

ผลของอุณหภูมิกวเผนนี้ก่ต่อสมบัติทางกล ของเหล็กกล้า โครเมียม โมลิบดีนัม  
SCM 415 ที่ผลิตโดยกระบวนการโลหะผง



นาย เถลิงศักดิ์ ตรีราช

## สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2549

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECT OF SINTERING TEMPERATURE ON MECHANICAL PROPERTIES  
OF CHROMIUM MOLYBDENUM STEEL SCM 415 PRODUCED VIA  
POWDER METALLURGY PROCESS



Mr. Thalerngsak Trachoo

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

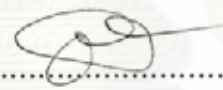
หัวข้อวิทยานิพนธ์ ผลของอุณหภูมิการเผาผนึกต่อสมบัติทางกล ของเหล็กกล้าโครเมียม  
โมลิบดีนัม SCM 415 ที่ผลิตโดยกระบวนการโลหะผง  
โดย นาย เถลิงศักดิ์ ตรีราชู  
สาขาวิชา วิศวกรรมโลหการ  
อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ไสว คำนชัชวิจิตร  
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ดร. เรืองเดช ชงศรี

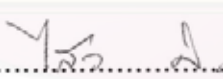
---


คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต

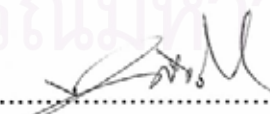
  
.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร. ชิเรก ลาวันย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
.....ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ชากร จารุพิสิฐธร)

  
.....อาจารย์ที่ปรึกษา  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ไสว คำนชัชวิจิตร)

  
.....อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม  
(ดร. เรืองเดช ชงศรี)

  
.....กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. ประสงค์ ศรีเจริญชัย)

เฉลิมศักดิ์ ตรีราช : ผลของอุณหภูมิการเผาผนึกต่อสมบัติทางกล ของเหล็กกล้าโครเมียม  
 โมลิบดีนัม SCM 415 ที่ผลิตโดยกระบวนการ โลหะผง. (Effect of Sintering Temperature  
 on Mechanical Properties of Chromium Molybdenum Steel SCM 415 Produced Via  
 Powder Metallurgy Process) อาจารย์ที่ปรึกษา : ศศ. ดร. ไสว คำนชัยวิจิตร  
 อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม : ดร. เรืองเดช ทรงศรี, 75 หน้า.

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิการเผาผนึก และปริมาณคาร์บอนที่มีต่อสมบัติทางกล  
 ของเหล็กกล้าผสมโครเมียมโมลิบดีนัม SCM 415 จากกระบวนการโลหะผง ทั้งก่อนและหลังการชุบแข็งผิว  
 ด้วยวิธีก๊าซคาร์บูไรซิ่ง โดยใช้อุณหภูมิการเผาผนึก 1200°C, 1250°C และ 1300°C นอกจากนี้ยังผสมผงกรา  
 ไฟต์ในปริมาณร้อยละ 0, 0.2 และ 0.3 โดยน้ำหนัก ซึ่งเผาที่อุณหภูมิการเผาผนึก 1300°C สมบัติทางกลที่  
 ทำการศึกษาได้แก่ ความต้านทานแรงดึงสูงสุด, การยืดตัว และความแข็ง จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า  
 สมบัติทางกลทั้งหมดของชิ้นงานเพิ่มสูงขึ้นตามอุณหภูมิการเผาผนึกที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากมีความหนาแน่น  
 ของชิ้นงานเพิ่มสูงขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อทำการชุบแข็งผิว กลับพบว่าสมบัติทางกลทั้งหมดของชิ้นงานในทุก  
 อุณหภูมิการเผาผนึก มีสมบัติทางกลใกล้เคียงกัน เนื่องจากความแตกต่างของความหนาแน่นลดลงจน  
 ใกล้เคียงกัน นอกจากนี้พบว่าชิ้นงานมีความต้านทานแรงดึงสูงสุด และความแข็ง เพิ่มขึ้นตามปริมาณกรา  
 ไฟต์ที่ผสม ในทางตรงข้ามก็ส่งผลให้การยืดตัวลดต่ำลง และเมื่อทำการชุบแข็งผิวพบว่าความต้านทานแรง  
 ดึงสูงสุด และการยืดตัว ลดต่ำลงตามปริมาณกราฟไฟต์ เพราะการเพิ่มขึ้นของเฟสซีเมนต์ไคต์บริเวณขอบ  
 เกรน

สถาบันวิทยบริการ  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

ลายมือชื่อนิสิต.....*เฉลิมศักดิ์ ตรีราช*.....  
 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....*ไสว คำนชัยวิจิตร*.....  
 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....*เรืองเดช ทรงศรี*.....

##467 06838 21 : MAJOR METALLURGICAL ENGINEERING

KEYWORD : SCM 415 / COMPACTION METHOD / SINTERING TEMPERATURE / GAS  
CARBURIZING / CARBON CONTENT

THALERNGSAK TRACHOO : EFFECT OF SINTERING TEMPERATURE ON  
MECHANICAL PROPERTIES OF CHROMIUM MOLYBDENUM STEEL SCM  
415 PRODUCED VIA POWDER METALLURGY PROCESS. THESIS ADVISOR :  
ASSISTANT PROFESSOR SAWAI DANCHAIVIJIT, Ph.D. THESIS COADVISOR  
: RUANGDAJ TONGSRI, Ph.D., 75 pp.

Mechanical properties of the chromium molybdenum steel SCM 415, prepared via varied sintering temperatures and graphite contents, were investigated. The sintering temperatures were varied from 1200°C to 1300°C. At the sintering temperature of 1300°C, the additional graphite contents were also varied from 0 to 0.3 %wt. The mechanical properties such as the ultimate tensile strength, the elongation and the hardness were carefully evaluated. The results revealed that the mechanical properties increased with increasing sintering temperature due to increasing density at the higher sintering temperature. After gas carburizing, the mechanical properties of all sintering temperature conditions were not much different because the density difference was reduce and their microstructures were similar. Furthermore, the ultimate tensile strength and the hardness increased with increasing graphite content. After gas carburizing, the ultimate tensile strength and the elongation decreased with increasing graphite content due to increasing cementite content at the grain boundary.

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department.....Metallurgical...Engineering...

Field of study...Metallurgical...Engineering...

Academic year.....2006.....

Student's signature.....Thalerngsak Trachoo.....

Advisor's signature ..Sawai Danchai Vijit ..

Co-advisor's signature ..Ruengdaj Tongy ..

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลงได้ ด้วยความช่วยเหลือจากหลาย ๆ ฝ่าย ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ อาจารย์ ดร. ไสว ด่านชัยวิจิตร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ ดร. เรืองเดช อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ให้คำปรึกษา ความรู้ และคำแนะนำต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งในงานวิจัยมาโดยตลอด ขอขอบคุณ คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่าง ๆ ขอขอบคุณศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ และภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้การสนับสนุนงานวิจัย และให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือต่าง ๆ ขอขอบคุณ คุณวีระเดช พิณเสนาะ และ คุณพงศกร ไทพัฒน์กุล ที่ให้ข้อมูล คำปรึกษา และประสานงาน สุดท้าย ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัว ที่สนับสนุนทางการศึกษา ให้คำแนะนำปรึกษาและให้กำลังใจมาโดยตลอด จนกระทั่งสามารถสำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาโทสำเร็จได้ตามเจตนารมณ์



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
รายการตาราง.....	ฎ
รายการรูปประกอบ.....	ฏ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 การศึกษาข้อมูลเบื้องต้น	
2.1 โลหะผสม SCM 415.....	3
2.2 กระบวนการอัดขึ้นรูปวัสดุผง.....	4
2.2.1 การผสม.....	5
2.2.2 การอัดขึ้นรูป.....	5
2.2.3 การกำจัดสารเติมแต่ง.....	6
2.2.4 การเผาผนึก.....	6
2.2.4.1 กลไกการเผาผนึก.....	6
2.2.4.2 ขั้นตอนการเผาผนึก.....	8
2.2.4.3 การวัดปริมาณการเผาผนึก.....	9
2.3 ปัจจัยในการอัดขึ้นรูปที่มีอิทธิพลต่อสมบัติต่าง ๆ ของชิ้นงาน.....	10
2.3.1 อิทธิพลของขนาดและรูปร่างอนุภาค.....	10
2.3.2 อิทธิพลของสารหล่อลื่น.....	10
2.3.3 อิทธิพลของแรงกดในการอัดขึ้นรูป.....	12
2.4 ปัจจัยในการเผาผนึกที่มีอิทธิพลต่อสมบัติต่าง ๆ ของชิ้นงาน.....	12
2.4.1 อิทธิพลของการอัดขึ้นรูป.....	12

	หน้า
2.4.2 อิทธิพลของอุณหภูมิและเวลาการเผาผนึก.....	13
2.4.3 อิทธิพลของปริมาณธาตุคาร์บอน.....	14
2.4.4 อิทธิพลจากการสูญเสียคาร์บอนที่ผิว.....	15
2.5 อิทธิพลของรูพรุนต่อสมบัติทางกลของชิ้นงานขึ้นรูปวัสดุผง.....	15
2.5.1 ประเภทของรูพรุน.....	15
2.5.2 อิทธิพลต่อความต้านทานแรงดึงและการยืดตัว.....	16
2.5.3 อิทธิพลต่อความแข็ง.....	17
2.6 การชุบแข็งผิว และกรรมวิธีทางความร้อนภายหลังการชุบแข็งผิว.....	17
2.6.1 การชุบแข็งผิวโดยวิธีคาร์บูไรซิ่ง.....	17
2.6.1.1 กลไกการแพร่ในกระบวนการคาร์บูไรซิ่ง.....	18
2.6.1.2 การวัดความหนาของผิวแข็ง.....	19
2.6.2 กรรมวิธีทางความร้อนหลังการทำคาร์บูไรซิ่ง.....	20
<b>บทที่ 3 ระเบียบวิธีการทดลอง.....</b>	<b>21</b>
3.1 วัสดุในการทดลอง.....	21
3.1.1 วัสดุผง.....	21
3.1.2 ชิ้นงานเปรียบเทียบ.....	22
3.1.3 สารเติมแต่ง.....	22
3.1.4 ก๊าซ.....	22
3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	22
3.3 ขั้นตอนการทดลอง.....	23
3.3.1 การวิเคราะห์ผงโลหะกับสารเติมแต่ง.....	23
3.3.1.1 ส่วนประกอบทางเคมี.....	23
3.3.1.2 รูปร่างอนุภาค.....	23
3.3.1.3 ขนาดอนุภาค.....	23
3.3.1.4 ความหนาแน่นเชิงปริมาตร.....	24
3.3.2 การผสมผงโลหะกับสารเติมแต่ง.....	24
3.3.3 การอัดขึ้นรูป.....	24
3.3.4 การกำจัดสารเติมแต่งและการเผาผนึก.....	25
3.3.5 การชุบแข็งผิว.....	26

	หน้า
3.4 การทดสอบสมบัติต่าง ๆ ของชิ้นงานทดสอบ.....	27
3.4.1 สมบัติทางกายภาพ.....	27
3.4.1.1 ขนาด.....	27
3.4.1.2 ความหนาแน่นและปริมาตรรูพรุน.....	28
3.4.2 สมบัติทางกล.....	29
3.4.2.1 การทดสอบแรงดึง.....	29
3.4.2.2 ความแข็ง.....	29
3.4.3 ส่วนประกอบทางเคมี.....	29
3.4.4 โครงสร้างจุลภาค.....	30
3.5 สรุป.....	30
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	31
4.1 สมบัติวัสดุผง.....	31
4.1.1 ส่วนประกอบทางเคมี.....	31
4.1.2 รูปร่างอนุภาค.....	31
4.1.3 ขนาดอนุภาค.....	32
4.1.4 ความหนาแน่นเชิงปริมาตร.....	32
4.2 สมบัติชิ้นงานกรีน.....	33
4.2.1 ขนาด.....	33
4.2.2 ความหนาแน่นกรีน.....	33
4.2.3 ผลของความดันอัดต่อความหนาแน่นกรีน.....	34
4.3 ผลของอุณหภูมิเผาผนึกต่อสมบัติต่าง ๆ ของชิ้นงาน.....	35
4.3.1 สมบัติทางกายภาพ.....	35
4.3.1.1 ขนาด.....	35
4.3.1.2 ความหนาแน่น.....	35
4.3.2 ส่วนประกอบทางเคมี.....	36
4.3.3 โครงสร้างจุลภาค.....	36
4.3.4 สมบัติทางกล.....	38
4.3.4.1 ความแข็ง.....	38
4.3.4.2 การทดสอบแรงดึง.....	39

	หน้า
4.4 ผลของอุณหภูมิเฉพาะนี้กต่อสมบัติต่าง ๆ ของชิ้นงานหลังชุบแข็งผิว.....	40
4.4.1 สมบัติทางกายภาพ.....	40
4.4.1.1 ขนาด.....	40
4.4.1.2 ความหนาแน่น.....	41
4.4.2 ส่วนประกอบทางเคมี.....	41
4.4.3 โครงสร้างจุลภาค.....	42
4.4.4 สมบัติทางกล.....	44
4.4.4.1 ความแข็ง.....	44
4.4.4.2 การทดสอบแรงดึง.....	45
4.5 ผลของปริมาณคาร์บอนต่อสมบัติต่าง ๆ ของชิ้นงาน.....	46
4.5.1 สมบัติทางกายภาพ.....	46
4.5.1.1 ขนาด.....	46
4.5.1.2 ความหนาแน่น.....	47
4.5.2 ส่วนประกอบทางเคมี.....	47
4.5.3 โครงสร้างจุลภาค.....	48
4.5.4 สมบัติทางกล.....	49
4.5.4.1 ความแข็ง.....	49
4.5.4.2 การทดสอบแรงดึง.....	50
4.6 ผลของปริมาณคาร์บอนต่อสมบัติต่าง ๆ ของชิ้นงานหลังชุบแข็งผิว.....	51
4.6.1 สมบัติทางกายภาพ.....	51
4.6.1.1 ขนาด.....	51
4.6.1.2 ความหนาแน่น.....	51
4.6.2 ส่วนประกอบทางเคมี.....	52
4.6.3 โครงสร้างจุลภาค.....	52
4.6.4 สมบัติทางกล.....	54
4.6.4.1 ความแข็ง.....	54
4.6.4.2 การทดสอบแรงดึง.....	54
บทที่ 5 อธิบายผลการทดลอง.....	56
5.1 ผลของความดันอัดต่อปริมาณรูพรุนในชิ้นงานกรีน.....	56
5.2 ผลของอุณหภูมิเฉพาะนี้ก.....	57

	หน้า
5.3 ผลของปริมาณคาร์บอน.....	58
5.4 ผลของการชุปแข็งผิวด้วยวิธีก๊าซคาร์บูไรซิ่งต่อสมบัติทาง ๆ ของชิ้นงาน.....	60
5.4.1 ผลต่อความหนาแน่นและลักษณะรูพรุน.....	60
5.4.2 ผลต่อโครงสร้างจุลภาค.....	61
5.4.3 ผลต่อสมบัติทางกล.....	64
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	65
6.1 สรุปผลการทดลอง.....	65
6.2 ข้อเสนอแนะ.....	66
รายการอ้างอิง.....	67
ภาคผนวก .....	69
ภาคผนวก ก. อภิธานศัพท์.....	70
ภาคผนวก ข. ใบรับรองสมบัติต่าง ๆ ของวัสดุผง SCM 415.....	71
ภาคผนวก ค. รายงานผลวิเคราะห์ส่วนประกอบเคมีของชิ้นงานเปรียบเทียบ.....	72
ภาคผนวก ง. สมบัติต่าง ๆ ของชิ้นงานเปรียบเทียบ.....	73
ภาคผนวก จ. แบบชิ้นงานทดสอบ.....	74
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	75

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ส่วนประกอบทางเคมีของเหล็กกล้าผสม SCM 415.....	3
2.2 เงื่อนไขกรรมวิธีทางความร้อนของเหล็กกล้าผสม SCM 415.....	3
2.3 สมบัติทางกลของเหล็กกล้าผสม SCM415 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อน.....	4
3.1 ส่วนประกอบทางเคมีของผงโลหะ SCM 415 ในการทดลอง.....	21
3.2 การกระจายตัวของขนาดผงโลหะ SCM 415 ในการทดลอง.....	21
3.3 อัตราส่วนของส่วนผสมสูตรต่าง ๆ.....	24
3.4 การตั้งค่าเครื่องอัดขึ้นรูปแบบไฮดรอลิก DORST TPA 50/4.....	24
3.5 รายละเอียดการกำจัดสารเติมแต่งและการเผาพูนึก.....	26
4.1 ผลการวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมีของชิ้นงานเปรียบเทียบ และผง SCM 415.....	31
4.2 ผลการวัดขนาดอนุภาคเฉลี่ยของผง SCM 415 และผงกราไฟต์.....	32
4.3 ผลการวัดความหนาแน่นเชิงปริมาตรของผง SCM 415 และผงกราไฟต์.....	33
4.4 ผลการวัดขนาดชิ้นงานกรีน.....	33
4.5 ผลการวัดความหนาแน่นกรีน.....	34
4.6 ผลการวัดขนาดของชิ้นงานที่อุณหภูมิเผาพูนึกต่าง ๆ.....	35
4.7 ผลการคำนวณและวัดความหนาแน่นของชิ้นงานที่อุณหภูมิเผาพูนึกต่าง ๆ.....	36
4.8 ผลการวัดปริมาณคาร์บอนของชิ้นงานที่อุณหภูมิเผาพูนึกต่าง ๆ.....	36
4.9 ผลการวัดค่าความแข็งของชิ้นงานที่อุณหภูมิเผาพูนึกต่าง ๆ และชิ้นงานเปรียบเทียบ...39	39
4.10 ผลการทดสอบแรงดึงชิ้นงานที่อุณหภูมิเผาพูนึกต่าง ๆ.....	40
4.11 ผลการวัดขนาดของชิ้นงานที่อุณหภูมิเผาพูนึกต่าง ๆ หลังชุบแข็งผิว.....	40
4.12 ผลการวัดความหนาแน่นของชิ้นงานที่อุณหภูมิเผาพูนึกต่าง ๆ หลังชุบแข็งผิว.....	41
4.13 ผลการวัดปริมาณคาร์บอนของชิ้นงานที่อุณหภูมิเผาพูนึกต่าง ๆ หลังชุบแข็งผิว.....	41
4.14 ผลการวัดค่าความแข็งของชิ้นงานที่อุณหภูมิเผาพูนึกต่าง ๆ หลังชุบแข็งผิว.....	45
4.15 ผลการทดสอบแรงดึงของชิ้นงานที่อุณหภูมิเผาพูนึกต่าง ๆ หลังชุบแข็งผิว.....	46
4.16 ผลการวัดขนาดของชิ้นงานผสมกราไฟต์ปริมาณต่าง ๆ.....	46
4.17 ผลการคำนวณและวัดความหนาแน่นของชิ้นงานผสมกราไฟต์ปริมาณต่าง ๆ.....	47
4.18 ผลการวัดปริมาณคาร์บอนของชิ้นงานผสมกราไฟต์ปริมาณต่าง ๆ.....	47
4.19 ผลการวัดค่าความแข็งของชิ้นงานผสมกราไฟต์ปริมาณต่าง ๆ.....	49
4.20 ผลการทดสอบแรงดึงของชิ้นงานผสมกราไฟต์ปริมาณต่าง ๆ.....	50
4.21 ผลการวัดขนาดของชิ้นงานผสมกราไฟต์ปริมาณต่าง ๆ หลังชุบแข็งผิว.....	51

ตารางที่	หน้า
4.22 ผลการวัดความหนาแน่นของชิ้นงานผสมกราไฟต์ปริมาณต่าง ๆ หลังชุบแข็งผิว.....	52
4.23 ผลการวัดปริมาณคาร์บอนของชิ้นงานผสมกราไฟต์ปริมาณต่าง ๆ หลังชุบแข็งผิว....	52
4.24 ผลการวัดค่าความแข็งของชิ้นงานที่อุณหภูมิเผาผนึกต่าง ๆ หลังชุบแข็งผิว.....	54
4.25 ผลการทดสอบแรงดึงของชิ้นงานผสมกราไฟต์ปริมาณต่าง ๆ หลังชุบแข็งผิว.....	54
5.1 เปรียบเทียบผลการทดสอบแรงดึงของชิ้นงานผสมกราไฟต์ปริมาณต่าง ๆ เมื่อเทียบกับชิ้นงานที่ไม่ผสมกราไฟต์.....	60



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 ขั้นตอนการอัดขึ้นรูปวัสดุผง.....	5
2.2 แบบจำลองกลไกการเผาผลาญในอนุภาคทรงกลม.....	7
2.3 โครงสร้างตาข่ายรูพรุนในขั้นตอนกลางของการเผาผลาญ.....	8
2.4 รูปร่างรูพรุนในการเผาผลาญตามตำแหน่งของรูพรุน.....	9
2.5 การกระจายตัวของความหนาแน่นกรีนจากการอัดขึ้นรูป.....	11
2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับแรงกด ของวัสดุผงที่ผสมและไม่ผสม สารหล่อลื่น.....	11
2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกรีนกับความดันอัด.....	12
2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นและขนาดเกรนกับอุณหภูมิเผาผลาญ.....	13
2.9 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า transverse rupture strength กับปริมาณคาร์บอน.....	14
2.10 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนจากกระบวนการ โลหะผง ที่มีปริมาณคาร์บอนต่าง ๆ.....	15
2.11 แผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณรูพรุนกับความหนาแน่น.....	16
2.12 แผนภูมิแสดงระดับการแพร่ของคาร์บอนที่พื้นผิว.....	19
3.1 ชิ้นงานทดสอบแรงดึง.....	25
3.2 แผนภูมิแสดงขั้นตอนการกำจัดสารหล่อลื่นและการเผาผลาญ.....	26
3.3 แผนภูมิแสดงขั้นตอนการชุบแข็งผิวและกรรมวิธีทางความร้อน.....	27
3.4 ตำแหน่งการวัดขนาดของชิ้นงาน.....	27
3.5 รายละเอียดการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิเผาผลาญและปริมาณคาร์บอน ก่อนและหลังจากชุบแข็งผิว.....	30
4.1 ภาพถ่าย SEM ของผง SCM 415 ที่กำลังขยายต่าง ๆ.....	32
4.2 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกรีนกับความดันอัด.....	34
4.3 ภาพถ่ายลักษณะรูพรุนในชิ้นงานที่อุณหภูมิเผาผลาญต่าง ๆ.....	37
4.4 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคในชิ้นงานที่อุณหภูมิเผาผลาญต่าง ๆ และชิ้นงานเปรียบเทียบ.....	38
4.5 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแรงดึงสูงสุด และการยึดตัวกับอุณหภูมิเผาผลาญ.....	39
4.6 ผลการวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมีบริเวณรูพรุนด้วยเครื่อง SEM+EDS.....	42

รูปที่	หน้า
4.7 ภาพถ่ายลักษณะรูพรุนในชิ้นงานที่อุณหภูมิเผาผนึกต่าง ๆ หลังชุบแข็งผิว.....	43
4.8 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคในชิ้นงานที่อุณหภูมิเผาผนึกต่าง ๆ และชิ้นงานเปรียบเทียบหลังชุบแข็งผิว.....	44
4.9 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแรงดึงสูงสุด และการยึดตัวกับอุณหภูมิเผาผนึก หลังจากชุบแข็งผิว.....	45
4.10 ภาพถ่ายลักษณะรูพรุนในชิ้นงานผสมกราไฟต์ปริมาณต่าง ๆ.....	48
4.11 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคในชิ้นงานผสมกราไฟต์ปริมาณต่าง ๆ.....	49
4.12 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแรงดึงสูงสุด และการยึดตัวกับปริมาณกราไฟต์.....	50
4.13 ภาพถ่ายลักษณะรูพรุนในชิ้นงานผสมกราไฟต์ปริมาณต่าง ๆ หลังชุบแข็งผิว.....	53
4.14 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคในชิ้นงานผสมกราไฟต์ปริมาณต่าง ๆ หลังชุบแข็งผิว.....	53
4.15 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแรงดึงสูงสุด และการยึดตัวกับปริมาณกราไฟต์ หลังจากชุบแข็งผิว.....	55
5.1 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณรูพรุนในชิ้นงานกรีนกับความดันอัด.....	56
5.2 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคในชิ้นงานผสมกราไฟต์ และชิ้นงานเปรียบเทียบ.....	58
5.3 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแรงดึงกับการยึดตัวของชิ้นงานผสมและไม่ผสมกราไฟต์.....	59
5.4 ภาพถ่ายลักษณะรูพรุนในชิ้นงานจากอุณหภูมิเผาผนึก 1300 °C.....	61
5.5 ภาพถ่าย SEM บริเวณเนื้อพื้นของชิ้นงานผสมและไม่ผสมกราไฟต์ หลังชุบแข็งผิว....	62
5.6 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคในชิ้นงานผสมและไม่ผสมกราไฟต์ หลังชุบแข็งผิว.....	62
5.7 แสดงผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM+EDS บริเวณเฟสซีเมนต์ไตต์.....	63
5.8 ผลการวิเคราะห์เฟสด้วยเครื่อง XRD.....	63

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญของงานวิจัย

โลหะผสม SCM 415 จัดอยู่ในกลุ่มเหล็กกล้าผสมโครเมียมและโมลิบดีนัม (Chromium Molybdenum Steels) ตามมาตรฐาน Japanese Industrial Standards (JIS) วัตถุประสงค์ประกอบสำคัญของ SCM 415 นอกจากโครเมียม และโมลิบดีนัม ซึ่งส่งผลให้มีความเหนียวและความต้านทานต่อแรงดึงที่ดี เนื่องจากปริมาณคาร์บอนต่ำ ในทางปฏิบัตินิยมนำมาทำการชุบแข็งผิวด้วยวิธีต่าง ๆ เช่น คาร์บูไรซิง (Carburizing), คาร์โบไนตรายดิง (Carbo-Nitriding) เป็นต้น เพื่อปรับปรุงความต้านทานการเสียดสี (Wear resistance) บริเวณผิว ด้วยสมบัติดังกล่าวจึงนิยมใช้งาน SCM 415 ในผลิตภัณฑ์ที่ต้องการความต้านทานการเสียดสีสูง เช่น เฟือง, เพลา, ลิ้ม และสกรู เป็นต้น ดังนั้นหากมองจากลักษณะของผลิตภัณฑ์ SCM 415 บางส่วนซึ่งมีขนาดเล็ก และมีความซับซ้อนของรูปร่างชิ้นงาน ส่งผลให้การขึ้นรูปด้วยกระบวนการโลหะผงจึงเป็นทางเลือกหนึ่งในการผลิต ตามความเหมาะสมของผลิตภัณฑ์

กระบวนการอัดขึ้นรูป (Compacting method) เป็นกระบวนการผลิตที่นิยมแพร่หลาย ทั้งในอุตสาหกรรมโลหะผงและเซรามิกส์ เนื่องจากสามารถผลิตชิ้นงานในปริมาณมากได้ง่าย และรวดเร็ว หลักการพื้นฐานของกระบวนการอัดขึ้นรูปโลหะผงได้แก่ การผสมโลหะผงกับสารเติมแต่ง (Additives) เช่นสารหล่อลื่น (Lubricant) เป็นต้น แล้วนำไปกดในแม่พิมพ์ เพื่อให้ได้เป็นชิ้นงานกรีน (Green part) จากนั้นนำไปกำจัดสารเติมแต่ง (Debinding) เป็นชิ้นงานบราวด์ (Brown part) สุดท้ายทำการเผาผนึก (Sintering) โดยทั่วไปที่อุณหภูมิประมาณร้อยละ 80 ของอุณหภูมิหลอมเหลวปกติ อย่างไรก็ตามชิ้นงานที่ได้จากกระบวนการโลหะผง จะมีความหนาแน่นต่ำกว่าชิ้นงานซึ่งผลิตจากกระบวนการอื่น ๆ เล็กน้อย เนื่องจากลักษณะเฉพาะตัวของกระบวนการขึ้นรูปด้วยวัสดุผงย่อมเกิดรูพรุน (Pore) กระจายตัวอยู่ภายในชิ้นงาน ส่งผลให้สมบัติทางกลต่ำลง โดยสัมพันธ์กับลักษณะและปริมาณของรูพรุน แต่ยังคงอยู่ในเกณฑ์ที่สามารถนำไปใช้งานได้ตามลักษณะการออกแบบและใช้งานของผลิตภัณฑ์

วัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยนี้ คือการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิการเผาผนึก ต่อสมบัติต่าง ๆ อันประกอบด้วย สมบัติทางกายภาพ (Physical property), สมบัติทางกล (Mechanical property), โครงสร้างจุลภาค (Microstructure) และส่วนประกอบทางเคมี (Chemical composition) ของชิ้นงานทดสอบโลหะผง SCM 415 ทั้งก่อนและหลังผ่านการชุบแข็งผิวด้วยวิธีก๊าซคาร์บูไรซิง (Gas Carburizing)

## 1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 ศึกษากระบวนการอัดขึ้นรูป ของชิ้นงานโลหะผสม SCM 415

1.2.2 ศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิการเผาผนึก ต่อ สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางกล ส่วนประกอบทางเคมี และ โครงสร้างจุลภาค ของชิ้นงานโลหะผสม SCM 415 ทั้งก่อนและหลังผ่านการชุบแข็งผิวด้วยวิธีก๊าซคาร์บูไรซิ่ง

1.2.3 ศึกษาผลกระทบของปริมาณคาร์บอน ต่อ สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางกล ส่วนประกอบทางเคมี และ โครงสร้างจุลภาค ของชิ้นงานโลหะผสม SCM 415 ทั้งก่อนและหลังผ่านการชุบแข็งผิวด้วยวิธีก๊าซคาร์บูไรซิ่ง

## 1.3 ขอบเขตการศึกษา

1.3.1 ผลิตชิ้นงานโลหะผสม SCM 415 โดยกระบวนการอัดขึ้นรูป เป็นชิ้นงานทดสอบแรงดึง ตามมาตรฐาน ASTM E8-96

1.3.2 เปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางกล ส่วนประกอบทางเคมี และโครงสร้างจุลภาค ของชิ้นงานทดสอบโลหะผสม SCM 415 ณ อุณหภูมิการเผาผนึก 1200°C, 1250 °C และ 1300°C ทั้งก่อนและหลังผ่านการชุบแข็งผิวด้วยวิธีก๊าซคาร์บูไรซิ่ง

1.3.3 เปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางกล ส่วนประกอบทางเคมี และโครงสร้างจุลภาค ของชิ้นงานทดสอบโลหะผสม SCM 415 ซึ่งผสมผงกราฟไฟต์ (Graphite) ร้อยละ 0, 0.2 และ 0.3 โดยน้ำหนัก ณ อุณหภูมิการเผาผนึก 1300 °C ก่อนและหลังผ่านการชุบแข็งผิวด้วยวิธีก๊าซคาร์บูไรซิ่ง

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ขั้นตอนและวิธีการผลิต ชิ้นงานโลหะผสม SCM 415 โดยกระบวนการอัดขึ้นรูป เพื่อสมบัติทางกลที่ดี และต้นทุนการผลิตต่ำ

1.4.2 ผลของการชุบแข็งผิว ต่อชิ้นงานโลหะผสม SCM 415

1.4.3 ผลของอุณหภูมิเผาผนึก ต่อชิ้นงานโลหะผสม SCM415

1.4.4 ผลของการปริมาณคาร์บอน ต่อชิ้นงานโลหะผสม SCM 415

## บทที่ 2

### การศึกษาข้อมูลเบื้องต้น

#### 2.1 โลหะผสม SCM 415

โลหะผสม SCM 415 จัดเป็นกลุ่มเหล็กกล้าผสมโครเมียมและโมลิบดีนัม ส่วนประกอบทางเคมีที่สำคัญของ SCM 415 ได้แก่ โครเมียม และโมลิบดีนัม ซึ่งส่งผลให้มีความเหนียวและทนต่อแรงดึงได้ดี ปริมาณส่วนประกอบทางเคมีดังที่แสดงในตารางที่ 2.1 สำหรับการใช้งานชิ้นงาน SCM 415 จำเป็นต้องผ่านกรรมวิธีทางความร้อน (Heat treatment) เพื่อปรับปรุงสมบัติก่อนนำไปใช้งาน โดยเงื่อนไขกรรมวิธีทางความร้อนแสดงในตารางที่ 2.2 และความสมบัติทางกลมาตรฐานหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อน แสดงดังในตารางที่ 2.3 แต่เนื่องจาก SCM 415 มีปริมาณคาร์บอนต่ำ ทำให้เหมาะสำหรับการนำมาเพิ่มปริมาณคาร์บอนด้วยวิธีการบูโรไนซิ่ง เพื่อปรับปรุงให้มีความต้านทานการเสียดสี ด้วยสมบัติดังกล่าวเหล็กกล้าผสม SCM 415 จึงเป็นที่นิยมสำหรับชิ้นงานที่ต้องการความต้านทานการเสียดสีสูง เช่น เฟือง, เพลา, ลิ้ม, ท่อ และสกรู เป็นต้น และจากลักษณะการใช้งานผลิตภัณฑ์บางส่วนของ SCM 415 ที่มีขนาดเล็กและมีรูปร่างซับซ้อน ทำให้การขึ้นรูปด้วยโลหะผงจึงกลายเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการผลิต

ตารางที่ 2.1 ส่วนประกอบทางเคมีของเหล็กกล้าผสม SCM 415<sup>(1)</sup>

ส่วนประกอบทางเคมี (%)						
C	Cr	Mo	Mn	P	Si	S
0.13 - 0.18	0.90 - 1.20	0.15 - 0.30	0.60 - 0.85	< 0.03	0.15 - 0.35	< 0.03

ตารางที่ 2.2 เงื่อนไขกรรมวิธีทางความร้อนของเหล็กกล้าผสม SCM 415<sup>(1)</sup>

กรรมวิธีทางความร้อน	อุณหภูมิ (°C)	การหล่อเย็น
Normalizing	850 – 900	อากาศ
Annealing	850	เย็นในเตา
Hardening	850 – 900	น้ำมัน
Tempering	150 - 200	อากาศ

ตารางที่ 2.3 สมบัติทางกลของเหล็กกล้าผสม SCM415 หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อน<sup>(1)</sup>

ความต้านทานแรงดึง (kgf/mm <sup>2</sup> )	การยืดตัว (%)	ความแข็งหลังการอบคืนตัว (HB)
85	มากกว่า 16	235 - 321

ธาตุองค์ประกอบสำคัญของ SCM 415 มีบทบาทต่อเหล็กกล้าดังต่อไปนี้<sup>(2)</sup>

- โครเมียม (Chromium, Cr) เพิ่มเสถียรภาพให้เฟสเฟอร์ไรท์ (Ferrite) ส่งผลให้ความต้านทานต่อการกัดสีและแรงกระแทกสูงขึ้น เพิ่มความต้านทานต่อการสึกกร่อน สามารถเกิดเป็นออกไซด์ (Oxide) และคาร์ไบด์ (Carbide) เพิ่มความสามารถในการชุบแข็ง (Hardenability) และสาเหตุในการหดตัวของเหล็กกล้าเมื่อทำการชุบน้ำ

- โมลิบดีนัม (Molybdenum, Mo) เพิ่มเสถียรภาพให้เฟสเฟอร์ไรท์ เมื่อใช้ร่วมกับโครเมียม และแมงกานีส จะเพิ่มความแข็งแรงและความเหนียวแก่เหล็กกล้า สามารถเกิดเป็นคาร์ไบด์ที่แข็งแรง ทำให้เกิดความแข็งครั้งที่ 2 (Secondary Hardening) ระหว่างการอบให้ความร้อน มีแนวโน้มทำให้สูญเสียคาร์บอนที่ผิวได้ง่าย จึงมักเติมซิลิกอนเพื่อปรับปรุงข้อบกพร่องนี้

- แมงกานีส (Manganese, Mn) สามารถตั้งกัมมันตรวมตัวเป็นแมงกานีสซัลไฟด์ (Manganese sulphide) เพื่อไม่ให้กัมมันตรวมตัวกับเหล็ก ซึ่งทำให้สูญเสียความเหนียว และเมื่อใช้ร่วมกับโครเมียม และโมลิบดีนัม ช่วยเพิ่มความสามารถในการชุบแข็งของเหล็กกล้า อย่างไรก็ตามหากใช้แมงกานีสเพียงลำพังมีข้อเสียคือ จะเปราะหลังจากอบคืนตัว (Tempering) ในช่วงอุณหภูมิ 400-600 °C

- ซิลิกอน (Silicon, Si) เป็นธาตุผสมจะมีบทบาทช่วยให้คาร์บอนรวมตัวเป็นกราฟไฟต์ ธาตุนี้มักใช้ร่วมกับโมลิบดีนัม หรือ วานาเดียม ช่วยลดการเกิดออกซิเดชัน (Oxidation) ที่อุณหภูมิสูง ช่วยให้ชุบแข็งง่ายขึ้น และช่วยให้คงความแข็งไว้ได้ดีในขณะอบคืนตัว (Tempering)

## 2.2 กระบวนการอัดขึ้นรูปวัสดุผง

กระบวนการอัดขึ้นรูปโลหะผง ประกอบด้วย 4 ขั้นตอน ประกอบด้วย การผสม, การอัดขึ้นรูป, การกำจัดสารเติมแต่ง และการเผาผนึก ดังรายละเอียดต่อไปนี้

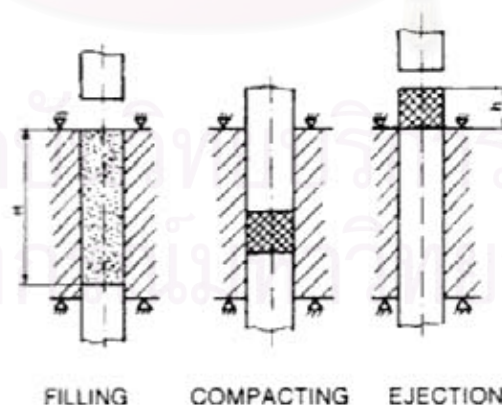
### 2.2.1 การผสม<sup>(3)</sup>

เป็นการผสมผงโลหะกับสารเติมแต่งในอัตราส่วนต่าง ๆ ให้ผสมกันสม่ำเสมอ ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้สารเติมแต่ง 2 ชนิด ได้แก่ Zinc stearate ทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่นใส่ปริมาณร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก และ ผงกราไฟต์ ทำหน้าที่เป็นธาตุผสม (Alloy Element) ใส่ปริมาณร้อยละ 0.2 และ 0.3 โดยน้ำหนัก นอกจากนี้ปัจจัยที่ต้องคำนึงถึงในการผสมได้แก่ คุณภาพของของผสม, การชั่งน้ำหนัก, ประเภทของเครื่องผสม, ปริมาณการผสม, ความเร็วในการผสม และเวลาในการผสม

### 2.2.2 การอัดขึ้นรูป<sup>(3)</sup>

การอัดขึ้นรูปวัสดุผง เหมาะสำหรับการขึ้นรูปชิ้นงานที่มีขนาดเล็ก รูปร่างไม่ซับซ้อนนัก เนื่องจากหากชิ้นงานมีขนาดใหญ่เกินไป จำเป็นต้องใช้แรงกดสูงซึ่งเป็นการสิ้นเปลืองพลังงาน และความหนาแน่นกรีน (Green Density) ไม่สม่ำเสมอ ส่งผลให้สมบัติโดยรวมของชิ้นงานหลังการเผาผนึกไม่ดี นอกจากนี้หากชิ้นงานมีความซับซ้อนมากเกินไปการอัดขึ้นรูปอาจไม่สมบูรณ์ และไม่มี ความสม่ำเสมอของความหนาแน่นกรีนเช่นกัน ซึ่งกระบวนการอัดขึ้นรูปวัสดุผงเป็นชิ้นงานกรีน แบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนดังในรูปที่ 2.1

1. การเติมผง (Filling) โดยการเติมวัสดุผงลงในแม่พิมพ์ ตามปริมาณที่กำหนดไว้
2. การอัด (Compacting) เป็นจังหวะที่กระบอกอัดกดลงบนแม่พิมพ์ และกดทับไว้ช่วงเวลาหนึ่ง เพื่อทำการขึ้นรูป
3. การถอดชิ้นงาน (Ejection) เมื่อชิ้นงานคงรูปแล้วจึงทำการถอดชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์



รูปที่ 2.1 ขั้นตอนการอัดขึ้นรูปวัสดุผง<sup>(3)</sup>

### 2.2.3 การกำจัดสารเติมแต่ง<sup>(4)</sup>

ก่อนเริ่มการเผาผนึก จำเป็นต้องกำจัดสารเติมแต่งต่าง ๆ ที่ใส่เข้าไปในชั้นดิน เช่น สารหล่อลื่น หรือตัวประสาน เป็นต้น เพื่อให้เหลือเพียงเนื้อวัสดุ ซึ่งการกำจัดสารเติมแต่ง แบ่งเป็น 2 วิธี ได้แก่ การกำจัดโดยสารละลาย (Solvent Debinding) และ การกำจัดโดยความร้อน (Thermal Debinding) แต่สำหรับชิ้นงานซึ่งผลิตจากกระบวนการอัดขึ้นรูป โดยทั่วไปมีปริมาณสารเติมแต่งอยู่น้อย จึงสามารถใช้เพียงวิธีการกำจัดโดยความร้อน โดยการเผาในอุณหภูมิที่สามารถทำให้สารเติมแต่งสลายตัวได้ โดยชิ้นงานที่กำจัดสารเติมแต่งแล้วเรียกว่าชิ้นงานบราวด์ ซึ่งพร้อมสำหรับการเผาผนึกต่อไป

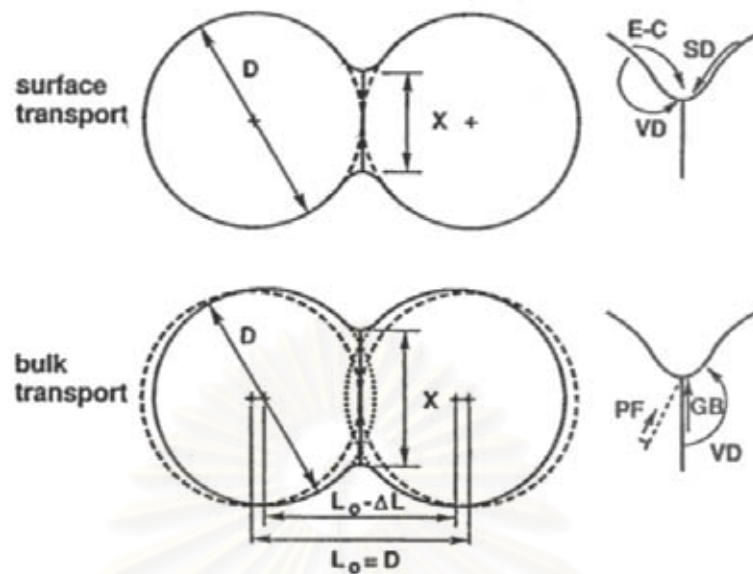
### 2.2.4 การเผาผนึก<sup>(4,5,6,7)</sup>

การเผาผนึก<sup>(5)</sup> คือการทำให้อนุภาคเชื่อมติดกันที่อุณหภูมิสูง โดยการเคลื่อนที่ของอะตอม ซึ่งการเชื่อมกันของอนุภาคเป็นการลดพลังงานพื้นผิวที่สูงของผงวัสดุ ปริมาณพลังงานพื้นผิวต่อหน่วยปริมาตรขึ้นอยู่กับส่วนกลับของขนาดอนุภาค และการประเมินพลังงานพื้นผิวประเมินจากพื้นที่ผิวของอนุภาค ดังนั้นอนุภาคขนาดเล็กมีพื้นที่ผิวมากกว่าจึงมีพลังงานพื้นผิวมากกว่าทำให้ใช้เวลาในการเผาผนึกเร็วกว่า นอกจากนี้ในกรณีของแข็งที่มีลักษณะเป็นผลึกดั่งเช่นผงโลหะ พบว่าบริเวณสัมผัสระหว่างอนุภาคจะกลายเป็นขอบเกรน

ในทางปฏิบัติการเผาผนึกเป็นกระบวนการอบชิ้นงานกรีน ที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของวัสดุในบรรยากาศที่ป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน เช่น ก๊าซไฮโดรเจน ก๊าซอาร์กอน หรือสุญญากาศ (Vacuum) เป็นต้น เพื่อป้องกันการเกิดออกไซด์ เมื่อผ่านการเผาผนึก ผิวอนุภาควัสดุจะหลอมเหลวและเชื่อมติดกันทำให้ปริมาณรูพรุนลดลง ความหนาแน่นเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ชิ้นงานมีความแข็งแรง และเหมาะสมต่อการนำไปใช้งาน

#### 2.2.4.1 กลไกการเผาผนึก<sup>(5,6)</sup>

การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างขณะเผาผนึก มีความสัมพันธ์กับการเพิ่มขนาดของคอลลอยด์ โดยขึ้นกับกลไกการเคลื่อนที่ (Transport Mechanism) ซึ่งส่วนใหญ่เป็นกระบวนการแพร่ที่สามารถกระตุ้นได้ด้วยความร้อน กลไกการเคลื่อนที่เป็นตัวกำหนดการไหลของมวลที่เกิดขึ้นตามแรงขับ กลไกการเคลื่อนที่แบ่งเป็น 2 ประเภท คือ การเคลื่อนที่ตามพื้นผิว (Surface transport) และการเคลื่อนที่แบบมวลรวม (Bulk transport) ทั้ง 2 กลไกประกอบด้วยกลไกระดับอะตอมที่สนับสนุนให้เกิดการไหลของมวล ดังที่แสดงในรูปที่ 2.2 โดย E-C คือ การระเหย-การควบแน่น, SD คือ การแพร่ตามพื้นผิว, VD คือ การแพร่ในเนื้อวัสดุ, PF คือ การไหลแบบพลาสติก และ GB คือ การแพร่ตามขอบเกรน



รูปที่ 2.2 แบบจำลองกลไกการเคลื่อนที่ของขอบเกรนในอนุภาคทรงกลม<sup>(6)</sup>

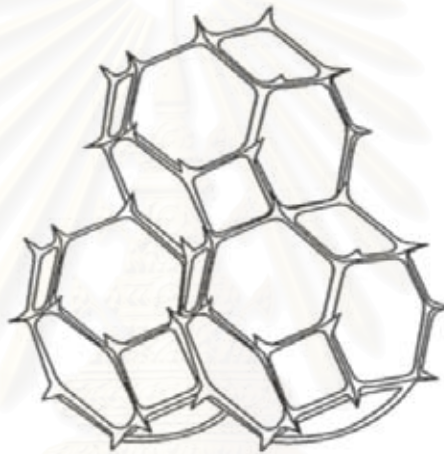
การเคลื่อนที่ตามพื้นผิวเกิดขึ้นในการเพิ่มขนาดของคอคอด โดยปราศจากการเปลี่ยนแปลงระยะต่าง ๆ ภายในอนุภาค กล่าวคือ ไม่มีการหดตัวและไม่มีการแน่นตัวเกิดขึ้น ทั้งที่เนื่องจากการไหลของมวลเริ่มต้นและสิ้นสุดที่พื้นผิวของอนุภาค ในขณะที่เคลื่อนที่ที่ควบคุมโดยการเคลื่อนที่ตามพื้นผิวมีกระบวนการสำคัญสองกระบวนการที่เกิดขึ้นขณะเคลื่อนที่ คือ การแพร่ตามพื้นผิวและการระเหย-การควบแน่น การแพร่ตามพื้นผิวมีความสำคัญในการเคลื่อนที่โลหะหลายชนิดที่อุณหภูมิต่ำ รวมทั้งการเคลื่อนที่เหล็กด้วย ส่วนการระเหย-การควบแน่นไม่เกิดที่อุณหภูมิต่ำ แต่มีความสำคัญต่อการเคลื่อนที่โลหะที่มีความเสถียรต่ำ เช่น ตะกั่ว เป็นต้น

การเคลื่อนที่มวลรวมทำให้เกิดการหดตัว มวลเริ่มต้นเคลื่อนที่จากภายในอนุภาคและสิ้นสุดที่คอคอด กลไกการเคลื่อนที่แบบมวลรวมคือการแพร่ในเนื้อวัสดุ การแพร่ตามขอบเกรน การไหลแบบพลาสติก และการไหลแบบหนืด สำหรับการไหลแบบพลาสติกมีความสำคัญในช่วงเริ่มให้ความร้อน โดยเฉพาะผงที่ผ่านการอัดทำให้มีความหนาแน่นของดิสโลเคชันสูง โดยทั่วไปความเค้นของแรงดึงผิวไม่เพียงพอที่จะสร้างดิสโลเคชันขึ้นมาใหม่ ดังนั้นดิสโลเคชันถูกอบอ่อนจากการให้ความร้อน ให้เคลื่อนออกจากผนังอนุภาค บทบาทของการไหลแบบพลาสติกจึงลดลง ในทางตรงข้ามสำหรับวัสดุออสเทนไนต์ เช่น แก้วและพลาสติก การเคลื่อนที่โดยการไหลแบบหนืดที่อัตราความร้อนรวมตัวกันของอนุภาคขึ้นกับขนาดของอนุภาคและความหนืดของวัสดุ โลหะสามารถเคลื่อนที่โดยการไหลแบบหนืดได้เช่นกัน ถ้ามีเฟสของเหลวเกิดขึ้นตามขอบเกรน การแพร่ตามขอบเกรนมีความสำคัญบ้างสำหรับการแน่นตัวในวัสดุที่เป็นผลึก และมีความสำคัญมากในการแน่นตัวของโลหะทั่วไป ทั้งกระบวนการเคลื่อนที่ตามพื้นผิวและการเคลื่อนที่มวลรวมทำให้คอคอดมีการเพิ่มขนาด แต่ความแตกต่างที่สำคัญอยู่ที่ความหนาแน่นและการหดตัว ระหว่างการเคลื่อนที่ โดยทั่วไปกระบวนการเคลื่อนที่แบบมวลรวมมีความสำคัญมากขึ้นที่อุณหภูมิสูง

#### 2.2.4.2 ขั้นตอนการเผาผนึก<sup>(4,5,6,7)</sup>

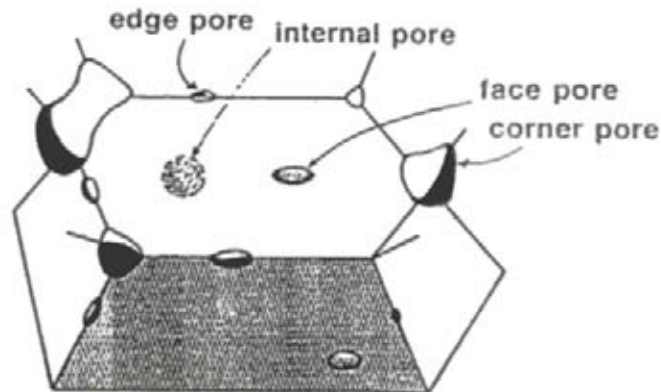
- ขั้นตอนที่แรก (Initial stage) บริเวณจุดสัมผัสระหว่างอนุภาคเริ่มเกิดเป็นคอคอด โดยอัตราส่วนขนาดคอคอดสัมผัสพาร์ท ไม่เกิน 0.3 มีการลดลงของพื้นที่ผิว แต่อาจเกิดหรือไม่เกิดการหดตัวก็ได้ ลักษณะรูพรุนภายในยังเป็นช่องว่างต่อเนื่องแบบเปิด และมีรูปร่างที่ไม่สม่ำเสมอ

- ขั้นตอนที่กลาง (Intermediate stage) เป็นขั้นตอนที่กำหนดสมบัติของชิ้นงานหลังการเผาผนึก เกิดจากการแพร่ในเนื้อวัสดุและการแพร่ตามขอบเกรน รูพรุนที่อยู่บนขอบเกรนจะหายไปเร็วกว่ารูพรุนที่อยู่ตามลำพัง และรูพรุนจะมีลักษณะมนขึ้นแล้วไปรวมกับขอบเกรนขณะที่เกรนโต จนกระทั่งรูพรุนมีลักษณะเป็นทรงกระบอกเชื่อมต่อกัน ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 โครงสร้างตาข่ายรูพรุนในขั้นตอนที่กลางของการเผาผนึก<sup>(6)</sup>

- ขั้นตอนที่สุดท้าย (Final stage) เป็นขั้นตอนที่เกิดขึ้นช้าที่สุด เพราะรูพรุนทรงกลมที่แยกจากกันเกิดจากการหดตัวด้วยกลไกการแพร่มวลรวม รูพรุนแยกกันอยู่ตามขอบเกรน ซึ่งลักษณะนี้ทำให้สมดุลระหว่างพลังงานขอบเกรนและพลังงานพื้นผิวของเฟสของแข็ง-ไอ เกิดเป็นร่องเรียกว่า มุมสองหน้า (Dihedral angle) รูพรุนที่อยู่ตามขอบเกรนจะมีรูปร่างเหมือนเลนส์นูนสองด้านประกบกัน ส่วนรูพรุนที่อยู่ตามมุมเกรนมีลักษณะมนหลายเหลี่ยม และเมื่อรูพรุนแยกตัวออกจากขอบเกรนจะมีรูปร่างเป็นทรงกลม ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 รูปร่างรูพรุนในการเผาผนึกตามตำแหน่งของรูพรุน<sup>(7)</sup>

### 2.2.4.3 การวัดปริมาณการเผาผนึก<sup>(5,6)</sup>

การวัดปริมาณการเผาผนึก ทำโดยการตั้งค่าตัวแปรขึ้นมาเพื่อวัดปริมาณซึ่งมีอยู่หลายค่า โดยตัวแปรที่นิยมใช้ได้แก่ อัตราส่วนขนาดคอคอดคอดสัมพัทธ์ ซึ่งคือค่าเส้นศูนย์กลางคอคอดหารด้วยเส้นผ่าศูนย์กลางอนุภาค และ อัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงพื้นที่ผิว ซึ่งคือพื้นที่ผิวที่เปลี่ยนแปลงหารด้วยพื้นที่ผิวเริ่มต้น นอกจากนี้ยังมีตัวแปรอื่น ๆ อีก เช่น

- ตัวแปรการแน่นตัว (Densification parameter,  $\Psi$ ) คือ การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นเนื่องจากการเผาผนึกหารด้วยการเปลี่ยนแปลงที่จำเป็นเพื่อให้ได้ชิ้นงานที่ปราศจากรูพรุน ดังสมการที่ 2.1

$$\Psi = \frac{(\rho_s - \rho_G)}{(\rho_T - \rho_G)} \quad \dots (2.1)$$

เมื่อ  $\Psi$  คือ ตัวแปรการแน่นตัว

$\rho_s$  คือ ความหนาแน่นหลังการเผาผนึก ( $\text{g/cm}^3$ )

$\rho_G$  คือ ความหนาแน่นกรีน ( $\text{g/cm}^3$ )

$\rho_T$  คือ ความหนาแน่นทางทฤษฎี ( $\text{g/cm}^3$ )

- การหดตัว คือ การเปลี่ยนแปลงความยาวของชิ้นงานหลังการเผาผนึกหารด้วยความยาวก่อนการเผาผนึก นอกจากนี้สามารถนำค่าการหดตัวมาคำนวณหาความหนาแน่นของชิ้นงานหลังการเผาผนึกได้จากสมการ 2.2

$$\rho_s = \frac{\rho_G}{\left(1 - \frac{\Delta L}{L_0}\right)^3} \quad \dots (2.2)$$

- เมื่อ  $\rho_s$  คือ ความหนาแน่นหลังการเผาผนึก ( $\text{g/cm}^3$ )  
 $\rho_G$  คือ ความหนาแน่นกรีน ( $\text{g/cm}^3$ )  
 $\Delta L$  คือ การเปลี่ยนแปลงความยาวของชิ้นงานหลังเผาผนึก (mm)  
 $L_0$  คือ ความยาวก่อนการเผาผนึก (mm)

### 2.3 ปัจจัยในการอัดขึ้นรูปที่มีอิทธิพลต่อสมบัติต่าง ๆ ของชิ้นงาน

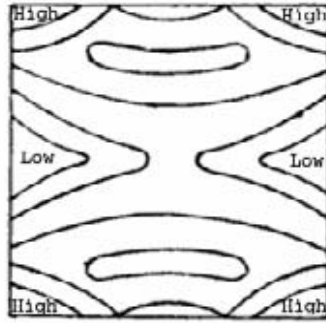
#### 2.3.1 อิทธิพลของขนาดและรูปร่างอนุภาค<sup>(5,8)</sup>

ขนาดของอนุภาคมีผลกระทบต่อแรงเสียดทาน (Friction) ระหว่างอนุภาค, ความหนาแน่นจากการจัดเรียงตัวและขนาดรูพรุน อนุภาคขนาดเล็กทำให้มีความยุ่งยากในการอัดเป็นเพราะรูพรุนขนาดใหญ่อยู่รอบตัวภายใต้ความดันต่ำกว่ารูพรุนขนาดเล็ก และการเกิดเวิร์กฮาร์ดเดนนิง (Work Hardening) ในอนุภาคขนาดใหญ่ช้ากว่า เนื่องจากระยะห่างของการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชันกว้างกว่า ดังนั้นอัตราการแน่นตัวตามความดันของผงขนาดใหญ่จึงดีกว่าผงขนาดเล็ก

ผงที่มีความพรุนภายในและรูปร่างอนุภาคคล้ายฟองน้ำ มีการยุบตัวของรูพรุนขนาดใหญ่ระหว่างอนุภาคทำให้เกิดการเริ่มต้นของการอัดแน่น ด้วยเหตุนี้ผงประเภทนี้จึงมีความสามารถในการอัดเริ่มต้นสูง แต่รูพรุนขนาดเล็กภายในจะขัดขวางการอัดเพื่อให้ได้ความหนาแน่นสุดท้ายสูง และทำให้เกิดแรงดัดกลับในขั้นตอนการเอาชิ้นงานออกสูง และมีผลทำให้เกิดการแตกร้าวได้

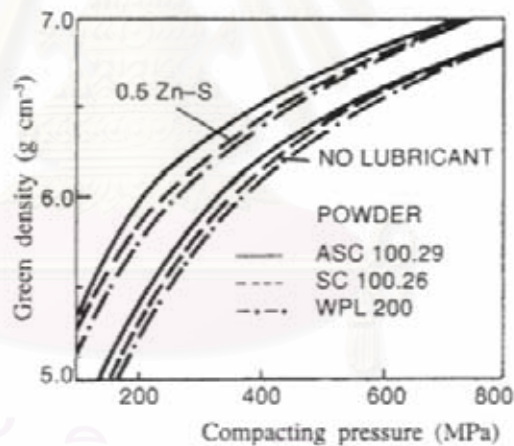
#### 2.3.2 อิทธิพลของสารหล่อลื่น<sup>(3,9)</sup>

การสูญเสียพลังงานในขั้นตอนการอัดขึ้นรูปส่วนใหญ่ เกิดจากแรงเสียดทานในขณะอัด ซึ่งแรงเสียดทานในขณะอัดเกิดขึ้นในหลายตำแหน่งได้แก่ แรงเสียดทานระหว่างกระบอกอัด (Punch) กับผนังแม่พิมพ์ (Die wall), แรงเสียดทานระหว่างชิ้นงานกรีนกับผนังแม่พิมพ์ขณะถอดชิ้นงาน, แรงเสียดทานระหว่างผง และแรงเสียดทานระหว่างผงกับผนังแม่พิมพ์ ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญต่อความไม่สม่ำเสมอของความหนาแน่นกรีน อันเป็นสาเหตุหลักต่อความเสียหายของชิ้นงานในขั้นตอนการเผาผนึก รวมไปถึงอายุการใช้งานของแม่พิมพ์ โดยแบบจำลองการกระจายตัวความหนาแน่น แสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 การกระจายตัวของความหนาแน่นกรีนจากการอัดขึ้นรูป<sup>(3)</sup>

เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวจึงมีการเติมสารหล่อลื่น ลงไปในวัสดุผงเพื่อลดแรงเสียดทาน ส่งผลให้การกระจายตัวของความหนาแน่นแคบลง และความหนาแน่นกรีน เพิ่มสูงขึ้นที่แรงกดเท่ากัน ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.6 ซึ่งสารที่นิยมนำมาใช้เป็นสารหล่อลื่นมักมีจุดหลอมเหลวต่ำในช่วง 100 – 200 °C เช่น กรดไขมัน (Stearic acid) และเกลือ (Stearate) ของ ลิเทียม (Lithium, Li), อลูมิเนียม (Aluminum, Al), แคลเซียม (Calcium, Ca) และสังกะสี (Zinc, Zn) เป็นต้น โดยนิยมผสมสารหล่อลื่นในปริมาณร้อยละ 1 – 2 โดยน้ำหนัก



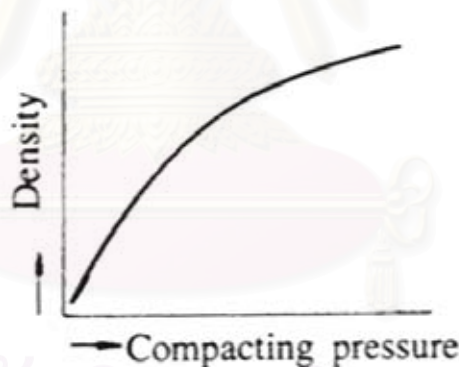
รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับแรงกด ของวัสดุผงที่ผสมและไม่ผสมสารหล่อลื่น<sup>(9)</sup>

### 2.3.3 อิทธิพลของแรงกดในการอัดขึ้นรูป<sup>(9)</sup>

แรงกดในขั้นตอนการอัดขึ้นรูป มีบทบาทสำคัญต่อการควบคุมความหนาแน่นกรีน โดยความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกรีนกับความดันอัด (Compacting pressure) แสดงในรูปที่ 2.7 ซึ่งจะเห็นว่าเมื่อแรงกดเพิ่มสูงขึ้น ความหนาแน่นกรีน สูงขึ้นจนถึงระดับหนึ่ง ก่อนที่ความหนาแน่นก่อนข้างคงที่ เพราะหากเพิ่มแรงกดมากไปกว่านั้นอาจเป็นการสิ้นเปลืองพลังงาน และอาจเกิดความเสียหายกับชิ้นงานกรีน แล้วเนื่องจากความหนาแน่นแปรผกผันกับปริมาตรรูพรุน จึงสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรรูพรุน กับความดันอัดได้ดังสมการที่ 2.3

$$P = P_0 \exp(-Kp^n) \quad \dots (2.3)$$

- เมื่อ  $P$  คือ ปริมาตรรูพรุนของชิ้นงานกรีน (%)  
 $P_0$  คือ ปริมาตรรูพรุนของวัสดุผงที่อยู่กันอย่างหลวม ๆ (%)  
 $p$  คือ ความดันอัด (MPa)  
 $K$  คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงรูพรุน มีค่าประมาณ  $1/\text{yield strength (MPa}^{-1})$   
 $n$  คือ strain hardening exponent



รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกรีนกับความดันอัด<sup>(9)</sup>

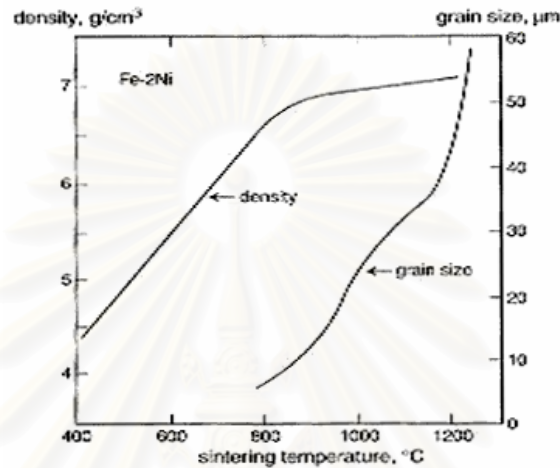
## 2.4 ปัจจัยในการเผาที่มีอิทธิพลต่อสมบัติต่าง ๆ ของชิ้นงาน

### 2.4.1 อิทธิพลของการอัดขึ้นรูป<sup>(5,8)</sup>

การอัดเป็นการลดความพรุนและเพิ่มปริมาณดิสโลเคชันเข้าไปในผงโลหะ โดยปกติชิ้นที่มีความพรุนต่ำการหดตัวขณะเผาผนึกจึงน้อยกว่าชิ้นงานที่มีความพรุนสูง นอกจากนี้ความหนาแน่นของดิสโลเคชันสูงกว่าช่วยทำให้อัตราการอบผนึกเริ่มต้นเร็วกว่า

## 2.4.2 อิทธิพลของอุณหภูมิและเวลาการเผาผนึก<sup>(4,9)</sup>

อุณหภูมิการเผาผนึกอยู่ในช่วง 70 – 80% ของอุณหภูมิหลอมเหลวของวัสดุผงแต่ละชนิด การให้ความร้อนในการเผาผนึก ถ้าอุณหภูมิสูง อะตอมสามารถเคลื่อนที่ได้ดีจึงทำให้อนุภาคเชื่อมติดกันได้ง่าย และรวดเร็ว รวมไปถึงการโตของเกรนเป็นไปอย่างรวดเร็วเช่นกัน ส่งผลให้มีความหนาแน่นสูงตามไปด้วย ดังที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นและขนาดเกรนกับอุณหภูมิเผาผนึก ในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นและขนาดเกรนกับอุณหภูมิเผาผนึก<sup>(4)</sup>

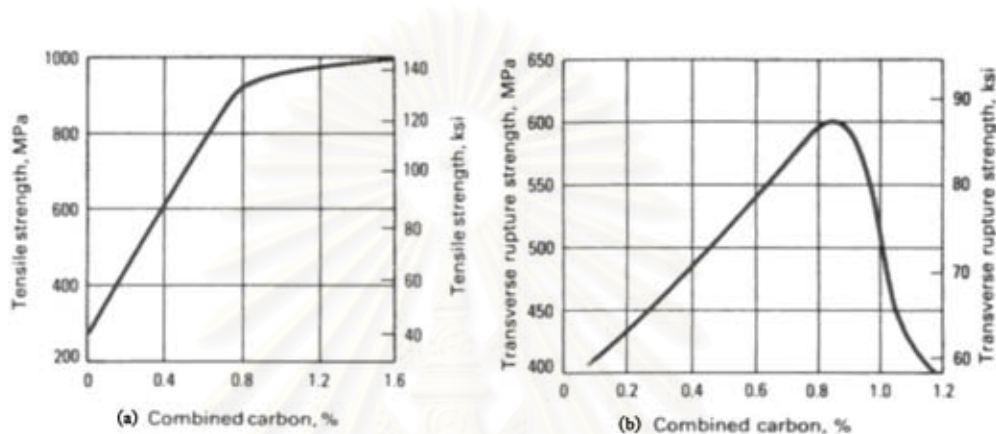
เวลาการเผาผนึก ส่งผลกับสมบัติทางกลของชิ้นงานโดยตรง หากเวลาน้อยเกินไปอนุภาคของวัสดุผงจะเชื่อมติดกันไม่สมบูรณ์ และหากเวลานานเกินไปอาจเกิดการเปลี่ยนโครงสร้างและขนาดเกรนใหญ่เกินไป ส่งผลให้สมบัติทางกลของชิ้นงานไม่ดี ซึ่งเวลาการเผาผนึก ในชิ้นงานแต่ละประเภทไม่เหมือนกัน โดยมีปัจจัยสำคัญดังต่อไปนี้

- รูปร่างชิ้นงาน หากชิ้นงานมีขนาดใหญ่ จำเป็นต้องใช้เวลาเผาผนึกเพิ่มมากขึ้น แต่หากชิ้นงานมีทั้งส่วนบางและหนาต่างกันมาก ๆ อาจส่งผลให้โครงสร้างภายในของทั้งสองตำแหน่งแตกต่างกัน
- อุณหภูมิเผาผนึก หากใช้อุณหภูมิเผาผนึกสูง เวลาในการเผาผนึกต่ำลง เพราะหากใช้เวลานานเกินไป อาจเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง และเกรนมีขนาดใหญ่เกินไป
- ขนาดอนุภาคของวัสดุผง ถ้าวัสดุผงมีขนาดอนุภาคเล็ก ทำให้มีพื้นที่ผิวมาก และพลังพื้นผิวสูง ส่งผลให้ใช้เวลาในการเผาผนึกน้อยกว่าวัสดุผงที่มีขนาดอนุภาคใหญ่

ตัวอย่างงานวิจัยของ Hwan-Jin Sung, Tae Kwon Ha, Sangho Ahn และ Young Won Chag<sup>(10)</sup> การเผาผนึกโลหะผง 17-4 PH ที่อุณหภูมิ 900 - 1350 °C พบว่าที่ 1350 °C ขนาดเกรนใหญ่ที่สุด และมีสมบัติทางกลสูงกว่าอุณหภูมิการเผาผนึกอื่น ๆ

### 2.4.3 อิทธิพลของปริมาณธาตุคาร์บอน<sup>(11)</sup>

ผลของปริมาณคาร์บอน ต่อสมบัติทางกลของเหล็กกล้า แสดงดังตัวอย่างในรูปที่ 2.9 สำหรับชิ้นงานจากกระบวนการรีด ค่า transverse rupture strength เพิ่มสูงขึ้นอย่างมาก จนถึง 0.8% อัตราการเพิ่มขึ้นกลับลดต่ำลง แต่ในทางตรงข้ามชิ้นงานจากกระบวนการโลหะผง ค่า transverse rupture strength กลับลดต่ำลง เมื่อปริมาณคาร์บอนเพิ่มสูงกว่า 0.85%

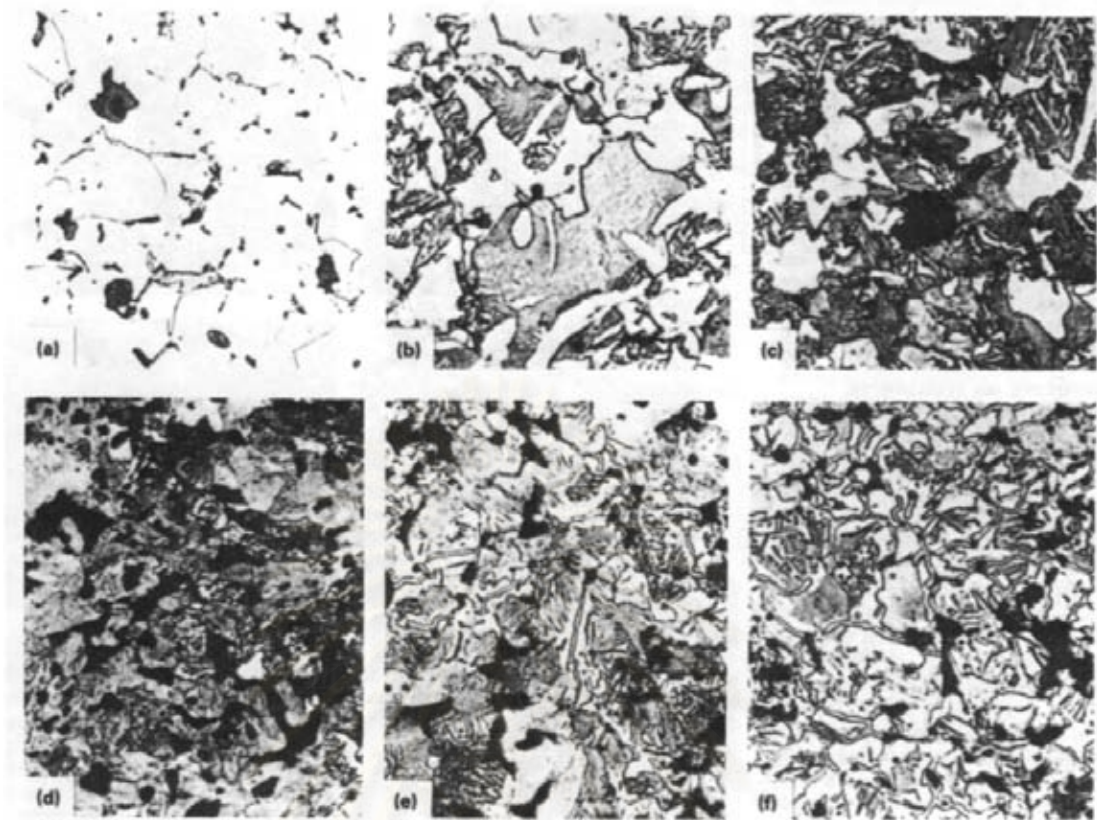


รูปที่ 2.9 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า transverse rupture strength กับปริมาณคาร์บอน<sup>(11)</sup>

(a) ชิ้นงานจากกระบวนการรีด (b) ชิ้นงานจากกระบวนการโลหะผง

เหตุผลที่เป็นเช่นนั้น เพราะปริมาณคาร์บอนที่เพิ่มขึ้นทำให้ปริมาณเพิร์ไลต์ (Pearlite) ในชิ้นงานเพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้ความแข็งแรง และความแข็งเพิ่มสูงขึ้น แต่เมื่อปริมาณคาร์บอนเพิ่มสูงกว่า 0.85% เริ่มเกิดซีเมนต์ไต์ (Cementite) ที่บริเวณขอบเกรน และกลายเป็นโครงข่ายซีเมนต์ไต์ ดังแสดงในรูปที่ 2.10 ส่งผลให้ค่า transverse rupture strength ลดต่ำลง

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.10 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนจากระบวนการโลหะผงที่มีปริมาณคาร์บอนต่าง ๆ<sup>(11)</sup> (a) ประมาณ 0% (b) 0.4% (c) 0.6% (d) 0.8% (e) 1.0% (f) 1.2%

#### 2.4.4 อิทธิพลจากการสูญเสียคาร์บอนที่ผิว<sup>(12)</sup>

การสูญเสียคาร์บอนที่ผิว (Decarburization) ในอุณหภูมิสูงเช่น ระหว่างการเผาผืน้ก, ชุบแข็งผิว และกรรมวิธีทางความร้อน เป็นต้น ชิ้นงานมีโอกาสสูญเสียคาร์บอนจากการทำปฏิกิริยากับบรรยากาศที่สัมผัสชิ้นงาน สามารถป้องกันหรือลดการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวได้ ด้วยการควบคุมบรรยากาศหรือเพิ่มธาตุองค์ประกอบลงในชิ้นงานเช่น ซิลิกอน เป็นต้น

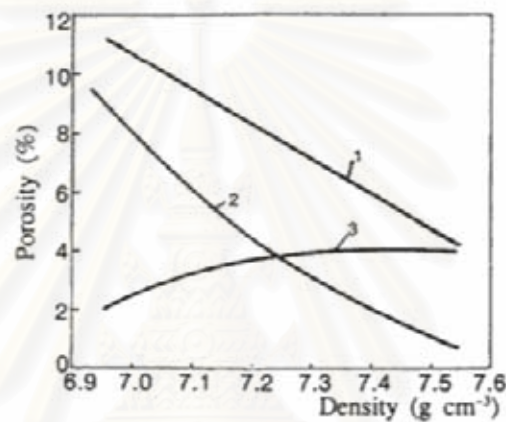
### 2.5 อิทธิพลของรูปพรุนต่อสมบัติทางกลของชิ้นงานขึ้นรูปวัสดุผง

#### 2.5.1 ประเภทของรูปพรุน<sup>(9)</sup>

การขึ้นรูปชิ้นงานวัสดุผงย่อมเกิดรูปพรุนขึ้นภายในชิ้นงานเสมอ ซึ่งส่งผลให้ความหนาแน่นของชิ้นงานลดลง รวมไปถึงส่งผลต่อสมบัติทางกลของชิ้นงาน โดยหากแบ่งประเภทของรูปพรุนตามลักษณะโครงสร้าง สามารถแบ่งได้ 2 ประเภท ได้แก่

1. รูพรุนเปิด (Open pore) รูพรุนต่อเนื่องกันจนทำให้ของไหล หมุนเวียนถึงกันได้
2. รูพรุนปิด (Close pore) รูพรุนของไม่ต่อกัน ของไหลไม่สามารถหมุนเวียนถึงกันได้

อย่างไรก็ดี มักพบรูพรุนในลักษณะผสม กล่าวคือ มีทั้งรูพรุนเปิด และรูพรุนปิดอยู่ร่วมกัน โดยปกติรูพรุนเปิดและอิทธิพลต่อสมบัติต่าง ๆ ของชิ้นงานมากกว่ารูพรุนปิด ยกเว้นชิ้นงานที่มีความหนาแน่นสูงกว่า 96% รูพรุนปิดจะมีปริมาณและอิทธิพลต่อชิ้นงานมากกว่า และสามารถแสดงสัมพันธ์โดยรวมได้ ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกับอิทธิพลของปริมาณรูพรุนต่อความหนาแน่น โดยรูพรุนแบบผสมคือผลรวมของรูพรุนเปิดและปิด



รูปที่ 2.11 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณรูพรุนกับความหนาแน่น<sup>(9)</sup>

(1) แบบผสม (2) แบบเปิด (3) แบบปิด

### 2.5.2 อิทธิพลต่อความต้านทานแรงดึงและการยืดตัว<sup>(9)</sup>

ความต้านทานแรงดึงและการยืดตัวของชิ้นงาน มีแนวโน้มลดต่ำลงในรูปแบบเดียวกัน เมื่อปริมาณรูพรุนเพิ่มสูงขึ้น แล้วเนื่องจากโดยทั่วไปกระบวนการอัดขึ้นรูปชิ้นงานมักมีความหนาแน่นประมาณ 90% ซึ่งเมื่อพิจารณาจากรูปที่ 2.10 ให้ความหนาแน่นดังกล่าวชิ้นงานได้รับอิทธิพลจากรูพรุนเปิดมากกว่า ทำให้สามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแรงดึงและการยืดตัวกับปริมาณรูพรุนได้ในรูปของสมการยกกำลัง ดังในสมการ 2.4 ซึ่งสมการนี้สามารถใช้ได้กับชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการผลิตเดียวกัน เนื่องจากลักษณะของโครงสร้างจุลภาค เช่น ขนาดเกรน และปริมาณแต่ละเฟส เป็นต้น มีส่วนสำคัญในการกำหนดสมบัติทางกลของชิ้นงาน

$$A = A_0 \exp(-kP) \quad \dots (2.4)$$

- เมื่อ  $A$  คือ ความต้านทานแรงดึง หรือการยืดตัว ของชิ้นงานขึ้นรูปผง  
 $A_0$  คือ ความต้านทานแรงดึง หรือการยืดตัว ของชิ้นงานเนื้อแน่น  
 $k$  คือ ค่าคงที่จากการทดลอง  
 $P$  คือ ปริมาณรูพรุน (%)

### 2.5.3 อิทธิพลต่อความแข็ง<sup>(9)</sup>

ความแข็งของชิ้นงาน มีแนวโน้มลดต่ำลงเมื่อปริมาณรูพรุนเพิ่มสูงขึ้น แต่ค่าความแข็งแตกต่างจากความต้านทานแรงดึงและการยืดตัว ที่ไม่ได้รับอิทธิพลการกระบวนการผลิตและประเภทของรูพรุน โดยขึ้นอยู่กับสมบัติความแข็งของเนื้อพื้น ปริมาณและขนาดรูพรุนเป็นสำคัญ ซึ่งสามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกับปริมาณรูพรุน ได้ดังสมการเส้นตรง ดังในสมการ 2.5

$$H = H_0 - kP \quad \dots (2.5)$$

- เมื่อ  $H$  คือ ความแข็งของชิ้นงานขึ้นรูปผง  
 $H_0$  คือ ความแข็งของชิ้นงานเนื้อแน่น  
 $k$  คือ ค่าคงที่จากการทดลอง  
 $P$  คือ ปริมาณรูพรุน (%)

## 2.6 การชุบแข็งผิว และกรรมวิธีทางความร้อนภายหลังการชุบแข็งผิว

### 2.6.1 การชุบแข็งผิวโดยวิธีคาร์บูไรซิ่ง<sup>(2,12)</sup>

การชุบแข็งผิว เป็นการชุบแข็งเพื่อให้ได้ความแข็งเฉพาะบริเวณผิวเท่านั้น ส่วนเนื้อชิ้นงานภายใต้ผิวแข็งจนถึงใจกลางจะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง ทั้งนี้เพื่อให้ชิ้นงานทนต่อการสึกหรอ และการเสียดสีที่ผิว, ป้องกันการยึดเกาะกับวัสดุอื่นในขณะใช้งาน, เจียรระไนผิวได้เรียบมัน และส่วนแกนกลางชิ้นงานยังคงมีความเหนียวรับแรงได้ดี ทำให้ทนต่อแรงบิด, แรงดึง หรือแรงกระแทกอย่างรุนแรงได้โดยไม่แตกหักง่าย จึงเป็นที่นิยมสำหรับใช้กับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำเพื่อให้ได้ชิ้นงานที่มีคุณภาพดี ยืดอายุการใช้งาน ตัวอย่างชิ้นงานที่นิยมใช้การชุบแข็งผิวได้แก่ เพลลาข้อเหวี่ยง, ก้านข้อเหวี่ยง, เฟือง, แกนสลัก เป็นต้น

เมื่อเหล็กที่ต้องการชุบแข็งผิวหากมีปริมาณคาร์บอนน้อยกว่า 0.2% ซึ่งไม่สามารถทำการชุบให้มีโครงสร้างมาร์เทนไซต์ (Martensite) ได้ ดังนั้นจึงต้องเติมคาร์บอนที่ผิวเสียก่อน จึงสามารถชุบให้เกิดเป็นโครงสร้างมาร์เทนไซต์ได้ วิธีการชุบแข็งผิวด้วยการเพิ่มคาร์บอนนี้ เรียกว่าวิธีการคาร์บูไรซิ่ง โดยการทำคาร์บูไรซิ่ง มีหลายวิธีตามตัวกลางที่ใช้ ได้แก่ ของแข็ง (Solid/Pack Carburizing), ของเหลว (Liquid Carburizing) และ ก๊าซ (Gas Carburizing) เป็นต้น

### 2.6.1.1 กลไกการแพร่ในกระบวนการคาร์บูไรซิ่ง<sup>(2,12,13)</sup>

กลไกการแพร่ในกระบวนการคาร์บูไรซิ่ง ดำเนินตามการกฎข้อที่ 1 ของฟิค (Fick's first law) ดังในสมการที่ 2.6 และสามารถแปลงออกมาเป็นรูปทั่วไปดังในสมการที่ 2.7 เพื่อความสะดวกสำหรับการใช้งานในกรณีกระบวนการคาร์บูไรซิ่ง

$$J = -D \frac{dC}{dx} \quad \dots (2.6)$$

เมื่อ  $J$  คือ Molar flux ( $\text{mol}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$ )  
 $D$  คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ ( $\text{cm}^2/\text{s}$ )  
 $C$  คือ ความเข้มข้น ( $\text{mol}/\text{cm}^3$ )  
 $x$  คือ ระยะทาง (cm)

$$\frac{C - C_0}{C_s - C_0} = 1 - \text{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right) \quad \dots (2.7)$$

เมื่อ  $C$  คือ ปริมาณคาร์บอนที่ความลึก  $x$  จากผิว (wt%)  
 $C_0$  คือ ปริมาณคาร์บอนเริ่มต้น (wt%)  
 $C_s$  คือ ปริมาณคาร์บอนที่ผิว (wt%)  
 $D$  คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ ( $\text{cm}^2/\text{s}$ )  
 $x$  คือ ระยะทางลึกจากผิว (cm)  
 $t$  คือ เวลา (s)

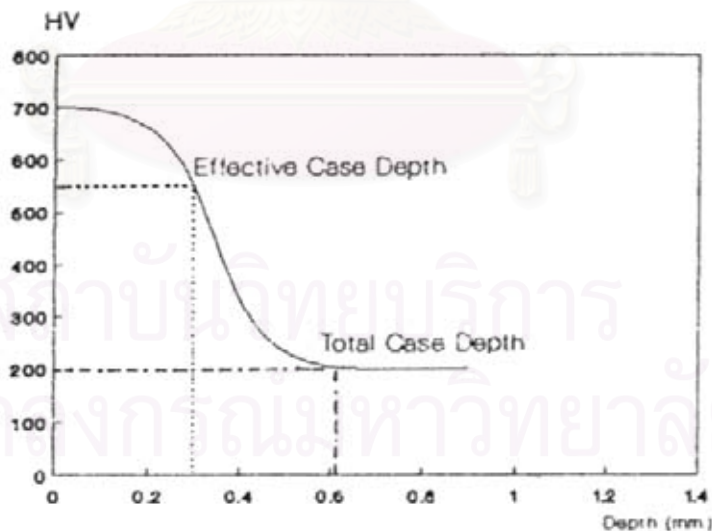
ในทางปฏิบัติ เพื่อประสิทธิภาพและควบคุมคุณภาพในการทำก๊าซคาร์บูไรซิ่ง นิยมแบ่งช่วงการแพร่ออกเป็น 2 ช่วงได้แก่

- ช่วงการคาร์บูไรซิ่ง (Carburizing period) เป็นช่วงเริ่มต้นของการทำคาร์บูไรซิ่งด้วยก๊าซบรรยากาศภายในเตาจะมีความเข้มข้นของคาร์บอน (Carbon potential) สูง เพื่อเร่งในคาร์บอนแพร่เข้าไปในชิ้นงานโดยเร็ว และกระบวนการจะดำเนินไปจนกว่าความเข้มข้นของคาร์บอนเข้าสู่สมดุล
- ช่วงการแพร่ (Diffuse period) เมื่อความเข้มข้นของคาร์บอนเริ่มเข้าสู่สมดุล ทำการปรับบรรยากาศภายในเตาให้ความเข้มข้นของคาร์บอนต่ำลง เท่ากับความเข้มข้นคาร์บอนสูงสุดในชิ้นงานที่ต้องการ อัตราการแพร่ลดต่ำลงแต่จะได้ชั้นการแพร่ที่สม่ำเสมอ

### 2.6.1.2 การวัดความหนาของผิวแข็ง<sup>(2)</sup>

โดยการวัดความหนาของพื้นผิวที่คาร์บอนแพร่เข้าไป สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.12 โดยแบ่งออกเป็น 2 ระดับได้แก่

1. Total case depth คือระยะทางที่วัดตั้งฉากจากผิวที่ชุบแข็งแล้ว ถึงจุดที่ไม่มีความแตกต่างทางเคมีกับแกนกลาง
2. Effective case depth คือ ระยะทางที่วัดตั้งฉากจากผิวที่ชุบพื้นผิว จนถึงจุดที่มีค่าความแข็ง 85% ของค่าความแข็งที่ผิว



รูปที่ 2.12 แผนภูมิแสดงระดับการแพร่ของคาร์บอนที่พื้นผิว<sup>(2)</sup>

จากงานวิจัยของ นีวัตร มุลปา และ ชายชาญ นาวิกนิเวท<sup>(14)</sup> โดยทำ pack carburizing ที่ 950 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง กับโลหะ SCM415 จากงานรีด โดยไม่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหลังทำการชุบไรรซึ่งพบว่าพื้นผิวชิ้นงานมีค่าความแข็งสูงสุดประมาณ 800 – 850 HV และมีค่า Total case depth ประมาณ 2 มิลลิเมตร

## 2.6.2 กรรมวิธีทางความร้อนหลังการทำการชุบไรร<sup>(2,12)</sup>

โดยทั่วไปหลังจากผ่านคาร์บูไรซิ่ง ปริมาณคาร์บอนที่ผิวสูงกว่า 0.8% ซึ่งทำให้เกิดมีซีเมนต์ไต์ที่ก่อนอุณหภูมิยูเทคตอยด์ปรากฏตามขอบเกรน ทั้งนี้เพราะอุณหภูมิที่ใช้ทำการชุบไรรซึ่งมักจะสูงซึ่งส่งผลให้สูญเสียความเหนียว เพื่อให้ได้เหล็กภายหลังการชุบแข็งมีคุณภาพดี จำเป็นต้องอบชุบหลายขั้นตอนดังต่อไปนี้

- ทำ Normalizing ที่อุณหภูมิ 850 – 900 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมงต่อชิ้นงานหนา 25 มิลลิเมตร เพื่อให้เกรนภายในมีความละเอียด ขณะเดียวกันปริมาณคาร์บอนที่ผิวซึ่งสูงกว่า 0.8% จะลดลงโดยการแพร่ซึมของคาร์บอนจากบริเวณผิวเข้าสู่แกนกลาง ทำให้ได้ความเหนียวและควบคุมปริมาณคาร์บอนที่ผิวไปพร้อม ๆ กัน

- ทำการอบชุบที่อุณหภูมิ 760 - 780 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมงต่อชิ้นงานหนา 25 มิลลิเมตร เพื่อให้ผิวเป็นออสเทนไนท์ ส่วนแกนกลางยังอยู่ในช่วงการเปลี่ยนแปลง แล้วนำมาชุบน้ำ เพื่อให้ออสเทนไนท์ที่ผิวกลายเป็นมาร์เทนไซต์ ส่วนภายในเนื่องจากอัตราการเย็นตัวไม่สูงพอ จะกลายเป็น เบนไนท์ (Bainite) หรือซอร์ไบท์ (Sorbite) แทน

- ทำการอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 150 – 170 °C เพื่อลดความเครียดที่เกิดจากการชุบน้ำและเป็นการเพิ่มความเหนียวให้กับมาร์เทนไซต์

อย่างไรก็ดีในอุตสาหกรรมจริงไม่นิยมทำการอบชุบหลายขั้นตอน เนื่องจากเป็นการสิ้นเปลืองพลังงานและเพิ่มต้นทุนการผลิต โดยมักทำการชุบเพียงครั้งเดียวจากอุณหภูมิคาร์บูไรซิ่ง หรืออาจลดอุณหภูมิลงมาระดับหนึ่งก่อนจึงชุบ แล้วนำไปอบคืนตัวอีกครั้งหนึ่ง

จากงานวิจัยของ Lee-Der Liu และ Fan-Shiong Chen<sup>(15)</sup> พบว่าเมื่อทำการชุบไรรซึ่ง ชิ้นงาน SCM 415 ซึ่งขึ้นรูปด้วยกระบวนการรีด โดยทำการชุบไรรซึ่งที่อุณหภูมิ 950 °C ทำการอบชุบที่ 840 °C หล่อเย็นด้วยน้ำมัน และอบคืนตัวที่ 180 °C พื้นผิวชิ้นงานมีค่าความแข็งสูงสุดประมาณ 850 – 900 HV และหากทำ super-carburization (Super-carburization) 5 รอบ ระยะทางการแพร่ซึมของคาร์บอนเพิ่มขึ้นประมาณ 25%

### บทที่ 3

#### ระเบียบวิธีการทดลอง

#### 3.1 วัสดุในการทดลอง

##### 3.1.1 วัสดุผง

วัสดุผงในการทดลอง คือ ผงเหล็กกล้าผสมโครเมียมและโมลิบดีนัม เกรด SCM 415 จาก บริษัท Atmix corporation รหัสสินค้า KIP 4100V สมบัติทั่วไปของวัสดุผงนี้ ได้แก่ มีลักษณะเป็นผงหยาบ สีโลหะเข้ม มีความหนาแน่นปรากฏ (Apparent Density)  $2.84 \text{ g/cm}^3$  เมื่อทำการอัดขึ้นรูปด้วยความดันอัด  $588.4 \text{ MPa}$  มีค่าความหนาแน่นกรีน  $6.96 \text{ g/cm}^3$  และมีปริมาณการสูญเสีย  $0.50 \text{ vol\%}$  นอกจากนี้ ยังมี ส่วนประกอบทางเคมีและการกระจายตัวของขนาดผง ดังที่แสดงในตารางที่ 3.1 และ 3.2 ตามลำดับ

ตารางที่ 3.1 ส่วนประกอบทางเคมีของผงโลหะ SCM 415 ในการทดลอง

ส่วนประกอบทางเคมี (%)							
C	Cr	Mo	Mn	O	P	Si	S
0.003	1.03	0.30	0.72	0.234	0.015	0.01	0.009

ตารางที่ 3.2 การกระจายตัวของขนาดผงโลหะ SCM 415 ในการทดลอง

ขนาดผงโลหะ ( $\mu\text{m}$ )	Weight %
180 -250	2.2
150 – 179	9.5
106 – 149	26.5
75 – 105	30.0
63 – 74	9.1
45 – 62	11.0
< 45	11.7

### 3.1.2 ชิ้นงานเปรียบเทียบ

ชิ้นงานเปรียบเทียบเป็นเหล็กกล้าผสมโครเมียมและโมลิบดีนัม เกรด SCM 415 ผลิตจากกระบวนการรีดมีรูปร่างเป็นทรงกระบอกเส้นผ่าศูนย์กลาง 30 มิลลิเมตร หนา 10 มิลลิเมตร

### 3.1.3 สารเติมแต่ง

1. Zinc stearate<sup>(16)</sup> สูตรเคมี  $Zn(C_{18}H_{35}O_2)_2$  มวลโมเลกุล 632.2 g/mol สมบัติทางกายภาพทั่วไป ได้แก่ ไม่ละลายในน้ำหรือแอลกอฮอล์ แต่สามารถละลายในเบนซีน ความหนาแน่น 1.095 g/cm<sup>3</sup> จุดหลอมเหลว 120 – 130°C ทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่น

2. กราไฟต์<sup>(17)</sup> เป็นอีกรูปหนึ่งของธาตุคาร์บอน สมบัติทางกายภาพทั่วไป รูปผลึกเป็นแผ่นบาง ๆ ทึบแสง อ่อนนุ่ม สีเทาเข้มถึงดำ เนื้ออ่อน เป็นตัวนำความร้อนและไฟฟ้าได้ดี ความหนาแน่น 2.27 g/cm<sup>3</sup> จุดหลอมเหลว 3550°C จุดเดือด 3825°C ซึ่งกราฟไฟต์ทำหน้าที่เป็นธาตุผสม

### 3.1.4 ก๊าซ

1. ก๊าซอาร์กอน (Argon gas, Ar) สำหรับขั้นตอนการกำจัดสารเติมแต่ง
2. ก๊าซไฮโดรเจน (Hydrogen gas, H<sub>2</sub>) สำหรับขั้นตอนการเผาผนึก

## 3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องหาขนาดอนุภาคโดยเทคนิคการเลี้ยวเบนของลำแสงเลเซอร์ Master Sizer
2. เครื่องหาความหนาแน่นอนุภาคโดยหลักการแทนที่ปริมาตรก๊าซ Ultrapycnometer
3. เครื่อง X-Ray Fluorescence Spectrometer (XRF)
4. เครื่องผสมผงแบบ Double cone
5. เครื่องอัดขึ้นรูปแบบไฮดรอลิก DORST TPA 50/4
6. เตาเผาผนึก Linn High Therm HT 1800 Vaccum
7. เตาชุบแข็งผิว
8. อุปกรณ์ชั่ง ตวง วัด และเครื่องมือพื้นฐานในห้องปฏิบัติการ
9. เครื่องทดสอบความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์
10. เครื่องทดสอบความแข็งแบบ HRC
11. เครื่องทดสอบแรงดึง Instron UTM8801 พร้อม Extenso meter

12. ชุดอุปกรณ์เตรียมชิ้นงานได้แก่ เครื่องตัด, เครื่องอัดชิ้นงานด้วยเรซินแบบร้อน และเครื่องขัด
13. กล้องจุลทรรศน์แบบแสงพร้อมชุดถ่ายภาพ
14. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดพร้อมอุปกรณ์ EDS
15. เครื่องวัดการเลี้ยวเบนของลำแสงเอ็กซ์ (XRD)
16. เครื่องสเปกโทรมิเตอร์
17. เครื่องวิเคราะห์ปริมาณธาตุคาร์บอนและกำมะถัน C-S Meter

### 3.3 ขั้นตอนการทดลอง

#### 3.3.1 การวิเคราะห์ผงโลหะกับสารเติมแต่ง

##### 3.3.1.1 ส่วนประกอบทางเคมี

เตรียมผงโลหะ SCM 415 โดยการอบไล่ความชื้นในตู้อบที่อุณหภูมิ 50°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง นำไปทำการวิเคราะห์ปริมาณธาตุคาร์บอนและกำมะถัน ด้วยเครื่อง C-S Meter และทำการวิเคราะห์ปริมาณธาตุอื่น ๆ ด้วยเครื่อง XRF

##### 3.3.1.2 รูปร่างอนุภาค

นำผงโลหะ SCM 415 มาถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดที่กำลังขนาด 25 -1000 เท่า

##### 3.3.1.3 ขนาดอนุภาค

เตรียมผงโลหะ SCM 415 และ กราไฟต์ โดยการอบไล่ความชื้นในตู้อบที่อุณหภูมิ 50°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และนำการวิเคราะห์ด้วยเครื่องหาขนาดอนุภาคโดยเทคนิคการเลี้ยวเบนของลำแสงเลเซอร์ Master Sizer ทำการวิเคราะห์ 5 ครั้ง แล้วหาค่าเฉลี่ย

### 3.3.1.4 ความหนาแน่นเชิงปริมาตร

เตรียมผงโลหะ SCM 415 โดยการอบไล่ความชื้นในตู้อบที่อุณหภูมิ 50°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และนำการวิเคราะห์ความหนาแน่นเชิงปริมาตร (Bulk Density) ด้วยเครื่องหาความหนาแน่นอนุภาคโดยหลักการแทนที่ปริมาตรก๊าซ Ultrapycnometer ซึ่งในการทดลองที่ใช้ก๊าซฮีเลียม ทำการวิเคราะห์ 5 ครั้ง แล้วหาค่าเฉลี่ย

### 3.3.2 การผสมผงโลหะกับสารเติมแต่ง

การผสมผงโลหะกับสารเติมแต่ง เริ่มจากตวงส่วนผสมตามสูตรที่แสดงในตารางที่ 3.3 โดยจำกัดปริมาณผงโลหะ 850 กรัมต่อหนึ่งขวดผสม เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผสม เทส่วนผสมรวมกันในขวดผสมปิดฝาให้แน่น แล้วนำเข้าเครื่องผสมผง ใช้อัตราการหมุนประมาณ 60 - 70 รอบต่อนาที เป็นเวลา 3 ชั่วโมง หรือจนกว่าส่วนผสมกลายเป็นเนื้อเดียวกัน

ตารางที่ 3.3 อัตราส่วนของส่วนผสมสูตรต่าง ๆ

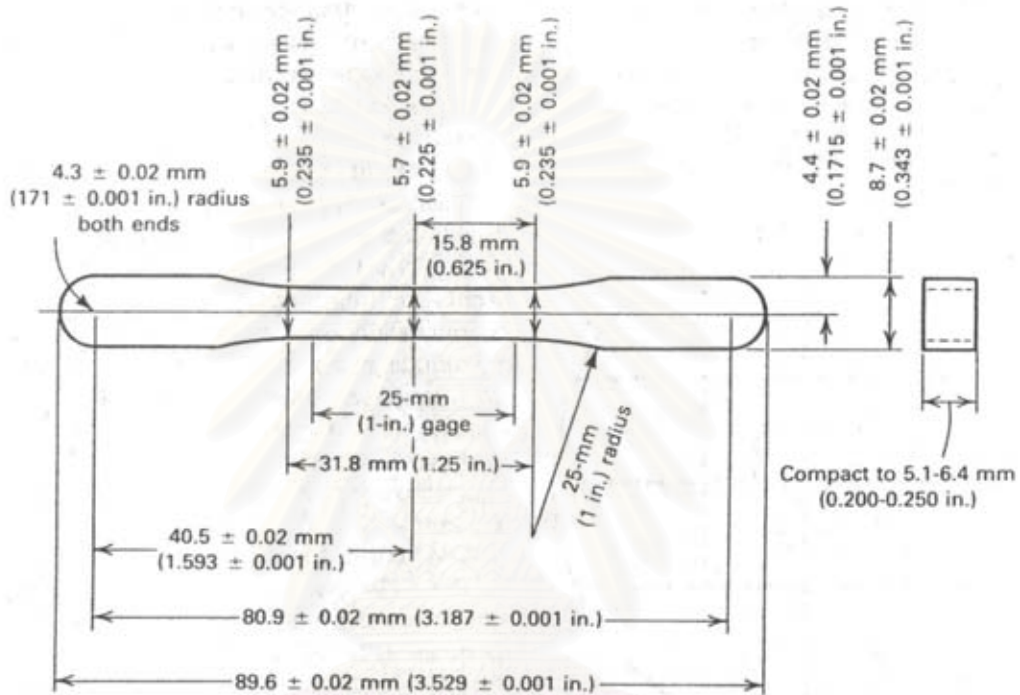
สูตร	ผงโลหะ (g)	Zinc Stearate		กราไฟต์	
		g	weight %	g	weight %
1	850	8.5	1.0	-	-
2	850	8.5	1.0	1.70	0.2
3	850	8.5	1.0	2.55	0.3

### 3.3.3 การอัดขึ้นรูป

นำส่วนผสมจากข้อ 3.3.2 มาอัดขึ้นรูปเป็นชิ้นงานกรีน ด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปแบบไฮดรอลิก DORST TPA 50/4 เป็นชิ้นงานทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM E8-96 ดังรูปที่ 3.1 โดยควบคุมค่าแรงอัดในช่วง 100 - 400 KN สํารวจความผิดปกติภายนอกชิ้นงานด้วยสายตาและตรวจสอบสมบัติทางกายภาพ จากนั้นนำข้อมูลมาประมวลเป็นแผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับความดันอัด โดยค่าความดันอัดคือ ค่าแรงอัดหารด้วยพื้นที่สัมผัสกระบอกอัด ( $631.7475 \text{ mm}^2$ ) เพื่อเลือกเงื่อนไขการขึ้นรูปซึ่งใช้แรงอัดต่ำสุด แต่ได้ชิ้นงานกรีนที่สมบูรณ์ และความหนาแน่นกรีนประมาณ  $6.96 \text{ g/cm}^3$  สุดท้ายขึ้นรูปชิ้นงานตามเงื่อนไขดังกล่าว ซึ่งแสดงในตารางที่ 3.4 ด้วยส่วนผสมสูตร 1 จำนวน 90 ชิ้น สูตร 2 และ 3 จำนวนสูตรละ 30 ชิ้น แล้วนำชิ้นงานไปตรวจสอบสมบัติทางกายภาพ

ตารางที่ 3.4 การตั้งค่าเครื่องอัดขึ้นรูปแบบไฮดรอลิก DORST TPA 50/4

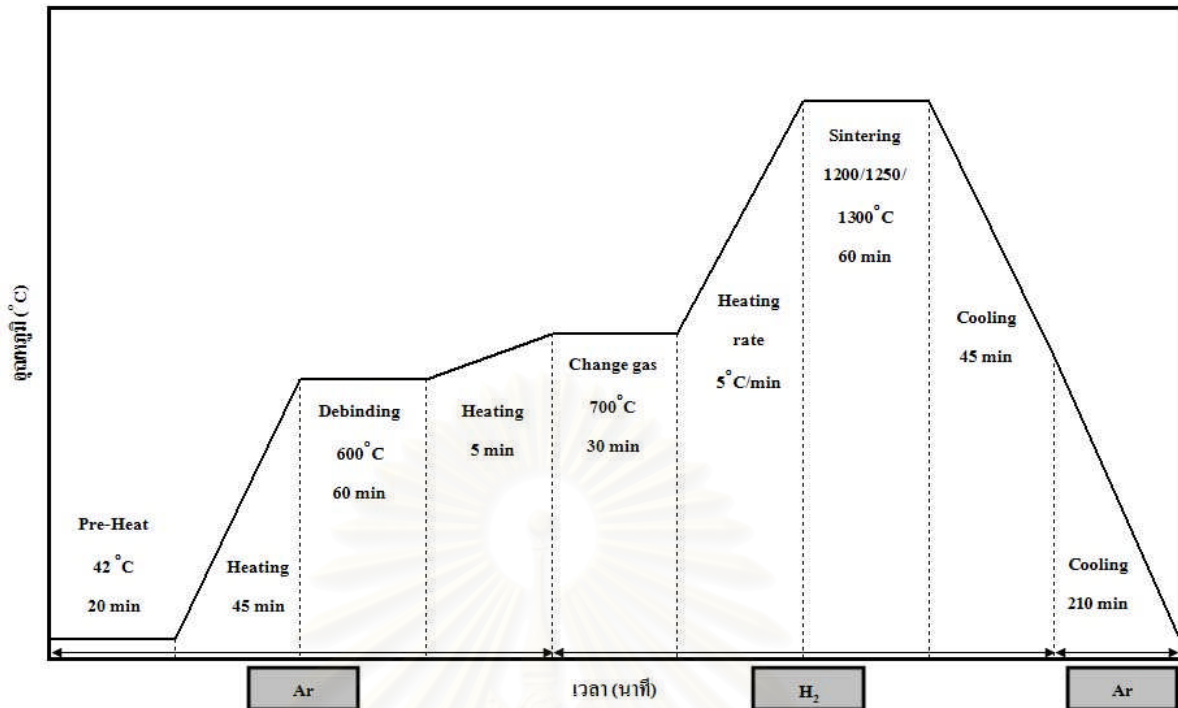
ตัวแปร	ระยะ (mm)
PTA	3.25
Up Punch	115.15



รูปที่ 3.1 ชิ้นงานทดสอบแรงดึง<sup>(11)</sup>

### 3.3.4 การกำจัดสารเติมแต่งและการเผาผนึก

นำชิ้นงานกรีน จากข้อ 3.3.3 มากำจัดสารเติมแต่งด้วยความร้อน และทำการเผาผนึกแบบ single step ด้วยเตาเผา Linn High Therm HT 1800 Vacuum โดยมีแผนภูมิแสดงขั้นตอนการดำเนินการดังในรูปที่ 3.2 และควบคุมอัตราการไหลของก๊าซประมาณ 250 ลิตรต่อชั่วโมง จำนวน 5 ชุด จำนวนชิ้นงานชุดละ 30 ชิ้น ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 3.3 เมื่อการเผาผนึกเสร็จสิ้น นำชิ้นงานแต่ละชุดจำนวน 15 ชิ้น แยกไว้เพื่อทำการชุบผิวแข็งในขั้นตอนต่อไป แล้วนำชิ้นงานที่เหลือมาทดสอบสมบัติทางกายภาพสมบัติทางกล ส่วนประกอบทางเคมี และโครงสร้างจุลภาค เพื่อทำการวิเคราะห์และประมวลผล



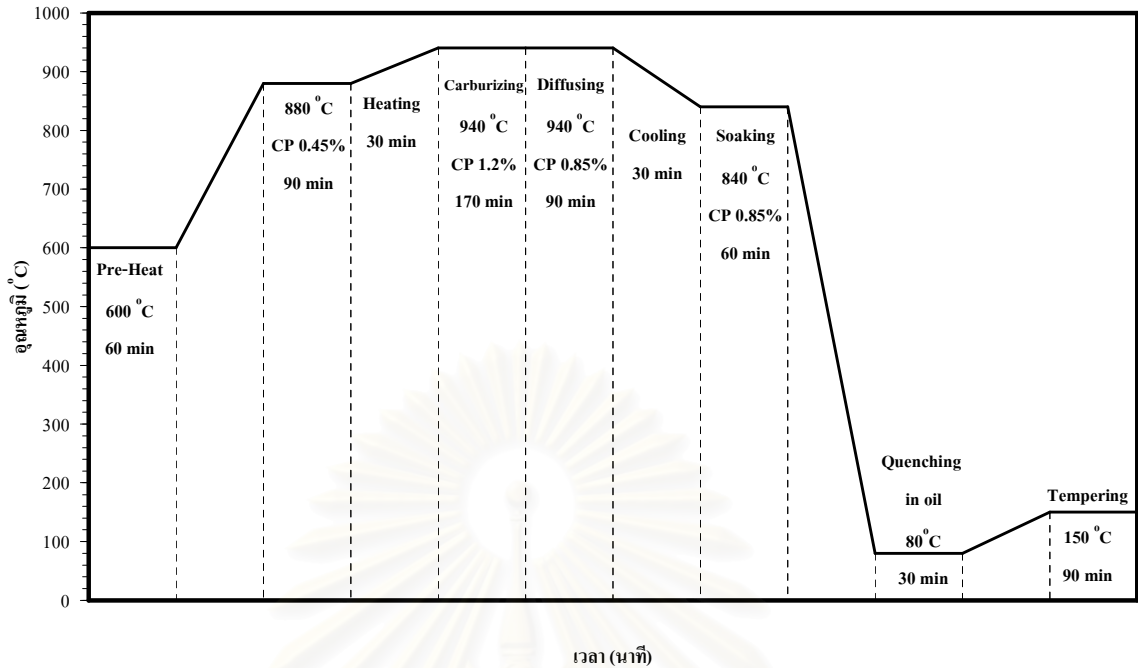
รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการกำจัดสารหล่อลื่นและการเผาผนึก

ตารางที่ 3.5 รายละเอียดการกำจัดสารเติมแต่งและการเผาผนึก

ชุดการทดลอง	สูตรส่วนผสม	การกำจัดสารเติมแต่ง			การเผาผนึก		
		อุณหภูมิ (°C)	เวลา (min)	บรรยากาศ	อุณหภูมิ (°C)	เวลา (min)	บรรยากาศ
1	1	600	60	Ar	1200	60	H <sub>2</sub>
2	1	600	60	Ar	1250	60	H <sub>2</sub>
3	1	600	60	Ar	1300	60	H <sub>2</sub>
4	2	600	60	Ar	1300	60	H <sub>2</sub>
5	3	600	60	Ar	1300	60	H <sub>2</sub>

### 3.3.5 การชุบแข็งผิว

นำชิ้นงานจากข้อ 3.3.4 จำนวนชุดละ 15 ชิ้น พร้อมกับชิ้นงานเปรียบเทียบ มาทำการชุบแข็งผิว ด้วยวิธีก๊าซคาร์บูไรซิ่ง ที่อุณหภูมิ 940 °C โดยก๊าซที่ใช้ได้จากการให้ความร้อนก้อนกราไฟต์ จากนั้นนำไปผ่านกรรมวิธีทางความร้อน ดังรายละเอียดในรูปที่ 3.3 เพื่อปรับปรุงสมบัติของชิ้นงาน แล้วนำชิ้นงานไปทดสอบสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางกล ส่วนประกอบทางเคมี และ โครงสร้างจุลภาคต่อไป



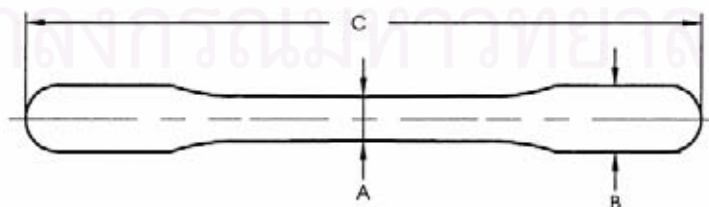
รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการชุบแข็งผิวและกรรมวิธีทางความร้อน

### 3.4 การทดสอบสมบัติต่าง ๆ ของชิ้นงานทดสอบ

#### 3.4.1 สมบัติทางกายภาพ

##### 3.4.1.1 ขนาด

การวัดขนาดของชิ้นงาน ทำโดยใช้เวอร์เนียวัดขนาดชิ้นงาน โดยทำการวัด 3 ตำแหน่งต่อชิ้น ตามที่แสดงในรูปที่ 3.4 โดยทำการวัดชิ้นงานทุกชิ้น แล้วหาค่าเฉลี่ย เพื่อเป็นข้อมูลสำหรับการออกแบบแม่พิมพ์ต่อไป



รูปที่ 3.4 ตำแหน่งการวัดขนาดของชิ้นงาน

### 3.4.1.2 ความหนาแน่นและปริมาณรูพรุน

การหาค่าความหนาแน่นของซีเมนต์ ใช้วิธีการแทนที่น้ำ โดยเอาซีเมนต์มาชั่งบนเครื่องชั่งน้ำหนัก เพื่อหาน้ำหนักซีเมนต์ในอากาศ จากนั้นนำซีเมนต์มาชုပ်ในแอลกอฮอล์ เพื่อป้องกันการเกิดฟองอากาศบริเวณผิว นำไปชั่งน้ำหนักในน้ำ และใช้ข้อมูลมาคำนวณหาความหนาแน่นตามสมการที่ 3.1 โดยใช้ซีเมนต์ 7 ชั่งต่อชุดการทดลอง และหาค่าเฉลี่ยจากค่ากลาง 5 ค่า

$$\frac{(W_a - W_w)}{D_w} = \frac{W_a}{D} \quad \dots (3.1)$$

- เมื่อ  $W_a$  คือ น้ำหนักซีเมนต์ที่ชั่งได้ในอากาศ (g)  
 $W_w$  คือ น้ำหนักซีเมนต์ที่ชั่งได้ในน้ำ (g)  
 $D_w$  คือ ความหนาแน่นของน้ำ ( $\text{g/cm}^3$ ) ณ  $25^\circ\text{C}$  เท่ากับ  $0.997 \text{ g/cm}^3$   
 $D$  คือ ความหนาแน่นของซีเมนต์ ( $\text{g/cm}^3$ )

นำค่าความหนาแน่นเฉลี่ย มาคำนวณหาความหนาแน่นสัมพัทธ์ (Relative density) ได้ดังในสมการที่ 3.2 และนิยามค่าความแตกต่างนั้นเป็นปริมาณรูพรุนในซีเมนต์ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 3.3

$$D_r = \frac{D}{D_0} \times 100 \quad \dots (3.2)$$

$$\%P = 100 - D_r \quad \dots (3.3)$$

- เมื่อ  $D_r$  คือ ความหนาแน่นสัมพัทธ์ (%)  
 $D$  คือ ความหนาแน่นของซีเมนต์ ( $\text{g/cm}^3$ )  
 $D_0$  คือ ความหนาแน่นทางทฤษฎี ( $\text{g/cm}^3$ )  
 $\%P$  คือ ปริมาณของรูพรุนในซีเมนต์ (%)

### 3.4.2 สมบัติทางกล

#### 3.4.2.1 การทดสอบแรงดึง

การทดสอบความต้านทานแรงดึงและการยืดตัวของชิ้นงาน สามารถทดสอบโดยเครื่องทดสอบแรงดึง Instron UTM8801 พร้อม Extensometer โดยใช้ชิ้นงานตัวอย่างจำนวน 5 ชิ้นต่อชุดการทดลอง แล้วหาค่าเฉลี่ยจากค่ากลาง 3 ค่า โดยค่าที่ได้จากการทดสอบได้แก่ ค่าความคราก (Yield strength), ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด (Ultimate tensile strength), ค่าการยืดตัว (Elongation)

#### 3.4.2.2 ความแข็ง

การทดสอบความแข็งของชิ้นงานก่อนชุบแข็งผิว เริ่มจากนำชิ้นงานมาทำการตัดให้มีขนาดเล็ก นำชิ้นงานไปอัดด้วยเรซิน โดยมี หน้าตัดขวางและผิวอยู่ด้านบน แล้วขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 120, 220, 500, 800 และ 1000 ตามลำดับ จากนั้นทำการวัดความแข็งด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ ด้วยแรงกด 50 กรัม ทดสอบชิ้นละ 2 ตำแหน่ง คือบริเวณผิวและกึ่งกลางชิ้นงาน ตำแหน่งละ 5 จุด แล้วหาค่าเฉลี่ยจากค่ากลาง 3 ค่า รวมทดสอบ 3 ชิ้นต่อชุดการทดลอง ขณะที่ชิ้นงานเปรียบเทียบบัดเฉพาะหน้าตัดขวาง 5 จุด แล้วหาค่าเฉลี่ยจากค่ากลาง 3 ค่า จำนวน 3 ชิ้น

การทดสอบความแข็งของชิ้นงานหลังชุบแข็งผิว เตรียมชิ้นงานเช่นเดียวกับชิ้นงานก่อนชุบแข็ง จากนั้นทำการวัดความแข็งด้วยเครื่องทดสอบความแข็งหน่วย HRC ทดสอบชิ้นละ 2 ตำแหน่ง คือบริเวณผิวและกึ่งกลางชิ้นงาน ตำแหน่งละ 5 จุด แล้วหาค่าเฉลี่ยจากค่ากลาง 3 ค่า รวมทดสอบ 3 ชิ้นต่อชุดการทดลอง ขณะที่ชิ้นงานเปรียบเทียบบัดใช้เครื่องทดสอบความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ ด้วยแรงกด 500 กรัม จากตำแหน่งผิว ไล่เข้าไปเว้นระยะห่าง 0.20 มิลลิเมตร ตำแหน่งละ 1 จุด

#### 3.4.3 ส่วนประกอบทางเคมี

การตรวจสอบส่วนประกอบทางเคมี เนื่องจากในงานวิจัยนี้ให้ความสำคัญกับปริมาณคาร์บอนในชิ้นงาน ดังนั้นการตรวจสอบธาตุองค์ประกอบจึงใช้เพราะเครื่อง C-S Meter เท่านั้น โดยตรวจสอบ 2 ตำแหน่งของชิ้นงาน คือบริเวณผิว และกึ่งกลางชิ้นงาน เตรียมชิ้นงานโดยการกลึงชิ้นงาน แล้วนำเศษจากการกลึงไปตรวจสอบด้วยเครื่อง C-S Meter ดังนั้นปริมาณคาร์บอนที่ได้จึงเป็นปริมาณคาร์บอนรวมทั้งบริเวณเนื้อพื้นและรูพรุน ขณะที่ชิ้นงานเปรียบเทียบบัดตรวจสอบด้วยเครื่องสเปกโตรมิเตอร์

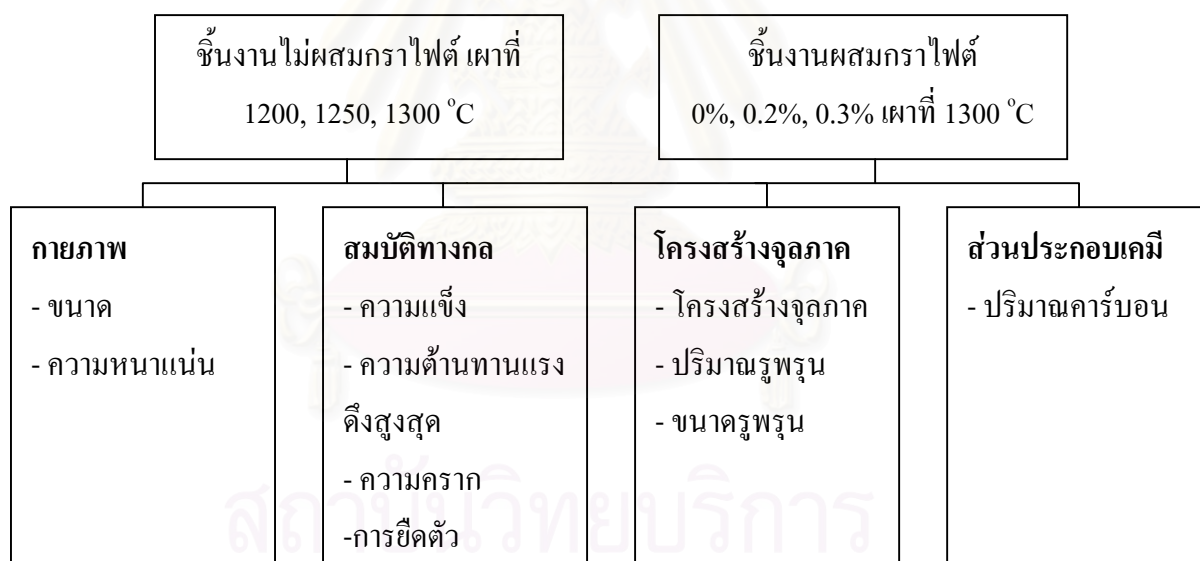
นอกจากนี้ยังตรวจสอบส่วนประกอบเคมีเฉพาะจุดบนชิ้นงาน โดยการใช้ชิ้นงานสำหรับถ่ายโครงสร้างจุลภาค ตรวจสอบโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดพร้อมอุปกรณ์ EDS

### 3.4.4 โครงสร้างจุลภาค

การถ่ายภาพโครงสร้างจุลภาค เริ่มจากนำชิ้นงานมาทำการตัด โดยตั้งฉากกับผิวชิ้นงาน แล้วนำไปอัดด้วยเรซิน โดยพื้นที่หน้าตัดขวางและบริเวณผิวอยู่ด้านบน แล้วขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 120, 220, 500, 800, 1000, 1200 และ 2400 ตามลำดับ จากนั้นนำไปขัดบนผ้าสักหลาดโดยผงเพชรขนาด 3 และ 1 ไมครอนตามลำดับ และกัดด้วยสารละลาย 2% Nitral ( $2 \text{ ml HNO}_3$ ,  $98 \text{ ml Ethanol}$ ) จากนั้นทำการถ่ายรูปโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด ด้วยกำลังขยายต่าง ๆ

### 3.5 สรุป

สามารถสรุปรายละเอียด สำหรับการศึกษาลักษณะของอุณหภูมิเผาผนึกและปริมาณคาร์บอน ทั้งก่อนและหลังการชุบแข็งผิวได้ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 รายละเอียดการศึกษาลักษณะของอุณหภูมิเผาผนึกและปริมาณคาร์บอน ก่อนและหลังการชุบแข็งผิว

## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

#### 4.1 สมบัติวัสดุผง

การทดสอบสมบัติของวัสดุผงประกอบด้วย ส่วนประกอบทางเคมี, รูปร่างอนุภาค, ขนาดอนุภาค และความหนาแน่นเชิงปริมาตร ดังรายละเอียดต่อไปนี้

##### 4.1.1 ส่วนประกอบทางเคมี

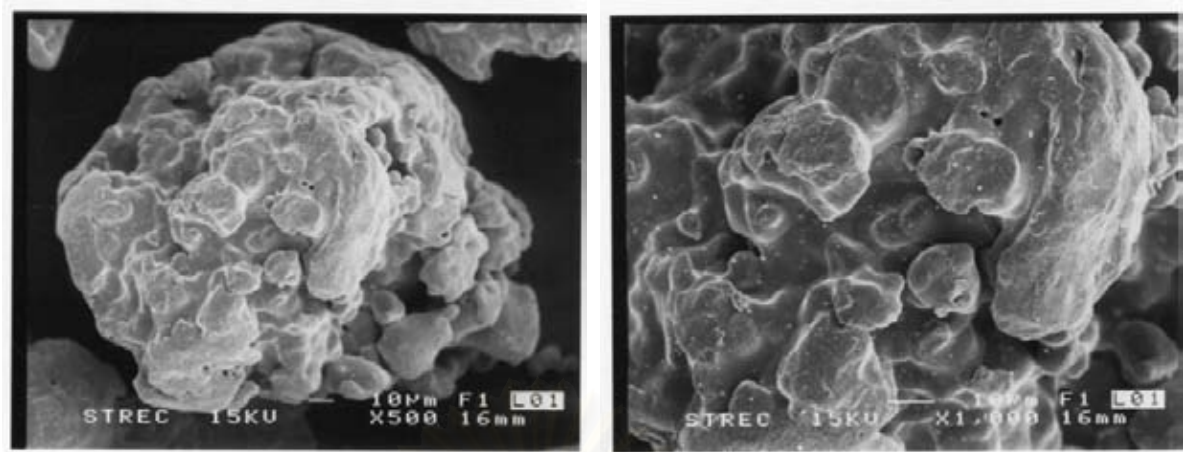
ผลการวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมีของชิ้นงานเปรียบเทียบ และผง SCM 415 แสดงในตารางที่ 4.1 เมื่อเทียบผลของชิ้นงานเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานของวัสดุ SCM 415 จากตารางที่ 2.1 พบว่าทุกธาตุมีปริมาณอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ยกเว้นคาร์บอนมีปริมาณสูงกว่าเกณฑ์เล็กน้อย และเมื่อเทียบผลของผง SCM 415 กับค่ามาตรฐานผงจากผู้ผลิตในตารางที่ 3.1 พบว่า คาร์บอน, แมงกานีส และฟอสฟอรัส มีปริมาณใกล้เคียงกับเกณฑ์มาตรฐาน โครเมียม และ โมลิบดีนัม มีปริมาณต่ำกว่าเกณฑ์ ในขณะที่ซิลิกอน และ กำมะถัน มีปริมาณสูงกว่าเกณฑ์

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมีของชิ้นงานเปรียบเทียบ และผง SCM 415

ตัวอย่าง	ส่วนประกอบทางเคมี (%)						
	C	Cr	Mo	Mn	P	Si	S
ชิ้นงานเปรียบเทียบ	0.193	0.928	0.151	0.665	0.01	0.242	0.013
ผง SCM 415	0.0034	0.863	0.18	0.728	0.013	0.05	0.0059

##### 4.1.2 รูปร่างอนุภาค

ภาพถ่ายรูปร่างอนุภาคของผง SCM 415 แสดงในรูปที่ 4.1 เห็นได้ว่าผง SCM 415 มีลักษณะรูปร่างไม่สม่ำเสมอ (Irregular shape) ผิวขรุขระ และมีรูพรุนขนาดเล็ก กระจายอยู่ทั่วไปบริเวณผิว



(a)

(b)

รูปที่ 4.1 ภาพถ่าย SEM ของผง SCM 415 ที่กำลังขยายต่าง ๆ

(a) กำลังขยาย 500 เท่า

(b) กำลังขยาย 1000 เท่า

#### 4.1.3 ขนาดอนุภาค

ผลการวัดขนาดอนุภาคเฉลี่ยของผง SCM 415 และผงกราฟไฟต์ แสดงในตารางที่ 4.2 พบว่าขนาดอนุภาคของผง SCM 415 มีขนาดใหญ่กว่าผงกราฟไฟต์มาก ส่งผลให้ในขณะที่ผสมผงกราฟไฟต์จะไปอยู่ในพื้นที่ว่างระหว่างอนุภาค SCM 415 และสามารถเกาะอยู่บนผิวหรือภายในรูพรุนของอนุภาค SCM 415

ตารางที่ 4.2 ผลการวัดขนาดอนุภาคเฉลี่ยของผง SCM 415 และผงกราฟไฟต์

ผง	ขนาดเฉลี่ย ( $\mu\text{m}$ )
SCM 415	137.42
กราฟไฟต์	6.44

#### 4.1.4 ความหนาแน่นเชิงปริมาตร

ผลการวัดความหนาแน่นเชิงปริมาตรของผง SCM 415 และผงกราฟไฟต์ แสดงในตารางที่ 4.3 เห็นได้ความหนาแน่นเชิงปริมาตรของผง SCM 415 มีค่าใกล้เคียงกับความหนาแน่นกรีน ( $6.96 \text{ g/cm}^3$ ) ในขณะที่ผงกราฟไฟต์มีความหนาแน่นเชิงปริมาตรใกล้เคียงกับค่ามาตรฐาน ( $2.27 \text{ g/cm}^3$ )

ตารางที่ 4.3 ผลการวัดความหนาแน่นเชิงปริมาตรของผง SCM 415 และผงกราไฟต์

ผง	ความหนาแน่นเชิงปริมาตร (g/cm <sup>3</sup> )
SCM 415	6.61
กราไฟต์	2.22

#### 4.2 สมบัติชิ้นงานกรีน

การทดสอบชิ้นงานกรีน ประกอบด้วย ขนาด, ความหนาแน่นกรีน และผลของความดันอัดต่อความหนาแน่นกรีน ดังรายละเอียดต่อไปนี้

##### 4.2.1 ขนาด

ผลการวัดขนาดของชิ้นงานกรีน จากส่วนผสมทั้ง 3 สูตร แสดงในตารางที่ 4.4 ไม่พบความแตกต่างของขนาด จากชิ้นงานผสมผงกราไฟต์

ตารางที่ 4.4 ผลการวัดขนาดชิ้นงานกรีน

ปริมาณกราไฟต์ (wt%)	ตำแหน่ง A (mm)	ตำแหน่ง B (mm)	ตำแหน่ง C (mm)
0	5.79	8.79	89.78
0.2	5.80	8.79	89.79
0.3	5.80	8.79	89.79

##### 4.2.2 ความหนาแน่นกรีน

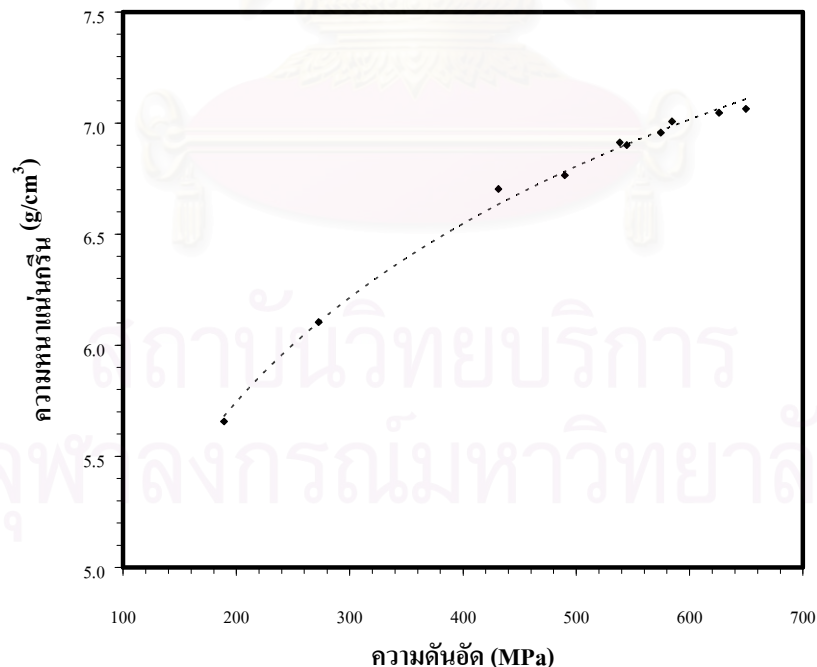
ผลการวัดความหนาแน่นกรีน จากส่วนผสมทั้ง 3 สูตร แสดงในตารางที่ 4.5 ไม่พบความแตกต่างของความหนาแน่นกรีนจากการผสมผงกราไฟต์

ตารางที่ 4.5 ผลการวัดความหนาแน่นกรีน

ปริมาณกราฟต์ (wt%)	ความหนาแน่นกรีน	
	g/cm <sup>3</sup>	%
0	6.98	89.55
0.2	6.97	89.38
0.3	6.94	89.03

#### 4.2.3 ผลของความดันอัดต่อความหนาแน่นกรีน

เมื่อนำข้อมูลจากการอัดขึ้นรูปวัสดุผงซึ่งไม่ผสมกราฟต์ มาวิเคราะห์สามารถเขียนแผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกรีนกับความดันอัดได้ดังในรูปที่ 4.2 ซึ่งความหนาแน่นกรีนเพิ่มขึ้นตามความดันอัด ในรูปแบบของสมการลอการิทึม ดังที่แสดงในสมการที่ 4.1 ซึ่งความดันอัดเฉลี่ยที่ใช้การอัดขึ้นรูปมีค่า 577.96 MPa ต่ำกว่าค่ามาตรฐานจากใบรับรองมาตรฐานวัสดุผง SCM 415 (588.4 MPa) ประมาณร้อยละ 2 อันเป็นผลมาจาก Zinc stearate ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่นลดแรงเสียดทานระหว่างขั้นตอนการอัดขึ้นรูป



รูปที่ 4.2 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกรีนกับความดันอัด

### 4.3 ผลของอุณหภูมิเผาผนึกต่อสมบัติต่าง ๆ ของชิ้นงาน

การทดสอบสมบัติต่าง ๆ ของชิ้นงานไม่ผสมผงกราฟิต์ที่อุณหภูมิเผาผนึกต่าง ๆ ประกอบด้วย สมบัติทางกายภาพ, ส่วนประกอบทางเคมี, โครงสร้างจุลภาค และสมบัติทางกล ดังรายละเอียดต่อไปนี้

#### 4.3.1 สมบัติทางกายภาพ

##### 4.3.1.1 ขนาด

ผลการวัดขนาดชิ้นงานที่อุณหภูมิเผาผนึกต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 4.6 พบว่า การหดตัวเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิเผาผนึก และตำแหน่ง C ซึ่งมีความยาวสูงสุดเป็นตำแหน่งที่เกิดการเปลี่ยนแปลงของขนาดมากที่สุด จึงใช้เป็นตำแหน่งอ้างอิงในการแทนค่าสมการที่ 2.2 เพื่อคำนวณค่าความหนาแน่นหลังเผาผนึก

ตารางที่ 4.6 ผลการวัดขนาดของชิ้นงานที่อุณหภูมิเผาผนึกต่าง ๆ

อุณหภูมิเผาผนึก (°C)	ตำแหน่ง A (mm)	ตำแหน่ง B (mm)	ตำแหน่ง C (mm)
1200	5.79	8.77	89.63
1250	5.79	8.75	89.56
1300	5.79	8.74	89.45

##### 4.3.1.2 ความหนาแน่น

ผลการวัดความหนาแน่นของชิ้นงานที่อุณหภูมิเผาผนึกต่าง ๆ เปรียบเทียบกับผลการคำนวณจากสมการที่ 2.2 แสดงในตารางที่ 4.7 พบว่า ความหนาแน่นเพิ่มขึ้นมาอุณหภูมิเผาผนึก ในขณะที่ความหนาแน่นที่วัดได้มีค่าสูงกว่าผลการคำนวณประมาณร้อยละ 1 – 1.5

ตารางที่ 4.7 ผลการคำนวณและวัดความหนาแน่นของชิ้นงานที่อุณหภูมิเผาผนึกต่าง ๆ

อุณหภูมิเผาผนึก (°C)	ความหนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> )		ความหนาแน่น (%)	
	คำนวณ	ค่าจริง	คำนวณ	ค่าจริง
1200	7.02	7.09	90.03	90.91
1250	7.04	7.13	90.24	91.40
1300	7.06	7.17	90.57	91.95

#### 4.3.2 ส่วนประกอบทางเคมี

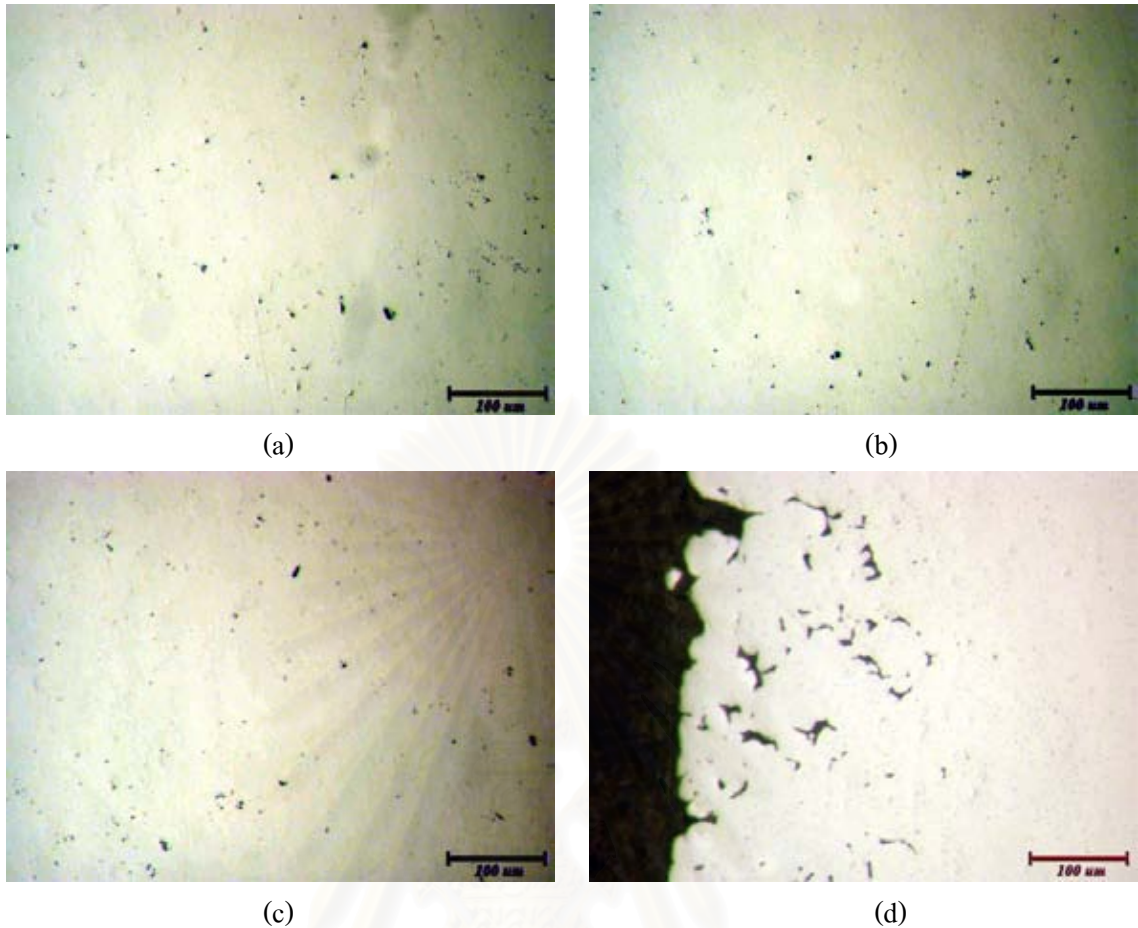
ผลการวัดปริมาณคาร์บอนของชิ้นงานที่อุณหภูมิเผาผนึกต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 4.8 ไม่พบว่าอุณหภูมิเผาผนึกมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณคาร์บอนอย่างชัดเจน และไม่พบการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวอย่างชัดเจนระหว่างการเผาผนึก

ตารางที่ 4.8 ผลการวัดปริมาณคาร์บอนของชิ้นงานที่อุณหภูมิเผาผนึกต่าง ๆ

อุณหภูมิเผาผนึก (°C)	ปริมาณคาร์บอน (wt%)	
	แกนกลาง	ผิว
1200	0.0032	0.0032
1250	0.0035	0.0031
1300	0.0033	0.0031

#### 4.3.3 โครงสร้างจุลภาค

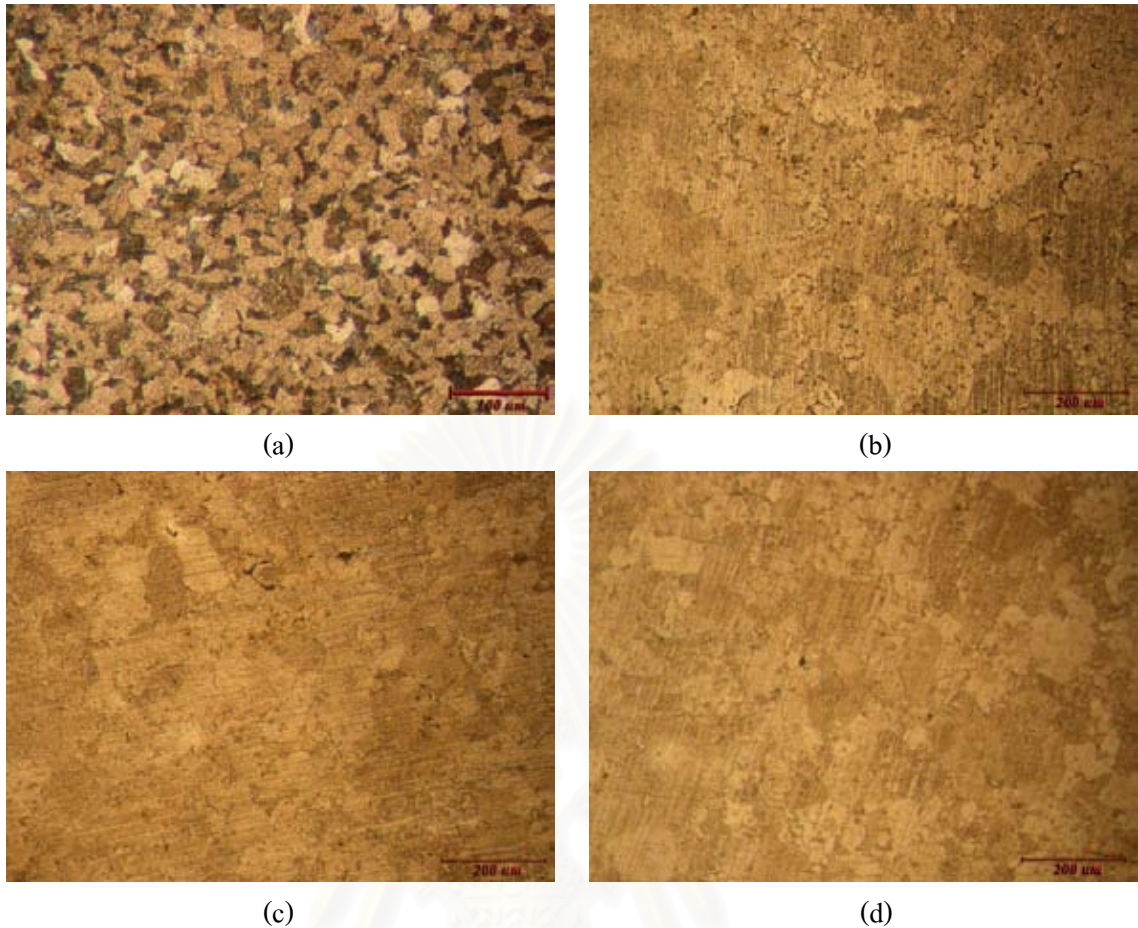
ภาพถ่ายลักษณะรูพรุนในชิ้นงานที่อุณหภูมิเผาผนึกต่าง ๆ แสดงในรูปที่ 4.3 ไม่พบความแตกต่างที่ชัดเจนของปริมาณและขนาดรูพรุน ที่อุณหภูมิเผาผนึกต่าง ๆ โดยลักษณะรูพรุนภายในชิ้นงานมีขนาดเล็ก กระจายตัวอยู่ทั่วไป และมีรูพรุนขนาดใหญ่อยู่เล็กน้อย แต่หากพิจารณารูปที่ 4.3 (d) ซึ่งเป็นภาพถ่ายรูพรุนบริเวณผิวชิ้นงาน พบว่ามีรูพรุนขนาดใหญ่อยู่มากกว่าบริเวณอื่น ในทุกอุณหภูมิเผาผนึก



รูปที่ 4.3 ภาพถ่ายลักษณะจุลภาคนิรในชิ้นงานที่อุณหภูมิเผาผนิกต่าง ๆ

(a) 1200 °C (b) 1250 °C (c) 1300 °C (d) 1300 °C (ผิว)

ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคนิรในชิ้นงานที่อุณหภูมิเผาผนิกต่าง ๆ และชิ้นงานเปรียบเทียบ แสดงในรูปที่ 4.4 พบว่าโครงสร้างจุลภาคนิรของชิ้นงานเปรียบเทียบ รูปที่ 4.4 (a) มีลักษณะเป็นเหล็กกล้าไฮโปยูเต็คตอยด์ (Hypo-Eutectoid) กล่าวคือ เนื้อพื้นมีเฟส เฟอร์ไรท์ (พื้นที่สีอ่อน) และเพิลไรท์ (พื้นที่สีเข้ม) ผสมกันอยู่ ในขณะที่ชิ้นงานซึ่งผ่านการเผาผนิกเนื้อพื้นมีเพียงเฟสเฟอร์ไรท์ และรูปพูนกระจายตัวอยู่ซึ่งพบมากในบริเวณขอบเกรน ทั้งนี้เนื่องมาจากมีปริมาณคาร์บอนละลายอยู่ในเนื้อพื้นต่ำจนไม่สามารถเกิดเพิลไรท์ได้ และหากพิจารณาผลของอุณหภูมิเผาผนิก ไม่พบความแตกต่างของเนื้อพื้นอย่างชัดเจน อย่างไรก็ตามหากพิจารณาที่อุณหภูมิเผาผนิก 1300 °C รูปที่ 4.4 (d) เห็นได้ว่ารูปพูนขนาดใหญ่มีปริมาณน้อยมาก เมื่อเทียบกับอุณหภูมิเผาผนิกอื่น ๆ



รูปที่ 4.4 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคในชั้นงานที่อุณหภูมิเผาผนึกต่าง ๆ และชั้นงานเปรียบเทียบ  
(a) ชั้นงานเปรียบเทียบ (b) 1200 °C (c) 1250 °C (d) 1300 °C

#### 4.3.4 สมบัติทางกล

##### 4.3.4.1 ความแข็ง

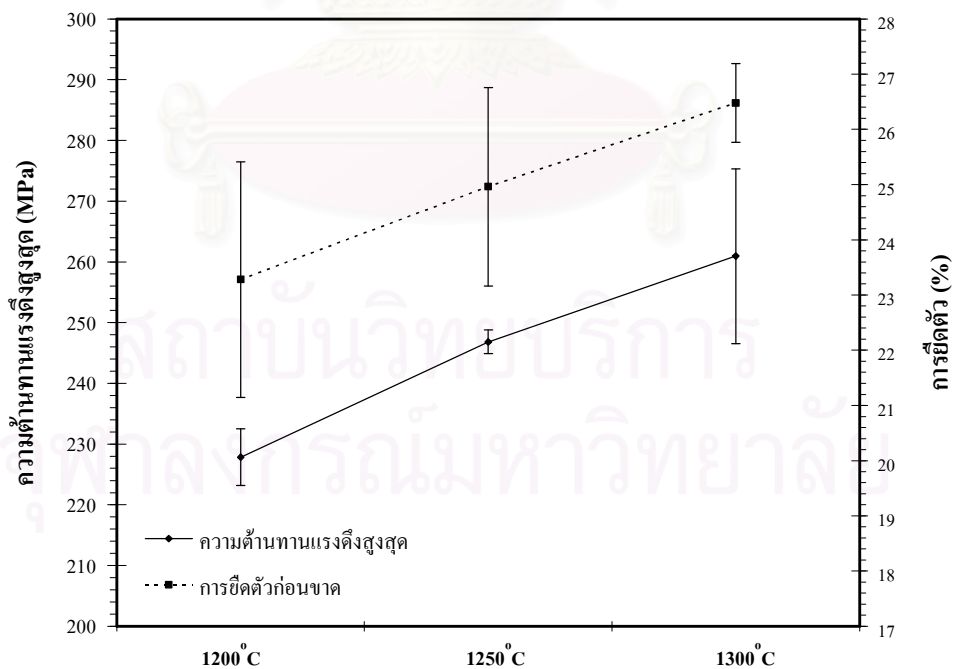
ผลการวัดค่าความแข็งของชั้นงานที่อุณหภูมิเผาผนึกต่าง ๆ และชั้นงานเปรียบเทียบ แสดงในตารางที่ 4.9 ชั้นงานทั้งหมดมีแนวโน้มในทิศทางเดียวกันคือ บริเวณผิวมีค่าความแข็งต่ำกว่าแกนกลางเล็กน้อย และพบว่าที่ 1200 °C มีค่าความแข็งต่ำกว่า อีกสองอุณหภูมิค่อนข้างมาก อันเป็นผลมาจากปริมาณรูพรุนภายในชั้นงานมีปริมาณมากกว่าและขนาดใหญ่กว่า ในขณะที่ 1250 °C และ 1300 °C ไม่มี ความแตกต่างอย่างชัดเจน

ตารางที่ 4.9 ผลการวัดค่าความแข็งของชิ้นงานที่อุณหภูมิเผาผนึกต่าง ๆ และชิ้นงานเปรียบเทียบ

อุณหภูมิเผาผนึก (°C)	ความแข็ง (HV)	
	แกนกลาง	ผิว
1200	107.63 ± 7.53	104.70 ± 1.99
1250	124.23 ± 6.59	118.23 ± 5.15
1300	125.73 ± 2.01	119.83 ± 4.54
ชิ้นงานเปรียบเทียบ	211.33 ± 4.72	

4.3.4.2 การทดสอบแรงดึง

ผลการทดสอบแรงดึง แสดงในตารางที่ 4.10 พบว่าแนวโน้มของความต้านทานแรงดึง, การยืดตัว และความคราก เป็นไปในลักษณะเดียวกัน คือ ความต้านทานแรงดึง, การยืดตัว และความคราก เพิ่มสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิเผาผนึกเพิ่มขึ้น ซึ่งค่าความครากคำนวณจาก 0.2% offset เนื่องจากไม่ปรากฏจุดครากในผลการทดสอบ และแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแรงดึงสูงสุดและการยืดตัวกับอุณหภูมิเผาผนึก ในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแรงดึงสูงสุดและการยืดตัวกับอุณหภูมิเผาผนึก

ตารางที่ 4.10 ผลการทดสอบแรงดึงชิ้นงานที่อุณหภูมิเผาผนึกต่าง ๆ

อุณหภูมิเผาผนึก (°C)	ความคราก (MPa)	ความต้านทาน แรงดึงสูงสุด (MPa)	การยืดตัว (%)
1200	104.33 ± 1.25	227.85 ± 4.67	23.28 ± 2.13
1250	105.33 ± 3.81	246.83 ± 1.94	24.96 ± 1.80
1300	116.67 ± 5.67	260.95 ± 14.40	24.48 ± 0.71

#### 4.4 ผลของอุณหภูมิเผาผนึกต่อสมบัติต่าง ๆ ของชิ้นงานหลังชุบแข็งผิว

การทดสอบสมบัติต่าง ๆ ของชิ้นงานไม่ผสมผงกราฟไฟต์ที่อุณหภูมิเผาผนึกต่าง ๆ หลังชุบแข็งผิว ประกอบด้วย สมบัติทางกายภาพ, ส่วนประกอบทางเคมี, โครงสร้างจุลภาค และสมบัติทางกล ดังรายละเอียดต่อไปนี้

##### 4.4.1 สมบัติทางกายภาพ

###### 4.4.1.1 ขนาด

ผลการวัดขนาดของชิ้นงานที่อุณหภูมิเผาผนึกต่าง ๆ หลังชุบแข็งผิว แสดงในตารางที่ 4.11 พบว่าชิ้นงานทั้งหมดมีขนาดใหญ่ขึ้นหลังชุบแข็งผิวเล็กน้อย

ตารางที่ 4.11 ผลการวัดขนาดของชิ้นงานที่อุณหภูมิเผาผนึกต่าง ๆ หลังชุบแข็งผิว

อุณหภูมิเผาผนึก (°C)	ตำแหน่ง A (mm)	ตำแหน่ง B (mm)	ตำแหน่ง C (mm)
1200	5.82	8.80	90.16
1250	5.85	8.81	90.14
1300	5.84	8.79	90.09

#### 4.4.1.2 ความหนาแน่น

ผลการวัดความหนาแน่นของชิ้นงานที่อุณหภูมิเผาผนึกต่าง ๆ หลังชุบแข็งผิว แสดงในตารางที่ 4.12 พบว่าความหนาแน่นลดลง และใกล้เคียงกันมากขึ้น เนื่องจากขนาดของชิ้นงานใหญ่ขึ้น โดยชิ้นงานจากอุณหภูมิเผาผนึก 1300 °C ยังคงมีความหนาแน่นสูงสุด

ตารางที่ 4.12 ผลการวัดความหนาแน่นของชิ้นงานที่อุณหภูมิเผาผนึกต่าง ๆ หลังชุบแข็งผิว

อุณหภูมิเผาผนึก (°C)	ความหนาแน่น	
	g/cm <sup>3</sup>	%
1200	7.06	90.33
1250	7.07	90.64
1300	7.09	90.91

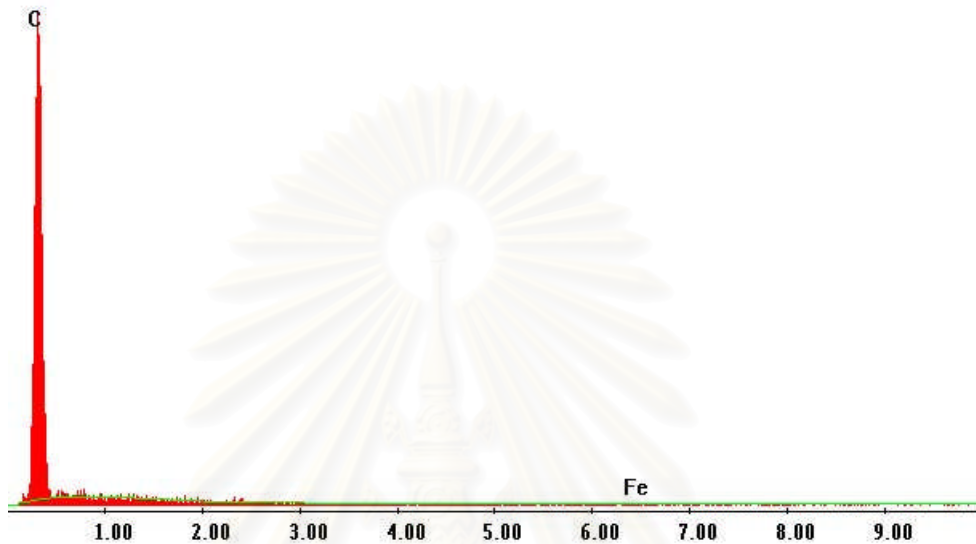
#### 4.4.2 ส่วนประกอบทางเคมี

ผลการวัดปริมาณคาร์บอนของชิ้นงานที่อุณหภูมิเผาผนึกต่าง ๆ หลังชุบแข็งผิวด้วยเครื่อง C-S Meter แสดงในตารางที่ 4.13 พบว่าแนวโน้มเป็นไปในทิศทางเดียวกัน คือบริเวณผิวมีปริมาณคาร์บอนสูงกว่าแกนกลาง โดยอุณหภูมิเผาผนึก 1200 °C มีปริมาณคาร์บอนบริเวณแกนกลางสูงสุด

ตารางที่ 4.13 ผลการวัดปริมาณคาร์บอนของชิ้นงานที่อุณหภูมิเผาผนึกต่าง ๆ หลังชุบแข็งผิว

อุณหภูมิเผาผนึก (°C)	ปริมาณคาร์บอน (wt%)	
	แกนกลาง	ผิว
1200	1.3246	1.6442
1250	1.1620	1.6125
1300	1.1154	1.5833

อย่างไรก็ตามเมื่อวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมีเฉพาะตำแหน่งด้วยเครื่อง SEM+EDS พบว่า บริเวณรูพรุนปริมาณคาร์บอนสูงกว่าบริเวณเนื้อพื้นมาก ในขณะที่บางจุดในรูพรุน ตรวจพบเฉพาะคาร์บอนเท่านั้น ดังที่แสดงในรูปที่ 4.6 และหากวิเคราะห์เฉพาะบริเวณเนื้อพื้น พบว่าทุกจุดมีปริมาณคาร์บอนใกล้เคียงกัน โดยในช่วงระยะเล็กจากผิว 0.2 มิลลิเมตรมีปริมาณคาร์บอนสูงสุด

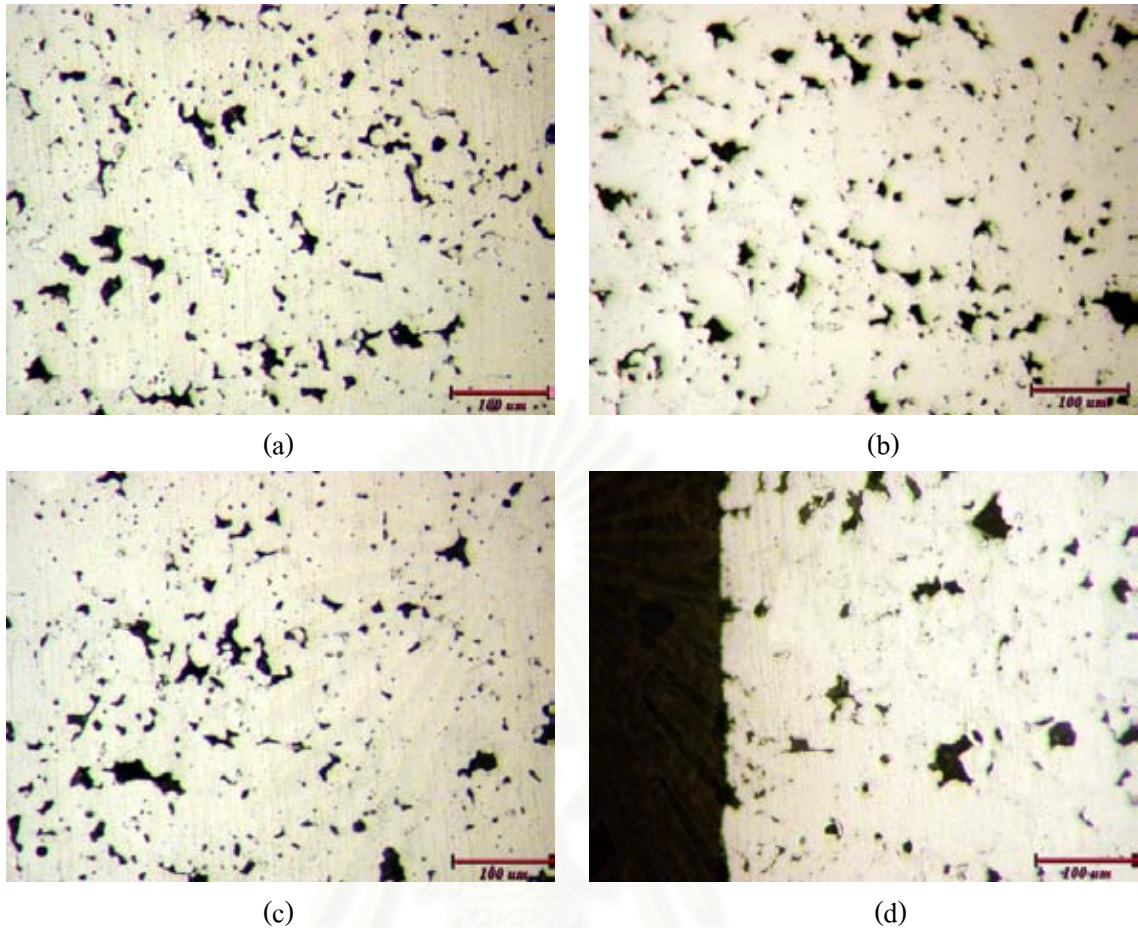


รูปที่ 4.6 ผลการวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมีบริเวณรูพรุนด้วยเครื่อง SEM+EDS

#### 4.4.3 โครงสร้างจุลภาค

ภาพถ่ายลักษณะรูพรุนในชิ้นงานที่อุณหภูมิเผาผนึกต่าง ๆ หลังชุบแข็งผิว แสดงในรูปที่ 4.7 เห็นได้ว่ารูพรุนที่มีการขยายตัวอย่างมาก เป็นรูพรุนขนาดใหญ่กระจายตัวอยู่ทั่วชิ้นงาน รวมถึงบริเวณผิวดังในรูปที่ 4.7 (d) ก็มีลักษณะเช่นเดียวกัน แต่ไม่พบความแตกต่างชัดเจนของลักษณะรูพรุนจากอุณหภูมิเผาผนึกต่าง ๆ

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

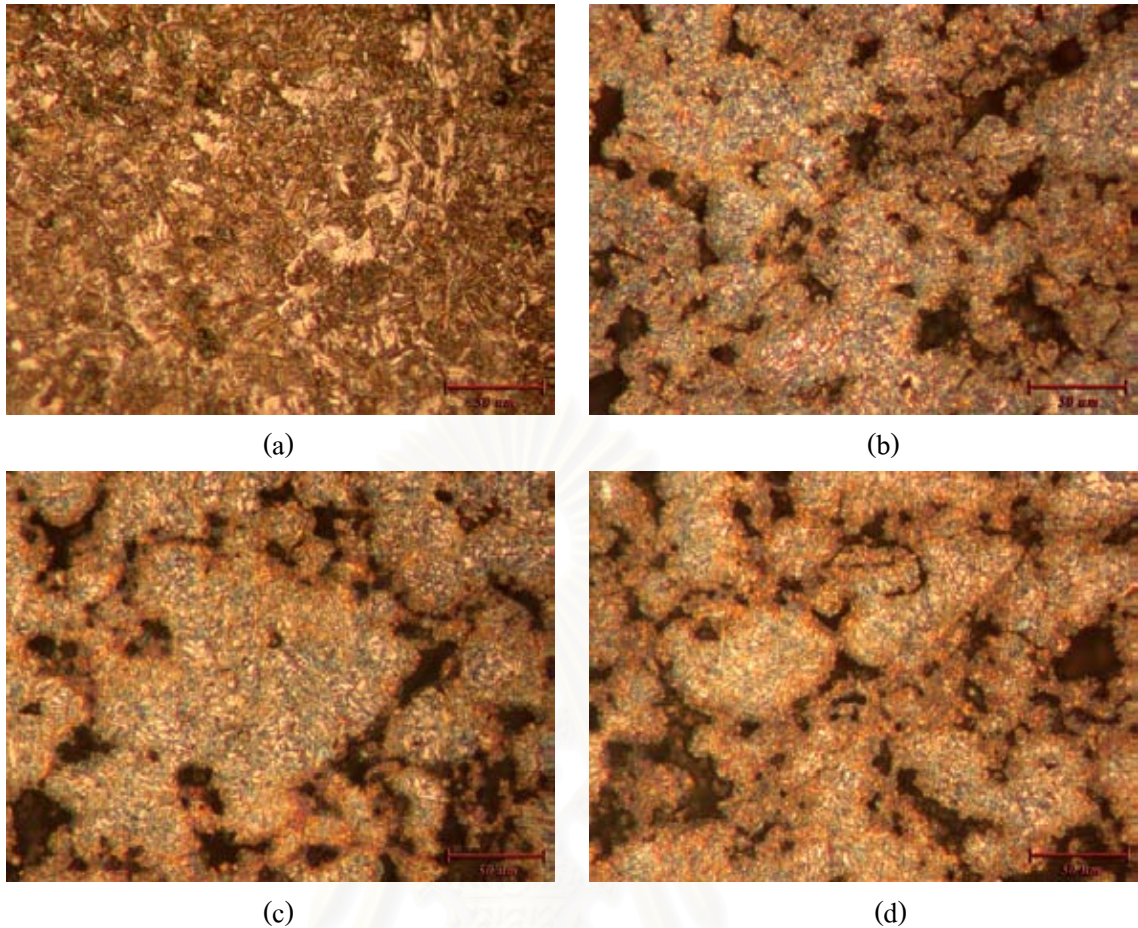


รูปที่ 4.7 ภาพถ่ายลักษณะรูพรุนในชิ้นงานที่อุณหภูมิเผาผนึกต่าง ๆ หลังชุบแข็งผิว

(a) 1200 °C (b) 1250 °C (c) 1300 °C (d) 1300 °C (ผิว)

ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคในชิ้นงานที่อุณหภูมิเผาผนึกต่าง ๆ และชิ้นงานเปรียบเทียบ หลังชุบแข็งผิว แสดงในรูปที่ 4.8 พบว่าบริเวณผิวชิ้นงานเปรียบเทียบ 4.8 (a) มีโครงสร้างเป็นมาร์เทนไซต์ ในขณะที่ชิ้นงานเผาผนึกทั้งหมด มีโครงสร้างคล้ายคลึงกัน โดยมีส่วนประกอบ 2 ส่วนคือ เฟสมาร์เทนไซต์ (พื้นที่สีอ่อน) เป็นเนื้อพื้น และรูพรุน (พื้นที่สีเข้ม)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.8 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคในชิ้นงานที่อุณหภูมิเผาผนึกต่าง ๆ และชิ้นงานเปรียบเทียบ หลังชุบแข็งผิว (a) ชิ้นงานเปรียบเทียบ (ผิว) (b) 1200 °C (c) 1250 °C (d) 1300 °C

#### 4.4.4 ผลของอุณหภูมิเผาผนึกต่อสมบัติทางกล

##### 4.4.4.1 ความแข็ง

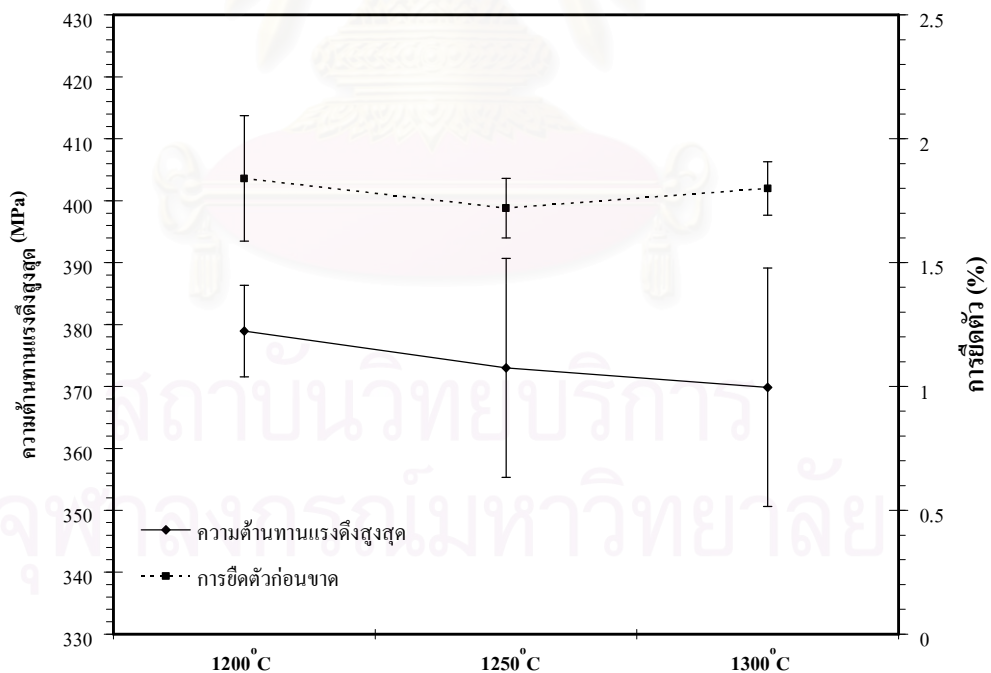
ผลการวัดค่าความแข็งของชิ้นงานที่อุณหภูมิเผาผนึกต่าง ๆ หลังชุบแข็งผิวแสดงในตารางที่ 4.14 บริเวณผิวมีค่าความแข็งต่ำกว่าแกนกลางเล็กน้อย และหากพิจารณาถึงผลของอุณหภูมิเผาผนึก พบว่าที่ 1300 °C ยังคงมีค่าความแข็งสูงสุด

ตารางที่ 4.14 ผลการวัดค่าความแข็งของชิ้นงานที่อุณหภูมิเผาผนึกต่าง ๆ หลังชุบแข็งผิว

อุณหภูมิเผาผนึก (°C)	ความแข็ง (HRC)	
	แกนกลาง	ผิว
1200	48.40 ± 0.17	44.67 ± 0.60
1250	48.80 ± 0.66	45.73 ± 0.31
1300	49.39 ± 0.29	46.60 ± 0.69
ชิ้นงานเปรียบเทียบ (ผิว)	62.57 ± 0.65	

#### 4.4.4.2 การทดสอบแรงดึง

ผลการทดสอบแรงดึงของชิ้นงานที่อุณหภูมิเผาผนึกต่าง ๆ หลังชุบแข็งผิวแสดงในตารางที่ 4.15 และสามารถแสดงความสัมพันธ์ของความต้านทานแรงดึงสูงสุด และการยืดตัวกับอุณหภูมิเผาผนึกได้ดังรูปที่ 4.9 พบว่าลักษณะการแตกหักของชิ้นงานเป็นการแตกหักแบบเปราะ โดยทั้งค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด และการยืดตัว มีค่าใกล้เคียงกันทั้ง 3 อุณหภูมิเผาผนึก



รูปที่ 4.9 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแรงดึงสูงสุด และการยืดตัวกับอุณหภูมิเผาผนึก หลังจากชุบแข็งผิว

ตารางที่ 4.15 ผลการทดสอบแรงดึงของชิ้นงานที่อุณหภูมิเผาผนึกต่าง ๆ หลังชุบแข็งผิว

อุณหภูมิเผาผนึก (°C)	ความต้านทาน แรงดึงสูงสุด (MPa)	การยืดตัว (%)
1200	378.96 ± 7.38	1.84 ± 0.25
1250	373.02 ± 17.68	1.72 ± 0.12
1300	369.59 ± 19.27	1.80 ± 0.11

#### 4.5 ผลของปริมาณคาร์บอนต่อสมบัติต่าง ๆ ของชิ้นงาน

การทดสอบสมบัติต่าง ๆ ของชิ้นงานผสมกราไฟต์ปริมาณต่าง ๆ ที่อุณหภูมิเผาผนึก 1300°C ประกอบด้วย สมบัติทางกายภาพ, ส่วนประกอบทางเคมี, โครงสร้างจุลภาค และสมบัติทางกล ดังรายละเอียดต่อไปนี้

##### 4.5.1 สมบัติทางกายภาพ

###### 4.5.1.1 ขนาด

ผลการวัดขนาดของชิ้นงานผสมกราไฟต์ปริมาณต่าง ๆ ในตารางที่ 4.16 พบว่าการหดตัวอยู่ในระดับเดียวกัน แต่ในตำแหน่ง C ชิ้นงานผสมกราไฟต์ มีการหดตัวมากกว่าเล็กน้อย เนื่องจากความหนาแน่นกรีนต่ำกว่า

ตารางที่ 4.16 ผลการวัดขนาดของชิ้นงานผสมกราไฟต์ปริมาณต่าง ๆ

ปริมาณกราไฟต์ (wt%)	ตำแหน่ง A (mm)	ตำแหน่ง B (mm)	ตำแหน่ง C (mm)
0	5.79	8.74	89.45
0.2	5.78	8.74	89.38
0.3	5.79	8.75	89.42

#### 4.5.1.2 ความหนาแน่น

ผลการวัดความหนาแน่นของชิ้นงานผสมกราไฟต์ปริมาณต่าง ๆ เปรียบเทียบกับค่าจากการคำนวณในสมการที่ 2.2 แสดงในตารางที่ 4.17 ไม่พบว่ากราไฟต์ส่งผลต่อความหนาแน่น ในขณะที่ความหนาแน่นที่วัดได้มีค่าสูงกว่าผลการคำนวณประมาณร้อยละ 1 – 1.5

ตารางที่ 4.17 ผลการคำนวณและวัดความหนาแน่นของชิ้นงานผสมกราไฟต์ปริมาณต่าง ๆ

ปริมาณกราไฟต์ (wt%)	ความหนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> )		ความหนาแน่น (%)	
	คำนวณ	ค่าจริง	คำนวณ	ค่าจริง
0	7.06	7.17	90.57	91.95
0.2	7.07	7.15	90.63	91.59
0.3	7.03	7.14	90.15	91.55

#### 4.5.2 ส่วนประกอบทางเคมี

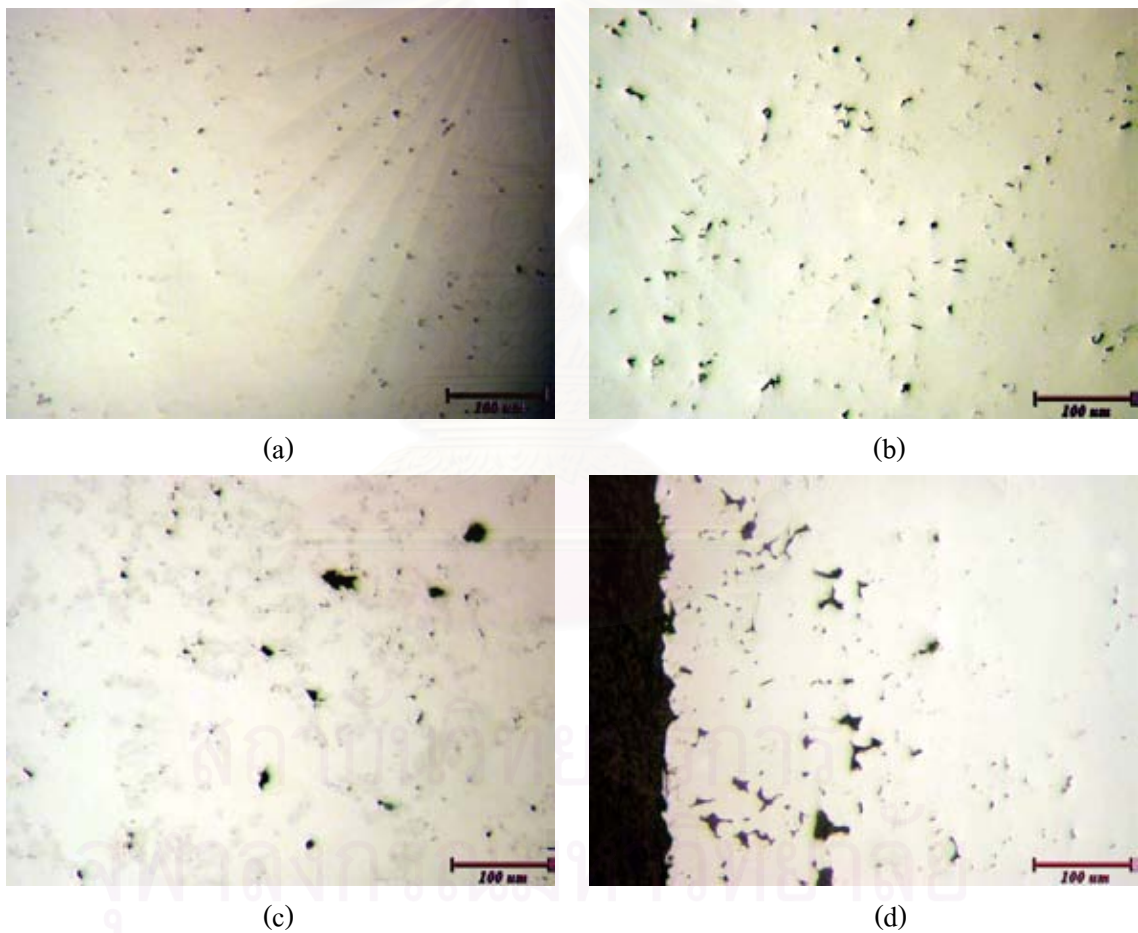
ผลการวัดปริมาณคาร์บอนของชิ้นงานผสมกราไฟต์ปริมาณต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 4.18 พบว่าเกิดการสูญเสียคาร์บอนระหว่างกระบวนการผลิตประมาณร้อยละ 25 – 35 นอกจากนี้พบว่าชิ้นงานผสมกราไฟต์เกิดการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวระหว่างการเผาผืนที่ประมาณร้อยละ 25 - 30 จากบริเวณแกนกลาง

ตารางที่ 4.18 ผลการวัดปริมาณคาร์บอนของชิ้นงานผสมกราไฟต์ปริมาณต่าง ๆ

ปริมาณกราไฟต์ (wt%)	ปริมาณคาร์บอน (wt%)	
	แกนกลาง	ผิว
0	0.0032	0.0031
0.2	0.1435	0.1164
0.3	0.2073	0.1464

### 4.5.3 โครงสร้างจุลภาค

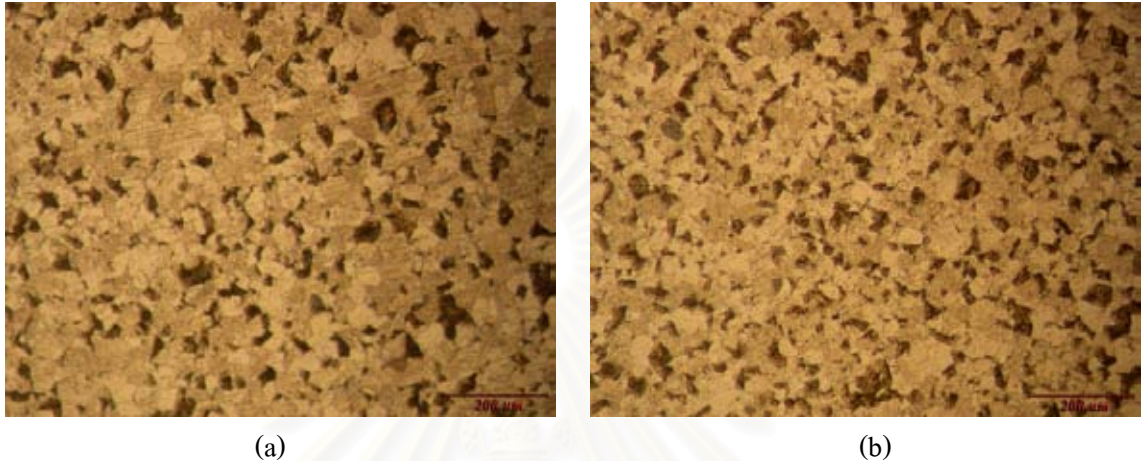
ภาพถ่ายลักษณะรูพรุนในชิ้นงานผสมกราไฟต์ปริมาณต่าง ๆ แสดงในรูปที่ 4.10 เห็นได้ว่าเมื่อผสมกราไฟต์ลงไป จะเกิดรูพรุนขนาดใหญ่มากขึ้นกว่าปกติ กระจายอยู่ทั่วไปในชิ้นงาน ซึ่งจุดที่เกิดเป็นรูพรุนขนาดใหญ่คือบริเวณที่ผงกราไฟต์เคยอยู่ขณะเป็นชิ้นงานกรีน แล้วเมื่อแพร่เข้าไปในเนื้อพื้นแล้วจึงเกิดเป็นช่องว่างขึ้น ประกอบกับความหนาแน่นกรีนของชิ้นงานที่เติมกราไฟต์ต่ำกว่า จึงเกิดรูพรุนขนาดใหญ่กว่าดังกล่าว นอกจากนี้หากพิจารณาบริเวณผิวในรูปที่ 4.10 (d) พบว่ามีรูพรุนขนาดใหญ่เกิดขึ้นมากเช่นเดียวกัน



รูปที่ 4.10 ภาพถ่ายลักษณะรูพรุนในชิ้นงานผสมกราไฟต์ปริมาณต่าง ๆ

(a) 0 wt% (b) 0.2 wt% (c) 0.3 wt% (d) 0.3 wt% (ผิว)

ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคในชิ้นงานผสมกราไฟต์ปริมาณต่าง ๆ แสดงในรูปที่ 4.11 พบว่าบริเวณเนื้อพื้นเป็นเฟสเฟอร์ไรต์ (พื้นที่สีอ่อน) และเฟสไฟรไลต์ (พื้นที่สีเข้ม) ตลอดทั้งชิ้นงาน เช่นเดียวกับในชิ้นงานเปรียบเทียบ และเห็นได้ว่าเฟสไฟรไลต์มีปริมาณเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณกราไฟต์เนื่องจากมีปริมาณคาร์บอนละลายอยู่ในเนื้อพื้นเพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 4.11 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคในชิ้นงานผสมกราไฟต์ปริมาณต่าง ๆ

(a) 0.2 wt% (b) 0.3 wt%

#### 4.5.4 ผลของปริมาณคาร์บอนต่อสมบัติทางกล

##### 4.5.4.1 ความแข็ง

ผลการวัดค่าความแข็งของชิ้นงานผสมกราไฟต์ปริมาณต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 4.19 พบว่าเมื่อผสมกราไฟต์ลงไป ค่าความแข็งเพิ่มสูงขึ้น อย่างไรก็ตามหากพิจารณาบริเวณผิว เห็นได้ว่าค่าความแข็งไม่แตกต่างจากเดิมนัก เนื่องจากเกิดการสูญเสียคาร์บอนที่ผิว

ตารางที่ 4.19 ผลการวัดค่าความแข็งของชิ้นงานผสมกราไฟต์ปริมาณต่าง ๆ

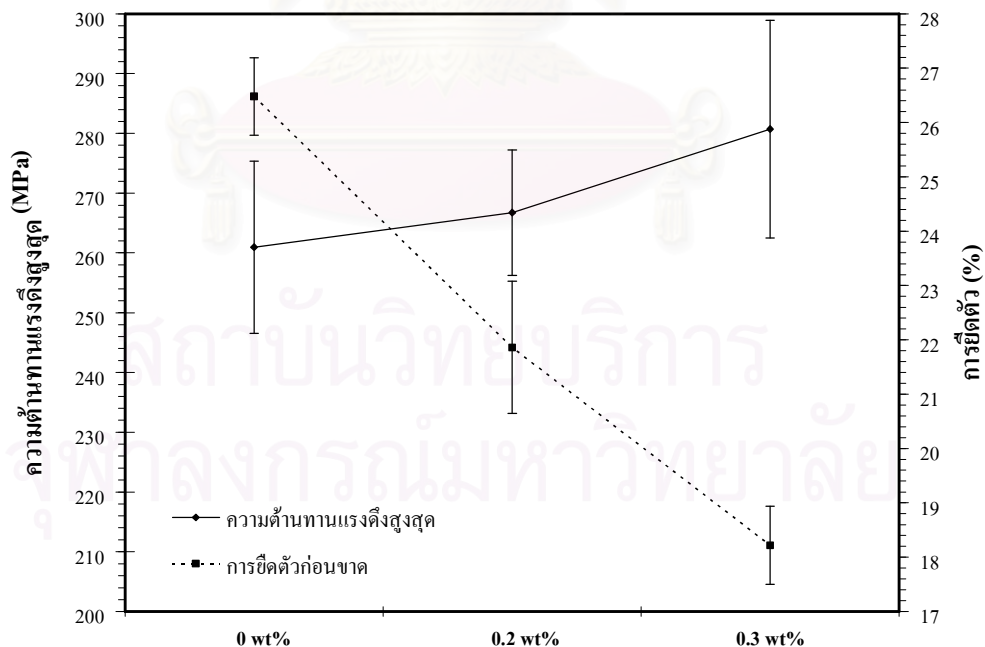
ปริมาณกราไฟต์ (wt%)	ความแข็ง (HV)	
	แกนกลาง	ผิว
0	125.73 ± 2.01	119.83 ± 4.54
0.2	145.90 ± 2.66	119.93 ± 5.56
0.3	151.90 ± 1.45	123.70 ± 11.20

#### 4.5.4.2 การทดสอบแรงดึง

ผลการทดสอบแรงดึงของชิ้นงานผสมกราไฟต์ปริมาณต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 4.20 พบว่าค่าความคราก ความต้านทานแรงดึงสูงสุด เพิ่มขึ้นตามปริมาณกราไฟต์ และในทางกลับกันส่งผลให้การยืดตัวลดลง และแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแรงดึงสูงสุดกับการยืดตัวของชิ้นงานผสมกราไฟต์ปริมาณต่าง ๆ แสดงในรูปที่ 4.12

ตารางที่ 4.20 ผลการทดสอบแรงดึงของชิ้นงานผสมกราไฟต์ปริมาณต่าง ๆ

ปริมาณกราไฟต์ (wt%)	ความคราก (MPa)	ความต้านทาน แรงดึงสูงสุด (MPa)	การยืดตัว (%)
0	$116.67 \pm 5.67$	$260.95 \pm 14.40$	$24.48 \pm 0.71$
0.2	$135.00 \pm 5.00$	$266.73 \pm 10.51$	$21.86 \pm 1.21$
0.3	$143.33 \pm 7.64$	$280.71 \pm 8.21$	$18.22 \pm 0.72$



รูปที่ 4.12 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแรงดึงสูงสุด และการยืดตัวกับปริมาณกราไฟต์

#### 4.6 ผลของปริมาณคาร์บอนต่อสมบัติต่าง ๆ ของชิ้นงานหลังชุบแข็งผิว

การทดสอบสมบัติต่าง ๆ ของชิ้นงานผสมกราไฟต์ปริมาณต่าง ๆ ที่อุณหภูมิเผาผืนิก 1300°C หลังชุบแข็งผิว ประกอบด้วย สมบัติทางกายภาพ, ส่วนประกอบทางเคมี, โครงสร้างจุลภาค และสมบัติทางกล ดังรายละเอียดต่อไปนี้

##### 4.6.1 สมบัติทางกายภาพ

###### 4.6.1.1 ขนาด

ผลการวัดขนาดของชิ้นงานผสมกราไฟต์ปริมาณต่าง ๆ หลังชุบแข็งผิว แสดงในตารางที่ 4.21 พบว่าชิ้นงานทั้งหมดมีขนาดใหญ่ขึ้นหลังชุบแข็งผิวเล็กน้อย ซึ่งหากพิจารณาดำแหน่ง C พบว่า ชิ้นงานผสมกราไฟต์มีการขยายตัวน้อยกว่าเล็กน้อย เนื่องจากความหนาแน่นกรีนต่ำกว่า

ตารางที่ 4.21 ผลการวัดขนาดของชิ้นงานผสมกราไฟต์ปริมาณต่าง ๆ หลังชุบแข็งผิว

ปริมาณกราไฟต์ (wt%)	ตำแหน่ง A (mm)	ตำแหน่ง B (mm)	ตำแหน่ง C (mm)
0	5.84	8.79	90.09
0.2	5.83	8.80	89.93
0.3	5.81	8.79	89.95

###### 4.6.1.2 ความหนาแน่น

ผลการวัดความหนาแน่นของชิ้นงานผสมกราไฟต์ปริมาณต่าง ๆ หลังชุบแข็งผิว แสดงในตารางที่ 4.22 พบว่ามีความหนาแน่นลดต่ำลงเล็กน้อย โดยชิ้นงานซึ่งไม่ผสมกราไฟต์ยังคงมีความหนาแน่นสูงสุด

ตารางที่ 4.22 ผลการวัดความหนาแน่นของชิ้นงานผสมกราไฟต์ปริมาณต่าง ๆ หลังชุบแข็งผิว

ปริมาณกราไฟต์ (wt%)	ความหนาแน่น	
	g/cm <sup>3</sup>	%
0	7.09	90.91
0.2	7.05	90.44
0.3	7.04	90.28

#### 4.6.2 ส่วนประกอบทางเคมี

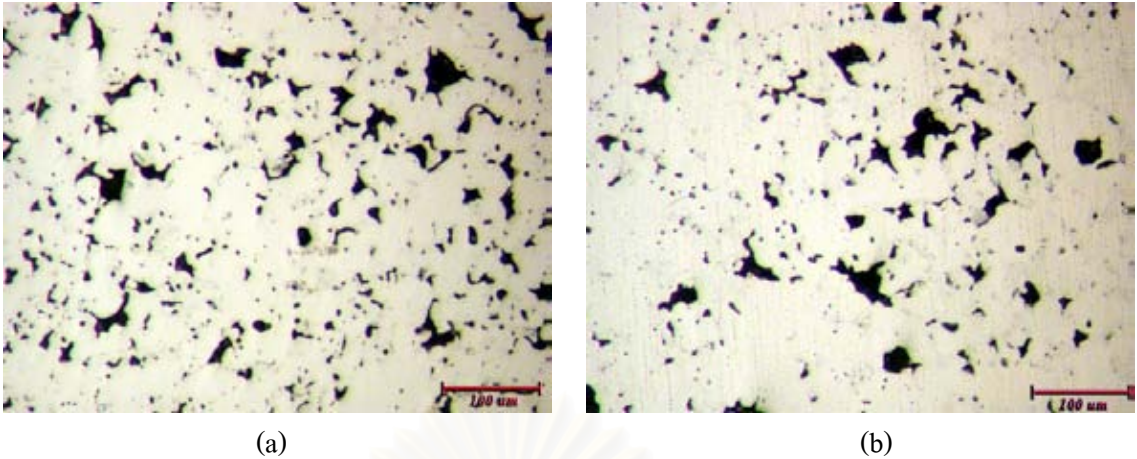
ผลการวัดปริมาณคาร์บอนของชิ้นงานผสมกราไฟต์ปริมาณต่าง ๆ หลังชุบแข็งผิว ด้วยเครื่อง C-S Meter แสดงในตารางที่ 4.23 พบว่าปริมาณคาร์บอนเพิ่มขึ้นตามปริมาณกราไฟต์ โดยบริเวณผิวมีปริมาณคาร์บอนสูงกว่าแกนกลาง และเมื่อใช้เครื่อง SEM+EDS วัดปริมาณคาร์บอนบริเวณรูพรุน และเนื้อพื้น พบว่าผลมีลักษณะเดียวกับหัวข้อ 4.2.2

ตารางที่ 4.23 ผลการวัดปริมาณคาร์บอนของชิ้นงานผสมกราไฟต์ปริมาณต่าง ๆ หลังชุบแข็งผิว

ปริมาณกราไฟต์ (wt%)	ปริมาณคาร์บอน (wt%)	
	แกนกลาง	ผิว
0	1.1154	1.5833
0.2	1.2896	1.6591
0.3	1.4023	1.7100

#### 4.6.3 โครงสร้างจุลภาค

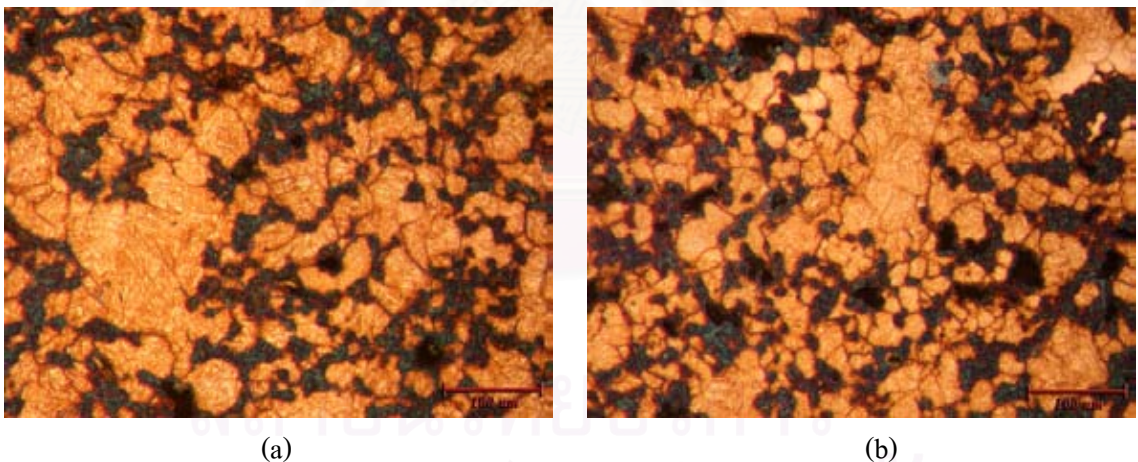
ภาพถ่ายลักษณะรูพรุนในชิ้นงานผสมกราไฟต์ปริมาณต่าง ๆ แสดงในรูปที่ 4.13 เห็นได้ว่ารูพรุนที่มีการขยายตัวอย่างมาก เป็นรูพรุนขนาดใหญ่กระจายตัวอยู่ทั่วชิ้นงาน และไม่พบความแตกต่างจากการผสมกราไฟต์



รูปที่ 4.13 ภาพถ่ายลักษณะรูพรุนในชิ้นงานผสมกราไฟต์ปริมาณต่าง ๆ หลังชุบแข็งผิว

(a) 0.2 wt% (b) 0.3 wt%

ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคในชิ้นงานผสมกราไฟต์ปริมาณต่าง ๆ หลังชุบแข็งผิว แสดงในรูปที่ 4.14 พบว่าบริเวณเนื้อพื้นแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ มาร์เทนไซต์ (พื้นที่สีอ่อน) เป็นเนื้อพื้น และบริเวณพื้นที่สีเข้ม อยู่ตามขอบเกรนเชื่อมต่อกัน โดยบริเวณพื้นที่สีเข้มมักมีรูพรุนอยู่ตรงกลาง และเห็นได้ว่า พื้นที่สีเข้มเพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณกราไฟต์



รูปที่ 4.14 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคในชิ้นงานผสมกราไฟต์ปริมาณต่าง ๆ หลังชุบแข็งผิว

(a) 0.2 wt% (b) 0.3 wt%

#### 4.6.4 ผลของอุณหภูมิเผาผนึกต่อสมบัติทางกล

##### 4.6.4.1 ความแข็ง

ผลการวัดค่าความแข็งของชิ้นงานผสมกราไฟต์ปริมาณต่าง ๆ หลังชุบแข็งผิว แสดงในตารางที่ 4.24 พบว่าบริเวณผิวไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็ง ในขณะที่บริเวณแกนกลาง มีค่าความแข็งเพิ่มขึ้นเล็กน้อย

ตารางที่ 4.24 ผลการวัดค่าความแข็งของชิ้นงานที่อุณหภูมิเผาผนึกต่าง ๆ หลังชุบแข็งผิว

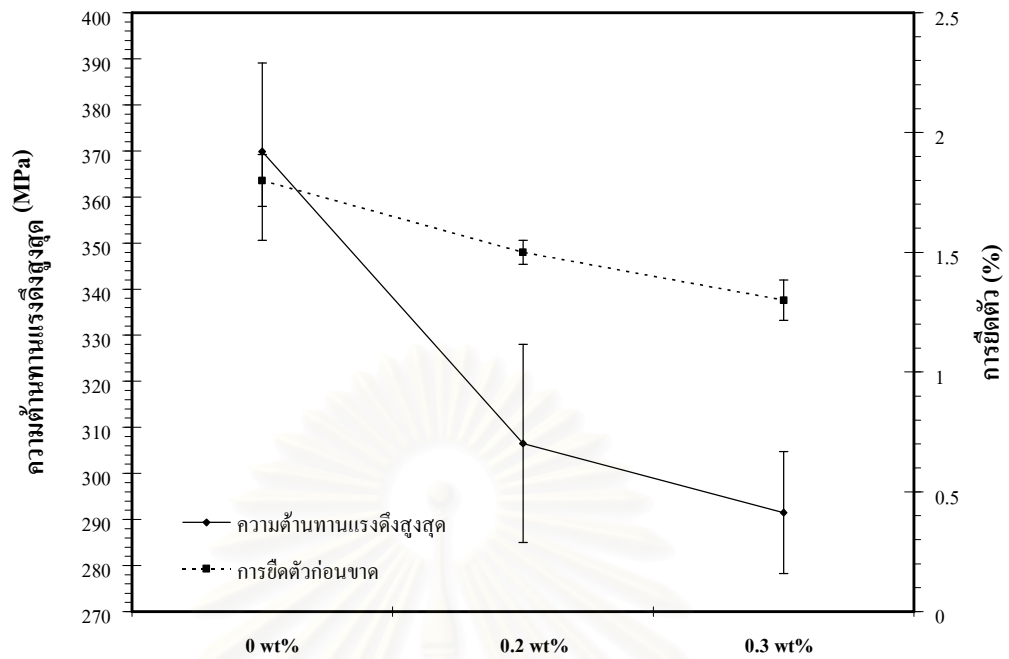
ปริมาณกราไฟต์ (wt%)	ความแข็ง (HRC)	
	แกนกลาง	ผิว
0	49.39 ± 0.29	46.60 ± 0.69
0.2	50.40 ± 0.26	46.50 ± 0.52
0.3	50.27 ± 1.69	46.57 ± 0.93

##### 4.6.4.2 การทดสอบแรงดึง

ผลการทดสอบแรงดึงของชิ้นงานผสมกราไฟต์ปริมาณต่าง ๆ หลังชุบแข็งผิว แสดงในตารางที่ 4.25 และความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแรงดึงสูงสุดและการยืดตัวกับปริมาณกราไฟต์ หลังจากชุบแข็งผิว แสดงในรูปที่ 4.15 พบว่าทั้งค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด และการยืดตัว ลดลงอย่างมากตามปริมาณกราไฟต์

ตารางที่ 4.25 ผลการทดสอบแรงดึงของชิ้นงานผสมกราไฟต์ปริมาณต่าง ๆ หลังชุบแข็งผิว

ปริมาณกราไฟต์ (wt%)	ความต้านทาน แรงดึงสูงสุด (MPa)	การยืดตัว (%)
0	369.59 ± 19.27	1.80 ± 0.11
0.2	306.51 ± 21.50	1.50 ± 0.05
0.3	291.50 ± 13.22	1.30 ± 0.08



รูปที่ 4.15 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแรงดึงสูงสุด และการยืดตัวก่อนขาดกับปริมาณกราไฟต์ หลังจากชุบแข็งผิว

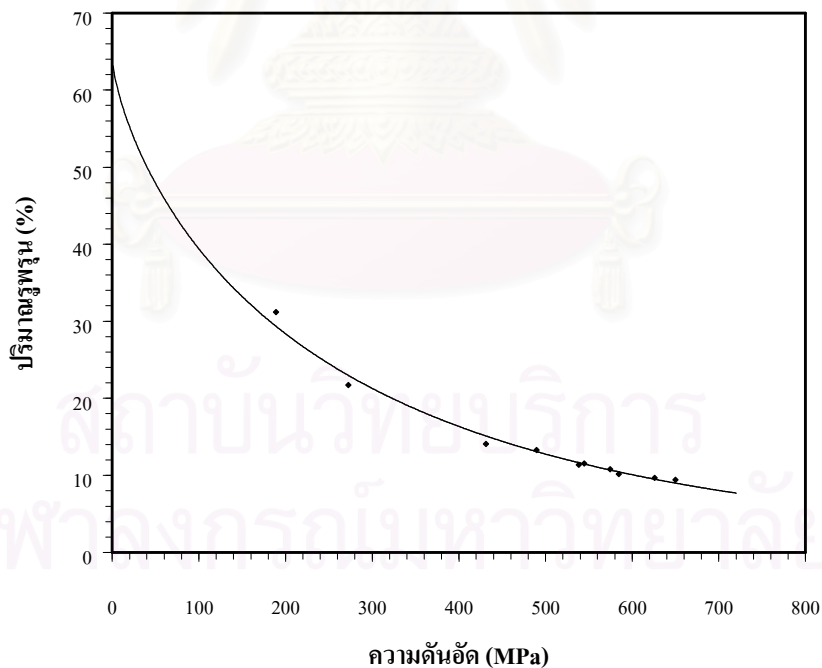
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 5

### อภิปรายผลการทดลอง

#### 5.1 ผลของความดันอัดต่อปริมาณรูพรุนในชิ้นงานกรีน

จากผลการทดลองเรื่องความดันอัดต่อความหนาแน่นของชิ้นงานกรีน ในรูปที่ 4.2 สามารถคำนวณและสร้างแผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณรูพรุนของชิ้นงานกรีนกับความดันอัด ได้ดังรูปที่ 5.1 โดยจุดในแผนภูมิเป็นการแปลงค่าจากรูปที่ 4.2 และเส้นแนวโน้มในแผนภูมิดังกล่าวสร้างจากสมการความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณรูพรุนในชิ้นงานกรีนกับความดันอัด ในสมการที่ 5.1 และกลายเป็นสมการที่ 5.2 โดยค่า  $P_0$  คำนวณได้จากความหนาแน่นปรากฏของผง SCM 415 มีค่าเท่ากับ 63.59 ในขณะที่ค่า  $K$  และ  $n$  สามารถคำนวณได้จากการประมาณค่าด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Method of Least Square) ได้ค่าเท่ากับ 0.0163 และ 0.74 ตามลำดับ โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination) เท่ากับ 0.94 และเมื่อพิจารณาปริมาณรูพรุนซึ่งลดลงตามความดันอัด หรืออีกนัยหนึ่งคือความหนาแน่นกรีนเพิ่มขึ้น



รูปที่ 5.1 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณรูพรุนในชิ้นงานกรีนกับความดันอัด

$$P = P_0 \exp(-Kp^n) \quad \dots (5.1)$$

$$P = 63.59 \exp(-0.0163p^{0.74}) \quad \dots (5.2)$$

เมื่อ $P$	คือ	ปริมาณรุกรานของชิ้นงานกรีน (%)
$P_0$	คือ	ปริมาณรุกรานของวัสดุผงที่อยู่กันอย่างหลวม ๆ (%)
$p$	คือ	ความดันอัด (MPa)
$K$	คือ	อัตราการเปลี่ยนแปลงรุกราน ( $\text{MPa}^{-1}$ )
$n$	คือ	strain hardening exponent

## 5.2 ผลของอุณหภูมิเผาผนึก

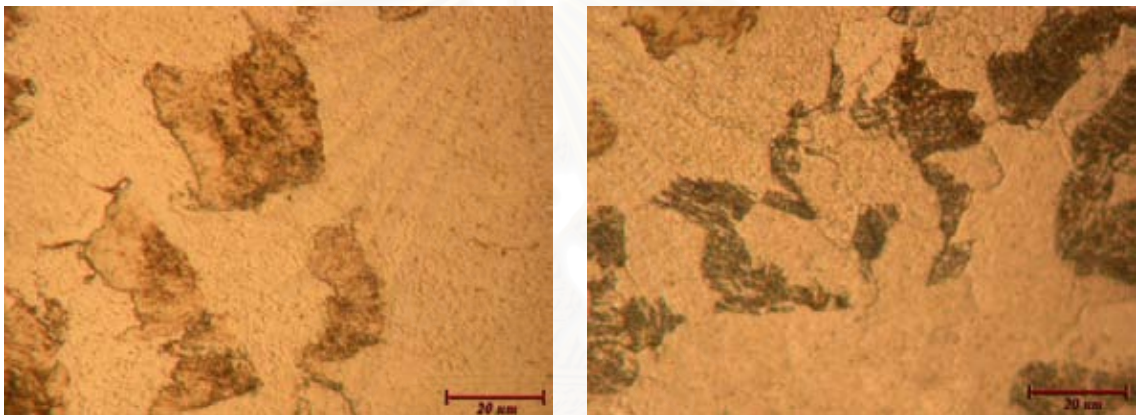
บทบาทสำคัญของอุณหภูมิเผาผนึกต่อสมบัติต่าง ๆ ของชิ้นงานโลหะผง คือ การเพิ่มการขยายตัวของเกรนและลดปริมาณรุกรานในชิ้นงาน ซึ่งส่งผลให้มีความหนาแน่นเพิ่มสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากกลไกการแพร่ในขั้นตอนการเผาผนึก เป็นกลไกซึ่งสามารถกระตุ้นได้ด้วยความร้อน ดังนั้นที่อุณหภูมิเผาผนึกสูงซึ่งมีพลังงานมากกว่าอุณหภูมิเผาผนึกต่ำ อะตอมสามารถเคลื่อนที่ได้มากกว่า จึงทำให้อนุภาคเชื่อมติดกันได้ง่ายและรวดเร็ว สอดคล้องกับผลของสมบัติทางกายภาพ ซึ่งพบว่าความหนาแน่น และการหดตัวของชิ้นงานจากอุณหภูมิเผาผนึก  $1300^{\circ}\text{C}$  สูงกว่า  $1250^{\circ}\text{C}$  และ  $1200^{\circ}\text{C}$  ตามลำดับ

อย่างไรก็ดีจากภาพถ่ายลักษณะรูพรุน ไม่พบความแตกต่างชัดเจนทั้งปริมาณและขนาดรูพรุนในชิ้นงาน เนื่องจากช่วงความแตกต่างของอุณหภูมิเผาผนึกในการทดลองแคบเกินไป นอกจากนี้พบว่าลักษณะรูพรุนจากบริเวณผิวลึกลงไปประมาณ 300 ไมครอน มีขนาดใหญ่กว่าบริเวณอื่น เนื่องจากในขั้นตอนสุดท้ายของการเผาผนึก บริเวณผิวเป็นบริเวณที่ก๊าซซึ่งตามรูพรุนเป็คภายในชิ้นงานไหลผ่านเพื่อออกจากชิ้นงาน ส่งผลให้เกิดรูพรุนขนาดใหญ่เหลือค้างอยู่บริเวณผิวชิ้นงาน เป็นสาเหตุให้ค่าความแข็งบริเวณผิวมีค่าต่ำกว่าบริเวณแกนกลางเล็กน้อย ในขณะที่ผลของปริมาณคาร์บอนบริเวณผิวไม่มีบทบาท เพราะเกิดการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวเพียงเล็กน้อยระหว่างการเผาผนึก เนื่องจากบรรยากาศในเตาเผาผนึกปกคลุมด้วยก๊าซไฮโดรเจน และอาร์กอน ซึ่งป้องกันการสูญเสียคาร์บอนที่ผิว ประกอบกับปริมาณธาตุคาร์บอนเดิมในวัสดุผงก็ต่ำมาก จนไม่ส่งผลต่อค่าความแข็ง และเมื่อพิจารณาเทียบกับชิ้นงานเปรียบเทียบ พบว่าชิ้นงานจากอุณหภูมิเผาผนึก  $1300^{\circ}\text{C}$  มีค่าความแข็งประมาณร้อยละ 60 ของชิ้นงานเปรียบเทียบ อันมีสาเหตุสำคัญ 2 ข้อคือ รูพรุนในชิ้นงาน และปริมาณคาร์บอนซึ่งต่ำกว่ามาตรฐาน SCM 415 มาก ซึ่งส่งผลให้เนื้อพื้นมีความแข็งต่ำ

ขณะที่การทดสอบแรงดึง พบว่า ทั้งค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด, การยืดตัว และความคราก เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเผาผนึกเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลจากการลดลงของปริมาณรูพรุน ทำให้ชิ้นงานมีพื้นที่เนื้อพื้นในการรับแรงดึงเพิ่มขึ้น และสามารถยืดตัวได้มากขึ้น ในขณะที่มีลักษณะเนื้อพื้นเหมือนกัน คือมีเพียงเฟสเฟอร์ไรท์ และรูพรุนกระจายตัวอยู่

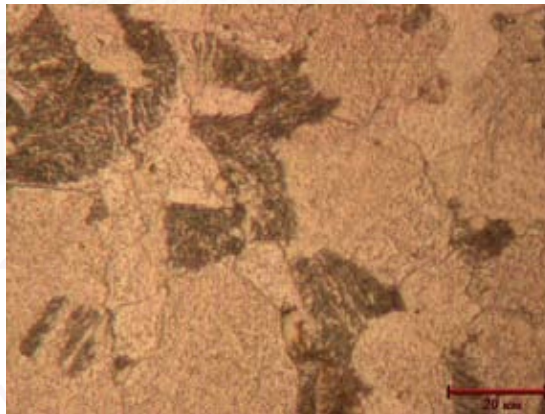
### 5.3 ผลของปริมาณคาร์บอน

บทบาทสำคัญของปริมาณคาร์บอนที่เพิ่มลงไปโดยการผสมผงกราไฟต์ คือการเพิ่มความแข็งแรงของเนื้อพื้นซึ่งสามารถเห็นได้ชัดเจนจากภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคว่าบริเวณเนื้อพื้นเกิดเป็น เฟสเฟอไรท์และเฟอไรต์ ผสมกันอยู่เหมือนกับในชิ้นงานเปรียบเทียบ แต่หากมองที่กำลังขยายสูง พบว่าพื้นที่ส่วนใหญ่มากกว่าร้อยละ 99 มีลักษณะเป็นดังในรูปที่ 5.2 (a) ซึ่งเฟสเฟอไรท์ที่เกิดมีปริมาณเฟสซีเมนต์ไครต์ไดคัลไดต์ได้น้อย เมื่อเทียบกับชิ้นงานเปรียบเทียบในรูปที่ 5.2 (c) เนื่องจากมีปริมาณคาร์บอนในบริเวณนั้นต่ำ ทำให้เกิดเป็นเฟสซีเมนต์ไครต์ไดคัลได้น้อย อย่างไรก็ตามก็พบบางส่วนในชิ้นงานมีที่เฟอไรท์ชัดเจน ดังเช่นในรูปที่ 5.2 (b) โดยบริเวณดังกล่าวกระจายอยู่ในชิ้นงานไม่แน่นอน แต่ในบางชิ้นงานไม่พบบริเวณดังกล่าวเลย



(a)

(b)



(c)

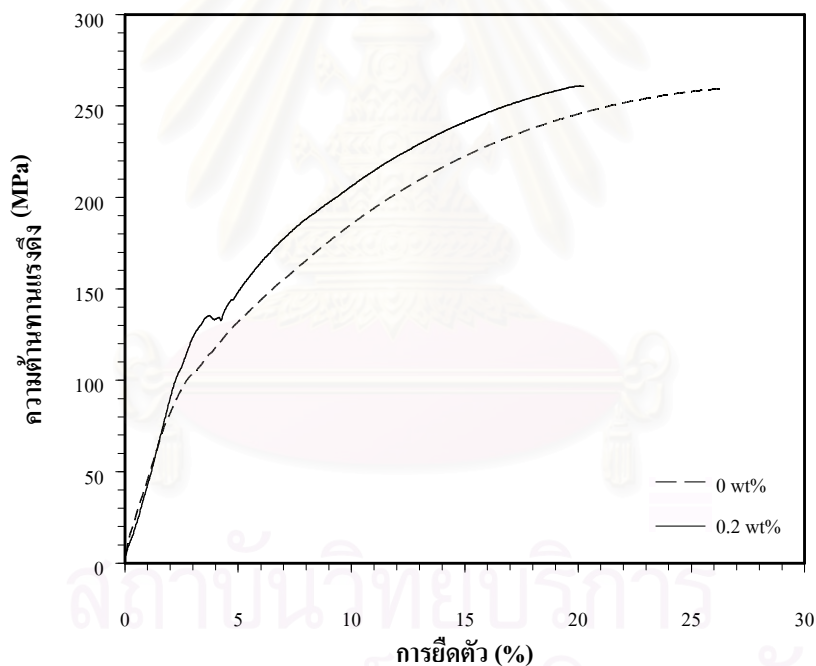
รูปที่ 5.2 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคในชิ้นงานผสมกราไฟต์ และชิ้นงานเปรียบเทียบ

(a) เฟอไรท์ที่มีซีเมนต์ไครต์ต่ำ (b) เฟอไรท์ปกติ (c) ชิ้นงานเปรียบเทียบ

ส่วนการหดตัว และความหนาแน่นของชิ้นงาน ไม่ได้รับผลกระทบจากการผสมผงกราไฟต์ เนื่องจากผสมปริมาณกราไฟต์เพียงเล็กน้อยเท่านั้น อย่างไรก็ตามก็เห็นว่าความหนาแน่นของชิ้นงาน ลดลงเล็กน้อยนั้น เกิดจากชิ้นงานผสมกราไฟต์มีความหนาแน่นกรีนต่ำกว่า

เมื่อพิจารณาความแข็ง พบว่าชิ้นงานผสมกราไฟต์ มีค่าความแข็งสูงกว่า เนื่องมาจากคาร์บอนซึ่งได้จากผงกราไฟต์ละลายเข้าไปในเนื้อพื้นจนสามารถเกิดเฟสเฟอไรต์ ซึ่งมีความแข็งสูงกว่าเฟสเฟอร์ไรท์ อย่างไรก็ตามพบว่าบริเวณผิว ค่าความแข็งไม่ต่างจากเดิม เนื่องจากเกิดการสูญเสียคาร์บอนที่ผิว และยังคงมีรูพรุนขนาดใหญ่บริเวณผิวในลักษณะเดียวกัน

ส่วนของการทดสอบแรงดึง พบว่าค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด และความครากเพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณกราไฟต์ที่ผสม เนื่องจากปริมาณรูพรุนมีค่าใกล้เคียงกัน ในขณะที่เนื้อพื้นเกิดเฟสเฟอไรต์ซึ่งมีความแข็งแรงมากกว่าเฟสเฟอร์ไรท์ แต่ในทางกลับกันส่งผลให้การยืดตัวลดต่ำลง ซึ่งสามารถเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงในรูปของร้อยละได้ในตารางที่ 5.1 นอกจากนี้จากผลการทดลองยังพบจุดน่าสนใจคือ เมื่อผสมกราไฟต์ลงไป ทำให้เกิดจุดครากที่ชัดเจน เนื่องจากคาร์บอนละลายเข้าไปอยู่ในโครงสร้างผลึกแบบ Body Center Cubic (BCC) ทำให้เกิด Elastic Interaction ที่แข็งแรงระหว่างอะตอมกับดิสโลเคชัน<sup>(18)</sup> ดังตัวอย่างในรูปที่ 5.3 ในทางกลับกันชิ้นงานที่ไม่ผสมกราไฟต์มีคาร์บอนละลายอยู่ต่ำจึงไม่เกิดจุดครากที่ชัดเจน



รูปที่ 5.3 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแรงดึงกับการยืดตัวของชิ้นงานผสมและไม่ผสมกราไฟต์

ตารางที่ 5.1 เปรียบเทียบผลการทดสอบแรงดึงของชิ้นงานผสมกราไฟต์ปริมาณต่าง ๆ เทียบกับชิ้นงานไม่ผสมกราไฟต์

ปริมาณกราไฟต์ (wt%)	ความคราก (%)	ความต้านทาน แรงดึงสูงสุด (%)	การยืดตัว (%)
0.2	+15.71	+2.22	-11.70
0.3	+22.85	+7.57	-25.57

#### 5.4 ผลของการชุบแข็งผิวด้วยวิธีก๊าซคาร์บูไรซิ่งต่อสมบัติทาง ๆ ของชิ้นงาน

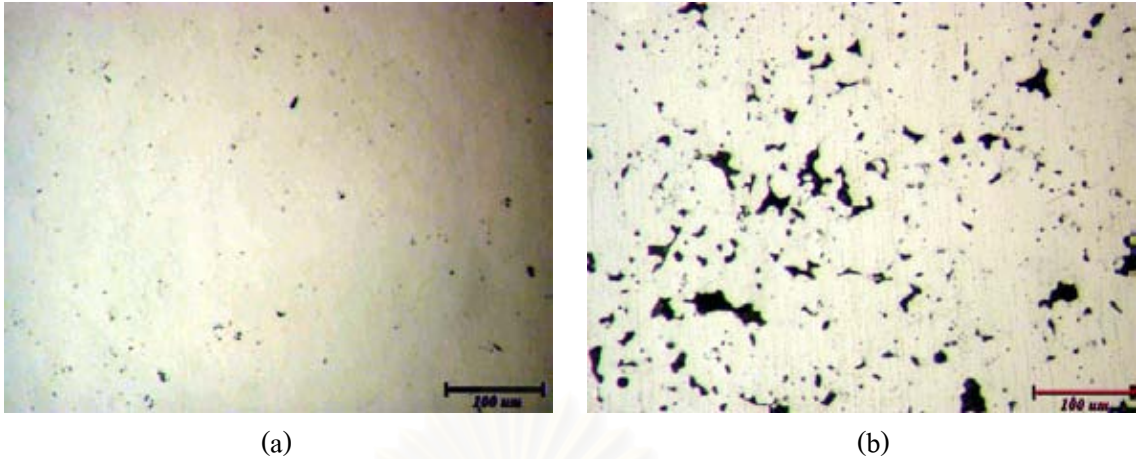
ผลของการชุบแข็งผิวด้วยวิธีก๊าซคาร์บูไรซิ่งซึ่งประกอบไปด้วย 3 ส่วนคือ ผลต่อความหนาแน่นและลักษณะรูพรุน, ผลต่อ โครงสร้างจุลภาค และผลต่อสมบัติทางกล ดังรายละเอียดต่อไปนี้

##### 5.4.1 ผลต่อความหนาแน่นและลักษณะรูพรุน

ในขั้นตอนการชุบแข็งผิว ชิ้นงานได้รับความร้อนที่ 940 °C เป็นเวลานาน เสมือนกับการนำไปเผาผนึกอีกครั้งแม้อุณหภูมิจะต่ำกว่า จึงเกิดการรวมตัวของรูพรุน นำไปสู่การโตของรูพรุนขนาดใหญ่ และสูญเสียรูพรุนขนาดเล็กซึ่งมีความเสถียรน้อยกว่า ส่งผลให้รูพรุนมีจำนวนน้อยลง แต่ขนาดใหญ่ขึ้น เรียกเหตุการณ์นี้ว่าปรากฏการณ์ออสท์วาลด์ (Ostwald ripening)

เมื่อใช้เครื่อง SEM+EDS วิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมีเฉพาะบริเวณรูพรุน พบมีปริมาณคาร์บอนสูงกว่าบริเวณเนื้อพื้นมาก และบางตำแหน่งในรูพรุนเป็นคาร์บอนเกือบทั้งหมด แสดงให้เห็นว่าเกิดการสะสมของคาร์บอนในรูพรุน ดังที่พบจากผลการวัดปริมาณคาร์บอนด้วยเครื่อง C-S Meter ของชิ้นงานที่เผาผนึกด้วยอุณหภูมิเผาผนึก 1200°C มีปริมาณคาร์บอนบริเวณแกนกลางสูงกว่าอุณหภูมิเผาผนึกอื่น เนื่องจากชิ้นงานมีปริมาณรูพรุนมากกว่า จึงมีพื้นที่ในการสะสมคาร์บอนมากกว่าชิ้นงานที่มีปริมาณรูพรุนต่ำ และจากผลยังแสดงให้เห็นว่าบริเวณผิวมีการสะสมของคาร์บอนในรูพรุนมากกว่าบริเวณอื่น ๆ เนื่องจากเป็นบริเวณที่สัมผัสกับก๊าซในขั้นตอนการชุบแข็งผิวมากที่สุด

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาถึงการขยายขนาดของชิ้นงานหลังชุบแข็งผิว ประกอบกับผลการวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมี พบว่าขนาดของชิ้นงานที่เพิ่มขึ้นเป็นผลมาจากการขยายตัวทางความร้อนระหว่างการชุบแข็งผิว แต่ทว่าในระหว่างนั้นอะตอมคาร์บอนได้แพร่ซึ่งเข้าไปในชิ้นงาน และเกิดการสะสมของคาร์บอนในรูปของกราไฟต์ภายในรูพรุนดังที่แสดงในรูปที่ 5.4 (b) ซึ่งรูพรุนขนาดใหญ่บางส่วนคือกราไฟต์ซึ่งสะสมอยู่ในรูพรุน และเมื่ออุณหภูมิลดต่ำลงชิ้นงานจึงไม่สามารถหดตัวให้ขนาดเท่ากับขนาดเริ่มต้น



รูปที่ 5.4 ภาพถ่ายลักษณะรูพรุนในชิ้นงานจากอุณหภูมิเผาผืนึก 1300 °C

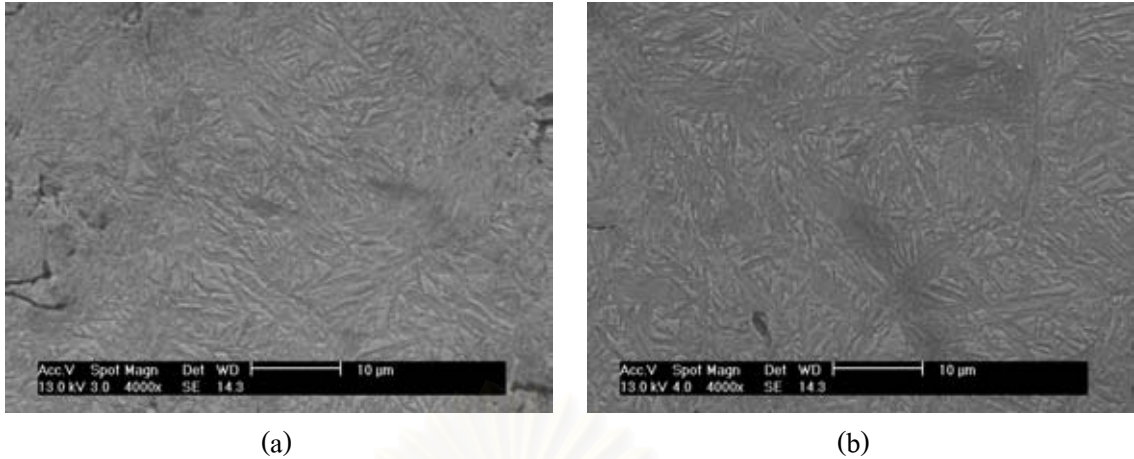
(a) ก่อนชุบแข็งผิว (b) หลังชุบแข็งผิว

สุดท้ายจึงส่งผลให้ความหนาแน่นของชิ้นงานหลังชุบแข็งผิวลดลง และมีค่าใกล้เคียงกันมากขึ้น หรืออาจกล่าวได้ว่าบทบาทของอุณหภูมิเผาผืนึกต่อปริมาณรูพรุน ลดน้อยลงในชิ้นงานหลังผ่านการชุบแข็งผิว

#### 5.4.2 ผลต่อโครงสร้างจุลภาค

หลังทำการชุบแข็งผิว ส่งผลให้ปริมาณคาร์บอนภายในชิ้นงานเพิ่มสูงขึ้น แต่จากผลการวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมีเฉพาะบริเวณเนื้อพื้นด้วยเครื่อง SEM+EDS พบว่ามีปริมาณคาร์บอนใกล้เคียงกันตลอดทั้งชิ้นงาน โดยที่ช่วงระยะลึกจากผิว 0.2 มิลลิเมตรมีปริมาณคาร์บอนสูงสุด ทั้งนี้เนื่องจากมีรูพรุนเปิดเชื่อมต่อกันภายในชิ้นงานจำนวนมาก ทำให้ก๊าซสามารถแพร่ผ่านรูพรุนได้ ส่งผลให้บริเวณภายในสามารถสัมผัสก๊าซได้โดยตรงโดยตรง ประกอบกับชิ้นงานทดสอบมีขนาดเล็ก ดังนั้นคาร์บอนสามารถแพร่เข้าไปถึงบริเวณแกนกลาง

ด้วยเหตุผลในขั้นต้น เมื่อพิจารณาลักษณะโครงสร้างเนื้อพื้น จึงพบว่าเนื้อพื้นส่วนใหญ่ของชิ้นงานทั้งบริเวณผิวและแกนกลางเป็นโครงสร้างมาร์เทนไซต์ ทั้งในชิ้นงานผสมและไม่ผสมกราไฟต์ ดังที่แสดงในรูปที่ 5.5



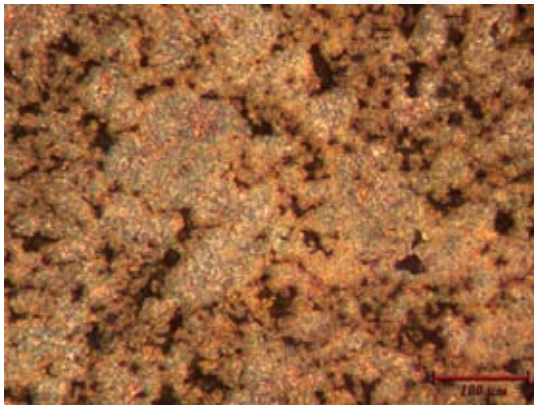
(a)

(b)

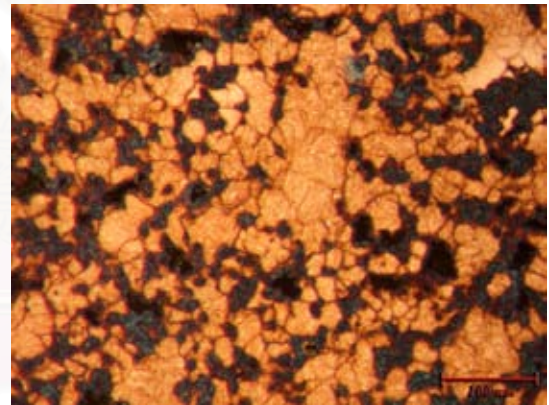
รูปที่ 5.5 ภาพถ่าย SEM บริเวณเนื้อพื้นของชิ้นงานผสมและไม่ผสมกราไฟต์ หลังชุบแข็งผิว

(a) ไม่ผสมกราไฟต์ (b) ผสมกราไฟต์

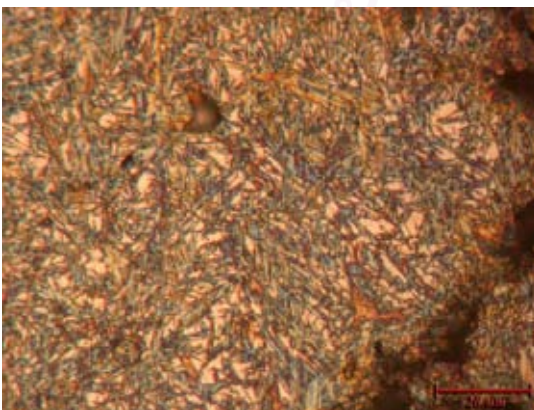
จุดแตกต่างของชิ้นงานผสมและไม่ผสมกราไฟต์อยู่ที่เฟสที่เกิดขึ้นบริเวณรอบรูพรุน ดังที่แสดงในรูปที่ 5.6 เห็นได้ว่าชิ้นงานผสมกราไฟต์ เกิดเฟสใหม่ขึ้นเป็นเฟสสี่เหลี่ยมรอบ ๆ รูพรุน และเชื่อมต่อกันเป็นโครงข่าย ในขณะที่ชิ้นงานที่ไม่ได้ผสมกราไฟต์ ไม่เกิดเฟสดังกล่าว มีเพียงรูพรุนเท่านั้น



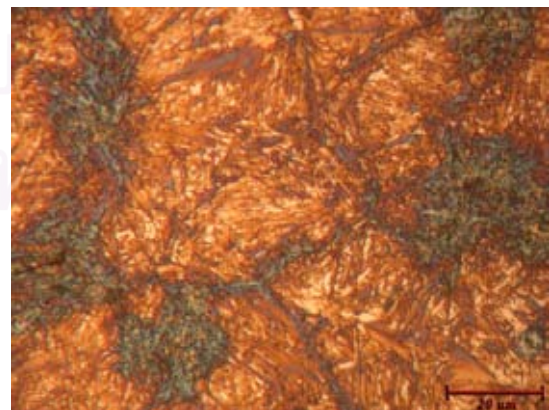
(a)



(b)



(c)

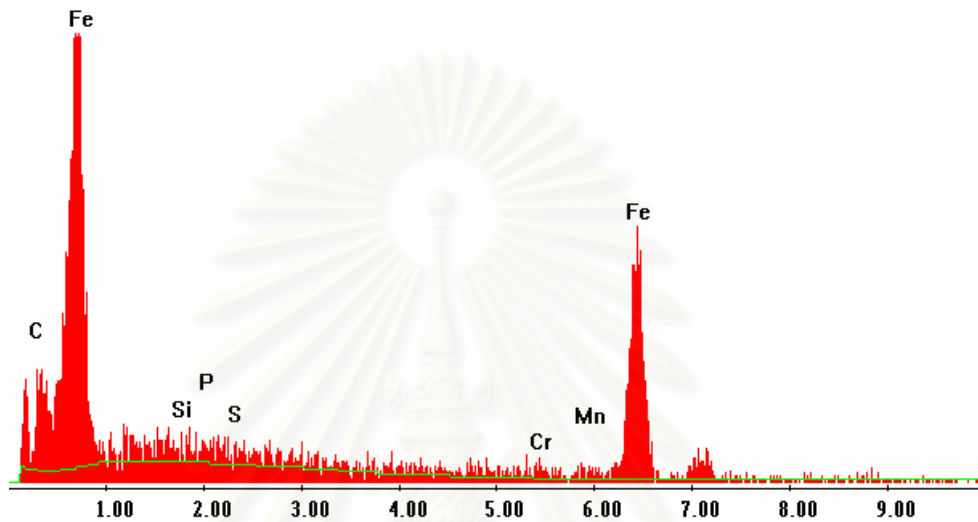


(d)

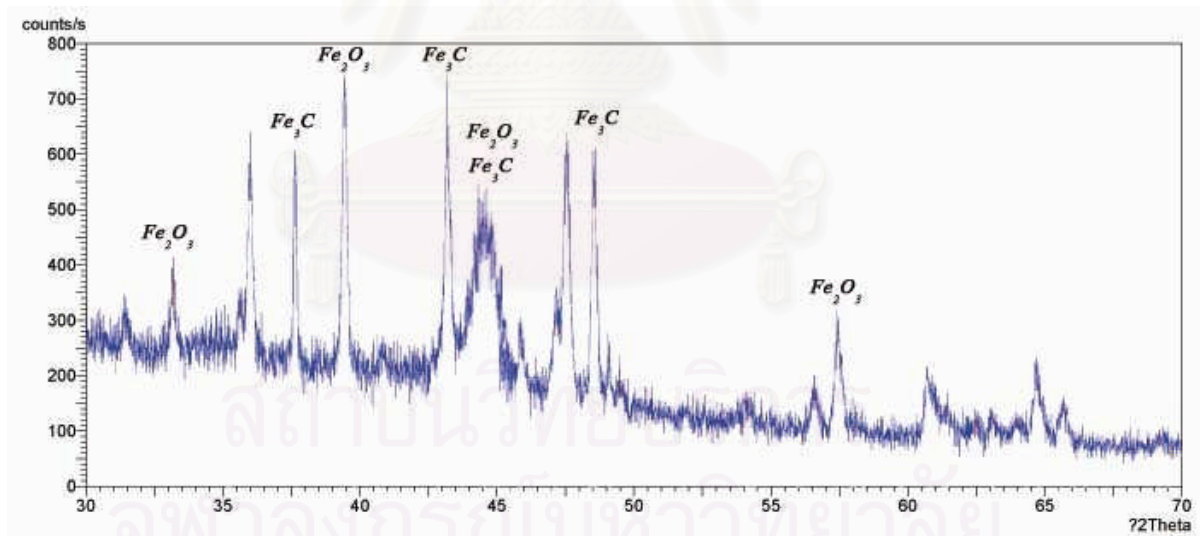
รูปที่ 5.6 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคในชิ้นงานผสมและไม่ผสมกราไฟต์ หลังชุบแข็งผิว

(a) ไม่ผสม (b) ผสม (c) ไม่ผสมกำลังขยายสูง (d) ผสมกำลังขยายสูง

เมื่อวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมีเฉพาะบริเวณดังกล่าวด้วยเครื่อง SEM+EDS ซึ่งแสดงผลในรูปที่ 5.7 ประกอบกับการวิเคราะห์เฟสด้วยเครื่อง XRD ดังที่แสดงในรูปที่ 5.8 สามารถสรุปได้ว่าบริเวณดังกล่าวเป็นเฟสซีเมนต์ไคต์ ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีซึ่งกล่าวว่าเมื่อปริมาณคาร์บอนของเหล็กกล้าคาร์บอนซึ่งผลิตจากกระบวนการโลหะพง มีค่ามากกว่าร้อยละ 0.85 โดยน้ำหนัก จะเริ่มเกิดเฟสซีเมนต์ไคต์ขึ้นตามขอบเกรน และขยายตัวมากขึ้นจนกลายเป็นโครงข่ายซีเมนต์ไคต์ เมื่อปริมาณคาร์บอนเพิ่มสูงขึ้น



รูปที่ 5.7 แสดงผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM+EDS บริเวณเฟสซีเมนต์ไคต์



รูปที่ 5.8 ผลการวิเคราะห์เฟสด้วยเครื่อง XRD

### 5.4.3 ผลต่อสมบัติทางกล

หลังการชุบแข็งผิว ความต้านทานแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานเพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากเฟสมาร์เทนไซต์มีความแข็งแรงสูงกว่าเฟสเฟอร์ไรท์ ในทางกลับกันผลของเฟสมาร์เทนไซต์ และการเกิดรูพรุนขนาดใหญ่ภายในชิ้นงานส่งผลให้การยึดตัวลดต่ำลงอย่างมาก ในขณะที่ค่าความแข็งก็เพิ่มสูงขึ้นเพราะผลของเฟสมาร์เทนไซต์เช่นกัน และยังคงมีแนวโน้มลักษณะเดียวกับชิ้นงานก่อนชุบแข็งผิว คือบริเวณผิวมีค่าความแข็งต่ำกว่าแกนกลาง เนื่องจากบริเวณผิวลึกลงมาถึงระยะ 0.2 มิลลิเมตร มีปริมาณคาร์บอนในเนื้อพื้นสูงกว่าแกนกลาง ความสามารถในการชุบแข็งบริเวณผิวจึงลดต่ำลง

สำหรับชิ้นงานไม่ผสมกราไฟต์ที่อุณหภูมิเผาผนึกต่าง ๆ พบว่าความหนาแน่นและปริมาณรูพรุนซึ่งเคยเป็นปัจจัยสำคัญต่อสมบัติทางกล มีค่าใกล้เคียงกันมากขึ้นหลังชุบแข็งผิว ประกอบกับลักษณะโครงสร้างจุลภาคเหมือนกัน จึงเป็นสาเหตุให้ผล ทั้งค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด, การยึดตัว และความแข็งมีค่าใกล้เคียงกัน

สำหรับชิ้นงานที่ผสมกราไฟต์ปริมาณต่าง ๆ ที่อุณหภูมิเผาผนึก 1300°C พบว่า หลังชุบแข็งผิว เนื่องจากเกิดโครงข่ายซีเมนต์ไตต์บริเวณขอบเกรนซึ่งเพิ่มขึ้นตามปริมาณกราไฟต์ ด้วยสมบัติแข็งแต่เปราะของโครงข่ายซีเมนต์ไตต์ เมื่อไปเกิดบริเวณขอบเกรนจึงส่งผลให้ ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด และการยึดตัวของชิ้นงานผสมกราไฟต์ ลดต่ำลงตามลำดับ ในขณะที่ค่าความแข็งไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจน เนื่องจากเฟสมาร์เทนไซต์ที่มีปริมาณคาร์บอนใกล้เคียงกัน

## บทที่ 6

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิการเผาผนึก และปริมาณคาร์บอนในชิ้นงาน ต่อสมบัติทางกลของชิ้นงานทดสอบเหล็กกล้าผสมโครเมียมและโมลิบดีนัม เกรด SCM 415 ซึ่งผลิตจากกระบวนการอัดขึ้นรูป สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังต่อไปนี้

#### 6.1 สรุปผลการทดลอง

6.1.1 การเติม Zinc stearate เป็นสารหล่อลื่น ปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก สามารถลดพลังงานที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปชิ้นงานกรีนได้ประมาณร้อยละ 2 นอกจากนี้พบการสูญเสียคาร์บอนระหว่างการผลิตของชิ้นงานที่เติมกราไฟต์เป็นธาตุผสม ประมาณร้อยละ 25 – 35 บริเวณแกนกลางและประมาณร้อยละ 40 – 50 บริเวณผิว

6.1.2 สมบัติทางกลทั้งหมดของชิ้นงานทดสอบเพิ่มสูงขึ้นตามอุณหภูมิการเผาผนึกที่เพิ่มขึ้น เป็นผลจากความหนาแน่นที่เพิ่มขึ้นและปริมาณรูพรุนที่ลดต่ำลงตามลำดับ ส่งผลให้ชิ้นงานซึ่งเผาที่อุณหภูมิ 1300°C มีสมบัติทางกลดีที่สุด

6.1.3 หลังการชุบแข็งผิวด้วยวิธีก๊าซคาร์บูไรซิ่ง สำหรับชิ้นงานทดสอบที่ใช้อุณหภูมิเผาผนึกต่าง ๆ สมบัติทางกลทั้งหมดมีค่าใกล้เคียงกันทั้งหมด เนื่องจากเนื้อพื้นของชิ้นงานมีลักษณะเหมือนกัน ในขณะที่ความหนาแน่นของชิ้นงานทั้งหมดมีค่าใกล้เคียงกันมากขึ้น ส่งผลให้บทบาทของอุณหภูมิเผาผนึกลดลง

6.1.4 ความต้านทานการดึง และความแข็ง เพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณกราไฟต์ที่เพิ่มขึ้น ในทางกลับกัน การยึดตัวกลับลดต่ำลง ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณคาร์บอนซึ่งละลายอยู่ในเนื้อพื้นเพิ่มขึ้น ทำให้เนื้อพื้นมีความแข็งแรงขึ้น ส่งผลให้ชิ้นงานซึ่งผสมกราไฟต์ปริมาณร้อยละ 0.3 โดยน้ำหนัก มีสมบัติทางกลโดยรวมดีที่สุด

6.1.5 หลังการชุบแข็งผิวด้วยวิธีก๊าซคาร์บูไรซิ่ง ในชิ้นงานที่ผสมกราไฟต์ปริมาณต่าง ๆ แนวโน้มของความต้านทานแรงดึงและการยึดตัว ลดต่ำลง เมื่อปริมาณกราไฟต์เพิ่มขึ้น เนื่องจากเกิดซีเมนต์ไครต์ ขึ้นบริเวณขอบเกรนจนกลายเป็นโครงข่ายซีเมนต์ไครต์ ส่งผลให้ความแข็งแรงของชิ้นงานลดต่ำลง ในขณะที่ความแข็งเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ดังนั้นชิ้นงานซึ่งไม่ได้ผสมกราไฟต์ จึงมีสมบัติทางกลโดยรวมดีที่สุด

6.1.6 เมื่อพิจารณาลักษณะการใช้งานของ SCM 415 ซึ่งนิยมนำไปชุบแข็งผิวก่อนนำไปใช้งาน ทำให้เงื่อนไขการผลิตที่ดี และประหยัดค่าใช้จ่ายที่สุด คือการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1200°C และไม่ผสมกราไฟต์ลงไป

## 6.2 ข้อเสนอแนะ

6.2.1 เพิ่มขั้นตอนการกำจัดรูพรุนบริเวณผิวชิ้นงานก่อนการชุบแข็งผิวด้วยวิธีก๊าซคาร์บูไรซิ่ง เพื่อลดผลกระทบของรูพรุน ซึ่งส่งผลให้ความหนาผิวแข็งลดต่ำลง

6.2.2 ขั้นตอนการชุบแข็งผิวด้วยวิธีก๊าซคาร์บูไรซิ่ง ควรมีการปรับเปลี่ยน เช่น การลดเวลา เป็นต้น เพื่อลดความหนาของผิวแข็งไม่ให้ไปถึงบริเวณแกนกลางของชิ้นงาน เนื่องจากชิ้นงาน SCM 415 ส่วนใหญ่มีขนาดเล็ก ซึ่งส่งผลให้การยึดตัวของชิ้นงานเพิ่มสูงขึ้น

6.2.3 เปลี่ยนวิธีการชุบแข็งผิวเป็นวิธีอื่น เช่น คาร์โบไนตรายดิง เป็นต้น เพื่อลดความหนาของผิวแข็ง เนื่องจากชิ้นงาน SCM 415 ส่วนใหญ่มีขนาดเล็กซึ่งส่งผลให้การยึดตัวของชิ้นงานเพิ่มสูงขึ้น

6.2.4 เพิ่มปริมาณผงกราไฟต์ที่ผสมลงไปผสมในผง SCM 415 ให้อยู่ในระดับเดียวกับปริมาณคาร์บอนหลังการทำก๊าซคาร์บูไรซิ่ง แล้วทำการชุบแข็ง

## รายการอ้างอิง

1. Japanese Standards Association. JIS handbook: ferrous materials and metallurgy. Toyko: Japanese Standards Association, 1999.
2. มนัส สติรจินดา. วิศวกรรมการอบชุบเหล็ก. พิมพ์ครั้งที่ 5. กรุงเทพมหานคร: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2539.
3. Anil Kumar Sinha. Powder Metallurgy. Delhi: Dhanpat Rai & Son, 1976.
4. Randall, M., German, and Animesh Bose. Injection Molding of Metals and Ceramics. New Jersey: Metal Powder Industries Federation, 1997.
5. นกิสพร มีมงคล. โลหกรรมวัสดุผง. สงขลา: มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 2548.
6. Randall, M., German. Powder Metallurgy Science. 2<sup>nd</sup> edition. New Jersey: Metal Powder Industries Federation, 1994.
7. Randall, M., German. Sintering Theory and Practice. New York: John Wiley & Son, 1996.
8. Leander, F., Pease III, and William, G., West. Fundamentals of Powder Metallurgy. New Jersey: Metal Powder Industries Federation, 2002.
9. Andrej Salak. Ferrous Powder Metallurgy. Cambridge: Cambridge International Science Publishing, 1995.
10. Hwan-Jin Sung, Tae Kwon Ha, Sangho Ahn, and Young Won Chag. Powder injection molding of a 17-4 PH stainless steel and the effect of wintering temperature on its microstructure and mechanical properties. Journal of Materials Processing Technology (2002): 321-327.
11. American Society for Metals International. ASM Handbook Volume 7 Powder Metallurgy. 9<sup>th</sup> edition. United States of America: American Society for Metals, 1993.
12. American Society for Metals. Carburizing and Carbonitriding. Ohio: American Society for Metals, 1977.
13. Poirier, D.R., and Geiger, G.H. Transport Phenomena in Materials Processing. United States of America: The Minerals, Metals & Materials Society, 1994.
14. นิวัตร มูลปา และ ชายชาญ นาวิกนิเวท. กรรมวิธีการเติมคาร์บอนเข้าไปในผิวเหล็กที่มีปริมาณคาร์บอนต่ำโดยใช้ส่วนผสมที่อัดเป็นเม็ด. วิทยานิพนธ์ปริญญาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2536.
15. Lee-Der Liu, and Fan-Shiong Chen. Super-carburization of low alloy steel in a vacuum furnace. Surface and Coatings Technology (2004): 233-238.
16. Available from: <http://www.jtbaker.com/msds/englishhtml/z4275.htm>

17. Klein Cornelis, and Cornelius, S., Hurlbut Jr. Manual of Mineralogy: after James D. Dana. New York: John Wiley & Sons, 1985.
18. Smallman, R.E., and Bishop, R.J. Modern Physical Metallurgy & Materials Engineering. 6<sup>th</sup> edition. Great Britain: Reed Educational and Professional Publishing, 1999.



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก


สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ก.

## อริธานศัพท์

ศัพท์	ความหมาย
ความหนาแน่นปรากฏ	อัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของผงที่อยู่กันอย่างหลวม ๆ กับปริมาตร มีหน่วยเป็น $\text{g/cm}^3$
ความหนาแน่นเชิงปริมาตร	อัตราส่วนระหว่างน้ำหนักแห้งของผงกับปริมาตรรวมของผงและรูพรุนมีหน่วยเป็น $\text{g/cm}^3$
ความดันอัด	อัตราส่วนระหว่างแรงอัดกับพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างกระบอกอัดกับชิ้นงาน มีหน่วยเป็น MPa
ความต้านทานแรงดึงสูงสุด	อัตราส่วนระหว่างแรงดึงกับพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานทดสอบสูงสุดของชิ้นงานทดสอบ มีหน่วยเป็น MPa
การยืดตัว	อัตราส่วนระหว่างการเปลี่ยนแปลงของความยาวกับความยาวเริ่มต้น มีหน่วยเป็น %
ความแข็ง	อัตราส่วนระหว่างน้ำหนักกด กับพื้นที่ที่เกิดรอยกด มีหน่วยหลายหน่วยเช่น HV, HB, HRC เป็นต้น

ภาคผนวก ข.


**JFE スチール 株式会社**  
**東日本製鉄所(千葉)**  
 JFE Steel Corporation  
 East Japan Works (Chiba)  
 〒250-0835 千葉県中央区川崎町1番地  
 1, KAWASAKI-CHO, CHUO-KU, CHIBA, JAPAN

**鉄粉検査証明書**  
**INSPECTION CERTIFICATE**

需要家 Customer 日立粉末冶金(株) 松戸工場  
 証明書番号 Certificate No. 413809 Invoice No. 7X-25W0  
 契約番号 Contract No. 29080M54001 製品記号 Name of Article JIP (KIP) 4100V

日付 Date 2005-01-05

製造番号 Manuf. No	種別 Spec.	質量 Mass (kg)	袋数 No. of Bags	総質量 Total Mass (kg)	化学成分 Chemical Composition %											見掛け密度 AD M/cm <sup>3</sup>	振動度 FR g/50g
					C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	0	Green Density MPa	Rattler Value MPa			
4Z12-06	M I N M A X	25	1	25	0.020	0.10	0.90	0.030	0.20	1.20	0.40	250			2.70	20.0	
					0.003	0.01	0.72	0.015	0.009	1.03	0.30	234			2.90	30.0	
4Z12-06	M I N M A X	0	0	0	2.2	9.5	26.5	30.0	9.1	11.0	11.7	6.90			2.84	25.3	

製造番号 Manuf. No #	粒度分布 Particle Size Distribution %						圧粉密度 Green Density MPa	ラトラー値 Rattler Value MPa
	+35 +425	+60 +250	+80 +180	+100 +150	+150 +106	+200 +75		
4Z12-06	0	2.0	5.0	15.0	36.0	44.0	588.4	588.4

A. Umetsu  
 東日本製鉄所 品質保証室  
 Quality Assurance Section  
 East Japan Works

(Notes) 上記添付品は、御指定の規格又は仕様に基づいて製造され、その要求事項を満足していることを証明します。

試験荷重 588.4MPa=6t/cm<sup>2</sup>  
 圧粉・ラトラー (GD and Rattler) : 1% ZnSt  
 外観OK

รูปที่ 1 ใบรับรองสมบัติต่าง ๆ ของวัสดุผง SCM 415

## ภาคผนวก ค.

## รายงานผลวิเคราะห์

รายงานเลขที่ 167/2549

หน้า 1/1

รหัสตัวอย่าง : MTL/06/146	เพื่อวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมี
ประเภทตัวอย่าง : Steel	วิธีวิเคราะห์ : ASTM E415-99a
ลักษณะตัวอย่างเมื่อรับ : เหมาะสมที่จะวิเคราะห์	เครื่องมือวิเคราะห์ : Optical emission spectrometer; Spectrolab M7
เจ้าของตัวอย่าง : นายวินชาติ สุพรรณพิทักษ์	วันที่วิเคราะห์ : 24 กุมภาพันธ์ 2549
ที่อยู่ : ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์	ผู้วิเคราะห์ : นายสมนึก นพนิษฐ์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	การเตรียมตัวอย่าง : -

ชื่อตัวอย่าง	ปริมาณธาตุ (% โดยน้ำหนัก)									
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	V
1. SCM 415	0.193	0.242	0.665	0.010	0.013	0.928	0.151	0.070	0.209	0.008

(นายสมนึก นพนิษฐ์)  
ผู้วิเคราะห์

(นายอุทัย ดิษฐ์สิทธิ์)  
หัวหน้าฝ่ายวิเคราะห์

(ผศ.ดร. สุพงศ์ นิมภุตรัตน์)  
ผู้อำนวยการ

หมายเหตุ : 1. ผลการทดสอบนี้เป็นผลเฉพาะของตัวอย่างที่ส่งให้ทดสอบเท่านั้น 2. รายงานผลวิเคราะห์นี้อาจไม่ถูกต้องหากผู้ส่งวิเคราะห์เป็นผลมาจากคุณสมบัติของวัสดุหรือวิธีการ  
ยกเว้นการทำการถ่วง

รูปที่ 2 รายงานผลวิเคราะห์ส่วนประกอบเคมีของชิ้นงานเปรียบเทียบ

## ภาคผนวก ง.

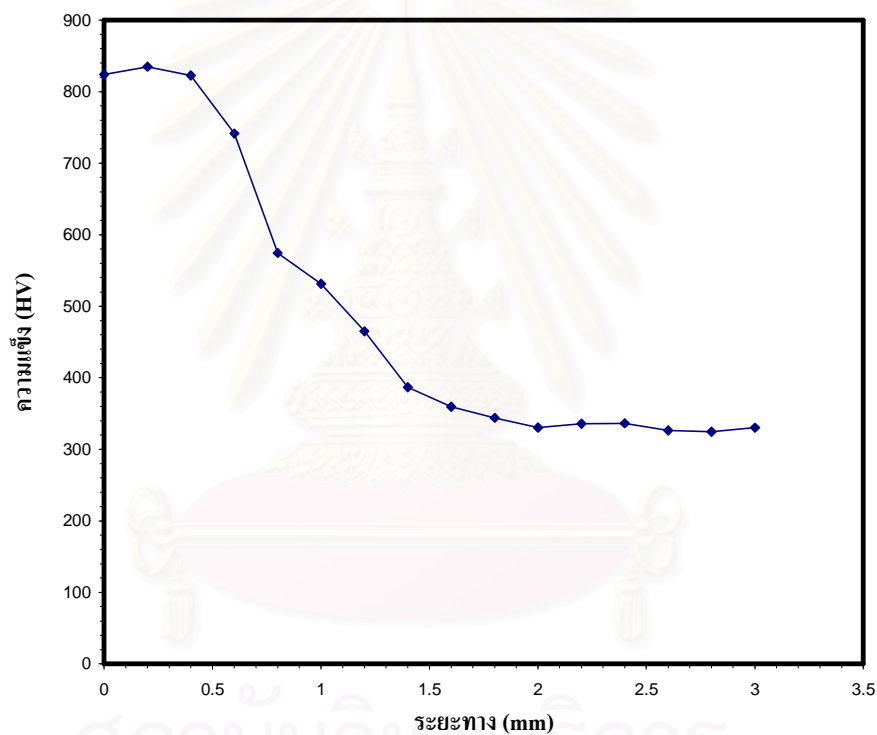
## สมบัติต่าง ๆ ของชิ้นงานเปรียบเทียบ

ความหนาแน่นก่อนการชุบแข็งผิว 7.813 g/cm<sup>3</sup> เท่ากับ 100.171 %

ความหนาแน่นหลังการชุบแข็งผิว 7.826 g/cm<sup>3</sup> เท่ากับ 100.330 %

ความแข็งก่อนการชุบแข็งผิว 211.33 ± 4.72 HV

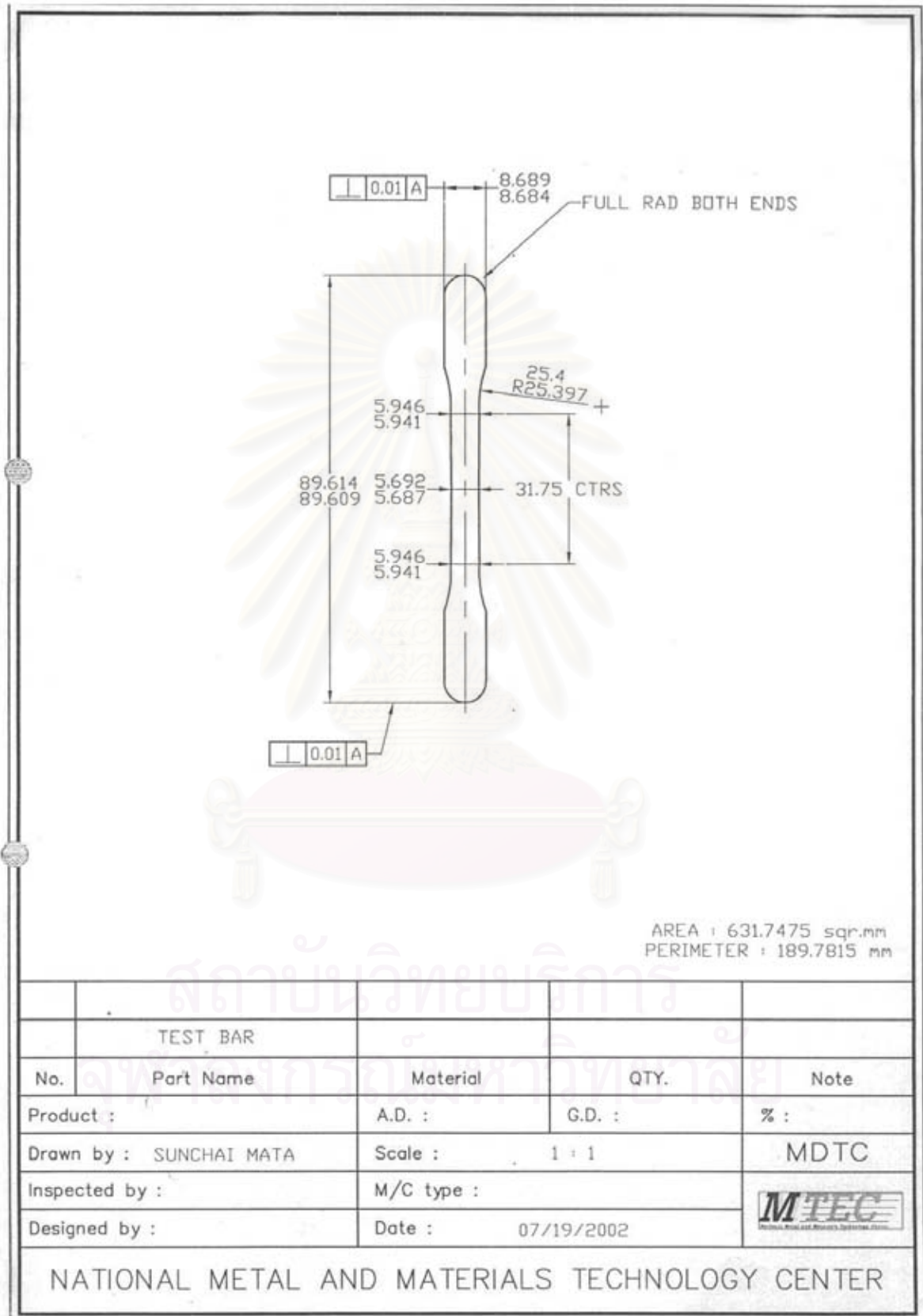
ความแข็งหลังการชุบแข็งผิว แสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 ผลการวัดความแข็งของชิ้นงานเปรียบเทียบหลังการชุบแข็งผิว

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก จ.



รูปที่ 4 แบบชิ้นงานทดสอบ

### ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายเถลิงศักดิ์ ตราชู เกิดเมื่อวันที่ 27 พฤศจิกายน พ.ศ. 2522 จบการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียน นวมินทราชินูทิศ เตรียมอุดมศึกษาน้อมเกล้า ในปี พ.ศ. 2541 จากนั้นเข้าศึกษาต่อระดับอุดมศึกษาที่ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ในปีเดียวกัน และจบการศึกษาในปี พ.ศ. 2545 จากนั้นจึงเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมโลหการมหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปี พ.ศ. 2546



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย