

การผลิตวัสดุผสมดีบุกพรุน

Production of Porous Tin Composite

คาตา แก้วสมบูรณ์

Kata Kaewsomboon

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of

Master of Engineering in Materials Engineering

Prince of Songkla University

2550

๐ ดิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

เลขที่	TAM8.9.P6 ๐๖๑ ๒๕๕๐ ๒. 2
Bib Key	309531
	ร. 9 ม.ค. 2550

(1)

ชื่อวิทยานิพนธ์      การผลิตวัสดุผสมดีบุกพรุน  
ผู้เขียน              นายคณา แก้วสมบูรณ์  
สาขาวิชา              วิศวกรรมวัสดุ

---

คณะกรรมการที่ปรึกษา

.....  
.....ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.เล็ก สีคง)

.....  
.....กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นภิสพร มีมงคล)

.....  
.....กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัชชัย ปลุกผล)

คณะกรรมการสอบ

.....  
.....ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิรวรรณ สุทธิศรีปก)

.....  
.....กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.เล็ก สีคง)

.....  
.....กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นภิสพร มีมงคล)

.....  
.....กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัชชัย ปลุกผล)

.....  
.....กรรมการ  
(ดร.เรืองเดช ธงศรี)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับนี้เป็น  
ส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ

.....  
.....  
(รองศาสตราจารย์ ดร.เกริกชัย ทองหนู)  
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อวิทยานิพนธ์ การผลิตวัสดุผสมดีบุกพูน  
ผู้เขียน นายภาดา แก้วสมบูรณ์  
สาขาวิชา วิศวกรรมวัสดุ  
ปีการศึกษา 2550

### บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการเกิดวิสเคอร์ดีบุกของระบบวัสดุผสม Sn-SiC และการผลิตชิ้นส่วนวัสดุผสมดีบุกพูน การศึกษาแบ่งเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกเป็นการศึกษาตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อกลไกการเกิดวิสเคอร์ดีบุกในชิ้นงานวัสดุผสมระหว่างดีบุกกับซิลิกอนคาร์ไบด์ ที่เตรียมโดยวิธีโลหะผสมเชิงกล พบว่า ระยะเวลาบด อุณหภูมิและความดันที่ใช้ขึ้นรูปที่เหมาะสม มีผลต่อการเกิดวิสเคอร์ดีบุกอย่างรวดเร็ว กลไกซึ่งมีความเป็นไปได้ที่จะเป็นสาเหตุของการฟอร์มตัวของวิสเคอร์ดีบุกมี 2 กลไก คือการตกผลึกใหม่และความแตกต่างของการขยายตัวเนื่องจากความร้อนของซิลิกอนคาร์ไบด์และดีบุก โดยอาศัยความเค้นตกค้างในวัสดุเป็นแรงขับเคลื่อน ให้มีการฟอร์มตัวของวิสเคอร์ดีบุกขึ้นเมื่อได้รับความร้อน ส่วนที่ 2 คือการผลิตชิ้นส่วนวัสดุผสมพูนระหว่าง โลหะดีบุกกับวัสดุผสม (Sn-10SiC) ผงดีบุกที่ใช้มีขนาด 200-300 ไมครอน และผงวัสดุผสมผลิตโดยวิธีโลหะผสมเชิงกลมีขนาด 100-150 ไมครอน ผงทั้งสองชนิดจะถูกผสมกันเป็นสัดส่วน โดยการสั่นแล้วอัดขึ้นรูปเป็นเหรียญ และนำเข้าอบผืนึกในบรรยากาศที่มีการควบคุมที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของดีบุก (231.9 องศาเซลเซียส) ในกระบวนการนี้อนุภาคของวัสดุผสมที่มี ความเค้นคงค้างเกิดขึ้นอยู่แล้วระหว่างการบดผสมเชิงกลถูกกระตุ้นให้เกิดวิสเคอร์ดีบุก และเกิดการยึดติดกันระหว่างผิวของอนุภาคดีบุกและวัสดุผสม (Sn-10SiC) ทำให้ได้วัสดุผสมพูน ตัวแปรที่ทำการศึกษามี 3 ตัวแปรคือ ปริมาณของวัสดุผสมที่เติม ความดันที่ใช้อัดขึ้นรูปและอุณหภูมิอบผืนึกที่มีอิทธิพลต่อการเกิดวิสเคอร์ดีบุก การซึมผ่านของของไหล ขนาดรูพรุน ปริมาตรรูพรุนและความแข็งแรง พบว่า ความดันที่ใช้อัดขึ้นรูปเป็นปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติของชิ้นงานมากที่สุด นอกจากนี้วิสเคอร์ดีบุกที่ฟอร์มตัวอยู่ในชิ้นงาน ยังทำให้ขนาดรูพรุนเฉลี่ย ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านและความแข็งแรงสูงขึ้น

**Thesis Title** Production of Porous Tin Composite  
**Author** Mr. Kata Kaewsomboon  
**Major Program** Materials Engineering  
**Academic Year** 2007

### Abstract

The purpose of this study is to investigate the forming behavior of tin whiskers and to produce the porous tin composite. The experimental study was divided into 2 parts. In part one, the important variables influenced on a tin whisker forming mechanism in Sn-SiC composite material prepared by mechanical alloying method was investigated. It was found that milling time, temperature and compaction pressures have an effect on a rapid tin whisker formation. There are two mechanisms to elucidate this phenomena such as recrystallization and the difference in thermal expansion of SiC and tin matrix which the residual stresses were induce and tin whisker were formed with an activation of heat. In the second part, porous composite materials of tin and Sn-10SiC composite were produced by mixing tin powders with a size range of 200-300 microns and Sn-10SiC composite particles prepared by mechanical alloying with a size range of 100-150 microns. The Sn-10SiC composite powders were proportionally mixed with tin powders by means of a vibration mixer, compacted to the coin shaped specimens, and then the specimens were sintered at various temperatures and times under an argon atmosphere. During heating at a certain condition, tin whiskers were induced to form and the connection among the powders was occurred. The influence of a mixture ratio of tin powder and Sn-10SiC, compaction pressure and sintering temperature on the formation of tin whiskers, permeability, pore size, pore % and strength of specimens were determined. It was apparent that a compaction pressure has the most significant effect on properties of the specimens. Moreover, tin whiskers formed in the porous composite materials can enhance the average pore size, permeability and strength.



## กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนใคร่ขอขอบพระคุณ รศ. ดร.เล็ก สีคง ประธานกรรมการที่ปรึกษา  
วิทยานิพนธ์ ผศ. ดร.ชัชชัย ปลุกผล และ ผศ.ดร.นภิสพร มีมงคล กรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์  
ที่ได้เสียสละเวลาอันมีค่ายิ่งในการให้คำแนะนำที่ดีเสมอมาตลอดจนช่วยตรวจสอบวิทยานิพนธ์และ  
ให้ข้อเสนอแนะที่เอื้อประโยชน์ต่องานวิจัยในครั้งนี้ และขอขอบพระคุณ ดร.เรืองเดช ทรงศรี ที่  
กรุณารับเป็นกรรมการสอบและตรวจแก้วิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชา การตลอดจนเป็น  
แบบอย่างในการนำวิชาความรู้ไปใช้ในการดำเนินชีวิตต่อไป ขอขอบพระคุณรศ. ดร.เล็ก สีคง ผศ.  
ดร.ชัชชัย ปลุกผล และ ผศ.ดร.นภิสพร มีมงคล ในการให้คำปรึกษาและช่วยเหลือเรื่องอุปกรณ์  
เครื่องมือในการทดสอบ

ขอขอบคุณโครงการทุนอุดหนุนงานวิจัยมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ที่ใช้งบ  
ประมาณอุดหนุนในการทำวิจัยครั้งนี้ ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้  
งบประมาณอุดหนุนบางส่วนในการทำวิจัยครั้งนี้

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ และเจ้าหน้าที่ของภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้ความร่วมมือและคำปรึกษาต่างๆเป็นอย่างดี  
ขอขอบคุณ คุณสุทธิพันธ์ แสงสงวนที่ให้คำปรึกษาที่ดีและให้ยืมอุปกรณ์ทดสอบ  
รวมทั้งบุคคลอื่นๆ ที่ไม่สามารถเอ่ยนามไว้ในนี้ได้ทั้งหมด ที่สนับสนุน เสียสละกำลังกาย  
และให้กำลังใจผู้วิจัยมาตลอดจนการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จสมบูรณ์

ขอบคุณ นางสาวอ้อมใจ พรหมรัญย์ที่เป็นกำลังใจ เพื่อนๆร่วมบ้านเลขที่ 55/38  
ตลอดการศึกษาปริญญาโท เพื่อนๆที่ๆน้องๆภาควิชาฟิสิกส์และเพื่อนๆที่ๆน้องๆ ภาควิชาวิศวกรรม  
เหมืองแร่และวัสดุที่ช่วยเหลือแนะนำและเป็นที่ยกย่องที่ดีในทุก โอกาส

ผู้วิจัยขออุทิศส่วนดีและประโยชน์อันพึงมีจากการทำวิทยานิพนธ์นี้แด่คุณย่าสร้อย  
คุณพ่อสงเคราะห์ และคุณแม่จุรี แก้วสมบูรณ์ ซึ่งเป็นผู้ให้กำลังใจ คำปรึกษา และเป็นแบบอย่างที่ดี  
มาตลอดจนถึงวันนี้ ตลอดจนกำลังใจจาก น้องครองศรี และน้องคณนา แก้วสมบูรณ์

คาตา แก้วสมบูรณ์

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	(3)
กิตติกรรมประกาศ	(5)
สารบัญ	(6)
รายการตาราง	(8)
รายการรูป	(9)
สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ	(16)
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 สมมุติฐานการเกิดขึ้นของวิสเคอร์คิบูก	24
3.2 วัสดุที่ใช้และวิธีดำเนินการวิจัยและผลการทดลองเบื้องต้น	26
4 ผลและวิเคราะห์ผลการทดลอง	32
4.1 อิทธิพลของความดันการอัดขึ้นรูป อุณหภูมิและระยะเวลาบด ที่มีผลต่อการเกิดวิสเคอร์ในวัสดุผสม Sn-10%SiC	32
4.2 ลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานที่ผลิตได้	40
4.3 อิทธิพลของสัดส่วนการเติมวัสดุผสม	41
4.4 อิทธิพลของความดัน	48

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.5 อิทธิพลของอุณหภูมิ	53
4.6 อิทธิพลของวิสเคอร์ตีบูกที่เกิดขึ้น	58
4.7 ภาพรวมของอิทธิพลต่างๆต่อสมบัติของวัสดุ	66
5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	72
5.1 สรุปผลการวิจัย	72
5.2 ข้อเสนอแนะ	73
บรรณานุกรม	74
ภาคผนวก	76
ประวัติผู้เขียน	128

## รายการตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ผลกระทบของวิสเคอร์ที่เกิดกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในวงจรต่างๆ	17
4.1	ผลการอบผนึกชิ้นตัวอย่าง Sn-10%SiC ด้วยกล้องจุลทรรศน์สถานะร้อนที่เวลาบด ความดันและอุณหภูมิ ต่างๆ	32
4.2	เปรียบเทียบลักษณะทางกายภาพของวิสเคอร์ที่เกิดจากชิ้นตัวอย่างที่ระยะเวลาบด ผสม 36 และ 48 ชั่วโมง	36
4.3	ขนาดและความยาวของวิสเคอร์ที่บดที่เวลาบดและความดันต่างๆที่อุณหภูมิอบผนึก 230 องศาเซลเซียส	36

## รายการรูป

รูปที่	หน้า	
1.1	ตัวกรองอากาศที่ทำจากวัสดุพูนประเภทต่างๆ	2
2.1	การหล่อเทป (tape casting)	4
2.2	ภาพสเก็ทซ์แสดงความสัมพันธ์ของความหนาแน่นกับความดันในการอัดแน่น แสดงขั้นตอนสำคัญและความสามารถในการอัดลดลงเมื่อความหนาแน่นเพิ่มขึ้น	5
2.3	ภาพแสดงขั้นตอนการอัดผงโลหะ เริ่มต้นมีการจัดเรียงตัวโดยลอบริคจ์ระหว่างอนุภาค เมื่อแรงอัดสูงขึ้นการแน่นตัวเกิดจากการเสียรูปของอนุภาค	6
2.4	การอัดแน่นผ่านแม่พิมพ์ของผงบรอนซ์ทรงกลม แสดงการเปลี่ยนแปลงความพูน จำนวนอนุภาคที่สัมผัสและพื้นที่สัมผัสเมื่อแรงอัดเพิ่มขึ้น	7
2.5	ลำดับขั้นตอนการเคลื่อนที่ของเครื่องมือในวัฏจักรการอัดแน่นผง	8
2.6	แบบจำลองออบผนึกอนุภาคทรงกลมสองอนุภาคที่พัฒนาพันธะระหว่างอนุภาค เริ่มต้นจากจุดสัมผัส การเพิ่มขนาดของคอคอดสร้างขอบเกรนที่รอยต่อระหว่างอนุภาค และในที่สุดรวมเป็นหนึ่งอนุภาคใหญ่	9
2.7	แบบจำลองกลไกการออบผนึกทั้งสองประเภทในอนุภาคทรงกลม กลไกการเคลื่อนที่ตามพื้นผิวใช้สำหรับการเพิ่มขนาดของคอคอดโดยมวลเคลื่อนที่จากแหล่งกำเนิดที่พื้นผิว (E-C = การระเหย-การควบแน่น SD = การแพร่ตามพื้นผิว VD = การแพร่ในเนื้อวัสดุ) การเคลื่อนที่ที่มวลรวมมีการเพิ่มขนาดของคอคอดโดยแหล่งมวลจากข้างใน (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 (Permeability coefficient test)	16
2.11	วิสเคอร์ดีบุกที่ผ่านใช้เทคนิคการรวมของลำไอออน	19
2.12	รูปร่างของวิสเคอร์ดีบุกในแบบต่างๆ	19
2.13	ลักษณะการเกิดขึ้นของวิสเคอร์ดีบุก	20
2.14	วิสเคอร์สังกะสี (zinc whisker)	22

## รายการรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.15 ภาพถ่าย SEM ของวิสเคอร์ตีบุกของวัสดุผสม Sn-SiC 10% โดยน้ำหนัก	23
3.1 แบบจำลองกลไกการเกิดขึ้นของวิสเคอร์ตีบุกบน โละบัดกรี โดยการเคลือบด้วยวิธี electro deposit	24
3.2 แบบจำลองกลไกการเกิดขึ้นของวิสเคอร์ตีบุกที่เกิดในวัสดุผสม Sn/SiC ที่เตรียมโดยวิธีบดผสมเชิงกล	25
3.3 แบบจำลองสมมุติฐานตำแหน่งของอนุภาควัสดุผสม Sn-10SiC กับอนุภาคตีบุก	25
3.4 แบบจำลองสมมุติฐานการผลิตวัสดุพูน หลังอบผนึกมีการฟอร์มตัวของวิสเคอร์ตีบุกที่เกิดจากวัสดุผสม Sn-10SiC และอนุภาคของตีบุกหลอมเชื่อมติดกัน	26
3.5 ผงตีบุกขนาดเล็กกว่า 45 $\mu m$	27
3.6 ผงซิลิกอนคาร์ไบด์ขนาดเล็กกว่า 37 $\mu m$	27
3.7 เครื่องบดแพลนารี พร้อมด้วยหม้อบด 250 ml และลูกบอลบด	27
3.8 ผงวัสดุผสม Sn-10%SiC ขนาด 100-150 ที่กำลังขยาย a) 35 เท่า b) 1000 เท่า	28
3.9 ผงวัสดุผสม Sn-10%SiC ขนาด 100-150 หลังให้ความร้อนในช่วงอุณหภูมิ 200-220 องศาเซลเซียส a) กำลังขยาย 150 เท่า b) กำลังขยาย 350 เท่า	28
3.10 ผงตีบุกในช่วงขนาด 200-300 $\mu m$	29
3.11 ขึ้นตัวอย่างกรีนเปรียบเทียบกับแบบจำลองสมมุติฐานตำแหน่งของวัสดุผสมกับตีบุก	29
3.12 เครื่องสั่นแม่เหล็ก (magnetic vibratory)	29
4.1 ผลทดสอบปฏิกิริยาทางความร้อนด้วย DTA ของ (a) ผงตีบุกบริสุทธิ์ กับ ผงวัสดุผสม Sn-10%SiC ที่เวลาบด (b) 12 ชั่วโมง (c) 24 ชั่วโมง (d) 36 ชั่วโมง และ (e) 48 ชั่วโมง	34
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)	35
4.3 ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุนิววิสเคอร์ตีบุกและขึ้นตัวอย่างวัสดุผสม Sn- 10%SiC ที่เวลาบด (a) 12 ชั่วโมง (b) 24 ชั่วโมง (c) 36 ชั่วโมง (d) 48 ชั่วโมง	37

## รายการรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.4 ผล XRD ของ ผงวัสดุผสม Sn-10%SiC ที่เวลาบด 24 ชั่วโมง	38
4.5 วิสเคอร์ดีบุกที่เกิดจากผงวัสดุผสม Sn-10SiC ที่ระยะบดนาน 24 ชั่วโมง อุณหภูมิ 200-220 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที ภายใต้บรรยากาศอาร์กอน	39
4.6 ผลทดสอบปฏิกิริยาทางความร้อนด้วย DTA ของตัวอย่างผงวัสดุผสม Sn-10%SiC ที่เวลาบด 24 ชั่วโมง (บด SiC ก่อน30นาที)	40
4.7 ลักษณะชิ้นงานวัสดุผสมดีบุกพูน Sn+4 %( Sn-10SiC) รูป a) ผิวบนของชิ้นงาน b) ผิวล่างของชิ้นงาน ที่สัดส่วนวัสดุผสม 2% ความดัน 1000 psi ออบนึ่งที่อุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 9 ชั่วโมง	40
4.8 ภาพถ่าย SEM ของชิ้นงานวัสดุพูน Sn+x(Sn-10SiC) เปรียบเทียบกันระหว่างที่ ผิวหน้าชิ้นงานที่ปริมาณวัสดุผสม 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% ที่อุณหภูมิอบนึ่ง 200 องศาเซลเซียส นาน 9 ชั่วโมง	42
4.9 กราฟความหนาแน่นของชิ้นงาน ที่อุณหภูมิและความดันต่างๆ เปรียบเทียบผลการ เติมวัสดุผสม	43
4.10 ภาพถ่าย SEM ของชิ้นงาน Sn + x %( Sn-10SiC) ที่ 500 psi 200 องศาเซลเซียส แสดงตำแหน่งของอนุภาควัสดุผสม 2 แบบ a) อนุภาควัสดุผสมอยู่ในตำแหน่งของ ช่องว่างระหว่างอนุภาคดีบุก b) อนุภาควัสดุผสมแทรกระหว่างอนุภาคดีบุก	43
4.11 เปอร์เซนต์ความพูนเปรียบเทียบกันระหว่างค่าความดันขึ้นรูปและอุณหภูมิอบนึ่ง ที่ปริมาณวัสดุผสมต่างๆ	44
4.12 สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของชิ้นงานเปรียบเทียบกันระหว่างค่าความดันขึ้นรูป 500 และ 1000 อุณหภูมิอบนึ่ง 200 และ 220 องศาเซลเซียส ที่ปริมาณวัสดุผสม 0-10 %( Sn-10SiC)	45
4.13 ขนาดรูพรุน โดลุคของชิ้นงานเปรียบเทียบกันระหว่างค่าความดันอัดขึ้นรูป 500 และ 1000 psi อุณหภูมิอบนึ่ง 200 และ 220 องศาเซลเซียส ที่ปริมาณวัสดุผสม 0-10 % ( Sn-10SiC)	46

## รายการรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.14	ขนาดรูพรุนเฉลี่ยของชิ้นงานเปรียบเทียบกันระหว่างค่าความดันอัดขึ้นรูป 500 และ 1000 psi อุณหภูมิอบผืนึก 200 และ 220 องศาเซลเซียส ที่ปริมาณวัสดุผสม 0-10 % ( Sn-10SiC)	47
4.15	ค่าความแข็งแรงเหนือนของชิ้นงานเปรียบเทียบกันระหว่างค่าความดันอัดขึ้นรูป 500 และ 1000 psi อุณหภูมิอบผืนึก 200 และ 220 องศาเซลเซียส ที่ปริมาณวัสดุผสม 0-10 %( Sn-10SiC)	48
4.16	ภาพถ่าย SEM ของชิ้นงานวัสดุผสม Sn+2%(Sn-10SiC) ความดัน a) 500 psi b) 1000 psi c) 1500 psi และ d) 2000 psi ที่อุณหภูมิอบผืนึก 200 องศาเซลเซียส นาน 9 ชั่วโมง	49
4.17	ความหนาแน่นของชิ้นงานวัสดุผสม Sn+2 % ( Sn-10SiC) ที่ค่าความดันอัดขึ้นรูป 4 ค่า ที่อุณหภูมิอบผืนึก 200 องศาเซลเซียส นาน 9 ชั่วโมง	50
4.18	เปอร์เซ็นต์ความพรุนของชิ้นงานวัสดุผสม Sn+2 % ( Sn-10SiC) ที่ความดัน 4 ค่า อุณหภูมิอบผืนึก 200 องศาเซลเซียส นาน 9 ชั่วโมง	50
4.19	ค่าสัมประสิทธิ์ในการซึมผ่านของอากาศของชิ้นงานที่ความดัน 500 psi 1000 psi 1500 psi และ 2000 psi ที่อุณหภูมิอบผืนึก 200 องศาเซลเซียส นาน 9 ชั่วโมง	51
4.20	ขนาดรูพรุน โดสุดของชิ้นงานที่ความดัน 500 1000 1500 และ 2000 psi ที่อุณหภูมิอบผืนึก 200 องศาเซลเซียส นาน 9 ชั่วโมง	52
4.21	ขนาดรูพรุนเฉลี่ยของชิ้นงานที่ความดัน 500 psi 1000 psi 1500 psi และ 2000 psi ที่ อุณหภูมิอบผืนึก 200 องศาเซลเซียส นาน 9 ชั่วโมง	52
4.22	ความแข็งแรงเหนือนของชิ้นงานที่ความดันที่ใช้อัดขึ้นรูป 4 ค่า ที่อุณหภูมิอบผืนึก 200 องศาเซลเซียส นาน 9 ชั่วโมง	53
4.23	ภาพถ่าย SEM เปรียบเทียบขึ้นตัวอย่าง Sn + 10 % ( Sn-10SiC) ที่อุณหภูมิอบผืนึก a) 200 องศาเซลเซียส b) 220 องศาเซลเซียส ที่ความดัน 1000 psi นาน 9 ชั่วโมง	54



## รายการรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.24 ความหนาแน่นของชิ้นงานที่อุณหภูมิอบผนึ่ง 200 องศาเซลเซียส เปรียบเทียบกับ 220 องศาเซลเซียส ที่ความดันที่ใช้อัดขึ้นรูป a) 500 psi และ b) 1000 psi นาน 9 ชั่วโมง	54
4.25 เปอร์เซ็นต์ความพรุนของชิ้นงานที่อุณหภูมิอบผนึ่ง 200 องศาเซลเซียส เปรียบเทียบกับ 220 องศาเซลเซียส ที่ความดันที่ใช้อัดขึ้นรูป a) 500 psi และ b) 1000 psi นาน 9 ชั่วโมง	55
4.26 ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของชิ้นงานที่อุณหภูมิอบผนึ่ง 200 องศาเซลเซียส เปรียบเทียบกับ 220 องศาเซลเซียส ที่ความดันที่ใช้อัดขึ้นรูป a) 500 psi และ b) 1000 psi นาน 9 ชั่วโมง	56
4.27 ขนาดรูพรุน โดสุดของชิ้นงานที่อุณหภูมิอบผนึ่ง 200 องศาเซลเซียส เปรียบเทียบกับ 220 องศาเซลเซียส ที่ความดันที่ใช้อัดขึ้นรูป a) 500 psi และ b) 1000 psi นาน 9 ชั่วโมง	56
4.28 ขนาดรูพรุนเฉลี่ยของชิ้นงานที่อุณหภูมิอบผนึ่ง 200 องศาเซลเซียส เปรียบเทียบกับ 220 องศาเซลเซียส ที่ความดันที่ใช้อัดขึ้นรูป a) 500 psi และ b) 1000 psi นาน 9 ชั่วโมง	57
4.29 ความแข็งแรงเฉือนของชิ้นงานที่อุณหภูมิอบผนึ่ง 200 องศาเซลเซียส เปรียบเทียบกับ 220 องศาเซลเซียส ที่ความดันที่ใช้อัดขึ้นรูป a) 500 psi และ b) 1000 psi นาน 9 ชั่วโมง	58
4.30 ภาพถ่าย SEM ของชิ้นงานวัสดุผสม ที่พารามิเตอร์ต่างๆ	59
4.31 กราฟความหนาแน่นของชิ้นงาน ที่อุณหภูมิและความดันต่างๆ เปรียบเทียบกัน ระหว่าง ชิ้นงานที่มีการฟอร์มตัวของวิสเคอร์ดีบุกกับชิ้นงานที่ไม่มีวิสเคอร์ดีบุก เกิดขึ้น ที่ความดันอัดขึ้นรูป และอุณหภูมิอบผนึ่งต่างๆ กัน นาน 9 ชั่วโมง	60
4.32 ค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุนตัวของชิ้นงาน ที่อุณหภูมิและความดันต่างๆ เปรียบเทียบกันระหว่าง ชิ้นงานที่มีการฟอร์มตัวของวิสเคอร์ดีบุกกับชิ้นงานที่ไม่มีวิสเคอร์ดีบุก เกิดขึ้นที่ความดัน อัดขึ้นรูป และอุณหภูมิอบผนึ่งต่างๆ กัน นาน 9 ชั่วโมง	61

## รายการรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.33	ขนาดรูพรุน โทสุดของชิ้นงานที่อุณหภูมิและความดันต่างๆ เปรียบเทียบกันระหว่างชิ้นงานที่มีการฟอร์มตัวของวิสเคอร์ดีบุกกับชิ้นงานที่ไม่มีวิสเคอร์ดีบุกเกิดขึ้นที่ความดันอัดขึ้นรูปและ อุณหภูมิอบผืนิกต่างๆ กัน นาน 9 ชั่วโมง	62
4.34	ขนาดรูพรุนเฉลี่ยของชิ้นงาน เปรียบเทียบกันระหว่าง ชิ้นงานที่มีการฟอร์มตัวของวิสเคอร์ดีบุกกับชิ้นงานที่ไม่มีวิสเคอร์ดีบุกเกิดขึ้นที่ความดันอัดขึ้นรูปและ อุณหภูมิอบผืนิกต่างๆ กัน นาน 9 ชั่วโมง	63
4.35	การเปลี่ยนแปลงปริมาตรของชิ้นงานหลังอบผืนิก เปรียบเทียบกันระหว่างชิ้นงานที่มีการฟอร์มตัวของวิสเคอร์ดีบุกกับชิ้นงานที่ไม่มีวิสเคอร์ดีบุกเกิดขึ้นที่ความดันอัดขึ้นรูปและ อุณหภูมิอบผืนิกต่างๆ กัน นาน 9 ชั่วโมง	64
4.36	ความสามารถในการซึมผ่านของชิ้นงานขนาดรูพรุน โทสุดของชิ้นงานที่เปรียบเทียบกันระหว่าง ชิ้นงานที่มีการฟอร์มตัวของวิสเคอร์ดีบุกกับชิ้นงานที่ไม่มีวิสเคอร์ดีบุกเกิดขึ้นที่ความดันอัดขึ้นรูปและ อุณหภูมิอบผืนิกต่างๆ กัน นาน 9 ชั่วโมง	65
4.37	ความแข็งแรงเหนือนของชิ้นงานที่ใช้ผงวัสดุผสมที่มีวิสเคอร์ดีบุกเกิดขึ้นเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ไม่เกิดวิสเคอร์ดีบุกที่อุณหภูมิอบผืนิก 200 องศาเซลเซียส ที่ 500 psi นาน 9 ชั่วโมง	66
4.38	เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของชิ้นงานที่ใช้ผงวัสดุผสมที่มีวิสเคอร์ดีบุกเกิดขึ้นที่อุณหภูมิอบผืนิก 200 องศาเซลเซียสและ 220 องศาเซลเซียส ที่ความดัน 500 และ 1000 psi นาน 9 ชั่วโมง	67
4.39	เปรียบเทียบค่ารูพรุน โทสุดของชิ้นงานที่ใช้ผงวัสดุผสมที่มีวิสเคอร์ดีบุกเกิดขึ้นที่อุณหภูมิอบผืนิก 200 องศาเซลเซียสและ 220 องศาเซลเซียส ที่ความดัน 500 และ 1000 psi นาน 9 ชั่วโมง	68
4.40	เปรียบเทียบค่ารูพรุนเฉลี่ยของชิ้นงานที่ใช้ผงวัสดุผสมที่มีวิสเคอร์ดีบุกเกิดขึ้นที่อุณหภูมิอบผืนิก 200 องศาเซลเซียสและ 220 องศาเซลเซียส ที่ความดัน 500 และ 1000 psi นาน 9 ชั่วโมง	69

## รายการรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.41	70
4.42	70
4.43	71

### สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ

Ma	บดผสมเชิงกล (mechanical alloying)
$\rho$	ความหนาแน่น
X	เส้นผ่านศูนย์กลางของส่วน โคนิ่ง
$\rho_0$	ความหนาแน่นเริ่มต้น
E-C	การระเหย-การควบแน่น
SD	การแพร่ตามพื้นผิว
VD	การแพร่ในเนื้อวัสดุ
PF	การไหลแบบพลาสติก
GB	การแพร่ตามขอบเกรน
VD	การแพร่ในเนื้อวัสดุ
J	ฟลักซ์ของการแพร่
A	พื้นที่ที่มีการแพร่ผ่าน
$\Omega$	ปริมาตรอะตอม
N	จำนวนรูพรุนต่อหน่วยปริมาตร
$\gamma$	พลังงานพื้นผิว
Pg	ความดันก๊าซในรูพรุน
t	เป็นเวลา
Dv	เป็นสภาพแพร่ในเนื้อวัสดุ
K	เป็นค่าคงที่ของ โบลท์แมนน์
T	เป็นอุณหภูมิสัมบูรณ์
G	เป็นขนาดเกรน
r	เป็นรัศมีรูพรุน
$\tau$	ความแข็งแรงเฉือน
F	แรงกระทำ
S	ความหนาของชั้นงาน
d	ขนาดของชิ้นตัวอย่าง
$d_x$	ขนาดของรูพรุนปรากฏ
$\delta$	แรงดึงผิว

$\cos \varphi$	มุมการเปียก (wetting angle)
$\Delta p_x$	ความดันที่ตัวกรองได้รับ
$\Delta P$	ความดันที่ลดลง
$e$	ความหนาของชั้นทดสอบ
$A$	พื้นที่หน้าตัดของชั้นทดสอบ
$\eta$	ความหนืดพลศาสตร์ของไหลทดสอบ
$Q$	อัตราการไหลของของไหล
$\psi_v$	สัมประสิทธิ์การซึมผ่าน
$e$	ความหนาของตัวกรอง หรือความยาวของหลอด
$Q$	อัตราการไหลของของไหล
$\varepsilon$	ร้อยละของความพรุน

## บทที่ 1

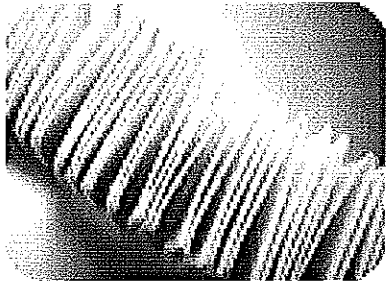
### บทนำ

#### 1.1 ความสำคัญและที่มาของหัวข้อวิจัย

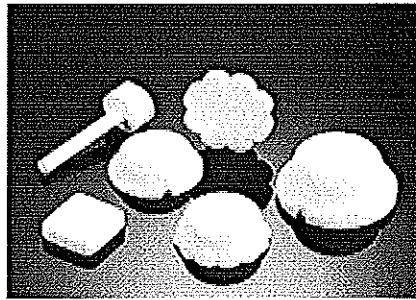
กรรมวิธีการผลิตวัสดุพูนเพื่อใช้ในงานกรองในปัจจุบันมีหลากหลายวิธีด้วยกัน ขึ้นอยู่กับประเภทของวัสดุที่นำมาใช้ ตัวอย่างเช่น ตัวกรองใยแก้ว-กระดาษ (รูปที่ 1.1a) โดยใช้วิธีการผลิตที่ปรับปรุงมาจากการผลิตกระดาษปกติ ทำได้โดยนำ slurry ของเส้นใยเทลงบนฐานพูน ปล่อยให้แห้งและเคลือบอยู่บนฐาน วิธีนี้ใช้กับ composite fiberglass filter paper หรืออาจใช้กับกระบวนการแปร่งใยฝ้าย ซึ่งคล้ายกับกระบวนการผลิตสิ่งทอทั่วไป เส้นใยจะผ่านโลหะตะขอเพื่อสร้างให้เส้นใยแยกออกจากกันเป็นเส้น นำเส้นใยที่ได้มาอัดเป็นก้อนสุดท้ายก็ได้เป็นชิ้นงานออกมา หรือจะเป็นตัวกรองที่ทำมาจากพลาสติกพูน (รูปที่ 1.1b) และเซรามิกพูน (รูปที่ 1.1d) ซึ่งมีการคิดค้นกรรมวิธีการผลิตวิธีใหม่และพัฒนาอย่างต่อเนื่อง นอกจากนี้ ก็ยังมีการนำวัสดุประเภทโลหะ มาผลิตเป็นวัสดุพูนสำหรับใช้ในงานที่ต้องการคุณสมบัติที่วัสดุประเภทอื่นไม่เหมาะกับการนำมาใช้งาน เช่น วัสดุเส้นใยและกระดาษจะใช้ในงานอุณหภูมิต่ำ วัสดุประเภทเซรามิกมีความเหมาะสม เป็นต้น

จากการทำการทดลองในห้องปฏิบัติการเบื้องต้น ณ ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่ และวัสดุ พบว่าวัสดุผสมระหว่างดีบุกและซิลิกอนคาร์ไบด์ใช้วิธีบดผสมเชิงกล เมื่อถูกกระตุ้นด้วยความร้อน มีการฟอร์มตัวของวิสเคอร์เกิดขึ้น จึงมีแนวความคิดที่จะนำกระบวนการที่พบนี้มาประยุกต์ใช้ในการผลิตวัสดุพูน โดยมีผงดีบุกเป็นเนื้อหลัก (matrix) และผงวัสดุผสมแทรกอยู่ระหว่างอนุภาค ขึ้นรูปชิ้นงานโดยใช้วิธีการทางโลหกรรมวัสดุผง อาศัยวิสเคอร์ที่เกิดขึ้นมาใช้ในการเพิ่มความพูน วัสดุพูนที่ผลิตได้จะมีสมบัติเด่นคือทนต่อการกัดกร่อน กรรมวิธีในการผลิตไม่ยุ่งยากเนื่องจากใช้อุณหภูมิต่ำและเป็นการเลือกใช้วัสดุที่มีอยู่ในประเทศ

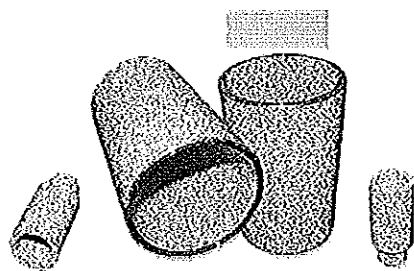
เนื่องจากไม่เคยมีการผลิตวัสดุพูน โดยวิธีนี้มาก่อน จึงใช้มาตรฐานอ้างอิงจากกรรมวิธีการผลิตบรอนซ์พูน (รูปที่ 1.1c) และเปรียบเทียบสมบัติที่ได้กับมาตรฐานของบรอนซ์พูนที่มีการผลิตในปัจจุบัน



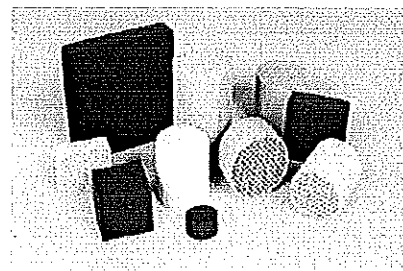
รูป a. ตัวกรองใยแก้ว-กระดาษ  
ที่มา : <http://www.china-shungwei.com>



รูป b. พลาสติกพรม  
ที่มา: <http://www.genpro.com>



รูป c. โลหะบรอนซ์พรม  
ที่มา : <http://www.tytlabs.co.jp>



รูป d. เซรามิกพรม  
ที่มา: <http://www.cys-pm.co.tw>

### รูปที่ 1.1 ตัวกรองอากาศที่ทำจากวัสดุพรมประเภทต่างๆ

## 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อศึกษากลไกการเกิดไวรัสเคอร์ติบูกภายใต้ภาวะต่างๆ
2. เพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่มีผลกระทบต่อสมบัติของวัสดุผสมคิบูกพรม
3. เพื่อศึกษาสมบัติการกรองของวัสดุผสมที่ผลิตได้เพื่อการใช้งานด้านการกรอง

## 1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถผลิตชิ้นงานวัสดุผสมคิบูกพรมใช้ได้เองในห้องปฏิบัติการ
2. รู้อิทธิพลของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อสมบัติของโลหะพรม
3. ได้พื้นฐานความรู้ที่จะนำไปประยุกต์ใช้ผลิตชิ้นส่วนโลหะพรมจากผงวัสดุผสมคิบูกกับวัสดุชนิดอื่น ๆ ต่อไป

#### 1.4 ขอบเขตของการวิจัย

การวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาการเกิดโครงสร้างพรุนของวัสดุผสม จากกลไกการเกิดวิสเคอร์ซีบุก โดยใช้เทคนิคการบดผสมโดยการบดผสมเชิงกล อัดขึ้นรูป (compacting) และอบเผือก (sintering) มีตัวแปร คือ สัดส่วนผสมของวัสดุผสมกับดีบุก ความดันขึ้นรูป อุณหภูมิอบเผือก และอิทธิพลของวิสเคอร์ซีบุก



## บทที่ 2

### ทฤษฎีและหลักการ

#### 2.1 ทฤษฎีและหลักการ

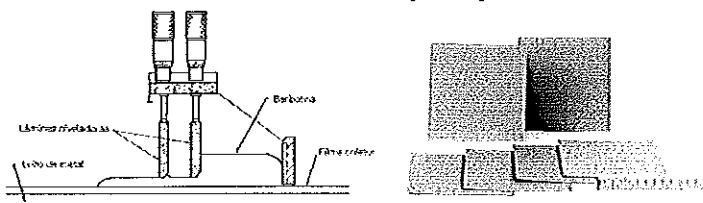
ในการเตรียมวัสดุผสมในงานวิจัยนี้อาศัยกระบวนการบดผสมเชิงกล เพื่อให้ได้ผงวัสดุผสมตามต้องการ ซึ่งกระบวนการบดผสมเชิงกลมีหลักการทำงานดังนี้

##### 2.1.1 กระบวนการบดผสมเชิงกล (mechanical alloying, MA)

กระบวนการบดผสมเชิงกลมีจุดเด่นคือ ผงโลหะที่ได้มีความเป็นเนื้อเดียวกัน มีการขยาย ตัวที่ดี ลดเวลาในการต้องขัดเกลาชิ้นงาน เป็นเทคนิคที่ใช้แก้ปัญหาของโลหะที่มีสถานะ บางส่วนเป็นของเหลว ซึ่งไม่สามารถผลิตโลหะที่มีความเป็นเนื้อเดียวกันได้ และช่วยลดความเสี่ยง อันตรายที่อาจจะเกิดขณะใช้งาน เนื่องจากเป็นกระบวนการของโลหะผสมที่อุณหภูมิต่ำ (cold alloying process) ซึ่งเครื่องมือบดมีหลายชนิดได้แก่ szegvari attritor mill, spex vibratory mill, large diameter ball mill สำหรับเครื่องมือบดผสมที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ เครื่องบดแพลนเนทรี (planetary mill)

##### 2.1.3 วิธีการผลิตโลหะพอรุน

วิธีการผลิตโลหะพอรุนทางด้านโลหะกรรมวัสดุผง สามารถทำได้หลายวิธี การฉีด ขึ้นรูป (injection molding) การหล่อเทป (tape casting) หรือ “doctor blade” (รูปที่ 2.1) เป็นเทคนิค การผลิตแผ่นเซรามิกบางซึ่งถูกนำมาใช้ทำแผ่นโลหะพอรุน เทปโลหะพอรุนนี้นำไปประยุกต์ใช้เป็น ตัวกรองหรือแผ่นฐานโลหะสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์แข็ง (SOFC) นอกจากนี้ยังมีการขึ้นรูป ด้วย sponge และ pore-former method ใช้ในการขึ้นรูปอะลูมินา สำหรับงานกรองน้ำ

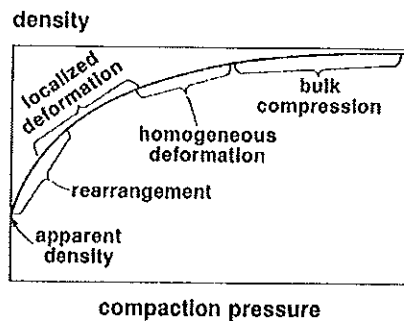


รูปที่ 2.1 การหล่อเทป (Tape Casting) ที่มา : <http://www.fz-juelich.de>

สำหรับวิธีการผลิตวัสดุพูนในงานงานวิจัยนี้ อาศัยวิธีการอัดขึ้นรูปและการอบ  
ผึ่ง

### 2.1.3.1 ทฤษฎีการอัดขึ้นรูป

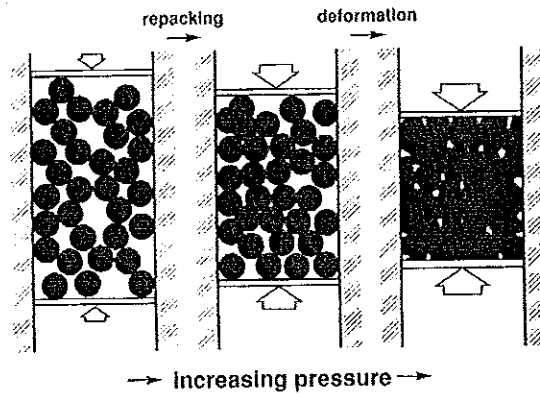
อัตราการแน่นตัวเริ่มต้นมีค่าสูงตามความดันที่ให้ เมื่อการเปลี่ยนรูปดำเนินต่อไป  
ความชันของเส้น โค้งความหนาแน่นต่อความดันลดลงซึ่งให้เห็นว่าอนุภาคเกิดความแข็งแรงแบบเวิร์ก  
ฮาร์ดเคนนิง ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ภาพสเก็ทซ์แสดงความสัมพันธ์ของความหนาแน่นกับความดันในการอัดแน่น  
แสดงขั้นตอนสำคัญและความสามารถในการอัดลดลงเมื่อความหนาแน่น  
เพิ่มขึ้น

ที่มา : นกิสพร, 2548

ภาพลำดับขั้นตอนการอัดแน่นผงวัสดุในรูปที่ 2.3 แสดงหลักเกณฑ์ในการนิยาม  
ขั้นตอนการอัดแน่น การอัดแน่นเริ่มต้นที่ความหนาแน่นประมาณเท่ากับความหนาแน่นปรากฏ มี  
ช่องว่างระหว่างอนุภาคปรากฏโดยทั่วไป เมื่อมีการเขย่าความหนาแน่นสูงสุดที่ได้คือความ  
หนาแน่นเกาะ ผงที่อยู่ในสภาวะหลอมยังคงมีช่องว่างอยู่ ไม่มีความแข็งแรง และจำนวนโคออร์ดิ  
เนชัน (CN) หรือจำนวนอนุภาคที่สัมผัสอยู่รอบอนุภาคหนึ่งๆ มีค่าต่ำ เมื่อเริ่มให้ความดันการตอบ  
รับแรกสุดคือการจัดเรียงตัวใหม่ของอนุภาค โดยอนุภาคมีการเติมในรูพรุนขนาดใหญ่ก่อนส่งผลให้  
จำนวนการสัมผัสกับอนุภาครอบข้างสูงขึ้น ซึ่งมีความคล้ายคลึงกับการเขย่าหรือสั่นผง การจัดเรียง  
ตัวใหม่ให้ผลดีเมื่อพื้นผิวของอนุภาคเรียบและแข็ง



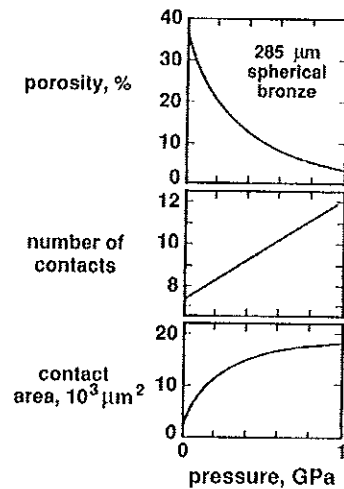
รูปที่ 2.3 ภาพแสดงขั้นตอนการอัดผงโลหะ เริ่มต้นมีการจัดเรียงตัวโดยลคบรีดจี้ระหว่างอนุภาค เมื่อแรงอัดสูงขึ้นการแน่นตัวเกิดจากการเสียรูปของอนุภาค

ที่มา : นภิสพร, 2548

การเพิ่มความดันทำให้การจัดเรียงตัวของอนุภาคดีขึ้นและนำไปสู่การลดลงของความพรุน โดยการฟอร์มตัวของจุดสัมผัสใหม่ระหว่างอนุภาค แสดงด้วยข้อมูลในรูปที่ 2.4 ซึ่งเป็นกราฟของอนุภาคบรอนซ์ทรงกลมที่แสดงค่าความพรุนลดลงเมื่อจำนวนการสัมผัสและพื้นที่ที่สัมผัสระหว่างอนุภาคเพิ่มขึ้น ที่จุดสัมผัสต่างๆ เริ่มมีการเปลี่ยนรูปแบบยึดหยุ่น และที่ทุกจุดสัมผัสในวัฏจักรของการอัดแน่นมีการเก็บพลังงานยึดหยุ่นค้างไว้ในชิ้นงาน ความดันสูงทำให้ความหนาแน่นเพิ่มขึ้น โดยการขยายบริเวณสัมผัสผ่านการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก ดังนั้นความดันทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปจำกัดเฉพาะในส่วนสัมผัส ส่งผลให้เกิดความเค้นจากการเปลี่ยนโครงสร้าง (เกิดความเครียด) หรือเวิร์กฮาร์ดเคนนิง และยอมให้จุดสัมผัสใหม่ฟอร์มตัวขึ้นที่ช่องว่างระหว่างอนุภาคที่ยุบตัวลง (collapse) บริเวณสัมผัสระหว่างอนุภาคปรากฏเป็นลักษณะแบนราบจากที่มีรูปโค้งตามเส้นรอบวง ความหนาแน่นกรีน ( $\rho$ ) และเส้นผ่านศูนย์กลางของส่วนโค้ง ( $X$ ) มีความสัมพันธ์กันดังนี้

$$x = D \left[ 1 - (\rho_0 / \rho)^{2/3} \right]^{1/2} \quad (2.1)$$

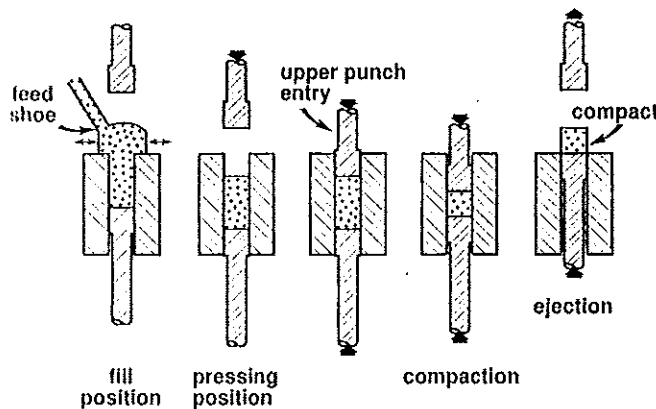
เมื่อ  $D$  เป็นขนาดอนุภาค และ  $\rho_0$  เป็นความหนาแน่นเริ่มต้นที่สอดคล้องกับค่า  $X = 0$  ความแข็งแรงของพันธะระหว่างอะตอมขึ้นกับปริมาณแรงเฉือนที่จุดสัมผัสระหว่างอนุภาค แรงเฉือนสูงสุดเกิดขึ้นตรงกลางของจุดสัมผัสระหว่างอนุภาคส่งผลให้มีการพัฒนาความแข็งแรงเพิ่มขึ้นในชิ้นงาน ความแข็งแรงหลังการอัดและก่อนการอบผิวก เรียกว่าหรือความแข็งแรงกรีน (green strength)



รูปที่ 2.4 การอัดแน่นผ่านแม่พิมพ์ของผงบรอนซ์ทรงกลม แสดงการเปลี่ยนแปลง ความพรุน จำนวนอนุภาคที่สัมผัสและพื้นที่สัมผัสเมื่อแรงอัดเพิ่มขึ้น  
ที่มา : นภิสพร, 2548

2.1.3.2 การอัดขึ้นรูปการอัดในแนวแกนเดียว (uniaxial compaction) ลำดับ ขั้นตอนการเคลื่อนที่ของเครื่องมือขณะอัดแน่นแสดงในรูปที่ 2.5 โดยเริ่มต้นจากบรรจุผงโลหะลงในแม่พิมพ์และอัดผ่านพินซ์ (punch) ซึ่งอาจเป็นพินซ์ตัวเดียว (ส่วนใหญ่เป็นตัวบน) หรือพินซ์ทั้งสองตัวคือทั้งตัวบน (upper punch) และตัวล่าง (lower punch) ทำให้เกิดแรงดันด้านข้าง ก่อนที่จะเทผงโลหะลงในแม่พิมพ์จะต้องเลื่อนพินซ์ตัวบนออกมาด้านนอกก่อน ส่วนพินซ์ตัวล่างอยู่ในตำแหน่งที่เรียกว่าตำแหน่งเดิมในแม่พิมพ์ ถ้ามีการคำนวณปริมาณของผงโลหะจากความสูงของช่องว่างในแม่พิมพ์และความหนาแน่นปรากฏของผงจะทำให้ทราบปริมาณที่จะเติมลงในแม่พิมพ์ ผงโลหะถูกบรรจุลงแม่พิมพ์โดยอุปกรณ์สำหรับเติมผง (feed shoe) อาจผ่านกระบวนการสั่นและเขย่าลงสู่แม่พิมพ์ ตำแหน่งสำหรับเติมผงของพินซ์ตัวล่างแตกต่างจากตำแหน่งที่ใช้ในขณะอัดเพื่อทำให้การอัดผงเข้าสู่ตรงกลางของแม่พิมพ์ ตำแหน่งของพินซ์ตัวล่างสามารถปรับเปลี่ยนได้เพื่อให้เกิดความสม่ำเสมอของผงทั่วทั้งชิ้น หลังการเติมผงโลหะแล้ว เลื่อนพินซ์ตัวล่างให้อยู่ในตำแหน่งที่จะอัดและเลื่อนพินซ์ตัวบนเข้าสู่แม่พิมพ์ การเพิ่มความดันให้กับผงโลหะอาจเลื่อนทั้งพินซ์ตัวบนและตัวล่างเข้าหากัน หรือเลื่อนเฉพาะพินซ์ตัวบนเพียงตัวเดียวในขณะที่พินซ์ตัวล่างอยู่กับที่ขั้นตอนสุดท้ายของการอัดแน่นผงวัสดุมีความดันสูงสุดและเมื่ออัดเสร็จพินซ์ตัวบนถูกเลื่อนออกไปใช้พินซ์ตัวล่างเป็นตัวคั่นเอาชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ และเริ่มวัฏจักรการอัดใหม่โดยการเติมผงโลหะลงในแม่พิมพ์ ถึงแม้ว่าการเคลื่อนที่ของพินซ์ตัวบนและตัวล่างในรูปที่ 2.5 จะดูไม่ยุ่งยาก แต่ในการ

ทำงานจริงขั้นตอนการออกแบบแต่ละชิ้นส่วนมีความซับซ้อนมาก โดยปกตินิยมใช้แท่งแกนกลาง (core rod) เป็นตัวบอกตำแหน่งของพื้นที่ด้านในหรือทำรูไว้ในงาน โดยทั่วไปปัญหาเรื่องการสึกหรอของแม่พิมพ์เกิดขึ้นเมื่อต้องใช้แรงในการอัดสูง และสามารถควบคุมได้ด้วยการเติมสารหล่อลื่นผสมลงในผงวัสดุ เครื่องมือที่ใช้ส่วนใหญ่ทำจากเหล็กกล้าเครื่องมือ หรือซีเมนต์คาร์ไบด์เพื่อให้มีอายุการใช้งานนาน

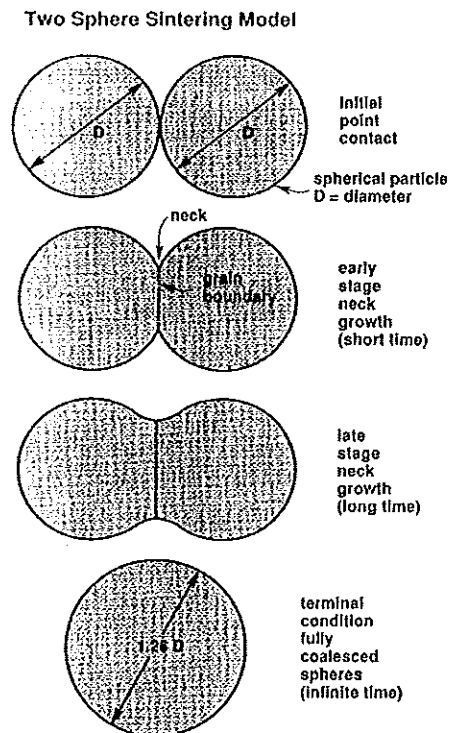


รูปที่ 2.5 ลำดับขั้นตอนการเคลื่อนที่ของเครื่องมือในวัฏจักรการอัดแน่นผง  
ที่มา : นภิสพร, 2548

## 2.2 ทฤษฎีการอบผนึก (Sintering theory)

### 2.2.1 แนวคิดพื้นฐาน (Basic concept)

พิจารณาบริเวณจุดสัมผัสของอนุภาคทรงกลมสองอนุภาคในรูปที่ 2.6 (ภาพบนสุด) โดยทั่วไปในการอัดแน่นผงอนุภาคแต่ละอนุภาคมีบริเวณสัมผัสหลายกับอนุภาคอื่นได้หลายบริเวณ พื้นที่ระหว่างอนุภาคที่บริเวณสัมผัสขยายโตขึ้นและรวมตัวกัน (merge) เมื่อการอบผนึกดำเนินไปอย่างต่อเนื่อง ที่แต่ละจุดสัมผัสของอนุภาคเกิดเป็นขอบเกรนโตขึ้นมาแทนที่บริเวณรอยต่อระหว่างเฟสของแข็งและไอ (solid-vapor interface) ดังรูปที่ 2.6 การอบผนึกเป็นเวลานานทำให้อนุภาคสองอนุภาครวมเป็นหนึ่งอนุภาคขนาดใหญ่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเป็น 1.26 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคเมื่อเริ่มต้น



รูปที่ 2.6 แบบจำลองการอบผนึกอนุภาคทรงกลมสองอนุภาคที่พัฒนาพันธะระหว่างอนุภาคเริ่มต้นจากจุดสัมผัส การเพิ่มขนาดของคอคอคสร้างขอบเกรนที่รอยต่อระหว่างอนุภาค และในที่สุดรวมเป็นหนึ่งอนุภาคใหญ่

ที่มา : นกิสพร, 2548

ขั้นตอนการอบผนึกเริ่มต้นจากขั้นตอนแรก (initial stage) ที่คอคอคระหว่างอนุภาคมีการเพิ่มขนาดอย่างรวดเร็ว ขั้นตอนต่อมาเรียกว่าขั้นตอนกลาง (intermediate stage) โครงสร้างรูพรุนราบเรียบขึ้นและมีการเชื่อมต่อกันของรูพรุนเป็นลักษณะทรงกระบอก (cylindrical nature) ขณะที่สมบัติของชิ้นงานมีการพัฒนา ในช่วงท้ายของขั้นตอนกลางเกิดการโตของเกรน (grain growth) ส่งผลให้เกรนมีขนาดใหญ่ขึ้นและจำนวนเกรนลดน้อยลง กรณีนี้เกิดขึ้นพร้อมกับการแยกตัวออกไปอยู่โคคเดี่ยวของรูพรุนและอัตราการอบผนึกช้าลง

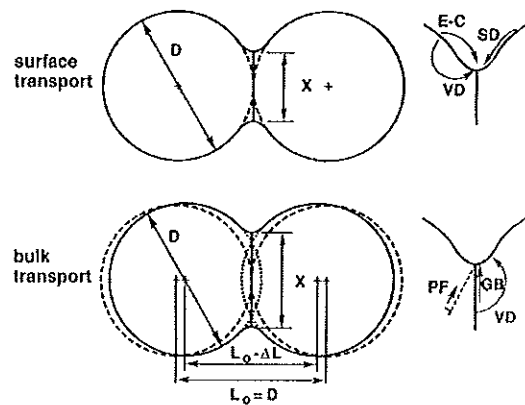
เมื่อความพรุนหดตัวลงประมาณ 8% (หรือความหนาแน่นทางทฤษฎี 92%) ทำให้โครงข่ายรูพรุนเปิดไม่เสถียร จากรูปลักษณะโครงข่ายของรูพรุน ณ จุดนี้ทำให้รูพรุนรูปทรงกระบอกยุบตัวลง (collapse) กลายเป็นทรงกลม ซึ่งไม่มีประสิทธิภาพในการทำให้เกรนโตช้าลง การที่เห็นรูพรุนเดี่ยวปรากฏขึ้นแสดงว่าขั้นตอนการอบผนึกมาถึงขั้นตอนสุดท้ายแล้ว ขณะเดียวกันอัตราการแน่นตัวช้าลง ก๊าซที่ค้างอยู่ในรูพรุนเป็นตัวกำหนดความหนาแน่นสุดท้ายของชิ้นงาน

ดังนั้นการอบผนึกในสุญญากาศจึงทำให้ได้ความหนาแน่นสูงขึ้นตราบเท่าที่โลหะยังไม่เกิดการระเหย

กลไกการเคลื่อนที่เป็นตัวกำหนดการไหลของมวลที่เกิดขึ้นตามแรงขับ กลไกการเคลื่อนที่แบ่งเป็นสองประเภทคือ การเคลื่อนที่ตามพื้นผิว (surface transport) และการเคลื่อนที่แบบมวลรวม (bulk transport) ทั้งสองกลไกประกอบด้วยกลไกระดับอะตอมที่สนับสนุนให้เกิดการไหลของมวล ดังแสดงด้วยอนุภาคทรงกลมสองอนุภาคในรูปที่ 2.7

การเคลื่อนที่ตามพื้นผิวเกี่ยวข้องกับ การเพิ่มขนาดของคอคอด โดยปราศจากการเปลี่ยนแปลงระยะต่างๆ ภายในอนุภาค (นั่นคือ ไม่มีการหดตัวและไม่มีการแน่นตัวเกิดขึ้น) ทั้งนี้เนื่องจากการไหลของมวลเริ่มต้นและสิ้นสุดที่พื้นผิวของอนุภาค ในขณะที่อบผนึกที่ควบคุม โดยการเคลื่อนที่ตามพื้นผิวมีกระบวนการสำคัญสองกระบวนการที่เกิดขึ้นขณะอบผนึกคือการแพร่ตามพื้นผิวและการระเหย-การควบแน่น การแพร่ตามพื้นผิวมีความสำคัญในการอบผนึกโลหะหลายชนิดที่อุณหภูมิต่ำ รวมทั้งการอบผนึกเหล็กด้วย ส่วนการระเหย-การควบแน่นไม่เกิดที่อุณหภูมิต่ำ แต่มีความสำคัญต่อการอบผนึกโลหะที่มีความเสถียรต่ำ เช่น ตะกั่ว

ในทางตรงข้ามการอบผนึกที่ควบคุม โดยการเคลื่อนที่มวลรวมทำให้เกิดการหดตัวมวลเริ่มต้นเคลื่อนที่จากภายในอนุภาคและสิ้นสุดที่คอคอด กลไกการเคลื่อนที่แบบมวลรวมคือการแพร่ในเนื้อวัสดุ การแพร่ตามขอบเกรน การไหลแบบพลาสติก และการไหลแบบหนืด สำหรับการไหลแบบพลาสติกมีความสำคัญที่สุดในช่วงเริ่มให้ความร้อน โดยเฉพาะผงที่ผ่านการอัดทำให้มีความหนาแน่นของดิสโคเคชันสูง โดยทั่วไปความเค้นของแรงดึงผิวไม่เพียงพอที่จะสร้างดิสโคเคชันขึ้นมาใหม่ ดังนั้นเมื่อดิสโคเคชันถูกอบอ่อน (จากการให้ความร้อน) ให้เลื่อนออกจากผกอนุภาค บทบาทของการไหลแบบพลาสติกจึงลดลง ในทางตรงข้ามสำหรับวัสดุออสเทนไนต์ เช่น แก้วและพลาสติก การอบผนึกโดยการไหลแบบหนืดที่อัตราการรวมตัวกันของอนุภาคขึ้นกับขนาดของอนุภาคและความหนืดของวัสดุ โลหะสามารถอบผนึกโดยการไหลแบบหนืดได้เช่นกันถ้ามีเฟสของเหลวเกิดขึ้นตามขอบเกรน การแพร่ตามขอบเกรนมีความสำคัญบ้างสำหรับการแน่นตัวในวัสดุที่เป็นผลึก และมีความสำคัญมากในการแน่นตัวของโลหะทั่วไป ทั้งกระบวนการเคลื่อนที่ตามพื้นผิวและการเคลื่อนที่มวลรวมทำให้คอคอดมีการเพิ่มขนาด แต่ความแตกต่างที่สำคัญอยู่ที่ความหนาแน่น (หรือการหดตัว) ระหว่างการอบผนึก โดยทั่วไปกระบวนการเคลื่อนที่แบบมวลรวมมีความสำคัญมากขึ้นที่อุณหภูมิสูงขึ้น



รูปที่ 2.7 แบบจำลองกลไกการอบผืนิกทั้งสองประเภทในอนุภาคทรงกลม กลไกการเคลื่อนที่ตามพื้นผิวใช้สำหรับการเพิ่มขนาดของคอคอด โดยมวลเคลื่อนที่จากแหล่งกำเนิดที่พื้นผิว (E-C = การระเหย-การควบแน่น SD = การแพร่ตามพื้นผิว VD = การแพร่ในเนื้อวัสดุ) การเคลื่อนที่มวลรวมมีการเพิ่มขนาดของคอคอดโดยแหล่งมวลจากข้างใน (PF = การไหลแบบพลาสติก GB = การแพร่ตามขอบเกรน VD = การแพร่ในเนื้อวัสดุ) ดังนั้นเฉพาะกลไกการเคลื่อนที่มวลรวมเท่านั้นทำให้เกิดการหดตัวของอนุภาค

ที่มา : นกิสพร, 2548

### 2.2.2 ขั้นตอนแรก (initial stage)

ค่าความแตกต่างของความดันไอ (vapor pressure) ยอมรับให้มีการประมาณค่าได้รวมทั้งความเข้มข้นของช่องว่างในผลึก (vacancy concentration) และความเค้นโดยรวมของการอบผืนิก ตัวอย่างเช่น ความดันไอที่บริเวณคอคอดมีค่าต่ำกว่าที่ภาวะสมดุลเพราะบริเวณคอคอดมีความโค้งสูงเป็นความโค้งเว้า อย่างไรก็ตามมวลรวมของผงจะปล่อยไอออกมาที่ความดันสูงกว่าสมดุลเพราะมวลของผงมีความโค้งนูน ดังนั้นจึงมีมวลสุทธิไหลเข้าสู่บริเวณคอคอด

การเปลี่ยนแปลงขนาดของชิ้นงานมีประโยชน์สำหรับกระบวนการที่ต้องทำการอบผืนิกเพราะช่วยให้ไม่ต้องวัดขนาดของคอคอดแต่ละอันเพื่อหาปริมาณการหดตัว โดยทั่วไปชิ้นงานทางด้าน P/M มองการหดตัวออกเป็นสองลักษณะ คือลักษณะแรกเป็นชิ้นงานที่ต้องการความแม่นยำสูง ดังนั้นผู้ผลิตที่ต้องการความแม่นยำของชิ้นส่วนสูงมักไม่ต้องการให้เกิดการหดตัวในชิ้นงาน ถ้าหลีกเลี่ยงการหดตัวได้ชิ้นงานจะมีความแม่นยำสูง การออกแบบเครื่องมือสำหรับชิ้นงานที่มีการหดตัวต้องให้มีการเผื่อขนาดของชิ้นงานไว้เพื่อให้ได้ขนาดสุดท้ายหลังการอบผืนิกอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ซึ่งอาจทำให้เกิดความยุ่งยากในกระบวนการผลิต ถ้าชิ้นงานมีความหนาแน่นต่างกันส่งผลให้มีการหดตัวต่างกันระหว่างการอบผืนิกด้วย ดังนั้นการอบผืนิกชิ้นงานที่อุณหภูมิสูงอาจทำให้ชิ้นงานเกิดการบิดเบี้ยว (warping) การอบผืนิกเป็นเวลาสั้นผนวกกับการใช้อุณหภูมิต่ำใน



การอบผนึกโดยใช้แรงอัดสูงส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนขนาดน้อยที่สุด ลักษณะที่สองเป็นชิ้นงานที่ต้องการความหนาแน่นสูง ในวัสดุบางอย่างต้องการความหนาแน่นสูงเพื่อนำไปใช้งาน ได้จึงต้องยอมให้มีการหดตัวระหว่างการอบผนึกได้ ดังนั้นการหดตัวเป็นสิ่งที่ต้องการหรือต้องหลีกเลี่ยงขึ้นอยู่กับวัสดุ ความยากง่ายในการอัด และสมบัติที่ต้องการ

### 2.2.3 ขั้นตอนกลาง (intermediate stage)

ความสำคัญของขั้นตอนกลางคือการกำหนดสมบัติของชิ้นงานหลังการอบผนึก ลักษณะเด่นที่เกิดขึ้นในขั้นตอนนี้คือความโค้งมนของรูพรุน (pore rounding) การแน่นตัวและการโตของเกรน

อัตราการแน่นตัวขึ้นอยู่กับการแพร่ของช่องว่างในผลึกออกจากรูพรุน ดังนั้นอัตราการแน่นตัว  $dp/dt$  เป็นดังนี้

$$dp/dt = JAN\Omega \quad (2.2)$$

เมื่อ  $J$  คือฟลักซ์ของการแพร่ (หรือจำนวนอะตอมต่อหน่วยเวลาต่อหน่วยพื้นที่)  $A$  คือพื้นที่ที่มีการแพร่ผ่าน  $\Omega$  คือปริมาตรอะตอม และ  $N$  คือจำนวนรูพรุนต่อหน่วยปริมาตร สมมติให้กระบวนการกำจัดรูพรุนเป็นการแพร่ในเนื้อวัสดุ โดยให้ขอบเกรนเป็นแหล่งรวมช่องว่างในผลึก (และช่องว่างในผลึกถูกทำลายที่นั่น)

การอบผนึกเป็นเวลานานทำให้มีการเปลี่ยนแปลงสมบัติหรือความหนาแน่นของชิ้นงานอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งอัตราการแพร่ การโตของเกรน และการเคลื่อนที่ของรูพรุนต่างเป็นกระบวนการที่กระตุ้นได้ด้วยความร้อน วัสดุส่วนใหญ่อัตราเหล่านี้ยังขึ้นอยู่กับรูปร่างและลักษณะเฉพาะ (เช่น ขนาดเกรน ขนาดรูพรุน และระยะห่างระหว่างรูพรุน) เนื่องจากโครงสร้างจุลภาคมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาขณะอบผนึก ดังนั้นอุณหภูมิจึงมีผลกระทบที่ซับซ้อนต่อกระบวนการอบผนึก

### 2.2.4 ขั้นตอนสุดท้าย (final stage)

การอบผนึกในขั้นตอนนี้สุดท้ายเป็นกระบวนการที่ช้า เพราะรูพรุนทรงกลมที่แยกจากกันเกิดการหดตัวด้วยกลไกการแพร่แบบมวลรวม รูพรุนแยกกันอยู่ตามมุมของเกรน ทำให้สมดุลระหว่างพลังงานขอบเกรนและพลังงานพื้นผิวของเฟสแข็ง-ไอเกิดร่องเรียกว่ามุมสองหน้า (dihedral angle) รูพรุนที่อยู่ตามขอบเกรนจะมีรูปร่างมุมสองด้านเหมือนเลนส์มุมสองอันประกบ

กัน เมื่อรูพรุนแยกตัวออกจากขอบเกรนจะมีรูปร่างเป็นทรงกลม ด้วยเหตุนี้รูพรุนจึงมีรูปร่างแปรตามบริเวณที่อยู่ รูพรุนที่ไม่อยู่ติดกับขอบเกรนมีลักษณะทรงกลม รูพรุนที่อยู่ตามขอบเกรนมีลักษณะแบนสองด้าน และรูพรุนที่อยู่ตามมุมเกรนมีลักษณะมน หลายเหลี่ยม ดังนั้นรูพรุนต้องแพร่ช่องว่างในผลึกให้ห่างจากขอบเกรนเพื่อทำให้เกิดการหดตัวอย่างต่อเนื่องซึ่งเป็นกระบวนการที่ช้ามาก ถ้าให้ความร้อนต่อไปรูพรุนเกิดการรวมตัวกันส่งผลให้ขนาดเฉลี่ยของรูพรุน โตขึ้นและจำนวนรูพรุนลดลง ความแตกต่างระหว่างความโค้งของรูพรุนต่างๆ นำไปสู่การโตของรูพรุนขนาดใหญ่ และสูญเสียรูพรุนขนาดเล็กซึ่งเป็นรูพรุนที่มีความเสถียรน้อยกว่า เรียกเหตุการณ์นี้ว่าปรากฏการณ์ออสท์วาลด์ (ostwald ripening) ถ้าภายในรูพรุนมีก๊าซติดค้างอยู่ความสามารถในการละลายก๊าซในเมทริกซ์ส่งผลกระทบต่ออัตราการกำจัดรูพรุน ดังนั้นจึงต้องกำจัดรูพรุนในขั้นตอนสุดท้าย เพราะการโตของรูพรุนทำให้ความหนาแน่นลดลงและส่งผลให้การอบผนึกในขั้นตอนสุดท้ายนานขึ้น

อัตราการกำจัดรูพรุนในขั้นตอนสุดท้ายเกี่ยวกับผลกระทบที่สำคัญสองอย่างคือพลังงานพื้นผิว ( $\gamma$ ) และความดันก๊าซในรูพรุน ( $P_g$ ) สมการอัตราการแน่นตัวที่เหมาะสมเป็นดังนี้

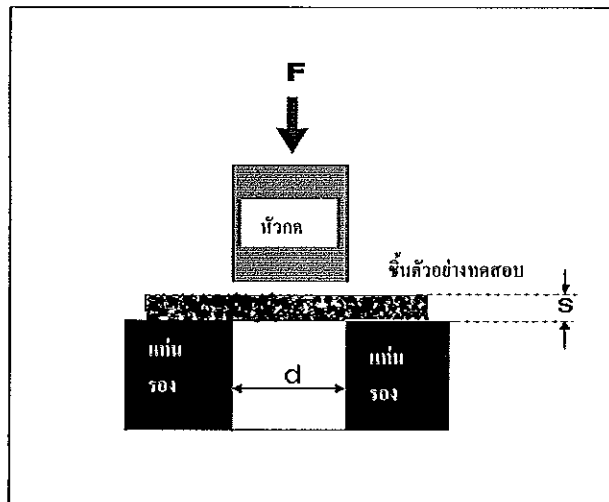
$$\frac{d\rho}{dt} = \frac{12D_v\Omega}{kTG^3} \left( \frac{2\gamma}{r} - P_g \right) \quad (2.3)$$

เมื่อ  $\rho$  เป็นความหนาแน่น  $t$  เป็นเวลา  $\Omega$  เป็นปริมาตรอะตอม  $D_v$  เป็นสภาพแพร่ในเนื้อวัสดุ  $k$  เป็นค่าคงที่ของโบลท์แมนน์  $T$  เป็นอุณหภูมิสัมบูรณ์  $G$  เป็นขนาดเกรน  $\gamma$  เป็นพลังงานพื้นผิวเฟสของแข็ง-ไอ  $r$  เป็นรัศมีรูพรุน และ  $P_g$  เป็นความดันก๊าซในรูพรุน จากสมการแสดงให้เห็นว่าเมื่อก๊าซถูกขังอยู่ในรูพรุนอัตราการแน่นตัวจะลดลงเข้าสู่ศูนย์ก่อนที่รูพรุนทั้งหมดถูกกำจัดออก ดังนั้นการอบผนึกในสุญญากาศเท่านั้นจึงได้ความหนาแน่นสูงสุด

## 2.3 การทดสอบสมบัติของตัวกรองวัสดุผสม

### 2.3.1 การทดสอบความแข็งแรงเฉือน (Shear strength test)

รูปแบบการทดสอบความแข็งแรงของวัสดุกรอง ตามมาตรฐานของ DIN 30911 part 6 วิธีการทดสอบความแข็งแรงเฉือนเป็นวิธีการที่เหมาะสมที่จะนำมาเป็นข้อมูลเกี่ยวกับสมบัติความแข็งแรงของวัสดุ เนื่องจากการทดสอบแรงดึงมีความยุ่งยากในการวัดมากกว่า และผลที่ได้ไม่เพียงพอที่จะนำมาคำนวณได้ภายใต้เงื่อนไขการกระทำนี้ โดยการทดสอบแรงเฉือนจะเป็นไปในลักษณะการกระแทกผ่านช่องว่าง (hole) รูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 การทดสอบแรงเฉือน (shear strength test)

สมการทดสอบหาความแข็งแรงเฉือน

$$\tau = \frac{F}{\pi \cdot d \cdot S} \quad (2.4)$$

$$\tau = \text{ความแข็งแรงเฉือน} \left( \frac{N}{mm^2} \right)$$

$$F = \text{แรงกระทำ} (N)$$

$$S = \text{ความหนาของชิ้นตัวอย่าง} (mm)$$

$$d = \text{ขนาดของชิ้นตัวอย่าง} (mm)$$

### 2.3.2 การทดสอบฟองอากาศ (bubble point test)

รูปแบบของการทดสอบนี้ ตีพิมพ์ในมาตรฐาน DIN ISO 4003 การทดสอบฟองอากาศนี้สามารถใช้น้ำฟองอากาศในน้ำแทนฟองอากาศจริง เพื่อหาขนาดของรูพรุนขนาดใหญ่ที่สุด โดยนำชิ้นงานทดสอบไปแช่ในของเหลวทดสอบที่มีค่าความตึงผิวต่ำ (ปกติจะใช้ isopropanol เป็นของเหลวทดสอบ: wetting agent) ตามกระบวนการนี้ ความดันอากาศจะปล่อยให้ฟองอากาศเข้าด้านหนึ่งและอีกด้านบรรจุชิ้นตัวอย่าง เมื่อเพิ่มความดันจนกระทั่งฟองอากาศแรกเกิดขึ้น (รูปที่ 2.9) ความดันที่ให้ขณะนั้น เรียกว่า ความดัน "bubble point" ซึ่งสามารถคำนวณหาค่า "ขนาดรูพรุนปรากฏ" ได้ (apparent pore diameter) ด้วยสมการ

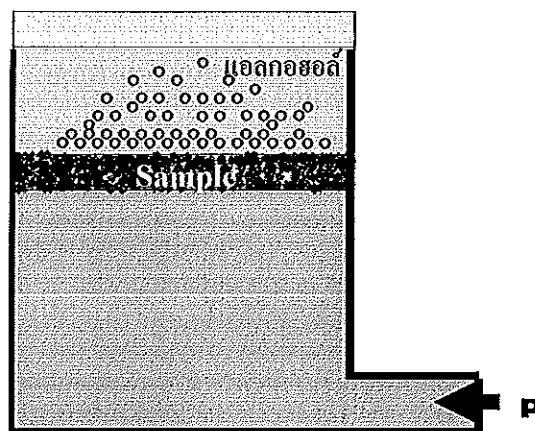
$$d_x = \frac{4 \cdot \delta \cdot \cos \varphi}{\Delta p} \quad (2.5)$$

$d_x$  = ขนาดของรูพรุนปรากฏ (m)

$\delta$  = แรงตึงผิว (N/m)

$\cos \varphi$  = มุมการเปียก (wetting angle)

$\Delta p_x$  = ความดันที่ตัวกรองได้รับ (Pa)



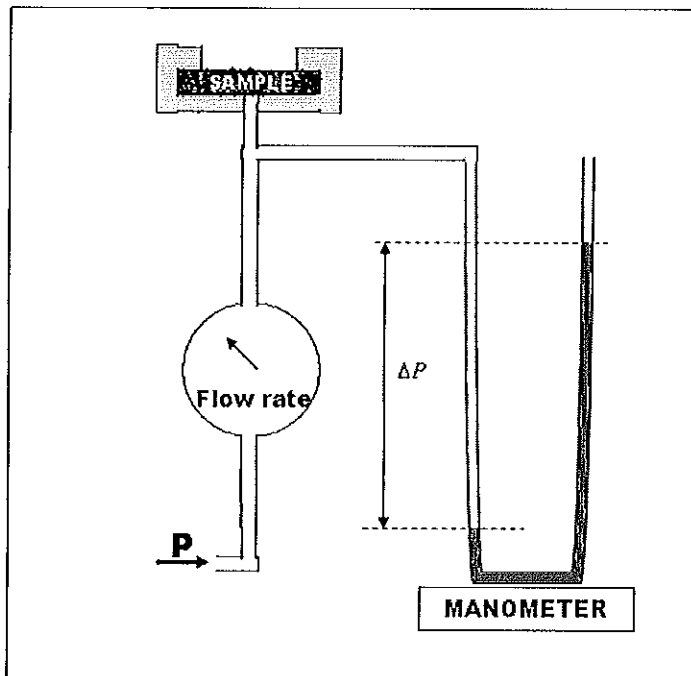
รูปที่ 2.9 การทดสอบฟองอากาศ bubble point test

### 2.3.3 การทดสอบความสามารถในการซึมผ่านของอากาศ (permeability coefficient test)

รูปแบบของการทดสอบนี้ ตีพิมพ์ในมาตรฐาน DIN ISO 4002 โดยใช้ wetting agent: isopropanol ตามหน้าที่การใช้งานของตัวกรอง ตรวจสอบความแข็งแรง แล้วการหาประสิทธิภาพของอัตราการไหล (ตามรูปที่ 2.10) ซึ่งขึ้นกับความแตกต่างของความดันและเพิ่มขึ้นไปจนอาจมีค่าเป็นอนันต์ สำหรับการวัดความสามารถการซึมผ่านโดยมากใช้อากาศ ซึ่งแสดงออกมาได้ค่อนข้างง่าย โดยวัดความแตกต่างของความดันที่ลดลง (pressure drop) และอัตราการไหลของอากาศที่ความดันและอุณหภูมิคงที่ โดยใช้ Darcy's equation

$$\frac{\Delta P}{e} = \frac{Q \cdot \eta}{A \psi_v} \quad (2.6)$$

เมื่อ	$\Delta P$	คือ ความดันที่ลดลง (Pa)
	$e$	คือ ความหนาของชั้นทดสอบ (m)
	$A$	คือ พื้นที่หน้าตัดของชั้นทดสอบ ( $m^2$ )
	$\eta$	คือ ความหนืดพลศาสตร์ของไหลทดสอบ (kg/m.s)
	$Q$	คือ อัตราการไหลของของไหล ( $m^3/s$ ) เท่ากับอัตราการไหลโดยมวลของของไหลหารด้วยความหนาแน่น ( $\rho$ ) ของของไหล
	$\psi_v$	คือ สัมประสิทธิ์การซึมผ่าน ( $m^2$ )



รูปที่ 2.10 การทดสอบความสามารถในการให้ของไหลซึมผ่าน

(Permeability coefficient test)

2.3.4 ขนาดรูพรุนเฉลี่ย (average poresize diameter) ค่าขนาดเฉลี่ยเป็นขนาดเสมือนกำหนดไว้เพื่ออธิบายถึงวัสดุตัวกรองใดๆ ให้ชัดเจนขึ้น โดยกำหนดขนาดของรูพรุนให้เป็นหลอดรูปทรงกระบอกซึ่งสามารถลดความดันลงได้เหมือนกับวัสดุตัวกรอง ในกรณีนี้ความยาวของหลอดจะสอดคล้องกับความหนาของวัสดุตัวกรองซึ่งคำนวณหาได้จากสมการที่ 2.6

$$d_{Le} = \sqrt{\frac{32eQ\eta}{A \cdot \Delta P \cdot \varepsilon}} \quad (2.7)$$

เมื่อ	$d_{Le}$	คือ ขนาดรูพรุนเฉลี่ย (m)
	$\eta$	คือ ความหนืดพลวัตของของไหลที่ใช้ทดสอบ (kg/m.s), (Pa.s)
	$e$	คือ ความหนาของตัวกรอง หรือความยาวของหลอด (m)
	$Q$	คือ อัตราการไหลของของไหล ( $m^3/s$ )
	$\Delta P$	คือ ความดันที่ลดลง (Pa)
	$A$	คือ พื้นที่ผิวตัวกรอง ( $m^2$ )
	$\varepsilon$	คือ ความพรุน (%) ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 2.7

$$\varepsilon = \frac{\rho_{solid} - \rho_{porous}}{\rho_{solid}} \times 100\% \quad (2.8)$$

## 2.4 การตรวจเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.4.1 ที่มาของการศึกษาการเกิดขึ้นของวิสเคอร์ดีบุก

มีการศึกษาการเกิดขึ้นของวิสเคอร์ดีบุกอย่างต่อเนื่องตั้งแต่ปี 1946 ซึ่งพบปัญหาของเครื่องมือในห้องปฏิบัติการว่ามีสาเหตุมาจากวิสเคอร์ดีบุกซึ่งเกิดจากโลหะบัดกรีทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้าเกิดลัดวงจร ซึ่งเป็นปัญหาสำคัญในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์และส่งผลกระทบต่อวงการเนื่องจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มีการใช้งานในทุวงการ ยกตัวอย่างดังที่แสดงในตาราง 2.1

ตารางที่ 2.1 ผลกระทบของวิสเคอร์ที่เกิดกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในวงการต่างๆ (Brusse และคณะ 2002)

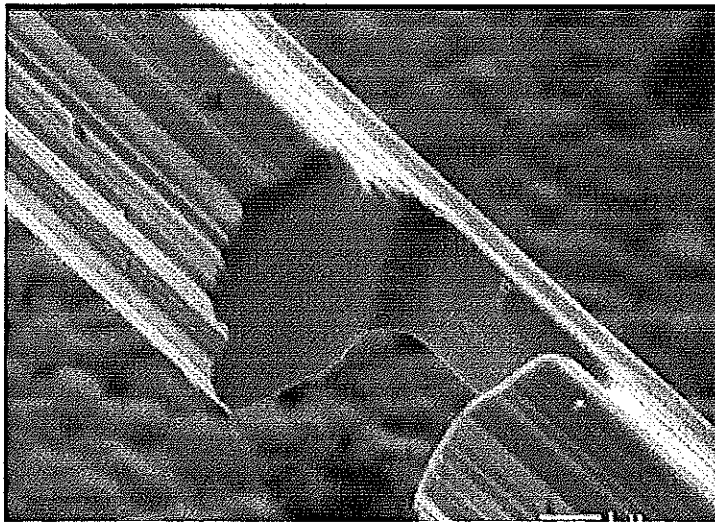
การใช้งาน	ผลกระทบ
การแพทย์: 1 เครื่องปั๊มหัวใจ (heart pacemaker)	ทำให้เกิดการลัดวงจร กระแสที่ส่งออกมาไม่เต็มที่
การทหาร: 1 เรดาร์รุ่น F-15 (F-15 Radar) 2 U.S. Missile Program 3 Phoenix Air to Air Missile	ทำความเสียหายกับวงจรขนาดจุลภาค (microcircuit)

นอกจากนี้เมื่อวันที่ 1 ก.ค. 2006 ทางสหภาพยุโรป (European Union) ร่วมกับ RoHS ประกาศเลิกใช้ตะกั่วในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ตามนโยบายเพื่อสิ่งแวดล้อม

Abtew และ Selvaduray (2000) ได้ศึกษาเกี่ยวกับโลหะบัดกรีชนิดไร้ตะกั่ว สำหรับการใช้งานในไมโครอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งในโลหะบัดกรีส่วนใหญ่มักจะมีดีบุกเป็นส่วนประกอบ เนื่องจากดีบุกมีสมบัติการเปียกและการแพร่ดี บนแผ่นฐานหลายๆ ชนิด ซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญที่นำมาประยุกต์ใช้ในงานด้านอิเล็กทรอนิกส์ จุดหลอมเหลวของดีบุก คือ 231.9 องศาเซลเซียสในสถานะของแข็งดีบุก จะมีโครงสร้างผลึกแตกต่างกันอยู่ 2 แบบ เป็น 2 ลักษณะ คือดีบุกขาวหรือ  $\beta$ -Tin มีโครงสร้างผลึกเป็นบอดีเซนเตอร์ เตตระกอนอล (body center tetragonal) ซึ่งจะมีความเสถียรที่อุณหภูมิห้อง อีกลักษณะก็คือ ดีบุกเทาหรือ  $\alpha$  - Tin มีโครงสร้างผลึกเป็นลูกบาศก์เพชรซึ่งจะมีความเสถียรเมื่ออุณหภูมิต่ำกว่า 13 องศาเซลเซียส การเปลี่ยนจาก  $\beta$ -tin ไปเป็น  $\alpha$  - tin (กระบวนการนี้เรียกว่า tin pest) จะเกิดขึ้นเมื่อ อุณหภูมิตกลงไปต่ำกว่า 13 องศาเซลเซียส ทำให้ปริมาตรเพิ่มขึ้นนำไปสู่การแตกหักในโครงสร้างของดีบุก tin pest จึงเป็นปัญหาอย่างมากในการนำดีบุกมาประยุกต์ใช้งานที่อุณหภูมิต่ำและยังมีแนวโน้มว่าดีบุกจะเกิดวิสเคอร์ดีบุกขึ้น มีลักษณะเป็นผลึกเดี่ยว (single crystal) คล้ายๆ หลอดเล็กๆ เนื่องจากลักษณะการเติบโตเป็นแบบที่ละอะตอม ซึ่งยึดได้จนมีความสูง 0.64 มิลลิเมตร วิสเคอร์ดีบุกจะมีโครงสร้างผลึกเป็นเตตระกอนอล เนื่องจากความเค้นภายในตัววัสดุเองหรือแรงจากภายนอกมากระทำ วิสเคอร์ดีบุกจะโตอย่างรวดเร็วที่ 51 องศาเซลเซียส แต่วิสเคอร์ดีบุกไม่มีผลกระทบต่อความสามารถในการบัดกรี เมื่อมีการนำดีบุกกับทองแดงมาผสมกันเป็นสารประกอบยูเทคติก Sn-0.7 wt%Cu อุณหภูมิยูเทคติก 227 องศาเซลเซียสจากปฏิกิริยา Cu จะเข้าไปฝังประรวมกันเป็นสารประกอบโลหะ  $Cu_6Sn_5$  ซึ่งยังคงสมบัติของโลหะผสมนี้อยู่ ซึ่งยังไม่แน่ชัดว่าการเกิดขึ้นของ วิสเคอร์ดีบุกเนื่องมาจากการแปลงเฟสจาก  $\beta \rightarrow \alpha$  หรือเปลี่ยนเฟสไปเป็นดีบุกเทา

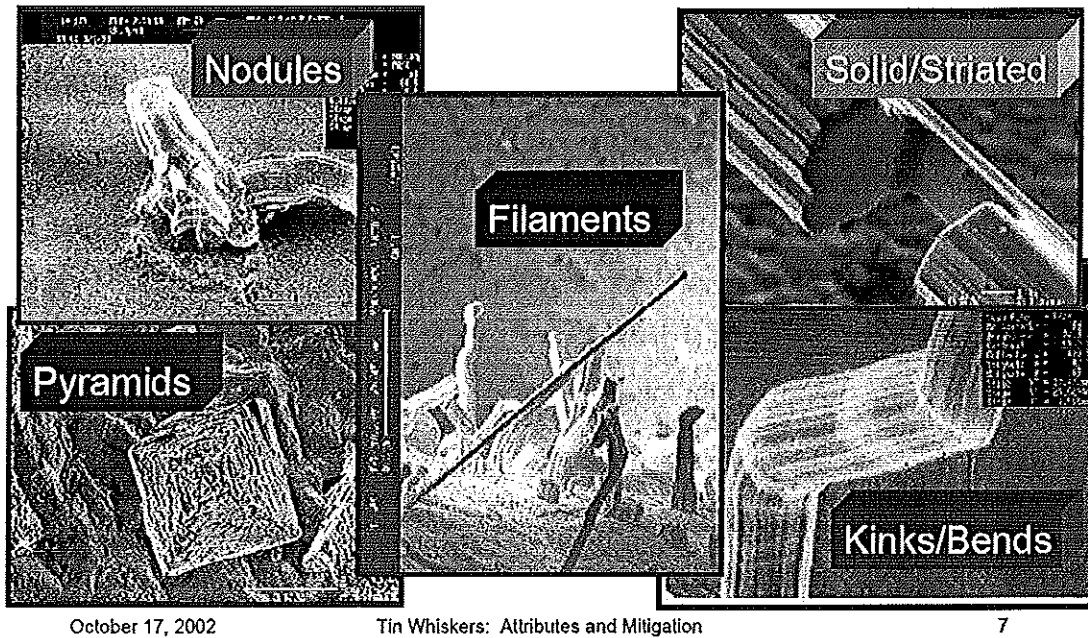
#### 2.4.1 ข้อมูลบางประการของวิสเคอร์ดีบุก

วิสเคอร์ดีบุกมีโครงสร้างใกล้เคียงผลึกเดี่ยว รูปร่างของวิสเคอร์ดีบุกจะมีหลายลักษณะเช่น ปุ่มนูน พีรามิด (รูปที่ 2.25) ซึ่งจะมีขนาดไม่เกิน  $10 \mu m$  รูปร่างที่พบมากจะมีลักษณะคล้ายเข็ม มีทั้งลักษณะตรงและหักโค้งความยาวจะอยู่ในช่วงระดับมิลลิเมตรขนาดอยู่ในช่วง  $1-4 \mu m$  ที่ขนาดใหญ่จะอยู่ในระดับ  $10 \mu m$  ขนาดเล็กจะอยู่ในระดับ  $0.006 \mu m$  ซึ่งมีในหลายตัวอย่างที่ขนาดของวิสเคอร์ดีบุกมีขนาดใหญ่กว่าขนาดของเกรนดีบุก นอกจากนี้วิสเคอร์ดีบุกมีความแข็งแรงเชิงกลสูงในทิศของแนวแกน เพราะมีโครงสร้างผลึกค่อนข้างสมบูรณ์ จากการใช้เทคนิคการรวมของลำไอออนทำให้เห็นหน้าตัดของวิสเคอร์ดีบุกมีลักษณะเป็นทรงตัน (รูปที่ 2.11)



รูปที่ 2.11 วิสเคอร์ดีบุกที่ผ่านใช้เทคนิคการรวมของลำไอออน  
ที่มา : Heidi และคณะ, 2004

เมื่อตรวจสอบลักษณะของวิสเคอร์ด้วยภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกวาด พบว่ามีรูปร่างที่แตกต่างกันออกไปดังแสดงในรูปที่ 2.12 (Brusse และคณะ 2002)



รูปที่ 2.12 รูปร่างของวิสเคอร์ดีบุกในแบบต่างๆ  
ที่มา : Brusse และคณะ 2002



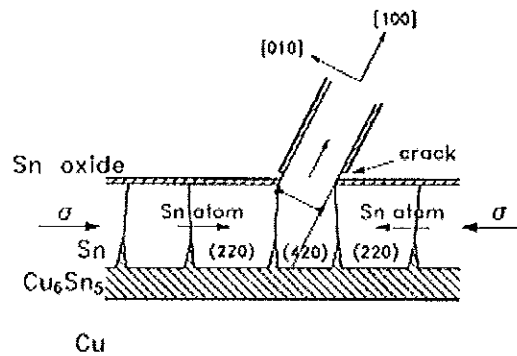
### 2.4.2 ทฤษฎีการเกิดขึ้นของวิสเคอร์ดีบุก

ซึ่งการเกิดขึ้นเองของ วิสเคอร์ดีบุก มีกระบวนการคล้ายคลึงกับการฟอร์มตัวของ เคนไครต์ แต่ไม่ใช่สิ่งเดียวกัน (NASA 2000)

Lee และคณะ (1998) ได้ศึกษากลไกการเกิดขึ้นเองของวิสเคอร์ดีบุก โดยนำดีบุก มาเคลือบด้วยวิธีทางไฟฟ้าลงบนแผ่นฟอสฟอรัสบรอนซ์ (phosphor bronze sheet) ทำการทดลองที่ อุณหภูมิห้องมีตัวแปรที่ใช้ในการทดลองคือ ความหนาแน่นกระแส (current density) ซึ่งใช้ค่าอยู่ในช่วง 0.5-3.5 A/dm<sup>2</sup> แรงขับเคลื่อนที่มีผลต่อกลไกการเกิดขึ้นเองของวิสเคอร์ดีบุกคือความเค้นตกค้าง (residual stress) ในลักษณะ 2 แนวแกนคือ ลักษณะยืดในแนวตั้งและลักษณะกดในแนวนอน วัตถุประสงค์ได้ประมาณ 8 เมกะปาสคาล อันเนื่องมาจากปฏิกิริยาการสร้างเฟสใหม่ของสารประกอบโลหะ สามารถเขียนแสดงได้ดังนี้



ซึ่งค่าของความเค้นกดในลักษณะ 2 แนวแกนนี้มีค่าขึ้นอยู่กับทิศทางการวางตัวของเกรนของดีบุก การก่อตัวเป็นวิสเคอร์ของดีบุก (รูปที่ 2.13) ความเค้นภายในดังกล่าวเป็นตัวขับเคลื่อนให้ดีบุก ออกมาจากเกรนแทรกผ่านผิวออกไซด์ที่อยู่เหนือชั้นฟิล์มดีบุกในลักษณะเลื่อน ดีบุกจะถูกขับเคลื่อนให้ออกมาเรื่อยๆ ในลักษณะทีละอะตอม เนื่องจากการขยายตัวของดิสโลเคชันลูป (dislocation loop) ซึ่งจะขยายตัวในลักษณะการปีน (climb) หลังจากที่ไม่สามารถเลื่อน (glide) ไปตามผิวได้อีกแล้ว



รูปที่ 2.13 ลักษณะการเกิดขึ้นของวิสเคอร์ดีบุก

ที่มา : Lee and Lee, 1998

Heidi และคณะ (2004) อธิบายสาเหตุของการเกิดขึ้นได้ว่า เนื่องมาจากสมบัติที่ต่างกันในเรื่องวัสดุ (anisotropic) ของโลหะที่สามารถเกิดวิสเคอร์ดีบุกได้ ซึ่งโดยมากจะเป็นโลหะที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ เช่น ดีบุก สังกะสีและแคดเมียม) เป็นผลให้สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน (thermal expansion coefficient) ของค่าคงที่แลตทิซด้าน a กับด้าน c แตกต่างกันเกือบเท่าตัว

### 2.4.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดขึ้นของวิสเคอร์ตีบุก

การศึกษาการเกิดวิสเคอร์ตีบุกเป็นไปเพื่อยับยั้งการเกิดขึ้นของวิสเคอร์ตีบุกเอง การทดลองโดยมากจึงเป็นการเฝ้าสังเกตพฤติกรรมการเกิดที่เกิดขึ้นเอง ด้วยเหตุนี้จึงมีปัจจัยที่ส่งผลต่อการเกิดวิสเคอร์ตีบุกอย่างหลากหลาย ได้แก่ ความชื้น สนามไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า บรรยากาศ- ความดัน ลักษณะพรีซิพิต ระบบที่ใช้เป็นฐานในการเกิด ขนาดและรูปร่างของเกรน อุณหภูมิ แต่ในทุกงานวิจัยการเกิดวิสเคอร์ตีบุก ต้องอาศัยความเค้นตักข้างเป็นแรงขับเคลื่อน

Kim และคณะ (2005) ศึกษาการเกิด วิสเคอร์ตีบุกบน โลหะบัดกรีไร้ตะกั่ว พบว่า ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดขึ้นเองของ วิสเคอร์ตีบุกคือการให้ความร้อนในลักษณะซ้ำไปซ้ำมา 600 รอบ โดยให้ความร้อนอยู่ในช่วงอุณหภูมิ -55 ถึง 125 องศาเซลเซียส โดยในแต่ละรอบของการให้ความร้อนใช้เวลา 30 นาที พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดวิสเคอร์ตีบุกคือ ความไม่เท่ากันของสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของวัสดุผสมที่นำมาใช้ทำโลหะบัดกรีไร้สารตะกั่ว

Fukuda และคณะ (2007) ทำการศึกษาผลของกระแสไฟฟ้าที่มีผลต่อการเกิดวิสเคอร์ตีบุกบนฟิล์มดีบุกที่เคลือบอยู่บนแผ่นทองแดง ซึ่งใช้ระยะเวลาการทดลอง 8 เดือน ภายใต้บรรยากาศปกติ ณ อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ความชื้น 50%RH โดยใช้กระแสไฟฟ้าคงที่  $0.48 \times 10^2 \text{ A/cm}^2$  พบว่ากระแสไฟฟ้าจะลดปริมาณการเกิดวิสเคอร์แต่จะทำให้วิสเคอร์มีความยาวได้มากขึ้น

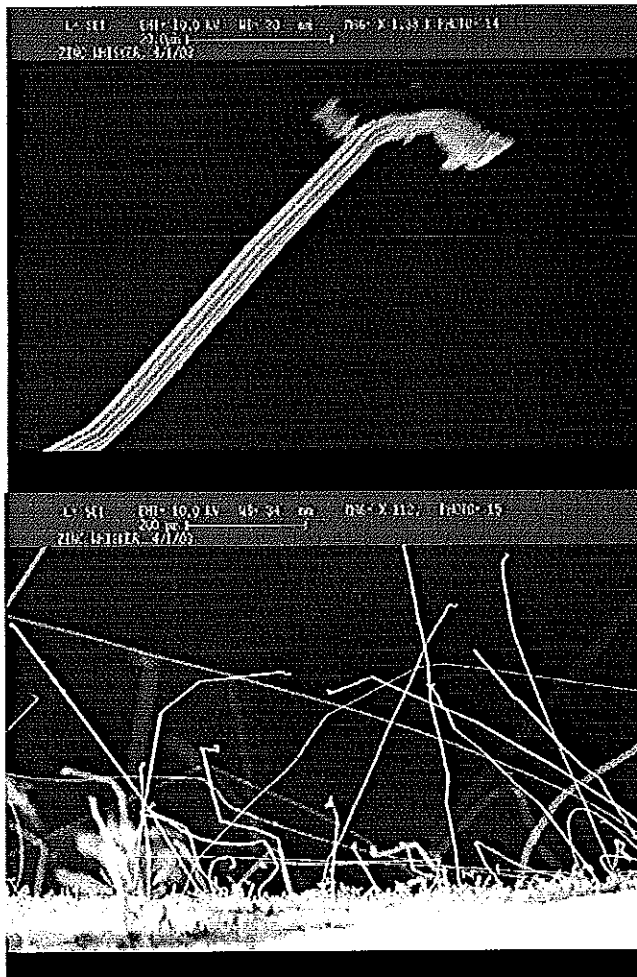
Chuang และคณะ (2007) ทำการศึกษาผลการเติมธาตุหายากเช่น Lu ใน Sn เพื่อเตรียมเป็นโลหะบัดกรี Sn-6.6Lu พบว่ามีการฟอร์มตัวเป็นวิสเคอร์ตีบุก ณ บริเวณของส่วนที่เป็นเฟส  $\text{Lu}_4\text{Sn}_5$  ที่บรรยากาศปกติอัตราการเติบโตของวิสเคอร์ตีบุกเป็น  $1 \text{ A}^0\text{s}^{-1}$  เมื่อเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียสอัตราการเติบโตของวิสเคอร์ตีบุกเป็น  $500 \text{ A}^0\text{s}^{-1}$  แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิมีอิทธิพลอย่างมากต่อการเกิดขึ้นของวิสเคอร์ตีบุก

Tu และคณะ (1994) ใช้กระบวนการผันกลับไม่ได้ของอุณหพลศาสตร์เพื่อตรวจสอบการทำปฏิกิริยากันเองของฟิล์มบาง Cu-Sn จากปฏิกิริยาการฟอร์มตัวเป็นสารประกอบกึ่งโลหะ ทำให้ปริมาตรมีการเปลี่ยนแปลงระหว่างการฟอร์มตัวเกิดความเค้นกดในสองแนวแกนในชั้นของดีบุก จากผลของความเค้นทำให้เกิดวิสเคอร์ตีบุกของดีบุกไปพร้อมกับปฏิกิริยาเคมี ค่าสภาพคล่องของอะตอมจะมีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อรูปร่าง และปฏิกิริยาของชิ้นงาน ถ้าอุณหภูมิของปฏิกิริยาสูงกว่า 100 องศาเซลเซียส สารประกอบจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วจนไม่มีผลพอสสำหรับการเกิดวิสเคอร์ตีบุกจะเกิดเป็นเนินเล็กๆแทน แบบจำลองของการเกิดวิสเคอร์ตีบุก (หรือการเกิดเนิน) น่าจะเกิดวิสเคอร์ตีบุกที่บริเวณจุดที่ผิวของดีบุกมีความอ่อนสุดทำให้ผิวของชั้นออกไซด์แตกได้ จุดนั้นจะเป็นตำแหน่งคลายตัวของความเค้นและจะมีความเค้นอยู่รอบๆจุดที่เกิดและเป็นแรงขับเคลื่อนให้เกิดวิสเคอร์ตีบุกจนกว่าความเค้นจะหมดไป

#### 2.4.4 วัสดุอื่น ๆ

นอกจากวัสดุเคอร์ติงก์ที่เกิดขึ้นได้เองแล้วยังพบว่า โลหะอื่นที่มีจุดหลอมเหลวต่ำก็สามารถเกิดวัสดุนี้ได้ ที่พบได้แก่ สังกะสี (รูปที่ 2.14) แคดเมียม ทอง และอลูมิเนียมเป็นต้น

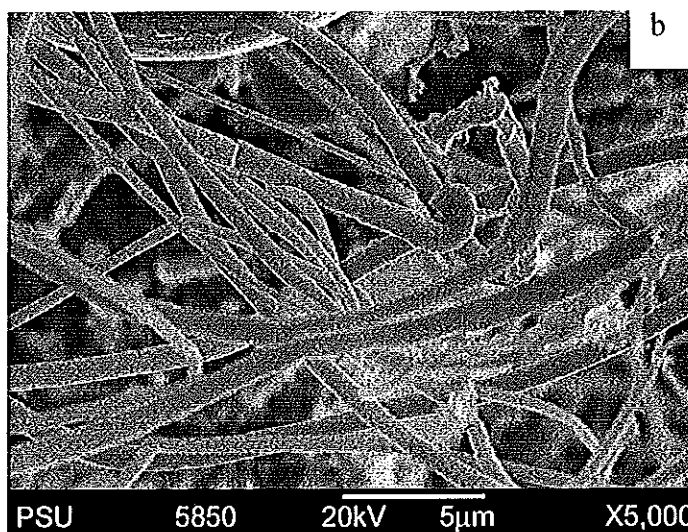
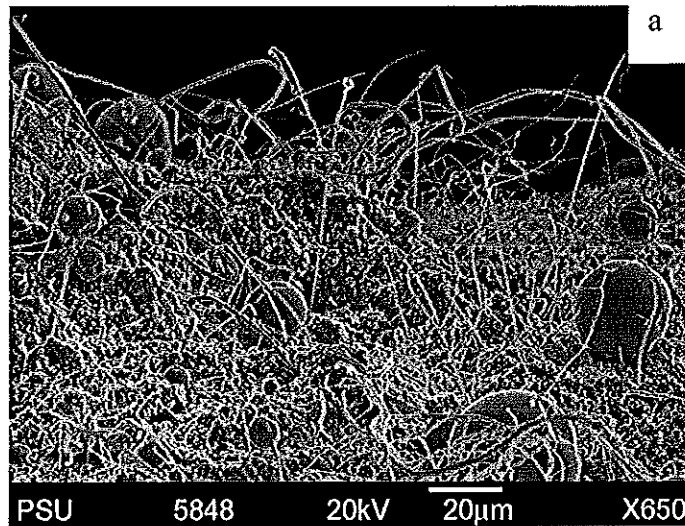
Heidi และคณะ (2004) อาศัยเทคโนโลยีการรวมของลำไอออน (focus ion beam technology) ในการสังเคราะห์นำตัดของวัสดุเคอร์ติงก์ซึ่ง วัสดุเคอร์ติงก์ที่ทดสอบเป็นการปล่อยให้เกิดขึ้นเองใช้เวลานาน 15-20 ปี พบว่าเกรนที่เป็นส่วนของ วัสดุเคอร์ติงก์ที่ถูกตัด มีความละเอียดมากในระดับจุลภาคย่อยเมื่อเทียบกับฐานซึ่งมีขนาดเกรนสม่ำเสมออยู่ในช่วง 4-10  $\mu\text{m}$  อธิบายสาเหตุของการเกิดขึ้นได้ว่า เนื่องมาจากความแตกต่างกันของสมบัติในเนื้อวัสดุ



รูปที่ 2.14 วัสดุเคอร์ติงก์สังกะสี (Zinc Whisker)

ที่มา : [nepp.nasa.gov/whisker/photos/floor\\_tile/index.html](http://nepp.nasa.gov/whisker/photos/floor_tile/index.html)

สำหรับงานวิจัยนี้เป็นแนวทางใหม่ในการผลิตวัสดุพอรุน โดยอาศัยการเกิดขึ้นของวิสเคอร์ดีบุกที่เกิดจากวัสดุผสมที่ผลิตด้วยกรรมวิธีบดผสมเชิงกลแล้วอาศัยความร้อนเป็นปัจจัยกระตุ้น ซึ่งจากการทดลองเบื้องต้นของ เล็ก สีทอง และคณะ (2003) ได้มีการศึกษาสมบัติพิเศษของวัสดุผสม Sn - SiC ที่เตรียมด้วยวิธีบดผสมเชิงกล แล้วนำมาอบพ่นที่อุณหภูมิตั้งแต่ 200 - 350 องศาเซลเซียส จากการศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงในสภาวะร้อน (hot - stage optical microscope) พบว่าเกิดวิสเคอร์ดีบุกทั่วทั้งชิ้นตัวอย่าง (รูปที่ 2.15) อุณหภูมิที่เริ่มเกิดวิสเคอร์ดีบุกเริ่มที่ประมาณ 240 องศาเซลเซียส ลักษณะของวิสเคอร์ดีบุกที่ได้มีขนาด  $1 \mu\text{m}$  โดยประมาณจากสมบัติดังกล่าวจึงมีแนวคิดที่จะนำมาประยุกต์ใช้ในการผลิตวัสดุพอรุน



รูปที่ 2.15 ภาพถ่าย SEM ของวิสเคอร์ดีบุกของวัสดุผสม Sn-SiC 10% โดยนำหน้า

### บทที่ 3

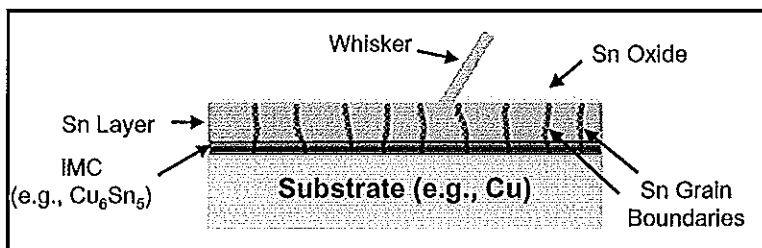
#### สมมุติฐานและวิธีการวิจัย

##### 3.1 สมมุติฐานการเกิดขึ้นของ whisker ดีบุก

กลไกการเกิดขึ้นของ whisker ดีบุกในงานวิจัยนี้ เมื่อเปรียบเทียบกับที่เกิดขึ้นเองของ whisker ดีบุกตามแนวคิดของ Lee และคณะ แล้วพบว่ามีความแตกต่างกัน เนื่องจากการเตรียมโดยวิธีที่แตกต่างกัน

##### 3.1.1 สมมุติฐานการเกิดขึ้นของ whisker ดีบุกตามแนวคิดของ Lee

เมื่อนำเคลือบดีบุกบนแผ่นฟอสเฟอร์ บรอนซ์โดยใช้วิธีเคลือบด้วยไฟฟ้า (electro deposit) ทำให้เกิดการฟอร์มตัวของ intermetallic compound ทำให้เกิดความเค้นในลักษณะกดที่บริเวณขอบเกรนของดีบุก ทำให้เกิดความเค้นตกค้างอยู่ในเนื้อของดีบุก เมื่อชั้นดีบุกถูกกระตุ้นด้วยความร้อนแบบช้าๆ (ความร้อนเกิดจากกระแสไฟฟ้า) ดีบุกจึงถูกขับออกมาในลักษณะคล้ายๆ กับยาสีที่พื้นที่ถูกบีบออกจากหลอดดังรูปที่ 3.1

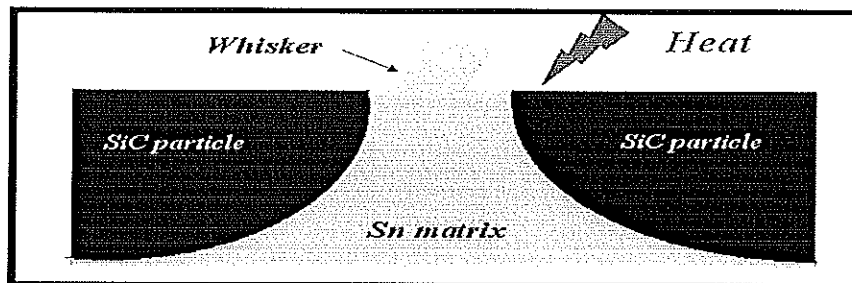


รูปที่ 3.1 แบบจำลองกลไกการเกิดขึ้นของ whisker ดีบุกบน โลหะบัดกรี โดยการเคลือบด้วยไฟฟ้า (electro deposit)

##### 3.1.2 สมมุติฐานการเกิดขึ้นของ whisker ดีบุกในงานวิจัย

Whisker ดีบุกที่เกิดขึ้นในงานวิจัยนี้ เกิดจากการเตรียมวัสดุผสมระหว่างดีบุก (เมตริกซ์) และซิลิกอนคาร์ไบด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีบดผสมเชิงกล จากแบบจำลองสามารถอธิบายได้ว่าดีบุก เป็นโลหะที่มีความอ่อนตัวเมื่อบดผสมเชิงกลกับเซรามิกที่มีความแข็งสูงเช่นซิลิกอนคาร์ไบด์ จึงเป็นการง่ายที่อนุภาคของซิลิกอนคาร์ไบด์ จะเข้าไปฝังประแบบกระจายอยู่ในเนื้อของดีบุก ดังรูปที่ 3.8 การเข้าไปแทรกตัวของซิลิกอนคาร์ไบด์ เป็นการสร้างความเค้นคงค้าง ให้แก่เนื้อดีบุก

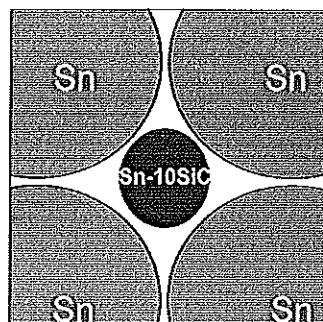
(Sn matrix) ซึ่งสามารถคลายความเค้นค้างได้ทันทีที่ได้รับพลังงานสูงพอที่จะทำให้กลไกทำงาน ด้วยเหตุนี้เมื่อให้พลังงานความร้อนแก่ชิ้นงานในระดับที่ใกล้เคียงจุดหลอมเหลวของดีบุกจะไม่มีผลกับซิลิกอนคาร์ไบด์ เนื่องจากมีความเสถียรมากกว่า แต่จะมีผลกับเนื้อของดีบุกซึ่งจะเกิดการขยายตัวเนื่องจากความร้อน แต่เนื่องจากเนื้อของดีบุกและซิลิกอนคาร์ไบด์ มีค่าสัมประสิทธิ์ขยายตัวเนื่องจากความร้อนแตกต่างกัน การขยายตัวของเนื้อของดีบุกจึงถูกขวางด้วยกำแพงซิลิกอนคาร์ไบด์ จึงเกิดความเค้นกด (compressive stress) ในเนื้อของดีบุกอะตอมดีบุก จึงถูกขับให้ออกมาในทิศทางที่มีความหนาแน่นน้อย (บริเวณผิวอนุภาควัสดุผสม) ในลักษณะที่ละเอียดคมกลายเป็น whisker ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แบบจำลองกลไกการเกิดขึ้นของ whisker ดีบุกที่เกิดในวัสดุผสม Sn/SiC ที่เตรียมโดยวิธีบดผสมเชิงกล

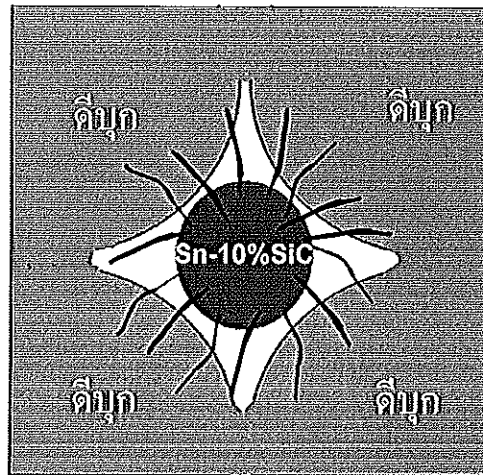
### 3.1.3 สมมุติฐานการผลิตชิ้นงานดีบุกพูนด้วย whisker ดีบุก

การผสมผงวัสดุผสม Sn-10SiC กับผงดีบุกที่มีขนาดอนุภาคโตกว่าประมาณเท่าตัว อนุภาคของวัสดุผสมจะแทรกอยู่ระหว่างช่องว่าง (void) ของอนุภาคดีบุกดังรูปที่ 3.3 ซึ่งเป็นแบบจำลองสมมุติฐานตำแหน่งของอนุภาควัสดุผสม Sn-10SiC ช่วงขนาด 100-150  $\mu m$  กับอนุภาคดีบุกช่วงขนาด 200-300  $\mu m$  โดยวิธีการสั้น



รูปที่ 3.3 แบบจำลองสมมุติฐานตำแหน่งของอนุภาควัสดุผสม Sn-10SiC กับอนุภาคดีบุก

เมื่อให้แรงดันแก่ชิ้นงาน โดยวิธีการอัดขึ้นรูป อนุภาคจะเรียงตัวชิดกันมากขึ้น (จะมากหรือน้อยขึ้นกับความดันที่ใช้) ชิ้นงานจะเกาะกันได้ ทั้งนี้รูปร่างของชิ้นงานจะขึ้นอยู่กับแม่แบบที่ใช้อัด หลังจากทำการอบผนึกโดยใช้อุณหภูมิที่สามารถทำให้วัสดุผสม Sn-10SiC เกิดวิสเคอร์ติบुकและอนุภาคติบुकเชื่อมติดกัน ทำให้ชิ้นงานมีสมบัติความพรุนและความแข็งแรงเพิ่มขึ้นดังรูปที่ 3.4

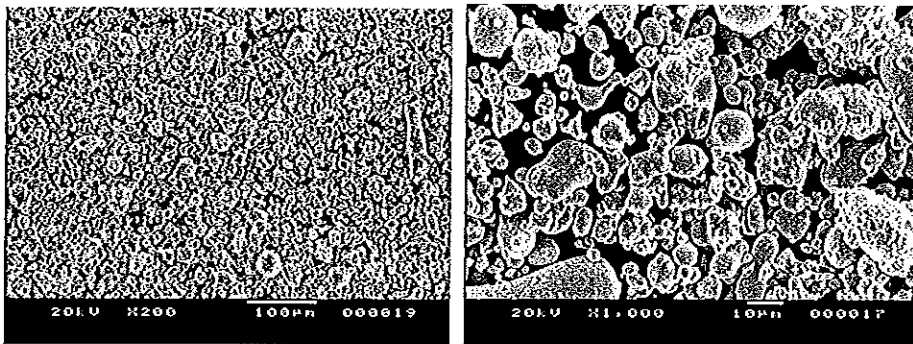


รูปที่ 3.4 แบบจำลองสมมุติฐานการผลิตวัสดุพรุน หลังอบผนึกมีการฟอร์มตัวของวิสเคอร์ติบुकที่เกิดจากวัสดุผสม Sn-10SiC และอนุภาคของติบुकหลอมเชื่อมติดกัน

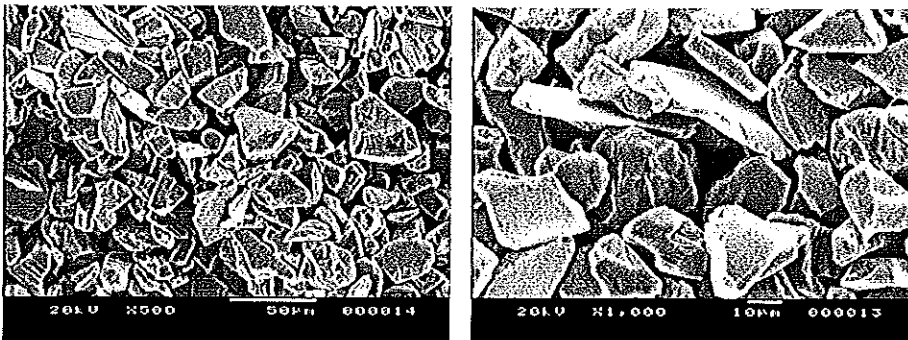
### 3.2 วัสดุที่ใช้และวิธีดำเนินการวิจัยและผลการทดลองเบื้องต้น

3.2.1 ศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเกิดวิสเคอร์ติบुकเบื้องต้น โดยมีวิธีการศึกษาเป็นดังนี้ เตรียมตัวอย่างระหว่างติบुकกับซิลิกอนคาร์ไบด์ ในอัตราส่วนผสม 9:1 โดยน้ำหนัก ทำการบดผสมติบुकและซิลิกอนคาร์ไบด์ด้วยเครื่องบดแพลนเทรีที่ความเร็วรอบ 450 rpm ที่ระยะ เวลาบด 12, 24, 36 และ 48 ชั่วโมง จากนั้นนำผงโลหะผสมไปขึ้นรูปในลักษณะทรงกระบอกด้วยเครื่องอัดขึ้นงาน อุณหภูมิตำที่ความดัน 500, 1000, 1500 และ 2000 psi แล้วจึงเผาอบผนึกชิ้นงานพร้อมทั้งสังเกตพฤติกรรมที่เกิด ขึ้นด้วยกล้องจุลทรรศน์สถานะร้อนและ DTA (differential thermal analyser) ด้วยอัตราการให้ความร้อน 10 และ 2 องศาเซลเซียสต่อนาที ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส และ 230 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ตรวจสอบธาตุที่เป็นองค์ประกอบของวิสเคอร์ติบुकด้วย EDX และวิเคราะห์การกระจายตัวของอนุภาคด้วยวิธี x-ray mapping สังเกตรูปร่างและวัดขนาดของวิสเคอร์ติบुकด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกวาดและโปรแกรม image tool เมื่อได้ผล จึงเลือกพารามิเตอร์ที่เหมาะสมมาใช้เพื่อเตรียมเป็นวัสดุผสม

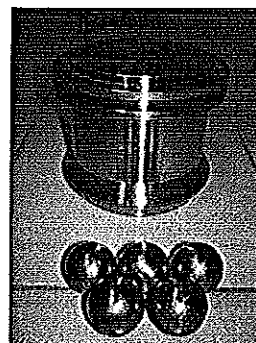
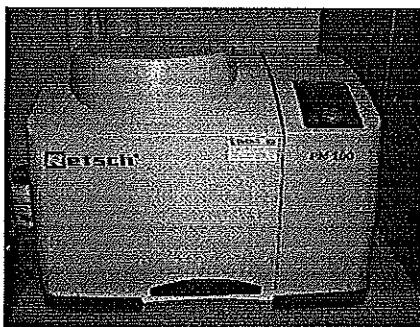
3.2.2 การเตรียมวัสดุผสม วัสดุสำคัญที่ใช้ในการเตรียมคือผงดีบุกที่ได้มาจากกระบวนการอะตอมไมเซชันขนาดเล็กกว่า  $45 \mu\text{m}$  (ความบริสุทธิ์ 99.95%, บริษัทไทยชาโก้ จำกัด) ดังรูปที่ 3.5 และผงซิลิกอนคาร์ไบด์ ขนาดน้อยกว่า  $37 \mu\text{m}$  (ดังรูปที่ 3.6) โดยใช้วิธีเตรียมโดยวิธีบดผสมเชิงกล สัดส่วนการผสมเป็น 9:1 ด้วยเครื่องบดแพลนนาเทรี ดังรูปที่ 3.7 ที่ความเร็วรอบ 300 rpm ระยะเวลาบด 24 ชั่วโมง ภายใต้บรรยากาศอาร์กอน ใช้กรดสเตียริก 2% เป็น PCAs เมื่อได้ผงวัสดุผสมนำมาคัดขนาด ให้ได้วัสดุผสมที่มีขนาดระหว่าง  $100\text{-}150 \mu\text{m}$  ดังรูปที่ 3.8 จึงซีกตัวอย่างส่วนหนึ่งนำไปทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วย DTA อีกส่วนหนึ่งนำไปเผาที่อุณหภูมิช่วง 200-220 องศาเซลเซียส เพื่อทดสอบการเกิดวิสเคอร์โดยสังเกตด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกวาด ดังรูปที่ 3.8 และรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.5 ผงดีบุกขนาดเล็กกว่า  $45 \mu\text{m}$

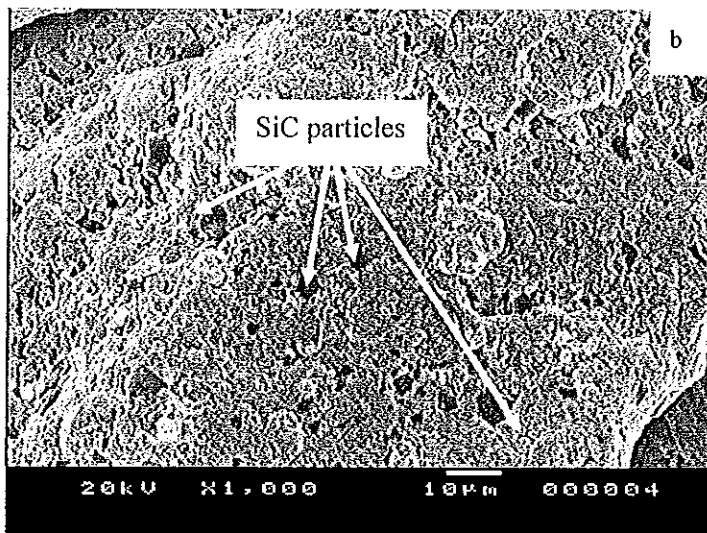
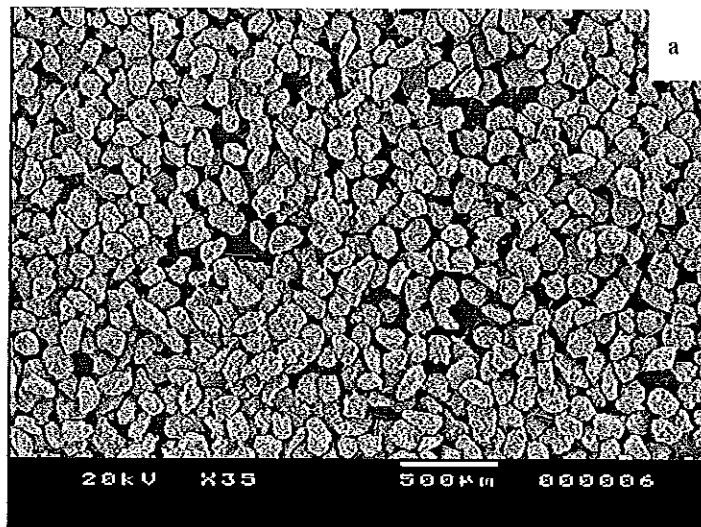


รูปที่ 3.6 ผงซิลิกอนคาร์ไบด์ขนาดเล็กกว่า  $37 \mu\text{m}$

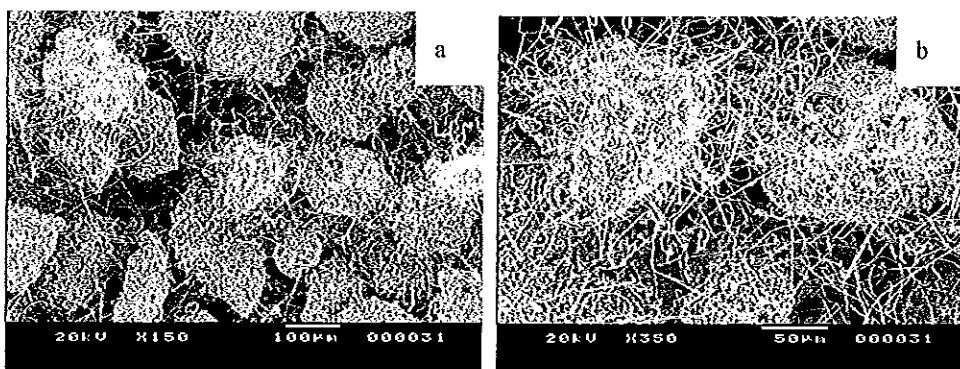


รูปที่ 3.7 เครื่องบดแพลนนาเทรี พร้อมด้วยหม้อบด 250 มิลลิลิตรและลูกบอลบด



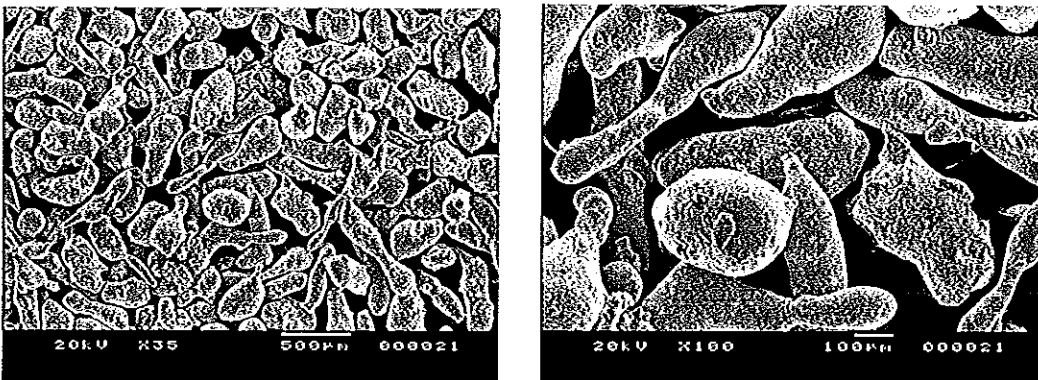


รูปที่ 3.8 ผงวัสดุผสม Sn-10%SiC ขนาด 100-150  $\mu\text{m}$  ที่กำลังขยาย a) 35 เท่า b) 1000 เท่า

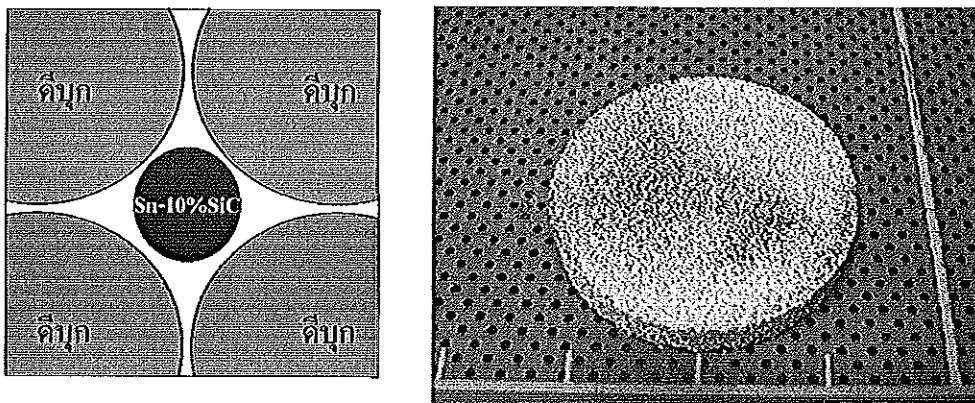


รูปที่ 3.9 ผงวัสดุผสม Sn-10%SiC ขนาด 100-150  $\mu\text{m}$  หลังการให้ความร้อนที่ช่วงอุณหภูมิ 200-220 องศาเซลเซียส a) กำลังขยาย 150 เท่า b) กำลังขยาย 350 เท่า

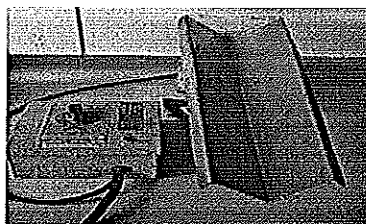
3.2.3 การผสมและอัดขึ้นรูป ผสมวัสดุผสมเข้ากับดีบุกที่ได้มาจากกระบวนการอะตอมไม-เซชันช่วงขนาด  $200-300 \mu\text{m}$  ดังรูปที่ 3.10 โดยเติมวัสดุผสม 2%, 4%, 6%, 8% และ 10% ให้น้ำหนักรวม 10 กรัม โดยมีสมมติฐานให้วัสดุผสมแทรกอยู่ระหว่างอนุภาคดีบุกจัดแบบจำลองในรูปที่ 3.10 โดยใช้วิธีการสั่นด้วยเครื่องสั่นแม่เหล็ก (magnetic vibratory) ดังรูปที่ 3.12 เพื่อให้ผงเข้ากันดีเวลาการสั่นที่ผงเข้ากันได้ดีที่สุดคือ 2 นาที จากนั้นจึงนำผงผสมไปอัดขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดแบบปรับอุณหภูมิได้ (thermo press) ที่ความดัน 500 psi (3.4 MPa), 1000 psi (6.9 MPa), 1500 psi (10.3 MPa) และ 2000 psi (13.8 MPa) นำชิ้นตัวอย่างมาวัดเส้นผ่านศูนย์กลางและความหนาเพื่อใช้คำนวณหาปริมาตรและความหนาแน่นของชิ้นตัวอย่างกรีน (รูปที่ 3.11)



รูปที่ 3.10 ผงดีบุกที่ช่วงขนาด  $200-300 \mu\text{m}$



รูปที่ 3.11 ชิ้นตัวอย่างกรีนเปรียบเทียบกับแบบจำลองสมมติฐานตำแหน่งของวัสดุผสมกับดีบุก



รูปที่ 3.12 เครื่องสั่นแม่เหล็ก (magnetic vibratory)

3.2.3 การอบผกขึ้นตัวอย่าง ที่อุณหภูมิ 200, 220 และ 230 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศอาร์กอน ผลการทดลองเบื้องต้น พบว่าที่เวลาเผาเซ 9 ชั่วโมง ชิ้นงานมีความแข็งแรงมากที่สุด หลังจากการทดลองผลิตขึ้นตัวอย่างวัสดุผสมพูนเบื้องต้น พบว่าที่อุณหภูมิอบผก 230 องศาเซลเซียส ชิ้นตัวอย่างมีการเข็มและบิดเบี้ยว เนื่องจากเป็นอุณหภูมิที่ใกล้เคียงจุดหลอมเหลวของคีนุกบรีสุทธิ ดังนั้นการทดลองที่อุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียสสำหรับทุกเงื่อนไขได้ตัดออกไปจากการทดลอง

3.2.4 การทดสอบสมบัติต่างๆ ของชิ้นงานที่เป็นวัสดุพูน ได้แก่ ความหนาแน่น เปอร์เซนต์ความพูน ความพูนเฉลี่ย สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของอากาศ และทดสอบแรงเฉือน ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

3.2.4.1 ความหนาแน่นของชิ้นงานหาจากสมการที่ 3.3

$$\rho_{\text{apparent}} = \frac{m}{V} \quad 3.1$$

โดย  $\rho$  คือ ความหนาแน่นของชิ้นงาน ( $\text{g/cm}^3$ )  
 $m$  คือ มวลของชิ้นงาน (g)  
 $V$  คือ ปริมาตรของชิ้นงาน ( $\text{cm}^3$ )

3.2.4.2 การหาค่าเปอร์เซนต์ความพูนดังสมการที่ 3.3 โดยหาผลต่างระหว่างความหนาแน่นตามทฤษฎีสมาการ 3.2 กับความหนาแน่นที่คำนวณได้จากสมการ 3.1

$$\rho_{\text{Theory}} = (1.9a - 0.9)\rho_{\text{Sn}} + 0.1(a - 1)\rho_{\text{SiC}} \quad 3.2$$

เมื่อ  $\rho_{\text{Theory}}$  คือ ความหนาแน่นของชิ้นงานตามทฤษฎี ( $\text{g/cm}^3$ )  
 $\rho_{\text{Sn}}$  คือ ความหนาแน่นของคีนุกตามทฤษฎี ( $\text{g/cm}^3$ )  
 $\rho_{\text{SiC}}$  คือ ความหนาแน่นของซิลิกอนคาร์ไบด์ตามทฤษฎี ( $\text{g/cm}^3$ )  
 $a$  คือ สัดส่วนของคีนุกที่มีอยู่ในชิ้นงาน ( $\text{g/cm}^3$ )

$$\text{Porosity}(\%) = \frac{\rho_{\text{Theory}} - \rho_{\text{apparent}}}{\rho_{\text{Theory}}} \times 100\% \quad 3.3$$

3.2.4.3 การทดสอบหาสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน เป็นการทดสอบหาความสามารถในการให้อากาศไหลซึมผ่านชั้นทดสอบ มีวิธีการดังนี้

1) ยึดชั้นทดสอบเข้ากับฟีกเจอร์ของชุดทดสอบ โดยมีประเก็น แหวนโลหะและประเก็นยางกันซึมรองอยู่ที่ ผิวหน้าของชั้นทดสอบเหลือพื้นที่ผิวเปิดขนาด 645.2 ตารางมิลลิเมตร (1 ตารางนิ้ว)

2) ปลดอากาศไหลผ่านตัวกรองเพิ่มชั้นที่ละน้อยจนอัตราการไหลอยู่ที่ 30 ลิตร ต่อนาที

3) อ่านค่าความแตกต่างของความดันจากมานอมิเตอร์แล้วนำไปแทนค่าในสมการ

4) ทดสอบหาขนาดรูพรุน ไตสุคของตัวกรองเป็นการวัดค่าความแตกต่างของความดันที่เกิดขึ้นเมื่อเกิดฟองอากาศฟองแรก มีวิธีการดังนี้

5) ชั้นทดสอบจะถูกแช่ไว้ในอัลกอฮอล์อย่างน้อยสองนาที

6) นำชั้นทดสอบที่แช่อัลกอฮอล์ไว้แล้วไปยึดเข้ากับฟีกเจอร์ให้แน่น โดยมีประเก็นยางรองผิวหน้าของชั้นงานทั้งสองด้าน

7) เปิดให้แรงดันอากาศจำนวนน้อยๆ แก่ชั้นทดสอบเพื่อป้องกันอัลกอฮอล์ภายในชั้นทดสอบถูกขับทิ้งออกมา และเทราดอัลกอฮอล์จำนวน 2 มิลลิลิตร ลงบนผิวหน้าของชั้นทดสอบ

8) เปิดวาล์วเพิ่มปริมาณอากาศให้ไหลผ่านชั้นทดสอบอย่างช้าๆ จนมองเห็นฟองอากาศฟองแรกเกิดขึ้น

9) อ่านค่าความแตกต่างของความดันจากมานอมิเตอร์แล้วนำไปแทนค่าในสมการ

3.2.4.4 วิธีการทดสอบความแข็งแรงเชิงกลจะใช้การทดสอบแบบแรงเฉือน วิธีการนี้เป็นการวัดแรงสูงสุดที่ทำให้วัสดุเริ่มเสียรูป

1) ชั้นทดสอบจะถูกยึดเข้ากับอุปกรณ์จับยึดชั้นงาน

2) วางอุปกรณ์จับยึดชั้นงานบนเครื่องทดสอบแรงกด

3) ทำการกดชั้นทดสอบ โดยให้อัตราการเคลื่อนที่ของการกดที่ 250 มิลลิเมตรต่อ นาที ซึ่งเป็นอัตราสูงสุดที่โปรแกรมของเครื่องทดสอบทำได้ ถัดจกชั้นงานเริ่มเสียรูป

4) บันทึกค่าแรงสูงสุดที่ได้ และนำไปคำนวณหาค่าความแข็งแรงเฉือน

## บทที่ 4

### ผลและวิเคราะห์ผลการทดลอง

#### 4.1 อิทธิพลของความดันการอัดขึ้นรูป อุณหภูมิและระยะเวลาบด ที่มีผลต่อการเกิดวิสเตอร์ในวัสดุผสม Sn-10%SiC

4.1.1 ผลของความดันการอัดขึ้นรูป อุณหภูมิและระยะเวลาบด ผลจากตารางที่ 4.1 ทำให้เราทราบว่าเวลาบดมีผลต่อการเกิดวิสเตอร์ดีบุกเนื่องจาก ผลการการบดโลหะผสมที่เวลาบด 12 ชั่วโมง ไม่เกิดวิสเตอร์ขึ้นเลย แต่เมื่อเพิ่มเวลาบดนานขึ้นเป็น 24, 36 และ 48 ชั่วโมง มีวิสเตอร์เกิดขึ้น นอกจากนี้ เวลาบดยังมีความสัมพันธ์กับความดันอัดขึ้นรูปและอุณหภูมิอีกด้วยที่เวลาบด 24 ชั่วโมงมีเส้นใยเกิดขึ้นที่ความดันอัดขึ้นรูป 2000 psi , อุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียส เมื่อเพิ่มเวลาบดนานขึ้นเป็น 36 และ 48 ชั่วโมง ความดันอัดขึ้นรูปและอุณหภูมิที่สามารถเกิดวิสเตอร์ได้ลดลงมาอยู่ที่ 1500 psi และ 220 องศาเซลเซียสตามลำดับ เป็นผลมาจากเวลาบดที่นานขึ้นทำให้อุณหภูมิของซิลิกอนคาร์ไบด์แตกตัวและกระจายตัวได้ดีขึ้นซึ่งเป็นไปตามสมมุติฐานในบทที่ 3

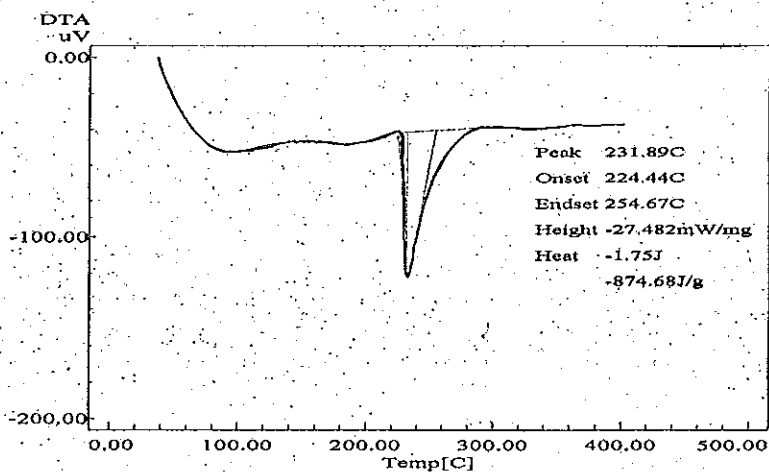
ตารางที่ 4.1 ผลการอบผนึกขึ้นตัวอย่าง Sn-10%SiC ด้วยกล้องจุลทรรศน์สแกนร้อนที่เวลาบด ความดันและอุณหภูมิ ต่างๆ

Milling time (hr)	Pressure(psi)											
	500			1000			1500			2000		
	Temperature(°C)											
	200	220	230	200	220	230	200	220	230	200	220	230
12	n	n	ex	n	n	ex	n	n	ex	n	n	ex
24	n	n	ex	n	n	n	n	n	n	n	n	ex+y
36	n	n	ex	n	n	n	n	y	y	n	y	y
48	n	n	n	n	n	n	ex+y	n	n	ex	n	ex+y

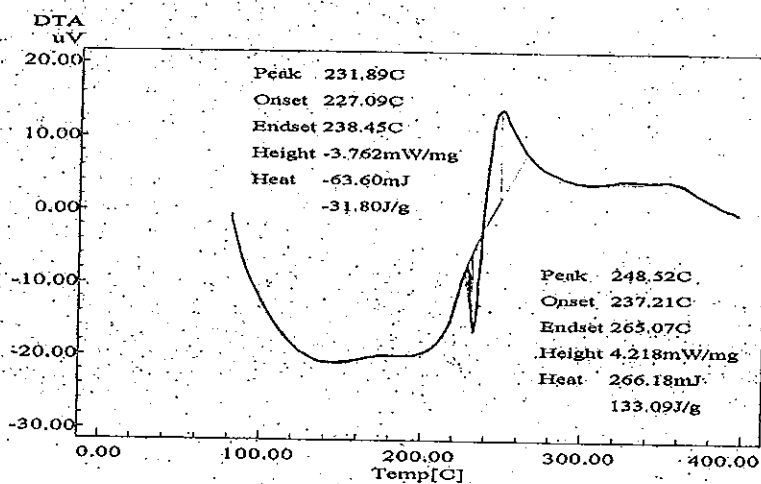
\*\*หมายเหตุ : y = เกิดวิสเตอร์      n = ไม่เกิดวิสเตอร์      ex = เกิดปฏิกิริยา exudation

4.1.2 ผลการทดสอบด้วย DTA ผลจากการทดสอบปฏิกิริยาทางความร้อนด้วย DTA (รูปที่ 4.1) ดินุกที่ยังไม่ผสม, ดินุกผสมซิลิกอนคาร์ไบด์ที่เวลาบดผสมนาน 12, 24, 36 และ 48 ชั่วโมง ที่ผ่านการอัดด้วยความดัน 1500 psi พบว่ามีการหลอมเหลว (สังเกตได้จากเกิดปฏิกิริยาคายความร้อน) ในอุณหภูมิช่วง 230-233 องศาเซลเซียส วัสดุผสม Sn-10SiC ที่เวลาบดผสมนาน 12, 24, 36 และ 48 ชั่วโมง มีจุดสิ้นสุดของปฏิกิริยาคายความร้อนอยู่ในอุณหภูมิช่วง 245-350 องศาเซลเซียส รูปที่ 4.1 เป็นผลการทดสอบปฏิกิริยาทางความร้อนด้วย DTA

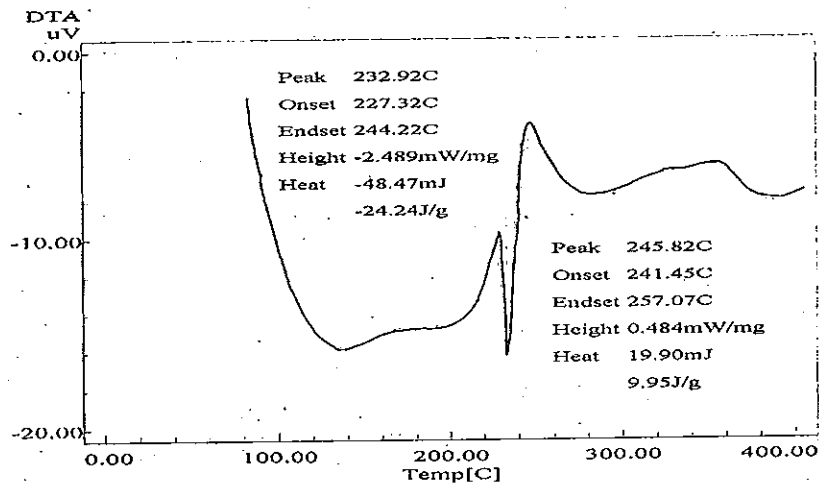
เมื่อสังเกตความเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นให้ความร้อนกับชิ้นงานชุดเดียวกันที่ทำการทดสอบ DTA โดยสังเกตผ่านกล้องจุลทรรศน์ด้วย hot-stage optical microscope ยืนยันได้ว่าปฏิกิริยาคายความร้อนที่เกิดขึ้นนั้นคือ การฟอร์มตัวของวิสเคอร์ดีบุก พลังงานที่คายออกมาคือพลังงานที่ใช้ในการตกผลึกใหม่ กล่าวคือ เมื่อชิ้นตัวอย่างได้รับความร้อนถึงอุณหภูมิประมาณ 230 องศาเซลเซียส พบว่าเกิดวิสเคอร์งอกออกจากผิวชิ้นตัวอย่าง ทันทีทันใดอย่างน่าอัศจรรย์



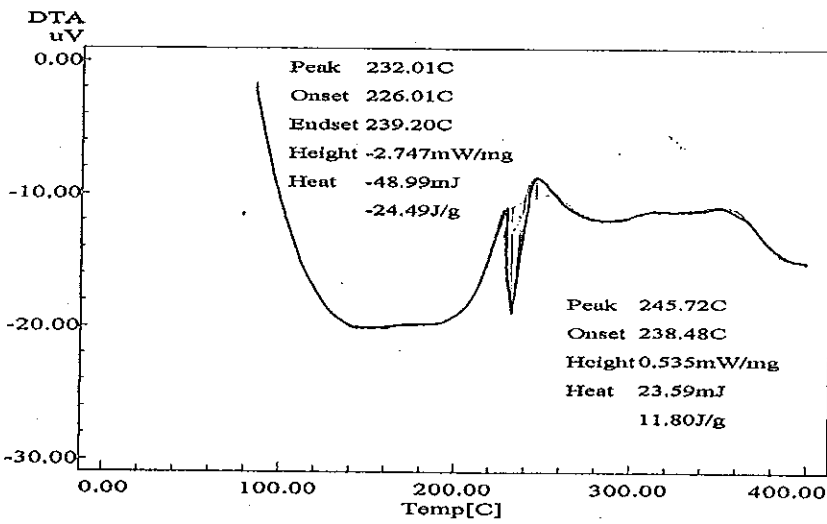
a)



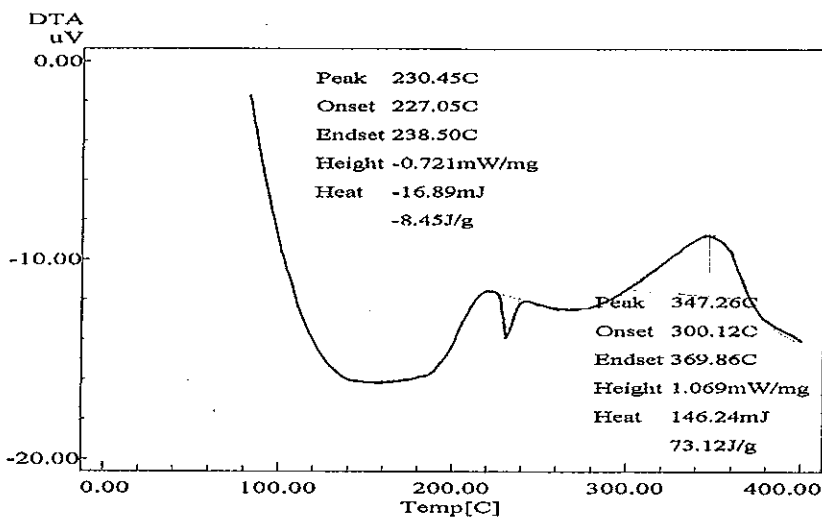
b)



c)



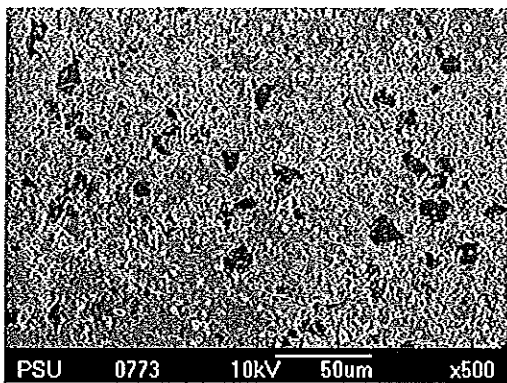
e)



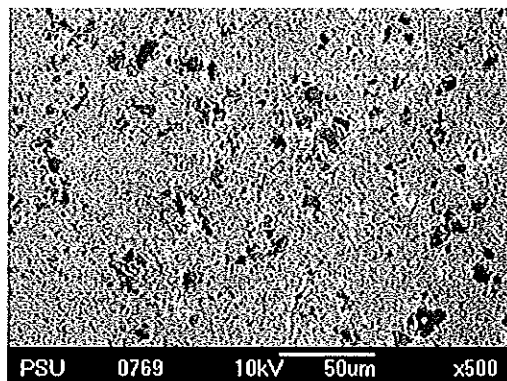
d)

รูปที่ 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

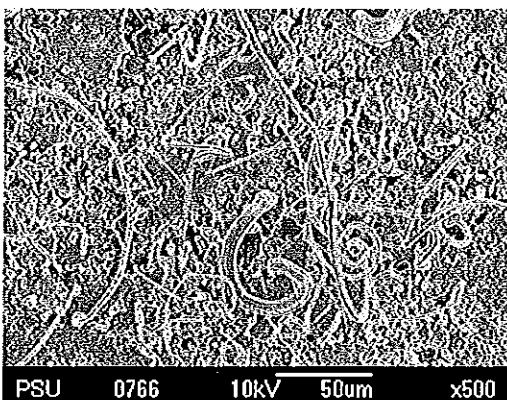
4.1.3 ภาพถ่าย SEM รูปที่ 4.2 แสดงให้เห็นการฟอร์มตัวของวิสเคอร์บนขึ้นตัวอย่างที่บดผสมที่ระยะเวลาบด 12, 24, 36 และ 48 ชั่วโมง ใช้ความดันอัดขึ้นรูป 1500 psi ที่ระยะเวลาบด 12 และ 24 ชั่วโมง ไม่มีวิสเคอร์เกิดขึ้นดังจะเห็นได้จากรูปที่ 4.2a และ 4.2b และจากรูปที่ 4.2c และ 4.2d คือภาพถ่าย SEM ที่เวลาบด 36 และ 48 ชั่วโมง เปรียบเทียบกันแล้วพบว่า ลักษณะทางกายภาพของวิสเคอร์ที่เกิดขึ้นมีความแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด ดังตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบลักษณะทางกายภาพของวิสเคอร์ที่เกิดขึ้นที่ระยะเวลาบดผสม 36 และ 48 ชั่วโมง เนื่องจากเมื่อเพิ่มระยะเวลาบดนานขึ้น อนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ถูกลดขนาดลงและกระจายตัวได้ดีขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับแบบจำลองกลไกการเกิดขึ้นของวิสเคอร์ (รูปที่ 3.2) คือเมื่อ SiC กระจายตัวดีขึ้นมีโอกาสที่จะทำให้ปริมาณของวิสเคอร์จะเพิ่มขึ้น แต่ทั้งนี้เมื่อขนาดซิลิกอนคาร์ไบด์ลดลง ย่อมทำให้ความเค้นตกค้างลดลงไปด้วย ดังนั้นด้วยเหตุนี้ วิสเคอร์ที่เกิดขึ้นบนขึ้นตัวอย่างที่ระยะเวลาบดนาน 48 ชั่วโมง จะมีปริมาณวิสเคอร์ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่มากกว่า แต่มีความยาวของเส้นใยน้อยกว่าที่ 36 ชั่วโมง



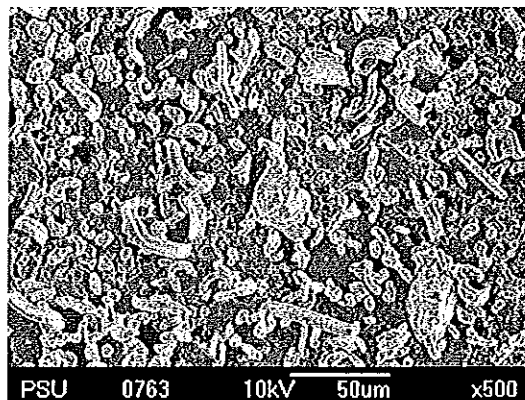
(a)



(b)



(c)



(d)

รูปที่ 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)



ตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบลักษณะทางกายภาพของวิสเคอร์ที่เกิดจากขึ้นตัวอย่างที่ระยะเวลาบดผสม 36 และ 48 ชั่วโมง

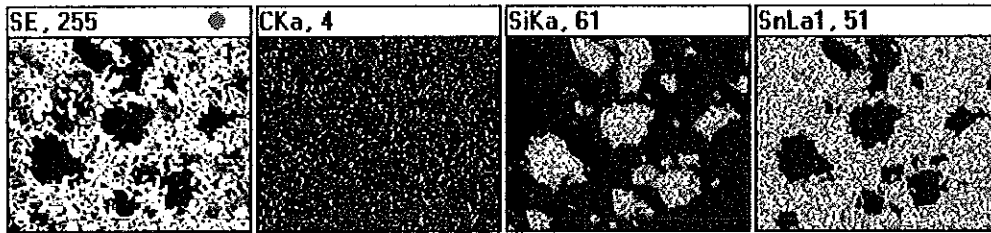
ลักษณะทางกายภาพของวิสเคอร์	ระยะเวลาบด(ชั่วโมง)	
	36	48
ความยาว ( $\mu m$ )	> 50 ( $\mu m$ )	< 50 ( $\mu m$ )
ปริมาณวิสเคอร์ที่เกิดขึ้นต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่	น้อยกว่า	มากกว่า
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ( $\mu m$ )	1-10 ( $\mu m$ )	1-20 ( $\mu m$ )

4.1.4 ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของอนุภาค โดยวิธี x-ray mapping และวิเคราะห์ขนาด ของวิสเคอร์โดยโปรแกรม image tool จากรูปที่ 4.3 แสดงผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุนิวตริคที่บดและขึ้นตัวอย่างวัสดุผสม Sn-10%SiC ที่เวลาบดผสมต่างๆ พบว่ารูปที่ 4.3a และ 4.3b จะเห็นวิสเคอร์ไม่ชัด ส่วนรูปที่ 4.3c และ 4.3d จะเห็นวิสเคอร์อย่างชัดเจนและวิสเคอร์เป็นโลหะดีบุกซึ่งมีซิลิกอนคาร์ไบด์ปนอยู่บ้างเมื่อวัดขนาดของเส้นใยปรากฏว่ามีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 5-30  $\mu m$  และความยาวเฉลี่ย 200-500  $\mu m$  (ตารางที่ 4.3)

ตารางที่ 4.3 ขนาดและความยาวของวิสเคอร์ดีบุกที่เวลาบดและความดันต่างๆ ที่อุณหภูมิอบแห้ง 230 องศาเซลเซียส

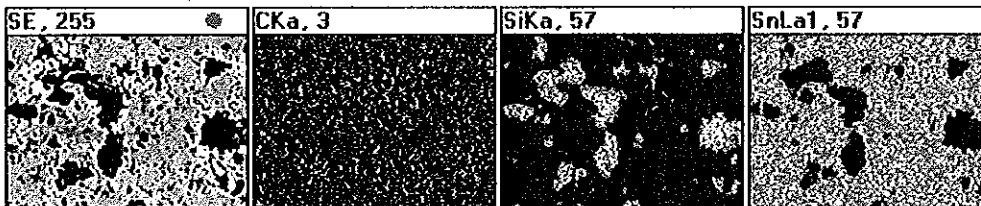
Milling Time (hr)	Pressure (psi)			
	1500		2000	
	Mean Length ( $\mu m$ )	Mean Diameter ( $\mu m$ )	Mean Length ( $\mu m$ )	Mean Diameter ( $\mu m$ )
12	-	-	-	-
24	-	-	429.94	28.19
36	256.13	14.82	-	-
48	240.98	6.17	301.40	15.68

Operator: N.Pornpot  
 Client: Department of Mining & Materials Engineering, Faculty of Engineering, PSU  
 Job: 7829 Kata  
 Label: Sn-10%SiC-12h (1 Feb 08 13:55:58)



(a)

Operator: N.Pornpot  
 Client: Department of Mining & Materials Engineering, Faculty of Engineering, PSU  
 Job: 7829 Kata  
 Label: Sn-10%SiC-24h (1 Feb 08 14:12:13)



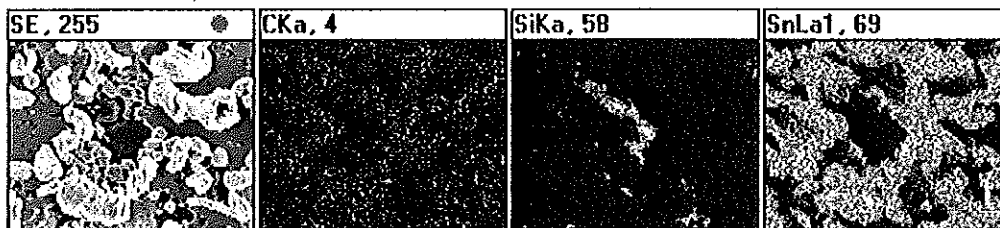
(b)

Operator: N.Pornpot  
 Client: Department of Mining & Materials Engineering, Faculty of Engineering, PSU  
 Job: 7829 Kata  
 Label: Sn-10%SiC-36h (1 Feb 08 14:25:41)



(c)

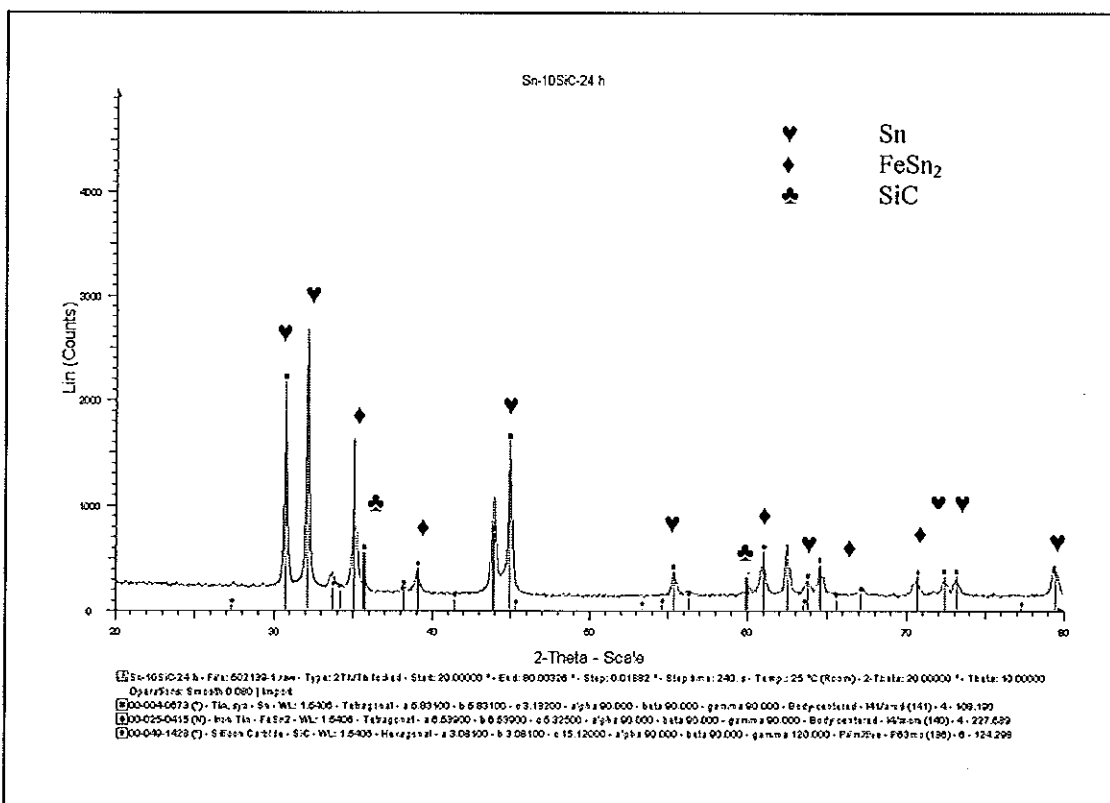
Operator: N.Pornpot  
 Client: Department of Mining & Materials Engineering, Faculty of Engineering, PSU  
 Job: 7829 Kata  
 Label: Sn-10%SiC-48h (1 Feb 08 14:39:55)



(d)

รูปที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุบนวิศเคอร์คีมุคและชิ้นตัวอย่างวัสดุผสม Sn- 10%SiC ที่เวลาบด (a) 12 ชั่วโมง (b) 24 ชั่วโมง (c) 36 ชั่วโมง (d) 48 ชั่วโมง

4.1.5 ผลการวิเคราะห์สารประกอบที่เกิดขึ้นจากการบดผสม ผลจากกราฟ XRD ในรูปที่ 4.4 แสดงให้เห็นว่า นอกจากมีเฟสของดีบุก ซิลิกอนคาร์ไบด์ แล้วยังเกิดสารประกอบระหว่างโลหะ FeSn<sub>2</sub> เนื่องจากหมีโลหะที่ใช้ในการบดผสมเป็นเหล็กกล้าไร้สนิม เป็นสาเหตุให้เกิดการปนเปื้อนเกิดขึ้นระหว่างกระบวนการโลหะผสมเชิงกล FeSn<sub>2</sub> ที่เกิดขึ้นน่าจะทำหน้าที่เช่นเดียวกับอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ ดังที่ Kyung และคณะ (2006) อธิบายว่ากลไกการฟอร์มตัวของเส้นใยดีบุกเกิดจากความแตกต่างของการขยายตัวเนื่องจากความร้อนระหว่างเนื้อดีบุกและมลทิน (impurity) เช่น สารประกอบระหว่างโลหะ (intermetallic compound)

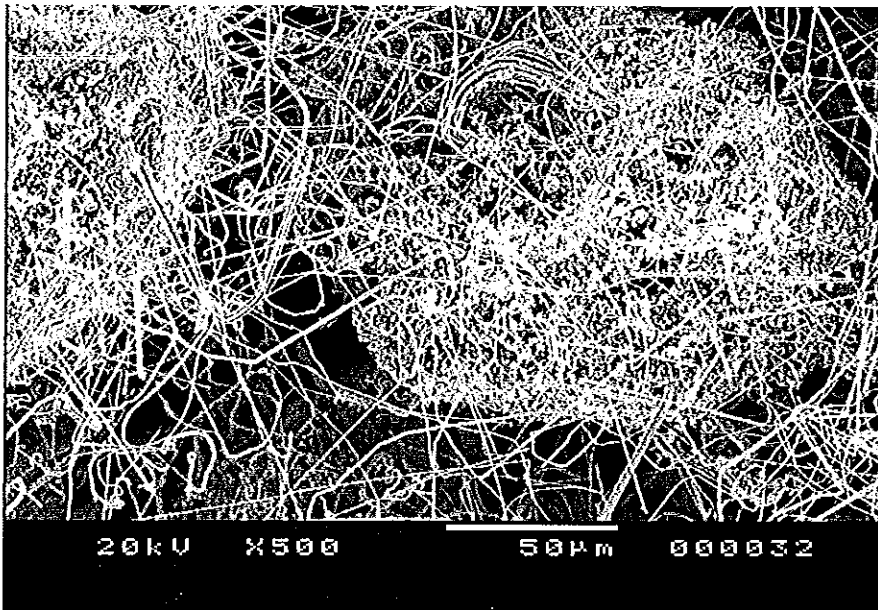


รูปที่ 4.4 ผล XRD ของ ผงวัสดุผสม Sn-10%SiC ที่เวลาบด 24 ชั่วโมง

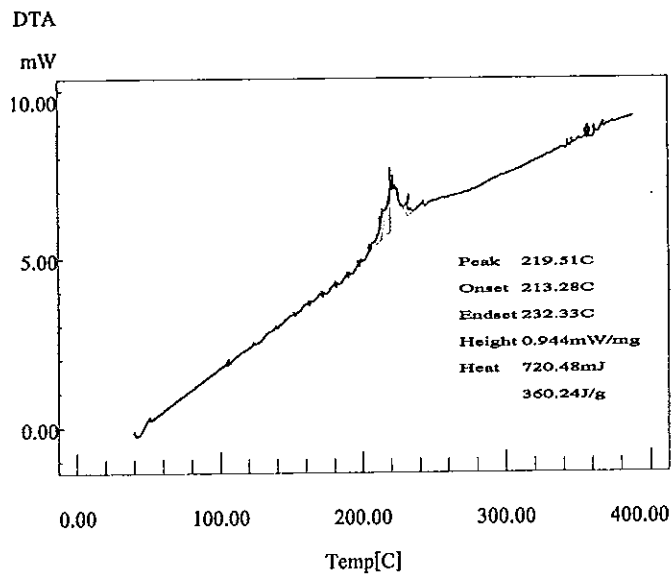
4.1.6 การเตรียมวัสดุผสมโดยระบบใหม่ จากผลการทดลองข้างต้นทำให้เราทราบว่า การเตรียมวัสดุผสมควรเตรียมที่ระยะเวลาบด 24 ชั่วโมง แต่เนื่องจากที่เวลาบดตั้งแต่ 24 ชั่วโมง แต่ต้องใช้ความดันสูงถึง 2000 psi เพื่อให้มีวิสเตอร์ดีบุกเกิดขึ้น จึงได้ปรับปรุงวิธีการสร้างวิสเตอร์ดีบุกโดยการนำผงซิลิกอนคาร์ไบด์มาบดก่อนเพื่อลดขนาดของอนุภาค โดยใช้ความเร็วรอบในการบด 300 รอบต่อนาที นาน 30 นาที แล้วจึงนำมาบดผสมกับดีบุก เป็นเวลา 24 ชั่วโมง พบว่าผงวัสดุผสมสามารถเกิดวิสเตอร์ดีบุกได้เมื่อ ถูกกระตุ้นด้วยความร้อนตั้งแต่ช่วงอุณหภูมิ 200-220 องศาเซล-

เซียส โดยไม่ต้องอาศัยความดัน ดังรูปที่ 4.4 ซึ่งตามสมมุติฐานการเกิดขึ้นของวิสเคอร์ดีบุกในงานวิจัยนี้ ปัจจัยหลักที่ทำให้เกิดเส้นใยคือค่าความเค้นตกค้างในอนุภาคของวัสดุผสม ซึ่งเบื้องต้นมีแนวคิดที่ว่า อาศัยความดันที่ใช้อัดขึ้นรูปเพื่อทำให้เกิดความเค้นตกค้างขึ้น แต่จากการทดลองโดยระบบใหม่ กลไกที่ทำให้เกิดวิสเคอร์ นอกเหนือจากอิทธิพลของพรีซิพิต (Sn-10SiC) ซึ่งมีผลต่อการเกิดเส้นใยลดน้อยลงเมื่อซิลิกอนคาร์ไบด์ถูกลดขนาดลงแล้ว น่าจะเป็นการการตกผลึกใหม่ ดังจะเห็นได้จากกราฟ DTA ในรูปที่ 4.6 เมื่อเทียบกับผลการทดสอบ DTA ของระบบแรก (รูปที่ 4.1) พบว่าเกิดพีคของปฏิกิริยาคายความร้อนและพีคของของปฏิกิริยาคูดความร้อนหายไป ซึ่งแสดงให้เห็นว่ากลไกการเกิดขึ้นของวิสเคอร์ดีบุก เกิดจากกระบวนการตกผลึกใหม่

กระบวนการเตรียมผงวัสดุผสมวิธีใหม่นี้ช่วยให้ประหยัดต้นทุนการผลิตและเวลา มากขึ้น นอกจากนี้จากรูปที่ 4.5 จะเห็นได้ว่า วิสเคอร์ดีบุกที่ผ่านขั้นตอนนี้ มีความยาวมากกว่า ขั้นตอนเดิมอีกด้วย



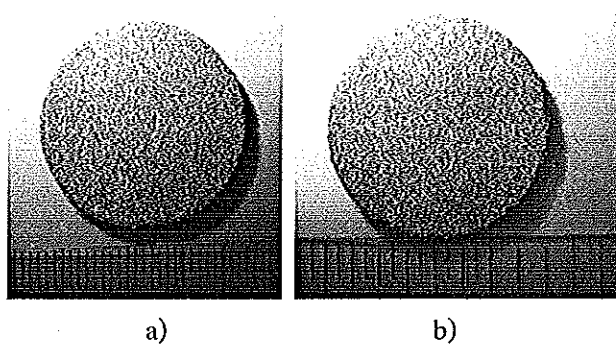
รูปที่ 4.5 วิสเคอร์ดีบุกที่เกิดจากผงวัสดุผสม Sn-10SiC ที่ระยะเวลา 24 ชั่วโมง ช่วงอุณหภูมิ 200-220 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที ภายใต้บรรยากาศอาร์กอน



รูปที่ 4.6 ผลทดสอบปฏิกิริยาทางความร้อนด้วย DTA ของตัวอย่างผงวัสดุผสม Sn-10%SiC ที่เวลา บด 24 ชั่วโมง (บด SiC ก่อน 30 นาที)

#### 4.2 ลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานที่ผลิตได้

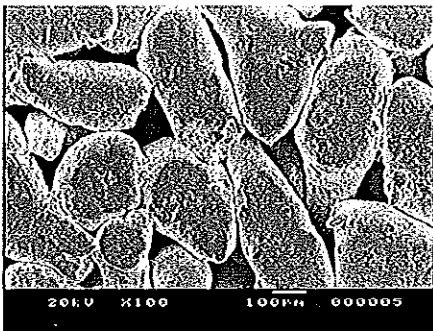
จากการทดลองขึ้นรูปชิ้นงานวัสดุผสมดีบุกพรุน (Sn-x(Sn-10SiC)) ทำให้ได้ชิ้นงาน เป็น ทรง ครอบกลมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25.2 มิลลิเมตรและหนาประมาณ 3.1-4.0 มิลลิเมตร ซึ่งมี ลักษณะ ดังรูป 4.7 ชิ้นงานที่แสดงอยู่ เป็นชิ้นงานที่ผ่านการอบผนึกที่ 220 องศาเซลเซียสแล้ว



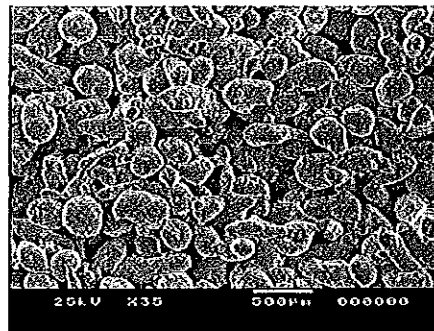
รูปที่ 4.7 ลักษณะชิ้นงานวัสดุผสมดีบุกพรุน Sn+4 %(Sn-10SiC) รูป a) ผิวบนของชิ้นงาน b) ผิวล่างของชิ้นงาน ที่ใส่ส่วนผสมวัสดุผสม 2% ความดัน 1000 psi อบผนึกที่ อุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 9 ชั่วโมง

### 4.3 อิทธิพลของสัดส่วนการเติมวัสดุผสม

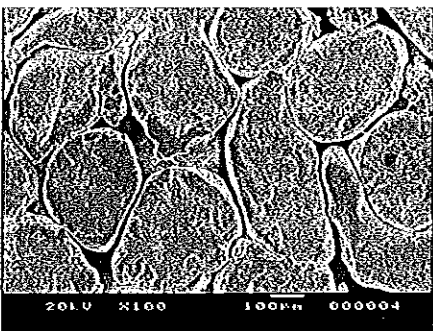
4.3.1 ลักษณะวิทยา (morphology) ลักษณะของชิ้นงานที่เปรียบเทียบกันระหว่างที่เติมวัสดุผสมกับไม่เติมมีความแตกต่างอย่างเห็นได้ชัด จากภาพถ่าย SEM ในรูปที่ 4.8 ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบโครงสร้างภายในของชิ้นงาน จะเห็นได้ว่าชิ้นงานมีรูพรุนลดลงชัดเจนเมื่อเพิ่มปริมาณวัสดุผสมเข้าไป เนื่องจากวัสดุผสมบางส่วนซึ่งมีขนาดอนุภาคเล็กกว่าขนาดอนุภาคของดีบุกเข้าแทรกตรงตำแหน่งช่องว่างของดีบุก ซึ่งนำมายืนยันความเป็นไปได้ของสมมติฐานในหัวข้อ 3.2 รูปที่ 3.3 ได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้พบว่าปริมาณวัสดุผสมที่เติมไม่มีอิทธิพลต่อค่าความหนาแน่นของชิ้นงาน ดังรูปที่ 4.7 ที่ทุกค่าความดันและอุณหภูมิอบผงนี้จะเห็นว่า ค่าความหนาแน่นมีแนวโน้มค่อนข้างคงที่เมื่อเพิ่มปริมาณของวัสดุผสม จากกราฟในรูปที่ 4.9 พบว่าบางจุดค่าความหนาแน่นมีการแกว่ง เนื่องจาก ผลจากอนุภาคของวัสดุผสมอยู่ผิดตำแหน่งดังรูปที่ 4.10 ซึ่งเปรียบเทียบตำแหน่งของวัสดุผสมในชิ้นงานที่แทรกอยู่ที่ช่องว่างกับวัสดุผสมที่อยู่ผิดตำแหน่งคือแทรกอยู่ระหว่างอนุภาค



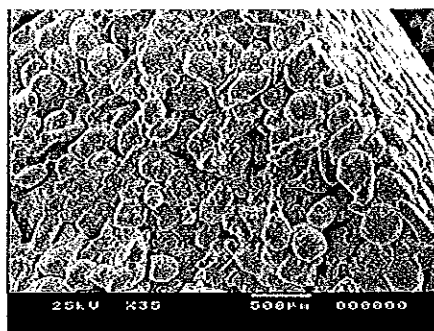
a)



b)

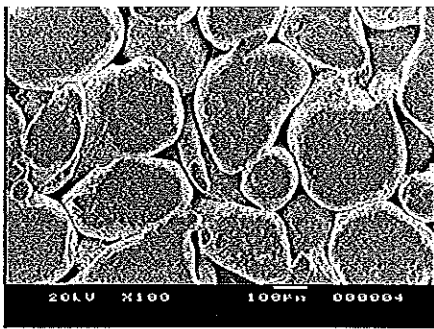


c)

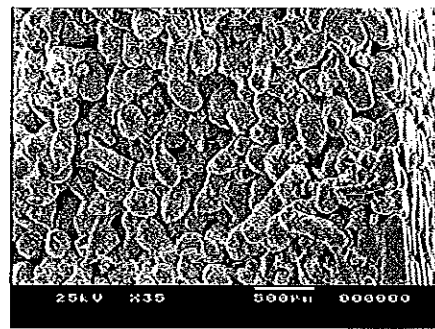


d)

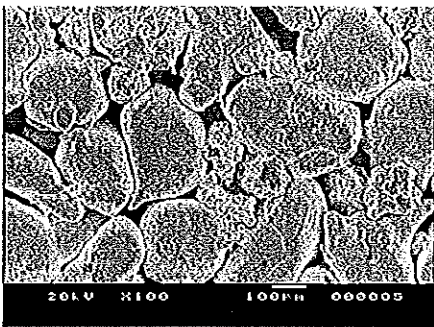
รูปที่ 4.8 ภาพถ่าย SEM ของชิ้นงานวัสดุพูน  $\text{Sn}+x(\text{Sn}-10\text{SiC})$  เปรียบเทียบกันระหว่างที่ผิวหน้า ชิ้นงานที่ปริมาณวัสดุผสม a) 0 % c) 2% กับภาคตัดขวางของชิ้นงานที่ปริมาณวัสดุผสม b) 0% d) 2% ที่อุณหภูมิอบผงนี้ 200 องศาเซลเซียส นาน 9 ชั่วโมง



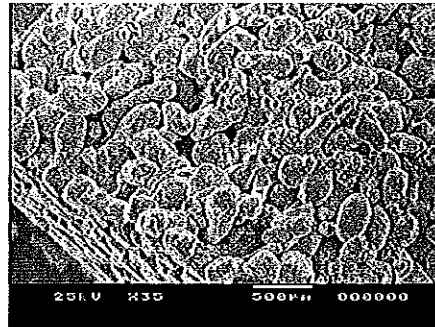
e)



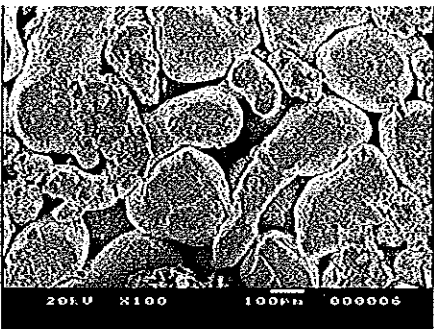
f)



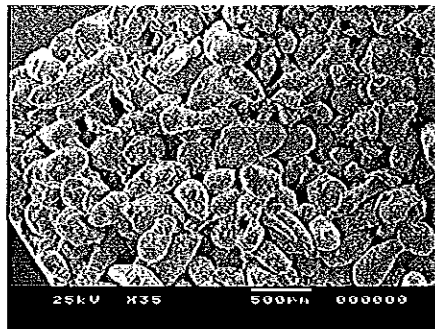
g)



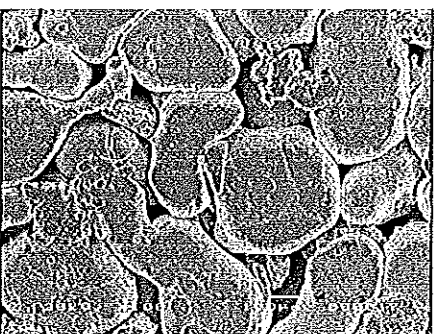
h)



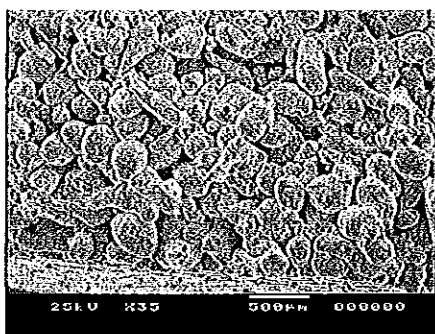
i)



j)

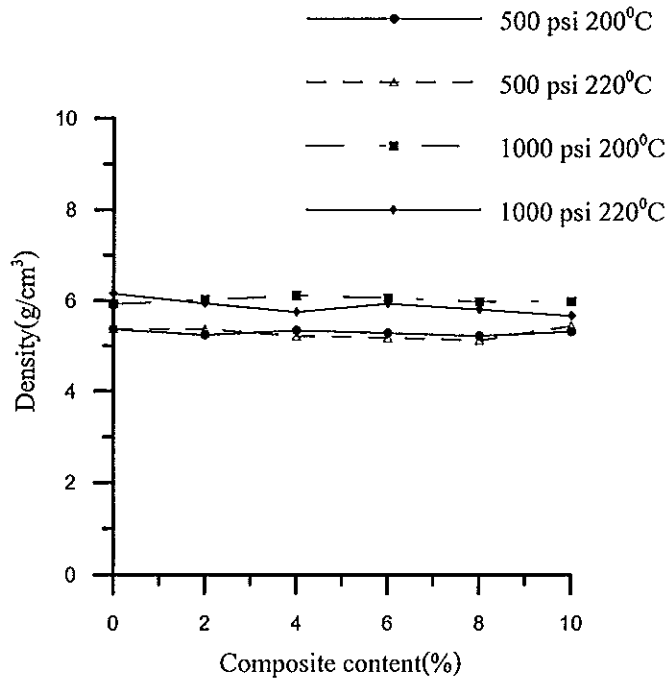


k)

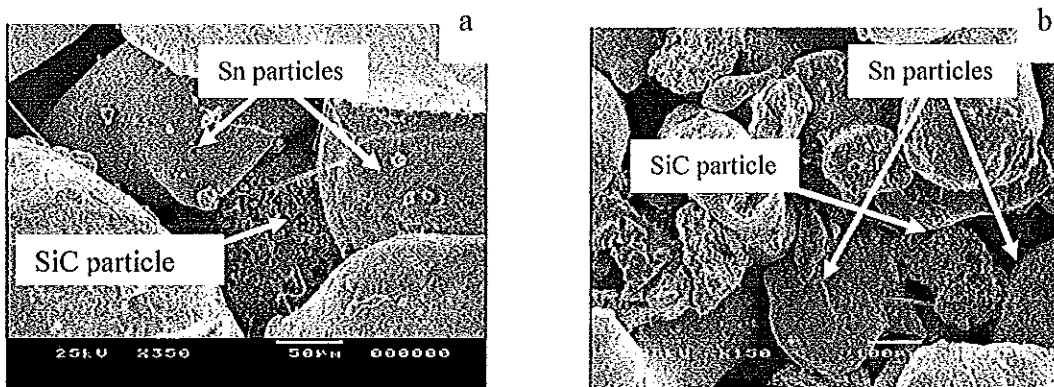


l)

รูปที่ 4.8 (ต่อ) ภาพถ่าย SEM ของชิ้นงานวัสดุพูน  $\text{Sn}+x(\text{Sn}-10\text{SiC})$  เปรียบเทียบกันระหว่างที่ผิวหน้าชิ้นงานที่ปริมาณวัสดุผสม e) 4% g) 6% i) 8% และ k) 10% กับภาคตัดขวางของชิ้นงานที่ปริมาณวัสดุผสม f) 4% h) 6% j) 8% และ l) 10% ที่อุณหภูมิอบแห้ง 200 องศาเซลเซียส นาน 9 ชั่วโมง



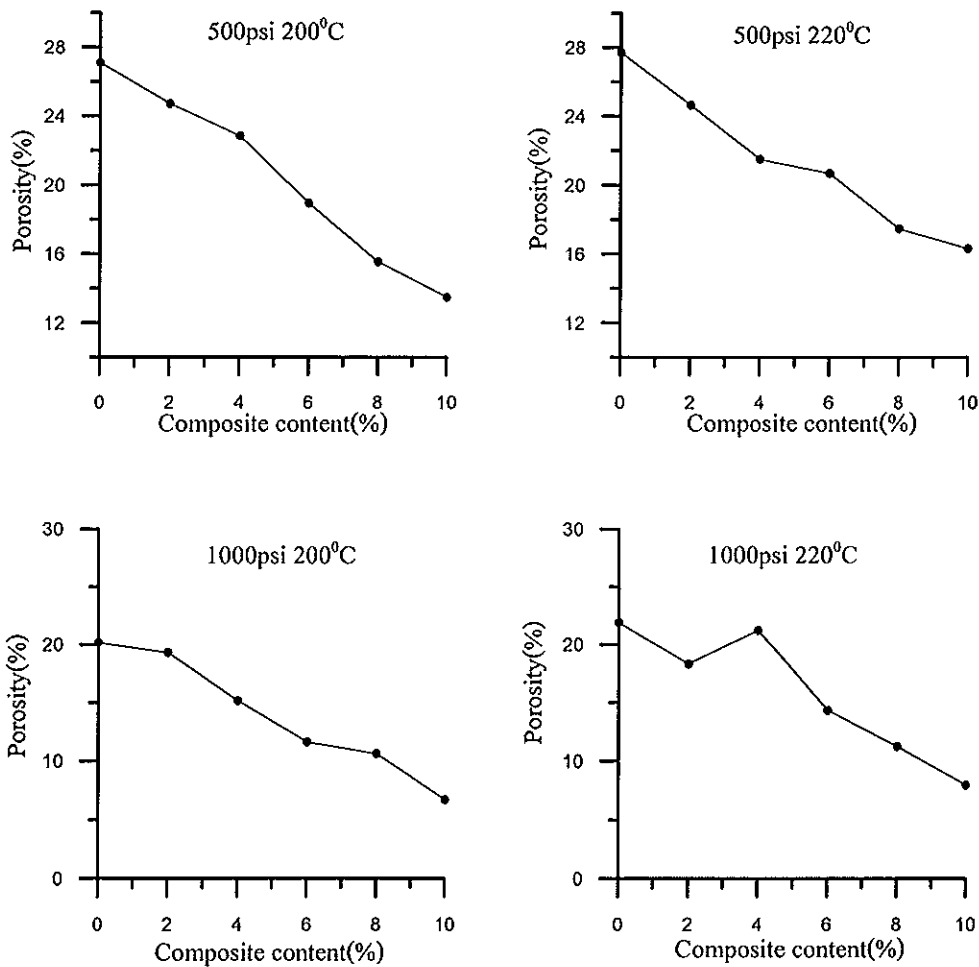
รูปที่ 4.9 กราฟความหนาแน่นของชิ้นงาน ที่อุณหภูมิและความดันต่างๆ เปรียบเทียบผลการเติมวัสดุผสม



รูปที่ 4.10 ภาพถ่าย SEM ของชิ้นงาน Sn + x % (Sn-10SiC) ที่ 500 psi 200 องศาเซลเซียส แสดงตำแหน่งของอนุภาควัสดุผสม 2 แบบ a) อนุภาควัสดุผสมอยู่ในตำแหน่งของช่องว่างระหว่างอนุภาคดีบุก b) อนุภาควัสดุผสมแทนที่ระหว่างอนุภาคดีบุก

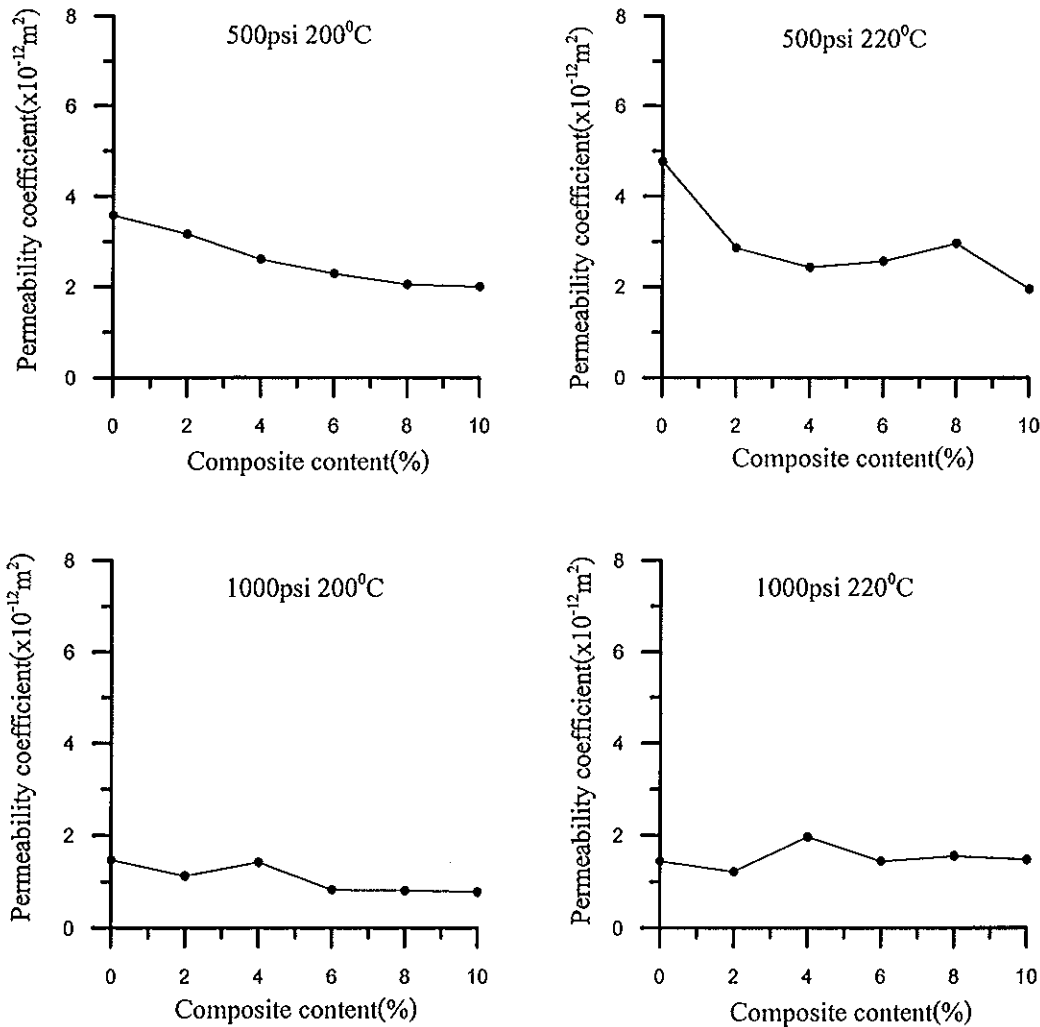
4.3.2 เปอร์เซนต์ความพรุนตัว (porosity) สัดส่วนการเติมวัสดุผสมมีอิทธิพลต่อเปอร์เซนต์ความพรุนตัวของชิ้นงานอย่างชัดเจน ดังรูปที่ 4.11 เมื่อปริมาณของวัสดุผสมในชิ้นงานเพิ่มขึ้นค่าความพรุนของชิ้นงานก็จะลดลง สืบเนื่องมาจากเหตุผลของตำแหน่งของอนุภาคจากข้อ 4.3.1 (รูปที่ 4.10)





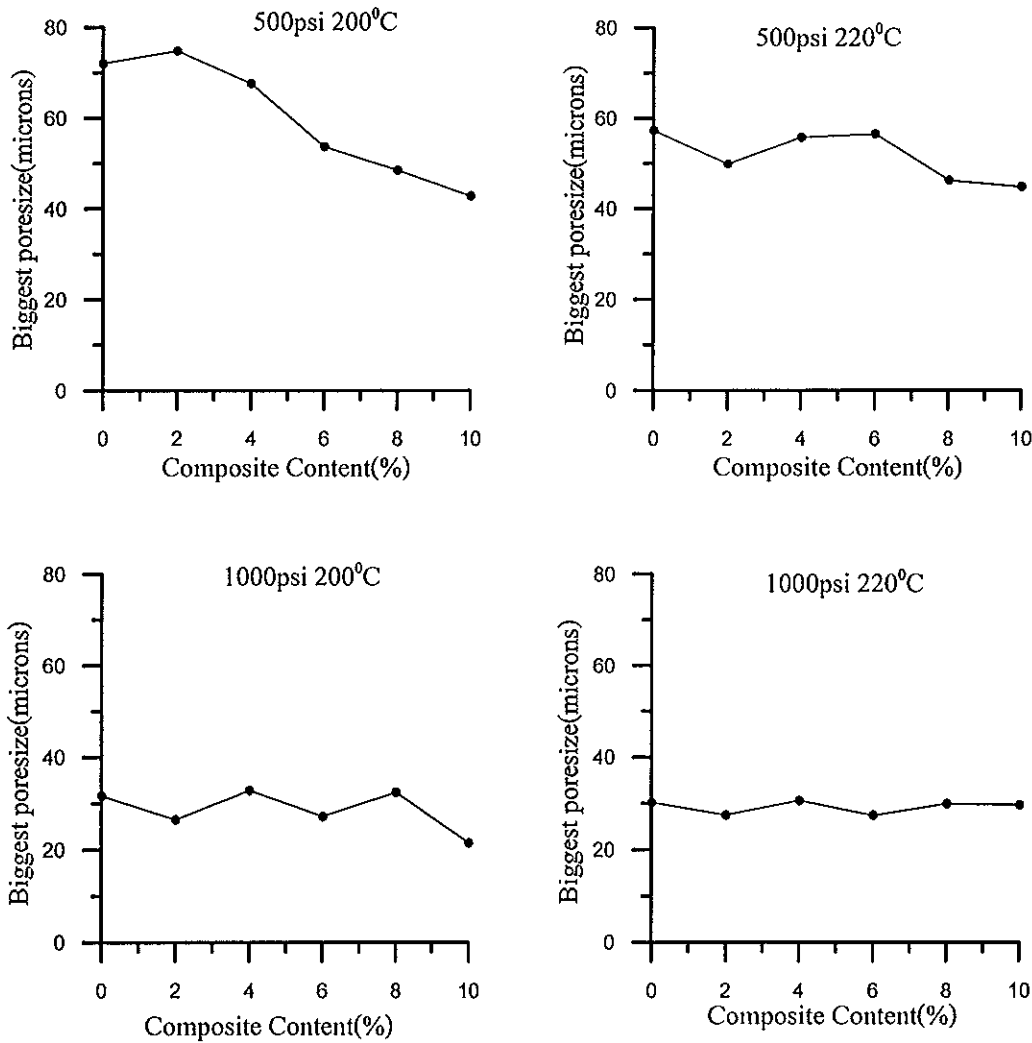
รูปที่ 4.11 เปรอ์เซ็นต์ความพรุนเปรียบเทียบกันระหว่างค่าความดันขึ้นรูปและอุณหภูมิอบแห้งที่ ปริมาณวัสดุผสมต่างๆ

4.3.3 สัมประสิทธิ์การซึมผ่าน ปริมาณวัสดุผสมที่เติมในชิ้นงาน เป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อค่า สัมประสิทธิ์การซึมผ่านอย่างชัดเจน เมื่อใช้ความดันอัดขึ้นรูปที่ 500 psi ดังกราฟในรูปที่ 4.12 จะ เห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มปริมาณวัสดุผสมมากขึ้น ความสามารถในการซึมผ่านของตัวกลางในชิ้นงานลด ลง เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านแปรผันตรงกับค่าความพรุนตัวของชิ้นงาน แต่เมื่อใช้ความ ดันในการอัดขึ้นรูปที่ 1000 psi พบว่าอิทธิพลของความดันมีเหนือกว่าอิทธิพลของปริมาณวัสดุผสม ที่เติม ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านค่อนข้างคงที่แม้ว่าจะเพิ่มปริมาณวัสดุผสม



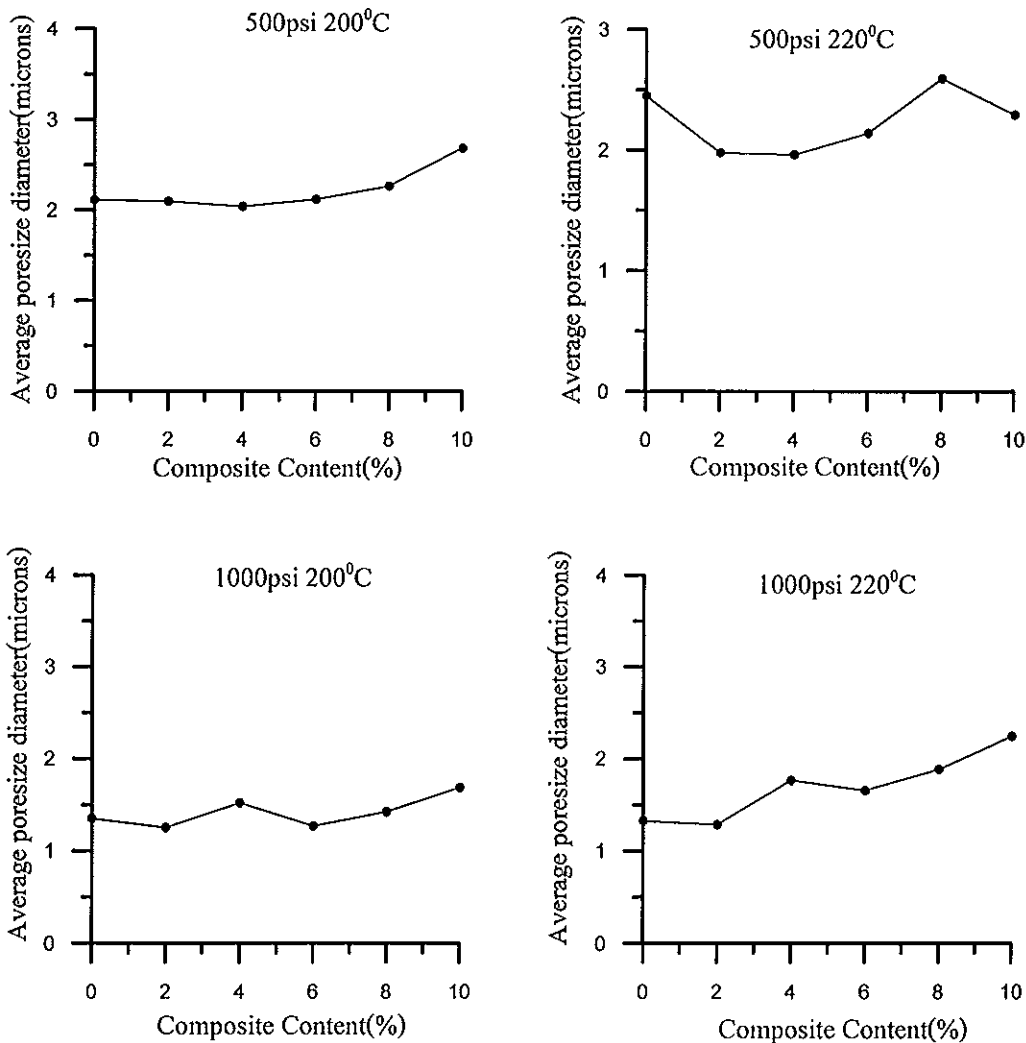
รูปที่ 4.12 สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของชิ้นงานเปรียบเทียบกันระหว่างค่าความดันขึ้นรูป 500 และ 1000 อุณหภูมิอบหนึ่ง 200 และ 220 องศาเซลเซียส ที่ปริมาณวัสดุผสม 0-10 % (Sn-10SiC)

4.3.4 ขนาดรูพรุนโตสุด ขนาดรูพรุนโตสุดของชิ้นงานที่ผลิตได้มีแนวโน้มสอดคล้องกับค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านดังรูปที่ 4.13 คือปริมาณของวัสดุผสมจะมีอิทธิพลต่อขนาดรูพรุนโตสุด เฉพาะชิ้นงานที่ใช้ความดันในการอัดขึ้นรูป 500 psi แต่เมื่อให้ความดันอัดขึ้นรูปสูงขึ้นเป็น 1000 psi อิทธิพลของความดันจะบดบังอิทธิพลของปริมาณวัสดุผสม ดังนั้นเมื่อเพิ่มปริมาณวัสดุผสม ขนาดรูพรุนโตสุดจึงไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก ค่าความหนาแน่นมีการแกว่งเนื่องจาก ผลจากอนุภาคของวัสดุผสมอยู่ผิดตำแหน่งดังรูปที่ 4.10 ซึ่งเป็นไปในทำนองเดียวกับความหนาแน่น



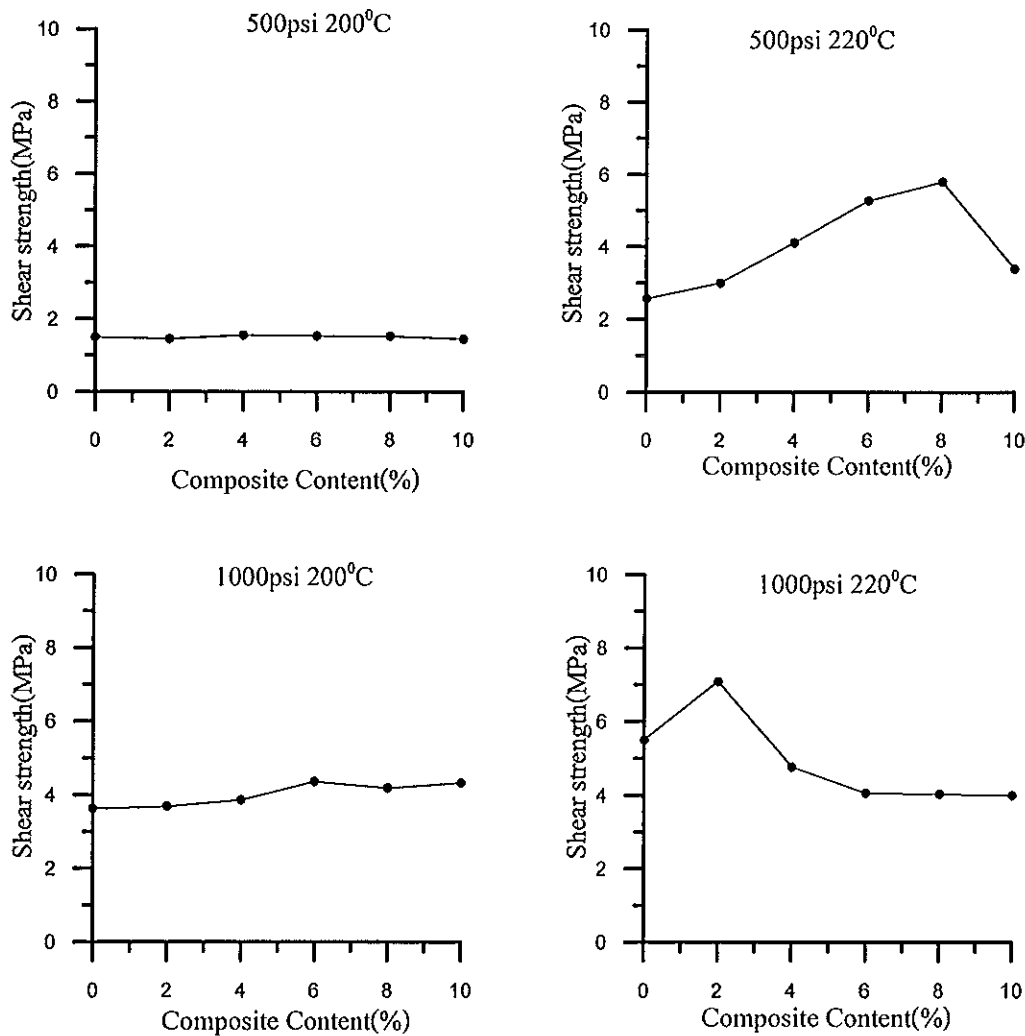
รูปที่ 4.13 ขนาดรูพรุน โตสุดของชิ้นงานเปรียบเทียบกันระหว่างค่าความดันอัดขึ้นรูป 500 และ 1000 psi อุณหภูมิอบผนึ่ง 200 และ 220 องศาเซลเซียส ที่ปริมาณวัสดุผสม 0-10 % (Sn-10SiC)

4.3.5 ขนาดรูพรุนเฉลี่ย ค่าขนาดรูพรุนเฉลี่ยที่ได้จากการคำนวณเมื่อนำมาเขียนกราฟดังรูปที่ 4.14 พบว่าปริมาณการเติมวัสดุผสมไม่มีอิทธิพลต่อขนาดรูพรุนเฉลี่ยที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานที่ผลิตได้ เนื่องจากเมื่อเพิ่มปริมาณวัสดุผสมแล้ว ขนาดรูพรุนเฉลี่ยมีแนวโน้มคงที่ ยกเว้นกราฟที่ความดันอัดขึ้นรูป 1000 psi อุณหภูมิอบผนึ่ง 220 องศาเซลเซียส ขนาดรูพรุนเฉลี่ยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณวัสดุผสม



รูปที่ 4.14 ขนาดรูพรุนเฉลี่ยของชิ้นงานเปรียบเทียบกันระหว่างค่าความดันอัดขึ้นรูป 500 และ 1000 psi อุณหภูมิอบผึ่ง 200 และ 220 องศาเซลเซียส ที่ปริมาณวัสดุผสม 0-10 % (Sn-10SiC)

4.3.6 ความแข็งแรงเลื่อน เมื่อนำความแข็งแรงเลื่อนที่ได้จากการทดลองมาเขียนกราฟดังรูปที่ 4.15 จะเห็นได้ว่าปริมาณวัสดุผสมที่เติมไม่ส่งผลต่อความแข็งแรงเลื่อนของชิ้นงาน คือเมื่อเพิ่มปริมาณวัสดุผสมแล้วค่าความแข็งแรงเลื่อนมีแนวโน้มคงที่ ยกเว้นชิ้นงานที่ใช้ความดันอัดขึ้นรูป 500 psi อุณหภูมิอบผึ่ง 220 องศาเซลเซียส ค่าความแข็งแรงเลื่อนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณวัสดุผสม สาเหตุเนื่องจากอิทธิพลของอุณหภูมิอบผึ่งทำให้ความแข็งแรงของชิ้นงานเพิ่มสูงขึ้น เมื่อใช้อุณหภูมิอบผึ่งเป็น 220 องศาเซลเซียส เป็นการเพิ่มโอกาสที่จะทำให้เกิดการไหลของมวลของอนุภาคดีบุกได้ง่าย ทำให้มีขนาดของคอคอดมากขึ้น ซึ่งกลไกการไหลของมวลของอนุภาคดีบุกเมื่อทำการอบผึ่งน่าจะเป็นการเคลื่อนที่ตามผิว (surface transport) (นภิสพร, 2548) เนื่องจากไม่มีการหดตัว สังเกตจากค่าความหนาแน่นของชิ้นงานไม่เปลี่ยนแปลง

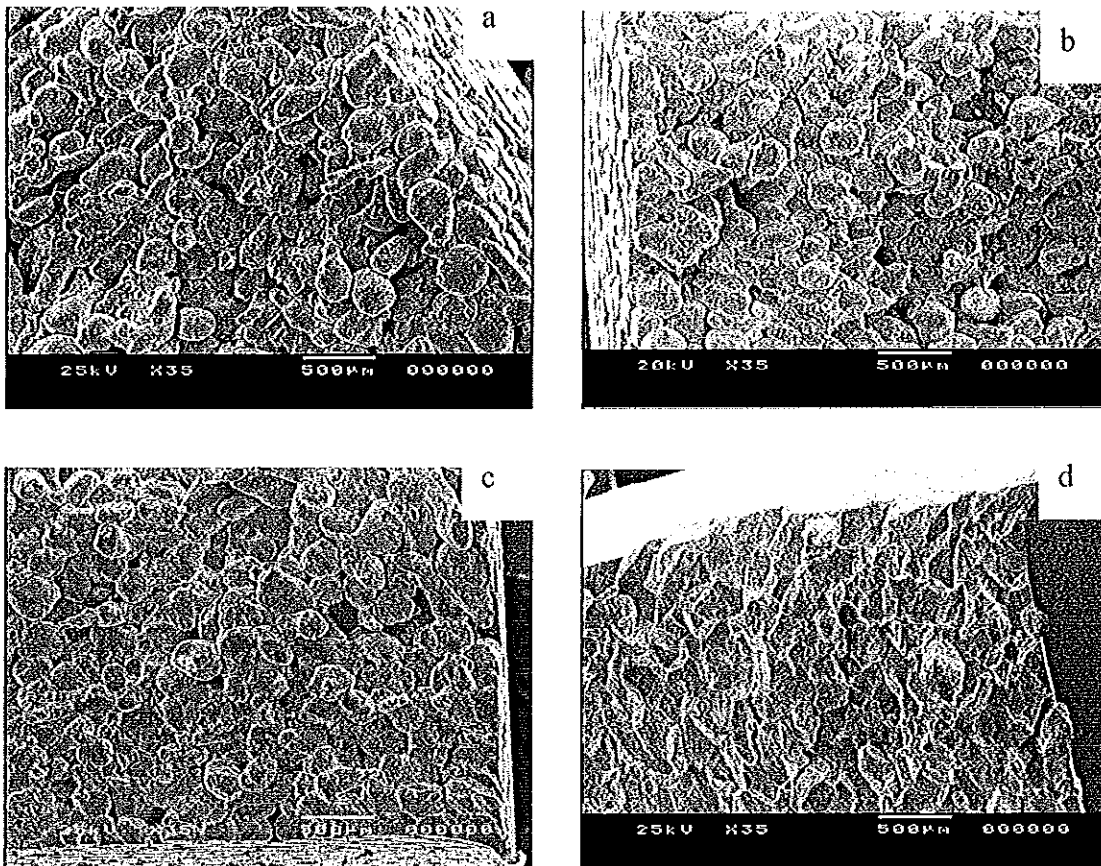


รูปที่ 4.15 ค่าความแข็งแรงเฉือนของชิ้นงานเปรียบเทียบกันระหว่างค่าความดันอัดขึ้นรูป 500 และ 1000 psi อุณหภูมิอบแห้ง 200 และ 220 องศาเซลเซียส ที่ปริมาณวัสดุผสม 0-10 % (Sn-10SiC)

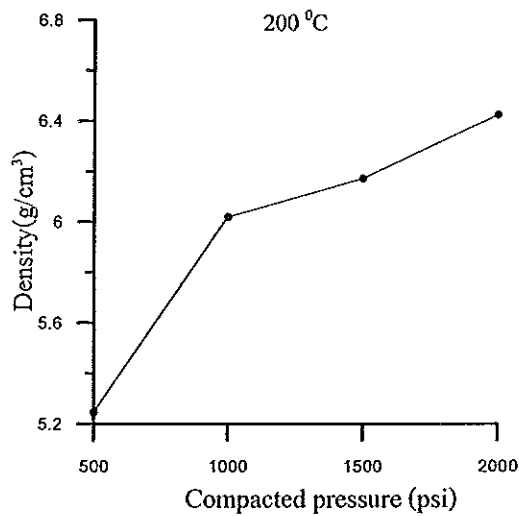
#### 4.4 อิทธิพลของความดัน

4.4.1 **ลักษณะวิทยา (morphology)** ค่าความดันที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปชิ้นงานเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อโครงสร้างของชิ้นงาน ดังรูปที่ 4.16 เมื่อความดันที่ใช้ขึ้นรูปสูงขึ้นพบว่า อนุภาคของดีบุกและวัสดุผสมอยู่ชิดกันมากขึ้น และจากภาพในรูปที่ 4.17 จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าเมื่อเพิ่มความดันที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปตั้งแต่ 500, 1000, 1500 จนถึง 2000 psi ค่าความหนาแน่นของชิ้นงานก็เพิ่มขึ้นตาม เนื่องจากเมื่อเริ่มให้ความดัน การตอบรับแรกสุดคือการจัดเรียงตัวใหม่ของอนุภาค โดยอนุภาคมีการเติมในรูพรุนขนาดใหญ่ก่อนส่งผลให้จำนวนการสัมผัสกับอนุภาครอบตัวสูงขึ้น (นภิสพร, 2548) ทำให้ความหนาแน่นสูงขึ้น

จากรูปที่ 4.16 เป็นภาพถ่าย SEM ของชิ้นงานที่ได้รับความดันในการอัดขึ้นรูปต่างกัน จะเห็นได้ว่าชิ้นงานที่ได้รับความดันในการอัดขึ้นรูป 500, 1000 และ 1500 psi (รูปที่ 4.16 a-c) มีลักษณะไม่แตกต่างกันมากนัก แต่เมื่อให้ความดันอัดขึ้นรูปเป็น 2000 psi จะเห็นว่ามิติอัตราการอัดแน่นตัวสูงกว่าอย่างชัดเจน ซึ่งส่งผลต่อขนาดของรูพรุน ประสิทธิภาพการอบผนึกและความแข็งแรงของชิ้นงาน โดยจะเห็นได้ว่าอัตราการแน่นตัวของชิ้นงานจะเพิ่มสูงขึ้น เมื่อเพิ่มค่าความดันที่อัดขึ้นรูป (นภิสพร, 2548) ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่างอนุภาคยอมเพิ่มสูงขึ้นด้วย ซึ่งเป็นไปตามกราฟในทฤษฎีการอัดขึ้นรูป รูปที่ 2.4 ส่งผลให้การอบผนึกชิ้นงานที่ใช้ความดันอัดขึ้นรูป 2000 psi เข้าสู่ขั้นตอนสุดท้ายของการอบผนึก คือ มีการรวมตัวกันของรูพรุนขนาดเล็ก (รูพรุนขนาดเล็กมีความเสถียรต่ำ) (นภิสพร, 2548) ในขณะที่ชิ้นงานที่ได้รับความดันในการอัดขึ้นรูป 500, 1000 และ 1500 psi อยู่ในขั้นตอนของการอบผนึกระหว่างขั้นแรกและขั้นกลางเท่านั้น (นภิสพร, 2548) กลไกการแน่นตัวและการอบผนึกที่มีผลมาจากการให้ความดันขึ้นรูปนี้เอง ทำให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นถึง 4 เท่าเมื่อเพิ่มความดันจาก 500 psi เป็น 2000 psi

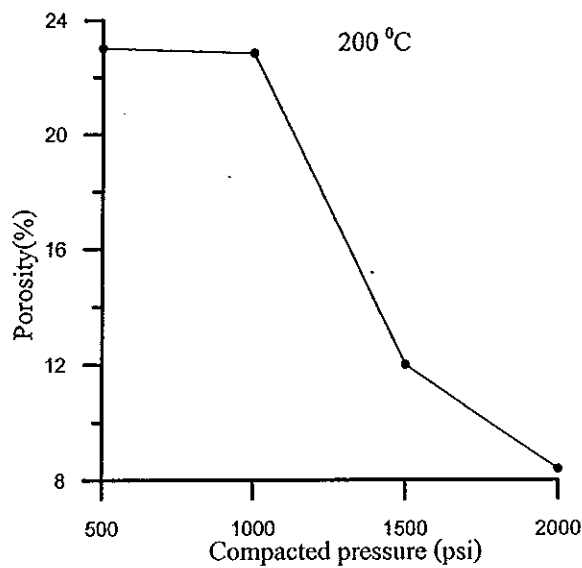


รูปที่ 4.16 ภาพถ่าย SEM ของชิ้นงานวัสดุผสม Sn+2%(Sn-10SiC) ความดัน a) 500 psi b) 1000 psi c) 1500 psi และ d) 2000 psi ที่อุณหภูมิอบผนึก 200 องศาเซลเซียส นาน 9 ชั่วโมง



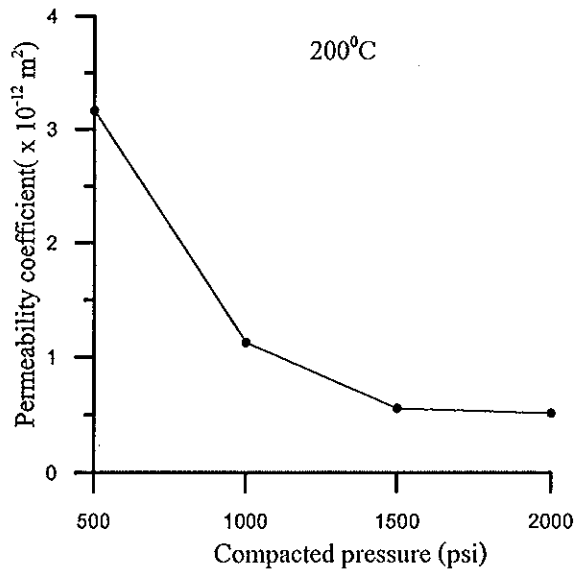
รูปที่ 4.17 ความหนาแน่นของชิ้นงานวัสดุผสม Sn+2% (Sn-10SiC) ที่ค่าความดันอัดขึ้นรูป 4 ค่า ที่อุณหภูมิอบสัณิก 200 องศาเซลเซียส นาน 9 ชั่วโมง

4.4.2 เปอร์เซนต์ความพรุนตัว (porosity) ความดันที่ใช้อัดขึ้นรูปมีอิทธิพลต่อความพรุนตัวของชิ้นงานเช่นเดียวกับความหนาแน่น เนื่องจากการเพิ่มความดันทำให้การจัดเรียงตัวของอนุภาคดีขึ้นและนำไปสู่การลดลงของความพรุน โดยการฟอร์มตัวของจุดสัมผัสใหม่ของอนุภาค (นภิสพร, 2548) ดังรูปที่ 4.18 จะเห็นได้ว่าค่าความพรุนตัวเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเมื่อความดันอัดขึ้นรูปเพิ่มจาก 500 psi เป็น 1000 psi แต่จะลดลงอย่างชัดเจนเมื่อเพิ่มความดันที่ใช้อัดขึ้นรูปเป็น 1500 และ 2000 psi



รูปที่ 4.18 เปอร์เซนต์ความพรุนของชิ้นงานวัสดุผสม Sn+2% (Sn-10SiC) ที่ความดัน 4 ค่า อุณหภูมิอบสัณิก 200 องศาเซลเซียส นาน 9 ชั่วโมง

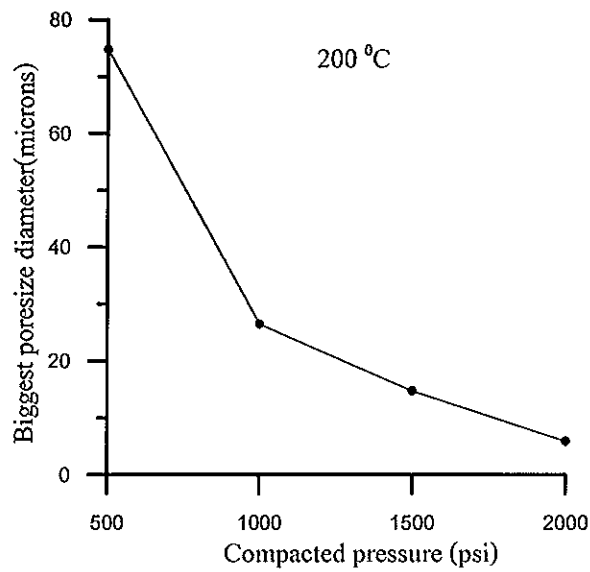
4.4.3 สัมประสิทธิ์การซึมผ่าน ความดันที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปมีอิทธิพลต่อค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านอย่างเห็นได้ชัด ดังรูปที่ 4.19 พบว่าค่าความดันในการอัดขึ้นรูปให้แก่ชิ้นงานจะแปรผกผันกับค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านเช่นเดียวกับเปอร์เซ็นต์ความพรุน เนื่องจากการอัดขึ้นรูปด้วย ความดันที่สูงขึ้น ทำให้จำนวนการสัมผัสและพื้นที่ที่สัมผัสระหว่างอนุภาคเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความพรุนลดลง ดังนั้น ความสามารถในการซึมผ่านจึงลดลงด้วย



รูปที่ 4.19 ค่าสัมประสิทธิ์ในการซึมผ่านของอากาศของชิ้นงานที่ความดัน 500 psi 1000 psi 1500 psi และ 2000 psi ที่อุณหภูมิอบผืนิก 200 องศาเซลเซียส นาน 9 ชั่วโมง

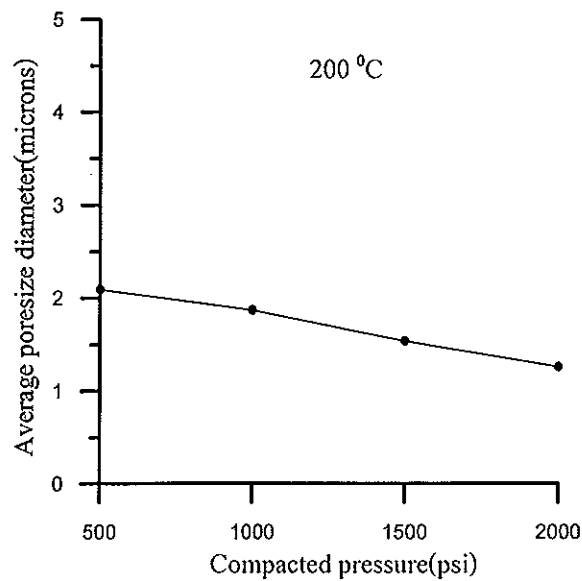
4.4.4 ขนาดรูพรุนโตสุด เมื่อนำผลการทดลองมาคำนวณและเขียนกราฟได้ดังรูปที่ 4.20 พบว่าอิทธิพลของความดันที่ใช้อัดขึ้นรูปมีอิทธิพลต่อขนาดของรูพรุน โตสุด เช่นเดียวกับค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านและเปอร์เซ็นต์ความพรุน เมื่อใช้ความดันในการอัดขึ้นรูปชิ้นงานเพิ่มสูงขึ้น ขนาดรูพรุน โตสุดจะลดลง เนื่องจากที่ความดันสูงขึ้นทำให้อนุภาคของดินุกและวัสดุผสมเรียงตัวชิดกันมากขึ้น ทำให้ระยะห่างระหว่างอนุภาคน้อยลง (ขนาดรูพรุนเล็กลง) (นภิสพร, 2548)





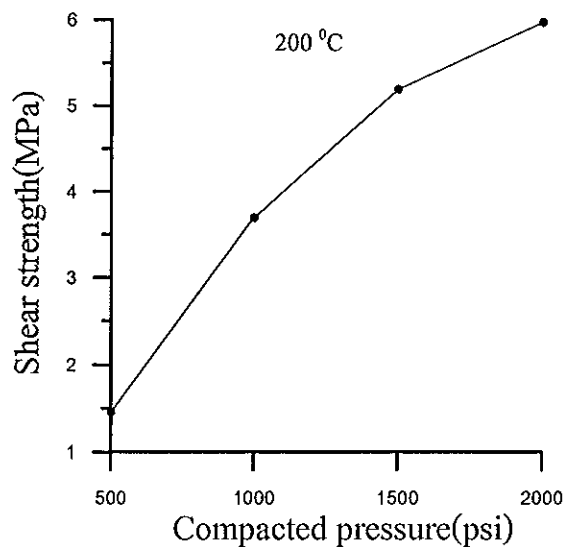
รูปที่ 4.20 ขนาดรูพรุนโตสุดของชิ้นงานที่ความดัน 500 1000 1500 และ 2000 psi ที่อุณหภูมิอบ  
ผืนึก 200 องศาเซลเซียส นาน 9 ชั่วโมง

4.4.5 ขนาดรูพรุนเฉลี่ย อิทธิพลของความดันที่ใช้อัดขึ้นรูปมีผลต่อขนาดรูพรุนเฉลี่ย เช่นเดียวกับขนาดรูพรุนโตสุดและสัมประสิทธิ์การซึมผ่านดังรูปที่ 4.21 เมื่อใช้ความดันในการอัดขึ้นรูปชิ้นงานเพิ่มสูงขึ้นขนาดรูพรุนเฉลี่ยจะลดลง ด้วยเหตุผลเช่นเดียวกับค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน



รูปที่ 4.21 ขนาดรูพรุนเฉลี่ยของชิ้นงานที่ความดัน 500 psi 1000 psi 1500 psi และ 2000 psi ที่  
อุณหภูมิอบผืนึก 200 องศาเซลเซียส นาน 9 ชั่วโมง

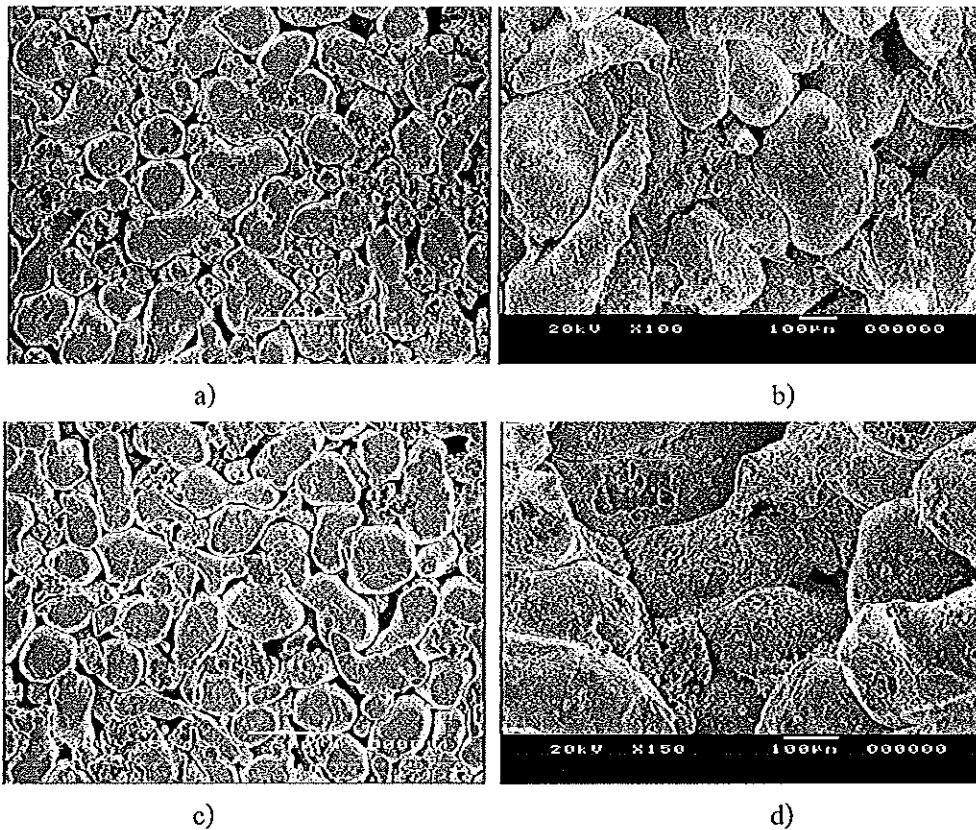
4.4.6 ความแข็งแรงเฉือน ทำการทดสอบความแข็งแรงเฉือนและนำมาเขียนกราฟดังรูปที่ 4.22 จะเห็นว่า ความดันที่ใช้ขึ้นรูปชิ้นงานมีอิทธิพลต่อค่าความแข็งแรงเฉือนอย่างชัดเจน เมื่อให้ความดันสูงขึ้นชิ้นงานมีความแข็งแรงมากขึ้น เนื่องจากแรงเฉือนสูงสุดเกิดขึ้นตรงกลางของจุดสัมผัสระหว่างอนุภาคส่งผลให้มีการพัฒนาความแข็งแรงขึ้นในชิ้นงาน (นภิสพร, 2548) ดังกล่าวมาเมื่อผิวสัมผัสมีพื้นที่เพิ่มมากขึ้นค่าความแข็งแรงก็สูงขึ้นตามไปด้วย



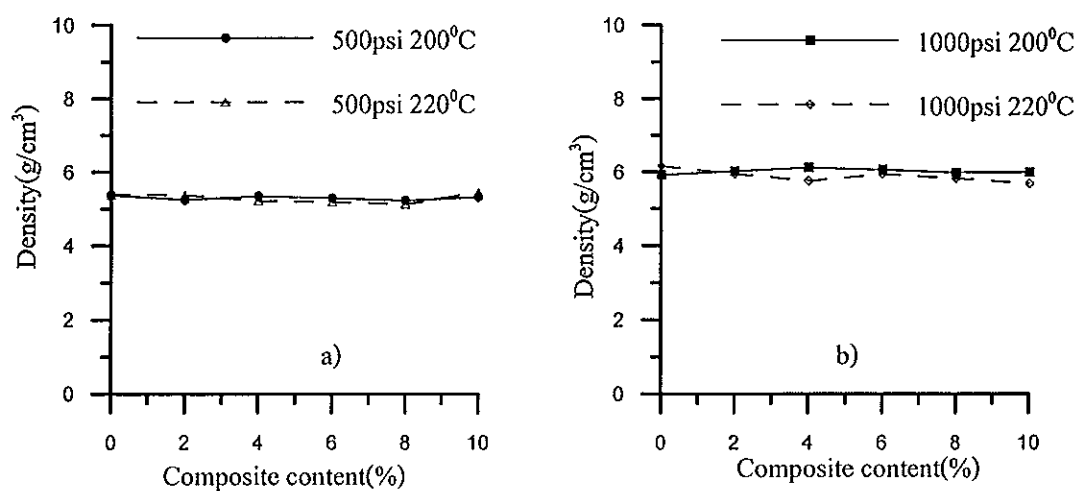
รูปที่ 4.22 ความแข็งแรงเฉือนของชิ้นงานที่ความดันที่ใช้อัดขึ้นรูป 4 ค่า ที่อุณหภูมิอบผงึก 200 องศาเซลเซียส นาน 9 ชั่วโมง

#### 4.5 อิทธิพลของอุณหภูมิ

4.5.1 สัณฐานวิทยา (morphology) จากการทดลองพบว่าที่อุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียส นาน 9 ชั่วโมง อนุภาคของดินุจะหลอมรวมเป็นเนื้อเดียวกัน นั่นคือเลยขั้นตอนสุดท้าย (final stage) ของการอบผงึก จึงเลือกใช้อุณหภูมิอบผงึกที่ 220 องศาเซลเซียส และ 200 องศาเซลเซียส ซึ่งจากรูปที่ 4.23 แสดงให้เห็นว่าผลของอุณหภูมิอบผงึกทั้งสองค่าไม่มีผลแตกต่างกันมากนัก ซึ่งน่าจะอยู่ในขั้นตอนแรกของการอบผงึกคือ มีคอคอดเกิดขึ้นระหว่างผิวสัมผัสของสองอนุภาคที่อยู่ติดกัน(รูปที่ 4.23b และ 4.23d) และจากการคำนวณหาความหนาแน่นแล้วนำมาเขียนกราฟดังรูปที่ 4.24 พบว่าอุณหภูมิอบผงึกที่ใช้ไม่มีผลต่อความหนาแน่นของชิ้นงานมากนัก เนื่องจากใช้อุณหภูมิอบผงึกที่ค่อนข้างต่ำ นอกจากนี้การอบผงึกไม่ทำให้ชิ้นงานหดตัวเนื่องจากชิ้นงานได้รับอิทธิพลของแรงดันจากการอัดขึ้นรูปมาก่อนแล้ว

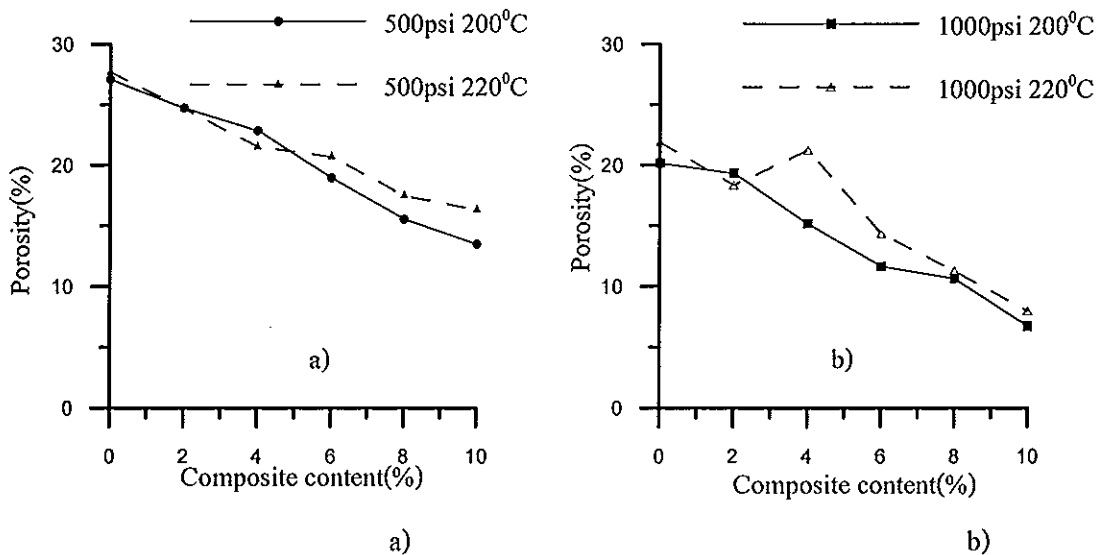


รูปที่ 4.23 ภาพถ่าย SEM เปรียบเทียบชิ้นตัวอย่าง Sn + 10 % (Sn-10SiC) ที่อุณหภูมิอบสัณิก a) 200 องศาเซลเซียส b) 220 องศาเซลเซียส ที่ความดัน 1000 psi นาน 9 ชั่วโมง



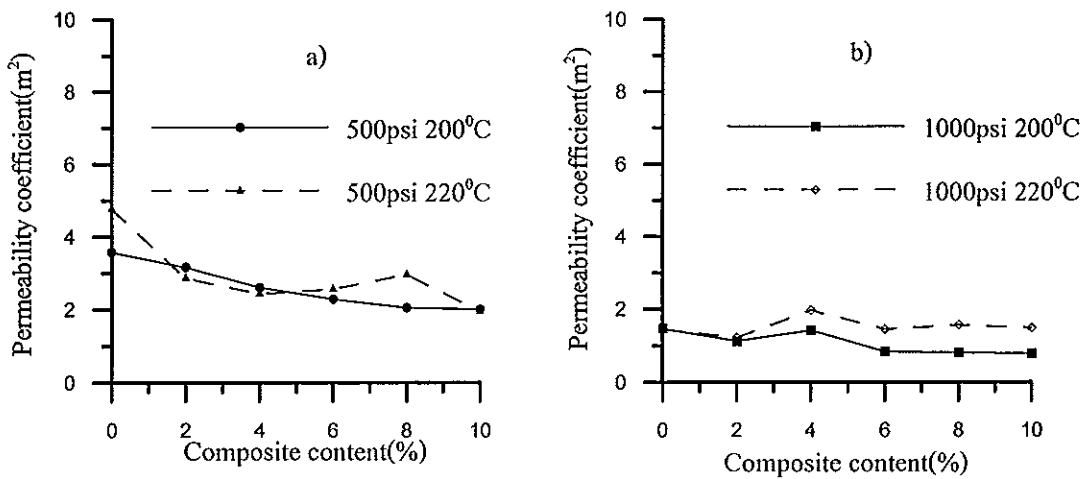
รูปที่ 4.24 ความหนาแน่นของชิ้นงานที่อุณหภูมิอบสัณิก 200 องศาเซลเซียส เปรียบเทียบกับ 220 องศาเซลเซียส ที่ความดันที่ใช้อัดขึ้นรูป a) 500 psi และ b) 1000 psi นาน 9 ชั่วโมง

4.5.2 เปอร์เซ็นต์ความพรุนตัว (porosity) อุณหภูมิที่ใช้ในการอบขึ้นงาน ไม่เป็นปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อเปอร์เซ็นต์ความพรุนของชิ้นงาน โดยตรง รูปที่ 4.25 แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิอบขึ้นที่สูงขึ้น ไม่ได้ทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุนเปลี่ยนแปลงมากนัก



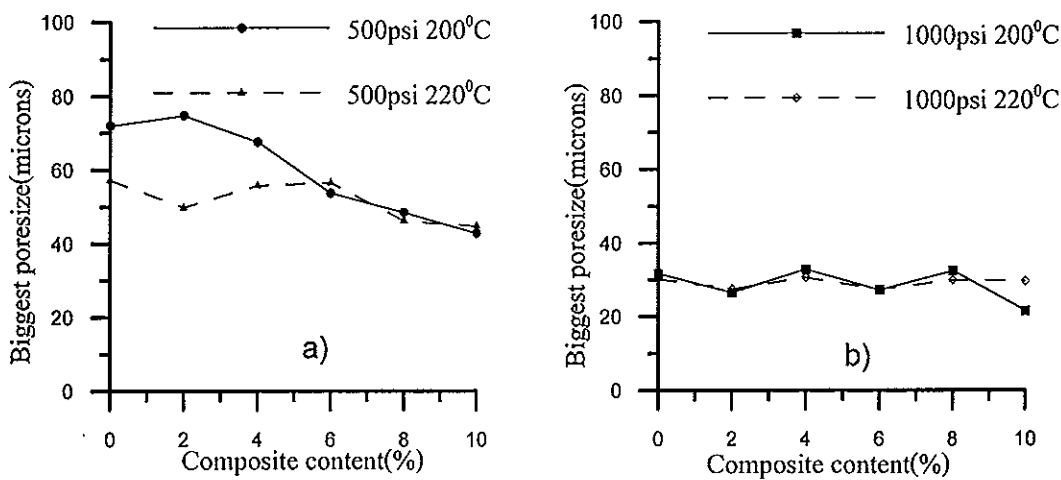
รูปที่ 4.25 เปอร์เซ็นต์ความพรุนของชิ้นงานที่อุณหภูมิอบขึ้น 200 องศาเซลเซียส เปรียบเทียบกับ 220 องศาเซลเซียส ที่ความดันที่ใช้อัดขึ้นรูป a) 500 psi และ b) 1000 psi นาน 9 ชั่วโมง

4.5.3 สัมประสิทธิ์การซึมผ่าน เมื่อนำผลการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของชิ้นงานที่ใช้อุณหภูมิอบขึ้นต่างกันมาเขียนกราฟ ดังรูปที่ 4.26 จะเห็นได้ว่า อุณหภูมิอบขึ้นจะไม่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านดังรูป 4.26 a) แต่เมื่อใช้ความดันในการอัดขึ้นรูปชิ้นงานที่ 1000 psi พบว่าอุณหภูมิอบขึ้นที่ 220 องศาเซลเซียส จากรูปที่ 4.26 b) ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ซึ่งสอดคล้องกับค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุนตัว ที่อุณหภูมิอบขึ้น 220 องศาเซลเซียส มีค่าความพรุนตัวสูงขึ้นเล็กน้อยทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านสูงขึ้นตามไปด้วย



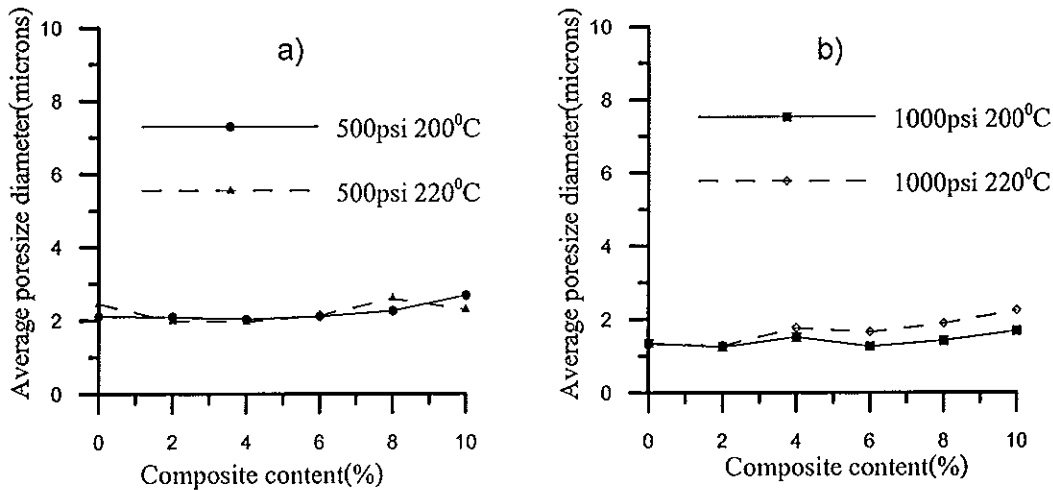
รูปที่ 4.26 ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของชิ้นงานที่อุณหภูมิอบผนึก 200 องศาเซลเซียส เปรียบเทียบกับ 220 องศาเซลเซียส ที่ความดันที่ใช้อัดขึ้นรูป a) 500 psi และ b) 1000 psi นาน 9 ชั่วโมง

4.5.4 ขนาดรูพรุนโตสุด ผลที่ได้จากการคำนวณค่าขนาดของรูพรุนโตสุดแล้วนำมาเขียนกราฟดังรูปที่ 4.27 แสดงให้เห็นอิทธิพลของความดันและสัดส่วนการเติมวัสดุผสมบนอิทธิพลของอุณหภูมิอบผนึกอยู่ ดังจะเห็นได้จากที่ความดัน 500 psi และปริมาณวัสดุผสมน้อยกว่า 6% ชิ้นงานที่อุณหภูมิอบผนึก 200 องศาเซลเซียส จะให้ค่าขนาดรูพรุนโตสุดสูงกว่าที่อุณหภูมิอบผนึก 220 องศาเซลเซียส เนื่องจากเมื่อเริ่มขั้นตอนแรกของการอบผนึกอุณหภูมิอบผนึกที่สูงกว่าจะทำให้เกิดคอคอดที่ผิวสัมผัสของอนุภาคมีการเพิ่มขนาดขึ้นเร็วกว่า ขนาดของรูพรุนจึงเล็กลง



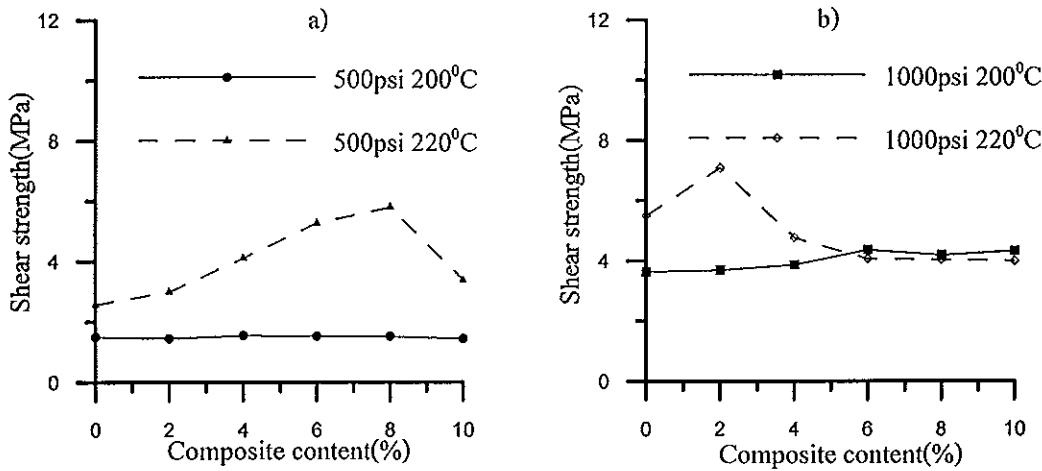
รูปที่ 4.27 ขนาดรูพรุนโตสุดของชิ้นงานที่อุณหภูมิอบผนึก 200 องศาเซลเซียส เปรียบเทียบกับ 220 องศาเซลเซียส ที่ความดันที่ใช้อัดขึ้นรูป a) 500 psi และ b) 1000 psi นาน 9 ชั่วโมง

4.5.5 ขนาดรูพรุนเฉลี่ย อุณหภูมิที่ใช้อบผนึกไม่มีอิทธิพลต่อค่าขนาดรูพรุนเฉลี่ยเช่นเดียวกับค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน รูปที่ 4.28 แสดงให้เห็นว่าแนวโน้มของกราฟของขนาดของรูพรุนเฉลี่ยเหมือนกันกับกราฟค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน ซึ่งจะไม่เปลี่ยนแปลงมากนักเมื่อเพิ่มอุณหภูมิอบผนึกสูงขึ้น



รูปที่ 4.28 ขนาดรูพรุนเฉลี่ยของชิ้นงานที่อุณหภูมิอบผนึก 200 องศาเซลเซียส เปรียบเทียบกับ 220 องศาเซลเซียส ที่ความดันที่ใช้อัดขึ้นรูป a) 500 psi และ b) 1000 psi นาน 9 ชั่วโมง

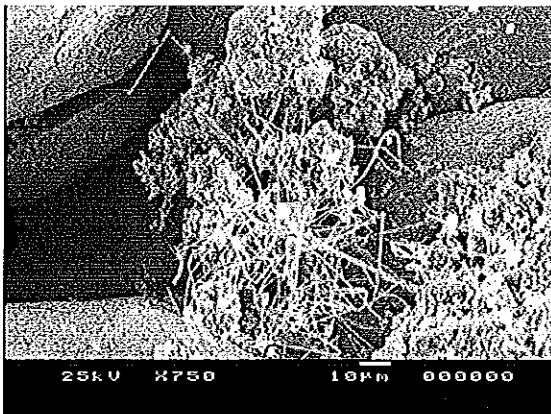
4.5.6 ความแข็งแรงเดือน อุณหภูมิที่ใช้ในการอบผนึกเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าความแข็งแรงเดือนเมื่อมองข้ามอิทธิพลของความดัน ดังรูปที่ 4.29 รูป b) แสดงให้เห็นว่าที่ปริมาณวัสดุผสมน้อยๆ อุณหภูมิอบผนึกที่เพิ่มขึ้นเป็น 220 องศาเซลเซียส จะทำให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น และรูป a) แสดงให้เห็นว่าอิทธิพลของอุณหภูมิที่ใช้ในการอบผนึกส่งผลต่อค่าความแข็งแรงของชิ้นงานอย่างชัดเจน เมื่อให้อุณหภูมิอบผนึกแก่ชิ้นงานสูงขึ้นจะทำให้ค่าความแข็งแรงของชิ้นงานสูงขึ้นด้วย เนื่องจากเมื่อให้อุณหภูมิในการอบผนึกเป็น 220 องศาเซลเซียส จะเพิ่มโอกาสให้เกิดการไหลของมวลของอนุภาคดีบุกได้ง่ายขึ้น ทำให้ขนาดของคอคอดระหว่างผิวสัมผัสของสองอนุภาคเพิ่มมากขึ้น



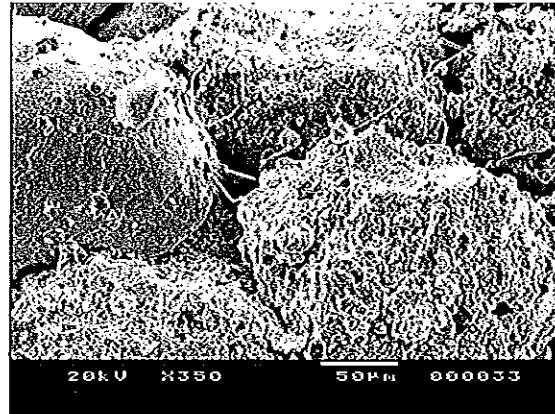
รูปที่ 4.29 ความแข็งแรงเฉือนของชิ้นงานที่อุณหภูมิอบผนึก 200 องศาเซลเซียส เปรียบเทียบกับ 220 องศาเซลเซียส ที่ความดันที่ใช้อัดขึ้นรูป a) 500 psi และ b) 1000 psi นาน 9 ชั่วโมง

#### 4.6 อิทธิพลของวิสเคอร์ดีบุกที่เกิดขึ้น

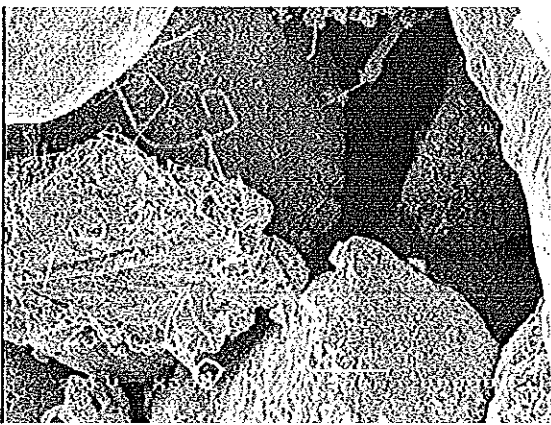
4.6.1 ลักษณะวิทยา (morphology) หลังอบผนึกชิ้นงานที่อุณหภูมิสูงกว่า 200 องศาเซลเซียส ส่วนที่เป็นอนุภาควัสดุผสม Sn-10SiC มีการฟอร์มวิสเคอร์ดีบุก วิสเคอร์ดีบุกจะเติบโตจากวัสดุผสมและเชื่อมต่อกับอนุภาคดีบุกดังรูป 4.30 ซึ่งภาพถ่าย SEM สามารถยืนยัน สมมุติฐานในบทที่ 3 รูปที่ 3.4 ว่าเป็นจริง จะเห็นได้ว่าวิสเคอร์ดีบุกงอกออกมาจากวัสดุผสมบางส่วนและไปเชื่อมต่อนำเข้ากับอนุภาคของดีบุก ความหนาแน่นของชิ้นงานที่มีวิสเคอร์ดีบุกเกิดขึ้นเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ไม่มีวิสเคอร์ดีบุกเขียนกราฟได้ ดังรูปที่ 4.31 จะเห็นว่าวิสเคอร์ดีบุกที่เกิดขึ้นในชิ้นงานไม่มีอิทธิพลต่อความหนาแน่นของชิ้นงาน เนื่องจากเมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างชิ้นงานที่มีการฟอร์มตัวของวิสเคอร์ดีบุก กับชิ้นงานที่ไม่มีวิสเคอร์ดีบุกค่าความหนาแน่นของชิ้นงาน ไม่แตกต่างกันมากนัก



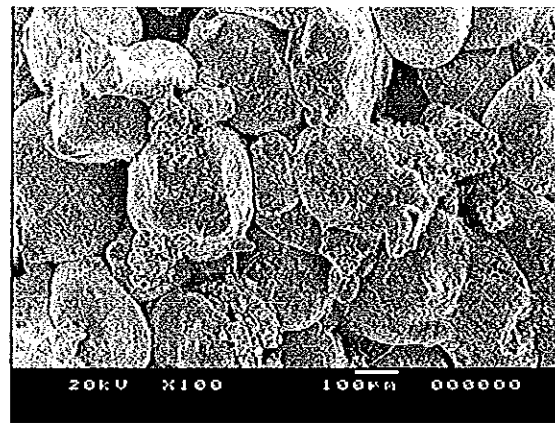
a)



b)



b)

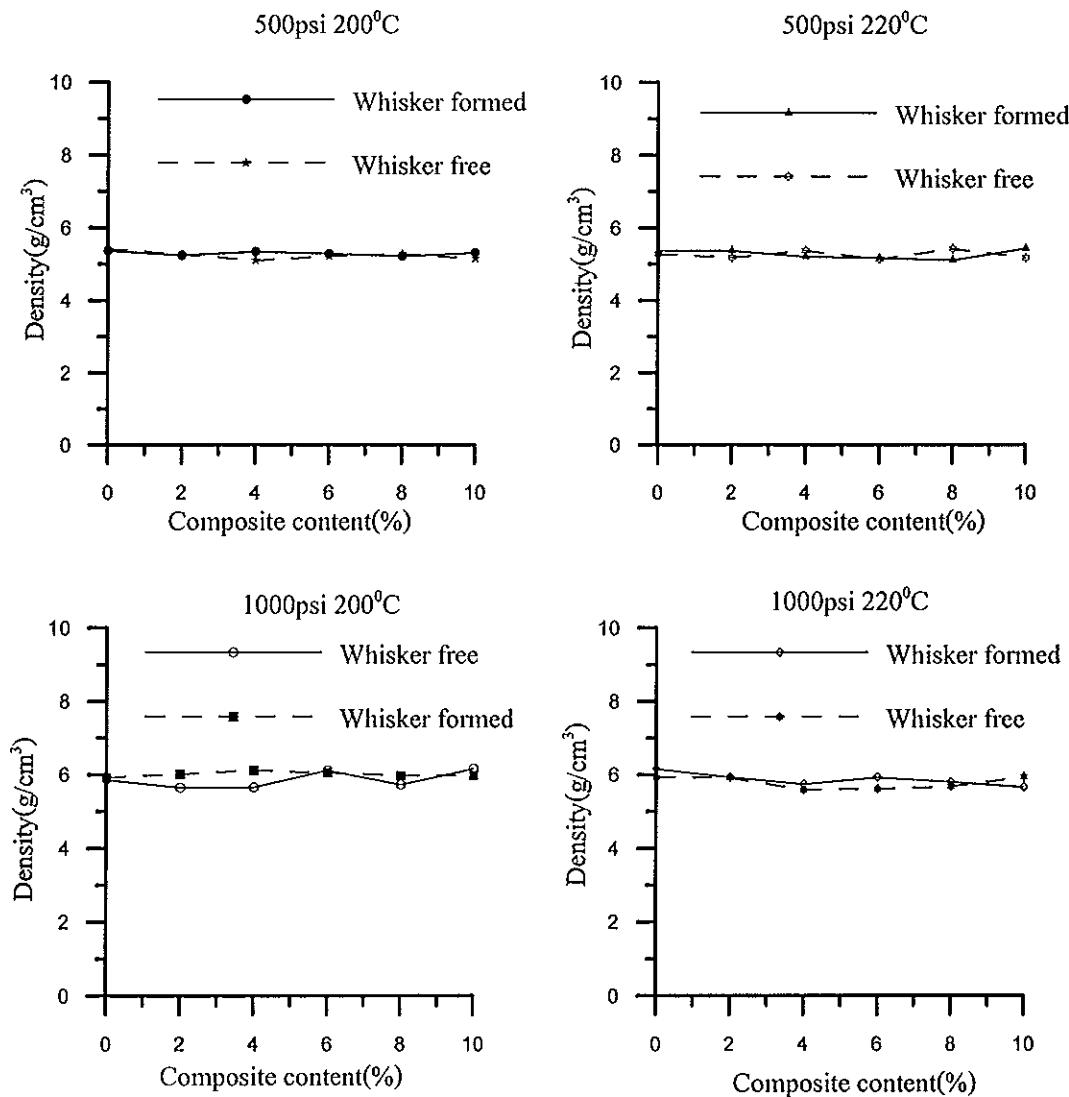


d)

รูปที่ 4.30 ภาพถ่าย SEM ของชิ้นงานวัสดุผสม ที่พารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้

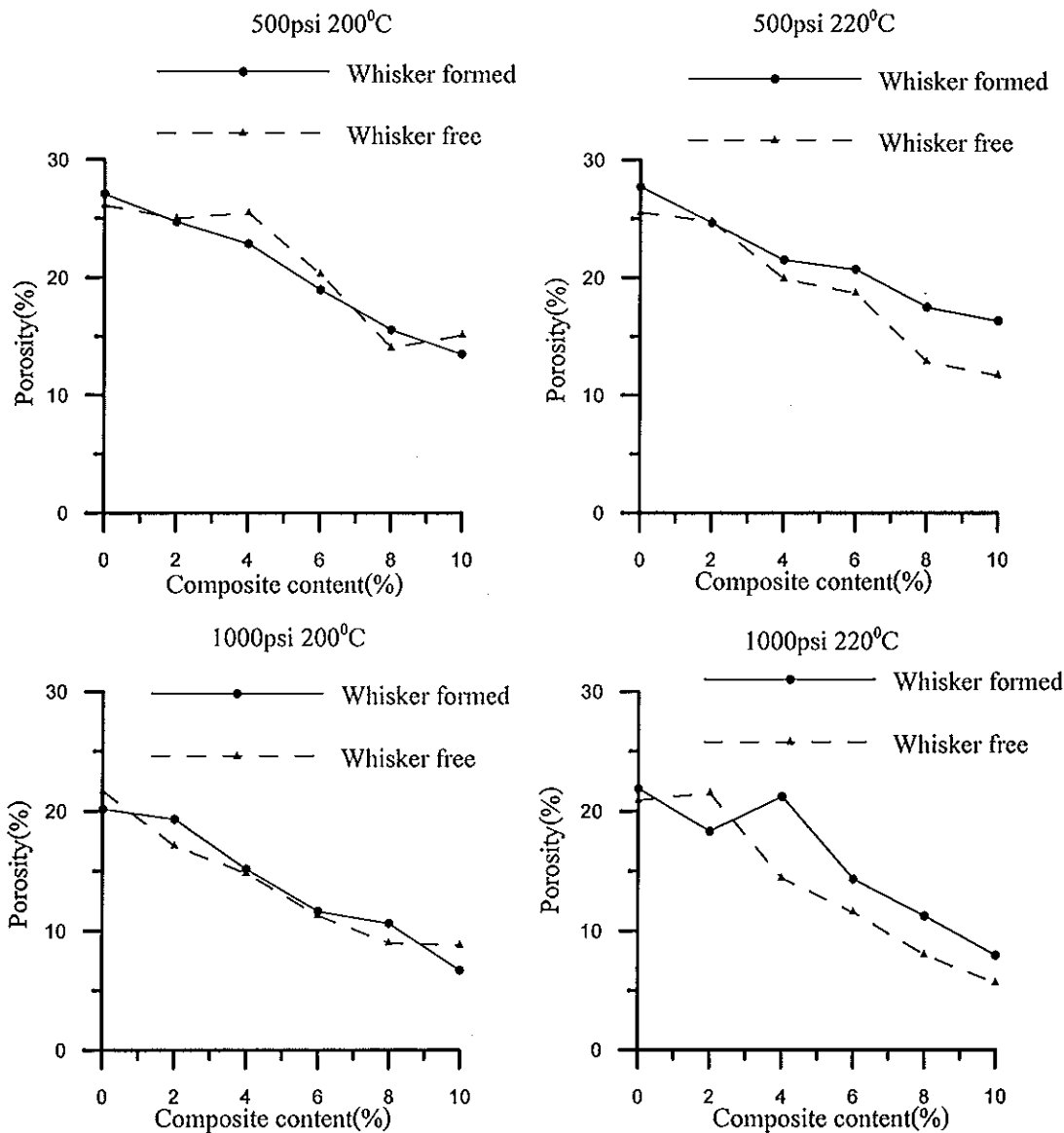
- a) Sn+2%(Sn-10SiC) ที่ กำลังขยาย 200x ณ ความดัน 1500 psi อุณหภูมิอบผืนึก 200 องศาเซลเซียส นาน 9 ชั่วโมง
- b) Sn+10%(Sn-10SiC) ที่ กำลังขยาย 350x ณ ความดัน 1000 psi อุณหภูมิอบผืนึก 200 องศาเซลเซียส นาน 9 ชั่วโมง
- c) Sn+10%(Sn-10SiC) ที่ กำลังขยาย 350x ณ ความดัน 500 psi อุณหภูมิอบผืนึก 220 องศาเซลเซียส นาน 9 ชั่วโมง
- d) Sn+8%(Sn-10SiC) ที่ กำลังขยาย 100x ณ ความดัน 500 psi อุณหภูมิอบผืนึก 200 องศาเซลเซียส นาน 9 ชั่วโมง





รูปที่ 4.31 กราฟความหนาแน่นของชิ้นงาน ที่อุณหภูมิและความดันต่างๆ เปรียบเทียบกันระหว่าง ชิ้นงานที่มีการฟอร์มตัวของวิสเคอร์ดีบุกกับชิ้นงานที่ไม่มีเส้นใยดีบุกเกิดขึ้น ที่ความดันอัดขึ้นรูป และอุณหภูมิอบผึ่งต่างๆ กัน นาน 9 ชั่วโมง

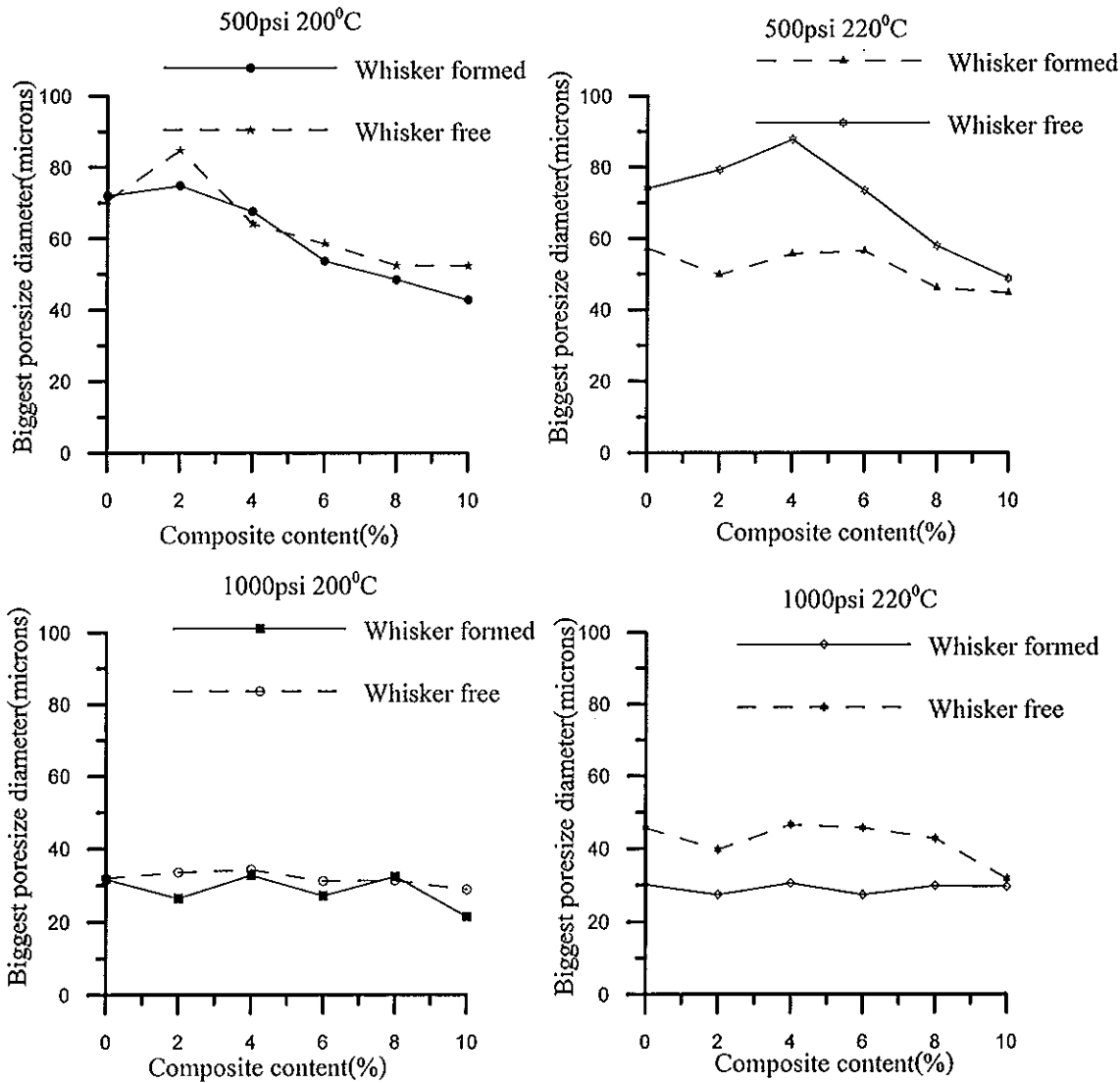
4.6.2 เปอร์เซ็นต์ความพรุนตัว (porosity) ค่าความพรุนตัวในชิ้นงานที่ผลิตได้ ซึ่งได้มาจากการคำนวณ การฟอร์มตัวของวิสเคอร์ดีบุกในชิ้นงานไม่มีอิทธิพลโดยตรง จากรูปที่ 4.32 จะเห็นได้ว่า ค่าความพรุนตัวของชิ้นงานที่มีวิสเคอร์ดีบุกเกิดขึ้นมีค่าไม่แตกต่างกับชิ้นงานที่ไม่มีการฟอร์มตัวของวิสเคอร์ดีบุกมากนัก



รูปที่ 4.32 ค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุนตัวของชิ้นงาน ที่อุณหภูมิและความดันต่างๆ เปรียบเทียบกัน ระหว่าง ชิ้นงานที่มีการฟอร์มตัวของ whisker ด้บุกกับชิ้นงานที่ไม่มี whisker ด้บุกเกิดขึ้นที่ ความดันอัดขึ้นรูป และอุณหภูมิอบผนึกต่างๆ กัน นาน 9 ชั่วโมง

#### 4.6.3 ขนาดรูพรุนโตสุด ขนาดของรูพรุน โตสุดที่ได้จากการคำนวณเมื่อนำมาเขียนกราฟดัง

รูปที่ 4.33 พบว่าขนาดรูพรุน โตสุดที่เกิดขึ้นบนชิ้นงาน ได้รับอิทธิพลโดยตรงจาก whisker ด้บุกที่เกิดขึ้น จากกราฟแสดงให้เห็นว่าชิ้นงานที่มี whisker ด้บุกเกิดขึ้นจะมีขนาดของรูพรุนเล็กลงเมื่อเทียบกับ ชิ้นงานที่ไม่มี whisker ด้บุกทุกสัดส่วนของวัสดุผสม



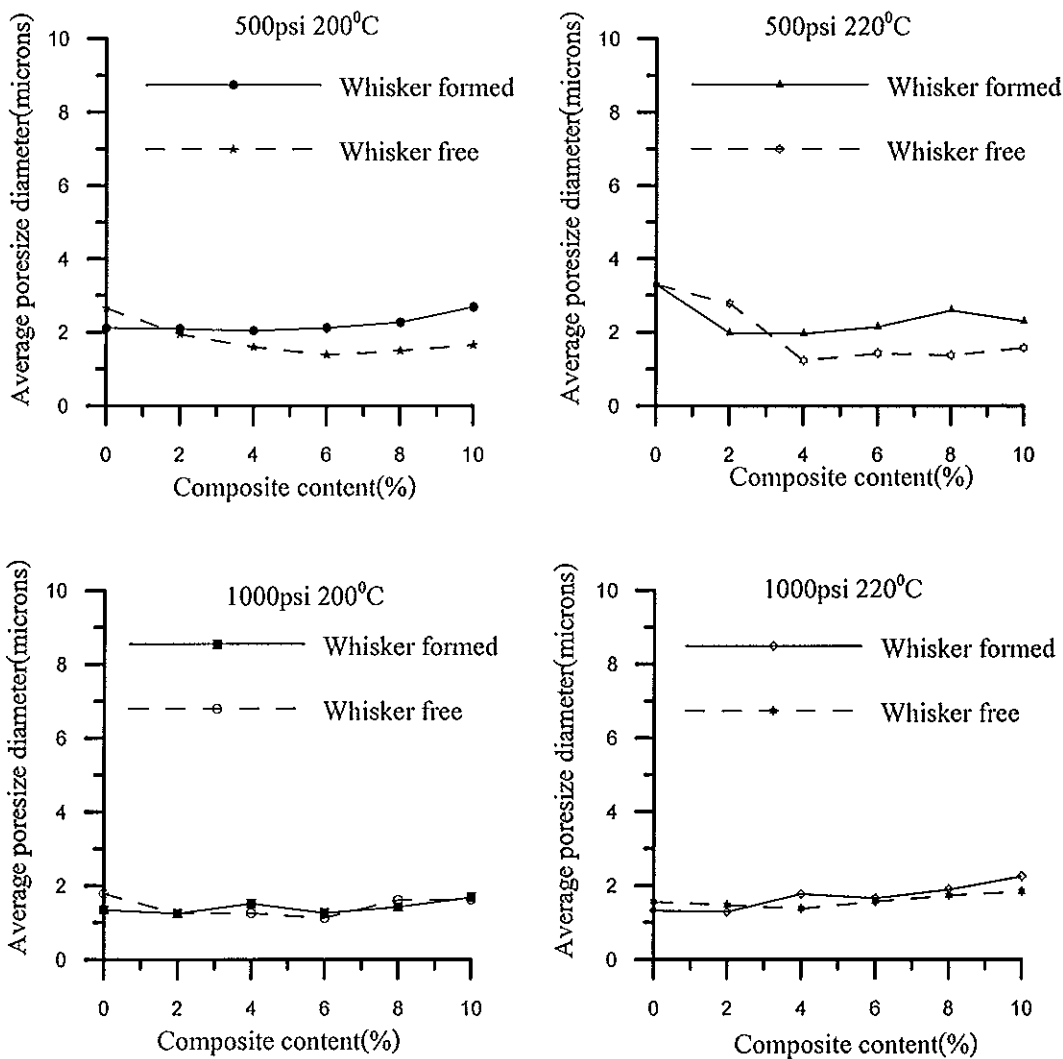
รูปที่ 4.33 ขนาดรูพรุนโตสุดของชิ้นงานที่อุณหภูมิและความดันต่างๆ เปรียบเทียบกันระหว่าง ชิ้นงานที่มีการฟอร์มตัวของวิสเคอร์ดีบุกกับชิ้นงานที่ไม่มีวิสเคอร์ดีบุกเกิดขึ้นที่ความดันอัดขึ้นรูปและ อุณหภูมิอบผนึกต่างๆ กัน นาน 9 ชั่วโมง

#### 4.6.4 ขนาดรูพรุนเฉลี่ย ขนาดของรูพรุนเฉลี่ยที่ได้จากการคำนวณเมื่อนำมาเขียนกราฟดัง

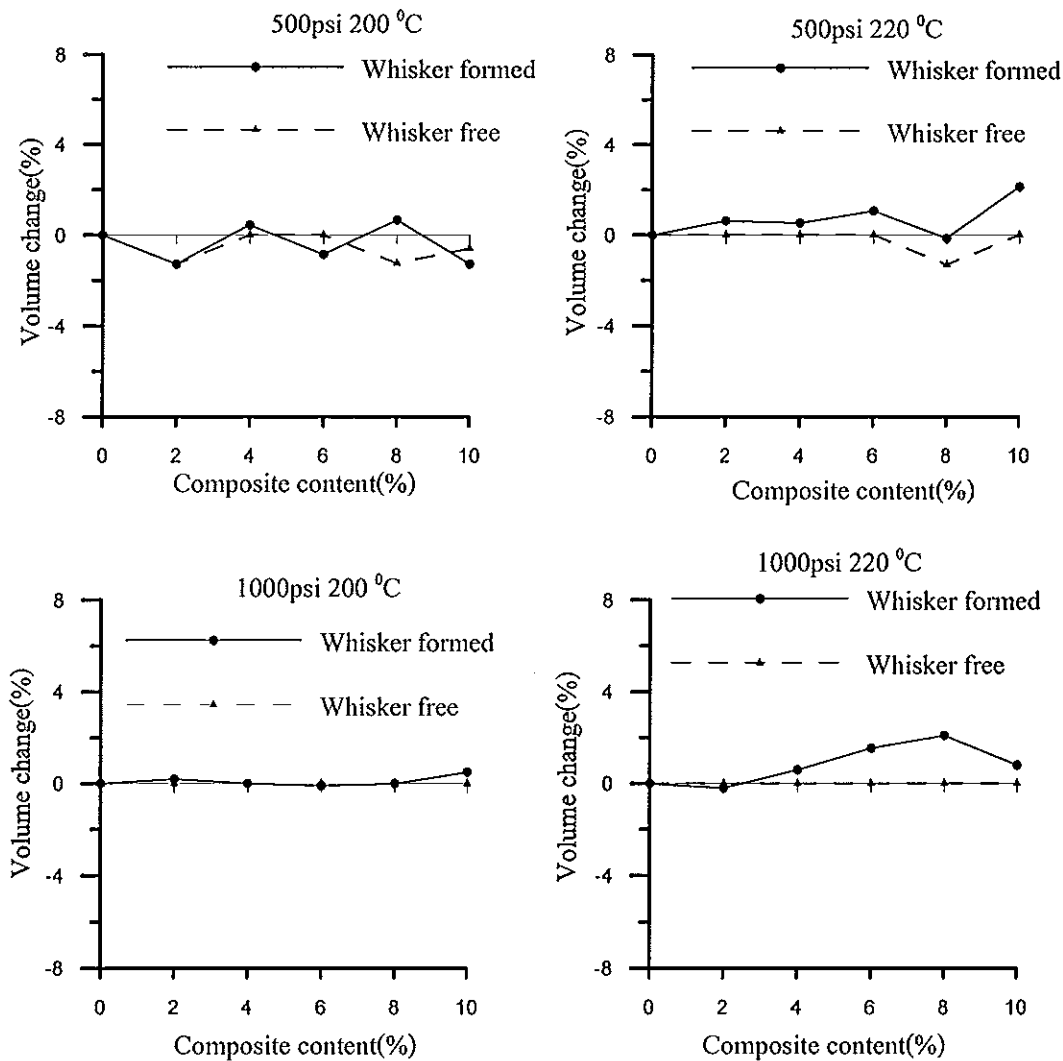
รูปที่ 4.34 พบว่าขนาดรูพรุนเฉลี่ยที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานได้รับอิทธิพลโดยตรงจากวิสเคอร์ดีบุกที่เกิดขึ้น จะเห็นได้ว่าชิ้นงานที่มีการฟอร์มตัวของวิสเคอร์ดีบุก จะมีขนาดรูพรุนเฉลี่ยใหญ่กว่าชิ้นงานที่ไม่มีวิสเคอร์ดีบุกเกิดขึ้น ซึ่งอธิบายได้น่าจะมีสาเหตุจากการที่กลุ่มของวิสเคอร์ดีบุกที่เริ่มฟอร์มตัว พยายามดันอนุภาคที่อยู่ใกล้เคียง เนื่องจากต้องการพื้นที่ว่างในการเติบโต ซึ่งขั้นตอนนี้เกิดระหว่างการอบผนึกเริ่มต้น ดังนั้นแรงที่เกิดจากการเติบโตของเส้นใยจึงน่าจะเพียงพอที่จะดันอนุภาคข้างเคียงซึ่งพร้อมเคลื่อนที่เนื่องจากอิทธิพลการอบผนึกอยู่แล้ว ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณหลังอบผนึก

ของชิ้นงานที่เพิ่มขึ้นดังรูปที่ 4.35 จะเห็นได้ว่าที่อุณหภูมิอบผนึ่ง 220 องศาเซลเซียส ชิ้นงานที่มีการฟอร์มตัวของวิสเคอร์ดีบุกจะมีปริมาตรหลังอบผนึ่งเพิ่มขึ้น ขณะที่ชิ้นงานที่ไม่มีเส้นใยดีบุกเกิดขึ้น มีปริมาตรหลังอบผนึ่งค่อนข้างคงที่ ยกเว้นชิ้นงานที่ความดันอัดขึ้นรูป 500 psi อุณหภูมิอบผนึ่ง 200 องศาเซลเซียส มีค่าค่อนข้างแกว่งและชิ้นงานบางส่วนมีการหดตัวเนื่องจาก ที่ความดันอัดขึ้นรูป 500 psi มีความแน่นตัวต่ำ ภายในชิ้นงานที่ผลิตได้จึงมีโอกาสมิจะมีพื้นที่ว่างพอสำหรับการเกิดวิสเคอร์ดีบุก

นอกจากนี้จากกราฟในรูปที่ 4.34 ที่ความดันอัดขึ้นรูป 1000 psi จะเห็นได้ว่า ชิ้นงานที่มีกับไม่มีวิสเคอร์ดีบุกเกิดขึ้น มีขนาดรูพรุนเฉลี่ยไม่แตกต่างกันมากนักเนื่องจากอิทธิพลของความดันมีเหนืออิทธิพลของวิสเคอร์ที่เกิดขึ้น

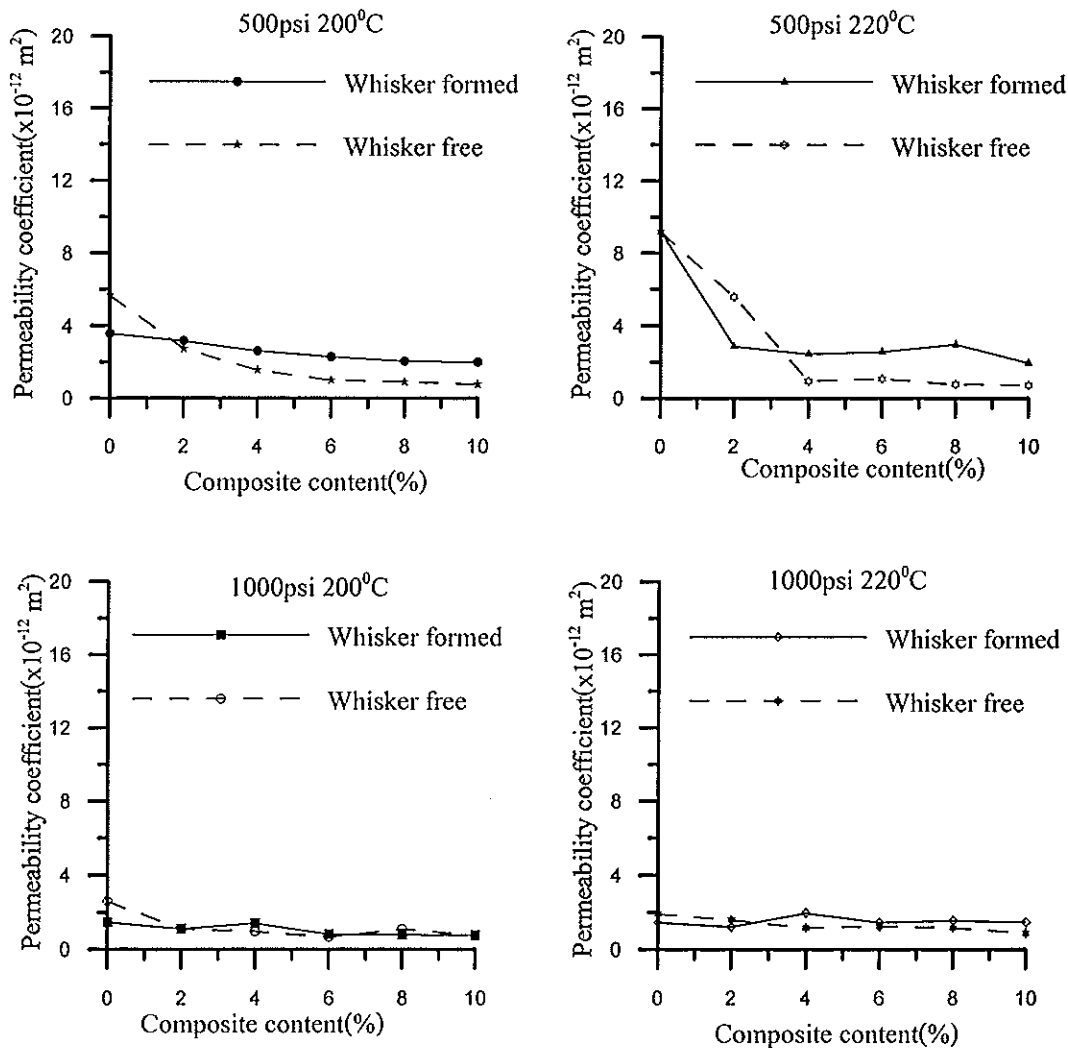


รูปที่ 4.34 ขนาดรูพรุนเฉลี่ยของชิ้นงาน เปรียบเทียบกันระหว่าง ชิ้นงานที่มีการฟอร์มตัวของวิสเคอร์ดีบุกกับชิ้นงานที่ไม่มีวิสเคอร์ดีบุกเกิดขึ้นที่ความดันอัดขึ้นรูปและ อุณหภูมิอบผนึ่งต่างๆ กัน นาน 9 ชั่วโมง



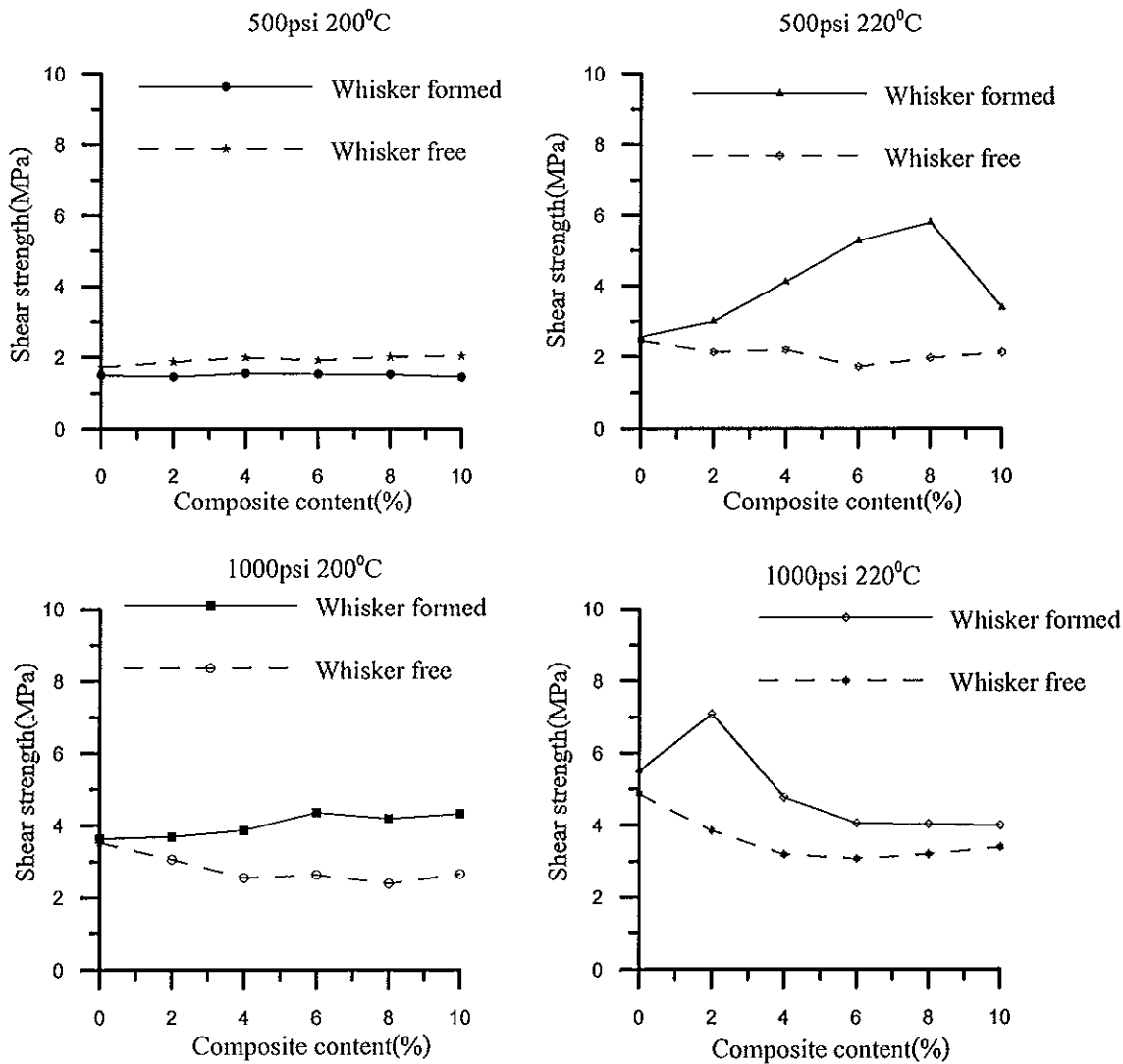
รูปที่ 4.35 การเปลี่ยนแปลงปริมาตรของชิ้นงานหลังอบผนึก เปรียบเทียบกันระหว่างชิ้นงานที่มีการฟอร์มตัวของวิสเคอร์ดีบุกกับชิ้นงานที่ไม่มีวิสเคอร์ดีบุกเกิดขึ้นที่ความดันอัดขึ้นรูปและอุณหภูมิอบผนึกต่างๆ กัน นาน 9 ชั่วโมง

4.6.5 สัมประสิทธิ์การซึมผ่าน เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน มีความสัมพันธ์โดยตรงกับขนาดรูพรุนเฉลี่ย คือเมื่อขนาดรูพรุนเพิ่มย่อมส่งผลให้ความสามารถในการซึมผ่านของชิ้นงานสูงขึ้นตามไปด้วย ดังกราฟในรูปที่ 4.36 จะเห็นได้ว่าได้ว่าวิสเคอร์ดีบุกที่เกิดขึ้นเป็นปัจจัยที่มีผลต่อความสามารถในการซึมผ่านของชิ้นงาน เนื่องจากเมื่อเทียบกับชิ้นงานที่ไม่มีวิสเคอร์ดีบุกแล้ว ชิ้นงานที่มีวิสเคอร์ดีบุกจะมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านสูงกว่า เช่นเดียวกับในกรณีของขนาดรูพรุนเฉลี่ย



รูปที่ 4.36 ความสามารถในการซึมผ่านของชิ้นงานขนาดรูปทรงแท่งของชิ้นงานที่เปรียบเทียบกันระหว่างชิ้นงานที่มีการฟอร์มตัวของวิสเคอร์ดีบุกกับชิ้นงานที่ไม่มีวิสเคอร์ดีบุกเกิดขึ้นที่ความดันอัดขึ้นรูปและ อุณหภูมิอบแห้งต่างกัน นาน 9 ชั่วโมง

4.6.6 ความแข็งแรงเฉือน นำผลการทดสอบความแข็งแรงของชิ้นงานมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงเฉือนกับปริมาณวัสดุผสมที่เติมในชิ้นงาน เปรียบเทียบระหว่างชิ้นงานที่มีวิสเคอร์ดีบุกเกิดขึ้นกับชิ้นงานที่ไม่มีวิสเคอร์ดีบุกเกิดขึ้น ดังรูปที่ 4.37 จะเห็นได้ว่าชิ้นงานที่มีวิสเคอร์ดีบุกเกิดขึ้นมีความแข็งแรงสูงกว่าชิ้นงานที่ไม่มีวิสเคอร์ดีบุกเกิดขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่า วิสเคอร์ดีบุกเกิดขึ้นในชิ้นงานมีอิทธิพลต่อความแข็งแรงของชิ้นงาน เนื่องจากวิสเคอร์ดีบุกที่เกิดขึ้นจะทำหน้าที่เป็นพันธะเชื่อมต่อระหว่างอนุภาคของดีบุกที่อยู่ใกล้กัน



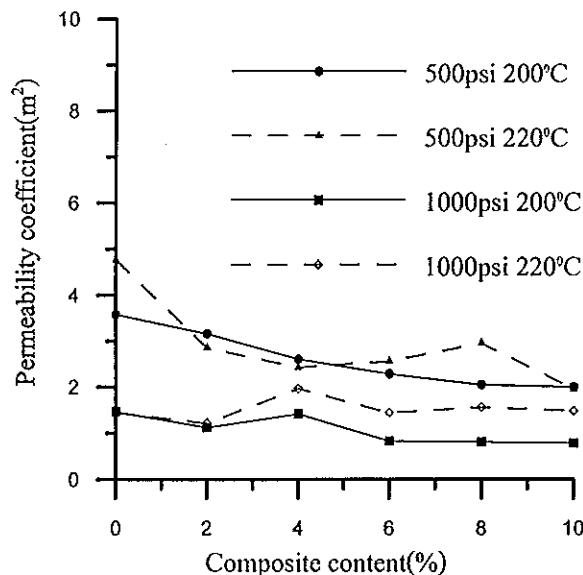
รูปที่ 4.37 ความแข็งแรงเฉือนของชิ้นงานที่ใช้ผงวัสดุผสมที่มี whisker เกิดขึ้นเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ไม่เกิด whisker ที่อุณหภูมิอบขึ้นที่ 200 องศาเซลเซียส ที่ 500 psi นาน 9 ชั่วโมง

#### 4.7 ภาพรวมของอิทธิพลต่างๆต่อสมบัติของวัสดุ

การทดลองทำให้ทราบว่าความดันที่ให้แก่ชิ้นงานมีอิทธิพลอย่างมากต่อสมบัติของวัสดุพูนเมื่อชิ้นงานได้รับความดันทำให้อุณหภูมิเรียงตัวกันชิดกันมากขึ้น ส่งผลให้ผิวสัมผัสของชิ้นงานมากขึ้นด้วย เมื่อทำการอบขึ้นชิ้นงานก็จะมีการแพร่ที่ผิวได้ง่ายขึ้นเมื่อให้ความดันสูงขึ้น นอกจากนี้ปริมาณวัสดุผสมที่เติม whisker ที่เกิดขึ้นและอุณหภูมิอบขึ้นก็เป็นปัจจัยรองลงมา

มีปัจจัยที่มีผลโดยตรงต่อค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของอากาศ เมื่อนำผลการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของอากาศ มาเขียนกราฟเป็นภาพรวมดังรูปที่ 4.38 จะเห็นได้ว่าความดันที่ใช้ ขึ้นรูปเป็นปัจจัยที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของอากาศมากที่สุด เนื่องจากการอัดขึ้นรูปขึ้น งานด้วยความดันส่งผลให้มีการจัดเรียงตัวใหม่ของอนุภาค อนุภาคของวัสดุผสมจะไปเต็มบริเวณ ของรูพรุนขนาดใหญ่ก่อนทำให้อนุภาคมีพื้นที่ผิวสัมผัสกันมากขึ้น ขนาดรูพรุนเล็กลงทำให้ตัว กลางซึมผ่านได้น้อยลงเมื่อความดันอัดสูงขึ้น

ปัจจัยรองลงมาคือปริมาณวัสดุผสมที่เดิมและวิสเคอร์ที่เกิดขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณวัสดุผสมค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของอากาศลดลง เนื่องจากอนุภาคของวัสดุผสมเข้าแทรกตรงตำแหน่งช่องว่าง (void) ทำให้พื้นที่ของช่องว่างลดลง ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของอากาศจึงลดลง



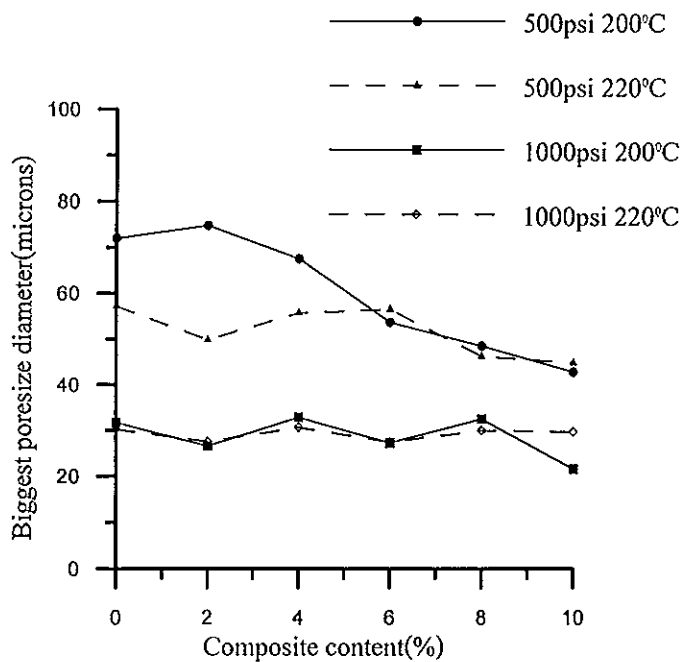
รูปที่ 4.38 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของชิ้นงานที่ใช้ผงวัสดุผสมที่มีวิสเคอร์คีนุกเกิดขึ้นที่อุณหภูมิอบแห้ง 200 องศาเซลเซียสและ 220 องศาเซลเซียส ที่ความดัน 500 และ 1000 psi นาน 9 ชั่วโมง

ปัจจัยที่มีผลโดยตรงต่อขนาดรูพรุน โดสุดของชิ้นงาน เมื่อนำผลการคำนวณขนาดรูพรุนโด สุดมาเขียนกราฟเป็นภาพรวมดังรูปที่ 4.39 จะเห็นได้ว่าความดันที่ใช้ขึ้นรูป เป็นปัจจัยที่มีผลต่อ ขนาดรูพรุน โดสุดของชิ้นงานมากที่สุด เนื่องจากการอัดขึ้นรูปขึ้นงานด้วยความดันส่งผลให้มีการ จัดเรียงตัวใหม่ของอนุภาค ระยะห่างระหว่างอนุภาคคีนุกมีน้อยลง ส่งผลให้ขนาดรูพรุน โดสุดของ ชิ้นงานลดลง



ปัจจัยรองลงมาคือปริมาณวัสดุผสมที่เดิมและวิสเคอร์ที่เกิดขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณวัสดุผสมขนาดรูพรุน โดสุดของชั้นงานลดลง เนื่องจากอนุภาคของวัสดุผสมเข้าแทรกตรงตำแหน่งช่องว่าง (void) ทำให้พื้นที่ของช่องว่างลดลง ดังนั้นขนาดรูพรุน โดสุดของชั้นงานจึงลดลง

ปัจจัยอีกประการที่มีผลต่อชั้นงานแต่ถูกบดบังด้วย อิทธิพลของความดันอัดขึ้นรูป และปริมาณวัสดุผสมที่เดิมคืออิทธิพลของอุณหภูมิ จะเห็นได้ว่าที่ความดันอัดขึ้นรูป 500 psi เมื่อปริมาณ ผงวัสดุผสมน้อยกว่าร้อยละ 6 อุณหภูมิอบหนึ่งจะมีอิทธิพลต่อขนาดรูพรุน โดสุดอย่างชัดเจนอุณหภูมิอบหนึ่งที่สูงขึ้นทำให้ขนาดรูพรุน โดสุดลดลง เนื่องจากเมื่อเริ่มขั้นตอนแรกของการอบหนึ่งอุณหภูมิอบหนึ่งที่สูงกว่าจะทำให้เกิดคอคอดที่ผิวสัมผัสของอนุภาคมีการเพิ่มขนาดขึ้นเร็วกว่าขนาดของรูพรุนจึงเล็กลง



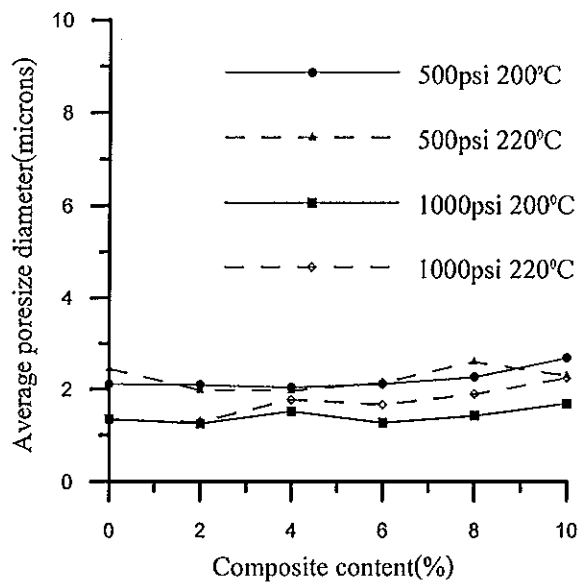
รูปที่ 4.39 เปรียบเทียบค่ารูพรุน โดสุดของชั้นงานที่ใช้ผงวัสดุผสมที่มีวิสเคอร์ดีบุกเกิดขึ้นที่อุณหภูมิอบหนึ่ง 200 องศาเซลเซียสและ 220 องศาเซลเซียส ที่ความดัน 500 และ 1000 psi นาน 9 ชั่วโมง

ปัจจัยที่มีผลโดยตรงต่อขนาดรูพรุนเฉลี่ยของชั้นงาน เมื่อนำผลการคำนวณขนาดรูพรุน เฉลี่ยมาเขียนกราฟเป็นภาพรวมดังรูปที่ 4.40 จะเห็นได้ว่าความดันที่ใช้ขึ้นรูปเป็นปัจจัยที่มีผลต่อ ขนาดรูพรุนเฉลี่ยของชั้นงานมากที่สุด ซึ่งเกี่ยวเนื่องกับค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุนตัว(รูปที่ 4.18) และ ขนาดรูพรุน โดสุด (รูปที่ 4.39) จะเห็นได้ว่าเมื่อให้ความดันในการอัดขึ้นรูปชั้นงานเพิ่มสูงขึ้น

เปอร์เซ็นต์ความพรุนตัวและขนาดรูพรุนโตสุดจะลดลง ซึ่งจากสมการ 2.6 ที่ใช้ในการคำนวณเพื่อหาขนาดรูพรุนเฉลี่ย ขนาดรูพรุนเฉลี่ยจะแปรผกผันกับเปอร์เซ็นต์ความพรุนตัวและแปรผันตรง กับค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของอากาศ ซึ่งจะได้ขนาดรูพรุนเฉลี่ยมีแนวโน้มไปในทางเดียวกันกับขนาดรูพรุนโตสุด

ปัจจัยรองลงมาคืออิทธิพลของอุณหภูมิอบผงึก จากกราฟรูปที่ 4.40 จะเห็นได้ว่าชิ้นงานที่ความดันอัดขึ้นรูป 500 psi เมื่อให้อุณหภูมิอบผงึกที่ 220 องศาเซลเซียส กราฟมีแนวโน้มของขนาดรูพรุนเฉลี่ยเพิ่มสูงขึ้น

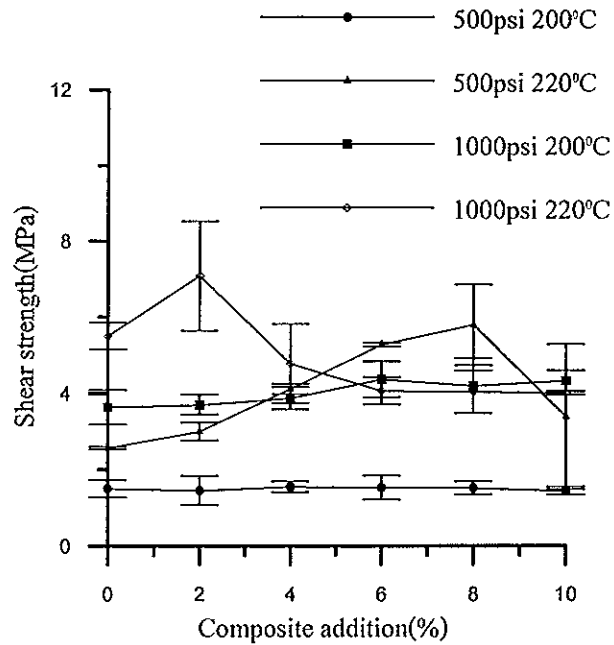
เมื่อเขียนกราฟภาพรวมความแข็งแรงของชิ้นงานดังรูปที่ 4.41 จะเห็นได้ว่าได้รับอิทธิพลโดยตรงจากความดันที่ใช้อัดขึ้นรูปโดยสัมพันธ์อยู่กับอิทธิพลของอุณหภูมิอบผงึก ชิ้นงานจะมีความแข็งแรงมากที่สุด เมื่ออัดขึ้นรูปด้วยความดัน 1000 psi และให้อุณหภูมิอบผงึกที่ 220 องศาเซลเซียส ซึ่งยังขึ้นอยู่กับปริมาณวัสดุที่เติมในชิ้นงานด้วย



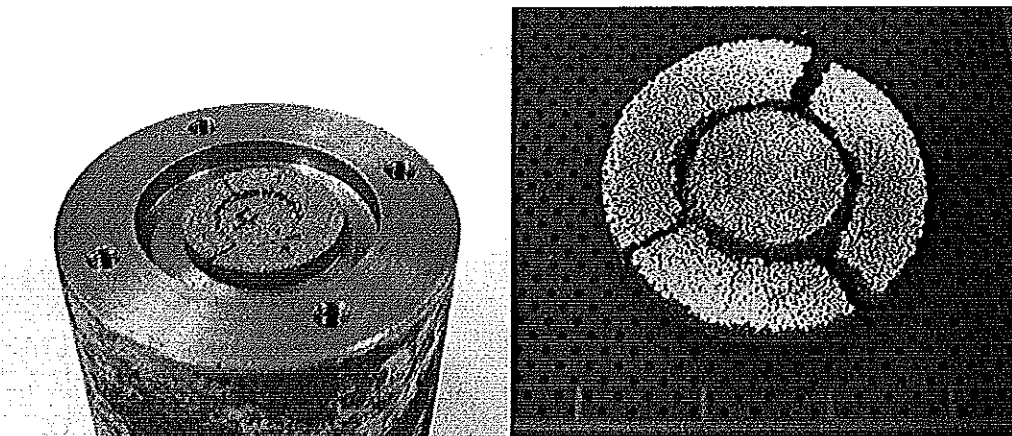
รูปที่ 4.40 เปรียบเทียบค่ารูพรุนเฉลี่ยของชิ้นงานที่ใช้ผงวัสดุผสมที่มีวิสเกอร์ตีบุกเกิดขึ้นที่อุณหภูมิอบผงึก 200 องศาเซลเซียสและ 220 องศาเซลเซียส ที่ความดัน 500 และ 1000 psi นาน 9 ชั่วโมง

นอกจากนี้ ความดันยังมีอิทธิพลต่ออัตราการหดตัวเหนือกว่าอิทธิพลจากอุณหภูมิอบผงึกเนื่องจากการให้ความดันแก่ชิ้นงานก่อนอบผงึก ทำให้อุณหภูมิเรียงตัวชิดกันมากจนอิทธิพลของอุณหภูมิไม่สามารถทำให้ชิ้นงานหดตัวได้อีก ทำให้ขนาดของชิ้นงานหลังอบผงึกไม่แตกต่างจากขนาดของชิ้นงานหลังอบผงึก

กล่าวโดยสรุปได้ว่าทุกปัจจัยมีอิทธิพลต่อสมบัติของชิ้นงานในลักษณะที่สัมพันธ์กันแต่ความดันที่ใช้อัดขึ้นรูปเป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อสมบัติของชิ้นงานวัสดุผสมคิบุกพูน



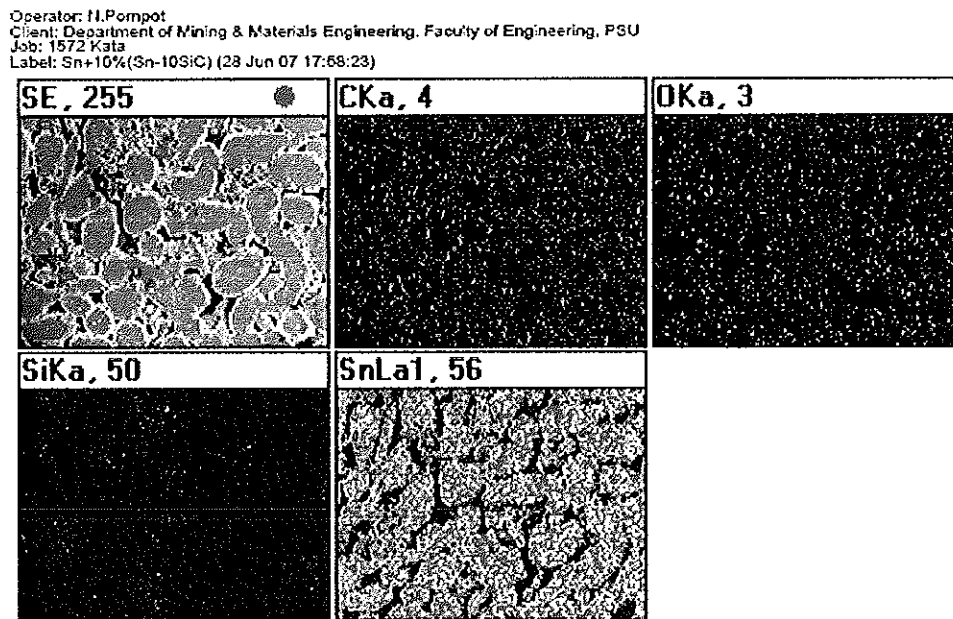
รูปที่ 4.41 เปรียบเทียบค่าความแข็งแรงเฉือนของชิ้นงานที่ใช้ผงวัสดุผสมที่มีวิสเคอร์คิบุกเกิดขึ้นที่อุณหภูมิอบผนึก 200 องศาเซลเซียสและ 220 องศาเซลเซียส ที่ความดัน 500 และ 1000 psi นาน 9 ชั่วโมง



รูปที่ 4.42 ลักษณะชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบแรงเฉือน

ค่าความแข็งแรงของชิ้นงานวัสดุผสมพูนที่ผลิตได้ค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับมาตรฐานของชิ้นงานบรอนซ์พูน ด้วยเหตุผลประการแรกคือ คิบุกเป็นโลหะที่มีค่าความแข็งต่ำ อีก

ประการซึ่งจะเห็นได้จากภาพถ่าย SEM รูปที่ 4.23 การเกิดคอคอดระหว่างอนุภาคของดีบุกไม่สมบูรณ์นัก เนื่องจากอุปสรรคของชั้นออกไซด์ ดังที่จะเห็นในภาพการกระจายตัวของธาตุ ด้วยเทคนิค x-ray mapping รูปที่ 4.43



รูปที่ 4.43 การกระจายตัวของธาตุต่างๆ ที่ผิวของชิ้นงานวัสดุผสมดีบุกพูน Sn+10%(Sn-10SiC) ที่อุณหภูมิอบผืนิก 220 องศาเซลเซียส ที่ความดัน 1000 psi นาน 9 ชั่วโมง

## บทที่ 5

### สรุปการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 กลไกการเกิดวิสเคอร์ดีบุก สามารถอธิบายกลไกการขึ้นของวิสเคอร์ดีบุกได้เป็น สองกรณี กลไกแรก เกิดจากอิทธิพลของพีริซิทเทตทำให้เกิดความแตกต่างของการขยายตัวทางความร้อนเมื่อได้ รับพลังงานความร้อนจากภายนอก ความเค้นตกค้างในเนื้อดีบุกจึงขับอะตอมของดีบุกออกมาเป็นวิสเคอร์ อีกกลไกหนึ่งคือ การเกิดการตกผลึกใหม่เมื่อถูกกระตุ้นด้วยพลังงานความร้อน

5.1.2 อิทธิพลของความดัน อุณหภูมิและสัดส่วนการเติมวัสดุผสม อิทธิพลของความดัน เป็นปัจจัยหลักที่ทำให้สมบัติของชิ้นงานเปลี่ยนไป ส่วนอิทธิพลของอุณหภูมิและสัดส่วนการเติมวัสดุผสม

เป็นเพียงปัจจัยเกื้อหนุน การใช้ความดันสูงในการขึ้นรูปชิ้นงานมีผลทำให้สมบัติด้านความพรุน คือสัมประสิทธิ์การซึมผ่านและขนาดรูพรุน มีค่าลดลงแต่จะจะทำให้สมบัติด้านความแข็งแรงเชิงกลมีค่าสูงมากขึ้น เนื่องจากความดันที่ให้กับชิ้นงานทำให้อนุภาคเรียงตัวชิดกันมากขึ้น ผิวสัมผัสระหว่างอนุภาคมีมากขึ้นส่งผลให้การอบแห้งได้ผลดีขึ้น ดังนั้นหากต้องการจะเพิ่มหรือลดสมบัติต่างๆ ของวัสดุผสมดีบุกพรุน วิธีการที่ดีที่สุดคือการเพิ่มหรือลดค่าความดันที่ให้แก่ชิ้นงานที่ใช้ในการผลิต

5.1.2 อิทธิพลของวิสเคอร์ดีบุกที่เกิดขึ้น จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า การเกิดขึ้นของวิสเคอร์ดีบุกส่งผลให้ปริมาตรของชิ้นงานมีแนวโน้มสูงขึ้น ทำให้ขนาดรูพรุนเฉลี่ยของชิ้นงานมีขนาดโตขึ้น อากาศทดสอบจึงไหลผ่านได้ดีขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านจึงมีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย แต่ไม่ส่งผลต่อขนาดของรูพรุน โดสุค

5.1.3 เปรียบเทียบสมบัติของชิ้นงานที่มีวิสเคอร์ดีบุกและไม่มีวิสเคอร์ดีบุกเกิดขึ้น จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า วัสดุผสมดีบุกพรุนที่เกิดวิสเคอร์ดีบุกกับวัสดุผสมดีบุกพรุนที่ไม่เกิดวิสเคอร์ดีบุก มีสมบัติไม่แตกต่างกันมากนัก แต่วิสเคอร์ดีบุกที่เกิดขึ้นช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้แก่ชิ้นงานได้

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 เครื่องมือสำหรับการอบผนึก เนื่องจากการผลิตชิ้นงานใช้อุณหภูมิในการอบผนึกต่ำ จึงทำให้ต้นทุนในการผลิตไม่สูงมาก ปัญหาที่พบในงานวิจัยคือตู้อบผนึกที่ใช้มีความแม่นยำต่ำ หากต้องการนำไปใช้ผลิตในเชิงอุตสาหกรรม ควรมีเตาเผาอุณหภูมิต่ำที่ให้อุณหภูมิที่มีความแม่นยำสูงเพื่อควบคุมสมบัติของชิ้นงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น

### บรรณานุกรม

- นภิสพร มีมงคล. 2548. โลหกรรมวัสดุผง. สงขลา: คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- เล็ก ลีทอง, ศิริกุล วิสุทธิ์เมธางกูร, ชนินทร์ คำรัสการ, ศรีพงษ์ พรรณแก้ว. 2546. สมบัติบางประการของวัสดุผสมระหว่างโลหะดีบุกกับซิลิกอนคาร์ไบด์ที่เตรียมด้วยวิธี Mechanical Alloying. รายงานการประชุมวิชาการด้านเหมืองแร่โลหะวิทยาและปิโตรเลียม รอบครั้งที่ ๓ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ 21-22 สิงหาคม 2546 หน้า 75-80
- Abtew, U. and Selvadulay, G. 2000. "Lead-free solders in microelectronics", Materials Science and Engineering. 27, 95-141.
- Brown, R.C. 1993. "Air filtration an integrated approach to the theory and applications of fibrous filter", Pergamon Press, pp. 12-28. 1<sup>st</sup> edition, Oxford.
- Brusse, J. Ewell, G. and Siplon, J. 2002. "Tin Whiskers: Attributes and Mitigation", Capacitor and Resistor Technology Symposium (CARTS), 68-80.
- Chuang, T.H. 2006. "Rapid whisker growth on the surface of Sn-3Ag-0.5Ce solders joints", Acta Materialia. 983-986
- Fukuda, Y. Osterman, M. and Pecht, M. 2007. "The impact of electrical current, mechanical bending, and thermal annealing on tin whisker growth", Microelectronics reliability. 88-92
- Kim, K.S. Yu, C.H. and Yang, J.M. 2006. "Behavior of tin whisker formation and growth on lead-free solder finish", Thin solid film. 350-354.
- Kyung, S.K. Chuang, H.Y. Yang, J.M. 2006. "Behavior of tin whisker formation and growth on lead-free solder finish," thin solid films. 504, 350-354.
- Lee, B.Z. and Lee, D.N. 1998. "Spontaneous growth mechanism of tin whiskers", Acta Metallurgical Inc, Vol. 46, No.10, 3701 - 3714
- Tu, K.N. IBM res. Div. Thomas, J. Watson res. Center. 1994. Kinetics of interfacial reaction in bimetallic Cu-Sn thin films, Physical Review, Vol.49, Issue3, 2030-2034.
- <http://www.china-shungwei.com> (2006, May 12)
- <http://www.genpro.com> (2006, May 18)

<http://www.tytlabs.co.jp> (2006, May 25)

<http://www.cys-pm.co.tw> (2006, May 25)

<http://www.nemi.org> (2006, May 25)

[nepp.nasa.gov/whisker/photos/floor\\_tile/index.html](http://nepp.nasa.gov/whisker/photos/floor_tile/index.html) (2005, August 3)

<http://www.gkn-filters.com> (2005, August 3)



**ภาคผนวก**

ภาคผนวกที่ 1 เปรียบเทียบสมบัติของชิ้นงานที่มี whisker ด้บุกและไม่มี whisker ด้บุกเกิดขึ้น  
 ตารางที่ ผ 1.1 สมบัติของชิ้นงานวัสดุผสมด้บุกพรุนที่เกิดและไม่เกิด whisker ด้บุกที่อุณหภูมิอบ  
 หนึ่ง 200 องศาเซลเซียส

Tin Whisker	Pressure (psi)	Composite Content (%)	Porosity (%)	Permeability coefficient		Average pore size diameter (microns)	Shear strength (MPa)
				min.(m <sup>2</sup> )	max.(m <sup>2</sup> )		
Whisker formed	500	2	23.02	$2.79 \times 10^{-12}$	$3.48 \times 10^{-12}$	2.0-2.2	1.2-1.9
		4	20.05	$2.33 \times 10^{-12}$	$2.98 \times 10^{-12}$	1.9-2.1	1.4-1.7
		6	16.34	$2.21 \times 10^{-12}$	$2.39 \times 10^{-12}$	2.0-2.2	1.3-1.9
		8	12.79	$2.01 \times 10^{-12}$	$2.11 \times 10^{-12}$	2.2-2.3	1.4-1.7
		10	8.86	$1.84 \times 10^{-12}$	$2.32 \times 10^{-12}$	2.6-2.9	1.3-1.5
	1000	2	22.84	$1.04 \times 10^{-12}$	$1.21 \times 10^{-12}$	1.2-1.3	3.5-3.9
		4	19.67	$1.26 \times 10^{-12}$	$1.49 \times 10^{-12}$	1.4-1.6	3.6-4.2
		6	16.45	$0.79 \times 10^{-12}$	$0.88 \times 10^{-12}$	1.2-1.3	3.8-4.5
		8	12.78	$0.77 \times 10^{-12}$	$0.86 \times 10^{-12}$	1.3-1.5	3.6-5.0
		10	8.78	$0.77 \times 10^{-12}$	$0.80 \times 10^{-12}$	1.6-1.7	4.0-4.5
Whisker free	500	2	22.98	$2.54 \times 10^{-12}$	$2.91 \times 10^{-12}$	1.9-2.0	1.85-1.87
		4	19.74	$1.52 \times 10^{-12}$	$1.61 \times 10^{-12}$	1.57-1.61	1.9-2.0
		6	16.59	$0.99 \times 10^{-12}$	$1.00 \times 10^{-12}$	1.38-1.39	1.8-2.0
		8	12.99	$0.90 \times 10^{-12}$	$0.91 \times 10^{-12}$	1.49-1.50	1.95-2.0
		10	9.09	$0.76 \times 10^{-12}$	$0.78 \times 10^{-12}$	1.6-1.7	2.0-2.1
	1000	2	22.79	$1.12 \times 10^{-12}$	$1.12 \times 10^{-12}$	1.2	3.0-3.1
		4	19.68	$0.90 \times 10^{-12}$	$1.04 \times 10^{-12}$	1.2-1.3	2.4-2.7
		6	17.15	$0.68 \times 10^{-12}$	$0.68 \times 10^{-12}$	1.1	2.5-2.8
		8	12.99	$0.65 \times 10^{-12}$	$1.56 \times 10^{-12}$	1.2-1.9	2.2-2.5
		10	9.16	$0.56 \times 10^{-12}$	$0.97 \times 10^{-12}$	1.4-1.8	2.6-2.7

ตารางที่ ผ 1.2 สมบัติของชิ้นงานวัสดุผสมคิบุกพรุนที่เกิด whisker คิบุกและไม่เกิด whisker คิบุกที่ อุณหภูมิอบแห้ง 220 องศาเซลเซียส

Tin Whisker	Pressure (psi)	Composite Content. (%)	Porosity (%)	Permeability coefficient		Average pore size diameter (microns)	Shear strength (MPa)
				min.(m <sup>2</sup> )	max.(m <sup>2</sup> )		
Whisker formed	500	2	23.28	$2.76 \times 10^{-12}$	$3.35 \times 10^{-12}$	1.83-2.13	2.74-3.04
		4	20.19	$2.39 \times 10^{-12}$	$2.51 \times 10^{-12}$	1.94-1.98	4.01-4.20
		6	17.81	$2.26 \times 10^{-12}$	$3.17 \times 10^{-12}$	1.99-2.45	5.24-5.31
		8	14.09	$2.48 \times 10^{-12}$	$3.44 \times 10^{-12}$	2.29-2.90	5.05-6.55
		10	10.91	$1.96 \times 10^{-12}$	$1.96 \times 10^{-12}$	2.29-2.30	1.55-5.34
	1000	2	23.43	$1.18 \times 10^{-12}$	$1.30 \times 10^{-12}$	1.26-1.34	5.42-8.01
		4	20.10	$1.82 \times 10^{-12}$	$2.11 \times 10^{-12}$	1.68-1.85	4.04-5.51
		6	16.86	$1.42 \times 10^{-12}$	$1.47 \times 10^{-12}$	1.61-1.71	3.81-4.32
		8	14.02	$1.52 \times 10^{-12}$	$1.68 \times 10^{-12}$	1.79-1.96	3.44-4.53
		10	9.45	$1.44 \times 10^{-12}$	$1.52 \times 10^{-12}$	2.11-2.38	3.97-4.03
Whisker free	500	2	22.73	$4.02 \times 10^{-12}$	$7.14 \times 10^{-12}$	2.38-3.17	1.91-2.33
		4	19.90	$0.94 \times 10^{-12}$	$0.96 \times 10^{-12}$	1.23-1.24	2.17-2.21
		6	16.54	$0.79 \times 10^{-12}$	$1.36 \times 10^{-12}$	1.24-1.62	1.44-2.01
		8	12.85	$0.66 \times 10^{-12}$	$0.86 \times 10^{-12}$	1.28-1.46	1.48-2.44
		10	9.29	$0.69 \times 10^{-12}$	$0.75 \times 10^{-12}$	1.54-1.61	1.52-2.72
	1000	2	23.66	$1.49 \times 10^{-12}$	$1.71 \times 10^{-12}$	1.42-1.52	3.85
		4	19.61	$1.10 \times 10^{-12}$	$1.24 \times 10^{-12}$	1.34-1.42	2.87-3.53
		6	16.10	$0.97 \times 10^{-12}$	$1.52 \times 10^{-12}$	1.39-1.74	2.88-3.28
		8	12.49	$1.02 \times 10^{-12}$	$1.34 \times 10^{-12}$	1.61-1.85	3.09-3.32
		10	8.42	$0.79 \times 10^{-12}$	$0.98 \times 10^{-12}$	1.73-1.93	3.26-3.55

ภาคผนวกที่ 2 ตารางข้อมูลคิบชิ้นงานมีวิศเคอร์คิบุก

\* หมายเหตุ

Ratio	=	ปริมาณวัสดุผสม Sn-10SiC ที่เติม (%)
P	=	ความดันที่ใช้อัดขึ้นรูป
$\emptyset$	=	เส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงาน
e	=	ความหนาชิ้นงาน
W	=	น้ำหนักชิ้นงาน
Temp.	=	อุณหภูมิอบชิ้น
$\rho_a$	=	ความหนาแน่นปรากฏ
$\rho_{true}$	=	ความหนาแน่นจริง

## ชุดที่ 1

NO.	Composite content (%)	P (psi)	Green part				Temp. (°C)	Sintered part			
			Ø (mm)	e (mm)	Volume (m <sup>3</sup> )	W (gm)		Ø (mm)	e (mm)	Volume (m <sup>3</sup> )	W (gm)
1	0	500	25.2	3.7	1.85E-06	10.0000	200	25.2	3.7	1.8E-06	9.9982
2	2		25.2	3.7	1.85E-06	9.9631		25.2	3.65	1.8E-06	9.9507
3	4		25.2	3.8	1.9E-06	9.9507		25.2	3.75	1.9E-06	9.9500
4	6		25.2	3.8	1.9E-06	9.9748		25.2	3.8	1.9E-06	9.8485
5	8		25.2	3.8	1.9E-06	9.9877		25.2	3.75	1.9E-06	9.9849
6	10		25.2	3.9	1.95E-06	9.9861		25.2	3.8	1.9E-06	9.9138
7	0	500	25.2	3.9	1.95E-06	10.0113	220	25.2	3.85	1.9E-06	10.06
8	2		25.2	3.8	1.9E-06	9.994		25.2	3.8	1.9E-06	10.0427
9	4		25.2	3.7	1.85E-06	9.9817		25.2	3.7	1.8E-06	9.9275
10	6		25.2	3.7	1.85E-06	9.9895		25.2	3.7	1.8E-06	9.9501
11	8		25.2	3.85	1.92E-06	9.9926		25.2	3.85	1.9E-06	9.9904
12	10		25.2	3.8	1.9E-06	9.9682		25.2	3.8	1.9E-06	9.9414
13	0	1000	25.2	3.3	1.65E-06	10.0135	200	25.2	3.3	1.6E-06	9.8642
14	2		25.2	3.25	1.62E-06	10.033		25.2	3.25	1.6E-06	9.5138
15	4		25.2	3.3	1.65E-06	9.9884		25.2	3.25	1.6E-06	9.4144
16	6		25.2	3.4	1.7E-06	9.9632		25.2	3.39	1.7E-06	9.8533
17	8		25.2	3.5	1.75E-06	9.9835		25.2	3.5	1.7E-06	9.8245
18	10		25.2	3.3	1.65E-06	9.988		25.2	3.35	1.7E-06	9.0943
19	0	1000	25.2	3.45	1.72E-06	10.0073	220	25.2	3.45	1.7E-06	10.0045
20	2		25.2	3.4	1.7E-06	9.948		25.2	3.4	1.7E-06	9.955
21	4		25.2	3.5	1.75E-06	9.9987		25.2	3.5	1.7E-06	9.0224
22	6		25.2	3.3	1.65E-06	10.0033		25.2	3.3	1.6E-06	9.0404
23	8		25.2	3.3	1.65E-06	9.9962		25.2	3.3	1.6E-06	9.0438
24	10		25.2	3.3	1.65E-06	10.0091		25.2	3.3	1.6E-06	9.0635

## รูปที่ 2

NO.	Composite content (%)	P (psi)	Green part				Temp. (°C)	Sintered part			
			Ø (mm)	e (mm)	Volume (m <sup>3</sup> )	W (gm)		Ø (mm)	e (mm)	Volume (m <sup>3</sup> )	W (gm)
1	0	500	25.2	3.7	1.85E-06	10.0015	200	25.2	3.7	1.8E-06	9.5982
2	2		25.2	3.8	1.9E-06	10.0037		25.2	3.8	1.9E-06	9.9707
3	4		25.2	3.85	1.92E-06	9.9855		25.2	3.85	1.9E-06	9.9668
4	6		25.2	3.8	1.9E-06	9.9159		25.2	3.8	1.9E-06	10.0344
5	8		25.2	3.8	1.9E-06	9.8958		25.2	3.9	1.9E-06	10.0218
6	10		25.2	3.95	1.97E-06	9.9102		25.2	3.95	2E-06	10.03
7	0	500	25.2	3.95	1.97E-06	9.8000	220	25.3	3.9	2E-06	10.0817
8	2		25.2	3.7	1.85E-06	9.9100		25.4	3.75	1.9E-06	10.0427
9	4		25.2	3.75	1.87E-06	9.892		25.3	3.75	1.9E-06	10.0025
10	6		25.2	3.8	1.9E-06	9.946		25.4	3.8	1.9E-06	9.9501
11	8		25.2	3.8	1.9E-06	10.04		25.5	3.7	1.9E-06	9.5904
12	10		25.2	4	2E-06	9.9568		25.6	4	2.1E-06	10.0117
13	0	1000	25.2	3.4	1.7E-06	10.0000	200	25.3	3.35	1.7E-06	9.012
14	2		25.2	3.3	1.65E-06	9.999		25.3	3.3	1.7E-06	9.0138
15	4		25.2	3.25	1.62E-06	9.993		25.2	3.3	1.6E-06	9.0144
16	6		25.2	3.3	1.65E-06	9.9846		25.2	3.3	1.6E-06	9.0094
17	8		25.2	3.4	1.7E-06	9.9606		25.2	3.4	1.7E-06	9.0245
18	10		25.2	3.3	1.65E-06	9.9889		25.2	3.3	1.6E-06	9.0396
19	0	1000	25.2	3.4	1.7E-06	9.9955	220	25.4	3.4	1.7E-06	9.595
20	2		25.2	3.4	1.7E-06	10.0074		25.4	3.3	1.7E-06	9.417
21	4		25.2	3.3	1.65E-06	9.9935		25.4	3.3	1.7E-06	9.1161
22	6		25.2	3.4	1.7E-06	10.0046		25.4	3.45	1.7E-06	9.8378
23	8		25.2	3.4	1.7E-06	9.9929		25.5	3.45	1.8E-06	9.6357
24	10		25.2	3.4	1.7E-06	9.9707		25.4	3.4	1.7E-06	9.4247



ภาคผนวกที่ 3 ตารางข้อมูลคืบขึ้นงาน ไม่มีมีวิสเคอร์ติง

ชุดที่ 1

NO.	Composite content (%)	P (psi)	Green part				Temp. (°C)	Sintered part			
			Ø (mm)	e (mm)	Volume (m <sup>3</sup> )	W (gm)		Ø (mm)	e (mm)	Volume (m <sup>3</sup> )	W (gm)
1	0	500	25.2	3.8	1.9E-06	9.9985	200	25.2	3.75	1.9E-06	9.9975
2	2		25.2	3.8	1.9E-06	9.9735		25.2	3.8	1.9E-06	9.976
3	4		25.2	3.8	1.9E-06	9.9977		25.2	3.8	1.9E-06	10.0056
4	6		25.2	3.75	1.87E-06	9.98		25.2	3.75	1.9E-06	9.9925
5	8		25.2	3.6	1.8E-06	9.9706		25.2	3.6	1.8E-06	9.9997
6	10		25.2	3.75	1.87E-06	9.9809		25.2	3.75	1.9E-06	10.006
7	0	500	25.2	3.7	1.85E-06	10.006	220	25.2	3.7	1.8E-06	10.0075
8	2		25.2	3.8	1.9E-06	10.001		25.2	3.8	1.9E-06	10.0086
9	4		25.2	3.7	1.85E-06	9.9735		25.2	3.7	1.8E-06	9.9858
10	6		25.2	3.7	1.85E-06	9.977		25.2	3.7	1.8E-06	9.9987
11	8		25.2	3.7	1.85E-06	9.9983		25.2	3.7	1.8E-06	10.0163
12	10		25.2	3.8	1.9E-06	9.9547		25.2	3.8	1.9E-06	9.9836
13	0	1000	25.2	3.4	1.7E-06	9.9453	200	25.2	3.4	1.7E-06	9.4053
14	2		25.2	3.15	1.57E-06	9.9968		25.2	3.15	1.6E-06	9.0145
15	4		25.2	3.5	1.75E-06	10.0032		25.2	3.5	1.7E-06	9.9281
16	6		25.2	3.35	1.67E-06	9.9105		25.2	3.35	1.7E-06	9.46
17	8		25.2	3.4	1.7E-06	9.9801		25.2	3.4	1.7E-06	9.2211
18	10		25.2	3.5	1.75E-06	9.9723		25.2	3.5	1.7E-06	9.4
19	0	1000	25.2	3.45	1.72E-06	10.0045	220	25.2	3.45	1.7E-06	9.7592
20	2		25.2	3.6	1.8E-06	9.993		25.2	3.6	1.8E-06	9.8891
21	4		25.2	3.45	1.72E-06	9.984		25.2	3.45	1.7E-06	9.7223
22	6		25.2	3.45	1.72E-06	9.992		25.2	3.45	1.7E-06	9.552
23	8		25.2	3.25	1.62E-06	9.9685		25.2	3.25	1.6E-06	9.0575
24	10		25.2	3.5	1.75E-06	9.9909		25.2	3.5	1.7E-06	9.5793



## ชุดที่ 2

NO.	Composite content (%)	P (psi)	Green part				Temp. (°C)	Sintered part			
			Ø (mm)	e (mm)	Volume (m <sup>3</sup> )	W (gm)		Ø (mm)	e (mm)	Volume (m <sup>3</sup> )	W (gm)
1	0	500	25.2	3.8	1.9E-06	9.9985	200	25.2	3.7	1.8E-06	9.9975
2	2		25.2	3.9	1.95E-06	9.9735		25.2	3.8	1.9E-06	9.976
3	4		25.2	4.2	2.1E-06	9.9977		25.2	4.2	2.1E-06	10.0385
4	6		25.2	4	2E-06	9.98		25.2	4	2E-06	9.9925
5	8		25.2	4	2E-06	9.9706		25.2	3.9	1.9E-06	9.9997
6	10		25.2	4.25	2.12E-06	9.9809		25.2	4.2	2.1E-06	10.006
7	0	500	25.2	3.7	1.85E-06	10.006	220	25.2	3.7	1.8E-06	10.0075
8	2		25.2	3.8	1.9E-06	10.001		25.2	3.8	1.9E-06	10.0086
9	4		25.2	3.7	1.85E-06	9.9735		25.2	3.7	1.8E-06	9.9858
10	6		25.2	3.9	1.95E-06	9.977		25.2	3.9	1.9E-06	9.9987
11	8		25.2	3.8	1.9E-06	9.9983		25.2	3.7	1.8E-06	10.0163
12	10		25.2	3.8	1.9E-06	9.9547		25.2	3.8	1.9E-06	9.9836
13	0	1000	25.2	3.4	1.7E-06	9.9453	200	25.2	3.4	1.7E-06	9.9445
14	2		25.2	3.4	1.7E-06	9.9968		25.2	3.4	1.7E-06	10.0012
15	4		25.2	3.45	1.72E-06	10.0032		25.2	3.45	1.7E-06	10.0135
16	6		25.2	3.4	1.7E-06	9.9105		25.2	3.4	1.7E-06	9.9254
17	8		25.2	3.4	1.7E-06	9.9801		25.2	3.4	1.7E-06	10.0006
18	10		25.2	3.65	1.82E-06	9.9723		25.2	3.65	1.8E-06	9.9975
19	0	1000	25.2	3.45	1.72E-06	10.0045	220	25.2	3.45	1.7E-06	10.0592
20	2		25.2	3.6	1.8E-06	9.993		25.2	3.6	1.8E-06	9.8891
21	4		25.2	3.4	1.7E-06	9.984		25.2	3.4	1.7E-06	10.0223
22	6		25.2	3.4	1.7E-06	9.992		25.2	3.4	1.7E-06	10.052
23	8		25.2	3.4	1.7E-06	9.9685		25.2	3.4	1.7E-06	9.9575
24	10		25.2	3.4	1.7E-06	9.9909		25.2	3.4	1.7E-06	9.7793

ภาคผนวกที่ 4 ตารางข้อมูลค่าความหนาแน่นและร้อยละความพรุนของชิ้นงานไม่มีวิส

เทอร์ติบูก

ชุดที่ 1

NO.	Composite content (%)	$\rho_a$ g/(cm <sup>3</sup> )	$\rho_{true}$ g/(cm <sup>3</sup> )	$\rho_a / \rho_{true}$	% Pore (%)
1	0	5.42	7.28	0.74	25.61
2	2	5.46	7.02	0.78	22.13
3	4	5.32	6.75	0.79	21.25
4	6	5.19	6.49	0.80	19.95
5	8	5.34	6.23	0.86	14.28
6	10	5.23	5.96	0.88	12.29
7	0	5.24	7.28	0.72	28.07
8	2	5.30	7.02	0.75	24.51
9	4	5.38	6.75	0.80	20.37
10	6	5.39	6.49	0.83	16.94
11	8	5.21	6.23	0.84	16.46
12	10	5.24	5.96	0.88	12.05
13	0	6.00	7.28	0.82	17.71
14	2	5.87	7.02	0.84	16.38
15	4	5.80	6.75	0.86	14.03
16	6	5.83	6.49	0.90	10.23
17	8	5.63	6.23	0.90	9.63
18	10	5.44	5.96	0.91	8.74
19	0	5.81	7.28	0.80	20.17
20	2	5.87	7.02	0.84	16.37
21	4	5.17	6.75	0.77	23.49
22	6	5.49	6.49	0.85	15.39
23	8	5.49	6.23	0.88	11.77
24	10	5.50	5.96	0.92	7.67

รูปที่ 2

NO.	Composite content (%)	$\rho_a$ g/(cm <sup>3</sup> )	$\rho_{true}$ g/(cm <sup>3</sup> )	$\rho_a / \rho_{true}$	% Pore (%)
1	0	5.12	7.28	0.70	28.58
2	2	5.26	7.02	0.75	25.06
3	4	5.19	6.75	0.77	23.17
4	6	5.29	6.49	0.82	18.44
5	8	5.15	6.23	0.83	17.27
6	10	5.09	5.96	0.85	14.64
7	0	5.14	7.28	0.71	29.40
8	2	5.28	7.02	0.75	24.70
9	4	5.30	6.75	0.79	21.46
10	6	5.16	6.49	0.80	20.40
11	8	5.07	6.23	0.81	18.50
12	10	4.86	5.96	0.82	18.47
13	0	5.35	7.28	0.73	26.53
14	2	5.45	7.00	0.78	22.29
15	4	5.47	6.75	0.81	18.93
16	6	5.47	6.49	0.84	15.68
17	8	5.32	6.23	0.85	14.55
18	10	5.49	5.96	0.92	7.91
19	0	5.59	7.28	0.77	23.23
20	2	5.65	7.02	0.80	19.45
21	4	5.47	6.75	0.81	18.98
22	6	5.63	6.49	0.87	13.31
23	8	5.47	6.23	0.88	12.19
24	10	5.48	5.96	0.92	8.27

รูปที่ 3

NO.	Composite content (%)	$\rho_a$ g/(cm <sup>3</sup> )	$\rho_{true}$ g/(cm <sup>3</sup> )	$\rho_a / \rho_{true}$	% Pore (%)
1	-	-	-	-	-
2	2	5.12	7.02	0.73	26.97
3	4	5.12	6.75	0.76	24.16
4	6	5.29	6.49	0.82	18.44
5	8	5.29	6.23	0.85	15.09
6	10	5.15	5.96	0.86	13.54
7	0	5.41	7.28	0.74	25.64
8	2	5.28	7.02	0.75	24.75
9	4	5.22	6.75	0.77	22.70
10	6	4.88	6.49	0.75	24.75
11	-	-	6.23	-	-
12	10	4.86	5.96	0.82	18.46
13	0	6.09	7.28	0.84	16.29
14	-	-	7.02	-	-
15	4	5.90	6.75	0.87	12.58
16	6	5.90	6.49	0.91	9.07
17	8	5.74	6.23	0.92	7.79
18	10	5.75	5.96	0.96	3.57
19	0	5.66	7.28	0.78	22.31
20	2	5.67	7.02	0.81	19.21
21	-	-	6.75	-	-
22	-	-	6.49	-	-
23	8	5.61	6.23	0.90	9.85
24	-	-	-	0.88	-

ภาคผนวกที่ 5 ตารางข้อมูลค่าความหนาแน่นและร้อยละความพรุนของชิ้นงานมีไม่มีวิส

เกอร์ดีบุก

ชุดที่ 1

NO.	Composite content (%)	$\rho_a$ g/(cm <sup>3</sup> )	$\rho_{true}$ g/(cm <sup>3</sup> )	$\rho_a / \rho_{true}$	% Pore (%)
1	0	5.34	7.28	0.73	26.61
2	2	5.26	7.02	0.75	25.01
3	4	5.278	6.75	0.78	21.85
4	6	5.345	6.49	0.82	17.70
5	8	5.57	6.23	0.89	10.57
6	10	5.35	5.96	0.90	10.30
7	0	5.42	7.28	0.74	25.54
8	2	5.28	7.02	0.75	24.77
9	4	5.41	6.75	0.80	19.90
10	6	5.41	6.49	0.83	16.54
11	8	5.43	6.23	0.87	12.85
12	10	5.27	5.96	0.88	11.68
13	0	5.54	7.28	0.76	23.85
14	2	5.74	7.02	0.82	18.26
15	4	5.69	6.75	0.84	15.81
16	6	5.66	6.49	0.87	12.78
17	8	5.447	6.23	0.87	12.69
18	10	5.38	5.96	0.90	9.71
19	0	5.67	7.28	0.78	22.13
20	2	5.51	7.02	0.78	21.53
21	4	5.65	6.75	0.84	16.36
22	6	5.55	6.49	0.86	14.49
23	8	5.59	6.23	0.90	10.28
24	10	5.49	5.96	0.92	7.99

ชุดที่ 2

NO.	Composite content (%)	$\rho_a$ g/(cm <sup>3</sup> )	$\rho_{true}$ g/(cm <sup>3</sup> )	$\rho_a / \rho_{true}$	% Pore (%)
1	0	5.42	7.28	0.74	25.61
2	2	5.26	7.02	0.75	25.01
3	4	4.79	6.75	0.71	29.06
4	6	5.01	6.49	0.77	22.84
5	8	5.14	6.23	0.83	17.45
6	10	4.77	5.96	0.80	19.91
7	0	5.42	7.28	0.74	25.54
8	2	5.28	7.02	0.75	24.77
9	4	5.41	6.75	0.80	19.90
10	6	5.14	6.49	0.79	20.82
11	8	5.43	6.23	0.87	12.85
12	10	5.27	5.96	0.88	11.68
13	0	5.86	7.28	0.80	19.48
14	2	5.90	7.02	0.84	15.98
15	4	5.82	6.75	0.86	13.86
16	6	5.85	6.49	0.90	9.84
17	8	5.89	6.23	0.95	5.319
18	10	5.49	5.96	0.92	7.92
19	0	5.84	7.28	0.80	19.73
20	2	5.51	7.02	0.78	21.53
21	4	5.91	6.75	0.88	12.51
22	6	5.93	6.49	0.91	8.69
23	8	5.90	6.23	0.95	5.71
24	10	5.76	5.96	0.97	3.31

ภาคผนวกที่ 6 ตารางข้อมูลของรูปต่าง ๆ

ก. ตารางข้อมูลรูปที่ 4.9

NO.	Composite content (%)	$\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )			Average value g/(cm <sup>3</sup> )
		Sample 1	Sample 2	Sample 3	
1	0	5.42	5.20	-	5.37
2	2	5.46	5.265	5.12	5.24
3	4	5.328	5.19	5.12	5.34
4	6	5.19	5.29	5.29	5.28
5	8	5.3	5.15	5.29	5.22
6	10	5.23	5.09	5.15	5.32
7	0	5.24	5.14	5.41	5.36
8	2	5.30	5.28	5.28	5.37
9	4	5.38	5.30	5.22	5.21
10	6	5.39	5.17	4.88	5.17
11	8	5.20	5.07	-	5.12
12	10	5.24	4.86	4.86	5.44
13	0	5.99	5.35	6.09	5.92
14	2	5.87	5.45	-	6.01
15	4	5.80	5.47	5.90	6.11
16	6	5.83	5.47	5.90	6.05
17	8	5.63	5.32	5.74	5.97
18	10	5.44	5.49	5.75	5.98
19	0	5.81	5.59	5.66	6.16
20	2	5.87	5.65	5.67	5.94
21	4	5.17	5.47	-	5.75
22	6	5.49	5.63	-	5.93
23	8	5.49	5.47	5.61	5.81
24	10	5.50	5.47	-	5.67

## ข. ตารางข้อมูลรูปที่ 4.11

NO.	Composite content (%)	Porosity (%)			Average value
		Sample1	Sample2	Sample3	
1	0	25.60	25.60	-	25.60
2	2	23.02	23.02	23.02	23.02
3	4	20.05	20.05	20.05	20.05
4	6	16.54	16.23	16.23	16.34
5	8	12.79	12.79	12.79	12.79
6	10	8.86	8.86	8.86	8.86
7	0	24.98	25.57	25.57	25.38
8	2	22.46	23.68	23.68	23.28
9	4	19.76	20.39	20.39	20.18
10	6	16.94	18.24	18.24	17.80
11	8	13.072	15.10	-	14.08
12	10	9.03	11.85	11.85	10.91
13	0	25.50	26.09	25.33	25.64
14	2	22.69	22.99	-	22.84
15	4	19.66	19.66	19.66	19.66
16	6	16.44	16.44	16.44	16.45
17	8	12.77	12.77	12.77	12.77
18	10	8.78	8.78	8.78	8.78
19	0	25.56	26.50	26.51	26.19
20	2	23.14	23.58	23.58	23.43
21	4	19.60	20.60	-	20.10
22	6	16.18	17.52	-	16.85
23	8	12.60	14.72	14.72	14.01
24	10	8.56	10.34	-	9.45



ค. ตารางข้อมูลรูปที่ 4.12

NO.	Composite content (%)	Permeability coefficient ( $\times 10^{-12} \text{ m}^2$ )			Average value
		Sample1	Sample2	Sample3	
1	0	3.30	3.86	-	3.58
2	2	2.79	3.48	3.21	3.16
3	4	2.51	2.33	2.99	2.61
4	6	2.40	2.21	2.26	2.29
5	8	2.11	2.01	2.04	2.05
6	10	1.85	1.84	2.32	2.00
7	0	4.96	4.52	4.82	4.77
8	2	2.76	3.35	2.48	2.86
9	4	2.39	2.51	2.40	2.43
10	6	3.17	2.26	2.26	2.56
11	8	3.44	2.48	-	2.96
12	10		1.96	1.95	1.95
13	0	1.38	1.50	1.54	1.47
14	2	1.21	1.04	-	1.13
15	4	1.51	1.26	1.50	1.43
16	6	0.79	0.88	0.82	0.83
17	8	0.78	0.87	0.79	0.81
18	10	0.80	0.77	0.78	0.78
19	0	1.35	1.58	1.41	1.45
20	2	1.30	1.18	1.18	1.22
21	4	2.11	1.82	-	1.97
22	6	1.47	1.42	-	1.45
23	8	1.52	1.68	1.49	1.56
24	10	1.52	1.44	-	1.48

ง. ตารางข้อมูลรูปที่ 4.13

NO.	Composite content (%)	Biggest pore size diameter ( $\mu m$ )			Average value
		Sample1	Sample2	Sample3	
1	0	71.73	72.31	-	72.02
2	2	-	77.30	72.31	74.81
3	4	-	64.05	71.17	67.61
4	6	56.75	-	50.66	53.71
5	8	49.54	-	47.44	48.49
6	10	43.32	-	42.30	42.81
7	0	-	59.78	54.68	57.23
8	2	52.75	-	46.95	49.85
9	4	56.40	53.37	57.48	55.75
10	6	55.01	57.98	-	56.50
11	8	45.06	-	47.33	46.20
12	10	42.10	45.98	46.22	44.77
13	0	35.44	27.93	-	31.69
14	2	24.84	28.29	-	26.56
15	4	32.61	33.09	-	32.85
16	6	28.83	25.62	-	27.23
17	8	-	33.97	30.92	32.44
18	10	20.71	-	22.42	21.56
19	0	27.59	-	32.85	30.22
20	2	29.21	27.76	25.55	27.50
21	4	31.03	30.19	-	30.61
22	6	25.47	29.40	-	27.44
23	8	29.79	30.05	-	29.92
24	10	29.40	29.89	-	29.64

จ. ตารางข้อมูลรูปที่ 4.14

NO.	Composite content (%)	Average pore size diameter ( $\mu\text{m}$ )			Average value
		Sample1	Sample2	Sample3	
1	0	2.03	2.20	-	2.11
2	2	1.97	2.20	2.11	2.09
3	4	2.00	1.93	2.18	2.04
4	6	2.15	2.09	2.11	2.12
5	8	2.30	2.24	2.26	2.27
6	10	2.58	2.58	2.89	2.69
7	0	2.52	2.38	2.46	2.45
8	2	1.98	2.13	1.83	1.98
9	4	1.97	1.98	1.94	1.96
10	6	2.45	1.99	1.99	2.14
11	8	2.90	2.29	-	2.60
12	10	-	2.30	2.29	2.30
13	0	1.32	1.35	1.39	1.35
14	2	1.31	1.20	-	1.26
15	4	1.57	1.43	1.56	1.52
16	6	1.24	1.31	1.26	1.27
17	8	1.39	1.47	1.41	1.43
18	10	1.71	1.67	1.68	1.69
19	0	1.30	1.38	1.31	1.33
20	2	1.34	1.26	1.26	1.29
21	4	1.86	1.68	-	1.77
22	6	1.71	1.61	-	1.66
23	8	1.96	1.91	1.80	1.89
24	10	2.38	2.11	-	2.25

จ. ตารางข้อมูลรูปที่ 4.15

NO.	Composite content (%)	Shear strength (MPa)			Average value
		Sample1	Sample2	Sample3	
1	0	1.72	1.52	1.26	1.50
2	2	1.90	1.27	1.20	1.46
3	4	1.72	1.44	1.50	1.55
4	6	1.89	1.40	1.29	1.53
5	8	1.72	1.43	1.42	1.52
6	10	1.52	1.48	1.32	1.44
7	0	2.58	2.53	2.59	2.57
8	2	3.05	3.20	2.74	3.00
9	4	4.21	4.01	-	4.11
10	6	5.24	5.31	-	5.27
11	8	6.55	5.05	-	5.80
12	10	3.27	5.34	1.55	3.39
13	0	3.75	4.02	3.13	3.64
14	2	3.51	3.88	-	3.70
15	4	3.77	4.20	3.64	3.87
16	6	3.85	4.77	4.49	4.37
17	8	3.59	4.99	4.01	4.20
18	10	4.46	4.02	4.51	4.33
19	0	5.62	5.77	5.10	5.50
20	2	7.82	8.01	5.42	7.08
21	4	4.04	5.51	-	4.77
22	6	4.32	3.81	-	4.07
23	8	4.53	3.44	4.15	4.04
24	10	4.03	3.97	-	4.00

ข. ตารางข้อมูลรูปที่ 4.17

Pressure (psi)	Density (g/cm <sup>3</sup> )	SD
500	5.24	0.20
1000	6.02	0.10
1500	6.17	0.13
2000	6.43	0.07

ค. ตารางข้อมูลรูปที่ 4.18

Pressure (psi)	Porosity (%)			Average value	SD
	Sample1	Sample2	Sample3		
500	23.03	23.03	23.03	23.03	0.00
1000	22.69	23.00	-	22.85	0.22
1500	10.74	13.28	-	12.01	1.80
2000	7.65	9.15	-	8.40	1.06

ง. ตารางข้อมูลรูปที่ 4.19

Pressure (psi)	Permeability coefficient (x 10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> )			Average value	SD
	Sample1	Sample2	Sample3		
500	2.79	3.48	3.21	3.16	0.35
1000	1.21	1.04		1.13	0.12
1500	0.55	0.56		0.56	0.01
2000	0.52	0.51		0.52	0.01

ณ. ตารางข้อมูลรูปที่ 4.20

Pressure (psi)	Biggest pore size diameter ( $\mu m$ )	SD
500	74.81	3.53
1000	26.56	2.44
1500	14.82	0.17
2000	5.95	4.21

ณ. ตารางข้อมูลรูปที่ 4.21

Pressure (psi)	Average pore size diameter ( $\mu m$ )	SD
500	2.09	0.12
1000	1.87	0.49
1500	1.54	0.50
2000	1.27	0.06

ณ. ตารางข้อมูลรูปที่ 4.22

Pressure (psi)	Shear strength (MPa)			average value	SD
	Sample1	Sample2	Sample3		
500	1.90	1.27	1.20	1.46	0.38
1000	3.51	3.88	-	3.70	0.26
1500	4.94	5.45	-	5.19	0.37
2000	6.10	5.85	-	5.97	0.18

ฐ. ตารางข้อมูลรูปที่ 4.22

NO.	Composite Content (%)	P (psi)	Temp. (°C)	Density (g/cm <sup>3</sup> )	SD
1	0			5.37	0.23
2	2			5.24	0.20
3	4	500	200	5.34	0.05
4	6			5.29	0.01
5	8			5.22	0.12
6	10			5.32	0.24
7	0			5.37	0.09
8	2			5.37	0.19
9	4	500	220	5.21	0.27
10	6			5.18	0.01
11	8			5.12	0.22
12	10			5.44	0.61
13	0			5.93	0.03
14	2			6.02	0.10
15	4	1000	200	6.12	0.05
16	6			6.06	0.13
17	8			5.98	0.11
18	10			5.98	0.21
19	0			6.16	0.19
20	2			5.95	0.10
21	4	1000	220	5.75	0.12
22	6			5.94	0.18
23	8			5.81	0.16
24	10			5.67	0.02

## ท. ตารางข้อมูลรูปที่ 4.25

NO.	Composite content (%)	P (psi)	Porosity (%)			Average	SD
			Sample1	Sample2	Sample3		
1	0	500	25.61	25.61	-	25.61	0.00
2	2		23.03	23.03	23.03	23.03	0.00
3	4		20.05	20.05	20.05	20.05	0.00
4	6		16.55	16.24	16.24	16.34	0.18
5	8		12.80	12.80	12.80	12.80	0.00
6	10		8.87	8.87	8.87	8.87	0.00
7	0	500	24.99	25.58	25.58	25.38	0.34
8	2		22.47	23.69	23.69	23.28	0.70
9	4		19.76	20.40	20.40	20.19	0.37
10	6		16.94	18.24	18.24	17.81	0.75
11	8		13.07	15.11	-	14.09	1.44
12	10		9.03	11.85	11.85	10.91	1.63
13	0	1000	25.51	26.09	25.34	25.65	0.40
14	2		22.69	23.00	-	22.85	0.22
15	4		19.67	19.67	19.67	19.67	0.00
16	6		16.45	16.45	16.45	16.45	0.00
17	8		12.78	12.78	12.78	12.78	0.00
18	10		8.78	8.78	8.78	8.78	0.00
19	0	1000	25.56	26.51	26.51	26.19	0.55
20	2		23.15	23.58	23.58	23.44	0.25
21	4		19.60	20.60	-	20.10	0.71
22	6		16.19	17.52	-	16.86	0.95
23	8		12.61	14.72	14.72	14.02	1.22
24	10		8.56	10.34	-	9.45	1.26



ต. ตารางข้อมูลรูปที่ 4.26

NO.	Composite content (%)	P (psi)	Permeability coefficient ( $\times 10^{-12} \text{ m}^2$ )			Average	SD
			Sample1	Sample2	Sample3		
1	0	500	3.30	3.86	-	3.58	0.39
2	2		2.79	3.48	3.21	3.16	0.35
3	4		2.51	2.33	2.99	2.61	0.34
4	6		2.40	2.21	2.26	2.29	0.09
5	8		2.11	2.01	2.04	2.05	0.05
6	10		1.85	1.84	2.32	2.00	0.27
7	0	500	4.96	4.52	4.82	4.77	0.22
8	2		2.76	3.35	2.48	2.86	0.44
9	4		2.39	2.51	2.40	2.43	0.07
10	6		3.17	2.26	2.26	2.56	0.53
11	8		3.44	2.48	-	2.96	0.68
12	10		-	1.96	1.95	1.95	0.01
13	0	1000	1.38	1.50	1.54	1.47	0.08
14	2		1.21	1.04	-	1.13	0.12
15	4		1.51	1.26	1.50	1.43	0.14
16	6		0.79	0.88	0.82	0.83	0.05
17	8		0.78	0.87	0.79	0.81	0.05
18	10		0.80	0.77	0.78	0.78	0.02
19	0	1000	1.35	1.58	1.41	1.45	0.12
20	2		1.30	1.18	1.18	1.22	0.07
21	4		2.11	1.82	-	1.97	0.21
22	6		1.47	1.42	-	1.45	0.04
23	8		1.52	1.68	1.49	1.56	0.10
24	10		1.52	1.44	-	1.48	0.06

ณ. ตารางข้อมูลรูปที่ 4.27

NO.	Composite content (%)	P (psi)	Biggest pore size diameter ( $\mu m$ )	SD
1	0	500	72.02	0.41
2	2		74.81	3.53
3	4		67.61	5.03
4	6		53.71	4.31
5	8		48.49	1.48
6	10		42.81	0.72
7	0	500	57.23	3.61
8	2		49.85	4.10
9	4		55.75	2.13
10	6		56.50	2.10
11	8		46.20	1.61
12	10		44.77	2.32
13	0	1000	31.69	5.31
14	2		26.56	2.44
15	4		32.85	0.34
16	6		27.23	2.27
17	8		32.44	2.15
18	10		21.56	1.21
19	0	1000	30.22	3.72
20	2		27.50	1.84
21	4		30.61	0.59
22	6		27.44	2.78
23	8		29.92	0.19
24	10		29.64	0.35

ค. ตารางข้อมูลรูปที่ 4.28

NO.	Composite content (%)	P (psi)	Average pore size diameter ( $\mu m$ )	SD
1	0	500	2.11	0.12
2	2		2.09	0.12
3	4		2.04	0.13
4	6		2.12	0.03
5	8		2.27	0.03
6	10		2.69	0.18
7	0	500	2.45	0.07
8	2		1.98	0.15
9	4		1.96	0.02
10	6		2.14	0.26
11	8		2.60	0.43
12	10		2.30	0.00
13	0	1000	1.35	0.04
14	2		1.26	0.07
15	4		1.52	0.08
16	6		1.27	0.04
17	8		1.43	0.04
18	10		1.69	0.02
19	0	1000	1.33	0.05
20	2		1.29	0.04
21	4		1.77	0.12
22	6		1.66	0.07
23	8		1.89	0.08
24	10		2.25	0.19

ต. ตารางข้อมูลรูปที่ 4.29

NO.	Composite content (%)	P (psi)	Shear strength (MPa)	SD
1	0	500	1.50	0.23
2	2		1.46	0.38
3	4		1.55	0.15
4	6		1.53	0.32
5	8		1.52	0.17
6	10		1.44	0.11
7	0	500	2.57	0.03
8	2		3.00	0.23
9	4		4.11	0.13
10	6		5.27	0.05
11	8		5.80	1.06
12	10		3.39	1.90
13	0	1000	3.64	0.46
14	2		3.70	0.26
15	4		3.87	0.29
16	6		4.37	0.47
17	8		4.20	0.72
18	10		4.33	0.27
19	0	1000	5.50	0.35
20	2		7.08	1.44
21	4		4.77	1.04
22	6		4.07	0.36
23	8		4.04	0.55
24	10		4.00	0.04

ถ. ตารางข้อมูลรูปที่ 4.31

NO.	Composite content (%)	P (psi)	Density (g/cm <sup>3</sup> )			
			Whisker formed sample	SD	Whisker free sample	SD
1	0	500	5.37	0.23	5.42	0.00
2	2		5.24	0.20	5.27	0.00
3	4		5.34	0.05	5.10	0.46
4	6		5.29	0.01	5.21	0.29
5	8		5.22	0.12	5.28	0.20
6	10		5.32	0.24	5.16	0.37
7	0	500	5.37	0.09	5.28	0.00
8	2		5.37	0.19	5.19	0.24
9	4		5.21	0.27	5.38	0.05
10	6		5.18	0.01	5.15	0.19
11	8		5.12	0.22	5.43	0.00
12	10		5.44	0.61	5.19	0.43
13	0	1000	5.93	0.03	5.87	0.00
14	2		6.02	0.10	5.65	0.00
15	4		6.12	0.05	5.66	0.00
16	6		6.06	0.13	6.13	0.00
17	8		5.98	0.11	5.73	0.00
18	10		5.98	0.21	6.17	0.00
19	0	1000	6.16	0.19	5.93	0.00
20	2		5.95	0.10	5.92	0.00
21	4		5.75	0.12	5.59	0.22
22	6		5.94	0.18	5.62	0.44
23	8		5.81	0.16	5.68	0.11
24	10		5.67	0.02	5.95	0.00

บ. ตารางข้อมูลรูปที่ 4.32

NO.	Composite content (%)	P (psi)	Porosity (%)		
			Whisker formed sample	SD	Whisker free sample
1	0	500	25.61	0.00	25.61
2	2		23.03	0.00	22.98
3	4		20.05	0.00	19.74
4	6		16.34	0.18	16.59
5	8		12.80	0.00	12.99
6	10		8.87	0.00	9.09
7	0	500	25.38	0.34	25.54
8	2		23.28	0.70	22.73
9	4		20.19	0.37	19.90
10	6		17.81	0.75	16.54
11	8		14.09	1.44	12.85
12	10		10.91	1.63	9.29
13	0	1000	25.65	0.40	26.01
14	2		22.85	0.22	22.79
15	4		19.67	0.00	19.68
16	6		16.45	0.00	17.15
17	8		12.78	0.00	12.98
18	10		8.78	0.00	9.16
19	0	1000	26.19	0.55	25.15
20	2		23.44	0.25	23.66
21	4		20.10	0.71	19.61
22	6		16.86	0.94	16.09
23	8		14.02	1.22	12.49
24	10		9.45	1.26	8.42

## ป. ตารางข้อมูลรูปที่ 4.33

NO.	Composite content (%)	P (psi)	Biggest pore size diameter ( $\mu m$ )			
			Whisker formed sample	SD	Whisker free sample	SD
1	0	500	72.02	0.41	70.61	0.00
2	2		74.81	3.53	84.66	3.38
3	4		67.61	5.03	64.17	3.89
4	6		53.71	4.31	58.53	5.91
5	8		48.49	1.48	52.44	0.00
6	10		42.81	0.72	52.30	8.93
7	0	500	57.23	3.61	74.11	0.00
8	2		49.85	4.10	79.35	0.00
9	4		55.75	2.13	87.91	0.00
10	6		56.50	2.10	73.54	13.42
11	8		46.20	1.61	57.95	7.35
12	10		44.77	2.32	48.87	0.94
13	0	1000	31.69	5.31	32.02	0.00
14	2		26.56	2.44	33.60	1.07
15	4		32.85	0.34	34.36	-
16	6		27.23	2.27	31.24	0.15
17	8		32.44	2.15	31.36	0.62
18	10		21.56	1.21	28.94	0.00
19	0	1000	30.22	3.72	45.68	2.14
20	2		27.50	1.84	39.79	1.37
21	4		30.61	0.59	46.64	4.10
22	6		27.44	2.78	45.75	6.54
23	8		29.92	0.19	42.84	6.16
24	10		29.64	0.35	31.88	3.50

ผ. ตารางข้อมูลรูปที่ 4.34

NO.	Composite content (%)	P (psi)	Average pore size diameter ( $\mu m$ )			
			Whisker formed sample	SD	Whisker free sample	SD
1	0	500	2.11	0.12	2.65	0.31
2	2		2.09	0.12	1.95	0.09
3	4		2.04	0.13	1.59	0.03
4	6		2.12	0.03	1.38	0.00
5	8		2.27	0.03	1.49	0.00
6	10		2.69	0.18	1.65	0.02
7	0	500	3.29	1.18	3.29	1.18
8	2		1.98	0.15	2.77	0.56
9	4		1.96	0.02	1.24	0.01
10	6		2.14	0.26	1.43	0.27
11	8		2.60	0.43	1.37	0.13
12	10		2.30	0.00	1.57	0.05
13	0	1000	1.35	0.04	1.79	0.00
14	2		1.26	0.07	1.25	0.00
15	4		1.52	0.08	1.26	0.06
16	6		1.27	0.04	1.13	0.00
17	8		1.43	0.04	1.61	0.50
18	10		1.69	0.02	1.62	0.31
19	0	1000	1.33	0.05	1.56	0.06
20	2		1.29	0.04	1.47	0.07
21	4		1.77	0.12	1.38	0.06
22	6		1.66	0.07	1.56	0.25
23	8		1.89	0.08	1.73	0.17
24	10		2.25	0.19	1.83	0.14



ผ. ตารางข้อมูลรูปที่ 4.35

NO.	Composite content (%)	P (psi)	Volume change (%)			
			Whisker formed sample	SD	Whisker free sample	SD
1	0	500	0.5	0	0	0
2	2		2	1.25	-1.28	1.81
3	4		169	2.01	0.00	0.00
4	6		5	1.48	0.00	0.00
5	8		6.5	2.79	-1.25	1.77
6	10		8	1.81	-0.59	0.83
7	0	500	0	0.00	0.00	0.00
8	2		5	2.10	0.00	0.00
9	4		171	0.46	0.00	0.00
10	6		8	0.92	0.00	0.00
11	8		9.5	0.21	-1.32	1.86
12	10		11	1.85	0.00	0.00
13	0	1000	6.5	0.00	0.00	0.00
14	2		8	0.28	0.00	0.00
15	4		339.67	1.53	0.00	0.00
16	6		11	0.17	0.00	0.00
17	8		12.5	0.87	0.00	0.00
18	10		14	0.00	0.00	0.00
19	0	1000	9.5	1.50	0.00	0.00
20	2		11	0.84	0.00	0.00
21	4		341.67	2.18	0.00	0.00
22	6		14	1.97	0.00	0.00
23	8		15.5	1.13	0.00	0.00
24	10		17	0.87	0.00	0.00

พ. ตารางข้อมูลรูปที่ 4.36

NO.	Composite content (%)	P (psi)	Permeability coefficient ( $\times 10^{-12} \text{ m}^2$ )			
			Whisker formed sample	SD	Whisker free sample	SD
1	0	500	3.58	0.39	5.66	1.34
2	2		3.16	0.35	2.73	0.26
3	4		2.61	0.34	1.57	0.06
4	6		2.29	0.09	0.99	0.00
5	8		2.05	0.05	0.90	0.01
6	10		2.00	0.27	0.77	0.02
7	0	500	9.17	6.23	9.17	6.23
8	2		2.86	0.44	5.58	2.21
9	4		2.43	0.07	0.95	0.01
10	6		2.56	0.53	1.08	0.40
11	8		2.96	0.68	0.76	0.14
12	10		1.95	0.01	0.72	0.05
13	0	1000	1.47	0.08	2.60	0.00
14	2		1.13	0.12	1.12	0.00
15	4		1.43	0.14	0.98	0.10
16	6		0.83	0.05	0.68	0.00
17	8		0.81	0.05	1.10	0.65
18	10		0.78	0.02	0.76	0.29
19	0	1000	1.45	0.12	1.92	0.14
20	2		1.22	0.07	1.60	0.15
21	4		1.97	0.21	1.17	0.10
22	6		1.45	0.04	1.24	0.39
23	8		1.56	0.10	1.18	0.23
24	10		1.48	0.06	0.89	0.14

ฟ. ตารางข้อมูลรูปที่ 4.37

NO.	Composite content (%)	P (psi)	Shear strength (MPa)			
			Whisker formed sample	SD	Whisker free sample	SD
1	0	500	1.50	0.23	1.72	0.12
2	2		1.46	0.38	1.86	0.01
3	4		1.55	0.15	1.99	0.09
4	6		1.53	0.32	1.91	0.11
5	8		1.52	0.17	2.00	0.06
6	10		1.44	0.11	2.03	0.08
7	0	500	2.57	0.03	2.47	0.27
8	2		3.00	0.23	2.13	0.30
9	4		4.11	0.13	2.19	0.03
10	6		5.27	0.05	1.72	0.41
11	8		5.80	1.06	1.96	0.68
12	10		3.39	1.90	2.12	0.84
13	0	1000	3.64	0.46	3.54	0.00
14	2		3.70	0.26	3.06	0.10
15	4		3.87	0.29	2.55	0.15
16	6		4.37	0.47	2.64	0.22
17	8		4.20	0.72	2.39	0.21
18	10		4.33	0.27	2.66	0.06
19	0	1000	5.50	0.35	4.87	0.00
20	2		7.08	1.44	3.85	0.00
21	4		4.77	1.04	3.20	0.47
22	6		4.07	0.36	3.08	0.28
23	8		4.04	0.55	3.21	0.16
24	10		4.00	0.04	3.40	0.21

ก. ตารางข้อมูลรูปที่ 4.38

NO.	Composite content (%)	P (psi)	permeability coefficient (m <sup>2</sup> )	SD
1	0	500	3.58	0.39
2	2		3.16	0.35
3	4		2.61	0.34
4	6		2.29	0.09
5	8		2.05	0.05
6	10		2.00	0.27
7	0	500	4.77	0.22
8	2		2.86	0.44
9	4		2.43	0.07
10	6		2.56	0.53
11	8		2.96	0.68
12	10		1.95	0.01
13	0	1000	1.47	0.08
14	2		1.13	0.12
15	4		1.43	0.14
16	6		0.83	0.05
17	8		0.81	0.05
18	10		0.78	0.02
19	0	1000	1.45	0.12
20	2		1.22	0.07
21	4		1.97	0.21
22	6		1.45	0.04
23	8		1.56	0.10
24	10		1.48	0.06

## ม. ตารางข้อมูลรูปที่ 4.39

NO.	Composite content (%)	P (psi)	Biggest pore size diameter ( $\mu m$ )	SD
1	0	500	72.02	0.41
2	2		74.81	3.53
3	4		67.61	5.03
4	6		53.71	4.31
5	8		48.49	1.48
6	10		42.81	0.72
7	0	500	57.23	3.61
8	2		49.85	4.10
9	4		55.75	2.13
10	6		56.50	2.10
11	8		46.20	1.61
12	10		44.77	2.32
13	0	1000	31.69	5.31
14	2		26.56	2.44
15	4		32.85	0.34
16	6		27.23	2.27
17	8		32.44	2.15
18	10		21.56	1.21
19	0	1000	30.22	3.72
20	2		27.50	1.84
21	4		30.61	0.59
22	6		27.44	2.78
23	8		29.92	0.19
24	10		29.64	0.35

ข. ตารางข้อมูลรูปที่ 4.40

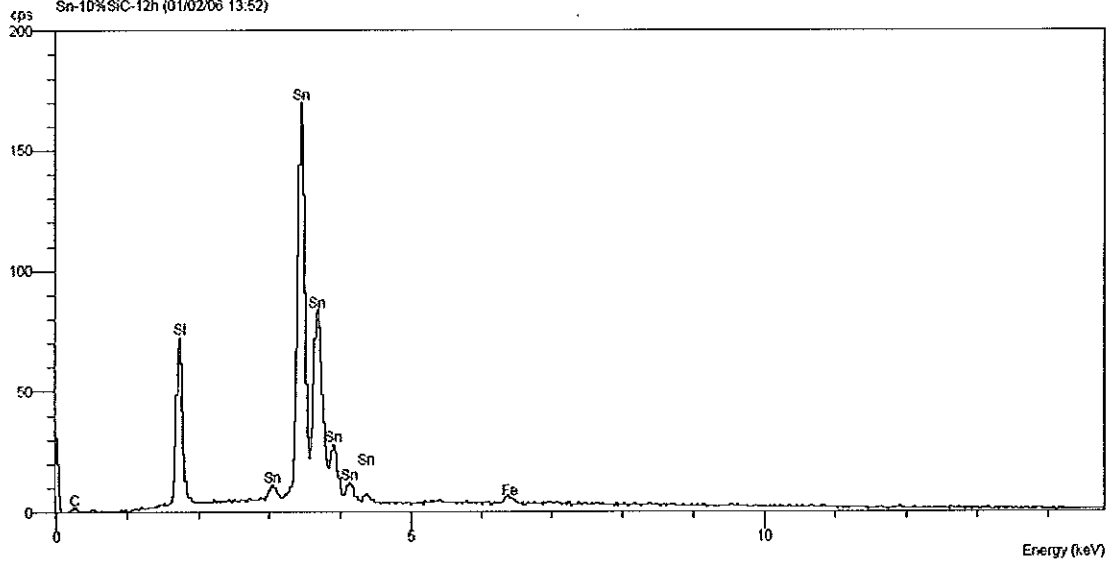
NO.	Composite content (%)	P (psi)	Average pore size diameter ( $\mu m$ )	SD
1	0	500	2.11	0.12
2	2		2.09	0.12
3	4		2.04	0.13
4	6		2.12	0.03
5	8		2.27	0.03
6	10		2.69	0.18
7	0	500	2.45	0.07
8	2		1.98	0.15
9	4		1.96	0.02
10	6		2.14	0.26
11	8		2.60	0.43
12	10		2.30	0.00
13	0	1000	1.35	0.04
14	2		1.26	0.07
15	4		1.52	0.08
16	6		1.27	0.04
17	8		1.43	0.04
18	10		1.69	0.02
19	0	1000	1.33	0.05
20	2		1.29	0.04
21	4		1.77	0.12
22	6		1.66	0.07
23	8		1.89	0.08
24	10		2.25	0.19

ร. ตารางข้อมูลรูปที่ 4.41

NO.	Composite content (%)	P (psi)	Shear strength (MPa)	SD
1	0	500	1.50	0.23
2	2		1.46	0.38
3	4		1.55	0.15
4	6		1.53	0.32
5	8		1.52	0.17
6	10		1.44	0.11
7	0	500	2.57	0.03
8	2		3.00	0.23
9	4		4.11	0.13
10	6		5.27	0.05
11	8		5.80	1.06
12	10		3.39	1.90
13	0	1000	3.64	0.46
14	2		3.70	0.26
15	4		3.87	0.29
16	6		4.37	0.47
17	8		4.20	0.72
18	10		4.33	0.27
19	0	1000	5.50	0.35
20	2		7.08	1.44
21	4		4.77	1.04
22	6		4.07	0.36
23	8		4.04	0.55
24	10		4.00	0.04

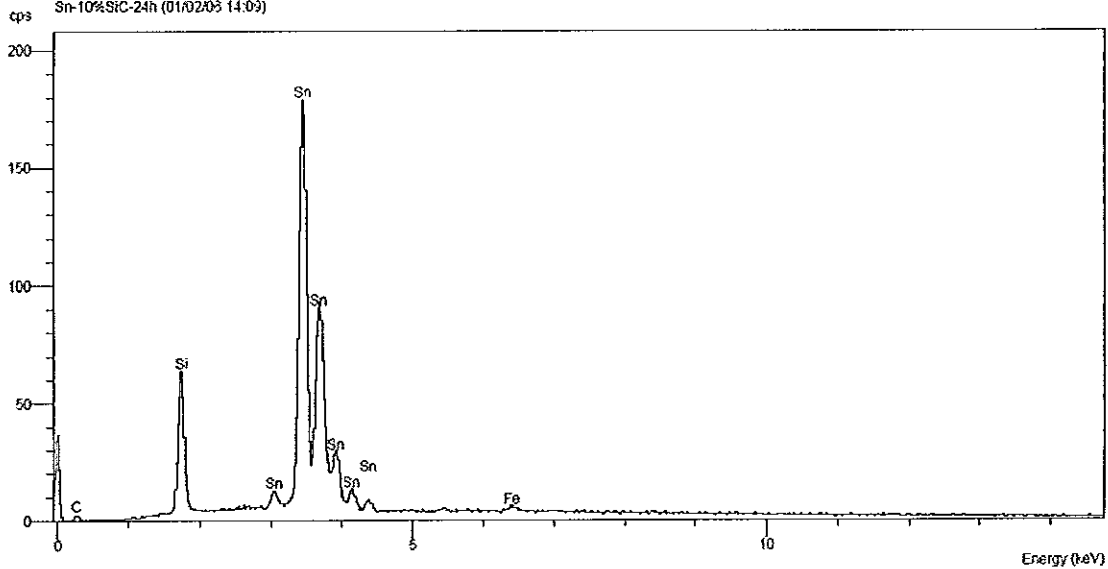
ภาคผนวกที่ 7 ผลการวิเคราะห์ธาตุของผงวัสดุผสม Sn-10%SiC ด้วยเครื่องบดแพลนาเทรี  
ความเร็วรอบ 300 rpm ที่ระยะเวลาบด 12, 24, 36 และ 48 ชั่วโมง

Operator : N Pompot  
Client : Department of Mining & Materials Engineering, Faculty of Engineering, PSU  
Job : 7829 Kata  
Sn-10%SiC-12h (01/02/06 13:52)



ก) ผงวัสดุผสม Sn-10SiC ที่เวลาบด 12 ชั่วโมง

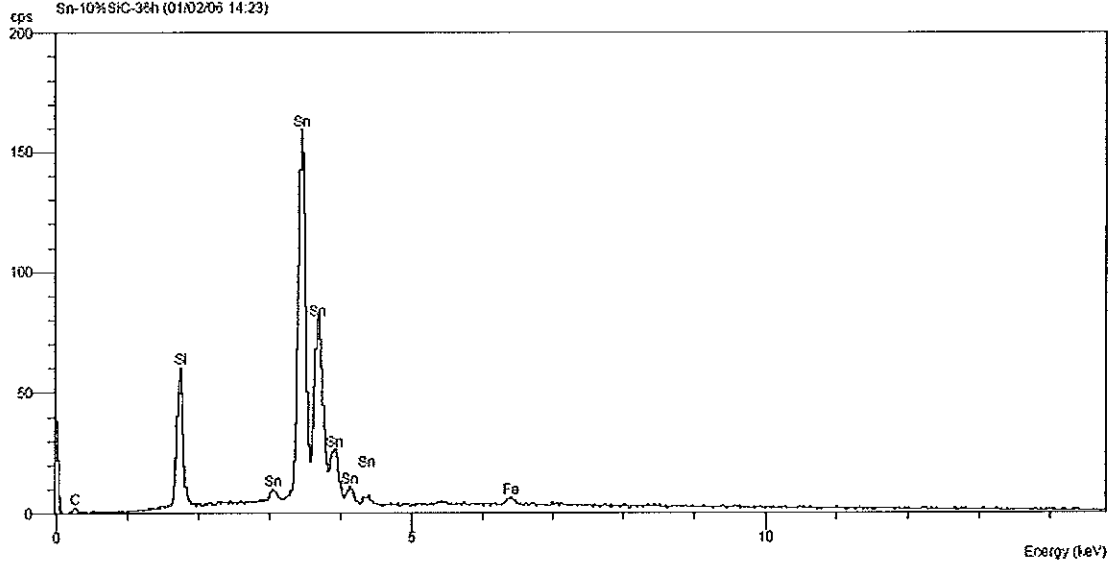
Operator : N Pompot  
Client : Department of Mining & Materials Engineering, Faculty of Engineering, PSU  
Job : 7829 Kata  
Sn-10%SiC-24h (01/02/06 14:03)



ข) ผงวัสดุผสม Sn-10SiC ที่เวลาบด 24 ชั่วโมง

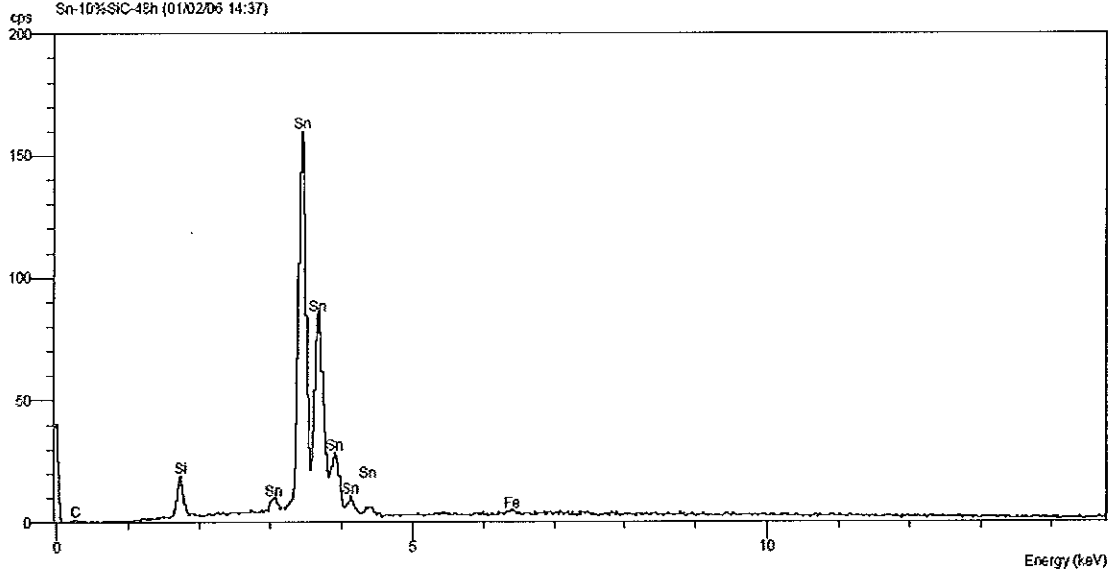


Operator : N Pompot  
 Client : Department of Mining & Materials Engineering, Faculty of Engineering, PSU  
 Job : 7829 Kata  
 Sn-10%SiC-36h (01/02/05 14:23)



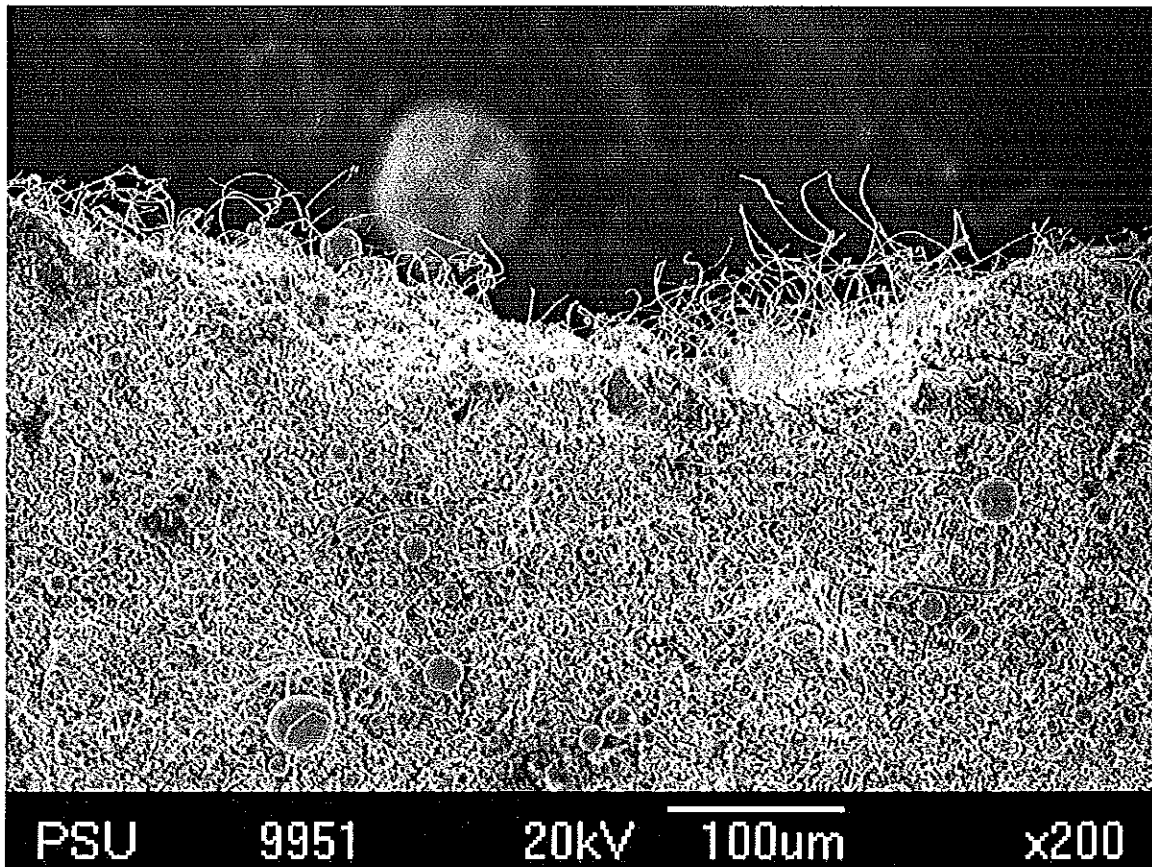
ค) ผงวัสดุผสม Sn-10SiC ที่เวลาบด 36 ชั่วโมง

Operator : N Pompot  
 Client : Department of Mining & Materials Engineering, Faculty of Engineering, PSU  
 Job : 7829 Kata  
 Sn-10%SiC-48h (01/02/05 14:37)

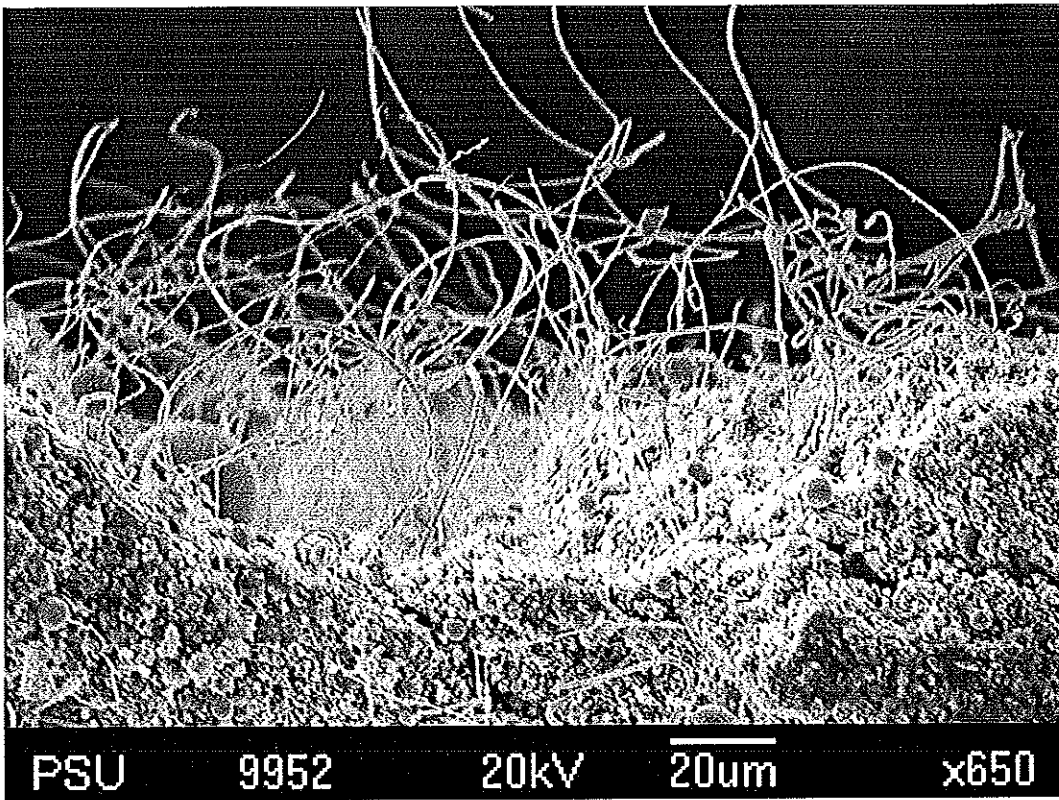


ง) ผงวัสดุผสม Sn-10SiC ที่เวลาบด 48 ชั่วโมง

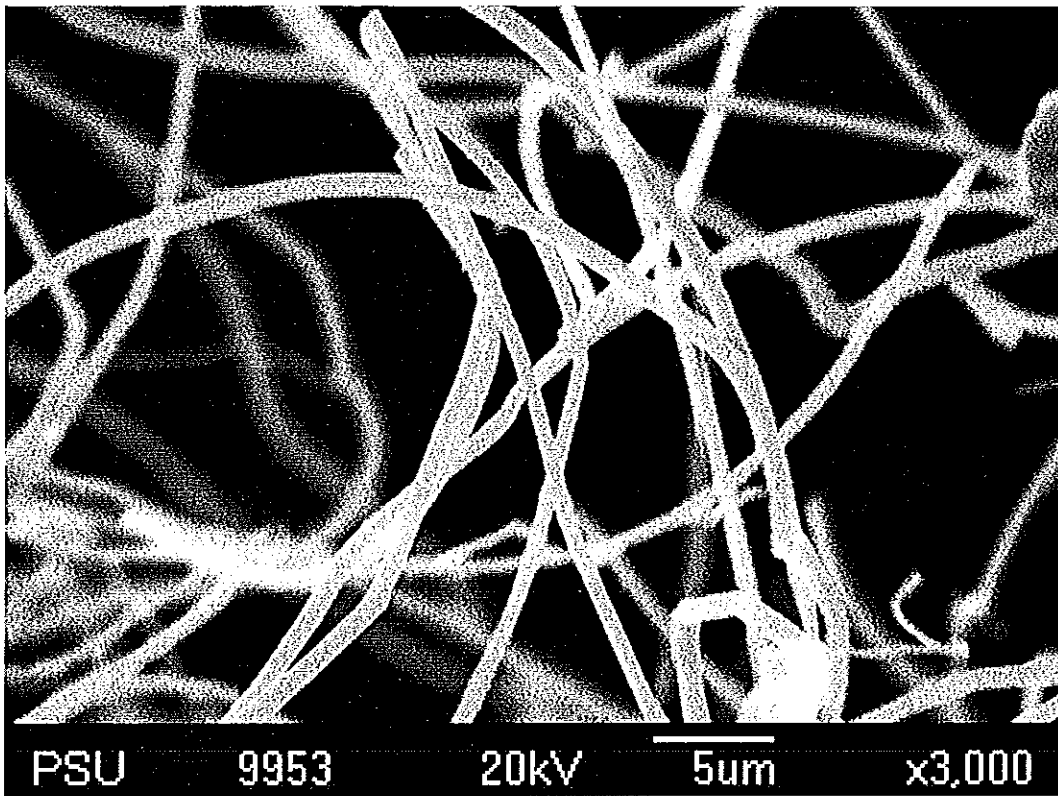
ภาคผนวกที่ 8 ภาพวิสเคอร์ตีบुकที่เกิดจากวัสดุผสม Sn-10%SiC ถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์  
แบบส่องกราด



ก) วิสเคอร์ตีบुकบนฐาน Sn-10%SiC อุณหภูมิช่วง 200-230 องศาเซลเซียสที่กำลังขยาย 200 เท่า



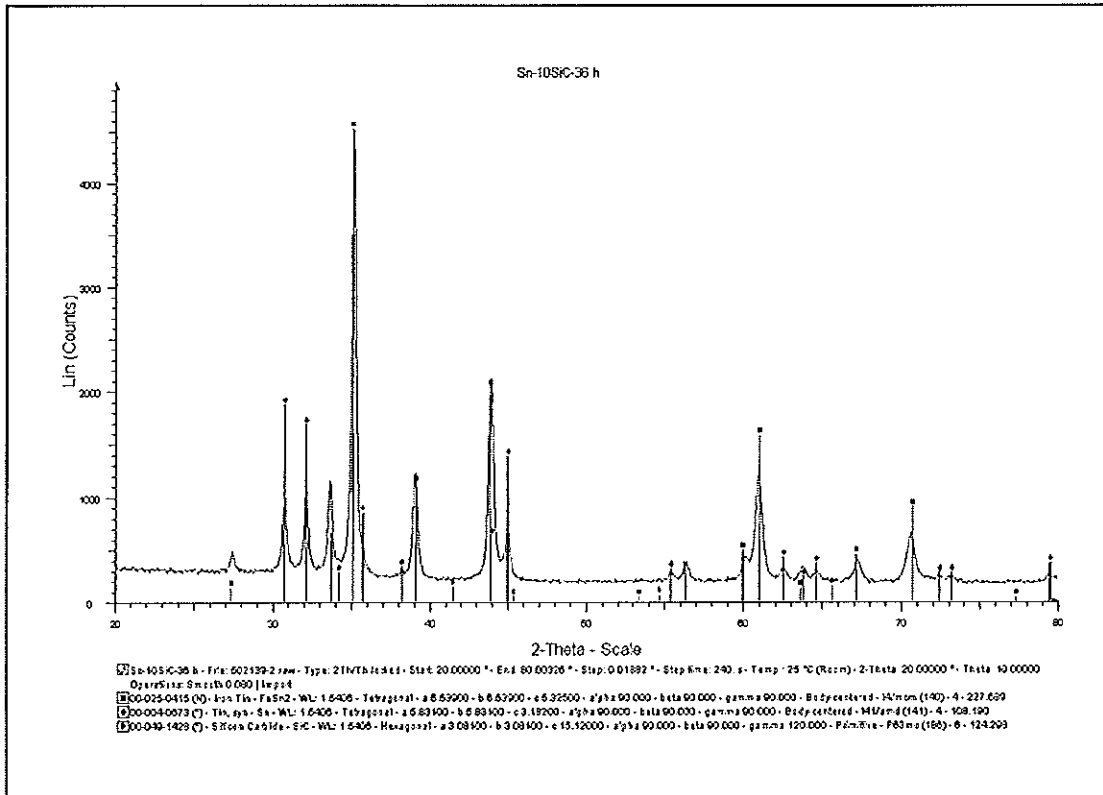
ข) วิสเคอร์ดีบุกบนฐาน Sn-10%SiC อุณหภูมิช่วง 200-230 องศาเซลเซียส ที่กำลังขยาย 650 เท่า



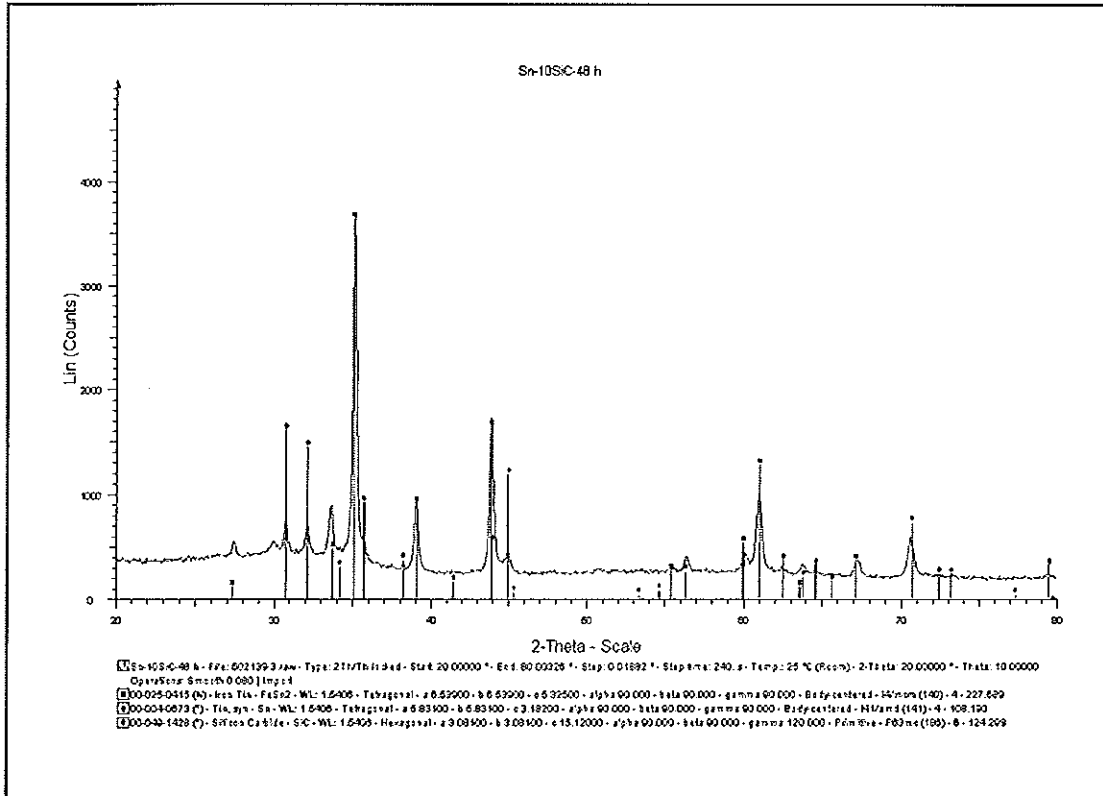
ค) วิสเคอร์ดีบุกบนฐาน Sn-10%SiC อุณหภูมิช่วง 200-230 องศาเซลเซียส ที่กำลังขยาย 3000 เท่า

ภาคผนวกที่ 9 ผลการวิเคราะห์สารประกอบของผงวัสดุผสม Sn-10%SiC ด้วยเครื่องบด  
แพลนารี ความเร็วรอบ 300 rpm ที่ระยะเวลาบดต่างๆ

ก) 36 ชั่วโมง



๗) 48 ชั่วโมง



### ภาคผนวกที่ 10 ผลงานที่เผยแพร่

กานดา แก้วสมบูรณ์ , เล็ก สีคง , นกิสพร มีมงคล , ธวัชชัย ปทุกผล “ การศึกษาภาวะการันต์  
เกิดเส้นใยดีบุกของวัสดุผสม Sn-10SiC” รายงานการประชุมวิชาการด้านเหมืองแร่โลหะวิทยาและ  
ปิโตรเลียม รอบครั้งที่ทาง ณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 20 ตุลาคม พ.ศ. 2549

## การศึกษาภาวะการเกิดเส้นใยสังกะสีของวัสดุผสม Sn-SiC

### The Study of Tin Whisker Formation Conditions of Sn-SiC Composite.

ศุภาภา สมบูรณ์ เด็ก สีสง นิสิตพร นิมงคล วัชรชัย ปัฐกุล

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องแม่เหล็ก

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

หาดใหญ่ สงขลา 90110

Email: k\_kaewsonboon@hotmail.com

#### บทคัดย่อ

วัสดุผสมระหว่างสังกะสีกับซิลิกอนคาร์ไบด์ส่วนผสม 9:1 ถูกเตรียมโดยวิธีผสมผสมเชิงกลด้วยเครื่องบดแบบทวาริตี ความเร็วรอบ 450 รอบ/นาที เป็นระยะเวลาบดต่าง ๆ แล้ว นำมาขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปแรงดันสูงที่  $150^{\circ}\text{C}$  ด้วย ความดันต่าง ๆ กัน ภายใต้บรรยากาศที่ป้องกันการเกิดออกซิเดชันของสารผสมที่ผลิตขึ้นในสุญญากาศ ภายใต้ความดันต่าง ๆ ด้วยการใช้เครื่องอัดขึ้นรูปแบบร้อนและ DTA ตรวจสอบธาตุ ที่เป็นองค์ประกอบของเส้นใยสังกะสีด้วย EDX วิเคราะห์การกระจายตัวของอนุภาคด้วยวิธี X-Ray mapping ถึงขนาด รูปร่างและวัดขนาดของเส้นใยด้วย SEM และ Image Tool พบว่าระยะเวลาในการบดและความดันเป็นปัจจัยที่ทำให้เกิด เส้นใยสังกะสีที่เวลาบดต่ำกว่า 12 ชั่วโมงจะไม่เกิด เส้นใยสังกะสีแต่จะเกิดเส้นใยสังกะสีในการอัดขึ้นรูปแรงดันสูงถึง 2000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และอุณหภูมิสูงถึง  $230^{\circ}\text{C}$  แต่เมื่อเพิ่ม ระยะเวลาบดเป็น 24 และ 36 ชั่วโมงจะเริ่มเกิดเส้นใยสังกะสีที่ ประมวลผล  $230^{\circ}\text{C}$  เมื่อความดันที่ใช้อัดขึ้นรูป 2000 ปอนด์ ต่อตารางนิ้วและที่ความดัน 1500 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เส้นใย จะเกิดที่อุณหภูมิสูงถึง  $220^{\circ}\text{C}$  ระยะเวลาบดนานขึ้น ทำให้โครงสร้างของวัสดุเป็นอสัณฐานมากขึ้น และง่ายต่อการกระตุ้มทำให้เกิดเส้นใย แต่เมื่อความดันสูงขึ้นเป็น 2000 ปอนด์ต่อตารางนิ้วจะเกิดเส้นใยที่อุณหภูมิสูงขึ้นไป  $230^{\circ}\text{C}$  ทั้งนี้ที่ระยะเวลาบดถูกบีบอัดให้เร็วแล้วจึงบดกันมากขึ้นจึงต้อง ใช้อุณหภูมิกระตุ้มที่สูงกว่า รูปร่างของเส้นใยจะมีลักษณะ เป็นแท่งยาวมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 5-30  $\mu\text{m}$  และความยาวเฉลี่ยประมาณ 200-500  $\mu\text{m}$

#### Abstract

The composites between Sn - SiC was prepared by a mechanical alloying process at the various milling times by using planetary mill. Sample mixed in the weight ratio of Sn:SiC was 9:1 and formed into coin shape by thermal pressing at the temperature of  $150^{\circ}\text{C}$

under the various pressure to observe the behavior of tin whisker formation. The effect of temperature on the tin whisker formation was investigated with hot stage optical microscope and DTA. Tin whiskers were analyzed by EDX and degree of dispersion of tin whiskers were investigated by using X-ray mapping method. Morphology and Size of tin whisker were observed by SEM and Image tool. The pressure and temperature were significant factors affected on the formation of tin whisker. For compacted specimen at pressure up to 2000 psi. of 12 hours ground sample, whiskers were formed at the temperature  $230^{\circ}\text{C}$ . However, for those of 24 and 36 hours ground samples, tin whiskers started to form at temperature of  $230^{\circ}\text{C}$  but at the lower compaction pressure of 1500 psi., tin whiskers were formed at the lower temperature of  $220^{\circ}\text{C}$  because a longer milling time causes microstructure of composite to be amorphous and becomes weak so that tin whiskers were formed easier however as the higher compaction pressure up to 2000 psi. was applied, the whisker forming temperature was changed to  $230^{\circ}\text{C}$ . It was due to the ground particles were compressed until the specimens had low interstitial porosity therefore activation temperature must be higher than that of lower pressure. The morphology of tin whiskers were long rods which have the average diameter of 5-30  $\mu\text{m}$  and the average length of 200-500  $\mu\text{m}$ .



1. บทนำ

การศึกษาการผลิตวัสดุผสมโพลีเอทิลีนคาร์บอน (MA) ระหว่างลิกนินและจิลีคอนคาร์ไบด์ ของ เล็ก ศิล และคณะ (1) พบว่าที่ขึ้นตอนของการอบแห้งในไดบุก เกิดขึ้น ซึ่งกล่าวถึงในไดบุกที่ ได้จะทำให้ขึ้นงานมีความหนาแน่นมากขึ้น สามารถเป็นแนวทางในการผลิตวัสดุผสมที่ขึ้นตอนจะประยุกต์ไปใช้ในเครื่องใช้คือไป

จากงานการวิจัยต่างๆ พบว่ามีการศึกษาการเกิดชั้นด้วยตัวเองของเส้นใยลิกนินในไดบุก [2-8] พบว่าเส้นใยลิกนินที่ผลิตขึ้นเองมีลักษณะเส้นใยสั้น มีความยาวทางสุคนธ์ถึง 10 ไมครอน (ที่พบโดยมากจะมีความยาวน้อยกว่า 1 ไมครอน) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางอยู่ในช่วง 0.006 ไมครอน ถึง 10 ไมครอน ทดดูการเกิดชั้นโดยเป็นแบบปฏิกิริยาของไดบุกใช้ระยะเวลาอย่างยาวนาน อัตราการเกิดโดยประมาณ 0.1 A<sup>0</sup>sec ยังไม่มีข้อสรุปที่แน่ชัดเกี่ยวกับกลไกการเกิดชั้นของเส้นใยลิกนิน

2. วิธีการศึกษา

เตรียมตัวอย่างระนาบผิวลิกนินกับจิลีคอนคาร์ไบด์ ในอัตราส่วนผสม 9:1 โดยน้ำหนัก ถ้าทราบคุณสมบัติของจิลีคอนคาร์ไบด์ด้วย plasma mill ที่ความเร็วรอบ 12, 24, 36 และ 48 ชั่วโมง จากนั้นนำผงโพลีเอทิลีนไปขึ้นรูปในลักษณะทรงกระบอกด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปอุณหภูมิที่ความดัน 500, 1000, 1500 และ 2000 psi โดยให้อุณหภูมิจะอัดเป็น 150 °C แล้วจึงทดสอบหาค่าขึ้นรูปพร้อมทั้งสังเกตพฤติกรรมที่ผลิตขึ้นแล้วนำตัวอย่างทดสอบที่สถานะร้อนและ DTA ส่วนอัตราการให้ความร้อน 10 และ 2 °C/min ที่อุณหภูมิ 200 °C และ 230 °C ตามลำดับ ตรวจสอบธาตุที่เป็นองค์ประกอบของเส้นใยลิกนินด้วย EDX และวิเคราะห์

การกระจายตัวของอนุภาคด้วยวิธี X-ray mapping ตั้งภาครูปถ่ายและหาค่าขนาดของเส้นใยด้วย SEM และโปรแกรม Image tool

3. ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ผล

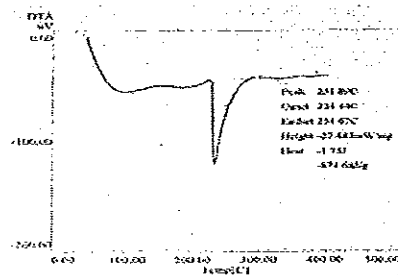
ผลการอบแห้งขึ้นด้วย Sa-10%SiC แล้วตัดจูลทรทัศน์สถานะร้อนดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลการอบแห้งขึ้นด้วย Sa-10%SiC แล้วตัดจูลทรทัศน์สถานะร้อน ทั้งเวลาอบ, ความดันและอุณหภูมิ ดังๆ

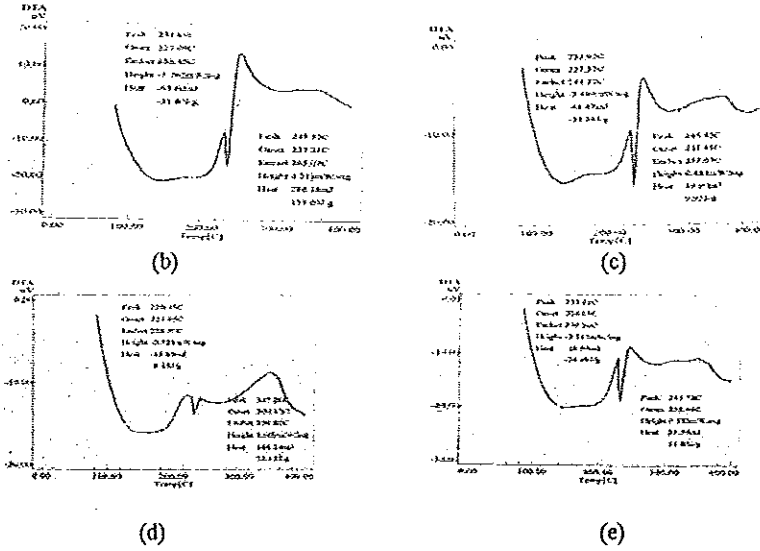
Milling time (hr)	Temp. (°C)	Pressure (psi)			
		500	1000	1500	2000
12	200	N	N	N	N
	220	N	N	N	N
	230	Ex	N	Ex	Ex
24	200	N	N	N	N
	220	N	N	N	N
	230	Ex	N	N	Ex
36	200	N	N	N	N
	220	N	N	Y	Y
	230	Ex	N	Y	Y
48	200	N	N	N	N
	220	N	N	N	N
	230	N	Ex+Y	Ex	Ex+Y

Y = เกิดชั้นใย  
N = ไม่เกิดชั้นใย  
Ex = เกิดปฏิกิริยา Exodation

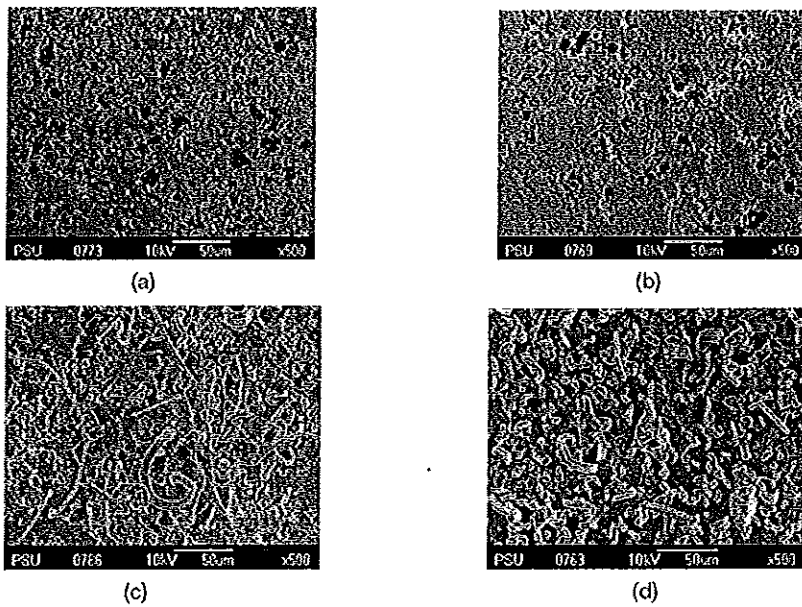
ผลการทดสอบปฏิกิริยาที่ผลิตขึ้นเมื่อ ได้รับความร้อนของหาวัสดุผสม Sa-10%SiC ด้วย DTA



(a)



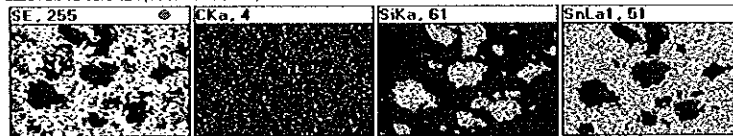
รูปที่ 1 ผลทดสอบปฏิกิริยาความร้อนด้วย DTA ของ (a) สหติบุงนวิฑูริ์ กับ สหวิฑูหสม Si-10%SiC ที่เวลาบค (b) 12 ชั่วโมง (c) 24 ชั่วโมง (d) 36 ชั่วโมง และ (e) 48 ชั่วโมง



รูปที่ 2 ภาพถ่าย SEM ของตัวอย่างที่ความดัน 1500 psi ให้ควาร้อนอุณหภูมิประมาณ 230 °C ที่เวลาบค (a) 12 ชั่วโมง (b) 24 ชั่วโมง (c) 36 ชั่วโมง (d) 48 ชั่วโมง (กำลังขยาย 500 เท่า)

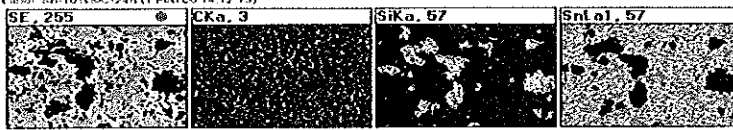
4 คลา แก้วสมบูรณ์, เต็ก คีง, นิสพร นิยมกุล, ธวัชชัย ปุ๊กกุล

Operator: H Pompat  
 Client: Department of Mining & Material's Engineering, Faculty of Engineering, PSU  
 Job: 7829 Kala  
 Label: Sn-10%SiC-12h (1 Feb 03 13:55:53)



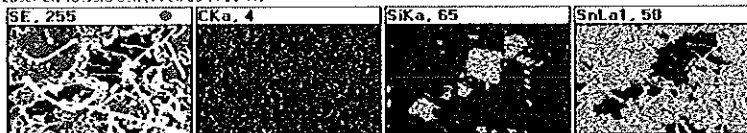
(a)

Operator: H Pompat  
 Client: Department of Mining & Material's Engineering, Faculty of Engineering, PSU  
 Job: 7829 Kala  
 Label: Sn-10%SiC-24h (1 Feb 06 14:12:13)



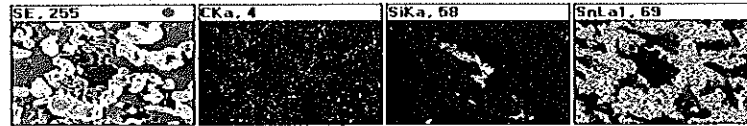
(b)

Operator: H Pompat  
 Client: Department of Mining & Material's Engineering, Faculty of Engineering, PSU  
 Job: 7829 Kala  
 Label: Sn-10%SiC-36h (1 Feb 06 14:25:41)



(c)

Operator: H Pompat  
 Client: Department of Mining & Material's Engineering, Faculty of Engineering, PSU  
 Job: 7829 Kala  
 Label: Sn-10%SiC-48h (1 Feb 06 14:39:55)



(d)

รูปที่ 3 ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของอนุภาคในฟิล์มและชิ้นตัวอย่างวัสดุผสม Sn-10%SiC ที่เวลาบด (a) 12 ชั่วโมง (b) 24 ชั่วโมง (c) 36 ชั่วโมง (d) 48 ชั่วโมง

หลังจากการทดสอบปฏิกิริยาทางความร้อนด้วย DTA (รูปที่ 1) ฟิล์มที่ขึ้นไม่ผสม, ฟิล์มผสมซิลิกอนคาร์ไบด์ที่ เวลาบดผสมนาน 12, 24, 36 และ 48 ชั่วโมง มีจุดหลอมเหลว เป็น 231.89 °C, 231.89 °C, 232.92 °C, 232.01 °C และ 230.45 °C ตามลำดับ ฟิล์มผสมซิลิกอนคาร์ไบด์ที่เวลาบดผสมนาน 12, 24, 36 และ 48 ชั่วโมง มีจุดสิ้นสุดของปฏิกิริยาเผาไหม้เป็น 248.52 °C, 248.52 °C, 248.52 °C, 245.72 °C และ 347.26 °C ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าเส้นใยหรือ whisker เริ่มเกิดที่ อุณหภูมิประมาณ 231 °C และตัดขาดที่อุณหภูมิ 248 °C จากเส้นกราฟที่ 1d จะเห็นว่าลักษณะของเส้นกราฟการวิเคราะห์เป็นกราฟวิเคราะห์ที่ชัดเจนยิ่งขึ้น

หลังจากการบด 1 ทำให้เราทราบว่าเวลาบดมีผลต่อการเกิดเส้นใยฟิล์มเนื่องจาก ผลการวิเคราะห์โดยผสมที่ เวลาบด 12 ชั่วโมง ไม่เกิดเส้นใยขึ้นเลย แต่เมื่อต้มเวลาบด นานขึ้นเป็น 24, 36 และ 48 ชั่วโมง มีเส้นใยเกิดขึ้น นอกจากนี้ เวลาบดยังมีความสัมพันธ์กับความดันและ อุณหภูมิอีกด้วยที่เวลาบด 24 ชั่วโมงมีเส้นใยเกิดขึ้นที่ความดัน 2000 psi, อุณหภูมิ 230 °C เพื่อเพิ่มเวลาบดมาซึ่งจะเป็น 36 และ 48 ชั่วโมง ความดันและอุณหภูมิที่สามารถเกิดเส้นใยได้ลดลงมาอยู่ที่ 1500 psi และ 220 °C ตามลำดับ เป็นผลมาจากเวลาที่นานขึ้นทำให้อนุภาคของซิลิกอนคาร์ไบด์ แยกตัวและกระจายตัวได้มากขึ้น ดังที่เห็นในภาพถ่าย SEM รูปที่ 2a และ 2b ที่เวลาบด 24 ชั่วโมง อนุภาคของซิลิกอนคาร์

โบลต์กระจ่ายตัวได้ลึกกว่าที่ 12 ชั่วโมง และจากรูปที่ 2c และ 2d คือภาพถ่าย SEM ที่เวลา 36 และ 48 ชั่วโมง ความดัน 1500 psi อุณหภูมิ 230 °C เมื่อเปรียบเทียบกับแล้ว เห็นใยติ่งที่เวลา 48 ชั่วโมงมีความสัมพันธ์มากกว่าที่ 36 ชั่วโมง เป็นผลมาจากภาระจ่ายตัวที่ลึกกว่าของขนาดซิลิกอนคาร์ไบด์

2. จากรูปที่ 3 แสดงผลการวัดระยะห่างระหว่างใยตัวของขนาดเส้นใยและชิ้นด้วยวัสดุผสม Sn-10%SiC ที่เวลาทดสอบต่างๆ พบว่ารูปที่ 3a และ 3b จะเห็นเส้นใยไม่ชัด ส่วนรูปที่ 2c และ 2d จะเห็นเส้นใยชัดและเห็นใยเป็นโลหะติ่งซึ่งมีซิลิกอนคาร์ไบด์ปนอยู่บ้างเพื่อวัดขนาดของเส้นใยปรากฏว่ามีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 5-30  $\mu m$  และความยาวเฉลี่ย 200-500  $\mu m$  (ตารางที่ 2)

ตารางที่ 2 ขนาดและความยาวของเส้นใยที่เวลาทดสอบและความดันต่างๆ ที่อุณหภูมิอบแห้ง 230 °C

Time (hr)	Pressure (psi)			
	1500		2000	
	Mean Length ( $\mu m$ )	Mean Diameter ( $\mu m$ )	Mean Length ( $\mu m$ )	Mean Diameter ( $\mu m$ )
12	-	-	-	-
24	-	-	429.94	24.19
36	256.13	14.42	-	-
48	248.58	6.17	381.40	15.68

4. สรุป

1. ผลของ DTA บ่งบอกได้ว่า ผลของการผสมระหว่างซิลิกอนและซิลิกอนคาร์ไบด์ ทำให้วัสดุผสมอยู่ในสภาวะที่พร้อมจะเกิดเส้นใยได้ เพื่อมีแรงจันดันที่เหมาะสมมากขึ้น
3. แรงจันดันที่ทำให้เกิดเส้นใยคือความดันสกดซึ่งได้จากการให้ความดันเพิ่มขึ้นรูปกับชิ้นงานซึ่งสกดมากกว่า 1500 psi และความร้อนเป็นปัจจัยกระตุ้น
4. เมื่อความดันสูงขึ้นเป็น 2000 ปอนด์ต่อตารางนิ้วจะเกิดเส้นใยที่อุณหภูมิสูงขึ้นเป็น 230°C ทั้งนี้เพราะอนุภาคถูกบีบอัดให้เรียงตัวกันมากขึ้นจึงต้องใช้อุณหภูมิกระตุ้นที่สูงกว่า
5. เนื่องจากการเกิดเส้นใยจะเกิดขึ้นโดยอัตโนมัติ ทำให้ที่ระยะเวลา 48 ชั่วโมง การเกิดเส้นใยของเส้นใยมีความสัมพันธ์มากกว่าที่เวลา 36 ชั่วโมง เพราะเมื่อเห็นระยะเวลาครบทำให้ขนาดของซิลิกอนคาร์ไบด์แตกตัวและกระจายตัวได้ลึกกว่า

6. รูปถ่ายของเส้นใยจะมีลักษณะเป็นแท่งยาวมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 5-30  $\mu m$  และความยาวเฉลี่ยประมาณ 200-500  $\mu m$

6. ศึกษิตกรประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ที่ให้อุปกรณ์และขอขอบคุณบริษัทไทยเซรามิก จำกัด ที่ให้อุปกรณ์หัวข้อห โดนาติอุส

7. เอกสารอ้างอิง

- [1]เล็ก สักง, สิริกุล วิฑูรย์เชษฐกุล, ฉันทนทร์ คำร์ตการ, ศิริพงษ์ ทรนงค์ "สมบัติทางประสาทของวัสดุผสมระหว่างโลหะ สังกกับซิลิกอนคาร์ไบด์ที่เตรียมด้วยวิธี Mechanical Alloying" รายงานการประชุมวิชาการด้านเหมือนแร่โลหะวิทยาและปิโตรเลียม ธรณีวิทยา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ พ.ศ.2546 หน้า 75-80.
- [2]B.-Z. Lee and D.N. Lee, "Spontaneous growth mechanism of tin whiskers", Acta Metallurgical Inc, Vol. 46, No.10, 1998 pp. 3701 - 3714.
- [3]Jay A. Brusse, Gary J. Ewell and Jocelyn P. Siplon, "Tin Whiskers: Attributes and Mitigation", Capacitor and Resistor Technology Symposium (CARTS), 2002 pp. 68-80.
- [4]Tong Fang, Michael Osterman and Michael Peeth, "Statistical analysis of tin whisker growth", Microelectronics and Reliability, Vol. 46, Issues 5-6, May-June 2006 pp. 846-849
- [5]Kyung-Seob Kim, Chung-Hee Yu and Jun-Mo Yang, "Behavior of tin whisker formation and growth on lead-free solder finish", Thin Solid Films, Vol. 504, Issues 1-2, 10 May 2006 pp. 350-354
- [6]K.S. Kim, C.H. Yu and J.M. Yang, "Tin whisker formation of lead-free plated leadframes", Microelectronics and Reliability, Vol. 46, Issue 7, July 2006 pp. 1080-1086
- [7][http://www.inemi.org/cms/projects/ese/tin\\_whisker.html](http://www.inemi.org/cms/projects/ese/tin_whisker.html)
- [8][http://nepp.nasa.gov/whisker/reference/tech\\_papers/2006-Leidecker-Tin-Whisker-Failures.pdf](http://nepp.nasa.gov/whisker/reference/tech_papers/2006-Leidecker-Tin-Whisker-Failures.pdf)

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล	นายคาตา แก้วสมบูรณ์	
รหัสประจำตัวนักศึกษา	4712061	
วุฒิการศึกษา		
วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2545

## ทุนการศึกษา (ที่ได้รับในระหว่างการศึกษา)

ทุนค่าเล่าเรียน ของนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์

## การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

คาตา แก้วสมบูรณ์ เล็ก สีง นภิสพร มีมงคล และชัชชัย ปลุกผล “การศึกษาภาวะการเกิดเส้นใยดีบุกของวัสดุผสม Sn-10SiC (Production of Porous Tin Composite)” การประชุมวิชาการด้านเหมืองแร่ โลหะวิทยาและปิโตรเลียม รอบเครื่องทาง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย วันที่ 20 ตุลาคม พ.ศ. 2549