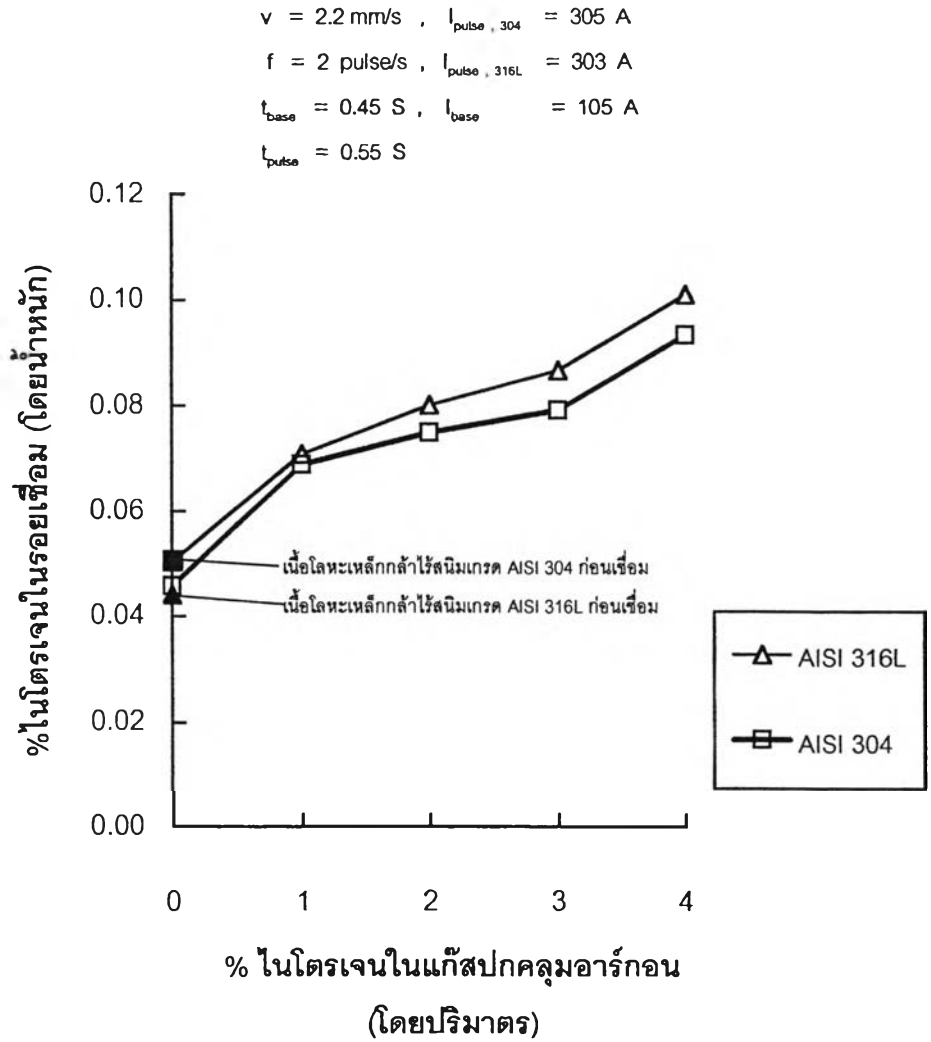


## บทที่ 4

### ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

#### 4.1 การละลายของไนโตรเจนในรอยเชื่อมของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด AISI 304 และ AISI 316L

ในการวิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจนในรอยเชื่อมของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด AISI 304 และ AISI 316L ที่ทำการเชื่อมโดยวิธีทิกพัลส์ โดยใช้แก๊สปกคลุมอาร์กอนและแก๊สอาร์กอนผสมแก๊สไนโตรเจนในอัตราส่วน 1-4 %โดยปริมาตร ใช้ความเร็วในการเชื่อม 2.2 มิลลิเมตร/วินาที ความถี่พัลส์ 2 พัลส์/วินาที กระแสไฟฟ้าเบส 105 แอมแปร์ เวลาในช่วงกระแสเบส 0.45 วินาที ปริมาณแก๊สปกคลุมด้านบน 16 ลิตร/วินาที ปริมาณแก๊สปกคลุมด้านล่าง 8 ลิตร/วินาที กระแสไฟฟ้าพัลส์ในการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด AISI 304 เท่ากับ 305 แอมแปร์ กระแสไฟฟ้าพัลส์ในการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด AISI 316L เท่ากับ 303 แอมแปร์ เวลาในช่วงกระแสพัลส์ 0.55 วินาที ค่าตัวแปรในการเชื่อม แสดงในภาคผนวก ก ทำการวิเคราะห์โดยใช้เครื่องวัดปริมาณไนโตรเจน (leco ce400 oxygen-nitrogen analyzer) ผลการวิเคราะห์ แสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแก๊สไนโตรเจนในแก๊สปกคลุมอาร์กอน (%โดยปริมาตร) กับปริมาณไนโตรเจนในรอยเชื่อม (% โดยน้ำหนัก) ของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด AISI 304 และ AISI 316L ทำการเชื่อมด้วยวิธีทิกพัลส์ โดยใช้แก๊สปกคลุมอาร์กอนและแก๊สอาร์กอนผสมแก๊สไนโตรเจนในอัตราส่วน 1-4 %โดยปริมาตร

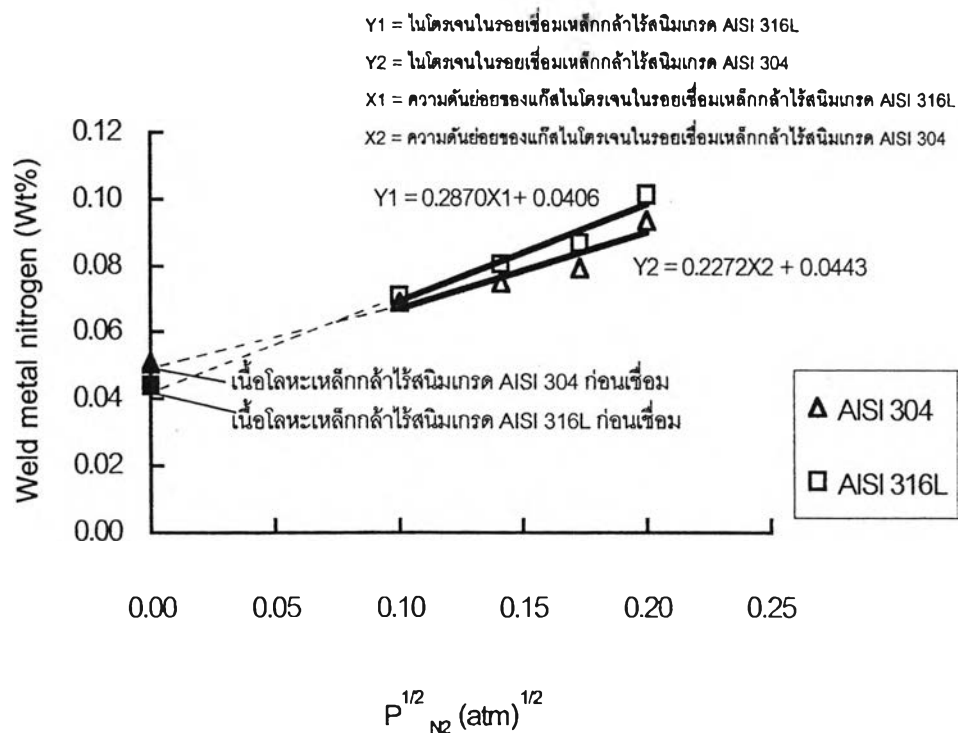
จากรูปที่ 4.1 พบว่าปริมาณไนโตรเจนในเนื้อโลหะเดิม (base metal) จะมีปริมาณใกล้เคียงกับปริมาณไนโตรเจนในรอยเชื่อมเมื่อใช้แก๊สอาร์กอนเป็นแก๊สปกคลุม<sup>(6)</sup> โดยพบว่าปริมาณไนโตรเจนในเนื้อโลหะเดิมของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด AISI 304 มีค่ามากกว่าปริมาณไนโตรเจนเมื่อใช้แก๊สอาร์กอนเป็นแก๊สปกคลุมเล็กน้อย แสดงว่าไนโตรเจนละลายในรอยเชื่อมได้ลดลงเมื่อใช้แก๊สอาร์กอนเป็นแก๊สปกคลุม ผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับผลการทดลองของ U.Kamachi และคณะ<sup>(6,11,12)</sup> ซึ่งให้เหตุผลว่าเมื่อความร้อนในการเชื่อมเพิ่มขึ้นการละลายของไนโตรเจนในรอยเชื่อมจะลดลง ส่วนในกรณีของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด AISI 316L พบว่าปริมาณไนโตรเจนในเนื้อโลหะเดิมของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด AISI 316L มีค่าน้อยกว่าปริมาณไนโตรเจนเมื่อใช้แก๊สอาร์กอนเป็นแก๊สปกคลุมเล็กน้อย เหตุนี้อาจเป็นเพราะใช้ความร้อนในการเชื่อมต่ำกว่าในเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด AISI 304 ทำให้การละลายของไนโตรเจนเพิ่มขึ้นเล็กน้อย<sup>(13,14)</sup> นอกจากนี้ยังพบว่า เมื่อปริมาณส่วนผสมของแก๊สไนโตรเจนในแก๊สปกคลุมอาร์กอนเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 1 จนถึง 4 % โดยปริมาตร จะทำให้ปริมาณการละลายของแก๊สไนโตรเจนในรอยเชื่อมจะสูงขึ้น โดยพบว่า การละลายของแก๊สไนโตรเจนในรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด AISI 316L มีค่าสูงกว่า AISI 304 เนื่องจากเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด AISI 316L มีส่วนผสมของธาตุโมลิบดีนัมซึ่งทำให้การละลายมีค่ามากขึ้น<sup>(1)</sup> อีกทั้งธาตุโมลิบดีนัมยังมีความสามารถในการละลาย (interaction parameter) ที่เพิ่มการละลายของแก๊สไนโตรเจน นอกจากนี้ธาตุคาร์บอนก็อาจมีผลต่อการละลายของไนโตรเจนด้วย หากพิจารณาในเรื่องการละลายของแก๊สมีผลจากการทำปฏิกิริยากับธาตุที่ผสมในเนื้อเหล็ก กล่าวคือธาตุคาร์บอนจะรวมตัวกับธาตุโครเมียมได้ดีกว่าไนโตรเจน การละลายของธาตุไนโตรเจนในรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด AISI 304 จึงน้อยกว่าเพราะปริมาณคาร์บอนมีมากกว่าในเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด AISI 316L

เมื่อวิเคราะห์ผลจากกราฟรูปที่ 4.1 สร้างความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการละลายของแก๊สไนโตรเจน กับความดันย่อยของแก๊สไนโตรเจน แสดงในกราฟรูปที่ 4.2 จะเห็นว่าได้กราฟเป็นเส้นตรง ซึ่งเป็นไปตามสมการของ Sievert's law<sup>(15)</sup> คือ

$$S = k\sqrt{P} \quad 4.1$$

เมื่อ S = ปริมาณการละลายของแก๊ส  
 k = ค่าคงที่  
 P = ความดันย่อย

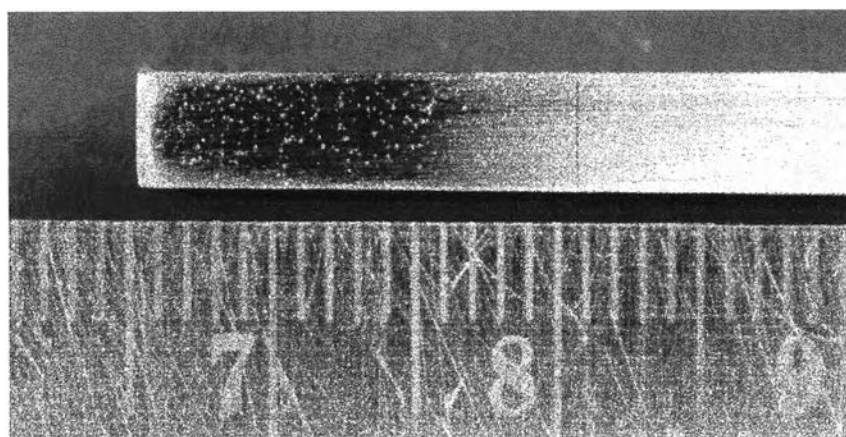
ซึ่งจากการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าเมื่อความดันย่อยของแก๊สไนโตรเจนสูงขึ้น ปริมาณไนโตรเจนในรอยเชื่อมจะเพิ่มขึ้นด้วย<sup>(21)</sup> โดยค่า k ของรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด AISI 304 และ AISI 316L มีค่าเท่ากับ 0.2272 และ 0.2870 ตามลำดับ



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไนโตรเจนในรอยเชื่อม (%โดยน้ำหนัก)กับค่าความดันย่อยของแก๊สไนโตรเจนในแก๊สปกคลุมอาร์กอนของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด AISI 304 และ AISI 316L

#### 4.2 การวิเคราะห์เส้นโพลาไรเซชันของรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด AISI 304 และ AISI 316L

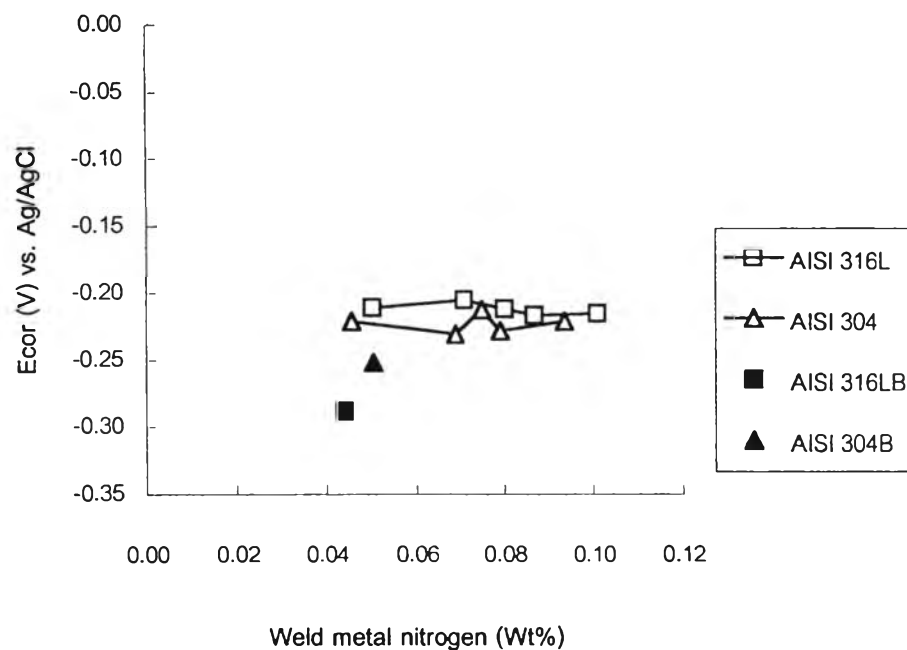
ในการทดลองวัดเส้นโพลาไรเซชันของรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด AISI 304 และ AISI 316L ด้วยเครื่องโพเทนชิโอสแตท ใช้ขั้วไฟฟ้าซิลเวอร์-คลอไรด์เป็นขั้วอ้างอิงและขั้วไฟฟ้าแพลทินัมเป็นขั้ววัดกระแส ใช้สารละลายในการทดสอบ 2 ชนิด คือ สารละลายมาตรฐาน NACE (50 กรัม NaCl + 5 กรัม  $\text{CH}_3\text{COOH}$  + 945 กรัม  $\text{H}_2\text{O}$ ) หรือสารละลายไฮเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 3.5 % โดยน้ำหนัก หลังจากผ่านการวัดเส้นโพลาไรเซชันพบว่า ชิ้นงานทดสอบจะเกิดรูพรุนขึ้น แสดงในรูปที่ 4.3



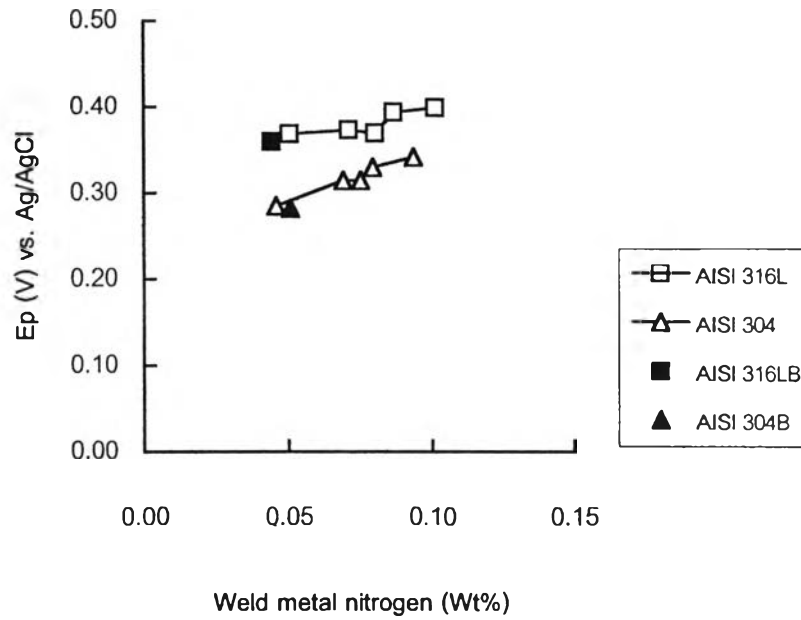
รูปที่ 4.3 ตัวอย่างลักษณะชิ้นงานทดสอบภายหลังการทดลองวัดเส้นโพลาไรเซชัน

4.2.1 ผลการวิเคราะห์เส้นโพลาริเซชันของเนื้อโลหะเดิมและรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด AISI 304 และ AISI 316L ที่ปริมาณไนโตรเจนต่าง ๆ กัน ในสารละลายไฮเดียมคลอไรด์ 3.5 % โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 26°C

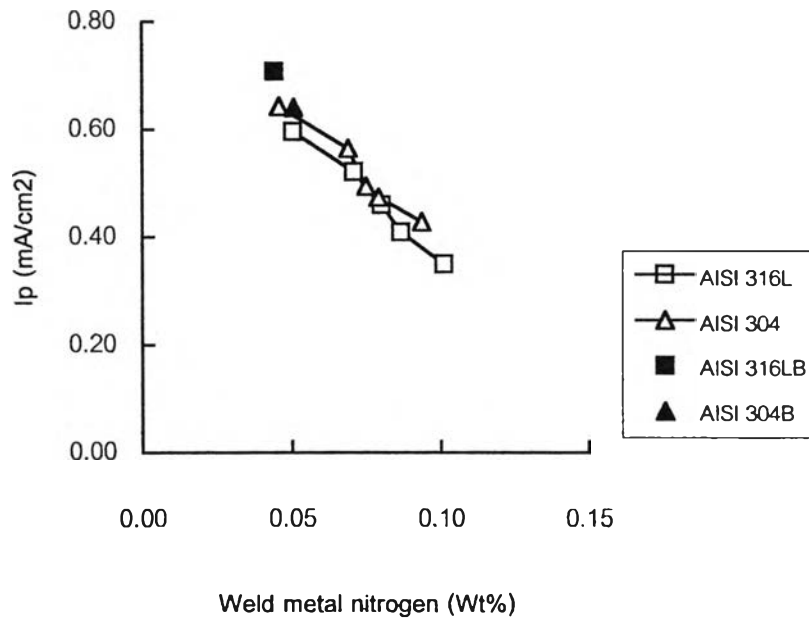
ผลการวิเคราะห์เส้นโพลาริเซชันของเนื้อโลหะเดิมและรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด AISI 304 และ AISI 316L ที่ปริมาณไนโตรเจนต่าง ๆ กัน ในสารละลายไฮเดียมคลอไรด์ 3.5% โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 26°C แสดงในภาคผนวก ๑.1 และ ๑.2 ตามลำดับ เพื่อให้สามารถวิเคราะห์ผลได้ชัดเจนจึงสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน ค่าศักย์ไฟฟ้าของการเกิดรูพรุน และค่าความหนาแน่นของกระแสในช่วงพาสซีฟกับปริมาณไนโตรเจนในรอยเชื่อม (% โดยน้ำหนัก) แสดงในรูปที่ 4.4 , 4.5 และ 4.6 ตามลำดับ



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไนโตรเจนในรอยเชื่อม(%โดยน้ำหนัก) กับค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด AISI 304 และ AISI 316L ในสารละลายไฮเดียมคลอไรด์ 3.5 % โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 26°C ความเป็นกรดต่าง 6.55



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไนโตรเจนในรอยเชื่อม (%โดยน้ำหนัก) กับค่าศักย์ไฟฟ้าของการเกิดรูพรุนของรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด AISI 304 และ AISI 316L ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3.5 %โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 26°C ความเป็นกรดต่าง 6.55



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไนโตรเจนในรอยเชื่อม (%โดยน้ำหนัก) กับค่าความหนาแน่นของกระแสในช่วงพาสซีฟของรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด AISI 304 และ AISI 316L ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3.5% โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 26°C ความเป็นกรดต่าง 6.55



ผลการวัดเส้นโพลาริเซชันของเนื้อโลหะเดิมและรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด AISI 304 และ AISI 316L ที่ปริมาณไนโตรเจนต่าง ๆ กัน ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3.5% โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 26°C (แสดงในภาคผนวก ๑.1 และ ๑.2) จะเห็นว่าไนโตรเจนทำให้เส้นโพลาริเซชันเคลื่อนไปในทิศทางที่ค่าความต่างศักย์เป็นบวกเช่นเดียวกับผลการทดลองของ T.Ogawa และคณะ<sup>(7)</sup> คือ เมื่อปริมาณไนโตรเจนในรอยเชื่อมเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้าของการกัดกร่อน ( $E_{corr}$ ) ของเนื้อโลหะเดิมมีค่าต่ำกว่ารอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด AISI 304 และ AISI 316L และยังพบว่าค่าศักย์ไฟฟ้าของการกัดกร่อนของรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด AISI 304 และ AISI 316L มีค่าไม่ต่างกันมากนัก แสดงในรูปที่ 4.4 แต่ทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้าของการเกิดรูพรุน ( $E_{pit}$ ) เพิ่มขึ้น<sup>(16,17)</sup> แสดงในรูปที่ 4.5 ซึ่งค่าศักย์ไฟฟ้าของการเกิดรูพรุน คือ ค่าศักย์ไฟฟ้าช่วงต่อระหว่างการเกิดพาสซีวิตี (passivity) และช่วงที่ฟิล์มถูกทำลาย (transpassive range) ผลที่ได้ชี้ให้เห็นว่า ไนโตรเจนมีแนวโน้มค่อนข้างบวก ทำให้ความต้านทานการกัดกร่อนแบบรูพรุนของรอยเชื่อมมีค่ามากขึ้น เหตุที่เป็นเช่นนี้อาจพิจารณาได้จากค่าความหนาแน่นของกระแสในช่วงพาสซีฟ ( $i_p$ ) ซึ่งเป็นตัวแสดงถึงเสถียรภาพของฟิล์ม พบว่าค่าความหนาแน่นของกระแสในช่วงพาสซีฟมีค่าลดลงเมื่อปริมาณไนโตรเจนในรอยเชื่อมเพิ่มขึ้น แสดงในรูปที่ 4.6 อาจกล่าวได้ว่าไนโตรเจนยอมให้อิออนผ่านได้ยาก หรือฟิล์มมีเสถียรภาพมากขึ้น เช่นเดียวกับผลการทดลองของ P.R Levey<sup>(1,20,23)</sup> ผลการทดลองในที่นี้ยังสอดคล้องกับผลการทดลองของ T.Ujiro และ S.Satoh<sup>(8)</sup> ที่รายงานว่าไนโตรเจนมีผลทำให้ความเหนียวของฟิล์มพาสซีวิตีมีค่ามากขึ้น อย่างไรก็ตามการค้นคว้าหาคำตอบเรื่องไนโตรเจนมีผลอย่างไรต่อฟิล์มบนเหล็กกล้าไร้สนิมก็ยังคงดำเนินต่อไป เพราะยังไม่มีข้อสรุปที่ชัดเจนแน่นอน แม้ว่าในปัจจุบันจะมีเทคนิคการวิเคราะห์ฟิล์มบนผิวโลหะที่ดี แต่เนื่องจากปริมาณไนโตรเจนที่ทำให้คุณสมบัติของฟิล์มบนเหล็กกล้าไร้สนิมดีขึ้นนั้นมีน้อยมาก จนวิธีการที่มีอยู่วิเคราะห์ได้ยาก

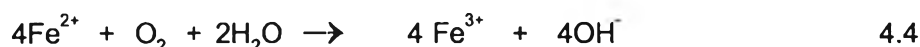
ผลการวิเคราะห์ค่าความเป็นกรดต่าง (pH) ของสารละลายก่อนและหลังการวัดเส้นโพลาริเซชัน และผลการวิเคราะห์อิออนที่เกิดขึ้นภายหลังการวัดเส้นโพลาริเซชันของรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด AISI 304 ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3.5 % โดยน้ำหนัก แสดงในตารางที่ 4.1 พบว่าความเป็นกรดต่างในการทดลองมีค่าอยู่ระหว่าง 6.55-7.25 และอิออนที่เกิดขึ้นภายหลังการวัดเส้นโพลาริเซชัน คือ อิออนของโครเมียม นิกเกิล และเหล็ก ผลการทดลองดังกล่าวนี้เป็นไปในทำนองเดียวกับผลการวิเคราะห์ค่าความเป็นกรดต่าง และผลการวิเคราะห์อิออนที่เกิดขึ้นภายหลังการวัดเส้นโพลาริเซชันของรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด

AISI 316L แสดงในตารางที่ 4.2 จะเห็นว่าการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรดต่างของสารละลายเกิดขึ้นในระหว่างการวัดเส้นโพลาริเซชัน แสดงว่าในระบบมีการเพิ่มความเข้มข้นของ  $\text{OH}^-$  ให้แก่สารละลาย

จากผลการวิจัยของ S. Torchio <sup>(10)</sup> ได้ยืนยันว่าค่าความเป็นกรดต่างของสารละลายไม่มีอิทธิพลต่อลักษณะของเส้นโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมในสารละลายที่มีคลอไรด์ผสม ในที่นี้อาจกล่าวได้ว่าค่าความเป็นกรดต่างของสารละลายเกลือโซเดียมคลอไรด์ที่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณไนโตรเจนมีผลต่อลักษณะของเส้นโพลาริเซชันน้อยมาก ในการทดลองนี้ใช้ออนเหล็กและ  $\text{OH}^-$  ที่เกิดขึ้นในสารละลายอาจมาจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของเหล็ก แสดงในสมการที่ 4.2 และปฏิกิริยารีดักชัน แสดงในสมการที่ 4.3



สมการของปฏิกิริยานี้คือ



$\text{Fe}^{3+}$  จะรวมตัวกับ  $\text{OH}^-$  กลายเป็น  $\text{FeO}(\text{OH})$  โดยอาจอยู่ในรูปของ  $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$  ซึ่งมาจากปฏิกิริยา



จากการทดลองพบว่า สารละลายที่ได้ภายหลังการวัดเส้นโพลาริเซชันมีสีแดง ซึ่งคือสีของสนิมเหล็ก  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  หรือ  $\text{Fe}^{3+}$

ตารางที่ 4.1 ค่าความเป็นกรดต่างก่อนและหลังการวัดเส้นโพลาไรเซชัน และผลการวิเคราะห์  
ไอออนที่เกิดขึ้นภายหลังการวัดเส้นโพลาไรเซชันของรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม  
ออสเทนนิติกเกรด AISI 304 ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3.5 %โดยน้ำหนัก  
ที่ปริมาณไนโตรเจนต่าง ๆ กัน

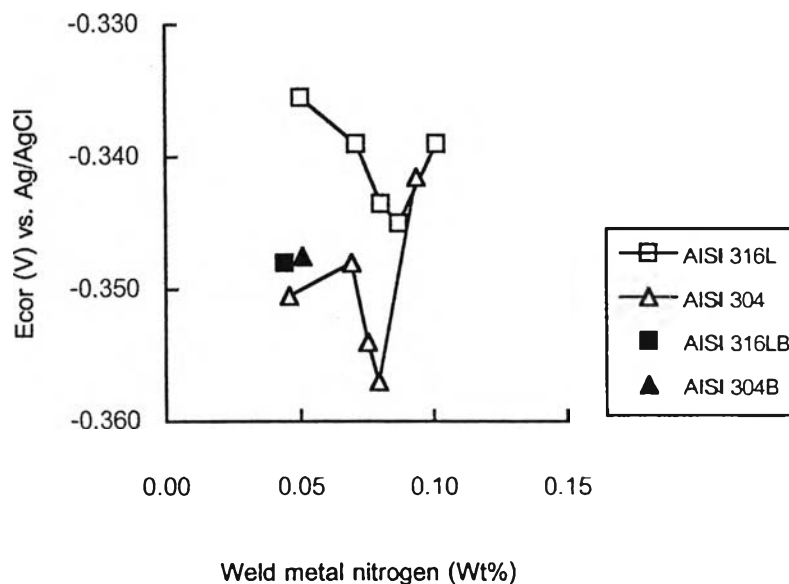
ปริมาณไนโตรเจน ในรอยเชื่อม (% โดยน้ำหนัก)	ค่าความเป็นกรด-ต่าง		ปริมาณธาตุในสารละลาย		
	pH ก่อน	pH หลัง	Cr (mg/l)	Ni (mg/l)	Fe (mg/l)
0.05068 (base)	6.55	7.23	1.732	1.418	1.845
0.04577	6.55	7.20	1.466	2.908	1.596
0.06894	6.55	7.25	1.616	1.387	2.350
0.07499	6.55	7.25	1.747	1.203	1.411
0.07915	6.55	7.35	1.870	1.173	2.922
0.09350	6.55	7.15	1.987	1.187	2.394

ตารางที่ 4.2 ค่าความเป็นกรดต่างก่อนและหลังการวัดเส้นโพลาไรเซชัน และผลการวิเคราะห์  
ไอออนที่เกิดขึ้นภายหลังการวัดเส้นโพลาไรเซชันของรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม  
ออสเทนนิติกเกรด AISI 316L ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3.5 %โดยน้ำหนัก  
ที่ปริมาณไนโตรเจนต่าง ๆ กัน

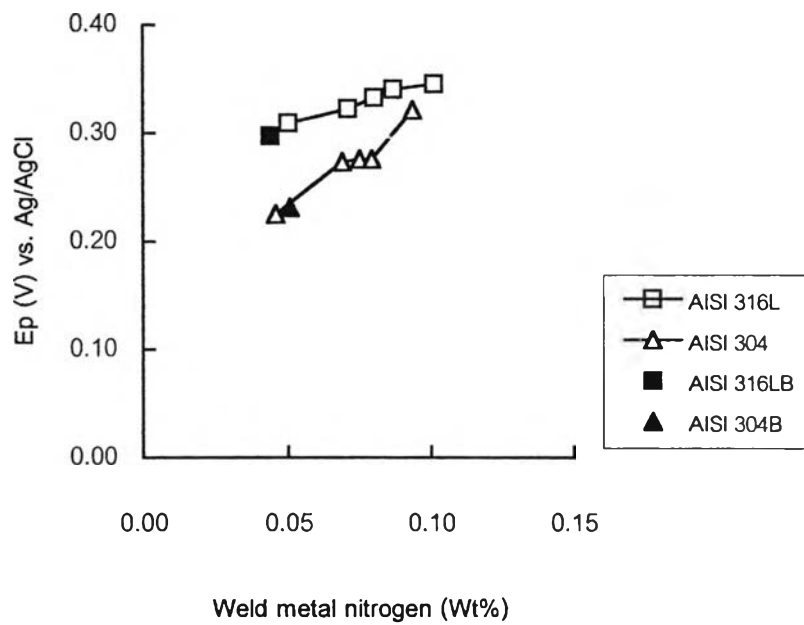
ปริมาณไนโตรเจน ในรอยเชื่อม (% โดยน้ำหนัก)	ค่าความเป็นกรด-ต่าง		ปริมาณธาตุในสารละลาย		
	pH ก่อน	pH หลัง	Cr (mg/l)	Ni (mg/l)	Fe (mg/l)
0.04409 (base)	6.55	7.10	1.133	1.177	1.319
0.05040	6.55	6.85	0.895	2.770	1.306
0.07092	6.55	6.92	1.045	2.390	0.983
0.08010	6.55	7.05	1.164	3.033	1.311
0.08672	6.55	7.15	1.285	2.702	0.932
0.10113	6.55	7.14	1.366	1.109	0.764

4.2.2 ผลการวิเคราะห์เส้นโพลาริเซชันของเนื้อโลหะเดิมและรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด AISI 304 และ AISI 316L ที่ปริมาณไนโตรเจนต่าง ๆ กัน ในสารละลายมาตรฐาน NACE ที่อุณหภูมิ 26°C

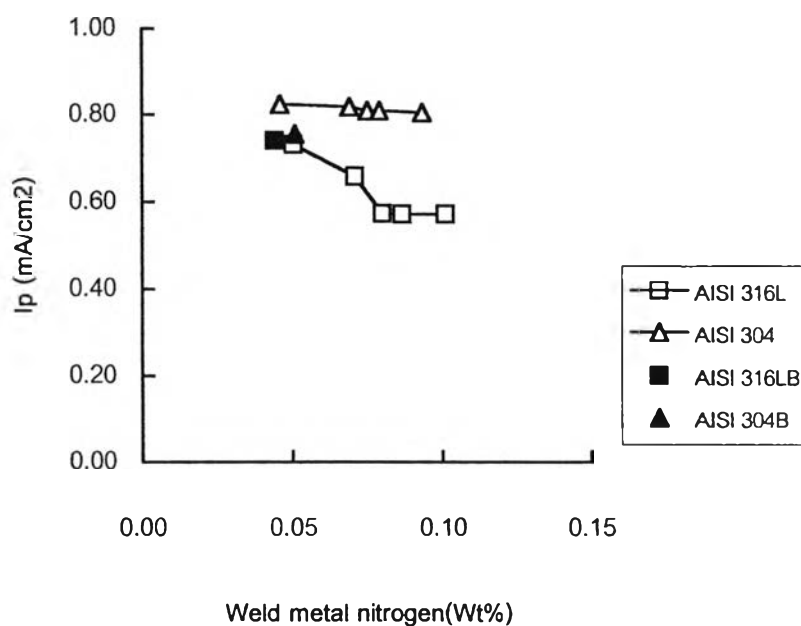
ผลการวิเคราะห์เส้นโพลาริเซชันของเนื้อโลหะเดิมและรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด AISI 304 และ AISI 316L ที่ปริมาณไนโตรเจนต่าง ๆ กัน ในสารละลายมาตรฐาน NACE ที่อุณหภูมิ 26°C แสดงในภาคผนวก ๑.3 และ ๑.4 ตามลำดับ เพื่อให้สามารถวิเคราะห์ผลได้ชัดเจนจึงสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน ค่าศักย์ไฟฟ้าของการเกิดรูพรุน และค่าความหนาแน่นของกระแสในช่วงพาสซีฟกับปริมาณไนโตรเจนในรอยเชื่อม (%โดยน้ำหนัก) แสดงในรูปที่ 4.7 , 4.8 และ 4.9 ตามลำดับ



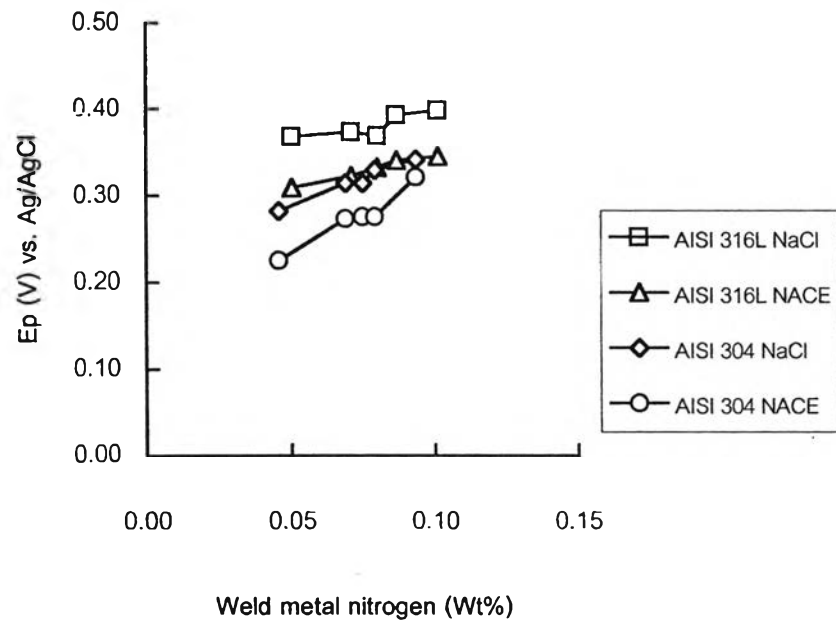
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไนโตรเจนในรอยเชื่อม(%โดยน้ำหนัก)กับค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด AISI 304 และ AISI 316L ในสารละลายมาตรฐาน NACE ที่อุณหภูมิ 26°C ความเป็นกรดต่าง 3.06



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไนโตรเจนในรอยเชื่อม (%โดยน้ำหนัก) กับค่าศักย์ไฟฟ้าของการเกิดรูพรุนของรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด AISI 304 และ AISI 316L ในสารละลายมาตรฐาน NACE ที่อุณหภูมิ 26°C ความเป็นกรดต่าง 3.06



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไนโตรเจนในรอยเชื่อม (%โดยน้ำหนัก) กับค่าความหนาแน่นของกระแสในช่วงพาสซีฟของรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด AISI 304 และ AISI 316L ในสารละลายมาตรฐาน NACE ที่อุณหภูมิ 26°C ความเป็นกรดต่าง 3.05



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไนโตรเจนในรอยเชื่อม (%โดยน้ำหนัก) กับค่าศักย์ไฟฟ้าของการเกิดรูพรุนของรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด AISI 304 และ AISI 316L ในสารละลายมาตรฐาน NACE และสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3.5 % โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 26°C

ผลการวัดเส้นโพลาไรเซชันของเนื้อโลหะเดิมและรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด AISI 304 และ AISI 316L ที่ปริมาณไนโตรเจนต่าง ๆ กัน ในสารละลายมาตรฐาน NACE ที่อุณหภูมิ 26°C (แสดงในภาคผนวก ๑.3 และ ๑.4) จะเห็นว่าเมื่อปริมาณไนโตรเจนในรอยเชื่อมเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนมีค่าไม่คงที่ แสดงในรูปที่ 4.7 แต่ทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้าของการเกิดรูพุนเพิ่มขึ้น แสดงในรูปที่ 4.8 และยังทำให้ค่าความหนาแน่นกระแสของช่วงพาสซีฟลดลง แสดงในรูปที่ 4.9 ซึ่งผลการทดลองในที่นี่ให้ลักษณะแนวโน้มอิทธิพลของไนโตรเจนทำนองเดียวกับการวัดเส้นโพลาไรเซชันในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3.5 % โดยน้ำหนัก กล่าวคือไนโตรเจนมีผลในทางบวกต่อเส้นโพลาไรเซชัน ในสารละลายมาตรฐาน NACE จะมีส่วนผสมของกรดและเกลือโซเดียมคลอไรด์มากกว่า ทำให้เกิดการกัดกร่อนของรอยเชื่อมที่รุนแรงกว่า แสดงในรูปที่ 4.10 จะเห็นว่าค่าศักย์ไฟฟ้าของการเกิดรูพุนของรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด AISI 304 และ AISI 316L ในสารละลายมาตรฐาน NACE มีค่าต่ำกว่าในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3.5 % โดยน้ำหนัก และยังแสดงให้เห็นว่าไนโตรเจนมีผลในทางบวกต่อการกัดกร่อนของรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด AISI 304 และ AISI 316L

การวิเคราะห์ค่าความเป็นกรดต่าง และอิออนที่เกิดขึ้นภายหลังการวัดเส้นโพลาไรเซชันของรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด AISI 304 และ AISI 316L ในสารละลายมาตรฐาน NACE แสดงในตารางที่ 4.3 และ 4.4 ตามลำดับ พบว่าค่าความเป็นกรดต่างมีทั้งเพิ่มขึ้นและลดลงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความเป็นกรดต่างของสารละลายก่อนการวัดเส้นโพลาไรเซชัน คืออยู่ระหว่าง 2.87 ถึง 3.25 ซึ่งยังไม่สามารถหาเหตุผลในการอธิบายความเป็นกรดที่เพิ่มขึ้นนี้ แต่อาจสรุปได้ว่าการวัดเส้นโพลาไรเซชันในที่นี่แทบจะไม่มีอิทธิพลของค่าความเป็นกรดต่างต่อลักษณะของเส้นโพลาไรเซชัน ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากขบวนการเกิดจากการละลายของโลหะในช่วงที่ฟิล์มถูกทำลายหรือภายหลังจากค่าศักย์ไฟฟ้ามากกว่าค่าศักย์ไฟฟ้าของการเกิดรูพุน ยังคงเป็นอิออนของโครเมียม นิกเกิล และ เหล็ก



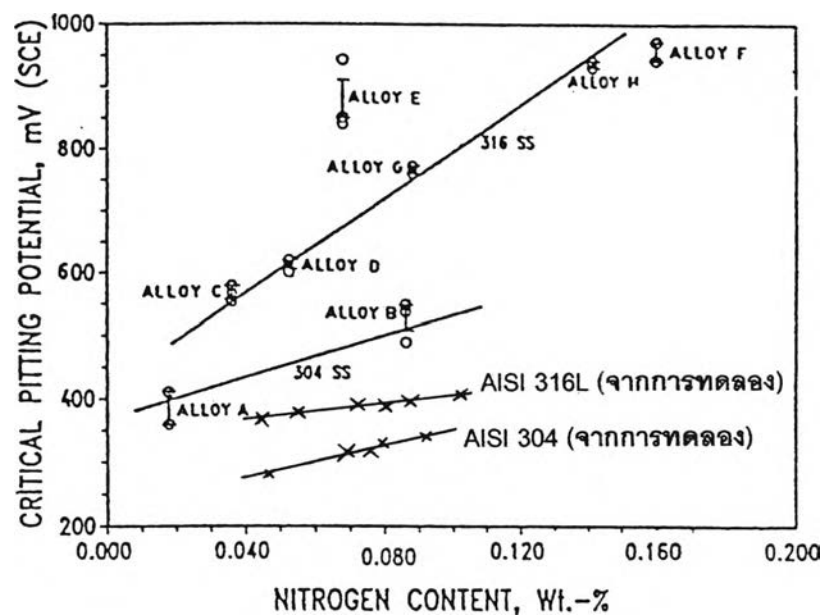
ตารางที่ 4.3 ค่าความเป็นกรดต่างก่อนและหลังการวัดเส้นโพลาไรเซชันและผลการวิเคราะห์  
ไอออนที่เกิดขึ้นภายหลังการวัดเส้นโพลาไรเซชันของรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม  
ออสเทนนิติกเกรด AISI 304 ในสารละลายมาตรฐาน NACE ที่ปริมาณ  
ไนโตรเจนต่าง ๆ กัน

ปริมาณไนโตรเจน ในรอยเชื่อม (% โดยน้ำหนัก)	ค่าความเป็นกรด-ต่าง		ปริมาณธาตุในสารละลาย		
	pH ก่อน	pH หลัง	Cr (mg/l)	Ni (mg/l)	Fe (mg/l)
0.05068 (base)	3.06	3.25	1.018	1.819	5.291
0.04577	3.06	3.04	1.157	2.205	3.352
0.06894	3.06	3.03	1.303	2.331	4.104
0.07499	3.06	3.24	1.293	2.686	3.870
0.07915	3.06	3.04	1.288	1.900	3.902
0.09350	3.06	3.11	1.403	2.595	4.219

ตารางที่ 4.4 ค่าความเป็นกรดต่างก่อนและหลังการวัดเส้นโพลาไรเซชันและผลการวิเคราะห์  
ไอออนที่เกิดขึ้นภายหลังการวัดเส้นโพลาไรเซชันของรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม  
ออสเทนนิติกเกรด AISI 316L ในสารละลายมาตรฐาน NACE ที่ปริมาณ  
ไนโตรเจนต่าง ๆ กัน

ปริมาณไนโตรเจน ในรอยเชื่อม (% โดยน้ำหนัก)	ค่าความเป็นกรด-ต่าง		ปริมาณธาตุในสารละลาย		
	pH ก่อน	pH หลัง	Cr (mg/l)	Ni (mg/l)	Fe (mg/l)
0.04409 (base)	3.06	3.14	0.852	1.762	4.100
0.05040	3.06	2.93	0.933	2.457	5.012
0.07092	3.06	2.87	0.764	2.357	3.385
0.08010	3.06	2.94	0.731	2.148	2.632
0.08672	3.06	2.99	0.856	2.131	2.633
0.10113	3.06	3.02	0.763	1.594	1.471

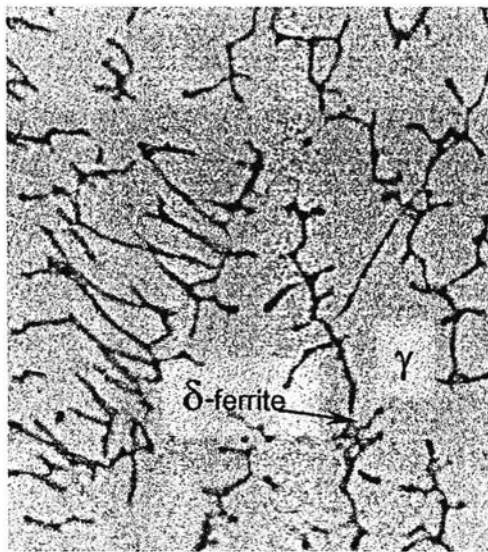
เมื่อนำค่าศักย์ไฟฟ้าของการเกิดรูพรุนกับปริมาณไนโตรเจนในรอยเชื่อม(%โดยน้ำหนัก) ของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด AISI 304 และ AISI 316L ที่เชื่อมโดยวิธีทิกพัลส์ ใช้แก๊สปกคลุมอาร์กอนและแก๊สอาร์กอนผสมแก๊สไนโตรเจนในอัตราส่วน 1-4% โดยปริมาตร ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3.5 %โดยน้ำหนัก เปรียบเทียบกับผลงานของ U.Kamachi และคณะ<sup>(7)</sup> ที่ศึกษาความต้านทานการกัดกร่อนแบบรูพรุนของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด AISI 304 , AISI 316 , AISI 317 ที่มีไนโตรเจนผสม ในสารละลาย 0.5M NaCl และ 0.5M H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ที่อุณหภูมิห้อง โดยใช้ SCE (saturated calomel electrode) เป็นขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (reference electrode) พบว่าค่าศักย์ไฟฟ้าวิกฤตของการเกิดรูพรุนของรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกที่ได้จากการทดลองมีค่าต่ำกว่าค่าศักย์ไฟฟ้าวิกฤตของการเกิดรูพรุนในเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด AISI 304 และ AISI 316 ของ U.Kamachi และคณะ<sup>(7)</sup> แสดงในรูปที่ 4.11



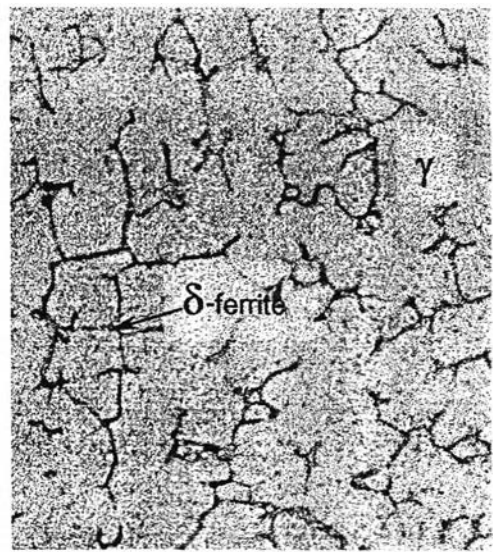
รูปที่ 4.11 เปรียบเทียบค่าศักย์ไฟฟ้าวิกฤตของการเกิดรูพรุนกับปริมาณไนโตรเจนในรอยเชื่อม (%โดยน้ำหนัก) ที่ได้จากการทดลองกับผลงานของ U.Kamachi และคณะ<sup>(7)</sup>

#### 4.2 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค

โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด AISI 304 และ AISI 316L ประกอบด้วยโครงสร้างออสเทนไนต์ ( $\gamma$ ) และเดลต้าเฟอร์ไรท์ ( $\delta$ -ferrite) ลักษณะที่สังเกตเห็นได้คือ โครงสร้างจุลภาคออสเทนไนต์จะมีสีเทา และเดลต้าเฟอร์ไรท์จะมีลักษณะเป็นสีดำแสดงในรูปที่ 4.12 เดลต้าเฟอร์ไรท์จะมีลักษณะคล้ายกิ่งซึ่งเป็นลักษณะโครงสร้างที่เกิดจากการเย็นตัวของงานหล่อ แทรกอยู่ระหว่างโครงสร้างที่เรียกว่าเดนไดรต์ (dendrite) สามารถหาปริมาณเดลต้าเฟอร์ไรท์ในรอยเชื่อมที่ได้จากการวัดขนาดเฉลี่ยของภาพถ่ายด้วยเครื่อง image analyzer แสดงในภาคผนวก ข ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มปริมาณแก๊สไนโตรเจนในแก๊สปกคลุมอาร์กอน จะทำให้ปริมาณของเดลต้าเฟอร์ไรท์ในรอยเชื่อมลดลง แสดงในรูปที่ 4.13 ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวเป็นไปในทำนองเดียวกับการทดลองของ U.Kamachi และคณะ<sup>(5,18)</sup>

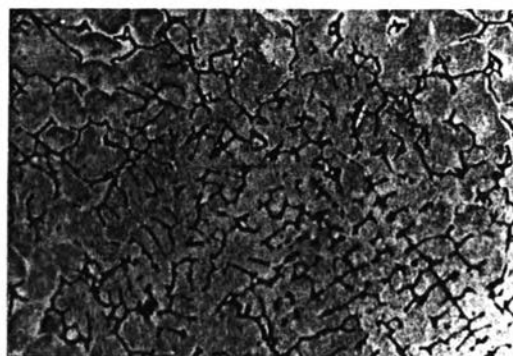
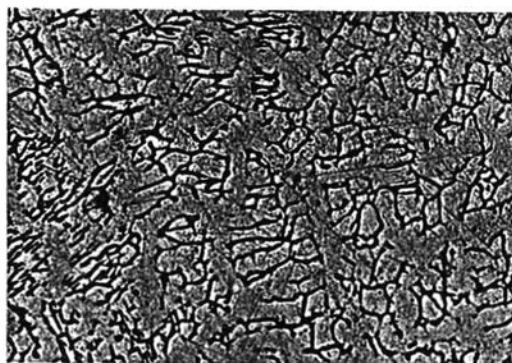


ก) เกรด AISI 304 (N = 0.06894 Wt%)

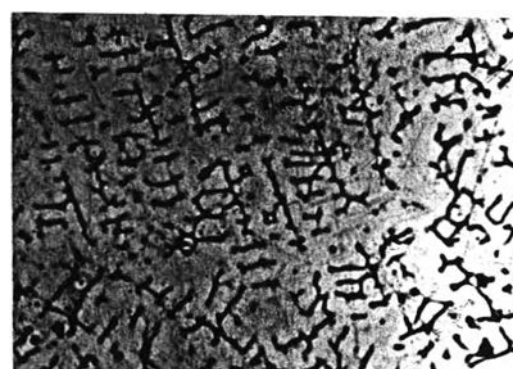


ข) เกรด AISI 316L (N = 0.07092 Wt%)

รูปที่ 4.12 โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด AISI 304 และ AISI 316L ทำการเชื่อมด้วยวิธีทิกพัลส์ โดยใช้แก๊สอาร์กอนผสมแก๊สไนโตรเจนในอัตราส่วน 1%โดยปริมาตร ที่กำลังขยาย 500 เท่า



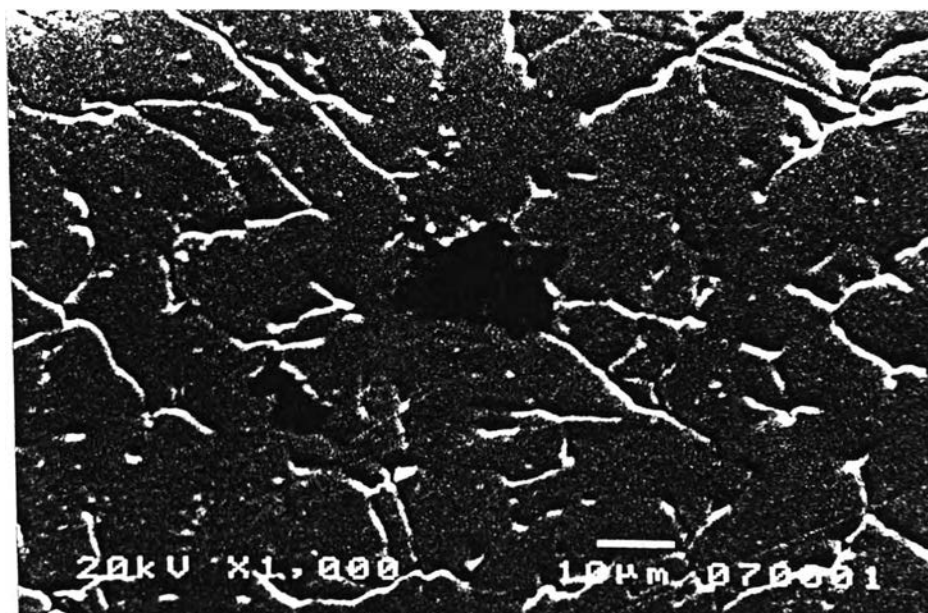
a) N = 0.04577 Wt% ,  $\delta$ -ferrite = 9.971 V%      b) N = 0.09350 Wt% ,  $\delta$ -ferrite = 5.171 V%  
 n) เกรด AISI 304



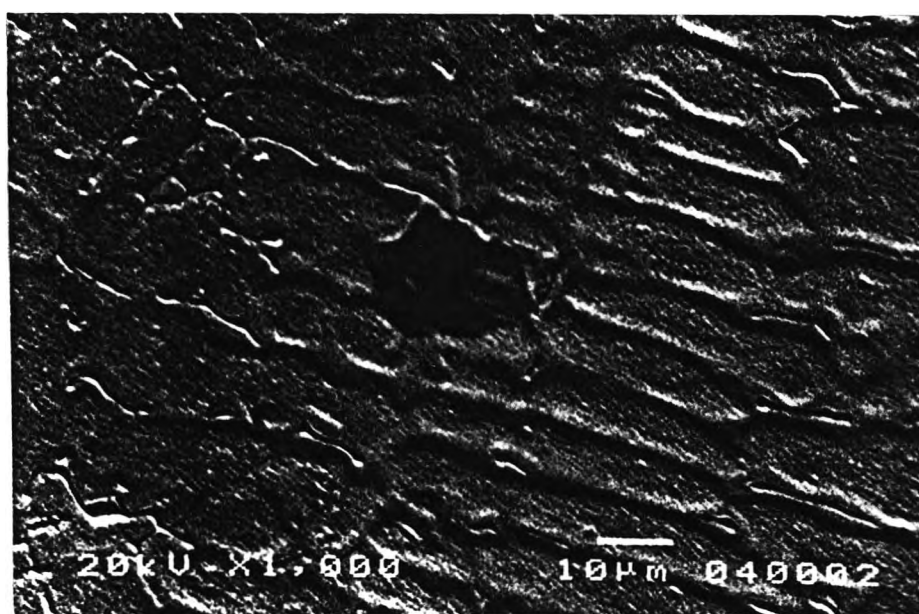
a) N = 0.05040 Wt% ,  $\delta$ -ferrite = 9.351 V%      b) N = 0.10113 Wt% ,  $\delta$ -ferrite = 7.407 V%  
 n) เกรด AISI 316L

รูปที่ 4.13 เปรียบเทียบผลของปริมาณไนโตรเจนในรอยเชื่อม (%โดยน้ำหนัก) ต่อโครงสร้าง  
 เดลต้าเฟอร์ไรท์ในรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด AISI 304 และ AISI  
 316L ที่กำลังขยาย 200 เท่า

ลักษณะของรูพรุนที่เกิดขึ้นในรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด AISI 304 และ AISI 316L ภายหลังจากการวัดเส้นโพลาไรเซชันในสารละลายมาตรฐาน NACE และสารละลายไฮเดียมคลอไรด์ 3.5 % โดยน้ำหนักจะเหมือนกัน ในรูปที่ 4.14 แสดงตัวอย่างของรูพรุนที่เกิดขึ้นภายหลังจากการวัดเส้นโพลาไรเซชันคือ รูพรุนจะเกิดขึ้นตรงบริเวณที่มีโครงสร้างเดลต้าเฟอร์ไรท์ ในที่นี้เสนอว่าจุดที่ทำให้เกิดการกัดกร่อนมิใช่เดลต้าเฟอร์ไรท์เอง แต่เป็นระหว่างขอบเกรนของเดลต้าเฟอร์ไรท์กับออสเทนไนท์ จากเหตุผลที่กล่าวไว้ว่า เดลต้าเฟอร์ไรท์มีส่วนผสมของโครเมียมและโมลิบดีนัมมากกว่าโครงสร้างออสเทนไนท์ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ U. Kamachi และคณะ<sup>(6)</sup> เพราะเป็นบริเวณที่มีปริมาณโครเมียมที่จำเป็นแก่การเกิดฟิล์มน้อยกว่า 13% หรืออาจกล่าวได้ว่า บริเวณขอบเกรนมีพลังงานสูงและมีโครงสร้างที่เหมาะสมจึงเป็นบริเวณที่เกิดการตกผลึก (precipitate) ของโครเมียมไนไตรด์ ทำให้บริเวณใกล้เคียงมีปริมาณโครเมียมน้อยกว่าการกัดกร่อนตามขอบเกรนจึงเกิดขึ้นได้ ในรูปที่ 4.15 แสดงการขยายตัวของบริเวณที่ถูกกัดกร่อนเข้าสู่โครงสร้างออสเทนไนท์ หากจะวิเคราะห์เหตุผลที่ไนโตรเจนมีผลในทางบวกต่อการเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อน คือทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนและค่าศักย์ไฟฟ้าการเกิดรูพรุนเพิ่มขึ้น แต่ทำให้ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าช่วงพาสซีฟลดลง ร่วมกับการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคแล้ว ในแง่ของจุดเริ่มต้นเกิดการกัดกร่อน ไนโตรเจนทำให้จุดเริ่มต้นของการกัดกร่อนลดลง เพราะขอบเกรนระหว่างเดลต้าเฟอร์ไรท์และออสเทนไนท์ลดลง เมื่อปริมาณเดลต้าเฟอร์ไรท์ลดลง ในแง่ของการทำให้ฟิล์มพาสซีฟแข็งแรงมากขึ้น แสดงว่าไนโตรเจนทำให้ฟิล์มพาสซีฟบริเวณโครงสร้างออสเทนไนท์แข็งแรงมากขึ้น เพราะโดยส่วนใหญ่ไนโตรเจนจะละลายอยู่ในโครงสร้างออสเทนไนท์ ปกติแล้วโครงสร้างออสเทนไนท์ที่มีปริมาณโครเมียมและโมลิบดีนัมละลายได้น้อยกว่าโครงสร้างเดลต้าเฟอร์ไรท์ ฟิล์มออกไซด์จะแข็งแรงน้อยกว่าด้วย การละลายของไนโตรเจนอาจทำให้ฟิล์มออกไซด์บนโครงสร้างออสเทนไนท์แข็งแรงมากขึ้น อย่างไรก็ตามในที่นี้เสนอว่าควรมีการทดลองเพื่อพิสูจน์ผลของไนโตรเจนต่อฟิล์มพาสซีฟ หรือ ฟิล์มออกไซด์บนผิวเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด AISI 304 และ AISI 316L เพื่อยืนยันผลของไนโตรเจนต่อความแข็งแรงของฟิล์ม หรือมีการทดลองอื่น ๆ ที่ง่ายกว่าการวิเคราะห์ผิวฟิล์มออกไซด์เพื่อหาเหตุผลว่าทำไมไนโตรเจนจึงมีผลทำให้ความต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิม หรือรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมมากขึ้น

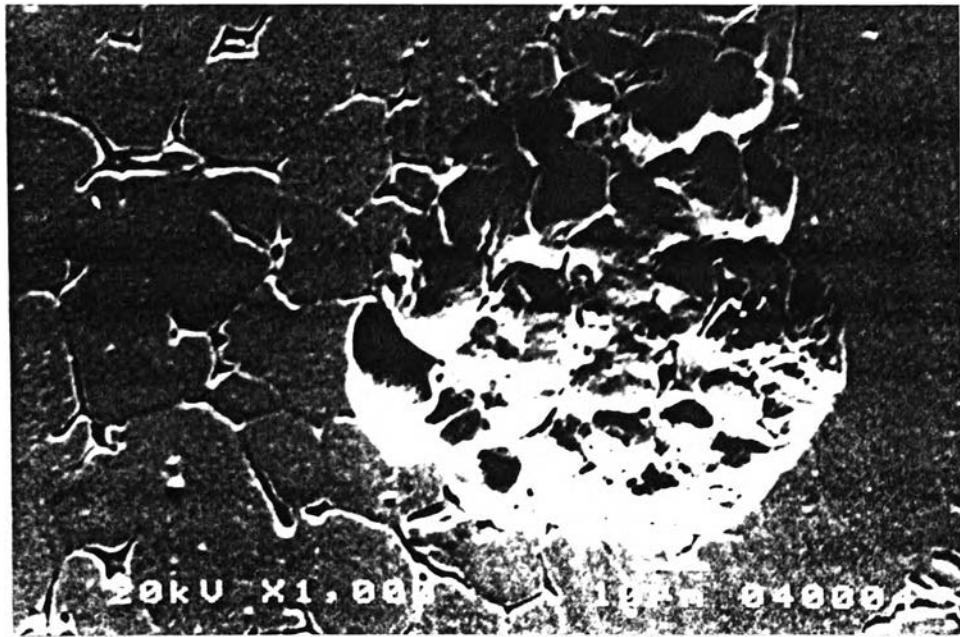


ก) เกรด AISI 304 (N = 0.06894 Wt%)



ข) เกรด AISI 316L (N = 0.08672 Wt%)

รูปที่ 4.14 ภาพตัวอย่างโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด AISI 304 และ AISI 316L ภายหลังจากวัดเส้นโพลาริเซชัน ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) ที่กำลังขยาย 1000 เท่า



รูปที่ 4.15 การขยายตัวของบริเวณที่ถูกกัดกร่อนในรอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกรด AISI 316L ที่ N = 0.10113 Wt% หลังจากผ่านการทำปฏิกิริยากับสารละลายมาตรฐาน NACE ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน(SEM)ที่กำลังขยาย 1000 เท่า