

ผลของตัวแปรการขึ้นรูปต่อคุณสมบัติเชิงกลและโครงสร้างจุลภาคของโลหะ Chromium Molybdenum
Steel SCM415 ที่ผลิตด้วยกระบวนการฉีดขึ้นรูปโลหะผง



นายวันชาติ สุพรหมพิทักษ์

สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2549

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECT OF FABRICATION PARAMETERS ON MECHANICAL PROPERTIES AND
MICROSTRUCTURE OF CHROMIUM MOLYBDENUM STEEL SCM 415 PRODUCED VIA
METAL POWDER INJECTION MOLDING PROCESS



Mr. Wanchat Suprompituk

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering program in Metallurgical Engineering

Department of Metallurgical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2006

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์ ผลของตัวแปรการขึ้นรูปต่อคุณสมบัติเชิงกลและ โครงสร้างจุลภาค ของ โลหะ Chromium Molybdenum Steel SCM415 ที่ผลิตด้วยกระบวนการตีขึ้นรูป โลหะผง

โดย นายวันชาติ สุพรมพิทักษ์

สาขาวิชา วิศวกรรมโลหการ

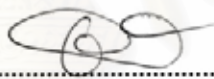
อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ไสว คำนชัยวิจิตร

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ดร. อัญชลี มโนกุล

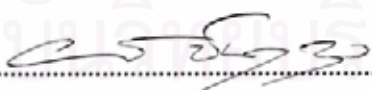
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้แนบวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท

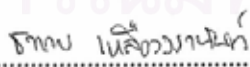

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. คิเรก ลาวัณย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


.....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ชاکกร จารุพิสิฐธร)


.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ไสว คำนชัยวิจิตร)


.....อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(ดร. อัญชลี มโนกุล)


.....กรรมการ
(อาจารย์ ดร. ธาชาย เหลืองวรานันท์)

วันชาติ สุพรรณพิทักษ์ : ผลของตัวแปรการขึ้นรูปต่อคุณสมบัติเชิงกลและ โครงสร้างจุลภาคของ โลหะ Chromium Molybdenum Steel SCM415 ที่ผลิตด้วยกระบวนการฉีดขึ้นรูปโลหะผง (EFFECT OF FABRICATION PARAMETERS ON MECHANICAL PROPERTIES AND MICROSTRUCTURE OF CHROMIUM MOLYBDENUM STEEL SCM415 PRODUCED VIA METAL POWDER INJECTION MOLDING PROCESS) อาจารย์ที่ปรึกษา: ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ไสว คำน ชัยวิจิตร อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม: ดร. อัญชลี มโนกุล, 65 หน้า.

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาตัวแปรของกระบวนการผลิตชิ้นงานทดสอบของผงโลหะ SCM415 ที่ ทำการขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบ โดยกระบวนการฉีดขึ้นรูปโลหะผงและทำการศึกษาตัวแปรในการฉีดขึ้น รูปโดยที่ทำการกำจัดตัวประสานและเผาผนึกด้วยความร้อนแบบต่อเนื่อง โดยใช้อุณหภูมิเผาผนึกที่ แตกต่างกัน 4 อุณหภูมิดังนี้ 1200°C 1250°C 1300°C และ 1350°C หลังทำการเผาผนึก ชิ้นงานทดสอบถูก นำไปชุบผิวแข็งด้วยกรรมวิธีก๊าซคาร์เบอร์ไรซ์ซิง ชิ้นงานทดสอบทั้งก่อนและหลังการชุบผิวแข็งถูก นำไปทดสอบและวิเคราะห์ผล จากสมบัติทางกลที่ได้พบว่าชิ้นงานทดสอบหลังเผาผนึกสมบัติทางกลจะ เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิเผาผนึกที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากความหนาแน่นเพิ่มขึ้นหลังทำการชุบผิวแข็งชิ้นงานที่ทำ การเผาผนึกที่ 1300°C มีค่าความต้านทานแรงดึงสูงที่สุดเนื่องจากมีปริมาณคาร์บอนและความหนาแน่น ที่เหมาะสมและผลการทดลองครั้งนี้ได้ทำการวิเคราะห์และเปรียบเทียบกับผลการทดลองของ โลหะ SCM415 ที่ทำการขึ้นรูปโดยกระบวนการอัดขึ้นรูปโลหะผงด้วย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....วิศวกรรมโลหการ...
สาขาวิชา...วิศวกรรมโลหการ...
ปีการศึกษา.....2549.....

ลายมือชื่อนิติศ.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

##4670487121 : MAJOR METALLURGICAL ENGINEERING

KEYWORD : SCM 415/METAL INJECTION MOLDING/SINTERING TEMPERATURE/GAS
CARBURIZING

WANCHAT SUPROMPITUK : EFFECT OF FABRICATION PARAMETERS ON
MECHANICAL PROPERTIES AND MICROSTRUCTURE OF CHROMIUM
MOLYBDENUM STEEL SCM 415 PRODUCED VIA METAL POWDER INJECTION
MOLDING PROCESS.THESIS ADVISOR : ASST. PROF. SAWAI DANCHAIVIJIT
Ph.D.THESIS CO-ADVISOR : ANCHALEE MANONUKUL D.Phil, 65 pp.

The objectives of this research were to study the processing variables and the effects of sintering temperature on the mechanical properties of SCM415 produced via metal injection molding (MIM) process. The feedstock of SCM415 powder and binder was molded to be tensile specimens by metal injection molding. The conditions of molding were studied. The green specimens were thermal debinded and sintered in one thermal cycle at 4 different temperatures, i.e. 1200°C, 1250°C, 1300°C and 1350°C. After sintering, the specimens were surface hardened by gas carburization method. The specimens before and after gas carburizing were characterized and investigated. The mechanical properties of sintered specimens were increased with increasing sintering temperature due to the higher density of specimens. After carburization, the specimens sintered at 1300°C had the highest value of tensile strength, because of the combination of proper carbon content and density. The results of this research were discussed and compared with the specimens by conventional powder metallurgy process.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department.....Metallurgical Engineering..... Student's signature.....*WANCHAT SUPROMPITUK*
Field of student. Metallurgical Engineering..... Advisor's signature.....*Sawai Danchaivijit.*
Academic year.....2006..... Co-advisor's signature.....*ANCHALEE MANONUKUL*

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลงได้ด้วยความช่วยเหลือจากหลายๆฝ่าย ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ อาจารย์ ดร. ไสว ต่านชัยวิจิตร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ ดร. อัญชลี มโนนุกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ให้คำปรึกษา ความรู้ และคำแนะนำต่างๆ ที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งในงานวิจัยมาโดยตลอด ขอขอบคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ขอขอบคุณสถาบันวิจัยโลหะและวัสดุแห่งชาติ ที่ให้การสนับสนุนงานวิจัยและให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือต่างๆ สุดท้ายนี้ผู้วิจัย ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัว ที่สนับสนุนทางการศึกษา ให้คำแนะนำและให้กำลังใจมาโดยตลอด จนกระทั่งสามารถสำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาโทมาบัณฑิตได้ตามเจตนารมณ์



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูปภาพ.....	ฐ

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	3
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3

บทที่ 2 การศึกษาข้อมูลเบื้องต้น

2.1 การเตรียมและการผสมวัตถุดิบ.....	4
2.1.1 วัตถุดิบที่ใช้ในกระบวนการขึ้นรูปโดยการฉีดขึ้นรูปโลหะผง.....	4
2.1.1.1 ผงโลหะ.....	5
2.1.1.2 ตัวประสาน.....	6
2.1.2 การผสมวัตถุดิบ.....	6
2.2 การขึ้นรูป.....	7
2.2.1 อุณหภูมิในการฉีดขึ้นรูป.....	7
2.2.2 ความเร็วในการฉีดขึ้นรูป.....	7
2.2.3 แรงดันของการฉีด.....	8
2.2.4 เวลาในการฉีดขึ้นรูป.....	8
2.3 การกำจัดตัวประสาน.....	9
2.3.1 การกำจัดตัวประสานด้วยสารละลาย.....	10
2.3.2 การกำจัดตัวประสานด้วยความร้อน.....	10
2.4 การเผาผนึก.....	11
2.4.1 ขนาดของผงโลหะ.....	12

2.4.2	อุณหภูมิในการเผาผนึก.....	12
2.4.3	บรรยากาศภายในเตาเผาผนึก.....	14
2.4.4	เวลาที่ใช้ในการเผาผนึก.....	14
2.5	ทดสอบหาคุณสมบัติและการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค.....	15
2.5.1	ความหนาแน่น.....	15
2.5.2	การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค.....	15
2.5.3	การทดสอบสอบแรงดึง.....	16
2.5.4	การทดสอบความแข็ง.....	17
2.5.5	การทดสอบส่วนผสมทางเคมี.....	17
2.6	การชุบแข็งพื้นผิวโดยวิธีคาร์เบอร์ไรซ์ซิง.....	18
2.6.1	กลไกการแพร่.....	18
2.6.2	ปัจจัยที่มีผลต่อการแพร่.....	19
2.6.3	การแพร่ในสถานะไม่คงตัว.....	22

บทที่ 3 ระเบียบวิธีการทดลอง

3.1	วัสดุดิบ.....	23
3.1.1	ผงโลหะที่จะใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงานทดลอง.....	23
3.1.2	ก๊าซที่ใช้ในการการทดลอง.....	24
3.2	อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	24
3.3	ขั้นตอนการทดลอง.....	25
3.3.1	การขึ้นรูปชิ้นงานทดลองโดยกระบวนการฉีดขึ้นรูปโลหะผง.....	25
3.3.2	การกำจัดตัวประสานและการเผาผนึก.....	26
3.3.3	การชุบผิวแข็ง.....	27
3.3.4	การวัดเปรียบเทียบสมบัติและคุณลักษณะของชิ้นงานทดลอง.....	27
3.3.4.1	การวัดสมบัติทางกายภาพ.....	27
3.3.4.2	การวัดสมบัติทางกล.....	28
3.3.4.3	การวิเคราะห์โครงสร้าง.....	29
3.3.4.4	การทดสอบส่วนผสมทางเคมี.....	29
3.4	สรุปขั้นตอนการทดลอง.....	31

บทที่ 4 ผลการทดลอง

4.1	การฉีดขึ้นรูป.....	32
-----	--------------------	----

4.1.1 ผลการวัดขนาด.....	32
4.1.2 ความหนาแน่น.....	32
4.2 ผลของอุณหภูมิเฟสเนื้กต่อสมบัติต่างๆ ของชิ้นงานทดสอบ.....	33
4.2.1 สมบัติทางกายภาพ.....	33
4.2.1.1 ขนาดและอัตราการหดตัว.....	33
4.2.1.2 ความหนาแน่น.....	34
4.2.2 ส่วนผสมทางเคมี.....	34
4.2.3 โครงสร้างจุลภาค.....	35
4.2.4 สมบัติทางกล.....	38
4.2.4.1 ความแข็ง.....	38
4.2.4.2 ความต้านทานแรงดึง.....	40
4.3 ผลของอุณหภูมิเฟสเนื้กต่อสมบัติต่างๆ ของชิ้นงานทดสอบหลังชุบผิวแข็ง.....	41
4.3.1 สมบัติทางกายภาพ.....	41
4.3.1.1 ขนาดและอัตราการหดตัว.....	41
4.3.1.2 ความหนาแน่น.....	42
4.3.1.3 ส่วนผสมทางเคมี.....	43
4.3.2 โครงสร้างจุลภาค.....	44
4.3.3 สมบัติทางกล.....	45
4.3.3.1 ความแข็ง.....	45
4.3.3.2 ความต้านทานแรงดึง.....	46

บทที่ 5 อภิปรายผลการทดลอง

5.1 ผลของอุณหภูมิเฟสเนื้กต่อสมบัติต่างๆของชิ้นงานทดสอบ.....	48
5.1.1 ผลของอุณหภูมิเฟสเนื้กต่อ โครงสร้างจุลภาค.....	48
5.1.2 ผลของอุณหภูมิเฟสเนื้กต่อสมบัติทางกายภาพ.....	49
5.1.3 ผลของอุณหภูมิเฟสเนื้กต่อสมบัติทางกล.....	50
5.2 ผลของการชุบผิวแข็งด้วยวิธีก๊าซคาร์บอนไรซ์ซึ่งต่อสมบัติต่างๆ ของ ชิ้นงานทดสอบ.....	50
5.2.1 ผลของการชุบผิวแข็งด้วยวิธีก๊าซคาร์บอนไรซ์ซึ่งต่อ โครงสร้างจุลภาค.....	51
5.2.2 ผลของการชุบผิวแข็งด้วยวิธีก๊าซคาร์บอนไรซ์ซึ่งต่อสมบัติทางกายภาพ.....	51
5.2.3 ผลของการชุบผิวแข็งด้วยวิธีก๊าซคาร์บอนไรซ์ซึ่งต่อสมบัติทางกล.....	53

5.3 ข้อดีของการขึ้นรูปโดยกระบวนการฉีดขึ้นรูปโลหะผงเปรียบเทียบกับกระบวนการ
 อัดขึ้นรูปโลหะผง..... 55

บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการทดลอง.....57

6.2 ข้อเสนอแนะ..... 58

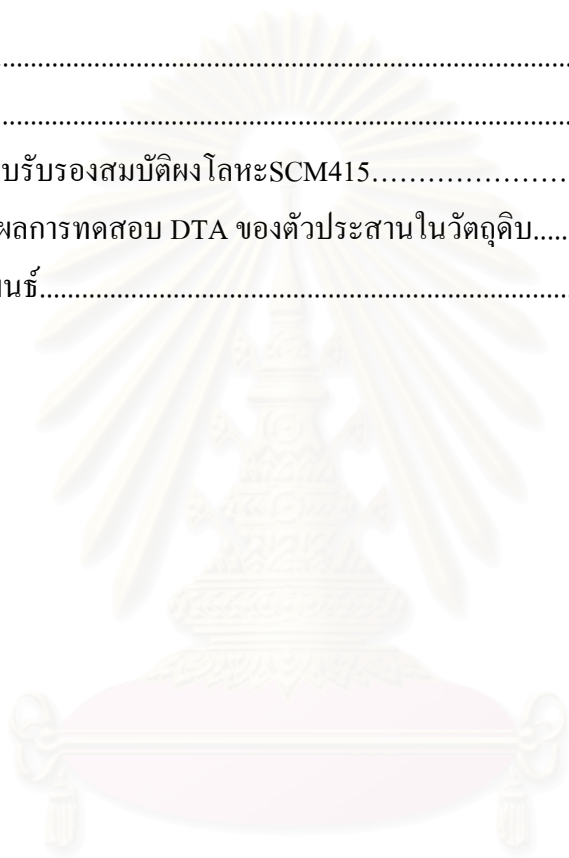
รายการอ้างอิง..... 59

ภาคผนวก..... 61

 ภาคผนวก ก. ใบรับรองสมบัติผงโลหะSCM415..... 62

 ภาคผนวก ข. ผลการทดสอบ DTA ของตัวประสานในวัดดูคิบ.....64

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์..... 65



สถาบันวิทยบริการ
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ส่วนผสมทางเคมี ของChromium Molybdenum steel เกรดSCM415.....	4
2.2 การเปรียบเทียบลักษณะและสมบัติของผงจากวิธีการผลิตที่ต่างกัน.....	5
3.1 ส่วนผสมทางเคมีของผงChromium Molybdenum steel เกรดSCM415.....	23
3.2 ขนาดผงChromium Molybdenum steel เกรดSCM415ที่ใช้ในการฉีดขึ้นรูป โลหะผง.....	23
3.3 อัตราส่วนผสมวัสดุคืบที่นำมาทำการทดลองโดยกระบวนการฉีดขึ้นรูปโลหะผง.....	24
4.1 ขนาดเฉลี่ยของชิ้นงานทดสอบแรงดึง โดยการฉีดขึ้นรูปโลหะผง.....	32
4.2 ค่าความหนาแน่นเฉลี่ยของชิ้นงานทดสอบแรงดึง โดยการฉีดขึ้นรูปโลหะผงก่อนทำการเผา ผืนิก.....	33
4.3 ขนาดเฉลี่ยของชิ้นงานทดสอบแรงดึง โดยการฉีดขึ้นรูปโลหะผงหลังจากทำการเผาผืนิกที่ อุณหภูมิเผาผืนิกที่ต่างกัน.....	33
4.4 อัตราการหดตัวเฉลี่ยของชิ้นงานทดสอบหลังจากทำการเผาผืนิกที่อุณหภูมิเผาผืนิก ที่ต่างกัน.....	34
4.5 ค่าความหนาแน่นเฉลี่ยของชิ้นงานทดสอบหลังจากทำการเผาผืนิกที่อุณหภูมิเผาผืนิกที่ ต่างกัน.....	34
4.6 ส่วนผสมทางเคมีของชิ้นงานทดสอบหลังทำการเผาผืนิกที่อุณหภูมิเผาผืนิกที่ต่างกัน.....	35
4.7 ปริมาณคาร์บอนเฉลี่ยของชิ้นงานทดสอบหลังทำการเผาผืนิกที่อุณหภูมิเผาผืนิกต่างกัน.....	35
4.8 ค่าความแข็งที่ผิวเฉลี่ยของชิ้นงานทดสอบหลังทำการเผาผืนิกที่อุณหภูมิเผาผืนิกที่ต่างกัน....	39
4.9 ค่าความต้านทานแรงดึงและอัตราการยืดตัวเฉลี่ยของชิ้นงานทดลองที่อุณหภูมิเผาผืนิกที่ ต่างกัน.....	40
4.10 ขนาดเฉลี่ยของชิ้นงานทดสอบแรงดึง โดยการฉีดขึ้นรูปโลหะผงหลังทำการชุบผิวแข็ง.....	42
4.11 อัตราการหดตัวเฉลี่ยของชิ้นงานทดสอบหลังจากทำการชุบผิวแข็ง.....	42
4.12 ค่าความหนาแน่นเฉลี่ยของชิ้นงานทดสอบหลังจากทำการเผาผืนิกที่อุณหภูมิเผาผืนิกที่ ต่างกันหลังทำการชุบผิวแข็ง.....	43
4.13 ปริมาณคาร์บอนเฉลี่ยของชิ้นงานทดลองที่ทำการเผาผืนิกที่อุณหภูมิเผาผืนิกต่างกันหลัง ทำการชุบแข็ง.....	43
4.14 ปริมาณคาร์บอนเฉลี่ยของชิ้นงานทดลองที่ทำการเผาผืนิกที่อุณหภูมิเผาผืนิกต่างกันหลัง ทำการชุบแข็งที่ระยะลึกจากผิว 0.5 มิลลิเมตรและ 1.0 มิลลิเมตร.....	44
4.15 ค่าความแข็งที่ผิวเฉลี่ยของชิ้นงานทดลองที่อุณหภูมิเผาผืนิกที่ต่างกันหลังทำการชุบแข็ง...	46

4.16 ค่าความต้านทานแรงดึงและอัตราการยืดตัวของชิ้นงานทดลองที่อุณหภูมิเผาผนึก
 ที่ต่างกันหลังทำการชุบแข็ง.....46

5.1 ปริมาณคาร์บอนเฉลี่ยของชิ้นงานทดลองที่ทำการเผาผนึกที่อุณหภูมิเผาผนึกต่างกันก่อนและ
 หลังทำการชุบแข็ง..... 52

5.2 เปรียบเทียบสมบัติระหว่างกระบวนการฉีดขึ้นรูปโลหะผงกับกระบวนการอัดขึ้นรูป
 โลหะผง..... 55



สถาบันวิทยบริการ
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 เครื่องผสมแบบ Twin screw.....	7
2.2 แผนภูมิแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างสภาวะในการฉีดและปัญหาที่เกิดจากการฉีด.....	9
2.3 การกระจายตัวของตัวประสานเมื่อทำการกำจัดตัวประสานด้วยความร้อนในช่วงต่างๆ.....	11
2.4 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อความหนาแน่นและขนาดของเกรนในการเผาผนึกโลหะ Fe-2Ni.....	12
2.5 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าไร้สนิม 17-4 PH ที่อุณหภูมิเผาผนึกต่างๆ.....	13
2.6 รูปแสดงกลไกการแพร่ของอะตอม.....	19
2.7 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของอะตอมที่เกิดจากการแพร่.....	19
2.8 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง สัมประสิทธิ์การแพร่ (D) กับอุณหภูมิของวัสดุต่างๆ.....	21
2.9 การแพร่ของอะตอมสู่เนื้อวัสดุ ซึ่งเป็นไปตามกฎข้อที่สองของฟิค.....	22
3.1 ชิ้นงานทดลอง SCM 415 หลังทำการฉีดขึ้นรูปและทำการตรวจสอบด้วยการ X-ray.....	26
3.2 แผนภูมิแสดงขั้นตอนการทำการชุบผิวแข็ง.....	27
3.3 ภาพชิ้นงานทดสอบแรงดึงและตำแหน่งของการวัดขนาดเพื่อหาอัตราการหดตัวของชิ้นงาน ทดลอง SCM 415 ที่ขึ้นรูปโดยกระบวนการฉีดขึ้นรูปโลหะผง.....	28
3.4 ชุดวัดค่าความหนาแน่นของชิ้นงานหลังทำการ เผาผนึก.....	28
3.5 ตำแหน่งของการวัดความแข็งของชิ้นงานทดลอง SCM415 ที่ขึ้นรูปโดยกระบวนการ ฉีดขึ้นรูปโลหะผง.....	29
3.6 แผนภูมิแสดงขั้นตอนการดำเนินการทดลอง.....	31
4.1 ภาพถ่ายลักษณะรูพรุนในชิ้นงานทดสอบหลังทำการเผาผนึกที่อุณหภูมิเผาผนึกต่างกัน ที่กำลังขยาย 50 เท่า.....	37
4.2 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคในชิ้นงานทดสอบหลังทำการเผาผนึกที่อุณหภูมิเผาผนึกต่างกัน ที่กำลังขยาย 100 เท่า.....	38
4.3 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งกับระยะลึกจากผิวชิ้นงานทดสอบหลังทำการ เผาผนึกที่อุณหภูมิเผาผนึกที่ต่างกัน.....	39
4.4 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานแรงดึงกับอุณหภูมิเผาผนึก.....	40
4.5 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการยืดตัวและอุณหภูมิเผาผนึก.....	41
4.6 ภาพถ่ายลักษณะรูพรุนในชิ้นงานทดสอบทำการเผาผนึกที่อุณหภูมิเผาผนึกต่างกัน หลังทำการชุบผิวแข็ง ที่กำลังขยาย 50 เท่า.....	44
4.7 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคในชิ้นงานทดสอบทำการเผาผนึกที่อุณหภูมิเผาผนึกต่างกัน หลังทำการชุบผิวแข็ง ที่กำลังขยาย 5000 เท่า.....	45

4.8 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานแรงดึงกับอุณหภูมิเผาผนึก หลังทำการชุบผิวแข็ง.....	47
4.9 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการยืดตัวและอุณหภูมิเผาผนึกหลังทำการชุบ ผิวแข็ง.....	47
5.1 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคในชิ้นงานทดสอบหลังทำการเผาผนึกที่อุณหภูมิเผาผนึกต่างกัน ที่กำลังขยาย 100 เท่าที่อุณหภูมิเผาผนึก 1200 °C และ 1350 °C.....	48
5.2 แผนภูมิแสดงค่าความหนาแน่นของชิ้นงานทดสอบหลังทำการเผาผนึกที่อุณหภูมิเผาผนึก ต่างกัน.....	49
5.3 อัตราการหดตัวเฉลี่ยของชิ้นงานทดสอบหลังจากทำการเผาผนึกที่อุณหภูมิเผาผนึก ที่ต่างกัน.....	50
5.4 ภาพถ่ายลักษณะรูพรุนในชิ้นงานที่ทำการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1300 °C ที่กำลังขยาย 50 เท่า.....	51
5.5 แผนภูมิแสดงค่าความหนาแน่นของชิ้นงานทดสอบก่อนและหลังทำการชุบผิวแข็ง.....	52
5.6 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งกับระยะลึกจากผิวชิ้นงานทดสอบ ที่ทำการเผาผนึกที่อุณหภูมิเผาผนึกที่ต่างกัน หลังทำการชุบผิวแข็ง.....	54

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญของงานวิจัย

การฉีดขึ้นรูปโลหะผงเป็นการขึ้นรูปชิ้นงานที่ประยุกต์มาจากการฉีดขึ้นรูปชิ้นงานที่ทำจากพลาสติกเนื่องจากในการใช้งานชิ้นส่วนที่มีรูปร่างซับซ้อนและวัสดุที่มีสมบัติที่เหนือกว่าพลาสติก อย่างเช่น โลหะหรือเซรามิกส์ที่มีความแข็งแรงสูงกว่า อุณหภูมิในการใช้งานที่สูงกว่า หรืออาจจะมีสมบัติทางด้านการนำไฟฟ้า แม่เหล็ก ซึ่งเป็นไปไม่ได้ที่จะใช้ชิ้นส่วนที่ทำมาจากพลาสติก

การฉีดขึ้นรูปโลหะผงเป็นการขึ้นรูปโลหะที่นำเอาข้อดีของการฉีดขึ้นรูปของพลาสติกที่ขึ้นรูปชิ้นส่วนที่มีรูปร่างซับซ้อนได้โดยการนำเอาผงโลหะที่มีขนาดเล็กมาผสมกับโพลีเมอร์บางชนิดที่เรียกว่า ตัวประสาน(Binder) ซึ่งมีคุณสมบัติและปริมาณที่เหมาะสมแก่การฉีดขึ้นรูปแล้วทำการฉีดเข้าในแบบที่ต้องการแล้วจึงทำการกำจัดตัวประสานเหล่านั้นออกไปโดยผ่านกรรมวิธีการละลายด้วยสารละลายหรือทางความร้อน เมื่อกำจัดตัวประสานออกแล้วจึงทำการเผาผนึกให้ได้ชิ้นงานที่เป็นโลหะและมีความหนาแน่นใกล้เคียงกับค่าความหนาแน่นตามทฤษฎี⁽¹⁾

ในปัจจุบันการขึ้นรูปโลหะผงโดยส่วนใหญ่ใช้วิธีการขึ้นรูปโดยกระบวนการอัดขึ้นรูปผงโลหะ ซึ่งเป็นวิธีการขึ้นรูปที่ง่ายและรวดเร็วได้ปริมาณงานมากแต่มีข้อจำกัดในการขึ้นรูปโดยกระบวนการอัดขึ้นรูปผงโลหะหลายประการ เช่น ไม่สามารถขึ้นรูปชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อนหรือมีส่วนโค้งเว้าได้ การใช้แรงกระทำต่อชิ้นงานทำให้เกิดความเครียดตกค้างในชิ้นงานส่งผลให้เกิดการเสียรูปร่างหลังจากทำการเผาผนึก และในการอัดขึ้นรูปโดยใช้แรงกระทำกับผงโลหะนั้น การส่งผ่านและการดูดซับแรงดันจากการอัดขึ้นรูปของชิ้นงานแต่ละส่วนไม่เท่ากันจึงทำให้ชิ้นงานที่ได้มีคุณสมบัติที่ไม่สม่ำเสมอ เช่น ความหนาแน่น ในการอัดขึ้นรูปผงโลหะแบบทิศทางเดียวจะส่งผลให้เกิดความแตกต่างกันของความหนาแน่นที่วัดได้ในชิ้นงาน⁽²⁾ การขึ้นรูปโดยกระบวนการอัดขึ้นรูปผงโลหะยังทำให้เกิดความเสียหายต่อแม่แบบได้ง่ายเพราะมีความเสียดทานที่เกิดจากการอัดผงโลหะให้เสียดสีกับแม่แบบจึงทำให้แม่แบบมีอัตราการสึกหรอที่สูงกว่าการฉีดขึ้นรูปโลหะผง

ข้อดีของการขึ้นรูปชิ้นงานโดยการฉีดขึ้นรูปโลหะผงเมื่อเปรียบเทียบกับการขึ้นรูปโดยกระบวนการอัดขึ้นรูปผงโลหะ นั้นมีด้วยกันหลายอย่าง เช่น ทำการขึ้นรูปชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อนได้ วัสดุสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ทำให้ลดต้นทุนการผลิตและใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่า ชิ้นงานที่ได้มีสมบัติที่สม่ำเสมอว่าการขึ้นรูปโดยวิธีการอัดขึ้นรูปผงโลหะ

แต่ในการขึ้นรูปชิ้นงานโดยการฉีดขึ้นรูปโลหะผงจะต้องคำนึงถึงปัจจัยในการขึ้นรูปที่สำคัญหลายประการเริ่มตั้งแต่ขั้นตอนการผสมให้ได้ส่วนผสมระหว่างผงโลหะและโพลีเมอร์ที่เหมาะสมเพื่อที่

จะสามารถทำการฉีดขึ้นรูปให้ได้ชิ้นงานที่มีรูปร่างที่สมบูรณ์และมีความแข็งแรง ในขั้นตอนการฉีดขึ้นรูปต้องคำนึงถึงปัจจัยต่างๆ ในการฉีดเช่น ความเร็วในการฉีด อุณหภูมิหลอมวัตถุดิบที่เป็นส่วนผสมระหว่างผงโลหะและโพลีเมอร์ แรงดันของการฉีด อุณหภูมิของแม่พิมพ์ รวมถึงขั้นตอนการกำจัดโพลีเมอร์ออกจากชิ้นงาน และการเผาผนึกให้ได้ชิ้นงานที่สมบูรณ์และมีคุณสมบัติตามที่ต้องการ จึงจำเป็นที่จะต้องทำการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการขึ้นรูปชิ้นงาน โดยการฉีดขึ้นรูปโลหะผงของโลหะแต่ละชนิด

ในการทดลองนี้มีความประสงค์ที่จะเปรียบเทียบคุณสมบัติของโลหะผสมSCM415 ซึ่งเป็นเหล็กกล้าผสมโครเมียมและโมลิบดีนัม ที่ผ่านการขึ้นรูปโดยกระบวนการฉีดขึ้นรูปโลหะผง(Metal injection molding process) ที่ทำการกำจัดตัวประสานและการเผาผนึกด้วยความร้อนแบบต่อเนื่อง (Single step) ด้วยขั้นตอนการให้ความร้อน(Heating profile) ที่แตกต่างกันเนื่องจากขั้นตอนการให้ความร้อนเป็นช่วงที่คาร์บอนเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันซึ่งอาจส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาณคาร์บอนในชิ้นงานและมีผลต่อคุณสมบัติและโครงสร้างของชิ้นงานได้เพราะโดยทั่วไปการใช้งานโลหะSCM415 จะใช้งานที่ต้องการผิวแข็ง เช่น เพื่องอบจัด ดังนั้นปริมาณคาร์บอนในชิ้นงานจึงมีความสำคัญเนื่องจากต้องนำชิ้นงานไปชุบผิวแข็งเพื่อให้ได้ผิวชิ้นงานที่มีความแข็งสม่ำเสมอส่งผลต่อคุณสมบัติที่ทนทานต่อการเสียดสี มีความแข็งแรงและมีอายุการใช้งานที่เพิ่มขึ้น จึงจำเป็นที่จะต้องทำการขึ้นรูปชิ้นงานโลหะSCM415 ให้มีคุณสมบัติที่สม่ำเสมอทั้งชิ้นงานก่อนที่จะนำไปทำการอบชุบผิวแข็งรวมทั้งทำการศึกษาเปรียบเทียบสมบัติทางกลและทางกายภาพของชิ้นงานSCM415 ที่ผ่านการขึ้นรูปโดยกระบวนการฉีดขึ้นรูปโลหะผงที่ทำการกำจัดตัวประสานด้วยความร้อนที่อุณหภูมิที่แตกต่างกันเพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานในการทำการผลิตโลหะSCM415 เพื่อให้ได้คุณสมบัติที่ดีขึ้นต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 ศึกษาตัวแปรของกระบวนการผลิตชิ้นงานทดลองของผงโลหะSCM415 ที่ขึ้นรูปโดยกระบวนการฉีดขึ้นรูปโลหะผง (Metal injection molding process)

1.2.2 ศึกษาโครงสร้างจุลภาค สมบัติทางกายภาพ และ สมบัติทางกล ของชิ้นงานทดลองของผงโลหะSCM415 ที่ขึ้นรูปโดยกระบวนการฉีดขึ้นรูปโลหะผง ที่ทำการกำจัดตัวประสานด้วยความร้อน (Thermal debinding) และการเผาผนึกด้วยความร้อนแบบต่อเนื่อง (Single step) ด้วยขั้นตอนการให้ความร้อน(Heating profile) ที่แตกต่างกัน

1.3 ขอบเขตการศึกษา

1.3.1 ทำการขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบแรงดึง(Tensile test bars) ตามมาตรฐานMPIF 10 ของผงโลหะSCM415 โดยกระบวนการฉีดขึ้นรูปโลหะผง

1.3.2 หาตัวแปรของกระบวนการผลิตชิ้นงานโลหะSCM415โดยกระบวนการฉีดขึ้นรูปโลหะผงที่ส่งผลให้สมบัติเชิงกลที่ดีที่สุด ประกอบด้วย อุณหภูมิของการฉีด ความเร็วในการฉีด แรงดันในการฉีด เวลาในการฉีด เวลาในการเย็นตัว ปริมาณวัตถุดิบที่ฉีดต่อครั้ง และ แรงดันระหว่างการเย็นตัว

1.3.3 เปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางกล และ โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานทดลองของผงโลหะSCM415 ที่ขึ้นรูปโดยกระบวนการฉีดขึ้นรูปโลหะผงที่ผ่านการกำจัดตัวประสานและการเผาผนึกด้วยความร้อนแบบต่อเนื่อง ด้วยขั้นตอนการให้ความร้อนที่อุณหภูมิเผาผนึกที่แตกต่างกัน ประกอบด้วย 1200°C 1250°C 1300°C และ1350°C และชุบผิวแข็งด้วยวิธีก๊าซคาร์เบอร์ไรซ์ซิง

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 วิธีการผลิตชิ้นงานโลหะSCM415 โดยกระบวนการฉีดขึ้นรูปผงโลหะเพื่อให้ได้สมบัติทางกลที่ดีที่สุด

1.4.2 ทำให้ทราบถึงขั้นตอนการให้ความร้อนที่เหมาะสมของการกำจัดตัวประสานและการเผาผนึกด้วยความร้อนแบบต่อเนื่อง ของชิ้นงานทดลองโลหะSCM415 ที่ผ่านการขึ้นรูปโดยกระบวนการฉีดขึ้นรูปโลหะผงเพื่อให้ได้สมบัติทางกลที่ดีที่สุด

บทที่ 2

การศึกษาข้อมูลเบื้องต้น

การขึ้นรูปชิ้นงานทดลองของโลหะSCM415 ด้วยกระบวนการขึ้นรูปโดยการฉีดขึ้นรูปโลหะผง จะประกอบด้วยขั้นตอนหลักคือ การเตรียมและการผสมวัตถุดิบ การขึ้นรูป การกำจัดตัวประสาน และการเผาเป็นขั้นตอนสุดท้าย แล้วจึงทดสอบหาสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกล

2.1 การเตรียมและการผสมวัตถุดิบ

2.1.1 วัตถุดิบที่ใช้ในกระบวนการขึ้นรูปโดยการฉีดขึ้นรูปโลหะผง

โลหะผงที่ใช้ คือ เหล็กกล้าโครเมียม โมลิบดีนัม เกรดSCM415 เป็นเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำมีธาตุโครเมียมและ โมลิบดีนัมผสมทำให้มีความเหนียวและทนแรงดึงสูงโดยมีส่วนผสมทางเคมีตามมาตรฐาน JIS ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ส่วนผสมทางเคมี ของ Chromium Molybdenum steel เกรด SCM 415(%โดยน้ำหนัก)⁽³⁾

Class symbol	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo
SCM 415	0.13- 0.18	0.15- 0.35	0.60- 0.85	0.030 max	0.030 max	0.030 max	0.25 max	0.90- 1.20	0.15- 0.30

วัตถุดิบที่ใช้นั้นได้จากการนำเอาผงโลหะมาทำการผสมกับ โพลีเมอร์ให้เป็นเนื้อเดียวกันอัตราส่วนในการผสมโดยประมาณประกอบด้วย 60% ผงโลหะและ 40% โพลีเมอร์โดยปริมาตร⁽⁴⁾ เรียกว่าวัตถุดิบที่ผสมกันนี้ว่า ฟีดสต็อก(Feedstock)

2.1.1.1 ผงโลหะ⁽⁵⁾

ผงโลหะที่ใช้ในกระบวนการขึ้นรูปโดยการฉีดขึ้นรูปโลหะผงนั้นสามารถผลิตได้จากหลายวิธีโดยแต่ละวิธีสามารถผลิตผงโลหะที่มีคุณสมบัติ ข้อได้เปรียบเสียเปรียบแตกต่างกันไป โดยแสดงการเปรียบเทียบในตารางที่ 2.2 ผงที่เหมาะสมกับกระบวนการขึ้นรูปโดยการฉีดขึ้นรูปโลหะผงมากที่สุดคือผงที่ได้จากกระบวนการ Carbonyl decomposition และ Gas atomization เพราะมีขนาดเล็กและรูปร่างกลม แต่ก็สามารถใช้ผงที่มาจาก กระบวนการ Water atomization ได้ถ้าผงที่ได้มีขนาดเล็กพอ

ตารางที่ 2.2 การเปรียบเทียบลักษณะและสมบัติของผงจากวิธีการผลิตที่ต่างกัน⁽⁵⁾

Process	Particle size range(μm)	Particle shape	Packing density	Alloying	Cost
Carbonyl decomposition	2-20	Spherical	Moderate	No	Moderate
Centrifugal atomization	50-1000	Spherical	High	Yes	Variable
Electrolytic	5-300	Irregular , Dendritic	Low	No	Moderate
Gas atomization	10-300	Spherical	High	Yes	High
Mechanical comminution	2-500	Angular	Moderate	Some	High
Melt spinning	200-1000	Flake	Moderate	Yes	High
Millscale reduction	20-800	Sponge	Low	No	Low
Oxide reduction	30-500	Sponge	Low	No	Moderate
Plasma atomization	5-80	Spherical	High	Yes	Vary high
Spark erosion	0.1-20	Spherical	Moderate	Some	Vary high
Water atomization	5-400	Irregular, Ligamental	Low to Moderate	Yes	Moderate

Pavan Suri, Ryan P.Koseki, และ Randall M. German⁽⁶⁾ ได้ทำการทดลองเปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคและสมบัติของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่ทำการฉีดขึ้นรูปจากผงที่ผลิตจาก

กระบวนการ Water atomization กับ Gas atomization ทำการเผาพริกที่ 1360°C ในบรรยากาศไฮโดรเจน ผลปรากฏว่าผงที่ผลิตด้วยกระบวนการ Gas atomization มีความหนาแน่นมากกว่า(99%ของความหนาแน่นตามทฤษฎี) ชิ้นงานที่ขึ้นรูปจากผง Water atomization(97%ของความหนาแน่นตามทฤษฎี)เป็นผลเนื่องมาจากผิวของชิ้นงานที่ผลิตจากผง Water atomization เกิดปฏิกิริยาทำให้เกิด ออกไซด์และไอน้ำที่ผิวในช่วงการเผาพริก ทำให้เกิดก๊าซของไอน้ำแทรกอยู่ระหว่างขอบเกรนจึงส่งผลให้ความหนาแน่นลดลง

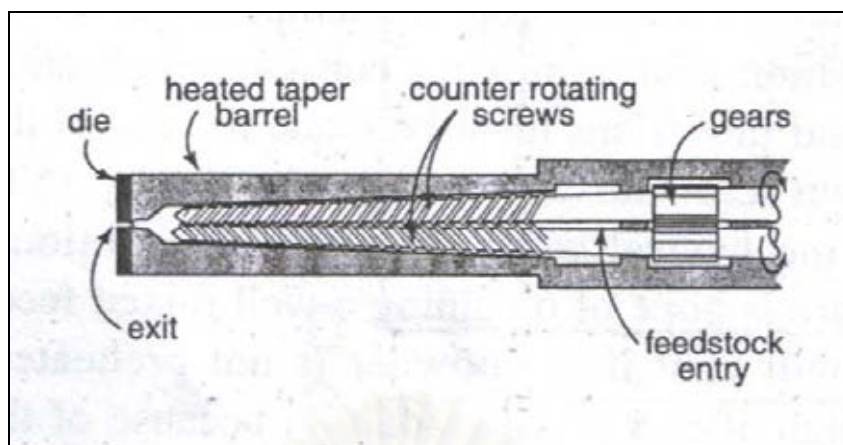
2.1.1.2 ตัวประสาน^(1,7)

ตัวประสานที่ใช้ผสมกับผงโลหะเพื่อฉีดขึ้นรูปโลหะผงส่วนมาก มีองค์ประกอบสำคัญคือ เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) ผสมกับ แวกซ์ (Wax) และ กรดสเตียริก (Stearic acid) เมื่อให้ความร้อนเทอร์โมพลาสติกจะอ่อนตัวลงทำให้มีความสามารถในการไหลและทำการฉีดขึ้นรูปได้ เมื่อเย็นตัวลงเทอร์โมพลาสติกก็จะแข็งตัวทำหน้าที่ในการยึดเกาะกับผงโลหะทำให้คงรูปร่างของชิ้นงานไว้ได้ ในส่วนของแวกซ์จะช่วยเพิ่มความสามารถในการไหลตัวให้ดีขึ้นทำให้การฉีดขึ้นรูปทำได้ง่ายและยังเพิ่มคุณสมบัติการเปียกช่วยลดความหนืด กรดสเตียริกทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่นลดแรงเสียดทานระหว่างผงกับผงและระหว่างผิวสัมผัสผงกับผิวในโพรงแบบ

2.1.2 การผสมวัสดุคืบ⁽¹⁾

การผสมวัสดุคืบที่ใช้ในกระบวนการขึ้นรูปโดยการฉีดขึ้นรูปโลหะผงสิ่งที่สำคัญคือ การผสมผงต้องให้มีความเป็นเนื้อเดียวกัน(Homogeneous) มีความสม่ำเสมอของวัสดุคืบคือการกระจายตัวของตัวประสานไปบนอนุภาคผงโดยทั่วถึงโดยปราศจากฟองอากาศและไม่เกิดการจับตัวเป็นก้อน การผสมผงที่ไม่สม่ำเสมอมีผลทำให้การฉีดขึ้นรูปและการเผาพริกทำได้ยาก อาจเกิดการแยกตัวที่เกิดจากความแตกต่างของขนาดอนุภาคและรูปร่างของผงโลหะหรือเกิดจากความหนาแน่นที่ต่างกันจากการผสมผงโลหะหลายชนิดเข้าด้วยกัน การแยกตัวระหว่างผงกับตัวประสานทำให้เกิดการบิดเบี้ยวของชิ้นงานและความหนาแน่นหลังทำการเผาพริกต่ำเพราะมีความหนืดในระหว่างการฉีดขึ้นรูปสูง

อนุภาคของผงที่มีขนาดเล็กและมีรูปร่างไม่สม่ำเสมอต้องการเวลาในการผสมที่นานกว่าและการผสมวัสดุคืบที่ทำให้มีความเป็นเนื้อเดียวกันดีที่สุดคือการผสมด้วยเครื่องผสมแบบเกลียวหนอนคู่ (Twin screw)⁽¹⁾ ดังที่แสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 เครื่องผสมแบบ Twin screw⁽¹⁾

2.2 การขึ้นรูป⁽¹⁾

กระบวนการขึ้นรูปโดยการฉีดขึ้นรูปโลหะผงเป็นการขึ้นรูปโดยการให้ความร้อนแก่วัตถุดิบ (Feedstock) เพื่อให้โพลีเมอร์ที่ผสมกับผงโลหะที่อยู่ในวัตถุดิบอ่อนตัวลงมีลักษณะคล้ายพลาสติกหลอมเหลวทำให้สามารถฉีดเข้าสู่แม่แบบได้ โดยปัจจัยที่มีผลกับการฉีดขึ้นรูปโลหะผงที่สำคัญประกอบด้วย

2.2.1 อุณหภูมิในการฉีดขึ้นรูป⁽¹⁾

วัตถุดิบที่ผลิตสำหรับการฉีดขึ้นรูปโลหะผงจะประกอบไปด้วยโพลีเมอร์หลายแบบและมีส่วนผสมมากมายหลายสูตร ดังนั้นอุณหภูมิการฉีดขึ้นรูปของวัตถุดิบแต่ละแบบจึงไม่เท่ากัน ในการฉีดจึงต้องคำนึงถึงอุณหภูมิในการฉีดขึ้นรูป ถ้าอุณหภูมิในการฉีดต่ำเกินไปจะทำให้โพลีเมอร์มีความหนืดสูง ความสามารถในการไหลไม่ดีและจะทำให้เกิดปัญหาคือ การฉีดไม่เต็มแบบเนื่องจากเกิดการแข็งตัวก่อนที่จะไหลเข้าสู่แม่แบบ ถ้าอุณหภูมิสูงเกินไปทำให้เกิด การหดตัวของชิ้นงานที่สูงและอาจทำให้เสียรูปร่างของชิ้นงานได้

2.2.2 ความเร็วในการฉีดขึ้นรูป⁽¹⁾

ความเร็วในการฉีดขึ้นรูปมีความสำคัญเพราะถ้าความเร็วในการฉีดขึ้นรูปไม่เหมาะสม เช่นในกรณีที่ความเร็วในการฉีดต่ำเกินไปวัตถุดิบจะไหลตัวเข้าไปในแบบช้าและเกิดการแข็งตัวก่อนจะ

เต็มแบบ แต่ถ้าความเร็วในการฉีดสูงเกินไปจะทำให้อากาศที่อยู่ภายในแม่แบบไม่สามารถไหลออกมาได้ทันทำให้เกิดปัญหาที่มีฟองอากาศเกิดขึ้นในชิ้นงาน

2.2.3 แรงดันของการฉีด⁽¹⁾

แรงดันของการฉีดจะต้องมีความเหมาะสมไม่มากเกินไปหรือน้อยเกินไป ถ้าแรงดันมากเกินไปจะทำให้ชิ้นงานเกิดความเค้นเนื่องจากแรงดันที่กระทำต่อชิ้นงานที่เริ่มแข็งตัวทำให้เกิดปัญหาการแตกหักของชิ้นงานที่ฉีดขึ้นรูป แต่แรงดันที่ต่ำเกินไปจะทำให้เนื้อวัสดุที่ทำการฉีดขึ้นรูปมีความหนาแน่นต่ำและเกิดการหดตัวสูง

2.2.4 เวลาในการฉีดขึ้นรูป⁽¹⁾

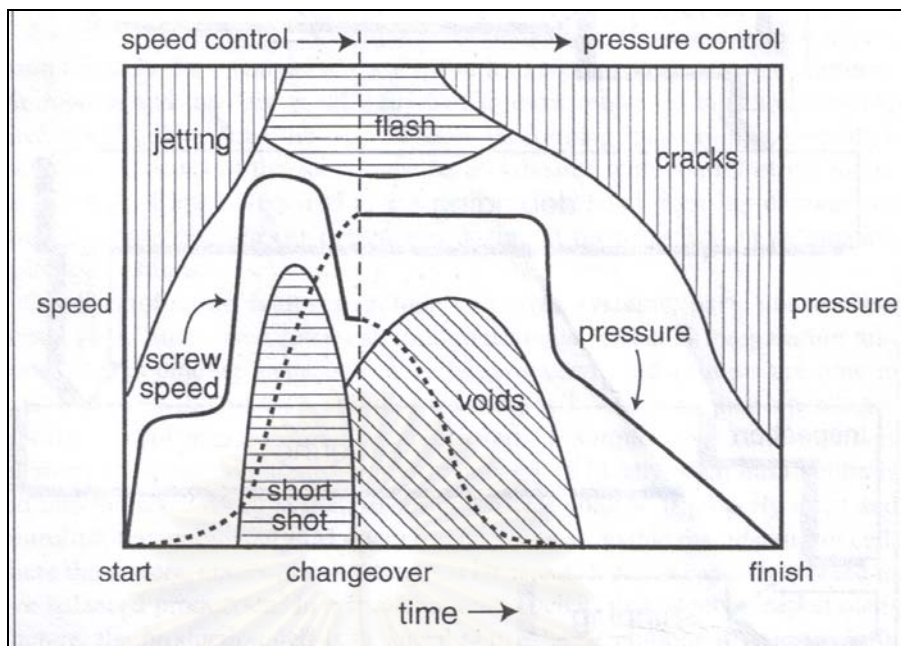
เวลาในการฉีดขึ้นรูปประกอบด้วย เวลาการฉีดขึ้นรูป และเวลาการเย็นตัวในแบบ

1) เวลาการฉีดขึ้นรูป มีผลกับการฉีดขึ้นรูปคือ ถ้าเวลาในการฉีดขึ้นรูปนานเกินไปจะทำให้ชิ้นงานได้รับแรงดันจากการฉีดนานเกินไปชิ้นงานอาจเกิดการแตกร้าวเนื่องจากแรงดันที่กระทำหลังจากชิ้นงานเย็นตัวแล้ว ถ้าเวลาในการฉีดสั้นเกินไปวัสดุคืบไม่สามารถไหลเข้าไปในแบบได้ทันทำให้ฉีดได้ไม่เต็มแบบ

2) เวลาการเย็นตัวในแบบ ขณะที่ปล่อยให้ชิ้นงานเย็นตัวในแบบยังมีการให้ความดันแก่ชิ้นงานเพื่อให้ความหนาแน่นของชิ้นงานมีความหนาแน่นสม่ำเสมอจนกระทั่งแข็งตัวอย่างสมบูรณ์ แต่ถ้าเวลาในการเย็นตัวนานเกินไปแรงดันนี้จะทำให้เกิดความเค้นกับชิ้นงานทำให้เกิดการแตกร้าวได้ แต่ถ้าเวลาในการเย็นตัวในแบบนี้สั้นเกินไปจะทำให้ชิ้นงานยังแข็งตัวไม่สมบูรณ์ เมื่อถูกดันออกจากแม่แบบจะทำให้เกิดการแตกหักได้

โดยปัญหาที่เกิดจากตัวแปรต่างๆของการฉีดได้ทำการแสดงในแผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่างความเร็ว เวลาและแรงฉีดของการฉีดในรูปที่ 2.2

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.2 แผนภูมิแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างสถานะในการฉีดและปัญหาที่เกิดจากการฉีด⁽¹⁾

Wen-Cheng J. Wei, Rong-Yuan Wu, และ Sah-Jai Ho⁽⁸⁾ ได้ทำการศึกษาผลที่เกิดจากแรงดันในการฉีดขึ้นรูปและเวลาที่คงแรงดันไว้ วัสดุที่ใช้ในการทดลองคือ ผงอลูมินาผสมกับตัวประสานด้วยอัตราส่วน 85:15 (โดยน้ำหนัก) ตัวประสานประกอบด้วย พาราฟินแว็กซ์ โพลีโพรพิลีน และกรดสเตียริก มีอัตราส่วน 70:25:5 (โดยน้ำหนัก) ทำการทดลองฉีดด้วยแรงดัน 22-117 MPa และทดลองเปลี่ยนเวลาคงแรงดัน 5-75 วินาที ผลปรากฏว่าเมื่อฉีดที่แรงดันสูงกว่า 70 MPa และเวลามากกว่า 5 วินาทีจะทำให้ใช้เนื้อวัสดุในการฉีดมากขึ้น ขนาดของชิ้นงานเพิ่มขึ้น ลดการยุบตัวของผิวชิ้นงานหลังฉีด แต่เมื่อทำการเผาผนึก พบว่าแรงดันและเวลาในการฉีด ไม่มีผลกับความหนาแน่นและความแข็งแรงของชิ้นงาน

2.3 การกำจัดตัวประสาน (Debinding)⁽¹⁾

การกำจัดตัวประสานก่อนทำการเผาผนึกเป็นขั้นตอนที่สำคัญอีกขั้นตอนหนึ่ง เพราะถ้ามีตัวประสานตกค้างมากเกินไปอาจส่งผลทำให้คุณสมบัติของวัสดุเปลี่ยนไป เช่น อาจมีปริมาณคาร์บอนที่สูงเกินไป วิธีการกำจัดตัวประสานในชิ้นงานที่ขึ้นรูปโดยกระบวนการฉีดขึ้นรูปโลหะผงมีอยู่ด้วยกันหลายกระบวนการ สามารถแยกได้เป็นกระบวนการหลักได้ 2 กระบวนการ ประกอบด้วย

2.3.1 การกำจัดตัวประสานด้วยสารละลาย (Solvent debinding)⁽¹⁾

การกำจัดตัวประสานด้วยสารละลาย เป็นการใช้สารละลายโดยทำการชุบชิ้นงานลงในสารละลายเพื่อละลายตัวประสานออกจากชิ้นงาน โดยตัวทำละลายที่ใช้ได้แก่ แอซีโตนเอทานอล (Acetone Ethanol) หรือ เฮกเซน (Hexane) ขึ้นอยู่กับชนิดตัวประสานที่ใช้ หรือตัวประสานบางชนิดยังสามารถที่จะใช้น้ำเป็นตัวทำละลายได้อีกด้วย จุดประสงค์ของการกำจัดตัวประสานด้วยสารละลายเพื่อละลายตัวประสานที่อยู่ผิวออกไปก่อน เพื่อเป็นการเปิดรูพรุนที่ผิวทำให้การกำจัดตัวประสานในขั้นตอนต่อไปทำได้ง่ายและรวดเร็วเป็นการลดเวลาในการกำจัดตัวประสานให้น้อยลง ข้อดีของการกำจัดตัวประสานด้วยสารละลาย คือ ชิ้นงานยังสามารถคงรูปร่างไว้ได้และไม่เกิดปฏิกิริยากับผงโลหะ ใช้เวลาน้อยกว่าการกำจัดตัวประสานด้วยความร้อน สารละลายที่ใช้บางชนิดสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ ทำให้ลดต้นทุน ข้อเสียของการกำจัดตัวประสานด้วยสารละลาย คือ สารละลายที่ใช้เป็นสารพิษมีผลกระทบต่อสภาวะแวดล้อม และ ต้องการกระบวนการทางความร้อนเพื่อทำให้ชิ้นงานแห้ง และกำจัดตัวประสานในขั้นต่อไป

2.3.2 การกำจัดตัวประสานด้วยความร้อน (Thermal debinding)⁽¹⁾

การกำจัดตัวประสาน ที่ใช้วิธีกำจัดตัวประสานด้วยความร้อนเป็นการเพิ่มอุณหภูมิภายในเตาเพื่อให้ความร้อนแก่ตัวประสาน โดยการให้ความร้อนในการกำจัดตัวประสานช่วงแรกจะให้ความร้อนในช่วง 100-200°C ความร้อนที่ให้ในช่วงนี้จะต่ำกว่าอุณหภูมิการสลายตัวของโพลีเมอร์ที่เป็นส่วนประกอบหลักของตัวประสาน ตัวประสานชนิดอื่นจะถูกกำจัดออกไปประมาณ 40% และทำให้เกิดรูเปิดที่ผิวชิ้นงาน ส่วนการให้ความร้อนเพื่อกำจัดตัวประสานในช่วงที่ 2 เรียกว่า ช่วงก่อนเผาผนึก (Pre sintering) ความร้อนที่ให้ในช่วงนี้จะสูงพอที่จะกำจัดตัวประสานที่เป็นส่วนประกอบหลักได้ การกำจัดตัวประสานในช่วงนี้จะใช้ก๊าซ ไนโตรเจน (N₂) ไฮโดรเจน (H₂) หรือ อาร์กอน (Ar) เป็นตัวพาตัวประสานที่สลายตัวออกมา การให้ความร้อนจะต้องให้ความร้อนในอัตราที่ต่ำเพื่อทำให้เกิดรูเปิดที่ผิวชิ้นงานและชิ้นงานได้รับความร้อนอย่างสม่ำเสมอ เพื่อป้องกันการเกิดความเค้นทางความร้อน (Thermal stress) ทำให้ชิ้นงานเสียรูปร่าง หลังจากการกำจัดตัวประสานชิ้นงานจะถูกเรียกว่า บราวน์พาร์ท (Brown parts) ซึ่งมีความแข็งแรงน้อยมากเนื่องจากตัวประสานที่ทำหน้าที่ยึดอนุภาคผงโลหะไว้ด้วยกันถูกกำจัดออกไป

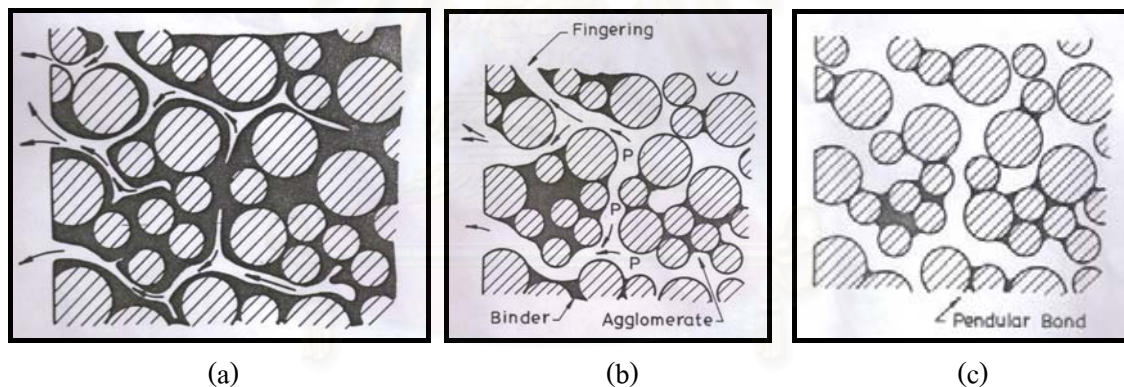
K S. Hwang และ T. H. Tsou⁽⁹⁾ ได้ศึกษาการกำจัดตัวประสานด้วยความร้อนของผงเหล็กที่มีขนาดผงเฉลี่ย 5µm ผสมกับตัวประสานประกอบด้วย โพลีเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (low density polyethylene) 3.2% (โดยน้ำหนัก) อคราแว็กซ์ (ACRAWAX) 3.2% (โดยน้ำหนัก) กรดสเตียริก 0.8% (โดยน้ำหนัก) และ ไดเอทิล ฟทาเลต (diethyl phthalate) 0.8% (โดยน้ำหนัก) โดยผสมกับผงเหล็ก

92%(โดยน้ำหนัก) ทำการฉีกขึ้นรูปเป็นชิ้นงานทดสอบแรงดึง ทำการกำจัดตัวประสานด้วยความร้อนในบรรยากาศ ไฮโดรเจน สามารถแบ่งช่วงของการกำจัดตัวประสานเป็น 3 ช่วงประกอบด้วย

ช่วงแรก เป็นช่วงที่ทำให้ความร้อนแก่ชิ้นงานอย่างช้าๆ ตัวประสานที่มีอุณหภูมิการสลายตัวต่ำจะเริ่มสลายตัวก่อนทำให้เกิดรูพรุนขนาดเล็กประมาณ 0.8 μm และมีรูเปิดที่ผิวดังที่แสดงในรูปที่ 2.3(a) การให้ความร้อนช้าๆเนื่องจากต้องการให้อัตราการแพร่ของตัวประสานออกจากชิ้นงานได้เร็วกว่าอัตราการสลายตัวเป็นก๊าซเพื่อป้องกัน ไม่ให้เกิดแรงดันภายในชิ้นงานซึ่งเป็นสาเหตุของการแตกหักของชิ้นงาน

ช่วงกลาง ตัวประสานที่เหลืออยู่จะเกิดการเปลี่ยนแปลง 2 ประการคือ 1) ความร้อนที่สูงขึ้นทำให้ตัวประสานมีลักษณะคล้ายของเหลว 2) ตัวประสานสลายตัวเร็วและมากขึ้น ถ้าก๊าซไม่สามารถแพร่ออกมาได้เร็วพอจะเกิดแรงดันภายในช่วยผลักดันตัวประสานให้แพร่ออกมาได้เร็วขึ้นและทำให้เกิดรูพรุนที่เป็นโพรงเปิดมากขึ้นดังที่แสดงในรูปที่ 2.3(b)

ช่วงสุดท้าย ตัวประสานจะสลายออกมามีได้เร็วมากจะเหลือตัวประสานเพียงเล็กน้อยที่ยึดอนุภาคของผงโลหะไว้ด้วยกันเป็นกลุ่มเล็กๆ ในลักษณะของพันธะเพนดูลาร์(Pendular bond) ก่อนถึงอุณหภูมิเผาผนึกดังที่แสดงในรูปที่ 2.3(c)



รูปที่ 2.3 การกระจายตัวของตัวประสานเมื่อทำการกำจัดตัวประสานด้วยความร้อนในช่วงต่างๆ⁽⁹⁾
(a)ช่วงแรก (b)ช่วงกลาง และ (c)ช่วงสุดท้าย

2.4 การเผาผนึก^(1, 10)

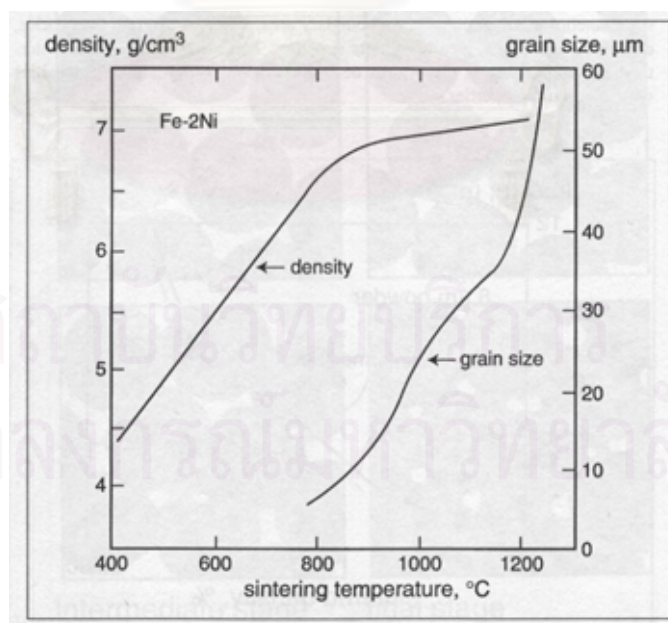
การเผาผนึก(Solid state sintering) เป็นกระบวนการเผาชิ้นงานที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของชิ้นงานในบรรยากาศที่ป้องกันไม่ให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ผิวอนุภาคผงโลหะจะหลอมเหลวและเชื่อมติดกันทำให้รูพรุนระหว่างอนุภาคลดลง ความหนาแน่นเพิ่มขึ้นชิ้นงานจะมีความแข็งแรงเหมาะสมต่อการนำไปใช้งาน ปัจจัยที่สำคัญสำหรับการเผาผนึกชิ้นงานให้มีสมบัติสอดคล้องกับการใช้งานมีอยู่ 4 ปัจจัย คือ ขนาดผงโลหะ อุณหภูมิในการเผาผนึก เวลาในการเผาผนึก และ บรรยากาศภายในเตา

2.4.1 ขนาดของผงโลหะ⁽¹⁾

ขนาดของผงโลหะมีผลต่อการเผาผนึกเพราะผงที่มีขนาดเล็กทำให้มีพื้นที่ผิวมาก ทำให้มีพลังงานพื้นผิว(Surface energy)มาก ซึ่งจะช่วยให้การเผาผนึกสามารถดำเนินไปอย่างรวดเร็ว

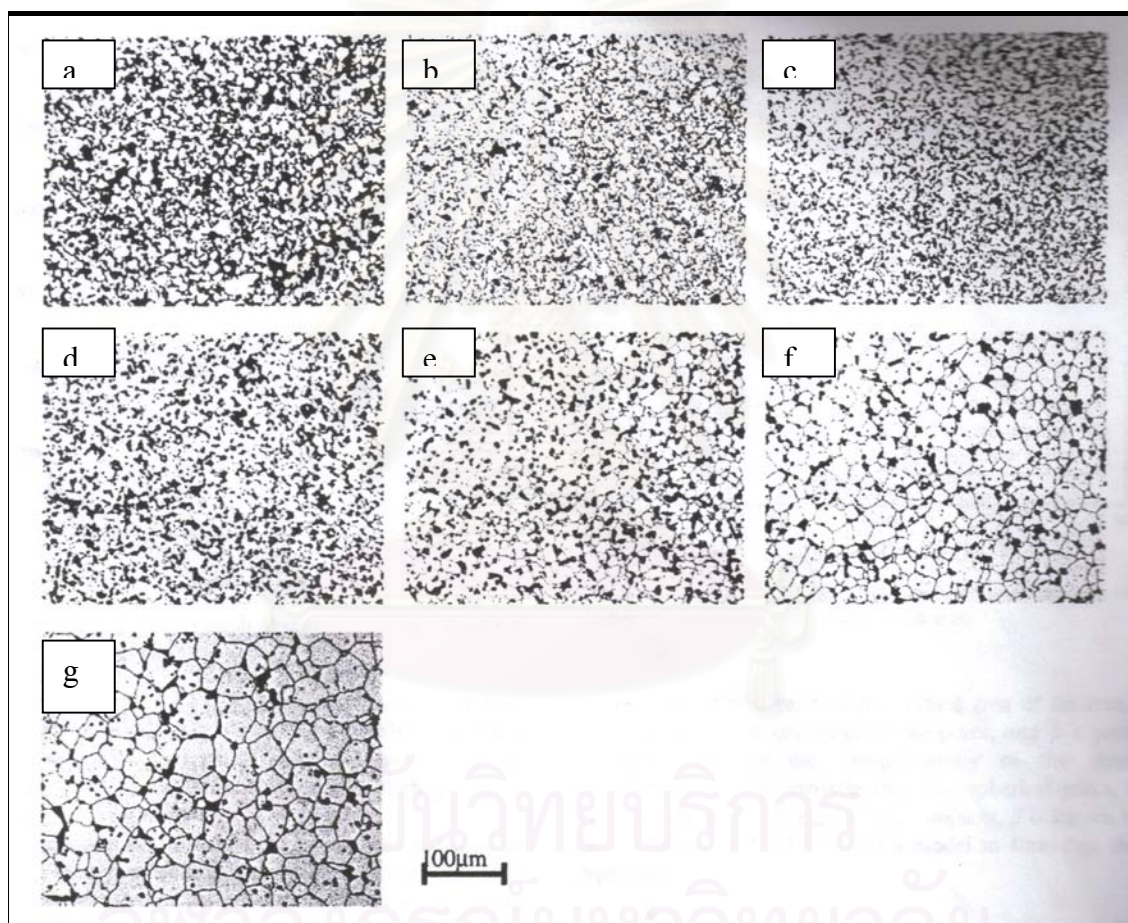
2.4.2 อุณหภูมิในการเผาผนึก^(1, 11)

อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาผนึกจะขึ้นอยู่กับช่วง 2/3 ถึง 3/4 ของอุณหภูมิหลอมเหลวของโลหะแต่ละชนิด การให้ความร้อนในการเผาผนึกถ้าใช้อุณหภูมิที่สูงอะตอมจะสามารถเคลื่อนที่ได้ดีจึงทำให้อนุภาคเชื่อมติดกันได้ง่าย ทำให้การเผาผนึกทำได้เร็วกว่ามีความหนาแน่นสูงแต่จะทำให้เกิดการหดตัวที่สูงด้วยและทำให้การโตของเกรนเป็นไปอย่างรวดเร็วดังที่แสดงในรูปที่ 2.4 จะแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในการเผาผนึกที่มีผลต่อความหนาแน่นและขนาดเกรนโดยเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะทำให้ความหนาแน่นและขนาดของเกรนเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งจะส่งผลถึงสมบัติของชิ้นงานด้วย เมื่ออุณหภูมิเผาผนึกที่สูงขึ้นมีผลให้อัตราการเคลื่อนที่ของขอบเกรนสูงกว่าการเคลื่อนที่ของรูพรุนที่ขอบเกรนทำให้อุณหภูมิสูงเกินไปมีผลให้รูพรุนถูกเกรนของโลหะล้อมรอบมีผลให้รูพรุนปรากฏที่บริเวณกลางเกรนเมื่อเพิ่มอุณหภูมิเผาผนึก



รูปที่ 2.4 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อความหนาแน่นและขนาดของเกรนในการเผาผนึก โลหะ Fe-2Ni⁽¹⁾

Hwan-Jin Sung และ คณะ⁽¹²⁾ ทำการศึกษาอุณหภูมิเผาผนึกที่มีผลต่อโครงสร้างจุลภาค และคุณสมบัติทางกลของเหล็กกล้าไร้สนิม 17-4 PH ที่ขึ้นรูปโดยการฉีด ในการศึกษาได้ทำการทดลองเผาผนึกที่อุณหภูมิที่แตกต่างกันในช่วง 900-1350 °C ผลปรากฏว่าเมื่ออุณหภูมิเผาผนึกเพิ่มขึ้นทำให้ความหนาแน่นเพิ่มขึ้น โดยที่ชิ้นงานที่ทำการเผาผนึกที่ 900 °C มีความหนาแน่น 61% (ของความหนาแน่นทางทฤษฎี) เผาผนึกที่ 1350 °C มีความหนาแน่น 99% ปริมาตรรูพรุนลดลง รูปร่างของรูพรุนกลมมากขึ้นและการกระจายตัวของรูพรุนอยู่แบบเดี่ยวๆ เมื่ออุณหภูมิเผาผนึกเพิ่มสูงขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2.5 จากลักษณะรูพรุนที่เป็นแบบปิดกลมและกระจายตัวอยู่เดี่ยวๆ มีผลให้อัตราการยืดตัวสูงขึ้น และค่าความต้านทานแรงดึงเพิ่มขึ้นตามไปด้วย



รูปที่ 2.5 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าไร้สนิม 17-4 PH ที่อุณหภูมิเผาผนึกต่างๆ⁽¹²⁾ (a) 900 °C (b) 1000 °C (c) 1100 °C (d) 1200 °C (e) 1250 °C (f) 1300 °C และ (g) 1350 °C

2.4.3 บรรยากาศ ภายในเตาเผาผนึก^(1, 11)

การทำกรเผาผนึกต้องมีการควบคุมบรรยากาศภายในเตาเผาผนึกเป็นอย่างดีเพราะอนุภาคผงโลหะที่ใช้ในกระบวนการขึ้นรูปโดยการฉีดขึ้นรูปโลหะผงมีขนาดเล็กจึงทำให้มีพื้นที่ผิวมาก ทำให้มีโอกาส เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันสูง ทำให้ผิวของผงโลหะเกิดออกไซด์ซึ่งจะทำให้การเผาผนึกทำได้ยาก ดังนั้นในการเผาผนึกจึงได้มีการควบคุมบรรยากาศ ภายในเตาเผาโดยใช้แก๊สที่มีความสามารถลดการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน เช่น อาร์กอน หรือทำให้เป็นสุญญากาศ เมื่อทำการเผาผนึกในบรรยากาศไนโตรเจนหรืออาร์กอนพบว่ามีการกัดกร่อนในรูปพรุนในชิ้นงานและเมื่ออุณหภูมิเผาผนึกเพิ่มสูงขึ้นก๊าซเหล่านี้จะขยายตัวมีผลให้ความหนาแน่นของชิ้นงานลดลง

S. Li และคณะ⁽¹³⁾ ได้ทำการศึกษาผลของบรรยากาศในการเผาผนึกที่มีผลต่อความหนาแน่นของเหล็กกล้าไร้สนิม 316L ที่ทำการฉีดขึ้นรูปโลหะผง โดยทำการทดลองเผาผนึกในบรรยากาศต่างๆประกอบด้วย ไนโตรเจน ไนโตรเจนผสมไฮโดรเจน อาร์กอน และอาร์กอนผสมไฮโดรเจน ผลปรากฏว่าการเผาผนึกในบรรยากาศ อาร์กอนและอาร์กอนผสมไฮโดรเจน มีความหนาแน่นสูงกว่าในบรรยากาศไนโตรเจน และไนโตรเจนผสมไฮโดรเจน เนื่องจากในบรรยากาศไนโตรเจน และไนโตรเจนผสมไฮโดรเจน เกิดสารประกอบ ออกไซด์และไนไตรด์ ในระหว่างช่วงเผาผนึกทำให้การเผาผนึกยากขึ้นส่งผลให้ความหนาแน่นหลังทำการเผาผนึกลดลง สารประกอบ ออกไซด์และไนไตรด์ที่เกิดขึ้นอยู่บริเวณขอบเกรนเป็นตัวขัดขวางการขยายตัวของขอบเกรนจึงส่งผลให้ขนาดเกรนของชิ้นงานที่เผาผนึกในบรรยากาศไนโตรเจน และไนโตรเจนผสมไฮโดรเจน มีขนาดเกรนที่ไม่สม่ำเสมอ

2.4.4 เวลาที่ใช้ในการเผาผนึก^(1, 11)

เวลาที่ใช้การเผาผนึกชิ้นงานขึ้นกับอุณหภูมิและขนาดของชิ้นงาน ถ้าเวลาน้อยเกินไป อาจเกิดการเชื่อมติดกันของผงโลหะไม่สมบูรณ์จะทำให้สมบัติทางกลต่ำ แต่ถ้าใช้เวลาเผาผนึกมากเกินไปอาจทำให้ชิ้นงานเปลี่ยน โครงสร้างเกิดการ โตของเกรนได้ทั้งนี้ขึ้นกับการออกแบบการทดลอง เมื่อเพิ่มเวลาเผาผนึกมีผลให้อัตราการหดตัวและความหนาแน่นเพิ่มสูงขึ้น

N.H.Loh⁽¹⁴⁾ และคณะศึกษาถึงผลของปัจจัยการเผาผนึกต่อสมบัติทางกลของเหล็กกล้าไร้สนิม 316L โดยที่ใช้อุณหภูมิในการเผาผนึก 1050 °C, 1200 °C และ 1350 °C อัตราการให้ความร้อน 5, 10 และ 15 °C/นาท เป็นเวลา 60, 90 และ 120 นาที ที่ 1050 °C เป็นอุณหภูมิเริ่มเกิดคอเชื่อมระหว่างอนุภาค เมื่อใช้ อุณหภูมิสูงขึ้นส่งผลให้สมบัติทางกลดีขึ้น ส่วนอัตราการให้ความร้อนสูงขึ้นจะทำให้เกิดรูพรุนมากขึ้น จึงทำให้ความหนาแน่นลดลง และเมื่อใช้เวลาเผาผนึกเพิ่มขึ้นแม้จะทำให้ความหนาแน่นเพิ่มขึ้นแต่ทำให้เกรนโตสมบัติทางกลจึงด้อยลง

2.5 ทดสอบหาคุณสมบัติ และ การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค

2.5.1 ความหนาแน่น^(10, 15)

การหาความหนาแน่นของชิ้นงานรูปทรงเรขาคณิตสามารถหาได้จากการคำนวณมวลของชิ้นงาน โดยการชั่งน้ำหนักและปริมาตรของชิ้นงานที่ต้องการทราบความหนาแน่นโดยสามารถคำนวณได้จากสูตรในสมการที่ 2.1

$$\text{ความหนาแน่น} = \text{มวล} / \text{ปริมาตร} \quad (2.1)$$

การหาความหนาแน่นและความถ่วงจำเพาะของวัสดุ อาศัยหลักการของอาร์คิมิดีสที่ใช้วิธีจุ่มของแข็งลงในของเหลวจะมีแรงพยุงเกิดขึ้นบนของแข็งนั้น โดยแรงพยุงที่เกิดขึ้นจะมีค่าเท่ากับน้ำหนักของของเหลวที่ถูกแทนที่ด้วยปริมาตรของของแข็ง วิธีการจึงทำได้โดยการหาค่ามวลของวัตถุในอากาศและขณะที่จุ่มอยู่ในน้ำดังสมการที่ 2.2

$$\text{ความหนาแน่น } \rho = \frac{W_a \cdot \rho_{fl}}{W_a - W_{fl}} \quad (2.2)$$

เมื่อ ρ คือ ค่าความหนาแน่นของชิ้นงาน(หน่วยเป็นกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)

ρ_{fl} คือ ค่าความหนาแน่นของของเหลว(หน่วยเป็นกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)

W_a คือ น้ำหนักแห้งของชิ้นงาน(หน่วยเป็นกรัม)

W_{fl} คือ น้ำหนักของชิ้นงานในของเหลว(หน่วยเป็นกรัม)

2.5.2 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค⁽¹⁰⁾

การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคเป็นการศึกษา โครงสร้างของโลหะภายใต้กล้องขยาย เพื่อจำแนกขนาดและการกระจายตัวของ โครงสร้างจุลภาคภายในโลหะทำได้โดยการเตรียมผิวชิ้นงานให้เรียบก่อน โดยการขัดกระดาษทรายและขัดละเอียดด้วยผ้าสักหลาด โดยมีน้ำผสมผงขัดละเอียดติดลงบนผ้าสักหลาด อาจเป็นผงขัดที่เป็นอลูมินา หรือ โครเมียมออกไซด์ จากนั้นนำไปผ่านการกัดผิว (Etching) บางๆด้วยสารละลายกรดเจือจาง(Etchants) ซึ่งมีหลายสูตรขึ้นกับโลหะที่จะศึกษาโครงสร้าง โดยทั่วไปถ้าเป็นเหล็กจะใช้กรดไนตริกประมาณ 2-4 % ผสมเอทิลแอลกอฮอล์ ซึ่งเรียกว่า ไนตอล (Nital) หรือใช้กรดเกลือผสมเฟอร์ริกคลอไรด์ หรืออื่นๆ

2.5.3 การทดสอบแรงดึง ^(10, 16, 17)

การทดสอบแรงดึงเป็นการทดสอบโดยการดึงชิ้นงานทดสอบจนขาดจากกันในขณะที่เครื่องทดสอบจะทำการบันทึกแรงที่เพิ่มขึ้นและระยะที่ชิ้นงานทดสอบยืดออก และจากแรงที่บันทึกได้สามารถนำไปคำนวณค่าต่างๆ ได้ดังนี้

ความเค้น(Stress) หมายถึงแรงต้านทานภายในเนื้อวัสดุที่พยายามต้านทานแรงภายนอกที่มากระทำเพื่อไม่ให้เกิดการเปลี่ยนรูปไปจากเดิม แรงที่มากระทำจะถูกกระจายไปอย่างสม่ำเสมอตลอดพื้นที่หน้าตัดของวัสดุ หากแบ่งตามลักษณะแรงที่กระทำกับวัสดุแล้วจะทำให้เกิดความเค้นขึ้น 3 แบบ คือ ความเค้นแรงดึง(tensile stress) ความเค้นอัด(compressive stress) และความเค้นแรงเฉือน(shear stress)

ลักษณะของแรงกระทำที่เป็นแรงดึงเราสามารถหาความเค้นที่เกิดขึ้นได้โดยคิดอัตราส่วนระหว่างแรงกระทำต่อพื้นที่หน้าตัด ดังสมการ 2.3

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2.3)$$

เมื่อ σ คือ ความเค้นแรงดึง(lb/in², N/m², kgf/mm²)

F คือ แรงที่กระทำตั้งฉากกับพื้นที่หน้าตัด(lb, N, kgf)

A คือ พื้นที่หน้าตัดขวางที่ถูกแรงกระทำ(in², m², mm²)

ความเครียด(Strain) คือการเปลี่ยนรูปร่างของวัสดุเมื่อมีแรงมากระทำ โดยแบ่งเป็นความเครียดยืดหยุ่น(elastic strain) และความเครียดถาวร(plastic strain) ความเครียดยืดหยุ่นเป็นการเปลี่ยนรูปในลักษณะที่เมื่อลดแรงกระทำแล้ววัสดุจะกลับสู่รูปเดิมเหมือนก่อนหน้าที่จะรับแรง ส่วนความเครียดแบบถาวรเป็นลักษณะที่เมื่อปล่อยแรงแล้ววัสดุจะไม่กลับสู่ขนาดเดิม

การหาความเครียดทางวิศวกรรมหาจากอัตราส่วนของขนาดที่เปลี่ยนแปลงไปต่อขนาดเดิมโดยแบ่งตามลักษณะแรงกระทำได้ 2 แบบคือ ความเครียดเชิงเส้น(linear strain) และความเครียดเฉือน(shear strain) ความเครียดเชิงเส้นจะเกิดขึ้นเมื่อวัสดุรับแรงดึงหรือแรงกดหาได้จากสมการที่ 2.4

$$\epsilon = \frac{l - l_0}{l_0} \quad (2.4)$$

เมื่อ ϵ คือ ความเครียดเชิงเส้น

l คือ ความยาวเมื่อได้รับแรงกระทำ

l_0 คือ ความยาวก่อนได้รับแรงกระทำ

พฤติกรรมของความเค้น-ความเครียดระดับการแปรรูปหรือเปลี่ยนรูปโครงสร้างหนึ่งๆ จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับขนาดของแรงกระทำที่กระทำต่อวัสดุ สำหรับโลหะส่วนใหญ่ซึ่งถูกกระทำ

ด้วยแรงดึงซึ่งมีขนาดไม่สูงนัก ความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นจะแปรผันตรงซึ่งกันและกันตามความสัมพันธ์ในสมการที่ 2.5

$$\sigma = E\varepsilon \quad (2.5)$$

ซึ่งรู้จักกันดีในนามของ กฎของฮุก(Hook's law) และค่าคงที่ของการแปรผันE(มีหน่วยเป็น GPa หรือ psi) เรียกว่า โมดูลัสความยืดหยุ่น (modulus of elasticity) หรือ โมดูลัสของยัง(Young's modulus)

2.5.4 การทดสอบความแข็ง⁽¹⁰⁾

การทดสอบความแข็งเป็นการทดสอบเพื่อหาความแข็งของโลหะมีหลายรูปแบบเช่น

1) การทดสอบความแข็งแบบบริเนลล์ HB (Brinell hardness) เหมาะกับเหล็กกล้าที่ไม่ได้ชุบแข็ง เหล็กหล่อ และโลหะนอกกลุ่มเหล็ก

2) การทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ส HV (Vickers hardness) สามารถทดสอบได้กับโลหะแทบทุกชนิด รวมทั้ง เหล็กกล้าที่ผ่านการชุบแข็งและไม่ได้ชุบแข็ง

3) การทดสอบความแข็งแบบรอกเวลล์บี HRB (Rockwell B) เหมาะกับโลหะนอกกลุ่มเหล็ก และเหล็กกล้าที่ไม่ได้ชุบแข็ง

4) การทดสอบความแข็งแบบรอกเวลล์ซี HRC (Rockwell C) เหมาะกับเหล็กกล้าที่ชุบแข็ง

5) การทดสอบความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ส (Micro Vickers hardness) เหมาะกับการหาค่าความแข็งลึก

2.5.5 การทดสอบส่วนผสมทางเคมี⁽¹⁰⁾

การวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีด้วยเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ โดยชิ้นงานโลหะที่ต้องการวิเคราะห์ส่วนผสมจะถูกสปาร์กที่ผิวจนเกิดเปลวอาร์กสารจันที่ผสมอยู่ในชิ้นงานทดสอบจะให้แสงที่มีความยาวคลื่นเป็นกลุ่ม หรือเป็นสเปกตรัมของคลื่นแสง โดยสารเจือแต่ละชนิดจะมีความยาวคลื่นที่เป็นลักษณะเฉพาะของธาตุแต่ละธาตุ และเนื่องจากมีธาตุอยู่หลายชนิดในชิ้นงานทดสอบเครื่องสเปกโตรมิเตอร์จะทำหน้าที่แยกคลื่นแสงที่รวมอยู่เป็นสเปกตรัมนี้ออก ให้เป็นเฉพาะสำหรับธาตุชนิดใดชนิดหนึ่ง ขณะเดียวกันความเข้มของแสงที่เกิดขึ้น สามารถบอกถึงปริมาณของธาตุนั้นๆ ได้โดยใช้วิธีเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่รู้ค่า ซึ่งวิธีการดังกล่าวต้องใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการเก็บข้อมูลเปรียบเทียบ การวิเคราะห์แต่ละครั้งใช้เวลาประมาณ 1 นาที ในขณะที่สามารถบอกสารเจือที่ผสมอยู่ในโลหะระหว่าง 10-20 ธาตุในคราวเดียวโดยเฉพาะเหล็กกล้าสามารถวิเคราะห์ธาตุที่ผสมในเหล็กกล้าชนิดต่างๆ ได้ครบแทบทุกธาตุ

2.6 การชุบแข็งพื้นผิวโดยวิธีการเบอรัลไรซิง^(18, 29)

เหล็กที่จะชุบแข็งด้วยกรรมวิธีนี้จะต้องเป็นเหล็กที่มีคาร์บอนต่ำประมาณ 0.1-0.2 % และอาจจะมีธาตุบางตัวเช่น นิกเกิล โครเมียม หรือวานาเดียมผสมอยู่บ้างในปริมาณเล็กน้อย เพื่อเพิ่มความเหนียวให้กับเหล็ก ปกติเหล็กที่มีคาร์บอนต่ำจะไม่สามารถทำการชุบแข็งด้วยวิธีธรรมดาเพราะมีคาร์บอนน้อย จะไม่มีโอกาสได้โครงสร้างมาร์เทนไซต์ แต่เหล็กชนิดนี้จะมีความเหนียวสูงทนได้ดีต่อแรงบิดและแรงกระแทกหลักในการชุบแข็งด้วยวิธีนี้ใช้หลักการเพิ่มปริมาณคาร์บอนให้กับบริเวณผิวเหล็กได้สูงประมาณ 0.8% โดยกลไกการแพร่ ซึ่งเป็นเหล็กคาร์บอนที่มีคุณสมบัติชุบแข็งดีที่สุดหลังจากนั้นจะนำเหล็กไปทำการชุบ เพื่อให้ได้ความแข็งและความเหนียวต่อไป

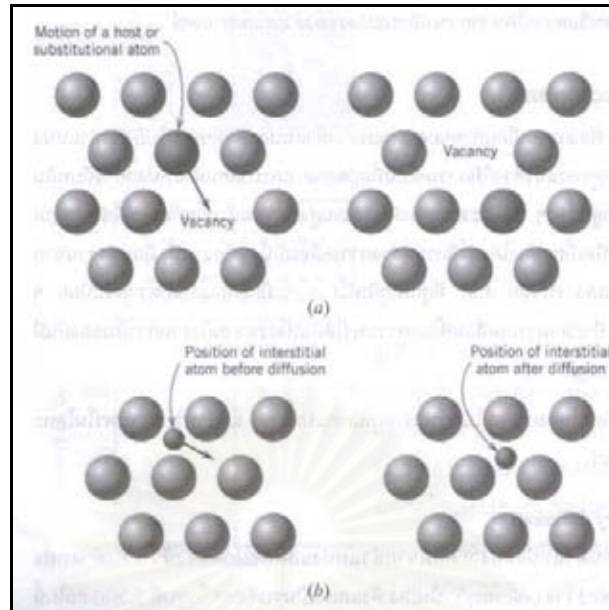
ผลของปริมาณคาร์บอนต่อสมบัติทางกลของเหล็กกล้าในชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปโดยกระบวนการรีดเมื่อมีปริมาณคาร์บอนเพิ่มขึ้นค่าความแข็งแรงของชิ้นงานจะเพิ่มขึ้นอย่างมากจนกระทั่งคาร์บอนมีปริมาณสูงถึง 0.8% ความแข็งแรงของชิ้นงานจะเริ่มคงที่ แต่ในชิ้นงานที่ขึ้นรูปโดยกระบวนการโลหะผง เมื่อปริมาณคาร์บอนเพิ่มขึ้นสูงกว่า 0.85 % ความแข็งแรงของชิ้นงานจะลดลงอย่างมากเนื่องจากปริมาณคาร์บอนที่เพิ่มขึ้นทำให้ปริมาณเฟสโลตที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความแข็งแรงและความแข็งเพิ่มสูงขึ้น แต่เมื่อปริมาณคาร์บอนสูงกว่า 0.85% จะเริ่มเกิดซีเมนต์ไคต์ที่ขอบเกรนส่งผลให้ชิ้นงานที่ขึ้นรูปจากผงโลหะมีความแข็งแรงลดลงอย่างมาก

2.6.1 กลไกการแพร่ (Diffusion Mechanism)^(16, 17)

การแพร่เป็นการเคลื่อนย้ายอะตอมจากตำแหน่งหนึ่งไปยังอีกตำแหน่งหนึ่ง อะตอมในวัสดุของแข็งต่างมีการเคลื่อนที่อยู่ตลอดเวลา การเปลี่ยนตำแหน่งจับพันธันมีเงื่อนไขคือ 1) มีช่องว่างอยู่ข้างๆ 2) อะตอมต้องมีพลังงานสูงพอที่จะทำลายพันธะที่มีต่ออะตอมข้างเคียง สำหรับการแพร่ในโลหะมีกลไกที่สำคัญอยู่ 2 แบบคือ

1. การแพร่โดยอาศัยช่องว่าง (Vacancy Diffusion) การแพร่แบบนี้จะเกิดขึ้นจากการเคลื่อนที่ของอะตอมจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่งเมื่อมีพลังงานกระตุ้นทำให้อะตอมสั่นสะเทือนและเคลื่อนที่เปลี่ยนตำแหน่ง โดยการเคลื่อนที่จากตำแหน่งหนึ่งสู่ที่ว่างอีกตำแหน่งหนึ่ง อะตอมที่กำลังแพร่และช่องว่างต้องแลกเปลี่ยนตำแหน่งกัน ดังนั้นการแพร่ของอะตอมในทิศทางหนึ่งจึงหมายถึงการเคลื่อนที่ช่องว่างในทิศทางตรงข้ามด้วยดังที่แสดงในรูปที่ 2.6(a)

2. การแพร่แบบแทรกที่ (Interstitial Diffusion) เป็นการแพร่ที่เกิดกับอะตอมที่มีขนาดเล็กเคลื่อนที่ไปแทรกตามช่องว่างของอะตอมขนาดใหญ่ ดังที่ได้แสดงในรูปที่ 2.6(b) กลไกแบบนี้พบในการแพร่ของอะตอมที่มีขนาดต่างกันมากๆ เช่น อะตอมคาร์บอนแทรกในเหล็ก



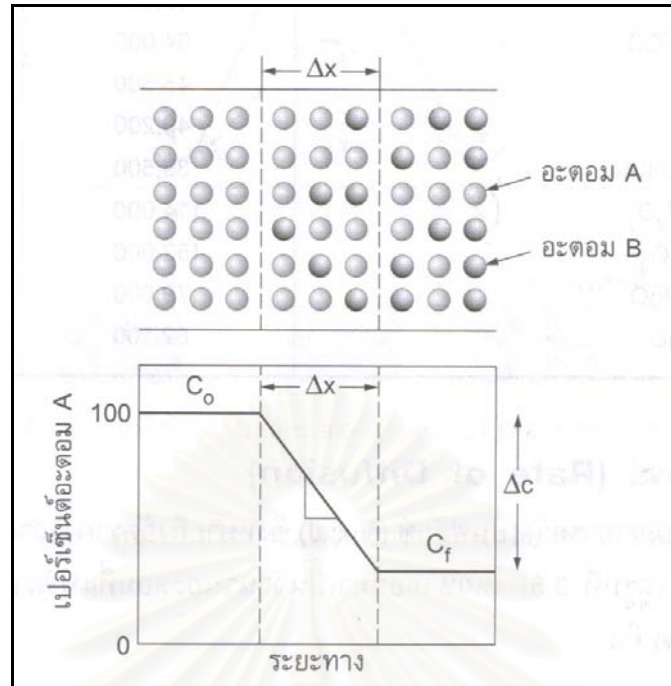
รูปที่ 2.6 รูปแสดงกลไกการแพร่ของอะตอม⁽¹⁷⁾ (a)การแพร่โดยอาศัยช่องว่าง (b)การแพร่แบบแทรกที่

2.6.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการแพร่^(16, 17)

ปัจจัยที่มีผลต่อการแพร่ประกอบด้วย

1. ความเข้มข้นหรือการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นตามระยะทาง บางครั้งเรียกว่าเกรเดียนต์ของความเข้มข้น เป็นความสัมพันธ์ของปริมาณความเข้มข้นของอะตอม (ΔC) ที่เปลี่ยนแปลงไปตามระยะทาง (ΔX) จะเกิดขึ้นเมื่อวัสดุชนิดที่มีส่วนผสมที่แตกต่างกัน หรือเกิดก๊าซหรือของเหลวที่มีความเข้มข้นสูงอยู่ล้อมรอบวัสดุของแข็ง แล้วเกิดการแพร่หรือถ่ายเทอะตอมจากที่มีความเข้มข้นสูงไปยังที่มีความเข้มข้นต่ำดังที่แสดงในรูปที่ 2.7

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.7 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของอะตอมที่เกิดจากการแพร่⁽¹⁶⁾

2. อุณหภูมิและสัมประสิทธิ์การแพร่(D) สัมประสิทธิ์การแพร่จะมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิตามสมการอาร์เรเนียส คือ

$$D = D_0 \exp(-Q/RT) \quad (2.6)$$

เมื่อ Q คือพลังงานกระตุ้น(cal/mol)

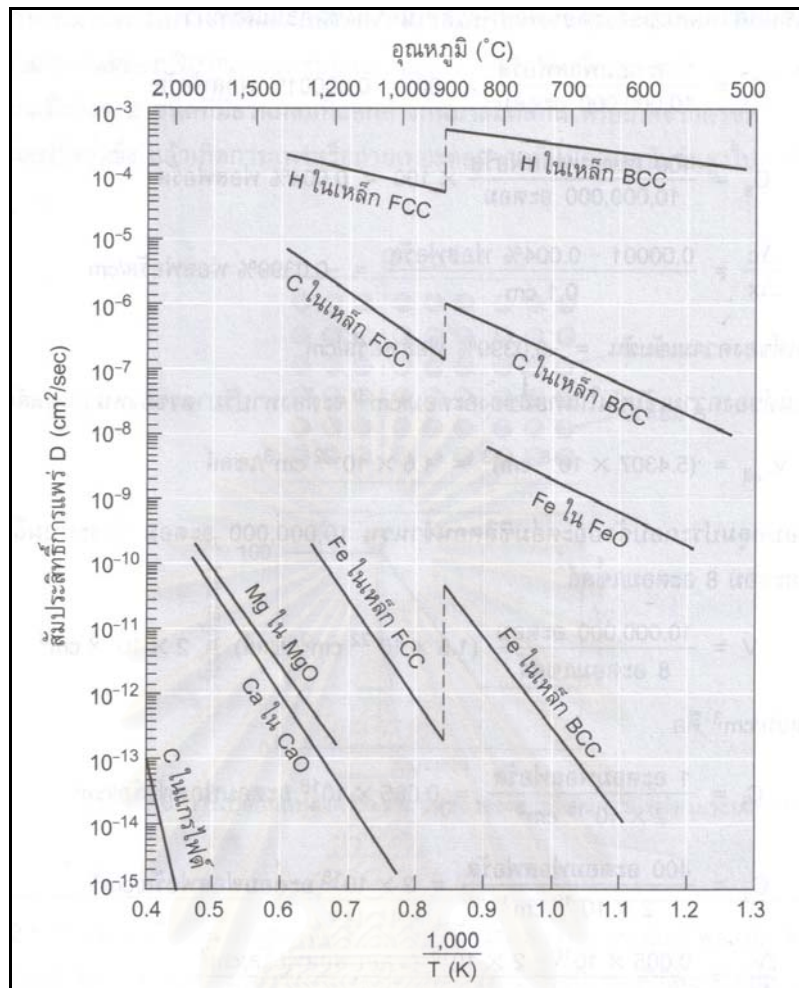
R คือค่าคงที่ของแก๊ส(1.987 cal/mol.K)

T คืออุณหภูมิสัมบูรณ์(K)

D_0 คือค่าคงที่ของระบบการแพร่

เมื่ออุณหภูมิของวัสดุสูงขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่จะเพิ่มขึ้นด้วยตามแผนภูมิที่แสดงในรูปที่ 2.8 ดังนั้นที่อุณหภูมิสูงๆ อัตราการแพร่จะเกิดสูงขึ้น เนื่องจากมีพลังงานกระตุ้นที่สูง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

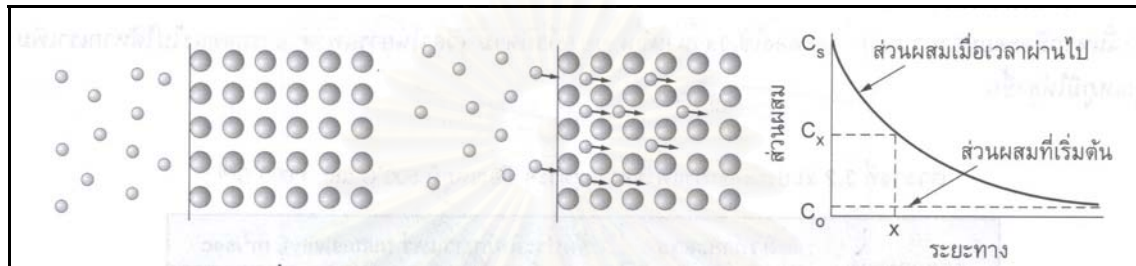


รูปที่ 2.8 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง สัมประสิทธิ์การแพร่ (D) กับอุณหภูมิของวัสดุต่างๆ⁽¹⁶⁾

3. ชนิดของโครงสร้างผลึก โครงสร้างผลึกแต่ละชนิดจะมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ที่แตกต่างกันเช่น เหล็กกล้าคาร์บอนที่มีโครงสร้างแบบ BCC จะมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคาร์บอนในเหล็กเท่ากับ $10^{-12} \text{ m}^2/\text{sec}$ ที่อุณหภูมิ 500°C ส่วนเหล็กกล้าคาร์บอนที่มีโครงสร้างแบบ FCC จะมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคาร์บอนในเหล็กเท่ากับ $5 \times 10^{-15} \text{ m}^2/\text{sec}$ ที่อุณหภูมิ 500°C
4. ชนิดของกลไกในการแพร่ กลไกการแพร่แบบแทรกที่หรือแบบช่องว่างจะส่งผลต่อสภาพของการแพร่เป็นอย่างมาก โดยหากอะตอมที่มีขนาดเล็กจะสามารถทำให้เกิดการแพร่แบบแทรกที่ในโครงสร้างของผลึกที่มีขนาดใหญ่ได้ค่อนข้างง่าย ส่วนการแพร่โดยอาศัยช่องว่างจะเกิดกับโครงสร้างผลึกที่มีขนาดอะตอมใกล้เคียงกันได้ดีกว่า
5. เวลาในการแพร่ กลไกการเกิดการแพร่ต้องอาศัยเวลา ถ้าหากอะตอมมีจำนวนมากจะต้องใช้เวลาของการแพร่ยาวนาน อย่างไรก็ตามเวลาในการแพร่สามารถลดลงไปได้หากเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้น

2.6.3 การแพร่ในสถานะไม่คงตัว(Nonsteady-state Diffusion)^(16, 17)

การแพร่ในสถานะไม่คงตัวจะเป็นกระบวนการแพร่ที่ความเข้มข้นของอะตอมจะมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาเช่น เหล็กที่มีอะตอมของคาร์บอนแพร่เข้าไปบริเวณผิวเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น ความเข้มข้นของอะตอมคาร์บอนในเหล็กจะมีการเปลี่ยนแปลงดังที่แสดงในรูปที่ 2.9 ซึ่งการแพร่ในสถานะไม่คงตัวนี้จะนำไปตามกฎข้อที่สองของฟิค(Fick's second law) ตามสมการดังนี้



รูปที่ 2.9 การแพร่ของอะตอมสู่เนื้อวัสดุ ซึ่งเป็นไปตามกฎข้อที่สองของฟิค⁽¹⁶⁾

$$(C_s - C_x) / (C_s - C_0) = \text{erf} (x / (2\sqrt{Dt})) \quad (2.7)$$

เมื่อ C_s คือความเข้มข้นของอะตอมที่ผิววัสดุ

C_0 คือความเข้มข้นของอะตอมที่มีอยู่ในเนื้อวัสดุก่อนเกิดการแพร่

C_x คือความเข้มข้นของอะตอมที่ระยะห่างจากผิว x ที่เวลา t

D คือสัมประสิทธิ์การแพร่ของอะตอม

x คือระยะทางจากผิว

t คือเวลา

erf คือเกาเซียนเออร์เรอร์ฟังก์ชัน

บทที่ 3

ระเบียบวิธีการทดลอง

3.1 วัตถุดิบ

3.1.1 ผงโลหะที่จะใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงานทดลอง

ผงโลหะที่เป็นวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตชิ้นรูปโลหะผง(Feed stock) คือ ผงเหล็กกล้าโครเมียมโมลิบดีนัม เกรดSCM415 ที่ผสมตัวประสานMRM-1สำเร็จ ขนาดผง Normal Size PF-20F ที่ผลิตโดย ATMIX CORPORATION ซึ่งมีข้อมูลและส่วนผสมทางเคมีในภาคผนวก ก.ได้นำมาแสดงในตารางที่3.1และตารางที่3.2

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมทางเคมีของผง Chromium Molybdenum steel เกรด SCM415

ชนิดวัสดุผง	ส่วนผสมทางเคมี %(wt)									
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	O(ppm)
SCM 415	0.333	0.26	0.75	0.019	0.008	0.08	1.04	0.21	0.01	4000

ตารางที่ 3.2 ขนาดผง Chromium Molybdenum steel เกรด SCM415 ที่ใช้ในการผลิตชิ้นรูปโลหะผง

ขนาดผงโลหะ (μm)	mass %
>40	1.6
40-30	4.4
30-20	10.8
20-10	31.0
<10	52.2

อัตราส่วนวัตถุดิบที่นำมาทำการทดลองโดยกระบวนการผลิตชิ้นรูปโลหะผง แสดงในตารางที่3.3

ตารางที่ 3.3 อัตราส่วนผสมวัตถุดิบที่นำมาทำการทดลองโดยกระบวนการฉีดขึ้นรูปโลหะผง

ชนิดวัตถุดิบ	ชื่อ	% โดยปริมาตร	ความหนาแน่น(g/cm ³)
ผงโลหะ	SCM 415 PF-20F	66.50	7.8000
ตัวประสาน	MRM-1	33.50	0.9604

3.1.2 ก๊าซที่ใช้ในการการทดลองประกอบด้วย

- 1) กำจัดตัวประสาน(Debinding) คือ ก๊าซไนโตรเจน โดยมีอัตราการไหล(Flow rate) ในช่วง กำจัดตัวประสาน 3 ลิตร/นาที
- 2) การเผาผนึก(Sintering) คือ ก๊าซอาร์กอน โดยมีอัตราการไหล(Flow rate)ในช่วง การเผาผนึก 3 ลิตร/นาที

3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- 1) เครื่องฉีด NIKATA model MD50 S-VI
- 2) เตา Shimadzu Vacuum Dewax sintering furnace : Model VHLgr 20/20/23 Max 1600 °C
- 3) เครื่องชั่งน้ำหนัก ดิจิตอลและชุดวัดความหนาแน่น
- 4) เวอร์เนียคาร์ลิปเปอร์
- 5) เครื่องวัดความแข็งแบบ Macro hardness Tester : Intron-Wolpert 930/250
- 6) เครื่องวัดความแข็งแบบ Micro Vicker hardness Tester
- 7) เครื่องทดสอบแรงดึงแบบ Universal testing machine : Intron 8810 Max load 100 kN
- 8) กล้องจุลทรรศน์ชนิดสะท้อนแสง(Optical Microscope)
- 9) เครื่องสเปกโทรมิเตอร์
- 10) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดพร้อมอุปกรณ์ EDS
- 11) เครื่องวิเคราะห์ปริมาณธาตุคาร์บอนและกำมะถัน
- 12) เตาชุบผิวแข็ง

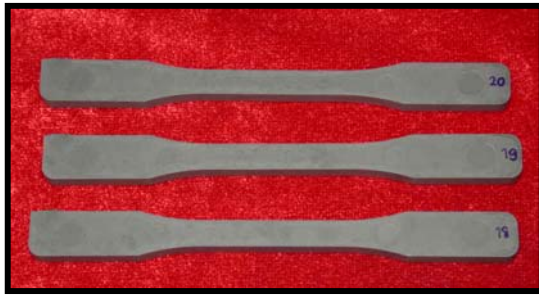
3.3 ขั้นตอนการทดลอง

3.3.1 การขึ้นรูปชิ้นงานทดลองโดยกระบวนการฉีดขึ้นรูปโลหะผง

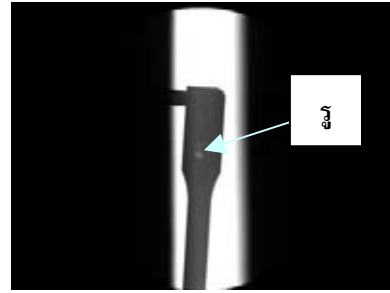
การฉีดขึ้นรูปโดยกระบวนการฉีดขึ้นรูปโลหะผงโดยเครื่องฉีด(Injection molding machine) เริ่มต้นด้วยการทดลองฉีดขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบแรงดึงที่แสดงในรูปที่3.1(a) เพื่อหาค่าสภาวะในการฉีดที่เหมาะสมสำหรับวัตถุดิบโดยการปรับเปลี่ยนค่าตัวแปรในการฉีด เริ่มต้นที่การปรับค่าปริมาณป้อนวัตถุดิบที่ทำการฉีดต่อครั้ง(Shot size) เพื่อหาปริมาณวัตถุดิบที่ฉีดเข้าไปให้เต็มแบบในการฉีด 1 ครั้งโดยเริ่มจากการปรับค่าจากน้อยไปหามากและในการปรับค่าแต่ละครั้งให้ทำการฉีดขึ้นงานทดลอง 10 ชิ้นเพื่อทำการตรวจสอบจากลักษณะภายนอกของชิ้นงานที่ได้ชิ้นงานที่เต็มแบบเมื่อได้ค่าปริมาณป้อนวัตถุดิบที่เหมาะสมให้ใช้ปริมาณป้อนวัตถุดิบที่ได้ แล้วเริ่มการปรับเปลี่ยนหาความเร็วในการฉีดที่เหมาะสม โดยตั้งค่าความเร็วในการฉีดไว้ที่10มม./วินาทีแล้วทำการฉีดขึ้นงานทดลอง 10 ชิ้นทำการตรวจสอบจากลักษณะภายนอกและทำการX-ray เพื่อดูตำหนิภายในของชิ้นงานทดลองดังที่ได้แสดงในรูปที่ 3.1(b) ทำการปรับค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ได้ค่าที่มีจำนวนการเกิดตำหนิภายในชิ้นงานทดลองน้อยที่สุด จึงใช้ค่าฉีดที่ชิ้นงานมีตำหนิน้อยที่สุด การปรับหาค่าความดันของการฉีดขึ้นรูปที่เหมาะสมให้ทำเช่นเดียวกันกับการปรับหาค่าความเร็วในการฉีดจนได้สภาวะการฉีดทั้งหมดที่ต้องการ แล้วทดลองทำการฉีดโดยใช้ค่าที่ทดลองได้พร้อมกัน ทำการตรวจสอบและวิเคราะห์ตำหนิที่เกิดกับชิ้นงานโดยใช้แผนภูมิของปัญหาที่เกิดกับการฉีดในรูปที่ 2.2 เพื่อทำการแก้ไขสภาวะที่น่าจะเป็นสาเหตุในการฉีดขึ้นรูปแล้วทำการปรับแก้ค่าต่างๆจนตำหนิที่ปรากฏหายไป โดยสภาวะการทดลองฉีดขึ้นรูปที่เหมาะสมมีรายละเอียดดังนี้

- อุณหภูมิของการฉีด Nozzle 170°C Front 170 °C Middle 165°C Rear 160°C
- ความเร็วในการฉีด 40 มม./วินาที
- แรงดันในการฉีด 80 MPa
- เวลาในการฉีด 3 วินาที
- เวลาในการเย็นตัว 10 วินาที
- ปริมาณวัตถุดิบที่ฉีดต่อครั้งคือระยะเคลื่อนที่กระบอกฉีด 30มม.xเส้นผ่าศูนย์กลาง25มม.
- แรงดันระหว่างการเย็นตัว 40 MPa

เมื่อได้สภาวะในการฉีดที่เหมาะสมจึงทำการฉีดขึ้นรูปชิ้นงานทดลองของผงโลหะSCM415 เพื่อนำไปทำการกำจัดตัวประสานและเผาผนึกทดสอบหาคุณสมบัติทางกายภาพและทางกลต่อไป



(a)



(b)

รูปที่ 3.1 ชิ้นงานทดลอง SCM415 (a)หลังทำการฉีดขึ้นรูป (b)ทำการตรวจสอบด้วยการ X-ray

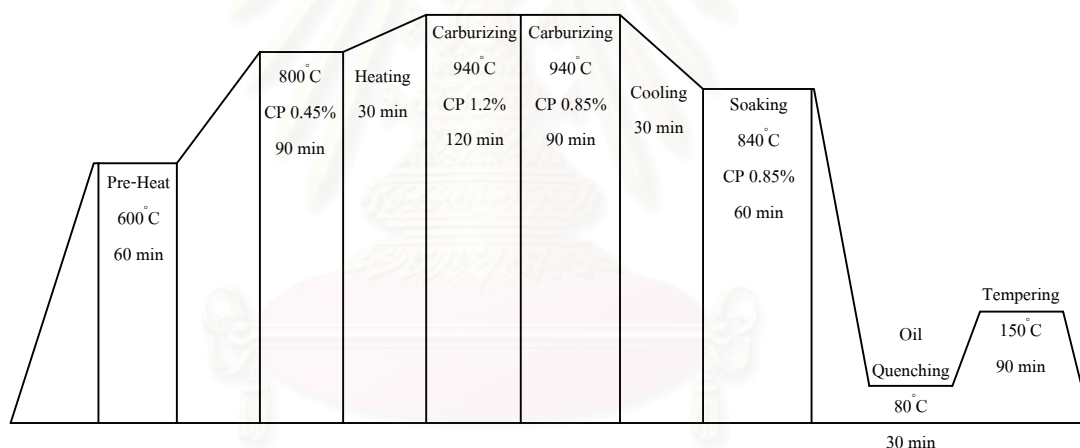
3.3.2 การกำจัดตัวประสาน และการเผาผนึก

ชิ้นงานทดลองที่ขึ้นรูปโดยกระบวนการฉีดขึ้นรูปโลหะผงทำการกำจัดตัวประสานและเผาผนึกด้วยความร้อนแบบต่อเนื่อง โดยทำการทดลองด้วยขั้นตอนการให้ความร้อนที่แตกต่างกัน ดังนี้

ชิ้นงานทดลองที่ขึ้นรูปโดยกระบวนการฉีดขึ้นรูปโลหะผง ทำการกำจัดตัวประสานในวิธีการกำจัดตัวประสานทางความร้อน (Thermal debinding) ในบรรยากาศไนโตรเจน โดยทำการให้ความร้อนในช่วงกำจัดตัวประสานเริ่มจากค่อยๆเพิ่มอุณหภูมิขึ้นไปอยู่ที่ 90°C หลังจากนั้นเพิ่มอุณหภูมิขึ้นไปอยู่ที่ 150°C เพื่อให้ชิ้นงานได้รับความร้อนที่สม่ำเสมอป้องกันการเกิดความเค้นจากความร้อน (thermal stress) แล้วจึงเพิ่มอุณหภูมิอย่างช้าๆ ไปจนถึง 400°C และคงไว้เป็นเวลา 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นเพิ่มอุณหภูมิขึ้นไปอยู่ที่ 500°C แล้วคงไว้ที่อุณหภูมินี้เป็นเวลา 30 นาที โดยใช้เวลาในขั้นตอนกำจัดตัวประสานเป็นเวลา 13 ชั่วโมง เนื่องจากต้องการให้ตัวประสานสลายตัวออกมาในช่วงอุณหภูมิ 400°C และ 500°C ตามผลการทดสอบอุณหภูมิการสลายตัวของตัวประสานที่แสดงไว้ในภาคผนวก ข. หลังจากนั้นเพิ่มอุณหภูมิขึ้นไปอยู่ที่ 800°C แล้วคงไว้ที่อุณหภูมินี้เป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้ชิ้นงานได้รับความร้อนที่สม่ำเสมอ ก่อนเพิ่มอุณหภูมิขึ้นไปอยู่ที่ 1050°C แล้วคงไว้ที่อุณหภูมินี้เป็นเวลา 1 ชั่วโมง พร้อมทั้งควบคุมบรรยากาศในเตาเผาผนึกให้เป็นสุญญากาศเพื่อกำจัดก๊าซไนโตรเจนที่ตกค้างอยู่ในชิ้นงานแล้วจึงเพิ่มอุณหภูมิขึ้นไปที่อุณหภูมิเผาผนึก ทำการทดลองเปลี่ยนอุณหภูมิที่ทำเผาผนึกดังต่อไปนี้ 1200°C , 1250°C , 1300°C และ 1350°C โดยคงอุณหภูมิเผาผนึกไว้เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ในบรรยากาศก๊าซอาร์กอน หลังจากนั้นปล่อยให้เย็นตัวลงมาที่ 800°C โดยใช้เวลา 30 นาทีจึงปล่อยให้เย็นตัวในเตาลงมาที่อุณหภูมิห้อง หลังจากนั้นจึงนำชิ้นงานไปทดสอบสมบัติต่างๆ ประกอบด้วย สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางกล ส่วนผสมทางเคมี และ โครงสร้างจุลภาคต่อไปแล้วจึงนำไปทำการชุบผิวแข็งต่อไป

3.3.3 การชุบผิวแข็ง

ทำการชุบผิวแข็งชิ้นงานด้วยวิธีก๊าซคาร์เบอร์ไรซ์ซึ่งโดยทำการให้ความร้อนแก่ชิ้นงานไปที่ 600°C แล้วคงไว้ที่อุณหภูมินี้เป็นเวลา 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นให้ความร้อนไปที่ 800°C บรรยากาศคาร์บอนมอนอกไซด์โดยมีคาร์บอนความเข้มข้น 0.45% เป็นเวลา 1 ชั่วโมง 30 นาที แล้วจึงเพิ่มอุณหภูมิเป็น 940°C แล้วผ่านบรรยากาศคาร์บอนมอนอกไซด์ที่มีคาร์บอนที่ความเข้มข้น 1.2 % แล้วคงอุณหภูมินี้ไว้ 2 ชั่วโมง หลังจากนั้นทำการผ่านบรรยากาศคาร์บอนมอนอกไซด์ที่มีคาร์บอนที่ความเข้มข้น 0.85 % แล้วคงอุณหภูมินี้ไว้ 1 ชั่วโมง แล้วทำการลดอุณหภูมิลงมาที่ 840°C โดยมีบรรยากาศที่คาร์บอนมีความเข้มข้น 0.85 % แล้วคงอุณหภูมินี้ไว้เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จึงทำการชุบในน้ำมันที่ 80°C แล้วจึงทำการอบคืนตัวที่ 150°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง 30 นาที ซึ่งได้แสดงรายละเอียดในรูปที่ 3.2 แล้วนำชิ้นงานไปทดสอบสมบัติต่างๆ ประกอบด้วย สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางกล ส่วนผสมทางเคมี และโครงสร้างจุลภาคต่อไป

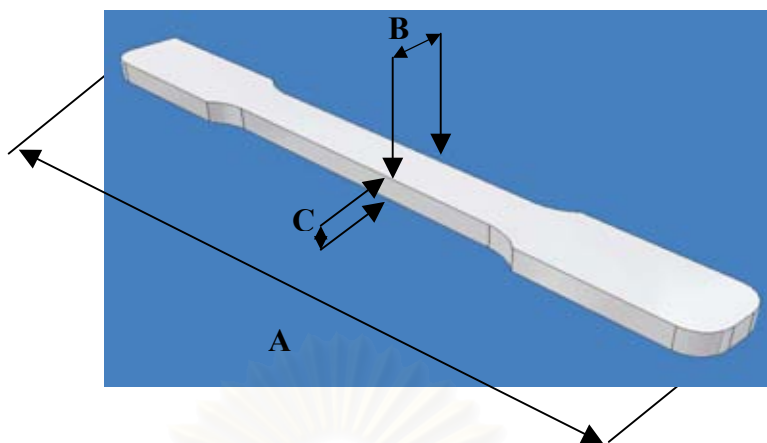


รูปที่ 3.2 แผนภูมิแสดงขั้นตอนการทำการชุบผิวแข็ง

3.3.4 การวัดเปรียบเทียบสมบัติ และ คุณลักษณะของชิ้นงานทดลอง

3.3.4.1 การวัดสมบัติทางกายภาพ

1) การวัดอัตราการหดตัว ทำการวัดโดยการวัดขนาดของชิ้นงานที่ตำแหน่ง A B และ C ดังที่แสดงในรูปที่ 3.3 โดยเวอร์เนียคาร์ลิปเปอร์ทั้งก่อนทำการเผาผนึก หลังทำการเผาผนึก และหลังทำการชุบผิวแข็งเพื่อนำมาทำการเปรียบเทียบอัตราการหดตัวของชิ้นงาน



รูปที่ 3.3 ภาพชิ้นงานทดสอบแรงดึงและตำแหน่งของการวัดขนาดเพื่อหาอัตราการหดตัวของชิ้นงานทดลอง SCM415 ที่ขึ้นรูปโดยกระบวนการ ฉีดขึ้นรูปโลหะผง

2) การวัดค่าความหนาแน่นของชิ้นงานโดยการใช้วิธีการแทนที่ของน้ำ โดยนำเอาชิ้นงาน มาชั่งบนเครื่องชั่งน้ำหนักในอากาศแล้วจึงนำเอาชิ้นงานทดลองไปชั่งน้ำหนักในน้ำโดยเครื่องชั่งดังรูปที่ 3.4 แล้วนำน้ำหนักที่ได้มาคำนวณหาความหนาแน่นของชิ้นงาน

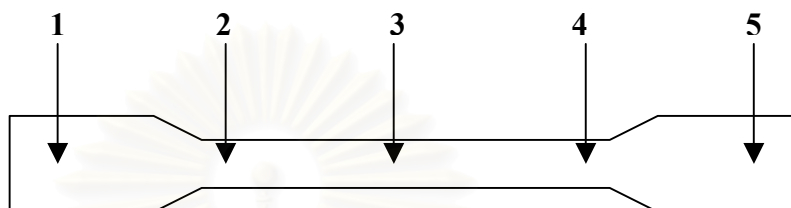


รูปที่ 3.4 ชุดวัดค่าความหนาแน่นของชิ้นงานหลังทำการเผาผืนิก

3.3.4.2 การวัดสมบัติทางกล

1) การวัดความแข็ง นำชิ้นงานที่ผ่านการเผาผืนิกและหลังทำการชุบผิวแข็งมาทำการวัดความแข็งที่ผิวทั้งด้านบนและด้านล่างที่ตำแหน่งต่างๆตามรูปที่ 3.5 โดยใช้เครื่องวัดความแข็ง

แบบ Macro hardness แบบร็อคเวลล์โดยใช้แรงกด 60 kg สำหรับชิ้นงานก่อนชุบผิวแข็งและ 150 kg สำหรับชิ้นงานหลังชุบผิวแข็ง จากนั้นนำชิ้นงานไปตัดและขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 180 320 600 800 1200 และ 2000 ตามลำดับเพื่อทำการวัดความแข็งเปรียบเทียบกับระยะลึกจากผิวด้วยเครื่องวัดความแข็งแบบ Micro Vicker hardness Tester โดยใช้แรงกด 50 g สำหรับชิ้นงานก่อนชุบผิวแข็ง และ 300 g สำหรับชิ้นงานหลังชุบผิวแข็งเพื่อนำค่าความแข็งที่ได้มาทำการเปรียบเทียบกันต่อไป



รูปที่ 3.5 แสดงตำแหน่งของการวัดความแข็งของชิ้นงานทดลอง SCM415 ที่ขึ้นรูปโดยกระบวนการฉีดขึ้นรูปโลหะผง

2) การวัดค่าความต้านทานแรงดึงและการยืดตัว โดยนำชิ้นงานที่ผ่านการเผาผืนิกและชิ้นงานหลังทำการชุบผิวแข็งแล้วมาทำการทดสอบโดยเครื่องทดสอบแรงดึงแบบ Universal testing machine : Intron 8810 Max load 100 โดยใช้อัตราเร็วในการทดสอบแรงดึงที่ 1 มิลลิเมตร/นาที

3.3.4.3 การวิเคราะห์โครงสร้าง

นำชิ้นงานทดลองที่ผ่านการเผาผืนิกและชิ้นงานหลังทำการชุบผิวแข็งมาทำการตัดและขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 180 320 600 800 1200 และ 2000 ตามลำดับ จากนั้นนำไปขัดบนผ้าสักหลาดโดยใช้ผงเพชรขนาด 3 ไมโครเมตร และกัดด้วยสารละลาย 2% Nital (2 ml HNO₃, 98 ml Ethanol หรือ Methanol) จากนั้นทำการถ่ายรูปโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์ชนิดสะท้อนแสง และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดพร้อมอุปกรณ์ EDS

3.3.4.4 การทดสอบส่วนผสมทางเคมี

นำชิ้นงานทดลองที่ผ่านการเผาผืนิกและชิ้นงานหลังทำการชุบผิวแข็งมาทำการตัดชิ้นงานระหว่างบริเวณหมายเลข 3 และ 4 ในรูปที่ 3.5 แล้วขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 180 320 เพื่อปรับผิวชิ้นงานแล้วจึงนำชิ้นงานไปทำการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีด้วยเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ที่ผิว หลังจากนั้นจึงขัดชิ้นงานทดลองลึกลงไป 0.5 และ 1.0 มิลลิเมตรจากระดับผิวชิ้นงานทดลองแล้วจึงนำ

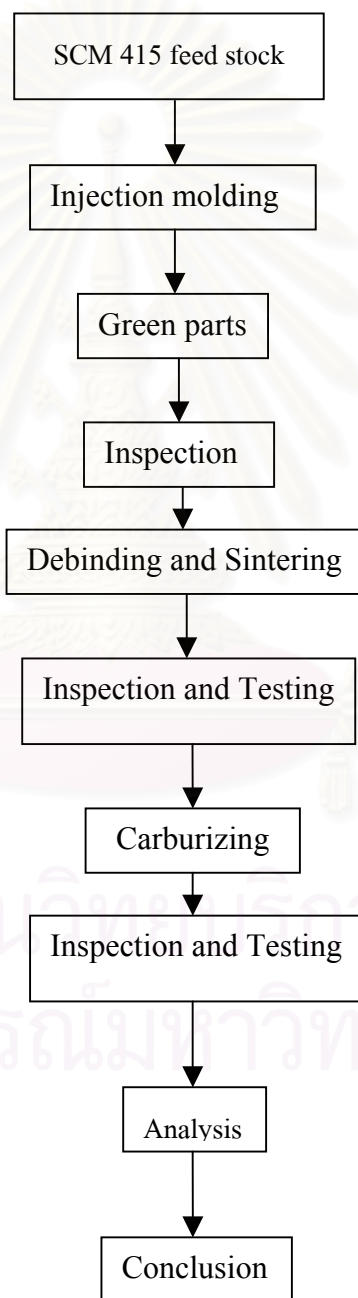
ชิ้นงานไปทำการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีด้วยเครื่องสเปกโทรมิเตอร์ที่ผิวด้านที่ทำการขัดผิว นอกจากนี้
นั้นได้ทำการตัดชิ้นงานให้มีน้ำหนักประมาณ 0.5 กรัมเพื่อนำไปวิเคราะห์หาปริมาณคาร์บอนเฉลี่ยใน
ชิ้นงานด้วยเครื่องวิเคราะห์ปริมาณธาตุคาร์บอนและกำมะถัน



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.4 สรุปขั้นตอนการทดลอง

จากขั้นตอนการทดลองทั้งหมดที่ได้กล่าวมาสามารถสรุปเป็นแผนภูมิขั้นตอนการทดลองดังที่แสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 แผนภูมิแสดงขั้นตอนการดำเนินการทดลอง

บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 การฉีดขึ้นรูป

หลังทำการทดลองฉีดขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบแรงดึงเป็นจำนวน 151 ชิ้น ได้ทำการวัดสมบัติทางกายภาพประกอบด้วย ขนาดของชิ้นงาน และความหนาแน่น

4.1.1 ผลการวัดขนาด

การวัดขนาดของชิ้นงานทดสอบก่อนทำการเผาผนึก เพื่อทำการเปรียบเทียบหาอัตราการหดตัวหลังทำการเผาผนึก โดยแยกวัดชิ้นงานเป็น 4 ชุดแล้วทำการหาค่าเฉลี่ยเพื่อเตรียมทำการเผาผนึกที่อุณหภูมิที่แตกต่างกันแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ขนาดเฉลี่ยของชิ้นงานทดสอบแรงดึงหลังการฉีดขึ้นรูปโลหะผง

อุณหภูมิเผาผนึก (°C)	ขนาดเฉลี่ยของชิ้นงาน(mm)		
	ตำแหน่ง A	ตำแหน่ง B	ตำแหน่ง C
1200	99.66 ± 0.05	6.13 ± 0.01	3.44 ± 0.01
1250	99.67 ± 0.02	6.13 ± 0.01	3.44 ± 0.01
1300	99.69 ± 0.01	6.12 ± 0.01	3.43 ± 0.01
1350	99.68 ± 0.02	6.13 ± 0.01	3.43 ± 0.01

4.1.2 ความหนาแน่น

ก่อนทำการเผาผนึก เพื่อทำการเปรียบเทียบการวัดความหนาแน่นของชิ้นงานทดสอบกับความหนาแน่นจากการคำนวณตามทฤษฎีแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ค่าความหนาแน่นเฉลี่ยของชิ้นงานทดสอบแรงดึง โดยการฉีดขึ้นรูปโลหะผงก่อนทำการเผาผนึก

ค่าความหนาแน่นคำนวณ(g/cm ³)	ค่าความหนาแน่นค่าจริง(g/cm ³)	ค่าความหนาแน่น(%)
5.5087	5.3868±0.0072	97.787

4.2 ผลของอุณหภูมิเผาผนึกต่อสมบัติต่างๆ ของชิ้นงานทดสอบ

การทดสอบคุณสมบัติของชิ้นงาน SCM415 ที่ผ่านการขึ้นรูปโดยกระบวนการฉีดขึ้นรูปโลหะผง หลังทำการเผาผนึกที่อุณหภูมิที่แตกต่างกันประกอบด้วย สมบัติทางกายภาพ ส่วนผสมทางเคมี โครงสร้างจุลภาค และ สมบัติทางกล มีผลดังต่อไปนี้

4.2.1 สมบัติทางกายภาพ

4.2.1.1 ขนาดและอัตราการหดตัว

การวัดขนาดของชิ้นงานทดสอบหลังจากทำการเผาผนึกที่อุณหภูมิที่แตกต่างกัน แสดงในตารางที่ 4.3 และอัตราการหดตัวเฉลี่ยของชิ้นงานทดสอบหลังจากทำการเผาผนึกในตารางที่ 4.4 พบว่าอัตราการหดตัวของชิ้นงานทดสอบที่ตำแหน่ง A ซึ่งเป็นตำแหน่งการวัดตามความยาวมีการเปลี่ยนแปลงของขนาดมากที่สุด โดยมีอัตราการหดตัวเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเผาผนึก

ตารางที่ 4.3 ขนาดเฉลี่ยของชิ้นงานทดสอบแรงดึง โดยการฉีดขึ้นรูปโลหะผงหลังจากทำการเผาผนึกที่อุณหภูมิเผาผนึกที่ต่างกัน

อุณหภูมิเผาผนึก (°C)	ขนาดเฉลี่ยของชิ้นงาน(mm)		
	ตำแหน่ง A	ตำแหน่ง B	ตำแหน่ง C
1200	88.60±0.05	5.40	3.05
1250	88.42±0.03	5.40	3.05
1300	88.19±0.05	5.40	3.04
1350	88.02±0.03	5.39	3.04

ตารางที่ 4.4 อัตราการหดตัวเฉลี่ยของชิ้นงานทดสอบหลังจากทำการเผาผนึกที่อุณหภูมิเผาผนึกที่ต่างกัน

อุณหภูมิเผาผนึก (°C)	อัตราการหดตัว ตำแหน่ง A(%)	อัตราการหดตัว ตำแหน่ง B(%)	อัตราการหดตัว ตำแหน่ง C(%)
1200	11.10	11.91	11.34
1250	11.29	11.91	11.34
1300	11.53	11.76	11.37
1350	11.70	12.07	11.37

4.2.1.2 ความหนาแน่น

ผลการวัดความหนาแน่นเฉลี่ยของชิ้นงานทดสอบหลังทำการเผาผนึกที่อุณหภูมิเผาผนึกที่ต่างกัันดังที่ได้แสดงในตารางที่ 4.5 ปรากฏว่าค่าความหนาแน่นเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มอุณหภูมิการเผาผนึก

ตารางที่ 4.5 ค่าความหนาแน่นเฉลี่ยของชิ้นงานทดสอบหลังจากทำการเผาผนึกที่อุณหภูมิเผาผนึกที่ต่างกัน

อุณหภูมิเผาผนึก (°C)	ความหนาแน่น (g/cm^3)	ความหนาแน่น(%)
1200	7.218 ± 0.034	92.54
1250	7.301 ± 0.004	93.68
1300	7.390 ± 0.042	94.74
1350	7.437 ± 0.011	95.35

หมายเหตุ เปอร์เซนต์ความหนาแน่น คำนวณจากความหนาแน่นทฤษฎี = 7.8 g/cm^3

4.2.2 ส่วนผสมทางเคมี

ส่วนผสมทางเคมีของชิ้นงานทดสอบหลังจากทำการเผาผนึกที่อุณหภูมิเผาผนึกที่ต่างกัันที่แสดงในตารางที่ 4.6 ผลปรากฏว่าปริมาณธาตุผสมมีปริมาณใกล้เคียงกันทั้ง 4 ชุดการทดลอง

ตารางที่ 4.6 ส่วนผสมทางเคมีของชิ้นงานทดสอบหลังทำการเผาผนึกที่อุณหภูมิเผาผนึกที่ต่างกัน

อุณหภูมิ (°C)	Ni (%wt)	Si (%wt)	Mn (%wt)	Cr (%wt)	Mo (%wt)	Cu (%wt)	P (%wt)	S (%wt)
1200	0.060	0.390	0.564	0.941	0.208	0.074	0.009	0.020
1250	0.059	0.292	0.559	0.968	0.206	0.060	0.013	0.027
1300	0.060	0.327	0.594	0.995	0.219	0.061	0.019	0.020
1350	0.060	0.373	0.579	0.985	0.216	0.054	0.010	0.023

และผลการเปรียบเทียบปริมาณคาร์บอนเฉลี่ยที่แสดงในตารางที่ 4.7 ปรากฏว่าชิ้นงานทดสอบที่เผาผนึกที่อุณหภูมิ 1200 °C และ 1250 °C มีปริมาณคาร์บอนเฉลี่ยเท่ากันและมีปริมาณสูงกว่าในชิ้นงานทดสอบที่เผาผนึกที่อุณหภูมิ 1300 °C และ 1350 °C ซึ่งมีปริมาณคาร์บอนเฉลี่ยเท่ากันเช่นเดียวกัน โดยปริมาณคาร์บอนหลังเผาผนึกลดลงจากผงในวัตถุดิบเริ่มต้น (0.333% โดยน้ำหนัก) เพราะเกิดการสูญเสียคาร์บอนในขั้นตอนการเผาผนึก

ตารางที่ 4.7 ปริมาณคาร์บอนเฉลี่ยของชิ้นงานทดสอบหลังทำการเผาผนึกที่อุณหภูมิเผาผนึกต่างกัน

อุณหภูมิเผาผนึก (°C)	ปริมาณคาร์บอนเฉลี่ย(%)
1200	0.21
1250	0.21
1300	0.19
1350	0.19

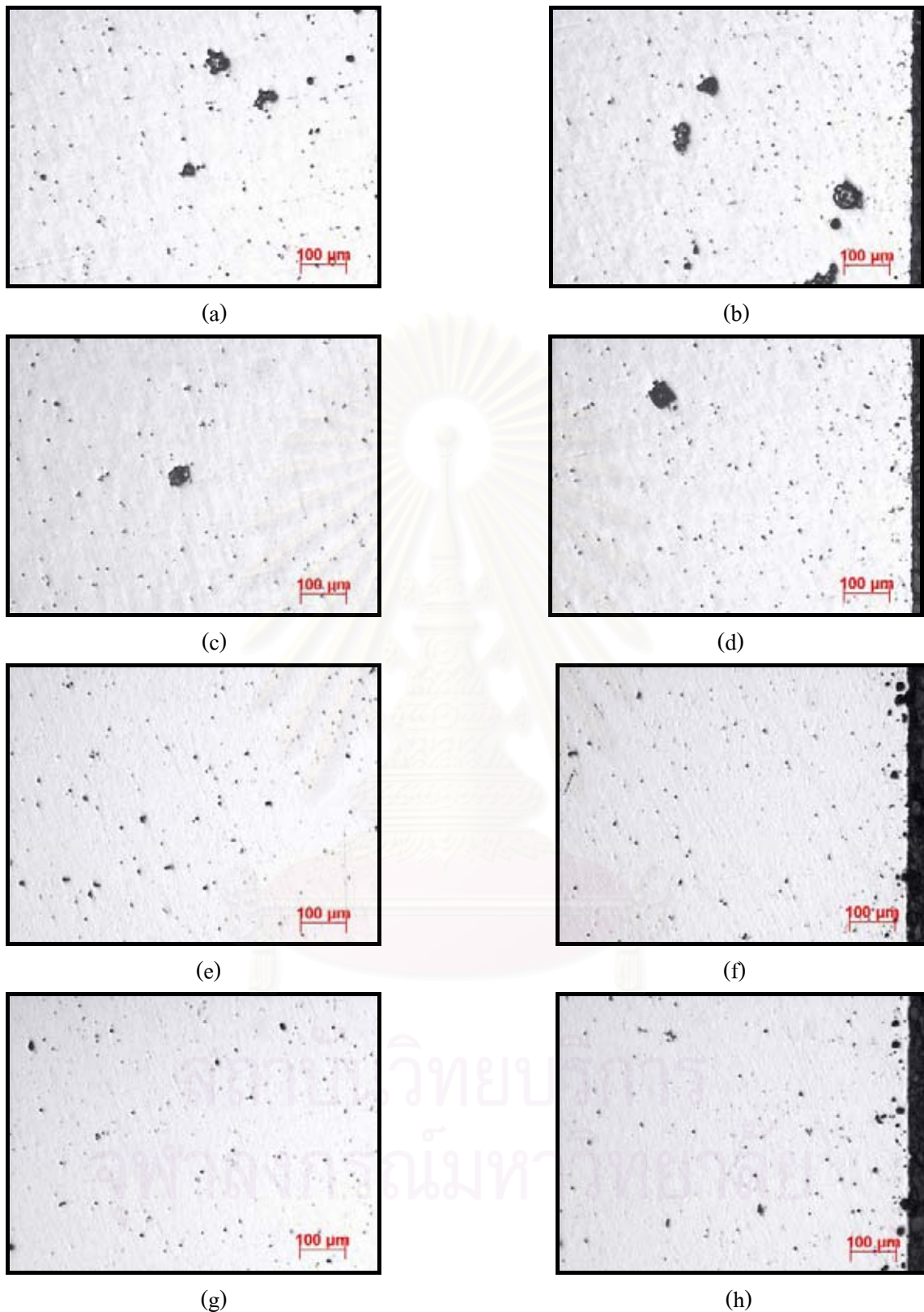
4.2.3 โครงสร้างจุลภาค

จากภาพถ่ายลักษณะรูพรุนของชิ้นงานทดสอบหลังทำการเผาผนึกที่อุณหภูมิเผาผนึกต่างกันในรูปแบบที่ 4.1 ปรากฏว่าลักษณะรูพรุนที่เกิดจะกระจายอยู่ทั่วทั้งชิ้นงานและที่อุณหภูมิเผาผนึก 1200 °C และ 1250 °C จะปรากฏรูพรุนที่มีขนาดใหญ่กระจายอยู่ในชิ้นงานทดสอบดังที่ปรากฏในรูปแบบที่ 4.1(a) 4.1(b) 4.1(c) และ 4.1(d) เพราะที่อุณหภูมิต่ำความสามารถในการแพร่ในชิ้นงานเกิดได้น้อยกว่าที่อุณหภูมิสูง โดยที่อุณหภูมิ 1200 °C จะมีปริมาณรูพรุนขนาดใหญ่มากกว่าที่อุณหภูมิ 1250 °C และชิ้นงาน

ที่ทำการเผาผลาญที่อุณหภูมิ 1300°C และ 1350°C ที่แสดงในรูปที่ 4.1(f) และ 4.1(h) จะปรากฏรูพรุนขนาดใหญ่ที่บริเวณใกล้ผิวเนื่องจากรูพรุนสามารถแพร่ออกไปได้ดีกว่าที่อุณหภูมิสูงกว่า

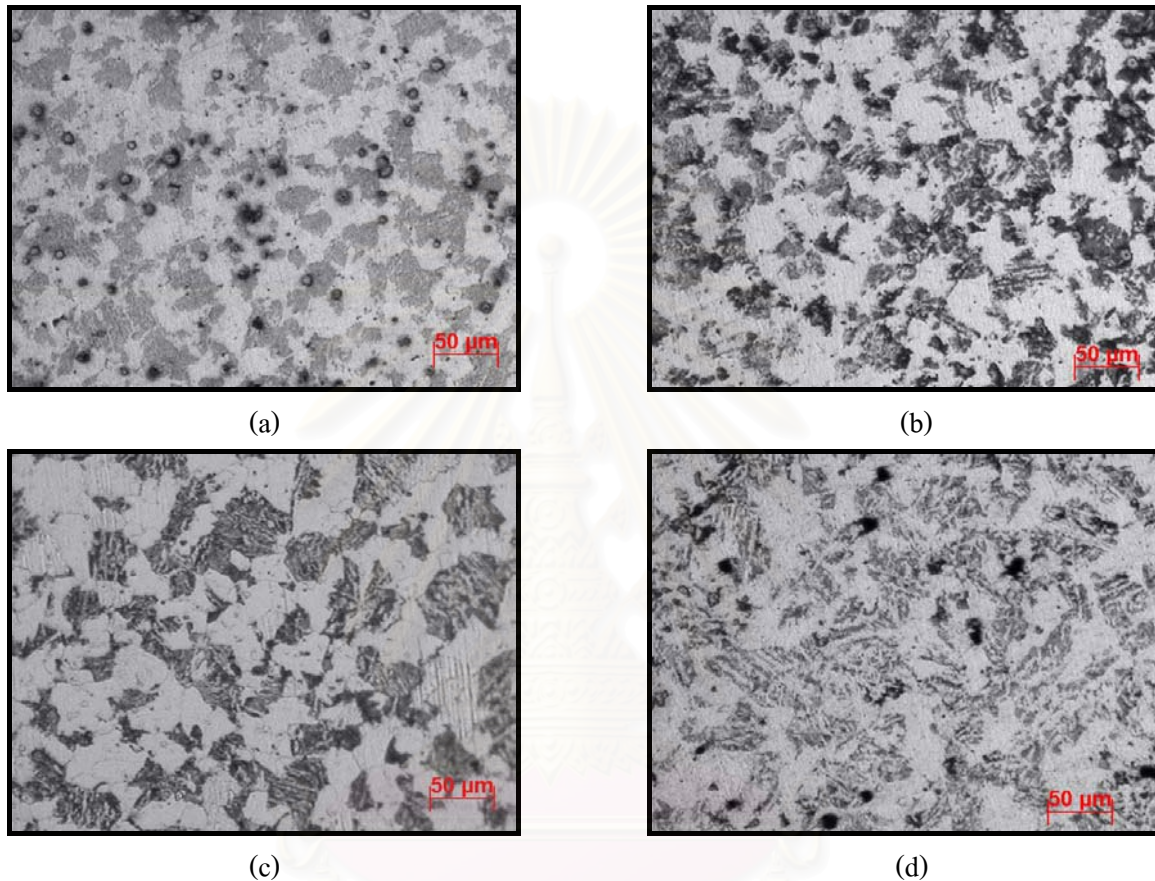


สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายลักษณะรูพรุนในชิ้นงานทดสอบหลังทำการเผาที่อุณหภูมิเผาที่อุณหภูมิต่างกัน ที่กำลังขยาย 50 เท่า (a) 1200 °C (b) 1200 °C(ผิว) (c)1250 °C (d)1250 °C(ผิว) (e)1300 °C (f)1300 °C(ผิว) (g)1350 °C (h)1350 °C(ผิว)

จากการเปรียบเทียบภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคในรูปที่ 4.2 จะพบว่าโครงสร้างจุลภาคในชิ้นงานทดสอบประกอบด้วยเฟสเฟอร์ไรต์ (พื้นที่สีอ่อน) และเฟส เพลิลไลต์ (พื้นที่สีเข้ม) โดยที่ชิ้นงานที่ทำการเผาผืนที่อุณหภูมิสูงกว่าคือที่ 1350°C ในรูปที่ 4.2 (d) จะมีขนาดเกรนเพลิลไลต์ใหญ่ที่สุดและมีแนวโน้มลดลงตามอุณหภูมิเผาผืน



รูปที่ 4.2 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคในชิ้นงานทดสอบหลังทำการเผาผืนที่อุณหภูมิเผาผืนต่างกันที่ กำลังขยาย 100 เท่า (a) 1200°C (b) 1250°C (c) 1300°C (d) 1350°C

4.2.4 สมบัติทางกล

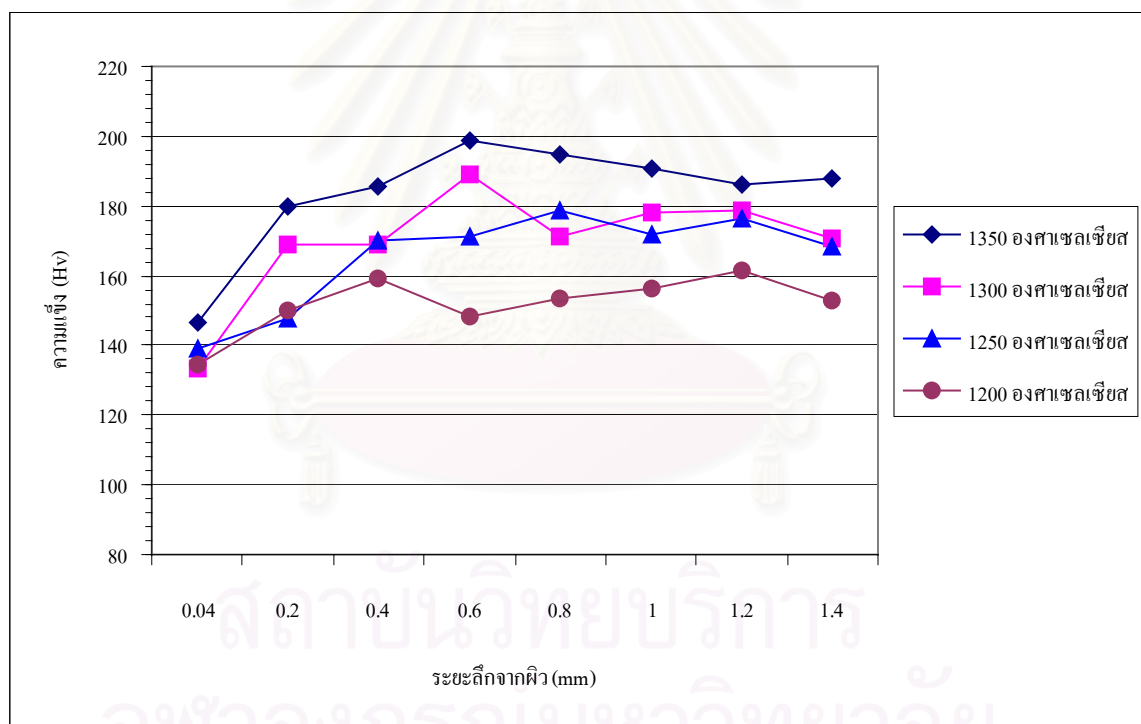
4.2.4.1 ความแข็ง

ผลการวัดความแข็งที่ผิวที่วัดได้จากชิ้นงานทดสอบหลังทำการเผาผืนที่อุณหภูมิเผาผืนต่างกันที่แสดงในตารางที่ 4.8 จะพบว่าความแข็งที่ผิวของชิ้นงานจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่ทำการเผาผืนและจากรูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งกับระยะลึกจากผิวชิ้นงานทดสอบ

ปรากฏว่าค่าความแข็งเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิเผาผนึกแต่ที่ความลึกใกล้ผิวจะมีค่าความแข็งที่ต่ำใกล้เคียงกันเนื่องจากเกิดการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวในช่วงการเผาผนึก

ตารางที่ 4.8 ค่าความแข็งที่ผิวเฉลี่ยของชิ้นงานทดสอบหลังทำการเผาผนึกที่อุณหภูมิเผาผนึกที่ต่างกัน

อุณหภูมิเผาผนึก (°C)	ความแข็ง(HV)
1200	113.50±2.03
1250	117.90±1.84
1300	130.36±0.97
1350	151.12±1.62



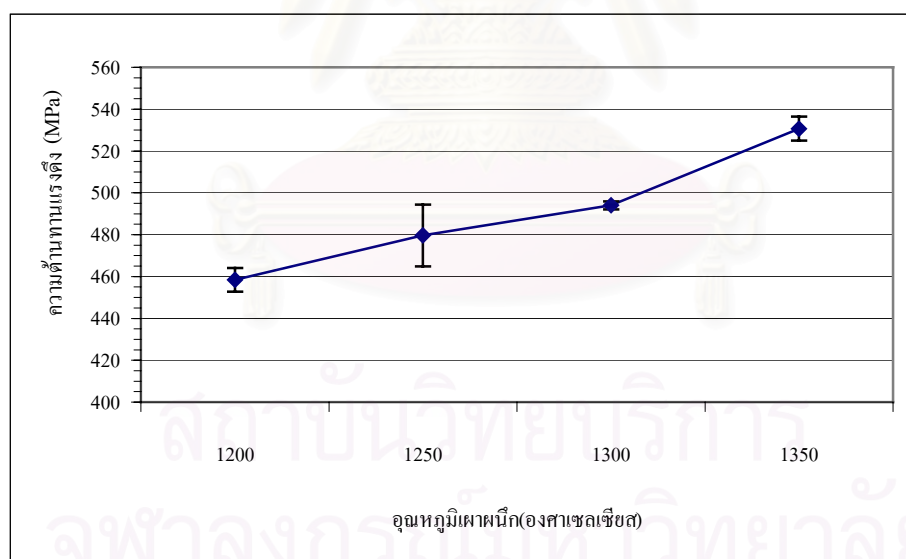
รูปที่ 4.3 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งกับระยะลึกจากผิวชิ้นงานทดสอบหลังทำการเผาผนึกที่อุณหภูมิเผาผนึกที่ต่างกัน

4.2.4.2 ความต้านทานแรงดึง

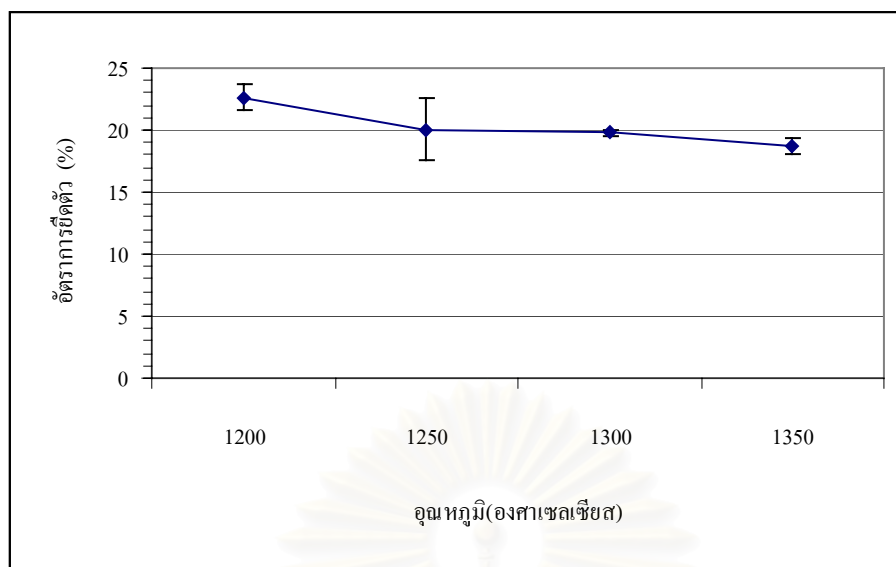
ผลการทดสอบแรงดึงในตารางที่ 4.9 ผลปรากฏว่าความต้านทานแรงดึงของชิ้นงานทดสอบมีแนวโน้มมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มอุณหภูมิที่ทำการเผาผนึกดังที่ได้แสดงในรูปที่ 4.4 และอัตราการยืดตัวมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเผาผนึกเพิ่มขึ้นดังที่ได้แสดงในรูปที่ 4.5

ตารางที่ 4.9 ค่าความต้านทานแรงดึงและอัตราการยืดตัวของชิ้นงานทดลองที่อุณหภูมิเผาผนึกที่ต่างกัน

อุณหภูมิเผาผนึก (°C)	ความต้านทานแรงดึง (MPa)	อัตราการยืดตัว (%)
1200	458.43±5.59	22.66±1.11
1250	479.67±14.78	20.02±2.50
1300	494.03±1.89	19.79±0.24
1350	530.67±5.77	18.76±0.62



รูปที่ 4.4 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานแรงดึงกับอุณหภูมิเผาผนึก



รูปที่ 4.5 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการช้ำตัวและอุณหภูมิเผาผนึก

4.3 ผลของอุณหภูมิเผาผนึกต่อสมบัติต่างๆ ของชิ้นงานทดสอบหลังชุบผิวแข็ง

ภายหลังทำการชุบผิวแข็งได้ทำการทดสอบสมบัติต่างๆประกอบด้วย สมบัติทางกายภาพ ปริมาณคาร์บอน โครงสร้างจุลภาค และสมบัติทางกล ดังรายละเอียดต่อไปนี้

4.3.1 สมบัติทางกายภาพ

4.3.1.1 ขนาดและอัตราการหดตัว

ผลการวัดขนาดของชิ้นงานทดสอบหลังทำการชุบผิวแข็งพบว่า ขนาดของชิ้นงานมีขนาดเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยดังที่ได้แสดงในตารางที่ 4.10 โดยที่มีอัตราการหดตัวที่ลดลงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับขนาดชิ้นงานหลังทำการเผาผนึกดังที่แสดงในตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.10 ขนาดเฉลี่ยของชิ้นงานทดสอบแรงดึง โดยการฉีดขึ้นรูปโลหะผง หลังทำการชุบผิวแข็ง

อุณหภูมิเผาพูนิก (°C)	ขนาดเฉลี่ยของชิ้นงาน(mm)		
	ตำแหน่ง A	ตำแหน่ง B	ตำแหน่ง C
1200	88.50±0.02	5.45±0.01	3.09±0.01
1250	88.35±0.05	5.44±0.00	3.08±0.01
1300	88.21±0.04	5.43±0.01	3.09±0.00
1350	88.05±0.03	5.43±0.01	3.08±0.00

ตารางที่ 4.11 อัตราการหดตัวเฉลี่ยของชิ้นงานทดสอบหลังจากทำการชุบผิวแข็ง

อุณหภูมิ เผาพูนิก (°C)	อัตราการหดตัว ตำแหน่ง A(%)	อัตราการหดตัว ตำแหน่งB(%)	อัตราการหดตัว ตำแหน่งC(%)
1200	11.20	11.10	10.17
1250	11.36	11.25	10.46
1300	11.52	11.27	9.91
1350	11.67	11.41	10.20

4.3.1.2 ความหนาแน่น

จากผลการวัดความหนาแน่นของชิ้นงานทดสอบหลังทำการชุบผิวแข็งพบว่าความหนาแน่นของชิ้นงานลดลงจากความหนาแน่นหลังทำการเผาพูนิกและชิ้นงานที่มีค่าความหนาแน่นหลังทำการชุบแข็งมากที่สุดยังคงเป็นชิ้นงานที่เผาพูนิกที่อุณหภูมิ 1350°C และมีค่าลดลงตามอุณหภูมิการเผาพูนิก ดังได้แสดงในตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.12 ค่าความหนาแน่นเฉลี่ยของชิ้นงานทดสอบหลังจากทำการเผาผนึกที่อุณหภูมิเผาผนึกที่ต่างกันหลังทำการชุบผิวแข็ง

อุณหภูมิเผาผนึก (°C)	ความหนาแน่น(g/cm ³)	ความหนาแน่น(%)
1200	7.212±0.032	92.46
1250	7.272±0.022	93.23
1300	7.335±0.024	94.04
1350	7.366±0.021	94.43

4.3.1.3 ส่วนผสมทางเคมี

ผลการทดสอบหาปริมาณคาร์บอนเฉลี่ยในชิ้นงานทดสอบหลังทำการชุบผิวแข็งที่แสดงในตารางที่ 4.13 ปรากฏว่าปริมาณคาร์บอนเฉลี่ยในชิ้นงานมีค่าใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 4.13 ปริมาณคาร์บอนเฉลี่ยของชิ้นงานทดลองที่ทำการเผาผนึกที่อุณหภูมิเผาผนึกต่างกันหลังทำการชุบผิวแข็ง

อุณหภูมิเผาผนึก (°C)	ปริมาณคาร์บอนเฉลี่ยหลังชุบผิวแข็ง(%wt)
1200	0.60
1250	0.61
1300	0.58
1350	0.58

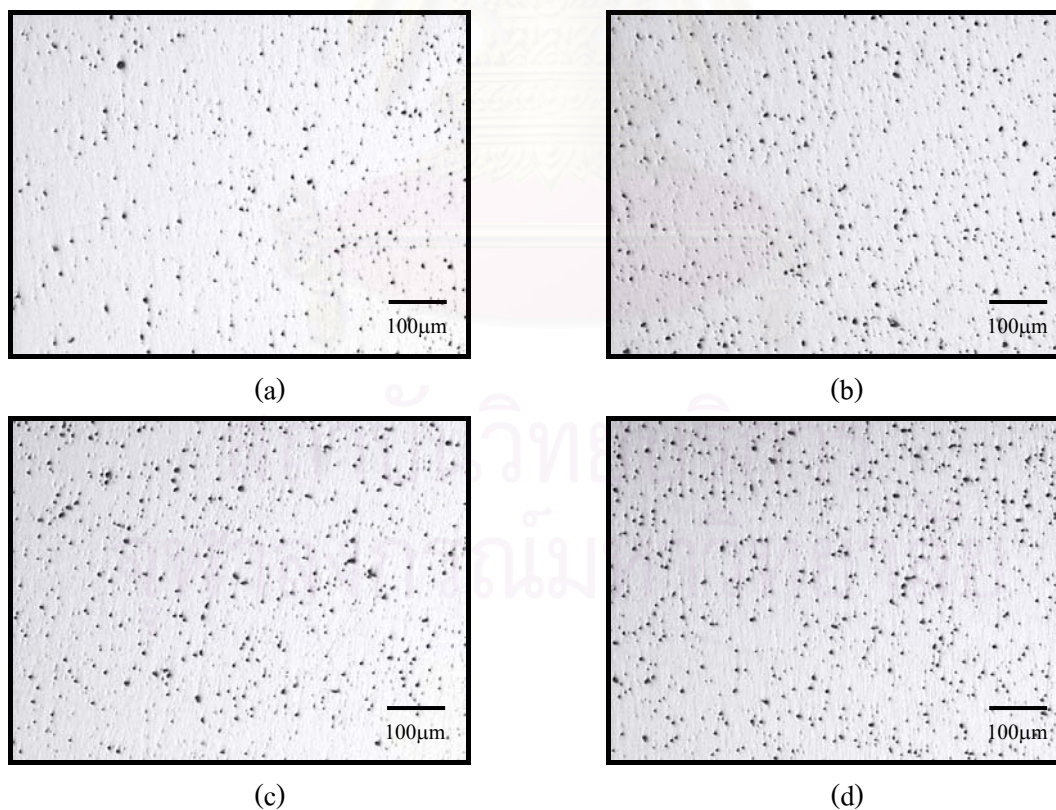
ผลการทดสอบหาปริมาณคาร์บอนที่บริเวณผิว ระยะลึกจากผิว 0.5 มิลลิเมตร และ 1.0 มิลลิเมตร ที่แสดงในตาราง ที่ 4.14 ปรากฏว่าที่ระยะลึกที่ใกล้ผิวจะมีปริมาณคาร์บอนสูงกว่าระยะลึกที่ใกล้แกนกลางชิ้นงาน และปริมาณคาร์บอนที่ผิวหลังชุบผิวแข็งของชิ้นงานที่ทำการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1350 °C มีปริมาณมากที่สุด แต่ที่แกนกลางชิ้นงานที่ทำการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1350 °C มีปริมาณคาร์บอนน้อยที่สุด ในทางตรงข้ามปริมาณคาร์บอนที่แกนกลางหลังชุบผิวแข็งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิการเผาผนึกลดลง โดยที่ชิ้นงานที่ทำการเผาผนึกที่ 1200 °C มีปริมาณคาร์บอนที่ใกล้แกนกลางหลังชุบผิวแข็งสูงที่สุด

ตารางที่ 4.14 ปริมาณคาร์บอนเฉลี่ยของชิ้นงานทดสอบที่ทำการเผาผนึกที่อุณหภูมิเผาผนึกต่างกันหลังทำการชุบแข็งที่ระยะลึกจากผิว 0.5 มิลลิเมตรและ 1.0 มิลลิเมตร

อุณหภูมิเผาผนึก (°C)	ปริมาณคาร์บอนเฉลี่ย(%)		
	ที่ผิว	ระยะลึกจากผิว 0.5 มิลลิเมตร	ระยะลึกจากผิว 1.0 มิลลิเมตร
1200	0.785	0.696	0.456
1250	0.829	0.664	0.433
1300	0.993	0.640	0.404
1350	1.169	0.615	0.359

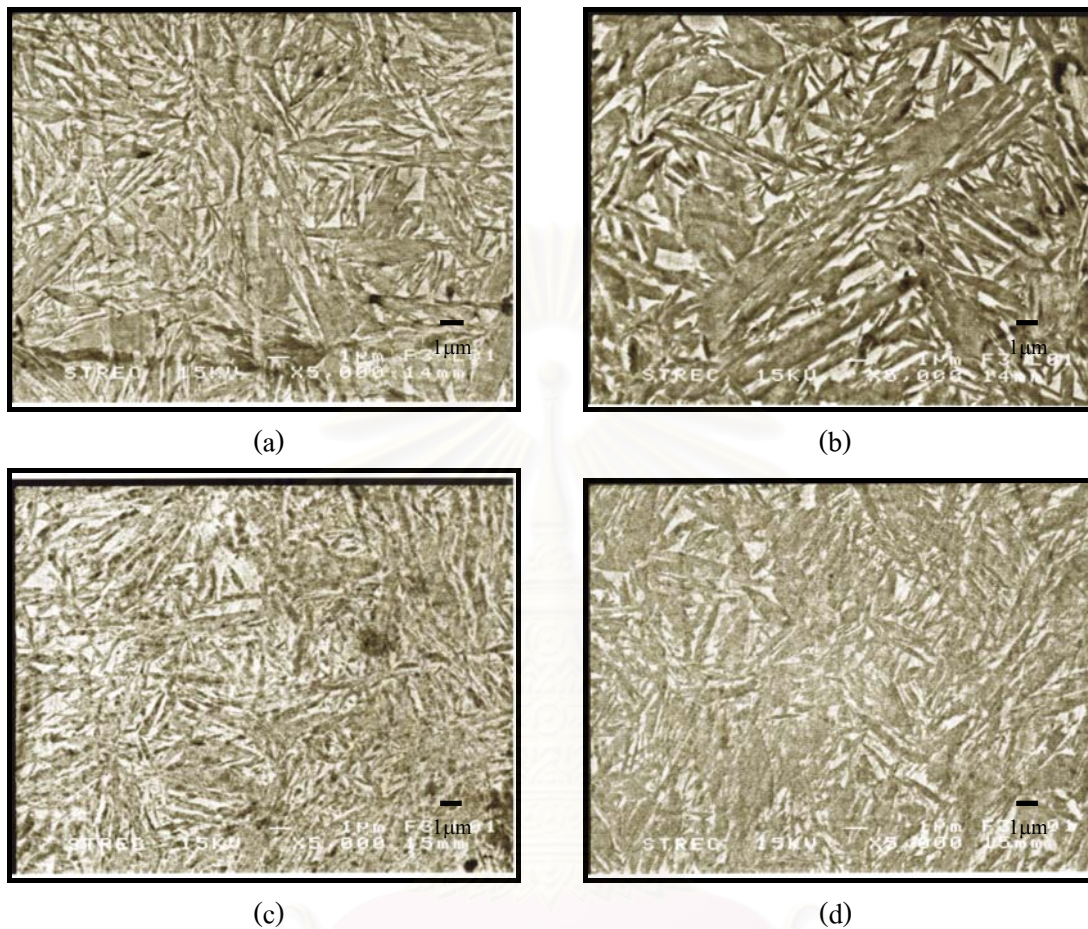
4.3.2 โครงสร้างจุลภาค

ภาพถ่ายรูพรุนในชิ้นงานทดสอบหลังทำการชุบผิวแข็ง ดังที่แสดงในรูปที่ 4.6 จะพบว่าลักษณะของรูพรุนในชิ้นงานทดสอบที่ทำการเผาผนึกที่อุณหภูมิเผาผนึกต่างกัน มีขนาดและการกระจายตัวในชิ้นงาน คล้ายกัน



รูปที่ 4.6 ภาพถ่ายลักษณะรูพรุนในชิ้นงานทดสอบทำการเผาผนึกที่อุณหภูมิเผาผนึกต่างกัน หลังทำการชุบผิวแข็ง ที่กำลังขยาย 50 เท่า (a) 1200 °C (b) 1250 °C (c) 1300 °C (d) 1350 °C

จากภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานทดสอบหลังทำการชุบผิวแข็งในรูปที่ 4.7 จะพบโครงสร้างจุลภาคไม่แตกต่างกัน โดยจะพบเฟสมาร์เทนไซต์ในชิ้นงานทดสอบ



รูปที่ 4.7 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคในชิ้นงานทดสอบทำการเผาที่อุณหภูมิเผาที่อุณหภูมิแตกต่างกันหลังทำการชุบผิวแข็ง ที่กำลังขยาย 5000 เท่า (a) 1200 °C (b) 1250 °C (c) 1300 °C (d) 1350 °C

4.3.3 สมบัติทางกล

4.3.3.1 ความแข็ง

ผลการวัดความแข็งเฉลี่ยที่ผิวของชิ้นงานทดสอบหลังทำการชุบผิวแข็งที่ได้แสดงในตารางที่ 4.15 พบว่าชิ้นงานทดสอบที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูงกว่าจะมีค่าความแข็งเฉลี่ยที่ผิวสูงที่สุดและมีแนวโน้มลดลงตามอุณหภูมิที่ทำการเผาก่อนนำมาทำการชุบผิวแข็ง

ตารางที่ 4.15 ค่าความแข็งที่ผิวเฉลี่ยของชิ้นงานทดลองที่อุณหภูมิเผาผนึกที่ต่างกันหลังทำการชุบแข็ง

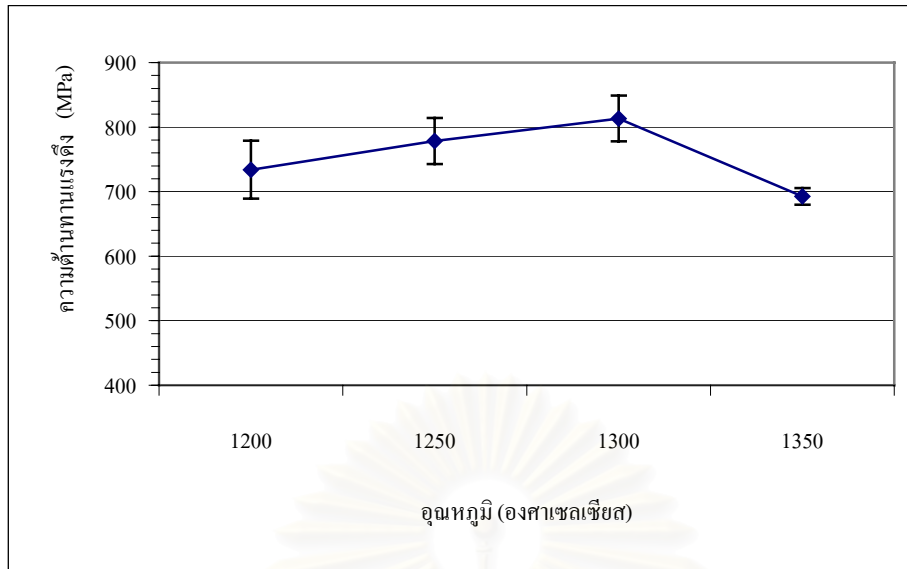
อุณหภูมิเผาผนึก (°C)	ความแข็ง(HV)
1200	730.92±2.28
1250	742.10±2.84
1300	756.92±4.32
1350	762.38±5.04

4.3.3.2 ความต้านทานแรงดึง

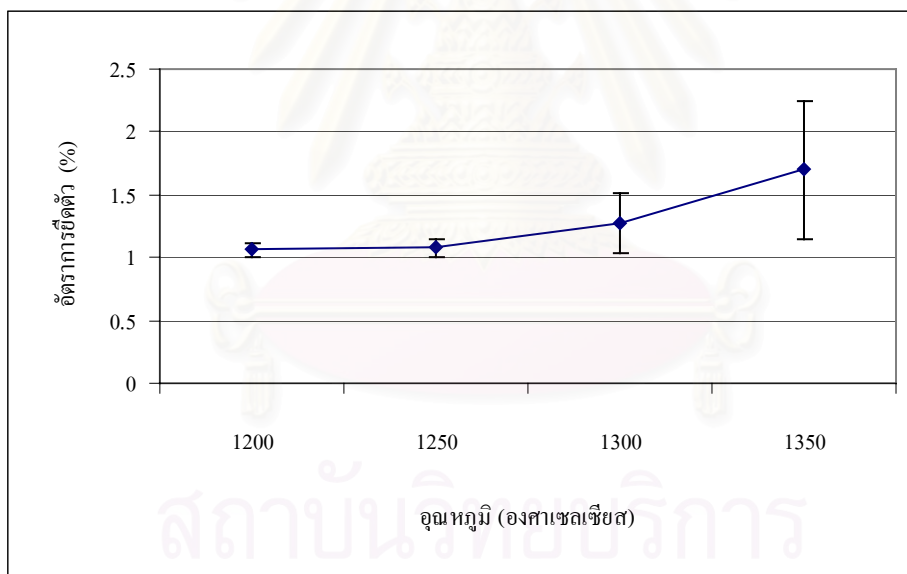
ผลการทดสอบความต้านทานแรงดึงที่แสดงในตารางที่ 4.16 ปรากฏว่าชิ้นงานที่ทำการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1300 °C มีค่าความต้านทานแรงดึงสูงที่สุดและชิ้นงานที่ทำการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1350 °C มีค่าความต้านทานแรงดึงต่ำที่สุดดังแสดงในรูปที่ 4.9 และผลการทดสอบอัตราการยืดตัวที่แสดงในรูปที่ 4.10 พบว่ามีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิเผาผนึกก่อนทำการชุบแข็ง

ตารางที่ 4.16 ค่าความต้านทานแรงดึงและอัตราการยืดตัวเฉลี่ยของชิ้นงานทดลองที่อุณหภูมิเผาผนึกที่ต่างกันหลังทำการชุบแข็ง

อุณหภูมิเผาผนึก (°C)	ความต้านทานแรงดึง (MPa)	อัตราการยืดตัว (%)
1200	734.07±45.12	1.06±0.06
1250	778.42±35.57	1.08±0.07
1300	813.44±35.29	1.27±0.24
1350	692.79±12.81	1.70±0.55



รูปที่ 4.8 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานแรงดึงกับอุณหภูมิเผาผนึกหลังทำการชุบผิวแข็ง



รูปที่ 4.9 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการยัดตัวและอุณหภูมิเผาผนึกหลังทำการชุบผิวแข็ง

บทที่ 5

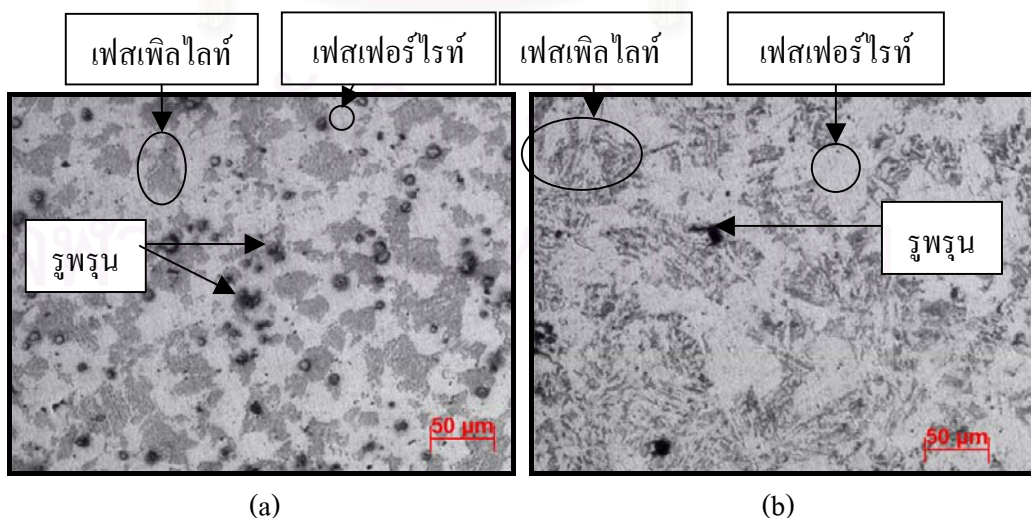
อภิปรายผลการทดลอง

5.1 ผลของอุณหภูมิเผาผนึกต่อสมบัติต่างๆของชิ้นงานทดสอบ

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าอุณหภูมิของการเผาผนึกมีผลต่อสมบัติของชิ้นงานทดลองโลหะ SCM415 ที่ขึ้นรูปโดยกระบวนการฉีดขึ้นรูปโลหะผงประกอบด้วย ผลต่อสมบัติทางกายภาพ ผลต่อโครงสร้างจุลภาค และผลต่อสมบัติทางกล ตามรายละเอียดต่อไปนี้

5.1.1 ผลของอุณหภูมิเผาผนึกต่อโครงสร้างจุลภาค

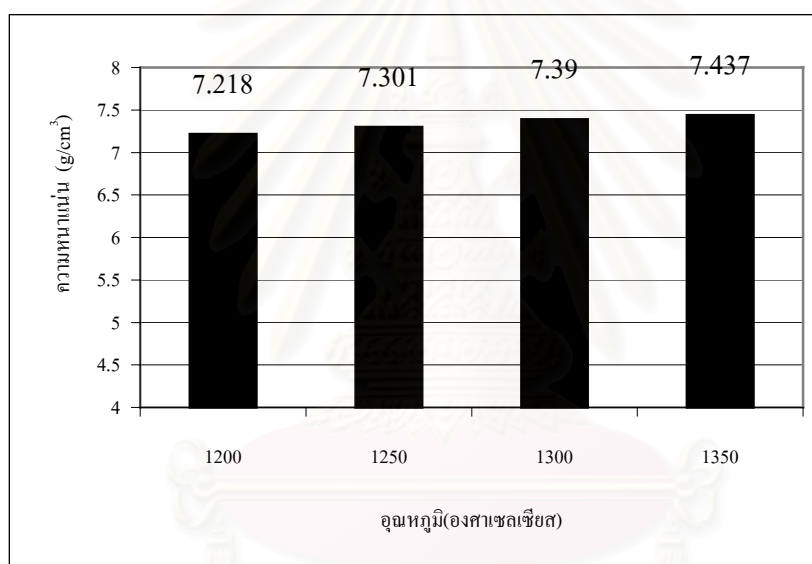
บทบาทของอุณหภูมิเผาผนึกที่มีผลต่อโครงสร้างจุลภาค จากผลการทดลองเมื่ออุณหภูมิเผาผนึกเพิ่มขึ้นส่งผลให้ขนาดเกรนใหญ่ขึ้นและปริมาณรูพรุนลดลง โดยชิ้นงานมีลักษณะเป็นเหล็กกล้าไฮโปยูเทคตอยด์ ประกอบด้วยเฟสเฟอร์ไรท์ และเฟสเพิลไลต์ เมื่อทำการเผาผนึกที่อุณหภูมิเผาผนึกสูงกว่าทำให้อะตอมสามารถเคลื่อนที่ได้ดีกว่าเนื่องจากกลไกการแพร่ของอะตอมที่ถูกระตุ้นด้วยความร้อน โดยที่อุณหภูมิสูงอะตอมมีพลังงานกระตุ้นให้เกิดการสั่นตัวสูงจึงสามารถแพร่ได้ดีกว่าและทำให้อนุภาคประสานกันได้ดีกว่าส่งผลให้เกรนใหญ่ขึ้นและในขณะเดียวกันที่อุณหภูมิที่สูงก็ทำให้เกิดกลไกการแพร่ของอะตอมเข้าไปแทนที่ช่องว่าง(vacancy)ได้มากกว่า จึงทำให้ช่องว่างในชิ้นงานลดลง ส่งผลให้ปริมาณรูพรุนลดลงโดยที่ขนาดเกรนของชิ้นงานที่ทำการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1350°C มีขนาดใหญ่กว่าและมีปริมาณรูพรุนน้อยกว่าชิ้นงานที่ทำการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1200°C ดังที่แสดงในรูปที่ 5.1



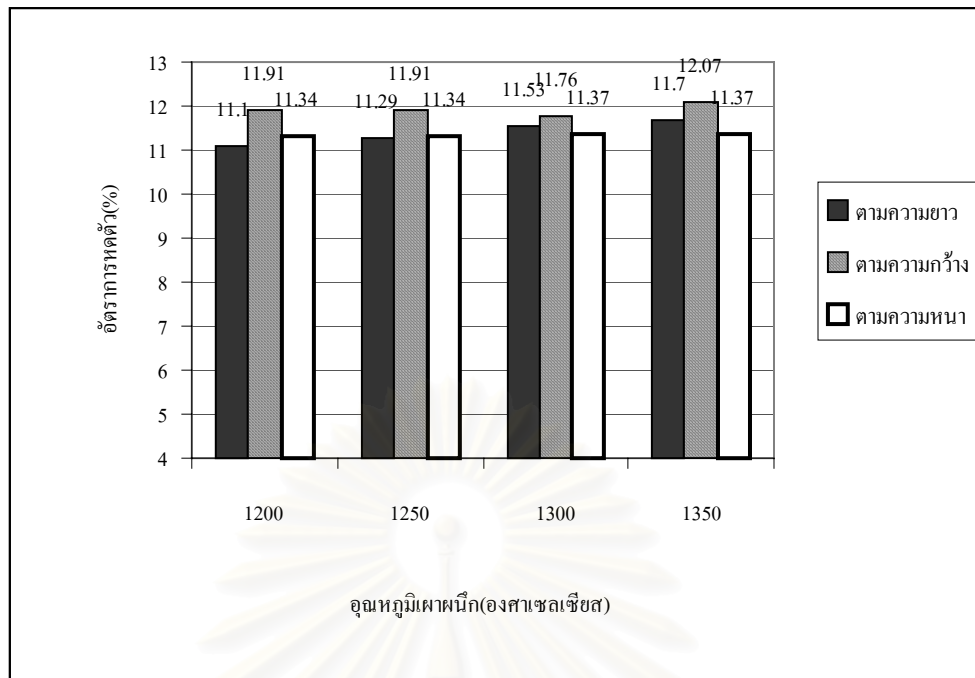
รูปที่ 5.1 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคในชิ้นงานทดสอบหลังทำการเผาผนึกที่อุณหภูมิเผาผนึกต่างกันที่กำลังขยาย 100 เท่า (a) อุณหภูมิเผาผนึก 1200°C (b) อุณหภูมิเผาผนึก 1350°C

5.1.2 ผลของอุณหภูมิเผาผนึกต่อสมบัติทางกายภาพ

จากผลการทดลองทำการเผาผนึกที่ อุณหภูมิ 1200 °C 1250 °C 1300 °C และ 1350 °C พบว่าอัตราการหดตัวมีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีแนวโน้มที่ชิ้นงานที่เผาผนึกที่อุณหภูมิสูงจะมีค่าความหนาแน่นและอัตราการหดตัวที่สูงและลดลงตามการลดลงของอุณหภูมิเผาผนึกดังที่แสดงในรูปที่ 5.2 และ รูปที่ 5.3 ตามลำดับ เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงกว่ามีพลังงานกระตุ้นการเคลื่อนที่ของอะตอมและช่องว่าง (vacancy) สูงกว่าส่งผลให้อะตอมสามารถเคลื่อนที่โดยกลไกการแพร่ได้ดีกว่า ทำให้อุณหภูมิของผงโลหะประสานกันได้ง่าย โดยอะตอมมีการเคลื่อนที่ทั้งแบบการแพร่ตามพื้นผิว การแพร่ภายในผลึกของเกรนและ การแพร่ตามขอบเกรน เมื่อรูพรุนที่มีอยู่ในชิ้นงานถูกอะตอมแพร่เข้าไปแทนที่ช่องว่างส่งผลให้รูพรุนในชิ้นงานลดลงจึงทำให้เกิดการหดตัวมากขึ้นเป็นผลให้ความหนาแน่นเพิ่มขึ้น



รูปที่ 5.2 แผนภูมิแสดงค่าความหนาแน่นของชิ้นงานทดสอบหลังทำการเผาผนึกที่อุณหภูมิเผาผนึกต่างกัน



รูปที่ 5.3 อัตราการบาดเจ็บเฉลี่ยของชิ้นงานทดสอบหลังจากทำการเผาผนึกที่อุณหภูมิเผาผนึกที่ต่างกัน

5.1.3 ผลของอุณหภูมิเผาผนึกต่อสมบัติทางกล

จากผลการทดสอบค่าความแข็งและทดสอบแรงดึงของชิ้นงานหลังทำการเผาผนึกปรากฏว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิเผาผนึกมีผลให้ค่าความแข็งเฉลี่ยและความต้านทานแรงดึงเพิ่มขึ้น โดยที่ชิ้นงานที่ทำการเผาผนึกที่ 1350 °C มีค่าความแข็งและความต้านทานแรงดึงสูงสุดและมีแนวโน้มลดลงตามอุณหภูมิเผาผนึก

เมื่อความหนาแน่นเพิ่มขึ้นทำให้อะตอมมีพันธะยึดเหนี่ยวกับอะตอมข้างเคียงแข็งแรงขึ้นในขณะที่เดียวกันปริมาตรรูพรุนลดลงทำให้ชิ้นงานมีพื้นที่ในการรับแรงเพิ่มขึ้น เนื่องจากบริเวณที่เป็นรูพรุนของชิ้นงานจะมีค่าความเข้มของความเค้น (stress concentration) ที่สูงซึ่งเมื่อเกิดแรงกระทำต่อชิ้นงานรูพรุนจะเกิดการแตกหักได้ง่ายดังนั้นเมื่อรูพรุนมีปริมาณลดลงจากอุณหภูมิเผาผนึกที่เพิ่มขึ้นจึงทำให้ชิ้นงานแข็งแรงขึ้น

5.2 ผลของการชุบผิวแข็งด้วยวิธีก๊าซคาร์เบอร์ไรซ์ซึ่งต่อสมบัติต่างๆของชิ้นงานทดสอบ

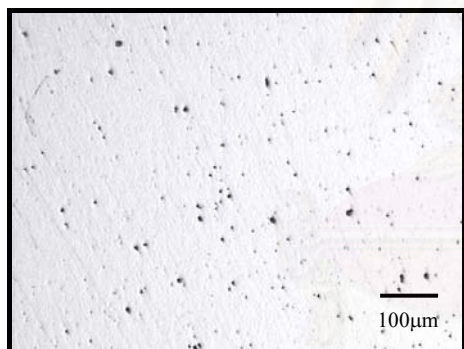
ผลของอุณหภูมิที่มีต่อสมบัติของชิ้นงานทดลองผงโลหะ SCM 415 ที่ขึ้นรูปโดยกระบวนการฉีดขึ้นรูปโลหะผงประกอบด้วย ผลต่อสมบัติทางกายภาพ ผลต่อโครงสร้างจุลภาค และผลต่อสมบัติทางกล มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

5.2.1 ผลของการชุบผิวแข็งด้วยวิธีก๊าซคาร์เบอร์ไรซ์ซึ่งต่อโครงสร้างจุลภาค

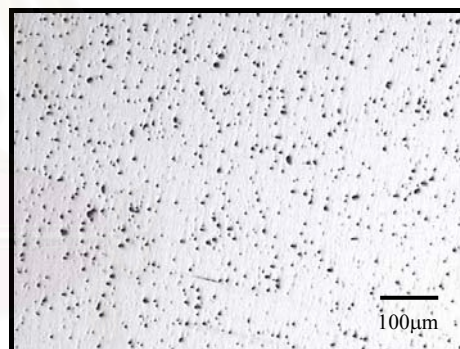
ผลจากการชุบผิวแข็งทำให้ในชิ้นงานมีขนาดของรูพรุนที่ใหญ่ขึ้นกระจายอยู่ทั่วชิ้นงาน ดังที่แสดงในรูปที่ 5.4 และได้โครงสร้างเป็นเฟสมาร์เทนไซต์เหมือนกันทั้งหมด

ในขั้นตอนการชุบผิวแข็งเมื่อชิ้นงานได้รับความร้อนที่ 940°C เป็นเวลานานเสมือนการเผาผนึกอีกครั้ง ทำให้รูพรุนขนาดเล็ก (micro pores) ที่มีจำนวนมากซึ่งมีพลังงานพื้นผิวมากและมีเสถียรภาพน้อย เมื่อได้รับความร้อนในช่วงทำการชุบผิวแข็งรูพรุนขนาดเล็กจึงรวมตัวกันให้มีขนาดใหญ่ขึ้นเพื่อลดพลังงานพื้นผิวลงทำให้มีเสถียรภาพมากขึ้น ดังนั้นจากภาพถ่ายลักษณะรูพรุนจึงสามารถสังเกตเห็นรูพรุนที่มีขนาดใหญ่ขึ้นหลังทำการชุบผิวแข็ง

ปัจจัยที่ทำให้เกิดเฟสมาร์เทนไซต์คืออัตราการเย็นตัวที่รวดเร็วหลังจากให้ความร้อนและผ่านก๊าซที่มีปริมาณคาร์บอนในอัตราที่เหมาะสมเพื่อเพิ่มปริมาณคาร์บอนในชิ้นงานแล้วจึงทำให้ชิ้นงานเย็นตัวลงจาก 840°C อย่างรวดเร็วโดยการชุบในน้ำมันที่ 80°C ทำให้โครงสร้างออสเทนไนท์เย็นตัวลงอย่างรวดเร็วอะตอมคาร์บอนไม่สามารถที่จะแยกตัวออกมาได้ทันจึงเกิดการบิดเบี้ยวของกลุ่มอะตอมที่ประกอปกันเป็นเฟลนที่บิดเบี้ยวจนได้เป็นเฟสมาร์เทนไซต์



(a)



(b)

รูปที่ 5.4 ภาพถ่ายลักษณะรูพรุนในชิ้นงานที่ทำการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1300°C ที่กำลังขยาย 50 เท่า

(a) ก่อนทำการชุบผิวแข็ง (b) หลังทำการชุบผิวแข็ง

5.2.2 ผลของการชุบผิวแข็งด้วยวิธีก๊าซคาร์เบอร์ไรซ์ซึ่งต่อสมบัติทางกายภาพ

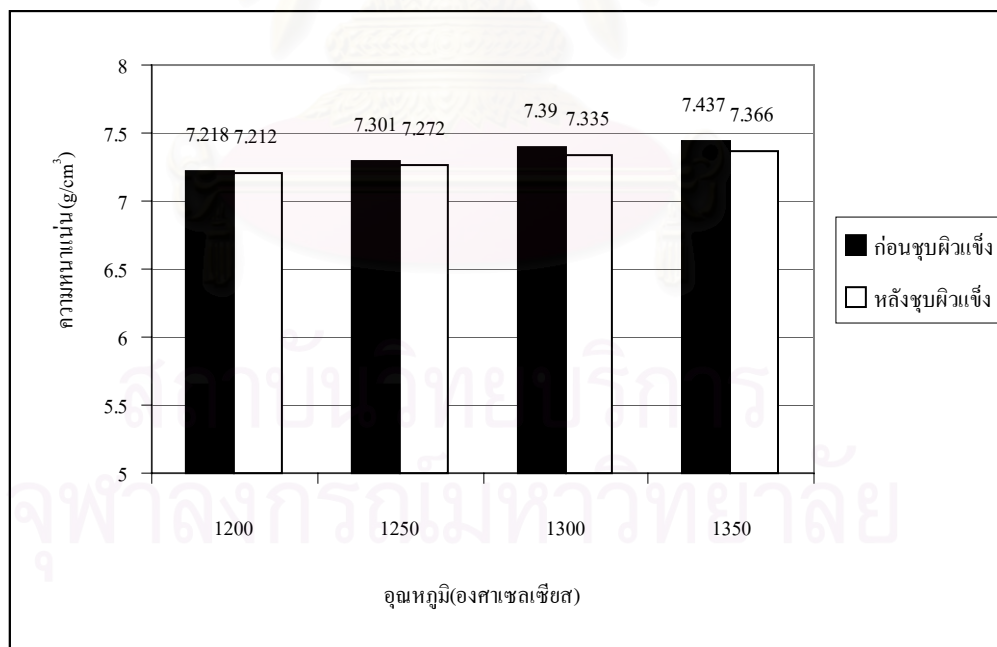
จากผลการทดลองพบว่าขนาดของชิ้นงานที่ผ่านการชุบผิวแข็งมีขนาดใหญ่กว่าชิ้นงานหลังทำการเผาผนึกเพียงเล็กน้อย โดยที่ความหนาแน่นของชิ้นงานหลังทำการชุบผิวแข็งมีค่าลดลงจากเดิมเล็กน้อย

เมื่อพิจารณาจากขนาดที่เปลี่ยนแปลงไปเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนขณะทำการชุบผิวแข็ง โดยการให้ความร้อนทำให้รูพรุนขนาดเล็กรวมตัวมีขนาดใหญ่ขึ้นเพื่อลดพลัง

งานพื้นผิว ในขณะที่เดียวกันอะตอมของคาร์บอนแพร่เข้าไปแทรกอยู่ระหว่างอะตอมของเหล็กทำให้ชิ้นงานมีปริมาณคาร์บอนเพิ่มขึ้นดังที่แสดงในตารางที่ 5.1 เมื่อทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วจึงทำให้โครงสร้างไม่สามารถเปลี่ยนแปลงกลับเป็นโครงสร้างแบบBCC ได้สมบูรณ์ ทำให้ขนาดของชิ้นงานมีการขยายขึ้นเล็กน้อยและมีผลให้ความหนาแน่นของชิ้นงานลดลงหลังทำการชุบผิวแข็งดังที่ได้แสดงในแผนภูมิรูปที่ 5.5

ตารางที่ 5.1 ปริมาณคาร์บอนเฉลี่ยของชิ้นงานทดลองที่ทำการเผาผืนที่อุณหภูมิเผาผืนต่างกันก่อนและหลังทำการชุบแข็ง

อุณหภูมิ เผาผืน (°C)	ปริมาณคาร์บอนเฉลี่ยหลังเผาผืน(%wt)	ปริมาณคาร์บอนเฉลี่ยหลังชุบผิวแข็ง(%wt)
1200	0.21	0.60
1250	0.21	0.61
1300	0.19	0.58
1350	0.19	0.58



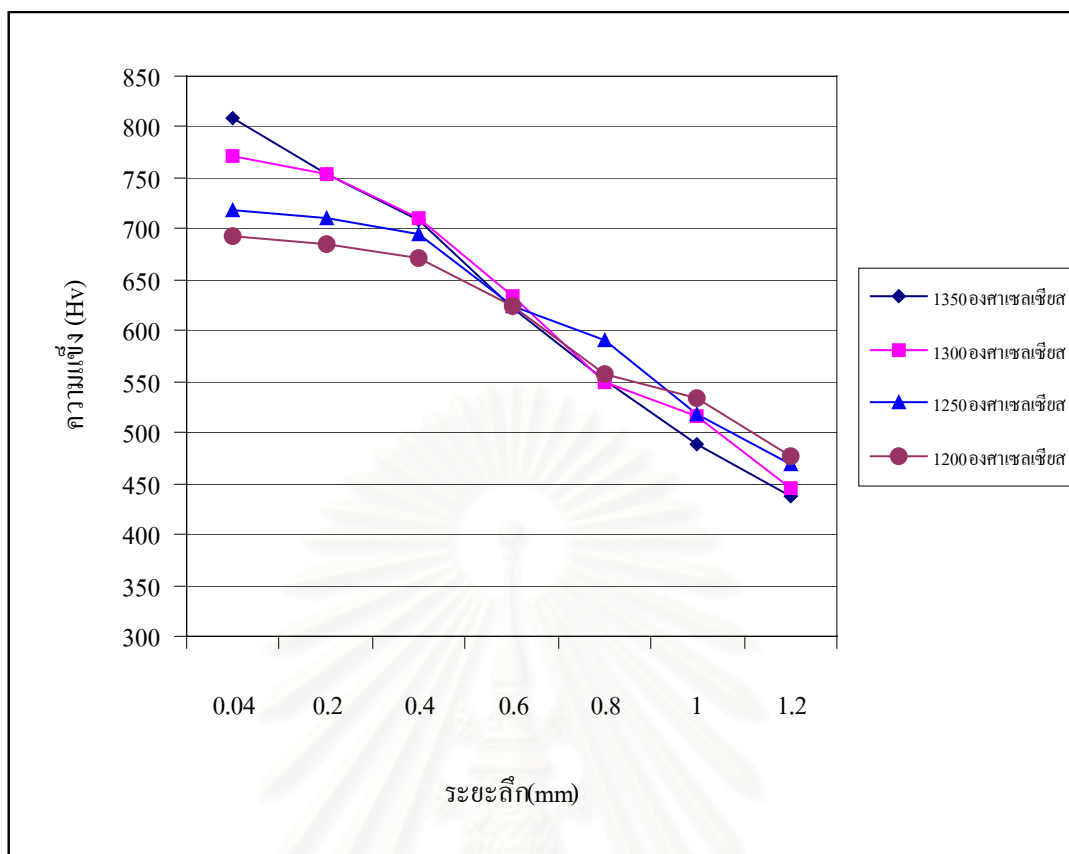
รูปที่ 5.5 แผนภูมิแสดงค่าความหนาแน่นของชิ้นงานทดสอบก่อนและหลังทำการชุบผิวแข็ง

5.2.3 ผลของการชุบผิวแข็งด้วยวิธีก๊าซคาร์บอนไรซ์ซึ่งต่อสมบัติทางกล

จากผลการวัดค่าความแข็งเปรียบเทียบกับระยะลึกจากผิวของชิ้นงานทดสอบหลังทำการชุบผิวแข็งที่แสดงในรูปที่ 5.6 พบว่าค่าความแข็งที่ผิวชิ้นงานทดสอบที่ผ่านการเผาผืนที่ 1350°C มีค่าความแข็งมากที่สุดและความแข็งที่ผิวลดลงตามอุณหภูมิเผาผืน และเมื่อวัดความแข็งลึกเข้าไปใกล้แกนกลางโดยที่ความแข็งที่ระยะลึกจากผิว 1.2 mm ปรากฏว่าชิ้นงานที่ผ่านการเผาผืนที่อุณหภูมิ 1200°C มีความแข็งมากที่สุดและความแข็งที่ใกล้แกนกลางมีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิเผาผืนสูงขึ้น

ค่าความแข็งของชิ้นที่แตกต่างกันเป็นผลเนื่องจากอัตราการแพร่ของคาร์บอนในชิ้นงานที่แตกต่างเพราะความหนาแน่นที่แตกต่างกัน เนื่องจากในช่วงการทำการชุบผิวแข็งด้วยวิธีก๊าซคาร์บอนไรซ์ซึ่งช่วงแรกได้ให้ความร้อนและผ่านก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่มีความเข้มข้นคาร์บอน 1.2% ทำให้เกิดการแพร่ของอะตอมคาร์บอนจากบรรยากาศภายในเตาสู่ผิวชิ้นงานจนทำให้ที่ผิวมีปริมาณคาร์บอน 1.2% โดยที่แกนกลางของชิ้นงานมีปริมาณคาร์บอนประมาณ 0.2% หลังจากนั้นทำการให้ความร้อนต่อไปโดยลดความเข้มข้นคาร์บอนในเตาลงเหลือ 0.85% จึงทำให้เกิดกลไกการแพร่ของอะตอมคาร์บอนจากผิวเข้าสู่แกนกลางเนื่องจากเกิดการกระตุ้นด้วยความร้อนและค่าความเข้มข้นของคาร์บอนที่แตกต่างกันระหว่างผิวและแกนกลาง โดยอะตอมของคาร์บอนพยายามแพร่จากบริเวณที่มีความเข้มข้นสูงสู่บริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำกว่าเพื่อเข้าสู่สมดุล โดยที่ชิ้นงานที่มีความหนาแน่นต่ำกว่า มีขนาดเกรนเล็กและมีปริมาณรูพรุนที่มากกว่า อะตอมของคาร์บอนจะสามารถแพร่จากผิวเข้าสู่กลางชิ้นงานได้มากกว่า เพราะความหนาแน่นที่ต่ำกว่าอะตอมจะใช้พลังงานในการเคลื่อนที่น้อยกว่าจึงเกิดการแพร่ได้เร็ว อีกปัจจัยหนึ่งคือที่บริเวณขอบเกรนและผิวของรูพรุน อะตอมจะเรียงตัวกันไม่เป็นระเบียบจึงทำให้อะตอมมีพลังงานสูงมีเสถียรภาพน้อยกว่าภายในเกรนส่งผลให้การแพร่ของอะตอมที่ขอบเกรนและผิวรูพรุนมีอัตราสูงกว่า จึงส่งผลให้ชิ้นงานที่มีขนาดเกรนเล็กและมีปริมาณรูพรุนที่มากกว่า อะตอมสามารถแพร่ได้ดีกว่า

ดังนั้นชิ้นงานที่มีความหนาแน่นมากกว่าเนื่องจากทำการเผาผืนที่อุณหภูมิสูงกว่าหลังจากชุบผิวแข็งจะมีปริมาณคาร์บอนที่ผิวสูงกว่าเพราะอะตอมของคาร์บอนที่ผิวแพร่เข้าไปในชิ้นงานได้น้อยกว่าจึงมีคาร์บอนสะสมที่ผิวสูงกว่าส่งผลให้มีความแข็งที่ผิวมากกว่า ส่วนชิ้นงานที่มีความหนาแน่นน้อยกว่าเมื่อผ่านการชุบผิวแข็งอะตอมของคาร์บอนสามารถแพร่จากผิวเข้าสู่แกนกลางได้มากกว่าจึงส่งผลให้มีปริมาณคาร์บอนที่ผิวน้อยกว่าความแข็งที่ผิวจึงน้อยกว่า โดยที่มีปริมาณคาร์บอนและความแข็งที่แกนกลางสูงกว่า



รูปที่ 5.6 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งกับระยะลึกจากผิวชิ้นงานทดสอบที่ทำการเผาผืนิกที่อุณหภูมิเผาผืนิกที่ต่างกัน หลังทำการชุบผิวแข็ง

เมื่อทำการทดสอบความต้านทานแรงดึงปรากฏว่าชิ้นงานที่ทำการเผาผืนิกที่อุณหภูมิ 1300°C มีค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดเนื่องจากชิ้นงานมีค่าความหนาแน่นและปริมาณคาร์บอนที่เหมาะสม โดยเมื่อเปรียบเทียบปริมาณคาร์บอนที่แกนกลางกับชิ้นงานที่ทำการเผาผืนิกที่ 1350°C พบว่าชิ้นงานที่ทำการเผาผืนิกที่อุณหภูมิ 1300°C มีปริมาณคาร์บอนที่แกนกลางชิ้นงานสูงกว่าเนื่องจากมีความหนาแน่นที่ต่ำกว่าและมีขนาดเกรนที่เล็กกว่าทำให้อะตอมของคาร์บอนแพร่เข้าสู่ชิ้นงานได้มากกว่า ซึ่งการที่อะตอมของคาร์บอนเข้าไปผสมอยู่ในรูปแบบสารละลายของแข็งแบบแทรกที่ จะก่อให้เกิดความเครียดในอะตอมที่อยู่ล้อมรอบ ปฏิกริยาของสนามความเครียดส่งผลให้ขัดขวางการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชันเมื่อมีแรงมากกระทำจึงทำให้มีแข็งแรงมากกว่า

เนื่องจากทำการชุบแข็งพื้นผิวในช่วงคาร์เบอร์ไรซ์ซิง(คาร์บอนเข้มข้น 1.2%) มีระยะเวลาที่สั้นเพียง 2 ชั่วโมงจึงทำให้อิทธิพลของความหนาแน่นมีผลกับค่าความแข็งแรงควบคู่ไปกับปริมาณคาร์บอนที่เพิ่มขึ้นดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นของชิ้นงานที่ทำการเผาผืนิกที่อุณหภูมิ 1300°C กับชิ้นงานที่ทำการเผาผืนิกที่ 1250°C และ 1200°C ปรากฏว่าชิ้นงานที่ทำการเผาผืนิกที่

1300 °C มีค่าความหนาแน่นหลังทำการชุบผิวแข็งที่สูงกว่า ทำให้อะตอมมีพันธะยึดเกาะกับอะตอมข้างเคียงที่แข็งแรงกว่าจึงทำให้สามารถรับแรงกระทำได้มากกว่าส่งผลให้มีค่าความต้านทานแรงดึงที่สูงกว่า

5.3 ผลของการขึ้นรูปโดยกระบวนการ ฉีดขึ้นรูปโลหะผง เปรียบเทียบกับการอัดขึ้นรูปโลหะผง

จากการทดลองของเถลิงศักดิ์ ตรีราช⁽²⁰⁾ ซึ่งทำการอัดขึ้นรูปผงโลหะSCM 415 โดยได้ชิ้นงานหลังอัดขึ้นรูปที่มีความหนาแน่นประมาณ 6.96g/cm³ โดยทำการเผาผนึกที่ 1300 °C ได้ชิ้นงานหลังทำการเผาผนึกมีปริมาณคาร์บอน 0.2 % (โดยน้ำหนัก) แล้วนำไปทำการทดสอบสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกล ซึ่งได้ผลดังนี้ ชิ้นงานหลังทำการเผาผนึกมีความหนาแน่น7.14 g/cm³ คิดเป็น 91.55 % ของความหนาแน่นตามทฤษฎี(7.8g/cm³) มีค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด 280.71 MPa อัตราการยืดตัว 18.22 % และค่าความแข็งที่ผิว 123.70 HV เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองนี้ซึ่งได้ทำการขึ้นรูปผงโลหะSCM415โดยกระบวนการฉีดขึ้นรูปโลหะผงซึ่งทำการเผาผนึกชิ้นงานที่อุณหภูมิ 1300 °C มีปริมาณคาร์บอนหลังการเผาผนึก0.19%(โดยน้ำหนัก)โดยผลการทดลองเมื่อได้ทำการเปรียบเทียบสมบัติต่างๆ กับกระบวนการอัดขึ้นรูปโลหะผงตามตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 เปรียบเทียบสมบัติระหว่างกระบวนการ ฉีดขึ้นรูปโลหะผงกับกระบวนการอัดขึ้นรูปโลหะผง

สมบัติของชิ้นงาน	ฉีดขึ้นรูปโลหะผง	อัดขึ้นรูปโลหะผง
ความหนาแน่น(%)	94.04	91.55
ความแข็งผิว(HV)	130.36±2.49	123.70±11.20
ความต้านทานแรงดึง(MPa)	494.03±1.89	280.71±8.21
อัตราการยืดตัว(%)	19.79±0.24	18.22±0.72

พบว่าชิ้นงานที่ทำการขึ้นรูปโดยกระบวนการฉีดขึ้นรูปโลหะผงมีค่าความหนาแน่นและสมบัติทางกลที่ดีกว่าชิ้นงานที่ขึ้นรูปโดยกระบวนการอัดขึ้นรูปโลหะผง

ปัจจัยที่มีผลต่อคุณสมบัติกลที่เหนือกว่าเนื่องจากขนาดของผงของชิ้นงานที่ทำให้ขึ้นรูปโดยการฉีดขึ้นรูปโลหะผง(ขนาดผง1µm-50µm)เล็กกว่าชิ้นงานที่ขึ้นรูปโดยการอัดขึ้นรูป(ขนาดผง45µm-250µm)ซึ่งมีพื้นที่ผิวมากกว่าทำให้มี พลังงานพื้นผิว (Surface energy) ที่สูงกว่าเมื่อทำการเผาผนึกจึงส่งผลให้อะตอมสามารถเคลื่อนที่ได้ง่ายกว่าเนื่องจากกลไกการแพร่ที่ถูกกระตุ้นด้วยความร้อนและพลังงานพื้นผิวมีผลให้อะตอมเกิดการแพร่ได้ดีกว่าทำให้อนุภาคของผงสามารถประสานกันได้ดีกว่า ส่งผลให้หลังทำการเผาผนึกชิ้นงานที่ขึ้นรูปโดยการฉีดขึ้นรูปโลหะผงมีความหนาแน่นสูงกว่า และได้ขนาด

เกรนที่เล็กกว่าเนื่องจากอนุภาคของผงมีขนาดเล็กกว่าชิ้นงานที่ขึ้นรูปโดยการอัดขึ้นรูปทำให้มีคุณสมบัติทางกลที่ดีกว่า

นอกจากนี้ชิ้นงานที่ทำการขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดขึ้นรูปโลหะผงยังทำให้การกระจายตัวของผงโลหะในชิ้นงานสม่ำเสมอมากกว่าทำให้การหดตัวและสมบัติของชิ้นงานมีความสม่ำเสมอว่าและยังสามารถขึ้นรูปชิ้นงานที่มีรูปร่างที่ซับซ้อนได้เนื่องจากการฉีดขึ้นรูปจะทำให้อนุภาคของผงโลหะที่ผสมกับตัวประสานมีความสามารถในการไหลเข้าไปในแบบชิ้นงานได้สม่ำเสมอและทั่วถึง ชิ้นงานที่ทำการฉีดขึ้นรูปยังมีลักษณะผิวชิ้นงานที่มีความหยาบน้อยกว่าเนื่องจากขนาดอนุภาคที่เล็กกว่าจึงลดแรงเสียดทานในการใช้งานได้มากกว่าเป็นผลให้ชิ้นงานทนทานต่อการสึกหรอมากกว่า



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิเผาผนึกและการชุบผิวแข็งด้วยวิธีคาร์เบอร์ไรซ์ซึ่งต่อสมบัติทางกายภาพ โครงสร้างจุลภาค และสมบัติทางกลของชิ้นงานทดสอบเหล็กกล้าผสมโครเมียมและโมลิบดีนัม เกรดSCM415ที่ขึ้นรูปโดยกระบวนการฉีดขึ้นรูปโลหะผง สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังต่อไปนี้

6.1 สรุปผลการทดลอง

6.1.1 เมื่อทำการเผาผนึกที่อุณหภูมิสูง ส่งผลให้ปริมาณรูพรุนในชิ้นงานลดลง ค่าความหนาแน่นจึงเพิ่มขึ้น มีผลให้สมบัติทางกลของชิ้นงานทดสอบเพิ่มสูงขึ้นตามอุณหภูมิเผาผนึกที่เพิ่มขึ้น จึงทำให้ชิ้นงานหลังทำการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1350 °C มีสมบัติทางกลดีที่สุด

6.1.2 หลังทำการชุบผิวแข็งด้วยวิธีคาร์เบอร์ไรซ์ซึ่งปริมาณคาร์บอนในชิ้นงานมีค่าแตกต่างกัน เนื่องจากค่าความหนาแน่นที่แตกต่างกัน โดยที่ชิ้นงานเผาผนึกที่อุณหภูมิสูงจะมีปริมาณคาร์บอนต่ำกว่าชิ้นงานเผาผนึกที่อุณหภูมิต่ำ

6.1.3 ชิ้นงานเหล็กกล้าผสมโครเมียมและโมลิบดีนัม เกรดSCM415ที่ขึ้นรูปโดยกระบวนการฉีดขึ้นรูปโลหะผง ที่เผาผนึกที่อุณหภูมิ 1300 °C เป็นชิ้นงานที่มีปริมาณคาร์บอนและความหนาแน่นที่เหมาะสมจึงส่งผลให้ได้ชิ้นงานที่มีสมบัติทางกลดีที่สุด

6.1.4 กระบวนการฉีดขึ้นรูปโลหะผง สามารถที่จะผลิตชิ้นงานจากผงโลหะเหล็กกล้าผสมโครเมียมและโมลิบดีนัม เกรดSCM415 ให้ได้ความหนาแน่นหลังเผาผนึกที่ 1300 °C สูงถึง 94.74 % ของความหนาแน่นชิ้นงานที่ผ่านการรีดขึ้นรูป(7.8 g/cm³)และสูงกว่ากรรมวิธีการอัดขึ้นรูปโลหะผงที่มีความหนาแน่นหลังเผาผนึกที่อุณหภูมิเดียวกันเพียง 91.55%ของความหนาแน่นชิ้นงานที่ผ่านการรีดขึ้นรูป จึงส่งผลให้ชิ้นงานที่ขึ้นรูปโดยกระบวนการฉีดขึ้นรูปโลหะผงมีสมบัติทางกลที่ดีกว่า

6.2 ข้อเสนอแนะ

6.2.1 ชิ้นงานที่ทำการเผาผนึกควรมีความหนาขึ้นหรือทำการลดเวลาในการชุบผิวแข็งลง เพื่อลดการแพร่ของคาร์บอนที่เข้าไปถึงแกนกลางชิ้นงาน เพราะจะทำให้อัตราการยืดตัวลดลง

6.2.2 ควรทำชิ้นงานทดสอบเพื่อทำการทดสอบแรงกระแทก เพราะในการใช้งานจริงชิ้นส่วนบางชนิดต้องรับแรงกระแทกในระหว่างที่ใช้งานด้วย



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

- (1) German, R. M., and A. Bose. Injection Molding of Metals and Ceramics. Princeton, NJ: Metal Powder Industries Federation, 1997.
- (2) Schatt, W., and K. P. Wieters. Powder Metallurgy Processing and Materials. Shrewsbury: European Powder Metallurgy Association, 1997.
- (3) Japanese Standards Association., JIS handbook: ferrous materials and metallurgy. Tokyo: Japanese Standards Association, 1999.
- (4) Lenel, F. V. Powder Metallurgy Principles and Application. Princeton, NJ: Metal Powder Industries Federation, 1980.
- (5) German, R. M. Powder Metallurgy of Iron and Steel. New York: Wiley-Interscience, 1998.
- (6) Suri, P., R. P.Koseki, and R. M. German. Microstructural evolution of injection molded gas-and water-atomized 316L stainless steel powder during sintering. Material Science and Engineering A 402 (2005): 341-348.
- (7) Ho, Y.L., and S.T. Lin. Debinding Variables Affecting the Residual Carbon Content of Injection-Molded Fe-2 Pct Ni Steel. Metallurgical and Materials Transaction A 26 (1995):133-142.
- (8) Wei, W. J., R.Y. Wu, and S. J. Ho. Effects of pressure parameters on alumina made by powder injection moulding. Journal of the European Ceramic Society 20 (2000): 1301-1310.
- (9) Hwang, K.S., and T.H. Tsou. Thermal Debinding of Powder Injection Molded Parts: Observations and Mechanisms. Matallurgical and Materials Transactions A 23 (1992): 2775-2782.
- (10) สมนึก วัฒนศรีขกุล. โลหวิทยา. กรุงเทพมหานคร: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. (ม.ป.ป.).
- (11) Ji, C.H., N.H. Loh, K.A. Khor, and S.B. Tor. Sintering study of 316L stainless steel metal injection molding parts using Taguchi method: final density. Materials Science and Engineering A (2001): 74-82.
- (12) Sung, H. J., T. K. Ha, S. Ahn, and Y. W. Chang. Powder injection molding of a 17-4 PH stainless steel and the effect of sintering temperature on its microstructure and mechanical properties. Journal of Materials Processing Technology (2002): 321-327.

- (13) Li, S., B. Huang, D. Li, Y. Li, S. Liang, and H. Zhou. Influences of sintering atmospheres on densification process of injection moulded gas atomised 316L stainless steel. Powder Metallurgy 46 (2003): 241-245.
- (14) Ioh, N.H., K.A. Khor, and S.B. Tor. Metal Injection Molding of Stainless Steel 316L. International Symposium on High Performance Metal Matrix Composites 2 (1997): 262-272.
- (15) วีระศักดิ์ อุดมกิจเดชา ราช.และคณะ. เครื่องมือวิจัยทางวัสดุศาสตร์: ทฤษฎีและหลักการดำเนินงานเบื้องต้น. กรุงเทพมหานคร: สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2543.
- (16) ณรงค์ศักดิ์ ธรรมโชติ ผศ. วัสดุวิศวกรรม. กรุงเทพมหานคร: ซีเอ็ดยูเคชั่น, 2549.
- (17) Callister, W. D., Jr. Materials Science and Engineering An Introduction. 6th ed. New York: John Wiley & Sons, 2003.
- (18) มนัส สติรจินดา ราช. วิศวกรรมการอบชุบเหล็ก. พิมพ์ครั้งที่ 6. กรุงเทพมหานคร: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2540.
- (19) American Society for Metal International. ASM Handbook Volume 7 Powder Metallurgy. 9th ed. United State of America: American Society for Metal, 1993.
- (20) เถลิงศักดิ์ ตราชู. ผลของอุณหภูมิต่อสมบัติทางกล ของเหล็กกล้าโครเมียมโมลิบดีนัม SCM 415 ที่ผลิตโดยกระบวนการโลหะผง. กรุงเทพมหานคร: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2549.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก.

05- 1-11; 8:37AM; 大坂金興業(株)
 アトミック
 〒039-1161
 〒0178-73-2801
 Fax.0178-73-2810

ATMIX CORPORATION
 4-44 Kaigan, Kawaragi-aza, O-aza,
 Hachinohe-shi, Aomori-ken, 039-1131 JAPAN
 Tel.+81-178-73-2801
 Fax.+81-178-73-2810

0794861701

4/ 20



①

PAGE:1

検査証明書

発行日 2004/08/04

(No. F13480128A)

需要家 : 株式会社 モールドリサーチ
 品名 : クロムモリブデン鋼パウダー
 契約量 : 50kg
 ロット番号 : 47V3219
 鋼種記号 : SCM 415E
 公称粒度 : PF-20F
 容器数 : 2
 総重量 : 50kg

化学成分 (mass %)	規格値	実績値
C	0.310~0.360	0.328
Si	0.15~0.35	0.25
Mn	0.60~0.85	0.68
P	MAX 0.030	0.019
S	MAX 0.030	0.006
Ni	MAX 0.25	0.06
Cr	0.90~1.20	1.01
Mo	0.15~0.30	0.21
Cu	MAX 0.30	0.01
O (ppm)	報告	4000

物理的性質	規格値	実績値
粒度分布 (mass %)		
+40 μm	報告	2.1
40~30 μm	報告	2.9
30~20 μm	報告	10.2
20~10 μm	報告	31.9
-10 μm	報告	52.9
平均粒径 μm	報告	9.50
タップ密度 g/cm3	報告	4.92

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)

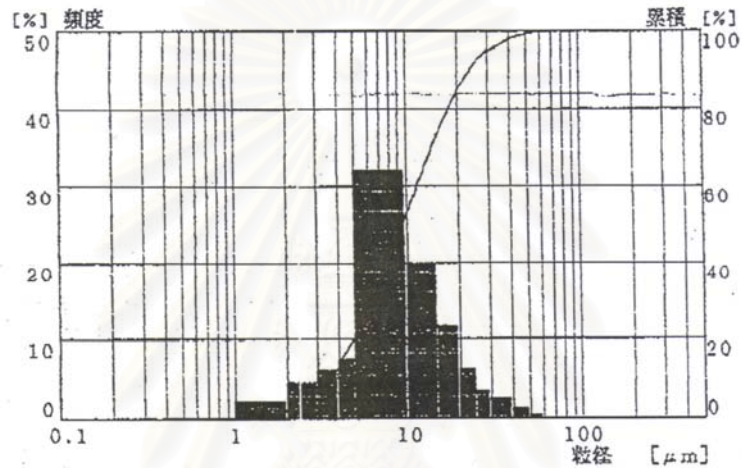
รูปที่ 1 ใบรับรองผลผงโลหะ SCM 415

①

※※ 粒度分布測定結果 ※※

CHUETSU GRAPHITE WORKS CO.,LTD.

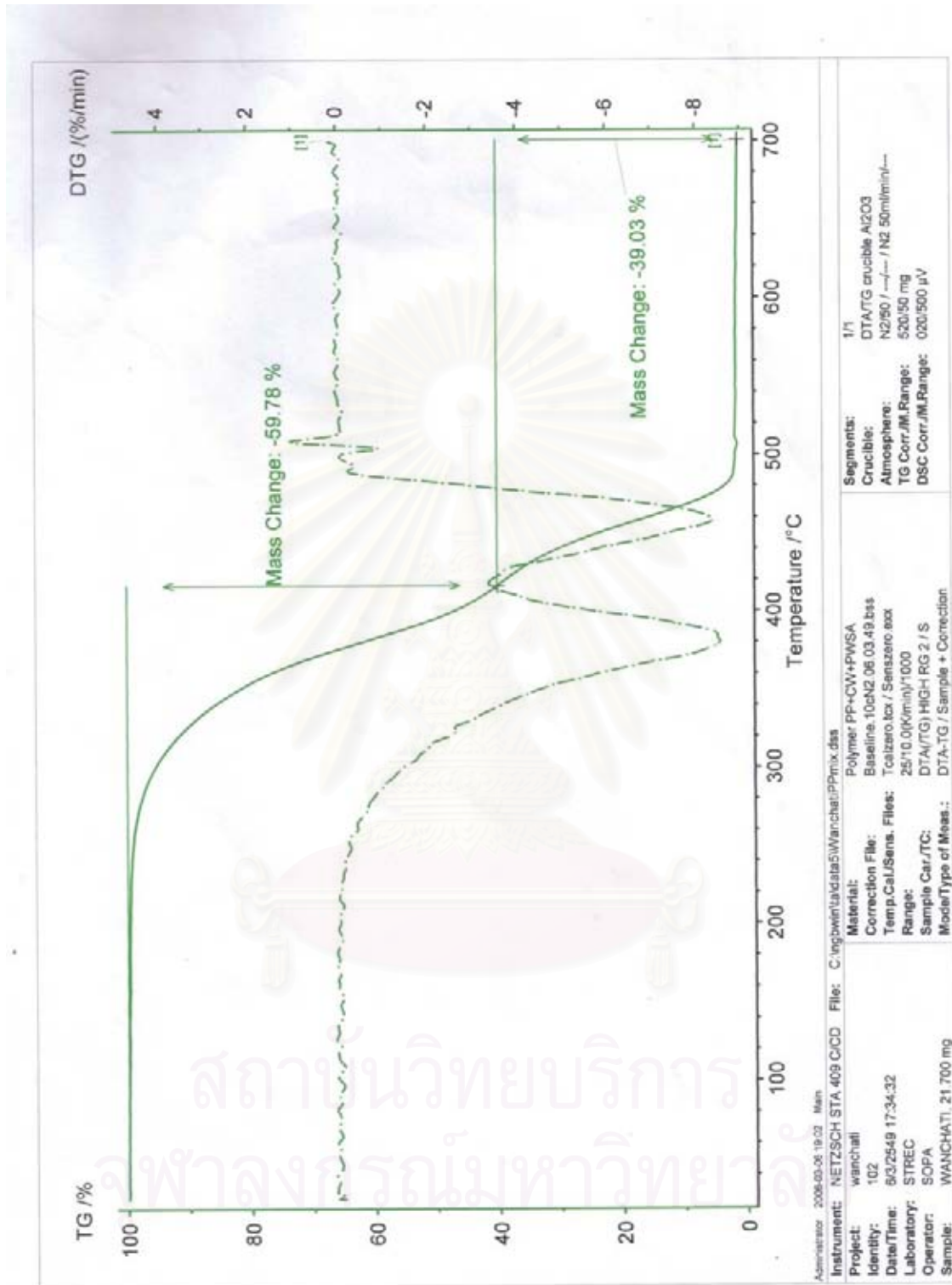
RUN No.	100	サンプルタイム	60
サンプル名 (ID-1)	SCM 415E:PF-20F	計測使用レンジ	0.9 - 176
ロットNo. (ID-2)	47V3219	データアドレス	733
計測日付	07/29/04	コメント	
計測時間	01:50	備考	任意粒径変換



(CH)	粒径 (μm)	累積 (%)	頻度 (%)	※ 要約データ ※
1	1.00	0.02	0.02	DV = 0.3356
2	2.00	2.12	2.10	10% = 3.52
3	3.00	6.75	4.63	50% = 9.50
4	4.00	13.08	6.33	90% = 23.10
5	5.00	20.65	7.58	MV = 11.95
6	10.00	52.93	32.28	CS = 0.845
7	15.00	72.86	19.93	
8	20.00	84.84	11.97	
9	25.00	91.32	6.48	
10	30.00	95.04	3.73	
11	40.00	97.94	2.90	
12	50.00	99.27	1.32	
13	60.00	99.88	0.61	
14	70.00	100.00	0.12	
15	80.00	100.00	0.00	
16	100.00	100.00	0.00	

รูปที่ 2 ใบแสดงผลการวิเคราะห์ขนาดผงโลหะ SCM 415

ภาคผนวก ข.



รูปที่ 1 ผลการทดสอบ DTA ของตัวประสานในวัสดุคืบ

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายวันชาติ สุพรหมพิทักษ์ เกิดเมื่อวันที่ 5 ธันวาคม 2517 เริ่มเข้าศึกษาระดับอุดมศึกษาที่ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เมื่อปี พ.ศ. 2537 และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาบัณฑิต หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ ในปี พ.ศ. 2543 จากนั้น ได้ทำงานเป็นพนักงานฝ่ายเทคนิค ของบริษัท อินเทอร์เน็ตเนชั่นแนลไอออนเวิร์คกิ้ง จำกัด เมื่อปี พ.ศ. 2544 และทำงานเป็นพนักงานของสถาบันราชภัฏเลย ตำแหน่งอาจารย์อัตราจ้าง เมื่อปี พ.ศ. 2545-2546 จากนั้นจึงเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมโลหการมหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปี พ.ศ. 2546



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย