



ผลของขั้นตอนการกำจัดตัวประสานและการเผาผนึกต่อสมบัติเชิงกล  
และโครงสร้างทางจุลภาคของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 17-4PH

นางสาวชญพร ยอดแก้ว

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุ  
คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

พ.ศ.2549

ผลของขั้นตอนการกำจัดตัวประสานและการเผาผลาญต่อสมบัติเชิงกล  
และ โครงสร้างทางจุลภาคของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 17-4PH

นางสาวชญพร ยอดแก้ว วท.บ. (เคมี)

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุ  
คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี  
พ.ศ. 2549

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....  
(ดร.นันทน์ ถาวรังกูร)

ประธานกรรมการวิทยานิพนธ์

.....  
(ดร.นคร ศรีสุขุมบวรชัย)

กรรมการ

.....  
(ดร.อัญชติ มโนนุกุล)

กรรมการ

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

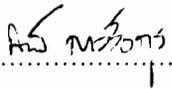
ผลของขั้นตอนการกำจัดตัวประสานและการเผาผนึกต่อสมบัติเชิงกล  
และ โครงสร้างทางจุลภาคของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 17-4PH

นางสาวชญพร ยอดแก้ว วท.บ. (เคมี)

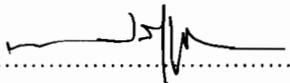
วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุ  
คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

พ.ศ. 2549

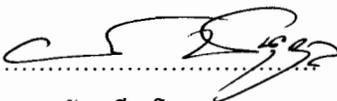
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
.....  
(ดร.นันทน์ ถาวรังกูร)

ประธานกรรมการวิทยานิพนธ์

  
.....  
(ดร.นคร ศรีสุขุมบวรชัย)

กรรมการ

  
.....  
(ดร.อัญชลี มโนนกุล)

กรรมการ

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

|                   |  |
|-------------------|--|
| หัวข้อวิทยานิพนธ์ | ผลของขั้นตอนการกำจัดตัวประสานและการเผาผนึกต่อสมบัติเชิงกลและโครงสร้างทางจุลภาคของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 17-4PH |
| หน่วยกิต          | 15   |
| ผู้เขียน          | นางสาวธัญพร ยอดแก้ว  |
| อาจารย์ที่ปรึกษา  | ดร.นันทน์ ถาวรังกูร  |
| หลักสูตร          | วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต   |
| สาขาวิชา          | เทคโนโลยีวัสดุ   |
| สายวิชา           | เทคโนโลยีวัสดุ   |
| คณะ               | พลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ   |
| พ.ศ.              | 2549   |

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้ศึกษาปัจจัยสำคัญต่อการเผาผนึกชิ้นงานตัวอย่างเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 17-4PH ซึ่งผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูปโลหะผง โดยปัจจัยที่ศึกษาได้แก่ ผลของขั้นตอนการกำจัดตัวประสาน คือ การกำจัดตัวประสานแบบขั้นตอนเดียวต่อเนื่องด้วยการเผาผนึกภายใต้บรรยากาศอาร์กอนหรือสุญญากาศ และ การกำจัดตัวประสานแบบสองขั้นตอนโดยการแยกกำจัดตัวประสานด้วยความร้อนภายใต้อากาศแล้วเผาผนึกภายใต้บรรยากาศอาร์กอน จากการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิเผาผนึกในช่วง 1300 ถึง 1375 องศาเซลเซียส พบว่าการเผาผนึกชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 17-4PH แบบขั้นตอนเดียวต่อเนื่องภายใต้บรรยากาศอาร์กอนส่งผลให้ค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์รวมถึงสมบัติเชิงกลด้านความแข็งแรงและความสามารถต้านทานแรงดึงของชิ้นงานมีค่าสูงกว่าผลจากการทดลองด้วยสภาวะอื่น ทั้งนี้ชิ้นงานที่ได้จากการกำจัดตัวประสานและเผาผนึกแบบสองขั้นตอนจะพบรูพรุนภายในโครงสร้างจำนวนมาก ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลที่ลดลง และในการเผาผนึกชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 17-4PH นี้ควรใช้อุณหภูมิเผาผนึกที่ 1325 องศาเซลเซียส เนื่องจากให้ค่าของผลการทดสอบต่างๆ ที่ดีกว่าอุณหภูมิเผาผนึกอื่น ในขณะที่ชิ้นงานที่ได้จากการเผาผนึกด้วยอุณหภูมิ 1375 องศาเซลเซียส จะได้ชิ้นงานที่มีเกรนแตกต่างไปจากเกรนที่ปรากฏ ณ อุณหภูมิเผาผนึกที่ 1300 ถึง 1350 องศาเซลเซียส โดยเกรนจะมีลักษณะรียาวและมีทิศทางการจัดเรียงตัวที่ไม่แน่นอนทำให้ผลการทดลองของชิ้นงานที่เผาผนึกที่อุณหภูมิ 1375 องศาเซลเซียส มีค่าด้อยที่สุดด้วย

คำสำคัญ : เหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 17-4PH/การกำจัดตัวประสาน/การเผาผนึก/บรรยากาศอาร์กอน/  
สุญญากาศ

|                |  |
|----------------|--|
| Thesis Title   | Effects of Debinding and Sintering Process on Mechanical Properties and Microstructure of Stainless Steel 17-4PH |
| Thesis Credits | 15   |
| Candidate      | Miss Thanyaporn Yotkaew  |
| Thesis Advisor | Dr. Nandh Thavarungkul   |
| Program        | Master of Engineering  |
| Field of Study | Materials Technology   |
| Department     | Materials Technology   |
| Faculty        | School of Energy, Environment and Materials  |
| B.E            | 2549   |

### **Abstract**

The effects of debinding and sintering process on mechanical properties and microstructure of metal injection molded stainless steel 17-4PH were studied in two processing routes: (1) the continuous debinding and sintering under argon or vacuum and (2) the two-step air debinding and argon sintering process. The sintering temperatures were varied from 1300°C to 1375°C with 25°C increment. The results showed that the relative density, hardness and tensile properties of stainless steel 17-4PH produced via continuous route under argon were higher than those via the other route. Parts produced via the two-step debinding and sintering process exhibited higher level of porosity, which degraded corresponding mechanical properties. It was found that the sintering temperature of 1325°C resulted in better properties to the parts than other sintering temperatures. At 1375°C, abnormal grain morphology was observed. The grains were elongated and arranged in random directions, which, as a result, reduced mechanical properties.

**Keywords :** Stainless Steel 17-4PH / Debinding / Sintering / Argon Atmosphere / Vacuum Atmosphere

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้ทำวิจัยขอขอบพระคุณ ดร.นันทน์ ถาวรังกูร ซึ่งเป็นที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำแนะนำและสอนสั่ง ตลอดระยะเวลาที่ผ่านมาในรั้วของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ทั้งด้านวิชาการและการดำเนินชีวิตอย่างมีคุณค่า ขอขอบคุณ ดร.นคร ศรีสุขุมบวรชัย และ ดร.อัญชลี มโนนุกูล ซึ่งเป็นคณะกรรมการวิทยานิพนธ์ และดร.เรืองเดช ชงศรี ที่กรุณาให้คำแนะนำในการดำเนินงานวิจัย การวิเคราะห์ผลการทดลอง การเขียนวิทยานิพนธ์ ทำให้ผู้เขียนสามารถทำงานวิจัยจนสำเร็จลุล่วงได้ในที่สุด

ขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ ที่อนุเคราะห์เครื่องมือและเงินทุนสำหรับค่าใช้จ่ายในการทดลองและวิจัย

ขอขอบคุณ คุณมนภาส มรกฏจินดา คุณกิตติชัย พักพันธ์ คุณเกศินี ศรีรักษาสิล น้องๆ ผู้ช่วยนักวิจัย หน่วยวิจัยและพัฒนาโปรแกรมวัสดุผง และกลุ่มวิจัยการฉีดขึ้นรูปโลหะผง ที่ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกด้านเครื่องมืออุปกรณ์ ทางด้านโลหะผง ตลอดจนคำแนะนำปรึกษา ขอขอบคุณ คุณธนภัทร ศรีโมรา ที่ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกด้านเครื่องมืออุปกรณ์ ทางด้านงานทดสอบสมบัติทางกล ตลอดจนคอยให้คำแนะนำปรึกษาและเป็นกำลังใจที่สำคัญอีกท่านหนึ่งมาโดยตลอด จนผู้เขียนสามารถทำวิจัยสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอกราบแทบเท้าคุณแม่แม่ณี ยอดแก้ว คุณเวชยันต์ ยอดแก้ว ผู้มีพระคุณสูงสุดในชีวิตของผู้ทำวิจัย เพราะด้วยความรัก ความห่วงใยและการให้กำลังใจตลอดมาของผู้มีพระคุณทั้งสอง ซึ่งเป็นแรงผลักดันที่สำคัญยิ่งให้ผู้ทำวิจัย มีกำลังใจที่จะฝ่าฟันอุปสรรคและปัญหาต่างๆ จนกระทั่งผู้เขียนสามารถทำงานวิจัยจนสำเร็จลุล่วงได้ในที่สุด

## สารบัญ

|   | หน้า     |
|---|----------|
| บทคัดย่อภาษาไทย                         | ข        |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ                      | ค        |
| กิตติกรรมประกาศ                         | ง        |
| สารบัญ                                  | จ        |
| รายการตาราง                             | ฉ        |
| รายการรูปประกอบ                         | ญ        |
| <br>                                    |          |
| <b>บทที่</b>                            |          |
| <b>1. บทนำ</b>                          | <b>1</b> |
| 1.1 ที่มาของงานวิจัย                    | 1        |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย             | 3        |
| 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย                   | 3        |
| <br>                                    |          |
| <b>2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b> | <b>4</b> |
| 2.1 ส่วนผสมตั้งต้น                      | 5        |
| 2.1.1 ผงโลหะ                            | 6        |
| 2.1.2 ตัวประสาน                         | 10       |
| 2.1.3 สัดส่วนของส่วนผสมตั้งต้น          | 13       |
| 2.2 การขึ้นรูป                          | 15       |
| 2.2.1 ชุดฉีด                            | 16       |
| 2.2.1.1 กรวยเติมผงโลหะ                  | 17       |
| 2.2.1.2 กระบอกลัดและแผ่นให้ความร้อน     | 17       |
| 2.2.1.3 เกลียวหนอน                      | 17       |
| 2.2.1.4 หัวฉีด                          | 17       |
| 2.2.2 ชุดปิด-เปิดแม่พิมพ์               | 18       |
| 2.2.2.1 แผ่นยึดแม่พิมพ์                 | 18       |
| 2.2.2.2 เพลาน้ำเลื่อน                   | 18       |

|  | หน้า      |
|--|-----------|
| 2.2.2.3 ระบบขับเคลื่อนปิด-เปิดแม่พิมพ์                                   | 18        |
| 2.2.2.4 แผ่นยึดระบบขับเคลื่อน  | 20        |
| 2.2.3 ฐานเครื่อง   | 20        |
| 2.3 การกำจัดตัวประสาน  | 20        |
| 2.3.1 การกำจัดตัวประสานด้วยความร้อน                                      | 20        |
| 2.3.2 การกำจัดตัวประสานด้วยตัวทำละลาย                                    | 24        |
| 2.4 การเผาผนึก   | 27        |
| 2.4.1 กลไกการเผาผนึก   | 28        |
| 2.4.2 การพัฒนาโครงสร้างจุลภาคและการเปลี่ยนแปลงลักษณะรูพรุน<br>ขณะเผาผนึก | 29        |
| 2.4.3 ปัจจัยแวดล้อมที่ส่งผลต่อการเผาผนึก                                 | 31        |
| 2.4.3.1 บรรยากาศการเผาผนึก   | 31        |
| 2.4.3.2 อุณหภูมิและเวลาในการเผาผนึก                                      | 36        |
| 2.5 เหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 17-4PH  | 43        |
| 2.5.1 ประโยชน์การใช้งาน  | 44        |
| <b>3. ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย</b>                                       | <b>45</b> |
| 3.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย  | 45        |
| 3.1.1 เม็ดส่วนผสมตั้งต้น   | 45        |
| 3.1.1.1 ผงโลหะ   | 45        |
| 3.1.1.2 ตัวประสาน  | 46        |
| 3.1.2 ก๊าซ   | 46        |
| 3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย  | 47        |
| 3.2.1 อุปกรณ์เตรียมชิ้นงาน   | 47        |
| 3.2.2 อุปกรณ์ทดสอบและวิเคราะห์   | 49        |
| 3.3 ขั้นตอนการทดลอง  | 51        |
| 3.3.1 การเตรียมชิ้นงานกรีน   | 52        |
| 3.3.2 การกำจัดตัวประสานและการเผาผนึก                                     | 53        |
| 3.3.2.1 การกำจัดตัวประสานและการเผาผนึกแบบขั้นตอนเดียวโดยเตาสู่ญญากาศ     | 53        |

|           |   |           |
|-----------|---|-----------|
| 3.3.2.2   | การกำจัดตัวประสานและการเผาผนึกแบบสองชั้นตอน                                 | 53        |
| 3.3.3     | การอบชุบชิ้นงานหลังการเผาผนึก   | 54        |
| 3.3.4     | การวัดขนาดชิ้นงานเพื่อศึกษาการหดตัว   | 55        |
| 3.3.5     | การทดสอบสมบัติชิ้นงานที่ผ่านการฉีดขึ้นรูป                                   | 56        |
| 3.3.5.1   | ความหนาแน่นของชิ้นงานกรีนและชิ้นงานหลังเผาประสาน                            | 56        |
| 3.3.5.2   | ความหนาแน่นสัมพัทธ์   | 56        |
| 3.3.5.3   | ความสามารถในการต้านทานแรงดึง  | 57        |
| 3.3.5.4   | ความแข็ง  | 57        |
| 3.3.5.5   | การตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาค  | 57        |
| 3.3.5.6   | การตรวจสอบโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคเอ็กซเรย์ดิฟแฟรกชัน                        | 58        |
| 3.3.5.7   | การตรวจสอบหาปริมาณออกซิเจน  | 58        |
| 3.3.5.8   | การตรวจสอบหาปริมาณธาตุองค์ประกอบ  | 58        |
| <b>4.</b> | <b>ผลการทดลองและอภิปรายผล</b>   | <b>59</b> |
| 4.1       | การทดลองหาอุณหภูมิหลอมเหลว  | 59        |
| 4.2       | ผลการเตรียมชิ้นงานโดยการปรับเปลี่ยนสถานะในการฉีด                            | 60        |
| 4.2.1     | อุณหภูมิหลอมเหลว  | 62        |
| 4.2.2     | อุณหภูมิแม่พิมพ์  | 64        |
| 4.2.3     | ความเร็วฉีด   | 65        |
| 4.2.4     | ความดันฉีด  | 66        |
| 4.3       | ผลทางกายภาพของชิ้นงานหลังการเผาผนึก   | 67        |
| 4.3.1     | ลักษณะทั่วไปโดยการตรวจสอบด้วยสายตา  | 67        |
| 4.3.2     | การศึกษาโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานทดสอบ                                      | 68        |
| 4.3.3     | ความหนาแน่นของชิ้นงาน   | 73        |
| 4.4       | ผลการตรวจสอบโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคเอ็กซเรย์ดิฟแฟรกชัน                      | 76        |
| 4.5       | ผลของปริมาณออกซิเจน   | 79        |
| 4.6       | ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของชิ้นงานที่ผ่านการเผาผนึก<br>จากสถานะต่างๆ | 81        |

|   | หน้า       |
|---|------------|
| 4.7 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกล  | 83         |
| 4.7.1 การทดสอบความแข็ง  | 83         |
| 4.7.2 การทดสอบความสามารถในการต้านทานแรงดึง                              | 86         |
| 4.8 การศึกษาการหดตัว ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ของชิ้นงานทดสอบ                    | 90         |
| 4.9 ผลการอบชุบชิ้นงานหลังการเผาพูนึก                                    | 93         |
| <b>5. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ</b>                                   | <b>95</b>  |
| 5.1 สรุปผลการวิจัย  | 95         |
| 5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยต่อไป                                       | 96         |
| <b>เอกสารอ้างอิง</b>  | <b>97</b>  |
| <b>ภาคผนวก</b>  | <b>100</b> |
| ภาคผนวก ก เอกสารแสดงรายละเอียดและสมบัติของผงเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 17-4PH | 100        |
| ภาคผนวก ข ผลการทดสอบ TGA ของเม็ดส่วนผสมตั้งต้น                          | 103        |
| <b>ประวัติผู้วิจัย</b>  | <b>105</b> |

รายการตาราง

| ตาราง | หน้า   |    |
|-------|--|----|
| 2.1   | ข้อดีและข้อเสียของผงโลหะขนาดเล็กต่อกระบวนการฉีดขึ้นรูป   | 7  |
| 2.2   | สูตรตัวประสานที่นิยมใช้ในงานฉีดขึ้นรูป   | 12 |
| 2.3   | ส่วนประกอบของเครื่องฉีดโลหะ  | 16 |
| 2.4   | องค์ประกอบทางเคมีของเหล็กกล้าความเร็วรอบสูงชนิด M2 และ T15   | 40 |
| 2.5   | องค์ประกอบทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 17-4 PH   | 43 |
| 3.1   | องค์ประกอบทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิม 17-4PH  | 45 |
| 4.1   | การปรับอุณหภูมิบริเวณสกรู  | 63 |
| 4.2   | การปรับเปลี่ยนอุณหภูมิแม่พิมพ์   | 64 |
| 4.3   | การปรับเปลี่ยนความเร็วในการฉีด   | 65 |
| 4.4   | การปรับเปลี่ยนความดันในการฉีด  | 66 |
| 4.5   | ลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานหลังการเผาพูนึก   | 67 |
| 4.6   | การตรวจสอบปริมาณธาตุของค์ประกอบของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 17-4PH บริเวณภายในวิฎภาคของเกรนและวิฎภาคของเดลด้าเฟอร์ไรต์ ด้วยเทคนิค EDS (Energy dispersive spectroscopy) | 70 |
| 4.7   | ผลขององค์ประกอบทางเคมีของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 17-4PH ซึ่งผ่านการเผาพูนึก ณ สภาวะการทดลองที่แตกต่างกัน   | 82 |

## รายการรูปประกอบ

| รูป  | หน้า  |    |
|------|---|----|
| 2.1  | กระบวนการขึ้นรูปชิ้นงานแบบฉีดขึ้นรูปผงโลหะ  | 5  |
| 2.2  | เมล็ดส่วนผสมตั้งต้นที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการฉีดขึ้นรูป  | 6  |
| 2.3  | ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การหดตัวและสัดส่วนความหนาแน่นการจัดเรียงตัว   | 7  |
| 2.4  | อนุภาคผง (ก) ทองแดงที่ได้จากการผลิตแบบพ่นด้วยแก๊สและ (ข) เหล็กกล้าไร้สนิมที่ได้จากการผลิตแบบพ่นด้วยน้ำ            | 8  |
| 2.5  | รูพรุนภายในชิ้นงานที่ได้จากผงแบบกลมและผงรูปร่างไม่แน่นอน  | 9  |
| 2.6  | ภาพจำลองแสดงการผสมกันระหว่างผงโลหะและตัวประสานในสัดส่วนที่แตกต่างกัน  | 13 |
| 2.7  | กราฟแสดงความหนาแน่นของส่วนผสมและสัดส่วนปริมาตรผงโลหะอะลูมิเนียมในดีแบบกลม ซึ่งผสมกับตัวประสานชนิดเว็กซ์-พอลิเมอร์ | 15 |
| 2.8  | แผนภาพของโครงสร้างพื้นฐานของเครื่องฉีดผงโลหะ  | 15 |
| 2.9  | แผนภาพของอุปกรณ์ชุดฉีด  | 17 |
| 2.10 | แผนภาพของระบบขับเคลื่อนแม่พิมพ์แบบแมคคานิก  | 19 |
| 2.11 | แผนภาพของระบบขับเคลื่อนแม่พิมพ์แบบไฮดรอลิก  | 19 |
| 2.12 | แบบจำลองการกำจัดตัวประสานด้วยความร้อน ซึ่งตัวประสานมีการแทรกซึมผ่านรูพรุนเปิดออกสู่ผิวหน้าของชิ้นงาน              | 21 |
| 2.13 | ส่วนประกอบโดยรวมของอุปกรณ์การกำจัดตัวประสานด้วยกระบวนการทางความร้อนภายใต้บรรยากาศสุญญากาศ                         | 22 |
| 2.14 | ส่วนประกอบของระบบกำจัดตัวประสานด้วยความร้อนภายใต้ความดันบรรยากาศสูง   | 23 |
| 2.15 | แบบจำลองการกำจัดตัวประสานด้วยวิธีการดูดซับด้วยเม็ดวัสดุพรุน   | 24 |
| 2.16 | การกำจัดตัวประสานด้วยการแช่ชิ้นงานในไอของตัวทำละลาย   | 25 |
| 2.17 | การกำจัดตัวประสานด้วยตัวเร่งปฏิกิริยากรด  | 26 |
| 2.18 | การเกิด necking ณ บริเวณจุดสัมผัสของอนุภาคผงกลมในระยะเริ่มต้นของการเผาผืนึก                                       | 27 |
| 2.19 | การเติบโตของ neck ด้วยกลไก transport ต่าง ๆ   | 28 |

| รูป  | หน้า   |    |
|------|--|----|
| 2.20 | กลไกการเผาผลาญ (ก) การเคลื่อนที่ตามพื้นผิว (ข) การเคลื่อนที่แบบมวลรวม  | 29 |
| 2.21 | ขั้นตอนการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางจุลภาคและรูพรุนขณะเกิดการเผาผลาญ  | 30 |
| 2.22 | รูปร่างรูพรุนที่แตกต่างกัน ณ ตำแหน่งต่าง   | 31 |
| 2.23 | แผนภาพทางความร้อนของการสูญเสียน้ำหนักระหว่างการเผาผลาญต่ออุณหภูมิเผาผลาญของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมซึ่งผสมสารประกอบอินทรีย์ช่วยในการหล่อขึ้น 0.4 เปอร์เซนต์ | 32 |
| 2.24 | ลักษณะภาคตัดขวางของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม ซึ่งเกิดรูพรุนบริเวณใกล้กับผิวหน้าชิ้นงาน เนื่องจากมีโครเมียมบางส่วนระเหยเป็นไอขณะเผาผลาญภายใต้บรรยากาศสุญญากาศ | 35 |
| 2.25 | ค่าความดันย่อยในการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของโครเมียมเป็นก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์   | 35 |
| 2.26 | ผลของอุณหภูมิเผาผลาญต่อความสามารถต้านทานแรงดึงสูงสุดของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 316L ซึ่งเผาผลาญภายใต้บรรยากาศดิสโซซิเอทแอมโมเนียและไฮโดรเจน                   | 36 |
| 2.27 | โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานพลาสมาเคลือบซึ่งผ่านการเผาผลาญที่อุณหภูมิ   | 37 |
| 2.28 | ผลของอุณหภูมิเผาผลาญ   | 38 |
| 2.29 | ลำดับขั้นการแยกตัวของรูพรุน และการเปลี่ยนแปลงลักษณะรูพรุนเป็นทรงกลม  | 39 |
| 2.30 | การจัดแบ่งลักษณะรูพรุนและขอบเกรนเป็น 2 ลักษณะ  | 39 |
| 2.31 | ผลของอุณหภูมิและบรรยากาศในการเผาผลาญชิ้นงาน  | 41 |
| 2.32 | ลักษณะ โครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงาน M2 ซึ่งเผาผลาญภายใต้บรรยากาศสุญญากาศที่อุณหภูมิ  | 42 |
| 3.1  | เมล็ดส่วนผสมตั้งต้นเหล็กกล้าไร้สนิม 17-4PH   | 46 |
| 3.2  | เครื่องฉีดขึ้นรูปชิ้นงานกรีน   | 47 |
| 3.3  | เตาสุญญากาศ SHIMADZU   | 48 |
| 3.4  | เตาเผากำจัดตัวประสาน   | 49 |
| 3.5  | เครื่องตรวจสอบรูพรุนภายในชิ้นงาน โดยการฉายรังสี  | 50 |
| 3.6  | เครื่องมือทดสอบสมบัติทางกล   | 50 |
| 3.7  | แผนภาพแสดงขั้นตอนการทดลอง  | 51 |

| รูป  | หน้า   |    |
|------|--|----|
| 3.8  | ลักษณะชิ้นงานทดสอบแรงดึง   | 52 |
| 3.9  | อุณหภูมิและระยะเวลาของการอบชุบเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 17-4PH ตามมาตรฐาน ASTM A564 Type 630  | 54 |
| 3.10 | การวัดชิ้นงานทดสอบแรงดึง ณ ตำแหน่งต่าง ๆ   | 55 |
| 3.11 | ลักษณะการกระจายตัวรอยกดของการทดสอบความแข็งทั้งด้านบนและล่างของชิ้นงาน  | 57 |
| 4.1  | อุณหภูมิการหลอมเหลวของเม็ดส่วนผสมตั้งต้นด้วยเทคนิค DSC   | 60 |
| 4.2  | ชิ้นงานที่มีจุดบกพร่องจากการฉีด (ก) ชิ้นงานไม่เต็มแม่พิมพ์ (ข) รอยแตกร้าวบริเวณทางเข้า (ค) โพรงอากาศภายในชิ้นงานบริเวณแกจ (ง) โพรงอากาศบริเวณทางเข้า และ (จ) ร่องรอยการยุบตัวบริเวณแกจ | 61 |
| 4.3  | โพรงอากาศภายในชิ้นงานกรีน ซึ่งได้จากการตรวจสอบชิ้นงานด้วยการฉายรังสี   | 62 |
| 4.4  | ชิ้นงานที่ได้จากการเผาผนึกแบบสองขั้นตอนแสดงให้เห็นรอยขีดข่วนบริเวณด้านที่สัมผัสกับแผ่นรองอะลูมินา  | 68 |
| 4.5  | โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 17-4PH ซึ่งผ่านกระบวนการเผาผนึกภายใต้บรรยากาศอาร์กอนแบบขั้นตอนเดียวต่อเนื่องที่อุณหภูมิเผาผนึกที่ 1300 องศาเซลเซียส                      | 69 |
| 4.6  | โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 17-4PH จากการทดลองเผาผนึกของ Hwan-Jin Sung และ คณะ โดยใช้อุณหภูมิในการเผาผนึกที่ 1250 องศาเซลเซียส                                       | 69 |
| 4.7  | ลักษณะ โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานตัวอย่างเหล็กกล้าไร้สนิม 17-4 PH ซึ่งผ่านการเผาผนึกที่สภาวะทดสอบต่าง ๆ   | 72 |
| 4.8  | ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของชิ้นงานที่ผ่านการเผาผนึกภายใต้สภาวะและอุณหภูมิเผาผนึกที่แตกต่างกัน   | 73 |
| 4.9  | ภาพเปรียบเทียบปริมาณรูพรุนของชิ้นงานที่ผ่านการเผาผนึกภายใต้บรรยากาศอาร์กอน ที่อุณหภูมิ 1325 องศาเซลเซียส ก่อนการกัดกรด   | 76 |
| 4.10 | X-ray diffractogram ของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 17-4PH ก่อนและหลังเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1325 องศาเซลเซียส  | 77 |

| รูป   | หน้า |
|---|------|
| 4.11 X-ray diffractogram ของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 17-4PH หลังเผาผืนิกภายใต้บรรยากาศอาร์กอนแบบขั้นตอนเดียวต่อเนื้อที่อุณหภูมิ 1300 และ 1375 องศาเซลเซียส | 77   |
| 4.12 X-ray diffractogram ของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 17-4PH หลังเผาผืนิกภายใต้บรรยากาศสุญญากาศที่อุณหภูมิ 1300 และ 1375 องศาเซลเซียส                       | 78   |
| 4.13 ปริมาณออกซิเจนหลังเผาผืนิกซึ่งอยู่ในชิ้นงานตัวอย่างเหล็กกล้าไร้สนิม 17-4PH ที่ผ่านการเผาผืนิกที่สภาวะต่างๆ   | 80   |
| 4.14 ความแข็งของชิ้นงานตัวอย่างเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 17-4PH ซึ่งผ่านการเผาผืนิก ณ สภาวะทดลองต่างๆ  | 84   |
| 4.15 ขนาดและลักษณะของเกรนที่แตกต่างกันเมื่ออุณหภูมิเผาผืนิกเพิ่มขึ้น (ก) 1300, (ข) 1325, (ค) 1350 และ (ง) 1375 องศาเซลเซียส                                   | 85   |
| 4.16 ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดแรงดึงของชิ้นงานทดสอบเหล็กกล้าไร้สนิม 17-4PH ซึ่งผ่านการเผาผืนิกภายใต้สภาวะและอุณหภูมิเผาผืนิกที่แตกต่างกัน                    | 88   |
| 4.17 ค่าจุดครากตัวที่ความเครียด 0.2 เปอร์เซ็นต์ ของชิ้นงานทดสอบเหล็กกล้าไร้สนิม 17-4PH ซึ่งผ่านการเผาผืนิกภายใต้สภาวะและอุณหภูมิเผาผืนิกที่แตกต่างกัน         | 88   |
| 4.18 อัตราการยืดของชิ้นงานทดสอบเหล็กกล้าไร้สนิม 17-4PH ซึ่งผ่านการเผาผืนิกภายใต้สภาวะและอุณหภูมิเผาผืนิกที่แตกต่างกัน   | 89   |
| 4.19 ค่าการหดตัว ณ ตำแหน่งความกว้างของกริปของชิ้นงานตัวอย่างเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 17-4PH   | 91   |
| 4.20 ค่าการหดตัว ณ ตำแหน่งความกว้างของเกจของชิ้นงานตัวอย่างเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 17-4PH  | 91   |
| 4.21 ค่าการหดตัวในส่วนของความยาวของชิ้นงานตัวอย่างเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 17-4PH   | 92   |
| 4.22 ค่าการหดตัวในส่วนของความหนาของชิ้นงานตัวอย่างเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 17-4PH   | 92   |
| 4.23 ค่าความแข็งของชิ้นงานตัวอย่างซึ่งผ่านการอบชุบตามมาตรฐาน ASTM A564 Type 630   | 93   |
| 4.24 ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานตัวอย่างซึ่งผ่านการอบชุบตามมาตรฐาน ASTM A564 Type 630  | 94   |
| ข.1 อุณหภูมิการสลายตัวของตัวประสานในเม็ดผสมตั้งต้น  | 104  |

# บทที่ 1 บทนำ

## 1.1 ที่มาของงานวิจัย

กระบวนการฉีดขึ้นรูปโลหะผง (Metal Injection Molding, MIM) ถูกพัฒนาขึ้นจากเทคโนโลยีการฉีดพลาสติก โดยวัตถุดิบที่ใช้ประกอบด้วยผงโลหะและตัวประสานซึ่งมีความสำคัญต่อขั้นตอนการฉีดขึ้นรูปโดยช่วยในการไหลตัวเข้าสู่แม่พิมพ์และคงรูปร่างตามลักษณะของชิ้นงาน ด้วยเหตุนี้เทคโนโลยีการฉีดขึ้นรูปโลหะผงจึงเป็นกระบวนการขึ้นรูปวัสดุอีกทางเลือกหนึ่งที่มีข้อดีคือ สามารถขึ้นรูปชิ้นงานที่มีขนาดเล็กและมีความซับซ้อนสูงและยากต่อการขึ้นรูปด้วยกระบวนการอื่นๆ ซึ่งชิ้นงานที่ได้ไม่จำเป็นต้องผ่านขั้นตอนการอบแห้งผิว ทำให้ไม่มีเศษวัสดุเหลือใช้ นอกจากนี้เทคนิค MIM ยังเหมาะที่จะใช้ผลิตชิ้นงานในปริมาณมากอีกด้วย

สำหรับขั้นตอนต่างๆ ของการขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดขึ้นรูปโลหะผง เพื่อให้ได้มาซึ่งชิ้นงานสุดท้ายที่พร้อมใช้งานประกอบด้วยขั้นตอนสำคัญคือ การผสม การฉีดขึ้นรูป การกำจัดตัวประสาน และการเผาพูน โดยสมบัติหรือคุณภาพของชิ้นงานที่ได้จะขึ้นกับรายละเอียดปลีกย่อยภายใต้ขั้นตอนดังกล่าว เช่นวิธีการกำจัดตัวประสานจะใช้ตัวทำละลายและ/หรือใช้ความร้อนก็ได้ ทั้งนี้ในอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นงานด้วยการฉีดขึ้นรูปโลหะผงยังคงนิยมที่จะกำจัดตัวประสานด้วยกระบวนการทางความร้อน เนื่องจากสะดวกและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่าการกำจัดตัวประสานด้วยตัวทำละลาย ซึ่งการกำจัดตัวประสานด้วยความร้อนยังสามารถทำได้ทั้งในรูปแบบของการให้ความร้อนเพื่อกำจัดตัวประสานอย่างต่อเนื่องจนเข้าสู่การเผาพูน โดยกระทำภายใต้บรรยากาศควบคุมเช่น การใช้ก๊าซไนโตรเจน หรืออาร์กอนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดตัวประสานออกให้หมด หรือสามารถแยกกำจัดตัวประสานด้วยความร้อนภายใต้อากาศแล้วจึงเผาพูนเพื่อเป็นการลดต้นทุนในส่วนของการควบคุมบรรยากาศ ซึ่งสภาวะการกำจัดตัวประสานที่แตกต่างกันดังกล่าวสามารถส่งผลต่อเนื่องถึงคุณภาพของชิ้นงานหลังการเผาพูนได้ นอกจากนี้ในส่วนของการเผาพูนชิ้นงานโลหะผงหลังจากกำจัดตัวประสานภายใต้บรรยากาศและอุณหภูมิที่แตกต่างกันจะทำให้ผลของสมบัติชิ้นงานที่ไม่เหมือนกัน ทั้งนี้ในการเผาพูนผงโลหะต้องกระทำภายใต้บรรยากาศควบคุมเพื่อป้องกันปฏิกิริยาออกซิเดชัน เช่นการใช้บรรยากาศไฮโดรเจน อาร์กอน ไนโตรเจน หรือสุญญากาศ ซึ่งส่งผลต่อชิ้นงานต่างกันออกไป ดังนั้นจะเห็นได้ว่าการเลือกวิธีการกำจัดตัวประสานและสภาวะการเผาพูนแบบใดนั้นจึงเป็นส่วนสำคัญต่อการกำหนดสมรรถนะและต้นทุนการผลิตที่แตกต่างกันด้วย

ในงานวิจัยฉบับนี้เป็นการทดลองฉีดขึ้นรูปโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 17-4PH ซึ่งผลิตโดยบริษัท ATMIX ประเทศญี่ปุ่นผสมเป็นเม็ดฉีด (Feedstock) กับตัวประสานประเภทเทอร์โมพลาสติกจากบริษัท Mold Research ประเทศญี่ปุ่น โดยงานวิจัยได้มุ่งเน้นทำการศึกษาถึงสมบัติเชิงกลของชิ้นงานทดสอบหลังการเผาผนึกด้วยการปรับเปลี่ยนสถานะในการกำจัดตัวประสานที่ต่างกัน กล่าวคือได้ทำการเปรียบเทียบผลของสมบัติเชิงกลของชิ้นงานทดสอบที่ผ่านการกำจัดตัวประสานแบบขั้นตอนเดียวต่อเนื่องด้วยการเผาผนึก ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้ในปัจจุบันสำหรับตัวประสานประเภทนี้ กับชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการกำจัดตัวประสานด้วยความร้อนแบบสองขั้นตอน คือการแยกขั้นตอนกำจัดตัวประสานด้วยความร้อนภายใต้บรรยากาศอากาศ แล้วเผาผนึกภายใต้บรรยากาศควบคุม ซึ่งการกำจัดตัวประสานด้วยวิธีการนี้ยังคงใช้กันทั่วไปในอุตสาหกรรมการฉีดขึ้นรูปโลหะที่ใช้ตัวประสานอื่นๆ เพราะสามารถลดต้นทุนการผลิตในส่วนของก๊าซไนโตรเจนซึ่งจำเป็นต้องใช้ในช่วงของการกำจัดตัวประสานสำหรับการกำจัดตัวประสานแบบขั้นตอนเดียวต่อเนื่องด้วยการเผาผนึก นอกจากนี้ยังสามารถลดภาระการใช้งานของเตาเผาผนึกซึ่งมีราคาสูงได้

ในส่วนของการศึกษาขั้นตอนการเผาผนึกนั้นได้ทำการปรับเปลี่ยนบรรยากาศในการเผาผนึกแบบมีการไหลผ่านของก๊าซอาร์กอนเปรียบเทียบกับการเผาผนึกภายใต้บรรยากาศสุญญากาศ เพื่อศึกษาเปรียบเทียบผลของสมบัติเชิงกลตลอดจนลักษณะของชิ้นงานหลังการเผาผนึก สำหรับเป็นอีกแนวทางเลือกของสถานะการเผาผนึกชิ้นงาน โลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดนี้ของผู้ที่สนใจผลิตชิ้นงานด้วยวิธีการฉีดขึ้นรูป และเนื่องจากอุณหภูมิการเผาผนึกนับเป็นปัจจัยที่สำคัญยิ่งต่อประสิทธิภาพการเกิดพันธะระหว่างอนุภาคผงโลหะซึ่งส่งผลต่อเนื่องถึงประสิทธิภาพของชิ้นงานหลังเผาผนึกแล้ว โดยได้มีรายงานวิจัยในอดีต [1] ทำการศึกษาอุณหภูมิเผาผนึกของวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดนี้ในช่วง 900 ถึง 1350 องศาเซลเซียส และพบว่าช่วงอุณหภูมิเผาผนึกที่ต่ำกว่า 1300 องศาเซลเซียส ให้ผลเชิงกลที่ไม่ดีเนื่องจากประสิทธิภาพการเกิดพันธะระหว่างการเผาผนึกยังไม่เพียงพอ แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิการเผาผนึกเป็น 1300 ถึง 1350 องศาเซลเซียส จะทำให้สมบัติเชิงกลดีขึ้น ดังนั้นในงานวิจัยฉบับนี้จึงสนใจทำการศึกษาถึงอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาผนึกเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 17-4PH ในช่วงอุณหภูมิที่แคบลงระหว่าง 1300 ถึง 1375 องศาเซลเซียส โดยปรับอุณหภูมิเพิ่มขึ้นครั้งละ 25 องศาเซลเซียส เพื่อศึกษาเปรียบเทียบผลของสมบัติเชิงกลจากอุณหภูมิเผาผนึกดังกล่าว สำหรับเป็นข้อมูลในการเลือกอุณหภูมิเผาผนึกที่เหมาะสมของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 17-4PH ซึ่งกำลังเป็นที่สนใจในอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนอุปกรณ์การแพทย์ และยานยนต์ เนื่องจากโลหะประเภทนี้มีสมบัติทนต่อการกัดกร่อนได้อย่างดีเยี่ยม และเป็นโลหะที่มีความแข็งแรงสูงอีกด้วย

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาผลของขั้นตอนในการกำจัดตัวประสาน และการเผาผนึก ต่อสมบัติเชิงกล และโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 17-4PH
2. เพื่อศึกษาผลของบรรยากาศในการเผาผนึก ต่อสมบัติเชิงกลและส่วนประกอบทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 17-4PH
3. เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิในการเผาผนึก ต่อสมบัติเชิงกลและโครงสร้างทางจุลภาคของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 17-4PH
4. เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานในการเผาผนึกเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 17-4PH ซึ่งขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดขึ้นรูป

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษาและเปรียบเทียบผลของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 17-4PH ซึ่งผ่านขั้นตอนการกำจัดตัวประสานแบบขั้นตอนเดียวต่อเนื่องด้วยการเผาผนึก และการกำจัดตัวประสานแบบสองขั้นตอนโดยการแยกขั้นตอนการกำจัดตัวประสาน และการเผาผนึกออกจากกัน
2. ศึกษาผลของการเผาผนึกชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 17-4PH ภายใต้บรรยากาศอาร์กอน และบรรยากาศสุญญากาศ
3. ศึกษาผลของอุณหภูมิเผาผนึกชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 17-4PH ที่อุณหภูมิ 1300, 1325, 1350 และ 1375 องศาเซลเซียส
4. ตรวจสอบผลของความหนาแน่น โครงสร้างผลึก องค์ประกอบทางเคมี ปริมาณออกซิเจน ความแข็ง ความสามารถในการต้านทานแรงดึง การหดตัว และโครงสร้างทางจุลภาค

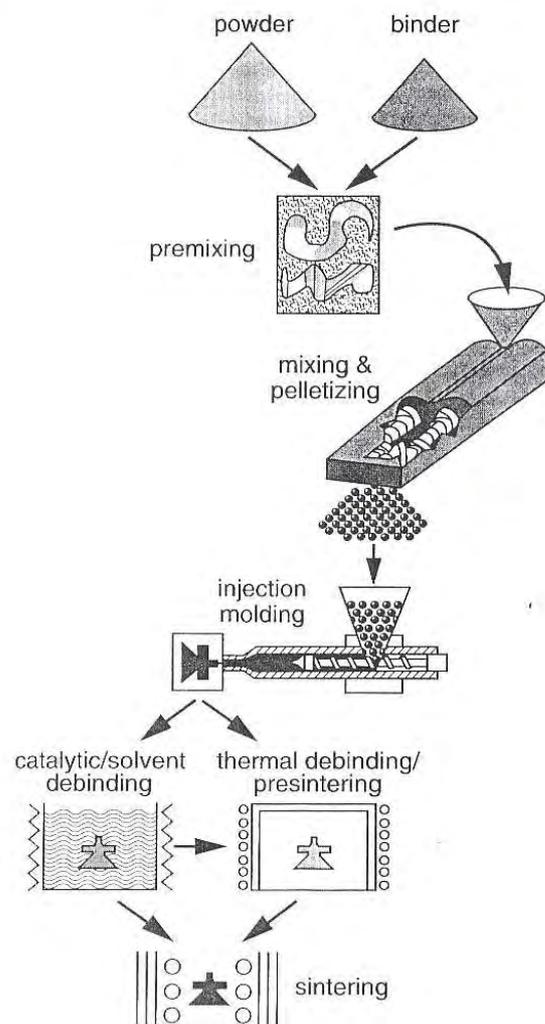
## บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เทคโนโลยีการฉีดขึ้นรูปโลหะผง เป็นเทคโนโลยีที่ได้รับการประยุกต์และพัฒนาจากเทคโนโลยีการฉีดขึ้นรูปพอลิเมอร์ ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1930 และได้รับความนิยมนำมาผลิตชิ้นงานกันอย่างแพร่หลายจนถึงระดับการผลิตเพื่ออุตสาหกรรมอย่างจริงจังในปี ค.ศ. 1977 เป็นต้นมา [2] เพราะการขึ้นรูปชิ้นงานโลหะซึ่งมีสมบัติแข็งแรง (Strength) และแข็งแรง (Stiffness) สูง ให้มีรูปทรงที่ซับซ้อนนั้นทำได้ยากด้วยกระบวนการทางโลหะอื่นๆ

การผลิตชิ้นงานด้วยกระบวนการฉีดขึ้นรูปโลหะผง เหมาะสำหรับอุตสาหกรรมที่ต้องการผลิตชิ้นงานขนาดเล็ก เช่น ชิ้นส่วนวัสดุทางการแพทย์ ชิ้นส่วนในอุตสาหกรรมยานยนต์ ชิ้นส่วนทางอิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น เนื่องจากการขึ้นรูปด้วยกระบวนการดังกล่าวให้ข้อดีว่าการผลิตด้วยกระบวนการอื่นๆ คือ [2,3]

- สามารถขึ้นรูปชิ้นงานที่มีความซับซ้อนได้ดี
- ชิ้นงานที่ได้มีรูปร่างใกล้เคียงชิ้นงานสุดท้าย (Near net shape) โดยไม่ต้องตกแต่งผิว
- ชิ้นงานที่ได้มีความหนาแน่นสูง ( $\approx 97.5-99.5\%$ ) ส่งผลให้ชิ้นงานมีสมบัติเชิงกลที่ดี
- ความคลาดเคลื่อนของชิ้นงานที่ได้อยู่ในระดับต่ำ ประมาณ  $\pm 0.001$  ต่อความยาว 1 นิ้ว
- ในการผลิตชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อนในปริมาณมาก จะใช้ต้นทุนการผลิตต่อหน่วยต่ำ

ขั้นตอนการขึ้นรูปโลหะผงประกอบด้วย 4 ขั้นตอน [2] ดังรูปที่ 2.1 คือการเตรียมส่วนผสมตั้งต้น (Feedstock) ซึ่งประกอบด้วยผงโลหะและตัวประสาน การฉีดขึ้นรูป (Molding) การกำจัดตัวประสาน (Debinding) ซึ่งสามารถกำจัดโดยใช้ตัวทำละลาย ใช้ความร้อน หรือใช้ทั้งสองวิธีร่วมกัน และการเผาผนึก (Sintering) เพื่อทำให้เกิดพันธะระหว่างอนุภาคของผงโลหะ โดยมีรายละเอียดของขั้นตอนต่างๆ ดังนี้



รูปที่ 2.1 กระบวนการขึ้นรูปชิ้นงานแบบฉีดขึ้นรูปผงโลหะ [2]

## 2.1 ส่วนผสมตั้งต้น

โดยส่วนใหญ่ส่วนผสมตั้งต้นมีลักษณะเป็นเม็ดเล็กๆ ที่ได้จากการอัดรีดและตัดเป็นเม็ดขนาดประมาณ 2-3 มิลลิเมตร (ดังรูปที่ 2.2) เพื่อความสะดวกในการบรรจุเข้าสู่เครื่องฉีด เม็ดส่วนผสมตั้งต้นประกอบด้วยส่วนสำคัญสองส่วน ได้แก่ผงโลหะ และตัวประสาน ดังนี้

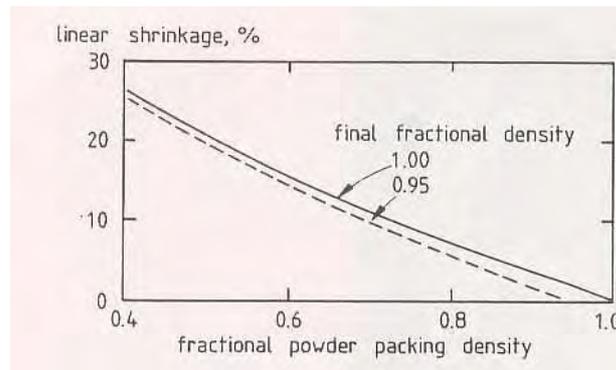


รูปที่ 2.2 เม็ดส่วนผสมตั้งต้นที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการฉีดขึ้นรูป [4]

### 2.1.1 ผงโลหะ

กระบวนการฉีดขึ้นรูปโลหะผง สามารถขึ้นรูปได้ด้วยผงโลหะเกือบทุกชนิด แต่ไม่นิยมใช้ผงอลูมิเนียมและแมกนีเซียม เนื่องจากสามารถเกิดออกไซด์ฟิล์มที่มีพันธะแข็งแรงและขัดขวางกระบวนการเผาผนึก โดยทั่วไปผงโลหะที่นิยมนำมาใช้ในอุตสาหกรรมฉีดขึ้นรูปโลหะผง ได้แก่ผงเหล็กกล้าไร้สนิม เหล็กกล้าความเร็วรอบสูง เหล็กกล้าผสมต่ำ ไทเทเนียม โลหะผสมของทองแดง โลหะผสมที่คงความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูงของนิเกิลและโคบอลต์ โลหะผสมแม่เหล็ก ตลอดจนโลหะทนความร้อนสูง [5]

การคัดเลือกผงโลหะเพื่อนำมาฉีดขึ้นรูปโดยกระบวนการฉีดขึ้นรูปโลหะผง เป็นสิ่งสำคัญที่ส่งผลต่อคุณภาพของชิ้นงาน โดยสมบัติประการหนึ่งที่น่าสนใจได้แก่ ความหนาแน่นในการจัดเรียงตัว (Packing density) ของอนุภาคผงโลหะ ในกรณีที่ชิ้นงานมีความหนาแน่นในการจัดเรียงตัวต่ำจะทำให้เกิดการหดตัวอย่างมากขณะเผาผนึก นอกจากนี้ชิ้นงานยังมีการบิดเบี้ยว (Distortion) และมีความแข็งต่ำ [6] ได้แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของความหนาแน่นในการจัดเรียงตัวกับเปอร์เซ็นต์การหดตัว ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อค่าสัดส่วนความหนาแน่นการจัดเรียงตัวต่ำ ชิ้นงานจะมีการหดตัวสูง ในทางกลับกันเมื่อความหนาแน่นในการจัดเรียงตัวมีค่าสูงหรือเข้าใกล้ 1 พบว่าเปอร์เซ็นต์การหดตัวจะน้อยมาก



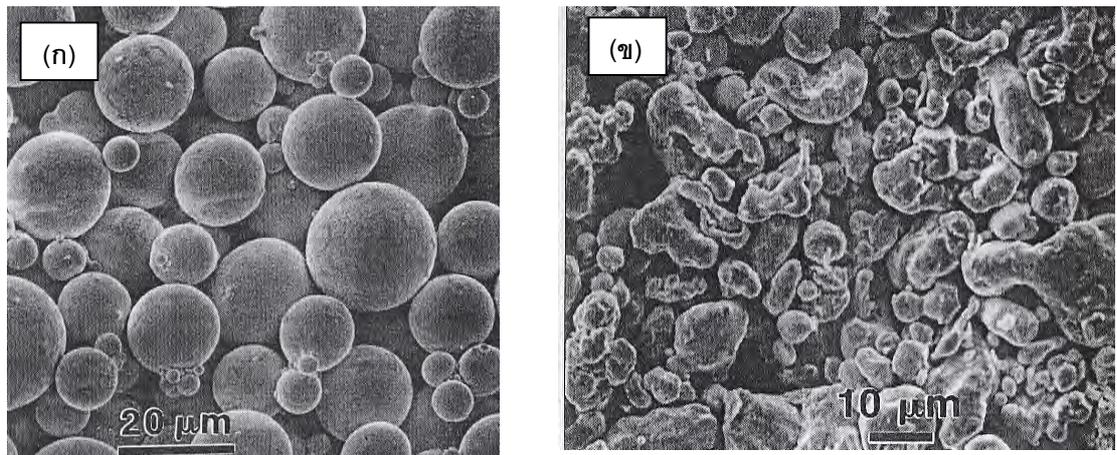
### รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การหดตัวและสัดส่วนความหนาแน่นการจัดเรียงตัว [6]

ดังนั้นสิ่งสำคัญที่สามารถใช้ในการพิจารณาคัดเลือกผงโลหะเพื่อให้ได้ค่าความหนาแน่นในการจัดเรียงตัวสูงได้แก่ ขนาดของผงที่เหมาะสมควรมีขนาดต่ำกว่า  $20\ \mu\text{m}$  และมีค่า  $D_{50}$  (Median particle size) ประมาณ  $4-8\ \mu\text{m}$  ผงโลหะที่ใช้ไม่ควรมีขนาดเล็กกว่า  $1\ \mu\text{m}$  เพราะทำให้เกิดปัญหาการรวมกันเป็นกลุ่มก้อน (Agglomeration) ส่งผลต่อการกระจายตัวของผงในชิ้นงานอย่างไม่สม่ำเสมอทำให้ความหนาแน่นสุดท้ายของชิ้นงานไม่ดี [2,6] โดยได้สรุปให้เห็นถึงข้อดีและข้อเสียของผงโลหะขนาดเล็กดังแสดงในตารางที่ 2.1

### ตารางที่ 2.1 แสดงข้อดีและข้อเสียของผงโลหะขนาดเล็กต่อกระบวนการฉีดขึ้นรูป [2]

| ลักษณะผง       | ข้อดี  | ข้อเสีย  |
|----------------|--|--|
| ผงโลหะขนาดเล็ก | <ul style="list-style-type: none"> <li>- ใช้เวลาในการเผาพูนิกน้อย</li> <li>- สามารถคงรูปร่างได้ดี</li> <li>- เกิดข้อบกพร่องระหว่างขึ้นรูปน้อย</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- ใช้เวลานานในการกำจัดตัวประสาน</li> <li>- ราคาแพง</li> <li>- มีสิ่งปนเปื้อนสูง</li> <li>- เกิดการหดตัวขณะเผาพูนิก</li> <li>- เกิดการรวมตัวเป็นกลุ่มก้อนได้ง่าย</li> <li>- มีความหนืดสูง</li> </ul> |

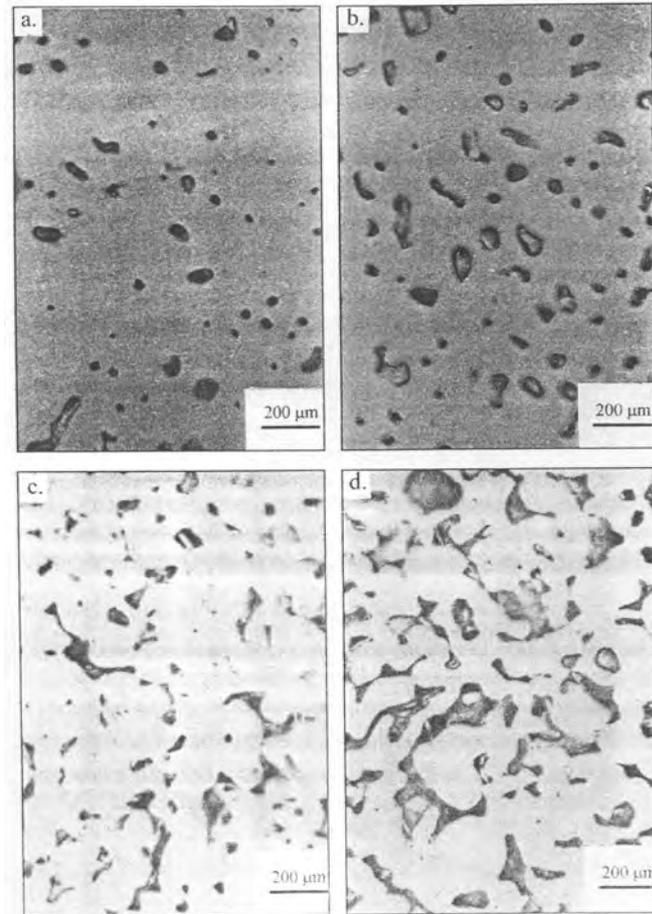
นอกจากนี้ความหนาแน่นในการจัดเรียงตัวยังเกี่ยวข้องโดยตรงกับรูปร่างของผงโลหะ ดังเช่นผงโลหะที่มีลักษณะทรงกลม (Spherical shape) ซึ่งส่วนใหญ่ได้จากการบวนการผลิตแบบการพ่นด้วยก๊าซ (Gas atomization, GA) ดังรูปที่ 2.4 (ก) จะให้ค่าความหนาแน่นในการจัดเรียงตัวสูง ความสามารถในการไหลเมื่อรวมกับตัวประสานดี ความหนาแน่นแบบ Tap density มีค่าสูง (เมื่อเปรียบเทียบกับผงโลหะที่ไม่เป็นทรงกลม) แต่ความหนาแน่นแบบ Apparent density ต่ำ [2] ทำให้ชิ้นงานเกิดความเสียหายได้ง่ายขณะกำจัดตัวประสาน และผงชนิดนี้มีราคาแพง ส่วนผงโลหะที่มีลักษณะไม่สม่ำเสมอ (Nonspherical shape) ดังรูปที่ 2.4 (ข) ส่วนใหญ่ได้จากการบวนการผลิตแบบการพ่นด้วยน้ำ (Water atomization, WA) อนุภาคจะมีรูปร่างไม่สม่ำเสมอส่งผลให้ค่าความหนาแน่นในการจัดเรียงตัวต่ำ ทั้งนี้ผงโลหะที่ใช้ในกระบวนการฉีดขึ้นรูปส่วนใหญ่ได้จากการผลิตด้วยวิธีการบดอัด วิธีออกไซค์รีดักชัน และการพ่นด้วยก๊าซ เนื่องจากกระบวนการดังกล่าวจะให้ผงที่มีลักษณะใกล้เคียงทรงกลม และมีขนาดอนุภาคในช่วง 0.5–15 ไมโครเมตร ซึ่งเหมาะสมสำหรับการฉีดขึ้นรูป [2]



รูปที่ 2.4 อนุภาคผง (ก) ทองแดงที่ได้จากการผลิตแบบพ่นด้วยก๊าซและ (ข) เหล็กกล้าไร้สนิมที่ได้จากการผลิตแบบพ่นด้วยน้ำ [2]

Anders Nylund และคณะ [7] ได้ทำการศึกษาผลของลักษณะผงเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 316 ซึ่งมีลักษณะกลมที่ได้จากการผลิตแบบพ่นด้วยก๊าซ และผงที่มีลักษณะไม่สม่ำเสมอซึ่งได้จากการผลิตแบบพ่นด้วยน้ำ โดยทำการฉีดขึ้นรูปเป็นชิ้นงานทดสอบแรงดึง และผ่านกระบวนการอื่นๆ พบว่าในขั้นตอนการผสมระหว่างผงโลหะและตัวประสานต่อหน่วยปริมาตรที่เท่ากันนั้น เมื่อใช้ผงกลม

สามารถใช้ปริมาณผงโลหะได้มากกว่า ซึ่งส่งผลต่อเนื่องไปยังขั้นตอนการเผาประสานที่ทำให้ชิ้นงานที่ได้จากผงกลมมีรูพรุนภายในชิ้นงานน้อยกว่าชิ้นงานที่ได้จากผงที่มีลักษณะไม่สม่ำเสมอ ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ซึ่งทำให้ชิ้นงานมีความหนาแน่นสูงและมีสมบัติเชิงกลที่สามารถต้านทานแรงดึงสูงสุดได้ดีกว่าชิ้นงานที่ได้จากผงแบบไม่สม่ำเสมอ



รูปที่ 2.5 บนซ้ายและขวาแสดงรูพรุนภายในชิ้นงานที่ได้จากผงแบบกลมบริเวณ shaft และ head ตามลำดับ และล่างซ้ายและขวา เป็นรูพรุนภายในชิ้นงานที่ได้จากผงรูปร่างไม่แน่นอนบริเวณ shaft และ head ตามลำดับ [7]

### 2.1.2 ตัวประสาน

ตัวประสานเป็นส่วนประกอบสำคัญยิ่งที่ขาดไม่ได้ในการผสมกับผงโลหะ ทำให้ผงโลหะสามารถไหลตัวเข้าสู่แม่พิมพ์ในขณะฉีด และยังเป็นตัวที่ทำให้อนุภาคผงโลหะเกิดการจัดเรียงตัวอย่างมีระเบียบ และทำหน้าที่ในการลดแรงเสียดทานระหว่างอนุภาคผงด้วยกันเองหรือระหว่างผงกับเครื่องมืออีกด้วย นอกจากนี้ยังเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้ชิ้นงานแข็งตัวคงรูปร่างตามลักษณะที่ต้องการหลังจากฉีดขึ้นรูปแล้ว หน้าที่ของตัวประสานจะหมดไปเมื่อผงโลหะถูกเผาผนึกแล้วเท่านั้น ปัจจุบันสามารถจัดแบ่งตัวประสานออกเป็นชนิดที่สำคัญดังนี้ [2]

1. สารประกอบประเภทเทอร์โมพลาสติก มีสมบัติอ่อนตัวเมื่อโดนความร้อนและแข็งตัวเมื่ออุณหภูมิต่ำ และมีข้อดีคือหากชิ้นงานที่ผ่านการฉีดขึ้นรูปและยังไม่ได้เผากำจัดตัวประสานมีข้อบกพร่องจะสามารถนำกลับมาฉีดขึ้นรูปได้ใช้ใหม่
2. สารประกอบประเภทเทอร์โมเซต ซึ่งจะเกิดพันธะข้าม (Crosslink) เมื่อได้รับความร้อนขณะฉีดขึ้นรูปและไม่สามารถนำกลับมาใช้ได้ใหม่ การกำจัดตัวประสานประเภทนี้ต้องใช้ความร้อนสูงจนเกิดการสลายตัว สารประกอบประเภทนี้ที่นิยมนำมาใช้เป็นตัวประสานได้แก่ อีพอกซี และพอลิยูรีเทน
3. ตัวประสานในระบบซึ่งมีน้ำเป็นส่วนประกอบที่ช่วยในการไหลตัว และมีสารประเภทแป้งหรือสบู่ซึ่งทำหน้าที่ให้ความแข็งแรงแก่ชิ้นงาน ทำให้ชิ้นงานคงรูปร่างอยู่ได้เมื่อน้ำถูกระเหยออกไปแล้ว
4. ตัวประสานประเภทเจล ซึ่งนิยมใช้สารพอลิเมอร์ที่ใช้ในกระบวนการทางอาหาร โดยมีข้อดีคือปลอดภัยและไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม
5. สารประกอบประเภทสารอนินทรีย์ ได้แก่สารประกอบของเกลือ และเหล็กไนเตรต เป็นต้น

ตัวประสานที่ดีควรมีสมบัติดังนี้ [2,8]

- เมื่อผสมกับผงโลหะแล้วควรมีค่าความหนืดอยู่ในช่วง 20–200 Pa-s และมีการเปลี่ยนแปลงความหนืดเล็กน้อยขณะฉีดขึ้นรูป
- ที่อุณหภูมิห้อง ตัวประสานควรมีสมบัติเชิงกลที่ดีเพื่อเป็นผลดีต่อการคงรูปของผงโลหะ
- ตัวประสานไม่ควรทำปฏิกิริยากับผงโลหะแต่สามารถเกาะติดกับผงโลหะได้เป็นอย่างดี (Low contact angle) เพื่อง่ายต่อการผสมกับผงโลหะ และไม่เกิดปัญหาการแยกตัวระหว่างผงโลหะกับตัวประสาน
- มีมวลโมเลกุลต่ำ หรือสายโซ่โมเลกุลสั้น ทำให้จุดหลอมเหลวต่ำ เพื่อประโยชน์ต่อการจัดเรียงตัวในทิศทางเดียวขณะไหลตัวในขั้นตอนการฉีดขึ้นรูป

- ไม่เป็นพิษ
- การนำความร้อนสูงเพื่อช่วยในการกระจายความร้อน และลดความเค้นจากความร้อน
- ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวจากความร้อนต่ำ
- มีการสลายตัวหลายช่วงอุณหภูมิ เพื่อเป็นประโยชน์ในขั้นตอนการกำจัดตัวประสาน

โดยทั่วไปแล้วตัวประสานส่วนใหญ่จะเป็นสารประกอบประเภทเทอร์โมพลาสติก เนื่องจากหาได้ง่าย และราคาไม่แพง ดังเช่นที่นิยมนำมาเป็นส่วนประกอบหลักของตัวประสาน ได้แก่ พาราฟินแวกซ์ ไซฟี่ง ไขมะพร้าว พอลิเอทิลีน พอลิโพรพิลีน ซึ่งสารเหล่านี้ล้วนมีจุดหลอมเหลวต่ำ มีสมบัติเปียกผิวผงโลหะ มีความหนืดต่ำ สายโซ่โมเลกุลสั้น สลายตัวง่ายโดยปริมาตรรวมไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก

สำหรับตัวประสานในสูตรต่างๆ ที่ใช้ในการผสมกับผงโลหะควรประกอบด้วยส่วนประกอบประมาณ 3 ชนิด เพื่อทำหน้าที่ต่างๆ กัน คือ ทำหน้าที่ช่วยให้เกิดความแข็งแรงแก่ชิ้นงาน ช่วยให้ไหลตัวและผสมเข้ากับผงโลหะได้ง่าย และสารพวก Surfactant ซึ่งช่วยเพิ่มความสามารถในการเปียกผิวของผงโลหะต่อตัวประสาน นอกจากนี้อาจมีสารที่ช่วยในการหล่อลื่นระหว่างเครื่องมือ ทั้งนี้การเลือกใช้สูตรตัวประสานใดนั้นขึ้นอยู่กับลักษณะของผงโลหะ และกระบวนการกำจัดตัวประสานอีกด้วย

ตารางที่ 2.2 แสดงสูตรตัวประสานที่นิยมใช้ในการฉีดขึ้นรูปโลหะผง ซึ่งแต่ละสูตรเหมาะกับกระบวนการกำจัดตัวประสานที่แตกต่างกันออกไป (ดังจะได้กล่าวในรายละเอียดตามหัวข้อที่ 2.3.4) ดังเช่นสูตรตัวประสานที่ 8, 9 และ 13 สามารถกำจัดตัวประสานทั้งด้วยกระบวนการทางความร้อน และสูตรตัวประสานที่ 4, 6 และ 7 นิยมกำจัดโดยการใส่ตัวทำละลายร่วมกับการใช้ความร้อน จากตารางดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าโดยส่วนใหญ่ตัวประสานจะประกอบด้วยสารประเภทเทอร์โมพลาสติก และแวกซ์เป็นส่วนประกอบสำคัญ (ตัวประสานในสูตรที่ 1, 2, 3 และ 13) และตัวประสานสูตรที่ 6 จะเลือกใช้ใช้น้ำมันถั่ว (Peanut oil) เป็นส่วนประกอบหลักเพื่อช่วยลดการหดตัวขณะที่ตัวประสานเย็นตัว ตัวประสานสูตรที่ 5 เป็นตัวประสานที่มีอีพอกซีเรซิน ซึ่งเป็นสารประเภทเทอร์โมเซตเป็นส่วนประกอบหลัก และสูตรตัวประสานที่ 10, 11 และ 12 ซึ่งมีสารประเภทเทอร์โมพลาสติกที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำและสามารถละลายน้ำได้ ได้แก่ Polyethylene glycol เป็นส่วนประกอบสำคัญเป็นต้น

ตารางที่ 2.2 สูตรตัวประสานที่นิยมใช้ในงานฉีดขึ้นรูป [2]

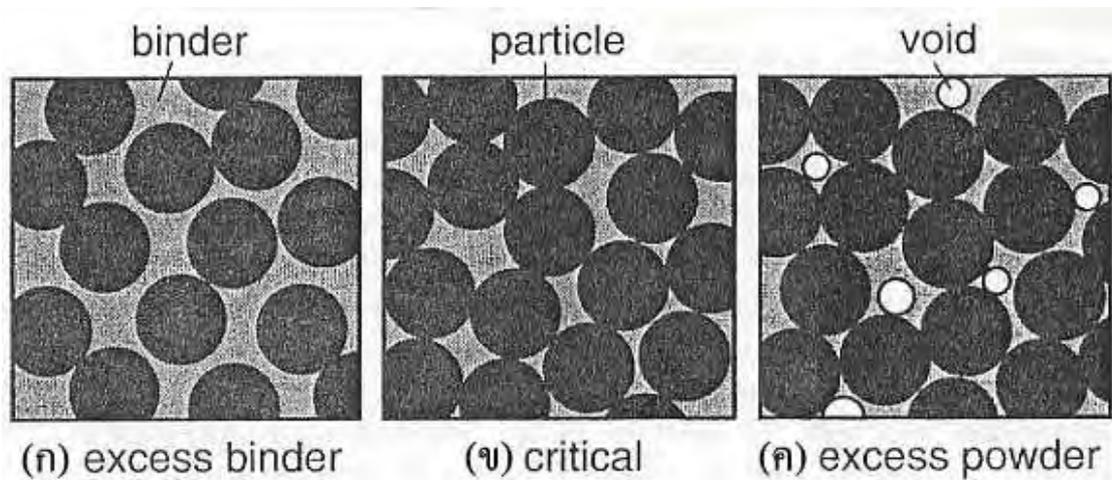
| สูตรตัวประสาน | ส่วนผสม (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)   |
|---------------|---|
| สูตรที่ 1     | 67% polypropylene, 22% microcrystalline wax, 11% stearic acid                                 |
| สูตรที่ 2     | 33% paraffin wax, 33% polypropylene, 33% beeswax, 1% stearic acid                             |
| สูตรที่ 3     | 69% paraffin wax, 20% polypropylene, 10% carnauba wax, 1% stearic acid                        |
| สูตรที่ 4     | 45% polystyrene, 45% vegetable oil, 5% polyethylene, 5% stearic acid                          |
| สูตรที่ 5     | 65% epoxy resin, 25% paraffin wax, 10% butyl stearate   |
| สูตรที่ 6     | 75% peanut oil, 25% polyethylene  |
| สูตรที่ 7     | 50% carnauba wax, 50% polyethylene  |
| สูตรที่ 8     | 55% paraffin wax, 35% polyethylene, 10% stearic acid  |
| สูตรที่ 9     | 4% agar, 3% glycerine, 93%water   |
| สูตรที่ 10    | 65% polyethylene glycon, 30% polyvinyl butyryl, 5% stearic acid                               |
| สูตรที่ 11    | 55% paraffin wax, 25% polyethylene glycon, 10% stearic acid, 10% diethyl phthalate            |
| สูตรที่ 12    | 38% polyethylene glycon, 36% polybutyl methacrylate, 14% polyacetal, 11% wax, 1% stearic acid |
| สูตรที่ 13    | 50% paraffin wax, 40% polypropylene, 10% carnauba wax   |

ปัจจุบันได้มีงานวิจัยที่ได้ทดลองหาตัวประสานตลอดจนสูตรส่วนผสมของตัวประสาน ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นตัวประสานที่หาได้ง่าย และต้นทุนต่ำดังเช่น Liu และคณะ [9] ได้ทดลองผสม พาราฟินแวกซ์ (PW) เอทิลีนไวนิลอะซิเตด (EVA) และ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (HDPE) กับผงโลหะ เหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 316L โดยได้ทดลองปรับเปลี่ยนปริมาณของส่วนผสมตัวประสานดังกล่าว และทดสอบการไหลตัว อุณหภูมิการสลายตัว และการกำจัดตัวประสาน โดยชิ้นงานยังสามารถคงรูปร่างอยู่ได้จนถึงขั้นตอนการเผาผนึก พบว่าสัดส่วนที่เหมาะสมของ พาราฟินแวกซ์ เอทิลีนไวนิลอะซิเตด และพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง ที่สามารถใช้ในเทคนิคการฉีดขึ้นรูปได้คือ 20:40:40 เปอร์เซนต์ โดยพาราฟินแวกซ์จะทำหน้าที่ช่วยในการไหลตัวของของผสมและเปิดรูพรุนในขั้นตอนการกำจัดตัวประสาน พาราฟินแวกซ์ทำหน้าที่ให้ผงโลหะสามารถรูปอยู่ได้ขณะกำจัดตัวประสาน และเอทิลีนไวนิลอะซิเตดทำหน้าที่เช่นเดียวกับพาราฟินแวกซ์ และเป็นสารหล่อลื่นเพื่อลดแรงเสียดทานระหว่างอุปกรณ์และชิ้นงานอีกด้วย นอกจากนี้ส่วนประกอบของส่วนผสมแล้ว ปริมาณของส่วนผสมยังเป็นปัจจัยสำคัญอีกประการ โดย Tam และคณะ [10] ได้ทดลองปรับเปลี่ยนปริมาณของไวนิลอะซิเตด ซึ่ง

เป็นส่วนประกอบในเอทิลีนไวนิลอะซิเตต จากนั้นนำไปผสมกับพาราฟินแวกซ์ พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณไวนิลอะซิเตตจะทำให้ความหนืดของตัวประสานลดลง ซึ่งส่งผลต่อเนื่องไปยังความหนืดของเม็ดส่วนผสมตั้งต้นมีค่าลดลง

### 2.1.3 สัดส่วนของส่วนผสมตั้งต้น

จากการที่เม็ดส่วนผสมตั้งต้นมีความสำคัญที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการฉีดขึ้นรูป ดังนั้นเม็ดส่วนผสมตั้งต้นต้องมีประสิทธิภาพที่ดีพอ เพื่อประสิทธิผลในการฉีดให้ได้ชิ้นงานกรีนที่มีคุณภาพ ซึ่งจะส่งผลต่อเนื่องไปยังชิ้นงานสุดท้ายหลังจากสิ้นสุดกระบวนการต่างๆ โดยปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับคุณภาพของเม็ดส่วนผสมตั้งต้นเช่น ลักษณะของผงโลหะ ชนิดของตัวประสาน ซึ่งได้กล่าวในหัวข้อที่ 2.1.1 และ 2.1.2 ตามลำดับแล้วนั้น ยังมีปัจจัยอื่นๆ เช่น วิธีการผสมตัวประสานกับผงโลหะ และเทคนิคการขึ้นรูปเป็นเม็ดของส่วนผสมตั้งต้น และปัจจัยอีกประการซึ่งจะได้กล่าวถึงในหัวข้อนี้ที่มีอิทธิพลโดยตรงต่อประสิทธิภาพของเม็ดส่วนผสมตั้งต้นคือ สัดส่วนปริมาณระหว่างผงโลหะและตัวประสาน



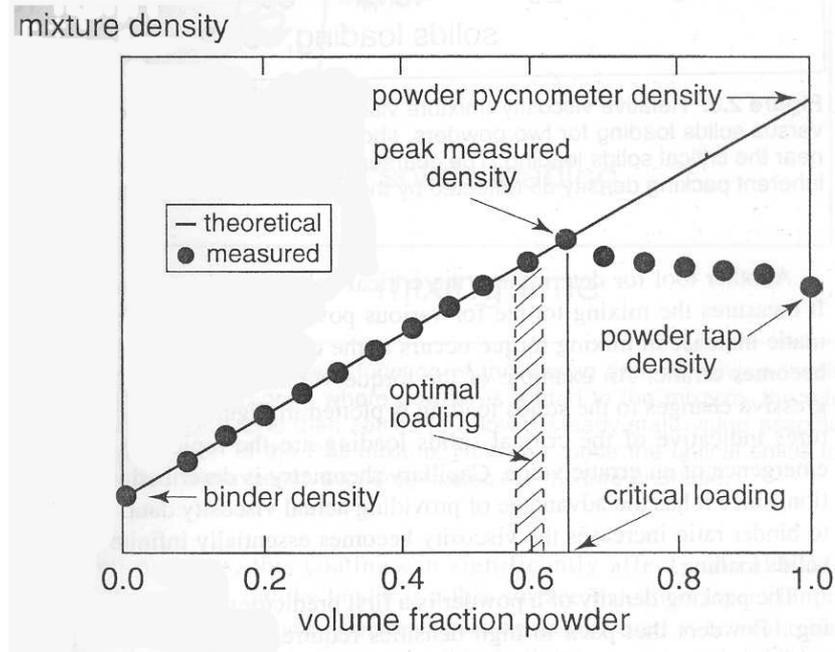
รูปที่ 2.6 ภาพจำลองแสดงการผสมกันระหว่างผงโลหะและตัวประสานในสัดส่วนที่แตกต่างกัน โดย(ก) เป็นการผสมที่มีตัวประสานมากเกินไป (ข) ปริมาณการผสมที่พอดีระหว่างผงและตัวประสาน และ (ค) ผงโลหะมากเกินไป [2]

โดยทั่วไปอนุภาคผงจะต้องมีความหนาแน่นในการจัดเรียงตัว (Packing density) ในตัวประสานสูง ขณะเดียวกันต้องรักษาความหนืดของระบบต่ำ และตัวประสานต้องมีปริมาณเพียงพอที่จะเคลือบบนอนุภาคผงและเติมในช่องว่างระหว่างอนุภาค เพื่อช่วยในการหล่อลื่น (ลดแรงเสียดทาน) เมื่ออนุภาคเคลื่อนที่ผ่านกันในระหว่างการฉีดขึ้นรูป [2,4] ในกรณีที่ปริมาณของผงโลหะมากเกินไป (หรือตัว

ประสานน้อย) จะทำให้ความหนืดของส่วนผสมสูงซึ่งยากต่อการฉีดขึ้นรูป และเกิดโพรงหรือ ฟองอากาศขึ้นในส่วนผสม ดังรูปที่ 2.6 (ค) ซึ่งส่งผลให้ชิ้นงานเกิดการแตกร้าวในขั้นตอนการกำจัดตัว ประสาน และหากปริมาณผงโลหะน้อยหรือตัวประสานมากเกินไป ดังรูปที่ 2.6 (ก) จะทำให้ส่วนผสม ตั้งต้นมีลักษณะไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Inhomogeneous) โดยเกิดการแยกตัวระหว่างผงโลหะกับตัว ประสานขณะการผสมและการฉีดขึ้นรูป ทำให้ชิ้นงานกรีนที่ได้มีการกระจายตัวของผงโลหะอย่างไม่ สม่าเสมอ นอกจากนี้อาจเกิดฟิล์มบางของตัวประสานขึ้นระหว่างผิวชิ้นงานกับแม่พิมพ์ และใน ขั้นตอนการกำจัดตัวประสานจะเกิดปัญหาการยุบตัวของชิ้นงาน เพราะอนุภาคผงโลหะไม่สามารถคง รูปอยู่ได้ ทั้งนี้ถ้าการผสมระหว่างตัวประสานและผงโลหะเกิดขึ้นในปริมาณที่พอดี (Critical solid loading) ดังรูปที่ 2.6 (ข) จะไม่ปรากฏโพรงอากาศ เนื่องจากช่องว่างระหว่างอนุภาคผงถูกเติมเต็มด้วย ตัวประสาน ทำให้อนุภาคผงเกิดการจัดเรียงตัวกันอย่างต่อเนื่องและมีตำแหน่งที่สัมผัสกับอนุภาคผง อื่นๆ มากขึ้น

จากปรากฏการณ์ดังกล่าวจะส่งผลดีต่อชิ้นงานหลังเผาผนึกคือ ชิ้นงานไม่มีการแตกร้าว และการหดตัว ของชิ้นงานเป็นไปอย่างสม่าเสมอ ทำให้สามารถคาดการณ์หรือทำนายขนาดสุดท้ายของชิ้นงานได้ง่าย แต่ปริมาณผงแบบ Critical solid loading ไม่เป็นที่นิยมในทางปฏิบัติ เพราะมีข้อเสียคือความหนืดของ ระบบสูง เนื่องจากผงมีการเสียดสีกันมาก ซึ่งส่งผลต่ออุปกรณ์การฉีด และกำลังการผลิตที่ลดต่ำลง ดังนั้นจึงนิยมเติมผงในสัดส่วนปริมาตรที่มีค่าต่ำกว่าค่า Critical solid loading เล็กน้อย หรือเรียกว่าจุด Optimal solid loading ดังรูปที่ 2.7 เพื่อให้ความหนืดของระบบต่ำลง

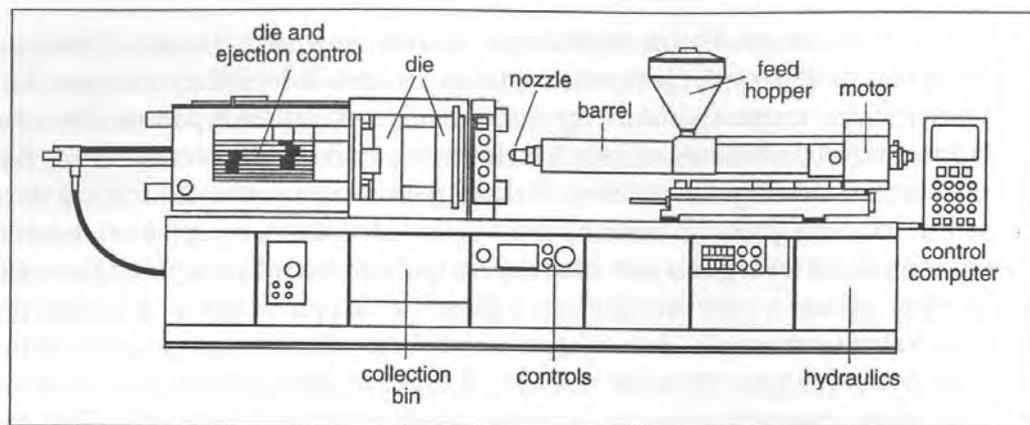
โดยรูปที่ 2.7 แสดงให้เห็นว่าเมื่อสัดส่วนปริมาตรของผงโลหะมากขึ้น ค่าความหนาแน่นของ ส่วนผสมจะมากขึ้นจนถึงสัดส่วนปริมาตรของ Critical solid loading ค่าความหนาแน่นจึงลดต่ำลง เนื่องจาก ณ จุดนี้ อนุภาคผงโลหะจะเชื่อมต่อกันโดยไม่มีชั้นของตัวประสานมาหล่อลื่น และเมื่อ ปริมาณอนุภาคผงเพิ่มขึ้น ทำให้ตัวประสานที่มีอยู่ไม่เพียงพอที่จะเติมในช่องว่างระหว่างอนุภาค ดังนั้นความหนาแน่นของส่วนผสมจึงลดลง จึงเป็นเหตุให้ในทางปฏิบัติการเตรียมส่วนผสมตั้งต้นจะ ใช้ปริมาณสัดส่วนของผงโลหะต่ำกว่าค่า Critical solid loading และตัวประสานมากขึ้น ดังเช่นการ ทดลองของ Cai และคณะ [11] ได้นำผงโลหะเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 316L ซึ่งผลิตจากกระบวนการ WA มาผสมกับตัวประสานแล้วจึงนำไปวัดแรงบิด (Torque) เพื่อหาปริมาณ Critical solid loading พบว่ามีค่าประมาณ 65 เปอร์เซ็นต์ แต่ค่าดังกล่าว จะทำให้การฉีดขึ้นรูปมีปัญหาเพราะความหนืดสูง ดังนั้นจึงใช้ผงโลหะเพียง 62 เปอร์เซ็นต์ในการผสมกับตัวประสาน ทั้งนี้ Cai และคณะ ได้ให้ ข้อเสนอแนะว่า สามารถใช้ค่าผงโลหะสูงสุดที่ 65 เปอร์เซ็นต์ได้ในกรณีที่ปัจจัยอื่นๆ คือ เวลา อุณหภูมิ และความเร็วยรอบในการผสม ถูกควบคุมอย่างดี ซึ่งหมายถึงต้นทุนที่สูงขึ้นด้วย



รูปที่ 2.7 กราฟแสดงความหนาแน่นของส่วนผสมและสัดส่วนปริมาตรผงโลหะอะลูมิเนียมแบบกลมซึ่งผสมกับตัวประสานชนิดเรซิน-พอลิเมอร์ [2]

## 2.2 การฉีดขึ้นรูป

อุปกรณ์ฉีดขึ้นรูปโลหะผง เป็นชุดอุปกรณ์ที่เหมือนกับอุปกรณ์การฉีดขึ้นรูปพลาสติกทุกประการ โดยมีลักษณะโครงสร้างพื้นฐานดังรูปที่ 2.8 ซึ่งประกอบด้วยส่วนประกอบสำคัญสามส่วนดังรายละเอียดในตารางที่ 2.3



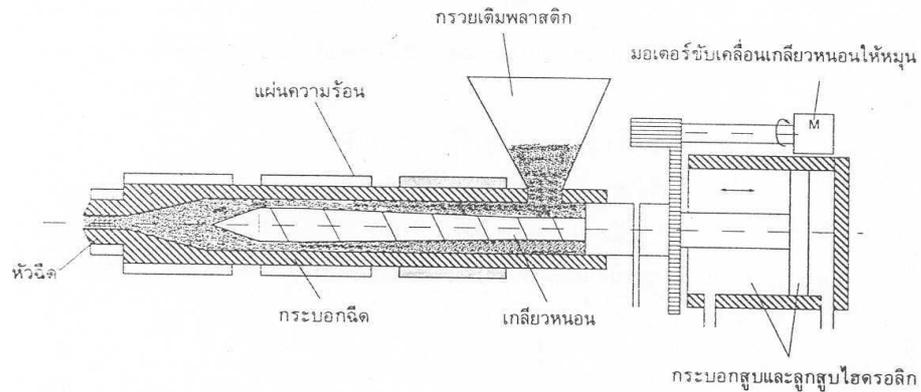
รูปที่ 2.8 แผนภาพของโครงสร้างพื้นฐานของเครื่องฉีดผงโลหะ [2]

ตารางที่ 2.3 ส่วนประกอบของเครื่องฉีดโลหะ [12]

| ส่วนประกอบหลัก      | ส่วนประกอบย่อย   |
|---------------------|--|
| ชุดฉีด              | <ul style="list-style-type: none"> <li>- กรวยเติมผงโลหะ (feed hopper)</li> <li>- กระบอกลูกฉีด (barrel) ซึ่งภายในประกอบด้วย เกลียวหนอน (injection screw) และแผ่นความร้อน (heater)</li> <li>- หัวฉีด (nozzle)</li> <li>- กระบอกสูบและลูกสูบไฮดรอลิก (hydraulic cylinder and pistol)</li> <li>- มอเตอร์ขับเคลื่อนเกลียวหนอนให้หมุน (drive motor)</li> </ul> |
| ชุดปิด-เปิดแม่พิมพ์ | <ul style="list-style-type: none"> <li>- แผ่นยึดแม่พิมพ์</li> <li>- เพลาหน้าเลื่อน</li> <li>- ระบบขับเคลื่อนปิด-เปิดแม่พิมพ์</li> <li>- แผ่นยึดระบบขับเคลื่อน</li> </ul>   |
| ฐานเครื่อง          | <ul style="list-style-type: none"> <li>- ระบบควบคุม</li> <li>- ถังบรรจุน้ำมันไฮดรอลิก</li> </ul>   |

### 2.2.1 ชุดฉีด

ชุดฉีดซึ่งประกอบด้วยส่วนปลีกย่อยดังรูปที่ 2.9 จะทำหน้าที่หลายอย่างได้แก่ การดึงส่วนผสมตั้งต้น ซึ่งอาจเป็นเม็ดหรือผงเข้ากระบอกลูกฉีดด้วยการหมุนรอบตัวเองของเกลียวหนอน และถูกถ้ำเลียงผ่านเกลียวหนอนสู่หัวฉีด พร้อมกับการทำให้หลอมเหลวจากแผ่นให้ความร้อน โดยมีรายละเอียดปลีกย่อยดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.9 แผนภาพของอุปกรณ์ชุดฉีด [12]

#### 2.2.1.1 กรวยเติมผงโลหะ

กรวยเติมทำหน้าที่บรรจุเม็ดส่วนผสมตั้งต้นที่ต้องการฉีด และควรมีมุมเอียงมากพอที่จะให้เม็ดส่วนผสมตั้งต้นไหลลงอย่างสะดวก และอาจเพิ่มเติมอุปกรณ์ช่วยลดความชื้นอยู่ด้านบนของกรวยเติมก็ได้

#### 2.2.1.2 กระบอกฉีดและแผ่นให้ความร้อน

กระบอกฉีดจะมีลักษณะเป็นท่อกลางหนา ซึ่งสามารถทำให้ร้อนได้โดยใช้แผ่นความร้อนหุ้มรอบกระบอกฉีดเอาไว้สำหรับฉีดตัวประสานประเภทเทอร์โมพลาสติก แต่ถ้าเป็นการฉีดตัวประสานชนิดเทอร์โมเซต หรืออีลาสโตเมอร์ ควรใช้กระบอกฉีด 2 ชั้น และใช้น้ำมันในการให้ความร้อนแทน เนื่องจาก โครงสร้างของพลาสติกแตกต่างกัน

#### 2.2.1.3 เกลียวหนอน

เกลียวหนอนจะอยู่ในกระบอกฉีด ทำหน้าที่หมุนรอบตัวเองเพื่อดึงเม็ดส่วนผสมตั้งต้นจากกรวยเติมเข้ามายังกระบอกฉีด และป้อนส่งต่อไปยังหน้าปลาตเกลียวหนอนพร้อมกับทำการหลอมพลาสติก และทำการคลุกเคล้าให้เป็นเนื้อเดียว และในช่วงจังหวะฉีดเกลียวหนอนก็จะทำหน้าที่เป็นลูกสูบเคลื่อนที่ตามแนวแกนดันพลาสติกเหลวเข้าแม่พิมพ์

#### 2.2.1.4 หัวฉีด

หัวฉีดจะมีหน้าที่เป็นตัวนำส่วนผสมตั้งต้นเหลวจากกระบอกฉีดเข้าสู่แม่พิมพ์

## 2.2.2 ชุดปิด-เปิดแม่พิมพ์

### 2.2.2.1 แผ่นยึดแม่พิมพ์

ตามปกติแผ่นยึดแม่พิมพ์ทั้งสองข้างจะมีรูเกลียวอยู่เป็นจำนวนมาก ขนาดและระยะห่างระหว่างรูเกลียวก็ขึ้นอยู่กับขนาดของเครื่องฉีดและบริษัทผู้ผลิต แผ่นยึดแม่พิมพ์นี้ยังจำเป็นต้องมีรูคว้านซึ่งมีศูนย์รวมกันกับหัวฉีดและแผ่นหน้าแปลนประคองศูนย์ของแม่พิมพ์ แผ่นยึดแม่พิมพ์ด้านอยู่กับที่จะถูกยึดติดตายอยู่ทางด้านชุดฉีด ส่วนแผ่นยึดแม่พิมพ์ด้านเคลื่อนที่จะเป็นตัวคอยเลื่อนปิด-เปิดแม่พิมพ์เอง

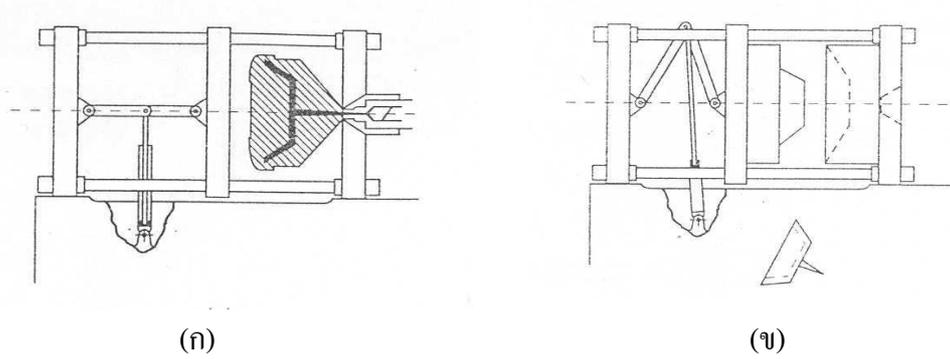
### 2.2.2.2 เพลานำเลื่อน

เพลานำเลื่อนนี้จะทำหน้าที่ประคองแผ่นยึดแม่พิมพ์ด้านเคลื่อนที่ให้สามารถเลื่อนปิด-เปิดแม่พิมพ์ได้อย่างสะดวกและเที่ยงตรง ตลอดจนรับน้ำหนักของแผ่นยึดแม่พิมพ์และตัวแม่พิมพ์ นอกจากนี้ยังช่วยรับแรงในการปิดล็อกแม่พิมพ์ด้วย เพลานำเลื่อนจะมีอยู่ 2 หรือ 4 เพลาก็ได้ ขนาดและระยะห่างของเพลาก็แตกต่างกันออกไปตามขนาดของเครื่องและบริษัทผู้ผลิต

### 2.2.2.3 ระบบขับเคลื่อนปิด-เปิดแม่พิมพ์

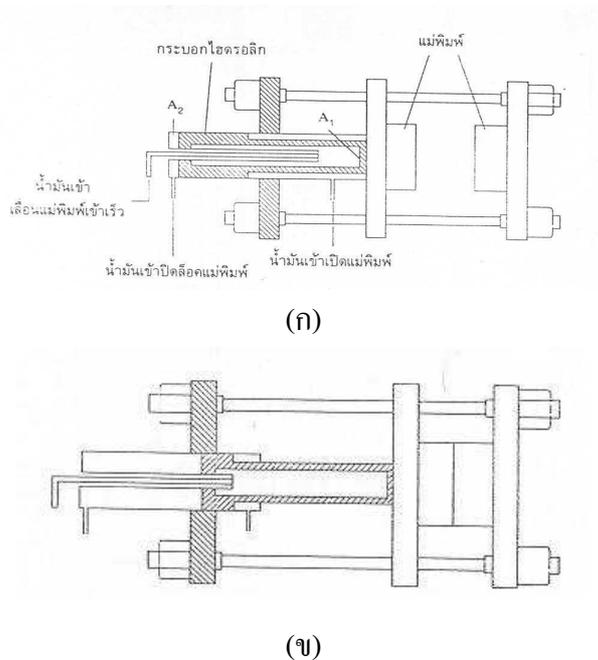
ระบบขับเคลื่อนปิด-เปิดแม่พิมพ์ สามารถแบ่งเป็นระบบแมคคานิก(รูปที่ 2.10) และไฮดรอลิก (รูปที่ 2.11) ดังนี้

ระบบแมคคานิก จะมีข้อพับเป็นตัวเลื่อนปิด-เปิดแม่พิมพ์ ซึ่งได้กำลังขับเคลื่อนมาจากกระบอบอกสูบไฮดรอลิก ด้วยเหตุนี้แรงที่เกิดขึ้นในการปิดล็อกแม่พิมพ์เพื่อป้องกันแม่พิมพ์ผกอนั้น ตัวข้อพับจะรับไปทั้งหมดเมื่ออยู่ในตำแหน่งเหยียดตรง ระบบปิด-เปิดแม่พิมพ์แบบนี้จะทำงานได้ค่อนข้างช้า การปรับแรงในการปิดล็อกแม่พิมพ์เราสามารถกระทำได้โดยการเลื่อนข้อพับให้อยู่ในตำแหน่งที่แตกต่างกัน กล่าวคือข้อพับเหยียดออกตรงจะให้แรงในการปิดล็อกแม่พิมพ์มากที่สุด และแรงจะลดลงเมื่อข้อพับหุบเข้ามาหรืออยู่ในตำแหน่งอื่น ดังรูปที่ 2.10 (ข)



รูปที่ 2.10 แผนภาพของระบบขับเคลื่อนแม่พิมพ์แบบแมคคานิก (ก) ขณะปิดแม่พิมพ์ และ (ข) ขณะเปิดแม่พิมพ์ [12]

ระบบไฮดรอลิก ระบบปิด-เปิดแม่พิมพ์แบบนี้จะใช้กำลังในการขับเคลื่อนและปิดล็อกแม่พิมพ์ด้วยกระบอกสูบไฮดรอลิกโดยตรง ด้วยเหตุนี้แรงที่ใช้ในการปิดล็อกแม่พิมพ์เพื่อป้องกันแม่พิมพ์หย่อนนั้นสามารถปรับได้ตามต้องการ แม้กระทั่งความเร็วในการปิด-เปิดแม่พิมพ์ก็สามารถปรับได้ ซึ่งในปัจจุบันสามารถปรับได้หลายชั้นความเร็วซึ่งช่วยในการทำงานเร็วขึ้นและยืดอายุการใช้งานของเครื่องมืออีกด้วย



รูปที่ 2.11 แผนภาพของระบบขับเคลื่อนแม่พิมพ์แบบไฮดรอลิก (ก) ขณะปิดแม่พิมพ์ และ (ข) ขณะเปิดแม่พิมพ์ [12]

#### 2.2.2.4 แผ่นยึดระบบขับเคลื่อน

แผ่นยึดนี้จะอยู่ด้านทางท้ายสุดของเครื่องฉีด โดยจะทำหน้าที่ยึดข้อพับหรือยึดกระบอกลูกสูบ ไฮดรอลิกก็ได้ และยังทำหน้าที่เป็นตัวรับแรงปิดล๊อคแม่พิมพ์โดยตรง โดยมีเพลานำเลื่อนช่วยอยู่ด้วย ในระบบปิด-เปิดแม่พิมพ์แบบแมคานิค แผ่นยึดนี้จะไม่ถูกยึดแน่นตายตัวติดกับฐานเครื่อง เพราะจะต้องยอมให้เคลื่อนที่ได้ในกรณีที่ต้องการปรับระยะปิดแม่พิมพ์ (เมื่อความสูงของแม่พิมพ์เปลี่ยนไป) แต่ในระบบปิด-เปิดแม่พิมพ์แบบไฮดรอลิก แผ่นยึดนี้จะถูกยึดแน่นตายตัวติดอยู่กับฐานเครื่อง เพราะว่าการปรับระยะปิดแม่พิมพ์สามารถปรับได้โดยตรงที่แกนไฮดรอลิก ด้วยเหตุนี้แผ่นยึดนี้จึงมีโอกาสถอยหลังกลับได้ ในระบบปิด-เปิดแม่พิมพ์แบบแมคานิค ทำให้แม่พิมพ์มีโอกาสเหยยออกและเกิดลึบขึ้นได้ที่ชิ้นงาน

#### 2.2.3 ฐานเครื่อง

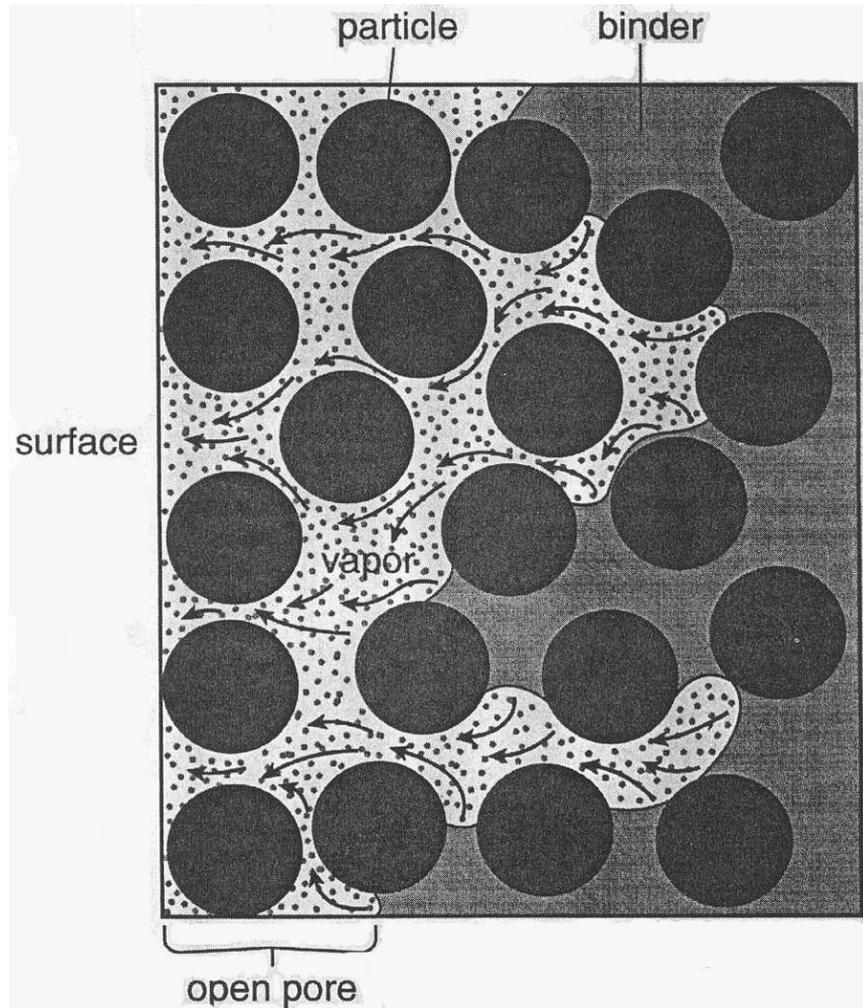
ฐานเครื่องส่วนใหญ่จะเป็นโครงสร้างเหล็กเหนียวที่ได้จากการเชื่อมประกอบ โดยทำหน้าที่คอยรับน้ำหนักของชุดฉีด และชุดปิด-เปิดแม่พิมพ์ ยึดติดอุปกรณ์ไฮดรอลิกทั้งหมด ติดตั้งชุดควบคุม ตลอดจนทำหน้าที่เป็นถังบรรจุน้ำมันไฮดรอลิก

### 2.3 การกำจัดตัวประสาน

ชิ้นงานหลังการฉีดขึ้นรูปหรือชิ้นงานกรีนจะถูกนำมากำจัดตัวประสานเพื่อให้เหลือเฉพาะผงโลหะ ซึ่งการกำจัดตัวประสานจะส่งผลโดยตรงต่อลักษณะปรากฏ และคุณภาพของชิ้นงานที่ผ่านการเผาผนึกแล้ว เนื่องจากในขั้นตอนนี้อาจทำให้ชิ้นงานมีโอกาสบิดเบี้ยว แตกร้าว ยุบตัว รวมถึงการปนเปื้อนต่อองค์ประกอบทางเคมีของผงโลหะ ทำให้ประสิทธิภาพการใช้งานของชิ้นงานที่ผ่านการเผาผนึกด้อยลงได้ วิธีการกำจัดตัวประสานมีผลต่ออัตราการผลิต ตลอดจนต้นทุนการผลิต และเป็นขั้นตอนที่ต้องใช้เวลานาน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับวิธีการกำจัดตัวประสาน ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 2 เทคนิคได้แก่

#### 2.3.1 การกำจัดตัวประสานด้วยความร้อน

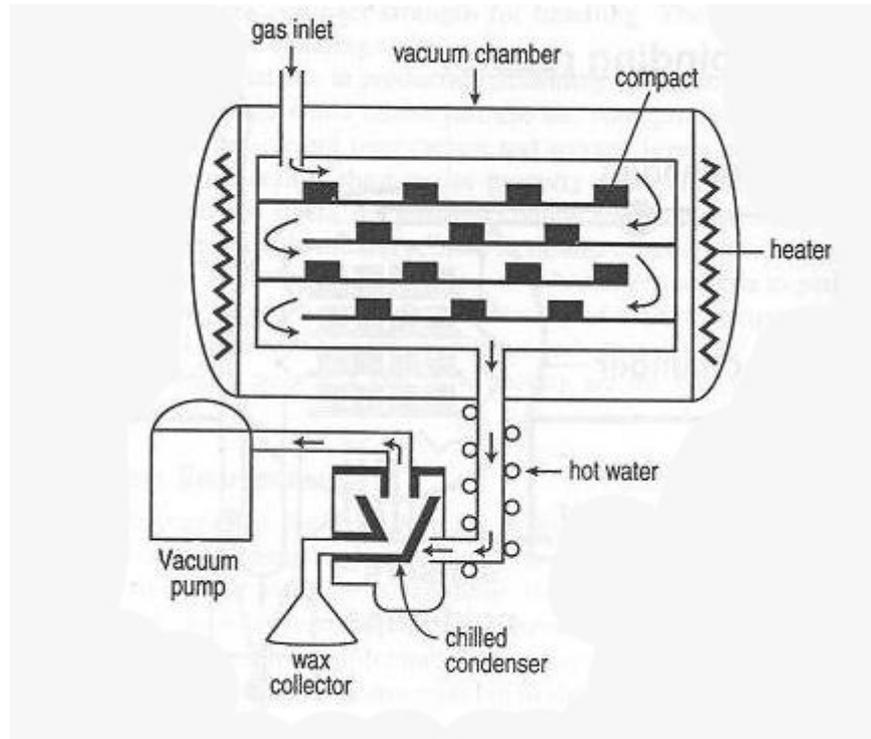
กระทำโดยการให้ความร้อนแก่ชิ้นงานเพื่อให้ตัวประสานเกิดการไหลตัวผ่านรูพรุนเปิดที่มีความต่อเนื่องจนกลายเป็นไอสู่บริเวณผิวหน้าของชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 แบบจำลองการกำจัดตัวประสานด้วยความร้อน ซึ่งตัวประสานมีการแทรกซึมผ่านรูพรุนเปิดออกสู่ผิวหน้าของชิ้นงาน [2]

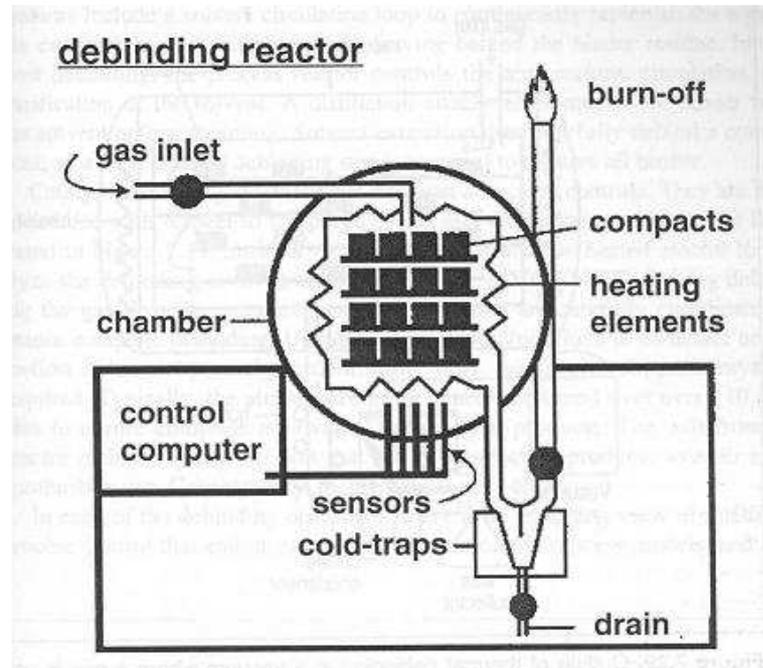
การกำจัดตัวประสานด้วยความร้อนสามารถแบ่งตามหลักการย่อยๆ ได้แก่

การกำจัดตัวประสานโดยอาศัยกลไกการแพร่ (Diffusion) ซึ่งเกิดขึ้นภายใต้ความดันบรรยากาศต่ำหรือภายใต้บรรยากาศสุญญากาศ โดยการให้ความร้อนอย่างช้าๆ แก่ชิ้นงาน เพื่อให้ส่วนประกอบของตัวประสานที่มีอุณหภูมิการสลายตัวต่ำสลายตัวเกิดเป็นรูพรุนเปิดขนาดเล็กอย่างต่อเนื่องเพื่อให้ก๊าซสามารถแพร่ออกจากชิ้นงานได้ ข้อเสียของการกำจัดตัวประสานด้วยวิธีนี้คือ ใช้เวลาในการกำจัดตัวประสานนาน อุปกรณ์ที่ใช้มีราคาแพง เนื่องจากมีความซับซ้อนในระบบควบคุมเพื่อความสามารถในการปรับรักษาความดัน หรือต้องมีอุปกรณ์ในการดักจับตัวประสาน (Wax collection) โดยใช้หลักการควบแน่นไอของตัวประสานให้กลับเป็นของแข็ง ดังแสดงในรูปที่ 2.13 นอกจากนี้ อุปกรณ์หรือเตากำจัดตัวประสานมีโอกาสนับเป็นอนจากไอของตัวประสานได้ง่ายอีกด้วย



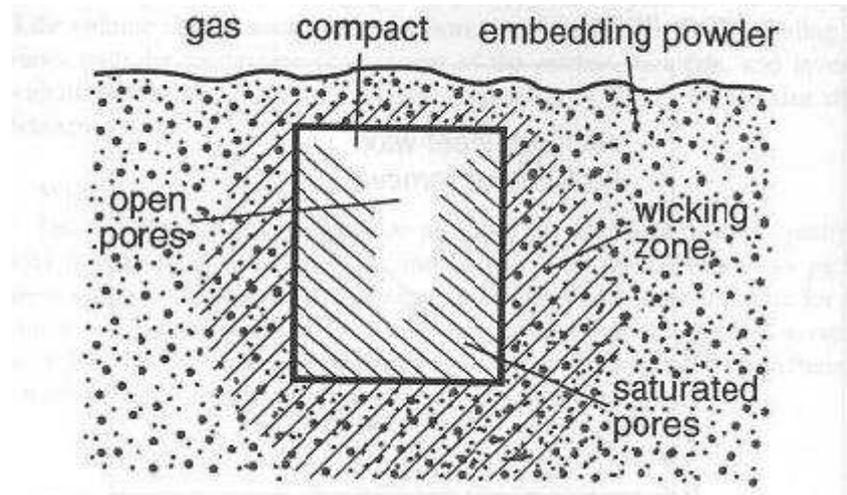
รูปที่ 2.13 ส่วนประกอบโดยรวมของอุปกรณ์การกำจัดตัวประสานด้วยกระบวนการทางความร้อนภายใต้บรรยากาศสุญญากาศ [2]

การกำจัดตัวประสานโดยกลไกการแทรกซึม (Permeation) ซึ่งเกิดขึ้นโดยการให้ความร้อนแก่ชิ้นงานภายใต้ความดันบรรยากาศปกติ (Ambient pressure) หรือความดันสูง ทำให้โมเลกุลก๊าซของตัวประสานเกิดการเคลื่อนไหวแบบชนกันเอง และเคลื่อนตัวออกสู่ผิวหน้าชิ้นงานตามรูพรุนเปิด ข้อดีของการกำจัดตัวประสานด้วยกระบวนการนี้คือ ไม่มีของเสียที่เกิดจากการสลายตัวของตัวประสานทั้งในลักษณะของแข็งหรือของเหลว นอกจากนี้อุปกรณ์ที่ใช้ยังมีราคาถูก เพราะมีระบบการทำงานไม่ซับซ้อน ดังรูปที่ 2.14 โดยมีช่องสำหรับใส่ชิ้นงานและล้อมรอบด้วยตัวทำความร้อน และมีอุปกรณ์เพิ่มเติมเพื่อตรวจจับความดันของไอที่เกิดจากการสลายตัวของตัวประสาน ซึ่งช่วยในการควบคุมอัตราการกำจัดตัวประสาน แต่กระบวนการนี้มีข้อด้อยคือชิ้นงานมีโอกาสบิดเบี้ยวได้ง่ายเนื่องจากอัตราการให้ความร้อนไม่เหมาะสม



รูปที่ 2.14 ส่วนประกอบของระบบกำจัดตัวประสานด้วยความร้อนภายใต้ความดันบรรยากาศสูง [2]

การกำจัดตัวประสานโดยการดูดซับ (Wicking) ซึ่งเหมาะกับการกำจัดตัวประสานชิ้นงานที่มีลักษณะบาง โดยการนำชิ้นงานฝังไว้ในวัสดุดูดซับ ดังแสดงในรูป 2.15 ซึ่งมีลักษณะเป็นเม็ดที่มีรูพรุน ได้แก่ ผงอะลูมินา กราไฟต์ ซิลิกา ดินขาว หรือเซอโคเนียเป็นต้น และให้ความร้อนแก่ชิ้นงานจนกระทั่งตัวประสานหลอมเหลว ไหลออกจากรูพรุนเปิดสู่ผิวหน้าของชิ้นงาน ซึ่งตัวประสานหลอมเหลวเหล่านี้จะถูกดูดซับเข้าสู่รูพรุนของวัสดุดูดซับด้วยแรงคาปิลารี ทั้งนี้ถ้าต้องการให้อัตราการกำจัดตัวประสานเร็วขึ้นวัสดุดูดซับที่ใช้ควรมีขนาดเล็ก และรูพรุนของวัสดุดูดซับต้องมีขนาดเล็กกว่าขนาดรูพรุนของชิ้นงาน สำหรับข้อดีของการกำจัดตัวประสานด้วยกระบวนการนี้คือ เวลาที่ใช้ในการกำจัดตัวประสานน้อยกว่าการกำจัดตัวประสานด้วยกระบวนการทางความร้อนแบบอื่นๆ นอกจากนี้ยังลดการบิดเบี้ยวของชิ้นงาน เนื่องจากเม็ดผงดูดซับจะช่วยในการกระจายความร้อนอย่างสม่ำเสมอ และช่วยพยุงชิ้นงานไม่ให้มีการเคลื่อนที่ แต่มีข้อเสียคือกรรมวิธีมีความซับซ้อนหลายขั้นตอน



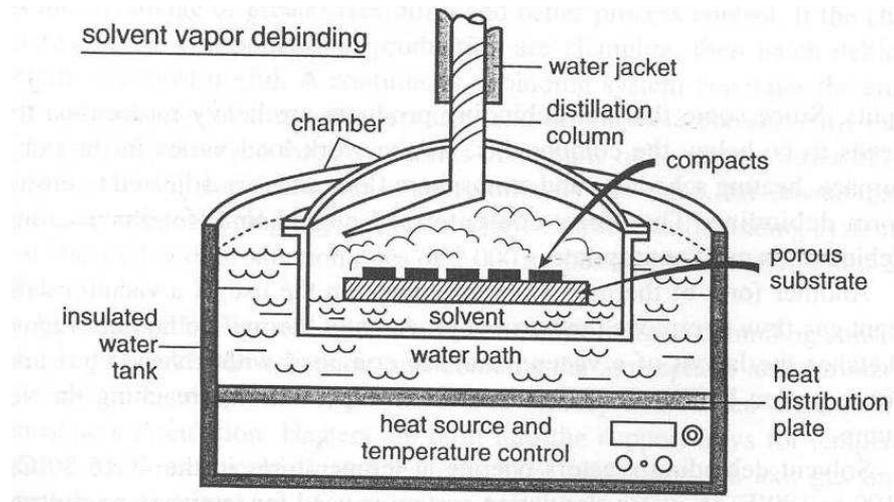
รูปที่ 2.15 แบบจำลองการกำจัดตัวประสานด้วยวิธีการดูดซับด้วยเม็ดวัสดุพูน[2]

### 2.3.2 การกำจัดตัวประสานด้วยตัวทำละลาย

ทำโดยแช่ชิ้นงานในของไหลที่มีความสามารถละลายส่วนผสมของตัวประสานบางตัวได้ เพื่อทำให้เกิดเป็นรูปพูนเปิดบริเวณผิวชิ้นงาน โดยส่วนใหญ่ตัวทำละลายจะมีความสามารถในการละลายตัวประสานประเภทไขมันอิ่มตัว [2] หรือสารประกอบประเภทไม่มีขั้วและสารมีขั้วโมเลกุลสั้น [8] แต่ไม่ละลายสารประกอบประเภทพอลิเมอร์ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวยึดอนุภาคผงโลหะเพื่อให้คงรูปร่างจนถึงขั้นตอนการเผาประสาน

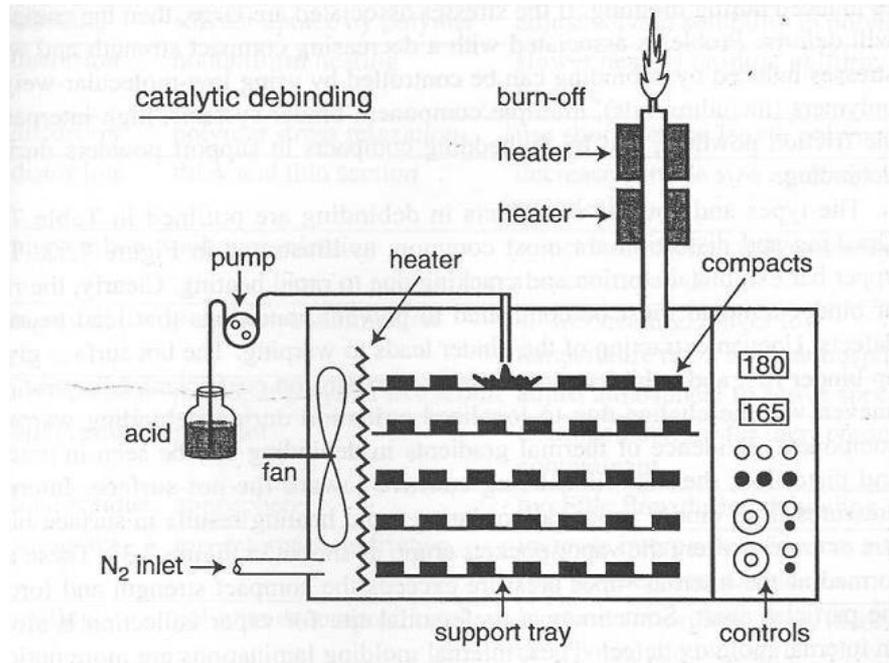
การกำจัดตัวประสานด้วยตัวทำละลายสามารถแบ่งเป็นชนิดย่อยๆ ดังนี้

การกำจัดตัวประสานด้วยการแช่ในตัวทำละลาย โดยแช่ชิ้นงานในตัวทำละลายของเหลวหรือภายใต้บรรยากาศไอของตัวทำละลาย ซึ่งได้จากการทำให้ตัวทำละลายร้อนประมาณ 50–70 องศาเซลเซียส จนเกิดเป็นไอ ในสภาวะปิดที่ป้องกันความชื้นจากอากาศหรือภายในระบบสุญญากาศ ดังรูปที่ 2.16 การแช่ชิ้นงานในตัวทำละลายโดยตรงจะใช้เวลาในการกำจัดตัวประสานน้อยกว่าการแช่ชิ้นงานภายใต้บรรยากาศไอของตัวทำละลาย โดยสามารถกำจัดตัวประสานได้ประมาณ 10 มิลลิเมตร ภายในเวลา 6 ชั่วโมง ทั้งนี้กระบวนการการกำจัดตัวประสานด้วยการแช่ชิ้นงานในตัวทำละลายมีข้อเสียคือ ชิ้นงานมีโอกาสเสียหายเนื่องจากการบวมหรือการเกิดการแตกร้าวซึ่งเกิดจากการที่ตัวทำละลายมีอุณหภูมิสูงเกินไป



รูปที่ 2.16 การกำจัดตัวประสานด้วยการแช่ชิ้นงานในไอของตัวทำละลาย [2]

การกำจัดตัวประสานโดยการเร่งปฏิกิริยาด้วยกรด (Catalytic debinding) ภายในเตาความร้อน โดยภายในระบบจะประกอบด้วยกรดไนตริกหรือออกซาลิกซึ่งถูกปั๊มเข้าสู่เตาโดยผ่านตัวทำความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 115-120 องศาเซลเซียส (ดังรูปที่ 2.17) ทำให้เกิดเป็นไอแทรกซึมผ่านรูพรุน และตัวประสานสลายตัวออกสู่ผิวภายนอกของชิ้นงาน ซึ่งมีก๊าซไนโตรเจนเป็นตัวพาไอของกรดและตัวประสานออกนอกระบบโดยผ่านกระบวนการเผาไหม้เพื่อไม่ให้เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม ข้อดีของการกำจัดตัวประสานด้วยกระบวนการนี้คือ สามารถกำจัดตัวประสานได้ในอัตราคงที่อย่างรวดเร็วคือ 2 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง โดยปราศจากการบิดเบี้ยว



รูปที่ 2.17 การกำจัดตัวประสานด้วยตัวเร่งปฏิกิริยากรด [2]

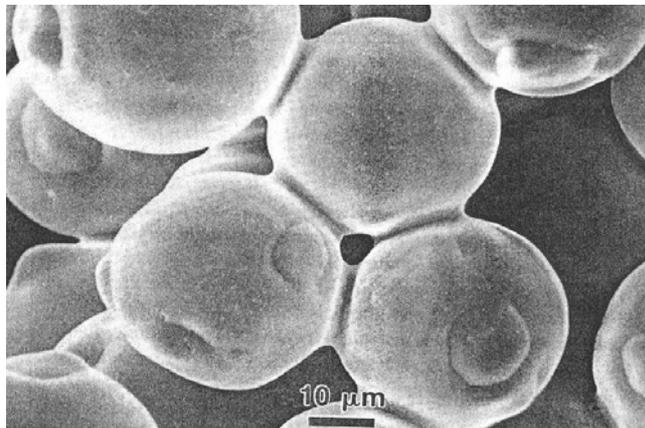
การกำจัดตัวประสานด้วยการแช่ชิ้นงานในตัวทำละลายภายใต้สภาวะที่มีความดันสูงมาก โคนมีหลักการคร่าวๆ คือ ให้ความร้อน (ประมาณ 80-100 องศาเซลเซียส) และความดัน (ประมาณ 20-30 เมกกะปาสคาล) แก่ระบบที่ประกอบด้วยชิ้นงานและตัวทำละลาย จนกระทั่งไอของตัวทำละลายถึงจุด Supercritical ซึ่งเป็นจุดที่ไอและของเหลวมีความหนาแน่นเท่ากัน และไม่สามารถแยกตัวออกจากกันได้ กระบวนการกำจัดตัวประสานแบบนี้เหมาะสำหรับใช้กำจัดตัวประสานที่มีส่วนผสมของแว็กซ์ แต่ไม่เป็นที่นิยมใช้ในการผลิตระดับอุตสาหกรรม เนื่องจากอุปกรณ์มีราคาแพง และเกิดอันตรายได้ง่าย นอกจากนี้ยังใช้เวลาค่อนข้างนานกว่าการกำจัดตัวประสานด้วยตัวทำละลายแบบอื่นๆ แต่มีข้อดีคือสามารถลดความเสียหายเนื่องจากการเกิดการแตกร้าวขณะกำจัดตัวประสานได้ดี สำหรับตัวทำละลายที่นิยมใช้คือ คาร์บอน ไดออกไซด์ ฟูรีออน หรือ โพรเพน เป็นต้น

จากกระบวนการกำจัดตัวประสานด้วยเทคนิคต่างๆ ข้างต้น ทั้งในรูปแบบของการกำจัดตัวประสานด้วยความร้อน หรือด้วยตัวทำละลาย ต่างก็มีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกัน ดังนั้นการเลือกเทคนิคในการกำจัดตัวประสานยังขึ้นกับชนิดของส่วนผสมของตัวประสานเป็นสำคัญ

## 2.4 การเผาผืนึก

ชิ้นงานที่ผ่านการกำจัดตัวประสานจะถูกนำเข้าสู่ขั้นตอนการเผาผืนึก ซึ่งเป็นขั้นตอนสำคัญที่ทำให้ชิ้นงานเกิดความแข็ง ความแข็งแรง ความสามารถในการนำไฟฟ้า ความเป็นแม่เหล็ก ความสามารถต้านทานการสึกหรอและทนต่อการกัดกร่อน หรือสมบัติการใช้งานอื่นๆ [2] โดยประสิทธิภาพของการเผาผืนึกสามารถชี้วัดได้ด้วยค่าของความหนาแน่นหลังการเผาผืนึก ซึ่งเพิ่มขึ้นเนื่องจากชิ้นงานมีการหดตัวและรูพรุนถูกกำจัดลดลง ส่งผลต่อโครงสร้างทางจุลภาคที่เปลี่ยนแปลงไป

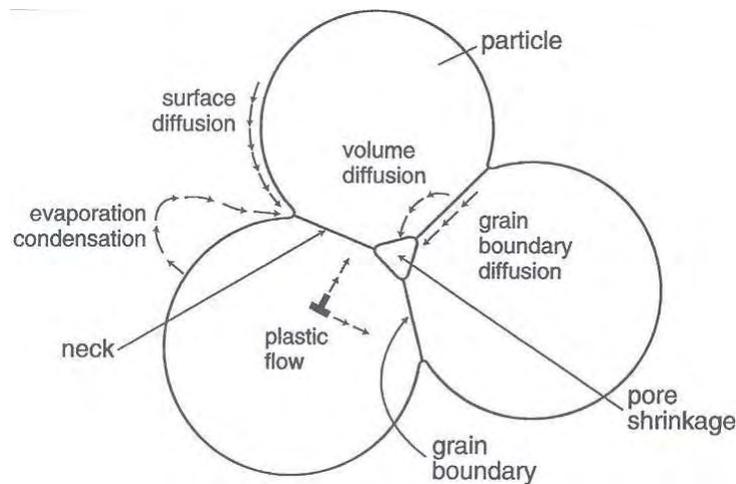
ในกระบวนการเผาผืนึกชิ้นงานจะได้รับพลังงานความร้อนซึ่งเป็นแรงขับที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ในระดับอะตอม จนอะตอมเกิดการแพร่ (Atomic diffusion) เชื่อมเป็นพันธะระหว่างอนุภาค (การเกิด Necking) ดังรูปที่ 2.18 ส่งผลให้ชิ้นงานมีการหดตัวและความหนาแน่นเพิ่มขึ้น โดยอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาผืนึกจะมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิหลอมเหลวของวัสดุชนิดต่างๆ หรือคิดเป็น 75% ของอุณหภูมิหลอมเหลว [13] ดังเช่นวัสดุเหล็กกล้าจะนิยมเผาผืนึกที่อุณหภูมิประมาณ 1250 องศาเซลเซียส ทองแดง 1045 องศาเซลเซียส เป็นต้น [2] การเกิดพันธะระหว่างอนุภาคสามารถเกิดขึ้นได้ทั้งในสถานะของแข็ง หรือการฟอรัมตัวของเฟสของเหลวขึ้นอยู่กับส่วนผสมของวัสดุและสภาวะในการเผาผืนึก



รูปที่ 2.18 การเกิด necking ณ บริเวณจุดสัมผัสของอนุภาคผงกลมในระยะเริ่มต้นของการเผาผืนึก [2]

### 2.4.1 กลไกการเผาผลาญ

พลังงานพื้นผิวซึ่งเกิดจากความเค้นผิวโค้งของอนุภาคผงเป็นปัจจัยหลักที่สำคัญในการทำให้เกิดกระบวนการเผาผลาญ ทั้งนี้เมื่ออนุภาคผงได้รับพลังงานความร้อนซึ่งกระตุ้นให้อะตอมมีการเคลื่อนที่เพื่อลดพลังงานพื้นผิวดังกล่าว โดยผ่านกลไกการเคลื่อนที่ของอะตอม (Atomic transport) (ดังรูปที่ 2.19) 2 แบบ คือ การเคลื่อนที่ตามพื้นผิว (Surface transport) และการเคลื่อนที่แบบมวลรวม (Bulk transport) ซึ่งกลไกทั้ง 2 แบบดังกล่าวต่างก็เป็นแรงขับให้เกิดการไหลของมวล

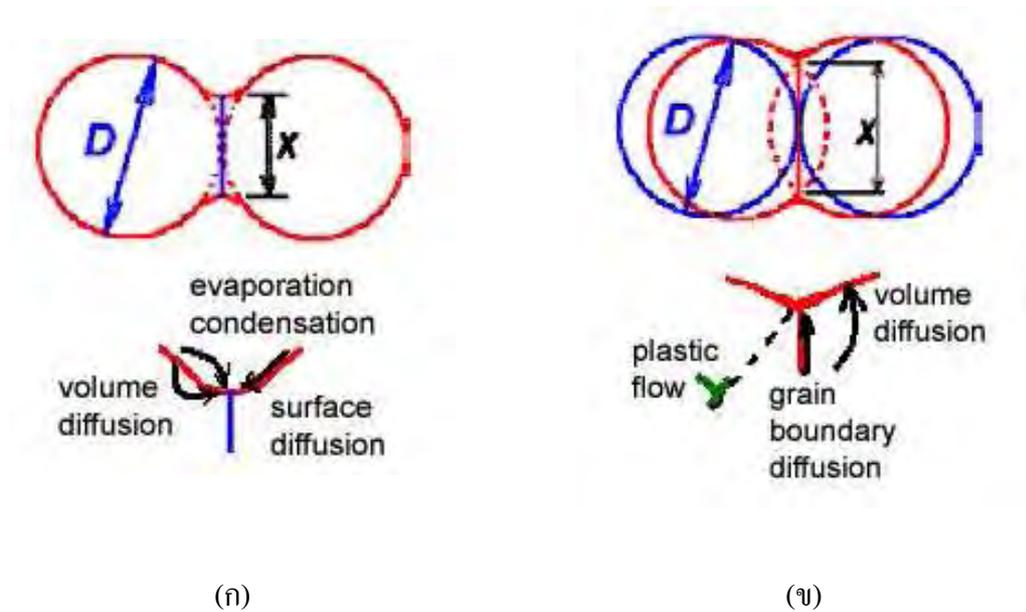


รูปที่ 2.19 การเติบโตของ Neck ด้วยกลไกการเคลื่อนที่แบบต่างๆ [2]

จากรูปที่ 2.19 กลไกการเคลื่อนที่ตามพื้นผิว จะเกิดขึ้นได้ด้วยพฤติกรรมเคลื่อนที่ของอะตอมในสถานะที่แตกต่างกันสองกรณีคือ การแพร่ตามพื้นผิว (Surface diffusion) และการระเหยและการควบแน่น (Evaporation–condensation) โดยปรากฏการณ์การเคลื่อนที่ตามพื้นผิวจะเป็นกลไกที่ทำให้เกิดการโตของรอยต่อระหว่างอนุภาค (Neck) แต่ไม่เกิดการแน่นตัวหรือหดตัวของชิ้นงาน หรือกล่าวได้ว่าระยะห่างระหว่างอนุภาคผงโลหะไม่มีการเปลี่ยนแปลงดังรูปที่ 2.20 (ก) เนื่องจากการไหลของมวลจะเกิดขึ้นและสิ้นสุดที่บริเวณผิวของอนุภาคเท่านั้น ซึ่งการแพร่ตามพื้นผิวเป็นพฤติกรรมที่เกิดขึ้น ณ อุณหภูมิการเผาผลาญต่ำๆ และปรากฏในกระบวนการเผาผลาญโลหะโดยทั่วไป และการระเหยและการควบแน่น เกิดขึ้นเมื่อการเผาผลาญประกอบด้วยธาตุเจือที่มีเสถียรภาพต่ำ เช่น ตะกั่ว เป็นต้น

ในทางตรงข้ามกลไกการเคลื่อนที่แบบมวลรวม ซึ่งเกิดขึ้นด้วยพฤติกรรมเคลื่อนที่ของอะตอมแบบต่างๆ ดังรูปที่ 2.19 คือ การไหลแบบพลาสติก (Plastic flow) การไหลแบบหนืด (Viscous flow) การแพร่ภายในเนื้อวัสดุ (Volume diffusion) และ การแพร่ตามขอบเกรน (Grain boundary diffusion) โดยกลไกการเคลื่อนที่แบบมวลรวม เป็นกลไกที่ทำให้เกิดการโตของรอยต่อระหว่างอนุภาค ทำให้

เกิดการแน่นตัวหรือหดตัวของชิ้นงาน กล่าวคือระยะห่างระหว่างอนุภาคมีการเปลี่ยนแปลงดังรูปที่ 2.20 (ข) เนื่องจากการไหลของมวลเกิดขึ้นภายในอนุภาคและสะสม ณ บริเวณรอยต่อระหว่างอนุภาค ซึ่งพฤติกรรมของการไหลแบบพลาสติก เกิดกับชิ้นงานที่ถูกอัดขึ้นรูปและมีปริมาณดิสโลเคชันจำนวนมาก ทั้งนี้บทบาทของการไหลแบบพลาสติกจะลดลงเมื่อดิสโลเคชันถูกกำจัดโดยการอบอ่อน การไหลแบบหนืด เกิดกับการเผาผนึกวัสดุฐานเช่น แก้วและพลาสติก โดยอัตราการรวมตัวของอนุภาคหรืออัตราการโตของรอยต่อระหว่างอนุภาค ขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาคและค่าความหนืดของวัสดุเป็นสำคัญ ทั้งนี้ในกรณีของการเผาผนึกวัสดุโลหะ จะเกิดการไหลแบบหนืดได้เมื่อมีอุณหภูมิของเหลวเกิดขึ้นบริเวณขอบเกรนเท่านั้น การแพร่ภายในเนื้อวัสดุ เป็นพฤติกรรมเคลื่อนที่ของอะตอมในโครงผลึก โดยแทรกตัวผ่านอะตอมอื่นๆ ข้างเคียงเมื่อได้รับพลังงานกระตุ้น ซึ่งอัตราการแพร่ภายในเนื้อวัสดุจะเกิดขึ้นอย่างช้าๆ สำหรับพฤติกรรมแพร่ตามขอบเกรน เป็นการเคลื่อนที่ของอะตอมบริเวณขอบเกรนซึ่งเป็นจุดบกพร่อง และสามารถเกิดได้ง่ายกับวัสดุโลหะ โดยทั่วไป ทั้งนี้กลไกการเคลื่อนที่ตามพื้นผิว และการเคลื่อนที่แบบมวลรวม ซึ่งทำให้เกิดการโตของ neck และการแน่นตัวของชิ้นงานขณะเผาผนึก สามารถเกิดขึ้นโดยใช้อุณหภูมิสูงเป็นตัวกระตุ้น



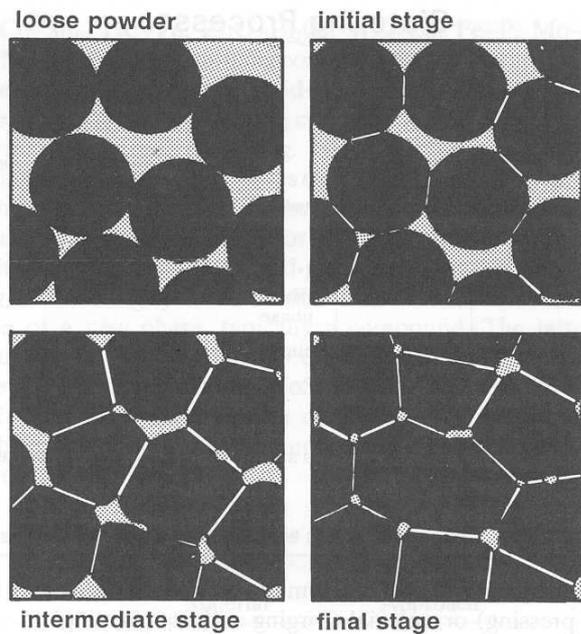
รูปที่ 2.20 กลไกการเผาผนึก (ก) การเคลื่อนที่ตามพื้นผิว (ข) การเคลื่อนที่แบบมวลรวม [14]

**2.4.2 การพัฒนาโครงสร้างทางจุลภาคและการเปลี่ยนแปลงลักษณะรูพรุนขณะเผาผนึก**

โดยทั่วไปโครงสร้างทางจุลภาคและลักษณะของรูพรุนขณะเกิดการเผาผนึกจะเกิดขึ้น 3 ขั้นตอน (รูปที่ 2.21) ที่สำคัญดังนี้ [14,15]

ขั้นเริ่มต้น (Initial stage) จะเกิดพันธะขึ้นระหว่างจุดสัมผัสของอนุภาค และพันธะมีการเติบโต รูพรุนเชื่อมต่อกันเป็นโครงข่าย

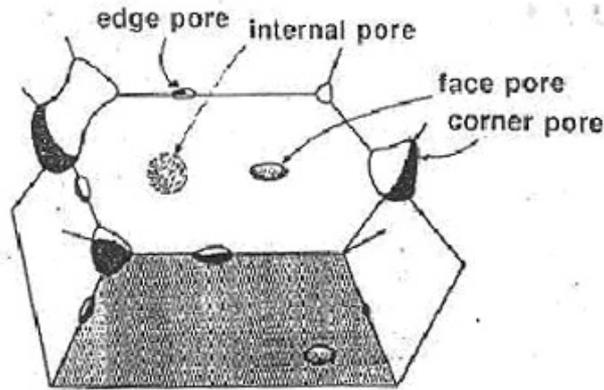
ขั้นกลาง (Intermediate) เป็นขั้นที่สำคัญที่ส่งผลต่อสมบัติของชิ้นงานมากที่สุด โดยรูพรุนเกิดการขดตัว (Convolutd) และอยู่บริเวณจุดตัดของขอบเกรนหรือรอยต่อของอนุภาค โดยรูพรุนมีลักษณะเข้าใกล้ทรงกระบอก และโครงสร้างเกิดการแน่นตัว 70–92 เปอร์เซ็นต์ของความหนาแน่นทางทฤษฎี โดยการลดลงของรัศมีรูพรุน



รูปที่ 2.21 ขั้นตอนการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางจุลภาคและรูพรุนขณะเกิดการเผาผนึก [2]

ขั้นสุดท้าย (Final stage) เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นอย่างช้าๆ เพราะรูพรุนทรงกลมที่แยกจากกันเกิดการหดตัวด้วยกลไกการแพร่แบบ Bulk diffusion และอยู่ตามมุมของเกรน ซึ่งลักษณะนี้ทำให้สมดุลระหว่างพลังงานขอบเกรนและพลังงานพื้นผิวของเฟสของแข็ง-ไอเกิดเป็นร่องเรียกว่ามุมสองหน้า (Dihedral angle) รูพรุนที่อยู่ตามขอบเกรนจะมีรูปร่างนูนสองด้านเหมือนเลนส์นูนสองอันประกบกัน เมื่อรูพรุนแยกตัวออกจากขอบเกรนจะมีรูปร่างเป็นรูปทรงกลม ด้วยเหตุนี้รูพรุนจึงมีรูปร่างแปรตามบริเวณที่อยู่ดังแสดงในรูปที่ 2.22 รูพรุนที่ไม่อยู่ติดกับขอบเกรนมีลักษณะทรงกลม รูพรุนที่อยู่ตามขอบเกรนมีลักษณะนูนสองด้าน และรูพรุนที่อยู่ตามมุมเกรนมีลักษณะมนหลายเหลี่ยม ดังนั้นรูพรุนต้องแพร่ช่องว่างในผลึกให้ห่างจากขอบเกรนเพื่อทำให้เกิดการหดตัวอย่างต่อเนื่องซึ่งเป็นกระบวนการที่ช้ามาก ถ้าให้ความร้อนต่อไปรูพรุนเกิดการรวมตัวกันส่งผลให้ขนาดเฉลี่ยของรูพรุนโตขึ้นและจำนวนรูพรุนลดลง ความแตกต่างระหว่างความโค้งของรูพรุนต่างๆ นำไปสู่การโตของรูพรุน

ขนาดใหญ่และสูญเสียน้ำรูพรุนขนาดเล็กซึ่งเป็นรูพรุนที่มีความเสถียรน้อยกว่า เรียกเหตุการณ์นี้ว่าปรากฏการณ์ออสท์วาลด์ และถ้าภายในรูพรุนมีก๊าซติดค้างอยู่ความสามารถในการละลายก๊าซในเมทริกซ์ส่งผลกระทบต่ออัตราการกำจัดรูพรุน ดังนั้นจึงต้องกำจัดรูพรุนในขั้นตอนสุดท้าย เพราะการโตของรูพรุนทำให้ความหนาแน่นลดลง และส่งผลให้การอบผนึกในขั้นตอนสุดท้ายนานขึ้น



รูปที่ 2.22 รูปร่างรูพรุนที่แตกต่างกัน ณ ตำแหน่งต่างๆ [15.]

### 2.4.3 ปัจจัยแวดล้อมที่ส่งผลต่อการเผาผนึก

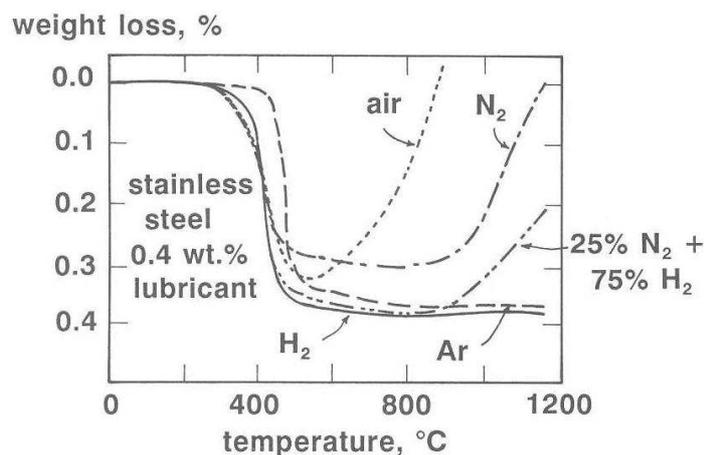
ในการเผาผนึกชิ้นงาน นอกจากลักษณะทางกายภาพของผงอัน ได้แก่ ลักษณะรูปร่างของผง ขนาดของผง และความหนาแน่นกรีน จะส่งผลต่อคุณภาพของชิ้นงานหลังเผาผนึกแล้ว ยังมีปัจจัยสำคัญอื่นๆ ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของชิ้นงานในขั้นตอนการเผาผนึกโดยตรงคือ

#### 2.4.3.1 บรรยากาศการเผาผนึก

บรรยากาศในการเผาผนึกเป็นส่วนสำคัญในการควบคุมการเกิดพันธะระหว่างอนุภาคผงและองค์ประกอบทางเคมีของชิ้นงานหลังเผาผนึก [13] โดยบรรยากาศเป็นตัวกลางในการขนส่งหรือส่งผ่านความร้อนจากตัวทำความร้อนสู่ชิ้นงาน [2] ทั้งนี้การส่งผ่านความร้อนสามารถจัดแบ่งออกเป็น 3 ลักษณะที่สำคัญ ได้แก่ การนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสี โดยการแผ่รังสีเป็นลักษณะการปลดปล่อย (Emission) พลังงานความร้อนดังเช่นปรากฏการณ์ความร้อนจากดวงอาทิตย์สู่โลก หรือการปลดปล่อยพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นคลื่น ซึ่งเมื่อความร้อนจากการปลดปล่อยกระทบกับวัสดุที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า วัสดุดังกล่าวจะดูดกลืนความร้อน สำหรับการเผาผนึกแบบส่งผ่านความร้อนด้วยการนำและการพา นั้นจะมีต้องมีเฟสของก๊าซร่วมด้วย โดยวิธีการทั้งสองแบบมีความแตกต่างกันที่ การส่งผ่านความร้อนแบบการนำความร้อนจะขึ้นกับค่าความสามารถในการนำความร้อนหรือ

สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุ ส่วนการพาความร้อนจะขึ้นกับค่าของความเร็วของก๊าซเฟส บริเวณผิวหน้าของชิ้นงาน

ในการเผาพริกงาน โลหะผงส่วนใหญ่ในช่วงเริ่มต้น บรรยากาศทำหน้าที่เป็นตัวช่วยกำจัดสารประกอบอินทรีย์ซึ่งเป็นส่วนผสมที่ใช้ในการขึ้นรูป [2,13] โดยบรรยากาศจะมีผลต่อการสูญเสียน้ำหนักของชิ้นงานที่แตกต่างกันดังรูปที่ 2.23 ซึ่งเป็นแผนภาพทางความร้อนที่แสดงการสูญเสียน้ำหนักต่ออุณหภูมิในการเผาพริกของชิ้นงานตัวอย่างเหล็กกล้าไร้สนิมผสมสารอินทรีย์ที่ช่วยในการหล่อลื่น 0.4 เปอร์เซนต์ ทั้งนี้พบว่าเมื่อบรรยากาศที่ใช้แตกต่างกัน น้ำหนักของชิ้นงานจะมีการเปลี่ยนแปลงที่แตกต่างกันด้วย นั่นคือบรรยากาศอากาศจะมีผลในการช่วยกำจัดสารอินทรีย์ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 400 องศาเซลเซียสเนื่องจากที่อุณหภูมิสูงกว่านี้ จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ทำให้น้ำหนักชิ้นงานเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และเมื่อเผาพริกภายใต้บรรยากาศที่มีไนโตรเจนเป็นส่วนประกอบ ไนโตรเจนสามารถดูดซึมสู่ผิวชิ้นงานเกิดเป็นสารประกอบไนไตรด์ ทำให้น้ำหนักชิ้นงานเพิ่มขึ้นและส่งผลกระทบต่อความสามารถในการต้านทานการสึกหรอของชิ้นงานเหล็กกล้าด้อยลง ในขณะที่เผาพริกภายใต้บรรยากาศไฮโดรเจนซึ่งมีประสิทธิภาพในการกำจัดสารประกอบอินทรีย์ตั้งแต่อุณหภูมิต่ำและไม่เกิดปฏิกิริยาอื่นใดเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ในส่วนของบรรยากาศอาร์กอนซึ่งจัดเป็นก๊าซเฉื่อย จะมีความสามารถในการกำจัดสารประกอบอินทรีย์ที่อุณหภูมิสูงกว่าบรรยากาศอื่นๆ แต่จะให้ประสิทธิภาพที่ดีที่สุดที่อุณหภูมิสูงขึ้น



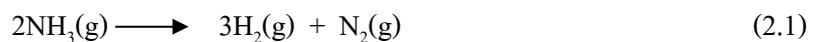
รูปที่ 2.23 แผนภาพทางความร้อนของการสูญเสียน้ำหนักระหว่างการเผาพริกต่ออุณหภูมิเผาพริกของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมซึ่งผสมสารประกอบอินทรีย์ช่วยในการหล่อลื่น 0.4 เปอร์เซนต์ [13]

โดยทั่วไปบรรยากาศที่ใช้ในการเผาผนึกชิ้นงานวัสดุโลหะผงเป็นตัวการสำคัญที่ใช้สำหรับป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่จะกลายเป็นผิวของสารประกอบออกไซด์ของโลหะ ทำให้ประสิทธิภาพในการเผาผนึกลดลง และยังอาจช่วยให้เกิดการรีดิวซ์ออกไซด์ได้อีกด้วย ดังนั้นการเลือกใช้บรรยากาศเผาผนึกแบบใดนั้น ต้องคำนึงถึงถึงลักษณะของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นหลัก บรรยากาศที่นิยมใช้ในการเผาผนึกได้แก่

อากาศ นิยมใช้ในการเผาผนึกวัสดุชนิดเซรามิกส์ออกไซด์ มีข้อดีคือ ราคาต้นทุนต่ำ แต่การควบคุมปริมาณความชื้นและการปนเปื้อนทำได้ยาก [13]

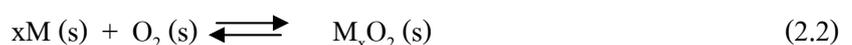
ไนโตรเจน ใช้ในการเผาผนึกเซรามิกส์ไนไตรด์ [2,4] เช่น อลูมิเนียมไนไตรด์ ซิลิกอนไนไตรด์และเป็นตัวป้องกันชิ้นงานไม่ให้สัมผัสกับอากาศขณะเผาผนึกชิ้นงานเหล็ก หรือวัสดุอื่นๆ

ดิสโซซิเอทแอมโมเนีย [13] ซึ่งมีสมบัติเป็นบรรยากาศรีดิวซ์ที่มีต้นทุนต่ำ สามารถกระทำได้โดยใช้ก๊าซแอมโมเนียเป็นตัวตั้งต้นและทำให้แตกตัวเป็นก๊าซไนโตรเจนและไฮโดรเจน (ดังสมการที่ 2.1) [16] โดยใช้ความร้อนประมาณ 1000 องศาเซลเซียส เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาการแตกตัว



ไฮโดรเจนที่ได้จะเป็นตัวช่วยรีดิวซ์ออกซิเจนภายในบรรยากาศการเผาผนึก บรรยากาศดิสโซซิเอทแอมโมเนียนิยมใช้ในการเผาผนึกวัสดุซิลิกอนไนไตรด์ แต่ในบางกรณีไนโตรเจนที่เกิดจากการแตกตัวสามารถเกิดเป็นสารประกอบไนไตรด์ที่เป็นพิษได้

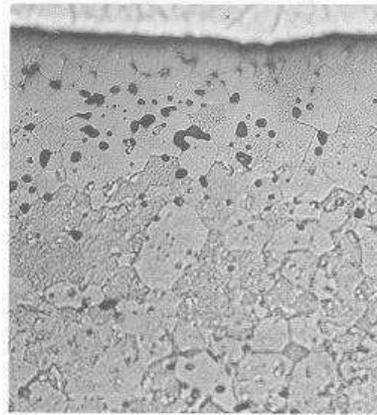
ก๊าซเฉื่อย [13] ได้แก่ ฮีเลียมและอาร์กอนซึ่งมีสมบัติเป็นกลาง มีประโยชน์ในการเผาผนึกชิ้นงานที่ไวต่อปฏิกิริยา เพราะก๊าซเฉื่อยสามารถลดการระเหยกลายเป็นไอของธาตุองค์ประกอบและสามารถทำให้มีความบริสุทธิ์ปราศจากมลทินและสิ่งปลอมปนที่อาจปนเปื้อนภายในชิ้นงานขณะเผาผนึก นอกจากนี้ก๊าซเฉื่อยยังมีประสิทธิภาพในการลดปริมาณออกซิเจนซึ่งอยู่ภายในระบบ ณ สถานะสมดุลที่อุณหภูมิสูง ดังสมการที่ 2.2 [13] ทำให้อัตราการเกิดสารประกอบออกไซด์ลดลง แต่อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพการกำจัดออกซิเจนดังกล่าวยังคงน้อยกว่าการเผาผนึกชิ้นงานภายใต้บรรยากาศไฮโดรเจน ในอุตสาหกรรมส่วนใหญ่นิยมใช้อาร์กอนเป็นบรรยากาศในการเผาผนึกชิ้นงานไทเทเนียม [4]



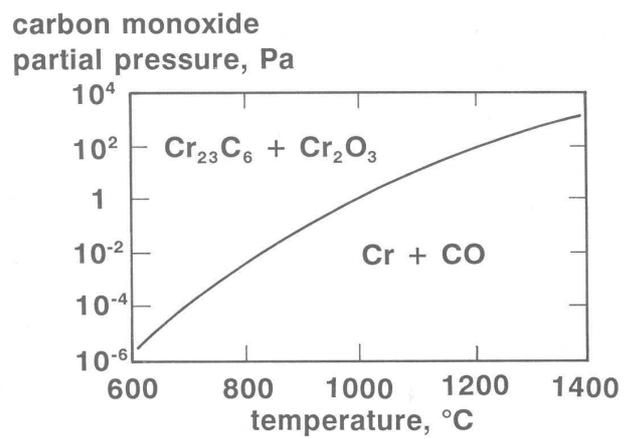
ไฮโดรเจน มีความสามารถในการรีดิวซ์ที่ดีที่สุด โดยเฉพาะผิวโครเมียมออกไซด์ [16,18] ดังนั้นบรรยากาศไฮโดรเจนจึงเป็นที่นิยมใช้ในการเผาผนึกเหล็กกล้าไร้สนิม แต่บรรยากาศดังกล่าวมีข้อเสียคือต้นทุนสูงและประสิทธิภาพการรีดิวซ์ขึ้นกับอุณหภูมิเผาผนึก นอกจากนี้ธาตุบางชนิดอันได้แก่แทนทาลัม ไทเทเนียม เซอโคเนียม หรือนีโอเบียมมีโอกาสเกิดปฏิกิริยากับไฮโดรเจนเป็นสารประกอบไฮไดรด์ซึ่งเปราะและแตกหักได้ง่าย ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องเลือกบรรยากาศอื่นๆ เช่นสุญญากาศหรือก๊าซเฉื่อยเพื่อเผาผนึกวัสดุดังกล่าวข้างต้น

สุญญากาศ [2,18] เป็นการเผาผนึกชิ้นงานภายใต้สภาวะที่ปราศจากสิ่งปนเปื้อนจากบรรยากาศภายนอก และความดันภายในเตามีค่าต่ำประมาณ  $10^{-4}$  ถึง  $10^{-7}$  atm โดยใช้ปั๊มชนิดโรตารีและไอออนดูดบรรยากาศภายในเตาออก ทำให้ส่งผลเสียต่อค่าความดันที่ไม่คงที่ และอาจเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างธาตุองค์ประกอบของชิ้นงานที่อยู่ในสภาพไอซึ่งหลุดออกมาจากชิ้นงานเนื่องจากความดันภายในเตาที่ต่ำมากกับออกซิเจนที่หลงเหลือ (Residual atmosphere) ภายในเตาเกิดเป็นสารประกอบออกไซด์เกาะจับบริเวณผิวชิ้นงาน ส่งผลเสียต่อองค์ประกอบทางเคมีของชิ้นงานที่มีปริมาณธาตุองค์ประกอบเปลี่ยนแปลงไป ทำให้สมบัติหลังการเผาผนึกของชิ้นงานด้อยลง ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.24 เป็นการเผาผนึกเหล็กกล้าไร้สนิมภายใต้บรรยากาศสุญญากาศ ซึ่งลักษณะ โครงสร้างทางจุลภาคบริเวณภายใต้ผิวและภายในชิ้นงานมีความแตกต่างกัน โดยบริเวณผิวเมื่อมีการฟอร์มตัวเกิดเป็นรูพรุนจะมีโครเมียมบางส่วนสูญเสียไปในรูปไอ ทำให้ความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนลดลง [13]

ส่วนใหญ่วัสดุที่นิยมเผาผนึกภายใต้บรรยากาศสุญญากาศ ได้แก่วัสดุที่ไวต่อปฏิกิริยา เช่นไทเทเนียม แทนทาลัม เบริลเลียม วัสดุทนต่อความร้อน เช่น เหล็กกล้าเครื่องมือ และอุปกรณ์ทนความร้อนต่างๆ นอกจากนี้เหล็กกล้าไร้สนิมก็เป็นที่นิยมเผาผนึกภายใต้บรรยากาศสุญญากาศเช่นกัน สำหรับปัญหาในการระเหยกลายเป็นไอขององค์ประกอบทางเคมีของชิ้นงานขณะเผาผนึก สามารถแก้ไขได้โดยการทำการเผาผนึกภายใต้บรรยากาศสุญญากาศจนกระทั่งเกิดเป็นรูพรุนปิด แล้วจึงเผาผนึกต่อภายใต้บรรยากาศก๊าซเฉื่อยในตอนท้าย ซึ่งจะส่งผลดีต่อลักษณะภายในรูพรุนที่ไม่ปนเปื้อน ทำให้การเผาผนึกเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ยิ่งขึ้น และสามารถลดการระเหยกลายเป็นไอบริเวณผิวชิ้นงานได้ ในอุตสาหกรรมการเผาผนึกด้วยบรรยากาศสุญญากาศอุปกรณ์ประกอบภายในเตาส่วนใหญ่ทำจากกราไฟท์ซึ่งสามารถเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนที่หลงเหลือภายในเตาหรือจากชิ้นงานเกิดเป็นก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ซึ่งมีความเสถียรเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2.25 ซึ่งแสดงค่าความดันและอุณหภูมิในการเกิดก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ที่ได้จากปฏิกิริยารีดักชันโครเมียม ดังนั้นการเผาผนึกชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม เหล็กกล้าเครื่องมือ และเหล็กกล้าผสมสูง สามารถกระทำได้ภายใต้บรรยากาศสุญญากาศ



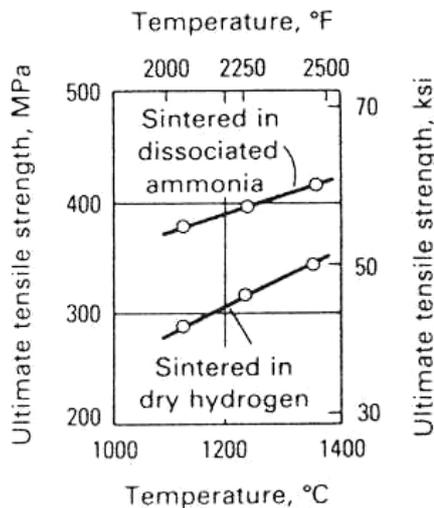
รูปที่ 2.24 ลักษณะภาคตัดขวางของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม ซึ่งเกิดรูพรุนบริเวณใกล้กับผิวหน้าชิ้นงาน เนื่องจากมีโครเมียมบางส่วนระเหยเป็นไอขณะเผาพูนีกภายใต้บรรยากาศสุญญากาศ [13]



รูปที่ 2.25 ค่าความดันย่อยในการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของโครเมียมเป็นก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ [13]

2.4.3.2 อุณหภูมิและเวลาในการเผาผนึก

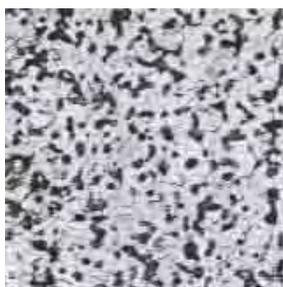
อุณหภูมินับเป็นปัจจัยหลักที่ทำให้อะตอมเกิดการเคลื่อนที่ และแพร่เป็นพันธะที่แข็งแรงระหว่างอนุภาค โดยทั่วไปอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาผนึกชิ้นงานโลหะผงมีค่าประมาณ 75 เปอร์เซ็นต์ของอุณหภูมิหลอมเหลว เพื่อให้กลไกการแพร่เกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ และเวลาที่ใช้ในการเผาผนึกที่เหมาะสมสามารถสังเกตได้จากลักษณะ โครงสร้างทางจุลภาคซึ่งรูพรุนควรมีลักษณะกลมอยู่ตามบริเวณมุมของเกรน ในการเผาผนึกชิ้นงานที่อุณหภูมิแตกต่างกันพบว่าสมบัติเชิงกลที่ได้มีค่าแตกต่างกัน โดยเมื่ออุณหภูมิเผาผนึกเพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลต่อค่าความต้านทานแรงดึงที่ดีกว่าการเผาผนึกชิ้นงานที่อุณหภูมิต่ำ [16] ดังรูปที่ 2.26 ซึ่งแสดงผลกระทบของอุณหภูมิเผาผนึกต่อสมบัติเชิงกลของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 316L ที่เผาผนึกภายใต้บรรยากาศดิสโซซิเอทแอมโมเนีย และไฮโดรเจน จากผลดังกล่าวพบว่าเมื่ออุณหภูมิเผาผนึกสูงขึ้นค่าความสามารถต้านทานแรงดึงเพิ่มสูงขึ้นเช่นกัน เนื่องจากการเผาผนึกที่อุณหภูมิสูงนั้นอะตอมสามารถเกิดการแพร่เป็นพันธะระหว่างอนุภาคมากขึ้น ทำให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงมากขึ้นนั่นเอง นอกจากผลกระทบของอุณหภูมิต่อสมบัติเชิงกลของชิ้นงานยังมีลักษณะ โครงสร้างจุลภาคที่เปลี่ยนแปลงไปได้แก่เกรนที่มีขนาดโตขึ้นเมื่อเผาผนึกที่อุณหภูมิสูงขึ้น ดังรูปที่ 2.27 ซึ่งเป็นการเผาผนึกวัสดุผงพลาเดียมที่อุณหภูมิต่างๆ สังเกตพบว่าเมื่ออุณหภูมิเผาผนึกสูงขึ้นเกรนจะมีขนาดใหญ่ขึ้น และลักษณะรูพรุนที่เปลี่ยนแปลงไป โดยรูพรุนจะมีลักษณะกลมและอยู่ตามบริเวณจุดตัดของขอบเกรน ซึ่งส่งผลต่อเนื่อง



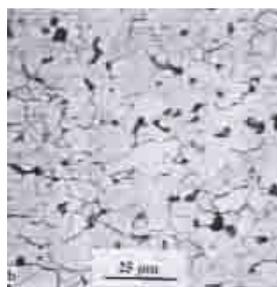
รูปที่ 2.26 ผลของอุณหภูมิเผาผนึกต่อความสามารถต้านทานแรงดึงสูงสุดของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 316L ซึ่งเผาผนึกภายใต้บรรยากาศดิสโซซิเอทแอมโมเนียและไฮโดรเจน [16]

ให้ค่าความหนาแน่นของชิ้นงาน และการหดตัวเพิ่มมากขึ้น ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.28 ซึ่งเป็นผลของอุณหภูมิเผาผนึกต่อการเปลี่ยนแปลงขนาด (รูปที่ 2.28 (ก)) และความหนาแน่น (รูปที่ 2.28 (ข)) เมื่อเวลาในการเผาผนึกนานขึ้นจะมีผลเกี่ยวเนื่องโดยตรงกับขนาดของเกรนที่โตมากขึ้น และหากยังมีการเผาผนึกต่อไปอีกจะเกิดปรากฏการณ์การแยกตัวของรูพรุนออกจากขอบเกรน ซึ่งทำให้สมบัติเชิงกลของชิ้นงานมีค่าด้อยลง เนื่องจากรูพรุนมีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งจากบริเวณขอบเกรนเข้าไปภายในเกรน กล่าวโดยรวมแล้วอุณหภูมิมีผลต่อปฏิสัมพันธ์ระหว่างรูพรุนและขอบเกรน [14] ในสามลักษณะคือ รูพรุนทำให้เกรนโตช้าลง รูพรุนถูกลากไปพร้อมกับการเคลื่อนที่ของขอบเกรนขณะเกิดการโตของเกรน และขอบเกรนแยกออกจากรูพรุนทิ้งให้รูพรุนค้างอยู่ภายในเกรน โดยส่วนใหญ่วัสดุที่มีมีอัตราการโตของเกรนในระดับต่ำเมื่อทำการเผาผนึกที่อุณหภูมิเผาผนึกต่ำ เพราะรูพรุนที่ติดอยู่กับขอบเกรนขัดขวางการโตของเกรน ส่วนวัสดุที่มีอัตราการโตของเกรนในระดับปานกลางถึงสูงเกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิเผาผนึกเพิ่มขึ้น ซึ่งจะทำให้อัตราการเคลื่อนที่ของขอบเกรนเพิ่มขึ้น และเนื่องจากรูพรุนมีการเคลื่อนที่ช้ากว่าขอบเกรนทำให้ขอบเกรนแยกออกจากรูพรุนดังรูปที่ 2.29

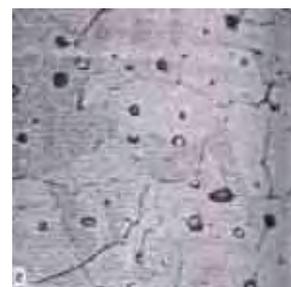
ในทางโลหะวิทยาสามารถจัดแบ่งลักษณะรูพรุนและขอบเกรนเป็นสองลักษณะ นั่นคือการที่รูพรุนปรากฏ ณ ตำแหน่งขอบเกรน ดังรูปที่ 2.30 (ก) ซึ่งจะทำให้เกิดการแน่นตัวโดยพลังงานของระบบลดต่ำลงเพราะรูพรุนช่วยลดพื้นที่ของขอบเกรน และลักษณะที่รูพรุนและขอบเกรนแยกกัน ดังรูปที่ 2.30 (ข) ส่งผลต่อพลังงานของระบบที่เพิ่มขึ้นและทำให้ไม่เกิดการแน่นตัว ดังนั้นการแยกตัวของรูพรุนกับขอบเกรนจึงเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อความหนาแน่นสุดท้ายของชิ้นงานที่ผ่านการเผาผนึกแล้ว ด้วยเหตุนี้การเผาผนึกจึงควรที่จะอยู่ภายใต้การควบคุมการให้ความร้อนและเวลาในการเผาผนึกให้ถูกต้อง



(ก)

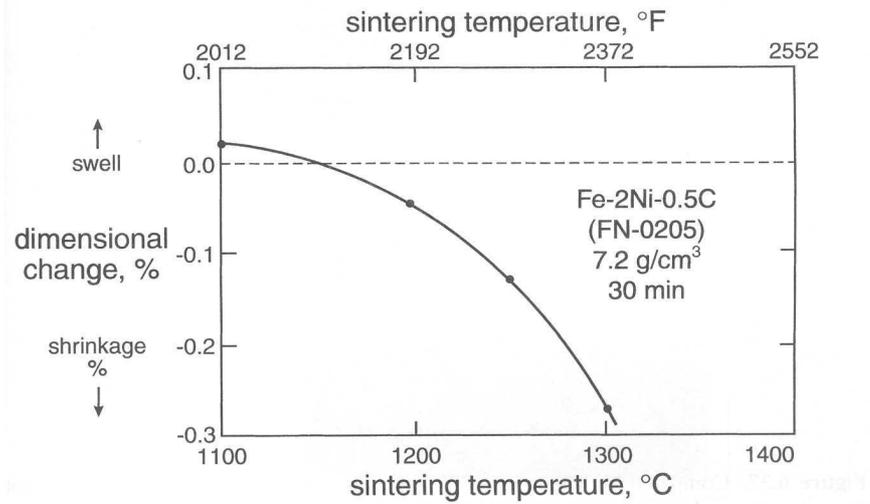


(ข)

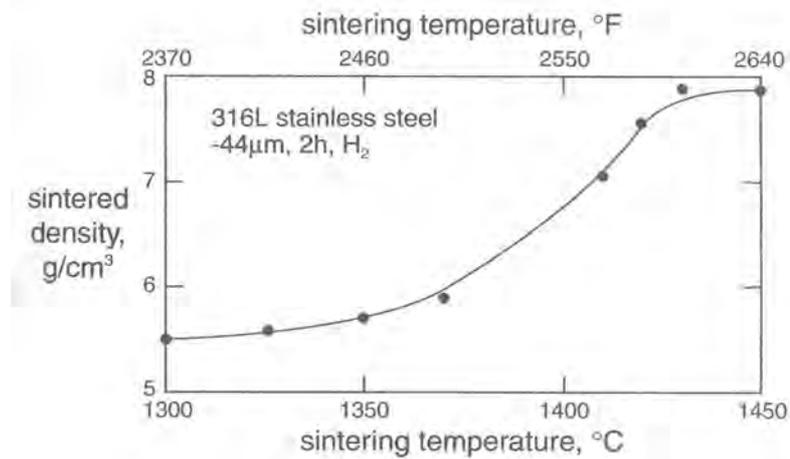


(ค)

รูปที่ 2.27 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานพลาเดียมซึ่งผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิ (ก) 744 (ข) 950 และ (ค) 1400 องศาเซลเซียส พบว่าขนาดเกรนและรูพรุนมีความเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น [14]

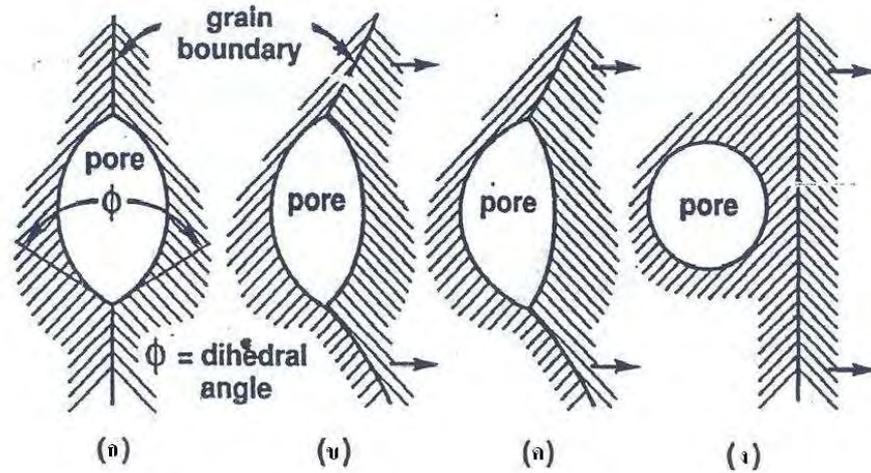


(ก)

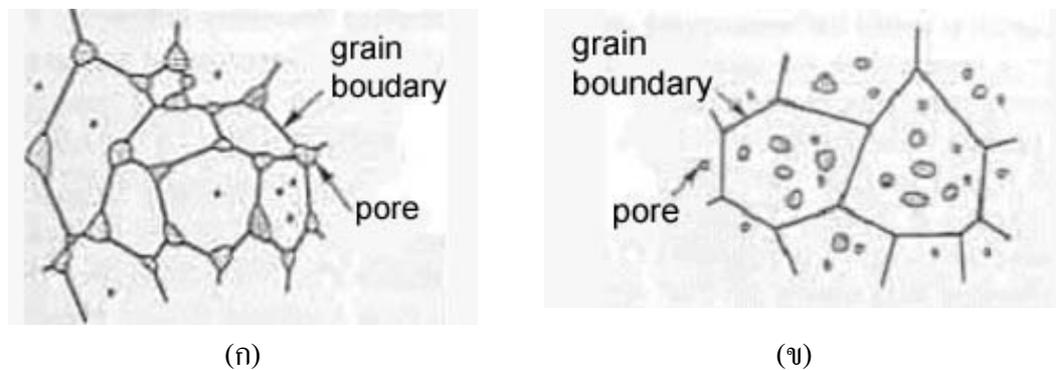


(ข)

รูปที่ 2.28 ผลของอุณหภูมิเผาผนึกต่อ (ก) การเปลี่ยนแปลงขนาดของชิ้นงาน Fe-2Ni-0.5C (ข) การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นหลังเผาผนึกของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 316L ที่ผ่านการฉีดขึ้นรูป [13]



รูปที่ 2.29 ลำดับขั้นการแยกตัวของรูพรุน และการเปลี่ยนแปลงลักษณะรูพรุนเป็นทรงกลม (ก) รูพรุน ณ ตำแหน่งขอบเกรนซึ่งมีมุม Dihedral ระหว่างของแข็ง-ไอที่สมดุล (ข) และ (ค) การโตของเกรนที่ลากรูพรุนไปด้วย และ (ง) รูพรุนแยกตัวเนื่องจากขอบเกรนถอนตัว [14]



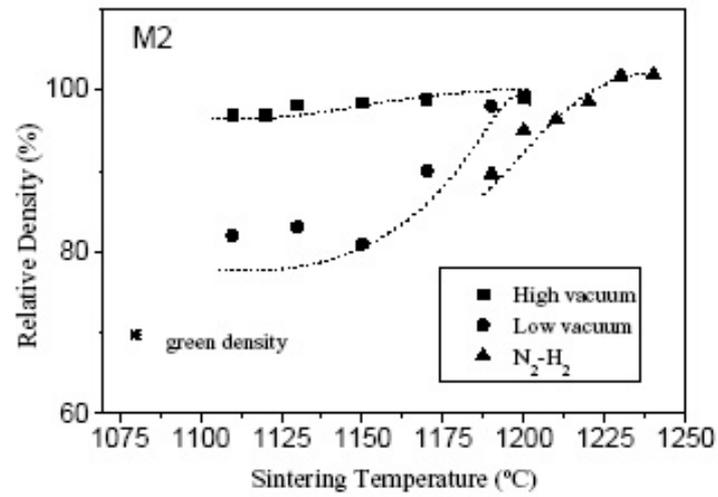
รูปที่ 2.30 การจัดแบ่งลักษณะรูพรุนและขอบเกรนเป็น 2 ลักษณะ คือ (ก) รูพรุนอยู่บริเวณขอบเกรนทำให้เกิดการแน่นตัว (ข) รูพรุนและขอบเกรนแยกกันทำให้ไม่เกิดการแน่นตัว [15]

จากผลของปัจจัยการเผาผลาญได้มีรายงานการวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทดลองเผาผลาญวัสดุต่างๆ ภายใต้บรรยากาศ อุณหภูมิ และเวลาในการเผาผลาญที่แตกต่างกัน ได้แก่ งานวิจัยของ Varez และคณะ [17] ซึ่งทำการศึกษาการเผาผลาญชิ้นงานชนิดขึ้นรูปเหล็กกล้าความเร็วรอบสูง T15 และ M2 ซึ่งมีองค์ประกอบทางเคมีดังตารางที่ 2.4 ภายใต้บรรยากาศเผาผลาญแบบสูญญากาศระดับสูง ( $10^{-3}$  ปาสกาล) สูญญากาศระดับต่ำ (0.1-1 ปาสกาล) และก๊าซผสมของไนโตรเจน 95 เปอร์เซ็นต์และไฮโดรเจน 5 เปอร์เซ็นต์ โดยทำการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิเผาผลาญต่างๆ พบว่า วัสดุเหล็กกล้าความเร็วรอบสูงทั้งสองชนิดที่เผาผลาญภายใต้บรรยากาศสูญญากาศระดับสูงจะมีความหนาแน่นหลังเผาผลาญสูงตั้งแต่อุณหภูมิเผาผลาญต่ำ ดังรูปที่ 2.31

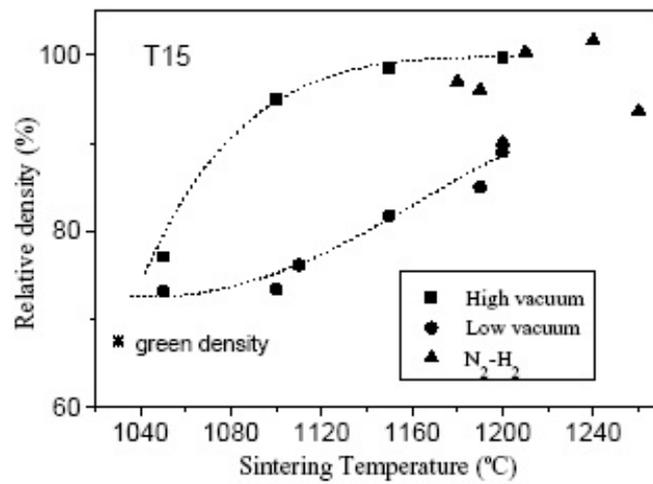
ตารางที่ 2.4 องค์ประกอบทางเคมีของเหล็กกล้าความเร็วรอบสูงชนิด M2 และ T15

| เหล็กกล้า<br>ความเร็วรอบสูง | ธาตุองค์ประกอบ (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) |      |      |      |      |      |      |      |
|-----------------------------|--|------|------|------|------|------|------|------|
|                             | C                                      | Cr   | W    | Mo   | V    | Si   | Mn   | Co   |
| M2                          | 0.84                                   | 3.97 | 6.54 | 4.81 | 1.95 | 0.35 | 0.36 | -    |
| T15                         | 1.5                                    | 4.5  | 12.5 | 0.5  | 5.0  | 0.4  | 0.4  | 4.75 |

ทั้งนี้การเผาผลาญภายใต้บรรยากาศสูญญากาศทำให้เกิดคาร์บอนตกค้างในปริมาณมากซึ่งเป็นสาเหตุให้อุณหภูมิการแข็งตัวลดต่ำลง และการเผาผลาญภายใต้บรรยากาศที่มีไนโตรเจนนั้นจะมีผลให้อุณหภูมิการแข็งตัวเพิ่มขึ้น ดังนั้นชิ้นงานที่ถูกเผาผลาญภายใต้บรรยากาศก๊าซผสมของไนโตรเจน 95 เปอร์เซ็นต์และไฮโดรเจน 5 เปอร์เซ็นต์ จะเกิดการแข็งตัวช้ากว่าชิ้นงานเผาผลาญภายใต้บรรยากาศอื่นๆ นอกจากการศึกษาสมบัติทางกายภาพแล้วทีมงานยังได้ทำการทดสอบสมบัติด้านความแข็งซึ่งให้ผลสอดคล้องกัน นั่นคือชิ้นงานที่เผาผลาญภายใต้บรรยากาศสูญญากาศระดับสูงจะมีค่าความแข็งสูงที่สุดในงานวิจัยฉบับนี้ได้แสดงการพัฒนาการของโครงสร้างทางจุลภาคที่เปลี่ยนแปลงไปกับอุณหภูมิเผาผลาญ โดยเมื่ออุณหภูมิเผาผลาญต่ำจะทำให้ผลิตภัณฑ์คาร์ไบด์  $M_6C$  มีลักษณะเป็นเม็ดกลมกระจายทั่วไป (ดังรูปที่ 2.32 (ก)) เมื่ออุณหภูมิเผาผลาญสูงขึ้นคาร์ไบด์ดังกล่าวมีการเปลี่ยนแปลงเป็นแท่ง ซึ่งเป็นโครงสร้างที่ไม่เสถียรของ  $M_2C$  และ  $M_3C$  (ดังรูปที่ 2.32 (ข)) และเมื่อถึงอุณหภูมิเผาผลาญ 1200 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นจุดสิ้นสุดของอุณหภูมิเผาผลาญนั้น ลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคเกิดเป็นเกรนขนาดใหญ่ (ดังรูปที่ 2.32 (ค)) โดยมีคาร์ไบด์ชนิด  $M_4C_3$  ปรากฏ ณ ตำแหน่งขอบเกรน

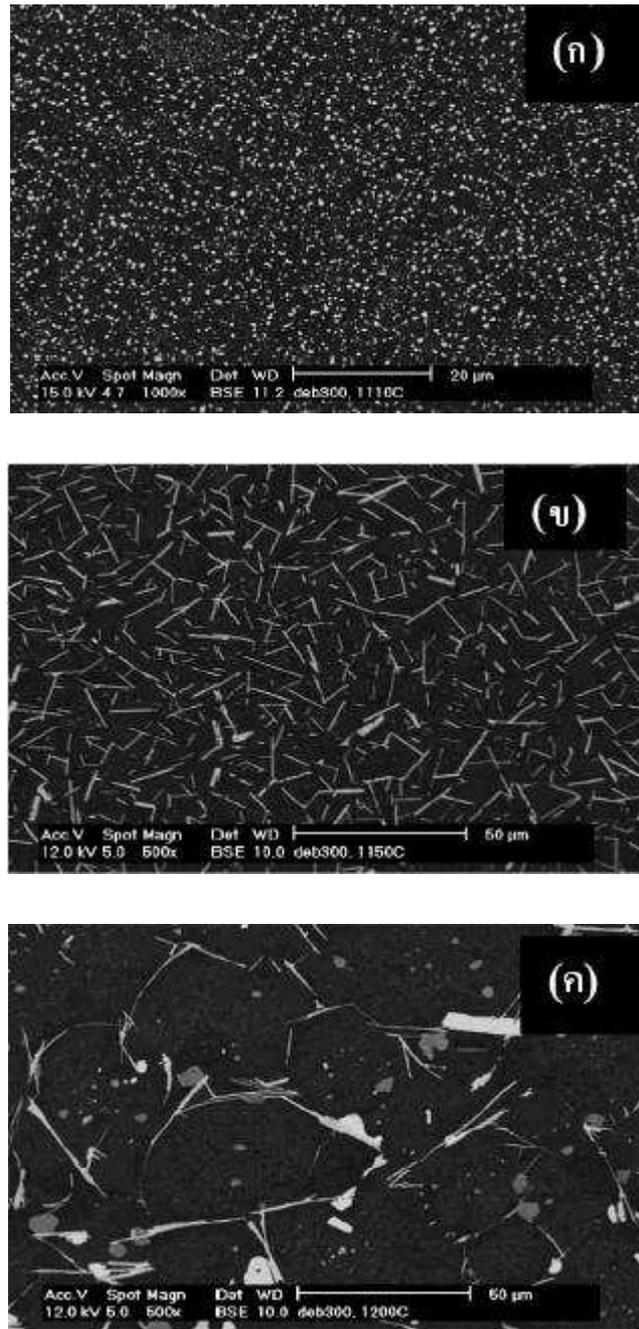


(ก)



(ข)

รูปที่ 2.31 ผลของอุณหภูมิและบรรยากาศในการเผาขึ้นงาน (ก) M2 และ (ข) T15 [17]



รูปที่ 2.32 ลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงาน M2 ซึ่งเผาพริกภายใต้บรรยากาศ  
 สูญญากาศที่อุณหภูมิ (ก) 1110 (ข) 1150 และ (ค) 1200 องศาเซลเซียส [17]

## 2.5 เหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 17-4PH

โดยทั่วไปเหล็กกล้าไร้สนิมประกอบด้วยธาตุหลักคือ เหล็ก และ โครเมียม (ตั้งแต่ 11 เปอร์เซ็นต์ขึ้นไป) ทำให้มีสมบัติที่สามารถป้องกันการเกิดสนิม และยังมีธาตุผสมอื่นๆ ที่เติมไปเพื่อเพิ่มสมบัติบางประการอีกด้วย เหล็กกล้าไร้สนิมถูกจัดแบ่งออกเป็น 5 กลุ่ม ตาม โครงสร้างผลึก [18] ได้แก่

- กลุ่มออสเทนนิติก (Austenitic stainless steels) มีโครงสร้างผลึกแบบ Face-centered-cubic (FCC)
- กลุ่มเฟอร์ริติก (Ferritic stainless steels) มีโครงสร้างผลึกแบบ Body-centered-cubic (BCC)
- กลุ่มมาร์เทนซิติก (Martensitic stainless steels) มีโครงสร้างผลึกแบบ Body-centered-tetragonal (BCT)
- กลุ่มดูเพล็กซ์ (Duplex stainless steels) มีโครงสร้างผลึกผสมระหว่างออสเทนนิติกและเฟอร์ริติก
- กลุ่มชุบแข็งแบบตกผลึก (Precipitation-hardenable (PH) stainless steels) มีโครงสร้างแบบกึ่งออสเทนนิติก (Semi-austenitic) หรือมาร์เทนซิติก

เหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 17-4PH เป็นเหล็กกล้าที่จัดอยู่ในเหล็กกล้าประเภทชุบแข็งแบบตกผลึก หรือเหล็กกล้าประเภทที่สามารถเพิ่มความแข็งและความแข็งแรงโดยการทำให้เกิดการตกผลึกของธาตุผสม สำหรับเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 17-4PH ประกอบด้วยธาตุหลักคือ เหล็ก โครเมียม นิกเกิล และธาตุอื่นๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 องค์ประกอบทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 17-4PH [18]

| ปริมาณสูงสุดโดยน้ำหนักของธาตุองค์ประกอบ (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) |      |      |       |       |             |           |                            |         |
|---|------|------|-------|-------|-------------|-----------|----------------------------|---------|
| C   | Mn   | Si   | P     | S     | Cr          | Ni        | Others                     | Fe      |
| 0.07  | 1.00 | 1.00 | 0.040 | 0.030 | 15.50-17.50 | 3.00-5.00 | 0.15-0.45 Nb; 3.00-5.00 Cu | Balance |

จากธาตุผสมตามตารางที่ 2.5 เห็นได้ว่าเหล็กกล้าชนิด 17-4PH มีคาร์บอนผสมอยู่เพียงไม่เกิน 0.07 เปอร์เซ็นต์ ส่งผลให้เหล็กกล้าชนิดนี้มีความเหนียว และความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนได้ดี แต่มีข้อด้อยคือสามารถต้านทานการเสียดสีต่ำ ในกรณีที่ต้องการเพิ่มความแข็งและความแข็งแรงของโลหะชนิดนี้กระทำได้โดยการทำ Solution annealing และ Aging เพื่อทำให้เกิดการตกผลึกของทองแดง

### 2.5.1 ประโยชน์ใช้งาน

เนื่องจากเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 17-4PH เป็นเหล็กกล้าซึ่งมีสมบัติสามารถต้านทานการกัดกร่อนได้อย่างดีเยี่ยม นอกจากนี้ยังมีความแข็งแรงและความเหนียวสูง ดังนั้นจึงนิยมนำไปใช้งานด้าน [19] อุปกรณ์สำหรับอุตสาหกรรมปิโตรเลียม ได้แก่ ชิ้นส่วนวาล์ว ชิ้นส่วนยานอวกาศ ข้อเหวี่ยงปั๊ม ส่วนประกอบของเตาปฏิกรณ์ปรมาณู เกียร์ อุปกรณ์บัดเชื่อมกระดาศ ส่วนประกอบซีปนาวุธ และอุปกรณ์การแพทย์ เป็นต้น

จากการศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่กล่าวแล้วข้างต้น พบว่าวิธีการกำจัดตัวประสานและปัจจัยในการเผาผลาญต่างส่งผลต่อสมบัติของชิ้นงานหลังเสร็จสิ้นกระบวนการผลิต งานวิจัยนี้เลือกศึกษาการกำจัดตัวประสานด้วยความร้อน ในรูปแบบของการให้ความร้อนภายใต้อากาศ และภายใต้บรรยากาศควบคุม เนื่องจากเป็นวิธีที่ไม่ซับซ้อนและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ตลอดจนเหมาะสมกับสมรรถนะของอุปกรณ์ที่มีอีกด้วย ในส่วนของการเผาผลาญจะศึกษาถึงปัจจัยของอุณหภูมิและบรรยากาศในการเผาผลาญ เนื่องจากปัจจัยทั้งสองประการต่างส่งผลต่อประสิทธิภาพของการเกิดพันธะระหว่างอนุภาคผง รวมถึงโครงสร้างทางจุลภาคและสมบัติเชิงกลของชิ้นงาน ทั้งนี้ในงานวิจัยนี้ไม่สนใจศึกษาปัจจัยของเวลาในการเผาผลาญ เนื่องจากได้รับคำแนะนำจากผู้ผลิตเม็ดส่วนผสมตั้งต้นให้ใช้เวลาในการเผาผลาญผงเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดนี้เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

## บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดของวัตถุดิบที่ใช้ในการทดลอง อุปกรณ์และเครื่องมือทดสอบ ขั้นตอนการทดลอง โดยเริ่มจากการทดลองหาสภาวะในการฉีดขึ้นงานเพื่อให้ได้ชิ้นงานที่ดี การเผาได้ตัวประสานและการเผาผนึกทั้งแบบขั้นตอนเดียวและสองขั้นตอน สภาวะการอบชุบขึ้นงาน ตลอดจนกระบวนการทดสอบชิ้นงาน ได้แก่ การทดสอบความหนาแน่น การทดสอบแรงดึง การทดสอบความแข็ง การทดสอบหาค่าประกอบทางเคมี และการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาค โดยมีรายละเอียดต่างๆ ดังต่อไปนี้

### 3.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

วัสดุที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วยเม็ดส่วนผสมตั้งต้นและก๊าซที่ใช้ในการเผาผนึกซึ่งมีรายละเอียดของส่วนประกอบดังนี้

#### 3.1.1 เม็ดส่วนผสมตั้งต้น (Feedstock)

##### 3.1.1.1 ผงโลหะ

ผงโลหะที่เป็นส่วนประกอบของเม็ดส่วนผสมตั้งต้นเป็นผงเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 17-4PH ซึ่งผลิตด้วยกระบวนการพ่นด้วยน้ำ (Water atomization) จากบริษัท ATMIX CORPORATION ประเทศญี่ปุ่น ขนาดเฉลี่ยของอนุภาคผงประมาณ 9.73 ไมโครเมตร มีความหนาแน่นผง 7.86 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และมีองค์ประกอบทางเคมี (ซึ่งได้จากผลการวิเคราะห์ของบริษัท) ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิม 17-4PH

| (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) |       |       |       |       |       |        |       |       |       |       | (ppm) |
|-------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|
| C                       | Si    | Mn    | P     | S     | Ni    | Cr     | Mo    | Cu    | Co    | Nb    | O     |
| 0.050                   | 0.800 | 0.780 | 0.019 | 0.004 | 4.240 | 15.600 | 0.020 | 3.230 | 0.060 | 0.300 | 3300  |

### 3.1.1.2 ตัวประสาน

ตัวประสานที่เป็นส่วนผสมอยู่ในเม็ดส่วนผสมตั้งต้น ผลิตโดยบริษัท Mold Research Co., Ltd. ซึ่งประกอบด้วยสารประกอบที่เป็นส่วนผสมหลักได้แก่ พอลิอะซิเตด (Polyacetal) จี๊ฟี่พาราฟิน (Paraffin wax) กรดสเตียริก (Stearic acid) และส่วนผสมอื่นๆ ซึ่งตัวประสานชนิดนี้มีความหนาแน่น 0.9604 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

ผงเหล็กกล้าและตัวประสานถูกผสมและตัดเป็นเม็ดส่วนผสมตั้งต้นพร้อมลีด ดังรูปที่ 3.1 ด้วยอัตราส่วน ผงโลหะต่อตัวประสานเท่ากับ 66.11:33.89 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร หรือ 92.47:7.53 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก



รูปที่ 3.1 เม็ดส่วนผสมตั้งต้นเหล็กกล้าไร้สนิม 17-4PH

### 3.1.2 ก๊าซ

ก๊าซที่ใช้ในการเผาไล่ตัวประสานแบบต่อเนื่องด้วยการเผาผนึกคือก๊าซไนโตรเจน 99.99 เปอร์เซ็นต์ และก๊าซที่ใช้ในขั้นตอนการเผาผนึกคือก๊าซอาร์กอน 99.99 เปอร์เซ็นต์

## 3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

### 3.2.1 อุปกรณ์เตรียมชิ้นงาน

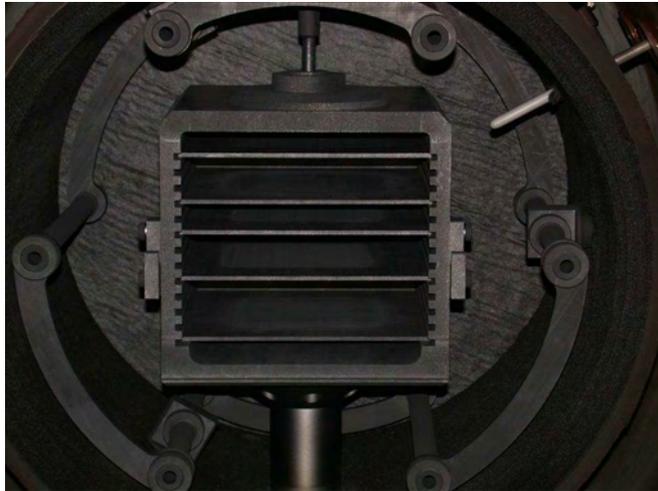
1. เครื่องฉีดพลาสติก (Injection Molding) ของบริษัท NISSEI รุ่น PS 60E9ASE (รูปที่ 3.2) ใช้สำหรับฉีดขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบ
2. เตาสุญญากาศ ของบริษัท SHIMADZU รุ่น VHL20/20/23 (รูปที่ 3.3) ใช้ในการกำจัดตัวประสานและเผาผนึก
3. เตาเผาไล่ตัวประสาน (Debinding furnace) ของบริษัท FINE รุ่น SHKS-2H (รูปที่ 3.4) ใช้สำหรับเผากำจัดตัวประสานด้วยความร้อนภายใต้บรรยากาศอากาศ



รูปที่ 3.2 เครื่องฉีดขึ้นรูปชิ้นงานกรีน



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.3 เตาสัญญากาศ SHIMADZU (ก) รูปชุดเตาสัญญากาศและตู้ระบบควบคุม (ข) บริเวณภายในของกล่องวางชิ้นงาน



รูปที่ 3.4 เตาเผาทำจัดตัวประสาน (FINE furnace)

### 3.2.2 อุปกรณ์ทดสอบและวิเคราะห์

1. ดิจิตอลเวอร์เนียล ของบริษัท Mitutoyo รุ่น Digimatic Caliper มีกำลังแยกแยะ 0.01 มิลลิเมตร
2. เครื่องตรวจสอบชิ้นงานด้วยการฉายรังสี (Radio Scopic Inspection System) ของบริษัท GILARDONI รุ่น RAGGI X (รูปที่ 3.5) เพื่อใช้ในการตรวจสอบโพรงอากาศซึ่งเป็นข้อบกพร่องที่ไม่สามารถตรวจสอบได้ด้วยสายตาภายในชิ้นงานกรีน
3. ชุดทดสอบความหนาแน่น (Specific Gravity Measuring KIT) ของบริษัท A&D รุ่น AD-1653
4. เครื่องทดสอบแรงดึง ของบริษัท Instron รุ่น 8801 รูปที่ 3.6 (ก)
5. เครื่องทดสอบความแข็ง ของบริษัท Instron รุ่น Wolpert 930/250 รูปที่ 3.6 (ข)
6. เครื่องทดสอบหาปริมาณองค์ประกอบทางเคมี ของบริษัท Thermo ARL รุ่น ARL 3460
7. เครื่องทดสอบหาปริมาณออกซิเจน ของบริษัท LECO รุ่น N&O TC-436 DR มีความสามารถหาปริมาณออกซิเจนและไนโตรเจนในระดับ 0.5 ppm.
8. เครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน ของบริษัท Bruker รุ่น D8-Advance
9. กล้องจุลทรรศน์ชนิดสะท้อนแสง ของบริษัท Nikon รุ่น Eclipse E200
10. เครื่องขัดชิ้นงาน ของบริษัท Struers รุ่น LaboPol-25
11. เครื่องตัดชิ้นงาน ของบริษัท Struers รุ่น Discotom-5
12. เครื่องขึ้นรูปเรื่อร้อน (Hot mount) ของบริษัท Struers รุ่น LaboPress-3



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.5 เครื่องตรวจสอบรูพรุนภายในชิ้นงานโดยการฉายรังสี (ก) ห้องวางชิ้นงาน (ข) ชุดควบคุม และแสดงผล



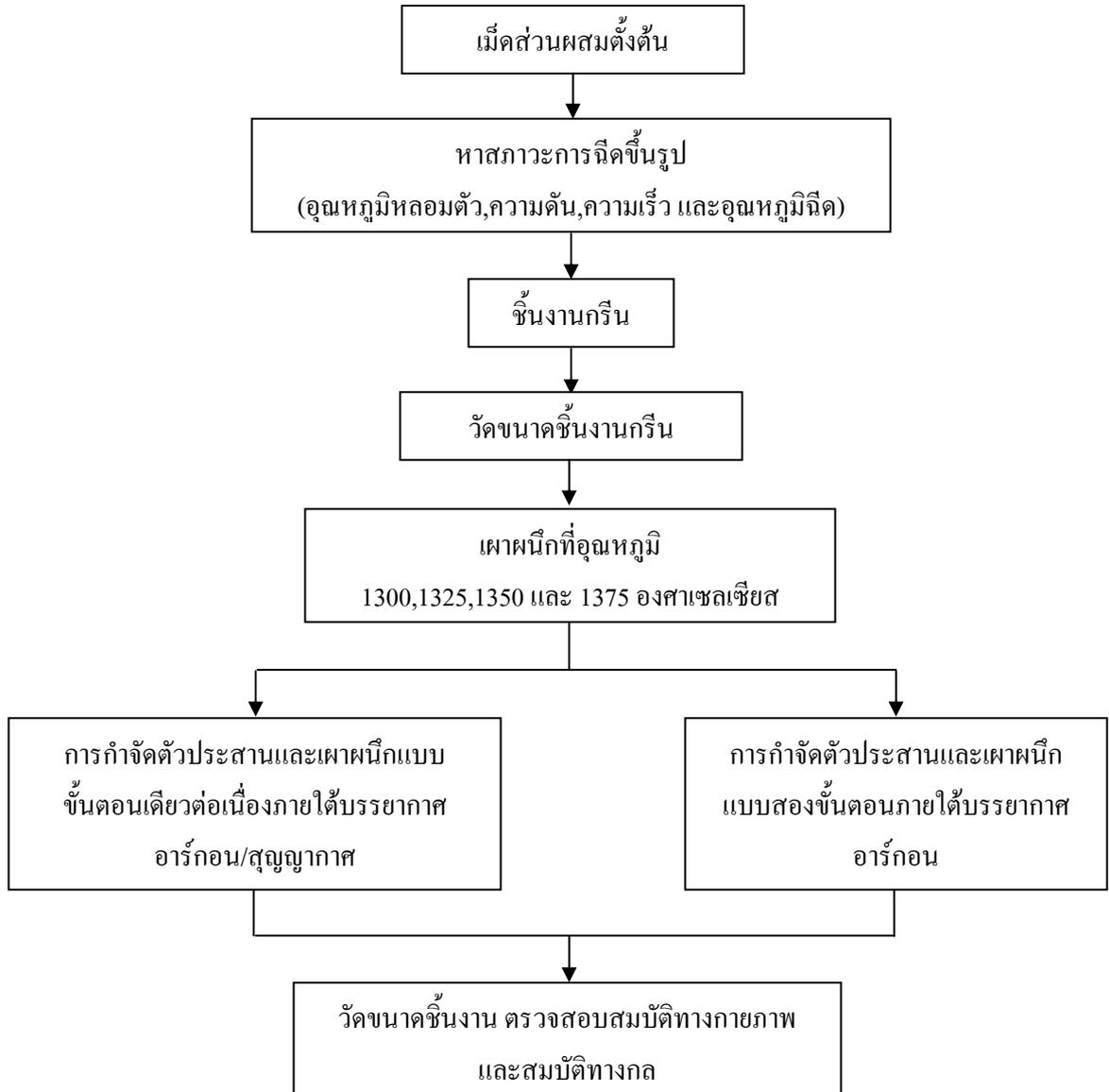
(ก)



(ข)

รูปที่ 3.6 (ก) ชุดทดสอบแรงดึง (ข) ชุดทดสอบความแข็ง

### 3.3 ขั้นตอนการทดลอง



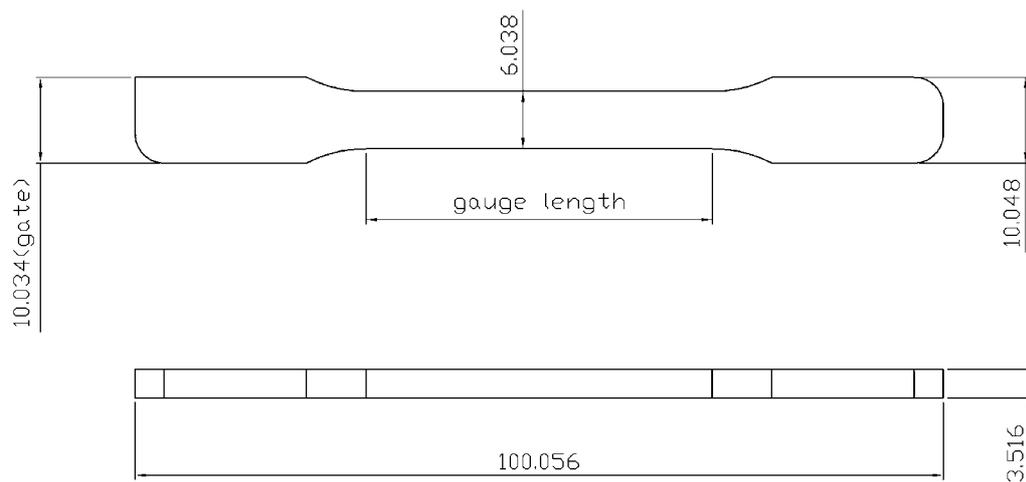
รูปที่ 3.7 แผนภาพแสดงขั้นตอนการทดลอง

จากแผนภาพแสดงขั้นตอนการทดลองข้างต้น จะมีรายละเอียดของการดำเนินการในขั้นตอนต่างๆ ดังต่อไปนี้

### 3.3.1 การเตรียมชิ้นงานกรีน (Tensile test bar)

นำเม็ดส่วนผสมตั้งต้นทดสอบหาอุณหภูมิหลอมเหลวของตัวประสานด้วยเทคนิคดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential scanning calorimeter, DSC) ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน ด้วยอัตราการให้ความร้อน 20 องศาเซลเซียสต่อนาที เพื่อนำไปใช้ในการตั้งค่าอุณหภูมิสกรูของเครื่อง Injection molding

ทำการทดลองปรับเปลี่ยนอุณหภูมิของสกรูในช่วง 150–180 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแม่พิมพ์ 30–65 องศาเซลเซียส ความเร็ว 20–60 มิลลิเมตรต่อวินาที และความดันในการฉีด 10–80 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เพื่อหาสภาวะในการฉีดให้ได้ชิ้นงานทดสอบแรงดึงที่เต็มแบบแม่พิมพ์ซึ่งมีลักษณะดังรูปที่ 3.8 ทั้งนี้ชิ้นงานที่ได้จากการฉีดจะพิจารณาลักษณะภายนอกด้วยสายตา (Visual inspection) โดยไม่มีรอยแตกร้าว ครีบ หรือริ้วรอยที่สามารถมองเห็นได้ด้วยสายตา และตรวจสอบหารูพรุนภายในชิ้นงาน โดยเครื่องตรวจสอบชิ้นงานด้วยการฉายรังสี เพื่อคัดแยกชิ้นงานที่มีรูพรุนทั้ง และนำชิ้นงานที่ดีและปราศจากรูพรุนทำการทดลองขั้นต่อไป ดังนี้



รูปที่ 3.8 ลักษณะชิ้นงานทดสอบแรงดึง

### 3.3.2 การกำจัดตัวประสานและการเผาผนึก

ชิ้นงานกรีนที่ผ่านการคัดเลือกจะถูกนำมากำจัดตัวประสานและเผาผนึกดังนี้

#### 3.3.2.1 การกำจัดตัวประสานและการเผาผนึกแบบขั้นตอนเดียว โดยเตาสัญญากาศ

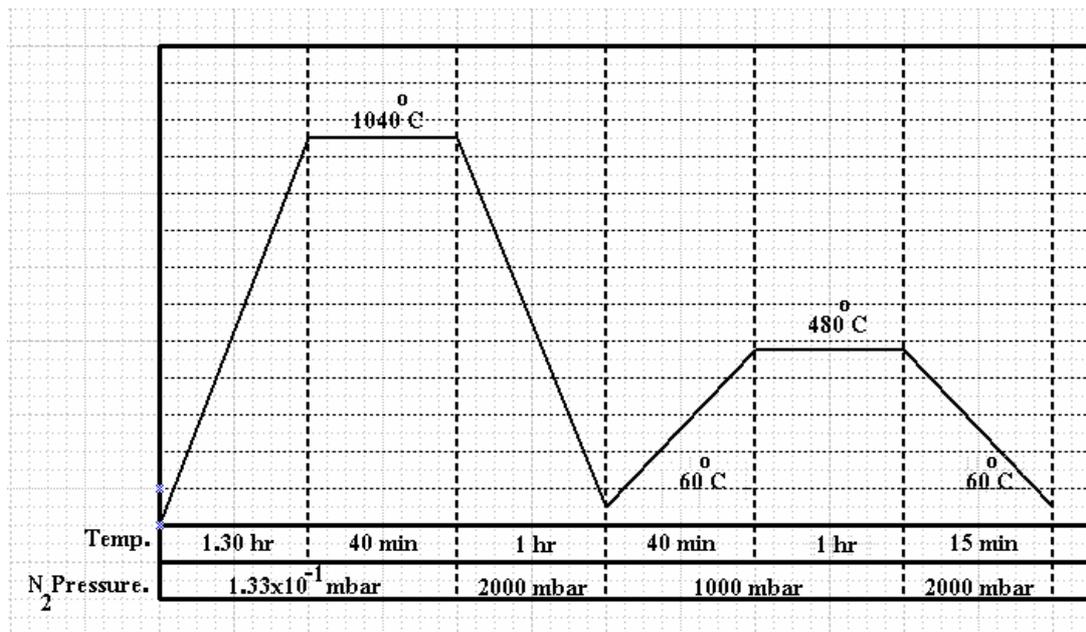
ชิ้นงานกรีนที่ผ่านการวัดขนาดถูกแบ่งเป็น 2 ส่วน เพื่อเผากำจัดตัวประสานด้วยกระบวนการทางความร้อนแบบขั้นตอนเดียวต่อเนื่องด้วยการเผาผนึก โดยเตาสัญญากาศ SHIMADZU ที่ปรับเปลี่ยนสภาวะในการเผาผนึก 2 แบบ คือ เผาผนึกด้วยบรรยากาศอาร์กอน และแบบสุญญากาศ โดยทั้ง 2 แบบใช้สภาวะในการเผากำจัดตัวประสานเหมือนกันคือ กำจัดตัวประสานภายใต้สภาวะไนโตรเจน 3 ลิตรต่อนาที เป็นเวลา 19 ชั่วโมง และต่อเนื่องด้วยการเผาผนึก ภายใต้บรรยากาศอาร์กอน 3 ลิตรต่อนาที หรือบรรยากาศสุญญากาศประมาณ  $10^{-4}$  ปาสคาล เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วปล่อยให้เย็นตัวจนถึงอุณหภูมิห้องภายในเตา ทั้งนี้ในการเผาผนึกทั้ง 2 บรรยากาศ จะปรับเปลี่ยนอุณหภูมิเผาผนึกที่ 1300, 1325, 1350 และ 1375 องศาเซลเซียส โดยอุณหภูมิดังกล่าวนี้จะทำการปรับเปลี่ยนและบันทึกค่าจากหน้าจอแสดงผลของเตาเผาผนึก SHIMADZU

#### 3.3.2.2 การกำจัดตัวประสานและการเผาผนึกแบบสองขั้นตอน

นำชิ้นงานกรีนที่ผ่านการวัดขนาด เผากำจัดตัวประสานด้วยเตา FINE ซึ่งเป็นเตาที่ให้ความร้อนภายใต้บรรยากาศอากาศ โดยการเผากำจัดตัวประสานจะใช้อุณหภูมิสูงสุดที่ 320 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 18 ชั่วโมง เพื่อกำจัดตัวประสานบางตัวและยังคงเหลือตัวประสานบางส่วนภายในชิ้นงานเพื่อคงความแข็งแรงของชิ้นงานก่อนเข้าสู่ขั้นตอนการเผาผนึก จากนั้นจึงปล่อยให้ชิ้นงานเย็นตัวจนถึงอุณหภูมิห้องภายในเตา แล้วจึงเคลื่อนย้ายชิ้นงานสู่เตา SHIMADZU เพื่อเผากำจัดตัวประสานส่วนที่เหลือภายใต้สภาวะไนโตรเจน 3 ลิตรต่อนาที เป็นเวลา 10 ชั่วโมง และต่อเนื่องด้วยการเผาผนึกภายใต้บรรยากาศอาร์กอน 3 ลิตรต่อนาที เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยปรับเปลี่ยนอุณหภูมิเผาผนึกเป็น 1300, 1325, 1350 และ 1375 องศาเซลเซียส

### 3.3.3 การอบชุบชิ้นงานหลังการเผาผิวนิก

ชิ้นงานกรีนที่ผ่านการกำจัดตัวประสานและเผาผิวนิกแล้ว จะนำสู่การอบชุบเพิ่มสมบัติเชิงกลในแง่ของความแข็งแรงและความสามารถในการต้านทานแรงดึง เพื่อให้เกิดการตกตะกอนของธาตุทองแดง ดังนั้นในงานวิจัยฉบับนี้จึงได้ทดลองอบชุบชิ้นงานตัวอย่างเพื่อตรวจสอบในเบื้องต้นว่าการเผาผิวนิกชิ้นงานด้วยอุณหภูมิต่างๆ ข้างต้น หรือการเผาผิวนิกภายใต้บรรยากาศและสภาวะที่แตกต่างกันจะส่งผลต่อค่าสมบัติเชิงกลของชิ้นงานหรือไม่ โดยในการทดลองจะทำการอบชุบชิ้นงานตัวอย่างตามมาตรฐาน ASTM A564 Type 630 ด้วยเตาอบชุบ SCHMETZ ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน ซึ่งแสดงเวลาและอุณหภูมิดังรายละเอียดในรูปที่ 3.9

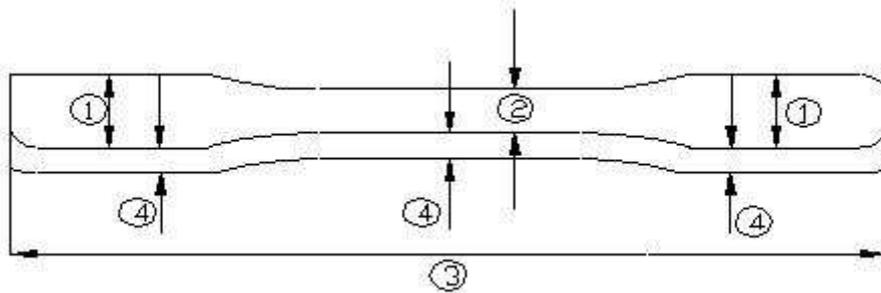


รูปที่ 3.9 อุณหภูมิและระยะเวลาของการอบชุบเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 17-4 PH ตามมาตรฐาน ASTM A564 Type 630

### 3.3.4 การวัดขนาดชิ้นงานเพื่อศึกษาการหดตัว

ชิ้นงานกรีนที่ปราศจากรูพรุนและชิ้นงานที่ผ่านการเผาผนึกจะนำมาวัดขนาดด้วยคิจิตอลเวอร์เนียร์ ณ ตำแหน่งต่างๆ ดังรูปที่ 3.10 เพื่อศึกษาอัตราการหดตัวของชิ้นงานก่อนและหลังเผาผนึก ทั้งนี้ขนาดที่วัดได้จะถูกนำมาคำนวณเป็นอัตราการหดตัวดังสมการที่ 3.1

$$\text{เปอร์เซ็นต์การหดตัว} = \frac{(\text{ขนาดชิ้นงานก่อนเผาผนึก} - \text{ขนาดชิ้นงานหลังเผาผนึก})}{\text{ขนาดชิ้นงานก่อนเผาผนึก}} \times 100 \quad (3.1)$$



รูปที่ 3.10 การวัดชิ้นงานทดสอบแรงดึง ณ ตำแหน่งต่างๆ โดยตำแหน่งที่ 1 คือความกว้างของกริป ตำแหน่งที่ 2 คือความกว้างของแกจ ตำแหน่งที่ 3 คือความยาวของชิ้นงาน และตำแหน่งที่ 4 คือความหนาของชิ้นงาน

### 3.3.5 การทดสอบสมบัติของชิ้นงานที่ผ่านการฉีดขึ้นรูป

#### 3.3.5.1 ความหนาแน่นของชิ้นงานกรีนและชิ้นงานหลังเผาประสาน

การวัดความหนาแน่นของชิ้นงานทดสอบก่อนและหลังการเผาผืนึก ใช้หลักการการแทนที่น้ำของ Archimedes โดยชั่งน้ำหนักชิ้นงานตัวอย่างในอากาศเทียบกับการชั่งน้ำหนักในน้ำดังสมการที่ 3.2

$$\rho = \frac{A}{A - B} \times (\rho_0 - d) + d \quad (3.2)$$

$\rho$  = ความหนาแน่นของชิ้นงาน (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)

$A$  = น้ำหนักชิ้นงานในอากาศ (กรัม)

$B$  = น้ำหนักชิ้นงานในน้ำ (กรัม)

$\rho_0$  = ความหนาแน่นน้ำ (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)

$d$  = ความหนาแน่นอากาศ (approx. 0.001 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)

#### 3.3.5.2 ความหนาแน่นสัมพัทธ์

ความหนาแน่นสัมพัทธ์เป็นการเปรียบเทียบความหนาแน่นของชิ้นงานกับความหนาแน่นทางทฤษฎีของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 17-4PH ซึ่งเท่ากับ 7.78 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ดังสมการที่ 3.3

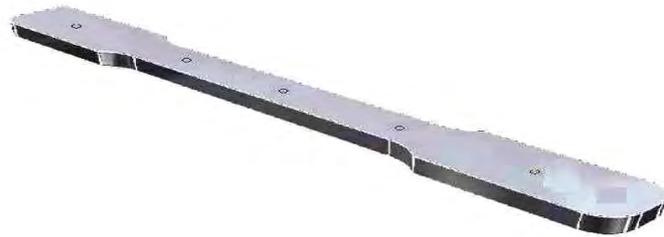
$$\text{ความหนาแน่นสัมพัทธ์} = \frac{\text{ความหนาแน่นที่วัดได้จากเทคนิค Archimedes}}{\text{ความหนาแน่นทางทฤษฎีของเหล็กกล้าไร้สนิม 17-4PH}} \quad (3.3)$$

### 3.3.5.3 ความสามารถในการต้านทานแรงดึง

ชิ้นงานที่ผ่านการเผาผนึก ณ สภาวะต่างๆ จะทำการทดสอบแรงดึงด้วยเครื่องทดสอบ Universal Testing Machine ของบริษัท Instron รุ่น 8801 ซึ่งมี Load Cell ขนาด 100 กิโลนิวตัน ในลำดับขั้นตอนของการทดสอบนั้นจะกำหนดความเร็วในการทดสอบเท่ากับ 5 มิลลิเมตรต่อนาที และใช้ระยะวัด (Gauge length) 25 มิลลิเมตร ตามมาตรฐาน ASTM E8

### 3.3.5.4 ความแข็ง

การทดสอบความแข็งของชิ้นงานหลังเผาผนึก ณ สภาวะต่างๆ จะทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM E18 ด้วยเครื่องทดสอบ Universal Testing Machine ของบริษัท Instron รุ่น Wolpert 930/250 โดยใช้หัวกดเพชรที่มีมุมรวม 120 องศา ที่ปลายของหัวทดสอบ และใช้แรงกด 150 กิโลกรัม ซึ่งเป็นวิธีการทดสอบความแข็งแบบ Rockwell scale C (HRC) ซึ่งเหมาะกับชิ้นงานที่มีความแข็งค่อนข้างสูง โดยระยะห่างระหว่างรอยกดแต่ละรอยไม่ควรต่ำกว่า 3 เท่าของขนาดรอยกดเพื่อไม่ให้มีผลกระทบจากความเครียดตกค้างบริเวณรอบรอยกด โดยแสดงตำแหน่งของรอยกดในการทดสอบความแข็งดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 ลักษณะการกระจายตัวรอยกดของการทดสอบความแข็งทั้งด้านบนและล่างของชิ้นงาน

### 3.3.5.5 การตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาค

ทำการตัดชิ้นงานตัวอย่างที่ได้จากการเผาผนึก ณ สภาวะต่างๆ ตามขวางและขึ้นรูปเรือนร้อน (Hot mount) โดยทำการขัดชิ้นงานด้วยกระดาษทรายเบอร์ 220, 500, 800, 1000, 1200 และ 2400 ตามลำดับ จากนั้นจึงขัดด้วยผ้าสักกะหลาดโดยใช้ผงเพชรขนาด 6, 3 และ 1 ไมโครเมตรตามลำดับ และกัดชิ้นงานด้วยสารละลายกรด Glyceregia ซึ่งได้จากการผสม HCl:glycerol:HNO<sub>3</sub> เป็น 3:2:1 จากนั้นทำการถ่ายรูปโครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์ชนิดสะท้อนแสง

### 3.3.5.6 การตรวจสอบโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชัน

ตัดชิ้นงานตัวอย่างที่ได้จากการเผาผนึก ณ สภาพต่างๆ บริเวณเกจ ความยาวประมาณ 2 เซนติเมตร นำไปติดตั้งบนที่วางชิ้นงานของเครื่องมือทดสอบ XRD ของบริษัท Bruker รุ่น D8-Advance โดยการวิเคราะห์แบบ locked coupled ที่มุม  $2\theta = 40-100^\circ$ , step size  $0.02^\circ$ , scan speed 0.4 sec/step, divergent slit และ antiscattering slit ขนาด 2 มิลลิเมตร โดย x-ray สำหรับการวิเคราะห์คือ  $\text{CuK}\alpha$  ที่มีความยาวคลื่น 1.54 นาโนเมตร ผ่าน โกลเบิลมิลเลอร์ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 40 กิโลโวลต์ และ กระแสไฟฟ้า 40 มิลลิแอมแปร์

### 3.3.5.7 การตรวจสอบหาปริมาณออกซิเจน

การตรวจสอบหาปริมาณออกซิเจนภายในชิ้นงาน จะทำการทดสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์หาปริมาณ ไนโตรเจน/หรือออกซิเจน ของบริษัท LECO รุ่น TC-436 DR โดยใช้เทคนิค Inert gas fusion ซึ่งมี หลักการทำงานคือ ให้ความร้อนแก่ชิ้นงานตัวอย่างภายใต้บรรยากาศก๊าซเฉื่อย (Helium) จนตัวอย่าง หลอมละลายหมด ออกซิเจนในตัวอย่างจะทำปฏิกิริยากับคาร์บอนจากถ้วยใส่ตัวอย่างเกิดเป็นก๊าซ คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และมีไนโตรเจนออกมา ก๊าซอื่นและสิ่งเจือปนจะถูกกำจัดออกไป ก๊าซทั้งสองจะถูกพาเข้าไปที่ตัววัด (Detector) ซึ่งได้ทำการปรับเทียบค่าไว้แล้ว และทำการประมวลผลโดย ไมโครโปรเซสเซอร์ ได้เป็นปริมาณไนโตรเจนและออกซิเจนต่อน้ำหนัก สำหรับชิ้นงานที่ต้องการ วิเคราะห์จะมีขนาดประมาณ 1 กรัม ( $\pm 0.05$  กรัม) และขัดผิวหน้าทุกด้านด้วยกระดาษทรายเพื่อเป็นการทำความสะอาดไม่ให้มีการปนเปื้อน

### 3.3.5.8 การตรวจสอบหาปริมาณธาตุองค์ประกอบ

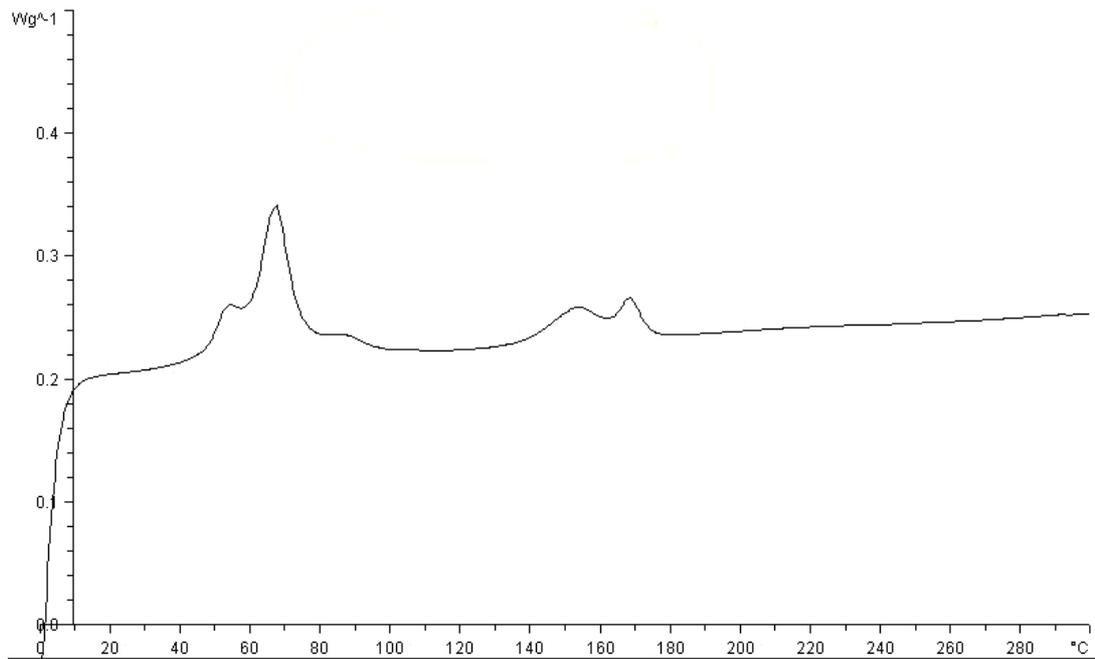
การตรวจสอบหาปริมาณธาตุองค์ประกอบหลังจากชิ้นงานทดสอบได้ผ่านกระบวนการเผาผนึก ณ สภาพเผาผนึกต่างๆ จะทำการตรวจวัดด้วยเทคนิคอิมมิชชันสเปคโตรมิเตอร์โดยเครื่อง Thermo ARL รุ่น ARL 3460

## บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล

ในบทนี้เป็นการแสดงผลการทดลองต่างๆ อาทิเช่น ผลการทดสอบเบื้องต้นเพื่อหาอุณหภูมิหลอมเหลวของตัวประสานในเม็ดส่วนผสมตั้งต้น ผลของการเตรียมชิ้นงานตัวอย่างที่ดีโดยการปรับเปลี่ยนสภาวะในการฉีดขึ้นรูป ผลทางกายภาพ เช่นลักษณะภายนอกและความหนาแน่นของชิ้นงานที่ได้จากกระบวนการกำจัดตัวประสานและการเผาขึ้นแบบขึ้นตอนเดียวต่อเนื่องภายใต้บรรยากาศอาร์กอนหรือบรรยากาศสุญญากาศ และแบบสองขั้นตอนในบรรยากาศอาร์กอน ผลการทดสอบเชิงกลได้แก่ ผลการทดสอบความสามารถในการต้านทานแรงดึง ความแข็ง และผลของการตรวจสอบโครงสร้างผลึก องค์ประกอบทางเคมี และโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานทดสอบที่ได้จากการปรับเปลี่ยนสภาวะต่างๆ ตลอดจนการเปรียบเทียบผลจากการทดลองตามสภาวะข้างต้น

### 4.1 การทดลองหาอุณหภูมิหลอมเหลว

จากการทดลองหาอุณหภูมิหลอมเหลวของเม็ดส่วนผสมตั้งต้นด้วยเทคนิคดีพีเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (DSC) ซึ่งให้ความร้อนด้วยอัตรา 20 องศาเซลเซียสต่อนาที ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน พบว่าอุณหภูมิที่เม็ดส่วนผสมตั้งต้นมีการหลอมเหลวแบ่งเป็น 2 ช่วง ดังภาพที่ 4.1 คือช่วงแรกเม็ดส่วนผสมตั้งต้นบางส่วนเริ่มหลอมเหลวที่อุณหภูมิประมาณ 50-70 องศาเซลเซียส ซึ่ง ณ ช่วงอุณหภูมิดังกล่าวนี้สารประกอบประเภทแวกซ์ รวมถึงกรดสเตียริกซึ่งมีจุดหลอมเหลวต่ำจะเกิดการหลอมเหลวก่อน แต่ทั้งนี้ยังมีส่วนผสมบางส่วนที่ยังไม่หลอมเหลว ดังนั้น ณ ช่วงอุณหภูมินี้จึงไม่สามารถใช้เป็นอุณหภูมิฉีด ทั้งนี้เมื่อการให้ความร้อนดำเนินต่อไปจะปรากฏการหลอมเหลวเป็นช่วงที่ 2 ที่อุณหภูมิ 150-170 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นการหลอมเหลวของสารประกอบพอลิอะซิโตนและส่วนผสมอื่นๆ ที่มีจุดหลอมเหลวสูง และ ณ ช่วงการหลอมเหลวที่สองนี้ พบว่าเม็ดส่วนผสมตั้งต้นหลอมเหลวหมด ดังนั้นในการทดลองหาสภาวะของอุณหภูมิที่ใช้ในการฉีดเพื่อเตรียมชิ้นงานกรีนจึงเลือกทดสอบที่อุณหภูมิหลอมเหลวในช่วงที่สอง โดยจะได้กล่าวอย่างละเอียดในหัวข้อที่ 4.2.1 ต่อไป



รูปที่ 4.1 อุณหภูมิการหลอมเหลวของเม็ดส่วนผสมตั้งต้นด้วยเทคนิค DSC

## 4.2 ผลการเตรียมชิ้นงานโดยการปรับเปลี่ยนสถานะในการฉีด

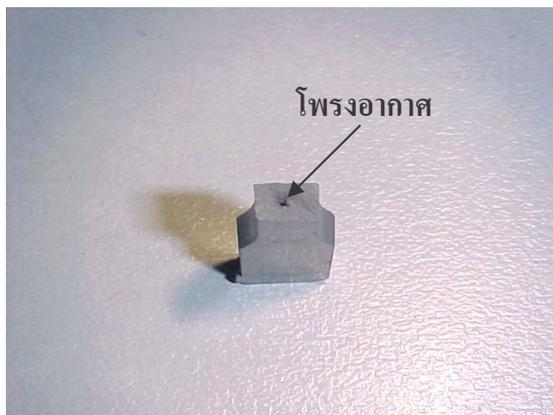
ในขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานกรีนเพื่อเข้าสู่กระบวนการกำจัดตัวประสานและเผาผนึกนั้น จะทำการฉีดขึ้นรูปชิ้นงาน โดยการปรับเปลี่ยนตัวแปรที่เกี่ยวข้องได้แก่ อุณหภูมิหลอมเหลว อุณหภูมิแม่พิมพ์ ความเร็วฉีด ความดันฉีด เพื่อให้ได้ชิ้นงานที่มีลักษณะภายนอกที่ปราศจากข้อบกพร่อง (แสดงตัวอย่างชิ้นงานที่บกพร่องดังรูปที่ 4.2) เช่น การเกิดรอยยวบ รอยแตกร้าว ครีบ หรือการแข็งตัวเร็วเกินไปทำให้ได้งานไม่เต็มแม่พิมพ์ ตลอดจนการเกิดโพรงอากาศภายในชิ้นงานกรีน ซึ่งตรวจพบได้ด้วยเครื่องตรวจสอบชิ้นงานด้วยการฉายรังสีดังรูปที่ 4.3 โดยในการปรับเปลี่ยนตัวแปรดังกล่าวข้างต้นมีรายละเอียดดังนี้



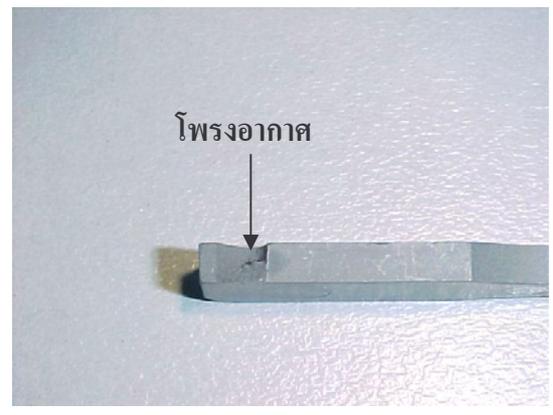
(ก)



(ข)



(ค)

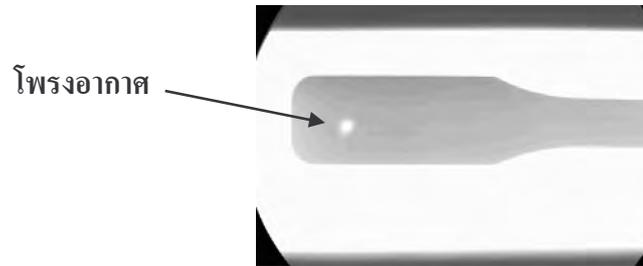


(ง)



(จ)

รูปที่ 4.2 ชิ้นงานที่มีจุดบกพร่องจากการฉีด (ก) ชิ้นงานไม่เต็มแม่พิมพ์ (ข) รอยแตกร้าวบริเวณทางเข้า (ค) โพรงอากาศภายในชิ้นงานบริเวณแกจ (ง) โพรงอากาศบริเวณทางเข้า และ (จ) ร่องรอยการยุบตัวบริเวณแกจ



รูปที่ 4.3 โพรงอากาศภายในชิ้นงานกรีน ซึ่งได้จากการตรวจสอบชิ้นงานด้วยการฉายรังสี

#### 4.2.1 อุณหภูมิหลอมเหลว

ผลการปรับตั้งอุณหภูมิบริเวณสกรู เพื่อให้เม็ดส่วนผสมตั้งต้นสามารถหลอมเหลวและไหลเข้าสู่แม่พิมพ์ ทำโดยการปรับค่าอุณหภูมิจากการทดสอบ DSC ดังภาพที่ 4.1 โดยทดลองตั้งค่าอุณหภูมิจากจุดยอดแรกที่ 60 องศาเซลเซียส พบว่าเม็ดส่วนผสมตั้งต้นบางส่วนไม่หลอมเหลวและเกิดอุกตัน ทำให้ไม่สามารถไหลเข้าสู่แม่พิมพ์ได้ ดังนั้นจึงปรับอุณหภูมิให้สูงขึ้นในช่วงจุดยอดที่ 2 คือ 170 องศาเซลเซียส และทดลองฉีดชิ้นงาน โดยชิ้นงานที่ผ่านการปรับอุณหภูมิแต่ละครั้งจะถูกตรวจสอบลักษณะภายนอก และตรวจหาโพรงอากาศภายในชิ้นงานด้วยการฉายรังสี และปรากฏผลการทดลองดังรายละเอียดในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 การปรับอุณหภูมิบริเวณสกรู

| อุณหภูมิสกรู (°C) | ผลที่ได้   | สาเหตุ  |
|-------------------|--|---|
| 150-160           | - ส่วนผสมตั้งต้นไม่ไหลเข้าสู่แม่พิมพ์ ทำให้ชิ้นงานไม่เต็มแม่พิมพ์                | - ส่วนผสมตั้งต้นหลอมเหลวไม่หมด  |
| 160-170           | - ชิ้นงานมีลักษณะเต็มแม่พิมพ์ และไม่ปรากฏร่องรอยของครีป รอยยุบตัว และมีผิวมันวาว | - ช่วงอุณหภูมิที่ใช้ทำให้ส่วนผสมตั้งต้นหลอมเหลวพอดี   |
| 170-180           | - ส่วนผสมเริ่มตันที่หลอมเหลวจะไหลเยิ้มบริเวณหัวฉีด<br>- มีโพรงอากาศภายในชิ้นงาน  | - ส่วนผสมตั้งต้นหลอมเหลวมากเกินไป<br>- ขณะที่ส่วนผสมตั้งต้นบางส่วนซึ่งเป็นสารประเภทแวกซ์ได้รับความร้อนสูงจะสลายตัวเป็นก๊าซอยู่ในชิ้นงาน |

#### 4.2.2 อุณหภูมิแม่พิมพ์

อุณหภูมิแม่พิมพ์มีความสำคัญต่อการแข็งตัวของชิ้นงานซึ่งถูกฉีดเข้าสู่แบบ ดังนั้นการปรับอุณหภูมิแม่พิมพ์ที่เหมาะสมจะส่งผลโดยตรงต่อลักษณะและคุณภาพของชิ้นงาน ในการทดลองหาอุณหภูมิแม่พิมพ์สำหรับตัวประสานชนิดนี้จะทำการทดลองปรับเปลี่ยนอุณหภูมิในช่วง 30-65 องศาเซลเซียส ซึ่งพบผลการทดลองดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 การปรับเปลี่ยนอุณหภูมิแม่พิมพ์

| อุณหภูมิแม่พิมพ์ (°C) | ผลที่ได้   | สาเหตุ   |
|-----------------------|--|--|
| 30-40                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>- ชิ้นงานไม่เต็มแม่พิมพ์</li> <li>- ผิวชิ้นงานหลุดติดแม่พิมพ์</li> </ul>                                  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- เนื่องจากเมื่อผนังแม่พิมพ์เย็นเกินไป จะทำให้ส่วนผสมตั้งต้นแข็งตัวอย่างรวดเร็วก่อนที่จะเต็มแม่พิมพ์</li> <li>- เนื่องจากส่วนผสมตั้งต้นบริเวณผิวชิ้นงานสัมผัสกับผนังแม่พิมพ์ซึ่งมีอุณหภูมิต่ำทำให้เกิดการแข็งตัวเร็วอย่างรวดเร็วติดกับผนังแม่พิมพ์</li> </ul> |
| 40-45                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>- ชิ้นงานเต็มแม่พิมพ์ ไม่มีรอยแตกหัก และมีผิวมันแวว</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- อุณหภูมิแม่พิมพ์เหมาะสมทำให้ส่วนผสมตั้งต้นแข็งตัวอย่างพอดี</li> </ul>   |
| 45-65                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>- ชิ้นงานแข็งตัวช้า ทำให้เกิดการแตกหักบริเวณทางเข้า หรือรอยแตกร้าวขณะผลักชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- เนื่องจากบริเวณทางเข้ามีขนาดเล็ก ทำให้แข็งตัวไม่พร้อมกับตัวชิ้นงาน ดังนั้นจึงเกิดการแตกหักได้ง่าย</li> </ul>  |

### 4.2.3 ความเร็วฉีด

จากการทดลองปรับเปลี่ยนความเร็วในการฉีดชิ้นงานในช่วง 20-60 มิลลิเมตรต่อวินาที ซึ่งแสดงผลการทดลองดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 การปรับเปลี่ยนความเร็วในการฉีด

| ความเร็วฉีด (mm/s.) | ผลที่ได้                             | สาเหตุ  |
|---------------------|--------------------------------------|---|
| 20-30               | - ชิ้นงานไม่เต็มแม่พิมพ์             | - เมื่อความเร็วในการฉีดน้อย เป็นผลให้ส่วนผสมตั้งต้นแข็งตัวก่อนเต็มแม่พิมพ์                |
| 30-40               | - ชิ้นงานเต็มแม่พิมพ์ และไม่มีรูพรุน | - ความเร็วที่เหมาะสมทำให้ส่วนผสมตั้งต้นไหลเข้าสู่แม่พิมพ์ได้ดี                            |
| 40-60               | - ชิ้นงานมีรูพรุน                    | - การฉีดชิ้นงานด้วยความเร็วสูง จะเกิดเป็นฟองอากาศปนอยู่ในส่วนผสมตั้งต้น และระบายออกไม่ทัน |

#### 4.2.4 ความดันน้ด

ในการทดลองปรับเปลี่ยนความดันน้ดในช่วง 10-80 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร พบผลดังรายละเอียดในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 การปรับเปลี่ยนความดันน้ดในการน้ด

| ความดันน้ด (kg/cm <sup>2</sup> ) | ผลที่ได้                                      | สาเหตุ   |
|----------------------------------|---|--|
| 10-50                            | - ช้่งงานแตกหัก และแตกร้าวง่าย                | - เนื้อวัสดุส่วนผสมตั้งต้นอัดตัวกันไม่แน่นพอ                     |
| 60-70                            | - ช้่งงานเต็มแม่พิมพ์ ไม่มีรอยแตกหัก และครีบบ | - ส่วนผสมตั้งต้นถูกอัดด้วยแรงดันพอดี ทำให้ได้ช้่งงานเต็มแม่พิมพ์ |
| 70-80                            | - เกิดครีบบบริเวณขอบของช้่งงาน                | - ส่วนผสมตั้งต้นถูกอัดด้วยแรงดันที่มากเกินจนล้นออกจากแม่พิมพ์    |

ดั่งนั้นสภาวะที่เหมาะสมต่อการน้ดขึ้นรูปช้่งงานกรีน จะทำการปรับตั้งอุณหภูมิของสกรูเพื่อหลอมเหลวส่วนผสมตั้งต้นในช่วงอุณหภูมิ 160-170 องศาเซลเซียส และใช้อุณหภูมิแม่พิมพ์ในช่วง 40-45 องศาเซลเซียส นอกจากนี้จะใช้ความเร็วในการน้ด 30-40 มิลลิเมตรต่อวินาที และความดันน้ด 60-70 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งได้ช้่งงานกรีนที่ไม่มีข้อบกพร่อง และมีความหนาแน่นกรีนเฉลี่ย 5.38 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และน้ำหนักโดยเฉลี่ยช้่งน้ดละ 14.75 กรัม

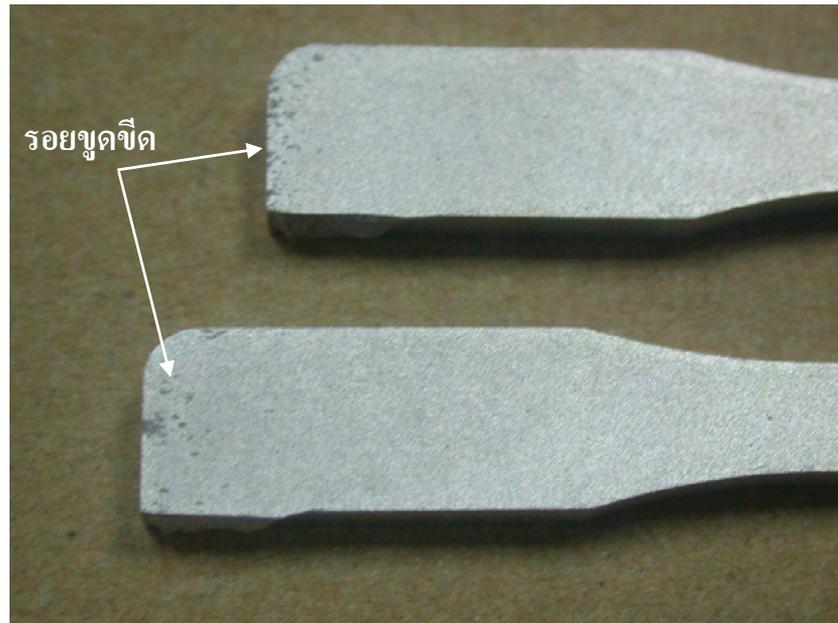
### 4.3 ผลทางกายภาพของชิ้นงานหลังการเผาผนึก

#### 4.3.1 ลักษณะทั่วไปโดยการตรวจสอบด้วยสายตา

ลักษณะผิวภายนอกโดยส่วนใหญ่ของชิ้นงานที่ผ่านการเผาผนึกจากสภาวะต่างๆ แสดงในตารางที่ 4.5 ทั้งนี้ชิ้นงานที่ได้จากการเผาผนึกแบบสองขั้นตอนเกิดเป็นรอยขีดขีด เนื่องจากชิ้นงานที่ได้จากเตา FINE เป็นชิ้นงานที่มีความแข็งแรงต่ำเพราะมีส่วนผสมของตัวประสานบางส่วนได้ถูกกำจัดไปแล้วในขั้นตอนนี้ ดังนั้นเมื่อชิ้นงานถูกเคลื่อนย้ายจากเตากำจัดตัวประสาน FINE ไปยังเตาเผาผนึกสุญญากาศ Shimadzu จึงมีโอกาสทำให้ชิ้นงานเกิดร่องรอยขีดขีดได้

ตารางที่ 4.5 ลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานหลังการเผาผนึก

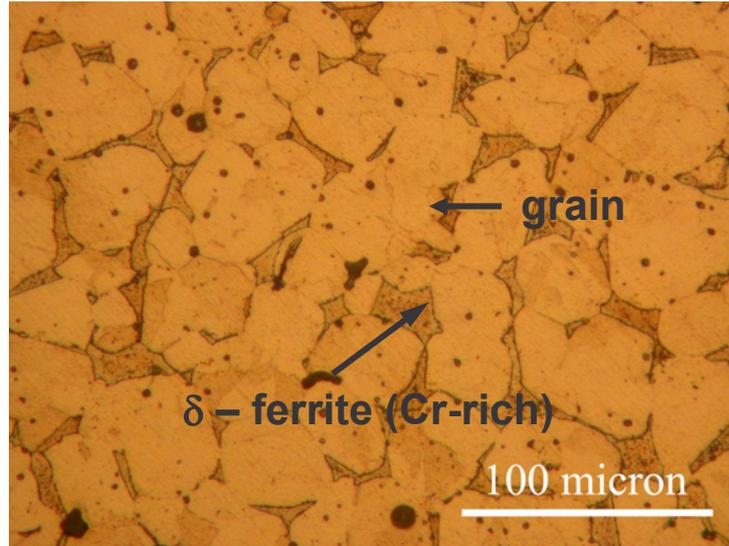
| สภาวะการเผา  | ลักษณะภายนอก  |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>■ การกำจัดตัวประสานและเผาผนึกแบบขั้นตอนเดียว ต่อเนื่องภายใต้บรรยากาศอาร์กอน</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- ชิ้นงานที่ได้มีสีเงินวาว</li> <li>- ผิวเรียบลื่นทั่วชิ้นงานทั้งด้านบนและด้านล่าง</li> </ul>  |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>■ การกำจัดตัวประสานและเผาผนึกแบบขั้นตอนเดียว ต่อเนื่องภายใต้บรรยากาศสุญญากาศ</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- ชิ้นงานที่ได้มีสีเงินวาวเฉพาะด้านที่สัมผัสกับแผ่นรองอะลูมินา และมีลักษณะคราบขุ่นสีเทาในด้านอื่นๆ ซึ่งไม่ได้สัมผัสกับแผ่นรองอะลูมินา เนื่องจากชิ้นงานด้านที่สัมผัสกับแผ่นรองอะลูมินาไม่ได้สัมผัสกับบรรยากาศเผาผนึกโดยตรง ทำให้ไม่เกิดเป็นผิวออกไซด์</li> <li>- ผิวเรียบทั่วทั้งชิ้นงาน</li> </ul> |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>■ การกำจัดตัวประสานและเผาผนึกแบบสองขั้นตอน ภายใต้บรรยากาศอาร์กอน</li> </ul>             | <ul style="list-style-type: none"> <li>- ชิ้นงานที่ได้มีสีเงินวาว</li> <li>- ผิวชิ้นงานด้านที่สัมผัสกับแผ่นรองอะลูมินามีรอยขีดขีด ดังรูปที่ 4.4</li> </ul>  |



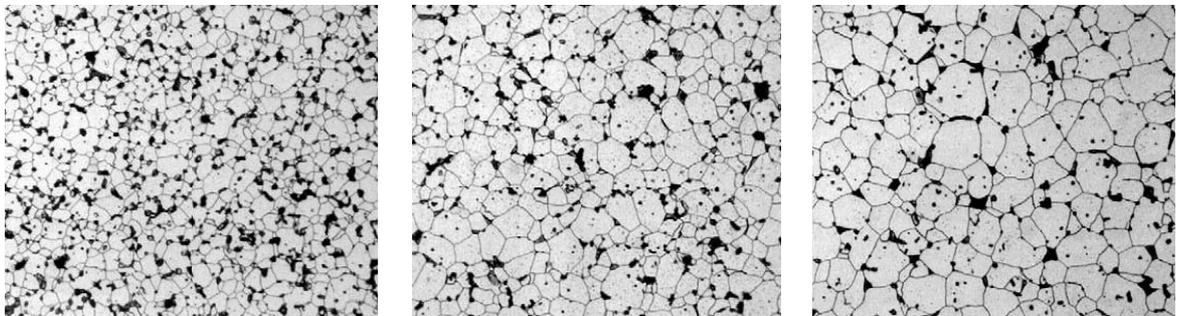
รูปที่ 4.4 ชิ้นงานที่ได้จากการเผาผิกรแบบสองขั้นตอนแสดงให้เห็นรอยขูดขีดบริเวณด้านที่สัมผัสกับแผ่นรองอะลูมินา

#### 4.3.2 การศึกษาโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานทดสอบ

เมื่อพิจารณาลักษณะ โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานทดสอบเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 17-4PH ซึ่งผ่านการกัดด้วยสารละลายกรด Glyceregia ดังรูปที่ 4.5 พบว่าวัฏภาคที่เกิดขึ้นประกอบด้วย 2 วัฏภาคที่ชัดเจน นั่นคือวัฏภาคของเกรนและวัฏภาคระหว่างเกรน ทั้งนี้จากงานวิจัยของ Simchi และคณะ [22] ได้อธิบายถึงวัฏภาคระหว่างเกรนดังกล่าวคือวัฏภาคของเคลด้าเฟอร์ไรต์ ( $\delta$ -ferrite) ซึ่งเกิดขึ้นที่อุณหภูมิเผาผิกรมากกว่า 1220 องศาเซลเซียส และใช้เวลาในการเผาผิกรนาน 2 ชั่วโมง ภายใต้บรรยากาศไฮโดรเจน โดยที่หากเวลาในการเผาผิกรน้อยลงจะไม่ปรากฏวัฏภาคของเคลด้าเฟอร์ไรต์หรือปรากฏเพียงเล็กน้อยและไม่ชัดเจน ดังเช่นการทดลองของ Hwan-Jin Sung และคณะ [1] ซึ่งทำการทดลองเผาผิกรชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดนี้ภายใต้บรรยากาศไฮโดรเจนและสุญญากาศที่อุณหภูมิ 900 ถึง 1350 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จะได้โครงสร้างจุลภาคที่ไม่ปรากฏวัฏภาคของเคลด้าเฟอร์ไรต์อย่างชัดเจนดังแสดงในรูปที่ 4.6 จากผลของวัฏภาคทั้งสองที่ปรากฏในโครงสร้างจุลภาค ได้ทำการตรวจสอบปริมาณธาตุองค์ประกอบภายในวัฏภาคเกรนและวัฏภาคเคลด้าเฟอร์ไรต์ ซึ่งแสดงผลของปริมาณธาตุดังกล่าวที่ 4.6 พบว่า ณ ตำแหน่งวัฏภาคเคลด้าเฟอร์ไรต์จะพบปริมาณธาตุโครเมียม (Cr-rich) มากกว่าบริเวณในเกรน ทั้งนี้คาดว่า การเผาผิกรชิ้นงานที่อุณหภูมิสูงเป็นเวลานานจะเป็นแรงขับที่ดีที่ทำให้ห่อหุ้มของธาตุโครเมียมเกิดปฏิกิริยาการแพร่ได้มากนั่นเอง



รูปที่ 4.5 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 17-4PH ซึ่งผ่านกระบวนการเผาพูนึกภายใต้บรรยากาศอาร์กอนแบบขั้นตอนเดียวต่อเนื่องที่อุณหภูมิเผาพูนึกที่ 1300 องศาเซลเซียส



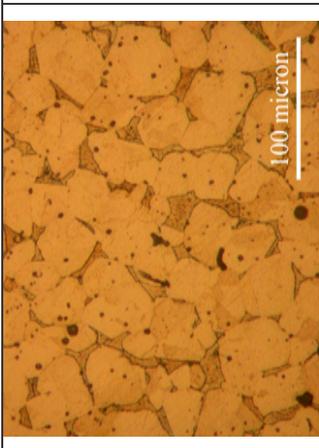
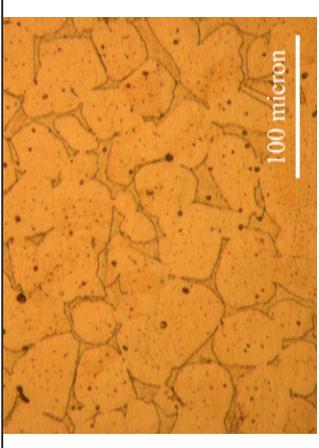
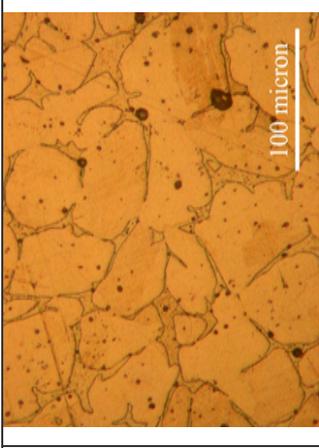
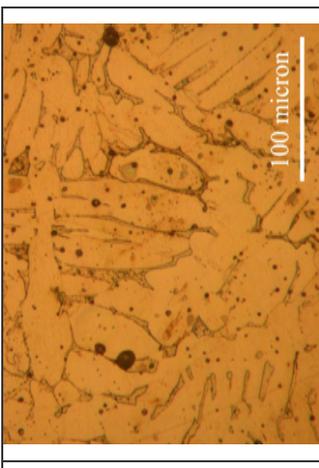
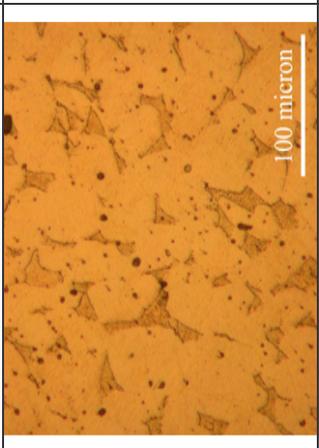
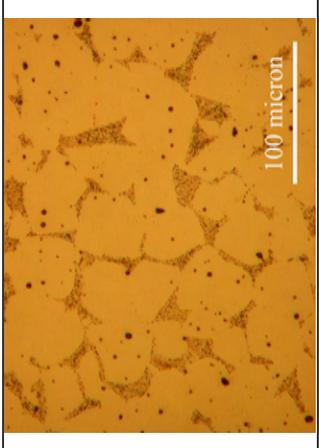
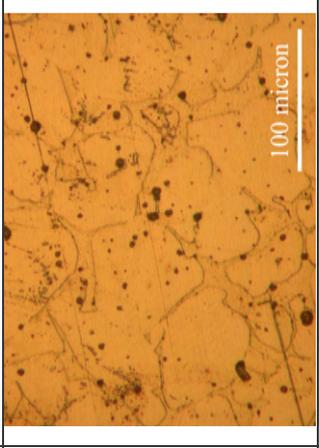
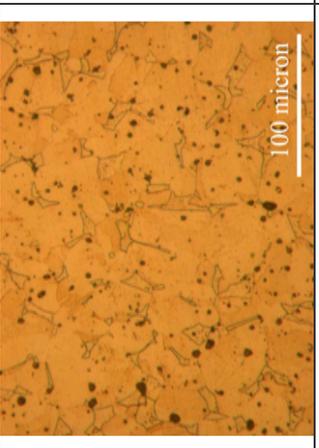
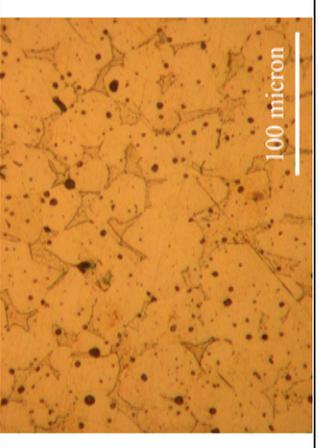
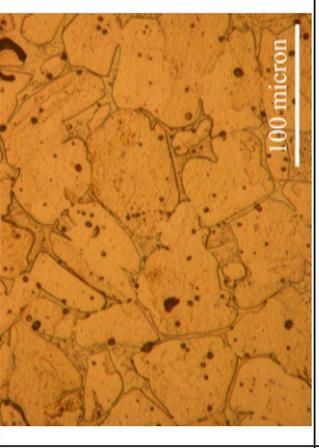
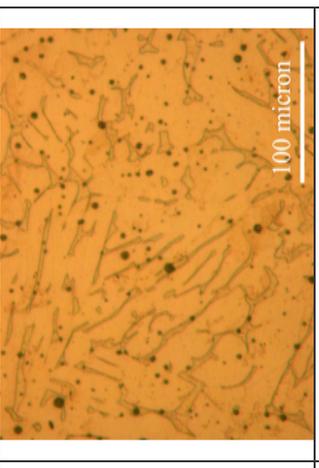
รูปที่ 4.6 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 17-4PH จากการทดลองเผาพูนึกของ Hwan-Jin Sung และ คณะ โดยใช้อุณหภูมิในการเผาพูนึกที่ 1250 องศาเซลเซียส (ซ้าย) 1300 (กลาง) และ 1350 องศาเซลเซียส (ขวา) [1]

ตารางที่ 4.6 การตรวจสอบปริมาณธาตุองค์ประกอบของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 17-4PH บริเวณภายในวิญภาคของเกรนและวิญภาคของเดลต้าเฟอร์ไรต์ด้วยเทคนิค EDS (Energy dispersive spectroscopy)

| สภาวะการทดลอง   | วิญภาค          | ปริมาณธาตุองค์ประกอบ (%) |      |       |      |       |      |      |  |
|---|-----------------|--------------------------|------|-------|------|-------|------|------|--|
|   |                 | C                        | Si   | Cr    | Mn   | Fe    | Ni   | Cu   |  |
| ชิ้นงานแผ่นนิกที่ 1300 องศาเซลเซียส, บรรจุภาศอาร์กอนแบบขั้นตอนเดียวต่อเนื่อง  | เกรน            | 0.16                     | 0.99 | 11.66 | 0.90 | 71.76 | 4.67 | 3.36 |  |
|   | เดลต้าเฟอร์ไรต์ | 0.15                     | 1.20 | 20.74 | 0.56 | 69.24 | 1.78 | 2.08 |  |
| ชิ้นงานแผ่นนิกที่ 1300 องศาเซลเซียส, บรรจุภาศสูญญากาศแบบขั้นตอนเดียวต่อเนื่อง | เกรน            | 0.15                     | 1.09 | 14.08 | 0.76 | 67.60 | 4.01 | 3.10 |  |
|   | เดลต้าเฟอร์ไรต์ | 0.11                     | 1.28 | 19.76 | 0.68 | 65.12 | 1.75 | 1.64 |  |
| ชิ้นงานแผ่นนิกที่ 1375 องศาเซลเซียส, บรรจุภาศอาร์กอนแบบขั้นตอนเดียวต่อเนื่อง  | เกรน            | 0.18                     | 1.16 | 14.26 | 1.01 | 68.24 | 4.53 | 3.35 |  |
|   | เดลต้าเฟอร์ไรต์ | 0.16                     | 1.22 | 20.05 | 0.63 | 67.28 | 2.00 | 1.71 |  |
| ชิ้นงานแผ่นนิกที่ 1375 องศาเซลเซียส, บรรจุภาศสูญญากาศแบบขั้นตอนเดียวต่อเนื่อง | เกรน            | 0.17                     | 1.24 | 14.49 | 0.65 | 68.13 | 4.36 | 2.67 |  |
|   | เดลต้าเฟอร์ไรต์ | 0.15                     | 1.20 | 18.92 | 0.79 | 66.63 | 1.90 | 2.09 |  |

จากภาพที่ 4.7 ซึ่งแสดงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานทดสอบเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 17-4PH ซึ่งผ่านการเผาผนึกภายใต้สภาวะต่างๆ พบว่ารูพรุนที่ปรากฏในโครงสร้างจุลภาคเป็นรูพรุนที่มีลักษณะกลมและกระจายทั่วไป ซึ่งรูพรุนเหล่านี้เป็นรูพรุนที่เกิดขึ้นในขั้นตอนสุดท้าย (Final stage) ของกระบวนการเผาผนึกที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงเป็นเวลานานทำให้รูพรุนแยกตัวเป็นอิสระออกจากขอบเกรนและปรากฏอยู่ภายในเกรน (Internal pore) เป็นส่วนใหญ่ [14] จากโครงสร้างจุลภาคในภาพที่ 4.7 พบว่าทุกสภาวะการทดลองเมื่ออุณหภูมิเผาผนึกเพิ่มเป็น 1350 และ 1375 องศาเซลเซียส รูพรุนที่ปรากฏจะมีขนาดใหญ่ขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิเป็นปัจจัยสำคัญที่กระตุ้นให้รูพรุนเกิดการรวมตัวกัน ส่งผลให้ขนาดเฉลี่ยของรูพรุน โตขึ้น [2]

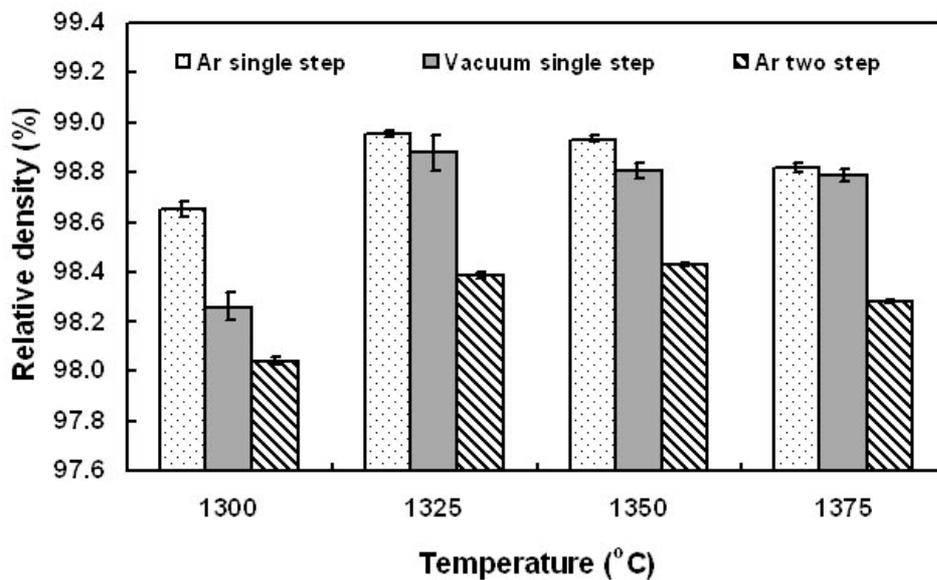
นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณรูพรุนที่เกิดจากการเผาผนึกชิ้นงานตัวอย่างภายใต้บรรยากาศอาร์กอนแบบสองขั้นตอนมีปริมาณมากกว่าปริมาณรูพรุนภายในชิ้นงานจากสภาวะการเผาผนึกแบบขั้นตอนเดียวต่อเนื่องอย่างชัดเจน โดยสาเหตุดังกล่าวเกิดจากชิ้นงานตัวอย่างเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 17-4PH ที่ได้รับการเผาผนึกแบบสองขั้นตอนต้องผ่านกระบวนการกำจัดตัวประสานภายใต้บรรยากาศอากาศ (รายละเอียดดัง 3.3.3.2) ซึ่งเป็นการให้ความร้อนเป็นเวลานานเพื่อกำจัดตัวประสานบางส่วน ทำให้ผิวหน้าเกิดเป็นรูพรุนเปิดและมีออกซิเจนแทรกซึม (Permeation) ปนอยู่ในรูพรุนเปิดดังกล่าว (แสดงผลการตรวจสอบปริมาณออกซิเจนในหัวข้อที่ 4.6) และเมื่อชิ้นงานเหล่านี้เข้าสู่ขั้นตอนการเผาผนึกรูพรุนเปิดดังกล่าวจะมีการเปลี่ยนรูปร่างเพื่อรักษาเสถียรภาพเป็นรูพรุนปิดทรงกลมหรืออื่นๆ ขึ้นกับตำแหน่งของรูพรุน ทั้งนี้ก๊าซที่ติดค้างอยู่ในรูพรุนจะส่งผลต่ออัตราการกำจัดรูพรุนในขั้นตอนสุดท้ายของการเผาผนึก [2] จึงทำให้ปริมาณรูพรุนจากสภาวะการเผาผนึกแบบสองขั้นตอนมีมากกว่าสภาวะการทดลองการเผาผนึกแบบขั้นตอนเดียวต่อเนื่องภายใต้บรรยากาศอาร์กอนและสุญญากาศ นอกจากนี้ลักษณะเกรนที่ปรากฏในโครงสร้างจุลภาคเป็นเกรนแบบอิกวิแอกซ์ (Equiaxed grain) ซึ่งมีลักษณะเหมือนกันในแต่ละอุณหภูมิเผาผนึก โดยขนาดของเกรนมีแนวโน้มโตขึ้นเมื่ออุณหภูมิเผาผนึกสูงขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิจะเป็นตัวกระตุ้นให้ปฏิกิริยาการแพร่เกิดได้ดีขึ้น แต่ทั้งนี้เมื่ออุณหภูมิเพิ่มมากถึง 1375 องศาเซลเซียส ลักษณะของเกรนจะมีการเปลี่ยนแปลงไปโดยสิ้นเชิงในรูปแบบของเกรนแบบรียาว (Elongated grain) ซึ่งกลไกการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของเกรนดังกล่าวนี้คาดว่าจะเกิดจากการแพร่ของอะตอมผ่านรูพรุนที่มีปริมาณมากไปในทิศทางที่เรียงตัวของรูพรุน จึงทำให้เกรนมีลักษณะรียาว ดังรูปที่ 4.7 ณ อุณหภูมิเผาผนึกที่ 1375 องศาเซลเซียส

|                    |  |  |   |  |
|--------------------|--|--|---|--|
| Ar single step     |   |   |   |   |
| Vacuum single step |   |   |   |   |
| Ar two step        |  |  |  |  |
|                    | 1300 องศาเซลเซียส  | 1325 องศาเซลเซียส  | 1350 องศาเซลเซียส   | 1375 องศาเซลเซียส  |

รูปที่ 4.7 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานตัวอย่างเหล็กกล้าไร้สนิม 17-4PH ซึ่งผ่านการเผาเหนืกที่สภาวะทดสอบต่างๆ

### 4.3.3 ความหนาแน่นของชิ้นงาน

กราฟผลการทดลองดังรูปที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นสัมพัทธ์กับอุณหภูมิเผาผนึกภายใต้บรรยากาศอาร์กอนและบรรยากาศสุญญากาศแบบขั้นตอนเดียวต่อเนื่อง และบรรยากาศอาร์กอนแบบสองขั้นตอน พบว่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ของชิ้นงานหลังการเผาผนึกจากทุกบรรยากาศมีค่าสูงมากกว่า 98 เปอร์เซ็นต์ และทุกสภาวะการเผาผนึกให้ผลของความหนาแน่นสัมพัทธ์ต่ำสุดที่อุณหภูมิเผาผนึก 1300 องศาเซลเซียส โดยแนวโน้มของผลการทดลองปรากฏในลักษณะคล้ายคลึงกัน นั่นคือ เมื่ออุณหภูมิเผาผนึกเพิ่มจาก 1300 องศาเซลเซียส เป็น 1325 องศาเซลเซียส จะให้ค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์เพิ่มขึ้น และเมื่ออุณหภูมิเผาผนึกเพิ่มเป็น 1350 และ 1375 องศาเซลเซียส แนวโน้มของความหนาแน่นสัมพัทธ์มีค่าลดลง จากผลการทดลองดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเผาผนึกส่งผลโดยตรงต่อค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ที่ได้จากงานวิจัยของ Hwan-Jin Sung และคณะ [1] จะมีแนวโน้มที่แตกต่างกัน โดยงานวิจัยของ Hwan-Jin Sung และคณะ [1]



รูปที่ 4.8 ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของชิ้นงานที่ผ่านการเผาผนึกภายใต้สภาวะและอุณหภูมิเผาผนึกที่แตกต่างกัน

จะปรากฏแนวโน้มของความหนาแน่นสัมพัทธ์ที่เพิ่มขึ้นตลอดการทดลองการเผาผนึกด้วยอุณหภูมิต่างๆ ซึ่งในการทดลองดังกล่าวใช้อุณหภูมิเผาผนึกสูงสุดที่ 1350 องศาเซลเซียส และ ณ อุณหภูมิเผาผนึกนี้จะให้ค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์สูงสุดถึง 99 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ในงานวิจัยฉบับนี้ยังได้กล่าวอธิบายถึงลักษณะของรูพรุนและเกรนที่ปรากฏในโครงสร้างจุลภาค ดังรูปที่ 4.6 ณ อุณหภูมิเผาผนึกต่างๆ กล่าวคือ ณ อุณหภูมิเผาผนึกที่ 900 องศาเซลเซียส เป็นจุดเริ่มต้นของการเข้าสู่กระบวนการเผาผนึก (Adhesion stage) ซึ่งชิ้นงานมีความหนาแน่นสัมพัทธ์เพียง 61 เปอร์เซ็นต์ และโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่เผาผนึกที่อุณหภูมิ 1000 และ 1100 องศาเซลเซียส แสดงความสัมพันธ์สอดคล้องกับขั้นตอนเริ่มต้นของกระบวนการเผาผนึก (Initial stage)

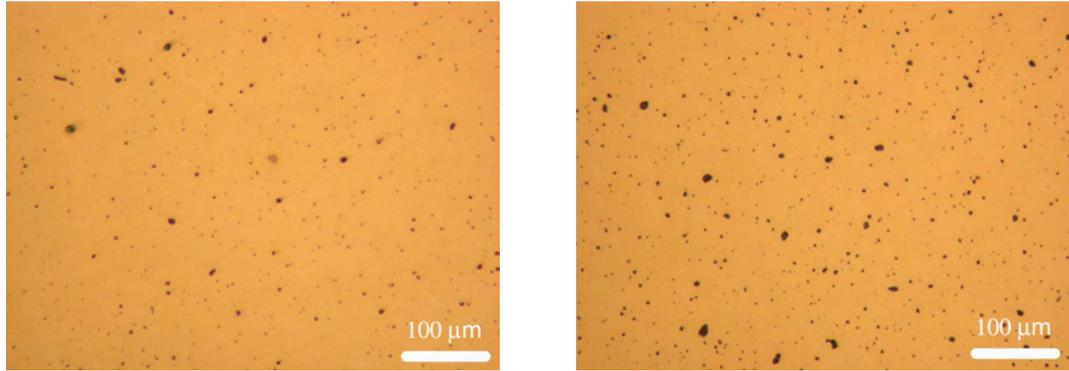
ส่วนโครงสร้างจุลภาคที่ปรากฏ ณ อุณหภูมิเผาผนึกที่ 1200 และ 1250 องศาเซลเซียส แสดงถึงขั้นตอนกลางของการเผาผนึก (Intermediate stage) ซึ่ง ณ ขั้นตอนนี้รูพรุนจะเริ่มมีลักษณะกลม และในขั้นตอนสุดท้าย (Final stage) เป็นโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ได้จากการเผาผนึก ณ อุณหภูมิ 1300 และ 1350 องศาเซลเซียส ทั้งนี้จากลักษณะของโครงสร้างจุลภาคดังกล่าวจะปรากฏวิญญากาศของเกรนและขอบเกรนอย่างชัดเจน ซึ่งแตกต่างจากโครงสร้างจุลภาคที่ได้จากการทดลองในงานวิจัยฉบับนี้ที่พบว่าโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานตัวอย่างเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 17-4PH ประกอบด้วยสองวิญญากาศคือเกรนและเคลด้าเฟอร์ไรต์ ซึ่งได้กล่าวอย่างละเอียดในหัวข้อที่ 4.4.2 แล้วนั้น เป็นโครงสร้างที่เกิดขึ้นในขั้นตอนสุดท้าย (สังเกตจากลักษณะและตำแหน่งของรูพรุนที่ปรากฏชัดเจนบริเวณภายในวิญญากาศของเกรน) ของกระบวนการเผาผนึกซึ่งใช้เวลานานทำให้ธาตุองค์ประกอบมีเวลาในการแพร่ได้มากขึ้น

ดังนั้นแนวโน้มของความหนาแน่นสัมพัทธ์ที่ได้ดังรูปที่ 4.8 จึงมีความสอดคล้องสัมพันธ์โดยตรงกับขนาดของเกรน รวมถึงปริมาณและตำแหน่งของรูพรุน และวิญญากาศของเคลด้าเฟอร์ไรต์ ทั้งนี้ค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ของชิ้นงานที่ผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1325 องศาเซลเซียส มีค่าสูงกว่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ของชิ้นงานที่อุณหภูมิ 1300 องศาเซลเซียส เนื่องจากในกระบวนการเผาผนึกอุณหภูมินับเป็นปัจจัยสำคัญที่กระตุ้นให้ปฏิกิริยาการแพร่ของอะตอมเกิดได้ดีขึ้น ส่งผลต่ออัตราการเกิดพันธะระหว่างอนุภาคมากขึ้น [2,16] และปริมาณรูพรุนที่ลดลง ทำให้แนวโน้มของความหนาแน่นเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมินั้นเอง แต่ทั้งนี้เมื่ออุณหภูมิการทดลองเพิ่มถึง 1350 และ 1375 องศาเซลเซียส นั้น ค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ของทุกระยะการอบกลับมีแนวโน้มลดต่ำลง เพราะการเผาผนึกด้วยอุณหภูมิที่สูงเกินไปจะทำให้อัตราการเคลื่อนที่ของขอบเกรนเพิ่มขึ้น และรูพรุนแยกตัวออกจากขอบเกรน [2,16] นอกจากนี้อุณหภูมิที่สูงยังทำให้รูพรุนเกิดการรวมตัวกันทำให้ขนาดเฉลี่ยของรูพรุนเพิ่มขึ้น ดังแสดงด้วยรูปโครงสร้างจุลภาคที่ 4.7 ทั้งนี้รูพรุนที่แยกตัวออกจากขอบเกรนเหล่านี้จะส่งผลให้ชิ้นงานไม่เกิดการแน่นตัว (No densification) และทำให้ความหนาแน่นสุดท้ายของชิ้นงานลดต่ำลง

จากผลของความหนาแน่นสัมพัทธ์ซึ่งได้จากการทดลองเผาผนึกแบบชั้นตอนเดียวต่อเนื่องภายใต้บรรยากาศอาร์กอน และสุญญากาศ ดังแสดงในรูปที่ 4.8 พบว่าทุกอุณหภูมิทดลอง ค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ของชิ้นงานซึ่งเผาผนึกภายใต้บรรยากาศอาร์กอนมีค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์สูงกว่าชิ้นงานที่เผาผนึกภายใต้บรรยากาศสุญญากาศเล็กน้อย เพราะการเผาผนึกภายใต้บรรยากาศสุญญากาศทำให้เกิดฟิวออกไซด์จากออกซิเจนซึ่งปะปนภายในบรรยากาศดังสมการที่ 2.2

ซึ่งสังเกตได้จากคราบขุ่นสีเทาบริเวณผิวชิ้นงาน เป็นสาเหตุทำให้ประสิทธิภาพของการเผาผนึกลดลง ทั้งนี้ในการเผาผนึกชิ้นงานภายใต้บรรยากาศอาร์กอนซึ่งเป็นก๊าซเฉื่อยนั้น ก๊าซอาร์กอนที่ไหลผ่านชิ้นงานจะทำหน้าที่พาออกซิเจนออกจากระบบเผาผนึกทำให้ออกซิเจนภายในบรรยากาศลดน้อยลง และช่วยให้ประสิทธิภาพการเผาผนึกเป็นไปอย่างดีขึ้น ทำให้ความหนาแน่นของชิ้นงานหลังเผาผนึกสูงขึ้น

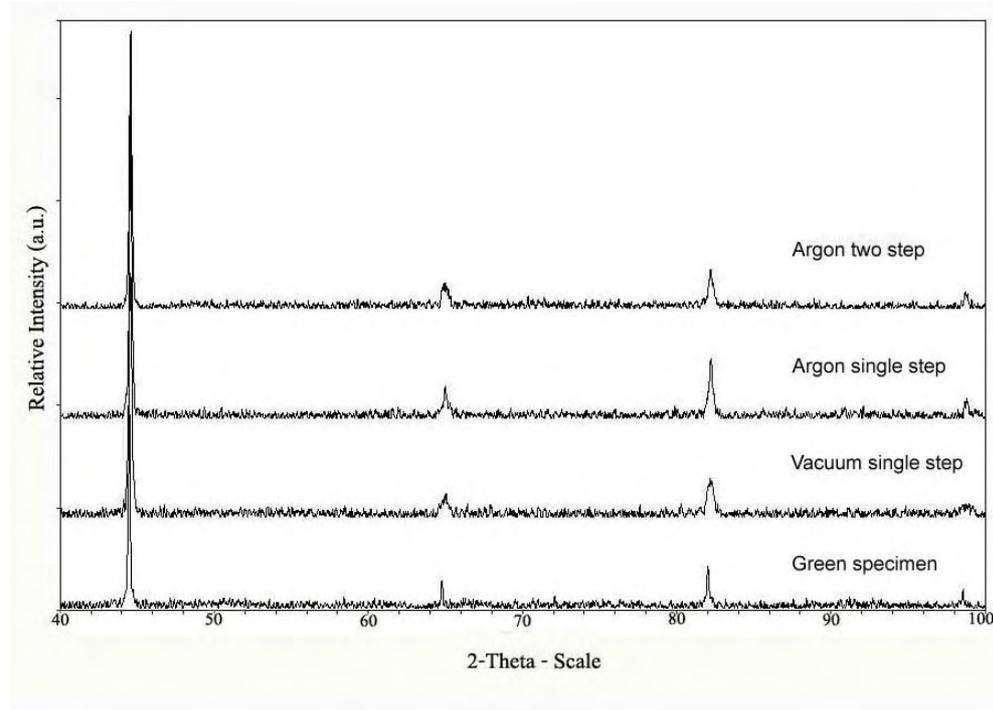
สำหรับผลของความหนาแน่นสัมพัทธ์ของชิ้นงานที่ได้จากการเผาผนึกภายใต้บรรยากาศอาร์กอนแบบชั้นตอนเดียวต่อเนื่องเปรียบเทียบกับแบบสองชั้นตอน ดังผลในรูปที่ 4.8 พบว่าค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ของชิ้นงานแบบชั้นตอนเดียวต่อเนื่องมีค่าสูงกว่าค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ของชิ้นงานแบบสองชั้นตอนอย่างชัดเจนทุกอุณหภูมิการทดลอง นั่นเป็นเพราะในการเผาผนึกแบบสองชั้นตอนซึ่งทำการกำจัดตัวประสานด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 320 องศาเซลเซียสในเตา FINE ภายใต้บรรยากาศอากาศ ซึ่งขณะให้ความร้อนผิวชิ้นงานเกิดเป็นรูพรุนเปิดและตัวประสานค่อยแทรกซึมออกสู่บรรยากาศภายนอก ทั้งนี้ในตัวประสานที่เป็นพอลิเมอร์และบรรยากาศมีองค์ประกอบซึ่งมีออกซิเจนเป็นส่วนผสม ดังนั้นชิ้นงานจึงมีออกซิเจนแทรกซึมปนเปื้อนอยู่ภายใน ด้วยเหตุนี้เมื่อนำชิ้นงานเข้าสู่ชั้นตอนการเผาผนึกซึ่งกระทำภายใต้สภาวะอาร์กอนซึ่งเป็นก๊าซเฉื่อยที่ไม่สามารถรีดิวซ์ออกซิเจนที่ปนเปื้อนในชิ้นงานนั้นออกได้ นอกจากนี้เมื่อชิ้นงานเข้าสู่ชั้นตอนการเผาผนึกรูพรุนจะกลายเป็นรูพรุนปิดซึ่งมีออกซิเจนขังตัวอยู่ภายใน ดังสังเกตได้จากปริมาณรูพรุนที่มากกว่าของชิ้นงานที่ผ่านการเผาผนึกแบบสองชั้นตอนเปรียบเทียบกับรูพรุนของชิ้นงานที่ผ่านการเผาผนึกแบบชั้นตอนเดียวต่อเนื่องดังรูปที่ 4.9 โดยรูพรุนปิดเหล่านี้สามารถขัดขวางประสิทธิภาพการเผาผนึกให้ลดต่ำลง ทำให้ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของชิ้นงานที่ผ่านการเผาผนึกแบบสองชั้นต่อน้อยกว่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ของชิ้นงานที่ผ่านการเผาผนึกแบบชั้นตอนเดียวต่อเนื่อง



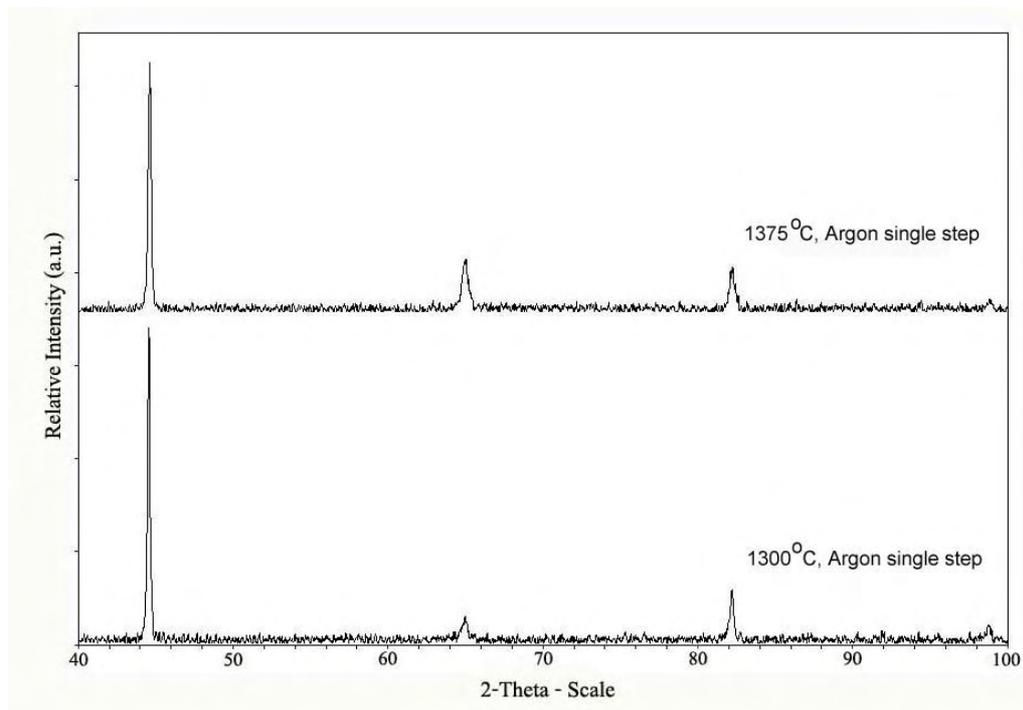
รูปที่ 4.9 ภาพเปรียบเทียบปริมาณรูพรุนของชั้นงานที่ผ่านการเผาผนึกภายใต้บรรยากาศอาร์กอน ที่อุณหภูมิ 1325 องศาเซลเซียส ก่อนการกัดกรวด (ซ้าย) ชั้นงานที่ผ่านการเผาผนึกแบบขั้นตอนเดียว (ขวา) ชั้นงานที่ผ่านการเผาผนึกแบบสองขั้นตอน

#### 4.4 ผลการตรวจสอบโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคเอ็กซเรย์ดิฟแฟรกชัน

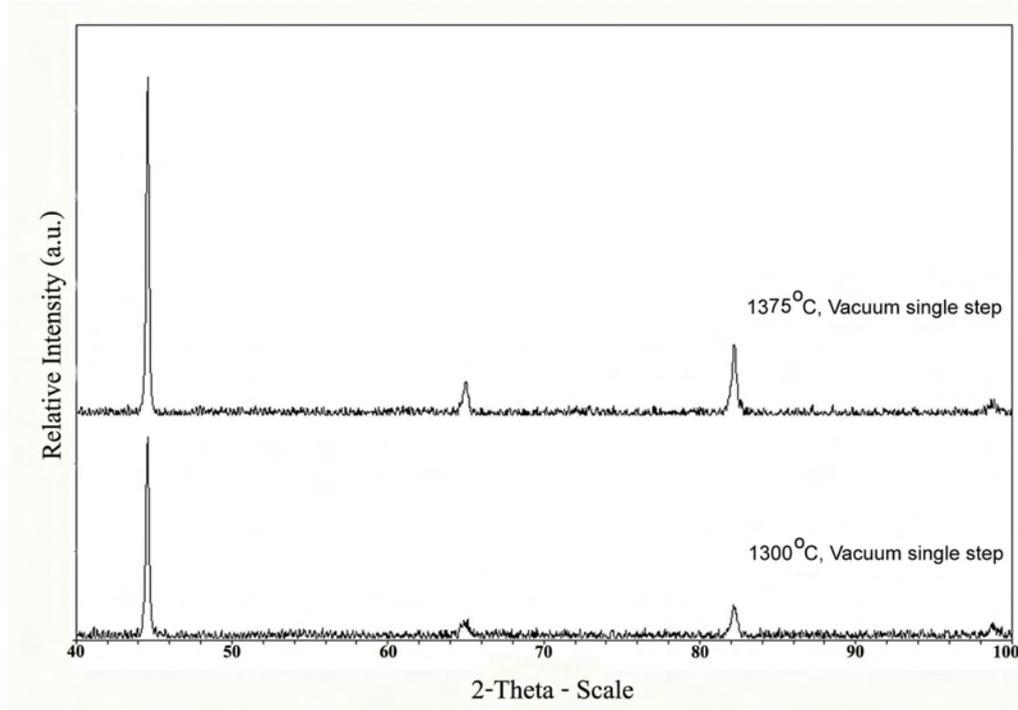
การตรวจสอบโครงสร้างผลึกของชั้นงานทดสอบเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 17-4PH ที่ได้จากการฉีดขึ้นรูปทั้งก่อน (ชั้นงานกรีน) และหลังการเผาผนึกด้วยเทคนิคเอ็กซเรย์ดิฟแฟรกชัน เพื่อตรวจหาโครงสร้างผลึก ณ สภาวะทดสอบต่างๆ ว่ามีความแตกต่างกันอย่างไรในแง่ของโครงสร้างผลึก ทั้งนี้ ชั้นงานตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์ได้จากการตัดชิ้นงานทดสอบบริเวณตำแหน่งเกจ (Gauge) โดยไม่ต้องขัดผิวหน้า พบว่าตำแหน่งของการเกิดพีค (Peak) ปรากฏในตำแหน่งเดียวกันทั้งหมด ดังรูปตัวอย่างที่ 4.10 ซึ่งเป็นรูปแสดงการเกิดพีค ของชั้นงานกรีนและชั้นงานที่ได้จากการเผาผนึกภายใต้บรรยากาศอาร์กอนและสุญญากาศที่อุณหภูมิ 1325 องศาเซลเซียส และรูปที่ 4.11 และ 4.12 ซึ่งเป็นผลการวิเคราะห์โครงสร้างของชั้นงานเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1300 และ 1375 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศเผาผนึกแบบอาร์กอน และแบบสุญญากาศตามลำดับ



รูปที่ 4.10 X-ray diffractogram ของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 17-4PH ก่อนและหลังเผาพูนีกที่ อุณหภูมิ 1325 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.11 X-ray diffractogram ของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 17-4PH หลังเผาพูนีกภายใต้ บรรยากาศอาร์กอนแบบขั้นตอนเดียวต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 1300 และ 1375 องศาเซลเซียส



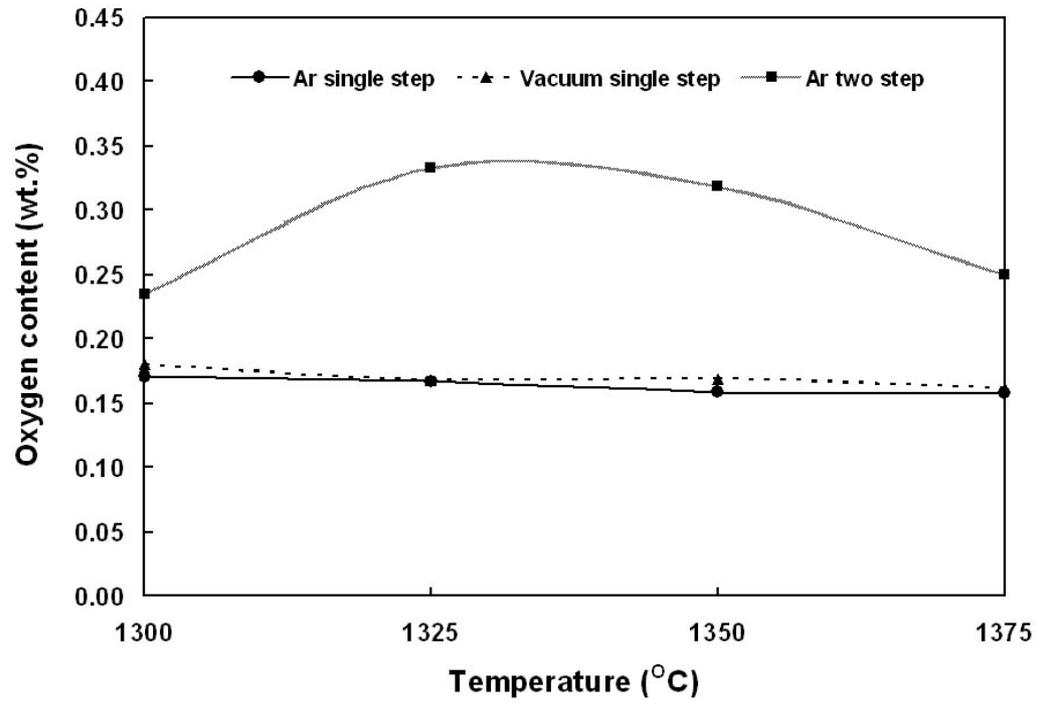
รูปที่ 4.12 X-ray diffractogram ของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 17-4PH หลังเผาพูนิกภายใต้บรรยากาศสุญญากาศที่อุณหภูมิ 1300 และ 1375 องศาเซลเซียส

จากลักษณะปรากฏของพีค ณ สภาวะทดสอบต่างๆ ข้างต้น การปรากฏของพีคที่มุม  $2\theta$  เกิดขึ้นในตำแหน่งเดียวกันทั้งหมด ดังนั้น โครงสร้างผลึกของชิ้นงานตัวอย่างทั้งก่อนและหลังการเผาพูนิกภายใต้สภาวะต่างๆ ต่างก็มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบ BCC ทั้งหมด และด้วยข้อจำกัดของเทคนิค XRD ไม่สามารถตรวจสอบหาโครงสร้างผลึก  $\delta$ -phase ได้ ทั้งนี้สามารถกล่าวสรุปได้ว่า การทำการเผาพูนิกชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 17-4PH ภายใต้บรรยากาศอาร์กอนและสุญญากาศแบบขั้นตอนเดียวต่อเนื่อง และแบบสองขั้นตอนภายใต้บรรยากาศอาร์กอนจะไม่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกแต่อย่างใด

#### 4.5 ผลของปริมาณออกซิเจน

ปริมาณออกซิเจนที่ปนอยู่ในชิ้นงานตัวอย่างแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพการเผาผลาญ เนื่องจากออกซิเจนมีส่วนสำคัญที่ก่อให้เกิดออกไซด์บนผิวอนุภาค หรือแทรกซึมภายในชิ้นงาน หรือกักในรูพรุน ซึ่งส่งผลในการขัดขวางกลไกการเผาผลาญ ทั้งนี้จากผลการทดลองพบว่า ชิ้นงานตัวอย่างที่เผาผลาญแบบสองขั้นตอนนี้มีปริมาณออกซิเจนปนอยู่มากที่สุดทุกอุณหภูมิการทดลอง ดังภาพที่ 4.13 ทั้งนี้ในกระบวนการเผาผลาญแบบสองขั้นตอนนี้ใช้เวลาในการกำจัดตัวประสานเป็นเวลา 18 ชั่วโมง แล้วจึงต่อเนื่องด้วยการใช้เตา SHIMADZU อีก 12 ชั่วโมง แต่เนื่องจากกระบวนการกำจัดตัวประสานด้วยความร้อนดังกล่าวอยู่ภายใต้บรรยากาศอากาศ จึงเป็นผลให้มีออกซิเจนปนเปื้อนอยู่ในชิ้นงานได้มาก ซึ่งผลในการวิเคราะห์ที่ได้อาจมีส่วนในการสนับสนุนค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 17-4PH ที่ผ่านกระบวนการกำจัดตัวประสานและเผาผลาญแบบสองขั้นตอนนี้มีค่าต่ำที่สุด ดังได้อธิบายรายละเอียดในหัวข้อ 4.4.3 ซึ่งได้อธิบายว่าออกซิเจนซึ่งปนเปื้อนในชิ้นงานถูกกักในรูพรุนปิดทำให้ค่าของความหนาแน่นสัมพัทธ์ต่ำที่สุดนั่นเอง

ทั้งนี้เมื่อพิจารณาปริมาณออกซิเจนของชิ้นงานที่ได้จากการเผาผลาญแบบขั้นตอนนี้ภายใต้บรรยากาศอาร์กอนและสุญญากาศ ซึ่งใช้เวลาในการกำจัดตัวประสานต่อเนื่องด้วยการเผาผลาญเป็นเวลา 21 ชั่วโมงเท่ากันนั้น พบว่าปริมาณออกซิเจนของชิ้นงานตัวอย่างที่เผาผลาญภายใต้บรรยากาศอาร์กอนจะมีปริมาณน้อยกว่าชิ้นงานที่เผาผลาญภายใต้บรรยากาศสุญญากาศเล็กน้อย ทั้งนี้คาดว่า การเผาผลาญภายใต้บรรยากาศสุญญากาศจะมีการปนเปื้อนของออกซิเจน เพราะประสิทธิภาพในการดึงอากาศออกจากเตาเผาผลาญยังไม่เพียงพอที่จะกำจัดออกซิเจนได้ทั้งหมด ส่วนการเผาผลาญภายใต้บรรยากาศอาร์กอนซึ่งมีความบริสุทธิ์ถึง 99.99 เปอร์เซ็นต์ และมีการไหลของก๊าซอาร์กอน 3 ลิตรต่อ นาที ตลอดเวลา ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดออกซิเจนดีกว่า



รูปที่ 4.13 ปริมาณออกซิเจนหลังเผาผนึกซึ่งอยู่ภายในชิ้นงานตัวอย่างเหล็กกล้าไร้สนิม 17-4PH ที่ผ่านการเผาผนึกที่สภาวะต่างๆ

#### 4.6 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของชิ้นงานที่ผ่านการเผาผนึกจากสถานะต่างๆ

สำหรับชิ้นงานตัวอย่างเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 17-4PH ที่ผ่านการเผาผนึกจากสถานะทดสอบต่างๆ จะถูกนำไปทดสอบหาปริมาณธาตุองค์ประกอบด้วยเทคนิคสเปกโตรอิมิตชัน เพื่อหาว่าหลังจากการเผาผนึกแล้ว องค์ประกอบของธาตุผสมมีการเปลี่ยนแปลงที่แตกต่างจากผงโลหะตั้งต้นมากน้อยอย่างไร ทั้งนี้ธาตุต่างๆ มีความสำคัญต่อสมบัติของชิ้นงานที่แตกต่างกัน ดังเช่นธาตุโมลิบดีนัม (Mo) มีผลช่วยในการส่งเสริมสมบัติทางกล และเพิ่มสมบัติความต้านทานการกัดกร่อน และธาตุนีโอเบียม (Nb) ช่วยรักษาเสถียรภาพของปริมาณคาร์บอนเป็นต้น [19] ซึ่งจากผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ 4.8 พบว่า ปริมาณธาตุองค์ประกอบที่ได้ของธาตุต่างๆ โดยส่วนใหญ่มีค่าไม่แตกต่างจากผงโลหะตั้งต้นเท่าใดนัก ยกเว้นธาตุทองแดง และธาตุทองแดงที่มีปริมาณลดลงจากเดิม ซึ่งผลดังกล่าวอาจกระทบต่อสมบัติของชิ้นงานสุดท้ายหลังจากขั้นตอนการอบชุบด้วยความร้อน เนื่องจากทองแดงเป็นธาตุองค์ประกอบที่ผสมเพื่อทำให้เกิดการตกผลึก (Precipitate) ส่งผลที่ดีต่อค่าความแข็งแรง และความแข็งที่เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.7 ผลขององค์ประกอบทางเคมีของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 17-4PH ซึ่งผ่านการเผาผนึก ณ สภาวะการทดลองที่แตกต่างกัน

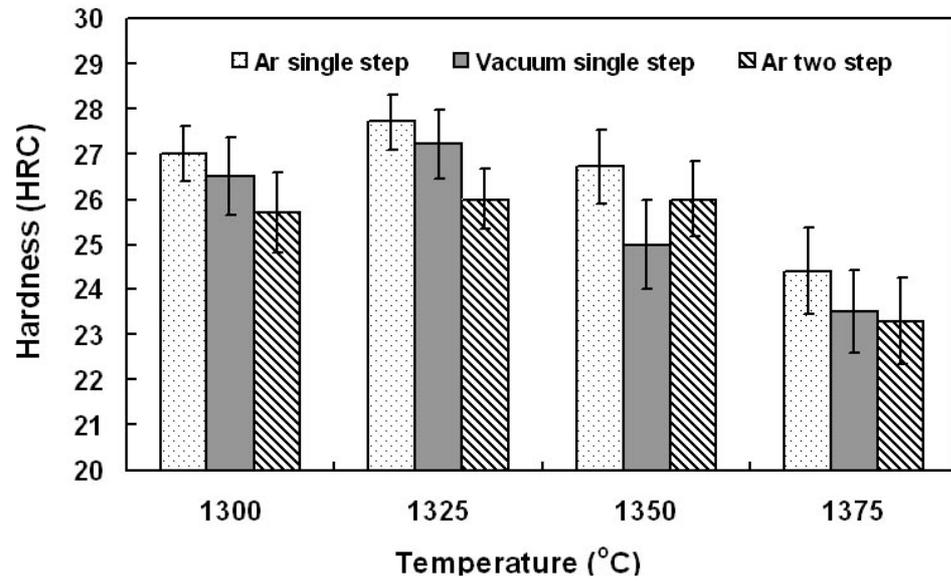
| บรรยากาศ           | อุณหภูมิ<br>(°C) | องค์ประกอบทางเคมี (เปอร์เซ็นต์) |        |        |        |        |        |         |        |        |        |        |
|--------------------|------------------|---------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|--------|--------|--------|--------|
|                    |                  | C                               | Si     | Mn     | P      | S      | Ni     | Cr      | Mo     | Cu     | Co     | Nb     |
| ATMIX              | -                | 0.050                           | 0.800  | 0.780  | 0.019  | 0.004  | 4.240  | 15.600  | 0.020  | 3.230  | 0.060  | 0.300  |
|                    | 1300             | 0.0073                          | 0.9563 | 0.6577 | 0.0156 | 0.0038 | 4.2431 | 15.5582 | 0.0171 | 2.7707 | 0.0584 | 0.3471 |
|                    | 1325             | 0.0019                          | 0.9124 | 0.5945 | 0.0151 | 0.0030 | 4.3054 | 15.5246 | 0.0166 | 2.8349 | 0.0578 | 0.3413 |
|                    | 1350             | 0.0031                          | 0.9708 | 0.5725 | 0.0166 | 0.0036 | 4.2410 | 15.8249 | 0.0170 | 2.7985 | 0.0584 | 0.3492 |
|                    | 1375             | 0.0825                          | 0.9095 | 0.5015 | 0.0150 | 0.0025 | 4.1990 | 15.6950 | 0.0170 | 2.6695 | 0.0595 | 0.3530 |
| Argon single step  | 1300             | 0.0019                          | 0.9085 | 0.5579 | 0.0154 | 0.0031 | 4.2941 | 15.4983 | 0.0165 | 2.7639 | 0.0580 | 0.3437 |
|                    | 1325             | 0.0010                          | 0.8851 | 0.4697 | 0.0144 | 0.0022 | 4.2567 | 15.5772 | 0.0163 | 2.7263 | 0.0574 | 0.3464 |
|                    | 1350             | 0.0026                          | 0.8823 | 0.4972 | 0.0157 | 0.0030 | 4.2331 | 15.5873 | 0.0166 | 2.7453 | 0.0578 | 0.3482 |
| Vacuum single step | 1375             | 0.0245                          | 0.8600 | 0.3910 | 0.0155 | 0.0020 | 4.2250 | 15.7515 | 0.0170 | 2.4295 | 0.0595 | 0.3515 |
|                    | 1300             | 0.0039                          | 0.9699 | 0.7902 | 0.0145 | 0.0047 | 4.1936 | 15.4058 | 0.0169 | 2.7975 | 0.0586 | 0.3508 |
| Argon two step     | 1325             | 0.0044                          | 0.9298 | 0.5851 | 0.0139 | 0.0037 | 4.2458 | 15.4020 | 0.0166 | 2.6497 | 0.0589 | 0.3482 |
|                    | 1350             | 0.0019                          | 0.9721 | 0.6296 | 0.0147 | 0.0038 | 4.2246 | 15.3507 | 0.0167 | 2.7787 | 0.0588 | 0.3484 |
|                    | 1375             | 0.0460                          | 0.8265 | 0.4120 | 0.0160 | 0.0025 | 4.2195 | 15.7980 | 0.0170 | 2.3580 | 0.0600 | 0.3515 |

## 4.7 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกล

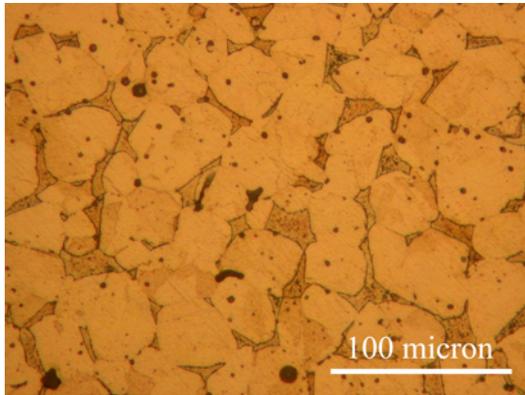
### 4.7.1 การทดสอบความแข็ง

ในการทดสอบความแข็งของชิ้นงานตัวอย่างเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 17-4PH ที่ได้จากการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิเผาผืนิก ภายใต้บรรยากาศและขั้นตอนการเผาผืนิกที่แตกต่างกัน โดยการทดสอบจะใช้วิธีการทดสอบดังรายละเอียดในหัวข้อ 3.3.5.3 ทั้งนี้ชิ้นงานตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบไม่ได้ผ่านการทำความสะอาดหรือปรับผิวหน้า เนื่องจากชิ้นงานมีผิวหน้าราบเรียบแล้ว ซึ่งจากผลการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิเผาผืนิกที่เพิ่มขึ้นครั้งละ 25 องศาเซลเซียส โดยเริ่มจากอุณหภูมิ 1300 จนกระทั่งถึง 1375 องศาเซลเซียส พบว่าแนวโน้มของค่าความแข็งจะเป็นไปในรูปแบบเดียวกันทั้งหมด ดังปรากฏในรูปที่ 4.14 นั่นคือ ค่าความแข็งจะเพิ่มสูงขึ้นจากอุณหภูมิเผาผืนิกเริ่มแรก โดยค่าความแข็งจะเพิ่มสูงสุดที่อุณหภูมิเผาผืนิก 1325 องศาเซลเซียส และค่าความแข็งจะลดต่ำลง จนต่ำสุดที่อุณหภูมิเผาผืนิก 1375 องศาเซลเซียส ของทุกๆ สภาวะการทดลอง โดยแนวโน้มของค่าความแข็งมีลักษณะเช่นเดียวกันกับแนวโน้มของค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ ทั้งนี้เมื่อพิจารณาวัฏภาคของชิ้นงานตัวอย่างที่ได้จากการเผาผืนิกที่อุณหภูมิ 1300 องศาเซลเซียส จะปรากฏวัฏภาคของเซลล์เฟอร์ไรต์เป็นจำนวนมากกระจายตัวอยู่ทั่วไป ดังรูปที่ 4.15 (ก) ซึ่งสันนิษฐานว่าวัฏภาคเฟอร์ไรต์นี้มีความสามารถในการต้านแรงกดต่ำกว่าโครงสร้างที่มีวัฏภาคเกรนเกิดอย่างต่อเนื่อง ดังนั้นจึงเป็นสาเหตุให้ค่าความแข็งของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการเผาผืนิกที่อุณหภูมิ 1325 องศาเซลเซียส ซึ่งมีลักษณะการกระจายตัวของเกรนอย่างต่อเนื่องกันมากกว่า และมีวัฏภาคเซลล์เฟอร์ไรต์ที่กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอรอบวัฏภาคของเกรน นอกจากนี้ ณ อุณหภูมิเผาผืนิกที่ 1325 องศาเซลเซียสนี้ ยังเป็นอุณหภูมิที่ทำให้อะตอมเกิดการเคลื่อนที่และแพร่เป็นพันธะที่แข็งแรงระหว่างอนุภาค ทำให้วัฏภาคของเกรนมีลักษณะต่อเนื่อง แต่ทั้งนี้เมื่ออุณหภูมิการเผาผืนิกมากขึ้นเป็น 1350 องศาเซลเซียส กลับส่งผลให้ค่าความแข็งลดลงเป็นเพราะอุณหภูมิที่สูงจะส่งผลให้รูพรุนมีการรวมตัวเป็นรูพรุนขนาดใหญ่และปรากฏในวัฏภาคของเกรน ซึ่งรูพรุนเหล่านี้ไม่มีผลต่อการแน่นตัวและยังทำให้ค่าความหนาแน่นของชิ้นงานลดลง

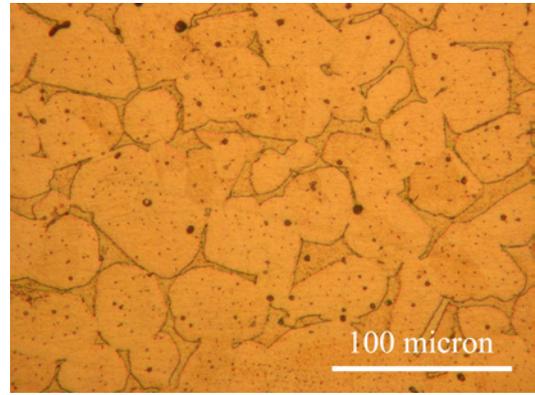
นอกจากนี้อุณหภูมิเผาผืนิกที่สูงขึ้นยังส่งผลทำให้เกรนขนาดใหญ่ขึ้น [1] ดังรูปที่ 4.15 (ค) ทำให้ปริมาณขอบเกรนลดลงและความสามารถในการต้านทานต่อน้ำหนักกดที่ลดน้อยลง สำหรับชิ้นงานที่ผ่านการเผาผืนิกที่อุณหภูมิ 1375 องศาเซลเซียส จะให้ค่าความแข็งที่ต่ำมากนั้นเนื่องจากโครงสร้างจุลภาคที่ได้มีลักษณะเปลี่ยนแปลงไปจากอุณหภูมิเผาผืนิกอื่นๆ อย่างเห็นได้ชัด โดยเกรนจะมีลักษณะริ้วาว และมีทิศทางการจัดเรียงตัวที่ไม่เป็นระเบียบ ดังรูปที่ 4.15 (ง) จึงทำให้ได้ค่าความแข็งต่ำที่สุด



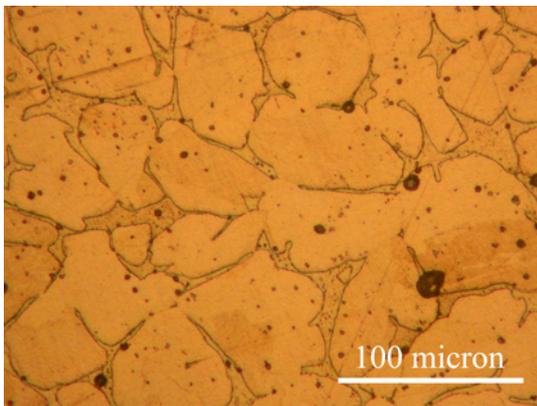
รูปที่ 4.14 ความแข็งของชิ้นงานตัวอย่างเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 17-4PH ซึ่งผ่านการเผาพูนิก ณ สภาวะทดลองต่างๆ



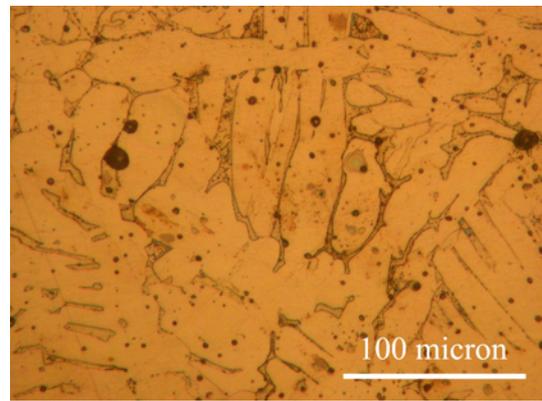
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 4.15 ขนาดและลักษณะของเกรนที่แตกต่างกันเมื่ออุณหภูมิเผาผนึกเพิ่มขึ้นจาก (ก) 1300, (ข) 1325, (ค) 1350 และ (ง) 1375 องศาเซลเซียส

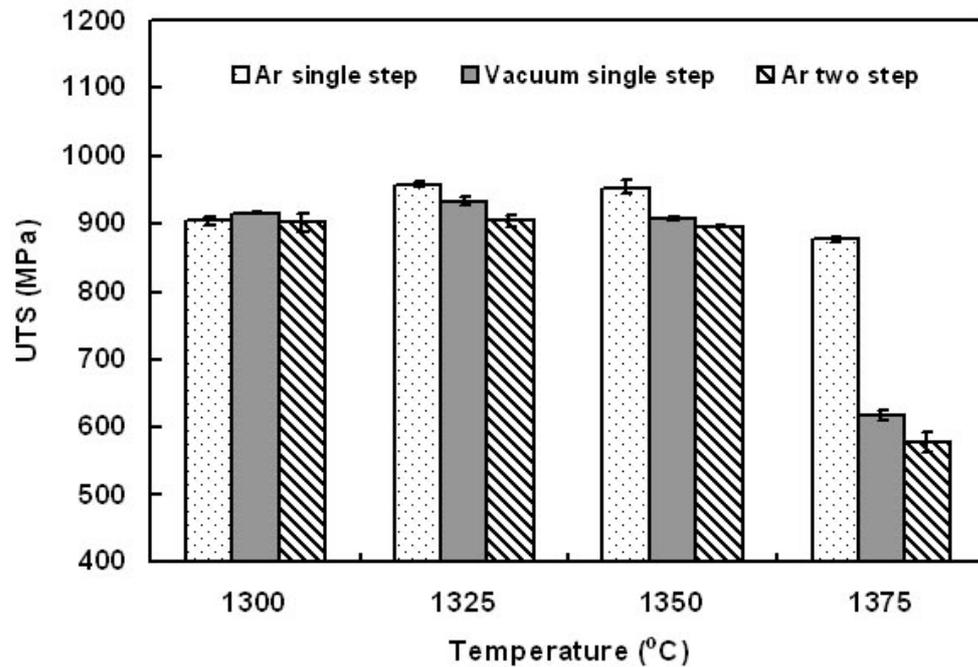
ทั้งนี้เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบค่าความแข็งแรงที่ได้จากการทดสอบชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 17-4PH ซึ่งเผาผนึกแบบชั้นตอนเดียวต่อเนื่องภายใต้บรรยากาศอาร์กอนและสุญญากาศ พบว่าค่าความแข็งแรงที่ได้มีค่าแตกต่างกันไม่มาก แต่การเผาผนึกภายใต้บรรยากาศสุญญากาศยังคงมีแนวโน้มของค่าความแข็งแรงที่ต่ำกว่าการเผาผนึกภายใต้บรรยากาศอาร์กอน ซึ่งจากรูปโครงสร้างจุลภาคที่ 4.7 พบว่าลักษณะและขนาดของวัฏภาคเกรนไม่มีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน ดังนั้นสาเหตุที่ทำให้ชิ้นงานที่ผ่านการเผาผนึกจากบรรยากาศทั้งสองน่าจะเกิดจากประสิทธิภาพการเผาผนึกที่แตกต่างกัน โดยกระบวนการเผาผนึกที่เกิดขึ้นภายใต้บรรยากาศอาร์กอนสามารถเกิดได้อย่างสมบูรณ์มากกว่า ซึ่งคาดว่าในการเผาผนึกภายใต้บรรยากาศสุญญากาศจะมีออกซิเจนปะปนอยู่บ้างดังแสดงจากผลการตรวจสอบปริมาณออกซิเจนของบรรยากาศสุญญากาศที่มีค่าสูงกว่าบรรยากาศอาร์กอนเล็กน้อย ซึ่งออกซิเจนดังกล่าวนี้มีผลต่อการขัดขวางการเผาผนึก

ในการเปรียบเทียบผลของความแข็งแรงของชิ้นงานตัวอย่างเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 17-4PH ซึ่งได้จากการเผาผนึกแบบชั้นตอนเดียวและแบบสองชั้นตอนภายใต้บรรยากาศอาร์กอน พบว่าค่าความแข็งแรงที่ได้จากการเผาผนึกแบบชั้นตอนเดียวมีค่าสูงกว่าค่าความแข็งแรงชิ้นงานที่ได้จากการเผาผนึกแบบสองชั้นตอนทุกอุณหภูมิการเผาผนึก เนื่องจากเผาผนึกชิ้นงานแบบสองชั้นตอนจะมีออกซิเจนปะปนและถูกกักในรูพรุน และไม่สามารถกำจัดออกได้ในขั้นตอนการเผาผนึก ดังนั้นจึงปรากฏรูพรุนจำนวนมากกระจายทั่วไปภายในวัฏภาคของเกรน ทำให้ชิ้นงานที่ผ่านการเผาผนึกแบบสองชั้นตอนมีความหนาแน่นต่ำและส่งผลต่อความสามารถต่อการต้านทานแรงกดได้น้อย

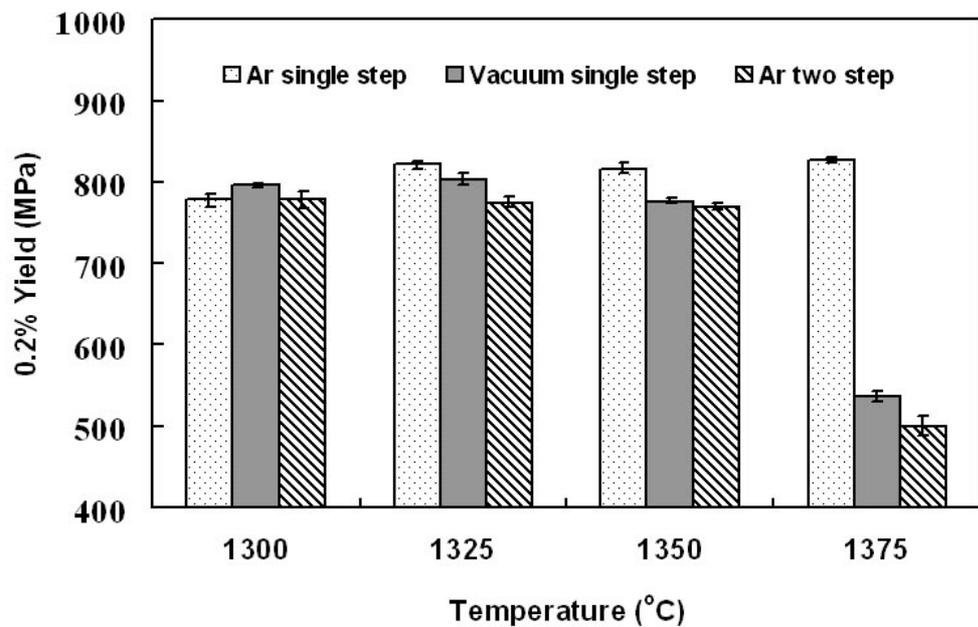
#### 4.7.2 การทดสอบความสามารถในการต้านทานแรงดึง

ในการทดสอบสมบัติเชิงกลด้านความสามารถในการต้านทานแรงดึงของชิ้นงานตัวอย่างเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 17-4PH ซึ่งผ่านกระบวนการเผาผนึกภายใต้สภาวะต่างๆ พบว่าผลของค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด (Ultimate tensile strength, UTS) และผลการทดสอบจุดครากตัวที่ความเครียด 0.2 เปอร์เซนต์ (Yield strength) แสดงดังรูปที่ 4.16 และ 4.17 ตามลำดับ โดยผลการทดลองทั้งสองมีลักษณะของแนวโน้มใกล้เคียงกันในแต่อุณหภูมิเผาผนึก นั่นคือค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดและจุดครากตัวที่ความเครียด 0.2 เปอร์เซนต์มีค่ามากที่สุดเมื่อใช้อุณหภูมิเผาผนึกที่ 1325 องศาเซลเซียส จากนั้นเมื่ออุณหภูมิเผาผนึกเพิ่มขึ้นค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดและผลของจุดครากตัวที่ความเครียด 0.2 เปอร์เซนต์ กลับมีแนวโน้มลดลง และมีค่าต่ำสุดที่อุณหภูมิเผาผนึกที่ 1375 องศาเซลเซียส ซึ่งผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับผลของความหนาแน่นสัมพัทธ์ดังหัวข้อที่ 4.4.3 และผลของโครงสร้างจุลภาคดังหัวข้อที่ 4.4.2 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของการเผาผนึกที่ดีที่สุดเกิดขึ้นที่อุณหภูมิเผาผนึก 1325 องศาเซลเซียส ทำให้ชิ้นงานที่ได้มีความแข็งแรงสูงที่สุดเช่นกัน

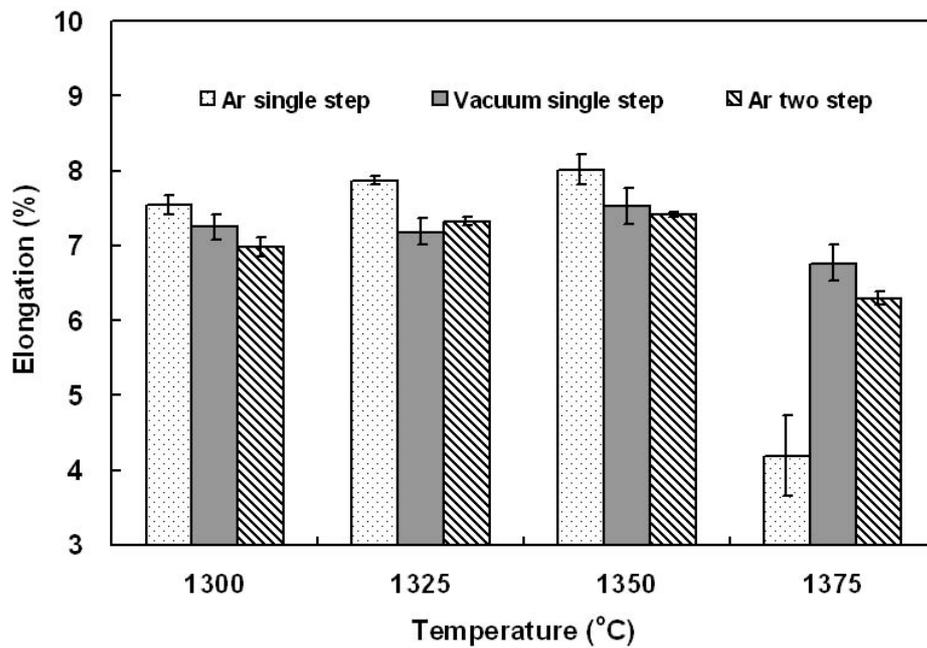
นอกจากนี้สาเหตุที่ทำให้ผลของค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดและผลของจุดครากตัวที่ความเครียด 0.2 เปอร์เซนต์ มีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเผาผนึกมีค่าเป็น 1375 องศาเซลเซียส เนื่องจาก ณ อุณหภูมิเผาผนึกนี้ทำให้วัฏภาคของเกรนมีขนาดเพิ่มขึ้นรวมถึงรูพรุนที่ปรากฏในวัฏภาคของเกรนมีขนาดโตขึ้นจึงทำให้ความหนาแน่นของชิ้นงานลดต่ำลงส่งผลต่อค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดและผลของจุดครากตัวที่ความเครียด 0.2 เปอร์เซนต์ ที่ลดต่ำลงด้วย และเมื่อทดสอบชิ้นงานที่ผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1375 องศาเซลเซียส ให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดและผลของจุดครากตัวที่ความเครียด 0.2 เปอร์เซนต์ มีค่าต่ำที่สุดในชุดการทดลอง เนื่องจากชิ้นงานมีลักษณะโครงสร้างจุลภาคของวัฏภาคเกรนที่ไม่สม่ำเสมอ และจัดเรียงตัวอย่างไม่มีทิศทางเดียวกัน ทำให้ความสามารถทนต่อแรงดึงต่ำ และเมื่อทำการเปรียบเทียบผลของค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดและจุดครากตัวที่ความเครียด 0.2 เปอร์เซนต์ ของชิ้นงานตัวอย่างที่ได้จากการเผาผนึกภายใต้บรรยากาศอาร์กอนและบรรยากาศสุญญากาศแบบขั้นตอนเดียวต่อเนื่อง พบว่าผลการทดลองที่ได้จากการเผาผนึกภายใต้บรรยากาศสุญญากาศมีแนวโน้มต่ำกว่าการเผาผนึกภายใต้บรรยากาศอาร์กอนเล็กน้อย เนื่องจากในการเผาผนึกภายใต้บรรยากาศสุญญากาศมีผลของออกซิเจนที่ปนเปื้อนในชิ้นงานทำให้อัตราการเผาผนึก ณ อุณหภูมิต่างๆ มีค่าลดลง นอกจากนี้เมื่อพิจารณาผลของค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดและผลของจุดครากตัวที่ความเครียด 0.2 เปอร์เซนต์ ในรูปที่ 4.16 และ 4.17 ตามลำดับ โดยพิจารณาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดสอบชิ้นงานที่ผ่านการเผาผนึกแบบสองขั้นตอนภายใต้บรรยากาศอาร์กอน พบว่าผลที่เกิดจากการเผาผนึกแบบสองขั้นตอนมีแนวโน้มที่ต่ำกว่า ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่ปรากฏรูพรุนจำนวนมากในวัฏภาคของเกรน ซึ่งรูพรุนเป็นตัวขัดขวางประสิทธิภาพการเผาผนึก ทำให้ค่าความแข็งแรงของชิ้นงานลดต่ำลง



รูปที่ 4.16 ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดแรงดึงของชิ้นงานทดสอบเหล็กกล้าไร้สนิม 17-4PH ซึ่งผ่านการเผาพูนิกภายใต้สภาวะและอุณหภูมิเผาพูนิกที่แตกต่างกัน



รูปที่ 4.17 ค่าจุดครากตัวที่ความเครียด 0.2 เปอร์เซ็นต์ ของชิ้นงานทดสอบเหล็กกล้าไร้สนิม 17-4PH ซึ่งผ่านการเผาพูนิกภายใต้สภาวะและอุณหภูมิเผาพูนิกที่แตกต่างกัน

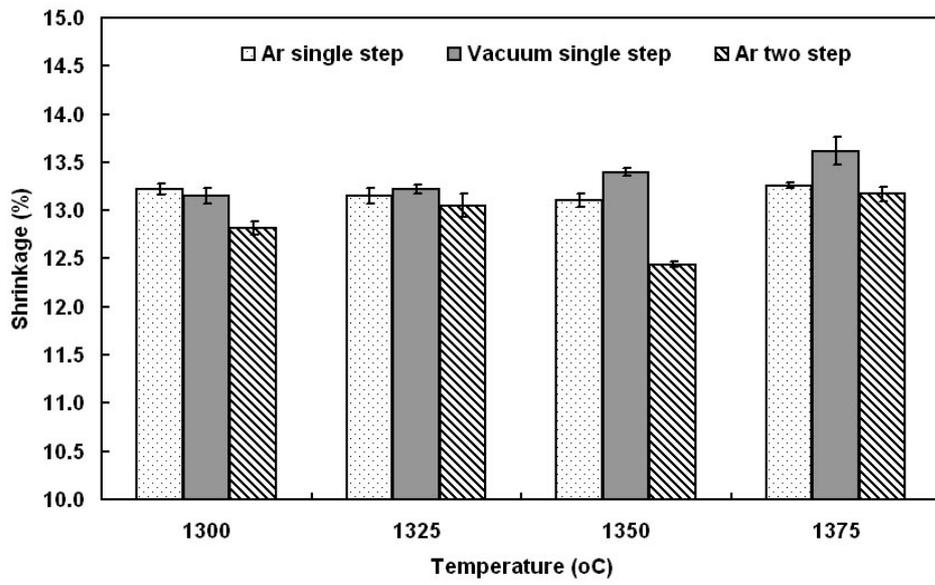


รูปที่ 4.18 อัตราการยืดของชิ้นงานทดสอบเหล็กกล้าไร้สนิม 17-4PH ซึ่งผ่านการเผาผนึกภายใต้สภาวะและอุณหภูมิเผาผนึกที่แตกต่างกัน

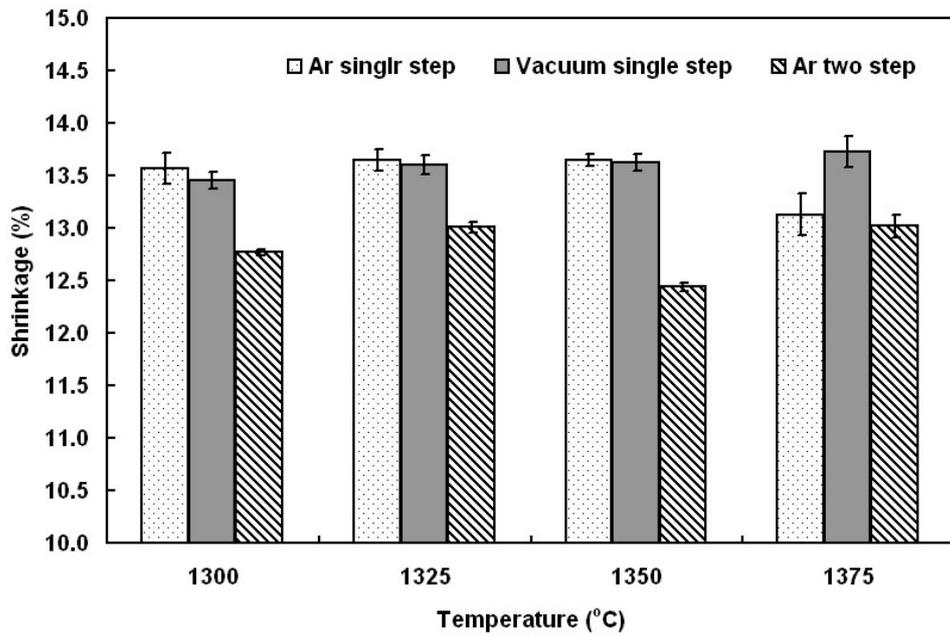
ในส่วนของผลของอัตราการยืดตัวของชิ้นงานทดสอบเหล็กกล้าไร้สนิม 17-4PH ซึ่งผ่านการเผาผนึกภายใต้สภาวะและอุณหภูมิเผาผนึกที่แตกต่างกัน ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.18 เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าที่ได้ในส่วนของผลของอุณหภูมิ พบว่าทุกสภาวะการเผาผนึกอัตราการยืดตัวปรากฏสูงสุดที่อุณหภูมิเผาผนึกที่ 1350 องศาเซลเซียส เนื่องจากอิทธิพลของเกรนที่โตกว่าอุณหภูมิอื่นๆ ส่งผลต่ออัตราการยืดตัวที่ดีของชิ้นงาน นอกจากนี้เมื่ออุณหภูมิเผาผนึกเพิ่มเป็น 1375 องศาเซลเซียส ซึ่งเกรนเปลี่ยนแปลงรูปร่างเป็นแบบรียาว และไม่มีทิศทางการจัดเรียงตัวที่แน่นอนจึงส่งผลต่ออัตราการยืดตัวที่ต่ำที่สุด ทั้งนี้ชิ้นงานที่ได้จากการเผาผนึกภายใต้บรรยากาศอาร์กอนแบบขั้นตอนเดียวยังคงมีอัตราการยืดตัวสูงกว่าชิ้นงานที่ได้จากการเผาผนึกภายใต้บรรยากาศสุญญากาศ ซึ่งเป็นสาเหตุที่ว่าในสภาวะนี้ประสิทธิภาพของการเผาผนึกเกิดขึ้นดีกว่าสภาวะอื่นๆ ทำให้ชิ้นงานมีอัตราการยืดตัวได้เป็นอย่างดี

#### 4.8 การศึกษาการหดตัว ณ ตำแหน่งต่างๆ ของชิ้นงานทดสอบ

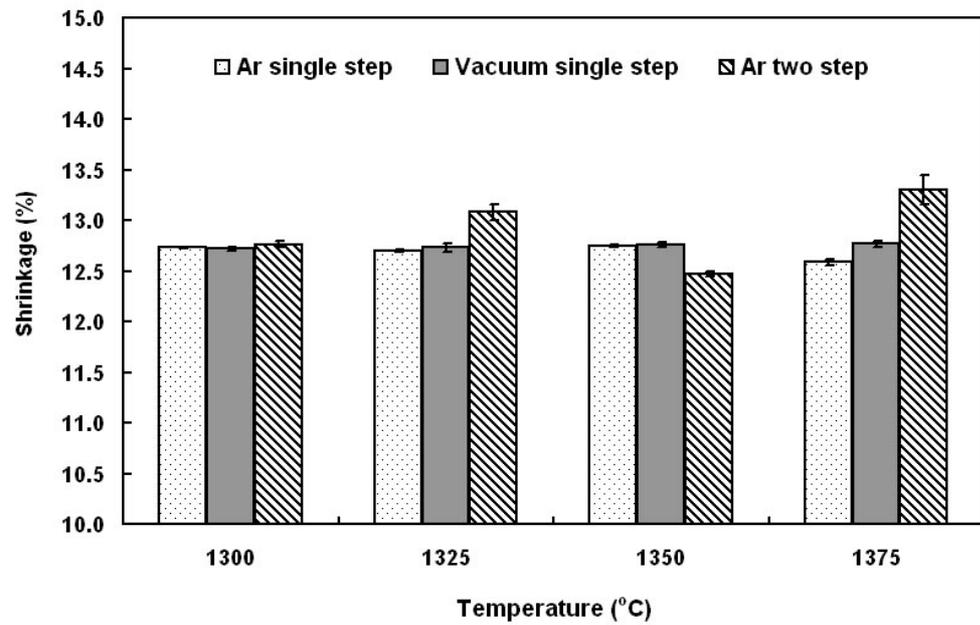
จากผลการศึกษาการหดตัวในส่วนของความกว้างของกริป ความกว้างของเกจ ความยาวของชิ้นงาน และความหนา ซึ่งได้ระบุตำแหน่งต่างๆ ดังรูปที่ 3.11 ซึ่งได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.19, 4.20, 4.21 และ 4.22 ตามลำดับ ของชิ้นงานตัวอย่าง พบว่าการใช้อุปกรณ์เวอร์เนียร์ ซึ่งมีค่าความละเอียดในการวัด (Resolution) เท่ากับ 0.01 มิลลิเมตรนั้น ไม่เหมาะสมสำหรับใช้ตรวจวัดค่าความแตกต่างในการหดตัวของชิ้นงานตัวอย่าง เนื่องจากผลที่ได้ไม่แสดงแนวโน้มของการหดตัวที่ชัดเจน เพราะชิ้นงานที่ได้จากการเผาผนึกเหล่านี้มีการเปลี่ยนแปลงขนาดใกล้เคียงกันมาก แต่จากผลการหดตัวโดยรวมพบว่า ชิ้นงานที่ผ่านการเผาผนึกแบบสองชั้นตอนภายใต้บรรยากาศอาร์กอนมีแนวโน้มการหดตัวต่ำกว่า ชิ้นงานที่ได้จากการเผาผนึกด้วยสภาวะอื่นๆ ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะ โครงสร้างจุลภาคที่แสดงให้เห็นปริมาณรูพรุนที่มากที่สุดดังแสดงในรูปที่ 4.7 และ 4.9 ทั้งนี้รูพรุนดังกล่าวนอกจากจะเป็นตัวขัดขวางประสิทธิภาพการเผาผนึกแล้ว ยังส่งผลต่อเนื่องต่อการต้านทานการหดตัวของชิ้นงานขณะเผาผนึกอีกด้วย



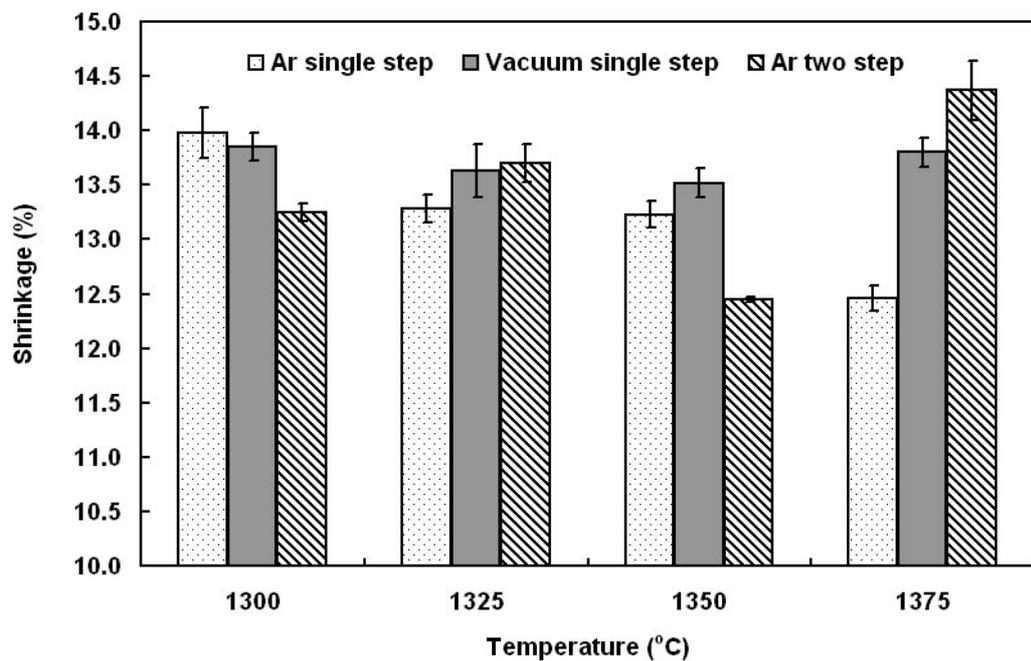
รูปที่ 4.19 ค่าการหดตัว ณ ตำแหน่งความกว้างของกริปของชิ้นงานตัวอย่างเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 17-4PH



รูปที่ 4.20 ค่าการหดตัว ณ ตำแหน่งความกว้างของเกจของชิ้นงานตัวอย่างเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 17-4PH



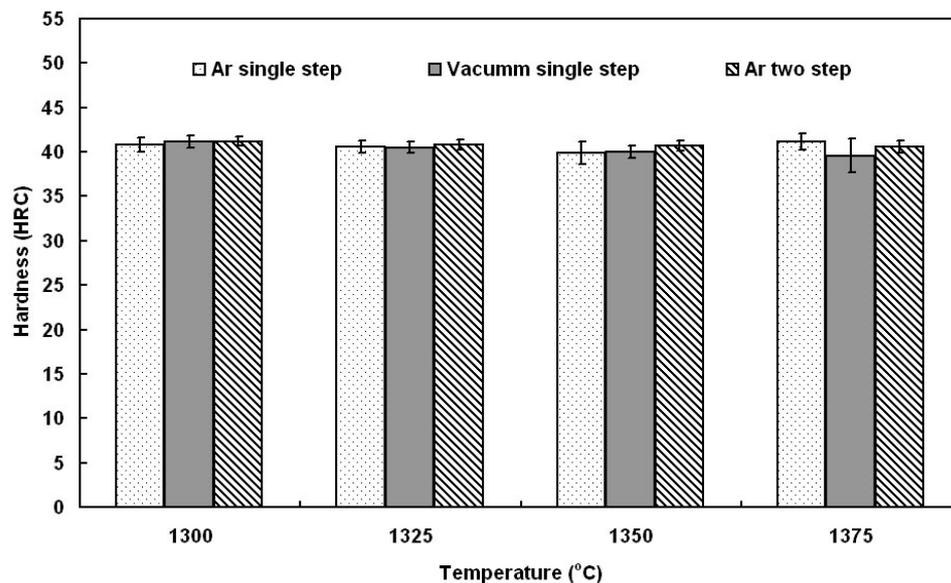
รูปที่ 4.21 ค่าการหดตัวในส่วนของความยาวของชิ้นงานตัวอย่างเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 17-4PH



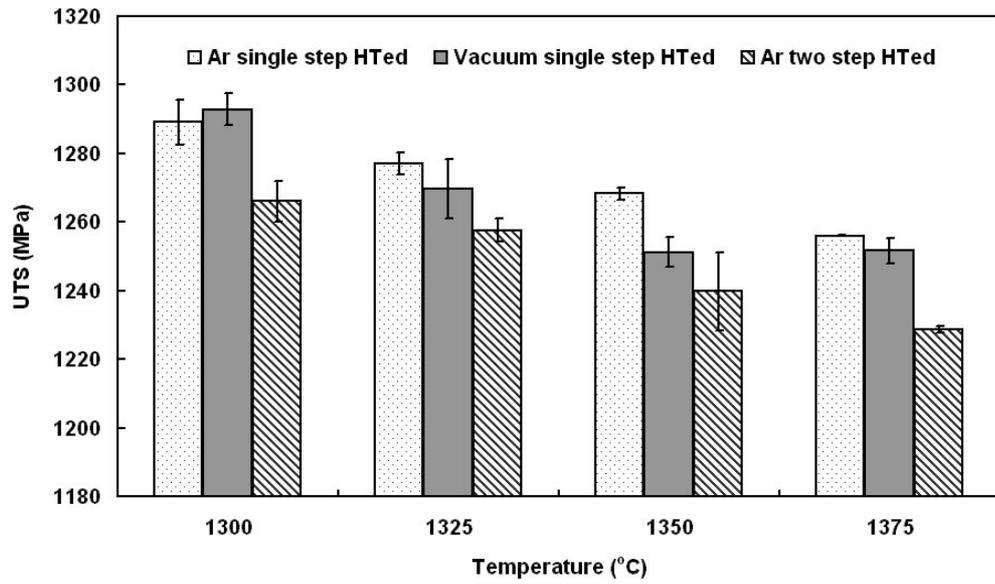
รูปที่ 4.22 ค่าการหดตัวในส่วนของความหนาของชิ้นงานตัวอย่างเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 17-4PH

## 4.9 ผลการอบชุบชิ้นงานหลังการเผาผืนิก

จากการนำชิ้นงานทดสอบที่ผ่านการเผาผืนิกภายใต้สภาวะต่างๆ ทำการอบชุบตามมาตรฐาน ASTM A564 Type 630 ซึ่งแสดงรายละเอียดของสภาวะตามรูปที่ 3.11 เพื่อตรวจสอบในเบื้องต้นถึงความสัมพันธ์ของผลการทดลองหลังการเผาผืนิกต่อผลของสมบัติเชิงกลหลังการอบชุบว่าเกี่ยวข้องกันหรือไม่นั้น พบว่าผลของความแข็งหลังการอบชุบมีค่าเฉลี่ยประมาณ 40 HRC ดังรูปที่ 4.23 ซึ่งใกล้เคียงกันในทุกอุณหภูมิเผาผืนิกและทุกสภาวะการทดลอง ทั้งนี้คาดว่าค่าความแข็งดังกล่าวมีความสัมพันธ์กับปริมาณการตกตะกอนของวัฏภาคทองแดง ซึ่งจากผลการตรวจสอบปริมาณทองแดงในหัวข้อที่ 4.7 พบว่ามีปริมาณทองแดงใกล้เคียงกันจากทุกสภาวะการเผาผืนิก ดังนั้นค่าความแข็งหลังการอบชุบจึงมีค่าไม่แตกต่างกันแต่อย่างใด ในส่วนของค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดที่แสดงดังรูปที่ 4.24 ยังคงมีแนวโน้มใกล้เคียงกับแนวโน้มของค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานเผาผืนิกในหัวข้อที่ 4.8.2 โดยผลของค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานที่ผ่านการเผาผืนิกแบบขั้นตอนเดียวภายใต้บรรยากาศอาร์กอนมีค่าสูงสุด และให้ค่าต่ำสุดเมื่อทำการกำจัดตัวประสานและเผาผืนิกแบบสองขั้นตอน ซึ่งผลดังกล่าวน่าจะเกี่ยวข้องกับลักษณะ โครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานหลังการเผาผืนิก แต่ทั้งนี้ในงานวิจัยฉบับนี้ยังไม่ได้ศึกษาถึงสาเหตุที่ชัดเจนต่อผลที่เกิดขึ้น



รูปที่ 4.23 ค่าความแข็งของชิ้นงานตัวอย่างซึ่งผ่านการอบชุบตามมาตรฐาน ASTM A564 Type 630



รูปที่ 4.24 ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานตัวอย่างซึ่งผ่านการอบชุบตามมาตรฐาน ASTM A564 Type 630

## บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการทดลองเผาผนึกชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 17-4PH โดยการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิเผาผนึก ในช่วง 1300 ถึง 1375 องศาเซลเซียส บรรยากาศเผาผนึกภายใต้บรรยากาศอาร์กอนและสุญญากาศ และขั้นตอนการกำจัดตัวประสานแบบต่อเนื่อง (กำจัดตัวประสานต่อเนื่องกับการเผาผนึก) และแบบสองขั้นตอน (แยกการกำจัดตัวประสานบางส่วนแล้วจึงเผาผนึก) พบว่าชิ้นงานที่เผาผนึกภายใต้บรรยากาศอาร์กอนจะให้ชิ้นงานที่มีผิวภายนอกมันวาวขณะที่ชิ้นงานที่ผ่านการเผาผนึกภายใต้บรรยากาศสุญญากาศทำให้ชิ้นงานมีผิวเป็นคราบขุ่นสีเทา นอกจากนี้ชิ้นงานที่เผาผนึกภายใต้บรรยากาศอาร์กอนยังมีค่าความหนาแน่นตลอดจนสมบัติเชิงกลทั้งค่าความสามารถต้านทานแรงดึง และค่าความแข็งแรงสูงกว่าชิ้นงานที่ผ่านการเผาผนึกภายใต้บรรยากาศสุญญากาศอีกด้วย และเมื่อทดลองเปรียบเทียบชิ้นงานที่ได้จากการเผาผนึกแบบสองขั้นตอนภายใต้บรรยากาศอาร์กอนพบว่าลักษณะผิวภายนอกของชิ้นงานยังคงมีผิวมันวาว ทั้งนี้ในส่วนของความหนาแน่นจะมีค่าน้อยกว่าชิ้นงานที่ได้จากการเผาผนึกภายใต้แบบขั้นตอนเดียว ซึ่งเกี่ยวข้องกับสัมพัทธ์ต่อผลของสมบัติเชิงกลอื่นๆ ที่ทำให้ค่าต่างๆ เหล่านี้ลดต่ำลงด้วยเช่นกัน ซึ่งสาเหตุเกิดจากขณะที่ทำการกำจัดตัวประสานด้วยบรรยากาศอากาศจะมีออกซิเจนปนเปื้อนแทรกซึมอยู่ในโครงสร้างและถูกกักอยู่ในรูพรุนปิดที่กระจายตัวอยู่ทั่วไป ซึ่งเป็นที่ทราบกันดีสำหรับเทคโนโลยีการขึ้นรูปโลหะว่ารูพรุนที่ปรากฏจำนวนมากในชิ้นงานส่งผลเสียต่อสมบัติต่างๆ ในส่วนของโครงสร้างทางจุลภาคที่ปรากฏในการทดลอง พบว่ามีลักษณะที่ค่อนข้างแตกต่างจากวัสดุโลหะอื่นๆ ซึ่งมักประกอบด้วยวัฏภาคของเกรนที่ชัดเจน แต่ในการทดลองนี้ยังปรากฏวัฏภาคของเคลต้าเฟอไรต์เป็นวัฏภาคที่สองที่น่าสนใจทำการศึกษาต่อไป สำหรับอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเผาผนึกชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 17-4PH คือ 1325 องศาเซลเซียส ซึ่งให้ผลของความหนาแน่นและสมบัติเชิงกลที่ดีที่สุด และอุณหภูมิที่ไม่ควรทำการเผาผนึกโลหะชนิดนี้คือ 1375 องศาเซลเซียส เนื่องจาก ณ อุณหภูมินี้จะเกิดวัฏภาคของเกรนที่มีลักษณะรียาวและไม่มีทิศทางการจัดเรียงตัวที่แน่นอน ซึ่งส่งผลเสียต่อสมบัติเชิงกลต่างๆ นอกจากนี้ยังเป็นการสิ้นเปลืองต้นทุนในส่วน of พลังงานที่ใช้อีกด้วย

## 5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยต่อไป

1. ควรทำการศึกษาการกำจัดตัวประสานซึ่งประกอบด้วยพอลิเมอร์กลุ่มเทอร์โมพลาสติกและแวคซ์ ซึ่งเป็นส่วนผสมสำคัญในการขึ้นรูปผงเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 17-4PH ในงานวิจัยนี้ ด้วยแนวทางแบบอื่น เช่นการใช้ตัวทำละลาย เพื่อช่วยลดระยะเวลาในการกำจัดตัวประสานให้สั้นลง
2. เพิ่มการศึกษาเกี่ยวกับเวลาที่ใช้ในการเผาผนึกว่ามีส่วนสำคัญมากน้อยเพียงไรต่อปริมาณการเกิดวัฏภาคเคลต้าเฟอร์ไรต์ ซึ่งวัฏภาคเฟอร์ไรต์ที่เกิดขึ้นนี้น่าจะส่งผลต่อเนื่องไปยังสมบัติเชิงกล
3. เนื่องจากเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 17-4PH เป็นวัสดุที่สามารถเพิ่มสมบัติเชิงกลได้โดยทำการอบชุบ ดังนั้นจึงควรศึกษาเพิ่มเติมในส่วนของปัจจัยของการอบชุบชิ้นงานชนิดนี้ เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยการอบชุบต่อสัณฐานวิทยา และสมบัติเชิงกล

## เอกสารอ้างอิง

1. Hwan-Jin Sung, Tae Kwon Ha, Sangho Ahn and Young Won Chang, 2002, "Powder injection molding of a 17-4PH stainless steel and the effect of sintering temperature on its microstructure and mechanical properties", **Journal of Materials Processing Technology**, 130-131, pp. 321-327.
2. Randall M. German and Animesh Bose, 1997, **Injection Molding of Metals and Ceramics**, Metal Powder Industries Federation, Princeton, New Jersey.
3. ภาณุ เวทชนุกูล, 2544, "Metal Injection Molding", **PM Tech**, ปีที่ 1, ฉบับที่ 1, หน้า 11
4. Randall M. German, 1998, **Powder Metallurgy of Iron and Steel**, John Wiley & Sons, Inc., New York.
5. EPMA, 2000, "A Manufacturing Process for Precision Engineering Component Metal Injection Moulding", European Powder Metallurgy Association.
6. R.M. German, 1989, "Optimization of the Powder-Binder Mixture for Powder Injection Molding ", **Compendium on Metal Injection Molding II**, Metal Powder Industries Federation, Princeton, New Jersey, pp. 51-65.
7. Anders Nylund, Thomas Tunberg, Hans Bertilsson, Elis Carstrom and Ingemar Olefjord, 1995, "Injection Molding of Gas and Water-Atomized Stainless Steel Powder", **The International Journal of Powder Metallurgy**, vol. 31, No.4, pp. 365-373.
8. อารดา บัญชาวิมลเชษฐ, 2544, ผลของส่วนผสมของตัวประสานต่อกระบวนการฉีดขึ้นรูปโลหะผง, วิทยานิพนธ์หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

9. Z.Y. Liu, N.H. Loh, S.B. Tor, K.A. Khor, Y. Murakoshi and R. Maeda, 2001, “Binder System for Micropowder Injection Molding”, **Materials Letters**, vol.48, pp.31-38.
10. K.C. Tam, S.P. Yap, M.L. Foong and N.H. Loh, 1997, “Metal Injection Molding : Effect of the Vinyl Acetate Content on Binder Behavior”, **Journal of Materials Processing Technology**, vol. 67, pp. 120-125.
11. Lixia Cai and Randall M. German, 1995, “Powder Injection Molding Using Water-Atomized 316L Stainless Steel”, **International Journal of Powder Metallurgy**, vol.31, no.3, pp. 257-264.
12. วิโรจน์ เตชะวิญญูธรรม, 2540,งานฉีดพลาสติก, ซีเอ็ดยูเคชั่น, กรุงเทพฯ
13. Randall M. German, 1996, **Sintering Theory and Practice**, John Wiley & Sons, Inc., New York
14. Randall M. German, 1994, **Powder Metallurgy Science**, 2<sup>nd</sup> Edition, Metal Powder Industries Federation, Princeton, New Jersey.
15. นภิสพร มีมงคล, 2548, **โลหะกรรมวัสดุผง**, สงขลา : ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
16. ASM Committee, 1984, “Production Sintering Practice foe P/M Materials”, **ASM Handbook; Powder Metallurgy**, Vol.7, pp.360-395.
17. A. Varez, B. Levenfeld, J.M. Torralba, G. Matula and L.A. Dobrzanski, 2004, “Sintering in different atmospheres of T15 and M2 high speed steels produced by a modified metal injection moulding process”, **Materials Science and Engineering**, A366, pp. 318-324.
18. J.R Davis, 1994, **ASM Specialty Handbook Stainless Steels**, ASM International Materials Park. OH

19. N. Hsiao, C.S. Chiou and J.R. Yang., 2002, "Aging reactions in 17-4 PH Stainless Steel", **Materials Chemistry and Physics**, vol. 74, pp. 134-142.
  
20. A.Shichi, A. Rota and P.Imgrund., 2006, "An investigation on the sintering behavior of 316L and 17-4PH stainless steel powders for graded composites", **Material Science and Engineering**, vol.424, pp. 282-289.

**ภาคผนวก ก.**

**เอกสารแสดงรายละเอียดและสมบัติของผงเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 17-4PH**

株式会社アトミック  
 青森県八戸市大字河原木字海岸4-44  
 〒036-1151  
 Tel.0178-73-2801  
 Fax.0178-73-2810

ATMIX CORPORATION  
 4-44 Kaigan, Kawaragi-aza, O-aza,  
 Hachinohe-shi, Aomori-kan, 039-1151 JAPAN  
 Tel.+81-178-73-2801  
 Fax.+81-178-73-2810

ATMIX

PAGE:1

## 検査証明書

発行日 2004/01/09

(No. F13410107A)

需要家 : 株式会社 モールドリサーチ  
 品名 : ステンレス鋼パウダー  
 契約量 : 100kg  
 ロット番号 : 3DV4193  
 鋼種記号 : 17-4PH  
 公称粒度 : PF-20R  
 容器数 : 4  
 総重量 : 100kg

### 化学成分 (mass %)

|         | 規格値         | 実績値   |
|---------|-------------|-------|
| C       | MAX 0.070   | 0.050 |
| Si      | MAX 1.00    | 0.80  |
| Mn      | MAX 1.00    | 0.78  |
| P       | MAX 0.040   | 0.019 |
| S       | MAX 0.030   | 0.004 |
| Ni      | 3.00~5.00   | 4.24  |
| Cr      | 15.00~17.50 | 15.60 |
| Mo      | 報告          | 0.02  |
| Cu      | 3.00~5.00   | 3.23  |
| Co      | 報告          | 0.06  |
| Nb      | 0.15~0.45   | 0.30  |
| O (ppm) | 報告          | 3300  |

### 物理的性質

| 粒度分布 (mass %) |                   | 規格値        | 実績値  |
|---------------|-------------------|------------|------|
| +30           | μm                | MAX 12.0   | 8.2  |
| 30~20         | μm                | MAX 20.0   | 12.4 |
| 20~10         | μm                | MAX 50.0   | 27.3 |
| -10           | μm                | MIN 35.0   | 52.1 |
| 平均粒径          | μm                | 9.00~11.00 | 9.73 |
| タップ密度         | g/cm <sup>3</sup> | 報告         | 4.82 |

上記注文品はご指定の規格または仕様にしたがって製造され、その要求事項を満たしていることを証明いたします。

品質管理責任者

(阿部 孝悦)

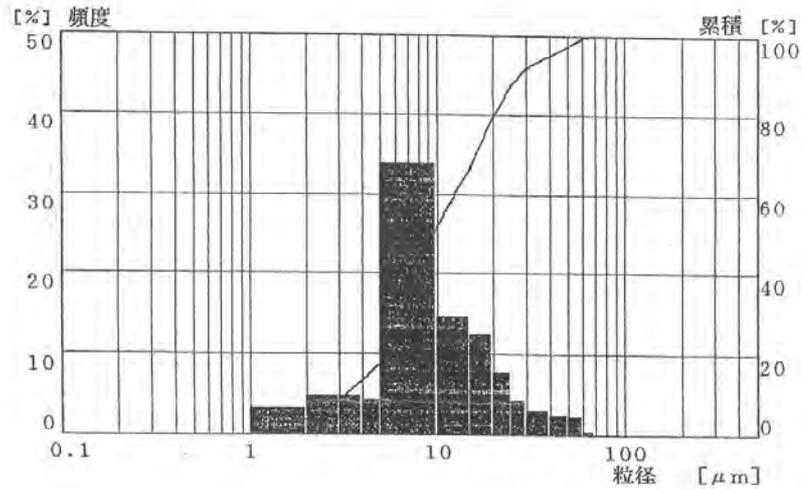


รูปที่ ก1 เอกสารกำกับรายละเอียดของผงเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 17-4PH

※※ 粒度分布測定結果 ※※

CHUETSU GRAPHITE WORKS CO.,LTD.

|               |               |         |           |
|---------------|---------------|---------|-----------|
| RUN No.       | 100           | サンプルタイム | 60        |
| サンプル名 (ID-1)  | 17-4PH:PF-20R | 計測使用レンジ | 0.9 - 176 |
| ロットNo. (ID-2) | 3DV4193       | データアドレス | 871       |
| 計測日付          | 12/26/03      | コメント    |           |
| 計測時間          | 07:28         | 備考      | 任意粒径変換    |

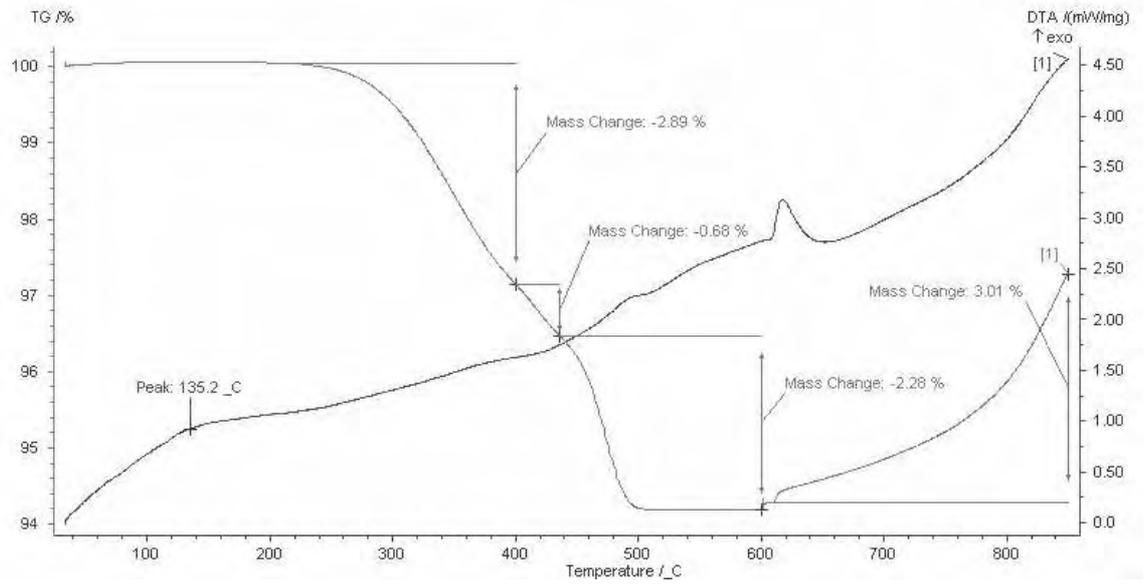


| (CH) | 粒径 (μm) | 累積 (%) | 頻度 (%) | ※ 要約データ ※   |
|------|---------|--------|--------|-------------|
| 1    | 1.00    | 0.16   | 0.16   | DV = 0.4268 |
| 2    | 2.00    | 3.69   | 3.53   | 10% = 3.26  |
| 3    | 3.00    | 8.61   | 4.92   | 50% = 9.73  |
| 4    | 4.00    | 13.56  | 4.95   | 90% = 28.28 |
| 5    | 5.00    | 17.94  | 4.38   | MV = 13.69  |
| 6    | 10.00   | 52.09  | 34.15  | CS = 0.850  |
| 7    | 15.00   | 66.78  | 14.70  |             |
| 8    | 20.00   | 79.35  | 12.57  |             |
| 9    | 25.00   | 87.33  | 7.98   |             |
| 10   | 30.00   | 91.79  | 4.46   |             |
| 11   | 40.00   | 94.97  | 3.18   |             |
| 12   | 50.00   | 97.33  | 2.36   |             |
| 13   | 60.00   | 99.55  | 2.23   |             |
| 14   | 70.00   | 100.00 | 0.45   |             |
| 15   | 80.00   | 100.00 | 0.00   |             |
| 16   | 100.00  | 100.00 | 0.00   |             |

รูปที่ ก2 เอกสารกำกับขนาดของผงเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 17-4PH

ภาคผนวก ข.

ผลการทดสอบ TGA ของเม็ดส่วนผสมตั้งต้น



รูปที่ ข1 อุณหภูมิการสลายตัวของตัวประสานในเม็ดส่วนผสมตั้งต้น

## ประวัติผู้วิจัย

|                          |  |
|--------------------------|--|
| ชื่อ-สกุล                | นางสาวชญพร ยอดแก้ว   |
| วัน เดือน ปี เกิด        | 16 กุมภาพันธ์ 2517   |
| ประวัติการศึกษา          |  |
| ระดับมัธยมศึกษา          | ประโยคมัธยมศึกษาตอนปลาย<br>โรงเรียนสตรีปากพ่อง   |
| ระดับปริญญาตรี           | วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมี<br>สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี พ.ศ. 2540  |
| ระดับประกาศนียบัตรบัณฑิต | ประกาศนียบัตรบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุ<br>มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี พ.ศ. 2542                                  |
| ระดับปริญญาโท            | วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุ<br>มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี พ.ศ. 2549                               |
| ทุนการศึกษา หรือทุนวิจัย | ทุนอุดหนุนสนับสนุนการทำวิจัยระดับบัณฑิตศึกษา สำนักงาน<br>คณะกรรมการอุดมศึกษา ทบวงมหาวิทยาลัย ปีงบประมาณ 2549                   |
| ประวัติการทำงาน          | เจ้าหน้าที่บริหารงานทั่วไป<br>สายวิชาเทคโนโลยีวัสดุ คณะพลังงานและวัสดุ<br>มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี พ.ศ. 2543-2545 |

## มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

และ

### สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ

### ข้อตกลงว่าด้วยการโอนลิขสิทธิ์ในวิทยานิพนธ์

ข้อตกลงฉบับนี้ทำขึ้นเมื่อวันที่ 20 เดือน มิถุนายน พ.ศ. 2550 โดยข้าพเจ้า นางสาวธัญพร ยอดแก้ว รหัสประจำตัว 45401311 เป็นนักศึกษาของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ระดับปริญญา  โท  เอก  ประ.ค หลักสูตร วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุ คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ อยู่บ้านเลขที่ 29/92 หมู่บ้านวารังกร์ ซอย 2/1 ถนน เลียบคลองสาม ตำบล/แขวง คลองสาม อำเภอ/เขต คลองหลวง จังหวัด ปทุมธานี รหัสไปรษณีย์ 12120 ขอโอนลิขสิทธิ์ในวิทยานิพนธ์ให้ไว้เป็นสิทธิร่วมกันระหว่างมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี โดยมี รศ.ดร.ไกรวุฒิ เกียรติโกมล ตำแหน่ง อธิการบดีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี และ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ โดยมี รศ.ดร.ศักรินทร์ ภูมิรัตน์ ตำแหน่ง ผู้อำนวยการสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ เป็นผู้รับโอนลิขสิทธิ์ โดยมีข้อตกลง ดังนี้

1. ข้าพเจ้าได้จัดทำวิทยานิพนธ์ เรื่อง “ผลของขั้นตอนการกำจัดตัวประสานและการเผาผนึกต่อสมบัติเชิงกลและโครงสร้างทางจุลภาคของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 17-4PH”\* ซึ่งอยู่ในความควบคุมของ ดร.นันทน์ วารังกร ดังนั้น วิทยานิพนธ์ฉบับดังกล่าวจึงถือเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ตามมาตรา 14 แห่ง พ.ร.บ. ลิขสิทธิ์ พ.ศ. 2537
2. ข้าพเจ้าตกลงโอนลิขสิทธิ์จากผลงานทั้งหมดที่เกิดขึ้นจากการสร้างสรรค์ของข้าพเจ้าในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ให้เป็นสิทธิร่วมกันระหว่างมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี และ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ ตลอดอายุแห่งการคุ้มครองลิขสิทธิ์ตามมาตรา 23 แห่งพระราชบัญญัติลิขสิทธิ์ พ.ศ. 2537 นับแต่วันที่ได้รับอนุมัติโครงร่างวิทยานิพนธ์จากมหาวิทยาลัย
3. ในกรณีที่ข้าพเจ้าประสงค์จะนำวิทยานิพนธ์ไปทำการเผยแพร่ไม่ว่าโดยสื่อใดๆ หรือโดยดุษฎีประสงค์ใดๆ ก็ตาม ข้าพเจ้าจะต้องระบุว่าวิทยานิพนธ์ฉบับดังกล่าวนี้เป็นผลงานร่วมกันระหว่าง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี และ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ ทุกครั้งที่มีการเผยแพร่
4. ในกรณีที่ข้าพเจ้าประสงค์จะนำวิทยานิพนธ์ไปเผยแพร่ หรืออนุญาตให้ผู้อื่นทำซ้ำ หรือคัดลอก หรือเผยแพร่ต่อสาธารณชน หรือกระทำการใดๆ ตามมาตรา 27 มาตรา 28 มาตรา 29 และมาตรา 30 แห่งพระราชบัญญัติลิขสิทธิ์ พ.ศ. 2537 อันเป็นการก่อให้เกิดค่าตอบแทนไม่ว่าจะเป็นตัวเงิน หรือไม่ก็ตาม ข้าพเจ้าจะ

กระทำได้อีกเมื่อได้รับความยินยอมเป็นลายลักษณ์อักษรจากทั้งมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี และ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ ก่อนทุกครั้ง

5. ในส่วนของการจัดสรรผลประโยชน์จากวิทยานิพนธ์ฉบับดังกล่าว ให้ทั้งมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี และ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ ดำเนินการตามที่ระบุไว้ในข้อบังคับ คณะกรรมการพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติว่าด้วยการจดทะเบียน และสิทธิประโยชน์ในทางทรัพย์สินทางปัญญา พ.ศ. 2543

นับสนุนการทำวิจัยจากศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ ลงชื่อ ช.พ.ร ๔๐๑๑๓๐ ผู้โอนลิขสิทธิ์  
(นางสาวรัชฎพร ขอดแก้ว)

นางาม ดร. นันทน์ ถาวรังกูร  
(ดร. นันทน์ ถาวรังกูร)  
อาจารย์ที่ปรึกษา

ลงชื่อ ไกรวุฒิ ผู้รับโอนลิขสิทธิ์  
(รศ.ดร. ไกรวุฒิ เกียรติโกมล)

ลงชื่อ ศกรินทร์ ผู้รับโอนลิขสิทธิ์  
(รศ.ดร. ศกรินทร์ ภูมิรัตน)

ลงชื่อ ผ่องศรี พยาน  
(ดร. ผ่องศรี เวสราวัช)

ลงชื่อ อัญชลี พยาน  
(ดร. อัญชลี มโนนุกุล)