

ความไวต่อการแตกร่อนในการเชื่อมเหล็กกล้าสแตนเลส เกรด 304 ด้วยลวดเชื่อม ER 310

นายชัยวิรุฬ โนนสระ ก.อ.บ. (ศาสตราจารย์พิเศษ)

โครงการวิจัยอุตสาหกรรมนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการเชื่อม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
พ.ศ. 2550

คณะกรรมการสอบโครงการวิจัยอุตสาหกรรม

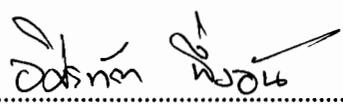

.....

ประธานกรรมการสอบโครงการวิจัยอุตสาหกรรม

(รศ.วิจิระ มีทอง)

.....

กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการวิจัยอุตสาหกรรม

(รศ.ดร.บวรโชค ผู้พัฒน์)

.....

กรรมการ

(ดร.อิสรทัต พึ่งอัน)

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

หัวข้อ โครงการวิจัยอุตสาหกรรม	ความไวต่อการแตกร่อนในการเชื่อมเหล็กกล้าสแตนเลส เกรด 304 ด้วยลวดเชื่อม ER 310
หน่วยกิต	6
ผู้เขียน	นายชัยวิรุฬ โนนสระ
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร.บวร โชค ผู้พัฒน์
หลักสูตร	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมกรรมการเชื่อม
ภาควิชา	วิศวกรรมอุตสาหกรรม
คณะ	วิศวกรรมศาสตร์
พ.ศ.	2550

บทคัดย่อ

โครงการวิจัยอุตสาหกรรมนี้ เป็นการศึกษาหาความไวต่อการแตกร่อน ของแนวเชื่อมเหล็กกล้าสแตนเลส เกรด 304 กับลวดเชื่อม ER 310 ด้วยกระบวนการเชื่อมแบบทิก และทำการทดสอบความไวต่อการแตกร่อนด้วยวิธี การทดสอบแบบแปรค่าความเหนียวรั้งในทิศทางตามความยาวของชิ้นงาน โดยทำการทดลองด้วยการแปรค่ากระแสไฟเชื่อมและความเครียด (Strain Percentage : %E) โดยใช้ค่าความเครียดที่ร้อยละ 2 , 1 , 0.5 และ 0.4 ทำการเชื่อมที่ค่ากระแสไฟเชื่อม 90 , 100 , 110 , 120 , 130 , 140 , 150 , 160 , 170 และ 180 แอมแปร์ จากผลการทดลองพบว่า ถ้ากระแสไฟเชื่อมและความเครียดสูงขึ้น รอยแตกของแนวเชื่อมก็จะมีแนวโน้มมากขึ้น และในทางตรงข้าม ถ้ากระแสไฟเชื่อมและเปอร์เซ็นต์ความเครียดลดลง รอยแตกของแนวเชื่อมก็จะมีแนวโน้มลดลงไปด้วย หรือไม่มีการแตกเกิดขึ้นเลย โดยไม่เกิดการแตกร่อนที่กระแสไฟเชื่อมประมาณ 100 แอมแปร์ ที่ความเครียดร้อยละ 0.5

คำสำคัญ : ความไวต่อการแตกร่อน / การเชื่อมสแตนเลส เกรด 304 / การทดสอบแบบการแปรค่า
การเหนียวรั้ง

Industrial Research Project Title	Hot Cracking Susceptibility in Stainless Steel Welding of Type 304 by Using ER 310 Filler Metal
Industrial Research Project Credits	6
Candidate	Mr. Chaivirulw Nonsra
Industrial Research Project Advisor	Assoc. Prof. Dr. Bovornchok Poopat
Program	Master of Engineering
Field of Study	Welding Engineering
Department	Production Engineering
Faculty	Engineering
B.E.	2550

Abstract

This objective of industrial research is to study hot cracking susceptibility in austenitic stainless steel type 304 by using ER 310 filler metal welded by Gas Tungsten Arc Welding (GTAW) process. The hot cracking susceptibility in weld was tested by longitudinal Vareststraint test. The variables in this experimental procedure are welding currents and strain percentages. A 2 , 1 , 0.5 and 0.4 strain percentages and welding currents of 90 , 100 , 110 , 120 , 130 , 140 , 150 , 160 , 170 and 180A were employed in this experiment. The result showed that, if the welding currents and strain percentages were increased, the amount of cracks tended to increase. On the other hand, if the welding currents and strain percentages were decreased, the amount of cracks tended to decrease or contained no crack in the weld. At welding current below 100A and strain percentage below 0.5 percent cannot promote hot cracking in the weld metal.

Keywords : Hot Cracking Susceptibility / Welding 304 Stainless Steel / Vareststraint Test

กิตติกรรมประกาศ

การดำเนินงานวิจัยครั้งนี้ประสบความสำเร็จและเสร็จสิ้นสมบูรณ์ด้วยความร่วมมือ และการช่วยเหลือจากบุคคลหลาย ๆ ฝ่าย เนื่องจากการทำวิจัยเป็นงานที่ต้องใช้ระยะเวลาในการทดลอง และต้องใช้เครื่องมือ รวมทั้งอุปกรณ์ทดลองหลายอย่าง ผู้ทำวิจัยขอขอบพระคุณในความสนับสนุน รวมถึง รศ.ดร.บวรโชค ผู้พัฒนา อาจารย์ที่ปรึกษา ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ควบคุมงานวิจัยและคอยให้คำปรึกษา ตลอดจนการแก้ปัญหาต่าง ๆ ในการทำวิจัยในครั้งนี้

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ดร.คำนึ่ง ทองเกตู อ.แสวง ไชยลังกา อ.เกษม รัตนธรรมทอง และ อ.สุทิน ทองสนิทกาญจน์ อาจารย์วิทยาลัยเทคนิคเชียงราย ที่ให้การสนับสนุนในการทำการวิจัยครั้งนี้เป็นอย่างดี ที่ให้ความร่วมมือในการทำงานและให้คำแนะนำ ที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัย อุตสาหกรรมในครั้งนี้ และเหนือสิ่งอื่นใดที่ผู้วิจัยจะขอกราบขอบพระคุณบิดาและมารดาของผู้วิจัย ผู้ที่ให้โอกาสทางการศึกษาให้ผู้วิจัยมีโอกาสก้าวหน้าในการศึกษา ขอขอบคุณภรรยาของผู้วิจัย ที่ได้ให้คำแนะนำและให้กำลังใจในการทำงานวิจัยอุตสาหกรรม ตลอดจนเพื่อนทุกคนที่คอยช่วยเหลือผู้วิจัย ในด้านการเรียนที่ดีเสมอ และประโยชน์อันใดที่เกิดจากงานวิจัยนี้ ย่อมเป็นผลจากความกรุณาของท่านดังกล่าวข้างต้น ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งเป็นอย่างยิ่ง จึงขอใคร่ขอขอบพระคุณอย่างยิ่งไว้ ณ โอกาสนี้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ	จ
รายการตาราง	ช
รายการรูปประกอบ	ซ
ประมวลศัพท์และคำย่อ	ฎ
บทที่	
1. บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 การดำเนินการ	2
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	3
2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 เหล็กกล้าสแตนเลส	4
2.2 เหล็กกล้าสแตนเลสออสเทนนิติก	5
2.3 โลหะเติมในการเชื่อม	6
2.4 กระบวนการเชื่อมทิก	7
2.5 การแตกร้อน (Hot Cracking) ในการเชื่อมเหล็กกล้าสแตนเลส	10
2.6 กลไกในการแตกของแนวเชื่อม	12
2.7 การทดสอบความไวต่อการแตก	15
2.8 กรรมวิธีการทดสอบแบบ Vareststraint Test	17
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	18

3. การดำเนินการทดลอง	21
3.1 การจัดเตรียมเครื่องมืออุปกรณ์	21
3.2 การปฏิบัติทดลอง	27
4. ผลการทดลอง	30
4.1 ผลที่ได้จากการทดลอง	30
4.2 อภิปรายผลการทดลอง	47
5. สรุปผลการทดลอง	50
5.1 สรุปผลการทดลอง	50
5.2 ข้อเสนอแนะ	51
เอกสารอ้างอิง	52
ภาคผนวก	54
ก ตัวอย่างรอยแตกร้อนของแนวเชื่อม	54
ข ชิ้นงานเชื่อมการทดสอบ	58
ค การคำนวณความร้อนที่ให้กับชิ้นงาน	62
ง แบบ Drawing และภาพประกอบชุดทดสอบ Vareststraint Test	64
จ ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าสแตนเลสออสเทนนิติก	83
ฉ ไบรบริงของลวดเติม Austenitic ER 310	86
ประวัติผู้ทำวิจัย	88

รายการตาราง

ตาราง	หน้า
2.1 ขนาดของอิเล็กโทรดทั้งสแตนเลสและข้อแนะนำการใช้งาน	10
4.1 ผลการทดลองที่ค่าความเครียด 2 %	30
4.2 ผลการทดลองที่ค่าความเครียด 1.5 %	35
4.3 ผลการทดลองที่ค่าความเครียด 1 %	38
4.4 ผลการทดลองที่ค่าความเครียด 0.5 %	41
4.5 ผลการทดลองที่ค่าความเครียด 0.4 %	44
จ.1 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าออสเทนนิติก (Wrought Austenitic Stainless Steels)	84
จ.2 ลวดเชื่อมที่แนะนำให้ใช้เชื่อมเหล็กกล้าออสเทนนิติก (Recommended Filler Metals for Welding Austenitic Stainless Steels)	85

รายการรูปประกอบ

รูป	หน้า
2.1 กระบวนการเชื่อมทิก	7
2.2 ข้อแตกต่างของกระแสไฟเชื่อมทั้ง 3 ประเภท	9
2.3 ความเหนียวจากการแข็งตัวของโลหะเชื่อม	13
2.4 พฤติกรรมการแข็งตัวที่ส่งผลกระทบต่อความไวของการแตกในระบบสองธาตุ	14
2.5 การทดสอบแบบ Vareststraint Test	17
2.6 ผลรวมความยาวของแต่ละวัสดุกับความเครียด	19
2.7 รอยแตกที่เกิดจากกระแสไฟเชื่อมคงที่กับอัตราความเร็วการเคลื่อนที่ของลวดเชื่อม	20
2.8 ผลกระทบจากกระแสที่ส่งผลกับความยาวรอยแตกของความหนาที่แตกต่างกันของเหล็กแผ่นและอัตราการลดลงที่ต่างกัน	20
3.1 กระบอคนิวเมติก	21
3.2 แขนกดชิ้นงาน	22
3.3 การประกอบและติดตั้งชุดกดชิ้นงานทดสอบ	22
3.4 Die Block ของการทดสอบที่ความเครียด 2 %	23
3.5 การตรวจสอบแนวระนาบ Die Block กับชิ้นงานทดสอบ	24
3.6 ชุดทดสอบ Vareststraint Test	24
3.7 เครื่องมือวัดค่ากระแสไฟเชื่อมและแรงดันไฟฟ้าขณะเชื่อม	25
3.8 อุปกรณ์ตรวจสอบและวัดความยาวรอยแตก	26
3.9 ตำแหน่งชิ้นงานพร้อมทำการเชื่อมทดลอง	28
3.10 ทิศทางการเชื่อมและตำแหน่งที่ให้แรงกดชิ้นงานทดสอบ	28
3.11 การวัดความยาวรอยแตก	29
3.12 โครงสร้างจุลภาคของรอยแตกร้อนเหล็กกล้าสแตนเลส เกรด 316L	29
4.1 ลักษณะรอยแตกที่กระแสไฟเชื่อม 170 แอมแปร์ ที่ความเครียด 2 %	31
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟเชื่อมกับความยาวรอยแตกที่ความเครียด 2 %	31
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Heat Input กับความยาวรอยแตกที่ความเครียด 2 %	32
4.4 Die Block ที่ความเครียด 1.5 %	33
4.5 Die Block ที่ความเครียด 1 %	34
4.6 Die Block ที่ความเครียด 0.5 %	34
4.7 Die Block ที่ความเครียด 0.4 %	34

4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟเชื่อมกับความยาวรอยแตกที่ความเครียด 1.5 %	36
4.9 ลักษณะรอยแตกที่ความเครียด 1.5 %	37
4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Heat Input กับความยาวรอยแตกที่ความเครียด 1.5 %	37
4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟเชื่อมกับความยาวรอยแตกที่ความเครียด 1 %	39
4.12 ลักษณะรอยแตกที่ความเครียด 1 %	40
4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Heat Input กับความยาวรอยแตกที่ความเครียด 1 %	40
4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟเชื่อมกับความยาวรอยแตกที่ความเครียด 0.5 %	42
4.15 ลักษณะรอยแตกที่ความเครียด 0.5 % กระแสไฟเชื่อม 160 แอมแปร์	43
4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Heat Input กับความยาวรอยแตกที่ความเครียด 0.5 %	43
4.17 ลักษณะรอยแตกที่ความเครียด 0.4 %	45
4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟเชื่อมกับความยาวรอยแตกที่ความเครียด 0.4 %	45
4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Heat Input กับความยาวรอยแตกที่ความเครียด 0.4 %	46
4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟเชื่อมกับความเครียดที่มีผลต่อการแตกร้อนของแนวเชื่อม	47
4.21 โครงสร้างมหาครอยแตกร้อนของแนวเชื่อมที่ทำการทดลอง	49
ก.1 รอยแตกที่กระแสไฟเชื่อม 160 แอมแปร์ ความเครียด 1.5 %	55
ก.2 รอยแตกที่กระแสไฟเชื่อม 170 แอมแปร์ ความเครียด 0.4 %	55
ก.3 รอยแตกที่กระแสไฟเชื่อม 150 แอมแปร์ ความเครียด 1.5 %	56
ก.4 รอยแตกที่กระแสไฟเชื่อม 170 แอมแปร์ ความเครียด 0.4 %	56
ก.5 รอยแตกที่กระแสไฟเชื่อม 160 แอมแปร์ ความเครียด 1.5 %	57
ข.1 ชิ้นงานเชื่อมทดสอบที่ค่าความเครียด 0.4 %	59
ข.2 ชิ้นงานเชื่อมทดสอบที่ค่าความเครียด 0.5 %	59
ข.3 ชิ้นงานเชื่อมทดสอบที่ค่าความเครียด 1 %	60
ข.4 ชิ้นงานเชื่อมทดสอบที่ค่าความเครียด 1.5 %	60
ข.5 ชิ้นงานเชื่อมทดสอบที่ค่าความเครียด 2 %	61
ง.1 แบบเครื่องทดสอบ Varestaint Test	65
ง.2 แบบข้อต่อแกนนิวมติคกับแขนกดชิ้นงาน	66
ง.3 แบบแขนกดชิ้นงาน	67
ง.4 แบบโครงสร้างรองรับรางเลื่อน	68
ง.5 แบบภาพถ่ายโครงสร้างรองรับรางเลื่อน	69
ง.6 แบบโครงสร้างเครื่องทดสอบ Varestaint Test	70
ง.7 แบบภาพถ่ายเครื่องทดสอบ Varestaint Test	71

ง.8	แบบแผ่นกดยึดชิ้นงานทดสอบ	72
ง.9	เครื่องทดสอบ Vrestraint Test	73
ง.10	ข้อต่อแกนนิวมेटิกกับแกนกดชิ้นงาน	74
ง.11	ข้อต่อแกนนิวมेटิก สลัก แหวนรอง และสลักหมุด	75
ง.12	รูปแกนกดชิ้นงาน	76
ง.13	ชิ้นส่วนการประกอบแกนกดชิ้นงานต่อเข้ากับแกนนิวมेटิก	77
ง.14	โครงสร้างรองรับรางเลื่อน	78
ง.15	การประกอบทอร์ชเชื่อมทิกเข้ากับเครื่องตัด Straight-line Cutting Machine และแผ่น รางเลื่อน	79
ง.16	โครงสร้างชุดทดสอบ Vrestraint Test	80
ง.17	แผ่นกดยึดชิ้นงานทดสอบให้อยู่บน Die Block	81
ง.18	แผ่นกดยึดชิ้นงานทดสอบและ Die Block	82
ง.19	การประกอบแผ่นกดยึดชิ้นงานทดสอบกับเข้ากับ Die Block	82
ฉ.1	ใบรับรองของลวดเติม Austenitic ER 310	87

ประมวลคำศัพท์และคำย่อ

Bead on Plate	=	การเชื่อมดินแนวนบนแผ่น โลหะ
Longitudinal Vareststraint Test	=	การทดสอบแบบแปรค่าความเหนียวรั้ง ในทิศทางตามความยาวของชิ้นงาน
Strain	=	ความเครียดของวัสดุ
Ferrite	=	โครงสร้างโลหะที่มีรูปผลึกเป็นแบบ Body Center Cubic
Austenite	=	โครงสร้างโลหะที่มีรูปผลึกเป็นแบบ Face center Cubic
Passive	=	ชั้นฟิล์มบาง ๆ ของออกไซด์ที่เคลือบผิววัสดุ
Weld Pool	=	บ่อหลอมละลายของแนวเชื่อม
Filler Metal	=	โลหะเติม
Die Block/Bending Die	=	แบบดัดชิ้นงานเชื่อมทดสอบ
Pneumatic	=	พลังงานจากแรงดันลม
Crack Sensitivity	=	ความรู้สึกลัวต่อการแตก
Hydraulic	=	พลังงานจากแรงดันของของเหลว
Crack length	=	ความยาวรอยแตก
Heat Input	=	พลังงานที่ทำให้เกิดความร้อนในการเชื่อม
Strain Rate	=	อัตราการยืดตัว (มิลลิเมตรต่อวินาที)
Preheat	=	การให้ความร้อนก่อนเชื่อม
Vareststraint test	=	การทดสอบ โดยการแปรค่าการเหนียวรั้ง
Dendrite	=	การเติบโตของผลึกที่มีรูปร่างลักษณะคล้ายกับกิ่งสน
Restraint	=	การเหนียวรั้ง
Pitting Corrosion	=	ตำแหน่งที่เกิดการกัดกร่อนลึกลงไปเป็นลักษณะ โพรงหรือเป็นขุม(หลุม)
Crevice Corrosion	=	การกัดกร่อนที่มีสาเหตุมาจากการตกตะกอนของสนิมหรือสารเคมีที่เกิดขึ้นตามรอยแยกของชิ้นงาน
GTA	=	การเชื่อมทิก

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความเป็นมาของปัญหา

เหล็กกล้าสแตนเลสออสเทนนิติก (Austenitic Stainless Steel) เป็นเหล็กกล้าสแตนเลส ที่มีการนำไปใช้งานอย่างกว้างขวาง มากกว่าเหล็กกล้าสแตนเลสประเภทอื่น เพราะมีสมบัติเด่นหลายประการ สามารถใช้ได้ทั้งในสภาวะอุณหภูมิต่ำและอุณหภูมิสูง และมีความสามารถในการเชื่อมดีกว่าเหล็กผสมสูงทั่วไป ในการเชื่อมเหล็กกล้าสแตนเลสออสเทนนิติกนั้น ปัญหาที่เกิดขึ้นกับการเชื่อม ก็คือ แนวเชื่อมจะมีความไวต่อการแตกร่อน ในขณะที่ทำการเชื่อม โดยเฉพาะแนวเชื่อมที่มีโครงสร้างออสเทนไนท์อย่างเดียวจะมีพฤติกรรมที่ไวต่อการแตกร่อนมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อแนวเชื่อมนั้นอยู่ภายใต้การเหนียวรั้งที่สูงของรอยต่อ และในการที่จะหลีกเลี่ยงหรือลดความเสี่ยงจากการแตกร่อนในแนวเชื่อม Austenitic Stainless Steel นั้น ก็จะต้องหลีกเลี่ยงไม่ให้เกิดความเค้นหรือความเครียดขึ้นในระหว่างที่แนวเชื่อมเกิดการแข็งตัว และปัจจัยอีกอย่างหนึ่งที่มีความสำคัญต่อการแตกร่อนของแนวเชื่อม ก็คือ ต้องควบคุมส่วนผสมทางเคมีของแนวเชื่อม เพื่อที่จะให้แนวเชื่อมมีปริมาณของเฟสเฟอร์ไรท์ (Ferrite Phase) เกิดขึ้น ในแนวเชื่อมในปริมาณที่เหมาะสม เพื่อไม่ให้เกิดผลกระทบต่อแนวเชื่อมในด้านอื่น ๆ แต่โครงสร้างเฟอร์ไรท์ก็มีข้อด้อยเช่นกัน คือ เมื่ออยู่ในสภาพแวดล้อมที่มีการกัดกร่อน โครงสร้างเฟอร์ไรท์จะถูกกัดกร่อนได้ง่าย ซึ่งจะเป็นอันตรายต่อความแข็งแรงของแนวเชื่อม และถ้าแนวเชื่อมมีโครงสร้างสองประเภท (Duplex Structure) คือ มีทั้งโครงสร้างเฟอร์ไรท์และออสเทนไนท์อยู่ด้วยกัน และถูกใช้งานที่อุณหภูมิระหว่าง 550-850 องศาเซลเซียส แนวเชื่อมนั้นก็เกิดเฟสที่มีความแข็งแรงเปราะขึ้น (Embrittlement) เรียกว่า Sigma Phase ซึ่งเกิดจากเฟอร์ไรท์และที่อุณหภูมิค่านั้น ก็จะพบว่า เฟอร์ไรท์ที่อยู่ในแนวเชื่อม จะมีผลกระทบกับความเหนียวของแนวเชื่อม [1] ดังนั้นการใช้งานของแนวเชื่อมเหล็กกล้าสแตนเลสออสเทนนิติก ที่ต้องอยู่ในสภาวะวิกฤติ (Critical Application) แนวเชื่อมที่มีโครงสร้างออสเทนไนท์เพียงอย่างเดียว จะมีคุณสมบัติการใช้งานที่ดีกว่าแนวเชื่อม ที่มีโครงสร้างเฟอร์ไรท์ผสมอยู่บางส่วน หรือแนวเชื่อมที่มีทั้งสองโครงสร้างคือ เฟอร์ไรท์และออสเทนไนท์ แต่อย่างไรก็ตามแนวเชื่อมที่มีโครงสร้างออสเทนไนท์เพียงอย่างเดียวก็มีปัญหาการแตกร่อนของแนวเชื่อมดังที่กล่าวมาข้างต้น

จากปัญหาการแตกร่อนของแนวเชื่อมเหล็กกล้าสแตนเลสออสเทนนิติกดังกล่าว จึงได้ทำการศึกษาปัญหานี้ โดยจะศึกษาการแตกร่อนของแนวเชื่อมเหล็กกล้าสแตนเลสออสเทนนิติก เกรด 304 ที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม Austenitic ER 310 โดยใช้กระบวนการเชื่อมทิก (Gas Tungsten Arc Welding: GTAW) ด้วยการแปรค่า (Variable) กระแสไฟเชื่อม (Welding Current) หรือค่าความร้อนที่ให้กับชิ้นงาน (Heat Input) และทดสอบความไวต่อการแตกร่อนด้วยกรรมวิธี Longitudinal V restraint Test

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาความไวต่อการแตกร่อนของแนวเชื่อมเหล็กกล้าสเตนเลสออสเทนนิติก เกรด 304 ที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม Austenitic ER 310
2. เพื่อหาแนวทางในการลดการแตกร้าวขณะร้อนของแนวเชื่อม

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

ศึกษาความไวต่อการแตกร่อนของแนวเชื่อมเหล็กกล้าสเตนเลสออสเทนนิติก ที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อม Austenitic ER 310 โดยเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมทิก ด้วยการแปรค่ากระแสไฟเชื่อมหรือความร้อนที่ให้กับชิ้นงานและความเครียด (Strain: ϵ) และประเมินความไวต่อการแตกร่อน จากความยาวรอยแตกที่ยาวที่สุด (Maximum Crack Length) และผลรวมความยาวรอยแตก (Total Crack Length) ของแนวเชื่อมที่เกิดขึ้นในแต่ละค่าของความเครียด

1.4 การดำเนินการ

1. ศึกษาข้อมูล
2. ออกแบบและสร้างเครื่องทดสอบ Varestreint Test
3. ออกแบบการทดลอง
4. ทำการทดลองและเก็บข้อมูล
5. วิเคราะห์ข้อมูล
6. สรุปผลการทดลอง

1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทำให้ทราบค่าของกระแสไฟเชื่อมหรือความร้อนที่ให้กับชิ้นงาน (Heat Input) กับค่าความเครียดที่มีผลกระทบกับการแตกร่อนของแนวเชื่อม
2. ทำให้ทราบแนวทางในการลดหรือหลีกเลี่ยงปัญหาการแตกร่อนของแนวเชื่อม

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 เหล็กกล้าสแตนเลส (Stainless Steels) [2]

เหล็กกล้าสแตนเลสเป็นเหล็กกล้าที่มีเหล็กเป็นส่วนผสมเหล็ก (Iron-Based Alloy) ซึ่งจะต้องมีปริมาณโครเมียมผสมอยู่อย่างน้อยอยู่ประมาณ 10.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (บางประเภทจะต้องมีโครเมียมไม่น้อยกว่า 12 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) ถ้าปริมาณโครเมียมยิ่งมากขึ้น เหล็กกล้าสแตนเลสก็จะยิ่งมีความต้านทานต่อการกัดกร่อน (Corrosion) และการเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนในสภาพแวดล้อมที่ก่อให้เกิดการกัดกร่อนมากขึ้น ดังนั้นจึงเรียกเหล็กที่มีสมบัติทนต่อการกัดกร่อนนี้ว่า “Corrosion-Resistant Steel” หรือ “CRES”

เหล็กที่ชุบเคลือบผิวด้วยโครเมียมนั้น โครเมียมจะป้องกันผิวเหล็กไม่ให้เกิดการกัดกร่อน และโครเมียมที่ผสมอยู่ในเหล็กกล้าสแตนเลส ก็ทำให้เกิดความต้านทานต่อการกัดกร่อน นอกจากนี้โครเมียม ยังเป็นตัวที่ทำให้เกิด “Passive” ซึ่งเป็นชั้นของโครเมียมออกไซด์ ที่เกิดขึ้นบนผิวหน้าของเหล็กกล้าสแตนเลส และ Passive นี้ ก็มีสมบัติที่แตกต่างกับเหล็กกล้าที่ผ่านการชุบหรือทาสี ก็คือถ้าเหล็กกล้าสแตนเลสถูกขีดข่วนให้เป็นรอย ชั้นของ Passive นี้ ก็จะเกิดการก่อตัวขึ้นได้อีกบนผิวเหล็กในสภาพบรรยากาศปกติ ดังนั้นจึงเกิดการปกป้องผิว จากการกัดกร่อนหรือเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนอยู่ตลอดเวลาเพื่อสร้าง Passive

สถาบันเหล็กและเหล็กกล้าของอเมริกา (The American Iron and Steel Institute; AISI) ได้แยกประเภทและจัดกลุ่ม ของเหล็กกล้าสแตนเลส ดังนี้

กลุ่มของเหล็กกล้าสแตนเลส AISI	ธาตุผสมหลัก
กลุ่ม 200	Cr-Ni-Mn
กลุ่ม 300	Cr-Ni
กลุ่ม 400	Cr

เหล็กกล้าสแตนเลสหลักมี 5 ประเภท คือ

ประเภท (Classification)	กลุ่มตาม AISI
ออสเทนนิติก (Austenitic)	กลุ่ม 200 และ 300
เฟอร์ริติก (Ferritic)	กลุ่ม 400 บางกลุ่ม
มาร์เทนซิติก (Martensitic)	กลุ่ม 400 บางกลุ่ม
ดูเพล็กซ์ (Duplex)	
พรีซิพิตชัน (Precipitation-Hardening)	

เหล็กกล้าสแตนเลสแต่ละชนิด จะแตกต่างกันที่ลักษณะของโครงสร้างทางโลหะวิทยาที่อุณหภูมิห้อง ส่วนมากเหล็กกล้าสแตนเลสที่ใช้งานทั่วไป จะถูกขึ้นรูปเพื่อให้เหมาะกับการนำไปใช้งานหลายรูปร่างต่าง ๆ กัน และในบทนี้จะกล่าวถึงเฉพาะเหล็กกล้าสแตนเลสออสเทนนิติกเท่านั้น

2.2 เหล็กกล้าสแตนเลสออสเทนนิติก (Austenitic Stainless Steels) [2]

เหล็กกล้าสแตนเลสที่ใช้งานมากที่สุด คือ เหล็กกล้าสแตนเลสออสเทนนิติก ซึ่งมีส่วนผสมของโครเมียม 16-25 เปอร์เซ็นต์ และนิกเกิล 7-35 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักในกลุ่ม 300 ของออสเทนนิติกนั้น จะมีส่วนของเหล็ก โครเมียม นิกเกิล ในขณะที่กลุ่ม 200 ของออสเทนนิติก นั้น จะมีส่วนผสมของแมงกานีส (Manganese) และไนโตรเจน (Nitrogen) เพื่อแทนที่ส่วนผสมบางส่วนของนิกเกิล เหล็กกล้าสแตนเลสทั้งสองกลุ่มนี้ ได้ชื่อว่า เป็นเหล็กกล้าโครงสร้าง Face Centered Cubic (FCC) ซึ่งโครงสร้างผลึกชนิดนี้ จะยังคงสภาพอยู่ที่อุณหภูมิห้อง ด้วยเหตุดังกล่าว จึงเรียกชื่อเหล็กกล้าที่มีโครงสร้างผลึกแบบนี้ว่า “Austenitic” และสมบัติบางอย่างของเหล็กกล้าสแตนเลสเหล่านี้ (พร้อมด้วยข้อยกเว้นบางอย่าง) มีดังนี้

1. ไม่มีสมบัติทางแม่เหล็ก (Nonmagnetic)
2. มีสมบัติต้านทานต่อการกัดกร่อนจากสภาพแวดล้อมทั่วไปได้ดีที่สุด
3. อบซุบด้วยความร้อนไม่ได้ (ไม่สามารถอบชุบ เพื่อเพิ่มความแข็งแรงหรือความแข็งได้)
4. สามารถทำให้มีความแข็งแรงขึ้นได้ด้วยกรรมวิธี Cold Work อย่างเดียวเท่านั้น
5. มีความอ่อนตัว (Ductility) และความเหนียว (Toughness) ที่อุณหภูมิต่ำและสูงได้ดี (นิกเกิลทำให้มีสมบัติดังกล่าว เมื่อใช้งานที่อุณหภูมิต่ำและสูง)
6. มีความต้านทานต่อการกัดกร่อนน้อยมาก เมื่ออยู่ในสภาวะดังนี้
 - การกัดกร่อนจากการแตกร้าวที่อยู่ภายใต้สภาวะความเค้น (Stress Corrosion Cracking)
 - การกัดกร่อนที่มีลักษณะเป็นขุม (Pitting Corrosion)
 - การกัดกร่อนที่เกิดจากรอยแยก (Crevice Corrosion)

เหล็กกล้าสแตนเลสที่ใช้งานกันอยู่ทั่วไป จะเป็นประเภท Wrought Austenitic Stainless Steel (ในตารางที่ จ.1) เกรด 302 จะเป็นเหล็กกล้าสแตนเลสประเภท Austenitic เกรดพื้นฐานที่มีส่วนผสม 18 Cr 8 Ni เกรด 304 จะมีปริมาณของโครเมียมและนิกเกิลที่สูง เพื่อให้มีความต้านทานต่อการกัดกร่อนที่ดีขึ้น ส่วนเกรด 316 จะมีปริมาณโครเมียมต่ำ แต่ก็มีปริมาณนิกเกิลที่สูงบวกกับการเพิ่มโมลิบดีนัม (Molybdenum) เข้าไปอีก เพื่อให้มีสมบัติในการต้านทานการกัดกร่อนจากการกัดกร่อนแบบขุม การกัดกร่อนที่เกิดจากรอยแยก และการกัดกร่อนจากการแตกร้าวที่อยู่ภายใต้ความเค้นได้ดีขึ้น (โดยเฉพาะในสภาพแวดล้อมที่เป็นคลอไรด์) เกรด “L” (เช่น 304L และ 316L) จะมีปริมาณคาร์บอนต่ำ ดังนั้น เกรด “L” จึงอาจจะมีแนวโน้มต่อการเกิดการกัดกร่อนระหว่างขอบเกรน (Intergranular Corrosion)

น้อยมาก เกรด “H” (เช่น 304H และ 316H) จะมีปริมาณคาร์บอนที่สูง ทั้งนี้ก็เพื่อต้องการให้มีความแข็งแรง (Strength) มากขึ้น เมื่อใช้งานที่อุณหภูมิสูง

2.3 โลหะเติมในการเชื่อม (Welding Filler Metals) [2]

เหล็กกล้าสแตนเลส สามารถที่จะเชื่อมได้โดยจะใช้หรือไม่ใช้โลหะเติม (Filler Metals) ก็ได้ กระบวนการเชื่อมที่ต้องใช้โลหะเติม

1. การเชื่อมอาร์คโลหะ (Shield Metal Arc Welding : SMAW)
2. การเชื่อมอาร์คแก๊สคลุม (Gas Metal Arc Welding : GMAW)
3. การเชื่อมอาร์คฟลักคอร์ (Flux Core Arc Welding : FCAW)
4. การเชื่อมอาร์คใต้ฟลัก (Submerged Arc Welding : SAW)

กระบวนการเชื่อมที่จะใช้หรือไม่ใช้โลหะเติมก็ได้

1. การเชื่อมทิก (Gas Tungsten Arc Welding : GTAW)
2. การเชื่อมอาร์คพลาสมา (Plasma Arc Welding : PAW)
3. การเชื่อมด้วยเลเซอร์ (Laser Beam Welding : LBW)
4. การเชื่อมด้วยลำอิเล็กตรอน (Electron Beam Welding : EBW)

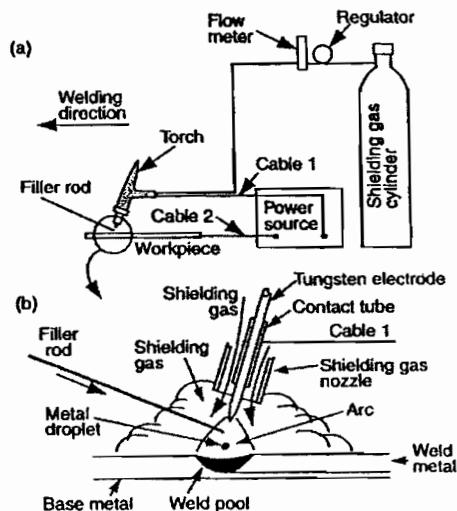
มาตรฐานการเชื่อม AWS ได้ระบุลวดเชื่อมเหล็กกล้าสแตนเลส และโลหะเติมไว้เป็นมาตรฐาน เพื่อให้เหมาะสมทั้งโลหะชิ้นงาน (Base Metal) และกระบวนการเชื่อม (Welding Processes) ดังนี้

1. AWS A 5.4 SMAW Electrode
2. AWS A 5.9 GMAW Electrode
 - GTAW Welding Rod
 - SAW Electrode
3. AWS A 5.22 FCAW Electrode
 - Cored Wire for GTAW
4. AWS A 5.30 Consumable Inserts

โลหะเติมที่ใช้ในการเชื่อมเหล็กกล้าสแตนเลส ดังแสดงในตารางที่ จ.2

2.4 กระบวนการเชื่อมทิก (Gas Tungsten Arc Welding: GTAW) [3]

กระบวนการเชื่อมทิก เป็นกระบวนการหลอม (Melt) และต่อโลหะ (Joint Metal) โดยการให้ความร้อนกับรอยต่อด้วยการอาร์ค (Arc) ระหว่างอิเล็กโทรดทังสเตน (Nonconsumable Tungsten Electrode) กับวัสดุ (ดังแสดงในรูปที่ 2.1) ส่วนหัวเชื่อม (Torch) ที่ใช้ยึดลวดเชื่อมทังสเตนจะต่อเข้ากับท่อที่บรรจุแก๊สปกคลุม (Shielding Gas) และมีสายไฟเชื่อมต่อกับเครื่องเชื่อม (Power Source) (ดังรูปที่ 2.1 a) อิเล็กโทรดทังสเตนจะอยู่ในท่อทองแดง ที่มีน้ำหล่อเย็นซึ่งเรียกว่า “Contact Tube” (ดังรูปที่ 2.1 b) ซึ่งจะต่อเข้ากับสายไฟเชื่อม (Cable 1) น้ำที่หล่อเย็นนี้ จะช่วยป้องกันการเกิดความร้อนสูงขึ้นกับกระแสไฟเชื่อม (Welding Current) จากเครื่องเชื่อมที่จะไหลเข้าไปในอิเล็กโทรดทังสเตนและช่วยระบายความร้อนให้กับอิเล็กโทรดทังสเตนด้วย ส่วนชิ้นงาน (Work Piece) จะต่อเข้ากับสายอีกด้านหนึ่ง (Cable 2) ของเครื่องเชื่อม แก๊สปกคลumnั้นจะไหลผ่านเข้าไปในหัวเชื่อมและออกมาทางรูหัวฉีด (Nozzle) แล้วพุ่งตรงไปยังบ่อหลอมละลายของแนวเชื่อม (Weld Pool) เพื่อป้องกันอากาศเข้าไปรวมตัวกับน้ำโลหะ ในป้องกันอากาศเข้าไปรวมตัวกับน้ำโลหะนี้ กระบวนการเชื่อมทิกจะป้องกันได้ดี มากกว่ากระบวนการเชื่อมอาร์คโลหะแก๊สคลุม (Gas Metal Arc Welding: GMAW) ทั้งนี้ก็เพราะว่าแก๊สเฉื่อย (Inert Gas) เช่น แก๊สอาร์กอน (Argon) หรือฮีเลียม (Helium) จะมีสมบัติเป็นแก๊สปกคลุมที่ดี และอีกประการหนึ่งแก๊สปกคลumnี จะไหลพุ่งไปยังบ่อหลอมละลายโดยตรง และด้วยเหตุที่ใช้แก๊สเฉื่อยนี้ จึงมักเรียกว่า “การเชื่อม Tungsten Inert Gas : TIG” แต่อย่างไรก็ตามในบางครั้ง ก็สามารถนำแก๊สชนิดอื่น ที่ไม่ใช่แก๊สเฉื่อยในปริมาณน้อยเข้าไปผสมเป็นแก๊สปกคลุมได้ ถ้าต้องการเชื่อมโดยใช้ลวดเติม (Filler Rod) เช่น ชิ้นงานที่มีความหนาที่สามารถที่จะป้อนลวดได้ทั้งแบบป้อนด้วยมือ (Manual) หรือป้อนลวดแบบอัตโนมัติ(Automatic) ได้



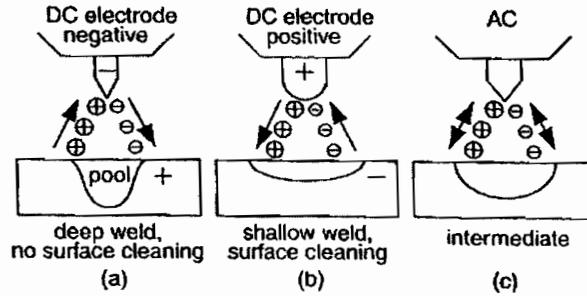
รูปที่ 2.1 กระบวนการเชื่อมทิก (a) อุปกรณ์การเชื่อม (b) ส่วนประกอบของ Contact Tube [3]

2.4.1 ประเภทของกระแสไฟเชื่อมและขั้วเชื่อม (Welding Current and Polarity) [3] , [4]

- Direct - Current Electrode Negative (DCEN) หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า ขั้วตรง (Straight Polarity) เป็นขั้วกระแสไฟเชื่อมที่ใช้กันทั่วไปในกระบวนการเชื่อมทิก ซึ่งอิเล็กโทรดจะต่อเข้ากับขั้วลบของเครื่องเชื่อม (ดังแสดงในรูปที่ 2.2 a) ทำให้อิเล็กตรอนไหลจากลวดเชื่อมทั้งสแตน และวิ่งข้ามช่องอาร์คไปยังชิ้นงานที่เป็นขั้วบวก และการไหลของอิเล็กตรอนในลักษณะนี้ จึงทำให้มีนัยสำคัญที่สัมพันธ์กับปริมาณของพลังงาน ซึ่งเรียกว่า “Work Function” ก็คือ อิเล็กตรอนจะถูกบังคับให้ไหลมาจากอิเล็กโทรด และเมื่ออิเล็กตรอนวิ่งเข้าไปในชิ้นงานแล้ว ปริมาณของพลังงานที่เทียบเท่ากับ Work Function ก็จะถูกปล่อยออกมา และด้วยเหตุนี้เองที่เป็นเหตุผลว่า ทำไมกระบวนการเชื่อมทิกด้วยกระแสไฟ DCEN จึงมีความร้อนเกิดขึ้นที่ชิ้นงานในจุดที่เกิดการอาร์คมาก (ประมาณ 2/3) และเกิดความร้อนที่ปลายลวดเชื่อมน้อยกว่า (ประมาณ 1/3) ดังนั้นจากความสัมพันธ์ในลักษณะดังกล่าว จึงทำให้แนวเชื่อมที่ได้จากการเชื่อมด้วยกระแส DCEN มีความลึกและแคบ กระแส DCEN เหมาะสำหรับการเชื่อมเหล็กกล้าสแตนเลส (Stainless Steel) ทองแดงผสม (Copper Alloys) นิกเกิลผสม (Nickel Alloy) ทิตาเนียม (Titanium) เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (Low-Carbon Steel) และเหล็กกล้าคาร์บอนสูง (High-Carbon Steel)

- Direct - Current Electrode Positive (DCEP) หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า กลับขั้ว (Reverse Polarity) การต่อขั้วกระแสไฟเชื่อมแบบนี้ ลวดเชื่อมจะต่อเข้ากับขั้วบวกของเครื่องเชื่อม (ดังรูปที่ 2.2 b) ผลกระทบของความร้อนจากการไหลของอิเล็กตรอน จะอยู่ที่ลวดเชื่อมทั้งสแตนมากกว่าชิ้นงาน ดังนั้นแนวเชื่อมที่ได้จึงตื้นและกว้าง ในการเชื่อมด้วยกระแส DCEP จึงต้องใช้แท่งทั้งสแตนที่มีขนาดใหญ่ขึ้น และใช้น้ำหล่อเย็นกับหัวเชื่อม เพื่อป้องกันแท่งทั้งสแตนหลอมจากความร้อนสูง ส่วนอ็อกไซด์ของแก๊สปกคลุม จะวิ่งเข้าชนชิ้นงานอย่างแรง (ดังรูปที่ 2.2 b) จนทำให้ชั้นบาง ๆ ของออกไซด์ (Oxide Film) แยกออกจากผิวชิ้นงาน จึงเป็นการทำความสะอาดผิวหน้าชิ้นงาน ดังนั้นการเชื่อมด้วยกระแส DCEP จึงสามารถใช้เชื่อมโลหะแผ่นบาง ที่มีออกไซด์เกาะบนผิวหน้าหนา ๆ ได้ เช่น อลูมิเนียม (Aluminum) และแมกนีเซียม (Magnesium) ซึ่งไม่ต้องการการหลอมละลายลึกมาก

- Alternating Current (AC) การเชื่อมด้วยกระแส AC นี้ จะให้ผลดีทั้งการหลอมละลายลึก และการทำความสะอาดออกไซด์ ที่เกาะอยู่บนผิวหน้าชิ้นงาน (ดังแสดงในรูปที่ 2.2 c) ดังนั้นการเชื่อมด้วยกระแสไฟเชื่อม AC จึงเหมาะสำหรับเชื่อมอะลูมิเนียมผสม (Aluminum Alloy)



รูปที่ 2.2 ข้อแตกต่างของกระแสไฟเชื่อมทั้ง 3 ประเภท [2]

2.4.2 อิเล็กโทรด (Electrode)

อิเล็กโทรดทั้งสแตนที่มี 2 เปอร์เซนต์ เซอเรียม (Cerium) หรือทอเรียม (Thorium) จะมีการไหลของอิเล็กตรอน ประสิทธิภาพการนำไฟฟ้าและต้านทานต่อสิ่งสกปรกได้ดีกว่าอิเล็กโทรดทั้งสแตนบริสุทธิ์ (Pure Tungsten) การเริ่มต้นอาร์คก็ง่ายและการอาร์คก็คงที่ ขนาดของอิเล็กโทรดทั้งสแตนและข้อแนะนำการใช้งาน ดังแสดงในตารางที่ 2.3

2.4.3 แก๊สปกคลุม (Shielding Gas)

ในกระบวนการเชื่อมทิกนั้น แก๊สปกคลุมแนวเชื่อมจะใช้ได้ทั้งแก๊สอาร์กอน (Argon) และแก๊สฮีเลียม (Helium) สมบัติบางอย่างของแก๊สปกคลุมบางชนิด พลังงานจากการเกิดไอออนไนเซชัน (Ionization Potentials) ของอาร์กอนและฮีเลียม คือ 15.7 และ 24.5 EV (Electron Volts) ตามลำดับ ในเมื่อแก๊สอาร์กอนเกิดไอออนไนเซชันง่ายกว่าฮีเลียม จึงทำให้การเริ่มต้นอาร์ค ง่ายกว่าและการลดลงของแรงดันในขณะที่วิ่งข้ามช่องอาร์คก็น้อยกว่า อีกทั้งยังมีน้ำหนักมากกว่าฮีเลียม และให้ประสิทธิภาพในการปกคลุมดีกว่า ถ้าใช้เชื่อมกับกระแสไฟเชื่อม DCEP หรือ AC แก๊สอาร์กอนก็ทำให้ปฏิกิริยาการทำความสะอาดออกไซด์ได้ดีกว่าฮีเลียม จากคุณสมบัติต่าง ๆ บวกกับต้นทุนที่ต่ำกว่าของแก๊สอาร์กอน จึงทำให้เป็นที่นิยมใช้งานกันมากกว่าแก๊สฮีเลียมในการเชื่อมทิก

ส่วนข้อดีของแก๊สฮีเลียม ก็คือ สามารถทำการเชื่อมได้กระแสสูงกว่าแก๊สอาร์กอน ระยะอาร์คมีความไวต่อการปรับเชื่อมจึงงานได้หนากว่า เชื่อมด้วยความเร็วสูงกว่า และสามารถปรับระยะอาร์คได้ในระหว่างการเชื่อมด้วยระบบอัตโนมัติ

ตารางที่ 2.1 ขนาดของอิเล็กโทรดทั้งสแตนเลสและข้อแนะนำการใช้งาน [5]

Recommended Tungsten Electrode^a and Gas Cup for Various Welding Current

Electrode Diameter		Use Gas Cup I.D.	Direct Current A		Alternating Current A	
			Straight Polarity ^b	Reverse Polarity ^b	Unbalanced Wave ^c	Balanced Wave ^c
in.	mm	in.	DCEN	DCEP	-	-
0.010	0.25	1/4	up to 15	-	up to 15	up to 15
0.020	0.50	1/4	5-20	-	5-15	10-20
0.040	1.00	3/8	15-80	-	10-60	20-30
1/16	1.6	3/8	70-150	10-20	50-100	30-80
3/32	2.4	1/2	150-250	15-30	100-160	60-130
1/8	3.2	1/2	250-400	25-40	150-210	100-180
5/32	4.0	1/2	400-500	40-55	200-275	160-240
3/16	4.8	5/8	500-750	55-80	250-350	190-300
1/4	6.4	3/4	750-1100	80-125	325-450	325-450

a. All Values are Base on the use of Argon as the Shielding Gas.

b. Use EWTh-2 Electrodes.

c. Use EWP Electrodes.

2.5 การแตกร้อน (Hot Cracking) ในการเชื่อมเหล็กกล้าสแตนเลส [2]

การเชื่อมเหล็กกล้าสแตนเลส นั้น บ่อยครั้งที่ผลของการเชื่อมเกิดการแตกร้าว (Cracking) ในระหว่างการเชื่อมทั้งในบริเวณ HAZ ของโลหะเชื่อม (Weld Metal) หรือในแนวซิมลึก (Root Pass) ของการเชื่อมซ้อนทับกันหลายแนว (Multi Pass Weld) ถ้าทำการเชื่อมด้วยความเร็วสูง (Fast Travel Speed) ก็จะทำให้เกิดการแตกที่ตรงกลางแนวเชื่อม (Centerline Crack) หรือถ้าบริเวณบ่อหลอมละลายที่ปลายสุดของแนวเชื่อมไม่ได้เติมน้ำโลหะให้เต็มตรงบริเวณดังกล่าวนี้ ก็จะทำให้เกิดการแตกลักษณะคล้ายรูปดาว (Crater or Star Crack) ที่กล่าวมาข้างต้นทั้งหมดเป็นรอยแตกร้อน (Hot Crack) ซึ่งรอยแตกร้อนนี้เกิดขึ้นในขณะที่รอยเชื่อมยังร้อนแดงอยู่ในสภาวะของเหลว ก่อนที่จะเย็นตัวลงที่อุณหภูมิห้อง

2.5.1 ประเภทของการแตกร้อน มีดังนี้

1. การแตกร้าวเป็นริ้วรอยเล็ก ๆ สั้น ๆ (Microfissuring)
2. การแตกร้าวที่บริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (Heat -Affected Zone Cracking)
3. การแตกร้าว เนื่องจากได้รับความร้อนซ้ำ (Reheat Cracking) หรือการแตกร้าวของแนวเชื่อมก่อนหน้า อันเนื่องมาจากได้รับความร้อน จากการเชื่อมทับแนว (Subsequent Weld Passes)
4. การแตกร้าวที่ปลายสุดของแนวเชื่อม (Crater Cracking)
5. การแตกร้าวขณะกำลังแข็งตัว (Solidification Cracking)

2.5.2 สาเหตุการเกิดการแตกร้อน

1. ความเค้นแรงดึง (Tensile Stress)
2. โครงสร้างที่มีความไวต่อการแตกร้าว (Crack Susceptible Microstructure) โดยเฉพาะเหล็กกล้าสแตนเลสออสเทนนิติก
3. มีสิ่งปนเปื้อน (Contaminants) โดยเฉพาะพวกธาตุซัลเฟอร์ (Sulfur) ฟอสฟอรัส (Phosphorus) ทิตาเนียม (Titanium) และไนโอเบียม (Niobium)

การแตกร้อนนี้ สามารถเกิดขึ้นได้กับการเชื่อมเหล็กกล้าสแตนเลสทุกประเภท เหล็กกล้าสแตนเลสประเภทที่ตัดแต่งด้วยเครื่องจักรได้ (Free-Machining Stainless Steels) จะมีส่วนผสมของซัลเฟอร์ (Sulfur) และฟอสฟอรัส (Phosphorus) อยู่ในปริมาณสูง (เช่น เกรด 303) พวกนี้จะมีความไวต่อการแตกร้อนสูงมาก และบางเกรดของเหล็กกล้าสแตนเลสประเภท Stabilized Grades ซึ่งมีส่วนผสมของทิตาเนียม (Titanium) และไนโอเบียม (Niobium) เช่นเกรด 321 , 347 , 444 ก็จะมีมีความไวต่อการแตกร้อนด้วยเช่นกัน

เงื่อนไขในการเชื่อมก็มีผลกระทบต่อกรแตกร้อนด้วยเหมือนกัน วิธีการที่จะลดการแตกร้อนควรทำดังนี้

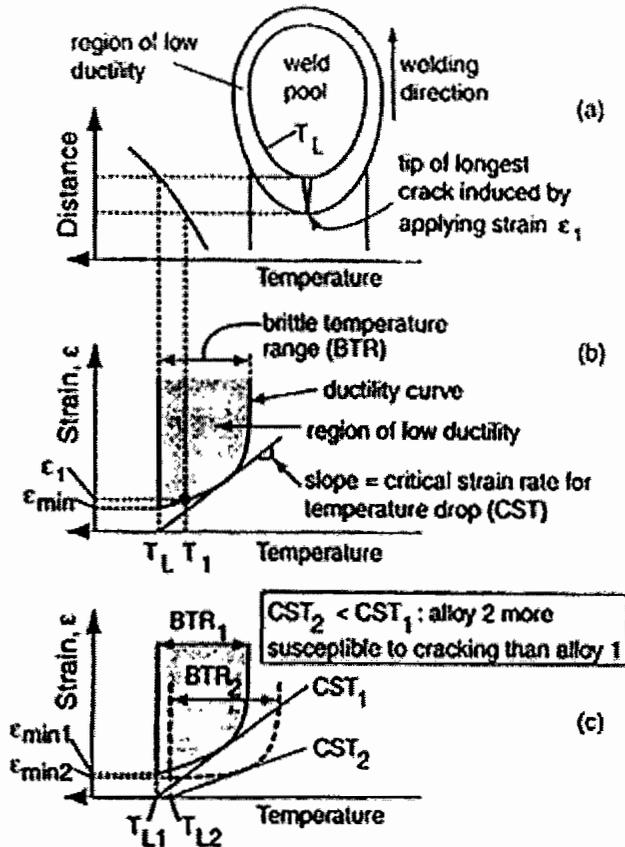
1. ใช้เทคนิคการเชื่อมแบบไม่สายลวดเชื่อม (Stringer Beads)
2. ลดความเร็ว (Travel Speed) ในการเชื่อม
3. ใช้โลหะชิ้นงาน (Base Metal) หรือใช้โลหะเติม (Filler Metal) ที่มีปริมาณเฟอร์ไรท์ (Ferrite) สูง
4. เติมน้ำโลหะที่บ่อหลอมละลายปลายสุดของแนวเชื่อม (Crater) ให้เต็ม
5. ลดการเกิดความเค้นแรงดึง (Tensile Stresses) เช่น ทำการคลายความเค้น (Stress Relieve) เปลี่ยนแปลงลักษณะรอยต่อ (Change Joint Design)
6. หลีกเลี่ยงระยะอาร์คที่ยาว (ซึ่งจะทำให้อากาศหรือไนโตรเจนรอบข้างเข้าไปใน บริเวณที่เกิดการอาร์ค เพราะจะทำให้มีไนโตรเจนในออสเทนไนท์เพิ่มขึ้น

เหล็กกล้าสแตนเลสที่มีความไวต่อการแตกร่อนมากที่สุด คือ ประเภทเหล็กกล้าสแตนเลสออสเทนนิติก ทั้งนี้ก็เพราะว่า เมื่อเปรียบเทียบปริมาณเฟอร์ไรท์กับเหล็กกล้าสแตนเลสประเภทอื่นแล้ว ออสเทนไนท์ จะเป็นโครงสร้างที่มีความไวต่อการแตกร่อนมากกว่าโครงสร้างประเภทอื่น ขณะเดียวกันสิ่งปนเปื้อนจะสามารถละลายเข้าไปในโครงสร้างเฟอร์ไรท์ได้ง่ายกว่าโครงสร้างออสเทนไนท์ และถ้ามีปริมาณของ Delta Ferrite เพียงเล็กน้อยในเหล็กกล้าสแตนเลสออสเทนนิติกก็จะช่วยให้รอยเชื่อมลดการแตกร่อนลงได้

2.6 กลไกในการแตกของแนวเชื่อม (Weld Cracking Mechanism)

2.6.1 ความเหนียวในระหว่างการแข็งตัวของแนวเชื่อม (Ductility of Solidifying Weld Metal) [3]

ความเหนียวของแนวเชื่อมที่อยู่ในช่วงระหว่างการแข็งตัวนั้น ถ้าแนวเชื่อมมีความเหนียวน้อยก็เป็นไปได้ว่า อาจเกิดการแตกในช่วงระหว่างการแข็งตัว และความเหนียวของช่วงการแข็งตัวของแนวเชื่อมนี้เรียกว่า “Ductility Curve” ดังรูปที่ 2.3 ซึ่งเส้น Ductility Curve นี้ได้จากความสัมพันธ์ของค่าอุณหภูมิ (Temperature : T) และความเครียด (Strain : ϵ) ที่ทำให้แนวเชื่อมเกิดการแตก โดย T_L คือ อุณหภูมิที่เส้นของเหลว (Liquids Temperature : T_L) ที่ขอบบ่อหลอมละลายน้ำโลหะเชื่อม (Weld Pool) (ดังรูปที่ 2.3 a) และ ϵ_{min} คือ ความเครียดที่น้อยที่สุด (Minimum Strain : ϵ_{min}) ที่ทำให้เกิดการแตกที่ขอบบ่อหลอมละลายน้ำโลหะเชื่อม และ T_L, ϵ_1 คือ อุณหภูมิและความเครียดที่ปลายสุดของรอยแตก (ดังรูปที่ 2.3 b) และถ้าทำการเปลี่ยนค่าอุณหภูมิและความเครียดเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ก็จะได้เส้น Ductility Curve ส่วนช่วงระยะห่างระหว่างเส้น T_L กับเส้น Ductility Curve เรียกว่า ช่วงอุณหภูมิที่มีความเปราะ (Brittle Temperature Range : BTR) และความชัน (Slope) ของเส้นสัมผัสที่ลากจากจุด T_L ไปสัมผัสกับเส้น Ductility Curve เรียกว่า เส้น “Critical Strain Rate for Temperature Drop : CST” ซึ่งก็คือ อัตราวิกฤติที่ความเครียดเปลี่ยนแปลงพร้อมกับอุณหภูมิลดลง ซึ่งโดยทั่วไปแล้ว ถ้าค่าความเครียดที่น้อยที่สุดที่มีค่าที่ต่ำกว่า (ถ้าความเครียดที่น้อยที่สุดอีกค่าหนึ่ง) และช่วง BTR ที่มากกว่าหรือความชันของเส้น CST น้อยกว่าก็ หมายถึงว่า จะมีความไวต่อการแตกในระหว่างที่เกิดการแข็งตัวมากกว่า (ดังรูปที่ 2.3 c) และสำหรับการที่จะหลีกเลี่ยงจากการแตกของแนวเชื่อมได้นั้น ก็คือเมื่อทำให้อัตราความเครียดของอุณหภูมิลดลง (CST) นั้นต่ำกว่าค่าวิกฤติ



รูปที่ 2.3 ความเหนียวจากการแข็งตัวของโลหะเชื่อม (a) การกระจายของอุณหภูมิ (b) Ductility Curve (c) Ductility Curve กับความแตกต่างของความไวต่อการแตก [3]

พฤติกรรมการแตกร้อนของวัสดุนั้น สามารถที่จะให้คำจำกัดความได้ โดยเงื่อนไขของอุณหภูมิและความเครียด การแตกร้อนเกิดขึ้นได้ก็เพราะว่า โลหะเชื่อมที่กำลังแข็งตัวนั้น ขาดความเหนียวในช่วงอุณหภูมิระหว่างการแข็งตัว ซึ่งช่วงอุณหภูมินี้เป็นที่รู้จักกัน คือ การแข็งตัวในช่วงอุณหภูมิที่มีความเปราะ (Solidification Brittleness Temperature Rang : BTR) แต่อย่างไรก็ตาม การแตกก็มีความเครียดและอัตราความเครียด (Strain and Strain Rate) เป็นตัวแปรตามด้วยเหมือนกัน ซึ่งการแตกจะไม่เกิดขึ้น ถ้าอัตราความเครียดไม่มากเกินกว่าค่าความเครียดวิกฤติ (Critical Strain : ϵ_{cr})

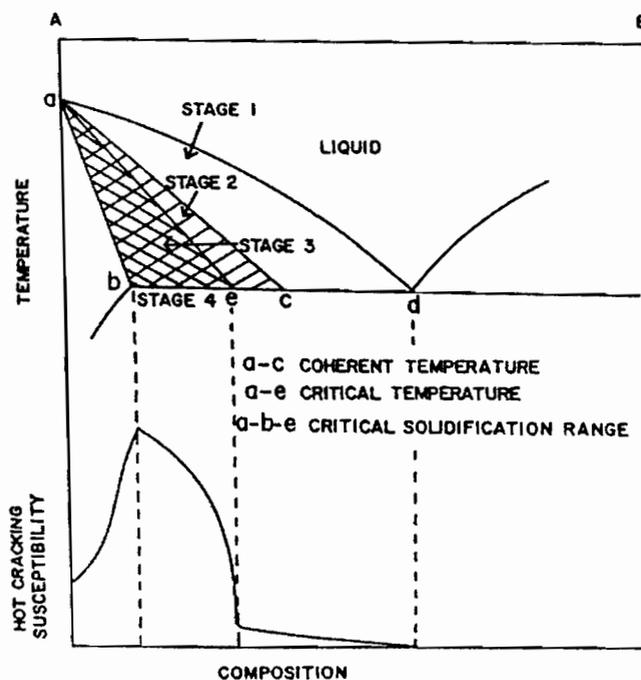
2.6.2 กลไกการแตกร้อนในโลหะเชื่อมของเหล็กกล้าสแตนเลสออสเทนนิติก (Mechanism of Hot Cracking in Austenitic Stainless Steel) [1]

ทฤษฎีที่อธิบายถึงกลไกการแตกร้อนของแนวเชื่อม มีอยู่ทฤษฎีหนึ่งที่มีเหตุผลและอธิบายกลไก การแตกร้อนที่เข้าใจง่ายที่สุด ถึงปรากฏการณ์ต่าง ๆ ที่มีความสัมพันธ์กับการแตกร้อน ซึ่งเป็นที่รู้จักกัน คือ “Generalized Theory” โดย Borland ซึ่งได้อธิบายขั้นตอนการแข็งตัว (Solidification) ไว้ 4 ขั้นตอน (ดังรูปที่ 2.4) ดังนี้

1. Primary Dendrite Formation เป็นขั้นตอนการเริ่มก่อตัวของเดนไดรต์ ซึ่งจะไม่มีเฟสของแข็งอยู่เลย จะมีเพียงเฟสของของเหลวเกิดขึ้นเท่านั้น และทั้งของแข็งและของเหลวจะสามารถเคลื่อนที่สัมพันธ์ซึ่งกันและกันตลอดเวลา ดังนั้นจึงไม่เกิดการแตกในขั้นตอนนี้

2. Dendrite Interlocking เป็นขั้นตอนนี้ทั้งของแข็งและของเหลว เริ่มก่อตัวขึ้นเรื่อย ๆ ซึ่งของแข็งก็จะก่อตัวเป็นเดนไดรต์ และมีเฟสของเหลวเท่านั้น ที่มีความสามารถเคลื่อนที่สัมพันธ์กันได้ และสามารถเคลื่อนที่ไปรอบ ๆ ระหว่างเดนไดรต์แต่ละอันได้ ซึ่งในขั้นตอนนี้ถ้าส่วนของเกรนถูกดึงด้วยการเกิดความเครียด (Straining) มากเกินไป ก็จะเกิดการรอยแตกขึ้นแต่รอยแตกนี้ก็จะถูกเติมด้วยของเหลวที่เคลื่อนตัวอยู่รอบ ๆ เดนไดรต์ จึงทำให้ไม่เกิดการแตก

3. Grain Boundary Development เป็นขั้นตอนของการเริ่มเกิดผลึกของของแข็ง และมีลักษณะเป็น Semi-continuous Network ซึ่งโครงข่ายของผลึกนี้ จะจำกัดการเคลื่อนที่ของของเหลวและเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า “Critical Solidification Range” ซึ่งในขั้นตอนนี้ ก็จะไม่มีการเติมของเหลว (Healing) ให้กับรอยแตก อันเนื่องมาจากเกิดความเครียดที่มากเกินไป เพราะว่าของเหลวไม่สามารถที่จะไหลเข้าไปเติมเต็มในรอยแตกได้ เนื่องจากถูกปิดกั้นด้วยโครงข่ายของผลึกที่แข็งตัวปิดทาง



รูปที่ 2.4 พฤติกรรมการแข็งตัวที่ส่งผลกระทบต่อความไวของการแตกในระบบสองธาตุ [1]

4. Complete Solidification ในขั้นตอนนี้ของเหลวที่ยังเหลืออยู่ตามขอบเกรนจะแข็งตัว เป็นของแข็งทั้งหมดและจะไม่มี การแตกเกิดขึ้น ปริมาณของการแตกที่เกิดขึ้นนั้น จะมีความสัมพันธ์กับปริมาณของความเครียดที่เกิดขึ้นในช่วงการแข็งตัววิกฤติด้วย

2.7 การทดสอบความไวต่อการแตก (Tests for Cracking Susceptibility) [7]

ในการประเมินความไวต่อการแตกของวัสดุชิ้นงาน (และวัสดุโลหะเติมใด ๆ) นั้น จุดประสงค์ของการทดสอบก็เพื่อที่จะลดหรือกำจัดการแตกที่จะเกิดขึ้นกับโลหะชิ้นงาน หรือแนวเชื่อมในระหว่างการประกอบหรือการใช้งาน (Fabrication or Service) ซึ่งการแตกนั้นสามารถที่จะเกิดขึ้นได้ ทั้งการแตกร้อน (Hot Cracking) การแตกเย็น (Cold Cracking) หรือการแยกชั้น (Lamellar Tearing) การแตกร้อนจะเกิดขึ้นในระหว่างที่แนวเชื่อมกำลังเกิดการแข็งตัว สามารถที่จะเกิดขึ้นได้ทั้งบริเวณของเนื้อโลหะเชื่อม (Weld Metal) หรือในบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (Heat Affected Zone : HAZ) การแตกร้อนนี้มีสาเหตุมาจากธาตุที่มีจุดหลอมละลายต่ำผสมอยู่ในแนวเชื่อม นอกจากนี้แล้วยังเกิดจากความเค้นแรงดึง (Tensile Stress) ที่เกิดขึ้นกับแนวเชื่อม การแตกร้อนจะมีชื่อเรียกกันหลายอย่าง คือ Microfissuring , Solidification Cracking, Reheat Cracking และ Liquation Cracking และในชิ้นส่วนของงานเชื่อมที่ใช้งานในสภาพจริง (Actual Weldment) แล้วนั้น ความเค้นแรงดึงก็อาจจะมาจากแรงกระทำภายนอก (External Loads) ในโครงสร้าง จากนั้นน้ำหนักของโครงสร้างเอง จากความเค้นที่เกิดจากการหดตัวในขณะที่แนวเชื่อมกำลังแข็งตัว (Solidification Shrinkage Stresses) หรือเกิดจากความเค้นที่เกิดขึ้นร่วมกันหลายอย่างก็ได้

ในการทดสอบเพื่อประเมินความไวต่อการแตกร้าวจะมีหลากหลายวิธี ซึ่งวิธีทดสอบโดยส่วนมากแล้ว จะใช้ประเมินความไวต่อการแตกร้าวได้เพียงหนึ่งประเภทเท่านั้น คือ การแตกร้าว การแตกเย็น การแตกใต้แนวเชื่อม (Underbead Cracking) หรือการแยกชั้น และการทดสอบบางวิธีก็สามารถที่จะใช้ประเมินความไวต่อการแตกร้าวได้ ทั้งประเภทการแตกร้อนและการแตกเย็น วิธีการทดสอบที่ใช้ประเมินความไวต่อการแตกร้าวของแนวเชื่อม แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ การทดสอบที่เกิดจากแรงดึงภายในชิ้นงาน (Self Restraint Tests) และการทดสอบที่เกิดจากแรงภายนอก (Externally Loads Tests)

2.7.1 การทดสอบที่เกิดจากแรงดึงภายในชิ้นงาน (Self Restraint Tests)

การทดสอบแบบนี้ จะใช้แรงที่เกิดจากการเหนียวรั้ง (Restraint) หรือ ความเค้น (Stress) ที่เกิดขึ้นภายในชิ้นงานทดสอบ (Specimen) ซึ่งแรงที่เกิดขึ้นนี้ จะเป็นสาเหตุให้แนวเชื่อมหรือชิ้นงาน เกิดการแตกร้าวขึ้น โดยที่ไม่มีแรงจากภายนอกมากระทำกับชิ้นงานทดสอบเลย ชิ้นงานทดสอบจะถูกออกแบบ เพื่อทำให้เกิดค่าของการเหนียวรั้งต่าง ๆ (Variable Restraint) ขึ้นกับรอยต่อที่ทำการเชื่อม เพื่อนำไปสู่สาเหตุของการแตกร้าว การทดสอบประเภทนี้มีกรรมวิธีการทดสอบต่าง ๆ ดังนี้

- Lehigh Restraint Test (Hot and Cold Cracks)
- Keyhole Restraint Cracking Test (Hot and Cold Cracks)
- Houldcroft Crack Susceptibility Test (Hot Crack Test)
- Keyhole Slotted-Plate Restraint Test (Hot Crack Test)
- Tekken Test (Cold Crack Test)
- Circular Path Test (Cold and Hot Crack Test)
- Navy Circular Patch Test (Cold and Hot Crack Test)
- Controlled-Thermal-Severity Test (Cold Crack Test)

2.7.2 การทดสอบที่เกิดจากแรงภายนอก (Externally Loads Tests)

การทดสอบแบบนี้ จะใช้แรงจากภายนอกมากระทำกับชิ้นงานทดสอบในระหว่างที่ทำการเชื่อม ซึ่งแรงภายนอกนี้ จะเป็นตัวแปรที่จะทำให้เกิดความเค้นในระดับต่าง ๆ ขึ้นกับชิ้นงานและส่งผลให้เกิดการแตกร้าวขึ้นกับแนวเชื่อม การทดสอบแบบนี้ จะทำให้ค่าความเค้นที่ได้มากกว่าการทดสอบแบบที่ใช้แรงดึงที่เกิดขึ้นภายในชิ้นงาน การทดสอบประเภทนี้จะมีกรรมวิธีการทดสอบต่าง ๆ ดังนี้

- Implant Testing (Cold Crack Test)
- Varestraint Test (Hot Crack Test)
- Spot Varestraint Test (Hot Crack Test)
- Sigmajig Test (Hot Crack Test)

ในการทดลองครั้งนี้ จะเลือกใช้กรรมวิธีการทดสอบแบบ Varestraint Test ดังนั้น ในบทนี้จึงขอกล่าวถึงเฉพาะการทดสอบแบบ Varestraint Test เท่านั้น

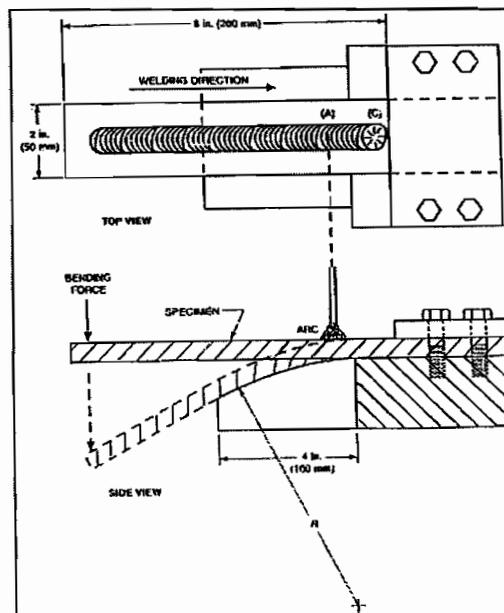
2.8 กรรมวิธีการทดสอบแบบ Vastrestraint Test (Hot Crack Test) [7]

การทดสอบความไวต่อการแตกร้อนแบบ Vastrestraint Test (Variable Restraint) ได้คิดค้นขึ้นที่สถาบัน Rensselaer Polytechnic Institute ซึ่งเป็นกรรมวิธีการทดสอบแบบง่าย ๆ ธรรมดาใช้สำหรับการทดสอบ เพื่อประเมินหาจุดที่มีความไวต่อการแตก (Crack Sensitivity) กรรมวิธีการทดลอง ก็คือ ปลายข้างหนึ่งของชิ้นงานทดสอบ (ปกติชิ้นงานจะมีขนาด 50×205×6.4 mm. หรือ 2×2×1/4 in) จะถูกยึดแน่นไว้กับที่ ส่วนปลายอีกข้างหนึ่งจะติดกับส่วนปลาย (หรือกลไก) ของไฮดรอลิก (Hydraulic) หรือนิวแมติก (Pneumatic) ดังรูปที่ 2.5 และด้านบนของชิ้นงานก็จะมีหัวเชื่อม GTAW โดยเชื่อมตามความยาว บริเวณกึ่งกลางของชิ้นงานจากปลายด้านที่ไม่ได้ยึดแน่น เคลื่อนที่ไปยังปลายอีกด้านที่ถูกยึดแน่น และเมื่อเชื่อมมาถึงจุดที่กำหนดไว้ ชิ้นงานก็จะถูกตัดให้โค้งตามรัศมีของแบบตัด (Die Block) ซึ่งการตัดแบบนี้จะทำให้เกิดความเครียด (Strain : ϵ) บนผิวหน้าตามความยาวของแนวเชื่อมเพิ่มขึ้น สำหรับค่าความเครียดนั้นประมาณได้จากสมการดังนี้

$$\epsilon (\%) = t/2R$$

เมื่อ t = ความหนาของชิ้นงานทดสอบ (ค่าคงที่)

R = รัศมีของแบบตัด (Die block)



รูปที่ 2.5 การทดสอบแบบ Vastrestraint Test [8]

วัสดุชิ้นงานประเภทเดียวกันและความหนาเท่ากัน ถ้านำไปตัดกับแบบตัด (Die Block) ที่มีรัศมีแตกต่างกัน ก็จะมีระดับความเครียดที่ไม่เท่ากัน ซึ่งจะมีผลทำให้จุดเริ่มต้นของการแตก มีความแตกต่างกันไปด้วย โดยทั่วไปแล้วในการประเมินการแตกของแนวเชื่อมพอกโลหะผสม (Alloy) นั้น ใช้แบบตัด (Die Block) ที่ทราบรัศมีเพียงตัวเดียว ทำการทดสอบก็จะทำให้ทราบการแตกที่จะเกิดขึ้นกับชิ้นงานตัวอย่างทั้งหมดได้ ตามปกติแล้วการแตกร้อนจะเกิดตามแนวรัศมี (คล้ายกับซี่ล้อรถ) ที่บริเวณขอบแนวเชื่อมหรือรอบ ๆ บ่อหลอมละลาย (Weld Pool) และบริเวณ HAZ ปริมาณค่าเฉลี่ยของความสามารถในการเชื่อมของชิ้นงาน จะได้จากจำนวนชิ้นงานตัวอย่างที่ทำทดสอบและค่าเฉลี่ยของผลรวมความยาวของรอยแตกหรือความยาวรอยแตกที่ยาวที่สุด นอกจากนี้แล้ว วิธีการทดสอบแบบ Vareststraint Test ยังใช้ทดสอบหาความไวต่อการแตกร้อนของวัสดุเติม (Filler Material) ได้ด้วย โดยการเติมลวดเติม (Filler Wire) ลงบนแผ่นชิ้นงาน (เช่น ในกระบวนการเชื่อม GMAW) และหลังจากนั้นก็ทำการตัดแต่ง (Machining) ผิวหน้าชิ้นงานให้เรียบ การทดสอบแบบ Vareststraint Test ยังสามารถทดสอบด้วยกระบวนการเชื่อมทิกได้อีก ซึ่งใช้ทดสอบในการประเมินผลกระทบของอัตราเจือ (Dilution) ระหว่างโลหะชิ้นงานกับวัสดุเติมในการเกิดความไวต่อการแตกร้อน

นอกจากนี้การทดสอบแบบ Vareststraint Test ยังสามารถทำการทดสอบในลักษณะอื่นได้ คือ Trans Vareststraint Test ซึ่งทิศทางการตัดชิ้นงานและทิศทางการเชื่อมก็จะเปลี่ยนไปจากทิศทางตามยาว (Longitudinal) โดยจะเชื่อมตามขวางชิ้นงานและแรงที่กระทำกับชิ้นงานก็จะเปลี่ยนจากแรงคดเป็นแรงดึง การทดสอบแบบนี้มักจะเกิดการแตกบริเวณตรงกลางแนวเชื่อม (Centerline Cracks) และความยาวของรอยแตกจะเป็นเครื่องวัดความไวต่อการแตกร้อน (Hot Crack Susceptibility)

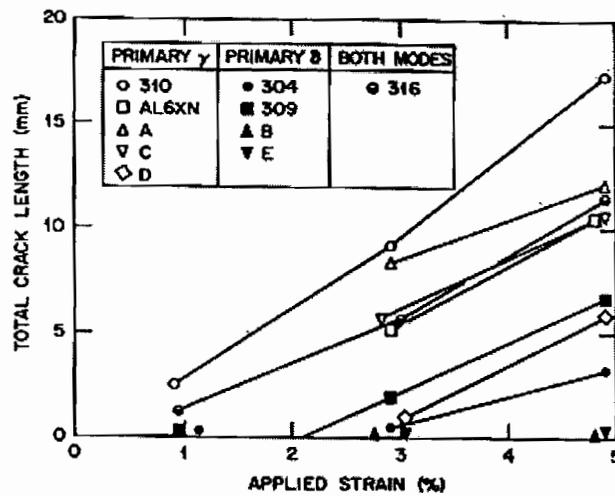
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Kujanpaa, and White [9] ได้ทำการศึกษาเรื่อง “Formation of Hot Cracking in Austenitic Stainless Steel Welds-Solidification Cracking” โดยศึกษาความไวต่อการแตกร้อนของเหล็กกล้า สแตนเลสเกรด 304 , 309 , 310 และ 316 ตามลำดับ โดยการเชื่อมจุด (Spot) ด้วยกระบวนการเชื่อม TIG ใช้กรรมวิธีการทดสอบความไวต่อการแตกร้อนแบบ Spot-Vareststraint or Tigamajig Test ผลการทดลองสรุปว่า ผลรวมของความยาวรอยแตกจะมากขึ้นถ้าเปอร์เซ็นต์ความเครียดเพิ่มขึ้น ซึ่งก็หมายถึง ถ้าความเครียดมากขึ้นความไวต่อการแตกก็มีมากขึ้น

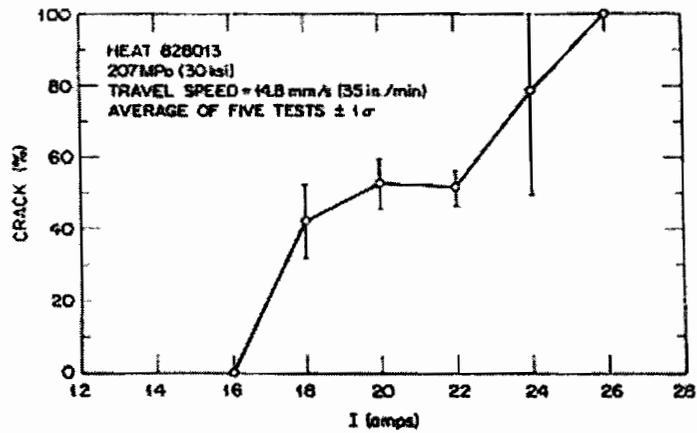
Goodwin [10] ได้ทำการศึกษาเรื่อง “The Effects of Heat Input and Weld Process on Hot Cracking in Stainless Steel” โดยศึกษาถึงฟังก์ชันที่มีผลต่อกระบวนการเชื่อม (Welding Process) และค่าของตัวแปร (Parameter Variation) ที่มีผลต่อการแตกร้อนของแนวเชื่อม ซึ่งใช้กระบวนการเชื่อม Gas Tungsten Arc (GTA) Electron Beam (EB) และ Pulsed Solid-State Laser Beam (LB) ทำการเชื่อมบน

ชิ้นงาน 316 Stainless Steel ใช้กรรมวิธีการทดสอบความไวต่อการแตกร่อนแบบ Sigmajig Test โดยผลสรุปการทดสอบของกระบวนการเชื่อม GTA คือ ถ้ากระแสไฟเชื่อมมากขึ้นหรือความเร็วในการเชื่อม (Travel Speed) ลดลง การแตกของแนวเชื่อมก็จะมากขึ้นและผลสรุปทั้งกระบวนการเชื่อม GTA , EB และ LB คือ ถ้า Heat Input เพิ่มขึ้น การแตกของแนวเชื่อมก็จะเพิ่มมากขึ้นด้วย

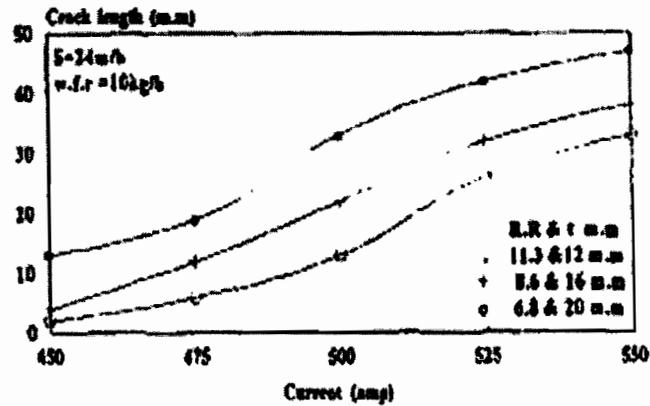
Khallaf, Ibrahim, Mahallawy and Taha [11] ได้ทำการศึกษาเรื่อง “On Crack Susceptibility in Submerged Arc Welding of Medium-Carbon Steel Plate” โดยศึกษาพฤติกรรมการแตกของเหล็กคาร์บอนปานกลาง (Medium Carbon Steel) ในระหว่างการเชื่อมใต้ฟลักซ์ (SAW) ใช้กรรมวิธีการทดสอบแบบ Trans-Varestraint Test โดยผลสรุปการทดสอบว่า ความไวในการแตกจะลดลง ถ้ากระแสไฟเชื่อมลดลง และถ้าความเร็วการเชื่อมหรือความเร็วการป้อนลวดมีอัตราเพิ่มขึ้น จะมีพฤติกรรมที่สัมพันธ์กับการแปรเปลี่ยนของค่าความร้อนที่ให้กับชิ้นงาน (Heat Input) อัตราการเจือของน้ำโลหะ (Dilution Ratio) การหลอมลึก (Penetration) และปริมาณคาร์บอนในแนวเชื่อม



รูปที่ 2.6 ผลรวมความยาวของแต่ละวัสดุกับความเครียด [9]



รูปที่ 2.7 รอยแตกที่เกิดจากกระแสไฟเชื่อมคงที่กับอัตราการเร็วการเคลื่อนที่ของลวดเชื่อม [10]



รูปที่ 2.8 ผลกระทบจากกระแสที่ส่งผลกับความยาวรอยแตกของความหนาที่แตกต่างกันของเหล็กแผ่นและอัตราการลดลงที่ต่างกัน [11]

บทที่ 3 การดำเนินการทดลอง

3.1 การจัดเตรียมเครื่องมืออุปกรณ์

เครื่องมืออุปกรณ์ ในการทดลองครั้งนี้ จะมีเครื่องมืออุปกรณ์และวัสดุที่จะใช้ในการทดสอบ ดังนี้

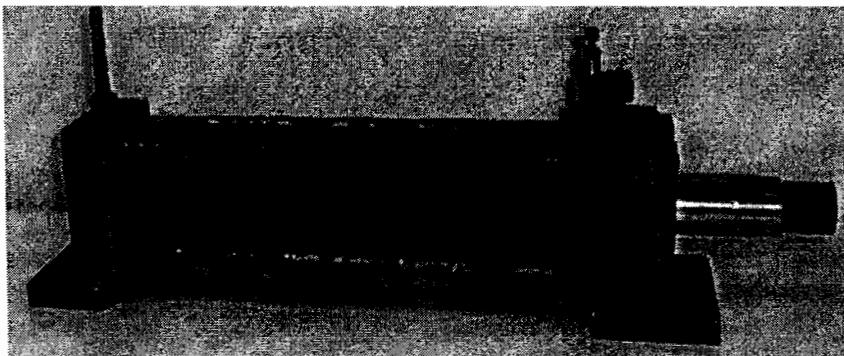
1. ชุดกดชิ้นงานทดสอบให้โค้งตามรัศมีของ Die Block โดยใช้ระบบนิวเมติก
2. Die Block
3. ชิ้นงานทดสอบ
4. ลวดเค็ม
5. เครื่องมือวัดค่ากระแสไฟเชื่อมและแรงดันไฟฟ้าขณะเชื่อม
6. เครื่องเชื่อมและอุปกรณ์การเชื่อมทิก
7. อุปกรณ์ตรวจสอบและวัดความยาวของรอยแตก

ในจำนวนเครื่องมือ อุปกรณ์และวัสดุทั้ง 7 รายการนี้มีอยู่ 2 รายการ ที่จะต้องจัดสร้างขึ้นมา คือ รายการที่ 1 ชุดกดชิ้นงานทดสอบ และรายการที่ 2 คือ Die Block ส่วนรายการที่ 3 ถึงรายการที่ 7 นั้น สามารถจัดซื้อได้ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

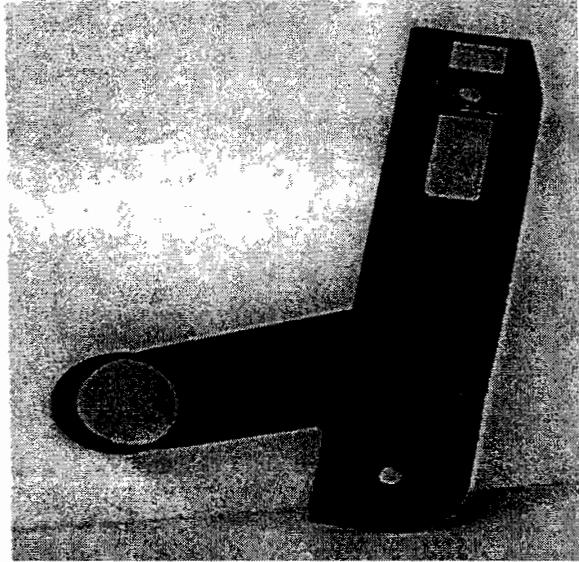
1. ชุดกดชิ้นงานทดสอบ จะประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก ๆ ดังนี้

- กระบอบอกนิวเมติก (Pneumatic) ใช้ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 60 mm. ยาว 410 mm. และขนาดแกนเส้นผ่าศูนย์กลาง 28 mm. ระยะชักของแกน 240 mm. ดังรูปที่ 3.1 ซึ่งมีขนาดที่สามารถกดชิ้นงานทดสอบให้โค้งตามรัศมี Die Block ได้

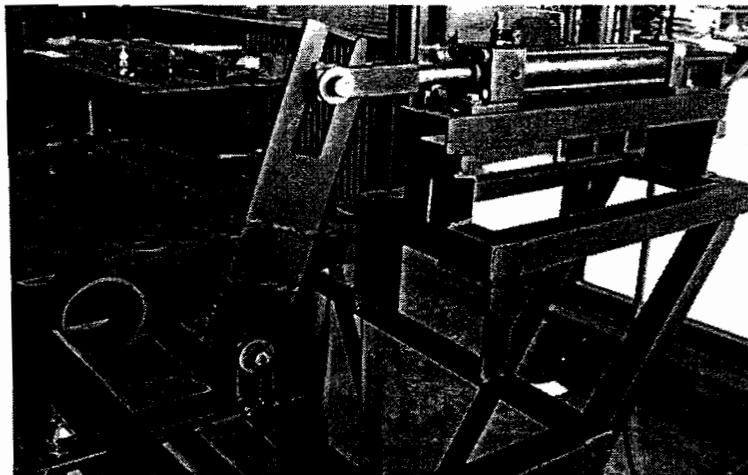
- แขนกดชิ้นงานสร้างด้วยเหล็กเส้นแบน 100×9 mm. และท่อเหล็กเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก 90 mm. ผนังท่อหนา 3.2 mm. ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.1 กระบอบอกนิวเมติก



รูปที่ 3.2 แขนกดชิ้นงาน



รูปที่ 3.3 การประกอบและติดตั้งชุดกดชิ้นงานทดสอบ

เมื่อทำการจัดสร้างแขนกดชิ้นงานและอุปกรณ์ต่าง ๆ เสร็จแล้วก็ทำการประกอบและติดตั้งชุดกดทดสอบชิ้นงานขึ้น ดังรูปที่ 3.3

2. Die Block

ในการทดลองครั้งนี้ ได้วางแผนการเชื่อม เพื่อค้นหาแนวโน้มการแตกร่อนของแนวเชื่อม ที่ค่าความเครียด 2 เปอร์เซ็นต์ ในการหารัศมีส่วนโค้งของ Die Block นั้น จะคำนวณตามสูตรของการทดสอบแบบ Vrestraint Test ดังนี้

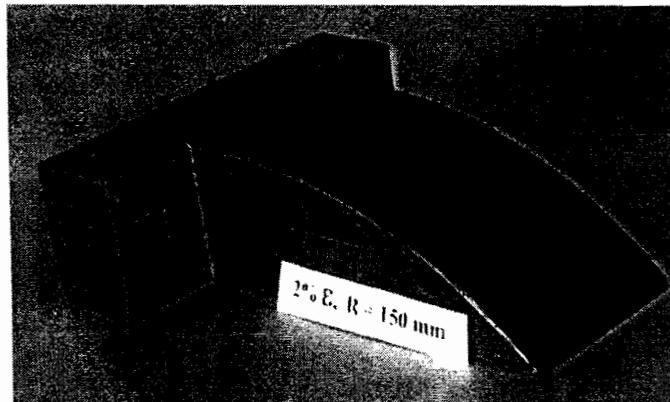
$$\%E = \frac{t}{2R} \quad ; t = 6 \text{ mm.}$$

$$R = \frac{t}{2(\%E)}$$

$$R = \frac{6}{2 \times 0.02}$$

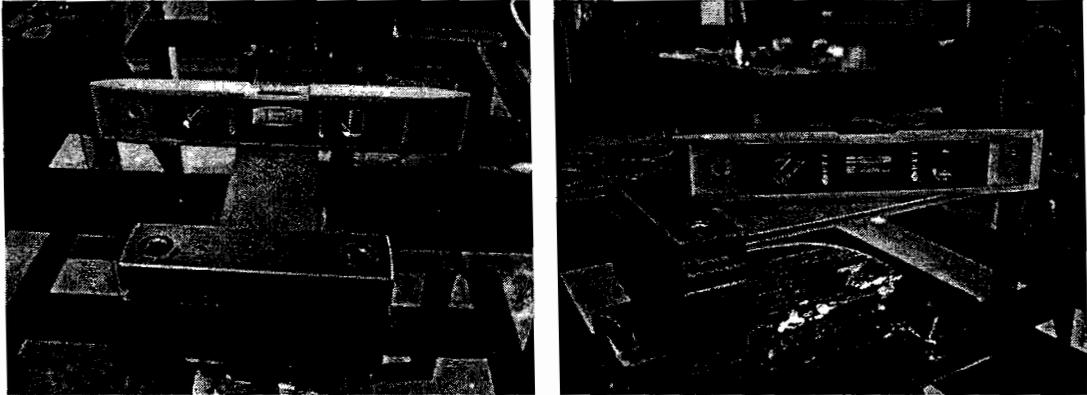
$$R = 150 \text{ mm.}$$

ดังนั้น ค่ารัศมี (R) ของ Die Block ที่ค่าความเครียด 2 เปอร์เซ็นต์ ก็เท่ากับ 150 มม. เมื่อทราบค่ารัศมีของ Die Block แล้วก็ทำการจัดสร้าง Die Block ขึ้นมา ดังรูปที่ 3.4

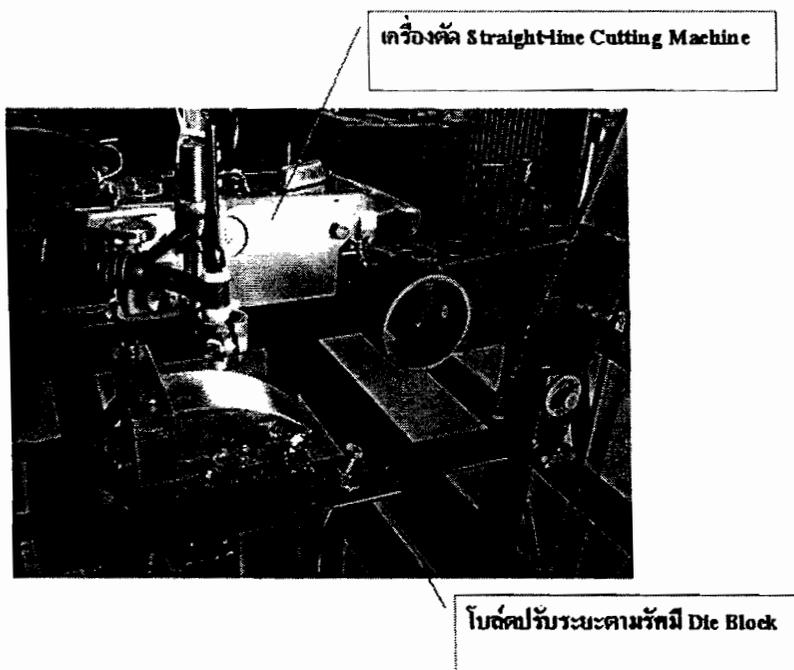


รูปที่ 3.4 Die Block ของการทดสอบที่ความเครียด 2 เปอร์เซ็นต์

เมื่อทำการขึ้นรูป Die Block เสร็จแล้ว ก็ทำการติดตั้งเข้ากับแท่นกดชิ้นงานทดสอบตามตำแหน่งที่กำหนดไว้ โดยต้องใช้ชิ้นงานทดสอบประกอบในการติดตั้งด้วย เพื่อให้ชิ้นงานทดสอบอยู่ในแนวระดับไม่เอียงไปด้านใดด้านหนึ่ง เพื่อให้การทดสอบมีความแม่นยำ ดังรูปที่ 3.5 และเมื่อติดตั้ง Die Block เรียบร้อยแล้ว จึงติดตั้งชุดควบคุมการเชื่อม ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.5 การตรวจสอบแนวระนาบ Die Block กับชิ้นงานทดสอบ



รูปที่ 3.6 ชุดทดสอบ Vareststraint Test

3. ชิ้นงานทดสอบ (Specimens)

ใช้เหล็กกล้าสแตนเลสออสเทนนิติก เกรด 304 ขนาด 50×250×6 mm. โดยมีส่วนผสมทางเคมี (จากผลการตรวจสอบด้วยเครื่อง Chemical Emission Spectrometer) ดังนี้

C	Si	Mn	P	S	Ni
0.052	0.341	1.762	0.031	0.003	8.050

Cr	Mo	Cu	Mg	Al	Ti
18.362	0.285	0.317	0.022	-	0.013
Nb	V	W	Pb		
0.016	0.013	0.016	0.017		

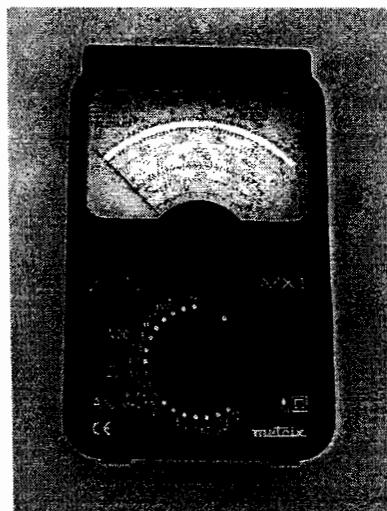
4. ลวดเติม (Filler Rod)

ใช้ลวดเติม Austenitic ER 310 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.4 mm. โดยมีส่วนผสมทางเคมี (จากใบรับรองของบริษัทผู้ผลิต) ดังนี้

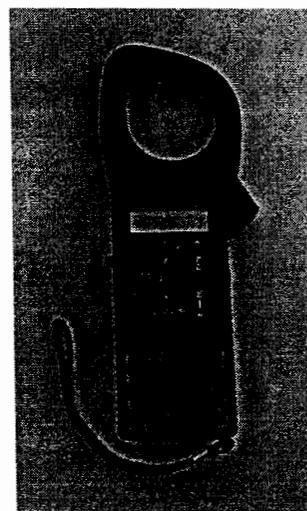
C	Mn	Si	S	P	Ni
0.120	1.670	0.350	0.001	0.020	20.900
Cr	Mo	Cu	Nb	Ti	N
25.650	0.180	0.150	0.010	0.010	0.053
Co	Al	B			
0.110	0.006	0.0009			

5. เครื่องมือวัดค่ากระแสไฟเชื่อมและแรงดันไฟฟ้าขณะเชื่อม

- ใช้ Clamp-on Meter วัดกระแสไฟเชื่อม
- ใช้ Multimeter วัดแรงดันไฟฟ้า ดังรูปที่ 3.7



(a)



(b)

รูปที่ 3.7 เครื่องมือวัดค่ากระแสไฟเชื่อมและแรงดันไฟฟ้าขณะเชื่อม (a) Multimeter (b) Clamp-on Meter

6. เครื่องเชื่อมและอุปกรณ์การเชื่อมทิก

มีส่วนประกอบหลักที่ใช้ในการทดลองดังนี้

- เครื่องเชื่อมทิก ขนาด 250 แอมแปร์
- อิเล็กโทรดทังสเตน ใช้ 2 เปรอร์เซนต์ Thoriated Tungsten Electrode โดยใช้ 2 ขนาด ตามค่า

ของกระแสไฟ คือ

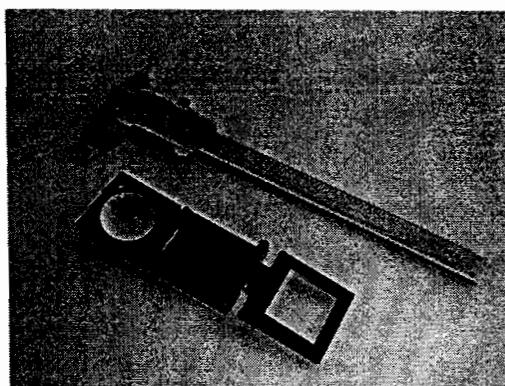
1. ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.6 mm. สำหรับกระแสไฟ 90-140 แอมแปร์
 2. ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.4 mm. สำหรับกระแสไฟ 150-180 แอมแปร์
- แก๊สปกคลุม ใช้แก๊สอาร์กอนบริสุทธิ์ 99.995 %

7. อุปกรณ์ตรวจสอบและวัดความยาวของรอยแตก

- กล้อง Zoon Stereo Microscope กำลังขยาย 4 เท่า
- เลนส์ขยายและเวอร์เนียร์คาลิปเปอร์ ดังรูปที่ 3.8



(a)



(b)

รูปที่ 3.8 อุปกรณ์ตรวจสอบและวัดความยาวรอยแตก (a) กล้อง Zoon Stereo Microscope กำลังขยาย 4 เท่า (b) เลนส์ขยายและเวอร์เนียร์คาลิปเปอร์

3.2 การปฏิบัติการทดลอง

ในการปฏิบัติการทดลองนั้น จะสุ่มหาความไวต่อการแตกร่อนที่ค่าความเครียด 2 เปอร์เซ็นต์ก่อน เพราะวรัศมีของ Die Block มีค่าน้อยมาก (150 mm.) ดังนั้นแนวโน้มที่จะเกิดการแตกร่อนของแนวเชื่อมและชิ้นงานจะมีมากกว่า ซึ่งถ้าผลการทดลองออกมา ปรากฏว่าเกิดการแตกที่ทุกค่าของกระแสไฟเชื่อม ก็จะต้องลดค่าความเครียดลงมา หรือถ้าไม่เกิดการแตกร่อนที่บางค่าของกระแสไฟเชื่อม ก็จะทำให้การเพิ่มค่าความเครียดขึ้นไป

3.2.1 การทดลองเชื่อมเพื่อสุ่มหาแนวโน้มการแตกร่อนของแนวเชื่อมและชิ้นงานที่ค่าความเครียด 2 เปอร์เซ็นต์

เงื่อนไขในการทดลอง

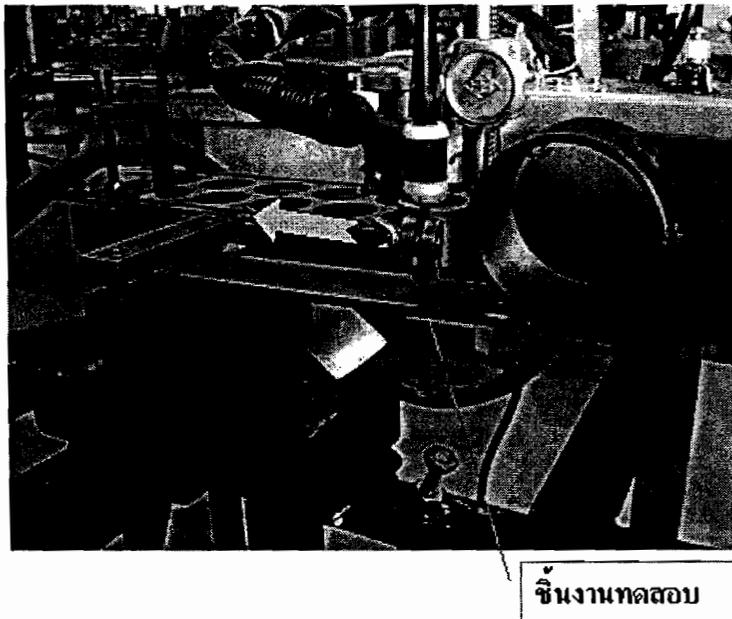
- เชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมทิก กระแสไฟเชื่อมตรง ขั้วตรง (DCEN)
- ค่ากระแสไฟเชื่อม 90 , 100 , 110 , 120 , 130 , 140 , 150 , 160 , 170 และ 180 แอมแปร์ ตามลำดับ
- ระยะอาร์ค (Arc Length) 4 mm.
- ความเร็วการเชื่อม (Welding Speed) คงที่ คือ 105 mm./min
- ป้อนลวดเชื่อมด้วยมือ
- อิเล็กโทรดทังสเตน ชนิด 2 เปอร์เซ็นต์ Thoriate Tungsten Electrode โดยใช้ 2 ขนาดตามช่วงค่ากระแสไฟเชื่อม ดังนี้
 1. เส้นผ่าศูนย์กลาง 1.6 mm. ใช้เชื่อมที่กระแสไฟเชื่อม 90-140 แอมแปร์
 2. เส้นผ่าศูนย์กลาง 2.4 mm. ใช้เชื่อมที่กระแสไฟเชื่อม 150-180 แอมแปร์
- ถ้วยครอบอิเล็กโทรดเซรามิก (Ceramic Gas Lens Nozzle) ใช้ 2 ขนาดตามขนาดของลวดเชื่อมทังสเตน คือ
 1. No. 6 (Ø 9 mm.) ใช้กับลวดเชื่อมทังสเตนเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.6 mm.
 2. No. 8 (Ø 13 mm.) ใช้กับลวดเชื่อมทังสเตนเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.4 mm.
- แก๊สปกคลุมใช้แก๊สอาร์กอนบริสุทธิ์ 99.995 เปอร์เซ็นต์

การปฏิบัติการเชื่อม

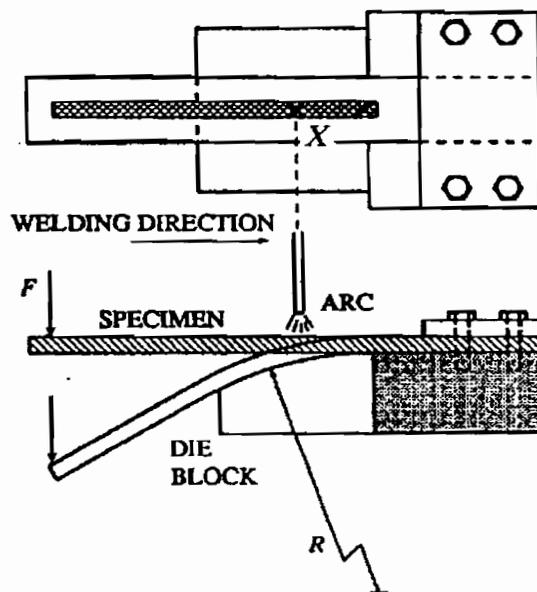
- เริ่มต้นทำการเชื่อมที่ปลายของชิ้นงานทดสอบด้านที่ติดกับแกนกด โดยมีระยะห่างจากปลายชิ้นงานประมาณ 50 mm. (ดังรูปที่ 3.9)
- ทำการวัดกระแสไฟเชื่อมและแรงดันกระแสไฟเชื่อมในขณะที่ทำการเชื่อม
- เมื่อทำการเชื่อมมาถึงตำแหน่ง X (ก่อนที่จะสิ้นสุดรัศมีโค้งของ Die Block ประมาณ 25 mm.) ก็ทำการตัดชิ้นงานทดสอบให้โค้งงอ ตามรัศมี Die Block อย่างเร็ว ด้วยนิวเมติกในขณะที่ทำการเชื่อม

(ดังรูปที่ 3.10) และทำการเชื่อมต่อไปจนเข้าสู่จุดที่เป็นเส้นตรงของ Die Block จึงหยุดทำการเชื่อม และจากการวัดความเร็วของแกนกระบอกนิวเมติกในระหว่างช่วงที่ทำการกดชิ้นงานทดสอบนั้น มีความเร็วประมาณ 80 cm./sec.

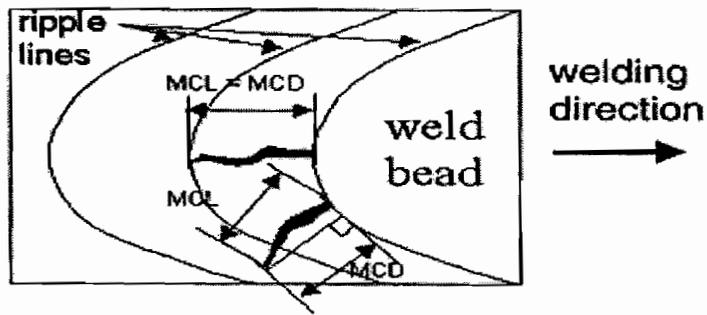
- นำชิ้นงานทดสอบไปตรวจสอบรอยแตกด้วย Visual Inspection และวัดความยาวรอยแตกที่ยาวที่สุดและผลรวมความยาวรอยแตกทั้งหมด (ดังรูปที่ 3.11) พร้อมกับบันทึกผล
- นำชิ้นงานทดสอบไปทำการตรวจสอบรอยแตกร่อนจากโครงสร้างทางโลหะวิทยา (ดังรูปที่ 3.12)



รูปที่ 3.9 ตำแหน่งชิ้นงานพร้อมทำการเชื่อมทดลอง

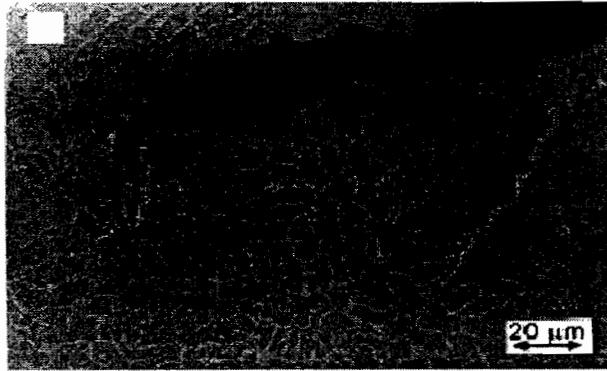


รูปที่ 3.10 ทิศทางการเชื่อมและตำแหน่งที่ให้แรงกดชิ้นงานทดสอบ [12]



MCL = Maximum Crack Length MCD = Maximum Crack Distance

รูปที่ 3.11 การวัดความยาวรอยแตก [6]



รูปที่ 3.12 โครงสร้างจุลภาคของรอยแตกร้อนเหล็กกล้าสแตนเลส เกรด 316L [6]

บทที่ 4 ผลการทดลอง

4.1 ผลที่ได้จากการทดลอง

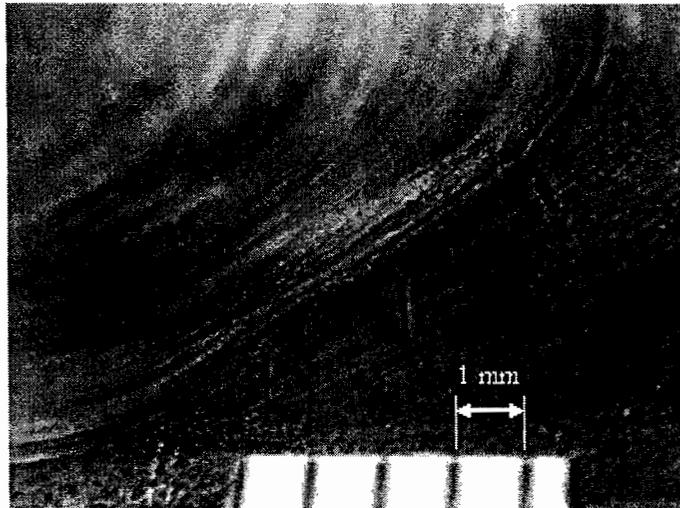
จากการทดลองที่ค่าความเครียดและกระแสไฟเชื่อมต่าง ๆ ได้ผลการทดลองดังนี้

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองที่ค่าความเครียด 2 %

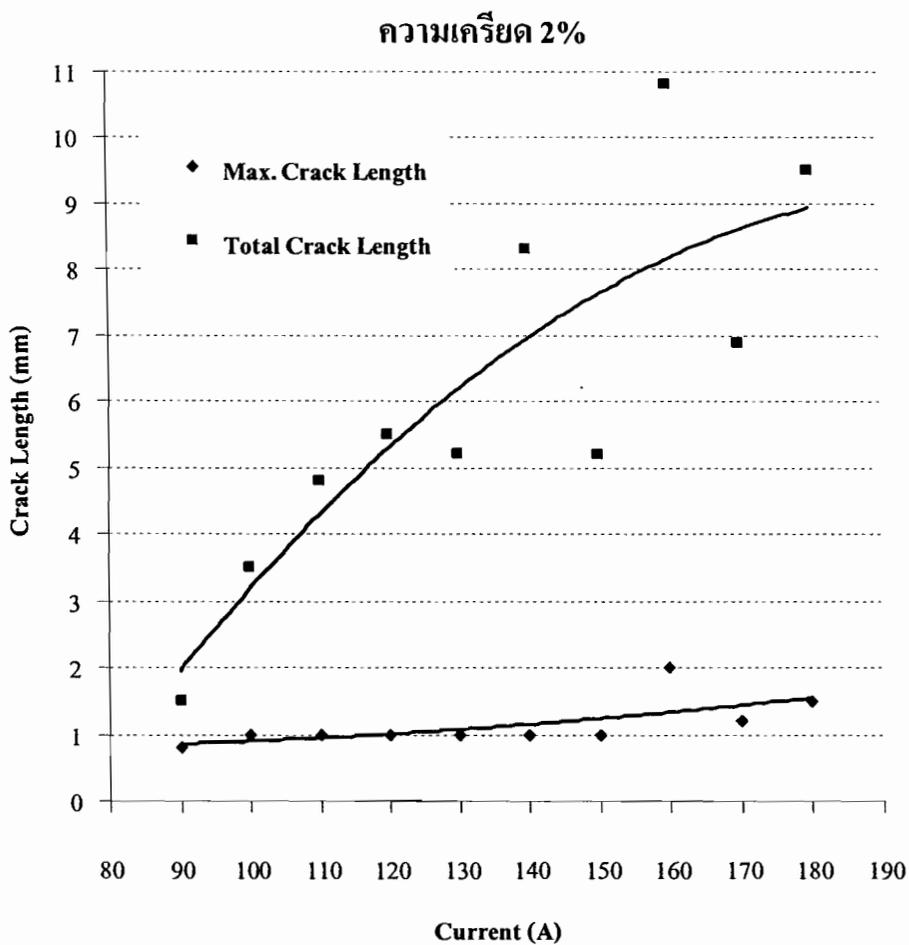
Current (A)	Volt (V)	Heat input (kJ/mm.)	Max. Crack length (mm.)	Total Crack length (mm.)
90	11.5	0.414	0.80	1.50
100	12.1	0.484	1.00	3.50
110	12.3	0.541	1.00	4.80
120	12.8	0.614	1.00	5.50
130	13.3	0.692	1.00	5.20
140	13.7	0.767	1.00	8.30
150	14.2	0.852	1.00	5.20
160	14.5	0.928	2.00	10.80
170	15.4	1.047	1.20	8.70
180	16.1	1.159	1.50	9.50

หมายเหตุ ความยาวของรอยแตกเป็นค่าความยาวโดยประมาณที่ใกล้เคียงที่สุด

ผลการทดลองที่ความเครียด 2 เปอร์เซ็นต์ ปรากฏว่าเกิดการแตกที่ทุกค่าของกระแสไฟเชื่อม (Welding Current) และทุกค่าของปริมาณความร้อนที่เข้าไปในแนวเชื่อม (Heat Input) ความยาวของรอยแตกที่ยาวที่สุด (Maximum Crack Length) จะมากขึ้นเรื่อย ๆ และสูงสุดที่กระแสไฟเชื่อม 160 แอมแปร์ ส่วนผลรวมของความรอยแตกทั้งหมด (Total Crack Length) จะมีค่ามากและน้อยแตกต่างกันเป็นช่วง ๆ ผลรวมความยาวรอยแตกสูงสุดอยู่ที่กระแสไฟเชื่อม 160 แอมแปร์

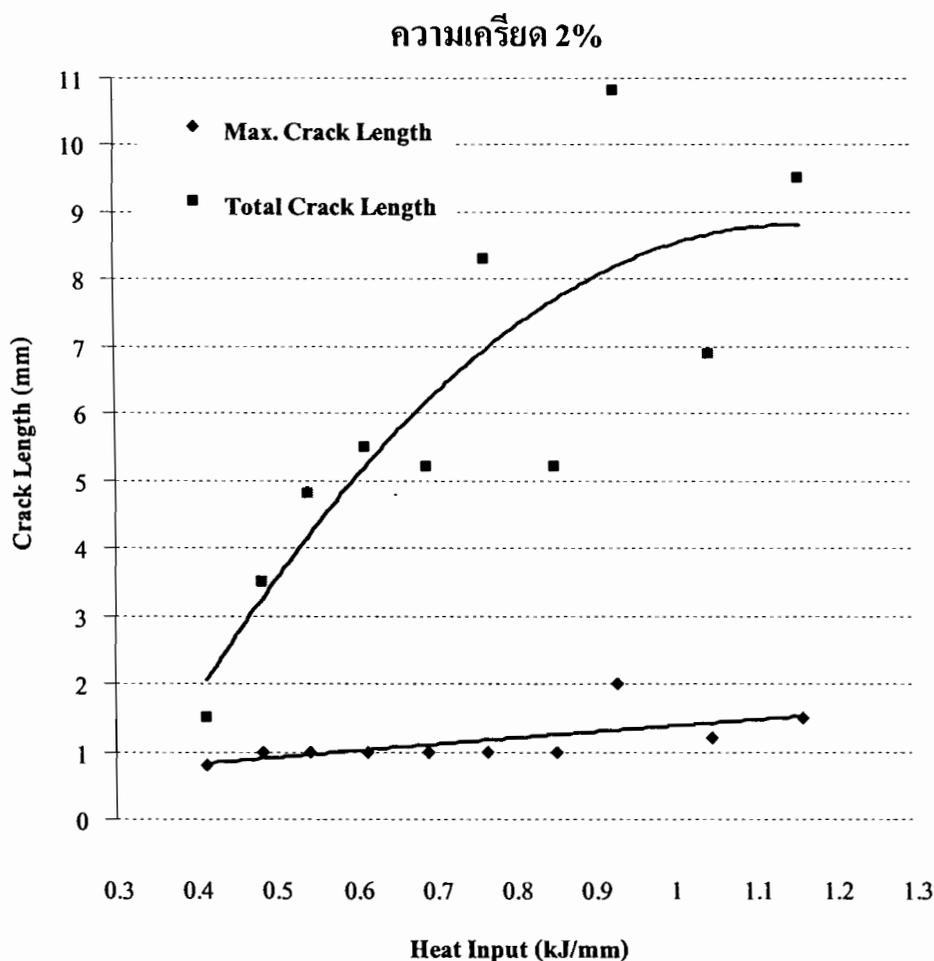


รูปที่ 4.1 ลักษณะรอยแตกที่กระแสไฟเชื่อม 170 แอมแปร์ ที่ความเครียด 2 %



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟเชื่อมกับความยาวรอยแตกที่ความเครียด 2 %

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟกับความยาวรอยแตกที่ความเครียด 2 เปอร์เซ็นต์ จะเห็นว่าความยาวของรอยแตกที่ยาวที่สุดจะมากขึ้นเรื่อย ๆ และสูงสุดที่กระแสไฟเชื่อม 160 แอมแปร์ และจะลดลงที่กระแสไฟเชื่อม 170 แอมแปร์ หลังจากนั้นความยาวของรอยแตก ก็จะเริ่มสูงขึ้นอีกครั้ง ส่วนผลรวมของความรอยแตกทั้งหมดก็มีลักษณะคล้ายกัน คือ ผลรวมของความยาวรอยแตกทั้งหมด จะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนถึงค่ากระแสไฟ 120 แอมแปร์ และจะลดลงที่กระแสไฟ 130 แอมแปร์ แล้วก็สูงขึ้นอีกที่กระแสไฟ 140 แอมแปร์ และลดลงที่ 150 แอมแปร์ ความยาวรอยแตกทั้งหมด จะสูงที่สุดที่กระแสไฟ 160 แอมแปร์ และจะลดลงที่ 170 แอมแปร์ หลังจากนั้นจึงจะเริ่มสูงขึ้นอีกครั้งหนึ่ง ซึ่งจะเห็นได้ว่า ความยาวสูงสุดของรอยแตกกับผลรวมของความยาวรอยแตกทั้งหมดนั้น จะเกิดขึ้นที่กระแสไฟ 160 แอมแปร์ เหมือนกัน



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Heat Input กับความยาวรอยแตกที่ความเครียด 2 %

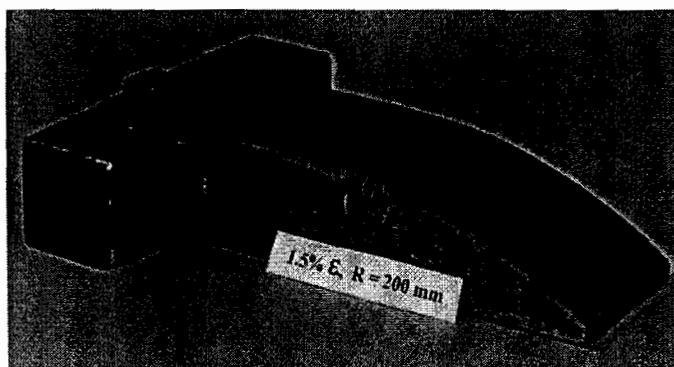
กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความร้อนที่เข้าไปในชิ้นงาน กับความยาวรอยแตกที่ความเครียด 2 เปอร์เซ็นต์ ก็เหมือนกันกับกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟกับความยาวรอยแตก ที่ความเครียด 2 เปอร์เซ็นต์ เพียงแต่เปลี่ยนจากค่ากระแสไฟ ไปเป็นค่าความร้อนที่ใส่เข้าไปในชิ้นงานเท่านั้น ความยาวรอยแตกที่มากที่สุด และผลรวมของความยาวรอยแตกทั้งหมดที่มากที่สุด จะเกิดขึ้นที่ค่าความร้อนที่เข้าไปในชิ้นงาน 0.928 kJ/mm. ตัวอย่างรอยแตก ดังแสดงในรูปที่ 4.1

จากผลการทดลองที่ความเครียด 2 เปอร์เซ็นต์ ปรากฏว่าแนวเชื่อมเกิดการแตกที่ทุกค่าของกระแสไฟ เชื่อม ดังนั้นจึงได้ข้อสรุปว่า จะต้องลดค่าความเครียดลงดังนี้คือ 1.5 , 1 , 0.5 และ 0.4 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ โดยมีรัศมีของ Die Block ที่ได้จากการคำนวณ ดังนี้

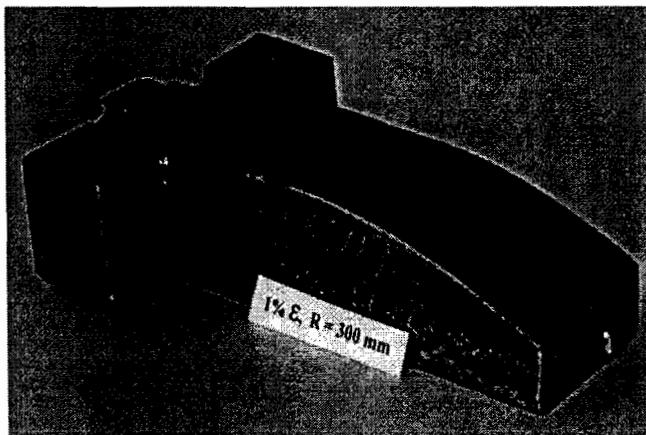
ค่ารัศมี (R) ของ Die Block ที่คำนวณได้จากสูตร

ความเครียด (%)	รัศมี (mm.)
1.5	200
1	300
0.5	600
0.4	750

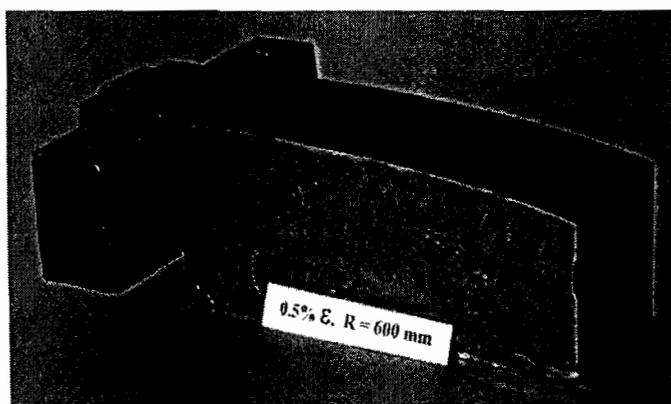
เมื่อทราบค่ารัศมีของ Die Block แล้วจึงเริ่มจัดสร้าง Die Block ดังรูปที่ 4.4 , 4.5 , 4.6 และรูปที่ 4.7 ตามลำดับ เพื่อทำการทดลองในขั้นต่อไป



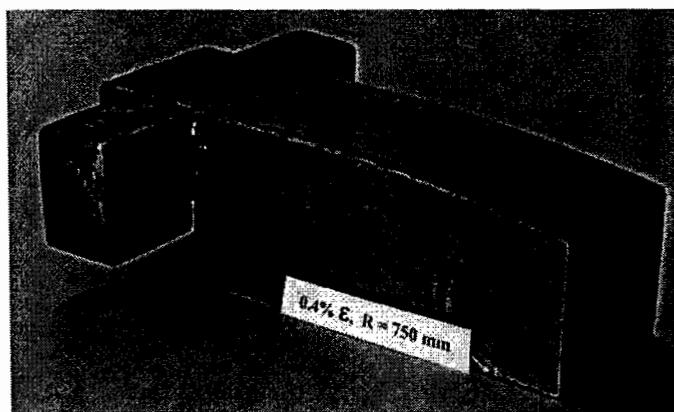
รูปที่ 4.4 Die Block ที่ความเครียด 1.5 %



รูปที่ 4.5 Die Block ที่ความเอียง 1 %



รูปที่ 4.6 Die Block ที่ความเอียง 0.5 %



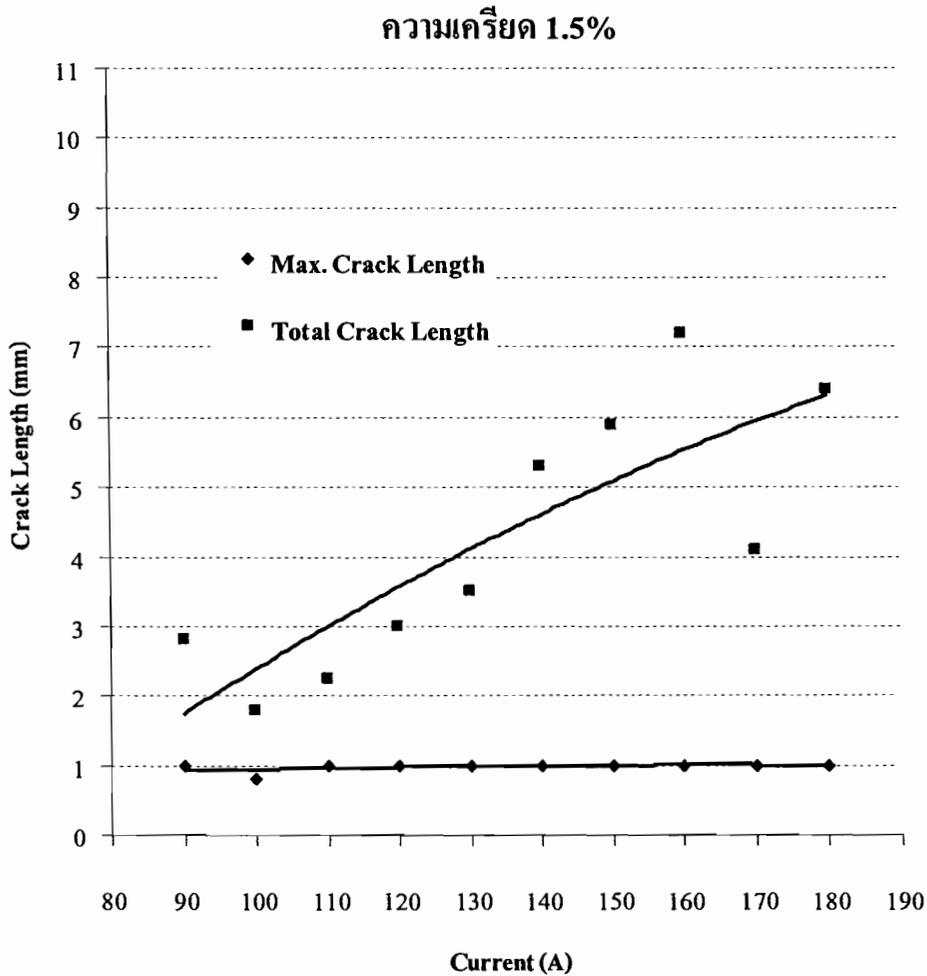
รูปที่ 4.7 Die Block ที่ความเอียง 0.4 %

ตารางที่ 4.2 ผลการทดลองที่ค่าความเครียด 1.5 %

Current (A)	Volt (V)	Heat Input (kJ/mm.)	Max. Crack length (mm.)	Total Crack length (mm.)
90	11.5	0.414	1.00	2.80
100	11.7	0.468	0.80	1.80
110	11.8	0.519	1.00	2.25
120	12.4	0.595	1.00	3.00
130	13.0	0.676	1.00	3.50
140	13.7	0.767	1.00	5.30
150	14.7	0.882	1.00	5.90
160	13.8	0.883	1.00	7.20
170	14.6	0.993	1.00	4.10
180	15.2	1.094	1.00	6.40

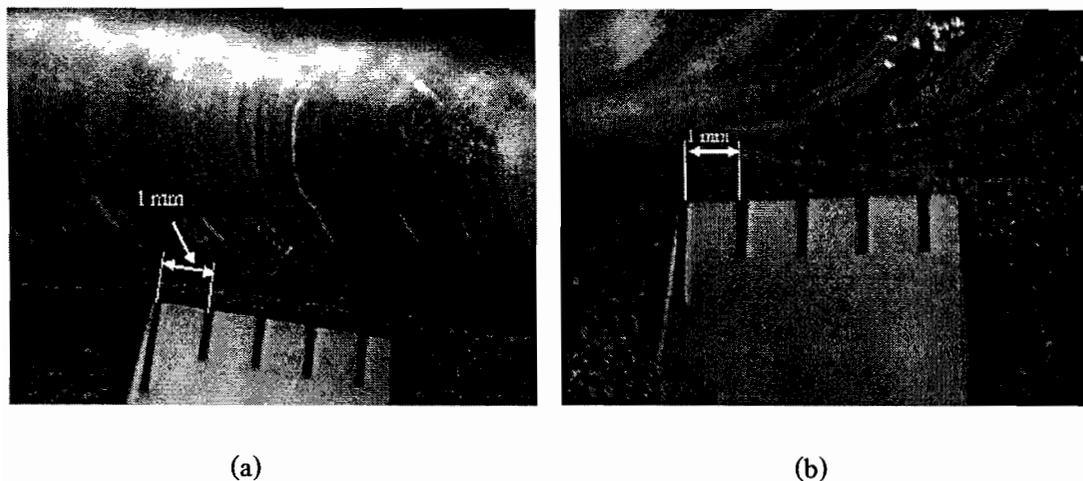
หมายเหตุ ความยาวของรอยแตกเป็นค่าความยาวโดยประมาณที่ใกล้เคียงที่สุด

ผลการทดลองที่ความเครียด 1.5 เปอร์เซ็นต์ ปรากฏว่าเกิดการแตกที่ทุกค่าของกระแสไฟเชื่อม และทุกค่าของปริมาณความร้อนที่เข้าไปในแนวเชื่อม ความยาวของรอยแตกที่ยาวที่สุด จะมีความยาวประมาณเท่า ๆ กัน ส่วนผลรวมของความยาวรอยแตกทั้งหมด ก็มีลักษณะคล้ายกัน คือ ผลรวมของความยาวรอยแตกทั้งหมดจะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนมีค่าสูงสุดที่กระแสไฟ 160 แอมแปร์ และจะลดลงที่ 170 แอมแปร์ หลังจากนั้นผลรวมความยาวของรอยแตกทั้งหมด ก็จะเริ่มเพิ่มขึ้นอีกครั้ง

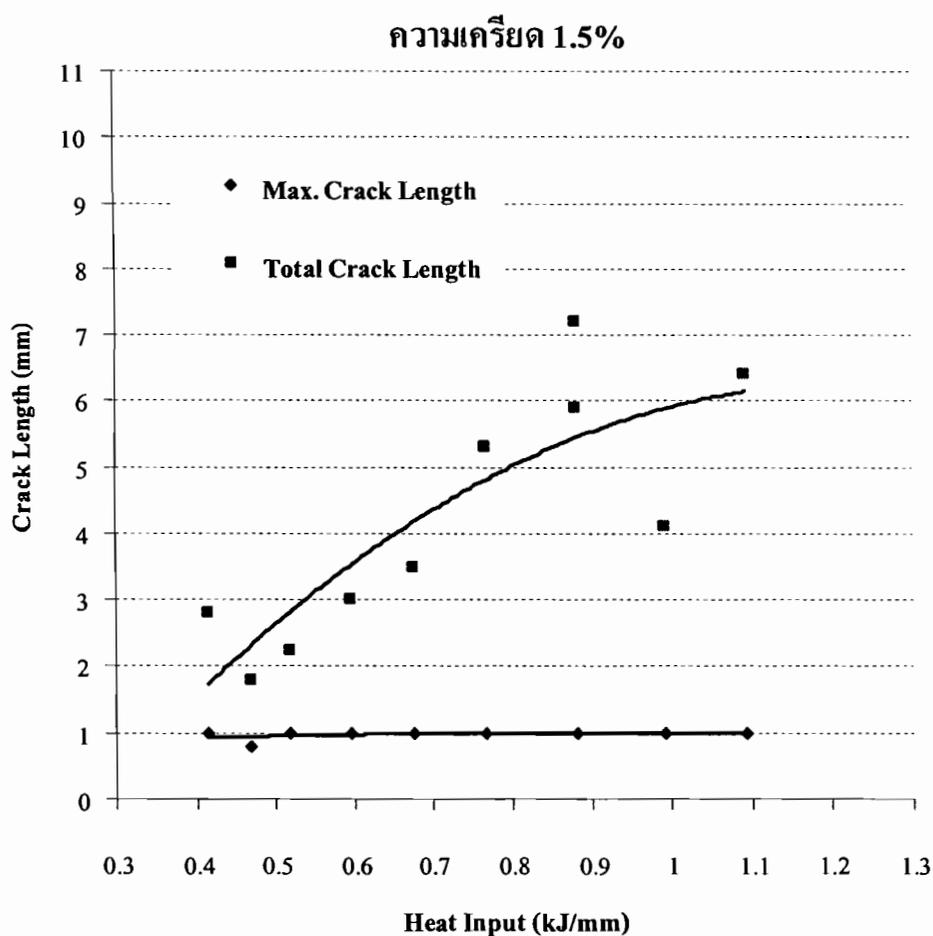


รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟเชื่อมกับความยาวรอยแตกที่ความเครียด 1.5 %

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟเชื่อมกับความยาวรอยแตกที่ความเครียด 1.5 เปอร์เซ็นต์ จะเห็นว่า ความยาวของรอยแตกที่ยาวที่สุดของกระแสไฟเชื่อม 100 แอมแปร์ จะลดน้อยลงกว่าค่ากระแสไฟเริ่มต้นและหลังจากนั้นความยาวรอยแตกที่ยาวที่สุด จะมีความยาวมากขึ้นและจะมีความยาวเท่า ๆ กันจนถึงกระแสไฟเชื่อม 180 แอมแปร์ ส่วนผลรวมของความรอยแตกจะเห็นว่ากระแสไฟเชื่อม 100 แอมแปร์ จะลดน้อยลงกว่าค่ากระแสไฟเริ่มต้นและหลังจากนั้นผลรวมความยาวรอยแตกจะมากขึ้นเรื่อย ๆ และสูงสุดที่กระแสไฟเชื่อม 160 แอมแปร์ และจะลดลงที่กระแสไฟเชื่อม 170 แอมแปร์ หลังจากนั้นผลรวมความยาวของรอยแตก จึงจะเริ่มเพิ่มขึ้นอีกครั้งหนึ่ง



รูปที่ 4.9 ลักษณะรอยแตกที่ความเครียด 1.5 % (a) รอยแตกที่กระแสไฟเชื่อม 130 แอมแปร์
(b) รอยแตกที่กระแสไฟเชื่อม 170 แอมแปร์



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Heat Input กับความยาวรอยแตกที่ความเครียด 1.5 %

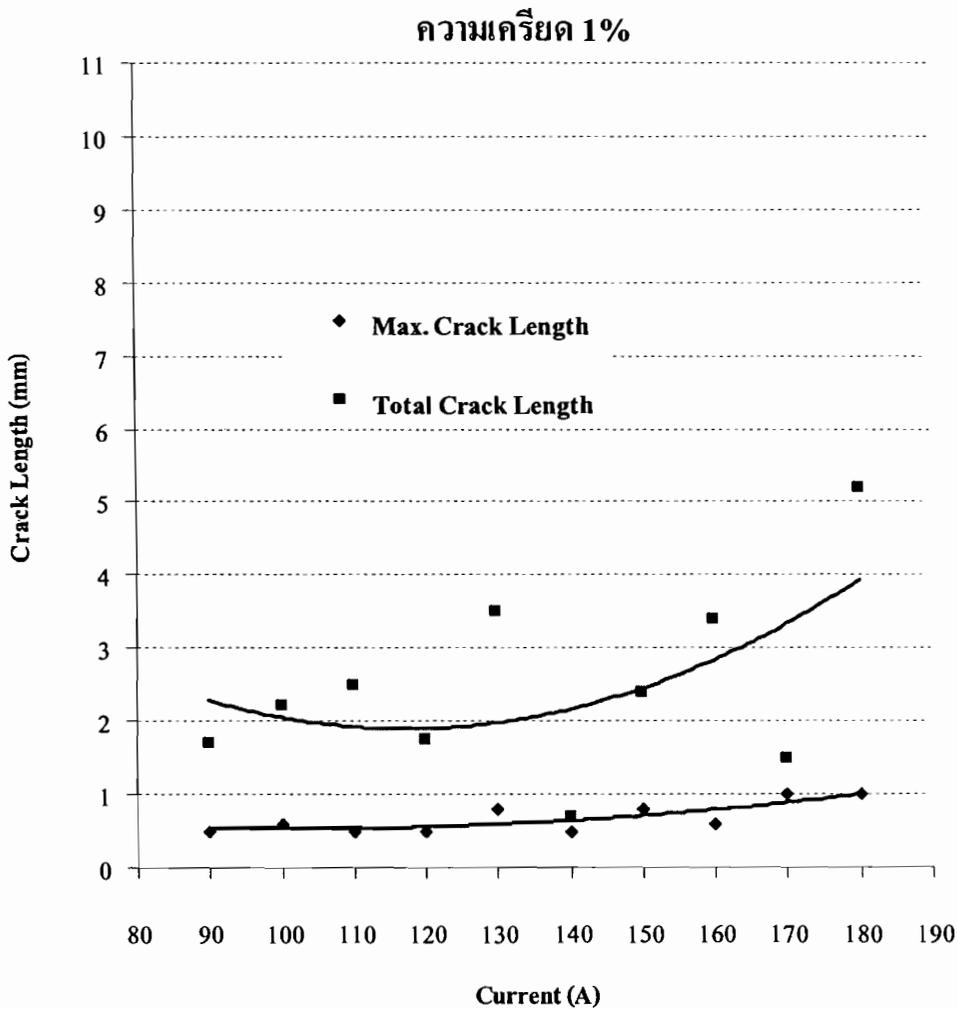
จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความร้อนที่เข้าไปในชิ้นงานกับความยาวรอยแตกที่ยาวที่สุด ที่ความเครียด 1.5 เปอร์เซ็นต์ ก็เหมือนกันกับกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟกับความยาวรอยแตกที่ความเครียด 1.5 เปอร์เซ็นต์ แต่ค่าความร้อนที่เข้าไปในชิ้นงานกับผลรวมความยาวรอยแตกที่มากที่สุด 0.883 kJ/mm. ตัวอย่างรอยแตก ดังแสดงในรูปที่ 4.9

ตารางที่ 4.3 ผลการทดลองที่ค่าความเครียด 1 %

Current (A)	Volt (V)	Heat input (kJ/mm.)	Max. Crack length (mm.)	Total Crack length (mm.)
90	11.1	0.400	0.50	1.70
100	12.3	0.492	0.60	2.20
110	12.5	0.550	0.50	2.50
120	12	0.576	0.50	1.75
130	13.6	0.676	0.80	3.50
140	14.3	0.672	0.50	0.70
150	13.2	0.792	0.80	2.40
160	15.1	0.966	0.60	3.40
170	15.6	1.061	1.00	1.50
180	16.1	1.159	1.00	5.20

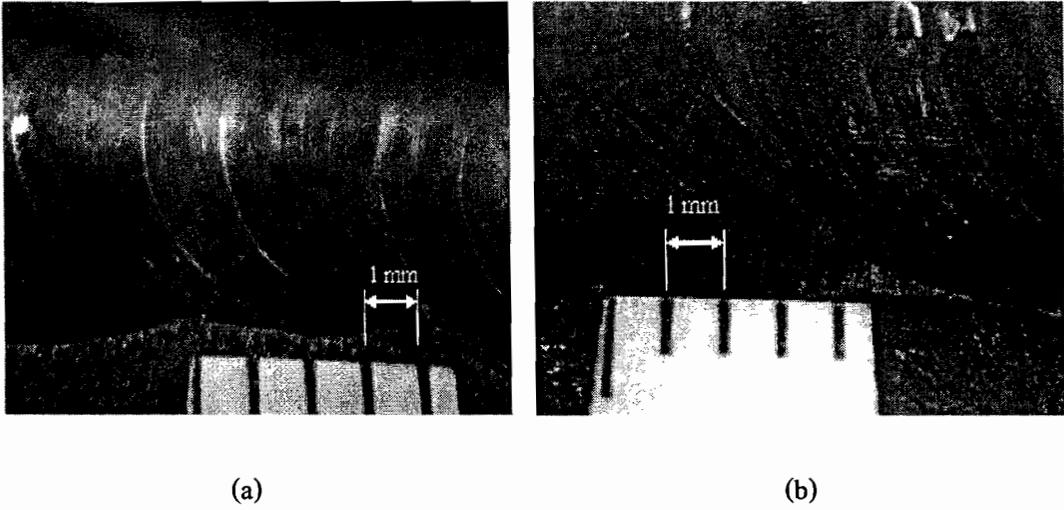
หมายเหตุ ความยาวของรอยแตกเป็นค่าความยาวโดยประมาณที่ใกล้เคียงที่สุด

ผลการทดลองที่ความเครียด 1 เปอร์เซ็นต์ ปรากฏว่าเกิดการแตกที่ทุกค่าของกระแสไฟและทุกค่าของปริมาณความร้อนที่เข้าไปในแนวเชื่อม ความยาวของรอยแตกที่ยาวที่สุด จะสูงขึ้นและลดลงที่บางช่วงของกระแสไฟเชื่อมและมากที่สุดที่ 170 และ 180 แอมแปร์ ส่วนผลรวมของความรอยแตกจะมีค่ามากขึ้นและลดลงเป็นบางช่วงเช่นเดียวกันและมีผลรวมความยาวรอยแตกสูงสุดที่กระแสไฟ 180 แอมแปร์

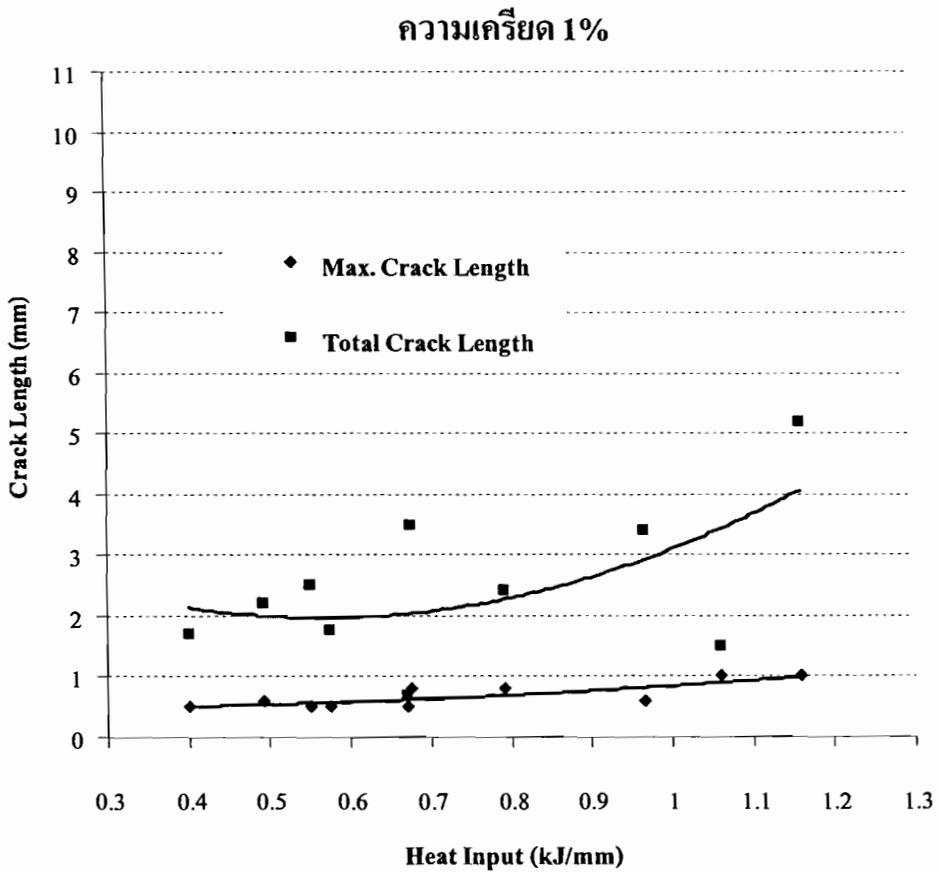


รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟเชื่อมกับความยาวรอยแตกที่ความเครียด 1 %

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟเชื่อมกับความยาวรอยแตกที่ยาวที่สุด ที่ความเครียด 1 เปอร์เซ็นต์ จะเห็นว่าความยาวของรอยแตกจะมีความแตกต่างกันเกือบทุกค่าของกระแสไฟ และที่น่าสังเกตก็คือ ที่กระแสไฟเชื่อม 140 แอมแปร์ จะมีความยาวรอยแตกเท่า ๆ กันกับกระแสไฟเชื่อม 90 , 110 และ 120 แอมแปร์ ตามลำดับ ส่วนผลรวมของความรอยแตก จะเห็นว่าผลรวมความยาวของรอยแตกของกระแสไฟเชื่อม 140 แอมแปร์ จะน้อยมาก



รูปที่ 4.12 ลักษณะรอยแตกที่ความเครียด 1 % (a) รอยแตกที่กระแสไฟเชื่อม 130 แอมแปร์
(b) รอยแตกที่กระแสไฟเชื่อม 180 แอมแปร์



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Heat Input กับความยาวรอยแตกที่ความเครียด 1 %

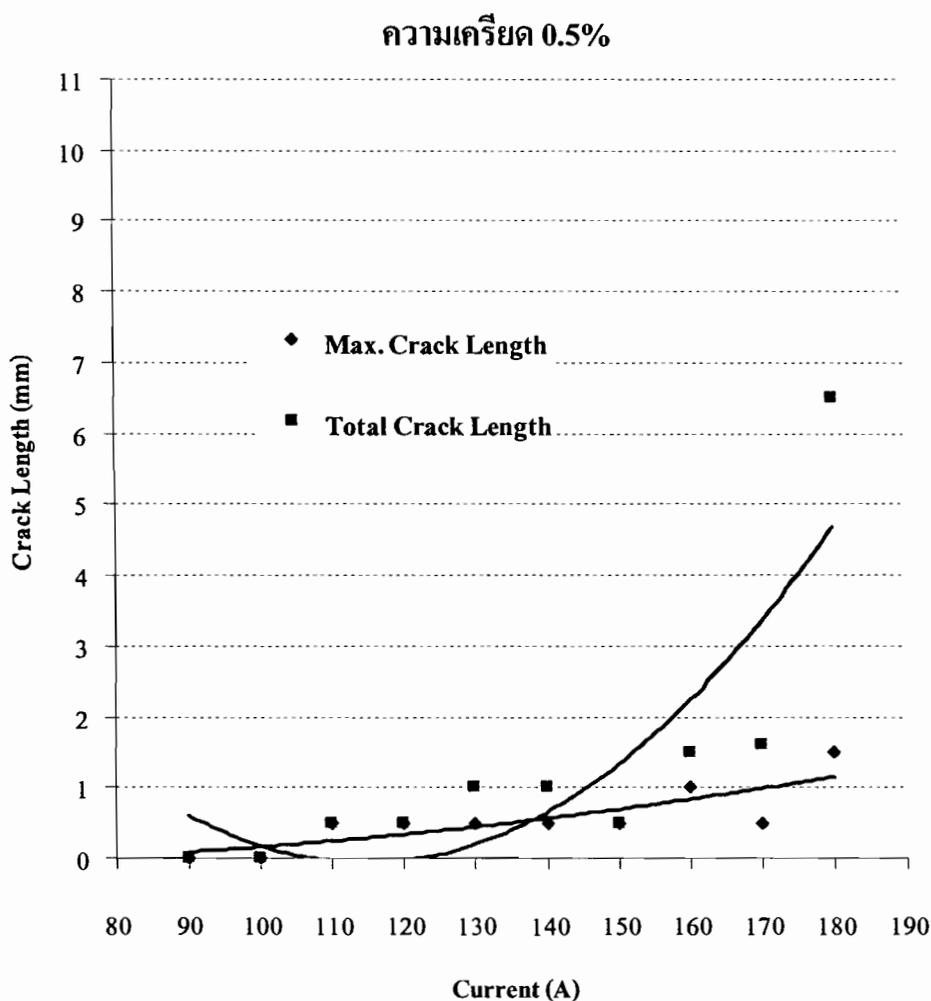
จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Heat Input กับความยาวรอยแตกที่ยาวที่สุดและผลรวมความยาวรอยแตกที่ความเครียด 1 เปอร์เซ็นต์ จะเห็นว่าที่ค่า Heat Input 0.67 kJ/mm. จะมีผลรวมความยาวรอยแตกน้อยมาก ซึ่งก็แสดงว่าเกิดการแตกล้นน้อยมาก และที่ค่า Heat Input 1.06 kJ/mm. ก็มีผลรวมความยาวรอยแตกน้อยเช่นเดียวกัน ตัวอย่างรอยแตก ดังแสดงในรูปที่ 4.12

ตารางที่ 4.4 ผลการทดลองที่ค่าความเครียด 0.5 %

Current (A)	Volt (V)	Heat Input (kJ/mm.)	Max. Crack Length (mm.)	Total Crack Length (mm.)
90	12	0.432	-	-
100	13	0.520	-	-
110	13	0.572	0.50	0.50
120	13	0.624	0.50	0.50
130	14	0.728	0.50	1.00
140	14.1	0.790	0.50	1.00
150	14.2	0.852	0.50	0.50
160	15.8	1.011	1.00	1.50
170	16.5	1.122	0.50	1.60
180	17	1.224	1.50	6.50

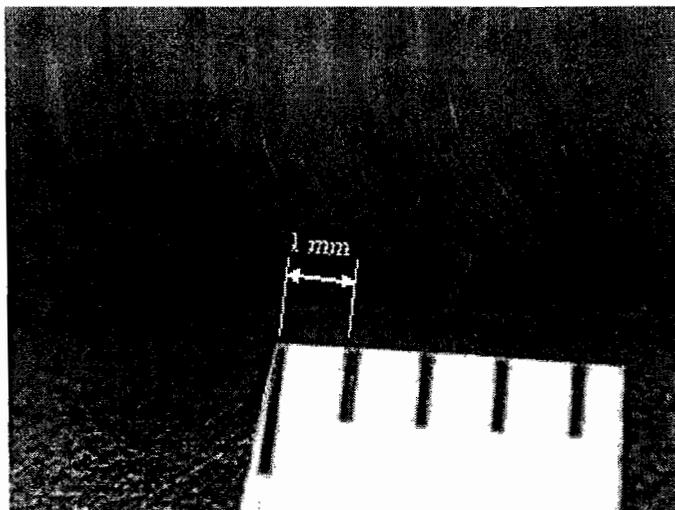
หมายเหตุ ความยาวของรอยแตกเป็นค่าความยาวโดยประมาณที่ใกล้เคียงที่สุด

จากผลการทดลองที่ค่าความเครียด 0.5 เปอร์เซ็นต์ จะไม่มีการแตกของแนวเชื่อมที่กระแสไฟเชื่อม 90 แอมแปร์ และ 100 แอมแปร์ แนวเชื่อมจะเกิดการแตกที่ 110 แอมแปร์ และที่กระแสไฟเชื่อม 180 แอมแปร์ จะมีความยาวรอยแตกยาวที่สุด คือ 1.50 mm. และมีผลรวมความยาวรอยแตกมากที่สุด คือ 6.50 mm.

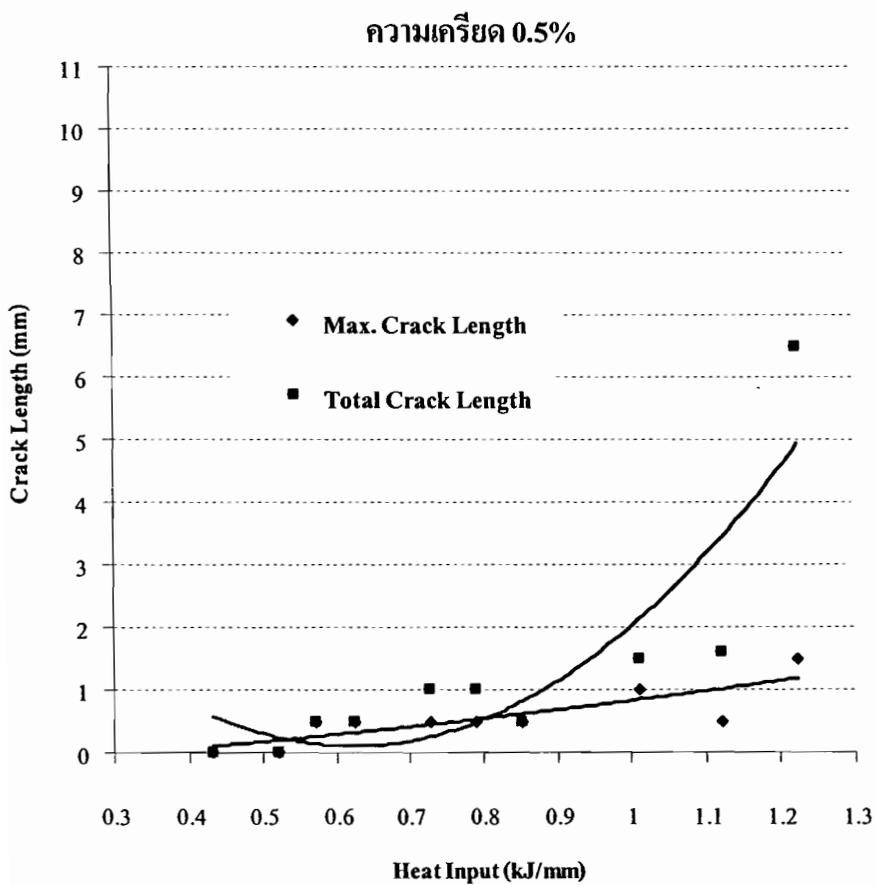


รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟเชื่อมกับความยาวรอยแตกที่ความเครียด 0.5 %

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟเชื่อมกับความยาวรอยแตกที่ยาวที่สุด ที่ความเครียด 0.5 เปอร์เซ็นต์ จะเห็นว่าที่กระแสไฟเชื่อม 90 แอมแปร์ และ 100 แอมแปร์ จะไม่เกิดการแตกของแนวเชื่อม แต่จะเห็นการแตกของแนวเชื่อมที่กระแสไฟเชื่อม 110 แอมแปร์ ความยาวของรอยแตกที่ยาวที่สุด จะมีความยาวเท่า ๆ กัน จนถึงกระแสไฟเชื่อม 150 แอมแปร์ และความยาวรอยแตกจะเพิ่มขึ้นที่กระแสไฟเชื่อม 160 แอมแปร์ และที่กระแสไฟเชื่อม 170 แอมแปร์ ความยาวรอยแตกจะลดลงและที่กระแสไฟเชื่อม 180 แอมแปร์ จะมีความยาวรอยแตกมากที่สุด ส่วนผลรวมความยาวรอยแตกนั้นที่กระแสไฟเชื่อม 110 , 120 และ 150 แอมแปร์ จะเท่า ๆ กัน และที่กระแสไฟเชื่อม 180 แอมแปร์ จะมีผลรวมความยาวรอยแตกมากที่สุด



รูปที่ 4.15 ลักษณะรอยแตกที่ความเครียด 0.5 % กระแสไฟเชื่อม 160 แอมแปร์



รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Heat Input กับความยาวรอยแตกที่ความเครียด 0.5 %

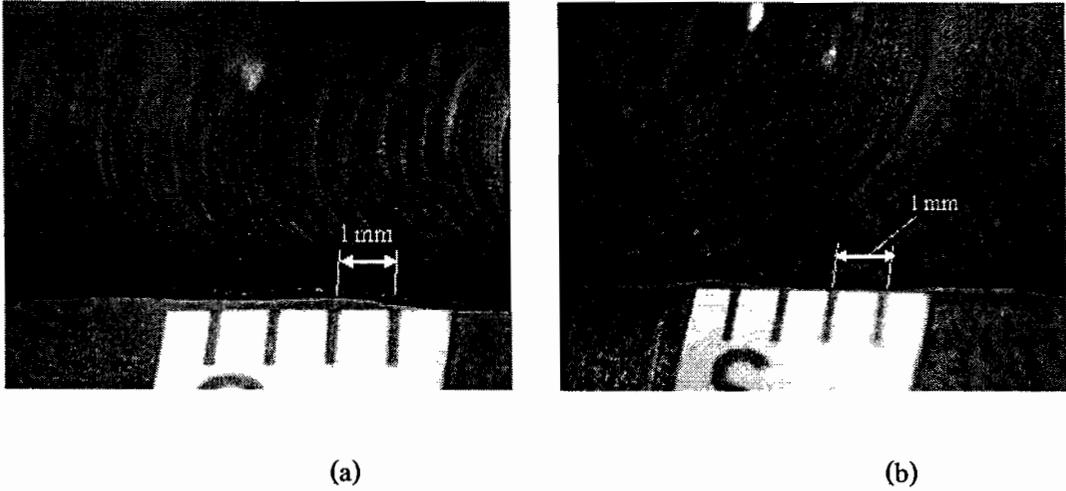
จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Heat Input กับความยาวรอยแตกที่ความเครียด 0.5 เปอร์เซ็นต์ จะเห็นว่า มีลักษณะคล้ายกับกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟเชื่อมกับความยาวรอยแตก ซึ่งที่ค่า Heat Input 0.85 kJ/mm. จะเกิดการแตกล้นน้อยกว่าค่า Heat Input ที่ต่ำกว่า ตัวอย่างรอยแตก ดังแสดงในรูปที่ 4.15

ตารางที่ 4.5 ผลการทดลองที่ค่าความเครียด 0.4 %

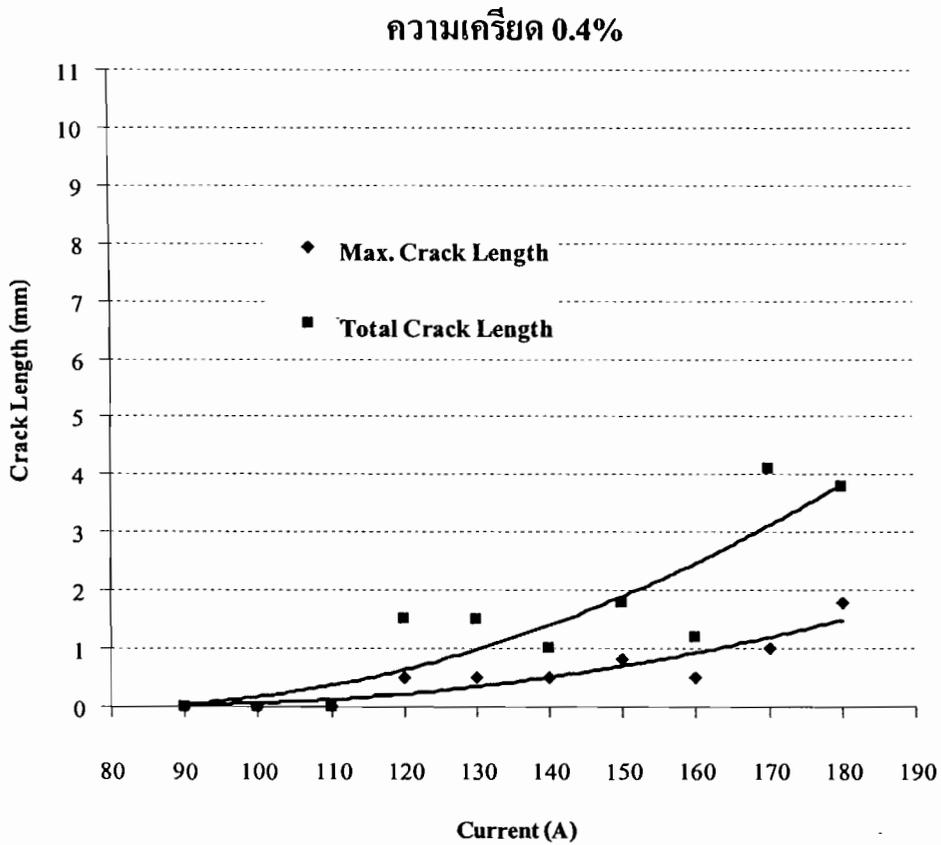
Current (A)	Volt (V)	Heat Input (kJ/mm.)	Max. Crack Length (mm.)	Total Crack Length (mm.)
90	11.4	0.410	-	-
100	12	0.480	-	-
110	12.4	0.546	-	-
120	12.7	0.610	0.50	1.50
130	13.1	0.681	0.50	1.50
140	13.4	0.750	0.50	1.00
150	14.1	0.846	0.80	1.80
160	14.4	0.922	0.50	1.20
170	15.8	1.074	1.00	4.10
180	16	1.152	1.80	3.80

หมายเหตุ ความยาวของรอยแตกเป็นค่าความยาวโดยประมาณที่ใกล้เคียงที่สุด

ผลการทดลองที่ความเครียด 0.4 เปอร์เซ็นต์ ปรากฏว่าที่กระแสไฟเชื่อม 90 , 100 และ 110 แอมแปร์ จะไม่เกิดการแตก แต่จะมีการแตกเกิดขึ้นที่กระแสไฟ 120 แอมแปร์ และความยาวรอยแตกที่มากที่สุดที่กระแสไฟเชื่อม 180 แอมแปร์ และเกิดการแตกมากที่สุดที่กระแสไฟเชื่อม 170 แอมแปร์

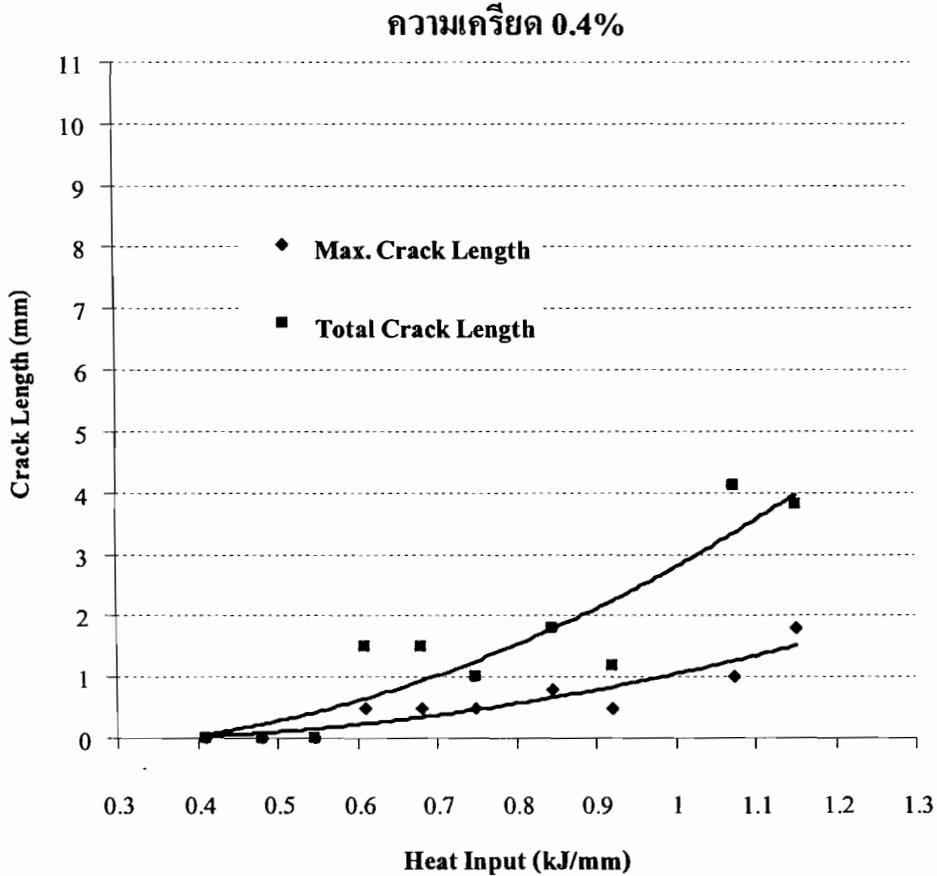


รูปที่ 4.17 ลักษณะรอยแตกที่ความเครียด 0.4 % (a) ที่กระแสไฟเชื่อม 140 แอมแปร์
(b) ที่กระแสไฟเชื่อม 180 แอมแปร์



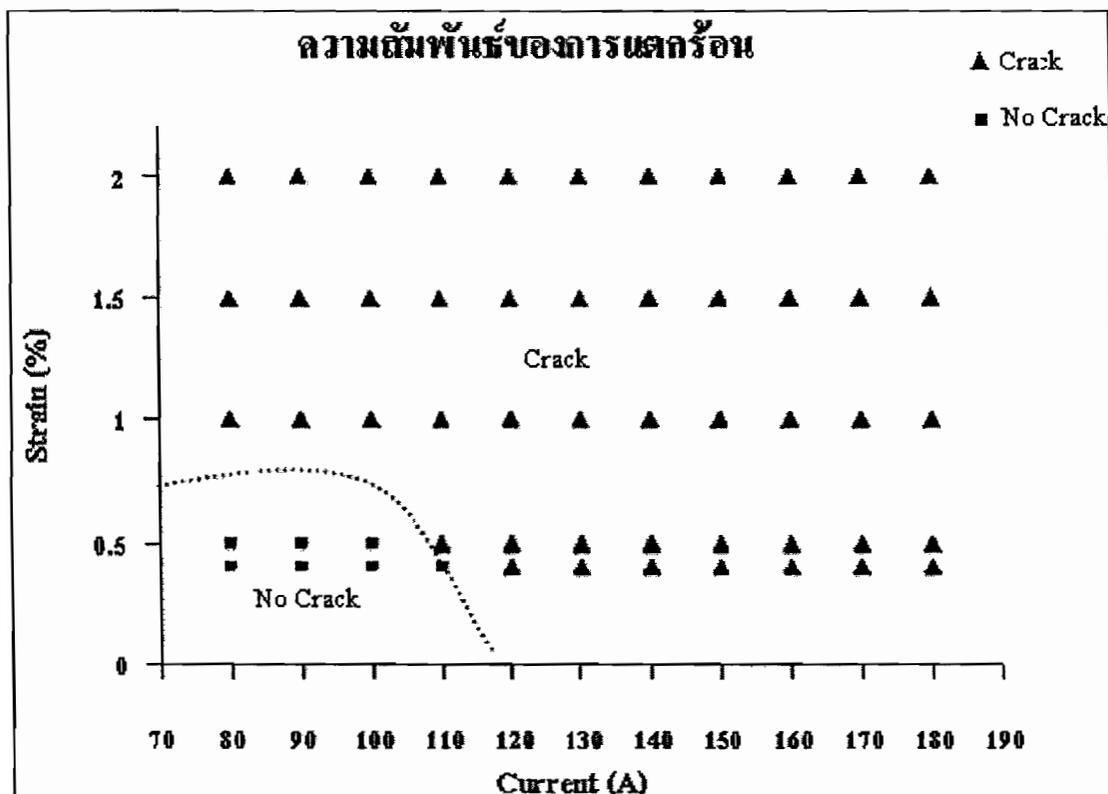
รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟเชื่อมกับความยาวรอยแตกที่ความเครียด 0.4 %

จากกราฟรูปที่ 4.18 จะเห็นว่าจะไม่มีการแตกที่กระแสไฟเชื่อม 90 , 100 และ 110 แอมแปร์ จะเริ่มมีการแตกที่กระแสไฟเชื่อม 110 แอมแปร์ และรอยแตกจะมีความยาวใกล้เคียงกันและที่กระแสไฟเชื่อม 150 แอมแปร์ รอยแตกจะมีความยาวเพิ่มขึ้นและลดลงที่กระแสไฟเชื่อม 160 แอมแปร์ และจะสูงขึ้นอีกครั้งที่กระแสไฟเชื่อม 170 แอมแปร์ ตัวอย่างรอยแตก ดังแสดงในรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Heat Input กับความยาวรอยแตกที่ความเครียด 0.4 %

จากกราฟจะเห็นได้ว่า ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Heat Input กับความยาวรอยแตกมีลักษณะเหมือนกันกับความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟเชื่อมกับความยาวรอยแตก



รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟเชื่อมกับความเครียดที่มีผลต่อการแตกร่อนของแนวเชื่อม

4.2 อภิปรายผลการทดลอง

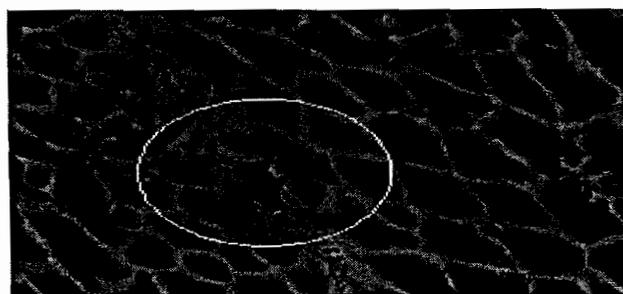
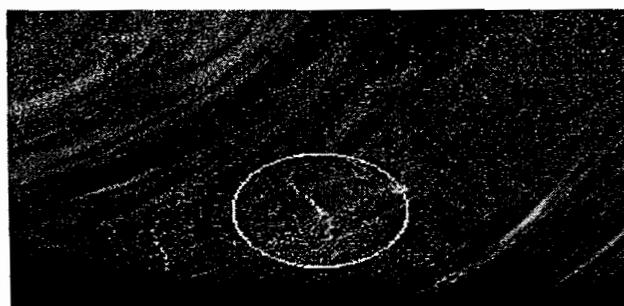
จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า ค่าของความยาวรอยแตกที่มากที่สุดของทุกค่าความเครียดนั้น จะมีค่าเพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ และหลังจากนั้น จะมีความยาวรอยแตกใกล้เคียงกันกัน ถึงแม้ว่าค่าของ Heat Input จะเพิ่มมากขึ้นก็ตาม ทั้งนี้ก็เนื่องจากว่าเกิดการอิ่มตัวของความเครียด (Saturated Strain : ϵ_{sat}) [13] และช่วงอุณหภูมิเปราะ (Brittle Temperature Range : BTR) ก็ใกล้เคียงกัน และการแตกของแนวเชื่อมก็เป็นผลมาจากการที่มีความเครียด มากกระทำกับแนวเชื่อมในระหว่างที่กำลังแข็งตัวมากเกินไป ซึ่งเกินกว่าความเหนียว (Ductility) ของน้ำโลหะที่กำลังแข็งตัวอยู่ขณะนั้น จะต้านทานได้ จึงส่งผลให้แนวเชื่อมเกิดการแตก รอยแตกที่มีความยาวน้อย ก็เนื่องจาก Heat Input น้อย ทำให้อุณหภูมิของแนวเชื่อมต่ำและส่งผลให้ช่วงอุณหภูมิเปราะนั้นแคบ เมื่อแนวเชื่อมได้รับความเครียด (จากแรงกดให้ชิ้นงานคดโค้ง) มากเกินไป ซึ่งเกินกว่าความเหนียวของน้ำโลหะที่กำลังแข็งตัวอยู่ในช่วงอุณหภูมินั้นจะต้านทานได้ จึงทำให้แนวเชื่อมเกิดการแตก แต่รอยแตกจะมีความยาวน้อยและจำนวนรอยแตกที่เกิดขึ้นก็น้อย และในลักษณะเดียวกันถ้า Heat Input มากขึ้น ก็ทำให้อุณหภูมิของแนวเชื่อมสูงขึ้น และส่งผลให้ช่วงอุณหภูมิเปราะนั้นกว้างมากขึ้น เมื่อแนวเชื่อมได้รับความเครียดมากเกินไป ซึ่งเกินกว่าความเหนียวของน้ำโลหะที่กำลังแข็งตัวอยู่ในช่วงอุณหภูมินั้นจะต้านทานได้ จึงทำให้แนวเชื่อมเกิดการแตก และรอยแตกจะมีความยาวมากขึ้นและจำนวนรอยแตกก็มีมากขึ้น เพราะ

แนวเชื่อมมีขนาดกว้างขึ้น (เนื่องจาก Heat Input มาก) รอยแตกจะกระจายอยู่บนแนวเชื่อมจากขอบแนวเชื่อม จนเข้าใกล้บริเวณตรงกลางแนวเชื่อม (Centerline) แต่จะไม่เกิดรอยแตกที่ตรงบริเวณตรงกลางแนวเชื่อม เพราะเป็นการทดสอบแบบ Longitudinal Vareststraint Test (การทดสอบแบบ Transverse Vareststraint Test จะเกิดรอยแตกขึ้นบริเวณตรงกลางแนวเชื่อม) และความยาวรอยแตกจะสั้นและยาวแตกต่างกันตามตำแหน่งบริเวณที่มีช่วงอุณหภูมิเปราะ (Brittle Temperature Rang : BTR) ที่แคบหรือกว้าง เช่น ที่บริเวณขอบแนวเชื่อมช่วงอุณหภูมิเปราะจะแคบ เพราะแนวเชื่อมเย็นตัวเร็วกว่า ดังนั้นความยาวรอยแตกจะสั้น และที่บริเวณใกล้ตรงกลางแนวเชื่อม ความยาวรอยแตกจะมากขึ้น เพราะแนวเชื่อมเย็นตัวช้ากว่า จึงทำให้ช่วงอุณหภูมิเปราะกว้างขึ้น ดังนั้นรอยแตกจึงมีความยาวมากขึ้น และเป็นที่น่าสังเกตว่าความยาวรอยแตกที่มากที่สุด (Maximum Crack Length) ของแนวเชื่อมที่เกิดขึ้นในแต่ละค่าของความเครียดนั้น จะมีความยาวที่เท่าๆ กัน ถึงแม้ว่ากระแสไฟเชื่อมจะเพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ ก็ตาม อย่างเช่น ที่ความเครียด 0.4 เปอร์เซ็นต์ ความยาวรอยแตกที่กระแสไฟเชื่อม 120-160 แอมแปร์ จะเท่ากัน หรือที่ความเครียด 1.5 เปอร์เซ็นต์ ความยาวรอยแตกที่กระแสไฟเชื่อม 110-180 แอมแปร์ จะเท่ากัน ซึ่งที่ผลออกมาเป็นเช่นนี้ ก็เพราะว่ารอยแตกนั้นเกิดการอึดตัวของความเครียดและเป็นไปได้ว่า ช่วงอุณหภูมิเปราะก็อยู่ในช่วงที่ใกล้เคียงกันมาก ด้วยเหตุผลดังกล่าวนี้ จึงทำให้รอยแตกมีความยาวเท่ากัน ถึงแม้ว่ากระแสไฟเชื่อมจะเพิ่มมากขึ้นก็ตาม ดังนั้นช่วงอุณหภูมิเปราะนี้ จึงเป็นช่วงที่มีความไวต่อการแตกร่อนของแนวเชื่อม ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีการแตกร่อนในแนวเชื่อมของ Borland [1] ที่กล่าวไว้ในขั้นตอนที่ 3 ของการแตกร่อนในแนวเชื่อมว่าเป็นช่วงของการแข็งตัววิกฤติ "Critical Solidification Range" ซึ่งในขั้นตอนนี้ก็จะไม่มีการเติมของเหลว (Healing) ให้กับรอยแตก ซึ่งเป็นสาเหตุมาจากแนวเชื่อมได้รับความเครียดที่มากเกินไป

ส่วนแนวเชื่อมที่ไม่เกิดการแตก (ที่ความเครียด 0.5 เปอร์เซ็นต์ กระแสไฟ 90 และ 100 แอมแปร์ และที่ 0.4 เปอร์เซ็นต์ กระแสไฟ 90 , 100 และ 110 แอมแปร์) ก็เพราะความเหนียวของน้ำโลหะที่กำลังแข็งอยู่นั้น สามารถที่จะต้านทานความเครียดที่เกิดขึ้นในระดับนั้นได้ ซึ่งก็หมายถึงความเครียดที่เกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิเปราะนั้น อยู่ในระดับที่ความเหนียวของน้ำโลหะที่กำลังแข็งตัวนั้น สามารถที่จะรับได้ ซึ่งก็หมายถึงค่าอัตราความเครียดวิกฤติของอุณหภูมิที่ลดลง (Critical Strain Rate for Temperature Drop : CST) [3] นั้น มีค่าต่ำกว่าค่าวิกฤติ จึงไม่ส่งผลให้น้ำโลหะที่อยู่ในช่วงระหว่างการแข็งตัวนั้นเกิดการแตก ตัวอย่างเช่น ที่ค่ากระแสไฟเชื่อม 110 แอมแปร์ ที่ความเครียด 0.4 เปอร์เซ็นต์ นั้น แนวเชื่อมจะไม่แตก แต่ที่ความเครียด 0.5 เปอร์เซ็นต์ ค่ากระแสไฟเชื่อมเท่ากัน แนวเชื่อมมีรอยแตกเกิดขึ้น ซึ่งก็แสดงว่าแม้จะมี Heat Input หรือช่วงอุณหภูมิเปราะเท่ากัน ถ้าระดับความเครียดต่างกันก็ส่งผลกระทบต่ออัตราการแตกร่อนของแนวเชื่อมในระหว่างที่กำลังแข็งตัวได้

จากกราฟรูปที่ 4.20 จะเห็นว่า ถ้าความเครียดและกระแสไฟเชื่อมน้อยลง การแตกร้อนของแนวเชื่อม ก็มีแนวโน้มลดลงไปด้วย ซึ่งเป็นผลมาจากระดับความเครียดไม่มากเกินกว่าช่วงอุณหภูมิเปราะ ที่สามารถจะรับได้ โดยการแตกจะไม่เกิดขึ้นที่ค่ากระแสไฟ 100 แอมแปร์ ที่ค่าความเครียด 0.5 เปอร์เซนต์ และจากการนำชิ้นงานไปทำการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคของรอยแตก เพื่อตรวจสอบว่าเป็นรอยแตกที่เกิดจากการแตกร้อนหรือเป็นรอยแตกที่เกิดจากสาเหตุอื่น ผลปรากฏว่ารอยแตกที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานทดสอบนั้น เป็นรอยแตกที่เกิดจากการแตกร้อน ซึ่งจะสังเกตเห็นรอยแยกที่บริเวณขอบเกรนและมีบ่อกว้าง ดังรูปที่ 4.21

ผลการทดลองทั้งหมดนี้ จะคล้ายกับการทดลองของ V.P. Kujanpää, S.A. David and C.L.White [9] G.M. Goodwin [10], M.E. Khallaf, M.A. Ibrahim, N.A. El-Mahallawy M.A. Taha [11], และ V. Shankar, T.P.S. Gill, S.L. Mannan, and S. Sundaresan [6] ซึ่งจะแตกต่างกันเพียงประเภทของวัสดุ กรรมวิธีการทดสอบและเงื่อนไขในการเชื่อมเท่านั้น



รูปที่ 4.21 โครงสร้างมหภาครอยแตกร้อนของแนวเชื่อมที่ทำการทดลอง

บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองทำการเชื่อมเหล็กกล้าสแตนเลส เกรด 304 ด้วยลวดเชื่อม ER 310 พบว่า แนวเชื่อมที่มีความเครียดสูง (ที่ความเครียด 2 เปอร์เซ็นต์) นั้น จะมีแนวโน้มนำเกิดการแตกทุกค่าของกระแสไฟเชื่อม (ทุกค่าของ Heat Input) ที่ทำการทดลอง เพราะแนวเชื่อมเกิดความเครียดสูงและประกอบกับความเร็วในการตัด (Bending Speed) ที่เร็วมาก ถึงแม้ว่าค่ากระแสไฟเชื่อมหรือ Heat Input จะต่ำก็ตาม ถ้าค่ากระแสไฟเชื่อมหรือ Heat Input สูงขึ้น ก็จะส่งผลให้เกิดการแตกมากขึ้น ส่วนการแตกของแนวเชื่อมที่มีความเครียดน้อยและกระแสไฟเชื่อมหรือ Heat Input ที่ต่ำลงไป (ความเครียดน้อยกว่า 2 เปอร์เซ็นต์) นั้น รอยแตกมีแนวโน้มนำลดลงไปเรื่อย ๆ จนไม่มีการแตกเกิดขึ้น และในการทดลองครั้งนี้ จะมีความยาวรอยแตกที่ยาวที่สุด และผลรวมของความยาวรอยแตกมากที่สุดที่กระแสไฟเชื่อมหรือ Heat Input ที่ค่าใดค่าหนึ่งในแต่ละค่าของความเครียด ซึ่งแสดงว่า ในแต่ละความเครียดนั้น จะมีความไวต่อการแตกร้อน (Hot Cracking Susceptibility) เกิดขึ้นมากที่สุดที่ช่วงของกระแสไฟเชื่อม หรือ Heat Input ที่ค่าใดค่าหนึ่ง โดยความไวต่อการแตกร้อน (โดยประเมินจากผลรวมความยาวรอยแตกของแต่ละค่ากระแสไฟและ Heat Input) ในแต่ละค่าความเครียดมีดังนี้

- ที่ความเครียด 2 เปอร์เซ็นต์ จะมีความไวต่อการแตกร้อนมากที่สุดที่กระแสไฟเชื่อม 160 แอมแปร์ (Heat Input = 0.928 kJ/mm.)
- ที่ความเครียด 1.5 เปอร์เซ็นต์ จะมีความไวต่อการแตกร้อนมากที่สุดที่กระแสไฟเชื่อม 160 แอมแปร์ (Heat Input = 0.883 kJ/mm.)
- ที่ความเครียด 1 เปอร์เซ็นต์ จะมีความไวต่อการแตกร้อนมากที่สุดที่กระแสไฟเชื่อม 180 แอมแปร์ (Heat Input = 1.159 kJ/mm.)
- ที่ความเครียด 0.5 เปอร์เซ็นต์ จะมีความไวต่อการแตกร้อนมากที่สุดที่กระแสไฟเชื่อม 180 แอมแปร์ (Heat Input = 1.224 kJ/mm.)
- ที่ความเครียด 0.4 เปอร์เซ็นต์ จะมีความไวต่อการแตกร้อนมากที่สุดที่กระแสไฟเชื่อม 170 แอมแปร์ (Heat Input = 1.074 kJ/mm.)

จากผลการทดลองจึงสรุปได้ว่า ถ้ากระแสไฟเชื่อมหรือ Heat Input มากและมีความเครียดสูงเกิดขึ้น ในระหว่างที่ทำการเชื่อม แนวโน้มนำที่จะเกิดการแตกร้อนของแนวเชื่อมก็จะมีมากขึ้น และในลักษณะเดียวกัน ถ้ากระแสไฟเชื่อมหรือ Heat Input น้อยและมีความเครียดเกิดขึ้นในระหว่างที่ทำการเชื่อม น้อย แนวโน้มนำที่จะเกิดการแตกร้อนของแนวเชื่อม ก็จะมีน้อยลงหรือไม่เกิดการแตกเลย และในการทดลองทำการเชื่อมเหล็กกล้าสแตนเลส เกรด 304 ด้วยลวดเชื่อม ER 310 ครั้งนี้ จะไม่เกิดการแตก

ที่ความเครียด 0.5 เปอร์เซ็นต์ ที่กระแสไฟเชื่อมประมาณ 100 แอมแปร์ หรือ ที่ Heat Input ประมาณ 0.520 kJ/mm. และที่ความเครียด 0.4 เปอร์เซ็นต์ ที่กระแสไฟเชื่อมประมาณ 110 แอมแปร์ หรือที่ Heat Input ประมาณ 0.546 kJ/mm.

ดังนั้นแนวทางในการลดหรือหลีกเลี่ยงการแตกร่อนของแนวเชื่อม Austenitic Stainless Steel เกรด 304 ด้วยลวดเชื่อม Austenitic ER 310 ควรจะใช้กระแสไฟเชื่อมหรือ Heat Input ให้มีค่าน้อยเท่าที่จะทำการเชื่อมได้ และให้เกิดความเครียดขึ้นน้อยที่สุด (กระแสไฟเชื่อมน้อยกว่า 110 แอมแปร์ ที่ความเครียด 0.5 เปอร์เซ็นต์) ในระหว่างทำการเชื่อมหรือในระหว่างที่แนวเชื่อมกำลังเกิดการแข็งตัว

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ถ้าใช้ความเร็วในการคัต (Bending Speed) แตกต่างกัน ก็จะทำให้ได้ผลลัพธ์ของความยาวรอยแตกในแนวเชื่อมแตกต่างกัน ถึงแม้ว่าจะใช้ค่าความเครียดเท่ากัน และเงื่อนไขในการเชื่อมเหมือนกันก็ตาม
2. ความเร็วในการเชื่อม (Welding Speed) จะเหมาะสมกับค่ากระแสไฟช่วงใดช่วงหนึ่งเท่านั้น อย่างเช่น ความเร็วที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้ (105 mm./min) เหมาะสมกับกระแสไฟเชื่อม 110-150 แอมแปร์ ซึ่งถ้าใช้กระแสเชื่อมต่ำหรือสูงกว่านี้ ก็จะต้องลดหรือเพิ่มความเร็วในการเชื่อมตามลำดับ ดังนั้นในการทดลองครั้งนี้ จึงไม่สามารถทำการเชื่อมที่กระแสไฟต่ำกว่า 90 แอมแปร์ และสูงกว่า 180 แอมแปร์ได้

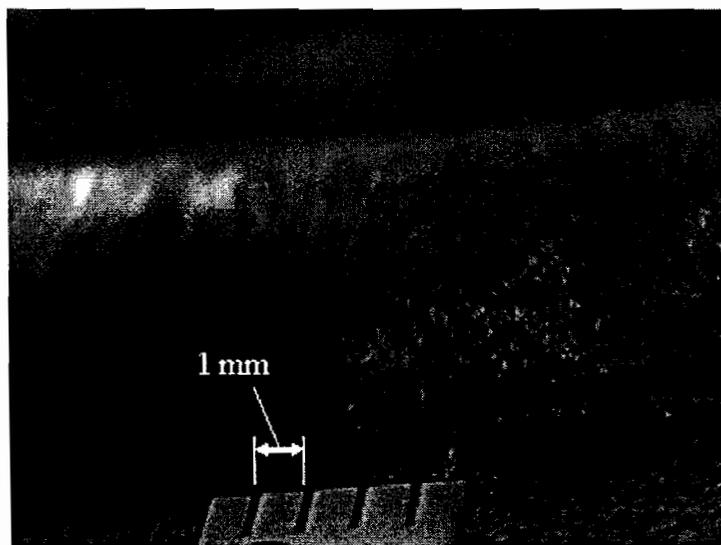
เอกสารอ้างอิง

1. Lundin, C.D. and Chow, C.P.D., 1983, "Hot Cracking Susceptibility of Austenitic Stainless Steel Weld Metals", **Welding Research Council Bulletin**, Bulletin 289, pp. 2-9.
2. Cambell, R.D., 1999, " **The Professional's Advisor on Welding of Stainless Steels**", United State of America, pp. 3-30.
3. Shindo Kou, 2003, "**Welding Metallurgy**", 2nd ed., John Wiley & Sons, United of America, pp. 13-16, 277-279.
4. Kroes, M.J. and Watkins, W.A., 1993, **Aircraft Maintenance & Repair**, 6th ed., Singapore, pp. 154-157.
5. American Welding Society, 1991, **Welding Handbook**, Vol. 2, 8th ed., United States of America, p. 79.
6. Shankar, V., Gill, T.P.S., Mannan, S.L. and Sundaresan, S., 2003, "Effect of Nitrogen Addition on Microstructure and Fusion Zone Cracking in Type 316L Stainless Steel Weld Metals", **Materials Science and Engineering**, Vol. 343, pp. 170-181.
7. ASM International, 1997, **Weld Integrity and Performance**, United State of America, pp. 23-30.
8. American Welding Society, 2001, "Formation of Hot Cracks in Austenitic Stainless Steel Weld-Solidification Cracking", **Welding Handbook**, 9th ed., Vol. 1, p. 286.
9. Kujanpaa, V.P., David, S.A. and White, C.L., 1986, "Formation of Hot Cracks in Austenitic Stainless Steel Weld-Solidification Cracking", **Welding Journal**, Vol. 65, No. 8, pp. 203-s-212-s.

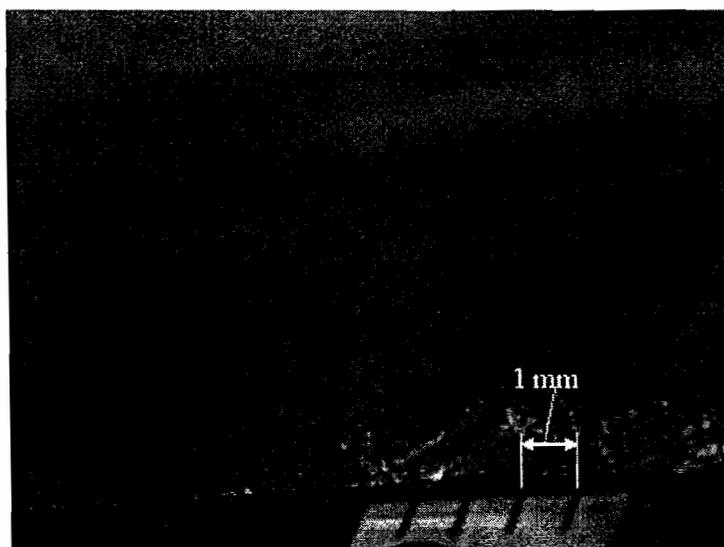
10. Goodwin, G.M., 1988, "The Effects of Heat Input and Weld Process on Hot Cracking in Stainless Steel", **Welding Journal**, Vol. 67, No. 4, pp. 88s-94s.
11. Khallaf, M.E., Ibrahim, M.A., El-Mahallawy, N.A. and Taha, M.A., 1997, "On Crack Susceptibility in The Submerged Arc Welding of Medium-Carbon Steel Plates", **Materials Processing Technology**, Vol. 68, pp. 43-49.
12. Haruki Madarame, Toshio Sukegava and Hiroshige Inoue, 1995, "Cracking Susceptibility of Stainless Steel Subjected to Plasma Disruption", **Fusion Engineering and Design**, Vol. 27, pp. 499-506.
13. Lippold, J.C., Kotecki, D.J., 2005, **Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels**, John Wiley & Sons, United of America, pp. 311-316.

ภาคผนวก ก

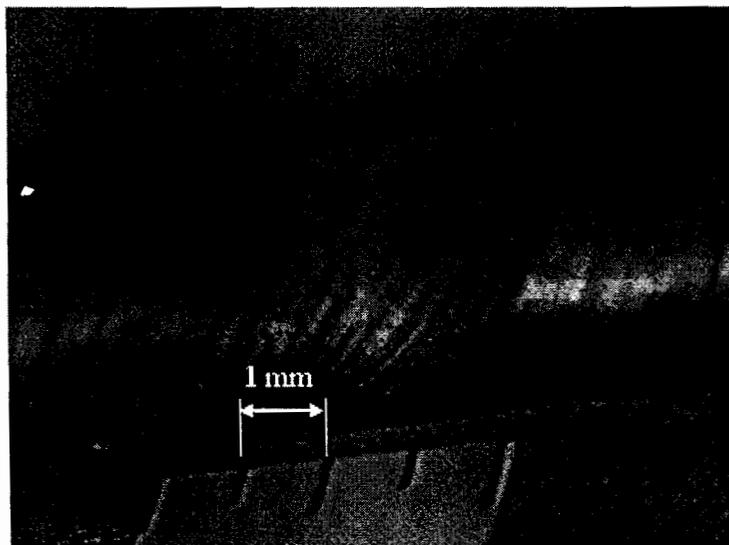
ตัวอย่างรอยแตกร่อนของแนวเชื่อม



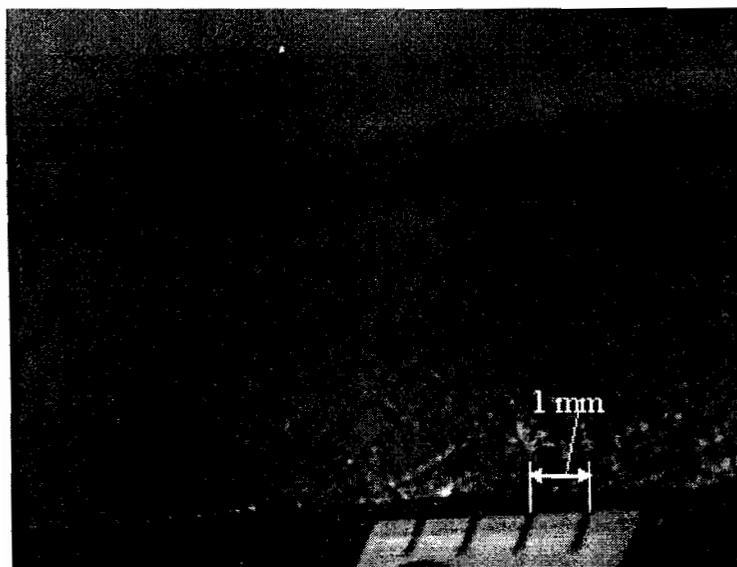
รูปที่ ก.1 รอยแตกที่กระแสไฟเชื่อม160 แอมแปร์ ความเครียด 1.5 %



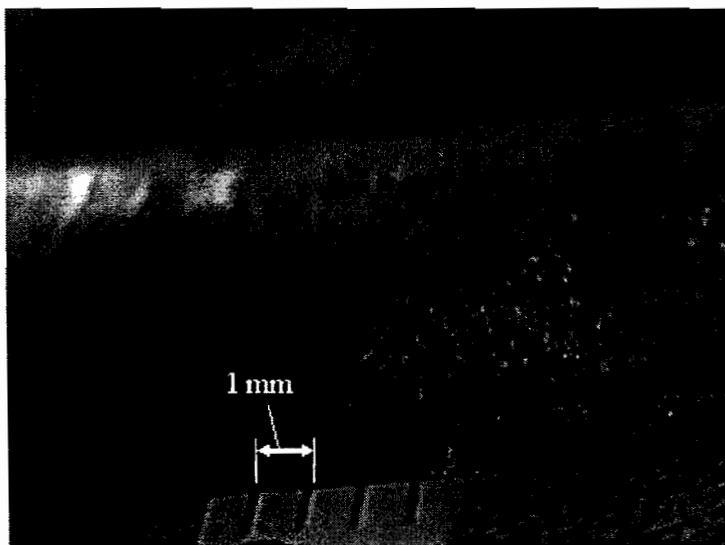
รูปที่ ก.2 รอยแตกที่กระแสไฟเชื่อม170 แอมแปร์ ความเครียด 0.4 %



รูปที่ ก.3 รอยแตกที่กระแสไฟเชื่อม150 แอมแปร์ ความเคียด 1.5 %



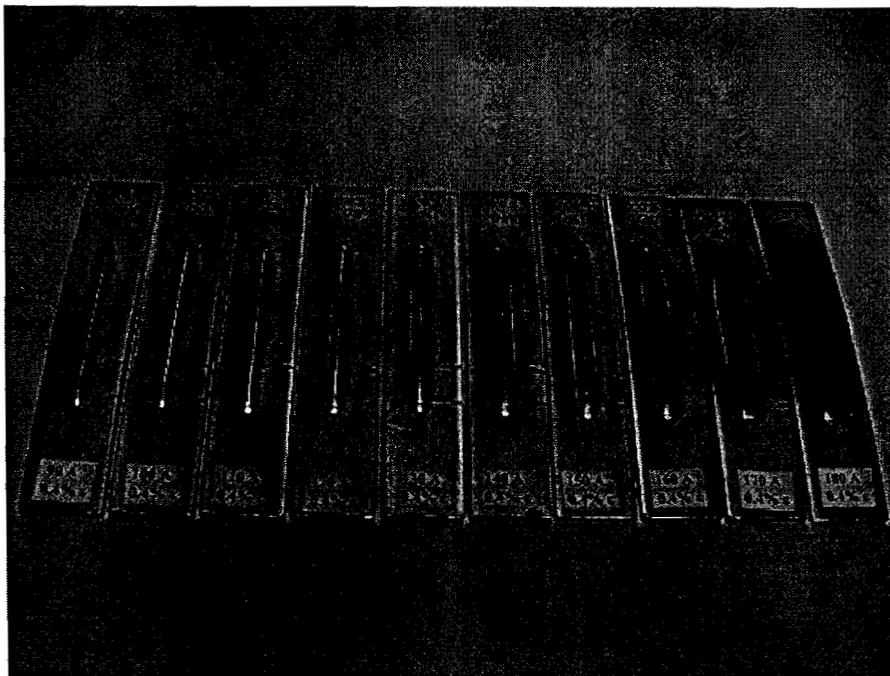
รูปที่ ก.4 รอยแตกที่กระแสไฟเชื่อม170 แอมแปร์ ความเคียด 0.4 %



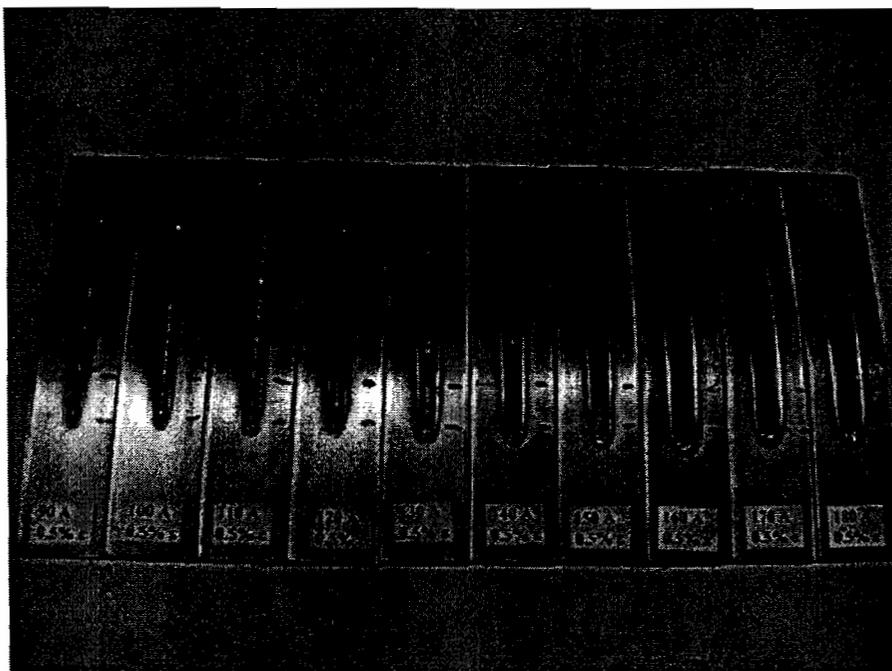
รูปที่ ก.5 รอยแตกที่กระแสไฟเชื่อม160 แอมแปร์ ความเครียด 1.5 %

ภาคผนวก ข

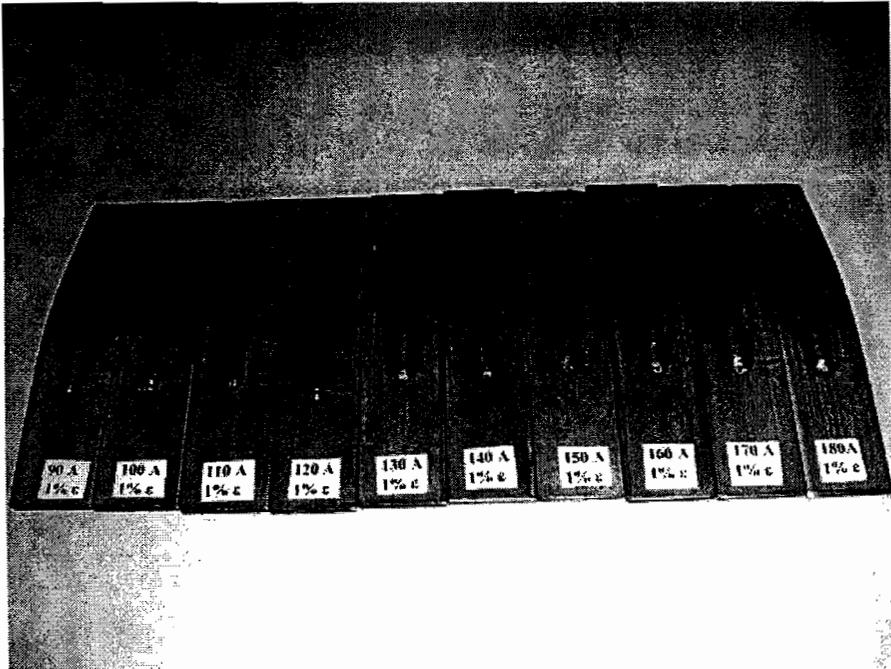
ชิ้นงานเชื่อมการทดสอบ



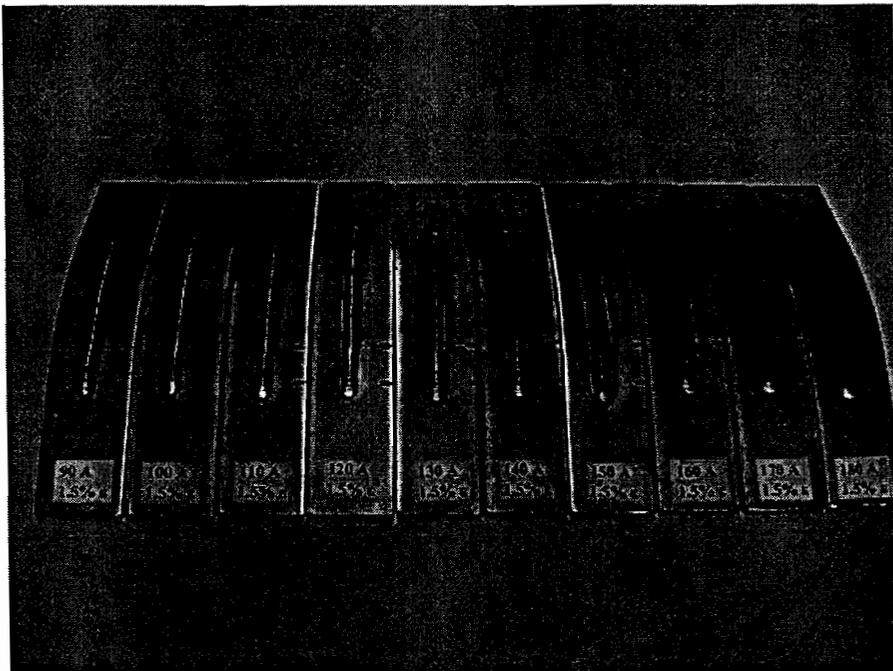
รูปที่ ข.1 ชิ้นงานเชื่อมทดสอบที่ค่าความเครียด 0.4 %



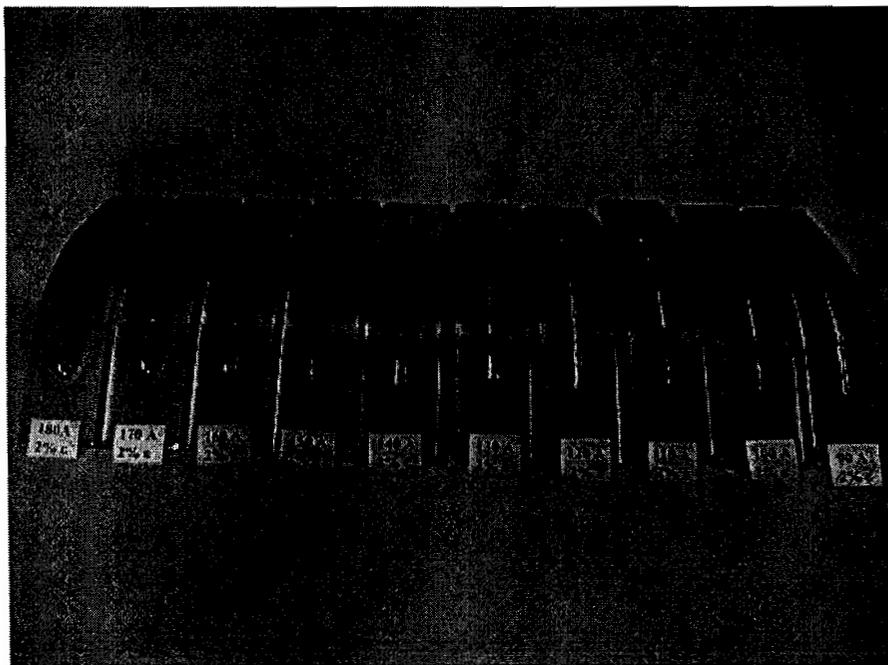
รูปที่ ข.2 ชิ้นงานเชื่อมทดสอบที่ค่าความเครียด 0.5 %



รูปที่ ข.3 ชิ้นงานเชื่อมทดสอบที่ค่าความเครียด 1 %



รูปที่ ข.4 ชิ้นงานเชื่อมทดสอบที่ค่าความเครียด 1.5 %



รูปที่ ข.5 ชิ้นงานเชื่อมทดสอบที่ค่าความเครียด 2 %

ภาคผนวก ค

การคำนวณความร้อนที่ให้กับชิ้นงาน

ค.1 สูตรคำนวณความร้อนที่ให้กับชิ้นงาน (Heat Input)

- สูตรคำนวณความร้อนที่ให้กับชิ้นงาน (Heat Input)

$$\text{Heat Input (Q)} = \frac{\eta \times V \times I \times 60}{v \times 1000} \quad (\text{kJ/mm.})$$

Q = Heat Input

V = Voltage

I = Current

v = Welding Speed (mm./min)

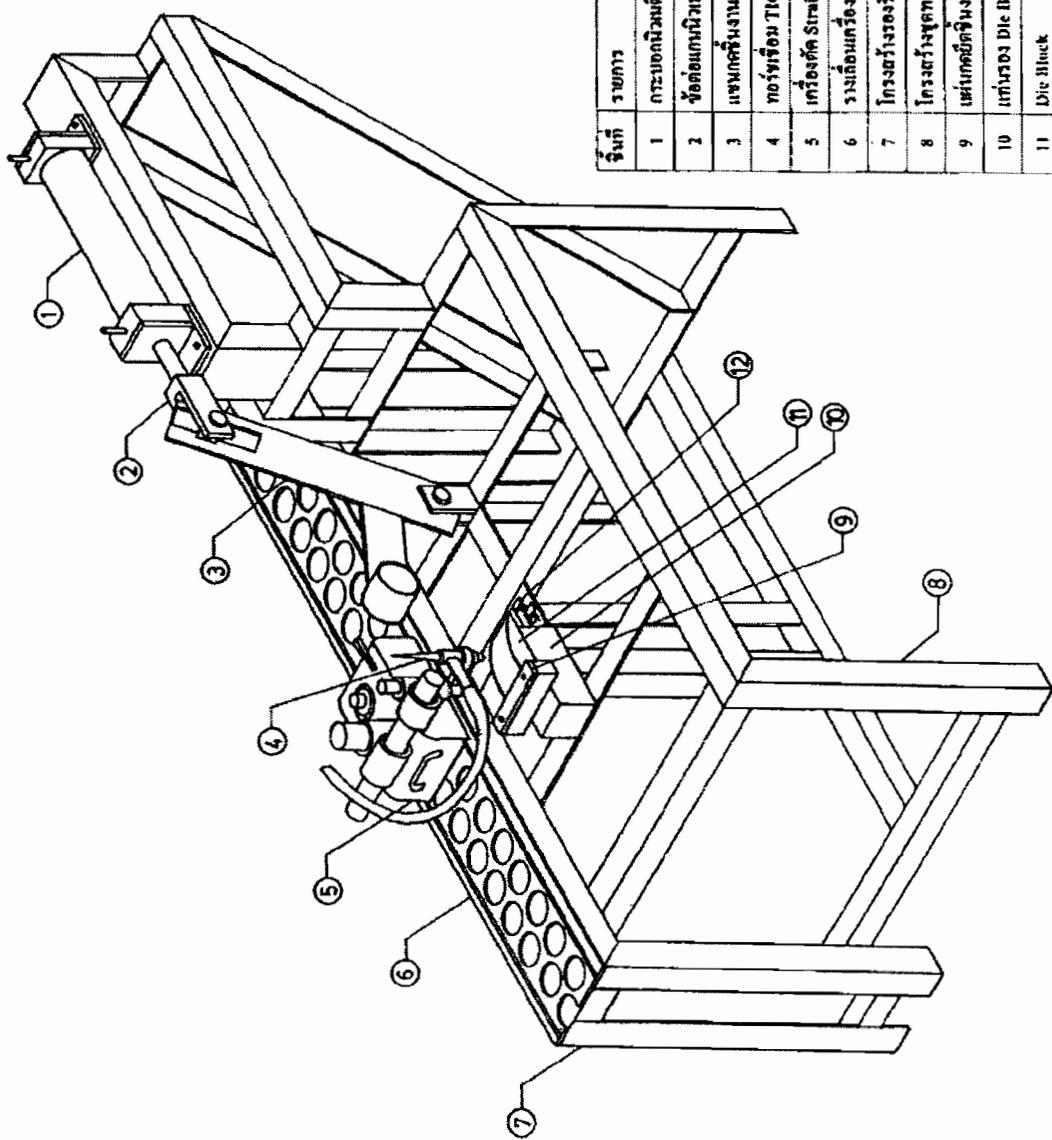
η = Arc Efficiency Factor

- ค่าของตัวประกอบของแต่ละกระบวนการเชื่อม

Arc Efficiency Factor	Arc Efficiency Factor (η)
Manual Metal Arc (MMA)	0.8
Gas Metal Arc (MIG/MAG)	0.8-0.9
Flux Core Arc (FCAW)	0.9
Submerged Arc	1.0
TIG (GTAW)	0.7

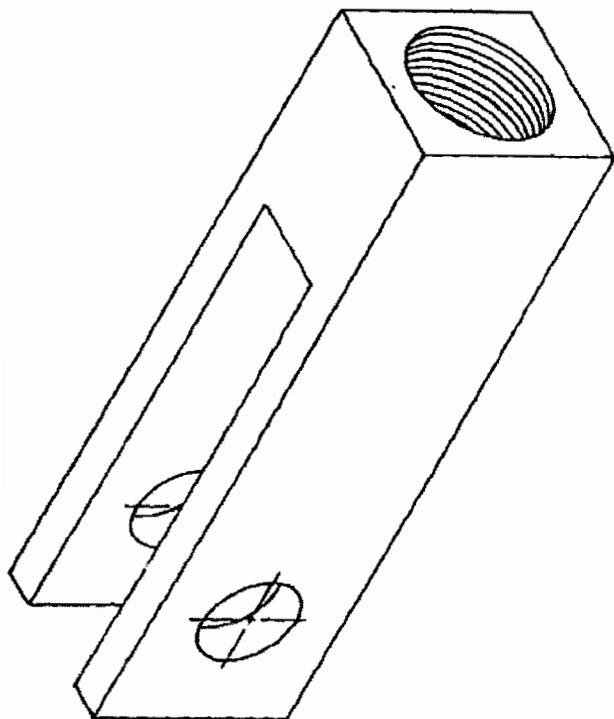
ภาคผนวก ง

แบบ Drawing และภาพประกอบชุดทดสอบ Vareststraint Test

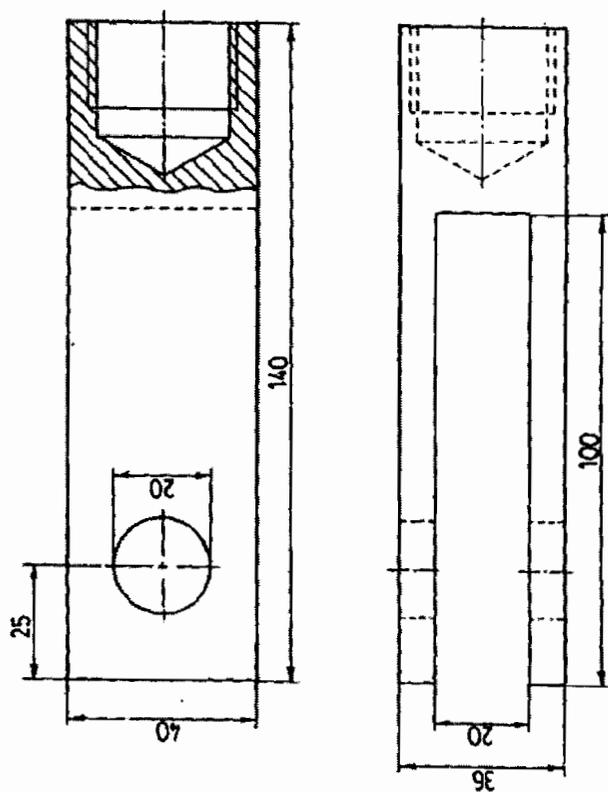


จํานวน	รายการ	วัสดุ
1	กระบอกนิวมัด	อุปกรณ์ทำรูป
2	ข้อต่อแกนนิวมัดกับแขนกดชิ้นงาน	เหล็กตีเหลี่ยมตัน 45x45 มม.
3	แขนกดชิ้นงาน	เหล็กตีเหลี่ยม 100x50x9 มม.
4	ทอรัเชื่อม TIG	อุปกรณ์ทำรูป
5	เครื่องตัด Straight-Line Cutting Machine	อุปกรณ์ทำรูป
6	วงล้อบนเครื่องตัด	อุปกรณ์ทำรูป
7	โครงสร้างรองรับรางเลื่อน	เหล็กฉาก 50x50x4 มม.
8	โครงสร้างชุดทดสอบ Varestraint Test	เหล็กฉาก 50x50x4 มม.
9	เส้นกดยึดชิ้นงานทดสอบ	เหล็กตีเหลี่ยมตัน 30x120 มม.
10	แกนรอง Die Block	เหล็กฉาก 50x50x4 มม.
11	Die Block	Die Block ที่ใช้ทดสอบ
12	โบลต์(bolt) ปรับระยะตามรัศมี Die Block	อุปกรณ์ทำรูป

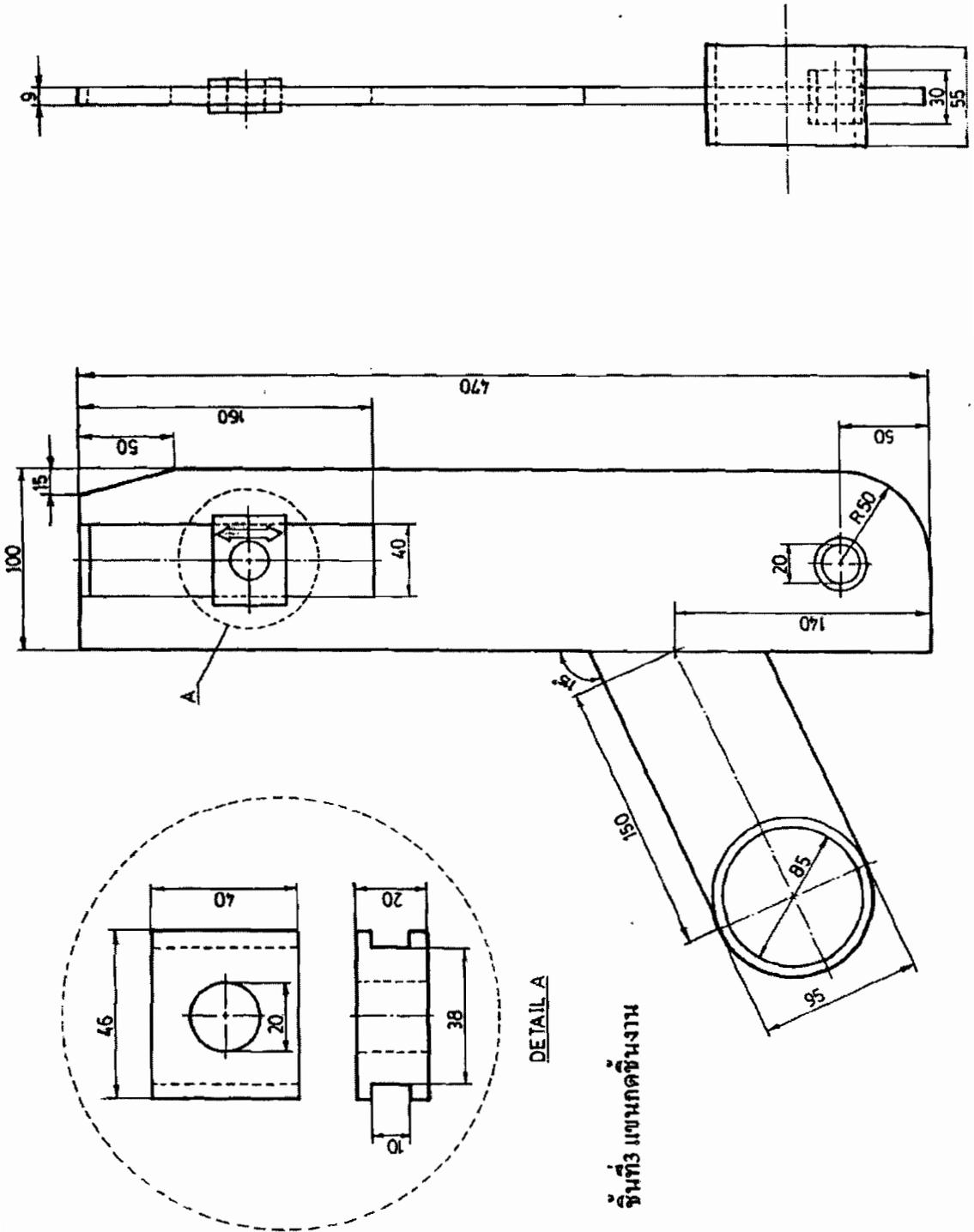
รูปที่ ๓.1 แบบเครื่องทดสอบ Varestraint Test



ชั้นที่ 2 ข้อต่อแกนนิวมตึคกับแชนกคชันงาน :

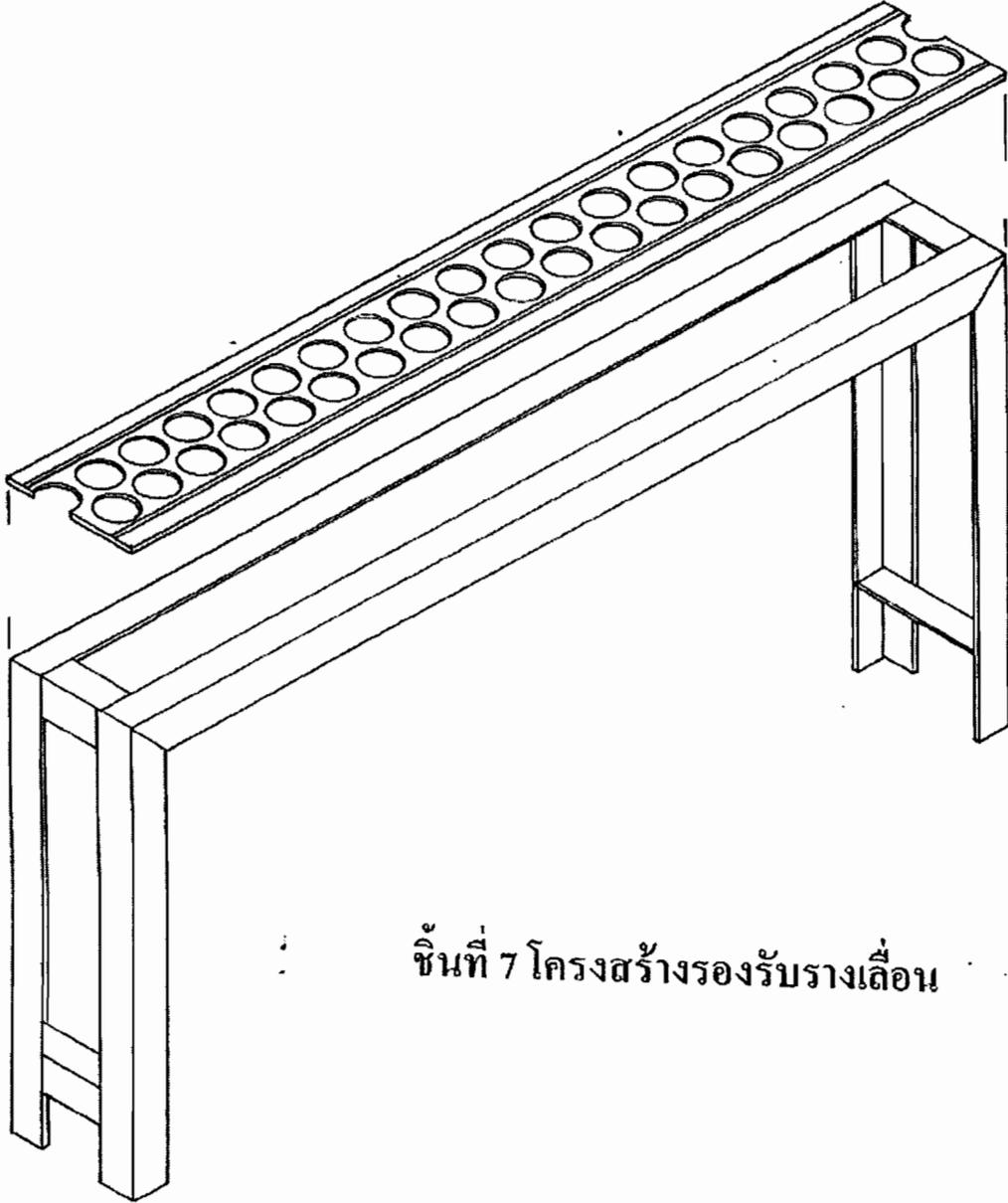


รูปที่ ง.2 แบบข้อต่อแกนนิวมตึคกับแชนกคชันงาน



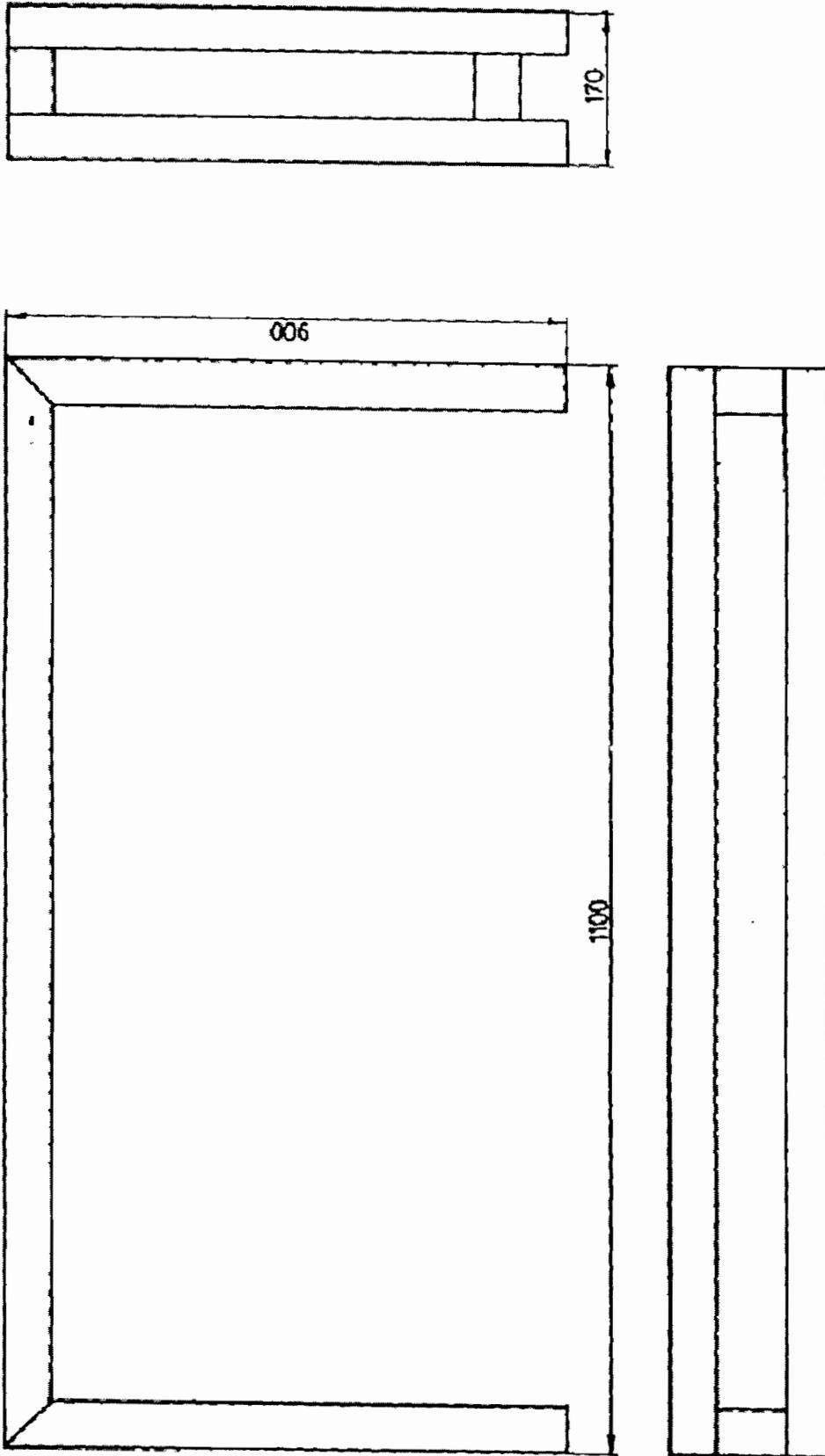
รูปที่ ง.3 แบบแขนกดชิ้นงาน

ชั้นที่ 6 รางเลื่อนเครื่องตัด Straight-Line Gas Cutting Machine



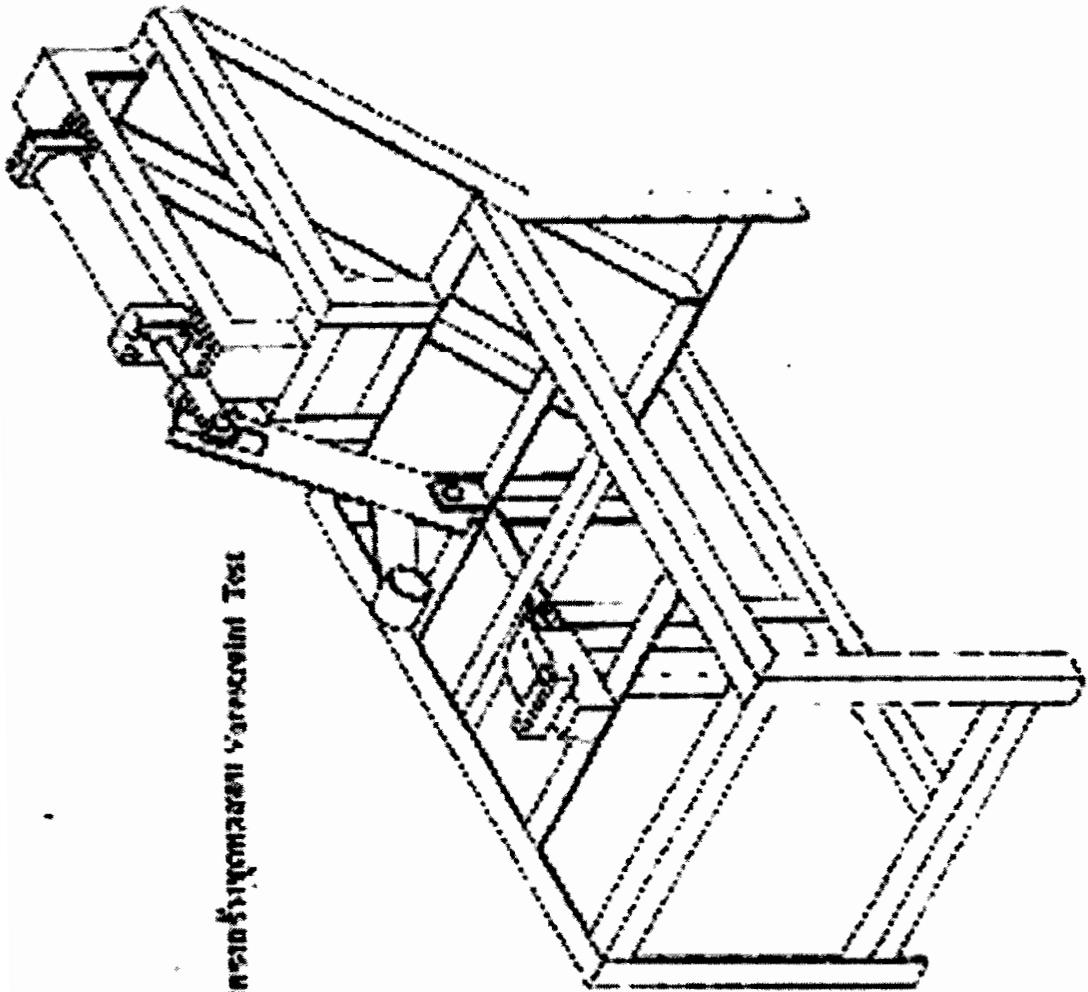
ชั้นที่ 7 โครงสร้างรองรับรางเลื่อน

รูปที่ ง.4 แบบโครงสร้างรองรับรางเลื่อน



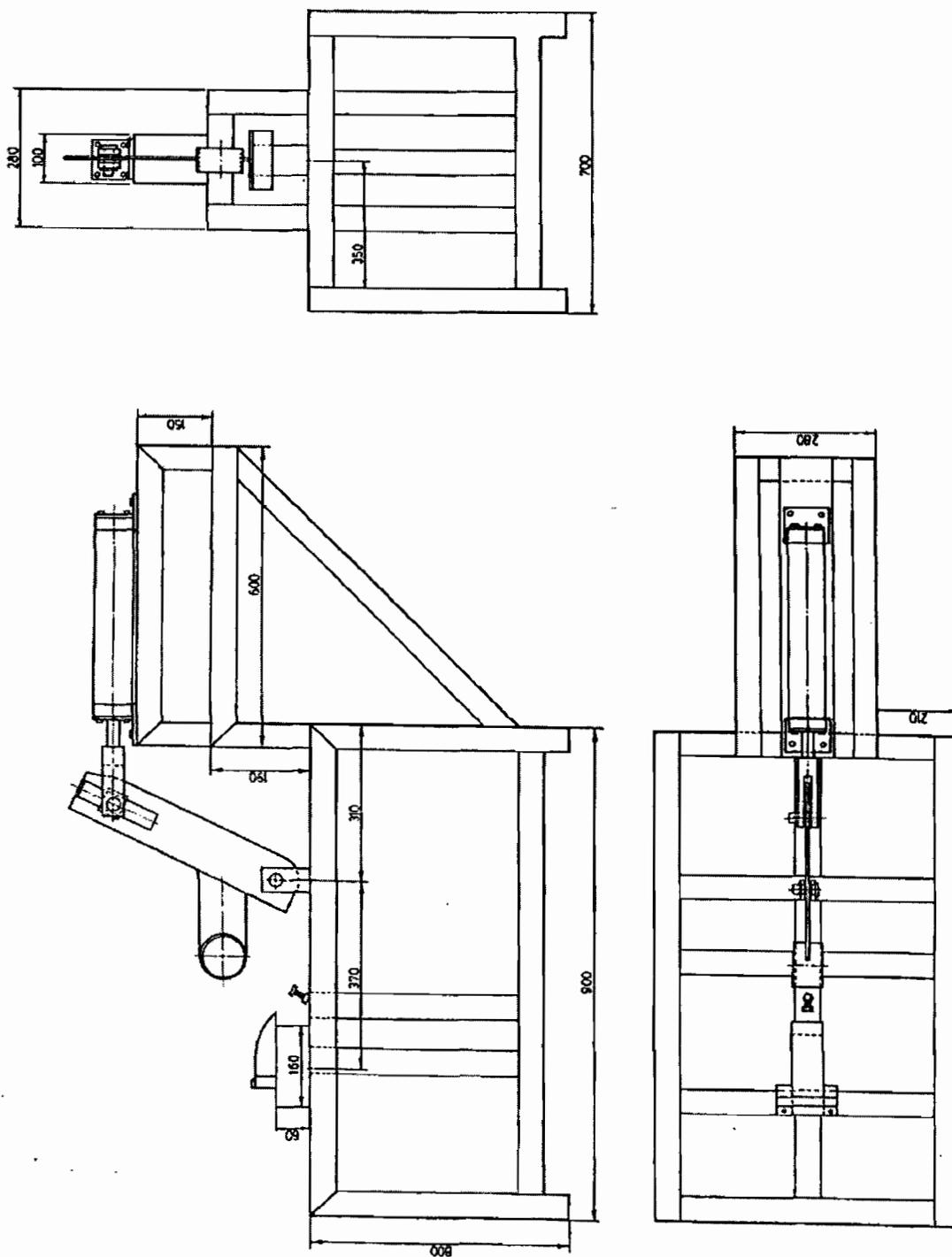
โครงสร้างรองรับรางเดิน

รูปที่ 5.5 แบบภาพฉายโครงสร้างรองรับรางเดิน

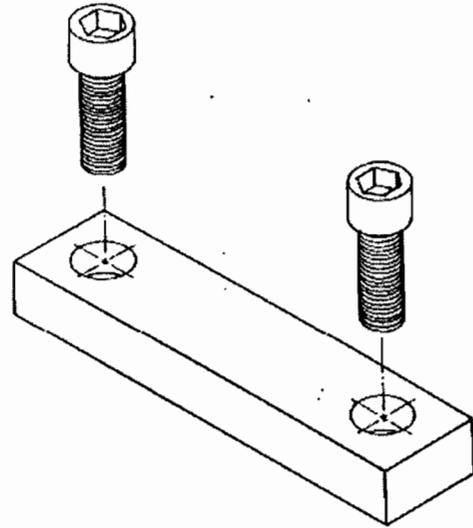
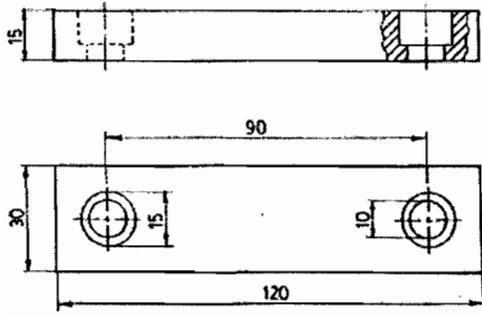


รูปที่ ๓ โครงสร้างชุดทดสอบ V restraint Test

รูปที่ ๓.๖ แบบ โครงสร้างเครื่องทดสอบ V restraint Test

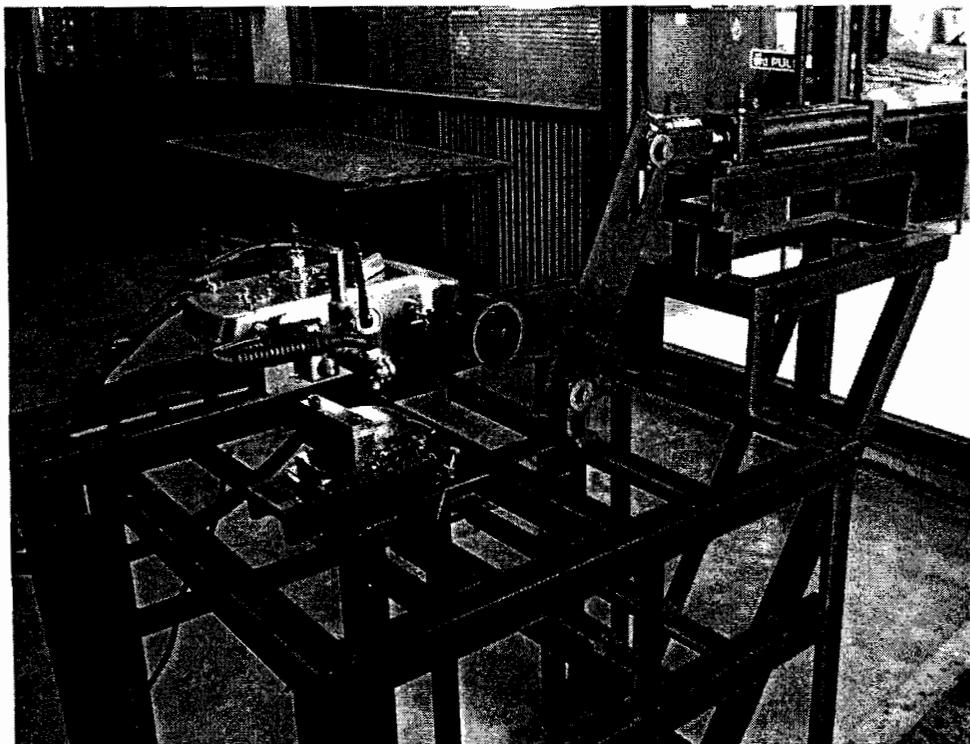


รูปที่ ๓.๗ แบบภาพฉายเครื่องทดสอบ Varestraint Test

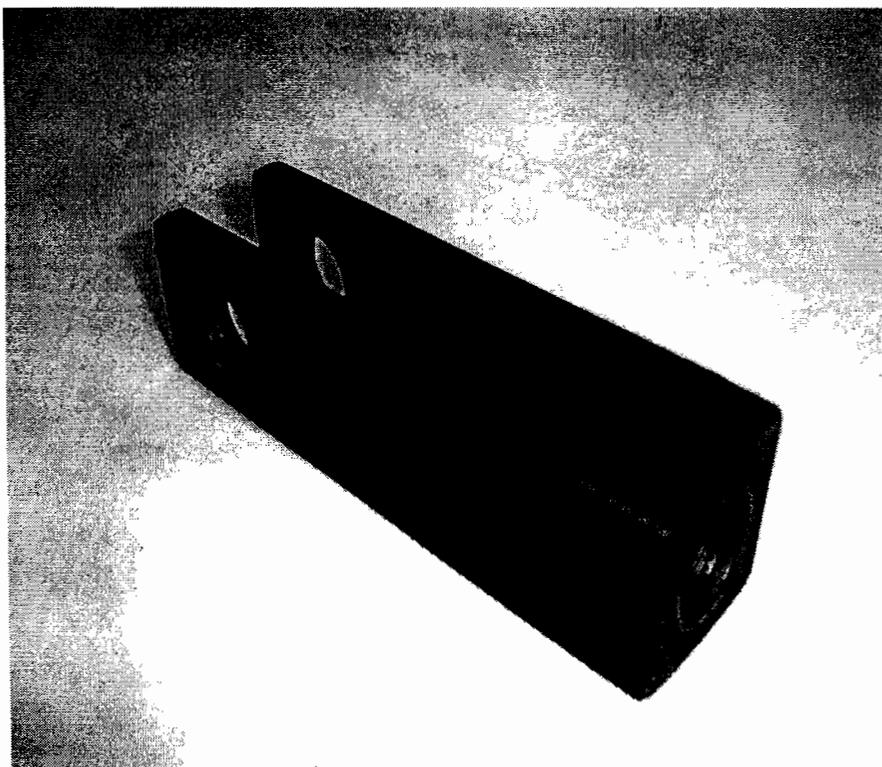


ชิ้นที่ 9 แผ่นกดยึดชิ้นงานทดสอบ

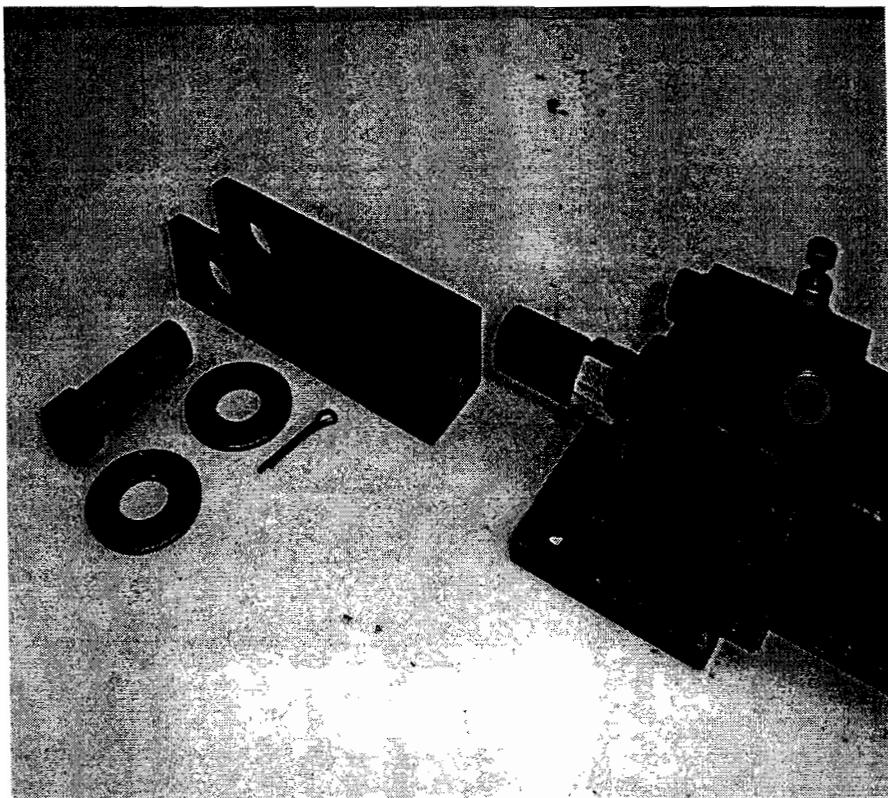
รูปที่ ง.8 แบบแผ่นกดยึดชิ้นงานทดสอบ



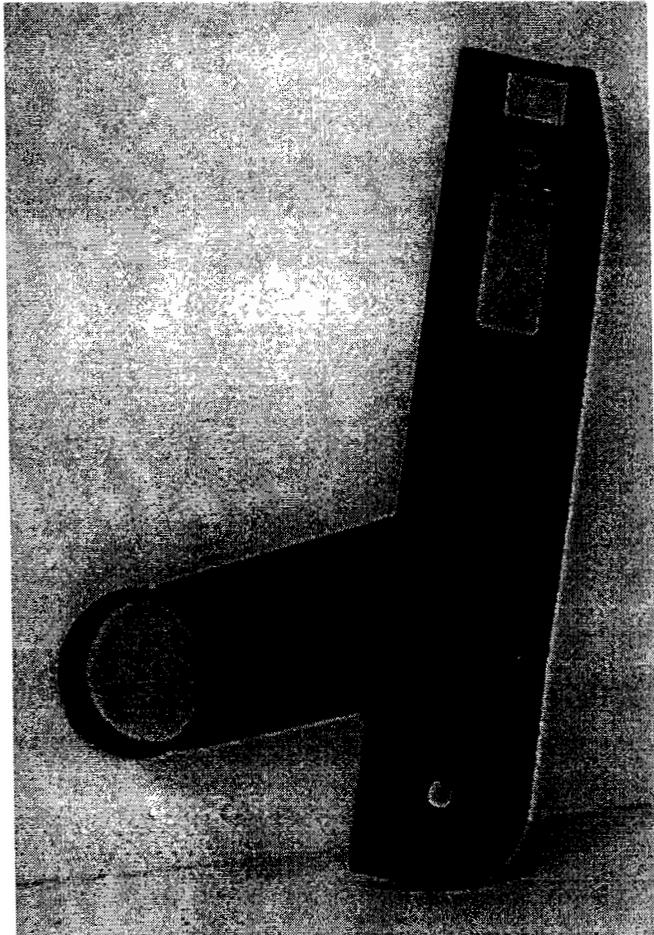
รูปที่ ๓.๑ เครื่องทดสอบ Vrestraint Test



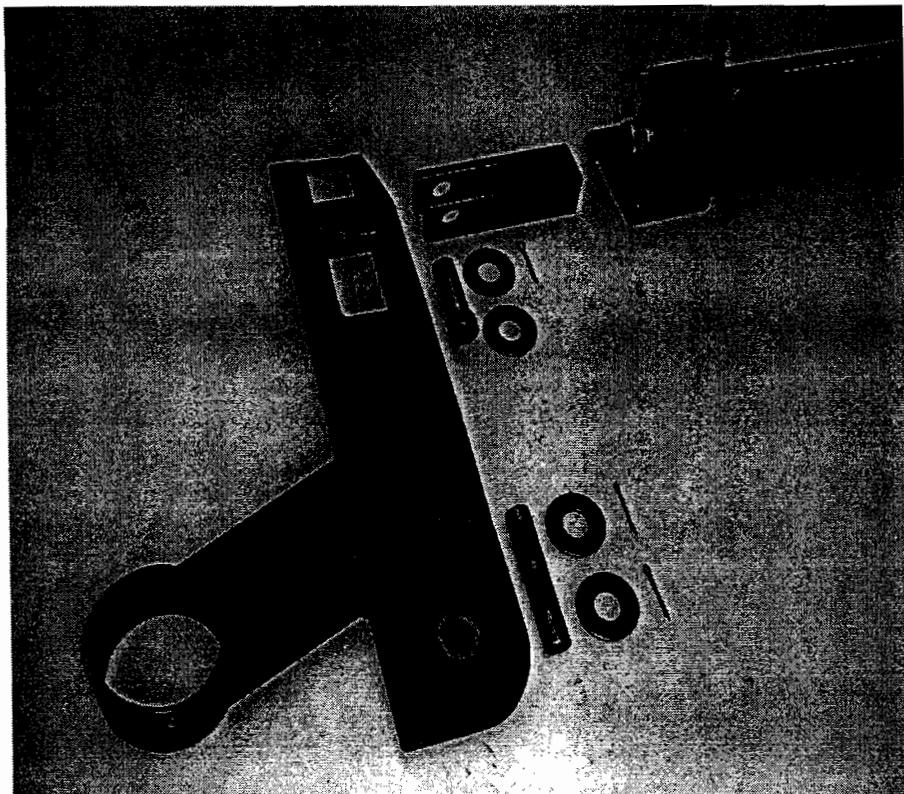
รูปที่ ๓.10 ข้อต่อแกนนิวมิตลกับแขนกดชิ้นงาน



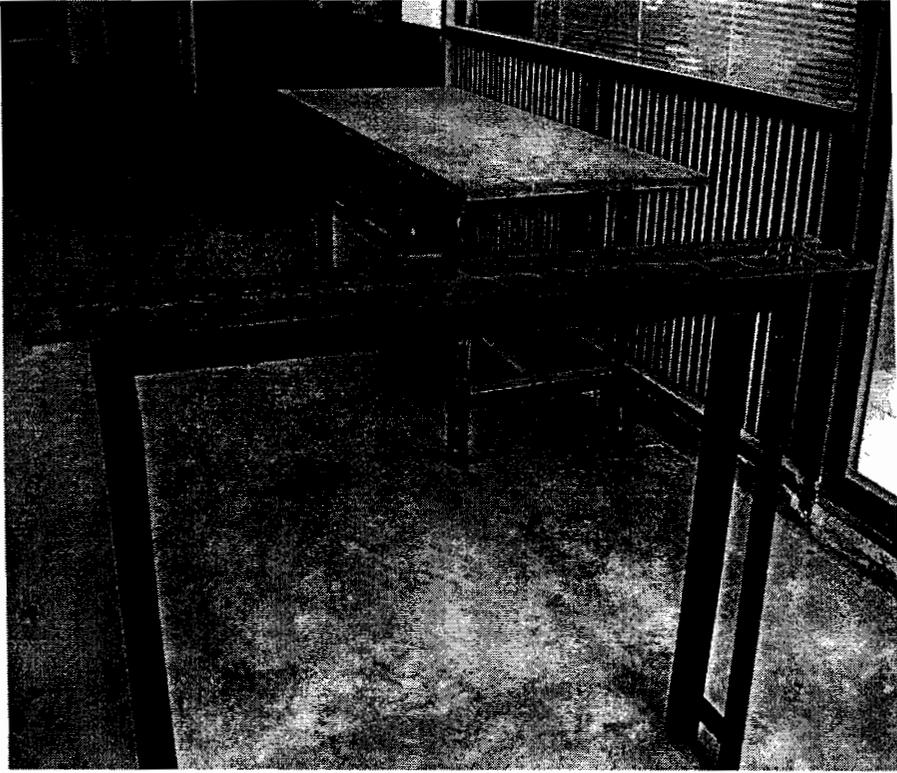
รูปที่ ง.11 ข้อต่อแกนนิวมตติค สลัก แหวนรอง และสลักหมุด



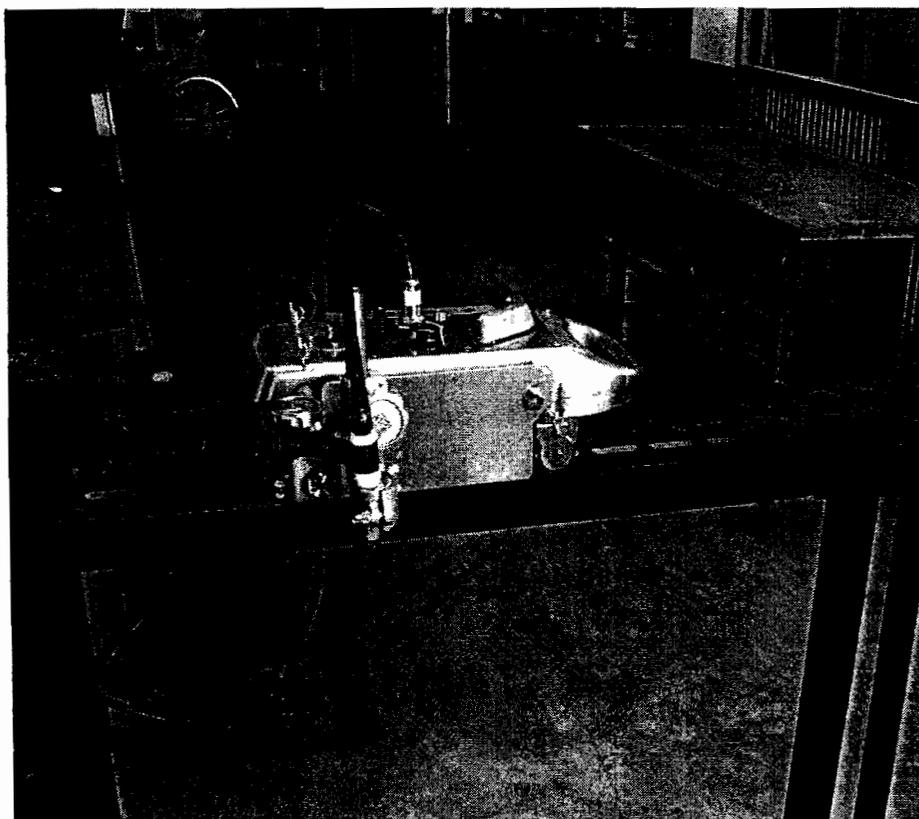
รูปที่ ง.12 รูปแขนกดชิ้นงาน



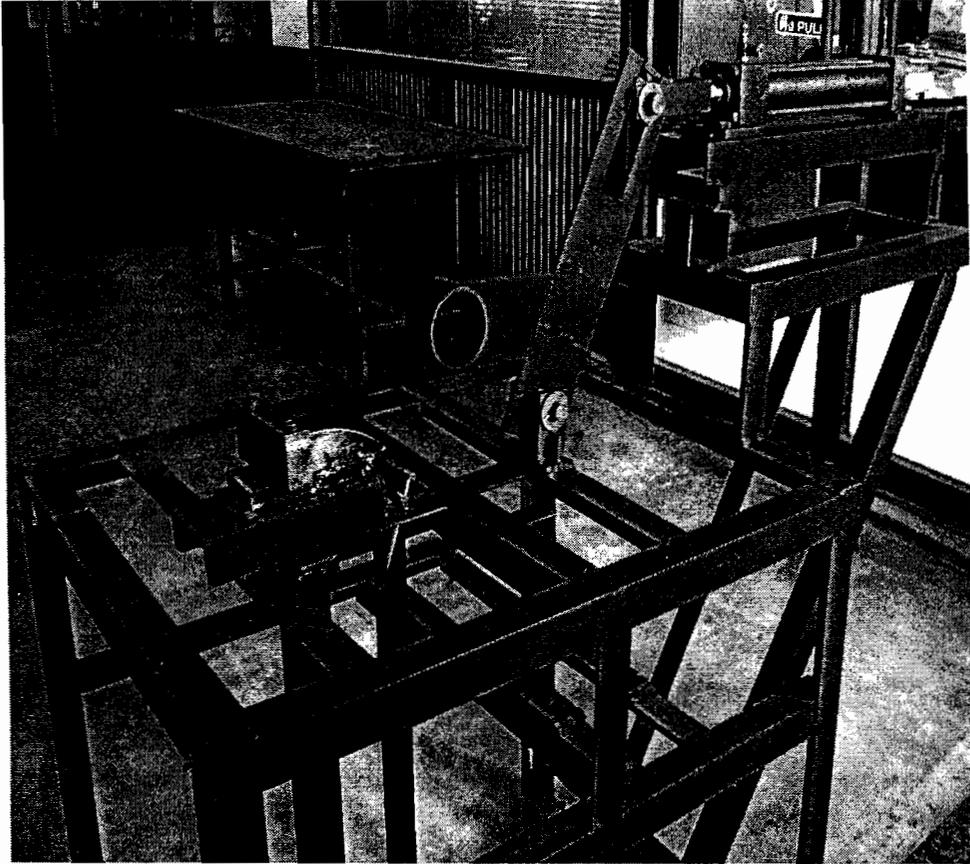
รูปที่ ง.13 ชิ้นส่วนการประกอบแขนกดชิ้นงานต่อเข้ากับแกนนิวมิต



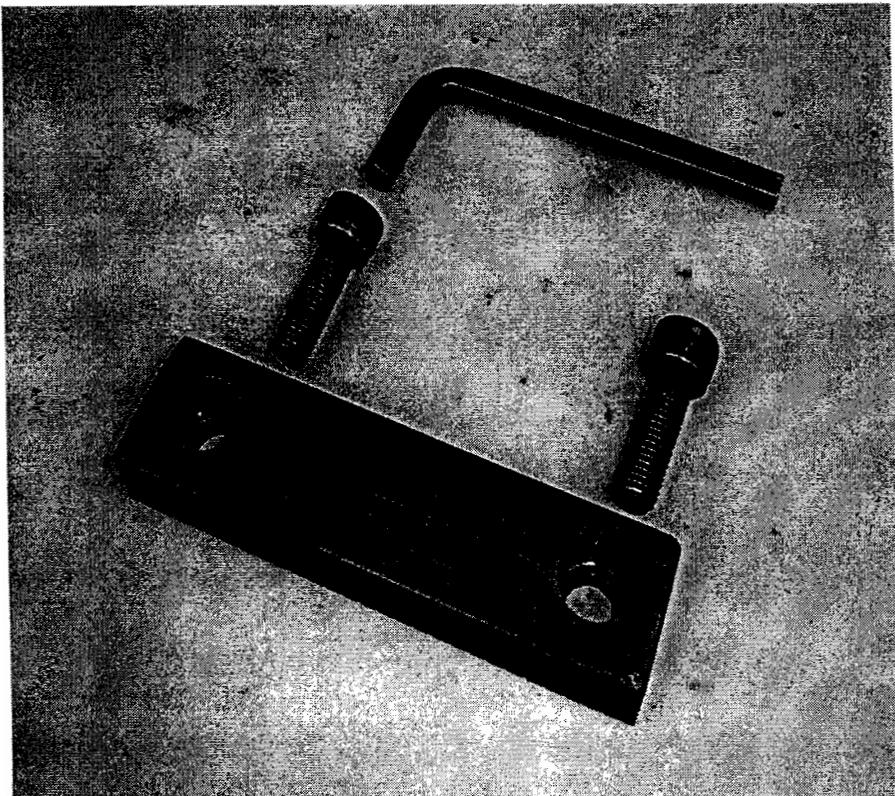
รูปที่ ง.14 โครงสร้างรองรับรางเลื่อน



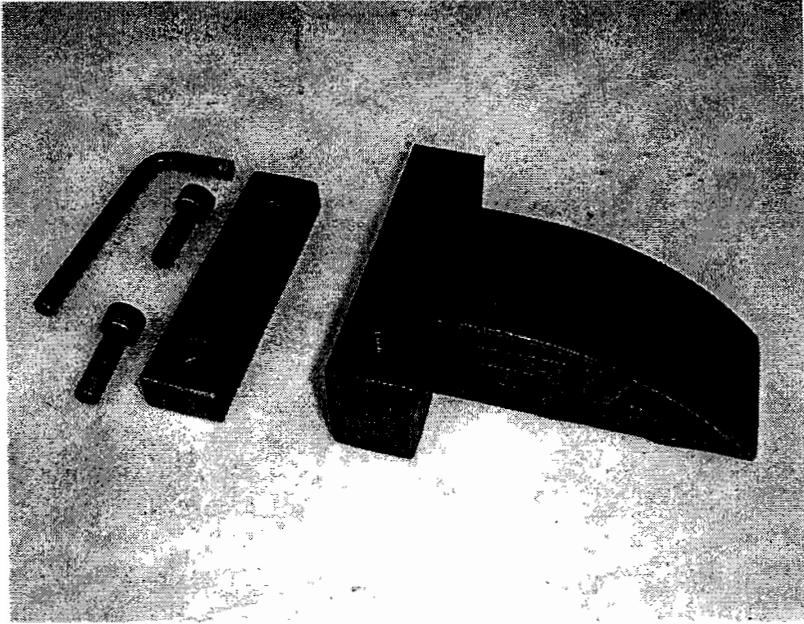
รูปที่ ๑.15 การประกอบทอร์ชเชื่อมทิกเข้ากับเครื่องตัด Straight-line Cutting Machine และแท่น
รางเลื่อน



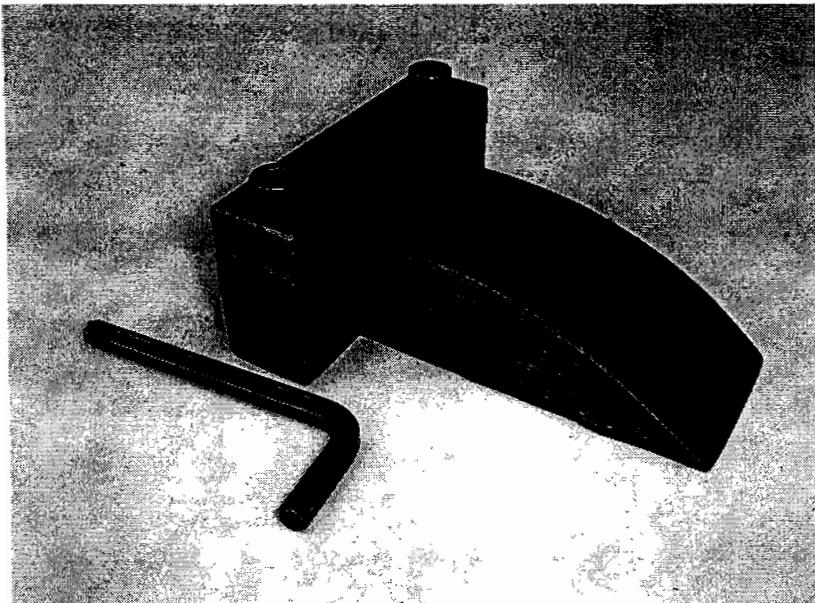
รูปที่ ง.16 โครงสร้างชุดทดสอบ V-restraint Test



รูปที่ ง.17 แผ่นกดยึดชิ้นงานทดสอบให้อยู่บน Die Block



รูปที่ ง.18 แผ่นกดยึดชิ้นงานทดสอบและ Die Block



รูปที่ ง.19 การประกอบแผ่นกดยึดชิ้นงานทดสอบกับเข้ากับ Die Block

ภาคผนวก จ

ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าสแตนเลสออสเทนนิติก

ตารางที่ ๑.1 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าออสเทนนิติก (Wrought Austenitic Stainless Steels)

Composition, wt.%									
Type	UNS Number	C	Mn	Si	Cr	Ni	P	S	Other
303	S30300	0.15	2.00	1.00	17.0-19.0	8.0-10.0	0.20	0.15 min	0-0.6 Mo
303Se	S30323	0.15	2.00	1.00	17.0-19.0	8.0-10.0	0.20	0.06	0.15 SeMin
304	S30400	0.08	2.00	1.00	18.0-20.0	8.0-10.5	0.045	0.03	-
304H	S30409	0.04-0.10	2.00	1.00	18.0-20.0	8.0-11.0	0.045	0.03	-
304L	S30403	0.03	2.00	1.00	18.0-20.0	8.0-11.0	0.045	0.03	-
304LN	S30453	0.03	2.00	1.00	18.0-20.0	8.0-11.0	0.045	0.03	0.10-0.16 N
304N	S30451	0.08	2.00	1.00	18.0-20.0	8.0-10.5	0.045	0.03	0.10-0.16 N
305	S30500	0.12	2.00	1.00	17.0-19.0	10.0-13.5	0.045	0.03	-
308	S30800	0.08	2.00	1.00	19.0-21.0	10.0-12.0	0.045	0.03	-
309	S30900	0.20	2.00	1.00	22.0-24.0	12.0-15.0	0.045	0.03	-
309S	S30908	0.08	2.00	1.00	22.0-24.0	12.0-15.0	0.045	0.03	-
310	S31000	0.25	2.00	1.50	24.0-26.0	19.0-22.0	0.045	0.03	-
310S	S31008	0.08	2.00	1.50	24.0-26.0	19.0-22.0	0.045	0.03	-
314	S31400	0.25	2.00	1.50-3.0	23.0-26.0	19.0-22.0	0.045	0.03	-
316	S31600	0.08	2.00	1.00	16.0-18.0	10.0-14.0	0.045	0.03	2.0-3.0 Mo
316H	S31609	0.04-0.10	2.00	1.00	16.0-18.0	10.0-14.0	0.045	0.03	2.0-3.0 Mo
316L	S31603	0.03	2.00	1.00	16.0-18.0	10.0-14.0	0.045	0.03	2.0-3.0 Mo
317	S31700	0.08	2.00	1.00	18.0-20.0	11.0-15.0	0.045	0.03	3.0-4.0 Mo
317L	S31703	0.03	2.00	1.00	18.0-20.0	11.0-15.0	0.045	0.03	3.0-4.0 Mo
321	S32100	0.08	2.00	1.00	17.0-19.0	9.0-12.0	0.045	0.03	5x% C Ti min

ตารางที่ จ.2 ลวดเชื่อมที่แนะนำให้ใช้เชื่อมเหล็กกล้าออสเทนนิติก (Recommended Filler Metals for Welding Austenitic Stainless Steels)

Type of Stainless Steel		Recommended Filler Metals		
Wrought	Cast	SMAW	GMAW, GTAW PAW, SAW	FCAW
201, 202	-	E209,E219,E308	ER209,E219,E308	E308TX-X
301,302,304,305	CF-20, CF-8	E308	ER308	E308 TX-X
304L	CF-3	E308L	ER308L	E308L TX-X
309	CH-20	E309	ER309	E309 TX-X
309S	-	E309L, E309Cb	ER309L	E309LTX-X,E309CbLTX-X
310, 314	CK-20	E310	ER310	E310TX-X
310S	-	E310, E310Cb	ER310	E310TX-X
316	CF-8M	E316	ER316	E316TX-X
316L	CF-3M	E316L	ER316L	E316LTX-X
316H	CF-12M	E16-8-2, E316H	E16-8-2, E316H	E316TX-X
317	-	E317	E317	E317LTX-X
317L	-	E317L	E317L	E317LTX-X
321	-	E347	E347	E347TX-X
330	HT	E330	E330	-
347, 348	CF-8C	E347	E347	E347TX-X

ภาคผนวก ฉ

ใบรับรองของลวดเติม Austenitic ER 310

88-86-85 13:39 AIR LIQUIDE WELDING (THAILAND)
FROM : PANGALPINA FAX NO. : 02 3675616

ID-662 9432256 PG1
Aug. 26 2004 05:47PM P7

INSPECTION CERTIFICATE



NOVAMETAL
SA SWITZERLAND

NEW 180/70 Road Wheel * P.O. Box 23 - CH-4404 Birmensdorf - Phone 041 410 940 88 88 * Fax 041 411 246 88 88

N 31878
Sample : 23/07/2004

40 mm 6, RAVENNA ER 9.5

2560
40 mm 6, RAVENNA ER 9.5

EX 10230 KEMMERTON - SAISON -

EX 10230 KEMMERTON - SAISON -

- EXECUTING Address -

- EXECUTING Address -

M. COMPIN. PRODUCT	DESCRIPTION	DIAMETER-LENGTH	WEIGHT	YOUR PO	DATE
3 74914 / 003 310	9 L ER 9.5 RAVENNA ER 9.5	1.4642 mm	2.40	1000 ER	8/06/2004
		EX 12072	25 20	NR 1201 P22 310804	

CHEMICAL ANALYSIS

Element	C	Mn	Si	S	P	Cr	Mo	Cu	Ni	Al	N	V	Nb	Ti	As	Pb	Fe
3 7139 - 21019	0.1209	1.5704	0.1198	0.0016	0.0016	20.9900	21.4304	0.1200	0.1200	0.0010	0.0010	0.0010	0.0010	0.0010	0.0010	0.0010	0.0010

* Results according to below diagram. This value is an approximation only.

* ELEMENTS TO * ELEMENTS

Q.C. Department

Page 1

88-26-84 17:21 TO: AIR LIQUIDE WELDING (THAILAND) FROM: 02 3675616

รูปที่ ๑.1 ใบรับรองของลวดเติม Austenitic ER 310

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล	นายชัยวิรุฬ โนนสระ
วัน เดือน ปีเกิด	22 กันยายน 2502
ประวัติการศึกษา	
ระดับอาชีวศึกษา	ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง สาขาวิชาช่างท่อและประสาน สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตขอนแก่น พ.ศ.2524
ระดับปริญญาตรี	ครุศาสตร์อุตสาหกรรมบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเชื่อมประกอบ สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตขอนแก่น พ.ศ.2543
ระดับปริญญาโท	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการเชื่อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี พ.ศ. 2550
ประวัติการทำงาน	อาจารย์ ระดับ คศ.2 สาขาเทคนิคโลหะ วิทยาลัยเทคนิคเขียงราย พ.ศ. 2524 - ปัจจุบัน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ขอตกลงว่าด้วยการโอนสิทธิในทรัพย์สินทางปัญญาของนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา

วันที่.....15.....เดือน.....กรกฎาคม.....พ.ศ.....2551.....

ข้าพเจ้า (ชื่อ / นาม / นามสกุล).....

รหัสประจำตัว.....46430527.....เป็นนักศึกษาของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ระดับ ประกาศนียบัตรบัณฑิต ปริญญาโท ปริญญาเอก

หลักสูตร.....วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต.....สาขาวิชา.....วิศวกรรมการเชื่อม.....

คณะ.....วิศวกรรมศาสตร์.....อยู่บ้านเลขที่.....1040/3.....หมู่.....-

ตรอก/ซอย.....-.....ถนน.....สนามบิน.....ตำบล/แขวง.....เวียง.....

อำเภอ/เขต.....เมือง.....จังหวัด.....เชียงราย.....รหัสไปรษณีย์.....57000.....

เป็น “ผู้โอน” ขอโอนสิทธิในทรัพย์สินทางปัญญาให้ไว้กับมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

โดยมี.....รศ.ดร.บุญเจริญ ศิริเนาวกุล.....ตำแหน่ง คณบดีคณะ.....วิศวกรรมศาสตร์.....

เป็นตัวแทน “ผู้รับโอน” สิทธิในทรัพย์สินทางปัญญาและมีข้อตกลงดังนี้

1. ข้าพเจ้าได้จัดทำโครงการวิจัยอุตสาหกรรมเรื่อง.....ความไวต่อการแตกร่อนในการเชื่อมเหล็กกล้า
สแตนเลส เกรด 304 ด้วยลวดเชื่อม ER 310.....ซึ่งอยู่ในความควบคุมของ.....รศ.ดร.บวรโชค ผู้พัฒนา.....
ตามพระราชบัญญัติลิขสิทธิ์ พ.ศ. 2537 และถือว่าเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรของมหาวิทยาลัย
เทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

2. ข้าพเจ้าตกลงโอนลิขสิทธิ์จากผลงานทั้งหมดที่เกิดขึ้นจากการสร้างสรรค์ของข้าพเจ้าใน
โครงการวิจัยอุตสาหกรรมให้กับมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ตลอดจนอายุแห่งการคุ้มครอง
ลิขสิทธิ์ตามพระราชบัญญัติลิขสิทธิ์ พ.ศ. 2537 ตั้งแต่วันที่ได้รับอนุมัติโครงร่างโครงการวิจัยอุตสาหกรรม
จากมหาวิทยาลัย

3. ในกรณีที่ข้าพเจ้าประสงค์จะนำโครงการวิจัยอุตสาหกรรมไปใช้ในการเผยแพร่ในสื่อใดๆ ก็ตาม
ข้าพเจ้าจะต้องระบุว่าโครงการวิจัยอุตสาหกรรมเป็นผลงานของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ทุกครั้งที่มีการเผยแพร่

4. ในกรณีที่ข้าพเจ้าประสงค์จะนำโครงการวิจัยอุตสาหกรรมไปเผยแพร่ หรือให้ผู้อื่นทำซ้ำหรือ
ดัดแปลงหรือเผยแพร่ต่อสาธารณชนหรือกระทำการอื่นใด ตามพระราชบัญญัติลิขสิทธิ์ พ.ศ. 2537 โดยมี
ค่าตอบแทนในเชิงธุรกิจ ข้าพเจ้าจะกระทำได้เมื่อได้รับความยินยอมเป็นลายลักษณ์อักษรจาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีก่อน

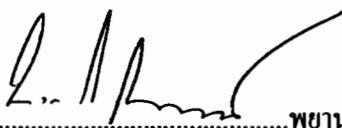
5. ในกรณีที่ข้าพเจ้าประสงค์จะนำข้อมูลจากโครงการวิจัยอุตสาหกรรมไปประดิษฐ์หรือพัฒนาต่อ ยอดเป็นสิ่งประดิษฐ์หรืองานทรัพย์สินทางปัญญาประเภทอื่น ภายในระยะเวลาสิบ (10) ปีนับจากวันลงนาม ในข้อตกลงฉบับนี้ ข้าพเจ้าจะกระทำมิได้เมื่อได้รับความยินยอมเป็นลายลักษณ์อักษรจาก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีมีสิทธิใน ทรัพย์สินทางปัญญานั้น พร้อมกับได้รับชำระค่าตอบแทนการอนุญาตให้ใช้สิทธิดังกล่าว รวมถึงการจัดสรร ผลประโยชน์อันพึงเกิดขึ้นจากส่วนใดส่วนหนึ่งหรือทั้งหมดของโครงการวิจัยอุตสาหกรรมในอนาคต โดย ให้เป็นไปตามระเบียบสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ว่าด้วย การบริหารผลประโยชน์อันเกิดจาก ทรัพย์สินทางปัญญา พ.ศ. 2538

6. ในกรณีที่มีผลประโยชน์เกิดขึ้นจาก โครงการวิจัยอุตสาหกรรมหรืองานทรัพย์สินทางปัญญาอื่นที่ ข้าพเจ้าทำขึ้นโดยมีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีเป็นเจ้าของ ข้าพเจ้าจะมีสิทธิได้รับการ จัดสรรผลประโยชน์อันเกิดจากทรัพย์สินทางปัญญาดังกล่าวตามอัตราที่กำหนดไว้ในระเบียบ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ว่าด้วย การบริหารผลประโยชน์อันเกิดจากทรัพย์สินทางปัญญา พ.ศ. 2538

ลงชื่อ..........ผู้โอนสิทธิ
(นายชัยวิรุฬ โนนสระ)

ลงชื่อ..........ผู้รับโอนสิทธิ
(รศ.ดร. นุญเจริญ สิริเนาวัล)

ลงชื่อ..........พยาน
(รศ. วชิระ มีทอง)

ลงชื่อ..........พยาน
(รศ.ดร. บวรโชค ผู้พัฒนา)