

รายงานการวิจัย

การศึกษาวิเคราะห์หาสภาวะการผลิตที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการ
ฉีดขึ้นรูปผงเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด316L

Analysis of an Optimum Process Condition for Metal Injection Molding
Process for Stainless Steel 316L

โดย

ผศ.ดร. จุฬาลักษณ์ คำไม้

ภาควิชาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์

แหล่งทุน



สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

พ.ศ. 2549

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย) : การศึกษาวิเคราะห์หาสภาวะการผลิตที่เหมาะสมสำหรับ
กระบวนการฉีดขึ้นรูปโลหะผสมเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316L
นักวิจัยหัวหน้าโครงการ ผศ.ดร.จุฬาลักษณ์ คำไม้
หน่วยงาน ภาควิชาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์
หมายเลขโทรศัพท์ 913-2500 ต่อ 8208 โทรสาร 025870029
ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยประเภท ทุนนักวิจัยรุ่นใหม่ ประจำปี 2549
งบประมาณรวมตลอดโครงการ 40,000 บาท

บทคัดย่อ

เทคโนโลยีการฉีดขึ้นรูปโลหะผสม (Metal Injection Molding; MIM) เป็นเทคโนโลยีการผลิตที่เหมาะสมสำหรับชิ้นส่วนโลหะที่มีขนาดเล็กและรูปร่างซับซ้อนในปริมาณมาก โดยขั้นตอนหลักประกอบด้วย การเตรียมเม็ดผสมของโลหะและตัวประสาน การฉีดเม็ดผสมเข้าแม่พิมพ์ การขจัดตัวประสาน และการเผาผืนิก พฤติกรรมของชิ้นงานในช่วงของการเผาผืนิกนั้นมีความสำคัญเพราะมีผลต่อการออกแบบแม่พิมพ์ที่ใช้ในขั้นตอนการฉีดขึ้นรูปอีกทั้งสภาวะของการเผาผืนิกมีผลต่อคุณสมบัติทางกลของชิ้นงานสำเร็จ ผลจากการปรับเปลี่ยนตัวแปรต่างๆ ให้เหมาะสมจะช่วยลดค่าใช้จ่ายที่ใช้ในกระบวนการและยังคงไว้ซึ่งคุณสมบัติตามมาตรฐานที่กำหนด

โครงการนี้จะทำการศึกษาค่าตัวแปรสภาวะการเผาผืนิกดังนี้ อุณหภูมิ เวลา และบรรยากาศ พบว่า การลดอุณหภูมิในช่วงเผาผืนิกจะทำให้คุณสมบัติต่างๆ แอลง ยกเว้นค่าความต้านแรงดึงตราบที่ยังคงมีค่าสูง การใช้อุณหภูมิในช่วง $1300\text{ }^{\circ}\text{C} - 1350\text{ }^{\circ}\text{C}$ ค่าคุณสมบัติทางกลที่ได้ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ และยังคงมีค่าคุณสมบัติทั้งหมดอยู่ในช่วงที่กำหนดโดยมาตรฐาน การลดเวลาที่ใช้ในช่วงการเผาผืนิกทำให้คุณสมบัติต่างๆ แอลงเช่นเดียวกับการลดลงของอุณหภูมิ การใช้เวลา 1.5 ชั่วโมงทำให้ได้ค่าความต้านแรงดึงตราบสูงกว่า การใช้เวลา 2 ชั่วโมง ในขณะที่คุณสมบัติอื่นๆ นั้นไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ และยังคงมีค่าคุณสมบัติทั้งหมดอยู่ในช่วงที่กำหนดโดยมาตรฐาน และการใช้บรรยากาศสุญญากาศในช่วงการเผาผืนิกทำให้เกิดการหดตัวมากกว่าการใช้บรรยากาศก๊าซอาร์กอน พร้อมกับค่าคุณสมบัติอื่นๆ ที่ดีกว่า ยกเว้นค่าความแข็งที่มีค่าน้อยกว่า และค่าคุณสมบัติทั้งหมดที่ได้อยู่ในช่วงที่กำหนดโดยมาตรฐาน

Project title	Analysis of an optimum process condition for metal injection molding process for Stainless steel 316L	
Principle researcher	Assistant Prof. Julaluk Carmai, DPhil Department of Production Engineering Faculty of Engineering	
Tel. No.	9132500 exl 8208 .	9132500
Type of grant	New researcher	Year 2006
Budget	40.000 bahts	

Abstract

Metal Injection Molding (MIM) is an advanced manufacturing process, which is suitable for producing small and complex metal structures in large volume. The process includes preparation of feed stock, injection moulding as well as debinding and sintering. Controlling of behaviour of material during sintering is important as it has effects of the mold design as well as quality of finished parts. Obtaining optimal sintering conditions can assist in reducing cost but still maintain standard properties. This project aims at studying the effects of sintering variables on properties of finished part by consideration of sintering at various temperature, time and atmospheres. It has been found that reducing sintering temperature degrades most of the properties of finished parts except the yield strength, which is still high. It has also found that sintering at 1300°C-1350°C has little effect on properties of finished parts. In addition all properties are still within standard. When comparing finished part properties obtained from 1.5 hr. sintering time to those obtained from 2 hr. sintering time, most of properties show little difference. Sintering in vacuum resulting in larger shrinkage of workpiece than those in Argon gas. In addition, the other properties of finished parts is also better except the hardness. However, all properties are within standard.

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนการวิจัยจาก สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ทู่นักวิจัย
รุ่นใหม่ ประจำปี 2549 ขอขอบคุณนักศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมการผลิต นายรักเกียรติ ไชติกะ นายอาทิตย์
ปุ่นหา และ นางสาวฉวีวงศ์ ชูศิริ ผู้ช่วยทำการทดลองในโครงการนี้

สารบัญ

บทคัดย่อ (ไทย)		i
Abstract		ii
กิตติกรรมประกาศ		iii
สารบัญ		iv
สารบัญตาราง		v
สารบัญรูป		vi
บทที่ 1 บทนำ		1
1.1	ปัญหาที่ทำไมวิจัยและความสำคัญของปัญหา	1
1.2	วัตถุประสงค์ของโครงการ	2
1.3	ขอบเขตของงานวิจัย	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง		4
2.1	เทคโนโลยีการฉีดขึ้นรูปโลหะผง	4
2.1.1	การประยุกต์ใช้งานของเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316L	6
2.2	ทฤษฎีการเผาผืนึก	7
2.3	แนวความคิดพื้นฐานของการเผาผืนึก	10
2.4	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องสำหรับกระบวนการเผาผืนึกของเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316L	12
2.5	ตัวแปรที่สนใจพิจารณาในการทำโครงการครั้งนี้	16
2.5.1	อุณหภูมิในช่วงการเผาผืนึก	16
2.5.2	บรรยากาศที่ใช้ภายในเตา	16
2.5.3	เวลาที่ใช้ในช่วงการเผาผืนึก	17
บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงานและการออกแบบการทดลอง		18
3.1	การออกแบบขั้นตอนในการทดลอง	18
3.2	โลหะผง (Powder) ที่ใช้	19
3.3	บรรยากาศ (Furnace atmosphere)	20
3.4	รายการข้อมูลของเครื่องจักร/อุปกรณ์ที่ใช้	20
3.5	ขั้นตอนการทดลอง	21
3.5.1	การฉีดขึ้นรูป	21
3.5.2	วัดขนาดชิ้นงานหลังฉีดเพื่อนำไปหาเปอร์เซ็นต์การหดตัว	22
3.5.3	หาค่าความหนาแน่นของชิ้นงานโดยวิธีแทนที่น้ำ	22
3.5.4	การเผาชิ้นงานในเตาเผาผืนึกตามเงื่อนไขที่กำหนด	23
3.5.5	การทดสอบแรงดึง	24
3.5.6	การทดสอบความแข็ง	25
3.5.7	การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานทดสอบ	25

สารบัญ (ต่อ)

บทที่ 4	ผลการศึกษาและการวิเคราะห์ผล	27
4.1	ผลกระทบจากตัวแปรในช่วงเผาผนึกที่มีต่อการหดตัวและความหนาแน่นของชิ้นงาน	27
4.1.1	ผลจากบรรยากาศในช่วงของการเผาผนึก	27
4.1.2	ผลจากอุณหภูมิในช่วงของการเผาผนึก	28
4.2	ผลกระทบจากตัวแปรในช่วงเผาผนึกที่มีต่อค่าความแข็งของชิ้นงาน	32
4.2.1	ผลจากบรรยากาศในช่วงของการเผาผนึก	32
4.2.2	ผลจากอุณหภูมิในช่วงของการเผาผนึก	34
4.3	ผลกระทบจากตัวแปรในช่วงเผาผนึกที่มีต่อค่าความต้านแรงดึงของชิ้นงาน	35
4.4	การกระจายรูพรุนที่แตกต่างกันบริเวณขอบ และบริเวณใจกลางชิ้นงาน	46
4.5	ลักษณะบกพร่องต่างๆ ที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานทดสอบแรงดึง	47
บทที่ 5	สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	49
5.1	สรุปผลการทดลอง	49
5.2	ข้อเสนอแนะ	51
	เอกสารอ้างอิง	52
ภาคผนวก ก.	ข้อมูลเกี่ยวกับการทดสอบก่อนและหลังการเผาผนึกของผงเหล็กกล้าไร้สนิม	53

สารบัญตาราง

		หน้า
ตารางที่ 2.1	การเปรียบเทียบลักษณะและสมบัติของผงโลหะจากกรรมวิธีที่ต่างกัน	6
ตารางที่ 2.2	ผลของปัจจัยในการเผาผนึกต่อการหดตัว ค่าความหนาแน่น คุณสมบัติเชิงกล ของเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316L	12
ตารางที่ 2.3	ตารางแสดงค่าคุณสมบัติทางกลที่ได้จากการทดสอบแรงดึงที่ระดับเปอร์เซ็นต์ของรูปพรรณต่างกัน	16
ตารางที่ 3.1	แสดงส่วนผสมทางเคมีของผงเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316L ที่ใช้ในโครงการครั้งนี้ พร้อมกับค่ามาตรฐานของส่วนผสมทางเคมีที่กำหนดโดยสมาพันธ์อุตสาหกรรมโลหะแห่งอเมริกา (MPIF)	20
ตารางที่ 3.2	แสดงคุณสมบัติทางกายภาพของผงเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316L ที่ใช้ในโครงการครั้งนี้	20
ตารางที่ 3.3	รายการข้อมูลของเครื่องจักร/อุปกรณ์ที่ใช้ในโครงการ	21
ตารางที่ 3.4	ตัวแปรที่ใช้ในการฉีด	22
ตารางที่ 3.5	แสดงขนาดของชิ้นงานหลังฉีด พร้อมด้วยขนาดของแม่พิมพ์ ณ ตำแหน่งเดียวกันที่ทำการวัด	23
ตารางที่ 3.6	การปรับเปลี่ยนตัวแปรที่ใช้ในการทดลองในช่วงของการเผาผนึก	24
ตารางที่ 3.7	การปรับเปลี่ยนตัวแปรที่ใช้ในการทดลองในช่วงของการเผาผนึก ณ อุณหภูมิคงที่	24
ตารางที่ 4.1	แสดงเปอร์เซ็นต์การหดตัว (%) ณ ตำแหน่งต่างๆ ที่ทำการวัดโดยบรรยากาศในการเผาต่างกัน	27
ตารางที่ 4.2	แสดงเปอร์เซ็นต์การหดตัว (%) ณ ตำแหน่งต่างๆ ที่ทำการวัด โดยอุณหภูมิในการเผาต่างกัน	28
ตารางที่ 4.3	แสดงค่าความแข็งที่วัดได้ตามตำแหน่งที่กำหนดโดยบรรยากาศในการเผาต่างกัน	32
ตารางที่ 4.4	แสดงค่าความแข็งที่วัดได้ตามตำแหน่งที่กำหนดโดยอุณหภูมิในการเผาต่างกัน	34
ตารางที่ 4.5	สรุปผลค่าคุณสมบัติต่างๆ ที่ได้จากการทดสอบแรงดึงในโครงการครั้งนี้	39
ตารางที่ 4.6	ค่าคุณสมบัติต่างๆ ซึ่งเป็นผลจากการปรับเปลี่ยน Condition ในช่วงเผาผนึก	39
ตารางที่ 4.7	สรุปผลที่ได้จากการทดลองซึ่งเป็นผลจากการปรับเปลี่ยนตัวแปรต่างๆ ในช่วงเผาผนึก	45

สารบัญรูป

		หน้า
รูปที่ 1.1	ชิ้นงานผลิตโดยการฉีดยาขึ้นรูปโลหะ	1
รูปที่ 1.2	ยอดขายชิ้นส่วนจากกระบวนการฉีดยาขึ้นรูปโลหะ	2
รูปที่ 2.1	แนวคิดของเทคโนโลยีการฉีดยาขึ้นรูปโลหะผง	4
รูปที่ 2.2	ลำดับขั้นตอนของเทคโนโลยีการฉีดยาขึ้นรูปโลหะผง	4
รูปที่ 2.3	ตัวอย่างของชิ้นงานที่ผลิตโดยการฉีดยาขึ้นรูปโลหะผง	5
รูปที่ 2.4	แสดงภาพ Scanning Electron Microscope (SEM) ของการเกิดคอคอยด์ (Neck growth) ในสภาวะของแข็ง (Solid-state) ของอนุภาคทรงกลมที่ยึดติดต่อกันผลจากคอคอยด์ที่เกิดขึ้นจะทำให้คุณสมบัติเปลี่ยนแปลงไป	7
รูปที่ 2.5	แสดงภาพ SEM ของการเผาไหม้ในช่วงแรกและคอคอยด์ที่เกิดขึ้น และ แสดงให้เห็น การสัมผัสกันระหว่างสามอนุภาคพร้อมกับกลไกพื้นฐานในการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นในช่วงของการเผาไหม้	8
รูปที่ 2.6	แสดงลักษณะรูปร่างของคอคอยด์ (Neck growth) ของสองอนุภาคที่มีความยาวคอคอยด์ (X) และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาค (D) พร้อมตัวแปรที่มีความโค้ง (P) บริเวณคอคอยด์ และ แสดงภาพ SEM ของสองอนุภาคที่เผาไหม้กัน	9
รูปที่ 2.7	แสดงผลกระทบจากช่วงเวลาในการเผาไหม้ (สองอุณหภูมิที่แตกต่างกัน) และ ลักษณะโดยทั่วไปที่เกิดจากอัตราส่วนของคอคอยด์ เช่น การลดลงของพื้นที่ผิว การหดตัว และการแน่นตัว	9
รูปที่ 2.8	แบบจำลองของการเผาไหม้ของอนุภาคทรงกลมสองอนุภาค ซึ่งเริ่มต้นจากจุดสัมผัสระหว่างอนุภาคก่อนที่จะมีการเพิ่มขนาดของคอคอยด์สร้างขอบเกรนที่รอยต่อระหว่างอนุภาคและในที่สุดรวมกันเป็นหนึ่งอนุภาคใหญ่	10
รูปที่ 2.9	ภาพขยายโครงสร้างจุลภาคของการประสานกันในระยะแรก (Initial stage bonding) ของอนุภาค	11
รูปที่ 2.10	ภาพขยายโครงสร้างจุลภาคของการประสานกันในระยะกลาง (Intermediate Stage) ของอนุภาค	11
รูปที่ 2.11	ภาพขยายโครงสร้างจุลภาคแสดงการหดกลบของรูพรุนและการขยายตัวขึ้นของขอบเกรน (Grain growth) ซึ่งเป็นระยะสุดท้าย (Final stage) ที่เกิดขึ้นในกระบวนการเผาไหม้	12
รูปที่ 2.12	SEM Photograph แสดงโครงสร้างจุลภาคหลังจากเผาไหม้ที่เงื่อนไขในการเผาแตกต่างกันของชิ้นงานทดสอบ	14
รูปที่ 2.13	แสดงผลจากการทดสอบแรงดึงที่ระดับสัดส่วน (%) รูพรุนต่อปริมาตรที่แตกต่างกัน	15
รูปที่ 2.14	แสดงผิวแตกหักซึ่งจะเห็นลักษณะทรงกลมของรูพรุนตามบริเวณขอบเกรน	15
รูปที่ 2.15	แสดงกระบวนการผลิตแบบต่อเนื่องของกระบวนการฉีดยาขึ้นรูปโลหะผง	17
รูปที่ 3.1	กราฟแสดงอัตราการให้ความร้อนภายในเตาเผาไหม้	18
รูปที่ 3.2	แผนผังแสดงขั้นตอนการดำเนินการทดลอง	19
รูปที่ 3.3	แสดงขนาดของชิ้นงานทดสอบแรงดึงที่ใช้ในการทดลอง	22
รูปที่ 3.4	แสดงตำแหน่งที่ทำการวัดขนาดชิ้นงานทดสอบแรงดึง	22

รูปที่ 3.5	แสดงการจัดเตรียมชิ้นงานก่อนที่จะเข้าเตาเผาผืนึก	23
สารบัญญรูป (ต่อ)		
		หน้า
รูปที่ 3.6	แสดงชิ้นงานทดสอบแรงดึง	25
รูปที่ 4.1	แสดงตำแหน่งต่างๆ ที่ทำการวัด	27
รูปที่ 4.2	แสดงภาพโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านการเผาผืนึก	28
รูปที่ 4.3	กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์การหดตัว ณ ตำแหน่งต่างๆ บนชิ้นงาน	29
รูปที่ 4.4	กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์การหดตัวระหว่างแต่ละ Condition ที่ทำการทดลอง	29
รูปที่ 4.5	กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์การหดตัว ณ ตำแหน่งต่างๆ บนชิ้นงาน	30
รูปที่ 4.6	กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์การหดตัวระหว่างแต่ละ Condition ที่ทำการทดลอง	30
รูปที่ 4.7	แสดงการหดตัวของชิ้นงานทดสอบแรงดึงก่อนขจัดตัวประสาน เทียบกับขนาดหลัง จากผ่านการเผาผืนึกแล้ว	31
รูปที่ 4.8	แสดงการหดตัวจากขนาดแม่พิมพ์ไปเป็นขนาดหลังเผาผืนึก	31
รูปที่ 4.9	แสดงชิ้นงานทดสอบแรงดึงและตำแหน่งต่างๆ ที่ได้ทำการวัดค่าความแข็ง	33
รูปที่ 4.10	แสดงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเผาที่อุณหภูมิต่างๆ กัน	34
รูปที่ 4.11	กราฟแสดงค่าความแข็งระหว่างแต่ละ condition ที่ทำการทดลอง	35
รูปที่ 4.12	กราฟแสดงค่าความต้านแรงดึง และค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของชิ้นงานทดสอบแต่ละ Condition	38
รูปที่ 4.13	แสดงค่าความต้านแรงดึง และค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของชิ้นงานทดสอบรวมทุก Condition	38
รูปที่ 4.14	กราฟแสดงค่าความหนาแน่นระหว่างแต่ละ Condition ที่ทำการทดลอง	40
รูปที่ 4.15	กราฟแสดงค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ระหว่างแต่ละ Condition ที่ทำการทดลอง	41
รูปที่ 4.16	แสดงผลกระทบของขนาดเกรนต่อค่าคุณสมบัติทางกล ซึ่งเป็นผลมาจา การเพิ่มขึ้น ของอุณหภูมิ	41
รูปที่ 4.17	แสดงการ เปรียบเทียบขนาดของเกรนที่ Condition ในการเผาผืนึกต่างๆ กัน	42
รูปที่ 4.18	แสดงการเปรียบเทียบขนาดของรูพรุนที่ Condition ในการเผาผืนึกต่างๆ กัน	43
รูปที่ 4.19	แสดงชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบแรงดึง	44
รูปที่ 4.20	เปรียบเทียบขนาด ของรูพรุนบริเวณใจกลางชิ้นงานกับบริเวณขอบชิ้นงาน (Condition 4)	46
รูปที่ 4.21	เปรียบเทียบความหนาแน่นในการกระจายตัวของรูพรุนบริเวณใจกลางชิ้นงานกับ บริเวณขอบชิ้นงาน (Condition 2)	46
รูปที่ 4.22	แสดงชิ้นงานชิ้นงานทดสอบแรงดึงที่มีปัญหาในขั้นตอนการฉีด	47
รูปที่ 4.23	แสดงรอยแตกภายใน (Condition 1, บริเวณ gage length)	47
รูปที่ 4.24	แสดงรอยแตกภายใน (Condition 6, บริเวณ gage length)	47
รูปที่ 4.25	แสดงรอยแตกภายใน (Condition 1, บริเวณ gage length) หลังจากการทดสอบคุณสมบัติทางกล	48

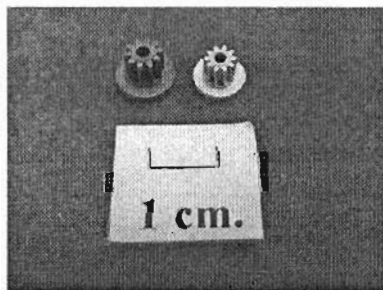
บทที่ 1

บทนำ

1.1 ปัญหาที่ทำวิจัยและความสำคัญของปัญหา

กระบวนการฉีดขึ้นรูปได้รับความนิยมใช้กันอย่างแพร่หลายมาหลายสิบปีสำหรับพลาสติก และเมื่อ 20 กว่าปีที่ผ่านมาเริ่มมีการนำวัสดุอื่นที่ไม่ใช่พลาสติก เช่น ผงโลหะ และผงเซรามิกส์ มาฉีดขึ้นรูปซึ่งได้รับความนิยมอย่างมาก เทคโนโลยีการฉีดขึ้นรูปโลหะผง MIM (Metal Injection Molding) เป็นกระบวนการผลิตที่ประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการฉีดพลาสติก (Plastic injection molding) สำหรับขึ้นรูป และเพิ่มความแข็งแรงให้กับชิ้นงานฉีดโดยวิธีทางโลหะผงวิทยา (Powder metallurgy) ขั้นตอนหลักประกอบด้วย การเตรียมเม็ดส่วนผสม (feedstock) ประกอบด้วยโลหะและตัวประสาน (binder) ซึ่งส่วนใหญ่เป็นพอลิเมอร์ การฉีดเม็ดส่วนผสม การไล่ตัวประสาน (debinding) และการเผาขึ้นเตอริง (sintering)

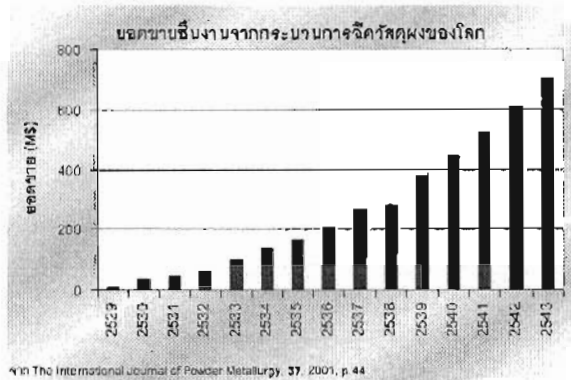
กระบวนการนี้เป็นกระบวนการที่มีเศษเหลือทิ้งน้อยมาก ชิ้นงานที่ได้มีขนาดใกล้เคียงกับชิ้นงานสุดท้าย (nearnet shape) และมีพิสัยความคลาดเคลื่อนของชิ้นงานน้อยมาก และสมบัติชิ้นงานจากการฉีดขึ้นรูปมีสมบัติเทียบเท่าชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีการขึ้นรูปด้วยแรงทางกล (wrought material) เช่น การทุบขึ้นรูป (forging) หรือ การรีด (rolling) ด้วยเหตุนี้ทำให้เทคโนโลยีการฉีดขึ้นรูปโลหะผงได้รับความนิยมสูงในการผลิตชิ้นส่วนโลหะที่มีขนาดเล็กและมีรูปร่างซับซ้อนซึ่งชิ้นงานเหล่านี้หากมีการผลิตในจำนวนมากจะนิยมใช้กระบวนการฉีดขึ้นรูปโลหะผง ทดแทนกระบวนการหล่อประณีต (precision casting) และการตัดปาดประณีต (precision machining) รูปที่ 1.1 แสดงชิ้นงานโลหะขนาดเล็กและซับซ้อนที่ผลิตด้วยกระบวนการฉีดขึ้นรูปโลหะผง ชิ้นที่ใหญ่กว่าเป็นชิ้นงานหลังขั้นตอนการฉีดก่อนนำไปเผาขึ้นเตอริง ส่วนชิ้นงานที่มีขนาดเล็กกว่าเป็นชิ้นงานเดียวกันหลังการเผาขึ้นเตอริง สังเกตว่าชิ้นงานมีการหดตัวมาก ประมาณร้อยละ 40 โดยปริมาตรหรือเท่ากับปริมาณตัวประสานที่ถูกผสมกับผงโลหะในขั้นตอนเริ่มต้น พฤติกรรมการหดตัวขณะเผามีความสำคัญและอาจมีผลให้เกิดการบิดเบี้ยวหรือการแตกร้าวของชิ้นงานได้โดยเฉพาะชิ้นงานที่มีความซับซ้อนมาก การออกแบบแม่พิมพ์จึงต้องคำนึงถึงการหดตัวเนื่องจากการเผา มีตัวแปรหลายประการที่มีผลต่อการหดตัวไม่ว่าจะเป็นปริมาณตัวประสาน ตัวแปรในการฉีด ตัวแปรในการเผา และอัตราส่วนขนาดของชิ้นงานเอง อีกทั้งตัวแปรเหล่านี้ยังมีผลต่อคุณสมบัติของเชิงกลของชิ้นงานด้วย



รูปที่ 1.1 ชิ้นงานผลิตโดยการฉีดขึ้นรูปโลหะผง

กระบวนการฉีดขึ้นรูปโลหะผงในประเทศไทยถือว่าเป็นเทคโนโลยีการผลิตใหม่ ปัจจุบันมีบริษัทเอกชนในประเทศไทยที่ผลิตด้วยวิธีนี้เพียงหนึ่งแห่งเท่านั้นซึ่งเป็นบริษัทของประเทศญี่ปุ่น แต่ในต่างประเทศได้มีการใช้กระบวนการผลิตนี้ค่อนข้างเป็นที่แพร่หลายและมีการผลิตอย่างต่อเนื่องดังแสดงในรูปที่ 1.2 ทั้งนี้เนื่องจากสามารถ

ผลิตชิ้นงานโลหะที่ซับซ้อนจำนวนมากได้ในต้นทุนที่ต่ำกว่าวิธีอื่นๆ เมื่อผลิตในจำนวนมากและชิ้นงานมีความซับซ้อน เทคโนโลยีการผลิตนี้ถูกคาดการณ์ว่าจะมีความสำคัญต่ออุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์และอุตสาหกรรมชิ้นส่วนไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ในประเทศไทยในอนาคต



รูปที่ 1.2 ยอดขายชิ้นส่วนจากกระบวนการฉีดวัสดุผงของโลก

โครงการนี้จึงเสนอขึ้นเพื่อทำการวิจัยเกี่ยวกับเทคโนโลยีการฉีดขึ้นรูปโลหะผง ดังที่ได้กล่าวมาข้างต้นว่ามีตัวแปรหลายประการที่มีผลต่อพฤติกรรมการหดตัวและคุณสมบัติของชิ้นงาน โครงการนี้จะทำการศึกษาหาตัวแปรในการผลิตที่เหมาะสมสำหรับการฉีดและเผาขึ้นเตอร้งโดยเลือกใช้ผงเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316L ข้อมูลที่ได้จากโครงการจะเป็นประโยชน์ต่อการออกแบบแม่พิมพ์ฉีดและต่อการผลิตชิ้นส่วนโดยการฉีดขึ้นรูปโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316L โครงการนี้ได้ขอความร่วมมือกับทางศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติซึ่งเป็นศูนย์วิจัยเฉพาะเทคโนโลยีการผลิตโลหะผงในการขอใช้เครื่องฉีด ทางศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาตินั้นมีความร่วมมือกับทางรัฐบาลญี่ปุ่นและกลุ่มผู้ผลิตชิ้นงานฉีดโลหะผงของประเทศญี่ปุ่นเพื่อจะสร้างความพร้อมในการถ่ายทอดเทคโนโลยีการผลิตใหม่ให้แก่กลุ่มอุตสาหกรรมไทย โครงการที่เสนอนี้จะมีส่วนช่วยในการสนับสนุนและส่งเสริมเทคโนโลยีการผลิตขึ้นรูปโลหะผงให้กับบริษัทผู้ผลิตไทยหลายแห่งที่สนใจการผลิตชิ้นส่วนโดยเทคโนโลยีการฉีดขึ้นรูปโลหะแต่ยังไม่มีความรู้ความเข้าใจเพียงพอ หากบริษัทในประเทศไทยสามารถผลิตชิ้นส่วนอุปกรณ์การแพทย์ ชิ้นส่วนเครื่องมืออุตสาหกรรม ชิ้นส่วนไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ที่มีขนาดเล็กและซับซ้อน เช่น อุปกรณ์สื่อสารหรือในนาฬิกา ได้มากขึ้นก็จะสามารถลดการนำเข้าและส่งเสริมการส่งออกได้

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

- เพื่อทำการศึกษาและพัฒนากรรมวิธีการขึ้นรูปชิ้นส่วนที่มีขนาดเล็กและความซับซ้อนสูงด้วยการฉีดขึ้นรูปโลหะผง
- ▣ เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างของตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในกระบวนการฉีดขึ้นรูปโลหะผงนำ และอิทธิพลของตัวแปรต่อคุณสมบัติเชิงกล นำไปสู่สภาวะการผลิตที่เหมาะสม
- ศึกษาและวิเคราะห์การหดตัวของชิ้นงานที่ทำจากผงเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316L เพื่อเป็นการนำเสนอและเผยแพร่เทคโนโลยีการฉีดขึ้นรูปโลหะผงซึ่งเป็นเทคโนโลยีใหม่ในการผลิตให้กับภาคอุตสาหกรรม

1.3 ขอบเขตการวิจัย

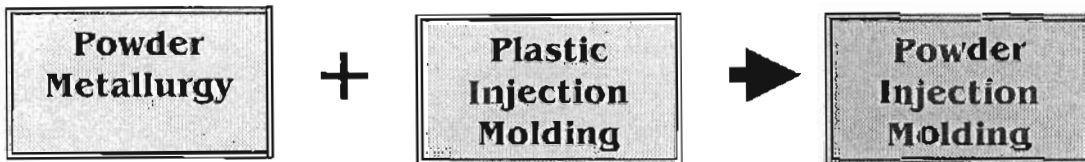
- กระบวนการที่ใช้ในการศึกษา คือ กระบวนการฉีดขึ้นรูปโลหะผง (Metal Injection Molding . MIM)
- วัสดุที่ใช้ในการศึกษาในโครงการนี้ คือ เหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316L
- ทำการศึกษาสภาวะเฉพาะในส่วนของการเผาซินเตอร์ริง (Sintering)
- ตัวแปรที่ทำการศึกษาในช่วงของการเผาซินเตอร์ริง (Sintering) มีดังต่อไปนี้ อุณหภูมิ บรรยากาศ เวลา

บทที่ 2

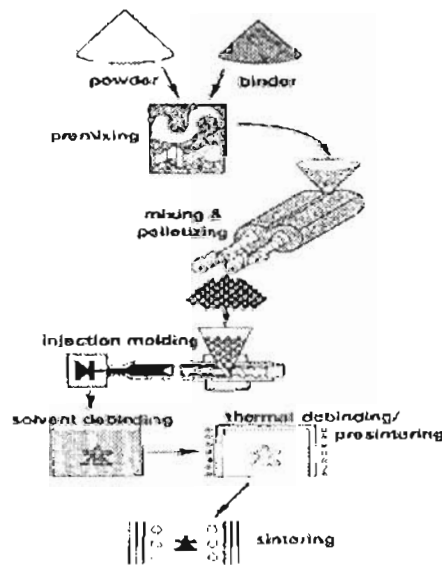
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 เทคโนโลยีการฉีดขึ้นรูปโลหะผง (Metal Injection Molding : MIM)

เทคโนโลยีการฉีดขึ้นรูปโลหะผงเป็นเทคโนโลยีการผลิตที่เหมาะสมสำหรับใช้ในการผลิตชิ้นส่วนที่มีขนาดเล็กและรูปร่างมีความซับซ้อนสูงได้ในปริมาณมาก (mass production) โดยกระบวนการนั้นเป็นการประยุกต์รวมเอาเทคโนโลยีการฉีดขึ้นรูปพลาสติก (plastic injection molding) และกระบวนการโลหะวัสดุผงวิทยา (Powder Metallurgy : P/M) เข้าด้วยกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.1 โดยเทคโนโลยีการฉีดขึ้นรูปโลหะผงได้มีการประยุกต์ใช้ในหลายๆ อุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมยานยนต์ อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ อุตสาหกรรมเคมี เครื่องมือและอุปกรณ์ในทางการแพทย์ เป็นต้น [8]



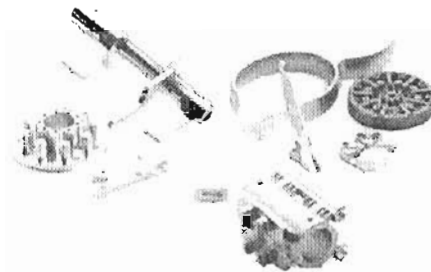
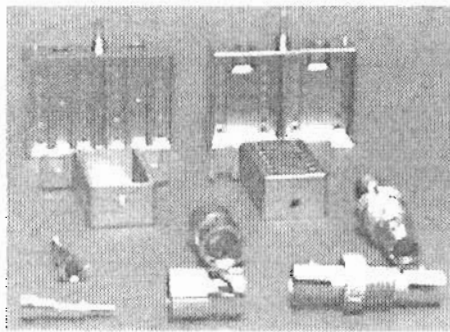
รูปที่ 2.1 แนวคิดของเทคโนโลยีการฉีดขึ้นรูปโลหะผง [1]



รูปที่ 2.2 ลำดับขั้นตอนของเทคโนโลยีการฉีดขึ้นรูปโลหะผง [1]

รูปที่ 2.2 แสดงลำดับขั้นตอนที่สำคัญของเทคโนโลยีการฉีดขึ้นรูปโลหะผงซึ่งขั้นตอนหลักในกระบวนการฉีดขึ้นรูปวัสดุผงนั้นจะประกอบไปด้วย 4 ขั้นตอน คือ การเตรียมเม็ดส่วนผสมของโลหะและตัวประสาน (premixing) การฉีดเม็ดส่วนผสมเข้าแม่พิมพ์ (injection molding) การขจัดตัวประสาน (debinding) และการเผาผนึก (sintering) โดยทั่วไปอนุภาคโลหะที่ใช้จะมีขนาดเล็กและต่ำกว่า 20 ไมครอน ซึ่งขนาดเล็กที่ว่าจะช่วยให้การเผา

ผนักทำได้รวดเร็วขึ้น ด้วยรูปร่างที่ใกล้เคียงกับทรงกลมของผงจะช่วยให้การฉีดเข้าแม่พิมพ์ทำได้ง่าย และมีความหนาแน่นในการอัดตัว (packing density) สูง ตัวประสานที่ใช้ผสมกับผงโลหะมีหลายชนิดแต่ที่ได้รับความนิยมมากที่สุด คือ ตัวประสานที่ประกอบด้วยส่วนผสมของวัสดุเทอร์โมพลาสติก เช่น โพลีเอทิลีน (PE) โพลีโพรพิลีน (PP) และซีพีอีพาราฟิน (PAW) หลังจากผ่านกระบวนการเตรียมเม็ดส่วนผสม ถัดไปก็จะเป็นการฉีดเม็ดส่วนผสมหลอมเหลวเข้าแม่พิมพ์โดยชิ้นงานหลังการฉีดเมื่อเย็นตัวลงจะมีความแข็งในระดับหนึ่ง เพื่อให้ง่ายต่อการกระทุ้ง (ejection) ออกมาจากแม่พิมพ์ ขั้นตอนต่อไปเป็นการขจัดตัวประสานซึ่งเป็นขั้นตอนที่ใช้ระยะเวลาที่นานที่สุด วิธีการขจัดตัวประสานที่นิยมใช้สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 วิธี คือ 1. การใช้ความร้อน (thermal debinding) และ 2. การใช้สารละลาย (solvent debinding) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของตัวประสานที่เลือกใช้ [2] และโครงการนี้ได้ทำการเลือกวิธีขจัดตัวประสานโดยการใช้ความร้อน และเนื่องจากผลของการพัฒนาเตาที่ใช้ในการเผาผนึก ทำให้โครงการครั้งนี้ได้มีการรวมเอาขั้นตอนของการขจัดตัวประสานและขั้นตอนของการเผาผนึกไว้ในขั้นตอนเดียว โดยอุณหภูมิที่ใช้ในการขจัดตัวประสาน (ขึ้นอยู่กับชนิดของตัวประสาน) จะเป็นอุณหภูมิที่ตัวประสานละลายตัว ซึ่งอุณหภูมินี้จะสูงกว่าอุณหภูมิที่ใช้สำหรับการฉีดต่ำกว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาผนึก สำหรับอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาผนึกนั้นจะขึ้นอยู่กับชนิดของผงวัสดุที่เลือกใช้ โดยรูปที่ 2.3 แสดงภาพชิ้นงานขนาดเล็กและซับซ้อนที่ผลิตด้วยกระบวนการฉีดขึ้นรูปโลหะผง



รูปที่ 2.3 ตัวอย่างของชิ้นงานที่ผลิตโดยการฉีดขึ้นรูปโลหะผง [8]

ข้อสังเกตของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการเผาผนึกแล้วนั้นพบว่าการหดตัว (shrinkage) ประมาณ 40% โดยปริมาตรหรือมีค่าเท่ากับปริมาณของตัวประสานที่ผสมกับผงโลหะในตอนเริ่มต้น พฤติกรรมการหดตัวขณะเผาผนึกนี้มีความสำคัญมากและอาจจะส่งผลทำให้เกิดการบิดเบี้ยว (distortion) หรือแตกร้าว (disruption) ของชิ้นงานขึ้นได้ โดยเฉพาะชิ้นงานที่มีความซับซ้อนสูง การออกแบบแม่พิมพ์จึงต้องคำนึงถึงการหดตัวเนื่องจากการเผาผนึก และยังมีตัวแปรอื่นๆ อีกที่มีผลต่อการหดตัวไม่ว่าจะเป็นปริมาณของตัวประสาน ตัวแปรในการฉีด ตัวแปรในการเผา อัตราส่วนขนาดของชิ้นงานอีกทั้งตัวแปรเหล่านี้ยังมีผลต่อคุณสมบัติเชิงกล (mechanical properties) ของชิ้นงานอีกด้วย [2] ดังนั้นโครงการนี้จึงได้ทำการศึกษาหาตัวแปรการผลิตที่เหมาะสมในช่วงของการเผาผนึก ของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316L ผลจากข้อมูลที่ได้ของโครงการนี้จะช่วยเป็นประโยชน์ต่อการออกแบบแม่พิมพ์ในการผลิตชิ้นส่วนจากเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316L ด้วยกรรมวิธีฉีดขึ้นรูปโลหะผง และโครงการนี้เป็นโครงการที่ได้รับการสนับสนุนจากศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) โดยโครงการนี้จะช่วยในการเผยแพร่และส่งเสริมเทคโนโลยีการฉีดขึ้นรูปโลหะผงให้กับผู้ประกอบการและผู้ผลิตชิ้นส่วนภายในประเทศเพื่อลดการนำเข้าและส่งเสริมการส่งออกได้

2.1.1 การประยุกต์ใช้งานของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316L

เหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316L เป็นเหล็กกล้าไร้สนิม (stainless steel) ในกลุ่มออสเทนนิติก ซึ่งแม่เหล็กดูดไม่ติดมีส่วนผสมของธาตุโครเมียม (Cr) ประมาณ 18% และมีนิกเกิล (Ni) ประมาณ 8% เพื่อช่วยให้เหล็กมีความสามารถต้านทานการกัดกร่อนได้ดีมีการเติมธาตุโมลิบดีนัม (Mo) อีก 2-3% เพื่อช่วยเพิ่มความสามารถต้านทานการกัดกร่อนที่เป็นหลุมลึก (pitting) โดยเฉพาะในสิ่งแวดล้อมที่มีคลอไรด์สูง เช่น น้ำทะเล เป็นต้น สาเหตุที่เหล็กกล้าไร้สนิมไม่เป็นสนิมเพราะว่าโครเมียมในเนื้อเหล็กสร้างฟิล์มโครเมียมออกไซด์ป้องกันผิวเหล็กไว้ แต่ถ้าโครเมียมทำปฏิกิริยากับคาร์บอนในเหล็กเกิดเป็นโครเมียมคาร์ไบด์ จะทำให้ปริมาณของโครเมียมลดลงจนไม่สามารถป้องกันการกัดกร่อนได้ต่อไป ปฏิกิริยาดังกล่าวเกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูง เช่น บริเวณแนวเชื่อมที่ได้รับความร้อน (Heat Affect Zone : HAZ) อาจเกิดการกัดกร่อนและเป็นสนิมได้ [9] สำหรับในภาคอุตสาหกรรมได้มีการนำเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316L มาประยุกต์ใช้ เช่น

1. เป็นอุปกรณ์ในห้องปฏิบัติการที่มีการกัดกร่อนสูง
2. นำมาผลิตเป็นชิ้นส่วนยานยนต์ที่ทนต่อการสึกหรอจากการกัดกร่อน
3. วัสดุอุปกรณ์ทางการแพทย์ เช่น ชิ้นส่วนทดแทนในร่างกาย เหล็กตัดฟัน
4. สปริงและสกรู เป็นต้น

โลหะผงที่นิยมใช้ในเทคโนโลยี MIM นั้นมักจะผลิตมาจากกรรมวิธีการพ่นด้วยก๊าซ (Gas Atomization : GA) และกรรมวิธีการพ่นด้วยน้ำ (Water Atomization : WA) ซึ่งจะมีลักษณะเฉพาะแตกต่างกันออกไป ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2.1

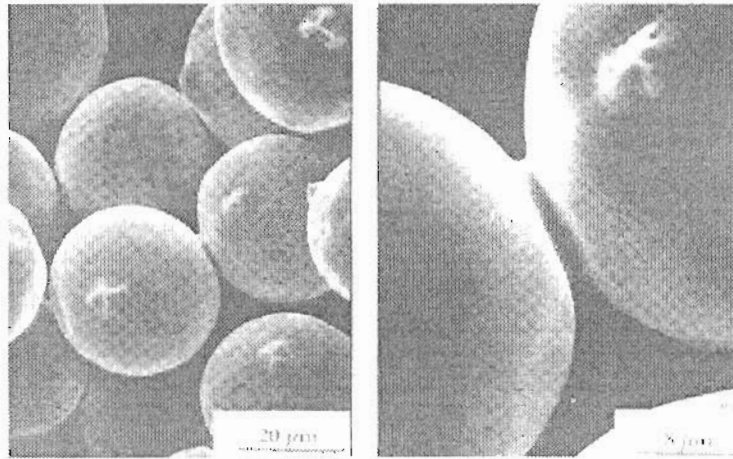
ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบลักษณะและสมบัติของผงโลหะจากกรรมวิธีที่ต่างกัน [1]

ลักษณะเฉพาะของผง	Gas Atomization (GA)	Water Atomization (WA)
ราคา	แพง	ถูก
รูปร่าง	กลม	ไม่สม่ำเสมอ
ความหนาแน่นเกาะ ^[B]	สูง	ต่ำ
ปริมาณตัวประสานที่ต้องการ	น้อย	มาก
เวลาที่ต้องการในการกำจัดตัวประสาน	น้อย	มาก
ความแข็งแรงหลังจากกำจัดตัวประสาน	ต่ำ	สูง
การหดตัวหลังการเผาผนึก	น้อยและเท่ากันทุกทิศทาง	มากและไม่เท่ากันทุกทิศทาง
ความหนาแน่นหลังการเผาผนึก	สูง	ต่ำ

หมายเหตุ ^[B] ความหนาแน่นของผงโลหะในภาชนะบรรจุเมื่อถูกเกาะหรือเขย่าภายใต้สภาวะที่กำหนด

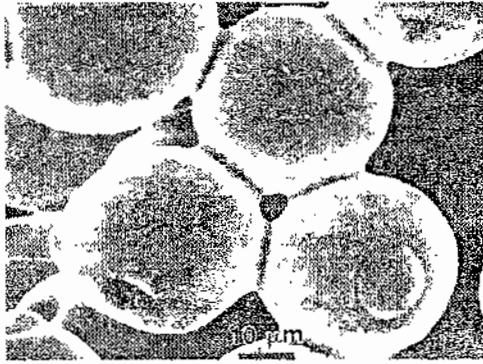
2.2 ทฤษฎีการเผาผนึก (Sintering theory)

การเผาผนึก คือ การประสานเข้าด้วยกันระหว่างอนุภาคที่อุณหภูมิต่ำ โดยกระบวนการเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดหลอมเหลว (melting point) ซึ่งเกิดจากการเคลื่อนย้ายของอะตอมในสถานะของแข็ง (solid-state) แต่มีในหลายๆ กรณีที่การประสานดังกล่าวนี้อาจจะเกิดขึ้นในสถานะของเหลว (liquid-phase sintering) ดังแสดงในรูปที่ 2.4 คือ ภาพขยายในระดับโครงสร้างจุลภาค แสดงให้เห็นการประสานที่เกิดขึ้นบริเวณคอคอด (neck growth) ระหว่างผิวของอนุภาคที่สัมผัสกัน[1]

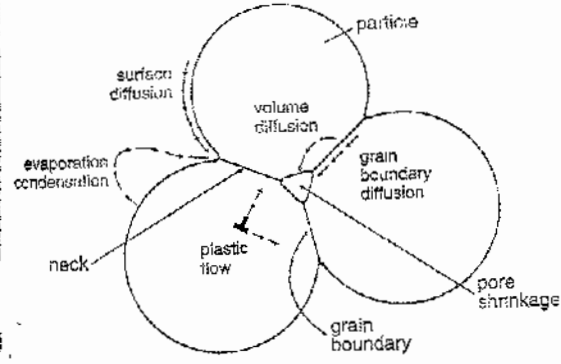


รูปที่ 2 4 แสดงภาพ Scanning Electron Microscope (SEM) ของการเกิดคอคอด (neck growth) ในสถานะของแข็ง (solid-state sintering) ของอนุภาคทรงกลมที่ยึดติดต่อกัน ซึ่งผลจากคอคอดที่เกิดขึ้นจะทำให้คุณสมบัติที่ได้เปลี่ยนแปลงไป [1]

อนุภาคแต่ละอนุภาคจะประสานกันโดยการเคลื่อนย้ายของอะตอม ซึ่งเป็นการขจัดพลังงานพื้นผิวที่มีค่าสูง อันเนื่องมาจากขนาดที่เล็กมากของอนุภาค (particle size) พลังงานพื้นผิว (surface energy) ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร จะแปรผกผันตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค ซึ่งโดยทั่วไปแล้วสามารถประมาณพลังงานพื้นผิวได้ด้วยพื้นที่ผิว (surface area) นั่นหมายความว่า อนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่าจะมีพื้นที่ผิวจำเพาะ (specific area) มากกว่าทำให้มีพลังงานพื้นผิวมากกว่า เป็นผลให้เกิดการเผาผนึก (sintering) ได้รวดเร็วกว่า แต่อย่างไรก็ตาม ไม่ได้มีเพียงแค่พลังงานพื้นผิวเท่านั้นที่สามารถก่อให้เกิดกระบวนการเผาผนึก ในกรณีของโลหะซึ่งมีผลึกเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบ (crystalline) 'ใกล้ชิด' กับบริเวณที่เกิดการสัมผัสกันระหว่างอนุภาคจะเกิดการขยายออกของขอบเกรน (enlarge grain boundaries) ซึ่งมีความสัมพันธ์โดยตรงกับพลังงานของขอบเกรน (grain boundaries energy) บริเวณขอบเกรนเป็นบริเวณที่มีความสำคัญมากที่อะตอมเกิดการเคลื่อนที่เป็นบริเวณที่มีความบกพร่อง (defect region) เกิดขึ้น เนื่องจากมีความหนาแน่นในการเคลื่อนที่ของอะตอมสูง กลไกในการเกิดการเผาผนึกสามารถอธิบายได้จากเส้นทางการเคลื่อนที่ของอะตอมซึ่งทำให้เกิดการไหลของมวล (mass flow) ขึ้น ในกรณีของผงโลหะกลไกที่ว่าจะเกิดจากกระบวนการแพร่ผ่าน (diffusion process) เหนือพื้นผิวของอนุภาคไปตามแนวของขอบเกรน หรือตรงไปยังแลทธิซของผลึก ดังแสดงไว้ใน รูปที่ 2.5 ปรากฏการณ์ทั้งหมดที่เกิดขึ้นนี้จะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับแรงขับเคลื่อน (driving force) และจลนศาสตร์ (kinetic) ที่เกี่ยวข้อง ซึ่งสามารถใช้วิธีการทางคณิตศาสตร์ในการอธิบายปรากฏการณ์เหล่านี้ได้ [1]



(a)



(b)

รูปที่ 2.5 (a) แสดงภาพ SEM ของการพ่นในช่วงแรกและคอคอดที่เกิดขึ้น และ (b) แสดงให้เห็น การสัมผัสกันระหว่างสามอนุภาคพร้อมกับกลไกพื้นฐานในการแพร่ที่เกิดขึ้นในช่วงของการเผาพ่น [2]

การเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างจะแปรเปลี่ยนไปตามคอคอดที่เกิดขึ้นในระหว่างการเผาพ่น ซึ่งเป็นผลมาจากกลไกในการเคลื่อนที่ (transport mechanism) ที่ส่วนใหญ่จะเป็นกระบวนการแพร่ผ่าน กระบวนการแพร่ผ่านเป็นกระบวนการที่เกิดจากการกระตุ้นด้วยความร้อน (thermal activation) ซึ่งคือพลังงานที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของอะตอม การที่อะตอมจะเคลื่อนที่ได้หรือไม่ขึ้นอยู่กับว่าอะตอมจะมีพลังงานมากเพียงพอหรือเท่ากับพลังงานกระตุ้นในการที่จะทำให้อะตอมแยกตัวออกมาเป็นอิสระจากตำแหน่งของปัจจุบัน และเคลื่อนที่เข้าไปยังตำแหน่งที่ว่าง (vacant site) จำนวนตำแหน่งว่างและจำนวนอะตอมที่มีพลังงานเพียงพอที่จะเคลื่อนที่เข้าไปยังตำแหน่งว่างนั้นจะแปรตามความสัมพันธ์เชิงอุณหภูมิของอาร์เรเนียส (Arrhenius temperature equation) ดังต่อไปนี้

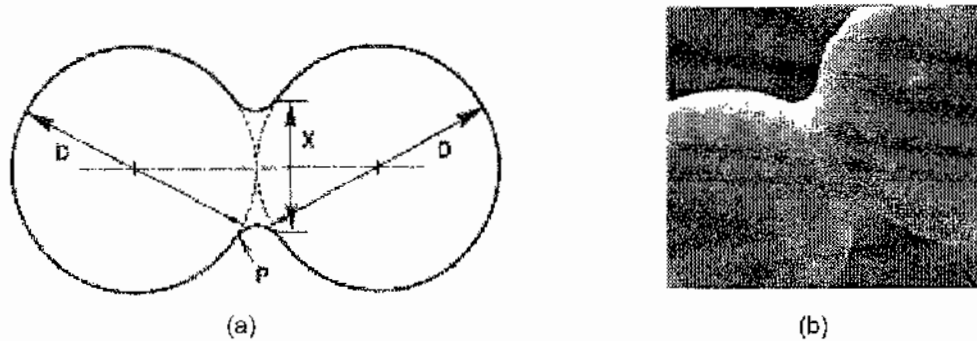
$$\frac{N}{N_0} = \exp\left(\frac{-Q}{RT}\right) \quad (1)$$

เมื่อกำหนดให้ N/N_0 เป็นอัตราส่วนของจำนวนตำแหน่งว่างหรือจำนวนอะตอมที่ถูกกระตุ้น ต่อ จำนวนของอะตอมทั้งหมด ค่า Q คือ พลังงานกระตุ้น (activation energy) และ R คือ ค่าคงที่ของก๊าซ (gas constant) ส่วน T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ในหน่วยเคลวิน (K) ที่อุณหภูมิสูงเราจะพบว่า การเผาพ่นจะเร็วขึ้นเป็นเพราะจำนวนของอะตอมที่ถูกกระตุ้นและตำแหน่งว่างเพิ่มขึ้น

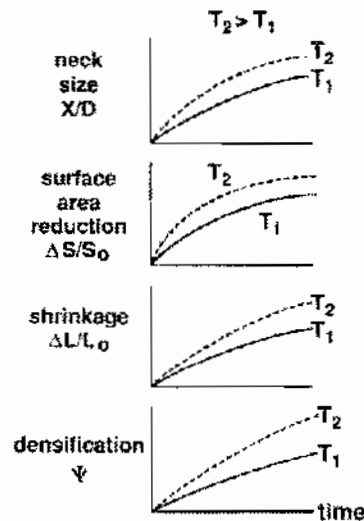
ในขณะที่เผาพ่นเราจะพบว่าพื้นที่ผิวของอนุภาคนั้นจะลดลงอย่างรวดเร็วจากพื้นที่ผิวเริ่มต้น (S_0) ปริมาณของพื้นที่ผิวที่เปลี่ยนแปลง (ปริมาณพื้นที่ผิวเริ่มต้นลบด้วยปริมาณพื้นที่ผิวสุดท้าย)หารด้วยพื้นที่ผิวเริ่มต้นซึ่งจะวัดอยู่ในรูปของตัวแปรไร้มิติ ($\Delta S/S_0$) ตัวแปรที่ได้นี้จะเป็นตัวบอกปริมาณการเผาพ่น การวัดพื้นที่ผิวสามารถทำได้หลายวิธี เช่น วัดโดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ทางจุลภาค (microscopic analysis) การวัดปริมาณการดูดซับก๊าซ (gas adsorption) หรือการวัดความสามารถในการซึมผ่านได้ของก๊าซ (gas permeability) [1]

การวัดปริมาณการเผาพ่นอื่นๆ เช่น การหาอัตราส่วนขนาดคอคอดสัมพันธ์ X/D ซึ่งกำหนดจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของคอคอด (X) หารด้วยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค (D) ดังแสดงไว้ใน รูปที่ 2.6 เมื่อคอคอดมีขนาดใหญ่ขึ้นส่งผลให้ขนาดของชิ้นงานหลังการเผาพ่นหดตัวลงมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นและความแข็งแรงเพิ่ม

มากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามการเพิ่มขนาดของคอคอดระหว่างอนุภาคจะทำให้พื้นที่ผิวของอนุภาคลดลง และในชั้นงานเองอาจจะปราศจากการหดตัวที่เกิดขึ้นระหว่างอนุภาคในขณะที่คุณสมบัติต่างๆ ดีขึ้น การเปลี่ยนแปลงอื่นๆที่เกิดขึ้นพร้อมกับการเพิ่มขนาดของคอคอดได้แสดงไว้ดัง รูปที่ 2.7



รูปที่ 2.6 (a) แสดงลักษณะรูปร่างของคอคอด (neck growth) ของสองอนุภาคที่มีความยาวคอคอด (X) และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาค (D) พร้อมด้วยรัศมีความโค้ง (P) บริเวณคอคอด [1] และ (b) แสดงภาพ SEM ของสองอนุภาคที่ผนึกกัน [8]



รูปที่ 2.7 แสดงผลกระทบจากช่วงเวลาในการเผาไหม้ (สองอุณหภูมิที่แตกต่างกัน) และลักษณะโดยทั่วๆ ไปที่เกิดจากอัตราส่วนของคอคอด เช่น การลดลงของพื้นที่ผิว การหดตัว และการแน่นตัว [1]

สำหรับอุณหภูมิในการเผาไหม้ที่แตกต่างกันสองค่า พบว่าการหดตัว ($\Delta L/L_0$) ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงความยาวของชิ้นงาน (ΔL) หลังจากเผาไหม้ด้วยความยาวเริ่มต้น (L_0) หรือความยาวก่อนการเผาไหม้ การหดตัวที่เกิดขึ้นนี้ทำให้ชิ้นงานแน่นตัวขึ้นจากความหนาแน่นเกรน (ρ_G) ไปเป็นความหนาแน่นหลังเผาไหม้ (ρ_S) ซึ่งจะได้ความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$\rho_s = \frac{\rho_G}{\left(1 - \frac{\Delta L}{L_0}\right)^3} \quad (2)$$

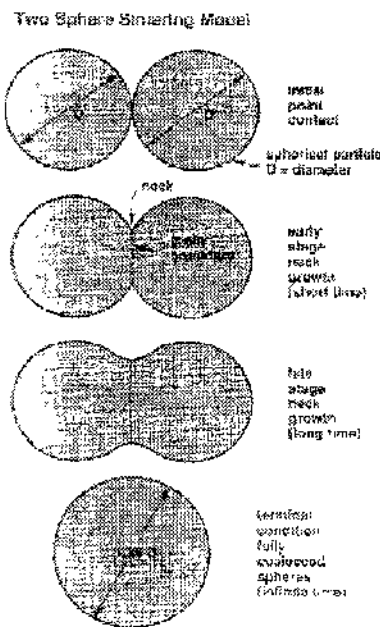
ตัวแปรการแน่นตัว (densification parameter : ψ) คือ การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นเนื่องจากการเผาผลาญด้วยวิธีการเปลี่ยนแปลงที่จำเป็นต้องให้ได้มาซึ่งชิ้นงานแข็งที่ปราศจากรูพรุน โดยตัวแปรการแน่นตัวมีค่าดังต่อไปนี้

$$\psi = \frac{(\rho_s - \rho_G)}{(\rho_T - \rho_G)} \quad (3)$$

เมื่อกำหนดให้ ρ_T คือ ค่าความหนาแน่นทางทฤษฎี จากสมการ (3) จะเห็นได้ว่าการวัดค่าปริมาณการแน่นตัว ความหนาแน่นสุดท้าย ขนาดของคอคอด พื้นที่ผิว และการหดตัว ล้วนเกี่ยวข้องกับกระบวนการจัดรูพรุนในช่วงของการเผาผลาญ

2.3 แนวความคิดพื้นฐานของการเผาผลาญ (Basic concept for sintering theory)

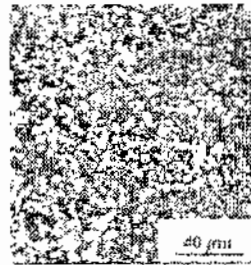
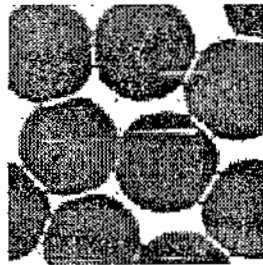
พิจารณาจุดสัมผัสระหว่างอนุภาคทรงกลมสองอนุภาค ดังรูปที่ 2.8 (ภาพบนสุด) โดยทั่วๆ ไปหลังจากการจัดตัวประสานแล้ว ในแต่ละอนุภาคจะมีบริเวณสัมผัสกับอนุภาคอื่นๆ หลายๆ บริเวณ พื้นที่ระหว่างอนุภาคที่บริเวณผิวสัมผัสจะขยายตัวขึ้นและรวมกัน (merge) เมื่อการเผาผลาญดำเนินไปอย่างต่อเนื่อง ที่แต่ละจุดสัมผัสของอนุภาคจะเกิดเป็นขอบเกรนโตขึ้นมาแทนที่บริเวณรอยต่อระหว่างเฟสของแข็งและไอ (solid-vapor interface) ตามลำดับ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.8 การเผาผลาญเป็นเวลานานจะทำให้อนุภาคสองอนุภาคประสานรวมกันและมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเป็น 1.26 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางเริ่มแรกของอนุภาค [1]



รูปที่ 2.8 แบบจำลองของการเผาผลาญของอนุภาคทรงกลมสองอนุภาค ซึ่งเริ่มต้นจากจุดสัมผัสระหว่างอนุภาคก่อนที่จะมีการเพิ่มขนาดของคอคอดสร้างขอบเกรนที่รอยต่อระหว่างอนุภาคและในที่สุดรวมกันเป็นหนึ่งอนุภาคใหญ่ [1]

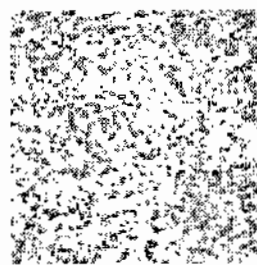
จากหลักการในเบื้องต้นของทฤษฎีการเผาผนึก (sintering) ทำให้ทราบได้ว่าการเผาผนึก คือ กระบวนการในการประสานกันระหว่างอนุภาคที่ระดับอุณหภูมิสูง (ต่ำกว่าอุณหภูมิหลอมเหลว) และเมื่ออุณหภูมิมีค่าสูงขึ้นการประสานกันก็จะยิ่งเพิ่มมากขึ้น ซึ่งในช่วงเวลาของกระบวนการเผาผนึกนี้สามารถที่จะแบ่งระยะในการประสานกันระหว่างอนุภาคได้ 3 ระยะดังจะได้อธิบายต่อไปนี้

ในระยะแรกของการเผาผนึก (initial stage) ดังรูปที่ 2.9 อนุภาคแต่ละอนุภาคจะเกิดพันธะระหว่างกันที่บริเวณผิวโค้ง (curvature gradients) ซึ่งทำให้เกิดจุดสัมผัสเป็นคอคอดขึ้นในแต่ละอนุภาค (inter-particle neck growth) และผิวสัมผัสจะเพิ่มมากขึ้นก่อให้เกิดโครงสร้างเปิด (open pores) เป็นผลให้รูพรุนที่เกิดขึ้นระหว่างอนุภาคเพิ่มความเรียบมากขึ้น นำไปสู่ระยะกลาง



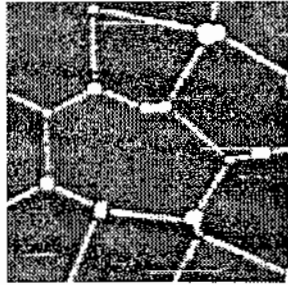
รูปที่ 2.9 ภาพขยายโครงสร้างจุลภาคของการประสานกันในระยะแรก (initial stage bonding) ของอนุภาค [1], [2]

ในระยะกลาง (intermediate stage) ดังรูปที่ 2.10 รูพรุนจะยิ่งเพิ่มความเรียบมากขึ้นและจะมีลักษณะเป็นโครงสร้างปิดอย่างต่อเนื่อง (close pores) การขยายตัวของเกรน (grain growth) จะเริ่มเกิดขึ้นหลังจากนี้ค่าของความหนาแน่นในระยะนี้จะมีค่าประมาณ 70% - 92% ของทฤษฎี



รูปที่ 2.10 ภาพขยายโครงสร้างจุลภาคของการประสานกันในระยะกลาง (intermediate stage) ของอนุภาค [1], [2]

ในระยะสุดท้าย (final stage) ดังรูปที่ 2.11 ของการเผาผนึก รูพรุนจะปิดกั้นและหดตัวลงอย่างช้าๆ เนื่องจากการแพร่ไปตามช่องว่าง (vacancy) และตามขอบเกรน (grain boundaries) ที่เกิดขึ้นระหว่างอนุภาคที่ประสานรวมกัน



รูปที่ 2.11 ภาพขยายโครงสร้างจุลภาคแสดงการหดกลมลงของรูพรุนและการขยายตัวขึ้นของขอบเกรน (grain growth) ซึ่งเป็นระยะสุดท้าย (final stage) ที่เกิดขึ้นในกระบวนการเผาผนึก [1], [2]

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องสำหรับกระบวนการเผาผนึกของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316L

Loh และคณะ [3] ได้ทำการศึกษาพารามิเตอร์บางตัวที่ใช้ในการเผาผนึกของเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316L (เช่น อุณหภูมิ อัตราการให้ความร้อน และเวลาที่ใช้) พร้อมกับการทดสอบหาค่าคุณสมบัติทางกลของชิ้นทดสอบ ที่ผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1050°C ซึ่งเป็นอุณหภูมิเริ่มต้นที่ใช้ในการเผาผนึก และที่ 1200°C การเผาผนึกเริ่มเข้าสู่ระยะกลาง หลังจากนั้นอุณหภูมิเริ่มเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ จนถึงระยะสุดท้าย ที่ 1300°C รูพรุนเริ่มที่จะแยกออกจากกัน พร้อมกับการหดตัว เป็นผลให้ค่าความหนาแน่นมีค่าเพิ่มมากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญที่อุณหภูมิจาก 1050°C จนถึง 1200°C อัตราการให้ความร้อนอย่างช้าๆ จะเป็นการเพิ่มให้เกรนเกิดการเรียงตัวอย่างสม่ำเสมอมากกว่า และยังช่วยลดไม่ให้เกิดการแยกตัวขึ้น (segregation) อัตราการให้ความร้อนที่ 5°C /min จะทำให้ได้การหดตัวสูงสุด การเพิ่มเวลาในช่วงการเผาผนึกจะเป็นผลให้เกรนเกิดการขยายตัว (enlarge grain growth) ซึ่งนำไปสู่การลดลงของค่าความแข็ง (hardness) และการลดลงของค่าความแข็งแรง (strength) ซึ่งเป็นผลมาจากการลดขนาดลงของขอบเกรน (grain boundaries reduction) จากผลที่ได้ พบว่าอัตราการให้ความร้อนอย่างช้าๆ ที่ 5°C /min พร้อมกับอุณหภูมิในช่วงเผาผนึกที่มากกว่า 1200°C และเวลาในการเผาผนึกจำนวน 60 นาที คือเงื่อนไขในการเผาผนึกที่ดีที่สุดที่จะส่งผลให้เกิดการหดตัวและได้ค่าความหนาแน่นสูงสุด ตารางที่ 2.2 แสดงการสรุปผลกระทบที่เกิดจากปัจจัยต่างๆ ในช่วงของการเผาผนึกต่อค่าคุณสมบัติที่สนใจ (การหดตัว ความหนาแน่น ค่าความแข็ง และค่าความเค้น)

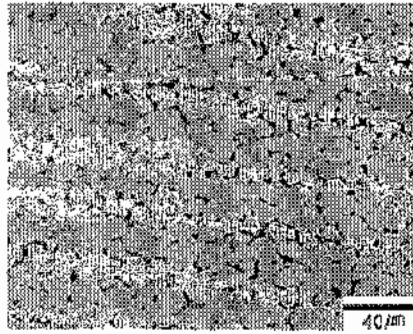
ตารางที่ 2.2 ผลของปัจจัยในการเผาผนึกต่อการหดตัว ค่าความหนาแน่น คุณสมบัติเชิงกล ของเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316L [3]

ปัจจัยในการเผาผนึก	การหดตัวเฉลี่ย	ค่าความหนาแน่น	ค่าความแข็ง	ความเค้นครา
อุณหภูมิ	↑	↑	↑	↑
อัตราการให้ความร้อน	↑	↓	↓	↓
เวลา	↑	↑	↓	↓

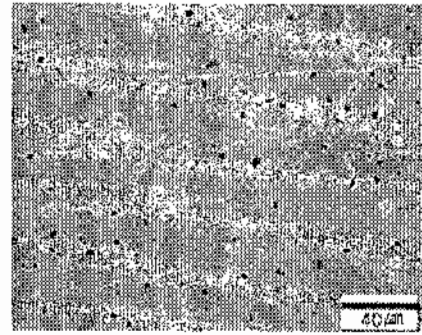
นอกจากนี้ Ji และคณะ [4] ยังได้ศึกษาปัจจัยบางตัวที่มีผลกระทบต่อการเผาผนึกเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316L เช่น อุณหภูมิในการเผาผนึกและบรรยากาศที่ใช้ในการเผาผนึกของชิ้นงานเผาในระยะสุดท้าย (final stage) บรรยากาศที่ใช้ในการเผาผนึกเป็นปัจจัยที่สำคัญตัวหนึ่งที่มีผลกระทบต่อค่าความหนาแน่นของชิ้นงานเผาในระยะสุดท้ายมากกว่าปัจจัยตัวอื่นๆโดยจำนวนและขนาดของรูพรุนบนชิ้นงานที่ได้จากการเผาผนึกในบรรยากาศแบบสุญญากาศ (vacuum atmosphere) นั้นมีน้อยกว่าและเล็กกว่าที่ได้จากการเผาผนึกในบรรยากาศไนโตรเจน (N_2) และบรรยากาศอาร์กอน (Ar) สัดส่วนความหนาแน่นของชิ้นงานที่ได้ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมที่สุดนั้นมีค่า 96.14% เมื่อเทียบกับวัสดุชนิดเดียวกันที่ผ่านการขึ้นรูปโดยวิธีทางกล (wrought material) โดยได้ทำการเผาที่อุณหภูมิเผาผนึก $1250^{\circ}C$ และใช้บรรยากาศสุญญากาศในการเผา การเผาผนึกในบรรยากาศอาร์กอนและไนโตรเจนจะทำให้ได้สัดส่วนของความหนาแน่นมีค่า 94.62% และ 94.80% ตามลำดับ การเผาผนึกในบรรยากาศไฮโดรเจน (H_2) และที่อุณหภูมิ $1260^{\circ}C$ จะทำให้ได้สัดส่วนความหนาแน่นของชิ้นงานหลังเผามีค่า 97% เมื่อเทียบกับความหนาแน่นในทางทฤษฎี และจากงานวิจัยของ Tae และคณะ [5] ซึ่งได้ทำการศึกษาผลกระทบของเงื่อนไขต่างๆ (อุณหภูมิและเวลา) ที่ใช้ในช่องของการเผาผนึก พร้อมกับการทดสอบค่าคุณสมบัติทางกลของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316L ที่ผลิตจากกระบวนการ MIM ซึ่งสามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเผาผนึกและเวลาที่ใช้ในช่วงการเผาผนึก (time soaked or time holding) มีผลทำให้ปริมาณรูพรุน (porosity) ลดน้อยลง พร้อมกับการเพิ่มขึ้นของขนาดเกรน (grain size) ดังแสดงในรูปที่ 2.12
2. การลดลงของปริมาณรูพรุนทำให้ค่าความต้านแรงดึงสูงสุด (ultimate tensile strength : s_u) และเปอร์เซ็นต์การยืดตัว (percentage elongation : ϵ) มีค่าเพิ่มมากขึ้นในขณะที่ค่าความต้านแรงดึงคราก (yield strength : s_y) มีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากจนแทบจะคงที่ ซึ่งเป็นผลมาจากปรากฏการณ์ "Balance Effect [5]" เนื่องจากว่าในขณะที่ปริมาณรูพรุนลดน้อยลงนั้นขนาดของเกรนเองก็จะมีแนวโน้มที่จะยิ่งหยาบขึ้น (grain coarsening) ดังแสดงในรูปที่ 2.13
3. ค่าความต้านแรงดึงสูงสุด (s_u) และเปอร์เซ็นต์การยืดตัว (ϵ) ที่ได้จากการทดลองนั้น พบว่าเป็นผลกระทบมาจากปริมาณของรูพรุนที่เกิดขึ้นภายในชิ้นทดสอบมากกว่าขนาดของเกรนที่โตขึ้น เนื่องจากว่าการแตกหัก (fracture) ที่เกิดขึ้นนั้น โดยส่วนใหญ่แล้วเกิดจากการขยายออกและเชื่อมต่อเข้าด้วยกันของรูพรุนขนาดเล็กภายใน (micro void) ดังแสดงในรูปที่ 2.14

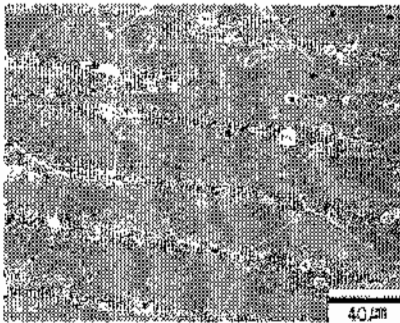
จากรูปที่ 2.13 แสดงผลจากการทดสอบแรงดึงที่ระดับสัดส่วน (%) รูพรุนต่อปริมาตรที่แตกต่างกัน ผลที่ได้จากการทดสอบแรงดึง (tensile test) ของชิ้นงานทดสอบที่ระดับรูพรุนต่างๆ กัน (เงื่อนไขที่ใช้ในช่วงของการเผาผนึกมีความแตกต่างกัน) ทำให้สามารถสรุปผลได้ดัง ตารางที่ 2.3



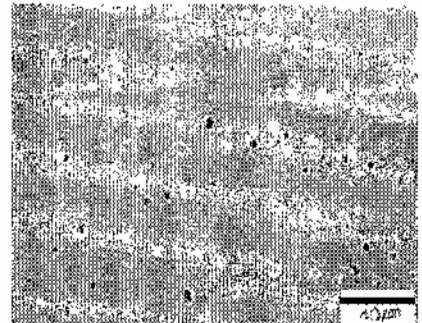
1100°C, 1 hour, 17% Porosity



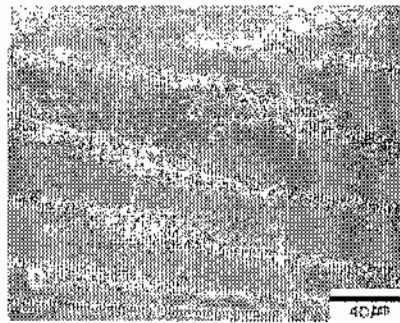
1320°C, 2 hours, 8% Porosity



1350°C, 1 hour, 5% Porosity

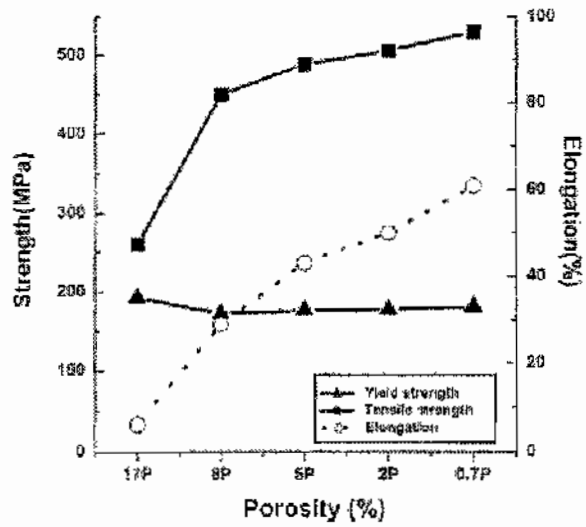


1350°C, 2 hours, 2% Porosity

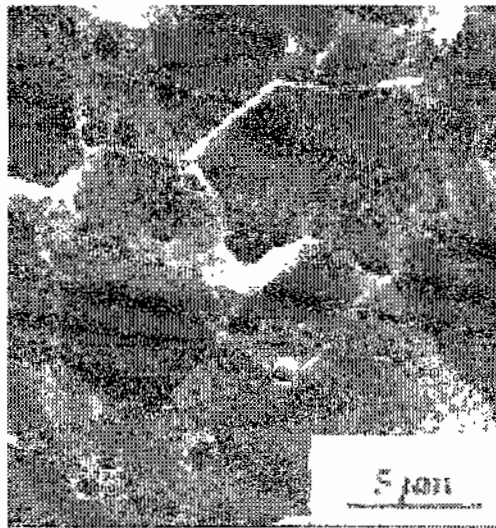


1350°C, 4 hours, 0.7% Porosity

รูปที่ 2.12 SEM Photograph แสดงโครงสร้างจุลภาคหลังจากเผาผืนที่เงื่อนไขการเผาแตกต่างกันของชิ้นงานทดสอบ [5]



รูปที่ 2.13 แสดงผลจากการทดสอบแรงดึงที่ระดับสัดส่วน (%) รูพรุนต่อปริมาตรที่แตกต่างกัน [5]



รูปที่ 2.14 แสดงผิวแตกหักซึ่งจะเห็นลักษณะทรงกลมของรูพรุนตามบริเวณขอบเกรน [1]

ตารางที่ 2.3 ตารางแสดงค่าคุณสมบัติทางกลที่ได้จากการทดสอบแรงดึงที่ระดับเปอร์เซ็นต์ของรูพรุนต่าง ๆ กัน [5]

ปริมาณรูพรุน	17P	8P	5P	2P	0.7P
เงื่อนไขที่ใช้ในช่วงของการเผาผนึก	1100°C 1 h	1320°C 1 h	1350°C 1 h	1350°C 2 h	1350°C 4 h
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุน (μm)	-	7	4.8	2.9	3.1
สัดส่วนรูพรุนต่อปริมาตร (%)	17.2	7.9	5.3	1.9	0.7
ขนาดของเกรน (μm)	12	45	63	77	90
ความหนาแน่นสัมพัทธ์ (%)	82.1±0.8	91.5±0.2	93.8±0.8	96.6±0.8	98.1±0.2
ความหนาแน่นจริง (Mg/m^3)	6.5±0.1	7.3±0.1	7.5±0.1	7.7±0.1	7.8±0.01
ความต้านแรงดึงคราก (MPa)	193	173	177	178	182
ความต้านแรงดึงสูงสุด (MPa)	260	450	489	506	531
เปอร์เซ็นต์การยืดตัว (%)	6	29	43	50	61

2.5 ตัวแปรที่สนใจศึกษาในการทำโครงการครั้งนี้

จากทฤษฎีที่ได้กล่าวมาพร้อมกับผลจากการทาวิจัยของ Loh [3] Ji [4] และ Tae [5] ที่ได้ทำการอ้างอิงในครั้งนี พบว่าตัวแปรดังต่อไปนี้ เป็นสิ่งที่โครงการนี้ได้ทำการศึกษา

2.5.1. อุณหภูมิในช่วงการเผาผนึก (1350°C 1300°C และ 1200°C)

จากผลวิจัยของ Loh Ji และ Tae พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิที่ใช้ในช่วงของการเผาผนึกนั้น มีผลต่อการลดลงทั้งขนาดและปริมาณของรูพรุน ซึ่งผลที่ได้นี้ทำให้ค่าความต้านแรงดึงคราก (s_y) ที่ได้จากการทดสอบแรงดึงมีค่าลดลง และค่าที่ลดลงนั้นน้อยมากในช่วงของอุณหภูมิหนึ่งและมีแนวโน้มว่าค่าความต้านแรงดึงครากจะคงที่ในช่วงอุณหภูมินี้ จากสิ่งที่ได้นี้โครงการจึงสนใจที่จะศึกษาผลการลดลงของอุณหภูมิ

- การลดอุณหภูมิที่ใช้ในช่วงการเผาผนึก จะเป็นการลดพลังงานที่ใช้ในกระบวนการ
(พลังงานความร้อน = แรงดันไฟฟ้า x กระแสไฟฟ้า)
- การลดอุณหภูมิที่ใช้ในช่วงการเผาผนึก จะช่วยลดเวลาในการเพิ่มอุณหภูมิไปจนถึงอุณหภูมิเผาผนึก และเวลาในการเย็นตัวภายในเตาเป็นผลให้สามารถลดเวลาในการนำงานออกจากเตา (ลดเวลาของกระบวนการ)

2.5.2. บรรยากาศที่ใช้ภายในเตา (Argon gas และ Vacuum atmosphere)

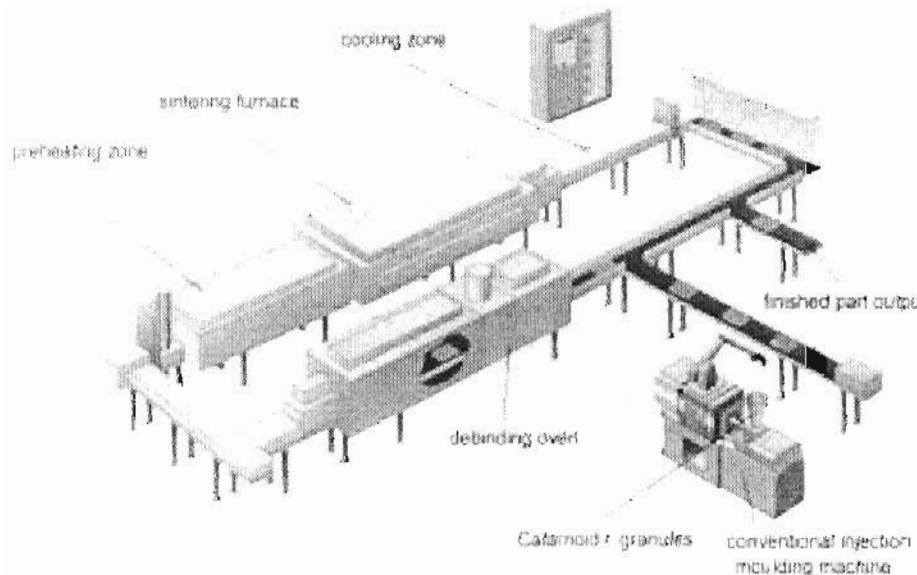
จากผลการวิจัยของ Loh พบว่าการใช้บรรยากาศสุญญากาศในช่วงของการเผาผนึกนั้น ทำให้ได้ปริมาณและขนาดของรูพรุนน้อยกว่าการใช้บรรยากาศก๊าซอาร์กอน ซึ่งเป็นผลให้ชิ้นงานที่ได้มีค่าความหนาแน่นมากกว่าในการเผาภายใต้บรรยากาศสุญญากาศ จากเหตุผลนี้โครงการจึงสนใจศึกษาผลจากการเปลี่ยนแปลงบรรยากาศภายในเตาที่ใช้ในช่วงของการเผาผนึก

- ถ้าสามารถใช้บรรยากาศสุญญากาศ และยังคงไว้ซึ่งคุณสมบัติตามมาตรฐาน^(A) (ค่าความต้านแรงดึง ค่าความแข็ง เพอร์เซ็นต์การยืดตัว และค่าความหนาแน่น) จะเป็นการลดต้นทุนการผลิต เนื่องจากปัจจุบันนี้ก๊าซอาร์กอนความบริสุทธิ์ 99.99% ที่ใช้ในช่องของการเผาขึ้นราคาถึงละ 6,000 บาท หนึ่งถังใช้ได้ประมาณ 3 ครั้ง (ปริมาณการใช้ก๊าซขึ้นอยู่กับขนาดของเตาและปริมาณของชิ้นงานที่ทำการเผาในช่องของการเผาขึ้น)

2.5.3. เวลาที่ใช้ในช่วงการเผาขึ้น (2 hours 1.5 hours และ 1 hour)

จากผลการวิจัยของ Tae พบว่าการใช้เวลาในช่วงของการเผาขึ้นมากขึ้นนั้น มีผลทำให้ปริมาณของรูพรุนลดน้อยลง และในเวลาเดียวกันขนาดของเกรนเองก็มีการขยายตัวมากขึ้นด้วยเช่นกัน ผลที่เกิดขึ้นนี้ทำให้ค่าความต้านแรงดึงครากเปลี่ยนแปลงน้อยมากจนแทบจะคงที่ในช่วงอุณหภูมิหนึ่ง แม้จะมีการเพิ่มเวลาในช่วงการเผาขึ้นมากขึ้นก็ตาม จากสิ่งที่ได้นี้โครงการจึงสนใจศึกษาเวลาที่ใช้ในช่วงเผาขึ้น

- ถ้าสามารถลดเวลาในช่วงของการเผาขึ้น ก็จะเป็นการลดเวลาของกระบวนการ (cycle time) ลง และยังช่วยเพิ่มอัตราการผลิต (productivity) เนื่องจากว่าแนวโน้มในปัจจุบันนี้มีการพัฒนากระบวนการที่เป็นแบบต่อเนื่อง (continuous process) ดังแสดงในรูปที่ 2.15 การลดเวลาในช่วงนี้ก็จะเป็นการลดเวลาโดยรวมของกระบวนการทั้งหมด



รูปที่ 2 15 แสดงกระบวนการผลิตแบบต่อเนื่องของกระบวนการฉีดขึ้นรูปโลหะผง [8]

หมายเหตุ ^(A) ค่าคุณสมบัติทั้งหมดที่ได้จากการทดลองจะทำการอ้างอิงและเปรียบเทียบกับมาตรฐาน MPIF Standard 35 (Materials Standards for Metal Injection Molded Parts 2000 edition) Published by Metal Powder Industries Federation.

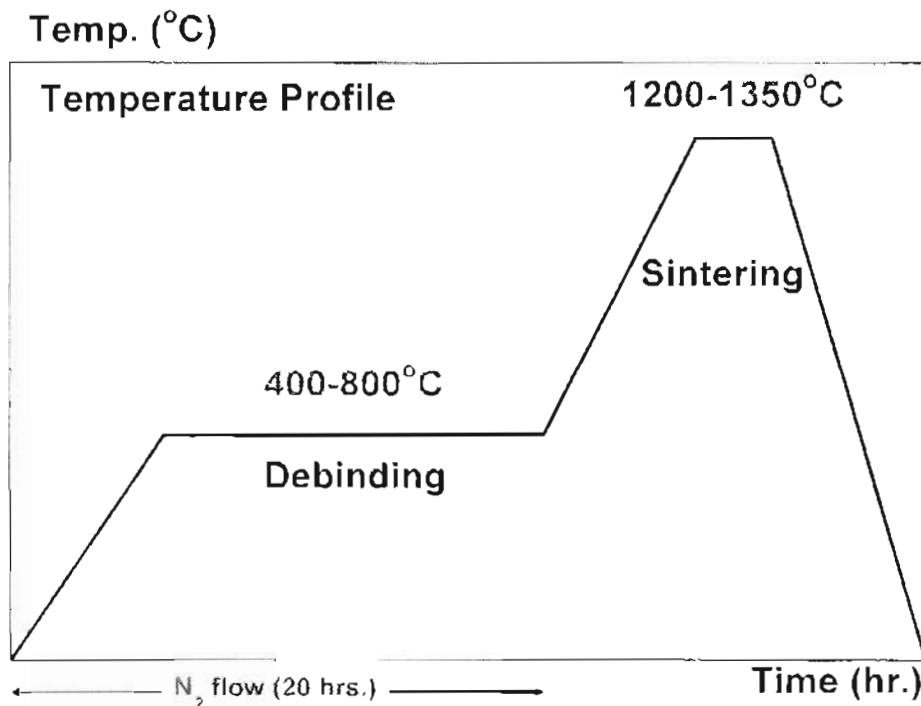
บทที่ 3

ขั้นตอนการดำเนินงานและการออกแบบการทดลอง

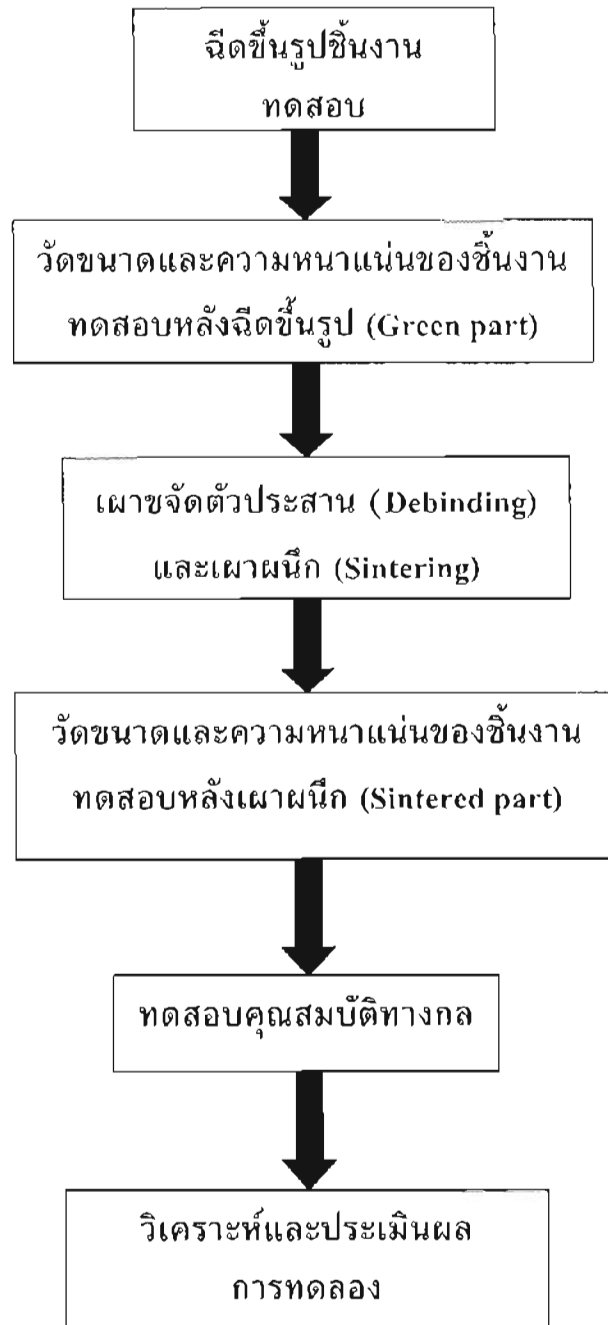
ในการศึกษาวิเคราะห์หาตัวแปรการผลิตที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการฉีดขึ้นรูปโลหะผงเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316L เพื่อให้ได้ผลออกมาถูกต้องตามทฤษฎีและขั้นตอนที่ได้จัดเตรียมเอาไว้ นั้นจะมีขั้นตอนต่างๆ ที่สามารถแบ่งเป็นขั้นตอนได้ดังนี้

3.1 การออกแบบขั้นตอนในการทดลอง (Experimental Procedure)

รูปที่ 3.1 แสดงรูปแบบของกระบวนการฉีดตัวประสานและการเผาผนึกของวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316L (SUS 316L) ที่ใช้ในโครงการครั้งนี้ โดยจะพบว่าช่วงที่สนใจทำการศึกษา คือ ช่วงของการเผาผนึก (sintering) ที่ระดับอุณหภูมิ 1200°C 1300°C และ 1350°C ตามลำดับ และเวลาจาก 1.0 ชั่วโมง 1.5 ชั่วโมง และ 2.0 ชั่วโมง ตามลำดับ โดยในช่วงนี้จะมีการปรับเปลี่ยนบรรยากาศในการเผาผนึกคือ บรรยากาศก๊าซอาร์กอนและบรรยากาศสุญญากาศ จากข้อมูลข้างต้นจึงได้ทำการวางแผนลำดับขั้นตอนของการดำเนินการทดลองซึ่งแสดงดัง รูปที่ 3.2



รูปที่ 3.1 กราฟแสดงอัตราการให้ความร้อนภายในเตาเผาผนึก



รูปที่ 3.2 แผนผังแสดงขั้นตอนการดำเนินการทดลอง

3.2 โลหะผง (Powder) ที่ใช้

สำหรับงานวิจัยนี้ได้ใช้ผงเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316L ที่ผลิตด้วยกรรมวิธี Water Atomization (WA) ด้วยความดันน้ำสูงทำให้มีรูปร่างค่อนข้างกลม โดยมีส่วนผสมทางเคมีดัง ตารางที่ 3.1 และคุณสมบัติการกระเจาตัวของผงดัง ตารางที่ 3.2 จะเห็นได้ว่าค่าส่วนผสมทางเคมีของผงที่ใช้อยู่ในช่วงค่าส่วนผสมของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316L องค์กร

ประกอบที่สำคัญ คือ ปริมาณ Ni และ Cr จำนวน 12.53 % และ 16.49% โดยมวล ตามลำดับ ซึ่งเติมในเหล็กเพื่อคุณสมบัติในการต้านทานต่อการกัดกร่อน (corrosion resistance) ขนาดเฉลี่ยของผงคือ 10.86 μm ซึ่งเป็นขนาดที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการฉีดขึ้นรูปโลหะผง

ตารางที่ 3.1 แสดงส่วนผสมทางเคมีของผงเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316L ที่ใช้ในโครงการครั้งนี้พร้อมกับค่ามาตรฐานของส่วนผสมทางเคมีที่กำหนดโดยสมาคมอุตสาหกรรมโลหะผงแห่งอเมริกา (MPIF)

ชนิดวัสดุผง	ส่วนผสมทางเคมี (Mass %)									
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	O (ppm)
SUS 316L (ATMIX ^๕)	0.024	0.81	0.80	0.019	0.009	12.53	16.49	2.10	0.03	3400
SUS 316L (MPIF)	0.03 (max)	1.0 (max)	2.0 (max)	-	-	10-14	16-18	2-3	-	-

ตารางที่ 3.2 แสดงคุณสมบัติการกระจายตัวของผงเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316L ที่ใช้ในโครงการครั้งนี้

ขนาดของผง	+30 μm	30 - 20 μm	20 ~ 10 μm	-10 μm
ขนาดของผงที่ได้จากการวิเคราะห์ (SCREEN ANALYSIS : mass%)	8.8	13.8	30.8	46.6
ขนาดเฉลี่ยของผง (μm)	10.86			
ค่าความหนาแน่นเกาะ (g/cm^3)	4.54			

3.3 บรรยากาศ

บรรยากาศในการช่วงการเผาผนึกใช้บรรยากาศ 2 ชนิด คือ

- บรรยากาศป้องกัน (protective atmosphere) โดยใช้ก๊าซอาร์กอน และ
- บรรยากาศสุญญากาศ (vacuum atmosphere)

หมายเหตุ บรรยากาศป้องกันที่นิยมใช้ในช่องของการเผาผนึก คือ ไนโตรเจน (N_2) ไฮโดรเจน (H_2) และ อาร์กอน (Ar) หรืออาจจะใช้สองอย่างรวมกัน เช่น $\text{N}_2 + \text{H}_2$, Ar + H_2 เป็นต้น [6], [7]

3.4 รายการข้อมูลของเครื่องจักร/อุปกรณ์ที่ใช้

อุปกรณ์ทั้งหมดที่ใช้ในโครงการครั้งนี้ติดตั้งอยู่ที่โรงงานต้นแบบของศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC Pilot Plant) ภายใต้โครงการถ่ายทอดเทคโนโลยีการผลิตขึ้นรูปโลหะผงจากประเทศญี่ปุ่นสู่ประเทศไทย ซึ่งเป็นการร่วมมือระหว่างศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติและกลุ่มผู้ผลิตชิ้นงานฉีดโลหะผงของประเทศญี่ปุ่น โดยเครื่องมือที่ใช้แสดงดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 รายการข้อมูลของเครื่องจักร/อุปกรณ์ที่ใช้

เครื่องมือ/อุปกรณ์	รายละเอียด	กิจกรรมที่ใช้
1. เครื่องฉีดขึ้นรูปโลหะผง (Metal Injection Molding Machine)	ขนาด 50 ตัน ควบคุมด้วยระบบสมองกล	เครื่องฉีดใช้ฉีดขึ้นรูปชิ้นงาน(green parts) และชุดหีบจะหีบชิ้นงานจากแม่พิมพ์ไปวางบนสายพานลำเลียงเพื่อป้องกันความเสียหายต่อชิ้นงาน
2. เตาเผาสุญญากาศ (vacuum furnace)	เตาเผาสุญญากาศและบรรยากาศควบคุม เช่น ภายใต้บรรยากาศก๊าซอาร์กอน ก๊าซไนโตรเจน และ ก๊าซไฮโดรเจนอุณหภูมิสูงสุด 1500 องศาเซลเซียส ควบคุมด้วยระบบสมองกล	ให้ความร้อนสำหรับเผาจัดตัวประสานและเผาผนึก (sintering) ให้ผงโลหะเป็นเนื้อเดียวกันเพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กับชิ้นงาน
3. เครื่องทดสอบแรงดึง (tensile test machine)	- เครื่องรุ่น Instron 8801 - อัตราเร็วในการดึง 5 m/min - Load ที่ใช้ดึง 100 kN	ใช้ทดสอบชิ้นงานทดสอบโดยการดึงจนขาด เพื่อหาค่าความต้านแรงดึงสูงสุด ค่าความต้านแรงดึงคราก และเปอร์เซ็นต์การยืดตัว
4. เครื่องทดสอบความแข็งแบบ Rockwell Scale B (hardness test machine แบบ Macro Hardness : HRB)	- เวลาที่ใช้ในการกด 3.0 วินาที - Load ที่ใช้กด 980.7 นิวตัน (N)	ทดสอบโดยใช้ลูกบอลเหล็กกล้าชุบผิวแข็งกดลงไปบนผิวชิ้นงาน จากนั้นทำการวัดค่าความแข็งพร้อมกันแสดงผล
5. เครื่องขัดผิวชิ้นงานและกระดาษทรายเพื่อตรวจดูโครงสร้างจุลภาค	- กระดาษทราย เบอร์ 200 500 800 1000 1500 พร้อมด้วยผงอลูมินาแบบกึ่งของเหลว ขนาด 0.3 ไมครอน	ใช้สำหรับขัดผิวชิ้นงานจนเรียบ ผิวเป็นมันเพื่อเตรียมสำหรับการกัดกรด
6. กรดที่ใช้สำหรับการกัดผิว (etching)	- ประกอบไปด้วย 1. กรดไฮโดรคลอริก (HCl) 2. กลีเซอรอล (glycerol) 3. กรดไนตริก (HNO ₃) ทั้งหมดในอัตราส่วน 3 : 2 : 1	ในขณะที่ทำการผสมให้ผสมกรดไฮโดรคลอริก กับ กลีเซอรอล ก่อน

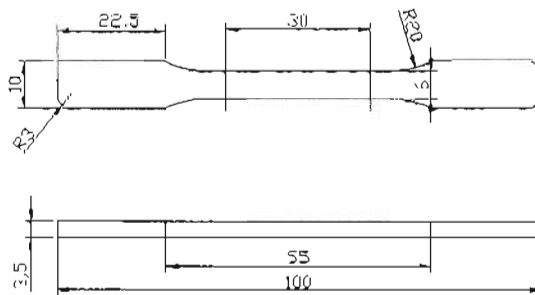
3.5 ขั้นตอนการทดลอง

3.5.1 การฉีดขึ้นรูป (Injection Molding)

ทำการฉีดขึ้นรูปชิ้นงานสำหรับใช้เป็นชิ้นงานทดสอบแรงดึง ดังรูปที่ 3.3 โดยค่าตัวแปรต่าง ๆ ในการฉีดขึ้นรูป มีดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 ตัวแปรที่ใช้ในการฉีด

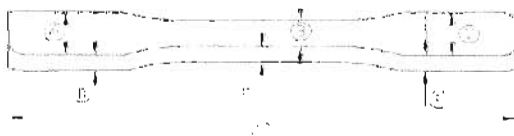
ตัวแปร	ค่าของตัวแปรที่ใช้ในการฉีด
ความดันในการฉีด	80 MPa
ความดันที่คงไว้ขณะที่ทำการฉีด (holding pressure)	40 MPa
อุณหภูมิที่ทำการฉีด (N1 N2 T1 T2 และ T3)	170°C 177°C 170°C 165°C 158°C
เวลาในการฉีด	3 วินาที
เวลาที่แม่พิมพ์ปิด	15 วินาที
เวลาที่แม่พิมพ์เปิด	5 วินาที



รูปที่ 3.3 ชิ้นงานทดสอบแรงดึง (หน่วย มิลลิเมตร)

3.5.2 วัดขนาดชิ้นงานหลังฉีด (Molded part or Green part) เพื่อนำไปหาเปอร์เซ็นต์การหดตัว

ใช้เวอร์เนียร์คาร์ดิปเปอร์ พร้อมด้วยไมโครมิเตอร์วัดขนาดของชิ้นงาน ณ ตำแหน่งต่างๆ ดังรูปที่ 3.4 จนครบทุกเงื่อนไขการทดลองที่ทำการออกแบบเอาไว้ ค่าที่วัดได้แสดงดังตารางที่ 3.5 พร้อมด้วยขนาดของร่องแม่พิมพ์ (mold cavity) ที่วัด ณ ตำแหน่งเดียวกัน



รูปที่ 3.4 ชิ้นงานทดสอบแรงดึง (หน่วย มิลลิเมตร)

3.5.3. หาค่าความหนาแน่นของชิ้นงานโดยวิธีแทนที่น้ำ

โดยใช้ความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้ในการคำนวณหาค่าความหนาแน่น

$$D = \frac{Ap_w}{A - C + E}$$

โดย D = ความหนาแน่น (หน่วย กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)

A = มวลของชิ้นงานทดสอบในอากาศ (หน่วย กรัม)

C = มวลของชิ้นงานทดสอบในน้ำ (หน่วย กรัม)

E = มวล (น้ำหนักของภาชนะที่ต้องหักออก) เช่น เส้นลวดที่ยึดหรือตะกร้าที่รองรับชิ้นงานในน้ำ (หน่วย กรัม)

ρ_w = ความหนาแน่นของน้ำที่อุณหภูมิทดสอบ (หน่วย กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)

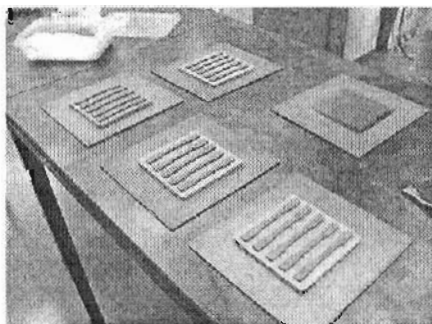
- หมายเหตุ
- มวล A C และ E ควรจะคำนวณให้มีค่าความคาดเคลื่อนอยู่ภายในช่วง ± 0.001 กรัม
 - ผลกระทบจากความตึงผิวของน้ำ ซึ่งจะมีผลต่อชิ้นงานทดสอบสามารถลดลงได้โดยการเพิ่มความเปียกผิวโดยใช้สารลดแรงตึงผิว

ตารางที่ 3.5 แสดงขนาดของชิ้นงานหลังฉีดพร้อมด้วยขนาดของร่องแม่พิมพ์ ณ ตำแหน่งเดียวกันที่ทำการวัด ดังรูปที่ 3.4 (หน่วยมิลลิเมตร)

ตำแหน่ง	A	B	C	D	E	F	G
Condition							
ขนาดของชิ้นงานหลังฉีดที่วัดได้	10.14	6.18	10.12	3.46	3.49	3.50	99.36
ขนาดของร่องแม่พิมพ์ที่วัดได้	9.91	5.9	9.91	3.52	3.53	3.52	99.95

3.5.4. การเผาชิ้นงานในเตาเผาหมักตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้ดังต่อไปนี้

ทำการเผาชิ้นงานตาม Condition ที่ได้กำหนดไว้ดังตารางที่ 3.6 และตารางที่ 3.7 โดยก่อนที่จะทำการเผาชิ้นงานจะต้องนำชิ้นงานมาจัดเรียงบนแผ่นเซรามิกส์ (ceramic plate) (แผ่นตรงกลางดังรูปที่ 3.5) จากนั้นนำแผ่นเซรามิกส์ที่ได้มีการจัดเรียงชิ้นงานไว้แล้ว มาวางบนแผ่นกราฟไฟต์อีกชั้นหนึ่ง เหตุที่ต้องนำแผ่นเซรามิกส์มาวางกั้นระหว่างชิ้นงานกับแผ่นกราฟไฟต์เพื่อเป็นการป้องกันไม่ให้คาร์บอนจากแผ่นกราฟไฟต์แพร่กระจายไปที่ชิ้นงานในระหว่างที่ทำการเผาหมัก ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 แสดงการจัดเตรียมชิ้นงานก่อนที่จะเข้าเตาเผาหมัก

ตารางที่ 3.6 การปรับเปลี่ยนตัวแปรที่ใช้ในการทดลองในช่วงของการเผาผนึก (sintering condition)

อุณหภูมิ	1350°C	1300°C	1200°C
บรรยากาศ	Condition 1 ^[C]	ไม่อยู่ในขอบเขตของการทดลอง	ไม่อยู่ในขอบเขตของการทดลอง
ก๊าซอาร์กอน	Condition 2	Condition 3	Condition 4
สุญญากาศ			

ตารางที่ 3.7 การปรับเปลี่ยนตัวแปรที่ใช้ในการทดลองในช่วงของการเผาผนึก (ต่อ)

เวลาที่ใช้ในช่วงเผาผนึก	1.5 ชั่วโมง	1.0 ชั่วโมง
อุณหภูมิ	1350°C ^[D]	
	Condition 5	Condition 6

- หมายเหตุ
- ทุก Condition ที่ได้ทำการทดลองใช้จำนวนชิ้นงานทดสอบ (Test pieces) จำนวน 20 ชิ้น
 - Condition ในการทดลองที่ 1 2 3 และ 4 ใช้เวลาในช่วงของการเผาผนึกเป็นเวลา 2 ชั่วโมง
 - ^[C] Condition 1 เป็น Condition ที่แนะนำโดยผู้ผลิตผงโลหะที่ใช้ในการทดลอง ครั้งนี้สำหรับเป็นเงื่อนไขอ้างอิง (reference condition) เพื่อเปรียบเทียบกับ Condition อื่นๆ
 - ^[D] อุณหภูมิสูงสุดที่ใช้ในช่วงของการเผาผนึกพร้อมกับบรรยากาศสุญญากาศ

3.5.5 การทดสอบแรงดึง (Tensile testing)

วัตถุประสงค์หลักของทดสอบแรงดึง เพื่อหาค่าความต้านแรงดึงสูงสุด (tensile strength : S_u) ค่าความต้านแรงดึงคราก (yield strength : S_y) และเปอร์เซ็นต์การยืดตัว (elongation : ϵ) ของชิ้นงานทดสอบ โดยชิ้นงานทดสอบแรงดึงแสดง ดังรูปที่ 3.6 โดยมีสูตรในการคำนวณ ดังนี้

ค่าความต้านแรงดึงสูงสุด

$$S_u = \frac{F_M}{A_n}$$

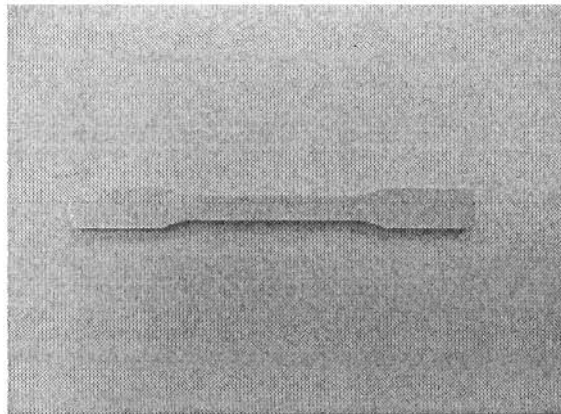
ค่าความต้านแรงดึงคราก

$$S_y = \frac{F_Y}{A_0}$$

ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว

$$\varepsilon = \frac{L - L_0}{L_0} 100 (\%)$$

- โดย S_u = ค่าความต้านแรงดึงสูงสุด (หน่วย นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร)
 S_v = ค่าความต้านแรงดึงที่จุดคราก (หน่วย นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร)
 ε = เปอร์เซนต์การยืดตัว (%)
 F_M = ขนาดของแรงดึงสูงสุด (หน่วย นิวตัน)
 F_v = ขนาดของแรงที่ดึงจนชิ้นงานครากตัว (หน่วย นิวตัน)
 L = ความยาวใดๆ (หน่วย มิลลิเมตร)
 L_0 = ความยาวเริ่มต้น (หน่วย มิลลิเมตร)



รูปที่ 3.6 แสดงชิ้นงานทดสอบแรงดึง

3.5.6 การทดสอบความแข็ง (Hardness testing)

เป็นการหาค่าคุณสมบัติทางกลของชิ้นงาน เพื่อหาความสามารถในการต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างถาวรเนื่องมาจากการกด การทดสอบจะเป็นลักษณะใช้หัวกดกดลงไปชิ้นงาน โดยที่หัวกด แรงที่ใช้กด และเวลาที่ใช้ในการกดแช่เพื่อให้เกิดการเปลี่ยนรูปร่างอย่างสมบูรณ์ต้องเป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนดดังต่อไปนี้

- Macro-hardness test (HRB Scale)
- หัวกดชนิดลูกบอลเหล็กกล้าชุบผิวแข็ง
- ใช้ Load ในการกด 980.7 นิวตัน (N)
- ใช้เวลาในการกดแช่เพื่อให้เกิดการเสียรูปร่างอย่างสมบูรณ์ 3 วินาที

3.5.7 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานทดสอบ

ในขั้นตอนนี้กระทำได้โดยการขัดชิ้นงานด้วยกระดาษทราย เบอร์ 200 500 800 1000 และ 1500 ตามลำดับ พร้อมกับขัดด้วยผ้าสักหลาดในครั้งสุดท้าย โดยใช้ผงอลูมินาแบบกึ่งของเหลว ขนาด 0.3 ไมครอน หลังจากนั้นทำการกัดผิวชิ้นงานด้วยสารละลายกรด (กรดไฮโดรคลอริก (HCl) + กลีเซอรอล (glycerol) + กรดไนตริก (HNO₃))

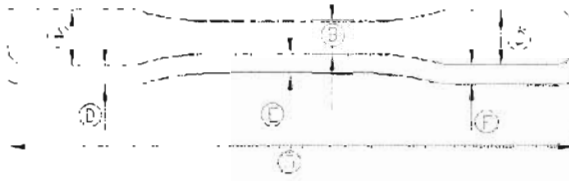
ทั้งหมดในอัตราส่วน 3 : 2 : 1) เป็นเวลา 20 นาที จากนั้นทำการถ่ายรูปโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์ชนิด สะท้อนแสง

บทที่ 4

ผลการศึกษาและการวิเคราะห์ห่อภิปรายผล

4.1 ผลกระทบจากตัวแปรในช่วงเผาผนึกที่มีต่อการหดตัวและความหนาแน่นของชิ้นงาน

4.1.1 ผลกระทบจากบรรยากาศในช่วงของการเผาผนึก



รูปที่ 4.1 แสดงตำแหน่งต่างๆ ที่ทำการวัด

ตารางที่ 4.1 แสดงเปอร์เซ็นต์การหดตัว (%) ณ ตำแหน่งต่างๆ ที่ทำการวัด โดยบรรยากาศในการเผาต่างกัน ดังรูปที่ 4.1

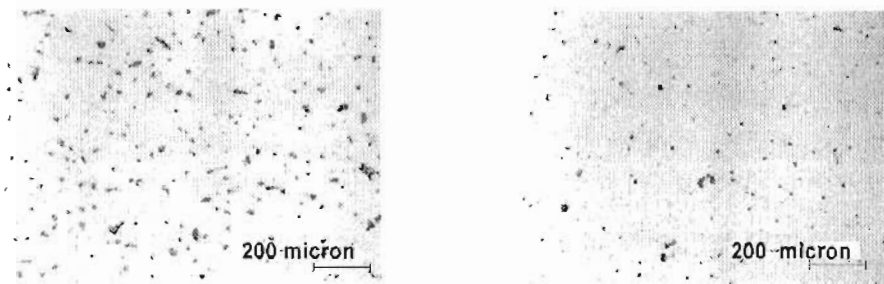
ตำแหน่ง Condition	A	B	C	D	E	F	G	ค่า เปอร์เซ็นต์ หดตัวเฉลี่ย (%)	ความหนา แน่น สัมพัทธ์*
1 (ก๊าซอาร์กอน)	11.57	9.57	11.66	15.17	14.73	14.03	13.98	12.96	95.65
2 (สุญญากาศ)	11.45	9.86	11.81	15.45	15.09	14.60	14.00	13.18	95.89

* ค่าความหนาแน่นจริงที่ได้จากชิ้นงานทดสอบ หาค่าด้วย ค่าความหนาแน่นของผงในทางทฤษฎี (โดย SUS 316L ที่ใช้ในโครงการครั้งนี้มีค่า $\rho_s = 7860 \text{ g/cm}^3$)

จากตารางที่ 4.1 แสดงเปอร์เซ็นต์การหดตัวจากร่องแม่พิมพ์ (mold cavity) เทียบกับขนาดของชิ้นงานหลังจากผ่านการเผาผนึก (sintered part) ณ ตำแหน่งต่างๆ ที่ทำการวัด ดังแสดงใน รูปที่ 4.1 ซึ่งจะเห็นได้ว่าการใช้บรรยากาศสุญญากาศ (vacuum) ในระหว่างการเผาผนึกจะทำให้เกิดการหดตัวมากกว่าการใช้บรรยากาศก๊าซอาร์กอน ซึ่งสามารถอธิบายสิ่งที่เกิดขึ้นได้ดังนี้ สืบเนื่องจากในขณะที่ช่วงปล่อยก๊าซอาร์กอนภายในเตา จะมีก๊าซอาร์กอนบางส่วนสามารถซึมผ่าน (permeable) เข้าไปภายในรูพรุนของชิ้นงาน (หลังจากที่ชิ้นงานผ่านกระบวนการจัดสารยึดแล้ว จะมีรูพรุนเปิด (open pores) เปิดสู่บรรยากาศภายในเตา และเกิดขึ้นรอบๆ ผิวชิ้นงานโดยที่รูพรุนเหล่านี้ยังจะเชื่อมโยงกันภายในชิ้นงานอีกด้วย) ดังนั้น ในระหว่างที่เกิดกระบวนการผนึกทั้งสามช่วง (initial, intermediate, and final

stage) จึงทำให้มีก๊าซบางส่วนถูกเก็บกัก (trapped) อยู่ภายในรูพรุน ก่อให้เกิดความดันขึ้นภายในชิ้นงาน ขัดขวางการหดตัวของชิ้นงาน (การขยายออกของขอบเกรนน้อยลงทำให้รูพรุนมีขนาดใหญ่กว่า ดูรูปที่ 4.2 ประกอบ) ความดันที่กล่าวนี้นี้เป็นสิ่งที่มีความวิกฤตอย่างหนึ่งในช่วงของการเผาผนึก เพราะถ้าเกิดความดันมีมากเกินไป และอัตราการให้ความร้อนไม่เหมาะสม (การหดตัวเร็วเกินไป โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับชิ้นงานที่มีรูปร่างสลับซับซ้อนสูง หรือ มีความแตกต่างของพื้นที่ภาคตัดขวาง (cross sectional area) มากจะทำให้เกิดการแตกร้าว (disruption) ได้ง่าย) บรรยากาศป้องกัน (protective atmosphere) ที่นิยมใช้ในช่วงของการเผาผนึก คือ ไนโตรเจน (N₂) ไฮโดรเจน (H₂) และ อาร์กอน (Ar) หรืออาจจะใช้สองอย่างรวมกัน

เช่น N₂ + H₂, Ar + H₂ เป็นต้น [6], [7]



(a) Condition 1, argon gas

(b) Condition 2, vacuum

รูปที่ 4.2 แสดงภาพโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านการเผาผนึก

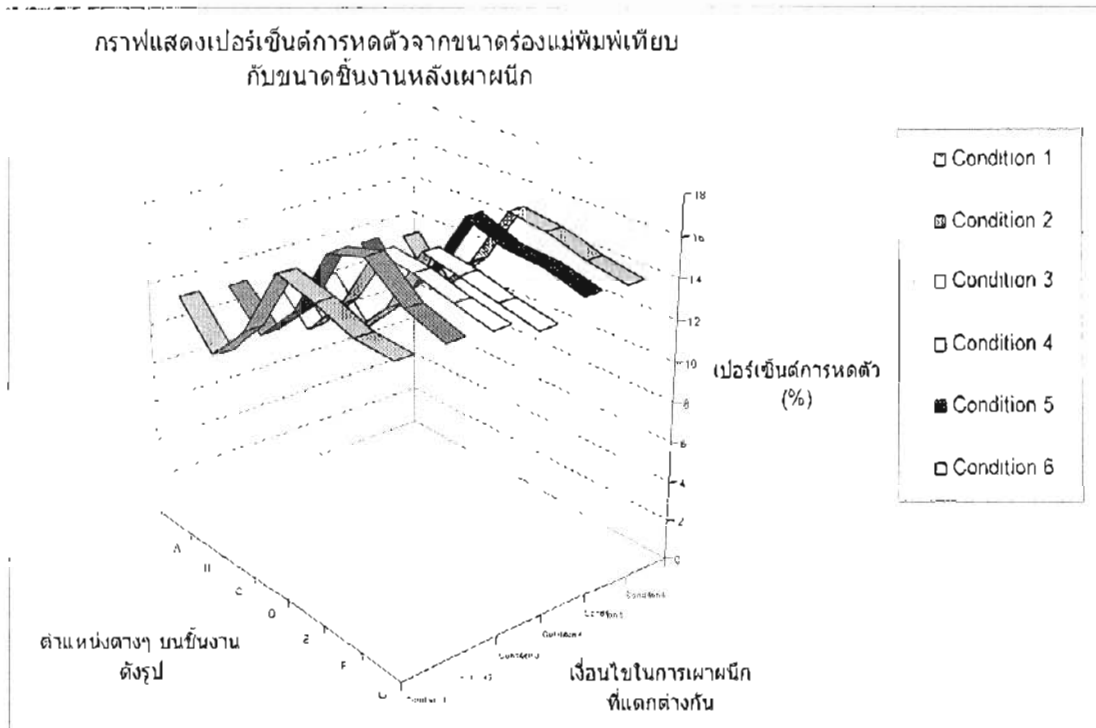
4.1.2 ผลจากอุณหภูมิในช่วงของการเผาผนึก

ตารางที่ 4.2 แสดงเปอร์เซ็นต์การหดตัว (%) ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ที่ทำการวัด โดยอุณหภูมิในการเผาต่างกัน

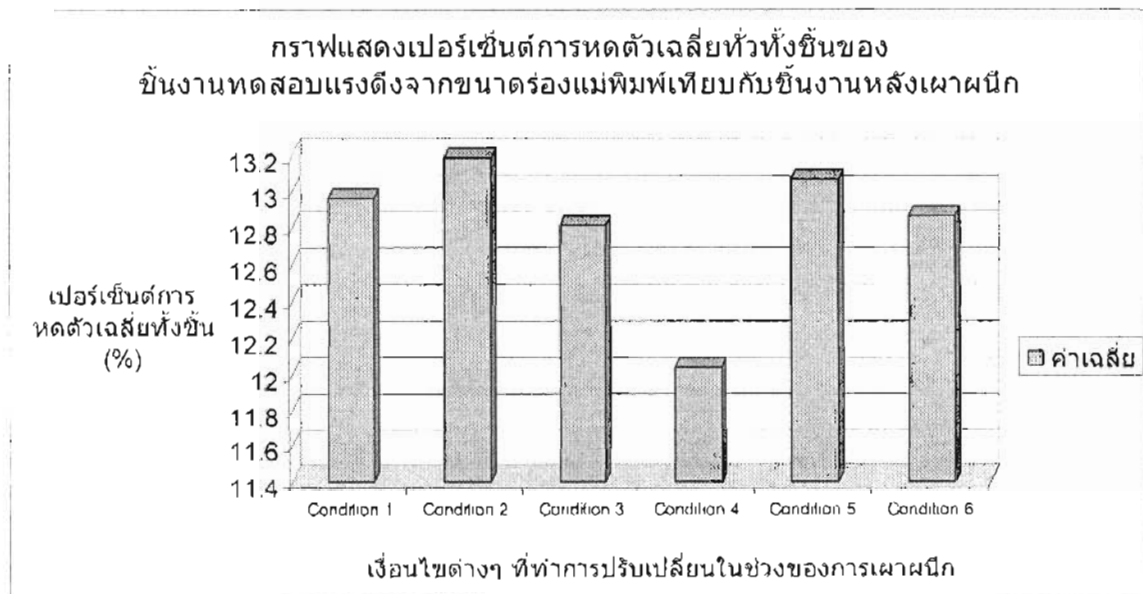
ตำแหน่ง Condition	A	B	C	D	E	F	G	ค่า เปอร์เซ็นต์ หดตัวเฉลี่ย (%)	ค่าความ หนาแน่น สัมพัทธ์
2 (1350 °C)	11.45	9.86	11.81	15.45	15.09	14.60	14.00	13.18	95.89
3 (1300 °C)	11.32	9.40	11.52	14.85	14.70	14.14	13.76	12.81	95.27
4 (1200 °C)	10.49	8.52	10.63	14.20	13.88	13.46	13.05	12.03	92.89

จากตารางที่ 4.2 ซึ่งแสดงเปอร์เซ็นต์การหดตัวจากร่องแม่พิมพ์ เทียบกับขนาดของชิ้นงานหลังจากผ่านการเผาผนึก ณ ตำแหน่งต่างๆ ที่ทำการวัด ดังแสดงในรูปที่ 4.1 พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิในช่วงของการเผาผนึกทำให้มีอัตราการหดตัว (% การหดตัว) เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากเหตุผลที่ว่า การเผาผนึกคือ การประสานกันระหว่างอนุภาคที่อุณหภูมิสูง (แต่ต่ำกว่าอุณหภูมิหลอมเหลวของวัสดุนั้นๆ) ซึ่งเป็นผลมาจากการเคลื่อนย้ายของอะตอม (Mass flow) ก่อให้เกิดกระบวนการแพร่ผ่านในสภาวะของแข็ง (solid-state diffusion process ดังนี้ 1. surface diffusion 2. grain boundary diffusion 3. volume diffusion) กระบวนการแพร่ผ่านเป็นกระบวนการที่เกิดจากการ

กระตุ้นด้วยความร้อน (thermal activation) ซึ่งคือ พลังงานที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของอะตอมนั่นเอง ดังนั้น การเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นก็คือ การให้พลังงานในการเคลื่อนที่ของอะตอมมากขึ้น ซึ่งเป็นผลให้เกิดการพ่นระหว่างอนุภาคมากยิ่งขึ้น เมื่อยิ่งผลึกมากขึ้นก็จะส่งผลให้หดตัวมากขึ้นตามไปด้วย

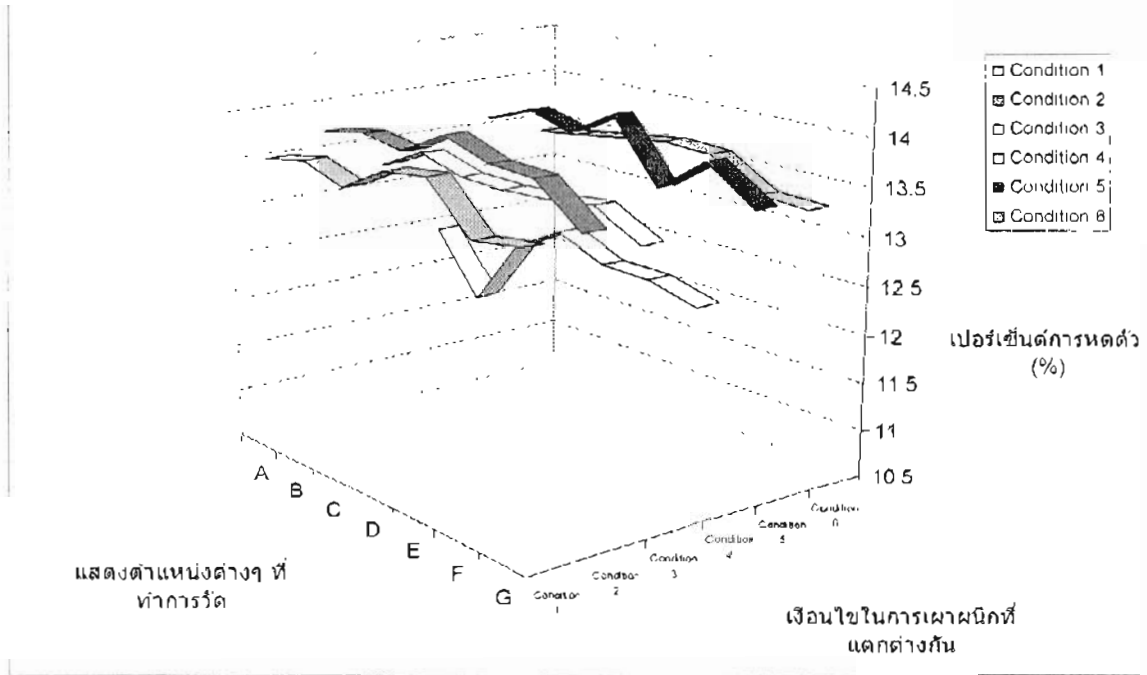


รูปที่ 4.3 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์การหดตัว ณ ตำแหน่งต่างๆ บนชิ้นงาน



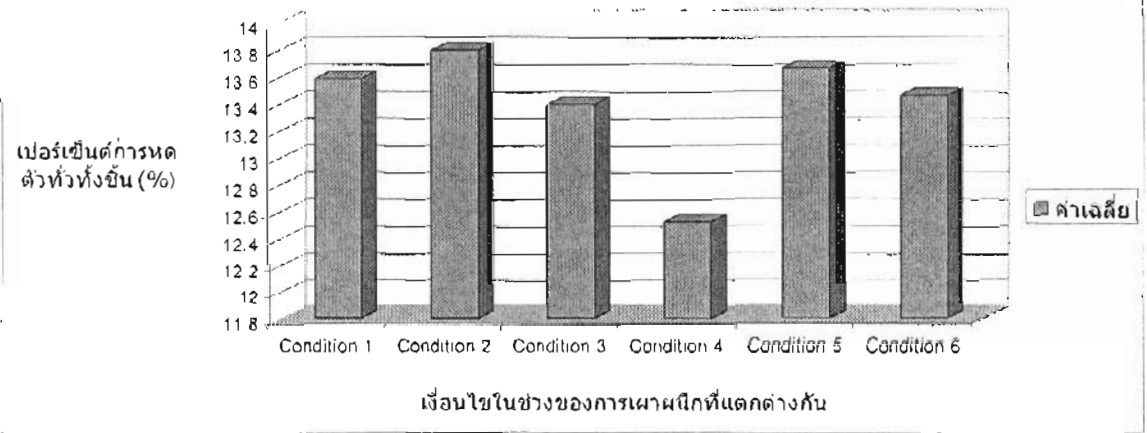
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์การหดตัวระหว่างแต่ละ Condition ที่ทำการทดลอง

กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์การหดตัวของชิ้นงานก่อนการกำจัดตัวประสานเทียบกับชิ้นงานหลังการเผาผนึก

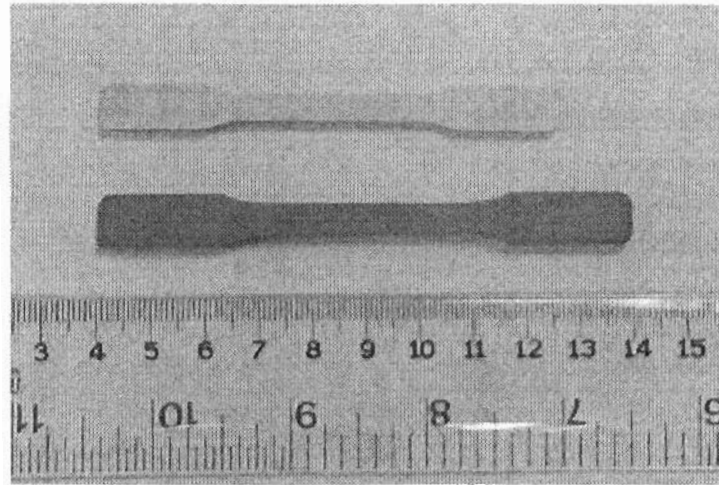


รูปที่ 4.5 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์การหดตัว ณ ตำแหน่งต่างๆ บนชิ้นงาน

กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์การหดตัวเฉลี่ยทั่วทั้งชิ้นของชิ้นงานทดสอบแรงดึง ก่อนกำจัดตัวประสานเทียบกับชิ้นงานหลังเผาผนึก



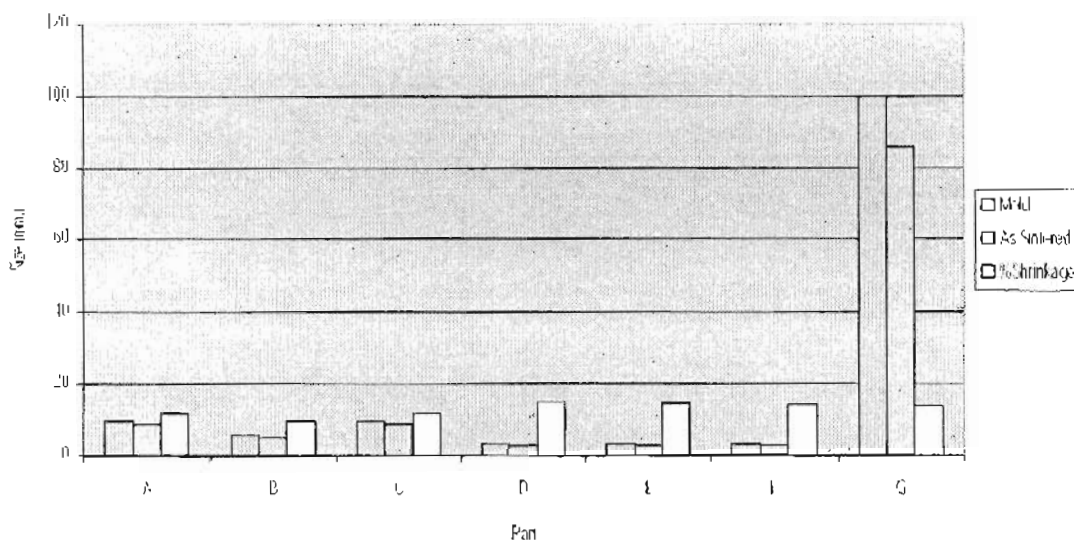
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์การหดตัวระหว่างแต่ละ Condition ที่ทำการทดลอง



รูปที่ 4.7 แสดงการหดตัวของชิ้นงานทดสอบแรงดึงก่อนขจัดตัวประสาน (ล่าง) เทียบกับขนาดหลังจากผ่านการเผาผนึกแล้ว (บน)

จากรูปที่ 4.3, รูปที่ 4.4 และรูปที่ 4.8 เป็นกราฟที่แสดงให้เห็นเปอร์เซ็นต์การหดตัวจากขนาดร่องแม่พิมพ์ (mold cavity) ไปเป็นขนาดของชิ้นงานหลังการเผาผนึก (sintered part) และกราฟรูปที่ 4.5 และรูปที่ 4.6 เป็นกราฟที่แสดงให้เห็นเปอร์เซ็นต์การหดตัวจากขนาดชิ้นงานก่อนการขจัดตัวประสาน (molded or green part) ไปเป็นขนาดของชิ้นงานหลังการเผาผนึก (sintered part) จากกราฟทั้งสองกลุ่มนี้ ถ้าสังเกตให้ดีจะพบว่าอัตราการหดตัวของทั้งสองกลุ่มไม่เท่ากัน พร้อมกับช่วงของเปอร์เซ็นต์การหดตัวที่แตกต่างกันด้วย (ทั้งที่คาดการณ์ไว้ว่าจะเท่ากันหรือมีรูปแบบการหดตัวที่เหมือนกัน เพราะชิ้นงานทดสอบแรงดึงทั้งหมดนั้นฉีดออกมาจากร่องแม่พิมพ์อันเดียวกัน) แต่ก็สามารถอธิบายสิ่งที่เกิดขึ้นได้ดังนี้

316L Size (mm)



รูปที่ 4.8 แสดงการหดตัวจากขนาดแม่พิมพ์ไปเป็นขนาดหลังเผาผนึก

เราพบว่าชิ้นงานทดสอบแรงดึงที่ผ่านการฉีดออกมาจากแม่พิมพ์นั้น จะมีส่วนของผง (powder) และส่วนของตัวประสาน (binder) โดยในส่วนของตัวประสานนั้นจะมีองค์ประกอบหลักของวัสดุในกลุ่มของพอลิเมอร์ โดยเมื่อชิ้นงานทดสอบแรงดึงเย็นตัวลงและถูกดันออกมาจากร่องแม่พิมพ์จะพบว่าชิ้นงานมีขนาดโตขึ้นกว่าขนาดของร่องแม่พิมพ์ ปรากฏการณ์นี้มีชื่อเรียกว่า "การบวม (swelling)" ซึ่งเป็นพฤติกรรมแบบวิสโคอีลาสติก (visco-elastic) ของวัสดุพอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นในระหว่างการไหลออกจากหัวฉีดเข้าไปยังร่องแม่พิมพ์ สาเหตุเนื่องจากในขณะที่พอลิเมอร์กำลังไหลในกระบอกหลอมพลาสติก (barrel or cylinder) จะมีการสะสมพลังงานความเครียด (strain energy) เอาไว้ และเมื่อนำเอาความเค้นออกไป (ถูกฉีดออกจากหัวฉีดไปยังร่องแม่พิมพ์) ก็จะทำให้เกิดการคืนตัว (relaxation) เป็นเหตุให้ชิ้นงานทดสอบแรงดึงหลังการฉีดมีขนาดโตขึ้น จากขนาดของร่องแม่พิมพ์ ซึ่งจากขนาดที่โตกว่านี้เอง จึงทำให้เปอร์เซ็นต์การหดตัว เมื่อเทียบกับการหดตัวของร่องแม่พิมพ์จึงมีค่าไม่เท่ากัน โดยมีแนวโน้มว่าอัตราการหดตัวจะมากกว่า เนื่องมาจากขนาดที่โตกว่านั่นเอง (ดูรูปที่ 4.7 ซึ่งแสดงให้เห็นขนาดที่ลดลงของชิ้นงานหลังเผาแห้งเมื่อเทียบกับขนาดของชิ้นงานก่อนการจัดตัวประสาน)

4.2 ผลกระทบจากตัวแปรในช่วงเผาแห้งที่มีต่อค่าความแข็งของชิ้นงาน

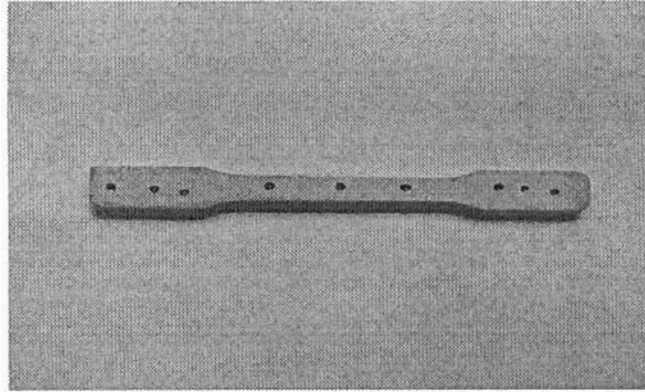
ตารางที่ 4.3 แสดงค่าความแข็งที่วัดได้ตามตำแหน่งที่กำหนดดังรูปที่ 4.9

ตำแหน่งที่ ทำการวัด Condition	A	B	C	ค่าความแข็ง เฉลี่ย (HRB)	Standard deviation
1 (ก๊าซอาร์กอน)	55.28	53.79	56.03	55.03	0.928
2 (สูญญากาศ)	53.50	50.83	54.40	52.91	1.513

4.2.1 ผลกระทบจากบรรยากาศในช่วงของการเผาแห้ง



(a) แสดงชิ้นงานตามแบบ



(b) แสดงชิ้นงานจริง

รูปที่ 4.9 แสดงชิ้นงานทดสอบแรงดึงและตำแหน่งต่างๆ ที่ได้ทำการวัดค่าความแข็ง

- หมายเหตุ A = ตำแหน่งทางเข้า (gate) ของชิ้นงานทดสอบแรงดึง
B = บริเวณความยาวทดสอบ (gage length) ของชิ้นงานทดสอบแรงดึง
C = ตำแหน่งตรงข้ามกับตำแหน่งทางเข้าของชิ้นงานทดสอบแรงดึง

เงื่อนไขที่ใช้ในการวัดค่าความแข็ง

1. แต่ละ Condition ใช้ชิ้นงานทดสอบแรงดึง 5 ชิ้น
2. เวลาที่ใช้ในขณะที่ทำการกด 3.0 วินาที
3. Load ที่ใช้กด 980.7 นิวตัน (N)

จากค่าความแข็งเฉลี่ยตลอดทั่วชิ้นงานในตารางที่ 4.3 ซึ่งแสดงค่าความแข็ง ณ ตำแหน่งต่างๆ ที่ทำการวัด ดังรูปที่ 4.9 จะเห็นได้ว่าชิ้นงานที่ผ่านการเผาผืนึกในบรรยากาศก๊าซอาร์กอนนั้น มีค่าความแข็งมากกว่าชิ้นงานที่ผ่านการเผาผืนึกในบรรยากาศสุญญากาศ (vacuum) เนื่องจากว่าในบรรยากาศสุญญากาศนั้นถึงแม้ว่าจะมีการดูดเอา ออกซิเจนออกไปจนหมดแล้วก็ตาม แต่ก็ยังคงมีออกซิเจนตกค้าง (residual or retained oxygen) หลงเหลืออยู่ภายใน เตาบวกกับออกซิเจนที่อยู่ทั้งภายในและบนผิวของชิ้นงาน โดยในผงเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316L ที่ใช้ในครั้งนี้มี ออกซิเจนเป็นส่วนประกอบอยู่ในรูปของโครเมียมออกไซด์ (Cr_2O_3) ซึ่งเป็นชั้นผิวป้องกัน (passive film) ฟอรัมตัว เคลือบผิวปกป้องผงเหล็กกล้าไร้สนิมเอาไว้ (ตารางที่ 3.1 ซึ่งมีปริมาณของออกซิเจนอยู่ 3400 ppm โดยมวล) ออกซิเจนเหล่านี้จะทำปฏิกิริยาเคมีกับคาร์บอนที่อยู่บนผิวของชิ้นงาน ณ อุณหภูมิสูง (ในผงเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316L ที่ใช้ในโครงการครั้งนี้มีปริมาณคาร์บอนในตอนเริ่มต้นเท่ากับ 0.024% โดยน้ำหนักอยู่) ในระหว่างการเผาผืนึก จึงทำให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีที่เรียกว่า "Decarburization" เมื่อปริมาณหรือเปอร์เซ็นต์ของคาร์บอนลดน้อยลงผลที่ ตามมาก็คือ ความแข็งจะลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ผ่านการเผาผืนึกในบรรยากาศก๊าซอาร์กอน โดยเฉพาะที่ บริเวณผิวของชิ้นงานค่าความแข็งจะลดลงมาก เนื่องจากมีการสัมผัสกับบรรยากาศภายในเตามากกว่าเมื่อเทียบกับ บริเวณอื่นๆ

4.2.2 ผลจากอุณหภูมิในช่วงของการเผาผนึก

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าความแข็งที่วัดได้ตามตำแหน่งที่กำหนด ดังรูปที่ 4.9

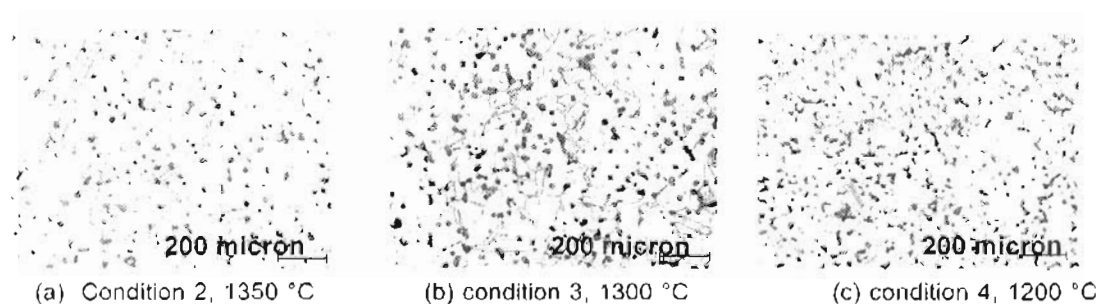
ตำแหน่งที่ ทำการวัด Condition	A	B	C	ค่าความแข็ง เฉลี่ย (HRB)	Standard deviation
2 (1350°C)	53.50	50.83	54.40	52.91	1.513
3 (1300°C)	56.27	54.97	57.22	56.15	0.921
4 (1200°C)	54.46	52.87	55.13	54.15	0.948

จาก ค่าความแข็งเฉลี่ยตลอดทั่วชิ้นงาน ในตารางที่ 4.6 พบว่าระดับอุณหภูมิในการเผาผนึกที่เพิ่มสูงขึ้นค่าของความแข็งจะมีค่าลดลง เนื่องจากว่าที่ระดับอุณหภูมิสูงนั้นจะทำให้เกรนเกิดการขยายตัว (grain growth) มากกว่าที่อุณหภูมิต่ำและถ้าเกรนขยายตัวเกินขนาดหนึ่งจะเป็นผลให้เกิดเกรนหยาบ (grain coarsening) ซึ่งเกรนหยาบจะมีค่าความแข็งน้อยกว่าเมื่อเทียบกับเกรนละเอียด (ดูรูป 4.10 ประกอบ) แต่ถ้าสังเกตดูให้ดีที่ condition 3 เมื่อเทียบกับ condition 4 นั้น condition 3 มีอุณหภูมิสูงกว่า (1300°C > 1200°C) แต่กลับมีค่าความแข็งมากกว่า (แทนที่น้อยกว่าตามที่ได้อาศัยการวัดไว้ในตอนต้น) โดยสามารถอธิบายสิ่งที่เกิดขึ้นนี้ได้จากปรากฏการณ์ที่เรียกว่า “Balance Effect” (เมื่ออุณหภูมิสูง แต่ขนาดเกรนกลับโตขึ้น) [5] ได้ดังต่อไปนี้

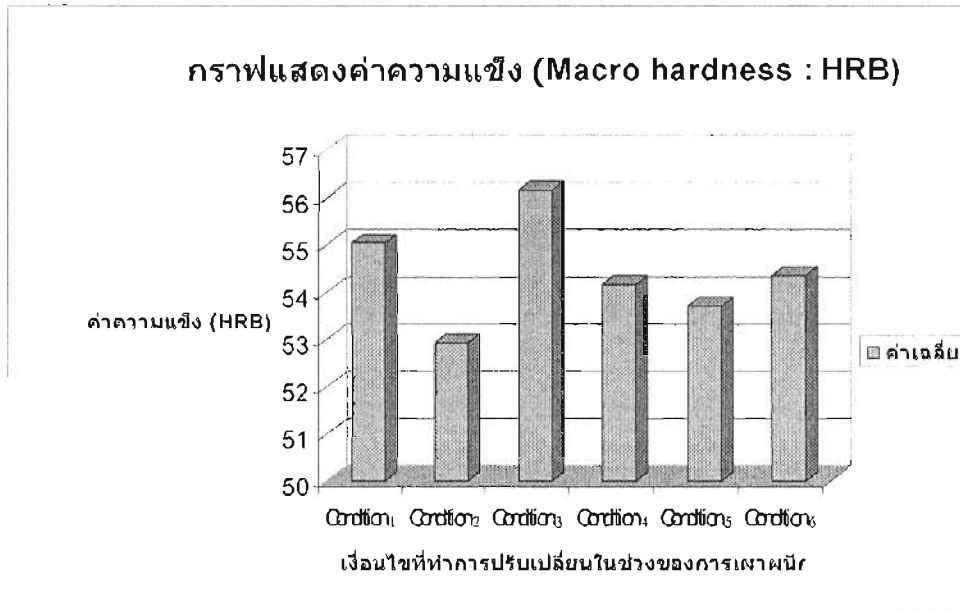
-Condition 2 อุณหภูมิสูงสุด ทำให้เกรนขยายตัวมากเกินไป ก่อให้เกิดเกรนหยาบเป็นผลให้ค่าความแข็งต่ำลง ปริมาณและขนาดของรูพรุนมีความใกล้เคียงกับ Condition 3 (ดูรูป 4.10 ประกอบ)

- Condition 3 อุณหภูมิต่ำลงมากทำให้เกิดความสมดุลระหว่างขนาดของเกรนที่ดีที่สุด (การทำโครงการครั้งนี้) เกรนไม่หยาบเกินไปยังคงไว้ซึ่งค่าความแข็งบวกกับขนาดและการกระจายที่เหมาะสมของรูพรุน (ดูรูป 4.10 (b) ประกอบ)

- Condition 4 อุณหภูมิต่ำที่สุดในการทดลองครั้งนี้ทำให้รูพรุนยังมีขนาดใหญ่และ ปริมาณการกระจายตัวที่มากอยู่ เป็นผลให้ค่าความแข็งมีค่าต่ำสุด (เกิดระยะยุบตัวมากในขณะที่ถูกกดด้วยลูกบอลเหล็กกล้าขณะวัดค่าความแข็ง) (ดูรูป 4.10 (c) ประกอบ)

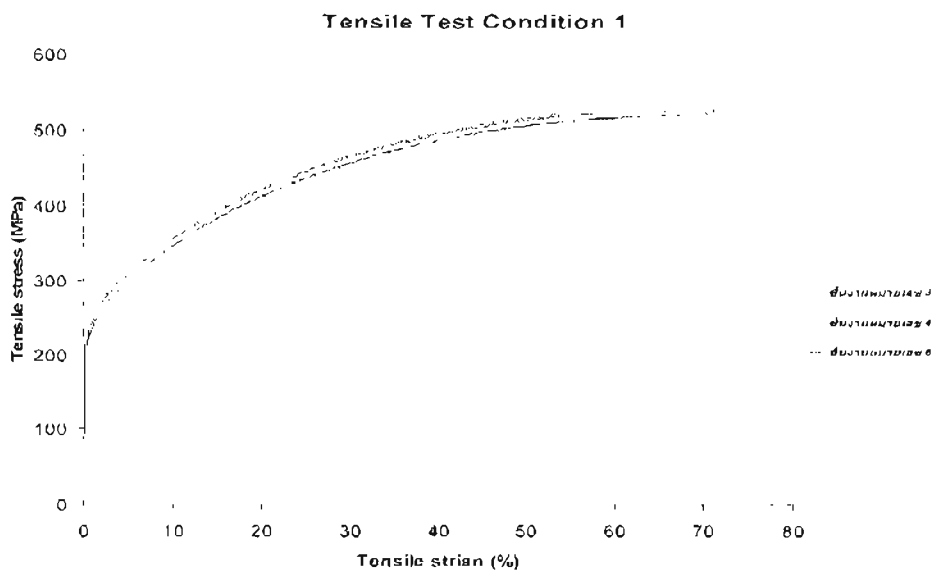


รูปที่ 4.10 แสดงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเผาที่อุณหภูมิต่างๆ กัน



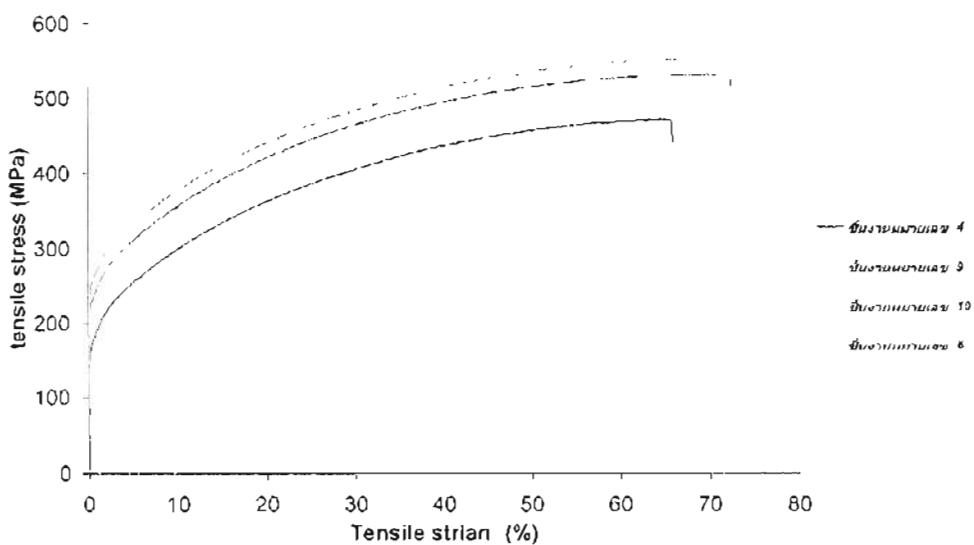
รูปที่ 4.11 กราฟแสดงค่าความแข็งในแต่ละ condition ที่ทำการทดลอง

4.3 ผลกระทบจากตัวแปรในช่วงเผาผิที่มีต่อค่าความต้านแรงดึงของชิ้นงาน



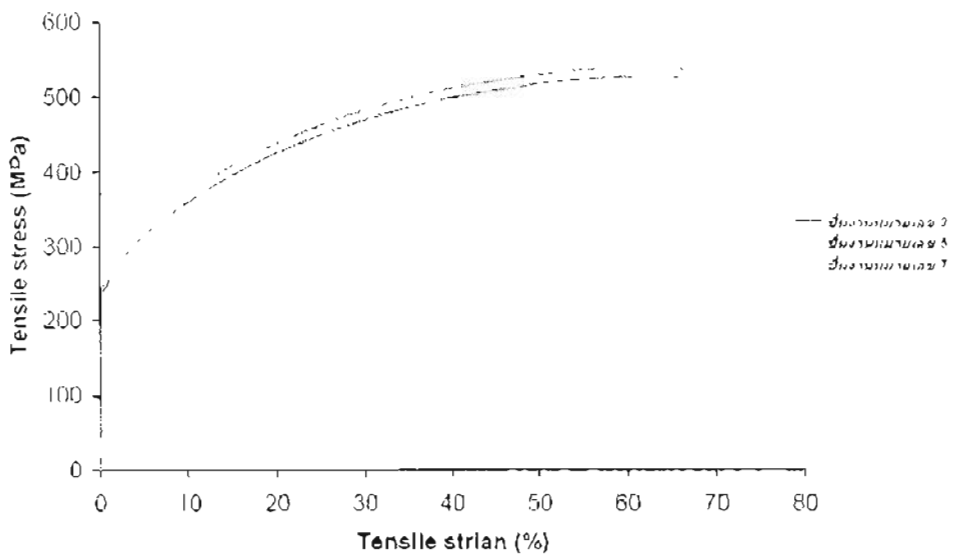
(a)

Tensile Test Condition 2



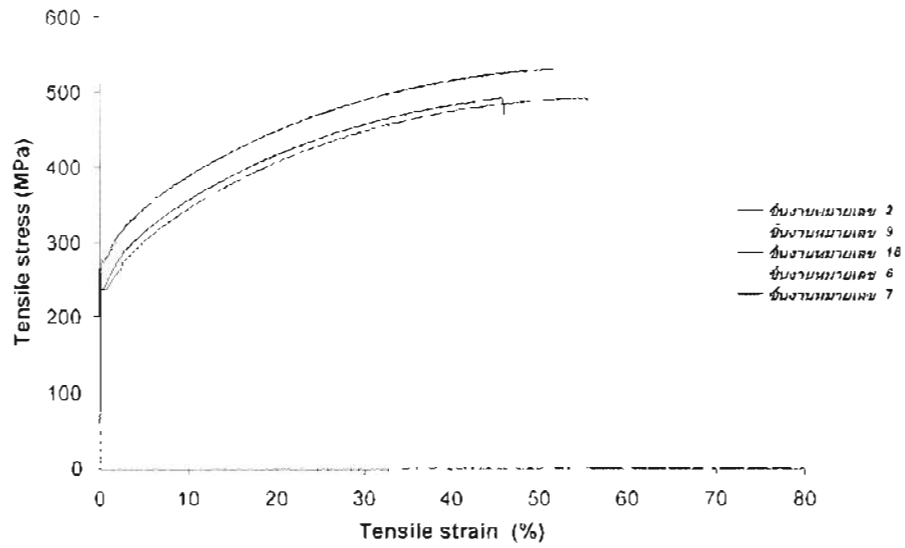
(b)

Tensile Test Condition 3



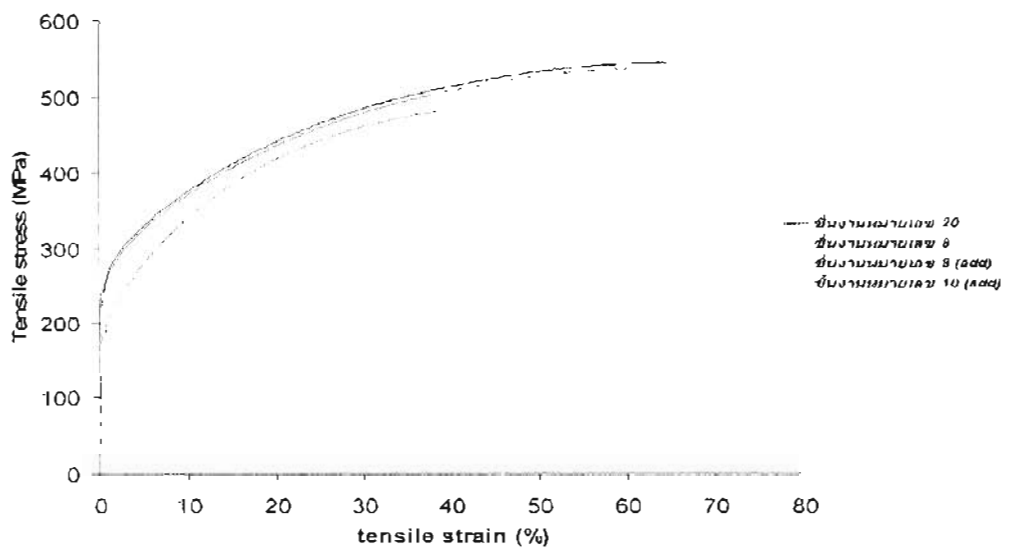
(c)

Tensile Test Condition 4

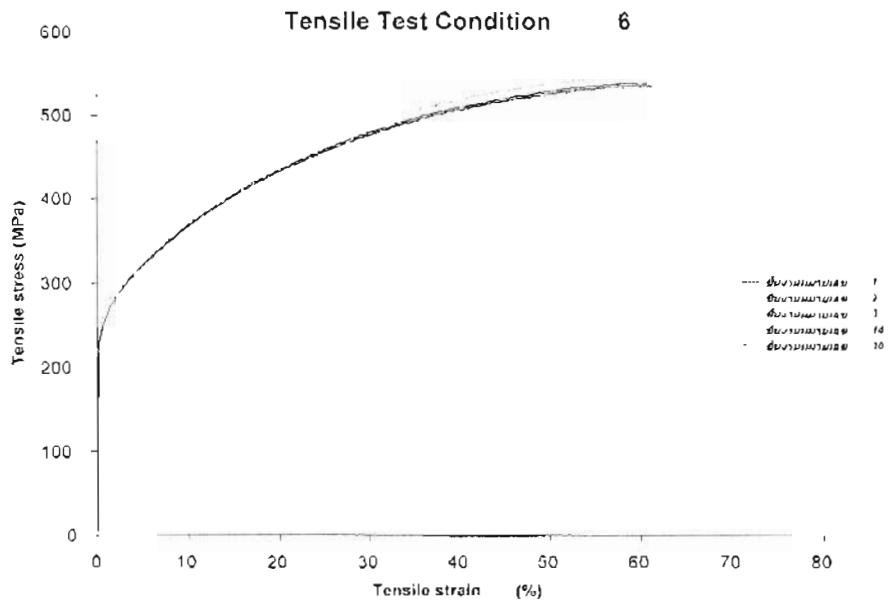


(d)

Tensile Test Condition 5

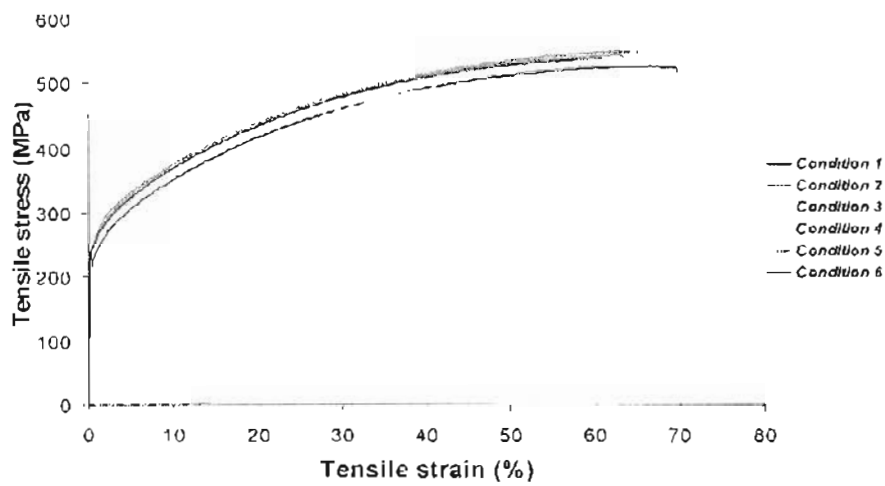


(e)



(f)

รูปที่ 4.12 (a)-(f) กราฟแสดงค่าความต้านแรงดึง และค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของชิ้นงานทดสอบแรงดึงในแต่ละ Condition



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงค่าความต้านแรงดึง และค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของชิ้นงานทดสอบแรงดึงรวมทุก Condition

ตารางที่ 4.5 สรุปผลค่าคุณสมบัติต่างๆ ที่ได้จากการทดสอบแรงดึงในโครงการครั้งนี้

Properties Condition	Ultimate Tensile Strength (MPa)	Yield Strength (0.2% offset) (MPa)	Percentage Elongation (Strain : %)
1	526.22	210.62	72.04
2	548.71	236.45	70.11
3	535.57	236.45	68.95
4	529.24	275.80	51.62
5	541.11	229.39	66.87
6	537.16	231.23	64.09
MIM 316L MPIF Standard 35	520 (min. 450)	175 (min. 140)	50.0 (min. 40.0)
Wrought Austenitic Stainless Steels UNS S31600 (AISI)	550 - 620	210 - 290	55 - 60

หมายเหตุ ผลลัพธ์ที่ได้ทั้งหมดเป็นผลจากค่าเฉลี่ยของชิ้นงานทดสอบในแต่ละ Condition

ตารางที่ 4.6 ค่าคุณสมบัติต่างๆ ซึ่งเป็นผลจากการปรับเปลี่ยน Condition ในช่วงเผาผืนึก

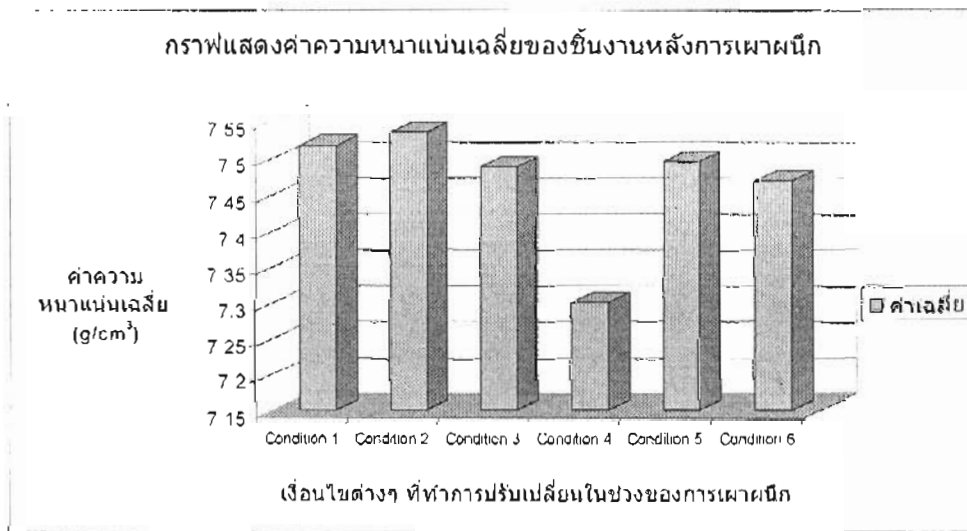
ตัวแปรที่ทำการ ปรับเปลี่ยนและ ผลที่ได้ Condition	อุณหภูมิ (°C)	เวลา (ชั่วโมง)	บรรยากาศ ภายในเตา	เปอร์เซ็นต์ การหดตัว จาก ร่องแม่ พิมพ์ (%)	ค่าความ หนาแน่น ของชิ้นงาน หลังจาก เผาผืนึก (g/cm ³)	ค่าความ แข็งเฉลี่ย ตลอดทั่ว ชิ้นงาน (HRB- Scale)
1	1350	2.00	ก๊าซอาร์กอน	12.96	7.518	55.03
2	1350	2.00	สุญญากาศ	13.18	7.537	52.91
3	1300	2.00	สุญญากาศ	12.81	7.488	56.15
4	1200	2.00	สุญญากาศ	12.03	7.301	54.15
5	1350	1.50	สุญญากาศ	13.06	7.496	53.70
6	1350	1.00	สุญญากาศ	12.86	7.469	54.35

หมายเหตุ ค่าความหนาแน่นของผง (SUS 316L) ในทางทฤษฎีมีค่า $\rho_t = 7.860 \text{ g/cm}^3$

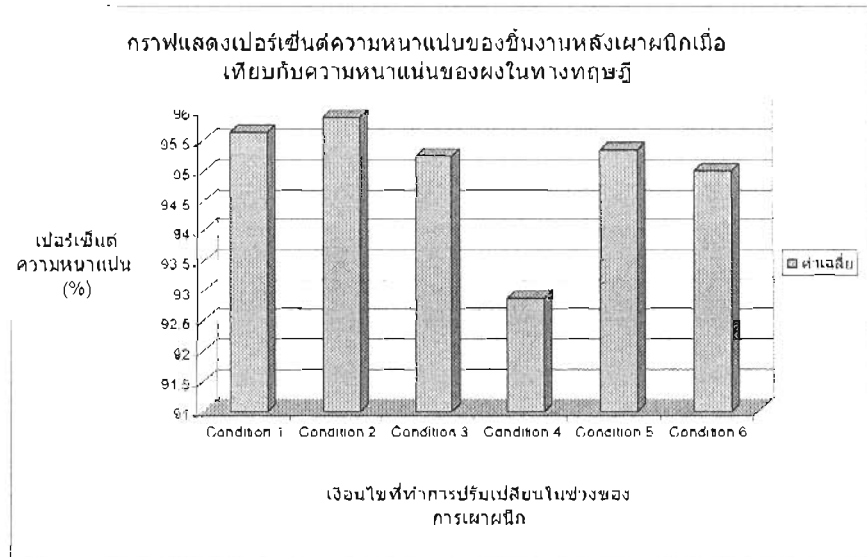
จากตารางที่ 4.5 ซึ่งแสดงค่าความต้านแรงดึง และค่าเปอร์เซ็นต์การยึดตัว พบว่า

1.) Condition 1 และ Condition 2 การใช้บรรยากาศสุญญากาศในช่วงของการเผาผนึกจะให้ค่าความต้านแรงดึงสูงสุด และค่าความต้านแรงดึงครากมากกว่าการใช้บรรยากาศอาร์กอน เพราะบรรยากาศสุญญากาศนั้นชิ้นงานมีการแน่นตัว (densification) มากกว่า (จากค่าความหนาแน่นที่ได้ ดังตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.14) มีการผกและประสานกันมากกว่าส่งผลให้มีปริมาณและขนาดของรูพรุนน้อยและเล็กกว่าทำให้มีพื้นที่ในการรับแรงที่มากขึ้น (ดูรูป 4.2 ประกอบ) เนื่องจากในบรรยากาศสุญญากาศนั้นไม่มีก๊าซที่ปล่อยเข้าไปในช่วงของการเผาผนึก ดังนั้นจึงไม่มีก๊าซที่ถูกเก็บกักอยู่ภายในชิ้นงานซึ่งก๊าซที่ว่านี้จะขัดขวางการขยายตัวของขอบเกรน และยังคงให้เกิดรูพรุนที่มีขนาดใหญ่และกระจายตัวไปทั่วมากกว่าอีกด้วย

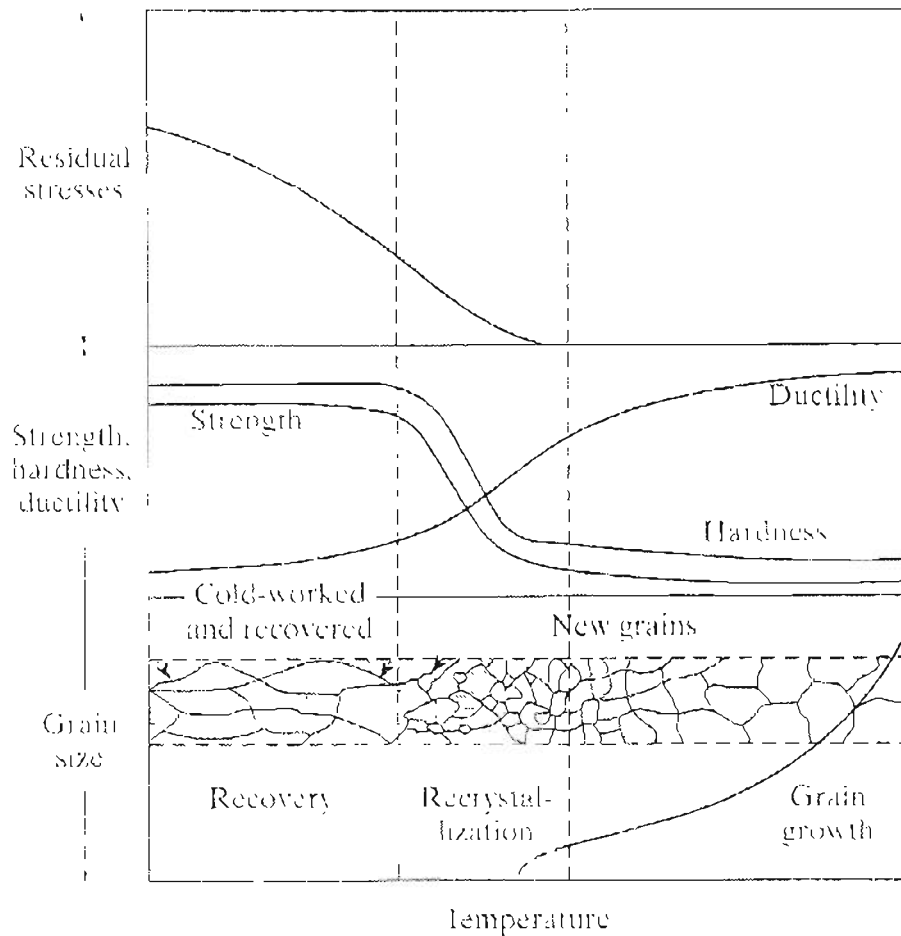
2.) Condition 3 และ 4 การเพิ่มอุณหภูมิที่ใช้ในช่วงของการเผาผนึก ทำให้ค่าความต้านแรงดึงสูงสุดมีค่ามากขึ้น ซึ่งเป็นผลจากการเพิ่มอุณหภูมินั้นจะทำให้ขนาดและปริมาณของรูพรุนมีค่าน้อยลง (การเพิ่มของอุณหภูมิเป็นการเร่งให้เกิดการผกมากยิ่งขึ้น) แต่ในกรณีของค่าความต้านแรงดึงครากกลับไม่เป็นเช่นนั้น (ดูรูปที่ 2.13 และรูปที่ 4.17 - 4.18 ซึ่งได้เปรียบเทียบขนาดเกรนและปริมาณของรูพรุน ประกอบ) การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิมีแนวโน้มว่าจะทำให้ค่าความต้านแรงดึงครากมีค่าต่ำลง และมีค่าเปลี่ยนแปลงน้อยมากเมื่ออุณหภูมิยังมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถอธิบายสิ่งที่เกิดขึ้นได้ดังนี้ โดยพบว่า การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิทำให้ปริมาณและขนาดของรูพรุนลดน้อยลง แต่ในขณะเดียวกันการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิก็จะส่งผลให้ตัวเกรนเองเกิดการขยายตัว (grain growth) ด้วยเช่นกัน ผลจากการขยายตัวจะก่อให้เกิดเกรนหยาบ (grain coarsening) ซึ่งเกรนหยาบนี้มีผลกระทบโดยตรงต่อคุณสมบัติทางกลของวัสดุโดยเฉพาะอย่างยิ่งค่าความต้านแรง (strength) และค่าความแข็ง (hardness) ซึ่งจะมีค่าลดลงเมื่อขนาดของเกรนโตขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.16



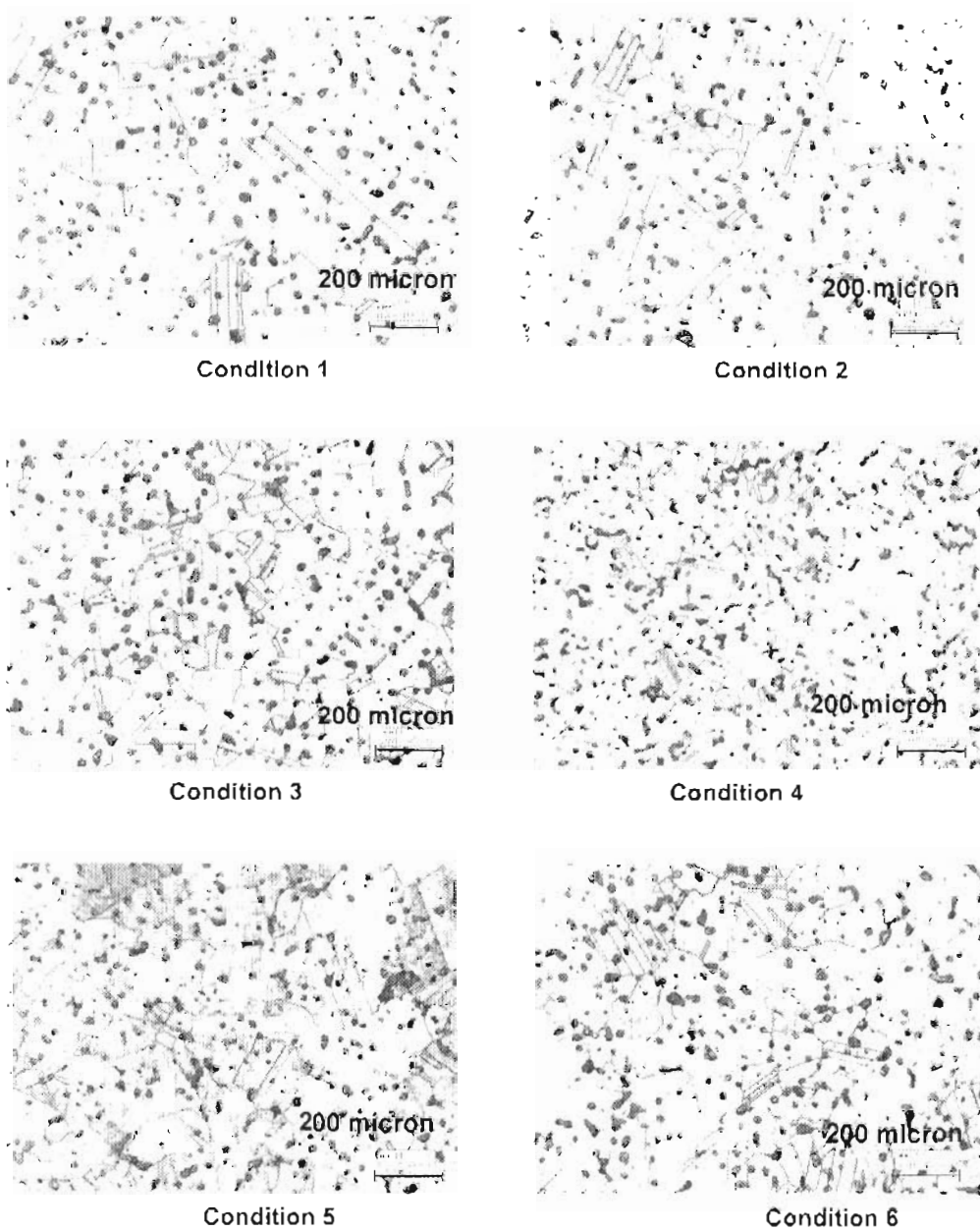
รูปที่ 4.14 กราฟแสดงค่าความหนาแน่นระหว่างแต่ละ Condition ที่ทำการทดลอง



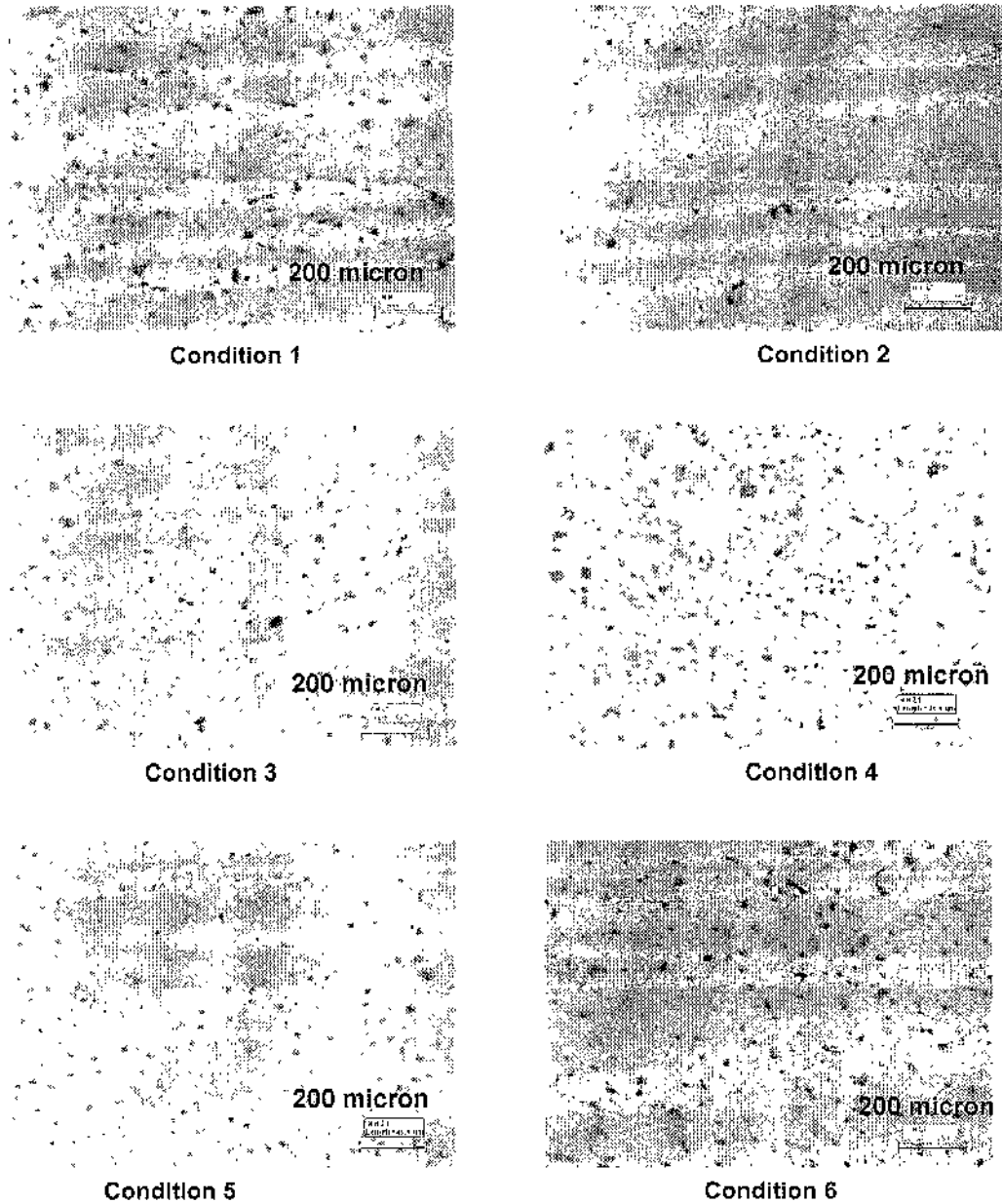
รูปที่ 4.15 กราฟแสดงค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ระหว่างแต่ละ Condition ที่ทำการทดลอง



รูปที่ 4.16 แสดงผลกระทบของขนาดเกรนต่อค่าคุณสมบัติทางกล (strength, hardness และ ductility) ซึ่งเป็นผลมาจากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ [9]



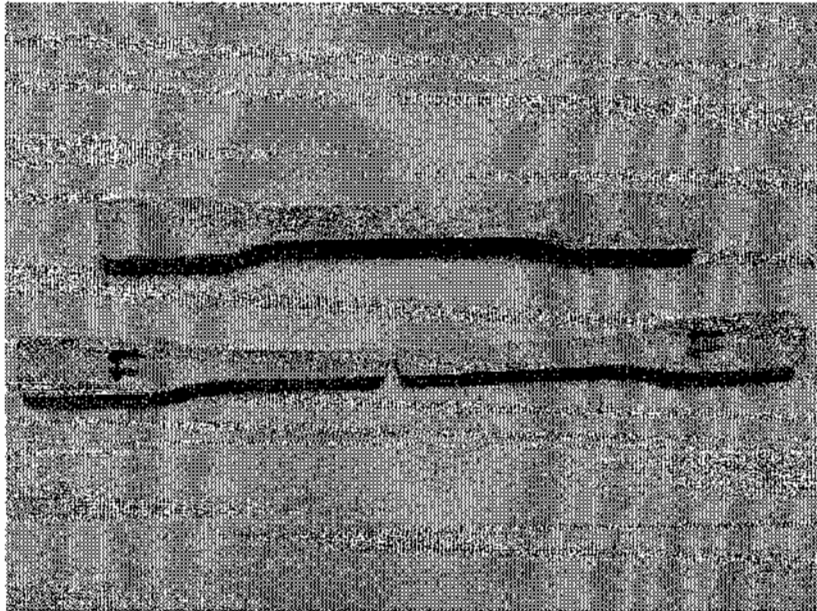
รูปที่ 4.17 เปรียบเทียบขนาดของเกรนที่ Condition ในการเผาขึ้นที่ต่างๆ กัน



รูปที่ 4.18 เปรียบเทียบขนาดของรูพรุนที่ Condition ในการเผาผนึกต่างๆ กัน

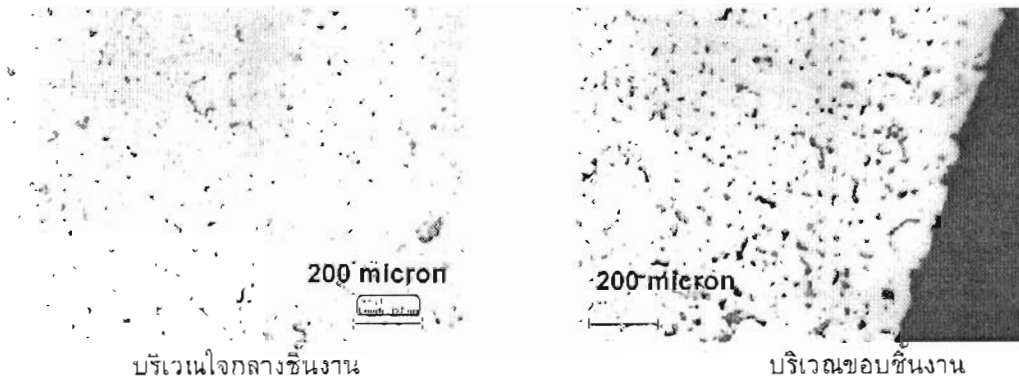
3.) Condition 2 5 และ 6 การเพิ่มเวลาในช่วงของการเผาผนึก ทำให้ค่าความต้านแรงดึงสูงสุดมีค่าเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่ค่าความต้านแรงดึงครากมีค่าเปลี่ยนแปลงน้อยมาก หรือแทบจะคงที่ (ดูรูปที่ 2.13 และรูปที่ 4.16 - 4.17 ซึ่งได้เปรียบเทียบขนาดเกรนและปริมาณของรูพรุนประกอบ) การสรุปผลสิ่งที่เกิดขึ้นใน ข้อ 3.) นี้เป็นไปในแนวทางเดียวกับ ข้อ 2.) ซึ่งการเพิ่มเวลาในช่วงของการเผาผนึกนั้น ทำให้ขนาดและปริมาณของรูพรุนลดน้อยลงในขณะเดียวกันจะก่อให้เกิดการขยายตัวของขอบเกรนมากขึ้นด้วยเช่นกัน รูปที่ 4.18 แสดงการแตกหักของชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบแรงดึง

โดยพบว่าตัวแยกการพิจารณาออกจากกัน ทั้งผลจากอุณหภูมิและผลจากเวลาทั้งสองในช่วงของการเผาผลาญ สิ่งที่มีอิทธิพลหรือส่งผลกระทบต่ออัตราการลดลงของขนาดและปริมาณของรูพรุนคือ การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในช่วงของการเผาผลาญ ส่วนการขยายตัวของขอบเกรนซึ่งก่อให้เกิดเกรนหยาบนั้น สิ่งที่มีอิทธิพลหรือส่งผลกระทบต่อมากที่สุดคือ เวลาที่ใช้ในช่วงของการเผาผลาญ (time holding or time soaked) ดังตารางที่ 4.7 ได้แสดงการสรุปผลคุณสมบัติทั้งหมดที่ได้จากการทดลอง

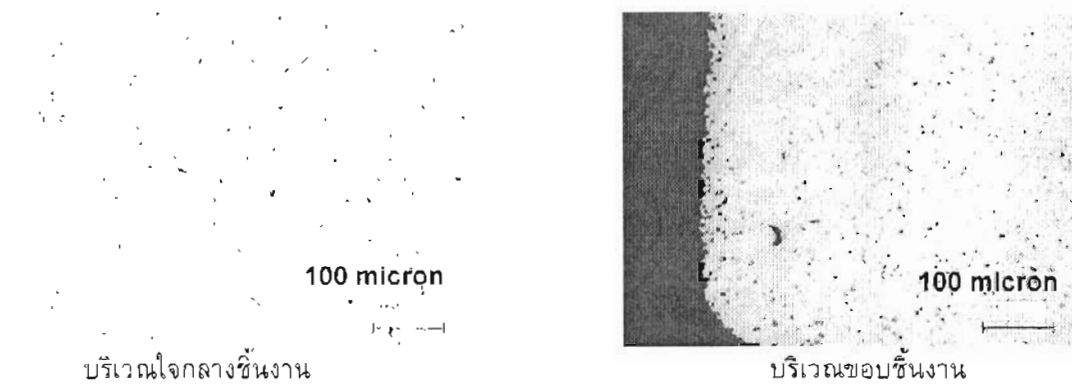


รูปที่ 4.19 แสดงชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบแรงดึง

4.4 การกระจายตัวของรูพรุนที่แตกต่างกันบริเวณขอบ และบริเวณใจกลางชิ้นงาน



รูปที่ 4.20 เปรียบเทียบขนาด ของรูพรุนบริเวณใจกลางชิ้นงานกับบริเวณขอบชิ้นงาน (Condition 4)

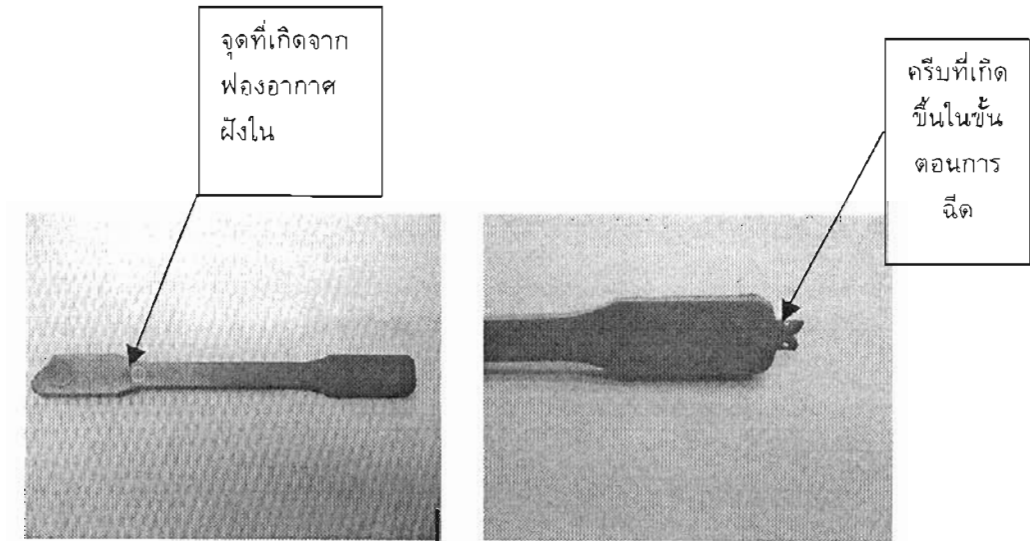


รูปที่ 4.21 เปรียบเทียบการกระจายตัวของรูพรุนบริเวณใจกลางชิ้นงานกับบริเวณขอบชิ้นงาน (Condition 2)

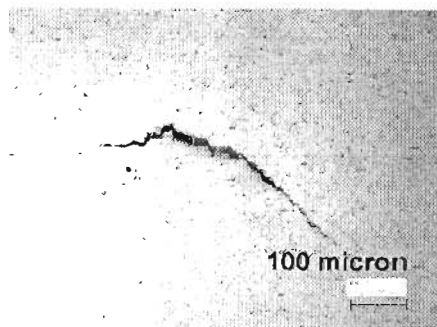
จากรูปที่ 4.20 และรูปที่ 4.21 แสดงการกระจายตัวของรูพรุนที่บริเวณขอบชิ้นงานและที่บริเวณ ใจกลางชิ้นงานซึ่งมีความแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด สิ่งที่เกิดขึ้นนี้เป็นผลสืบเนื่องมาจากการกระจายตัวของผงที่แตกต่างกันของทั้งสองบริเวณ ซึ่งการกระจายตัวที่ต่างกันนี้เกิดขึ้นในขั้นตอนการฉีดขึ้นรูป ขณะที่ส่วนผสมหลอมเหลวของผงและตัวประสาน (feedstock) ถูกฉีดเข้าไปยังร่องแม่พิมพ์นั้นจะก่อให้เกิดสิ่งที่เรียกว่า "ชั้นผิวเย็น" (frozen layer) [2] ซึ่งเป็นผลมาจากการเย็นตัวอย่างรวดเร็วของส่วนผสมหลอมเหลวขณะที่สัมผัสกับผิวภายในของผนังแม่พิมพ์ที่เย็นตัว (cold die wall) ทำให้เกิดความหนาของส่วนผสมหลอมเหลวขึ้นในทันที โดยชั้นความหนานี้จะมีสัดส่วนปริมาณผง และตัวประสานเทียบเท่ากับส่วนผสมหลอมเหลวภายในกระบอกหลอม (barrel or cylinder) ซึ่งสัดส่วนที่ว่าจะมีการกระจายตัวของผงน้อยกว่า (การกระจายตัวของรูพรุนมากกว่า ดังรูป 4.20 และรูป 4.21) เมื่อเทียบกับบริเวณใจกลางชิ้นงาน โดยบริเวณใจกลางชิ้นงานนั้นการเย็นตัวจะเกิดขึ้นช้ากว่า ทำให้ในขณะที่กำลังฉีดอยู่นั้นจะมีการอัดตัวของผงในปริมาณมากกว่าให้เกิดการแน่นตัวของผงที่มากกว่า ผลจากความแตกต่างของสัดส่วนของผงที่

นี้ จึงทำให้ชิ้นงานหลังผ่านการเผาผนึกมีความแตกต่างในการกระจายตัวของรูพรุนระหว่างบริเวณขอบชิ้นงานกับบริเวณใจกลางชิ้นงาน

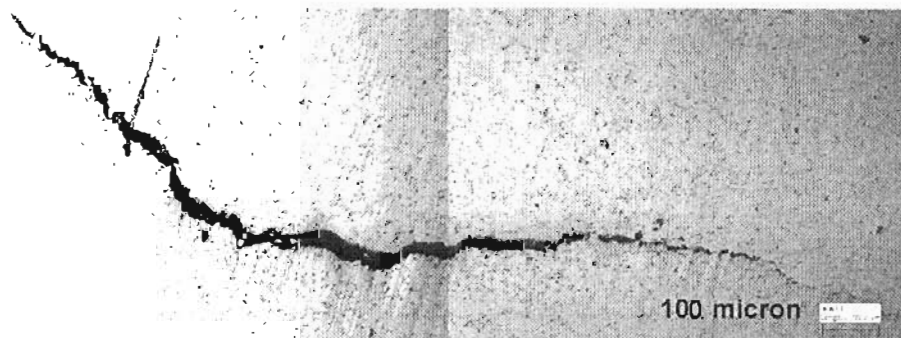
4.5 ลักษณะบกพร่องต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานทดสอบแรงดึง



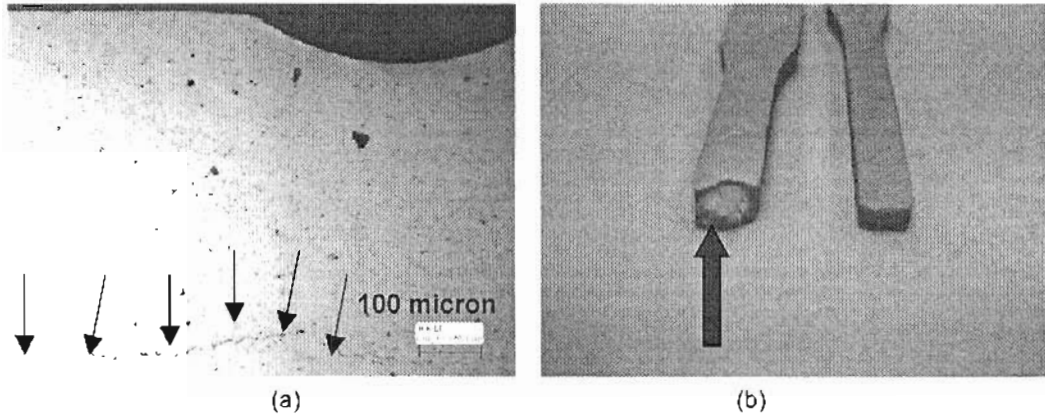
รูปที่ 4.22 ชิ้นงานทดสอบแรงดึงที่มีปัญหาในขั้นตอนการฉีด



รูปที่ 4.23 รอยแตกภายใน (Condition 1 บริเวณ gage length)



รูปที่ 4.24 รอยแตกภายใน (Condition 6 บริเวณ gage length)



รูปที่ 4.25 รอยแตกภายใน (Condition 1 บริเวณ gage length) หลังจากการทดสอบคุณสมบัติทางกลโดย (ข) ชั้นงานที่ได้จากการทดสอบความแข็ง และ (b) ชั้นงานที่ได้จากการทดสอบแรงดึง

รูปที่ 4.23 และรูปที่ 4.24 แสดงให้เห็นรอยแตกภายใน (internal crack) โดยคาดว่าน่าจะเกิดขึ้นในขั้นตอนการฉีดขึ้นรูปเนื่องจากตัวแปรในการฉีด (อุณหภูมิหัวฉีด ความดันฉีด และความเร็วฉีด) อาจจะยังไม่เหมาะสม รูปที่ 4.25 (a) ผลจากรอยแตกภายในด้านล่าง (ลูกศรชี้) ทำให้ค่าความแข็งที่วัดได้ (รอยกดต้านบน) มีค่าลดลงอย่างมาก และ (b) เช่นเดียวกันผลจากรอยแตกภายในยังทำให้ค่าความต้านแรงดึงที่ได้จากการทดสอบแรงดึงมีค่าลดลงด้วย

หมายเหตุ ชั้นงานที่เกิดข้อบกพร่องทั้งหมดดังที่ได้กล่าวมานั้น ได้ทำการตัดออกจากชิ้นงานปกติ ที่ใช้ในการทดลองแล้ว ซึ่งผลจากข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นดังกล่าวจะไม่มีผลกระทบต่อผลการทดลอง

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการปรับเปลี่ยนตัวแปรต่างๆ ได้แก่ อุณหภูมิ เวลา และ บรรยากาศ ในช่วงของการเผาผืนึก ของกระบวนการฉีดขึ้นรูปผงเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316L ทำให้สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังต่อไปนี้

5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1 ผลจากการเพิ่มอุณหภูมิที่ใช้ในช่วงของการเผาผืนึก ทำให้ค่าความต้านแรงดึงสูงสุด (σ_u) และ เปอร์เซ็นต์การยืดตัว (ϵ) มีค่ามากขึ้น พร้อมกับค่าความต้านแรงดึงคราก (σ_y) ที่มีค่าลดลง และมีแนวโน้มว่าจะมีค่าลดลงที่ค่าหนึ่ง (เปลี่ยนแปลงน้อยมาก) ในช่วงของอุณหภูมิหนึ่งที่ทำการศึกษาทดลอง (1300 °C ~ 1350 °C) จากผลที่ได้นี้ ถ้าผู้ผลิตต้องการผลิตชิ้นส่วนจากเทคโนโลยีฉีดขึ้นรูปโลหะผง โดยชิ้นส่วนดังกล่าวมีการใช้ค่าของความต้านแรงดึงครากเป็นเกณฑ์ในการพิจารณาความเสียหาย การใช้อุณหภูมิสูงสุดที่ 1300 °C ในช่วงของการเผาผืนึกจะเป็นการเหมาะสมที่สุด ซึ่งจะช่วยลดพลังงานที่ใช้ในกระบวนการ โดยที่ค่าคุณสมบัติทางกลอื่นๆ ที่ได้ยังคงมีค่าสอดคล้องในช่วงของเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดโดยสมาคมอุตสาหกรรมโลหะผงแห่งอเมริกา (MPIF) ดังแสดงในตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 แสดงค่าคุณสมบัติที่ได้จากชิ้นงานทดสอบแรงดึงพร้อมด้วยมาตรฐานที่กำหนด

อุณหภูมิ (C°)	เปอร์เซ็นต์การหดตัวจากแม่พิมพ์ (%)	ค่าความหนาแน่น (g/cm ³)	เปอร์เซ็นต์ความหนาแน่นสัมพัทธ์ (%)	ค่าความแข็ง (HRB)	ค่าความต้านแรงดึงสูงสุด (MPa)	ค่าความต้านแรงดึงคราก (0.2%) (MPa)	เปอร์เซ็นต์การยืดตัว (%)
1200	12.04	7.30	92.89	54.16	529.24	275.81	51.62
1300	12.82	7.49	95.27	56.16	535.57	236.46	68.96
1350	13.18	7.54	95.89	52.91	548.71	236.46	70.12
1350*	12.96	7.52	95.65	55.04	526.22	210.62	72.04
MPIF Standard	-	-	-	67.00	520.00 (min 450)	175.00 (min 140)	50.00 (min 40)

* เป็น Condition ที่ใช้อย่างยิ่งในครั้งนี ซึ่งแนะนำโดยผู้ผลิตโลหะผง

บรรยากาศ ภายในเตา	เปอร์เซ็นต์ การหดตัว จากแม่ พิมพ์ (%)	ค่าความ หนาแน่น (g/cm ³)	เปอร์เซ็นต์ ความหนา แน่น สัมพัทธ์ (%)	ค่าความ แข็ง (HRB)	ค่าความ ต้านแรง ดึงสูงสุด (MPa)	ค่าความ ต้านแรงดึง คราก(0.2%) (MPa)	เปอร์เซ็นต์ การยืดตัว (%)
ก๊าซ อาร์กอน*	12.96	7.52	95.65	55.04	526.22	210.62	72.04
สุญญากาศ	13.18	7.54	95.89	52.91	548.71	236.46	70.12
MPIF Standard	-	-	-	67.00	520.00 (min 450)	175.00 (min 140)	50.00 (min 40)

ตารางที่ 5.2 แสดงค่าคุณสมบัติที่ได้จากชิ้นงานทดสอบแรงดึงพร้อมด้วยมาตรฐานที่กำหนด

* เป็น Condition ที่ใช้อ้างอิงในครั้งนี ซึ่งแนะนำโดยผู้ผลิตโลหะผง

5.1.2 บรรยากาศที่ใช้ในช่วงของการเผาผนึกมีผลต่อค่าคุณสมบัติทางกล และค่าความหนาแน่นของชิ้นงานที่ผ่านการเผาผนึก ดังแสดงในตารางที่ 5.2 โดยชิ้นงานที่ผ่านการเผาผนึกในบรรยากาศสุญญากาศจะมีค่าของความหนาแน่น มากกว่าบรรยากาศก๊าซอาร์กอน ดังนั้น บรรยากาศที่แนะนำให้ใช้ในช่วงของการเผาผนึก เมื่อต้องการชิ้นส่วนที่ใช้งานทั่วๆ ไป คือ บรรยากาศสุญญากาศ เนื่องด้วยเหตุผลดังที่กล่าวมาข้างต้น พร้อมกับค่าคุณสมบัติอื่นๆ ที่ได้ยังคงมีค่าสอดคล้องตามมาตรฐานที่ได้กำหนดเอาไว้ (ตาม MPIF) และจะเป็นการประหยัดมากกว่า โดยที่ไม่ต้องเสียค่าใช้จ่ายสำหรับซื้อก๊าซอาร์กอนในช่วงของการเผาผนึก

ตารางที่ 5.3 แสดงค่าคุณสมบัติที่ได้จากชิ้นงานทดสอบแรงดึงพร้อมด้วยมาตรฐานที่กำหนด

เวลาที่ ใช้ใน ช่วงเผา ผนึก (ชั่วโมง)	เปอร์เซ็นต์ การหดตัว จากแม่ พิมพ์(%)	ค่าความ หนาแน่น (g/cm ³)	เปอร์เซ็นต์ ความหนา แน่น สัมพัทธ์ (%)	ค่าความ แข็ง (HRB)	ค่าความ ต้านแรง ดึงสูงสุด (MPa)	ค่าความ ต้านแรงดึง คราก(0.2%) (MPa)	เปอร์เซ็นต์ การยืดตัว (%)
2.00*	12.96	7.58	95.65	55.04	526.22	210.62	72.04
1.50	13.07	7.50	95.37	53.71	541.11	229.40	66.87
1.00	12.86	7.47	95.02	54.35	537.17	231.24	64.09
MPIF Standard	-	-	-	67.00	520.00 (min 450)	175.00 (min 140)	50.00 (min 40)

* เป็น Condition ที่ใช้อ้างอิงในครั้งนี ซึ่งแนะนำโดยผู้ผลิตโลหะผง

5.1.3 การเพิ่มเวลา (Time holding) ที่ใช้ในช่วงของการเผาผนึกนั้น มีแนวโน้มที่จะทำให้ค่าความแข็งแรงลดลงเนื่องมาจากการเกิดเกรนหยาบ (Grain coarsening) พร้อมด้วยค่าความหนาแน่นที่มากขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 5.3 ดังนั้น ช่วงเวลาที่แนะนำให้ใช้ในช่วงของการเผาผนึก คือ ที่ 1.50 ชั่วโมง เนื่องจากได้ค่าความต้านแรง

ถึงสูงสุดของชิ้นงานมากที่สุด ในขณะที่คุณสมบัติอื่นๆ ยังคงมีค่าสอดคล้องในช่วงของมาตรฐานที่ได้กำหนดเอาไว้ (ตาม MPIF) พร้อมกับผลต่างที่ไม่เห็นเด่นชัด (insignificant) เมื่อเทียบกับการใช้ช่วงเวลา 2.00 ชั่วโมง ทำให้เป็นการประหยัดเวลาที่ใช้ในกระบวนการ

5.2 ข้อเสนอแนะ

ควรใช้เครื่องฉีดขึ้นรูปโลหะผงที่สามารถปรับสภาวะในการฉีดได้ละเอียด เพื่อให้ได้ชิ้นงานทดสอบเริ่มต้นที่ดี ซึ่งส่งผลต่อคุณภาพของชิ้นงานหลังจากการเผาผืนึก เนื่องจากพบว่าชิ้นงานในขั้นตอนการฉีดขึ้นรูปนั้นมีปัญหาที่เกิดขึ้นมากที่สุด ซึ่งปัญหาที่เกิดขึ้นนี้แล้วแต่มีผลกระทบโดยตรงต่อค่าคุณสมบัติทางกลของชิ้นงานในขั้นตอนการทดสอบ เช่น รอยแตกภายในชิ้นงาน ฟองอากาศฝังใน เป็นต้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] German R.M., "Powder Metallurgy Science", 2nd edition, MPIF, New Jersey, 1994.
- [2] German R.M. and A. Bose, "Injection Molding of Metals and Ceramics", MPIF, New Jersey, 1997.
- [3] Loh, N. H., Khor, K. A. and Tor, S. B., *Metal Injection Molding of stainless steel 316L. The 2nd International Symposium on High Performance Metal Matrix Composites* (1997): 267-272.
- [4] Ji, C. H., Loh, N. H., Khor, K. A. and Tor, S. B., *Sintering Study of 316L Stainless Steel MIM Parts Using Taguchi Method: Final Density, 3rd International Symposium on High Performance Metal Matrix Composites*, (March 1999): 240-264.
- [5] Tae, S. Y., You, H. L., and Sang. H. A., *Effects of Sintering Conditions on the Mechanical Properties of Metal Injection Molded 316L Stainless Steel*, (2003) : 119-126.
- [6] อารดา ปัญชาวิมลเชษฐ, "ผลของส่วนผสมของตัวประสานต่อกระบวนการฉีดขึ้นรูปโลหะผง" วิทยานิพนธ์ สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2544.
- [7] อติกานต์ ทองสะอาด, "การผลิตชิ้นส่วนรถยนต์สมรรถนะสูงด้วยกระบวนการฉีดหล่อโลหะผง" วิทยานิพนธ์ สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2543.
- [8] Metal Injection Molding [Online]. Available from: <http://www.EPMA.com> [2005 June 25].
- [9] Kalpajian. S. and Schmid S. R., *Manufacturing Engineering and Technology*, 5th edition, 2006

ภาคผนวก ก.
ข้อมูลเกี่ยวกับการทดสอบก่อนและหลังการเผาผืนึก
ผงเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316L

ATMIX
 大分県豊後高田4-44
 〒87-2801
 6-73-2810

ATMIX CORPORATION
 4-44 Kigaya, Kawasagi-cho, O-aza
 Hachinohe-shi, Aomori-ken, 039-1 61 JAPAN
 Tel.+81-178-73-2801
 Fax.+81-178-73-2810

10178732810



PAGE:1

MILL CERTIFICATE

DATE OF ISSUE 2005/04/22 (No. F13540160A)

CUSTOMER : NATIONAL METAL AND MATERIALS TECHNOLOGY CENTER
 KIND OF MATERIALS : STAINLESS STEEL POWDER
 CONTRACT QTY : 10kg
 LOT NO : 54V3090
 DESIGNATION OF GRADE : SUS316L
 NOMINAL SIZE : PF-20F
 NO. OF PACKAGES : 1
 NET WEIGHTS : 10kg

CHEMICAL COMPOSITIONS (mass %)		Specification	Results
C	:	MAX 0.030	0.024
Si	:	MAX 1.00	0.81
Mn	:	MAX 2.00	0.80
P	:	MAX 0.045	0.019
S	:	MAX 0.030	0.009
Ni	:	12.00~15.00	12.53
Cr	:	16.00~18.00	16.49
Mo	:	2.00~3.00	2.10
Cu	:	REPORT	0.03
O (ppm)	:	REPORT	3400

PHYSICAL PROPERTIES		Specification	Results
SCREEN ANALYSIS (mass %)			
+30	μm	MAX 10.0	8.8
30~20	μm	MAX 15.0	13.8
20~10	μm	MAX 45.0	30.8
-10	μm	MIN 40.0	46.6
MEAN SIZE	μm	10.0~12.0	10.86
TAP DENSITY	g/cm ³	REPORT	4.54

IT IS HEREWITH CERTIFIED THAT THE ABOVE MATERIALS ARE SATISFACTORY IN COMPLIANCE WITH THE REQUIREMENTS SPECIFIED IN THE CONTRACTS.

MANAGER OF Q. A. SECTION

ภาพที่ 1 ใบรับรองพงเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316L ที่ใช้ในโครงการครั้งนี้

ตารางที่ 1 แสดงการการปรับเปลี่ยนการกำหนดอุณหภูมิ เวลา และบรรยากาศภายในช่วงของการเผาผลาญของ Condition ต่างๆดังต่อไปนี้

ตัวแปรที่ทำการปรับเปลี่ยน Condition	อุณหภูมิ (°C)	เวลา (ชั่วโมง)	บรรยากาศภายในเตา
1	1350	2.00	ก๊าซอาร์กอน
2	1350	2.00	สุญญากาศ
3	1300	2.00	สุญญากาศ
4	1200	2.00	สุญญากาศ
5	1350	1.50	สุญญากาศ
6	1350	1.00	สุญญากาศ

หมายเหตุ แต่ละ Condition ที่ทำการทดลองใช้ชิ้นงานทดสอบ (Tensile test bars) จำนวน 20 ชิ้น

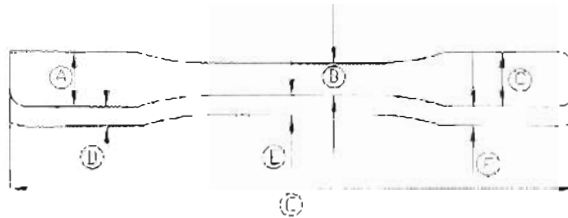
ตารางที่ 2 แสดงค่าความหนาแน่นของชิ้นงานทดสอบที่ Condition ต่างๆ กันพร้อมกับแสดงให้เห็นค่าความหนาแน่นเมื่อเทียบกับความหนาแน่นทางทฤษฎี

ผลที่ได้จากการวัดค่าความหนาแน่น Condition	ค่าความหนาแน่นของชิ้นงานก่อนการกำจัดตัวประสาน (Green part) (g/cm ³)	ค่าความหนาแน่นของชิ้นงานหลังเผาผลาญ (Sintered part) (g/cm ³)	เปอร์เซ็นต์ความหนาแน่นของชิ้นงานหลังเผาผลาญเมื่อเทียบกับความหนาแน่นของผงในทางทฤษฎี (ρ_T)
1	5.240	7.518±0.006	95.649%
2	5.242	7.537±0.010	95.890%
3	5.251	7.488±0.010	95.267%
4	5.249	7.301±0.017	92.888%
5	5.239	7.496±0.014 *	95.369%
6	5.245	7.469±0.029	95.025%

(* ทำการเผาผลาญใหม่อีกครั้ง)

- หมายเหตุ 1. ค่าความหนาแน่นของ Feedstock ในทางทฤษฎีมีค่า $\rho_f = 5.238 \text{ g/cm}^3$
 2. ค่าความหนาแน่นของ Powder (SUS 316L) ในทางทฤษฎีมีค่า $\rho_T = 7.860 \text{ g/cm}^3$

ตารางที่ 3 แสดงขนาดต่างๆ ซึ่งวัดจากร่องแม่พิมพ์ (Mold cavity) ของชิ้นงานทดสอบแรงดึงที่ใช้ในการทำโครงการครั้งนี้ ตำแหน่งต่างๆ ได้แสดงเอาไว้ดังรูป



ภาพที่ 2 แสดงขนาดของร่องแม่พิมพ์และตำแหน่งต่างๆ ที่ทำการวัด

ตำแหน่ง	A	B	C	D	E	F	G
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
ขนาดที่วัดได้	9.910	5.900	9.910	3.520	3.530	3.520	99.950

Stainless Steels MIM Material Properties

Material Designation Code (condition)	MINIMUM VALUES					TYPICAL VALUES					Corrosion Resistance	
	Tensile Properties		Density g/cm ³	Tensile Properties		Unnotched Charpy Impact Energy J	Hardness		H ₂ SO ₄ gr/m ² /day	Boil Test (H ₂ O)		
	Ultimate Strength MPa	Yield Strength (0.2%) MPa		Ultimate Strength MPa	Yield Strength (0.2%) MPa		Macro (apparent)	Micro (converted)			Rockwell	Pass
MIM-316L (as-sintered)	450	170	7.6	175	500	190	67-73B	<0.005	Pass	Pass		
MIM-430L (as-sintered)	565	205	7.5	240	250	140	65-73B	1A	1A	1A		
MIM-17-4 PH (as-sintered)	795	600	7.4	730	6.0	190	27-30C	<0.005	Pass	Pass		
MIM-17-4 PH (heat treated)	1370	965	7.3	1090	6.0	150	23-30C	<0.005	Pass	Pass		

*Heat treating parts were aged at 482°C (900°F)

NOTES

1. All chemical data is preparative unless otherwise specified in subsequent portions of the standard.



2019 Edition
August 2019