



ใบรับรองวิทยานิพนธ์  
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)

ปริญญา

วิศวกรรมเครื่องกล

วิศวกรรมเครื่องกล

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง ระบบหล่อเย็นแม่พิมพ์แบบฉีดผิวด้วยวิธีการเติมเนื้อโลหะ

Conformal Mold – Cooling System Using Metal Deposition Process

نامผู้วิจัย นายรัฐพล จันทร์ช่วงโชติ

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

( อาจารย์คุณยุต เอี่ยมสะอาด, Ph.D. )

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

( อาจารย์ชัยยากร จันทร์สุวรรณ, Ph.D. )

หัวหน้าภาควิชา

( รองศาสตราจารย์ชวลิต กิตติชัยการ, Ph.D. )

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

( รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr. )

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ ..... เดือน ..... พ.ศ. ....

สิงสิงห์ มทาวิตยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

ระบบหล่อเย็นแม่พิมพ์แบบฉีดด้วยวิธีการเติมเนื้อโลหะ

Conformal Mold – Cooling System Using Metal Deposition Process

โดย

นายรัฐพล จันทรช่วงโชติ

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)

พ.ศ. 2557

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

รัฐพล จันทรช่วงโชติ 2557: ระบบหล่อเย็นแม่พิมพ์แบบฉีดผิวด้วยวิธีการเติมเนื้อโลหะ  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล) สาขาวิศวกรรมเครื่องกล  
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก:  
อาจารย์คุณยุต เอี่ยมสอาด, Ph.D. 112 หน้า

ปัจจุบันธุรกิจการฉีดขึ้นรูปพลาสติกมีการแข่งขันกันอย่างสูง ซึ่งการลดต้นทุนในการผลิตจะเป็นการเพิ่มโอกาสในการแข่งขันได้ ดังนั้นผู้ผลิตจำเป็นต้องเน้นไปที่การลดต้นทุนแม่พิมพ์รวมถึงการลดระยะเวลาในการฉีดขึ้นรูปพลาสติกเพื่อให้เกิดต้นทุนน้อยที่สุด การผลิตแม่พิมพ์โดยวิธีการเติมเนื้อโลหะทีละชั้น เป็นวิธีหนึ่งที่สามารถผลิตแม่พิมพ์โดยใช้ต้นทุนต่ำและทำการผลิตได้อย่างรวดเร็ว เนื่องจากปริมาณเนื้อวัสดุที่ใช้จะลดลงกว่าแม่พิมพ์แบบทั่วไป ทำให้ใช้เวลาในการกัดแต่งผิวชิ้นงานลดลง ส่งผลทำให้ต้นทุนต่ำลง จากงานวิจัยที่ผ่านมา แม่พิมพ์ที่ทำการขึ้นรูปโดยวิธีการเติมเนื้อโลหะทีละชั้นนั้นยังไม่มีระบบหล่อเย็นที่ดี ทำให้กระบวนการฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ใช้เวลานาน ซึ่งระบบหล่อเย็นแม่พิมพ์เป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้เวลาในกระบวนการฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ลดลง ดังนั้นทางคณะผู้วิจัยจึงได้สร้างแม่พิมพ์ตัวผู้โดยวิธีเติมเนื้อโลหะ โดยมีระบบหล่อเย็นแม่พิมพ์แบบฉีดผิว (Conformal cooled) นอกจากนั้นยังเพิ่มครีบบรรเทาแรงที่ผนังด้านข้างและด้านบน ผลจากการวิเคราะห์ด้วย Finite Element Method (FEM) พบว่าแม่พิมพ์ที่สร้างขึ้นมีความแข็งแรงเพียงพอต่อการฉีดขึ้นรูป และจากผลการทดลองอัตราการระบายความร้อนพบว่าแม่พิมพ์ที่มีระบบหล่อเย็นแบบฉีดผิวที่ขึ้นรูปด้วยการเติมเนื้อโลหะมีการระบายความร้อนสม่ำเสมอและเร็วกว่าแม่พิมพ์ที่ใช้ระบบหล่อเย็นแบบแผ่นกั้น (Baffle cooled) ถึง 61.29 เปอร์เซ็นต์

อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้เป็นเพียงรูปแบบแม่พิมพ์และระบบหล่อเย็นอย่างง่าย ทั้งนี้ในอนาคตสามารถนำระบบหล่อเย็นแบบฉีดผิวไปประยุกต์ใช้กับแม่พิมพ์ที่มีรูปร่างซับซ้อนขึ้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการระบายความร้อนของแม่พิมพ์ ซึ่งจะส่งผลทำให้ลดระยะเวลาในการฉีดขึ้นรูปพลาสติกและลดปัญหาที่เกิดกับชิ้นงานลงได้ในอนาคต

Rattapon Janchuangchote 2014: Conformal Mold – Cooling System Using Metal Deposition Process. Master of Engineering (Mechanical Engineering), Major Field: Mechanical Engineering, Department of Mechanical Engineering. Thesis Advisor: Mr. Kunayut Eiamsa-ard, Ph.D. 112 pages.

Presently the business of plastic injection molding is highly competitive. The reduction in manufacturing costs will increase the opportunity for competition. Therefore, manufacturers need to focus on reducing cost and cycle time to achieve minimum cost. Metal deposition process is a means to produce mold at low cost and short cycle time. This is due to the fact that the program requires less material and machining time which can lead to reduction cost. From past research, the mold formed by metal deposit process has no cooling system, resulting in a long cycle time. The cooling system is a key factor to decrease mold injection cycle time. Therefore, in this research a core mold was created by metal deposition process with conformal cooling system and support ribs. The analysis by Finite Element Method (FEM) is used to analyze to make sure that mold is strong enough for injection. From the experiment result, the cooling mold with conformal cooled system is uniformly and faster than baffle cooled mold cooling system 61.29 percent.

However, this research is only a form of mold and cooling system simple. We can design a cooling system that is more complicated to optimize the mold cooling, which could be better in reducing the cycle time of the injection molded plastic in the future.

---

Student's signature

---

Thesis Advisor's signature

\_\_\_\_ / \_\_\_\_ / \_\_\_\_

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ อ.ดร.คุณยุต เอี่ยมสอาด ประธานกรรมการที่ปรึกษาที่ได้ช่วยเหลือให้คำปรึกษาและแนะนำแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ตลอดจนวางแผนงานในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ และขอขอบพระคุณ อ.ดร.ชัยากร จันท์สุวรรณ กรรมการวิชาเอก ตลอดจนผู้แทนบัณฑิตวิทยาลัย ที่กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำและช่วยเหลือในการทำวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา คณาจารย์ เพื่อนๆ และผู้ที่ให้การสนับสนุนทุกท่านที่ได้เมตตาอบรม สั่งสอน ให้กำลังใจ กำลังทรัพย์ และช่วยเหลือสนับสนุนการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ประโยชน์อันใดที่เกิดจากงานวิจัยนี้ ย่อมเป็นผลมาจากความกรุณาของท่าน ดังกล่าวไว้ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

รัฐพล จันท์ช่วงโชติ

มกราคม 2557

## สารบัญ

## หน้า

|                                                 |     |
|-------------------------------------------------|-----|
| สารบัญ                                          | (1) |
| สารบัญตาราง                                     | (2) |
| สารบัญภาพ                                       | (3) |
| คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ                       | (8) |
| คำนำ                                            | 1   |
| วัตถุประสงค์                                    | 3   |
| การตรวจเอกสาร                                   | 5   |
| อุปกรณ์และวิธีการ                               | 47  |
| อุปกรณ์                                         | 47  |
| วิธีการ                                         | 48  |
| ผลและวิจารณ์                                    | 72  |
| สรุปและข้อเสนอแนะ                               | 96  |
| สรุป                                            | 96  |
| ข้อเสนอแนะ                                      | 97  |
| เอกสารและสิ่งอ้างอิง                            | 99  |
| ภาคผนวก                                         | 101 |
| ภาคผนวก ก การคำนวณต้นทุนในการผลิตแม่พิมพ์ตัวผู้ | 102 |
| ภาคผนวก ข คุณสมบัติลวดเชื่อมที่ใช้ในงานวิจัย    | 107 |
| ภาคผนวก ค ภาพตัดผ่าแม่พิมพ์                     | 110 |
| ประวัติการศึกษาและการทำงาน                      | 112 |

## สารบัญตาราง

| ตารางที่ |                                                                                            | หน้า |
|----------|--------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 1        | การเชื่อมอาร์คโลหะก๊าซคลุมคาร์บอนไดออกไซด์ ใช้ลวดเชื่อมไมโครไวร์<br>เชื่อมด้วยมือ          | 26   |
| 2        | ก๊าซปกคลุมในการเชื่อมมิกและการนำไปใช้งาน                                                   | 31   |
| 3        | อัตราการไหลของก๊าซคลุมและระยะห่างของหัวฉีดที่เหมาะสม                                       | 32   |
| 4        | การเปรียบเทียบกระแสแรงเคลื่อนและการนำไปใช้งานของการส่งถ่านน้ำโลหะ                          | 34   |
| 5        | แสดงค่าเปรียบเทียบความหนาแน่นของกระแสสำหรับลวดเชื่อมขนาด 0.9 และ<br>1.2 มม.                | 35   |
| 6        | พารามิเตอร์ตั้งต้นสำหรับการเชื่อมขึ้นรูปด้วยเครื่องซีเอ็นซี มิก/แม็ก                       | 50   |
| 7        | ค่าพารามิเตอร์ของการจำลองการฉีดพลาสติกด้วยคอมพิวเตอร์                                      | 64   |
| 8        | ค่าพารามิเตอร์ของโปรแกรม NC สำหรับกัดแต่งผิวแม่พิมพ์                                       | 67   |
| 9        | แสดงค่าเฉลี่ยความกว้างและความสูงของรอยแนวเชื่อมที่ได้จากการปรับค่า<br>ความเร็วหัวเชื่อม    | 72   |
| 10       | ผลการทดสอบความแข็งของชิ้นงานทดสอบ                                                          | 76   |
| 11       | ค่าเฉลี่ยผลการทดสอบแรงดึง                                                                  | 78   |
| 12       | ผลการทดสอบการรั่วซึมของแม่พิมพ์                                                            | 90   |
| 13       | อัตราการระบายความร้อนของแม่พิมพ์ตัวผู้                                                     | 92   |
| 14       | การเปรียบเทียบระยะเวลาในการผลิตแม่พิมพ์ตัวผู้ ระหว่างกระบวนการกัดเนื้อโลหะ                 | 93   |
| 15       | การเปรียบเทียบต้นทุนในการผลิตแม่พิมพ์ตัวผู้ ระหว่างกระบวนการกัดแต่งผิวและ<br>เดิมเนื้อโลหะ | 94   |
| 16       | การเปรียบเทียบเนื้อเหล็กที่สูญเสียเนื่องจากการกัดแต่งผิว                                   | 95   |

## สารบัญภาพ

| ภาพที่ |                                                                                                                     | หน้า |
|--------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 1      | แสดงขั้นตอนการออกแบบผลิตภัณฑ์โดยใช้เทคโนโลยีสมัยใหม่                                                                | 5    |
| 2      | ตัวอย่างภาพเสมือนขึ้นงานรูปเฟืองโซลิดโมเดล (ภาพด้านซ้าย) และ<br>การตัดแบ่งชิ้นงานออกเป็นชั้นๆ ตามภาคตัดขวาง         | 6    |
| 3      | เครื่อง Stereo Lithography Apparatus (SLA)                                                                          | 7    |
| 4      | Laser – Engineered Net Shaping (LENS)                                                                               | 8    |
| 5      | ขั้นตอนในการขึ้นรูปวัสดุ                                                                                            | 9    |
| 6      | แม่พิมพ์ Cavity Plate ที่ได้จาก 3-D Welding and Milling                                                             | 10   |
| 7      | 3-D Welding and Milling Machine                                                                                     | 10   |
| 8      | HLM Machine                                                                                                         | 11   |
| 9      | (a) ชิ้นงานที่ได้จากการเติมเนื้อวัสดุ (b) ชิ้นงานหลังผ่านกระบวนการกัดแต่งผิว                                        | 11   |
| 10     | (a) ชิ้นงานระหว่างการเติมเนื้อวัสดุ (b) ชิ้นงานระหว่างกระบวนการกัดแต่งผิว<br>(c) ชิ้นงานหลังผ่านกระบวนการกัดแต่งผิว | 12   |
| 11     | (a) ชิ้นงานใน 3D Computer Graphic (b) ชิ้นงานที่ได้จากการขึ้นรูป                                                    | 12   |
| 12     | เครื่อง 3D Micro Welding                                                                                            | 13   |
| 13     | แสดงแผนภูมิกระบวนการผลิตด้วย Rapid Prototyping                                                                      | 14   |
| 14     | แสดงอุปกรณ์เชื่อมมิก                                                                                                | 15   |
| 15     | การเชื่อมมิก (MIG Welding)                                                                                          | 16   |
| 16     | แสดงลักษณะของคลื่นกระแสไฟตรงที่ได้จากเครื่องเรียงกระแส                                                              | 17   |
| 17     | เส้นโค้งแรงดันและกระแสของเครื่องเชื่อมชนิดแรงดันคงที่กระแสตรง                                                       | 19   |
| 18     | ชุดป้อนลวดด้วยวิธีดันลวดพร้อมที่ใส่ม้วนลวด                                                                          | 19   |
| 19     | ชุดป้อนลวดแบบดึงลวด                                                                                                 | 20   |
| 20     | ระบบการป้อนลวดแบบดัน-ดึง ใช้กับการเชื่อมที่มีระยะห่างจากชุดป้อนลวดมาก ๆ                                             | 20   |
| 21     | การเชื่อมกึ่งอัตโนมัติ                                                                                              | 21   |
| 22     | การเชื่อมอัตโนมัติ                                                                                                  | 21   |
| 23     | ส่วนประกอบของสายเชื่อมและสายน้ำทั้งชนิดระบายความร้อนด้วยอากาศและน้ำ                                                 | 22   |

## สารบัญภาพ (ต่อ)

| ภาพที่ |                                                                                                                                                                                                                             | หน้า |
|--------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 24     | อัตราการผลิตเนื้อโลหะของลวดเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอนแบ่งตามขนาด<br>ลวดเชื่อมและใช้ก๊าซคลุมเป็นคาร์บอนไดออกไซด์                                                                                                                 | 25   |
| 25     | เปรียบเทียบระยะซึมลึกระหว่างลวดเชื่อมขนาดต่างกันเมื่อใช้กระแสเชื่อมเท่ากัน                                                                                                                                                  | 27   |
| 26     | ลักษณะของกระบวนการเชื่อมอาร์คโลหะก๊าซคลุม                                                                                                                                                                                   | 28   |
| 27     | ประเภทกระบวนการเชื่อมอาร์คโลหะก๊าซคลุมเรียกชื่อตามชนิดของก๊าซ                                                                                                                                                               | 29   |
| 28     | อุปกรณ์ควบคุมความดันและมาตรวัดการไหล                                                                                                                                                                                        | 31   |
| 29     | การถ่ายโอนน้ำโลหะทั้ง 4 แบบ                                                                                                                                                                                                 | 33   |
| 30     | ผลกระทบจากอัตราเร็วเคลื่อนที่หัวเชื่อมต่อการเกิดตะเข็บเชื่อมและลักษณะ<br>ตะเข็บเชื่อมภายใต้เงื่อนไข กระแสเชื่อม 175 แอมแปร์ แรงดันอาร์ค 12 โวลต์<br>ขนาดลวดเชื่อม 0.9 มม. ก๊าซคลุมคาร์บอนไดออกไซด์ และระยะ โฟลด์ลวด 9.5 มม. | 36   |
| 31     | แม่พิมพ์แบบสองแผ่น                                                                                                                                                                                                          | 37   |
| 32     | การหล่อเย็นแผ่นคอร์แบบขึ้นเดียวโดยใช้วงจรระบบรูเฉียง                                                                                                                                                                        | 39   |
| 33     | การหล่อเย็นแผ่นคอร์แบบขึ้นเดียวโดยใช้วงจรระบบรูตรงแบบใช้แผ่นกัน                                                                                                                                                             | 40   |
| 34     | การหล่อเย็นแผ่นคอร์แบบขึ้นเดียวโดยใช้วงจรหล่อเย็นแบบเป็นชั้น                                                                                                                                                                | 40   |
| 35     | การหล่อเย็นอินเล็ตของส่วนคอร์ที่หนาแบบช่องหล่อเย็นลึก<br>(ก) ระบบช่องหล่อเย็นลึก (ข) การวางตำแหน่งรูทางออกที่ไม่ถูกต้อง                                                                                                     | 42   |
| 36     | การหล่อเย็นอินเล็ตของคอร์แบบใช้ช่องหล่อเย็นลึกที่มีเสารองรับตรงศูนย์กลาง                                                                                                                                                    | 43   |
| 37     | การหล่อเย็นอินเล็ตของคอร์แบบใช้ร่องเกลียวกันหอย                                                                                                                                                                             | 43   |
| 38     | การหล่อเย็นอินเล็ตของส่วนคอแบบระบบรูหล่อเย็นแบบใช้แผ่นกัน<br>(ก) ภาพตัดของส่วน คอร์ (ข) แสดงภาพด้านหน้าบางส่วน (ค) ภาพด้านหลัง<br>ของส่วนคอร์บางส่วนแสดงการประกอบแผ่นกัน (ง) ไดอะแกรมวงจรทางไหล<br>(จ) ปลายของแผ่นกัน       | 45   |
| 39     | แสดงความร้อนของชิ้นส่วนแม่พิมพ์ขณะฉีด ภาพซ้ายใช้ระบบหล่อเย็นแบบฉีดผิว<br>ภาพขวาใช้ระบบหล่อเย็นแบบทั่วไป                                                                                                                     | 46   |
| 40     | แสดงระบบหล่อเย็นแบบทั่วไปและแบบฉีดผิว ภาพซ้ายระบบหล่อเย็นแบบทั่วไป<br>ภาพขวาระบบหล่อเย็นแบบฉีดผิว                                                                                                                           | 46   |

## สารบัญภาพ (ต่อ)

| ภาพที่ |                                                                                         | หน้า |
|--------|-----------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 41     | ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย                                                                | 48   |
| 42     | ส่วนประกอบของเครื่องเชื่อมขึ้นรูปทีละชั้นแบบอัตโนมัติ                                   | 49   |
| 43     | ตัวอย่างค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการเชื่อม                                          | 50   |
| 44     | แสดงการวัดระยะความกว้างและความสูงของแนวเชื่อม                                           | 51   |
| 45     | รูปแบบเส้นทางเดินของหัวเชื่อมแบบ Spiral                                                 | 52   |
| 46     | รูปแบบเส้นทางเดินของหัวเชื่อมแบบ Zigzag                                                 | 52   |
| 47     | เครื่องทดสอบความแข็งแรงยูนิเวอร์แซล ยี่ห้อ IDENTEC                                      | 54   |
| 48     | แสดงขนาดชิ้นงานทดสอบความแข็งแรงเบร็คเวลล์                                               | 54   |
| 49     | แสดงชิ้นงานทดสอบความแข็งแรงเบร็คเวลล์                                                   | 54   |
| 50     | เส้นโค้งความเค้น-ความเครียด (Stress-Strain Curve) แบบมีจุดคราก (Yield Point)            | 55   |
| 51     | เส้นโค้งความเค้น-ความเครียดแบบที่ไม่มีจุดคราก                                           | 56   |
| 52     | เปรียบเทียบเส้นโค้งความเค้น-ความเครียดของ (ก)วัสดุเปราะ (ข)วัสดุพลาสติก                 | 57   |
| 53     | แสดงขนาดและรูปร่างชิ้นงานทดสอบแรงดึง ตามมาตรฐาน ASTM E8M-04                             | 59   |
| 54     | แสดงชิ้นงานทดสอบแรงดึง                                                                  | 59   |
| 55     | เครื่องทดสอบแรงดึงและการติดตั้งภายใต้การควบคุมอุณหภูมิ                                  | 60   |
| 56     | แสดงขนาดชิ้นงานทดสอบการดัดโค้ง                                                          | 61   |
| 57     | การปรับตั้ง Guide Bending สำหรับการทดสอบการดัดโค้ง                                      | 61   |
| 58     | ขั้นตอนการออกแบบแม่พิมพ์ตัวผู้                                                          | 62   |
| 59     | แสดงชิ้นงานพลาสติกแบบ 3 มิติ                                                            | 63   |
| 60     | ตัวอย่างชิ้นงานที่ใช้ซอฟต์แวร์ Solidworks Simulation ในการวิเคราะห์ความแข็งแรง          | 65   |
| 61     | แผนผังอุปกรณ์ทดสอบการรั่วซึมของแม่พิมพ์                                                 | 69   |
| 62     | อุปกรณ์ทดสอบการรั่วซึมของแม่พิมพ์                                                       | 69   |
| 63     | แผนผังอุปกรณ์ทดสอบการระบายความร้อนของแม่พิมพ์ตัวผู้                                     | 70   |
| 64     | อุปกรณ์ทดสอบการระบายความร้อนของแม่พิมพ์ตัวผู้                                           | 71   |
| 65     | แนวเชื่อมที่ใช้ความเร็วหัวเชื่อม 200, 300, 400 และ 500 มม./นาที<br>จากซ้ายไปขวาตามลำดับ | 73   |

## สารบัญภาพ (ต่อ)

| ภาพที่ |                                                                                                        | หน้า |
|--------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 66     | แสดงแนวเชื่อมขนานกันจำนวน 5 แนว โดยมีระยะห่างระหว่างแนวเชื่อม 1, 2, 3, 4 และ 5 มม. จากบนลงล่างตามลำดับ | 74   |
| 67     | รูปแบบแนวเชื่อมแบบ (ก) Spiral (ข) Zigzag                                                               | 75   |
| 68     | แสดงตัวอย่างชิ้นงานหลังจากทดสอบแรงดึงภายใต้การควบคุมอุณหภูมิ                                           | 77   |
| 69     | ค่าเฉลี่ย Stress-Strain Curve ของชิ้นงานทดสอบ                                                          | 77   |
| 70     | แสดงตัวอย่างชิ้นงานขณะทดสอบการดัดโค้งภายใต้การควบคุมอุณหภูมิ                                           | 79   |
| 71     | แสดงชิ้นงานหลังทดสอบการดัดโค้ง                                                                         | 80   |
| 72     | แสดงแรงดันสูงสุดจากการจำลองการฉีดพลาสติก                                                               | 81   |
| 73     | แสดงกราฟแรงปิดแม่พิมพ์สูงสุดจากการจำลองการฉีดพลาสติก                                                   | 81   |
| 74     | แสดงลักษณะระบบหล่อเย็นแบบชนิดผิว                                                                       | 82   |
| 75     | แสดงแม่พิมพ์ตัวผู้ที่มีระบบหล่อเย็นแบบชนิดผิว                                                          | 82   |
| 76     | แสดงลักษณะระบบหล่อเย็นแบบแผ่นกั้น                                                                      | 83   |
| 77     | แสดงแม่พิมพ์ตัวผู้ที่มีระบบหล่อเย็นแบบแผ่นกั้น                                                         | 83   |
| 78     | แสดงภาระแรงดันฉีดพลาสติกสูงสุดที่กระทำกับแม่พิมพ์ตัวผู้                                                | 84   |
| 79     | แสดงภาระแรงปิดแม่พิมพ์สูงสุดที่กระทำกับแม่พิมพ์ตัวผู้                                                  | 84   |
| 80     | แสดงภาระอุณหภูมิใช้งานแม่พิมพ์ที่กระทำกับแม่พิมพ์ตัวผู้                                                | 85   |
| 81     | แสดงระยะและตำแหน่งการโค้งงอของแม่พิมพ์ที่มีระบบระบายความร้อนแบบชนิดผิวเมื่อได้รับการกระทำ              | 86   |
| 82     | แสดงจุดที่มีค่าความปลอดภัยต่ำสุดของแม่พิมพ์ที่มีระบบระบายความร้อนแบบชนิดผิว                            | 86   |
| 83     | ระยะและตำแหน่งการโค้งงอของแม่พิมพ์ที่มีระบบระบายความร้อนแบบแผ่นกั้นเมื่อได้รับการกระทำ                 | 87   |
| 84     | แสดงจุดที่มีค่าความปลอดภัยต่ำสุดของแม่พิมพ์ที่มีระบบระบายความร้อนแบบแผ่นกั้นเมื่อได้รับการกระทำ        | 87   |
| 85     | แสดงขั้นตอนการในการขึ้นรูปแม่พิมพ์ที่มีระบบหล่อเย็นแบบชนิดผิว                                          | 88   |
| 86     | แสดงขั้นตอนการในการขึ้นรูปแม่พิมพ์ที่มีระบบหล่อเย็นแบบแผ่นกั้น                                         | 89   |

## สารบัญภาพ (ต่อ)

| ภาพที่            |                                                                | หน้า |
|-------------------|----------------------------------------------------------------|------|
| 87                | ผลการระบายความร้อนของแม่พิมพ์ที่มีระบบระบายความร้อนแบบชนิดผิว  | 91   |
| 88                | ผลการระบายความร้อนของแม่พิมพ์ที่มีระบบระบายความร้อนแบบแผ่นกั้น | 91   |
| <b>ภาพผนวกที่</b> |                                                                |      |
| ค1                | ภาพตัดผ่าแม่พิมพ์ตัวผู้ที่มีระบบระบายความร้อนแบบแผ่นกั้น       | 111  |
| ค2                | ภาพตัดผ่าแม่พิมพ์ตัวผู้ที่มีระบบระบายความร้อนแบบชนิดผิว        | 111  |

### คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

|      |   |                                           |
|------|---|-------------------------------------------|
| ASTM | = | American Society of Testing and Materials |
| AWS  | = | American Welding Society                  |
| CAD  | = | Computer Aided Design                     |
| CAE  | = | Computer Aided Engineering                |
| CAM  | = | Computer Aided Manufacturing              |
| DCEN | = | การต่อเชื่อมขั้วไฟให้ลวดเชื่อมเป็นลบ      |
| DCEP | = | การต่อขั้วไฟให้ลวดเชื่อมเป็นบวก           |
| FEA  | = | Finite Element Analysis                   |
| GMAW | = | Metal arc welding                         |
| LENS | = | Laser-engineered net shaping              |
| MAG  | = | Metal Active Gas                          |
| MIG  | = | Metal Inert Gas                           |
| SDM  | = | Shape Deposition Manufacturing            |
| SLA  | = | Stereo lithography apparatus              |
| SMAW | = | Shield Metal Arc Welding                  |
| UTM  | = | Universal Testing Machine                 |

## ระบบหล่อเย็นแม่พิมพ์แบบฉีดผิวโดยวิธีการเติมเนื้อโลหะ

### Conformal Mold – Cooling System using Metal Deposition Process

#### คำนำ

ปัจจุบันแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกมีการใช้อย่างแพร่หลายในวงการอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์พลาสติก หลักการพื้นฐานของการฉีดพลาสติกคือ เริ่มจากการหลอมเม็ดพลาสติกและฉีดเข้าสู่โพรงแม่พิมพ์ จากนั้นทำให้เย็นและปลดชิ้นงานออกจากเครื่องฉีดพลาสติก ขั้นตอนหลักของการฉีดพลาสติกประกอบด้วย การฉีด การหล่อเย็น และการปลดชิ้นงาน ต้นทุนหลักของกระบวนการหลักๆขึ้นอยู่กับเวลาที่ใช้ในวัฏจักรของการหล่อเย็น เนื่องจากอุตสาหกรรมในยุคปัจจุบัน เวลาและต้นทุนมีความสัมพันธ์กันอย่างมาก การใช้เวลาในการผลิตชิ้นงานมากก็ถือต้นทุนที่เพิ่มขึ้นนั่นเอง การลดเวลาที่ใช้ในการหล่อเย็นทำให้มีอัตราการผลิตเพิ่มขึ้นอย่างมากซึ่งจะส่งผลให้ต้นทุนลดลง

เวลาที่ใช้ในการหล่อเย็น ก็ เวลาที่ใช้ในการนำความร้อนออกจากพลาสติกจนกระทั่งเข้าสู่สภาวะคงสภาพได้ ฉะนั้นการออกแบบระบบหล่อเย็นจึงเป็นตัวทำให้เกิดความเหมาะสมของอัตราการถ่ายเทความร้อนระหว่างพลาสติกหลอมเหลวกับแม่พิมพ์ โดยทั่วไปแล้วแม่พิมพ์แบบดั้งเดิมจะใช้วิธีเจาะรูนำหล่อเย็นเป็นลักษณะภาพตรงภายในแม่พิมพ์ฝั่งตัวเมีย (Cavity) และตัวผู้ (Core) จากนั้นใช้น้ำหล่อเย็นหมุนเวียนในระบบด้วยปั๊มน้ำเพื่อให้มีการนำความร้อนออกจากพลาสติกเหลว ซึ่งการใช้วิธีในการสร้างรูนำหล่อเย็นแบบนี้ไม่สามารถสร้างท่อน้ำหล่อเย็นที่มีภาพทรงแบบ 3 มิติ แบบชิดไปกับผิวแม่พิมพ์ได้

ในปัจจุบันการใช้ Rapid Prototyping Technology ได้เข้ามาสู่อุตสาหกรรมแม่พิมพ์มากขึ้น เนื่องจากมีข้อจำกัดในการออกแบบแม่พิมพ์น้อยกว่าการขึ้นรูปแม่พิมพ์แบบดั้งเดิมมาก โดยถ้าเปรียบเทียบในด้านต้นทุน (Costs) เวลา (Times) กับความซับซ้อนของชิ้นงาน (Complexity) พบว่าในกรณีที่ชิ้นงานมีความซับซ้อนน้อย การสร้างชิ้นงานด้วย NC Milling จะถูกกว่าและใช้เวลาในการสร้างเร็วกว่า Rapid Prototyping Technology แต่ถ้าชิ้นงานเพิ่มความซับซ้อนมากขึ้น จนถึงจุดหนึ่ง จะพบว่า การใช้ NC Milling ต้องเสียค่าใช้จ่ายในเรื่องของ Tooling สูงมาก และเสียเวลามากในการ Machine ส่วนที่ซับซ้อน ขณะที่ Rapid Prototyping Technology ใช้เวลาในการสร้างเร็วกว่า

และประหยัดค่าใช้จ่ายมากกว่า เนื่องจากเสียค่าใช้จ่ายในเรื่อง Tooling น้อยหรืออาจไม่มีค่าใช้จ่ายเลย

งานวิจัยนี้มีเป้าหมายในการนำ Rapid Prototyping Technology มาประยุกต์ใช้ในการขึ้นรูปแม่พิมพ์ตัวผู้ที่มีระบบหล่อเย็นแบบชนิดผิวด้วย โดยวิธีการเดิมเนื้อโลหะที่ละชั้น ด้วยเครื่องเชื่อมซีเอ็นซี มิก/แม็ก (MIG/MAG CNC Welding Machine) โดยออกแบบให้มีครีบริบแรงที่ผนังด้านข้างและด้านบน ซึ่งได้มีการออกแบบรูปทรงของช่องหล่อเย็นให้มีภาพคล้ายกับผลิตภัณฑ์และมีความชนิดผิวของโพรงแม่พิมพ์มากที่สุดและใช้ Computer-Aided Engineering (CAE) ช่วยในการวิเคราะห์ในด้านความแข็งแรงของแม่พิมพ์ ซึ่งจะช่วยลดการเดิมเนื้อวัสดุที่เป็นลวดเชื่อมโลหะลงแต่ยังคงมีค่าความปลอดภัยที่เพียงพอ และจะทำการทดสอบเพื่อหาอัตราการหล่อเย็นของแม่พิมพ์เปรียบเทียบกับแม่พิมพ์ตัวผู้ที่มีลักษณะโพรงหล่อเย็นที่ขึ้นรูปโดยวิธีดั้งเดิม (Baffle) ว่ามีอัตราการหล่อเย็นแตกต่างกันอย่างไร

จุดเด่นของกรรมวิธี Rapid Tooling หรือ Rapid Manufacturing คือ สามารถผลิตแม่พิมพ์ที่ได้ในเวลาที่รวดเร็วและสามารถสร้างโพรงน้ำหล่อเย็นภายในที่ซับซ้อนกว่าการผลิตแม่พิมพ์ที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน ซึ่งจะช่วยให้สามารถผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆออกจำหน่ายได้ในเวลาที่รวดเร็วทันกับความต้องการของตลาด รวมถึงสามารถลดจำนวนผลิตภัณฑ์ที่เสียหายเนื่องจากข้อจำกัดในการสร้างโพรงแม่พิมพ์โดยวิธีแบบดั้งเดิมลงได้

## วัตถุประสงค์

1. ศึกษาเทคนิค วิธีการและหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการขึ้นรูปชิ้นงาน โดยการเดิมเนื้อวัสดุทีละชั้นด้วยเครื่องเชื่อมซีเอ็นซี มิก/แม็ก
2. ศึกษาและวิเคราะห์คุณสมบัติของวัสดุที่ได้จากการเชื่อมขึ้นรูป
3. สร้างแม่พิมพ์ตัวผู้ (Core Plate) ที่มีระบบหล่อเย็นแบบชนิดผิวโดยวิธีการเชื่อมขึ้นรูปทีละชั้นด้วยเครื่องเชื่อมซีเอ็นซี มิก/แม็ก
4. ศึกษาและเปรียบเทียบการระบายความร้อนของแม่พิมพ์ตัวผู้ (Core Plate) ที่มีระบบหล่อเย็นแบบชนิดผิว (Conformal) กับแบบแผ่นกั้น (Baffle)

## ขอบเขตการวิจัย

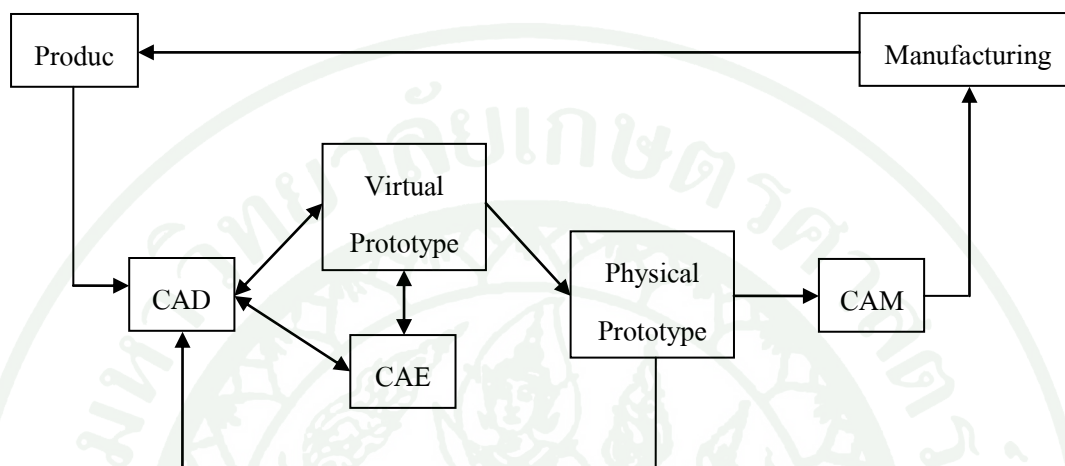
1. ทดสอบและวิเคราะห์คุณสมบัติทางกลของชิ้นงาน โดยทำการทดสอบความแข็งแรงแบบร็อกเวลล์ ทดสอบแรงดึงและทดสอบการดัดโค้ง
2. งานวิจัยนี้จะทำการจำลองการฉีดขึ้นงานพลาสติกด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยใช้พลาสติก Polypropylene ของบริษัท Shell
3. ออกแบบแม่พิมพ์ตัวผู้ที่มีระบบหล่อเย็นแบบชนิดผิว
4. ขึ้นรูปแม่พิมพ์ตัวผู้โดยใช้วิธีการเดิมเนื้อวัสดุทีละชั้น ด้วยเครื่องเชื่อมซีเอ็นซี มิก/แม็ก (MIG/MAG CNC Welding Machine) โดยใช้ลวดเชื่อม ER70S-6
5. ทดสอบการระบายความร้อนของแม่พิมพ์ตัวผู้ด้วยชุดทดสอบการระบายความร้อนของแม่พิมพ์ที่ทางผู้ทำการวิจัยสร้างขึ้น

### ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ความรู้ใหม่ที่ได้จากการศึกษาวิจัยการขึ้นรูปแม่พิมพ์ด้วยวิธีเติมเนื้อโลหะ
2. สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานทางด้านการผลิตหรือซ่อมแซมแม่พิมพ์
3. สามารถนำไปพัฒนากระบวนการผลิตแม่พิมพ์หรือเป็นแนวทางการผลิตโดยวิธีการอื่นที่ประสิทธิภาพมากขึ้น
4. สามารถลดระยะเวลาในการหล่อเย็นชิ้นงานและลดจำนวนชิ้นงานเสียในกระบวนการฉีดขึ้นรูป โดยใช้การขึ้นรูปแม่พิมพ์ที่มีระบบหล่อเย็นแบบฉีดผิวด้วยกระบวนการขึ้นรูปทีละชั้น
5. เป็นแนวทางสำหรับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องต่อไป

## การตรวจเอกสาร

### 1. หลักการออกแบบผลิตภัณฑ์



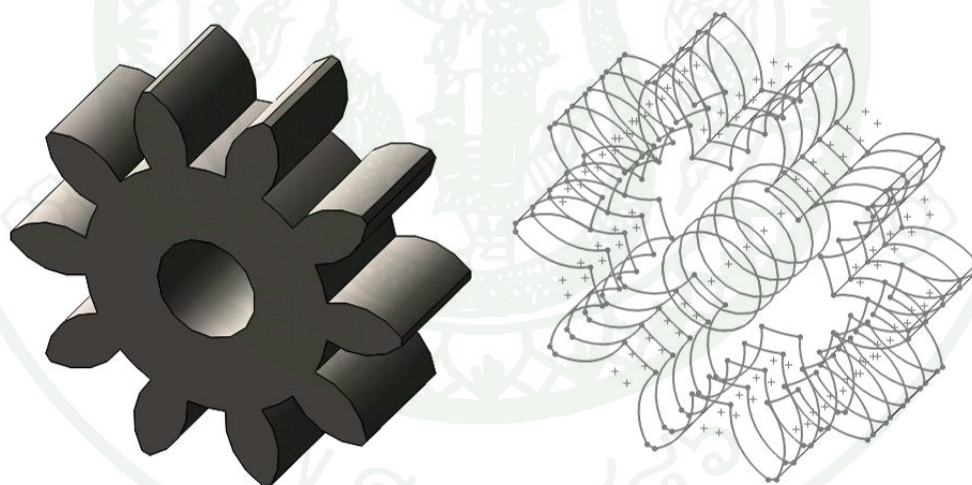
ภาพที่ 1 แสดงขั้นตอนการออกแบบผลิตภัณฑ์โดยใช้เทคโนโลยีสมัยใหม่

ปัจจุบันการออกแบบผลิตภัณฑ์ มีการนำเทคโนโลยีสมัยใหม่เข้ามาช่วยมากขึ้น เพื่อเพิ่มศักยภาพในการแข่งขันในตลาดอุตสาหกรรม ซึ่งมีสภาวะการแข่งขันสูงมาก โดยกระบวนการออกแบบผลิตภัณฑ์เริ่มจากความต้องการผลิตภัณฑ์ประเภทต่างๆ จากนั้นออกแบบผลิตภัณฑ์ด้วย CAD (Computer Aided Design) และตรวจสอบผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการออกแบบโดยการ Rendering หรือ Virtual Prototype หลังจากที่เราวิเคราะห์รูปร่างของผลิตภัณฑ์แล้ว ทำการวิเคราะห์คุณสมบัติต่างๆ ของผลิตภัณฑ์โดยใช้ CAE (Computer Aided Engineering) จะแสดงผลออกมาเป็นภาพกราฟิก เป็นระดับความเข้มของสีต่างๆ ถ้ามีตำแหน่งที่ต้องเปลี่ยนแปลงแก้ไขความผิดพลาดที่แสดงจากการวิเคราะห์โดย CAE จะนำกลับไปแก้ไขใน CAD ในรูปแบบที่ควรจะเป็น และทำการ Rendering และวิเคราะห์โดย CAE จนกว่าจะถูกต้อง จากนั้นส่งข้อมูลที่ได้จากการออกแบบไปทำชิ้นงานต้นแบบ (Physical Prototype) โดยใช้ Rapid Prototyping นำชิ้นงานต้นแบบที่ได้มาวิเคราะห์และตรวจสอบความถูกต้องจากการออกแบบและทดสอบการใช้งาน หากมีข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการออกแบบ จะถูกนำกลับไปแก้ไขใน CAD จนกว่าจะมั่นใจในความถูกต้องของผลิตภัณฑ์จากการออกแบบ จากนั้นทำการส่งข้อมูลไปยัง CAM (Computer Aided Manufacturing) เพื่อทำการผลิตและส่งเข้าสู่กระบวนการผลิต เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่ต้องการไปสู่มือของผู้บริโภคต่อไป

จะพบว่าในขั้นตอนของการสร้างชิ้นงานต้นแบบ (Physical Prototype) ในอดีตการสร้างชิ้นงานต้นแบบจะขึ้นรูปด้วยมือหรือเครื่องจักรธรรมดา เพื่อให้ได้ตามที่ออกแบบไว้ ขั้นตอนดังกล่าวเสียเวลาค่อนข้างมาก ในปัจจุบันจึงเริ่มมีการนำ Rapid Prototyping เข้ามาช่วยในขั้นตอนดังกล่าว ซึ่งลดเวลาในการออกแบบผลิตภัณฑ์ค่อนข้างมาก

## 2. ความหมายของ Rapid Prototyping Technology

Rapid Prototyping Technology (RPT) เป็นเทคโนโลยีใหม่ที่เกิดขึ้น ใช้ในการสร้างชิ้นงานต้นแบบ (Prototype) จากข้อมูลคอมพิวเตอร์กราฟิกโดยตรง ตั้งบนพื้นฐานของ Layer-by-Layer โดยใช้หลักการตัดแบ่งวัตถุ (Solid Model) จาก CAD ออกเป็นชั้นๆ ตามภาคตัดขวาง (Cross Section) และส่งข้อมูลภาคตัดขวางชั้นเล็กๆ ตามที่กำหนด ไปยังเครื่อง Rapid Prototyping เพื่อทำการขึ้นรูปชิ้นงานต้นแบบในลักษณะ Free Form Fabrication สามารถสร้างชิ้นงานที่ซับซ้อนได้ในไม่กี่ชั่วโมง แทนที่จะใช้เวลาเป็นวัน เป็นสัปดาห์ หรือเป็นเดือน ดังคำที่ว่า Rapid

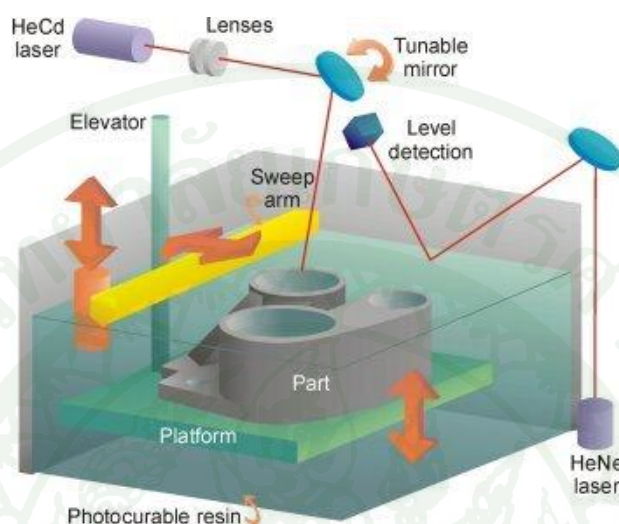


ภาพที่ 2 ตัวอย่างภาพเสมือนชิ้นงานรูปเฟืองโซลิดโมเดล (ภาพด้านซ้าย) และการตัดแบ่งชิ้นงานออกเป็นชั้นๆ ตามภาคตัดขวาง

## 3. การผลิตต้นแบบอย่างรวดเร็ว (Rapid Prototyping)

การผลิตต้นแบบอย่างรวดเร็ว (Rapid Prototyping) เกิดขึ้นในช่วงปี 1980 โดยหลักการของ Rapid Prototyping คือการสร้างชิ้นงานโดยการขึ้นรูปชิ้นงานต้นแบบจาก CAD Drawing ชิ้นงานจะ

ถูกสร้างทีละชั้นด้วยการสแกนเลเซอร์เพื่อให้เรซินแข็งตัว ชั้นตอนดังกล่าวข้างต้นจะถูกทำซ้ำไปเรื่อยๆ จนออกมาเป็นชิ้นงานที่เหมือนกับ CAD Drawing ซึ่งในปัจจุบันได้มีการใช้วิธีต่างๆ มากมาย และมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในงานระดับอุตสาหกรรม

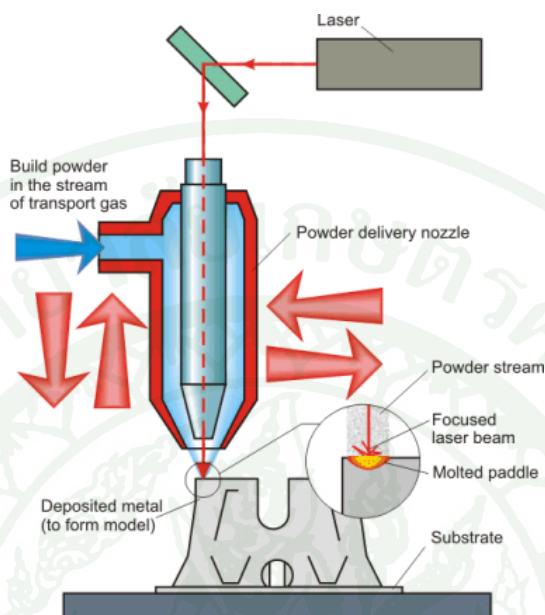


ภาพที่ 3 เครื่อง Stereo Lithography Apparatus (SLA)

เทคนิคต่างๆ ในการสร้างต้นแบบรวดเร็ว (Rapid Prototyping) เริ่มพัฒนาและใช้อย่างแพร่หลายในปี 1986 เนื่องจากความเติบโตทางอุตสาหกรรม (Jacobs, 1992) จึงได้มีการใช้เครื่อง Stereo Lithography Apparatus (SLA) โดยมีหลักการจากการนำข้อมูลของชิ้นงานที่เขียนจาก CAD Drawing และทำการตัด (Slicing) เป็นส่วนๆ และทำเป็นไฟล์ข้อมูลสกุล STL และสร้างชิ้นงานด้วยการสแกนเลเซอร์เพื่อให้เรซินแข็งตัวทีละชั้นตามข้อมูลจาก CAD Drawing ในการผลิตชิ้นงานขนาดใหญ่ มีความจำเป็นที่จะต้องใช้แม่พิมพ์ (Mould) (Koch and Mazumder, 1993)

เนื่องจากความต้องการใช้ชิ้นงานที่เป็นเหล็ก ชิ้นงานที่มีรูปทรงซับซ้อนและความแม่นยำมีเพิ่มขึ้น (Complexity and Accurate) มีเพิ่มขึ้น จึงเป็นที่มาของ Rapid Metal Forming (RMP) และต่อมาได้พัฒนาเป็น Laser-Engineered Net Shaping (LENS) ซึ่งเป็นกระบวนการขึ้นรูปโลหะด้วยเลเซอร์ให้มีขนาดใกล้เคียงกับชิ้นงานที่ออกแบบมากที่สุด (Near-Net-Shape) (Keicher et al., 1998) และในบางวัตถุประสงค์ของการผลิตมีการนำ Laser Cladding Technique มาใช้ ซึ่งวิธีการนี้เริ่มจากการเคลือบผิว (Surface Coating) ของชิ้นงานโลหะ เพื่อที่จะสร้างชิ้นงานโลหะโดยการบวนการเติมเนื้อวัสดุทีละชั้น (Layer Additive) (Kreute et al., 1995) กรรมวิธีที่กล่าวมาโดยส่วนมากจะมีการขึ้นรูปเหล็กที่เหมือนกัน ซึ่งในกระบวนการขึ้นรูปเหล็กด้วยเลเซอร์โดยการป้อนวัสดุที่เป็นเหล็ก ไม่ว่า

จะเป็นผงโลหะหรือลวดโลหะ และใช้เลเซอร์หลอมวัสดุที่นำมาป้อนให้กลายเป็นชั้นของเหลว โดยสร้างจากชั้นล่างสุดไปยังชั้นบนสุดจนออกมาเป็นชิ้นงานต้นแบบ

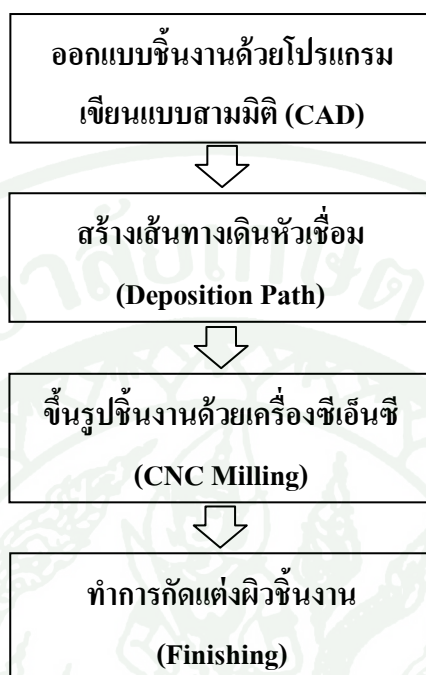


ภาพที่ 4 Laser – Engineered Net Shaping (LENS)

ต่อมามีการใช้วิธี Shape Deposition Manufacturing (SDM) ซึ่งพัฒนาจากกระบวนการที่กล่าวมา มีหลักการเหมือนกันคือ ขึ้นรูปโลหะจากผงหรือลวด แต่เนื่องจากในกระบวนการขึ้นรูปโลหะที่กล่าวมาทั้งหมดมีข้อเสียคือ ผิวที่ได้ยังไม่เรียบและขนาดรูปทรงยังไม่แม่นยำ จึงมีการเพิ่มกระบวนการเติมและการตัดออก (Additive and Subtractive Techniques) โดยที่มีการใช้เครื่องกัด CNC กัดชิ้นงานแต่ละชั้นให้ได้ขนาดตามแบบหลังจากกระบวนการเติมเนื้อวัสดุ (Paul et al., 2006)

ในปัจจุบันรูปแบบการผลิตมีการแข่งขันสูงในเรื่องของระยะเวลาในการผลิต กระบวนการใหม่ที่จะใช้ในการสร้างชิ้นงานหรือแม่พิมพ์นี้ เป็นกระบวนการสร้างแม่พิมพ์ด้วยการเติมเนื้อโลหะ โดยกระบวนการนี้สามารถที่จะผลิตชิ้นงานหรือแม่พิมพ์ได้โดยตรงจาก CAD Drawing เพื่อลดขั้นตอนในการผลิตแม่พิมพ์ได้หลายขั้นตอน ทำให้สามารถลดเวลาในการผลิตแม่พิมพ์ได้ และกระบวนการนี้สามารถสร้างแม่พิมพ์ที่มีรูปร่างซับซ้อนได้มากกว่าการสร้างแม่พิมพ์ด้วยวิธีการกัด ดังนั้นวิธีนี้จึงสามารถสร้างชิ้นงานหรือแม่พิมพ์ที่ใช้งานได้ทันที โดยได้มีนักวิจัยหลายกลุ่มได้ทำการวิจัยในประเด็นหลักๆ คือ การหาค่าที่เหมาะสมในการขึ้นรูปชิ้นงานที่มีขนาดใกล้เคียงกับ

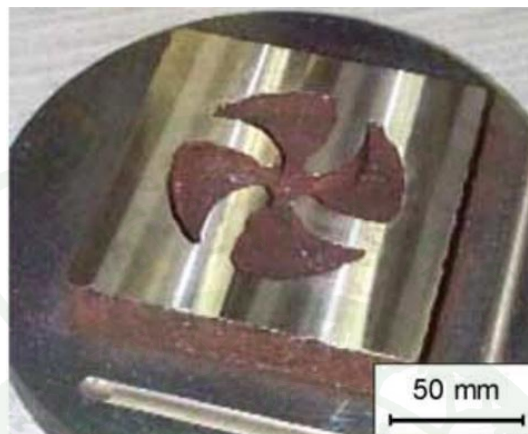
ชิ้นงานที่ต้องการ โดยแต่ละงานวิจัยมีหลักการและขั้นตอนสำคัญในการขึ้นรูปวัสดุเหมือนกันดังแสดงในภาพที่ 5



ภาพที่ 5 ขั้นตอนในการขึ้นรูปวัสดุ

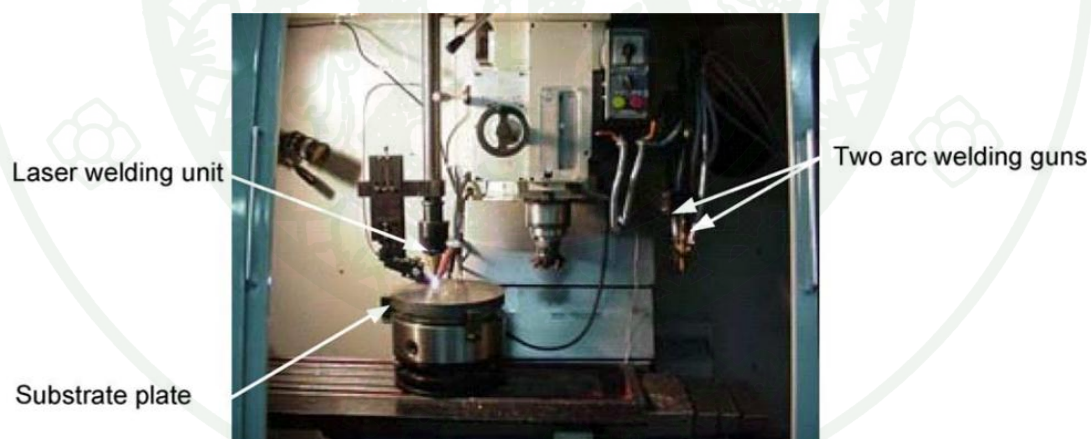
จากภาพที่ 5 กระบวนการเริ่มจากออกแบบชิ้นงานจากโปรแกรมเขียนแบบสามมิติ หลังจากนั้นนำแบบมาสร้างทางเดินในการเติมเนื้อวัสดุจากไฟล์ CAD ที่สร้างขึ้น แล้วส่งไฟล์ไปยังเครื่อง CNC ที่ติดเครื่องมือสำหรับการขึ้นรูปชิ้นงานโลหะ โดยส่วนที่มากนิยมใช้มีสองชนิดหลักๆ คือ เครื่องเชื่อมและเลเซอร์ โดยที่การขึ้นรูปด้วยเครื่องเชื่อมและเลเซอร์มีความแตกต่างในเรื่องความละเอียด ผิวของเนื้องาน ความเร็วในการเติมเนื้อวัสดุ และคุณสมบัติทางกลของชิ้นงาน ซึ่งการใช้เลเซอร์ ชิ้นงานที่ได้จะมีความละเอียด ลักษณะผิวและคุณสมบัติทางกลที่ดี ในการเติมเนื้อวัสดุสามารถใช้ได้ทั้งลวดโลหะ ผงโลหะ แต่การเติมเนื้อวัสดุด้วยเลเซอร์จะใช้ต้นทุนที่สูงมาก ในส่วนของเครื่องเชื่อมจะใช้ต้นทุนที่ไม่สูงนัก ที่นิยมใช้มีอยู่สองชนิดคือ การเชื่อมแบบ Gas Tungsten Arc Welding (GTAW) และการเชื่อมแบบ Gas Metal Arc Welding (GMAW) ซึ่งการเชื่อมในแบบ GMAW จะเป็นที่นิยมมากกว่า เนื่องจากเครื่องเชื่อมชนิดนี้เป็นระบบอัตโนมัติและใช้ต้นทุนไม่สูงนักในการเติมเนื้อวัสดุ ส่วน GTAW ต้องทำการติดตั้งตัวป้อนลวดเพิ่มเติมเพื่อทำให้เป็นระบบอัตโนมัติ หลังจากทำการขึ้นรูปชิ้นงานตามที่ต้องการแล้ว ชิ้นงานที่ได้จะยังมีผิวที่ไม่เรียบเกิดจากกระบวนการเติมเนื้อวัสดุด้วยเครื่องเชื่อม จึงจำเป็นต้องเพิ่มกระบวนการกัดแต่งผิวชิ้นงานเพื่อให้ได้ผิวที่เรียบและมีขนาดตามที่ต้องการ (คุณชุต และคณะ, 2550; Song et al., 1995;

Sreenathbabu and Karunakaran, 2006; Xinhong et al., 2009; Toshihide et al., 2009) ชิ้นงานที่ได้จากกระบวนการขึ้นรูปในแต่ละงานวิจัยแสดงในภาพที่ 6 - 12



ภาพที่ 6 แม่พิมพ์ Cavity Plate ที่ได้จาก 3-D Welding and Milling

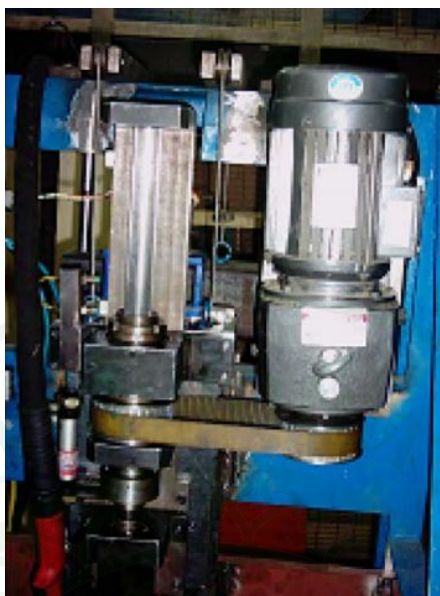
ที่มา: Song *et al.* (1995)



ภาพที่ 7 3-D Welding and Milling Machine

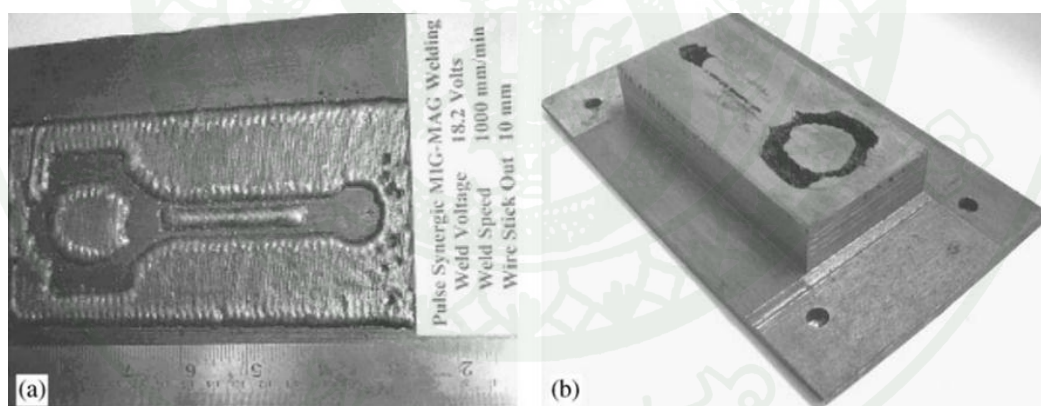
ที่มา: Song *et al.* (1995)

ภาพที่ 6 แสดงแม่พิมพ์ส่วน Cavity Plate ที่ทำการขึ้นรูปด้วยกระบวนการเติมเนื้อวัสดุ โดยใช้เครื่องเชื่อมแบบ GMAW ซึ่งนำมาติดกับเครื่องกัดแบบสามแกน และใช้ลวดเชื่อมชนิด ER70S-6 ในการเติมเนื้อวัสดุ



ภาพที่ 8 HLM Machine

ที่มา: Streenathbabu and Karunakaran (2006)



ภาพที่ 9 (a) ชิ้นงานที่ได้จากการเชื่อมเนื้อวัสดุ (b) ชิ้นงานหลังผ่านกระบวนการกัดแต่งผิว

ที่มา: Streenathbabu and Karunakaran (2006)

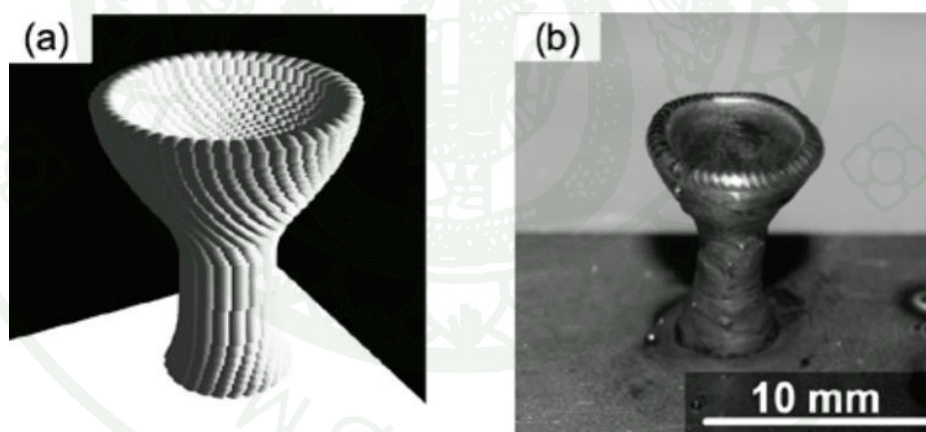
จากภาพที่ 9 แสดงชิ้นงานที่ทำการขึ้นรูปด้วยกระบวนการเชื่อมเนื้อวัสดุโดยใช้เครื่องเชื่อมแบบ GMAW ซึ่งนำมาติดกับเครื่องเชื่อมเนื้อวัสดุแบบสามแกนที่สร้างขึ้น และใช้ลวดเชื่อมชนิด ER70S-6 ด้วยอัตราส่วนผสมระหว่างก๊าซคลูม  $\text{CO}_2$  : Ar คือ 18 : 82



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

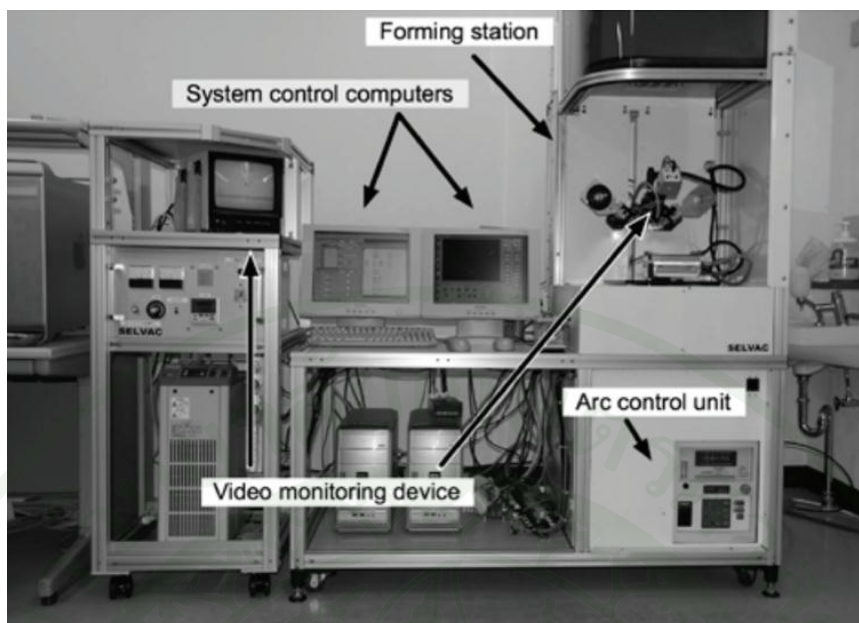
ที่มา: Xinhong *et al.* (2009)

จากภาพที่ 10 แสดงชิ้นงานที่ทำการขึ้นรูปด้วยกระบวนการเติมเนื้อวัสดุ โดยเครื่องเชื่อมแบบ Plasma ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับ GTAW นำมาติดกับเครื่องกัดแบบสามแกน และใช้ผงโลหะในการเติมเนื้อวัสดุ



ภาพที่ 11 (a) ชิ้นงานใน 3D Computer Graphic (b) ชิ้นงานที่ได้จากการขึ้นรูป

ที่มา: Toshihide *et al.* (2009)



ภาพที่ 12 เครื่อง 3D Micro Welding

ที่มา: Toshihide *et al.* (2009)

จากภาพที่ 11 แสดงชิ้นงานที่ทำการขึ้นรูปด้วยกระบวนการเติมเนื้อวัสดุ โดยใช้เครื่องเชื่อมแบบ Micro TIG ดังภาพที่ 12 ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับ GTAW แต่ขนาดของหัวเชื่อมและลวดเชื่อมเล็กกว่า โดยนำมาติดกับแขนกลที่เคลื่อนที่ได้สามแกนและเพิ่มระบบป้อนลวดอัตโนมัติ เหมาะสำหรับชิ้นงานขนาดเล็ก

#### 4. กระบวนการผลิตชิ้นงานต้นแบบด้วย Rapid Prototyping Technology

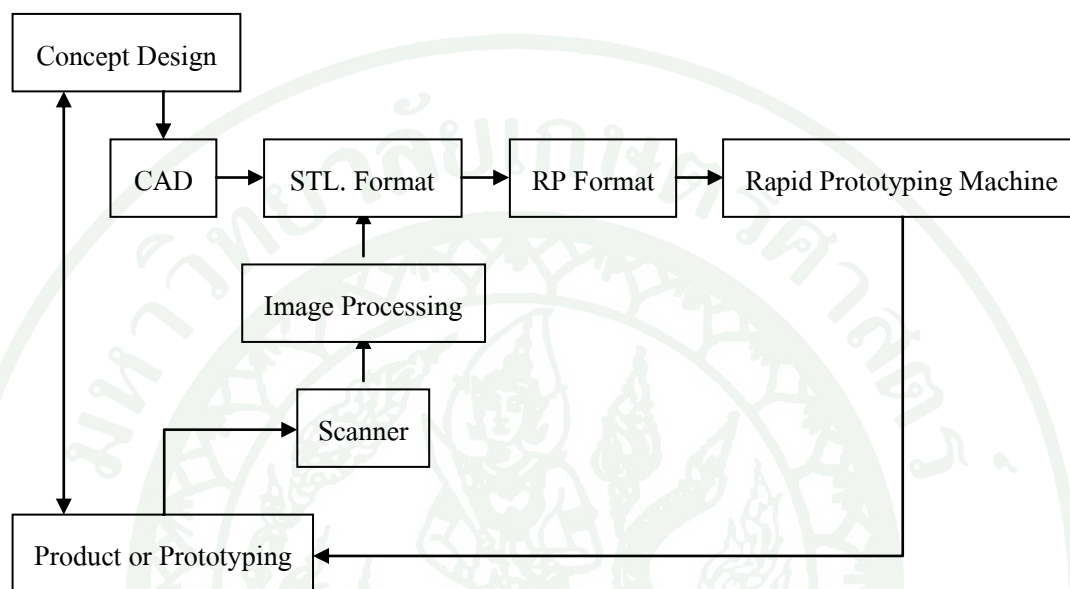
กระบวนการในการผลิตชิ้นงานต้นแบบ สามารถแบ่งได้ 2 ลักษณะ ได้แก่

##### 4.1 Forward Engineering

เป็นการสร้างชิ้นงานต้นแบบจากการออกแบบด้วย CAD และส่งถ่ายข้อมูลจาก CAD ให้อยู่ในรูปแบบของ STL Files และเปิดข้อมูล STL ด้วยซอฟต์แวร์ของ Rapid Prototyping แต่ละแบบและทำการตัดแบ่งวัตถุออกเป็นชั้นๆ และสร้างทางเดินของ Rapid Prototyping โดยจัดเก็บใน

รูปแบบของ Rapid Prototyping แต่ละแบบ จากนั้นทำการส่งข้อมูลเข้าสู่ Rapid Prototyping Machine เพื่อขึ้นรูปชิ้นงานได้เป็นชิ้นงานต้นแบบต่อไป

#### FORWARD



#### REVERSE

ภาพที่ 13 แสดงแผนภูมิกระบวนการผลิตด้วย Rapid Prototyping

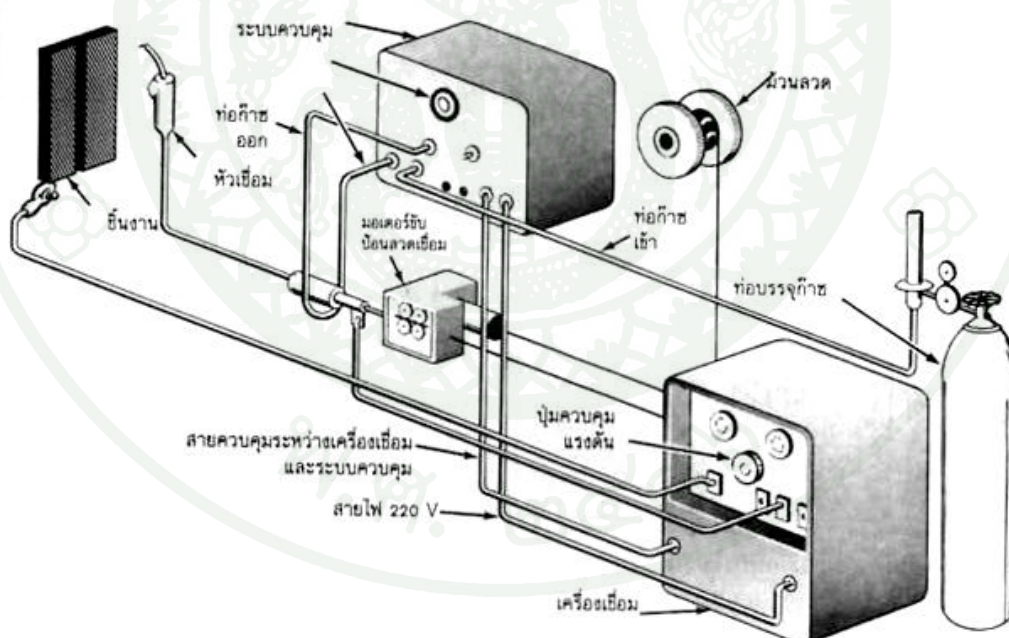
#### 4.2 Reverse Engineering

เป็นการสร้างชิ้นงานต้นแบบในทางกลับกัน โดยจำเป็นต้องออกแบบด้วย CAD แต่นำชิ้นงานที่ต้องการมาทำการ SCAN โดยใช้เครื่อง CT-Scanner (Computer-Tomography Scanner), MRI (Magnetic Resonance Image), Laser Scan, หรือ CMM (Coordinate Measurement Machine) เป็นต้น นำข้อมูลที่ได้จากการ SCAN เข้าสู่ Image Processing Software จะทำการคำนวณข้อมูลดังกล่าวให้เป็นรูปชิ้นงานในรูปของโซลิดโมเดล และส่งถ่ายข้อมูลดังกล่าวให้อยู่ในรูปแบบของ STL Files และเปิดข้อมูล STL ด้วยซอฟต์แวร์ของ Rapid Prototyping แต่ละแบบและทำการตัดแบ่งวัตถุออกเป็นชิ้นๆ และสร้างทางเดินของ Rapid Prototyping โดยจัดเก็บในรูปแบบของ Rapid Prototyping แต่ละแบบ จากนั้นทำการส่งข้อมูลเข้าสู่ Rapid Prototyping Machine เพื่อขึ้นรูปชิ้นงานได้เป็นชิ้นงานต้นแบบต่อไป

## 2. ทฤษฎีพื้นฐานการเชื่อมอาร์คแบบใช้ก๊าซปกคลุม

มานะศิษฐ์, (2542) การเชื่อมภายใต้ก๊าซปกคลุมหรือการเชื่อม MIG/MAG (Metal Inert Gas/Metal Active Gas) เป็นกระบวนการเชื่อมที่นิยมกันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน บางครั้งสามารถนำมาทดแทนการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ที่สามารถเชื่อมโลหะต่างๆ ได้หลายชนิด ขบวนการเชื่อม MIG/MAG ที่ได้พัฒนาไปอย่างไม่หยุดยั้ง ทำให้สามารถเชื่อมได้ทั้งชนิดที่ควบคุมการเชื่อมด้วยมือและด้วยระบบอัตโนมัติ

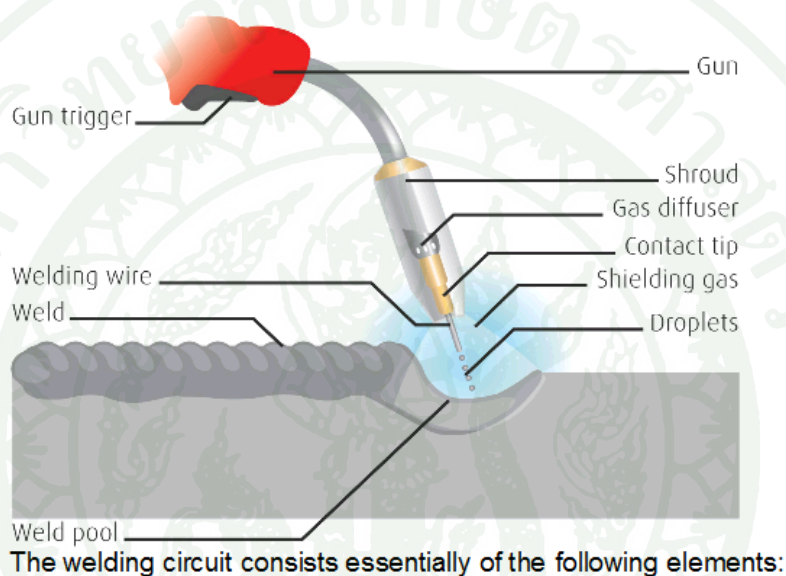
การเชื่อม MIG/MAG เป็นขบวนการเชื่อมที่ได้จากความร้อนจากการอาร์คระหว่างลวดเชื่อม (Consumable Electrode) กับชิ้นงาน สำหรับลวดเชื่อมที่ใช้เป็นลวดเชื่อมเปลือยแข็งที่ส่งป้อนอย่างต่อเนื่องไปยังบริเวณอาร์คและทำหน้าที่เป็นโลหะเติมลงไปยังบ่อหลอมละลาย บริเวณบ่อหลอมละลายจะถูกปกคลุมไว้ด้วยก๊าซปกคลุม ไม่ให้เกิดการรวมตัวกับอากาศ วิธีการเชื่อมอาจใช้วิธีอัตโนมัติหรือกึ่งอัตโนมัติ แต่วิธีกึ่งอัตโนมัติเป็นวิธีที่ใช้กันมากที่สุด



ภาพที่ 14 แสดงอุปกรณ์เชื่อมมิก

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

ชิ้นงาน ลวดเชื่อมจะถูกส่งป้อนอย่างต่อเนื่อง ซึ่งควบคุมโดยระบบควบคุมการป้อนลวดเชื่อม (Wire Speed Control) และเป็นตัวเติมโลหะไปยังบ่อหลอมละลายกลายเป็นแนวเชื่อม บริเวณอาร์คซึ่งมีบ่อหลอมละลายจะถูกปกคลุมด้วยก๊าซปกคลุม เพื่อป้องกันก๊าซจากบรรยากาศมารวมตัวกับน้ำโลหะ แนวเชื่อม ก๊าซที่ใช้ปกคลุมอาจเป็นก๊าซเฉื่อยบริสุทธิ์ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์หรือก๊าซผสม ก๊าซปกคลุมที่เป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์หรือก๊าซผสมคาร์บอนไดออกไซด์ เรียกว่ากระบวนการเชื่อมแบบ MIG (Metal Inert Gas) ดังแสดงในภาพที่ 15



ภาพที่ 15 การเชื่อมมิก (MIG Welding)

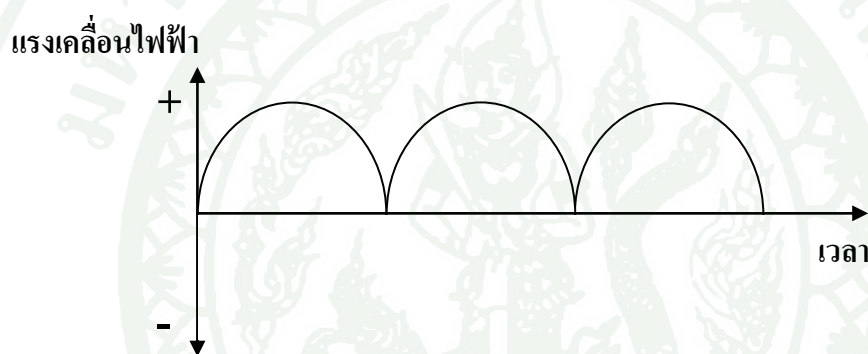
## 2.1 เครื่องมือที่ใช้ในการเชื่อม MIG/MAG

การเชื่อม MIG/MAG เป็นการเชื่อมแบบกึ่งอัตโนมัติ นิยมใช้มากในอุตสาหกรรมต่างๆ ไป ซึ่งมีเครื่องมือและอุปกรณ์สำคัญประกอบด้วย

2.1.1 เครื่องเชื่อม (Welding Machine) สำหรับการเชื่อมมิกจะเป็นเครื่องเชื่อมไฟฟ้า กระแสตรงชนิดแรงเคลื่อนคงที่ (Constant Voltage) ต่อเป็นกระแสไฟตรงขั้วบวก (DCRP) ซึ่งจะทำให้การหลอมละลายลึก (Deep Penetration) และได้แนวเชื่อมสะอาด เครื่องเชื่อมมีใช้ทั้งแบบหม้อแปลงเรียงกระแส (Transformer Rectifier) และแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ (Motor Generator) การเชื่อมมิกซึ่งส่งถ่านน้ำโลหะแบบพ่น ขณะเกิดการลัดวงจร กระแสไฟฟ้าเชื่อมจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนเกิดแรงดันการอาร์คอย่างรุนแรง ซึ่งจะมีผลต่อเครื่องเชื่อม เป็นเหตุให้เครื่อง

เชื่อมเสียหายได้และทำให้เกิดการกระเด็นของเม็ดโลหะไปเกาะติดขอบแนวเชื่อมจำนวนมาก วิธีแก้จึงต้องมีอินดักแตนซ์ (Inductance) มาต่ออนุกรมเข้ากับเครื่องเชื่อม เพื่อควบคุมปริมาณและอัตรา การเพิ่มกระแสไฟเชื่อมให้เหมาะสม ทำให้การอาร์คเรียบสม่ำเสมอและแนวเชื่อมสมบูรณ์ขึ้น ลดการกระเด็นของเม็ดโลหะเกาะติดข้างแนวเชื่อม

กระแสที่ใช้ในการเชื่อมมี 2 ชนิด คือ กระแสไฟตรง (DC) หมายถึง กระแสที่มีอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ในทิศทางตามยาวของตัวนำในทิศทางเดียวเท่านั้น การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนเหมือนกับการเคลื่อนที่ของน้ำประปาในท่อ กระแสไฟตรงจะไหลจากขั้วหนึ่งไปตลอดโดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงขั้ว



ภาพที่ 16 แสดงลักษณะของคลื่นกระแสไฟตรงที่ได้จากเครื่องเรียงกระแส

การแบ่งชนิดของเครื่องเชื่อมไฟฟ้าตามลักษณะการจ่ายพลังงานสามารถแบ่งได้เป็นสองชนิดคือ แบบกระแสคงที่ (Constant Current) คือ เป็นลักษณะของเครื่องเชื่อมซึ่งเมื่อเครื่องเชื่อมจ่ายพลังงานออกมาแล้วและเริ่มเชื่อม ถ้าปรับค่ากระแสไฟสูงขึ้นมากเท่าไร ค่าแรงเคลื่อนจะลดลงมาเท่านั้น การเชื่อมที่ต้องการลักษณะของการจ่ายพลังงานแบบนี้ได้แก่การเชื่อมแบบ CAW, SMAW, TIG, SW เป็นต้น และแบบแรงเคลื่อนคงที่ (Constant Voltage) คือ เป็นลักษณะของเครื่องเชื่อม ซึ่งเมื่อเครื่องจ่ายพลังงานออกมาแล้วและเริ่มเชื่อมเมื่อกระแสเปลี่ยนแปลงไป แรงเคลื่อนคงที่จะเปลี่ยนแปลงไปน้อยลงมาก หรือแรงเคลื่อนคงที่จะไม่เปลี่ยนแปลงตามขนาดของกระแสเชื่อมที่ต้องการ การจ่ายพลังงานแบบนี้ ได้แก่ MIG, MAW, SAW ที่ใช้ลวดเชื่อมเล็ก เครื่องเชื่อมแบบนี้มักจะผลิตออกมาเฉพาะกระแสตรง ปรับแรงเคลื่อนไฟฟ้าให้ลดต่ำจาก 220 โวลต์ ที่ใช้ตามบ้านทั่วไปลงโดยไม่ทำให้เกิดอันตรายต่อช่างเชื่อมประมาณ 40-80 โวลต์ แต่ต้องเหมาะสมเพียงพอที่จะเริ่มสร้างการอาร์ค

สำหรับการต่อขั้วการเชื่อมด้วยกระแสตรง สามารถต่อได้ในสองวิธีคือ การต่อเชื่อมขั้วไฟให้ลวดเชื่อมเป็นลบ (Direct Current Electrode Negative) มีสัญลักษณ์คือ DCEN การต่อขั้วแบบนี้จะมีผลคือ ทำให้ความร้อนที่เกิดขึ้นที่ลวดเชื่อมจะน้อยกว่าชิ้นงาน เหมาะสำหรับการเชื่อมงานที่มีความหนาและต้องการการละลายลึกสูง ในการต่ออีกวิธีเป็นการต่อขั้วไฟให้ลวดเชื่อมเป็นลวด (Direct Current Electrode Positive) มีสัญลักษณ์คือ DCEP การต่อขั้วแบบนี้จะมีผลคือ ทำให้ความร้อนที่เกิดขึ้นที่ลวดเชื่อมประมาณ 70 % และชิ้นงานประมาณ 30 % ความร้อนที่ลวดเชื่อมจะมากกว่าชิ้นงาน เหมาะสำหรับการเชื่อมงานที่ชิ้นงานบางและการละลายลึกลด

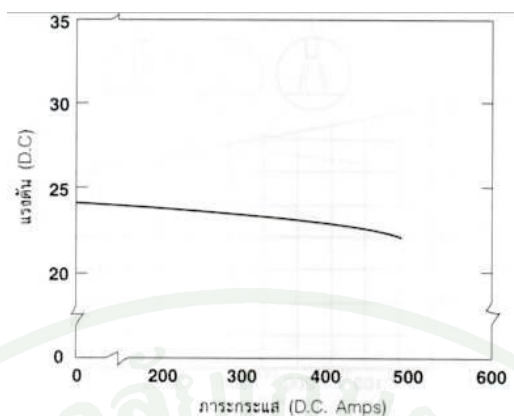
การเชื่อมอาร์คโลหะก๊าซคลุมมีลักษณะวงจรการเชื่อมประกอบด้วยระบบป้อนลวดเชื่อม (Wire Feeder System) จะเป็นตัวควบคุมการป้อนลวดเชื่อม เครื่องเชื่อมที่ใช้เป็นชนิดแรงดันคงที่ (CV) กระแสเชื่อม การไหลของก๊าซคลุมและน้ำหล่อเย็น ส่วนหัวเชื่อมจะทำหน้าที่ให้ลวดเชื่อมและก๊าซคลุมไหลผ่านออกมาสู่พื้นที่อาร์ค กระบวนการเชื่อมนี้จะใช้ไฟกระแสตรง ส่วนกระแสกลับใช้ไม่ได้และกระแสตรงที่ให้ประสิทธิภาพในการเชื่อมสูงที่สุดคือ กระแสตรงกลับขั้ว (Direct Current Reverse Polarity, DCRP) โดยลวดเชื่อมจะเป็นขั้วบวก (DCEP) ความร้อนที่ได้รับจากการอาร์คจะหนาแน่นที่บ่อหลอมเหลวจึงเกิดการซึมลึกมาก ผิวงานสะอาดเหมาะสมกับงานเชื่อมที่มีออกไซด์บนผิวงานหนา (Heavy Surface Oxides) โดยที่ค่าของแรงดันกระแสของเครื่องเชื่อมแสดงในภาพที่ 17

คุณสมบัติเฉพาะสำหรับเครื่องเชื่อมแรงดันคงที่มี 3 ประการ คือ

- การไหลของกระแสเชื่อมไปสู่งานจะได้รับการปรับอย่างอัตโนมัติให้เหมาะกับอัตราป้อนลวดเชื่อม

- อัตราเร็วป้อนลวดเชื่อมคงที่

- การเริ่มอาร์คอย่างทันที จะขจัดจุดเบี่ยงเบนที่จุดเริ่มต้นของรอยเชื่อม เนื่องจากลวดเชื่อมหลอมเหลวทันที โดยกระแสจำนวนมากจะป้องกันไม่ให้ลวดเชื่อมติดชิ้นงาน ขณะเดียวกันกระแสก็จะกลับคืนสู่ค่าเดิมได้เร็ว ช่วยป้องกันการหลอมย้อนของลวดเชื่อม

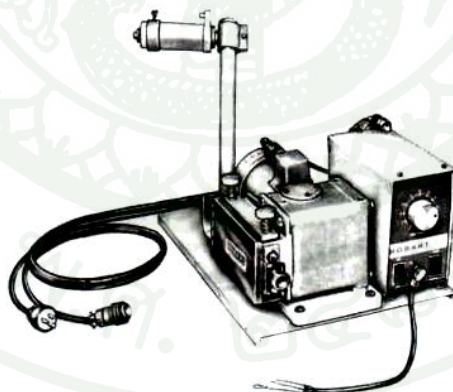


ภาพที่ 17 เส้นโค้งแรงดันและกระแสของเครื่องเชื่อมชนิดแรงดันคงที่กระแสตรง

ที่มา: มานะสิทธิ์ (2542)

### 2.1.2 ระบบป้อนลวด (Wire – Feed System) มีส่วนประกอบ ดังนี้

ที่ใส่ม้วนลวดเชื่อมและชุดเบรก, มอเตอร์ป้อนลวดเชื่อม, ล้อคัดลวดให้ตรง, ล้อป้อนลวดเชื่อม

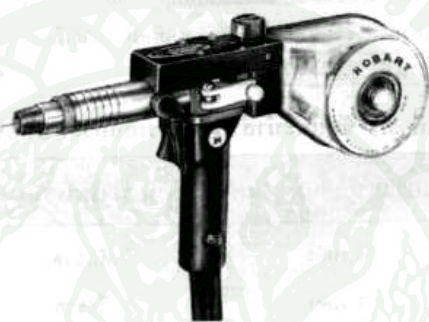


ภาพที่ 18 ชุดป้อนลวดด้วยวิธีดันลวดพร้อมที่ใส่ม้วนลวด

การป้อนลวดเชื่อม MIG/MAG ทั่วไปจะใช้แบบดัน โดยมีชุดเฟืองซึ่งอาจเป็นแบบ 2 ตัวหรือ 4 ตัวที่ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ ทำหน้าที่ดึงลวดออกจากล้อพร้อมทั้งดันลวดเชื่อม สำหรับ

ความยาวของสายเชื่อมที่ใช้กับลวดเชื่อมเหล็กจะยาวไม่เกิน 10 ฟุต ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของลวดเชื่อมที่สามารถทนต่อแรงดันโดยไม่โค้งงอ ดังแสดงในภาพที่ 18

การป้อนลวดแบบดึงเป็นการป้อนลวดโดยใช้หัวเชื่อมที่มีชุดป้อนลวดเชื่อมพร้อมมอเตอร์และล้อลวดเชื่อมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางนอก 4 นิ้ว ประกอบอยู่พร้อมภายในหัวเชื่อม เหมาะกับการป้อนลวดเชื่อมชนิดแข็งและยังเหมาะกับการเชื่อมงานที่มีเนื้อที่สำหรับการเชื่อมจำกัด ดังแสดงในภาพที่ 19



ภาพที่ 19 ชุดป้อนลวดแบบดึงลวด

การป้อนลวดแบบดันและดึง เหมาะสำหรับลวดเชื่อมที่มีความแข็งแรงต่ำ โดยระบบป้อนลวดเชื่อมแบบดัน จะมีการต่ออุปกรณ์ไปควบคุมความเร็วของตัวป้อนลวดแบบดึงที่ติดตั้งอยู่อีกด้านหนึ่งใกล้กับล้อลวดเชื่อม แต่ความเร็วของตัวป้อนลวดเชื่อมทั้งสองนี้ต้องสัมพันธ์กัน โดยใช้หลักการของแรงดึงในเส้นลวด ดังแสดงในภาพที่ 20

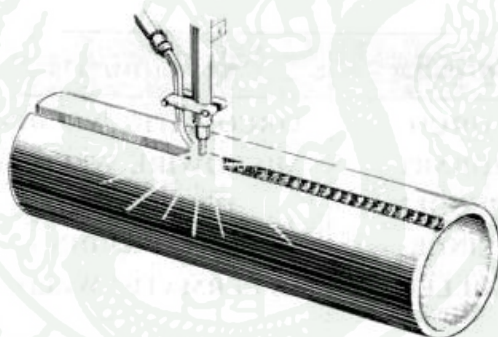


ภาพที่ 20 ระบบการป้อนลวดแบบดัน-ดึง ใช้กับการเชื่อมที่มีระยะห่างจากชุดป้อนลวดมากๆ

การเชื่อมด้วยวิธีกึ่งอัตโนมัติ (Welding Gun and Cable Assembly) และการเชื่อมด้วยวิธีอัตโนมัติหรือทอร์ชเชื่อม (Welding Torch) เช่นการเชื่อมด้วย Robot ดังแสดงในภาพที่ 21 และภาพที่ 22



ภาพที่ 21 การเชื่อมกึ่งอัตโนมัติ

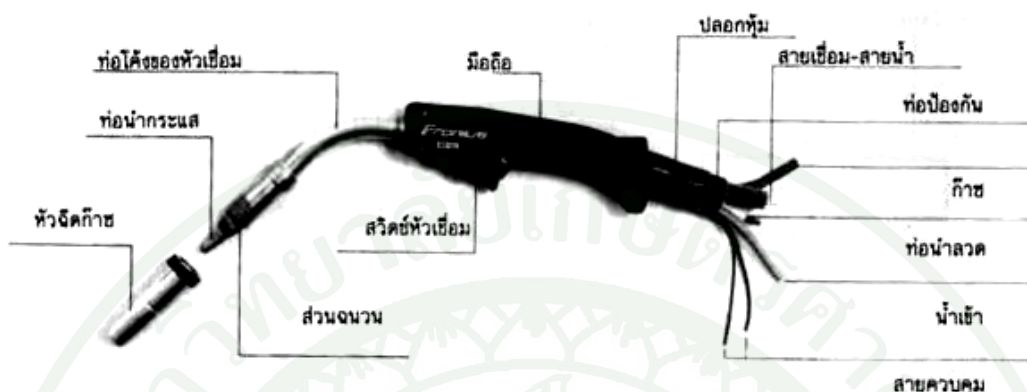


ภาพที่ 22 การเชื่อมอัตโนมัติ

2.1.3 หัวเชื่อม มีหน้าที่ส่งก๊าซคลุมกระแสเชื่อมและนำลวดเชื่อมเข้าสู่ท่อนำลวดไปยังพื้นที่ที่จะเชื่อม สายเชื่อมและสายน้ำ จะประกอบด้วย

2.1.3.1 ท่อนำลวด ซึ่งทำจากลวดสปริงขดเป็นท่อ ใช้เป็นทางเดินของลวดเชื่อม ขาวตลอดอยู่ในสายเชื่อม สามารถอ่อนไปมาได้โดยไม่หดรัดลวดเชื่อม ซึ่งเคลื่อนที่อยู่ภายใน แม้สายเชื่อมจะ โค้งงอได้มาก แต่ในขณะที่ทำงานจะทำให้ลวดเชื่อมเคลื่อนที่ผ่านไปได้อย่างราบรื่น การเชื่อมอาจสะดุดลงเพราะลวดเชื่อมผ่านไม่สะดวก ดังนั้นขณะปฏิบัติการเชื่อม ควรปล่อยสายเชื่อมให้มีส่วนโค้งงอน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ ท่อนำลวดจะต่อโดยตรงระหว่างหัวเชื่อมและล่อจับ

ลวดในชุดป้อนลวด ลวดเชื่อมจะถูกป้อนผ่านท่อนี้โดยตรงไปยังหัวเชื่อมและท่อนำกระแสต่อไป  
ดังแสดงในภาพที่ 23



ภาพที่ 23 ส่วนประกอบของสายเชื่อมและสายน้ำทั้งชนิดระบายความร้อนด้วยอากาศและน้ำ

2.1.3.2 สายส่งก๊าซ เป็นท่อส่งสายยางทำหน้าที่ส่งก๊าซไปยังหัวฉีดในหัวเชื่อมแบบคอห่านขนาดเล็กอาจใช้การส่งก๊าซไปตามท่อนำลวด ถ้าเป็นหัวเชื่อมขนาดใหญ่ใช้กระแสสูงถึง 500 แอมแปร์ จะต่อสายส่งก๊าซจากชุดป้อนลวดไปยังหัวเชื่อมโดยตรงและสายส่งก๊าซจะถูกหุ้มด้วยปลอกหนังอีกชั้นหนึ่ง เพื่อป้องกันประกายโลหะและการเสียดสีกับพื้นโรงงาน

2.1.3.3 สายน้ำหล่อเย็น มีอยู่ด้วยกันสองสายคือ สายน้ำเข้าและสายน้ำออก จะเป็นท่อสายยางที่มีน้ำหนักเบา อายุการใช้งานยาวนาน ปรกติแล้วสายน้ำหล่อเย็นจะถูกหุ้มรวมอยู่กับสายอื่นๆ ภายในปลอกหนัง เพื่อป้องกันประกายโลหะที่จะทำให้สายยางเกิดความเสียหายได้ สายน้ำหล่อเย็นนี้จะใช้เฉพาะหัวเชื่อมขนาดใหญ่ที่มีช่วงกระแสเชื่อมสูงราว 80-500 แอมแปร์ ส่วนหัวเชื่อมขนาดเล็ก 80-350 แอมแปร์ ไม่นิยมใช้หัวเชื่อมแบบหล่อเย็นด้วยน้ำ

2.1.3.4 สายไฟเชื่อม สายไฟเชื่อมและขั้วต่อมีหน้าที่ต่อหัวเชื่อมเข้ากับเครื่องเชื่อมและงานเชื่อม สายไฟเชื่อมจะทำจากทองแดงหรืออลูมิเนียม แต่ทองแดงนิยมใช้กันมากกว่า สายไฟเชื่อมหนึ่งเส้นประกอบด้วยเส้นลวดทองแดงขนาดเล็กรวมกันประมาณ 100 เส้น หุ้มฉนวนด้วยยางธรรมชาติหรือสังเคราะห์ สายเชื่อมที่ต่อกับเครื่องเชื่อมและหัวเชื่อมจะเรียกว่า Electrode Lead ในการเชื่อมกึ่งอัตโนมัติสายไฟเชื่อมจะเป็นส่วนหนึ่งของสายเชื่อมและสายน้ำ เก็บอยู่รวมกับสายก๊าซและท่อนำลวดสำหรับการเชื่อมด้วยเครื่องกลหรือการเชื่อมอัตโนมัติสายเชื่อมจะต่อแยก

ต่างหาก ส่วนสายเชื่อมที่ต่ออยู่กับงานเชื่อมและเครื่องเชื่อมเรียกว่า Work Lead สายเชื่อมนี้ต่ออยู่กับ แคลมป์บีบหรือโบลท์

2.1.3.5 ขนาดของสายเชื่อมจะขึ้นอยู่กับขนาดกำลังด้านนอก (Output Capacity) ของเครื่องเชื่อม วัฏจักรการทำงานของเครื่องเชื่อมและระยะห่างระหว่างเครื่องเชื่อมกับงานเชื่อม ขนาดสายเชื่อมเล็กสุดจะมีตั้งแต่ AWG No.8 ถึง AWG No.40 ซึ่งรับพิกัดกระแสได้เกิน 75 แอมแปร์ขึ้นไป

2.1.4 ลวดเชื่อม (Wire Electrode) เป็นหัวใจสำคัญของการเชื่อม MIG/MAG ดังนั้นจึงต้องรู้จักเลือกใช้ลวดเชื่อมให้ถูกต้อง ลวดเชื่อมจะหลอมผ่านเปลวอาร์คไปยังบ่อหลอมละลายเกิดเป็นแนวเชื่อม ซึ่งลวดเชื่อมที่ผ่านเปลวอาร์คนั้น จะทำปฏิกิริยากับก๊าซปกคลุม จึงทำให้ส่วนผสมลวดเชื่อมเปลี่ยนไป ขนาดของลวดเชื่อมที่ใช้ขึ้นอยู่กับวิธีเชื่อมและท่าเชื่อมเป็นสำคัญ ลวดเชื่อมทั้งหมดจะมีลักษณะแข็งเปื่อย เว้นแต่ลวดเชื่อมชนิดเหล็กคาร์บอนจะเคลือบผิวด้วยทองแดงเพื่อป้องกันสนิม ลวดเชื่อมสำหรับการเชื่อมแบบ GMAW นี้ จะเตรียมไว้ในล้อยี่สามเข้ากับเครื่องได้พอดี ในการเลือกใช้ลวดเชื่อมต้องพิจารณาองค์ประกอบ คือ

2.1.4.1 ส่วนผสมทางเคมีของโลหะชิ้นงาน ต้องเหมาะสมกับส่วนผสมทางเคมีของโลหะลวดเชื่อมและเข้ากันได้กับส่วนผสมของโลหะชิ้นงาน เฉพาะอย่างยิ่งงานที่ต้องการความต้านทานต่อการกัดกร่อน มีผิวที่เหมือนเดิม ความต้านทานต่อการขีด การนำความร้อนหรือไฟฟ้า วัสดุเชื่อมที่ไม่ใช่เหล็ก เหล็กกล้าไร้สนิมและเหล็กกล้าเจืออื่นๆ ควรเลือกส่วนผสมทางเคมีที่เข้ากันได้

2.1.4.2 คุณสมบัติทางกลของโลหะชิ้นงาน โดยลวดเชื่อมที่เลือกใช้ต้องมีความต้านทานแรงดึงครากที่เข้ากันได้กับโลหะชิ้นงาน ซึ่งเป็นข้อสำคัญที่สุดของการเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เหล็กกล้าเจือต่ำ แม้กระทั่งอลูมิเนียมหรือแมกนีเซียม

2.1.4.3 ชนิดของก๊าซปกคลุม ในการใช้ก๊าซคลุมเพียงชนิดเดียว ไม่สามารถทำให้เกิดการถ่ายโอนโลหะหรือใช้กับโลหะได้ทุกชนิด บางครั้งต้องการก๊าซผสมเพื่อให้คุณภาพตะเข็บเชื่อมดีขึ้น

2.1.4.4 สภาพการใช้งานและข้อกำหนดรายละเอียด ในแต่ละสภาพการใช้งาน เชื่อมอาจแตกต่างกัน เช่น ที่อุณหภูมิต่ำ-สูง หรือรับการกระแทก ดังนั้นลวดเชื่อมต้องมีส่วนผสมที่เข้ากันได้กับโลหะงานเชื่อม ต้องเลือกใช้ลวดเชื่อมที่มีคุณสมบัติด้านความเหนียวและต้านทานต่อการกระแทก

2.1.4.5 ความหนาและรูปทรงโลหะชิ้นงาน สำหรับงานเชื่อมที่มีความหนาและรูปทรงแตกต่างกัน เมื่อนำมาเชื่อมต่อประกอบเข้าด้วยกันต้องการความเหนียวสูงสุดเพื่อป้องกันงานเชื่อมเกิดรอยร้าว โลหะงานเชื่อมควรมีคุณสมบัติด้านความเหนียว

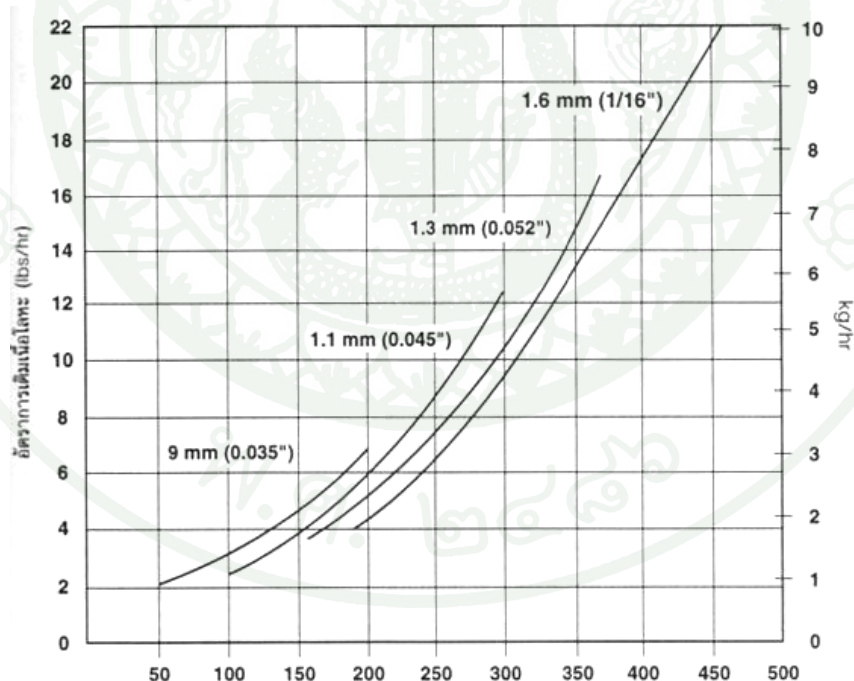
2.1.4.6 รหัสบอกชนิดลวด การแบ่งชนิดลวดเชื่อมอาร์คโลหะก๊าซคลุมจะอาศัยพื้นฐานด้านส่วนผสมทางเคมีของเนื้อโลหะเชื่อม (Weld Deposit) เป็นหลัก แต่ลวดเชื่อมเหล็กกล้าต้องมีข้อพิจารณาสองประการ คือ ส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อมและคุณสมบัติทางกลของเนื้อโลหะเชื่อม สำหรับลวดเชื่อมเหล็กกล้าต้นจะกำหนดรายละเอียดมาตรฐาน AWS 5.81 และ AWS 5.28 ซึ่งการออกรหัสเป็นทั้งตัวอักษรและตัวเลขควบคู่กันดังนี้



|                 |                                                                                 |
|-----------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| E (Electrode)   | หมายถึง ลวดเชื่อมอาร์คหรือลวดเชื่อมไฟฟ้าที่ใช้กับการเชื่อมอาร์คโลหะก๊าซคลุม     |
| R (Welding Rod) | หมายถึง ลวดเชื่อมเติมได้เช่นเดียวกับลวดที่ใช้กับการเชื่อมทิกและพลาสมา           |
| XX              | หมายถึง ตัวเลขที่บอกถึงความต้านแรงดึงของเนื้อโลหะเชื่อม (อาจมี 2 หรือ 3 ตัวเลข) |
| S (Solid Wire)  | หมายถึง ลวดตัน ถ้าอักษร T หมายถึงลวดไส้ฟลักซ์                                   |
| X               | หมายถึง ส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อมและคุณสมบัติทางกลอื่นที่ต้องการ               |

ตัวอย่าง ชนิดลวดเชื่อม

2.1.4.7 ขนาดลวดเชื่อม สำหรับลวดเชื่อม มิก/แม็ก จะถูกเก็บไว้เป็นม้วนและมีขนาดแตกต่างกัน โดยบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทั้งระบบนิ้วและมิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเชื่อมจึงมีตั้งแต่ 0.6 มม. (0.020 นิ้ว), 0.8 มม. (0.030 นิ้ว), 0.9 มม. (0.035 นิ้ว), 1.0 มม. (0.045 นิ้ว), 1.2 มม. (0.047 นิ้ว), 1.6 มม. (0.0625 นิ้ว) และ 3.2 มม. (0.125 นิ้ว) และลวดเชื่อมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กคือ 0.6, 0.8 และ 0.9 มม. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลวดเชื่อมจะมีผลต่อความกว้างของตะเข็บเชื่อม ระยะซึมลึกและอัตราเร็วการเชื่อม ลวดเชื่อมขนาดใหญ่ใช้กระแสสูงและให้อัตราเติมเนื้อโลหะมากกว่า การหลอมเหลวของลวดเชื่อมจะเป็นฟังก์ชันกับคามหนาแน่นกระแส (Current Density) หากใช้กระแสเชื่อมเดียวกัน ลวดเชื่อมขนาดเล็กจะมีอัตราการเติมเนื้อโลหะมากกว่า ลวดเชื่อม 0.6 – 0.9 มม. ใช้ได้ผลดีกับการเชื่อมโลหะบางและมีชื่อเรียกเฉพาะว่า ไมโครไวร์ (Microwire) ตารางที่ 1 การเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไมโครไวร์ ใช้ระยะ โพล์ลวด 6.4 – 9.5 มม.



ภาพที่ 24 อัตราการเติมเนื้อโลหะของลวดเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอนแบ่งตามขนาดลวดเชื่อมและใช้ก๊าซคลุมเป็นคาร์บอนไดออกไซด์

**ตารางที่ 1** การเชื่อมอาร์คโลหะก๊าซคลุมคาร์บอนไดออกไซด์ ใช้ลวดเชื่อมไมโครไวร์เชื่อมด้วยมือ  
เชื่อมทีวเดียว (Single Pass) รอยเชื่อมฉากแนวราบ (Flat Fillet Weld)

| ความหนา<br>วัสดุงาน<br>(mm) | ขนาดลวด<br>(mm) | แรงดันอาร์ค<br>(DCRP) | กระแสเชื่อม<br>(Amp) | อัตราการ<br>ไหลก๊าซ<br>(liter/min) | อัตราเร็ว<br>การเชื่อม<br>(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                             |

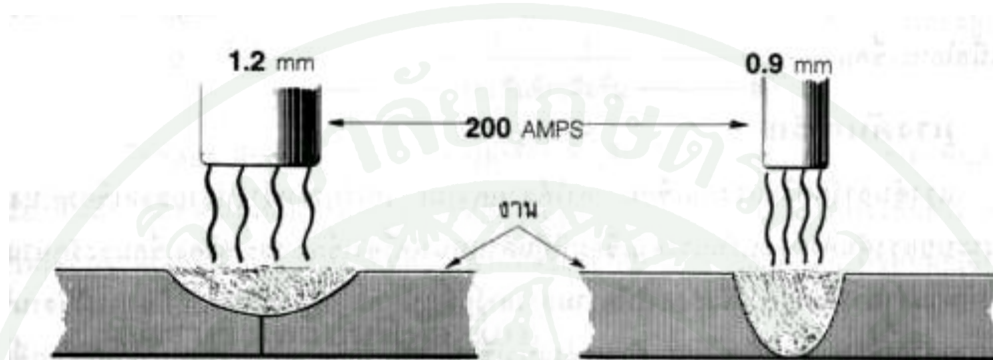
คุณสมบัติที่ได้จากการเชื่อมลวดต่างขนาดมีดังนี้

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

- การซึมลึกขึ้นอยู่กับความหนาแน่นกระแสเช่นกัน ซึ่งลวดเล็กจะซึมลึกดีกว่าลวดใหญ่

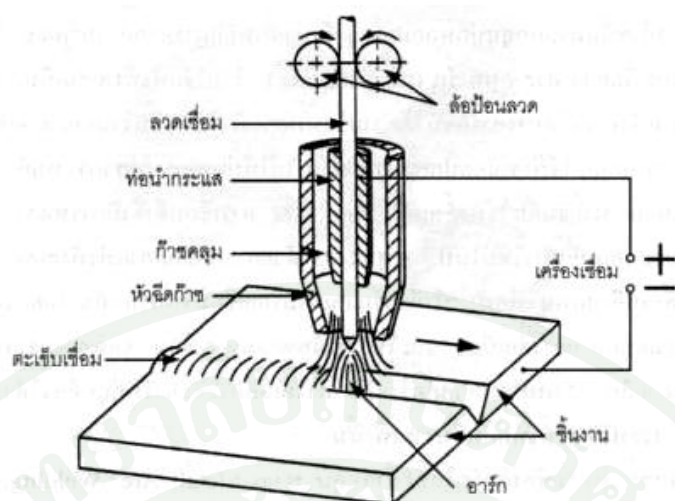
- ลวดเชื่อมขนาดใหญ่จะให้แนวเชื่อมกว้างกว่าลวดเชื่อมเล็ก ดังนั้นเมื่อสภาวะในการเชื่อมเหมือนกัน ดังแสดงในภาพที่ 25

- ความหนาของชิ้นงานเชื่อมมีผลต่อการเลือกขนาดลวดเชื่อม การเชื่อมฟิลเลท และต่อแถบโลหะหนา 0.032 นิ้ว ปกติจะใช้ลวด 0.025 นิ้ว หรือ 0.030 นิ้ว (0.6 มม. หรือ 0.8 มม.) ซึ่งลวดเชื่อมขนาดนี้ยังสามารถเชื่อมงานที่มีความหนาจนถึง 0.075 นิ้ว ได้ดีอีกด้วย ถ้างานเชื่อมหนาขึ้นต้องใช้ลวดเชื่อมโตขึ้นด้วย



ภาพที่ 25 เปรียบเทียบระยะซึมลึกระหว่างลวดเชื่อมขนาดต่างกันเมื่อใช้กระแสเชื่อมเท่ากัน

2.15 ก๊าซคลุม (Shield Gas) การเชื่อมอาร์คโลหะก๊าซคลุม เป็นกระบวนการเชื่อมโดยใช้ลวดเชื่อมเส้นเปลือยขนาดเล็กจากม้วนลวด ซึ่งจะถูกป้อนผ่านหัวเชื่อมหรือปืนเชื่อม (Torch or Welding Gun) ออกมาอย่างต่อเนื่องผ่านท่อนำลวดและท่อนำกระแส (Contact Tip) ลวดเชื่อมจะสัมผัสกับผิวท่อนำกระแส ทำให้กระแสเชื่อมไหลเข้าสู่ลวด เมื่อปลายลวดแตะกับผิวโลหะชิ้นงาน จะเกิดการอาร์คขึ้น ความร้อนจากการอาร์คจะหลอมผิวโลหะชิ้นงานและปลายลวดเชื่อมให้เป็นหยดโลหะถ่ายโอนสู่บ่อหลอมเหลวของรอยเชื่อม ขณะเดียวกันก๊าซจากท่อบรรจุจะไหลเข้าที่ง่ายสู่หัวฉีดพุ่งออกมาปกคลุมบ่อหลอมเหลวและบริเวณรอบเปลวอาร์ค เพื่อทำหน้าที่เป็นม่านป้องกันไม่ให้ออกซิเจนหรือก๊าซอื่นในบรรยากาศเข้าไปทำปฏิกิริยากับเปลวอาร์คและโลหะที่กำลังหลอมเหลว ก๊าซคลุมที่เลือกใช้ได้แก่ ก๊าซเฉื่อย แอคทีฟก๊าซ อันรีแอคทีฟก๊าซและก๊าซผสม ดังแสดงในภาพที่ 26

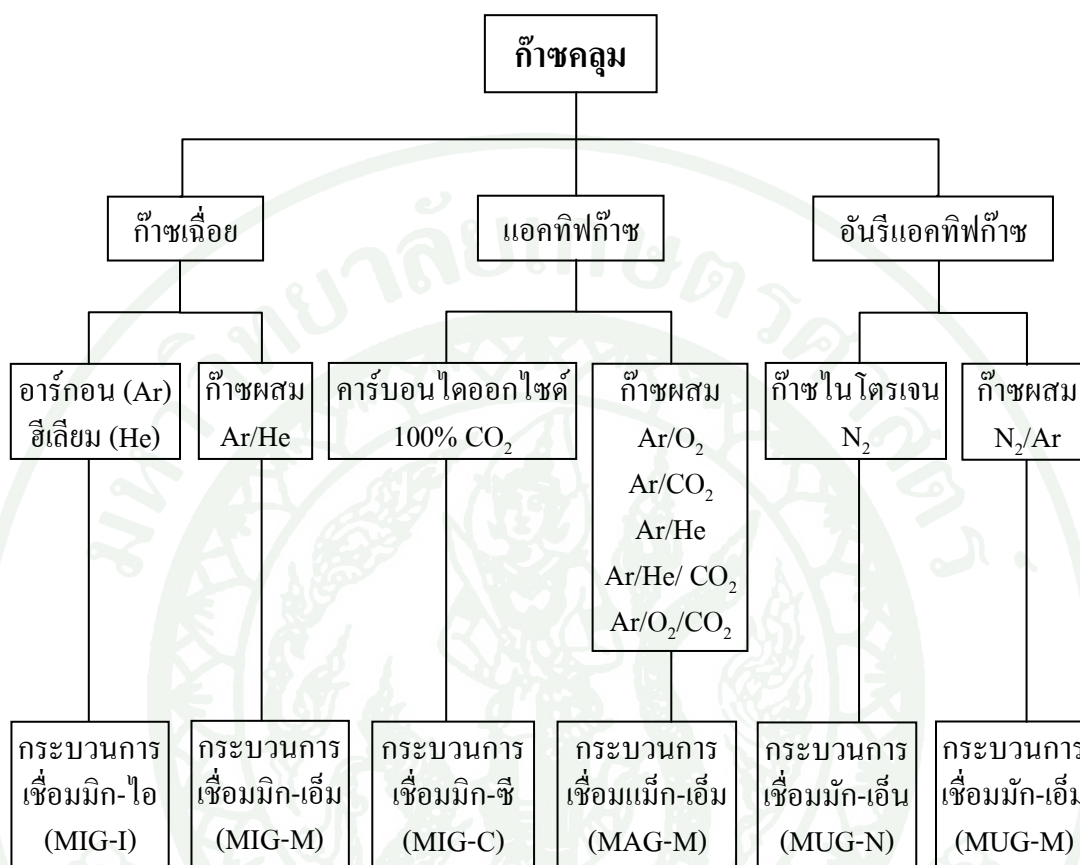


ภาพที่ 26 ลักษณะของกระบวนการเชื่อมอาร์คโลหะก๊าซคลุม

นอกจากก๊าซคลุมจะมีผลต่อความต้านแรงของรอยต่อและความบกพร่องในเนื้อโลหะเชื่อมแล้ว ก๊าซจะทำหน้าที่ปกคลุมบริเวณแนวเชื่อมและบ่อหลอมละลายเพื่อไม่ให้เกิด ปฏิกิริยาออกซิเดชันหรือสิ่งสกปรกจากอากาศรอบๆ บริเวณแนวเชื่อม เช่น ออกซิเจน ไนโตรเจนและไอน้ำในอากาศ เพื่อที่จะให้แนวเชื่อมมีคุณภาพสูง ก๊าซที่ใช้ปกคลุมในการเชื่อมแบบ GMAW นี้คือ ก๊าซอาร์กอน ฮีเลียมหรือก๊าซผสมสำหรับการเชื่อมโลหะจำพวกที่ไม่ใช่เหล็ก ส่วนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สำหรับการเชื่อมเหล็ก ส่วนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กับก๊าซอาร์กอนหรือกับก๊าซฮีเลียมหรือก๊าซอาร์กอนผสมก๊าซออกซิเจนเล็กน้อยสำหรับการเชื่อมเหล็กสแตนเลส คุณสมบัติของก๊าซแต่ละชนิดจะแตกต่างกัน การนำไปใช้งานก็ขึ้นอยู่กับลักษณะโลหะงานเชื่อม ทำเชื่อม ความเร็วในการเชื่อม

ก๊าซที่นำมาใช้คลุมบ่อหลอมเหลวสำหรับกระบวนการเชื่อมอาร์คโลหะ ก๊าซคลุมแบ่งออกเป็น 4 ชนิดด้วยกันคือ ก๊าซเฉื่อย (อาร์กอน (Ar), ฮีเลียม (He)) แอคทีฟก๊าซ (คาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) อันรีแอคทีฟก๊าซ (ไนโตรเจน(N<sub>2</sub>)) และก๊าซผสม (Ar/CO<sub>2</sub>, Ar/O<sub>2</sub>, Ar/O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>) การเลือกก๊าซคลุมชนิดใดขึ้นอยู่กับชนิดโลหะชิ้นงาน ขนาดลวดเชื่อมและชนิดการถ่ายโอนโลหะ เช่น การถ่ายโอนโลหะแบบสละองจะไม่เกิดขึ้นเมื่อใช้คาร์บอนไดออกไซด์เป็นก๊าซคลุมหรือก๊าซฮีเลียมเพียงอย่างเดียว เพราะการถ่ายโอนแบบสละองต้องใช้อาร์กอนเป็นก๊าซคลุมและมีปริมาณมากถึง 85 % โดยก๊าซคลุมที่จะนำมาใช้จะมีผลต่อระยะซึมลึก ลักษณะตะขีบเชื่อมอัตราการเติมเนื้อโลหะ ปริมาณการเกิดควันและไอ ปรากฏโลหะ อัตราเร็วการเชื่อม คุณสมบัติทางกล การถ่ายโอน

โลหะ การเชื่อมโลหะที่เป็นเหล็กนิยมนำคาร์บอนไดออกไซด์กลุ่ม ภาพที่ 27 แสดงการแบ่งลักษณะการใช้ก๊าซกลุ่ม



ภาพที่ 27 ประเภทกระบวนการเชื่อมอาร์คโลหะก๊าซกลุ่มเรียกชื่อตามชนิดของก๊าซ

ที่มา: มานะศิษฐ์ (2542)

2.1.5.1 ก๊าซอาร์กอน (Ar) เป็นก๊าซที่มีค่าความถ่วงจำเพาะ 1.38 สามารถปกคลุมแนวเชื่อมได้ดีกว่าก๊าซฮีเลียม อาร์กอนมีค่านำความร้อนต่ำ ลำของเปลวไฟถูกจำกัดให้แคบ จึงทำให้มีความหนาแน่นของเปลวไฟมีค่าสูง ทำให้พลังงานจากเปลวไฟเชื่อมเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนถ่ายเทเข้ากับชิ้นงานได้ดีมาก ซึ่งทำให้ได้รอยเชื่อมที่มีลักษณะแคบและการซึมลึกสูง มีเม็ดโลหะกระเด็นน้อย ใช้ในการเชื่อมโลหะที่ไม่ใช่เหล็กและโลหะผสม เช่น อลูมิเนียม แมกนีเซียม อลูมิเนียมผสมกับแมกนีเซียมและทองแดง

2.1.5.2 ก๊าซฮีเลียม (He) มีค่าถ่วงจำเพาะที่ 0.137 ซึ่งจะมากกว่าอากาศ ทำให้ก๊าซฮีเลียมมักลอยหนีจากรอยเชื่อมเสมอ ฉะนั้นต้องให้อัตราการไหลของก๊าซปกคลุมสูง ฮีเลียมให้ความร้อนของเปลวไฟเชื่อมมากกว่าอาร์กอน จึงเหมาะสำหรับการเชื่อมวัสดุที่มีค่านำความร้อนสูง เช่น อลูมิเนียม แมกนีเซียม ทองแดง รอยเชื่อมที่ได้จะกว้างกว่าอาร์กอน แต่จะมีการซึมลึกน้อยกว่าเมื่อเทียบกับก๊าซอาร์กอน การเชื่อมโดยใช้ก๊าซฮีเลียมปกคลุมใช้มากในขบวนการเชื่อมอัตโนมัติ เพราะสามารถควบคุมระยะอาร์คได้สม่ำเสมอ เป็นก๊าซเฉื่อยน้ำหนักเบากว่าก๊าซอาร์กอนและการนำความร้อนดีกว่าก๊าซอาร์กอน เปลวอาร์คที่เกิดจากก๊าซฮีเลียมปกคลุมจะขยายวงกว้างและความเข้มข้นของการอาร์คจะต่ำกว่า แนวเชื่อมกว้างและซึมลึกน้อยกว่าก๊าซอาร์กอน ใช้ในการเชื่อมโลหะที่ไม่ใช่เหล็ก เช่น อลูมิเนียม แมกนีเซียมและทองแดง ยังใช้ผสมกับก๊าซอื่นเพื่อใช้เป็นก๊าซปกคลุมด้วย

2.1.5.3 ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) จะแตกต่างจากอาร์กอนและฮีเลียมซึ่งประกอบด้วยอะตอมเพียงตัวเดียว แต่คาร์บอนไดออกไซด์จะมีโมเลกุลคาร์บอน 1 ตัว และออกซิเจน 2 ตัว ที่ความดันบรรยากาศปกติมีความหนาแน่นเท่ากับ  $0.00198 \text{ g/cm}^3$  ที่อุณหภูมิ  $31^\circ\text{C}$  และความดัน  $7.35 \text{ MPa}$  จะอยู่ในสภาพของเหลวและเป็นของเหลวที่ความดันบรรยากาศเมื่ออุณหภูมิ  $-78.5^\circ\text{C}$  มีค่าถ่วงจำเพาะ 1.52 ทำให้ปกคลุมแนวเชื่อมได้ดีกว่าก๊าซเฉื่อย คาร์บอนไดออกไซด์มีราคาถูกกว่าก๊าซเฉื่อย ให้อายุเชื่อมกว้างและมีการซึมลึกสูง แต่มีข้อเสียคือ เปลวไฟเชื่อมไม่สม่ำเสมอและเกิดเม็ดโลหะมาก แต่เม็ดโลหะนี้สามารถลดลงได้โดยการใช้ระยะอาร์คที่น้อยตลอดเวลาที่ทำการเชื่อม ประกอบด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กับออกซิเจน ไม่เป็นก๊าซเฉื่อยเหมือนกับก๊าซอาร์กอนและฮีเลียม เปลวอาร์คที่เกิดขึ้นจะกว้างกว่าการใช้ก๊าซอาร์กอนแต่จะแคบกว่าการใช้ก๊าซฮีเลียม แนวเชื่อมที่ปกคลุมด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะมีความกว้างปานกลาง ซึมลึกดี การหลอมละลายดี

## 2.2 หลักการเชื่อมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์คลุม ( $\text{CO}_2$ Welding Process)

- ถ้าก๊าซคลุมเป็นก๊าซเฉื่อย เช่น Ar, He เรียกวิธีเชื่อมนี้ว่า MIG (Metal Inert Gas)
- ถ้าก๊าซคลุมเป็นก๊าซไม่เฉื่อย เช่น Ar +  $\text{CO}_2$  เรียกวิธีเชื่อมนี้ว่า MAG (Metal Active Gas)
- ถ้าก๊าซคลุมเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เรียกวิธีเชื่อมนี้ว่า การเชื่อมด้วย  $\text{CO}_2$

ตารางที่ 2 ก๊าซปกคลุมในการเชื่อมมิกและการนำไปใช้งาน

| ก๊าซปกคลุม                                              | ประเภท | การนำไปใช้งาน                                                                                                                                                                |
|---------------------------------------------------------|--------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| อาร์กอน (Ar)                                            | Inert  | สำหรับเชื่อมโลหะเกือบทุกชนิด ยกเว้นเหล็ก                                                                                                                                     |
| ฮีเลียม (He)                                            | Inert  | เชื่อมโลหะที่ไม่ใช่เหล็ก เช่น อลูมิเนียม แมกนีเซียม และทองแดง                                                                                                                |
| คาร์บอนไดออกไซด์ (CO <sub>2</sub> )                     | Active | ใช้เป็นก๊าซปกคลุมในการเชื่อมเหล็กกล้าอะมุนและเหล็กกล้าคาร์บอน ส่วนใหญ่ใช้ในการเชื่อมมิกจะใช้กับระบบส่งถ่านน้ำโลหะแบบจุ่มและแบบหยด ไม่เหมาะที่จะใช้กับการส่งถ่านน้ำโลหะแบบพ่น |
| ก๊าซผสมอาร์กอนกับคาร์บอนไดออกไซด์ (Ar/CO <sub>2</sub> ) | Active | ใช้กับงานเชื่อมเหล็กกล้าอะมุนและเหล็กกล้าคาร์บอน ทำให้ความร้อนบริเวณการอาร์คสูงขึ้น การซึมลึกดีและมากขึ้น เหมาะกับการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมแกนฟลักซ์                            |

### 2.3 อัตราการไหลของก๊าซคลุม (Gas Flow)



ภาพที่ 28 อุปกรณ์ควบคุมความดันและมาตรวัดการไหล

ที่มา: มานะศิษฐ์ (2542)

อัตราการไหลเป็นตัวแปรปฐมนิยาม ที่ต้องเลือกก่อนปฏิบัติการเชื่อม อัตราการไหลของก๊าซ ลิตร/นาที (l/min) การปรับอัตราการไหลของก๊าซปกคลุมเพื่อให้ก๊าซที่กระจายออกมาคลุมรอยเชื่อมได้ผลดี ก๊าซที่ฉีดออกมาจากหัวฉีด (Nozzle) ควรมีการไหลแบบราบเรียบ (Laminar Flow) คือมีแนวการไหลเป็นเส้นตรง อัตราการไหลสูงเกินไปจะเกิดการปั่นป่วน (Turbulent) คือเกิดการหมุนวนของก๊าซ ก๊าซที่หมุนวนนี้จะผสมกับอากาศแล้วรวมตัวเข้ากับเนื้อโลหะเชื่อม ทำให้รอยเชื่อมสกปรกและเสียคุณสมบัติที่ดีไป แต่ถ้าเราไม่สามารถคลุมไว้ได้ดีพอก็จะเกิดโพรงอากาศและความพรุนในเนื้อโลหะเชื่อม ดังนั้นควรเลือกอัตราการไหลของก๊าซคลุมได้พอดีอย่ามากเกินไป ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งมีค่าความถ่วงจำเพาะ 1.52 การปรับอัตราการไหลของก๊าซปกคลุมสามารถคิดจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดเชื่อมคูณด้วย 10 ภาพที่ 28 แสดงอุปกรณ์ควบคุมการไหลของก๊าซ

ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) เป็นสารประกอบไม่ใช่ก๊าซเฉื่อยเหมือนกับก๊าซอาร์กอนและก๊าซฮีเลียม แต่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นก๊าซอีกชนิดหนึ่งที่นิยมใช้กันมากเพื่อนำมาเป็นก๊าซปกคลุมในการเชื่อมอีกด้วยเหตุผลประการหนึ่งคือ เป็นก๊าซที่หนักกว่าอากาศ (หนักกว่าอากาศประมาณ 50 เท่า) มีข้อดีคือ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ราคาถูก ใช้เชื่อมเหล็กกว่าคาร์บอน มีการซึมลึกสูง เมื่อเชื่อมอัตโนมัติจะทำงานได้เร็ว ถ้าเชื่อมแบบกึ่งอัตโนมัติจะทำให้ต้นทุนการเชื่อมต่ำ ส่วนข้อเสียคือ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะให้การอาร์คที่รุนแรง จึงมีประกายโลหะกระเด็นมาก ทำให้ประสิทธิภาพการหลอมเหลวของลวดเชื่อมลดลง การอาร์คไม่ค่อยคงที่ ต้องใช้การเชื่อมที่ความยาวอาร์คสั้นและให้ความยาวอาร์คคงที่ตลอดเวลาของการเชื่อม

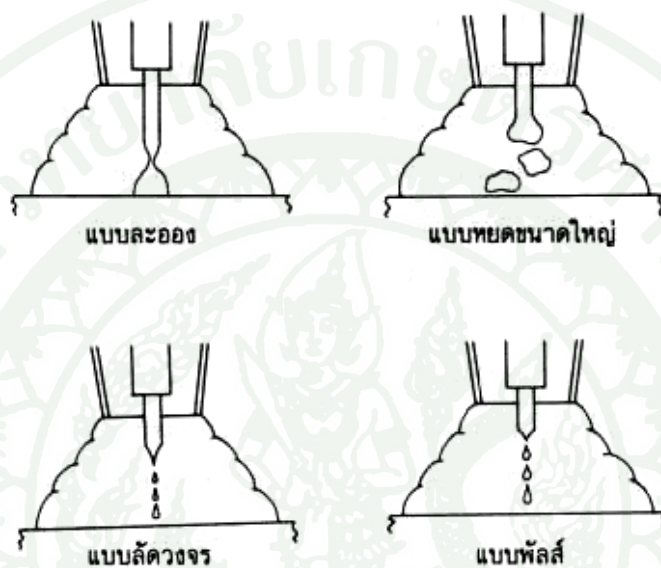
ตารางที่ 3 อัตราการไหลของก๊าซคลุมและระยะห่างของหัวฉีดที่เหมาะสม

| ขนาดลวดเชื่อม<br>(mm) | กระแสเชื่อม<br>(A) | ระยะห่างของหัวฉีด<br>(mm) | อัตราการไหลของก๊าซคลุม<br>(l/min) |
|-----------------------|--------------------|---------------------------|-----------------------------------|
| 1.2                   | 100 – 200          | 10 – 15                   | 15 – 25                           |
|                       | 200 – 300          | 15 – 20                   | 20 – 30                           |

## 2.4 การส่งถ่ายน้ำโลหะ (Metal Transfer)

การเชื่อม MIG/MAG เป็นขบวนการเชื่อมแบบสั้นเปลือกลวดเชื่อม โดยลวดเชื่อมหลอมละลายเต็มลงไปแนวเชื่อม ซึ่งตัวป้อนลวดจะดึงลวดออกจากม้วนผ่านไปตามท่อที่อยู่ภายในสายหัวเชื่อมและจะไปยังจุดสุดท้ายที่ปลายหัวเชื่อม

การที่ปลายลวดเชื่อมหลอมและเติมลงไปยังบ่อหลอมละลายนั้นเรียกว่า “ถ่ายเทโลหะ” (Metal Transfer) ซึ่งมีอยู่ด้วยกันหลายแบบ เช่น Shot Arc, Spray Arc, Globular Transfer และ Pulse เป็นต้น ความแตกต่างของการถ่ายเทโลหะแต่ละชนิดนั้น ขึ้นอยู่กับกระแสไฟ แรงเคลื่อนในการอาร์ค ขนาดลวดและชนิดของก๊าซปกคลุม ภาพที่ 29 แสดงการถ่ายโอนน้ำโลหะ



ภาพที่ 29 การถ่ายโอนน้ำโลหะทั้ง 4 แบบ

ที่มา: มานะศิษฐ์ (2542)

การถ่ายโอนน้ำโลหะแบ่งออกได้ 4 แบบ คือ แบบละออง (Spray) แบบหยดขนาดใหญ่ (Globular) แบบลัดวงจร (Short Circuit) และแบบพัลส์ (Pulse)

2.4.1 การส่งถ่ายน้ำโลหะแบบจุ่ม (Dip Transfer) หรือแบบลัดวงจร (Short Circuit Arc) กระแสเชื่อมต่ำ เช่นการเชื่อมโลหะแผ่นบาง น้ำโลหะจะเย็นตัวเร็ว ความร้อนในการถ่ายเทประมาณ 70 – 100 ครั้ง/วินาที เกิดขึ้นช่วงลวดเชื่อมสัมผัสกับบ่อหลอมละลาย

2.4.2 การส่งถ่ายน้ำโลหะแบบพ่น (Spray Transfer) เป็นการถ่ายเทโลหะที่ใช้กระแสเชื่อม และแรงเคลื่อนสูงกว่าแบบอื่นทั้งหมด การถ่ายเทน้ำโลหะประมาณ 100 – 300 ครั้ง/วินาที ใช้ก๊าซอาร์กอนเป็นก๊าซคลุม ใช้ในการเชื่อมโลหะที่มีความหนา มาก

2.4.3 การส่งถ่ายน้ำโลหะแบบหยด (Globular Transfer) กระแสเชื่อมอยู่ระหว่าง Spray Arc กับ Short Arc คลุมด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ส่งถ่ายโลหะประมาณ 100 ครั้ง/วินาที ใช้แรงเคลื่อนค้อย่างสูงมากกว่า 20 โวลต์ เชื่อมงานที่มีความหนาตั้งแต่ 2 มิลลิเมตรขึ้นไป เชื่อมแนวทาบหน้าได้ดี

2.4.4 การส่งถ่ายน้ำโลหะแบบพัลส์ (Pulsed Transfer) กระแสเชื่อมค่าสูง (Peak) และค่าต่ำ (Back Ground) สลับกัน ช่วงกระแสต่ำทำให้ลวดเชื่อมหลอมละลายและช่วงกระแสค่าสูงจะติดหยดน้ำโลหะพุ่งต่อเนื่องอย่างเป็นระเบียบ

ตารางที่ 4 การเปรียบเทียบกระแสแรงเคลื่อนและการนำไปใช้งานของการส่งถ่ายน้ำโลหะ

| ชนิดการส่งถ่าย<br>น้ำโลหะ | ขนาดแรงเคลื่อน<br>(โวลต์) | กระแส<br>(แอมป์) | การนำไปใช้งาน                                                                         |
|---------------------------|---------------------------|------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| Short Arc Transfer        | 13 – 23                   | 60 – 210         | เชื่อมวัสดุบาง เชื่อมทุกท่าเชื่อม                                                     |
| Spray Transfer            | 20 – 40                   | 200 ขึ้นไป       | เชื่อมโลหะหนา ให้อัตราการเติมลวดเชื่อมสูง เชื่อมได้ในท่าทาบ ทาฟิลเลท ขนานนอนและทำตั้ง |
| Globular Transfer         | 20 – 26                   | 200 – 280        | ให้อัตราการเติมลวดเชื่อมสูงกว่า Shot Arc Transfer ให้ความร้อนต่ำกว่า Spray Transfer   |
| Pulsed Transfer           | 23 - 25                   | 60 - 220         | สำหรับเชื่อมโลหะบาง เช่น เหล็กกล้า ละมุน สแตนเลส อลูมิเนียม เป็นต้น                   |

## 2.5 ตัวแปรการเชื่อม (Welding Parameters)

กระแสเชื่อมที่เหมาะสมอยู่ที่การปรับ 2 ตัวแปรคือ อาร์คโวลต์เตจ กระแสเชื่อมและความเร็วลวด ตัวแปรการเชื่อมหลักที่เกี่ยวข้องกับการเชื่อมอาร์คโลหะก๊าซคลุม มีอยู่สามชนิดคือ

2.5.1 ตัวแปรเลือกขั้นต้น (Preselected Variables) ตัวแปรนี้จะถูกกำหนดขึ้นมาก่อนการเชื่อม โดยมีองค์ประกอบที่เกี่ยวข้องกับการเลือกตัวแปร ได้แก่ ชนิดโลหะชิ้นงาน ความหนา ตำแหน่งแนวเชื่อม อัตราการเติมเนื้อโลหะและคุณสมบัติทางกลที่ต้องการ ตัวแปรเหล่านี้จะเปลี่ยนแปลงไม่ได้

ขณะกำลังปฏิบัติการเชื่อม ตัวแปรเลือกขั้นต้นประกอบด้วย ชนิดลวดเชื่อม, ขนาดลวดเชื่อม, ชนิดก๊าซคลุม, อัตราการไหลของก๊าซคลุม

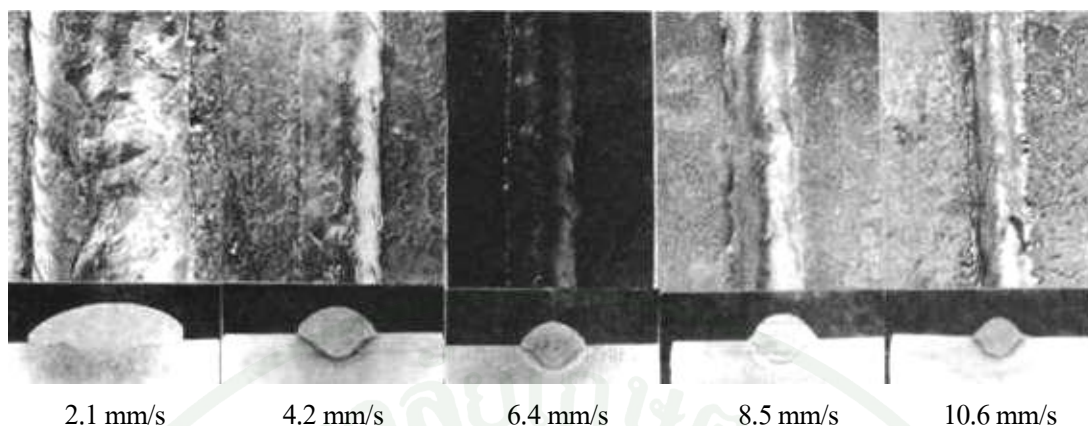
2.5.2 ตัวแปรปรับปฐมภูมิ (Primary Adjustable Variables) ตัวแปรปรับปฐมภูมิเป็นตัวแปรที่ใช้ควบคุมกระบวนการเชื่อมหลังจากเลือกตัวแปรขั้นต้นได้แล้ว ตัวแปรนี้จะควบคุมระยะซึมลึก ความกว้างตะเข็บเชื่อม ความสูงตะเข็บเชื่อม ความเสถียร ค่าที่ดีที่สุด ในขณะที่งานเชื่อมอยู่และมีช่วงการปรับได้กว้าง ตัวแปรปฐมภูมิประกอบด้วย อัตราเร็วป้อนลวดเชื่อม, แรงดันอาร์ค, อัตราเร็วการเคลื่อนที่หัวเชื่อม

2.5.3 ตัวแปรปรับทุติยภูมิ (Secondary Adjustable Variables) ตัวแปรปรับทุติยภูมิเป็นตัวแปรรองจากตัวแปรปรับปฐมภูมิ สามารถปรับเปลี่ยนอย่างต่อเนื่องขณะกำลังปฏิบัติการเชื่อม ตัวแปรนี้ไม่มีผลกระทบโดยตรงต่อการเกิดตะเข็บเชื่อม (Bead Formation) แต่ส่งผลให้ตัวแปรปรับทุติยภูมิเกิดการเปลี่ยนแปลงและมีผลให้สภาพตะเข็บเชื่อมเปลี่ยนแปลงไปอีกทอดหนึ่ง ตัวแปรเหล่านี้ประกอบด้วย ระยะโผล่ลวด (Stick Out), มุมหัวเชื่อม (Nozzle Angle), อัตราเร็วป้อนลวด (Wire Feed Speed)

ตารางที่ 5 แสดงค่าเปรียบเทียบความหนาแน่นของกระแสสำหรับลวดเชื่อมขนาด 0.9 และ 1.2 มม.

| ขนาดลวดเชื่อม<br>(mm) | พื้นที่หน้าตัด<br>ลวดเชื่อม<br>(mm <sup>2</sup> ) | กระแสเชื่อม<br>(A) | ความหนาแน่น<br>ของกระแส<br>(A/mm <sup>2</sup> ) | อัตราการเติม<br>เนื้อโลหะ<br>(kg/hr) |
|-----------------------|---------------------------------------------------|--------------------|-------------------------------------------------|--------------------------------------|
| 0.9                   | 0.636                                             | 200                | 314.46                                          | 3.2                                  |
| 1.2                   | 1.130                                             | 200                | 176.99                                          | 2.8                                  |

จากตารางที่ 5 การเพิ่มขึ้นของอัตราการเติมเนื้อโลหะของลวดเชื่อมขนาดเล็กจะมากกว่าขนาดใหญ่ การเลือกปฏิบัติต่อตัวแปรทั้งสามลำดับนี้คือ ต้องเลือกตัวแปรขั้นต้นก่อนการเชื่อม ตัวแปรปรับปฐมภูมิก็เลือกก่อนเช่นกัน แต่กระทำเมื่อเปิดเครื่องเชื่อมแล้ว ส่วนตัวแปรทุติยภูมิต้องทำขณะที่กำลังเชื่อม ตัวแปรเหล่านี้มีผลต่อระยะซึมลึก ความสูง ความกว้างของแนวเชื่อม เมื่อเชื่อมด้วยระบบแรงดันคงที่ (CV) กระแสเชื่อมจะถูกควบคุมด้วยอัตราเร็วป้อนลวด ดังแสดงในภาพที่ 30



ภาพที่ 30 ผลกระทบจากอัตราเร็วเคลื่อนที่หัวเชื่อมต่อการเกิดตะเข็บเชื่อมและลักษณะตะเข็บเชื่อม ภายใต้เงื่อนไข กระแสเชื่อม 175 แอมแปร์ แรงดันอาร์ค 12 โวลต์ ขนาดลวดเชื่อม 0.9 มม. ก๊าซคลุมคาร์บอนไดออกไซด์ และระยะ โผล่ลวด 9.5 มม.

### 3. ทฤษฎีพื้นฐานการออกแบบแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก

#### 3.1 ชนิดของแม่พิมพ์ฉีด

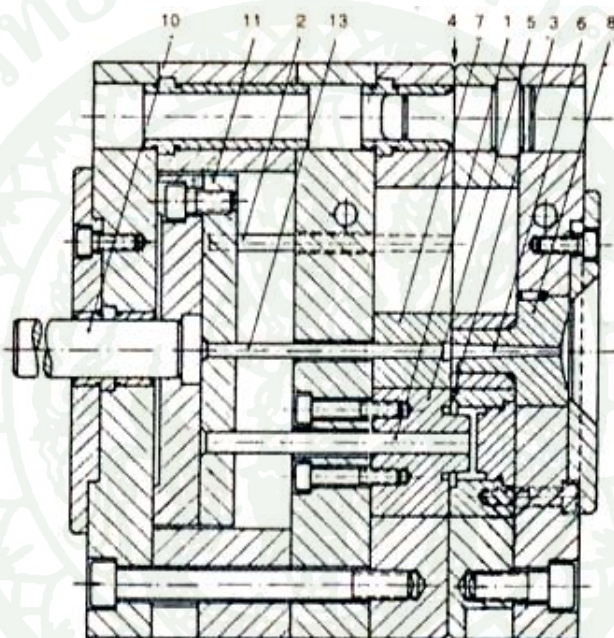
แม่พิมพ์ฉีดเป็นแม่พิมพ์ที่มีการนำมาใช้ในการผลิตชิ้นงานพลาสติกกันอย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะกับพลาสติกประเภทเทอร์โมพลาสติก (Thermo Plastic) และในปัจจุบันมีการปรับปรุงและพัฒนาเครื่องฉีดพลาสติกและแม่พิมพ์ฉีดให้สามารถฉีดชิ้นงานพลาสติกที่ทำจากพลาสติกประเภทเทอร์โมเซตติง (Thermosetting Plastic) ได้อีกด้วย ทำให้ขอบเขตการใช้งานของแม่พิมพ์ฉีดกว้างขวางยิ่งขึ้น การออกแบบแม่พิมพ์ฉีดมักจะพิจารณาจากรูปร่างของชิ้นงานเป็นหลัก ซึ่งลักษณะรูปร่างของชิ้นงานสามารถจัดเป็นกลุ่มได้ดังนี้

- ก. ชิ้นงานที่ปราศากร่องหรือบ่า เช่น ถ้วยแก้ว ชาม หวี เป็นต้น
- ข. ชิ้นงานที่มีร่องหรือบ่าด้านนอก เช่น เกลียวตัวผู้ หลอดด้าย เป็นต้น
- ค. ชิ้นงานที่มีร่องหรือบ่าด้านใน เช่น ฝาเกลียว เป็นต้น
- ง. ชิ้นงานที่มีร่องหรือบ่าทั้งด้านนอกและด้านใน เช่น ชิ้นส่วนของปากกาหมึกซึมที่มีทั้งเกลียวนอกและเกลียวใน เป็นต้น

จากลักษณะของชิ้นงานดังกล่าว ทำให้มีการออกแบบแม่พิมพ์ฉีดชนิดต่างๆ กัน เพื่อให้สามารถผลิตชิ้นงานที่มีรูปร่างตามต้องการได้

3.1.1 แม่พิมพ์ฉีดแบบสองแผ่น (Two-Plate Injection Mold) เป็นแม่พิมพ์แบบง่ายที่ใช้ผลิตชิ้นงานที่ปราศจากร่องหรือบ่า ลักษณะของแม่พิมพ์แบบนี้จะมีเส้นแบ่งส่วนแม่พิมพ์เพียงเส้นเดียวหรือมีช่องเปิดสำหรับปลดชิ้นงาน แกนรูวิ่งและแกนรูฉีดเพียงช่องเดียวเท่านั้น ดังแสดงในภาพที่

31



ภาพที่ 31 แม่พิมพ์แบบสองแผ่น

จากภาพที่ 31 แสดงลักษณะของแม่พิมพ์ฉีดแบบสองแผ่น ซึ่งออกแบบให้มีรูเข้าแบบเข็ม (Pinpoint Gate) ที่จุด (3) เมื่อพลาสติกหลอมไหลเข้าเต็มอิมเพรสชันแล้วก็ป็นอันว่าสิ้นสุดกระบวนการฉีด แม่พิมพ์จะเลื่อนเปิดออกตามแนวลูกศร (4) ส่วนของแม่พิมพ์ด้านขวาจะอยู่กับที่และส่วนของแม่พิมพ์ด้านซ้ายจะเลื่อนเปิดออก ชิ้นงานจะติดอยู่กับส่วนคอร์ (5) ในแม่พิมพ์ (7) จะทำเป็นร่องวงแหวนเรียวไว้ในตำแหน่งที่ตรงกันกับรูของปลอกกูฉีด (8) ทำให้แกนรูฉีด (6) ถูกดึงออกจากปลอกกูฉีด (8) เมื่อแม่พิมพ์เลื่อนเปิดออก เมื่อแม่พิมพ์เลื่อนเปิดต่อไป เพลาต้นปลด (10) จะปะทะกับเพลากระทุ้งของเครื่องฉีดพลาสติก ทำให้แผ่นยึดตัวปลด (11) ที่ประกอบอยู่กับเพลาต้นปลด (10) หดเคลื่อนที่ ชิ้นงานที่ติดอยู่กับส่วนคอร์ (5) ก็จะถูกสลักปลด (1) ดันออกและลัดคันแกนรูฉีด (13) ก็จะดันแกนรูฉีด (6) ให้หลุดออกจากร่องวงแหวนเรียวพร้อมกับชิ้นงาน ในจังหวะที่แม่พิมพ์เลื่อนเปิด

สลักดันกลับ (2) ซึ่งประกอบอยู่กับแผ่นยึดตัวปลด ปลายสลักดันกลับจะปะทะกับแผ่นแม่พิมพ์ด้านที่อยู่กับที่และดันให้แผ่นยึดตัวปลด (11), สลักปลด (1) และสลักดันแกนรูฉีด (13) กลับไปยังตำแหน่งเดิม

### 3.3 การหล่อเย็นแม่พิมพ์ (Mold Cooling)

อุณหภูมิใช้งานของแม่พิมพ์ที่ใช้ผลิตชิ้นงานแต่ละอย่างจะขึ้นอยู่กับแฟกเตอร์ต่างๆ ดังนี้ ชนิดและเกรดของพลาสติกที่ใช้ฉีด ระยะทางที่พลาสติกไหลในอิมเพรสชั่น ความหนาของผนังชิ้นงาน ความยาวของระบบป้อน เป็นต้น บ่อยครั้งที่นิยมใช้อุณหภูมิใช้งานให้สูงกว่าอุณหภูมิที่จำเป็นต้องใช้ เพียงเพื่อให้พลาสติกไหลเติมอิมเพรสชั่นได้เต็มพอดิเท่านั้น อุณหภูมิส่วนที่เพิ่มขึ้นนี้จะช่วยปรับปรุงผิวสำเร็จของชิ้นงานให้มีคุณภาพดีขึ้น กล่าวคือ ช่วยขจัดไม่ให้เกิดรอยเชื่อม รอยการไหลตัวของพลาสติก และรอยมลทินอื่นๆ

เพื่อรักษาระดับความแตกต่างของอุณหภูมิแม่พิมพ์และพลาสติกหลอมเหลวให้ได้ตามต้องการ น้ำหรือของเหลวอื่นๆ จะถูกส่งเข้าไปไหลเวียนในรูหรือร่องที่ทำขึ้นในแม่พิมพ์ รูหรือร่องที่ทำขึ้นนี้เรียกว่าทางไหลของระบบหล่อเย็นหรือทางน้ำหล่อเย็นและระบบทั้งหมดที่สมบูรณ์นี้เรียกว่าวงจรระบบหล่อเย็น

ในระหว่างขั้นตอนการไหลเติมอิมเพรสชั่นของพลาสติกหลอม พลาสติกหลอมที่ร้อนที่สุดจะอยู่ใกล้กับทางเข้าอิมเพรสชั่น คือ รูเข้า และพลาสติกหลอมส่วนที่เย็นที่สุดจะอยู่ตรงตำแหน่งที่อยู่ห่างจากทางเข้ามากที่สุด อุณหภูมิของสารหล่อเย็นที่ไหลผ่านแม่พิมพ์จะมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น ดังนั้นเพื่อให้อัตราการหล่อเย็นตลอดผิวของชิ้นงานเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ จำเป็นที่จะต้องวางตำแหน่งทางเข้าของสารหล่อเย็นให้ใกล้กับผิวชิ้นงานส่วนที่ร้อนและไหลออกไปทางผิวชิ้นงานส่วนที่เย็น แต่ในทางปฏิบัติจริงแล้ว การวางตำแหน่งของสารหล่อเย็นดังกล่าวไม่สามารถกระทำได้เลย ดังนั้นผู้ออกแบบจะต้องใช้สามัญสำนึก กำหนดวงจรระบบหล่อเย็นให้เหมาะสมที่สุด และต้องพยายามหลีกเลี่ยงการใช้วงจรที่ทำให้แม่พิมพ์มีราคาแพงมากขึ้นโดยไม่จำเป็น

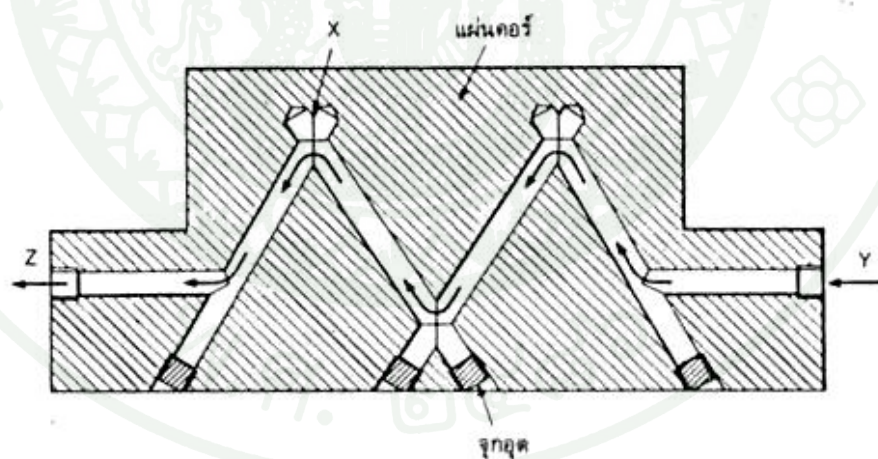
อุปกรณ์ที่ทำให้เกิดการไหลเวียนของน้ำและสารหล่อเย็นอื่นๆ สามารถที่จะหาซื้อได้ทั้งชุดและต่อเข้ากับแม่พิมพ์โดยใช้ท่ออ่อนหรือท่อที่หยุนตัวได้ การใช้อุปกรณ์ชุดนี้ทำให้สามารถควบคุมอุณหภูมิที่ใช้งานของแม่พิมพ์ในพิสัยที่แคบได้ การควบคุมระดับของอุณหภูมิที่ต่างกันน้อยๆ จะทำได้ ถ้าต่อวงจรระบบหล่อเย็นเข้ากับแหล่งน้ำเย็น เช่น ก๊อกน้ำ โดยตรง

ผู้ออกแบบแม่พิมพ์จะต้องรับผิดชอบในการจัดเตรียมระบบหล่อเย็นแม่พิมพ์ที่เหมาะสม ซึ่งสามารถทำได้หลายวิธี วิธีหนึ่งที่ทำได้ง่ายคือ การเจาะเป็นรูในแผ่นแม่พิมพ์ ซึ่งสามารถใช้ได้กับแม่พิมพ์ทั่ว ๆ ไป แต่ไม่ได้หมายความว่าวิธีที่ดีที่สุดสำหรับแม่พิมพ์แต่ละประเภท

### 3.3.1 การหล่อเย็นแผ่นแม่พิมพ์คอร์แบบชั้นเดียว (Cooling integer-type core plate)

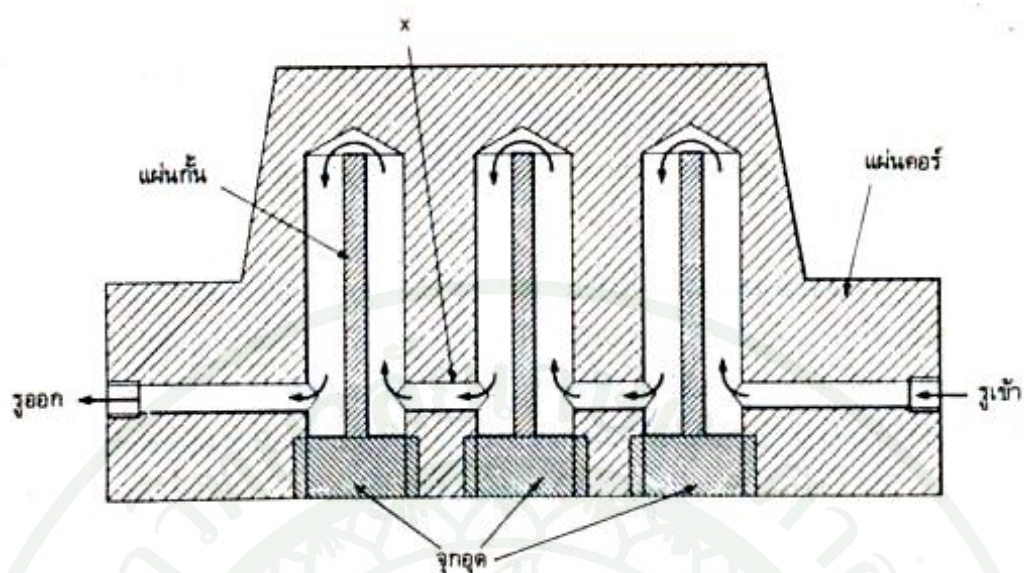
สำหรับแผ่นคอร์ที่มีความหนาไม่มาก คือน้อยกว่า 25 มม. สามารถใช้ระบบหล่อเย็นรูปตัว Z แบบชั้นเดียวก็ได้ ทางไหลของสารหล่อเย็นจะอยู่ด้านใต้แผ่นคอร์ สำหรับแผ่นคอร์ที่มีความหนามากๆ วงจรระบบหล่อเย็นแบบชั้นเดียวจะไม่เพียงพอในการถ่ายเทความร้อนออกจากผิวของแผ่นคอร์ได้เร็วตามต้องการ ดังนั้นจะต้องจัดการให้สารหล่อเย็นเกิดการไหลเวียนภายในแผ่นคอร์ ซึ่งมีอยู่ด้วยกันหลายวิธีการเลือกใช้จะขึ้นอยู่กับรูปร่างของของแผ่นคอร์เป็นส่วนใหญ่

ระบบรูเฉียง (Angle hole system) ดังแสดงในภาพที่ 32 ทางไหลของสารหล่อเย็นจะเจาะเฉียงเป็นมุมจากทางด้านใต้ของแผ่นคอร์และมาบรรจบกันที่จุด x ซึ่งอยู่ใกล้ ๆ กับผิวด้านบนของแผ่นคอร์ รูเจาะแต่ละรูจะถูกอุดเพื่อให้เป็นวงจรทางไหลอย่างต่อเนื่อง รูทางเข้า (y) และรูทางออก (z) ของสารหล่อเย็นจะเจาะทางผนังด้านข้างของแผ่นคอร์ จนทะลุถึงรูเฉียงดังกล่าว



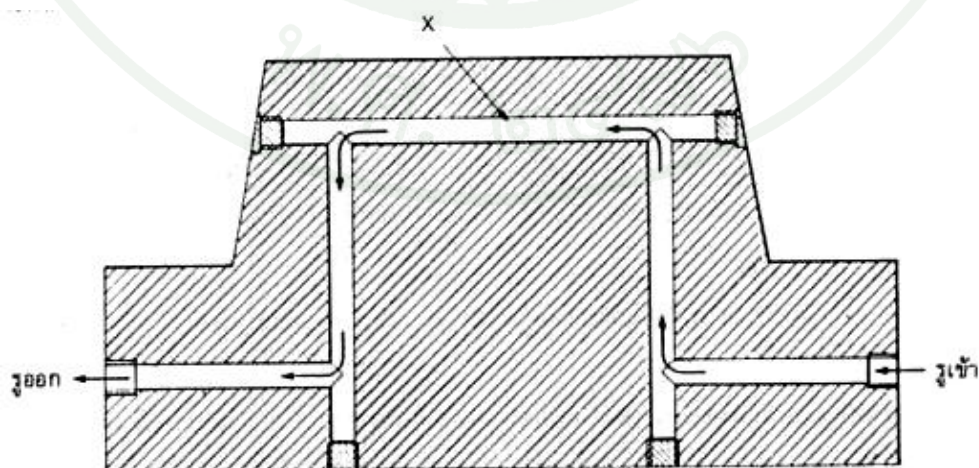
ภาพที่ 32 การหล่อเย็นแผ่นคอร์แบบชั้นเดียวโดยใช้วงจรระบบรูเฉียง

ระบบรูตรงแบบใช้แผ่นกั้น (Baffled-straight hole system) ในระบบนี้ (ภาพที่ 33) รูจะเจาะคว้านตั้งฉากกับผิวด้านใต้ของแผ่นคอร์ ปลายด้านล่างของแต่ละรูจะถูกอุด รูเจาะคว้านแต่ละรูจะต่อถึงกันด้วยรูเจาะ x ซึ่งเจาะเข้าจากผิวด้านข้างของแผ่นคอร์ทะลุยาวตลอดปลายทั้งสองข้าง รูเจาะ x จะเป็นรูทางเข้าและรูทางออกของสารหล่อเย็น และเพื่อให้สารหล่อเย็นเกิดการไหลเวียนในรูเจาะคว้าน แผ่นกั้นจะถูกประกอบเข้ารูแต่ละรูดังกล่าว



ภาพที่ 33 การหล่อเย็นแผ่นคอร์แบบขั้นเดียวโดยใช้วงจรระบบตรงแบบใช้แผ่นกัน

วงจรระบบหล่อเย็นแบบเป็นขั้น (Stepped circuit) ในกรณีต้องการให้ทางไหลของสารหล่อเย็นอยู่ในตำแหน่งที่ใกล้กับผิวด้านขนของแผ่นคอร์ อาจเลือกใช้วงจรหล่อเย็นแบบเป็นขั้นในระบบนี้ (ภาพที่ 34) รู x จะเจาะทะลุตลอดผนังด้านข้างของแผ่นคอร์ในแนวขนานกับผิวด้านบนของแผ่นคอร์แม่พิมพ์ รูเจาะนี้จะต้องอุดและปรับแต่งผิวอย่างระมัดระวัง เพราะเป็นส่วนหนึ่งของอิมเพรสชันด้วย หากอุดและปรับแต่งผิวไม่ดีเพียงพอจะทำให้เกิดปัญหาต่อผิวของชิ้นงานได้ และด้วยเหตุผลอันนี้ นักออกแบบส่วนใหญ่จึงไม่นิยมใช้วงจรระบบหล่อเย็นแบบนี้ การเจาะรูเป็นขั้นจำเป็นต้องจดตำแหน่งรูทางเข้าและรูทางออกของสารหล่อเย็นในตำแหน่งที่เหมาะสม



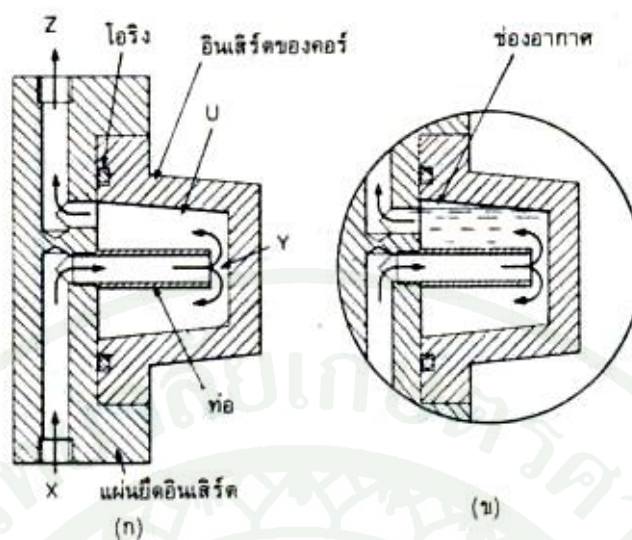
ภาพที่ 34 การหล่อเย็นแผ่นคอร์แบบขั้นเดียวโดยใช้วงจรหล่อเย็นแบบเป็นขั้น

3.3.2 การหล่อเย็นอินเสิร์ตของคอร์ที่มีความหนาแน่นมาก หลักการออกแบบวงจรก็เพียงทำให้สารหล่อเย็นไหลลึกเข้าไปในอินเสิร์ตเพื่อระบายความร้อนออกจากผิวของส่วนคอร์เท่านั้น ซึ่งมีวิธีออกแบบอยู่หลายวิธีด้วยกัน ดังนี้

3.3.2.1 แบบช่องหล่อเย็นลึก (Deep chamber design) แบบนี้ (ภาพที่ 35) ตรงส่วนด้านล่างของแผ่นอินเสิร์ตจะตกต่ำเป็นช่องลึก (U) ช่องนี้โดยปกติจะทำการเป็นช่องทางกระบอกกลมเพื่อให้ตัดเฉือนได้ง่าย จากนั้นแผ่นอินเสิร์ตจะถูกนำไปยึดเข้ากับช่องที่ทำไว้ในแผ่นยึดอินเสิร์ตด้วยสกรู โอริงจะถูกใส่ไว้ในร่องตรงรอยต่อระหว่างแผ่นอินเสิร์ตกับแผ่นยึดอินเสิร์ตเพื่อป้องกันการรั่วไหลของสารหล่อเย็น ขณะหล่อเย็นภายในช่องจะเต็มไปด้วยสารหล่อเย็น โดยสารหล่อเย็นจะไหลเข้าจากรูทางเข้า (x) ผ่านเข้าไปในรูเจาะและท่อ กระบอบบริเวณศูนย์กลาง (y) ของช่องหล่อเย็น สำหรับแม่พิมพ์แบบอิมเพรสชันเดียว ตรงบริเวณศูนย์กลางนี้จะเป็นส่วนของอินเสิร์ตที่ร้อนที่สุด เนื่องจากอยู่ตรงข้ามกับรูฉีดเข้าโดยตรง

การหล่อเย็นอินเสิร์ตที่หนาแน่น ๆ ด้วยวิธีนี้เป็นแบบที่ถูกที่สุด แต่การออกแบบใช้ช่องหล่อเย็นลึกแบบนี้มีข้อเสียใหญ่ ๆ อยู่ 2 ประการ คือ

1. ความเร็วไหลของสารหล่อเย็นจะลดลงเมื่อไหลเข้าไปในช่องหล่อเย็น ซึ่งหมายความว่าลักษณะการไหลวนของสารหล่อเย็นจะไม่เกิดขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพในการระบายความร้อนไปยังสารหล่อเย็นมีค่าต่ำ
2. ถ้าหากการออกแบบไม่ถูกต้องหรือทำผิดพลาด จะทำให้เกิดช่องอากาศทางด้านบนของช่องหล่อเย็นดังแสดงในภาพที่ 35 (ข) ซึ่งจะทำให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิบนผิวของส่วนคอร์ และจะเกิดปัญหากับชิ้นงานในภายหลัง ช่องอากาศในที่นี้เกิดจากการวางตำแหน่งรูทางออกของสารหล่อเย็น (Z) ไม่ถูกต้อง ตำแหน่งของรูทางออกจะต้องอยู่ตรงจุดที่สูงที่สุด และช่องหล่อเย็นเมื่อประกอบแม่พิมพ์เข้ากับเครื่องฉีดพลาสติก ด้วยเหตุผลข้อนี้ในการออกแบบระบบหล่อเย็นแม่พิมพ์ที่เป็นแบบช่องหล่อเย็นลึก จะต้องทำเครื่องหมายแสดงตำแหน่งการจับยึดแม่พิมพ์เข้ากับเครื่องฉีดพลาสติกไว้ด้วย การออกแบบวิธีนี้ได้ประโยชน์มากในกรณีที่ต้องทำการผลิตไม่ใช่สิ่งสำคัญและราคาแม่พิมพ์จะต้องต่ำที่สุด



ภาพที่ 35 การหล่อเย็นอินเสิร์ตของส่วนคอร์ที่หนาแบบช่องหล่อเย็นลึก (ก) ระบบช่องหล่อเย็นลึก (ข) การวางตำแหน่งรูทางออกที่ไม่ถูกต้อง

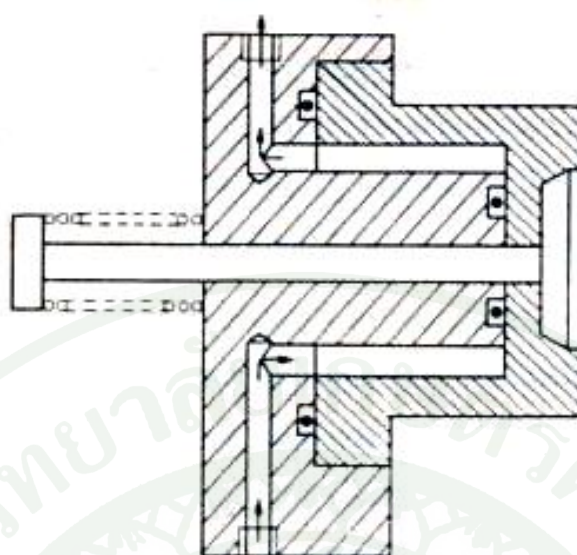
3.3.2.2 แบบช่องหล่อเย็นลึกมีการรองรับตรงศูนย์กลาง (Deep chamber design with central support) ระบบนี้ได้แสดงไว้ในภาพที่ 36 การรองรับจะใช้เสาตรงศูนย์กลาง ซึ่งอาจเป็นชิ้นเดียวกับแผ่นยึดอินเสิร์ตหรือทำให้เป็นส่วนแยกต่างหาก หากความลึกของช่องหล่อเย็นมากทำให้จำเป็นต้องใช้เสารองรับที่ค่อนข้างยาว มักนิยมทำเป็นชิ้นส่วนแยกต่างหาก

การออกแบบใช้เสารองรับตรงศูนย์กลางมีวัตถุประสงค์เบื้องต้นอยู่ 2

ประการ คือ

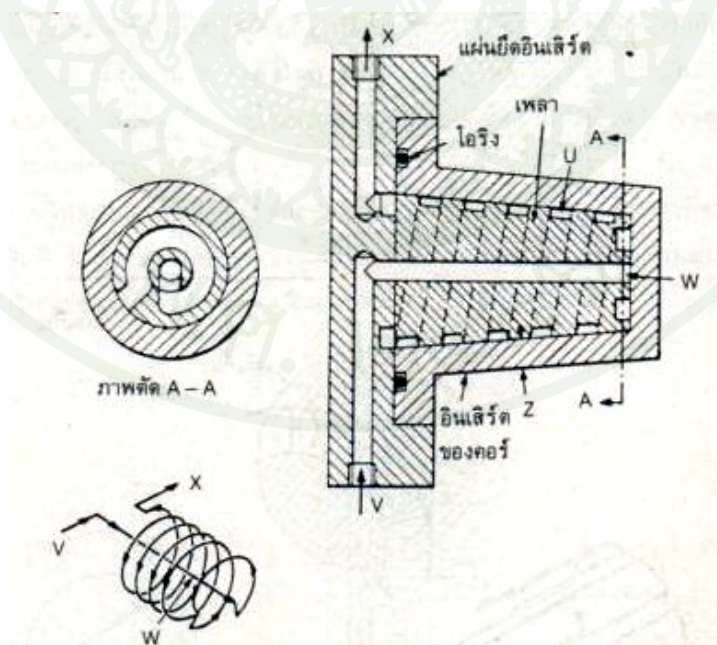
1. ใช้รองรับบริเวณศูนย์กลางของส่วนคอร์เพื่อป้องกันการบิดงอหรือโก่ง
2. เพื่อให้บริเวณศูนย์กลางของช่องหล่อเย็นเป็นเนื้อตันใช้ประกอบขึ้นได้ปลดได้ ข้อควรระวังก็คือ หากมีลิ้นตันปลดประกอบและใช้เสารองรับแบบแยกชิ้นต่างหาก จะต้องใส่โอริงเพิ่มขึ้นอีกเพื่อป้องกันการหล่อเย็นรั่วเข้าไปตามลิ้นตันปลด

แบบนี้จะมีข้อเสียเช่นเดียวกับแบบที่แล้วเหมือนกัน กล่าวคือ ความเร็วในการไหลของสารหล่อเย็นจะลดลงเมื่อไหลเข้าไปในร่องวงแหวนและอาจเกิดช่องอากาศขึ้นได้เหมือนกัน



ภาพที่ 36 การหล่อเย็นอินเสิร์ตของคอร์แบบใช้ช่องหล่อเย็นเกลียวที่มีเสารองรับตรงศูนย์กลาง

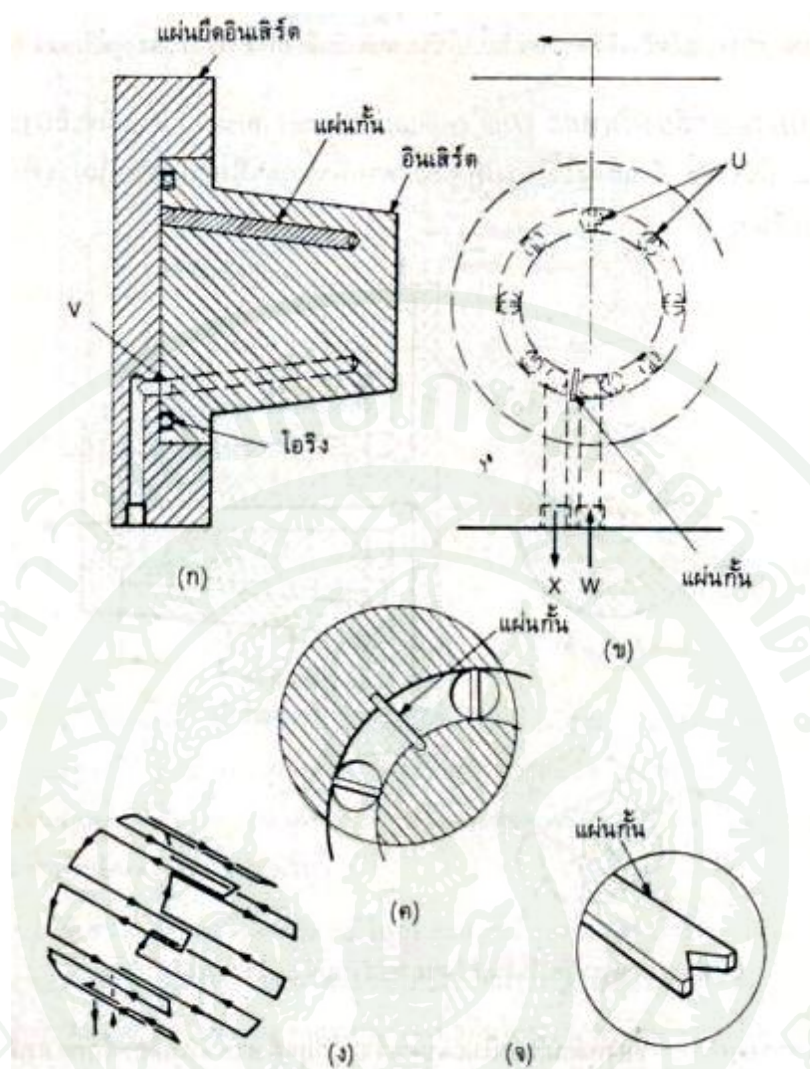
3.3.2.3 แบบร่องเกลียวกันหอย (The helical channel design) แสดงไว้ในภาพที่ 37  
แบบนี้จะมีประสิทธิภาพในการหล่อเย็นดีกว่า 2 แบบข้างต้น หากพิจารณาถึงค่าใช้จ่ายในการทำ  
แม่พิมพ์แบบนี้จะมีราคาสูงกว่าแบบอื่นๆ



ภาพที่ 37 การหล่อเย็นอินเสิร์ตของคอร์แบบใช้ร่องเกลียวกันหอย

ลักษณะการออกแบบช่องหล่อเย็นลึกในแผ่นคอร์จะถูกอุดด้วยเพลาลูกหรือทองเหลืองรอบ ๆ เพลานี้จะทำเป็นร่องเกลียวกันหอย (U) และเจาะรูต่อวงจรหล่อเย็นบนแผ่นยัดอินเสิร์ตและบนเพลาลูกให้ทะลุถึงร่องเกลียวกันหอย สารหล่อเย็นจะไหลเข้ามาทางรูทางเข้า (V) และไหลเข้าไปตามรูตรงศูนย์กลาง (W) ผ่านไปตามร่องตรงปลายของเพลาลูก (ดูภาพตัด A-A) และไหลลงตามร่องเกลียวกันหอยจนไหลออกที่รูทางออก (X) แผ่นคอร์จะยึดอยู่กับแผ่นอินเสิร์ตโดยมีโอริงเป็นซีลกันรั่ว การออกแบบใช้วงจรลักษณะนี้ทำให้เกิดวงจรไหลของสารหล่อเย็นอย่างต่อเนื่องโดยไม่เกิดการอัดตัวของสารหล่อเย็นเนื่องจากช่องทางไหลที่อุดตัน เพราะเทคนิคการทำร่องหรือรู เพลาลูกจะทำหน้าที่รองรับอินเสิร์ตได้อย่างแข็งแรง ดังนั้นหนังของอินเสิร์ต (Z) จึงสามารถทำให้บางได้มากกว่าวงจรแบบอื่น ทำให้สามารถระบายความร้อนได้รวดเร็วกว่าเพราะสารหล่อเย็นไหลผ่านใกล้กับผิวด้านนอกของอินเสิร์ตมาก

3.3.2.4 ระบบรูหล่อเย็นแบบใช้แผ่นกั้น (Baffle hole system) รูทางไหลของสารหล่อเย็น (U) ในที่นี้จะเกิดจากการใช้แผ่นกั้น ดังแสดงในภาพที่ 38 โดยการเจาะรูทางด้านใต้ของแผ่นอินเสิร์ตให้แนวรูเจาะขนานไปกับผิวด้านนอกของส่วนคอร์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูเจาะจะอยู่ระหว่าง 13 มม. ถึง 25 มม. ซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดของอินเสิร์ต ทางด้านใต้ของแผ่นอินเสิร์ตจะทำเป็นร่องวงแหวน (V) เพื่อต่อรูเจาะให้ติดต่อถึงกัน ส่วนแผ่นกั้นจะประกอบเข้ากับร่องที่กัดในแนวตั้งฉากกับร่องวงแหวน (ดังภาพที่ 38ค) รูทางเข้า (W) และรูทางออก (X) จะเจาะทะลุเข้าไปในแผ่นยัดอินเสิร์ตโดยอยู่ด้านข้างทั้งสองของแผ่นกั้น (ดูภาพที่ 38ข) เพื่อให้แน่ใจว่าสารหล่อเย็นไหลเวียนในรูที่เจาะใช้ จะต้องประกอบแผ่นกั้นเข้าไปในรูแต่ละรู ตรงปลายด้านบนของแผ่นกั้นจะทำเป็นร่องตัววีเพื่อให้สารหล่อเย็นไหลกลับ (ภาพ 38จ) ส่วนด้านล่างของแผ่นกั้นจะแนบสนิทกับผิวของแผ่นยัดอินเสิร์ตเพื่อป้องกันการสูญเสียสารหล่อเย็น โดยปกติแผ่นกั้นจะทำด้วยทองเหลือง (ภาพที่ 38ง) เป็นไดอะแกรมแสดงการไหลของสารหล่อเย็น และเช่นเดียวกันเมื่อประกอบอินเสิร์ตเข้ากับแผ่นยัดอินเสิร์ต จะต้องใส่โอริงไว้เพื่อป้องกันการรั่วของสารหล่อเย็น ทั้งนี้การออกแบบวงจรทางไหลของสารหล่อเย็นที่กล่าวมาข้างต้นนั้น เหมาะสำหรับอินเสิร์ตของคอร์ที่มีขนาดใหญ่



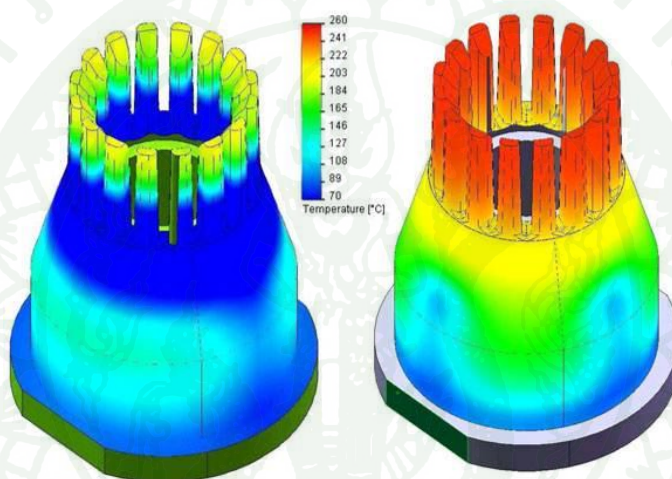
ภาพที่ 38 การหล่อเย็นอินเลอร์ของส่วนคอแบบระบบหล่อเย็นแบบใช้แผ่นกัน (ก) ภาพตัดของส่วนคอ (ข) แสดงภาพด้านหน้าบางส่วน (ค) ภาพด้านหลังของส่วนคอรับส่วนแสดงการประกอบแผ่นกัน (ง) โคอะแกรมวงจรทางไหล (จ) ปลายของแผ่นกัน

### 3.4 ระบบหล่อเย็นแบบชิดผิว (Conformal Cooling System)

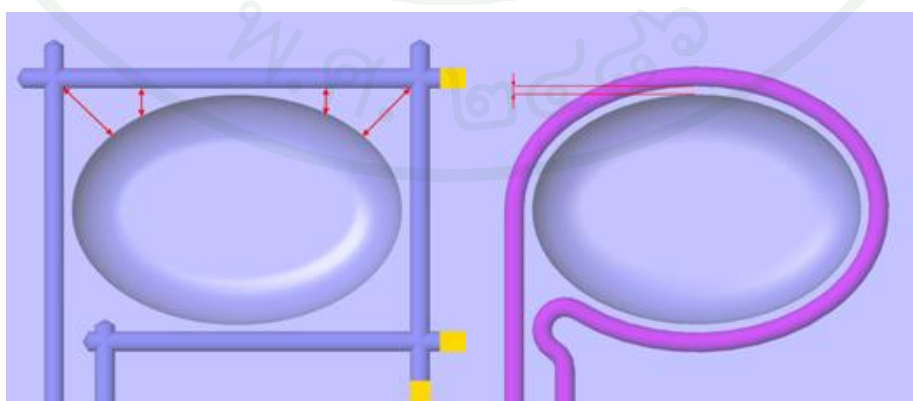
ระบบหล่อเย็นแบบชิดผิวในแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกนั้นถูกพัฒนาขึ้นเพื่อสร้างช่องระบายความร้อนที่มีลักษณะเป็นไปตามรูปร่างของแม่พิมพ์ เพื่อให้บริเวณที่มีความร้อนวิกฤตได้รับการระบายความร้อนอย่างทั่วถึง เช่น บริเวณที่ระบายความร้อนได้ยาก บริเวณที่มีความหนามาก หรือ บริเวณที่ช่องระบายความร้อนแบบทั่วไปไม่สามารถเข้าถึงได้ เทคโนโลยีระบบหล่อเย็นแบบชิดผิวจะ

ช่วยให้ชิ้นงานมีการระบายความร้อนอย่างสม่ำเสมอมากขึ้น ซึ่งจะเป็นการช่วยลดเวลาในกระบวนการฉีดขึ้นรูปชิ้นงาน ทั้งนี้ยังเป็นการเพิ่มผลผลิตและปรับปรุงคุณภาพชิ้นงานด้วย

ในความเป็นจริง การระบายความร้อนเป็นส่วนที่สำคัญมากของกระบวนการฉีด ระบบระบายความร้อนแบบฉีดผิวใช้เวลาหลายปีในการพัฒนาในเรื่องการป้องกันการรั่วไหลของน้ำหล่อเย็น และป้องกันความเสียหายของแม่พิมพ์ การเกิดขึ้นของเครื่องพิมพ์สามมิติ (3D printing) หรือวิธีการผลิตโดยวิธีเติมเนื้อโลหะ เช่น Direct Metal Laser Sintering (DMLS) ถือเป็น โอกาสใหม่ในการพัฒนา และปรับปรุงรูปแบบของระบบหล่อเย็นแบบฉีดผิวในแม่พิมพ์ฉีดในอนาคตต่อไป



ภาพที่ 39 แสดงความร้อนของชิ้นส่วนแม่พิมพ์ขณะฉีด ภาพซ้ายใช้ระบบหล่อเย็นแบบฉีดผิว ภาพขวาใช้ระบบหล่อเย็นแบบทั่วไป



ภาพที่ 40 แสดงระบบหล่อเย็นแบบทั่วไปและแบบฉีดผิว ภาพซ้ายระบบหล่อเย็นแบบทั่วไป ภาพขวา ระบบหล่อเย็นแบบฉีดผิว

## อุปกรณ์และวิธีการ

### อุปกรณ์

#### 1. ซอฟต์แวร์

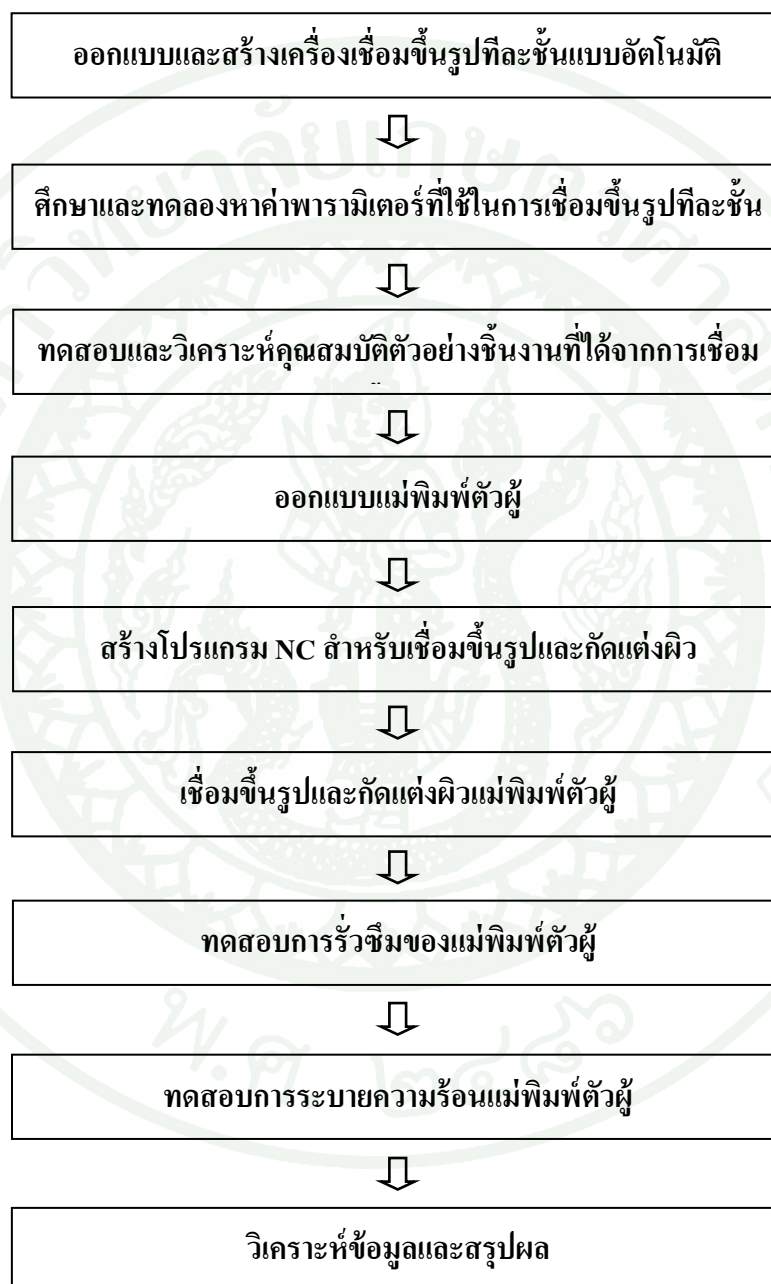
- 1.1 โปรแกรม Solidworks สำหรับเขียนแบบสามมิติ
- 1.2 โปรแกรม Solidworks Simulation สำหรับวิเคราะห์ความแข็งแรงของชิ้นงาน
- 1.3 โปรแกรม SolidCAM สำหรับสร้างเส้นทางเดินของหัวเชื่อมและสร้างโปรแกรมกัดผิว
- 1.4 โปรแกรม Autodesk Simulation Moldflow สำหรับวิเคราะห์การฉีดพลาสติก
- 1.5 โปรแกรม Mach 3 สำหรับควบคุมเครื่องเชื่อม CNC มิก/แม็ก

#### 2. ฮาร์ดแวร์

- 2.1 คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล (Personal Computer)
- 2.2 เครื่องเชื่อม Gas Metal Arc Welding (GMAW) ยี่ห้อ Tanking รุ่น NBC-300
- 2.3 ลวดเชื่อมมิก เกรด ER70S-6 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.2 mm ยี่ห้อ YAWATA
- 2.4 แผ่นเหล็กรองพื้น SS400 ขนาด 250 × 200 × 25 mm
- 2.5 ถังก๊าซ CO<sub>2</sub> พร้อมอุปกรณ์ควบคุมแรงดันและมาตรวัดการไหล
- 2.6 เครื่อง Mini CNC แบบ 3 แกน
- 2.7 เวอร์เนียคาลิเปอร์
- 2.8 เครื่องเจียรไฟฟ้า
- 2.9 เครื่องกัด CNC แบบ 3 แกน ยี่ห้อ Makino รุ่น BMC 60
- 2.10 เครื่องทดสอบความยูนีเวอร์แซล (Universal Hardness Tester) ยี่ห้อ INDENTEC
- 2.11 เครื่องทดสอบแรงดึงและการดัดงอภายใต้การควบคุมอุณหภูมิ (Temperature-controlled Universal Test Machine) ยี่ห้อ INSTRON รุ่น 5969
- 2.12 ชุดอุปกรณ์ทดสอบการรั่วซึมของแม่พิมพ์
- 2.13 ชุดอุปกรณ์ทดสอบการระบายความร้อนของแม่พิมพ์
- 2.14 อุปกรณ์ความปลอดภัย (แว่นตากันสะเก็ด, หน้ากากกันสะเก็ด, หน้ากากกรองอากาศ, ที่ครอบหูลดเสียง, ถุงมือหนักันความร้อน)

## วิธีการ

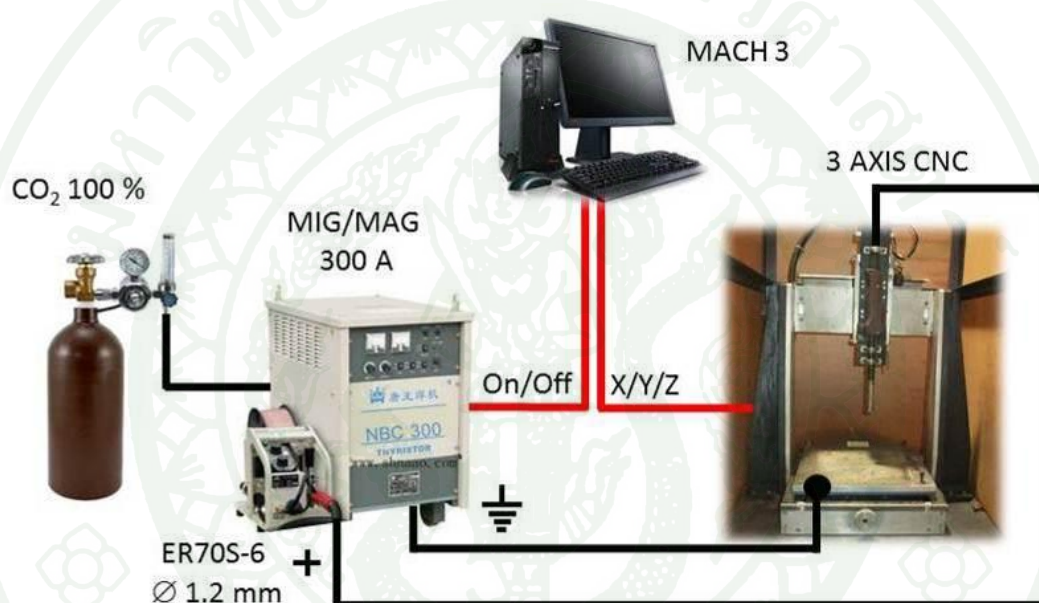
ขั้นตอนการดำเนินงานการวิจัย ได้แสดงในภาพที่ 41



ภาพที่ 41 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

## 1. ออกแบบและสร้างเครื่องเชื่อมขึ้นรูปทีละชั้นแบบอัตโนมัติ

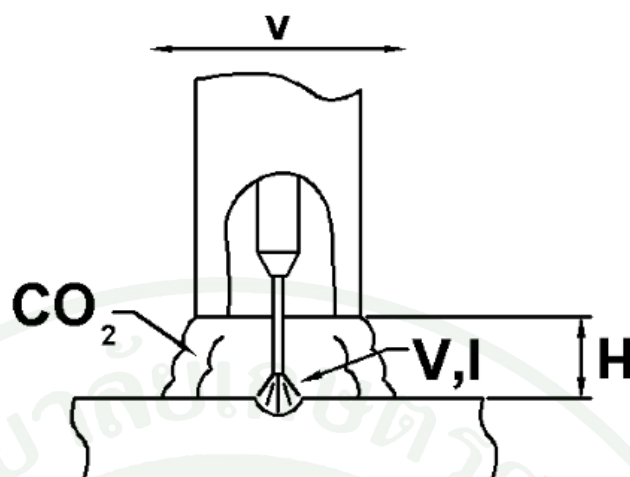
เครื่องเชื่อมขึ้นรูปทีละชั้นแบบอัตโนมัติที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ประกอบไปด้วยอุปกรณ์ 2 ชุด คือ ชุดเครื่องเชื่อมมิก/แม็ก และชุดเครื่องซีเอ็นซีขนาดเล็ก แบบ 3 แกน ที่มีระยะเคลื่อนที่แกน X, Y และ Z คือ 250 mm, 250 mm และ 120 mm ตามลำดับ โดยจะทำการรวมอุปกรณ์ทั้ง 2 ชุดเข้าด้วยกัน โดยทำการติดตั้งหัวเชื่อมของเครื่องเชื่อมมิก/แม็ก เข้ากับแกน Z หรือแกนในแนวตั้งของเครื่อง ซีเอ็นซีขนาดเล็ก ที่ควบคุมแบบอัตโนมัติผ่านคอมพิวเตอร์ ดังแสดงในภาพที่ 42



ภาพที่ 42 ส่วนประกอบของเครื่องเชื่อมขึ้นรูปทีละชั้นแบบอัตโนมัติ

## 2. ศึกษาและทดลองหาค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการเชื่อมขึ้นรูปทีละชั้น

ขั้นตอนแรกทำการตรวจสอบค่าพารามิเตอร์สำหรับการเชื่อม MIG ด้วยลวดเชื่อม Mild Steel เกรด ER70S-6 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.2 มม. ด้วยเครื่องเชื่อม MIG/MAG ชนิดค่าความต่างศักย์คงที่จากหนังสือและงานวิจัยต่างๆ จากนั้นนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้มาเป็นพารามิเตอร์ตั้งต้น เพื่อทดลองและปรับเปลี่ยนค่าให้เหมาะสมในการเชื่อมขึ้นรูปต่อไป ซึ่งมีรายละเอียดดังภาพที่ 43 และตารางที่ 6



ภาพที่ 43 ตัวอย่างค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการเชื่อม

ตารางที่ 6 พารามิเตอร์ตั้งต้นสำหรับการเชื่อมขึ้นรูปด้วยเครื่องซีเอ็นซี มิก/แม็ก

| รายละเอียด                                  | ค่าพารามิเตอร์  |
|---------------------------------------------|-----------------|
| กระแสไฟฟ้า (I), แอมแปร์                     | 100 - 200       |
| ความต่างศักย์ (V), โวลต์                    | 19 - 23         |
| ความสูงระหว่างชิ้นงานกับหัวเชื่อม (H), มม.  | 6 - 15          |
| ปริมาณก๊าซคลุม ( $\text{CO}_2$ ), ลิตร/นาที | 10 - 25         |
| ความเร็วเดินหัวเชื่อม (v), มม./นาที         | 200 - 500       |
| ระยะเหลื่อมของแนวเชื่อม (D), มม.            | 1 - 5           |
| รูปแบบเส้นทางเดินของหัวเชื่อม               | Contour, Zigzag |

ในการทดลองเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการเชื่อมขึ้นรูป จะแบ่งออกเป็น 3 การทดลอง คือการทดลองที่ 1 จะทดลองเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่ 1 – 5 ตามตารางที่ 6 ส่วนการทดลองที่ 2 และ 3 จะเป็นการทดลองหาค่าพารามิเตอร์ที่ 6 และ 7 ตามลำดับ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

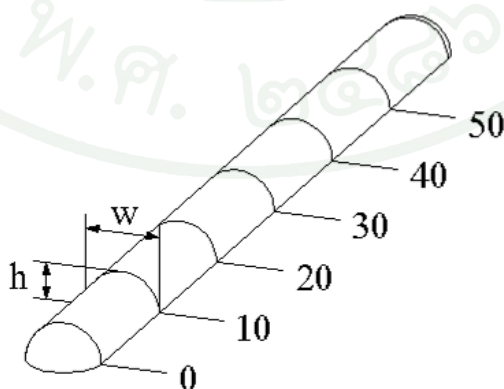
## 2.1 การทดลองที่ 1

2.1.1 ทำการปรับค่ากระแสและความต่างศักย์ โดยกำหนดค่าอื่นๆ คงที่ดังนี้ ความสูงระหว่างชิ้นงานกับหัวเข็ม 10 มม. ความเร็วในการเดินหัวเข็ม 300 มม./นาที่ แก๊สคลุม  $\text{CO}_2$  15 ลิตร/นาที่ ทำการเลือกค่ากระแสกับความต่างศักย์ที่เหมาะสม โดยพิจารณาจากรอยแนวเข็มและสะเก็ดไฟระหว่างการเชื่อม

2.1.2 เมื่อได้ค่ากระแสและความต่างศักย์ที่เหมาะสม จึงทำการปรับความสูงระหว่างชิ้นงานกับหัวเข็ม ทำการเลือกความสูงที่ระหว่างชิ้นงานกับหัวเข็มที่เหมาะสมโดยพิจารณาจากรอยแนวเข็มและสะเก็ดไฟระหว่างการเชื่อม

2.1.3 ทำการปรับปริมาณแก๊สคลุม โดยจะทดลองปริมาณแก๊สคลุมระหว่าง 10-25 ลิตร/นาที่ โดยคงค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากข้อ 2.1.1 และ 2.1.2 จากนั้นทำการเลือกปริมาณแก๊สคลุมที่เหมาะสม โดยพิจารณาจากรอยแนวเข็มและสะเก็ดไฟระหว่างการเชื่อม

2.1.4 นำพารามิเตอร์ที่เลือกจากการทดลองที่ 2.1.1 ถึง 2.1.3 มาทำการเชื่อมเป็นแนวยาว 60 มม. โดยใช้ความเร็วในการเดินหัวเข็ม ( $v$ ) ระหว่าง 200-500 มม./นาที่ และทำการวัดระยะความกว้าง ( $w$ ) กับความสูง ( $h$ ) ของแนวเชื่อมดังแสดงในภาพที่ 42 ด้วย Vernier Caliper รอยเชื่อมละ 5 ตำแหน่งที่ระยะ 10, 20, 30, 40, 50 มม. และทำการหาค่าเฉลี่ย จากนั้นเลือกค่าความเร็วในการเดินหัวเข็มที่ทำให้รอยแนวเชื่อมมีความสูงและความกว้างเฉลี่ยเหมาะสมในการเชื่อมขึ้นรูป



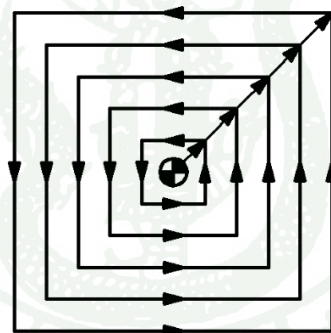
ภาพที่ 44 แสดงการวัดระยะความกว้างและความสูงของแนวเชื่อม

## 2.2 การทดลองที่ 2

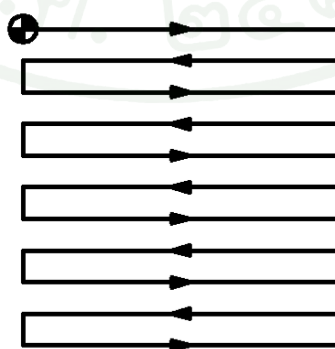
นำค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลองที่ 1 มาทำการเชื่อม 5 แนวติดกัน โดยเว้นระยะห่างในแต่ละแนวเท่าๆกัน และทำการเปลี่ยนระยะห่างในแต่ละแนว ตั้งแต่ 1 - 5 มม. จากนั้นเลือกค่าระยะห่างระหว่างแนวเชื่อมที่เหมาะสมที่สุดในการเชื่อมขึ้นรูปโดยพิจารณาจากความเรียบของรอยต่อระหว่างแนวเชื่อม

## 2.3 การทดลองที่ 3

การทดลองและหารูปแบบเส้นทางการเดินของหัวเชื่อมที่เหมาะสมในการเชื่อมขึ้นรูป โดยนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลองที่ 1 และ 2 มาทำการเชื่อมแบบในรูปแบบ Spiral และ Zigzag ดังแสดงในภาพที่ 45 และ 46 ตามลำดับ ซึ่งในการเลือกรูปแบบมาใช้งานจะพิจารณาจากพื้นผิวบนของแนวเชื่อมว่ามีความเรียบสม่ำเสมอและมีความต่อเนื่องที่สุด



ภาพที่ 45 รูปแบบเส้นทางการเดินของหัวเชื่อมแบบ Spiral



ภาพที่ 46 รูปแบบเส้นทางการเดินของหัวเชื่อมแบบ Zigzag

### 3. การทดสอบและวิเคราะห์คุณสมบัติตัวอย่างชิ้นงานที่ได้จากการเชื่อม

ในการทดสอบคุณสมบัติทางกลของชิ้นงานนี้จะนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลองในหัวข้อที่ 2 ข้างต้น มาทำการเชื่อมขึ้นรูป กัดแต่งรูปร่างและขนาด จากนั้นทดสอบตามมาตรฐาน ASTM (American Society for Testing and Materials) โดยมีการทดสอบทั้งหมด 3 วิธีคือ การทดสอบความแข็งแบบร็อกเวลล์ การทดสอบแรงดึง และการทดสอบการดัดโค้ง

เนื่องจากในงานวิจัยนี้เป็นการเชื่อมขึ้นรูปชิ้นงานที่เป็นแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก ฉะนั้นจึงได้มีการทดสอบแรงดึงที่และทดสอบการดัดโค้งของชิ้นงานที่ได้จากการเชื่อมขึ้นรูปทั้งที่อุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิใช้งานสูงสุดของแม่พิมพ์ คือ 25 และ 80 องศาเซลเซียสตามลำดับ เพื่อที่จะนำผลที่ได้จากการทดสอบค่าที่ได้ไปใช้ในขั้นตอนการออกแบบแม่พิมพ์ได้อย่างถูกต้องปลอดภัยต่อการใช้งานจริง ซึ่งรายละเอียดการทดสอบมีดังนี้

#### 3.1 การทดสอบความแข็งแบบร็อกเวลล์ (Rockwell Hardness Testing)

การทดสอบความแข็งของชิ้นงาน ทำเพื่อวัดความแข็งจะเป็นการทดสอบความสามารถของโลหะในการต้านทานต่อการแปรรูปถาวร เมื่อถูกแรงกดจากหัวกดลงบนชิ้นงานทดสอบ

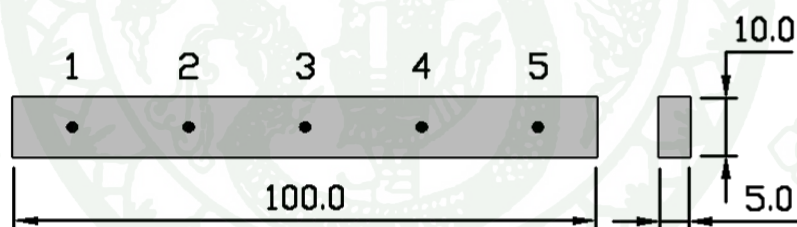
ขั้นตอนแรกทำการเตรียมชิ้นงานทดสอบ โดยนำค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองมาเชื่อมขึ้นรูปชิ้นงานและกัดแต่งให้มีขนาดดังภาพที่ x จากนั้นทำการขึ้นรูปเหล็กเกรด SS400 โดยให้มีขนาดเดียวกันเพื่อเปรียบเทียบค่าความแข็ง จากนั้นนำชิ้นงานเข้าทดสอบความแข็งแบบร็อกเวลล์ สเกล C ตามมาตรฐาน ASTM E18 - 08b (Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials) ด้วยเครื่องทดสอบความแข็งยูนิเวอร์แซล ดังภาพที่ 47 โดยจะทดสอบชิ้นงานละ 5 ตำแหน่ง ดังภาพที่ 48 โดยขั้นตอนการทดสอบมีดังนี้

1. เตรียมเครื่องทดสอบความแข็งยูนิเวอร์แซล (ทดสอบแบบร็อกเวลล์ สเกล C)
  - หัวกด Diamond Cone มุมปลาย 120 องศา รัศมีปลายโคน 0.2 มม.
  - แรงกดรวม 150 Kgf
2. นำชิ้นงานทดสอบวางบนแท่นรองรับ ซึ่งตั้งฉากกับหัวกด
3. ชันเกลียวแท่นรองรับชิ้นงานเพื่อให้ชิ้นงานสัมผัสกับหัวกด
4. ทำการกดทดสอบความแข็งชิ้นงานทั้ง 5 จุด

## 5. บันทึกค่าความแข็งที่ได้จากการทดสอบ



ภาพที่ 47 เครื่องทดสอบความแข็งยูนิเวอร์แซล ยี่ห้อ IDENTEC



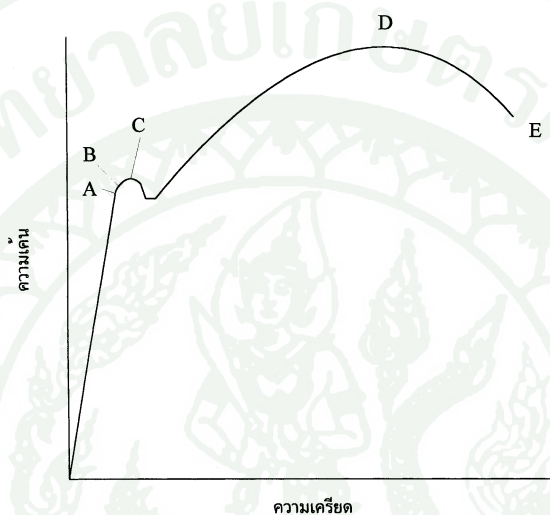
ภาพที่ 48 แสดงขนาดชิ้นงานทดสอบความแข็งแบบร็อคเวลล์



ภาพที่ 49 แสดงชิ้นงานทดสอบความแข็งแบบร็อคเวลล์

### 3.2 การทดสอบแรงดึง (Tension Testing) ASTM E8M – 04 (Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials)

วิธีการทดสอบนั้น เราจะนำตัวอย่างที่จะทดสอบมาดึงอย่างช้า ๆ แล้วบันทึกค่าของความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นไว้ แล้วมาพล็อตเป็นเส้นโค้งดังภาพที่ 50

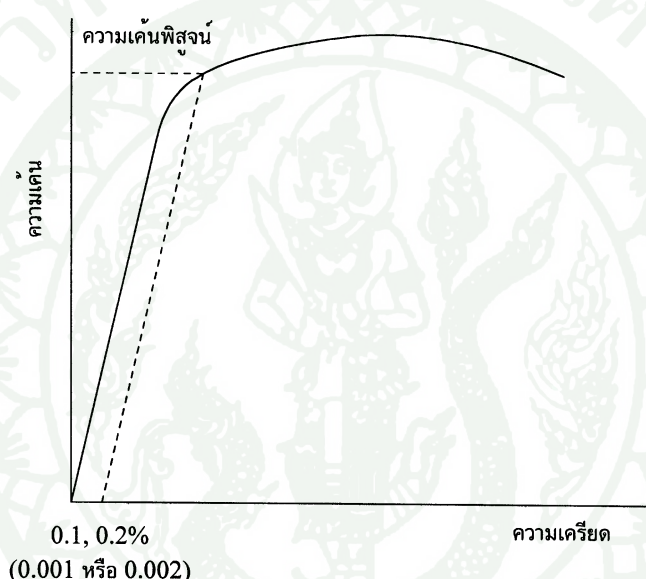


ภาพที่ 50 เส้นโค้งความเค้น-ความเครียด (Stress-Strain Curve) แบบมีจุดคราก (Yield Point)

จากการศึกษาเส้นโค้งความเค้น-ความเครียด เราพบว่า เมื่อเราเริ่มดึงขึ้นทดสอบอย่างช้า ๆ ขึ้นทดสอบจะค่อย ๆ ยืดออก จนถึงจุดจุดหนึ่ง (จุด A) ซึ่งในช่วงนี้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดจะเป็นสัดส่วนคงที่ ทำให้เราได้กราฟที่เป็นเส้นตรง ตามกฎของฮุก (Hook's law) ซึ่งกล่าวว่าความเค้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเครียด จุด A นี้เรียกว่าพิสัยสัดส่วน (Proportional Limit) และภายใต้พิสัยสัดส่วนนี้ วัสดุจะแสดงพฤติกรรมการคืนรูปแบบยืดหยุ่น (Elastic Behavior) นั่นคือเมื่อปล่อยแรงกระทำ ขึ้นทดสอบจะกลับไปมีขนาดเท่าเดิม

เมื่อเพิ่มแรงกระทำต่อไปจนเกินพิสัยสัดส่วน เส้นกราฟจะค่อย ๆ โค้งออกจากเส้นตรง วัสดุหลายชนิดจะยังคงแสดงพฤติกรรมการคืนรูปได้อีกเล็กน้อยจนถึงจุด ๆ หนึ่ง (จุด B) เรียกว่า พิกัดยืดหยุ่น (Elastic limit) ซึ่งจุดนี้จะเป็นจุดกำหนดว่าความเค้นสูงสุดที่จะไม่ทำให้เกิดการแปรรูปถาวร (Permanent Deformation or Offset) กับวัสดุนั้น เมื่อผ่านจุดนี้ไปแล้ววัสดุจะมีการเปลี่ยนรูปอย่างถาวร (Plastic Deformation) ลักษณะการเริ่มต้นของความเครียดแบบพลาสติกนี้

เปลี่ยนแปลงไปตามชนิดของวัสดุในโลหะหลายชนิด เช่น พกกเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (Low Carbon Steel) จะเกิดการเปลี่ยนรูปร่างอย่างรวดเร็ว โดยไม่มีการเพิ่มความเค้น (บางครั้งอาจจะลดลงก็มี) ที่จุด C ซึ่งเป็นจุดที่เกิดการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก จุด C นี้เรียกว่าจุดคราก (Yield Point) และค่าของความเค้นที่จุดนี้เรียกว่า ความเค้นจุดคราก (Yield Stress) หรือ Yield Strength ค่า Yield Strength นี้มีประโยชน์กับวิศวกรมาก เพราะเป็นจุดแบ่งระหว่างพฤติกรรมการคืนรูปกับพฤติกรรมการคงรูป และในกรณีของโลหะจะเป็นค่าความแข็งแรงสูงสุดที่เราคงใช้ประโยชน์ได้โดยไม่เกิดการเสียหาย



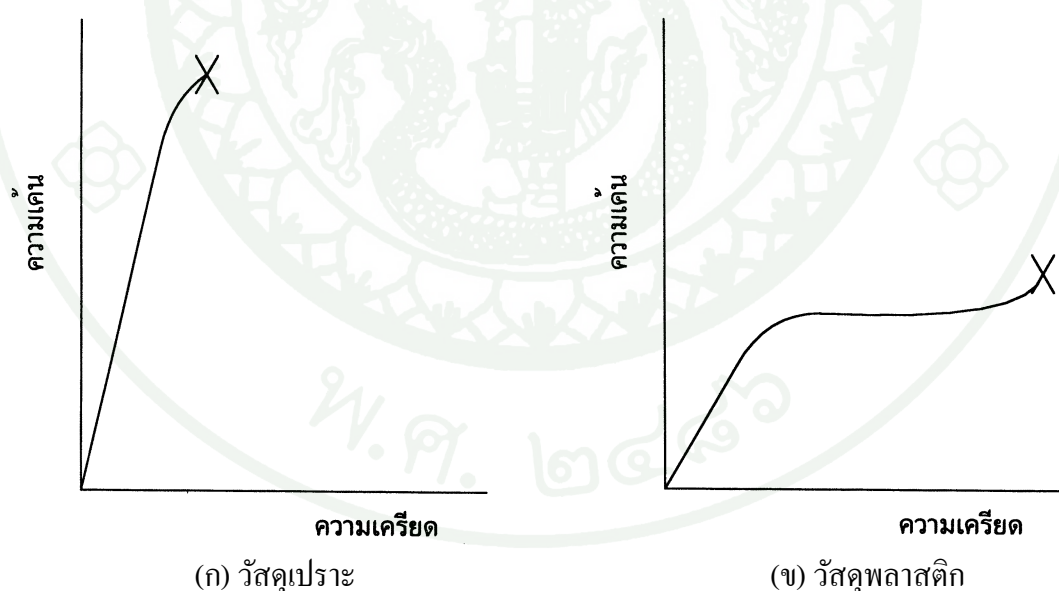
ภาพที่ 51 เส้นโค้งความเค้น-ความเครียดแบบที่ไม่มีจุดคราก

วัสดุหลายชนิดเช่น อะลูมิเนียม ทองแดง จะไม่แสดงจุดครากอย่างชัดเจน แต่เราก็มีวิธีที่จะหาได้โดยกำหนดความเครียดที่ 0.10 - 0.20% ของความยาวกำหนดเดิม (Original Gage Length) แล้วลากเส้นขนานกับกราฟช่วงแรกไปจนตัดเส้นกราฟที่โค้งไปทางด้านขวา ค่าความเค้นที่จุดตัดนี้จะนำมาใช้แทนค่าความเค้นจุดครากได้ ความเค้นที่จุดนี้บางครั้งเรียกว่า ความเค้นพิสูจน์ (Proof Stress) หรือความเค้น 0.1 หรือ 0.2% offset ดังแสดงในภาพที่ 51

หลังจากจุดครากแล้ว วัสดุจะเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกโดยความเค้นจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ หรืออาจจะคงที่จนถึงจุดสูงสุด (จุด D) ค่าความเค้นที่จุดนี้เรียกว่า Ultimate Strength หรือความเค้นแรงดึง (Tensile Strength) ซึ่งเป็นค่าความเค้นสูงสุดที่วัสดุจะทนได้ก่อนที่จะขาด

หรือแตกออกจากกัน (Fracture) เนื่องจากวัสดุหลายชนิดสามารถเปลี่ยนรูปร่างอย่างพลาสติกได้มาก ๆ ค่าความเค้นสูงสุดนี้สามารถนำมาคำนวณใช้งานได้ นอกจากนี้ ค่านี้ยังใช้เป็นดัชนีเปรียบเทียบคุณสมบัติของวัสดุได้ด้วยว่า ค่าว่า ความแข็งแรง (Strength) ของวัสดุ หรือ กำลังวัสดุนั้น โดยทั่วไปจะหมายถึงค่าความเค้นสูงสุดที่วัสดุทนได้นี้เอง

ที่จุดสุดท้าย (จุด E) ของกราฟ เป็นจุดที่วัสดุเกิดการแตกหรือขาดออกจากกัน (Fracture) สำหรับโลหะบางชนิด เช่น เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำหรือโลหะเหนียว ค่าความเค้นประลัย (Rupture Strength) นี้จะต่ำกว่าความเค้นสูงสุด เพราะเมื่อเลยจุด D ไป พื้นที่ภาคตัดขวางของตัวอย่างทดสอบลดลง ทำให้พื้นที่ที่จะต้านทานแรงดึงลดลงด้วย ในขณะที่เรายังคงคำนวณค่าของความเค้นจากพื้นที่หน้าตัดเดิมของวัสดุก่อนที่จะทำการทดสอบแรงดึง ดังนั้นค่าของความเค้นจึงลดลง ส่วนโลหะอื่น ๆ เช่น โลหะที่ผ่านการขึ้นรูปเย็น (Cold Work) มาแล้ว มันจะแตกหักที่จุดความเค้นสูงสุด โดยไม่มีการลดขนาดพื้นที่ภาคตัดขวาง ดังภาพ 52ก ทำนองเดียวกับพวกวัสดุเปราะ (Brittle Materials) เช่น เซรามิก ที่มีการเปลี่ยนรูปร่างอย่างพลาสติกน้อยมากหรือไม่มีเลย ส่วนกรณีของวัสดุที่เป็นพลาสติกจะเกิดแตกหักโดยที่อัตราการความเค้นสูงขึ้น ดังภาพ 52ข



ภาพที่ 52 เปรียบเทียบเส้นโค้งความเค้น-ความเครียดของ (ก) วัสดุเปราะ (ข) วัสดุพลาสติก

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

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

$$\text{เปอร์เซ็นต์การยืดตัว (\%El)} = \frac{L_f - L_o}{L_o} \times 100\%$$

เมื่อ  $L_f$  = ความยาวของเกจหลังจากดึงจนขาด

$L_o$  = ความยาวของเกจเริ่มต้น

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

เมื่อ  $A_o$  = พื้นที่หน้าตัดก่อนดึง

$A_f$  = พื้นที่หน้าตัดหลังจากดึงขาด

ในทางปฏิบัติเรามักใช้ค่า %El มากกว่าเพราะสะดวกในการวัด ความเหนียวของวัสดุนี้จะเป็นตัวบอกความสามารถในการขึ้นรูปของมัน คือถ้าวัสดุมีความเหนียวดี (%El สูง) ก็สามารถนำไปขึ้นรูปเช่น รีด ดึงขึ้นรูป ดึงเป็นลวด ฯลฯ ได้ง่าย แต่ถ้ามีความเหนียวต่ำ (เพราะ , Brittle) ก็จะนำไปขึ้นรูปยาก หรือทำไม่ได้ เป็นต้น

2. Modulus of Elasticity or Stiffness ภายใต้อิทธิพลของแรงที่กระทำต่อวัสดุที่มีพฤติกรรมเป็นอีลาสติก อัตราส่วนระหว่างความเค้นต่อความเครียดจะเท่ากับค่าคงที่ ค่าคงที่นี้เรียกว่า Modulus of elasticity (E) หรือ Young's Modulus หรือ Stiffness

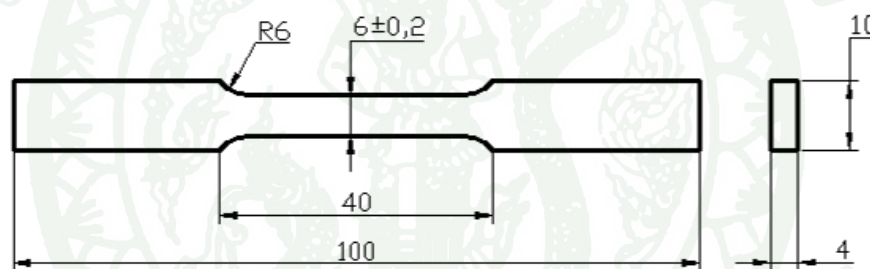
$$E = \frac{\sigma}{e} = \frac{PL}{A\Delta L}$$

ถ้าแรงที่กระทำเป็นแรงเฉือนเราเรียกค่าคงที่นี้ว่า 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 วัสดุจะเปลี่ยนรูปร่างอย่างยืดหยุ่นได้น้อย แต่ถ้า  $E$  และ  $G$  ต่ำ มันก็จะเปลี่ยนรูปร่างอย่างยืดหยุ่นได้มาก ค่า  $E$  และ  $G$  นี้มีประโยชน์มากสำหรับงานออกแบบวัสดุที่ต้องรับแรงต่าง ๆ

การทดสอบแรงดึงจะเริ่มจากการเตรียมชิ้นงานที่จะทำการทดสอบ โดยเชื่อมชิ้นขึ้นรูปขึ้นงานที่ใช้ในการทดสอบแรงดึงด้วยพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลอง จากนั้นกัดแต่งชิ้นงานเป็นรูปคัมเบล (Dumbbell) ตามมาตรฐาน ASTM E8M - 04 ดังภาพที่ 53 และ 54 จากนั้นขึ้นรูปเหล็ก SS400 ขนาดเดียวกัน เพื่อทดสอบและเปรียบเทียบค่าด้วยเครื่องทดสอบแรงดึงและการดัดงอภายใต้การควบคุมอุณหภูมิ (Temperature-controlled Universal Test Machine) ดังภาพที่ 55 โดยทดสอบชิ้นงานที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิใช้งานแม่พิมพ์อย่างละ 3 ตัวอย่าง



ภาพที่ 53 แสดงขนาดและรูปร่างชิ้นงานทดสอบแรงดึง ตามมาตรฐาน ASTM E8M-04



ภาพที่ 54 แสดงชิ้นงานทดสอบแรงดึง



ภาพที่ 55 เครื่องทดสอบแรงดึงและการดัดงอภายใต้การควบคุม

### 3.3 การทดสอบการดัดโค้ง (Bending Testing)

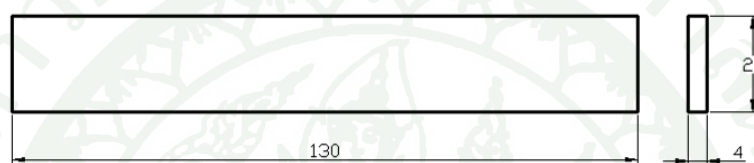
การทดสอบการดัดโค้ง เป็นการทดสอบความสามารถในการดัดโค้งของวัสดุ โดยวัสดุที่นำมาทดสอบ จะเป็นชิ้นงานที่มีหน้าตัดแบบใดก็ได้ ไม่ว่าจะเป็น หน้าตัดสี่เหลี่ยม, หน้าตัดกลม หรือหลายเหลี่ยมก็ได้ โดยมีหลักการทดสอบการดัดโค้งบนพื้นฐานเดียวกัน คือการดัดวัสดุ ให้ได้รัศมีความโค้งตามที่กำหนดไว้หรือให้ได้มุมตามที่กำหนด

ในการดัดโค้งนั้นจะต้องใช้ทิศทางของแรงดัดที่คงที่และการดัดต้องเป็นไปอย่างช้าๆ เพื่อป้องกันการเคลื่อนที่ของวัสดุในแนวข้าง หลังจากชิ้นทดสอบโค้งงอไปตามที่กำหนดแล้ว จึงทำการตรวจสอบดูว่าที่พื้นผิวด้านนอกของชิ้นทดสอบตรงบริเวณที่ดัดโค้ง ซึ่งจะเป็นบริเวณที่รับความเค้นแรงดึงในระหว่างการดัดโค้ง ว่ามีรอยแตกเกิดขึ้นหรือไม่ โดยการตรวจสอบสามารถทำได้โดยการตรวจสอบด้วยตาเปล่า หรืออาจใช้กล้องที่มีกำลังขยายไม่เกิน 20 เท่า (ปกติจะกำหนดให้ใช้ตาเปล่า) ในกรณีชิ้นงานที่มีอัตราส่วน ความกว้าง/ความหนา มากกว่า 8 ขึ้นไป ถ้าตรวจพบรอยแตกที่ขอบของชิ้นทดสอบ ให้ทำการขัดขอบของชิ้นทดสอบที่แตกนั้นให้เรียบ แล้วทำการทดสอบใหม่อีกครั้ง

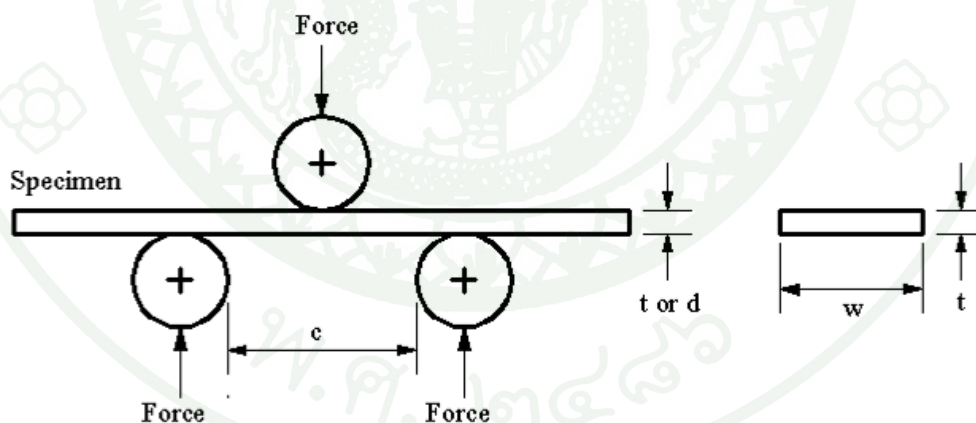
รัศมีการดัดโค้งต่ำสุด (Minimum bend radius) คือรัศมีการดัดโค้งที่ต่ำที่สุด ที่จะไม่ทำให้เกิดรอยแตกที่ผิวชิ้นทดสอบ โดยปกติจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความหนา ดังนั้นความสามารถ

ในการดัดโค้งจึงใช้บอกเป็นจำนวนเท่าของความหนาของชิ้นงาน เช่น 3t คือ ชิ้นงานสามารถทำการดัดโค้งด้วยรัศมีดัดโค้งต่ำสุดเป็น 3 เท่าของความหนาชิ้นงานโดยไม่เกิดรอยแตก

การทดสอบการดัดโค้งจะเริ่มจากการเตรียมชิ้นงานที่จะทำการทดสอบ โดยเชื่อมชิ้นขึ้นรูปชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบแรงดึงด้วยพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลอง จากนั้นกัดแต่งชิ้นงานเป็นรูปให้มีขนาดตามแสดงดังภาพที่ 56 จากนั้นทดสอบชิ้นงานตามมาตรฐาน ASTM E290 – 09 (Standard Test Methods for Bend Testing of Material for Ductility) โดยทดสอบชิ้นงานที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิใช้งานแม่พิมพ์อย่างละ 3 ตัวอย่าง



ภาพที่ 56 แสดงขนาดชิ้นงานทดสอบการดัดโค้ง



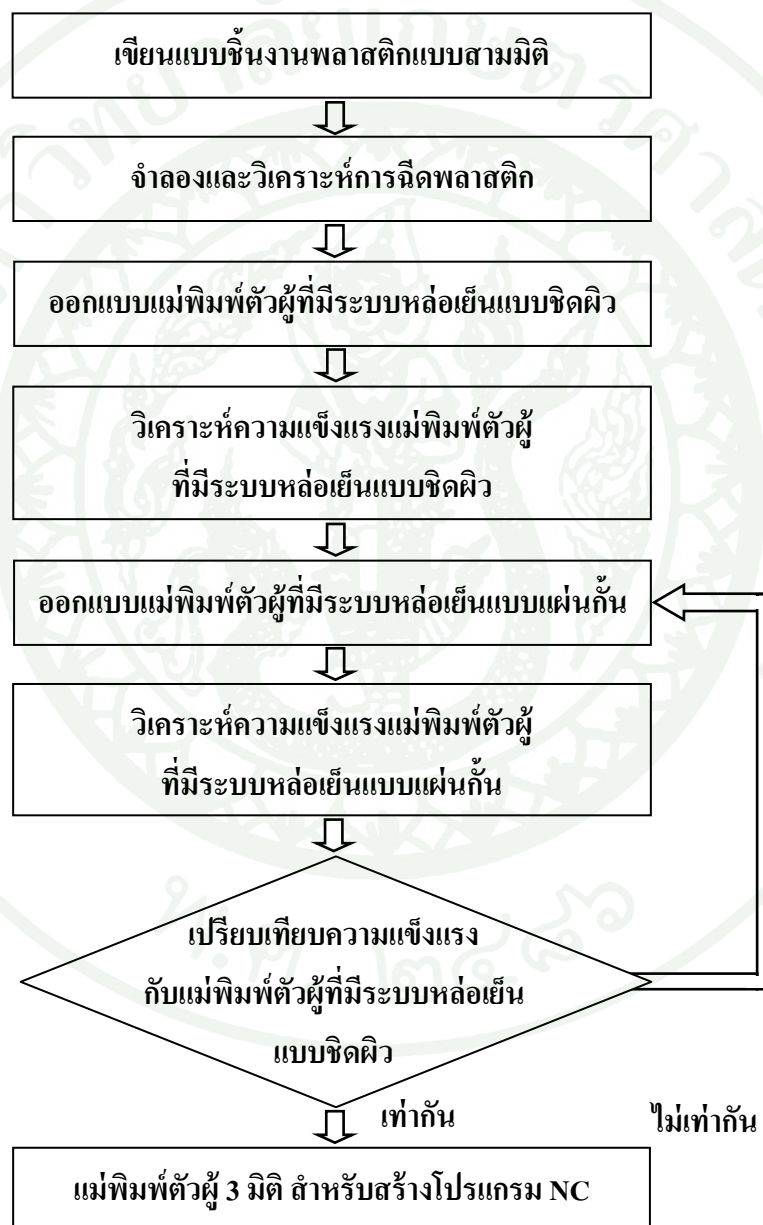
$$C = 2r + 3t \pm t/2$$

Note c = distance between lower support  
 r = radius of the end of the mandrel or plunger  
 t = sheet specimen thickness  
 d = round specimen diameter  
 w = sheet specimen width

ภาพที่ 57 การปรับตั้ง Guide Bending สำหรับการทดสอบการดัดโค้ง

#### 4. การออกแบบแม่พิมพ์ตัวผู้

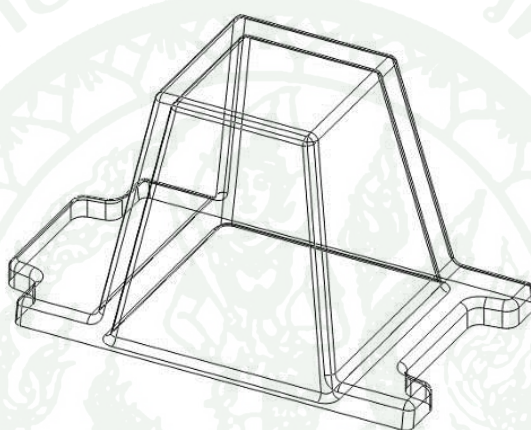
ในงานวิจัยนี้จะทำการออกแบบและสร้างแม่พิมพ์ตัวผู้ที่มีระบบหล่อเย็น 2 แบบคือ แบบฉีดผิวและอีกแบบซึ่งเป็นที่นิยมในแม่พิมพ์ทั่วไปคือแบบแผ่นกั้น ซึ่งขั้นตอนการออกแบบแม่พิมพ์ตัวผู้ได้แสดงดังภาพที่ 58



ภาพที่ 58 ขั้นตอนการออกแบบแม่พิมพ์ตัวผู้

#### 4.1 เขียนแบบชิ้นงานพลาสติกแบบสามมิติ

ขั้นตอนนี้เป็นการเขียนแบบชิ้นงานพลาสติกแบบ 3 มิติ โดยใช้โปรแกรม Solidworks 2014 ในการเขียน ชิ้นงานที่ทำการเขียนนี้เป็นชิ้นงานที่ได้จากการฉีดขึ้นรูปพลาสติกโดยแม่พิมพ์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ดังแสดงในภาพที่ 59 ซึ่งมีขนาด กว้าง × ยาว × สูง คือ กว้าง 100 × 175 × 100 มม. ความหนาผนัง 5 มม. ปริมาตร 23.06 ลบ.ซม. หลังจากนั้นจะนำไฟล์ชิ้นงานพลาสติกไปทำการจำลองและวิเคราะห์การฉีดพลาสติกในขั้นตอนต่อไป



ภาพที่ 59 แสดงชิ้นงานพลาสติกแบบ 3 มิติ

#### 4.2 จำลองและวิเคราะห์การฉีดพลาสติก

การจำลองและวิเคราะห์การฉีดพลาสติก เป็นขั้นตอนที่สร้างขึ้นเพื่อให้ทราบค่าต่างๆที่เกิดขึ้นขณะทำการฉีดพลาสติก เช่น แรงดันภายในโพรงแม่พิมพ์ที่เกิดขึ้นขณะฉีดพลาสติก แรงปิดแม่พิมพ์ เป็นต้น โดยจะต้องกำหนดค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นที่จำเป็นให้กับโปรแกรม จากนั้นโปรแกรมจะทำการคำนวณค่าออกมา ค่าพารามิเตอร์ที่กำหนดให้โปรแกรมแสดงดังตารางที่ 7

#### 4.3 การออกแบบแม่พิมพ์ตัวผู้ที่มีระบบหล่อเย็นแบบชนิดผิว

งานวิจัยนี้ได้ออกแบบระบบหล่อเย็นแบบชนิดผิวโดยพัฒนามาจากระบบหล่อเย็นแบบน้ำ ล้น โดยจะมีลักษณะทางน้ำเข้าเป็นแบบ น้ำล้นคือมีท่อตรงกลางเพื่อส่งน้ำหล่อเย็นให้ขึ้นไปในส่วนบนและมีโพรงให้น้ำหล่อเย็นไหลออกทุกทิศทาง ซึ่งน้ำหล่อเย็นจะสัมผัสผิวโพรงน้ำหล่อเย็นพร้อม

กันทุกด้าน แต่ในงานวิจัยนี้จะออกแบบให้มีข้อแตกต่างจากระบบเย็นหล่อเย็นแบบน้ำล้น ทั่วไปคือ ระบบหล่อเย็นแม่พิมพ์แบบน้ำล้นทั่วไปจะใช้วิธีเจาะโพรงด้านในเป็นรูตรง ซึ่งทำให้ความหนาของผนังแม่พิมพ์ไม่คงที่ส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนไม่สม่ำเสมอ ส่วนระบบหล่อเย็นในงานวิจัยนี้จะออกแบบให้มีความหนาของผนังแม่พิมพ์คงที่เท่ากันทุกด้านและมีความบางมากที่สุดทั้งนี้ยังคงมีความแข็งแรงเพียงพอ เพื่อให้การนำความร้อนมีความสม่ำเสมอ นอกจากนั้นยังได้ออกแบบครีบก้ำยื่นภายในของผนังแม่พิมพ์ด้านข้างและด้านบนเพื่อเพิ่มความแข็งแรงอีกด้วย ซึ่งเป็นข้อได้เปรียบของการขึ้นรูปขึ้นงานด้วยวิธีเติมเนื้อโลหะที่ละชั้น นอกจากนี้การออกแบบขนาดความหนาของผนังแม่พิมพ์และความหนาครีบก้ำรับแรงต้องพิจารณาจากความเหมาะสมและความเป็นไปได้ในการขึ้นรูปขึ้นงานจริงด้วย

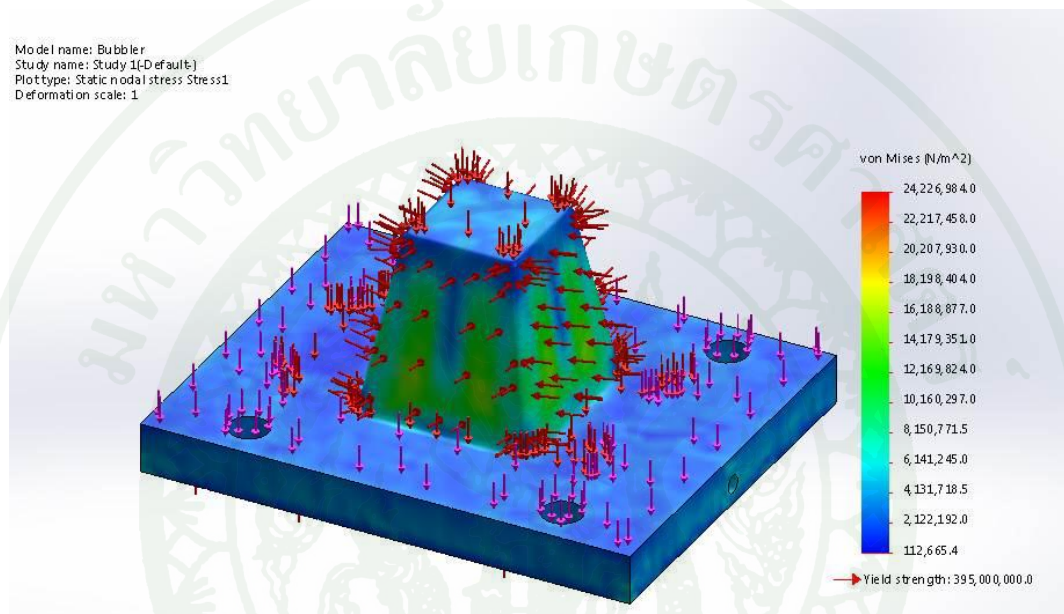
ตารางที่ 7 ค่าพารามิเตอร์ของการจำลองการฉีดพลาสติกด้วยคอมพิวเตอร์

| Parameter                  | Value              |
|----------------------------|--------------------|
| Mesh Type                  | Dual Domain Mesh   |
| Analysis Sequence          | Fill + Pack        |
| Material Properties        |                    |
| - Material Type            | Polypropylene (PP) |
| - Manufacture              | Shell              |
| - Trade Name               | JY 6100            |
| Injection Location         | 1                  |
| Process Setting            |                    |
| - Mold Surface Temperature | 50 C               |
| - Melt Temperature         | 230 C              |
| - Injection Time           | 10 s               |
| - Cooling Time             | Automatic          |

#### 4.4 วิเคราะห์ความแข็งแรงแม่พิมพ์ตัวผู้ที่มีระบบหล่อเย็นแบบฉีดผิว

หลังจากทำการออกแบบแม่พิมพ์เสร็จแล้ว จะต้องทำการวิเคราะห์ความแข็งแรงของแม่พิมพ์โดยใช้โปรแกรม Solidworks Simulation เพื่อวิเคราะห์ค่าการเสียรูป ค่าความปลอดภัย ความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นขณะที่แม่พิมพ์ได้รับภาระเสมือนขณะทำการฉีดพลาสติก ซึ่งใน

งานวิจัยนี้จะวิเคราะห์โดยใช้การรับภาระกรรมแบบสถิต (Static) คือชิ้นส่วนโลหะทางวิศวกรรมรับภาระแบบคงที่ตลอดเวลา ซึ่งประกอบไปด้วยภาระ 3 ชนิด คือ แรงปิดแม่พิมพ์ ความร้อนแม่พิมพ์และแรงดันของน้ำพลาสติกขณะฉีด ซึ่งค่าแรงปิดแม่พิมพ์และค่าแรงดันของน้ำพลาสติกขณะฉีดเป็นค่าที่ได้จากการจำลองการฉีดพลาสติกในหัวข้อที่ 4.2 ส่วนค่าความร้อนแม่พิมพ์เป็นค่าความร้อนสูงสุดของแม่พิมพ์ที่ใช้สำหรับการฉีดขึ้นงานพลาสติกชนิดโพลีโพรไพลีน (PP)



ภาพที่ 60 ตัวอย่างชิ้นงานที่ใช้ซอฟต์แวร์ Solidworks Simulation ในการวิเคราะห์ความแข็งแรง

#### 4.5 การออกแบบแม่พิมพ์ตัวผู้ที่มีระบบหล่อเย็นแบบแผ่นกัน

แม่พิมพ์ตัวผู้ที่มีระบบหล่อเย็นแบบแผ่นกันที่สร้างขึ้นเพื่อเป็นเสมือนระบบหล่อเย็นที่นิยมใช้ทั่วไปในอุตสาหกรรม โดยจะทำการเปรียบเทียบการระบายความร้อนกับแม่พิมพ์ตัวผู้ที่มีระบบหล่อเย็นแบบชนิดผิว ซึ่งช่องน้ำหล่อเย็นด้านในของแม่พิมพ์จะมีรูปร่างเป็นรูผนังตรง มีแผ่นกันบังคับน้ำหล่อเย็นให้ไหลขึ้นไปบริเวณส่วนบนของโพรงและวกกลับไหลออกอีกทาง เกณฑ์ในการออกแบบจะอ้างอิงจากค่าความโค้งตัวและค่าความปลอดภัยของแม่พิมพ์ตัวผู้ที่มีระบบหล่อเย็นแบบชนิดผิว โดยจะต้องออกแบบให้แม่พิมพ์มีค่าการโค้งตัวและค่าความปลอดภัยใกล้เคียงกับแม่พิมพ์ตัวผู้ที่มีระบบหล่อเย็นแบบชนิดผิวที่ได้ออกแบบในหัวข้อ 4.3

#### 4.6 วิเคราะห์ความแข็งแรงแม่พิมพ์ตัวผู้ที่มีระบบหล่อเย็นแบบแผ่นกัน

การวิเคราะห์ความแข็งแรงของแม่พิมพ์ตัวผู้ที่มีระบบหล่อเย็นแบบแผ่นกัน มีขั้นตอนการดำเนินงานเหมือนวิเคราะห์ความแข็งแรงแม่พิมพ์ตัวผู้ที่มีระบบหล่อเย็นแบบฉีดผิวทุกประการ โดยมีในหลักในการวิเคราะห์คือ ค่าการโก่งตัว (Displacement) และค่าความปลอดภัย (Safety factor) ที่วิเคราะห์ได้ต้องมีค่าใกล้เคียงกับค่าจากการวิเคราะห์ความแข็งแรงของแม่พิมพ์ตัวผู้ที่มีระบบหล่อเย็นแบบแผ่นกันที่วิเคราะห์ในหัวข้อที่ 4.4 ในกรณีถ้าค่าที่วิเคราะห์ได้ยังไม่ใกล้เคียง ให้ทำการแก้ไขแบบจำลองแม่พิมพ์และทำการวิเคราะห์ใหม่ ทำซ้ำเช่นนี้จนกระทั่งได้ค่าทั้งสองใกล้เคียงกันมากที่สุด หลังจากทำการออกแบบแม่พิมพ์ตัวผู้ที่มีระบบหล่อเย็นทั้งสองแบบและวิเคราะห์ความแข็งแรงจนกระทั่งมีค่าใกล้เคียงกันแล้ว ก็จะได้แบบจำลองสามมิติของแม่พิมพ์ตัวผู้ที่จะเข้าสู่ขั้นตอนการทำโปรแกรม NC และขึ้นรูปแม่พิมพ์ต่อไป

### 5. การสร้างโปรแกรม NC สำหรับเชื่อมขึ้นรูปและกัดแต่งผิว

โปรแกรม NC (Numerical Control) ทำขึ้นเพื่อใช้สั่งงานอุปกรณ์หรือเครื่องมือที่ควบคุมด้วยระบบคอมพิวเตอร์ ในงานวิจัยนี้จะมีการสร้างโปรแกรม NC ทั้งหมด 2 โปรแกรม คือ โปรแกรมที่ใช้ควบคุมเครื่องเชื่อมขึ้นรูปและโปรแกรมที่ใช้ควบคุมเครื่องกัด CNC สำหรับกัดแต่งผิวแม่พิมพ์ โดยมีรายละเอียดดังนี้

#### 5.1 การสร้างโปรแกรม NC สำหรับเชื่อมขึ้นรูปแม่พิมพ์

- ก. เปิดไฟล์ CAD แม่พิมพ์ 3 มิติ ด้วยโปรแกรม Solidworks
- ข. บันทึกไฟล์ CAD ให้เป็นนามสกุล STL
- ค. เปิดไฟล์ CAD นามสกุล STL ด้วยโปรแกรม PolyWorks เพื่อทำการสไลด์ CAD เป็นชั้น ๆ
- ง. สไลด์ CAD เป็นชั้นๆ ในบริเวณที่ต้องทำการเชื่อมขึ้นรูป ความหนาชั้นละ 2 มม. ด้วยโปรแกรม PolyWorks ความหนาชั้นละ 2 มม. และจัดเก็บไฟล์เป็นนามสกุล DXF
- จ. สร้างเส้นทางเดินของหัวเชื่อม (Toolpath) ของทุกชั้นที่ทำการเชื่อมด้วยโปรแกรม AutoCAD
- ฉ. สร้างโปรแกรม NC ของทุกชั้นที่ทำการเชื่อมด้วยโปรแกรม SolidCAM

## 5.2 การสร้างโปรแกรม NC สำหรับกัดแต่งผิวแม่พิมพ์

- ก. เปิดไฟล์ CAD แม่พิมพ์ 3 มิติ ด้วยโปรแกรม Solidworks
- ข. เปิดโปรแกรมช่วย SolidCAM เพื่อสร้าง โปรแกรม NC สำหรับกัดแต่งผิวแม่พิมพ์
- ค. กำหนดตำแหน่ง Origin โปรแกรม NC ที่กึ่งกลางผิวด้านบนของแผ่นฐานแม่พิมพ์
- ง. สร้างโปรแกรม NC กัดหยาบ และกัดละเอียดโดยมีรายละเอียดดังตารางที่ 8

ตารางที่ 8 ค่าพารามิเตอร์ของโปรแกรม NC สำหรับกัดแต่งผิวแม่พิมพ์

| Detail                  | Rough     | Finish    |
|-------------------------|-----------|-----------|
| Tool type               | Bull nose | Ball nose |
| Tool diameter (mm)      | 25        | 12        |
| Corner radius (mm)      | 3         | 6         |
| Feed rate (mm/min)      | 1000      | 1000      |
| Spindle speed (rev/min) | 1500      | 3000      |
| Toolpath type           | Contour   | Contour   |
| Overlap (mm)            | 0.65      | 0.65      |
| Step down (mm)          | 0.5       | 0.1       |
| Wall offset (mm)        | 0.5       | 0         |

## 6. การเชื่อมชิ้นรูปแม่พิมพ์ตัวผู้

การขึ้นรูปแม่พิมพ์ตัวผู้จะทำการเชื่อมขึ้นรูปด้วย เครื่องเชื่อมซีเอ็นซี มิก/แม็ก ที่ควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ตามโปรแกรม NC ที่ป้อนเข้าไป จากนั้นเครื่องจะทำการเชื่อมทีละชั้นซ้อนกัน จนได้รูปร่างชิ้นงานที่ตามออกแบบไว้ โดยมีขั้นตอนดังนี้

- ก. นำเหล็กแผ่นฐานแม่พิมพ์ที่เตรียมไว้ ทำการติดตั้งบน โต๊ะของเครื่องเชื่อมซีเอ็นซี มิก/แม็ก
- ข. ติดตั้งไดอัลเกจ (Dial gauge) ที่แกน Z ของเครื่องเชื่อม จากนั้นเคลื่อนแกน X และขอบทางด้านหน้าของแผ่นเหล็กฐานเพื่อปรับความขนานของแผ่นเหล็กฐาน จากนั้นล็อกแคลมป์ให้แน่นหนา

ค. เปิดโปรแกรม Marh 3 จากเครื่องคอมพิวเตอร์ จากนั้นเปิดโปรแกรม NC สำหรับเชื่อม ขึ้นรูปแม่พิมพ์

ง. เปิดเครื่องเชื่อม ติดตั้งสายดิน ปรับค่าความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการเชื่อม

จ. กดคำสั่งเริ่มทำงานที่โปรแกรม March 3 เครื่องเชื่อมจะทำการเชื่อมตามโปรแกรม NC

## 7. การกัดแต่งผิวแม่พิมพ์ตัวผู้

หลังจากทำการเชื่อมขึ้นรูปแม่พิมพ์เสร็จแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการกัดแต่งผิวแม่พิมพ์ โดย จะทำการกัดแต่งผิวด้วยเครื่องกัด CNC โดยใช้โปรแกรม NC สำหรับกัดแต่งผิวแม่พิมพ์ที่ได้สร้าง ขึ้นมาในขั้นตอนก่อนหน้านี้ ซึ่งประกอบด้วยโปรแกรมกัดหยาบและกัดละเอียด

## 8. ทดสอบการรั่วซึมของแม่พิมพ์ตัวผู้

เนื่องจากแม่พิมพ์ในงานวิจัยนี้เป็นแม่พิมพ์ที่มีระบบหล่อเย็นภายในด้วยน้ำ เพื่อให้ได้ แม่พิมพ์ที่มีคุณสมบัติที่ดีและสามารถใช้งานได้จริง จึงจำเป็นต้องทำการทดสอบการรั่วซึมของ แม่พิมพ์ โดยจะทดสอบตามมาตรฐาน ASTM E1003 (Standard Test Method for Hydrostatic Leak Testing) ซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบแสดงดังภาพที่ 61 และ 62 ประกอบไปด้วย ปลั๊ก ทอง เหลืองสำหรับอุดทางน้ำขาออก, ข้อต่อที่ติดอยู่กับเกจวัดแรงดันและหัวสูบลม, เครื่องสูบลม มีขั้นตอนการทดสอบดังนี้

ก. กำหนดแรงดันที่ใช้ในการทดสอบโดยอ้างอิงจากปั๊มเฮด ( Pump head) สูงสุดของปั๊ม น้ำโดยใช้สูตรดังนี้

$$P = \rho \times g \times h$$

เมื่อ P คือ แรงดันปั๊มน้ำ

$\rho$  คือ ความหนาแน่นของน้ำ

g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก

h คือ ปั๊มเฮด

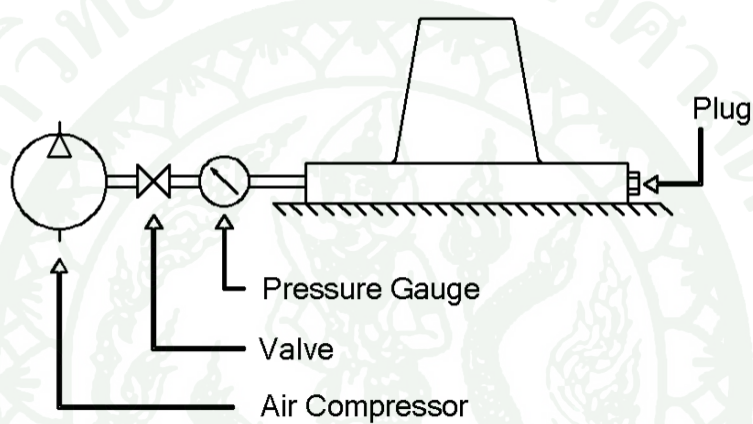
ข. ติดตั้งปลั๊กทองเหลืองสำหรับอุดรูทางน้ำออก

ค. เติมน้ำเข้าไปที่รูน้ำเข้าแม่พิมพ์จนเต็มและติดตั้งชุดเกจวัดแรงดันทางด้านรูน้ำเข้าของแม่พิมพ์

ง. ต่อเครื่องอัดลมเข้ากับหัวเติมลม โดยอัดเข้าช้าๆที่แรงดัน 50 เปอร์เซ็นต์ของแรงดันสูงสุดและสังเกตการรั่วซึมที่ผิวแม่พิมพ์และข้อต่อ

จ. ถ้าไม่เกิดการรั่วซึม ให้เพิ่มแรงดันเป็น 100 เปอร์เซ็นต์ของแรงดันสูงสุด จากนั้นพักแรงดันไว้เป็นเวลา 30 นาที เพื่อสังเกตการรั่วซึมและบันทึกผล

ฉ. ทำซ้ำเช่นเดียวกับข้อ จ. แต่เพิ่มแรงดันเป็น 150 เปอร์เซ็นต์ของแรงดันสูงสุด



ภาพที่ 61 แผนผังอุปกรณ์ทดสอบการรั่วซึมของแม่พิมพ์

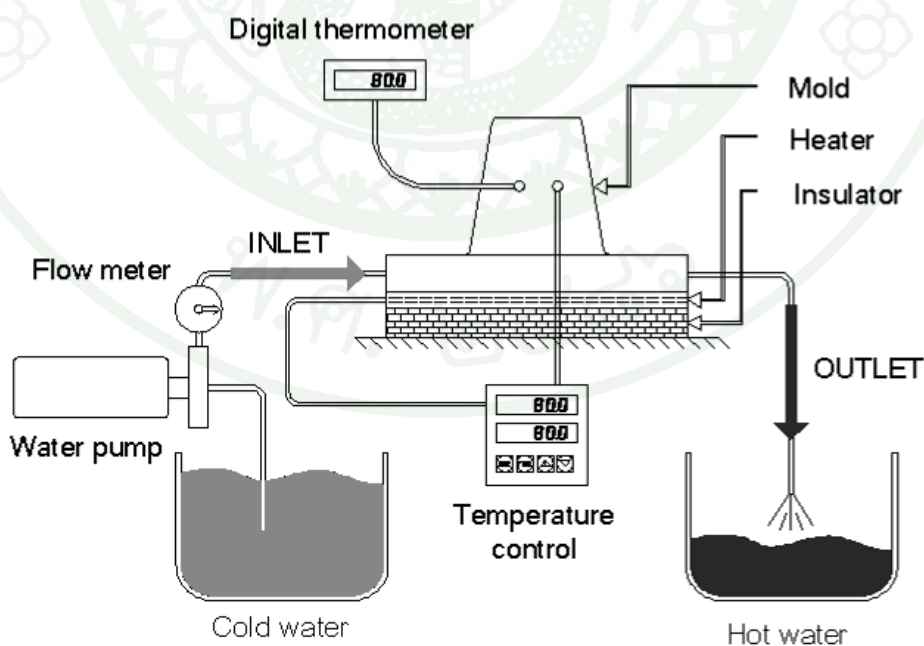


ภาพที่ 62 อุปกรณ์ทดสอบการรั่วซึมของแม่พิมพ์

## 9. ทดสอบการระบายความร้อนแม่พิมพ์ตัวผู้

การทดสอบการระบายความร้อนของแม่พิมพ์ตัวผู้ในงานวิจัยนี้จะทำการทดสอบโดยใช้ชุดทดสอบที่ผู้วิจัยทำการสร้างขึ้นมา ซึ่งแสดงดังภาพที่ 63 และ 64 มีการติดตั้งเครื่องวัดอุณหภูมิดิจิตอลที่ผิวแม่พิมพ์ทั้ง 5 ด้าน คือ ด้านบน, ด้านซ้าย, ด้านขวา, ด้านหน้าและด้านหลัง และจากคู่มืองานฉีดพลาสติกแนะนำอุณหภูมิผิวแม่พิมพ์สำหรับพลาสติกโพลีโพรไพลีน (PP) ไว้ที่ 20-80 องศาเซลเซียส แต่เนื่องจากอุณหภูมิห้องทดลอง และน้ำหล่อเย็นถูกควบคุมไว้ที่ 27 และ 30 องศาเซลเซียสตามลำดับ ผู้วิจัยจึงได้เลือกช่วงอุณหภูมิทดลองจาก 80-40 °C ซึ่งขั้นตอนการทดสอบดังนี้

- ก. เปิดสวิตช์เครื่องควบคุมอุณหภูมิ ตั้งอุณหภูมิที่ 80 องศาเซลเซียส และทิ้งไว้จนอุณหภูมิผิวแม่พิมพ์คงที่ที่ 80 องศาเซลเซียสโดยดูจากเครื่องวัดอุณหภูมิดิจิตอล
- ข. เมื่ออุณหภูมิคงที่เป็นเวลา 10 นาทีแล้ว ให้ปิดเครื่องควบคุมอุณหภูมิ และนำแผ่นฮีตเตอร์ออก
- ค. เปิดปั๊มน้ำหล่อเย็นเพื่อให้อุณหภูมิแม่พิมพ์ลดลงและทำการบันทึกอุณหภูมิผิวแม่พิมพ์ทุก 1 วินาที จนกระทั่งอุณหภูมิแม่พิมพ์ลดลงถึง 30 องศาเซลเซียส
- ง. ทำการทดสอบซ้ำข้อ ก - ค จำนวน 10 ครั้ง



ภาพที่ 63 แผนผังอุปกรณ์ทดสอบการระบายความร้อนของแม่พิมพ์ตัวผู้



ภาพที่ 64 อุปกรณ์ทดสอบการระบายความร้อนของแม่พิมพ์ตัวผู้

หลังจากทำการทดลองและเก็บผลการระบายความร้อนของแม่พิมพ์ที่มีระบบระบายความร้อนทั้งสองแบบแล้ว จะนำข้อมูลทั้งสองมาเปรียบเทียบและวิเคราะห์ เพื่อที่จะเห็นว่าแม่พิมพ์ตัวผู้ที่มีระบบหล่อเย็นทั้งสองแบบมีอัตราการระบายความร้อนความแตกต่างกันอย่างไร

## ผลและวิจารณ์

### 1. ผลการทดลองหาค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการเชื่อมจันรูปที่ละชั้น

#### 1.1 ผลการทดลองที่ 1

จากการตรวจสอบข้อมูลค่าพารามิเตอร์ในการเชื่อมจากคู่มือในการเชื่อมและงานวิจัยต่างๆ และทำการทดลองที่ 1.1 จากนั้นทำการเลือกค่าพารามิเตอร์ที่ทำให้ได้ชิ้นงานที่มีคุณสมบัติเหมาะสมโดยพิจารณาจากความสมบูรณ์ของแนวเชื่อม ความกว้างและความสูงของแนวเชื่อมและการเกิดสะเก็ดเชื่อม ได้ผลดังนี้

|                                     |     |          |
|-------------------------------------|-----|----------|
| - กระแสไฟฟ้า                        | 100 | แอมป์    |
| - ความต่างศักย์ไฟฟ้า                | 19  | โวลต์    |
| - ความสูงระหว่างชิ้นงานกับหัวเชื่อม | 10  | มม.      |
| - ปริมาณก๊าซคลุม                    | 15  | ลิตร/นาท |

จากการทดลองเชื่อมด้วยค่าพารามิเตอร์ข้างต้นเป็นแนวยาว 60 มม. โดยทำการปรับความเร็วหัวเชื่อมระหว่าง 200-500 มม./นาท จากนั้นทำการวัดค่าความกว้างและความสูงเฉลี่ย จะได้ค่าดังแสดงในตารางที่ 9 และภาพที่ 63

**ตารางที่ 9** แสดงค่าเฉลี่ยความกว้างและความสูงของรอยแนวเชื่อมที่ได้จากการปรับค่าความเร็วหัวเชื่อม

| ความเร็วในการเดินหัวเชื่อม<br>(มม./นาท) | ความกว้างเฉลี่ย<br>(มม.) | ความสูงเฉลี่ย<br>(มม.) |
|-----------------------------------------|--------------------------|------------------------|
| 200                                     | 7.0                      | 3.5                    |
| 300                                     | 6.0                      | 3.0                    |
| 400                                     | 5.0                      | 2.5                    |
| 500                                     | 4.0                      | 2.0                    |



ภาพที่ 65 แนวเชื่อมที่ใช้ความเร็วหัวเชื่อม 200, 300, 400 และ 500 มม./นาทิจากซ้ายไปขวาตามลำดับ

จากการวัดระยะความกว้างและความสูงจำนวน 5 จุดต่อแนวเชื่อมและทำการหาค่าเฉลี่ยระหว่างความกว้างและความสูงของแนวเชื่อม พบว่าที่ความเร็วในการเดินหัวเชื่อมต่ำจะได้ค่าความกว้างและความสูงของแนวเชื่อมมาก ในทางกลับกันถ้าความเร็วในการเดินหัวเชื่อมสูง ค่าความกว้างและความสูงจะมีค่าลดลง และค่าที่เหมาะสมที่สุดจากการทดลองคือ ค่าความเร็วในการเดินหัวเชื่อม 300 มม./นาทิจ เนื่องจากรอยแนวเชื่อมมีความสมบูรณ์ต่อเนื่อง มีความกว้างและความสูงเหมาะสม เกิดสะเก็ดระหว่างการเชื่อมน้อย

## 1.2 ผลการทดลองที่ 2

นำค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลองที่ 1 มาทำการเชื่อม 5 แนวติดกัน โดยเว้นระยะห่างในแต่ละแนวเท่ากัน และทำการเปลี่ยนระยะห่างในแต่ละแนว ตั้งแต่ 1 - 5 มม. จะได้แนวรอยเชื่อมดังแสดงในภาพที่ 66



ภาพที่ 66 แสดงแนวเชื่อมขนานกันจำนวน 5 แนว โดยมีระยะห่างระหว่างแนวเชื่อม 1, 2, 3, 4 และ 5 มม. จากบนลงล่างตามลำดับ

จากการทดลองพบว่าระยะห่างระหว่างแนวเชื่อม 3 และ 4 มม. มีรอยต่อเรียบใกล้เคียงกัน รอยต่อสม่ำเสมอ มีร่องหรือส่วนนูนน้อย ในกรณีที่ระยะห่างระหว่างรอยแนว 1 และ 2 มม. ซึ่งมีระยะน้อยเกินไปแนวเชื่อมจะทับกันเกิดสันนูนตรงกลางรอยแนวเชื่อม จึงไม่เหมาะสำหรับกระบวนการเชื่อมขึ้นรูป ส่วนที่ระยะห่าง 5 มม. เกิดร่องระหว่างแนวเชื่อมเนื่องจากแต่ละแนวเชื่อมมีระยะห่างมากเกินไป ซึ่งไม่เหมาะสมสำหรับการเชื่อมขึ้นรูปเช่นกัน และจากการทำการทดลองเพิ่มเติม พบว่าค่าระยะห่างระหว่างแนวเชื่อม 3.5 มม. ทำให้รอยเชื่อมมีความเรียบและมีความสูงเหมาะสม

### 1.3 ผลการทดลองที่ 3

เส้นทางการเดินหัวเชื่อม (Tool Path) ในการทดลองนี้จะทำการทดลองสองแบบคือ แบบ Zigzag และแบบ Spiral ซึ่งแสดงแนวเชื่อมดังภาพที่ 67 โดยจากการทดลองพบว่าการใช้เส้นทางการเดินหัวเชื่อมแบบ Spiral แนวเชื่อมมีความเรียบสมบูรณ์ ขอบรอบนอกของแนวเชื่อมเรียบ และจากการทดลองใช้การเดินหัวเชื่อมแบบ Zigzag พบว่า แนวเชื่อมมีความเรียบสมบูรณ์เช่นกัน แต่บริเวณขอบรอบนอกของรอยเชื่อมไม่เรียบเนื่องจากการเดินสลับไปมาซ้ายขวา ซึ่งการใช้การเดินหัวเชื่อมแบบ Zigzag เหมาะสำหรับการเชื่อมพื้นที่ที่มีความใหญ่เนื่องจากจะใช้ระยะในการเดินของหัวเชื่อมน้อยกว่าแบบ Spiral เมื่อเปรียบเทียบจากการเชื่อมบนพื้นที่เท่ากัน

นอกจากสองแบบนี้อาจใช้เส้นทางการเดินหัวเชื่อมแบบผสมคือ ขอบนอกใช้การเดินแบบ Contour และด้านในใช้การเดินแบบ Zigzag เพื่อจะให้ขอบด้านนอกของรอยเชื่อมเรียบและมีระยะการเดินของหัวเชื่อมน้อย ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับรูปร่างของพื้นที่ที่ต้องการเชื่อมว่าเหมาะสมกับการใช้รูปแบบการเดินของหัวเชื่อมแบบใด



(ก)



(ข)

ภาพที่ 67 รูปแบบแนวเชื่อมแบบ (ก) Spiral (ข) Zigzag

## 2. ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของวัสดุ

การวิเคราะห์คุณสมบัติทางกลของชิ้นงานตัวอย่างที่ได้จากการเชื่อมขึ้นรูปด้วยค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลองที่ 1 และ 2 ได้ทำการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกลสามอย่างคือ ค่าความแข็ง แรงดึง

และการดัดโค้ง และเนื่องจากงานวิจัยนี้เป็นการเชื่อมชิ้นรูปแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกชนิดโพลีโพรไพลีน ซึ่งมีอุณหภูมิใช้งานแม่พิมพ์สูงสุด 80 องศาเซลเซียส ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงได้ทำการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกลของวัสดุที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส แต่จะทำการวิเคราะห์เพียงแรงดึงและการดัดโค้งเท่านั้น เนื่องจากเครื่องมือที่ใช้ทดสอบมีความสามารถในการควบคุมอุณหภูมิได้

## 2.1 ผลการวิเคราะห์ค่าความแข็ง

นำชิ้นงานตัวอย่างที่ได้จากการเชื่อมชิ้นรูปด้วยลวดเชื่อมเกรด ER70S-6 และชิ้นงานที่เป็นโลหะเกรด SS400 มาทดสอบค่าความแข็งแบบร็อกเวลล์ สเกล C และเทียบกับค่าความแข็งของเหล็กแม่พิมพ์เกรด P20 ได้ผลแสดงดังตารางที่ 10

ตารางที่ 10 ผลการทดสอบความแข็งของชิ้นงานทดสอบ

| ตำแหน่งการวัด | ค่าความแข็ง (HRC) |       |     |
|---------------|-------------------|-------|-----|
|               | ER70S-6           | SS400 | P20 |
| 1             | 18                | 9.9   | -   |
| 2             | 18                | 10    | -   |
| 3             | 19.9              | 9.9   | -   |
| 4             | 20.5              | 9.8   | -   |
| 5             | 19.4              | 10.4  | -   |
| เฉลี่ย        | 19.16             | 10.0  | 54  |

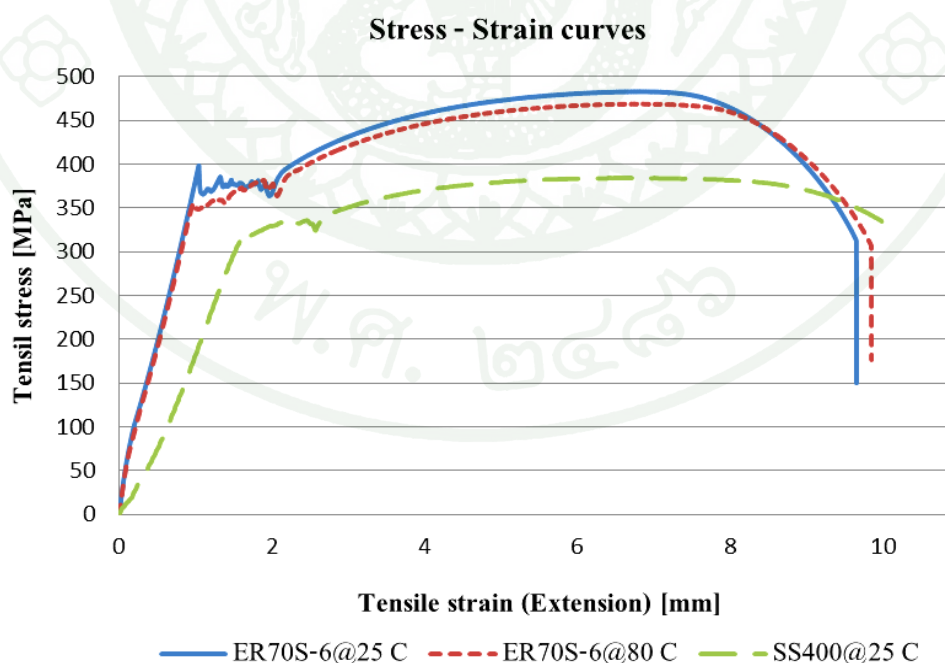
จากผลการทดสอบความแข็งดังตารางที่ 10 จะเห็นว่าความแข็งของชิ้นงานที่เชื่อมชิ้นรูปจากลวดเชื่อม ER70S-6 มีความแข็งเฉลี่ยมากกว่าเหล็ก SS400 ถึง 1.96 เท่า ซึ่งสรุปได้ว่าชิ้นงานที่ได้จากการเชื่อมชิ้นรูปด้วยลวดเชื่อม ER70S-6 สามารถต้านทานการเสียดสีและแรงกดขูดมากกว่าเหล็ก SS400 และยังพบว่าค่าความแข็งของชิ้นงานที่เชื่อมชิ้นรูปจากลวดเชื่อม ER70S-6 น้อยกว่าโลหะเกรด P20 อยู่ที่ 35.48 %

## 2.2 ผลการทดสอบแรงดึง

จากการขึ้นรูปชิ้นงานตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบแรงดึง ทั้งจากการเชื่อมด้วยลวด ER70S-6 และจากเหล็ก SS400 โดยขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐาน ASTM E8-04 และทำการทดสอบแรงดึงด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง (Universal Testing Machine) ที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิใช้งานแม่พิมพ์รวมทั้งเทียบกับค่าความแข็งแรงของเหล็กแม่พิมพ์เกรด P20 ได้ผลการทดสอบดังแสดงที่ในภาพที่ 68 - 69 และตารางที่ 11



ภาพที่ 68 แสดงตัวอย่างชิ้นงานหลังจากทดสอบแรงดึงภายใต้การควบคุมอุณหภูมิ



ภาพที่ 69 ค่าเฉลี่ย Stress-Strain Curve ของชิ้นงานทดสอบ

ตารางที่ 11 ค่าเฉลี่ยผลการทดสอบแรงดึง

| Metal Grade    | E-Modulus<br>(MPa) | Yield Stress<br>(MPa) | Ultimate Tensile<br>Strength (MPa) |
|----------------|--------------------|-----------------------|------------------------------------|
| ER70S-6 @25 °C | 28,296             | 391                   | 483                                |
| ER70S-6 @80 °C | 26,653             | 349                   | 469                                |
| SS400          | 6,538              | 335                   | 384                                |
| P20            | 205,000            | 800                   | 1,000                              |

จากภาพที่ 67 พบว่ากราฟทั้งสามเส้นหลังจากเกิดจุด Yield point แล้ววัสดุจะเกิดการเปลี่ยนรูปถาวรระยะ เวลาหนึ่งก่อนการแตกหัก แสดงให้เห็นว่าชิ้นงานทดสอบเป็นวัสดุอ่อนเหนียว (ductile materials) และจากตารางที่ 11 พบว่า ชิ้นงานที่ขึ้นรูปจากการเชื่อมด้วยลวดเชื่อม ER70S-6 ที่ทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิ 25 °C และที่ 80 °C มีค่า E-modulus, Yield stress และ Ultimate tensile strength สูงกว่าชิ้นงานที่ขึ้นรูปจากเหล็ก SS400 332.8% , 16.7% และ 25.78 % ตามลำดับ ดังนั้น ชิ้นงานที่ได้จากการเชื่อมขึ้นรูปด้วยลวดเชื่อม ER70S-6 สามารถต้านทานการเสียรูปและมีความสามารถในการรับแรงมากกว่าเหล็ก SS400

ส่วนเมื่อเปรียบเทียบชิ้นงานที่เชื่อมขึ้นรูปจากลวดเชื่อม ER70S-6 ที่ทำการทดสอบ อุณหภูมิ 25 °C และ 80 °C พบว่า ชิ้นงานที่ทดสอบที่อุณหภูมิ 25 °C มีค่า E-modulus, Yield stress และ Ultimate tensile strength สูงกว่าชิ้นงานที่ทดสอบที่อุณหภูมิ 80 °C 5.8 % , 10.7 % และ 2.9 % ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าชิ้นงานมีความสามารถในการต้านทานการเสียรูปลดลงเล็กน้อยเมื่อมี อุณหภูมิสูงขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบชิ้นงานที่เชื่อมขึ้นรูปจากลวดเชื่อม ER70S-6 ที่ทำการทดสอบ อุณหภูมิ 25 °C กับโลหะเกรด P20 พบว่า โลหะ P20 มีค่า E-modulus, Yield stress และ Ultimate tensile strength สูงกว่าโลหะที่เชื่อมขึ้นรูปจากลวด ER70S-6 624.5%, 104 % และ 107 % ซึ่งถือว่ามีความแข็งแรงต่างกันมาก แต่ทั้งนี้ราคาก็สูงกว่าเช่นกัน

ทั้งนี้การกำหนดคุณสมบัติของวัสดุในขั้นตอนการจำลองความแข็งแรงของแม่พิมพ์ จะต้องใช้ค่าที่มีความแข็งแรงน้อยกว่า คือค่าความแข็งแรงของวัสดุที่อุณหภูมิ 80 °C เพื่อป้องกัน ความเสียหายของแม่พิมพ์ขณะทำงานที่อุณหภูมิใช้งานจริง

### 2.3 ผลการทดสอบการดัดโค้ง

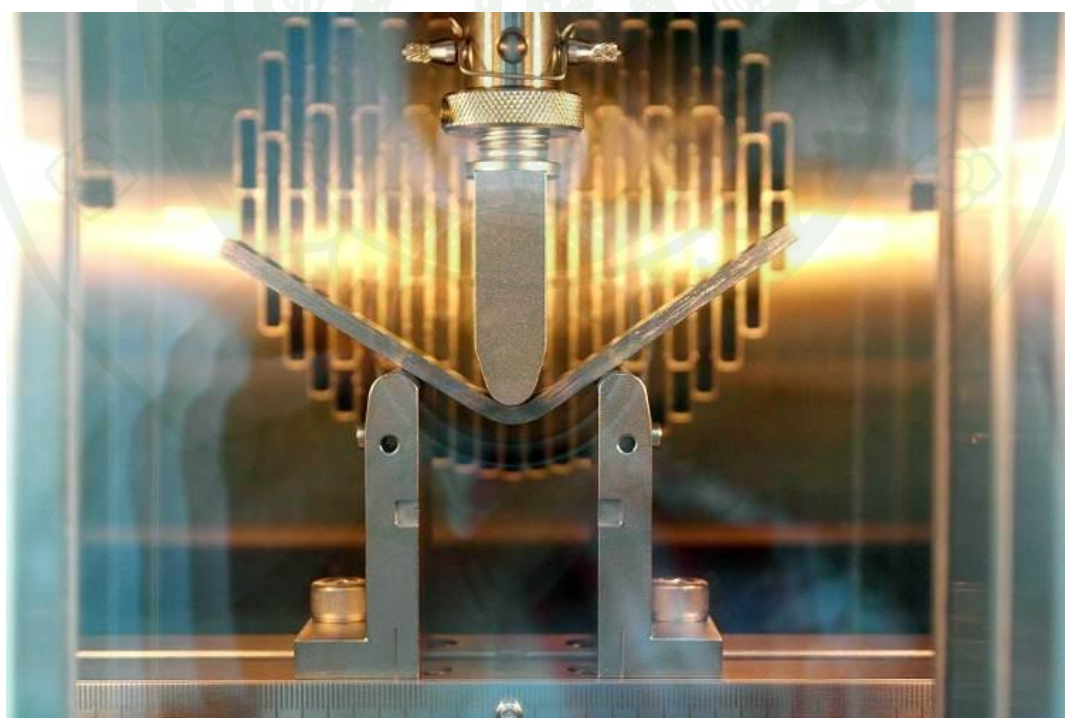
ขั้นตอนนี้จะทำการเชื่อมชิ้นรูปชิ้นงาน กัดแต่งผิว และทดสอบตามมาตรฐาน ASTM E290 – 09 (Standard Test Methods for Bend Testing of Material for Ductility) อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิใช้งานแม่พิมพ์ ซึ่งขั้นตอนแรกจะต้องทำการคำนวณระยะห่างของจุกรองรับการดัดโค้ง โดยมีค่าที่ใช้ในการคำนวณคือ รัศมีของจุกรองรับในการดัดโค้ง ( $r$ ) 5 มม. และความหนาชิ้นงานทดสอบ ( $t$ ) 4 มม. ทำการคำนวณตามมาตรฐาน ASTM E290 – 09 ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

$$C = 2r + 3t \pm t/2$$

$$C = (2 \times 5) + (3 \times 4) \pm (4/2) \text{ มม.}$$

$$C = 22 \pm 2 \text{ มม.}$$

จากนั้นนำค่าที่คำนวณได้ไปปรับตั้งเครื่องมือทดสอบ และทำการกดชิ้นงานจนงอเป็นมุม 90 องศา ซึ่งจะขึ้นงานขณะทดสอบและหลังทดสอบดังแสดงที่ในภาพที่ 70 และ 71



ภาพที่ 70 แสดงตัวอย่างชิ้นงานขณะทดสอบการดัดโค้งภายใต้การควบคุมอุณหภูมิ



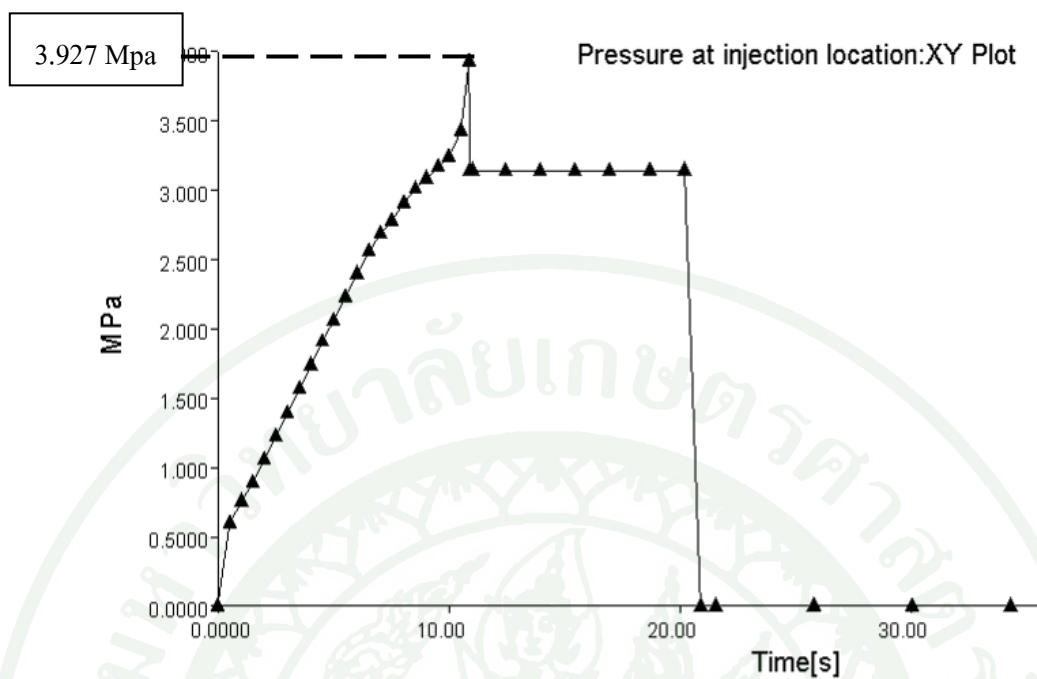
ภาพที่ 71 แสดงชิ้นงานหลังทดสอบการดัดโค้ง

จากการตรวจสอบด้วยตาเปล่าบริเวณโค้งด้านนอกของชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบการดัดโค้งทั้งที่อุณหภูมิห้อง ( $25^{\circ}\text{C}$ ) และที่อุณหภูมิใช้งานแม่พิมพ์ ( $80^{\circ}\text{C}$ ) พบว่า ชิ้นงานที่ทดสอบภายใต้อุณหภูมิทั้งสองไม่มีรอยแตกหรือรอยแยกของผิวชิ้นงาน แสดงให้เห็นว่า ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการเชื่อมมีความเหมาะสม ชิ้นงานที่ได้จากการเชื่อมขึ้นรูปมีการยึดเหนี่ยวระหว่างรอยเชื่อมที่แข็งแรง สามารถรับแรงดัดโค้งได้ดีทั้งที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิใช้งานแม่พิมพ์

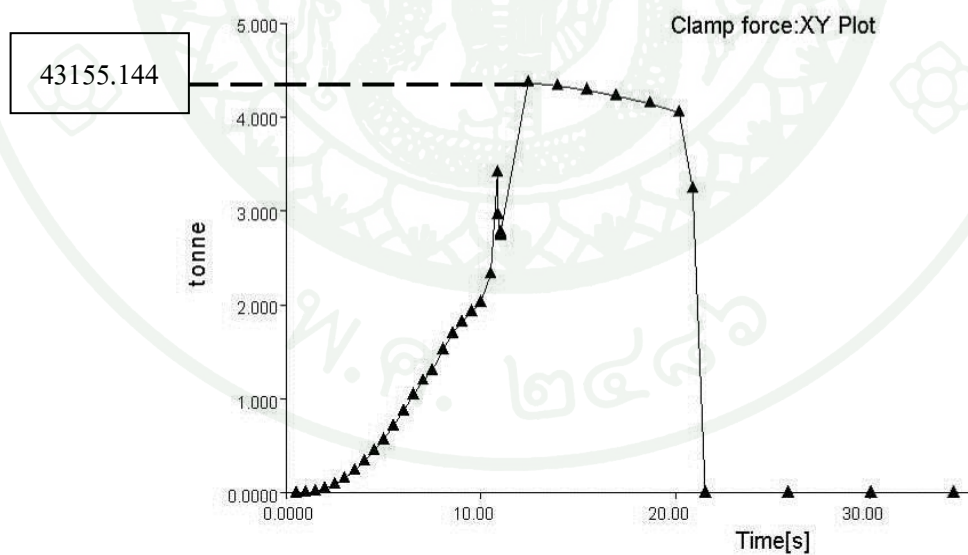
### 3. ผลการออกแบบแม่พิมพ์ตัวผู้

#### 3.1 ผลจำลองและวิเคราะห์การฉีดพลาสติก

จากการจำลองการฉีดขึ้นงานพลาสติกทางคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม Autodesk Simulation Moldflow ได้ค่าแรงดันฉีดพลาสติกสูงสุด  $3.927\text{ Mpa}$  และค่าแรงปิดแม่พิมพ์สูงสุด  $43155.144\text{ N}$  ดังแสดงในภาพที่ 72 และ 73 ตามลำดับ



ภาพที่ 72 แสดงแรงดันสูงสุดจากการจำลองการฉีดพลาสติก

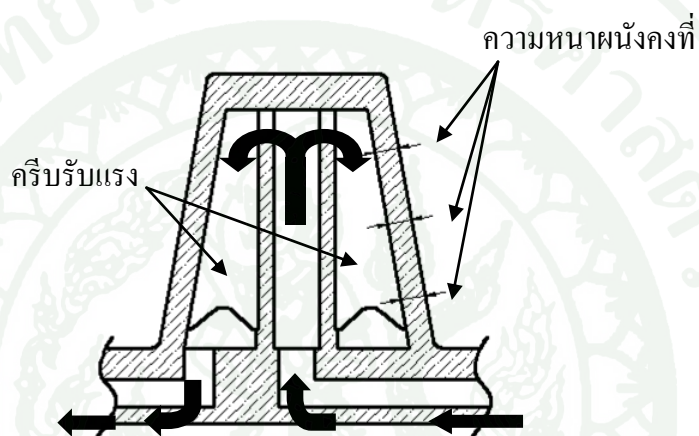


ภาพที่ 73 แสดงกราฟแรงปิดแม่พิมพ์สูงสุดจากการจำลองการฉีดพลาสติก

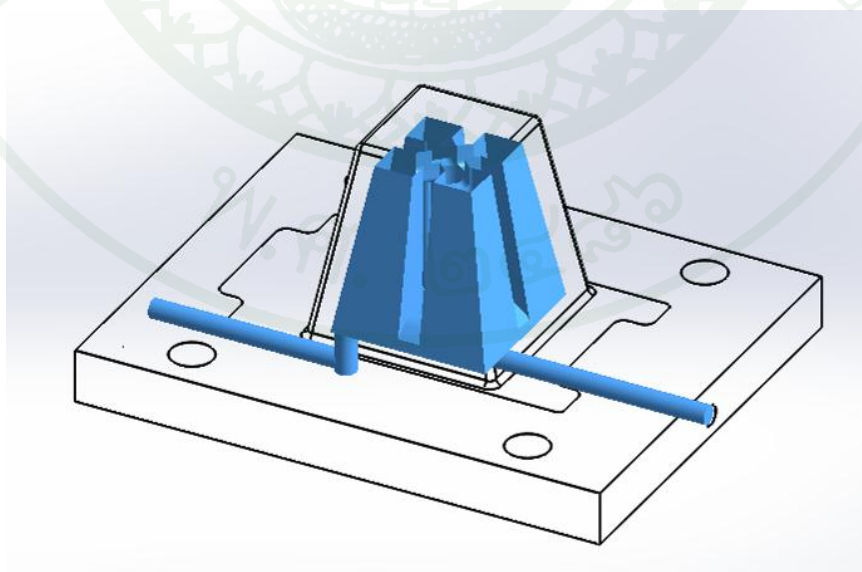
### 3.2 ผลการออกแบบแม่พิมพ์ตัวผู้

#### 3.2.1 ผลการออกแบบแม่พิมพ์ตัวผู้ที่มีระบบหล่อเย็นแบบชนิดผิว

หลังจากทำการออกแบบเรียบร้อยแล้ว ได้แม่พิมพ์มีความหนาผนังด้านข้าง, ผนังด้านบน, ความหนาที่น้ำสั่นและความหนาครีบริบแรง 8 , 12 , 6 และ 10 มม. ตามลำดับ น้ำหนักแม่พิมพ์ 14.5 กิโลกรัม ดังแสดงในภาพที่ 74 และ 75



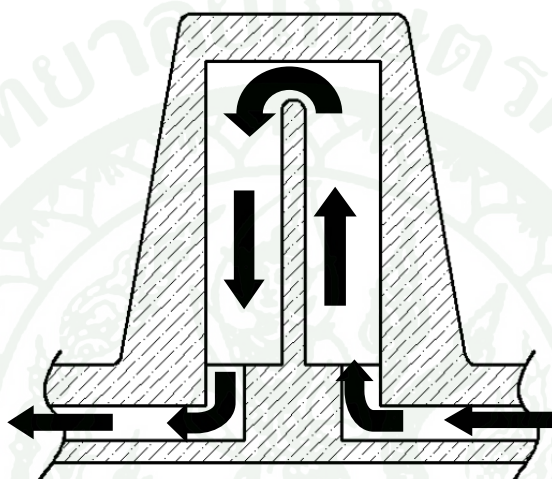
ภาพที่ 74 แสดงลักษณะระบบหล่อเย็นแบบชนิดผิว



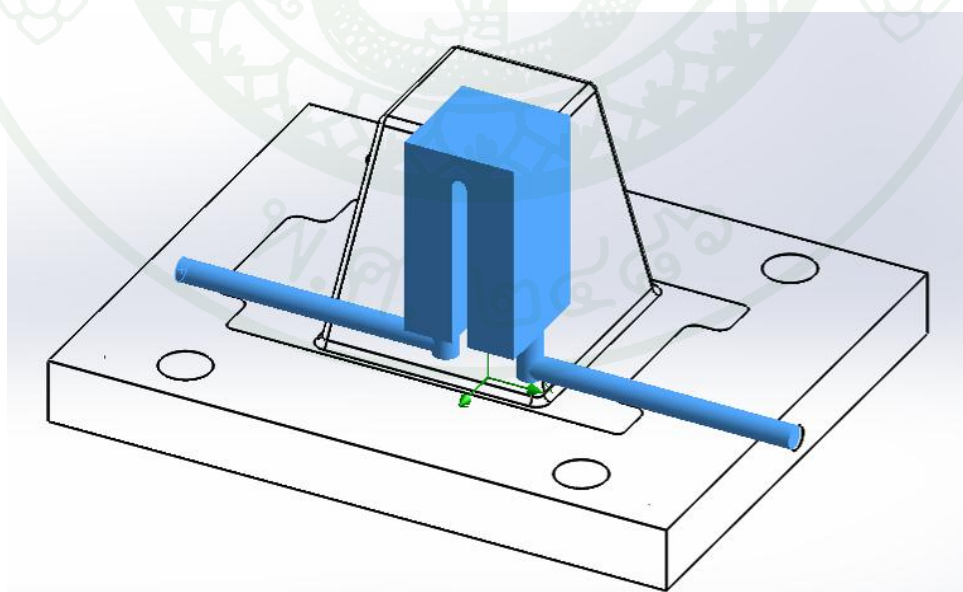
ภาพที่ 75 แสดงแม่พิมพ์ตัวผู้ที่มีระบบหล่อเย็นแบบชนิดผิว

### 3.2.2 ผลการออกแบบแม่พิมพ์ตัวผู้ที่มีระบบหล่อเย็นแบบแผ่นกัน

หลังจากทำการออกแบบเรียบร้อยแล้ว ได้แม่พิมพ์มีโพรงหล่อเย็นสี่เหลี่ยมขนาด  $44 \times 44$  มม.ผนังด้านบนและแผ่นกันหนา 12 และ 6 มม. ตามลำดับ น้ำหนักแม่พิมพ์ 15 กิโลกรัม ดังแสดงในภาพที่ 76 และ 77



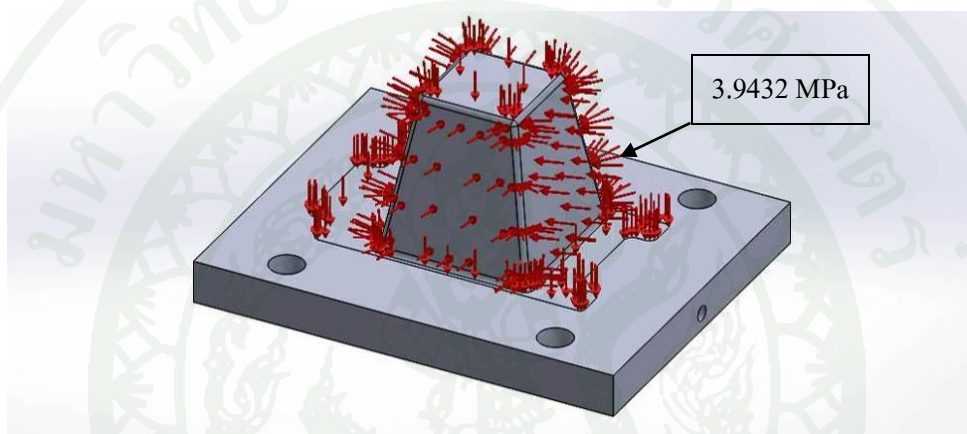
ภาพที่ 76 แสดงลักษณะระบบหล่อเย็นแบบแผ่นกัน



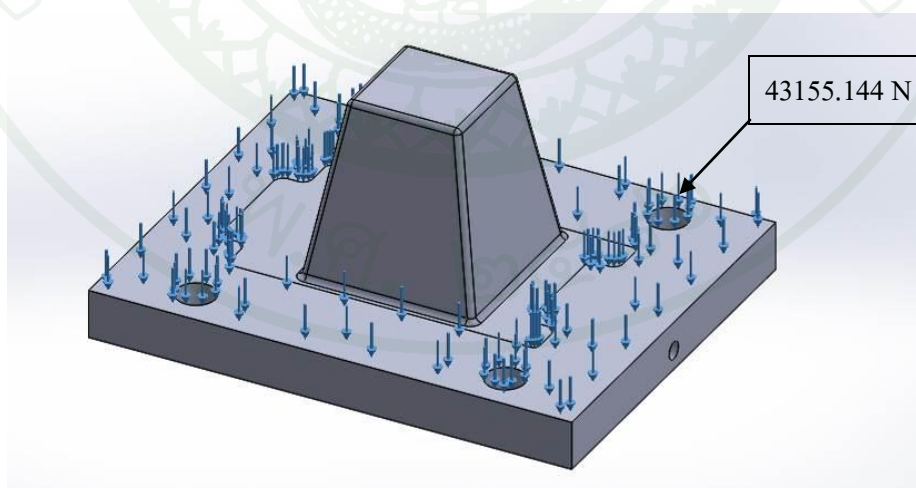
ภาพที่ 77 แสดงแม่พิมพ์ตัวผู้ที่มีระบบหล่อเย็นแบบแผ่นกัน

### 3.3 ผลวิเคราะห์ความแข็งแรงแม่พิมพ์ตัวผู้

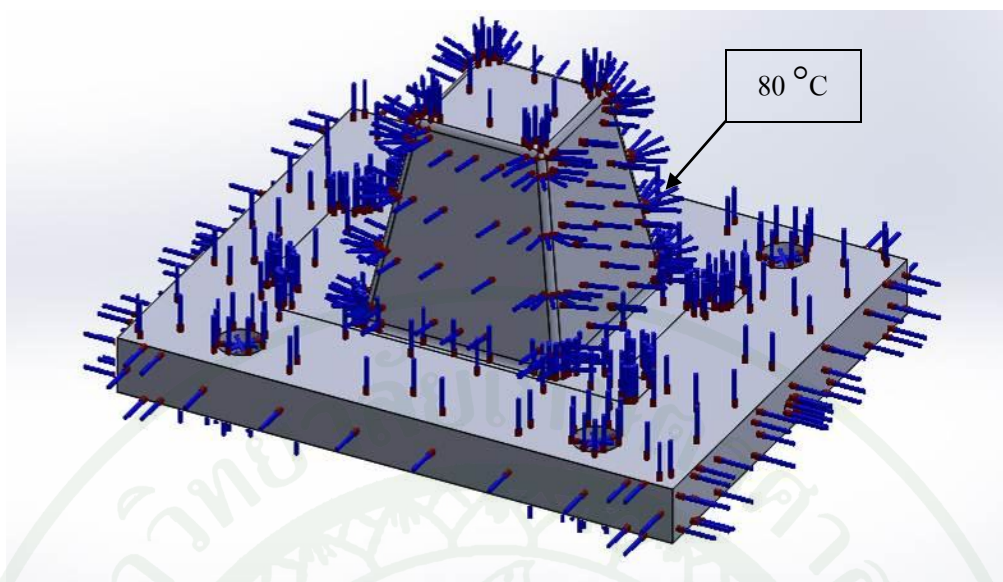
การวิเคราะห์ความแข็งแรงของแม่พิมพ์ตัวผู้จะกำหนดคุณสมบัติของวัสดุแม่พิมพ์ตามที่ได้ทดสอบวัสดุในหัวข้อที่ 2.2 และขณะจำลองการฉีดพลาสติกจะใส่ภาระให้กับแม่พิมพ์ตัวผู้ 3 ชนิดพร้อมกัน คือ ค่าแรงดันฉีดพลาสติกสูงสุด ค่าแรงปิดแม่พิมพ์สูงสุดและอุณหภูมิใช้งานแม่พิมพ์ ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากหัวข้อที่ 3.1 มีค่า 3.9432 MPa , 43155.144 N และ 80 °C ตามลำดับดังแสดงในภาพที่ 78 – 80



ภาพที่ 78 แสดงภาระแรงดันฉีดพลาสติกสูงสุดที่กระทำกับแม่พิมพ์ตัวผู้



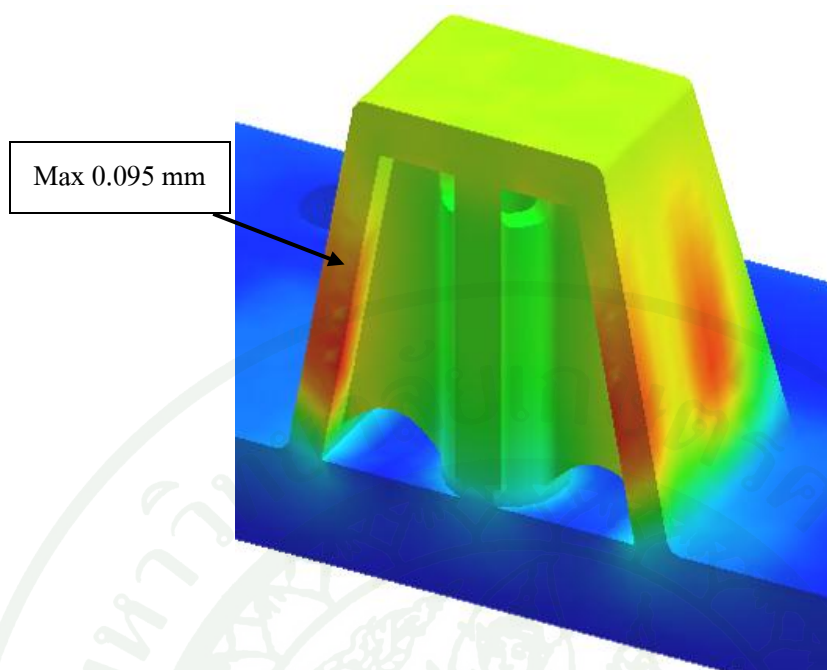
ภาพที่ 79 แสดงภาระแรงปิดแม่พิมพ์สูงสุดที่กระทำกับแม่พิมพ์ตัวผู้



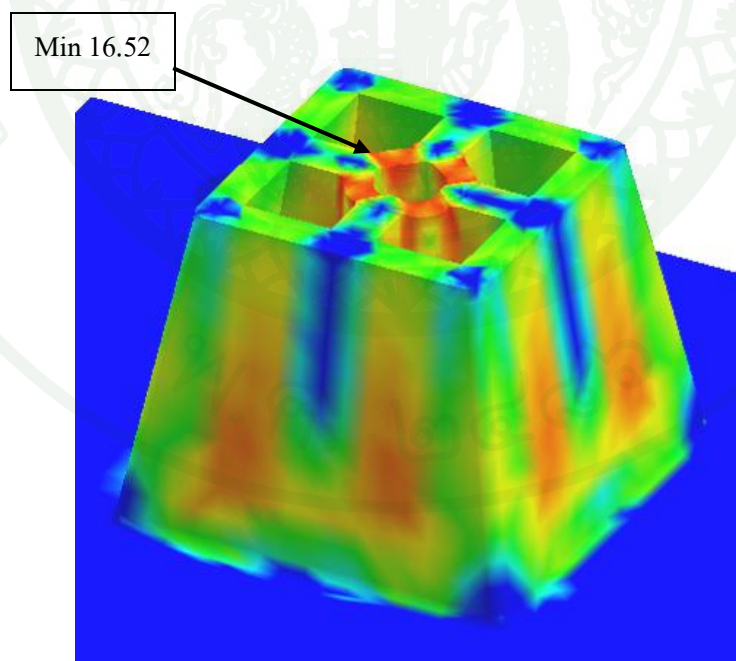
ภาพที่ 80 แสดงภาระอุณหภูมิใช้งานแม่พิมพ์ที่กระทำกับแม่พิมพ์ตัวผู้

หลังจากทำการวิเคราะห์ความแข็งแรงภายใต้ภาระกระทำดังที่กล่าวมาแล้วด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ จะได้ค่าการโก่งงอและค่าความปลอดภัยของแม่พิมพ์ตัวผู้ที่มีระบบหล่อเย็นแบบชนิดผิวและแบบแผ่นกัน พบว่าแม่พิมพ์ตัวผู้ที่มีระบบหล่อเย็นแบบชนิดผิวมีค่าการโก่งงอมากที่สุด 0.095 mm เกิดขึ้นบริเวณกึ่งกลางระหว่างมุมของแม่พิมพ์และครีป ดังแสดงในภาพที่ 81 ส่วนแม่พิมพ์ที่มีระบบหล่อเย็นแบบแผ่นกัน มีค่าการโก่งงอมากที่สุด 0.098 mm เกิดขึ้นบริเวณกึ่งกลางของผนังด้านข้าง ดังแสดงในภาพที่ 83

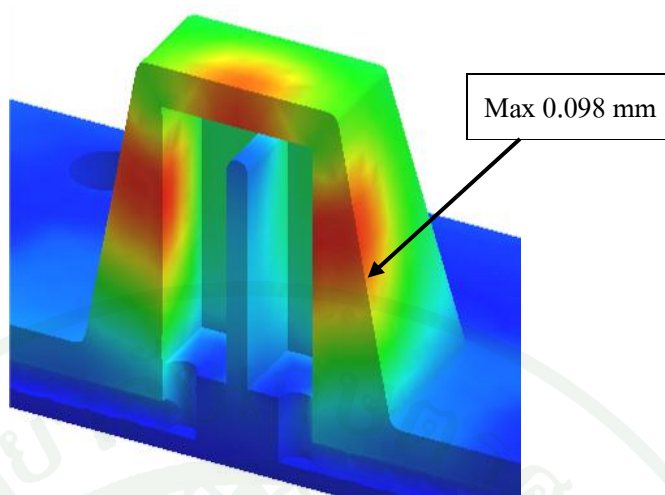
การหาค่าความปลอดภัยหรือ Safety Factor จะใช้ Failure Criterion for Ductile Material แบบ Max Von Mises Stress ในการพิจารณา ซึ่งมีค่าความปลอดภัยต่ำสุดของแม่พิมพ์ตัวผู้ที่มีระบบหล่อเย็นแบบชนิดผิวคือ 16.52 เกิดขึ้นที่ช่องน้ำหล่อเย็นส่วนบนของช่องหล่อเย็น ดังแสดงในภาพที่ 82 ค่าความปลอดภัยต่ำสุดของแม่พิมพ์ตัวผู้ที่มีระบบหล่อเย็นแบบแผ่นกันคือ 16.70 บริเวณขอบของรูน้ำเข้าและออกดังภาพที่ 84



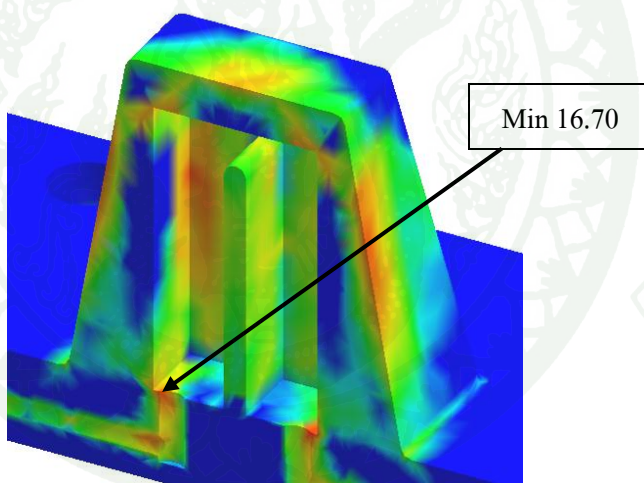
ภาพที่ 81 แสดงระยะและตำแหน่งการโก่งงอของแม่พิมพ์ที่มีระบบระบายความร้อนแบบฉนวนเมื่อได้รับการกระทำ



ภาพที่ 82 แสดงจุดที่มีค่าความปลอดภัยต่ำสุดของแม่พิมพ์ที่มีระบบระบายความร้อนแบบฉนวน



ภาพที่ 83 ระยะและตำแหน่งการโค้งงอของแม่พิมพ์ที่มีระบบระบายความร้อนแบบแผ่นกั้นเมื่อได้รับการกระทำ



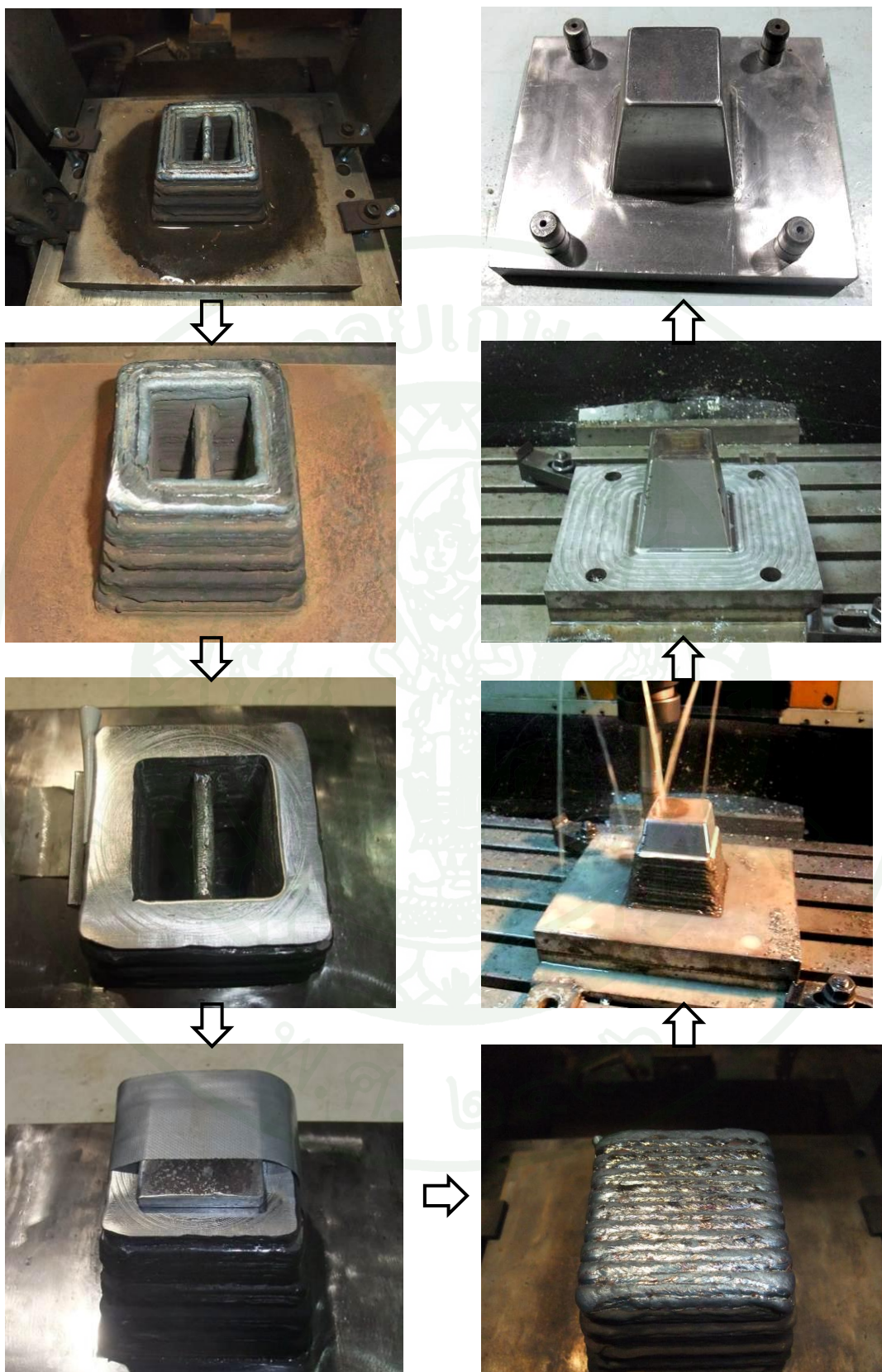
ภาพที่ 84 แสดงจุดที่มีค่าความปลอดภัยต่ำสุดของแม่พิมพ์ที่มีระบบระบายความร้อนแบบแผ่นกั้นเมื่อได้รับการกระทำ

#### 4. ผลการการขึ้นรูปแม่พิมพ์ตัวผู้

กระบวนการขึ้นรูปแม่พิมพ์ที่มีระบบหล่อเย็นแบบฉีดผิวและแบบแผ่นกั้นโดยวิธีการขึ้นรูปทีละชั้น ดังแสดงในภาพที่ 85 และ 86



ภาพที่ 85 แสดงขั้นตอนการในการขึ้นรูปแม่พิมพ์ที่มีระบบหล่อเย็นแบบจิตผิว



ภาพที่ 86 แสดงขั้นตอนการในการขึ้นรูปแม่พิมพ์ที่มีระบบหล่อเย็นแบบแผ่นกัน

มีขั้นตอนการผลิตคือ จะเริ่มจากนำแผ่นเหล็กฐานติดตั้งบนเครื่องเชื่อมซีเอ็นซี มิก/แม็ก จากนั้นจะทำการเชื่อมซ้อนทับกันทีละชั้นตามโปรแกรม NC จนถึงความสูงก่อนผิวด้านบนของแม่พิมพ์ จากนั้นจะนำแผ่นเหล็ก ซึ่งกัดแต่งขนาดเรียบร้อยแล้วมาปิดด้านบนและทำการเจาะตัดปาดและยึดด้วยโบลท์เพื่อป้องกันการเลื่อนของแผ่นเหล็กขณะทำการเชื่อมทับ จากนั้นทำการเชื่อมปิดส่วนผิวด้านบนของแม่พิมพ์ตามโปรแกรม NC ต่อจนได้ขนาดตามที่ต้องการแล้ว ขั้นตอนต่อไปจะนำแม่พิมพ์ที่เชื่อมขึ้นรูปเสร็จเรียบร้อยแล้วไปกัดแต่งผิวด้วยเครื่อง CNC machining center จนได้ขนาดตามที่ได้ออกแบบไว้

##### 5. ผลการทดสอบการรั่วซึมของแม่พิมพ์ตัวผู้

คำนวณแรงดันที่ใช้ในการทดสอบโดยอ้างอิงจากปั๊มเฮด ( Pump head) สูงสุดของปั๊มน้ำ โดยดูจากเพลทที่ติดอยู่กับปั๊มน้ำ ซึ่งมีค่า 22 เมตร โดยใช้สูตรดังนี้

$$P = \rho \times g \times h$$

$$P = ( 1000 \text{ kg / m}^3 ) \times ( 9.81 \text{ m / s}^2 ) \times ( 22 \text{ m} )$$

$$P = 215820 \text{ ( kg} \times \text{m / s}^2 \text{) / m}^2$$

$$P = 215821 \text{ / ( 14.5} \times 10^5 \text{) psi}$$

$$P = 31.3 \text{ psi}$$

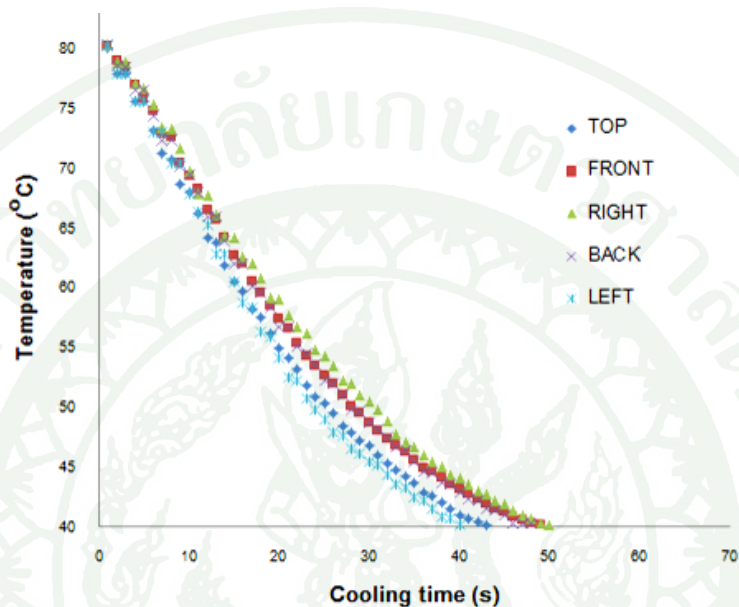
หลังจากได้ค่าแรงดันสูงสุดของปั๊มน้ำ ให้ทำการทดสอบโดยอัดแรงดันที่ 50 %,100% และ 150% ของแรงดันปั๊มน้ำสูงสุด ซึ่งได้ผลการทดลองดังตารางที่ 12

ตารางที่ 12 ผลการทดสอบการรั่วซึมของแม่พิมพ์

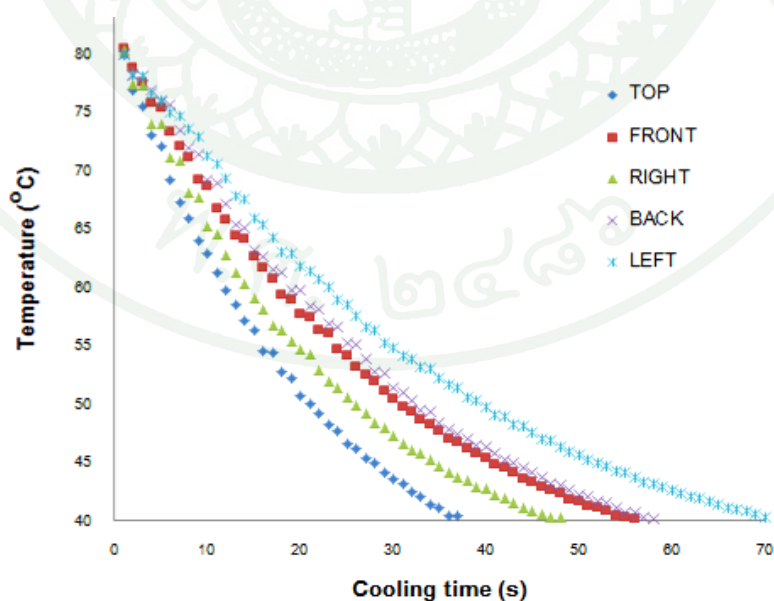
| แรงดันทดสอบ                    | ผลการทดสอบ      |
|--------------------------------|-----------------|
| 50 % ของแรงดันปั๊ม (15.6 psi)  | ไม่มีการรั่วซึม |
| 100 % ของแรงดันปั๊ม (31.3 psi) | ไม่มีการรั่วซึม |
| 150 % ของแรงดันปั๊ม (46.9 psi) | ไม่มีการรั่วซึม |

## 6. ผลการทดสอบการระบายความร้อนแม่พิมพ์ตัวผู้

จากการทดลองได้ผลการระบายความร้อนของแม่พิมพ์ที่มีระบบระบายความร้อนแบบฉีดผิวและแบบแผ่นกัน ได้ผลการระบายความร้อนเฉลี่ยดังแสดงในภาพที่ 87 และภาพที่ 88 ตามลำดับ



ภาพที่ 87 ผลการระบายความร้อนของแม่พิมพ์ที่มีระบบระบายความร้อนแบบฉีดผิว



ภาพที่ 88 ผลการระบายความร้อนของแม่พิมพ์ที่มีระบบระบายความร้อนแบบแผ่นกัน

## 7. การเปรียบเทียบอัตราการระบายความร้อนของแม่พิมพ์

ตารางที่ 13 อัตราการระบายความร้อนของแม่พิมพ์ตัวผู้

| ระบบหล่อเย็น | ด้าน | อุณหภูมิ       |                | เวลา<br>(s) | อัตราการระบายความร้อน |
|--------------|------|----------------|----------------|-------------|-----------------------|
|              |      | สูงสุด<br>(°C) | ต่ำสุด<br>(°C) |             | (°C/min)              |
| แบบฉีดผิว    | บน   | 80.12          | 40.2           | 43          | 55.70                 |
|              | หน้า | 80.27          | 40.13          | 49          | 49.15                 |
|              | ขวา  | 80.38          | 40.22          | 52          | 48.19                 |
|              | หลัง | 80.29          | 40.25          | 48          | 50.05                 |
|              | ซ้าย | 80.14          | 40.18          | 40          | 59.94                 |
| แบบแผ่นกั้น  | บน   | 79.89          | 40.50          | 37          | 63.88                 |
|              | หน้า | 80.37          | 40.18          | 56          | 43.07                 |
|              | ขวา  | 80.27          | 40.33          | 48          | 49.92                 |
|              | หลัง | 80.06          | 40.12          | 58          | 41.32                 |
|              | ซ้าย | 79.94          | 40.27          | 71          | 33.53                 |

ในหัวข้อนี้จะทำการเปรียบเทียบผลเฉลี่ยของอัตราการระบายความร้อนที่ผิวของแม่พิมพ์ Core ทุกด้าน ของแม่พิมพ์ที่มีระบบระบายความร้อนแบบฉีดผิวและแบบแผ่นกั้น ซึ่งแสดงดังตารางที่ 13 จะเห็นได้ว่าแม่พิมพ์ที่มีระบบระบายความร้อนแบบฉีดผิว มีอัตราการระบายความร้อนด้านหน้า ด้านหลังและด้านซ้ายดีกว่าแม่พิมพ์ที่มีระบบระบายความร้อนแบบแผ่นกั้น แต่ด้านบนและด้านขวา ของแม่พิมพ์ที่มีระบบระบายความร้อนแบบแผ่นกั้น สามารถระบายความร้อนได้ดีกว่าเนื่องจากน้ำหล่อเย็นซึ่งมีอุณหภูมิต่ำจะเข้าสู่แม่พิมพ์ทางด้านขวาก่อนและขึ้นไปทางด้านบนจึงสามารถรับความร้อนจากแม่พิมพ์ได้ดี โดยเมื่อคิดอัตราการระบายความร้อนเฉลี่ยทุกด้าน แม่พิมพ์ที่มีระบบระบายความร้อนแบบฉีดผิวและแบบแผ่นกั้น มีอัตราการระบายความร้อน  $52.61^{\circ}\text{C/min}$  และ  $46.34^{\circ}\text{C/min}$  ตามลำดับ ซึ่งเมื่อคิดเป็นเปอร์เซ็นต์แล้ว แม่พิมพ์ที่มีระบบระบายความร้อนแบบฉีดผิว สามารถนำความร้อนได้ดีกว่าแม่พิมพ์ที่มีระบบระบายความร้อนแบบแผ่นกั้น 13.52 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อพิจารณาความสม่ำเสมอในการระบายความร้อนของผิวแม่พิมพ์ทุกด้าน โดยดูจากความแตกต่างของอัตราการระบายความร้อนระหว่างด้านที่มีอัตราการระบายความร้อนมาก

ที่สุดกับด้านที่มีอัตราการระบายความร้อนน้อยที่สุด พบว่า แม่พิมพ์ที่มีระบบระบายความร้อนแบบฉีดผิวและแบบแผ่นกัน มีอัตราการระบายความร้อนแตกต่างกัน 11.75 °C/min และ 30.35 °C/min ตามลำดับ ซึ่งเมื่อคิดเป็นเปอร์เซ็นต์แล้ว แม่พิมพ์ที่มีระบบระบายความร้อนแบบฉีดผิว สามารถนำความร้อนได้สม่ำเสมอกว่าแม่พิมพ์ที่มีระบบระบายความร้อนแบบ แผ่นกัน 61.29 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งอัตราการระบายความร้อนในที่ไม่สม่ำเสมอจะทำให้ชิ้นงานพลาสติกที่ฉีดขึ้นรูปเกิดการบิดเสียรูปและโก่งงอ กลายเป็นชิ้นงานเสียได้

#### 8. การเปรียบเทียบเวลาและต้นทุนในกระบวนการผลิตแม่พิมพ์ตัวผู้

การเปรียบเทียบระยะเวลาในการผลิตแม่พิมพ์ตัวผู้ ระหว่างการผลิตด้วยกระบวนการกัดแม่พิมพ์จากเหล็กต้นแบบปกติและการผลิตโดยใช้วิธีการเชื่อมขึ้นรูปทีละชั้น โดยถ้าพิจารณาจากระยะเวลาที่ใช้ในการกัดแต่งผิวชิ้นงาน จะพบว่ากระบวนการขึ้นรูปทีละชั้นใช้เวลาในการกัดแต่งผิวน้อยกว่าการสร้างแม่พิมพ์ด้วยกระบวนการกัดแบบปกติมาก สำหรับระยะเวลารวมในการผลิตแม่พิมพ์ด้วยการขึ้นรูปทีละชั้นใช้เวลามากกว่ากระบวนการกัดแต่งผิวแบบปกติ สำหรับต้นทุนในการผลิตแม่พิมพ์ด้วยวิธีกัดเนื้อโลหะแบบปกติจะมีต้นทุนสูงกว่าการขึ้นรูปทีละชั้น ดังแสดงในตารางที่ 14 และ 15 ตามลำดับ

ตารางที่ 14 การเปรียบเทียบระยะเวลาในการผลิตแม่พิมพ์ตัวผู้ ระหว่างกระบวนการกัดเนื้อโลหะกับการเติมเนื้อโลหะ

| ขั้นตอนการผลิต    | เวลา (ชั่วโมง) |               |
|-------------------|----------------|---------------|
|                   | กัดเนื้อโลหะ   | เติมเนื้อโลหะ |
| Mold design       | 5              | 5.5           |
| Slice CAD         | -              | 0.5           |
| Toolpath generate | -              | 1             |
| CAM process       | 2              | 1             |
| Prototyping       | -              | 8             |
| Machining         | 12             | 6             |
| Total             | 17             | 22            |

ตารางที่ 15 การเปรียบเทียบต้นทุนในการผลิตแม่พิมพ์ตัวผู้ ระหว่างกระบวนการกัดแต่งผิวและเติมเนื้อโลหะ

| รายการ                    | การกัดเนื้อโลหะ |            | เติมเนื้อโลหะ |            |
|---------------------------|-----------------|------------|---------------|------------|
|                           | ปริมาณ          | ราคา (บาท) | ปริมาณ        | ราคา (บาท) |
| ออกแบบ                    | 5 hr            | 2,500      | 5.5 hr        | 2,750      |
| เหล็ก                     | 18.5 kg         | 925        | 10 kg         | 500        |
| ลวดเชื่อม                 | -               | -          | 5 kg          | 267        |
| ค่าก๊าซ                   | -               | -          | 13.5 kg       | 100        |
| ค่าไฟฟ้าที่ใช้ในการเชื่อม | -               | -          | 8 hr          | 1,052      |
| เครื่องจักรกัดแต่งผิว     | 12 hr           | 6,000      | 6 hr          | 3,000      |
| ค่าแรงงานคน               | 12 hr           | 1,032      | 14 hr         | 1,204      |
| หัวกัด                    | 2 pcs           | 1,000      | 2 pcs         | 1,000      |
| รวม                       |                 | 11,457     |               | 9,873      |

จากตารางที่ 14 พบว่า แม่พิมพ์ที่ผลิตด้วยวิธีกัดเนื้อโลหะจะใช้ขั้นตอนน้อยกว่าแม่พิมพ์ที่ผลิตด้วยวิธีเติมเนื้อโลหะ แต่พบว่าใช้เวลาในการกัดแต่งผิวแม่พิมพ์มากกว่าถึงสองเท่าเนื่องจากมีเนื้อโลหะที่ต้องกัดออกมากกว่า แต่เวลาการผลิตรวมก็ยังน้อยกว่าแม่พิมพ์ที่ผลิตด้วยวิธีเติมเนื้อโลหะที่ละชั้น สาเหตุเนื่องมาจากแม่พิมพ์ที่ขึ้นรูปด้วยวิธีเติมเนื้อโลหะใช้เวลาในขั้นตอนการเชื่อมขึ้นรูปมาก

จากตารางที่ 15 พบว่าแม่พิมพ์ที่ผลิตด้วยวิธีกัดเนื้อโลหะต้องมีค่าใช้จ่ายในเรื่องเหล็กและค่ากัดแต่งผิวมาก และถึงแม้แม่พิมพ์ที่ผลิตด้วยวิธีเติมเนื้อโลหะจะมีขั้นตอนการผลิตมากกว่า แต่ราคารวมก็ยังถูกกว่าแม่พิมพ์ที่ผลิตด้วยวิธีกัดเนื้อโลหะ โดยแม่พิมพ์ที่ขึ้นรูปโดยวิธีเติมเนื้อโลหะมีราคาถูกกว่าแม่พิมพ์ที่ขึ้นรูปโดยวิธีกัดเนื้อโลหะ 1,584 บาท คิดเป็น 13.82 %

เมื่อเปรียบเทียบเนื้อเหล็กที่จะต้องสูญเสียไปเนื่องจากการกัดแต่งผิว โดยคิดจากผลต่างของน้ำหนักเหล็กวัตถุดิบลบด้วยน้ำหนักแม่พิมพ์หลังจากการกัดแต่งผิว ดังแสดงในตารางที่ 16

ตารางที่ 16 การเปรียบเทียบเนื้อเหล็กที่สูญเสียเนื่องจากการกัดแท่งผิว

| รายละเอียด                  | การกัดเนื้อโลหะ | การเติมเนื้อโลหะ |
|-----------------------------|-----------------|------------------|
| เหล็กวัดตุคิป (kg)          | 18.5            | 10               |
| ลวดเชื่อม (kg)              | -               | 5                |
| แม่พิมพ์หลังกัดแท่งผิว (kg) | 15              | 14.5             |
| เหล็กที่สูญเสีย (kg)        | 3.5             | 0.5              |

จากตารางที่ 16 พบว่า แม่พิมพ์ที่ขึ้นรูปด้วยวิธีกัดเนื้อโลหะมีเนื้อเหล็กสูญเสีย 3.5 กิโลกรัม หรือคิดเป็น 18.9 % ส่วนแม่พิมพ์ที่ขึ้นรูปด้วยวิธีเติมเนื้อโลหะ มีเนื้อเหล็กสูญเสีย 0.5 กิโลกรัม หรือคิดเป็น 3.3 % ซึ่งจะสูญเสียเฉพาะเหล็กในส่วนที่ทำการเชื่อมขึ้นรูป จะเห็นได้ว่าแม่พิมพ์ที่ขึ้นรูปโดยการเติมเนื้อโลหะมีการสูญเสียเนื้อเหล็กน้อยกว่าแม่พิมพ์ที่ขึ้นรูปโดยการกัดเนื้อโลหะ เนื่องจากในขั้นตอนการออกแบบแม่พิมพ์ที่ขึ้นรูปโดยวิธีการเติมเนื้อโลหะ สามารถออกแบบให้มีการเผื่อเนื้อเหล็กสำหรับการกัดแท่งผิวได้น้อย

## สรุปและข้อเสนอแนะ

### สรุป

1. จากการศึกษากระบวนการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยวิธีเดิมเนื้อโลหะด้วยเครื่องซีเอ็นซี มิก-แม็ก พบว่ามีพารามิเตอร์หลายตัวที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการ ซึ่งสามารถสรุปค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองได้ดังนี้

|                                     |                 |           |
|-------------------------------------|-----------------|-----------|
| - กระแสไฟฟ้า                        | 100             | แอมแปร์   |
| - ความต่างศักย์ไฟฟ้า                | 19              | โวลต์     |
| - ความสูงระหว่างชิ้นงานกับหัวเชื่อม | 10              | มม.       |
| - ปริมาณก๊าซคลุม                    | 15              | ลิตร/นาที |
| - ความเร็วเดินหัวเชื่อม             | 300             | มม./นาที  |
| - ระยะเลื่อมระหว่างแนวเชื่อม        | 3.5             | มม.       |
| - เส้นทางการเดินหัวเชื่อม           | Contour, Zigzag |           |

2. จากการศึกษาคุณสมบัติทางกลของชิ้นงานที่เชื่อมขึ้นรูปจากลวดเชื่อม ER70S-6 ทั้งที่อุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิใช้งานแม่พิมพ์เมื่อเปรียบเทียบกับโลหะเกรด SS400 พบว่า ชิ้นงานที่เชื่อมขึ้นรูปจากลวดเชื่อม ER70S-6 มีความแข็งแรงและมีความแข็งแรงมากกว่าโลหะเกรด SS400 และยังพบอีกว่าเมื่อชิ้นงานที่ขึ้นรูปจากลวดเชื่อม ER70S-6 ได้รับความร้อนที่อุณหภูมิใช้งานแม่พิมพ์ ทั้งความแข็งแรงและความแข็งจะลดลงเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับชิ้นงานที่อุณหภูมิห้อง

3. ในขั้นตอนการออกแบบและวิเคราะห์ความแข็งแรงของแม่พิมพ์ตัวผู้ ได้ใช้คุณสมบัติทางกลของวัสดุซึ่งได้จากการทดลองด้วยอุปกรณ์ที่ได้มาตรฐานและการวิเคราะห์ความแข็งแรงได้ใช้ค่าพารามิเตอร์ที่ถูกต้องไม่ว่าจะเป็นค่าแรงดันฉีดสูงสุด ค่าแรงปิดแม่พิมพ์สูงสุดและอุณหภูมิใช้งานแม่พิมพ์ รวมถึงใช้เครื่องซีเอ็นซี มิก-แม็ก ที่มีความแม่นยำในการเชื่อมขึ้นรูปจึงส่งผลให้แม่พิมพ์ที่ได้มีความถูกต้องตามที่ออกแบบและมีความแข็งแรงเพียงพอในการใช้งานจริงได้

4. จากการทดสอบและเปรียบเทียบอัตราการระบายความร้อนของแม่พิมพ์ตัวผู้ที่มีระบบหล่อเย็นแบบฉีดผิวและแบบแผ่นกัน พบว่าแม่พิมพ์ตัวผู้ที่มีระบบระบายความร้อนแบบฉีดผิวมีอัตราการ

ระบายความร้อนที่รวดเร็วและมีความสม่ำเสมอมากกว่าแม่พิมพ์ตัวผู้ที่มีระบบระบายความร้อนแบบแผ่นกัน

5. จากการศึกษาต้นทุนในการผลิตแม่พิมพ์ที่มีระบบระบายความร้อนแบบฉีดผิวที่ขึ้นรูปด้วยวิธีเติมเนื้อโลหะกับแม่พิมพ์ที่มีระบบระบายความร้อนแบบแผ่นกันที่ขึ้นรูปด้วยวิธีกัดเนื้อโลหะ พบว่าการผลิตแม่พิมพ์ที่มีระบบระบายความร้อนแบบฉีดผิวที่ขึ้นรูปด้วยวิธีเติมเนื้อโลหะใช้ระยะเวลาผลิตรวมมากกว่า แต่กลับมีต้นทุนในการผลิตต่ำกว่า ก็เนื่องมาจากมีเนื้อโลหะที่ต้องกัดออกน้อยกว่า ซึ่งในขั้นตอนนี้มีราคาในการผลิตค่อนข้างสูง จึงส่งผลให้ต้นทุนการผลิตโดยรวมของแม่พิมพ์ที่มีระบบระบายความร้อนแบบฉีดผิวที่ขึ้นรูปด้วยวิธีเติมเนื้อโลหะต่ำกว่า

### ข้อเสนอแนะ

1. เครื่องมือ ที่ใช้สำหรับขึ้นรูปแม่พิมพ์ที่สร้างขึ้นในงานวิจัยนี้เป็นเครื่องชนิดกึ่งอัตโนมัติ และไม่ครอบคลุมขั้นตอนการขึ้นรูปทั้งหมด คือในระหว่างการเชื่อมแต่ละชั้นยังต้องทำการเจียรนัยผิวด้วยมือและยังต้องใช้เครื่อง CNC machining center กัดแต่งผิวในขั้นตอนสุดท้าย ทำให้เกิดความไม่สะดวกและใช้เวลาในการทำงานนาน สำหรับงานวิจัยในอนาคต ถ้าสามารถสร้างเครื่องขึ้นรูปด้วยวิธีเติมเนื้อวัสดุที่มีการทำงานได้ครบทุกขั้นตอน จะสามารถลดเวลาและเพิ่มความสามารถในการขึ้นรูปชิ้นงานได้

2. เนื่องจากลวดเชื่อมที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.2 mm ซึ่งเป็นขนาดที่ค่อนข้างใหญ่ ทำให้รอยเชื่อมที่ได้มีขนาดใหญ่ตามไปด้วย จึงไม่สามารถออกแบบแม่พิมพ์ให้มีความซับซ้อนหรือมีความละเอียดมากได้ ดังนั้นงานวิจัยในอนาคต อาจใช้ลวดเชื่อมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กลง เพื่อที่จะได้ออกแบบแม่พิมพ์ที่มีความละเอียดซับซ้อนมากขึ้นได้

3. ในขั้นตอนการแบ่ง CAD เป็นชั้น ๆ และขั้นตอนการสร้าง Toolpath ในงานวิจัยนี้ยังต้องใช้โปรแกรมหลายโปรแกรมในการทำงานซึ่งทำให้ใช้เวลามาก สำหรับงานวิจัยในอนาคต ถ้าสามารถสร้างโปรแกรมที่สามารถทำงานในขั้นตอนดังกล่าวข้างต้นได้โดยใช้โปรแกรมเดียวและมีความเป็นอัตโนมัติมากขึ้น จะทำให้ลดเวลาในการทำงานลงได้

4. รูปแบบระบบหล่อเย็นในงานวิจัยนี้ยังเป็นรูปแบบอย่างง่าย ถ้ามีการพัฒนารูปแบบระบบหล่อเย็นมากขึ้น เช่น ออกแบบให้มีผิวโพรงหล่อเย็นสัมผัสกับน้ำหล่อเย็นมากขึ้น จะช่วยให้อัตราการระบายความร้อนของแม่พิมพ์ลดลงได้

5. รูปทรงของแม่พิมพ์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นเพียงรูปทรงอย่างง่าย ซึ่งอาจไม่ทำให้เกิดข้อได้เปรียบในเรื่องอัตราการระบายความร้อนเมื่อเทียบกับระบบหล่อเย็นแบบทั่วไปมากนัก ซึ่งระบบหล่อเย็นแบบชนิดผิวจะมีความได้เปรียบระบบหล่อเย็นแบบทั่วไปมากเมื่อใช้กับแม่พิมพ์ที่มีพื้นผิวเป็นรูปแบบที่ไม่เป็นทรงเรขาคณิตหรือมีพื้นที่ส่วนหนึ่งส่วนใดที่มีขนาดเล็กหรือมีความต่างระดับของพื้นผิวมาก ซึ่งจะทำให้เกิดจุดร้อน (hot spot) ซึ่งระบบหล่อเย็นแบบทั่วไปไม่สามารถแก้ปัญหาในส่วนนี้ได้ ทำให้เกิดปัญหากับชิ้นงานที่ฉีดออกมา งานวิจัยในอนาคต ควรใช้รูปแบบแม่พิมพ์ที่ทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างระบบระบายความร้อนแบบชนิดผิวกับแบบทั่วไป ซึ่งจะสามารถเห็นข้อได้เปรียบของระบบหล่อเย็นแบบชนิดผิวมากขึ้น

6. เพื่อให้การขึ้นรูปแม่พิมพ์ด้วยวิธีขึ้นรูปแบบรวดเร็วและสามารถสร้างระบบหล่อเย็นแบบชนิดผิวที่มีความซับซ้อนมีความเป็นไปได้ในการผลิตมากขึ้น อาจใช้วิธีการขึ้นรูปด้วยการ Stack โดยการตัดแผ่นโลหะเป็นรูปแบบที่ต้องการและนำมาเรียงซ้อนและผนึกให้เป็นชิ้นเดียวกัน โดยวิธีนี้จะ เป็นวิธีที่ไม่ต้องการเทคโนโลยีในการผลิตที่ซับซ้อนและมีความเป็นไปได้ในการผลิตมาก

## เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- คุณยุต เอี่ยมสอาด. 2548. การศึกษาความเป็นไปได้ของการผลิตแม่พิมพ์ผลิตภัณฑ์แบบ  
อัดโดยกระบวนการเติมเนื้อวัสดุ. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลครั้งที่  
21. จังหวัดชลบุรี.
- ชาติ ตระการกุล. 2533. การออกแบบแม่พิมพ์ฉีด. สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น).  
กรุงเทพฯ.
- ณัฐพร บุญเลิศเจริญศักดิ์, คุณยุต เอี่ยมสอาด, สิริชัย จิรวงศ์สุวรรณ และจังหวัด เจริญสุข. 2552.  
การขึ้นรูปแม่พิมพ์แบบกลวงด้านในโดยวิธีขึ้นรูปทีละชั้น. การประชุมวิชาการเครือข่าย  
วิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 23. จังหวัดเชียงใหม่.
- มานะศิษฐ์ พิมพ์สาร. 2541. คู่มือการเชื่อม มิก-แม็ก. พิมพ์ครั้งที่ 2. บริษัทเอ็มแอนด์อี จำกัด,  
กรุงเทพฯ.
- Huijun, W., W. Jiang, J. Ouyang and R. Kovacicvic. 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  
composition 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 Engineer**. 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.
- 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. Kirihara and Y. Miyamoto. 2009. Freeform fabrication of superalloy objects by 3D micro welding. **Material and Design**. 30: 1093-1097.



ภาคผนวก



## 1. การคำนวณต้นทุนการผลิตแม่พิมพ์ตัวผู้ด้วยกระบวนการกัดเนื้อโลหะ

### 1.1 ต้นทุนการออกแบบ

|                   |   |                  |             |
|-------------------|---|------------------|-------------|
| - ระยะเวลาออกแบบ  | = | 5.5              | ชั่วโมง     |
| - ต้นทุน          | = | 500              | บาท/ชั่วโมง |
| - ต้นทุนการออกแบบ | = | $5.5 \times 500$ | บาท         |
|                   | = | 2,750            | บาท         |

### 1.2 ต้นทุนค่าเหล็ก

|                  |   |                |              |
|------------------|---|----------------|--------------|
| - น้ำหนักเหล็ก   | = | 10             | กิโลกรัม     |
| - ต้นทุน         | = | 50             | บาท/กิโลกรัม |
| - ต้นทุนค่าเหล็ก | = | $10 \times 50$ | บาท          |
|                  | = | 500            | บาท          |

### 1.3 ต้นทุนกัดแต่งผิว

|                      |   |                 |             |
|----------------------|---|-----------------|-------------|
| - ระยะเวลากัดแต่งผิว | = | 12              | ชั่วโมง     |
| - ต้นทุน             | = | 500             | บาท/ชั่วโมง |
| - ต้นทุนกัดแต่งผิว   | = | $12 \times 500$ | บาท         |
|                      | = | 6,000           | บาท         |

### 1.4 ต้นทุนค่าแรงงานคน

|                         |   |                    |             |
|-------------------------|---|--------------------|-------------|
| - ระยะเวลาเชื่อมขึ้นรูป | = |                    |             |
| - ระยะเวลากัดแต่งผิว    | = | 12                 | ชั่วโมง     |
| - อัตราค่าแรงงานคน      | = | $(15000 / 22) / 8$ | บาท/ชั่วโมง |
|                         | = | 86                 | บาท/ชั่วโมง |
| - ต้นทุนค่าแรงงานคน     | = | $12 \times 86$     | บาท         |
| - ต้นทุนค่าแรงงานคน     | = | 1,032              | บาท         |

## 1.5 ต้นทุนค่าหัวกั๊ด

|                    |   |                |          |
|--------------------|---|----------------|----------|
| - จำนวนหัวกั๊ด     | = | 2              | ชิ้น     |
| - ราคาหัวกั๊ด      | = | 500            | บาท/ชิ้น |
| - ต้นทุนค่าหัวกั๊ด | = | $2 \times 500$ | บาท      |
|                    | = | 1,000          | บาท      |

## 2. การคำนวณต้นทุนการผลิตแม่พิมพ์ตัวผู้ด้วยกระบวนการเติมเนื้อโลหะ

## 2.1 ต้นทุนการออกแบบ

|                   |   |                |             |
|-------------------|---|----------------|-------------|
| - ระยะเวลาออกแบบ  | = | 5              | ชั่วโมง     |
| - ต้นทุน          | = | 500            | บาท/ชั่วโมง |
| - ต้นทุนการออกแบบ | = | $5 \times 500$ | บาท         |
|                   | = | 2,500          | บาท         |

## 2.2 ต้นทุนค่าเหล็ก

|                  |   |                  |              |
|------------------|---|------------------|--------------|
| - น้ำหนักเหล็ก   | = | 18.5             | กิโลกรัม     |
| - ต้นทุน         | = | 50               | บาท/กิโลกรัม |
| - ต้นทุนค่าเหล็ก | = | $18.5 \times 50$ | บาท          |
|                  | = | 925              | บาท          |

## 2.3 ต้นทุนลวดเชื่อม

|                             |   |                  |          |
|-----------------------------|---|------------------|----------|
| - ราคาลวดเชื่อม 15 กิโลกรัม | = | 800              | บาท      |
| - ราคาลวดเชื่อม 1 กิโลกรัม  | = | $800 / 15$       | บาท      |
|                             | = | 53.33            | บาท      |
| - น้ำหนักลวดที่ใช้          | = | 5                | กิโลกรัม |
| - ต้นทุนลวดเชื่อม           | = | $5 \times 53.33$ | บาท      |
|                             | = | 267              | บาท      |

### 2.3 ต้นทุนค่าก๊าซ

|                          |   |                    |          |
|--------------------------|---|--------------------|----------|
| - ราคาก๊าซ 40.2 กิโลกรัม | = | 300                | บาท      |
| - ราคาก๊าซ 1 กิโลกรัม    | = | $300 / 40.2$       | บาท      |
|                          | = | 7.44               | บาท      |
| - น้ำหนักก๊าซที่ใช้      | = | 13.5               | กิโลกรัม |
| - ต้นทุนค่าก๊าซ          | = | $13.5 \times 7.44$ | บาท      |
|                          | = | 100                | บาท      |

### 2.4 ต้นทุนค่าไฟฟ้าที่ใช้ในการเชื่อม

|                                   |   |                                                            |             |
|-----------------------------------|---|------------------------------------------------------------|-------------|
| - แฟกเตอร์สำหรับไฟ 3 เฟส          | = | 1.73                                                       |             |
| - ความต่างศักย์ไฟ 3 เฟส           | = | 380                                                        | โวลต์       |
| - กระแสไฟฟ้าขณะเชื่อม             | = | 100                                                        | แอมแปร์     |
| - ค่าประสิทธิภาพเครื่องเชื่อม     | = | 80                                                         | เปอร์เซ็นต์ |
| - เวลาที่ใช้ในการเชื่อม           | = | 8                                                          | ชั่วโมง     |
| - กำลังไฟฟ้าที่ใช้                | = | $(1.73 \times 380 \times 100 \times 0.8 \times 8) / 1,000$ | กิโลวัตต์   |
|                                   | = | 420.736                                                    | กิโลวัตต์   |
| - ค่าไฟฟ้าต่อหน่วย                | = | 2.5                                                        | บาท         |
| - ต้นทุนค่าไฟฟ้าที่ใช้ในการเชื่อม | = | $420.736 \times 2.5$                                       | บาท         |
|                                   | = | 1,052                                                      | บาท         |

### 2.5 ต้นทุนกัดแต่งผิว

|                      |   |                |             |
|----------------------|---|----------------|-------------|
| - ระยะเวลากัดแต่งผิว | = | 6              | ชั่วโมง     |
| - ต้นทุน             | = | 500            | บาท/ชั่วโมง |
| - ต้นทุนกัดแต่งผิว   | = | $6 \times 500$ | บาท         |
|                      | = | 3,000          | บาท         |

## 2.4 ต้นทุนค่าแรงงานคน

|                         |   |                     |             |
|-------------------------|---|---------------------|-------------|
| - ระยะเวลาเชื่อมชิ้นรูป | = | 8                   | ชั่วโมง     |
| - ระยะเวลาคัดแต่งผิว    | = | 6                   | ชั่วโมง     |
| - อัตราค่าแรงงานคน      | = | $(15,000 / 22) / 8$ | บาท/ชั่วโมง |
|                         | = | 86                  | บาท/ชั่วโมง |
| - ต้นทุนค่าแรงงานคน     | = | $(8 + 6) \times 86$ | บาท         |
|                         | = | 1,204               | บาท         |

## 2.4 ต้นทุนค่าหัวกั๊ด

|                    |   |                  |          |
|--------------------|---|------------------|----------|
| - จำนวนหัวกั๊ด     | = | 2                | ชิ้น     |
| - ราคาหัวกั๊ด      | = | 500              | บาท/ชิ้น |
| - ต้นทุนค่าหัวกั๊ด | = | $(2 \times 500)$ | บาท      |
|                    | = | 1,000            | บาท      |
| - ต้นทุนค่าหัวกั๊ด | = | $(2 \times 500)$ | บาท      |
|                    | = | 1,000            | บาท      |





## TECHNICAL SPECIFICATION SHEET

ER70S-6 CARBON STEEL WELDING WIRE

SPECIFICATION COMPLIANCE: AISI/AWS A5.18 & ASME SFA 5.18 ER 70S-6

**DESCRIPTION:** ER70S-6 is a premium mild steel solid wire formulated to provide high quality welds and trouble-free performance from heavy duty, high speed, spray transfer applications all the way to light duty low speed, short-arc applications. ER70S-6 is designed for use with various gas mixtures such as 100% CO<sub>2</sub>, 75/25 Ar/CO<sub>2</sub> or 98/2 Ar/O<sub>2</sub>. Even in the most difficult applications ER70S-6 produces a smooth stable arc with low spatter, producing a weld bead that ties in evenly with the sides and has a smooth finished appearance.

**APPLICATIONS:** Frame fabrication, automotive structures, farm implements, construction equipment, pressure vessels, pipe fabrication, railcar construction and repair, general fabrication. Widely used in high-speed robotic and automatic welding applications and semi-automatic applications.

### NOMINAL COMPOSITION:

|            |             |          |             |              |             |
|------------|-------------|----------|-------------|--------------|-------------|
| Carbon     | .06-.15 %   | Copper   | .50 % max.  | Manganese    | 1.40-1.85 % |
| Silicon    | .80-1.15%   | Sulfur   | .035 % max. | Phosphorus   | .025 % max. |
| Nickel     | 0.15 % max. | Chromium | 0.15 % max. | Vanadium     | 0.03% max.  |
| Molybdenum | 0.15 % max. | Iron     | Balance     | Others Total | .50 % max.  |

### PHYSICAL PROPERTIES:

Density lbs/cu in .283

### TYPICAL MECHANICAL PROPERTIES AS WELDED (GMAW)

| Shielding Gas           | CO <sub>2</sub> | 75%Ar/25%CO <sub>2</sub> | 98%Ar/2%O <sub>2</sub> |
|-------------------------|-----------------|--------------------------|------------------------|
| Tensile Strength(psi)   | 80-85,000       | 85-90,000                | 85-90,000              |
| Yield Strength(psi)     | 65-70,000       | 70-75,000                | 70-75,000              |
| Elongation % in 2"      | 28.5%           | 28%                      | 28%                    |
| Reduction of area       | 55-70%          | 55-70%                   | 55-70%                 |
| Charpy V-notch ft. lbs. | 20-30           | 25-35                    | 30-40                  |

### \* RECOMMENDED WELDING PARAMETERS:

**GMAW(MIG) Parameters** (DC Reverse Polarity) Electrode Positive Spray transfer:

| Wire Dia. | Amps    | Volts | Argon/ 1-5% O <sub>2</sub> | Wire Feed ipm |
|-----------|---------|-------|----------------------------|---------------|
| .023      | 85-170  | 23-27 | 25                         | 360-620       |
| .030      | 135-230 | 24-28 | 25                         | 390-670       |
| .035      | 165-300 | 24-28 | 30                         | 360-520       |
| .045      | 200-375 | 24-30 | 30-35                      | 210-390       |
| 1/16      | 275-500 | 24-32 | 40                         | 150-360       |
| 3/32      | 300-600 | 24-33 | 50                         | 75-125        |



**\* RECOMMENDED WELDING PARAMETERS (continued):**

**GTAW (Tig) Parameters (DCSP) 2 %Thoriated Tungsten Electrode negative**

| <u>Material</u> | <u>Tungsten dia</u> | <u>Filler Wire Size</u> | <u>Amps</u> | <u>Gas Cup</u> | <u>Argon(cfh)</u> |
|-----------------|---------------------|-------------------------|-------------|----------------|-------------------|
| 1/16"           | 1/16"               | 1/16"                   | 100-140     | 3/8            | 20                |
| 3/32"           | 1/16"               | 1/16"                   | 100-160     | 3/8            | 20                |
| 1/8"            | 3/32"               | 1/16"                   | 125-200     | 7/16           | 20                |
| 3/16"           | 3/32"               | 3/32"                   | 150-250     | 7/16           | 25                |
| 1/4"            | 1/8"                | 1/8"                    | 150-250     | 1/2            | 25                |
| 3/8"            | 1/8"                | 1/8"                    | 150-275     | 1/2            | 25                |
| 1/2"            | 1/8"                | 1/8"                    | 150-300     | 1/2            | 25                |

**\* All parameters are suggested as basic guidelines and will vary depending on joint design number of passes, and other factors.**

**SAFETY INFORMATION:**

WARNING: PROTECT yourself and others. Read and understand this information.

FUMES AND GASES can be hazardous to your health.

HEAT RAYS (INFRARED RADIATION) from flame or hot metal can injure eyes.

• Before use, read and understand the manufacturer's instructions, Material Safety Data Sheet (MSDS) and your employer's safety practices.

• Keep your head out of fumes.

• Use enough ventilation, exhaust at the flame, or both, to keep fumes and gases from your breathing zone and the general area.

• Wear correct eye, ear, and body protection.

• See American National Standard Z49.1, *Safety in Welding, Cutting, and Allied Processes*, published by the American Welding Society, 550 N.W. LeJeune Road, Miami, Florida 33126; OSHA Safety and Health Standards, available from the U.S. Government Office, Washington, DC 20402

**STATEMENT OF LIABILITY — DISCLAIMER** Any suggestion of product applications or results is given without representation or warranty, either expressed or implied. Without exception or limitation, there are no warranties of merchantability or of fitness for particular purpose or application. The user must fully evaluate every process and application in all aspects, including suitability, compliance with applicable law and non-infringement of the rights of others. Unibrazo Corp and its affiliates shall have no liability in respect thereof.





ภาพผนวกที่ ค1 ภาพตัดผ่าแม่พิมพ์ตัวผู้ที่มีระบบระบายความร้อนแบบแผ่นกั้น



ภาพผนวกที่ ค2 ภาพตัดผ่าแม่พิมพ์ตัวผู้ที่มีระบบระบายความร้อนแบบฉีดผิว

## ประวัติการศึกษาและการทำงาน

|                                     |                                                                    |
|-------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| ชื่อ                                | นายรัฐพล จันทรช่วงโชติ                                             |
| เกิดวันที่                          | 19 มีนาคม 2526                                                     |
| สถานที่เกิด                         | อำเภอเมืองสุรินทร์ จังหวัดสุรินทร์                                 |
| ประวัติการศึกษา                     | วศ.บ. (วิศวกรรมเครื่องกล)<br>มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องค์กรักษ์ |
| ตำแหน่งปัจจุบัน                     | -                                                                  |
| สถานที่ทำงานปัจจุบัน                | -                                                                  |
| ผลงานดีเด่นและ/หรือรางวัลทางวิชาการ | -                                                                  |
| ทุนการศึกษาที่ได้รับ                | -                                                                  |