



EFFECT OF TIG PULSE PARAMETERS AND SHIELDING GAS COMPOSITIONS ON  
WELD BEAD FORMATIONS AND MICROSTRUCTURE OF THE 316L AUSTENITIC  
STAINLESS STEEL AT THE 6 HOUR 8 HOUR 9 HOUR 10 HOUR AND 12 HOUR  
POSITIONS

Mr. Ekkarut Viyanit

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

Department of Metallurgical Engineering

Graduate School

Chulalongkorn University

Academic Year 1999

ISBN 974-331-453-9



เอกรัตน์ ไวยนิตย์ : อิทธิพลของตัวแปร ในการเชื่อมทิกพัลส์และส่วนผสมของแก๊สปกคลุมต่อลักษณะการเกิด รอยเชื่อม และ โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเตนนิติกเกรด 316L ในตำแหน่งการเชื่อม 6 นาฬิกา 8 นาฬิกา 9 นาฬิกา 10 นาฬิกา และ 12 นาฬิกา (EFFECT OF TIG PULSE PARAMETERS AND SHIELDING GAS COMPOSITIONS ON WELD BEAD FORMATIONS AND MICROSTRUCTURE OF THE 316L AUSTENITIC STAINLESS STEEL AT THE 6 HOUR 8 HOUR 9 HOUR 10 HOUR AND 12 HOUR POSITIONS) อ. ที่ปรึกษา : ผศ. ดร. กอบบุญ หล่อทองคำ, อ. ที่ปรึกษาร่วม : อ. พันธุ์แสง ชูมั่ง, 110 หน้า. ISBN 974-331-453-9.

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ คือศึกษาหาอิทธิพลของตัวแปรการเชื่อมทิกพัลส์สำหรับเหล็กกล้าไร้สนิม ออสเตนนิติกเกรด 316L ชนิดแผ่นหนา 3 มม. โดยอ้างอิงลักษณะรอยเชื่อมตามมาตรฐาน DIN 8563 ระดับ BS ที่ตำแหน่งเชื่อม 6, 8, 9, 10 และ 12 นาฬิกา ตัวแปรการเชื่อมทิกพัลส์ที่ศึกษา คือ ความเร็วเชื่อม กระแสไฟฟ้าพัลส์ กระแสไฟฟ้าเบส ความถี่พัลส์ และ % On time ใช้แก๊สปกคลุมอาร์กอนผสมแก๊สไนโตรเจน 0-4 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร อัตราการไหลของแก๊สปกคลุมด้านบนและด้านล่างรอยเชื่อม 8 ลิตร/นาที

จากการทดลองเบื้องต้นเพื่อหาค่ากระแสไฟฟ้าเบส ความถี่พัลส์ และค่า % On time ที่ตำแหน่ง 6 นาฬิกา ความเร็วเชื่อม 4 มม./วินาที ใช้แก๊สปกคลุมอาร์กอนบริสุทธิ์ พบว่าค่าที่เหมาะสมคือ กระแสไฟฟ้าเบส 61 แอมแปร์ ความถี่พัลส์ 5 เฮิร์ตซ และ 65% On time ตัวแปรเหล่านี้จะใช้เป็นตัวแปรคงที่สำหรับการทดลองเชื่อมทุกตำแหน่งเชื่อมต่อไป

การทดลองขั้นต้นต่อไปคือ การเชื่อมที่ตำแหน่ง 6, 8, 9, 10 และ 12 นาฬิกา โดยใช้ กระแสไฟฟ้าเบส 61 แอมแปร์ ความถี่พัลส์ 5 เฮิร์ตซ และ 65% On time ศึกษาผลของความเร็วเชื่อมระหว่าง 2-8 มม./วินาที ผลของส่วนผสมของแก๊สไนโตรเจนในแก๊สอาร์กอน 0-4 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ต่อค่ากระแสไฟฟ้าพัลส์ที่ได้อัตราตามมาตรฐาน DIN 8563 ระดับ BS และรอยซึมลึกตลอดความหนาของแผ่นเหล็ก ผลการทดลองพบว่า ค่ากระแสไฟฟ้าพัลส์ที่ตำแหน่งเชื่อม 9 นาฬิกามีค่าต่ำสุด การเพิ่มปริมาณแก๊สไนโตรเจนในแก๊สอาร์กอน จะช่วยลดค่ากระแสไฟฟ้าพัลส์ที่ตำแหน่งเชื่อม 6 และ 12 นาฬิกาใช้ความเร็วได้สูงสุด 6 มม./วินาที และที่ความเร็วเชื่อม 7 มม./วินาทีเกิดข้อบกพร่องแบบ Slag inclusion ที่ตำแหน่ง 8, 9 และ 10 นาฬิกาใช้ความเร็วได้สูงสุด 5 มม./วินาที และที่ความเร็วเชื่อม 6 มม./วินาที เกิดข้อบกพร่องแบบ Incompletely filled groove

อัตราส่วนรอยซึมลึกต่อความกว้างรอยเชื่อมอยู่ระหว่าง 0.34-0.40 การเพิ่มความเร็วเชื่อม ทำให้รอยเชื่อม กว้างน้อยลงและอัตราส่วนรอยซึมลึกต่อความกว้างรอยเชื่อมมากขึ้น โครงสร้างจุลภาคของเนื้อเชื่อมประกอบด้วยเฟลด์ไฟเฟอร์ไรท์และออสเตนไนท์ ปริมาณเฟลด์ไฟเฟอร์ไรท์อยู่ระหว่าง 6-10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร โดยมีระดับความเชื่อมั่นทางสถิติ 95% ปริมาณเฟลด์ไฟเฟอร์ไรท์ที่แนวตัดตั้งฉากและแนวขนานรอยเชื่อมต่างกันไม่เกิน 5% ที่ตำแหน่งเชื่อม 9 นาฬิกา ปริมาณเฟลด์ไฟเฟอร์ไรท์ในเนื้อเชื่อมมีค่าต่ำสุด เพราะมีปริมาณไนโตรเจนในเนื้อเชื่อมมากที่สุด ตรวจสอบรอยเชื่อม ที่ได้ด้วยวิธีการฉายรังสีพบว่าไม่มีโพรงอากาศ

ภาควิชา ..... วิศวกรรมโลหการ  
สาขาวิชา ..... วิศวกรรมโลหการ  
ปีการศึกษา ..... 2542

ลายมือชื่อนิสิต .....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

# # 3972554921 : MAJOR METALLURGICAL ENGINEERING

KEY WORD: TIG PULSE/SHIELDING GAS/DELTA FERRITE/316L AUSTENITIC STAINLESS STEEL/WELDING POSITIONS

EKKARUT VIYANIT: EFFECT OF TIG PULSE PARAMETERS AND SHIELDING GAS COMPOSITIONS ON WELD BEAD FORMATIONS AND MICROSTRUCTURE OF THE 316L AUSTENITIC STAINLESS STEEL AT THE 6 HOUR 8 HOUR 9 HOUR 10 HOUR AND 12 HOUR POSITIONS. THESIS ADVISOR: ASSIST. PROF. GOBBOON LOTHONGKUM, Dr. -Ing.

THESIS CO-ADVISOR: MR. PHANSAENG CHOOMUNG. 110 pp. ISBN 974-331-453-9.

The objective of this work is to investigate the influence of parameters in TIG pulse welding of the AISI 316L stainless steel plate with 3-mm thickness. The weld bead profile corresponded to the DIN 8563 class BS. The welding positions were 6, 8, 9, 10 and 12 h. The studied parameters were welding speed, pulse current, base current, pulse frequency, % On time, and shielding gas Ar + N<sub>2</sub> (0-4 vol.%) with flow of 8 liter/min both for shielding and backing gases.

From the preliminary experiments, the suitable base current, pulse frequency, and %On time at the welding position of 6 h with a welding speed of 4 mm/s and argon gas shielding were 61 A, 5 Hz, and 65% On time respectively. These parameters were kept at these levels for all experiments.


At base currents of 61 A, pulse frequency of 5 Hz, and 65 %On time, the effects of welding speed and shielding gas composition on pulse currents were studied at the 6, 8, 9, 10 and 12 h welding positions. For complete penetration with weld bead profile corresponded to the DIN 8563 class BS, it was found that pulse current decreased from the welding position of 6 to 9 h and increased from the welding position of 9 to 12 h. Nitrogen in argon shielding gas decreases the pulse current because nitrogen has lower ionization energy than argon. At the welding position of 6 and 12 h, the maximum welding speed was 6 mm/s. Slag inclusion was found at welding speed of 7 mm/s. At the welding position of 8, 9 and 10 h, the maximum welding speed was 5 mm/s. Incompletely filled groove was found at the welding speed of 6 mm/s.

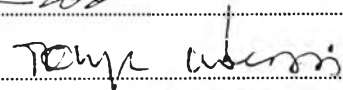
The depth/width ratio of welds were 0.34-0.40. Increasing welding speed decreased the weld width but increased the depth/width ratio. The weld microstructure compose of 6-10 vol.%  $\delta$ -ferrite with a confidence interval of 95%. The  $\delta$ -ferrite contents in the cross sectional and parallel sectional surface of welds are different less than 5%. At the welding position of 9 h, the  $\delta$ -ferrite contents in weld metal were less than that at the other positions, because of higher nitrogen contents in the weld metal. By X-ray test no pore was found in all accepted welds.

ภาควิชา..... วิศวกรรมโลหการ

สาขาวิชา..... วิศวกรรมโลหการ

ปีการศึกษา..... 2542

ลายมือชื่อนิสิต..... 

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา..... 

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม..... 

## กิตติกรรมประกาศ



วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลือ และสนับสนุนเป็นอย่างดี ของ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กอบบุญ หล่อทองคำ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้ให้คำแนะนำและ ข้อคิดเห็นต่างๆ ในการวิจัยด้วยดีตลอดมา ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ฉัตรชัย สมศิริ รองศาสตราจารย์ ดร.ปริทรรศน์ พันธบุรุษรงค์ อาจารย์ พันธุ์แสง ชูมั่ง และ อาจารย์ ดร.สุมาลี วงศ์จันทร์ คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ซึ่งได้ให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ ขอขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.อิทธิพล เตี้ยวณิชย์ ที่คอยช่วยเหลือและให้คำแนะนำตลอดมา ขอขอบพระคุณอาจารย์ ทรศ ตาปิง ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม ที่ให้คำแนะนำเกี่ยวกับเทคนิคการเชื่อม ขอขอบพระคุณ พี่สุกษณิ นิลพันธุ์ บริษัท พีเออี ไทยแลนด์ จำกัด(มหาชน) ที่ช่วยเหลือตรวจสอบรอยเชื่อมโดยวิธีฉายรังสี ขอขอบคุณ พี่ๆห้องปฏิบัติการ พี่ธุรการภาควิชาวิศวกรรมโลหการ และเพื่อนๆชาวโลหการทุกคน ที่ คอยช่วยเหลือและเป็นกำลังใจด้วยดีตลอดมา และเนื่องจากทุนการวิจัยนี้ได้รับมาจากทุนอุดหนุน การวิจัยของกองทุนโลหการ-สวทช. และสกว. จึงขอขอบคุณมา ณ.ที่นี้ด้วย

ท้ายนี้ ผู้เขียนใคร่ขอกราบขอบพระคุณ บิดา-มารดา และคุณป้า ที่สนับสนุนในด้านการเงิน และให้กำลังใจแก่ผู้เขียนเสมอมา จนสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญรูป.....	ฎ
คำอธิบายคำย่อ.....	ด
บทที่	
1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
2 วารสารปริทัศน์	
2.1 มาตรฐานรอยเชื่อม DIN 8563.....	4
2.2 อิทธิพลของตัวแปรการเชื่อมทิก ต่อการเกิดรอยเชื่อม และโครงสร้างจุลภาคของเนื้อโลหะรอยเชื่อม.....	7
3 อุปกรณ์ เครื่องมือ วิธีการตรวจสอบ และขั้นตอนการทดลอง	
3.1 อุปกรณ์เครื่องมือการทดลอง.....	33
3.2 การเตรียมชิ้นงานสำหรับการทดลอง.....	35
3.3 การวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิม ออสเทนนิติก เกรด 316L.....	36
3.4 การตรวจสอบรอยเชื่อม.....	38
3.5 สร้างขั้นตอนการทดลอง.....	40
3.6 ตัวแปรสำหรับการทดลองเชื่อม.....	41
3.7 แผนภูมิขั้นตอนการทดลอง.....	42

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

บทที่

4	ผลการทดลอง และอภิปรายผลการทดลอง	
4.1	กระแสไฟฟ้าเบสที่เหมาะสมสำหรับการเชื่อมทิกพัลส์เหล็กกล้า ไร้สนิมออสเตนนิติก เกรด 316L ที่ตำแหน่งเชื่อม 6 นาฬิกา.....	43
4.2	ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่พัลส์ และ ค่า %On Time ของ การเชื่อมทิกพัลส์ที่ตำแหน่ง 6 นาฬิกา.....	44
4.3	ผลของตำแหน่งเชื่อม ความเร็วเชื่อม กระแสไฟฟ้าพัลส์ และส่วนผสม ของแก๊สไนโตรเจนในแก๊สปกคลุมอาร์กอน ต่อการเชื่อมเหล็กกล้า ไร้สนิมออสเตนนิติก เกรด 316L หนา 3 มิลลิเมตร.....	49
4.4	ผลของตำแหน่งเชื่อม ต่อการเกิดลักษณะรอยเชื่อม.....	65
4.5	โครงสร้างจุลภาคเนื้อโลหะรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม ออสเตนนิติก เกรด 316L.....	73
4.6	เปรียบเทียบผลการทดลองกับผลงานที่มีการตีพิมพ์.....	79
5	สรุปผลการทดลอง	
5.1	สรุปผลการทดลอง.....	81
5.2	ข้อเสนอแนะ.....	82
	รายการอ้างอิง.....	83
	ภาคผนวก ก.....	87
	ภาคผนวก ข.....	89
	ภาคผนวก ค.....	106
	ภาคผนวก ง.....	108
	ภาคผนวก จ.....	109
	ประวัติผู้เขียน.....	110



## สารบัญญัตินำ

ตารางที่	หน้า	
2.1	มาตรฐานรอยเชื่อม DIN 8563ระดับBS สำหรับการเชื่อมแบบต่อชนด้วยกรรมวิธีการเชื่อมแบบหลอมละลาย.....	4
2.2	คุณสมบัติของแก๊สปกคลุมที่ใช้สำหรับการเชื่อมทิก.....	8
2.3	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเคลด้า-เฟอร์ไรท์ กับความเร็วเชื่อม.....	14
3.1	ส่วนผสมทางเคมีเหล็กกล้าไร้สนิมออสเตนนิติก เกรด 316L ที่ใช้ในการทดลอง.....	37
3.2	ค่าโครเมียมเทียบเท่าและนิกเกิลเทียบเท่า ของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเตนนิติก เกรด 316L.....	37
4.1	ระดับค่ากระแสไฟฟ้าเบส ต่อลักษณะการอาร์คที่เกิดขึ้น.....	43
4.2	ผลของความถี่พัลส์ กับค่า%On Time ต่รอยซึมลึกของเนื้อโลหะรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเตนนิติก เกรด 316L.....	45
4.3	ผลของความถี่พัลส์ กับค่า%On Time ต่ความกว้างของเนื้อโลหะรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเตนนิติก เกรด 316L.....	46
4.4	ผลของความถี่พัลส์ กับค่า%On Time ต่อัตราส่วนของรอยซึมลึกต่อความกว้างของเนื้อโลหะรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเตนนิติก เกรด 316L.....	47
4.5	กระแสไฟฟ้าพัลส์ต่ำสุดที่แต่ละความเร็วเชื่อม ได้รอยเชื่อมผ่านมาตรฐาน DIN 8563ระดับBS เมื่อเปลี่ยนแปลงปริมาณแก๊สในโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอน ที่ตำแหน่งเชื่อม 6 นาฬิกา.....	52
4.6	กระแสไฟฟ้าพัลส์ต่ำสุดที่แต่ละความเร็วเชื่อม ได้รอยเชื่อมผ่านมาตรฐาน DIN8563ระดับBS เมื่อเปลี่ยนแปลงปริมาณแก๊สในโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอน ที่ตำแหน่งเชื่อม 8 นาฬิกา.....	56
4.7	กระแสไฟฟ้าพัลส์ต่ำสุดที่แต่ละความเร็วเชื่อม ได้รอยเชื่อมผ่านมาตรฐาน DIN 8563ระดับBS เมื่อเปลี่ยนแปลงปริมาณแก๊สในโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอน ที่ตำแหน่งเชื่อม 9 นาฬิกา.....	57

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า	
4.8	กระแสไฟฟ้าพัลส์ต่ำสุดที่แต่ละความเร็วเชื่อม ได้รอยเชื่อมผ่าน มาตรฐาน DIN 8563ระดับBS เมื่อเปลี่ยนแปลงปริมาณแก๊สในโตรเจน ผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอน ที่ตำแหน่งเชื่อม 10 นาฬิกา.....	58
4.9	กระแสไฟฟ้าพัลส์ต่ำสุดที่แต่ละความเร็วเชื่อม ได้รอยเชื่อมผ่าน มาตรฐาน DIN 8563ระดับBS เมื่อเปลี่ยนแปลงปริมาณแก๊สในโตรเจน ผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอน ที่ตำแหน่งเชื่อม 12 นาฬิกา.....	62
4.10	ผลของปริมาณแก๊สในโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอน ต่อ การเกิดลักษณะรอยเชื่อม ที่ตำแหน่งเชื่อม 6, 8, 9, 10 และ 12 นาฬิกา $V_s = 4$ มม./วินาที.....	68
4.11	ผลของความเร็วเชื่อม 2 ถึง 5 มม./วินาที ต่อการเกิดลักษณะรอยเชื่อม ใช้แก๊สปกคลุมอาร์กอนผสมแก๊สในโตรเจน 4 เปอร์เซนต์โดยปริมาตร ที่ตำแหน่งเชื่อม 6, 8, 9, 10 และ 12 นาฬิกา.....	69
4.12	ปริมาณเคลดดำ-เฟอร์ไรท์ในเนื้อโลหะรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม ออสเตนนิติก เกรด 316L ที่ผ่านมาตรฐาน DIN 8563ระดับBS ใช้แก๊สปกคลุม $Ar+N_2(0-4\%vol.)$ $V_s = 4$ มม./วินาที ที่ตำแหน่งเชื่อม 6, 8, 9, 10 และ 12 นาฬิกา.....	75
4.13	ปริมาณในโตรเจน(%wt.) และปริมาณเคลดดำ-เฟอร์ไรท์(%vol.) ในเนื้อโลหะรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเตนนิติก เกรด 316L ใช้แก๊สปกคลุม $Ar+N_2(0-4\%vol.)$ ที่ตำแหน่งเชื่อม 6 และ 9 นาฬิกา.....	77
ข.1	ปริมาณเคลดดำ-เฟอร์ไรท์(%vol.) ในเนื้อโลหะรอยเชื่อมเหล็กกล้า ไร้สนิมออสเตนนิติก เกรด 316L (ในแนวตั้งจากรอยเชื่อม).....	89
ข.2	ปริมาณเคลดดำ-เฟอร์ไรท์(%vol.) ในเนื้อโลหะรอยเชื่อมเหล็กกล้า ไร้สนิมออสเตนนิติก เกรด 316L (ในแนวขนานรอยเชื่อม).....	102
ข.3	ความแตกต่างปริมาณเคลดดำ-เฟอร์ไรท์ ที่วิเคราะห์ในแนวตั้งฉาก และในแนวขนานรอยเชื่อม.....	105

## สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่		หน้า
ค.1	ปริมาณไนโตรเจน(%wt.)ในเนื้อโลหะพื้น.....	106
ค.2	ปริมาณไนโตรเจน(%wt.) ในเนื้อโลหะรอยเชื่อม ที่ตำแหน่ง 6 นาฬิกา ใช้แก๊สปกคลุม Ar+N <sub>2</sub> (0-4 %vol.).....	107
ค.3	ปริมาณไนโตรเจน(%wt.) ในเนื้อโลหะรอยเชื่อม ที่ตำแหน่ง 6 นาฬิกา ใช้แก๊สปกคลุม Ar+N <sub>2</sub> (0-4 %vol.).....	107
ง.1	ผลการตรวจสอบรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก เกรด 316L ด้วยวิธีตรวจสอบฉายรังสี.....	108

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ผลของปริมาณแก๊สไฮโดรเจนในแก๊สปกคลุมอาร์กอน ต่ออัตราส่วน... ความกว้างต่อรอยซึมลึกของรอยเชื่อม เมื่อเปลี่ยนแปลงระยะอาร์ค <sup>(6)</sup> .....	9
2.2 ความสัมพันธ์ของปริมาณเคลดดำ-เฟอร์ไรท์ กับปริมาณไนโตรเจน ในเนื้อโลหะรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเตนนิติก เกรด 304L <sup>(4)</sup> .....	10
2.3 การเปลี่ยนแปลงปริมาณไนโตรเจนในเนื้อโลหะรอยเชื่อม โดยการเชื่อมทิกใช้แก๊สปกคลุมอาร์กอนผสมแก๊สไนโตรเจน (กระแสไฟฟ้าเชื่อม 250 แอมแปร์ ความเร็วเชื่อม 15 ซม./นาที อัตราการไหลแก๊สปกคลุม 15 ลิตร/นาที) <sup>(3)</sup> .....	11
2.4 การเกิดโพรงในเนื้อโลหะรอยเชื่อมของโลหะผสมนิกเกิล-ทองแดง ที่สัมพันธ์กับปริมาณแก๊สไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอน และความเร็วเชื่อม <sup>(8)</sup> .....	12
2.5 ผลของส่วนผสมแก๊สปกคลุม และความเร็วเชื่อม ที่มีต่อการเกิด โพรงตรงกลาง <sup>(1)</sup> .....	13
2.6 ผลของอัตราการโต ต่อลักษณะการแข็งตัวของใต้เงื่อนไขการโต แบบกิ่งก้าน(Dendritic) <sup>(35)</sup> .....	15
2.7 อิทธิพลของความเร็วเชื่อมต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณเคลดดำ-เฟอร์ไรท์ ในเนื้อโลหะรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเตนนิติก เกรด 316 <sup>(24)</sup> .....	16
2.8 แผนภูมิแฮมมาร์แสดงความสัมพันธ์ระหว่างส่วนผสมทางเคมี และลักษณะการแข็งตัวของเนื้อโลหะรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม ออสเตนนิติก อนุกรม 300 <sup>(35)</sup> .....	17
2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวรอยแตกร้าวกับเฟอร์ไรท์นัมเบอร์ ที่เกิด ขึ้นจากลักษณะการแข็งตัวของเนื้อโลหะรอยเชื่อมที่แตกต่างกัน <sup>(25)</sup> .....	18
2.10 ลักษณะการแข็งตัวของน้ำโลหะเหล็กกล้าไร้สนิมออสเตนนิติก เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนค่าโครเมียมเทียบเท่ากับนิกเกิลเทียบเท่า <sup>(42)</sup> .....	18
2.11 แผนภูมิเดอลองแสดงอิทธิพลของส่วนผสมทางเคมี ต่อโครงสร้าง จุลภาคของเนื้อโลหะรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเตนนิติก <sup>(20)</sup> .....	19

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.12 ความสัมพันธ์ของปริมาณซัลเฟอร์และฟอสฟอรัส และปริมาณเคลดต้า- เฟอร์ไรท์ ต่อการเกิดรอยแตกร้าวของเนื้อโลหะรอยเชื่อมเหล็กกล้า ไร้สนิมออสเตนนิติก <sup>(9)</sup> .....	21
2.13 ลักษณะเคลดต้า-เฟอร์ไรท์ ที่เกิดในเนื้อโลหะรอยเชื่อมเหล็กกล้า ไร้สนิมออสเตนนิติก ก. Vermicular Ferrite ข. Lathy Ferrite ค. Acicular Ferrite ง. Globular Ferrite <sup>(21)</sup> .....	23
2.14 แผนภาพแสดงชนิดรอยบกพร่องที่เกิดขึ้นสัมพันธ์กับความเร็วเชื่อม และกระแสไฟฟ้าเชื่อม โดยเชื่อมแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมออสเตนนิติก เกรด 316 ด้วยวิธีทิก <sup>(12)</sup> .....	25
2.15 การเกิดรอยแตกร้าวในเนื้อโลหะรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม ออสเตนนิติก เกรด 316 ที่สัมพันธ์กับกระแสไฟฟ้าเชื่อม และความเร็วเชื่อม <sup>(15)</sup> .....	26
2.16 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าพัลส์ และจุดหลอมละลาย ที่เกิดเป็นรอยเชื่อม <sup>(40)</sup> .....	26
2.17 ผลของตัวแปรการเชื่อมทิกพัลส์ที่มีต่อ ก. รอยซึมลึก ข. ความกว้างรอยเชื่อม <sup>(18)</sup> .....	29
2.18 รูปแบบของ Driving Force ในบ่อน้ำโลหะหลอมเหลวของ การเชื่อมทิกพัลส์ <sup>(14)</sup> .....	30
2.19 การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนรอยซึมลึกต่อความกว้างของรอยเชื่อม เมื่อเชื่อมที่ความถี่พัลส์แตกต่างกัน <sup>(16)</sup> .....	31
2.20 ตัวแปรการเชื่อมทิกพัลส์ ท่อเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ เกรด 329L <sup>(19)</sup> .....	31
3.1 เครื่องเชื่อม Miller/Syncrowave 350 Amperes Constant Current AC/DC Arc Welding .....	34
3.2 ชุดจับยึดชิ้นงานทดลอง และชุดป้อนแก๊สปกคลุมด้านล่าง.....	34
3.3 แผนภาพแสดงการควบคุมอัตราการไหลของแก๊สปกคลุมด้านบน และด้านล่างของการเชื่อมทิกพัลส์.....	36

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.4	
โครงสร้างจุลภาคโลหะพื้นเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก เกรด 316L (กำลังขยาย 500 เท่า).....	37
3.5	39
3.6	40
4.1	
ผลของความถี่พัลส์ กับค่า%On Time ต่อรอยซึมลึกของรอยเชื่อม เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก เกรด 316L ที่ตำแหน่งเชื่อม 6 นาฬิกา.....	45
4.2	
ผลของความถี่พัลส์ กับค่า%On Time ต่อความกว้างของรอยเชื่อม เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก เกรด 316L ที่ตำแหน่งเชื่อม 6 นาฬิกา.....	46
4.3	
ผลของความถี่พัลส์ กับค่า %On Time ต่ออัตราส่วนรอยซึมลึกต่อ ความกว้างของรอยเชื่อม เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก เกรด 316L ที่ตำแหน่งเชื่อม 6 นาฬิกา.....	47
4.4	
ตัวอย่างรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก เกรด 316L เชื่อมด้วย ทิกพัลส์ ( $I_B = 60$ แอมแปร์ $I_p = 171$ แอมแปร์ $V_s = 4$ มม./วินาที) ก. $F_p = 1$ เฮิร์ตซ ที่ 45 %On Time   ข. $F_p = 3$ เฮิร์ตซ ที่ 35 %On Time ค. $F_p = 5$ เฮิร์ตซ ที่ 65 %On Time   ง. $F_p = 10$ เฮิร์ตซ ที่ 65 %On Time.....	50
4.5	
กระแสไฟฟ้าพัลส์ต่ำสุดที่ได้รอยเชื่อมสมบูรณ์ผ่านมาตรฐาน DIN 8563ระดับBS เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วเชื่อม และปริมาณ แก๊สในโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอน ที่ตำแหน่งเชื่อม 6 นาฬิกา.....	52
4.6	
ตัวอย่างรอยเชื่อมที่ผ่านมาตรฐาน DIN 8563ระดับBS ที่ตำแหน่งเชื่อม 6 นาฬิกา ก. $V_s = 2$ มม./วินาที $I_p = 171$ แอมแปร์ แก๊สปกคลุม Ar ข. $V_s = 6$ มม./วินาที $I_p = 252$ แอมแปร์ แก๊สปกคลุม Ar ค. $V_s = 6$ มม./วินาที $I_p = 230$ แอมแปร์ แก๊สปกคลุม Ar+N <sub>2</sub> (4%Vol).....	53
4.7	
ตัวอย่างรอยเชื่อมที่ไม่ผ่านมาตรฐาน DIN 8563ระดับBS ที่ตำแหน่ง เชื่อม 6 นาฬิกา $V_s = 7$ มม./วินาที $I_p = 280$ แอมแปร์ แก๊สปกคลุม Ar.....	54

### สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.8	
กระแสไฟฟ้าพัลส์ต่ำสุด ที่ได้รอยเชื่อมสมบูรณ์ผ่านมาตรฐาน DIN 8563ระดับBS เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วเชื่อม และปริมาณแก๊สใน โตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอน ที่ตำแหน่งเชื่อม 8 นาฬิกา.....	
	56
4.9	
กระแสไฟฟ้าพัลส์ต่ำสุด ที่ได้รอยเชื่อมสมบูรณ์ผ่านมาตรฐาน DIN 8563ระดับBS เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วเชื่อม และปริมาณแก๊สใน โตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอน ที่ตำแหน่งเชื่อม 9 นาฬิกา.....	
	57
4.10	
กระแสไฟฟ้าพัลส์ต่ำสุด ที่ได้รอยเชื่อมสมบูรณ์ผ่านมาตรฐาน DIN 8563ระดับBS เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วเชื่อม และปริมาณแก๊สใน โตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอน ที่ตำแหน่งเชื่อม 10 นาฬิกา.....	
	58
4.11	
ตัวอย่างรอยเชื่อมที่ผ่านมาตรฐาน DIN 8563ระดับBS ก. $V_s = 5$ มม./วินาที $I_p = 208$ แอมแปร์ แก๊สปกคลุม Ar ตำแหน่ง เชื่อม 8 นาฬิกา ข. $V_s = 4$ มม./วินาที $I_p = 170$ แอมแปร์ แก๊สปกคลุม Ar + N <sub>2</sub> (3 %vol.) ตำแหน่งเชื่อม 9 นาฬิกา.....	
	59
4.12	
ตัวอย่างรอยเชื่อมที่ไม่ผ่านมาตรฐาน DIN 8563ระดับBS ที่ตำแหน่ง เชื่อม 8 นาฬิกา $V_s = 6$ มม./วินาที $I_p = 232$ แอมแปร์ แก๊สปกคลุม Ar.....	
	59
4.13	
กระแสไฟฟ้าพัลส์ต่ำสุด ที่ได้รอยเชื่อมสมบูรณ์ผ่านมาตรฐาน DIN 8563 ระดับ BS เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วเชื่อม และปริมาณแก๊สใน โตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอน ที่ตำแหน่งเชื่อม 12 นาฬิกา.....	
	62

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.14 ตัวอย่างรอยเชื่อมที่ผ่านมาตรฐาน DIN 8563ระดับBS ที่ตำแหน่งเชื่อม 6 นาฬิกา ก. $V_s = 3$ มม./วินาที $I_p = 155$ แอมแปร์ แก๊สปกคลุม Ar + N <sub>2</sub> (4 %vol.) ข. $V_s = 4$ มม./วินาที $I_p = 200$ แอมแปร์ แก๊สปกคลุม Ar ค. $V_s = 6$ มม./วินาที $I_p = 230$ แอมแปร์ แก๊สปกคลุม Ar + N <sub>2</sub> (4 %vol.).....	63
4.15 ตัวอย่างรอยเชื่อมที่ไม่ผ่านมาตรฐาน DIN 8563ระดับBS ที่ตำแหน่งเชื่อม 12 นาฬิกา $V_s = 7$ มม./วินาที $I_p = 275$ แอมแปร์ แก๊สปกคลุม Ar.....	64
4.16 กระแสไฟฟ้าพัลส์ต่ำสุด ที่ตำแหน่งเชื่อม 6, 8, 9, 10 และ 12 นาฬิกา เมื่อเปลี่ยนแปลงปริมาณแก๊สไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอน ที่ $V_s = 4$ มม./วินาที.....	65
4.17 ผลของปริมาณแก๊สไนโตรเจน และตำแหน่งเชื่อมของการเชื่อมทิกพัลส์ ต่อ W ของรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม ออสเทนนิติก เกรด 316L ที่ $V_s = 4$ มม./วินาที.....	70
4.18 ผลของปริมาณแก๊สไนโตรเจน และตำแหน่งเชื่อมของการเชื่อมทิกพัลส์ ต่อ D/W ของรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม ออสเทนนิติก เกรด 316L ที่ $V_s = 4$ มม./วินาที.....	70
4.19 ผลของปริมาณแก๊สไนโตรเจน และตำแหน่งเชื่อมของการเชื่อมทิกพัลส์ ต่อ $\Delta a_3$ ของรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม ออสเทนนิติก เกรด 316L ที่ $V_s = 4$ มม./วินาที.....	71
4.20 ผลของความเร็วเชื่อม 2 ถึง 5 มม./วินาที ที่ตำแหน่งเชื่อม 6, 8, 9, 10 และ 12 นาฬิกา ใช้แก๊สปกคลุม Ar+N <sub>2</sub> (4 %vol.) ต่อ W ของรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก เกรด 316L.....	71
4.21 ผลของความเร็วเชื่อม 2 ถึง 5 มม./วินาที ที่ตำแหน่งเชื่อม 6, 8, 9, 10 และ 12 นาฬิกา ใช้แก๊สปกคลุม Ar+N <sub>2</sub> (4 %vol.) ต่อ D/W ของรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก เกรด 316L.....	72



## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.22 ผลของความเร็วเชื่อม 2 ถึง 5 มม./วินาที ที่ตำแหน่งเชื่อม 6, 8, 9, 10 และ 12 นาฬิกา ใช้แก๊สปกคลุม Ar+N <sub>2</sub> (4 %vol.) ต่อ $\Delta a_s$ ของรอยเชื่อม เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด 316L.....	72
4.23 ผลของปริมาณแก๊สใน โครเจน(%vol.) ผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอน ต่อปริมาณเคลด้า-เฟอร์ไรท์(%vol.) ในเนื้อโลหะรอยเชื่อมเหล็กกล้า ไร้สนิมออสเทนนิติก เกรด 316L ที่ตำแหน่งเชื่อม 6, 8, 9, 10 และ 12 นาฬิกา.....	75
4.24 โครงสร้างจุลภาคของเนื้อโลหะรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม ออสเทนนิติก เกรด 316L ที่ตำแหน่งเชื่อม 6 นาฬิกา. $V_s = 4$ มม./วินาที ใช้แก๊สปกคลุมAr + N <sub>2</sub> (0-4 %vol.) ก. N <sub>2</sub> = 0 % ข. N <sub>2</sub> = 1 % ค. N <sub>2</sub> = 2 % ง. N <sub>2</sub> = 3 % จ. N <sub>2</sub> = 4 % (กำลังขยาย 500 เท่า).....	76
4.25 ผลของปริมาณแก๊สใน โครเจน(%Vol) ผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอน ต่อปริมาณไน โครเจน(%wt.) ในเนื้อโลหะรอยเชื่อมเหล็กกล้า ไร้สนิมออสเทนนิติก เกรด 316L ที่ตำแหน่งเชื่อม 6 และ 9 นาฬิกา.....	77
4.26 ความสัมพันธ์ของปริมาณไนโครเจน(%wt.) และปริมาณเคลด้า-เฟอร์ไรท์(%vol.) ในเนื้อโลหะรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม ออสเทนนิติก เกรด 316L ที่ตำแหน่งเชื่อม 6 และ 9 นาฬิกา.....	78
4.27 เปรียบเทียบผลการทดลองตัวแปรการเชื่อมทิกพัลส์เหล็กกล้า ไร้สนิมออสเทนนิติก เกรด 316L ตำแหน่งเชื่อม 6 นาฬิกา กับผลงานของ V.P.KUJANPAA <sup>(12)</sup> .....	79
ก.1 แสดงตำแหน่งการวัดค่า $\lambda$ และ $(L_3)_\alpha$ จาก Test Line.....	88

## คำอธิบายคำย่อ

คำย่อ-สัญลักษณ์	คำเต็ม	ความหมาย
$I_p$	Peak Pulse Current	กระแสไฟฟ้าพัลส์
$I_B$	Base Current	กระแสไฟฟ้าเบส
$t_p$	Pulse Current Duration	ช่วงเวลากระแสไฟฟ้าพัลส์
$t_B$	Base Current Duration	ช่วงเวลากระแสไฟฟ้าเบส
$T$	Period of Cycle	ช่วงเวลาระหว่างกระแสไฟฟ้าพัลส์
$I_m$	Average Current	ค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ย
$I_{rms}$	Root Mean Square Current	กระแสไฟฟ้าเฉลี่ยค่ากลางเรขาคณิต
$V_s$	Welding Speed	ความเร็วเชื่อม
Ar	Argon Gas	แก๊สปกคลุมอาร์กอน
Ar+N <sub>2</sub>	Mixing Gas of Argon and Nitrogen	แก๊สปกคลุมอาร์กอนผสมไนโตรเจน
W	Width of Weldment	ความกว้างรอยเชื่อม
D	Depth of Weldment	รอยซึมลึก
$\Delta a_1$	Excessive Weld Metal	เนื้อโลหะรอยเชื่อมส่วนเกิน
$\Delta a_2$	Incompletely Filled Groove	การเติมรอยเชื่อมที่ไม่สมบูรณ์
$\Delta a_3$	Excessive Penetration	รอยซึมลึกเกิน
$Cr_{eq}$	Chromium Equivalent	ค่าโครเมียมเทียบเท่า
$Ni_{eq}$	Nickel Equivalent	ค่านิกเกิลเทียบเท่า