

คุณสมบัติเชิงกลของผงโลหะผสมระหว่างเหล็กทองแดง และแกรไฟต์

นาย สามชัย จิระภัทรศิลป์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2540

ISBN 974-637-953-4

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I 17929015

MECHANICAL PROPERTIES OF METAL POWDER MIXES OF
IRON COPPER AND GRAPHITE

Mr. Samchai Jirapatarasil

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

Department of Industrial Engineering

Graduate School

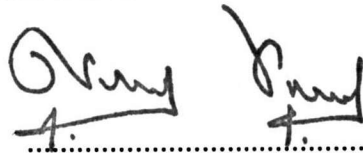
Chulalongkorn University

Academic Year 1997

ISBN 974-637-953-4

หัวข้อวิทยานิพนธ์ คุณสมบัติเชิงกลของผงโลหะผสมระหว่างเหล็กทองแดง และแกรไฟต์
โดย นาย สามชัย จิระภัทรศิลป์
ภาควิชา วิศวกรรมอุตสาหการ
อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์ ดร. สมชาย พัวจินดาเนตร

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทมหาบัณฑิต

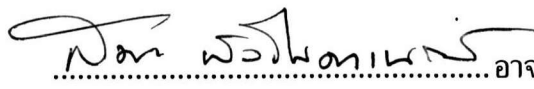


..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(ศาสตราจารย์ นายแพทย์ ศุภวัฒน์ ชุตินวงศ์)

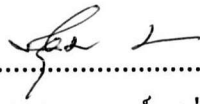
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



..... ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร. ศิริจันทร์ ทองประเสริฐ)



..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์ ดร. สมชาย พัวจินดาเนตร)



..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ช่อม มลิลลา)



..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ สมชาย พวงเพ็ชร์)

สามชัย จิระภัทรศิลป์ : คุณสมบัติเชิงกลของผงโลหะผสมระหว่างเหล็กทองแดง และแกรไฟต์
(MECHANICAL PROPERTIES OF METAL POWDER MIXES OF IRON COPPER AND GRAPHITE) อ.ที่ปรึกษา : อาจารย์ ดร.สมชาย พัวจินดาเนตร,
158 หน้า ISBN 974-637-953-4

การวิจัยนี้ เป็นการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ และคุณสมบัติเชิงกลของผงโลหะผสมที่มีผงเหล็ก ทองแดง และแกรไฟต์ เป็นองค์ประกอบ โดยมีการเปลี่ยนแปลง อุณหภูมิการเผา

ชิ้นงานที่มีส่วนผสมของเหล็ก ทองแดง และ แกรไฟต์ เตรียมขึ้นโดยใช้ปริมาณของผงเหล็ก ร้อยละ ระหว่าง 88.8 - 100 ปริมาณผงทองแดงร้อยละระหว่าง 0 - 10 และ ปริมาณแกรไฟต์ ร้อยละระหว่าง 0 - 1.2 โดยน้ำหนัก จากนั้นขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเครื่องอัดที่แรงอัด 10 ตัน และเผาที่อุณหภูมิ 880 950 และ 1120 องศาเซลเซียส สุดท้ายได้ทำการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ และคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงาน ได้แก่ ความถ่วงจำเพาะ การเปลี่ยนแปลงขนาด แรงดัดชนิด 2 แกน โมดูลัสความยืดหยุ่น และความแข็งของชิ้นงานผงโลหะผสม และได้ศึกษาสมการความสัมพันธ์ของแต่ละคุณสมบัติ และ สมการความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติ กับส่วนผสมของ ปริมาณทองแดง แกรไฟต์ และอุณหภูมิการเผา โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์การถดถอย

ผลที่ได้จากการทดลอง พบว่า ที่ส่วนผสมของผงโลหะผสมที่มีเหล็กเป็นองค์ประกอบหลัก และมี ปริมาณทองแดงร้อยละ 8 โดยน้ำหนัก ภายหลังจากเผาที่อุณหภูมิ 1120 องศาเซลเซียส จะให้ค่าการขยายตัวของ ชิ้นงานสูงสุด ร้อยละเท่ากับ 1.72 ของขนาดก่อนเผา ในขณะที่ ส่วนผสมที่มีปริมาณทองแดง ร้อยละ 6 แกรไฟต์ ร้อยละ 0.8 โดยน้ำหนัก ภายหลังจากเผาที่อุณหภูมิ 1120 องศาเซลเซียส จะให้ค่าแรงดัดชนิด 2 แกน และค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นสูงสุด เท่ากับ 656.15 และ 8489.46 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร ตามลำดับ และส่วนผสมที่มี ปริมาณทองแดงร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก แกรไฟต์ร้อยละ 1.2 โดยน้ำหนัก ภายหลังจากเผาที่อุณหภูมิ 1120 องศาเซลเซียส จะให้ค่าความถ่วงจำเพาะ และ ค่าความแข็งมากที่สุด เท่ากับ 6.187 และ 81.5 HRT ตามลำดับ

ภาควิชา วิศวกรรมอุตสาหการ
สาขาวิชา วิศวกรรมอุตสาหการ
ปีการศึกษา 2540

ลายมือชื่อนิสิต
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

C816609 : MAJOR INDUSTRIAL ENGINEERING

KEYWORD: POWDER METALLURGY/ IRON POWDER/BIAXIAL BENDING STRENGTH
SAMCHAI JIRAPATARASIL : MACHANICAL PROPRIETIES OF METAL
POWDER MIXES OF IRON COPPER AND GRAPHITE. THESIS ADVISOR
SOMCHAI PUAJINDANETR, Ph.D. 158 pp. ISBN 974-637-953-4

This research was to study physical properties and mechanical properties of powder metallurgy consisted of iron powder, copper powder and graphite including the variation of sintering temperature.

The metal powders were prepared using iron powder, ranged 88.8 - 100 of percentage, copper powder ranged 0 - 10 of percentage and graphite ranged 0 - 1.2 percentage by weight. The specimens were performed at the pressure of 10-Ton using die compression machine. The sintering temperatures in this study were 880 °C 950 °C and 1120 °C. The physical properties and mechanical properties of the sintered specimens were studied such as specific gravity, linear shrinkage, biaxial bending strength, young's modulus, hardness. The relationship of the properties, the compositions and the sintering temperatures of the specimens were observed using regression analysis.

The results showed that the material consisted of 8% of copper provided the maximum expansion of 1.72 percent after the sintering temperature of 1120 °C. However, 6 and 0.8 percentage of copper and graphite after sintering at 1120 °C resulted the maximum of the biaxial bending strength and the young's modulus of 656.15 N/mm² and 8489.46 N/mm² respectively. Finally, 10 and 1.2 percentage of copper and graphite sintered at 1120 °C provided the maximum of the specific gravity and the hardness of 6.187 and 81.5 HRT respectively.

ภาควิชา.....วิศวกรรมอุตสาหกรรม.....

สาขาวิชา.....วิศวกรรมอุตสาหกรรม.....

ปีการศึกษา..... 2540.....

ลายมือชื่อนิสิต..... *สมชาย จิราพัทธสารสิน*.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา..... *สมชาย จิราพัทธสารสิน*.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องมาจากความเมตตา กรุณาของ อาจารย์ ดร. สมชาย พัวจินดาเนตร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาเสียสละเวลาให้ทั้ง คำปรึกษา ความรู้ และข้อคิดเห็นต่างๆ อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่ง ตลอดระยะเวลาของการทำวิทยานิพนธ์

ขอกราบขอบพระคุณ คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งประกอบด้วย ศาสตราจารย์ ดร. ศิริจันทร์ ทองประเสริฐ , รองศาสตราจารย์ ช่อม มลิตา และ รองศาสตราจารย์ สมชาย พวงเพ็ชร์ ที่ได้กรุณาให้ข้อคิดเห็น และ ข้อเสนอแนะสำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอกราบขอบพระคุณ คุณสมชาย เวโรจน์พิพัฒน์ ผู้จัดการโรงงาน THAI CARBON & GRAPHITE ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ทางด้าน อุปกรณ์ เครื่องมือ วัสดุในการขึ้นรูปชิ้นงาน รวมทั้ง คำปรึกษาต่าง ๆ ตลอดระยะเวลาการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณผู้ที่ได้กรุณาให้ความอนุเคราะห์ และอำนวยความสะดวกในการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้ ซึ่งได้แก่ เจ้าหน้าที่ของโรงงาน เจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการ ศูนย์เครื่องมือวิจัย วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้กรุณาให้ความอนุเคราะห์ ในการใช้ เครื่อง SEM ขอขอบคุณ พี่ๆ เจ้าหน้าที่ธุรการประจำภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรมทุกท่าน ที่ได้อำนวยความสะดวกในการเข้าใช้ห้องปฏิบัติการของภาควิชา ขอขอบคุณเพื่อนๆ นิสิตภาควิชา วิศวกรรมอุตสาหกรรม ที่ได้ให้กำลังใจมาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยใคร่ขอขอบคุณ บุคคลที่เกี่ยวข้องที่มีได้เอื้อนาม ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการทำวิจัยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นอย่างดี

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ฎ
บทที่ 1. บทนำ	
1.1 หลักการและเหตุผล.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	4
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	4
1.4 วิธีดำเนินการวิจัย.....	5
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	6
บทที่ 2. หลักการพื้นฐาน และการสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 หลักการพื้นฐานเกี่ยวกับการแปรรูปวัสดุ.....	7
2.2 ผงโลหะวิทยา	
2.2.1 การทำผงโลหะ.....	8
2.2.2 กระบวนการผสมและการอัดขึ้นรูปผงโลหะ	8
2.2.3 การเผา.....	11
2.2.4 การปรับปรุงคุณสมบัติของชิ้นส่วนผงโลหะผสม.....	12
2.2.5 การประยุกต์ใช้ผลิตภัณฑ์ผงโลหะผสม.....	12
2.3 การวิเคราะห์การถดถอย.....	13
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	16

บทที่ 3. การดำเนินงานวิจัย	
3.1 การเตรียมชิ้นงาน และการขึ้นรูปชิ้นงาน	
3.1.1 วัสดุ และอุปกรณ์.....	20
3.1.2 วิธีการเตรียมชิ้นงานสำหรับผงโลหะผสม.....	20
3.2 การตรวจสอบรูปทรงผงวัสดุ.....	24
3.3 การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ	
3.3.1 การตรวจสอบอัตราส่วนผสมในโลหะผสม.....	24
3.3.2 ความถ่วงจำเพาะ.....	25
3.3.3 การเปลี่ยนแปลงขนาด.....	25
3.4 การทดสอบคุณสมบัติเชิงกล	
3.4.1 คุณสมบัติภายใต้แรงค้ำชนิด 2 แกน.....	26
3.4.2 ความแข็ง.....	28
3.4.3 การตรวจสอบลักษณะเกรนของผงโลหะผสมภายหลังการค้ำชนิด 2 แกน	28
3.4.4 การตรวจสอบการกระจายของผงโลหะผสมภายหลังการค้ำชนิด 2 แกน..	29
3.5 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ	
3.5.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวน.....	32
3.5.2 การวิเคราะห์การถดถอย.....	32
บทที่ 4. ผลการทดลอง และการวิเคราะห์	
4.1 ผลการตรวจสอบรูปทรง และลักษณะของผงเหล็ก ผงทองแดง และ แกรไฟต์...	34
4.2 ผลการทดลองส่วนผสมระหว่าง เหล็ก ทองแดง และ แกรไฟต์	
4.2.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ.....	36
4.2.2 ผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกล.....	51
4.2.3 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ.....	80
4.3 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติของผงโลหะผสม	
4.3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติกายภาพ.....	100
4.3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความถ่วงจำเพาะ กับ คุณสมบัติเชิงกล.....	100
4.3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงขนาด กับ คุณสมบัติเชิงกล.....	105
4.3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติเชิงกล.....	109

4.4	สรุปผลการทดลอง	
4.4.1	ผลสรุปการทดลองส่วนผสม ระหว่าง ทองแดง แกรไฟต์ และ อุณหภูมิการเผา.....	113
4.4.2	ผลสรุปความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติของผง โลหะผสม.....	113
บทที่ 5.	วิจารณ์ผลการทดลอง	
5.1	ส่วนผสมระหว่าง ปริมาณทองแดง แกรไฟต์ และ อุณหภูมิการเผา	
5.1.1	ผลของ ทองแดง แกรไฟต์ และ อุณหภูมิการเผาที่มีต่อคุณสมบัติทางกายภาพ และคุณสมบัติเชิงกล.....	119
5.1.2	ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติแรงดัดชนิด 2 แกน กับ แรงดัดชนิด 3 จุด.....	122
5.1.3	ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติทางกายภาพ และเชิงกล กับส่วนผสมของทองแดง แกรไฟต์ และ อุณหภูมิการเผา	122
5.2	ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติของผงโลหะผสม.....	123
บทที่ 6.	สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ	
6.1	สรุปผลการทดลอง.....	125
6.2	การประยุกต์ผลการทดลอง.....	127
6.3	ข้อเสนอแนะ.....	127
	รายการอ้างอิง.....	129
	ภาคผนวก-ก ข้อมูลผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและ คุณสมบัติเชิงกล.....	132
	ภาคผนวก-ข ตัวอย่างผลการตรวจสอบอัตราส่วนผสมในโลหะผสม	147
	ภาคผนวก-ค ตัวอย่างผลการทดสอบคุณสมบัติด้วยเครื่องทดสอบแรงดัดชนิด 2 แกน.....	150
	ภาคผนวก-ง ตัวอย่างโปรแกรมคำสั่ง และผลการรันโปรแกรม SPSS.....	152
	ภาคผนวก-จ กราฟแสดงผลของค่าความแข็งแรงในการรับแรงดัดชนิด 3 จุด.....	157
	ประวัติผู้เขียน.....	158

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ส่วนผสมของผงโลหะผสมระหว่าง เหล็ก ทองแดง แกรไฟต์ และ อลูมิเนียมการเผา.....	21
4.1 ผลการตรวจสอบอัตราส่วนผสมในผงโลหะหลังการเผา.....	36
4.2 ผลของค่าความถ่วงจำเพาะ ของปริมาณทองแดง และ แกรไฟต์ ที่อุณหภูมิการเผา 1120 องศาเซลเซียส.....	38
4.3 ผลของค่าความถ่วงจำเพาะ ของปริมาณทองแดง และ แกรไฟต์ ที่อุณหภูมิการเผา 950 องศาเซลเซียส.....	40
4.4 ผลของค่าความถ่วงจำเพาะ ของปริมาณทองแดง และ แกรไฟต์ ที่อุณหภูมิการเผา 880 องศาเซลเซียส.....	42
4.5 ผลของการเปลี่ยนแปลงขนาด ของปริมาณทองแดง และ แกรไฟต์ ที่อุณหภูมิการเผา 1120 องศาเซลเซียส.....	45
4.6 ผลของการเปลี่ยนแปลงขนาด ของปริมาณทองแดง และ แกรไฟต์ ที่อุณหภูมิการเผา 950 องศาเซลเซียส.....	47
4.7 ผลของการเปลี่ยนแปลงขนาด ของปริมาณทองแดง และ แกรไฟต์ ที่อุณหภูมิการเผา 880 องศาเซลเซียส.....	49
4.8 ผลของค่าแรงดัดชนิด 2 แกน ของปริมาณทองแดง และ แกรไฟต์ ที่อุณหภูมิการเผา 1120 องศาเซลเซียส.....	52
4.9 ผลของค่าแรงดัดชนิด 2 แกน ของปริมาณทองแดง และ แกรไฟต์ ที่อุณหภูมิการเผา 950 องศาเซลเซียส.....	54
4.10 ผลของค่าแรงดัดชนิด 2 แกน ของปริมาณทองแดง และ แกรไฟต์ ที่อุณหภูมิการเผา 880 องศาเซลเซียส.....	56
4.11 ผลของค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น ของปริมาณทองแดง และ แกรไฟต์ ที่อุณหภูมิการเผา 1120 องศาเซลเซียส.....	59
4.12 ผลของค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น ของปริมาณทองแดง และ แกรไฟต์ ที่อุณหภูมิการเผา 950 องศาเซลเซียส.....	61
4.13 ผลของค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น ของปริมาณทองแดง และ แกรไฟต์ ที่อุณหภูมิการเผา 880 องศาเซลเซียส.....	63

4.14 ผลของค่าความแข็ง ของปริมาณทองแดง และ แกรไฟต์ ที่อุณหภูมิการเผา 1120 องศาเซลเซียส.....	66
4.15 ผลของค่าความแข็ง ของปริมาณทองแดง และ แกรไฟต์ ที่อุณหภูมิการเผา 950 องศาเซลเซียส.....	68
4.16 ผลของค่าความแข็ง ของปริมาณทองแดง และ แกรไฟต์ ที่อุณหภูมิการเผา 880 องศาเซลเซียส.....	70
4.17 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลความถ่วงจำเพาะ.....	81
4.18 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลการเปลี่ยนแปลงขนาด.....	83
4.19 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลแรงค้ำชนิด 2 แกน.....	85
4.20 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลโมดูลัสความยืดหยุ่น.....	87
4.21 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลความแข็ง.....	89
4.22 ผลการวิเคราะห์การถดถอยของข้อมูลความถ่วงจำเพาะ.....	91
4.23 ผลการวิเคราะห์การถดถอยของข้อมูลการเปลี่ยนแปลงขนาด.....	93
4.24 ผลการวิเคราะห์การถดถอยของข้อมูลแรงค้ำชนิด 2 แกน.....	95
4.25 ผลการวิเคราะห์การถดถอยของข้อมูล โมดูลัสความยืดหยุ่น.....	97
4.26 ผลการวิเคราะห์การถดถอยของข้อมูลความแข็ง.....	99
4.27 สรุปผลค่าเฉลี่ยของคุณสมบัติทางกายภาพ และคุณสมบัติเชิงกล ของส่วนผสม ระหว่าง ทองแดง แกรไฟต์ และ อุณหภูมิการเผา.....	114
4.28 สรุปสมการความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติทางกายภาพ และคุณสมบัติเชิงกล กับ ส่วนผสม ทองแดง แกรไฟต์ และ อุณหภูมิการเผา.....	117
4.29 สรุปสมการความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติของชิ้นงานผงโลหะผสม.....	118
5.1 ผลการเปรียบเทียบของค่าแรงค้ำชนิด 2 แกน และค่าแรงค้ำชนิด 3 จุด ที่อุณหภูมิการเผา 1120 องศาเซลเซียส.....	124
6.1 ผลการเลือกปริมาณทองแดง แกรไฟต์ และอุณหภูมิการเผา ในการผลิตชิ้นส่วนผงโลหะผสม.....	128

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
3.1 อุปกรณ์หาค่าความถ่วงจำเพาะ.....	29
3.2 อุปกรณ์ทดสอบแรงค้ำชนิด 2 แกน.....	30
3.3 เครื่องและอุปกรณ์ทดสอบแรงค้ำชนิด 2 แกน.....	30
3.4 เครื่องทดสอบความแข็ง	31
4.1 ภาพถ่ายของผงเหล็ก.....	34
4.2 ภาพถ่ายของผงทองแดง.....	35
4.3 ภาพถ่ายของผงแกรไฟต์.....	35
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถ่วงจำเพาะ กับ ปริมาณทองแดง และแกรไฟต์ ที่อุณหภูมิการเผา 1120 องศาเซลเซียส.....	39
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถ่วงจำเพาะ กับ ปริมาณทองแดง และแกรไฟต์ ที่อุณหภูมิการเผา 950 องศาเซลเซียส.....	41
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถ่วงจำเพาะ กับ ปริมาณทองแดง และแกรไฟต์ ที่อุณหภูมิการเผา 880 องศาเซลเซียส.....	43
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงขนาด กับ ปริมาณทองแดง และ แกรไฟต์ ที่อุณหภูมิการเผา 1120 องศาเซลเซียส	46
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงขนาด กับ ปริมาณทองแดง และแกรไฟต์ ที่อุณหภูมิการเผา 950 องศาเซลเซียส.....	48
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงขนาด กับ ปริมาณทองแดงและแกรไฟต์ ที่อุณหภูมิการเผา 880 องศาเซลเซียส.....	50
4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงค้ำชนิด 2 แกน กับ ปริมาณทองแดงและ แกรไฟต์ ที่อุณหภูมิการเผา 1120 องศาเซลเซียส.....	53
4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงค้ำชนิด 2 แกน กับ ปริมาณทองแดงและ แกรไฟต์ ที่อุณหภูมิการเผา 950 องศาเซลเซียส.....	55
4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงค้ำชนิด 2 แกน กับ ปริมาณทองแดงและแกรไฟต์ ที่อุณหภูมิการเผา 880 องศาเซลเซียส.....	57

4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น กับ ปริมาณทองแดง และ แกรไฟต์ ที่อุณหภูมิการเผา 1120 องศาเซลเซียส.....	60
4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น กับ ปริมาณทองแดงและ แกรไฟต์ ที่อุณหภูมิการเผา 950 องศาเซลเซียส.....	62
4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น กับ ปริมาณทองแดง และ แกรไฟต์ ที่อุณหภูมิการเผา 880 องศาเซลเซียส.....	64
4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็ง กับ ปริมาณทองแดง และ แกรไฟต์ ที่อุณหภูมิการเผา 1120 องศาเซลเซียส.....	67
4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็ง กับ ปริมาณทองแดง และ แกรไฟต์ ที่อุณหภูมิการเผา 950 องศาเซลเซียส.....	69
4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็ง กับ ปริมาณทองแดง และ แกรไฟต์ ที่อุณหภูมิการเผา 880 องศาเซลเซียส.....	71
4.19 ภาพถ่ายเกรนของผงโลหะผสมที่มี ทองแดง 6 เปอร์เซ็นต์ แกรไฟต์ 0.4 เปอร์เซ็นต์ อุณหภูมิการเผา 1120 องศาเซลเซียส.....	73
4.20 ภาพถ่ายเกรนของผงโลหะผสมที่มี ทองแดง 6 เปอร์เซ็นต์ แกรไฟต์ 0.8 เปอร์เซ็นต์ อุณหภูมิการเผา 1120 องศาเซลเซียส.....	73
4.21 ภาพถ่ายเกรนของผงโลหะผสมที่มี ทองแดง 6 เปอร์เซ็นต์ แกรไฟต์ 1.2 เปอร์เซ็นต์ อุณหภูมิการเผา 1120 องศาเซลเซียส.....	74
4.22 ภาพถ่ายเกรนของผงโลหะผสมที่มี ทองแดง 6 เปอร์เซ็นต์ แกรไฟต์ 0.4 เปอร์เซ็นต์ อุณหภูมิการเผา 950 องศาเซลเซียส.....	74
4.23 ภาพถ่ายเกรนของผงโลหะผสมที่มี ทองแดง 6 เปอร์เซ็นต์ แกรไฟต์ 0.4 เปอร์เซ็นต์ อุณหภูมิการเผา 880 องศาเซลเซียส.....	75
4.24 ภาพถ่ายเกรนของผงโลหะผสมที่มี ทองแดง 6 เปอร์เซ็นต์ แกรไฟต์ 0.8 เปอร์เซ็นต์ อุณหภูมิการเผา 880 องศาเซลเซียส.....	75
4.25 ภาพถ่ายบริเวณพื้นที่หน้าตัดของรอยหัก ของชิ้นส่วนผงโลหะผสมที่เป็น ผงเหล็ก 100 เปอร์เซ็นต์ และ อุณหภูมิการเผา 1120 องศาเซลเซียส.....	77
4.26 ภาพถ่ายบริเวณพื้นที่หน้าตัดของรอยหัก ของชิ้นส่วนผงโลหะผสมที่เป็น ทองแดง 4 เปอร์เซ็นต์ แกรไฟต์ 0 เปอร์เซ็นต์ และ อุณหภูมิการเผา 1120 องศาเซลเซียส.....	77

4.27	ภาพถ่ายบริเวณพื้นที่หน้าตัดของรอยหัก ของชิ้นส่วนผงโลหะผสมที่เป็น ทองแดง 8 เปอร์เซ็นต์ แกรไฟต์ 0 เปอร์เซ็นต์ และ อุณหภูมิการเผา 1120 องศาเซลเซียส.....	78
4.28	ภาพถ่ายบริเวณพื้นที่หน้าตัดของรอยหัก ของชิ้นส่วนผงโลหะผสมที่เป็น ผงเหล็ก 100 เปอร์เซ็นต์และ อุณหภูมิการเผา 950 องศาเซลเซียส.....	78
4.29	ภาพถ่ายบริเวณพื้นที่หน้าตัดของรอยหัก ของชิ้นส่วนผงโลหะผสมที่เป็น ผงเหล็ก 100 เปอร์เซ็นต์ และ อุณหภูมิการเผา 880 องศาเซลเซียส.....	79
4.30	ความสัมพันธ์แบบเส้นตรง ระหว่างค่าความถ่วงจำเพาะ กับ การเปลี่ยนแปลงขนาด.....	101
4.31	ความสัมพันธ์แบบโพลีโนเมียลดีกรี2 ระหว่างค่าความถ่วงจำเพาะ กับ การเปลี่ยนแปลงขนาด.....	101
4.32	ความสัมพันธ์แบบเส้นตรง ระหว่างค่าความถ่วงจำเพาะ กับ แรงดัดชนิด 2 แกน.....	102
4.33	ความสัมพันธ์แบบโพลีโนเมียลดีกรี2 ระหว่างค่าความถ่วงจำเพาะ กับ แรงดัดชนิด 2 แกน.....	102
4.34	ความสัมพันธ์แบบเส้นตรง ระหว่างค่าความถ่วงจำเพาะ กับ โมดูลัสความยืดหยุ่น.....	103
4.35	ความสัมพันธ์แบบโพลีโนเมียลดีกรี2 ระหว่างค่าความถ่วงจำเพาะ กับ โมดูลัสความยืดหยุ่น.....	103
4.36	ความสัมพันธ์แบบเส้นตรง ระหว่างค่าความถ่วงจำเพาะ กับ ความแข็ง.....	104
4.37	ความสัมพันธ์แบบโพลีโนเมียลดีกรี2 ระหว่างค่าความถ่วงจำเพาะ กับ ความแข็ง.....	104
4.38	ความสัมพันธ์แบบเส้นตรง ระหว่างการเปลี่ยนแปลงขนาด กับ แรงดัดชนิด 2 แกน.....	106
4.39	ความสัมพันธ์แบบโพลีโนเมียลดีกรี2 ระหว่างการเปลี่ยนแปลงขนาด กับ แรงดัดชนิด 2 แกน.....	106
4.40	ความสัมพันธ์แบบเส้นตรง ระหว่างการเปลี่ยนแปลงขนาด กับ โมดูลัสความยืดหยุ่น....	107
4.41	ความสัมพันธ์แบบโพลีโนเมียลดีกรี2 ระหว่างการเปลี่ยนแปลงขนาด กับ โมดูลัสความยืดหยุ่น.....	107
4.42	ความสัมพันธ์แบบเส้นตรง ระหว่างการเปลี่ยนแปลงขนาด กับ ค่าความแข็ง.....	108
4.43	ความสัมพันธ์แบบโพลีโนเมียลดีกรี2 ระหว่างการเปลี่ยนแปลงขนาด กับ ค่าความแข็ง.	108
4.44	ความสัมพันธ์แบบเส้นตรง ระหว่างค่าแรงดัดชนิด 2 แกน กับ โมดูลัสความยืดหยุ่น.....	110
4.45	ความสัมพันธ์แบบโพลีโนเมียลดีกรี2 ระหว่างค่าแรงดัดชนิด 2 แกน กับ โมดูลัสความยืดหยุ่น.....	110

4.46 ความสัมพันธ์แบบเส้นตรง ระหว่างค่าความแข็ง กับ แรงค้ำชนิด 2 แกน.....	111
4.47 ความสัมพันธ์แบบโพลีโนเมียลดีกรี2 ระหว่างค่าความแข็ง กับ แรงค้ำชนิด 2 แกน.....	111
4.48 ความสัมพันธ์แบบเส้นตรง ระหว่างค่าความแข็ง กับ โมดูลัสความยืดหยุ่น.....	112
4.49 ความสัมพันธ์แบบโพลีโนเมียลดีกรี2 ระหว่างค่าความแข็ง กับ โมดูลัสความยืดหยุ่น....	112