การศึกษาตัวแปรการเชื่อมเลเซอร์เทเลอร์แบล็งค์ต่อการยืดตัว ของรอยต่อชนแผ่นเหล็กเคลือบสังกะสี เกรด SGACD

A Study of Tailored Blank Laser Welding Parameters on Elongation of SGACD Gavanized Steel Joint

ผศ. ไพฑูรย์ ประทีปสุข

ผศ. ไพบูลย์ แย้มเผื่อน

ดร. กิตติพงษ์ กิมะพงศ์

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

งบประมาณประจำปี 2554

ชื่องานวิจัย : การศึกษาตัวแปรการเชื่อมเลเซอร์เทเลอร์แบล็งค์ต่อการยืดตัวของรอยต่อชนแผ่นเหล็กเคลือบสังกะสี เกรด SGACD

ชื่อผู้วิจัย : ผศ.ไพฑูรย์ ประทีปสุข
ผศ.ไพบูลย์ แย้มเผื่อน
ดร.กิตติพงษ์ กิมะพงศ์

หน่วยงาน : ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปี พ.ศ. : 2554

บทคัดย่อ

งานวิจัยฉบับนี้จัดทำขึ้นเพื่อศึกษาผลกระทบของตัวแปรในการเชื่อมเลเซอร์เทเลอร์แบล็งค์ โดยศึกษาการยืดตัวของรอยต่อชนแนวเชื่อมของเหล็ก SGACD การเปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคของรอยต่อชนแนวเชื่อมและการยืดตัวได้ใช้วิธีการทดสอบแบบอีริทเซน

วัตถุดิบที่ใช้ในการศึกษาเป็นเหล็กเคลือบสังกะสีเกรด SGACD 45/45 ความหนา 0.7 มม. และ1.2 มม. ขนาดของแผ่นเหล็กความหนา 0.7 มม.ถูกตัดเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้ากว้าง 1050 มม.และยาว 1680 มม.ส่วนขนาดของแผ่นเหล็กความหนา 1.2 มม.ถูกตัดเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้ากว้าง 280 มม.และยาว 1660 มม.รอยต่อชนของแผ่นเหล็กทั้ง 2 ถูกเชื่อมด้วยลำแสงเลเซอร์แบบ Nd:YAG โดยมีตัวแปรของการเชื่อมคือ ความเร็วในการเชื่อมอยู่ที่ 4000 - 6000 มม.ต่อนาที ตำแหน่งหัวเชื่อมอยู่ที่ 0.45 - 0.55 มม. และระยะห่างระหว่างแผ่นชิ้นงานอยู่ที่ 0.00 - 0.13 มม.แนวเชื่อมที่ถูกเชื่อมแล้วจะถูกทดสอบการขึ้นรูปด้วยเครื่องอีริทเซนและถูกวิเคราะห์ผลโดยโปรแกรมอะโนว่า (Anova)

ผลของการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้ ผลการทดสอบการขึ้นรูปโดยเครื่องอีริทเซน ความสูงของการขึ้นรูปมากกว่า 7.00 มม.ซึ่งสูงกว่าค่ามาตรฐานที่ยอมรับในอุตสาหกรรมรถยนต์ ตัวแปรที่เหมาะสมในการเชื่อมได้แก่ ความเร็วของการเชื่อมอยู่ที่ 4000 มม.ต่อนาที ตำแหน่งหัวเชื่อมอยู่ที่ 0.45 มม.และระยะห่างระหว่างแผ่นชิ้นงานอยู่ที่ 0.00 มม. โดยการยืดตัวอยู่ที่ 9.98 มม. การเพิ่มตำแหน่งของหัวเชื่อมจะทำให้การยืดตัวของแนวเชื่อมเพิ่มขึ้น เนื่องจากเป็นการเพิ่มระยะการซึมลึกของการเชื่อม ซึ่งเป็นตัวแปรสำคัญในกระบวนการขึ้นรูปโลหะ การเพิ่มความเร็วการเชื่อมและการเพิ่มระยะห่างระหว่างแผ่นชิ้นงาน จะมีผลโดยตรงต่อการลดลงของการยืดตัว เพราะจะทำให้แนวเชื่อมไม่สมบูรณ์ และทำให้เกิดปัญหา อันเดอร์ฟิลที่แนวเชื่อม

คำสำคัญ : การเชื่อมเลเซอร์เทเลอร์แบล็งค์ ; การเชื่อมเลเซอร์Nd:YAG ; การทดสอบวิธีอีริทเซน ; เหล็กเคลือบสังกะสีเกรด SGACD 45/45 ; การผลิตประตูรถยนต์

Research Title : A Study of Tailored Blank Laser Welding Parameters on Elongation of SGACD Gavanized Steel Joint

Researcher :

Organization : Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi

Year of Achievement : 2010

Abstract

This thesis was conducted to study an effect of Tailor blank laser welding parameters on an elongation property of a SGACD steel butt joint. A comparative between a microstructure of the butt joint and an elongation that was tested by the Erichsen test was also performed.

The 0.7 mm. and 1.2 mm thicknesses of SGACD 45/45 galvanized steel plates were a material used in this study. The dimension of 0.7 mm in thickness plate was prepared to be a rectangular shape with 1050 mm wide and 1680 mm long. The dimension of 1.2 mm in thickness plate was also prepared to be a rectangular shape with 280 mm wide and 1660 mm long. The butt joint of 2 plates was Nd: YAG laser welded by the welding parameters that were a welding speed of 4000-5000 mm/min, a target position of 0.45-0.55 mm. and a gap distance of 0.00-0.13 mm. The joint that was successfully welded was Erichsen Cupping tested and then analyzed by ANOVA software.

The experiment results were concluded as follows. The Erichsen cupping test results of the joints in this study were higher than that of 7.00 mm and were higher than that of the accepted standard in an automobile industry. The optimum parameter was a welding speed of 4000 mm/min, s target position of 0.45 mm and a gap distance of 0.0 mm with a elongation of 9.98 mm. Increasing of the target position could increase the joint elongation because it could increase the penetration distance of the joint that was an important factor for the metal deforming process. Increasing speed welding and the gap distance between the plates of the joint directly decreased the joint elongation because it produced an incomplete joint and produced the under-fill defect on the welded surface.

Key words ; Tailored blank laser welding ; Laser welding Nd:YAG ; Erichsen Cupping test ; Galvanized steel grade SGACD 45/45 ; door automobile production .

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ได้ให้ทุนสนับสนุนการวิจัย ประจำปี 2554 ทำให้งานวิจัยชิ้นนี้สามารถดำเนินการและบรรลุวัตถุประสงค์ดังที่ตั้งไว้ ขอขอบคุณ ห้องปฏิบัติการโลหะวิทยา ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัย เทคโนโลยี ราชมงคลธัญบุรี ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้สถานที่ทำให้การทดลองนี้เสร็จสมบูรณ์ เป็นไปอย่างราบรื่น

ขอขอบคุณ คุณธรรมนูญ อินทรพล และคุณยงยุทธ ขุนอาจ ที่ให้ความช่วยเหลือในการ ควบคุมเครื่องเชื่อมเลเซอร์สำหรับการเชื่อมชิ้นงานทำการทดลอง จนงานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงตาม จุดประสงค์

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครูบาอาจารย์ ที่อบรมสั่งสอนจนทำให้ ผู้วิจัยมีโอกาสในการทำวิจัยนี้นอกจากนั้นขอกราบขอบพระคุณทุกๆท่านที่มีความเกี่ยวข้องกับ งานวิจัยชิ้นนี้ ซึ่งผู้วิจัยไม่ได้เอ่ยนามถึง ประโยชน์อันใดที่เกิดจากงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยขอมอบแด่ทุกท่านที่ ให้ความช่วยเหลือจนงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ผศ.ไพฑูรย์ ประทีปสุข
ผศ.ไพบูลย์ แย้มเผื่อน
ดร.กิตติพงษ์ กิมะพงศ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย	2
1.3 ขอบเขตการวิจัยและตัวแปร	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 เหล็กแผ่นเคลือบสังกะสี	4
2.2 รอยต่อชนแผ่นเหล็กเคลือบสังกะสี	6
2.3 ทฤษฎีการเชื่อมเลเซอร์เทเลอร์แบล็งค์	6
2.4 การทดสอบและตรวจสอบสมบัติของแนวเชื่อม	17
2.5 ทฤษฎีการประเมินทางสถิติ	21
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	28
บทที่ 3 การดำเนินงานการวิจัย	31
3.1 ลำดับขั้นตอนวิธีการวิจัย	31
3.2 การออกแบบลำดับขั้นการทดลองการทดลอง	47
3.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวน	52
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ข้อมูล	53
4.1 การทดลองเบื้องต้น	53
4.2 ผลการทดสอบอิทธิพลของตัวแปรในการเชื่อม	59
4.3 การวิเคราะห์ตัวแปรการเชื่อมต่อค่าการยืดตัวด้วยอะโนว่า	73

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	78
5.1 สรุปผลการทดลอง	78
5.2 ข้อเสนอแนะ	79
บรรณานุกรม	80
ภาคผนวก ก ค่าการยืดตัวและรูปจากการทดลอง	82
ภาคผนวก ข ตารางบันทึกค่าการยืดตัวลงในโปรแกรมมินิเทป	110
ภาคผนวก ค ผลงานตีพิมพ์	117

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	เกรดและสัญลักษณ์สำหรับเหล็กรีดร้อนประเภทเหล็กแผ่นและเหล็กม้วน	4
2.2	เกรดและสัญลักษณ์สำหรับเหล็กรีดเย็นประเภทเหล็กแผ่นและเหล็กม้วน	5
2.3	แบบพารามิเตอร์	23
2.4	การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับแบบจำลอง 3 ปัจจัย แบบผลตายตัว(Fixed effect)	26
3.1	ขั้นตอนการวิจัย	31
3.2	ส่วนผสมทางเคมี	32
3.3	สมบัติทางกลความแข็งแรงดึง	34
3.4	แผนผังการสุ่มการทดลอง	48
4.1	ผลการทดลองการยืดตัวของแนวเชื่อมการทดลองความเร็วการเชื่อม 6000 มม.ต่อนาที	54
4.2	ผลการทดลองการยืดตัวของแนวเชื่อมการทดลองความเร็วการเชื่อม 4000 มม.ต่อนาที	56
4.3	ค่าเฉลี่ยการวัดมิติรอยเชื่อมเลเซอร์ความเร็วระยะตำแหน่งหัวเชื่อม + 0.45 มม.	60
4.4	ค่าการยืดตัวจากการทดลอง	61
4.5	ค่าเฉลี่ยการวัดมิติรอยเชื่อมเลเซอร์ที่ระยะห่างแผ่นงานเชื่อม 0.00 0.07 0.15 มม.	65
4.6	ค่าเฉลี่ยการวัดมิติรอยเชื่อมเลเซอร์ที่ความเร็ว 4000 5000 6000 มม.ต่อนาที	69
4.7	ค่าเฉลี่ยการวัดมิติรอยเชื่อมเลเซอร์ที่ตำแหน่งหัวเชื่อม + 0.45 + 0.50 + 0.55 มม.	72
4.8	การวิเคราะห์อะโนว่า (Anova analysis) ต่อค่าการยืดตัว (Elongation)	74

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
1.1	ผลิตภัณฑ์ชิ้นส่วนประตูรถยนต์	1
1.2	ชิ้นงานที่มีความหนาและความกว้างต่างกัน	2
2.1	Nd: YAG เลเซอร์ขนาด 3 กิโลวัตต์	7
2.2	เครื่องผลิตลำแสงเลเซอร์	8
2.3	เครื่องถ่ายเทความร้อน	9
2.4	การเคลื่อนที่หัวเชื่อม	9
2.5	การตรวจสอบความหนา	10
2.6	นำชิ้นงานวางที่โต๊ะเชื่อม	10
2.7	นำชิ้นงานออกจากที่โต๊ะเชื่อม	11
2.8	การปล่อยลำแสง	11
2.9	การควบคุมการทำงาน	12
2.10	ชุดรับข้อมูลและสั่งการ	12
2.11	วางชิ้นงานที่ตรวจสอบความหนาแล้ว	13
2.12	โต๊ะวางชิ้นงานก่อนตรวจสอบความหนา	13
2.13	แผนภาพของNd: YAG เลเซอร์	14
2.14	แผ่นเทเลอร์แบล็งค์	15
2.15	การเชื่อมรอยต่อชนด้วยเลเซอร์	16
2.16	การเชื่อมรอยต่อเกยด้วยความต้านทาน	16
2.17	การเชื่อมแบบการเหนี่ยวนำความถี่สูง	17
2.18	การเชื่อมด้วยลำอิเลกตรอน	17
2.19	เครื่องทดสอบอิริเซน	18
2.20	ขนาดชิ้นงานทดสอบค่าการยืดตัว	18
2.21	ผลการทดสอบค่าการยืดตัว	19
2.22	แสดงโครงสร้างทางสถิติที่นิยมใช้ในปัจจุบัน	22
2.23	แสดง ค่าวิกฤติ พื้นที่วิกฤติ ระดับนัยสำคัญ และค่าพี- แวลู่ (P-value)	24
2.24	พื้นที่ใต้โค้งด้านขวาการแจกแจงเอฟ	26
3.1	ขนาดชิ้นงานตัด	32

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.2	การทดสอบความแข็งแรงดึง	33
3.3	การเตรียมชิ้นงานที่ตัดเสร็จก่อนการเชื่อม	33
3.4	โต๊ะสำหรับวางชิ้นงานก่อนวัดความหนา	34
3.5	กดปุ่มสวิทช์ สตาร์ท	35
3.6	นำชิ้นงานเข้าตรวจสอบความหนา	36
3.7	ตรวจสอบความหนาที่โต๊ะตรวจสอบ	37
3.8	ชิ้นงานที่ ตรวจสอบความหนาแล้ว	37
3.9	นำชิ้นงานวางบนจิ๊กเชื่อม	38
3.10	ทำความสะอาดขอบชิ้นงาน	38
3.11	ทำความสะอาดจิ๊กเชื่อม	39
3.12	ทำความสะอาดร่องตัวดันชิ้นงาน	40
3.13	ตรวจตำแหน่ง Pusher	40
3.14	ทำความสะอาดโฟกัสเลนซ์	41
3.15	ตรวจพลังงานเลเซอร์	41
3.16	ตรวจแรงดันลม	42
3.17	การต่อชนในอุปกรณ์การจับยึด	42
3.18	รีโมทคอนโทรลความเร็ว	43
3.19	การปรับตำแหน่งหัวเชื่อม	44
3.20	ตำแหน่งหัวเชื่อมเคลื่อนที่	44
3.21	ชิ้นงานเตรียมตรวจสอบโครงสร้างมหภาค	45
3.22	ชิ้นงานที่ตัดเสร็จเตรียมไปทดสอบ	46
3.23	เครื่องตัด ชิ้นงานทดสอบ	47
3.24	เครื่องมือทดสอบการยืดตัว	49
3.25	การทดสอบการยืดตัวของแนวเชื่อม	49
3.26	กระจกส่องแนวเชื่อมเครื่องทดสอบการยืดตัว	50
3.27	สเกลวัดค่าการยืดเครื่องทดสอบการยืด	50
3.28	เครื่องทดสอบการยืดตัวอิริเซน	51
3.29	การทดสอบการยืดตัวของแนวเชื่อม	52

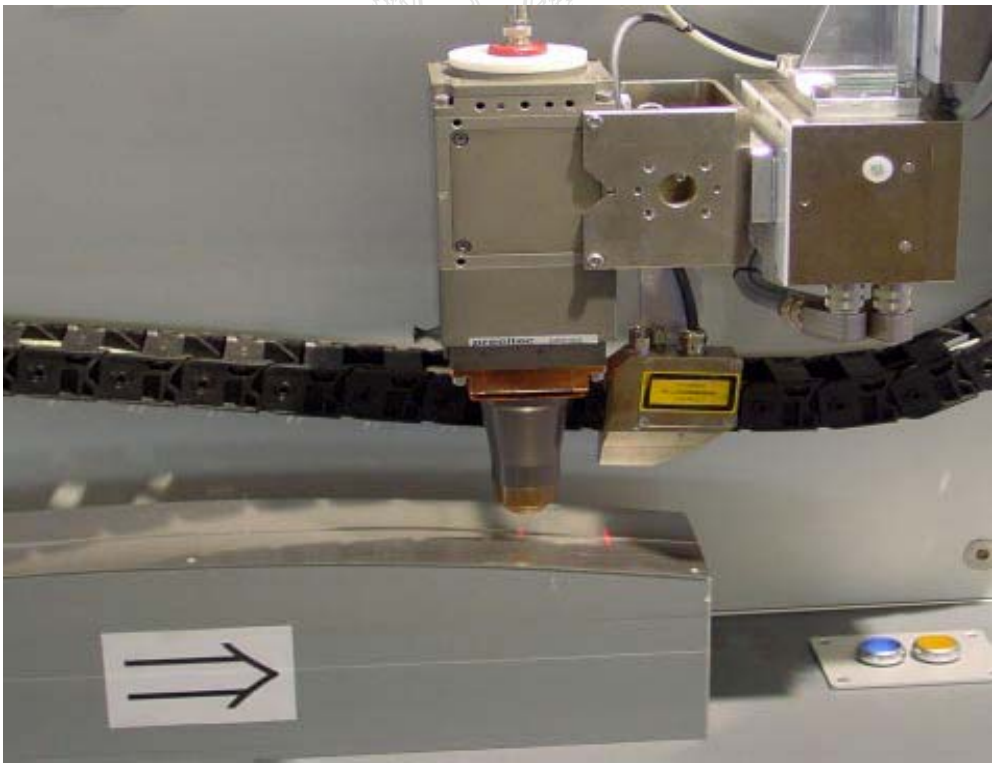
สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.1	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งจุดหัวเชื่อมกับระยะห่างแผ่นงานเชื่อมและค่าการยืดตัว	55
4.2	กราฟความสัมพันธ์ระยะห่างระหว่างแผ่นตำแหน่งหัวเชื่อมกับค่าการยืดตัว	57
4.3	ขนาดมิติของรอยต่อต่างๆบริเวณแนวเชื่อม	60
4.4	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างแผ่นงานเชื่อมกับตำแหน่งการวัดค่า	61
4.5	ชิ้นงานหลังการทดสอบการยืดตัว	63
4.6	ระยะห่างแผ่นงานเชื่อมกับค่าการยืดตัว	63
4.7	โครงสร้างมหภาคของระยะห่างแผ่นงานเชื่อม 0.00 0.07 0.13 มม.	64
4.8	ความเร็วการเชื่อมกับค่าการยืดตัว	64
4.9	โครงสร้างมหภาคของรอยต่อรอยต่อที่ความเร็วการเชื่อม 4000 5000 6000มม.ต่อนาที	65
4.10	ตำแหน่งหัวเชื่อมกับค่าการยืดตัว	66
4.11	โครงสร้างมหภาคของตำแหน่งหัวเชื่อม + 0.45 + 0.50 + 0.55 มม.	67
4.12	อิทธิพลร่วม ระหว่างความเร็วและตำแหน่งหัวเชื่อม	68
4.13	อิทธิพลร่วม ระหว่างความเร็วและ ระยะห่างของแผ่นงาน	68
4.14	อิทธิพลร่วมระหว่างตำแหน่งหัวเชื่อมและระยะห่างแผ่นงานเชื่อม	70
4.15	โครงสร้างสหภาคตำแหน่งหัวเชื่อม + 0.45 มม.	71
4.16	โครงสร้างมหภาคตำแหน่งหัวเชื่อม + 0.50 มม.	71
4.17	โครงสร้างมหภาคตำแหน่งหัวเชื่อม + 0.55 มม.	72
4.18	อิทธิพลร่วมระหว่างความเร็วและตำแหน่งหัวเชื่อม	75
4.19	อิทธิพลร่วมระหว่างความเร็วระยะห่างแผ่นงานเชื่อม	76
4.20	อิทธิพลร่วมระหว่างตำแหน่งหัวเชื่อมและระยะห่างแผ่นงานเชื่อม	76

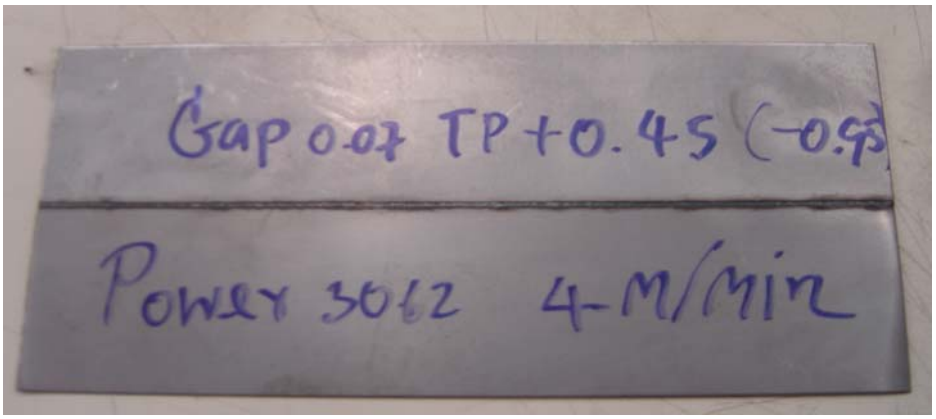
บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

อุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ มีผลิตภัณฑ์หลายชนิดในการผลิต ผลิตภัณฑ์ชิ้นส่วนประตูรถยนต์ เป็นผลิตภัณฑ์ชิ้นส่วนที่มีความสำคัญมากที่สุด เพราะวัตถุดิบที่นำมาผลิตเป็นวัตถุดิบเหล็กแผ่น 2 ชิ้นที่มีความหนาต่างกัน เพื่อลดวัตถุดิบในการผลิต แต่ความแข็งแรงยังคงเดิม ซึ่งส่งผลทำให้น้ำหนักโครงสร้างโดยรวมลดลง และยังทำให้โครงสร้างของรถยนต์นั้นมีความยืดหยุ่นเพิ่มมากขึ้น [1] ทั้งยังลดความสูญเสียพลังงานน้ำมันเชื้อเพลิงของผู้ใช้รถ ซึ่งเหล็กที่มีความหนาต่างกัน (Tailored blank) ผลิตเป็นชิ้นงานชิ้นเดียวกัน ต้องผ่านกรรมวิธีกระบวนการเชื่อมเลเซอร์เทเลอร์แบลงค์ ดังรูปที่ 1 และรูปที่ 2 แล้วนำไปทดสอบคุณสมบัติการยืดตัวของแนวเชื่อม และชิ้นงานที่ต้องการได้ค่าความลึกของรอยทดสอบไม่ต่ำกว่า 7.00 มิลลิเมตร ตามมาตรฐานการทดสอบโดยวิธีอิริเซนคัปปิ้งเทส [2] ก่อนนำไปขึ้นรูปปั๊มเป็นประตูรถยนต์



รูปที่ 1.1 การเชื่อมเลเซอร์เทเลอร์แบล็งค์



รูปที่ 1.2 ชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมเลเซอร์เทเลอร์แบล็งค์

ในปัจจุบันค่าความลึกที่ทดสอบได้มีค่าต่ำกว่าและสูงกว่ามาตรฐานที่กำหนด โดยไม่ทราบค่าตัวแปรการเชื่อมตัวใดที่มีอิทธิพลต่อการยืดตัวของแนวเชื่อม และยังไม่ทราบโครงสร้างจุลภาคกับความสามารถในการขึ้นรูป ทำให้ไม่มีมาตรฐานการผลิตที่แน่นอนในการควบคุมกระบวนการผลิต ซึ่งจุดสำคัญของการเชื่อมเลเซอร์นี้ คือ อิทธิพลของตัวแปรการเชื่อมที่มีผลต่อการยืดตัวของแนวเชื่อมที่มีค่าความลึกจากรอยทดสอบไม่ต่ำกว่า 7.00 มิลลิเมตร ตามมาตรฐานการทดสอบโดยวิธี อิริเซนคัปปิ้งเทส และโครงสร้างจุลภาคกับความสามารถในการขึ้นรูป หรือการยืดตัวด้วยเหตุนี้ในงานวิจัยจึงต้องทำการทดสอบ เพื่อหาตัวแปรใดที่มีอิทธิพลทำให้แนวเชื่อมยืดตัวได้ตามค่าความลึกของรอยทดสอบตามมาตรฐานที่กำหนด โดยวิธีอิริเซนคัปปิ้งเทสและค่าการยืดตัวของแนวเชื่อมสูงสุดและต่ำสุดและโครงสร้างจุลภาคกับความสามารถในการขึ้นรูป เพื่อเตรียมข้อมูลในการใช้งานในอุตสาหกรรมต่าง เช่น อุตสาหกรรมการผลิตรถยนต์

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1.2.1 ศึกษาอิทธิพลตัวแปรการเชื่อมเลเซอร์เทเลอร์แบล็งค์ที่มีผลต่อสมบัติทางกลของรอยเชื่อมเหล็กแผ่นชุบสังกะสีเกรด SGACD 45/45ได้ค่าความลึกของรอยทดสอบไม่ต่ำกว่ามาตรฐาน 7.00 มิลลิเมตร และค่าการยืดตัวของแนวเชื่อมสูงสุดและต่ำสุดโดยใช้เครื่องอิริเซนเทส

1.2.2 ศึกษาโครงสร้างมหภาคและความสามารถในการขึ้นรูปของรอยต่อชนแผ่นเทเลอร์แบล็งค์

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

ชิ้นงานในการทดสอบ คือ เหล็กแผ่นชุบสังกะสีเกรด SGACD 45/45 ขนาดหนา 0.7 มิลลิเมตร กว้าง 1050 มิลลิเมตร ยาว 1680 มิลลิเมตร จำนวน 108 แผ่น และแผ่นชุบสังกะสีเกรด SGACD 45/45 ขนาดหนา 1.2 มิลลิเมตร กว้าง 280 มิลลิเมตร ยาว 1660 มิลลิเมตร จำนวน 108 แผ่น นำมาเชื่อมเข้าด้วยกัน แล้วนำไปทดสอบค่ารอยความลึกจากการทดสอบ และตรวจสอบโครงสร้างกับความสามารถในการขึ้นรูปของรอยต่อชนแผ่นเทเลอร์แบล็งค์

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 เป็นองค์ความรู้ในการวิจัยต่อไป พัฒนาองค์ความรู้พื้นฐานของการเชื่อมเลเซอร์เทเลอร์แบล็งค์ต่อการยืดตัวของรอยต่อชนแผ่นเหล็กเคลือบสังกะสีเกรด SGACD ในภาคอุตสาหกรรมต่างๆ

1.4.2 บริการความรู้แก่ภาคธุรกิจเพื่อนำไปสู่การผลิตเชิงพาณิชย์จัดเตรียมข้อมูลวิธีการ และผลการทดลองเบื้องต้นที่สามารถนำเสนอให้แก่ภาคธุรกิจและสามารถนำไปใช้ประโยชน์เพื่อทำการผลิตได้ทันที

1.4.3 เพิ่มประสิทธิภาพในการผลิต คาดว่าการเชื่อมเลเซอร์เทเลอร์แบล็งค์ต่อการยืดตัวของรอยต่อชนแผ่นเหล็กเคลือบสังกะสีเกรด SGACD จะทำให้งานอุตสาหกรรมสามารถเตรียมการผลิตเพื่อป้องกันการเชื่อมชนิดนี้ได้

1.4.4 เป็นประโยชน์ต่อประชากรกลุ่มเป้าหมาย กลุ่มผู้วิจัย พัฒนาองค์ความรู้เกี่ยวกับการเชื่อมเลเซอร์เทเลอร์แบล็งค์ต่อการยืดตัวของรอยต่อชนแผ่นเหล็กเคลือบสังกะสีเกรด SGACD เพื่อเป็นพื้นฐานในการพัฒนางานวิจัยต่อไป และสามารถเผยแพร่ในงานประชุมวิชาการภายในประเทศหรือตีพิมพ์ในวารสารภายในประเทศอย่างน้อย 1 เรื่อง

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาข้อมูลทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรการเชื่อมเลเซอร์เทเลอร์แบล็งค์ต่อการยืดตัวของรอยต่อชนแผ่นเหล็กเคลือบสังกะสีเกรด SGACD 45/45 ได้ค่าความลึกของรอยทดสอบไม่ต่ำกว่ามาตรฐาน 7.00 มิลลิเมตร และค่าการยืดตัวของแนวเชื่อมสูงสุดและต่ำสุดโดยใช้เครื่องอีริทเซนเทส (Erichsen test) และศึกษาโครงสร้างมหภาคกับความสามารถในการขึ้นรูปมีหัวข้อดังต่อไปนี้

2.1 เหล็กแผ่นเคลือบสังกะสี

เหล็กแผ่นเคลือบสังกะสีคือ เหล็กแผ่นที่เคลือบสังกะสีเพื่อป้องกัน การกัดกร่อนที่เนื้อเหล็ก ซึ่งในบรรยากาศที่มีการกัดกร่อนสังกะสีที่เคลือบจะทำหน้าที่เป็นตัวถูกกัดกร่อนแทนเหล็ก [3]

2.1.1 ประเภทของเหล็กแผ่นเคลือบสังกะสี

เหล็กแผ่นเคลือบสังกะสีในประเทศไทยแบ่งเป็น 2 ประเภท [4]

(ก) เหล็กแผ่นเหล็กเคลือบสังกะสีชนิดแผ่นเรียบสังกะสีชนิดนี้ส่วนใหญ่ใช้ในอุตสาหกรรมต่อเนื่อง เช่น อุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ เครื่องใช้ไฟฟ้า เฟอร์นิเจอร์ เครื่องทำความร้อน ท่อของเครื่องปรับอากาศรางน้ำ ฝาโอ่ง และแท้งค์น้ำเป็นต้น

(ข) เหล็กแผ่นเคลือบสังกะสีแผ่นลอนหรือแบบลูกฟูก มีลักษณะการใช้งานในการก่อสร้างขนาดเล็ก สำหรับใช้กั้นเป็นอาณาเขตของสถานที่ก่อสร้างและที่พักคนงาน รวมถึงการนำมาสร้างเป็นสังกะสีมุงหลัง และฝาบ้าน เช่นกลุ่มลูกค้าในภาคเกษตรกรรม

2.1.2 เกรดและสัญลักษณ์ แบ่งตามโลหะพื้นฐานของเหล็ก (Base metal) ในเหล็กรีดร้อนแบ่งเป็น 6 เกรด ดังแสดงในตารางที่ 2.1 และสำหรับเหล็กรีดเย็นแบ่งเป็น 10 เกรด ดังแสดงในตารางที่ 2.2 [2]

ตารางที่ 2.1 เกรดและสัญลักษณ์สำหรับเหล็กรีดร้อนทั้งประเภทเหล็กแผ่นและเหล็กม้วน

สัญลักษณ์ของเกรด	ความหนา (มิลลิเมตร)	การใช้
SGHC	มากกว่า 1.6 ถึง 6.0	เกี่ยวกับการค้าคุณภาพ
SGHC340		โครงสร้างคุณภาพ
SGH400		
SGH440		
SGH490		
SGH540		

ตารางที่ 2.2 เกรดและสัญลักษณ์สำหรับเหล็กรีดเย็นทั้งประเภทเหล็กแผ่นและเหล็กม้วน

สัญลักษณ์ของเกรด	ความหนา (มิลลิเมตร)	การใช้
SGCC	มากกว่า 0.25 ถึง 3.2	เกี่ยวกับการค้าคุณภาพ
SGCH	มากกว่า 0.11 ถึง 1.0	เกี่ยวกับการค้าคุณภาพ,ชั้นความแข็ง
SGCD1(SGACD 45/45)	มากกว่า 0.40 ถึง 2.3	คุณภาพการขึ้นรูป,ชั้น1
SGCD2(SGACD 45/45)		คุณภาพการขึ้นรูป,ชั้น2
SGCD3	มากกว่า 0.60 ถึง 2.3	คุณภาพการขึ้นรูป,ชั้น3
SGC340	มากกว่า 0.25 ถึง 3.2	โครงสร้างคุณภาพ
SGC400		
SGC440		
SGC490		
SGC570	มากกว่า 0.25 ถึง 2.0	

2.1.3 สมบัติของเหล็กเคลือบสังกะสี [3]

(ก) ความต้านทานต่อการกัดกร่อน สังกะสีมีคุณสมบัติเด่นในการป้องกันการกัดกร่อนแบบการเสียสละ(Sacrificial)โดยการเสียสละตัวเองเกิดการทำปฏิกิริยาการกัดกร่อนแทนเหล็กช่วยป้องกันการเกิดสนิมบริเวณผิวเปิด หรือขอบตัดซึ่งเป็นจุดที่เกิดการกัดกร่อนได้ง่าย

(ข) การเชื่อมเหล็กเคลือบสังกะสี เหล็กเคลือบสังกะสี ซึ่งผ่านกระบวนการเคลือบสังกะสีด้วยวิธีชุบร้อนแบบต่อเนื่องทำให้แผ่นเหล็กมีผิวเคลือบที่ทนทานไม่แตกกระเทาะหรือลอกในระหว่าง การเชื่อม การรีดขึ้นรูป ดัดโค้ง และปั๊มลึก

(ค) ความเรียบเหล็กเคลือบสังกะสี สามารถนำไปรีด เพื่อปรับสภาพผิว (Skin pass) เพื่อสะดวกในการทาสี เคลือบ

(ง) ความหนา ความกว้าง เหล็กเคลือบสังกะสี มีขนาดความหนา ตั้งแต่ 0.23 มิลลิเมตร ถึง 1.60 มิลลิเมตร ส่วนความกว้างมีให้เลือก 710-1265 มิลลิเมตร และระดับมวลสารของชั้นเคลือบตั้งแต่ Z12 ถึง Z35 ขึ้นอยู่กับการใช้งาน

2.1.4 การนำเหล็กเคลือบสังกะสีไปใช้งาน [5]

การใช้ประโยชน์ของแผ่นเหล็กเคลือบสังกะสีในปัจจุบันนี้อุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ได้มีการนำเข้ามาใช้กันอย่างแพร่หลายโดยเฉพาะการผลิตประตูรถยนต์ (Door Car) ซึ่งมีอยู่ทั้งหมด 3 ลักษณะด้วยกัน [5] มีดังต่อไปนี้

(ก) PNL FR DRINR LH/RH(S/CAB) ขนาดเหล็กหนา 1.2 มิลลิเมตร กว้าง 280 มิลลิเมตร ยาว 1660 มิลลิเมตรและขนาดเหล็กหนา 0.7 มิลลิเมตร กว้าง 1050 มิลลิเมตร ยาว 1680 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นประตูรถบิ๊กอัพประเภท 2 ประตู 1 ตอน

(ข) PNL FR DRINR LH/RH (C/CAB) ขนาดเหล็กหนา 1.2 มิลลิเมตร กว้าง 255 มิลลิเมตร ยาว 1670 มิลลิเมตรและขนาดเหล็กหนา 0.7 มิลลิเมตร กว้าง 1140 มิลลิเมตร ยาว 1690 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นประตูรถปิ๊กอัพประเภท 2 ประตู 2 ตอน

(ค) PNL RR RH (D/CAB) ขนาดตัดเหล็กหนา 1.2 มิลลิเมตร กว้าง 255 มิลลิเมตร ยาว 905 มิลลิเมตรและขนาดเหล็กหนา 0.7 มิลลิเมตร กว้าง 925 มิลลิเมตร ยาว 1285 มิลลิเมตรซึ่งเป็นประตูรถปิ๊กอัพประเภท 4 ประตู

2.2 รอยต่อชนแผ่นเหล็กเคลือบสังกะสี

การเชื่อมเลเซอร์เทเลอร์แบล็งค์ ระยะห่างของรอยต่อชนระหว่างแผ่นงานเชื่อม กำหนดให้ไม่เกิน 0.10 มิลลิเมตรตามมาตรฐานการเชื่อมเลเซอร์เทเลอร์แบล็งค์ Nd: YAG (Neodymium yttrium aluminum garnet) เพื่อให้เกิดการโอนถ่ายของน้ำโลหะจากแผ่นเหล็กที่หนากว่าไปยังแผ่นเหล็กที่บางกว่ามีความสมบูณ์มากที่สุดขณะทำการเชื่อม [6,7]

2.3 ทฤษฎีการเชื่อมเลเซอร์เทเลอร์แบล็งค์ (Laser Tailored Blank Welded History)

2.3.1 การเชื่อมเลเซอร์ [6]

การเชื่อมเลเซอร์ (Laser welding) คือการนำโลหะสองชิ้นซึ่งอาจจะเป็นโลหะชนิดเดียวกันหรือต่างชนิดกันก็ได้มาสัมผัสกัน ทำการให้ความร้อนบริเวณที่สัมผัสกันให้ร้อนจนถึงจุดละลายแล้วเชื่อมจนติดกัน ฉะนั้นความร้อนที่ใช้จะต้องมากพอทำให้โลหะละลายแต่ต้องไม่มากจนกระทั่งทำให้เกิดการระเหยกลายเป็นไอซึ่งจะทำให้เกิดรอยเชื่อมต่อเป็นรูพรุน โลหะส่วนมากมีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนลดลงอย่างรวดเร็วเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจนถึงจุดละลาย ดังนั้นจึงต้องระมัดระวังให้มีการควบคุมปริมาณพลังของเลเซอร์ให้ดีซึ่งพบว่าจะมีปัญหามากเมื่อโลหะมีจุดละลายต่างกันมากๆ โดยเฉพาะมักทำให้เกิดการระเหยเป็นไอได้

การเชื่อมด้วยเลเซอร์ อาจจะใช้แทนการบัดกรี (Soldering) การเชื่อมด้วยการอาร์ค (Arc welding) การเชื่อมด้วยความต้านทาน (Resistance welding) และการเชื่อมด้วยลำอิเลคตรอน (Electron beam welding) เนื่องจากการเชื่อมที่ ไม่มีการสัมผัสกับอุปกรณ์ภายนอกใดๆเลย การให้ความร้อนเกิดขึ้นเฉพาะที่ สามารถเชื่อมโลหะต่างชนิดกันได้ สามารถเชื่อมชิ้นงานที่ควบคุมอยู่ในเตาเผาที่ยอมให้แสงผ่านได้

การเชื่อมเลเซอร์ในปัจจุบันนี้สามารถทำได้ทั้งการตัดและยึดติดวัสดุ สำหรับสื่อกระตุ้น (Active Medium) เป็นได้ทั้งในสถานะของแข็งและก๊าซดังนั้นจึงได้แบ่งเครื่องเชื่อมเลเซอร์ออกเป็นสองชนิดคือเลเซอร์ชนิดของแข็ง (Solid Laser) และเลเซอร์ชนิดก๊าซ (Gas Laser)

หนึ่งในเลเซอร์ชนิดของแข็งที่นิยมใช้กันมากก็คือNd:YAG(NeodymiumYttriumAluminum Garnet) ซึ่งสามารถให้ความยาวคลื่นที่ 1.064 ไมครอนสามารถให้กำลังที่สูงภายใต้ช่วงเวลาการปฏิบัติงานที่ยาวนานโดยปราศจากการเกินภาระทางความร้อน(Overheat) ด้วยข้อดีของ Nd:YAG ดังกล่าวอุตสาหกรรมการผลิตรถยนต์จึงนิยมใช้ Nd:YAG ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ซึ่งเป็น Nd:YAG เลเซอร์ขนาด 3 กิโลวัตต์ [6,7]

รูปที่ 2.1 Nd: YAG เลเซอร์ขนาด 3 กิโลวัตต์

2.3.2 ลักษณะอุปกรณ์การเชื่อมเลเซอร์

(ก) เครื่องผลิตลำแสงเลเซอร์ (Laser generator) ดังแสดงในรูปที่ 2.2

(ข) ระบบการถ่ายความร้อน (Chiller system) ที่เกิดจากเครื่องผลิตลำแสงเลเซอร์ (Laser Generator) ดังแสดงในรูป 2.3

(ค) การเคลื่อนหัวเชื่อมไปในทิศทางที่ต้องการ (Welding robot) ดังแสดงในรูป 2.4

(ง) การเคลื่อนชิ้นงานที่มีความหนาต่างกันเข้าตำแหน่งการตรวจสอบความหน(Distracting robot) ดังแสดงในรูปที่ 2.5

(จ) การเคลื่อนชิ้นงานจากโต๊ะที่ตรวจสอบความหนาแล้วเข้าวางที่โต๊ะเชื่อม(Loading robot) ดังแสดงในรูปที่ 2.6

(ฉ) การเคลื่อนชิ้นงานที่เชื่อมเสร็จออกจากจิ๊กเชื่อม (Unloading robot) ดังแสดงในรูปที่2.7

(ช) การปล่อยลำแสงเลเซอร์ลงบนชิ้นงาน (Laser head) ดังแสดงในรูปที่ 2.8

(ซ) แผงควบคุมเครื่องจักรของพนักงาน (Operation panel) ดังแสดงในรูปที่ 2.9

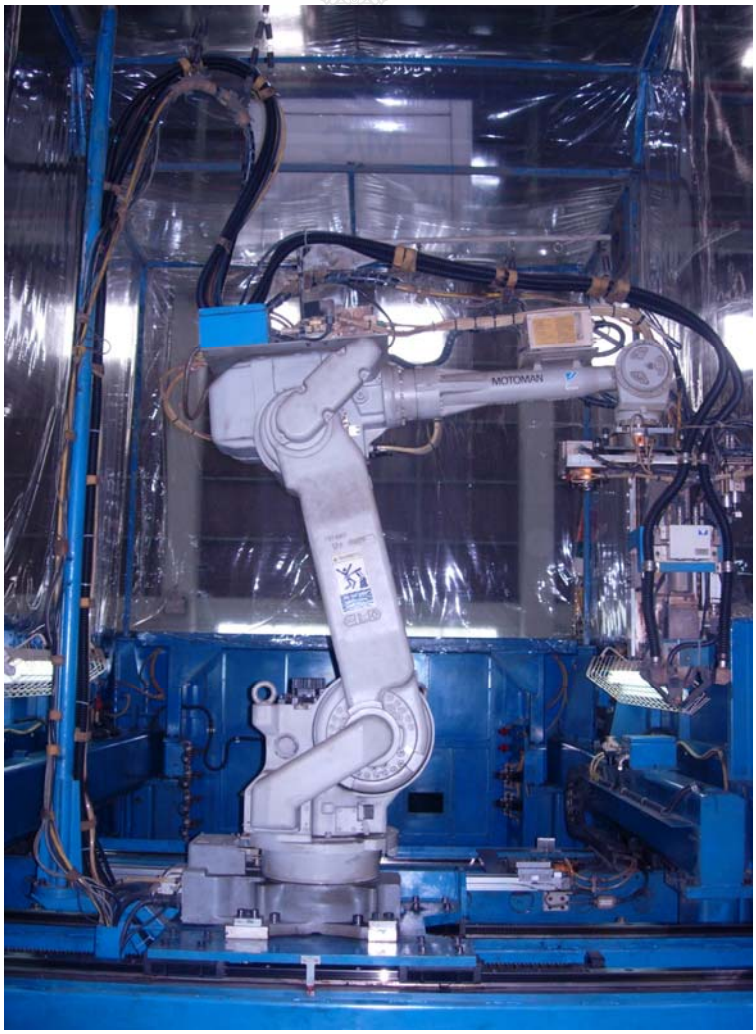
(ฌ) ชุดรับข้อมูลสั่งการไปยังอุปกรณ์ต่างๆในเครื่องเชื่อม ดังแสดงในรูปที่ 2.10

(ญ)โต๊ะวางชิ้นงานที่ตรวจสอบความหนาแล้ว (Centering table) ดังแสดงในรูปที่ 2.11

(ฎ)โต๊ะวางชิ้นงานก่อนวัดความหนา (Blank supply table) ดังแสดงในรูปที่ 2.12

รูปที่ 2.2 เครื่องผลิตลำแสงเลเซอร์

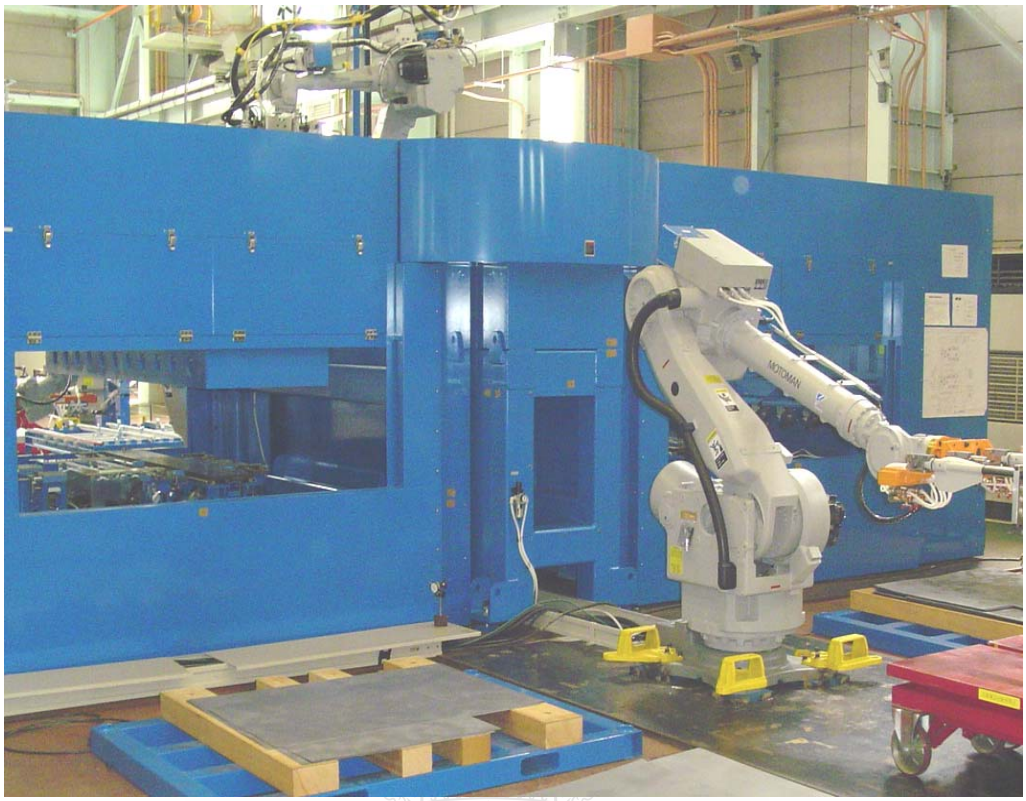
รูปที่ 2.3 เครื่องถ่ายเทความร้อน



รูปที่ 2.4 การเคลื่อนที่หัวเชื่อม

รูปที่ 2.5 การตรวจสอบความหนา

รูปที่ 2.6 นำชิ้นงานวางที่โต๊ะเชื่อม



รูปที่ 2.7 นำชิ้นงานออกจากที่โต๊ะเชื่อม

รูปที่ 2.8 การปล่อยลำแสง

รูปที่ 2.9 การควบคุมการทำงาน

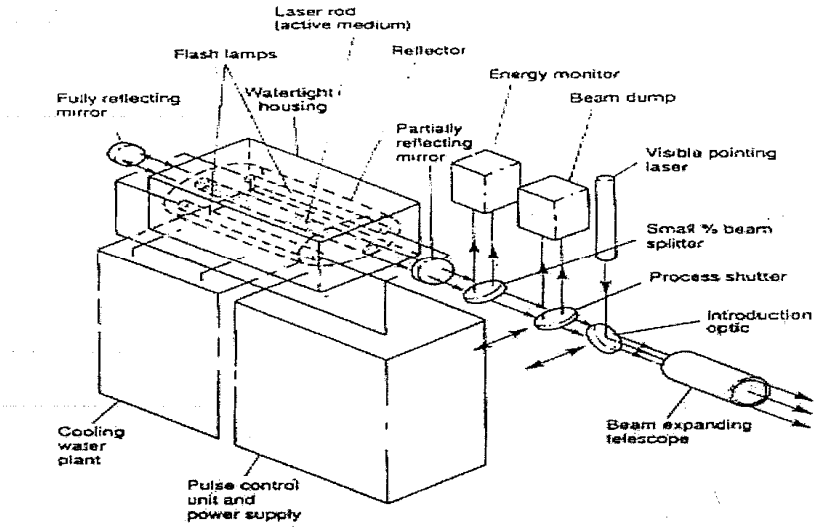
รูปที่ 2.10 ชุดรับข้อมูลและสั่งการ

รูปที่ 2.11 วางชิ้นงานที่ตรวจสอบความหนาแล้ว

รูปที่ 2.12 โต๊ะวางชิ้นงานก่อนตรวจสอบความหนา

2.3.3 รายละเอียดหลักการทำงาน

การเชื่อมเลเซอร์นั้นลำแสงเลเซอร์จะถูกยิงไปยังผิวชิ้นงานและเกิดการถ่ายถอดพลังงานไปยังชิ้นงาน ชิ้นงานจะดูดซับพลังงานทำให้เกิดรูหลอมละลาย (Key hole) จากนั้นลำแสงจะเข้าไปในรูหลอมละลาย (Key hole) และกระจายพลังงานไปด้านข้าง และเกิดการหลอมละลายโดยรอบของรูหลอมละลาย (Key hole) ทำให้เกิดการหลอมละลายของชิ้นงานอย่างต่อเนื่องบริเวณแนวเชื่อม และขณะที่ทำการเชื่อมแก๊สไนโตรเจน (Nitrogen gas) จะถูกปล่อยมาทำความสะอาดแนวอย่างต่อเนื่องเพื่อให้แนวเชื่อมสมบูรณ์มากที่สุด หลักการทำงานของเครื่องกำเนิดลำแสงเลเซอร์ (Light amplification by stimulated emission of radiation) ดังแสดงในรูปที่ 2.13 คือหลอดไฟ (Flash lamps) จะถูกกระตุ้นให้ส่งพลังงานแสงออกมาจากชุด จ่ายพลังงาน (Power supply) ซึ่งพลังงานแสงจะสะท้อนไปมาภายในห้องสะท้อน (Rellector) แล้วไปกระตุ้นให้อนุภาคของแกนเลเซอร์ (Laser rod) ให้เกิดการเคลื่อนที่ของอนุภาคแสง(Photon)ในแกนเลเซอร์และอนุภาคแสงจะวิ่งออกจากแกนเลเซอร์สะท้อนกระจกสะท้อนกลับ 100% (Fully rellecting mirror) กลับมาผ่านแกนเลเซอร์ ออกไปสะท้อนกระจกที่ยอมให้แสงผ่านบางส่วน (Partially reflecting mirror) ลำแสงที่มีพลังงานมากพอจะทะลุผ่านกระจกที่ยอมให้แสงผ่านและจะถูกวัดค่าพลังงานโดยชุดติดตามพลังงาน (Energy monitor) ในการนำลำแสงเลเซอร์ไปใช้งานลำแสงจะถูกเปิด-ปิดให้วิ่งผ่านไปยังกล้องขยายลำแสง (Beam expanding telescope) โดยลิ้นเปิด-ปิด (Process shutter) ในกรณีที่ไม่ต้องการใช้งานลำแสงลิ้นเปิด-ปิดจะเปลี่ยนทิศทางลำแสงไปยังตัวดูดซับพลังงาน(Absorber) เครื่องกำเนิดลำแสงจะถูกรักษาอุณหภูมิโดยระบบน้ำหล่อเย็น(Cooling water plant)โดยทั่วไปจะเป็นระบบชิลเลอร์ (chiller) และน้ำที่ใช้เป็นตัวถ่ายเทความร้อนต้องเป็นน้ำปราศจากไอออน (Deionized water) [6,7,8]



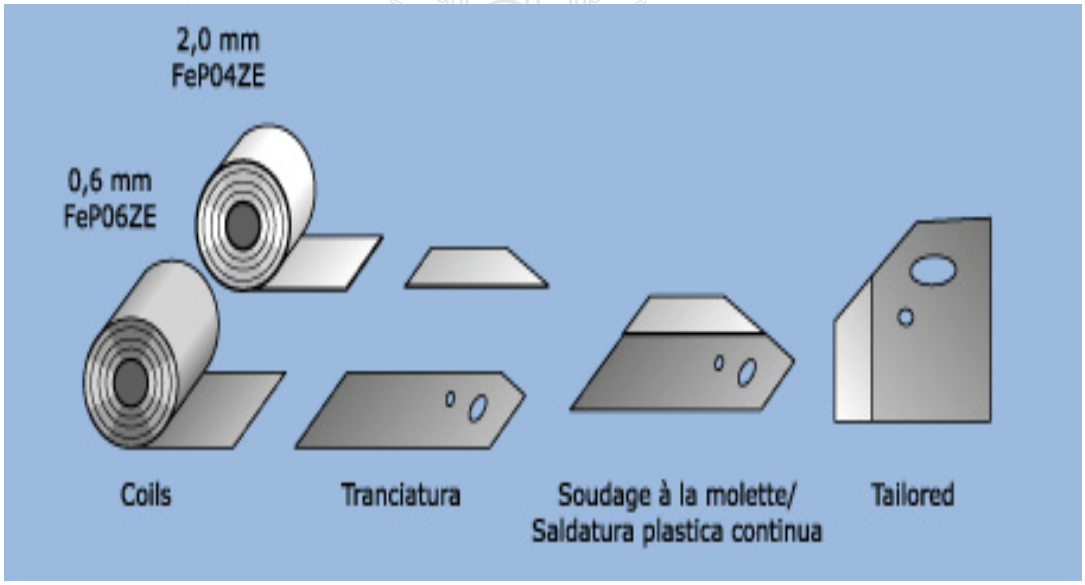
รูปที่ 2.13 แผนภาพของ Nd: YAG เลเซอร์ [6]

2.3.4 เทเลอร์แบล็งค์ (Tailor blank) [7]

เทเลอร์แบล็งค์ คือกระบวนการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ โดยนำเหล็กแผ่นที่มีความหนาแตกต่างกัน รวมไปถึงเหล็กที่มีคุณสมบัติ หรือชั้นเคลือบที่ต่างกัน ดังแสดงในรูป 2.14 มาเชื่อมต่อให้เป็นเหล็กแผ่นชิ้นเดียวกันก่อนที่จะนำไปทำการขึ้นรูป แนวคิดในการรวมเหล็กประเภทต่างๆ เข้ามาเป็นแผ่นเดียวกันด้วยการเชื่อมถูกพัฒนา เพื่อผลิตผลิตภัณฑ์ทางวิศวกรรมโดยนำเหล็กที่มีสมบัติแตกต่างกันมาต่อให้อยู่ในบริเวณที่เหมาะสมที่สุด เพื่อผลิตให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติดีที่สุดวิธีนี้ไม่เพียงแต่จะช่วยลดน้ำหนักของชิ้นส่วนให้ลดลง แต่ยังช่วยให้สามารถผลิตชิ้นส่วนได้โดยลดการใช้อุปกรณ์ยึดต่างๆ ด้วย

กระบวนการนี้ถูกนำไปใช้และพัฒนาอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมยานยนต์ โดยมีแรงผลักดันมาจากข้อบังคับทางด้านสิ่งแวดล้อม ความปลอดภัย และการอนุรักษ์พลังงาน ซึ่งต้องการให้ออกแบบรถยนต์ที่มีน้ำหนักเบา เพื่อประหยัดพลังงาน และก่อให้เกิดมลภาวะน้อยลง พร้อมกับการปรับปรุงโครงสร้างของตัวรถให้มีความปลอดภัยยิ่งขึ้น

ชิ้นส่วนที่ผลิตมาจากเทเลอร์แบล็งค์ได้แก่ โครงประตูรถ ประตูด้านใน รางวางแท่นเครื่องยนต์ เสากลางโครงรถยนต์ โครงหน้าต่าง เป็นต้น

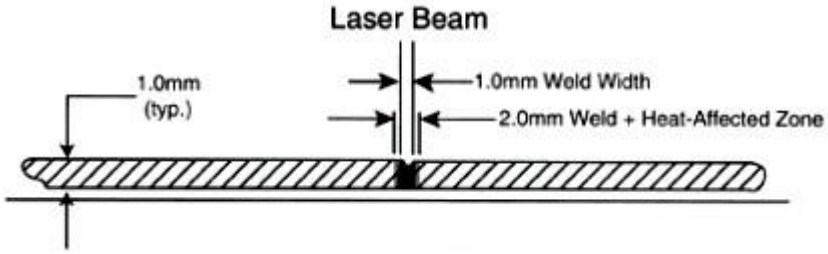


รูปที่ 2.14 แผ่นเทเลอร์แบล็งค์ [7]

2.3.5 การเชื่อมเทเลอร์แบล็งค์ (Laser tailor blank welding) [6]

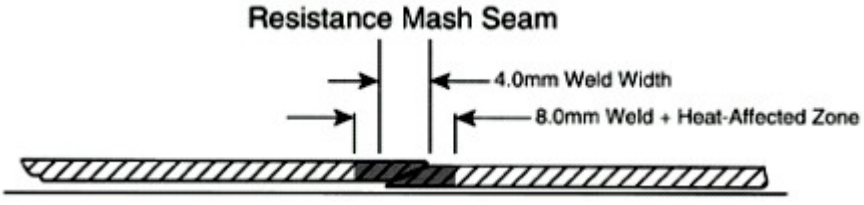
การเชื่อมเทเลอร์แบล็งค์ มีด้วยกัน 4 วิธี

(ก) การเชื่อมรอยต่อชนด้วยเลเซอร์ เป็นการเชื่อมแบบเต็ม (Full penetration) ซึ่งสามารถเชื่อมให้ได้รอยเชื่อมที่มีอัตราส่วนของความลึกต่อความหนาสูง ดังนั้นวิธีนี้จึงสามารถเชื่อมได้แนวเชื่อมที่ลึกและแคบ อัตราการเย็นตัวของแนวเชื่อมที่สูงมาก ทำให้ได้ความแข็งของรอยเชื่อมที่สูงกว่าการเชื่อมด้วยวิธีความต้านทาน และควบคุมแนวเชื่อมได้แม่นยำ ดังแสดงในรูปที่ 2.15 ซึ่งเป็นการเชื่อมที่เหล็กหนา 1.0 มิลลิเมตร ความกว้างลำแสงเลเซอร์ 1.0 มิลลิเมตรบริเวณแนวเชื่อมรวมกับบริเวณพื้นที่ผลกระทบร้อนเท่ากับ 2.0 มิลลิเมตร



รูปที่ 2.15 การเชื่อมรอยต่อชนด้วยเลเซอร์ [6]

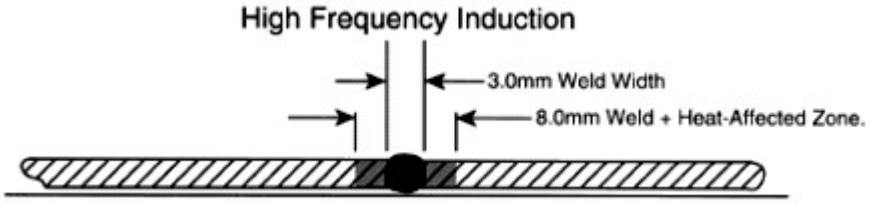
(ข) การเชื่อมรอยต่อเกยด้วยความต้านทาน เป็นกระบวนการเชื่อมโดยใช้ลูกรีด ซึ่งต้องอาศัยรอยเชื่อมที่ต่อเหลื่อมกันอัดเนื้อเหล็กเข้าด้วยกัน ขณะที่ปล่อยกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน วิธีนี้เป็นการเชื่อมในสภาวะของแข็ง (Solid state) จะได้แนวเชื่อมที่กว้างกว่าการเชื่อมด้วยเลเซอร์เล็กน้อย ดังแสดงในรูปที่ 2.16 ซึ่งความกว้างของการต่อเกยเท่ากับ 4.0 มิลลิเมตรบริเวณแนวเชื่อมรวมกับบริเวณพื้นที่ผลกระทบร้อนเท่ากับ 8.0 มิลลิเมตรและวิธีแบบนี้จะใช้กับการผลิตรถยนต์ในยุโรปของโวคสวาเจน วอลโว่ซีต เป็นต้น



รูปที่ 2.16 การเชื่อมรอยต่อเกยด้วยความต้านทาน [6]

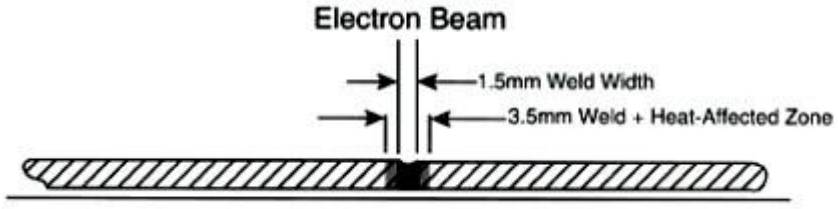
(ค) การเชื่อมแบบการเหนี่ยวนำความถี่สูงเป็น การเชื่อมแบบต่อชน (Butt upset weld) ซึ่งพัฒนาโดยบริษัทวอลโว่ใช้สำหรับเชื่อมงานเหล็กแผ่นการเชื่อมทำโดยนำเหล็กแผ่น 2 แผ่นมากดเข้าหากันตรงขอบด้วยตัวยึดตลอดแนวความยาวของเหล็กแผ่น และหน้าสัมผัสของชิ้นงานจะถูกกดด้วยแรงอัดในระหว่างการเชื่อม ซึ่งเหล็กจะหลอมติดกันปัจจุบันมีการใช้สำหรับงานเชื่อมที่มี

ความยาวของแนวเชื่อมสูงสุด1 เมตรรอยเชื่อมที่ได้จะมีความสูงกว่าความหนาของเหล็กแผ่นประมาณ 50% ซึ่งต้องทำการขัดออกภายหลังการเชื่อม ดังแสดงในรูปที่ 2.17 ซึ่งมีความกว้างรอยเชื่อม 3.0 มิลลิเมตร บริเวณแนวเชื่อมรวมกับบริเวณพื้นที่ผลกระทบร้อนเท่ากับ 8.0 มิลลิเมตร



รูปที่ 2.17 การเชื่อมแบบการเหนี่ยวนำความถี่สูง [6]

(ง) การเชื่อมด้วยลำแสงอิเลคตรอน เป็นเชื่อมแบบหลอมละลาย เช่นเดียวกับวิธีอื่นๆ โดยทั่วไปใช้กำลังไฟฟ้าประมาณ 25 - 35 กิโลวัตต์ วิธีนี้เหมาะ สำหรับการเชื่อมวัสดุที่มีขนาดหนาๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.18 มีความกว้างรอยเชื่อมลำแสงอิเลคตรอน 1.5 มิลลิเมตร บริเวณแนวเชื่อมรวมกับบริเวณพื้นที่ผลกระทบร้อนเท่ากับ 3.5 มิลลิเมตรและเมื่อเปรียบเทียบกับการเชื่อมด้วยเลเซอร์ พบว่าการเชื่อมด้วยลำอิเลคตรอน สามารถเชื่อมได้โดยที่มีระยะห่างของแผ่นโลหะ (Gap) มากกว่าการเชื่อมด้วยเลเซอร์เล็กน้อย นอกจากนี้ยังทำการเชื่อมได้เร็วกว่า และกระแสของอิเล็กตรอน ควบคุมได้ง่ายกว่า แต่มีข้อจำกัดที่สำคัญของการเชื่อมด้วยลำอิเลคตรอน คือ จำเป็นต้องมีอุปกรณ์ป้องกันการแผ่รังสีเอ็กซ์ที่เกิดขึ้นในระหว่างการเชื่อม



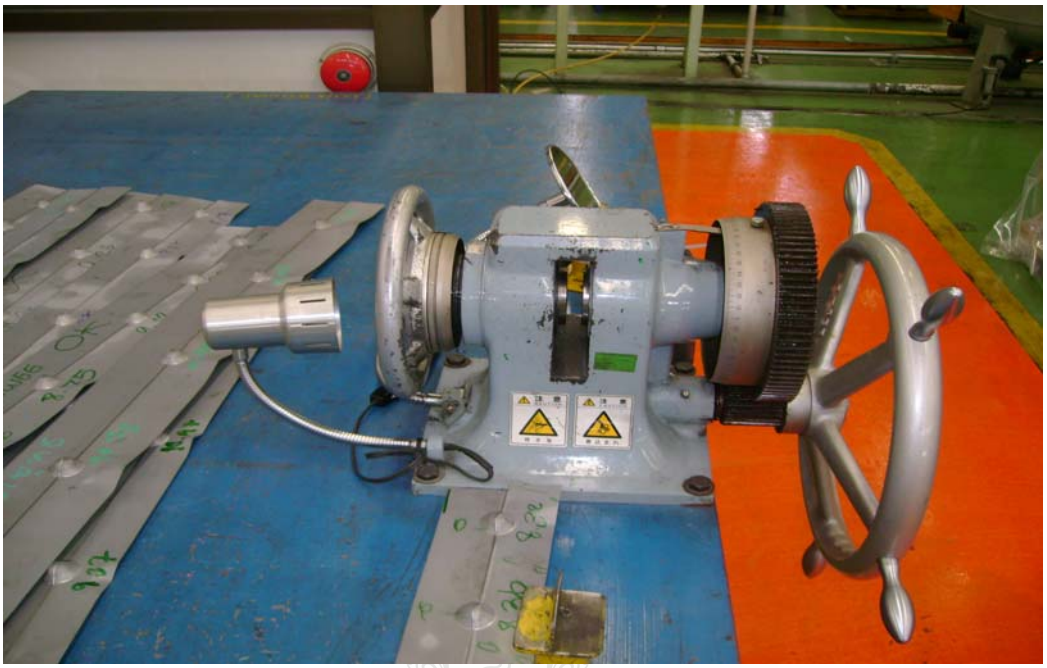
รูปที่ 2.18 การเชื่อมด้วยลำอิเลคตรอน [6]

2.4 การทดสอบและตรวจสอบสมบัติของแนวเชื่อม

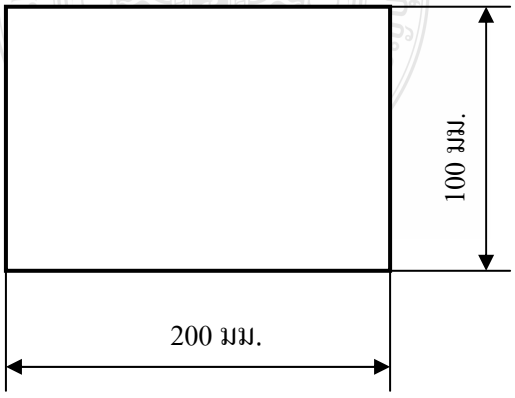
2.4.1 การทดสอบด้วยอีริทเซน

เป็นการทดสอบสมบัติทางกลการยืดตัวของแนวเชื่อม ซึ่งชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการเชื่อมเลเซอร์เทเลอร์แบล็งค์ นั้นต้องผ่านการทดสอบคุณสมบัติทางกลการยืดตัวของรอยเชื่อม จากการทดสอบด้วยเครื่อง อีริทเซนคัปปิ้งเทส ตามมาตรฐาน JIS B7729 และ JIS-Z-2247 [2] ดังแสดงในรูป

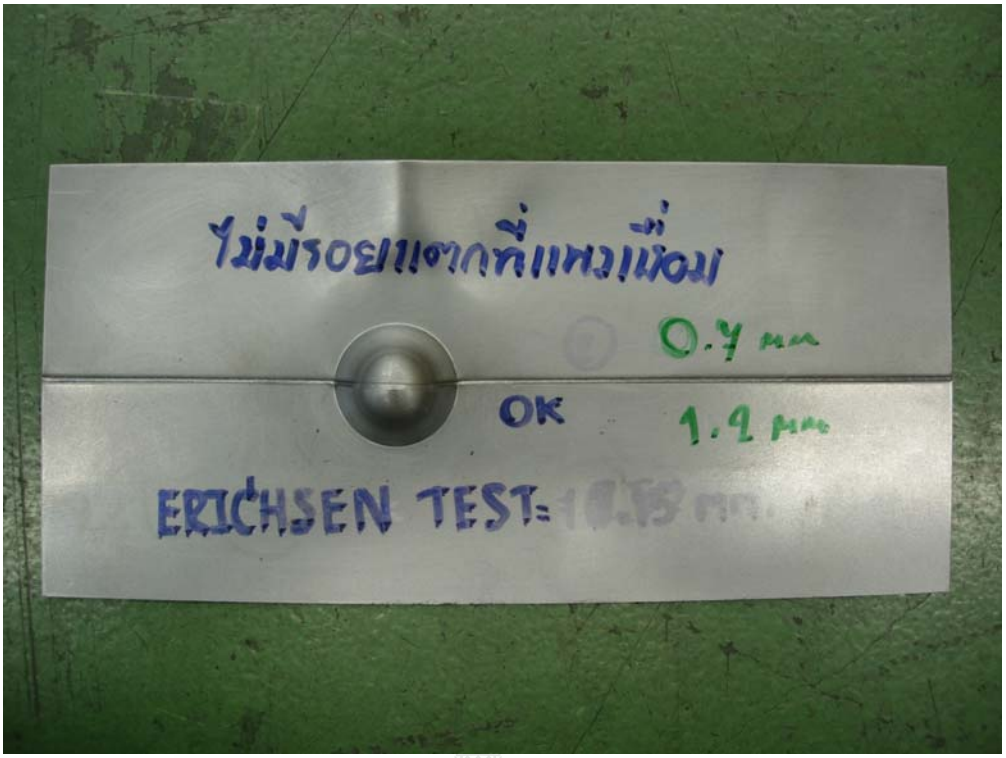
ที่ 2.19 และมีขนาดชิ้นงานทดสอบ ความกว้าง 100 มิลลิเมตร ยาว 200 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 2.20 และค่าที่ได้จากการวัดความลึกของรอยทดสอบต้องมากกว่าหรือเท่ากับ 7.00 มิลลิเมตร โดยผิวรอยเชื่อมไม่แตกร้าว ดังแสดงในรูปที่ 2.21



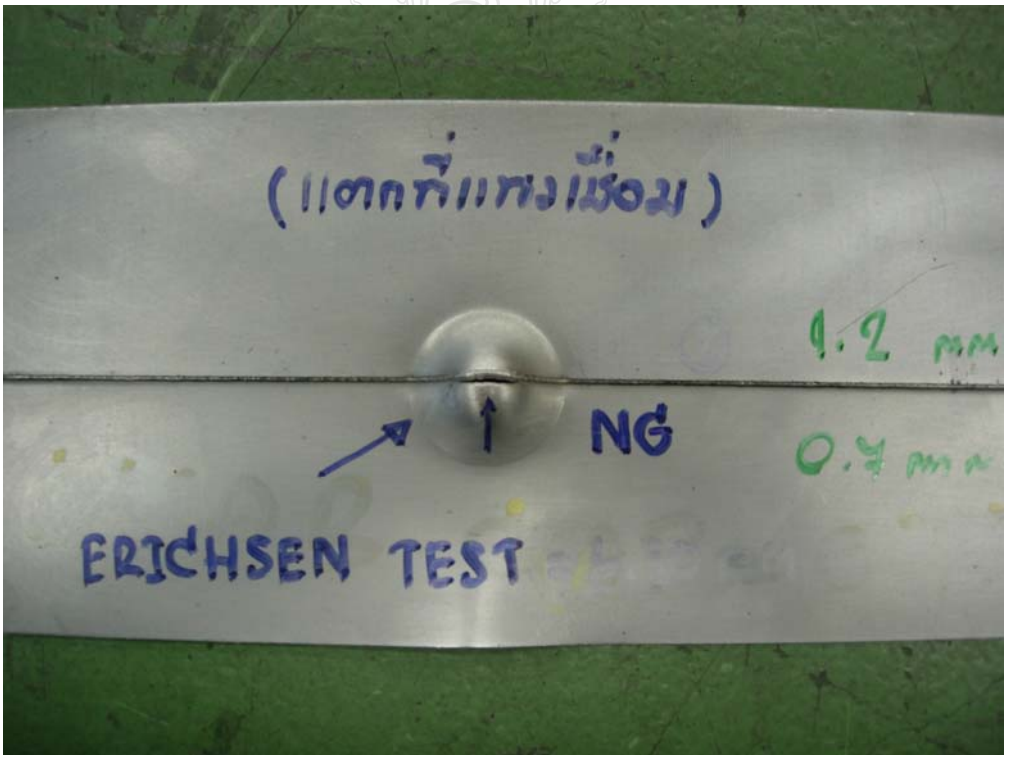
รูปที่ 2.19 เครื่องทดสอบอีริทเซน



รูปที่ 2.20 ขนาดชิ้นงานทดสอบค่าการยืดตัว (หน่วย: มิลลิเมตร)



ไม่แตกร้าว (OK)



แตกร้าว (NG)

รูปที่ 2.21 ผลการทดสอบค่าการยืด

2.4.2 การศึกษาโครงสร้างของโลหะ

การศึกษาโครงสร้างของโลหะ (Metallography) หมายถึงเป็นการตรวจสอบ โครงสร้างจุลภาค (Microstructure examination) หรือโครงสร้างเล็กๆ ของโลหะด้วยกล้องไมโครสโคปเพื่อขยายดูรูปร่างของเม็ดเกรน (Grain) และบรรดาสารหรือสิ่งที่เจือปนอยู่ในเนื้อของโลหะที่ได้หลังการรีดโลหะ หรือการหล่อหลอมด้วยกรรมวิธีแบบต่างๆการศึกษาดูโครงสร้างของโลหะนั้น จะแบ่งวิธีการออกเป็น 2 วิธีด้ยกันคือ วิธีแบบไมโคร เป็นการใช้กล้องขยายดูโครงสร้างที่มีขนาดกำลังขยายตั้งแต่ 40 เท่า (4 x)ลงมา จะเป็นการศึกษาดูโครงสร้างของโลหะแบบหยาบๆ และวิธีแบบมาโคร เป็นการใช้กล้องขยายดูโครงสร้างที่มีขนาดกำลังขยายตั้งแต่40เท่า(4x)ขึ้นไป จะเป็นการศึกษาดูโครงสร้างของโลหะแบบละเอียดมากในกระบวนการ [9]

การศึกษาโครงสร้างของโลหะ (Micro structure) มีวิธีการและขั้นตอนต่างๆดังนี้

(ก) การเตรียม หรือการตัดชิ้นทดสอบ (Sawing) ชิ้นงานที่จะเตรียมมา ทำการตัดเพื่อใช้เป็นสเปกซีเมนนั้นต้องรู้จักสังเกตดูก่อนทุกครั้งว่าเป็นโลหะแข็งหรือโลหะอ่อน เพื่อที่จะได้เลือกใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ในการตัดได้ถูก เช่น ตัดด้วยเลื่อยมือ ตัดด้วยเลื่อยกลหรือล้อตัดไฟเบอร์ (Abrasive cutt off wheel)

(ข) การตัดหรืออัดชิ้นทดสอบ (Mounting) ในกรณีชิ้นทดสอบ มีขนาดเล็กหรือรูปร่างบางมาก เช่น ใบมีด แผ่นทองเหลือง หรือเส้นลวดทองแดง ฯลฯ ซึ่งทำให้เราไม่สามารถจับต้องในการทำงานได้สะดวก ให้ใช้วิธีการอัดด้วยวัสดุจำพวกพลาสติก เช่น ถ้าเป็นจำพวก เทอร์โมเซ็ตติ้ง เรซิ่น จะได้แก่ เบคกาไลค์ จะมีลักษณะเป็นเม็ดเล็กๆ ส่วนใหญ่จะเป็นสีดำมันเงา นำมาใส่ในบล๊อกรูปทรงกระบอกเพื่อหุ้มผิวชิ้นงานที่มีขนาดบางๆ ดังกล่าว โดยใช้ความร้อนในการทำให้ละลายเข้าเป็นเนื้อเดียวกันประมาณ 150 $^{\circ}$C และใช้แรงอัด (Pessure) ประมาณ 4000 PSI

ส่วนจำพวก เทอร์โมเซ็ตติ้ง เรซิ่น จะได้แก่ ลัคไก้ จะมีลักษณะเป็นเม็ดเล็กๆใสๆหรือขาวๆจะใช้หลักการในการอัดในบล็อกรูปทรงกระบอก โดยใช้อุณหภูมิและแรงอัดเหมือนๆกันกับ เบคกาไลค์

(ค) วิธีการขัดชนิดหยาบ (Hand grinding) จะทำการขัดด้วยกระดาษทรายน้ำโดยมีน้ำวิ่งผ่านบริเวณผิวหน้าสเปกซีเมนและกระดาษทรายน้ำโดยตลอดเวลาที่ทำการขัดหยาบ โดยเรียงลำดับนัมเบอร์ของกระดาษทรายน้ำตั้งแต่ขนาดเม็ดทรายหยาบๆ ไปหาขนาดเม็ดทรายละเอียดๆ เช่น เริ่มตั้งแต่นัมเบอร์ 150 180 220 240 320 400 600 800 1000 และ 1200 เป็นต้น โดยที่นัมเบอร์ที่มีขนาดเม็ดละเอียดจะมีตัวเลขเพิ่มมากขึ้นเช่นกัน

(ง) วิธีการขัดชนิดมัน(Polishing) เมื่อขัดด้วยกระดาษทรายน้ำจนผ่านนัมเบอร์ 1200 มาแล้วก็จะนำสเปกซีเมนดังกล่าวมาทำการขัดบนล้อ ผ้าสักหลาดที่ผนึกติดกับจานล้อขัดที่ใช้มอเตอร์ในการขับประมาณ 300 รอบต่อนาที และต้องคอยเติมสารช่วยขัดเงา

(จ) วิธีการกัดกรด (Etching) หลังจากผ่านกระบวนการขัดชนิดมันมาแล้วก็จะนำสเปกซีเมน

ดังกล่าวมาทำการกัดด้วยกรด 2 เปอร์เซนต์ไนไตร ซึ่งจะมีส่วนผสมระหว่างกรดไนตริกปริมาณ 2 เปอร์เซนต์ ผสมกับเมทิลแอลกอฮอล์ปริมาณ 98 เปอร์เซนต์ เพื่อให้เจือจางลงกว่าเดิม โดยใช้เวลาในการกัดกรดประมาณ 15 ถึง 20 นาที ให้สังเกตดูผิวหน้าสเปกซีเมนจะเป็นสีดำเป็นใช้ได้ เมื่อเสร็จแล้วให้รีบจุ่มหรือล้างลงในเมทิลแอลกอฮอล์อีกครั้ง เพื่อชำระล้างคราบที่หลงเหลือจากกระบวนการกัดกรดอีกครั้ง

(ฉ) ส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์ (Metallurgical microscope) ชิ้นทดสอบ (Specimen)ที่ได้ผ่านกรรมวิธีการกัดกรด (Etching) มาแล้วเราจะนำมาทำการส่องดูโครงสร้าง (Structure) ด้วยกล้องไมโครสโคปที่มีกำลังขยายขนาดต่างๆไล่จากน้อยไปหามาก เช่น 50 เท่า (5x) 100 เท่า (10x) 200 เท่า (20x) 500 เท่า (50x) และ1000 เท่า (100x) ตามลำดับ

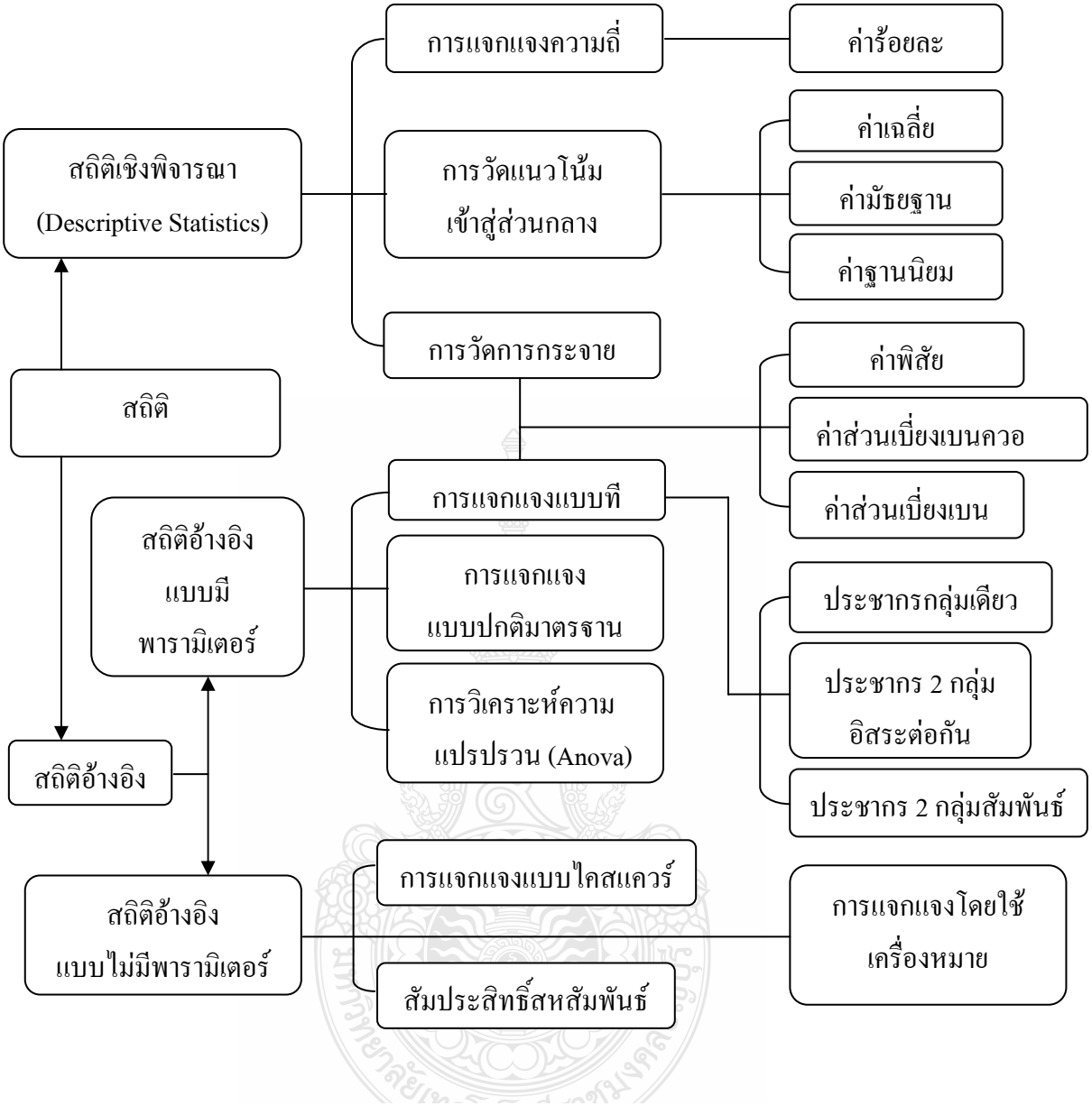
การทำงานของกล้องดังกล่าวจะใช้หลักการที่แสงวิ่งมาตกกระทบกับสเปกซีเมนจนเกิดการหักเหของลำแสง แล้วจะเกิดการสะท้อนกลับเข้าสู่ตาเรานั่นเอง

ซึ่งเมื่อปรับจนเป็นที่พอใจในความคมชัดของกราฟโครงสร้าง (Structure) แล้วถ้าเป็นกล้องชนิดพิเศษมีกล้อง ถ่ายภาพติดในตัวก็สามารถใช้ระบบการถ่ายภาพเก็บภาพโครงสร้างดังกล่าวลงบนแผ่นฟิล์มเพื่อนำไปล้าง อัดต่อไป [9]

2.5 ทฤษฎีการประเมินทางสถิติ

สถิติ (Statistics) คือ วิธีการจัดการข้อมูลโดยเริ่มตั้งแต่ การเก็บรวบรวมข้อมูล ไปจนถึงการวิเคราะห์และแปรผลข้อมูล เพื่อช่วยในการตัดสินใจ ในภาวะไม่แน่นอน (Uncertain) โดยอาศัยรากฐานของหลักความน่าจะเป็น (Probability) เป็นพื้นฐานสำคัญ และสถิติที่นิยมใช้ในงานวิจัยโดยสรุปเป็นโครงสร้างสถิติดังแสดงในรูปที่ 2.22

สำหรับการวิจัยในครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาทฤษฎี สถิติอ้างอิง แบบมีพารามิเตอร์ (Parametric inference) และใช้วิธีการทดสอบสมมติฐาน การทดสอบโดยการแจกแจงแบบ เอฟ-เทส (F-Test) และการวิเคราะห์ความแปรปรวนโดยอะโนว่า (Anova) ซึ่งเป็นการวิเคราะห์หาผลกระทบจากหลายๆปัจจัยที่ส่งผล ต่อผลลัพธ์ที่เราสนใจ (Response) กล่าวคือเป็นชุดของการทดลอง ซึ่งในแต่ละครั้งจะทำการปรับเปลี่ยนค่าของปัจจัย (Input variables) อย่างเป็นระบบตามรูปแบบที่ได้วางแผนเอาไว้ แล้วทำการบันทึกผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองแต่ละครั้ง และงานวิจัยนี้ออกแบบการทดลองเป็นแบบ 3 ปัจจัย ตัวแปรการเชื่อมที่ศึกษาที่จะมีผลต่อสมบัติทางกลการยืดตัวบริเวณแนวเชื่อม และโครงสร้างจุลภาคกับความสามารถในการขึ้นรูปได้แก่ (A) ความเร็วการเชื่อม (B) ตำแหน่งหัวเชื่อม (C) ระยะห่างของชิ้นงานเชื่อม ซึ่งทั้งสามปัจจัยประกอบด้วย 3 ระดับและทำการทดลองซ้ำ 4 ครั้ง [10] ดังแสดงในตารางที่3.4



รูปที่ 2.22 โครงสร้างทางสถิติที่นิยมใช้ในปัจจุบัน [11]

2.5.1 พารามิเตอร์ (Parameter)

เป็นค่าที่คำนวณได้จากข้อมูลประชากร(Population data) และจากข้อมูลกลุ่มตัวอย่างของประชากร (Sample data) ซึ่งเป็นค่าที่บรรยายหรือแสดงลักษณะของประชากรและกลุ่มตัวอย่างของประชากร เช่น ค่าเฉลี่ยของประชากร μ ดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 แบบพารามิเตอร์ [12]

ค่าพารมิเตอร์หรือตัวแปร	ประชากร	กลุ่มตัวอย่างของประชากร
ค่าเฉลี่ย	μ	$\overline{y}$
ค่าความแปรปรวน	σ^2	S^2
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	σ	S

2.5.2 การทดสอบสมมติฐาน (Test of Hypothesis)

สมมติฐาน (Hypothesis) หมายถึง ข้อสมมติหรือข้อความที่เกี่ยวกับสิ่งที่ทำการศึกษา ซึ่งเป็นข้อสันนิษฐานอาจจะเป็นจริงหรือไม่เป็นจริงก็ได้ [12] สมมติฐานที่กำหนด จะมี 2 อย่างคือ สมมติฐานหลัก (Null hypothesis: H_0) เป็นสมมติฐานที่ถูกกำหนดขึ้นเพื่อจุดมุ่งหมายที่ต้องการและสมมติฐานรอง (Alternative hypothesis: H_1) เป็นสมมติฐานที่ถูกกำหนดให้ตรงกันข้ามกับสมติฐานหลักและการทดสอบสมมติฐาน จะมี 2 ลักษณะคือ

(ก) การทดสอบแบบมีทิศทางหรือแบบหางเดียว (One tailed test) จะเป็นการทดสอบเพื่อบอกว่ามีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่า ตัวอย่างเช่น

$H_0 ; \mu = 150$ $H_0 ; \mu = 150$

$H_1 ; \mu > 150$ $H_1 ; \mu < 150$

(ข) การทดสอบแบบไม่มีทิศทางหรือแบบสองหาง (Two tailed test) จะเป็นการทดสอบเพื่อบอกว่ามีค่าเท่ากันหรือไม่ ตัวอย่างเช่น

$H_0; \mu = 150$

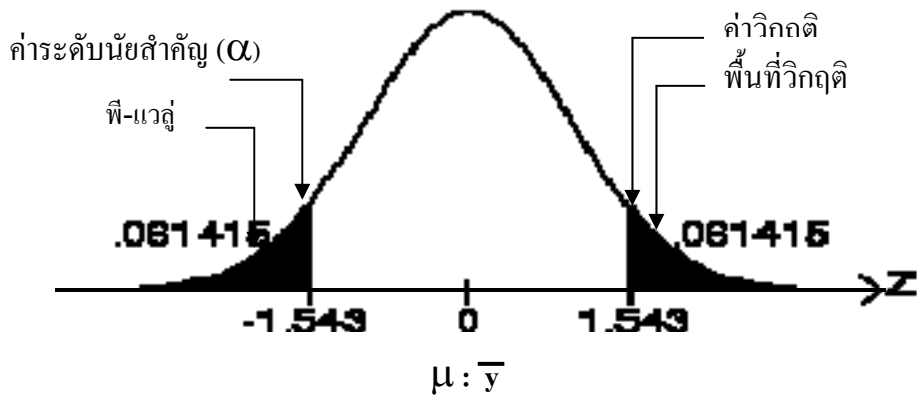
$H_1; \mu \neq 150$

2.5.3 ค่าวิกฤต พื้นที่วิกฤต และระดับนัยสำคัญ

ค่าวิกฤติ หมายถึง ค่าที่เป็นจุดแบ่งของการยอมรับหรือปฏิเสธสมมติฐานหลัก

พื้นที่วิกฤติ หมายถึง พื้นที่ของการปฏิเสธสมมติฐานหลัก

ค่าระดับนัยสำคัญ หมายถึง ระดับการผิดพลาดสูงสุดที่ผู้ศึกษายอมรับให้เกิดขึ้นได้ดังแสดงในรูปที่ 2.23 [12]



รูปที่ 2.23 ค่าวิกฤติ พื้นที่วิกฤติ ระดับนัยสำคัญ และค่าพี-แวลู่ [12]

2.5.4 การทดสอบโดยการแจกแจงแบบ เอฟ-เทส

เป็นการแจกแจงของตัวแปรสุ่มที่สร้างจากการแจกแจงแบบไคสแควร์ดังนิยาม ต่อไปนี้ ให้ U และ V เป็นตัวแปรสุ่มที่มีการแจกแจงแบบไคสแควร์พร้อมด้วยองศา ความเป็นอิสระเท่ากับ V_1 และ V_2 ตามลำดับถ้า U และ V เป็นตัวแปรสุ่มที่เป็นอิสระต่อกันแล้วตัวแปรสุ่ม F เท่ากับ U / V_1 หารด้วย V/ V_2จะมีการแจกแจงแบบเอฟ พร้อมด้วยองศาความเป็นอิสระเท่ากับ V_1 และ V_2 ตามลำดับ [5]

คุณสมบัติการแจกแจงแบบ เอฟ-เทส

- ตัวแปร F มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง ∞ นั่นคือ $0 < F < \infty$
- เส้นโค้งการแจกแจงมีลักษณะเบ้ขวา โดยขึ้นอยู่กับองศาความเป็นอิสระ V_1 และ V_2
- เส้นโค้งการแจกแจงแบบเอฟมีลักษณะคล้ายกับเส้นโค้งการแจกแจงแบบไคสแควร์ และมีจุดศูนย์กลางที่ 1

แล้วตัวแปร F จะมีการแจกแจงแบบเอฟ (F distribution) โดยมีองศาความเป็นอิสระเท่ากับ $v_1 = n_1 - 1$ และ $v_2 = n_1 - 1$ ค่าของเอฟที่มีองศาความเป็นอิสระเท่ากับ V_1 และ V_2 และทำให้พื้นที่ใต้โค้งด้านขวาของโค้งการแจกแจงเท่ากับα เขียนแทนด้วย $f_{\alpha ; V1\ V2}$ ดังแสดงในรูปที่ 2.24

2.5.5 การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล 3 ปัจจัย

การออกแบบเชิงแฟคทอเรียล (Factorial design) [10] เป็นวิธีการทดลองที่มีประสิทธิภาพสูงสุด การออกแบบเชิงแฟคทอเรียล หมายถึง การทดลองที่พิจารณาถึงผลที่เกิดจากการรวมกันของระดับ (Level) ของปัจจัยทั้งหมดที่เป็นไปได้ในการทดลองนั้นตัวอย่างผลที่เกิดจากปัจจัยหนึ่งหมายถึง การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับผลตอบ(Response) ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงระดับของปัจจัยนั้นๆ ซึ่งเรียกว่า ผลหลัก (Main effect) และในการทดลองบางอย่าง อาจพบว่าความแตกต่างของผลตอบที่เกิดขึ้นบนระดับต่างๆของปัจจัยหนึ่งจะมีค่าไม่เท่ากันที่ระดับอื่นๆ ทั้งหมดของปัจจัยอื่นซึ่ง

หมายถึงผลตอบของปัจจัยหนึ่งจะขึ้นอยู่กับระดับของปัจจัยอื่นๆนั่นเอง และเรียกเหตุการณ์นี้ว่าการมีอันตรกิริยา (Interaction) ต่อกันระหว่างปัจจัยที่เกี่ยวข้องและการออกแบบเชิงแฟกทอเรียล 3 ปัจจัยนี้ คือ A B และ C ปัจจัย A จะประกอบด้วย a ระดับ ปัจจัย B จะประกอบด้วย b ระดับและปัจจัย C จะประกอบด้วย c ระดับ ซึ่งทั้งหมดนี้ถูกจัดให้อยู่ในรูปของการออกแบบเชิงแฟกทอเรียล นั่นคือ ในแต่ละการทดสอบของการทดลองจะประกอบด้วยการทดลองร่วมปัจจัยทั้งหมด a x b x c การทดลอง โดยปกติจะมีจำนวนการทดสอบทั้งหมด n ครั้ง กำหนดให้ γ_{ijkl} คือผลตอบที่สังเกตได้เมื่อปัจจัย A อยู่ที่ระดับ i (i = 1,2,…,a) ปัจจัย B อยู่ที่ระดับ j (j = 1,2,…, b) และปัจจัย C อยู่ที่ระดับ k (k = 1,2,…, c) สำหรับการทดสอบที่ l (l = 1,2,…, n) รูปแบบทั่วไปของการออกแบบเชิงแฟกทอเรียล 3 ปัจจัย เนื่องจากลำดับของการสังเกตทั้ง a x b x c x n ครั้ง ถูกเลือกมาอย่างสุ่ม ซึ่งเป็นการออกแบบสุ่มบริบูรณ์ (Completely randomized design)

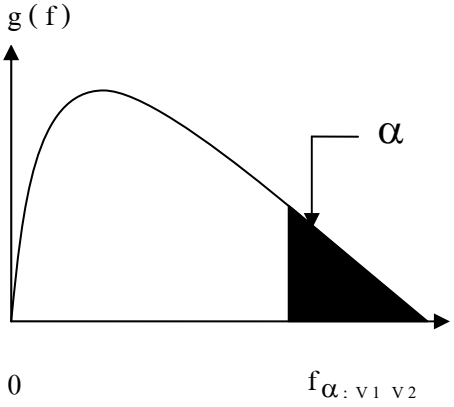
ในกรณีที่ปัจจัย A มีจำนวนระดับเท่ากับ a ปัจจัย B มีจำนวนระดับเท่ากับ b ปัจจัย C มีจำนวนระดับเท่ากับ c ต่อไปเช่นนี้เรื่อย ๆ และทั้งหมดนี้ถูกจัดให้อยู่ในลักษณะของการทดลองเชิงแฟกทอเรียล ซึ่งจะมีจำนวนข้อมูลที่ได้ทั้งหมดในการทดลองเท่ากับ abc…n และจะต้องมีเรพลิเคตอย่างน้อย 2 การทดสอบ ($n \geq 2$) เพื่อที่จะทำให้สามารถหาค่าผลรวมของกำลังสองที่เกิดจากความผิดพลาดได้ ถ้าอันตรกิริยาที่เป็นไปได้ทั้งหมดถูกนำเข้าไปพิจารณาในแบบจำลอง

ถ้าปัจจัยในการทดลองทั้งหมดเป็นแบบค่าตายตัวเราสามารถที่จะคิดสูตร และทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับผลหลักและอันตรกิริยาได้โดยง่าย สำหรับแบบจำลองแบบผลตายตัว ตัวทดสอบเชิงสถิติสำหรับผลหลักและอันตรกิริยาสามารถหาได้โดยสร้างค่ากำลังสองเฉลี่ยของสิ่งนั้นขึ้น แล้วหารด้วยค่ากำลังสองเฉลี่ยของความผิดพลาด (เหมือนกับกรณีของ 2 ปัจจัย) และการทดสอบสมมติฐานจะใช้ F-Test แบบทดสอบปลายด้านบนหนึ่งด้าน (Upper-Tail, One-Tail Test) จำนวนระดับขั้นความเสรีสำหรับผลหลักของปัจจัยใด ๆ มีค่าเท่ากับจำนวนระดับของปัจจัยนั้นลบด้วย 1 และจำนวนระดับขั้นความเสรีของอันตรกิริยามีค่าเท่ากับผลคูณของระดับขั้นความเสรีของส่วนประกอบของอันตรกิริยานั้น ๆ

ตัวอย่างเช่น พิจารณาแบบจำลองการวิเคราะห์ความแปรปรวน 3 ปัจจัย ตามสมการ 2.1 [10]

$$y_{ijkl} = \mu + \tau_i + \beta_j + \gamma_k + (\tau\beta)_{ij} + (\tau\gamma)_{ik} + (\beta\gamma)_{jk} + (\tau\beta\gamma)_{ijk} + \varepsilon_{ijkl} \quad \begin{cases} i = 1,2,\ldots,a \\ j = 1,2,\ldots,b \\ k = 1,2,\ldots,c \\ l = 1,2,\ldots,n \end{cases} \qquad (2.1)$$

สมมติว่า A, B และ C มีค่าตายตัว ตารางสำหรับการวิเคราะห์ความแปรปรวนแสดงได้ดังตารางที่ 2.4 ค่าของเอฟ-เทส ของผลหลักและอันตรกิริยาหาได้โดยตรงจากค่ากำลังสองเฉลี่ยคาดหมายที่ได้



รูปที่ 2.24 พื้นที่ใต้โค้งด้านขวาการแจกแจงเอฟ [12]

ตารางที่ 2.4 ตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับแบบจำลอง 3 ปัจจัย แบบผลตายตัว [10]

สาเหตุของความแตกต่าง	ผลบวกกำลังสอง	ระดับขั้นความเสรี	ค่าเฉลี่ยกำลังสอง	ผลค่าเฉลี่ยกำลังสอง	ตัวสถิติ F_0
A	SS_A	a-1	MS_A	$\sigma^2 + \frac{bnc\sum\tau_i^2}{a-1}$	$F_0 = \frac{MS_A}{MS_E}$
B	SS_B	b-1	MS_B	$\sigma^2 + \frac{acn\sum\beta_j^2}{b-1}$	$F_0 = \frac{MS_B}{MS_E}$
C	SS_C	c-1	MS_C	$\sigma^2 + \frac{abn\sum\gamma_k^2}{c-1}$	$F_0 = \frac{MS_C}{MS_E}$
AB	SS_{AB}	(a-1)(b-1)	MS_{AB}	$\sigma^2 + \frac{cn\sum\sum(\tau\beta)_{ij}^2}{(a-1)(b-1)}$	$F_0 = \frac{MS_{AB}}{MS_E}$
AC	SS_{AC}	(a-1)(c-1)	MS_{AC}	$\sigma^2 + \frac{bn\sum\sum(\tau\gamma)_{ik}^2}{(a-1)(c-1)}$	$F_0 = \frac{MS_{AC}}{MS_E}$
BC	SS_{BC}	(b-1)(c-1)	MS_{BC}	$\sigma^2 + \frac{an\sum\sum(\beta\gamma)_{ik}^2}{(b-1)(c-1)}$	$F_0 = \frac{MS_{BC}}{MS_E}$
ABC	SS_{ABC}	(a-1) (b-1)(c-1)	MS_{ABC}	$\sigma^2 + \frac{n\sum\sum\sum(\tau\beta\gamma)_{ijk}^2}{(a-1)\ (b-1)(c-1)}$	$F_0 = \frac{MS_{ABC}}{MS_E}$
Error	SS_E	abc(c-1)	MS_E	σ^2	
Total	SS_T	abcn-1			

การคำนวณด้วยมือสำหรับค่าผลรวมทั้งหมดของกำลังสองในตารางที่ 2.4 มีสูตรในการคำนวณดังนี้ [10]

$$SS_T = \sum_{i=1}^{a}\sum_{j=1}^{b}\sum_{k=1}^{c}\sum_{l=1}^{n} \gamma^2_{ijkl} - \frac{\gamma^2_{...}}{abcn} \quad (2.2)$$

ค่าผลรวมของกำลังสองของผลหลักหาได้จากสูตรต่อไปนี้ [10]

$$SS_A = \frac{1}{bcn}\sum_{i=1}^{a}\gamma^2_{i..} - \frac{\gamma^2_{...}}{abcn} \quad (2.3)$$

$$SS_B = \frac{1}{acn}\sum_{j=1}^{b}\gamma^2_{.j..} - \frac{\gamma^2_{...}}{abcn} \quad (2.4)$$

$$SS_C = \frac{1}{abn}\sum_{k=1}^{c}\gamma^2_{.k..} - \frac{\gamma^2_{...}}{abcn} \quad (2.5)$$

เพื่อที่จะคำนวณค่าผลรวมของกำลังสองแบบ 3 ปัจจัยของอันตรกิริยา จะต้องสร้างตามผลรวมซึ่งประกอบด้วยเซลล์จำนวน A x B, A x C และ B x C เซลล์ขึ้นมา ซึ่งเกิดจากการยุบตารางข้อมูลเบื้องต้นให้อยู่ในรูปของตารางแบบ 2 ทาง จำนวน 3 ตาราง เพื่อคำนวณค่าต่างๆ เหล่านี้ ค่าผลรวมของกำลังสองหาได้จาก [10]

$$SS_{AB} = \frac{1}{cn}\sum_{i=1}^{a}\sum_{j=1}^{b}\gamma^2_{ij..} - \frac{\gamma^2_{...}}{abcn} - SS_A - SS_B$$

$$= SS_{Subtotals\ (AB)} - SS_A - SS_B \quad (2.6)$$

$$SS_{AC} = \frac{1}{bn}\sum_{i=1}^{a}\sum_{k=1}^{c}\gamma^2_{i.k.} - \frac{\gamma^2_{...}}{abcn} - SS_A - SS_C$$

$$= SS_{Subtotals\ (AC)} - SS_A - SS_C \quad (2.7)$$

$$SS_{BC} = \frac{1}{an}\sum_{j=1}^{b}\sum_{k=1}^{c}\gamma^2_{.jk.} - \frac{\gamma^2_{...}}{abcn} - SS_B - SS_C$$

$$= SS_{Subtotals\ (BC)} - SS_B - SS_C \quad (2.8)$$

ค่าผลรวมของกำลังสองของอันตรกิริยาแบบ 3 ปัจจัย หาได้จากสูตร [10]

$$SS_{ABC} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{a}\sum_{j=1}^{b}\sum_{k=1}^{c}\gamma_{ijk.}^{2} - \frac{\gamma_{...}^{2}}{abcn} - SS_A - SS_B - SS_C - SS_{AB} - SS_{AC} - SS_{BC} \quad (2.9)$$

$$= SS_{Subtotals\ (ABC)} - SS_A - SS_B - SS_C - SS_{AB} - SS_{AC} - SS_{BC} \quad (2.10)$$

ค่าผลรวมของกำลังสองของความผิดพลาดหาได้จากการลบผลรวมของกำลังสองทั้งหมดที่เกิดจากผลหลักและอันตรกิริยาจากผลรวมทั้งหมดของกำลังสอง [10]

$$SS_E = SS_T - SS_{Subtotals\ (ABC)} \quad (2.11)$$

2.5.6 การวิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธีการทางสถิติ

เป็นการนำวิธีการทางสถิติใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล เพื่อให้ผลลัพธ์และข้อสรุปที่เกิดขึ้นเป็นไปตามวัตถุประสงค์ของการทดลอง เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตัดสินใจที่มีประสิทธิภาพ ข้อสรุปที่ได้มีเหตุผลและความน่าเชื่อถือ การวิเคราะห์ผลการทดสอบค่าการยืดตัว ของชิ้นทดสอบบันทึกผลการทดลอง สถิติที่ใช้ในการวิจัย ซึ่งต้องใช้ในการวิเคราะห์ ค่าทดสอบของชิ้นทดสอบที่ใช้ในงานวิจัย คือ สถิติเชิงพรรณนา (Descriptive statistics) ซึ่งเป็นการศึกษาเกี่ยวกับการเก็บรวบรวมข้อมูล การนำเสนอข้อมูล การวิเคราะห์ข้อมูล การแปลความหมายของข้อมูล ตลอดจนทฤษฎีและการวิวัฒนาการทางสถิติ เพื่อหาค่าเฉลี่ย ค่าสูงสุด ค่าต่ำสุด และ สถิติเชิงอนุมาน (Inferential statistic) เป็นผลมาจากการรวบรวมทฤษฎีความน่าจะเป็นกับการใช้ข้อมูลทางสถิติเข้าด้วยกัน และค่าทางสถิติที่หาได้ไปใช้เป็นเครื่องมือในการประมาณ การทดสอบสมมติฐาน การทำนาย การตัดสินใจเกี่ยวกับปัญหาบางอย่างที่ต้องการ เพื่อหาค่าความแปรปรวน และอิทธิพลของตัวแปรที่เกี่ยวข้อง [8,12]

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.6.1 นิพนธ์ บัวแก้ว [13] ศึกษาผลกระทบของปัจจัยการเชื่อมเลเซอร์ที่มีต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อมในแขน จับหัวอ่านสำหรับจานแม่เหล็กแบบแข็ง เพื่อศึกษาถึงปัจจัยการเชื่อมเลเซอร์ที่มีต่อกำลังเลเซอร์ (Power) ขนาดของรอยเชื่อม ความลึกของรอยเชื่อม (Penetration) แรงฉีกของรอยเชื่อม และความแข็งของรอยเชื่อม การวิจัยใช้เครื่องเชื่อมแบบนีโอดิเมียมแย็กเลเซอร์ (Nd: YAG laser) โดยทำการเชื่อมสเตนเลส 304 ที่มีความหนา 51,102 และ 200 ไมครอน จำนวนสองแผ่นเข้าด้วยกัน โดยแปรเปลี่ยนค่าแรงดันไฟฟ้าและค่าระยะเวลาในการเชื่อม โดยที่ปัจจัยอื่นๆ เช่น ระยะรวมแสง (Focal length) ขนาดของสายไฟเบอร์ออฟทิค กระจกต่างๆ และแรงกดอุปกรณ์จับยึด (Clamping force) ถูกกำหนดให้คงที่ตลอดการวิจัย ผลทดลองได้ตรวจสอบกำลังของเลเซอร์ ขนาดของรอยเชื่อม ความลึก

ของรอยเชื่อม แรงฉีก (Peel force) และความแข็งแรงของรอยเชื่อม ผลการวิจัยพบว่า (1) ระยะเวลาของการเชื่อมเพิ่มขึ้น มีผลให้การทนต่อแรงฉีกขาดและความแข็งแรงของรอยเชื่อมสูงขึ้น (2) ระยะลึกของรอยเชื่อมแปรผันตามแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการเชื่อมขณะที่ระยะเวลาการเชื่อมคงที่ (3) ขนาดของรอยเชื่อมแปรผันตามระยะเวลาของการเชื่อมขณะที่แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการเชื่อมคงที่ (4) กำลังเลเซอร์แปรผันตามระยะเวลาและแรงดันไฟฟ้าโดยระยะเวลาของการเชื่อมมีอิทธิพลสูงกว่า (5) เงื่อนไขของปัจจัยที่ 476 โวล์ทและระยะเวลาการเชื่อมที่ 1.1 มิลลิวินาที ให้ความแข็งแรงของรอยเชื่อมสูงสุดคือ 8.76 Kg_f / mm^2

2.6.2 ฉัตรทอง ใสแสง [14] อิทธิพลของพารามิเตอร์การเชื่อมต่อโครงสร้างและสมบัติทางกลของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเตนนิติกเกรด304 เพื่อศึกษาอิทธิพลของพารามิเตอร์การเชื่อมต่อสมบัติทางกล และโครงสร้างของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเตนนิติค เกรด 304 การวิจัยเป็นการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลดีไซด์ (Factorial design) ที่มีพารามิเตอร์ในการศึกษาได้แก่ กระแสการเชื่อม ความเร็วในการเชื่อม และแก๊สปกคลุม โดยทำการศึกษาทางด้านความแข็งแรงดึงสูงสุด ความแรงดึงจุดคราก อัตราการยืดตัว และความแข็ง ผลการวิจัยพบว่า ผลการศึกษาต่อความแข็งแรงดึงสูงสุด (Ultimate tensile) พบว่าปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลง คือ ความเร็วในการเชื่อม ความสัมพันธ์กระแส*ความเร็ว*แก๊สปกคลุม โดยพารามิเตอร์การเชื่อมที่กระแส 90 แอมป์ ความเร็ว 500 มิลลิเมตรต่อนาที และปกคลุมด้วยแก๊ส Ar+5%O_2 จะให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด มีค่าเท่ากับ 95.85 Kg/mm^2 ผลการศึกษาต่อความแข็งแรงดึงจุดคราก (Yield point) พบว่าปัจจัยหลักทั้งสามตัวไม่มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงความสัมพันธ์ คือ กระแส*ความเร็ว*แก๊สปกคลุม โดยพารามิเตอร์การเชื่อมที่กระแส 90 แอมป์ ความเร็ว 300 มิลลิเมตรต่อนาที และปกคลุมด้วยแก๊ส Ar+3%N_2 มีค่าเท่ากับ 66.09 Kg/mm^2 ผลการศึกษาต่ออัตราการยืดตัว (Elongation) พบว่าปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลง คือ พารามิเตอร์การเชื่อมทั้งสาม ความสัมพันธ์ คือ กระแส*ความเร็ว*แก๊สปกคลุม โดยพารามิเตอร์การเชื่อมที่กระแส 100 แอมป์ ความเร็ว 400 มิลลิเมตรต่อนาที และปกคลุมด้วยแก๊ส Ar+5%H_2 มีค่าเท่ากับ 20% ผลการศึกษาต่อความแข็ง (Hardness) พบว่าปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลง คือ ความเร็ว และ แก๊สปกคลุม ความสัมพันธ์ คือ กระแส*ความเร็ว*แก๊สปกคลุม โดยพารามิเตอร์การเชื่อมที่กระแส 90 แอมป์ ความเร็ว 300 มิลลิเมตรต่อนาที และปกคลุมด้วยแก๊ส Ar+5%H_2 มีค่าเท่ากับ 273.33 HV ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่มีค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด (Ultimate tensile) ที่มีค่ามากที่สุดกับชิ้นงานที่มีค่าต่ำสุด พบว่าลักษณะโครงสร้างของ Columnar dendrite และการโตของเกรนในบริเวณ HAZ มีความแตกต่างกันมาก กล่าวคือ ขนาดของ Columnar dendrite จะเล็กกว่าในกรณีของชิ้นงานที่มี Ultimate tensile สูงกว่า และขนาดของเกรนที่โตในบริเวณ HAZ ก็โตได้น้อยกว่า ส่วนโครเมียมคาร์ไบด์ ($Cr_{23} C_6$) สามารถเกิดขึ้นได้กับทั้งสอง

2.6.3 Kenji **UNO** [15] ศึกษาการผลิตของเทเลอร์แบล็งค์โดยวิธีการทางเทคนิคต่อชนเป็นเส้นตรง เป็นการพัฒนาของการผลิตชิ้นส่วนรถยนต์เพื่อความต้องการด้านการป้องกัน ผลกระทบต่อ

สิ่งแวดล้อม ในกระบวนการผลิต บอร์ดี และชิ้นส่วนประกอบ ใช้เหล็กที่มีน้ำหนักต่ำและได้ค่าความยืดตัวสูง โดยการใช้เทเลอร์แบล็งค์ ลักษณะชิ้นงาน ที่ผลิต เช่น ประตูรถยนต์ โครงประตู ผลการวิจัยพบว่า การผลิตของเทเลอร์แบล็งค์โดยวิธีการทางเทคนิคต่อชนเป็นเส้นตรง นั้นสามารถประยุกต์ใช้กับการผลิต การต่อชนของชิ้นส่วนที่เป็นมุม เช่นการผลิตชิ้นส่วน ดออินเนอร์พาเนล ซึ่งคุณลักษณะของการเชื่อมได้ตามที่ต้องการ และกลุ่มบริษัทมิตซูบิชิ มอเตอร์ ได้ยอมรับและให้การสนับสนุนการนำเทเลอร์แบล็งค์เข้ามาใช้ในกระบวนผลิต

2.6.4 J. LISOK, A. PIELA [16] ศึกษาวิธีการประเมินค่าความสามารถการยืดตัวของ Laser Weld Tailored Blanks เป็นการประเมินความสามารถของการยืดตัวของ ส่วนประกอบของยานพาหนะ ที่ความสามารถดัดงอได้โดยไม่แตกหักของแผ่นเหล็ก โดยประเมินค่า คุณสมบัติทางกลและเทคโนโลยีการทดสอบการเชื่อม ที่มีความแตกต่างกันเกี่ยวกับความหนาของส่วนประกอบ ซึ่งเกิดไปถึงรอยแตกของชิ้นงานขึ้นรูป ทำให้รู้ล่วงหน้าของพฤติกรรมของ Tailored Blank ของกระบวนการขึ้นรูปชิ้นส่วน รถยนต์ที่มีการเปลี่ยนแปลงการขึ้นรูปอย่างถาวร โดยใช้คอมพิวเตอร์เป็นตัวแทนในการทดสอบลักษณะชิ้นงาน ผลการวิจัยพบว่า วิธีพิจารณาความสามารถของการยืดตัวยอมรับที่การประเมินของความสามารถดัดงอได้โดยไม่แตกหักของแผ่นเหล็กโดยใช้ Finite Elements Method (FEM) ทดสอบ

บทที่ 3
การดำเนินงานการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการวิจัยเพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรการเชื่อมเลเซอร์เทเลอร์แบล็งค์ต่อการยืดตัวของรอยต่อชนแผ่นเหล็กเคลือบสังกะสีเกรด SGACD 45/45 โดยมีการดำเนินงานการวิจัยตามลำดับขั้นตอน ดังนี้

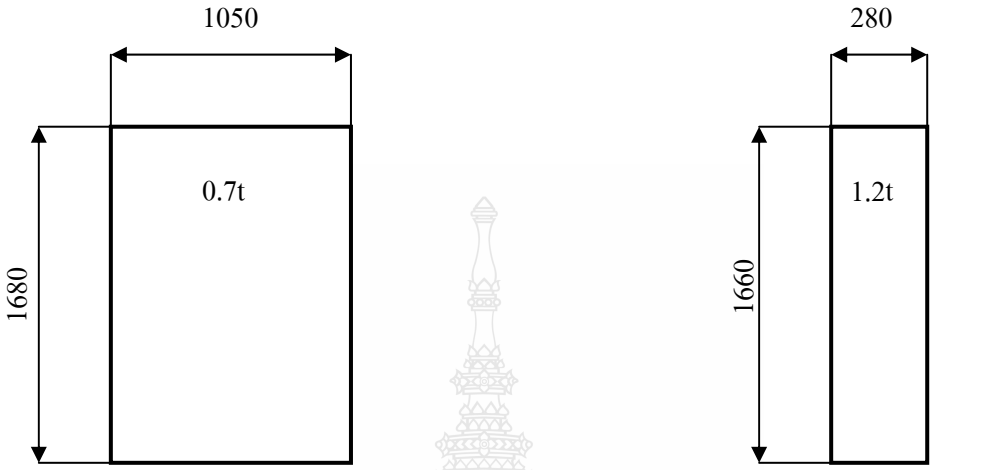
3.1 ลำดับขั้นตอนวิธีการวิจัย

ตารางที่ 3.1 ขั้นตอนการวิจัย

ลำดับ	การดำเนินงาน	วิธีปฏิบัติ
1	แผ่นเหล็กเคลือบสังกะสีเกรด SGACD	1.1 ขนาดชิ้นงาน 1.2 ส่วนผสมทางเคมี 1.3 ความแข็งแรงดึง 1.4 การเตรียมชิ้นงานเมื่อตัดเสร็จ
2	รอยต่อชนแผ่นเหล็กเคลือบสังกะสี SGACD	2.1 วิธีการต่อชน 2.2 การเตรียมชิ้นงานและตรวจสอบจิ๊ก ก่อนการต่อชน 2.3 การต่อชนในอุปกรณ์จับยึด
3	การปรับค่าการเชื่อมเลเซอร์เทเลอร์แบล็งค์	3.1 การปรับค่าความเร็วการเชื่อม 3.2 การปรับค่าตำแหน่งหัวเชื่อม 3.3 การเคลื่อนที่การเชื่อม 3.4 ตัวแปรการเชื่อม 3.5 การกำหนดค่าตัวแปรการทดลอง
4	การเตรียมชิ้นงานในการทดสอบและตรวจสอบ	4.1 การออกแบบการตัดชิ้นงาน 4.2 เครื่องมือที่ใช้ในการตัดชิ้นงาน 4.3 เครื่องมือทีใช้ในการทดสอบการยืดตัว 4.4 การทดสอบการยืดตัวของรอยเชื่อม 4.5 เครื่องมือทีใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค 4.6 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

3.1.1 แผ่นเหล็กเคลือบสังกะสีเกรด SGACD 45/45

วัสดุที่ใช้ในการทดลองของการวิจัยครั้งนี้ เป็นเหล็กเคลือบสังกะสีโลหะผสมซึ่งมีขนาดในการทดลองคือแผ่นความหนา 0.7 มิลลิเมตรกว้าง 1050 มิลลิเมตรยาว 1680 มิลลิเมตรและแผ่นความหนา 1.2 มิลลิเมตร กว้าง 280 มิลลิเมตร ยาว 1660 มิลลิเมตรซึ่งเป็นขนาดชิ้นงานจริงที่ใช้ในการผลิตประตูรถยนต์จำนวน 108 แผ่นดังแสดงในรูปที่ 3.1



(ก) หนา 0.70 มิลลิเมตร (ข) หนา 1.2 มิลลิเมตร

รูปที่ 3.1 ขนาดชิ้นงานตัด (หน่วย : มิลลิเมตร)

ตารางที่ 3.2 ตารางส่วนผสมทางเคมี เป็นข้อมูลมาจากใบรับรองสินค้าของผู้ขายเหล็ก

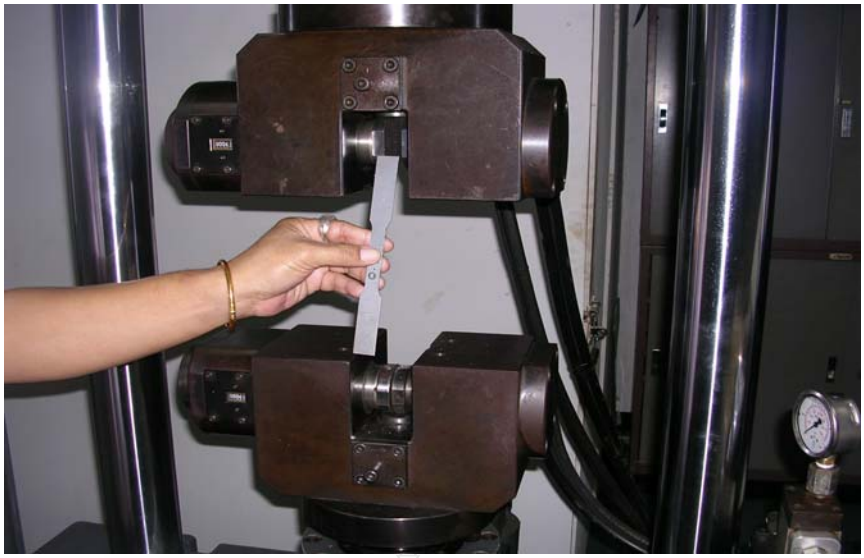
เปอร์เซ็นต์ส่วนผสมทางเคมี (โดยน้ำหนัก)				
คาร์บอน	ซิลิกอน	ฟอสฟอรัส	ซัลเฟอร์	ทองแดง
0.002	TR	0.014	0.024	0.006

3.1.2 สมบัติความแข็งแรงดึง

สมบัติทางกลจากการทดสอบตามมาตรฐาน ASTME8 (American Society Test for Metals E-8) ดังแสดงในรูปที่ 3.2-3.4 ของแผ่นเหล็กเคลือบสังกะสีเกรดSGACD และค่าความแข็งแรงดึงแสดง ดังตารางที่ 3.3

รูปที่ 3.2 ชิ้นงานทดสอบความแข็งแรงดึง

รูปที่ 3.3 เครื่องทดสอบความแข็งแรงดึง



รูปที่ 3.4 การเตรียมประกอบการทดสอบความแข็งแรงดึง

ตารางที่ 3.3 สมบัติทางกลความแข็งแรงดึง

ความหนา (มม.)	ความแข็งแรงดึง			ค่าทดสอบอิริเซน
	ความแข็งแรงดึงจุดคราก (นิวตัน/มม.^{2})	ความเค้นแรงดึงสูงสุด (นิวตัน/มม.^{2})	เปอร์เซนต์การยืดตัว (Elongation)	ความลึก (มม.)
0.7	171	2.6	42	8.20
1.2	172	4.4	47	9.10

3.1.3 การเตรียมชิ้นงานเมื่อตัดเสร็จ

ชิ้นงานเมื่อตัดเสร็จจะนำวางไว้บน พาเลทเหล็ก และห่อหุ้มด้วยพลาสติกเพื่อป้องกันฝุ่นสิ่งสกปรกตกไปติดที่ผิวชิ้นงานแล้วนำเก็บไว้บริเวณพื้นที่เตรียมงานระหว่างกระบวนการผลิต พร้อมติดแผ่นป้ายบ่งชี้ งานทดลอง แสดงดังรูปที่ 3.5

(ก) ความหนา 1.2 มิลลิเมตร

(ข) ความหนา 0.7 มิลลิเมตร

รูปที่ 3.5 การเตรียมชิ้นงานที่ตัดเสร็จก่อนการเชื่อม

3.1.4 รอยต่อแผ่นเหล็กเคลือบสังกะสี

การต่อชนชิ้นงานเชื่อมในการทดลองได้ดำเนินการตามกระบวนการผลิตซึ่งเป็นระบบการผลิตแบบอัติโนมัติ (Automation) โดยระบบหุ่นยนต์

(ก) วิธีการต่อชน แผ่นเหล็กหนาขนาด 1.20 มิลลิเมตร ครีบหงายขึ้น และแผ่นเหล็กบางขนาด 0.7 มิลลิเมตรครีบคว่ำลง ต่อชนกัน ซึ่งค่าความสูงของครีบไม่เกิน 0.30 มิลลิเมตรโดยปฏิบัติดังนี้ [8]

- นำชิ้นงานที่เตรียมไว้วางบนโต๊ะสำหรับวางชิ้นงานก่อนวัดความหนาดังแสดงในรูปที่ 3.6

- กดปุ่มสวิทช์ สตาร์ทเพื่อให้โรบอตนำ ชิ้นงานไปตรวจวัดความหนา ดังแสดงในรูปที่ 3.7

-โรบอตนำชิ้นงานที่มีความหนา 0.7 และ 1.2 มิลลิเมตรเข้าตรวจสอบความหนาที่ตำแหน่งการตรวจสอบความหนา ดังแสดงในรูปที่ 3.8 และ 3.9

- นำชิ้นงานไปวางไว้ที่โต๊ะวางชิ้นงานที่ตรวจสอบความหนาแล้วดังแสดงในรูปที่ 3.10

-โรบอตนำชิ้นงานจากโต๊ะที่ตรวจสอบความหนาแล้ว เข้าวางที่โต๊ะเชื่อม หรือจิ๊กต่อชนดังแสดงในรูปที่ 3.11

รูปที่ 3.6 โต๊ะสำหรับวางชิ้นงานก่อนวัดความหนา

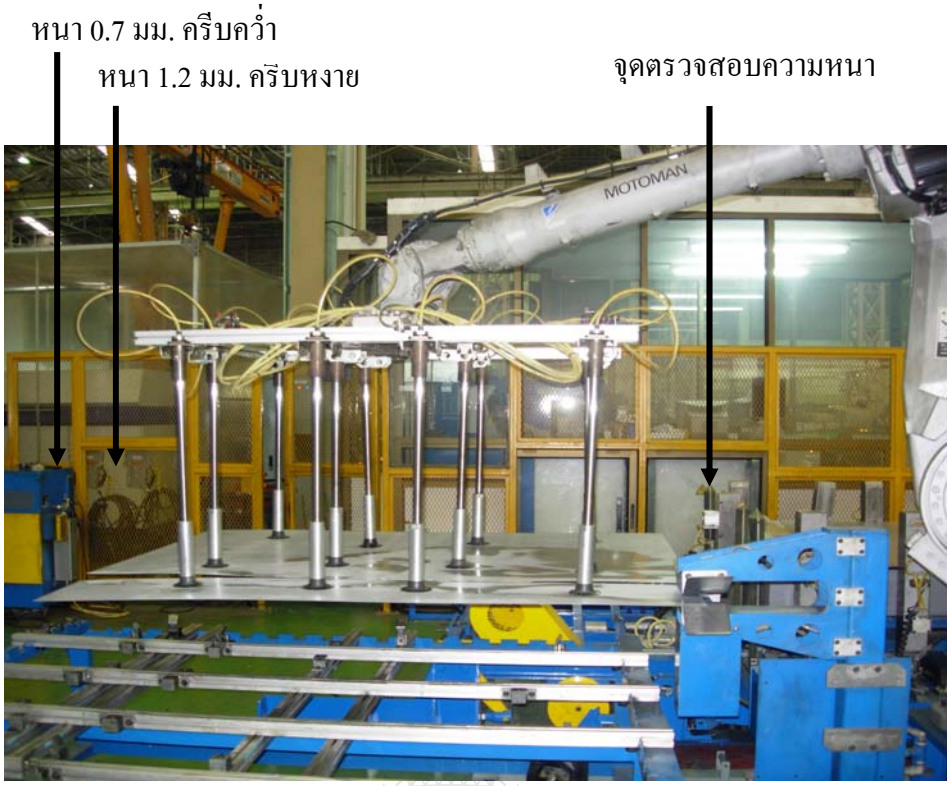
ปุ่มกดสวิทธ์สตาร์ท

รูปที่ 3.7 กดปุ่มสวิทช์ สตาร์ท

หนา 0.7 มม. ครีบคว่ำ

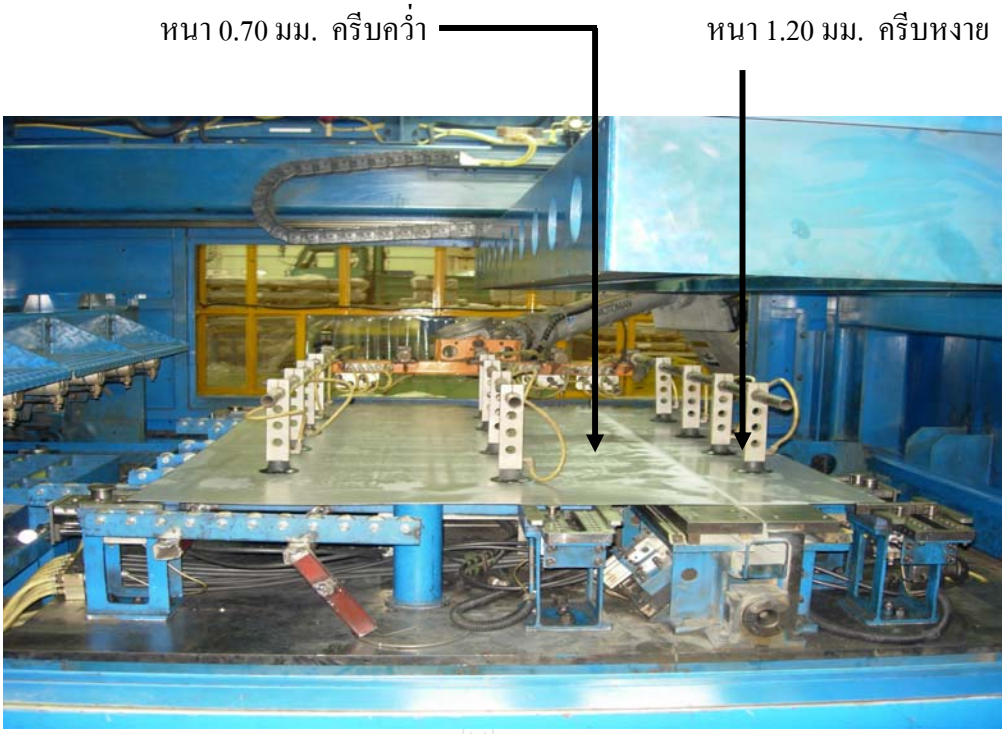
หนา 1.2 มม.ครีบหงาย

รูปที่ 3.8 นำชิ้นงานเข้าตรวจสอบความหนา



รูปที่ 3.9 ตรวจสอบความหนาที่โต๊ะตรวจสอบ

รูปที่ 3.10 ชิ้นงานที่ ตรวจสอบความหนาแล้ว



รูปที่ 3.11 นำชิ้นงานวางบนจิ๊กเชื่อม

(ข) การเตรียมชิ้นงานและตรวจสอบจิ๊กก่อนการต่อชน ก่อนที่จะนำชิ้นงานจากโต๊ะตรวจสอบความหนา มาวางที่จิ๊กเชื่อมหรือจิ๊กต่อชน ต้องปฏิบัติดังนี้ [8]

-ทำความสะอาดขอบชิ้นงาน บริเวณหน้าสัมผัสการเชื่อมทั้งขนาดความหนา 0.7 และ 1.2 มิลลิเมตร โดยใช้น้ำยาสารโซเวนท์ (Sovent) ชโลมที่ผิวเหล็กแล้ว ขัดด้วยแปรงลวดทองเหลืองดังแสดงในรูปที่ 3.12

-ทำความสะอาดจิ๊กเชื่อมบริเวณที่วางแผ่นชิ้นงานไม่ให้มีคราบสกปรกติดอยู่ดังแสดงในรูปที่ 3.13

-ทำความสะอาดร่องตัวดันชิ้นงานเพื่อป้องกันไม่ให้ตัวดันชิ้นงานติดขัดในขณะดันชิ้นงานให้ขอบแนบชิดติดกันมากที่สุดก่อนแคลมป์จับยึด เพื่อดำเนินการเชื่อมลำดับต่อไป ดังแสดงในรูปที่ 3.14

-ตรวจตำแหน่งตัวดันให้อยู่ในตำแหน่งการดันชิ้นงาน ตามความกว้างของชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 3.15

- ทำความสะอาดโฟกัสเลนซ์ และกระจกเลนซ์นำร่องการเชื่อม ดังแสดงในรูปที่ 3.16

-ตรวจสอบพลังงานเลเซอร์ในการเชื่อมให้มีค่า 3000 วัตต์ เพิ่มหรือลดลงไม่เกิน 10 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในรูปที่ 3.17

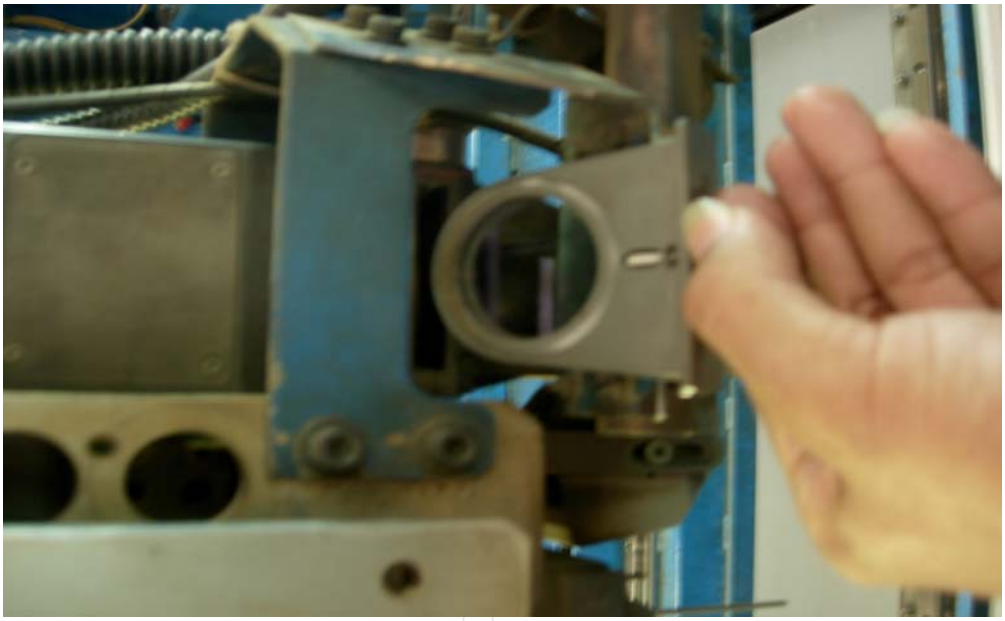
- ตรวจสอบแรงดันลมต้องไม่ต่ำกว่า 7 บาร์ ดังแสดงในรูปที่ 3.18

รูปที่ 3.12 ทำความสะอาดขอบชิ้นงาน

รูปที่ 3.13 ทำความสะอาดจิ๊กเชื่อม

รูปที่ 3.14 ทำความสะอาดร่องตัวดันชิ้นงาน

รูปที่ 3.15 ตรวจตำแหน่ง Pusher



รูปที่ 3.16 ทำความสะอาดโฟกัสเลนซ์

รูปที่ 3.17 ตรวจสอบพลังงานเลเซอร์

รูปที่ 3.18 ตรวจสอบแรงดันลม

(ค) การต่อชนในอุปกรณ์จับยึด การต่อชนในอุปกรณ์จับยึดดังแสดงในรูปที่ 3.19 มีขั้นตอนการปฏิบัติดังนี้ [8]

- กดปุ่มควบคุมให้ชุดแคลมป์เคลื่อนที่เข้าหาตำแหน่งที่จะทำการต่อชนทั้ง 2 แผ่นความหนา

- เลือกตำแหน่ง การควบคุม l การปรับตั้งการต่อชนที่ความหนา 1.2 มิลลิเมตร

-กดปุ่มควบคุมการปรับตั้งตัวหยุดเพื่อแบ่งกึ่งกลางในการเชื่อมของแนวต่อชน ระหว่างเหล็กหนา 1.2 และ 0.7 มิลลิเมตร

- กดปุ่มตัวดันด้านขวาและซ้ายเพื่อดันชิ้นงานด้านข้างเข้าหาตำแหน่งการเชื่อม

- กดปุ่มตัวดันด้านหลังเพื่อดันชิ้นงานด้านหลังเข้าหาตัวหยุด

- กดปุ่มควบคุมตัวเหยียบเพื่อให้ตัวเหยียบเหยียบชิ้นงาน 1.2 มิลลิเมตรให้คงที่

- กดปุ่มตัวหยุดเก็บซึ่งเป็นขั้นตอนการสิ้นสุดการปรับตั้งด้านความหนา 1.2 มิลลิเมตร

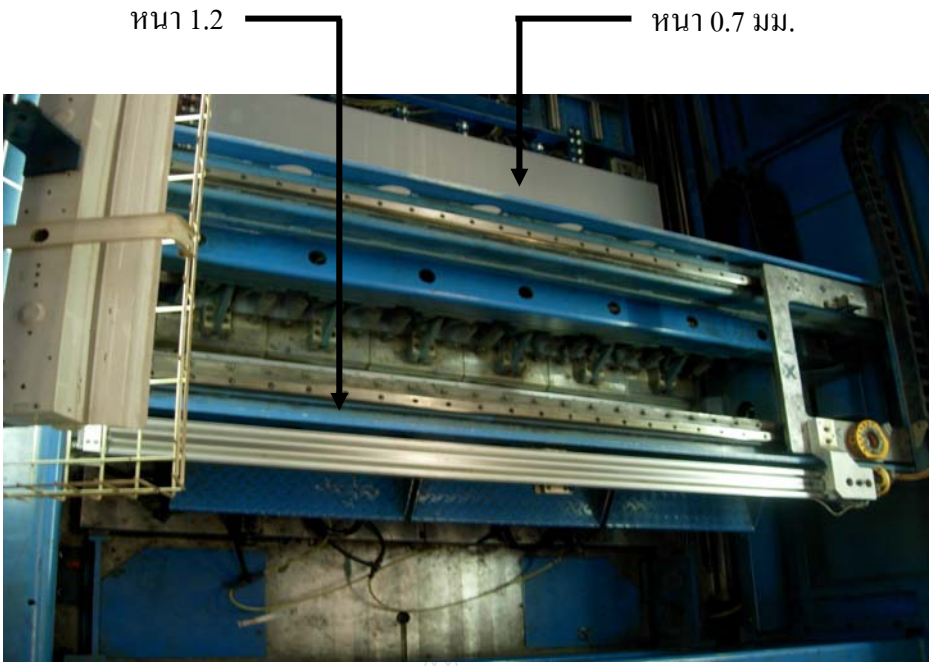
- เลือกตำแหน่งการควบคุมการปรับตั้งการต่อชนที่ความหนา 0.70 มิลลิเมตร

- กดปุ่มตัวดันด้านขวา และซ้ายเพื่อดันชิ้นงานด้านข้างเข้าหาตำแหน่งการเชื่อม

- กดปุ่มควบคุมตัวเหยียบด้านสูง และปุ่มควบคุมตัวเหยียบด้านต่ำเพื่อให้ปลายตัวเหยียบประคองปลายเหล็ก

- กดปุ่มตัวดันด้านหลังเพื่อดันชิ้นงานด้านหลังให้แนวต่อชนทั้ง 2 ความหนาแนบชิดกัน

- กดปุ่มควบคุมตัวเหยียบด้านสูงเพื่อให้ตัวเหยียบเหยียบชิ้นงานไม่ให้เคลื่อน ตัวออกซึ่งเป็นขั้นตอนการสิ้นสุดการจับยึดชิ้นงานก่อนการเชื่อม



รูปที่ 3.19 การต่อชนในอุปกรณ์การจับยึด

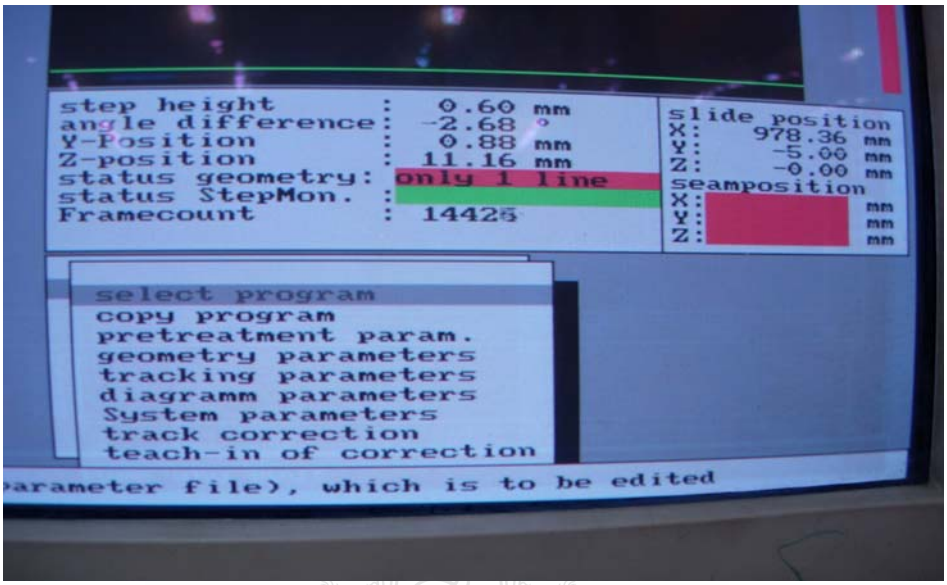
3.1.5 หลักการปรับค่าความเร็วการเชื่อม

การปรับความเร็วการเชื่อมในการทดลองการวิจัยในครั้งนี้ได้ปรับระดับความเร็วในการเชื่อมเป็น 3 ระดับคือ ความเร็วที่ 4000 มิลลิเมตรต่อนาที 5000 มิลลิเมตรต่อนาที และ 6000 มิลลิเมตรต่อนาที ซึ่งทำการควบคุมค่าความเร็วโดยป้อนข้อมูลลงในรีโมท ดังแสดงในรูปที่ 3.20

รูปที่ 3.20 รีโมทปรับความเร็ว

3.1.6 หลักการปรับค่าตำแหน่งหัวเชื่อม

การปรับตำแหน่งหัวเชื่อมในการทดลองการวิจัยในครั้งนี้ได้ปรับระดับตำแหน่งหัวเชื่อมในการเชื่อมเป็น 3 ระดับคือ +0.45 +0.55 + 0.55 มิลลิเมตร ซึ่งทำการควบคุมโดยป้อนข้อมูลลงในโปรแกรม ดังแสดงในรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.21 การปรับตำแหน่งหัวเชื่อม

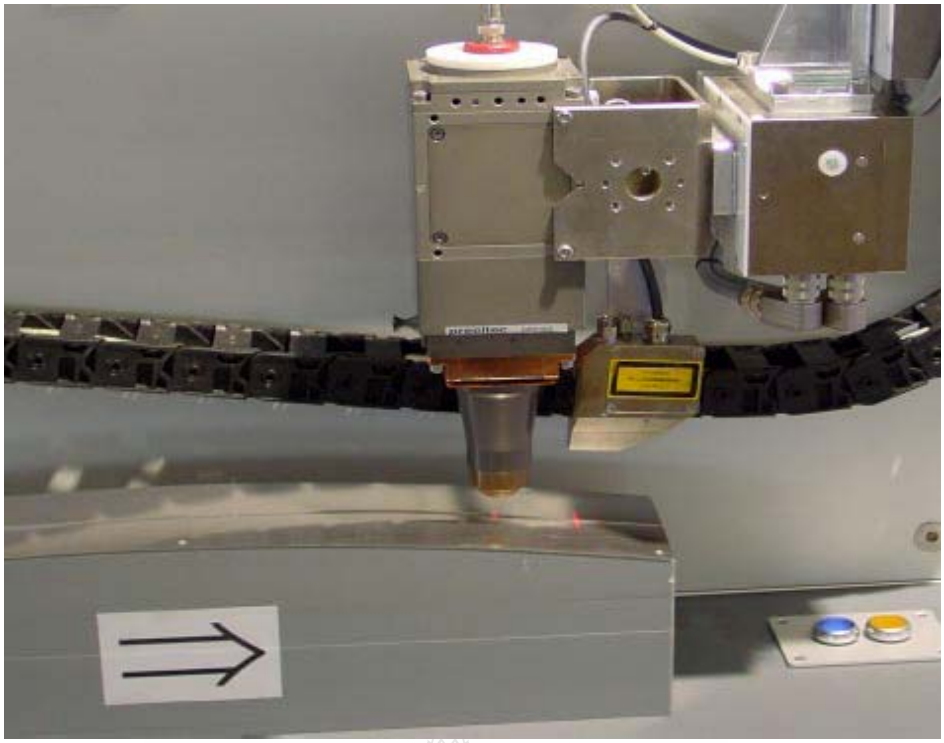
3.1.7 การเคลื่อนที่การเชื่อม

การเชื่อมเลเซอร์เทเลอร์แบล็งค์เป็นกระบวนการเชื่อมที่มีการเคลื่อนที่การเชื่อมสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท [5,6,8]

(ก) ตำแหน่งหัวเชื่อมอยู่กับที่ หมายถึง การเคลื่อนที่ชิ้นงานที่จะเชื่อมเข้าหาหัวเชื่อมเพื่อทำการเชื่อมชิ้นงาน

(ข) ตำแหน่งหัวเชื่อมเคลื่อนที่ หมายถึง ชิ้นงานอยู่กับที่หัวเชื่อมเคลื่อนที่ตามแนวชิ้นงานที่ต้องการเชื่อม

สำหรับการทดลองในการวิจัยศึกษาอิทธิพลของตัวแปรการเชื่อมเลเซอร์เทเลอร์แบล็งค์ต่อการยืดตัวของรอยต่อชนแผ่นเหล็กเคลือบสังกะสี ครั้งนี้ได้ใช้เครื่องเชื่อมเลเซอร์เทเลอร์แบล็งค์ประเภทตำแหน่งหัวเชื่อมเคลื่อน ดังแสดงในรูปที่ 3.22



รูปที่ 3.22 ตำแหน่งหัวเชื่อมเคลื่อนที่

3.1.8 ตัวแปรการเชื่อม

การกำหนดค่าตัวแปรการทดลองในครั้งนี้ได้กำหนดตัวแปรการทดลองออกเป็น 3 ประเภท คือ

(ก) ตัวแปรคงที่ คือ พลังงานเลเซอร์ (Laser output) ระยะห่างของจุดรวมแสงเลเซอร์กับผิวชิ้นงานเชื่อม (Focus height) ครีบของขอบผิวชิ้นงานที่เชื่อม (Material burr direction) แก๊สที่ใช้ปกคลุมแนวเชื่อม (Gas covers the joint)

(ข) ตัวแปรอิสระ คือ ความเร็วในการเชื่อม (Welding speed) ตำแหน่งหัวเชื่อม (Laser target position) ระยะห่างแผ่นงานเชื่อม (Butt gap occurrence)

(ค) ตัวแปรตาม คือ ค่าความลึกของรอยทดสอบ (Crack point deep) โดยใช้เครื่อง Erichsen Cupping Test ตามมาตรฐาน Japanese Industrial Standard (JIS) No.B7729 และ JIS-Z-2247

ซึ่งตัวแปรอิสระที่ทำการศึกษามี 3 ตัวเลือก 3 ระดับของแต่ละตัวแปร เพราะได้ทำการศึกษาเบื้องต้นมาแล้ว และคาดว่ามีอิทธิพลต่อการยืดตัวของรอยต่อชน คือ ความเร็วการเชื่อม 4000 5000 6000 มิลลิเมตรต่อนาที ที่ไม่เลือกความเร็วที่ต่ำกว่า 4000 มิลลิเมตรต่อนาที เพราะทำให้ผลผลิตลดลง และคุณลักษณะเครื่องเชื่อมรุ่น เอช แอล ดี 3006 ความเร็วการเชื่อมไม่เกิน 6000 มิลลิเมตรต่อนาที ตำแหน่งหัวเชื่อม +0.45 +0.50 +0.55 มิลลิเมตร ซึ่งนอกเหนือจากการใช้ข้อมูลการทดลองเบื้องต้นมาพิจารณา แล้วก็ได้วิเคราะห์ตามคุณลักษณะเครื่องเชื่อมด้วยคือ ตำแหน่งการปรับตั้งหัว

เชื่อมปรับได้ครั้งละไม่เกิน 0.05 มิลลิเมตร ระยะห่างแผ่นงานเชื่อม 0.00 0.07 0.13 มิลลิเมตร เช่นเดียวกัน คือใช้ข้อมูลการทดลองเบื้องต้นมาพิจารณา ขณะเดียวกันการเชื่อมในงานปกติค่าระยะห่างแผ่นงานเชื่อม ที่ตรวจวัดจะได้ค่าอยู่ในช่วงนี้

3.2 การออกแบบลำดับขั้นการทดลอง การเตรียมชิ้นงานเพื่อการทดสอบค่าการยืดตัวและการตรวจสอบศึกษาโครงสร้างจุลภาคและความสามารถในการขึ้นรูปได้ ออกแบบการทดลองโดยมีการกำหนดค่าตัวแปรการทดลอง [10] ดังแสดงในตารางที่ 3.4 และปฏิบัติดังนี้

3.2.1 การสุ่มชิ้นงานทดสอบค่าการยืดตัว

นำแผ่นเหล็กชุบสังกะสีเกรด SGACD 45/45 ที่เชื่อมเสร็จแล้ว ไปตัดให้ได้ขนาดกว้าง 100 มิลลิเมตร ขนาดยาว 200 มิลลิเมตร จำนวนทั้งหมด 108 แผ่นตามมาตรฐานของอิริเซนเทส (Erichsen test) เพื่อนำไปทดสอบค่าการยืดตัว โดยสุ่มการทดสอบตาม ที่กำหนดในตารางที่ 3.4

3.2.2 การตรวจสอบโครงสร้างมหภาค

นำชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบค่าการยืดตัวดังแสดงในรูปที่ 3.23 ไปตรวจสอบศึกษาโครงสร้างมหภาค

รูปที่ 3.23 ชิ้นงานเตรียมตรวจสอบโครงสร้างมหภาค

3.2.3 การออกแบบการตัดชิ้นงาน

การออกแบบการตัดชิ้นงานในการทดสอบ (Specimen) เป็นการเตรียมชิ้นงานที่เชื่อมเสร็จเพื่อนำไปทดสอบค่าการยืดตัวบนแนวเชื่อมตามมาตรฐานวิธีของอิริเซนคัปปิ้งเทส (Erichsen cupping Test) ดังแสดงในข้อที่ 2.4.1 และรูปที่ 2.20 โดยการตัดชิ้นงานจากจุดเริ่มต้นการเชื่อมถึง 200

มิลลิเมตร และห่างจากเส้นแนวเชื่อมด้านละ 50 มิลลิเมตร รวมเป็นความกว้างการตัดชิ้นงาน 100 มิลลิเมตรตามวิธีของ อีริทเซนคัปปิ้งเทส (Erichsen Cupping Test) มาตรฐาน JISB7729 และ JIS-Z-2247 [2] ดังแสดงในรูปที่ 3.24

ตารางที่ 3.4 แผนผังการสุ่มการทดลอง

	(A) ความเร็วการเชื่อม (มม./นาที)								
ระยะห่างชิ้นงานเชื่อม (มม.) (C) Gap	4,000 มม./นาที			5,000 มม./นาที			6,000 มม./นาที		
	(B) ตำแหน่งจุดหัวเชื่อม								
	+ 0.45	+ 0.50	+ 0.55	+ 0.45	+ 0.50	+ 0.55	+ 0.45	+ 0.50	+ 0.55
0.00	9	2	98	4	23	6	7	10	85
	34	11	95	13	28	16	14	17	19
	5	20	67	22	99	24	87	26	8
	15	29	32	39	18	33	61	35	1
0.07	37	40	66	88	41	30	43	25	45
	46	44	48	77	106	27	52	38	101
	55	80	57	53	59	12	63	56	3
	64	86	65	70	68	36	58	96	105
0.13	73	102	74	89	78	54	71	81	21
	82	60	84	51	108	72	92	79	50
	91	75	93	42	94	90	97	76	104
	100	62	47	103	49	69	31	83	107

3.2.4 เครื่องมือที่ใช้ในการตัดชิ้นงาน

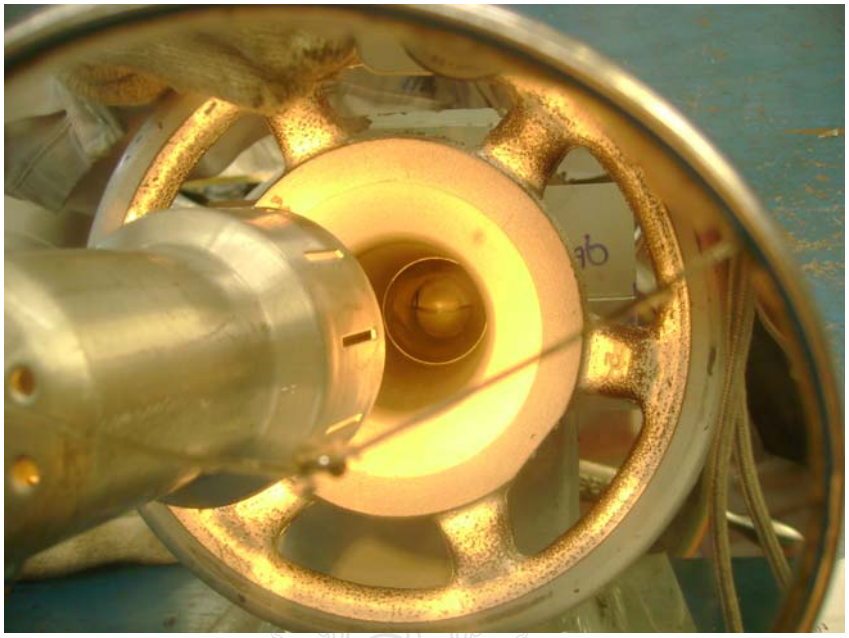
นำแผ่นเหล็กชุบสังกะสีเกรด SGACD 45/45 ที่เชื่อมเสร็จแล้ว ตัดตามการออกแบบการตัดขนาดกว้าง 100 มิลลิเมตร ขนาดยาว 200 มิลลิเมตร จำนวนทั้งหมด 108 แผ่นตามมาตรฐานของอีริทเซนคัปปิ้งเทส ดังแสดงในรูปที่ 3.25

รูปที่ 3.24 ชิ้นงานที่ตัดเสร็จเตรียมไปทดสอบ

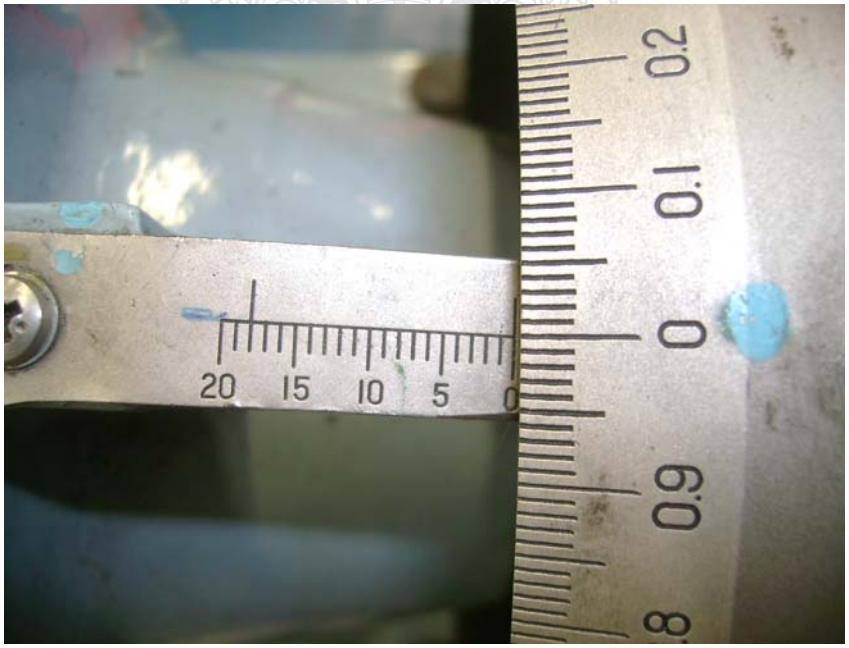
รูป 3.25 เครื่องตัดชิ้นงานการทดสอบ

3.2.5 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบการยืดตัว

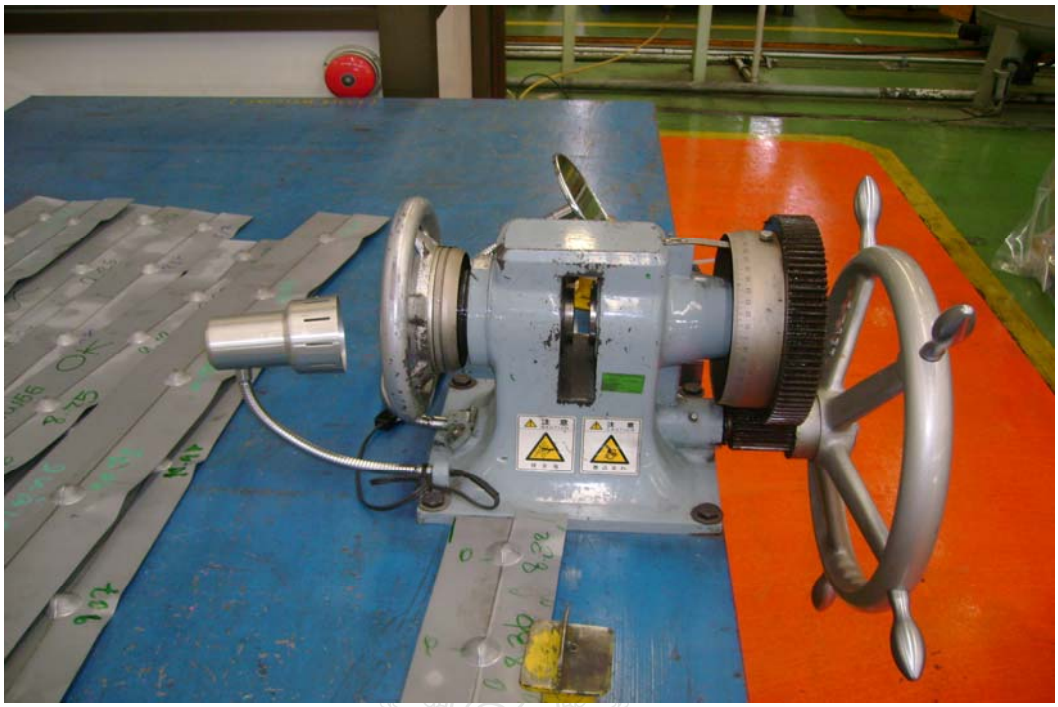
ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการเชื่อมเลเซอร์เทเลอร์แบล็งค์ นั้นต้องผ่านการทดสอบคุณสมบัติทางกลการยืดตัวของแนวเชื่อมจากการทดสอบด้วย Erichsen Test Machine ตามมาตรฐาน JISB7729 และ JIS-Z-2247 [2] แสดงดังรูป 3.26-3.28



รูปที่ 3.26 กระจกส่องแนวเชื่อมเครื่องทดสอบการยืดตัว



รูปที่ 3.27 สเกลวัดค่าการยืดเครื่องทดสอบการยืดตัว



รูปที่ 3.28 เครื่องทดสอบการยืดตัวอิริเซน

วิธีการทดลองค่าการยืดตัวที่ เครื่องอิริเซนคัปปิ้งเทส ดังแสดงในรูปที่ 3.29

(ก) นำชิ้นงานสอดเข้าไปให้ตำแหน่งรอยเชื่อมที่ต้องการทดสอบอยู่กึ่งกลางของหัวบอล Test

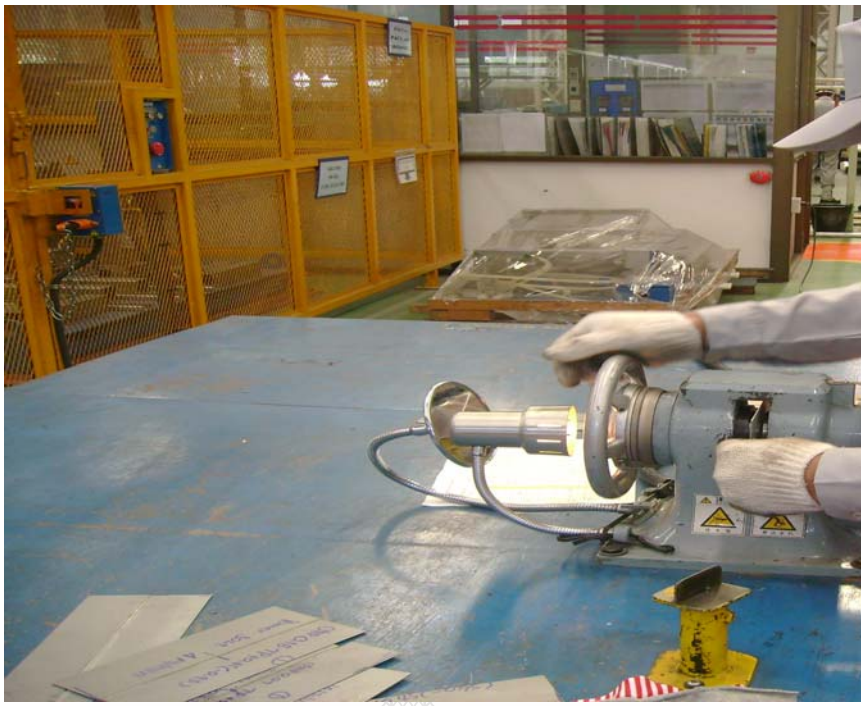
(ข) ทำการหมุนแกนบังคับให้หัวบอลสัมผัสกับตำแหน่งรอยเชื่อมที่ต้องการทดสอบ

(ค) เริ่มทำการหมุนแกนบังคับให้หัวบอลดัน รอยเชื่อมอย่างช้าๆ พร้อมทั้งสังเกตุที่รอยเชื่อมผ่านทางแผ่นกระจกขยาย

(ง) เมื่อเห็นว่ารอยเชื่อมเริ่มแตกให้หยุดหมุนแกนบังคับทันที

(จ) และให้อ่านค่าที่สเกลหลัก (หน่วยเป็นมิลลิเมตร) และสเกลรอง (หน่วยเป็นไมครอน)

(ฉ) นำชิ้นงานที่ทดสอบออกจากเครื่องทดสอบเครื่องอิริเซนคัปปิ้งเทส



รูปที่ 3.29 การทดสอบการยืดตัวของแนวเชื่อม

3.2.6 การตรวจสอบโครงสร้าง

นำชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบค่าการยืดตัวแล้วดำเนินการตรวจสอบโครงสร้างมหภาค โดยดำเนินการตามวิธีการ [9] ดังต่อไปนี้

1. การเตรียมชิ้นงานตรวจสอบ(Specimen)
2. การปรับระดับผิวหน้าของชิ้นงานทดสอบ ด้วยตะไบ
3. การขัดด้วยกระดาษทราย (Grinding) ด้วยเบอร์ 150 – 1200
4. การขัดมัน (Polishing)
5. การกัดด้วยสารละลาย กรด (Etching)
6. การตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์ (Microscopy)
7. การถ่ายภาพโครงสร้าง

3.3 วิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance)

เนื่องจากงานวิจัยนี้ได้ออกแบบการทดลองเป็นแบบ 3 ปัจจัย ประกอบด้วยความเร็วเชื่อม (A) ตำแหน่งหัวเชื่อม (B) ระยะห่างชิ้นงานเชื่อม (C) แต่ละปัจจัยมี 3 ระดับ และทำการทดลองซ้ำ 4 ครั้ง และการวิเคราะห์ ความแปรปรวนในการทดลองครั้งนี้ได้ใช้โปรแกรม Minitab วิเคราะห์ผลและการสร้างกราฟผลที่เกิดขึ้น [10, 12]

บทที่ 4
ผลการทดลองและวิเคราะห์ข้อมูล

การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรการเชื่อมเลเซอร์เทเลอร์แบล็งค์ ต่อการยืดตัวของรอยต่อชนแผ่นเหล็กชุบสังกะสีเกรด SGACD 45/45 เป็นการออกแบบการทดลองที่มีตัวแปรศึกษาประกอบด้วย

- ความเร็วในการเชื่อม 3 ระดับ คือ 4000 5000 และ 6000 มิลลิเมตรต่อนาที
- ตำแหน่งหัวเชื่อม 3 ระดับ คือ + 0.45 + 0.50 + 0.55
- ระยะห่างชิ้นงานเชื่อม 3 ระดับ คือ 0.00 0.07 0.13 มิลลิเมตร

ซึ่งได้ผลการทดลองค่าการยืดตัวของแนวเชื่อมดังแสดงในตารางที่ 4.4 และรูปชิ้นงานหลังการทดลองการยืดตัวดังแสดงในรูปที่ 4.5 สำหรับตัวแปรอิสระที่ทำการศึกษานี้ที่คาดว่า มีอิทธิพลต่อการยืดตัว ซึ่งได้ทำการทดลองทำการศึกษาเบื้องต้นมาแล้วดังแสดงในข้อ 4.1

4.1 การทดลองเบื้องต้น

ก่อนที่จะเลือกระดับของปัจจัยตัวแปรทั้งสามที่คาดว่ามีอิทธิพลต่อการยืดตัวของรอยต่อชน ได้ทำการทดลองเบื้องต้นเพื่อที่จะได้ข้อมูลมาเป็นแนวทางในการเลือกระดับของตัวแปรซึ่งการทดลองเบื้องต้นมีดังนี้

4.1.1 การทดลองครั้งที่ 1 ทดลองเพื่อหาค่าระยะตำแหน่งหัวเชื่อม จากตารางที่ 4.1 กำหนดเงื่อนไขการเชื่อมคือ ความเร็วการเชื่อมคงที่ 6000 มิลลิเมตรต่อนาที ตำแหน่งหัวเชื่อม 0 -0.1 -0.2 และ+ 0.1 +0.2 +0.3 +0.4 +0.5 +0.6 และ+ 0.7 มิลลิเมตร และระยะห่างแผ่นงานเชื่อม 0.0 0.1 0.2 และ 0.3 มิลลิเมตร และค่าผลการยืดตัวแนวเชื่อม ได้คือ ค่าการยืดตัวสูงสุดที่ 9.80 มิลลิเมตร ค่าการยืดตัวต่ำสุดที่ 7.50 มิลลิเมตร ที่เงื่อนไข ตำแหน่งหัวเชื่อม + 0.5 มิลลิเมตร ระยะห่างแผ่นงานเชื่อม 0 มิลลิเมตรและที่เงื่อนไข ตำแหน่งหัวเชื่อม + 0.4 มิลลิเมตร ระยะห่างแผ่นงานเชื่อม 0.1 มิลลิเมตร ตามลำดับ และนำข้อมูลที่แสดงในตารางที่ 4.1 มาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ตำแหน่งจุดหัวเชื่อมระยะห่างระหว่างแผ่นกับค่าการยืดตัวแนวเชื่อมดังแสดงในรูปที่ 4.1

การวิเคราะห์ผลการทดลอง จากตารางที่ 4.1 ระยะห่างแผ่นงาน 0.0 0.1 0.2 0.3 มิลลิเมตร ตำแหน่งหัวเชื่อมไปด้านเหล็กบางคือ -0.1 -0.2 และที่ตำแหน่งหัวเชื่อม 0 มิลลิเมตร ระยะห่างแผ่นงาน 0.1 0.2 0.3 มิลลิเมตรและที่ตำแหน่งหัวเชื่อมไปทางเหล็กหนาคือ + 0.1 มิลลิเมตร ระยะห่างแผ่นงาน 0.2 0.3 มิลลิเมตรผลค่าการยืดตัวเป็น 0.00 มิลลิเมตร เพราะไม่มีน้ำเหล็กจากการเชื่อมที่นำไปเติมเต็มบริเวณรอยต่อชน สำหรับที่ระยะห่างแผ่นงานเชื่อม 0.00 มิลลิเมตรตำแหน่งหัวเชื่อม + 0.10 มิลลิเมตรค่าการยืดตัวเฉลี่ยเท่ากับ 8.57 มิลลิเมตร ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีการเชื่อมเลเซอร์เทเลอร์แบล็งค์ ความหนาต่างกันตำแหน่งหัวเชื่อมต้องกำหนดไปทางเหล็กหนา และรอยต่อชนของแผ่นงานเชื่อมไม่เกิน 0.1 มิลลิเมตร ที่กำหนดไว้ในบทที่ 2 และความสัมพันธ์ของกราฟในรูปที่ 4.1 ที่ระยะห่างแผ่นงาน 0.0 มิลลิเมตร ค่าการยืดตัวจะค่อยๆสูงขึ้นตามลำดับตามตำแหน่งจุดหัวเชื่อมที่

เคลื่อนที่เข้าหาแผ่นเหล็กที่หนากว่าและจะค่อยๆลดลงที่ตำแหน่งจุดหัวเชื่อม +0.6 มิลลิเมตร ค่าการยืดตัวสูงสุดที่ 9.60 มิลลิเมตรตำแหน่งจุดหัวเชื่อม +0.5 มิลลิเมตร ค่าการยืดตัวต่ำสุดที่ 7.68 มิลลิเมตร ตำแหน่งจุดหัวเชื่อม +0.7 มิลลิเมตร ที่ระยะห่างแผ่นงาน 0.1 มิลลิเมตร ค่าการยืดตัวก็จะค่อยๆสูงขึ้นตามตำแหน่งจุดหัวเชื่อมที่เคลื่อนที่เข้าหาแผ่นเหล็กที่หนากว่าเช่นเดียวกัน และจะค่อยๆ ลดลงที่ตำแหน่งจุดหัวเชื่อม +0.6 มิลลิเมตร ค่าการยืดตัวสูงสุดที่ 8.98 มิลลิเมตร ตำแหน่งจุดหัวเชื่อม +0.2 มิลลิเมตร ค่าการยืดตัวต่ำสุดเท่ากับ 7.3 มิลลิเมตร ตำแหน่งจุดหัวเชื่อม +0.7 มิลลิเมตร ขณะที่ระยะห่างแผ่นงาน 0.2 มิลลิเมตร ค่าการยืดตัวสูงขึ้นตามลำดับตามตำแหน่งจุดหัวเชื่อมที่เคลื่อนที่เข้าหาแผ่นเหล็กที่หนากว่า จะค่อยๆลดลงที่ตำแหน่งจุดหัวเชื่อม +0.6 มิลลิเมตร ค่าการยืดตัวสูงสุดเท่ากับ 8.90 มิลลิเมตร ตำแหน่งจุดหัวเชื่อม +0.3 มิลลิเมตร ค่าการยืดตัวต่ำสุดที่ 7.07 มิลลิเมตร ตำแหน่งจุดหัวเชื่อม +0.7 มิลลิเมตร สำหรับที่ระยะห่างแผ่นงาน 0.3 มิลลิเมตร ค่าการยืดตัวก็สูงขึ้นตามลำดับตามตำแหน่งจุดหัวเชื่อมที่เคลื่อนที่เข้าหาแผ่นเหล็กที่หนากว่า และจะค่อยๆลดลงที่ตำแหน่งจุดหัวเชื่อม +0.6 มิลลิเมตร ค่าการยืดตัวสูงสุดที่ 8.05 มิลลิเมตร ตำแหน่งจุดหัวเชื่อม +0.4 มิลลิเมตร ค่าการยืดตัวต่ำสุดที่ 0.00 มิลลิเมตรตำแหน่งจุดหัวเชื่อม +0.7 มิลลิเมตร

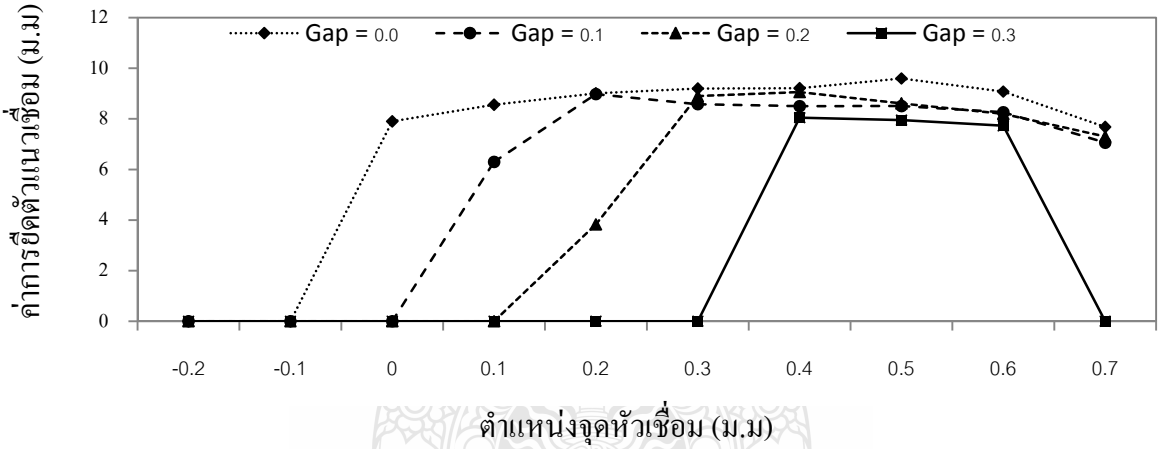
สรุปผลการทดลองเบื้องต้นครั้งที่ 1 ตำแหน่งหัวเชื่อมไปทางเหล็กบางค่าการยืดตัวเท่ากับ 0 มิลลิเมตรตำแหน่งหัวเชื่อมไปทางเหล็กหนาให้ค่าการยืดตัวสูงแต่เริ่มลดลงเมื่อตำแหน่งอยู่ที่ +0.6 มิลลิเมตร ทั้งนี้คาดว่าผลมาจากลำแสงเลเซอร์โตสุด 0.6 มิลลิเมตร

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองการยืดตัวของแนวเชื่อม ที่ความเร็วการเชื่อม 6000 มิลลิเมตรต่อนาที

ระยะห่างระหว่างแผ่น (มม.)	ตำแหน่งจุดหัวเชื่อม (มม.)									
	-0.2	-0.1	0	+0.1	+0.2	+0.3	+0.4	+0.5	+0.6	+0.7
0.00	0	0	7.90	8.60	9.30	9.55	8.90	9.80	9.50	9.30
	0	0	7.90	9.00	8.95	8.85	9.15	9.30	8.95	8.25
	0	0	7.90	8.10	8.80	9.20	9.60	9.70	8.80	5.50
0.1	0	0	0	6.50	9.30	8.90	9.50	8.30	8.10	6.50
	0	0	0	5.00	8.85	8.65	8.50	8.95	8.80	7.90
	0	0	0	7.40	8.80	8.20	7.50	8.30	7.90	6.80
0.2	0	0	0	0	0	9.10	9.25	8.95	7.80	0
	0	0	0	0	6.00	8.70	8.45	8.40	8.50	7.30
	0	0	0	0	5.50	8.90	9.50	8.50	8.30	0

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองการยืดตัวของแนวเชื่อม ที่ความเร็วการเชื่อม 6000 มิลลิเมตรต่อนาที (ต่อ)

ระยะห่างระหว่างแผ่น (มม.)	ตำแหน่งจุดหัวเชื่อม (มม.)									
	-0.2	-0.1	0	+0.1	+0.2	+0.3	+0.4	+0.5	+0.6	+0.7
0.3	0	0	0	0	0	0	8.05	7.70	7.50	0
	0	0	0	0	0	0	8.20	8.25	6.90	0
	0	0	0	0	0	0	7.90	7.90	8.80	0



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งจุดหัวเชื่อม กับระยะห่างแผ่นงานเชื่อมและค่าการยืดตัว

4.1.2 การทดลองครั้งที่ 2 ทดลองเพื่อหาค่าระยะห่างแผ่นงานเชื่อม หลังจากทราบผลการทดลองในครั้งที่ 1 แล้วนำผลการทดลองมาวิเคราะห์และปรับระดับตัวแปรใหม่โดยกำหนดเงื่อนไขการเชื่อมคือ ความเร็วการเชื่อมคงที่ 4000 มิลลิเมตรต่อนาที ตำแหน่งหัวเชื่อม + 0.45 + 0.50 + 0.55 มิลลิเมตร และระยะห่างแผ่นงานเชื่อม 0.00 0.03 0.05 0.07 0.09 0.11 0.13 และ 0.15 มิลลิเมตร ค่าผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.2 ได้คือ ค่าการยืดตัวสูงสุดที่ 10.35 มิลลิเมตร ค่าการยืดตัวต่ำสุดที่ 8.05 มิลลิเมตร ที่เงื่อนไข ตำแหน่งหัวเชื่อม + 0.50 มิลลิเมตร ระยะห่างแผ่นงานเชื่อม 0 มิลลิเมตรและที่เงื่อนไข ตำแหน่งหัวเชื่อม + 0.55 มิลลิเมตร ระยะห่างแผ่นงานเชื่อม 0.13 มิลลิเมตรตามลำดับ

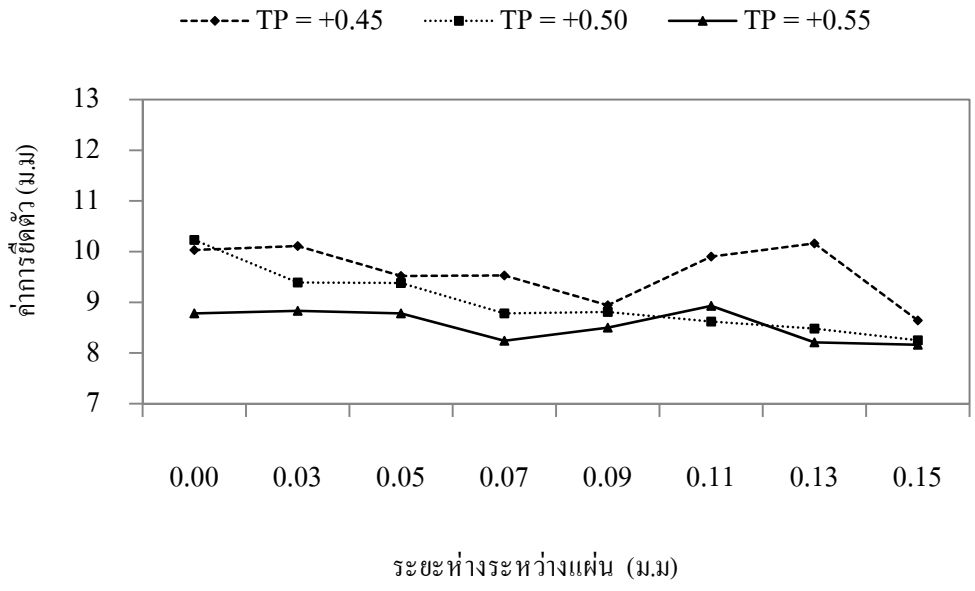
การวิเคราะห์ผลการทดลอง จากตารางที่ 4.2 การกำหนดเงื่อนไขตัวแปรการเชื่อม ของตำแหน่งหัวเชื่อมที่ + 0.45 + 0.50 + 0.55 มิลลิเมตร และระยะห่างของแผ่นงานเชื่อม 0.00 0.03 0.05 0.07 0.09 0.11 0.13 0.15 มิลลิเมตร ช่วงระยะห่าง 0.02-0.03 มิลลิเมตรนั้นได้ปรับลดลงจากการทดลองครั้งที่ 1 และนำข้อมูลค่าการยืดตัวจากตารางที่ 4.2 มาทำการสร้างกราฟดังแสดงในรูปที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ของระยะห่างระหว่างแผ่น จุดตำแหน่งหัวเชื่อมกับค่าการยืดตัว พบค่าการยืดตัวสูงสุดของการทดสอบมีค่าเท่ากับ 10.35 มิลลิเมตรที่ ระยะห่างระหว่างแผ่นงานเชื่อม 0.00 มิลลิเมตร ตำแหน่งหัวเชื่อมมีค่าเท่ากับ + 0.50 มิลลิเมตร และค่าการยืดตัวของแนวเชื่อมมีแนวโน้มลดลง เมื่อระยะห่างระหว่างแผ่นชิ้นงานทั้งสองมีค่าเพิ่มมากขึ้น

ตารางที่ 4.2 ผลการทดลองการยืดตัวของแนวเชื่อม ครั้งที่ 2 ความเร็วการเชื่อม 4000 มิลลิเมตร/นาที

ระยะห่างระหว่างแผ่น (มม.)	ตำแหน่งจุดหัวเชื่อม (มม.)		
	+0.45	+0.50	+0.55
0.00	9.78	10.40	8.80
	10.23	10.30	8.80
	10.10	10.00	8.75
0.03	10.00	10.00	9.10
	10.15	8.20	8.80
	10.18	9.98	8.60
0.05	10.00	10.05	9.40
	8.83	9.05	8.50
	9.75	9.05	8.45
0.07	9.60	10.10	8.15
	9.90	8.10	8.30
	9.10	8.15	8.28
0.09	8.95	8.45	7.65
	8.91	9.00	9.00
	8.98	9.00	8.85

ตารางที่ 4.2 ผลการทดลองการยืดตัวของแนวเชื่อม ครั้งที่ 2 ความเร็วการเชื่อม 4000 มิลลิเมตร/นาที (ต่อ)

ระยะห่างระหว่างแผ่น (มม.)	ตำแหน่งจุดหัวเชื่อม (มม.)		
	+0.45	+0.50	+0.55
0.11	10.00	8.42	7.50
	9.80	8.35	9.35
	9.90	9.10	9.95
0.13	10.60	8.45	8.05
	10.05	8.25	8.30
	9.85	8.75	8.30
0.15	8.90	8.05	8.35
	8.58	8.35	8.05
	8.45	8.35	8.10



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระยะห่างระหว่างแผ่น ตำแหน่งหัวเชื่อมกับค่าการยืดตัว

การลดลงของค่าการยืดตัวจากการทดสอบอิริเซนตามตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.2 นี้คาดว่าเกิดจากการเปลี่ยนแปลงขนาดมิติของรอยต่อต่างๆดังแสดงในรูปที่ 4.3 ทำให้ความสามารถในการรับแรงเกิดการเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งมิติการวัดค่าในรูปที่ 4.3 (ข) นั้น เป็นค่ามาตรฐานที่ยอมรับกันในอุตสาหกรรมการผลิตรถยนต์ [7] ที่ใช้วัดตรวจสอบรอยเชื่อมเลเซอร์ของแผ่นเทเลอร์แบล็งค์ โดยอักษรต่างๆ ที่แสดง คือ อักษร a แสดงอัตราการซึมลึก (Penetration) หรือความหนาของโลหะเชื่อมจากการเชื่อม อักษร b แสดงความกว้างด้านล่างของแนวเชื่อม (Width of back penetration) โดยต้องมีค่าที่สามารถยอมรับได้ที่ค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 0.5 มิลลิเมตรอักษร c คือ อันเดอร์คัท (Undercut) ในการเชื่อมต่อชนเทเลอร์แบล็งค์ ไม่อนุญาตให้มีรอยอันเดอร์คัท อักษร d แสดงอันเดอร์ฟิล (Underfill) ในการเชื่อมต่อชนเทเลอร์แบล็งค์ ไม่อนุญาตให้มีรอยนี้เช่นเดียวกับอันเดอร์คัท และอักษร e แสดงคือความราบเรียบของแผ่นต่อชนที่ต้องมีความแตกต่างกันไม่เกิน 0.2 มิลลิเมตร เริ่มต้นในการตรวจสอบที่ระยะ e ก่อน พบว่า ค่าที่สามารถวัดได้นั้นทุกๆ สภาวะการเชื่อมในการทดลองนี้มีค่าต่ำกว่า 0.2 มิลลิเมตร คือมีค่าอยู่ระหว่าง 0.000 – 0.113 มิลลิเมตร โดยค่าระยะที่มีค่ามากที่สุด คือ รอยเชื่อมที่เชื่อมด้วยระยะ TP เท่ากับ +0.50 และ +0.55 มิลลิเมตร และระยะห่างระหว่างแผ่นเท่ากับ 0.15 มิลลิเมตร ขณะที่รอยต่อที่มีระยะห่างระหว่างแผ่นต่ำ คือ 0.00 มิลลิเมตร นั้น ค่า e นี้มีค่าเป็นศูนย์ทั้งหมด จึงเชื่อได้ว่าการเกิดระยะความเรียบของแผ่นหลังแนวเชื่อมนี้ อาจเกิดจากการโก่งตัวของชิ้นงานเชื่อม เมื่อได้รับความร้อน อย่างไรก็ตามค่าที่ได้นี้มีค่าเป็นที่ยอมรับในการนำไปใช้งานได้ ค่า d ซึ่งเป็นค่าอันเดอร์ฟิลของรอยเชื่อมเลเซอร์แผ่นเทเลอร์แบล็งค์ซึ่งเป็นค่าที่ไม่อนุญาตให้มี แต่แนวเชื่อมที่เกิดขึ้นในการทดลองนี้ทุกๆแนวเชื่อมสามารถตรวจสอบพบได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์

พิจารณาค่าที่วัดได้ดังแสดงในตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.4 ซึ่งเป็นค่า d ของรอยเชื่อมที่มีค่า TP อยู่ที่ +0.45 มิลลิเมตร เป็นค่าที่แสดงการทดสอบอีริทเซนที่มีค่าสูงกว่าค่า TP อื่นๆ และพบว่าค่า d นี้มีค่าแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อระยะห่างของแนวเชื่อมมีค่าเพิ่มขึ้นการเกิดลักษณะนี้เนื่องจากโลหะที่บริเวณแผ่นด้านหนา ถูกทำให้หลอมละลายและต้องเกิดการถ่ายโอน เพื่อไปทดแทนตำแหน่งระยะห่างที่เพิ่มขึ้นและก่อให้เกิดรอยอันเดอร์ฟิลขึ้น รอยอันเดอร์ฟิลที่เกิดขึ้นนี้ส่งผลโดยตรงต่อสมบัติของรอยเชื่อมเนื่องจากเป็นบริเวณที่เป็นจุดรวมความเค้นของแนวเชื่อม เมื่อวัสดุถูกนำไปรับแรงแล้วมักเป็นจุดกำเนิดของการพังทลาย [17] อย่างไรก็ตามค่าอันเดอร์ฟิลมีค่าต่ำที่ระยะห่างระหว่างแผ่น 0.13 มิลลิเมตร ซึ่งคาดว่าเป็นเหตุผลหนึ่งที่ทำให้ค่าความยืดตัวของรอยเชื่อมมีค่าที่สูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับรอยเชื่อมสภาวะการเชื่อมอื่นๆ เนื่องจากการทดสอบการยืดตัวแบบอีริทเซนนี้เป็นการกดอัดจากด้านล่างของแนวเชื่อม และผิวหน้าด้านบนของแนวเชื่อมอยู่ที่ด้านบน ดังนั้นหากค่าอันเดอร์ฟิลมีค่ามากจะทำให้ความสามารถในการยืดตัวมีค่าต่ำ เพราะอาจเกิดการฉีกขาดของโลหะเชื่อม หรือโลหะงานที่บริเวณขอบของอันเดอร์ฟิลได้ ขณะที่ค่าอันเดอร์คัทที่แสดงด้วยอักษร c ในการทดลองทุกๆ สภาวะครั้งนี้ ไม่สามารถตรวจสอบเจอ คาดว่าสาเหตุเกิดจากระยะช่องว่างระหว่างแผ่นนี้มีความห่างค่อนข้างน้อย การ เติมเต็มน้ำโลหะที่ขอบด้านล่างของแนวเชื่อมทำได้ดี ค่าความกว้างด้านหลังของ

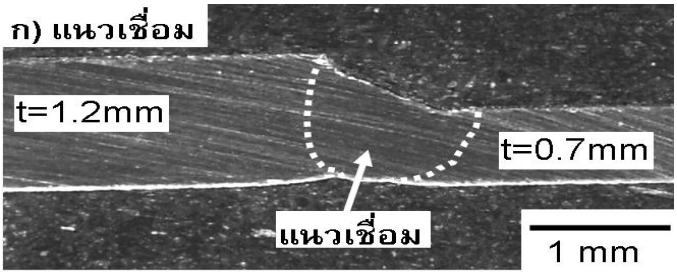
ชิ้นงานเชื่อม หรือระยะ b ของชิ้นงานมีความแตกต่างไม่มากนัก ค่าที่วัดได้ของระยะ TP=+0.45 มิลลิเมตรนั้น มีระยะอยู่ที่ประมาณ 0.788 ถึง 0.810 ซึ่งหากพิจารณาแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงค่าการยืดตัวอีริทเซนแล้วพบว่า ความสัมพันธ์ที่เกิด ขึ้นระหว่างขนาดความกว้างระยะ b กับค่าการยืดตัวนี้ไม่เกี่ยวข้องกัน

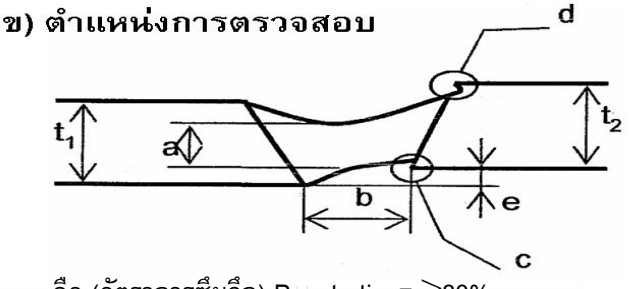
พิจารณาค่าอัตราการซึมลึกระยะ a หรืออาจกล่าวได้ว่าเป็นค่าความหนาของโลหะเชื่อมที่เกิดขึ้นระหว่างแผ่นโลหะ 2 แผ่น พบว่าค่าความหนาของวัสดุที่ตำแหน่งนี้มีการเปลี่ยนแปลงไปตามการเปลี่ยนแปลงของระยะห่างระหว่างแผ่นทั้งสอง เช่น ในกรณีของระยะ TP เท่ากับ +0.50 และ +0.55 มิลลิเมตรนั้น ค่าความหนาของระยะ a นี้ มีค่าลดลงเรื่อยๆ เมื่อระยะห่างระหว่างแผ่นโลหะมีค่าเพิ่มขึ้น โดยระยะ TP เท่ากับ +0.50 มิลลิเมตร มีค่าลดลงจาก 0.893 ถึง 0.810 มิลลิเมตร (เมื่อระยะห่างระหว่างแผ่นมีค่า 0.00 – 0.15 มิลลิเมตร) ระยะ TP เท่ากับ +0.55 มิลลิเมตร มีค่าลดลงจาก 0.842 ถึง 0.775 มิลลิเมตร (เมื่อระยะห่างระหว่างแผ่นมีค่า 0.00 –0.15 มิลลิเมตร) พิจารณาค่า a ของระยะ TP=+0.45 ซึ่งแสดงในตารางที่ 4.3 พบว่าระยะ a มีแนวโน้มลดลงเมื่อระยะห่างระหว่างแผ่นเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับที่เกิดใน TP=+0.50 และ +0.55 มิลลิเมตร เปรียบเทียบกับการเปลี่ยนแปลงค่าการยืดตัวในรูปที่ 4.3 พบว่าการลดลงของค่า a นี้สัมพันธ์กับการลดลงของค่าการยืดตัว อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาค่าระยะห่างระหว่างแผ่นเท่ากับ 0.13 มิลลิเมตร พบว่าค่าการยืดตัวของโลหะมีค่าเพิ่มขึ้น และเป็นค่าที่แสดงการยืดตัวสูงสุดของรอยต่อในการทดลองครั้งนี้ สาเหตุคาดว่าเกิดจากความหนาระยะ a ที่มีค่าสูงทำให้โลหะมีความสามารถในการยืดตัวสูง

สรุปผลการทดลองเบื้องต้นครั้งที่ 2 การเพิ่มระยะห่างของแผ่นงานเชื่อมทำให้ค่าการยืดตัวของแนวเชื่อมลดลง สาเหตุเพราะอัตราการซึมลึกของโลหะมีน้อยทำให้พื้นที่ สำหรับรองรับแรงมากระทำน้อยลง และผลจากการทดลองเบื้องต้นทั้ง 2 ครั้งนี้นำไปกำหนดตัวแปรในการศึกษาการวิจัยในครั้งนี้

4.2 ผลการทดสอบอิทธิพลของตัวแปรในการเชื่อม

ค่าการยืดตัวของการทดลองของแต่ละตัวแปรแสดงในตารางที่ 4.4 และชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 4.5





a คือ (อัตราการซึมลึก) Penetration= ≥80%

b คือ (ความกว้าง) = ≥ 0.5 มม.

c คือ Under Cut = ต้องไม่มี

d คือ Under Fill = ต้องไม่มี

e คือ (ความเรียบ) Flatness ≤ 0.2 มม.

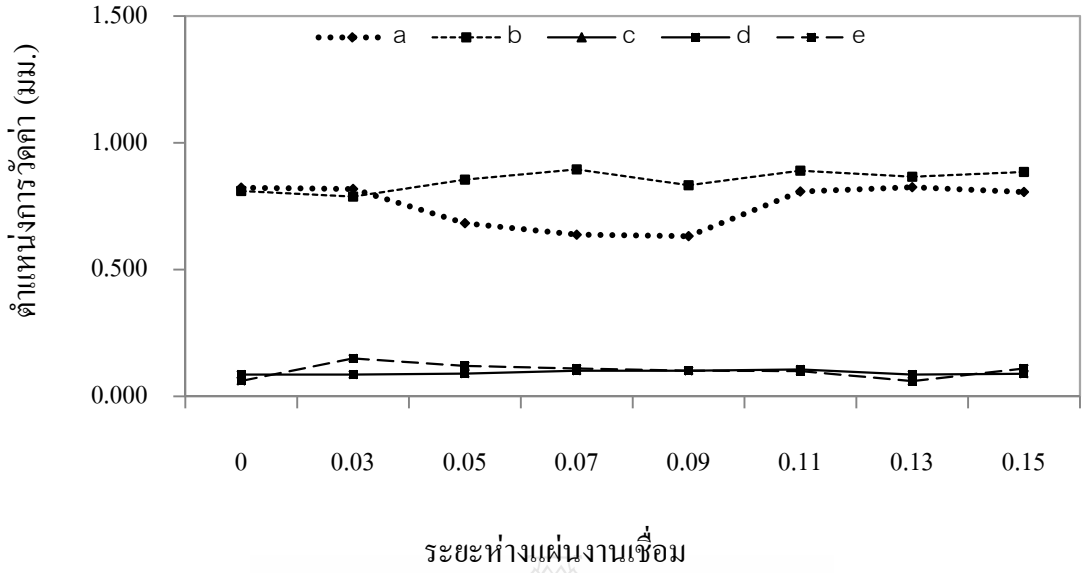
(ก) โครงสร้างมหภาคของรอยต่อ

(ข) ตำแหน่งการวัดค่า

รูปที่ 4.3 ขนาดมิติของรอยต่อต่างๆบริเวณแนวเชื่อม

ตารางที่ 4.3 ค่าเฉลี่ยการวัดมิติรอยเชื่อมเลเซอร์ ระยะตำแหน่งหัวเชื่อม +0.45 มิลลิเมตร

ระยะห่างแผ่นงานเชื่อม (มม.)	a	B	c	d	e
0.00	0.823	0.810	ไม่มี	0.086	0.061
0.03	0.818	0.788	ไม่มี	0.086	0.150
0.05	0.683	0.855	ไม่มี	0.090	0.120
0.07	0.638	0.895	ไม่มี	0.101	0.110
0.09	0.632	0.833	ไม่มี	0.101	0.101
0.11	0.808	0.890	ไม่มี	0.106	0.100
0.13	0.825	0.866	ไม่มี	0.086	0.060
0.15	0.806	0.885	ไม่มี	0.089	0.110



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างแผ่นงานเชื่อมกับตำแหน่งการวัดค่า

ตารางที่ 4.4 ค่าการยืดตัวจากการทดลอง

ระยะห่างระหว่างแผ่น (มม.) (C)Gap	(A) ความเร็วการเชื่อม (มม./นาที)								
	4000 มม./นาที			5000 มม./นาที			6000 มม./นาที		
	(B) ตำแหน่งจุดหัวเชื่อม								
	+ 0.45	+ 0.50	+ 0.55	+ 0.45	+ 0.50	+ 0.55	+ 0.45	+ 0.50	+ 0.55
0.00	9.98	9.90	9.80	9.45	9.40	9.20	9.30	9.00	8.90
	9.95	9.95	9.80	9.50	9.40	9.25	9.30	9.00	8.90
	9.85	9.90	9.75	9.50	9.35	9.20	9.20	9.15	8.95
	9.95	9.85	9.75	9.48	9.35	9.25	9.20	9.15	8.95

ตารางที่ 4.4 ค่าการยืดตัวจากการทดลอง (ต่อ)

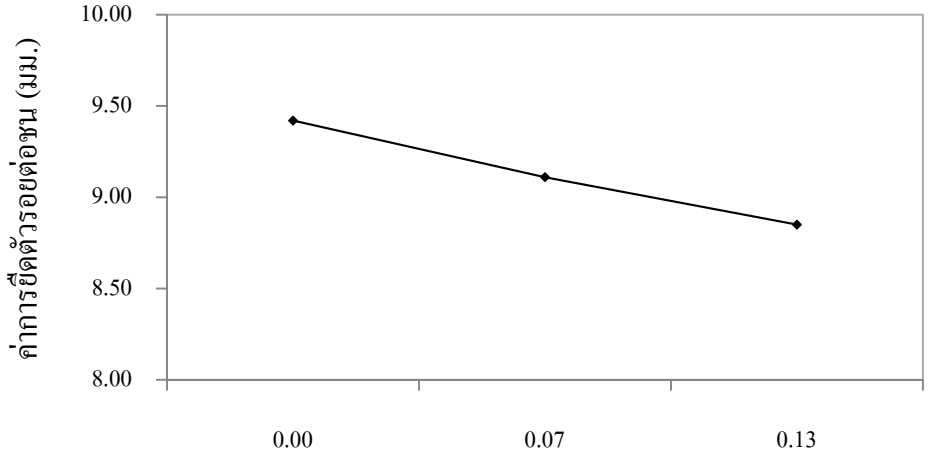
ระยะห่างระหว่างแผ่น (มม.) (C)Gap	(A) ความเร็วการเชื่อม (มม./นาที)								
	4000 มม./นาที			5000 มม./นาที			6000 มม./นาที		
	(B) ตำแหน่งจุดหัวเชื่อม								
	+ 0.45	+ 0.50	+ 0.55	+ 0.45	+ 0.50	+ 0.55	+ 0.45	+ 0.50	+ 0.55
0.07	9.85	9.55	9.50	9.45	9.00	8.80	8.90	8.85	8.60
	9.80	9.50	9.50	9.40	8.95	8.90	8.85	8.85	8.60
	9.75	9.55	9.00	9.40	8.95	8.85	8.85	8.80	8.55
	9.80	9.65	9.45	9.45	9.00	8.95	8.90	8.80	8.55
0.13	9.50	9.25	9.00	8.90	8.80	8.45	8.50	8.55	8.40
	9.50	9.25	9.00	8.90	8.80	8.45	8.45	8.60	8.35
	9.45	9.30	8.95	8.85	8.80	8.40	8.50	8.65	8.35
	9.45	9.30	8.95	8.85	8.85	8.40	8.45	8.60	8.45

รูปที่ 4.5 แสดงชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบการยืดตัวของแนวเชื่อม ด้วยการทดสอบอีริทเซน ผลการทดสอบการวัดความนูนของแนวเชื่อม พบว่าที่ค่าผลการทดสอบทุกๆ ตัวแปรการเชื่อมในตารางที่ 4.4 แนวเชื่อมทุกแนวมีความสามารถในการยืดตัว ในระดับที่ยอมรับได้ตามมาตรฐาน JISB7729 และ JIS-Z-2247 [2] สำหรับการขึ้นรูปแนวเชื่อมเทเลอร์แบล็งค์ ของอุตสาหกรรมการผลิตรถยนต์ คือ ค่ารอยความลึกของรอยทดสอบมีค่าการยืดตัวที่ไม่ต่ำกว่า 7.00 มิลลิเมตร โดยไม่มีการแตกร้าวบริเวณแนวเชื่อมที่ทำการทดสอบการยืดตัว

4.2.1 ระยะห่างแผ่นงานเชื่อม

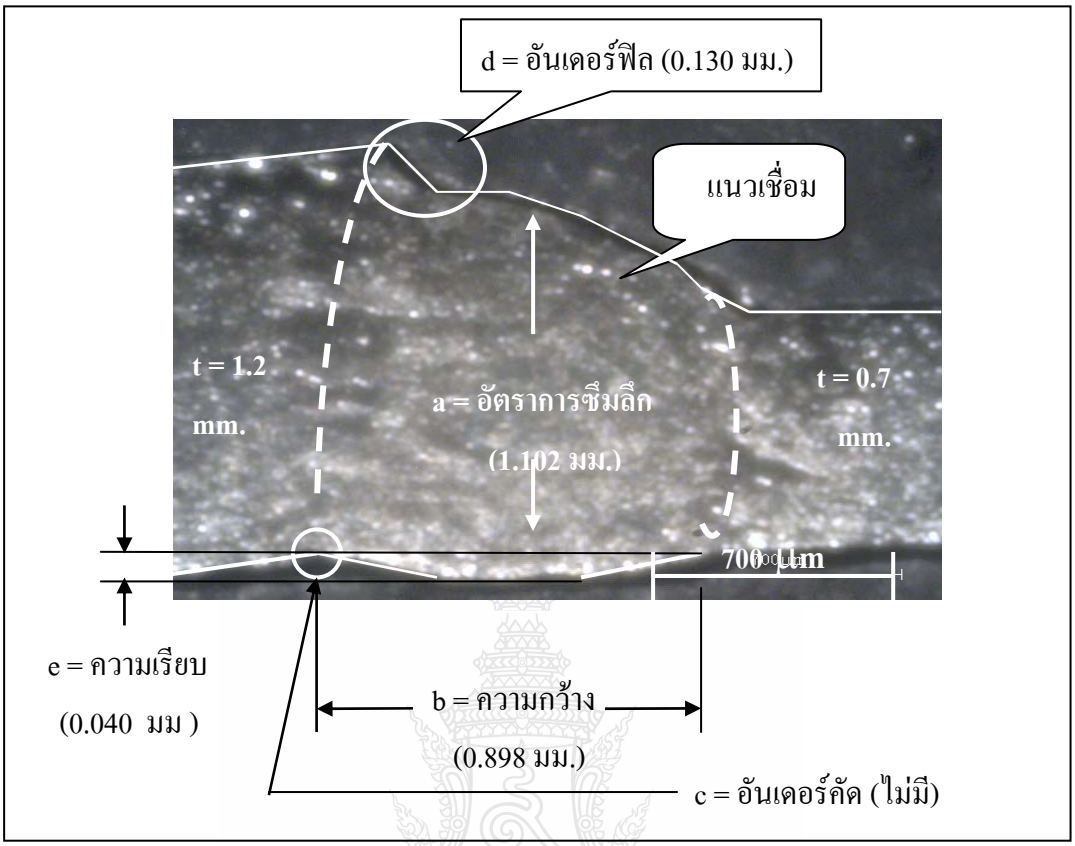
นำข้อมูลผลการทดลองของระยะห่างแผ่นงานเชื่อม จากตารางที่ 4.4 มาทำการสร้างกราฟดังแสดงในรูปที่ 4.6

รูปที่ 4.5 ชิ้นงานหลังการทดสอบการยืดตัว

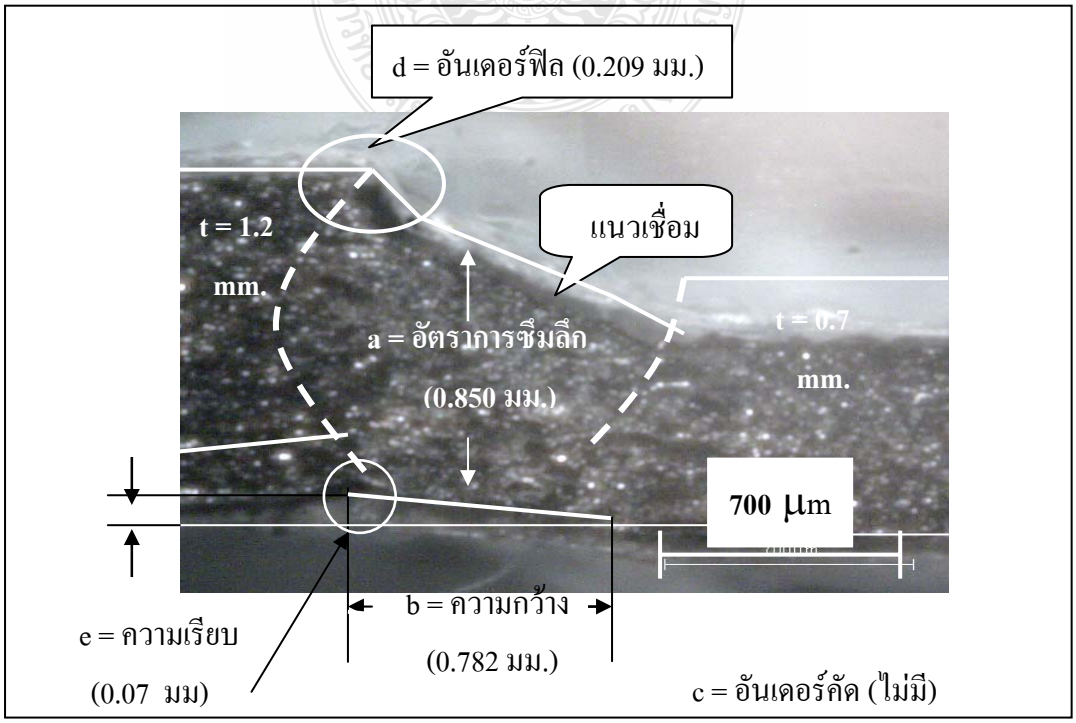


รูปที่ 4.6 ระยะห่างแผ่นงานเชื่อมกับค่าการยืดตัว

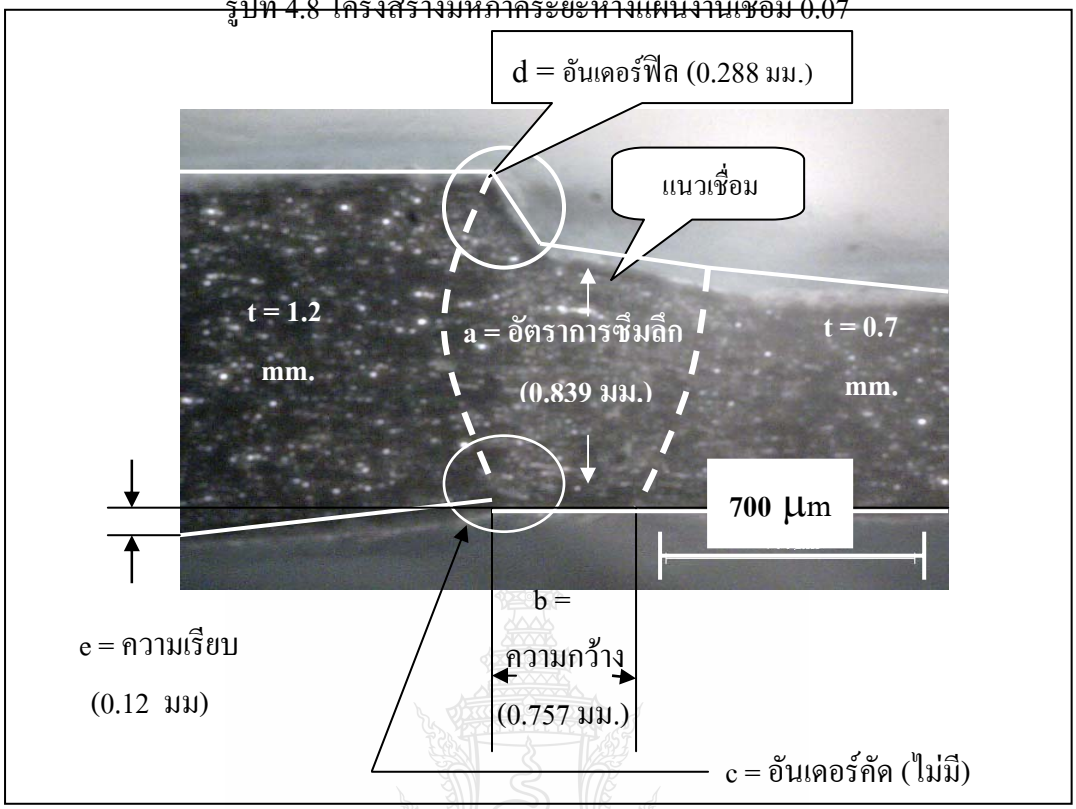
รูปที่ 4.6 เป็นค่าความสัมพันธ์ของระยะห่างแผ่นงานเชื่อมกับการยืดตัวของแนวเชื่อมหรือรอยต่อชน ที่ระยะห่างแผ่นงานเชื่อม 0.00 มิลลิเมตร ค่าการยืดตัวสูงสุดเท่ากับ 9.44 มิลลิเมตร ที่ระยะห่างแผ่นงานเชื่อม 0.07 มิลลิเมตร ค่าการยืดตัวเท่ากับ 9.14 มิลลิเมตร และที่ระยะห่างแผ่นงานเชื่อม 0.13 มิลลิเมตร ค่าการยืดตัวเท่ากับ 8.81 มิลลิเมตร ซึ่งค่าการยืดตัวของแนวเชื่อมจะค่อยๆลดลงอย่างต่อเนื่อง เมื่อระยะห่างของแผ่นงานเชื่อมเพิ่มขึ้น สาเหตุเนื่องมาจากเมื่อระยะห่างแผ่นงานเชื่อมเพิ่มขึ้นทำให้การโอนถ่ายน้ำโลหะจากเหล็กหนากว่าไปสู่เหล็กที่บางกว่าเพื่อการเติมเต็มของช่องว่างรอยต่อชนที่เพิ่มขึ้น ทำให้มีเนื้อโลหะหรืออัตราการซึมลึกมีน้อยลงทำให้การรับแรงจากการทดสอบค่าการยืดตัวมีค่าน้อย และการเกิดการซึมลึกของรอยเชื่อม ได้มาจากการเปลี่ยนแปลงขนาดมิติของรอยต่อตามมิติการวัดดังแสดงในรูปที่ 4.3 และแสดงผลดังตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 โครงสร้างมหภาคระยะห่างแผ่นงานเชื่อม 0.00 มม.



รูปที่ 4.8 โครงสร้างมหภาคระยะห่างแผ่นงานเชื่อม 0.07



รูปที่ 4.9 โครงสร้างมหภาคระยะห่างแผ่นงานเชื่อม 0.13 มม.

ตารางที่ 4.5 ค่าเฉลี่ยการวัดมิติรอยเชื่อมเลเซอร์ ระยะห่าง 0.00 0.07 และ 0.13 มิลลิเมตร

ระยะห่างระหว่างแผ่น (มม.)	a	b	c	d	e
0.00	1.102	0.898	ไม่มี	0.130	0.040
0.07	0.850	0.782	ไม่มี	0.209	0.070
0.13	0.839	0.757	ไม่มี	0.288	0.120

ผลในตารางที่ 4.5 ค่าเฉลี่ยการวัดมิติรอยเชื่อมเลเซอร์ และรูปที่ 4.7 โครงสร้างมหภาคของรอยต่อที่ระยะแผ่นงานเชื่อม 0.00 มิลลิเมตร 0.07 มิลลิเมตร 0.13 มิลลิเมตร ค่า a หรืออัตราการซึมลึก และลักษณะผิวชิ้นงานของรูปที่ 4.7 จะมีความแตกต่างกันกับในรูปที่ 4.8 และรูปที่ 4.9 ซึ่งมีค่าแตกต่างกันถึง 0.252 มิลลิเมตร และ 0.263 มิลลิเมตร ตามลำดับส่วนผิวชิ้นงานของรูปที่ 4.7 นั้นจะมี

ลักษณะบ่าเอียงชันน้อยกว่ารูปที่ 4.8 และรูปที่ 4.9 ในขณะที่ค่า a และลักษณะผิวชิ้นงานของรูปที่ 4.8 และรูปที่ 4.9 มีความใกล้เคียงกันโดยที่รูปที่ 4.8 มีค่า a มากกว่าเพียง 0.020 มิลลิเมตรและมีลักษณะบ่าเอียงใกล้เคียงกัน แต่อย่างไรก็ตามค่า a ทั้งสามรูปก็อยู่ในค่ามาตรฐานของการวัด คือ มากกว่า 80%

ค่า b หรือความกว้างด้านหลังของชิ้นงานเชื่อมของรูปที่ 4.7 จะมีค่าใกล้เคียงกันกับในรูปที่ 4.8 ซึ่งมีค่า bใกล้เคียงกัน 0.116 มิลลิเมตร และเมื่อค่า b ใกล้เคียงกันรูปลักษณะของผิวงานเชื่อมโดยค่าความนูนของด้านหลังชิ้นงานเชื่อมก็ใกล้เคียงกัน

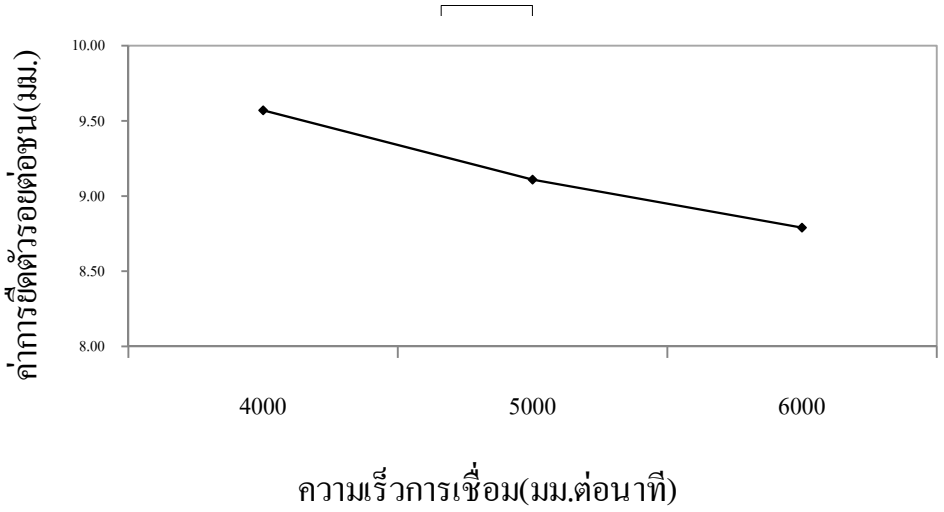
ค่า c หรืออันเดอร์คัดทั้งสามรูปคือรูปที่ 4.7 รูปที่ 4.8 และรูปที่ 4.9 ตรวจสอบไม่พบค่าจากกล้องจุลทัศน์และในมาตรฐานการวัดค่าก็กำหนดให้ต้องไม่มีค่า c

ค่า d หรืออันเดอร์ฟิลของรอยเชื่อม เปรียบเทียบระหว่างในรูปที่ 4.7 รูปที่ 4.8 และรูปที่ 4.9 นั้นค่าdในรูปที่ 4.7 มีค่าต่ำกว่าทั้งสองรูปคือ มีค่าเท่ากับ 0.079 มิลลิเมตร และ 0.158 มิลลิเมตร ตามลำดับและเช่นเดียวกัน ลักษณะผิวแนวเชื่อมรูปที่ 4.7 ก็มีบ่าความชันน้อยกว่าซึ่งเกิดจากการโอนถ่ายน้ำเหล็กจากโลหะหนากว่าไปยังโลหะบางกว่า และเมื่อพิจารณารูปที่ 4.8 และรูปที่ 4.9 นั้นจะมีค่า d และลักษณะผิวบ่าความชันการไหลของน้ำเหล็กใกล้เคียงกันซึ่งค่า d ของรูปที่ 4.8 ต่ำกว่าเท่ากับ 0.079 มิลลิเมตร

ค่า e หรือค่าความเรียบของแผ่นหลังแนวเชื่อมทั้งสามรูปคือรูปที่ 4.7 รูปที่ 4.8 และรูปที่ 4.9 นั้นค่า e และลักษณะผิวชิ้นงานเชื่อมของรูปที่ 4.7 และรูปที่ 4.8 จะใกล้เคียงกันซึ่งค่า e ของรูปที่ 4.7 มีค่าต่ำกว่าค่า e รูปที่ 4.8 เท่ากับ 0.03 มิลลิเมตร และเมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างรูปที่ 4.7 กับรูปที่ 4.9 ค่า e และลักษณะผิวชิ้นงานเชื่อมนั้นจะมีความแตกต่างกันโดยที่ค่า e ของรูปที่ 4.9 จะมีค่าสูงกว่ารูปที่ 4.7 เท่ากับ 0.08 มิลลิเมตร แต่ค่าที่วัดได้ก็อยู่ในมาตรฐานคือเท่ากับหรือน้อยกว่า 0.2 มิลลิเมตร

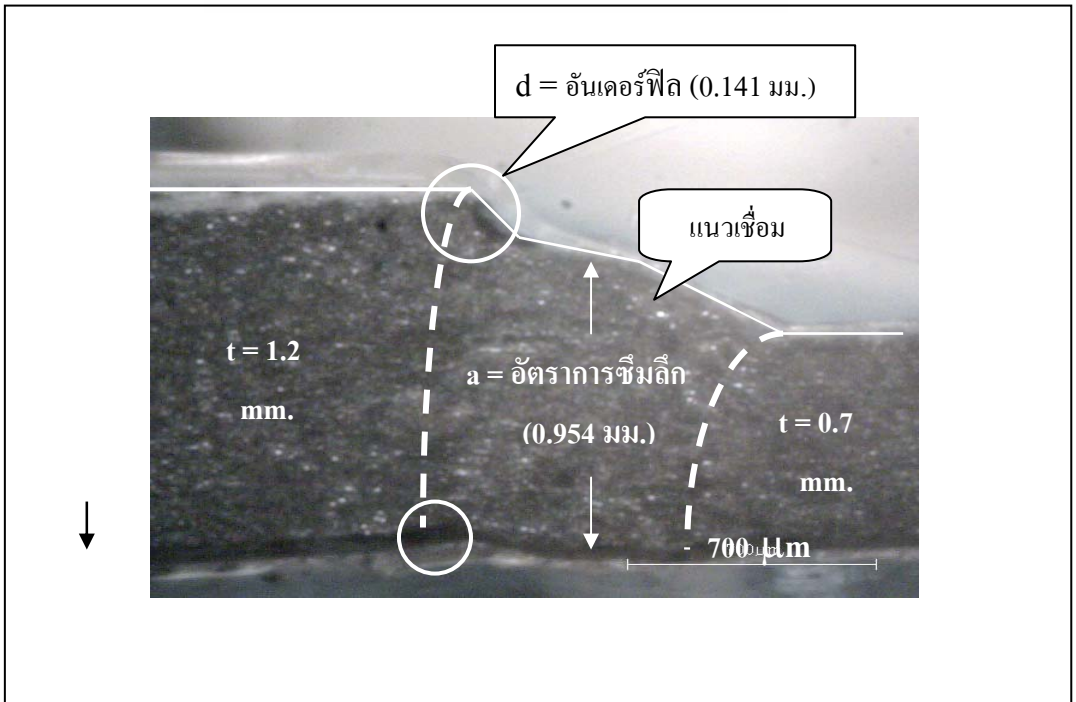
4.2.2 ความเร็วการเชื่อม

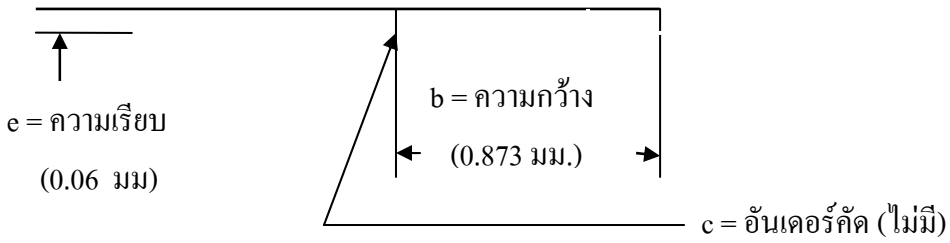
นำข้อมูลผลการทดลองของความเร็วการเชื่อม จากตารางที่4.4 มาทำการสร้างกราฟดังแสดงในรูปที่ 4.10



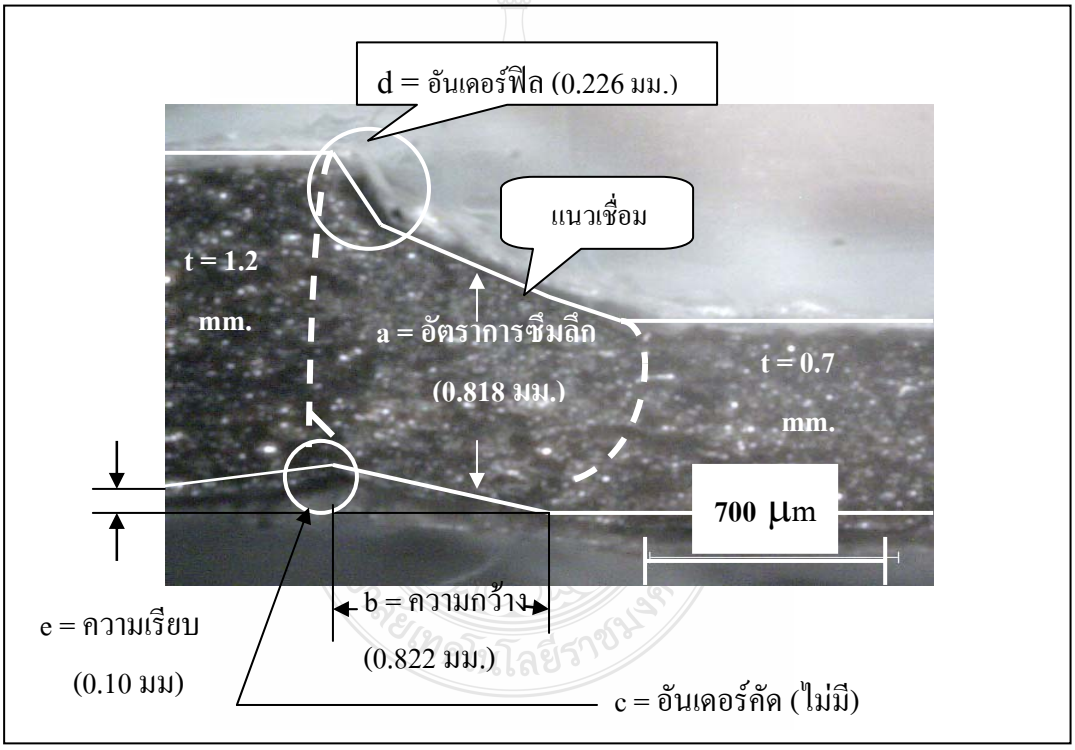
รูปที่ 4.10 ความเร็วการเชื่อมกับค่าการยืดตัว

รูปที่ 4.10 เป็นค่าความสัมพันธ์ของความเร็วการเชื่อมกับการยืดตัวของแนวเชื่อมหรือรอยต่อชน ที่ความเร็วการเชื่อม 4000 มิลลิเมตรต่อนาทีค่าการยืดตัวสูงสุดเท่ากับ 9.56 มิลลิเมตรที่ความเร็วการเชื่อม 5000 มิลลิเมตรต่อนาทีค่าการยืดตัวเท่ากับ 9.05 มิลลิเมตรและที่ความเร็วการเชื่อม 6000 มิลลิเมตรต่อนาที ค่าการยืดตัวเท่ากับ 8.78 มิลลิเมตรซึ่งค่าการยืดตัวของแนวเชื่อมจะค่อยๆลดลงอย่างต่อเนื่อง เมื่อความเร็วการเชื่อมเพิ่มขึ้น สาเหตุเนื่องมาจากเมื่อความเร็วการเชื่อมสูงขึ้นการหลอมละลายและการโอนถ่ายของน้ำเหล็กจากเหล็กหนาไปยังเหล็กบางไม่สมบูรณ์ทำให้เกิดค่าอันเดอร์ฟิลขึ้น และรอยอันเดอร์ฟิลที่เกิดขึ้นนี้ส่งผลโดยตรงต่อสมบัติของรอยเชื่อมเนื่องจากเป็นบริเวณที่เป็นจุดรวมความเค้นของแนวเชื่อมเมื่อวัสดุถูกนำไปรับแรงแล้วมักเป็นจุดกำเนิดของการพังทลาย [18] ซึ่งการเกิดค่าอันเดอร์ฟิลขึ้นของรอยเชื่อมได้มาจากการเปลี่ยนแปลงขนาดมิติของรอยต่อตามมิติการวัด ดังแสดงในรูปที่ 4.3 และแสดงผลดังตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.11-4.13

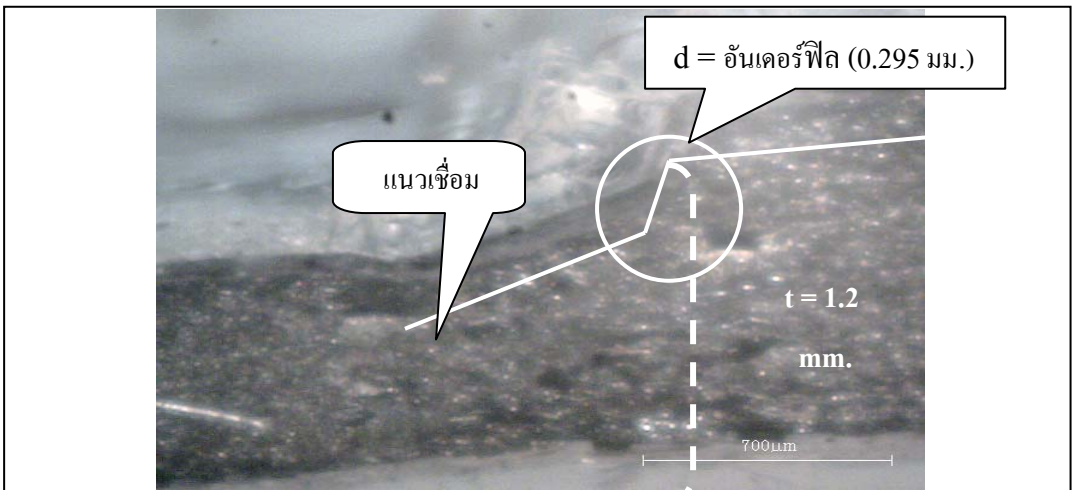


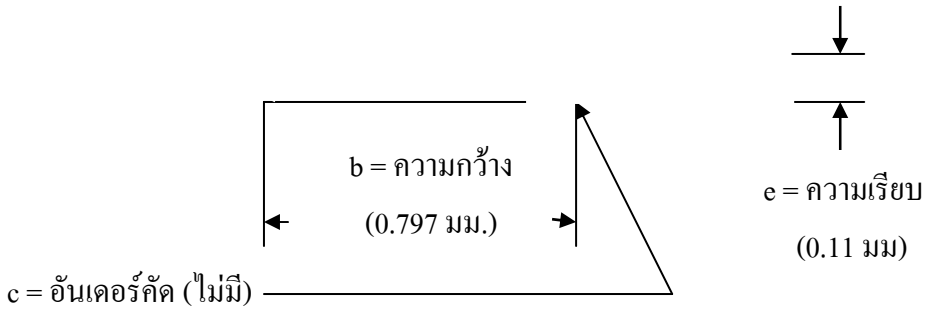


รูปที่ 4.11 โครงสร้างมหภาคความเร็วการเชื่อม 4000 มม. ต่อนาที



รูปที่ 4.12 โครงสร้างมหภาคความเร็วการเชื่อม 5000 มม.ต่อนาที





รูปที่ 4.13 โครงสร้างมหภาคความเร็วการเชื่อม 6000 มม.ต่อนาที

ตารางที่ 4.6 ค่าเฉลี่ยการวัดมิติรอยเชื่อมเลเซอร์ ที่ความเร็ว 4000-5000-6000 มิลลิเมตรต่อนาที

ความเร็วเชื่อม (มม.ต่อนาที)	a	b	c	d	e
4000	0.954	0.873	ไม่มี	0.141	0.060
5000	0.818	0.822	ไม่มี	0.226	0.101
6000	0.791	0.797	ไม่มี	0.295	0.110

ผลในตารางที่ 4.6 ค่าเฉลี่ยการวัดมิติรอยเชื่อมเลเซอร์ และรูปที่ 4.10 โครงสร้างมหภาคของรอยต่อที่ความเร็ว 4000 มิลลิเมตรต่อนาที ความเร็ว 5000 มิลลิเมตรต่อนาทีความเร็ว 6000 มิลลิเมตรต่อนาที ค่า a หรืออัตราการซึมลึกและลักษณะผิวความชันของชิ้นงานรูปที่ 4.11 จะมีความใกล้เคียงกันกับในรูปที่ 4.12 ซึ่งมีค่าแตกต่างกันเพียง 0.136 มิลลิเมตร และเมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 4.13 มีความแตกต่างกันทั้งค่า และลักษณะผิวความชันของชิ้นงานซึ่งค่า a แตกต่างกันถึง 0.163 มิลลิเมตร ส่วนผิวชิ้นงานของรูปที่ 4.11 นั้นจะมีลักษณะบ่าเอียงชันน้อยกว่ารูปที่ 4.13 และสำหรับรูปที่ 4.13 นั้นเมื่อเปรียบเทียบค่า a และลักษณะผิวชิ้นงานกับรูปที่ 4.12 ค่า a และลักษณะผิวชิ้นงานของรูปที่ 4.12 มีค่า a มากกว่า 0.027 มิลลิเมตร และมีลักษณะความชันของบ่าน้อยกว่า แต่อย่างไรก็ตามค่า a ทั้งสามรูปก็อยู่ในค่ามาตรฐานของการวัด คือ มากกว่า 80%

ค่า b หรือความกว้างด้านหลังของชิ้นงานเชื่อมของรูปที่ 4.11 รูปที่ 4.12 และรูปที่ 4.13 มีค่า b รูปลักษณะของผิวงานเชื่อมโดยค่าความนูนของด้านหลังชิ้นงานเชื่อมก็ใกล้เคียงกัน โดยมีค่า b แตกต่างกันเพียง 0.051 และ 0.076 มิลลิเมตร ตามลำดับ

ค่า c หรืออันเดอร์คัดทั้งสามรูป คือ รูปที่ 4.11 รูปที่ 4.12 และรูปที่ 4.13 ตรวจสอบไม่พบค่า

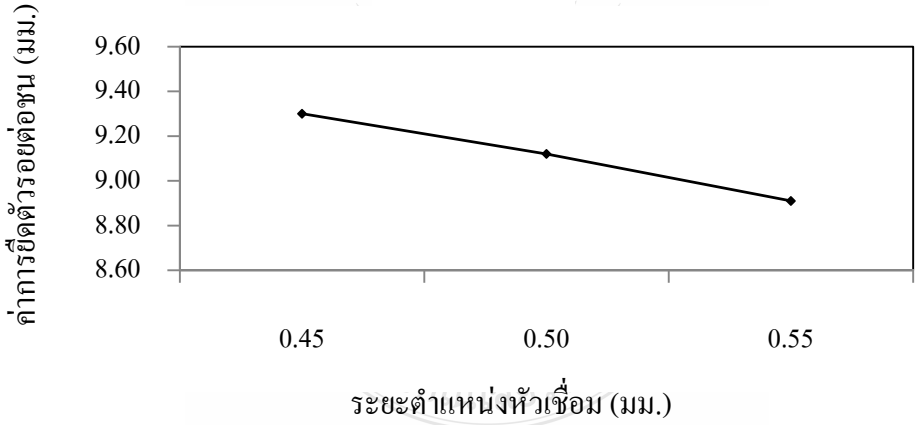
จากกล้องจุลทรรศน์ซึ่งในมาตรฐานการวัดค่าก็กำหนดให้ต้องไม่มีค่า c

ค่า d หรืออันเดอร์ฟิลของรอยเชื่อม เปรียบเทียบกันระหว่างในรูปที่ 4.11 รูปที่ 4.12 และรูปที่ 4.13 นั้นค่า d ในรูปที่ 4.11 มีค่าต่ำกว่าทั้งสองรูปคือ มีค่าเท่ากับ 0.085 มิลลิเมตร และ0.154 มิลลิเมตร ตามลำดับ และเช่นเดียวกันลักษณะผิวแนวเชื่อมรูปที่ 4.11 ซึ่งเกิดจากการโอนถ่ายน้ำเหล็กจากโลหะหนากว่าไปยังโลหะบางกว่า มีความใกล้เคียงกันกับรูปที่ 4.12 และเมื่อพิจารณารูปที่ 4.12 กับรูปที่ 4.13 นั้นจะมีค่า d และลักษณะผิวบ่าความชันการไหลของน้ำเหล็กแตกต่างกันซึ่งค่า d ของรูปที่ 4.12 ต่ำกว่าเท่ากับ 0.069 มิลลิเมตร

ค่า e หรือค่าความเรียบของแผ่นหลังแนวเชื่อมทั้งสามรูป คือ รูปที่ 4.11 รูปที่ 4.12 และรูปที่ 4.13 นั้นค่า e และลักษณะผิวชิ้นงานเชื่อมจะใกล้เคียงกันซึ่งค่า e มีความแตกต่างกันเพียง 0.041 และ 0.05 มิลลิเมตร ตามลำดับ แต่ค่าที่วัดได้ก็อยู่ในมาตรฐานคือเท่ากับหรือน้อยกว่า 0.2 มิลลิเมตร

4.2.3 ระยะตำแหน่งหัวเชื่อม

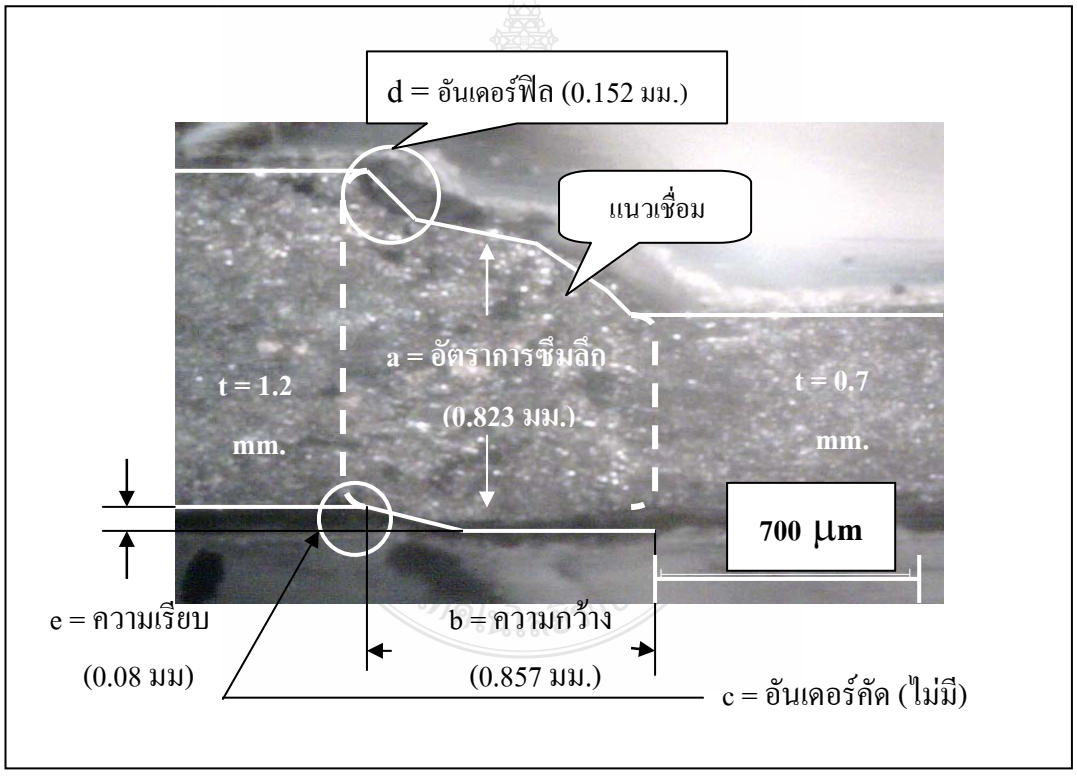
นำข้อมูลผลการทดลองของระยะตำแหน่งหัวเชื่อมจากตารางที่ 4.4 มาทำการสร้างกราฟดังแสดงในรูปที่ 4.10



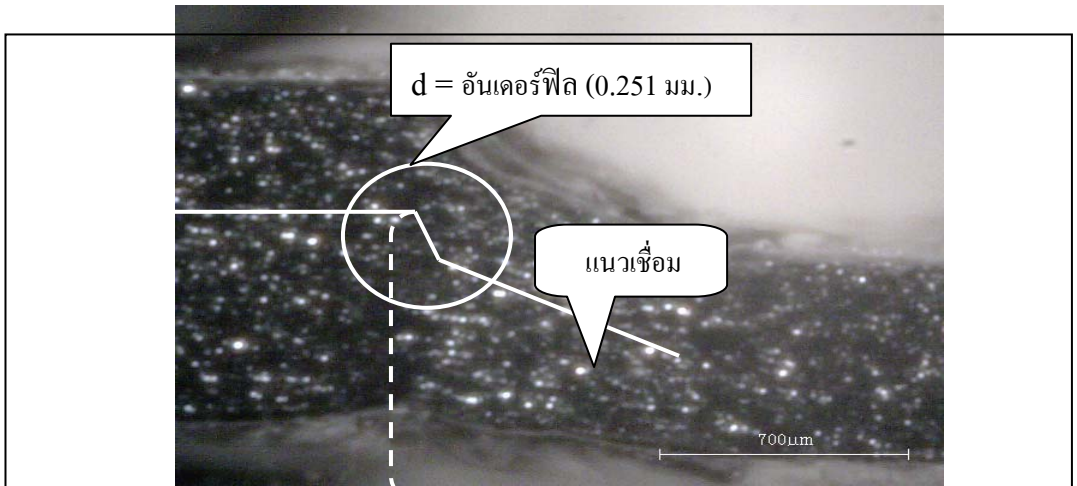
รูปที่ 4.14 ตำแหน่งหัวเชื่อมกับค่าการยืดตัว

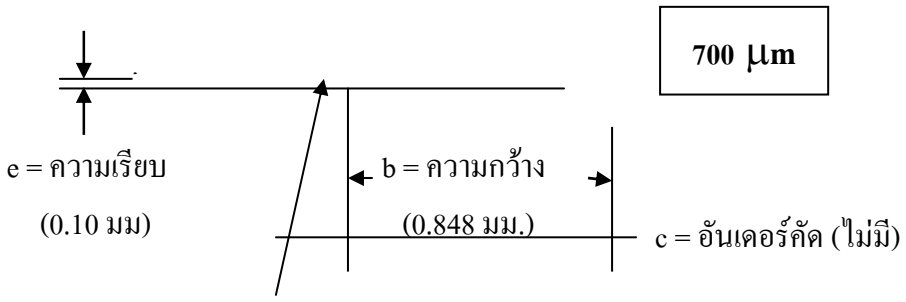
รูปที่ 4.14 เป็นค่าความสัมพันธ์ของตำแหน่งหัวเชื่อมกับการยืดตัวของแนวเชื่อมหรือรอยต่อชน ที่ตำแหน่งหัวเชื่อม 0.45 มิลลิเมตร ค่าการยืดตัวสูงสุดเท่ากับ 9.29 มิลลิเมตร ที่ตำแหน่งหัวเชื่อม 0.50 มิลลิเมตร ค่าการยืดตัวเท่ากับ 9.16 มิลลิเมตร และที่ตำแหน่งหัวเชื่อม 0.55 มิลลิเมตร ค่าการยืดตัวเท่ากับ 8.95 มิลลิเมตร ซึ่งค่าการยืดตัวของแนวเชื่อมจะค่อยๆลดลงอย่างต่อเนื่อง สาเหตุเนื่องมาจากเมื่อตำแหน่งหัวเชื่อมสูงไปทางเหล็กหนาใกล้เคียงกับระยะ 0.60 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นขนาดเท่ากับความโตของลำแสงเลเซอร์ที่ใช้ในการหลอมละลายทำให้การหลอมละลายไม่สมบูรณ์และการโอนถ่ายของ

น้ำเหล็กจากเหล็กหนาไปยังเหล็กบางไม่ต่อเนื่องทำให้เกิดค่าอันเดอร์ฟิลขึ้น และรอยอันเดอร์ฟิลที่เกิดขึ้นนี้ส่งผลโดยตรงต่อสมบัติของรอยเชื่อม เนื่องจากเป็นบริเวณที่เป็นจุดรวมความเค้นของแนวเชื่อมเมื่อวัสดุถูกนำไปรับแรงแล้วมักเป็นจุดกำเนิดของการพังทลาย [17] ซึ่งการเกิดค่าอันเดอร์ฟิลขึ้นของรอยเชื่อมได้มาจากการเปลี่ยนแปลงขนาดมิติของรอยต่อตามมิติการวัดดังแสดงในรูปที่ 4.3 และแสดงผลดังตารางที่ 4.7 และรูปที่ 4.15-4.17

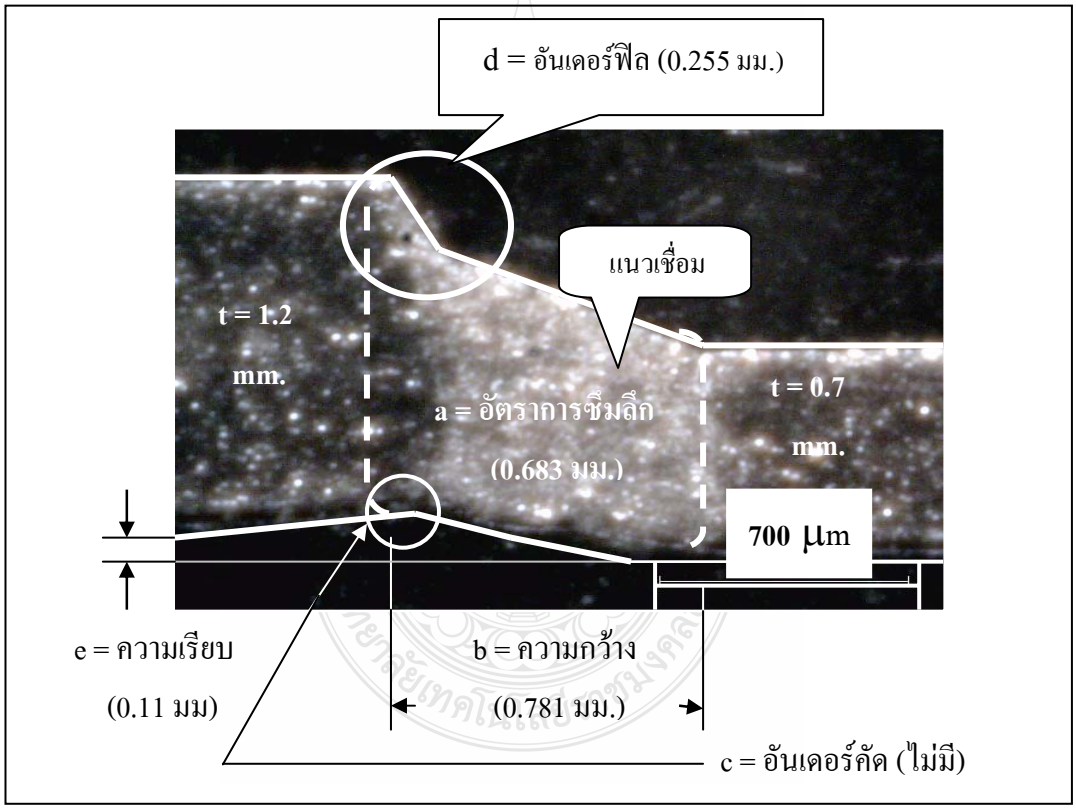


รูปที่ 4.15 โครงสร้างมหภาคตำแหน่งหัวเชื่อม + 0.45 มม.





รูปที่ 4.16 โครงสร้างมหภาค ตำแหน่งหัวเชื่อม + 0.50 มม.



รูปที่ 4.17 โครงสร้างมหภาค ตำแหน่งหัวเชื่อม + 0.55 มม.

ตารางที่ 4.7 ค่าเฉลี่ยการวัดมิติรอยเชื่อมเลเซอร์ ตำแหน่งหัวเชื่อมที่ +0.45 +0.50 +0.55 มิลลิเมตร

ตำแหน่งหัวเชื่อม (มม.)	a	b	c	d	e
0.45	0.823	0.857	ไม่มี	0.152	0.08

0.50	0.806	0.848	ไม่มี	0.251	0.10
0.55	0.683	0.781	ไม่มี	0.255	0.11

ผลในตารางที่ 4.7 ค่าเฉลี่ยการวัดมิติรอยเชื่อมเลเซอร์ และรูปที่ 4.14 โครงสร้างมหภาคของรอยต่อที่ระยะตำแหน่งหัวเชื่อม 0.45 มิลลิเมตร ระยะตำแหน่งหัวเชื่อม 0.50 มิลลิเมตร ค่า a หรืออัตราการซึมลึกและลักษณะผิวชิ้นงานของรูปที่ 4.15 จะมีความแตกต่างกันกับ ในรูปที่ 4.16 และรูปที่ 4.17 ซึ่งมีค่าแตกต่างกันถึง 0.017 มิลลิเมตร และ0.140 มิลลิเมตรตามลำดับส่วนผิวชิ้นงานของรูปที่ 4.15 นั้นจะมีลักษณะบ่าเอียงชันน้อยกว่ารูปที่ 4.16 และรูปที่ 4.17 ในขณะที่ค่า a และลักษณะผิวชิ้นงานของรูปที่ 4.16 และรูปที่ 4.17 มีความใกล้เคียงกันโดยที่รูปที่ 4.16 มีค่า a มากกว่าเพียง 0.123 มิลลิเมตร และมีลักษณะลาดความชันของบ่าเอียงใกล้เคียงกัน แต่อย่างไรก็ตามค่า a ทั้งสามรูปก็อยู่ในค่ามาตรฐานของการวัด คือมากกว่า 80%

ค่า b หรือความกว้างด้านหลังของชิ้นงานเชื่อมของรูปที่ 4.15 มีความแตกต่างกันทั้งรูปที่ 4.16 และรูปที่ 4.17 คือมีค่าความแตกต่างกันเท่ากับ 0.009 และ076 มิลลิเมตร ตามลำดับ และเช่นเดียวกันลักษณะผิวงานเชื่อมค่าความความกว้างก็ต่างกันตามความแตกต่างของค่าที่วัดได้คือรูปที่ 4.15 จะมีความกว้างมากกว่า รูปที่ 4.16 รูปที่ 4.17 ตามลำดับ และเมื่อพิจารณา รูปที่ 4.16 กับ รูปที่ 4.17 มีค่าใกล้เคียงกันทั้งค่า b และลักษณะผิวความกว้างด้านหลังของชิ้นงานเชื่อม ซึ่งมีค่า b แตกต่างกันเพียง 0.067 มิลลิเมตร

ค่า c หรืออันเดอร์คัดทั้งสามรูปคือรูปที่ 4.15 รูปที่ 4.16 และรูปที่ 4.17 ตรวจสอบไม่พบค่าจากกล้องจุลทรรศน์และในมาตรฐานการวัดค่าก็กำหนดให้ต้องไม่มีค่า c

ค่า d หรืออันเดอร์ฟิลของรอยเชื่อม เปรียบเทียบระหว่างในรูปที่ 4.15 รูปที่ 4.16 และรูปที่ 4.17 นั้นค่าdในรูปที่ 4.15 มีค่าต่ำกว่าทั้งสองรูปคือ มีค่าเท่ากับ 0.099 มิลลิเมตร และ0.103 มิลลิเมตรตามลำดับและเช่นเดียวกัน ลักษณะผิวแนวเชื่อมรูปที่ 4.15 ก็มีค่าความชันของบ่าน้อยกว่าซึ่งเกิดจากการโอนถ่ายน้ำเหล็กจากโลหะหนากว่าไปยังโลหะบางกว่า และเมื่อพิจารณารูปที่ 4.16 และรูปที่ 4.17 นั้นจะมีค่า d และลักษณะผิวของความชันจากการไหลของน้ำเหล็กใกล้เคียงกันซึ่งค่า d ของรูปที่ 4.16 ต่ำกว่าเท่ากับ 0.004 มิลลิเมตร

ค่า e หรือค่าความเรียบของแผ่นหลังแนวเชื่อมทั้งสามรูปคือรูปที่ 4.15 รูปที่ 4.16 และรูปที่ 4.17 นั้นค่า ลักษณะผิวชิ้นงานเชื่อมของรูปที่ 4.15 รูปที่ 4.16 จะใกล้เคียงกันซึ่งค่า e ของรูปที่ 4.15 มีค่าต่ำกว่าค่า e รูปที่ 4.16 เท่ากับ 0.02 มิลลิเมตร และเมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างรูปที่ 4.15 กับรูปที่ 4.17 ค่า e และลักษณะผิวชิ้นงานเชื่อมนั้นจะมีความแตกต่างกันโดยที่ค่า e ของรูปที่ 4.17 จะมีค่าสูงกว่ารูปที่ 4.15 เท่ากับ 0.03 มิลลิเมตร แต่ค่าที่วัดได้ก็อยู่ในมาตรฐานคือเท่ากับหรือน้อยกว่า 0.2 มิลลิเมตร

4.3 การวิเคราะห์ตัวแปรการเชื่อมต่อค่าการยืดตัวด้วย ANOVA

ผลจากการทดลองทางวิศวกรรมของตัวแปรการเชื่อมที่มีอิทธิพลต่อการยืดตัวของรอยต่อชนได้ถูกยืนยันความเชื่อมั่นทางสถิติโดยโปรแกรมการทดสอบอะโนว่า แสดงดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 แสดงตารางการวิเคราะห์ ANOVA ต่อค่าการยืดตัว

Analysis of Variance for Deep, using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Sum of Squares	Mean Squares	F	P-Value
Blocks	3	0.02005	0.00668	1.82	0.151
Speed	2	11.72216	5.86108	1593.31	0.000
Target Position	2	1.74754	0.87377	237.53	0.000
Gap	2	8.10954	4.05477	1102.27	0.000
Speed*Target Position	4	0.06967	0.01742	4.74	0.002
Speed*Gap	4	0.21976	0.05494	14.93	0.000
Target Position*Gap	4	0.27077	0.06769	18.40	0.000
Speed*Target Position*Gap	8	0.36782	0.04598	12.50	0.000
Error	78	0.28693	0.00368		
Total	107	22 .81423			

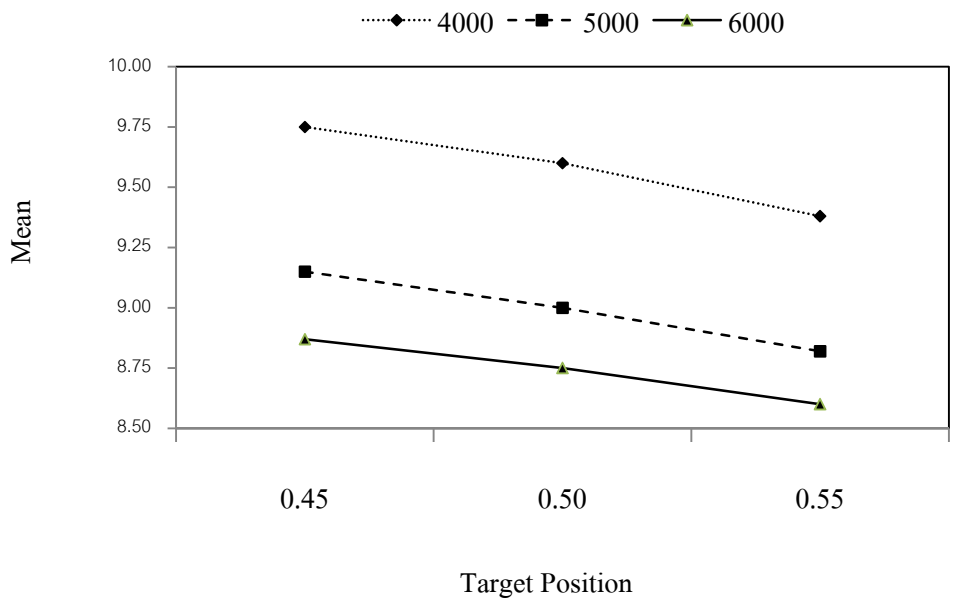
S = 0.0606511 R-Sq = 98.74% R-Sq (adj) = 98.27%

ผลในตารางที่ 4.8 สังเกตุที่ค่า P-Value ของตัวแปร ระยะห่างชิ้นงานเชื่อม ความเร็วการเชื่อม และระยะตำแหน่งหัวเชื่อมที่ศึกษาคือ มีค่าต่ำกว่า 0.05 ซึ่งเป็นค่าระดับนัยสำคัญทางสถิติที่กำหนดไว้ และค่า F สูง คือค่าความเร็วการเชื่อมมีค่า F = 1593.31 ระยะห่างแผ่นงานมีค่า F = 1102.27 และระยะตำแหน่งหัวเชื่อม F = 237.53 แสดงว่าปฏิเสธสมมติฐานหลักนั่นหมายถึงตัวแปรทั้ง 3 มีอิทธิพลต่อ

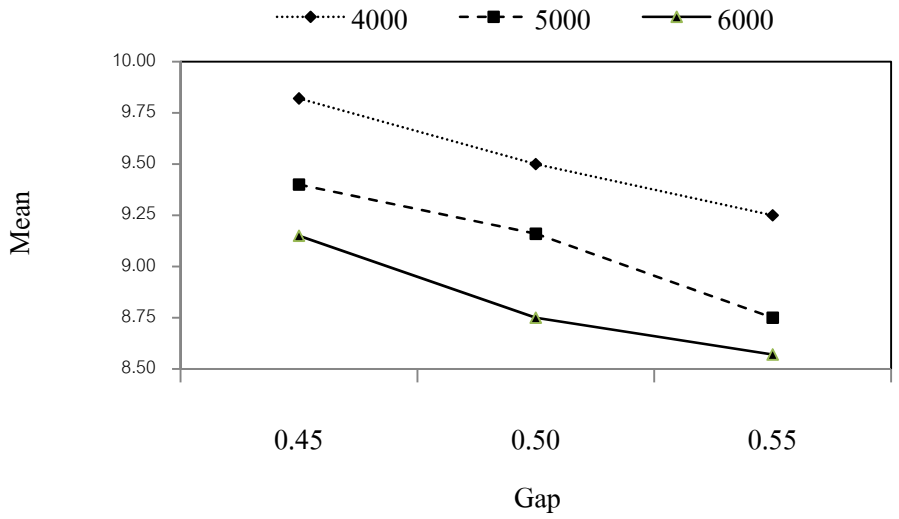
การยืดตัวของรอยต่อชนแนวเชื่อม และเมื่อพิจราณาความสัมพันธ์หรือผลกระทบร่วม (*Interaction) ของตัวแปร คือ ระยะตำแหน่งหัวเชื่อม*ระยะห่าง แผ่นงานเชื่อม ความการเชื่อม*ระยะห่าง แผ่นงานเชื่อม ความการเชื่อม*ระยะตำแหน่งหัวเชื่อม*ระยะห่างแผ่นงานเชื่อม และความเร็วการเชื่อม* ระยะห่างแผ่นงานเชื่อมนั่นคือตัวแปรทั้งสามก็มีความสัมพันธ์กัน และส่วน R-Sq = 98.74% คือตัวแปรที่ใช้ในการทดลองมีผลทำให้เกิดผลลัพธ์ยิ่งใกล้ 100% แปลว่ามีผลร่วมกันอย่างแท้จริงและ R-Sq (adj) = 98.27% คือมีการปรับค่าลดลงตามความคลาดเคลื่อนแล้วก็ตามยัง คงมีผลร่วมกันค่อนข้างมาก และ S = 0.0606511 เป็นค่าเบี่ยงเบนในที่นี้แปลว่ามีความเบี่ยงเบนของผลลัพธ์น้อยแปลว่าได้ผลที่ดีมากด้วย [10,12]

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ ระหว่างตัวแปรการเชื่อมต่อค่าการยืดตัว พบว่าอิทธิพลหลักที่มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงคือ ความเร็วในการเชื่อม ระยะห่างชิ้นงานเชื่อม และตำแหน่งหัวเชื่อม ส่วนอิทธิพลร่วมคือ1) ความเร็ว*ตำแหน่งหัวเชื่อม 2) ความเร็ว*ระยะห่างชิ้นงาน 3) ตำแหน่งหัวเชื่อม*ระยะห่างชิ้นงานเชื่อม 4) ความเร็ว*ตำแหน่งหัวเชื่อม*ระยะห่างชิ้นงานเชื่อม ดังแสดงความสัมพันธ์ในรูปที่ 4.18-4.20 ตามลำดับ ซึ่งทั้งหมดรวมกัน ต่างมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าการยืดตัว อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ($F_{0.05,2,105} = 3.21, P < 0.05$)

เมื่อพิจารณารูปที่ 4.18 แสดงระดับความเร็วการเชื่อม และตำแหน่งหัวเชื่อม มีอิทธิพลร่วมกันต่อการยืดตัวจากความสัมพันธ์เมื่อนำมาวิเคราะห์ เพื่อหาค่าประมาณแบบช่วงของค่าการยืดตัวสูงสุด [10,11] แยกตามระดับของความเร็วการเชื่อม และตำแหน่งหัวเชื่อมที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % จะพบว่าความเร็วในการเชื่อมที่ 4000 มิลลิเมตร ต่อนาที ตำแหน่งหัวเชื่อม +0.45 มิลลิเมตร จะให้ค่าการยืดตัวที่สูงที่สุดที่ 9.75 มิลลิเมตร และถ้าเพิ่มระยะตำแหน่งหัวเชื่อมสูงขึ้น ค่าการยืดตัวมีแนวโน้มลดลงส่วนที่ความเร็ว 5000 และ 6000 มิลลิเมตร ต่อนาที จะให้ค่าการยืดตัวลดลงที่ตำแหน่งหัวเชื่อม +0.45 มิลลิเมตร และมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อ เพิ่มระยะตำแหน่งหัว เชื่อมสูงขึ้น



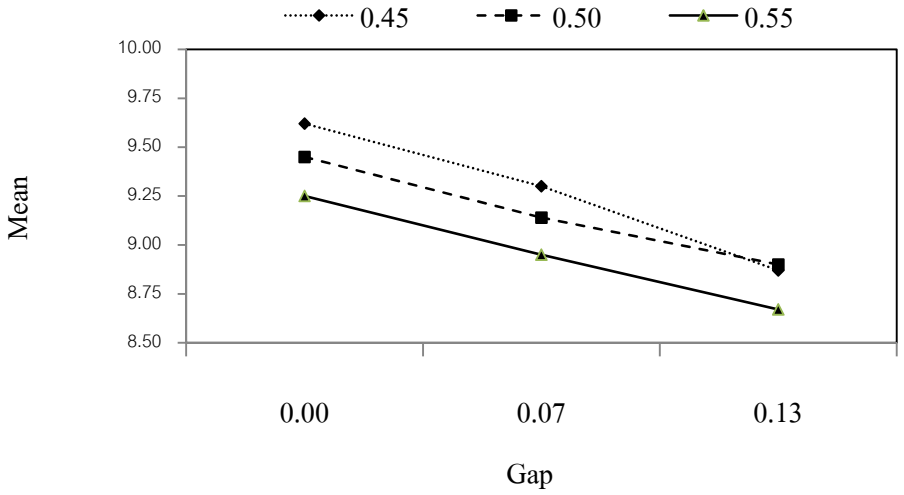
รูปที่ 4.18 อิทธิพลร่วมระหว่างความเร็วและตำแหน่งหัวเชื่อม



รูปที่ 4.19 อิทธิพลร่วมระหว่างความเร็วและระยะห่างแผ่นงานเชื่อม

พิจารณารูปที่ 4.19 แสดงระดับความเร็วการเชื่อม และระยะห่างแผ่นงานเชื่อมมีอิทธิพลร่วมกันต่อการยืดตัวจากความสัมพันธ์ เมื่อนำมาวิเคราะห์เพื่อหาค่าประมาณแบบช่วงของค่าการยืดตัว

สูงสุด [10,11] แยกตามระดับของความเร็ว การเชื่อมและระยะห่างของแผ่นงานเชื่อมที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % จะพบว่าความเร็วในการเชื่อมที่ 4000 มิลลิเมตร ต่อนาทีต่อระยะห่างของแผ่นงานเชื่อมที่ 0.00 มิลลิเมตร จะให้ค่าการยืดตัวที่สูงที่สุดที่ 9.80 มิลลิเมตร และถ้าเพิ่มระยะห่างของแผ่นงานเชื่อมสูงขึ้น ค่าการยืดตัวมีแนวโน้มลดลงส่วนที่ความเร็ว 5000 และ 6000 มิลลิเมตร ต่อนาทีจะให้ค่าการยืดตัวลดลงที่ระยะห่างของแผ่นงานเชื่อม 0.00 มิลลิเมตร และมีแนวโน้มลดลงต่อเนื่อง เมื่อเพิ่มระยะห่างของแผ่นงานเชื่อม



รูปที่ 4.20 อิทธิพลร่วมระหว่างตำแหน่งหัวเชื่อมและระยะห่างแผ่นงานเชื่อม

เมื่อพิจารณารูปที่ 4.20 แสดงระดับตำแหน่งหัวเชื่อม และระยะห่างแผ่นงานเชื่อมมีอิทธิพลร่วมกันต่อการยืดตัวจากความสัมพันธ์เมื่อนำมาวิเคราะห์ เพื่อหาค่าประมาณแบบช่วงของค่าการยืดตัวสูงสุด [10, 12] แยกตามระดับของตำแหน่งหัวเชื่อมและระยะห่างของแผ่นงานเชื่อม ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% จะพบว่าตำแหน่งหัวเชื่อมที่ +0.45 มิลลิเมตร ต่อระยะห่างของแผ่นงานเชื่อมที่ 0.00 มิลลิเมตร จะให้ค่าการยืดตัวที่สูงที่สุดที่ 9.60 มิลลิเมตร และถ้าเพิ่มระยะห่างของแผ่นงานเชื่อมสูงขึ้น ค่าการยืดตัวมีแนวโน้มลดลงส่วนที่ตำแหน่งหัวเชื่อม + 0.50 และ + 0.55 มิลลิเมตร ให้ค่าการยืดตัวลดลงที่ระยะห่างของแผ่นงานเชื่อม 0.00 มิลลิเมตร และมีแนวโน้มลดลงต่อเนื่อง เมื่อเพิ่มระยะห่างของแผ่นงานเชื่อม

พิจารณารูปที่ 4.18-4.20 จากความสัมพันธ์ของตัวแปรการเชื่อมแล้วนำมาวิเคราะห์ เพื่อหาค่าประมาณแบบช่วงของการยืดตัว [10] แยกตามระดับความเร็วการเชื่อม ตำแหน่งหัวเชื่อม และระยะห่างแผ่นงานเชื่อม พบว่าค่าเฉลี่ยการยืดตัวที่แยกตามระดับของความเร็วการเชื่อมและตำแหน่งหัวเชื่อม ที่ระดับความเร็วการเชื่อม 4000 มิลลิเมตร ต่อนาที ตำแหน่งหัวเชื่อม + 0.45 มิลลิเมตร ระยะห่างแผ่นงานเชื่อมที่ 0.00 มิลลิเมตร ได้ค่าความลึกจากการทดสอบของการยืดตัวสูงสุดที่ 9.98

มิลลิเมตร และมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องถึงค่าต่ำสุดที่ 8.5 มิลลิเมตร และเมื่อความเร็วการเชื่อม ตำแหน่งหัวเชื่อม ระยะห่างแผ่นงานเชื่อมสูงขึ้น การยืดตัวก็มีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องเช่นเดียวกัน และค่าการยืดตัวขนาดกลางเท่ากับ 9.10 มิลลิเมตร ที่ระดับความเร็วการเชื่อม 5000 มิลลิเมตร ต่อนาที ตำแหน่งหัวเชื่อม + 0.50 มิลลิเมตร ระยะห่างแผ่นงานเชื่อมที่ 0.07 มิลลิเมตร

กล่าวได้ว่าการวิเคราะห์ทางวิศวกรรมของตัวแปรการเชื่อมที่มีอิทธิพลต่อการยืดตัวของรอยต่อชนได้ถูกยืนยันความเชื่อมั่นทางสถิติโดยโปรแกรมการทดสอบอะโนว่าอย่างถูกต้อง

บทที่ 5
สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรการเชื่อมเลเซอร์เทเลอร์แบล็งค์ต่อการยืดตัวของรอยต่อชนแผ่นเหล็กชุบสังกะสีเกรด SGACD 45/45 ซึ่งเป็นการออกแบบการทดลองที่มีตัวแปรศึกษาประกอบด้วย ความเร็วในการเชื่อม ตำแหน่งหัวเชื่อม ระยะห่างชิ้นงานเชื่อม ที่มีผลต่อการยืดตัวของรอยเชื่อม ผลการทดลองสรุปได้ดังนี้

5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1 การเชื่อมเลเซอร์เทเลอร์แบล็งค์ในสภาวะสมดุลเนื้อเชื่อมบริเวณที่ถูกเชื่อมมีความสมบูรณ์ที่ความเร็ว 4000 มิลลิเมตรต่อนาที ระยะห่างระหว่างแผ่นงานเชื่อม 0.00 มิลลิเมตร ตำแหน่งหัวเชื่อม + 0.45 มิลลิเมตร จะให้ค่าการยืดตัวใกล้เคียงกับโลหะเดิม

5.1.2 การปรับตำแหน่งหัวเชื่อมไปทางเหล็กบาง ทำให้ค่าการยืดตัวต่ำเพราะไม่มีเนื้อเหล็กที่ไหลไปเติมเต็มระหว่างรอยต่อชนของแผ่นเหล็กทั้งสอง ขณะที่เพิ่มตำแหน่งหัวเชื่อมไปทางเหล็กหนาทำให้ค่าการยืดตัวจะสูงขึ้น เพราะเนื้อเหล็กของโลหะที่หนากว่าจะไหลไปยังโลหะที่บางกว่าทำให้เกิดการเติมเต็มของเนื้อโลหะมากขึ้น

5.1.3 การเพิ่มความเร็วการเชื่อม การเพิ่มระยะห่างของแผ่นงานเชื่อมสูงขึ้น ทำให้ค่าการยืดตัวลดลง เพราะความเร็วเชื่อมสูงทำให้โลหะหลอมละลายไม่สมบูรณ์ และการเพิ่มระยะห่างของแผ่นงานเชื่อมทำให้อัตราการซึมลึกน้อยลง

5.1.4 การวัดค่ารอยต่อการเชื่อมผลอัตราการซึมลึกแนวเชื่อมมีค่าสูงทำให้ค่าความสามารถในการยืดตัวของรอยต่อชนจะมีค่าสูง และเมื่อระยะห่างแผ่นงานเชื่อมเพิ่มขึ้นค่าอัตราการซึมลึกแนวเชื่อมมีค่าลดลง ทำให้ค่าการยืดตัวลดลง

5.1.5 ค่าอันเดอร์ฟิลมีค่าต่ำ ความสามารถในการยืดตัวของรอยต่อชนจะมีค่าสูง ในขณะที่ค่าอันเดอร์ฟิลมีค่าสูง ความสามารถในการยืดตัวของรอยต่อชนจะมีค่าลดลง เพราะการเกิดอันเดอร์ฟิลเกิดที่รอยเชื่อมด้านบนและเป็นจุดรวมความเค้น เมื่อวัสดุได้รับแรงกระทำซึ่งก็คือแรงกดอัดจากการทดสอบอีริทเซนจากแนวเชื่อมด้านล่างจึงเกิดการพังทะลายหรือแตกบริเวณอันเดอร์ฟิลซึ่งถ้าค่าอันเดอร์ฟิลมีค่าต่ำ การแตกหักจะมีน้อย

5.1.6 ตัวแปรที่มีอิทธิพลหลัก คือ ความเร็วการเชื่อม ระยะห่างแผ่นงานเชื่อม และ ระยะตำแหน่งหัวเชื่อมจากการวิเคราะห์ผลทางสถิติด้วยโปรแกรมอะโนว่าซึ่งค่าพี-แวลู่ต่ำกว่าระดับนัยสำคัญที่ 0.05 จึงแสดงผลว่าตัวแปรทั้งสามมีอิทธิพลต่อการยืดตัวของรอยต่อชน

5.1.7 ตัวแปรที่มีอิทธิพลร่วม คือ ความเร็วการเชื่อม* ระยะตำแหน่งหัวเชื่อม ความเร็วการเชื่อม*ระยะห่างชิ้นงานเชื่อม ระยะตำแหน่งหัวเชื่อม*ระยะห่างชิ้นงานเชื่อม และความเร็วการเชื่อม* ระยะตำแหน่งหัวเชื่อม*ระยะห่างชิ้นงานเชื่อม

5.1.8 โครงสร้างมหภาคที่มีค่าอันเดอร์ฟิลต่ำสุด 0.130 มิลลิเมตรและอัตราการซึมลึกสูงสุด คือ 1.102 มิลลิเมตร ได้ค่าการขึ้นรูปของรอยต่อชนสูงสุดเท่ากับ 9.98 มิลลิเมตร

5.1.9 โครงสร้างมหภาคที่มีค่าอันเดอร์ฟิล 0.141 มิลลิเมตรและอัตราการซึมลึก 0.954 มิลลิเมตร ได้ค่าการขึ้นรูปของรอยต่อชนเท่ากับ 9.10 มิลลิเมตร

5.1.10 โครงสร้างมหภาคที่มีค่าอันเดอร์ฟิล 0.255 มิลลิเมตรและอัตราการซึมลึก คือ 0.683 มิลลิเมตร ได้ค่าการขึ้นรูปของรอยต่อชนต่ำสุดเท่ากับ 8.50 มิลลิเมตร

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 การเกิดช่องว่างของแผ่นงานเชื่อมในขณะทำการเชื่อม จะทำให้การเติมเต็มของน้ำโลหะซึ่งจากการโอนถ่ายของน้ำโลหะที่หนากว่า ไปยังโลหะที่บางกว่าไม่สมบูรณ์ทำให้เกิดอันเดอร์ฟิล การเพิ่มแรงดันลมให้สม่ำเสมอ (7-8 บาร์) สามารถลดข้อบกพร่องในการเชื่อมได้

5.2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วการเชื่อม ระยะห่างระหว่างแผ่นงานเชื่อมและตำแหน่งหัวเชื่อมมีความสัมพันธ์กันจึงต้องมีการกำหนดให้สอดคล้องกันในการเชื่อมแบบเลเซอร์เทเลอร์แบล็งค์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

บรรณานุกรม

[1] Sun, Z. and Karppi, R. **The Application of Electron Beam Welding for Joining of Dissimilar Metals**: An Overview, 1996, pp. 257-267.

[2] JIS Handbook 1998, **Japanese Standards Association 4-1-24**, Akasaka, Minato-ku, Tokyo, 107- 8440 Japan.

[3] วีระพันธ์ สิทธิพงศ์,**โลหะวิทยากายภาพสำหรับวิศวกร ภาค 2** ,กรุงเทพฯ,โรงพิมพ์นิยมวิทยา, 2533

[4] สถาบันวิจัยพัฒนาแห่งประเทศไทย ,http://www.tdri.or.th/reports/unpublished/survey/c_4.pdf (Online) **,**ปีที่พิมพ์. Available: http://www.tdri.or.th, 2544. (15 พฤศจิกายน 2550)

[5] กระบวนการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์,http://subtaweetrading.igetweb.com/index.php?mo=14&newsid=33267(Online),2008.Available:http://www.subtaweetrading.igetweb.com, (15 พฤศจิกายน 2550)

[6] J.Wilson & J.F.B.Hawkes , สุรพล รักวิจัย แปลและเรียบเรียง , **เลเซอร์ทฤษฎีและการประยุกต์**, เพียร์สัน เอ็ดดูเคชั่น อินโดไซน่า,กรุงเทพฯ, 2544

[7] Mitsubishi Motor Japan ,**เอกสารอบรมการเชื่อมเลเซอร์เทเลอร์ แบล็งค์** ,16-18 กรกฎาคม, 2546

[8] ฝ่ายวิศวกรรมการผลิต,**คู่มือการเชื่อมเลเซอร์เทเลอร์แบล็งค์**,ซัมมิทแอดวานซ์ แมททีเรียล,2546

[9] วีระพันธ์ สิทธิพงศ์ , **โลหะวิทยากายภาพสำหรับวิศวกร ภาค 1** , กรุงเทพฯ, โรงพิมพ์นิยมวิทยา, 2537, หน้า 18-131

[10] Douglas C. Montgomery, Arizona state university, **Design and Analysis of Experiments**, Sixth Edition, 2005

[11] ศิวฤทธ์ พงศกรรังศิลป์, **สถิติธุรกิจ**, เพียร์สัน เอ็ด ดูเคชั่น อินโดไซน่า, กรุงเทพ ฯ, 2545. หน้า 1-9

[12] สายชล สินสมบูรณ์ทอง, **สถิติวิศวกรรม**, พิมพ์ครั้งที่ 2, จามจุรีโปรดักท์, กรุงเทพฯ, 2550

[13] นิพนธ์ บัวแก้ว , **ศึกษาผลกระทบของปัจจัยการเชื่อมเลเซอร์ที่มีต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อมในแขนจับหัวอ่านสำหรับจานแม่เหล็กแบบแข็ง**, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2525

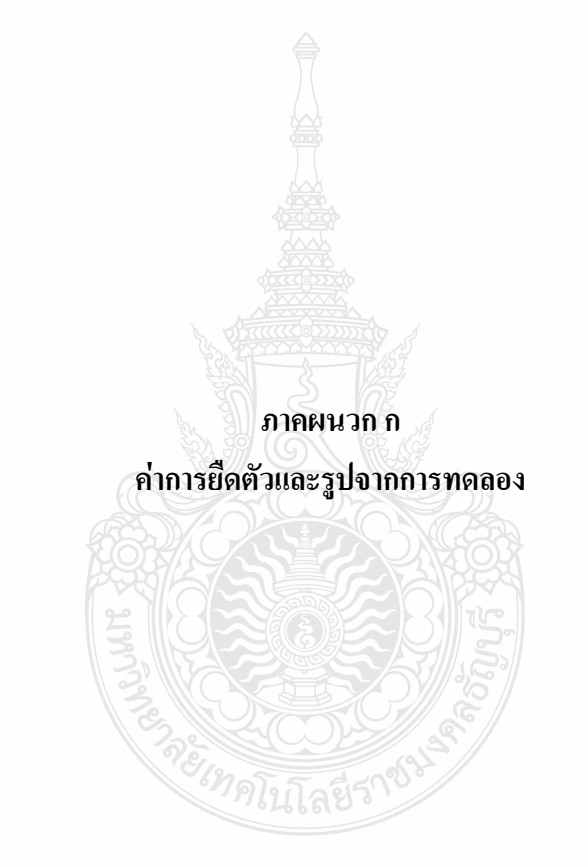
บรรณานุกรม (ต่อ)

[14] ฉัตรทองใสแสง**, อิทธิพลของพารามิเตอร์การเชื่อมต่อโครงสร้างและสมบัติทางกลของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเตนนิติก เกรด304**, หลักสูตรปริญญาครุศาสตร์อุตสาหกรรมมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี , 2548

[15] Kenji UNO , **Mass Production of Tailored Blanks by Means of Multilinear Joining Technique**, Production Engineering Body Department, Mitsubishi Motors CorporationJapan(MMC),http://www.mitsubishimotors.com/corporate/about_us/technology/review/e/pdf/2005/17e_10.pdf (Online),2005.Available:http://www.mitsubishi-motors.com,(11 November 2007)

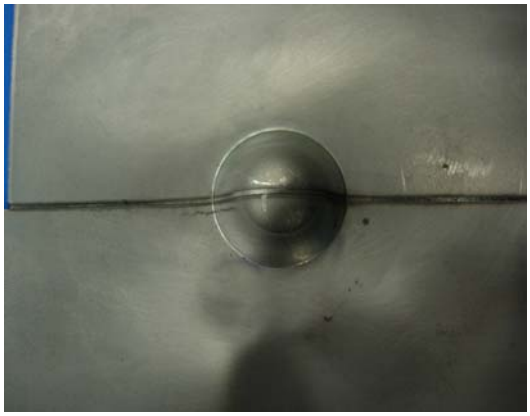
[16] J.LISOK,A.PIELA , **Method of evaluating drawability of laser-welded tailored blanks** ,Silesian University of Technology, Krasinskiego8, 40- 019katowice, http://www.wmech.pwr.wroc.pl/acme/ACME/vol4-no3/vol4-no3-PageALL-04-Methods-of-Evaluating-drawability.pdf (Online), 2004.Available: http://www.wmech.pwr.wroc.pl, (11 November 2007)

[17] Brandon, D., Kaplan, W**. "Joining Process"**, An Introduction, John wiley and Son, 1997. p.500



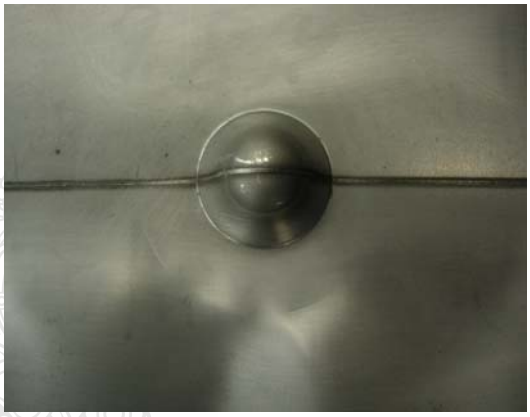
ภาคผนวก ก
ค่าการยืดตัวและรูปจากการทดลอง

ก. 9.98 มิลลิเมตร



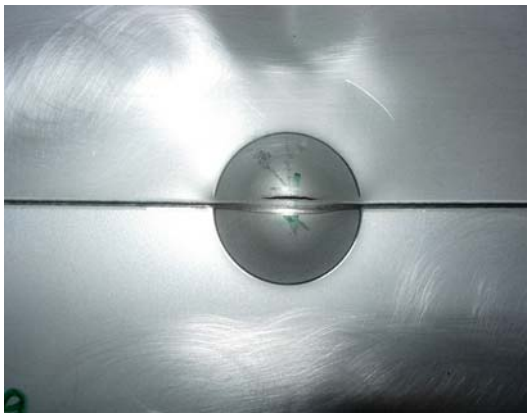
ข. 9.95 มิลลิเมตร

ค. 9.85 มิลลิเมตร

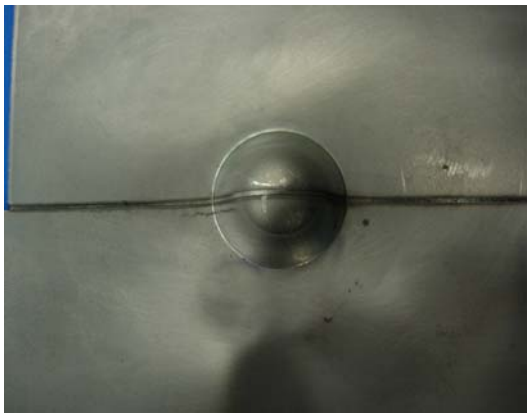


ง. 9.95 มิลลิเมตร

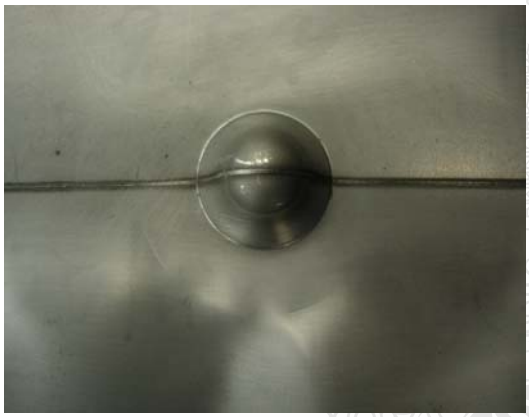
รูปที่ ก.1 ค่าการยืดตัวของชิ้นงานทดลองที่ความเร็ว 4000 มิลลิเมตรต่อนาที ระยะห่างชิ้นงานเชื่อม 0.00 มิลลิเมตรตำแหน่งหัวเชื่อม + 0.45 มิลลิเมตร



ก. 9.90 มิลลิเมตร



ข. 9.95 มิลลิเมตร

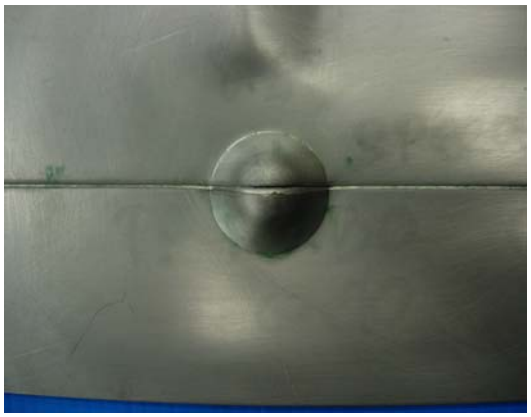


ค. 9.90 มิลลิเมตร

ง. 9.85 มิลลิเมตร

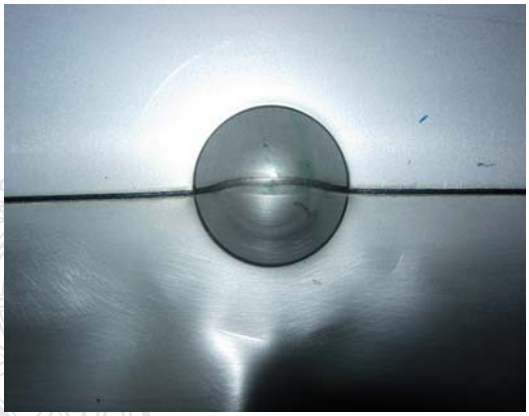
รูปที่ ก.2 ค่าการยืดตัวของชิ้นงานทดลองที่ความเร็ว 4000 มิลลิเมตรต่อนาที ระยะห่างชิ้นงานเชื่อม 0.00 มิลลิเมตรตำแหน่งหัวเชื่อม + 0.50 มิลลิเมตร

ก. 9.80 มิลลิเมตร



ข. 9.80 มิลลิเมตร

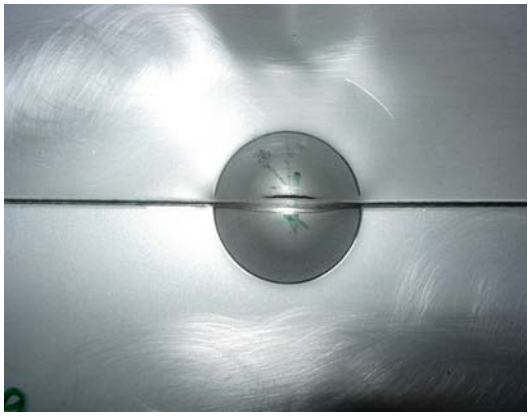
ค. 9.75 มิลลิเมตร



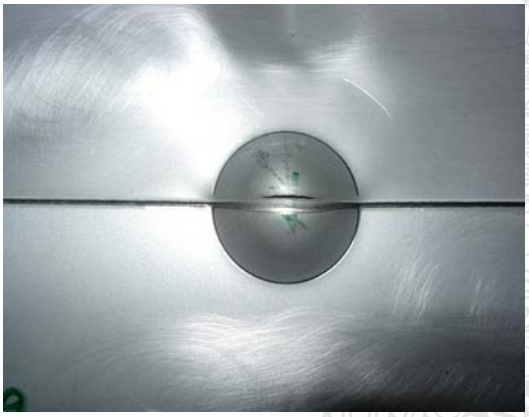
ง. 9.75 มิลลิเมตร

รูปที่ ก.3 ค่าการยืดตัวของชิ้นงานทดลองที่ความเร็ว 4000 มิลลิเมตรต่อนาที ระยะห่างชิ้นงานเชื่อม 0.00 มิลลิเมตรตำแหน่งหัวเชื่อม + 0.55 มิลลิเมตร

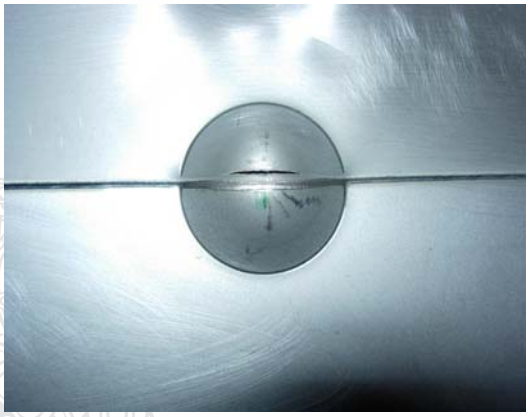
ก. 9.45 มิลลิเมตร



ข. 9.50 มิลลิเมตร



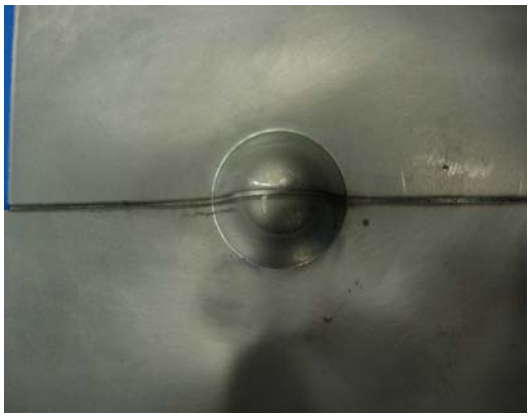
ค. 9.50 มิลลิเมตร



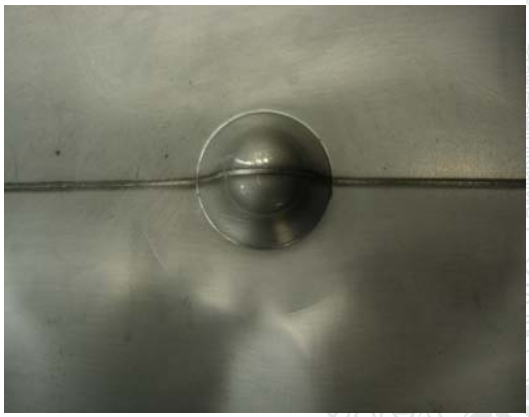
ง. 9.48 มิลลิเมตร

รูปที่ ก.4 ค่าการยืดตัวของชิ้นงานทดลองที่ความเร็ว 5000 มิลลิเมตรต่อนาที ระยะห่างชิ้นงานเชื่อม 0.00 มิลลิเมตรตำแหน่งหัวเชื่อม + 0.45 มิลลิเมตร

ก. 9.40 มิลลิเมตร



ข. 9.40 มิลลิเมตร

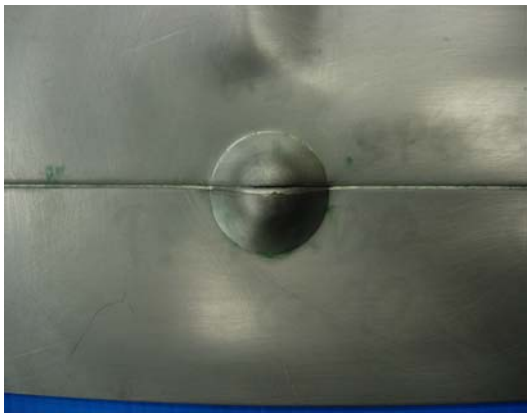


ค. 9.35 มิลลิเมตร

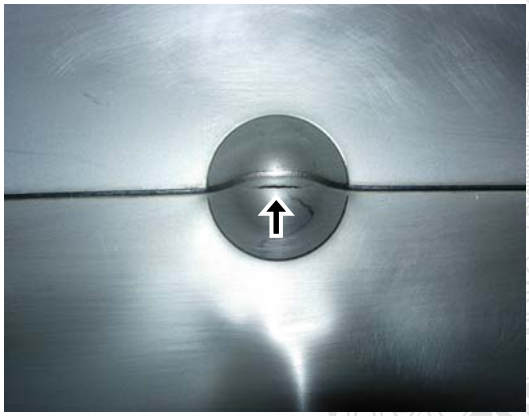
ง. 9.35 มิลลิเมตร

รูปที่ ก.5 ค่าการยืดตัวของชิ้นงานทดลองที่ความเร็ว 5000 มิลลิเมตรต่อนาที ระยะห่างชิ้นงานเชื่อม 0.00 มิลลิเมตรตำแหน่งหัวเชื่อม +0. 50 มิลลิเมตร

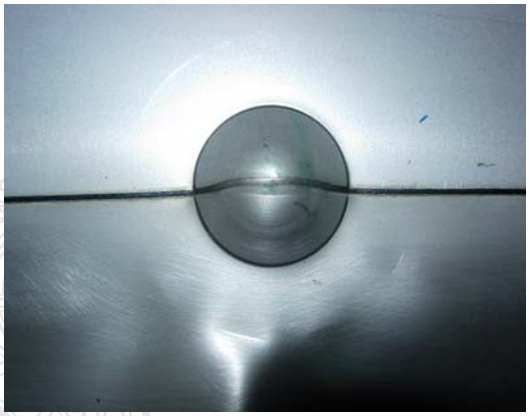
ก. 9.20 มิลลิเมตร



ข. 9.25 มิลลิเมตร

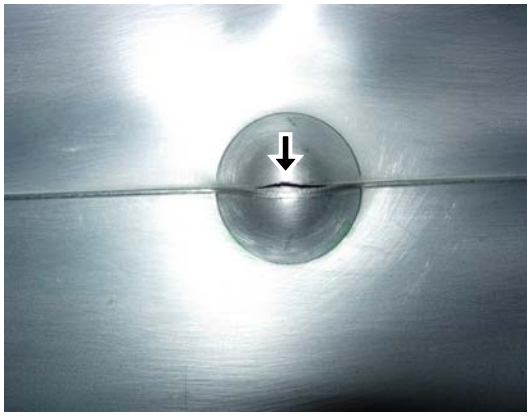


ค. 9.20 มิลลิเมตร



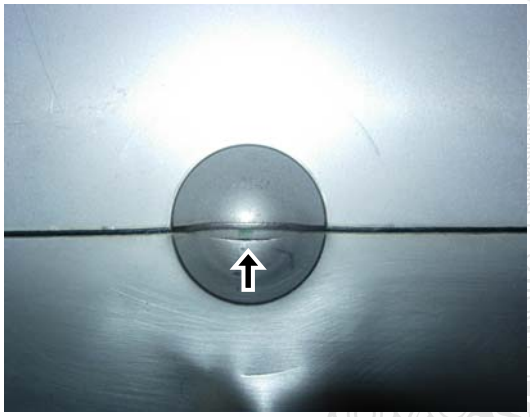
ง. 9.25 มิลลิเมตร

รูปที่ ก.6 ค่าการยืดตัวของชิ้นงานทดลองที่ความเร็ว 5000 มิลลิเมตรต่อนาที ระยะห่างชิ้นงานเชื่อม 0.00 มิลลิเมตรตำแหน่งหัวเชื่อม + 0.55 มิลลิเมตร (ลูกศรชี้แสดงรอยแตกร้าว)

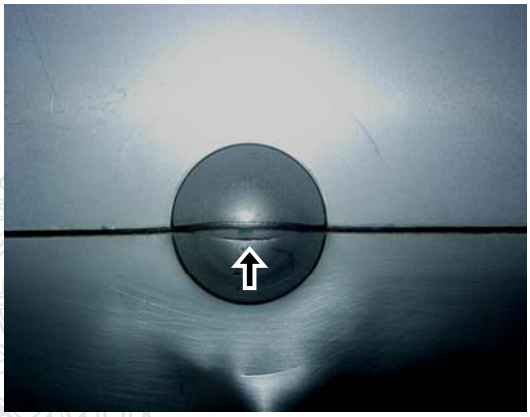


ก. 9.30 มิลลิเมตร

ข. 9.30 มิลลิเมตร

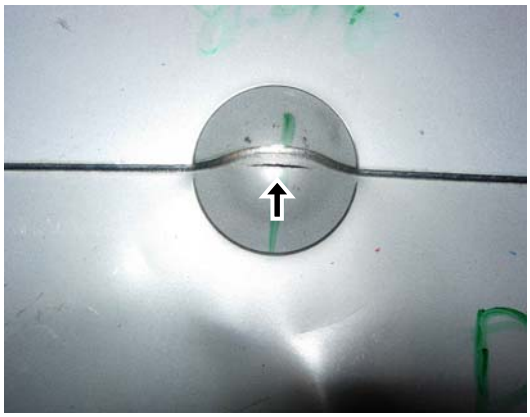


ค. 9.20 มิลลิเมตร

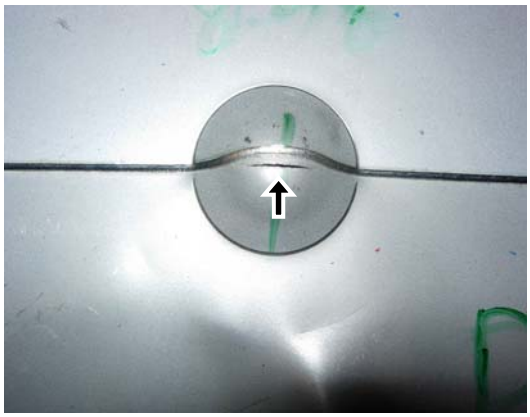


ง. 9.20 มิลลิเมตร

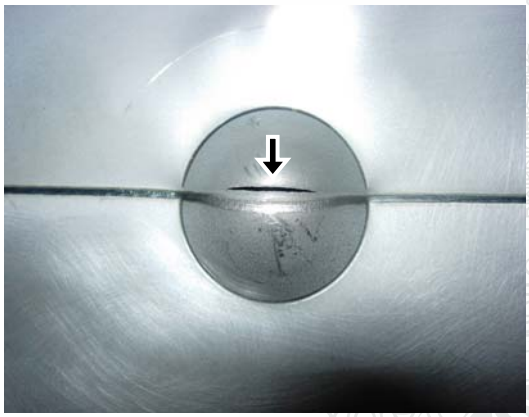
รูปที่ ก.7 ค่าการยืดตัวของชิ้นงานทดลองที่ความเร็ว 6000 มิลลิเมตรต่อนาที ระยะห่างชิ้นงานเชื่อม 0.00 มิลลิเมตรตำแหน่งหัวเชื่อม + 0.45 มิลลิเมตร (ลูกศรชี้แสดงรอยแตกร้าว)



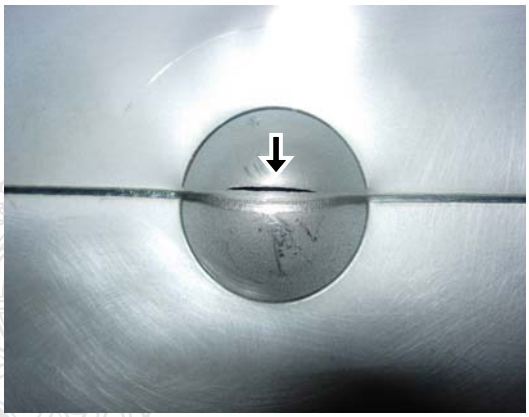
ก. 9.00 มิลลิเมตร



ข. 9.00 มิลลิเมตร



ค. 9.15 มิลลิเมตร



ง. 9.15 มิลลิเมตร

รูปที่ ก.8 ค่าการยืดตัวของชิ้นงานทดลองที่ความเร็ว 6000 มิลลิเมตรต่อนาที ระยะห่างชิ้นงานเชื่อม 0.00 มิลลิเมตรตำแหน่งหัวเชื่อม + 0.50 มิลลิเมตร (ลูกศรชี้แสดงรอยแตกร้าว)

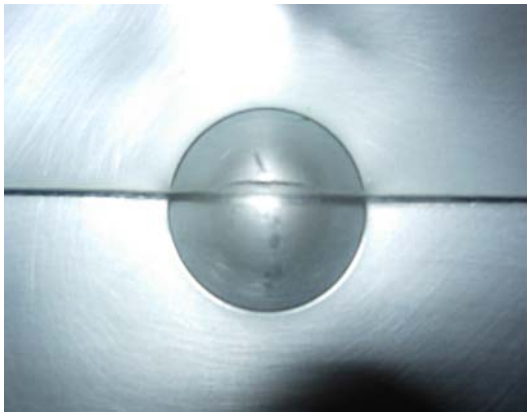
ก. 8.90 มิลลิเมตร

ข. 8.90 มิลลิเมตร

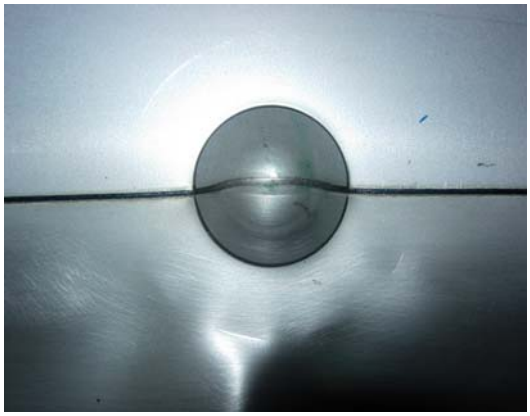
ค. 8.95 มิลลิเมตร

ง. 8.95 มิลลิเมตร

รูปที่ ก.9 ค่าการยืดตัวของชิ้นงานทดลองที่ความเร็ว 6000 มิลลิเมตรต่อนาที ระยะห่างชิ้นงานเชื่อม 0.00 มิลลิเมตรตำแหน่งหัวเชื่อม + 0.55 มิลลิเมตร (ลูกศรชี้แสดงรอยแตกร้าว)

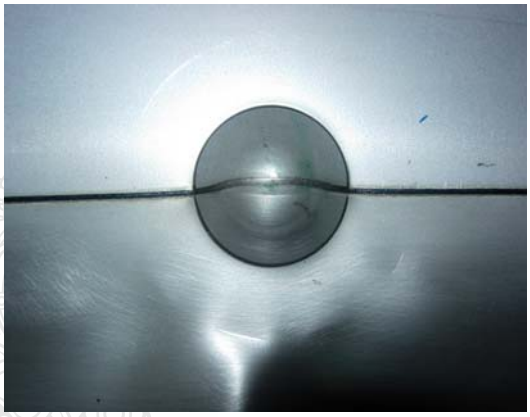


ก. 9.85 มิลลิเมตร



ข. 9.80 มิลลิเมตร

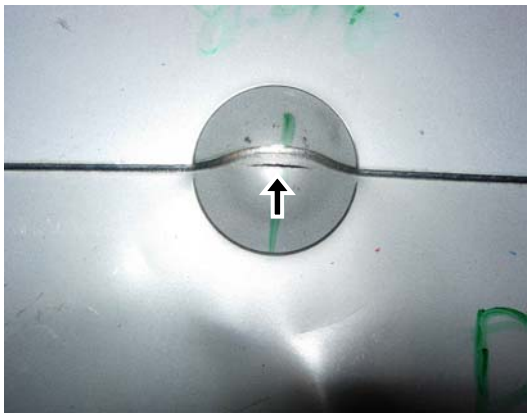
ค. 9.75 มิลลิเมตร



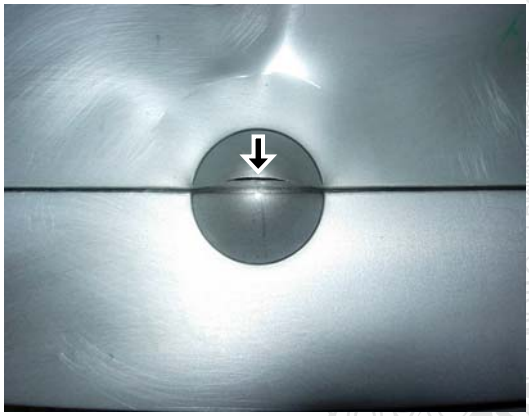
ง. 9.80 มิลลิเมตร

รูปที่ ก.10 ค่าการยืดตัวของชิ้นงานทดลองที่ความเร็ว 4000 มิลลิเมตรต่อนาที ระยะห่างชิ้นงานเชื่อม 0.07 มิลลิเมตรตำแหน่งหัวเชื่อม +0. 45 มิลลิเมตร

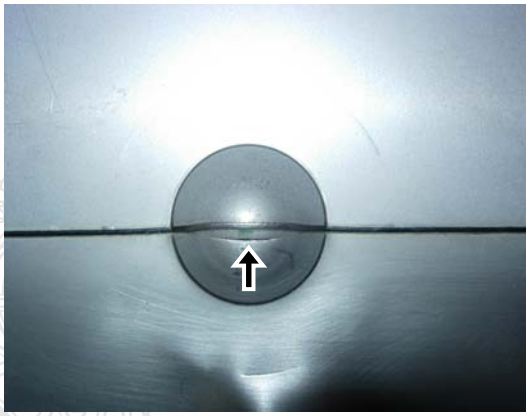
ก. 9.55 มิลลิเมตร



ข. 9.50 มิลลิเมตร

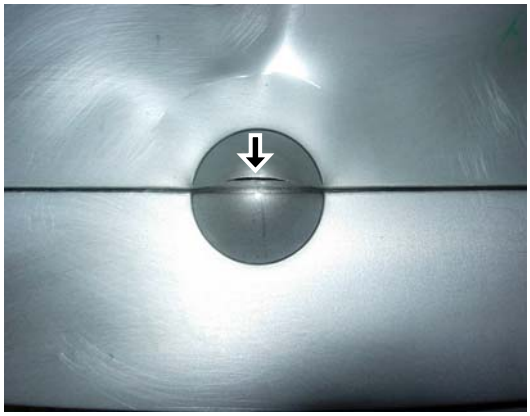


ค. 9.55 มิลลิเมตร

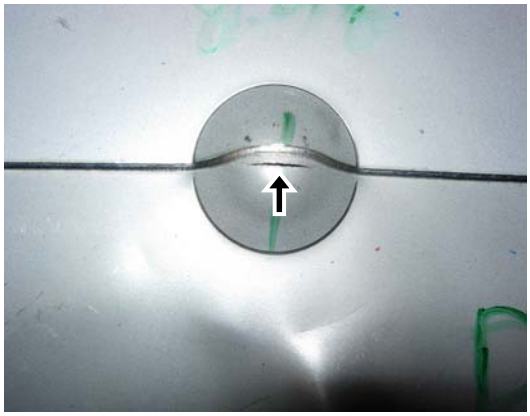


ง. 9.65 มิลลิเมตร

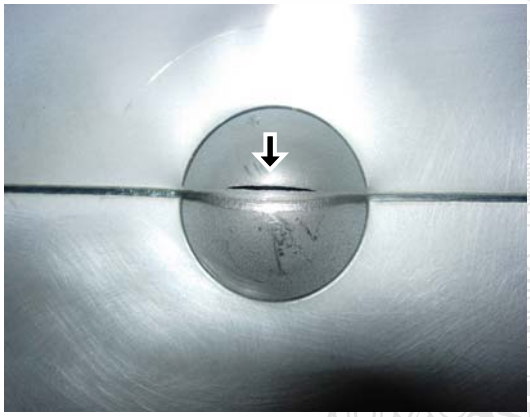
รูปที่ ก.11 ค่าการยืดตัวของชิ้นงานทดลองที่ความเร็ว 4000 มิลลิเมตรต่อนาที ระยะห่างชิ้นงานเชื่อม 0.07 มิลลิเมตรตำแหน่งหัวเชื่อม +0.50 มิลลิเมตร (ลูกศรชี้แสดงรอยแตกร้าว)



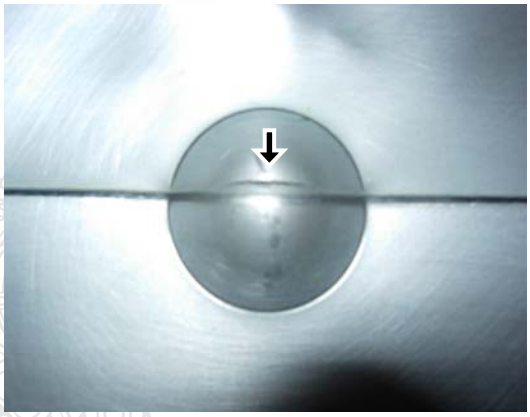
ก. 9.50 มิลลิเมตร



ข. 9.50 มิลลิเมตร

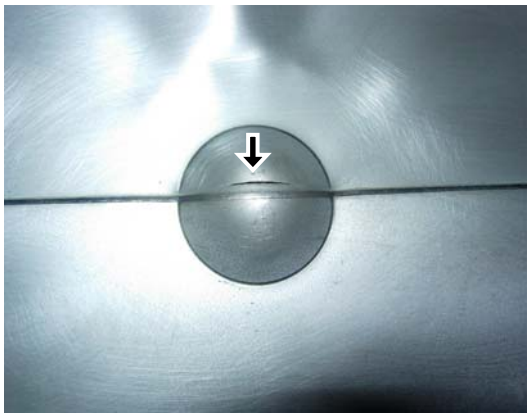


ค. 9.00 มิลลิเมตร

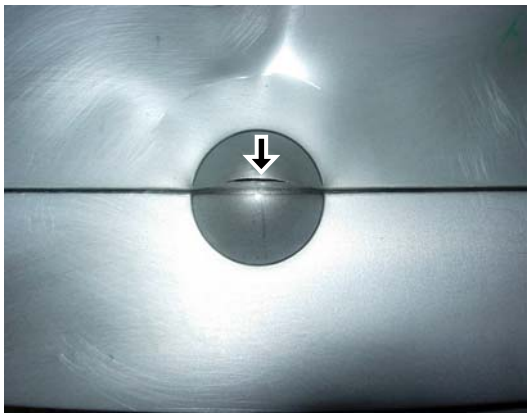


ง. 9.45 มิลลิเมตร

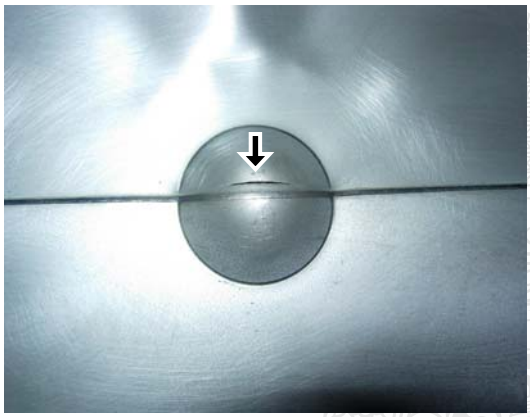
รูปที่ ก.12 ค่าการยืดตัวของชิ้นงานทดลองที่ความเร็ว 4000 มิลลิเมตรต่อนาที ระยะห่างชิ้นงานเชื่อม 0.07 มิลลิเมตรตำแหน่งหัวเชื่อม + 0.55 มิลลิเมตร (ลูกศรชี้แสดงรอยแตกร้าว)



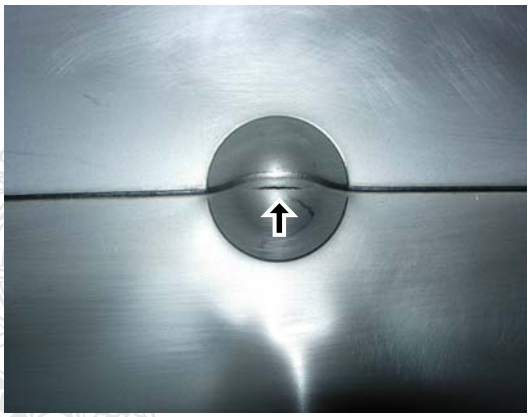
ก. 9.45 มิลลิเมตร



ข. 9.40 มิลลิเมตร

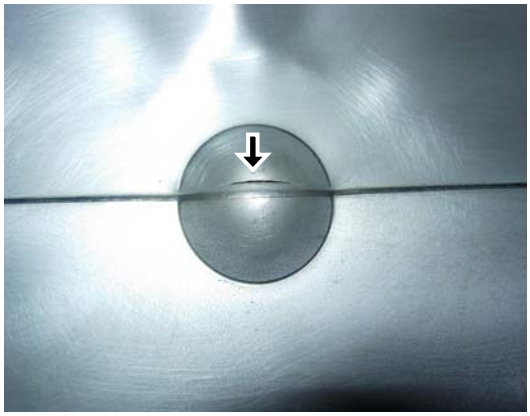


ค. 9.40 มิลลิเมตร

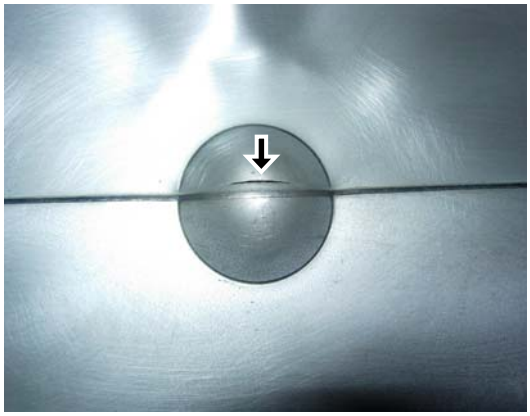


ง. 9.45 มิลลิเมตร

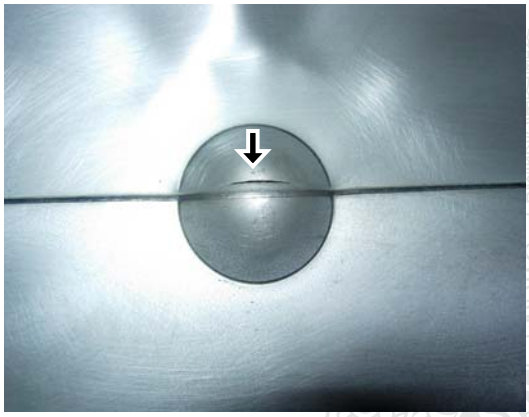
รูปที่ ก.13 ค่าการยืดตัวของชิ้นงานทดลองที่ความเร็ว 5000 มิลลิเมตรต่อนาที ระยะห่างชิ้นงานเชื่อม 0.07 มิลลิเมตรตำแหน่งหัวเชื่อม + 0.45 มิลลิเมตร (ลูกศรชี้แสดงรอยแตกร้าว)



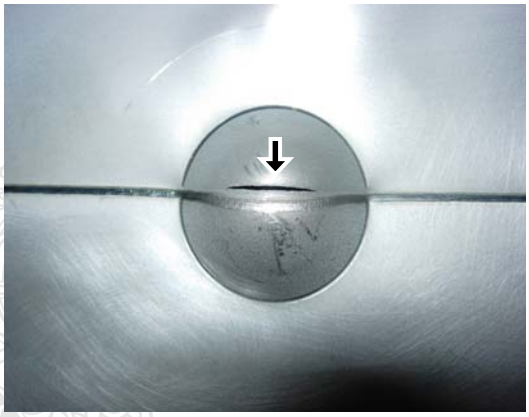
ก. 9.00 มิลลิเมตร



ข. 8.95 มิลลิเมตร

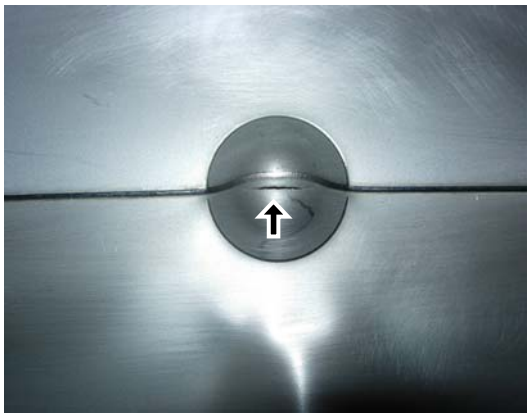


ค. 8.95 มิลลิเมตร



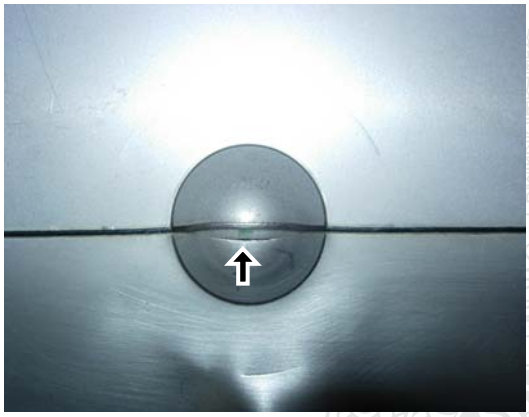
ง. 9.00 มิลลิเมตร

รูปที่ ก.14 ค่าการยืดตัวของชิ้นงานทดลองที่ความเร็ว 5000 มิลลิเมตรต่อนาที ระยะห่างชิ้นงานเชื่อม 0.07 มิลลิเมตรตำแหน่งหัวเชื่อม + 0.50 มิลลิเมตร (ลูกศรชี้แสดงรอยแตกร้าว)

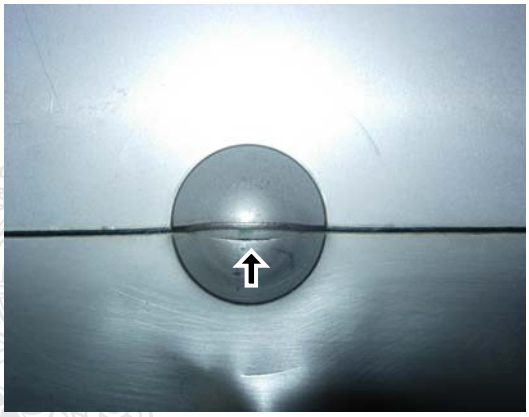


ก. 8.80 มิลลิเมตร

ข. 8.90 มิลลิเมตร

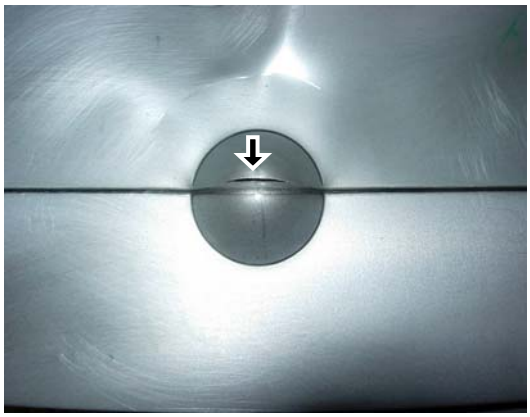


ค. 8.85 มิลลิเมตร

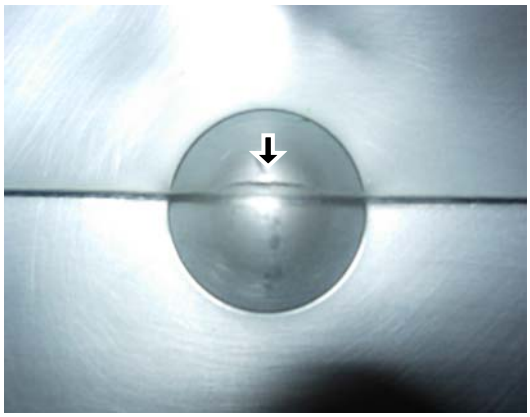


ง. 8.95 มิลลิเมตร

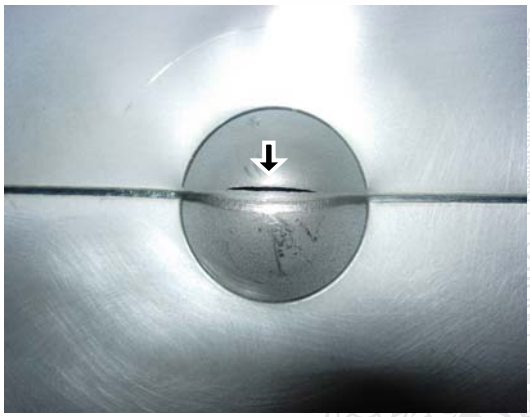
รูปที่ ก.15 ค่าการยืดตัวของชิ้นงานทดลองที่ความเร็ว 5000 มิลลิเมตรต่อนาที ระยะห่างชิ้นงานเชื่อม 0.07 มิลลิเมตรตำแหน่งหัวเชื่อม + 0.55 มิลลิเมตร (ลูกศรชี้แสดงรอยแตกร้าว)



ก. 8.90 มิลลิเมตร



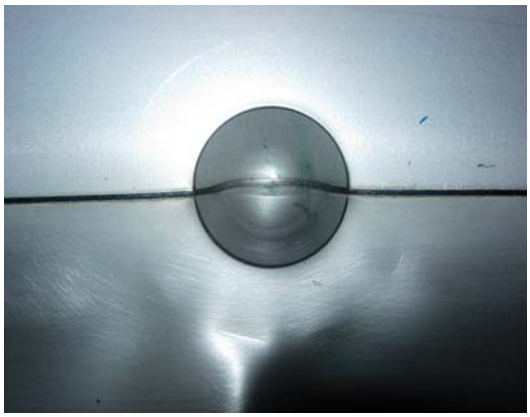
ข. 8.85 มิลลิเมตร



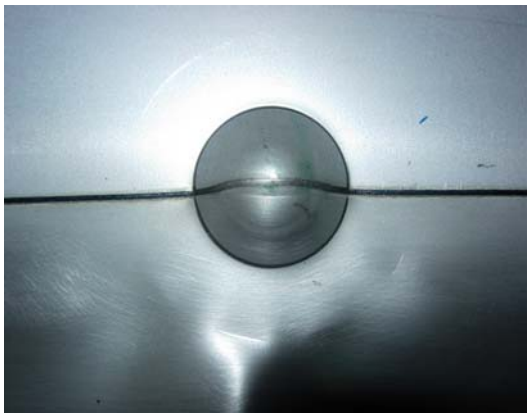
ค. 8.85 มิลลิเมตร

ง. 8.90 มิลลิเมตร

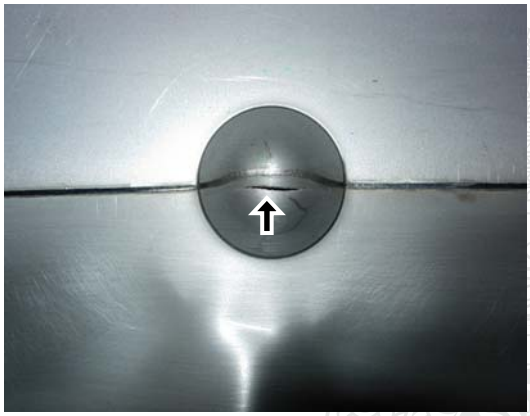
รูปที่ ก.16 ค่าการยืดตัวของชิ้นงานทดลองที่ความเร็ว 6000 มิลลิเมตรต่อนาที ระยะห่างชิ้นงานเชื่อม 0.07 มิลลิเมตรตำแหน่งหัวเชื่อม + 0.45 มิลลิเมตร (ลูกศรชี้แสดงรอยแตกร้าว)



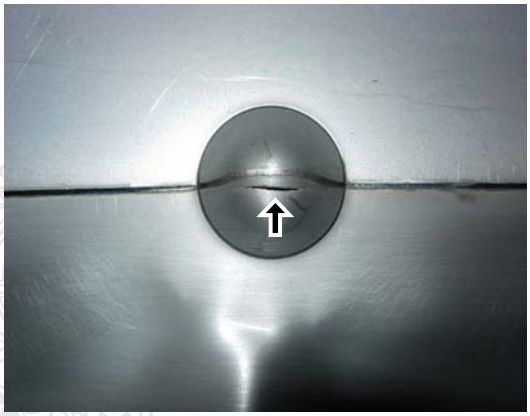
ก. 8.85 มิลลิเมตร



ข. 8.85 มิลลิเมตร

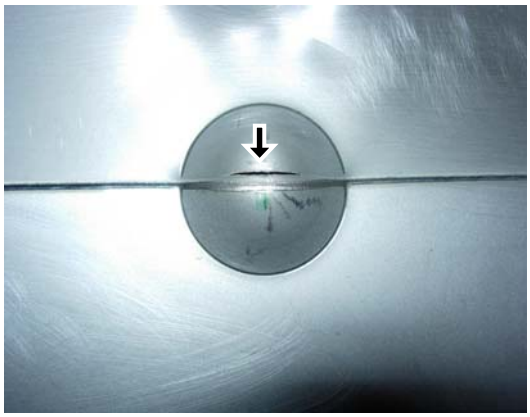


ค. 8.80 มิลลิเมตร

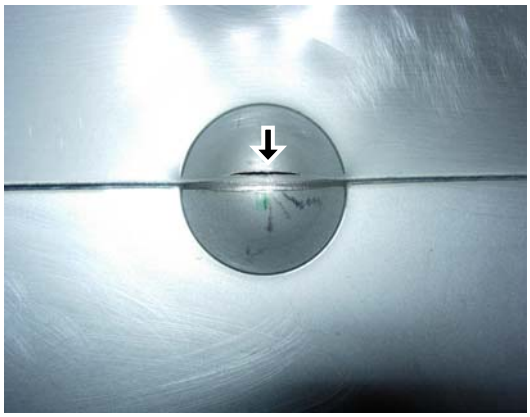


ง. 8.80 มิลลิเมตร

รูปที่ ก.17 ค่าการยืดตัวของชิ้นงานทดลองที่ความเร็ว 6000 มิลลิเมตรต่อนาที ระยะห่างชิ้นงานเชื่อม 0.07 มิลลิเมตรตำแหน่งหัวเชื่อม + 0.50 มิลลิเมตร (ลูกศรชี้แสดงรอยแตกร้าว)



ก. 8.60 มิลลิเมตร

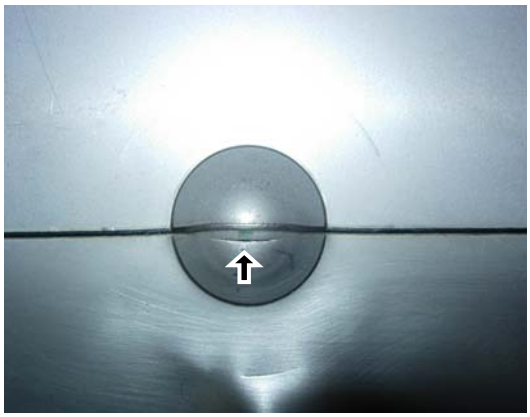


ข. 8.60 มิลลิเมตร

ค. 8.55 มิลลิเมตร

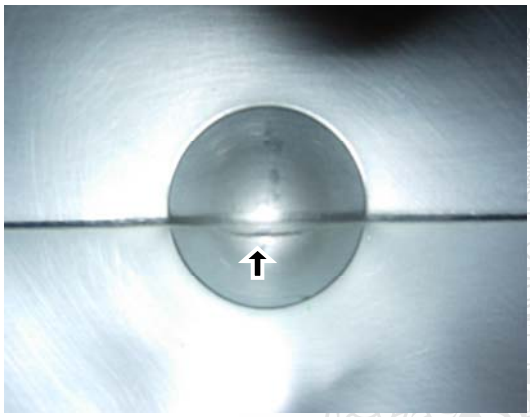
ง. 8.55 มิลลิเมตร

รูปที่ ก.18 ค่าการยืดตัวของชิ้นงานทดลองที่ความเร็ว 6000 มิลลิเมตรต่อนาที ระยะห่างชิ้นงานเชื่อม 0.07 มิลลิเมตรตำแหน่งหัวเชื่อม + 0.55 มิลลิเมตร (ลูกศรชี้แสดงรอยแตกร้าว)

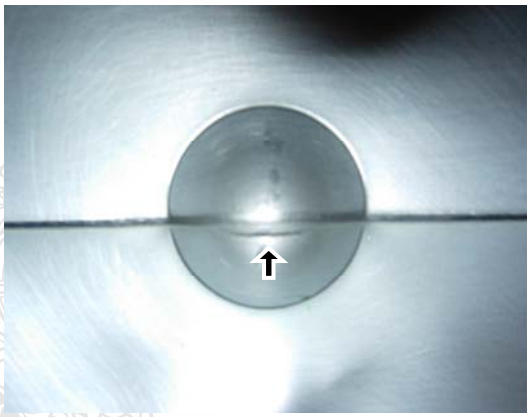


ก. 9.50 มิลลิเมตร

ข. 9.50 มิลลิเมตร

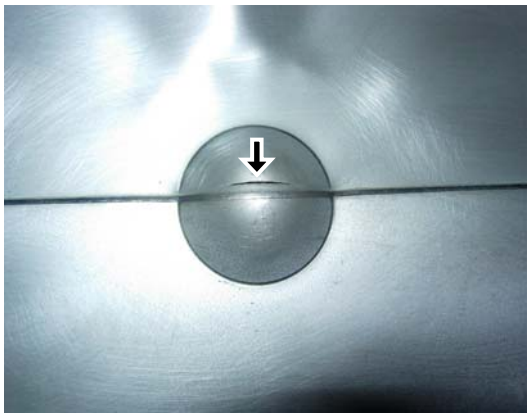


ค. 9.45 มิลลิเมตร

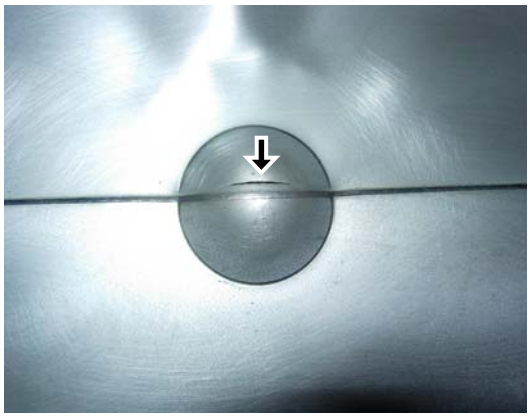


ง. 9.45 มิลลิเมตร

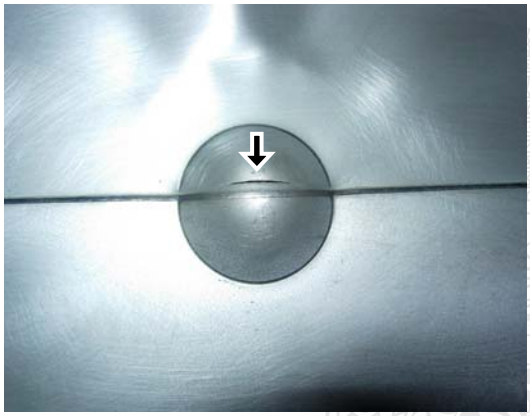
รูปที่ ก.19 ค่าการยืดตัวของชิ้นงานทดลองที่ความเร็ว 4000 มิลลิเมตรต่อนาที ระยะห่างชิ้นงานเชื่อม 0.13 มิลลิเมตรตำแหน่งหัวเชื่อม + 0.45 มิลลิเมตร (ลูกศรชี้แสดงรอยแตกร้าว)



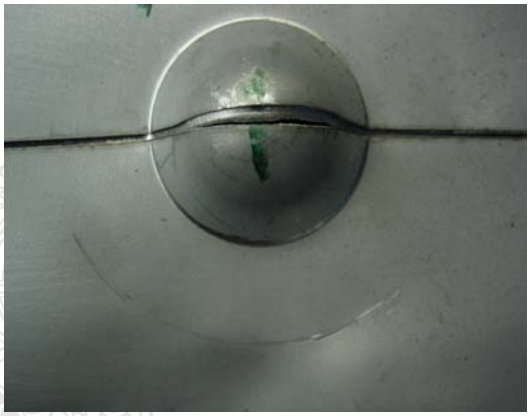
ก. 9.25 มิลลิเมตร



ข. 9.25 มิลลิเมตร

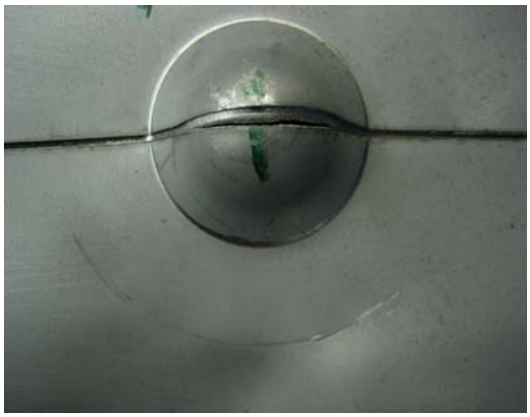


ค. 9.30 มิลลิเมตร

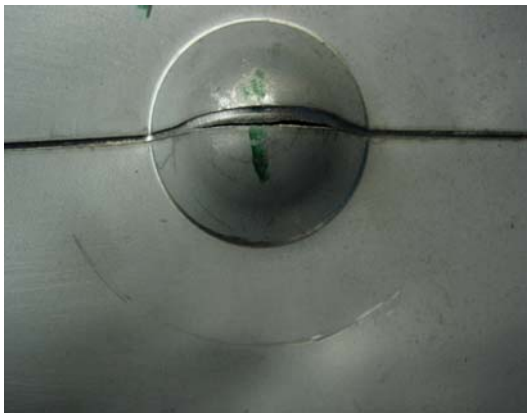


ง. 9.30 มิลลิเมตร

รูปที่ ก.20 ค่าการยืดตัวของชิ้นงานทดลองที่ความเร็ว 4000 มิลลิเมตรต่อนาที ระยะห่างชิ้นงานเชื่อม 0.13 มิลลิเมตรตำแหน่งหัวเชื่อม + 0.50 มิลลิเมตร (ลูกศรชี้แสดงรอยแตกร้าว)



ก. 9.00 มิลลิเมตร

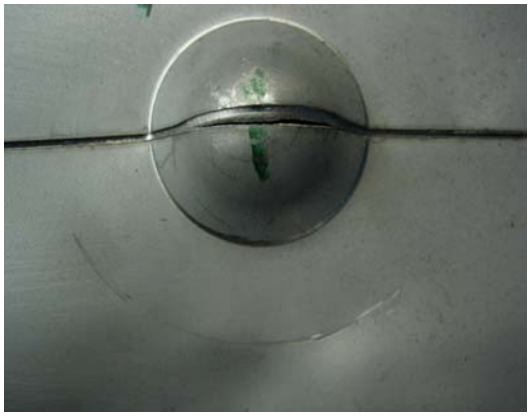


ข. 9.00 มิลลิเมตร

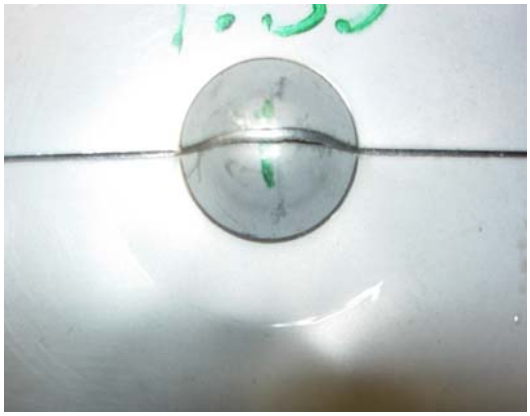
ค. 8.95 มิลลิเมตร

ง. 8.95 มิลลิเมตร

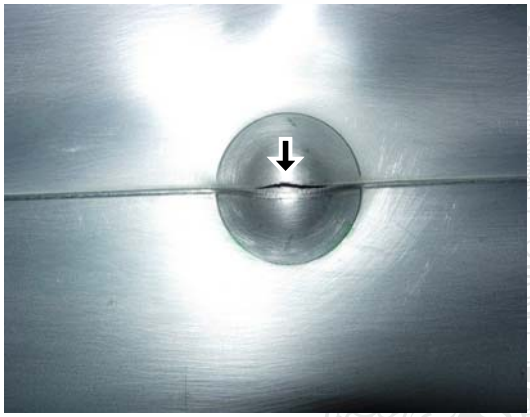
รูปที่ ก.21 ค่าการยืดตัวของชิ้นงานทดลองที่ความเร็ว 4000 มิลลิเมตรต่อนาที ระยะห่างชิ้นงานเชื่อม 0.13 มิลลิเมตรตำแหน่งหัวเชื่อม + 0.55 มิลลิเมตร (ลูกศรชี้แสดงรอยแตกร้าว)



ก. 8.55 มิลลิเมตร



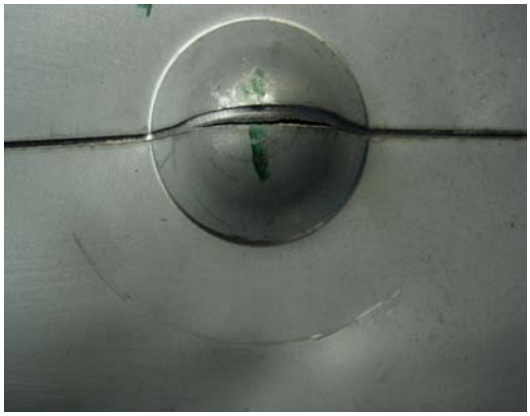
ข. 8.55 มิลลิเมตร



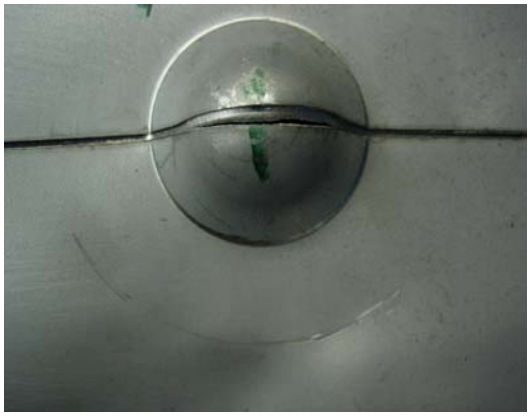
ค. 8.60 มิลลิเมตร

ง. 8.60 มิลลิเมตร

รูปที่ ก.22 ค่าการยืดตัวของชิ้นงานทดลองที่ความเร็ว 5000 มิลลิเมตรต่อนาที ระยะห่างชิ้นงานเชื่อม 0.13 มิลลิเมตรตำแหน่งหัวเชื่อม + 0.45 มิลลิเมตร (ลูกศรชี้แสดงรอยแตกร้าว)



ก. 8.70 มิลลิเมตร

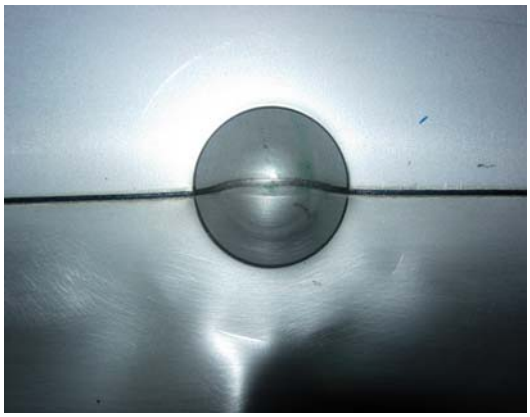


ข. 8.70 มิลลิเมตร

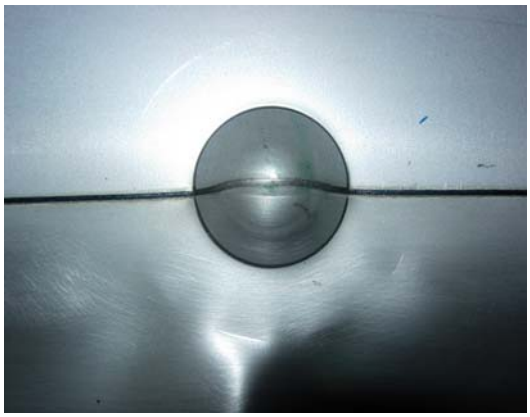
ค. 8.75 มิลลิเมตร

ง. 8.75 มิลลิเมตร

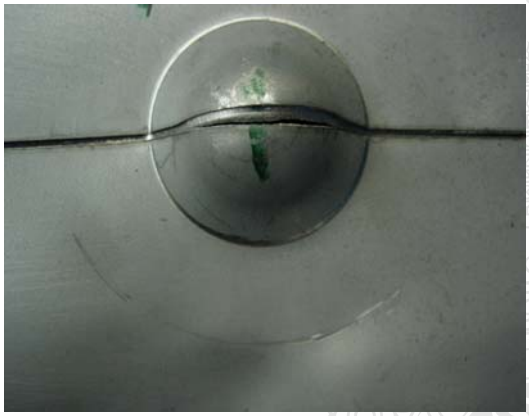
รูปที่ ก.23 ค่าการยืดตัวของชิ้นงานทดลองที่ความเร็ว 5000 มิลลิเมตรต่อนาที ระยะห่างชิ้นงานเชื่อม 0.13 มิลลิเมตรตำแหน่งหัวเชื่อม + 0.50 มิลลิเมตร



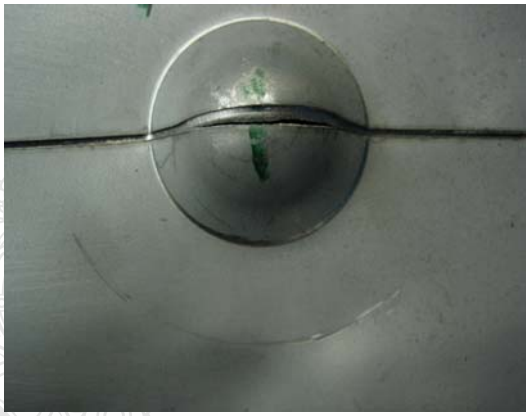
ก. 8.45 มิลลิเมตร



ข. 8.45 มิลลิเมตร

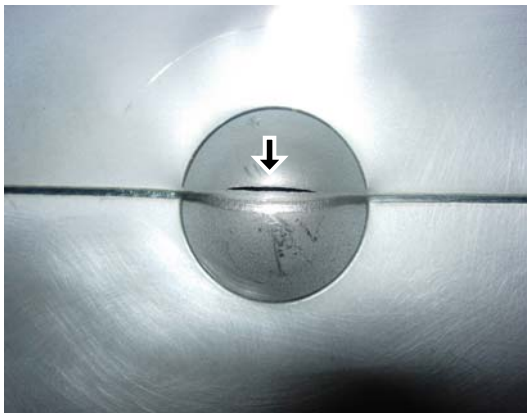


ค. 8.40 มิลลิเมตร

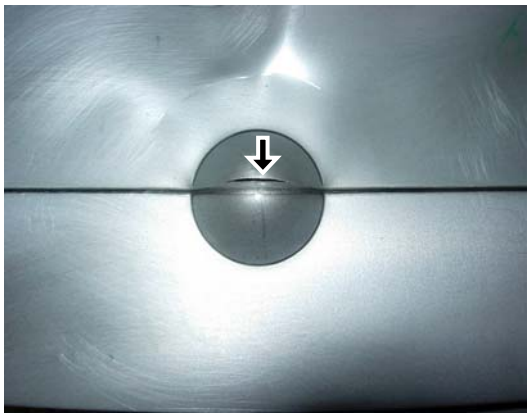


ง. 8.40 มิลลิเมตร

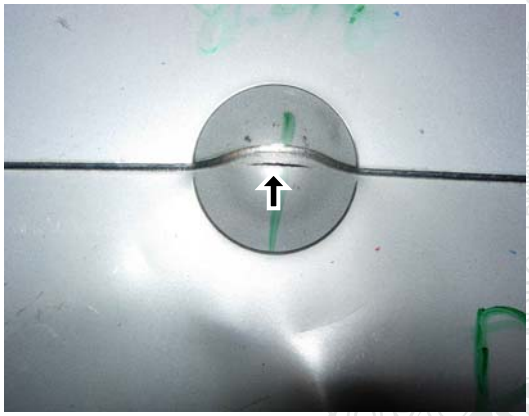
รูปที่ ก.24 ค่าการยืดตัวของชิ้นงานทดลองที่ความเร็ว 5000 มิลลิเมตรต่อนาที ระยะห่างชิ้นงานเชื่อม 0.13 มิลลิเมตรตำแหน่งหัวเชื่อม + 0.55 มิลลิเมตร



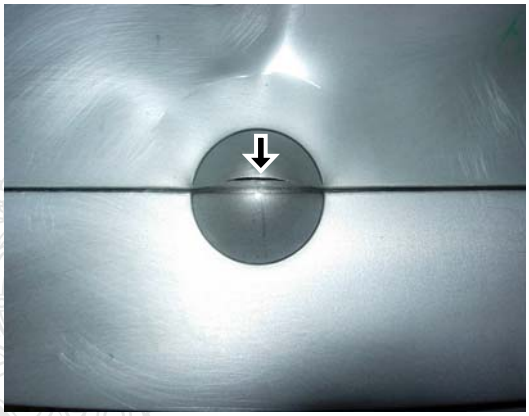
ก. 8.50 มิลลิเมตร



ข. 8.45 มิลลิเมตร

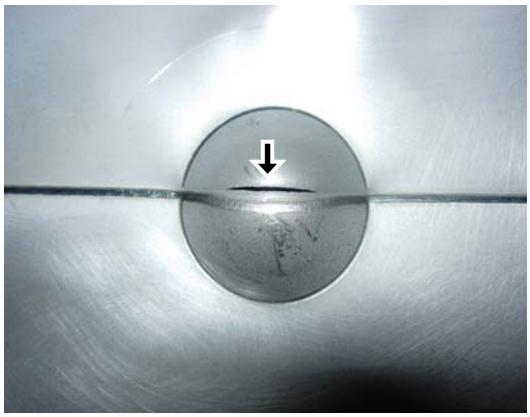


ค. 8.50 มิลลิเมตร

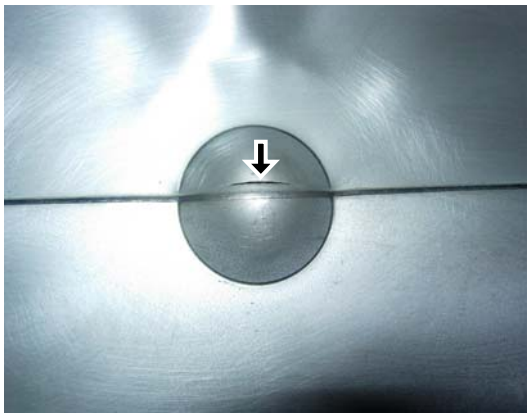


ง. 8.45 มิลลิเมตร

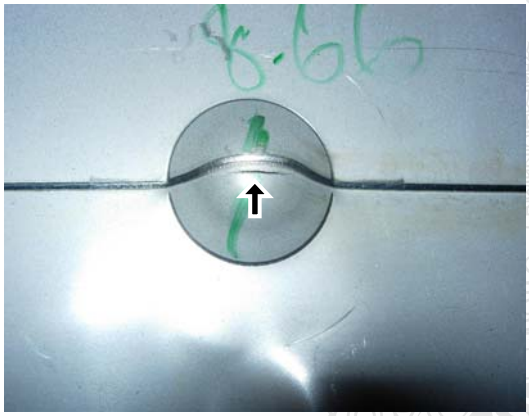
รูปที่ ก.25 ค่าการยืดตัวของชิ้นงานทดลองที่ความเร็ว 6000 มิลลิเมตรต่อนาที ระยะห่างชิ้นงานเชื่อม 0.13 มิลลิเมตรตำแหน่งหัวเชื่อม + 0.45 มิลลิเมตร (ลูกศรชี้แสดงรอยแตกร้าว)



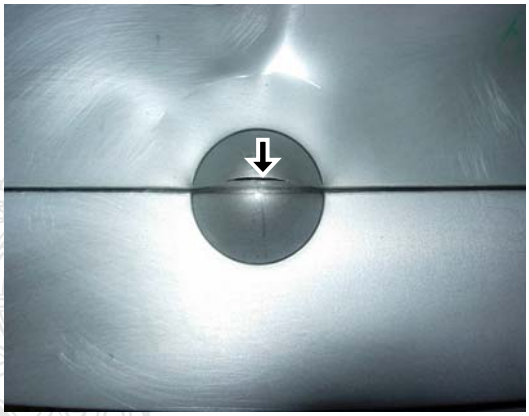
ก. 8.55 มิลลิเมตร



ข. 8.60 มิลลิเมตร

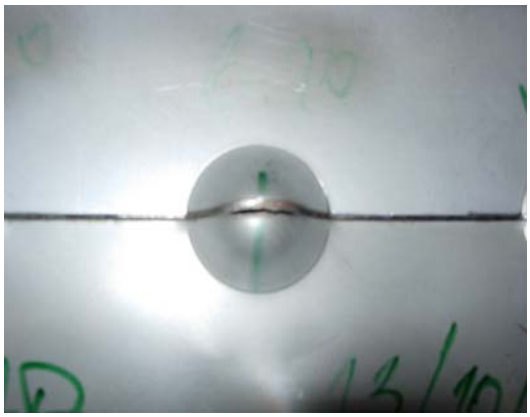


ค. 8.65 มิลลิเมตร

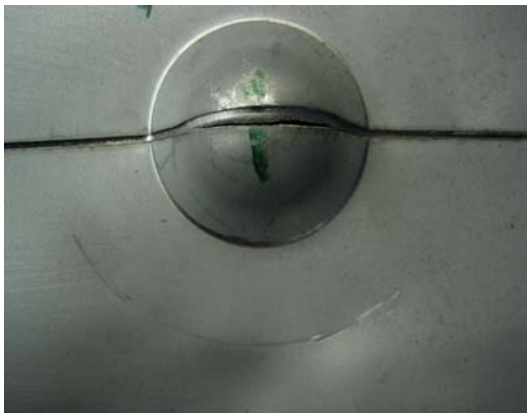


ง. 8.60 มิลลิเมตร

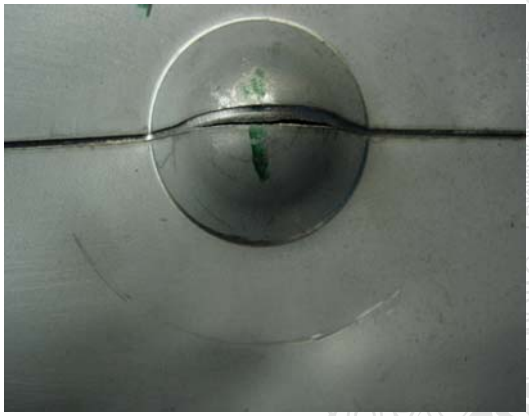
รูปที่ ก.26 ค่าการยืดตัวของชิ้นงานทดลองที่ความเร็ว 6000 มิลลิเมตรต่อนาที ระยะห่างชิ้นงานเชื่อม 0.13 มิลลิเมตรตำแหน่งหัวเชื่อม + 0.50 มิลลิเมตร (ลูกศรชี้แสดงรอยแตกร้าว)



ก. 8.40 มิลลิเมตร



ข. 8.35 มิลลิเมตร



ค. 8.35 มิลลิเมตร

ง. 8.45 มิลลิเมตร

รูปที่ ก.27 ค่าการยืดตัวของชิ้นงานทดลองที่ความเร็ว 6000 มิลลิเมตรต่อนาที ระยะห่างชิ้นงานเชื่อม 0.13 มิลลิเมตรตำแหน่งหัวเชื่อม + 0.55 มิลลิเมตร

ภาคผนวก ข
ตารางบันทึกค่าการยืดตัวลงในโปรแกรมมินิเทป (Minitab)

ตารางที่ ข. 1 การบันทึกผลค่าการทดสอบการยืดตัวของรอยต่อชนลงบนโปรแกรมมินิเทป

Std Order	Run Order	Pt type	Block	Speed	T.P.	Gap	Deep
1	1	1	1	4000	0.45	0.00	9.98
2	2	1	1	4000	0.45	0.07	9.85
3	3	1	1	4000	0.45	0.13	9.50
4	4	1	1	4000	0.50	0.00	9.90
5	5	1	1	4000	0.50	0.07	9.55
6	6	1	1	4000	0.50	0.13	9.25
7	7	1	1	4000	0.55	0.00	9.80
8	8	1	1	4000	0.55	0.07	9.50
9	9	1	1	4000	0.55	0.13	9.00
10	10	1	1	5000	0.45	0.00	9.45
11	11	1	1	5000	0.45	0.07	9.45
12	12	1	1	5000	0.45	0.13	8.55
13	13	1	1	5000	0.50	0.00	9.40
14	14	1	1	5000	0.50	0.07	9.00
15	15	1	1	5000	0.50	0.13	8.70
16	16	1	1	5000	0.55	0.00	9.20
17	17	1	1	5000	0.55	0.07	8.80
18	18	1	1	5000	0.55	0.13	8.45
19	19	1	1	6000	0.45	0.00	9.30
20	20	1	1	6000	0.45	0.07	8.90
21	21	1	1	6000	0.45	0.13	8.50
22	22	1	1	6000	0.50	0.00	9.00
23	23	1	1	6000	0.50	0.07	8.85
24	24	1	1	6000	0.50	0.13	8.55
25	25	1	1	6000	0.55	0.00	8.90

ตารางที่ ข. 1 การบันทึกผลค่าการทดสอบการยืดตัวของรอยต่อชนลงบนโปรแกรมมินิเทป (ต่อ)

Std Order	Run Order	Pt type	Block	Speed	T.P.	Gap	Deep
26	26	1	1	6000	0.55	0.07	8.60
27	27	1	1	6000	0.55	0.13	8.40
28	28	1	2	4000	0.45	0.00	9.95
29	29	1	2	4000	0.45	0.07	9.80
30	30	1	2	4000	0.45	0.13	9.50
31	31	1	2	4000	0.50	0.00	9.95
32	32	1	2	4000	0.50	0.07	9.50
33	33	1	2	4000	0.50	0.13	9.25
34	34	1	2	4000	0.55	0.00	9.80
35	35	1	2	4000	0.55	0.07	9.50
36	36	1	2	4000	0.55	0.13	9.00
37	37	1	2	5000	0.45	0.00	9.50
38	38	1	2	5000	0.45	0.07	9.40
39	39	1	2	5000	0.45	0.13	8.55
40	40	1	2	5000	0.50	0.00	9.40
41	41	1	2	5000	0.50	0.07	8.95
42	42	1	2	5000	0.50	0.13	8.70
43	43	1	2	5000	0.55	0.00	9.25
44	44	1	2	5000	0.55	0.07	8.90
45	45	1	2	5000	0.55	0.13	8.45
46	46	1	2	6000	0.45	0.00	9.30
47	47	1	2	6000	0.45	0.07	8.85
48	48	1	2	6000	0.45	0.13	8.45
49	49	1	2	6000	0.50	0.00	9.00
50	50	1	2	6000	0.50	0.07	8.85

ตารางที่ ข. 1 การบันทึกผลค่าการทดสอบการยึดตัวของรอยต่อชนลงบนโปรแกรมมินิเทป (ต่อ)

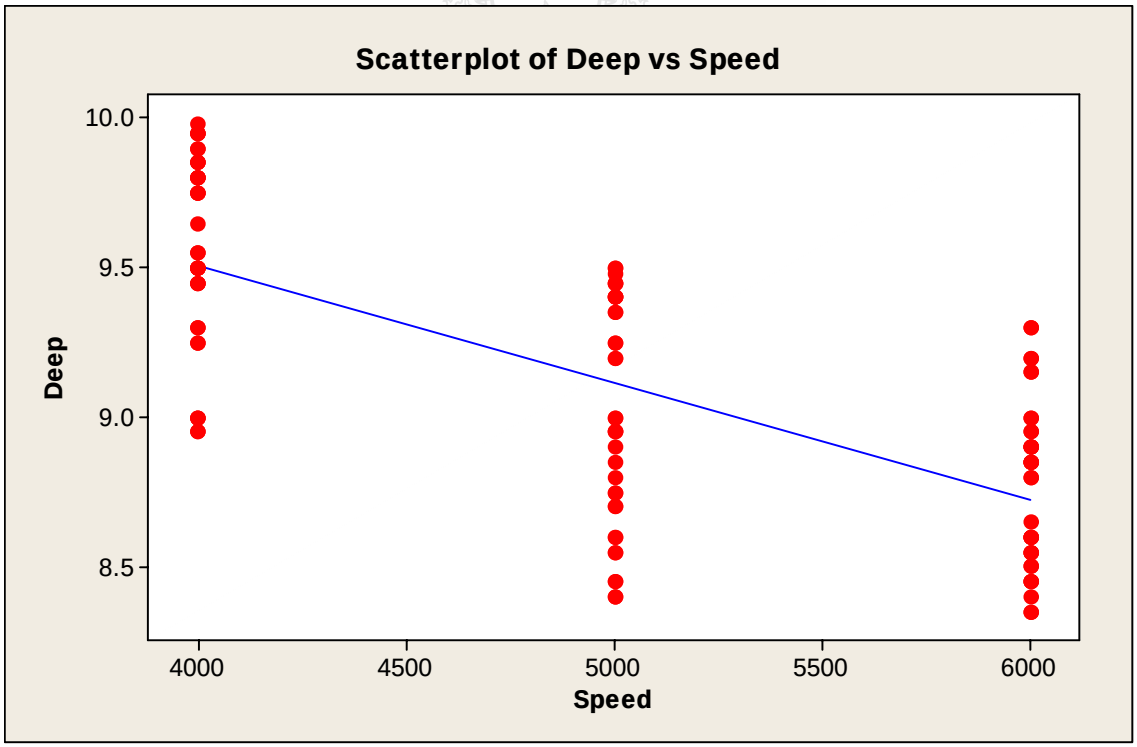
Std Order	Run Order	Pt type	Block	Speed	T.P.	Gap	Deep
51	51	1	2	6000	0.50	0.13	8.60
52	52	1	2	6000	0.55	0.00	8.90
53	53	1	2	6000	0.55	0.07	8.60
54	54	1	2	6000	0.55	0.13	8.35
55	55	1	3	6000	0.45	0.00	9.85
56	56	1	3	4000	0.45	0.07	9.75
57	57	1	3	4000	0.45	0.13	9.45
58	58	1	3	4000	0.50	0.00	9.90
59	59	1	3	4000	0.50	0.07	9.55
60	60	1	3	4000	0.50	0.13	9.30
61	61	1	3	4000	0.55	0.00	9.75
62	62	1	3	4000	0.55	0.07	9.00
63	63	1	3	4000	0.55	0.13	8.95
64	64	1	3	5000	0.45	0.00	9.50
65	65	1	3	5000	0.45	0.07	9.40
66	66	1	3	5000	0.45	0.13	8.60
67	67	1	3	5000	0.50	0.00	9.35
68	68	1	3	5000	0.50	0.07	8.95
69	69	1	3	5000	0.50	0.13	8.75
70	70	1	3	5000	0.55	0.00	9.20
71	71	1	3	5000	0.55	0.07	8.85
72	72	1	3	5000	0.55	0.13	8.40
73	73	1	3	6000	0.45	0.00	9.20
74	74	1	3	6000	0.45	0.07	8.85
75	75	1	3	6000	0.45	0.13	8.50

ตารางที่ ข. 1 การบันทึกผลค่าการทดสอบการยืดตัวของรอยต่อชนลงบนโปรแกรมมินิเทป (ต่อ)

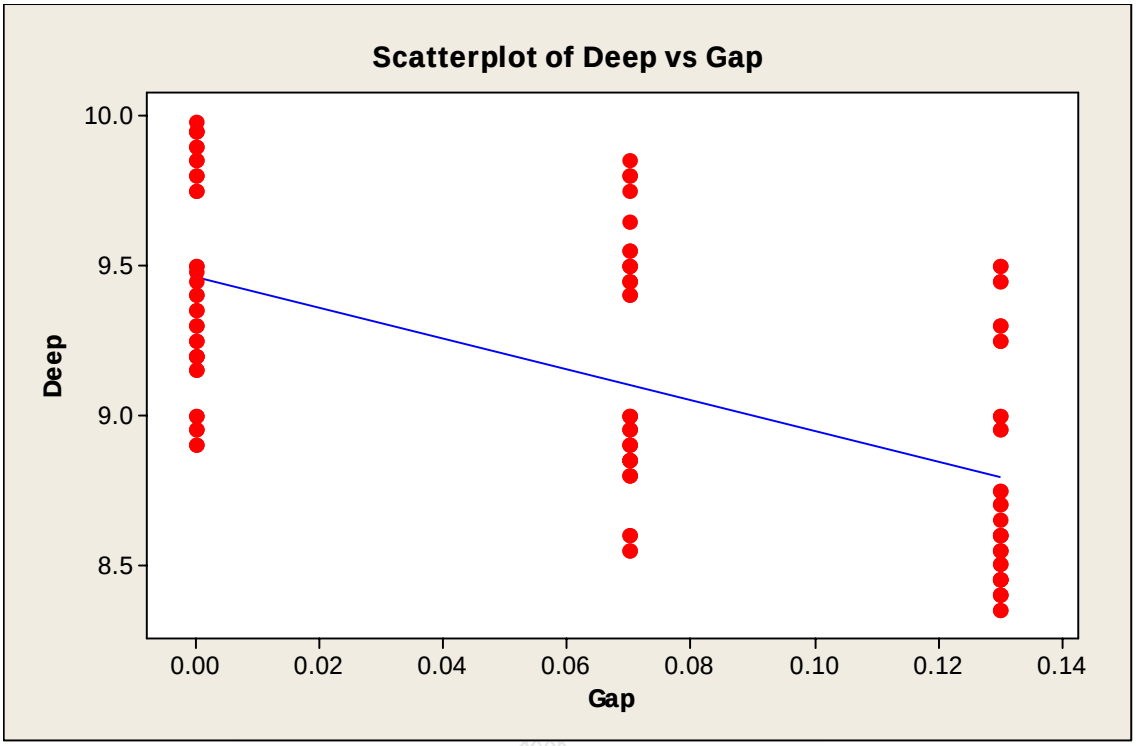
Std Order	Run Order	Pt type	Block	Speed	T.P.	Gap	Deep
76	76	1	3	6000	0.50	0.00	9.15
77	77	1	3	6000	0.50	0.07	8.80
78	78	1	3	6000	0.50	0.13	8.65
79	79	1	3	6000	0.55	0.00	8.95
80	80	1	3	6000	0.55	0.07	8.55
81	81	1	3	6000	0.55	0.13	8.35
82	82	1	4	4000	0.45	0.00	9.95
83	83	1	4	4000	0.45	0.07	9.80
84	84	1	4	4000	0.45	0.13	9.45
85	85	1	4	4000	0.50	0.00	9.85
86	86	1	4	4000	0.50	0.07	9.65
87	87	1	4	4000	0.50	0.13	9.30
88	88	1	4	4000	0.55	0.00	9.75
89	89	1	4	4000	0.55	0.07	9.45
90	90	1	4	4000	0.55	0.13	8.95
91	91	1	4	5000	0.45	0.00	9.48
92	92	1	4	5000	0.45	0.07	9.45
93	93	1	4	5000	0.45	0.13	8.60
94	94	1	4	5000	0.50	0.00	9.35
95	95	1	4	5000	0.50	0.07	9.00
96	96	1	4	5000	0.50	0.13	8.75
97	97	1	4	5000	0.55	0.00	9.25
98	98	1	4	5000	0.55	0.07	8.95
99	99	1	4	5000	0.55	0.13	8.40
100	100	1	4	6000	0.45	0.00	9.20

ตารางที่ ข. 1 การบันทึกผลค่าการทดสอบการยึดตัวของรอยต่อชนลงบนโปรแกรมมินิเทป (ต่อ)

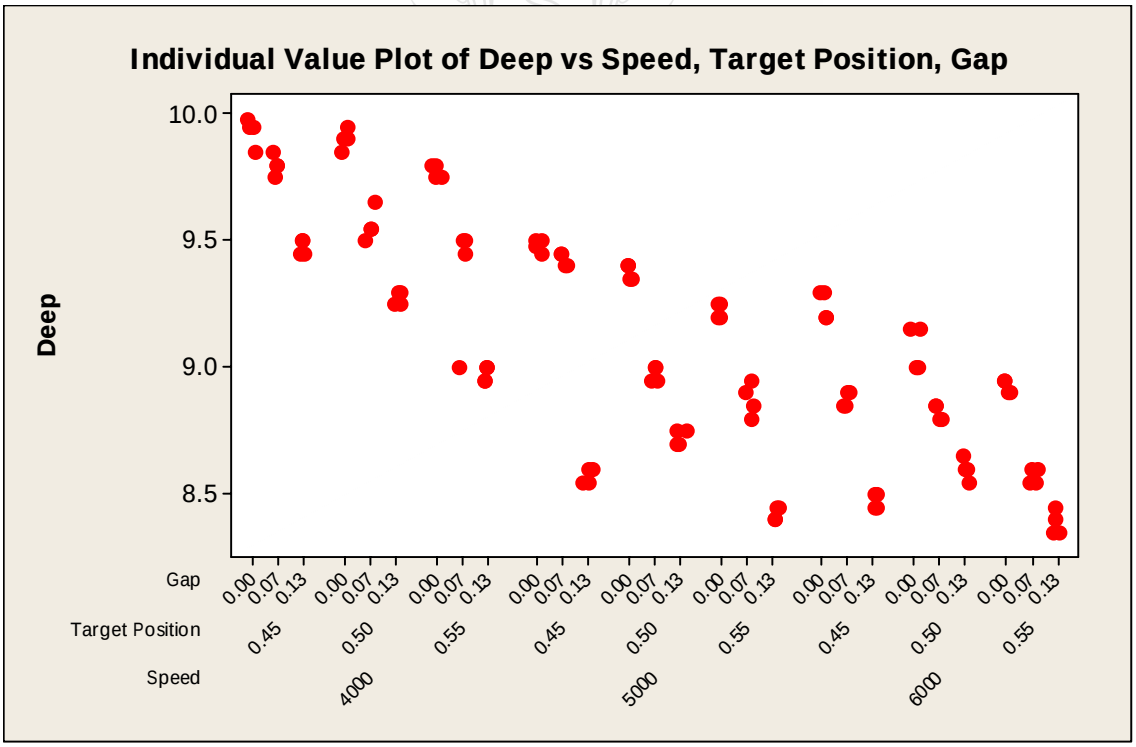
Std Order	Run Order	Pt type	Block	Speed	T.P.	Gap	Deep
101	101	1	4	6000	0.45	0.07	8.90
102	102	1	4	6000	0.45	0.13	8.45
103	103	1	4	6000	0.50	0.00	9.15
104	104	1	4	6000	0.50	0.07	8.80
105	105	1	4	6000	0.50	0.13	8.60
106	106	1	4	6000	0.55	0.00	8.95
107	107	1	4	6000	0.55	0.07	8.55
108	108	1	4	6000	0.55	0.13	8.45



รูปที่ ข.2 การประมวลผล ความเร็วการเชื่อม กับค่าการยืดตัวจากโปรแกรม Minitab



รูปที่ ข.3 การประมวลผล ระยะห่างแผ่นงาน กับค่าการยืดตัวจาก จากโปรแกรม Minitab



รูปที่ ข.4 การประมวลผล ค่าการยืดตัว กับระยะห่าง ตำแหน่งหัวเชื่อม และ ความเร็วการเชื่อมจากโปรแกรม Minitab

ภาคผนวก ค
ผลงานตีพิมพ์