

ผลของอุณหภูมิการเผาผนึกต่อสมบัติทางกล ของเหล็กกล้าโครเมียม-โมลิบดีนัม  
SCM 415 ที่ผลิตโดยกระบวนการ โลหะผง



นาย เถลิงศักดิ์ ตราชู

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**

**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**

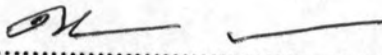
**Copyright of Chulalongkorn University**

**490492**

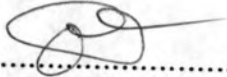
หัวข้อวิทยานิพนธ์ ผลของอุณหภูมิการเผาผนึกต่อสมบัติทางกล ของเหล็กกล้าโครเมียม  
โมลิบดีนัม SCM 415 ที่ผลิตโดยกระบวนการโลหะผง  
โดย นาย เถลิงศักดิ์ ตราฐ  
สาขาวิชา วิศวกรรมโลหการ  
อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ไสว คำนชัยวิจิตร  
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ดร. เรืองเดช ธงศรี

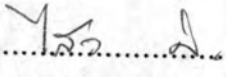
---

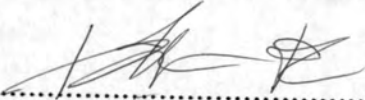
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท

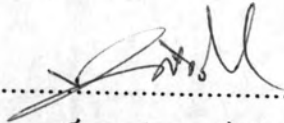
  
.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร. คิเรก ถาวงษ์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
.....ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ชاکกร จารุพิสิฐธร)

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

  
.....อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม  
(ดร. เรืองเดช ธงศรี)

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

เถลิงศักดิ์ ตราฐ : ผลของอุณหภูมิการเผาผนึกต่อสมบัติทางกล ของเหล็กกล้าโครเมียม  
 โมลิบดีนัม SCM 415 ที่ผลิตโดยกระบวนการโลหะผง. (Effect of Sintering Temperature  
 on Mechanical Properties of Chromium Molybdenum Steel SCM 415 Produced Via  
 Powder Metallurgy Process) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผศ. ดร. ไสว คำนชัยจิตร  
 อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม : ดร. เรืองเดช ชงศรี, 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

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

ลายมือชื่อนิสิต.....*เถลิงศักดิ์ ตราฐ*.....  
 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....*ไสว คำนชัยจิตร*.....  
 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....*เรืองเดช ชงศรี*.....

##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 DANCHAIWIJIT, 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.

Department.....Metallurgical...Engineering...	Student's signature..... <i>Thalerngsak Trachoo</i> .....
Field of study...Metallurgical...Engineering...	Advisor's signature <i>Sawai Danchaiwijit</i>
Academic year.....2006.....	Co-advisor's signature <i>Ruangdej Tongry</i>

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลงได้ ด้วยความช่วยเหลือจากหลาย ๆ ฝ่าย ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ อาจารย์ ดร. ไสว คำนชัยจิตร 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 ไทพัฒนกุล ที่ให้ข้อมูล, คำปรึกษา และประสานงาน สุดท้าย ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัว ที่สนับสนุนทางการศึกษา ให้คำแนะนำปรึกษาและให้กำลังใจมาโดยตลอด จนกระทั่งสามารถสำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาโทมาบัณฑิตได้ตามเจตนารมณ์

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
รายการตาราง.....	ฉ
รายการรูปประกอบ.....	ต
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 ผลของอุณหภูมิเผาผนึกต่อสมบัติต่าง 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 ผลของอุณหภูมิเผาผนึก.....	57

	หน้า
5.3 ผลของปริมาณคาร์บอน.....	58
5.4 ผลของการหุบแข็งผิวด้วยวิธีก๊าซคาร์บูไรซิ่งต่อสมบัติทาง 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 รายละเอียดการกำจัดการเติมแต่งและการเผาผนึก.....	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 ผลการวัดขนาดของชิ้นงานที่อุณหภูมิเผาผนึกต่าง ๆ.....	35
4.7 ผลการคำนวณและวัดความหนาแน่นของชิ้นงานที่อุณหภูมิเผาผนึกต่าง ๆ.....	36
4.8 ผลการวัดปริมาณคาร์บอนของชิ้นงานที่อุณหภูมิเผาผนึกต่าง ๆ.....	36
4.9 ผลการวัดค่าความแข็งของชิ้นงานที่อุณหภูมิเผาผนึกต่าง ๆ และชิ้นงานเปรียบเทียบ...39	39
4.10 ผลการทดสอบแรงดึงชิ้นงานที่อุณหภูมิเผาผนึกต่าง ๆ.....	40
4.11 ผลการวัดขนาดของชิ้นงานที่อุณหภูมิเผาผนึกต่าง ๆ หลังชุบแข็งผิว.....	40
4.12 ผลการวัดความหนาแน่นของชิ้นงานที่อุณหภูมิเผาผนึกต่าง ๆ หลังชุบแข็งผิว.....	41
4.13 ผลการวัดปริมาณคาร์บอนของชิ้นงานที่อุณหภูมิเผาผนึกต่าง ๆ หลังชุบแข็งผิว.....	41
4.14 ผลการวัดค่าความแข็งของชิ้นงานที่อุณหภูมิเผาผนึกต่าง ๆ หลังชุบแข็งผิว.....	45
4.15 ผลการทดสอบแรงดึงของชิ้นงานที่อุณหภูมิเผาผนึกต่าง 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

## 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 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแรงดึงกับการยึดตัว ของชิ้นงานผสมและไม่ผสมกราไฟต์.....	59
5.4 ภาพถ่ายลักษณะรูพรุนในชิ้นงานจากอุณหภูมิเผาผนึก 1300 °C.....	61
5.5 ภาพถ่าย SEM บริเวณเนื้อพื้นของชิ้นงานผสมและไม่ผสมกราไฟต์ หลังชุบแข็งผิว.....	62
5.6 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคในชิ้นงานผสมและไม่ผสมกราไฟต์ หลังชุบแข็งผิว.....	62
5.7 แสดงผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM+EDS บริเวณเฟสซีเมนต์ไคต์.....	63
5.8 ผลการวิเคราะห์เฟสด้วยเครื่อง XRD.....	63