโลจูลต่อมิลลิเมตร) ปานกลาง (2.784 กิโลจูลต่อมิลลิเมตร) และสูง (3.017 กิโลจูลต่อมิลลิเมตร) พบว่าการใช้ปริมาณความร้อนในระหว่างการเชื่อมที่สูงขึ้นจะส่งผลให้เกรนในแนวระบร้อนหยาบมากขึ้น และมีความยาวเดนไดรต์เฉลี่ยในบริเวณหลอมเหลวยาวขึ้น ทำให้ความต้านทานแรงดึงสูงสุด (ultimate tensile strength) และความแข็งของเหล็กกล้าไร้สนิมอสเทนติก เกรด 304 ลดลง ดังนั้นการใช้ปริมาณความร้อนในระหว่างการเชื่อมที่ต่ำให้สมบัติทางกลที่ดีกว่าการใช้ปริมาณความร้อนในระหว่างการเชื่อมปานกลางและสูง

2.4 ผลของการผสมแก๊สไนโตรเจนในแก๊สปกคลุมอาร์กอน

แก๊สปกคลุมถูกใช้สำหรับการเชื่อมทิก เพื่อเป็นตัวกลางสนับสนุนการอาร์กให้เสถียร ป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน และควบคุมลักษณะของรอยเชื่อม แก๊สปกคลุมที่นิยมใช้กันเช่น แก๊สอาร์กอน แก๊สฮีเลียม แก๊สไฮโดรเจน และแก๊สไนโตรเจน แต่แก๊สไนโตรเจนจะมีสมบัติอย่างหนึ่งที่แตกต่างจากแก๊สปกคลุมอื่นชนิดอื่นคือไนโตรเจนมีสมบัติทำให้โครงสร้างอสเทไนต์เสถียร ดังนั้นการผสมแก๊สไนโตรเจนในแก๊สปกคลุมอาร์กอนจะส่งผลต่อโครงสร้างจุลภาค และสมบัติทางกลของเนื้อโลหะรอยเชื่อมด้วย โดยแก๊สไนโตรเจนสามารถละลายในน้ำโลหะตามแสดงในสมการ [27, 28]



เมื่อพิจารณาที่สมดุลค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยาคือ

$$K = \frac{a_N}{\sqrt{p_{N_2}}} = \frac{f_N [\%N]}{\sqrt{p_{N_2}}} \quad 2.16$$

โดยที่ a_N คือแอกทิวิตีของไนโตรเจน p_{N_2} คือความดันย่อยของไนโตรเจน f_N คือค่าสัมประสิทธิ์แอกทิวิตี และ [%N] คือความเข้มข้นของไนโตรเจนในน้ำโลหะ จากสมการพบว่าความเข้มข้นของไนโตรเจนในน้ำโลหะจะแปรผันตรงกับความดันย่อยของไนโตรเจน และแปรผกผันกับค่าสัมประสิทธิ์แอกทิวิตี โดยค่าสัมประสิทธิ์แอกทิวิตีถูกกำหนดโดย

$$\log f_N = \sum_j e_N^j x_j + \sum_j \sum_k r_N^{jk} x_j x_k \quad 2.17$$

โดยที่ e_N^j คือค่าอินเตอร์แอคชั่นพารามิเตอร์อันดับที่หนึ่งของธาตุ j ต่อไนโตรเจน r_N^{jk} คือค่าอินเตอร์แอคชั่นพารามิเตอร์อันดับที่สองของธาตุ j ต่อไนโตรเจน และ x_j คือความเข้มข้นของสารละลาย j ในหน่วยเปอร์เซ็นต์ โดย น้ำหนัก จากสมการ 2.16 และ 2.17 จะเห็นว่าความสามารถในการละลายของไนโตรเจนจะเพิ่มขึ้นเมื่อค่าอินเตอร์แอคชั่นพารามิเตอร์เป็นลบมาก เมื่อพลังงานพันธะระหว่างไนโตรเจนกับธาตุผสม สูงกว่า พันธะระหว่างไนโตรเจนกับเหล็ก และพันธะระหว่างเหล็กกับธาตุผสม โดยธาตุที่เพิ่มความสามารถในการละลายของไนโตรเจนในเหล็กเช่น โครเมียม แมงกานีส โมลิบดีนัม อะลูมิเนียม และไทเทเนียม ธาตุที่ลดความสามารถในการละลายของไนโตรเจนในเหล็กเช่น นิกเกิล คาร์บอน และซิลิคอน H. Wada และ R.D. Pehlke [29, 30] พัฒนาสมการความสามารถในการละลายของไนโตรเจนที่สมดุลในน้ำโลหะผสมเหล็ก-โครเมียม-นิกเกิล ที่ผสมแมงกานีสและโมลิบดีนัม ที่เป็นฟังก์ชันของค่าสัมประสิทธิ์แอคทิวิตี อุดมภูมิ แสดงในสมการที่ 2.18 โดยค่าสัมประสิทธิ์แอคทิวิตีที่เป็นฟังก์ชันของธาตุผสม แสดงในสมการที่ 2.19

$$\log [\%N] = -\frac{247}{T} - 1.22 - \left(\frac{4780}{T} - 1.51\right) \log f_N - \left(\frac{1760}{T} - 0.91\right) (\log f_N)^2 \quad 2.18$$

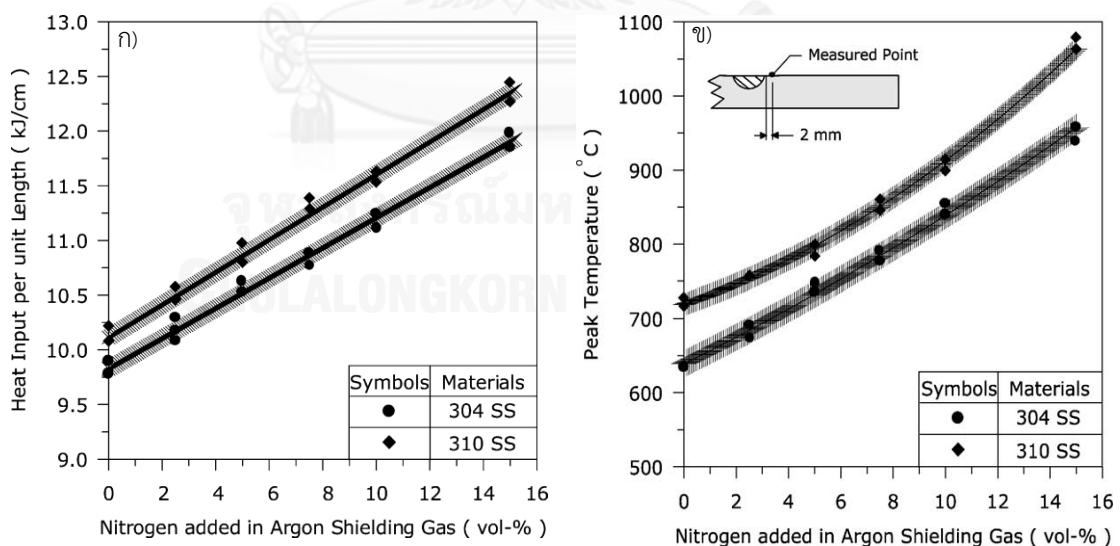
$$\begin{aligned} \log f_N = & \{-164[\%Cr] + 8.33[\%Ni] - 33.2[\%Mo] - 134[\%Mn] + 1.68[\%Cr]^2 - 1.83[\%Ni]^2 - \\ & 2.78[\%Mo]^2 + 8.82[\%Mn]^2 + (1.6[\%Ni] + 1.2[\%Mo] + 2.16[\%Mn]).[\%Cr] + (-0.26[\%Mo] + \\ & 0.09[\%Mn]).[\%Ni]\}/T + \{0.0415[\%Cr] + 0.0019[\%Ni] + 0.0064[\%Mo] + 0.035[\%Mn] - \\ & 0.0006[\%Cr]^2 + 0.001[\%Ni]^2 + 0.0013[\%Mo]^2 - 0.0056[\%Mn]^2 + (-0.0009[\%Ni] - \\ & 0.0005[\%Mo] - 0.0005[\%Mn]).[\%Cr] + (0.0003[\%Mo] + 0.0007[\%Mn]).[\%Ni]\} + 0.13[\%C] \\ & + 0.06[\%Si] + 0.046[\%P] + 0.007[\%S] + 0.01[\%Al] - 0.9[\%Ti] - 0.1[\%V] - 0.003[\%W] - \\ & 0.12[\%O] \end{aligned} \quad 2.19$$

การผสมแก๊สไนโตรเจนในแก๊สปกคลุมอาร์กอนทำให้มีการละลายของไนโตรเจนเข้าไปในน้ำโลหะ ซึ่งจะส่งผลต่อเหล็กกล้าไร้สนิมดังการศึกษาของ R.K. Okagawa, R.D. Dixon และ D.L. Olson [8] ศึกษาอิทธิพลของแก๊สไนโตรเจนที่ผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอนต่อโครงสร้างจุลภาคของเนื้อโลหะรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก เกรด 304L เมื่อผสมแก๊สไนโตรเจนในแก๊สปกคลุมอาร์กอนจาก 0 ถึง 5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ในการเชื่อมทิก พบว่าการผสมแก๊สไนโตรเจนในแก๊สปกคลุมอาร์กอนทำให้ปริมาณแก๊สไนโตรเจนในเนื้อโลหะรอยเชื่อมเพิ่มขึ้นส่งผลให้ปริมาณเดลต้าเฟสไรต์ในบริเวณนั้นลดลง

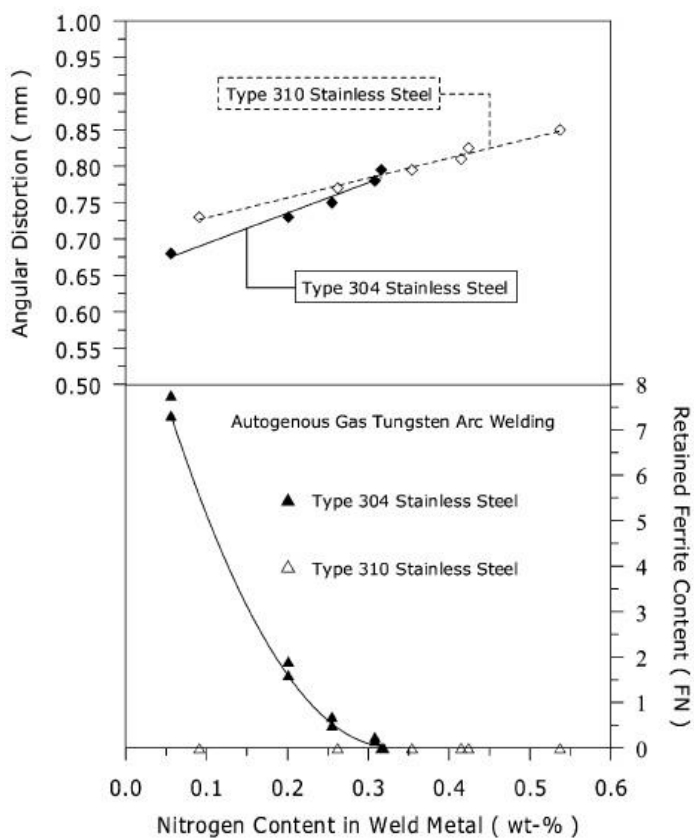
K.H. Tseng และ C.P. Chou [6] ศึกษาผลของแก๊สไนโตรเจนที่ผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอนในการเชื่อมทิกของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 และ 301 หนา 8 มิลลิเมตร เมื่อผสมแก๊ส

ไนโตรเจน 0, 2.5, 5, 7.5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร พบว่าเมื่อผสมแก๊สไนโตรเจนในแก๊สปกคลุมอาร์กอนเพิ่มขึ้นทำให้ศักย์การอาร์กเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ปริมาณความร้อนในระหว่างการเชื่อมเพิ่ม ดังแสดงในรูปที่ 2.9 ก. ซึ่งสอดคล้องกับผลของอุณหภูมิสูงสุดในขณะเชื่อมที่วัดได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.9 ข. และทำให้ปริมาณไนโตรเจนในเนื้อโลหะรอยเชื่อมเพิ่มขึ้น โดยที่เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติกเกรด 310 ไนโตรเจนอิมิตัวที่ 0.51 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ขณะที่เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติกเกรด 304 ไนโตรเจนอิมิตัวที่ 0.31 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติกเกรด 310 มีปริมาณความร้อนในระหว่างการเชื่อมที่สูงกว่าเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติกเกรด 304 ทำให้ความสามารถในการละลายของไนโตรเจนเพิ่มขึ้น และพบรูพรุนเมื่อปริมาณไนโตรเจนในเนื้อโลหะรอยเชื่อมเพิ่มขึ้นใกล้ขีดจำกัดการละลายสูงสุด โดยเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติกเกรด 304 พบรูพรุนเมื่อผสมแก๊สไนโตรเจนในแก๊สปกคลุมอาร์กอน 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร

นอกจากนี้ปริมาณไนโตรเจนในเนื้อโลหะรอยเชื่อมเพิ่มขึ้นจะทำให้การบิดเบี้ยวเชิงมุม (Angular distortion) เพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณความร้อนในระหว่างการเชื่อมที่เพิ่มขึ้นจากปริมาณแก๊สไนโตรเจนในแก๊สปกคลุมอาร์กอนที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความเค้นจากความร้อนเนื่องจากการเชื่อม (Welding thermal stress) เพิ่มขึ้น โดยปริมาณเคลดดำเฟร์ไรต์ที่เพิ่มขึ้นสามารถลดแนวโน้มการเกิดการบิดเบี้ยวเชิงมุมเนื่องจากโครงสร้างเคลดดำเฟร์ไรต์มีความเหนียวที่อุณหภูมิสูง (High temperature ductility) มากกว่าโครงสร้างออสเทนิต และโครงสร้างเฟร์ไรต์ มีสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน (Thermal expansion coefficient) น้อยกว่าโครงสร้างออสเทนิต ดังแสดงในรูปที่ 2.10 และปริมาณแก๊สไนโตรเจนในแก๊สปกคลุมอาร์กอนเพิ่มขึ้นทำให้ความแข็งของเนื้อโลหะรอยเชื่อมเพิ่มขึ้น เนื่องจากไนโตรเจนที่เข้าไปในเนื้อโลหะรอยเชื่อมเกิดเป็นสารละลายของแข็งแบบแทรกที่ (interstitial solid solution strengthening) และการตกตะกอน (precipitation)

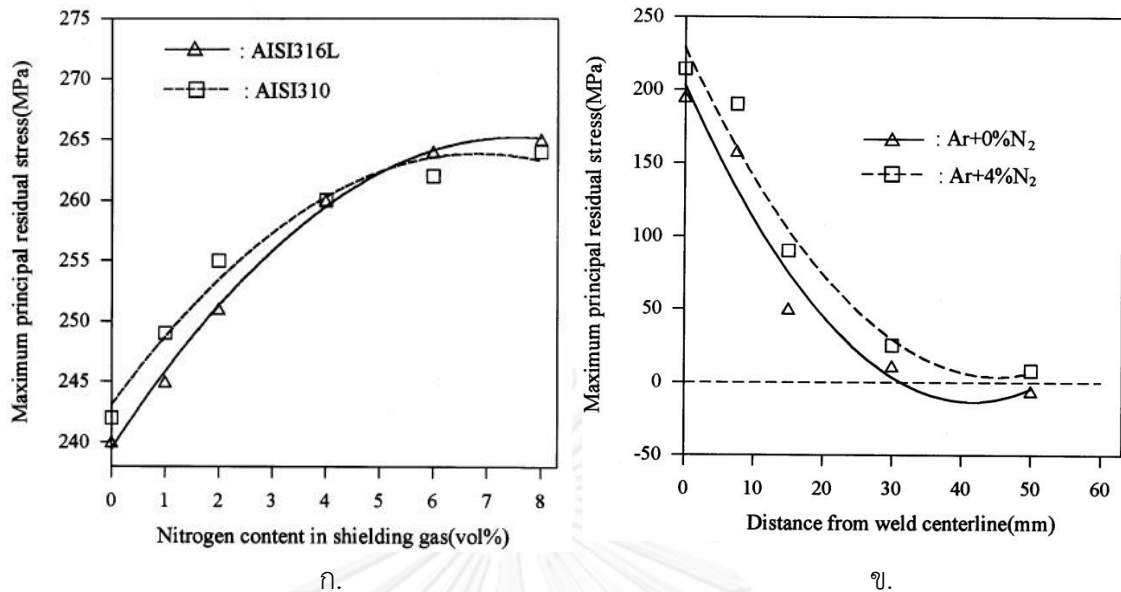


รูปที่ 2.9 ผลของแก๊สไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอนต่อ ก.ปริมาณความร้อนในระหว่างการเชื่อม ข.อุณหภูมิสูงสุดในขณะเชื่อม [6]



รูปที่ 2.10 ผลของปริมาณไนโตรเจนในเนื้อโลหะรอยเชื่อมต่อปริมาณเฟรไรต์ตกค้างและการบิดเบี้ยวเชิงมุม [6]

V. Shankar และคณะ [31] ศึกษาผลของไนโตรเจนต่อความสามารถในการเชื่อมของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316L โดยการเชื่อมทิก พบว่าผลของไนโตรเจนต่อความสามารถในการเชื่อมจะขึ้นอยู่กับระดับของสารมลทิน โดยเนื้อโลหะรอยเชื่อมที่มีปริมาณซิลเฟอร์อยู่ถึง 0.012 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ปริมาณไนโตรเจนที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลเพิ่มการเกิดรอยแตกขณะร้อน แต่ถ้าเนื้อโลหะรอยเชื่อมมีปริมาณซิลเฟอร์อยู่ 0.001 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ผลของปริมาณไนโตรเจนแทบจะไม่ส่งผลหรือไม่ส่งผลต่อการเกิดรอยแตกขณะร้อนเลย



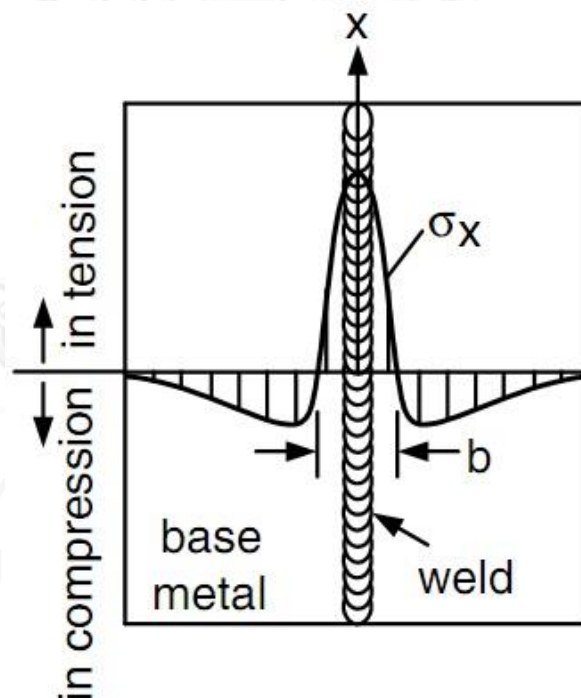
รูปที่ 2.11 ผลของความเค้นตกค้าง ก. เมื่อผสมแก๊สไนโตรเจนในแก๊สปกคลุมอาร์กอน ข. เมื่อระยะห่างจากศูนย์กลางแนวเชื่อมของเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316L เพิ่มขึ้น [5]

M. Coetzee และ P.G.H. Pistorius [7] ศึกษาความไวในการเกิดรอยแตกขณะร้อน การตกตะกอนของโครเมียมคาร์ไบด์ (Sensitization) และการกัดกร่อนแบบรูเข็ม (pitting corrosion) ของเหล็กกล้าไร้สนิมโครเมียม-แมงกานีสที่มีนิกเกิลต่ำ เมื่อมีการเติมไนโตรเจนตั้งแต่ 0.001 ถึง 0.27 เปอร์เซ็นต์ใน 17โครเมียม-7แมงกานีส-4นิกเกิล-0.5คอปเปอร์ และเมื่อมีการเติมคอปเปอร์ตั้งแต่ 0.01 ถึง 3.11 เปอร์เซ็นต์ใน 17โครเมียม-7แมงกานีส-2นิกเกิล-0.1ไนโตรเจน พบว่า เหล็กกล้าไร้สนิมโครเมียม-แมงกานีสทั้งที่เติมไนโตรเจนและคอปเปอร์การแข็งตัวเริ่มจากเตลต้าเฟร์ไรต์ เย็นตัวลงบางส่วนเปลี่ยนเป็นออสเทนไนต์และยังคงเหลือเตลต้าเฟร์ไรต์อยู่ ดังนั้นการเติมไนโตรเจนและคอปเปอร์จะไม่ส่งผลต่อความไวในการเกิดรอยแตกขณะร้อน และเมื่อปริมาณไนโตรเจนเพิ่มขึ้นจะทำให้ปริมาณเตลต้าเฟร์ไรต์ในเนื้อโลหะรอยเชื่อมน้อยลง โดยปริมาณไนโตรเจนและคอปเปอร์ที่เพิ่มขึ้นไม่ส่งผลกระทบต่อการตกตะกอนของโครเมียมคาร์ไบด์ในการเชื่อม และยังเพิ่มความต้านทานต่อการกัดกร่อนแบบรูเข็มโดยที่ 0.27 เปอร์เซ็นต์ไนโตรเจนจะให้ความต้านทานการกัดกร่อนแบบรูเข็มพอกๆ กับเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนติก เกรด 304 ที่ 0.19 และ 0.27 เปอร์เซ็นต์ไนโตรเจนจะมีโครงสร้างจุลภาคเหมือนกับเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนติก เกรด 304

2.5 ผลของการเชื่อมต่อความเค้นตกค้าง

ความเค้นตกค้างคือ ความเค้นที่คงอยู่ในวัสดุแม้ไม่มีแรงจากภายนอกมากระทำ ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้จากหลายสาเหตุ หนึ่งในนั้นคือการเชื่อม เนื่องจากการเชื่อมจะทำให้วัสดุเกิดการหลอมละลายเฉพาะบริเวณเป็นสาเหตุให้วัสดุขยายตัวในวงจำกัด เมื่อเนื้อโลหะรอยเชื่อมเกิดเย็นตัว บางพื้นที่เย็นก่อนและเกิดการหดตัวก่อนส่วนอื่น การขยายตัวและหดตัวไม่สมดุลกันในบริเวณจำกัดนี้ส่งผลให้เกิดความเค้นตกค้างขึ้นภายในวัสดุที่ผ่านการเชื่อม โดยปัจจัยหลักที่ส่งผลก่อให้เกิดความเค้นตกค้างขึ้นกับวัสดุที่ผ่านการเชื่อม [32] คือ

- ความเค้นตกค้างที่เกิดขึ้นกับวัสดุก่อนการเชื่อมที่เกิดจากกระบวนการผลิต
 - สมบัติของวัสดุที่รวมถึง ส่วนผสมทางเคมี โครงสร้างจุลภาค และสมบัติทางกล
 - รูปทรงของวัสดุที่นำมาเชื่อม
 - การตั้งของวัสดุที่จะเชื่อม เช่นการจับยึดจากภายนอก องค์ประกอบอื่นของโครงสร้างที่อยู่ติดกัน
 - กระบวนการเชื่อมที่รวมถึงตัวแปรในการเชื่อม สภาวะในการเชื่อม และจำนวนในการเชื่อมซ้ำ
- เมื่อพิจารณาความเค้นตกค้างที่เกิดขึ้นบริเวณเนื้อโลหะรอยเชื่อมจะพบว่าในระหว่างการเชื่อมวัสดุจะได้รับความร้อนเกิดการหลอมละลายในบริเวณจำกัด ทำให้เกิดการขยายตัวไม่อิสระส่งผลเกิดความเค้นแรงอัดที่เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ และในระหว่างการเย็นตัวจะเกิดการหดตัวที่ไม่อิสระทำให้ความเค้นแรงอัดเปลี่ยนเป็นความเค้นแรงดึงที่เพิ่มขึ้นกับอุณหภูมิที่ลดลง ภายหลังการเย็นตัวจะพบว่าที่บริเวณเนื้อโลหะรอยเชื่อมจะมีความเค้นตกค้างแรงดึง โดยสูงที่สุดที่บริเวณกลางแนวเชื่อมแล้วลดลงเมื่อระยะห่างจากกลางแนวเชื่อมเพิ่มขึ้นจนกลายเป็นความเค้นตกค้างแรงอัด [27] ดังแสดงในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 การกระจายตัวของความเค้นตกค้าง [27]

จากงานวิจัยข้างต้นเห็นได้ว่าปริมาณความร้อนในระหว่างการเชื่อม และการผสมไนโตรเจนในแก๊สปกคลุมอาร์กอนจะส่งผลต่อโครงสร้างจุลภาค และสมบัติของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกที่จะศึกษาอิทธิพลของปริมาณความร้อนในระหว่างการเชื่อม และการผสมไนโตรเจนในแก๊สปกคลุมอาร์กอนของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติกเกรดใหม่ เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานในการช่วยพิจารณาเลือกใช้เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก

บทที่ 3 ระเบียบวิธีการวิจัย

3.1 อุปกรณ์และสารเคมี

3.1.1 อุปกรณ์

1. เครื่องเชื่อมทิก
2. เครื่องเชื่อมสปอต
3. ชุดจับยึดชิ้นงาน
4. แก๊สอาร์กอน
5. แก๊สอาร์กอนผสมไนโตรเจน 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร
6. เครื่องบันทึกข้อมูล (Data logger)
7. เทอร์โมคัปเปิล ประเภท เค
8. เครื่องวัดความเค้นตึงด้วยรังสีเอ็กซ์ (X-ray Stress Analyzer) รุ่น Xstress 3000
9. กล้องดิจิทัลความเร็วสูง
10. เครื่องทดสอบแรงดึง
11. กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscope: OM)
12. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบกวาด (Scanning Electron Microscope) รุ่น S-3400N
13. เครื่อง Feritscope รุ่น FMP 30
14. หม้อแปลงไฟ

3.1.2 สารเคมี

1. คอปเปอร์ซัลเฟต (Copper (II) sulfate)
2. กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid)
3. กรดออกซาลิก (Oxalic acid)

3.2 การเตรียมชิ้นงาน

งานวิจัยนี้จะใช้ชิ้นงานทดลองเป็นแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมทั้งหมด 3 เกรด ด้วยกันคือ เหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 304, 202 และ D7 ขนาดกว้าง 100 ยาว 120 หนา 2 มิลลิเมตร

3.2.1 ตรวจสอบส่วนผสมเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิมทั้ง 3 เกรดด้วยเครื่อง Spark Optical Emission Spectroscopy ส่วนผสมแสดงในตารางที่ 3.1

3.2.2 นำแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติกทั้ง 3 เกรด มาเชื่อมติดกับแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมขนาดกว้าง 30 ยาว 100 หนา 2 มิลลิเมตร ที่ด้านข้างทั้งสองด้วยเครื่องเชื่อมทิก เพื่อเป็นจุดเริ่มและหยุดการเชื่อม

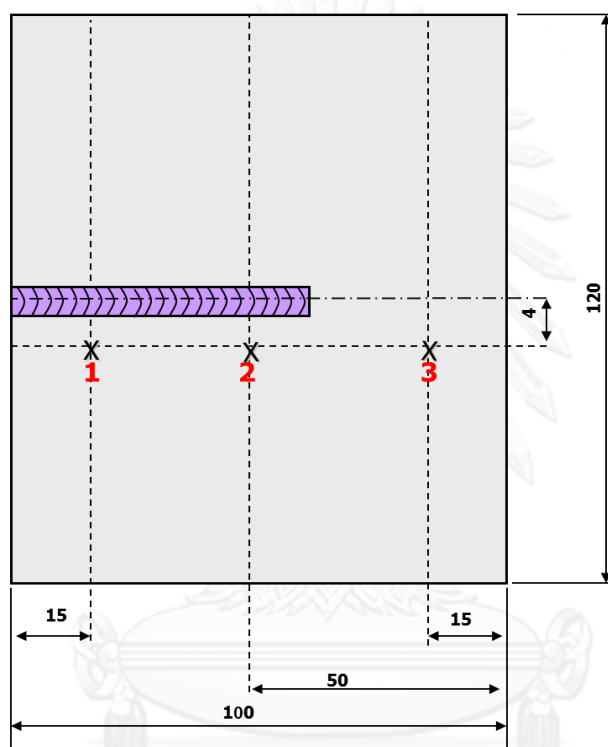
3.2.3 ทำความสะอาดชิ้นงานให้ปราศจากสิ่งสกปรกและคราบมัน โดยใช้อะซิโตนเช็ดทำความสะอาดแล้วทิ้งไว้ให้แห้ง

3.2.4 ติดตั้งเทอร์โมคัปเปิล ประเภท เค ที่ตำแหน่งห่างจากศูนย์กลางแนวเชื่อม 4 มิลลิเมตร ห่างจากขอบชิ้นงานทดลองเข้าไป 15, 50 และ 85 มิลลิเมตร ด้วยเครื่องเชื่อมสปอต ดังแสดงในรูปที่

3.1 ปลายอีกข้างหนึ่งของเทอร์โมคัปเปิลนำไปเสียบติดกับเครื่องบันทึกข้อมูล

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมทางเคมีของชิ้นงานทดลอง

ชิ้นงาน ทดลอง	ส่วนผสมทางเคมี (เปอร์เซ็นต์ โดย น้ำหนัก)											
	Cr	Ni	Mn	Cu	C	S	P	Mo	Si	Nb	N	Fe
304	17.82	7.98	1.05	0.18	0.0512	0.0003	0.0007	0.14	0.4	0.01	0.039	Bal.
202	14.91	3.88	7.96	1.32	0.038	0.0004	0.0007	0.15	0.47	0.01	0.038	Bal.
D7	17.3	1.63	5.05	2.38	0.067	0.0004	0.0008	0.12	0.67	0.05	0.174	Bal.



รูปที่ 3.1 ตำแหน่งติดตั้งเทอร์โมคัปเปิล

3.3 การเชื่อมทิกพัลส์

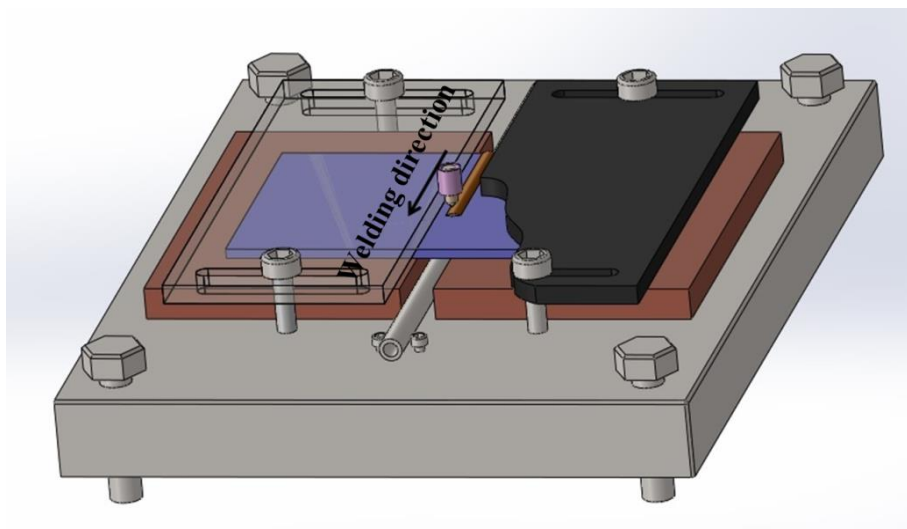
3.3.1 นำชิ้นงานทดลองที่เตรียมเสร็จเรียบร้อยแล้วมาติดตั้งกับชุดจับยึดที่มีท่อป้อนแก๊สปกคลุมด้านล่างของชิ้นงานทดลอง โดยใช้แรงในการยึดสกรู 2 นิวตัน ดังแสดงในรูปที่ 3.2 และปรับตั้งแนวที่จะเชื่อมของชิ้นงานทดลองให้ตรงกับปลายอิเล็กโทรดตลอดเวลา

3.3.2 เตรียมความพร้อมของอุปกรณ์ตั้งพารามิเตอร์ในการเชื่อมทิกพัลส์ ดังแสดงในตารางที่ 3.2

3.3.3 บันทึกภาพด้วยกล้องดิจิทัลความเร็วสูงที่อัตรา 250 ภาพต่อวินาที

3.3.4 ทำการเชื่อมทิกพัลส์ตามตัวแปรการทดลองในตารางที่ 3.3 พร้อมกับเริ่มบันทึกอุณหภูมิในระหว่างการเชื่อม

3.3.5 รอจนชิ้นงานทดลองเย็นจึงเลิกบันทึกอุณหภูมิ และนำชิ้นงานออกจากชุดจับยึด



รูปที่ 3.2 การติดตั้งชิ้นงานกับชุดจับยึด

ตารางที่ 3.2 ตัวแปรคงที่สำหรับการเชื่อมทิกพัลส์

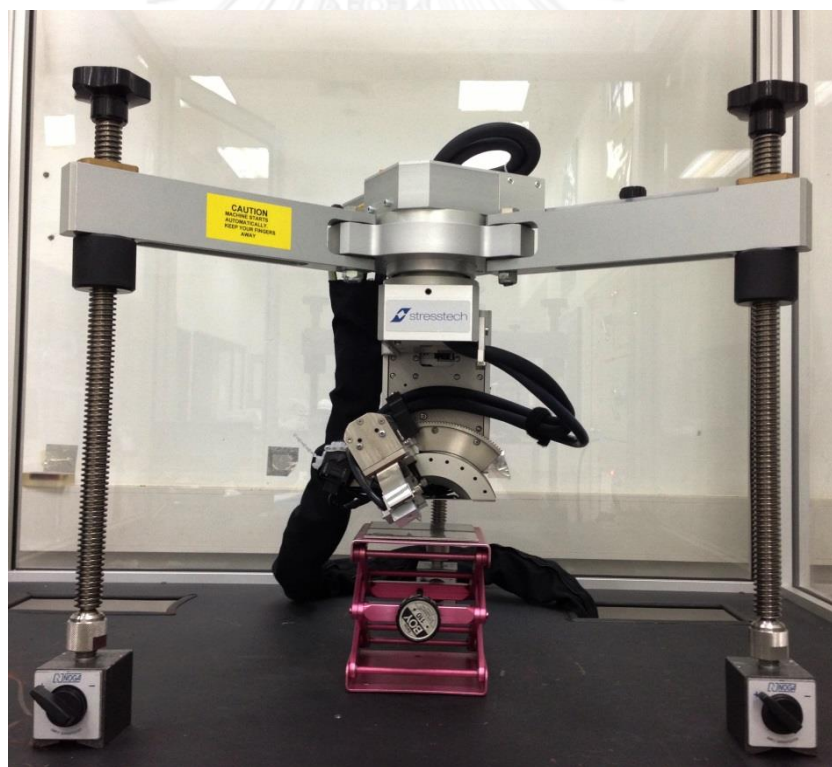
ตัวแปรคงที่	
ความต่างศักย์	22 โวลต์
กระแสไฟฟ้าเบส	60 แอมแปร์
%On Time	65 เปอร์เซ็นต์
ความถี่พัลส์	5 เฮิร์ตซ์
ระยะอาร์ก	2 มิลลิเมตร
อิเล็กโทรด	ทั้งสแตนเลสทอเรียบ 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เส้นผ่านศูนย์กลาง 2.4 มิลลิเมตร มุมปลาย 60 องศา
อัตราการไหลแก๊สปกคลุมด้านบน	11 ลิตรต่อนาที
อัตราการไหลแก๊สปกคลุมด้านล่าง	11 ลิตรต่อนาที
Nozzle	เซรามิก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 11 มิลลิเมตร
ระยะยื่นของอิเล็กโทรดจาก Nozzle	4 มิลลิเมตร
หัว Torch ทำมุมกับชิ้นงานทดลอง	90 องศา
ความเร็วเชื่อม	5 มิลลิเมตรต่อวินาที

ตารางที่ 3.3 ตัวแปรทดลองสำหรับการเชื่อมทิกพัลส์

ตัวแปรทดลอง	
วัสดุ	เหล็กกล้าไร้สนิม 304, 202 และ D7
กระแสไฟฟ้าพัลส์	130, 160 แอมแปร์
ปริมาณแก๊สไนโตรเจนที่ผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอน	0, 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร

3.4 การทดสอบความเค้นตกค้าง

นำชิ้นงานทดลองที่ผ่านการเชื่อมมาวัดปริมาณความเค้นตกค้างด้วยเครื่องวัดความเค้นตกค้างด้วยรังสีเอ็กซ์ ดังแสดงในรูปที่ 3.3 ที่ระยะห่างจากกลางแนวเชื่อม 5, 10, 15 และ 20 มิลลิเมตร โดยแต่ละตำแหน่งจะยิงรังสีเอ็กซ์ที่มุม -21.8° , -31.7° , 40° , 21.8° , 31.7° และ 40° ตามลำดับ

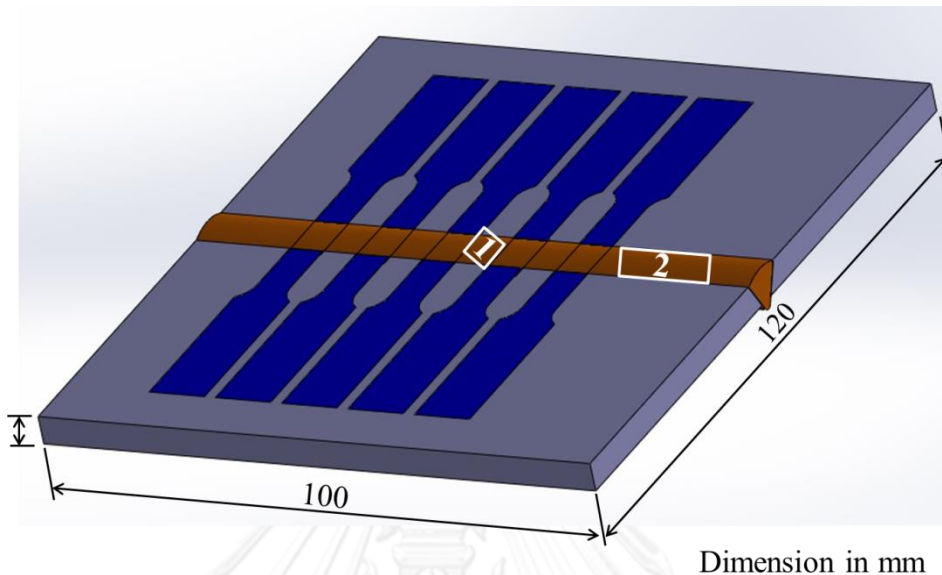


รูปที่ 3.3 เครื่องวัดความเค้นตกค้างด้วยรังสีเอ็กซ์

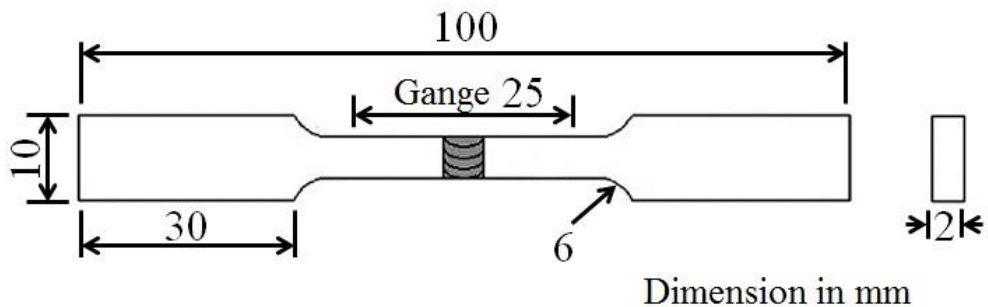
3.5 การทดสอบแรงดึง

นำชิ้นงานทดลองที่ผ่านการเชื่อมมาตัดด้วยเครื่อง Wire Cut ตามมาตรฐาน ASTM E8 [33] ตัวแปรละ 5 ชิ้น ดังแสดงในรูปที่ 3.4 และ 3.5 นำไปทดสอบแรงดึงที่อัตรา 10 มิลลิเมตรต่อนาที

แล้วนำชิ้นงานภายหลังการทดสอบแรงดึงมาตรวจสอบพื้นผิวรอยแตกด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบกวาดที่กำลังขยาย 2000 เท่า



รูปที่ 3.4 ชิ้นงานทดลองภายหลังการเชื่อม



รูปที่ 3.5 ชิ้นงานทดลองความต้านทานแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM E8

3.6 การตรวจสอบรอยเชื่อม

3.6.1 การตรวจสอบโครงสร้างมหภาคของเนื้อโลหะรอยเชื่อม

นำชิ้นงานทดลองที่ผ่านการเชื่อมเรียบร้อยแล้วตำแหน่งที่ 1 ในรูปที่ 3.4 มาตัดด้วยเครื่องตัดไฟเบอร์แบบมีน้ำฉีดพ่นเพื่อไม่ให้เกิดความร้อนในขณะตัดชิ้นงานทดลอง หลังจากนั้นนำชิ้นงานที่ตัดเรียบร้อยแล้วมาขึ้นรูปสำหรับขัดด้วยเรซิน ขัดชิ้นงานด้วยกระดาษทรายเบอร์ 80 ถึง 1000 แล้วกัดด้วยสารละลาย คอปเปอร์ซัลเฟต 20 กรัม กรดไฮโดรคลอริก 100 มิลลิลิตร และน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร เป็นเวลา 30 นาที เพื่อนำไปดูรูปร่างของรอยเชื่อม และวัดพื้นที่เนื้อโลหะรอยเชื่อมด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่กำลังขยาย 10 เท่า

3.6.2 การตรวจโครงสร้างจุลภาคของเนื้อโลหะรอยเชื่อม

นำชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมมาวัดปริมาณเคลือบเฟอโรไรต์ในเนื้อโลหะรอยเชื่อม ด้วยเครื่อง Feritscope แล้วนำชิ้นงานทดลองโลหะพื้นและชิ้นงานทดลองที่วัดพื้นที่เนื้อโลหะรอยเชื่อมเรียบร้อยแล้ว นำมาขัดกับกระดาษทรายเบอร์ 80 ถึง 4000 ตามด้วยขัดผงเพชรขนาด 9, 6, 3 และ 1 ไมครอน ตามลำดับ จึงนำไปกัดกรดด้วยไฟฟ้า (Electro-etching) ในสารละลายที่ผสมกรดออกซาลิก 10 กรัม กับน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร ความต่างศักย์ 6 โวลต์ เป็นเวลา 1 นาที [34, 35] หลังจากนั้นนำไปตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่กำลังขยาย 200 เท่า

3.6.3 การตรวจปริมาณไนโตรเจนในเนื้อโลหะรอยเชื่อม

นำชิ้นงานทดลองที่ผ่านการเชื่อมตำแหน่งที่ 2 ในรูปที่ 3.4 มาใส่เนื้อโลหะรอยเชื่อมในทิศทางตามรอยเชื่อมให้ได้น้ำหนักประมาณ 1 กรัม ด้วยเครื่องกัดแล้วนำไปวิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจนด้วยเครื่อง Oxygen-Nitrogen Analyzer



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทที่ 4

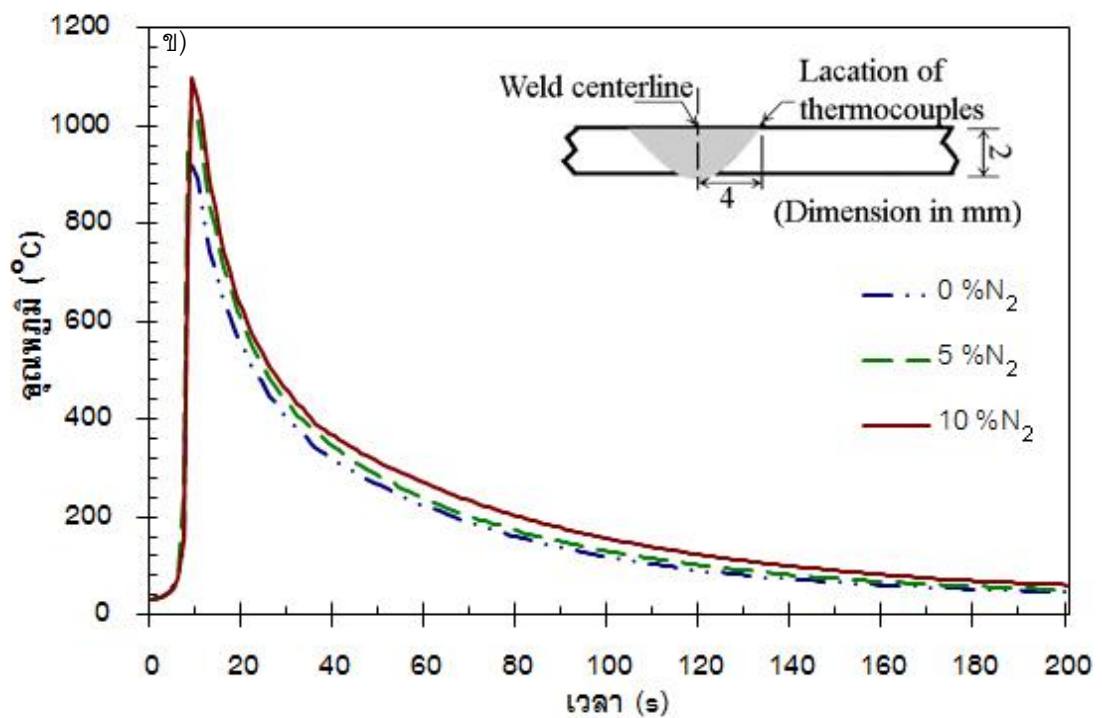
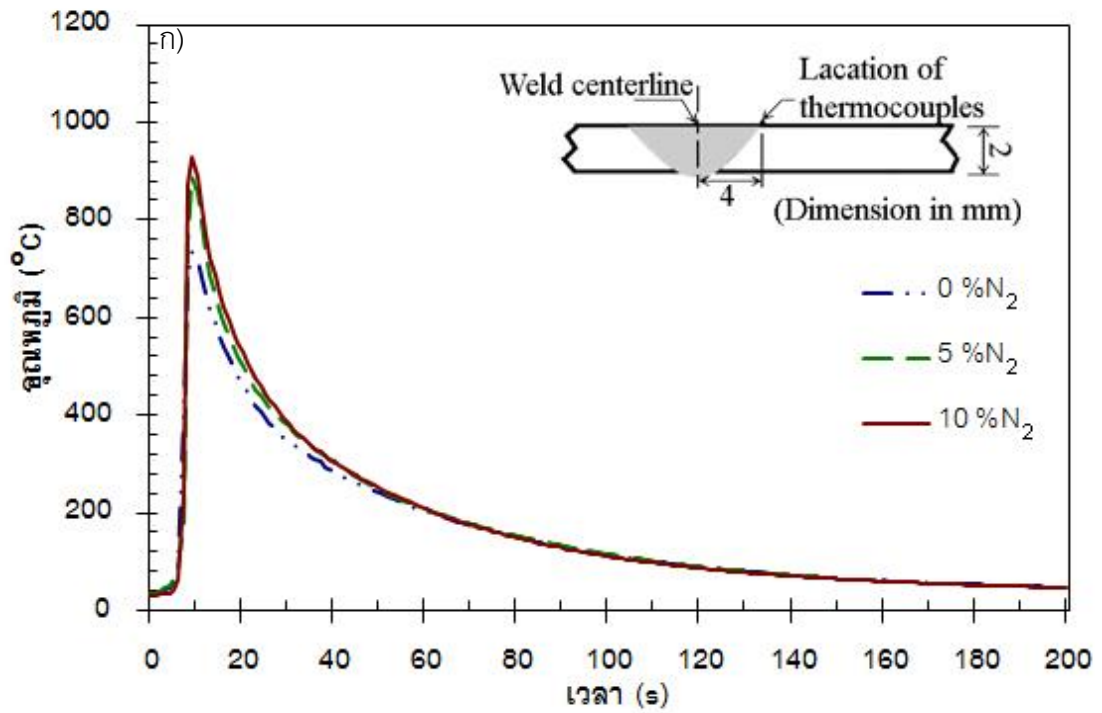
ผลการทดลองและการอภิปราย

4.1 ผลของกระแสไฟฟ้าเชื่อมพัลส์สูงสุด และส่วนผสมของแก๊สไนโตรเจนในแก๊สปกคลุมอาร์กอน ต่อวัฏจักรความร้อน

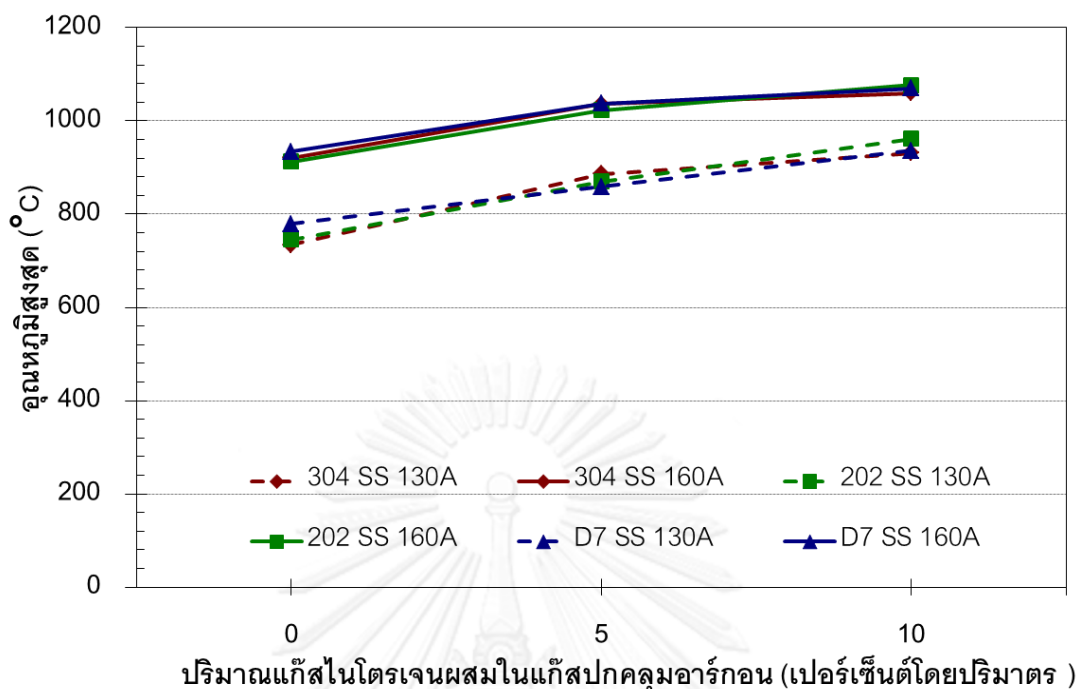
ค่ากระแสไฟฟ้าเชื่อมพัลส์สูงสุดเป็นกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการเชื่อมทิกพัลส์ในช่วงของเวลาพัลส์ที่ทำให้เกิดการหลอมละลายของเนื้อโลหะ ในการทดลองนี้จึงเลือกที่จะศึกษาความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้าเชื่อมพัลส์สูงสุดกับวัฏจักรความร้อน โดยเลือกใช้กระแสไฟฟ้าเชื่อมพัลส์สูงสุดสองค่าคือ 130 และ 160 แอมแปร์ เมื่อเชื่อมแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก เกรด 304, 202 และ D7 หนา 2 มิลลิเมตร ด้วยแก๊สไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอน 0, 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร โดยติดเทอร์โมคัปเปิลวัดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ รูปที่ 4.1 แสดงวัฏจักรความร้อนในการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก เกรด 304

เมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิสูงสุด พบว่าเมื่อเชื่อมทิกพัลส์ด้วยกระแสไฟฟ้าเชื่อมพัลส์สูงสุด 160 แอมแปร์ ค่าอุณหภูมิสูงสุดสูงกว่าการเชื่อมที่ใช้กระแสไฟฟ้าเชื่อมพัลส์สูงสุด 130 แอมแปร์ และเมื่อปริมาณไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอนเพิ่มสูงขึ้นค่าอุณหภูมิสูงสุดมีค่าสูงขึ้น เป็นเช่นนี้เหมือนกันทั้งเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก เกรด 304, 202 และ D7 ดังแสดงในรูปที่ 4.2

เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้าเชื่อมพัลส์สูงสุดที่ปริมาณแก๊สไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอน 0 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร พบว่าการเพิ่มกระแสไฟฟ้าเชื่อมพัลส์สูงสุด ทำให้อุณหภูมิสูงสุดเพิ่มขึ้น กล่าวคือการเพิ่มกระแสไฟฟ้าเชื่อมพัลส์สูงสุดจาก 130 แอมแปร์ เป็น 160 แอมแปร์ ทำให้อุณหภูมิสูงสุดของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก เกรด 304, 202 และ D7 เพิ่มขึ้นจาก 734.6 เป็น 921.3, 745.8 เป็น 912.9 และ 779.1 เป็น 934.6 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เนื่องจากการเพิ่มกระแสไฟฟ้าเชื่อมพัลส์สูงสุดทำให้ปริมาณความร้อนในระหว่างการเชื่อมเพิ่มขึ้นตามสมการที่ 2.13



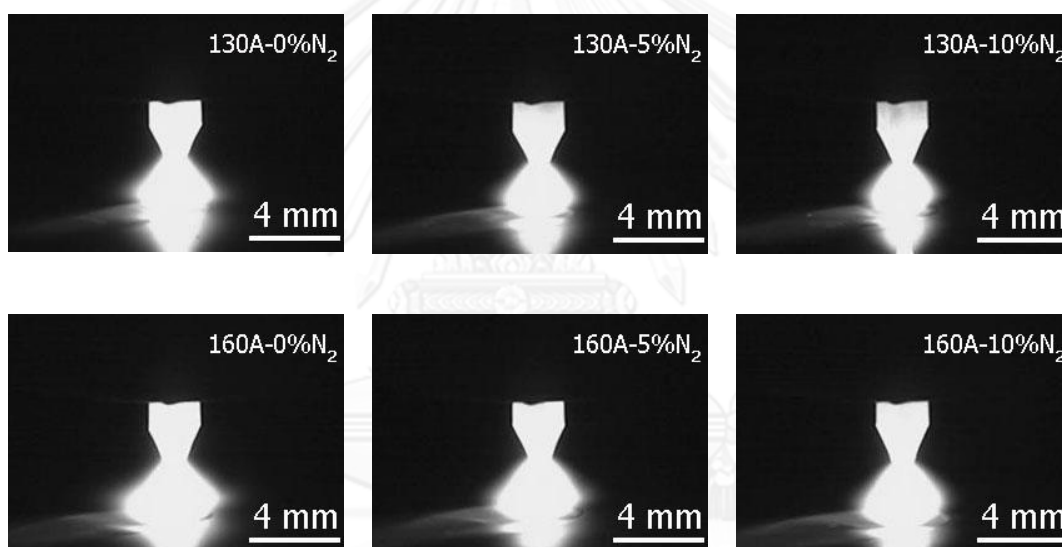
รูปที่ 4.1 ผลของปริมาณแก๊สไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอน ต่อวัฏจักรความร้อนในการเชื่อมแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก เกรด 304 หนา 2 มิลลิเมตร ที่กระแสไฟฟ้าเชื่อมพัลส์สูงสุด ก. 130 แอมแปร์ ข. 160 แอมแปร์



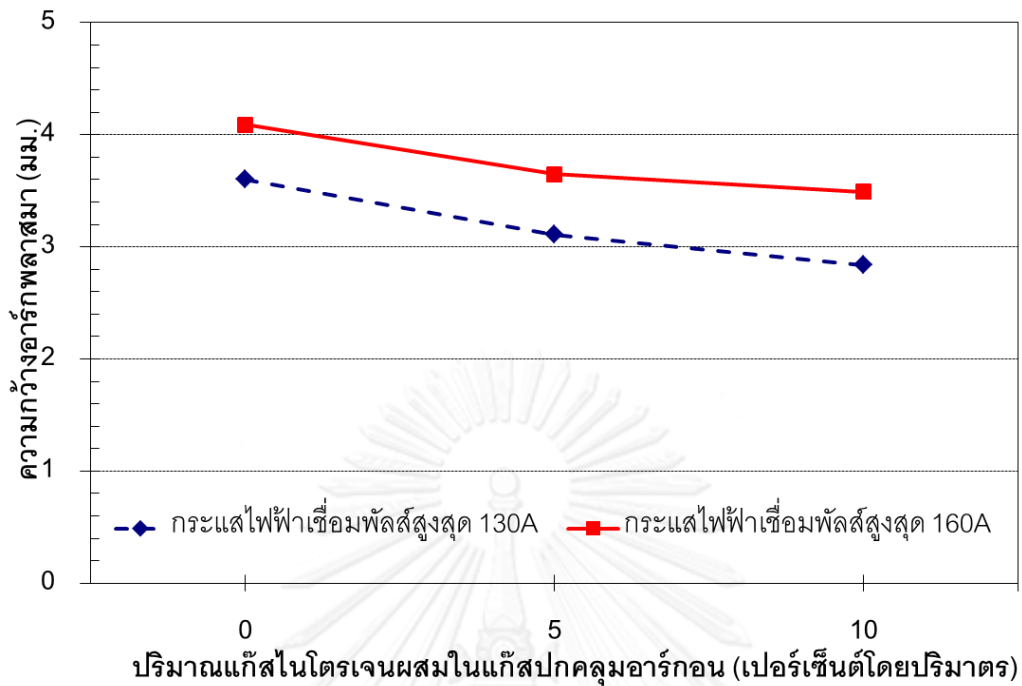
รูปที่ 4.2 ผลของปริมาณแก๊สไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอน และกระแสไฟฟ้าเชื่อมพัลส์สูงสุด ต่ออุณหภูมิสูงสุด

เมื่อพิจารณาผลของการเพิ่มปริมาณแก๊สไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอน พบว่าการเพิ่มปริมาณแก๊สไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอน ทำให้อุณหภูมิสูงสุดเพิ่มขึ้น กล่าวคือเมื่อใช้กระแสไฟฟ้าเชื่อมพัลส์สูงสุด 130 แอมแปร์ เพิ่มปริมาณแก๊สไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอน จาก 0 เป็น 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ในการเชื่อมแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก เกรด 304, 202 และ D7 หนา 2 มิลลิเมตร อุณหภูมิสูงสุดเพิ่มขึ้นจาก 734.6 เป็น 930.8, 745.8 เป็น 961.8 และ 779.1 เป็น 935.7 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และเมื่อใช้กระแสไฟฟ้าเชื่อมพัลส์สูงสุด 160 แอมแปร์ เพิ่มปริมาณแก๊สไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอนจาก 0 เป็น 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ในการเชื่อมแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก เกรด 304, 202 และ D7 หนา 2 มิลลิเมตร อุณหภูมิสูงสุดเพิ่มขึ้นจาก 921.3 เป็น 1097.7, 912.9 เป็น 1077.3 และ 934.6 เป็น 1069.6 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เนื่องจากแก๊สไนโตรเจนมีค่าความจุความร้อนจำเพาะสูงกว่าของแก๊สอาร์กอน (ตามที่แสดงในภาคผนวก ก) ทำให้อาร์กพลาสมาแคบลง ความหนาแน่นกระแสจะเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความต่างศักย์การอาร์กเพิ่มขึ้น [36] ดังในรูปที่ 4.3 แสดงลักษณะอาร์กพลาสมาของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก เกรด 304 และรูปที่ 4.4 แสดงขนาดความกว้างของอาร์กพลาสมา จากรูปพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณแก๊สไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอนขนาดความกว้างของอาร์กพลาสมาลดลง และเมื่อพิจารณาความต่างศักย์การอาร์ก ดังแสดงในรูปที่ 4.5 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณแก๊สไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอน ทำให้ความต่างศักย์การอาร์กเพิ่มขึ้น ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับผลการทดลองของ Lu. Shanping และ คณะ [37] ได้รายงานผลการทดลองว่า เมื่อเชื่อมทิกด้วยกระแสไฟฟ้า 100 แอมแปร์ ในแก๊สปกคลุมอาร์กอนบริสุทธิ์ กับในแก๊สปกคลุมไนโตรเจนบริสุทธิ์ ความต่างศักย์การอาร์กเพิ่มจาก 13.2 เป็น 15.8 โวลต์ และเมื่อเชื่อมทิกด้วยกระแสไฟฟ้า

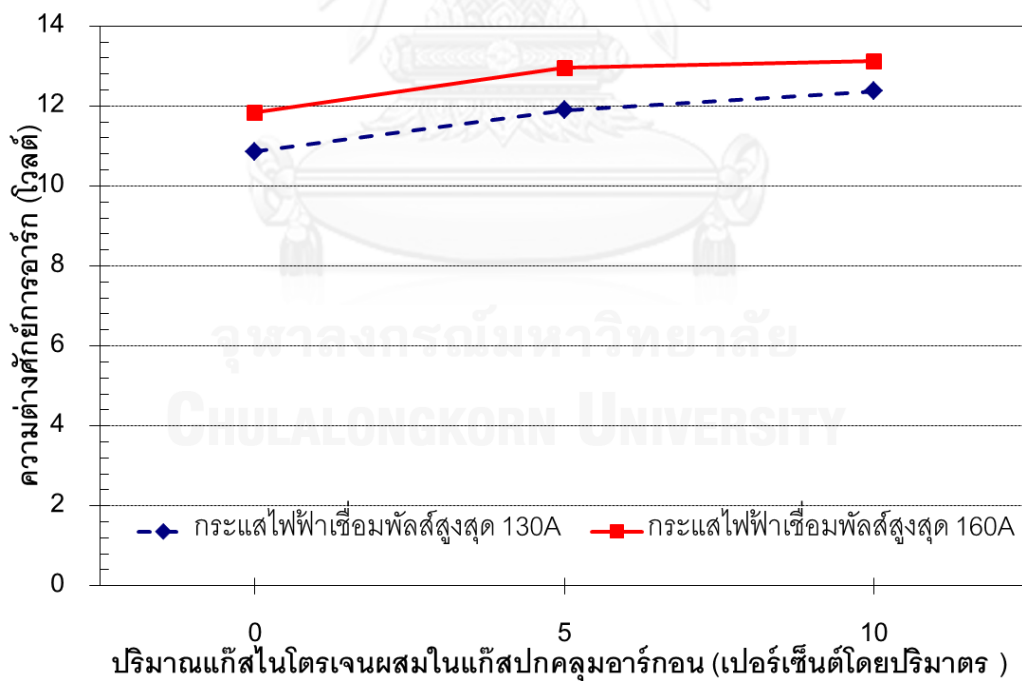
200 แอมแปร์ ในแก๊สปกคลุมอาร์กอนบริสุทธิ์ กับในแก๊สปกคลุมไนโตรเจนบริสุทธิ์ ความต่างศักย์การอาร์กเพิ่มขึ้นจาก 15.8 เป็น 21.2 โวลต์ เมื่อพิจารณาสมการที่ 2.14 ในการทดลองนี้ให้ช่วงเวลาพัลส์กระแสไฟฟ้าเบส ช่วงเวลาเบส และความเร็วเชื่อมคงที่ พบว่าปริมาณความร้อนในระหว่างการเชื่อมสามารถเพิ่มขึ้นจากการเพิ่มกระแสไฟฟ้าเชื่อมพัลส์สูงสุด และค่าความต่างศักย์การอาร์กที่เพิ่มขึ้นจากการเพิ่มปริมาณแก๊สไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอน ดังแสดงในรูปที่ 4.6 พบว่าการเพิ่มกระแสไฟฟ้าเชื่อมพัลส์สูงสุด ส่งผลเพิ่มปริมาณความร้อนในระหว่างการเชื่อมอย่างมาก และเมื่อเพิ่มปริมาณแก๊สไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอน ทำให้ปริมาณความร้อนในระหว่างการเชื่อมเพิ่มขึ้นจากผลของการเพิ่มความต่างศักย์การอาร์ก แต่ยังคงน้อยกว่าผลจากการเพิ่มกระแสไฟฟ้าเชื่อมพัลส์สูงสุด ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับผลการทดลองของ K.H. Tseng และ C.P. Chou [6] ในการเชื่อมทิกแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก เกรด 310 และ 304 ในแก๊สไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอน 0, 2.5, 5, 7.5, 10, 15 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร



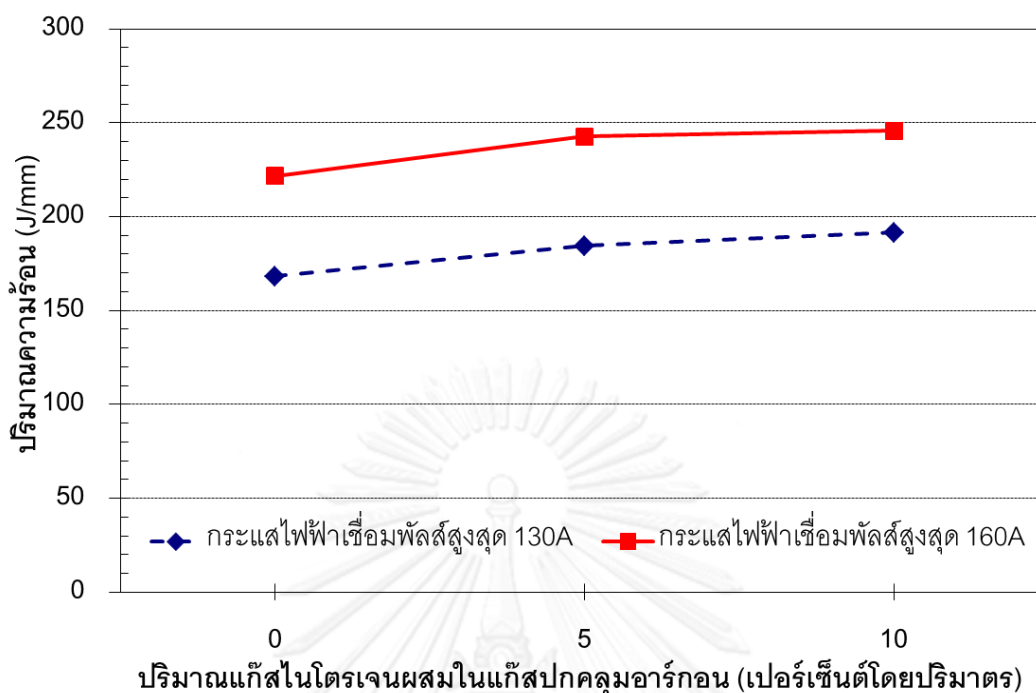
รูปที่ 4.3 ลักษณะอาร์กพลาสมาของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก เกรด 304



รูปที่ 4.4 ผลของปริมาณแก๊สไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอน และกระแสไฟฟ้าเชื่อมพัลส์สูงสุด ต่อความกว้างของอาร์กพลาสมา

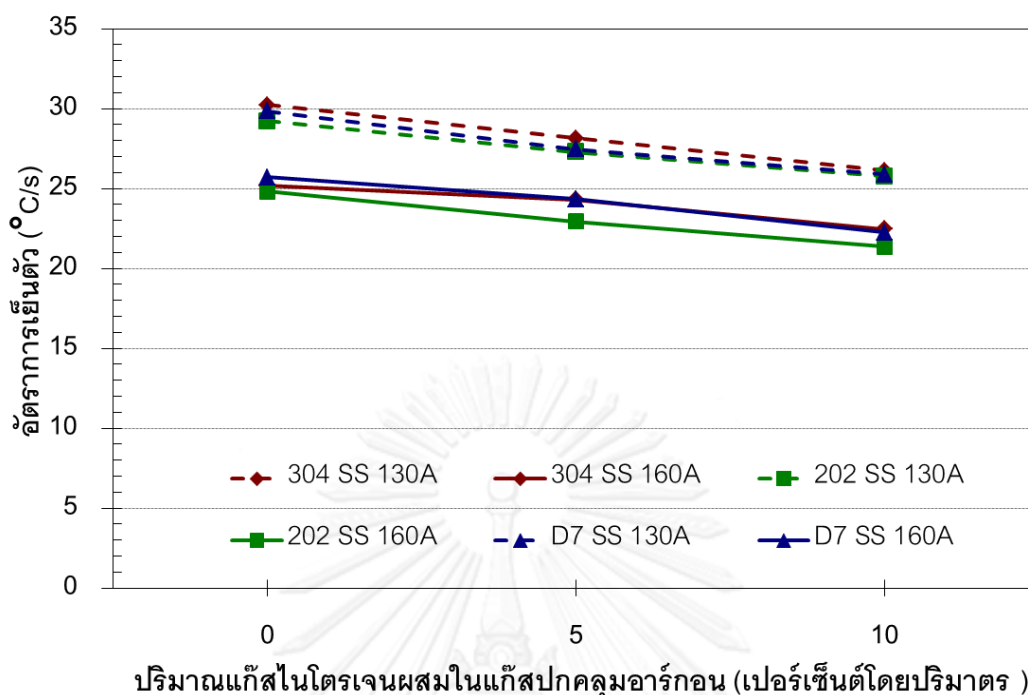


รูปที่ 4.5 ผลของปริมาณแก๊สไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอน และกระแสไฟฟ้าเชื่อมพัลส์สูงสุด ต่อความต่างศักย์การอาร์ก



รูปที่ 4.6 ผลของปริมาณแก๊สไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอน และกระแสไฟฟ้าเชื่อมพัลส์สูงสุด ต่อปริมาณความร้อนในระหว่างการเชื่อม

อัตราการเย็นตัวเป็นตัวแปรหนึ่งที่มีความสำคัญต่อลักษณะของโครงสร้างจุลภาค อัตราการเย็นตัวของงานเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอน หรือเหล็กกล้าธาตุผสมต่ำคำนวณได้จากระยะเวลาการเย็นตัวระหว่างอุณหภูมิ 800 ถึง 500 องศาเซลเซียส เพราะเป็นช่วงอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาค ออสเทนไนต์ เป็น มาร์เทนไซต์ [38] แต่ในการทดลองนี้ชิ้นงานทดลองแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติกเกรด 304 หนา 2 มิลลิเมตร ที่กระแสไฟฟ้าเชื่อมพัลส์สูงสุด 130 แอมแปร์ ในแก๊สไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอน 0 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร มีค่าอุณหภูมิสูงสุดอยู่ที่ 734.6 องศาเซลเซียส จึงทำให้ในการทดลองนี้ต้องคำนวณอัตราการเย็นตัวจากช่วงอุณหภูมิ 734.6 ถึง 500 องศาเซลเซียส แทนดังแสดงผลการคำนวณหาอัตราการเย็นตัวในรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 ผลของปริมาณแก๊สไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอน และกระแสไฟฟ้าเชื่อมพัลส์สูงสุด ต่ออัตราการเย็นตัวของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติกทั้ง 3 เกรด ที่ความหนา 2 มิลลิเมตร

จากรูปที่ 4.7 พบว่าเมื่อเชื่อมโดยใช้กระแสไฟฟ้าเชื่อมพัลส์สูงสุด 130 แอมแปร์ จะมีอัตราการเย็นตัวสูงกว่าเมื่อเชื่อมโดยใช้กระแสไฟฟ้าเชื่อมพัลส์สูงสุด 160 แอมแปร์ และเมื่อเพิ่มปริมาณแก๊สไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอนอัตราการเย็นตัวลดลง กล่าวคือ เมื่อใช้แก๊สไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอน 0 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร เพิ่มกระแสไฟฟ้าเชื่อมพัลส์สูงสุดจาก 130 แอมแปร์ เป็น 160 แอมแปร์ พบว่า อัตราการเย็นตัวของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก เกรด 304, 202 และ D7 หนา 2 มิลลิเมตร ลดลงจาก 30.7 เป็น 25.2, 29.2 เป็น 24.8 และ 29.8 เป็น 25.7 °C/s ตามลำดับ และเมื่อใช้กระแสไฟฟ้าเชื่อมพัลส์สูงสุด 160 แอมแปร์ เพิ่มปริมาณแก๊สไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอนจาก 0 เป็น 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร พบว่า อัตราการเย็นตัวของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก เกรด 304, 202 และ D7 หนา 2 มิลลิเมตร ลดลงจาก 25.2 เป็น 22.5, 24.8 เป็น 21.4 และ 25.7 เป็น 22.3 °C/s ตามลำดับ เนื่องจากอัตราการเย็นตัวแปรผกผันกับปริมาณความร้อนในระหว่างการเชื่อม และอุณหภูมิการให้ความร้อนก่อนการเชื่อม [27] แต่ในการทดลองนี้ไม่มีการให้ความร้อนก่อนการเชื่อมดังนั้นอัตราการเย็นตัวแปรผกผันกับปริมาณความร้อนในระหว่างการเชื่อมเพียงอย่างเดียวที่จะเพิ่มขึ้นกับการเพิ่มกระแสไฟฟ้าเชื่อมพัลส์สูงสุดและปริมาณแก๊สไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอน ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับผลการทดลองของ Y.C. Lin และ P.Y. Chen [5] ทดลองเชื่อมทิกแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก เกรด 310 และ 316L ที่กระแสไฟฟ้า 130 และ 160 แอมแปร์ ในแก๊สไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอน 0, 1, 2, 4, 6,

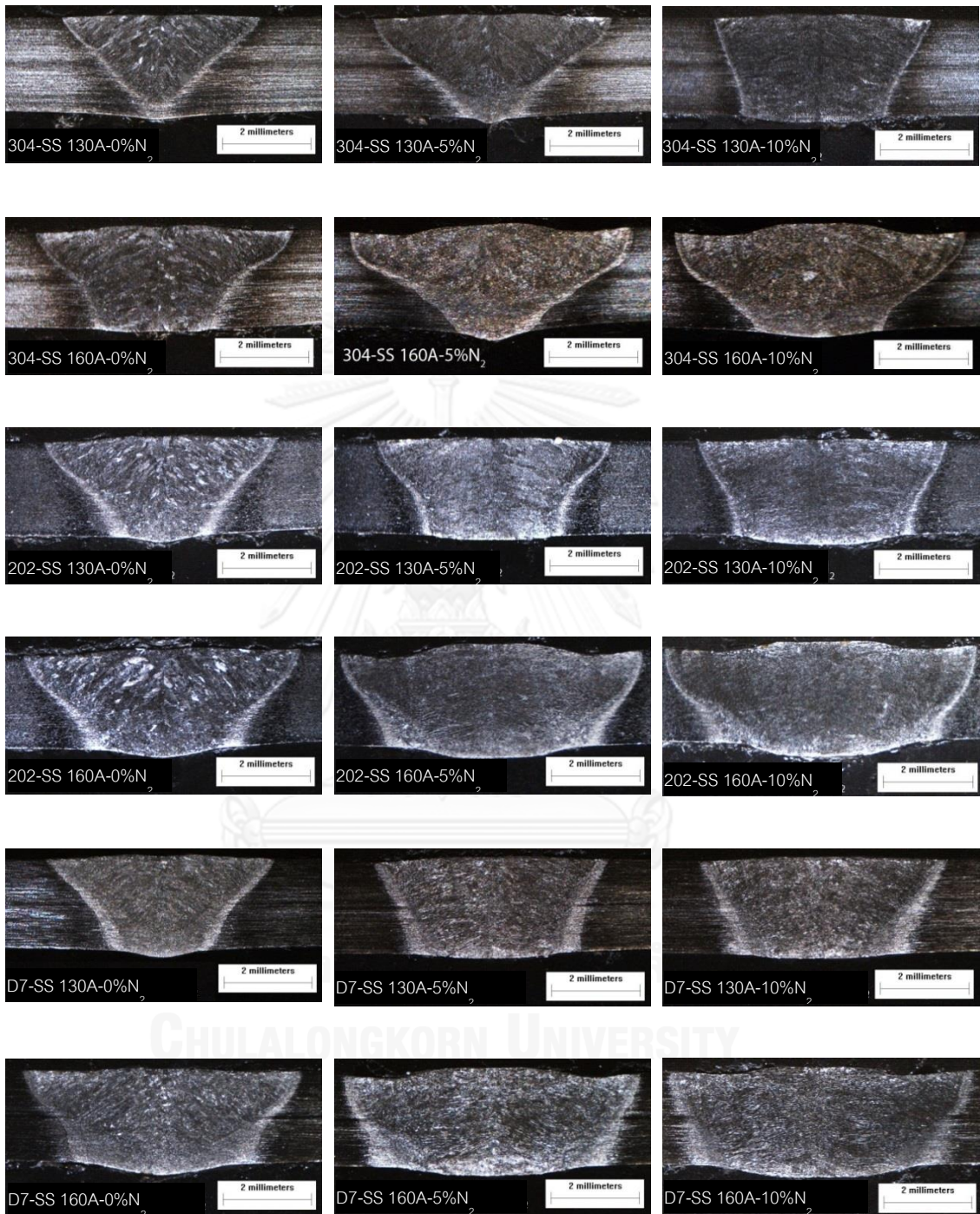
และ 8 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร พบว่าการเพิ่มกระแสไฟฟ้าเชื่อม และการเพิ่มปริมาณแก๊สไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอน ส่งผลให้อุณหภูมิสูงสุดสูงขึ้น และอัตราการเย็นตัวลดลง

4.2 ผลของกระแสไฟฟ้าเชื่อมพัลส์สูงสุด และส่วนผสมของแก๊สไนโตรเจนในแก๊สปกคลุมอาร์กอน ต่อรูปร่างของรอยเชื่อม

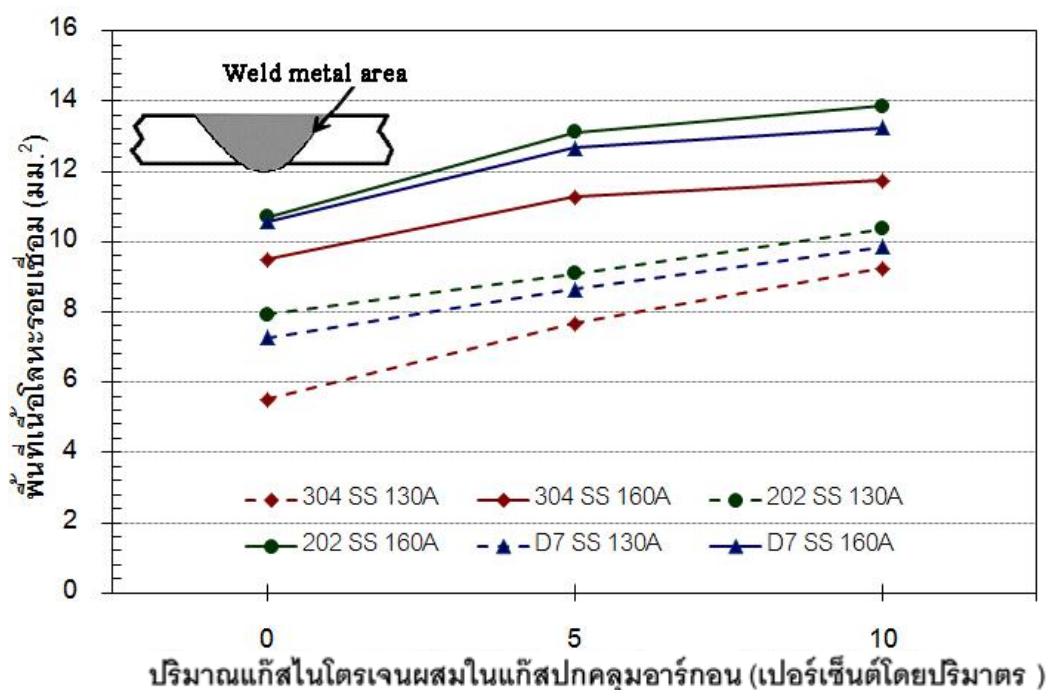
การเชื่อมทิกพัลส์โดยการเปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้าเชื่อมพัลส์สูงสุดที่ 130 และ 160 แอมแปร์ และปริมาณแก๊สไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอน 0, 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ทำให้ปริมาณความร้อนในระหว่างการเชื่อม และอัตราการเย็นตัวเปลี่ยนแปลง ส่งผลต่อรูปร่างของรอยเชื่อมของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก เกรด 304, 202 และ D7 หนา 2 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.8 และ 4.9

จากผลการทดลอง เมื่อเปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้าเชื่อมพัลส์สูงสุด 130 และ 160 แอมแปร์ พบว่าการเพิ่มกระแสไฟฟ้าเชื่อมพัลส์สูงสุดมีผลต่อการเพิ่มพื้นที่เนื้อโลหะรอยเชื่อม กล่าวคือ เมื่อพิจารณาเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก เกรด 304, 202 และ D7 ที่ปริมาณแก๊สไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอน 0 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร การเปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้าเชื่อมพัลส์สูงสุดจาก 130 แอมแปร์ เป็น 160 แอมแปร์ พื้นที่เนื้อโลหะรอยเชื่อมเพิ่มจาก 5.52 เป็น 9.49, 7.92 เป็น 10.69 และ 7.17 เป็น 10.58 ตารางมิลลิเมตร ตามลำดับ เนื่องจากการเพิ่มกระแสไฟฟ้าเชื่อมพัลส์สูงสุดทำให้ปริมาณความร้อนในระหว่างการเชื่อมเพิ่มขึ้นจึงมีบริเวณที่ถูกหลอมละลายมากขึ้น ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับผลของ P. K. Giridharan [23] ทดลองเชื่อมทิกพัลส์เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก เกรด 304L พบว่าเมื่อเพิ่มกระแสไฟฟ้าเชื่อมพัลส์สูงสุดจาก 180 เป็น 212 แอมแปร์ พื้นที่เนื้อโลหะรอยเชื่อมเพิ่มจาก 8.84 เป็น 21.36 ตารางมิลลิเมตร

เมื่อเปลี่ยนแปลงปริมาณแก๊สไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอน 0, 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร พบว่าการเพิ่มปริมาณแก๊สไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอนมากขึ้น ทำให้พื้นที่เนื้อโลหะรอยเชื่อมเพิ่มขึ้นเป็นเหมือนกันทั้งเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก เกรด 304, 202 และ D7 ที่กระแสไฟฟ้าเชื่อมพัลส์สูงสุด 130 และ 160 แอมแปร์ กล่าวคือ เมื่อใช้กระแสไฟฟ้าเชื่อมพัลส์สูงสุด 130 แอมแปร์ เพิ่มปริมาณแก๊สไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอนจาก 0 เป็น 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ในการเชื่อมแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก เกรด 304, 202 และ D7 หนา 2 มิลลิเมตร พบว่า พื้นที่เนื้อโลหะรอยเชื่อมเพิ่มจาก 5.52 เป็น 9.24, 7.92 เป็น 10.37 และ 7.17 เป็น 9.55 ตารางมิลลิเมตร ตามลำดับ และเมื่อใช้กระแสไฟฟ้าเชื่อมพัลส์สูงสุด 160 แอมแปร์ เพิ่มปริมาณแก๊สไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอนจาก 0 เป็น 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ในการเชื่อมแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก เกรด 304, 202 และ D7 หนา 2 มิลลิเมตร พบว่า พื้นที่เนื้อโลหะรอยเชื่อมเพิ่มจาก 9.49 เป็น 11.73, 10.69 เป็น 13.87 และ 10.58 เป็น 13.24 ตารางมิลลิเมตร ตามลำดับ เนื่องจากการเพิ่มปริมาณแก๊สไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอน ทำให้ปริมาณความร้อนในระหว่างการเชื่อมเพิ่มสูงขึ้น จึงมีพื้นที่ที่ถูกหลอมละลายมากขึ้น ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับผลของ H.Y. Huang [39] ทดลองเชื่อมทิกแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก เกรด 304 ในแก๊สไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอน 0, 2.5, 5, 7.5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร



รูปที่ 4.8 ผลของปริมาณแก๊สไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอน และกระแสไฟฟ้าเชื่อมพัลส์สูงสุด ต่อรูปร่างของรอยเชื่อมของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติกทั้ง 3 เกรด หน้า 2 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.9 ผลของปริมาณแก๊สไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอน และกระแสไฟฟ้าเชื่อมพัลส์สูงสุด ต่อพื้นที่เนื้อโลหะรอยเชื่อมของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติกทั้ง 3 เกรด หนา 2 มิลลิเมตร

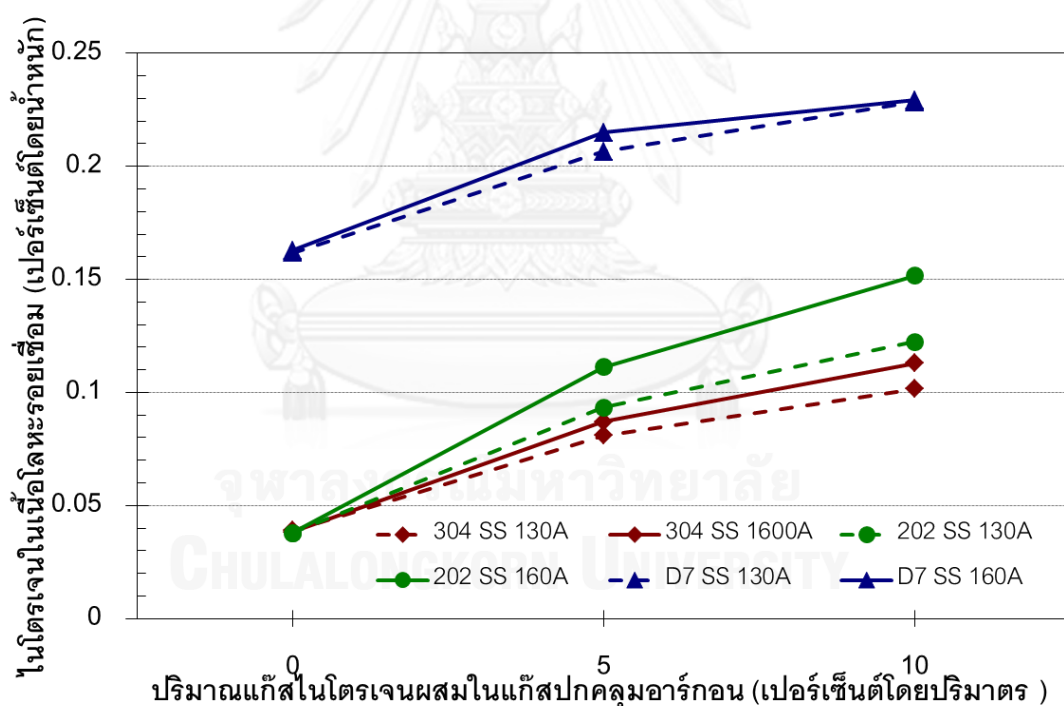
4.3 ผลของกระแสไฟฟ้าเชื่อมพัลส์สูงสุด และส่วนผสมของแก๊สไนโตรเจนในแก๊สปกคลุมอาร์กอน ต่อปริมาณไนโตรเจนในเนื้อโลหะรอยเชื่อม

แก๊สไนโตรเจนถูกผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอนเพื่อปรับปรุงสมบัติภายหลังการเชื่อมของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก และไนโตรเจนยังมีสมบัติเป็นตัวทำให้โครงสร้างออสเทนิตเสถียร ดังนั้นการละลายของไนโตรเจนในเนื้อโลหะรอยเชื่อมที่เพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจากการเพิ่มปริมาณแก๊สไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอน จะส่งผลต่อปริมาณเตลต้าเฟอไรต์ ในเนื้อโลหะรอยเชื่อม ในการทดลองนี้จึงศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแก๊สไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอนที่ 0, 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร กับปริมาณไนโตรเจนในเนื้อโลหะรอยเชื่อม

จากผลการทดลองรูปที่ 4.10 พบว่าการเชื่อมโดยใช้แก๊สไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอน 0 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ปริมาณไนโตรเจนในเนื้อโลหะรอยเชื่อมใกล้เคียงกันมากกับปริมาณไนโตรเจนของโลหะพื้น แสดงให้เห็นว่าการใช้แก๊สปกคลุมสามารถป้องกันแนวเชื่อมจากไนโตรเจนในบรรยากาศได้อย่างสมบูรณ์ และพบว่าการเพิ่มกระแสไฟฟ้าเชื่อมพัลส์สูงสุดจาก 130 แอมแปร์ เป็น 160 แอมแปร์ ทำให้ปริมาณไนโตรเจนในเนื้อโลหะรอยเชื่อมเพิ่มขึ้น เนื่องจากความสามารถในการละลายของไนโตรเจนในเนื้อโลหะรอยเชื่อมของกระบวนการเชื่อมที่ถูกกำหนดโดยปริมาณความร้อนในระหว่างการเชื่อมและระยะอาร์ก [6] โดยในการทดลองนี้ให้ระยะอาร์กคงที่ ดังนั้นปริมาณไนโตรเจนในเนื้อโลหะรอยเชื่อมถูกกำหนดโดยปริมาณความร้อนในระหว่างการเชื่อม

เพียงอย่างเดียว ซึ่งปริมาณความร้อนในระหว่างการเชื่อมเพิ่มขึ้นกับการเพิ่มกระแสไฟฟ้าเชื่อมพัลส์ สูงสุดดังที่ได้กล่าวมา ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับผลการทดลองของ Zhao Lin และคณะ [40] ที่ศึกษาอิทธิพลของไนโตรเจน และปริมาณความร้อนในระหว่างการเชื่อมต่อเนื้อโลหะรอยเชื่อมของการ เชื่อมทิกเหล็กกล้าโรสนิม เกรด 1Cr21Mn16N พบว่าเมื่อผสมแก๊สไนโตรเจนในแก๊สปกคลุมอาร์กอน การเพิ่มปริมาณความร้อนในระหว่างการเชื่อมทำให้ปริมาณไนโตรเจนในเนื้อโลหะรอยเชื่อมเพิ่มขึ้น

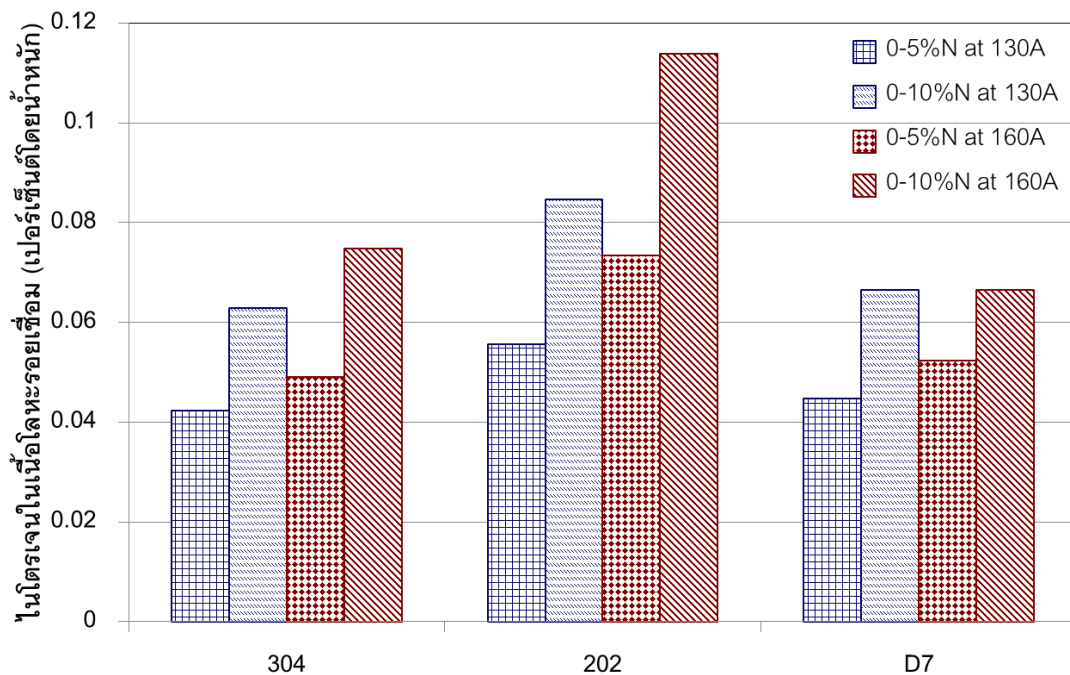
เมื่อพิจารณาผลของปริมาณแก๊สไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอน พบว่าการเพิ่ม ปริมาณแก๊สไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอน ทำให้ปริมาณไนโตรเจนในเนื้อโลหะรอยเชื่อม เพิ่มขึ้น เนื่องจากความสามารถในการละลายของไนโตรเจนในน้ำโลหะแปรผันตรงกับรากที่สองของ ความดันย่อยของแก๊สไนโตรเจน [41, 42] และการเพิ่มปริมาณแก๊สไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุม อาร์กอนทำให้ความต่างศักย์การอาร์กเพิ่มขึ้น ส่งผลเพิ่มปริมาณความร้อนในระหว่างการเชื่อม ทำให้ ความสามารถในการละลายของไนโตรเจนเพิ่มขึ้น จึงมีปริมาณไนโตรเจนในเนื้อโลหะรอยเชื่อมสูงขึ้น ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับผลการทดลองของ T. Ogawa และคณะ [43] ที่ทดลองเชื่อมทิกแผ่น เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก เกรด 304 และ 308 ในแก๊สไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอน 0, 2, 5, 10 และ 15 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร



รูปที่ 4.10 ผลของปริมาณแก๊สไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอน ต่อปริมาณไนโตรเจนในเนื้อ โลหะรอยเชื่อม

จากผลการทดลองเมื่อพิจารณาปริมาณไนโตรเจนที่สามารถละลายเพิ่มเข้าไปในเนื้อโลหะรอย เชื่อมเมื่อเพิ่มปริมาณแก๊สไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอนจาก 0 เป็น 5 และจาก 0 เป็น 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ดังแสดงในรูปที่ 4.11 พบว่าเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก เกรด 202 มี ปริมาณไนโตรเจนละลายเพิ่มเข้าไปในเนื้อโลหะรอยเชื่อมได้มากที่สุด ทั้งที่กระแสไฟฟ้าเชื่อมพัลส์

สูงสุด 130 และ 160 แอมแปร์ ถึงแม้ว่าที่ปริมาณแก๊สไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอนที่ 0 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก เกรด 202 จะมีปริมาณไนโตรเจนในเนื้อโลหะรอยเชื่อมพอกๆกับเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก เกรด 304 เนื่องจากแมงกานีสที่ถูกเติมในเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก เกรด 202 มีปริมาณมากที่สุด โดยแมงกานีสที่เติมลงไปแทนนิกเกิลเพื่อให้โครงสร้างออสเทนิตเสถียรแล้วยังจะไปเพิ่มความสามารถในการละลายของไนโตรเจนในเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก [44] เมื่อการคำนวณความสามารถในการละลายของไนโตรเจนที่สมดุลในน้ำโลหะผสมเหล็ก-โครเมียม-นิกเกิล ที่ผสมแมงกานีส และโมลิบดีนัม ตามสมการที่ 2.17 และ 2.18 แสดงในตารางที่ 4.1 พบว่าเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก เกรด 202 มีค่าความสามารถในการละลายของไนโตรเจนมากที่สุด จึงทำให้เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก เกรด 202 มีปริมาณไนโตรเจนละลายในเนื้อโลหะรอยเชื่อมเพิ่มขึ้นจากเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก เกรด 304 ที่มีการเติมแมงกานีสเพียงเล็กน้อย ส่วนเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก เกรด D7 ที่มีการเติมแมงกานีสเช่นเดียวกับเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก เกรด 202 และมีค่าความสามารถในการละลายของไนโตรเจนใกล้เคียงกัน แต่มีปริมาณไนโตรเจนที่ละลายเพิ่มเข้าไปในเนื้อโลหะรอยเชื่อมใกล้เคียงกับเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก เกรด 304 น่าจะเป็นเพราะเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก เกรด D7 มีปริมาณไนโตรเจนละลายในเนื้อพื้นมากอยู่แล้วจึงทำให้ไนโตรเจนสามารถละลายเพิ่มขึ้นได้ไม่มาก และเมื่อสังเกตที่ปริมาณแก๊สไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอน 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร พบว่าการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้าเชื่อมพัลส์สูงสุด 160 แอมแปร์ มีปริมาณไนโตรเจนละลายแทบจะไม่เพิ่มขึ้นจากการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้าเชื่อมพัลส์สูงสุด 130 แอมแปร์ น่าจะเป็นเนื่องจากใกล้ถึงขีดจำกัดการละลายของไนโตรเจนในเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก เกรด D7



รูปที่ 4. 11 ปริมาณการเพิ่มขึ้นของไนโตรเจนในเนื้อโลหะรอยเชื่อม

ตารางที่ 4.1 ความสามารถในการละลายของไนโตรเจนในน้ำโลหะผสมเหล็ก-โครเมียม-นิกเกิล ที่ผสมแมงกานีส และโมลิบดีนัม

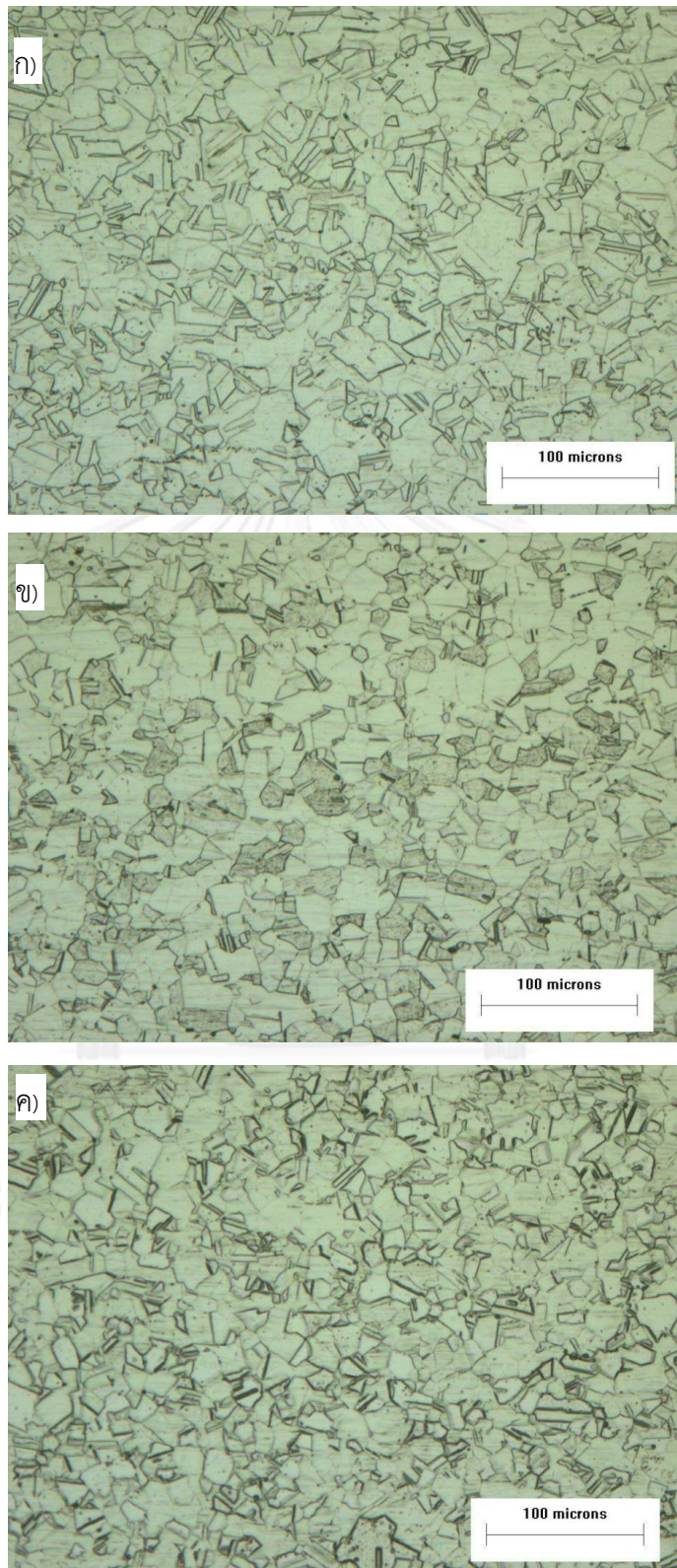
ชิ้นงานทดลอง	ความสามารถในการละลายของไนโตรเจน (wt.%)
304	0.221
202	0.304
D7	0.292

4.4 ผลของกระแสไฟฟ้าเชื่อมพัลส์สูงสุด และส่วนผสมของแก๊สไนโตรเจนในแก๊สปกคลุมอาร์กอนต่อโครงสร้างจุลภาค

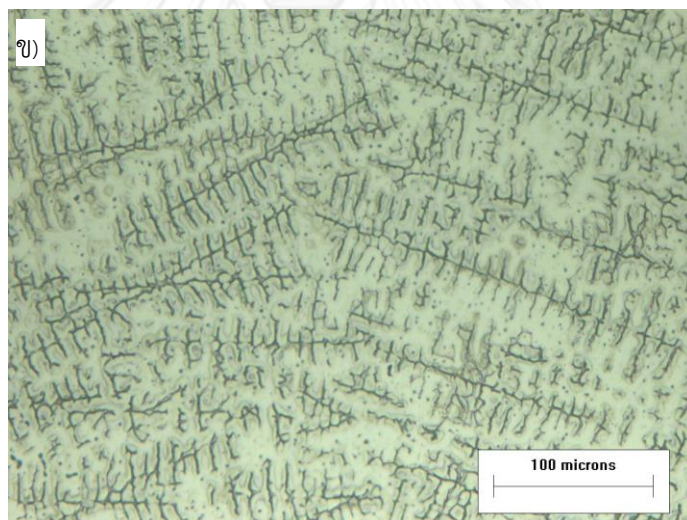
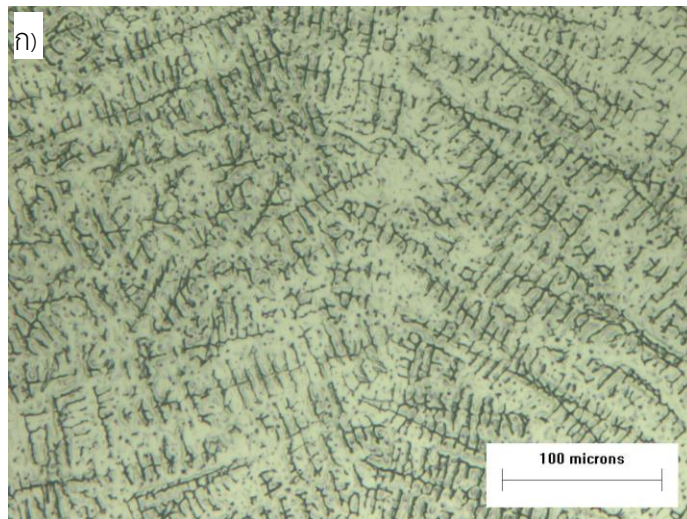
การเชื่อมทิก ความร้อนที่ได้จากการอาร์กจะทำให้เหล็กกล้าไร้สนิมหลอมละลาย ส่งผลให้โครงสร้างจุลภาคของเนื้อเหล็กกล้าไร้สนิมที่หลอมละลายเกิดการเปลี่ยนแปลง ในการทดลองนี้จึงศึกษาผลของกระแสไฟฟ้าเชื่อมพัลส์สูงสุด และส่วนผสมของแก๊สไนโตรเจนในแก๊สปกคลุมอาร์กอนต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก เกรด 304, 202 และ D7 หนา 2 มิลลิเมตร ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง

จากรูปที่ 4.12 พบว่าโครงสร้างจุลภาคโลหะพื้นของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก เกรด 304, 202 และ D7 เป็นเกรนออสเทนิตทั้งหมด

ภายหลังการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมทั้งหมดมีโครงสร้างจุลภาคแบบดูเพล็กซ์ที่ประกอบด้วยโครงสร้างเดนไดรต์ของเฟสเฟอร์ไรต์ และโครงสร้างออสเทนิต การเปลี่ยนแปลงตัวแปรในการเชื่อมทำให้สัดส่วน และปริมาณเฟสเฟอร์ไรต์เปลี่ยนแปลง โดยเมื่อเพิ่มกระแสไฟฟ้าเชื่อมพัลส์สูงสุดจาก 130 แอมแปร์ เป็น 160 แอมแปร์ พบว่าระยะห่างระหว่างแกนเดนไดรต์เพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.13 และ 4.14 เนื่องจากระยะห่างระหว่างแกนเดนไดรต์แปรผกผันกับอัตราการเย็นตัว [27, 45] โดยอัตราการเย็นตัวจะลดลงเมื่อเพิ่มกระแสไฟฟ้าเชื่อมพัลส์สูงสุด ดังนั้นการเพิ่มกระแสไฟฟ้าเชื่อมพัลส์สูงสุดจะส่งผลให้ระยะห่างระหว่างแกนเดนไดรต์เพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.12 โครงสร้างจุลภาคโลหะพื้นของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก ก. เกรด 304
ข. เกรด 202 ค. เกรด D7 (กำลังขยาย 200 เท่า)

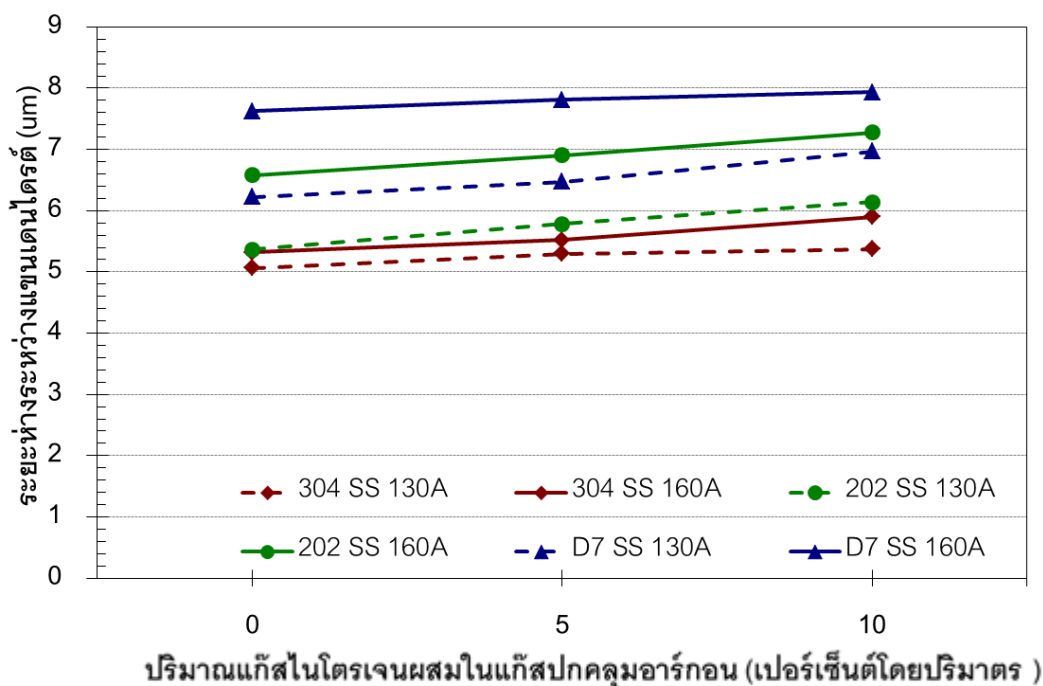


รูปที่ 4.13 โครงสร้างจุลภาคเนื้อโลหะรอยเชื่อมของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก เกรด D7 ที่ปริมาณแก๊สไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุม 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร เชื่อมด้วย กระแสไฟฟ้าเชื่อมพัลส์สูงสุด ก. 130 แอมแปร์ ข. 160 แอมแปร์ (กำลังขยาย 200 เท่า)

เมื่อพิจารณาผลของปริมาณแก๊สไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอน พบว่าการเชื่อมโดยใช้แก๊สไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอน 0 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก เกรด 304, 202 และ D7 มีสัณฐานเดลต้าเฟร์ไรต์ แบบแลทธิเฟร์ไรต์กับเวอร์มิคูลาร์เฟร์ไรต์ ดังรูปที่ 4.15 ก และเมื่อผสมแก๊สไนโตรเจนในแก๊สปกคลุมอาร์กอน 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก เกรด 304, 202 และ D7 มีสัณฐานเดลต้าเฟร์ไรต์ แบบเวอร์มิคูลาร์เฟร์

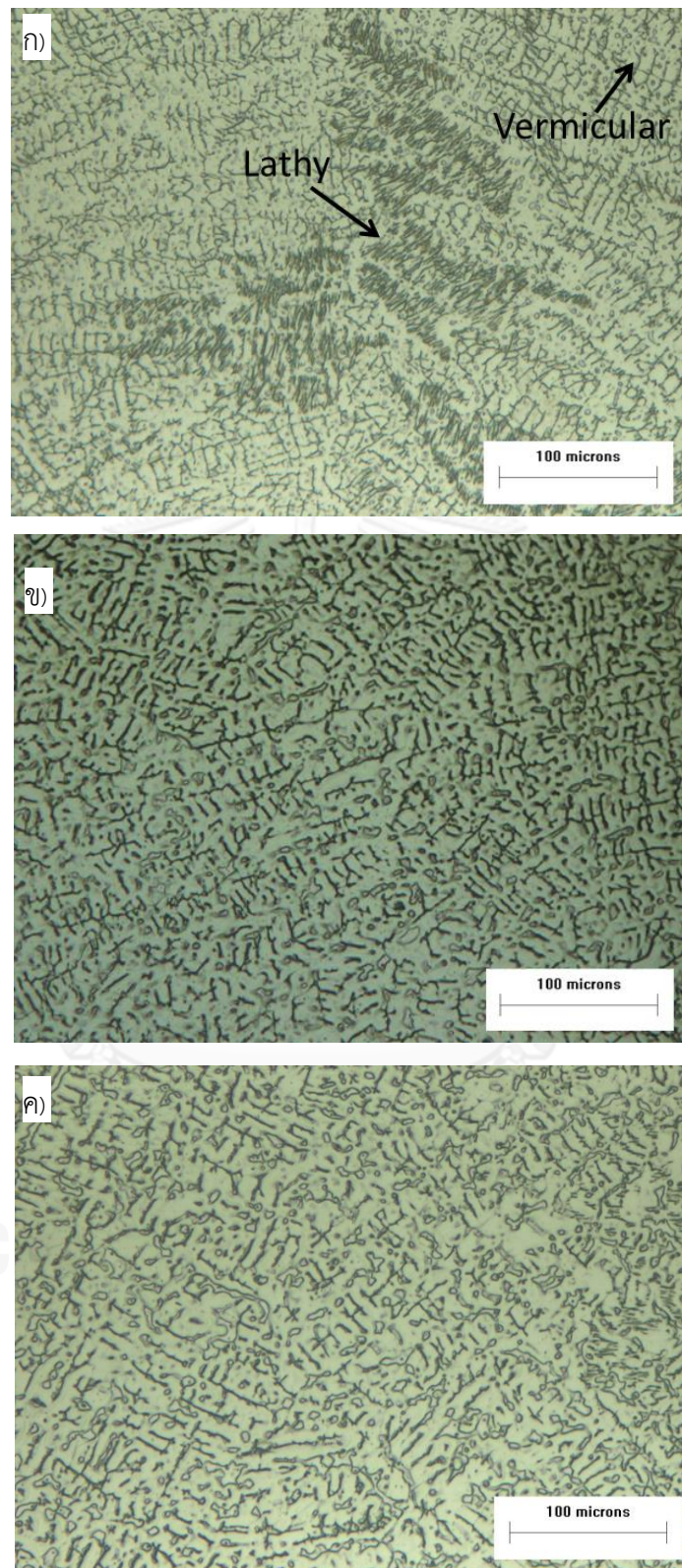
ไรต์ ดังในรูปที่ 4.15 ข และ ค เนื่องจากเดลต้าเฟร์ไรต์ที่มีสัญญาณแบบแลทธิเฟร์ไรต์จะเกิดในเนื้อโลหะรอยเชื่อมที่มีค่าอัตราส่วนของโครเมียมเทียบเท่าต่อนิกเกิลเทียบเท่าสูงกว่าสัญญาณแบบเวอร์มิคูลาร์เฟร์ไรต์ [10, 18, 27, 46, 47] และการผสมแก๊สไนโตรเจนที่จัดอยู่ในกลุ่มนิกเกิลเทียบเท่าในแก๊สปกคลุมอาร์กอน ทำให้ค่าอัตราส่วนของโครเมียมเทียบเท่าต่อนิกเกิลเทียบเท่าต่ำกว่าการเชื่อมโดยใช้แก๊สปกคลุมอาร์กอนเพียงอย่างเดียว ส่งผลให้สัญญาณเดลต้าเฟร์ไรต์ เป็นแบบเวอร์มิคูลาร์เฟร์ไรต์ ในการเชื่อมเมื่อใช้แก๊สไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอน 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร และมีสัญญาณเดลต้าเฟร์ไรต์ แบบแลทธิเฟร์ไรต์กับเวอร์มิคูลาร์เฟร์ไรต์ในการเชื่อมเมื่อใช้แก๊สไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอน 0 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร

นอกจากการผสมแก๊สไนโตรเจนในแก๊สปกคลุมอาร์กอนจะส่งผลต่อสัญญาณของเดลต้าเฟร์ไรต์แล้ว แก๊สไนโตรเจนซึ่งเป็นธาตุที่มีผลต่อโครงสร้างจุลภาคเช่นเดียวกับนิกเกิลที่ทำให้โครงสร้างออสเทนไตต์เสถียร เมื่อถูกผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอนจะส่งผลต่อปริมาณของเดลต้าเฟร์ไรต์ ของทั้งเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนติก เกรด 304, 202 และ D7 ดังรูปที่ 4.15 จากรูปพบว่าเมื่อใช้แก๊สไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอน 0 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร จะมีสัญญาณของเดลต้าเฟร์ไรต์ เป็นแลทธิเฟร์ไรต์กับเวอร์มิคูลาร์เฟร์ไรต์ที่มีความหนาแน่นของปริมาณเดลต้าเฟร์ไรต์มาก เมื่อเพิ่มปริมาณแก๊สไนโตรเจนในแก๊สปกคลุมอาร์กอน 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร จะมีสัญญาณของเดลต้าเฟร์ไรต์ เป็นเวอร์มิคูลาร์เฟร์ไรต์ที่มีปริมาณเดลต้าเฟร์ไรต์น้อยลง สอดคล้องกับผลของปริมาณเดลต้าเฟร์ไรต์ ในเนื้อโลหะรอยเชื่อมที่วัดโดยใช้ Feritscope ที่แสดงในรูปที่ 4.16 พบว่าเมื่อเพิ่มแก๊สไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอนจาก 0 เป็น 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ทำให้ปริมาณเดลต้าเฟร์ไรต์ ในเนื้อโลหะรอยเชื่อมลดลง กล่าวคือ เมื่อใช้กระแสไฟฟ้าเชื่อมพัลส์สูงสุด 130 แอมแปร์ เพิ่มปริมาณแก๊สไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอนจาก 0 เป็น 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร พบว่าปริมาณเดลต้าเฟร์ไรต์ในเนื้อโลหะรอยเชื่อมของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนติก เกรด 304, 202 และ D7 ลดลงจาก 4.62 เป็น 1.23, 1.72 เป็น 0.49 และ 10.23 เป็น 2.47 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรตามลำดับ และเมื่อใช้กระแสไฟฟ้าเชื่อมพัลส์สูงสุด 160 แอมแปร์ เพิ่มปริมาณแก๊สไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอนจาก 0 เป็น 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร พบว่าปริมาณเดลต้าเฟร์ไรต์ ในเนื้อโลหะรอยเชื่อมของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนติก เกรด 304, 202 และ D7 ลดลงจาก 5.37 เป็น 0.91, 2.47 เป็น 0.38 และ 11.49 เป็น 1.65 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ตามลำดับ เนื่องจากการเพิ่มแก๊สไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอนจาก 0 เป็น 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ทำให้มีปริมาณไนโตรเจนที่เป็นตัวทำให้โครงสร้างออสเทนไตต์เสถียรในเนื้อโลหะรอยเชื่อมเพิ่มขึ้น จึงทำให้ปริมาณเดลต้าเฟร์ไรต์ ในเนื้อโลหะรอยเชื่อมลดลง ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับผลการทดลองของ K.H. Tseng และ C.P. Chou [6] ในการเชื่อมทิกเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนติก เกรด 310 และ 304 ในแก๊สไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอน 0, 2.5, 5, 7.5, 10, 15 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร



รูปที่ 4. 14 ผลของปริมาณแก๊สไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอน และกระแสไฟฟ้าเชื่อมพัลส์สูงสุด ต่อระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด

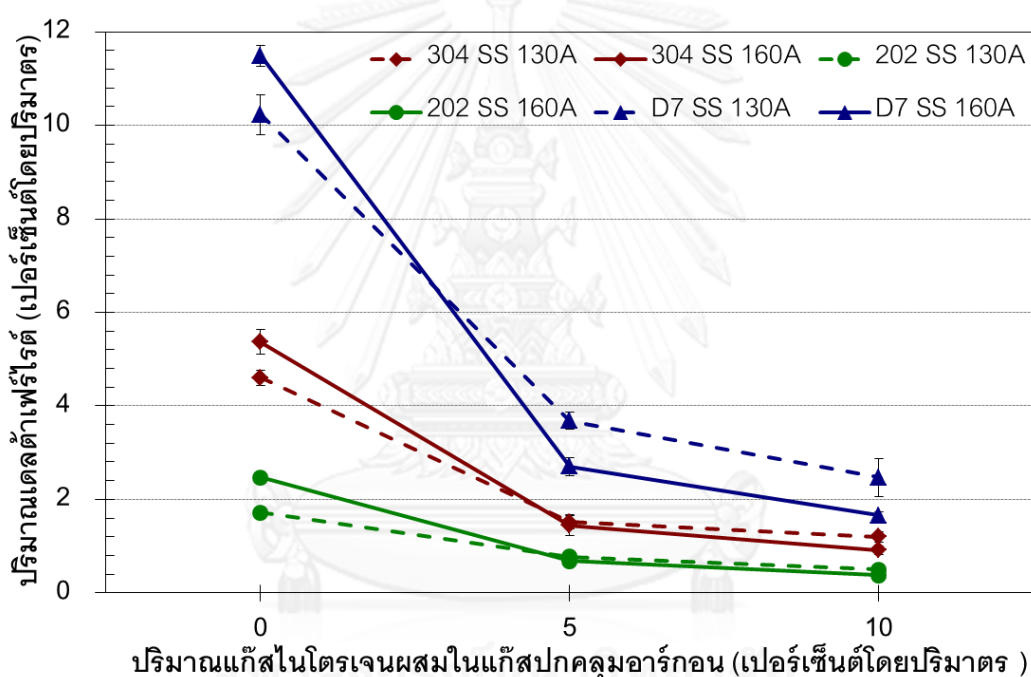
เมื่อพิจารณาปริมาณแก๊สไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอน 0 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร การเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้าเชื่อมพัลส์สูงสุด 160 แอมแปร์ ปริมาณเคลตต้าเฟร์ไรต์ ในเนื้อโลหะรอยเชื่อมมากกว่าการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้าเชื่อมพัลส์สูงสุด 130 แอมแปร์ เนื่องจากการเชื่อมในแก๊สไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอน 0 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ที่กระแสไฟฟ้าเชื่อมพัลส์สูงสุด 130 แอมแปร์ และกระแสไฟฟ้าเชื่อมพัลส์สูงสุด 160 แอมแปร์ มีปริมาณไนโตรเจนในเนื้อโลหะรอยเชื่อมพอๆกัน แต่การเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้าเชื่อมพัลส์สูงสุด 130 แอมแปร์ มีอัตราการเย็นตัวสูงกว่าการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้าเชื่อมพัลส์สูงสุด 160 แอมแปร์ ดังนั้นการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้าเชื่อมพัลส์สูงสุด 130 แอมแปร์ มีเวลาน้อยกว่าในการเกิดเฟสที่อุณหภูมิสูง จึงทำให้ปริมาณเคลตต้าเฟร์ไรต์ที่เกิดขึ้นมีน้อยกว่าการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้าเชื่อมพัลส์สูงสุด 160 แอมแปร์ ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับผลการทดลองของ S.A. David และคณะ [19] ศึกษาผลของการแข็งตัวอย่างรวดเร็ว ต่อโครงสร้างจุลภาคในเนื้อโลหะรอยเชื่อมของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิค อนุกรม 300 พบว่าเคลตต้าเฟร์ไรต์ลดลงเมื่ออัตราการเย็นตัวเพิ่มขึ้น และอาจเกิดโครงสร้างออสเทนไนต์ทั้งหมดได้ถ้าอัตราการเย็นตัวสูงกว่าอัตราการเย็นตัววิกฤต



รูปที่ 4.15 โครงสร้างจุลภาคเนื้อโลหะรอยเชื่อมของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก เกรด 304 ที่ กระแสไฟฟ้าเชื่อมพัลส์สูงสุด 160 แอมแปร์ ปริมาณแก๊สไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุม

อาร์กอน ก. 0 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ข. 5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ค. 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร (กำลังขยาย 200 เท่า)

เมื่อพิจารณาปริมาณแก๊สไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอน 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร พบว่าการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้าเชื่อมพัลส์สูงสุด 130 แอมแปร์ มีปริมาณเดลต้าเฟร์ไรต์ ในเนื้อโลหะรอยเชื่อมมากกว่าการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้าเชื่อมพัลส์สูงสุด 160 แอมแปร์ เนื่องจากเมื่อพิจารณาจากผลของปริมาณไนโตรเจนในเนื้อโลหะรอยเชื่อมจะพบว่าการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้าเชื่อมพัลส์สูงสุด 160 แอมแปร์ มีปริมาณไนโตรเจนในเนื้อโลหะรอยเชื่อมมากกว่าการเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้าเชื่อมพัลส์สูงสุด 130 แอมแปร์ ซึ่งปริมาณไนโตรเจนในเนื้อโลหะรอยเชื่อมที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลลดปริมาณเดลต้าเฟร์ไรต์ เพราะไนโตรเจนมีสมบัติเป็นตัวทำให้โครงสร้างออสเทนิตเสถียร



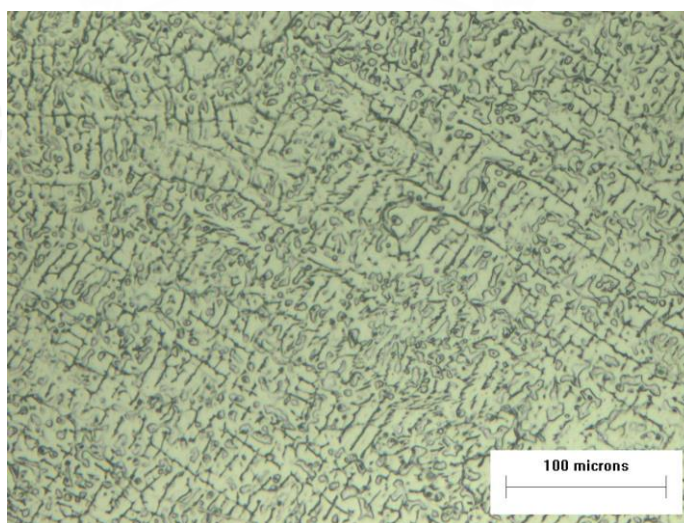
รูปที่ 4.16 ผลของปริมาณแก๊สไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอน และกระแสไฟฟ้าเชื่อมพัลส์สูงสุด ต่อปริมาณเดลต้าเฟร์ไรต์

นอกจากนี้จากรูปที่ 4.16 ยังพบว่าเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติกเกรด D7 มีปริมาณเดลต้าเฟร์ไรต์ ในเนื้อโลหะรอยเชื่อมมากที่สุดรองลงมาคือเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติกเกรด 304 และ 202 ตามลำดับ เนื่องจากเมื่อพิจารณาค่าโครเมียมเทียบเท่าต่อนิกเกิลเทียบเท่าตามสมการที่ 2.1 และ 2.2 พบว่าเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติกเกรด D7 มีค่าโครเมียมเทียบเท่าต่อนิกเกิลเทียบเท่ามากที่สุดรองลงมาคือเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติกเกรด 304 และ 202 ตามแสดงในตารางที่ 4.2 ดังนั้นจึงทำให้เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติกเกรด D7 มีปริมาณเดลต้าเฟร์ไรต์ ในเนื้อโลหะรอยเชื่อมมากที่สุด และเมื่อพิจารณาโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติกเกรด D7 ซึ่งเป็นเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติกเกรดที่มีปริมาณเดลต้าเฟร์ไรต์ในเนื้อโลหะรอยเชื่อมมากที่สุด ที่กระแสไฟฟ้าเชื่อม

พัลส์สูงสุด 160 แอมแปร์ แก๊สไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอน 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ดังแสดงในรูปที่ 4.13 ข กับ เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก เกรด 202 ซึ่งเป็นเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก เกรดที่มีปริมาณเดลต้าเฟอไรต์ในเนื้อโลหะรอยเชื่อมน้อยที่สุดดังแสดงในรูปที่ 4.17 พบว่าเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก เกรด D7 เดลต้าเฟอไรต์ ยังคงมีขนาดยาวและหนาแน่นเมื่อเทียบกับเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก เกรด 202 โดยปริมาณเดลต้าเฟอไรต์ในเนื้อโลหะรอยเชื่อมที่เหมาะสมควรมีไม่เกิน 8 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร เพื่อป้องกันการกัดกร่อนตามแนวขอบตาข่ายระหว่างรอยต่อของโครงสร้าง เดลต้าเฟอไรต์ และออสเทนิต และปริมาณเดลต้าเฟอไรต์ในเนื้อโลหะรอยเชื่อมควรมีไม่ต่ำกว่า 2 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร เพื่อป้องกันการเกิดการแตกร้าวขณะร้อน [12] จากผลการทดลองจะพบว่า เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก เกรด 304 และ 202 ที่ปริมาณแก๊สไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอน 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร และเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก เกรด D7 ที่ปริมาณแก๊สไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอน 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร มีปริมาณเดลต้าเฟอไรต์ในเนื้อโลหะรอยเชื่อมต่ำกว่า 2 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร จึงควรระวังปัญหาการเกิดการแตกร้าวขณะร้อน

ตารางที่ 4.2 ค่าอัตราส่วนของโครเมียมเทียบเท่าต่อนิกเกิลเทียบเท่า

%N ₂	Cr _{eq} / Ni _{eq}					
	130			160		
	304	202	D7	304	202	D7
0	1.8327	1.7497	1.9881	1.8342	1.7494	1.9851
5	1.7307	1.6094	1.8619	1.7169	1.5691	1.8394
10	1.6849	1.5450	1.8057	1.6608	1.4848	1.8034

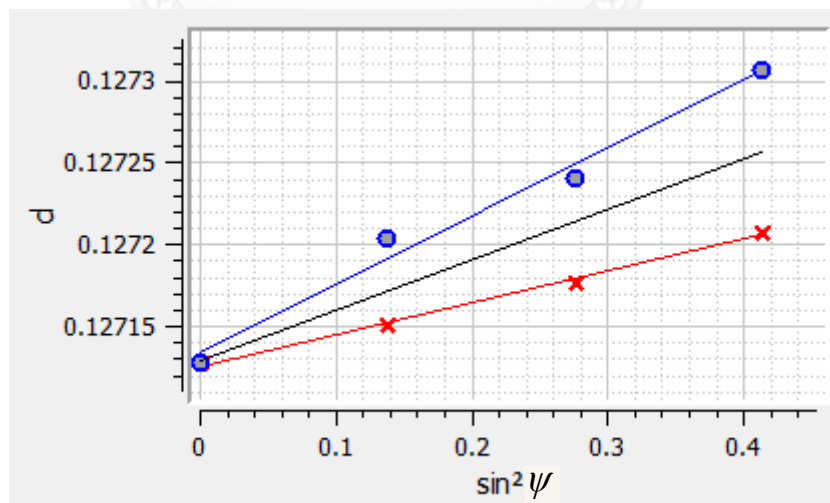


รูปที่ 4.17 โครงสร้างจุลภาคเนื้อโลหะรอยเชื่อมของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนติก เกรด 202 ที่ กระแสไฟฟ้าเชื่อมพัลส์สูงสุด 160 แอมแปร์ ปริมาณแก๊สไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุม อาร์กอน 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร (กำลังขยาย 200 เท่า)

4.5 ผลของกระแสไฟฟ้าเชื่อมพัลส์สูงสุด และส่วนผสมของแก๊สไนโตรเจนในแก๊สปกคลุม อาร์กอน ต่อความเค้นตกค้าง

การเชื่อมจะทำให้วัสดุเกิดการหลอมละลายเฉพาะบริเวณเป็นสาเหตุให้วัสดุขยายตัวในวงจำกัด เมื่อเนื้อโลหะรอยเชื่อมเกิดขึ้นตัว บางพื้นที่เย็นก่อนและเกิดการหดตัวก่อนส่วนอื่น การขยายตัวและหดตัวไม่สมดุลกันในบริเวณจำกัดนี้ทำให้เกิดความเค้นตกค้างขึ้นภายในวัสดุ ดังนั้น ภายหลังจากเชื่อมควรตรวจสอบพฤติกรรมความเค้นตกค้างของวัสดุ ในการทดลองนี้จึงตรวจสอบพฤติกรรมความเค้นตกค้างของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนติก เกรด 304, 202 และ D7 หนา 2 มิลลิเมตร โดยเครื่องวัดความเค้นตกค้างด้วยรังสีเอกซ์

เครื่องวัดความเค้นตกค้างด้วยรังสีเอกซ์เป็นเครื่องมือที่ประเมินปริมาณความเค้นตกค้างโดยอาศัยการวัดมุมการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ และอาศัยหลักการของ Bragg's law หรือ $2d \sin\theta = n\lambda$ คำนวณหาระยะห่างระหว่างระนาบ (d) ที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อได้รับความเค้น พล็อตกับไซน์กำลังสองของมุมบวกลบของมุมยิงรังสีเอกซ์ (ψ) ในการทดลองนี้ใช้มุม 21.8, 31.7, 40, -21.8, -31.7 และ -40 องศา ดังแสดงในรูปที่ 4.18 แล้วหาค่าความชันเฉลี่ย (เส้นสีดำ) ระหว่างเส้นมุมยิงบวก (เส้นกากบาท) และเส้นมุมยิงลบ (เส้นวงกลม) มาคำนวณหาค่าความเค้นตกค้างตามสมการในภาคผนวก ค โดยความชันเฉลี่ยเป็นบวกจะมีความเค้นตกค้างแรงดึง ขณะที่ความชันเฉลี่ยเป็นลบจะมีความเค้นตกค้างแรงอัด



รูปที่ 4.18 ผลการวัดความเค้นตกค้างโดยเครื่องวัดความเค้นตกค้างด้วยรังสีเอกซ์แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างระหว่างระนาบ (d) กับ มุมยิงรังสีเอกซ์ (ψ)

ผลการวัดความเค้นตกค้างของโลหะพื้นของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนติก เกรด 304, 202 และ D7 พบว่าเหล็กกล้าไร้สนิมทั้งสามเกรดมีความเค้นตกค้างแรงอัดใกล้เคียงกันดังแสดงในตารางที่ 4.3 โดยทั้งหมดมีความเค้นตกค้างเป็นความเค้นแรงอัดเนื่องจากเหล็กไร้สนิมทั้งสามเกรดขึ้นรูปโดยผ่านการรีดขึ้นรูป

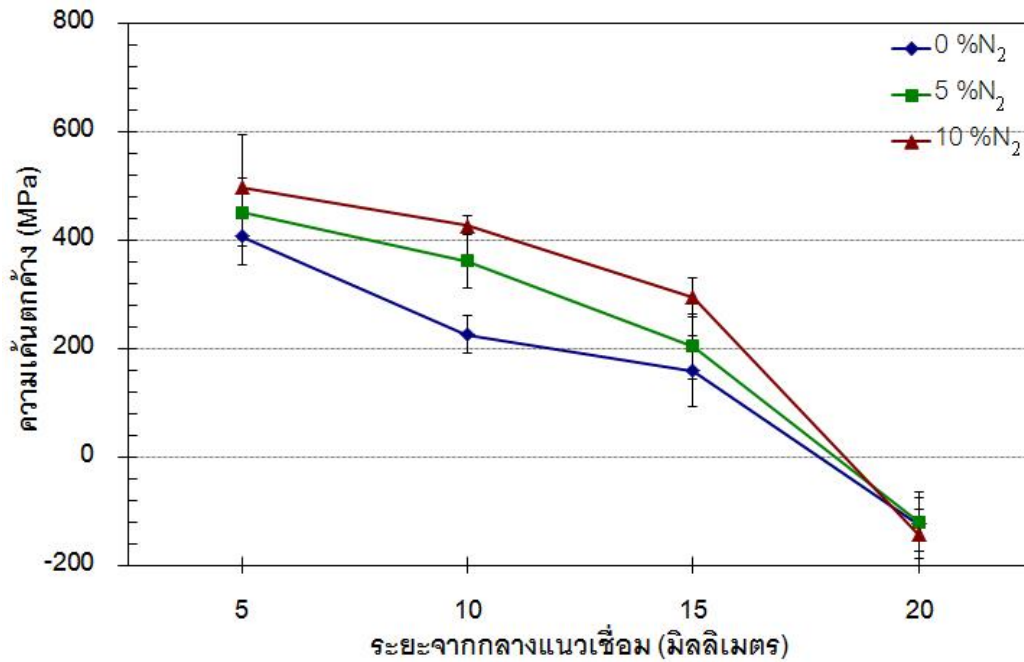
ตารางที่ 4.3 ค่าความเค้นตกค้างก่อนการเชื่อม

ชิ้นงานทดลอง	ความเค้นตกค้าง (MPa)
304	-117.9
202	-117.4
D7	-115.6

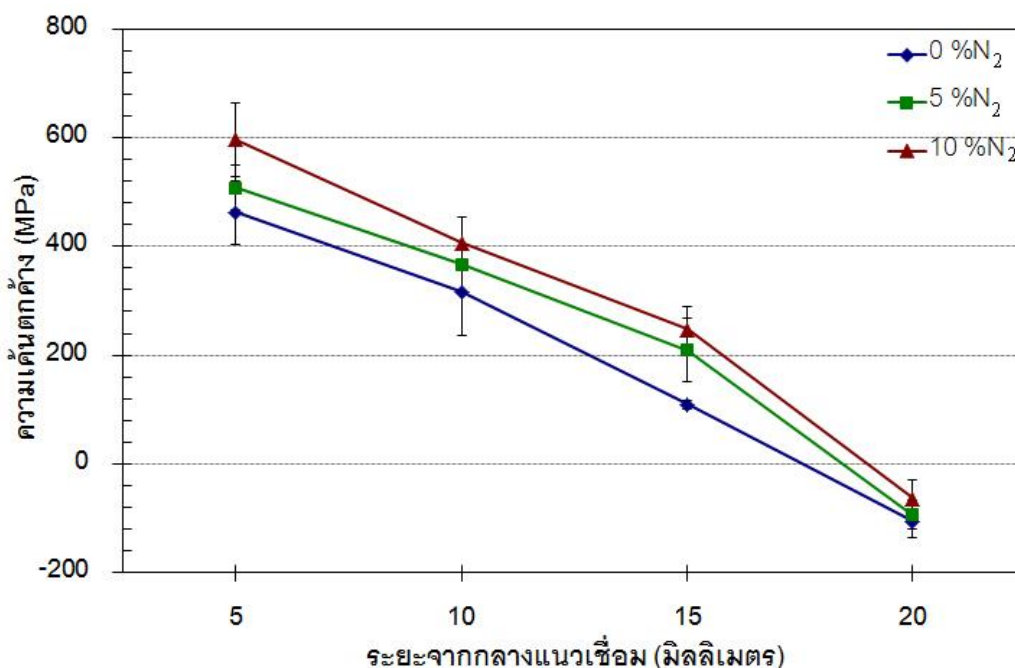
จากผลการทดลองในรูปที่ 4.19 และ 4.20 พบว่าบริเวณห่างจากกลางแนวเชื่อมมา 5 มิลลิเมตร เป็นบริเวณที่มีปริมาณความเค้นตกค้างมากที่สุด และลดลงเมื่อระยะห่างจากกลางแนวเชื่อมเพิ่มขึ้นเป็น 10, 15 และ 20 มิลลิเมตร ตามลำดับ โดยที่ระยะห่างจากกลางแนวเชื่อมมา 5, 10, และ 15 มิลลิเมตร มีความเค้นตกค้างเป็นบวกคือเป็นความเค้นตกค้างแรงดึง และที่ระยะห่างจากกลางแนวเชื่อมมา 20 มิลลิเมตร มีความเค้นตกค้างเป็นลบคือเป็นความเค้นตกค้างแรงอัด เป็นเช่นนี้เหมือนกันทั้งเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนติก เกรด 304, 202 และ D7 ที่กระแสไฟฟ้าเชื่อมพัลส์สูงสุด 130 และ 160 แอมแปร์ ในแก๊สไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอน 0, 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร เนื่องจากบริเวณใกล้แนวเชื่อมจะเป็นบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากการหดตัวของเนื้อโลหะ รอยเชื่อมขณะเย็นตัวลง ทำให้บริเวณใกล้แนวเชื่อมมีความเค้นตกค้างแรงดึง โดยเฉพาะอย่างยิ่งบริเวณใกล้แนวเชื่อม [27, 48] ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับผลการทดลองของ R. Ihara และคณะ [49] ที่พบว่าภายหลังการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนติก เกรด 316L มีความเค้นตกค้างสูงสุดบริเวณแนวกระแทกร้อน และลดลงเมื่อระยะห่างจากกลางแนวเชื่อมเพิ่มขึ้น

เมื่อพิจารณาผลของปริมาณแก๊สไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอนที่ระยะห่างจากกลางแนวเชื่อมมา 5, 10, และ 15 มิลลิเมตร พบว่าการเชื่อมโดยใช้แก๊สไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอน 0 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร มีความเค้นตกค้างน้อยที่สุด และความเค้นตกค้างมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณแก๊สไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอนเป็น 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร เป็นเช่นนี้เหมือนกันทั้งเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนติก เกรด 304, 202 และ D7 ที่กระแสไฟฟ้าเชื่อมพัลส์สูงสุด 130 และ 160 แอมแปร์ เนื่องจากการเพิ่มปริมาณแก๊สไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอนทำให้อุณหภูมิสูงสุดของวัฏจักรความร้อนสูงขึ้น ส่งผลให้ปริมาณความร้อนในระหว่างการเชื่อมเพิ่มสูงขึ้น จึงมีบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากการขยายตัวและหดตัวเนื่องจากความร้อนเพิ่มขึ้น โดยจะเห็นได้จากพื้นที่เนื้อโลหะรอยเชื่อมที่เพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณแก๊สไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอน ตามที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 4.2 และเมื่อปริมาณแก๊สไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอนเพิ่มขึ้น ทำให้ปริมาณเตลต้าเฟร์ไรต์ในเนื้อโลหะรอยเชื่อมลดลง ซึ่งการมีโครงสร้างจุลภาคเตลต้าเฟร์ไรต์อยู่กับโครงสร้างออสเทนไนต์จะช่วยลดการหดตัวทางความร้อนลง เนื่องจากค่า

สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของโครงสร้างจุลภาคเฟอไรต์ต่ำกว่าของออสเทนไนต์ [6] ดังนั้น การที่ปริมาณเดลต้าเฟอไรต์ในเนื้อโลหะรอยเชื่อมลดลงทำให้ความเค้นที่เกิดจากการหดตัวในระหว่าง ขบวนการเย็นตัวเพิ่มขึ้น ส่วนที่ระยะห่างจากกลางแนวเชื่อมมา 20 มิลลิเมตร มีความเค้นตกค้าง แรงแอ้แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ



รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นตกค้าง กับระยะห่างจากกลางแนวเชื่อมของแผ่นเหล็กกล้า ไร้สนิมออสเทนติก เกรด 304 หนา 2 มิลลิเมตร ที่กระแสไฟฟ้าเชื่อมพัลส์สูงสุด 130 แอมแปร์



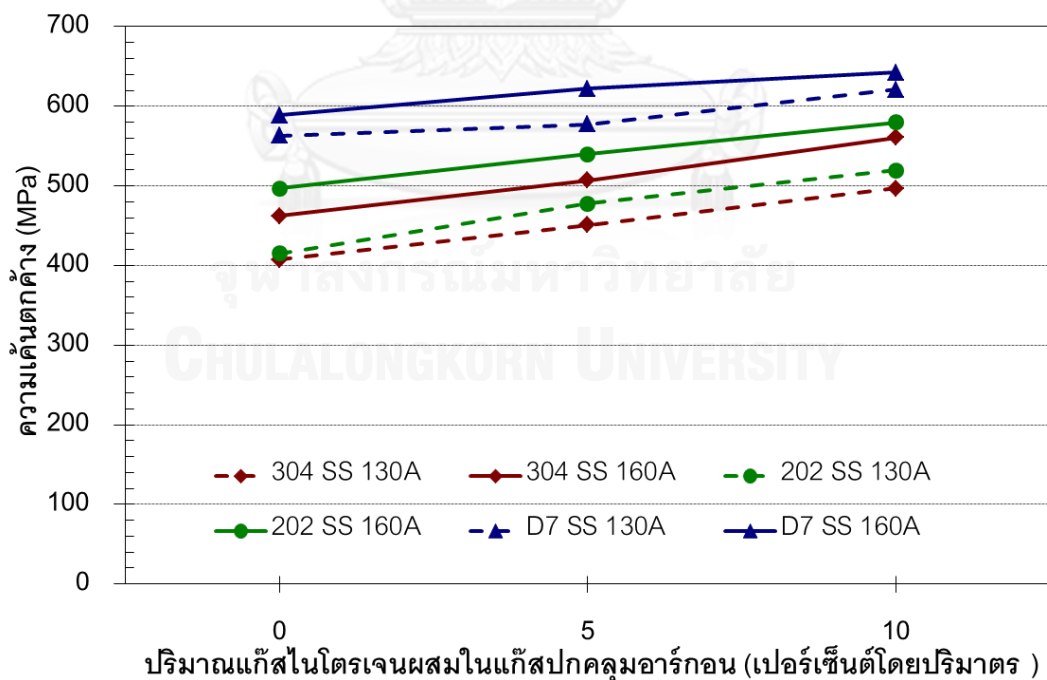
รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นตกค้าง กับระยะห่างจากกลางแนวเชื่อมของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนติก เกรด 304 ทหนา 2 มิลลิเมตร ที่กระแสไฟฟ้าเชื่อมพัลส์สูงสุด 160 แอมแปร์

เมื่อพิจารณาผลของกระแสไฟฟ้าเชื่อมพัลส์สูงสุดที่ระยะห่างจากกลางแนวเชื่อมมา 5 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นระยะที่ค่าความเค้นตกค้างมากที่สุด และเห็นความแตกต่างของความเค้นตกค้างชัดเจน แสดงในรูปที่ 4.21 พบว่าการเชื่อมโดยใช้กระแสไฟฟ้าพัลส์สูงสุด 160 แอมแปร์ ทำให้มีความเค้นตกค้างในเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนติก เกรด 304, 202 และ D7 เพิ่มจากการเชื่อมโดยใช้กระแสไฟฟ้าพัลส์สูงสุด 130 แอมแปร์ อย่างชัดเจนโดยมีผลต่อความเค้นตกค้างมากกว่าการเพิ่มปริมาณแก๊สไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอน เนื่องจากความเค้นจากความร้อนในการเชื่อมเพิ่มขึ้นกับปริมาณความร้อนในระหว่างการเชื่อม [50] ที่เพิ่มขึ้นจากการเพิ่มกระแสไฟฟ้าเชื่อมพัลส์สูงสุดมากกว่าการเพิ่มปริมาณแก๊สไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอน

นอกจากนี้จากผลการทดลองในรูปที่ 4.21 พบว่าเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนติก เกรด D7 ทั้งที่กระแสไฟฟ้าเชื่อมพัลส์สูงสุด 130 และ 160 แอมแปร์ มีความเค้นตกค้างสูงกว่าในเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนติก เกรด 304 และ 202 รองลงมาคือเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนติก เกรด 202 และ 304 ที่กระแสไฟฟ้าเชื่อมพัลส์สูงสุด 160 และ 130 แอมแปร์ ตามลำดับ เนื่องจากแรงปฏิกิริยาในทิศทางขวางทิศทางเชื่อมที่เป็นสาเหตุทำให้เกิดความเค้นตกค้าง หลักๆเกิดขึ้นโดยการตรึงการหดตัวของชิ้นงานทดลอง และปริมาณความร้อน ถ้าพิจารณาที่ตัวแปรในการเชื่อมเดียวกันหมดจะขึ้นอยู่กับอัตราการตรึงการหดตัวของชิ้นงานที่เป็นค่าเฉพาะของชิ้นงานทดลอง ซึ่งสามารถคำนวณได้จากค่าความเข้มขันการตรึง (Restraining intensity, R_F) ที่ถูกกำหนดโดย [51]

$$R_F = \frac{E \times h}{L}$$

จากสมการพบว่าค่าความเข้มข้นการตริงขึ้นอยู่กับค่ามอดุลัสของยัง ความหนาชิ้นงาน และความยาวของชิ้นงาน โดยในการทดลองนี้ชิ้นงานทดลองมีความหนาและความยาวเท่ากันหมด ดังนั้นค่าความเข้มข้นการตริงในการทดลองนี้ขึ้นอยู่กับค่ามอดุลัสของยังของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติกแต่ละเกรดเพียงอย่างเดียว เมื่อพิจารณาค่ามอดุลัสของยังของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติกแต่ละเกรดในตารางที่ 4.4 พบว่าเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก เกรด D7 มีค่ามอดุลัสของยังมากที่สุด โดยมีค่ามอดุลัสของยังมากกว่าเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก เกรด 202 ที่มีค่ามอดุลัสของยังรองลงมาอยู่ 3.86 GPa แต่เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก เกรด 202 มีค่ามอดุลัสมากกว่าเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก เกรด 304 ที่เป็นตัวมีค่ามอดุลัสของยังน้อยที่สุดอยู่เพียง 1.14 GPa จึงทำให้เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก เกรด D7 มีค่าความเข้มข้นการตริงสูงสุดรองมาคือเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก เกรด 202 และ 304 ตามลำดับ ส่งผลให้เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก เกรด D7 มีค่าความเค้นตกค้างสูงสุด สูงกว่าเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก เกรด 304 และ 202 ทั้งที่กระแสไฟฟ้าเชื่อมพัลส์สูงสุด 130 และ 160 แอมแปร์ และเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก เกรด 202 มีค่าความเค้นตกค้างใกล้เคียงกันกับเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก เกรด 304



รูปที่ 4.21 ผลของปริมาณแก๊สไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอน และกระแสไฟฟ้าเชื่อมพัลส์สูงสุด ต่อปริมาณความเค้นตกค้างที่ระยะห่างจากกลางแนวเชื่อม 5 มิลลิเมตร

ตารางที่ 4. 4 ค่ามอดูลัสของยังของชิ้นงานทดลอง

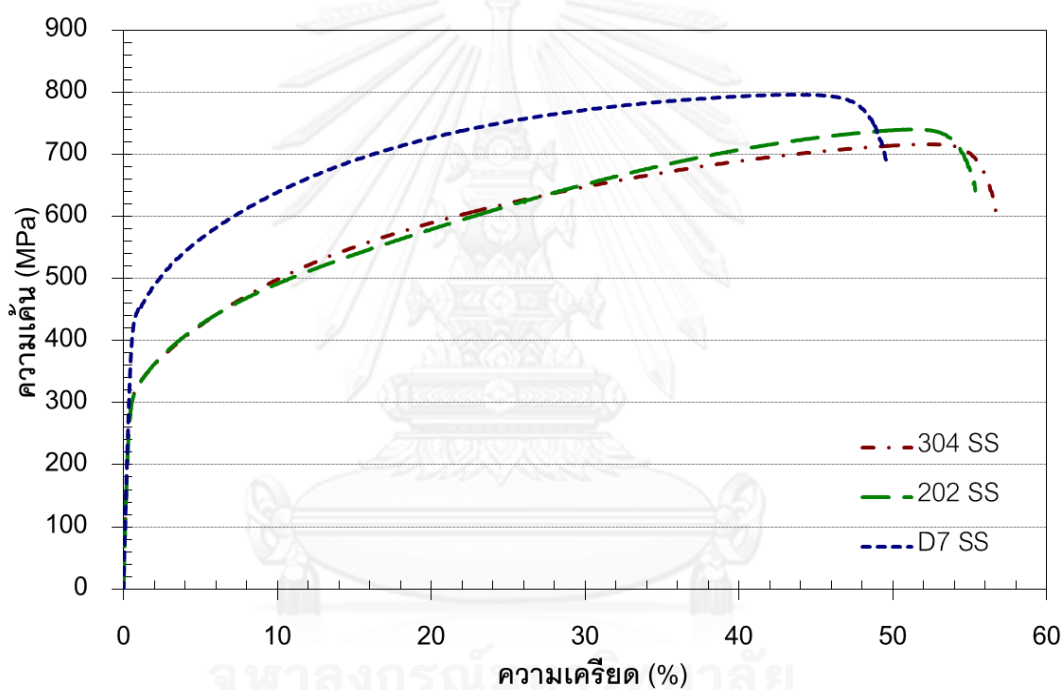
ชิ้นงานทดลอง	ค่ามอดูลัสของยัง (GPa)
304	88.39
202	89.53
D7	93.39

4.6 ผลของกระแสไฟฟ้าเชื่อมพัลส์สูงสุด และส่วนผสมของแก๊สไนโตรเจนในแก๊สปกคลุมอาร์กอน ต่อสมบัติความต้านทานแรงดึง

สมบัติความต้านทานแรงดึงเป็นสมบัติเฉพาะของวัสดุที่สำคัญที่สามารถบอกถึงค่าความเค้นจุดคราก (yield strength) ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด (ultimate tensile strength) และค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว (percent elongation) แต่การเชื่อมและการใช้ตัวแปรในการเชื่อมที่แตกต่างกัน ทำให้สมบัติเหล่านี้ของวัสดุเปลี่ยนแปลงไป จึงจำเป็นต้องศึกษาผลของกระแสไฟฟ้าเชื่อมพัลส์สูงสุด และส่วนผสมของแก๊สไนโตรเจนในแก๊สปกคลุมอาร์กอนต่อสมบัติความต้านทานแรงดึงของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก เกรด 304, 202 และ D7 หนา 2 มิลลิเมตร

จากรูปที่ 4.22 ผลการทดลองความต้านทานแรงดึงโลหะพื้นของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก เกรด 304, 202 และ D7 พบว่าเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก เกรด D7 มีค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด และค่าความเค้นจุดครากสูงที่สุดรองลงมาคือเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก เกรด 202 และ 304 ตามลำดับ ในทางกลับกันเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก เกรด D7 มีเปอร์เซ็นต์การยืดตัวต่ำที่สุดรองลงมาคือเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก เกรด 202 และ 304 ตามลำดับ เนื่องจากเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก เกรด 202 และ D7 มีการเติมแมงกานีสเพื่อให้โครงสร้างออสเทนิตเสถียรแทนนิกเกิล โดยแมงกานีสที่เติมลงไปลดค่าพลังงานการจัดเรียงตัวผลึก แต่นิกเกิลที่เติมในเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก เกรด 304 เพื่อให้โครงสร้างออสเทนิตเสถียรจะไปเพิ่มค่าพลังงานการจัดเรียงตัวผลึก ตามที่แสดงในสมการ 2.4 เมื่อคำนวณค่าพลังงานการจัดเรียงตัวผลึกตามสมการแสดงในตารางที่ 4.5 พบว่าเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก เกรด D7 มีค่าพลังงานการจัดเรียงตัวผลึกน้อยที่สุดรองลงมาคือเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก เกรด 202 และ 304 ตามลำดับ ดังนั้นเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก เกรด D7 มีโอกาสที่โครงสร้างออสเทนิตจะเปลี่ยนเป็นโครงสร้างมาร์เทนไซต์ได้มากที่สุดขณะทดสอบความต้านทานแรงดึง รองลงมาคือเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก เกรด 202 และ 304 ตามลำดับ สอดคล้องกับผลการทดสอบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ของชิ้นงานทดลองโลหะพื้นเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติกทั้ง 3 เกรดที่ไม่ผ่านและผ่านการทดสอบสมบัติความต้านทานแรงดึง แสดงในรูปที่ 4.23 และ 4.24 ตามลำดับ พบว่าชิ้นงานทดลองที่ผ่านการทดสอบสมบัติความต้านทานแรงดึงของโลหะพื้น

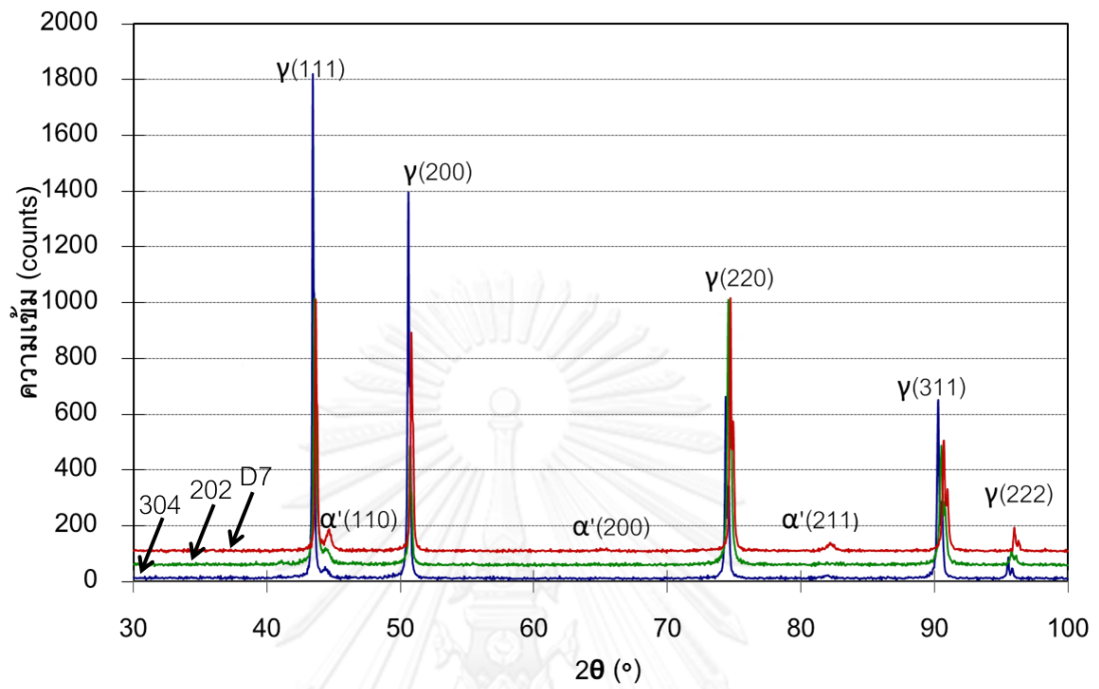
เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติกทั้ง 3 เกรด มีความเข้มของพีระนาบ (110) (200) และ (211) ที่เป็นระนาบของโครงสร้างมาร์เทนไซต์เพิ่มขึ้นจากชิ้นงานทดลองที่ไม่ได้ผ่านการทดสอบสมบัติความต้านทานแรงดึง โดยเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก เกรด D7 มีความเข้มของพีคเพิ่มขึ้นมากที่สุด รองลงมาคือเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก เกรด 202 และ 304 ตามลำดับ จึงทำให้เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก เกรด D7 มีความต้านทานแรงดึงสูงสุด และความเค้นจุดครากสูง และมีเปอร์เซ็นต์การยืดตัวต่ำ ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับผลการทดลองของ A.S. Hamada และคณะ [52] พบว่าเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก เกรด 201L ที่มีค่าพลังงานการจัดเรียงตัวผลึก 3.7 mJ/m^2 เกิดโครงสร้างจุลภาคมาร์เทนไซต์มากกว่าเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก เกรด 201 ที่มีค่าพลังงานการจัดเรียงตัวผลึก 8.6 mJ/m^2 เนื่องจากคาร์บอนเพิ่มค่าพลังงานการจัดเรียงตัวผลึกเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก เกรด 201



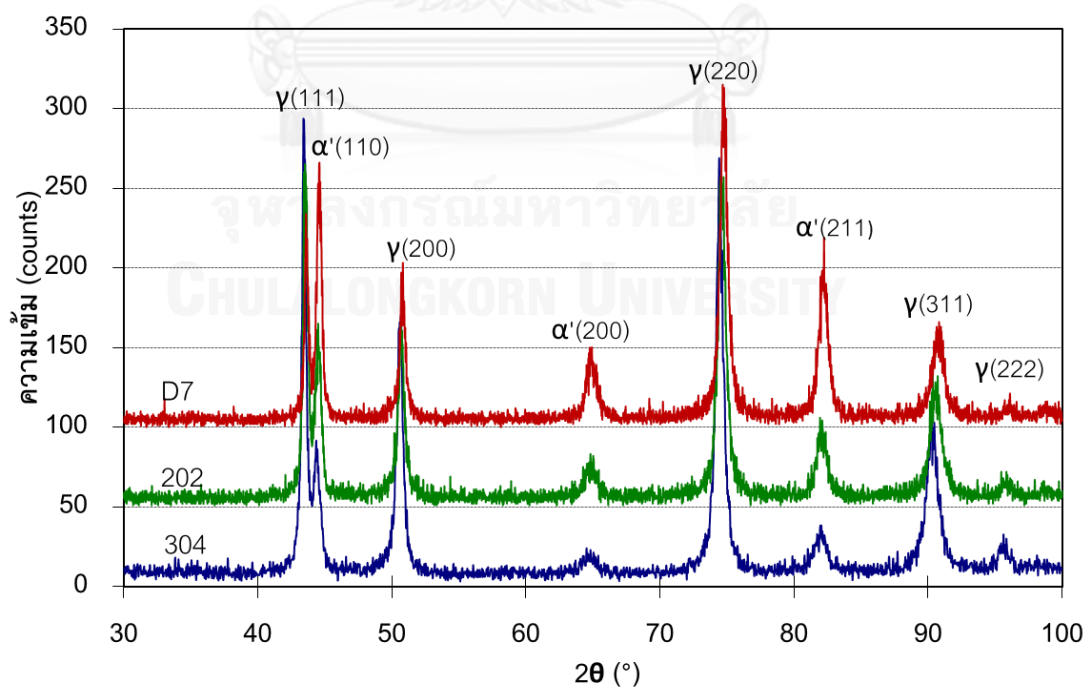
รูปที่ 4.22 กราฟความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียดของโลหะพื้นเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก เกรด 304, 202 และ D7

ตารางที่ 4.5 ค่าพลังงานการจัดเรียงตัวผลึก

ชิ้นงานทดลอง	SFE (mJ/m^2)
304	37.09
202	17.32
D7	12.56

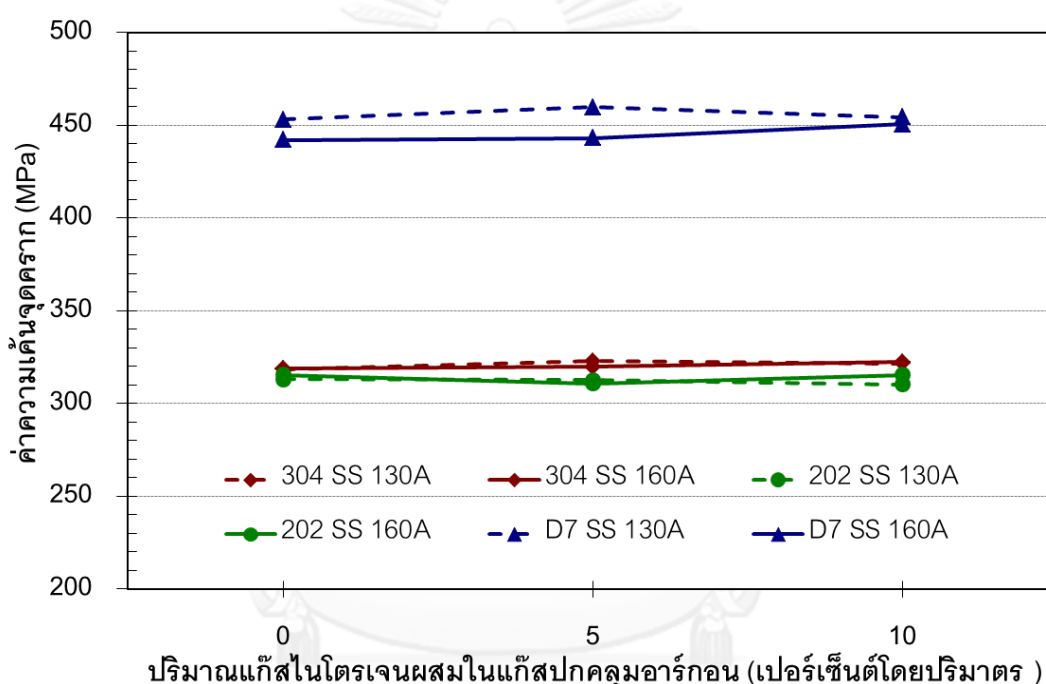


รูปที่ 4. 23 ผลการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ของชิ้นงานทดลองโลหะพื้นเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติกทั้ง 3 เกรด ที่ไม่ผ่านการทดสอบสมบัติความต้านทานแรงดึง



รูปที่ 4. 24 ผลการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ของชิ้นงานทดลองโลหะพื้นเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติกทั้ง 3 เกรด ที่ผ่านการทดสอบสมบัติความต้านทานแรงดึง

ภายหลังการเชื่อมแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก เกรด 304, 202 และ D7 หนา 2 มิลลิเมตร พบว่าการเพิ่มกระแสไฟฟ้าเชื่อมพัลส์สูงสุดจาก 130 เป็น 160 แอมแปร์ และการเพิ่มปริมาณแก๊สไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอนจาก 0 เป็น 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าความเค้นจุดคราก ตามแสดงในรูปที่ 4.25 แต่ส่งผลกระทบต่อสมบัติความต้านทานแรงดึงสูงสุด และ ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ตามแสดงในรูปที่ 4.26 และ 4.27



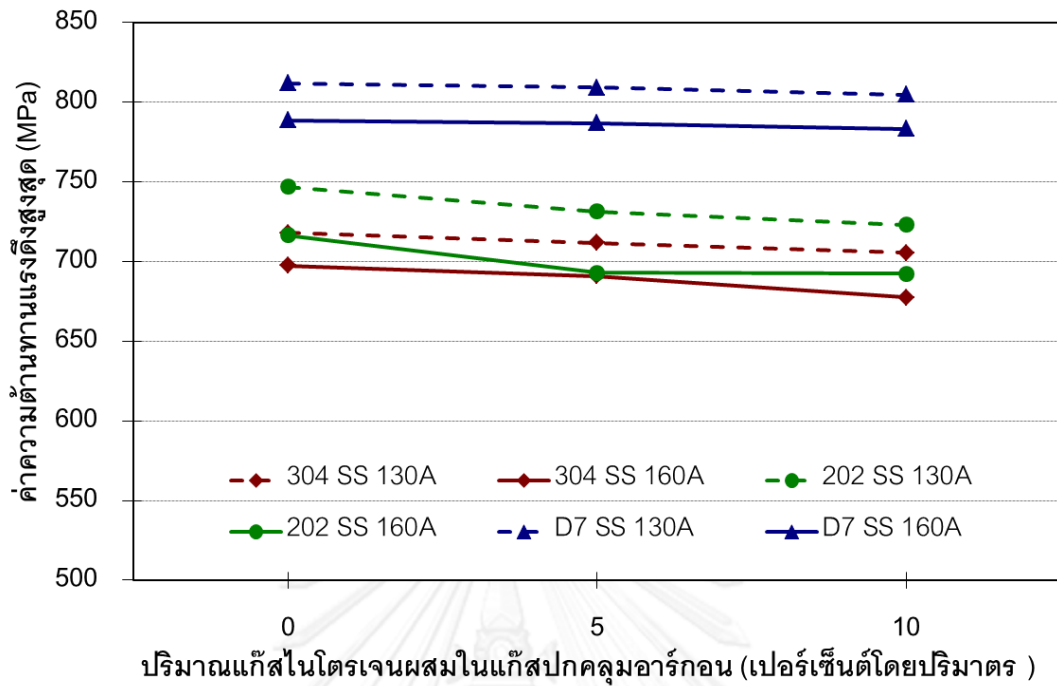
รูปที่ 4.25 ผลของปริมาณแก๊สไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอน และกระแสไฟฟ้าเชื่อมพัลส์สูงสุด ต่อค่าความเค้นจุดคราก

จากผลการทดลองรูปที่ 4.26 และ 4.27 เมื่อพิจารณาผลของกระแสไฟฟ้าเชื่อมพัลส์สูงสุดต่อค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด และค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว พบว่าการเพิ่มกระแสไฟฟ้าเชื่อมพัลส์สูงสุดจาก 130 แอมแปร์ เป็น 160 แอมแปร์ ทำให้เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก เกรด 304, 202 และ D7 มีค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด และค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวลดลงเหมือนกันทุกปริมาณแก๊สไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอน สอดคล้องกับผลการทดลองของ Subodh Kumar และ A.S.Shahi [26] พบว่าการเพิ่มกระแสไฟฟ้าเชื่อมในการเชื่อมทิกจาก 120 เป็น 150 และ 160 แอมแปร์ ทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด ของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก เกรด 304 ลดลงจาก 657.32 เป็น 639.45 และ 622.8 ตามลำดับ และค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ลดจาก 24.28 เป็น 22.85 และ 21.42 ตามลำดับ

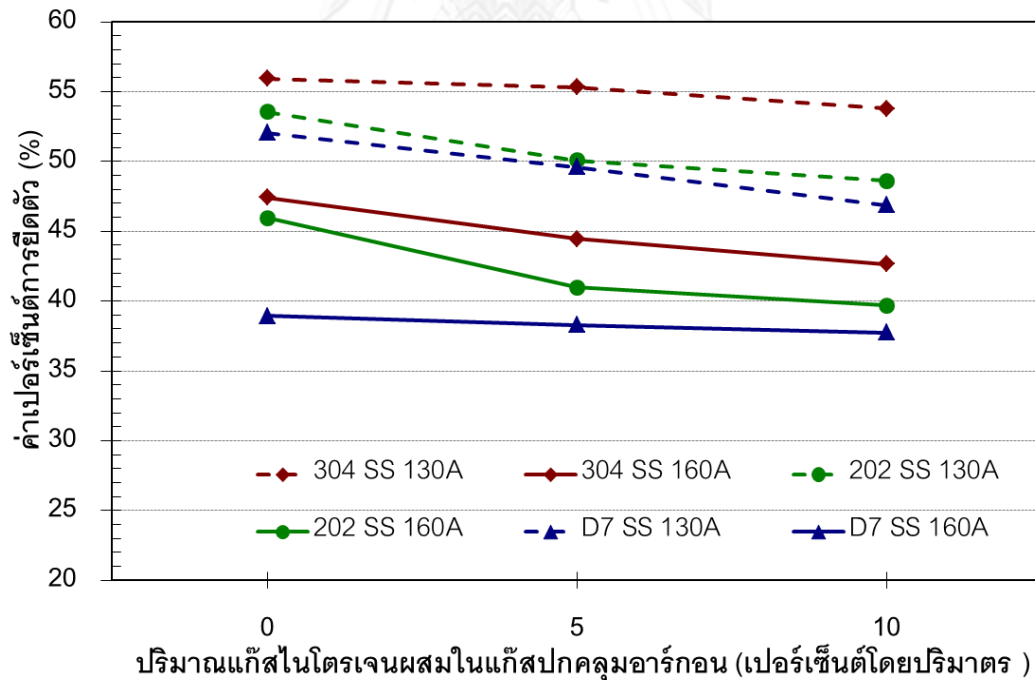
เมื่อพิจารณาผลของปริมาณแก๊สไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอนต่อค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด และค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว พบว่าการเพิ่มปริมาณแก๊สไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอนจาก 0 เป็น 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด และค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก เกรด 304, 202 และ D7 ลดลง แต่ไม่เด่นชัดเท่าผลจากการเพิ่มกระแสไฟฟ้าเชื่อมพัลส์สูงสุด

การลดลงของค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด และค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวเมื่อเพิ่มกระแสไฟฟ้าเชื่อมพัลส์สูงสุด และปริมาณแก๊สไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอน เพราะการเพิ่มกระแสไฟฟ้าเชื่อมพัลส์สูงสุด และปริมาณแก๊สไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอนทำให้ปริมาณความร้อนในระหว่างการเชื่อมเพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้อัตราการเย็นตัวลดลง ดังแสดงในรูปที่ 4.6 และ 4.7 ตามลำดับ ซึ่งอัตราการเย็นตัวจะแปรผกผันกับระยะห่างระหว่างแกนเดนไดรต์ ดังนั้นอัตราการเย็นตัวที่ลดลงจากเพิ่มกระแสไฟฟ้าเชื่อมพัลส์สูงสุด และปริมาณแก๊สไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอน ทำให้ระยะห่างระหว่างแกนเดนไดรต์เพิ่ม ส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด และค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวลดลง [53, 54] การที่ผลของการเพิ่มปริมาณแก๊สไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอน ส่งผลลดค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด และค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวน้อยกว่าผลของการเพิ่มกระแสไฟฟ้าเชื่อมพัลส์สูงสุดน่าจะเป็นเพราะผลของการเพิ่มปริมาณแก๊สไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอนส่งผลต่อการเพิ่มระยะห่างระหว่างแกนเดนไดรต์น้อยกว่าผลของการเพิ่มกระแสไฟฟ้าเชื่อมพัลส์สูงสุด ตามแสดงในรูปที่ 4.14

นอกจากนี้ผลการทดลองยังพบว่าเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก เกรด D7 ทั้งที่กระแสไฟฟ้าเชื่อมพัลส์สูงสุด 130 และ 160 แอมแปร์ มีค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดสูงกว่าเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก เกรด 304 และ 202 รองลงมาคือเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก เกรด 202 และ 304 ตามลำดับ ในทางกลับกันพบว่าเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก เกรด 304 มีค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว สูงที่สุดรองลงมาคือเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก เกรด 202 และ D7 ตามลำดับเป็นเหมือนกันทั้งกระแสไฟฟ้าเชื่อมพัลส์สูงสุด 130 และ 160 แอมแปร์ ที่เป็นเช่นนี้น่าจะเป็นผลมาจากสมบัติความต้านทานแรงดึงสูงสุด และค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของโลหะพื้นของเหล็กกล้าไร้สนิมแต่ละเกรด ซึ่งสอดคล้องกับผลค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด และค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก เกรด 304, 202 และ D7 ภายหลังจากการเชื่อม

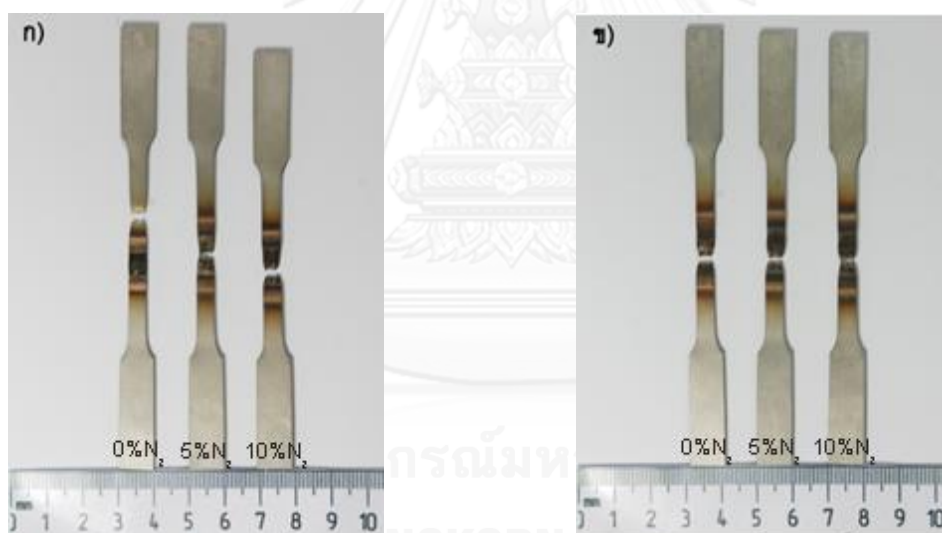


รูปที่ 4.26 ผลของปริมาณแก๊สไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอน และกระแสไฟฟ้าเชื่อมพัลส์ สูงสุด ต่อค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด



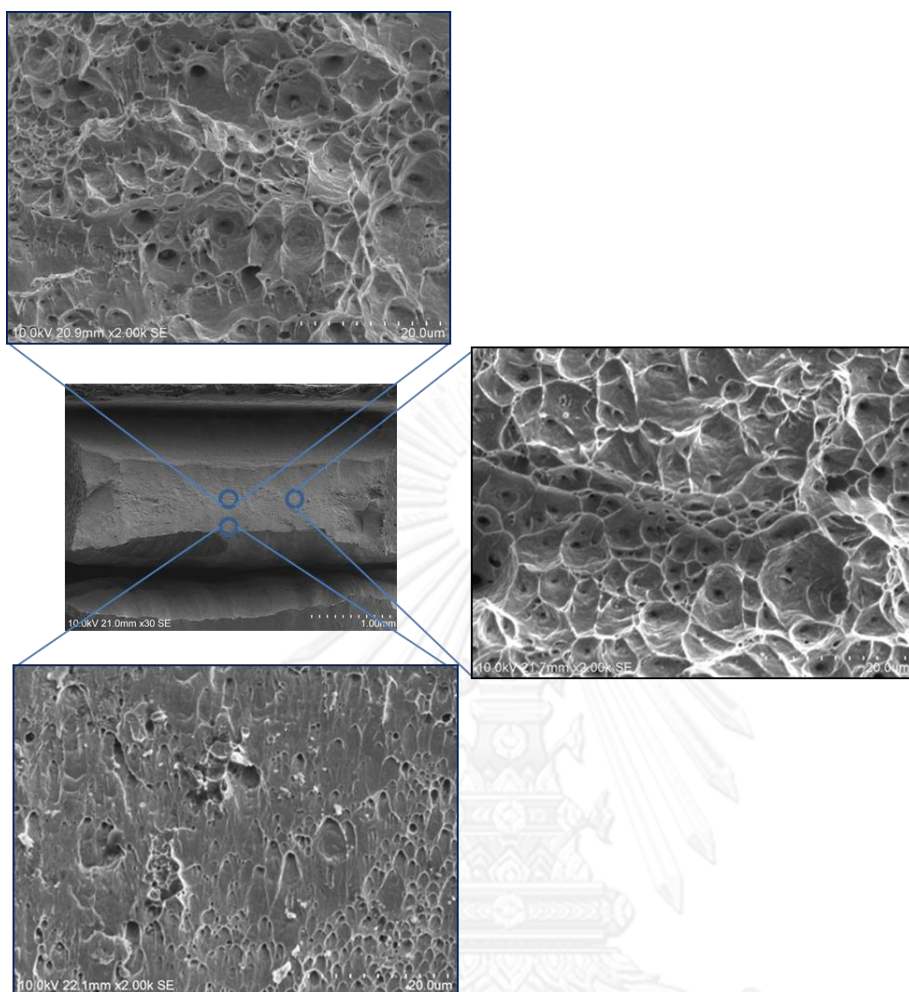
รูปที่ 4.27 ผลของปริมาณแก๊สไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอน และกระแสไฟฟ้าเชื่อมพัลส์ สูงสุด ต่อค่าเปอร์เซ็นต์การยึดตัว

ภายหลังการทดสอบความต้านทานแรงดึง นำชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบความต้านทานแรงดึง มาตรวจสอบลักษณะการแตกหัก ดังแสดงในรูปที่ 4.28 พบว่ามีเพียงการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม ออสเทนิติก เกรด 304, 202 และ D7 โดยใช้กระแสไฟฟ้าเชื่อมพัลส์สูงสุด 130 แอมแปร์ ด้วยแก๊ส ไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอนจาก 0 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ที่เกิดการแตกหักที่บริเวณโลหะ พื้น ส่วนเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก เกรด 304, 202 และ D7 ที่เชื่อมโดยใช้กระแสไฟฟ้าเชื่อมพัลส์ สูงสุด 130 แอมแปร์ ด้วยแก๊สไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอน 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดย ปริมาตร และที่เชื่อมโดยใช้กระแสไฟฟ้าเชื่อมพัลส์สูงสุด 160 แอมแปร์ ทั้งหมด พบว่าเกิดการแตกหัก ที่บริเวณเนื้อโลหะรอยเชื่อม โดยทั้งหมดทั้งที่แตกหักบริเวณโลหะพื้น และบริเวณเนื้อโลหะรอยเชื่อม พบว่าเป็นการแตกหักแบบฉฉวยและโคนซึ่งบ่งบอกถึงว่าเป็นการแตกหักแบบเหนียว และจากรูปแสดง ให้เห็นว่าการแตกหักที่เปลี่ยนจากบริเวณโลหะพื้นมายังเนื้อโลหะรอยเชื่อมน่าจะเป็นผลมาจาก ปริมาณความร้อนที่เพิ่มขึ้น มากกว่าผลของไนโตรเจนที่มีต่อโครงสร้างจุลภาค เนื่องจากแม้การเชื่อม โดยใช้กระแสไฟฟ้าเชื่อมพัลส์สูงสุด 160 แอมแปร์ ด้วยแก๊สไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอน 0 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ก็ส่งผลให้เกิดการแตกหักที่บริเวณเนื้อโลหะรอยเชื่อมแล้ว

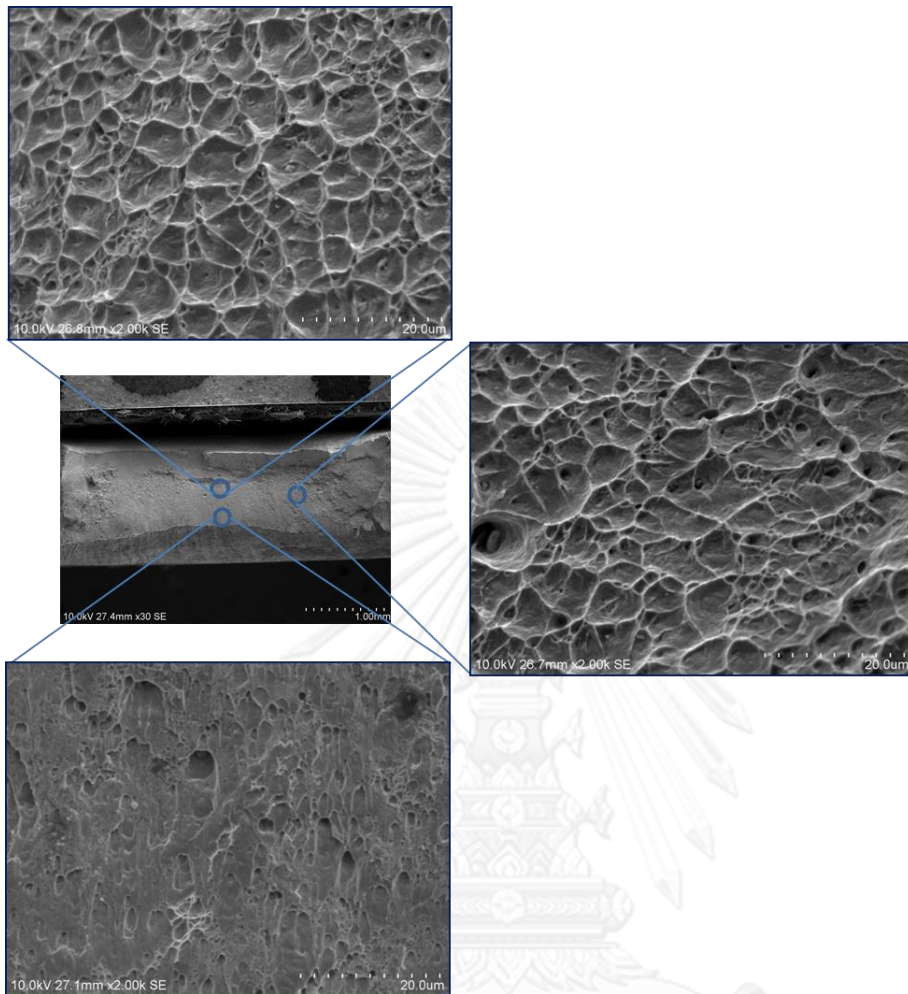


รูปที่ 4.28 ชิ้นงาน ภายหลังการทดสอบความต้านทานแรงดึงของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก เกรด 304 ที่กระแสไฟฟ้าเชื่อมพัลส์สูงสุด ก. 130 แอมแปร์ ข. 160 แอมแปร์

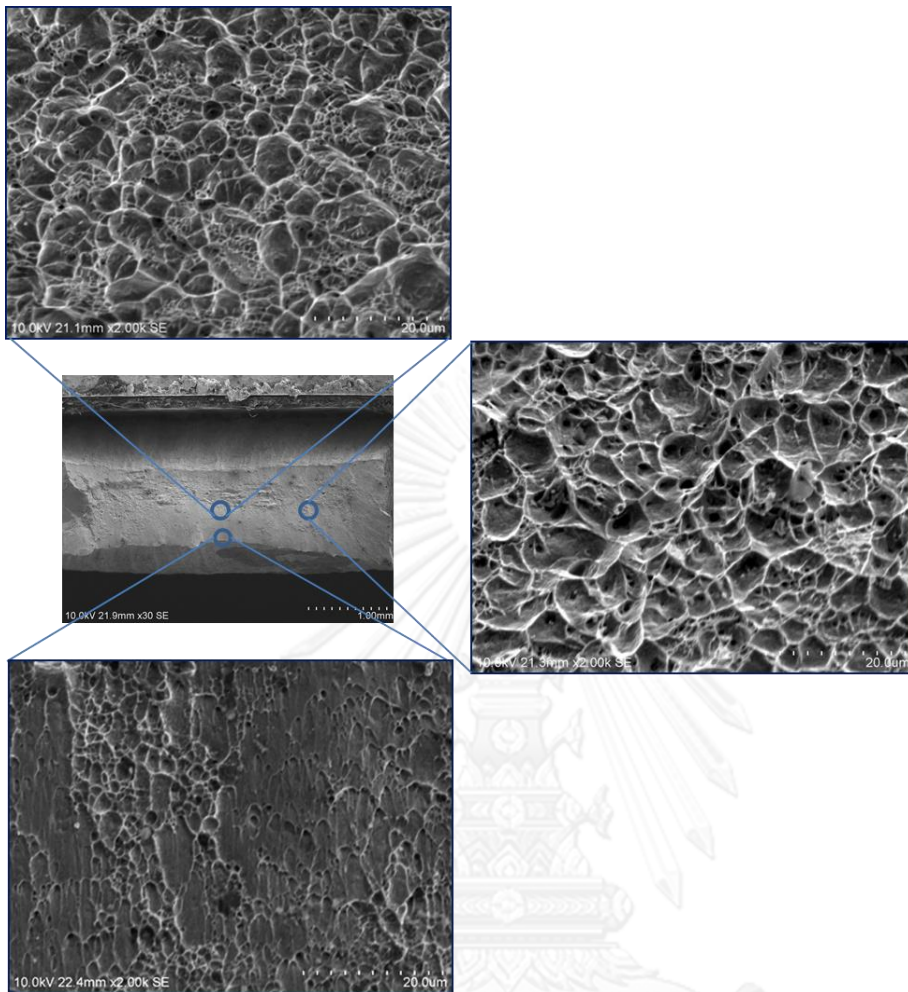
เมื่อนำชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก เกรด 304, 202 และ D7 ภายหลังการทดสอบ ความต้านทานแรงดึงมาตรวจสอบพื้นผิวการแตกหักด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบกวาดที่ กำลังขยาย 2000 เท่า ดังแสดงในรูปที่ 4.29 – 4.31 พบว่าทุกชิ้นบริเวณใจกลางพื้นผิวรอยแตกหัก ประกอบไปด้วยดิมเพิล (dimple) ซึ่งแสดงถึงลักษณะความเสียหายจากการแตกหักเมื่อได้รับความ แค้นแรงดึงแนวเดียว ดิมเพิลแต่ละดิมเพิลจะเป็นครึ่งหนึ่งของไมโครรอยด์ที่ถูกสร้างขึ้นและแยกออก จากกันในระหว่างกระบวนการแตกหัก [55, 56] และบริเวณขอบชิ้นงานประกอบด้วยเชิอร์ดิมเพิลซึ่ง บ่งบอกถึงการแตกหักแบบเหนียวด้วยแรงเฉือน



รูปที่ 4.29 พื้นผิวรอยแตกของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก เกรด 304 หนา 2 มิลลิเมตร ที่ กระแสไฟฟ้าเชื่อมพัลส์สูงสุด 160 แอมแปร์ ปริมาณไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุม อาร์กอน 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร



รูปที่ 4.30 พื้นผิวรอยแตกของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมอสเทนนิติก เกรด 202 หนา 2 มิลลิเมตร ที่ กระแสไฟฟ้าเชื่อมพัลส์สูงสุด 160 แอมแปร์ ปริมาณไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุม อาร์กอน 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร



รูปที่ 4.31 พื้นผิวรอยแตกของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมอสเทนดิก เกรด D7 หนา 2 มิลลิเมตร ที่ กระแสไฟฟ้าเชื่อมพัลส์สูงสุด 160 แอมแปร์ ปริมาณไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุม อาร์กอน 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

การทดลองนี้ศึกษาอิทธิพลของกระแสไฟฟ้าเชื่อมพัลส์สูงสุดและปริมาณไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอนในการเชื่อมทิกพัลส์แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก เกรด 304, 202 และ D7 หนา 2 มิลลิเมตร สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1. ปริมาณความร้อนที่เพิ่มขึ้นจากการเพิ่มกระแสไฟฟ้าเชื่อมพัลส์สูงสุด และปริมาณแก๊สไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอน ส่งผลทำให้พื้นที่เนื้อโลหะรอยเชื่อม ปริมาณไนโตรเจนในเนื้อโลหะรอยเชื่อม และความเค้นตกค้างเพิ่มขึ้น ขณะที่ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด และค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวลดลง

2. ปริมาณไนโตรเจนในเนื้อโลหะรอยเชื่อมที่เพิ่มขึ้นจากการเพิ่มปริมาณแก๊สไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอน ส่งผลให้มีปริมาณเดลต้าเฟร์ไรต์ในเนื้อโลหะรอยเชื่อมลดลง และเหลือเพียงสัณฐานแบบเวอร์มิคูลาร์ จากการเชื่อมในแก๊สอาร์กอนบริสุทธิ์ที่มีสัณฐานแบบแลทธิ และเวอร์มิคูลาร์

3. แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก เกรด D7 หนา 2 มิลลิเมตร มีความเหมาะสมที่จะเชื่อมโดยใช้กระแสไฟฟ้าเชื่อมพัลส์สูง 130 แอมแปร์ ในแก๊สไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอน 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร เนื่องจากการซึมลึกที่สมบูรณ์และช่วยควบคุมปริมาณเดลต้าเฟร์ไรต์ให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสม โดยที่ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดและค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย

4. แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก เกรด 304 และ 202 หนา 2 มิลลิเมตร มีความเหมาะสมที่จะเชื่อมโดยใช้กระแสไฟฟ้าเชื่อมพัลส์สูง 130 แอมแปร์ ในแก๊สไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอน 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร เนื่องจากการซึมลึกที่สมบูรณ์ โดยที่ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดและค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย แต่ควรระวังการเกิดการแตกร้าวขณะร้อนจากการมีปริมาณเดลต้าเฟร์ไรต์ต่ำกว่าช่วงที่เหมาะสม

5.2 ข้อเสนอแนะ

ผลการทดลองการเชื่อมทิกพัลส์แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก เกรด 304, 202 และ D7 หนา 2 มิลลิเมตร โดยการใช้ไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอน 0, 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร คาดว่าสามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นในการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติกในอุตสาหกรรมได้ แต่ผลการทดลองนี้เป็นเพียงข้อมูลเบื้องต้น จึงยังต้องการการทดลองเพิ่มเติมเพื่อให้ได้ข้อมูลที่สมบูรณ์ยิ่งขึ้น ได้แก่

1. ควรทดสอบการแตกตัวของไขมันของเหล็กกล้าไร้สนิมอสเทนดิกเกรดที่มีปริมาณคาร์บอนต่ำเพื่อไรต์ต่ำกว่าช่วงที่เหมาะสม
2. การศึกษาโครงสร้างจุลทรรศน์ที่มีความเป็นไปได้ที่จะเกิดขึ้นภายหลังการเชื่อมด้วยตัวแปรเชื่อมต่างๆ
3. การศึกษาผลของความต้านทานการกัดกร่อนภายหลังการเชื่อมด้วยตัวแปรเชื่อมต่างๆ
4. การศึกษาสมบัติเชิงกลอื่นๆได้แก่การทดสอบความแข็ง และความแกร่งของเนื้อโลหะรอยเชื่อม



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

รายการอ้างอิง

1. Ujiro, T., et al., Effect of alloying Cu on the corrosion resistance of stainless steels in chloride media. *Corrosion Science* 2001. **43**: p. 2185-2200.
2. Pardo, A. and M.C. Merino, Influence of Cu and Sn content in the corrosion of AISI 304 and 316 stainless steels in H₂SO₄ *Corrosion Science* 2006. **48**: p. 1075-1092.
3. Peckner, D. and J.M. Bernstein, *Handbook of stainless steels*. 1977, New York: McGraw-Hill.
4. Kim, S.-T., et al., Effects of shielding gases on the microstructure and localized corrosion of tube-to-tube sheet welds of super austenitic stainless steel for seawater cooled condenser. *Corrosion Science* 2011. **53**: p. 2611-2618.
5. Lin, Y.C. and P.Y. Chen, Effect of nitrogen content and retained ferrite on the residual stress in austenitic stainless steel weldments. *Materials Science and Engineering* 2001. **A307**: p. 165-171.
6. Tseng, K.H. and C.P. Chou, The study of nitrogen in argon gas on the angular distortion of austenitic stainless steel weldments. *Journal of Materials Processing Technology*, 2003. **142**: p. 139-144.
7. Coetzee, M. and P.G.H. Pistorius, The welding of experimental low-nickel Cr-Mn-N stainless steels containing copper. *The Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy*, 1996: p. 99-108.
8. OKAGAWA, R.K., R.D. Dixon, and D.L. Olson, The influence of nitrogen from welding on stainless steel weld metal microstructures. *Welding Journal* 1983. **62**: p. 204s-209s.
9. Davis, J.R., *ASM Speciality Handbook: Stainless Steels*. 1994, OH: ASM International.
10. Lippold, J.C. and D.J. Kotecki, *Welding metallurgy and weldability of stainless steels*. 2005, NJ: John Wiley & Sons, Inc.
11. Olson, D.L., Prediction of Austenitic Weld Metal Microstructure and Properties. *Welding Journal*, 1985. **10**: p. 281s-295s.
12. Hull, F.C., Effect of Delta Ferrite on the hot cracking of stainless steel. *Welding Journal* 1967. **46**: p. 399s-409s.
13. Castro, R. and J. De Cadenet, *Welding metallurgy of stainless steel and heat resistance steels*. 1975, London: Cambridge University Press.
14. Krishnan, K.N. and K. Prasad Rao, Effect of microstructure on stress corrosion cracking behaviour of austenitic stainless steel weld metals. *Materials Science and Engineering*, 1991. **A142** p. 79-85.

15. Eichelmann, G.J. and F.C. Hull, The effect of composition of spontaneous transformation of austenite to martensite in 18–8-type stainless steel. Transactions ASM 1953. **45**: p. 77-104.
16. Rajasekhar, K., et al., Microstructural Evolution during Solidification of Austenitic Stainless steel Weld Metals: A Color Metallographic and Electron Microprobe Analysis Study. Materials Characterization 1997. **38**: p. 53-65.
17. Suutala, N., T. Takalo, and T. Moiso, The relationship between solidification and microstructure in austenitic and austenitic-ferritic stainless steel welds. Metallurgical Transaction A, 1979. **10**(4): p. 512-514.
18. Suutala, N., T. Takalo, and T. Moiso, Ferrite-Austenite solidification mode in austenitic stainless steel welds. Metallurgical Transaction A 1980. **11**: p. 717-725.
19. David, S.A., J.M. Vitek, and T.L. Hebble, Effect of rapid solidification on stainless weld metal microstructure and it's implication on the Schaeffler diagram. Welding Journal 1987. **66**: p. 289s-300s.
20. Cornu, J., Advanced welding systems : TIG and related processes. 1988, Berlin: JFS.
21. Lakshminarayanan, A.K., K. Shanmugam, and V. Balasubramanian, Effect of Autogenous Arc Welding Processes on Tensile and Impact Properties of Ferritic Stainless Steel. Journal of Iron and Steel Research 2009. **16**: p. 62-68.
22. Karunakaran, N. and V. Balasubramanian, Effect of pulsed current on temperature distribution, weld bead profiles and characteristics of gas tungsten arc welded aluminum alloy joints. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2011. **21**: p. 278-286.
23. Giridharan, P.K. and N. Murugan, Optimization of pulsed GTA welding process parameters for the welding of AISI 304L stainless steel sheets. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2009. **40**: p. 478-489.
24. เอกรัตน์ ไวยนิตย์, อิทธิของตัวแปรในการเชื่อมทิกพัลส์และส่วนผสมของแก๊สปกคลุมต่อลักษณะการเกิดรอยเชื่อม และโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก เกรด 316L ในตำแหน่งการเชื่อม 6, 8, 9, 10, และ 12 นาฬิกา. 2542, สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
25. R., S., et al., Effect of welding process parameters on weld bead geometry and optimization of process parameters to maximize depth to width. European Journal of Scientific Research 2011. **62**: p. 76-94.

26. Kumar, S. and A.S. Shahi, Effect of heat input on the microstructure and mechanical properties of gas tungsten arc welded AISI 304 stainless steel joints. *Materials and Design* 2011. **32**: p. 3617-3623.
27. Sindo, K., *Welding Metallurgy*. 2002, NJ: Wiley & Sons, Inc.
28. Kowanda, C. and M.O. Spridel, Solubility of nitrogen in liquid nickel and binary Ni–Xi alloys (Xi=Cr, Mo,W, Mn, Fe, Co) under elevated pressure. *Scripta Materialia* 2003. **40**: p. 1073-1078.
29. Wada, H. and R.D. Pehlke, Solubility of nitrogen in liquid Fe-Cr-Ni alloys containing manganese and molybdenum. *Metallurgical Transactions B*, 1977. **8**: p. 675-682.
30. TOIT, M.d. and P.C. PISTORIUS, Nitrogen Control during the Autogenous Arc Welding of Stainless Steel Part 2: A Kinetic Model for Nitrogen Absorption and Desorption. *Welding Journal*, 2003. **9**: p. 231s-237s.
31. Shankar, V., et al., Effect of nitrogen addition on microstructure and fusion zone cracking in type 316L stainless steel weld metals. *Materials Science and Engineering A*, 2003. **343**: p. 170-181.
32. Leggatt, R.H., Residual stresses in welded structures. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2008. **85**: p. 144-151.
33. ASTM INTERNATIONAL, Designation: E08M-04, Standard test methods for tension testing of metallic materials. 2004.
34. ASTM INTERNATIONAL, Designation: E407-99, Standard Practice for Microetching Metals and Alloys. 1999.
35. Petzow, G., *Metallographic Etching Metallographic Etching: Techniques for Metallography, Ceramography, Plastography*. 2 ed. 1999, Ohio: American Society for Metals.
36. Boulos, M.I., P. Fauchais, and E. Pfender, *Thermal Plasmas – Fundamentals and Applications*. 1994, New York: Plenum Co.
37. Lu, S., et al., Numerical study and comparisons of gas tungsten arc properties between argon and nitrogen. *Computational Materials Science* 2009. **45**: p. 327-335.
38. Easterling, K., *Introduction to the Physical Metallurgy of Welding*. 1985, Oxford: Butterworths.
39. Huang, H.-Y., Effects of shielding gas composition and activating flux on GTAW weldments. *Materials and Design* 2009. **30**: p. 2404-2409.
40. Lin, Z., et al., Influence of nitrogen and heat input on weld metal of gas tungsten arc welded high nitrogen steel. *Journal of Iron and Steel Research* 2007. **14**: p. 259-262.

41. Hertzman, S., et al., Influence of Shielding Gas Composition and Welding Parameters on the N-content and Corrosion Properties of Welds in N-alloyed Stainless Steel Grades Iron and Steel Research International, 1996. **36**: p. 968-976.
42. Ogawa, R.K., R.D. Dixon, and D.L. Olson, The influence of Nitrogen from Welding on Stainless Steel Weld Metal Microstructures. Welding Journal 1983. **62**: p. 204s-209s.
43. Ogawa, T. and T. Koseki, Weld ability of Newly Developed Austenitic Alloys for Cryogenic Service: Part II High-Nitrogen Stainless Steel Weld Metal. Welding Journal 1988. **60**: p. 8s-17s.
44. Iorio, L., M. Cortie, and J. R., Technical Note: Solubility of nitrogen in experimental low-nickel austenitic stainless. The Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy, 1984: p. 173-178.
45. Reis, B.P., et al., The effects of dendritic arm spacing (as-cast) and aging time (solution heat-treated) of Al–Cu alloy on hardness. Journal of Alloys and Compounds, 2013. **549**: p. 324-335.
46. Elmer, J.W., S.M. Allen, and T.W. Eagar, Microstructure Development during Solidification of Stainless Steel Alloys. Metallurgical Transactions A, 1989. **20**: p. 2117-2131.
47. David, S.A., Ferrite Morphology and Variations in Ferrite Content in Austenitic Stainless Steel Welds. Welding Journal 1981. **60**: p. 63s-71s.
48. Weisman, C., Welding handbook. 1976, Miami: American Welding Society.
49. Ihara, R., T. Hashimoto, and M. Mochizuki, Residual stress variation due to piping processes of austenitic stainless steel. Journal of Physics, 2012. **379**: p. 1-8.
50. Akbari, D. and I. Sattari-Far, Effect of the welding heat input on residual stresses in butt-welds of dissimilar pipe joints. International Journal of Pressure Vessels and Piping 2009. **86**: p. 769-776.
51. Boellinghaus, T., H. Hoffmesister, and M. Littich, Application of the IRC-Test for Assessment of Reaction Stresses in Tubular Joints with Respect to Hydrogen Assisted Cracking. Welding in the World 1999. **43**(27-35).
52. Hamada, A.S., et al., Contribution of deformation mechanisms to strength and ductility in two Cr–Mn grade austenitic stainless steels. Materials Science and Engineering A 2013. **559**: p. 336-344.
53. QUARESMA, J.M.V., C.A. SANTOS, and A. GARCIA, Correlation between Unsteady-State Solidification Conditions, Dendrite Spacings, and Mechanical Properties of Al-Cu Alloys. METALLURGICAL AND MATERIALS TRANSACTIONS A, 2000. **31**: p. 3167-3168.

54. Hemanth, J., Effect of cooling rate on dendrite arm spacing (DAS), eutectic cell count (ECC) and ultimate tensile strength (UTS) of austempered chilled ductile iron. *Materials and Design* 2000. **21**: p. 1-8.
55. Callister, W.D., *Materials Science and Engineering: An Introduction*. 2003, NJ: John Wiley & Sons, Inc.
56. Anderson, T.L., *Fracture Mechanics Fundamentals and Applications*. 1995, Boca Raton: CRC Press, Inc., .
57. Shielding, P.I., *Shielding Gases Selection Manual*. 1999, Danbury.





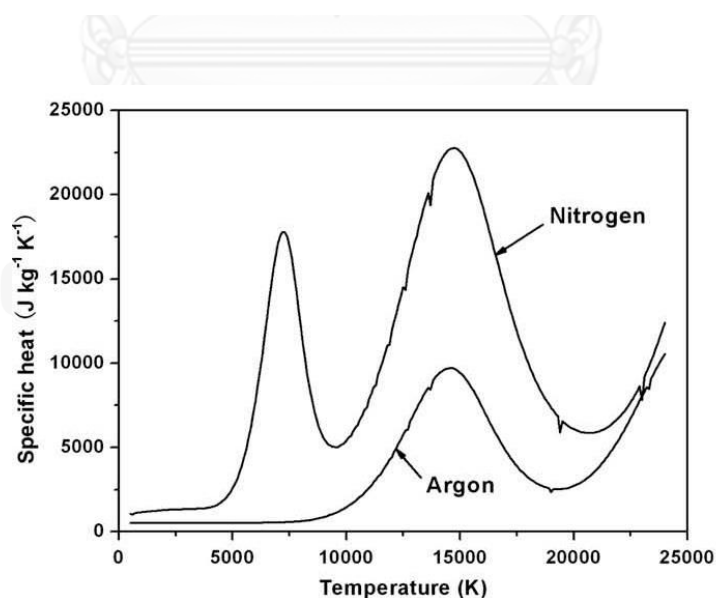
ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก
สมบัติของแก๊สปกคลุม

ตารางที่ ก.1 สมบัติของแก๊สปกคลุม [57]

	Argon	Carbon Dioxide	Helium	Hydrogen	Nitrogen	Oxygen
Chemical Symbol	Ar	CO ₂	He	H ₂	N ₂	O ₂
Atomic Number	18	—	2	1	7	8
Molecular Weight	39.95	44.01	4.00	2.016	28.01	32.00
Specific Gravity, Air = 1	1.38	1.53	0.1368	0.0695	0.967	1.105
Density (lb/cu ft) at 0 C, 1 atmosphere	0.1114	0.1235	0.0111	0.0056	0.0782	0.0892
Ionization Potential (ev)	15.7	14.4	24.5	13.5	14.5	13.2
Thermal Conductivity (10⁻³ x Btu/hr-ft- F)	9.69 (32 F)	8.62 (32 F)	85.78 (32 F)	97.22 (32 F)	13.93 (32 F)	14.05 (32 F)
Cubic ft/lb	9.67	8.73	96.71	192	13.8	12.08
Cubic ft/gal	113.2	74.0	100.6	103.7	93.2	115.0

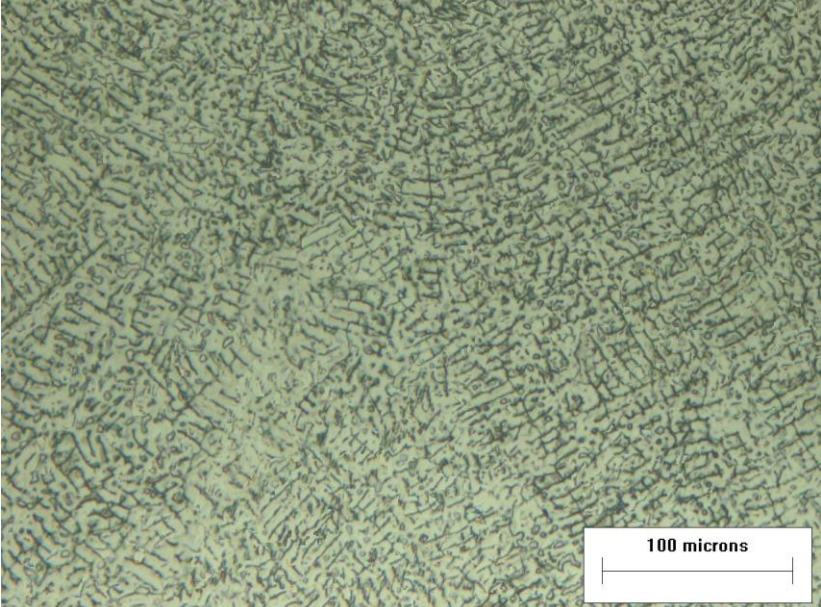
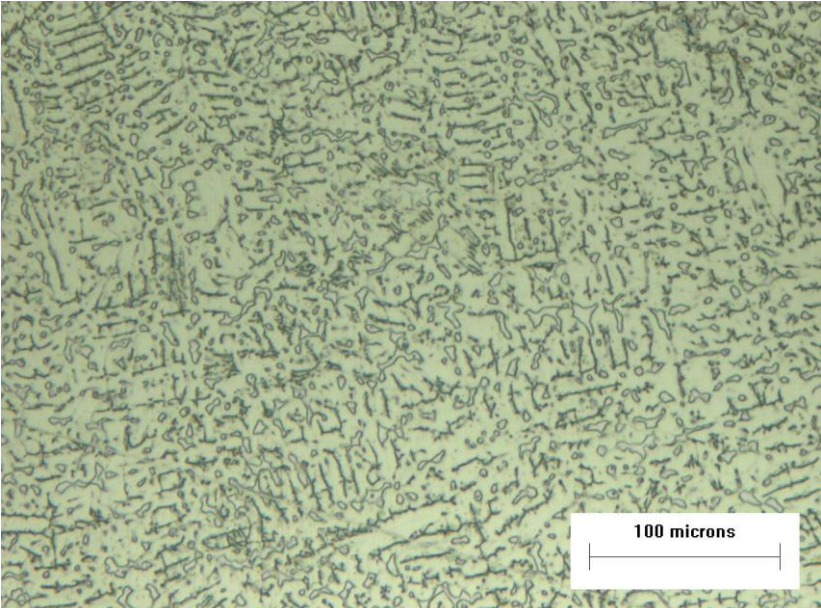


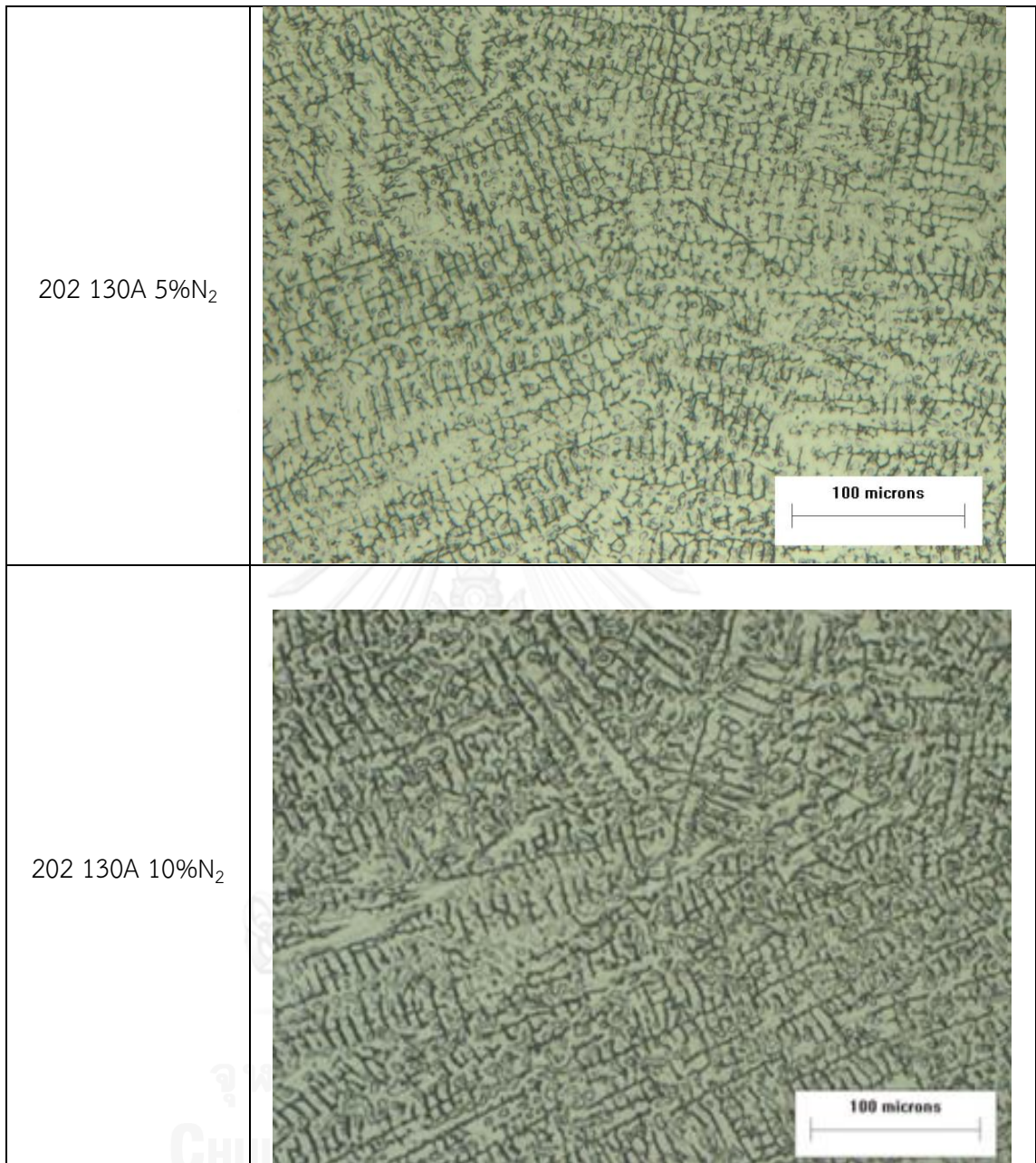
รูปที่ ก.1 เปรียบเทียบค่าความจุความร้อนของแก๊สอาร์กอนกับแก๊สไนโตรเจนที่อุณหภูมิต่างๆ [37]

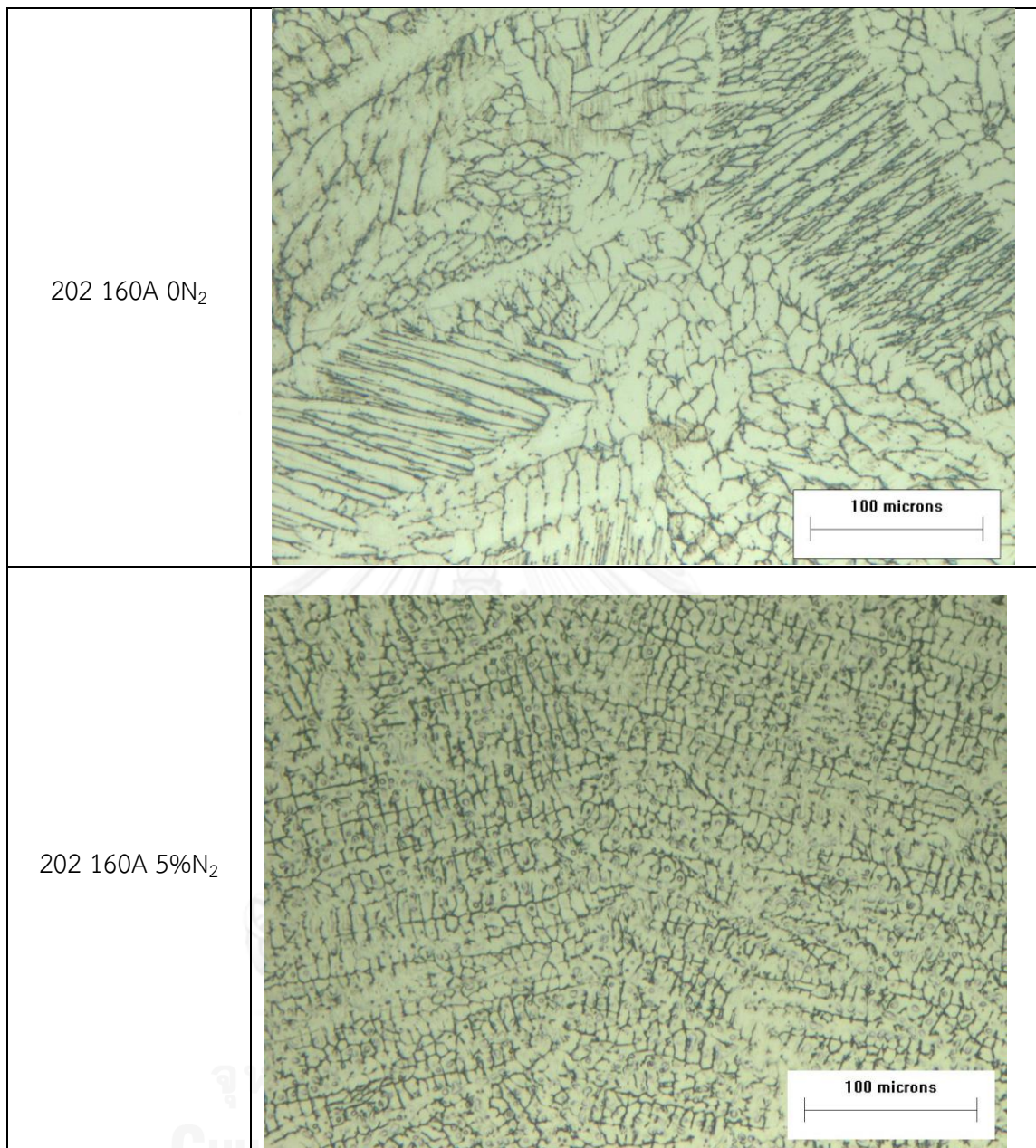
ภาคผนวก ข

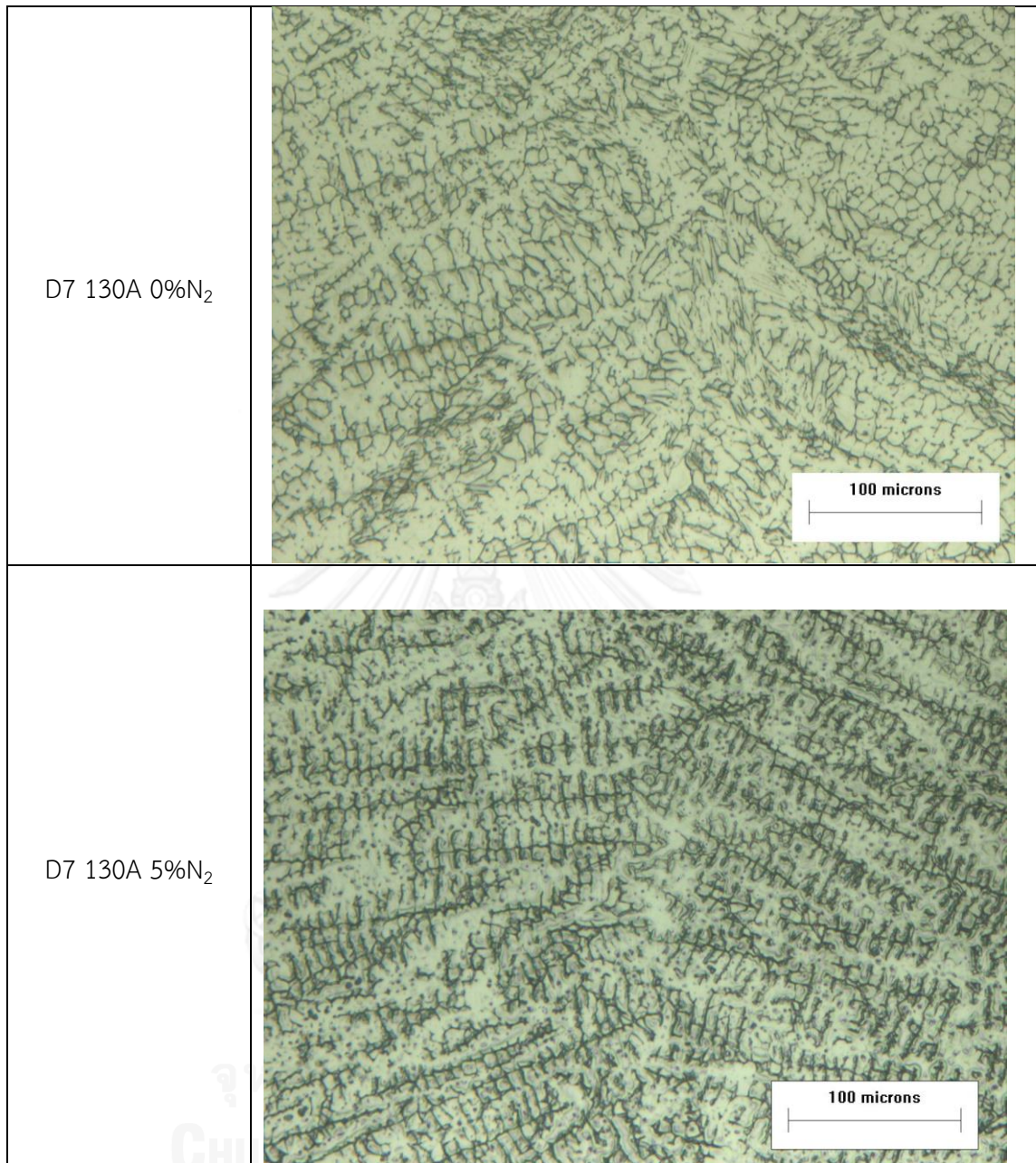
โครงสร้างจุลภาค

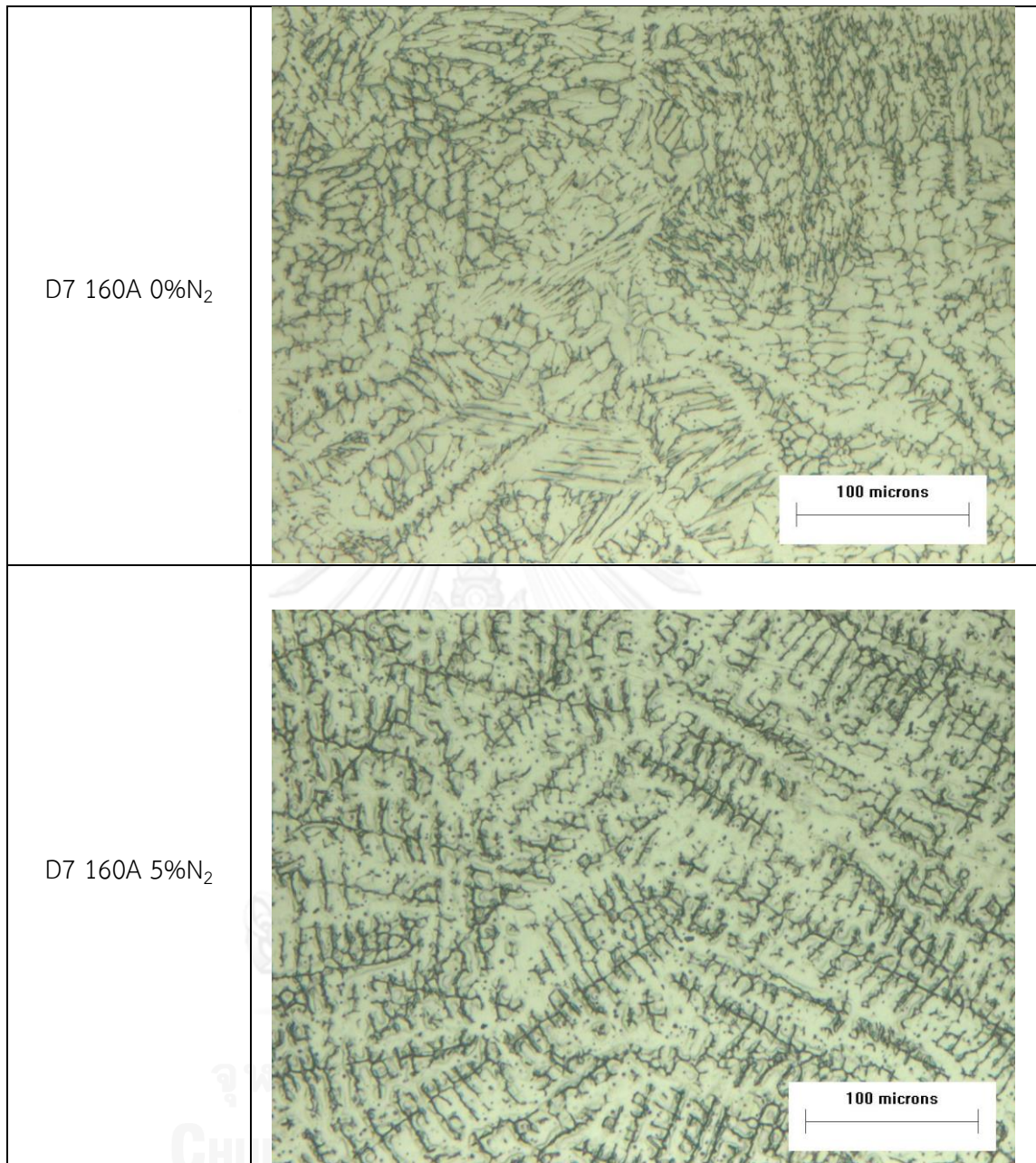
ตารางที่ ข.1 โครงสร้างจุลภาคเนื้อโลหะรอยเชื่อมที่กำลังขยาย 200 เท่า

ชิ้นงานทดสอบ	โครงสร้างจุลภาค
304 130A 5%N ₂	
304 130A 10%N ₂	









ภาคผนวก ค

การคำนวณค่าความเค้นตกค้าง

การวัดความเค้นโดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่เกิดขึ้นที่พื้นผิวของวัสดุ เมื่อความเค้นในทิศทางตั้งฉากกับพื้นผิวของวัสดุเท่าศูนย์ ($\sigma_3 = 0$) แต่ความเครียดในทิศทางตั้งฉากกับพื้นผิวของวัสดุไม่เท่าศูนย์ ($\varepsilon_3 \neq 0$)

ε_3 สามารถวัดจาก

$$\varepsilon_3 = \frac{d_n - d_0}{d_0} \quad \text{ค.1}$$

เมื่อ d_n คือระยะห่างระหว่างระนาบที่ขนานกับพื้นผิวของวัสดุที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อได้รับความเค้น และ d_0 คือระยะห่างระหว่างระนาบที่ขนานกับพื้นผิวของวัสดุเมื่อไม่มีความเค้นตกค้าง

ε_3 ถูกกำหนดโดย

$$\varepsilon_3 = \varepsilon_z = -\frac{\nu}{E}(\sigma_1 + \sigma_2) \quad \text{ค.2}$$

จากทฤษฎีอิลาสติกซิตี

$$\varepsilon_\psi = \frac{\sigma_\phi}{E}(1 + \nu)\sin^2 \psi - \frac{\nu}{E}(\sigma_1 + \sigma_2) \quad \text{ค.3}$$

โดย

$$\varepsilon_\psi = \frac{d_i - d_0}{d_0} \quad \text{ค.4}$$

แทนค่า (2) ใน (3)

$$\varepsilon_\psi = \frac{\sigma_\phi}{E}(1 + \nu)\sin^2 \psi + \varepsilon_3 \quad \text{ค.5}$$

$$\varepsilon_\psi - \varepsilon_3 = \frac{\sigma_\phi}{E}(1 + \nu)\sin^2 \psi \quad \text{ค.6}$$

แทนค่า (1) และ (4) ใน (6)

$$\frac{d_i - d_0}{d_0} - \frac{d_n - d_0}{d_0} = \frac{\sigma_\phi}{E}(1 + \nu)\sin^2 \psi \quad \text{ค.7}$$

$$\frac{d_i - d_n}{d_0} = \frac{\sigma_\phi}{E}(1 + \nu)\sin^2 \psi \quad \text{ค.8}$$

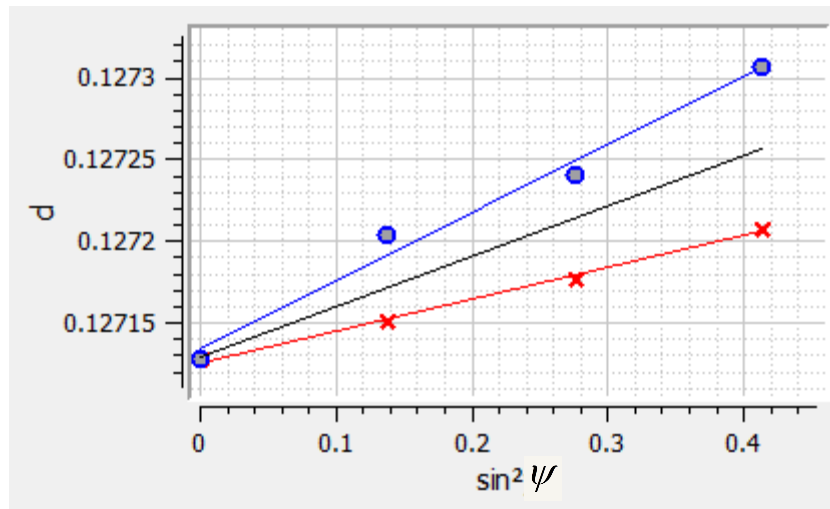
$$\sigma_\phi = \frac{E}{(1 + \nu)\sin^2 \psi} \left(\frac{d_i - d_n}{d_0} \right) \quad \text{ค.9}$$

สามารถแทน d_0 ด้วย d_n โดยเกิดความคลาดเคลื่อนเพียงเล็กน้อย

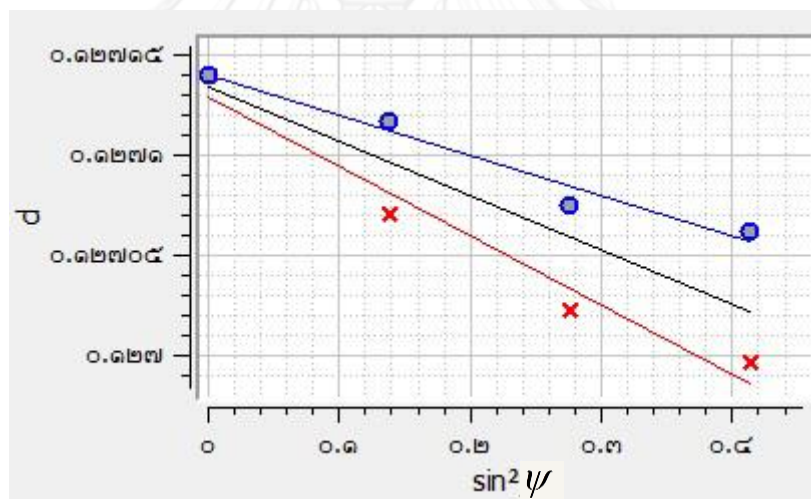
$$\sigma_\phi = \frac{E}{(1 + \nu)\sin^2 \psi} \left(\frac{d_i - d_n}{d_n} \right) \quad \text{ค.10}$$

$$d_i = \frac{d_n(1 + \nu)\sigma_\phi}{E} \sin^2 \psi + d_n \quad \text{ค. 11}$$

จากสมการที่ ค.11 พบว่าเมื่อทราบความชันของสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ระยะห่างระหว่างระนาบ (d_i) กับไซน์กำลังสองของมุมยิงรังสีเอกซ์ (ψ) จะสามารถหาค่าความเค้นตกค้าง (σ_ϕ) ออกมาได้ เมื่อทราบอัตราส่วนปัวซอง (ν) และค่ามอดุลัสของยัง (E) ของวัสดุ ดังแสดงในรูปที่ ค.1 แสดงค่าความชันเฉลี่ย (เส้นสีดำ) ของเส้นมุมยิงบวก (เส้นกากบาท) และเส้นมุมยิงลบ (เส้นวงกลม) เป็นบวก เมื่อนำค่าความชันเฉลี่ยมาคำนวณในสมการที่ ค.11 จะได้ค่าความเค้นตกค้างแรงดึง และ รูปที่ ค.2 แสดงค่าความชันเฉลี่ย (เส้นสีดำ) ของเส้นมุมยิงบวก (เส้นกากบาท) และเส้นมุมยิงลบ (เส้นวงกลม) เป็นลบ เมื่อนำค่าความชันเฉลี่ยมาคำนวณในสมการที่ ค.11 จะได้ค่าความเค้นตกค้างแรงอัด



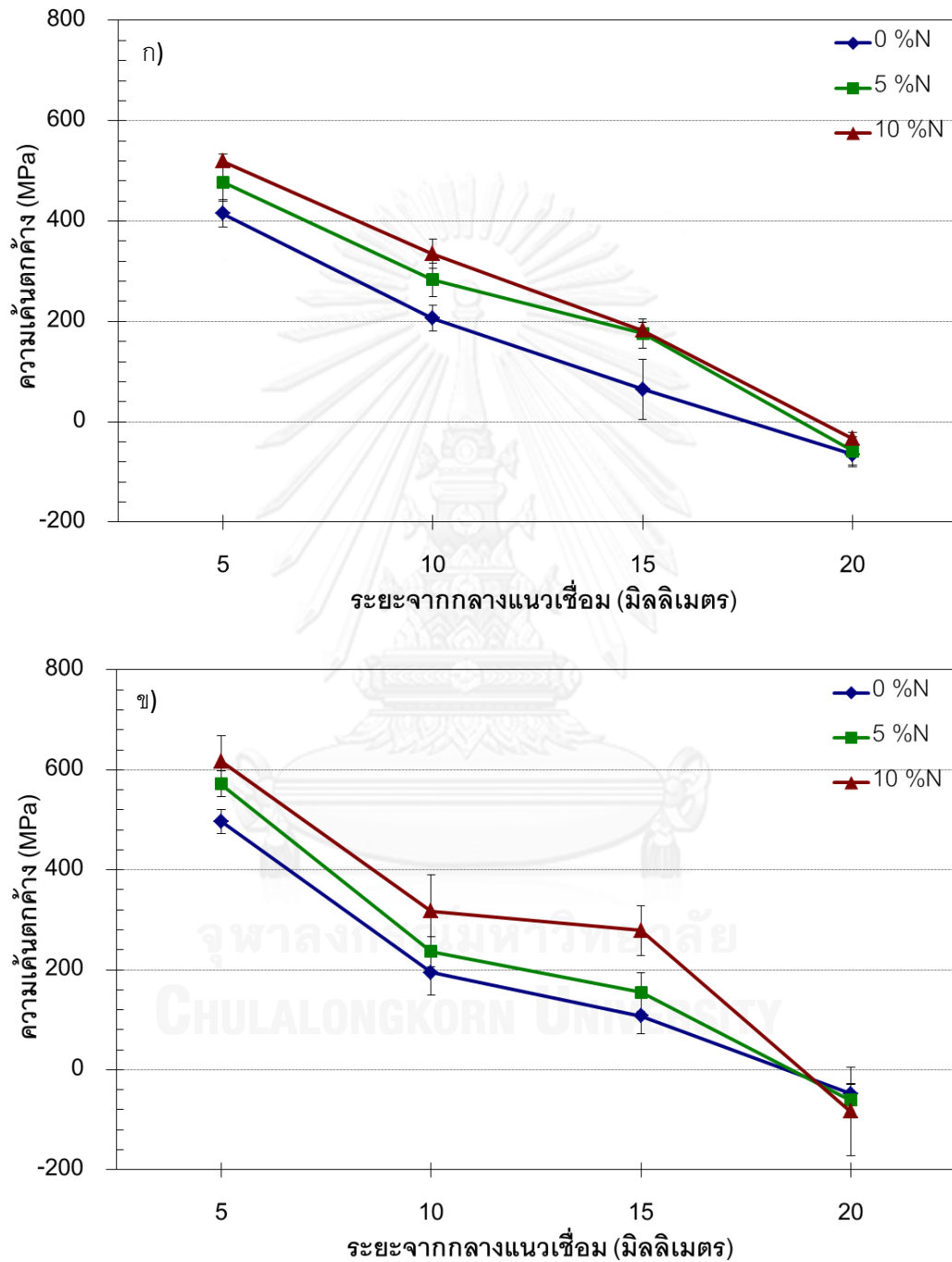
รูปที่ ค.1 ผลการวัดความเค้นตกค้างโดยเครื่องวัดความเค้นตกค้างด้วยรังสีเอกซ์แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างระหว่างระนาบ (d) กับ มุมยิงรังสีเอกซ์ (ψ) ที่ความชันเฉลี่ยเป็นบวก



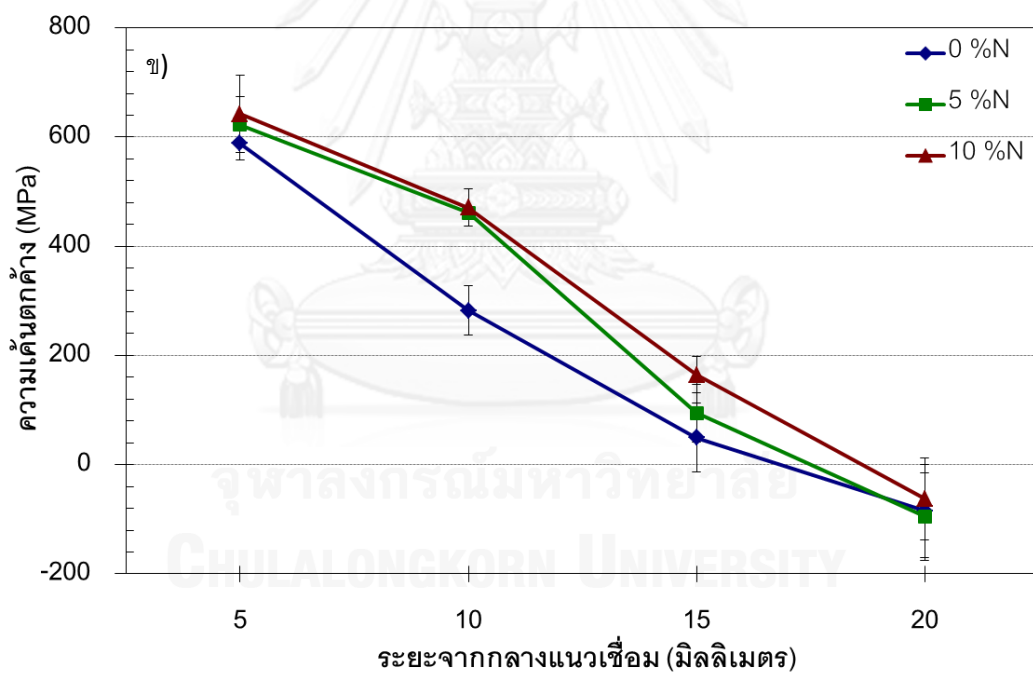
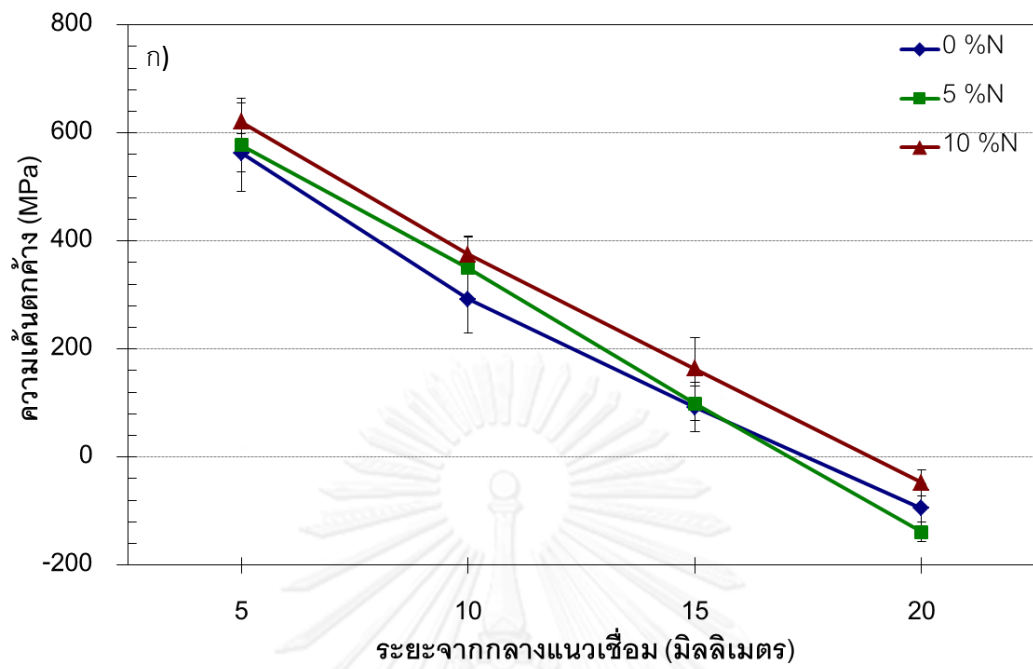
รูปที่ ค.2 ผลการวัดความเค้นตกค้างโดยเครื่องวัดความเค้นตกค้างด้วยรังสีเอกซ์แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างระหว่างระนาบ (d) กับ มุมยิงรังสีเอกซ์ (ψ) ที่ความชันเฉลี่ยเป็นลบ

ภาคผนวก ง

ผลความเค้นตกค้าง



รูปที่ ง.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นตกค้าง กับระยะห่างจากกลางแนวเชื่อมของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติกเกรด 202 หนา 2 มิลลิเมตร ที่กระแสไฟฟ้าเชื่อมพัลส์สูงสุด ก. 130 ข. 160 แอมแปร์



รูปที่ ๒.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นตึงกับระยะห่างจากกลางแนวเชื่อมของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิติก เกรด D7 หนา 2 มิลลิเมตร ที่กระแสไฟฟ้าเชื่อมพัลส์สูงสุด ก. 130 ข. 160 แอมแปร์

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ชื่อ - นามสกุล นายประกาศศักดิ์ เพ็ชรอาภรณ์
วัน - เดือน - ปีเกิด 15 กรกฎาคม 2530
ที่อยู่ 153/110 ถ.สุขโขทัย เขตดุสิต กทม. 10300
วุฒิการศึกษา มัธยมศึกษาตอนปลาย
โรงเรียนจิตรลดา ปีการศึกษา 2548
วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวัสดุศาสตร์
คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ปีการศึกษา 2552
เข้าศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
ภาควิชา วิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2553