สารบัญ

		หน้า
สารบัญ		(6)
รายการตาราง		(7)
รายการภาพประกอบ		(8)
สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ		(12)
บทที่		
1. บทนำ		1
	1.1 ความสำคัญและที่มาของหัวข้อวิจัย	1
	1.2 การตรวจเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
	1.3 ทฤษฎีและหลักการ	11
	1.4 วัตถุประสงค์ของโครงการ	34
	1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	35
	1.6 ขอบเขตของการวิจัย	35
2. วิธีการวิจัย		36
	2.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย	36
	2.2 เครื่องมือและอุปกรณ์	40
	2.3 วิธีการดำเนินงาน	46
3. ผลและการอภิปรายผล		50
	3.1 อิทธิพลของขนาดอนุภาค	50
	3.2 อิทธิพลของอุณหภูมิและเวลา	57
	3.3 อิทธิพลของแม่พิมพ์	63
	3.4 เปรียบเทียบสมบัติของชิ้นงานที่ได้กับชิ้นงานในท้องตลาด	72
4. สรุป		74
	4.1 สรุปผล	74
	4.2 ข้อเสนอแนะ	74
บรรณานุกรม		76
ภาคผนวก		78
ประวัติผู้เขียน		81

รายการตาราง

ตารางที่		หน้า
1.1	สถิติการนำเข้าอุปกรณ์ปรับความดันก๊าซจากต่างประเทศในช่วงปี พ.ศ. 2543-2548	3
1.2	สมบัติของวัสดุตัวกรอง 4 เกรด ผลิตแบบ loose powder โดยการอบผนึกผงบรอนซ์รูปทรงกลม	14
1.3	สมการที่ใช้ในขั้นตอนแรกของการอบผนึก $(X/D)^n = Bt/D^m$	29
2.1	สมบัติของผงบรอนซ์จากผู้ผลิต	36
2.2	ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของผงบรอนซ์ในของเหลวด้วยเครื่อง laser particle size analyzer	40
3.1	ค่าการกระจายตัวของรูพรุนในชิ้นงานทั้ง 3 ขนาด อบผนึกที่ 900 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที	51
3.2	ค่าการกระจายตัวของรูพรุนในชิ้นงานจากผงขนาด 150 ไมโครเมตร อุณหภูมิอบผนึก 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที เปรียบเทียบจากแม่พิมพ์เหล็กกล้าไร้สนิมและแม่พิมพ์กราไฟต์	64
3.3	สมบัติของชิ้นงานที่ผลิตได้จากแม่พิมพ์เหล็กกล้าไร้สนิม	72
3.4	สมบัติของชิ้นงานที่ผลิตได้จากแม่พิมพ์กราไฟต์	73
3.5	สมบัติของชิ้นงานของบริษัท GKN Sinter Metals	73
ก.	สมบัติของบรอนซ์ Cu89/Sn11	79
ข.	สมบัติทางกายภาพของอากาศ ที่ความดันบรรยากาศมาตรฐาน	79
ค.	สมบัติของน้ำ (ที่ 1 บรรยากาศ)	80

รายการภาพประกอบ

รูปที่		หน้า
1.1	ตัวกรองบรอนซ์พรุนที่ใช้ในงานต่างๆ	2
1.2	ตัวลดเสียงในระบบนิวเมตริก	2
1.3	การอัดขึ้นรูปและการอบผนึก	12
1.4	การอบผนึกแบบกราวิตี้	13
1.5	โครงสร้างโลหะบรอนซ์พรุน	13
1.6	การอัดขึ้นรูปทุกทิศทาง	15
1.7	การทดสอบแรงเฉือนแบบ blanking-shear tests	16
1.8	การทดสอบความสามารถในการให้ของไหลซึมผ่าน	17
1.9	การทดสอบฟองอากาศประเมินขนาดรูพรุนแบบ bubble-point tests	18
1.10	การหาขนาดรูพรุนเฉลี่ย	19
1.11	การอบผนึกอนุภาคทรงกลมขนาดคอคอด X ขนาดอนุภาค D และเส้นรอบคอคอดมีรัศมี p	22
1.12	ผลของเวลาในการอบผนึกต่ออัตราส่วนขนาดคดคอด พื้นที่ผิวที่ลดลง การหดตัว และการแน่นตัว	22
1.13	แบบจำลองการอบผนึกอนุภาคทรงกลมสองอนุภาคที่พัฒนาพันธะระหว่างอนุภาค เริ่มต้นจากจุดสัมผัส การเพิ่มขนาดของคอคอดสร้างขอบเกรนที่รอยต่อระหว่างอนุภาค และในที่สุดรวมเป็นหนึ่งอนุภาคใหญ่	23
1.14	ลักษณะความโค้งบนพื้นผิวโค้งที่บอกในรูปของรัศมีหลักสองค่า	25
1.15	ระดับอะตอมแสดงพันธะระหว่างอนุภาคจากการอบผนึก อะตอมที่ไม่เรียงอยู่ในแนวเส้นเดียวกันกลายเป็นขอบเกรน คอคอดคือบริเวณที่มีการขาดกันเกิดขึ้นโดยกระบวนการเคลื่อนที่	26
1.16	แบบจำลองกลไกการอบผนึกทั้งสองประเภทในอนุภาคทรงกลม กลไกการเคลื่อนที่ตามพื้นผิวใช้สำหรับการเพิ่มขนาดของคอคอดโดยมวลเคลื่อนที่จากแหล่งกำเนิดที่พื้นผิว การเคลื่อนที่มวลรวมมีการเพิ่มขนาดของคอคอดโดยแหล่งมวลจากข้างใน	27
2.1	ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 70 เท่า ของผงบรอนซ์ที่ซื้อมาทั้ง 3 ขนาด	37
2.2	ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 70 เท่า ของผงบรอนซ์ทั้ง 3 ขนาด ที่ทำการคัดขนาดใหม่	38

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
2.3	ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวในของเหลวของผงบรอนซ์ทั้ง 3 ขนาด ด้วยเครื่อง laser particle size analyzer	39
2.4	ลักษณะการติดตั้งท่อก๊าซที่ใช้สำหรับควบคุมบรรยากาศภายในเตา	40
2.5	อุปกรณ์สำหรับจับยึดชิ้นงานทดสอบแรงเฉือน	41
2.6	การติดตั้งอุปกรณ์สำหรับจับยึดชิ้นงานทดสอบแรงเฉือน	42
2.7	แบบร่างของเครื่องมือทดสอบหาความสามารถในการซึมผ่านและขนาดรูพรุนโตสุด	43
2.8	เครื่องมือทดสอบหาความสามารถในการซึมผ่านและขนาดรูพรุนโตสุด	44
2.9	แม่พิมพ์เหล็กกล้าไร้สนิมที่ใช้ผลิตบรอนซ์พรุน	45
2.10	แม่พิมพ์กราไฟต์ที่ใช้ผลิตบรอนซ์พรุน	45
2.11	แผนภาพสมดุลของทองแดง-ดีบุก	46
2.12	ลักษณะระบบของเตาเผาอุณหภูมิสูงแบบท่อ	47
2.13	ลักษณะชิ้นงานจากผงอนุภาคขนาด 320 ไมโครเมตร อบผนึกที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที	47
3.1	ลักษณะชิ้นงานจากผงบรอนซ์ขนาด 150 ไมโครเมตร อบผนึกที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที	50
3.2	การกระจายตัวของรูพรุนในชิ้นงานขนาด 150 ไมโครเมตร อุณหภูมิอบผนึก 900 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที	51
3.3	การกระจายตัวของรูพรุนในชิ้นงานขนาด 320 ไมโครเมตร อุณหภูมิอบผนึก 900 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที	51
3.4	การกระจายตัวของรูพรุนในชิ้นงานขนาด 380 ไมโครเมตร อุณหภูมิอบผนึก 900 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที	52
3.5	ความหนาแน่นของชิ้นงานทั้งสามขนาดที่ผลิตจากแม่พิมพ์เหล็กกล้าไร้สนิม อุณหภูมิอบผนึก 900 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที	52
3.6	อัตราการหดตัวของชิ้นงานทั้งสามขนาดที่ผลิตจากแม่พิมพ์เหล็กกล้าไร้สนิม อุณหภูมิอบผนึก 900 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที	53

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.7	ความสามารถในการซึมผ่านของอากาศเปรียบเทียบจากชิ้นงานทั้งสามขนาดอนุภาค ที่ผลิตจากแม่พิมพ์เหล็กกล้าไร้สนิม อบผนึกที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที	54
3.8	ขนาดรูพรุนโตสุดเปรียบเทียบจากชิ้นงานทั้งสามขนาดอนุภาคที่ผลิตจาก แม่พิมพ์เหล็กกล้าไร้สนิม อบผนึกที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที	54
3.9	อัตราความพรุนเปรียบเทียบจากชิ้นงานทั้งสามขนาดอนุภาคที่ผลิตจาก แม่พิมพ์เหล็กกล้าไร้สนิม อบผนึกที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที	55
3.10	ขนาดรูพรุนเฉลี่ยเปรียบเทียบจากชิ้นงานทั้งสามขนาดอนุภาคที่ผลิตจาก แม่พิมพ์เหล็กกล้าไร้สนิม อบผนึกที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที	56
3.11	ความแข็งแรงเฉือนเปรียบเทียบจากชิ้นงานทั้งสามขนาดอนุภาคที่ผลิตจาก แม่พิมพ์เหล็กกล้าไร้สนิม อบผนึกที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที	56
3.12	ภาพ SEM เปรียบเทียบชิ้นขนาดอนุภาค 150 ไมโครเมตร อบผนึกที่อุณหภูมิต่างกัน เวลา 15 นาที	57
3.13	ชิ้นงานที่เกิดการหลอมตัวของอนุภาคที่อุณหภูมิสูง	57
3.14	ภาพถ่าย (SEM) ของชิ้นงานทั้งสามขนาด เผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เวลาเผาแช่ 15 นาที (S15, M15, L15) และเวลาเผาแช่ 30 นาที (S30, M30, L30)	58
3.15	อัตราการหดตัวของชิ้นงานทั้งสามขนาดที่ผลิตจากแม่พิมพ์เหล็กกล้าไร้สนิม อุณหภูมิอบผนึก 900 องศาเซลเซียส เปรียบเทียบที่เวลาอบผนึก 15 และ 30 นาที	59
3.16	ความสามารถในการซึมผ่านของอากาศเปรียบเทียบจากชิ้นงานทั้งสามขนาดอนุภาค ที่ผลิตจากแม่พิมพ์เหล็กกล้าไร้สนิม อบผนึกที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เวลา 15 และ 30 นาที	60
3.17	ขนาดรูพรุนโตสุดเปรียบเทียบจากชิ้นงานทั้งสามขนาดอนุภาคที่ผลิตจาก แม่พิมพ์เหล็กกล้าไร้สนิม อบผนึกที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เวลา 15 และ 30 นาที	61
3.18	อัตราความพรุนเปรียบเทียบจากชิ้นงานทั้งสามขนาดอนุภาคที่ผลิตจาก แม่พิมพ์เหล็กกล้าไร้สนิม อบผนึกที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เวลา 15 และ 30 นาที	61
3.19	ขนาดรูพรุนเฉลี่ยเปรียบเทียบจากชิ้นงานทั้งสามขนาดอนุภาคที่ผลิตจาก แม่พิมพ์เหล็กกล้าไร้สนิม อบผนึกที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เวลา 15 และ 30 นาที	62

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.20	ความแข็งแรงเฉือนเปรียบเทียบจากชิ้นงานทั้งสามขนาดอนุภาคที่ผลิตจาก แม่พิมพ์เหล็กกล้าไร้สนิม อบผนึกที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที	63
3.21	การกระจายตัวของรูพรุนในชิ้นงานขนาด 150 ไมโครเมตร ผลิตจากแม่พิมพ์ เหล็กกล้าไร้สนิม อุณหภูมิอบผนึก 900 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที	64
3.22	การกระจายตัวของรูพรุนในชิ้นงานขนาด 150 ไมโครเมตร ผลิตจากแม่พิมพ์กราไฟต์ อุณหภูมิอบผนึก 900 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที	64
3.23	อัตราการหดตัวของชิ้นงานทั้งสามขนาด อบผนึกที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที เปรียบเทียบระหว่างแม่พิมพ์เหล็กกล้าไร้สนิม และแม่พิมพ์กราไฟต์	65
3.24	เปรียบเทียบความสามารถในการซึมผ่านของอากาศในชิ้นงานทั้งสามขนาด ระหว่างแม่พิมพ์เหล็กกล้าไร้สนิม และแม่พิมพ์กราไฟต์	66
3.25	ขนาดรูพรุนโตสุดเปรียบเทียบจากชิ้นงานทั้งสามขนาดอนุภาคที่ผลิตจาก แม่พิมพ์เหล็กกล้าไร้สนิม และแม่พิมพ์กราไฟต์	66
3.26	อัตราความพรุนเปรียบเทียบจากชิ้นงานทั้งสามขนาดอนุภาคที่ผลิตจาก แม่พิมพ์เหล็กกล้าไร้สนิม และแม่พิมพ์กราไฟต์	67
3.27	ขนาดรูพรุนเฉลี่ยเปรียบเทียบจากชิ้นงานทั้งสามขนาดอนุภาคที่ผลิตจาก แม่พิมพ์เหล็กกล้าไร้สนิม และแม่พิมพ์กราไฟต์	68
3.28	ความแข็งแรงเชิงกลเปรียบเทียบจากชิ้นงานทั้งสามขนาดอนุภาคที่ผลิตจาก แม่พิมพ์เหล็กกล้าไร้สนิม และแม่พิมพ์กราไฟต์	68
3.29	เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของชิ้นงานทั้งสามขนาดในแม่พิมพ์ ทั้งสองชนิด อุณหภูมิอบผนึก 900 องศาเซลเซียส เวลาอบผนึก 15 และ 30 นาที	69
3.30	เปรียบเทียบค่ารูพรุนโตสุดของชิ้นงานทั้งสามขนาดในแม่พิมพ์ทั้งสองชนิด อุณหภูมิอบผนึก 900 องศาเซลเซียส เวลาอบผนึก 15 และ 30 นาที	70
3.31	เปรียบเทียบค่าความแข็งแรงเชิงกลของชิ้นงานทั้งสามขนาดในแม่พิมพ์ทั้งสองชนิด อุณหภูมิอบผนึก 900 องศาเซลเซียส เวลาอบผนึก 15 และ 30 นาที	71
3.32	ลักษณะชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบแรงเฉือน	71
3.33	เปรียบเทียบอัตราการหดตัวของชิ้นงานทั้งสามขนาดในแม่พิมพ์ทั้งสองชนิด อุณหภูมิอบผนึก 900 องศาเซลเซียส เวลาอบผนึก 15 และ 30 นาที	72

สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ

A	พื้นที่ที่มีการแพร่ผ่าน
A	พื้นที่ผิวตัวกรอง
A	พื้นที่หน้าตัดของชิ้นทดสอบ
B	ค่าคงที่ขึ้นกับชนิดและรูปทรงของวัสดุ
C_O	ความเข็มข้นของวาเคนซีสมดุล
D	ขนาดอนุภาค
d	ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางรูพรุนโตสุด
$d_{L\varepsilon}$	ขนาดรูพรุนเฉลี่ย
DTA	Differential Thermal Analyzer
D_v	ค่าการแพร่ที่ปริมาตร (Volume diffusivity)
e	ความหนาของชิ้นทดสอบ
F	แรงกระทำ
G	ขนาดของเกรน
G_0	ขนาดของเกรนช่วงเริ่มต้น
h	ระยะห่างระหว่างผิวหน้าบนสุดของชิ้นทดสอบกับระดับของของเหลวทดสอบ
J	ฟลักซ์ของการแพร่
k	ค่าคงที่ของโบลทซ์แมน
MPIF	Metal Powder Industries Federation
N	จำนวนรูพรุนต่อหน่วยปริมาตร
N	ตำแหน่งว่างหรือจำนวนอะตอมที่มีพลังงานกระตุ้น
N_0	จำนวนอะตอมทั้งหมด
P_g	ความดันก๊าซในรูพรุน
p	ค่าความแตกต่างของความดันที่ผ่านชิ้นงานทดสอบ
Q	พลังงานกระตุ้น
Q	อัตราการไหลของของไหล
R	ค่าคงที่ของก๊าซ
r	รัศมีรูพรุน
s	ความหนาของชิ้นงาน

สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ (ต่อ)

T	อุณหภูมิสัมบูรณ์
t	เวลา
X	ความโตของคอคอด
ΔP	ความดันที่ลดลง
Ω	ปริมาตรของอะตอม
ε	ความพรุน
γ	ความตึงผิว
γ	พลังงานพื้นผิว
η	ความหนืดพลวัติ
κ	ค่าพารามิเตอร์ที่ถูกกระตุ้นทางความร้อน
ρ	ความหนาแน่น
τ	ความแข็งแรงเฉือน
ψ_v	สัมประสิทธิ์การซึมผ่าน