

## บทที่ 2

### วารสารปริทัศน์

#### 2.1 มาตรฐานรอยเชื่อม DIN 8563

ในมาตรฐาน DIN 8563 ที่นำมากล่าวในส่วนนี้ จะขมามาเฉพาะส่วนที่สำคัญและเกี่ยวข้องกับ การศึกษาในครั้งนี้เท่านั้น มาตรฐานนี้เป็นมาตรฐานที่ใช้ในการตรวจสอบและรับประกันคุณภาพรอยเชื่อม และกระบวนการเชื่อม แบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ

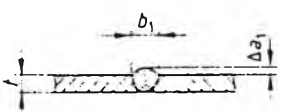
ส่วนที่ 1 กล่าวถึงหลักการทั่วไป สำหรับกระบวนการเชื่อม

ส่วนที่ 2 กล่าวถึงความต้องการในกระบวนการเชื่อม เพื่อให้สามารถรักษาคุณสมบัติที่ดีของรอยเชื่อมตามที่ต้องการ

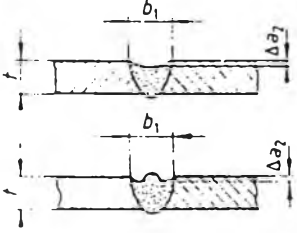

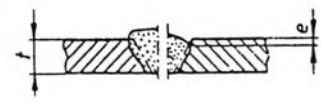
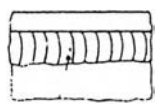
ส่วนที่ 3 กล่าวถึงการประกันคุณภาพการเชื่อม โลหะ ที่ใช้กรรมวิธีการเชื่อมแบบหลอมละลาย (Fusion Welded Joint)

การศึกษาครั้งนี้ พิจารณาลักษณะรอยเชื่อมตามมาตรฐาน DIN 8563 ส่วนที่ 3 ที่สอดคล้องกับการเชื่อมที่มีการเตรียมรอยเชื่อมแบบต่อชน (Square Root Butt Joint) และคุณภาพรอยเชื่อมระดับ BS ความหนาชิ้นงานอยู่ในระหว่าง 0.5 ถึง 3.6 มิลลิเมตร เป็นลักษณะเงื่อนไขการตรวจสอบรอยเชื่อมภายนอก ดังแสดงในตารางที่ 2.1

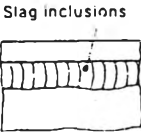
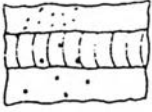
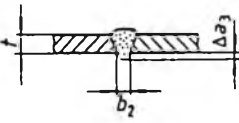

ตารางที่ 2.1 มาตรฐานรอยเชื่อม DIN 8563ระดับBS สำหรับการเชื่อมแบบต่อชนด้วยกรรมวิธีการเชื่อมแบบหลอมละลาย<sup>(37)</sup>

ลำดับที่	ลักษณะรอยบกพร่อง	ระดับคุณภาพ
1.	Excess weld metal $\Delta a_1$ 	$\Delta a_1 \leq 1 + 0.15 b_1$

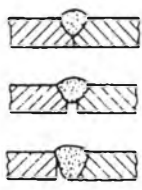

ตารางที่ 2.1(ต่อ) มาตรฐานรอยเชื่อม DIN 8563ระดับBS สำหรับการเชื่อมแบบต่อชนด้วยกรรมวิธีการเชื่อมแบบหลอมละลาย<sup>(37)</sup>

ลำดับที่	ลักษณะรอยบกพร่อง	ระดับคุณภาพ
2.	Incompletely filled groove $\Delta a_2$ 	$\Delta a_2 \leq 0.1 + 0.07t$
3.	b) for welds made from one side (root side) 	$e \leq 0.25 + 0.1r$
4.	Undercuts 	ให้เกิดได้เล็กน้อย
5.	Visible pores  Visible pores	ไม่อนุญาตให้เกิด

ตารางที่ 2.1(ต่อ) มาตรฐานรอยเชื่อม DIN 8563ระดับBS สำหรับการเชื่อมแบบต่อชนด้วยกรรมวิธี  
การเชื่อมแบบหลอมละลาย<sup>(37)</sup>

ลำดับที่	ลักษณะรอยบกพร่อง	ระดับคุณภาพ
6.	Visible slag inclusions 	ไม่อนุญาตให้เกิด
7.	Spatter 	ให้เกิดได้เล็กน้อย
8.	Excessive penetration $\Delta a_3$ 	$\Delta a_3 \leq 1 + 0.15 b_2$
9.	Root concavity 	ให้เกิดได้เล็กน้อย

ตารางที่ 2.1 (ต่อ) มาตรฐานรอยเชื่อม DIN 8563 ระดับ BS สำหรับการเชื่อมแบบต่อชนด้วยกรรม  
วิธีการเชื่อมแบบหลอมละลาย<sup>(37)</sup>

ลำดับที่	ลักษณะรอยบกพร่อง	ระดับคุณภาพ
10.	Lack of fusion at root of weld 	ไม่อนุญาตให้เกิด
11.	Shrinkage groove 	ให้เกิดได้เล็กน้อย

## 2.2 อิทธิพลของตัวแปรการเชื่อมตึก ต่อการเกิดรอยเชื่อม และโครงสร้างจุลภาคของเนื้อโลหะรอยเชื่อม

### 2.2.1 อิทธิพลของแก๊สปกคลุม

กรรมวิธีการเชื่อมตึกนั้นมีการใช้แก๊สเฉื่อย (Inert Gas) เป็นแก๊สปกคลุมเพื่อป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน และควบคุมคุณภาพของรอยเชื่อม บางกรณีผสมรีดิวซิงแก๊ส (Reducing Gas) เช่น ผสมแก๊สไฮโดรเจนในแก๊สปกคลุมอาร์กอน ทำให้เพิ่มความเร็วเชื่อมได้สูงขึ้น เนื่องจากแก๊สไฮโดรเจนเพิ่มศักย์การอาร์ค (Arc Voltage) และการเหนี่ยวนำความร้อน (Thermal Conductivity)<sup>(6,40)</sup> แต่เมื่อผสมแก๊สไฮโดรเจนในปริมาณมาก จะก่อให้เกิดโพรง (Porosity) ขึ้นในเนื้อโลหะรอยเชื่อมได้ ฉะนั้นการเลือกใช้แก๊สปกคลุมที่เหมาะสมสำหรับการเชื่อมตึกจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติของแก๊สปกคลุมที่ใช้สำหรับการเชื่อมทิก

แก๊สปกคลุม	Thermal Conductivity $10^3(\text{W/m}\cdot\text{K})$	Ionization Potential (eV)	ความหนาแน่น ( $\text{Kg/m}^3$ )
อาร์กอน	45.9	15.75	1.784
ฮีเลียม	354.0	24.85	0.178
ไฮโดรเจน	448.0	13.59	0.083
ไนโตรเจน	64.7	14.54	1.161
ออกซิเจน	71.0	13.61	1.326
คาร์บอนไดออกไซด์	58.2	14.00	1.977

M.ONSOIEN และคณะ<sup>(6)</sup> ศึกษาเกี่ยวกับผลของแก๊สไฮโดรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอนสำหรับการเชื่อมทิก ต่อลักษณะรอยเชื่อม(Bead Morphology) และคุณลักษณะของการอาร์ค(Arc Characteristic) โดยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก เกรด 304 ใช้แก๊สปกคลุมอาร์กอนผสมแก๊สไฮโดรเจน 1, 2, 3 และ 4 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร พบว่า เมื่อปริมาณแก๊สไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นทำให้ศักย์การอาร์คและความต้านทานอาร์คเพิ่มขึ้น เนื่องจากแก๊สปกคลุมอาร์กอนผสมแก๊สไฮโดรเจนมีประจุไฟฟ้า(Charge Carrier) น้อยกว่าแก๊สปกคลุมอาร์กอนบริสุทธิ์ และแก๊สไฮโดรเจนมีค่า Thermal Conductivity มากกว่าแก๊สอาร์กอน ทำให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ Arc Column มีขนาดเล็กลง นอกจากนี้เมื่อปริมาณแก๊สไฮโดรเจนในแก๊สปกคลุมอาร์กอนมีปริมาณเพิ่มขึ้น ทำให้อัตราส่วนของความกว้างต่อรอยซึมลึกของรอยเชื่อมมีค่าลดลง ดังแสดงในรูปที่ 2.1

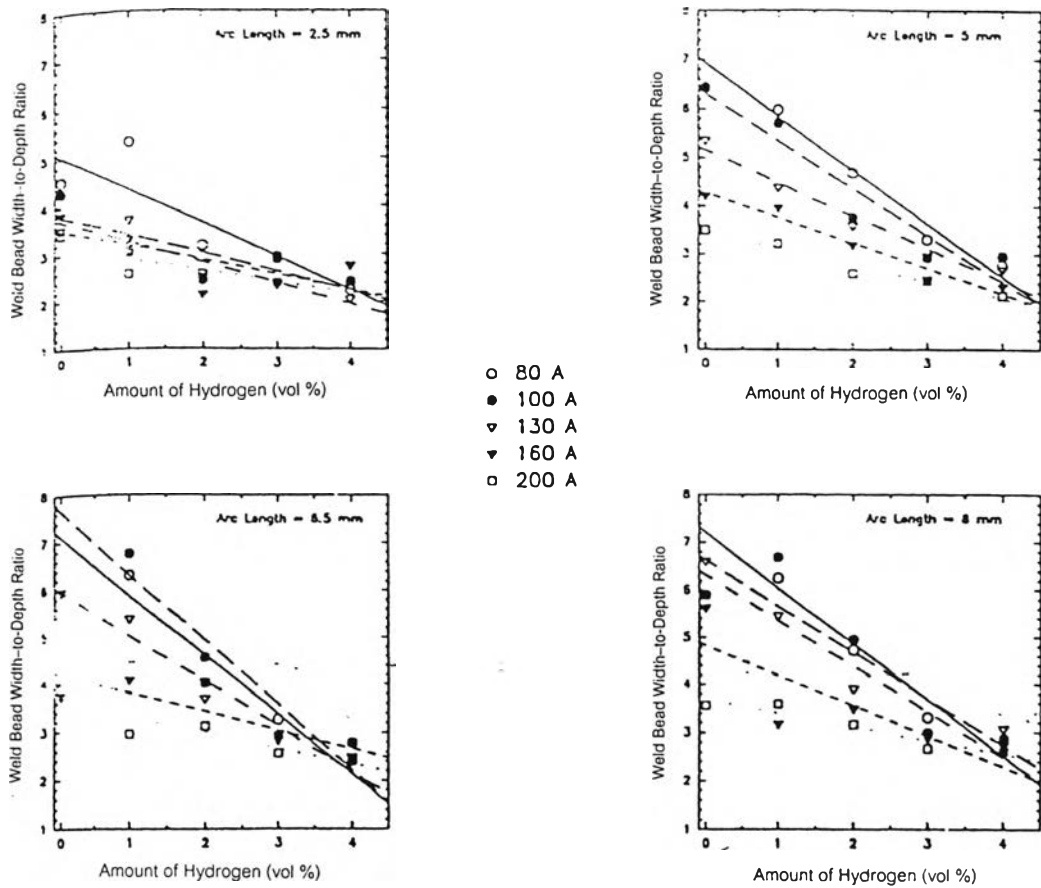
เนื่องด้วยในการทดลองนี้มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณแก๊สไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอนสำหรับการเชื่อมทิกพัลส์ โดยปกติแก๊สไนโตรเจนสามารถละลายในน้ำโลหะได้ในสถานะอะตอม(Atomic State) แสดงด้วยสัญลักษณ์ [N] และเมื่อปริมาณการละลายของไนโตรเจนในน้ำโลหะเกินขีดจำกัด(Solubility Limit) ก่อให้เกิดฟองแก๊สขึ้นในน้ำโลหะได้ เป็นสาเหตุของการเกิดโพรงในเนื้อโลหะรอยเชื่อม<sup>(41)</sup> สมการการละลายของไนโตรเจนในน้ำโลหะแสดงในสมการที่ 2.1



และสมการของ Sievert's law แสดงได้ดังนี้

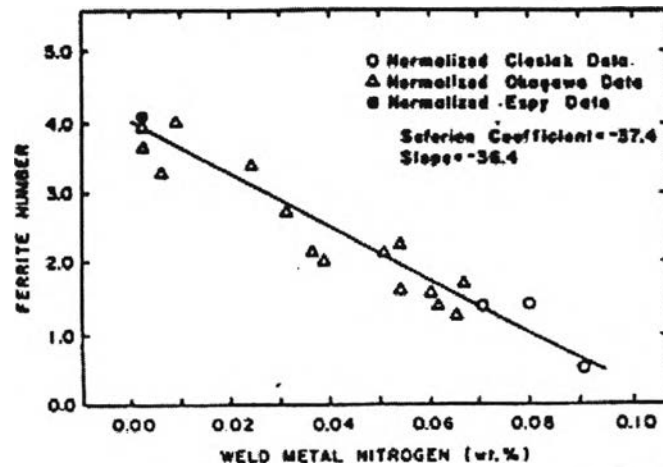
$$[\%N] = K_N \sqrt{p_{\text{N}_2}} \quad 2.2$$

จากสมการที่ 2.2 พบว่า เมื่อเพิ่มความดันย่อย(Partial Pressure) ของแก๊สไนโตรเจน ทำให้ปริมาณไนโตรเจนในเนื้อโลหะเพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.1 ผลของปริมาณแก๊สไฮโดรเจนในแก๊สปกคลุมอาร์กอน ต่ออัตราส่วนความกว้างต่อรอยซึมลึกของรอยเชื่อม เมื่อเปลี่ยนแปลงระยะอาร์ค<sup>(6)</sup>

จากการศึกษาของ R.K.OKAGAWA, R.D.DIXON และ D.L.OLSON<sup>(4)</sup> เกี่ยวกับอิทธิพลของไนโตรเจนที่มีต่อโครงสร้างจุลภาคของเนื้อโลหะรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด 304L โดยวิธีการเชื่อมทิก ใช้แก๊สปกคลุมอาร์กอนผสมแก๊สไนโตรเจน มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณแก๊สไนโตรเจน 0 ถึง 5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร พบว่า เมื่อใช้แก๊สปกคลุมอาร์กอนบริสุทธิ์ ปริมาณไนโตรเจนในเนื้อโลหะรอยเชื่อมจะเท่ากับโลหะพื้นแต่เมื่อเพิ่มปริมาณแก๊สไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอนทำให้ปริมาณไนโตรเจนในเนื้อโลหะเพิ่มขึ้น ส่งผลต่อการลดปริมาณเคลดคาร์เฟอร์ไรท์ในเนื้อโลหะรอยเชื่อม ดังแสดงในรูปที่ 2.2 คณะผู้วิจัยสรุปว่า แก๊สปกคลุมอาร์กอนที่ผสมแก๊สไนโตรเจน 0 ถึง 5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคและคุณสมบัติของเนื้อโลหะรอยเชื่อม โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ลักษณะการกระจายตัวและปริมาณของเคลดคาร์เฟอร์ไรท์

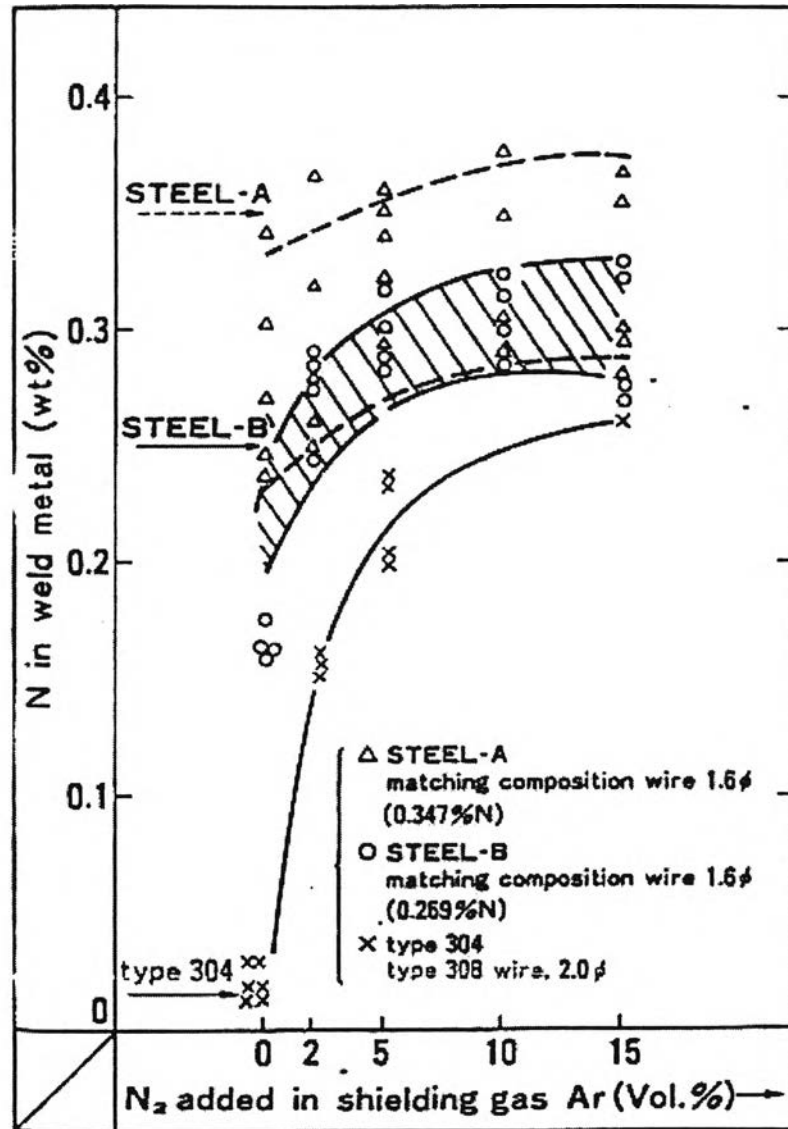


รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ของปริมาณเคลต้า-เฟอร์ไรท์ กับปริมาณไนโตรเจนในเนื้อโลหะรอยเชื่อม เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก เกรด 304L<sup>(4)</sup>

T. OGAWA, K. SUZUKI และ T. ZAIZEN<sup>(3)</sup> ศึกษาเกี่ยวกับความสามารถในการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกที่มีไนโตรเจนเป็นส่วนผสม ต่อการเกิดโพรง รอยร้าว (Cracking) และคุณสมบัติการคืบ (Creep Properties) ด้วยวิธีการเชื่อมทิก ใช้แก๊สปกคลุมอาร์กอนบริสุทธิ์ และแก๊สอาร์กอนผสมแก๊สไนโตรเจน พบว่า เมื่อปริมาณไนโตรเจนในเนื้อโลหะรอยเชื่อมเพิ่มขึ้น ก่อให้เกิดปัญหาคือ 1. เกิดโพรงเพิ่มขึ้น 2. เกิดรอยแตกร้าวขณะร้อน (Hot Cracking) เพิ่มมากขึ้น จากการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก เกรด 304 ใช้แก๊สปกคลุมอาร์กอนผสมแก๊สไนโตรเจน 25 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร พบว่า เนื้อโลหะรอยเชื่อมมีโพรงเกิดขึ้น และเมื่อเปลี่ยนแปลงปริมาณแก๊สไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอน ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณไนโตรเจนในเนื้อโลหะรอยเชื่อม ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ซึ่งปริมาณไนโตรเจนในเนื้อโลหะรอยเชื่อมที่เพิ่มขึ้นจะช่วยเพิ่มความต้านทานการเกิดแตกร้าวของรอยเชื่อม ในกรณีที่เนื้อโลหะรอยเชื่อมมีโครงสร้างออสเทนไนท์ทั้งหมด เนื่องจากไนโตรเจนทำให้ขนาดเกรนออสเทนไนท์เล็กลง

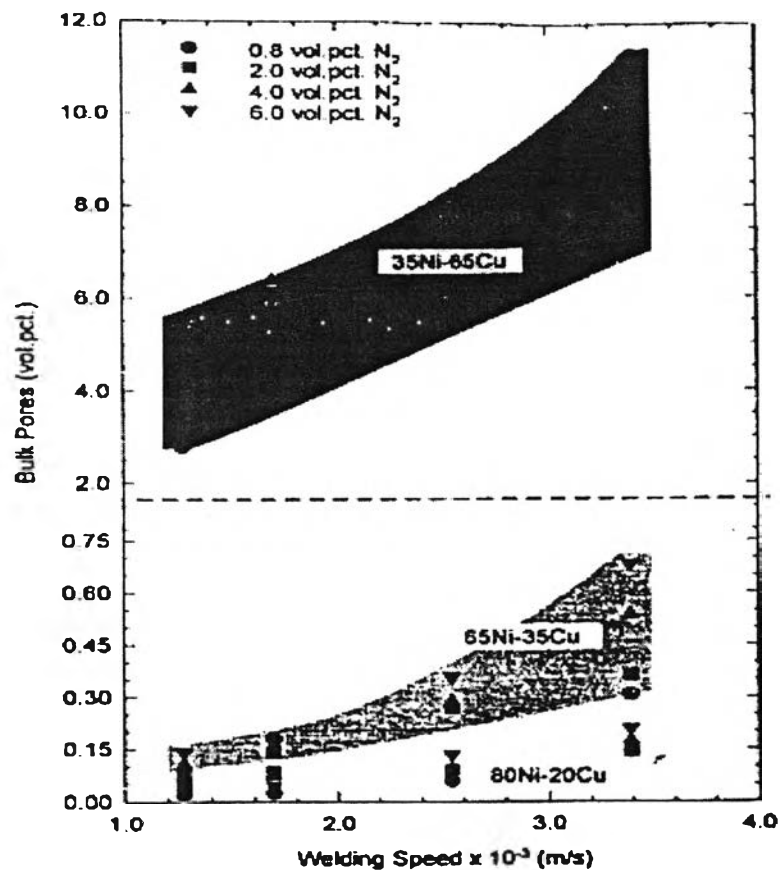
จากการศึกษาของ J. E. RAMIREZ, B. HAN และ S. LIU<sup>(8)</sup> เกี่ยวกับผลของตัวแปรการเชื่อมและอัตราการแข็งตัวของน้ำโลหะ ต่อการเกิดโพรงในเนื้อโลหะรอยเชื่อมนิกเกิล-ทองแดง โดยการเชื่อมทิก ใช้แก๊สปกคลุมอาร์กอนผสมแก๊สไนโตรเจน 0.2 ถึง 6.0 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร พบว่าเมื่อความเร็วเชื่อมเพิ่มขึ้นและใช้แก๊สปกคลุมอาร์กอนผสมแก๊สไนโตรเจนเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดโพรงในเนื้อโลหะรอยเชื่อมเพิ่มมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.4 คณะผู้วิจัยสรุปได้ว่า แก๊สปกคลุมอาร์กอนเมื่อผสมแก๊สไนโตรเจนในปริมาณสูงขึ้น ไม่มีผลต่อโครงสร้างจุลภาคที่เกิดขึ้นจากการแข็งตัวของ

น้ำโลหะ แต่สิ่งที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคคือ ความเร็วเชื่อม และส่วนผสมทางเคมีของเนื้อโลหะรอยเชื่อม



รูปที่ 2.3 การเปลี่ยนแปลงปริมาณไนโตรเจนในเนื้อโลหะรอยเชื่อม โดยวิธีเชื่อมทิก ใช้แก๊สปกคลุมอาร์กอนผสมแก๊สไนโตรเจน (กระแสไฟฟ้าเชื่อม 250 แอมแปร์ ความเร็วในการเชื่อม 15 เซนติเมตรต่อนาที อัตราการไหลแก๊สปกคลุม 15 ลิตรต่อนาที)<sup>(3)</sup>

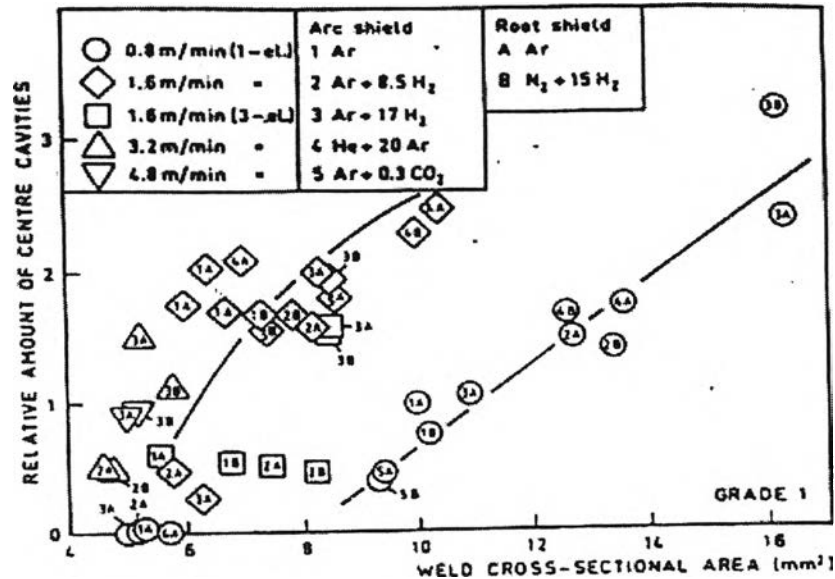




รูปที่ 2.4 การเกิดโพรงในเนื้อโลหะรอยเชื่อมของโลหะผสมนิกเกิล-ทองแดง ที่สัมพันธ์กับปริมาณแก๊สไนโตรเจนผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอน และความเร็วเชื่อม<sup>(8)</sup>

V.P.KUJANPAA, L.P.KARJALAINEN และ A.V.SIKANEN<sup>(1)</sup> ศึกษาเกี่ยวกับผลของแก๊สปกคลุมต่อการเกิดรอยบกพร่อง (Discontinuity) ของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก เกรด 316 โดยการเชื่อมทิก ใช้แก๊สปกคลุมด้านบนเป็นแก๊สผสมระหว่างแก๊สอาร์กอนกับแก๊สไฮโดรเจน แก๊สซีเลียมกับแก๊สอาร์กอน แก๊สอาร์กอนกับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และแก๊สอาร์กอนบริสุทธิ์ ตามลำดับ อัตราการไหล 8 ลิตรต่อนาที แก๊สปกคลุมด้านหลัง (Trail Shielding) อัตราการไหล 8 ลิตรต่อนาที ส่วนแก๊สปกคลุมด้านล่าง (Root Shielding) ใช้แก๊สอาร์กอนบริสุทธิ์และแก๊สไนโตรเจนผสมแก๊สไฮโดรเจน อัตราการไหล 8 ลิตรต่อนาที พบว่า รอยบกพร่องที่เกิดขึ้นในเนื้อโลหะรอยเชื่อม มี 3 ชนิด คือ รอยแตก โพรงตรงกลาง (Center cavity) และรอยกินลึก (Undercut) แต่ไม่เกิดรูพรุนขึ้นภายในเนื้อโลหะรอยเชื่อม ปริมาณรอยบกพร่องเหล่านี้สามารถทำให้ลดลงโดยใช้แก๊สปกคลุมด้านบนเป็นแก๊สผสมระหว่างแก๊สอาร์กอนกับแก๊สไฮโดรเจนหรือแก๊สซีเลียมกับแก๊สอาร์กอน เนื่องจากแก๊สผสมทั้งสองชนิดนี้ทำให้การเชื่อมได้รอยเชื่อมที่ซึมลึกสมบูรณ์ ด้วยระดับกระแส

ไฟฟ้าเชื่อมลดลง ซึ่งส่งผลต่อการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดรอยเชื่อม ดังแสดงในรูปที่ 2.5 สำหรับแก๊สปกคลุมด้านล่างไม่มีผลต่อการเกิดรอยบกพร่องของเนื้อโลหะรอยเชื่อม



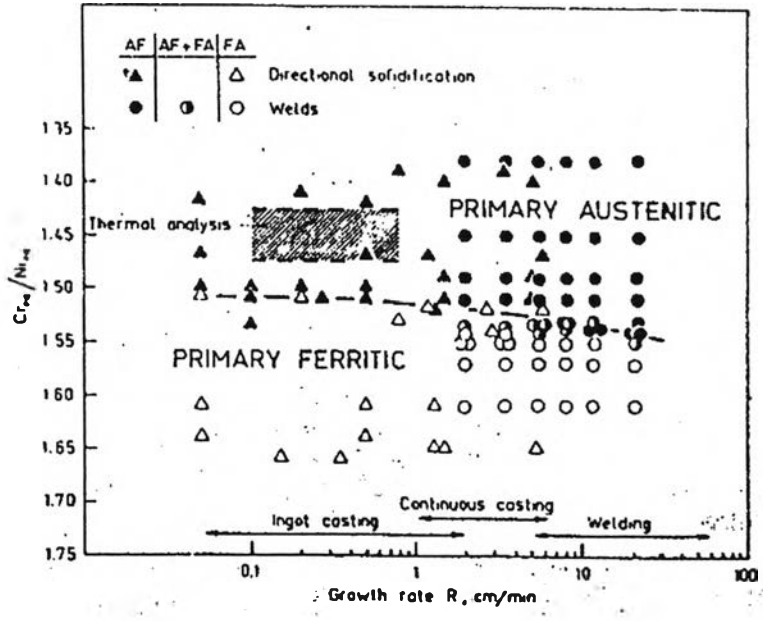
รูปที่ 2.5 ผลของส่วนผสมแก๊สปกคลุม และความเร็วการเชื่อมต่อการเกิดโพรงตรงกลาง<sup>(1)</sup>

2.2.2 ผลของลักษณะการแข็งตัวของน้ำโลหะรอยเชื่อม ต่อโครงสร้างจุลภาคของเนื้อโลหะรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก

ลักษณะการแข็งตัว(Solidification Mode) ของน้ำโลหะรอยเชื่อม มีผลต่อการเกิด โครงสร้างจุลภาคของเนื้อโลหะรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก ลักษณะการแข็งตัวของน้ำโลหะรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท<sup>(25)</sup> ดังนี้คือ

- ลักษณะการแข็งตัวแบบ Primary Austenitic โครงสร้างจุลภาคของเนื้อโลหะรอยเชื่อมเป็นออสเทนไนท์ และบางครั้งมีเฟอร์ไรท์เกิดขึ้นเล็กน้อย
- ลักษณะการแข็งตัวแบบ Primary Ferritic โครงสร้างจุลภาคของเนื้อโลหะรอยเชื่อมเป็นแบบดูเพล็กซ์ ประกอบด้วยเฟอร์ไรท์และออสเทนไนท์ โดยมีปริมาณเฟอร์ไรท์ในโครงสร้างจุลภาคมากกว่าประเภทที่ 1 และประเภทที่ 3
- ลักษณะการแข็งตัวแบบ Primary Austenitic หรือ Primary Ferritic โครงสร้างจุลภาคของเนื้อโลหะรอยเชื่อมเป็นแบบดูเพล็กซ์ มีปริมาณเฟอร์ไรท์น้อยกว่าประเภทที่ 2

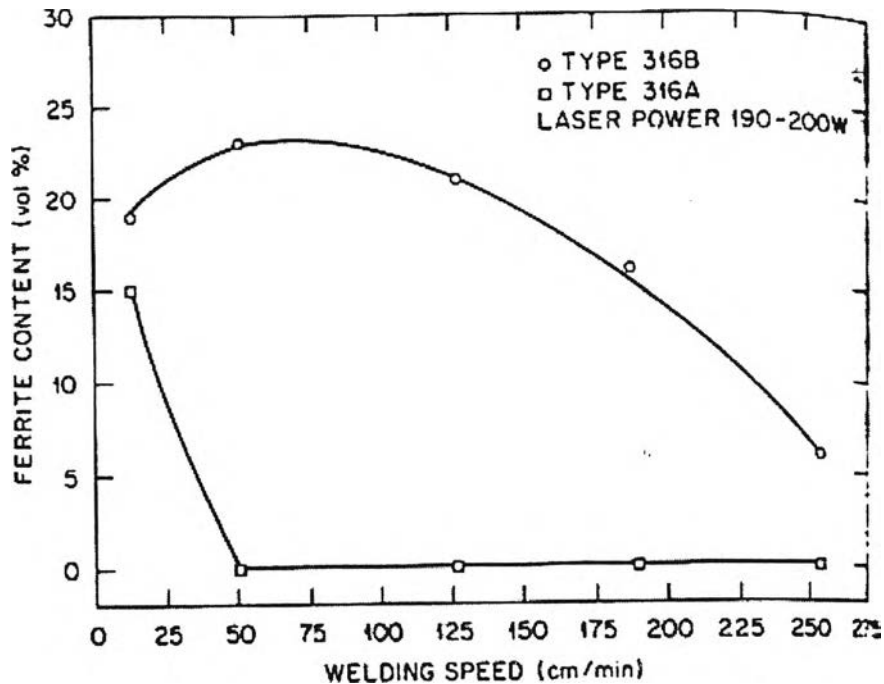
**ต้นฉบับ หน้าขาดหาย**



รูปที่ 2.6 ผลของอัตราการโต ต่อลักษณะการแข็งตัว ภายใต้เงื่อนไขการ โตแบบกิ่งก้าน(Dendritic)<sup>(35)</sup>

N.SOUTALA, T.TAKALO และ T.MOISIO<sup>(34)</sup> ศึกษาเกี่ยวกับลักษณะการแข็งตัวของน้ำ โลหะรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก ใช้การเชื่อมได้ฟลักซ์ พบว่า เนื้อโลหะรอยเชื่อมมี ปริมาณเคลต้า-เฟอร์ไรท์เพิ่มขึ้น เมื่ออัตราส่วนของค่าโครเมียมเทียบเท่าต่อนิกเกิลเทียบเท่ามีค่าเพิ่ม ขึ้นและ โครงสร้างจุลภาคของเนื้อโลหะรอยเชื่อมที่เกิดขึ้นจะสัมพันธ์กับอัตราส่วนของค่าโครเมียม เทียบเท่าต่อนิกเกิลเทียบเท่า กล่าวคือเมื่อค่าโครเมียมเทียบเท่าต่อนิกเกิลเทียบเท่ามีค่าต่ำ(ประมาณ 1.51)เคลต้า-เฟอร์ไรท์ในเนื้อโลหะรอยเชื่อม จะเกิดแบบเวอร์มิคูลาร์-เฟอร์ไรท์(Vermicular-Ferrite) แต่เมื่อค่าโครเมียมเทียบเท่าต่อนิกเกิลเทียบเท่ามีค่าเพิ่มขึ้น(ประมาณ 1.70 ถึง 1.95)เคลต้า-เฟอร์ไรท์ เกิดเป็นแบบแลทซ์-เฟอร์ไรท์ (Lathy Ferrite)

S.A.DAVID, J.M.VITEK และ T.L.HEBBLE<sup>(32)</sup> ศึกษาเกี่ยวกับผลของการแข็งตัวของน้ำ โลหะอย่างรวดเร็ว ต่อการเกิดโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก โดย อธิบายโครงสร้างจุลภาคที่เกิดขึ้นด้วยแผนภูมิเซฟเลอร์ ใช้วิธีเชื่อมเลเซอร์ เชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม ออสเทนนิติก อนุกรม 300 พบว่า การเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด 316 ปริมาณเคลต้า- เฟอร์ไรท์จะลดลง เมื่ออัตราการเย็นตัวเพิ่มขึ้นและมีโอกาสเกิด โครงสร้างออสเทนนิติกได้ทั้งหมด เมื่ออัตราการเย็นตัวต่ำกว่าอัตราการเย็นตัววิกฤต(Critical Cooling Rate) ซึ่งอัตราการเย็นตัวจะเพิ่ม ขึ้นเมื่อความเร็วเชื่อมเพิ่มขึ้น ดังนั้นปริมาณเคลต้า-เฟอร์ไรท์จะลดลงเมื่อความเร็วเชื่อมเพิ่มขึ้น ดัง แสดงในรูปที่ 2.7



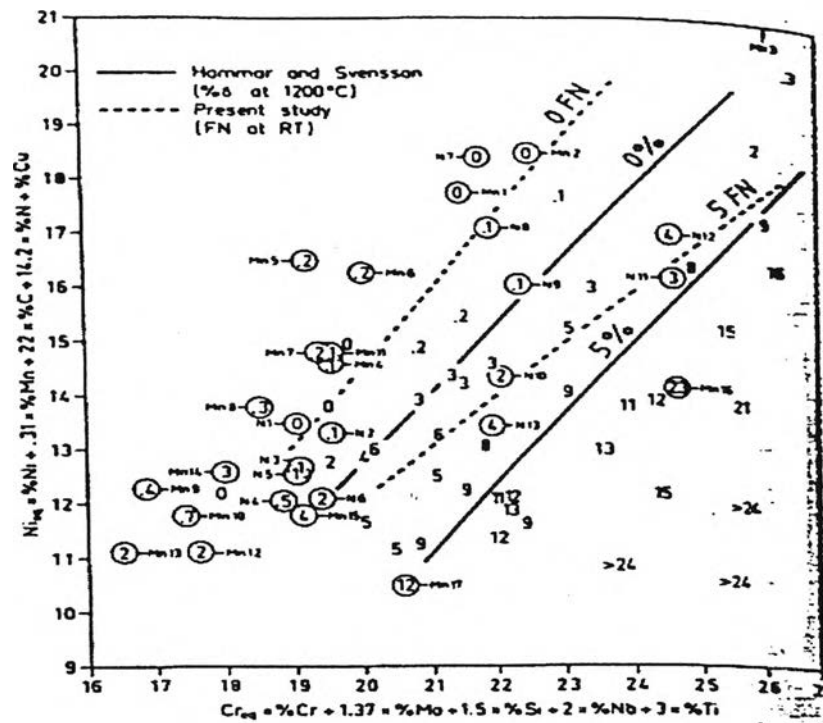
รูปที่ 2.7 อิทธิพลของความเร็วเชื่อมต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณเฟอไรต์ในเนื้อโลหะรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด 316<sup>(24)</sup>

จากงานวิจัยที่ผ่านมา<sup>(10,11,34,35,36)</sup> ได้อธิบายเกี่ยวกับการแบ่งขอบเขตของการเกิดลักษณะการแข็งตัวของน้ำโลหะรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกแบบ Primary Austenitic และการแข็งตัวแบบ Primary Ferritic โดยใช้อัตราส่วนค่าโครเมียมเทียบเท่าต่อนิกเกิลเทียบเท่า พบว่า สมการของแฮมมาร์(Hammar's Equation) สามารถใช้อธิบายการแบ่งขอบเขตลักษณะการแข็งตัวของเนื้อโลหะรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกอนุกรม 300 ที่ผ่านการเชื่อมทิก(อัตราการเย็นตัว =  $10^3 \text{ } ^\circ\text{C/s}$ )<sup>(32)</sup> ได้อย่างเหมาะสม โดยสมการของค่าโครเมียมเทียบเท่าและนิกเกิลเทียบเท่าแสดงได้ดังนี้

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

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

เมื่ออัตราส่วนค่าโครเมียมเทียบเท่าต่อนิกเกิลเทียบเท่า มากกว่าหรือเท่ากับ  $1.5 (\text{Cr}_{\text{eq}}/\text{Ni}_{\text{eq}} \geq 1.5)$  น้ำโลหะรอยเชื่อมจะเกิดลักษณะการแข็งตัวแบบ Primary Ferritic ได้มากขึ้น นอกจากนี้การพิจารณาขอบเขตลักษณะการแข็งตัวของเนื้อโลหะรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก อนุกรม 300 สามารถพิจารณาจากแผนภูมิแฮมมาร์ (Hammar's Diagram) ดังแสดงในรูปที่ 2.8

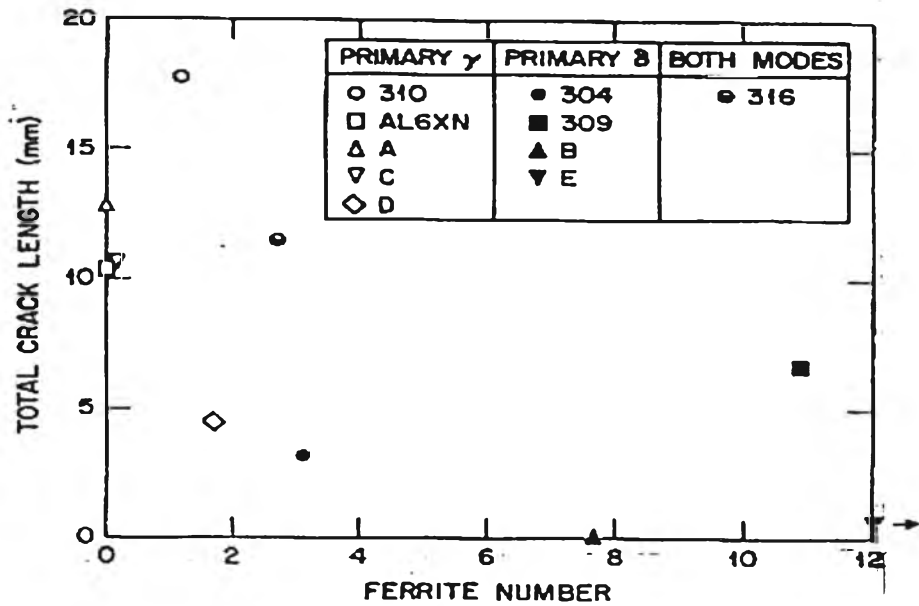


รูปที่ 2.8 แผนภูมิแฮมมาร์แสดงความสัมพันธ์ระหว่างส่วนผสมทางเคมี และลักษณะการแข็งตัวของเนื้อโลหะรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกอนุกรม 300<sup>(36)</sup>

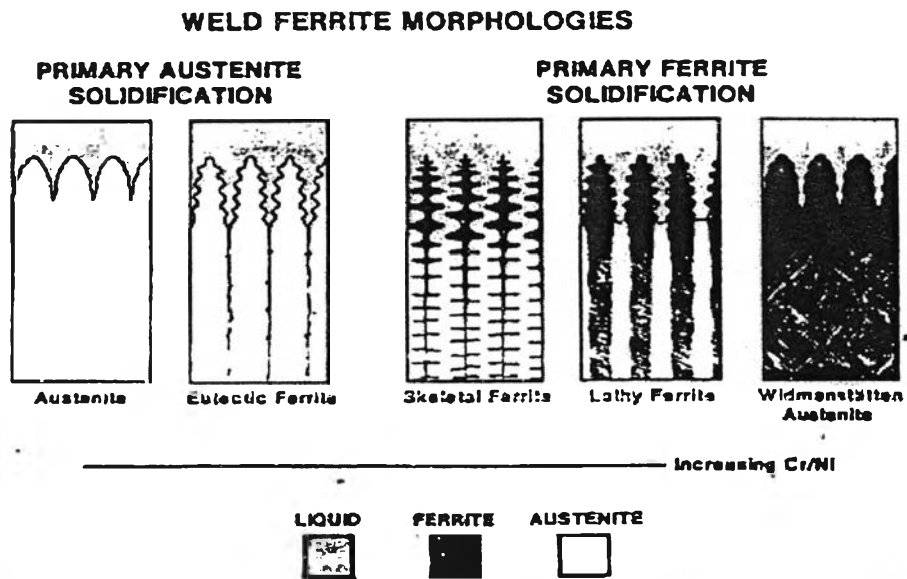
จากผลงานวิจัยที่ผ่านมา สรุปได้ว่า ข้อเสียประการหนึ่งของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกที่ผ่านกระบวนการเชื่อมแบบหลอมละลาย (Fusion Welding) คือ เกิดรอยแตกร้าวขณะร้อนได้ง่าย ซึ่งทำให้ลดลงได้ โดยเลือกใช้เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกที่มีส่วนผสมทางเคมีทำให้เนื้อโลหะรอยเชื่อมเกิดลักษณะการแข็งตัวแบบ Primary Ferritic<sup>(10-12,25,28,32)</sup> ซึ่งทำให้เนื้อโลหะรอยเชื่อมมีปริมาณเคลต้า-เฟอร์ไรท์เพิ่มขึ้น เนื่องจากสารเจือปนซัลเฟอร์และฟอสฟอรัส ละลายในโครงสร้างเฟอร์ไรท์ได้มากกว่าโครงสร้างออสเทนไนท์ จากการศึกษาของ V.P.KUJANPAA และคณะ<sup>(11)</sup> พบว่า การเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด 316 สามารถทำให้รอยแตกร้าวขณะร้อนลดลงควรมีอัตราส่วนค่าโครเมียมเทียบเท่าต่อนิกเกิลเทียบเท่ามากกว่า 1.5 หรือมีปริมาณซัลเฟอร์ร่วมกับฟอสฟอรัสน้อยกว่า 0.03 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

V.P.KUJANPAA, S.A.DAVID และ C.L.WHITE<sup>(25)</sup> ได้ศึกษาเกี่ยวกับการแตกร้าวขณะร้อนของเนื้อโลหะรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก ทดลองโดยใช้วิธี Spot-Varestraint กับเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก เกรด 304, 309, 310 และ 316 พบว่า รอยแตกเกิดขึ้นในทิศทางเดียวกับการแข็งตัวของน้ำโลหะรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก พบในเนื้อโลหะรอยเชื่อมที่เกิดลักษณะการแข็งตัวแบบ Primary Austenitic มากกว่า Primary Ferritic ดังแสดงในรูปที่ 2.9 ผู้วิจัย

ยังพบว่า ที่ผิวของรอยแตกมีปริมาณซัลเฟอร์มากกว่าบริเวณอื่น และรอยแตกร้าจะพบในบริเวณรอยต่อของเกรนอสเตนไนท์กับอสเตนไนท์มากกว่ารอยต่อของเกรนเฟอร์ไรท์กับอสเตนไนท์



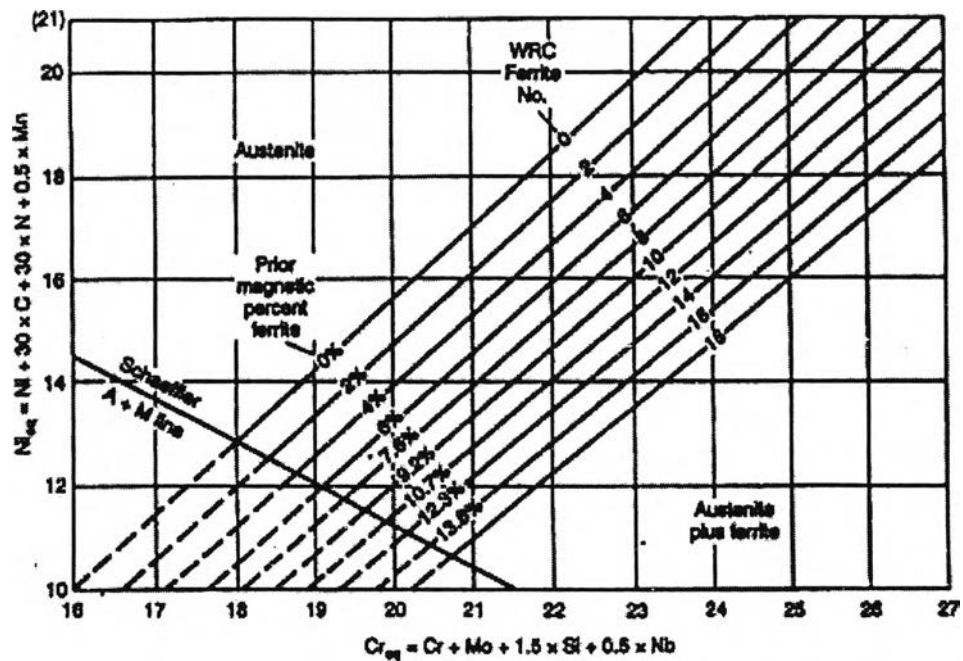
รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวรอยแตกร้ากับเฟอร์ไรท์นัมเบอร์เกิดจากลักษณะการแข็งตัวของเนื้อโลหะรอยเชื่อมที่แตกต่างกัน<sup>(25)</sup>



รูปที่ 2.10 ลักษณะการแข็งตัวของน้ำโลหะรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมอสเตนนิติกเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนค่าโครเมียมเทียบเท่าต่อนิเกิลเทียบเท่า<sup>(42)</sup>

### 2.2.3 ผลของส่วนผสมทางเคมี ต่อโครงสร้างจุลภาคของเนื้อโลหะรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม ออสเทนนิติก

การศึกษาโครงสร้างจุลภาคของเนื้อโลหะรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก ถือได้ว่าเป็นเรื่องสำคัญ เนื่องจากเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกที่ผ่านกระบวนการเชื่อมแบบหลอมละลาย มีโอกาสเกิดโครงสร้างจุลภาคแบบคูเพิลท์ซ์ได้ ปัจจัยสำคัญที่ทำให้เนื้อโลหะรอยเชื่อมมีโครงสร้างจุลภาคที่แตกต่างกัน คือส่วนผสมทางเคมีของเนื้อโลหะรอยเชื่อม ฉะนั้นก่อนปฏิบัติการเชื่อมประสานโลหะชนิดใดผู้ควบคุมการเชื่อมควรรู้ส่วนผสมทางเคมีของโลหะชนิดนั้นก่อน เพื่อเลือกกรรมวิธีการเชื่อมที่เหมาะสม เพื่อได้โครงสร้างจุลภาคของเนื้อโลหะรอยเชื่อมที่ดีที่สุด เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกที่ผ่านกระบวนการเชื่อมแบบทิกและมิก มีการใช้แก๊สปกคลุมบ่อน้ำโลหะในขณะที่ทำการเชื่อม เพื่อป้องกันการเกิดออกซิเดชันของน้ำโลหะ แต่แก๊สในโตรเจนจากสภาวะแวดล้อมก็ยังสามารถผสมไปในบ่อน้ำโลหะได้ ดังนั้นการทำนายโครงสร้างจุลภาคที่เกิดในเนื้อโลหะรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกจึงใช้แผนภูมิเดอลอง(DeLong Diagram) เนื่องจากได้อธิบายผลของไนโตรเจนที่มีต่อค่า निकเกิดเทียบเท่า ซึ่งมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณเซลล์ต้า-เฟอร์ไรท์ในโครงสร้างจุลภาคของเนื้อโลหะรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก<sup>(20)</sup> ดังแสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 แผนภูมิเดอลองแสดงอิทธิพลของส่วนผสมทางเคมี ต่อโครงสร้างจุลภาคของเนื้อโลหะ รอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก<sup>(20)</sup>



จากแผนภูมิพบว่า อิทธิพลของส่วนผสมทางเคมีต่อโครงสร้างจุลภาคของเนื้อโลหะรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกแบ่งออกได้ 2 กลุ่ม คือ

- กลุ่มที่มีผลต่อโครงสร้างจุลภาคในลักษณะเดียวกับโครเมียม เรียกว่า Ferrite Former เป็นกลุ่มที่ช่วยเพิ่มเสถียรภาพของการเกิดผลึกโครงสร้างแบบเฟอร์ไรท์ โดยมีโครงสร้างผลึกเป็น Body Center Cubic(BCC) ธาตุในกลุ่มนี้ได้แก่ โครเมียม โมลิบดีนัม ซิลิกอน และไนโอเบียม

- กลุ่มที่มีผลต่อโครงสร้างจุลภาคในลักษณะเดียวกับนิกเกิล เรียกว่า Austenite Former เป็นกลุ่มที่ช่วยเพิ่มเสถียรภาพของการเกิดผลึกโครงสร้างแบบออสเทนไนท์ โดยมีโครงสร้างผลึกเป็น Face Center Cubic(FCC) ธาตุในกลุ่มนี้ได้แก่ นิกเกิล คาร์บอน ไนโตรเจน และแมงกานีส อิทธิพลของธาตุ 2 กลุ่มนี้สามารถแสดงในสมการที่ 2.5 และ 2.6 ตามลำดับ

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

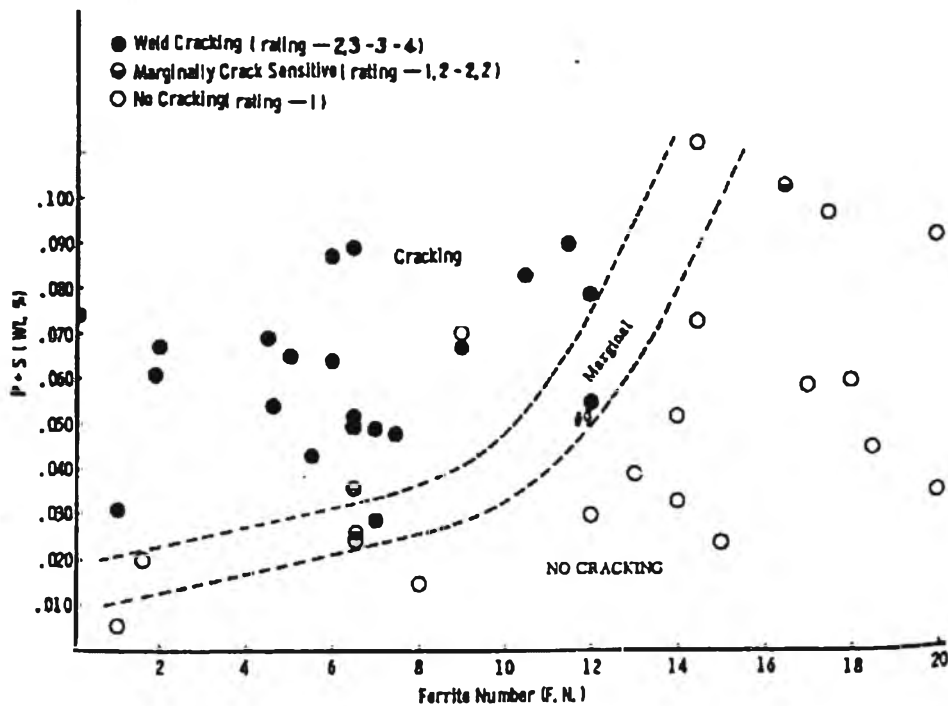
$$\text{Nickel Equivalent (Ni}_{\text{eq}}) = \%Ni + 30\%C + 30\%N + 0.5\%Mn \quad 2.6$$

เห็นได้ว่าแก๊สไนโตรเจนที่ผสมในแก๊สปกคลุมอาร์กอนที่ใช้สำหรับการเชื่อมทิกนัั้น เป็นธาตุในกลุ่ม Austenite Former ทำให้เกิดผลึกโครงสร้างออสเทนไนท์เพิ่มขึ้น และเคลต้า-เฟอร์ไรท์ลดลง ดังนั้นการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกจำเป็นต้องควบคุมปริมาณเคลต้า-เฟอร์ไรท์ในเนื้อโลหะรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกให้เหมาะสม จากการศึกษาของ F.C.HULL<sup>(31)</sup> เกี่ยวกับผลของปริมาณเคลต้า-เฟอร์ไรท์ ต่อการเกิดรอยแตกร้าวขณะร้อนของเนื้อโลหะรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก พบว่า ปริมาณเคลต้า-เฟอร์ไรท์ที่เหมาะสมควรอยู่ในช่วง 5 ถึง 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ซึ่งช่วยเพิ่มความต้านทานการเกิดรอยแตกร้าวขณะร้อนให้สูงขึ้น เนื่องจากซัลเฟอร์และฟอสฟอรัสละลายได้ดีในโครงสร้างเฟอร์ไรท์ และเคลต้า-เฟอร์ไรท์ช่วยเพิ่มคุณสมบัติความแข็งแรง (Strength) ในขณะที่ความแกร่ง(Toughness)และการยืดตัว(Ductility)ลดลงไม่มากนัก ตลอดจนช่วยลดปัญหาการกัดกร่อนของเนื้อโลหะรอยเชื่อมด้วย เมื่อปริมาณเคลต้า-เฟอร์ไรท์ในเนื้อโลหะรอยเชื่อมมีมากกว่า 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ทำให้เกิดโครงสร้างตาข่ายของเคลต้า-เฟอร์ไรท์และเกิดการกัดกร่อนในบริเวณตามแนวขอบตาข่ายระหว่างรอยต่อของเคลต้า-เฟอร์ไรท์กับออสเทนไนท์ และเมื่อนำไปใช้งานที่อุณหภูมิประมาณ 600 ถึง 900 องศาเซลเซียส<sup>(41)</sup> พบว่าเคลต้า-เฟอร์ไรท์ สามารถเปลี่ยนเป็นซิกม่า(Sigma-Phase)ได้ ซึ่งมีคุณสมบัติเปราะ ทำให้มีโอกาสเกิดรอยแตกร้าวได้มากยิ่งขึ้น T.A.SIEWART และคณะ<sup>(33)</sup> ได้เสนอสมการที่ใช้สำหรับคำนวณหา

ปริมาณเดลต้า-เฟอร์ไรท์ที่เกิดขึ้นในเนื้อโลหะรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก เกรด 316 ดังแสดงในสมการที่ 2.7

$$\% \text{ Delta Ferrite} = 3(\text{Cr}_{\text{eq}} - 0.93 \text{Ni}_{\text{eq}} - 6.7) \quad 2.7$$

สารเจือปนเป็นสาเหตุของการเกิดปัญหาการร้าวในเนื้อโลหะรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเพิ่มขึ้น ดังนั้นเมื่อปริมาณสารเจือปนมากขึ้นเนื้อโลหะรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกจำเป็นต้องมีปริมาณเดลต้า-เฟอร์ไรท์มากขึ้น จากการศึกษาของ J.A.BROOKS และ F.J.LAMBERT, JR.<sup>(9)</sup> เกี่ยวกับผลของฟอสฟอรัส ซัลเฟอร์ และปริมาณเดลต้า-เฟอร์ไรท์ ต่อการเกิดรอยแตกร้าวของเนื้อโลหะรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด 309 พบว่า เมื่อปริมาณซัลเฟอร์และฟอสฟอรัสเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดรอยแตกร้าวมากขึ้น และเมื่อปริมาณเดลต้า-เฟอร์ไรท์เพิ่มขึ้นทำให้การเกิดรอยแตกร้าวลดลง ดังแสดงในรูปที่ 2.12 และเมื่อปริมาณผลรวมของ ซัลเฟอร์กับฟอสฟอรัสเพิ่มขึ้น 0.01 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะต้องเพิ่มปริมาณเดลต้า-เฟอร์ไรท์ขึ้นประมาณ 4 FN เพื่อป้องกันการเกิดรอยแตกร้าวของเนื้อโลหะรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก



รูปที่ 2.12 ความสัมพันธ์ของปริมาณซัลเฟอร์และฟอสฟอรัส และปริมาณเดลต้า-เฟอร์ไรท์ ต่อการเกิดรอยแตกร้าวของเนื้อโลหะรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก<sup>(9)</sup>

จากแผนภูมิเดอลอง พบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเคลต้า-เฟอร์ไรท์ในรูปแบบของ เฟอร์ไรท์นัมเบอร์ และเปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร(% Volume) แสดงในสมการที่ 2.8 และ 2.9 ตามลำดับ

- ในช่วงปริมาณเฟอร์ไรท์น้อยกว่า 7 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร

$$\text{Ferrite Number (FN)} = \% \text{ Ferrite} \quad 2.8$$

- ในช่วงปริมาณเฟอร์ไรท์ 7 ถึง 14 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร

$$\text{Ferrite Number (FN)} = 1.285 \times (\% \text{ Ferrite}) \quad 2.9$$

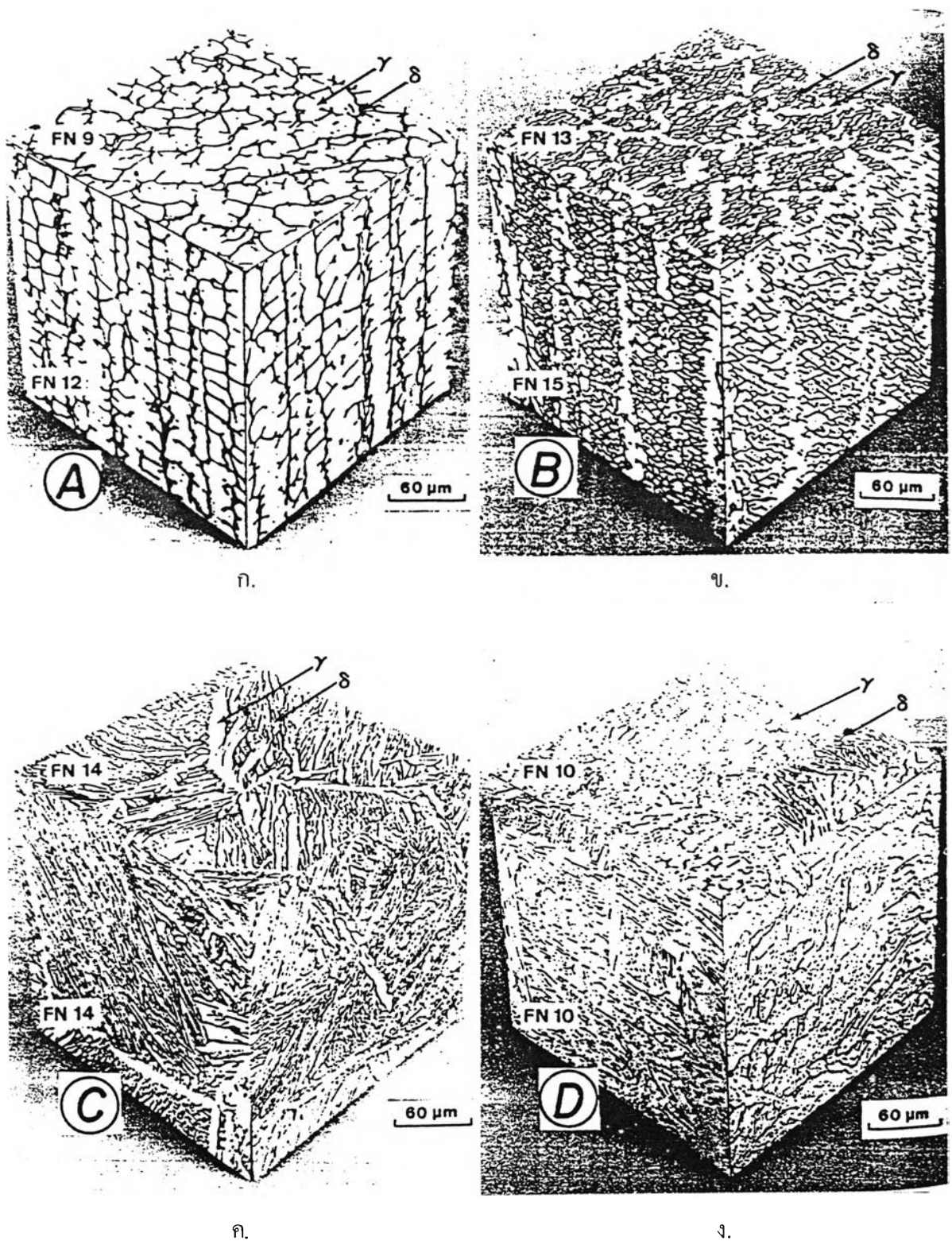
องค์ประกอบสำคัญที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณเคลต้า-เฟอร์ไรท์ในเนื้อโลหะรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก คือ ชาติส่วนผสมทางเคมี การเปลี่ยนโครงสร้างของเฟอร์ไรท์ ลักษณะของเฟอร์ไรท์ และอัตราการเย็นตัวของเนื้อโลหะรอยเชื่อม เป็นต้น S.D.DAVID<sup>(21)</sup> ศึกษาเกี่ยวกับลักษณะของเคลต้า-เฟอร์ไรท์และการเปลี่ยนแปลงปริมาณเคลต้า-เฟอร์ไรท์ในเนื้อโลหะรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก พบว่า ลักษณะของเคลต้า-เฟอร์ไรท์ที่เกิดขึ้นในเนื้อโลหะรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ชนิดคือ

- Vermicular Morphology พบในเนื้อโลหะรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกที่เกิดเป็นโครงสร้างดิวเพล็กซ์ มีปริมาณเฟอร์ไรท์นัมเบอร์ตั้งแต่ 9 ถึง 12 (รูปที่ 2.13 ก.)

- Lathy Morphology พบในเนื้อโลหะรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกที่เกิดเป็นโครงสร้างดิวเพล็กซ์ มีปริมาณเฟอร์ไรท์นัมเบอร์ตั้งแต่ 13 ถึง 15 (รูปที่ 2.13 ข.)

- Acicular Morphology เคลต้า-เฟอร์ไรท์ที่เกิดขึ้นมีลักษณะคล้ายกับเข็มมีการเรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบ ค่าเฉลี่ยของปริมาณเฟอร์ไรท์นัมเบอร์ของการเกิดเฟอร์ไรท์ชนิดนี้เท่ากับ 14 จะพบเฟอร์ไรท์ชนิดนี้เมื่อเนื้อโลหะรอยเชื่อมมีค่าโครเมียมเทียบเท่ากับ 20 เปอร์เซ็นต์มากกว่า 2 (รูปที่ 2.13 ค.)

- Globular Morphology เคลต้า-เฟอร์ไรท์ชนิดนี้ไม่ได้เกิดจากการแข็งตัวของเนื้อโลหะรอยเชื่อม แต่เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของเคลต้า-เฟอร์ไรท์เมื่อผ่านกระบวนการทางความร้อน มีค่าเฉลี่ยของปริมาณเฟอร์ไรท์นัมเบอร์เท่ากับ 10 (รูปที่ 2.13 ง.)



รูปที่ 2.13 ลักษณะเซลล์เฟอร์ไรท์ที่เกิดขึ้นในเนื้อโลหะรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมอสเตนนิก

ก. Vermicular Ferrite ข. Lathy Ferrite ค. Acicular Ferrite และ ง. Globular Ferrite<sup>(21)</sup>

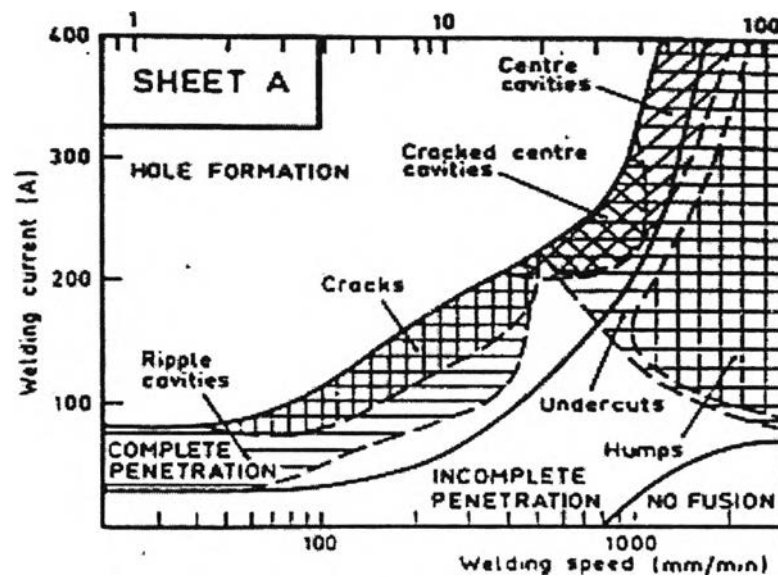
## 2.2.4 ผลกระทบของตัวแปรการเชื่อมตักต่อการเกิดเนื้อโลหะรอยเชื่อม

### 2.2.4.1 ความเร็วเชื่อม และกระแสไฟฟ้าเชื่อม

จากการศึกษาของ V.P.KUJANPAA<sup>(12)</sup> เกี่ยวกับการเกิดรอยบกพร่องในเนื้อโลหะรอยเชื่อม แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก เกรด 316 หนา 2 มม. เมื่อใช้ตัวแปรในการเชื่อมที่แตกต่างกัน โดยในการศึกษานี้มุ่งเน้นการพิจารณาปริมาณและขนาดของรอยบกพร่องที่เกิดขึ้นเมื่อเปลี่ยนแปลง กระแสไฟฟ้าเชื่อมและความเร็วเชื่อม ใช้วิธีการเชื่อมตัก และไม่ใช้ลวดเชื่อม เชื่อมในท่าราบ รอยต่อชิ้นงานเป็นแบบต่อชน จากการทดลองพบว่า รอยบกพร่องที่เกิดขึ้นมี 6 ชนิดคือ รอยแตก โพรงตรงกลาง(Cracked Center Cavities) Ripple Cavities รอยกินลึก(Undercut) และ Humps การแบ่งประเภท กำหนดได้จากตำแหน่งการเกิดรอยบกพร่อง ขนาดและรูปร่างของรอยบกพร่อง

การเชื่อมที่ใช้กระแสไฟฟ้าเชื่อมสูง ทำให้ปริมาตรบ่อน้ำโลหะ(Weld Pool)มีขนาดเพิ่มมากขึ้น โอกาสที่เกิดการหดตัว(Shrinkage)เพิ่มขึ้น ส่งผลต่อการเกิดรอยแตกและโพรงตรงกลาง สำหรับการเชื่อมที่ความเร็วเชื่อมต่ำ ทำให้ลักษณะของบ่อน้ำโลหะเปลี่ยนรูปทรงจากรูปไข่(Ellipse) เป็นรูปร่างค่อนข้างกลม(Drop-Shapes) ทำให้เกิดการแยกตัว(Segregation)ของสารเจือปนได้มาก ส่งผลต่อการเกิดรอยแตกร้าวในเนื้อโลหะรอยเชื่อม ดังนั้นสรุปได้ว่า การเพิ่มระดับกระแสไฟฟ้าเชื่อมไม่ มีผลต่อการเปลี่ยนชนิดรอยบกพร่อง แต่ทำให้รอยบกพร่องมีขนาดและปริมาณเพิ่มขึ้น สำหรับความเร็วเชื่อมมีผลต่อการเกิดลักษณะรอยบกพร่องดังนี้คือ รอยแตกและRipple Cavities เกิดขึ้นเมื่อใช้ความเร็วเชื่อมต่ำ ในขณะที่ โพรงตรงกลาง รอยกินลึก และHumps เกิดขึ้นเมื่อใช้ความเร็วเชื่อมเพิ่มสูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.14

การเพิ่มความเร็วเชื่อม นอกจากจะทำให้เกิดรอยบกพร่องในเนื้อโลหะรอยเชื่อมแล้วยังทำให้ปริมาณเคลดดำ-เฟอร์ไรต์ลดลงด้วย จากการศึกษานี้ของ N.SUUTALA<sup>(35)</sup> พบว่า เมื่อความเร็วเชื่อมเพิ่มขึ้นจาก 2.5 เซนติเมตรต่อนาที เป็น 80 เซนติเมตรต่อนาที เฟอร์ไรต์นัมเบอร์มีปริมาณลดลง 1 ถึง 2 หน่วย สำหรับการเชื่อมตักการปรับตัวแปรการเชื่อม ทั้งกระแสไฟฟ้าเชื่อมและความเร็วเชื่อม ต้องมีความสัมพันธ์กัน เพื่อให้ได้รอยซึมลึกสมบูรณ์(Complete Penetration) การเพิ่มความเร็วเชื่อมสูงขึ้น ต้องปรับกระแสไฟฟ้าเชื่อมเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ซึ่งก่อให้เกิดรอยบกพร่องมากขึ้น ดังนั้นจึงมี จำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องศึกษาตัวแปรการเชื่อมตักเพื่อให้ได้รอยเชื่อมที่สมบูรณ์

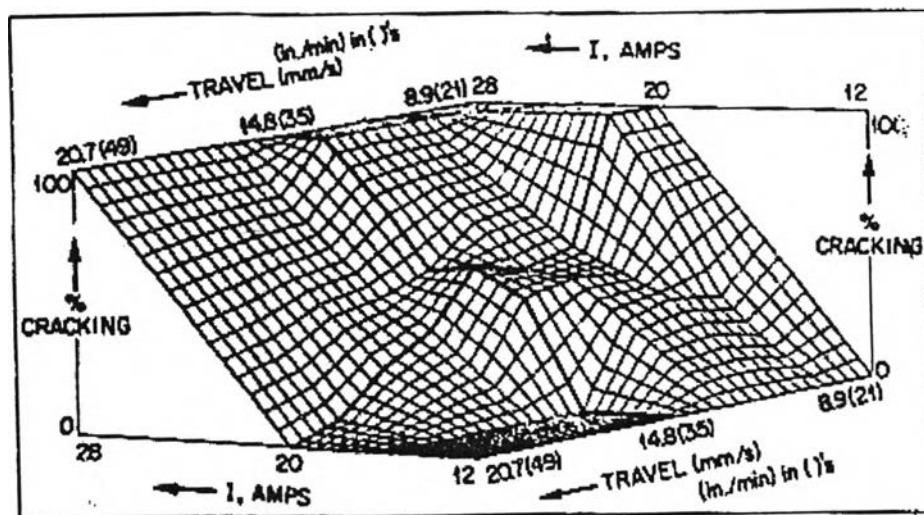


รูปที่ 2.14 แผนภาพแสดงชนิดรอยบกพร่องที่เกิดขึ้นสัมพันธ์กับ ความเร็วเชื่อมและกระแสไฟฟ้าเชื่อม ของการเชื่อมแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก โดยวิธีเชื่อมทิก<sup>(12)</sup>

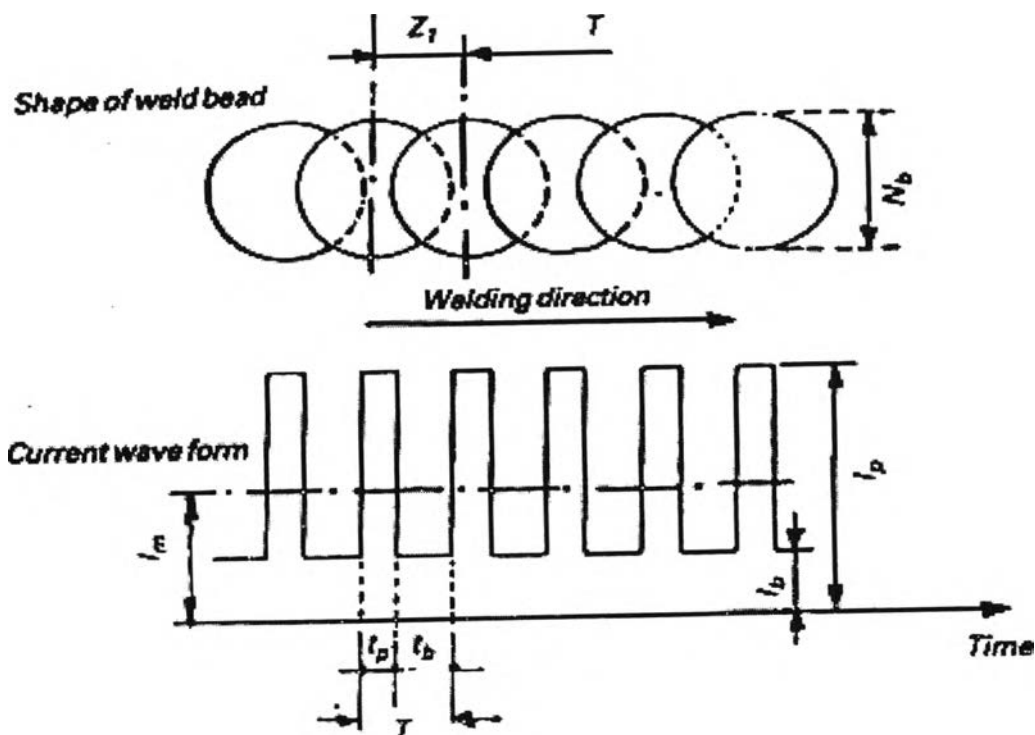
G.M.GOODWIN<sup>(15)</sup> ศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบของปริมาณความร้อนในระหว่างเชื่อมและกระบวนการเชื่อมต่อการเกิดรอยแตกร้าวในเนื้อโลหะรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก ใช้วิธีการเชื่อมทิก เปลี่ยนแปลงความเร็วเชื่อมและกระแสไฟฟ้าเชื่อม เพื่อให้ได้รอยเชื่อมที่สมบูรณ์เชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก เกรด 316 พบว่า เมื่อใช้ความเร็วเชื่อมลดลงและกระแสไฟฟ้าเชื่อมเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดรอยแตกร้าวเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.15 ผู้วิจัยสรุปว่า อิทธิพลของตัวแปรการเชื่อมทิกเมื่อกำหนดให้ปริมาณความร้อนที่ใช้ในการเชื่อมคงที่ รอยแตกร้าวจะเกิดขึ้น เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของบ่อน้ำโลหะ และการกระจายของความเค้น(Stress Distribution) ที่ด้านหลังของบ่อน้ำโลหะ และเมื่อเพิ่มปริมาณความร้อนที่ใช้ในการเชื่อมสูงขึ้น ทำให้เกิดรอยแตกร้าวเพิ่มสูงขึ้นด้วยเช่นเดียวกัน

#### 2.2.4.2 ตัวแปรการเชื่อมทิกพัลส์(GTAW-P)

ปัญหาแตกร้าวขณะร้อนของเนื้อโลหะรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก สามารถทำให้ลดลงได้โดยการใช้กรรมวิธีการเชื่อมแบบพัลส์ ซึ่งกรรมวิธีการเชื่อมทิกพัลส์ก็เป็นตัวเลือกหนึ่งที่ใช้สำหรับการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก ในช่วงกระแสไฟฟ้าพัลส์(Peak Pulse Current) เกิดการหลอมละลายของโลหะ และช่วงกระแสไฟฟ้าเบส(Base Current) เกิดการเย็นตัวของบ่อน้ำโลหะ ดังแสดงในรูปที่ 2.16 แสดงลักษณะกราฟของกระแสไฟฟ้าพัลส์



รูปที่ 2.15 การเกิดรอยแตกร้าวในเนื้อโลหะรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก เกรด 316 ที่สัมพันธ์กับกระแสไฟฟ้าเชื่อมและความเร็วเชื่อม<sup>(15)</sup>



รูปที่ 2.16 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าพัลส์และจุดหลอมละลายที่เกิดเป็นรอยเชื่อม<sup>(40)</sup>

ความสัมพันธ์ของตัวแปรการเชื่อมแบบพัลส์สามารถแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

- อัตราส่วนระหว่างค่ากระแสไฟฟ้าเบสต่อกระแสไฟฟ้าพัลส์(RE)

$$RE = I_B / I_p \quad 2.10$$

- อัตราส่วนระหว่างช่วงเวลากระแสไฟฟ้าพัลส์ต่อระยะเวลาครบรอบ(RI)

$$RI = t_p / T \quad 2.11$$

- ความถี่พัลส์( $F_p$ )

$$F_p = 1/T \quad 2.12$$

- ค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ย( $I_m$ )

$$I_m = (I_p t_p + I_B t_b) / T \quad 2.13$$

- กระแสไฟฟ้าเฉลี่ยค่ากลางเรขาคณิต ( $I_{rms}, I_c$ )

$$I_{rms} = \sqrt{[(I_p^2 t_p + I_b^2 t_b) / T]} \quad 2.14$$

- ค่าพลังงานที่ใช้สำหรับการหลอมละลายเนื้อโลหะ( $P_c$ )

$$P_c = V \times I_c \quad 2.15$$

- ปริมาณความร้อนที่ถูกใช้สำหรับการหลอมละลายเนื้อโลหะ( $W_s$ )

$$W_s = (\eta \times P_c) / V_s \quad 2.16$$

$\eta$  = ค่าประสิทธิภาพ       $V_s$  = ความเร็วเชื่อม

การเลือกใช้กรรมวิธีการเชื่อมทิกพัลส์นี้ มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ผู้ปฏิบัติการเชื่อมจะต้องเข้าใจถึงคุณลักษณะของตัวแปรการเชื่อมแต่ละตัว ที่มีอิทธิพลต่อการเกิดลักษณะของรอยเชื่อมและโครงสร้างจุลภาคของเนื้อ โลหะรอยเชื่อม ตัวแปรการเชื่อมทิกพัลส์ที่สำคัญดังกล่าวประกอบด้วย<sup>(40)</sup>

- กระแสไฟฟ้าพัลส์ และกระแสไฟฟ้าเบส

กระแสไฟฟ้าเบสนั้นควรเลือกใช้ให้มีค่าอยู่ในระดับที่ต่ำสุด แต่ยังคงรักษาเสถียรภาพของการอาร์คได้(Arc Stable) เพื่อให้ปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นบนรอยเชื่อมมีค่าน้อยที่สุด ป้องกัน



การสะสมปริมาณความร้อนของเนื้อโลหะรอยเชื่อมมากเกินไป ส่วนกระแสไฟฟ้าพัลส์ควรมีค่าสูงกว่ากระแสไฟฟ้าเบส 2 ถึง 3 เท่า แต่ก็ขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะที่เชื่อม และคุณสมบัติของรอยเชื่อม การเพิ่มค่ากระแสไฟฟ้าเบสสูงขึ้นทำให้รอยซึมลึกด้านหลังรอยเชื่อมมีความต่อเนื่องสมบูรณ์เพิ่มขึ้น

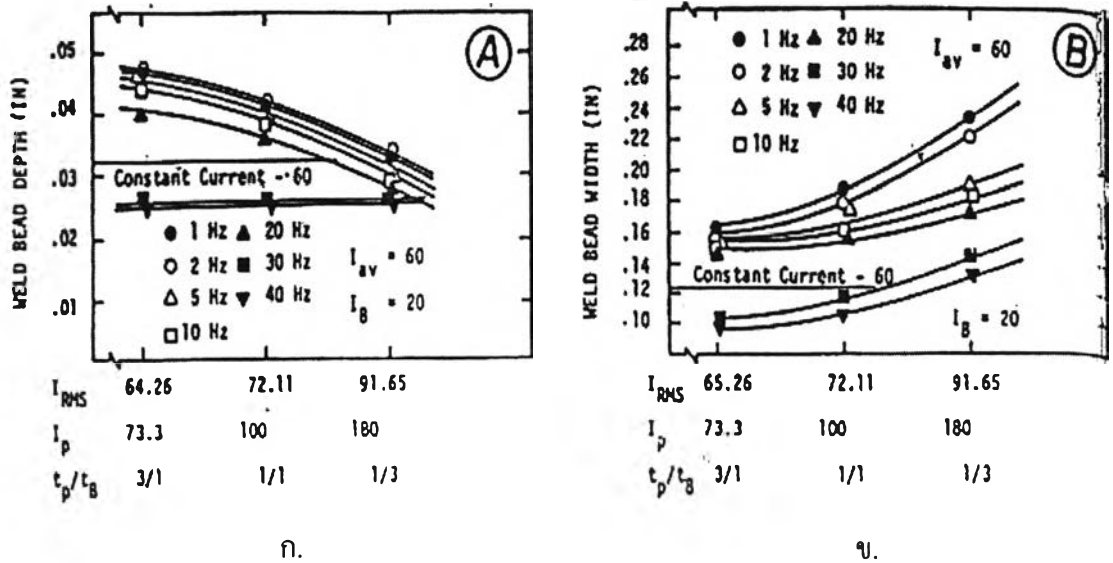
- ช่วงระยะเวลาและความถี่ของกระแสไฟฟ้าพัลส์

การพิจารณาใช้ช่วงเวลากระแสไฟฟ้าพัลส์ที่เหมาะสม นั้นต้องคำนึงถึงความหนาและคุณสมบัติทางความร้อนของโลหะที่เชื่อม สำหรับโลหะที่มีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนสูง ควรใช้ช่วงเวลากระแสไฟฟ้าพัลส์ลดลง และโลหะที่มีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนต่ำ สามารถใช้ช่วงเวลากระแสไฟฟ้าพัลส์มากขึ้นได้ การเพิ่มความถี่พัลส์มากขึ้น ทำให้การเย็นตัวของบ่อน้ำโลหะในช่วงเวลากระแสไฟฟ้าพัลส์มีค่าเพิ่มมากขึ้น ทำให้เนื้อโลหะรอยเชื่อมมีขนาดเกรนเล็กลง

- ความเร็วเชื่อม

การเปลี่ยนแปลงความเร็วเชื่อมมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดความกว้างและรอยซึมลึกของเนื้อโลหะรอยเชื่อม กล่าวคือเมื่อเพิ่มความเร็วเชื่อมสูงขึ้น ทำให้ขนาดพื้นที่หน้าตัดเนื้อโลหะรอยเชื่อมเล็กลง ซึ่งช่วยลดการสะสมความร้อนมากเกินไป(Overheating)ในเนื้อโลหะรอยเชื่อม แต่อย่างไรก็ตามการเพิ่มความเร็วเชื่อมสูงขึ้นทำให้เกิดรอยกินลึกเพิ่มมากขึ้น

A.A.OMAR และC.D.LUNDIN<sup>(18)</sup> ศึกษาการเชื่อมด้วยวิธีพลาสมาพัลส์(Pulse Plasma)และทิกพัลส์(Pulse GTA) ต่อการเกิดลักษณะรอยเชื่อมของวัสดุอิน โคนเนล 600 เพื่อหาตัวแปรการเชื่อมที่เหมาะสมของวิธีการเชื่อมทั้ง 2 วิธี โดยเปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้าพัลส์ กระแสไฟฟ้าเบส ช่วงเวลากระแสไฟฟ้าพัลส์ ช่วงเวลากระแสไฟฟ้าเบส และค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ย ที่มีผลต่อลักษณะรอยเชื่อม เช่น ความกว้าง รอยซึมลึก และพื้นที่หน้าตัดของเนื้อโลหะรอยเชื่อม พบว่าระดับกระแสไฟฟ้าพัลส์ต่ำและช่วงเวลากระแสไฟฟ้าพัลส์มากขึ้นทำให้เนื้อโลหะรอยเชื่อมซึมลึกดีขึ้น แต่เมื่อเพิ่มกระแสไฟฟ้าพัลส์สูงขึ้นและช่วงเวลากระแสไฟฟ้าพัลส์สั้นลงทำให้เนื้อโลหะรอยเชื่อมมีความกว้างเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 ผลของตัวแปรการเชื่อมทิกพัลส์ที่มีต่อ ก.รอยซึมลึก ข.ความกว้างรอยเชื่อม<sup>(18)</sup>

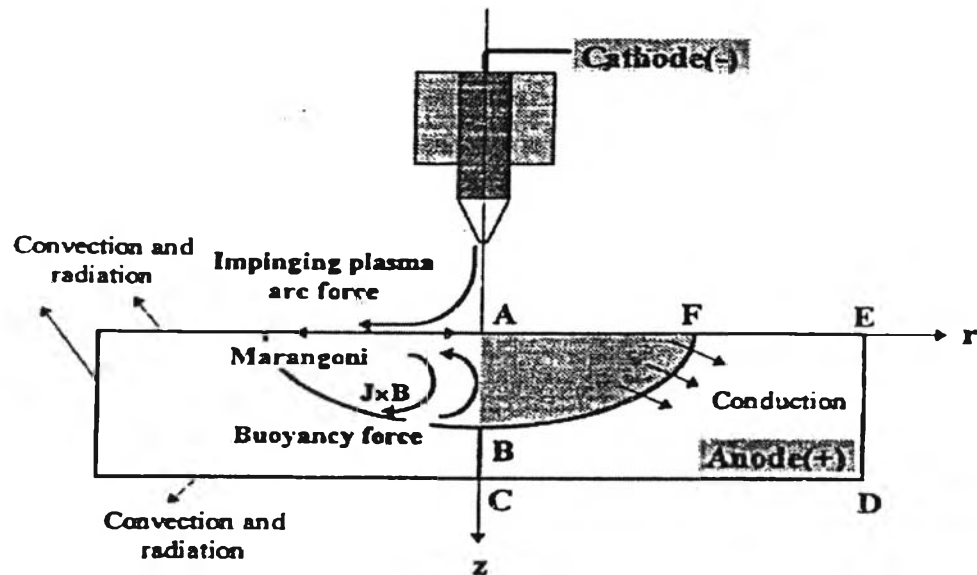
จากการศึกษาของ W.H.KIM และ S.J.NA<sup>(14)</sup> เกี่ยวกับปริมาณความร้อนและการไหลของน้ำโลหะในบ่อน้ำโลหะที่เกิดขึ้นในระหว่างการเชื่อมทิกพัลส์ โดยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด 304 ได้กล่าวไว้ว่า Driving Forces ที่มีผลต่อการไหลของน้ำโลหะในบ่อน้ำโลหะในระหว่างการเชื่อมทิกพัลส์ประกอบด้วย (ดังแสดงในรูปที่ 2.18)

- Electromagnetic หรือ Lorentz Force เกิดขึ้นจากความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่เหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็ก
- Surface Tension หรือ Marangoni Force เกิดขึ้นจากความแตกต่างของระดับอุณหภูมิที่ผิวบ่อน้ำโลหะ
- Impinging Plasma Arc Force หรือ Gas Drag Force เกิดขึ้นที่ผิวของบ่อน้ำโลหะเกี่ยวข้องกับ Plasma Jet Momentum
- Buoyancy force เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของบ่อน้ำโลหะ

โดยที่ Driving Force เหล่านี้มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของรอยเชื่อม และโครงสร้างจุลภาคของเนื้อโลหะรอยเชื่อม กล่าวคือ Lorentz Force จะผลักดันน้ำโลหะไหลไปในทิศของการซึมลึกและไหลในทิศทางทวนเข็มนาฬิกาเข้าหาแนวแกนของการเชื่อม Surface Tension สามารถไหลได้ทั้งสองทิศทางขึ้นอยู่กับแรงตึงผิว ถ้า  $\partial\gamma / \partial r < 0$  จะทำให้น้ำโลหะไหลจากบริเวณผิวของแข็ง-เหลวเข้าสู่แนวแกนของการเชื่อม ทำให้อรอยเชื่อมมีรอยซึมลึกเพิ่มมากขึ้น Gas Drag Force คัดน้ำโลหะให้ไหลในทิศทางออกจากตรงกลางบ่อน้ำโลหะไปยังขอบของบ่อน้ำโลหะ มีผลให้อรอย

ซึ่งมีลักษณะของเนื้อโลหะรอยเชื่อมลดลง และ Buoyancy Force จะดันนำโลหะในทิศทางตรงข้ามกับ Electromagnetic Force

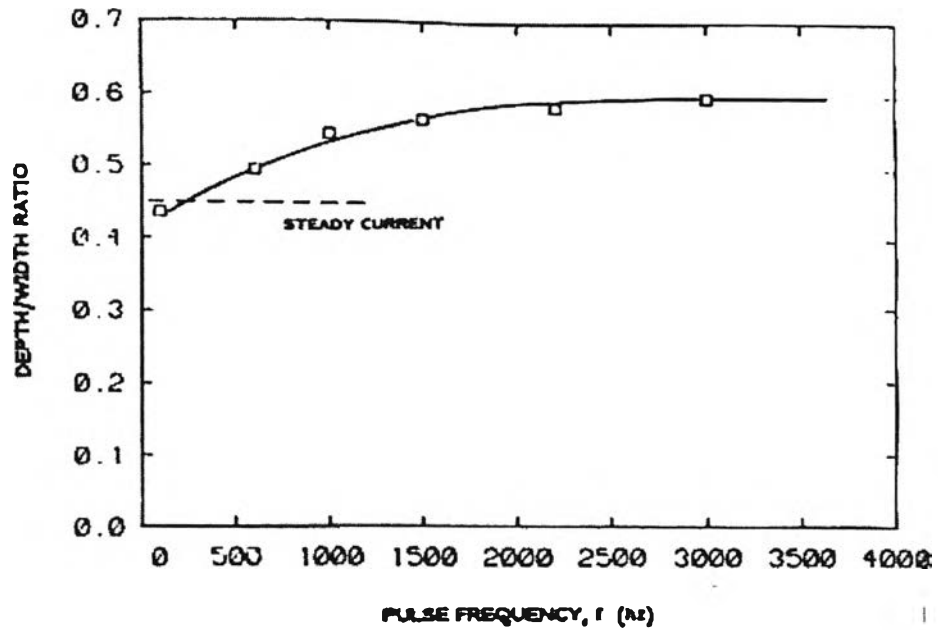
W.-H. Kim, S.-J. Na/Int. J. Heat Transfer 41 (1998) 3213-3227



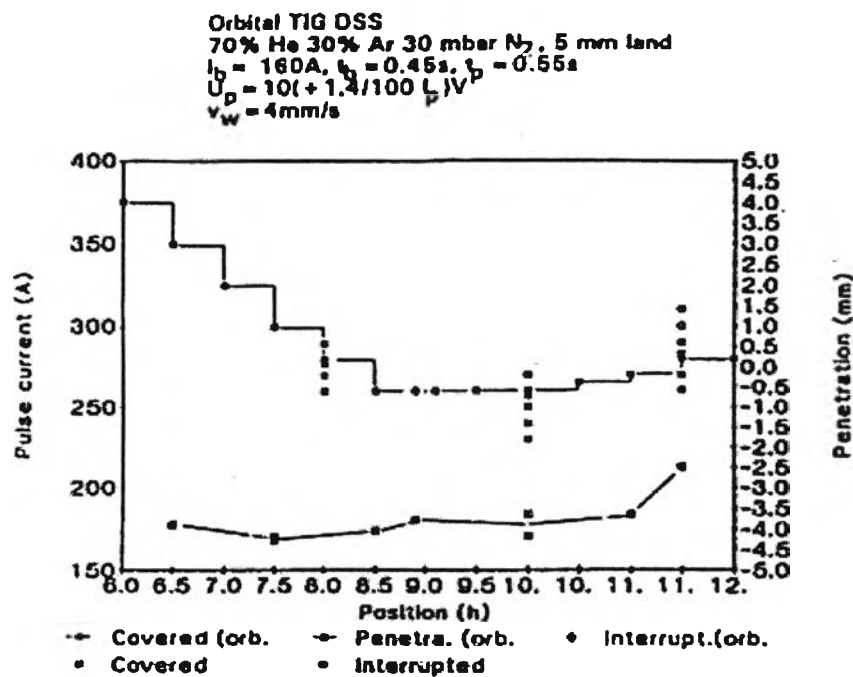
รูปที่ 2.18 รูปแบบของ Driving Forces ในบ่อน้ำโลหะหลอมเหลวของการเชื่อมแบบทิกพัลส์<sup>(14)</sup>

H.R.SAEDI และ W.UNKEL<sup>(16)</sup> ศึกษาเกี่ยวกับการอาร์ค และลักษณะบ่อน้ำโลหะที่เกิดจากการเชื่อมทิกพัลส์ โดยเปลี่ยนแปลงความถี่พัลส์ของการเชื่อมจาก 10 ถึง 3000 เฮิรตซ์ พบว่าเมื่อเพิ่มความถี่พัลส์สูงขึ้นทำให้รอยเชื่อมมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ความกว้างของรอยเชื่อมมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย ส่งผลให้อัตราส่วนของรอยเชื่อมต่อความกว้างของรอยเชื่อมเพิ่มขึ้น ดังนั้น การเพิ่มความถี่พัลส์ของการเชื่อมสูงขึ้นทำให้ได้รอยเชื่อมที่มีคุณภาพดี ดังในรูปที่ 2.19

จากการศึกษาของ G.HUISMANN และ H.HOFFMEISTER<sup>(19)</sup> เกี่ยวกับผลของตัวแปรการเชื่อมทิกพัลส์ได้แก่ กระแสไฟฟ้าพัลส์ กระแสไฟฟ้าเบส ความเร็วเชื่อม โดยเชื่อมท่อเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ เกรด 329L (Duplex Stainless Steel) หนา 5 มิลลิเมตร ที่ตำแหน่งการเชื่อม 6 ถึง 12 นาฬิกา ด้วยวิธีทิกพัลส์สามารถสรุปได้ว่า ความเร็วเชื่อม 4 มิลลิเมตรต่อวินาที กระแสไฟฟ้าเบส 160 แอมแปร์ กระแสไฟฟ้าพัลส์ 300 แอมแปร์ ใช้แก๊สปกคลุมอาร์กอนผสมแก๊สไนโตรเจน ที่อัตราการไหล 20 ลิตรต่อนาที โดยมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณของแก๊สไนโตรเจน 1 ถึง 3 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ลักษณะรอยเชื่อมที่ได้มีความสมบูรณ์ปราศจากรอยบกพร่อง และรอยเชื่อมที่ได้มีค่าอยู่ระหว่าง 3.5 ถึง 4 มิลลิเมตร แต่อย่างไรก็ตาม กระแสไฟฟ้าพัลส์ที่ใช้เพื่อให้ได้รอยเชื่อมที่ดีนี้จะมีค่าอยู่ในช่วงแคบๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.20 แสดงกราฟตัวแปรการเชื่อมทิกพัลส์ที่ได้จากการทดลอง



รูปที่ 2.19 การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนรอยซึมลึกต่อความกว้างของรอยเชื่อม เมื่อเชื่อมที่ความถี่พัลส์แตกต่างกัน<sup>(16)</sup>



TIG orbital welding results at constant welding speed

รูปที่ 2.20 ตัวแปรการเชื่อมทิกพัลส์ท่อเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ เกรด 329L<sup>(19)</sup>

จากข้อมูลการวิจัยที่ผ่านมาแม้ว่าจะมีการเก็บข้อมูลการเชื่อมทิกพัลส์ เหล็กกล้าไร้สนิม ออสเตนเนติกไว้มากมายแต่ในประเทศไทยยังไม่มี การทดลองและเก็บข้อมูลการเชื่อมทิกพัลส์ เหล็กกล้าไร้สนิม โดยเฉพาะยิ่งเกรดที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรม การศึกษาดังกล่าวจะเป็นข้อมูล เบื้องต้นที่สามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรม โดยไม่จำเป็นต้องพึ่งพาข้อมูล และเทคโนโลยีจากต่าง ประเทศ