บทที่ 3
การดำเนินงานการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการวิจัยเพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรการเชื่อมเลเซอร์เทเลอร์แบล็งค์ต่อการยืดตัวของรอยต่อชนแผ่นเหล็กเคลือบสังกะสีเกรด SGACD 45/45 โดยมีการดำเนินงานการวิจัยตามลำดับขั้นตอน ดังนี้

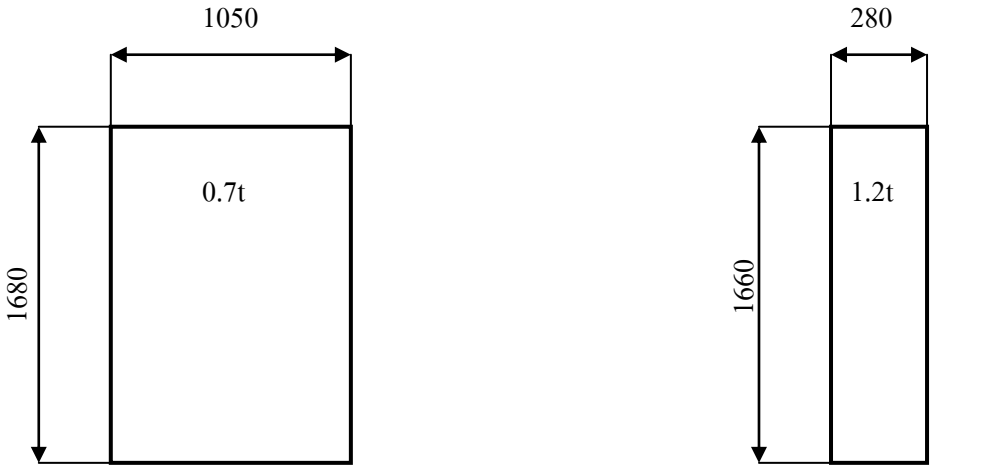
3.1 ลำดับขั้นตอนวิธีการวิจัย

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

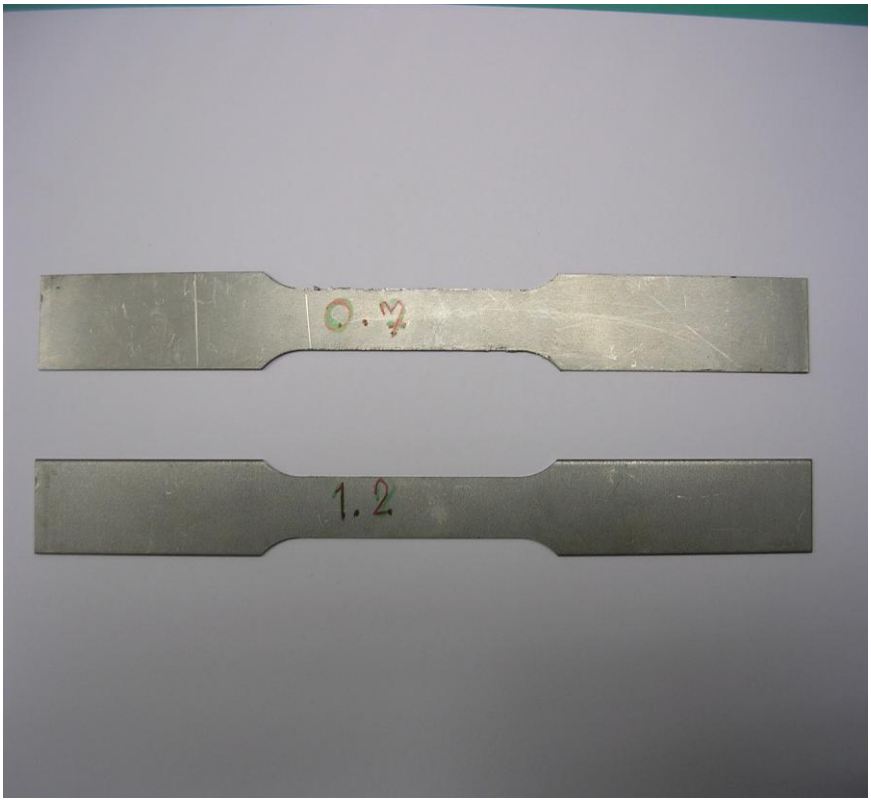
รูปที่ 3.1 ขนาดชิ้นงานตัด (หน่วย : มิลลิเมตร)

ตารางที่ 3.2 ตารางส่วนผสมทางเคมี เป็นข้อมูลมาจากใบรับรองสินค้าของผู้ขายเหล็ก

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

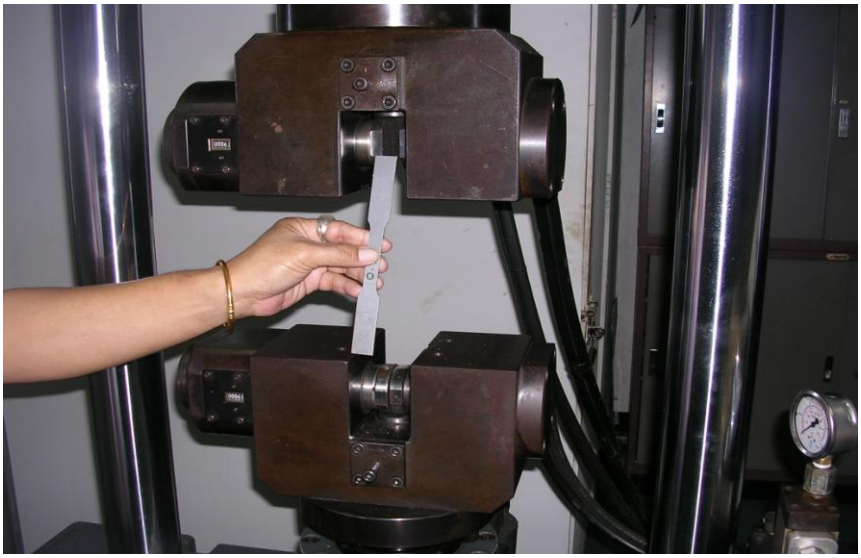
3.1.2 สมบัติความแข็งแรงดึง

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

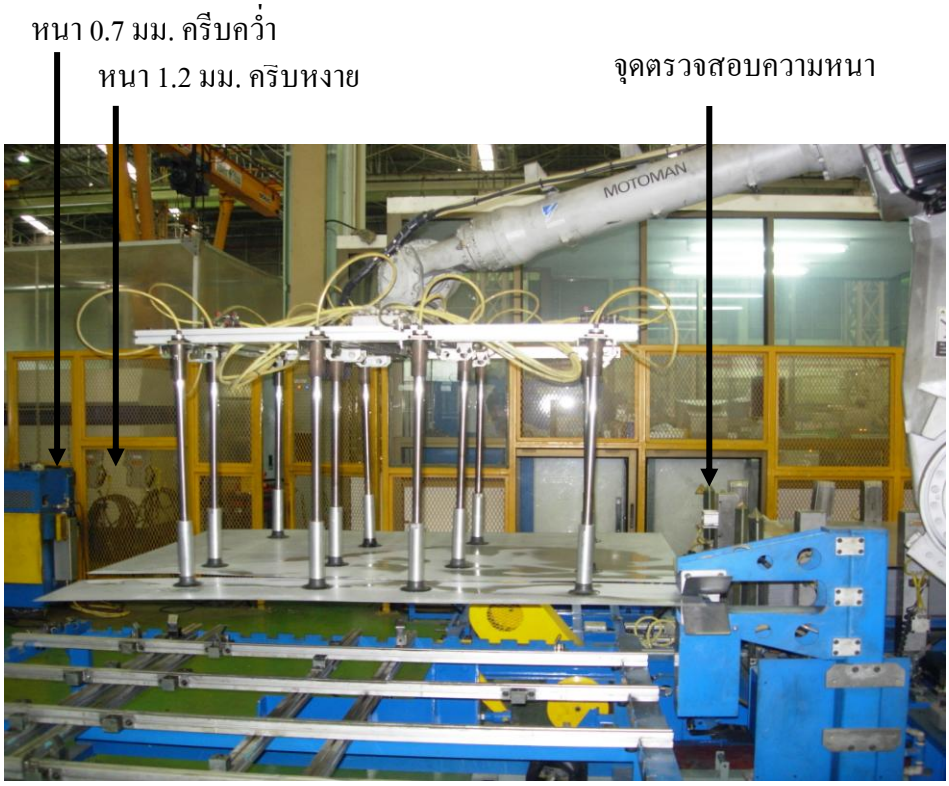
- นำชิ้นงานไปวางไว้ที่โต๊ะวางชิ้นงานที่ตรวจสอบความหนาแล้วดังแสดงในรูปที่ 3.10

-โรบอตนำชิ้นงานจากโต๊ะที่ตรวจสอบความหนาแล้ว เข้าวางที่โต๊ะเชื่อม หรือจิ๊กต่อชนดังแสดงในรูปที่ 3.11

รูปที่ 3.6 โต๊ะสำหรับวางชิ้นงานก่อนวัดความหนา

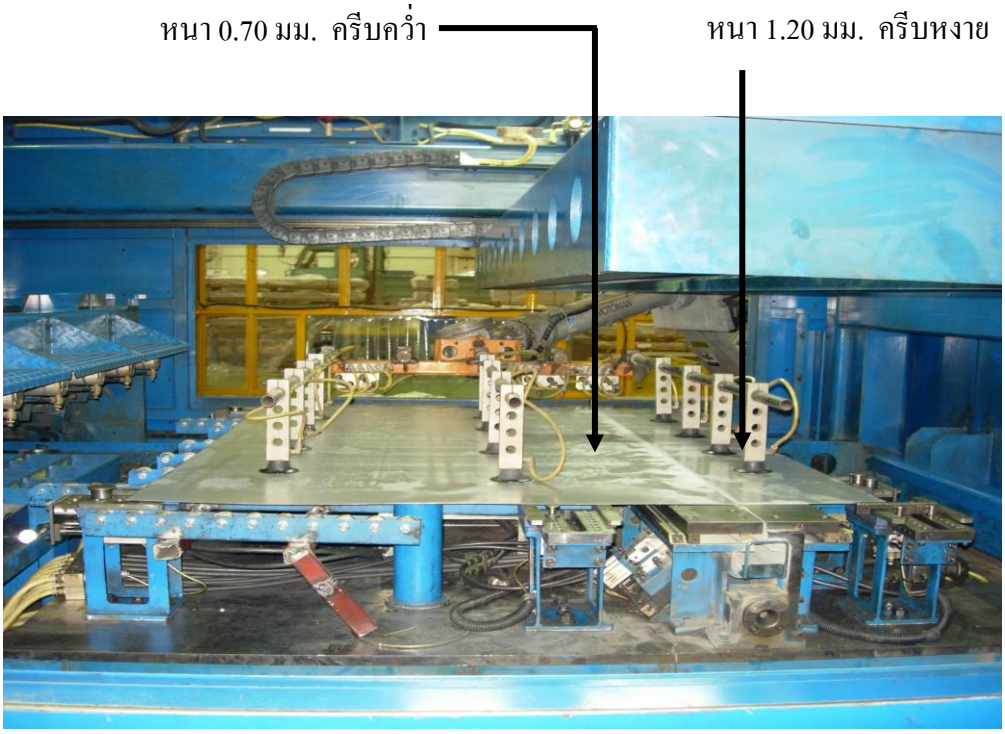
รูปที่ 3.7 กดปุ่มสวิทช์ สตาร์ท

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

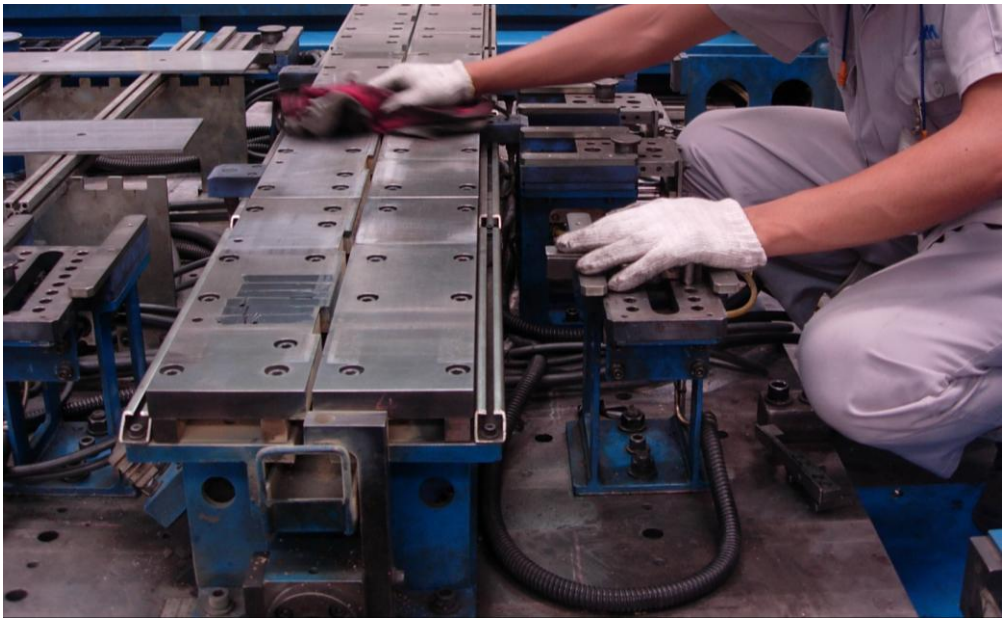
-ตรวจตำแหน่งตัวดันให้อยู่ในตำแหน่งการดันชิ้นงาน ตามความกว้างของชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 3.15

- ทำความสะอาดโฟกัสเลนซ์ และกระจกเลนซ์นำร่องการเชื่อม ดังแสดงในรูปที่ 3.16

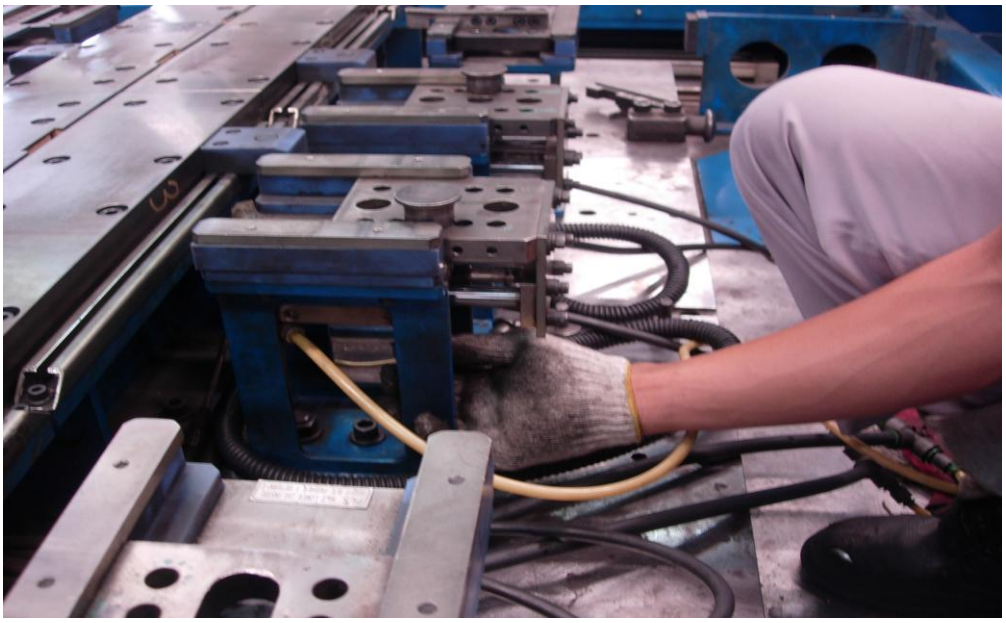
-ตรวจสอบพลังงานเลเซอร์ในการเชื่อมให้มีค่า 3000 วัตต์ เพิ่มหรือลดลงไม่เกิน 10 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในรูปที่ 3.17

- ตรวจสอบแรงดันลมต้องไม่ต่ำกว่า 7 บาร์ ดังแสดงในรูปที่ 3.18

รูปที่ 3.12 ทำความสะอาดขอบชิ้นงาน

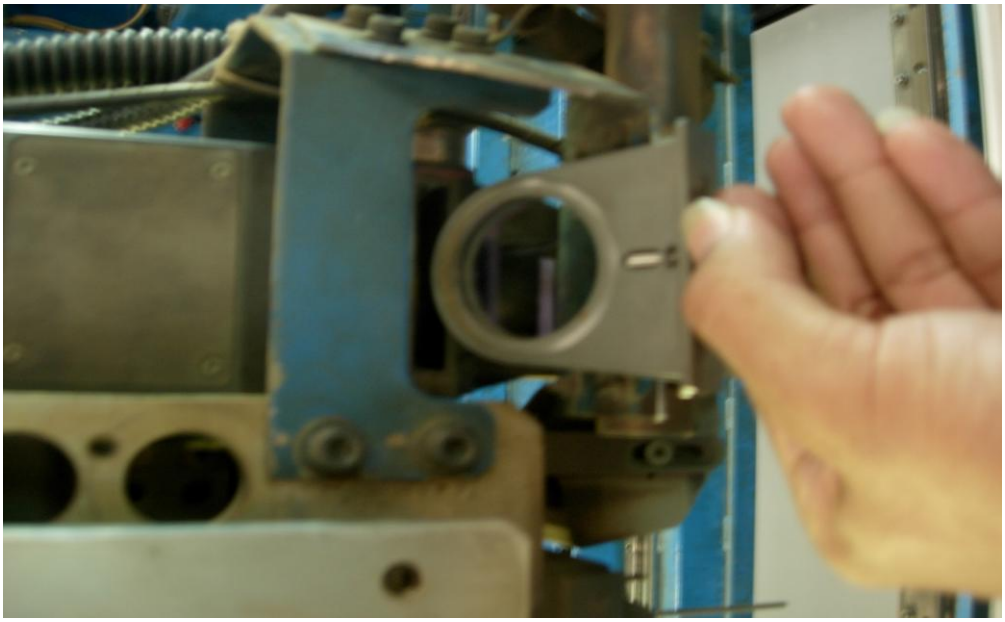


รูปที่ 3.13 ทำความสะอาดจิ๊กเชื่อม



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

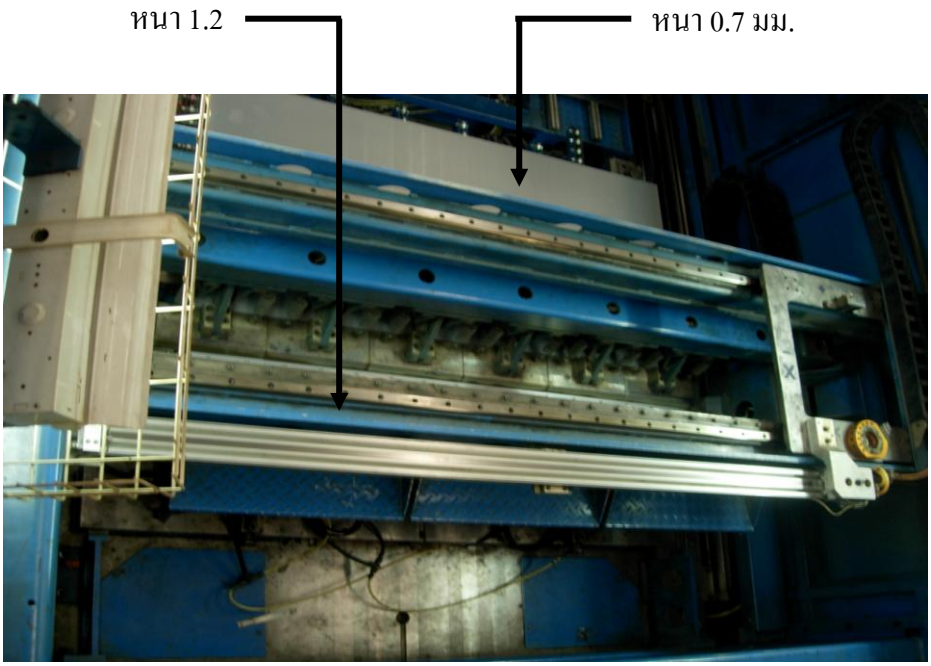
- เลือกตำแหน่งการควบคุมการปรับตั้งการต่อชนที่ความหนา 0.70 มิลลิเมตร

- กดปุ่มตัวดันด้านขวา และซ้ายเพื่อดันชิ้นงานด้านข้างเข้าหาตำแหน่งการเชื่อม

- กดปุ่มควบคุมตัวเหยียบด้านสูง และปุ่มควบคุมตัวเหยียบด้านต่ำเพื่อให้ปลายตัวเหยียบประคองปลายเหล็ก

- กดปุ่มตัวดันด้านหลังเพื่อดันชิ้นงานด้านหลังให้แนวต่อชนทั้ง 2 ความหนาแนบชิดกัน

- กดปุ่มควบคุมตัวเหยียบด้านสูงเพื่อให้ตัวเหยียบเหยียบชิ้นงานไม่ให้เคลื่อน ตัวออกซึ่งเป็นขั้นตอนการสิ้นสุดการจับยึดชิ้นงานก่อนการเชื่อม



รูปที่ 3.19 การต่อชนในอุปกรณ์การจับยึด

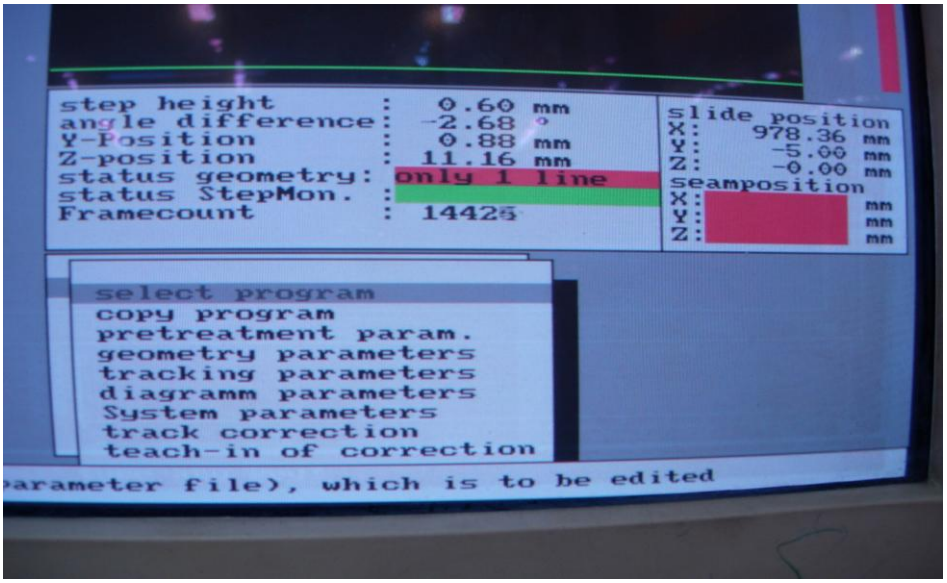
3.1.5 หลักการปรับค่าความเร็วการเชื่อม

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

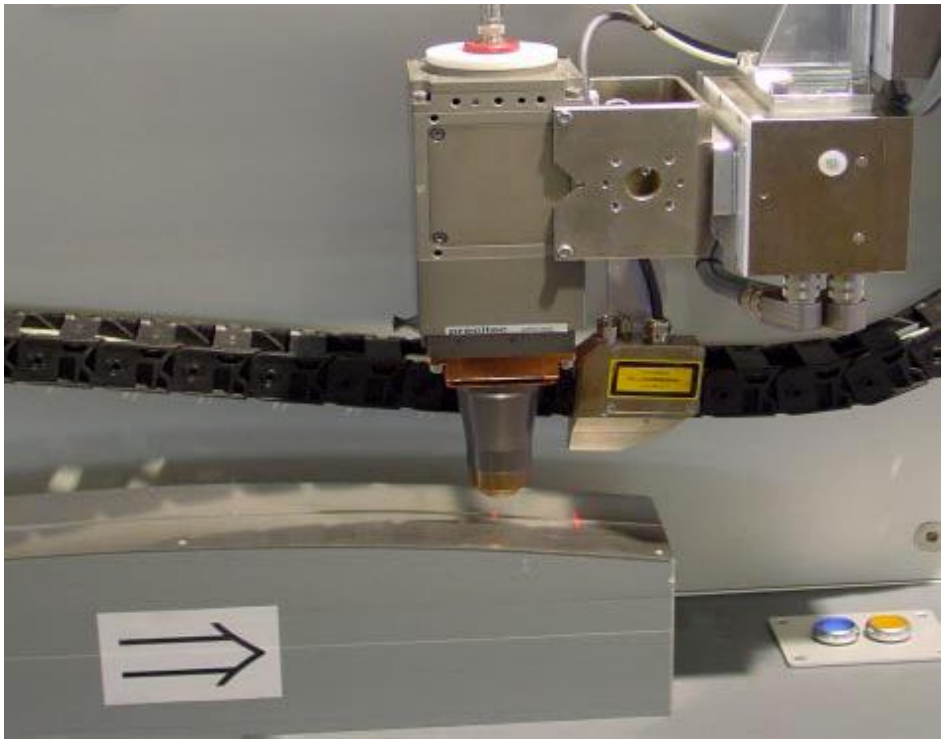
3.1.7 การเคลื่อนที่การเชื่อม

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

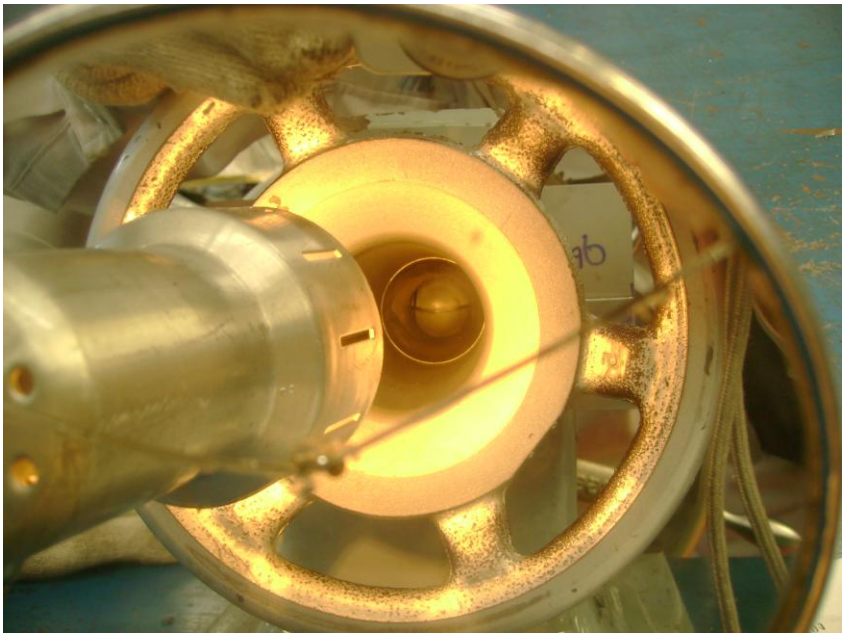
นำแผ่นเหล็กชุบสังกะสีเกรด SGACD 45/45 ที่เชื่อมเสร็จแล้ว ตัดตามการออกแบบการตัดขนาดกว้าง 100 มิลลิเมตร ขนาดยาว 200 มิลลิเมตร จำนวนทั้งหมด 108 แผ่นตามมาตรฐานของอีริทเซนคัปปิ้งเทส ดังแสดงในรูปที่ 3.25

รูปที่ 3.24 ชิ้นงานที่ตัดเสร็จเตรียมไปทดสอบ

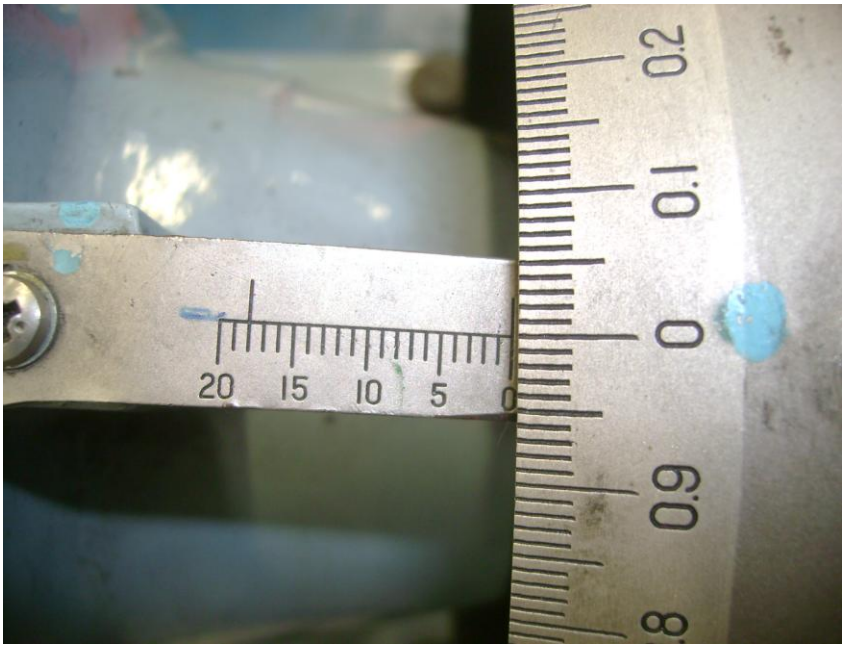
รูป 3.25 เครื่องตัดชิ้นงานการทดสอบ

3.2.5 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบการยืดตัว

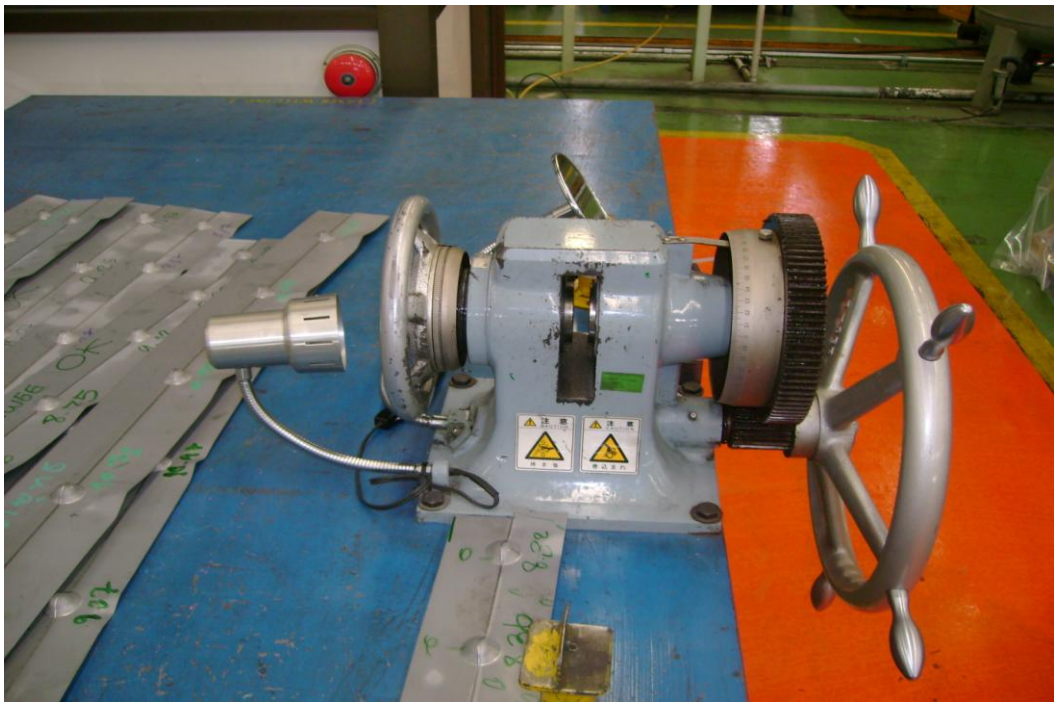
ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการเชื่อมเลเซอร์เทเลอร์แบล็งค์ นั้นต้องผ่านการทดสอบคุณสมบัติทางกลการยืดตัวของแนวเชื่อมจากการทดสอบด้วย Erichsen Test Machine ตามมาตรฐาน JISB7729 และ JIS-Z-2247 [2] แสดงดังรูป 3.26-3.28



รูปที่ 3.26 กระจกส่องแนวเชื่อมเครื่องทดสอบการยืดตัว



รูปที่ 3.27 สเกลวัดค่าการยืดเครื่องทดสอบการยืดตัว



รูปที่ 3.28 เครื่องทดสอบการยืดตัวอิริเซน

วิธีการทดลองค่าการยืดตัวที่ เครื่องอิริเซนคัปปิ้งเทส ดังแสดงในรูปที่ 3.29

(ก) นำชิ้นงานสอดเข้าไปให้ตำแหน่งรอยเชื่อมที่ต้องการทดสอบอยู่กึ่งกลางของหัวบอล Test

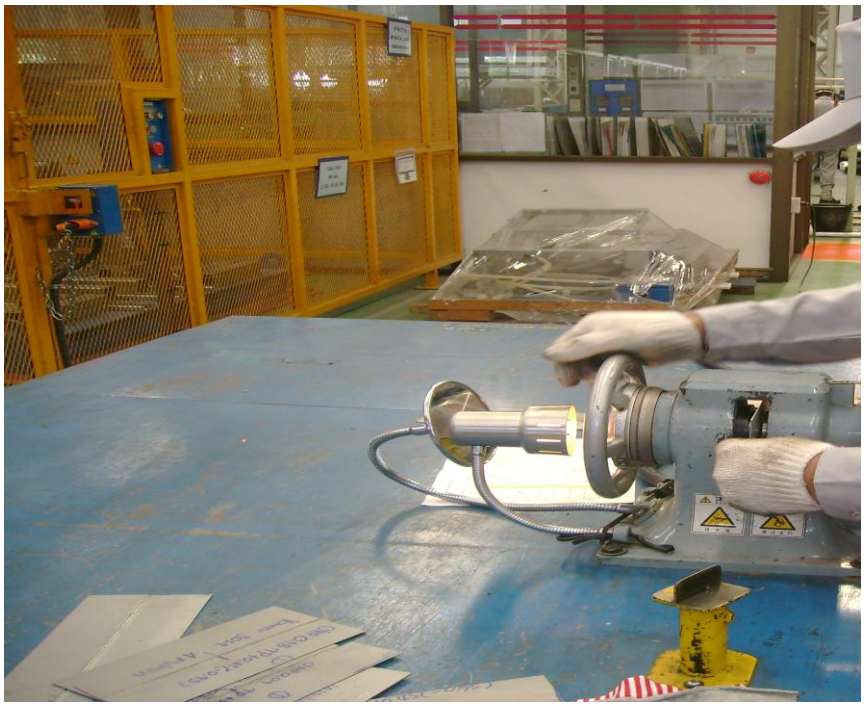
(ข) ทำการหมุนแกนบังคับให้หัวบอลสัมผัสกับตำแหน่งรอยเชื่อมที่ต้องการทดสอบ

(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]