สารบัญ

	หน้า
คำนำ	(1)
บทคัดย่อ	(2)
Abstract	(3)
สารบัญ	(4)
รายการตาราง	(6)
รายการรูป	(7)
สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ	(14)
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของหัวข้อวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.4 ขอบเขตของการวิจัย	3
2 ทฤษฎีและหลักการ	4
2.1 ทฤษฎีและหลักการ	4
2.2 ทฤษฎีการอบผนึก (sintering theory)	8
2.3 การทดสอบสมบัติของตัวกรองวัสดุผสม	13
2.4 การตรวจเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	17
3 สมมุติฐานและวิธีการวิจัย	24
3.1 สมมุติฐานการเกิดขึ้นของเส้นใยดีบุก	24
3.2 วัสดุที่ใช้และวิธีดำเนินการวิจัยและผลการทดลองเบื้องต้น	26

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4 ผลและวิเคราะห์ผลการทดลอง	34
4.1 อิทธิพลของความดันการอัดขึ้นรูป อุณหภูมิและระยะเวลาบด ที่มีผลต่อการเกิดเส้นใยในวัสดุผสม Sn-10%SiC	34
4.2 ลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานที่ผลิตได้	41
4.3 อิทธิพลของสัดส่วนการเติมวัสดุผสม	42
4.4 อิทธิพลของความดัน	48
4.5 อิทธิพลของอุณหภูมิ	56
4.6 อิทธิพลของเส้นใยดีบุกที่เกิดขึ้น	60
4.7 ภาพรวมของอิทธิพลต่างๆต่อสมบัติของวัสดุ	68
4.8 เปรียบเทียบสมบัติของชิ้นงานที่มีเส้นใยดีบุกและไม่มีเส้นใยดีบุกเกิดขึ้น	74
5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	76
5.1 สรุปผลการวิจัย	76
บรรณานุกรม	78
กิตติกรรมประกาศ	80
ภาคผนวก	81

รายการตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ผลกระทบของเส้นใยที่เกิดกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในวงการต่างๆ	17
4.1	ผลการอบผนึกชิ้นตัวอย่าง Sn-10%SiC ด้วยกล้องจุลทรรศน์สถานะร้อนที่เวลาบด ความดันและอุณหภูมิ ต่างๆ	34
4.2	เปรียบเทียบลักษณะทางกายภาพของเส้นใยที่เกิดจากชิ้นตัวอย่างที่ระยะเวลาบดผสม 36 และ 48 ชั่วโมง	38
4.3	ขนาดและความยาวของเส้นใยดีบุกที่เวลาบดและความดันต่างๆที่อุณหภูมิอบผนึก 230 องศาเซลเซียส	39
4.4	สมบัติของชิ้นงานวัสดุผสมดีบุกพรุนที่เกิด-ไม่เกิดเส้นใยดีบุกที่อุณหภูมิอบผนึก 200 องศาเซลเซียส	74
4.5	สมบัติของชิ้นงานวัสดุผสมดีบุกพรุนที่เกิด-ไม่เกิดเส้นใยดีบุกที่อุณหภูมิอบผนึก 220 องศาเซลเซียส	75

รายการรูป

รูปที่		หน้า
1.1	ตัวกรองอากาศที่ทำจากวัสดุพรุนประเภทต่างๆ	2
2.1	การหล่อเทป (Tape Casting)	4
2.2	ภาพสเก็ตช์แสดงความสัมพันธ์ของความหนาแน่นกับความดันในการอัดแน่น แสดงขั้นตอนสำคัญและความสามารถในการอัดลดลงเมื่อความหนาแน่นเพิ่มขึ้น	5
2.3	ภาพแสดงขั้นตอนการอัดผงโลหะ เริ่มต้นมีการจัดเรียงตัวโดยลดบริดจ์ระหว่างอนุภาค เมื่อแรงอัดสูงขึ้นการแน่นตัวเกิดจากการเสียรูปของอนุภาค	6
2.4	การอัดแน่นผ่านแม่พิมพ์ของผงบรอนซ์ทรงกลม แสดงการเปลี่ยนแปลงความพรุน จำนวนอนุภาคที่สัมผัสและพื้นที่สัมผัสเมื่อแรงอัดเพิ่มขึ้น	7
2.5	ลำดับขั้นตอนการเคลื่อนที่ของเครื่องมือในวัฏจักรการอัดแน่นผง	8
2.6	แบบจำลองอบผนึกอนุภาคทรงกลมสองอนุภาคที่พัฒนาพันธะระหว่างอนุภาค	9
2.7	แบบจำลองกลไกการอบผนึกทั้งสองประเภทในอนุภาคทรงกลม กลไกการเคลื่อนที่ตามพื้นผิวใช้สำหรับการเพิ่มขนาดของคอคอดโดยมวลเคลื่อนที่จากแหล่งกำเนิดที่พื้นผิว (E-C = การระเหย-การควบแน่น SD = การแพร่ตามพื้นผิว VD = การแพร่ในเนื้อวัสดุ) การเคลื่อนที่มวลรวมมีการเพิ่มขนาดของคอคอดโดยแหล่งมวลจากข้างใน (PF = การไหลแบบพลาสติก GB = การแพร่ตามขอบเกรน VD = การแพร่ในเนื้อวัสดุ) ดังนั้นเฉพาะกลไกการเคลื่อนที่มวลรวมเท่านั้นทำให้เกิดการหดตัวของอนุภาค	11
2.8	การทดสอบแรงเฉือน (Shear strength test)	14
2.9	การทดสอบฟองอากาศ Bubble point test	15
2.10	การทดสอบความสามารถในการให้ของไหลซึมผ่าน	16
2.11	วิสเคอร์ดีบุกที่ผ่านใช้เทคนิคการรวมของลำไอออน	19
2.12	รูปร่างของวิสเคอร์ดีบุกในแบบต่างๆ	19
2.13	ลักษณะการเกิดขึ้นของวิสเคอร์ดีบุก	20
2.14	วิสเคอร์สังกะสี (Zinc Whisker)	22
2.15	ภาพถ่าย SEM ของวิสเคอร์ดีบุกของวัสดุผสม Sn-SiC 10% โดยน้ำหนัก	23

รายการรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.1	แบบจำลองกลการเกิดขึ้นของวิสเคอร์ดีบุกบนโละบัดกรีโดยการเคลือบด้วยวิธี Electro deposit	24
3.2	แบบจำลองกลการเกิดขึ้นของเส้นใยดีบุกที่เกิดในวัสดุผสม Sn/SiC ที่เตรียมโดยวิธีบดผสมเชิงกล	25
3.3	แบบจำลองสมมุติฐานตำแหน่งของอนุภาควัสดุผสม Sn-10SiC กับอนุภาคดีบุก	25
3.4	แบบจำลองสมมุติฐานการผลิตวัสดุพรุน หลังอบผนึกมีการฟอร์มตัวของเส้นใยดีบุกที่เกิดจากวัสดุผสม Sn-10SiC และอนุภาคของดีบุกหลอมเชื่อมติดกัน	26
3.5	ผงดีบุกขนาดเล็กกว่า 45 μm	27
3.6	ผงซิลิกอนคาร์ไบด์ขนาดเล็กกว่า 37 μm	27
3.7	Planetary mill พร้อมด้วยหม้อบด 250 mlและลูกบอลบด	27
3.8	ผงวัสดุผสม Sn-10%SiC ขนาด 100-150 ที่กำลังขยาย a) 35 เท่า b).1000 เท่า	28
3.9	ผลทดสอบปฏิกิริยาทางความร้อนด้วย DTA ผงวัสดุผสม Sn-10%SiC ที่เวลาบด 24 ชั่วโมง	29
3.10	ผงวัสดุผสม Sn-10%SiC ขนาด 100-150 หลังให้ความร้อนที่ช่วงอุณหภูมิ 200-220 องศาเซลเซียส	29
3.11	ผงดีบุกที่ช่วงขนาด 200-300 μm	30
3.12	ชิ้นตัวอย่างกรีนเปรียบเทียบกับแบบจำลองสมมุติฐานตำแหน่งของวัสดุผสมกับดีบุก	30
3.13	เครื่องสั่นแม่เหล็ก (magnetic vibratory)	30
3.14	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งและระยะเวลาให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ ของผงดีบุกขนาด 200-300 μm ขึ้นรูปด้วยความดัน 1000 psi	31
4.1	ผลทดสอบปฏิกิริยาทางความร้อนด้วย DTA ของ (a) ผงดีบุกบริสุทธิ์ กับ ผงวัสดุผสม Sn-10%SiC ที่เวลาบด (b) 12 ชั่วโมง (c) 24 ชั่วโมง (d) 36 ชั่วโมง และ (e) 48 ชั่วโมง	36

รายการรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.2	ภาพถ่าย SEM ของตัวอย่างที่ความดัน 1500 psi ให้ความร้อนอุณหภูมิประมาณ 230 องศาเซลเซียส ที่เวลาบด (a) 12 ชั่วโมง (b) 24 ชั่วโมง (c) 36 ชั่วโมง (d) 48 ชั่วโมง (กำลังขยาย 500 เท่า)	37
4.3	ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุบนวิสเคอร์ดีบุกและชิ้นตัวอย่างวัสดุผสม Sn- 10%SiC ที่เวลาบด (a) 12 ชั่วโมง (b) 24 ชั่วโมง (c) 36 ชั่วโมง (d) 48 ชั่วโมง	39
4.4	ผล XRD ของ ผงวัสดุผสม Sn-10%SiC ที่เวลาบด 12, 24, 36 และ 48 ชั่วโมง	39
4.5	วิสเคอร์ดีบุกที่เกิดจากผงวัสดุผสม Sn-10SiC ที่ระยะบดนาน 24 ชั่วโมง อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที ภายใต้บรรยากาศอาร์กอน	40
4.6	ผลทดสอบปฏิกิริยาทางความร้อนด้วย DTA ของตัวอย่างผงวัสดุผสม Sn-10%SiC ที่เวลาบด 24 ชั่วโมง (บด SiC ก่อน30นาที)	41
4.7	ลักษณะชิ้นงานวัสดุผสมดีบุกพรุนSn+4 %(Sn-10SiC) รูป a) ผิวบนของชิ้นงาน b) ผิวล่างของชิ้นงาน ที่สัดส่วนวัสดุผสม 2% ความดัน 1000 psi อบผนึกที่อุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 9 ชั่วโมง	41
4.8	ภาพถ่าย SEM ของชิ้นงานวัสดุพรุน Sn+x(Sn-10SiC) เปรียบเทียบกันระหว่างที่ผิวหน้าชิ้นงานที่ปริมาณวัสดุผสม a) 0 % c) 2% e) 4% g) 6% i) 8% และ k) 10% กับภาคตัดขวางของชิ้นงานที่ปริมาณวัสดุผสม b) 0% d) 2% f) 4% h) 6% j) 8% และ l) 10% ที่อุณหภูมิอบผนึก 200 องศาเซลเซียส นาน 9 ชั่วโมง	43
4.9	กราฟความหนาแน่นของชิ้นงาน ที่อุณหภูมิและความดันต่างๆ เปรียบเทียบผลการเติมวัสดุผสม	44
4.10	ภาพถ่าย SEM ของชิ้นงาน Sn + x %(Sn-10SiC) ที่ 500 psi 200 องศาเซลเซียส แสดงตำแหน่งของอนุภาควัสดุผสม 2 แบบ a) อนุภาควัสดุผสมอยู่ในตำแหน่งของช่องว่างระหว่างอนุภาค b) อนุภาควัสดุผสมแทรกระหว่างอนุภาค	44
4.11	อัตราความพรุนเปรียบเทียบกันระหว่างค่าความดันขึ้นรูปและอุณหภูมิอบผนึกที่ปริมาณวัสดุผสมต่างๆ	45

รายการรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.12	สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของชิ้นงานเปรียบเทียบกันระหว่างค่าความดันขึ้นรูป 500 และ 1000 อุณหภูมิอบผนึก 200 และ 220 องศาเซลเซียส ที่ปริมาณวัสดุผสม 0-10 %(Sn-10SiC)	46
4.13	ขนาดรูพรุนโตสุดของชิ้นงานเปรียบเทียบกันระหว่างค่าความดันอัดขึ้นรูป 500 และ 1000 psi อุณหภูมิอบผนึก 200 และ 220 องศาเซลเซียส ที่ปริมาณวัสดุผสม 0-10 % (Sn-10SiC)	47
4.14	ขนาดรูพรุนเฉลี่ยของชิ้นงานเปรียบเทียบกันระหว่างค่าความดันอัดขึ้นรูป 500 และ 1000 psi อุณหภูมิอบผนึก 200 และ 220 องศาเซลเซียส ที่ปริมาณวัสดุผสม 0-10 % (Sn-10SiC)	48
4.15	ค่าความแข็งแรงเฉือนของชิ้นงานเปรียบเทียบกันระหว่างค่าความดันอัดขึ้นรูป 500 และ 1000 psi อุณหภูมิอบผนึก 200 และ 220 องศาเซลเซียส ที่ปริมาณวัสดุผสม 0-10 %(Sn-10SiC)	49
4.16	ภาพถ่าย SEM ของชิ้นงานวัสดุผสม Sn+2%(Sn-10SiC) ความดัน a) 500 psi b) 1000 psi c) 1500 psiและ d) 2000 psi ที่อุณหภูมิอบผนึก 200 องศาเซลเซียส นาน 9 ชั่วโมง	52
4.17	ความหนาแน่นของชิ้นงานวัสดุผสม Sn+2 %(Sn-10SiC) ที่ค่าความดันอัดขึ้นรูป 4 ค่า ที่อุณหภูมิอบผนึก 200 องศาเซลเซียส นาน 9 ชั่วโมง	52
4.18	อัตราความพรุนของชิ้นงานวัสดุผสม Sn+2 %(Sn-10SiC) ที่ความดัน 4 ค่า อุณหภูมิอบผนึก 200 องศาเซลเซียส นาน 9 ชั่วโมง	53
4.19	ค่าสัมประสิทธิ์ในการซึมผ่านของอากาศของชิ้นงานที่ความดัน 500 psi 1000 psi 1500 psi และ 2000 psi ที่อุณหภูมิอบผนึก 200 องศาเซลเซียส นาน 9 ชั่วโมง	54
4.20	ขนาดรูพรุนโตสุดของชิ้นงานที่ความดัน 500 1000 1500 และ 2000 psi ที่อุณหภูมิอบผนึก 200 องศาเซลเซียส นาน 9 ชั่วโมง	54
4.21	ขนาดรูพรุนเฉลี่ยของชิ้นงานที่ความดัน 500 psi 1000 psi 1500 psi และ 2000 psi ที่อุณหภูมิอบผนึก 200 องศาเซลเซียส นาน 9 ชั่วโมง	55

รายการรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.22	ความแข็งแรงเฉือนของชิ้นงานที่ความดันที่ใช้อัดขึ้นรูป 4 ค่า ที่อุณหภูมิอบผนึก 200 องศาเซลเซียส นาน 9 ชั่วโมง	56
4.23	ภาพถ่าย SEM เปรียบเทียบชิ้นตัวอย่าง Sn + 10 %(Sn-10SiC) ที่อุณหภูมิอบผนึก a) 200 องศาเซลเซียส b) 220 องศาเซลเซียส ที่ความดัน 1000 psi นาน 9 ชั่วโมง	57
4.24	ความหนาแน่นของชิ้นงานที่อุณหภูมิอบผนึก 200 องศาเซลเซียส เปรียบเทียบกับ 220 องศาเซลเซียส ที่ความดันที่ใช้อัดขึ้นรูป a) 500 psi และ b) 1000 psi นาน 9 ชั่วโมง	58
4.25	อัตราความพรุนของชิ้นงานที่อุณหภูมิอบผนึก 200 องศาเซลเซียส เปรียบเทียบกับ 220 องศาเซลเซียส ที่ความดันที่ใช้อัดขึ้นรูป a) 500 psi และ b) 1000 psi นาน 9 ชั่วโมง	58
4.26	ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของชิ้นงานที่อุณหภูมิอบผนึก 200 องศาเซลเซียส เปรียบเทียบกับ 220 องศาเซลเซียส ที่ความดันที่ใช้อัดขึ้นรูป a) 500 psi และ b) 1000 psi นาน 9 ชั่วโมง	58
4.27	ขนาดรูพรุนโตสุดของชิ้นงานที่อุณหภูมิอบผนึก 200 องศาเซลเซียส เปรียบเทียบกับ 220 องศาเซลเซียส ที่ความดันที่ใช้อัดขึ้นรูป a) 500 psi และ b) 1000 psi นาน 9 ชั่วโมง	59
4.28	ขนาดรูพรุนเฉลี่ยของชิ้นงานที่อุณหภูมิอบผนึก 200 องศาเซลเซียส เปรียบเทียบกับ 220 องศาเซลเซียส ที่ความดันที่ใช้อัดขึ้นรูป 500 psi และ 1000 psi นาน 9 ชั่วโมง	59
4.29	ความแข็งแรงเฉือนของชิ้นงานที่ที่อุณหภูมิอบผนึก 200 องศาเซลเซียส เปรียบเทียบกับ 220 องศาเซลเซียส ที่ความดันที่ใช้อัดขึ้นรูป a) 500 psi และ b) 1000 psi นาน 9 ชั่วโมง	60
4.30	ภาพถ่าย SEM ของชิ้นงานวัสดุผสม ที่พารามิเตอร์ต่างๆ	61
4.31	กราฟความหนาแน่นของชิ้นงาน ที่อุณหภูมิและความดันต่างๆ เปรียบเทียบกันระหว่าง ชิ้นงานที่มีการฟอร์มตัวของเส้นใยดีบุกกับชิ้นงานที่ไม่มีเส้นใยดีบุกเกิดขึ้นที่ความดันอัดขึ้นรูป และอุณหภูมิอบผนึกต่างๆ กัน นาน 9 ชั่วโมง	62

รายการรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.32	ค่าร้อยละของความพรุนตัวของชิ้นงาน ที่อุณหภูมิและความดันต่างๆ เปรียบเทียบกันระหว่าง ชิ้นงานที่มีการฟอร์มตัวของเส้นใยดีบุกกับชิ้นงานที่ไม่มีเส้นใยดีบุกเกิดขึ้นที่ความดัน อัดขึ้นรูป และอุณหภูมิอบผนึกต่างๆ กัน นาน 9 ชั่วโมง	63
4.33	ขนาดรูพรุนโตสุดของชิ้นงานที่อุณหภูมิและความดันต่างๆ เปรียบเทียบกันระหว่างชิ้นงานที่มีการฟอร์มตัวของเส้นใยดีบุกกับชิ้นงานที่ไม่มีเส้นใยดีบุกเกิดขึ้นที่ความดันอัดขึ้นรูปและ อุณหภูมิอบผนึกต่างๆ กัน นาน 9 ชั่วโมง	64
4.34	ขนาดรูพรุนเฉลี่ยของชิ้นงาน ที่อุณหภูมิและความดันต่างๆ เปรียบเทียบกันระหว่างชิ้นงานที่มีการฟอร์มตัวของเส้นใยดีบุกกับชิ้นงานที่ไม่มีเส้นใยดีบุกเกิดขึ้นที่ความดันอัดขึ้นรูปและ อุณหภูมิอบผนึกต่างๆ กัน นาน 9 ชั่วโมง	65
4.35	การเปลี่ยนแปลงปริมาตรของชิ้นงานหลังอบผนึก เปรียบเทียบกันระหว่างชิ้นงานที่มีการฟอร์มตัวของวิสเคอร์ดีบุกกับชิ้นงานที่ไม่มีวิสเคอร์ดีบุกเกิดขึ้นที่ความดันอัดขึ้นรูปและ อุณหภูมิอบผนึกต่างๆ กัน นาน 9 ชั่วโมง	66
4.36	ความสามารถในการซึมผ่านของชิ้นงานขนาดรูพรุนโตสุดของชิ้นงานที่อุณหภูมิและความดันต่างๆ เปรียบเทียบกันระหว่าง ชิ้นงานที่มีการฟอร์มตัวของวิสเคอร์ดีบุกกับชิ้นงานที่ไม่มีวิสเคอร์ดีบุกเกิดขึ้นที่ความดันอัดขึ้นรูปและ อุณหภูมิอบผนึกต่างๆ กัน นาน 9 ชั่วโมง	67
4.37	ความแข็งแรงเฉือนของชิ้นงานที่ใช้ผงวัสดุผสมที่มีวิสเคอร์ดีบุกเกิดขึ้นเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ไม่เกิดวิสเคอร์ดีบุกที่อุณหภูมิอบผนึก 200 องศาเซลเซียส ที่ 500 psi นาน 9 ชั่วโมง	68
4.38	เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของชิ้นงานที่ใช้ผงวัสดุผสมที่มีวิสเคอร์ดีบุกเกิดขึ้นที่อุณหภูมิอบผนึก 200 องศาเซลเซียสและ 220 องศาเซลเซียส ที่ความดัน 500 และ 1000 psi นาน 9 ชั่วโมง	69
4.39	เปรียบเทียบค่ารูพรุนโตสุดของชิ้นงานที่ใช้ผงวัสดุผสมที่มีวิสเคอร์ดีบุกเกิดขึ้นที่อุณหภูมิอบผนึก 200 องศาเซลเซียสและ 220 องศาเซลเซียส ที่ความดัน 500 และ 1000 psi นาน 9 ชั่วโมง	70

รายการรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.40	เปรียบเทียบค่ารูพรุนเฉลี่ยของชิ้นงานที่ใช้ผงวัสดุผสมที่มีวิสเคอร์ดีบุกเกิดขึ้นที่อุณหภูมิอบผนึก 200 องศาเซลเซียสและ 220 องศาเซลเซียส ที่ความดัน 500 และ 1000 psi นาน 9 ชั่วโมง	71
		72
4.41	เปรียบเทียบค่าความแข็งแรงเฉือนของชิ้นงานที่ใช้ผงวัสดุผสมที่มีวิสเคอร์ดีบุกเกิดขึ้นที่อุณหภูมิอบผนึก 200 องศาเซลเซียสและ 220 องศาเซลเซียส ที่ความดัน 500 และ 1000 psi นาน 9 ชั่วโมง	72
4.42	ลักษณะชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบแรงเฉือน	73
4.43	การกระจายตัวของธาตุต่างๆ ที่ผิวของชิ้นงานวัสดุผสมดีบุกพรุน Sn + 10 %(Sn-10SiC)ที่อุณหภูมิอบผนึก 220 องศาเซลเซียส ที่ความดัน 1000 psi นาน 9 ชั่วโมง	