



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)

ปริญญา

วิศวกรรมเครื่องกล

วิศวกรรมเครื่องกล

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การขึ้นรูปแม่พิมพ์แบบกลวงด้านในโดยวิธีการขึ้นรูปทีละชั้น

Hollow-Shape Molds by Layer Manufacturing Process

نامผู้วิจัย นายณัฐพร บุญเลิศเจริญศักดิ์

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(อาจารย์คุณยุต เอี่ยมสอาด, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(อาจารย์ชัยยากร จันทร์สุวรรณ, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(รองศาสตราจารย์ชวลิต กิตติชัยการ, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา วีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

สืบสีตจ้ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ณัฐพร บุญเลิศเจริญศักดิ์ 2553: การขึ้นรูปแม่พิมพ์แบบกลวงด้านใน โดยวิธีการขึ้นรูปทีละชั้น ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล) สาขาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: อาจารย์คุณยุต เอี่ยมสะอาด, Ph.D. 134 หน้า

การขึ้นรูปแม่พิมพ์แบบกลวงด้านในโดยวิธีการขึ้นรูปทีละชั้น เป็นกระบวนการที่รวม 2 กระบวนการเข้าด้วยกันคือ (ก) กระบวนการขึ้นรูปทีละชั้น โดยการเชื่อมพอกด้วยเครื่องเชื่อม MIG/MAG และ (ข) กระบวนการกัดด้วยเครื่อง CNC Milling Machine เพื่อปาดผิวงานให้เรียบ กระบวนการนี้สามารถลดต้นทุนเนื่องจากปริมาณเนื้อวัสดุที่ใช้จะลดลง และแม่พิมพ์ที่ได้จากกระบวนการนี้ยังมีน้ำหนักเบาเนื่องจากแม่พิมพ์จะมีลักษณะกลวงด้านใน ดังนั้นจึงเหมาะกับแม่พิมพ์ที่มีขนาดใหญ่ซึ่งจะทำให้การติดตั้งแม่พิมพ์บนเครื่องอัดและการตั้งศูนย์ทำได้ง่ายขึ้น นอกจากนี้สามารถลดระยะเวลาในการผลิตแม่พิมพ์ลงได้เนื่องจากปริมาณเนื้อวัสดุที่ต้องทำการกัดออกมีปริมาณที่น้อยกว่าการทำแม่พิมพ์โดยทั่วไป ในการทดสอบคุณสมบัติของเนื้อแม่พิมพ์ที่เดิมขึ้น โดยทำการทดสอบความแข็งแบบร็อกเวลล์ (Rockwell Hardness Test) ซึ่งได้ผลการทดสอบความแข็งแรงใกล้เคียงกับวัสดุที่ใช้เป็นแผ่นพื้น ทั้งนี้ความแข็งขึ้นอยู่กับชนิดของลวดเชื่อมและแผ่นพื้นที่เลือกใช้ จากการตรวจสอบโครงสร้างของเนื้อโลหะ ด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscopy (SEM) และ การตรวจสอบด้วยรังสี (Radiographic Examination) พบว่าวัสดุที่เดิมขึ้นมีการหลอมละลายสมบูรณ์ไม่เกิดรูพรุนและรอยร้าว การใช้ Finite Element Method (FEM) มาวิเคราะห์ความแข็งแรงของชิ้นงานกลวงที่สร้างขึ้น สรุปได้ว่าชิ้นงานกลวงมีความแข็งแรงอยู่ในเกณฑ์ดี

ลายมือชื่อนิติศ

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Nattaporn Boonlertcharoensak 2010: Hollow-Shape Molds by Layer Manufacturing Process. Master of Engineering (Mechanical Engineering), Major Field: Mechanical Engineering, Department of Mechanical Engineering.

Thesis Advisor: Mr. Kunayut Eiamsa-ard, Ph.D. 134 pages.

Hollow-Shape molds by Layer Manufacturing Process is a hybrid process that combines (a) Material Deposition Process using MIG/MAG welding machine to form the shape layer by layer and (b) Material Removal Process using CNC Milling Machine to enhance the surface finish. This process can greatly reduce the cost and time to manufacture because the amount of material required to form the molds is reduced. Molds are only formed in near-net shape and finished by the milling process after that. Thus, “zero” excess material has to be removed. Molds made by this hybrid process have much lighter weight compared to molds made by the conventional milling process because we introduce the hollow-shape inside the molds. The benefit of hollow-shape is absolutely appropriate for medium to large mold size; or even gigantic molds. The procedures to set up the mold are much easier because of the weight. Several tests have been done with the molds made by this process. Rockwell Hardness Test prove that the strength of the filled material is not significantly different from the substrate. This, however, depends upon the substrate and wire selected for the process. The Scanning Electron Microscopy (SEM) and Radiographic Examination are done in order to verify that the solid is fully dense and there are no cracks and pores. The stress and deformation analyses are conducted in Finite Element Method (FEM) Software. The results show that molds made by this process are in good range in terms of stress and deformation.

/ /

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยกราบขอบพระคุณ อาจารย์ ดร. คุณยุต เอี่ยมสอาด ประธานกรรมการที่ปรึกษาที่ได้ช่วยเหลือให้คำปรึกษาแนะนำแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ตลอดจนวางแผนงานงานวิจัยในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ และขอขอบคุณ อาจารย์ ดร. ชัยยากร จันทรสุวรรณ กรรมการวิชาเอก ตลอดจนผู้แทนบัณฑิตวิทยาลัย ที่กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำและช่วยเหลือในการทำวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบคุณ บริษัท เอ็มโปเรียม เซอร์วิส จำกัด ที่เอื้อเฟื้ออุปกรณ์และสถานที่ในการทำวิจัยในครั้งนี้

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา คณาจารย์ เพื่อนๆ และผู้ที่ให้การสนับสนุนทุกท่านที่ได้เมตตาอบรม สั่งสอน ให้กำลังใจ กำลังทรัพย์ และช่วยเหลือสนับสนุนการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ณัฐพร บุญเลิศเจริญศักดิ์

มกราคม 2553

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(4)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	46
อุปกรณ์	46
วิธีการ	47
ผลและวิจารณ์	69
สรุปและข้อเสนอแนะ	86
สรุป	86
ข้อเสนอแนะ	87
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	88
ภาคผนวก	90
ภาคผนวก ก หน้าที่ ชนิด และสมบัติของก๊าซคลอัม	91
ภาคผนวก ข คุณสมบัติของธาตุต่าง ๆ เมื่อผสมลงไปในเหล็ก	107
ภาคผนวก ค การทดสอบความแข็ง (Hardness test)	113
ภาคผนวก ง การคำนวณหาเวลาและต้นทุนในการผลิต	129
ประกการศึกษาและการทำงาน	134

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	การเชื่อมอาร์คโลหะก๊าซคลุมคาร์บอนไดออกไซด์ใช้ลวดเชื่อมไมโครไวร์เชื่อมด้วยมือเชื่อมทีวเดียว (Single Pass) รอยเชื่อมจากแนวราบ (Flat Fillet Weld)	32
2	อุณหภูมิและเปอร์เซ็นต์ของคาร์บอนไดออกไซด์	37
3	ก๊าซปกคลุมในการเชื่อมมิกและการนำไปใช้งาน	38
4	อัตราการไหลของก๊าซคลุมและระยะห่างของหัวฉีดที่เหมาะสม	40
5	การเปรียบเทียบกระแสเชื่อม, แรงเคลื่อนและการนำไปใช้งานของการส่งถ่ายน้ำโลหะแบบต่าง ๆ	42
6	แสดงค่าเปรียบเทียบความหนาแน่นของกระแสสำหรับลวดเชื่อมขนาด 0.9 และ 1.2 มิลลิเมตร	44
7	แสดงความกว้างและความสูงของรอยเชื่อมที่ได้จะการปรับค่าความเร็ว	70
8	ค่าผลการวิเคราะห์ห้ด้วย FEM	79
9	การเปรียบเทียบระยะเวลาในการผลิตแม่พิมพ์ส่วนตัวผู้ ระหว่างกระบวนการกัดแต่งผิว และ การขึ้นรูปทีละชั้น	84
10	การเปรียบเทียบต้นทุนในการผลิตแม่พิมพ์ส่วนตัวผู้ ระหว่างกระบวนการกัดแต่งผิว และ การขึ้นรูปทีละชั้น	85

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
ก1	แสดงสมบัติทั่วไปของก๊าซคลุมตามมาตรฐาน DIN 32 526	95
ก2	แสดงความบริสุทธิ์ (Purities) และจุดกลายเป็นของเหลว (Dew Point) ของก๊าซคลุม	96
ก3	แสดงข้อดี – ข้อเสีย ของการใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นก๊าซคลุม	100
ค1	ค่าอัตราส่วน P/D^2 ของโลหะแต่ละชนิด	115
ค2	การวัดความแข็งแบบ Rockwell สเกลต่างๆ	118
	(1) การวัดความแข็งแบบ Rockwell สเกลต่างๆ	119
	(2) การวัดความแข็งแบบ Rockwell สเกลต่างๆ	120
ค3	ค่า Correction factors สำหรับการวัดความแข็งชิ้นงานทรงกระบอก ด้วยลูกบอล 16/1 นิ้ว (1.588 มม.) (Rockwell สเกล B, F และ G)	122
ค4	ค่า Correction factors สำหรับการวัดความแข็งชิ้นงานทรงกระบอก ด้วยหัวกดเพชร (Rockwell สเกล C, D และ A)	123
ค5	เปรียบเทียบค่าความแข็งตามวิธีต่างๆ	124
	(1) เปรียบเทียบค่าความแข็งตามวิธีต่างๆ	125
	(2) เปรียบเทียบค่าความแข็งตามวิธีต่างๆ	126
	(3) เปรียบเทียบค่าความแข็งตามวิธีต่างๆ	127
	(4) เปรียบเทียบค่าความแข็งตามวิธีต่างๆ	128

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	เครื่อง Stereo Lithography Apparatus (SLA)	4
2	Laser-Engineered Net Shaping (LENS)	5
3	การขึ้นรูปชิ้นงาน โดยใช้ Laser-Engineered Net Shaping (LENS)	6
4	ขั้นตอนในการขึ้นรูปวัสดุ	7
5	แม่พิมพ์ Cavity Plate ที่ได้จาก 3-D Welding and Milling	8
6	3-D Welding and Milling Machine	8
7	HLM Machine	9
8	(a) ชิ้นงานที่ได้จากการเติมเนื้อวัสดุ (b) ชิ้นงานหลังผ่านกระบวนการกัดแต่งผิว	9
9	แม่พิมพ์ Cavity Plate ที่ได้จากกระบวนการเติมเนื้อวัสดุ	10
10	(a) ชิ้นงานระหว่างการเติมเนื้อวัสดุ (b) ชิ้นงานระหว่างกระบวนการกัดแต่งผิว (c) ชิ้นงานหลังผ่านกระบวนการกัดแต่งผิว	10
11	เครื่อง 3D Micro Welding	11
12	(a) ชิ้นงานใน 3D Computer Graphic (b) ชิ้นงานที่ได้จากการขึ้นรูป	11
13	แสดงพื้นที่หน้าตัดของรอยเชื่อมบนชิ้นงานเพลท	13
14	แสดงการหลอมละลายและการเกิดบ่อหลอมละลายของงานเชื่อมโลหะ	14
15	แสดงรอยแตกบริเวณกระแทกร้อนแนวเชื่อมในงานเหล็กกล้าความแข็งแรง	15
16	แสดงขั้นตอนการแข็งตัวและการเกิดผลึกกิ่งไม้ของแนวเชื่อม	16
17	แสดงหน้าตัด โครงสร้างมหภาคงานเชื่อมหลายแนว	18

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
18	แสดงการเชื่อมหลายแนวที่มีผลกระทบต่อความแข็งแรงของแนวเชื่อม และบริเวณใกล้เคียง	19
19	แสดงอุปกรณ์เชื่อมมิก (MIG)	20
20	การเชื่อมมิก (MIG)	21
21	แสดงลักษณะของคลื่นกระแสไฟตรงที่ได้จากเครื่องเรียงกระแส	22
22	เส้นโค้งแรงดันและกระแสของเครื่องเชื่อมชนิดแรงดันคงที่ กระแสตรง	23
23	ชุดป้องกันลวดเครื่องเชื่อม MIG/ MAG	24
24	ชุดป้องกันลวดด้วยวิธีคั่นลวดพร้อมที่ใส่ม้วนลวด	25
25	ชนิดชุดป้องกันลวดแบบคั้งลวด	26
26	ระบบการป้องกันลวดแบบคั่น-คั้ง ใช้กับการเชื่อมที่มีระยะห่างจากชุดป้องกัน ลวดมากๆ	26
27	(ก) การเชื่อมกึ่งอัตโนมัติ	27
	(ข) การเชื่อมอัตโนมัติ	27
28	ส่วนประกอบของสายเชื่อมและสายน้ำทั้งชนิดระบายความร้อนด้วย อากาศและน้ำ	28
29	อัตราการเติมเนื้อโลหะของลวดเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอน แบ่งตาม ขนาด ลวดเชื่อมและใช้ก๊าซคลุมเป็นคาร์บอนไดออกไซด์	31
30	เปรียบเทียบการใช้ลวดขนาดต่างกัน	33
31	ลักษณะของกระบวนการเชื่อมอาร์คโลหะก๊าซคลุม	34
32	ประเภทกระบวนการเชื่อมอาร์คโลหะก๊าซคลุมเรียกชื่อ ตามชนิดของก๊าซ	35
33	อุปกรณ์ควบคุมความดันละมาตรการวัดการไหล	39
34	การถ่ายโอนโลหะทั้ง 4 แบบ	41

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
35	กราฟแสดงการถ่ายทำน้ำโลหะแบบหยด (Globular Transfer)	42
36	ผลกระทบจากอัตราเร็วเคลื่อนที่หัวเชื่อมต่อการเกิดตะเข็บเชื่อมและลักษณะตะเข็บเชื่อมภายใต้เงื่อนไข กระแสเชื่อม 175 แอมแปร์ แรงดันอาร์ค 12 โวลต์ ขนาดลวดเชื่อม 0.9 mm ก๊าซคลุมคาร์บอนไดออกไซด์ และระยะ โผล่ลวด 9.5 mm	45
37	ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย	47
38	ส่วนประกอบของชุดจับยึดหัวเชื่อมที่ติดตั้งลงบนเครื่องกัดสามแกน	48
39	หมายเลขจุดบนชิ้นงานที่ทำการทดสอบค่าความแข็ง	51
40	แสดงชิ้นงานก่อนวัดค่าความแข็ง	51
41	เส้น โค้งความเค้น-ความเครียด (Stress-Strain Curve) แบบมีจุดคราก (Yield Point)	54
42	เส้น โค้งความเค้น-ความเครียดแบบที่ไม่มีจุดคราก	56
43	เปรียบเทียบเส้น โค้งความเค้น-ความเครียดของวัสดุเปราะและวัสดุพลาสติก	57
44	แสดงขนาดและรูปร่างของชิ้นทดสอบตามมาตรฐาน ASTM E8-04	59
45	แสดงชิ้นทดสอบที่ทำการขึ้นรูป	59
46	แสดงเครื่องทดสอบแรงดึง (Universal Testing Machine)	60
47	ขั้นตอนการขึ้นรูปแม่พิมพ์แบบกลวงด้านในโดยวิธีการขึ้นรูปที่ละชั้น	61
48	แสดงรูปแม่พิมพ์ที่เขียนด้วยโปรแกรม UNIGRAPHICS	62
49	แสดงรูปแม่พิมพ์แบบกลวงด้านในที่ทำการปรับความหนาของผนังด้วยโปรแกรม COSMOS	63
50	แสดงการกำหนดค่าแรงดันที่กระทำบนแม่พิมพ์แบบกลวงด้านในที่ผนังส่วนตัวผู้	64
51	แสดงการกำหนดค่าแรงบิดแม่พิมพ์ที่กระทำบนแผ่นรองแม่พิมพ์	64

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
52	แสดงรูปแม่พิมพ์แบบกลวงด้านในที่ทำกรแบ่งเป็นชั้น	65
53	แสดง Deposition Path ชั้นที่ 31 สำหรับงานเชื่อมชั้นรูปแม่พิมพ์แบบ กลวงด้านใน	65
54	ตัวอย่าง NC – CODE สำหรับส่งไปยังเครื่อง CNC	66
55	ชิ้นงานตัวอย่างที่ได้การเติมเนื้อวัสดุด้วยเครื่องเชื่อม	67
56	ชิ้นงานตัวอย่างจากการเติมเนื้อวัสดุด้วยเครื่องเชื่อมหลังจากผ่าน กระบวนการกัดแต่งผิว	67
57	แสดงการวัดระยะความกว้างและความสูงของรอยแนวเชื่อม	70
58	ก รอยแนวเชื่อมที่ใช้ความเร็วในการเดินหัวเชื่อม 300 มม./นาที	70
	ข รอยแนวเชื่อมที่ใช้ความเร็วในการเดินหัวเชื่อม 400 มม./นาที	70
	ค รอยแนวเชื่อมที่ใช้ความเร็วในการเดินหัวเชื่อม 500 มม./นาที	71
59	ก รอยแนวเชื่อมจำนวน 5 แนวที่ระยะห่างระหว่างรอยแนวเชื่อม 0 มม.	71
	ข รอยแนวเชื่อมจำนวน 5 แนวที่ระยะห่างระหว่างรอยแนวเชื่อม 1 มม.	72
	ค รอยแนวเชื่อมจำนวน 5 แนวที่ระยะห่างระหว่างรอยแนวเชื่อม 2 มม.	72
	ง รอยแนวเชื่อมจำนวน 5 แนวที่ระยะห่างระหว่างรอยแนวเชื่อม 3 มม.	72
	จ รอยแนวเชื่อมจำนวน 5 แนวที่ระยะห่างระหว่างรอยแนวเชื่อม 3.5 มม.	72
	ฉ รอยแนวเชื่อมจำนวน 5 แนวที่ระยะห่างระหว่างรอยแนวเชื่อม 4 มม.	72
	ช รอยแนวเชื่อมจำนวน 5 แนวที่ระยะห่างระหว่างรอยแนวเชื่อม 5 มม.	73
60	เส้นทางเดินแบบผสม	74
61	โครงสร้างของเหล็กที่เชื่อมขึ้น	75
62	ภาพถ่ายฟิล์มที่นำชิ้นงานไปฉายรังสี	76
63	แสดงชิ้นงานหลังการทดสอบแรงดึง	76
64	กราฟและค่าแรงดึงชิ้นงานที่ 1 จากเครื่องทดสอบแรงดึง	77

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
65	กราฟและค่าแรงดึงขึ้นงานที่ 2 จากเครื่องทดสอบแรงดึง	77
66	กราฟและค่าแรงดึงขึ้นงานที่ 3 จากเครื่องทดสอบแรงดึง	78
67	แสดงขนาดความหนาของผนังแม่พิมพ์	79
68	แสดงค่า Von Mises Stress ในแม่พิมพ์	79
69	แสดงค่า Displacement ในแม่พิมพ์	80
70	แสดงค่าความปลอดภัยตั้งแต่ค่าน้อยสุดถึงค่ามากที่สุดของแม่พิมพ์	80
71	แสดงขั้นตอนโดยสังเขปในการขึ้นรูปแม่พิมพ์แบบกลวงค้ำใน	81
72	แสดงแม่พิมพ์ และ เครื่องฉีดที่ใช้ในการทดสอบ	83
73	ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากแม่พิมพ์	83
ภาพผนวกที่		หน้า
ก1	แผนภูมิแสดงการเชื่อมโดยใช้ก๊าซคลุม ตาม DIN 1910 Part 4	106
ค1	การทดสอบแบบ Brinell	114
ค2	ลักษณะการทดสอบแบบ Brinell ที่ไม่ถูกต้อง	115
ค3	ลักษณะรอยกดจากหัวเพชรของ Vickers Hardness Test	117
ง1	แสดงการจำลองงานกัดแม่พิมพ์ส่วนตัวผู้ช่วยฟังก์ชัน CAM ของโปรแกรม UGS	131
ง2	แสดงเส้นทางเดินของงานกัดแบบละเอียด	131

การขึ้นรูปแม่พิมพ์แบบกลวงด้านในโดยวิธีการขึ้นรูปทีละชั้น

Hollow-Shape Molds by Layer Manufacturing Process

คำนำ

การผลิตทางอุตสาหกรรมในปัจจุบันมีความต้องการชิ้นงานโลหะต้นแบบ และ แม่พิมพ์ (Metallic Prototypes and Tools) (Rosochowski, 2000) เพื่อใช้ในการผลิตสูงชิ้น อีกทั้งการสร้างแม่พิมพ์โดยส่วนใหญ่จะใช้เวลาก่อนข้างนาน และมีราคาสูง ซึ่งเป็นเหตุให้ไม่สามารถตอบสนองความต้องการของอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว (Short Product Life Cycle) ได้ (คุณยศ, 2549) จากปัญหาดังกล่าวทำให้มีนักวิจัยหลายกลุ่มทำการพัฒนากระบวนการใหม่ที่ใช้ในการผลิตชิ้นงานโลหะต้นแบบมากมาย เช่น Laser-Engineered Net Shaping (LENS), Direct Metal Deposition (DMD), Shape Deposition Manufacturing (SDM), 3-D Welding and Milling, Hybrid Adaptive Layer Manufacturing และ กระบวนการขึ้นรูปแม่พิมพ์ด้วยกระบวนการเติมเนื้อวัสดุ วิธีที่กล่าวมาล้วนเป็นกระบวนการ Layer Manufacturing ซึ่งเป็นการสร้างชิ้นงานโลหะต้นแบบโดยการเติมเนื้อโลหะขึ้นทีละชั้นจากชั้นล่างสุดไปยังชั้นบนสุดด้วยกระบวนการเติมเนื้อวัสดุ (Additive) จนได้ชิ้นงานที่มีขนาดใกล้เคียงกับแบบที่สร้างขึ้น แล้วนำชิ้นงานหรือแม่พิมพ์ไปกัดแต่งผิวด้วยหว่ากัด (Subtractive Technique) วิธีเหล่านี้มีข้อดีคือสามารถผลิตชิ้นงานหรือแม่พิมพ์ได้โดยตรงจาก CAD Drawing โดยข้ามขั้นตอนในการผลิตชิ้นงานหรือแม่พิมพ์ได้หลายขั้นตอน ดังนั้นวิธีนี้จะช่วยลดเวลาในการผลิตชิ้นงานลงได้ และวิธีนี้เป็นการเติมเนื้อวัสดุให้มีขนาดใกล้เคียงกับชิ้นงานจริงจึงใช้วัสดุในการผลิตชิ้นงานน้อยกว่าการผลิตชิ้นงานแบบใช้เครื่องกัดซึ่งต้องกัดชิ้นงานจากเหล็กก้อนใหญ่ อีกทั้งหว่ากัดมีการกัดน้อยกว่ากระบวนการกัดชิ้นงานแบบปกติ นอกจากนี้วิธีนี้ยังสามารถที่จะช่วยให้ผู้ประกอบการสามารถผลิตชิ้นงานหรือแม่พิมพ์ที่มีลักษณะที่ซับซ้อนได้มากกว่าการสร้างชิ้นงานหรือแม่พิมพ์ด้วยการกัด ชิ้นงานหรือแม่พิมพ์ที่ได้จากการผลิตด้วยวิธีการเติมเนื้อโลหะนี้จะเป็นชิ้นงานหรือแม่พิมพ์ที่สามารถนำไปใช้ได้ทันที สำหรับกระบวนการที่กล่าวมาข้างต้นส่วนมากใช้หัวเลเซอร์ซึ่งมีความ

เหมาะสมในการสร้างชิ้นงานขนาดเล็ก และงานวิจัยที่ใช้หัวเชื่อมเช่น Hybrid Adaptive Layer Manufacturing และ กระบวนการขึ้นรูปแม่พิมพ์ด้วยการเติมเนื้อวัสดุ มีความเหมาะสมในการสร้างชิ้นงานขนาดใหญ่ เนื่องจากหัวเชื่อมมีอัตราการเติมเนื้อวัสดุที่มากกว่า อย่างไรก็ตาม ชิ้นงานที่ผลิตจากการเชื่อมในบางส่วนเกิดรูฟองอากาศ และ สิ่งสกปรกจากกระบวนการเชื่อม

แนวคิดสำหรับงานวิจัยนี้เน้นไปที่การวิจัยและพัฒนากระบวนการผลิตชิ้นงาน โลหะ ต้นแบบแบบรวดเร็วด้วยการขึ้นรูปแม่พิมพ์แบบกลวงด้านในโดยวิธีการขึ้นรูปทีละชั้น (Hollow-Shape Molds by Layer Manufacturing Process) โดยที่กระบวนการนี้เป็นการพัฒนามาจาก กระบวนการขึ้นรูปแม่พิมพ์ด้วยการเติมเนื้อวัสดุ มีการเพิ่มกระบวนการกัดแต่งผิวหลังจากการเติมเนื้อวัสดุในแต่ละชั้นเพื่อแก้ปัญหาการพองและ ฟองอากาศในชิ้นงานที่มาจากสิ่งสกปรกหลัง การเชื่อมในแต่ละชั้น อีกทั้งกระบวนการนี้สามารถลดต้นทุนการผลิตมากกว่ากระบวนการเติม ในด้านการลดปริมาณเนื้อวัสดุที่ใช้เนื่องจากแม่พิมพ์จากกระบวนการนี้ถูกขึ้นรูปให้มีลักษณะ กลวงด้านใน จึงส่งผลให้แม่พิมพ์ที่ได้มีน้ำหนักเบา ซึ่งจะทำให้การติดตั้งแม่พิมพ์บนเครื่องอัด และการตั้งศูนย์ทำได้ง่ายขึ้น กระบวนการนี้จึงมีความเหมาะสมในการผลิตแม่พิมพ์ที่มีขนาดใหญ่ นอกจากนั้นกระบวนการนี้สามารถลดระยะเวลาในการผลิตแม่พิมพ์ลงได้เนื่องจากปริมาณเนื้อ วัสดุที่ต้องทำการกัดออกมีปริมาณที่น้อยกว่าการทำแม่พิมพ์โดยทั่วไป แม้ว่าในงานวิจัยนี้ได้ทำ การขึ้นงานต้นแบบแม่พิมพ์ขนาดเล็กเนื่องมาจากงบประมาณที่ใช้ในการทำวิจัยมีจำกัดแต่ งานวิจัยนี้สามารถแสดงประสิทธิภาพและข้อได้เปรียบของกระบวนการนี้ดังที่กล่าวไว้ข้างต้นได้

วัตถุประสงค์

1. ศึกษาเทคนิคและวิธีการขึ้นรูปชิ้นงานทีละชั้น โดยการเชื่อมพอกและหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการเชื่อมขึ้นรูปชิ้นงาน
2. สร้างแผ่นแม่พิมพ์ส่วนตัวผู้ (Core Plate) โดยใช้การขึ้นรูปแม่พิมพ์แบบกลวงด้านใน โดยวิธีการขึ้นรูปทีละชั้น
3. วิเคราะห์คุณสมบัติทางวัสดุของชิ้นงานที่ได้จากการขึ้นรูปแม่พิมพ์แบบกลวงด้านใน โดยวิธีการขึ้นรูปทีละชั้น

ขอบเขตการวิจัย

1. สร้างเครื่องต้นแบบสำหรับกระบวนการขึ้นรูปแม่พิมพ์แบบกลวงด้านใน โดยวิธีการขึ้นรูปทีละชั้น
2. ออกแบบแม่พิมพ์ที่มีความกลวงด้านใน และสร้างแผ่นแม่พิมพ์ส่วนตัวผู้โดยใช้การขึ้นรูปแม่พิมพ์แบบกลวงด้านใน โดยวิธีการขึ้นรูปทีละชั้น ด้วยเครื่องเชื่อมแบบ MIG/MAG โดยใช้ลวดเชื่อม ER70S-6
3. วิเคราะห์คุณสมบัติทางวัสดุของชิ้นงานโดยทำการทดสอบความแข็งแบบร็อคเวลล์, การทดสอบแรงดึง, การตรวจสอบด้วยรังสี, การทดสอบกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

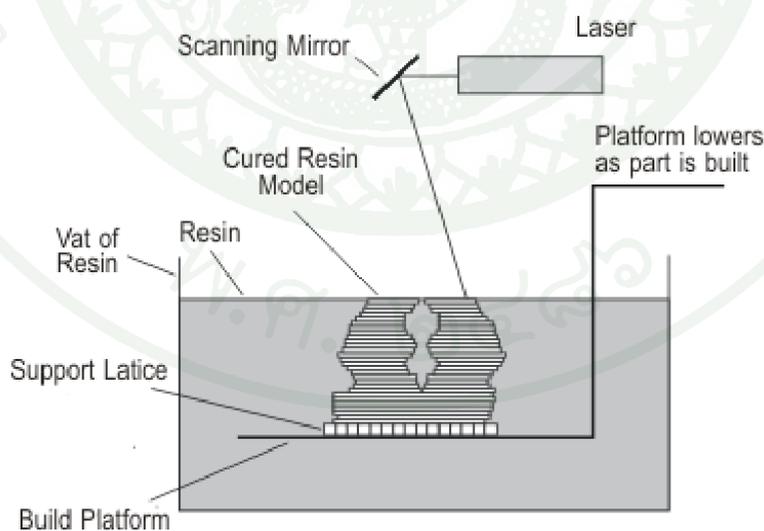
1. ลดต้นทุนที่ใช้ในการสร้างแม่พิมพ์ในภาคอุตสาหกรรม โดยใช้กระบวนการขึ้นรูปแม่พิมพ์แบบกลวงด้านใน โดยวิธีการขึ้นรูปทีละชั้น
2. ช่วยส่งเสริมและสนับสนุนให้ผู้ประกอบการ และบุคลากรในอุตสาหกรรมแม่พิมพ์ผลิตภัณฑ์อย่างสร้างองค์ความรู้เพื่อการใช้ และพัฒนาเทคโนโลยีขั้นสูงเพื่อก่อให้เกิดความสามารถในการแข่งขันในอุตสาหกรรมแม่พิมพ์

การตรวจเอกสาร

1. การผลิตต้นแบบแบบรวดเร็ว

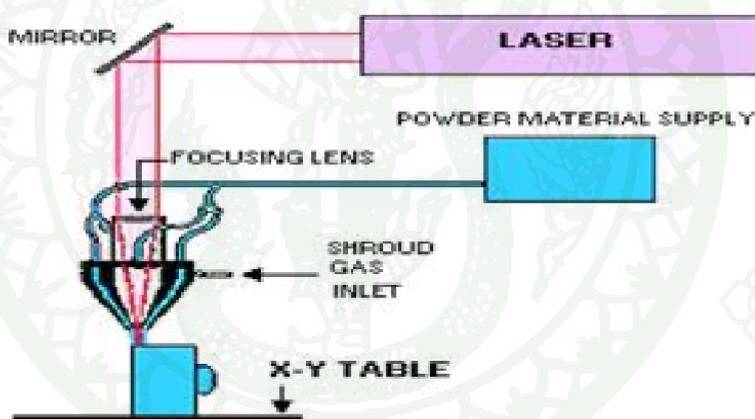
การผลิตต้นแบบแบบรวดเร็ว (Rapid Prototyping) เกิดขึ้นในช่วงปีค.ศ. 1980 โดยหลักการของ Rapid Prototyping คือการสร้างชิ้นงานโดยการจูนรูปชิ้นงานต้นแบบจาก CAD Drawing ชิ้นงานจะถูกสร้างทีละชั้นด้วยการสแกนเลเซอร์เพื่อทำให้เรซินแข็งตัว ชั้นตอนดังกล่าวข้างต้นจะถูกทำซ้ำไปเรื่อยๆจนออกมาเป็นชิ้นงานที่เหมือนกับ CAD Drawing ซึ่งในปัจจุบันได้มีการใช้วิธีต่างๆมากมายและมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในงานอุตสาหกรรม

เทคนิคต่างๆในการสร้างต้นแบบแบบรวดเร็ว (Rapid Prototyping) เริ่มพัฒนาและใช้อย่างแพร่หลายในปี 1986 เนื่องจากความเติบโตทางอุตสาหกรรม (Jacobs, 1992) จึงได้มีการใช้เครื่อง Stereo Lithography Apparatus (SLA) โดยมีหลักการจากการนำข้อมูลของชิ้นงานที่เขียนจาก CAD Drawing และทำการตัด (Slicing) เป็นส่วนๆและทำเป็นไฟล์ข้อมูลสกุล STL และสร้างชิ้นงานด้วยการสแกนเลเซอร์เพื่อทำให้เรซินแข็งตัวทีละชั้นตามข้อมูลจาก CAD Drawing ในการผลิตขนาดใหญ่มีความจำเป็นที่จะต้องใช้แม่พิมพ์ (Mould) (Koch and Mazumder, 1993)

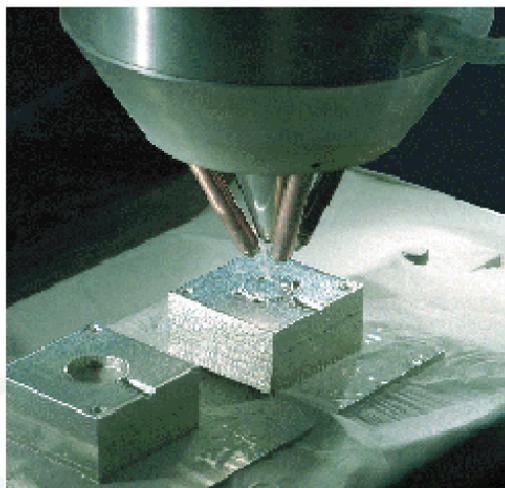


ภาพที่ 1 เครื่อง Stereo Lithography Apparatus (SLA)

เนื่องจากความต้องการในการใช้ชิ้นงานที่เป็นเหล็ก ชิ้นงานที่มีรูปทรงซับซ้อนและความแม่นยำ (Complexity and Accurate) มีเพิ่มขึ้น จึงเป็นที่มาของ Rapid Metal Forming (RMF) และต่อมาได้พัฒนาเป็น Laser-Engineered Net Shaping (LENS) ซึ่งเป็นกระบวนการขึ้นรูปโลหะด้วยเลเซอร์ให้มีขนาดใกล้เคียงกับชิ้นงานที่ออกแบบมากที่สุด (Near-Net-Shape) (Keicher *et al.*, 1998) และในบางวัตถุประสงค์ของการผลิตมีการนำ Laser Cladding Technique มาใช้ ซึ่งวิธีการนี้เริ่มจากการเคลือบผิว (Surface Coating) ของชิ้นงานโลหะเพื่อที่จะสร้างชิ้นงานโลหะโดยกระบวนการเติมเนื้อวัสดุทีละชั้น (Layer Additive) (Kreute *et al.*, 1995) กรรมวิธีที่กล่าวมาโดยส่วนมากจะมีการขึ้นรูปเหล็กที่เหมือนกัน ซึ่งในกระบวนการขึ้นรูปเหล็กด้วยเลเซอร์โดยการป้อนวัสดุที่เป็นเหล็ก ไม่ว่าจะเป็น ผงโลหะ หรือ ลวดโลหะ และใช้เลเซอร์หลอมวัสดุที่นำมาป้อนให้กลายเป็นชั้นของเหลว โดยสร้างจากชั้นล่างสุดไปยังชั้นบนสุดจนออกมาเป็นชิ้นงานต้นแบบ



ภาพที่ 2 Laser-Engineered Net Shaping (LENS)



ภาพที่ 3 การขึ้นรูปชิ้นงานโดยใช้ Laser-Engineered Net Shaping (LENS)

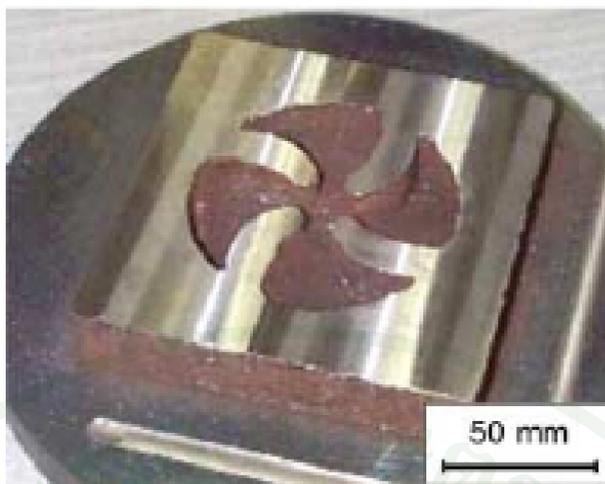
ต่อมาได้มีการใช้วิธี Shape Deposition Manufacturing (SDM) ซึ่งพัฒนามาจากกระบวนการที่กล่าวมา มีหลักการเหมือนกันคือขึ้นรูปโลหะจากผง หรือ ลวด แต่เนื่องจากในกระบวนการขึ้นรูปโลหะที่กล่าวมาทั้งหมดมีข้อเสียคือ ผิวที่ได้ยังไม่เรียบและขนาดรูปทรงยังไม่แม่นยำ จึงมีการเพิ่มขบวนการเติมและการตัดออก (Additive and Subtractive Techniques) โดยที่มีการใช้เครื่องกัด CNC กัดชิ้นงานแต่ละชั้นให้ได้ขนาดตามแบบหลังจากกระบวนการเติมเนื้อวัสดุ (Paul *et al.*, 2006)

ในปัจจุบันรูปแบบการผลิตมีการแข่งขันสูงในเรื่องของระยะเวลาในการผลิต กระบวนการใหม่ที่จะใช้ในการสร้างชิ้นงานหรือแม่พิมพ์นี้เป็นกระบวนการสร้างแม่พิมพ์ด้วยการเติมเนื้อโลหะ โดยกระบวนการนี้สามารถที่จะผลิตชิ้นงานหรือแม่พิมพ์ได้โดยตรง จาก CAD Drawing เพื่อลดขั้นตอนในการผลิตแม่พิมพ์ได้หลายขั้นตอนทำให้สามารถลดเวลาในการผลิตแม่พิมพ์ได้ และกระบวนการนี้สามารถสร้างแม่พิมพ์ที่มีรูปร่างซับซ้อนได้มากกว่าการสร้างแม่พิมพ์ด้วยวิธีการกัด ดังนั้นวิธีนี้จึงสามารถสร้างชิ้นงานหรือแม่พิมพ์ที่ใช้งานได้ในทันที โดยได้มีนักวิจัยหลายกลุ่มได้ทำการวิจัยในประเด็นหลักๆคือการหาค่าที่เหมาะสมในการขึ้นรูปชิ้นงานที่มีขนาดใกล้เคียงกับชิ้นงานที่ต้องการ โดยแต่ละงานวิจัยมีหลักการและขั้นตอนสำคัญในการขึ้นรูปวัสดุเหมือนกันดังแสดงในภาพที่ 4

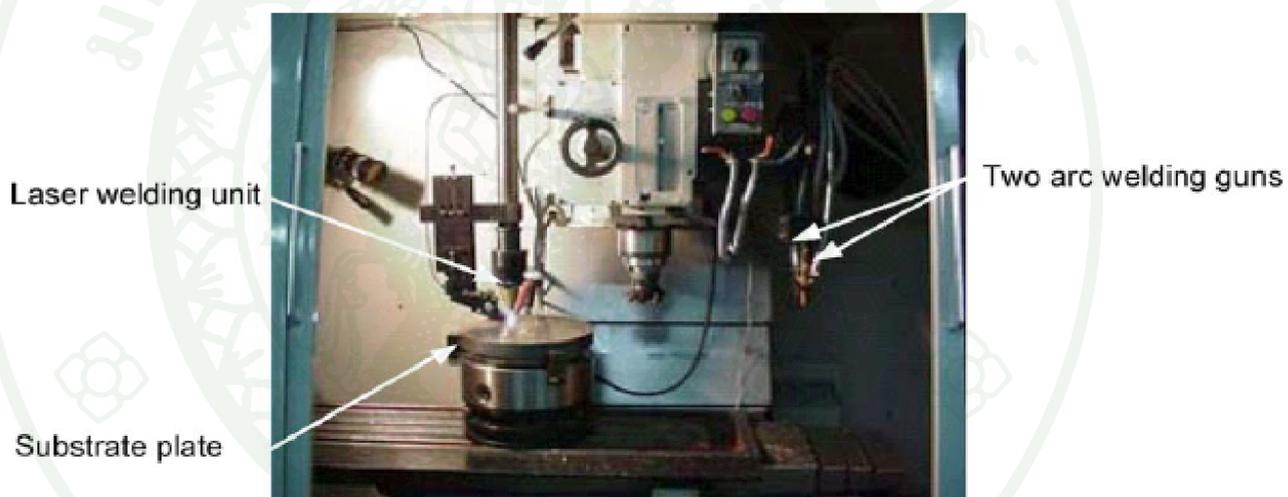


ภาพที่ 4 ขั้นตอนในการขึ้นรูปวัสดุ

จากภาพที่ 4 กระบวนการเริ่มจากการออกแบบชิ้นงานจากโปรแกรมเขียนแบบสามมิติ หลังจากนั้นนำแบบมาสร้างเส้นทางเดินในการเติมเนื้อวัสดุจากไฟล์ CAD ที่สร้างขึ้น แล้วส่งไฟล์ไปยังเครื่อง CNC ที่ติดเครื่องมือสำหรับการขึ้นรูปชิ้นงานโลหะ โดยส่วนมากนิยมใช้มีสองชนิดหลักๆ คือเครื่องเชื่อม และ เลเซอร์ โดยที่การขึ้นรูปด้วยเครื่องเชื่อม และ เลเซอร์มีความแตกต่างในเรื่องความละเอียด ผิวของเนื้องาน ความเร็วในการเติมเนื้อวัสดุ และคุณสมบัติทางวัสดุของชิ้นงาน ซึ่งการใช้เลเซอร์ ชิ้นงานที่ได้จะมีความละเอียด ผิว และ คุณสมบัติที่ดี ในการเติมเนื้อวัสดุสามารถใช้ได้ทั้งลวดโลหะ และผงโลหะ แต่การเติมเนื้อวัสดุด้วยเลเซอร์จะใช้ต้นทุนที่สูงมาก ในส่วนของเครื่องเชื่อมจะใช้ต้นทุนที่ไม่สูงนักที่นิยมใช้มีอยู่สองชนิด คือ การเชื่อมแบบ Gas Tungsten Arc Welding (GTAW) และการเชื่อมแบบ Gas Metal Arc Welding (GMAW) ซึ่งการเชื่อมในแบบ GMAW จะเป็นที่นิยมมากกว่าเนื่องจากเครื่องเชื่อมชนิดนี้เป็นระบบอัตโนมัติและใช้ต้นทุนไม่สูงนักในการเติมเนื้อวัสดุ ส่วน GTAW ต้องทำการติดตั้งตัวป้อนลวดเพิ่มเติมเพื่อให้เป็นระบบอัตโนมัติ หลังจากทำการขึ้นรูปชิ้นงานตามทีออกแบบไว้ ชิ้นงานที่ได้จะยังมีผิวที่ไม่เรียบเกิดจากกระบวนการเติมเนื้อวัสดุด้วยเครื่องเชื่อม จึงจำเป็นต้องเพิ่มกระบวนการกัดแต่งผิวชิ้นงานเพื่อให้ได้ชิ้นงานที่เรียบและมีขนาดตามที่ต้องการ (คุณยุศ และ กณะ, 2550; Song *et al.*, 1995; Sreenathbabu and Karunakaran, 2006; Xinhong *et al.*, 2009; Toshihide *et al.*, 2009) ชิ้นงานที่ได้จากกระบวนการขึ้นรูปในแต่ละงานวิจัยแสดงในภาพที่ 5-12

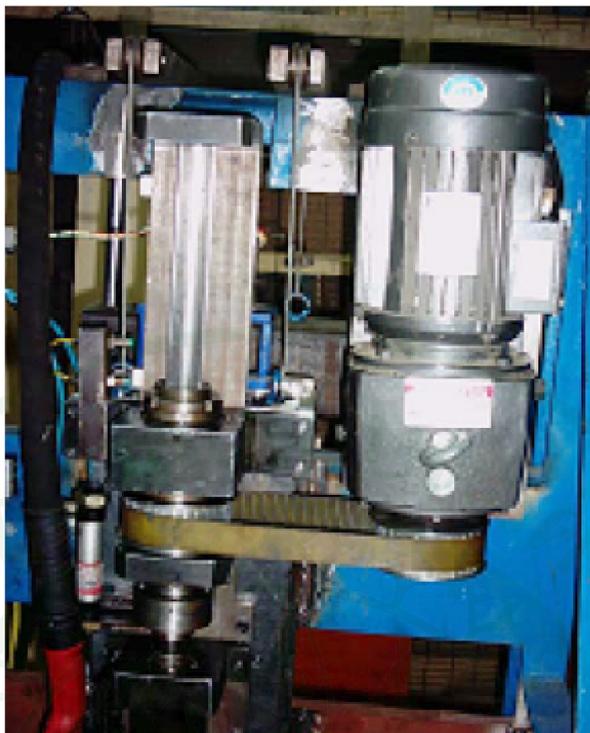


ภาพที่ 5 แม่พิมพ์ Cavity Plate ที่ได้จาก 3-D Welding and Milling (Song *et al.*, 1995)

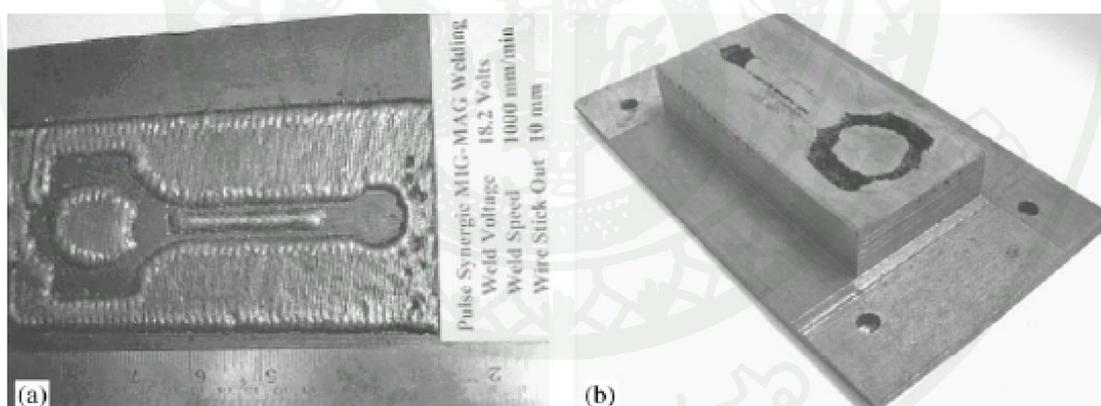


ภาพที่ 6 3-D Welding and Milling Machine (Song *et al.*, 1995)

จากภาพที่ 5 เป็นแม่พิมพ์ส่วน Cavity Plate ที่ทำการขึ้นรูปด้วยกระบวนการเติมเนื้อวัสดุ โดยใช้เครื่องเชื่อมแบบ GMAW ซึ่งนำมาติดกับเครื่องกัดแบบสามแกน และใช้ลวดเชื่อมชนิด ER70S-6 ในการเติมเนื้อวัสดุ



ภาพที่ 7 HLM Machine (Sreenathbabu and Karunakaran, 2006)



ภาพที่ 8 (a) ชิ้นงานที่ได้จากการเติมเนื้อวัสดุ (b) ชิ้นงานหลังจากกระบวนการกัดแต่งผิว

ที่มา: Sreenathbabu and Karunakaran (2006)

จากภาพที่ 8 เป็นชิ้นงานที่ทำการขึ้นรูปด้วยกระบวนการเติมเนื้อวัสดุโดยใช้เครื่องเชื่อมแบบ GMAW ซึ่งนำมาติดกับเครื่องเติมเนื้อวัสดุแบบสามแกนที่สร้างขึ้น และใช้ลวดเชื่อมชนิด ER70S-6 ด้วยอัตราส่วนผสมระหว่างก๊าซคลุม CO_2/Ar เป็น 18/82



ภาพที่ 9 แม่พิมพ์ Cavity Plate ที่ได้จากการเติมเนื้อวัสดุ

ที่มา: คุณยุต และคณะ (2550)

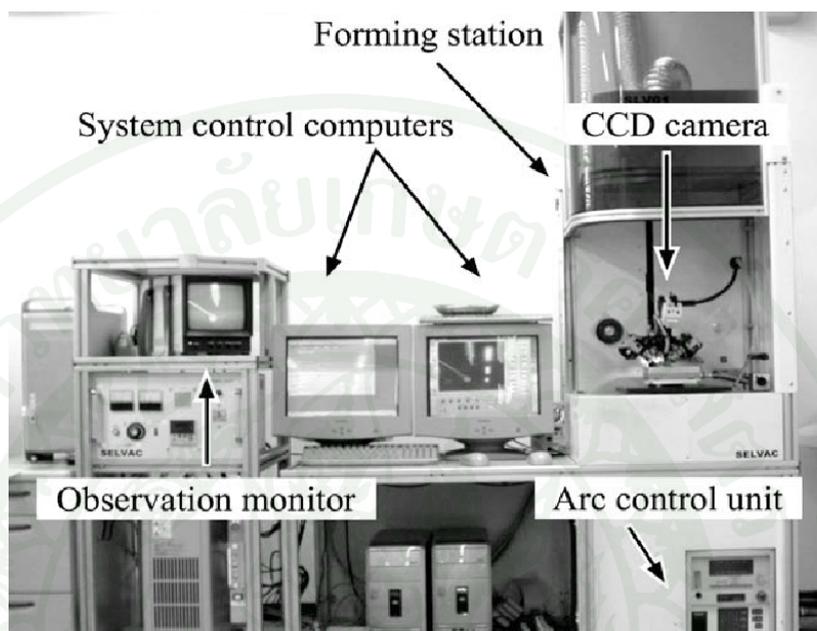
จากภาพที่ 9 เป็นแม่พิมพ์ส่วน Cavity Plate ที่ทำการขึ้นรูปด้วยกระบวนการเติมเนื้อวัสดุ โดยใช้เครื่องเชื่อมแบบ GMAW ซึ่งนำมาติดกับเครื่องกัดแบบสามแกน และใช้ลวดเชื่อมชนิด ER70S-6 ด้วยก๊าซกลุ่ม CO_2



ภาพที่ 10 (a) ชิ้นงานระหว่างการเติมเนื้อวัสดุ (b) ชิ้นงานระหว่างกระบวนการกัดแต่งผิว (c) ชิ้นงานหลังผ่านกระบวนการกัดแต่งผิว

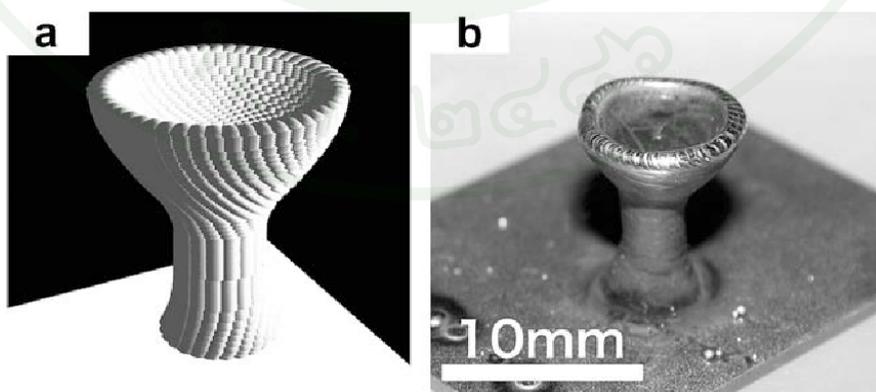
ที่มา: Xinhong *et al.* (2009)

จากภาพที่ 10 เป็นชิ้นงาน ที่ทำการขึ้นรูปด้วยกระบวนการเติมเนื้อวัสดุโดยใช้เครื่องเชื่อมแบบ Plasma ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับ GTAW นำมาติดกับเครื่องกัดแบบสามแกน และใช้ผงโลหะในการเติมเนื้อวัสดุ



ภาพที่ 11 เครื่อง 3D Micro Welding

ที่มา: Toshihide *et al.* (2009)



ภาพที่ 12 (a) ชิ้นงานใน 3D Computer Graphic (b) ชิ้นงานที่ได้จากการขึ้นรูป

ที่มา: Toshihide *et al.* (2009)

จากภาพที่ 12 เป็นชิ้นงาน ที่ทำการขึ้นรูปด้วยกระบวนการเติมเนื้อวัสดุโดยใช้เครื่องเชื่อมแบบ Micro TIG ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับ GTAW แต่ขนาดของหัวเชื่อมและลวดเชื่อมเล็กกว่านำมาติดกับแขนกลที่เคลื่อนที่ได้สามแกนและเพิ่มระบบป้องกันลวดแบบอัตโนมัติ เหมาะสำหรับชิ้นงานขนาดเล็ก

2. ทฤษฎีเกี่ยวข้องกับทางโลหะวิทยางานเชื่อมโลหะ (พัฒน์ชัย, 2546)

2.1 พื้นฐานของงานเชื่อมโลหะ

กระบวนการเชื่อมโลหะเพื่อให้ชิ้นงานยึดติดกัน ส่วนมากต้องอาศัยพลังงานจากความร้อนให้ชิ้นงานมีอุณหภูมิสูงจนถึงจุดหลอมละลาย เช่น การเชื่อม TIG, MIG, SMAW เป็นต้น บางกระบวนการเชื่อมอาจใช้แรงกดอัดเข้าช่วยร่วมกับความร้อน เช่น การเชื่อมจุด (Spot) เป็นต้น พลังงานจากการเชื่อมในรูปของความร้อนสำหรับการอาร์ค จะได้พลังงานความร้อนที่ใส่เข้าไปสู่หัตถ์ดังสมการที่ (1)

$$H_{net} = \frac{P}{V} = \frac{F_1 EI}{V} \quad (1)$$

- เมื่อ H_{net} คือ พลังงานที่ใส่เข้าไป, จูล/มม.
 P คือ กำลังที่ใส่เข้าทั้งหมดของแหล่งความร้อน, วัตต์
 V คือ ความเร็วที่แหล่งความร้อนเคลื่อนที่, มม./วินาที
 E คือ แรงดันไฟฟ้า, โวลต์
 I คือ กระแสเชื่อม, แอมป์
 F_1 คือ ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน

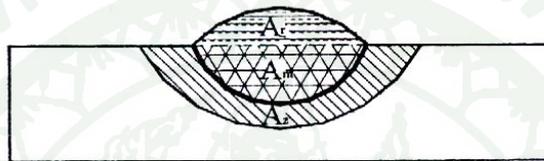
เราสามารถหาประสิทธิภาพของการหลอมละลาย (F_2) สามารถหาจากสมการที่ (2)

$$F_2 = \frac{QA}{H_{net}} = \frac{QA_w V}{F_1 P} = \frac{QA_w V}{F_1 EI} \quad (2)$$

เมื่อ Q คือ ปริมาณความร้อนที่ต้องการในการหลอมต่อปริมาตรโลหะ

$Q = (T_m + 273)^2$; เมื่อ T_m เป็นอุณหภูมิหลอมละลาย $^{\circ}C$

A_w คือ พื้นที่หน้าตัดของรอยเชื่อม สามารถหาได้ดังภาพที่ 13



ภาพที่ 13 แสดงพื้นที่หน้าตัดของรอยเชื่อมบนชิ้นงานเพลท

ที่มา: พัฒน์ชัย (2546)

จากรูปข้างต้น แบ่งพื้นที่หน้าตัดของรอยเชื่อมออกได้ 3 ส่วน ดังนี้

A_m คือ พื้นที่หน้าตัดของโลหะเชื่อมที่ล้อมรอบด้วยแนวหลอม

A_r คือ พื้นที่หน้าตัดของโลหะเชื่อมที่เป็นส่วนเพิ่ม

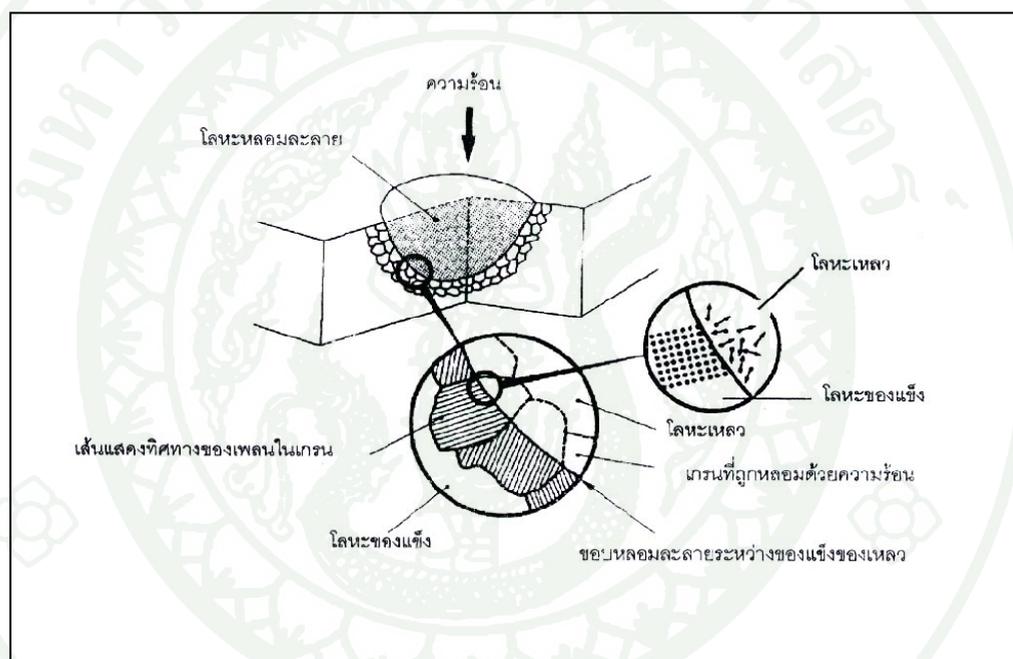
A_z คือ พื้นที่หน้าตัดบริเวณที่มีผลกระทบจากความร้อนถึงบริเวณที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างและคุณสมบัติบริเวณนี้ว่า บริเวณกระทบร้อน (Heat Affected Zone: HAZ)

ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการหลอมขึ้นกับขบวนการเชื่อม กรรมวิธีการเชื่อม รูปร่าง รอยต่อ และความหนาของชิ้นงาน

2.2 โลหะวิทยาของการเชื่อม

กระบวนการเชื่อมโลหะเกิดความร้อนในการเชื่อมเสมอ (Heat Flow in Welding) ทั้งแนวเชื่อมและบริเวณใกล้เคียง ซึ่งมีผลต่อคุณสมบัติทางกลและทางโลหะวิทยาของงานเชื่อม ต้องให้ความสำคัญในการควบคุมปัจจัยต่าง ๆ ดังนี้

2.2.1 อุณหภูมิสูงสุดและการกระจายของบริเวณกระทบร้อน ในการเชื่อมอาร์คเกิดความร้อนทำให้สวดเชื่อมหลอมรวมกับโลหะงานบางส่วนเกิดเป็นบ่อหลอมละลาย (Weld Pool) เมื่อเกิดการแข็งตัวเป็นโลหะเชื่อม (Weld Metal) ส่วนของโลหะงานที่อยู่ถัดจากแนวเชื่อม ซึ่งหลอมละลายแต่ได้รับผลกระทบจากความร้อนขณะเชื่อม เรียกว่าบริเวณนี้ว่าบริเวณกระทบร้อน

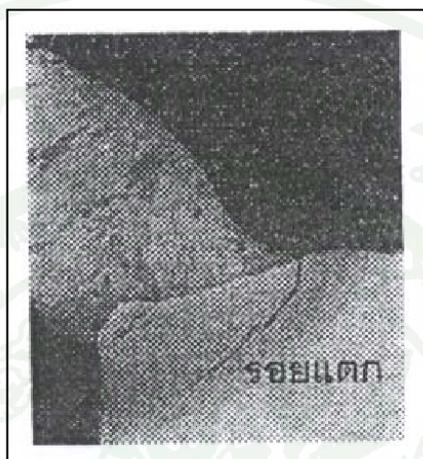


ภาพที่ 14 แสดงการหลอมละลายและการเกิดบ่อหลอมละลายของงานเชื่อมโลหะ

ที่มา: พัฒน์ชัย (2546)

2.2.2 อัตราการเย็นตัว และอัตราการเย็นตัววิกฤต ของแนวเชื่อมขึ้นอยู่กับ อัตราการให้ความร้อนขณะเชื่อมความหนาของแผ่นงาน อุณหภูมิแผ่นงาน ความสามารถนำความร้อนของแผ่นงาน และลักษณะของแนวเชื่อม อัตราเย็นตัวของแนวเชื่อมจะสูง เมื่อโลหะงานได้รับความร้อนสูง แผ่นงานบาง โลหะงานมีการนำความร้อนต่ำและการเชื่อมแบบต่อชน ส่วนการเชื่อมแบบฟิลเล็ทหรือเตรียมแนวเชื่อมลักษณะอื่นจะมีโลหะงานล้อมรอบโลหะเชื่อมมากกว่า

แบบต่อชน จึงสามารถระบายความร้อนจากแนวเชื่อมได้มากกว่าทำให้มีอัตราการเย็นตัวเร็วกว่าการให้ความร้อนแก่ชิ้นงานก่อนการเชื่อม (Preheat) จะทำให้อัตราการเย็นตัวลดลง เป็นหลักการที่ใช้กันในงานเชื่อม โดยเฉพาะกับเหล็กที่มีความแข็งแรงสูง ในการเชื่อมหากอัตราการเย็นตัวสูงจนเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างในบริเวณกระทบร้อนจะทำให้เกิดความเสียหายต่อการเกิดรอยแตก (Crack) ภายใต้อิทธิพลจากความเค้น (Stress) ที่เกิดขึ้นจากก๊าซไฮโดรเจน (H_2)



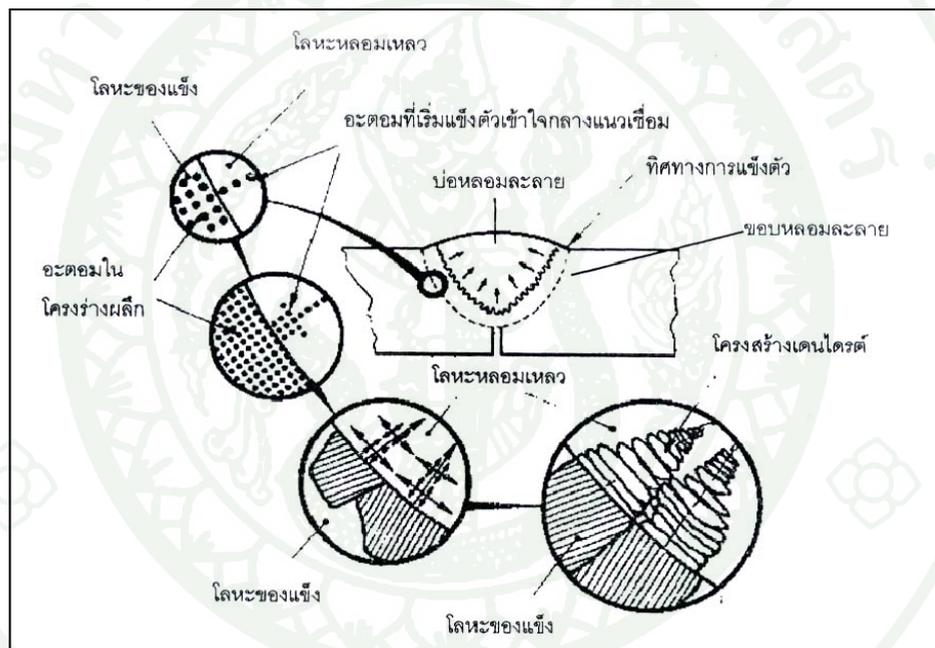
ภาพที่ 15 แสดงรอยแตกบริเวณกระทบร้อนแนวเชื่อมในงานเหล็กกล้าความแข็งแรง

ที่มา: พัฒน์ชัย (2546)

การอุ่นชิ้นงานด้วยอุณหภูมิที่เหมาะสม จะช่วยลดอัตราการเย็นตัว การเชื่อมเหล็กต้องพิจารณาอัตราการเย็นตัววิกฤต เพื่อที่จะเป็นขอบเขตในการเชื่อว่าจะไม่ควรเกินอัตราเย็นตัวนี้ และการอุ่นชิ้นงานที่พอเหมาะสำหรับการลดอัตราการเย็นตัวลงเพื่อไม่ให้เกินจุดวิกฤต การอุ่นชิ้นงานหากอุ่นมากเกินไป จะทำให้การเชื่อมยาก แล้วยังเพิ่มบริเวณกระทบร้อนขึ้นอีก บางงานการอุ่นชิ้นงานไม่มีความจำเป็น

ดังนั้นการเชื่อมควรมีการควบคุมอัตราการเย็นของการเชื่อม วิธีหนึ่งที่ใช้คือการอุ่นชิ้นงาน โดยอุณหภูมิอุ่นงานจะต้องเหมาะสมและไม่เกินค่าอัตราการเย็นตัววิกฤตสำหรับงานเชื่อมเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง ควรพิจารณา %CE ด้วย

2.2.3 อัตราการแข็งตัว (Solidification Rate) การแข็งตัวของโลหะเชื่อมอย่างต่อเนื่อง จะให้โครงสร้างทางโลหะวิทยาที่แตกต่างกันไป ส่งผลต่อคุณสมบัติทางกลด้วย เวลาในการแข็งตัวของเนื้อโลหะ แปรผันตามความร้อนเข้า เมื่อเชื่อมโลหะจะเกิดการหลอมละลายรวมกันระหว่างโลหะงาน (Base Metal) กับโลหะเติม (Filler Metal) เกิดบ่อหลอมละลาย (Weld Pool) แล้วเกิดการแข็งตัวเป็นโลหะเชื่อม (Weld Metal) บริเวณที่สัมผัสกับโลหะงานจะเกิดการแข็งตัวของรอยเชื่อม เกิดลักษณะประหนึ่งชุปเนื้อแนวเชื่อมลงในโลหะงานที่อยู่โดยรอบ ขณะแข็งตัวความร้อนจะถ่ายเทจากรอยเชื่อมทำให้เกิดโครงสร้างเดนไดรต์ของแนวเชื่อมเติบโตห่างยาว พุ่งเข้าหาใจกลางแนวเชื่อม แสดงดังภาพที่ 16

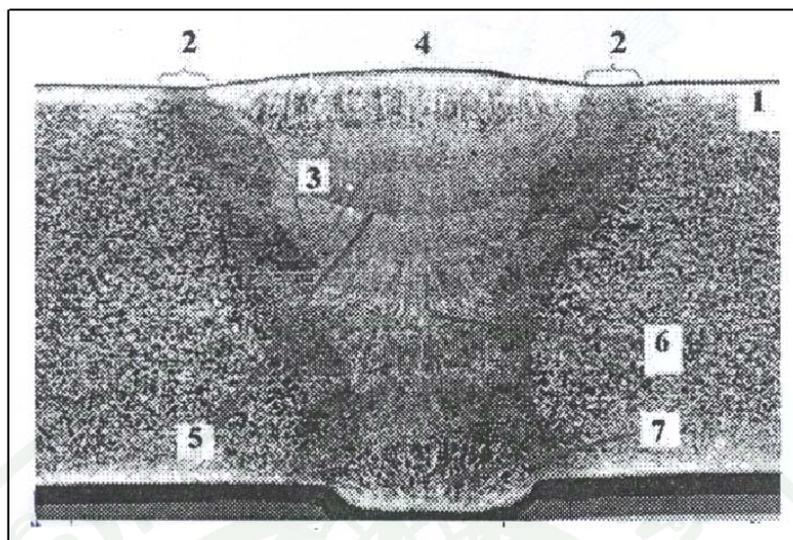


ภาพที่ 16 แสดงขั้นตอนการแข็งตัวและการเกิดผลึกกิ่งไม้ของแนวเชื่อม

ที่มา: พัฒน์ชัย (2546)

ขณะหลอมเหลวโลหะเชื่อมจะละลายก๊าซได้มากกว่าในสถานะของแข็งตัว ก๊าซจะหนีออกมาภายนอก ถ้าอัตราการเย็นตัวเร็วเกินไป ก๊าซจะหนีออกมาไม่ทัน จึงเป็นโพรงก๊าซ อยู่ภายในแนวเชื่อม ซึ่งคล้ายกับการเกิดโพรงก๊าซในงานหล่อ แต่มีลักษณะการแข็งตัวแตกต่างกัน ระหว่างงานเชื่อมกับงานหล่อ คือ อัตราการเย็นตัวและเวลาในการแข็งตัวสูงกว่างาน งาน

หล่อนมาก และเวลาในการหลอมสั้น ดังนั้นจึงมีก๊าซละลายในน้ำโลหะ เชื่อมน้อย หลังจากเย็นตัวแล้วจึงไม่มีโอกาสเกิดโพรงก๊าซขนาดใหญ่ การควบคุมบรรยากาศขณะเชื่อมได้ด้วยสแลกหรือก๊าซปกคลุมผิวแนวเชื่อมที่ได้จากฟลักซ์ที่หุ้มลวดเชื่อม สแลกจะป้องกันก๊าซไม่ให้ละลายเข้าไปในแนวเชื่อม โดยทั่วไปนั้นมักจะเกิดการแยกตัวของโครงสร้าง และธาตุผสมบางชนิดซึ่งเมื่อโครงสร้างเย็นตัวตั้งฉากซึ่งกันและกัน จะทำให้เกิดแนวที่อ่อนแอที่สุด เพราะโลหะเชื่อมมีทิศทางแข็งตัวด้วยความยาวของแนวเชื่อม และมีสารมลทินรวมตัวตามใจกลางแนวเชื่อมเพียงเล็กน้อย โลหะผสมที่แข็งตัวช้า อาจเกิดแยกตัวของธาตุผสม (Coring) บางชนิด ปกติมักจะเกิดได้ง่ายในโลหะนอกกลุ่มเหล็ก และเหล็กกล้าไร้สนิม การแก้ไข Coring ทำได้โดยให้แนวเชื่อมเย็นตัวเร็ว หรืออบชุบหลังการเชื่อมการแก้ไขการหดตัวของงานเชื่อม โดยควบคุมบ่อหลอมละลายให้แข็งตัวต่อเนื่องในทิศทางเดียวกัน เพื่อให้โลหะเชื่อมที่หลอมเหลวป้อนเต็มส่วนที่หดตัวตลอดเวลา ขณะแข็งตัวปกติรอยเชื่อมมักจะแข็งตัวจากล่างไปหาส่วนบนแนวเชื่อม ความร้อนบริเวณด้านล่างแนวเชื่อมจะถ่ายเทไปยังโลหะงานเร็วกว่า แนวเชื่อมจึงไม่ค่อยเกิดตำหนิเนื่องจากการหดตัว แต่บางครั้งอาจจะพบโพรงหดตัวที่บริเวณใจกลางแนวเชื่อม โดยเฉพาะบริเวณที่หยุดแนวเชื่อม มักพบการหดตัวและแตกร้าวเสมอ เนื่องจากอัตราการแข็งตัวของ การเชื่อมเร็วมาก จึงเป็นวิธีการยากที่จะศึกษาการแข็งตัวของกรรมวิธีการเชื่อมเช่นเดียวกับการแข็งตัวของกรรมวิธีการหล่อโลหะ ถ้าหากเชื่อมถูกวิธีแนวเชื่อมจะมีความแข็งแรง (Strength) และความเหนียว (Ductility) ตามต้องการ รอยบกพร่องจะเกิดขึ้นต่อเมื่อสภาวะการเชื่อมไม่เหมาะสมการควบคุมแนวเชื่อมให้สมบูรณ์ได้หากเลือกลวดเชื่อมและกรรมวิธีการเชื่อมให้เหมาะสม แต่การควบคุมโลหะจะกระทำได้ยากกว่า เนื่องจากข้อจำกัดในการเลือกโลหะต้องให้เหมาะสมกับการใช้งาน ซึ่งอาจจะไม่เหมาะสมกับการเชื่อมก็ได้ ดังนั้นข้อจำกัดในการเชื่อมนั้นเป็นข้อจำกัดของโลหะ ไม่ใช่ข้อจำกัดทางโลหะเชื่อมชั้นต่อมา



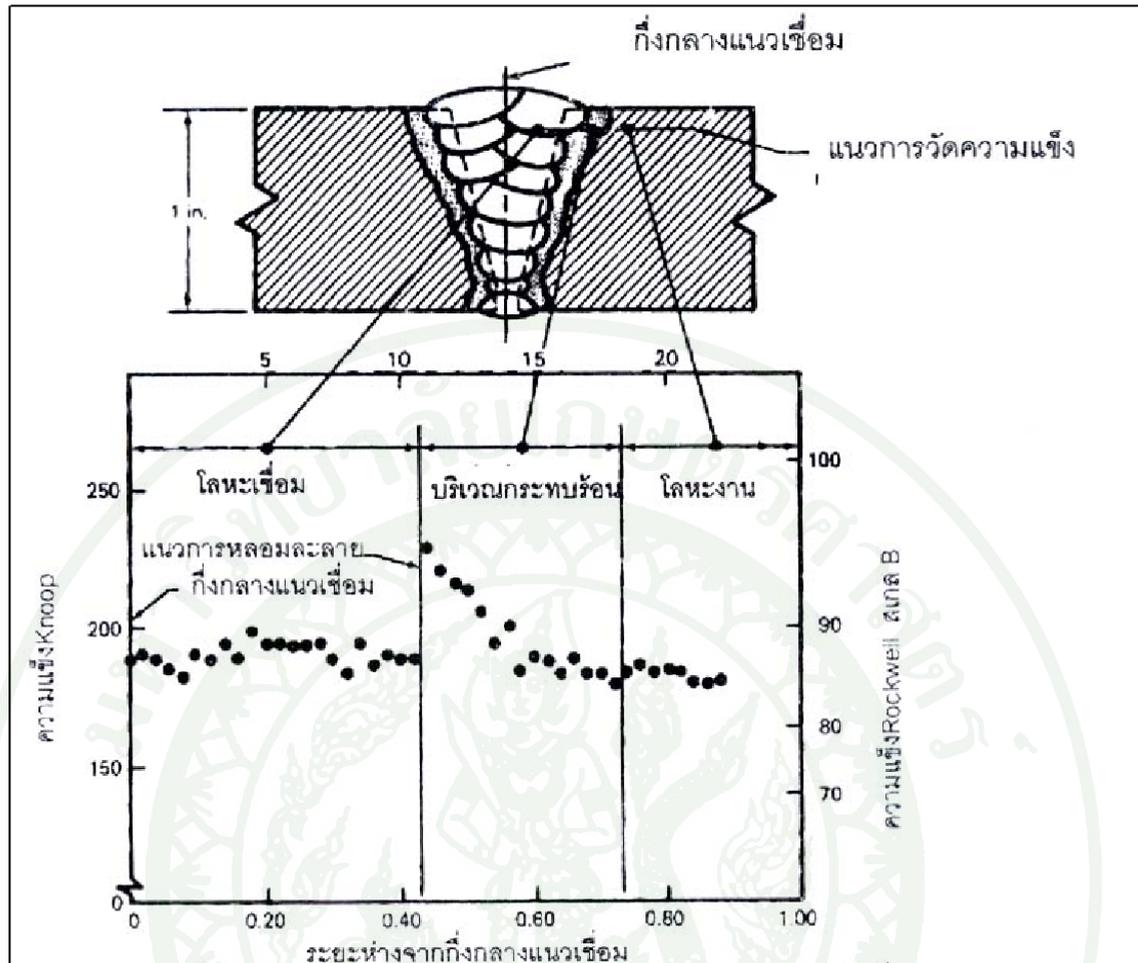
ภาพที่ 17 แสดงหน้าตัดโครงสร้างมหภาคงานเชื่อมหลายแนว

ที่มา: พัฒน์ชัย (2546)

จากภาพที่ 17 หมายเลขในภาพมีความหมายดังนี้ 1. โลหะงาน, 2. บริเวณกระทบร้อน, 3. ขอบแนวเชื่อม, 4. แนวเชื่อมปกคลุมด้านบน, 5. แนวเชื่อมชั้นต่าง ๆ ที่มีเกรนละเอียด, 6. ชั้นของแนวเชื่อมที่หนาจะทำให้เกิดเกรนละเอียด, 7. แนวเชื่อมปกคลุมด้านล่างมีเกรนหยาบ

อุณหภูมิที่เกิดขึ้นในเขตต่าง ๆ ของแนวเชื่อมทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเนื่องมาจากอัตราการเย็นตัวอย่างรวดเร็วซึ่งเหมือนกับการชุบตลอคแนวเชื่อมเขตต่าง ๆ ของแนวเชื่อมจะมีการเปลี่ยนแปลงในช่วงบริเวณแคบ ๆ เกิดขึ้นบริเวณขอบทั้งสองของแนวเชื่อม

เมื่อเดินแนวเชื่อมเพียงแนวเล็ก ๆ จะมีแนวโน้มนำให้เกิดโครงสร้างพื้นฐานในแนวเชื่อมถัดไปทำให้โครงสร้างบริเวณถัดไปมีปริมาตรเล็กมาก จนกระทั่งทำการเชื่อมซ้ำ ๆ กันหลายแนว ในกรณีเชื่อมโลหะงานนาน ๆ จะเหมือนกับการทำกระบวนการทางความร้อน (Heat Treatment) ซ้ำ ๆ กันหลายครั้งซึ่งมีผลต่อคุณสมบัติความแข็งของแนวเชื่อม ดังภาพที่ 18



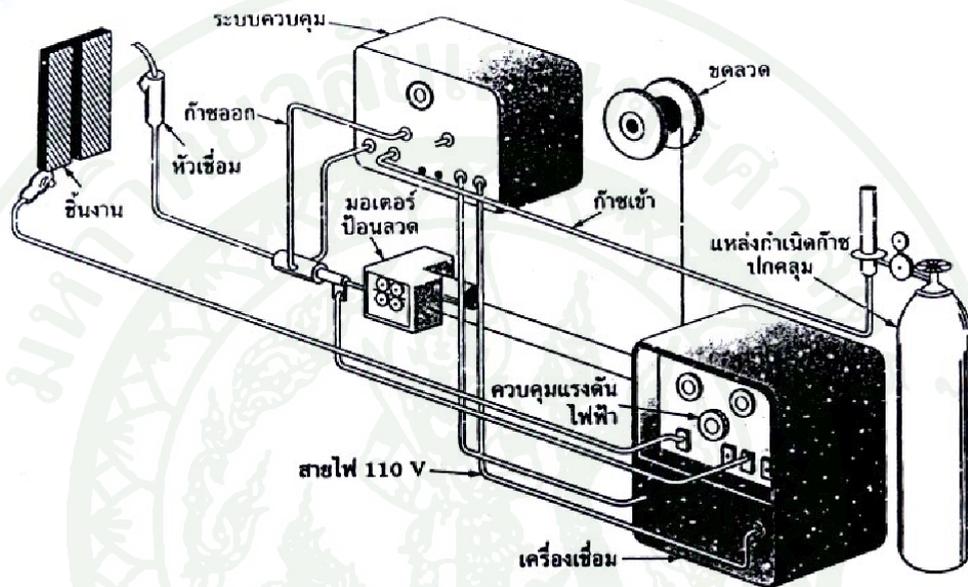
ภาพที่ 18 แสดงการเชื่อมหลายแนวที่มีผลกระทบต่อความแข็งของแนวเชื่อมและบริเวณใกล้เคียง

ที่มา: พัฒน์ชัย (2546)

3. ทฤษฎีพื้นฐานการเชื่อมอาร์คแบบใช้ก๊าซปกคลุม

มานะศิษฏ์, (2542) การเชื่อมภายใต้ก๊าซปกคลุมหรือการเชื่อม MIG/MAG (Metal Inert Gas/Metal Active Gas) เป็นกระบวนการเชื่อมที่นิยมกันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน บางครั้งสามารถนำมาทดแทนการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ ที่สามารถเชื่อมโลหะต่าง ๆ ได้หลายชนิดขบวนการเชื่อม MIG/MAG ที่ได้พัฒนาไปอย่างไม่หยุดยั้งทำให้สามารถเชื่อมได้ทั้งชนิดที่ควบคุมการเชื่อมด้วยมือและด้วยระบบอัตโนมัติ

การเชื่อม MIG/MAG เป็นขบวนการเชื่อมที่ได้จากความร้อนจากอาร์คระหว่างลวดเชื่อม (Consumable Electrode) กับชิ้นงาน สำหรับลวดเชื่อมที่ใช้เป็นลวดเชื่อมเปลือยแข็งที่ส่งป้อนอย่างต่อเนื่องไปยังบริเวณอาร์คและทำหน้าที่เป็นโลหะเติมลงยังบ่อหลอมละลาย บริเวณบ่อหลอมละลายจะถูกปกคลุมไว้ด้วยก๊าซปกคลุม ไม่ให้เกิดการรวมตัวกับอากาศ วิธีการเชื่อมอาจใช้วิธีอัตโนมัติหรือกึ่งอัตโนมัติ แต่วิธีกึ่งอัตโนมัติเป็นวิธีที่ใช้กันมากที่สุด



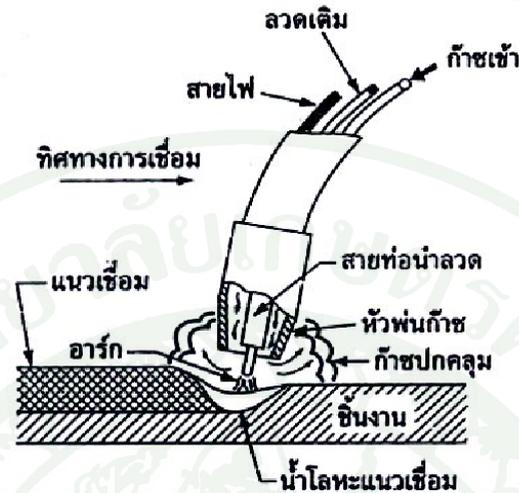
ภาพที่ 19 แสดงอุปกรณ์เชื่อมมิก (MIG)

ที่มา: มานะศิษย์ (2542)

กระบวนการเชื่อมมิก (Metal Inert Gas; MIG) หรือเรียกว่ากระบวนการเชื่อม Gas Metal Arc Welding (GMAW) การเชื่อมจะใช้ลวดเชื่อมแบบต่อเนื่องและลวดเชื่อมหลอมละลาย (Continuous Consumable Wire Electrode)

ความร้อนที่เกิดขึ้นได้มาจากการอาร์คระหว่างลวดเชื่อมกับชิ้นงาน ลวดเชื่อมจะถูกส่งป้อนอย่างต่อเนื่องซึ่งควบคุมโดยระบบควบคุมการป้อนลวดเชื่อม (Wire Speed Control) และเป็นตัวเติมโลหะไปยังบ่อหลอมละลายเกิดเป็นแนวเชื่อม บริเวณการอาร์คซึ่งมีบ่อหลอมละลายจะถูกปกคลุมด้วยก๊าซปกคลุม เพื่อป้องกันก๊าซจากบรรยากาศมารวมตัวกับน้ำโลหะแนวเชื่อม ก๊าซที่ใช้ปกคลุมอาจเป็นก๊าซเฉื่อยบริสุทธิ์ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ หรือก๊าซผสม ก๊าซปกคลุม

เป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ หรือก๊าซผสมคาร์บอนไดออกไซด์ เรียกว่า กระบวนการเชื่อม MIG (Metal Inert Gas) ดังแสดงในภาพที่ 20



ภาพที่ 20 การเชื่อมมิก (MIG)

ที่มา: สมบูรณ์ (2542)

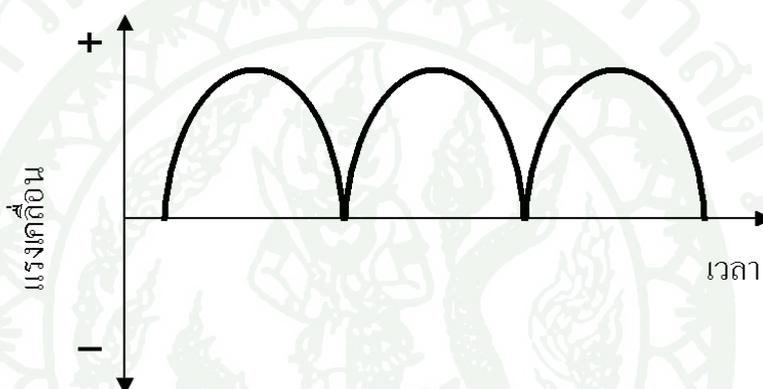
3.1 เครื่องมือที่ใช้ในการเชื่อม MIG/MAG

การเชื่อม MIG/MAG จะเป็นการเชื่อมแบบกึ่งอัตโนมัตินิยมใช้มากในวงการอุตสาหกรรมทั่ว ๆ ไป ซึ่งมีเครื่องมือและอุปกรณ์สำคัญโดยประกอบด้วย

3.1.1 เครื่องเชื่อม (Welding Machine) สำหรับการเชื่อมมิก จะเป็นเครื่องเชื่อมไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแรงเคลื่อนคงที่ (Constant Voltage) ต่อเป็นกระแสไฟตรงขั้วบวก (DCRP) ซึ่งจะทำให้การหลอมละลายลึก (Deep Penetration) และได้แนวเชื่อมสะอาด เครื่องเชื่อมมีใช้ทั้งแบบหม้อแปลงเรียงกระแส (Transformer Rectifier) และแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ขับด้วยมอเตอร์ (Motor Generator) การเชื่อมมิกซึ่งส่งถ่ายน้ำโลหะแบบพ่นขณะเกิดการลัดวงจร กระแสไฟเชื่อมจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนเกิดแรงดันการอาร์คอย่างรุนแรงซึ่งจะมีผล เครื่องเชื่อม เป็นเหตุให้เครื่องเชื่อมเสียหายได้ และทำให้เกิดการกระเด็นของเม็ดโลหะไป เกาะติดขอบแนวเชื่อมจำนวนมาก วิธีแก้จึงต้องมีอินดักแตนซ์ (Inductance) มาต่ออนุกรมเข้า

กับเครื่องเชื่อม เพื่อควบคุมปริมาณและอัตราการเพิ่มกระแสไฟเชื่อมให้เหมาะสม ทำให้การอาร์กเรียบสม่ำเสมอและแนวเชื่อมสมบูรณ์ขึ้น ลดการกระเด็นของเม็ดโลหะไปเกาะติดข้างแนวเชื่อม

กระแสไฟที่ใช้ในการเชื่อมมี 2 ชนิด คือ กระแสไฟตรง (DC) หมายถึง กระแสที่มีอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ ในทิศทางตามยาวของตัวนำในทิศทางเดียวเท่านั้น การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนเหมือนกับการเคลื่อนที่ของน้ำประปาในท่อกระแสไฟตรง จะไหลจากหัวหนึ่งไปตลอดโดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงหัว

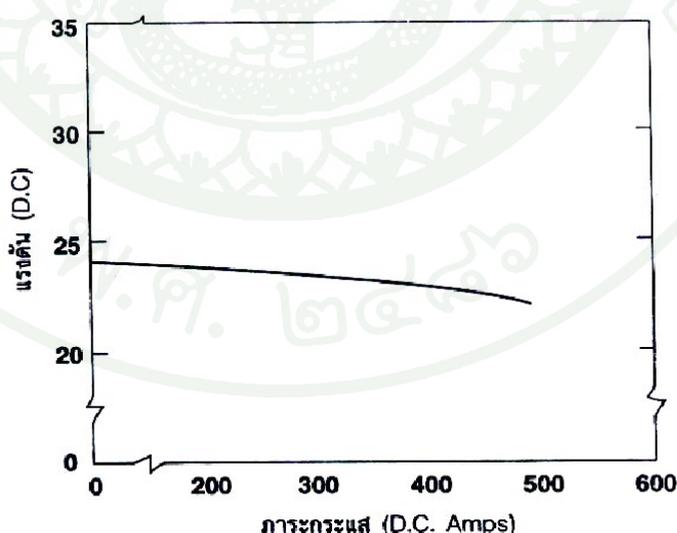


ภาพที่ 21 แสดงลักษณะของคลื่นกระแสไฟตรงที่ได้จากเครื่องเรียงกระแส

การแบ่งชนิดของเครื่องเชื่อมไฟฟ้าตามลักษณะการจ่ายพลังงานสามารถแบ่งได้เป็นสองชนิดคือ แบบกระแสคงที่ (Constant Current) คือ เป็นลักษณะของเครื่องเชื่อมซึ่งเมื่อเครื่องเชื่อมจ่ายพลังงานออกมาแล้วและเริ่มเชื่อม ถ้าปรับค่ากระแสไฟสูงขึ้นมากเท่าไร ค่าแรงเคลื่อนจะลดลงมาเท่านั้น การเชื่อมที่ต้องการลักษณะของการจ่ายพลังงานแบบนี้ ได้แก่ การเชื่อมแบบ CAW, SMAW, TIG, SW เป็นต้น และ แบบแรงเคลื่อนคงที่ (Constant Voltage) คือ เป็นลักษณะของเครื่องเชื่อม ซึ่งเมื่อเครื่องจ่ายพลังงานออกมาแล้ว และเริ่มเชื่อมเมื่อกระแสเปลี่ยนแปลงไปแรงเคลื่อนคงที่จะเปลี่ยนแปลงไปน้อยลงมาก หรือแรงเคลื่อนคงที่จะไม่เปลี่ยนแปลงตามขนาดของกระแสการเชื่อมที่ต้องการ การจ่ายพลังงานแบบนี้ ได้แก่ MIG, MAW, SAW ที่ใช้ลวดเชื่อมเล็ก เครื่องเชื่อมแบบนี้มักจะผลิตออกมาเฉพาะกระแสตรง (DC อย่างเดียว) ปรับแรงเคลื่อนไฟฟ้าให้ลดต่ำจาก 220 โวลต์ที่ใช้ตามบ้านทั่วไปลงโดยไม่ทำให้เกิดอันตรายต่อช่างเชื่อม ประมาณ 40 – 80 โวลต์ แต่ต้องเหมาะสมเพียงพอที่จะเริ่มสร้างการอาร์ก

สำหรับการต่อขั้วการเชื่อมด้วยกระแสตรง สามารถต่อได้ในสองวิธีคือ การต่อเชื่อมขั้วไฟให้ลวดเชื่อมเป็นลบ (Direct Current Electrode Negative) มีสัญลักษณ์คือ (DCEN) การต่อขั้วแบบนี้จะมีผล คือ ทำให้ความร้อนที่เกิดขึ้นที่ลวดเชื่อมจะน้อยกว่าชิ้นงาน เหมาะสำหรับการเชื่อมงานที่มีความหนาและต้องการการละลายลึกสูง ในการต่ออีกวิธีเป็นการต่อขั้วไฟให้ลวดเชื่อมเป็นบวก (Direct Current Electrode Positive) คือ (DCEP) การต่อขั้วแบบนี้จะมีผลคือ ทำให้ความร้อนที่เกิดขึ้นที่ลวดเชื่อมประมาณ 70% และชิ้นงานประมาณ 30% ความร้อนที่ลวดเชื่อมจะมากกว่าชิ้นงาน เหมาะสำหรับการเชื่อมงาน ที่ชิ้นงานบางและการละลายลึกน้อย

การเชื่อมอาร์คโลหะก๊าศคลุมมีลักษณะวงจรการเชื่อมประกอบด้วยระบบป้อนลวดเชื่อม (Wire Feeder System) จะเป็นตัวควบคุมการป้อนลวดเชื่อม เครื่องเชื่อมที่ใช้เป็นชนิดแรงดันที่คงที่ (CV) กระแสเชื่อม การไหลของก๊าศคลุมและน้ำหล่อเย็น ส่วนหัวเชื่อมจะทำหน้าที่ให้ลวดเชื่อมและก๊าศคลุมไหลผ่านออกมาสู่พื้นที่อาร์ค กระบวนการเชื่อมนี้จะใช้ไฟกระแสตรงส่วนกระแสกลับใช้ไม่ได้ และกระแสตรงที่ให้ ประสิทธิภาพในการเชื่อมสูงที่สุดคือ กระแสตรงกลับขั้ว (Direct Current Reverse Polarity, DCRP) โดยลวดเชื่อมจะเป็นขั้วบวก (DCEP) ความร้อนที่ได้รับจากการอาร์คจะหนาแน่นที่บ่อหลอมเหลวจึงเกิดการซึมลึกมาก ผิวงานสะอาดเหมาะสมกับงานเชื่อมที่มีออกไซด์บนผิวงานหนา (Heavy Surface Oxides) โดยที่ค่าของแรงดันกระแสของเครื่องเชื่อมแสดงในภาพที่ 22



ภาพที่ 22 เส้น โกว้งแรงดันและกระแสของเครื่องเชื่อมชนิดแรงดันคงที่กระแสตรง

ที่มา: มานะศิษฐ์ (2542)

คุณสมบัติเฉพาะสำหรับเครื่องเชื่อมแรงดันคงที่มี 3 ประการ คือ

- การไหลของกระแสเชื่อมไปสู่งานจะได้รับการปรับอย่างอัตโนมัติให้เหมาะสมกับอัตราป้อนลวดเชื่อม

- อัตราเร็วป้อนลวดเชื่อมคงที่

- การเริ่มอาร์คอย่างทันที จะขจัดจุดเบี่ยงเบนที่จุดเริ่มของรอยเชื่อม เนื่องจากลวดเชื่อมหลอมเหลวทันที โดยกระแสจำนวนมากจะป้องกันไม่ให้ลวดเชื่อมติดชิ้นงาน ขณะเดียวกันกระแสก็จะกลับคืนสู่สภาพเดิมได้เร็ว ช่วยป้องกันการหลอมย้อนของลวดเชื่อม

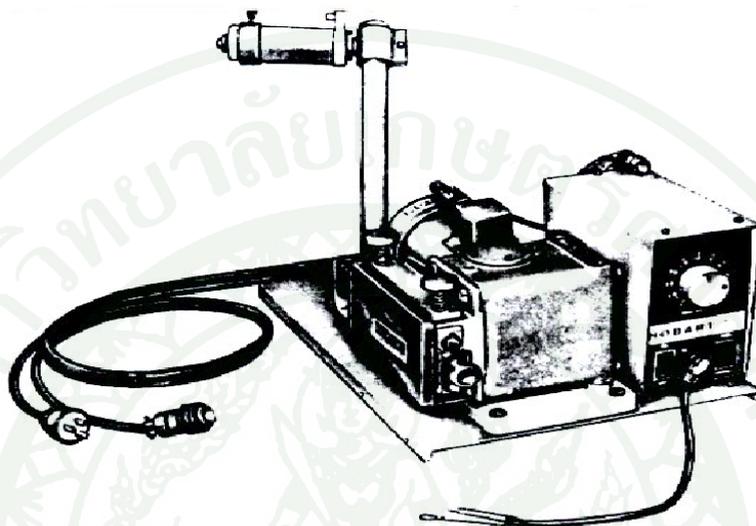
3.1.2 ระบบป้อนลวด (Wire – Feed System) มีส่วนประกอบ ดังนี้

- ที่ใส่ม้วนลวดเชื่อมและชุดเบรก
- มอเตอร์ป้อนลวดเชื่อม
- สวิตช์ลวดให้ตรง
- สล้อป้อนลวดเชื่อม



ภาพที่ 23 ชุดป้อนลวดเครื่องเชื่อม MIG/ MAG

การป้อนลวดเชื่อม MIG/MAG ทั่วไปจะใช้แบบดัน โดยมีชุดเฟืองซึ่งอาจเป็นแบบ 2 ตัว หรือ 4 ตัวที่จับด้วยมอเตอร์ ทำหน้าที่ดึงลวดออกจากสล็อต พร้อมทั้งดันลวดเชื่อมสำหรับความยาวของสายเชื่อมที่ใช้กับลวดเชื่อมเหล็กจะยาวไม่เกิน 10 ฟุต ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของลวดเชื่อมที่สามารถทนต่อแรงดันโดยไม่โค้งงอ ดังแสดงในภาพที่ 24



ภาพที่ 24 ชุดป้อนลวดด้วยวิธีดันลวดพร้อมที่ใส่ม้วนลวด

ที่มา: มานะศิษฐ์ (2542)

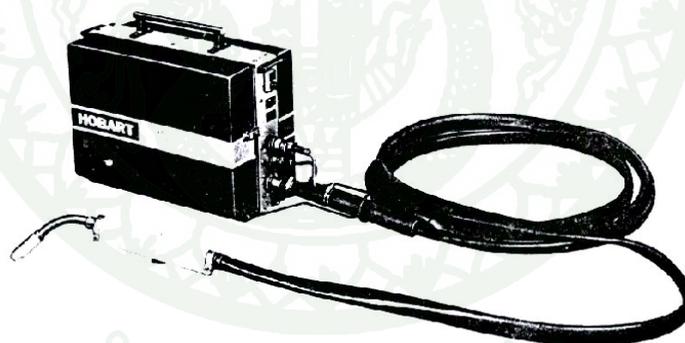
การป้อนลวดแบบดึงเป็นการป้อนลวด โดยใช้หัวเชื่อมที่มีชุดป้อนลวดเชื่อมพร้อมมอเตอร์และสล็อตลวดเชื่อมที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางนอก 4 นิ้ว ประกอบอยู่พร้อมภายในหัวเชื่อมกับการป้อนลวดเชื่อมชนิดแข็ง และยังเหมาะกับการเชื่อมงานที่มีเนื้อที่สำหรับการเชื่อมจำกัด ดังแสดงในภาพที่ 25



ภาพที่ 25 ชนิดชุดป้อนลวดแบบคิงลวด

ที่มา: มานะศิษฏ์ (2542)

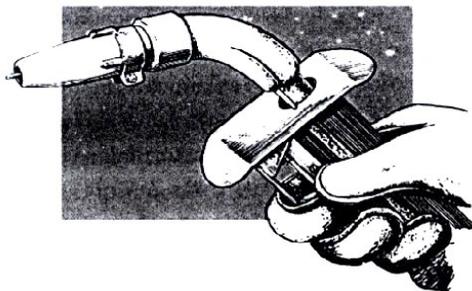
การป้อนลวดแบบคั่นและคิง เหมาะสำหรับลวดเชื่อมที่มีความแข็งแรงต่ำ โดยระบบป้อนลวดเชื่อมแบบคั่น จะมีการต่ออุปกรณ์ไปควบคุมความเร็วของตัวป้อนลวดแบบคิงที่ติดตั้งอยู่อีกด้านหนึ่ง ใกล้เคียงกับลวดเชื่อมแต่ความเร็วของตัวป้อนลวดเชื่อมทั้งสองนี้ต้องสัมพันธ์กัน โดยใช้หลักการของแรงคิงในเส้นลวด ดังแสดงในภาพที่ 26



ภาพที่ 26 ระบบการป้อนลวดแบบคั่น-คิง ใช้กับการเชื่อมที่มีระยะห่างจากชุดป้อนลวดมากๆ

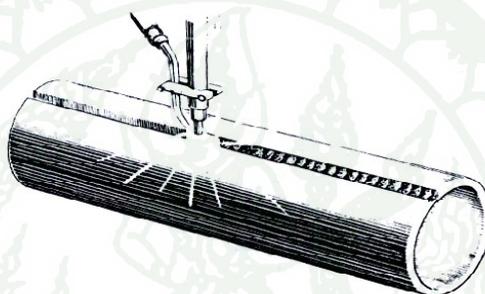
ที่มา: มานะศิษฏ์ (2542)

การเชื่อมด้วยวิธีคิงอัตโนมัติ (Welding Gun and Cable Assembly) และการเชื่อมด้วยวิธีอัตโนมัติหรือทอร์ชเชื่อม (Welding Torch) เช่นการเชื่อมด้วย Robot ดังแสดงในภาพที่ 27 ก และ ภาพที่ 27 ข



ภาพที่ 27 ก การเชื่อมกิ่งอัดโนมตี

ที่มา: มานะศิษฏ์ (2542)

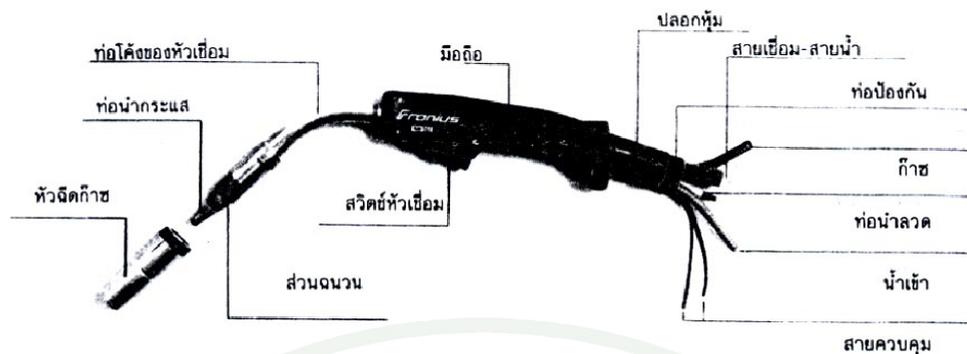


ภาพที่ 27 ข การเชื่อมอัดโนมตี

ที่มา: มานะศิษฏ์ (2542)

3.1.3 หัวเชื่อม มีหน้าที่ส่งก๊าซคลุมกระแสเชื่อมและลวดเชื่อมเข้าสู่ท่อนำลวดไปยังพื้นที่ที่จะเชื่อม สายเชื่อมและสายน้ำจะประกอบด้วย

3.1.3.1 ท่อนำลวด ซึ่งทำจากลวดสปริงคดเป็นท่อใช้เป็นทางเดินของลวดเชื่อม ยาวตลอดอยู่ในสายเชื่อม สามารถอ่อนไปมาได้โดยไม่หดรัดลวดเชื่อม ซึ่งเคลื่อนที่อยู่ภายใน แม้สายเชื่อมจะโค้งงอได้มาก แต่ขณะในงานจะทำให้ลวดเชื่อมเคลื่อนที่ผ่านไปไม่ได้ลำบาก บางครั้งการเชื่อมอาจสะดุดลงเพราะลวดผ่านไม่สะดวก ดังนั้นขณะปฏิบัติการเชื่อมควรปล่อยสายเชื่อมให้มีส่วนโค้งงอน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ ท่อนำลวดจะต่อโดยตรงระหว่างหัวเชื่อมและส้อมจับลวดในชุดป้อนลวด ลวดเชื่อมจะถูกป้อนผ่านท่อนี้โดยตรงไปยังหัวเชื่อม และท่อนำกระแสต่อไป ดังแสดงในภาพที่ 28



ภาพที่ 28 ส่วนประกอบของสายเชื่อมและสายน้ำทั้งชนิดระบายความร้อนด้วยอากาศและน้ำ

ที่มา: มานะศิษฐ์ (2542)

3.1.3.2 สายส่งก๊าซ เป็นท่อส่งสายที่ทำหน้าที่ส่งก๊าซไปยังหัวฉีดในหัวเชื่อมแบบคอห่านขนาดเล็กอาจใช้การส่งก๊าซไปตามท่อนำลวด ถ้าเป็นหัวเชื่อมขนาดใหญ่ใช้กระแสสูงถึง 500 แอมแปร์ จะต่อสายส่งก๊าซจากชุดป้อนลวดไปยังหัวเชื่อมโดยตรงและสายส่งก๊าซจะถูกหุ้มด้วยปลอกหนังอีกชั้นหนึ่ง เพื่อป้องกันประกายโลหะและการเสียดสีกับพื้นโรงงาน

3.1.3.3 สายน้ำหล่อเย็น มีอยู่ด้วยกันสองสายคือสายน้ำเข้าและสายน้ำออกจะเป็นท่อสายยางที่มีน้ำหนักเบา อายุการใช้งานยาวนาน ปรกติแล้วสายน้ำหล่อเย็นจะถูกหุ้มรวมอยู่กับสายอื่น ๆ ภายในปลอกหนัง เพื่อป้องกันประกายโลหะที่จะทำให้สายยางเกิดความเสียหายได้ สายน้ำหล่อเย็นนี้จะใช้เฉพาะหัวเชื่อมขนาดใหญ่ที่มีช่วงกระแสเชื่อมสูงราว 80 – 500 แอมแปร์ ส่วนหัวเชื่อมขนาดเล็ก 80 – 350 แอมแปร์ ไม่นิยมใช้หัวเชื่อมแบบหล่อเย็นด้วยน้ำ

3.1.3.4 สายไฟเชื่อม สายไฟเชื่อมและขั้วต่อมีหน้าที่ต่อหัวเชื่อมเข้ากับเครื่องเชื่อมและงานเชื่อม สายไฟเชื่อมจะทำจากทองแดงหรืออลูมิเนียม แต่ทองแดงนิยมใช้กันมากกว่า สายไฟเชื่อมหนึ่งเส้นประกอบด้วยเส้นลวดทองแดงขนาดเล็กรวมกันประมาณ 100 เส้น หุ้มฉนวนด้วยยางธรรมชาติหรือสังเคราะห์ สายเชื่อมที่ต่อกับเครื่องเชื่อมและหัวเชื่อมจะเรียกว่า Electrode Lead ในการเชื่อมกึ่งอัตโนมัติสายไฟเชื่อมจะเป็นส่วนหนึ่งของสายเชื่อมและสายน้ำเก็บอยู่รวมกับสายก๊าซและท่อนำลวด สำหรับการเชื่อมด้วยเครื่องกลหรือการเชื่อมอัตโนมัติสายเชื่อมจะต่อแยกต่างหาก ส่วนสายเชื่อมที่ต่ออยู่กับงานเชื่อมและเครื่องเชื่อมเรียกว่า Work Lead สายเชื่อมนี้ต่ออยู่กับแคลมป์บีบหรือโบลท์

3.1.3.5 ขนาดของสายเชื่อมจะขึ้นอยู่กับขนาดกำลังค่านอก (Output Capacity) ของเครื่องเชื่อม วัตถุประสงค์การทำงานของเครื่องเชื่อมและระยะห่างระหว่างเครื่องเชื่อมกับงานเชื่อมขนาด สายเชื่อมเล็กสุดจะมีตั้งแต่ AWG No.8 ถึง AWG No. 4/0 ซึ่งรับพิกัดกระแสได้เกิน 75 แอมแปร์ขึ้นไป

3.1.4 ลวดเชื่อม (Wire Electrode) เป็นหัวใจสำคัญของการเชื่อม MIG/ MAG ดังนั้นจึงต้องรู้จักเลือกใช้ลวดเชื่อมให้ถูกต้อง ลวดเชื่อมจะหลอมผ่านเปลวอาร์คไปยังบ่อหลอมละลายเกิดเป็นแนวเชื่อม ซึ่งลวดเชื่อมที่ผ่านเปลวอาร์คนั้น จะทำปฏิกิริยากับก๊าซปกคลุมจึงทำให้ส่วนผสมลวดเชื่อมเปลี่ยนไป ขนาดของลวดเชื่อมที่ใช้ขึ้นอยู่กับวิธีเชื่อมและท่าเชื่อมเป็นสำคัญ ลวดเชื่อมทั้งหมดจะมีลักษณะแข็งเปื่อย เว้นแต่ลวดเชื่อมชนิดเหล็กคาร์บอนจะเคลือบผิวด้วยทองแดงเพื่อป้องกันสนิม ลวดเชื่อมสำหรับการเชื่อมแบบ GMAW นี้ จะเตรียมไว้ในล้อยี่ที่สวมเข้ากับเครื่องได้พอดี ในการเลือกใช้ลวดเชื่อมต้องพิจารณาองค์ประกอบ คือ

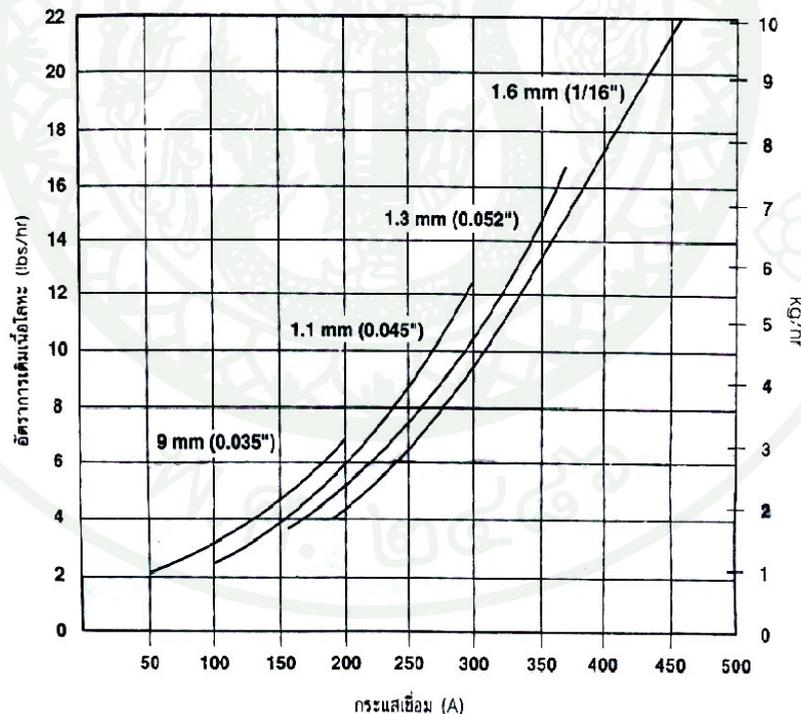
3.1.4.1 ส่วนผสมทางเคมีของโลหะชิ้นงาน ต้องเหมาะสมกับส่วนผสมทางเคมีของโลหะลวดเชื่อมและเข้ากันได้กับส่วนผสมของโลหะชิ้นงาน เฉพาะอย่างยิ่งงานที่ต้องการความต้านทานต่อการกัดกร่อน มีผิวที่เหมือนเดิม ความต้านต่อการก๊อบ การนำความร้อนหรือไฟฟ้า วัสดุงานเชื่อมที่ไม่ใช่เหล็ก เหล็กกล้าไร้สนิม และเหล็กกล้าเจืออื่น ๆ ควรเลือกส่วนผสมทางเคมีที่เข้ากันได้

3.1.4.2 คุณสมบัติทางกลของโลหะชิ้นงาน โดยลวดเชื่อมที่เลือกใช้ต้องมีความต้านแรงดึงครากที่เข้ากันได้กับโลหะชิ้นงาน ซึ่งเป็นข้อสำคัญที่สุดของการเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เหล็กกล้าเจือต่ำแม่เหล็กอ่อนลูมิเนียมหรือแมกนีเซียม

3.1.4.3 ชนิดของก๊าซปกคลุม ในการใช้ก๊าซคลุมเพียงชนิดเดียวไม่สามารถทำให้เกิดการถ่ายโอนโลหะหรือใช้กับโลหะได้ทุกชนิด บางครั้งต้องการก๊าซผสมเพื่อให้คุณภาพตะเข็บเชื่อมดีขึ้น

3.1.4.4 สภาพการใช้งานและข้อกำหนดรายละเอียด ในแต่ละสภาพการใช้งานเชื่อมอาจแตกต่างกันเช่นที่อุณหภูมิต่ำ – สูง หรือรับการกระแทก ดังนั้นลวดเชื่อมต้องมีส่วนผสม

3.1.4.7 ขนาดลวดเชื่อม สำหรับลวดเชื่อม มิก/แม็ก จะถูกเก็บไว้เป็นม้วน และมีขนาดแตกต่างกัน โดยบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางทั้งระบบนิ้วและมิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางลวดเชื่อมจึงมีตั้งแต่ 0.6 mm (0.020 นิ้ว), 0.8 mm (0.030 นิ้ว), 0.9 mm (0.035 นิ้ว), 1.0 mm (0.045 นิ้ว), 1.2 mm (0.047 นิ้ว), 1.6 mm (1/16 นิ้ว) และ 3.2 mm (1/8 นิ้ว) และลวดเชื่อมที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเล็กคือ 0.6, 0.8 และ 0.9 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางลวดเชื่อมจะมีผลต่อความกว้างของตะเข็บเชื่อม ระยะซึมลึกและอัตราเร็วการเชื่อม ลวดเชื่อมขนาดใหญ่ใช้กระแสสูงและให้อัตราเติมเนื้อโลหะมากกว่าการหลอมเหลวของลวดเชื่อมจะเป็นฟังก์ชันกับความหนาแน่นกระแส (Current Density) หากใช้กระแสเชื่อมเดียวกัน ลวดเชื่อมขนาดเล็กจะมีอัตราการเติมเนื้อโลหะมากกว่า ภาพที่ 28 โดยขนาดลวดเชื่อมมีตั้งแต่ 0.6 mm (0.02 นิ้ว), 0.8 mm (0.030 นิ้ว), 0.9 mm (0.035 นิ้ว), 1.0 mm (0.045 นิ้ว), 1.2 mm (0.047 นิ้ว), 1.6 mm (1/16 นิ้ว) และ 3.2 mm (1/8 นิ้ว) ลวดเชื่อม 0.6 – 0.9 mm ใช้ได้ผลดีกับการเชื่อมโลหะบางและมีชื่อเรียกเฉพาะว่า ไมโครไวร์ (Microwire) ตารางที่ 1 การเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไมโครไวร์ ใช้ระยะโพล์ลวด 6.4 – 9.5 มิลลิเมตร



ภาพที่ 29 อัตราการเติมเนื้อโลหะของลวดเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอน แบ่งตามขนาดลวดเชื่อมและใช้ก๊าซคลุมเป็นคาร์บอนไดออกไซด์

ตารางที่ 1 การเชื่อมอาร์คโลหะก๊าซคลุมคาร์บอนไดออกไซด์ใช้ลวดเชื่อมไมโครไวร์เชื่อมด้วย

มือเชื่อมเดี่ยวเดียว (Single Pass) รอยเชื่อมจากแนวราบ (Flat Fillet Weld)

ความหนา วัสดุงาน (mm)	ขนาดลวด (mm)	แรงดันอาร์ค (DCRP)	กระแสเชื่อม (Amp)	อัตราการ ไหลก๊าซ (liter/ min)	อัตราเร็ว การเชื่อม (meter/min)
0.6	0.6	15 – 17	30 – 50	7 – 10	0.3 – 0.5
0.8	0.6	15 – 17	40 – 60	7 – 10	0.4 – 0.6
0.9	0.8	15 – 17	65 – 85	7 – 10	0.9 – 1.0
1.5	0.8	17 – 19	80 – 100	7 – 10	0.9 – 1.0
1.6	0.8	17 – 19	90 – 110	10 – 12	0.8 – 0.9
2.0	0.8	18 – 20	110 – 130	10 – 12	0.6 – 0.8
3.2	0.8	19 – 21	140 – 160	10 – 12	0.5 – 0.6
3.2	1.0	20 – 23	180 – 200	10 – 12	0.7 – 0.8
4.7	0.8	19 – 21	140 – 160	10 – 12	0.3 – 0.4
4.7	1.0	20 – 23	180 – 200	10 – 12	0.4 – 0.6
6.7	0.8	19 – 21	140 – 160	10 – 12	0.2 – 0.3
6.7	1.0	20 – 23	180 – 200	10 – 12	0.3 – 0.4

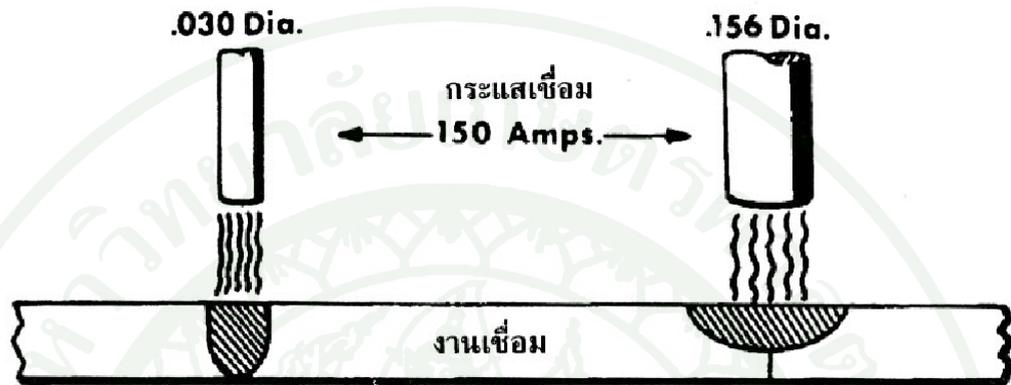
คุณสมบัติที่ได้จากการเชื่อมลวดต่างขนาดมีดังนี้

- อัตราการหลอมละลายของลวดจะมากเมื่อค่าความหนาแน่นกระแส (Current Density) มาก คือ ปริมาณของกระแสต่อตารางนิ้ว หรือต่อพื้นที่หน้าตัดของลวดเชื่อมถ้าใช้กระแสเท่ากัน เมื่อเชื่อมด้วยลวดขนาด 0.030” จะได้ค่า Current Density สูงกว่าเมื่อใช้ลวดขนาด 0.045” ดังนั้น เมื่อใช้กระแสเชื่อมที่เท่ากันลวดเชื่อมขนาดเล็กจะหลอมเร็วกว่าลวดเชื่อมขนาดใหญ่

- การซึมลึกขึ้นอยู่กับความหนาแน่นกระแส เช่นกัน ซึ่งลวดเล็กจะซึมลึกดีกว่าลวดใหญ่

- ลวดเชื่อมขนาดใหญ่จะให้แนวเชื่อมกว้างกว่าลวดเชื่อมเล็ก ทั้งนี้เมื่อสภาวะในการเชื่อมเหมือนกัน ดังแสดงในภาพที่ 30

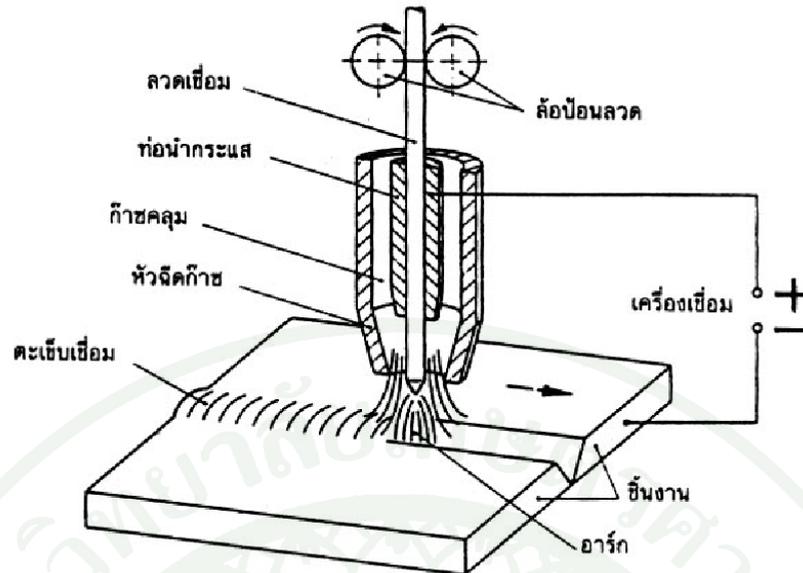
- ความหนาของชิ้นงานเชื่อมมีผลต่อการเลือกขนาดลวดเชื่อม การเชื่อมฟิลเลท และต่อเกยบนโลหะหนา 0.032" ปกติจะใช้ลวด 0.025" หรือ 0.030" (0.6 มม. หรือ 0.8 มม.) ซึ่งลวดเชื่อมขนาดนี้ยังสามารถเชื่อมงานที่มีความหนาจนถึง 0.075" ได้ดีอีกด้วย และถ้างานเชื่อมหนาขึ้นต้องใช้ลวดเชื่อมโตขึ้นด้วย



ภาพที่ 30 เปรียบเทียบการใช้ลวดขนาดต่างกัน

ที่มา: สมบูรณ์ (2542)

3.1.5 ก๊าซคลุม (Shielding Gas) การเชื่อมอาร์คโลหะก๊าซคลุม เป็นกระบวนการเชื่อมโดยใช้ลวดเชื่อมเส้นเปลือยขนาดเล็กกว่าม้วนลวด ซึ่งจะถูกป้อนผ่านหัวเชื่อมหรือปืนเชื่อม (Torch or Welding Gun) ออกมาอย่างต่อเนื่องผ่านท่อนำลวดและท่อนำกระแส (Contact Tip) ลวดเชื่อมจะสัมผัสกับผิวท่อนำกระแส ทำให้กระแสเชื่อมไหลเข้าสู่ลวด เมื่อปลายลวดแตะกับผิวโลหะชิ้นงานจะเกิดการอาร์คขึ้น ความร้อนจากอาร์คจะหลอมผิวโลหะชิ้นงาน และปลายลวดเชื่อมให้เป็นหยดโลหะถ่ายโอนสู่บ่อหลอมเหลวของรอยเชื่อม ขณะเดียวกันก๊าซจากท่อบรรจุจะไหลเข้าท่อจ่ายสู่หัวฉีดพุ่งออกมาปกคลุมบ่อหลอมเหลว และบริเวณรอบเปลวอาร์ค เพื่อทำหน้าที่เป็นม่านป้องกันไม่ให้ออกซิเจนหรือก๊าซอื่นในบรรยากาศเข้าไปทำปฏิกิริยากับเปลวอาร์คและโลหะที่กำลังหลอมเหลว ก๊าซคลุมที่เลือกใช้ได้แก่ ก๊าซเฉื่อยแอกทิฟก๊าซ อันริแอกทิฟก๊าซ และก๊าซผสม ดังแสดงในภาพที่ 31



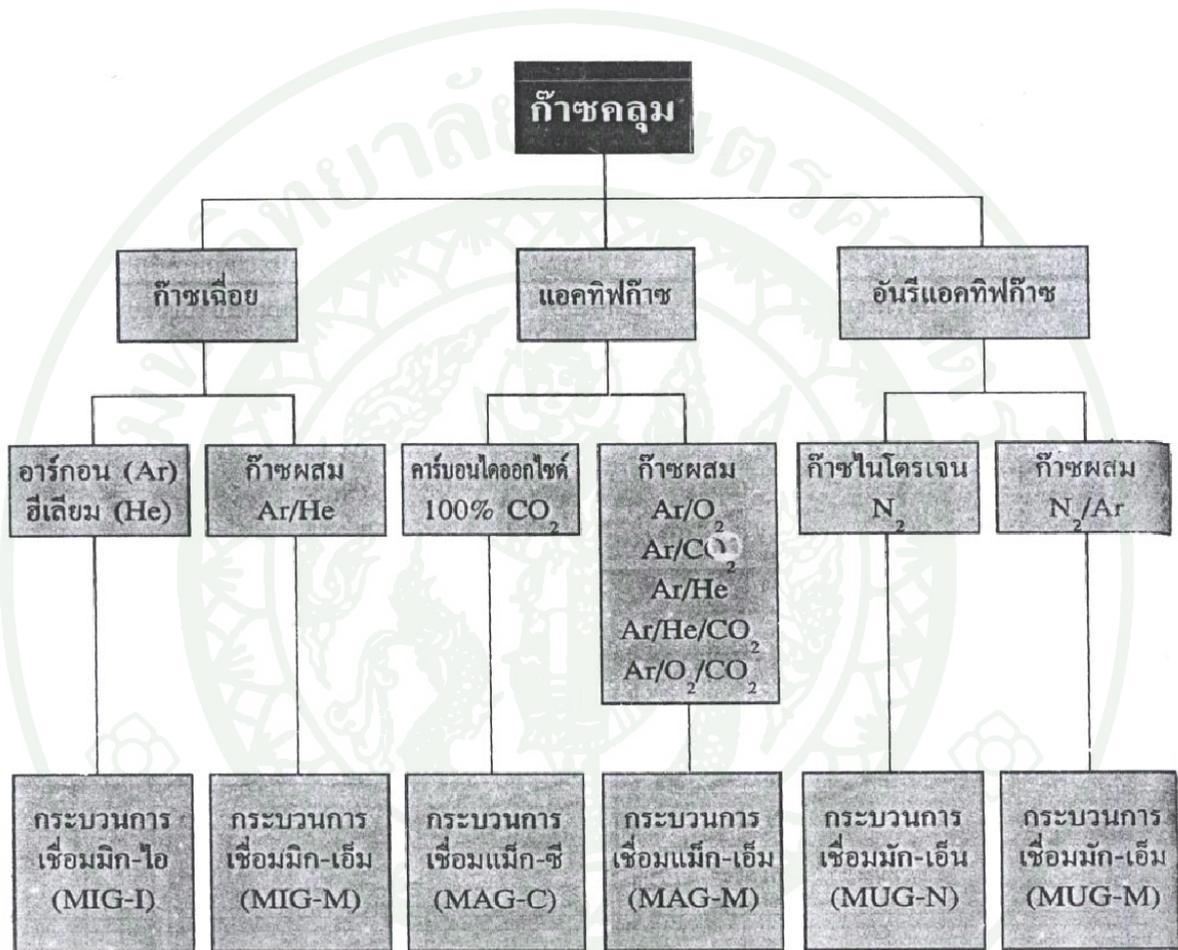
ภาพที่ 31 ลักษณะของกระบวนการเชื่อมอาร์คโลหะก๊าซคลุม

ที่มา: มานะศิษฐ์ (2542)

นอกจากก๊าซคลุมจะมีผลต่อความต้านแรงของรอยต่อและความบกพร่องในเนื้อโลหะเชื่อมแล้ว ก๊าซจะทำหน้าที่ปกคลุมบริเวณแนวเชื่อมและบ่อหลอมละลายเพื่อไม่ให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน หรือสิ่งสกปรกจากบรรยากาศรอบ ๆ บริเวณแนวเชื่อม เช่น ออกซิเจน ไนโตรเจน และไอน้ำในอากาศ เพื่อที่จะให้แนวเชื่อมมีคุณภาพสูง ก๊าซที่ใช้ปกคลุมในการเชื่อมแบบ GMAW นี้คือ ก๊าซอาร์กอน ฮีเลียม หรือก๊าซผสมสำหรับการเชื่อมโลหะจำพวกที่ไม่ใช่เหล็ก ส่วนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) สำหรับการเชื่อมเหล็ก ส่วนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กับก๊าซอาร์กอน หรือ กับก๊าซฮีเลียม หรือก๊าซอาร์กอนผสมก๊าซออกซิเจนเล็กน้อย สำหรับการเชื่อมเหล็กสแตนเลส คุณสมบัติของก๊าซแต่ละชนิดจะแตกต่างกัน การนำไปใช้งานก็ขึ้นอยู่กับลักษณะ โลหะงานเชื่อม ทำเชื่อม ความเร็วในการเชื่อม

ก๊าซที่นำมาใช้คลุมบ่อหลอมเหลวสำหรับกระบวนการเชื่อมอาร์คโลหะก๊าซคลุมแบ่งออก 4 ชนิดด้วยกันคือ ก๊าซเฉื่อย (อาร์กอน, Ar, ฮีเลียม, He) แอคทิฟก๊าซ (คาร์บอนไดออกไซด์ CO_2) อันรีแอคทิฟก๊าซ (ไนโตรเจน, N_2) และก๊าซผสม (Ar/CO_2 , Ar/O_2 , $\text{Ar}/\text{O}_2/\text{CO}_2$) การเลือกก๊าซคลุมชนิดใดขึ้นอยู่กับชนิดโลหะชิ้นงาน ขนาดลวดเชื่อมและชนิดการถ่ายโอนโลหะ เช่น การถ่ายโอนโลหะแบบละอองจะไม่เกิดขึ้นเมื่อใช้คาร์บอนไดออกไซด์เป็น

ก๊าซคลุมหรือก๊าซฮีเลียมเพียงอย่างเดียว เพราะการถ่ายโอนแบบละอองต้องใช้อาร์กอนเป็นก๊าซคลุมและมีปริมาณมากถึง 85% โดยก๊าซคลุมที่จะนำมาใช้จะมีผลต่อระยะซึมลึก ลักษณะตะเจ็บเชื่อมอัตราการเติมเนื้อโลหะ ปริมาณการเกิดควันและไอ ปรากฏโลหะ อัตราเร็วการเชื่อม คุณสมบัติทางกล การถ่ายโอนโลหะ การเชื่อมโลหะที่เป็นเหล็กนิยมนำคาร์บอนไดออกไซด์คลุม ภาพที่ 32 แสดงการแบ่งลักษณะการใช้ก๊าซคลุม



ภาพที่ 32 ประเภทกระบวนการเชื่อมอาร์คโลหะก๊าซคลุมเรียกชื่อตามชนิดของก๊าซ

ที่มา: มานะศิษฐ์ (2542)

3.1.5.1 ก๊าซอาร์กอน (Ar) เป็นก๊าซที่มีค่าความถ่วงจำเพาะ 1.38 สามารถปกคลุมแนวเชื่อมได้ดีกว่าก๊าซฮีเลียม อาร์กอนมีค่านำความร้อนต่ำ ถ้าของเหลวไฟถูกจำกัดให้แคบ จึงทำให้มีความหนาแน่นของเปลวไฟมีค่าสูงทำให้พลังงานจากเปลวไฟเชื่อม เปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนถ่ายเทเข้ากับชิ้นงานได้ดีมาก ซึ่งทำให้ได้รอยเชื่อมมีลักษณะแคบ และการซึม

ลึกลง มีเม็ดโลหะน้อย เป็นก๊าซเฉื่อยที่นำความร้อนต่ำ เกิดเปลวอาร์คแคบและมีความเข้มสูง ทำให้งานที่ได้รับพลังงานและความร้อนสูง แนวเชื่อมที่ได้จะแคบและซึมลึกดี ใช้ในการเชื่อมโลหะที่ไม่ใช่เหล็ก และโลหะผสม เช่น อลูมิเนียม แมกนีเซียม อลูมิเนียมผสมกับแมกนีเซียมและทองแดง

3.1.5.2 ก๊าซฮีเลียม (He) มีค่าถ่วงจำเพาะ ที่ 0.137 ซึ่งจะมากกว่าอากาศทำให้ ก๊าซฮีเลียมมักลอยหนีจากรอยเชื่อมเสมอ ฉะนั้นต้องให้อัตราการไหลของก๊าซปกคลุมสูง ฮีเลียมให้ความร้อนของเปลวไฟเชื่อมมากกว่าอาร์กอน จึงเหมาะสำหรับการเชื่อมวัสดุที่มีค่าความนำความร้อนสูง เช่น อลูมิเนียม แมกนีเซียม ทองแดง รอยเชื่อมที่ได้จะกว้างกว่าอาร์กอน แต่จะมีการซึมลึกน้อยกว่าเมื่อเทียบกับก๊าซอาร์กอน การเชื่อมโดยใช้ก๊าซฮีเลียมปกคลุมใช้มากใน ขบวนการเชื่อมอัตโนมัติ เพราะสามารถควบคุมระยะอาร์คได้สม่ำเสมอ เป็นก๊าซเฉื่อย น้ำหนักเบากว่าก๊าซอาร์กอน และการนำความร้อนดีกว่าก๊าซอาร์กอน เปลวอาร์คที่เกิดจากก๊าซฮีเลียมปกคลุม จะขยายวงกว้างและความเข้มข้นของการอาร์คจะต่ำกว่า แนวเชื่อมกว้าง และซึมลึกน้อยกว่าก๊าซอาร์กอน ใช้ในการเชื่อมโลหะที่ไม่ใช่เหล็ก เช่น อลูมิเนียม แมกนีเซียม และทองแดง ยังใช้ผสมกับก๊าซอื่น เพื่อใช้เป็นก๊าซปกคลุม

3.1.5.3 ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) จะแตกต่างจากอาร์กอนและฮีเลียมซึ่งประกอบด้วยอะตอมเพียงตัวเดียว แต่คาร์บอนไดออกไซด์จะมีโมเลกุลคาร์บอน 1 ตัว และออกซิเจน 2 ตัว มีสูตรทางเคมี CO₂ ที่ความดันบรรยากาศปรกติมีความหนาแน่นเท่ากับ 0.00198 g/cm³ ที่อุณหภูมิ 31°C และความดัน 7.53 Mpa จะอยู่ในสภาพของเหลวและเป็นของเหลวที่ความดันบรรยากาศเมื่ออุณหภูมิ -78.5°C มีค่าถ่วงจำเพาะ 1.52 ทำให้ปกคลุมแนวเชื่อมได้ดีกว่าก๊าซเฉื่อย คาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) มีราคาถูกกว่าก๊าซเฉื่อย ให้รอยเชื่อมกว้าง และมีการซึมลึกลง แต่มีข้อเสียคือ เปลวไฟเชื่อมไม่สม่ำเสมอและเกิดเม็ดโลหะมาก แต่เม็ดโลหะนี้สามารถลดลงได้โดยการใช้ระยะอาร์คที่น้อย ตลอดเวลาที่ทำกรเชื่อม ประกอบด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กับออกซิเจน ไม่เป็นก๊าซเฉื่อยเหมือนกับก๊าซอาร์กอนและฮีเลียม เปลวอาร์คที่เกิดขึ้นจะกว้างกว่าการใช้ก๊าซอาร์กอนแต่จะแคบกว่าการใช้ก๊าซฮีเลียม แนวเชื่อมที่ปกคลุมด้วย CO₂ จะมีความกว้างปานกลาง ซึมลึกดี การหลอมละลายดี

ตารางที่ 2 อุณหภูมิและเปอร์เซ็นต์ของคาร์บอนไดออกไซด์

จุดน้ำค้าง		น้ำหนักความชื้น	ความชื้นใน
°F	°C	(%)	CO ₂ (ppm)
-90	-68	0.00021	2
-80	-62	0.00043	4
-70	-57	0.00091	9
-60	-51	0.00188	19
-50	-46	0.00365	36
-40	-40	0.0066	66
-30	-34	0.0120	120
-20	-29	0.0218	218
-10	-23	0.0354	354
-0	-17.8	0.0590	590
10	-12.2	0.0980	980

3.2 หลักการเชื่อมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์คลุม (CO₂ Welding Process)

3.2.1 ถ้าก๊าซคลุมเป็นก๊าซเฉื่อย เช่น Ar, He เรียกกรรมวิธีนี้ว่า MIG (Metal Insert Gas)

3.2.2 ถ้าก๊าซคลุมเป็นก๊าซไม่เฉื่อย เช่น Ar + CO₂ เรียกกรรมวิธีนี้ว่า MAG (Metal Active Gas)

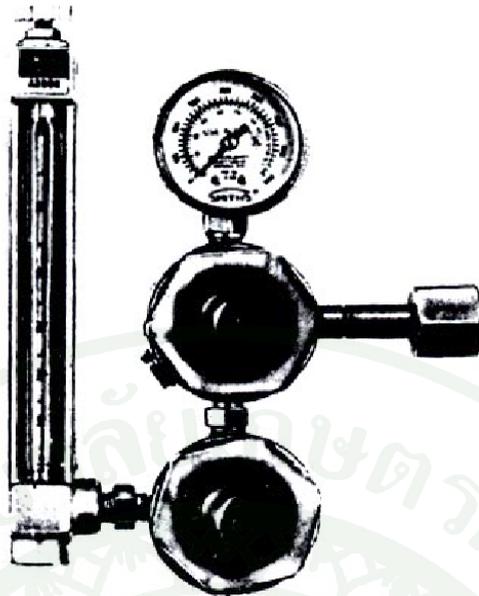
3.2.3 ถ้าก๊าซคลุมเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เรียกกรรมวิธีเชื่อมนี้ว่า การเชื่อมด้วย CO₂

ตารางที่ 3 ก๊าซปกคลุมในการเชื่อมมิกและการนำไปใช้งาน

ก๊าซปกคลุม	ก๊าซปกคลุม	การนำไปใช้งาน
อาร์กอน (Ar)	Insert	สำหรับเชื่อมโลหะเกือบทุกชนิด ยกเว้นเหล็ก
ฮีเลียม (He)	Insert	เชื่อมโลหะที่ไม่ใช่เหล็ก เช่น อลูมิเนียม แมกนีเซียม และทองแดง
คาร์บอนไดออกไซด์ (CO ₂)	Active	ใช้เป็นก๊าซปกคลุมในการเชื่อมเหล็กกล้าละมุนและเหล็กกล้าคาร์บอน ส่วนใหญ่ที่ใช้ในการเชื่อมมิกจะใช้กับระบบส่งถ่ายน้ำโลหะแบบจุ่มและแบบหยด ไม่เหมาะที่จะใช้กับการส่งถ่ายน้ำโลหะแบบพ่น
ก๊าซผสมอาร์กอนกับคาร์บอนไดออกไซด์ (Ar – CO ₂)	Active	ใช้กับงานเชื่อมเหล็กกล้าละมุนและเหล็กกล้าคาร์บอน ทำให้ความร้อนบริเวณการอาร์คสูงขึ้นการซึมลึกดีและมากขึ้นเหมาะกับการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมแกนฟลักซ์

3.3 อัตราการไหลของก๊าซคลุม (Gas Flow)

อัตราการไหลเป็นตัวแปรปฐมภูมิ ที่ต้องเลือกก่อนปฏิบัติการเชื่อม อัตราการไหลของก๊าซลิตร/ นาที (l/ min) การปรับอัตราการไหลของก๊าซ (Gas Flow) ปกคลุมเพื่อให้ก๊าซที่กระจายออกมามีความละเอียดดีที่ฉีดออกมาหัวฉีด (Nozzle) ควรมีการไหลแบบราบเรียบ (Laminar Flow) คือมีแนวการไหลเป็นเส้นตรง อัตราการไหลสูงเกินไปจะเกิดการปั่นป่วน (Turbulent) คือ เกิดการหมุนวนของก๊าซ ก๊าซที่หมุนวนนี้จะผสมกับอากาศแล้วรวมตัวเข้ากับเนื้อโลหะเชื่อมทำให้รอยเชื่อมสกปรกและเสียคุณสมบัติที่ดีไป แต่ถ้าไม่สามารถคลุมไว้ได้ดีพอก็จะเกิดโพรงอากาศและความพรุนในเนื้อโลหะเชื่อม ดังนั้นควรเลือกอัตราการไหลของก๊าซคลุมให้พอดีอย่ามากหรือน้อยเกินไป ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ซึ่งมีค่าความถ่วงจำเพาะ = 1.52 การปรับอัตราการไหลของก๊าซปกคลุมโดยสามารถ คัดจากขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของลวดเชื่อม 10 เช่น ϕ ลวดเชื่อม 1.0 มม. จะได้ $1.0 \times 10 = 10$ ลิตร/ นาที ภาพที่ 33 แสดงอุปกรณ์ควบคุมการไหลของก๊าซ



ภาพที่ 33 อุปกรณ์ควบคุมความดันละมาตรการวัดการไหล

ที่มา: มานะศิษฏ์ (2542)

ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) เป็นสารประกอบไม่ใช่ก๊าซเฉื่อยเหมือนกับก๊าซอาร์กอนและก๊าซฮีเลียม แต่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นก๊าซอีกชนิดหนึ่งที่นิยมใช้กันมากเพื่อนำมาเป็นก๊าซปกคลุมในการเชื่อมมิกด้วยเหตุผลประการหนึ่งก็คือ เป็นก๊าซที่หนักกว่าอากาศ (หนักกว่าอากาศประมาณ 50 เท่า) มีข้อดี คือก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ราคาถูก ใช้เชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอน มีการซึมลึกสูง เมื่อเชื่อมอัตโนมัติจะทำงานได้เร็ว ถ้าเชื่อมแบบกึ่งอัตโนมัติจะทำให้ต้นทุนการเชื่อมต่ำ ส่วนข้อเสีย คือก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะให้การอาร์คที่รุนแรง จึงมีประกายโลหะกระเด็นมาก ทำให้ประสิทธิภาพการหลอมของลวดเชื่อมลดลง การอาร์คไม่ค่อยคงที่เปลี่ยนแปลงอยู่เสมอ ต้องใช้การเชื่อมที่ความยาวอาร์คสั้นและให้ความยาวอาร์คคงที่ตลอดเวลาของการเชื่อม

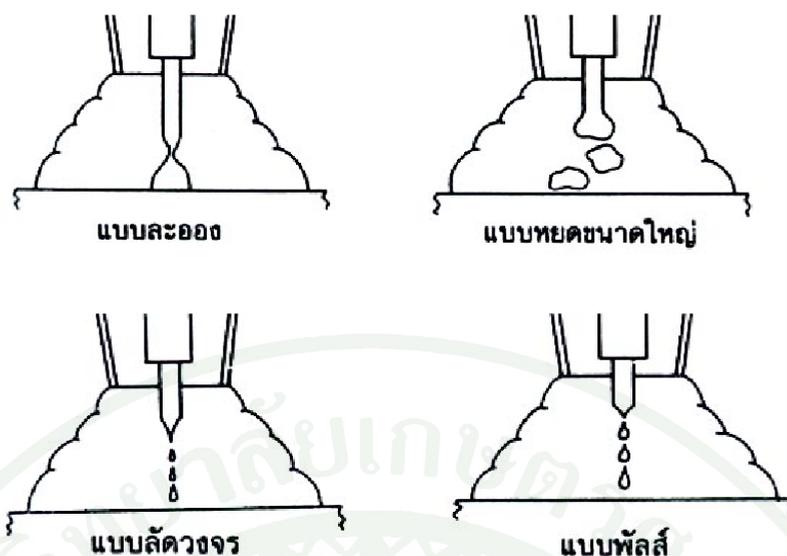
ตารางที่ 4 อัตราการไหลของก๊าซคลุมและระยะห่างของหัวฉีดที่เหมาะสม

ขนาดลวดเชื่อม (mm)	กระแสเชื่อม (A)	ระยะห่างของหัวฉีด (mm)	อัตราการไหล ของก๊าซคลุม (L/ min)
1.2	100 – 200	10 – 15	15 – 25
	200 – 300	15 – 20	20 – 30
1.6	200 – 300	15 – 20	20 – 30
	300 – 450	20 – 25	20 – 30

3.4 การส่งถ่ายนำโลหะ (Metal Transfer)

การเชื่อม MIG/MAG เป็นขบวนการเชื่อมแบบสั้นเปลือกลวดเชื่อม โดยลวดเชื่อมหลอมละลายเค็กลงไปในแนวเชื่อม ซึ่งตัวป้อนลวดจะดึงลวดออกจากม้วนผ่านไปตามท่อที่อยู่ภายในสายหัวเชื่อม และจะไปยังจุดสุดท้ายที่ปลายหัวเชื่อม

การที่ปลายลวดเชื่อมหลอมและเค็กลงไปยังบ่อหลอมละลายนั้นเรียกว่า “ถ่ายเทโลหะ” (Metal Transfer) ซึ่งมีอยู่ด้วยกันหลายแบบ เช่น Short Arc, Spray Arc, Globular Transfer, และ Pulse เป็นต้น ความแตกต่างของการถ่ายเทโลหะแต่ละชนิดนั้น ขึ้นอยู่กับกระแสไฟ, แรงเคลื่อนในการอาร์ค ขนาดลวดและชนิดของก๊าซปกคลุม ภาพที่ 33 แสดงการถ่ายโอนโลหะ



ภาพที่ 34 การถ่ายโอนโลหะทั้ง 4 แบบ

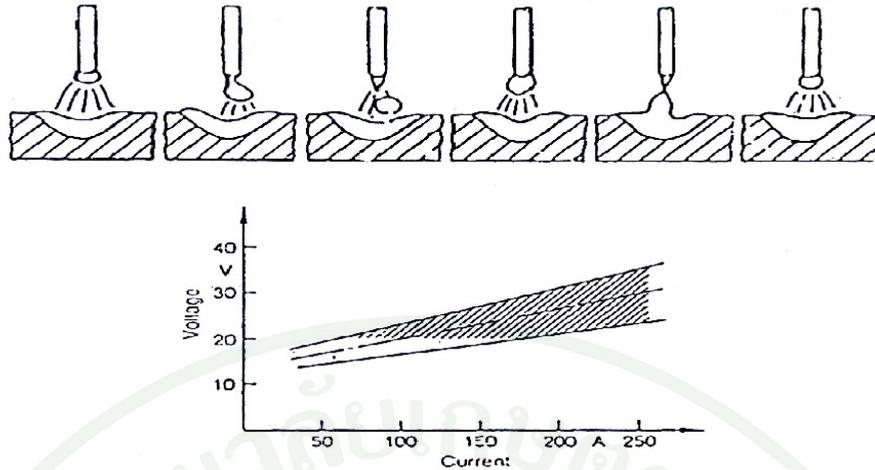
ที่มา: มานะศิษฐ์ (2542)

การถ่ายโอนโลหะแบ่งออกได้ 4 แบบ คือ แบบละออง (Spray) แบบหยดขนาดใหญ่ (Globular) แบบลัดวงจร (Short Circuit) และแบบพัลส์ (Pulsed)

3.4.1 การส่งถ่ายน้ำโลหะ แบบจุ่ม (Dip Transfer) หรือแบบลัดวงจร (Short Circuit Arc) กระแสเชื่อมต่ำ เช่นการเชื่อมโลหะแผ่นบาง น้ำโลหะจะเย็นตัวเร็ว ความร้อนในการถ่ายเท ประมาณ 70 – 100 ครั้ง/วินาที เกิดขึ้นช่วงลวดเชื่อมสัมผัสกับบ่อหลอมละลาย

3.4.2 การส่งถ่ายน้ำโลหะ แบบพ่น (Spray Transfer) เป็นการถ่ายเทโลหะที่ใช้กระแสเชื่อมและแรงเคลื่อนสูงกว่าแบบอื่นทั้งหมด การถ่ายเทน้ำโลหะประมาณ 100 – 300 ครั้งต่อวินาที ก๊าซที่ใช้คลุมอาร์กอน (Ar) เชื่อมโลหะความหนามาก

3.4.3 การส่งถ่ายน้ำโลหะแบบหยด (Globular Transfer) กระแสเชื่อมอยู่ระหว่าง Spray Arc กับ Short Arc คลุมด้วยก๊าซ CO_2 คาร์บอนไดออกไซด์ ส่งถ่ายโลหะประมาณ 100 ครั้งต่อวินาที ใช้แรงเคลื่อนค่อนข้างสูงมากกว่า 20 โวลต์ เชื่อมงานที่มีความหนาตั้งแต่ 2 มิลลิเมตร เชื่อมแนวทับหน้าได้ดี ดังแสดงในภาพที่ 35



ภาพที่ 35 กราฟแสดงการถ่ายทำน้ำโลหะแบบหยด (Globular Transfer)

ที่มา: มานะศิษฏ์ (2542)

3.4.4 การถ่ายส่งน้ำโลหะแบบพัลส์ (Pulsed Transfer) กระแสเชื่อมค่าสูง (Peak) และค่าต่ำ (Back Ground) สลับกัน ช่วงกระแสต่ำทำให้ลวดเชื่อมหลอมละลาย และช่วงกระแสค้ำจะติดหยดน้ำโลหะพุ่งต่อเนื่องอย่างเป็นระเบียบตามตารางที่ 5

ตารางที่ 5 การเปรียบเทียบกระแสเชื่อม, แรงเคลื่อนและการนำไปใช้งานของการส่งน้ำโลหะแบบต่าง ๆ

ชนิดการส่งถ่าย น้ำโลหะ	ขนาดแรงเคลื่อน (โวลต์)	กระแส (แอมป์)	การนำไปใช้งาน
Short Arc	13 – 23	60 – 210	เชื่อมวัสดุบาง, เชื่อมทุกท่าเชื่อม
Spray Transfer	20 – 40	200 – สูง กว่า	เชื่อมโลหะหนา ให้อัตราการเติมลวดเชื่อมสูง เชื่อมได้ในท่าราบ, ท่าฟิลเลท, ขนานนอนและ ท่าตั้ง
Globular Transfer	20 – 26	200 – 280	ให้อัตราการเติมลวดเชื่อมสูงกว่า Short Arc ให้ ความร้อนต่ำกว่า Spray Arc
Pulse Arc	23 – 25	60 – 220	สำหรับเชื่อมโลหะบาง เช่น เหล็กกล้าอะลูมิเนียม, สแตนเลส, อลูมิเนียม ฯลฯ

3.5 ตัวแปรการเชื่อม (Welding Parameters)

กระแสเชื่อมที่เหมาะสมอยู่ที่การปรับ 2 ตัวแปรคือ อาร์คโวลต์เตจ/ กระแสเชื่อม (Amp) และความเร็วลวด ตัวแปรการเชื่อมหลักที่เกี่ยวข้องกับการเชื่อมอาร์คโลหะ ก๊าซคลุมมีอยู่สามชนิด คือ

3.5.1 ตัวแปรเลือกขั้นต้น (Preselected Variables) ตัวแปรนี้จะถูกกำหนดขึ้นมาก่อนการเชื่อมโดยมีองค์ประกอบที่เกี่ยวข้องกับการเลือกตัวแปร ได้แก่ ชนิดโลหะชิ้นงาน ความหนาแน่นแนวเชื่อม อัตราการเติมเนื้อโลหะและคุณสมบัติทางกลที่ต้องการ ตัวแปรเหล่านี้จะเปลี่ยนแปลงไม่ได้ขณะกำลังปฏิบัติการเชื่อม ตัวแปรเลือกขั้นต้นประกอบด้วย

- ชนิดลวดเชื่อม
- ขนาดลวดเชื่อม
- ชนิดก๊าซคลุม
- อัตราการไหลของก๊าซคลุม

3.5.2 ตัวแปรปรับปฐมภูมิ (Primary Adjustable Variables) ตัวแปรปรับปฐมภูมิเป็นตัวแปรที่ใช้ควบคุมกระบวนการเชื่อมหลังจากเลือกตัวแปรขั้นต้นได้แล้ว ตัวแปรนี้จะควบคุมระยะซึมลึก ความกว้างตะเข็บเชื่อม ความสูงตะเข็บเชื่อม ความเสถียร ค่าที่ดีที่สุดในขณะที่ทำงานเชื่อมอยู่และมีช่วงการปรับได้กว้าง ตัวแปรปฐมภูมิประกอบด้วย

- อัตราเร็วป้อนลวดเชื่อม
- แรงดันอาร์ค
- อัตราเร็วการเคลื่อนที่หัวเชื่อม

3.5.3 ตัวแปรปรับทุติยภูมิ (Secondary Adjustable Variables) ตัวแปรปรับทุติยภูมิ เป็นตัวแปรรองจากตัวแปรปรับปฐมภูมิ สามารถปรับเปลี่ยนอย่างต่อเนื่องขณะกำลังปฏิบัติการเชื่อม ตัวแปรนี้ไม่มีผลกระทบโดยตรงต่อการเกิดตะเข็บเชื่อม (Bead Formation) แต่ส่งผลให้ตัวแปรปรับทุติยภูมิเกิดการเปลี่ยนแปลงและมีผลให้รูปตะเข็บเชื่อมเปลี่ยนแปลงไปอีกทอดหนึ่ง ตัวแปรเหล่านี้ประกอบด้วย

- ระยะ โพล์ลวด (Stick Out)
- มุมหัวเชื่อม (Nozzle Angle)
- อัตราเร็วป้อนลวด (Wire Feed Speed)

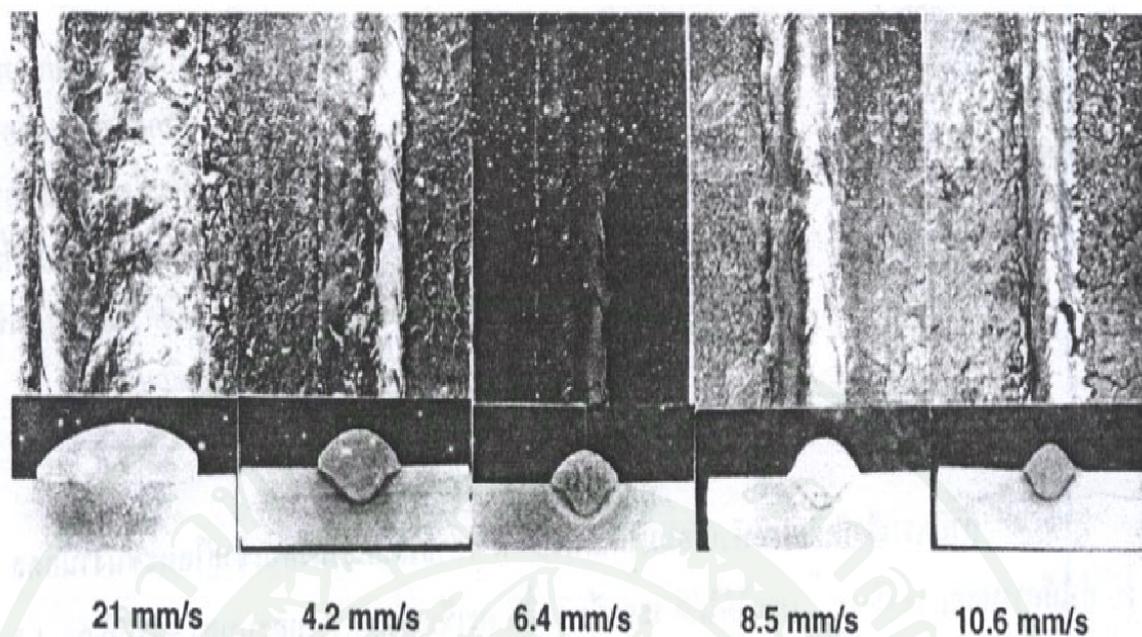
ตารางที่ 6 แสดงค่าเปรียบเทียบความหนาแน่นของกระแสสำหรับลวดเชื่อมขนาด 0.9 และ 1.2 มิลลิเมตร

ขนาดลวดเชื่อม (mm)	พื้นที่หน้าตัดลวดเชื่อม (mm ²)	กระแสเชื่อม (A)	ความหนาแน่นของกระแส (A/ mm ²)	อัตราการเติมเนื้อโลหะ (kg/ hr)
0.9	0.636	200	200/ 0.636 = 314.46	3.2
1.2	1.130	200	200/ 1.13 = 176.99	2.8

จากตารางที่ 6 การเพิ่มขึ้นของอัตราการเติมเนื้อโลหะของลวดเชื่อมขนาดเล็กจะมากกว่าขนาดใหญ่

การเลือกปฏิบัติต่อตัวแปรทั้งสามลำดับดังนี้ คือ ต้องเลือกตัวแปรขั้นต้นก่อนการเชื่อมตัวแปรปรับปฐมภูมิก็เลือกก่อนเช่นกัน แต่กระทำเมื่อเปิดเครื่องเชื่อมแล้ว ส่วนตัวแปรทุติยภูมิต้องทำขณะที่กำลังเชื่อม

ตัวแปรเหล่านี้มีผลระยะซึมลึก ความสูง ความกว้าง เมื่อเชื่อมด้วยระบบแรงดันคงที่ (CV) กระแสเชื่อมจะถูกควบคุมด้วยอัตราเร็วป้อนลวด mm/ s ดังแสดงในภาพที่ 36



ภาพที่ 36 ผลกระทบจากอัตราเร็วเคลื่อนที่หัวเชื่อมต่อการเกิดตะเข็บเชื่อมและลักษณะตะเข็บเชื่อมภายใต้เงื่อนไข กระแสเชื่อม 175 แอมแปร์ แรงดันอาร์ค 12 โวลต์ ขนาดลวดเชื่อม 0.9 mm ก๊าซคลุมคาร์บอนไดออกไซด์ และระยะ โพล์ลวด 9.5 mm

ที่มา: มานะศิษฏ์ (2542)

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. ซอฟต์แวร์

- 1.1 โปรแกรม UNIGRAPHICS สำหรับเขียนแบบสามมิติ และสร้างเส้นทางเดินของหัวเชื่อมในการขึ้นรูป
- 1.2 โปรแกรม COSMOS สำหรับวิเคราะห์ความแข็งแรงของชิ้นงานกลวงที่สร้างขึ้น

2. ฮาร์ดแวร์

- 2.1 เครื่องคอมพิวเตอร์
- 2.2 เครื่องกัด CNC แบบ 3 แกน
- 2.3 เครื่องเชื่อม Gas Metal Arc Welding (GMAW)
- 2.4 ลวดเชื่อม ER70S-6
- 2.5 แผ่นเหล็กรองพื้น S50C
- 2.6 ถังก๊าซ CO₂ และ Ar
- 2.7 อุปกรณ์จับยึดหัว nozzle ของเครื่องเชื่อมกับเครื่องกัด CNC
- 2.8 ดอกกัดชิ้นงาน
- 2.9 เวอร์เนียคาลิเปอร์ (Vernier Caliper)
- 2.10 เครื่องตรวจสอบด้วยรังสี
- 2.11 เครื่องทดสอบความแข็งแบบรอกเวล (Rockwell Hardness Test)
- 2.12 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (SEM)
- 2.13 เครื่องทดสอบแรงดึง (UTS)
- 2.14 เครื่องอัดขึ้นรูป (Compression Moulding Machine)

วิธีการ

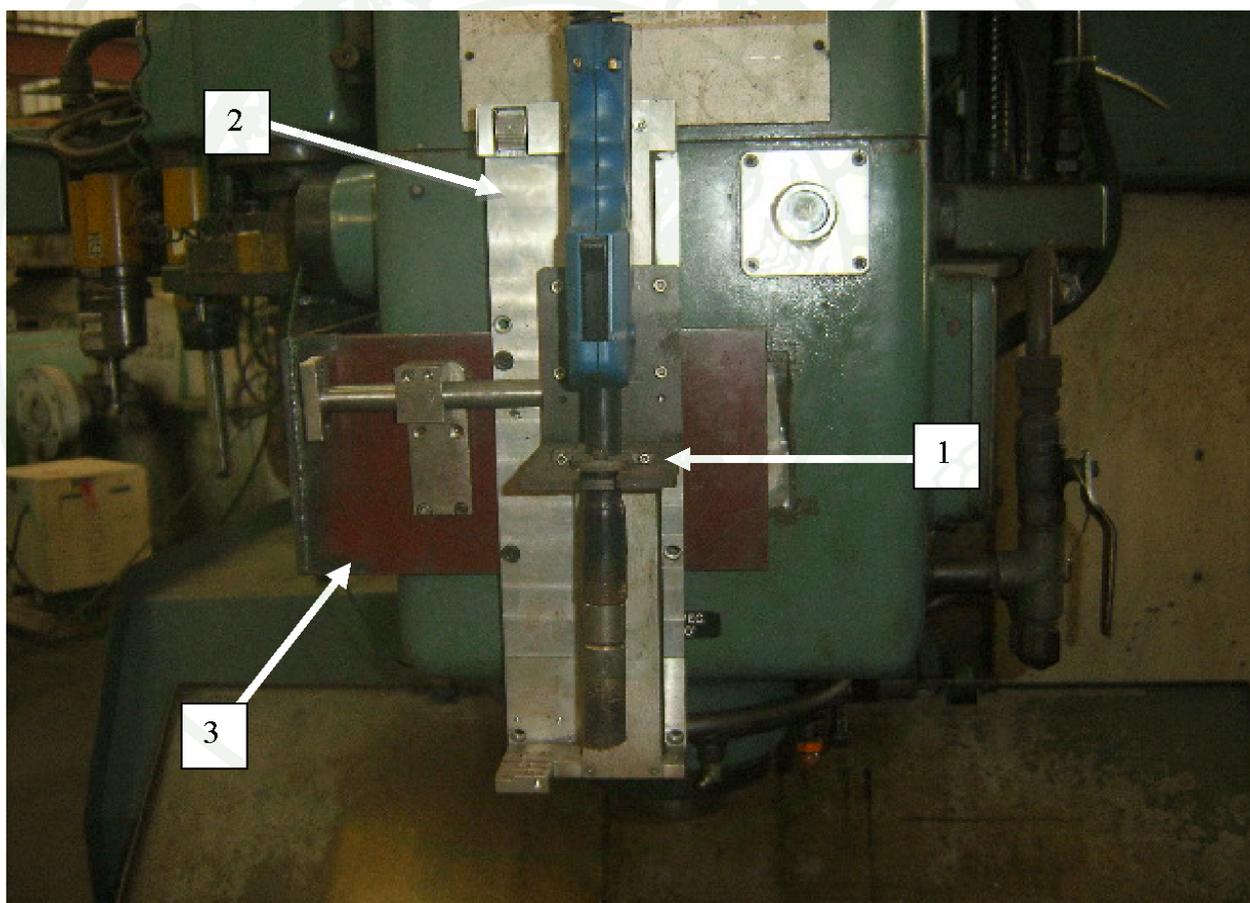
ขั้นตอนดำเนินการในงานวิจัยนี้ ได้แสดงในภาพที่ 37



ภาพที่ 37 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

1. การออกแบบและสร้างชุดจับยึดหัวเชื่อมสำหรับการเติมเนื้อวัสดุ

ในการเติมเนื้อวัสดุจะใช้ชุดหัวเชื่อมที่ติดตั้งกับเครื่องกัดแบบสามแกน เพื่อให้หัวเชื่อมสามารถเคลื่อนที่เพื่อไปเติมเนื้อวัสดุตามรูปแบบสามมิติที่ทำการวาดจาก CAD และทำการกัดแต่งผิวหลังกระบวนการเชื่อม เริ่มจากการออกแบบอุปกรณ์สำหรับจับยึดหัวเชื่อมกับเครื่องกัดสามแกน โดยการสร้างชุดจับยึดหัวเชื่อม แสดงในหมายเลข 1 ของภาพที่ 37 และติดตั้งลงบนรางเลื่อนแนวตั้งสำหรับยกหัวเชื่อมขึ้นเพื่อไม่ให้หัวเชื่อมชนชิ้นงานในขั้นตอนการกัดแต่งผิว แสดงในหมายเลข 2 ของภาพที่ 37 จากนั้นทำการติดตั้งรางเลื่อนบนแผ่นเหล็กที่ติดตั้งบนเครื่องกัดสามแกน แสดงในหมายเลข 3 ของภาพที่ 38



ภาพที่ 38 ส่วนประกอบของชุดจับยึดหัวเชื่อมที่ติดตั้งลงบนเครื่องกัดสามแกน

2. การทดลองหาค่าพารามิเตอร์ในการเชื่อมด้วยเครื่อง GMAW

ค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องในการเชื่อมลวด ER70S-6 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.2 mm บนแผ่นโลหะ SS400 มี ดังนี้

- ความสูงระหว่างชิ้นงานกับหัวเชื่อม (H)
- กระแส (I)
- ความต่างศักย์ (V)
- ความเร็วในการเดินหัวเชื่อม (v)
- อัตราการป้อนลวด (F)
- อัตราส่วนก๊าซคลุม CO₂ และ Ar

ทำการตรวจสอบข้อมูลสำหรับค่าพารามิเตอร์ในการเชื่อมจากคู่มือในการเชื่อมและงานวิจัยต่างๆ จากนั้นนำค่าพารามิเตอร์ต่างๆมาทำการทดลองที่ 1 เพื่อปรับเปลี่ยนค่าให้เหมาะสมกับเครื่องเชื่อม และลวดเชื่อมที่ใช้อยู่ จะได้ค่าพารามิเตอร์สำหรับเชื่อมในงานวิจัย

2.1 การทดลองที่ 1

2.1.1 ทำการปรับค่ากระแส และ ความต่างศักย์ โดยกำหนดให้ค่าอื่นๆ คงที่ดังนี้ ความสูงระหว่างชิ้นงานกับหัวเชื่อม เป็น 10 มม. อัตราการป้อนลวด 2.5 เมตร/วินาที ความเร็วในการเดินหัวเชื่อม 300 มม./นาที ก๊าซคลุม คาร์บอนไดออกไซด์ 10 ลิตร/นาที และทำการเลือกค่ากระแส กับความต่างศักย์ที่เหมาะสม โดยพิจารณาจากรอยแนวเชื่อมและสะเก็ดไฟระหว่างเชื่อม

2.1.2 เมื่อได้ค่ากระแส และความต่างศักย์ที่เหมาะสม จึงทำการปรับความสูงระหว่างชิ้นงานกับหัวเชื่อม และ อัตราส่วนก๊าซคลุม และทำการเลือกค่าความสูงระหว่างชิ้นงานกับหัวเชื่อม และ อัตราส่วนก๊าซคลุม โดยพิจารณาจากรอยแนวเชื่อมและสะเก็ดไฟระหว่างเชื่อม

2.1.3 นำพารามิเตอร์ที่เลือกจากการทดลองที่ 2.1.1 และ 2.1.2 มาทำการเชื่อมเป็นแนวยาว 100 มม. โดยใช้ความเร็วในการเดินหัวเชื่อม (v) ระหว่าง 300-500 มม./นาที และทำการวัดระยะความกว้าง (w) กับความสูง (h) ของรอยแนวเชื่อมด้วยเครื่องมือวัด Calipers จำนวน 5

จุดต่อรอยแนวเชื่อม และทำการหาค่าเฉลี่ย และเลือกค่าความเร็วในการเดินหัวเชื่อมที่ทำให้ รอยแนวเชื่อมมีความสูงและความกว้างเหมาะสมในการเชื่อมขึ้นรูป

ทำการทดลองหาระยะห่างระหว่างรอยแนวเชื่อมที่เหมาะสมในการขึ้นรูป เพื่อให้การขึ้นรูปในแต่ละชั้นมีผิวเนียนสม่ำเสมอโดยที่ไม่เกิดรอยต่อระหว่างรอยแนวเชื่อม ซึ่งจะใช้ค่าพารามิเตอร์ในการเชื่อมที่ได้จากการทดลองที่ 1

2.2 การทดลองที่ 2

2.2.1 นำค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดจากการทดลองที่ 1 มาทำการเชื่อมเป็นแนวจำนวน 5 แนวติดต่อกันโดยทำการเว้นระยะห่างในแต่ละแนวเท่าๆกัน และทำการเปลี่ยนระยะห่างในแต่ละแนวตั้งแต่ 0 – 5 มม. และเลือกค่าระยะห่างระหว่างแนวที่เหมาะสมกับการขึ้นรูป

ทำการทดลองเส้นทางเดินของหัวเชื่อม (Deposition Path) เพื่อหาเส้นทางเดินของหัวเชื่อมที่เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูปในแต่ละชั้นโดยทำการขึ้นรูปขึ้นงานตัวอย่างด้วยเส้นทางเดินแบบ Zigzag และ Contour ซึ่งพิจารณาจากพื้นผิวที่ได้มีความสม่ำเสมอ และ กระบวนการเชื่อมมีความต่อเนื่อง

2.3 การทดลองที่ 3

2.3.1 นำค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดจากการทดลองที่ 1 และ 2 มาทำการทดลองเชื่อมขึ้นงานด้วยเส้นทางเดินชนิด Zigzag และ Contour เพื่อพิจารณาเลือกเส้นทางเดินที่มีความเหมาะสม

3. การทดสอบค่าคุณสมบัติต่างๆที่ได้จากพารามิเตอร์ที่เลือก

3.1 ขั้นตอนการทดสอบความแข็งขึ้นงานตัวอย่าง

นำชิ้นงานที่ได้เข้าขบวนการตรวจสอบความแข็งขึ้นงานทดลองด้วยเครื่องทดสอบความแข็ง แบบร็อคเวลล์ (Rockwell Hardness Tester)

1. เตรียมเครื่องทดสอบความแข็งยูนิเวอร์แซล (ทำการทดสอบด้วยการทดสอบแบบรีอคเวลล์ สเตล B)

- หัวกดบอลขนาด 1/16
- น้ำหนักครวม 100 กิโลกรัม Force

2. นำชิ้นทดสอบวางบนแท่นรองรับ ซึ่งตั้งฉากกับหัวกดทดสอบ
3. จับชิ้นงานทดสอบกับหัวกดนำ
4. ทดสอบด้วยแรงครรวม โดยชิ้นทดสอบจะถูกกดเพิ่มด้วยแรง 100 กิโลกรัม
5. บันทึกค่าความแข็งที่ได้จากการทดสอบ

1	2	3	4	5
6	7	8	9	10
11	12	13	14	15

ภาพที่ 39 หมายเลขจุดบนชิ้นงานที่ทำการทดสอบค่าความแข็ง



ภาพที่ 40 แสดงชิ้นงานก่อนวัดค่าความแข็ง

3.2 การทดสอบกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน เป็นเครื่องมือวิทยาศาสตร์ช่วยขยายภาพประเภทที่ใช้ลำแสงอิเล็กตรอนฉายหรือส่องกราดไปบนผิวของตัวอย่างที่ต้องการตรวจสอบให้ได้ข้อมูลของลักษณะพื้นผิวปรากฏเป็นภาพขยายที่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่าหรืออาจบันทึกภาพที่บนแผ่นฟิล์มได้

3.2.1 หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน

โดยหลักการของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน แล้วภายในคอลัมน์ (Column) ของเครื่องจะมีแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน (Electron Gun) ซึ่งทำหน้าที่ปลดปล่อยอิเล็กตรอนออกมา (Primary Electron) เราจะควบคุมจำนวนอิเล็กตรอนนั้นด้วยศักย์ไฟฟ้าสูง ๆ (High Voltage) และใช้เลนส์แม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Lens) โฟกัสให้อิเล็กตรอนนั้นตกกระทบชิ้นงาน และเมื่ออิเล็กตรอนตกกระทบชิ้นงานจะเกิดอันตรกิริยา (Interaction) ได้สัญญาณแบบต่าง ๆ เช่น สัญญาณจากอิเล็กตรอนในชิ้นงานที่หลุดออกมา (Secondary Electron) อิเล็กตรอนที่กระดอนกลับ (Backscattered Electron) หรือ x-ray สัญญาณแต่ละชนิดจะถูกจับโดย Detector และแปลผลเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า และแปลเป็นภาพในที่สุด

3.2.2 การเตรียมผิวชิ้นงานที่จะทำการทดสอบ

ตัวอย่างที่จะศึกษาต้องแห้ง ไม่มีความชื้น และไม่ปนเปื้อนสารจำพวกไฮโดรคาร์บอน (เช่น น้ำมัน) เพราะเมื่อชิ้นงานอยู่ภายใต้สภาวะสุญญากาศ ความชื้นหรือสารไฮโดรคาร์บอนจะแตกตัวเป็นโมเลกุลเล็ก ๆ ขัดขวางเส้นทางของอิเล็กตรอน ทำให้ภาพที่ได้ไม่ชัดเจน อีกทั้งโมเลกุลเหล่านี้อาจไปเกาะส่วนต่าง ๆ ของกล้อง เช่น ผิวของแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน เป็นเหตุให้แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนมีอายุการใช้งานสั้นลง หากตัวอย่างเป็นวัสดุที่ไม่นำไฟฟ้าต้องเคลือบผิวหน้าชิ้นงานด้วยฟิล์มที่นำไฟฟ้าบาง ๆ (ประมาณ 100 อังสตรอม) ซึ่งวัสดุที่นิยมนำมาใช้เคลือบผิวได้แก่ ทอง ทองผสมแพลทินัม และคาร์บอน การเคลือบด้วยทองหรือทองผสมแพลทินัมจะให้ภาพที่คมชัดกว่าการเคลือบด้วยคาร์บอน แต่จะทำให้ข้อมูลทางเคมีของเทคนิค EDS บิดเบือนไปได้ในกรณีที่ต้องการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีสำหรับตัวอย่างที่ไม่นำไฟฟ้าอาจไม่ต้องทำการเคลือบก็ได้ โดยเลือกใช้ความต่างศักย์น้อย ๆ (ต่ำกว่า 3 kV) ซึ่ง

ภายใต้เงื่อนไขที่เหมาะสมจะไม่เกิดการสะสมประจุที่ผิว (charging) เนื่องจากปริมาณกระแสเข้าไปเท่ากับกระแสออก หรือเลี้ยงไปใช้ SEM แบบสุญญากาศตำแหน่ง

3.3 การตรวจสอบด้วยรังสี

การตรวจสอบด้วยรังสี (Radiographic Examination) หมายถึง การฉายรังสีผ่านทะลุเนื้อโลหะและแนวเชื่อมเข้าไปหาฟิล์ม ปริมาณความเข้มของรังสีที่ตกกระทบและทำ ปฏิกิริยาบนฟิล์มขึ้นอยู่กับคุณสมบัติในการดูดกลืน รังสีของโลหะและรอยบกพร่อง รอยบกพร่องที่มีความหนาแน่นน้อยกว่าเนื้อโลหะ จะปรากฏอยู่ในฟิล์มเป็นบริเวณที่มีความเข้มสูง โดยในการตรวจสอบนี้ใช้สำหรับหารอยบกพร่องใด ๆ ที่อยู่ในรอยเชื่อมและส่วนที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน ซึ่งมีผลต่อความแข็งแรงของวัสดุ ทั้งรอยบกพร่องที่เกิดขึ้นในระหว่างการเชื่อมสร้างหรือการเชื่อมซ่อม

3.3.1 การเตรียมผิวชิ้นงานที่จะทำการทดสอบ

ผิวชิ้นงานที่บริเวณที่จะทำการทดสอบจะต้องสะอาด ปราศจากสิ่งที่จะเป็นอุปสรรคในการทดสอบบนภาพถ่ายด้วยรังสีได้ เช่น เม็ดโลหะ (Spatter) รอยเชื่อมช่วยยึดชั่วคราว แผ่นสนิม รอยขีดข่วนทำให้ผิวทดสอบขรุขระ แนวเชื่อมที่ไม่สม่ำเสมอหรือเป็นรอยคลื่นทั้งด้านใน (ซึ่งสามารถเข้าไปถึงได้) และด้านนอกต้องได้รับการกำจัดออกด้วยกระบวนการที่เหมาะสมโดยการใช้ เครื่องขัด หรือเครื่องกัดแต่งผิว จนกระทั่งได้ระดับที่ไม่สามารถสร้างความสับสนต่อภาพปรากฏของข้อบกพร่องในภาพถ่ายด้วยรังสี

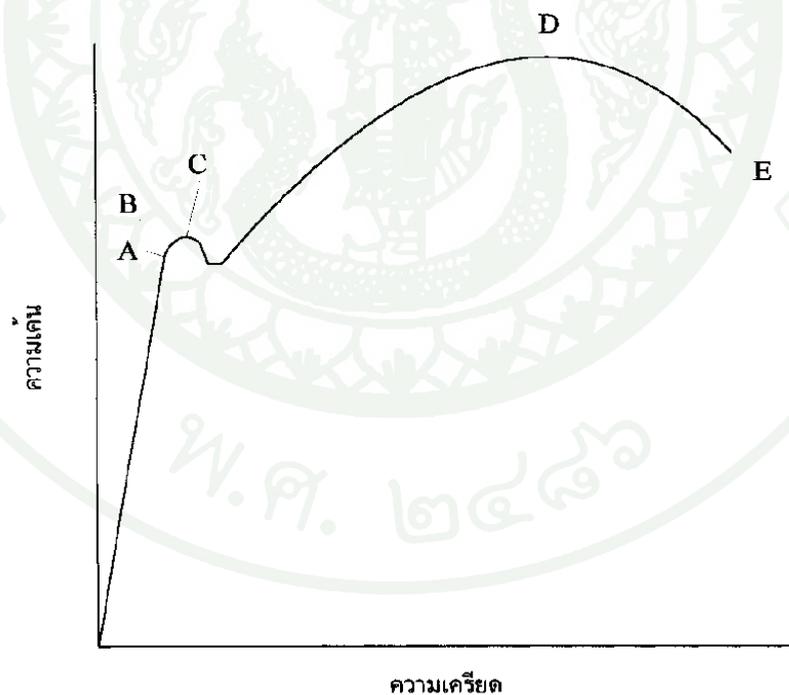
3.3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ทดสอบ (Equipment Used)

- แหล่งกำเนิดรังสี
- ฟิล์มสำหรับภาพถ่ายด้วยรังสี
- ตัวบ่งชี้คุณภาพของภาพถ่ายทางรังสี (Image Quality Indicator/ IQI or Penetrameter)
- ฉากเพิ่มความไว (Intensifying Screen)

- Safelight เป็นอุปกรณ์ในห้องมืด फिल्मจะถูกปฏิบัติภายใต้สภาพ Safelight ตามข้อแนะนำ ของผู้ผลิตฟิล์ม
- อุปกรณ์อ่านภาพถ่ายด้วยรังสี (Viewing Facility)
- เครื่องมือวัดความเข้มของภาพถ่ายด้วยรังสี

3.4 การทดสอบแรงดึง

วิธีการทดสอบนั้น เราจะนำตัวอย่างที่จะทดสอบมาดึงอย่างช้า ๆ แล้วบันทึกค่าของความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นไว้ แล้วมาพลอตเป็นเส้นโค้งดังภาพที่ 41 โดยขนาดและรูปร่างของชิ้นทดสอบมีต่างๆ กัน ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุนั้นๆ มาตรฐานต่างๆ ของการทดสอบ เช่น มาตรฐานของ ASTM (American Society of Testing and Materials), BS (British Standards), JIS (Japanese Industrial Standards) หรือแม้แต่ มอก. (มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมไทย) ได้กำหนดขนาดและรูปร่างของชิ้นทดสอบไว้ ทั้งนี้เพื่อให้ผลของการทดสอบเชื่อถือได้ พร้อมกับกำหนดความเร็วในการเพิ่มแรงกระทำเอาไว้ด้วย

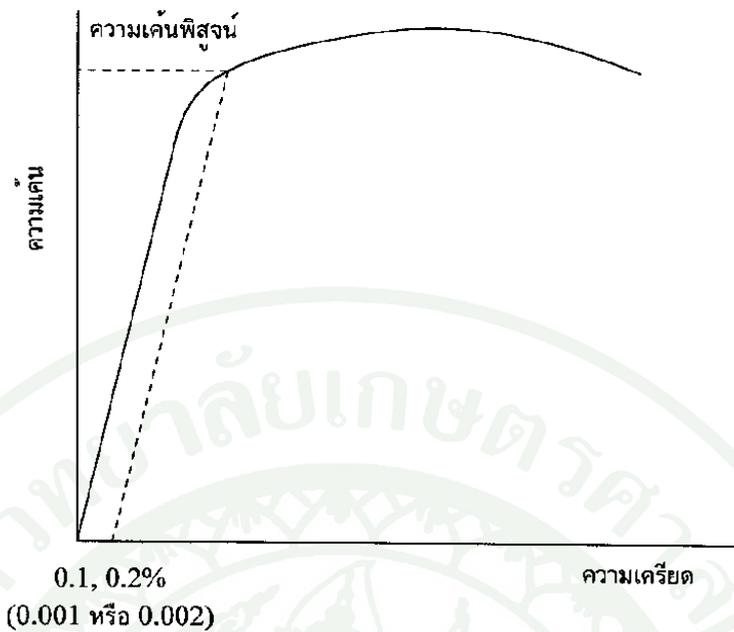


ภาพที่ 41 เส้นโค้งความเค้น-ความเครียด (Stress-Strain Curve) แบบมีจุดคราก (Yield Point)

จากการศึกษาเส้นโค้งความเค้น-ความเครียด พบว่า เมื่อเราเริ่มดึงขึ้นทดสอบอย่างช้า ๆ ขึ้นทดสอบจะค่อย ๆ ยืดออก จนถึงจุดจุดหนึ่ง (จุด A) ซึ่งในช่วงนี้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดจะเป็นสัดส่วนคงที่ ทำให้เราได้กราฟที่เป็นเส้นตรง ตามกฎของฮุก (Hook's Law) ซึ่งกล่าวว่าความเค้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเครียด จุด A นี้เรียกว่าพิคัดสัดส่วน (Proportional Limit) และภายใต้พิคัดสัดส่วนนี้ วัสดุจะแสดงพฤติกรรมการคืนรูปแบบยืดหยุ่น (Elastic Behavior) นั่นคือเมื่อปล่อยแรงกระทำ ขึ้นทดสอบจะกลับไปมีขนาดเท่าเดิม

เมื่อเราเพิ่มแรงกระทำต่อไปจนเกินพิคัดสัดส่วน เส้นกราฟจะค่อย ๆ โค้งออกจากเส้นตรง วัสดุหลายชนิดจะยังคงแสดงพฤติกรรมการคืนรูปได้อีกเล็กน้อยจนถึงจุด ๆ หนึ่ง (จุด B) เรียกว่า พิคัดยืดหยุ่น (Elastic Limit) ซึ่งจุดนี้จะเป็นจุดกำหนดว่าความเค้นสูงสุดที่จะไม่ทำให้เกิดการแปรรูปถาวร (Permanent Deformation or Offset) กับวัสดุนั้น เมื่อผ่านจุดนี้ไปแล้ววัสดุจะมีการเปลี่ยนรูปอย่างถาวร (Plastic Deformation) ลักษณะการเริ่มต้นของความเครียดแบบพลาสติกนี้เปลี่ยนแปลงไปตามชนิดของวัสดุในโลหะหลายชนิด เช่น พวกเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (Low Carbon Steel) จะเกิดการเปลี่ยนรูปอย่างรวดเร็ว โดยไม่มีการเพิ่มความเค้น (บางครั้งอาจจะลดลงก็มี) ที่จุด C ซึ่งเป็นจุดที่เกิดการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก จุด C นี้เรียกว่าจุดคราก (Yield Point) และค่าของความเค้นที่จุดนี้เรียกว่า ความเค้นจุดคราก (Yield Stress) หรือ Yield Strength ค่า Yield Strength นี้มีประโยชน์กับวิศวกรมาก เพราะเป็นจุดแบ่งระหว่างพฤติกรรมการคืนรูปกับพฤติกรรมการคงรูป และในกรณีของโลหะจะเป็นค่าความแข็งแรงสูงสุดที่เราจะใช้ประโยชน์ได้โดยไม่เกิดการเสียหาย

วัสดุหลายชนิดเช่น อลูมิเนียม ทองแดง จะไม่แสดงจุดครากอย่างชัดเจน แต่สามารถที่จะหาได้โดยกำหนดความเครียดที่ 0.10 - 0.20% ของความยาวกำหนดเดิม (Original Gage Length) แล้วลากเส้นขนานกับกราฟช่วงแรกไปจนถึงเส้นกราฟที่โค้งไปทางขวา ดังรูปที่ 2.5 ค่าความเค้นที่จุดตัดนี้จะนำมาใช้แทนค่าความเค้นจุดครากได้ ความเค้นที่จุดนี้บางครั้งเรียกว่า ความเค้นพิสูจน์ (Proof Stress) หรือความเค้น 0.1 หรือ 0.2% Offset ดังแสดงในภาพที่ 42

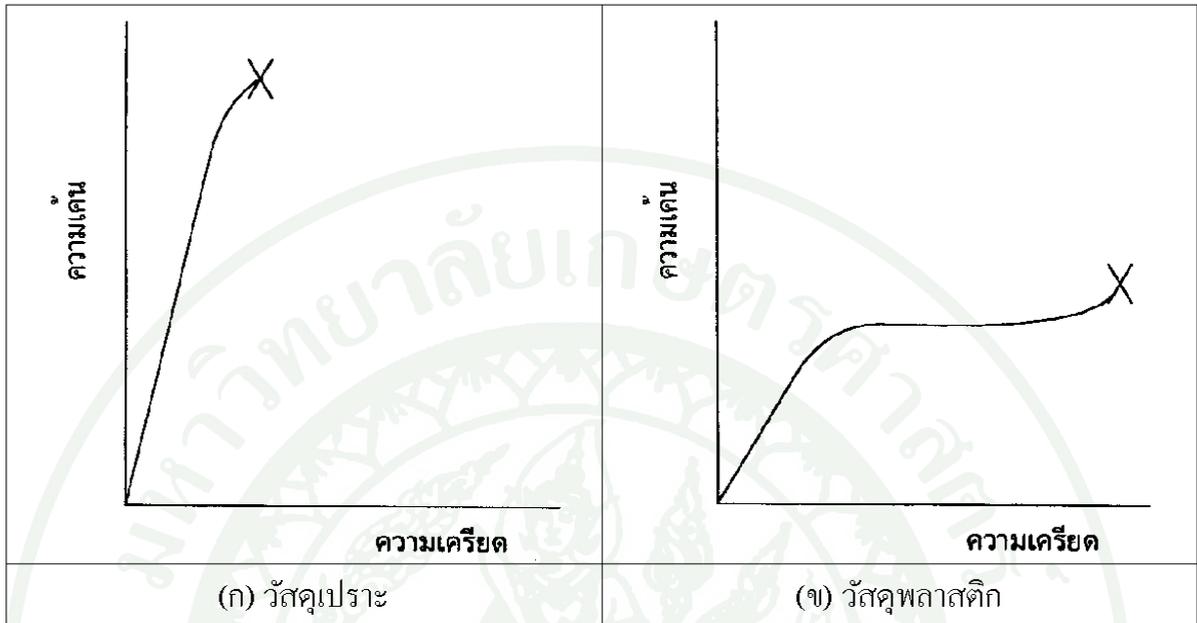


ภาพที่ 42 เส้นโค้งความเค้น-ความเครียดแบบที่ไม่มีจุดคราก

หลังจากจุดครากแล้ว วัสดุจะเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกโดยความเค้นจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ หรืออาจจะคงที่จนถึงจุดสูงสุด (จุด D) ค่าความเค้นที่จุดนี้เรียกว่า Ultimate Strength หรือความเค้นแรงดึง (Tensile Strength) ซึ่งเป็นค่าความเค้นสูงสุดที่วัสดุจะทนได้ก่อนที่จะขาดหรือแตกออกจากกัน (Fracture) เนื่องจากวัสดุหลายชนิดสามารถเปลี่ยนรูปอย่างพลาสติกได้มาก ค่าความเค้นสูงสุดนี้สามารถนำมาคำนวณใช้งานได้ นอกจากนี้ ค่านี้ยังใช้เป็นดัชนีเปรียบเทียบคุณสมบัติของวัสดุได้ด้วยว่า ค่าว่า ความแข็งแรง (Strength) ของวัสดุ หรือ กำลังวัสดุนั้น โดยทั่วไป จะหมายถึงค่าความเค้นสูงสุดที่วัสดุทนได้

ที่จุดสุดท้าย (จุด E) ของกราฟ เป็นจุดที่วัสดุเกิดการแตกหรือขาดออกจากกัน (Fracture) สำหรับโลหะบางชนิด เช่น เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำหรือโลหะเหนียว ค่าความเค้นประลัย (Rupture Strength) นี้จะต่ำกว่าความเค้นสูงสุด เพราะเมื่อเลยจุด D ไป พื้นที่ภาคตัดขวางของตัวอย่างทดสอบลดลง ทำให้พื้นที่ที่ต้านทานแรงดึงลดลงด้วย ในขณะที่เรายังคงคำนวณค่าของความเค้นจากพื้นที่หน้าตัดเดิมของวัสดุก่อนที่จะทำการทดสอบแรงดึง ดังนั้นค่าของความเค้นจึงลดลง ส่วนโลหะอื่น ๆ เช่น โลหะที่ผ่านการขึ้นรูปเย็น (Cold Work) มาแล้ว มันจะแตกหักที่จุดความเค้นสูงสุด โดยไม่มีการลดขนาดพื้นที่ภาคตัดขวาง ดังภาพที่ 43 ก ทำนองเดียวกับพวกวัสดุเปราะ (Brittle Materials) เช่น เซรามิก ที่มีการเปลี่ยนรูปอย่างพลาสติกน้อย

มากหรือ ไม่มีเลย ส่วนกรณีของวัสดุที่เป็นพลาสติกจะเกิดแตกหักโดยที่อัตราการความเค้นสูงขึ้น ดังภาพที่ 42 ข



ภาพที่ 43 เปรียบเทียบเส้นโค้งความเค้น-ความเครียดของวัสดุเปราะและวัสดุพลาสติก

เส้นโค้งความเค้น-ความเครียดนี้ นอกจากจะใช้บอกค่าความแข็งแรง ณ จุดคราก (Yield Strength) ความเค้นสูงสุดและความเค้นประลัยแล้ว ยังจะใช้บอกค่าต่าง ๆ ได้อีกดังนี้ คือ

1. ความเหนียว (Ductility) ค่าที่ใช้วัดจะบอกเป็นเปอร์เซ็นต์ การยืดตัว (Percentage Elongation) และการลดพื้นที่ภาคตัดขวาง (Reduction of Area) โดยที่

$$\text{เปอร์เซ็นต์การยืดตัว (\%E1)} = \frac{L_f - L_0}{L_0} \times 100\%$$

เมื่อ L_f = ความยาวของเกจหลังจากดึงจนขาด
 L_0 = ความยาวของเกจเริ่มต้น

$$\text{การลดพื้นที่ภาคตัดขวาง (\%R.A.)} = \frac{A_o - A_f}{A_o} \times 100\%$$

เมื่อ A_o = พื้นที่หน้าตัดก่อนดึง

A_f = พื้นที่หน้าตัดหลังจากดึงขาด

ในทางปฏิบัติเรามักใช้ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว มากกว่าเพราะสะดวกในการวัดความเหนียวของวัสดุนี้จะเป็นตัวบอกความสามารถในการขึ้นรูปของมัน คือถ้าวัสดุมีความเหนียวดี (%EI สูง) ก็สามารถนำไปขึ้นรูป เช่น รีด ตีขึ้นรูป ดึงเป็นลวด ฯลฯ ได้ง่าย แต่ถ้ามีความเหนียวต่ำ (เปราะ , Brittle) ก็จะนำไปขึ้นรูปยาก หรือทำไม่ได้ เป็นต้น

2. Modulus of Elasticity or Stiffness ภายใต้อิทธิพลของแรงดึงวัสดุที่มีพฤติกรรมเป็นอีลาสติก อัตราส่วนระหว่างความเค้นต่อความเครียดจะเท่ากับค่าคงที่ ค่าคงที่นี้เรียกว่า Modulus of elasticity (E) หรือ Young's Modulus หรือ Stiffness มักมีหน่วยเป็น ksi (1 ksi=1000 psi) หรือ kgf/mm² หรือ GPa (สังเกตว่าเป็นหน่วยเดียวกับหน่วยของความเค้น)

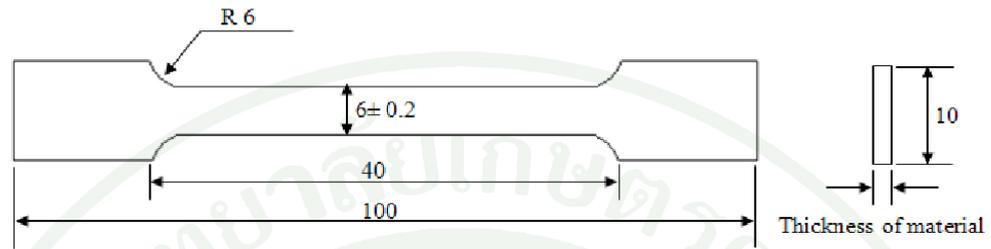
$$E = \frac{\sigma}{e} = \frac{PL}{A\Delta L}$$

ถ้าแรงที่มากกระทำเป็นแรงเฉือนเราเรียกค่าคงที่นี้ว่า Shear Modulus หรือ Modulus of Rigidity (G)

$$G = \frac{\tau}{\gamma} = \frac{Ph}{Aa}$$

ค่า E และ G ของวัสดุแต่ละชนิดจะมีค่าเฉลี่ยคงที่ และเป็นตัวบอกความสามารถคงรูป (Stiffness, Rigidity) ของวัสดุ นั่นคือ ถ้า E และ G มีค่าสูง วัสดุจะเปลี่ยนรูปร่างอย่างอีลาสติกได้น้อย แต่ถ้า E และ G ต่ำ มันก็จะเปลี่ยนรูปร่างอย่างอีลาสติกได้มาก ค่า E และ G นี้มีประโยชน์มากสำหรับงานออกแบบวัสดุที่ต้องรับแรงต่าง ๆ

ในการทดสอบแรงดึงเพื่อหาค่าความเค้นสูงสุดของชิ้นงานที่ได้จากการเชื่อม
 ชิ้นรูปชิ้นงานจำนวน 3 ชิ้นด้วยลวดเชื่อม ER70S – 6 ด้วยพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลองที่ 1-3
 และทำการกัดแต่งผิวให้มีขนาดตามมาตรฐาน ASTM E8-04 และใช้เครื่องทดสอบแรงดึง
 (Universal Testing Machine) ดังแสดงในภาพที่ 44 - 46



ภาพที่ 44 แสดงขนาดและรูปร่างของชิ้นทดสอบตามมาตรฐาน ASTM E8-04



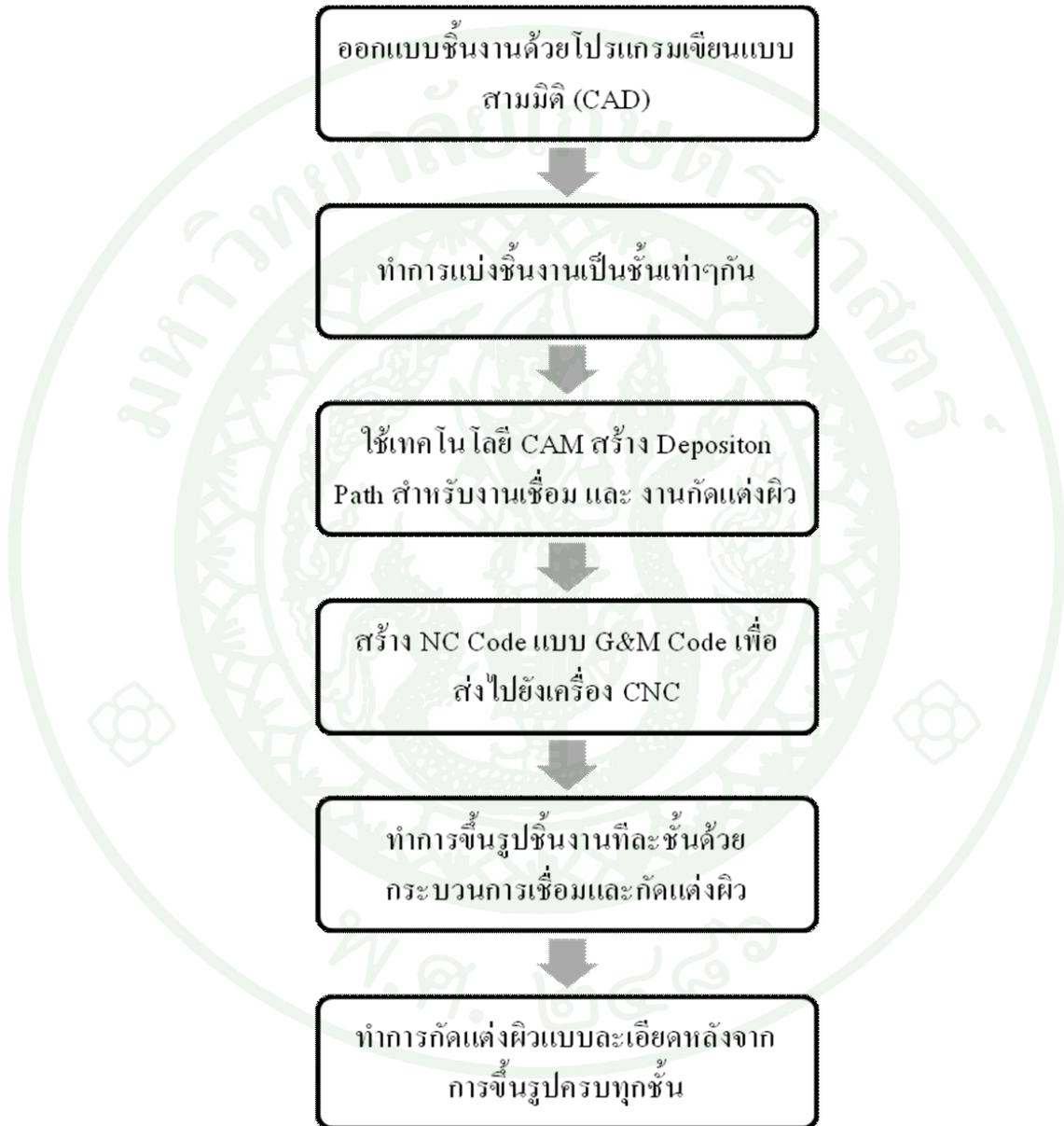
ภาพที่ 45 แสดงชิ้นทดสอบที่ทำการขึ้นรูป



ภาพที่ 46 แสดงเครื่องทดสอบแรงดึง (Universal Testing Machine)

4. การขึ้นรูปแม่พิมพ์แบบกลวงด้านในโดยวิธีการขึ้นรูปทีละชั้น

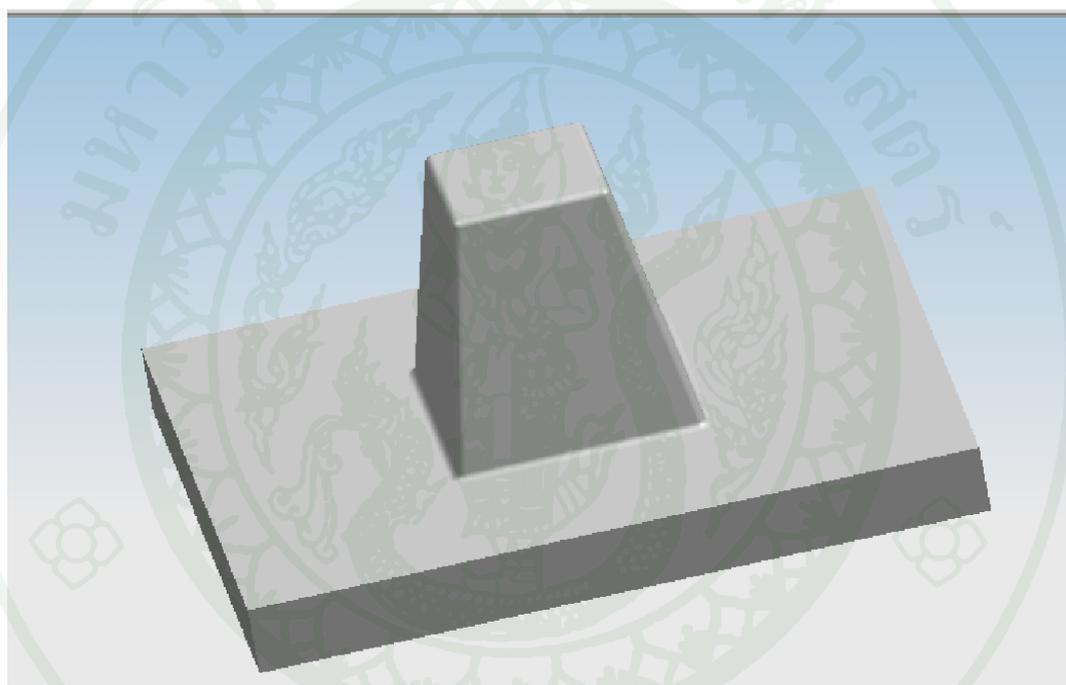
กระบวนการขึ้นรูปแม่พิมพ์แบบกลวงด้านในโดยวิธีการขึ้นรูปทีละชั้น ประกอบไปด้วย ขั้นตอนดังภาพที่ 47



ภาพที่ 47 ขั้นตอนการขึ้นรูปแม่พิมพ์แบบกลวงด้านในโดยวิธีการขึ้นรูปทีละชั้น

4.1 การออกแบบแม่พิมพ์แบบกลวงด้านใน

ในการออกแบบแม่พิมพ์ฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยาง เพื่อทดสอบการขึ้นรูปแม่พิมพ์แบบกลวงด้านในโดยวิธีการขึ้นรูปทีละชั้น ด้วยค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมจากการทดลอง ซึ่งในการออกแบบได้เลือกแบบของแม่พิมพ์ที่มีขนาดเหมาะสม สำหรับเครื่องฉีดยางแนวตั้ง NISSEI รุ่น TH100 - 25VSER ขนาด 100 ตัน และมีปริมาตรกระบอกฉีดเท่ากับ 254 ลูกบาศก์เซนติเมตร จากนั้นทำการออกแบบแม่พิมพ์แบบกลวงด้านในด้วยโปรแกรม UNIGRAPHICS ดังแสดงในภาพที่ 48



ภาพที่ 48 แสดงรูปแม่พิมพ์ที่เขียนด้วยโปรแกรม UNIGRAPHICS

ใช้โปรแกรม COSMOS เพื่อวิเคราะห์หาค่าที่เหมาะสมของความกลวงด้านในแม่พิมพ์ โดยคำนึงถึงปริมาณเนื้อวัสดุที่สามารถถอดได้มากที่สุด และแม่พิมพ์มีความแข็งแรงเพียงพอกับการใช้งานโดยมีขั้นตอนในการทำดังนี้

1. นำแบบจากโปรแกรม UNIGRAPHICS ที่แปลงเป็นไฟล์สกุล Parasolid มาเปิดในโปรแกรม COSMOS
2. ทำการแบ่งชิ้นงานเป็นชิ้นส่วนย่อยเป็น Node และ Element

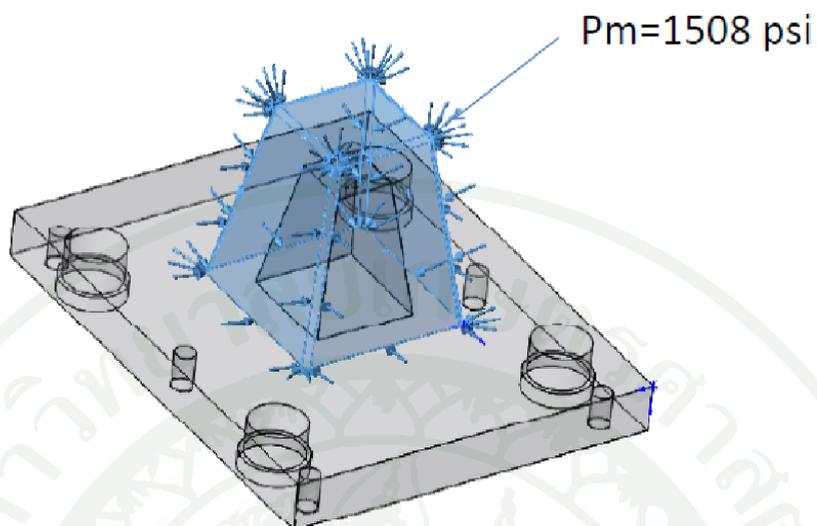
3. ป้อนค่า Boundary Condition และแรงกระทำลงในสมการ
4. ป้อนค่าสมบัติของวัสดุในชิ้นงาน
5. กำหนดหาผลลัพธ์ที่ต้องการจาก Boundary Condition และสมบัติของวัสดุ
6. ทำการปรับความหนาของผนังชิ้นงานให้ค่าความปลอดภัยของชิ้นงาน

(Safety Factor) มีค่าอยู่ในช่วง 1.5 - 2



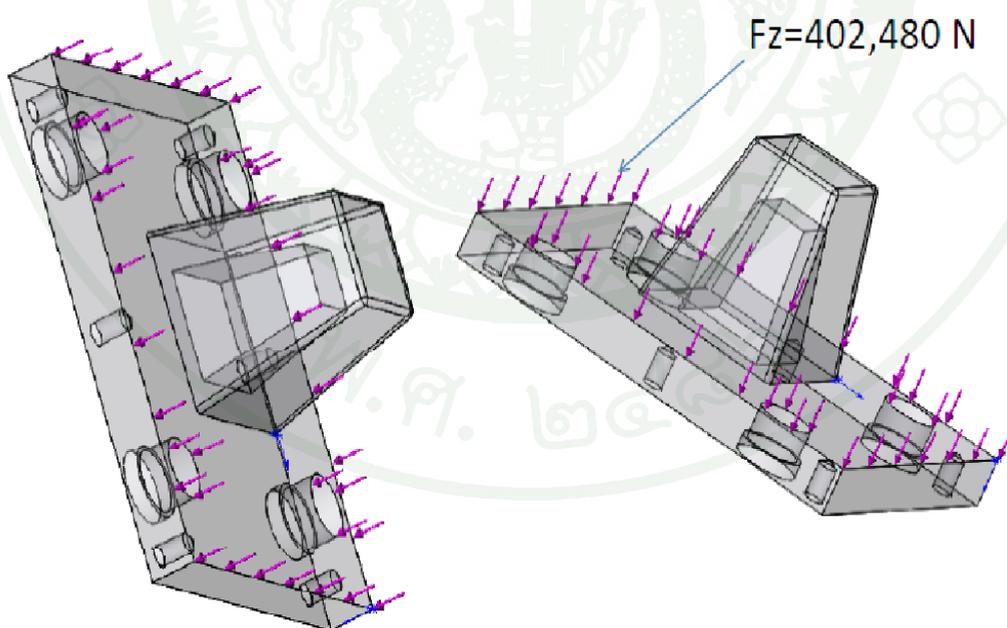
ภาพที่ 49 แสดงรูปแม่พิมพ์แบบกลวงด้านในที่ทำการปรับความหนาของผนังด้วยโปรแกรม COSMOS

Pressure impact on Core



ภาพที่ 50 แสดงการกำหนดค่าแรงดันที่กระทำบนแม่พิมพ์แบบกลวงด้านในที่ผนังส่วนตัวผู้

Force impact on Core



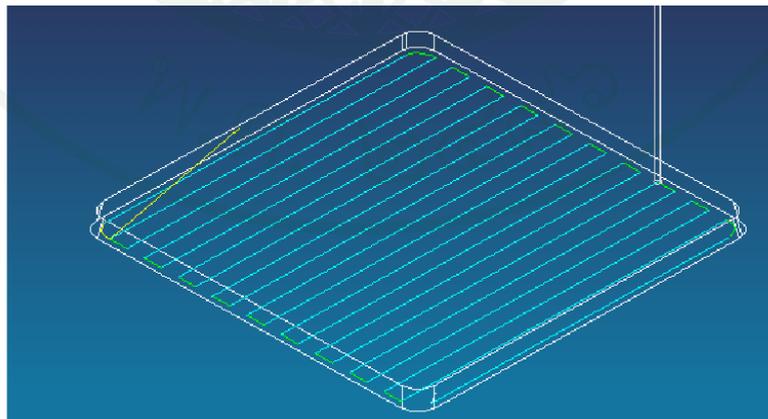
ภาพที่ 51 แสดงการกำหนดค่าแรงปิดแม่พิมพ์ที่กระทำบนแผ่นรองแม่พิมพ์

4.2 การแบ่งชิ้นงานออกเป็นชั้น และการสร้าง Deposition path

ทำการแบ่งชิ้นงานเป็นชั้นเท่าๆกัน และใช้เทคโนโลยี CAM ของโปรแกรม UNIGRAPHICS ในการสร้าง Deposition Path สำหรับงานเชื่อม และ Tool Path สำหรับงานกัด แต่งผิวดังแสดงในภาพที่ 52 และภาพที่ 53



ภาพที่ 52 แสดงรูปแม่พิมพ์แบบกลวงด้านในที่ทำกรแบ่งเป็นชั้น



ภาพที่ 53 แสดง Deposition Path ชั้นที่ 31 สำหรับงานเชื่อมขึ้นรูปแม่พิมพ์แบบกลวงด้านใน

4.3 การสร้าง NC – CODE

จาก Deposition path ที่ได้สามารถแปลงเป็น NC – CODE ด้วยโปรแกรม UNIGRAPHICS เพื่อส่งไปยังเครื่อง CNC ที่ได้ทำการออกแบบและสร้างชุดจับยึดหัวเชื่อม สำหรับการเติมเนื้อวัสดุ CODE โดยวิธี DNC (Direct Numerical Control) ซึ่งเป็นการส่งโปรแกรมให้เครื่อง CNC จากเครื่อง คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลโดยผ่านทางสายคอมพิวเตอร์ RS 232 เพราะขนาดของ NC-CODE มีขนาดค่อนข้างใหญ่ ตัวอย่าง NC – CODE แสดงในภาพที่ 54



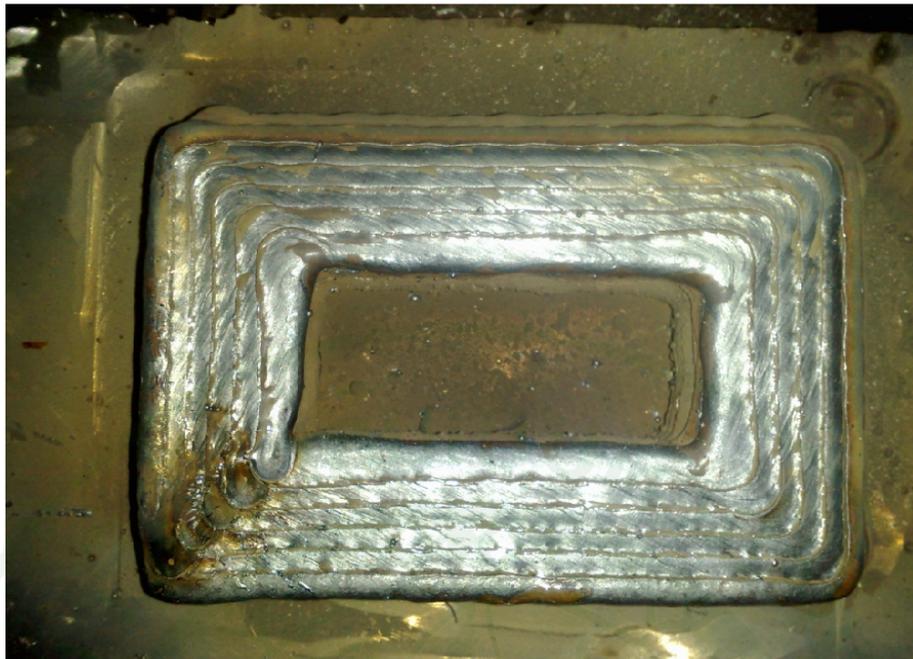
```

Inyer01 - Notepad
File Edit Format View Help

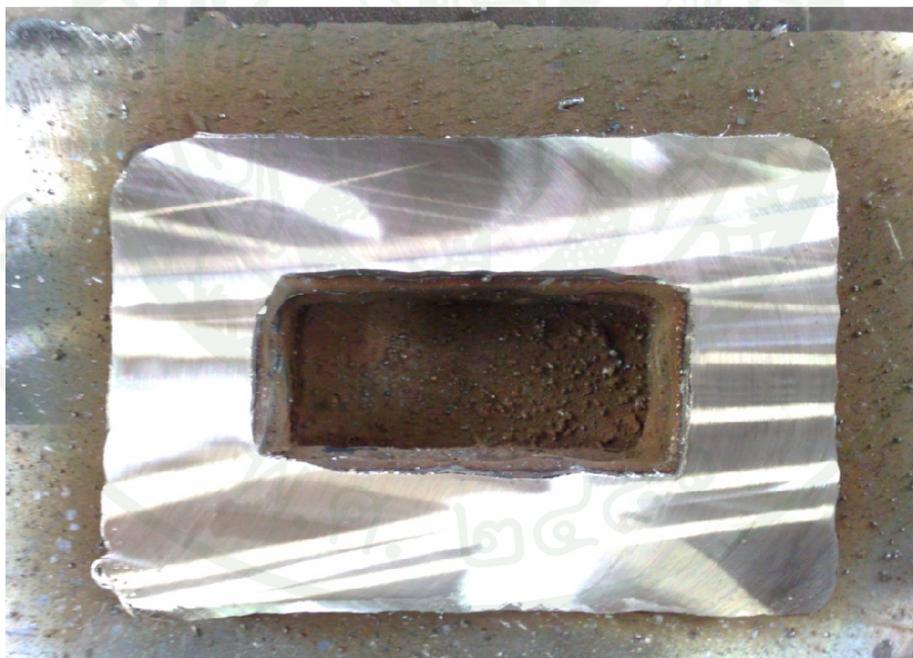
%_N_PSP_MPF
; $ PATH=/_N_MPF_DIR
G54
G64
N0010 G40 G17 G90 G71
N0012 G0 Z100 Y0.0 M03
N0014 X-45.00 Y-45.00
N0016 Z10.00
N0018 G1 Z0.00 F100
N0020 M00
N0030 X45.00
N0040 Y45.00
N0050 X-45.00
N0060 Y-45.00
N0070 M00
N0080 Z10.00
  
```

ภาพที่ 54 ตัวอย่าง NC – CODE สำหรับส่งไปยังเครื่อง CNC

ชิ้นงานที่ได้การเติมเนื้อวัสดุด้วยเครื่องเชื่อมในแต่ละชั้นจะมีขนาดใหญ่กว่าชิ้นงานที่ต้องการเล็กน้อยและ เกิดสิ่งสกปรกจากกระบวนการเชื่อมดังแสดงในภาพที่ 55 จึงมีการเพิ่มกระบวนการกัดแต่งผิวอีกขั้นตอนหลังจากการเชื่อมในแต่ละชั้นดังแสดงในภาพที่ 56 โดยนำ NC - CODE สำหรับงานกัดแต่งผิวแบบหยาบส่งไปยังเครื่องและทำการกัดแต่งผิวแบบหยาบ ซึ่งในขั้นตอนนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อให้ชิ้นงานที่ได้มีขนาดใกล้เคียงกับชิ้นงานที่ต้องการมากยิ่งขึ้น และกำจัดสิ่งสกปรกที่เกิดจากกระบวนการเชื่อมเนื่องจากสิ่งสกปรกนี้เป็นสาเหตุให้เกิดรูฟองอากาศหรือมลทินในตัวชิ้นงาน



ภาพที่ 55 ชิ้นงานตัวอย่างที่ได้การเติมเนื้อวัสดุด้วยเครื่องเชื่อม



ภาพที่ 56 ชิ้นงานตัวอย่างจากการเติมเนื้อวัสดุด้วยเครื่องเชื่อมหลังผ่านกระบวนการกัดแต่งผิว

4.4 การสร้างแม่พิมพ์

หลังจากนำ NC - CODE ส่งไปยังเครื่อง CNC เพื่อทำการขึ้นรูปทีละชั้นเป็นการสร้างชิ้นงานขึ้นมาจากแบบ โดยการเติมเนื้อชิ้นงานจากชั้นล่างสุดทีละชั้นไปยังชั้นบนสุดด้วยการเชื่อม และกัดแต่งผิวจนได้เป็นชิ้นงานแบบกลวงที่มีโพรงอยู่ตรงกลางตามที่ได้ออกแบบ ต่อจากนั้นต้องทำการปิดโพรงที่อยู่ตรงกลางของชิ้นงาน เพื่อให้ได้แม่พิมพ์ที่สามารถใช้งานได้ ซึ่งขั้นตอนนี้ทำได้โดยทำการกัดแต่งขอบผนังกลวงด้านในเพื่อสร้างร่องสำหรับวางแผ่นเหล็ก เพื่อปิดโพรงตรงกลางชิ้นงาน และนำเหล็กที่ตัดให้มีขนาดเท่ากับร่องที่สร้างขึ้นมาวางในร่อง ต่อจากนั้นทำการเชื่อมเติมเนื้อวัสดุและทำการกัดต่อจนครบทุกชั้นจะได้แม่พิมพ์แบบกลวงที่มีขนาดใกล้เคียงกับแม่พิมพ์ที่ต้องการ ในกระบวนการสุดท้ายมีการกัดแต่งผิวแบบละเอียดอีกครั้งหนึ่งเพื่อให้ได้แม่พิมพ์แบบกลวงด้านในที่มีผิวและขนาดตามที่ออกแบบ

ผลและวิจารณ์

1. ผลการออกแบบและสร้างชุดจับยึดหัวเชื่อมสำหรับการเติมเนื้อวัสดุ

จากการออกแบบและนำชุดหัวเชื่อมมาติดตั้งกับเครื่องกัดแบบสามแกน สำหรับการกระบวนการเติมเนื้อวัสดุ ได้เครื่องที่ใช้สำหรับการเติมเนื้อวัสดุแบบกึ่งอัตโนมัติที่สามารถทำการเติมเนื้อวัสดุและกัดแต่งผิวได้สามแกน โดยเครื่องสามารถทำการเติมเนื้อวัสดุจากการกดปุ่มคำสั่งจากเครื่องกัด และเครื่องเชื่อมเพื่อเปิดหัวเชื่อมให้ทำการเติมเนื้อวัสดุ เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการเติมเนื้อวัสดุในแต่ละชั้น จะต้องทำการยกหัวเชื่อมขึ้นเพื่อไม่ให้หัวเชื่อมชนกับชิ้นงานในกระบวนการกัดแต่งผิว สำหรับเครื่องที่ออกแบบสามารถสร้างชิ้นงานขนาด กว้าง x ยาว x สูง เท่ากับ 150 mm. x 300 mm. x 200 mm.

2. ผลการทดลองหาค่าพารามิเตอร์ในการเชื่อมด้วยเครื่อง GMAW

ผลการทดลองเพื่อหาค่าพารามิเตอร์และตัวแปรที่สำคัญในการขึ้นรูปชิ้นงานแบบกลวงด้านในโดยกระบวนการขึ้นรูปทีละชั้นมีดังนี้

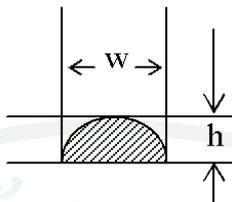
2.1 ผลการทดลองที่ 1

จากการตรวจสอบข้อมูลสำหรับค่าพารามิเตอร์ในการเชื่อมจากคู่มือในการเชื่อมและงานวิจัยต่างๆ และทำการทดลองที่ 1.1 และ 1.2 และทำการเลือกค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมโดยพิจารณาจากความสมบูรณ์ของรอยแนวเชื่อม และการอาร์คได้ผลดังนี้

- ความสูงระหว่างชิ้นงานกับหัวเชื่อม (H) = 10 มม.
- กระแส (I) = 150 แอมป์
- ความต่างศักย์ (V) = 19 โวลต์
- อัตราการป้อนลวด (F) = 2.5 ม./นาที
- อัตราส่วนผสมก๊าซคลุม คาร์บอนไดออกไซด์:อาร์กอน = 70:30

ส่วนค่าจากการปรับความเร็วในการเดินหัวเชื่อม (v) ได้จากการทดลองที่ 1.3 ซึ่งกำหนดให้ช่วงความเร็วอยู่ระหว่าง 300 – 500 มม./นาที โดยใช้ค่าพารามิเตอร์อื่นๆที่ได้จากการ

ทดลองที่ 1.1 และ 1.2 ทำการเชื่อมเป็นแนวยาว 100 มม. แสดงผลดังตารางที่ 7 และภาพที่ 58 แสดงรอยแนวเชื่อมที่ใช้ความเร็วในการเดินหัวเชื่อมต่าง ๆ กัน



ภาพที่ 57 แสดงการวัดระยะความกว้างและความสูงของรอยแนวเชื่อม

ตารางที่ 7 แสดงค่าเฉลี่ยความกว้าง และความสูง ของรอยแนวเชื่อมที่ได้จากการปรับค่าความเร็ว

ความเร็วในการเดินหัวเชื่อม (มม./นาที่)	ความกว้างเฉลี่ย (w) (มม.)	ความสูงเฉลี่ย (h) (มม.)
300	7.5	3.5
400	6.5	3
500	5.5	2.5



(ก)



(ข)



(ก)

- ภาพที่ 58** (ก) รอยแนวเชื่อมที่ใช้ความเร็วในการเดินหัวเชื่อม 300 มม./นาที่
 (ข) รอยแนวเชื่อมที่ใช้ความเร็วในการเดินหัวเชื่อม 400 มม./นาที่
 (ค) รอยแนวเชื่อมที่ใช้ความเร็วในการเดินหัวเชื่อม 500 มม./นาที่

จากการวัดระยะความกว้างและความสูงเป็นจำนวน 5 จุดต่อรอยแนวเชื่อมและทำการหาค่าเฉลี่ยระหว่างความกว้างและความสูงของรอยแนวเชื่อม พบว่าที่ความเร็วในการเดินหัวเชื่อมต่ำจะได้ค่าความกว้างของรอยแนวเชื่อมมาก และค่าความสูงมาก ส่วนถ้าความเร็วในการเดินหัวเชื่อมสูง ค่าความกว้างและค่าความสูง จะมีค่าน้อยกว่าที่ความเร็วในการเดินหัวเชื่อมต่ำ และค่าที่เหมาะสมที่สุดจากการทดลองสำหรับขึ้นรูปคือ ค่าความเร็วในการเดินหัวเชื่อม 400 มม./นาที่ เนื่องจากรอยแนวเชื่อมมีความสมบูรณ์ ไม่ราบแบน หรือแคบจนเกินไป มีความสูงเหมาะสม และระยะเวลาที่ใช้ในการเชื่อมชิ้นงานต่ำ

2.2 ผลการทดลองที่ 2

ผลการทดลองที่ 2.1 โดยทำการปรับค่าระยะห่างระหว่างรอยแนวเชื่อมที่ระยะ 0 – 5 มม. เป็นจำนวน 5 แนว ด้วยค่าพารามิเตอร์จากการทดลองที่ 1 ได้รอยแนวเชื่อมดังแสดงในภาพที่

59



(ก)



(ก)



(ค)



(ง)



(จ)



(ฉ)



(ง)

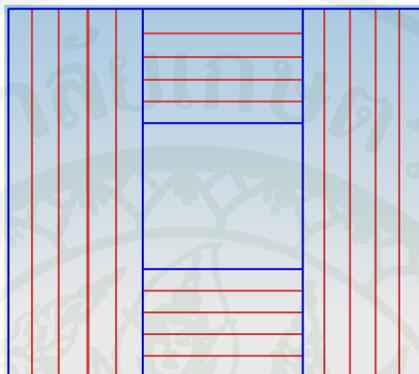
- ภาพที่ 59** (ก) รอยแนวเชื่อมจำนวน 5 แนวที่ระยะห่างระหว่างรอยแนวเชื่อม 0 มม.
 (ข) รอยแนวเชื่อมจำนวน 5 แนวที่ระยะห่างระหว่างรอยแนวเชื่อม 1 มม.
 (ค) รอยแนวเชื่อมจำนวน 5 แนวที่ระยะห่างระหว่างรอยแนวเชื่อม 2 มม.
 (ง) รอยแนวเชื่อมจำนวน 5 แนวที่ระยะห่างระหว่างรอยแนวเชื่อม 3 มม.
 (จ) รอยแนวเชื่อมจำนวน 5 แนวที่ระยะห่างระหว่างรอยแนวเชื่อม 3.5 มม.
 (ฉ) รอยแนวเชื่อมจำนวน 5 แนวที่ระยะห่างระหว่างรอยแนวเชื่อม 4 มม.
 (ช) รอยแนวเชื่อมจำนวน 5 แนวที่ระยะห่างระหว่างรอยแนวเชื่อม 5 มม.

จากการทดลองพบว่าระยะห่างระหว่างรอยแนวเชื่อม 3 – 4 มม. มีความเหมาะสมสำหรับพารามิเตอร์ที่ใช้มากที่สุดเนื่องจากการเชื่อมเป็นแนวเรียงกันมีพื้นผิวและรอยต่อที่สม่ำเสมอมีร่อง หรือส่วนนูน น้อยมาก ในกรณีที่ระยะห่างระหว่างรอยแนวเชื่อมน้อย จะเกิดรอยแนวเชื่อมที่ซ้อนทับกันและทำให้เกิดสันนูนตรงกลางรอยแนวเชื่อม และความกว้างของรอยแนวเชื่อมจะได้น้อยจึงไม่เหมาะสำหรับกระบวนการขึ้นรูป ส่วนที่ระยะห่างของรอยแนวเชื่อม 5 มม. เกิดรอยต่อระหว่างรอยแนวเชื่อมเป็นร่องเนื่องจากแต่ละแนวเชื่อมมีระยะห่างมากเกินไป ซึ่งไม่เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูป และจากการทำการทดลองเพิ่มเติมพบว่าค่าระยะห่างรอยแนวเชื่อม 3.5 มม. เป็นค่าที่ดีที่สุด

2.3 ผลการทดลองที่ 3

เส้นทางการเดินหัวเชื่อม (Tool Path) โดยทั่วไปมีสองแบบคือ แบบ Zigzag และแบบ Contour โดยจากการทดลองพบว่าการเดินแบบ Contour ไม่เหมาะในการเดินชิ้นงานที่มีพื้นที่แคบ เนื่องจากการเดินแบบนี้ทำให้เกิดการสะสมของเนื้อเหล็กที่ด้านในสุดของชิ้นงาน แต่ถ้าเดินในระยะกว้างจะไม่มี ความแตกต่างกับการเดินแบบ Zigzag และจากการทดลองใช้เส้นทาง

การเดินแบบผสม โดยการเดินเส้น Contour บนขอบชิ้นงานส่วนด้านในใช้การเดินแบบ Zigzag พบว่ารอยแนวเชื่อมที่ได้มีแนวที่สวยกว่าการเดินแบบ Zigzag และการสะสมของเนื้อเหล็กด้านในน้อยกว่าการเดินแบบ Contour ดังแสดงในภาพที่ 60 โดยเส้นสีน้ำเงินที่ขอบใช้การเดินแบบ Contour และเส้นสีแดงเป็นการเดินแบบ Zigzag ส่วนค่าระยะระหว่างแนวเชื่อม (Offset) ที่สามารถใช้ได้อยู่ในช่วง 3 - 4 mm. โดยที่ค่าที่ดีที่สุดคือ 3.5 mm.



ภาพที่ 60 เส้นทางการเดินแบบผสม

3. ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางวัสดุ

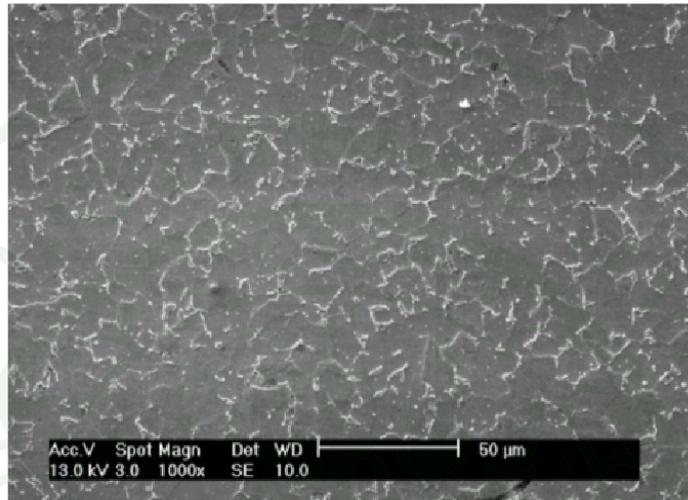
การวิเคราะห์คุณสมบัติทางวัสดุจากชิ้นงานตัวอย่างที่ได้จากการเชื่อมด้วยค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม ได้ทำการวิเคราะห์ในหัวข้อต่อไปนี้

3.1 ผลการวิเคราะห์ค่าความแข็ง (Hardness Test)

นำชิ้นงานตัวอย่างที่ได้จากการเชื่อมมาทดสอบค่าความแข็งแบบร็อคเวลล์ได้ค่าความแข็งเฉลี่ยบริเวณส่วนที่เป็นลวดเชื่อม 73.1 HRB, ค่าความแข็งเฉลี่ยบริเวณรอยต่อ 90.7 HRB และ ค่าความแข็งเฉลี่ยบริเวณเหล็กแผ่นรอง 89 HRB ซึ่งสรุปได้ว่าค่าความแข็งเฉลี่ยในแต่ละส่วนของชิ้นงานมีความสม่ำเสมอ และค่าความแข็งเฉลี่ยบริเวณลวดเชื่อมมีค่าใกล้เคียงกับค่าความแข็งเฉลี่ยบริเวณเหล็กแผ่นรอง

3.2 ผลการตรวจสอบโครงสร้างของเนื้อโลหะด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscopy (SEM)

ผลจากการส่องด้วยกล้องอิเล็กตรอนเพื่อตรวจสอบโครงสร้างชิ้นงาน ตัวอย่างที่ได้จากการเชื่อม ดังแสดงในภาพที่ 61 พบว่าโครงสร้างของเหล็กที่เชื่อมขึ้นประกอบไปด้วยส่วนของ Ferrite และ Pearlite ซึ่งเป็นคุณสมบัติของเหล็กชนิด Low Carbon Steels โดยที่ขนาดของเกรนมีขนาดเล็กกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ ซึ่งสรุปได้ว่าชิ้นงานตัวอย่างมีการหลอมละลายสมบูรณ์

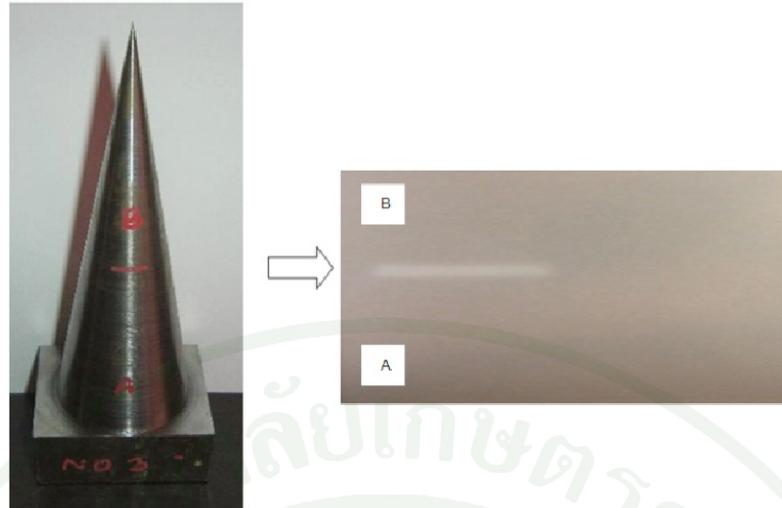


ภาพที่ 61 โครงสร้างของเหล็กที่เชื่อมขึ้น

3.3 ผลการตรวจสอบด้วยรังสี (Radiographic Examination)

การตรวจสอบชิ้นงานตัวอย่างด้วยรังสี เพื่อหาความบกพร่องภายในตัวชิ้นงาน ซึ่งอาจเกิดมาจากรูฟองอากาศ สิ่งสกปรกปนเปื้อน รอยแตก หรือรอยแนวเชื่อมที่ไม่แนบสนิท แสดงในภาพที่ 62 โดยที่ ส่วน A คือเหล็กแผ่นรอง และ B คือเหล็กที่เชื่อมขึ้น โดยสามารถสรุปผลการตรวจสอบชิ้นงานด้วยรังสี ได้ดังนี้

1. ชิ้นทดสอบไม่เกิดรอยบ่งชี้ขึ้นเนื่องมาจากรอยแตกร้าว (Crack), การหลอมละลายไม่สมบูรณ์ (Incomplete Fusion) และการซึมลึกไม่สมบูรณ์ (Incomplete Penetration)
2. ชิ้นทดสอบไม่เกิดรอยบ่งชี้ที่ถูกพิจารณาว่าเป็นสารมลทินฝังในหรือฟองอากาศ
3. ชิ้นทดสอบไม่เกิด Slag Inclusion
4. ค่าพารามิเตอร์ในการเชื่อมขึ้นรูป และ เส้นทางการเดินของการเชื่อมมีความเหมาะสมส่งผลให้ให้การหลอมละลายสมบูรณ์



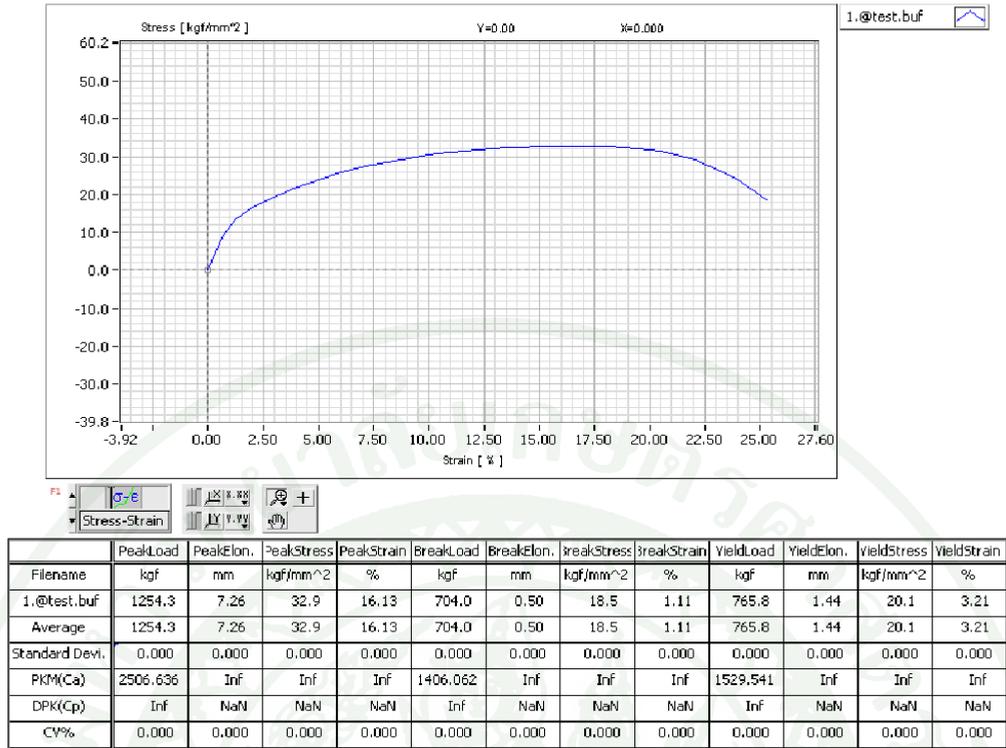
ภาพที่ 62 ภาพถ่ายฟิล์มที่นำชิ้นงานไปฉายรังสี

3.4 ผลการทดสอบแรงดึง (Tension Test)

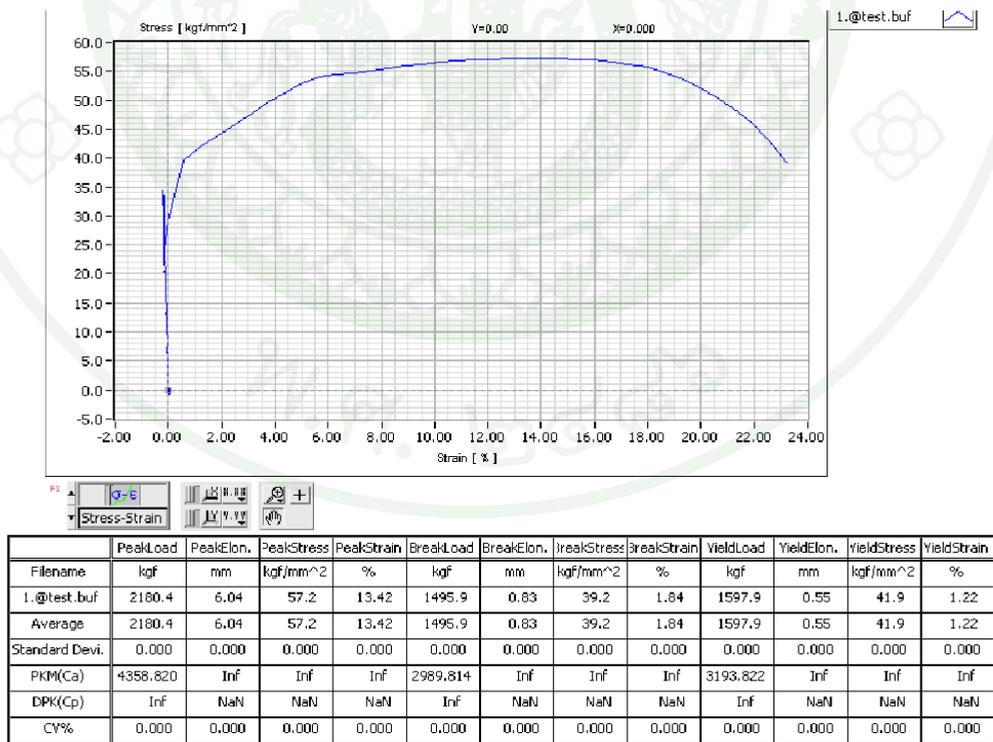
จากการนำชิ้นทดสอบที่ทำการเชื่อมขึ้นรูปชิ้นงานจำนวน 3 ชิ้นด้วยลวดเชื่อม ER70S-6 ด้วยพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลองที่ 1-3 และทำการกัดแต่งผิวให้มีขนาดตามมาตรฐาน ASTM E8-04 และทำการทดสอบแรงดึงด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง (Universal Testing Machine) ได้ค่าแรงที่จุดคลาก (Load at Yield Point) = 195 MPa และค่าแรงที่ชิ้นทดสอบแตกหัก (Ultimate Load) = 338 MPa ดังแสดงในภาพที่ 63 - 66



ภาพที่ 63 แสดงชิ้นงานหลังการทดสอบแรงดึง



ภาพที่ 64 กราฟและค่าแรงดึงขึ้นงานที่ 1 จากเครื่องทดสอบแรงดึง



ภาพที่ 65 กราฟและค่าแรงดึงขึ้นงานที่ 2 จากเครื่องทดสอบแรงดึง



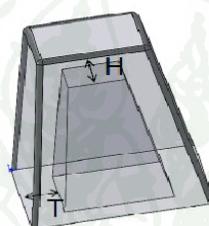
ภาพที่ 66 กราฟและค่าแรงดึงขึ้นงานที่ 3 จากเครื่องทดสอบแรงดึง

4. ผลการออกแบบแม่พิมพ์แบบกลวงด้านใน

การออกแบบแม่พิมพ์ใช้โปรแกรม UNIGRAPHICS ในการวาดแบบ และทำการวิเคราะห์ Finite Element Method (FEM) ด้วยโปรแกรม COSMOS เพื่อวิเคราะห์หาค่าที่เหมาะสมของความกลวงด้านในแม่พิมพ์ และค่าแรงกระทำในการฉีดยางพบว่าค่า Stress สูงสุดในตัวขึ้นงานที่เกิดจากแรงดันในการฉีดยางเกิด ณ บริเวณกึ่งกลางของผนังด้านข้างของแม่พิมพ์ บริเวณส่วนขอบของแม่พิมพ์เกิด Stress น้อยกว่า ดังนั้นในการออกแบบขึ้นงานกลวงด้านในจึงต้องคำนึงถึงความหนาของผนังรอบๆแม่พิมพ์ จากการนำข้อมูลเบื้องต้นมาออกแบบแม่พิมพ์ และทำการวิเคราะห์พบว่าที่ขนาดความหนาผนังดังแสดงในภาพที่ 67 แม่พิมพ์ค่า Stress สูงสุด 87 MPa ณ บริเวณกึ่งกลางของผนังด้านข้างแม่พิมพ์ ค่า Displacement 14 Micron ณ บริเวณผนังด้านข้าง และ ความปลอดภัยต่ำสุดของแม่พิมพ์ (Factor of Safety) เท่ากับ 2.03 ดังแสดงในตารางที่ 8 และ ภาพที่ 68 - 71

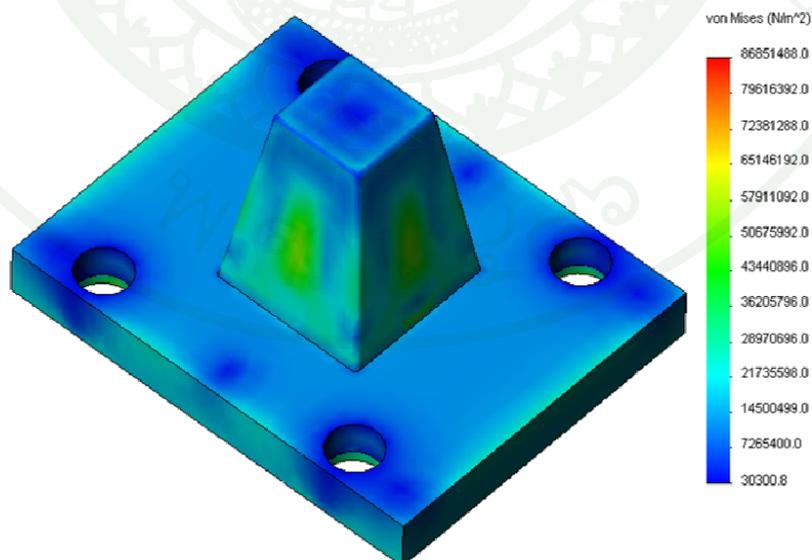
ตารางที่ 8 ค่าผลการวิเคราะห์ด้วย FEM

Name	Max	Location
Von Mises Stress	87 MPa Node: 15329	(80.7408 mm, -43.8688 mm, -144.259 mm)
Displacement	14×10^{-6} m Node: 14792	(100 mm, -36.7874 mm, -104.501 mm)

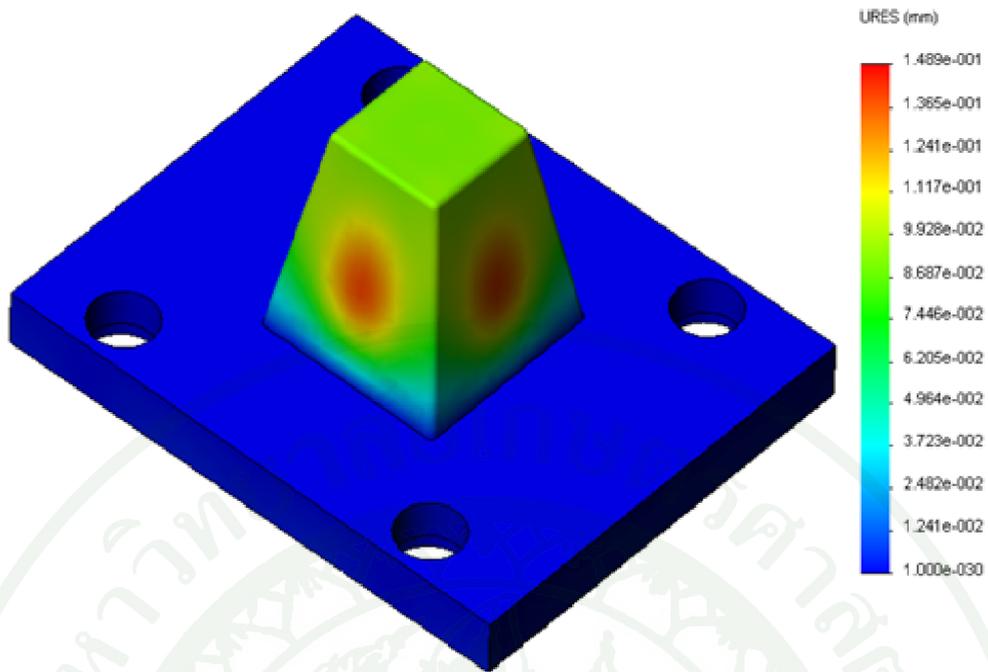


T=18 mm
H=25 mm

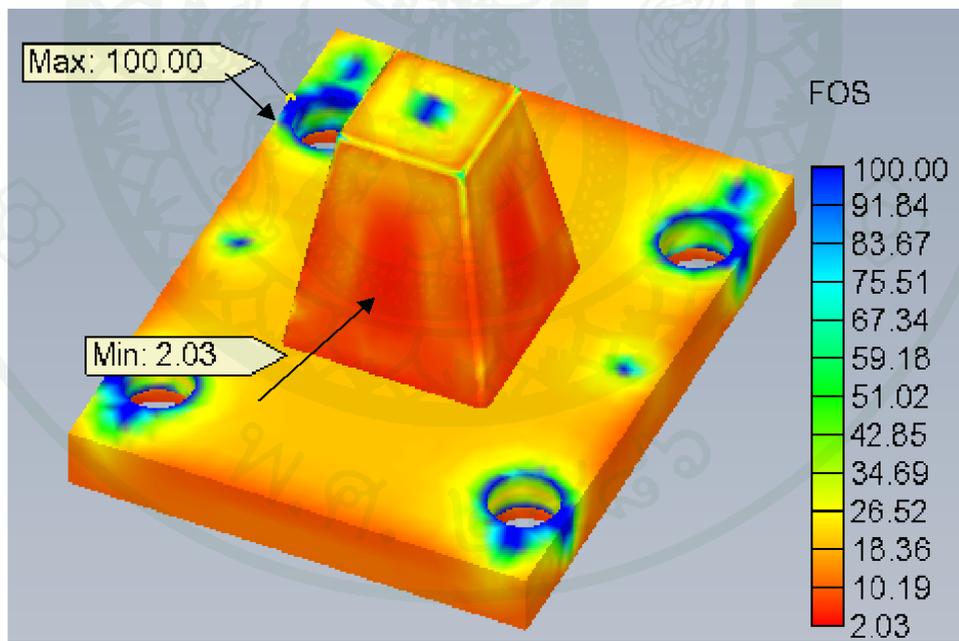
ภาพที่ 67 แสดงขนาดความหนาของผนังแม่พิมพ์



ภาพที่ 68 แสดงค่า Von Mises Stress ในแม่พิมพ์



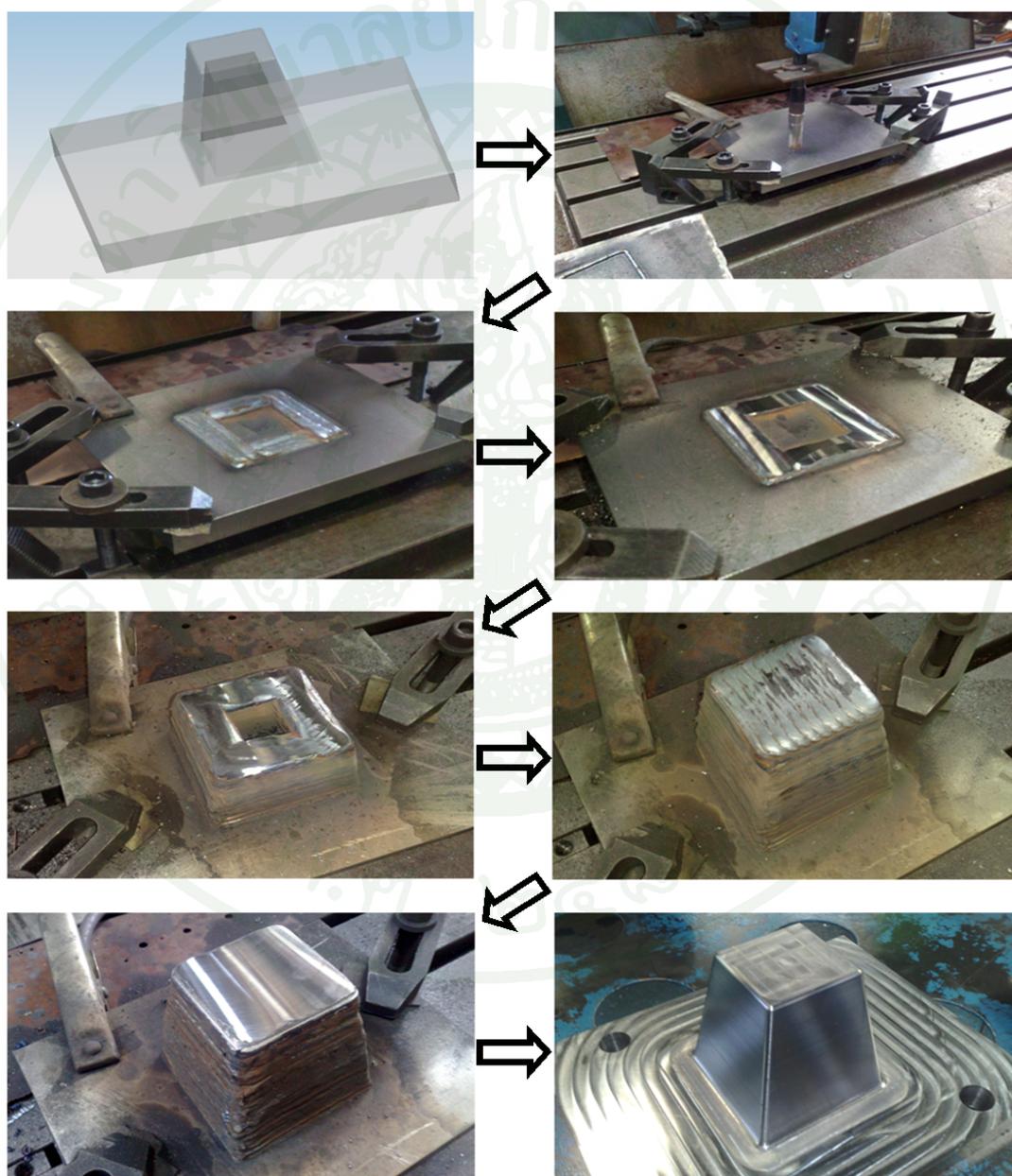
ภาพที่ 69 แสดงค่า Displacement ในแม่พิมพ์



ภาพที่ 70 แสดงค่าความปลอดภัยตั้งแต่ค่าน้อยสุดถึงค่ามากที่สุดของแม่พิมพ์

5. ผลการขึ้นรูปแม่พิมพ์แบบกลวงด้านในโดยวิธีการขึ้นรูปทีละชั้น

การขึ้นรูปแม่พิมพ์แบบกลวงด้านในโดยวิธีการขึ้นรูปทีละชั้นด้วยชุดหัวเชื่อมที่ติดตั้งกับเครื่องกัดแบบสามแกนด้วยลวดเชื่อม ER70S – 6 ด้วยพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลองที่ 1-3 และใช้แบบที่ออกแบบด้วยโปรแกรม CAD และ COSMOS แล้วส่ง G – Code ไปยังเครื่อง CNC เพื่อขึ้นรูปแม่พิมพ์แสดงคังภาพที่ 71



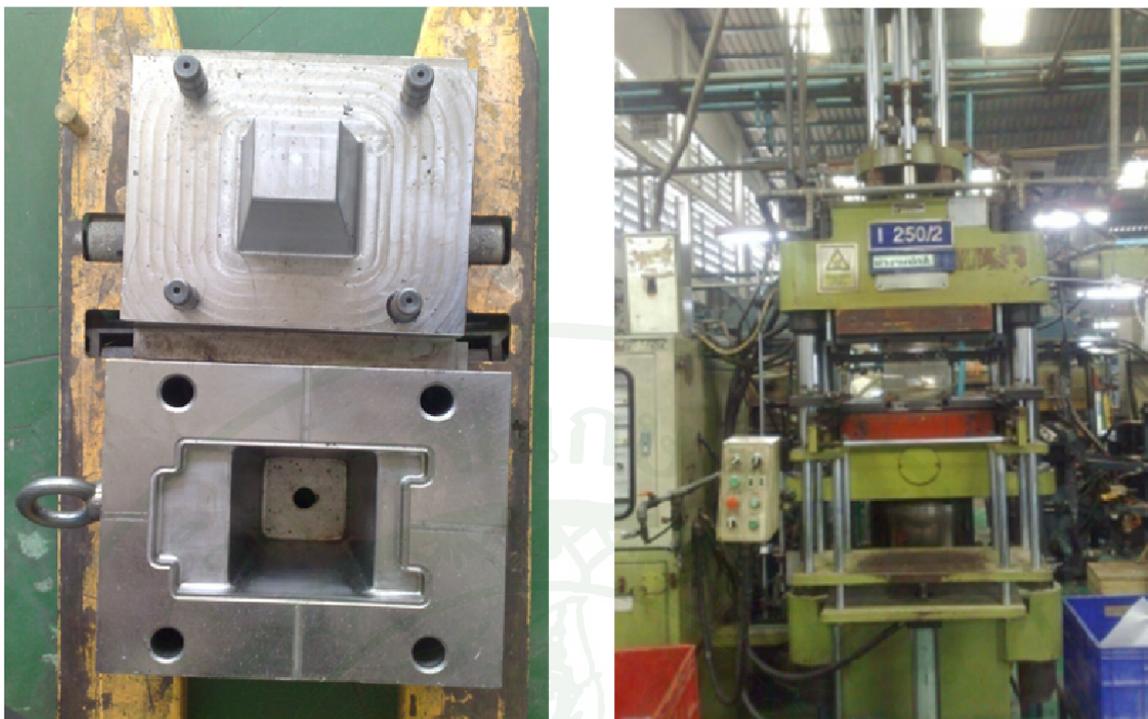
ภาพที่ 71 แสดงขั้นตอนโดยสังเขปในการขึ้นรูปแม่พิมพ์แบบกลวงด้านใน

จากภาพที่ 71 กระบวนการเริ่มจากการออกแบบชิ้นงานด้วยโปรแกรมเขียนแบบสามมิติ จากนั้นเมื่อทำการแบ่งเป็นชั้นและทำการแปลงไฟล์ให้เป็น NC - CODE สำหรับส่งข้อมูลไปยังเครื่อง CNC เพื่อทำการขึ้นรูปทีละชั้นโดยการเติมเนื้อชิ้นงานในชั้นล่างสุดด้วยการเชื่อม และทำการกัดแต่งผิว จะได้ชิ้นงานในชั้นที่ 1 จากนั้นทำในชั้นต่อไปจนได้เป็นชิ้นงานแบบกลวงที่มีโพรงอยู่ตรงกลางตามที่ได้ออกแบบ เมื่อทำการขึ้นรูปชิ้นงานจนไปถึงชั้นที่ต้องทำการปิดโพรงที่อยู่ตรงกลางของชิ้นงาน เพื่อให้ได้แม่พิมพ์ที่สามารถใช้งานได้ ซึ่งขั้นตอนนี้ทำได้โดยทำการกัดแต่งขอบผนังกลวงด้านในเพื่อสร้างร่องสำหรับวางแผ่นเหล็กเพื่อปิดโพรงตรงกลางชิ้นงาน และนำเหล็กที่ตัดให้มีขนาดเท่ากับร่องที่สร้างขึ้นมาวางในร่อง ต่อจากนั้นทำการเชื่อมเติมเนื้อวัสดุ และทำการกัดต่อจนครบทุกชั้นจะได้แม่พิมพ์แบบกลวงที่มีขนาดใกล้เคียงกับแม่พิมพ์ที่ต้องการ ในกระบวนการสุดท้ายมีการกัดแต่งผิวแบบละเอียดอีกครั้งหนึ่งเพื่อให้ได้แม่พิมพ์แบบกลวงด้านในที่มีผิวและขนาดตามที่ออกแบบ

5. ผลการทดลองใช้งานแม่พิมพ์

จากการสร้างแม่พิมพ์ในส่วนตัวเมียด้วยกระบวนการกัดแต่งผิว เพื่อนำแม่พิมพ์ไปทดสอบฉีดยางด้วยเครื่องฉีดคังแสดงในภาพที่ 72 พบว่าแม่พิมพ์แบบกลวงที่ทำการขึ้นรูปทีละชั้นสามารถใช้งานได้ และ ผลึกภัณฑ์ที่ได้จากแม่พิมพ์มีความสมบูรณ์ดังแสดงในภาพที่ 73 โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ในการฉีดคังนี้

- ค่าแรงปิดแม่พิมพ์ 195 กก./ชม.² (191 บาร์)
- ระยะเวลาการสุกยาง 350 วินาที
- แรงดันการฉีดยาง 100 กก./ชม.² (98 บาร์)
- อัตราการฉีด 100 ลิตร/นาที (16 ลบ.ชม./วินาที)
- อุณหภูมิแม่พิมพ์ 180° C
- อุณหภูมิยางที่ฉีด 60° C



ภาพที่ 72 แสดงแม่พิมพ์ และ เครื่องฉีดยางที่ใช้ในการทดสอบ



ภาพที่ 73 ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากแม่พิมพ์

6. การเปรียบเทียบเวลาและต้นทุนในกระบวนการผลิตแม่พิมพ์ส่วนตัวผู้

จากการเปรียบเทียบระยะเวลาในการผลิตแม่พิมพ์ส่วนตัวผู้ ระหว่างการผลิตด้วยกระบวนการกัดแต่งผิวแบบปกติ และ การผลิตโดยใช้วิธีการขึ้นรูปทีละชั้น โดยถ้าพิจารณาจากระยะเวลาที่ใช้ในการกัดแต่งผิวงานจะพบว่ากระบวนการขึ้นรูปทีละชั้นใช้เวลาในการกัดแต่งผิวน้อยกว่าการสร้างแม่พิมพ์กระบวนการกัดแต่งผิวปกติมาก สำหรับระยะเวลารวมในการผลิตแม่พิมพ์ด้วยการขึ้นรูปทีละชั้นใช้เวลามากกว่ากระบวนการกัดแต่งผิวในปัจจุบันเพียงเล็กน้อย สำหรับต้นทุนในการผลิตแม่พิมพ์ของทั้งสองกระบวนการมีค่าใกล้เคียงกัน ดังแสดงในตารางที่ 9 และ ตารางที่ 10

ตารางที่ 9 การเปรียบเทียบระยะเวลาในการผลิตแม่พิมพ์ส่วนตัวผู้ ระหว่างกระบวนการกัดแต่งผิว และ การขึ้นรูปทีละชั้น

ขั้นตอน	กระบวนการกัดแต่งผิว (นาที)	การขึ้นรูปทีละชั้น (นาที)
การเชื่อมขึ้นรูปชิ้นงาน	-	217
การกัดงานแบบหยาบ	249	20
การกัดงานแบบละเอียด	128	128
รวม	377	365

หมายเหตุ: วิธีการคิดเวลาแสดงในภาคผนวก ง โดยระยะเวลาในการผลิตสำหรับเครื่องที่ใช้ในงานวิจัย และ ไม่นับเวลาในการติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ

ตารางที่ 10 การเปรียบเทียบต้นทุนในการผลิตแม่พิมพ์ส่วนตัวผู้ ระหว่างกระบวนการกัดแต่ง
ผิวและ การขึ้นรูปทีละชั้น

รายการ	กระบวนการกัดแต่งผิว (บาท)	การขึ้นรูปทีละชั้น (บาท)
ค่าใช้จ่ายในการเชื่อม	-	307
ค่าเครื่องจักร CNC	2,514	2,434
ค่าวัสดุ	544	180
ค่าหัวกัด	679	267
รวม	3,737	3,188

หมายเหตุ: วิธีการคำนวณต้นทุนอย่างละเอียดแสดงในภาคผนวก ง โดยกำหนดให้ค่าต้นทุนใน
การกัดงานอยู่ที่ 400 บาทต่อชั่วโมง

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

การขึ้นรูปแม่พิมพ์แบบกลวงด้านในโดยวิธีการขึ้นรูปทีละชั้นด้วยเครื่องเชื่อม MIG/MAG โดยใช้ลวดชนิด ER70s - 6 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.2 mm บนแผ่นโลหะ SS400 จากผลการวิเคราะห์ค่าความแข็งแบบร็อคเวลล์ ได้ค่าความแข็งเฉลี่ยบริเวณส่วนที่เป็นลวดเชื่อม 73.1 HRB, ค่าความแข็งเฉลี่ยบริเวณรอยต่อ 90.7 HRB และ ค่าความแข็งเหล็กแผ่นรอง 89 HRB ซึ่งสรุปได้ว่าค่าความแข็งเฉลี่ยในแต่ละส่วนของชิ้นงานมีความสม่ำเสมอ และใกล้เคียงกับวัสดุที่เป็นแผ่นพื้น ในการตรวจสอบโครงสร้างของเนื้อโลหะด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscopy พบว่าโครงสร้างของเหล็กที่เชื่อมขึ้นประกอบไปด้วยส่วนของ Ferrite และ Pearlite ซึ่งเป็นโครงสร้างพื้นฐานของเหล็กชนิด low carbon steels โดยที่ขนาดของเกรนมีขนาดเล็กกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ ซึ่งสรุปได้ว่าชิ้นงานตัวอย่างมีการหลอมละลายสมบูรณ์ จากการตรวจสอบด้วยรังสี พบว่าวัสดุที่เดิมขึ้นมีการหลอมละลายสมบูรณ์โดยที่ไม่มีสารมลทินฝังในหรือฟองอากาศและรอยร้าว จากผลการทดสอบดึงหวัข้อที่กล่าวมาสามารถสรุปได้ว่าค่าพารามิเตอร์ในการเชื่อมขึ้นรูป และ เส้นทางเดินของการเชื่อมมีความเหมาะสม

ในการวิเคราะห์ Finite Element Method แม่พิมพ์แบบกลวงด้านในที่สร้างขึ้นโดยวิธีการขึ้นรูปทีละชั้น ได้ค่า stress สูงสุด 87 MPa ณ บริเวณกึ่งกลางของผนังด้านข้างแม่พิมพ์ ค่า Displacement 14 Micron ณ บริเวณผนังด้านข้าง และ ความปลอดภัยต่ำสุดของแม่พิมพ์ (Factor of Safety) เท่ากับ 2.03 โดยการทดสอบบีดียงด้วยเครื่องฉีด พบว่าแม่พิมพ์แบบกลวงที่ทำการขึ้นรูปทีละชั้นสามารถใช้งานได้ และ ผลึกภัณฑ์ที่ได้จากแม่พิมพ์มีความสมบูรณ์

ข้อเสนอแนะ

1. เครื่องมือสำหรับการเติมเนื้อวัสดุที่สร้างขึ้นในงานวิจัยนี้เป็นเครื่องชนิดกึ่งอัตโนมัติ เนื่องจากเครื่องก๊ัดที่ใช้ เป็นเครื่องที่โรงงานสนับสนุนและไม่สามารถทำการตัดแปลงเองได้ สำหรับงานวิจัยในอนาคต ถ้าสามารถสร้างเครื่องเติมเนื้อวัสดุชนิดอัตโนมัติ จะสามารถลดเวลาและขั้นตอนในการสร้างแม่พิมพ์ได้
2. ในงานวิจัยนี้ได้ใช้โปรแกรม UNIGRAPHICS ในการเขียนแบบและสร้างทางเดินหัวเชื่อม สำหรับกระบวนการเติมเนื้อวัสดุ และก๊ัดแต่งผิว ซึ่งในการสร้างทางเดินหัวเชื่อมและการแบ่งชิ้นงานเป็นชั้นด้วยโปรแกรมนี้ต้องทำการตัดแปลงวิธีในการสร้างทางเดินหัวเชื่อมเนื่องจากทิศทางเดินของหัวเชื่อมและ หัวก๊ัด สำหรับ การเติมเนื้อวัสดุ และ การก๊ัดแต่งผิว มีทิศทางในแกน Z กลับกัน ถ้าสามารถสร้างโปรแกรมสำเร็จรูปสำหรับกระบวนการเติมเนื้อวัสดุที่สามารถแบ่งชิ้นงานเป็นชั้นได้ง่าย จะทำให้การสร้าง NC-CODE สำหรับการเติมเนื้อวัสดุง่ายขึ้น และลดเวลาในการสร้างแม่พิมพ์ลง
3. รูปแบบความกลวงด้านในของแม่พิมพ์ในงานวิจัยนี้เป็นรูปทรงแบบง่าย ถ้ามีการพัฒนาและปรับปรุงรูปทรงความกลวงด้านในด้วยการเพิ่ม Support Structure สำหรับช่วยในการรับแรง จะทำให้แม่พิมพ์มีความแข็งแรงขึ้น
4. สำหรับชนิดของลวดเชื่อมในงานวิจัยนี้เป็นลวดเชื่อมชนิดเดียว สำหรับงานวิจัยต่อไป ถ้ามีการปรับปรุงคุณสมบัติของวัสดุที่ทำการขึ้นรูป จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของแม่พิมพ์หรือชิ้นงานที่สร้างจากกระบวนการนี้ได้

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

พัฒนชัย พรมทา. 2546. **งานเชื่อมโลหะ 1**. สำนักพิมพ์ศูนย์ส่งเสริมอาชีพฯ, กรุงเทพฯ.

สมบูรณ์ เต็งหงษ์เจริญ. 2542. **กระบวนการเชื่อม**. สำนักพิมพ์ศูนย์ส่งเสริมวิชาการ, กรุงเทพฯ.

มานะศิษฐ์ พิมพ์สาร. 2542. **คู่มือการเชื่อม มิก-แม็ก**. เอ็มแอนด์ดี, กรุงเทพฯ.

Laeng, J., J.G. Stewart and F.W. Liou, 2000. Laser metal forming processes for rapid prototyping - a review. **International Journal of Production Research**. 38: 16, 3973 – 3996.

Huijun, W., W. Jiang, J. Ouyang and R. Kovacevic. 2004. Rapid prototyping of 4043 Al-alloy parts by VP-GTAW. **Journal of Materials Processing Technology**. 148: 93–102.

Song, Y.-A., S. Park, D. Choi and H. Jee. 2005. 3D welding and milling: Part I-a direct approach for freeform fabrication of metallic prototypes. **International Journal of Machine Tools Manufacture**. 45: 1057–1062.

Costa L., R. Vilar, T. Reti and A.M. Deus. 2005. Rapid tooling by laser powder deposition: Process simulation using finite element analysis. **Acta Materialia**. 53: 3987–3999.

Song, Y.-A. and Sehyung Park. 2006. Experimental investigations into rapid prototyping of composites by novel hybrid deposition process. **Journal of Materials Processing Technology**. 171: 35–40.

Sreenathbabu, A. and K.P. Karunakaran. 2006. Hybrid adaptive layer manufacturing: An Intelligent art of direct metal rapid tooling process. **Robotics and Computer Integrated Manufacturing**. 22: 113–123.

- Paul, C.P., A. Jain, P. Ganesh, J. Negi and A.K. Nath. 2006. Laser rapid manufacturing of Colmonoy-6 components. **Optics and Lasers in Engineering**. 44: 1096–1109.
- Edson, C. S., M. Shiomia, K. Osakadaa and T. Laoui. 2006. Rapid manufacturing of metal components by laser forming. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**. 46: 1459–1468.
- Qian, Y.-P., H. Zhang and G. Wang. 2006. Research of rapid and direct thick coatings deposition by hybrid plasma-laser. **Applied Surface Science**. 252: 6173–6178.
- Eiamsa-ard, K., N. Boonlertcharoensak, N. Chaipakdee, S. Rodkwan and C. Raksiri. 2007. Making Compression Mould for Rubber Products by Material Deposition Process. **Conference of the Mechanical Engineering Network of Thailand 21st**. Chonburi, Thailand.
- Xinhong, X., H. Zhang and G. Wang. 2009. Metal direct prototyping by using hybrid plasma deposition and milling. **Journal of materials processing technology**. 209: 124-130.
- Toshihide, H., S. Kiriara and Y. Miyamoto. 2009. Freeform fabrication of superalloy objects by 3D micro welding. **Materials and Design**. 30: 1093–1097.



ภาคผนวก



ภาคผนวก ก
หน้าที่ ชนิด และสมบัติของก๊าซกลุ่ม

1. หน้าที่ของก๊าซคลุม (Function of Gas Shielded)

กระบวนการเชื่อมแบบอาร์คใช้ก๊าซคลุม มีหลายกระบวนการ ได้แก่ กระบวนการเชื่อม GTAW (TIG) , GMAW (MIG/MAG) , FCAW แบบใช้ก๊าซคลุม จากภายนอกช่วย , PAW และ EGW ขณะที่เกิดการอาร์ค อากาศที่ปกคลุมรอบๆ บริเวณอาร์คจะถูกแทนที่ด้วยก๊าซคลุม ป้องกันมิให้ไนโตรเจน ออกซิเจน และความชื้นในอากาศเข้าไปรวมตัวกับบ่อหลอมละลาย ปกติไนโตรเจนที่มีอยู่ในเหล็กกล้าจะทำให้คุณสมบัติทาง Ductility และ Impact Strength ของแนวเชื่อมลดลง และ อาจเป็นสาเหตุให้รอยเชื่อมเกิดการแตกร้าว (Cold Crack) , รูพรุน (Porosity) เหล็กกล้าที่มีออกซิเจนมากเกินไป จะรวมตัวกับคาร์บอนในเหล็ก อยู่ในรูปของก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ (CO) ผ่องอยู่ในเนื้อเหล็กเกิดเป็นรูพรุน ดังนั้นจึงมีการเติมธาตุอื่น ๆ เข้าไปเพื่อให้รวมตัวกับออกซิเจนในรูปของสารประกอบ ผ่องอยู่ภายในเนื้อเหล็กแทนการเป็นรูพรุน ส่วนไฮโดรเจนจาก ไขมันและน้ำมันก็จะแทรกอยู่ในเนื้อเหล็กหรือออลูมิเนียม ซึ่งจะมีผลเกิดเป็นรูพรุนหรือเป็นสาเหตุของการแตกร้าวได้รอยเชื่อมขึ้นได้เช่นกัน สาเหตุของการรวมตัวดังกล่าวมาแล้วข้างต้น สามารถป้องกันได้โดยใช้ก๊าซคลุม ซึ่งก๊าซคลุมที่สำคัญมีอยู่ 2 กลุ่มคือ

1.1 ก๊าซเฉื่อย (Inert Gas) ได้แก่ ก๊าซอาร์กอน (Argon : Ar) และก๊าซฮีเลียม (Helium : He) หรือก๊าซอาร์กอนและฮีเลียมผสมกัน ก๊าซเหล่านี้จะไม่เกิดปฏิกิริยารวมตัวกับสารอื่น

1.2 แอกทีฟก๊าซ (Active Gas) ได้แก่ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) หรืออาจใช้ก๊าซผสมระหว่างอาร์กอนกับแอกทีฟก๊าซบางตัว เช่น ออกซิเจน, ไนโตรเจน, คาร์บอนไดออกไซด์ หรือไฮโดรเจน (H₂). นอกจากก๊าซคลุมจะใช้ปกคลุมการอาร์คในการเชื่อมแล้ว ยังนำไปใช้ในกระบวนการตัดที่เกี่ยวข้อง เช่น การตัดด้วยพลาสมา (Plasma Cutting), การตัดด้วยเลเซอร์ (Laser Cutting) เป็นต้น

2. วัตถุประสงค์ของการใช้ก๊าซคลุม

มีวัตถุประสงค์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้แก่การเชื่อมและการตัด 3 ประการคือ

2.1 การทำให้อุณหภูมิที่มีประจุไฟฟ้าแตกตัวให้อิออน (Ionization Potential)

เป็นการสร้างพลังงานที่จำเป็นในการดึงอิเล็กตรอน (Electron) ออกจากอะตอมของก๊าซ (Gas Atom) การแตกตัวให้อิออน ณ อุณหภูมิของการอาร์ค มีผลต่อการส่งถ่ายพลังงานความร้อน (Heat Energy) ไปยังบริเวณที่เกิดการอาร์ค พลังงาน Ionization Potential ที่สูงต้องใช้แรงเคลื่อนไฟฟ้าสูงในการทำให้อะตอมของก๊าซแตกตัวให้อิออนมาก ดังนั้น ก๊าซฮีเลียม ซึ่งมีค่า Ionization Potential 24.5 eV (หมายความว่า ต้องใช้แรงเคลื่อนไฟฟ้า 24.5 โวลต์ ในการทำให้อะตอมของก๊าซฮีเลียมแตกตัวให้อิออนมาก) สูงกว่าค่า Ionization Potential ของก๊าซอาร์กอน (15.7 eV) ดังนั้นการใช้ก๊าซอาร์กอนเป็นก๊าซคลุมจะทำให้เริ่มต้นอาร์คได้ง่ายกว่าการใช้ก๊าซอาร์กอนเป็นก๊าซคลุม

2.2 การนำความร้อน (Thermal Conductivity)

ความสามารถในการนำความร้อนของก๊าซคลุมที่ต่ำ เช่น ก๊าซอาร์กอนทำให้การอาร์คเกิดความเข้มข้นสูงเฉพาะจุดและเป็นบริเวณแคบ ขณะที่ก๊าซฮีเลียมมีคุณสมบัติในการนำความร้อนที่ดีเลิศ จึงเป็นเหตุให้เปลวอาร์คที่ได้จากการใช้ก๊าซฮีเลียมเป็นก๊าซคลุมแผ่ขยายกว้าง ในขณะที่เดียวกับศูนย์กลางของเปลวอาร์คจะเจาะทะลุลงไปยังส่วนล่างของแนวเชื่อม ทำให้แนวเชื่อมที่ใช้ก๊าซฮีเลียมเป็นก๊าซคลุมซึมลึกกว่าการใช้ก๊าซอาร์กอนเป็นก๊าซคลุม

2.3 การทำปฏิกิริยากับแนวเชื่อม (Reactivity)

หมายถึง ก๊าซคลุมทำปฏิกิริยากับแนวเชื่อม ก๊าซอาร์กอนและก๊าซฮีเลียมต่างเป็นก๊าซเฉื่อย (Inert Gas) ดังนั้น ก๊าซทั้งสองจึงไม่มีการทำปฏิกิริยากับแนวเชื่อมแต่อย่างใด (แม้ว่าจะใช้ก๊าซฮีเลียมผสมกับก๊าซอาร์กอนก็ตาม) ก๊าซที่สามารถทำปฏิกิริยา (React) กับบ่อหลอมละลายของแนวเชื่อม ได้แก่

2.3.1 ก๊าซไฮโดรเจน (Hydrogen) เป็น Reducing Gas (ดึงคาร์บอนให้เกิดขึ้นน้อย และลดยุคไซด์ที่จะไปรวมตัวกับบ่อหลอมละลาย) อย่างไรก็ตามก๊าซไฮโดรเจน ถ้าใช้เป็นส่วนผสมของก๊าซคลุมในการเชื่อมเหล็กแข็ง (Hardened Steel) จะส่งผลร้ายตรงกันข้ามเช่นเกิดการแตกร้าวใต้แนวเชื่อม (Underbead Cracking) ได้ง่าย

2.3.2 ก๊าซออกซิเจน (Oxygen) และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbondioxide) ก๊าซทั้งสองจัดอยู่ในกลุ่มก๊าซปฏิกิริยา (Reactive Gas) เรียกว่า Oxidizers Gas จะทำปฏิกิริยากับบ่อหลอมละลาย ในรูปของออกไซด์ (Oxides)

2.3.3 ก๊าซไนโตรเจน (Nitrogen) ใช้แรงเคลื่อนไฟฟ้าสูง กระแสเชื่อมสูง จึงจะถ่ายเทความร้อนได้ดี แต่เนื่องจากไม่ใช่เป็นก๊าซเฉื่อย ขณะเชื่อมจะทำปฏิกิริยากับเหล็กคาร์บอน (Carbon Steel) ในรูปของไนเตรท (Nitrates) ที่มา : ANSI / AWS C 5.10 – 94 . 1993 : 1

3. ชนิดและสมบัติของก๊าซคลุม (Types and Properties of Gas Shields)

สมบัติพื้นฐานของก๊าซคลุมที่นำไปใช้ในการเชื่อมมีดังนี้

- สมบัติทางความร้อน (Thermal Properties) ที่อุณหภูมิสูง
- เกิดปฏิกิริยาเคมีขึ้นระหว่างก๊าซคลุมกับธาตุต่าง ๆ ที่ผสมอยู่ในโลหะงานและลวดเชื่อม
- รูปแบบของการส่งถ่ายน้ำโลหะ จะขึ้นอยู่กับชนิดของก๊าซคลุมด้วย

การนำความร้อนของก๊าซที่อุณหภูมิของการอาร์คมีผลต่ออาร์คโวลต์เตจ และพลังงานความร้อนที่จ่ายให้กับการเชื่อม ขณะที่ก๊าซคลุมมีการนำความร้อนเพิ่มขึ้น แรงเคลื่อนที่ใช้เชื่อมต้องเพิ่มขึ้นเพื่อให้สามารถประกอการอาร์คได้ ตัวอย่างเช่น ก๊าซฮีเลียมกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีการนำความร้อนสูงกว่าก๊าซอาร์กอน จึงมีการถ่ายพลังงานความร้อนให้กับงานเชื่อมมาก ดังนั้น ก๊าซฮีเลียมและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ จึงต้องมีแรงเคลื่อนไฟฟ้าสูง เพื่อรักษาอาร์คให้สม่ำเสมอก๊าซที่จะนำมาเป็นก๊าซคลุมจะต้องเข้ากันได้และเหมาะสมกับชนิดของลวดเชื่อมและชิ้นงานที่จะทำการเชื่อม เช่น ก๊าซ CO_2 และก๊าซคลุมที่ผสมด้วยออกซิเจน (O_2) จะไม่ใช่เชื่อมอูมิเนียม เพราะจะเกิดอูมิเนียมออกไซด์ขึ้นได้ อย่างไรก็ตาม CO_2 และก๊าซผสม O_2 จะใช้กับการเชื่อมเหล็กกล้าได้ ในการเชื่อม GMAW ก๊าซคลุมผสม O_2 จะช่วยให้การอาร์คสม่ำเสมอ O_2 จะทำหน้าที่ Oxidizing ได้ดีกว่า CO_2 การใช้ O_2 โดยทั่วไปจะผสมไม่เกิน 12% โดยปริมาณผสมกับก๊าซอาร์กอน (Ar) ขณะเดียวกันลวดเชื่อมที่ใช้จะต้องผสมธาตุ Deoxidizing ลงไปเพื่อไม่ให้เกิดรูพรุนกับรอยเชื่อมการเลือกใช้ก๊าซคลุมยังขึ้นอยู่กับรูปแบบของ Metal Transfer และการซึมลึก เช่น Metal Transfer แบบ Spray Arc จะไม่เกิดขึ้น เมื่อใช้ก๊าซคลุมที่ผสม

ด้วย CO₂ โดยที่มี CO₂ ผสม โดยปริมาณมากกว่า 20% จะไม่สามารถเกิด Spray Arc ที่แท้จริงได้ เพียงแต่จะเกิดการ Transfer ที่คล้ายกับ Spray Transfer และเมื่อใช้ก๊าซกลุ่มที่ผสมด้วย CO₂ ในเปอร์เซ็นต์สูงถึง 30% โดยปริมาณจะต้องใช้กระแสในระดับสูงและไม่สามารถรักษาอาร์คให้สม่ำเสมอและเกิดเป็นโลหะกระเด็น (Spatter) มากด้วย อย่างไรก็ตามในการเชื่อม TIG ไม่สามารถใช้ก๊าซ CO₂ หรือก๊าซกลุ่มผสม CO₂ ในการเชื่อมได้ เพราะ จะทำให้ปลายลวดทั้งสแตนเลสและไทเทเนียมไม่สามารถทำการเชื่อมได้

ตารางผนวกที่ ก1 แสดงสมบัติทั่วไปของก๊าซกลุ่มตามมาตรฐาน DIN 32 526

ชนิดของ ก๊าซ	สัญลักษณ์ ทางเคมี	ความ หนาแน่น*	ความ หนาแน่น**	จุดเดือด ***	ปฏิกิริยา ระหว่าง การเชื่อม
อาร์กอน	Ar	1.665	1.37	-185.9	ก๊าซเฉื่อย
ฮีเลียม	He	0.167	0.14	-286.9	ก๊าซเฉื่อย
คาร์บอนไดออกไซด์	CO ₂	1.849	1.44	-78.511.	ปฏิกิริยา ออกไซด์
ออกซิเจน	O ₂	1.337	1.04	-183.3	ปฏิกิริยา ออกไซด์
ไนโตรเจน	N ₂	1.770	0.91	-195.8	ก๊าซเสริม
ไฮโดรเจน	H ₂	0.085	0.06	-252.9	ลดออกไซด์

1) Sublimation Temperature (อุณหภูมิที่เกิดการระเหิดเปลี่ยนสถานะของแข็งกลายเป็นไอ เฉพาะ CO₂)

2) ก๊าซกลุ่มที่มีส่วนผสมของก๊าซไฮโดรเจนมากกว่า 10% จะเป็นอันตราย เพราะว่าจะติดไฟได้ง่ายและอาจเกิดการระเบิด (Explosion) ได้

* ที่ 15 °ซ ความกดดัน 1 บาร์ (กก. / ม3.)

** เทียบกับอากาศ (=1.15 °ซ ความกดดัน 1 บาร์)

*** ที่ความกดดัน 1.013 บาร์ °ซ

ที่มา : DIN Handbook 8 . Welding 1 , 1990 : 315

ตารางผนวกที่ ก2 แสดงความบริสุทธิ์ (Purities) และจุดกลายเป็นของเหลว (Dew Point) ของ
ก๊าซ

ชนิดของก๊าซ	โดยปริมาตร	ที่ความดัน 1 บาร์ อุณหภูมิ ความชื้นสูงสุด °ซ
อาร์กอน	99.9	-50
ฮีเลียม	99.9	-50
คาร์บอนไดออกไซด์	99.7	-35
ออกซิเจน	99.5	-35
ไนโตรเจน	99.5	-50
ไฮโดรเจน	99.5	-50

ที่มา : สมบูรณ์ (2542)

4. ก๊าซเฉื่อย (Inert Gas)

ก๊าซกลุ่มที่เป็นก๊าซเฉื่อย คือ ก๊าซอาร์กอน (Ar) , ฮีเลียม (He) หรือก๊าซทั้งสองผสมกัน
เปลวอาร์คจะเกิดขึ้นอย่างอิสระระหว่างปลายอิเล็กโทรดทั้งสแตนท์ที่ไม่หลอมละลายในกรณีเชื่อม
ทิก (TIG) หรือเปลวอาร์คเกิดขึ้นอย่างอิสระระหว่างปลายอิเล็กโทรดที่หลอมละลาย ลงสู่โลหะ
ชิ้นงานในกรณีเชื่อมมิก (MIG) ก๊าซเฉื่อยเหล่านี้จะไม่เกิดปฏิกิริยากับสารอื่น

4.1 ก๊าซอาร์กอน (Ar) ความหนาแน่น 1.784 กก. / ลบ.ม.

ผลิตได้จากอากาศ มีอยู่ในอากาศประมาณ 0.9% อาร์กอนเป็นอ็อกซิไดซ์ที่ต่ำและเปลวอาร์คที่เกิดขึ้นจะเรียบนิ่ง ก๊าซอาร์กอนหนักกว่าอากาศผลิตโดยการแยกอากาศเหลว
การนำเอาก๊าซไปใช้มีทั้งในรูปก๊าซอัดถังหรืออากาศเหลว ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณในการซื้อขาย
กรณีใช้จำนวนมากในรูปก๊าซเหลวจะถูกกว่าในรูปก๊าซอัดถัง (อาร์กอนเหลวจะเก็บไว้ที่อุณหภูมิ
ต่ำกว่า -184 °ซ เล็กน้อย)

4.1.1 ก๊าซอาร์กอนมีข้อดีกว่าก๊าซฮีเลียม ดังนี้

1. อาร์กอนเสียงเงียบและสม่ำเสมอ
2. เริ่มต้นอาร์กกระทำได้ง่าย มี Ionization Potential 15.7 โวลท์
3. ใช้แรงเคลื่อนอาร์กต่ำ และระยะอาร์กสั้น ซึ่งให้ผลดีกับการเชื่อมโลหะบาง
4. ให้ปฏิกิริยาทำความสะอาดดี ซึ่งเหมาะที่จะนำไปเชื่อมอลูมิเนียมและ แมกนีเซียม
5. อัตราการไหลก๊าซต่ำเพราะก๊าซหนักกว่าอากาศ 1.4 เท่า หนักกว่าฮีเลียม 10 เท่า
6. ราคาถูกและหาได้ง่าย
7. มีความต้านทานต่อการเป่าของอากาศ
8. เหมาะแก่การเชื่อมโลหะต่างชนิด
9. บ่อหลอมละลายสามารถควบคุมได้ง่าย เมื่อเชื่อมทำเหนือศีรษะและทำตั้ง
10. ลดปัญหาเรื่องการเกิดโอโซน ซึ่งเป็นมลพิษต่อสภาพแวดล้อม (Ozone

Generations)

4.1.2 ข้อเสีย ไม่เหมาะกับการเชื่อมโลหะที่หนามาก ๆ ก๊าซ อาร์กอนมี Ionization Potential 15.7 Volts (หมายความว่า จะต้องใช้ความต่างศักย์ 15.7 โวลท์ จึงจะทำให้อะตอมของ ก๊าซ เป็นไอออน) ก๊าซ อาร์กอน มีแบ่งออกเป็นเกรดต่าง ๆ ได้แก่

1. Argon Welding Grade (99.99%)
2. Argon High Purity Grade (99.993%)

สำหรับ Argon เกรดที่ใช้เชื่อมจะมีส่วนประกอบที่สำคัญอยู่ในระดับต่อไปนี้

- Argon ต่ำสุด 99.99%
- ออกซิเจน น้อยกว่า 10 ppm.
- ความชื้น น้อยกว่า 10 ppm.
- ไนโตรเจน น้อยกว่า 50 ppm.
- คาร์บอนไดออกไซด์ น้อยกว่า 5 ppm.
- คาร์บอนมอนนอกไซด์ น้อยกว่า 1 ppm.
- ไฮโดรคาร์บอน น้อยกว่า 1 ppm.
- ไฮโดรเจน น้อยกว่า 1 ppm.

** ก๊าซ อาร์กอนสามารถใช้เป็นก๊าซ คลุมได้ทั้งในสภาพบริสุทธิ์ และผสมกับก๊าซอื่น ๆ เพื่อให้ได้ สมบัติตามต้องการสำหรับใช้เชื่อมโลหะเหล็ก และโลหะนอกกลุ่มเหล็ก กระบวนการเชื่อมทั้งหมดที่ใช้ก๊าซ อาร์กอนบริสุทธิ์และอาร์กอนผสมจุดประสงค์เพื่อต้องการเพิ่มสมบัติความสามารถในการเชื่อมคุณสมบัติทางกล คุณลักษณะของการอาร์ค

4.2 ก๊าซฮีเลียม (He) ความหนาแน่น 0.178 กก. / ลบ.ม.

ผลิตจากหลุมก๊าซธรรมชาติ ราคาซื้อขายกัน ปรากฏว่าในสหรัฐอเมริกาถูกกว่ายุโรปมาก มีสมบัติแตกต่างกับอาร์กอนตรงที่เป็นตัวนำความร้อนสูงกว่าก๊าซอาร์กอน สามารถเฉลี่ยความร้อนภายในเปลวอาร์คได้สม่ำเสมอ สามารถหลีกเลี่ยงการสูญเสียความร้อนไป แต่เป็นตัวนำทางไฟฟ้าต่ำกว่าก๊าซอาร์กอนและมีค่าความต่างศักย์ไอออนในที่สูงกว่า ดังนั้น จึงต้องใช้ค่าแรงดันอาร์ค (โวลต์) สูงตามไปด้วย บ่อหลอมละลายที่เกิดขึ้น จะมีความร้อนสูง ทำให้น้ำโลหะหลอมเหลวใสกว่า ก๊าซฮีเลียมสามารถใช้เชื่อมโลหะชิ้นงานที่เป็นตัวนำความร้อนที่ดี เช่น ทองแดง , อลูมิเนียม นอกจากนี้ยังสามารถช่วยให้ความเร็วในการเชื่อมสูงกว่าด้วย ก๊าซฮีเลียมมีน้ำหนักเบากว่าอากาศ ทำให้น้ำหนักออกจากหัวฉีดและพุ่งลงภายใต้เปลวอาร์คแล้วจะลอยไปอย่างรวดเร็ว เป็นการช่วยก่อให้เกิดพลังงานการเคลื่อนไหวเพิ่มขึ้นมากมาย สามารถปกคลุมบ่อหลอมละลายได้ดียิ่ง

4.2.1 ก๊าซฮีเลียมมีข้อดีเหนือกว่าก๊าซอาร์กอน คือ

1. ให้ HAZ เล็กกว่า
2. แรงเคลื่อนอาร์คสูงกว่า ซึ่งเหมาะกับการเชื่อมโลหะหนา และโลหะที่เป็นตัวนำความร้อนสูงมี Ionization Potential 24.5 โวลต์
3. ให้ความเร็วในการเชื่อมสูง
4. ให้การปกคลุมบริเวณอาร์คดีในการเชื่อมทำตั้งและทำเหนือศีรษะ
5. การซึมลึกสูง เพราะให้ความร้อนมาก
6. เมื่อใช้เป็นก๊าซรองหลัง จะได้รอยเชื่อมซึมลึกค่อนข้างเรียบแบน
7. เหมาะสำหรับเชื่อมโลหะพวกนิกเกิลผสมและอลูมิเนียมที่หนามาก

4.2.2 ข้อเสีย ต้องคอยควบคุมเรื่อง อัตราการไหลของก๊าซ

5. แอกทีฟแก๊ส (Active Gas)

ตามปกติแก๊สเฉื่อยที่นำมาใช้เป็นแก๊สคลุม จะมีปฏิกิริยาที่เฉื่อยเฉย ตัวที่แสดงปฏิกิริยา แอกทีฟตรงตำแหน่งแนวเชื่อม คือ แก๊สไฮโดรเจน ออกซิเจน คาร์บอนไดออกไซด์ เป็นต้น มีผลทำให้เกิดสภาวะออกซิเดชัน ส่งเสริมกับของส่วนผสมทางเคมีของธาตุที่แตกต่างกันอย่างดี

5.1 ชนิดของแอกทีฟแก๊ส ได้แก่

5.1.1 แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂ ความหนาแน่น 1.977 กก. / ลบ. ม.)

เป็นตัวนำความร้อนได้สูงมาก ในบริเวณขอบรอยนอกของเปลวอาร์ค เมื่อสัมผัสกับแกนนำของ กระแสจะช่วยให้เกิดพลังที่เข้มข้นสูงขึ้น มีผลทำให้เกิดการหลอมละลายลึกได้สูง และจะเกิดการแตกตัวเมื่ออยู่ภายใต้เปลวอาร์ค ซึ่งออกซิเจนจะรวมตัวกับธาตุที่ส่งผ่านอาร์คเกิดเป็นออกไซด์ และลอยตัวขึ้นไปอยู่เหนือบ่อหลอมละลายในรูปของ Slag และ Scale ถึงแม้ว่า CO₂ จะเป็น Active Gas ที่ให้แก๊ส ออกซิเจนแต่คุณภาพรอยเชื่อมที่ได้ มีความสมบูรณ์ปราศจากรูพรุนและตำหนิ Active Gas CO₂ จะใช้ในการเชื่อมแม่เหล็ก (MAG - C) หรือใช้ผสมกับแก๊สเฉื่อยอื่น ในการเชื่อม MAG - M CO₂ จะนำไปใช้กับการเชื่อมเหล็กกล้า และเหล็กกล้าผสมต่ำ เนื่องจากเป็นแก๊ส ที่หาง่าย ราคาถูก คุณภาพรอยเชื่อมดี และติดตั้งง่าย ประสิทธิภาพการเติมเนื้อโลหะของ CO₂ จะต่ำ เพราะเกิดการสูญเสียไปเป็น Spatter ซึ่งจะส่งผลถึงราคารวมทั้งหมดเมื่อเชื่อมด้วย CO₂

CO₂ จะไม่สามารถทำ Spray Transfer ได้ แต่จะทำได้เฉพาะ Short Circuiting และ Globular Transfer ข้อดีของการใช้แก๊ส CO₂ คือ เชื่อมด้วยความเร็วสูงและการซึมลึกมาก จุดประสงค์หลักเมื่อเริ่มแรกที่ใช้ CO₂ สำหรับการเชื่อมแบบ Globular แต่มี Spatter สูง การใช้ CO₂ อย่างเดียวจะได้ผิวรอยเชื่อมที่มีออกไซด์มาก จึงจำเป็นต้องเติมธาตุลดออกซิเจน (Deoxidizing) จำนวนมากลงในลวดเชื่อม เพื่อป้องกันผิวรอยเชื่อมเกิดออกไซด์ และให้ได้สมบัติทางกลที่ดีอีกด้วย เมื่อเชื่อมโดยใช้อาร์กอนผสม CO₂ เป็นแก๊ส คลุม จะให้คุณสมบัติที่แตกต่างออกไปจากใช้แก๊ส CO₂ อย่างเดียว สำหรับงานที่ต้องการให้ได้คุณสมบัติทนต่อแรงกระแทกสูง แนะนำให้ใช้แก๊ส ผสมอาร์กอนกับ CO₂ จะดีกว่าการต่อ CO₂ ออกใช้งานในแต่ละถังไม่ควรให้มีอัตราการไหลออกจากถังเกิน 25 C.F.H. (12 ลิตร / นาที) ถ้าหากมีความต้องการเกินกว่าที่กำหนด ควรใช้ระบบ Manifold หรือใช้ Flow meter ชนิดมี Heater ให้ความร้อนจะดีกว่า เพราะถ้าอัตรา

การไหลของ CO₂ มากเกินไปจะทำให้เกิดการแข็งตัวของ CO₂ อุดตันอยู่ที่ Flow meter หรือ ดึงเอา CO₂ เหลวออกมาจากถังบรรจุด้วย

ตารางผนวกที่ ก3 แสดงข้อดี – ข้อเสีย ของการใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นก๊าซ

ข้อดี	ข้อเสีย
1. ให้ความซึมลึกของแนวเชื่อมดี	1. เกิด Oxidation ทำลายคุณสมบัติของแนวเชื่อมและไม้เหมาะสำหรับเชื่อมวัสดุต่อไปนี้ - สแตนเลส - อลูมิเนียม - ทองแดง - นิกเกิลผสม 2. เชื่อมค่อนข้างยากกว่าเมื่อเทียบกับก๊าซอาร์กอน 3. เกิด Spatter มากทำให้เปลืองลวดเชื่อม 4. มีผลต่อการเกิด โอโซน (Ozone Generations) ซึ่งเป็นมลพิษต่อสภาพแวดล้อม

ก๊าซ CO₂ เป็นผลที่ได้จากการเผาไหม้ ธรรมชาติ น้ำมัน ถ่านโค้ก สำหรับ CO₂ ที่ได้จากการผลิตแอมโมเนีย และหมักแอลกอฮอล์จะมีความบริสุทธิ์ 100% CO₂ มีทั้งสถานะก๊าซและเหลวเป็นก๊าซที่มีคุณสมบัติไม่ติดไฟ ไม่เป็นพิษ ไม่มีกลิ่น และไม่มีสี นอกจากนี้ CO₂ ยังหนักกว่าอากาศประมาณ 1.5 เท่า เกรดของ CO₂ แบ่งออกได้หลายเกรด ตามลักษณะส่วนประกอบและความบริสุทธิ์ ได้แก่

- Food Grade
- Medical Grade
- Industrial Grade

5.1.2 ก๊าซออกซิเจน (O₂ (Reactive Gas หรือ Oxidizer Gas) ใช้เป็นตัวร่วมผสมได้เล็กน้อย เมื่อนำไปใช้เป็นก๊าซผสม มีแรงหุ้มผสมอยู่รอบของผิวเหล็กจะเป็นตัวช่วยให้หยดน้ำโลหะในการเชื่อม MAG - M เป็นฝอยละเอียด เมื่อได้รับความร้อนสูงและ ช่วยให้ผิวรอยเชื่อมเรียบ และเป็นเกล็ดละเอียด ออกซิเจน จะแยกออกจากกันเมื่ออยู่ในเปลวอาร์ค และ จะเข้าไปร่วม

เผาไหม้อยู่กับการหลอมของโลหะผสม ในการเชื่อมทิกจะมีส่วนน้อยมากที่จะไปทำให้
ทั้งสแตนเกิดออกซิเดชัน

5.1.3 ก๊าซไฮโดรเจน (H₂) เป็นตัวนำความร้อนได้สูง ให้ความหลอมลึกลง เชื่อมได้เร็ว
ไม่แพ้ฮีเลียม แต่จะมีผลทำให้เกิดครุพูนในเนื้อโลหะ โดยไฮโดรเจนบางส่วน เข้ามารวมตัวอยู่
ด้วย โมเลกุลของไฮโดรเจนจะแตกตัวภายในเปลวอาร์ค และจะรวมกันเป็น H₂ ใหม่เมื่อความ
ร้อนลดลง มีข้อดีเป็นตัวช่วยนำความร้อนสู่โลหะชิ้นงานได้เป็นอย่างดี ไฮโดรเจนไม่รวมตัวกับ
ธาตุอื่นขณะเชื่อมแต่จะแทรกอยู่ในแนวเชื่อมอาจส่งผลกระทบต่อความแข็งแรงของแนวเชื่อม

5.1.4 ก๊าซไนโตรเจน (ก๊าซเฉื่อย) (Unreactive Gas) ปกติจะใช้เป็นก๊าซปกคลุมแนว
เชื่อมด้านหลัง (Root Run Shielding Gas หรือ Back Gas) ก๊าซไนโตรเจนสามารถใช้เป็นก๊าซปก
คลุมได้อีกด้วยเหมือนกัน แต่นาน ๆ ถึงจะมีใช้ เพราะต้องใช้แรงเคลื่อนสูง จึงได้กระแสเชื่อม
สูง การถ่ายเทความร้อนจะสูงกว่าก๊าซอาร์กอนหรือฮีเลียม ก๊าซไนโตรเจนดีสำหรับการเชื่อม
ทองแดง และทองแดงผสม อย่างไรก็ตาม ไนโตรเจนจะลดความสม่ำเสมอของการอาร์ค และทำ
ให้ปลายลวดทั้งสแตนสกรปรก เพราะว่าไม่ใช่ก๊าซเฉื่อย แต่ถ้าใช้ลวดทั้งสแตนชนิด ทอริเอทเทท
(thoriated tungsten) ความสกปรกจากไนโตรเจนจะไม่ใช่สิ่งสำคัญ

6. ก๊าซผสม (Mixture Gas)

6.1 ก๊าซผสม Inert Gas + Inert Gas

ได้แก่ ก๊าซอาร์กอน และก๊าซฮีเลียมผสมกันในอัตราส่วนที่แตกต่างกันไป โดยมี
วัตถุประสงค์ให้เชื่อมงานได้หนามากขึ้น และเพิ่มความเร็วในการเชื่อม ก๊าซผสมอาร์กอน -
ฮีเลียม จะให้ผลดีที่เกิดจากก๊าซทั้งสอง ก๊าซอาร์กอนให้ผลดีต่อการควบคุมอาร์ค ส่วนฮีเลียมให้
การซึมลึกดี อัตราส่วนการผสมก๊าซตามปริมาณ โดยทั่ว ๆ ไป 75% ฮีเลียม 25% อาร์กอน หรือ
80% ฮีเลียม 20% อาร์กอน เป็นต้น ก๊าซผสม 2 ชนิดนี้นำไปใช้กับการเชื่อมแบบอัตโนมัติ
ดังนั้นการเชื่อมงานหนาหรืองานที่ต้องการความเร็วในการเชื่อมสูง ควรใช้ก๊าซผสมระหว่าง
ฮีเลียมกับอาร์กอนในอัตราส่วน 2 : 1 เพื่อตัดปัญหาในเรื่องการเปลี่ยนแปลงของระยะอาร์ค และ
ยังช่วยลดครุพูนภายในแนวเชื่อมอีกด้วย ก๊าซผสมระหว่างอาร์กอน - ฮีเลียม ใช้กับการเชื่อม
โลหะจำพวกไม่ใช่เหล็ก (non - ferrous) ได้แก่ อลูมิเนียม ทองแดง นิกเกิลผสมและโลหะที่

เกิดปฏิกิริยาเคมีได้ง่าย (Reactive Metal) ก๊าซผสมชนิดนี้เป็นการนำเอาสมบัติของฮีเลียมเพิ่มให้กับอาร์กอน ได้แก่แรงเคลื่อนและความร้อนสูงจึ้นกว่าอาร์กอน ถ้าต้องการเชื่อมวัสดุหนา จะต้องเพิ่มเปอร์เซ็นต์การผสมของฮีเลียมเปอร์เซ็นต์ฮีเลียมจำนวนน้อย คือ ต่ำกว่า 10 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งจะมีผลต่ออาร์คและสมบัติทางกลของรอยเชื่อม เมื่อเพิ่มเปอร์เซ็นต์ของฮีเลียมจะทำให้แรงเคลื่อนอาร์ค Spatter และการซึมลึกเพิ่มขึ้น ขณะที่รูพรุนมีน้อยมาก การใช้ฮีเลียมบริสุทธิ์จะได้รอยเชื่อมที่มีการซึมลึกกว้างและการซึมลึกเข้าไปในชิ้นงานปานกลางและมีการอาร์คสม่ำเสมอขึ้นอีกด้วย การผสมอาร์กอนอย่างน้อย 20% เข้ากับก๊าซ ฮีเลียมจึงจะเกิดและคงรูปของ Spray Arc อยู่

6.1.1 Argon - 25% He (He - 25) เป็นก๊าซ กลุ่มผสมที่ใช้กันน้อย ซึ่งจะใช้สำหรับการเชื่อมอลูมิเนียม

6.1.2 Argon - 75% He (He - 75) เป็นก๊าซ กลุ่มผสมที่ใช้กันทั่วไปสำหรับการเชื่อมอลูมิเนียมที่หนาเกิน 1 นิ้ว ในตำแหน่งทำราบด้วยเครื่องเชื่อมแบบอัตโนมัติ ก๊าซ กลุ่มชนิดนี้ยังนำไปเชื่อมทองแดงหนา 1/4 - 1/2 ซึ่งเป็นวัสดุนำความร้อนที่ดี เนื่องจากก๊าซ ผสมนี้ให้ Heat Input สูงและการเกิดรูพรุนมีน้อย

6.1.3 Argon - 90% He (He - 90) ก๊าซ กลุ่มผสมชนิดนี้ใช้สำหรับเชื่อมทองแดงหนาเกินกว่า 1/2 และอลูมิเนียมหนาเกินกว่า 3 นิ้ว ซึ่งการใช้ก๊าซ ผสมนี้จะให้ Heat Input สูง และให้คุณภาพรอยเชื่อมดีสามารถผ่านการตรวจสอบด้วย X - Ray ได้ และยังใช้เชื่อมแบบ Short Circuiting Transfer ด้วยลวดเชื่อมชนิดผสมนิเกิลสูงได้อีกด้วย

6.2 ก๊าซผสม Inert Gas + Active Gas

คือ ก๊าซผสมระหว่างก๊าซอาร์กอน หรือก๊าซฮีเลียมกับแอคทีฟก๊าซบางตัว ได้แก่

6.2.1 ก๊าซผสมอาร์กอน + ไฮโดรเจน จะนำไปใช้ในการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม , Inconel , Monel และ โลหะที่มีปัญหาเนื่องจากรูพรุน ก๊าซผสมนี้จะใช้เมื่อไม่สามารถหาก๊าซอื่นที่ป้องกันการเกิดรูพรุนได้ จุดประสงค์ของการใช้ก๊าซผสมอาร์กอน-ไฮโดรเจน คือช่วยให้ความร้อนในการเชื่อมเพิ่มขึ้น , ช่วยควบคุมรูปร่างรอยเชื่อม , การไหลตัวของน้ำโลหะบ่อหลอม

ละลายดี และรอยเชื่อมสม่ำเสมอก๊าซผสมชนิดนี้ไม่ใช่ก๊าซเฉื่อยสมบูรณ์ ดังนั้นก๊าซผสมนี้ไม่ควรนำไปเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอน หรือ เหล็กกล้าผสมต่ำ ส่วนเหล็กกล้าไร้สนิม สามารถใช้ก๊าซผสมนี้ที่มีส่วนผสมของไฮโดรเจนสูงถึง 15% , อัตราส่วนผสมที่เป็นแบบอย่างมีอาร์กอน 95% และไฮโดรเจน 5%

6.2.2 ก๊าซอาร์กอน + ออกซิเจน อาร์กอนที่ผสม O_2 จำนวนเล็กน้อยจะให้อาร์คที่เรียบสม่ำเสมอ เพิ่มอัตราการหยุดเติมของลวดเชื่อม การเกิด Spray Arc ที่กระแสต่ำ (Transition Current) น้ำโลหะหลอมละลายมีการไหลตัวดี (Wetting) และรูปร่างรอยเชื่อมสวยงาม น้ำโลหะที่บ่อหลอมละลายเหลวและยังคงสภาพเหลวอยู่นานเพื่อให้ น้ำโลหะไหลเข้าไปใน TOE ของรอยเชื่อมป้องกันการกัดขอบของแนวเชื่อม (undercut) และให้รอยเชื่อมแบนราบ เมื่อใช้ออกซิเจนจำนวนเล็กน้อยผสมในก๊าซอาร์กอนสำหรับเชื่อม non - Ferrous ได้มีการรายงานจาก NASA ว่า การผสมออกซิเจน 1% ทำให้อาร์คสม่ำเสมอสำหรับเชื่อมอลูมิเนียมแผ่นที่มีความสะอาดมาก ๆ

6.2.3 ก๊าซผสมอาร์กอน + คาร์บอนไดออกไซด์ มีจุดประสงค์หลักใช้สำหรับเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอน และ เหล็กผสมต่ำ ห้ามนำไปใช้กับการเชื่อม Stainless Steel การเติมอาร์กอนเข้าไปใน CO_2 จะช่วยลด Spatter ได้ดีกว่าการใช้ CO_2 อย่างเดียว และถ้าเติม CO_2 จำนวนเล็กน้อยเข้าไปในก๊าซอาร์กอน ก็จะได้คุณสมบัติของ Spray Arc เหมือนกับเติมออกซิเจนลงในก๊าซอาร์กอนจำนวนเล็กน้อยเหมือนกัน การเชื่อมแบบ GMAW โดยใช้ CO_2 ผสมเติมเข้าไปในก๊าซอื่น เมื่อระดับกระแสสูงขึ้นเล็กน้อยก็จะได้ Spray Transfer ที่ส่งผ่านอาร์คที่สม่ำเสมอ แต่ถ้าเติม O_2 ลงไปจะช่วยลดขนาดกระแส (Transition Current) ของ Spray Transfer ลง การผสม CO_2 เกินกว่า 20% โดยประมาณจะได้ Spray Transfer ที่ไม่สม่ำเสมอ และอาจจะเกิดเป็นแบบ Short Circuiting และ Globular Transfer ไป

6.2.4 ก๊าซผสมอาร์กอน + ไนโตรเจน การเติมไนโตรเจนจำนวนเล็กน้อยลงในก๊าซผสม $Ar - 1\%O_2$ เพื่อให้ได้รอยเชื่อมที่มีโครงสร้างรอยเชื่อมเป็นอสเทนไนต์ที่สมบูรณ์ในการเชื่อมด้วยลวดเชื่อม Stainless Steel ชนิด 347 ความเข้มข้นของไนโตรเจนที่ใช้อยู่ระหว่าง 1.5 - 3% ปริมาณของไนโตรเจนที่สูงเกินกว่า 10% จะกลายเป็นควันแต่รอยเชื่อมจะมีความสมบูรณ์ เมื่อเติมไนโตรเจนมากกว่า 2% จะเกิดรูพรุนกับการเชื่อมเหล็กกล้าละมุนด้วย GMAW แต่ถ้าเติมน้อยกว่า 1% จะเกิดรูพรุนกับการเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอนด้วยกรรมวิธี GMAW

6.2.5 ก๊าซผสมอาร์กอน + คลอรีน คลอรีนใช้กำจัดไฮโดรเจนในแท่งอินก๊อต และอลูมิเนียมหล่อ โดยเป่าผ่านน้ำอลูมิเนียมหลอมเหลวคั่งนั้น คลอรีนที่เติมลงผสมในอาร์กอนจะทำหน้าที่ได้ ก๊าซไฮโดรเจน (Degassing) ออกจากรอยเชื่อมอลูมิเนียม ซึ่งก๊าซผสมชนิดนี้ไม่ค่อยใช้กัน เนื่องจากเป็นอันตรายแก่ผู้ช่างเคียงและช่างเชื่อมยกเว้นแต่ จะมีความปลอดภัยอย่างดี หรือเครื่องควบคุมอันตราย

6.2.6 ก๊าซผสมอาร์กอน + ออกซิเจน + คาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซกลุ่มที่ผสมอยู่ 3 ชนิด เรียกว่า “Universal” ก๊าซผสมนี้สามารถเกิด Short Circuiting, Globular , Spray Arc , Pulse และชนิดการส่งถ่ายที่มีความหนาแน่นสูง ก๊าซผสม 3 ชนิด มีให้เลือกมาก ซึ่งขึ้นอยู่กับความต้องการชนิดของ Metal Transfer และคุณลักษณะของอาร์ค

6.2.6.1 Argon - 5 -10% CO₂ - 1 - 3% O₂ ก๊าซผสม 3 ชนิดนี้ได้มีการใช้กันมากเมื่อหลายปีก่อนในสหรัฐอเมริกา ข้อดีของก๊าซผสมชนิดนี้มีหลายอย่าง ใช้สำหรับเชื่อมเหล็กกล้า คาร์บอน เหล็กผสมต่ำ และ Stainless Steel ในทุก ๆ ความหนา การเชื่อม Stainless Steel ควรใช้การเชื่อมแบบ Spray Arc เท่านั้น เพราะถ้าอาร์คตรง และใช้ความร้อนต่ำ สำหรับเหล็กคาร์บอน และเหล็กกล้าผสมต่ำ เมื่อเชื่อมด้วยก๊าซผสมนี้ จะให้คุณลักษณะของรอยเชื่อมและสมบัติทางกลที่ดีในการเชื่อมวัสดุบาง ออกซิเจนจะช่วยให้อาร์คสม่ำเสมอที่ระดับกระแสต่ำ (ต่ำลงกว่าปกติ 30-60 แอมป์) ด้วยการใช้อาร์คสั้นและสามารถคุมได้ ซึ่งเป็นการช่วยงานให้เกิดการทะลุน้อย และไม่ค่อยเสียรูป เนื่องจากให้ปริมาณความร้อนแก่บ่อหลอมละลายต่ำ

6.2.6.2 Argon - 10 -20% CO₂ - 5% O₂ ก๊าซกลุ่มผสมชนิดนี้ไม่ค่อยใช้ในสหรัฐอเมริกา แต่จะพบใช้กันในยุโรป ซึ่งคุณลักษณะจะให้อาร์คแบบ Short Circuiting Transfer ที่ร้อน และน้ำโลหะบ่อหลอมละลายไหลตัวดี

6.2.7 ก๊าซผสมอาร์กอน + ฮีเลียม + ออกซิเจน การเติมฮีเลียมลงในอาร์กอนเป็นการเพิ่มพลังงาน เมื่อทำการเชื่อม non - Ferrous เมื่อเติมฮีเลียมลงในอาร์กอน + ออกซิเจน จึงมีผลต่อการอาร์คของการเชื่อมแบบ GMAW ที่เป็นโลหะเหล็ก Ar - He - O₂ ใช้สำหรับการเชื่อมแบบ Spray Arc และการพอกผิวเหล็กกล้าผสมต่ำและ Stainless Steel เพื่อปรับปรุงการไหลตัวของน้ำโลหะ รูปร่างรอยเชื่อมและช่วยลดรูพรุน

6.2.8 ก๊าซผสมอาร์กอน + คาร์บอนไดออกไซด์ + ไฮโดรเจน เมื่อผสม

ไฮโดรเจนจำนวนเล็กน้อย (1-2%) จะช่วยปรับปรุงสมบัติการไหลตัวของน้ำโลหะและอาร์คให้สม่ำเสมอ ในการเชื่อม Stainless Steel ด้วย MIG ระบบ Pulse ก๊าซ CO₂ จะต้องมีจำนวนต่ำ (1-3%) เพื่อให้การคั้งคาร์บอนเกิดขึ้นน้อยและให้อาร์คสม่ำเสมอ ก๊าซชนิดนี้ไม่นำไปเชื่อมเหล็กกล้าผสมต่ำ เพราะจะทำให้รอยเชื่อมมีไฮโดรเจนสูง อันเป็นเหตุให้เกิดการแตก และสมบัติทางกลไม่ดี

6.2.9 ก๊าซผสมอาร์กอน + ฮีเลียม + คาร์บอนไดออกไซด์ การเติมฮีเลียมและ CO₂

ลงในอาร์กอนจะเป็นการเพิ่ม Heat Input ให้กับรอยเชื่อมและ ปรับปรุงอาร์คให้สม่ำเสมอ รูปร่างรอยเชื่อมสวยงาม การไหลตัวของน้ำโลหะ เมื่อเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอนและเหล็กกล้าผสมต่ำ การเติมฮีเลียมเป็นการช่วยเพิ่ม Heat Input และปรับปรุงการไหลตัวของน้ำโลหะเหมือนกับเติมออกซิเจน เพียงแต่ฮีเลียมเป็นก๊าซเฉื่อยไม่ทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับรอยเชื่อม และไม่ทำให้ธาตุผสมในโลหะบางตัวหายไป เมื่อนำไปเชื่อมโลหะผสมต่ำจะมีสมบัติทางกลไม่เปลี่ยนแปลง

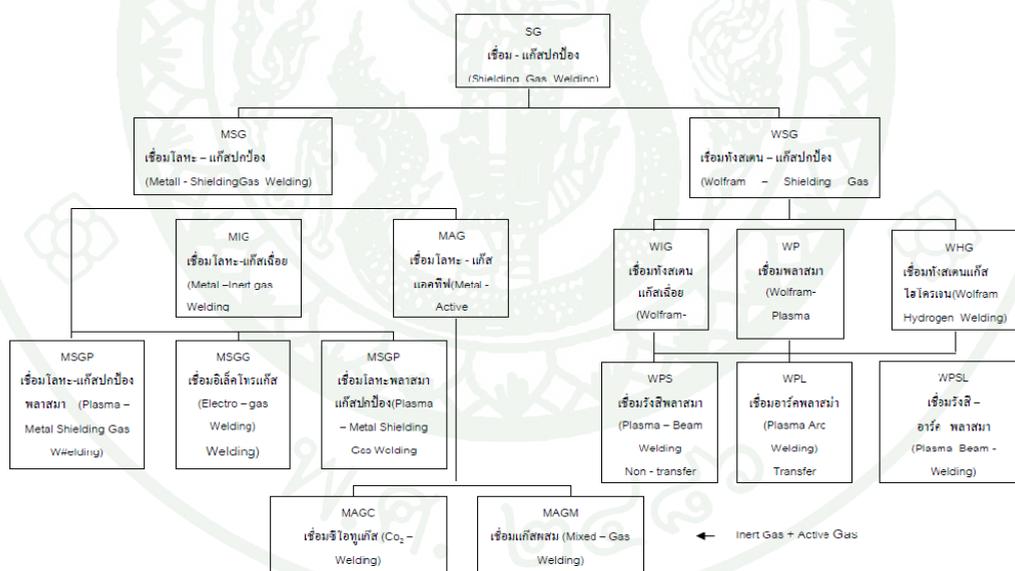
6.2.10 ก๊าซผสมอาร์กอน + ฮีเลียม + คาร์บอนไดออกไซด์ + ออกซิเจน ก๊าซคลุม

ผสมชนิดนี้ เรียกว่า “Quad Mix” อัตราส่วนผสมนี้นิยมใช้กันสำหรับเชื่อม GMAW ที่ต้องการอัตราการเติมลวดเชื่อมสูง โดยใช้อาร์คที่มีความหนาแน่น ในการส่งถ่ายโลหะ (Metal Transfer) สูง ก๊าซคลุมชนิดนี้จะให้สมบัติทางกลดี และความสามารถในการทำงาน คือ มีช่วงกว้างของอัตราการเติมลวดเชื่อมสูง การนำไปใช้งานหลักจะ ใช้กับการเชื่อมเหล็กผสมต่ำ มีความแข็งแรงสูง แต่ถ้านำไปใช้เชื่อมเหล็กกล้าละมุนที่ต้องการผลผลิตสูงต้องคำนึงถึงราคา ก๊าซชนิดนี้เรียกว่า “Quad Mix” อัตราส่วนผสมนี้นิยมใช้กันสำหรับเชื่อม GMAW ที่ต้องการอัตราการเติมลวดเชื่อมสูง โดยใช้อาร์คที่มีความหนาแน่น ในการส่งถ่ายโลหะ (Metal Transfer) สูง ก๊าซคลุมชนิดนี้จะให้สมบัติทางกลดี และความสามารถในการทำงาน คือ มีช่วงกว้างของอัตราการเติมลวดเชื่อมสูง การนำไปใช้งานหลักจะ ใช้กับการเชื่อมเหล็กผสมต่ำ มีความแข็งแรงสูง แต่ถ้านำไปใช้เชื่อมเหล็กกล้าละมุนที่ต้องการผลผลิตสูงต้องคำนึงถึงราคา ก๊าซชนิดนี้

6. องค์ประกอบในการพิจารณาเลือกใช้นิพจน์ชื่อย่อสำหรับการเชื่อมแบบ GMAW มีดังนี้

1. ชนิดของโลหะที่จะเชื่อม
2. ลักษณะการอาร์ค และแบบของ Metal Transfer
3. ความเร็วเชื่อม
4. แนวโน้มการเกิด Undercut
5. การซึมลึก ความกว้างและรูปร่างของรอยเชื่อม
6. ความสามารถในการจัดหา
7. ราคาก๊าซคลุมหรือก๊าซปกป้อง
8. สมบัติทางกลที่ต้องการ

7. แผนภูมิแสดงการเชื่อมโดยใช้ก๊าซคลุม ตาม DIN 1910 Part 4



E = Engspalt = Narrow Gap

อิเล็กโทรดทอมละลาย ←→ อิเล็กโทรดไม่ทอมละลาย

ข้อหมายเหตุ: กระบวนการเชื่อมด้วยแก๊สปกป้องตาม DIN 1910 จะถูกแบ่งไปตามชนิดของอิเล็กโทรด (แบบอิเล็กโทรดทอมละลายและไม่ทอมละลาย) และแบ่งไปตามชนิดของแก๊สปกป้อง แก๊สเฉื่อยหรือแก๊สแอคทีฟ

ภาพผนวกที่ 1 แสดงการเชื่อมโดยใช้ก๊าซคลุม ตาม DIN 1910 Part 4

ที่มา : สมบูรณ์ (2542)



1. คุณสมบัติของธาตุต่าง ๆ เมื่อผสมลงไปเหล็ก

1.1 คาร์บอน (Carbon) สัญลักษณ์ทางเคมี คือ C

เป็นธาตุที่สำคัญที่สุด จะต้องผสมอยู่ในเนื้อเหล็ก มีคุณสมบัติทำให้เหล็กแข็งเพิ่มขึ้น หลังจากนำไปอบชุบ (Heat Treatment) โดยรวมตัวกับเนื้อเหล็ก เป็นสารที่เรียกว่า มาร์เทนไซต์ (Martensite) และซีเมนไตต์ (Cementite) นอกจากนั้น คาร์บอนยังสามารถรวมตัวกับเหล็ก และธาตุอื่น ๆ กลายเป็นคาร์ไบด์ (Carbide) ซึ่งจะช่วยให้เพิ่มความต้านทานต่อการสึกหรอของเหล็ก อย่างไรก็ตาม คาร์บอนจะลดความยืดหยุ่น (Elasticity) ความสามารถในการตีขึ้นรูป (Forging) และความสามารถในการเชื่อม (Welding) และไม่มีผลต่อความต้านทานการกัดกร่อน

1.2 อลูมิเนียม (Aluminium) สัญลักษณ์ทางเคมี คือ Al

เป็นธาตุที่นิยมใช้เป็นตัวไล่ก๊าซออกซิเจน และไนโตรเจน (Deoxidizer และ Denitrizer) มากที่สุด ซึ่งผสมอยู่เล็กน้อยในเหล็ก จะมีผลทำให้เนื้อละเอียดขึ้น เมื่อใช้ผสมลงในเหล็กที่จะนำไปผ่านกระบวนการอบชุบแข็ง โดยวิธีไนไตรดิง (Nitriding) ทั้งนี้เนื่องจาก อลูมิเนียมสามารถรวมตัวกับไนโตรเจน เป็นสารที่แข็งแรงมาก ใช้ผสมลงในเหล็กทนความร้อนบางชนิด เพื่อให้ต้านทานต่อการตกสะเก็ด (Scale) ได้ดีขึ้น

1.3 โบรอน (Boron) สัญลักษณ์ทางเคมี คือ B

ช่วยเพิ่มความสามารถชุบแข็งแก่เหล็ก ที่ใช้ทำชิ้นส่วนเครื่องจักรทั่วไป จึงทำให้ใจกลางของงานที่ทำด้วยเหล็กชุบผิวแข็ง มีความแข็งสูงขึ้น โบรอนสามารถดูดกลืนนิวตรอนได้สูง จึงนิยมเติมในเหล็กที่ใช้ทำจากก้อนยูเรเนียมเคลียร์

1.4 เบริลเลียม (Beryllium) สัญลักษณ์ทางเคมี คือ Be

สปริงนาฬิกาซึ่งต้องต่อต้านอำนาจแม่เหล็ก และรับแรงแปรอยู่ตลอดเวลา นั้น ทำจากทองแดงผสมเบริลเลียม (Beryllium-Coppers Alloys) โลหะผสมนิกเกิล-เบริลเลียม (Ni-Be Alloys) แข็งมาก ทนการกัดกร่อนได้ดี ใช้ทำเครื่องมือผ่าตัด

1.5 แคลเซียม (Calcium) สัญลักษณ์ทางเคมี คือ Ca

แคลเซียมจะใช้ในลักษณะแคลเซียมซิลิไซด์ (CaSi) เพื่อลดออกซิเดชัน (Deoxidation) นอกจากนั้น แคลเซียม ยังช่วยเพิ่มความต้านทานการเกิดสเกลของวัสดุที่ใช้เป็นตัวนำความร้อน

1.6 ซีเรียม (Cerium) สัญลักษณ์ทางเคมี คือ Ce

เป็นตัวลดออกซิเจนและกำมะถันได้ดี ช่วยปรับปรุงคุณสมบัติด้าน Hot Working ของเหล็กกล้า และปรับปรุงความต้านทานการเกิดสเกลของเหล็กทนความร้อน

1.7 โคบอลต์ (Cobalt) สัญลักษณ์ทางเคมี คือ Co

ไม่ทำให้เกิดคาร์ไบด์ แต่สามารถป้องกันไม่ให้เกิดเนื้อหยาบที่อุณหภูมิสูง ดังนั้น จึงช่วยปรับปรุงให้เหล็กมีความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูง ด้วยเหตุนี้ จึงใช้ผสมในเหล็กขึ้นรูปงานร้อน เหล็กทนความร้อน และเหล็กไฮสปีด ธาตุโคบอลต์เมื่อได้รับรังสีนิวตรอนจะเกิดเป็นโคบอลต์ 60 ซึ่งเป็นสารกัมมันตภาพรังสีอย่างรุนแรง ดังนั้น จึงไม่ควรเติมโคบอลต์ลงในเหล็กที่ใช้ทำเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู

1.8 โครเมียม (Chromium) สัญลักษณ์ทางเคมี คือ Cr

ทำให้เหล็กอบชุบได้ง่ายขึ้น เพราะลดอัตราการเย็นตัววิกฤตลงอย่างมาก สามารถชุบในน้ำมันหรืออากาศได้ (Oil or Air Quenching) เพิ่มความแข็งให้เหล็ก แต่ลดความทนทานต่อแรงกระแทก (Impact) ลง โครเมียมที่ผสมในเหล็กจะรวมตัวกับคาร์บอน เป็นสารประกอบพวกคาร์ไบด์ ซึ่งแข็งมาก ดังนั้น จึงทำให้เหล็กทนทานต่อแรงเสียดสี และบริเวณที่เป็นรอยคมหรือความคมไม่ลบง่าย ทำให้เหล็กเป็นสนิมได้ยาก เพิ่มความแข็งแรงของเหล็กที่ใช้งานที่อุณหภูมิสูง เพิ่มความทนทานต่อการกัดกร่อนของสารต่าง ๆ ได้ดีขึ้น

1.9 ทองแดง (Copper) สัญลักษณ์ทางเคมี คือ Cu

เพิ่มความแข็งแรง ถ้ามีทองแดงผสมอยู่ในเหล็กแม้เพียงเล็กน้อย เหล็กจะไม่เกิดสนิมเมื่อใช้งานในบรรยากาศ ทองแดงจะไม่มีผลเสียต่อความสามารถในการเชื่อมของเหล็กแต่อย่างไร

1.10 แมงกานีส (Manganese) สัญลักษณ์ทางเคมี คือ Mn

ใช้เป็นตัวไล่กำมะถัน (S) ซึ่งเป็นตัวที่ไม่ต้องการในเนื้อเหล็ก จะถูกกำจัดออกในขณะหลอม ทำให้เหล็กอบชุบแข็งง่ายขึ้น เนื่องจากเป็นตัวลดอัตราการเย็นตัววิกฤต (Critical Cooling Rate) ทำให้เหล็กทนทานต่อแรงดึงได้มากขึ้น เพิ่มสัมประสิทธิ์การขยายตัวของเหล็กเมื่อถูกความร้อน แต่จะลดคุณสมบัติในการเป็นตัวนำไฟฟ้า และความร้อน นอกจากนี้แมงกานีสยังมีอิทธิพลต่อการขึ้นรูปหรือเชื่อม เหล็กกล้าคาร์บอนที่มีปริมาณแมงกานีสเพิ่มขึ้น จะทนต่อการเสียดสีได้ดีขึ้นมาก

1.11 โมลิบดีนัม (Molybdenum) สัญลักษณ์ทางเคมี คือ Mo

ปกติจะใช้ผสมร่วมกับธาตุอื่น ๆ เป็นตัวลดอัตราการเย็นตัววิกฤต ทำให้อบชุบง่ายขึ้น ป้องกันการเปราะขณะอบคืนตัว (Temper Brittleness) ทำให้เหล็กมีเนื้อละเอียด เพิ่มความทนทานต่อแรงดึงแก่เหล็กมากขึ้น สามารถรวมตัวกับคาร์บอนเป็นคาร์ไบด์ได้ง่ายมาก ดังนั้นจึงปรับปรุงคุณสมบัติในการตัดโลหะ (Cutting) ของเหล็กไฮสปีดได้ดีขึ้น เพิ่มความต้านทานต่อการกัดกร่อน (Corrosion Resistance) แก่เหล็ก อย่างไรก็ตาม เหล็กที่มีโมลิบดีนัมสูงจะตีขึ้นรูปยาก

1.12 ไนโตรเจน (Nitrogen) สัญลักษณ์ทางเคมี คือ N

ขณะทำไนไตรดิง (Nitriding) ไนโตรเจนจะรวมตัวกับธาตุบางชนิดในเหล็ก เกิดเป็นสารประกอบไนไตรด์ ซึ่งทำให้ผิวงานมีความแข็งสูงมาก ด้านทานการสึกหรอได้ดีเยี่ยม

1.13 นิกเกิล (Nickel) สัญลักษณ์ทางเคมี คือ Ni

เป็นตัวที่เพิ่มความทนทานต่อแรงกระแทกของเหล็ก ดังนั้น จึงใช้ผสมในเหล็กที่จะนำไปชุบแข็งที่ผิว ใช้ผสมกับโครเมียม ทำให้เหล็กทนทานต่อการกัดกร่อนได้ดี ไม่เป็นสนิมง่าย ทนความร้อน

1.14 ออกซิเจน (Oxygen) สัญลักษณ์ทางเคมี คือ O₂

ออกซิเจนเป็นอันตรายต่อเหล็ก ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับ ชนิด ส่วนผสม รูปร่าง และการกระจายตัวของสารประกอบที่เกิดจากออกซิเจนนั้น ออกซิเจนทำให้คุณสมบัติเชิงกล โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ความต้านทานแรงกระแทกลดลง (ตามแนวขวาง) และเปราะยิ่งขึ้น

1.15 ตะกั่ว (Lead) สัญลักษณ์ทางเคมี คือ Pb

เหล็กฟรีแมชชีนนิ่ง (Free-Machining Steel) มีตะกั่วผสมอยู่ประมาณ 0.20 - 0.50 % โดยตะกั่วจะเป็นอนุภาคละเอียด กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอภายในเนื้อเหล็ก เมื่อนำไปกลึง หรือ ตัดแต่งด้วยเครื่องมือกลทำให้ขี้กึ่งขาดง่าย จึงทำให้ตัดแต่งได้ง่าย ตะกั่วไม่มีผลกระทบต่อคุณสมบัติเชิงกลของเหล็ก

1.16 ฟอสฟอรัส (Phosphorus) และกำมะถัน (Sulphur) สัญลักษณ์ทางเคมี คือ P และ S ตามลำดับ

เป็นตัวทำลายคุณสมบัติของเหล็ก แต่มักผสมอยู่ในเนื้อเหล็ก โดยไม่ได้ตั้งใจ ต้องพยายามให้มีน้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ มักจะเรียกสารเหล่านี้ว่า สารมลทิน (Impurities) เหล็กเกรดสูงจะต้องมีฟอสฟอรัสไม่เกิน 0.03 - 0.05 % ส่วนกำมะถันจะทำให้เหล็กเกิด Red Shortness จึงแตกเปราะง่าย โดยทั่วไปจึงจำกัดปริมาณกำมะถันในเหล็กไม่เกิน 0.025 หรือ 0.03 % ยกเว้นเหล็กฟรีแมชชีนนิ่ง (Free Machining) ที่เติมกำมะถันถึง 0.30 % เพื่อให้เกิดซัลไฟด์ขนาดเล็ก กระจายทั่วเนื้อเหล็ก ทำให้ขี้กึ่งขาดง่าย จึงตัดแต่งด้วยเครื่องมือกลได้ง่าย

1.17 ซิลิคอน (Silicon) สัญลักษณ์ทางเคมี คือ Si

ซิลิคอนจะปรากฏในเหล็กทุกชนิด เนื่องจากสินแร่เหล็กมักมีซิลิคอนผสมอยู่ด้วยเสมอ ซิลิคอนไม่ใช่โลหะ แต่มีสภาพเหมือนโลหะ ใช้เป็นตัวทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิไดซ์ (Oxidizing) ทำให้เหล็กแข็งแรงและทนทานต่อการเสียดสีได้ดีขึ้น เพิ่มค่าแรงดึงที่จุดคราก (Yield Point) ของเหล็กให้สูงขึ้นมาก ดังนั้น จึงใช้ผสมในการทำเหล็กสปริง (Spring Steels) ช่วยทำให้เหล็กทนทานต่อการตกสะเก็ด (Scale) ที่อุณหภูมิสูงได้ดี จึงใช้ผสมในเหล็กทนความร้อน เหล็กกล้าที่มีซิลิคอนสูงจะมีเกรนหยาบ

1.18 ไทเทเนียม (Titanium) สัญลักษณ์ทางเคมี คือ Ti

ไทเทเนียมเป็นโลหะที่แข็งแรงมาก ทำให้เกิดคาร์ไบด์ได้ดี เป็นธาตุผสมที่สำคัญในเหล็กสเตนเลส เพื่อป้องกันการผุกร่อนตามขอบเกรน นอกจากนี้ ไทเทเนียมยังช่วยทำให้เหล็กมีเกรนละเอียด

1.19 วาเนเดียม (Vanadium) สัญลักษณ์ทางเคมี คือ V

ทำให้เหล็กทนต่อความร้อนได้ดี เพิ่มความแข็งแรงให้กับเหล็ก โดยไม่ทำให้คุณสมบัติในการเชื่อม และการดึงเสียไป ทำให้เหล็กมีเนื้อละเอียด รวมตัวกับคาร์บอนที่เป็นคาร์ไบด์ได้ง่าย จึงทำให้ทนทานต่อการสึกกร่อน มักจะผสมในเหล็กขึ้นรูปร้อน (Hot Working Steels) และเหล็กไฮสปีด

1.20 ทังสเตน (Tungsten) สัญลักษณ์ทางเคมี คือ W

สามารถรวมตัวกับคาร์บอนเป็น คาร์ไบด์ ที่แข็งแรงมาก จึงทำให้เหล็กที่ผสมทังสเตนมีความแข็งแรงมาก หลังจากผ่านการอบชุบ จึงใช้ทำพวกเครื่องมือคม (Cutting Tools) ต่าง ๆ ทำให้เหล็กเหนียวขึ้น และป้องกันไม่ให้เหล็กเกิดเนื้อหยาบ เนื่องจากการที่เกรนขยายตัว เพิ่มความทนทานต่อการเสียดสีของเหล็ก ดังนั้น จึงนิยมเติมทังสเตนในเหล็กไฮสปีด (Hi-Speed) และเหล็กที่ต้องอบชุบแข็งโดยทั่วไป



ความแข็ง คือ ความต้านทานต่อแรงกด การขัดสีและการกลึงของวัสดุ ดังนั้นการทดสอบความแข็งจึงสามารถทำได้หลายวิธี แต่ในเชิงโลหะวิทยา การวัดความแข็งจะเป็นการทดสอบความสามารถของโลหะในการต้านทานต่อการแปรรูปถาวร เมื่อถูกแรงกดจากหัวกดกระทำลงบนชิ้นงานทดสอบ โดยมีวิธีในการทดสอบที่นิยมใช้งาน ดังนี้

1. Brinell Hardness Test (H_B)

เป็นการวัดความแข็งโดยอาศัยแรงกดคงที่กระทำกับลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็งลงบนผิวชิ้นงานทดสอบ ค่าความแข็งจะคำนวณจากแรงกดที่กระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ผิว โดยพื้นที่ผิวมีลักษณะเป็นผิวโค้ง ดังนั้นสามารถคำนวณค่าความแข็งได้ตามสูตร ดังนี้

$$H_B = \frac{P}{\pi \frac{D}{2} (D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

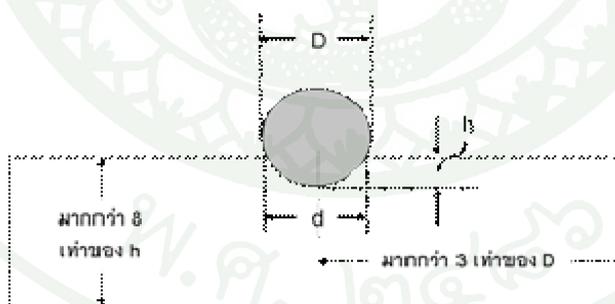
โดยที่

H_B คือ ค่าความแข็งแบบ Brinell (kgf/mm^2)

P คือ แรงกด (kgf)

D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของลูกบอลเหล็กกล้า (mm.)

d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของรอยกด (mm.)



ภาพผนวกที่ 1 การทดสอบแบบ Brinell

แรงกดสำหรับการทดสอบจะอยู่ในช่วง 500-3000 kgf และลูกบอลเหล็กกล้าจะมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.0-10 มม. โดยใช้ระยะเวลาในการกดประมาณ 10-15 วินาที สำหรับเหล็กหรือเหล็กกล้า และ 30 วินาทีสำหรับโลหะนิ่ม (เช่น ตะกั่ว ดีบุก เป็นต้น) อย่างไรก็ตาม เนื่องจากโลหะมีความแข็งที่แตกต่างกัน หากโลหะที่ทดสอบนิ่มและใช้แรงกดมาก จะมีผลทำให้

ระยะที่หัวกดจมลงไปลึกมาก จนอาจเกินกว่าครึ่งลูก ซึ่งจะมีผลต่อการคำนวณค่าความแข็งผิดพลาดได้ หรือหากเลือกแรงกดน้อยไปเมื่อเทียบกับขนาดของลูกบอลเหล็กกล้าก็จะทำให้การแปลผลทำได้ไม่แม่นยำเช่นกัน ดังนั้นการเลือกใช้แรงกด และขนาดลูกบอลจะแตกต่างกันไปด้วย เพื่อป้องกันข้อบกพร่องที่จะพบได้ในการทดสอบด้วยวิธีนี้ เราสามารถพิจารณาได้จากอัตราส่วน P/D^2 ดังต่อไปนี้

ตารางผนวกที่ ก1 ค่าอัตราส่วน P/D^2 ของโลหะแต่ละชนิด

โลหะ	ค่าความแข็งโดยประมาณ (HB)	อัตราส่วน P/D^2
เหล็กกล้าและเหล็กหล่อ	มากกว่า 100	30
ทองแดง, ทองแดงผสม, อะลูมิเนียมผสม	30-200	10
อะลูมิเนียม	15-100	5
ดีบุก, ดีบุกผสม, ตะกั่ว, ตะกั่วผสม	3-20	1



ภาพผนวกที่ ก2 ลักษณะการทดสอบแบบ Brinell ที่ไม่ถูกต้อง

สำหรับการทดสอบเหล็กกล้าชุบแข็ง หรือโลหะที่มีความแข็งสูงมากๆ จะไม่สามารถทดสอบด้วยลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็งได้ จะต้องใช้ลูกบอลทังสเตนคาร์ไบด์ขนาด 2.45 มม. แทนซึ่งจะใช้สำหรับทดสอบวัสดุที่แข็งตั้งแต่ 444 - 627 H_B

ข้อควรระวังสำหรับการวัดความแข็งด้วยวิธีนี้ ได้แก่

- ผิวของชิ้นงานทดสอบต้องเรียบ เพื่อให้ได้ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยกดที่แน่นอน และที่ผิวของชิ้นงานทดสอบต้องไม่มี oxide scale หรือสิ่งแปลกปลอม นอกจากนี้การเตรียมผิวต้องระวังอย่างมาก โดยหลีกเลี่ยงกรรมวิธีร้อน (heating) และกรรมวิธีเย็น (cold working)

- ต้องระวังตำแหน่งการทดสอบโดยให้ระยะหัวกดอยู่ห่างจากขอบแต่ละด้านของชิ้นงานอย่างน้อย 3 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของลูกบอล ระยะห่างของแต่ละรอยกดห่างกันอย่างน้อย 3 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของลูกบอล และชิ้นงานต้องมีความหนาอย่างน้อย 8 เท่าของความลึกของการกด
- ควรวัดเส้นผ่านศูนย์กลางรอยกด 2 ครั้งในแนวตั้งฉากกัน แล้วหาค่าเฉลี่ยเพื่อนำไปคำนวณหาความแข็งต่อไป

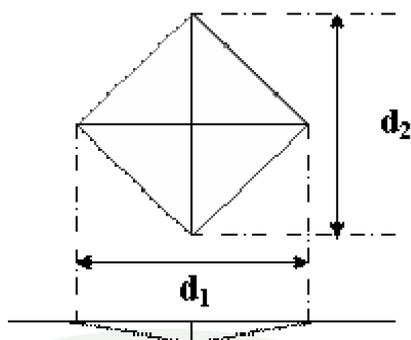
การวัดความแข็งแบบ Brinell มีข้อดี คือ ในการกด 1 ครั้ง จะครอบคลุมหลายๆ เฟสของชิ้นงาน ทำให้ได้ค่าความแข็งที่สม่ำเสมอ ซึ่งหากวัดด้วยวิธีที่ใช้หัวกดขนาดเล็กมาก อาจทำให้วัดได้เพียงเฟสเดียว ทำให้ค่าความแข็งที่ได้ ไม่ได้เป็นค่าที่แสดงถึงความแข็งของทั้งวัสดุ นั้น แต่ข้อจำกัดของวิธีนี้ คือ ชิ้นงานต้องมีขนาดใหญ่เพียงพอที่จะวัดกับหัวกดได้ และไม่ควรวัดกับชิ้นงานที่มีรัศมีผิวโค้งน้อยกว่า 1 นิ้ว

2. Vickers Hardness Test

เป็นการวัดความแข็งโดยใช้หัวกดเพชรมีลักษณะเป็นปิรามิดฐานสี่เหลี่ยม ที่ปลายหัวกดทำมุม 136° (เป็นมุมที่มีองศาใกล้เคียงกับหัวกดลักษณะกลมมากที่สุด) เป็นเวลา 10-15 วินาที ค่าความแข็งจะคำนวณจากแรงกดที่กระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ผิวเช่นเดียวกับการทดสอบแบบ Brinell แต่วิธีนี้หัวกดเป็นเพชรซึ่งมีความแข็งสูงมากๆ ดังนั้นในการใช้งานจึงสามารถวัดค่าความแข็งได้ตั้งแต่โลหะที่นิ่มมาก HV ประมาณ 5 จนถึงโลหะที่แข็งมากๆ (VHN ประมาณ 1500) โดยไม่ต้องเปลี่ยนหัวกด จะเปลี่ยนก็เฉพาะแรงกดเท่านั้น โดยมีตั้งแต่ 1-120 kgf ขึ้นอยู่กับความแข็งของโลหะที่ทดสอบ ซึ่งทำให้วิธีนี้มีข้อได้เปรียบกว่า Brinell คือ ไม่ต้องคำนึงถึงอัตราส่วน P/D^2 และข้อจำกัดในด้านความหนาของชิ้นงานทดสอบเนื่องจากหัวกดเพชรมีขนาดเล็กมาก

$$HV = \frac{1.854P}{d^2}$$

โดยที่ HV คือ ค่าความแข็งแบบ Vicker (kgf/mm^2)
 P คือ แรงกด (kgf)
 d คือ ขนาดเส้นทะแยงมุม d_1 และ d_2 เฉลี่ย (mm.)



ภาพผนวกที่ ๓ ลักษณะรอยกดจากหัวเพชรของ Vickers Hardness Test

ข้อควรระวังสำหรับการวัดความแข็งด้วยวิธีนี้ ได้แก่

- การเลือกใช้น้ำหนักกดมีผลต่อความแข็งด้วย คือ ถ้าเลือกน้ำหนักน้อยเกินไป จะได้ค่าความแข็งที่ผิด แต่ถ้าใช้น้ำหนักมากเกินไป อาจทำให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับหัวกดเพชรตอนกลายเป็นหัวกดได้

- ผิวของชิ้นงานทดสอบต้องไม่มี oxide scale หรือสิ่งแปลกปลอม การเตรียมผิวของชิ้นทดสอบต้องใช้ความระมัดระวังอย่างมาก และหลีกเลี่ยงกรรมวิธีร้อน (heating) หรือกรรมวิธีเย็น (cold working)

- ไม่ควรวัดความแข็งในบริเวณที่ใกล้กับตำแหน่งเดิม โดยควรเว้นระยะห่างไว้ไม่น้อยกว่า 2.5 เท่าของเส้นทแยงมุมรอยกด ทั้งตามแนวแกน x และ y

- ความหนาของชิ้นงานทดสอบควรมากกว่าอย่างน้อย 1.5 เท่าของเส้นทแยงมุมของรอยกด และหลังจากการทดสอบวัดความแข็ง ไม่ควรมีการเปลี่ยนแปลงใดๆ ให้เห็นทางด้านหลัง (อีกด้านหนึ่ง) ของชิ้นงานทดสอบ

- การอ่านค่าความยาวเส้นทแยงมุม จะขึ้นกับสายตาของแต่ละคน ดังนั้นควรให้คนใดคนหนึ่งเป็นผู้อ่านค่า

วิธีทดสอบนี้ไม่เป็นที่นิยมในการใช้งานสำหรับภาคอุตสาหกรรม เนื่องจากข้อจำกัดที่ทดสอบได้ช้า ต้องมีเตรียมผิวที่ดี เพื่อให้ได้ค่าเส้นทแยงมุมของรอยกดที่แน่นอน และมีโอกาสผิดพลาดในการวัดระยะเส้นผ่านศูนย์กลางได้

3. Rockwell Hardness Test

เป็นวิธีวัดความแข็งของโลหะที่นิยมใช้มากที่สุด โดยจะวัดความแข็งจากความลึกระยะกคที่ถูกหัวกดคคด้วยแรงกดที่ ซึ่งจะแตกต่างจากแบบ Brinell และ Vicker ที่วัดจากแรงกดต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ ดังนั้นวิธีนี้จึงมีการวัดด้วยกันหลายสเกล เพื่อให้สามารถเลือกใช้วัดความแข็งได้เหมาะสมที่สุด แรงที่ใช้กดมี 2 ส่วน คือ minor load และ major load

Minor load เป็นแรงที่ยืดหัวกดลูกบอลเหล็กชุบแข็ง หรือหัวกดเพชร ไว้บนผิวโลหะที่จะวัดความแข็ง

Major load เป็นแรงที่มากกว่า minor load และกดลงภายหลังจากให้ minor load กับชิ้นงาน

สำหรับมาตรฐานความแข็งแบบ Rockwell มีอยู่ 15 สเกล (ไม่รวม superficial hardness scale) ดังแสดงในตารางผนวกที่ ก2

ตารางผนวกที่ ก2 การวัดความแข็งแบบ Rockwell สเกลต่างๆ

สเกล	ประเภทหัวกด	Major load, kgf	การใช้งานทั่วไป
A	หัวกดเพชร (two scales-carbide and steel)	60	ซีเมนต์คาร์ไบด์, เหล็กกล้าที่มีขนาดบาง และเหล็กกล้าชุบแข็งผิวไม่ลึก (shallow case-hardening steel)
B	ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็ง 1/16 นิ้ว (1.588 มม.)	100	โลหะผสมของทองแดง (Copper alloys), เหล็กกล้าที่ไม่แข็งมาก (soft steels), โลหะผสมของอะลูมิเนียม (aluminum alloys) และเหล็กหล่ออ่อนเหนียว (malleable iron)
C	หัวกดเพชร	150	เหล็กกล้า, เหล็กหล่อที่มีความแข็งสูง (hard cast irons), เหล็กหล่ออ่อนเหนียวชนิดเพอร์ริติก, ไทเทเนียม, เหล็กกล้าชุบแข็งที่ผิวลึก และวัสดุอื่นๆ ที่มีความแข็งมากกว่า 100 HRB
D	หัวกดเพชร	100	เหล็กหล่อ, โลหะผสมของอะลูมิเนียม โลหะผสมของแมกนีเซียม และโลหะสำหรับผลิตแบร็ง

ตารางผนวกที่ ก2 (ต่อ)

สเกล	ประเภทหัวกด	Major load, kgf	การใช้งานทั่วไป
E	ลูกบอลเหล็กกล้าชุบ แข็ง 1/8 นิ้ว (3.175 มม.)	100	โลหะผสมของทองแดงที่ผ่านการอบอ่อน และ โลหะแผ่นบางที่ไม่แข็ง
F	ลูกบอลเหล็กกล้าชุบ แข็ง 1/16 นิ้ว (1.588 มม.)	60	บรอนซ์ผสมฟอสฟอรัส (Phosphor bronze), โลหะผสมทองแดง-เบริลเลียม (beryllium copper), เหล็กหล่ออบเหนียว. โดยความแข็ง สูงสุดที่วัดได้จะต้องไม่เกิน 92 HRG เพื่อป้องกันหัวกดเสียหาย
G	ลูกบอลเหล็กกล้าชุบ แข็ง 1/16 นิ้ว (1.588 มม.)	150	
H	ลูกบอลเหล็กกล้าชุบ แข็ง 1/8 นิ้ว (3.175 มม.)	60	อะลูมิเนียม, สังกะสี และตะกั่ว
K	ลูกบอลเหล็กกล้าชุบ แข็ง 1/8 นิ้ว (3.175 มม.)	150	โลหะสำหรับผลิตแบร็ง และวัสดุอื่นๆ ที่บางและ นิ่ม โดยเลือกใช้ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็งขนาด เล็กและใช้แรงกดสูงเพื่อป้องกันผลของ anvil effect
L	ลูกบอลเหล็กกล้าชุบ แข็ง ¼ นิ้ว (6.350 มม.)	60	โลหะสำหรับผลิตแบร็ง และวัสดุอื่นๆ ที่บางและ นิ่ม โดยเลือกใช้ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็งขนาด เล็กและใช้แรงกดสูงเพื่อป้องกันผลของ anvil effect
M	ลูกบอลเหล็กกล้าชุบ แข็ง ¼ นิ้ว (6.350 มม.)	100	โลหะสำหรับผลิตแบร็ง และวัสดุอื่นๆ ที่บางและ นิ่ม โดยเลือกใช้ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็งขนาด เล็กและใช้แรงกดสูงเพื่อป้องกันผลของ anvil effect

ตารางผนวกที่ ก2 (ต่อ)

สเกล	ประเภทหัวกด	Major load, kgf	การใช้งานทั่วไป
P	ลูกบอลเหล็กกล้าชุบ แข็ง ¼ นิ้ว (6.350 มม.)	150	โลหะสำหรับผลิตแบร็ริง และวัสดุอื่นๆ ที่บางและ นิ่ม โดยเลือกใช้ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็งขนาด เล็กและใช้แรงกดสูงเพื่อป้องกันผลของ anvil effect
R	ลูกบอลเหล็กกล้าชุบ แข็ง ½ นิ้ว (12.70 มม.)	60	โลหะสำหรับผลิตแบร็ริง และวัสดุอื่นๆ ที่บางและ นิ่ม โดยเลือกใช้ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็งขนาด เล็กและใช้แรงกดสูงเพื่อป้องกันผลของ anvil effect
S	ลูกบอลเหล็กกล้าชุบ แข็ง 1/2 นิ้ว (12.70 มม.)	100	โลหะสำหรับผลิตแบร็ริง และวัสดุอื่นๆ ที่บางและ นิ่ม โดยเลือกใช้ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็งขนาด เล็กและใช้แรงกดสูงเพื่อป้องกันผลของ anvil effect
V	ลูกบอลเหล็กกล้าชุบ แข็ง 1/2 นิ้ว (12.70 มม.)	150	โลหะสำหรับผลิตแบร็ริง และวัสดุอื่นๆ ที่บางและ นิ่ม โดยเลือกใช้ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็งขนาด เล็กและใช้แรงกดสูงเพื่อป้องกันผลของ anvil effect

ค่าความแข็งจะแสดงเป็น 2 ส่วน คือ ตัวเลขค่าความแข็งที่วัดได้ และสัญลักษณ์ของ
สเกลที่ใช้วัด (แสดงถึงลักษณะหัวกดที่ใช้วัด ค่า และ major load) ตัวอย่าง เช่น 64.0 HRC
หมายความว่า ตัวเลขความแข็งที่อ่านได้เท่ากับ 64.0 ด้วยการวัดแบบ Rockwell สเกล C ที่ใช้หัว
กดเพชร และมีค่า major load เท่ากับ 100 kgf

ส่วนใหญ่การทดสอบเหล็กกล้า และวัสดุอื่นๆ จะใช้เป็น Rockwell สเกล C และ B
อย่างไรก็ตาม เนื่องจากไม่ได้มีการกำหนดสเกลที่ชัดเจน ดังนั้นจึงควรพิจารณาถึงปัจจัยอื่นๆ ด้วย
เพื่อให้เลือกใช้สเกลได้เหมาะสมที่สุด ซึ่งปัจจัยต่างๆ ที่ต้องคำนึงถึง ได้แก่

3.1 ชนิดของวัสดุ

โดยทั่วไปผลการทดสอบที่ดีที่สุด ได้จากการใช้แรงกดสูงสุดเท่าที่ชิ้นงานทดสอบจะสามารถรับได้ และจากตารางผนวกที่ ๓1 จะบอกได้ว่าวัสดุที่ทดสอบควรใช้สเกลแบบไหน เช่น วัสดุแข็ง เช่น เหล็กกล้า หรือทังสเตนคาร์ไบด์ จะต้องใช้สเกล A, C, D เท่านั้น

3.2 ความหนาของชิ้นงานทดสอบ

ควรมากกว่าความลึกของรอยกดอย่างน้อย 10 เท่า เพื่อให้ได้ค่าความแข็งที่ถูกต้อง ซึ่งการวัดความลึกรอยกด แบ่งได้เป็น 2 ส่วน ดังนี้

- ความลึกรอยกด = $(100 - \text{ค่าความแข็งที่วัดได้}) \times 0.002$ สำหรับหัวกดเพชร

- ความลึกรอยกด = $(130 - \text{ค่าความแข็งที่วัดได้}) \times 0.002$ สำหรับหัวกดบอล

นอกจากนี้ภายหลังการทดสอบจะต้องไม่มีรอยนูนเกิดขึ้นทางด้านหลังของชิ้นงานทดสอบด้วย

- รูปร่างของชิ้นงานทดสอบ และตำแหน่งในการวัด

- ชิ้นงานรูปทรงยาว จะต้องติดตั้งแท่นรองรับเพื่อให้มั่นใจได้ว่า ผิวทดสอบที่ทำกรวัดความแข็งตั้งฉากกับแนวกดของหัวกด

- ชิ้นงานทรงกระบอก การวัดค่าความแข็งให้ถูกต้องจะต้องใช้ค่า correction factor ช่วยปรับค่าความแข็งที่อ่านได้ เนื่องจากในการวัดความแข็งของผิวนูน (convex) หัวกดจะกดลงไปลึกมากกว่าปกติ ดังนั้นค่าที่อ่านได้จะน้อยกว่าความเป็นจริง ดังนั้นค่า correction factor (ตารางผนวกที่ ๓3 จะถูกบวกเข้าไปเมื่อวัดความแข็งกับผิวชิ้นงานทรงกระบอก นอกจากนี้ในการวัดความแข็งชิ้นงานทรงกระบอกจะต้องใช้แท่นตัววี (V anvil) เพื่อช่วยรองรับชิ้นงานทดสอบให้อยู่หนึ่งกับที่

ตารางผนวกที่ ๓3 ค่า Correction factors สำหรับการวัดความแข็งชิ้นงานทรงกระบอกด้วย
ลูกบอล 16/1 นิ้ว (1.588 มม.) (Rockwell สเกล B, F และ G)

Correction factors สำหรับชิ้นงานทดสอบที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ							
ค่าความ แข็งที่ อ่านได้	6.350	9.525	12.700	15.875	19.050	22.225	25.400
	มม.						
	(0.250 นิ้ว)	(0.375 นิ้ว)	(0.500 นิ้ว)	(0.625 นิ้ว)	(0.750 นิ้ว)	(0.875 นิ้ว)	(1.000 นิ้ว)
0	*	*	*	*	4.5	3.5	3.0
10	*	*	*	5.0	4.0	3.5	3.0
20	*	*	*	4.5	4.0	3.5	3.0
30	*	*	5.0	4.5	3.5	3.0	2.5
40	*	*	4.5	4.0	3.0	2.5	2.5
50	*	*	4.0	3.5	3.0	2.5	2.0
60	*	5.0	3.5	3.0	2.5	2.0	2.0
70	*	4.0	3.0	2.5	2.0	2.0	1.5
80	5.0	3.5	2.5	2.0	1.5	1.5	1.5
90	4.0	3.0	2.0	1.5	1.5	1.5	1.0
100	3.5	2.5	1.5	1.5	1.0	1.0	0.5

ตารางผนวกที่ ๓4 ค่า Correction factors สำหรับการวัดความแข็งชิ้นงานทรงกระบอกด้วย
หัวกดเพชร (Rockwell สเกล C, D และ A)

Correction factors สำหรับชิ้นงานทดสอบที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ							
ค่าความ แข็งที่ อ่านได้	6.350	9.525	12.700	15.875	19.050	22.225	25.400
	มม.						
	(0.250 นิ้ว)	(0.375 นิ้ว)	(0.500 นิ้ว)	(0.625 นิ้ว)	(0.750 นิ้ว)	(0.875 นิ้ว)	(1.000 นิ้ว)
20	*	*	*	2.5	2.0	1.5	1.5
30	*	*	2.5	2.0	1.5	1.5	1.0
40	*	2.5	2.0	1.5	1.0	1.0	1.0
50	2.5	2.0	1.5	1.0	1.0	0.5	0.5
60	1.5	1.0	1.0	0.5	0.5	0.5	0.5
70	1.0	1.0	0.5	0.5	0.5	-	-
80	0.5	0.5	0.5	-	-	-	-

หมายเหตุ : * เป็น correction factor ที่เกิน 5.0 (สำหรับ Rockwell สเกล B, F และ G) และ 3.0 (สำหรับ Rockwell สเกล C, D และ A) ซึ่งไม่เป็นที่ยอมรับ จึงไม่รวมอยู่ในตารางผนวก

- การวัดความแข็งผิวด้านใน (เช่น ด้านในของวงแหวน) ส่วนใหญ่จะใช้หัวกดแบบ gooseneck adapter

- ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของรอยกด กับขอบของชิ้นงานทดสอบควรมากกว่า 2.5 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางรอยกด และไม่ควรวัดความแข็งในบริเวณที่ใกล้กับตำแหน่งเดิม โดยควรเว้นระยะห่างไว้ไม่น้อยกว่า 4 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางรอยกด

ตารางผนวกที่ 5 เปรียบเทียบค่าความแข็งตามวิธีต่างๆ

ROCKWELL			SUPERFICIAL ROCKWELL			BRINELL		VICKERS HARDNESS NUMBER	
Diamond Brale			1/16" "N" Brale Penetrater			10 m/m Ball			
Ball						3000 kgm Load			
						Dia. Of		Hardness	
150 kgf	60 kgf	100 kgf	100 kgf	Load	Load	Load	Ball	Number	
C Scale	A Scale	D Scale	B Scale	15 N	30 N	45N	Impression		
							in m/m		
80	92	87		97	92	87		1865	
79	92	86			92	87		1787	
78	91	85		96	91	86		1710	
77	91	84			91	85		1633	
76	90	83		96	90	84		1556	
75	90	83			89	83		1478	
74	89	82		95	89	82		1400	
73	89	81			88	81		1323	
72	88	80		95	87	80		1245	
71	87	80			87	79		1160	
70	87	79		94	86	78		1076	
69	86	78		94	85	77		1004	
68	86	77			85	79		942	
67	85	76		93	84	75		894	
66	85	76		93	83	73		854	
65	84	75		92	82	72	2.25	745	820

ตารางผนวกที่ ก5 (ต่อ)

ROCKWELL			SUPERFICIAL ROCKWELL			BRINELL	VICKERS HARDNESS NUMBER		
Diamond Brale		1/16"	"N" Brale Penetrater			10 m/m Ball			
		Ball				3000 kgm Load			
150 kgf	60 kgf	100 kgf	100 kgf	Load	Load	Load	Dia. Of Ball	Hardness Number	
C Scale	A Scale	D Scale	B Scale	15 N	30 N	45N	Impression		
								in m/m	
64	84	74			81	74	2.3	710	789
63	83	73			92	80	2.3	710	763
62	83	73			91	79	2.35	682	746
61	82	72			91	79	2.35	682	720
60	81	71			90	78	2.40	653	697
59	81	70			90	77	2.45	627	674
58	80	69			89	76	2.55	578	653
57	80	69			89	75	2.55	578	633
56	79	68			88	74	2.60	555	613
55	79	67			88	73	2.60	555	595
54	78	66			87	72	2.65	534	577
53	77	65			87	71	2.70	514	560
52	77	65			86	70	2.75	495	544
51	76	64			86	69	2.75	495	528
50	76	63			86	69	2.80	477	513
49	75	62			85	68	2.85	461	498

ตารางผนวกที่ ก5 (ต่อ)

ROCKWELL				SUPERFICIAL ROCKWELL			BRINELL	VICKERS HARDNESS NUMBER	
Diamond Brale		1/16"	"N" Brale Penetrater	10 m/m Ball			3000 kgm Load		
150 kgf	60 kgf	100 kgf	100 kgf	Load	Load	Load	Dia. Of Ball	Hardness Number	
C Scale	A Scale	D Scale	B Scale	15 N	30 N	45N	Impression in m/m		
48	75	61		85	67	53	2.90	444	484
47	74	61		84	66	51	2.90	444	471
46	73	60		84	65	50	2.95	432	458
45	73	59		83	64	49	3.00	415	446
44	73	59		83	63	48	3.00	415	434
43	72	58		82	62	47	3.05	401	423
42	72	57		82	61	46	3.10	388	412
41	71	56		81	60	44	3.10	388	402
40	70	55		80	60	43	3.15	375	
39	70	55		80	59	42	3.20	363	
38	69	54		79	58	41	3.25	352	
37	69	53	109	79	57	40	3.30	341	
36	68	52	109	78	56	39	3.35	331	
35	68	52	108	78	55	37	3.35	331	
34	67	51	108	77	54	36	3.40	321	
33	67	50	107	77	53	38	3.45	311	

ตารางผนวกที่ ก5 (ต่อ)

ROCKWELL				SUPERFICIAL ROCKWELL			BRINELL	VICKERS HARDNESS NUMBER	
Diamond Brale		1/16"	"N" Brale Penetrater			10 m/m Ball			
		Ball				3000 kgm Load			
150 kgf	60 kgf	100 kgf	100 kgf	Load	Load	Load	Dia. Of Ball	Hardness Number	
C Scale	A Scale	D Scale	B Scale	15 N	30 N	45N	Impression		
							in m/m		
32	66	49	106	76	52	34	3.50	302	
31	66	48	106	76	51	33	3.55	293	
30	65	48	105	75	50	32	3.60	285	
29	65	47	104	75	50	30	3.65	277	
28	64	46	103	74	49	29	3.70	269	
27	64	45	103	73	48	28	3.75	262	
26	63	45	102	73	47	27	3.80	255	
25	63	44	101	72	46	26	3.80	255	
23	62	42	99	71	44	23	3.90	241	254
22	62	42	99	71	43	22	3.95	235	248
21	61	41	98	70	42	21	4.00	229	243
20	61	40	97	69	42	20	4.05	223	238
18			95				4.10	217	230
16			94				4.15	212	222
14			92				4.25	203	213
12			90				4.35	192	204

ตารางผนวกที่ ก5 (ต่อ)

ROCKWELL		SUPERFICIAL ROCKWELL			BRINELL		VICKERS HARDNESS NUMBER		
Diamond Brale		1/16"	"N" Brale Penetrater		10 m/m Ball				
		Ball			3000 kgm Load				
						Dia. Of Hardness			
150 kgf	60 kgf	100 kgf	100 kgf	Load	Load	Load	Ball	Number	
C Scale	A Scale	D Scale	B Scale	15 N	30 N	45N	Impression		
							in m/m		
10			89				4.40	187	195
8			87				4.50	179	187
6			85				4.60	170	180
4			84				4.65	166	173
2			82				4.80	156	166
0			81				4.80	156	160
			79				4.90	149	156



1. การกำหนดเวลาการผลิตแม่พิมพ์ส่วนตัวผู้ ด้วยกระบวนการกัดแต่งผิว

การผลิตแม่พิมพ์ส่วนตัวผู้ ด้วยกระบวนการกัดแต่งผิว มีสองขั้นตอนหลักๆคือ การกัดงานแบบหยาบ (Roughing) และ การกัดงานแบบละเอียด (Finishing) สำหรับการหาเวลาในการผลิตเบื้องต้นจะทำได้โดยทำการจำลองงานกัดด้วยฟังก์ชัน CAM ของโปรแกรม Unigraphics ดังแสดงในภาพผนวกที่ ง1 โดยระยะเวลานี้ขึ้นอยู่กับการใช้ขนาดของหัวกัด, ความเร็วในการกัดชิ้นงาน, ความลึกในการกัดชิ้นงาน และชนิดของเส้นทางเดินในการกัด ในการจำลองครั้งนี้จะใช้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆดังนี้

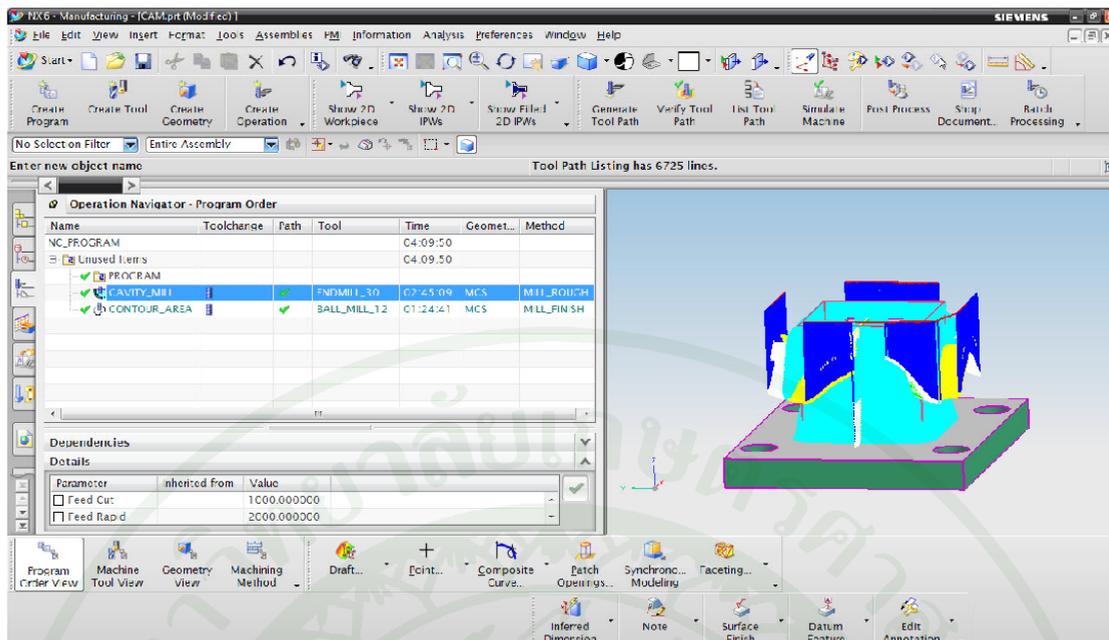
การกัดหยาบ

1. หัวกัดชนิด Flat End Mill ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 30 มิลลิเมตร ในการกัดหยาบ
2. เส้นทางเดินแบบ Follow Part
3. ความเร็วในการเดินใบมีด 1000 มิลลิเมตร/นาที
4. ความเร็วหัว Spindle 2500 รอบต่อนาที
5. ความลึกในการตัด 0.5 มิลลิเมตร
6. ค่า Step Over 20 มิลลิเมตร

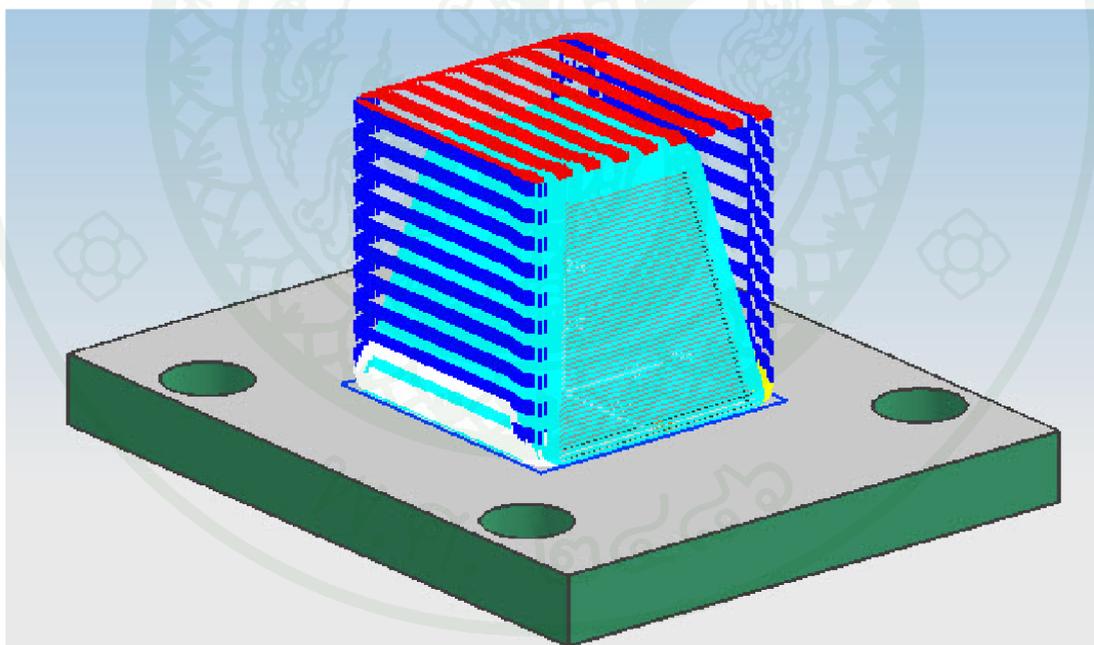
การกัดละเอียด

1. หัวกัดชนิด Ball End Mill ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร ในการกัดละเอียด
2. เส้นทางเดินแบบ Area Milling
3. ความเร็วในการเดินใบมีด 250 มิลลิเมตร/นาที
4. ความเร็วหัว Spindle 4500 รอบต่อนาที
5. ความ Step Over 0.2 มิลลิเมตร

ผลจากการจำลองพบว่าเวลาการกัดงานทั้งหมดโดยประมาณ 251 นาที สำหรับการปฏิบัติการด้วยเครื่องจักรส่วนมากจะใช้เวลามากกว่าเวลาที่ได้จากการจำลอง เนื่องจากประสิทธิภาพของเครื่อง CNC ที่ใช้ ซึ่งการประมาณเวลาในการผลิตจริงจะต้องทำการนำแฟลคเตอร์มาคูณกับเวลาที่ได้จากการจำลองโดยทั่วไปจะใช้ค่าแฟลคเตอร์ประมาณ 1.5 ดังนั้นการประมาณเวลาที่ใช้ในกระบวนการจริงอยู่ที่ 377 นาที



ภาพผนวกที่ 1 แสดงการจำลองงานกัดแม่พิมพ์ส่วนตัวผู้ช่วยฟังก์ชัน CAM ของโปรแกรม UGs



ภาพผนวกที่ 2 แสดงเส้นทางเดินของงานกัดแบบละเอียด

2. การคำนวณต้นทุนการผลิตแม่พิมพ์ส่วนตัวผู้ ด้วยกระบวนการกัดแต่งผิว

วิธีการคิดค่าใช้จ่ายสำหรับงานกัดแต่งผิว สามารถคิดจากสมการของเศรษฐศาสตร์การตัดวัสดุ

$$C_p = C_l + C_u + C_s + C_m + C_t \quad (1)$$

เมื่อ

C_p = ต้นทุนการผลิตต่อชิ้น (Production cost per piece)

C_l = ต้นทุนการใส่ชิ้นงานก่อนการตัด (Loading cost per piece)

C_u = ต้นทุนการถอดชิ้นงานหลังการตัด (Unloading cost per piece)

C_s = ต้นทุนการตั้งใบมีดก่อนตัดชิ้นงาน (Setting cost per Piece)

C_m = ต้นทุนการตัดต่อชิ้นไม่รวมค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับใบมีด (Machining cost per piece)

C_t = ต้นทุนเกี่ยวกับใบมีดหมายถึงค่าเปลี่ยนใบ ค่าลับคม (Tooling cost per piece)

$$C_l = (A_o + A_l)T_l \quad (2)$$

เมื่อ

A_l = ค่าใช้จ่ายต่อชิ้นที่เกิดขึ้นโดยตรง เช่น ค่าแรงช่าง (บาท/นาที)

A_o = เป็นค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับเครื่องจักรไม่ว่าจะใส่งานหรือไม่ก็ตาม เช่น ค่าแรงทางอ้อม ค่าไฟฟ้า ค่าซ่อมบำรุง ค่าเสื่อมราคา (บาท/นาที)

T_l = คือเวลาที่ใส่งานต่อหนึ่งชิ้น (นาที)

$$C_u = (A_o + A_u)T_u \quad (3)$$

เมื่อ

T_u = เวลาที่ถอดงานออกต่อหนึ่งชิ้น (นาที)

A_u = ค่าใช้จ่ายต่อชิ้นที่เกิดขึ้นโดยตรง เช่น ค่าแรงช่าง (บาท/นาที)

$$C_s = (A_o + A_s)T_s \quad (4)$$

เมื่อ

A_s = ค่าใช้จ่ายต่อชิ้นที่เกิดขึ้นโดยตรง เช่น ค่าแรงช่าง (บาท/นาที)

T_s = เวลาในการตั้งใบมีดต่อชิ้น (Tool setting time)

$$C_m = (A_o + A_m + A_d)T_m \quad (5)$$

เมื่อ

A_m = ค่าใช้จ่ายตรง โดยรวม ค่าแรงช่างกับค่าไฟฟ้า

A_d = ค่าเสื่อมราคาของเครื่องจักร

T_m = เวลาที่คมมีดลงตัดชิ้นงาน (Actual cutting time)

$$C_t = ((A_o + A_m)T_c + (B_o + B_g + B_d)T_g) / N_w \quad (6)$$

เมื่อ

T_c = เวลาที่ใช้เปลี่ยนคมมีด (Tool change time per edge)

B_o = ค่าลับคมมีดที่ต้องจ่ายเช่น ค่าไฟ ค่าเครื่องจักร ค่าเสื่อมราคา

B_g = ค่าแรงช่างลับคม ค่าสึกหรอ

B_d = ค่าเสื่อมราคาของคมมีด

T_g = เวลาที่ใช้ในการลับคมมีดแต่ละครั้ง (Tool grinding time)

N_w = จำนวนชิ้นงานที่ตัดได้ต่อการลับคมหนึ่งครั้ง

ทำการแทนค่าสมการที่ (2) – (7) ลงในสมการที่ (1) จะได้ค่าต้นทุนการผลิต โดยการสำรวจข้อมูลจากโรงงานพบว่าค่าต้นทุนสำหรับงานกัดอยู่ในช่วง 300 – 800 บาทต่อชั่วโมง

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ นายณัฐพร บุญเลิศเจริญศักดิ์
เกิดวันที่ 18 มีนาคม 2528
สถานที่เกิด เขตจตุจักร จังหวัดกรุงเทพมหานคร
ประวัติการศึกษา วศ.บ. (วิศวกรรมเครื่องกล) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ตำแหน่งปัจจุบัน -
สถานที่ทำงานปัจจุบัน -
ผลงานดีเด่นและ/หรือรางวัลทางวิชาการ งานวิจัยเรื่องเครื่องต้นแบบเพื่อผลิตแม่พิมพ์ด้วย
 กระบวนการเติมเนื้อวัสดุ
ทุนการศึกษาที่ได้รับ -