บทที่ 4

ผลและวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 อิทธิพลของความดันการอัดขึ้นรูป อุณหภูมิและระยะเวลาบด ที่มีผลต่อการเกิดวิสเคอร์ในวัสดุผสม Sn-10%SiC

4.1.1 ผลของความดันการอัดขึ้นรูป อุณหภูมิและระยะเวลาบด ผลจากตาราง 4.1 ทำให้เราทราบว่าเวลาบดมีผลต่อการเกิดวิสเคอร์ดีบุกเนื่องจาก ผลการการบดโลหะผสมที่เวลาบด 12 ชั่วโมง ไม่เกิดวิสเคอร์ขึ้นเลย แต่เมื่อเพิ่มเวลาบดนานขึ้นเป็น 24, 36 และ 48 ชั่วโมง มีวิสเคอร์เกิดขึ้น นอกจากนี้ เวลาบดยังมีความสัมพันธ์กับความดันอัดขึ้นรูปและอุณหภูมิอีกด้วยที่เวลาบด 24 ชั่วโมง มีเส้นใยเกิดขึ้นที่ความดันอัดขึ้นรูป 2000 psi , อุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียส เมื่อเพิ่มเวลาบดนานขึ้นเป็น36 และ 48 ชั่วโมง ความดันอัดขึ้นรูปและอุณหภูมิที่สามารถเกิดวิสเคอร์ได้ลดลงมาอยู่ที่ 1500 psi และ 220 องศาเซลเซียสตามลำดับ เป็นผลมาจากเวลาบดที่นานขึ้นทำให้อนุภาคของซิลิกอนคาร์ไบด์แตกตัวและกระจายตัวได้ดีขึ้นซึ่งเป็นไป ตามสมมุติฐานในบทที่ 3

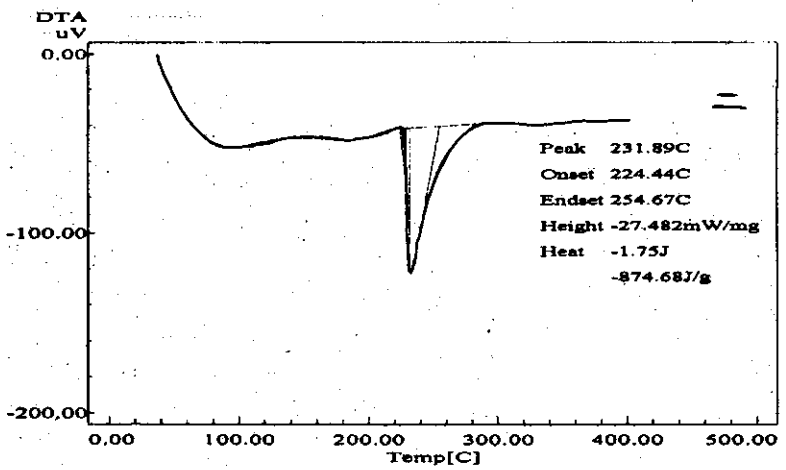
ตารางที่ 4.1 ผลการอบผนึกชิ้นตัวอย่าง Sn-10%SiC ด้วยกล้องจุลทรรศน์สถานะร้อนที่เวลาบด ความดันและอุณหภูมิ ต่างๆ

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

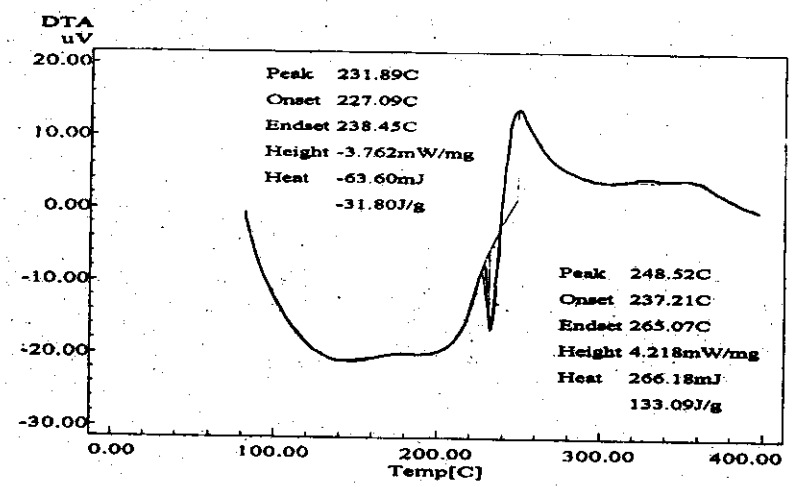
**หมายเหตุ : y = เกิดวิสเคอร์ n = ไม่เกิดวิสเคอร์ ex = เกิดปฏิกิริยา Exudation

4.1.2 ผลการทดสอบด้วย DTA (Differential Thermal analysis) ผลจากการทดสอบปฏิกิริยาทางความร้อนด้วย DTA (รูปที่ 4.1) ดีบุกที่ยังไม่ผสม, ดีบุกผสมซิลิกอนคาร์ไบด์ที่เวลาบดผสมนาน 12, 24, 36 และ 48 ชั่วโมง ที่ผ่านการอัดด้วยความดัน 1500 psi พบว่ามีการหลอมเหลว (สังเกตได้จากเกิดปฏิกิริยาดูดความร้อน) ในอุณหภูมิช่วง 230-233 องศาเซลเซียส วัสดุผสม Sn-10SiC ที่เวลาบดผสมนาน 12, 24, 36 และ 48 ชั่วโมง มีจุดสิ้นสุดของปฏิกิริยาคายความร้อนอยู่ในอุณหภูมิช่วง 245-350 องศาเซลเซียส รูปที่ 4.1 เป็นผลการทดสอบปฏิกิริยาทางความร้อนด้วย DTA

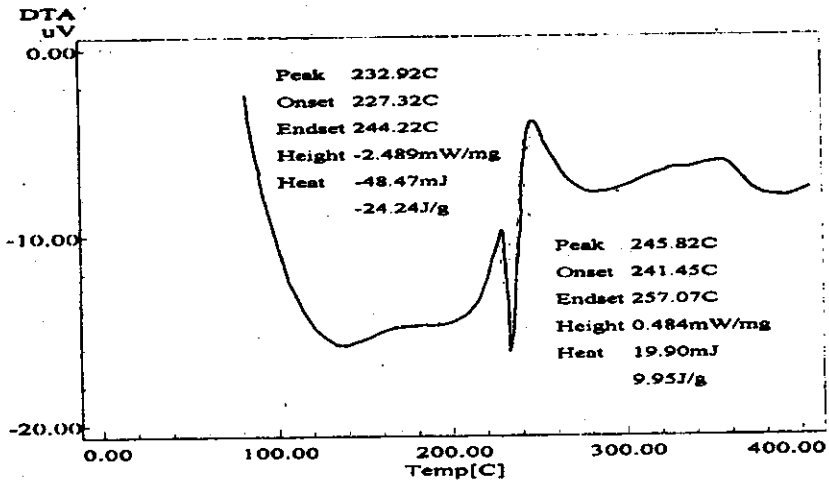
เมื่อสังเกตความเปลี่ยนแปลงที่เกิดขณะให้ความร้อนกับชิ้นงานชุดเดียวกันที่ทำการทดสอบ DTA โดยสังเกตผ่านกล้องจุลทรรศน์ด้วย hot-stage optical microscope ยืนยันได้ว่าปฏิกิริยาคายความร้อนที่เกิดขึ้นนั้นคือ การฟอร์มตัวของวิสเคอร์ดีบุก พลังงานที่คายออกมาคือพลังงานที่ใช้ในการตกผลึกใหม่ กล่าวคือ เมื่อชิ้นตัวอย่างได้รับความร้อนถึงอุณหภูมิประมาณ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



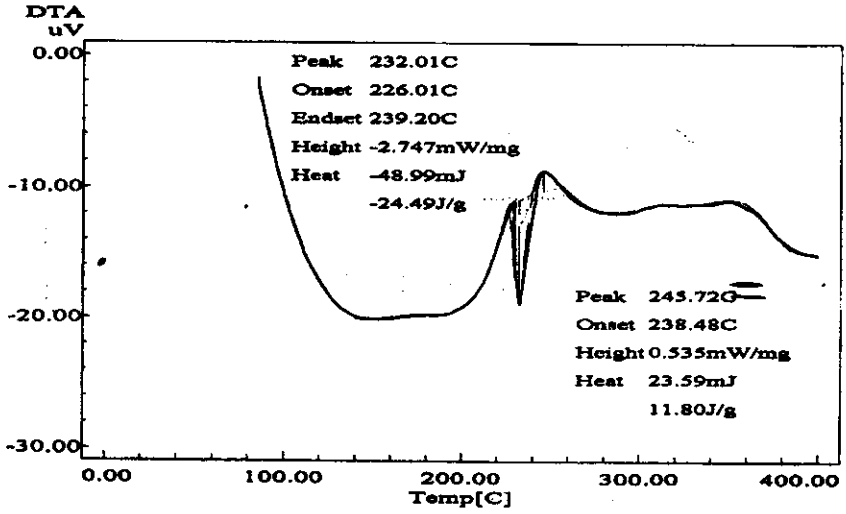
a)



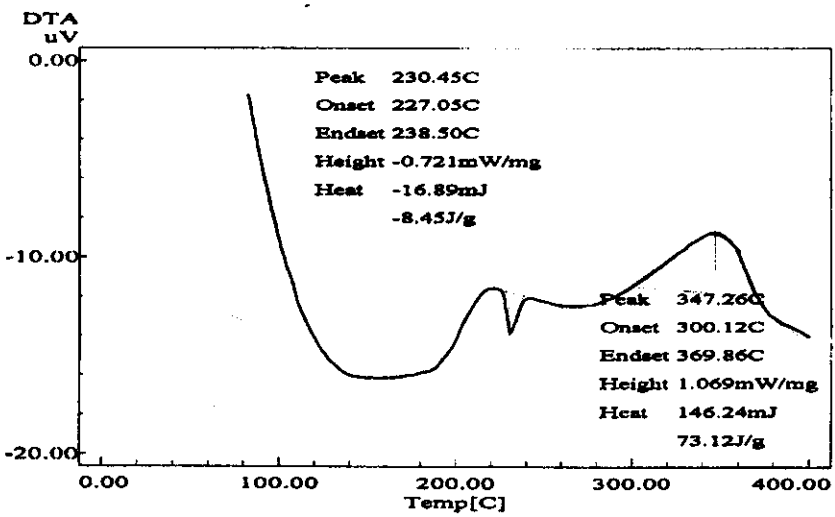
b)



c)



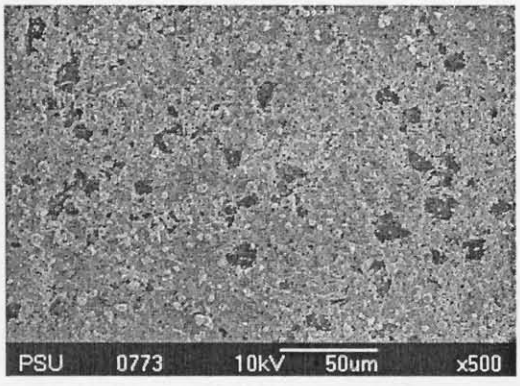
e)



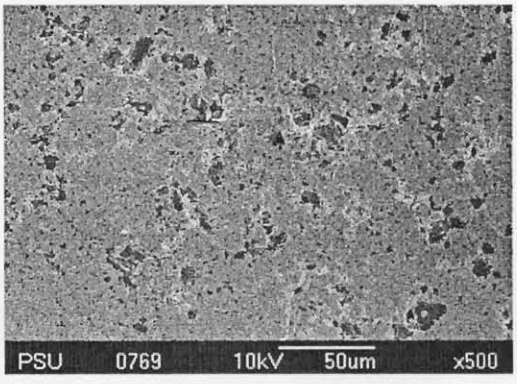
d)

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

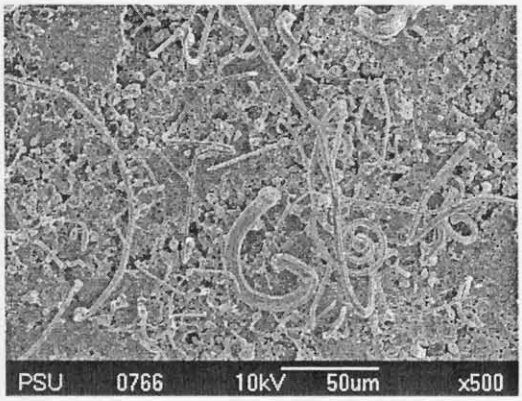
4.1.3 ภาพถ่าย SEM รูปที่ 4.2 แสดงให้เห็นการฟอร์มตัวของวิสเคอร์บนชิ้นตัวอย่างที่บดผสมที่ระยะเวลาบด 12, 24, 36และ 48 ชั่วโมง ใช้ความดันอัดขึ้นรูป 1500 psi ที่ระยะเวลาบด 12 และ24 ชั่วโมง ไม่มีวิสเคอร์เกิดขึ้นดังจะเห็นได้จากรูปที่ 4.2a และ 4.2b และจากรูปที่ 4.2c และ 4.2d คือภาพถ่าย SEM ที่เวลาบด 36 และ 48 ชั่วโมง เปรียบเทียบกันแล้วพบว่า ลักษณะทางกายภาพของวิสเคอร์ที่เกิดขึ้นมีความแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด ดังตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบลักษณะทางกายภาพของวิสเคอร์ที่เกิดจากชิ้นตัวอย่างที่ระยะเวลาบดผสม 36 และ 48 ชั่วโมง เนื่องจากเมื่อเพิ่มระยะเวลาบดนานขึ้น อนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ถูกลดขนาดลงและกระจายตัวได้ดีขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับแบบจำลองกลไกการเกิดขึ้นของวิสเคอร์ (รูปที่3.2) คือเมื่อ SiC กระจายตัวดีขึ้นมีโอกาสที่จะทำให้ปริมาณของวิสเคอร์จะเพิ่มขึ้น แต่ทั้งนี้เมื่อขนาดซิลิกอนคาร์ไบด์ลดลง ย่อมทำให้ความเค้นตกค้างลดลงไปด้วย ดังนั้นด้วยเหตุนี้ วิสเคอร์ที่เกิดขึ้นบนชิ้นตัวอย่างที่ระยะเวลาบดนาน 48 ชั่วโมง จะมีปริมาณวิสเคอร์ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่มากกว่า แต่มีความยาวของเส้นใยน้อยกว่าที่ 36 ชั่วโมง



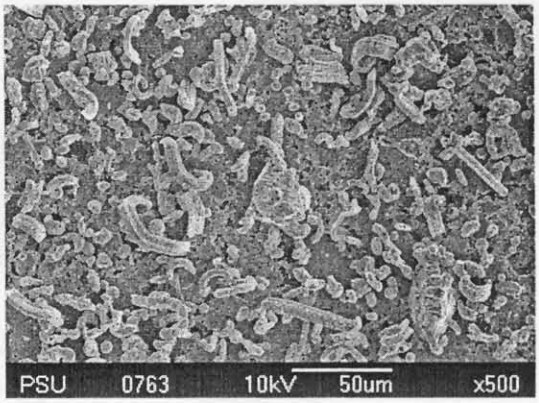
(a)



(b)



(c)



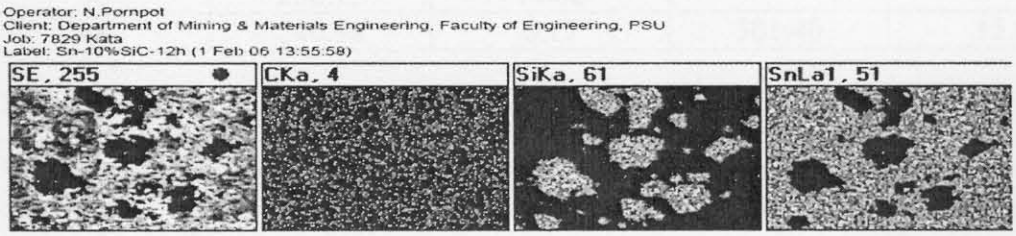
(d)

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)

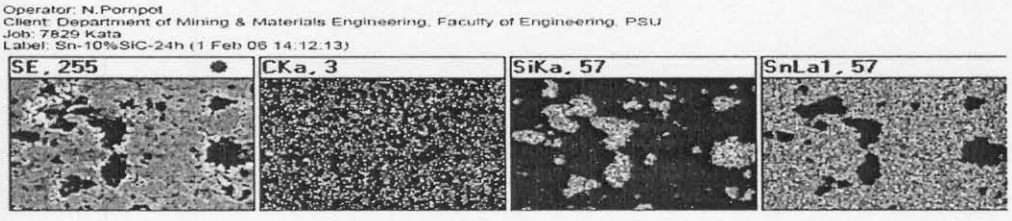
ตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบลักษณะทางกายภาพของเส้นใยที่เกิดจากชิ้นตัวอย่างที่ระยะเวลาบดผสม 36 และ 48 ชั่วโมง

ลักษณะทางกายภาพของวิสเคอร์	ระยะเวลาบด(ชั่วโมง)	
	36	48
ความยาว (μm)	> 50 (μm)	< 50 (μm)
ปริมาณวิสเคอร์ที่เกิดขึ้นต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่	น้อยกว่า	มากกว่า
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (μm)	1-10 (μm)	1-20 (μm)

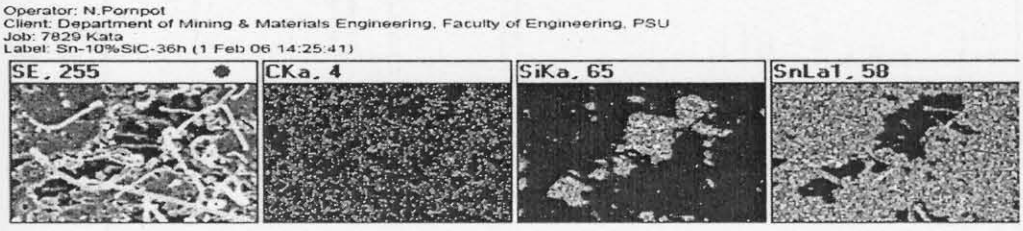
4.1.4 ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของอนุภาค โดยวิธี x-ray mapping และวิเคราะห์ขนาด ของวิสเคอร์โดยโปรแกรม image tool จากรูปที่ 4.3 แสดงผลการการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุบนวิสเคอร์ดีบุกและชิ้นตัวอย่างวัสดุผสม Sn-10%SiC ที่เวลาบดผสมต่างๆ พบว่ารูปที่ 4.3a และ 4.3b จะเห็นวิสเคอร์ไม่ชัด ส่วนรูปที่ 4.3c และ 4.3d จะเห็นวิสเคอร์ชัดและวิสเคอร์เป็นโลหะดีบุกซึ่งมีซิลิกอนคาร์ไบด์ปนอยู่บ้างเมื่อวัดขนาดของเส้นใยปรากฏว่ามีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 5-30 μm และความยาวเฉลี่ย 200-500 μm (ตารางที่ 4.3)



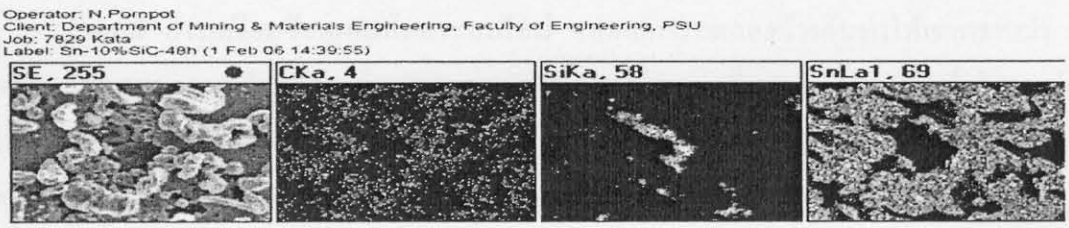
(a)



(b



(c)



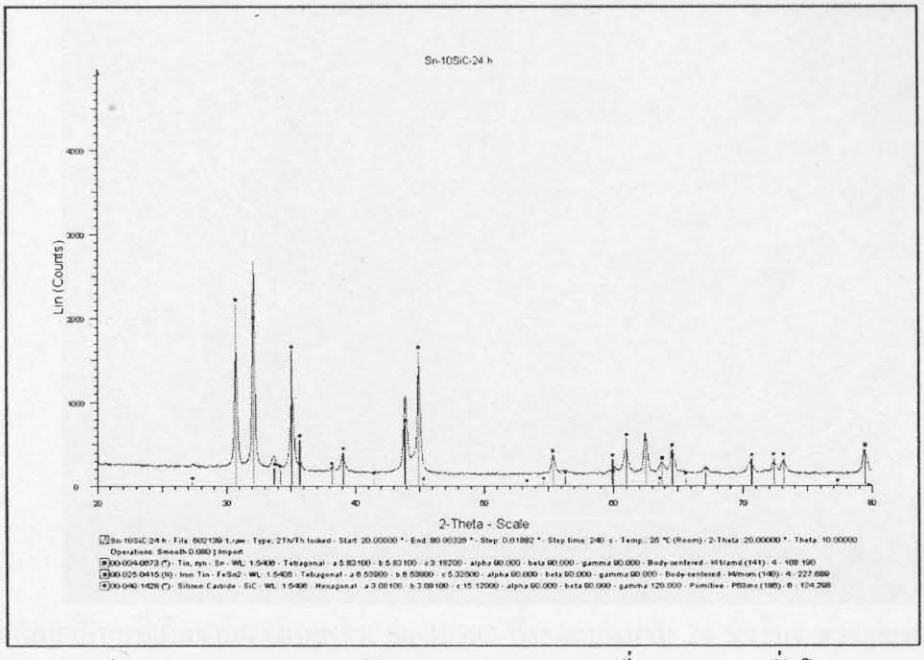
(d)

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

ตารางที่4.3 ขนาดและความยาวของวิสเคอร์ดีบุกที่เวลาบดและความดันต่างๆที่อุณหภูมิอบผนึก 230 องศาเซลเซียส

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

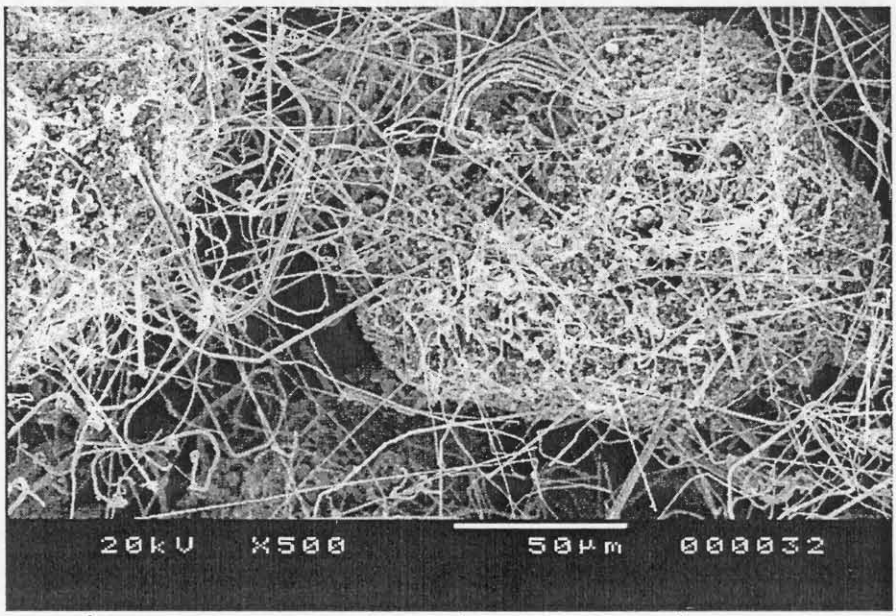
4.1.5 ผลการวิเคราะห์สารประกอบที่เกิดขึ้นจากการบดผสม



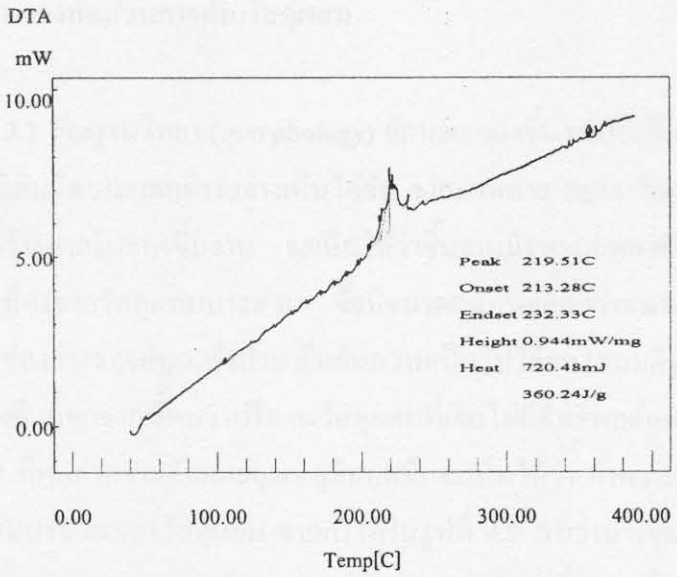
รูป 4.4 ผล XRD ของ ผงวัสดุผสม Sn-10%SiC ที่เวลาบด 24 ชั่วโมง

4.1.6 การเตรียมวัสดุผสมโดยระบบใหม่ จากผลการทดลองข้างต้นทำให้เราทราบว่า การเตรียมวัสดุผสมควรเตรียมที่ระยะเวลาบด 24 ชั่วโมง แต่เนื่องจากที่เวลาบดตั้งแต่ 24 ชั่วโมง แต่ต้องใช้ความดันสูงถึง 2000psi เพื่อให้มีวิสเคอร์ดีบุกเกิดขึ้น จึงได้ปรับปรุงวิธีการสร้างวิสเคอร์ดีบุก โดยการนำผงซิลิกอนคาร์ไบด์มาบดก่อนเพื่อลดขนาดของอนุภาค โดยใช้ความเร็วรอบในการบด 300 รอบต่อนาที นาน 30 นาที แล้วจึงนำมาบดผสมกับดีบุก เป็นเวลา 24 ชั่วโมง พบว่าผงวัสดุผสมสามารถเกิดวิสเคอร์ดีบุกได้เมื่อ ถูกกระตุ้นด้วยความร้อนตั้งแต่ช่วงอุณหภูมิ 200-220 องศาเซลเซียส โดยไม่ต้องอาศัยความดัน ดังรูปที่ 4.4 ซึ่งตามสมมุติฐานการเกิดขึ้นของวิสเคอร์ดีบุกในงาน วิจัยนี้ ปัจจัยหลักที่ทำให้เกิดเส้นใยคือค่าความเค้นตกค้างในอนุภาคของวัสดุผสม ซึ่งเบื้องต้นมีแนวคิดว่า อาศัยความดันที่ใช้อัดขึ้นรูปเพื่อทำให้เกิดความเค้นตกค้างขึ้นแต่จากการทดลองโดยระบบใหม่ กลไกที่ทำให้เกิดวิสเคอร์ นอกเหนือจากอิทธิพลของพรีซิพิเทต (Sn-10SiC) ซึ่งมีผลต่อการเกิดเส้นใยลดน้อยลงเมื่อซิลิกอนคาร์ไบด์ถูกลดขนาดลงแล้ว น่าจะเป็นการการตกผลึกใหม่ (recrystallization) ดังจะเห็นได้จากกราฟ DTA ในรูปที่ 4.6 เมื่อเทียบกับผลการทดสอบ DTA ของระบบแรก (รูปที่ 4.1) พบว่าเกิดพีคของปฏิกิริยาคายความร้อนและพีคของของปฏิกิริยาดูดความร้อนหายไป ซึ่งแสดงให้เห็นว่ากลไกการเกิดขึ้นของวิสเคอร์ดีบุก เกิดจากกระบวนการตกผลึกใหม่

กระบวนการเตรียมผงวัสดุผสมวิธีใหม่นี้ช่วยให้ประหยัดต้นทุนการผลิตและเวลามากขึ้น นอกจากนี้จากรูปที่ 4.5 จะเห็นได้ว่า วิสเคอร์ดีบุกที่ผ่านขั้นตอนนี้ มีความยาวมากกว่าขั้นตอนเดิมอีกด้วย



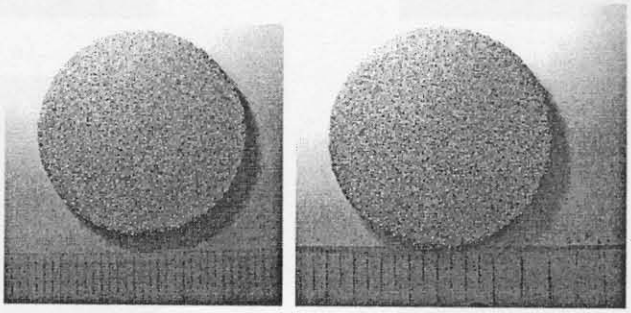
รูป 4.5 วิสเคอร์ดีบุกที่เกิดจากผงวัสดุผสม Sn-10SiC ที่ระยะบดนาน 24 ชั่วโมง ช่วงอุณหภูมิ 200-220 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที ภายใต้บรรยากาศอาร์กอน



รูปที่ 4.6 ผลทดสอบปฏิกิริยาทางความร้อนด้วย DTA ของตัวอย่างผงวัสดุผสม Sn-10%SiC ที่เวลาบด 24 ชั่วโมง (บด SiC ก่อน30นาที)

4.2 ลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานที่ผลิตได้

จากการทดลองขึ้นรูปชิ้นงานวัสดุผสมดีบุกพรุน (Sn-x(Sn-10SiC)) ทำให้ได้ชิ้นงาน เป็นทรง กระบอกมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25.2 มิลลิเมตรและหนาประมาณ 3.1-4.0 มิลลิเมตร ซึ่งมีลักษณะ ดังรูป 4.7 ชิ้นงานที่แสดงอยู่ เป็นชิ้นงานที่ผ่านการอบผนึกที่ 220 องศาเซลเซียสแล้ว

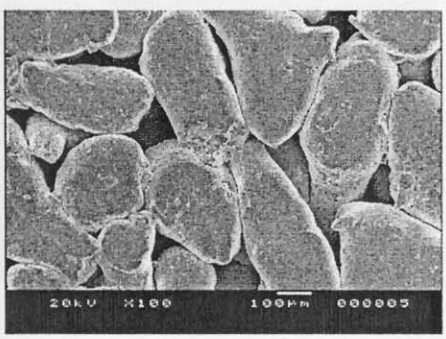


a) b)

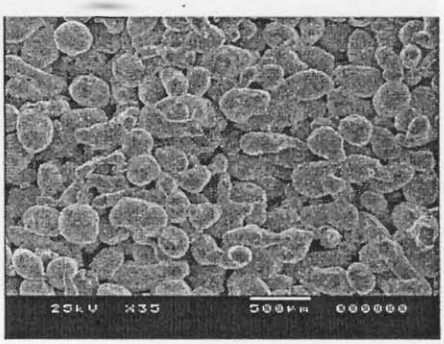
รูปที่ 4.7 ลักษณะชิ้นงานวัสดุผสมดีบุกพรุนSn+4 %(Sn-10SiC) รูป a) ผิวบนของชิ้นงาน b) ผิวล่างของชิ้นงาน ที่สัดส่วนวัสดุผสม 2% ความดัน 1000 psi อบผนึกที่อุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 9 ชั่วโมง

4.3 อิทธิพลของสัดส่วนการเติมวัสดุผสม

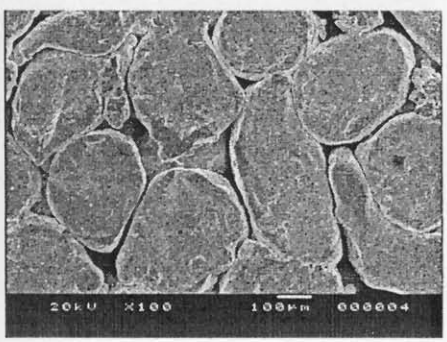
4.3.1 สัณฐานวิทยา (morphology) ลักษณะของชิ้นงานที่เปรียบเทียบกันระหว่างที่เติมวัสดุผสมกับไม่เติมมีความแตกต่างอย่างเห็นได้ชัด จากภาพถ่าย SEM ในรูปที่ 4.8 ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบโครงสร้างภายในของชิ้นงาน จะเห็นได้ว่าชิ้นงานมีรูพรุนลดลงชัดเจนเมื่อเพิ่มปริมาณวัสดุผสมเข้าไป เนื่องจากวัสดุผสมบางส่วน ซึ่งมีขนาดอนุภาคเล็กกว่าขนาดอนุภาคของดีบุกเข้าแทรกตรงตำแหน่งช่องว่างของดีบุก ซึ่งนำมายืนยันความเป็นไปได้ของสมมติฐานในหัวข้อ 3.2 รูปที่ 3.3 ได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้พบว่าปริมาณวัสดุผสมที่เติมไม่มีอิทธิพลต่อค่าความหนาแน่นของชิ้นงานดังรูปที่ 4.7 ที่ทุกค่าความดันและอุณหภูมิอบผนึกจะเห็นได้ว่า ค่าความหนาแน่นมีแนวโน้มค่อนข้างคงที่เมื่อเพิ่มปริมาณของวัสดุผสม จากกราฟในรูปที่ 4.9 พบว่าบางจุด ค่าความหนาแน่นมีการแกว่งเนื่องจาก ผลจากอนุภาคของวัสดุผสมอยู่ผิดตำแหน่งดังรูปที่ 4.10 ซึ่งเปรียบเทียบตำแหน่งของวัสดุผสมในชิ้นงานที่แทรกอยู่ที่ช่องว่างกับวัสดุผสมที่อยู่ผิดตำแหน่งคือแทรกอยู่ระหว่างอนุภาค



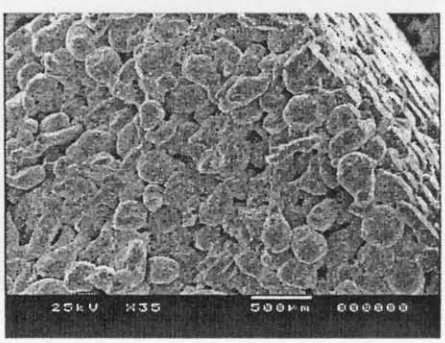
a)



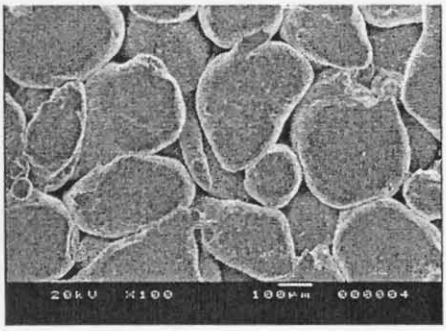
b)



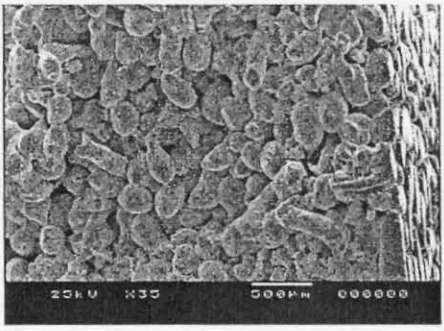
c)



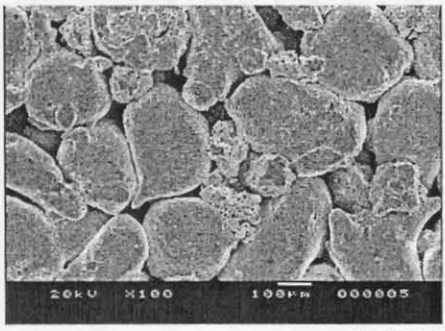
d)



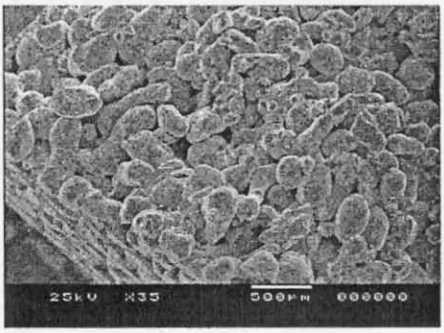
d)



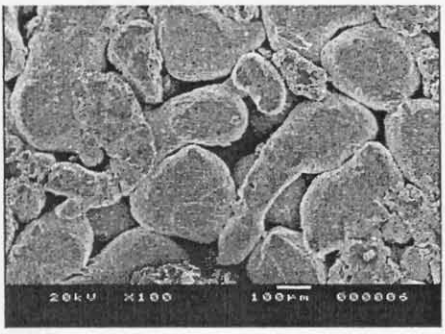
f)



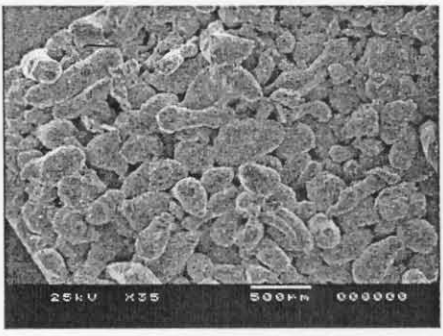
g)



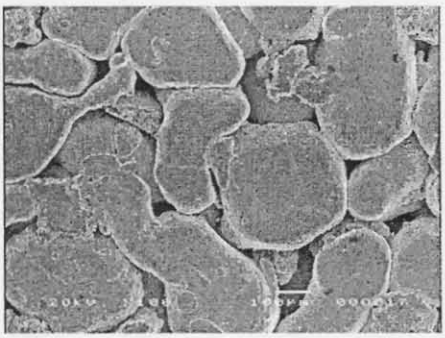
h)



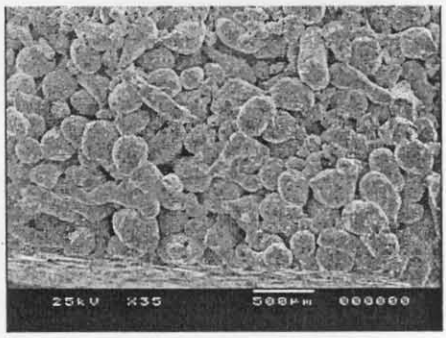
h)



j)

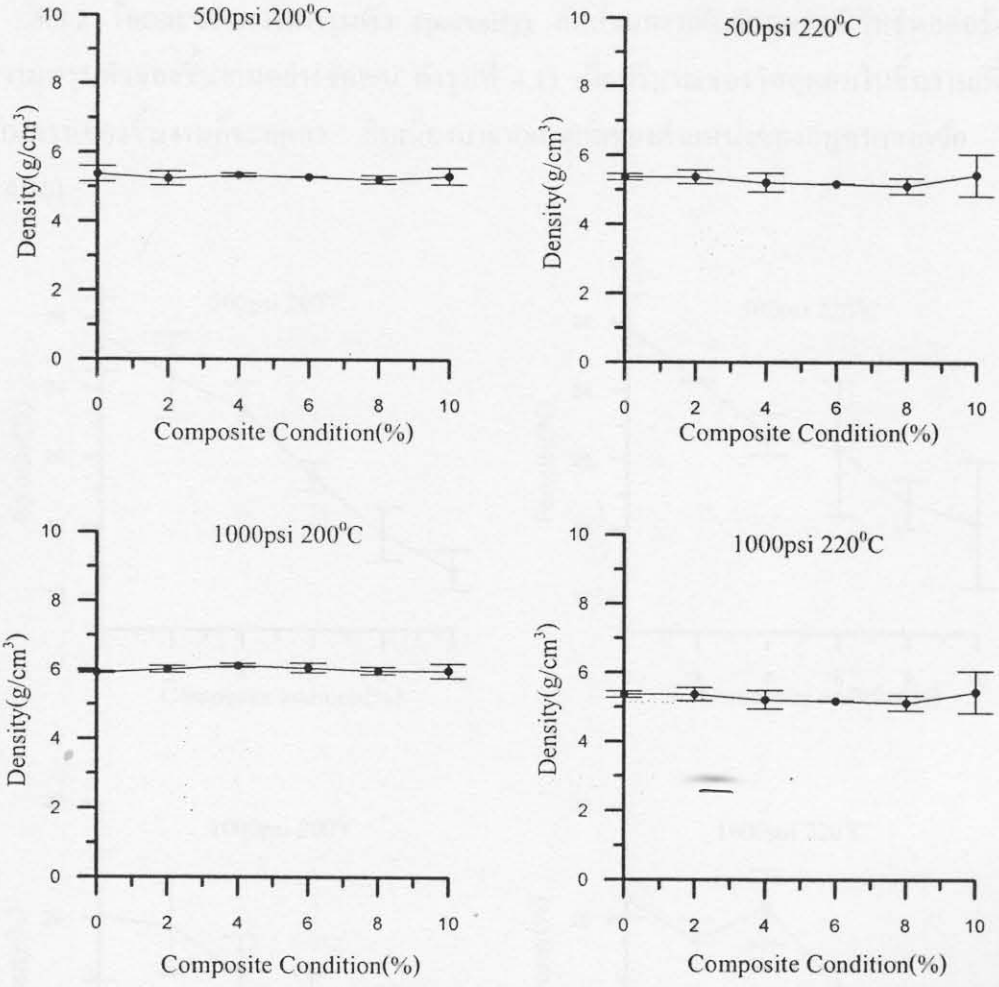


k)

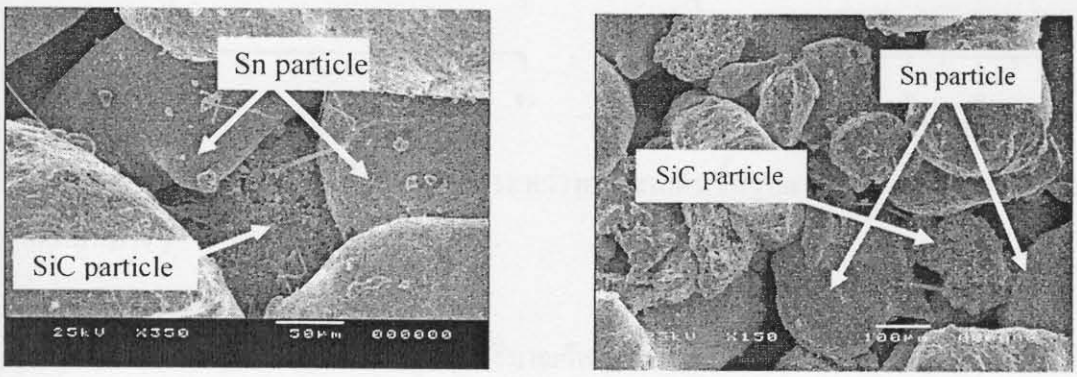


l)

รูปที่ 4.8 ภาพถ่าย SEM ของชิ้นงานวัสดุพรุน Sn+x(Sn-10SiC) เปรียบเทียบกันระหว่างที่ผิวหน้าชิ้นงานที่ปริมาณวัสดุผสม a) 0 % c) 2% e) 4% g) 6% i) 8% และ k) 10% กับภาคตัดขวางของชิ้นงานที่ปริมาณวัสดุผสม b) 0% d) 2% f) 4% h) 6% j) 8% และ l) 10% ที่อุณหภูมิอบผนึก 200 องศาเซลเซียส นาน 9 ชั่วโมง



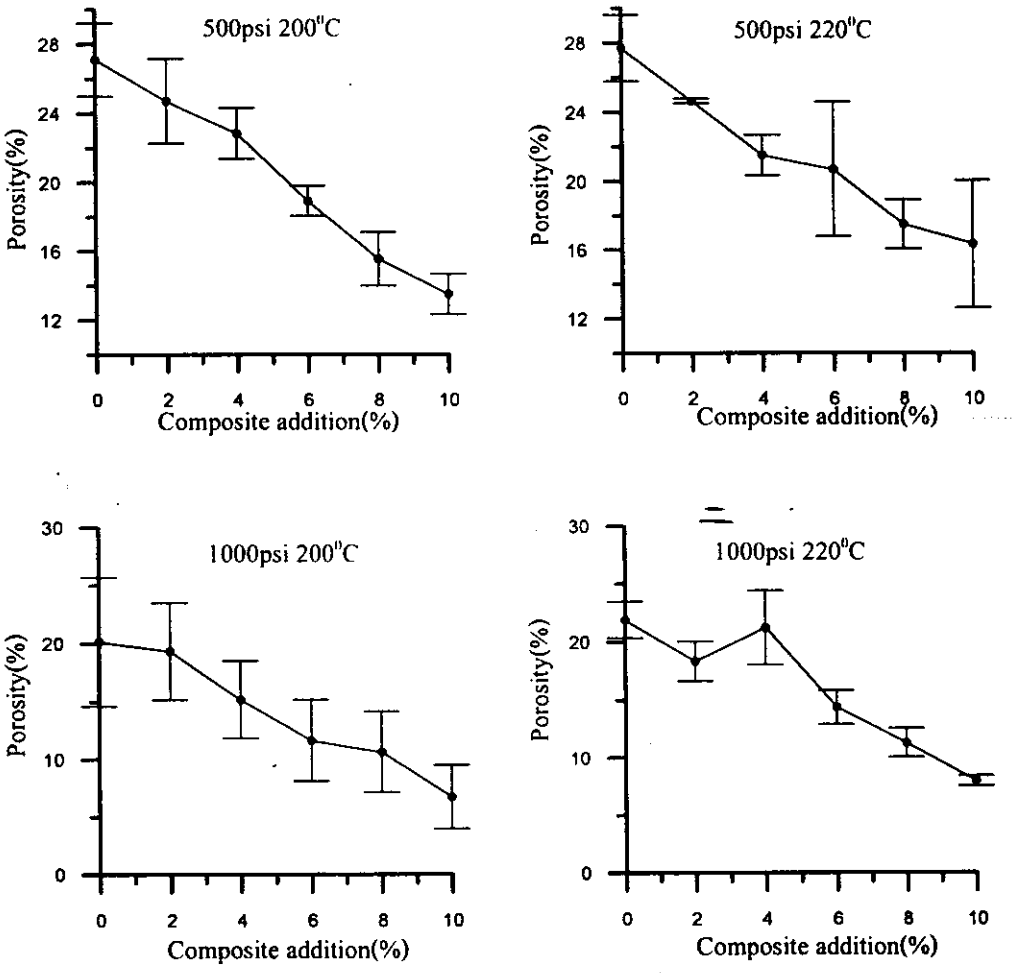
รูปที่ 4.9 กราฟความหนาแน่นของชิ้นงาน ที่อุณหภูมิและความดันต่างๆ เปรียบเทียบผลการเติมวัสดุผสม



a) b)

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

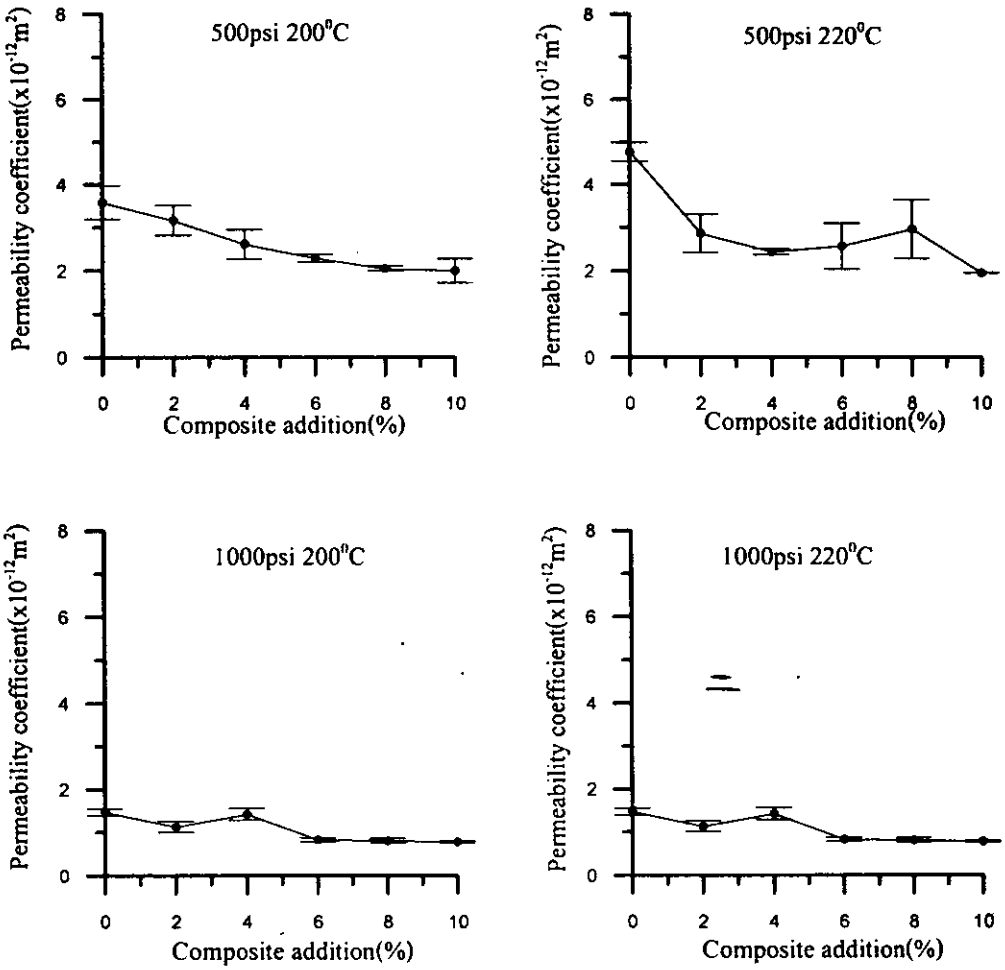
4.3.2 ร้อยละของความพรุนตัว (porosity) สัดส่วนการเติมวัสดุผสมมีอิทธิพลต่อร้อยละของความพรุนตัวของชิ้นงานอย่างชัดเจน ดังรูปที่ 4.11 เมื่อปริมาณของวัสดุผสมในชิ้นงานเพิ่มขึ้น ค่าความพรุนของชิ้นงานก็จะลดลง สืบเนื่องมาจากเหตุผลของตำแหน่งของอนุภาคจากข้อ 4.3.1 (รูปที่ 4.10)



รูปที่ 4.11 อัตราความพรุนเปรียบเทียบกันระหว่างค่าความดันขึ้นรูปและอุณหภูมิอบผนึกที่ปริมาณวัสดุผสมต่างๆ

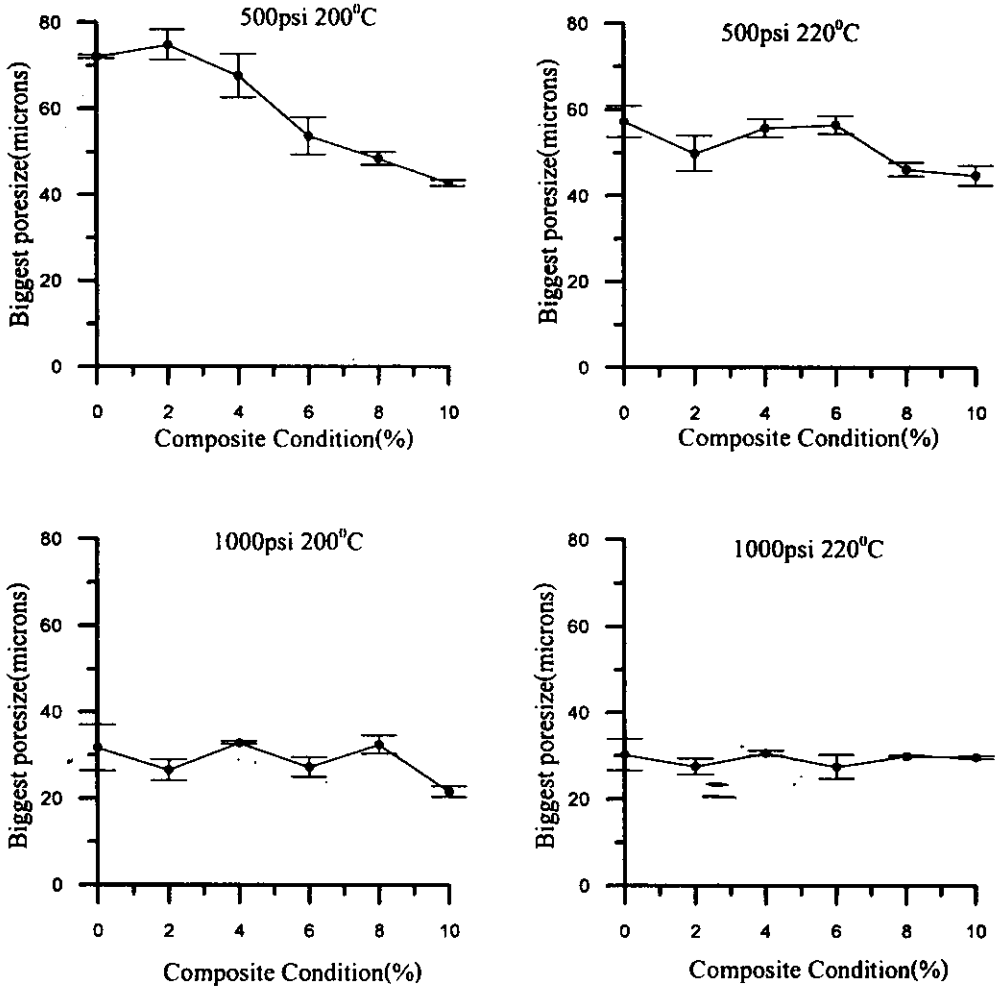
4.3.3 สัมประสิทธิ์การซึมผ่าน ปริมาณวัสดุผสมที่เติมในชิ้นงาน เป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านอย่างชัดเจน เมื่อใช้ความดันอัดขึ้นรูปที่ 500 psi ดังกราฟในรูปที่ 4.12 จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มปริมาณวัสดุผสมมากขึ้น ความสามารถในการซึมผ่านของตัวกลางในชิ้นงานลดลง เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านแปรผันตรงกับค่าความพรุนตัวของชิ้นงาน แต่เมื่อใช้

ความดันในการอัดขึ้นรูปที่ 1000 psi พบว่าอิทธิพลของความดันมีเหนือกว่าอิทธิพลของปริมาณวัสดุผสมที่เติม ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านค่อนข้างคงที่แม้ว่าจะเพิ่มปริมาณวัสดุผสม



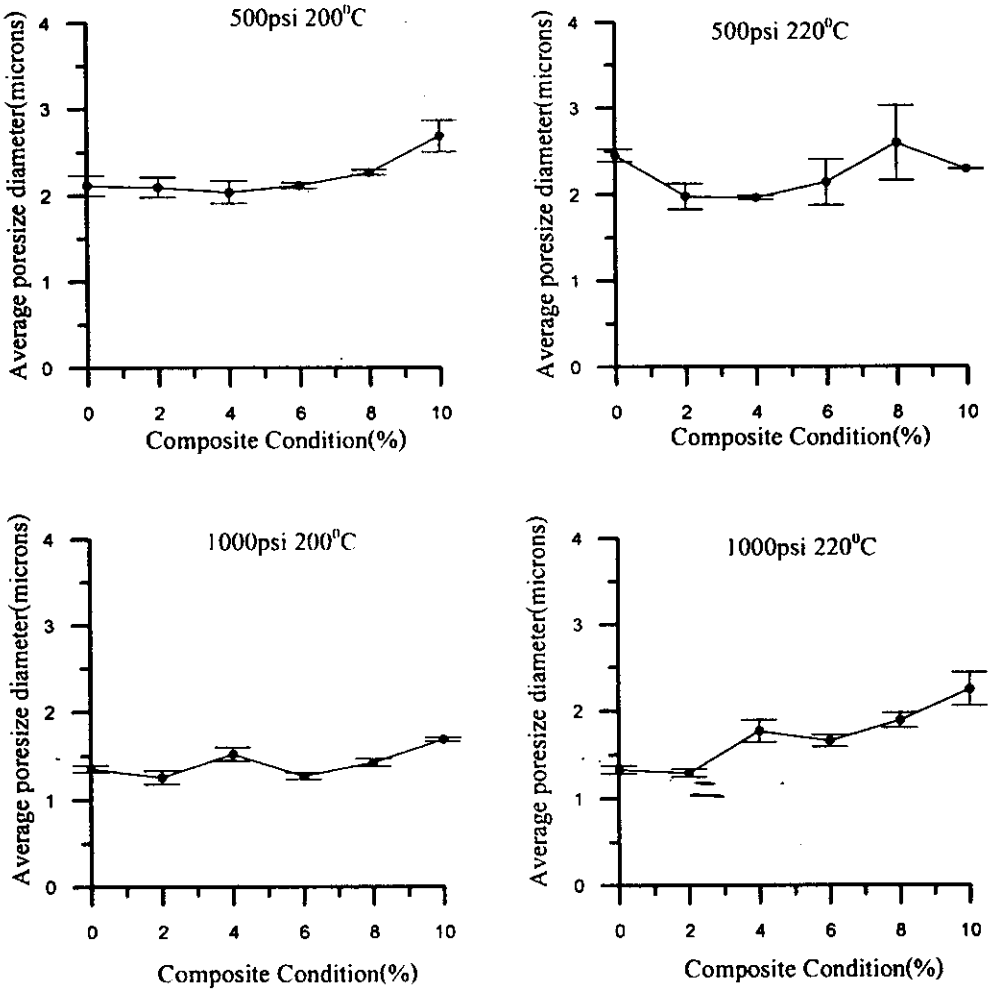
รูปที่ 4.12 สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของชิ้นงานเปรียบเทียบกันระหว่างค่าความดันขึ้นรูป 500 และ 1000 อุณหภูมิอบผนึก 200 และ 220 องศาเซลเซียส ที่ปริมาณวัสดุผสม 0-10 %(Sn-10SiC)

4.3.4 ขนาดรูพรุนโตสุด ขนาดรูพรุนโตสุดของชิ้นงานที่ผลิตได้มีแนวโน้มสอดคล้องกับค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านดังรูปที่ 4.13 คือปริมาณของวัสดุผสมจะมีอิทธิพลต่อขนาดรูพรุนโตสุดเฉพาะชิ้นงานที่ใช้ความดันในการอัดขึ้นรูป 500 psi แต่เมื่อให้ความดันอัดขึ้นรูปสูงขึ้นเป็น 1000 psi อิทธิพลของความดันจะบดบังอิทธิพลของปริมาณวัสดุผสม ดังนั้นเมื่อเพิ่มปริมาณวัสดุผสมขนาดรูพรุนโตสุดจึงไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก ค่าความหนาแน่นมีการแกว่งเนื่องจาก ผลจากอนุภาคของวัสดุผสมอยู่ผิดตำแหน่งดังรูปที่ 4.10 ซึ่งเป็นไปในทำนองเดียวกับความหนาแน่น



รูปที่ 4.13 ขนาดรูพรุนโตสุดของชิ้นงานเปรียบเทียบกันระหว่างค่าความดันอัดขึ้นรูป 500 และ 1000 psi อุณหภูมิอบผนึก 200 และ 220 องศาเซลเซียส ที่ปริมาณวัสดุผสม 0-10 %(Sn-10SiC)

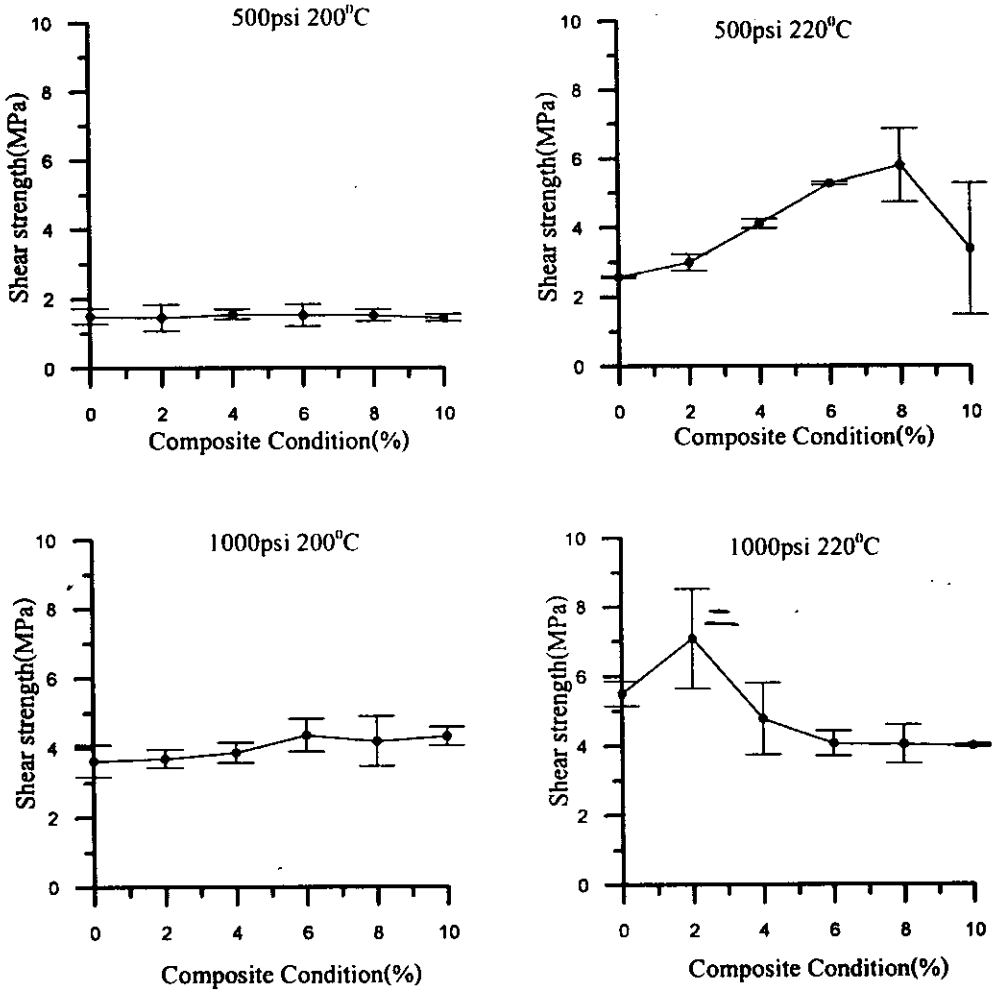
4.3.5 ขนาดรูพรุนเฉลี่ย ค่าขนาดรูพรุนเฉลี่ยที่ได้จากการคำนวณเมื่อนำมาเขียนกราฟดังรูปที่ 4.14 พบว่าปริมาณการเติมวัสดุผสมไม่มีอิทธิพลต่อขนาดรูพรุนเฉลี่ยที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานที่ผลิตได้ เนื่องจากเมื่อเพิ่มปริมาณวัสดุผสมแล้ว ขนาดรูพรุนเฉลี่ยมีแนวโน้มคงที่ ยกเว้นกราฟที่ความดันอัดขึ้นรูป 1000 psi อุณหภูมิอบผนึก 220 องศาเซลเซียส ขนาดรูพรุนเฉลี่ยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณวัสดุผสม ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยปรากฏการณ์ออสท์วาลด์ (oswald ripening) ซึ่งจะเกิดในขั้นตอนสุดท้ายของการอบผนึก เมื่อได้รับความร้อนต่อเนื่อง รูพรุนจะเกิดการรวมตัวกันส่งผลให้ขนาดรูพรุนเฉลี่ยจะโตขึ้นจำนวนรูพรุนจะลดลง



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

4.3.6 ความแข็งแรงเฉือน เมื่อนำความแข็งแรงเฉือนที่ได้จากการทดลองมาเขียนกราฟดังรูปที่ 4.15 จะเห็นได้ว่าปริมาณวัสดุผสมที่เติมไม่ส่งผลต่อความแข็งแรงเฉือนของชิ้นงาน คือเมื่อเพิ่มปริมาณวัสดุผสมแล้วค่าความแข็งแรงเฉือนมีแนวโน้มคงที่ ยกเว้นชิ้นงานที่ใช้ความดันอัดขึ้นรูป 500 psi อุณหภูมิอบผนึก 220 องศาเซลเซียส ค่าความแข็งแรงเฉือนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณวัสดุผสม สาเหตุเนื่องจากอิทธิพลของอุณหภูมิอบผนึกทำให้ความแข็งแรงของชิ้นงาน เพิ่มสูงขึ้น เมื่อใช้อุณหภูมิอบผนึกเป็น 220 องศาเซลเซียส เป็นการเพิ่มโอกาสที่จะทำให้เกิดการ ไหลของมวลของอนุภาคดีบุกได้ง่าย ทำให้มีขนาดของคอคอดมากขึ้น ซึ่งกลไกการไหลของมวล ของ

อนุภาคดีบุกเมื่อทำการอบผนึกน่าจะเป็นการเคลื่อนที่ตามผิว (Surface transport) เนื่องจากไม่มี การหดตัว สังเกตจากค่าความหนาแน่นของชิ้นงานไม่เปลี่ยนแปลง



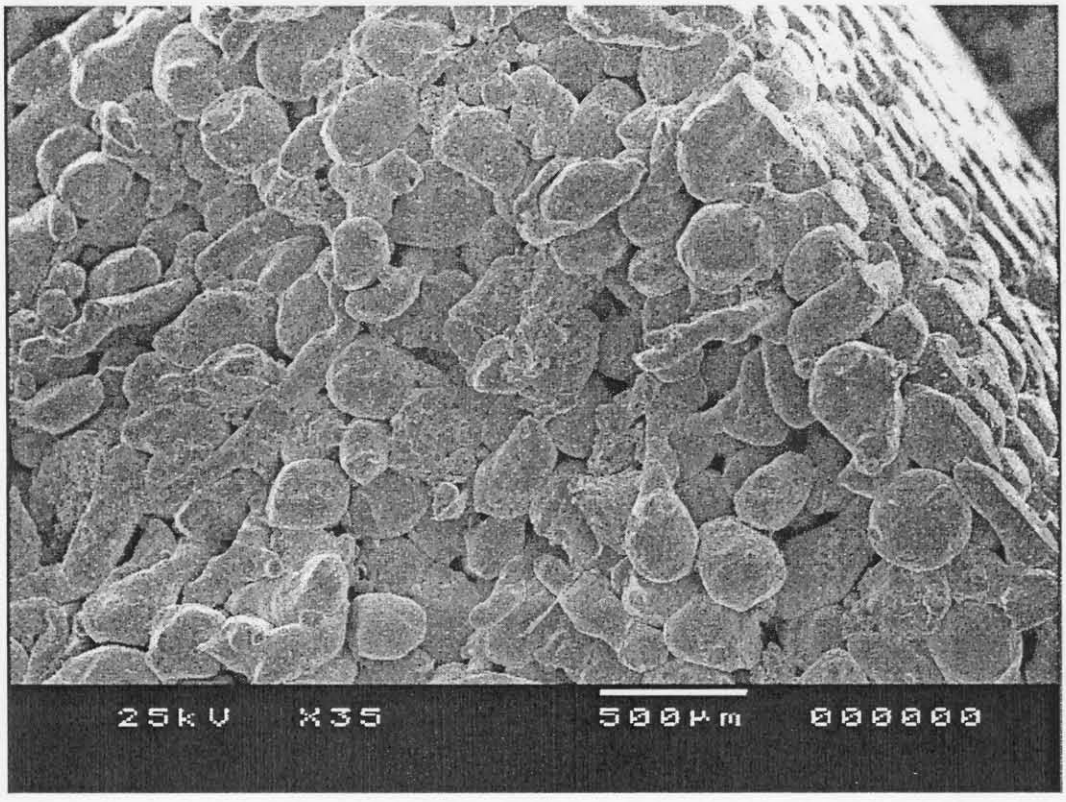
รูปที่ 4.15 ค่าความแข็งแรงเฉือนของชิ้นงานเปรียบเทียบกันระหว่างค่าความดันอัดขึ้นรูป 500 และ 1000 psi อุณหภูมิอบผนึก 200 และ 220 องศาเซลเซียส ที่ปริมาณวัสดุผสม 0-10 % (Sn-10SiC)

4.4 อิทธิพลของความดัน

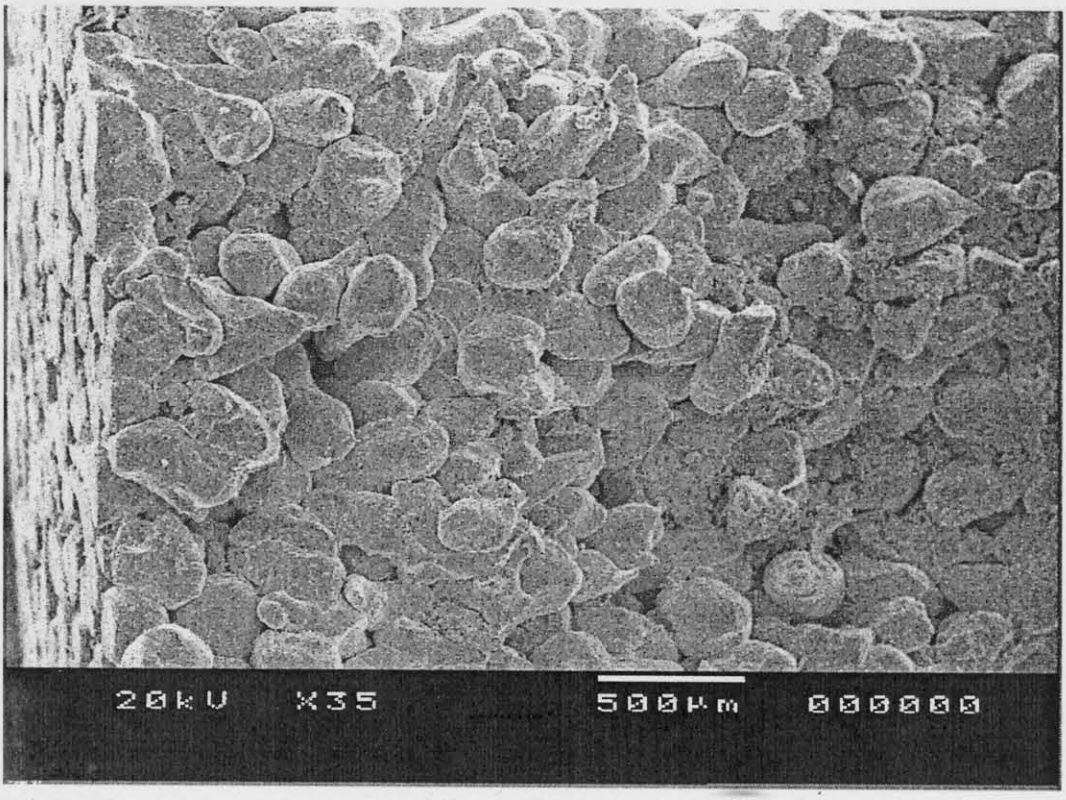
4.4.1 สัณฐานวิทยา (morphology) ค่าความดันที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปชิ้นงานเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อโครงสร้างของชิ้นงาน ดังรูปที่ 4.16 เมื่อความดันที่ใช้ขึ้นรูปสูงขึ้นพบว่าอนุภาคของดีบุกและวัสดุผสมอยู่ชิดกันมากขึ้น และจากภาพในรูปที่ 4.17 จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าเมื่อเพิ่มความดันที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปตั้งแต่ 500, 1000, 1500 จนถึง 2000 psi ค่าความหนาแน่นของ

ชิ้นงานก็เพิ่มสูงขึ้นตาม เนื่องจากเมื่อเริ่มให้ความดัน การตอบรับแรกสุดคือการจัดเรียงตัวใหม่ของอนุภาค โดยอนุภาคมีการเติมในรูพรุนขนาดใหญ่ก่อนส่งผลให้จำนวนการสัมผัสกับอนุภาครอบตัวสูงขึ้น (นภิสพร, 2005) ทำให้ความหนาแน่นสูงขึ้น

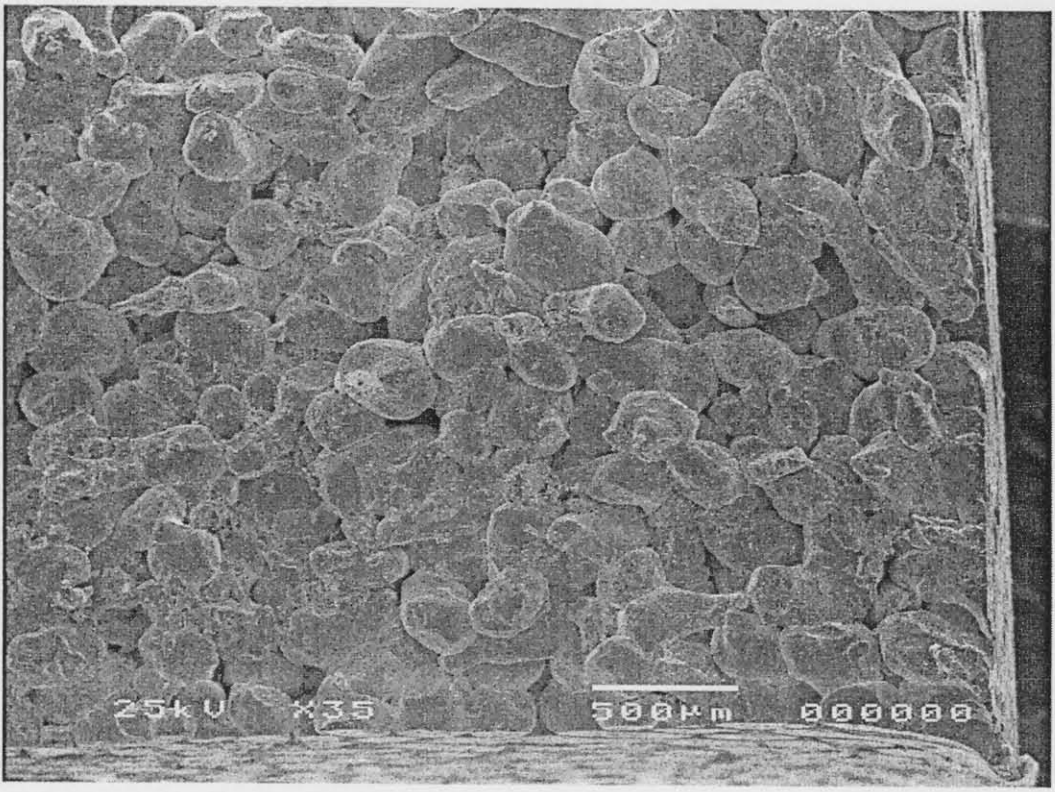
จากรูปที่ 4.16 เป็นภาพถ่าย SEM ของชิ้นงานที่ได้รับความดันในการอัดขึ้นรูปแตกต่างกัน จะเห็นได้ว่าชิ้นงานที่ได้รับความดันในการอัดขึ้นรูป 500, 1000และ1500 psi (รูปที่ 4.16 a-c) มีลักษณะไม่แตกต่างกันมากนัก แต่เมื่อให้ความดันอัดขึ้นรูปเป็น 2000 psi จะเห็นว่ามีอัตราการอัดแน่นตัวสูงกว่าอย่างชัดเจน ซึ่งส่งผลต่อขนาดของรูพรุน ประสิทธิภาพการอบผนึกและความแข็งแรงของชิ้นงาน โดยจะเห็นได้ว่าอัตราการแน่นตัวของชิ้นงานจะเพิ่มสูงขึ้น เมื่อเพิ่มค่าความดันที่อัดขึ้นรูป ดังนั้นผิวสัมผัสระหว่างอนุภาคย่อมเพิ่มสูงขึ้นด้วย ซึ่งเป็นไปตามกราฟในทฤษฎีการอัดขึ้นรูป รูปที่ 2.4 ส่งผลให้การอบผนึกชิ้นงานที่ใช้ความดันอัดขึ้นรูป 2000 psi เข้าสู่ขั้นตอนสุดท้ายของการอบผนึก คือ มีการรวมตัวกันของรูพรุนขนาดเล็ก (รูพรุนขนาดเล็กมีความเสถียรต่ำ) ในขณะที่ชิ้นงานที่ได้รับความดันในการอัดขึ้นรูป 500, 1000และ1500 psi อยู่ในขั้นตอนของการอบผนึกระหว่างขั้นแรกและขั้นกลาง เท่านั้น กลไกการแน่นตัวและการอบผนึกที่มีผลมาจากการให้ความดันขึ้นรูปนี้เอง ทำให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นถึง 4 เท่าเมื่อเพิ่มความดันจาก 500 psi เป็น 2000 psi



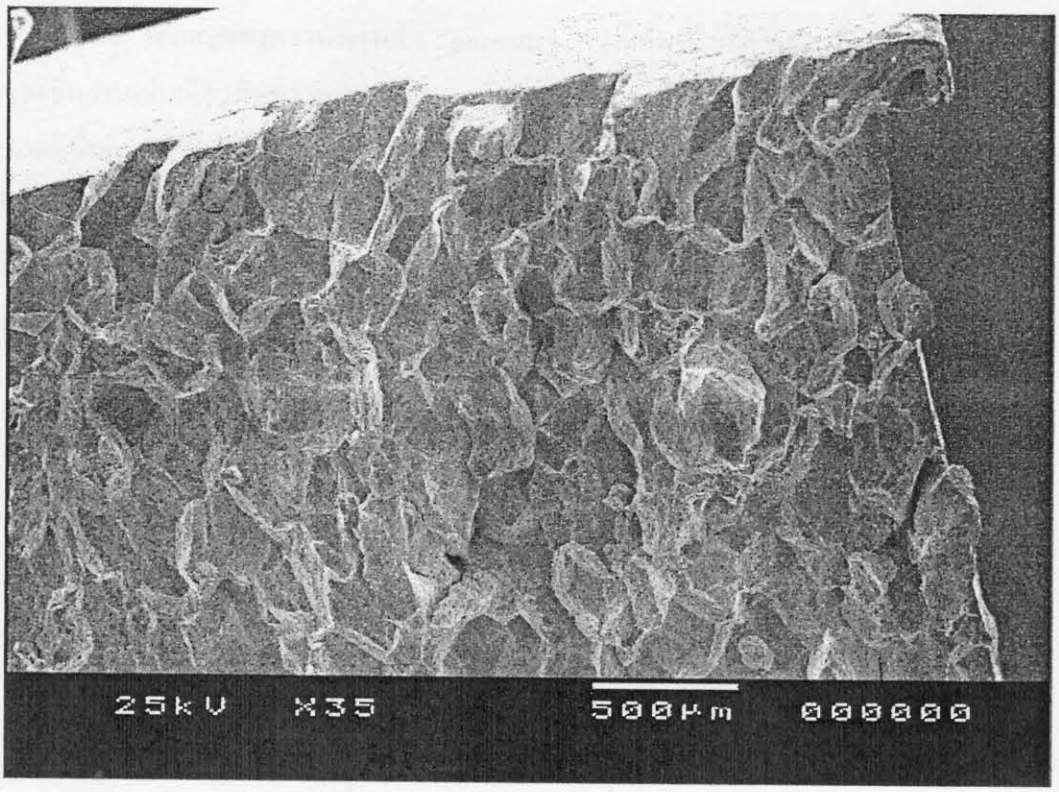
a)



b)

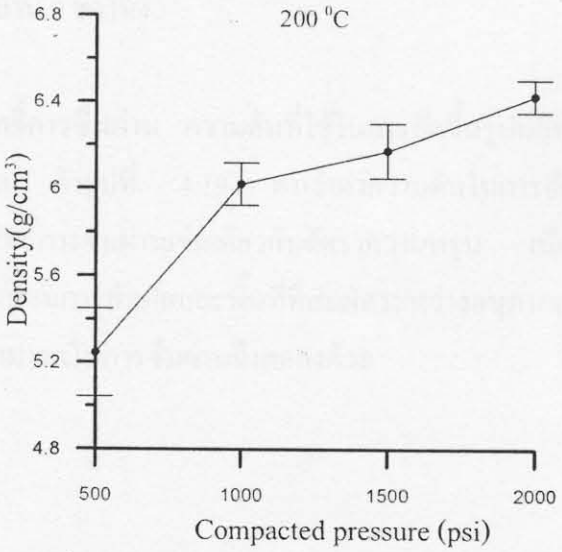


c)



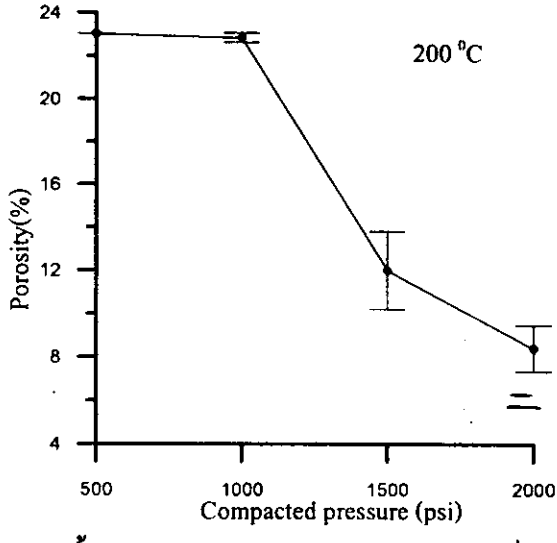
d)

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



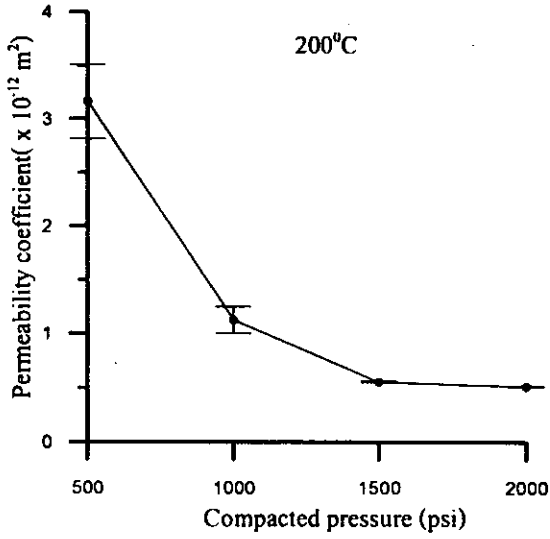
รูปที่ 4.17 ความหนาแน่นของชิ้นงานวัสดุผสม Sn+2 %(Sn-10SiC) ที่ค่าความดันอัดขึ้นรูป 4 ค่า ที่อุณหภูมิอบผนึก 200 องศาเซลเซียส นาน 9 ชั่วโมง

4.4.2 ร้อยละของความพรุนตัว (porosity) ความดันที่ใช้อัดขึ้นรูปมีอิทธิพลต่อความพรุนตัวของชิ้นงานเช่นเดียวกับความหนาแน่น เนื่องจากการเพิ่มความดันทำให้การจัดเรียงตัวของอนุภาคดีขึ้นและนำไปสู่การลดลงของความพรุน โดยการฟอร์มตัวของจุดสัมผัสใหม่ของอนุภาค (นภิสพร, 2005) ดังรูปที่ 4.18 จะเห็นได้ว่าค่าความพรุนตัวเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเมื่อความดันอัดขึ้นรูปเพิ่มจาก 500 psi เป็น 1000 psi แต่จะลดลงอย่างชัดเจนเมื่อเพิ่มความดันที่ใช้อัดขึ้นรูปเป็น 1500 และ 2000 psi



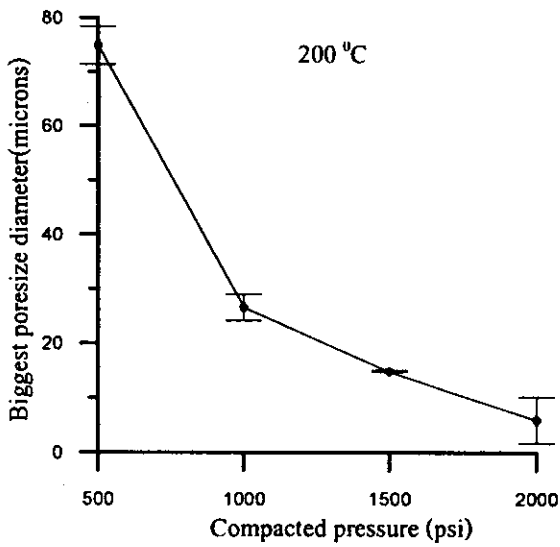
รูปที่ 4.18 อัตราความพรุนของชิ้นงานวัสดุผสม Sn+2 %(Sn-10SiC) ที่ความดัน 4 ค่า อุณหภูมิอบผนึก 200 องศาเซลเซียส นาน 9 ชั่วโมง

4.4.3 สัมประสิทธิ์การซึมผ่าน ความดันที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปมีอิทธิพลต่อค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านอย่างเห็นได้ชัด ดังรูปที่ 4.19 พบว่าค่าความดันในการอัดขึ้นรูปให้แก่ชิ้นงานจะแปรผกผันกับค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านเช่นเดียวกับอัตราความพรุน เนื่องจากการอัดขึ้นรูปด้วยความดันที่สูงขึ้น ทำให้จำนวนการสัมผัสและพื้นที่ที่สัมผัสระหว่างอนุภาคเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความพรุนลดลง ดังนั้น ความสามารถในการซึมผ่านจึงลดลงด้วย



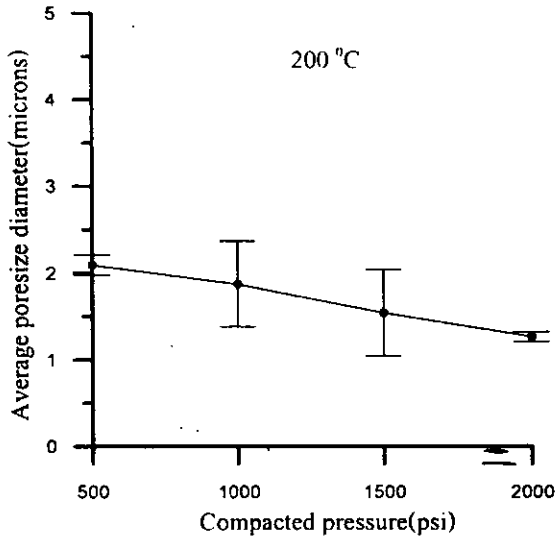
รูปที่ 4.19 ค่าสัมประสิทธิ์ในการซึมผ่านของอากาศของชิ้นงานที่ความดัน 500 psi 1000 psi 1500 psi และ 2000 psi ที่อุณหภูมิอบผนึก 200 องศาเซลเซียส นาน 9 ชั่วโมง

4.4.4 ขนาดรูพรุนโตสุด เมื่อนำผลการทดลองมาคำนวณและเขียนกราฟได้ดังรูปที่ 4.20 พบว่าอิทธิพลของความดันที่ใช้อัดขึ้นรูปมีอิทธิพลต่อขนาดของรูพรุนโตสุด เช่นเดียวกับค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านและอัตราความพรุน เมื่อใช้ความดันในการอัดขึ้นรูปชิ้นงานเพิ่มสูงขึ้น ขนาดรูพรุนโตสุดจะลดลง เนื่องจากที่ความดันสูงขึ้นทำให้อนุภาคของดีบุกและวัสดุผสมเรียงตัวชิดกันมากขึ้น ทำให้ระยะห่างระหว่างอนุภาคน้อยลง (ขนาดรูพรุนเล็กลง)



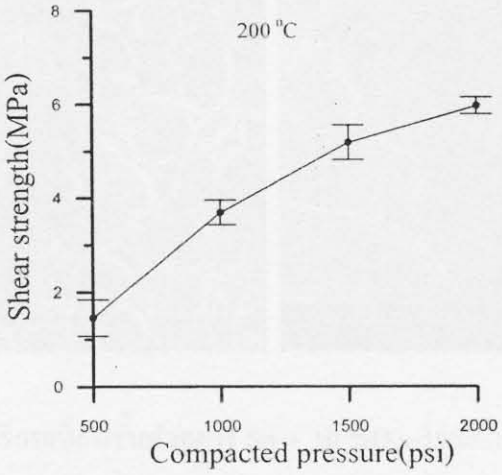
รูปที่ 4.20 ขนาดรูพรุนโตสุดของชิ้นงานที่ความดัน 500 1000 1500 และ 2000 psi ที่อุณหภูมิอบผนึก 200 องศาเซลเซียส นาน 9 ชั่วโมง

4.4.5 ขนาดรูพรุนเฉลี่ย อิทธิพลของความดันที่ใช้อัดขึ้นรูปมีผลต่อขนาดรูพรุนเฉลี่ยเช่นเดียวกับขนาดรูพรุนโตสุดและสัมประสิทธิ์การซึมผ่านดังรูปที่ 4.21 เมื่อใช้ความดันในการอัดขึ้นรูปชิ้นงานเพิ่มสูงขึ้นขนาดรูพรุนเฉลี่ยจะลดลง ด้วยเหตุผลเช่นเดียวกับค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน เนื่องจากการอัดขึ้นรูปด้วยความดันที่สูงขึ้น ทำให้จำนวนการสัมผัสและพื้นที่ที่สัมผัสระหว่างอนุภาคเพิ่มขึ้นส่งผลให้ระยะห่างระหว่างอนุภาคน้อยลง (ขนาดรูพรุนเล็กลง)



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

4.4.6 ความแข็งแรงเฉือน ทำการทดสอบความแข็งแรงเฉือนและนำมาเขียนกราฟดังรูปที่ 4.22 จะเห็นว่า ความดันที่ใช้ขึ้นรูปชิ้นงานมีอิทธิพลต่อค่าความแข็งแรงเฉือนอย่างชัดเจน เมื่อให้ความดันสูงขึ้นชิ้นงานมีความแข็งแรงมากขึ้น เนื่องจากแรงเฉือนสูงสุดเกิดขึ้นตรงกลางของจุดสัมผัสระหว่างอนุภาคส่งผลให้มีการพัฒนาความแข็งแรงขึ้นในชิ้นงาน (นภิสพร, 2005) ดังกล่าวมาเมื่อผิวสัมผัสมีพื้นที่เพิ่มมากขึ้นค่าความแข็งแรงก็สูงขึ้นตามไปด้วย

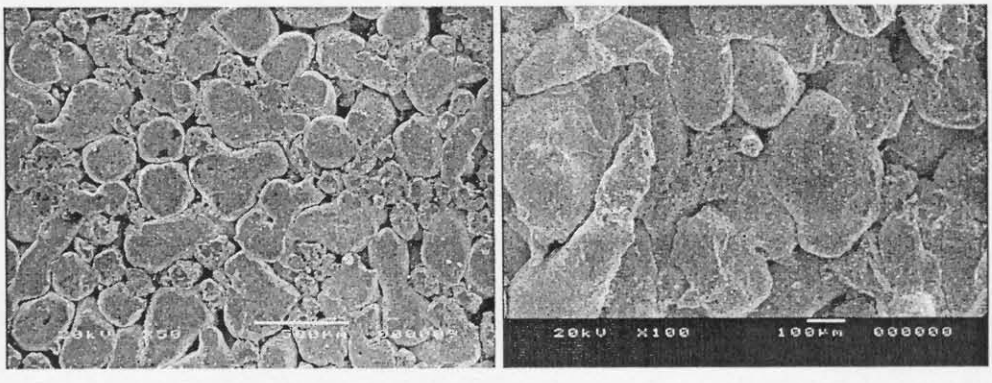


รูปที่ 4.22 ความแข็งแรงเฉือนของชิ้นงานที่ความดันที่ใช้อัดขึ้นรูป 4 ค่า ที่อุณหภูมิอบผนึก 200 องศาเซลเซียส นาน 9 ชั่วโมง

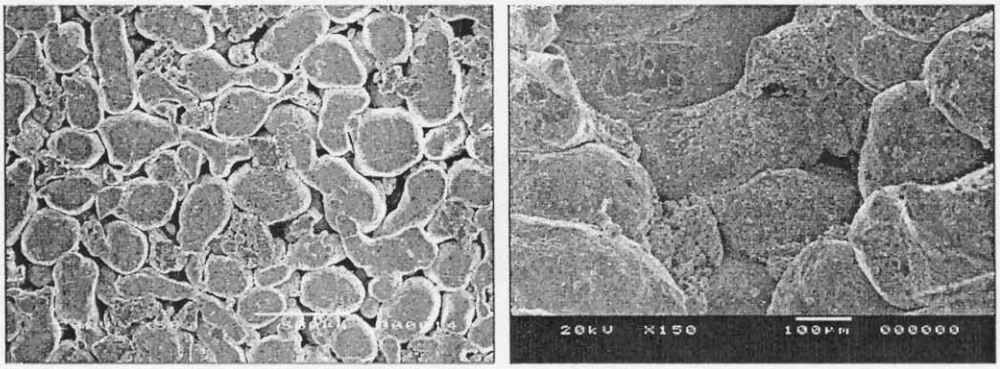
4.5 อิทธิพลของอุณหภูมิ

4.5.1 สัณฐานวิทยา (morphology) จากการทดลองพบว่าที่อุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียส นาน 9 ชั่วโมง อนุภาคของดีบุกจะหลอมรวมเป็นเนื้อเดียวกัน นั่นคือเลยขั้นตอนสุดท้าย (final stage) ของการอบผนึก จึงเลือกใช้อุณหภูมิอบผนึกที่ 220 องศาเซลเซียส และ 200 องศาเซลเซียส ซึ่งจากรูปที่ 4.23 แสดงให้เห็นว่าผลของอุณหภูมิอบผนึกทั้งสองค่าไม่มีผลแตกต่างกันมากนัก ซึ่งน่าจะอยู่ในขั้นตอนแรกของการอบผนึกคือ มีคอคอดเกิดขึ้นระหว่างผิวสัมผัสของสองอนุภาคที่อยู่ติดกัน(รูปที่ 4.23b และ 4.23d) และจากการคำนวณหาความหนาแน่นแล้วนำมาเขียนกราฟดังรูปที่ 4.24 พบว่าอุณหภูมิอบผนึกที่ใช้ไม่มีผลต่อความหนาแน่นของชิ้นงานมากนัก เนื่องจากใช้อุณหภูมิอบผนึกที่ค่อนข้างต่ำและไม่ห่างกันมากนัก

นอกจากนี้การอบผนึกไม่ทำให้ชิ้นงานหดตัวเนื่องจากชิ้นงานได้รับอิทธิพลของแรงดันจากการอัดขึ้นรูปมาก่อนแล้ว

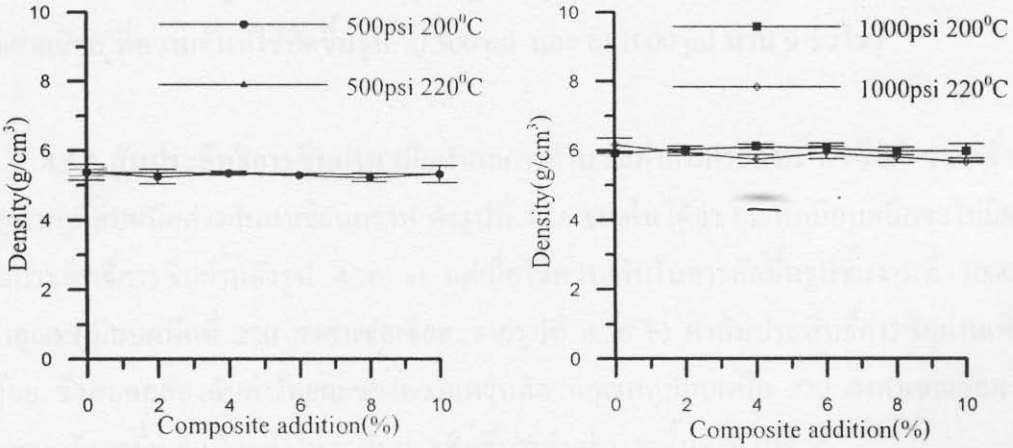


a) b)



c) d)

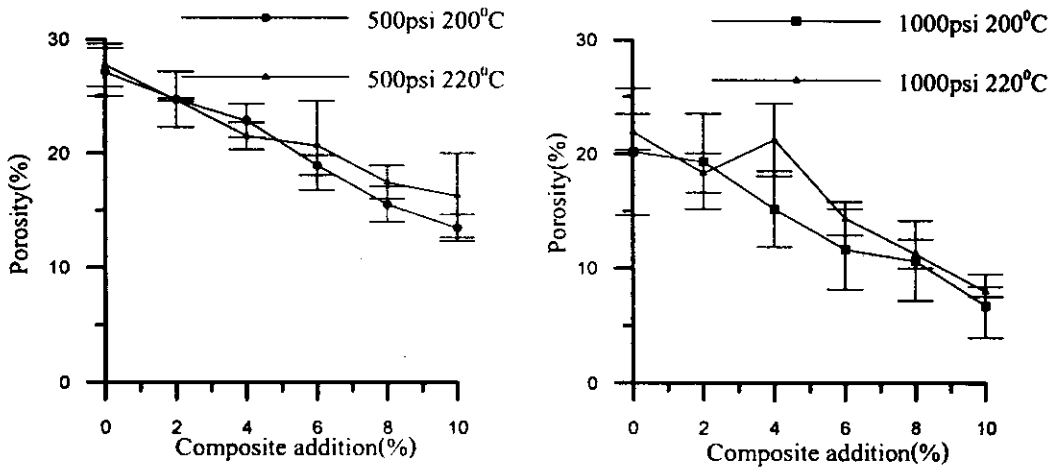
รูปที่ 4.23 ภาพถ่าย SEM เปรียบเทียบชิ้นตัวอย่าง Sn + 10 %(Sn-10SiC) ที่อุณหภูมิอบผนึก a) 200 องศาเซลเซียส b) 220 องศาเซลเซียส ที่ความดัน 1000 psi นาน 9 ชั่วโมง



a) b)

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

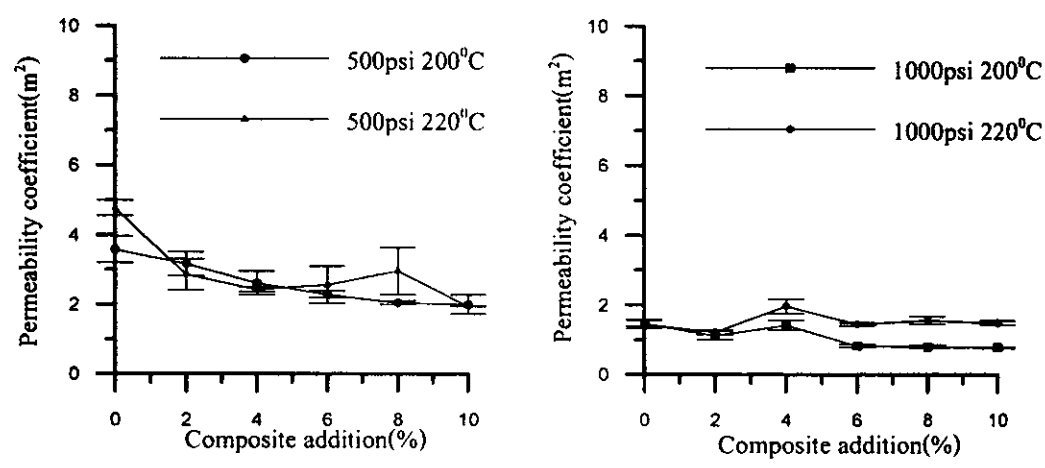
4.5.2 ร้อยละของความพรุนตัว (porosity) อุณหภูมิที่ใช้ในการอบผนึกชิ้นงาน ไม่เป็นปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่ออัตราความพรุนของชิ้นงานโดยตรง รูปที่ 4.25 แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิอบผนึกที่สูงขึ้นไม่ได้ทำให้ค่าอัตราความพรุนเปลี่ยนแปลงมากนัก



a) b)

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

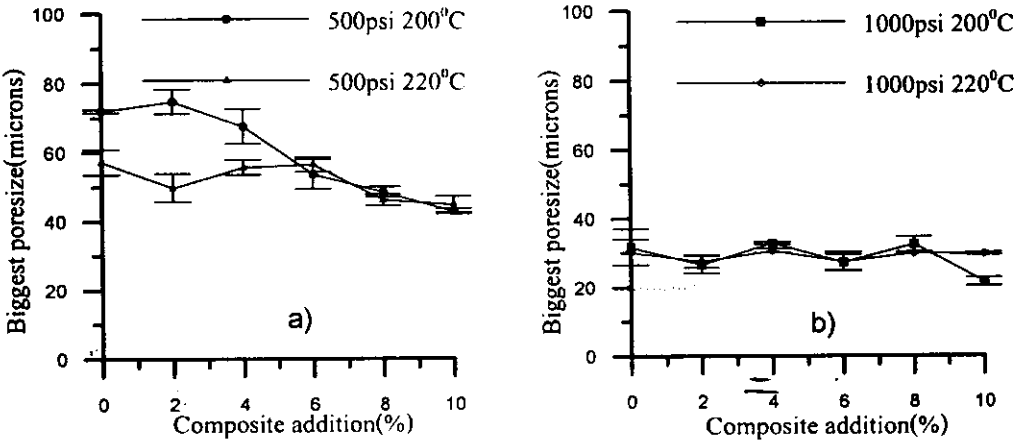
4.5.3 สัมประสิทธิ์การซึมผ่าน เมื่อนำผลการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของชิ้นงานที่ใช้อุณหภูมิอบผนึกต่างกันมาเขียนกราฟ ดังรูปที่ 4.26 จะเห็นได้ว่า อุณหภูมิอบผนึกจะไม่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านดังรูป 4.26 a) แต่เมื่อใช้ความดันในการอัดขึ้นรูปชิ้นงานที่ 1000 psi พบว่าอุณหภูมิอบผนึกที่ 220 องศาเซลเซียส จากรูปที่ 4.26 b) ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ซึ่งสอดคล้องกับค่าร้อยละของความพรุนตัว ที่อุณหภูมิอบผนึก 220 องศาเซลเซียส มีค่าความพรุนตัวสูงขึ้นเล็กน้อยทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านสูงขึ้นตามไปด้วย



a) b)

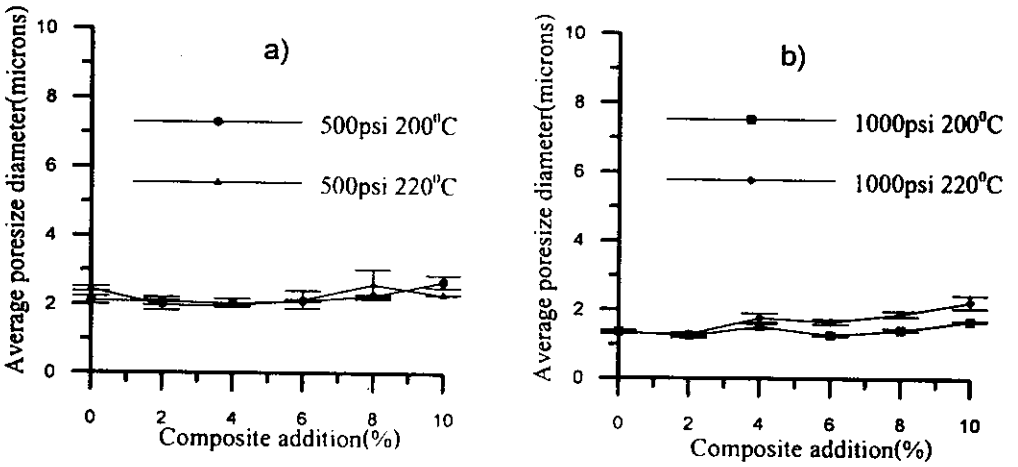
รูปที่ 4.26 ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของชิ้นงานที่อุณหภูมิอบผนึก 200 องศาเซลเซียส เปรียบเทียบกับ 220 องศาเซลเซียส ที่ความดันที่ใช้อัดขึ้นรูป a) 500 psi และ b) 1000 psi นาน 9 ชั่วโมง

4.5.4 ขนาดรูพรุนโตสุด ผลที่ได้จากการคำนวณค่าขนาดของรูพรุนโตสุดแล้วนำมาเขียนกราฟดังรูปที่ 4.27 แสดงให้เห็นอิทธิพลของความดันและสัดส่วนการเติมวัสดุผสมบดบังอิทธิพลของอุณหภูมิอบผนึกอยู่ ดังจะเห็นได้จากที่ความดัน 500 psi และปริมาณวัสดุผสมน้อยกว่า 6% ชิ้นงานที่อุณหภูมิอบผนึก 200 องศาเซลเซียส จะให้ค่าขนาดรูพรุนโตสุดสูงกว่าที่อุณหภูมิอบผนึก 220 องศาเซลเซียส เนื่องจากเมื่อเริ่มขั้นตอนแรกของการอบผนึกอุณหภูมิอบผนึกที่สูงกว่าจะทำ ให้เกิดคอคอดที่ผิวสัมผัสของอนุภาคมีการเพิ่มขนาดขึ้นเร็วกว่า ขนาดของรูพรุนจึงเล็กลง



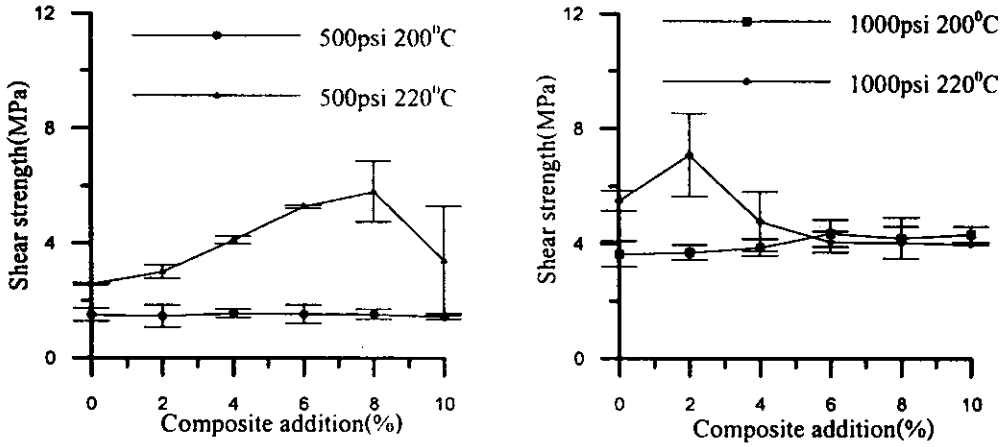
รูปที่ 4.27 ขนาดรูพรุนโตสุดของชิ้นงานที่อุณหภูมิอบผนึก 200 องศาเซลเซียส เปรียบเทียบกับ 220 องศาเซลเซียส ที่ความดันที่ใช้อัดขึ้นรูป a) 500 psi และ b) 1000 psi นาน 9 ชั่วโมง

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

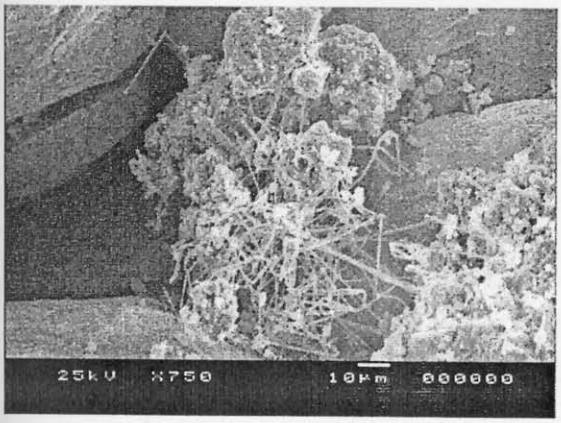
4.5.6 ความแข็งแรงเฉือน อุณหภูมิที่ใช้ในการอบผนึกเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าความแข็ง แรงเฉือนเมื่อมองข้ามอิทธิพลของความดัน ดังรูปที่ 4.29 รูป b) แสดงให้เห็นว่าที่ปริมาณวัสดุผสม น้อยๆ อุณหภูมิอบผนึกที่เพิ่มขึ้นเป็น 220 องศาเซลเซียส จะทำให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงเพิ่ม ขึ้น และรูป a) แสดงให้เห็นว่าอิทธิพลของอุณหภูมิที่ใช้ในการอบผนึก ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงของ ชิ้นงานอย่างชัดเจน เมื่อให้อุณหภูมิอบผนึกแก่ชิ้นงานสูงขึ้นจะทำให้ค่าความแข็งแรงของชิ้น งาน สูงขึ้นด้วย เนื่องจากเมื่อใช้อุณหภูมิในการอบผนึกเป็น 220 องศาเซลเซียส จะเพิ่มโอกาสให้เกิดการ ไหลของมวลของอนุภาคดีบุกได้ง่ายขึ้น ทำให้ขนาดของคอคอดระหว่างผิวสัมผัสของสอง อนุภาค เพิ่มมากขึ้น



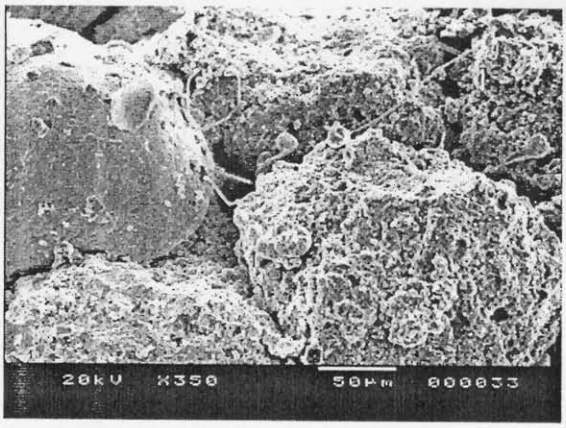
รูปที่ 4.29 ความแข็งแรงเฉือนของชิ้นงานที่ที่อุณหภูมิอบผนึก 200 องศาเซลเซียส เปรียบเทียบกับ 220 องศาเซลเซียส ที่ความดันที่ใช้อัดขึ้นรูป a) 500 psi และ b) 1000 psi นาน 9 ชั่วโมง

4.6 อิทธิพลของวิสเคอร์ดีบุกที่เกิดขึ้น

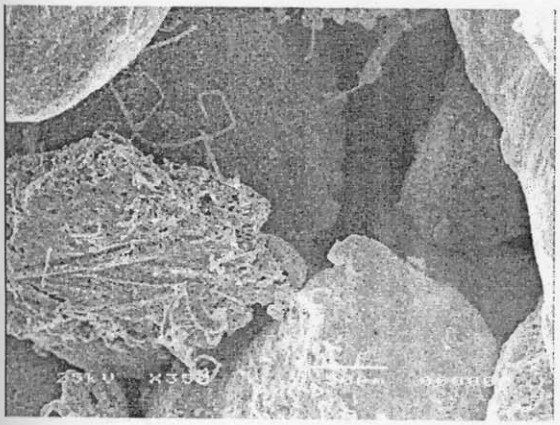
4.6.1 สัณฐานวิทยา (morphology) หลังอบผนึกชิ้นงานที่อุณหภูมิสูงกว่า 200 องศาเซลเซียส ส่วนที่เป็นอนุภาควัสดุผสม Sn-10SiC มีการฟอร์มวิสเคอร์ดีบุก วิสเคอร์ดีบุกจะเติบโตจากวัสดุผสมและเชื่อมต่อกับอนุภาคดีบุกดังรูป 4.30 ซึ่งภาพถ่าย SEM สามารถยืนยัน สมมุติฐานในบทที่ 3 รูปที่ 3.4 ว่าเป็นจริง จะเห็นได้ว่าวิสเคอร์ดีบุกงอกออกมาจากวัสดุผสมบางส่วนและไปเชื่อมต่อเข้ากับอนุภาคขอ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



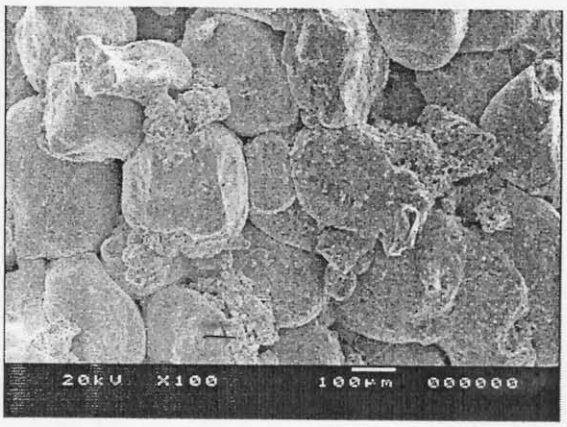
a)



b)



b)



d)

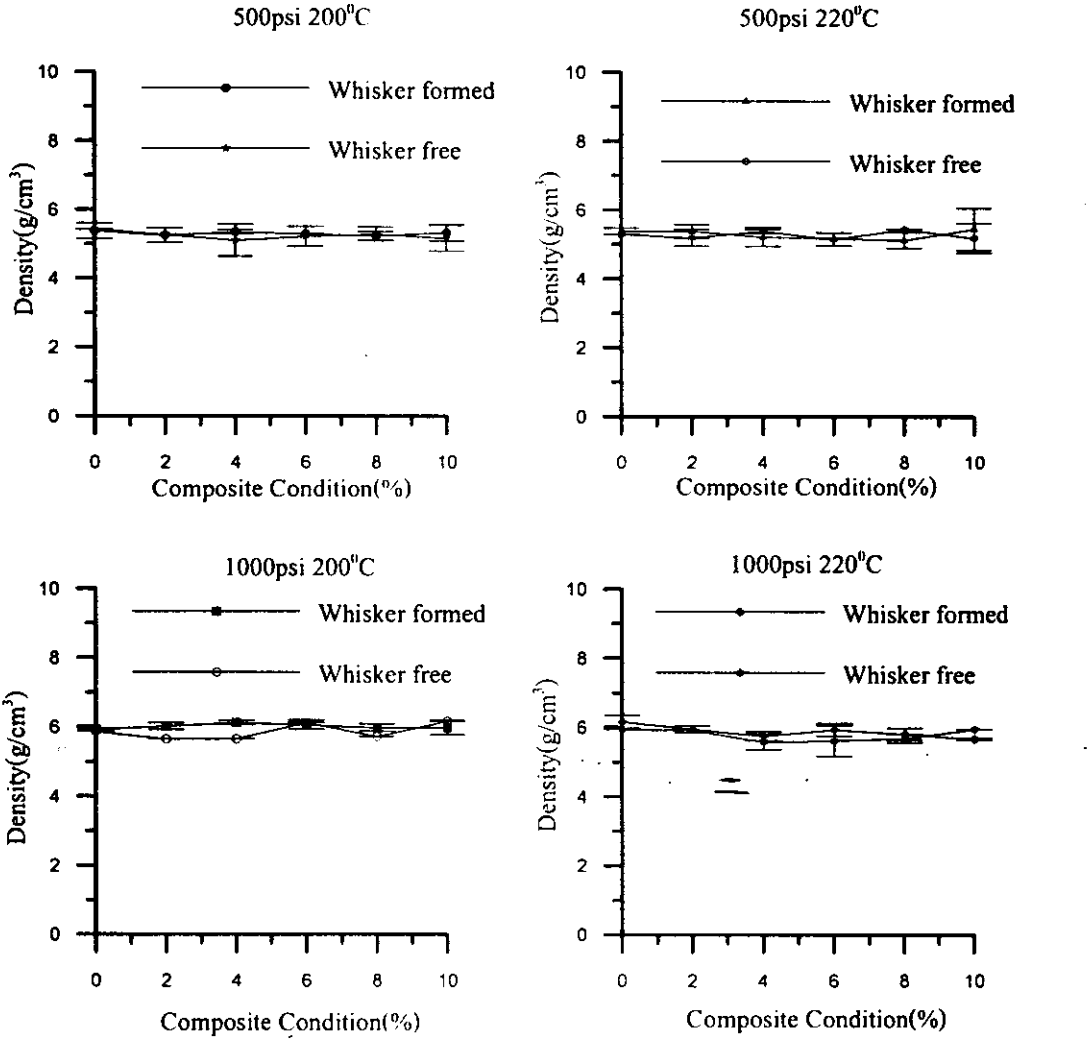
รูปที่ 4.30 ภาพถ่าย SEM ของชิ้นงานวัสดุผสม ที่พารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้

a) Sn+2%(Sn-10SiC) ที่ กำลังขยาย 200x ณ ความดัน 1500 psi อุณหภูมิอบผนึก 200 องศาเซลเซียส นาน 9 ชั่วโมง

b) Sn+10%(Sn-10SiC) ที่ กำลังขยาย 350x ณ ความดัน 1000 psi อุณหภูมิอบผนึก 200 องศาเซลเซียส นาน 9 ชั่วโมง

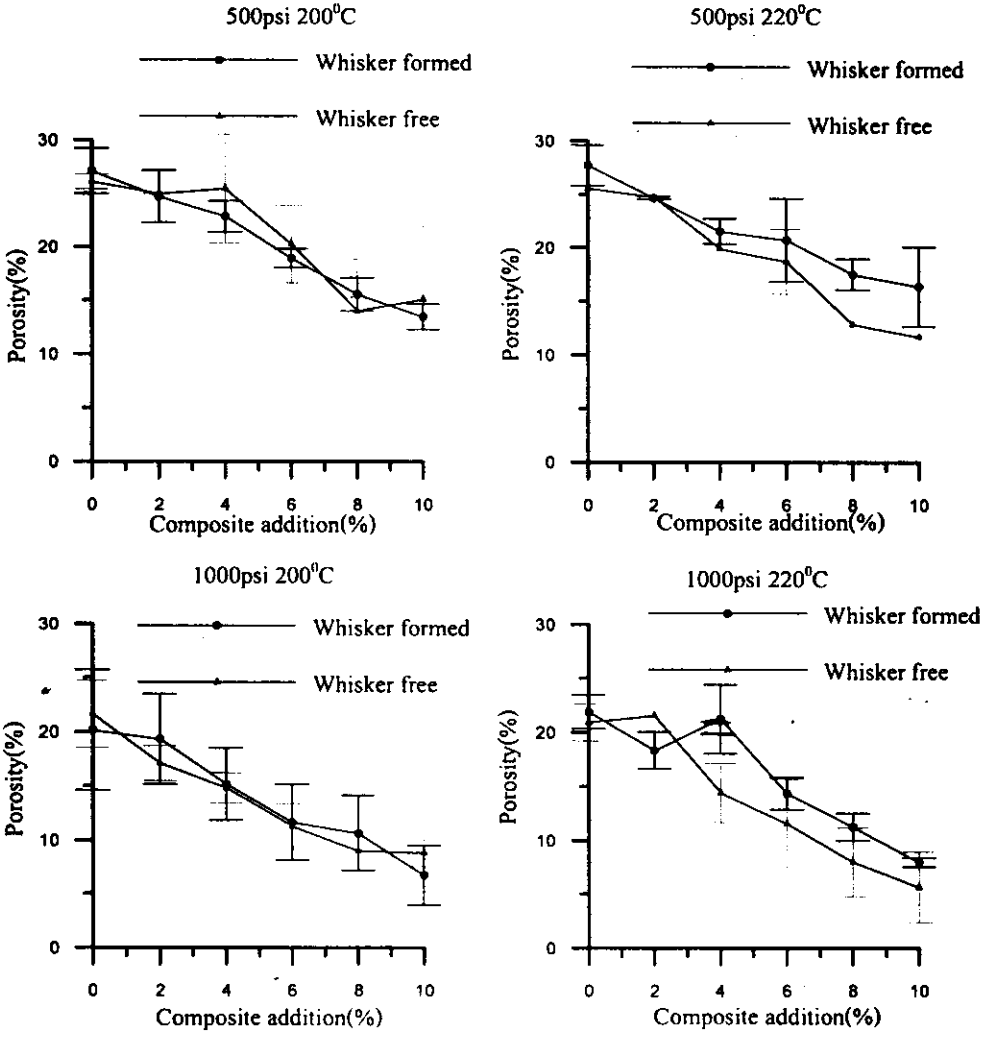
c) Sn+10%(Sn-10SiC) ที่ กำลังขยาย 350x ณ ความดัน 500 psi อุณหภูมิอบผนึก 220 องศาเซลเซียส นาน 9 ชั่วโมง

d) Sn+8%(Sn-10SiC) ที่ กำลังขยาย 100x ณ ความดัน 500 psi อุณหภูมิอบผนึก 200 องศาเซลเซียส นาน 9 ชั่วโมง



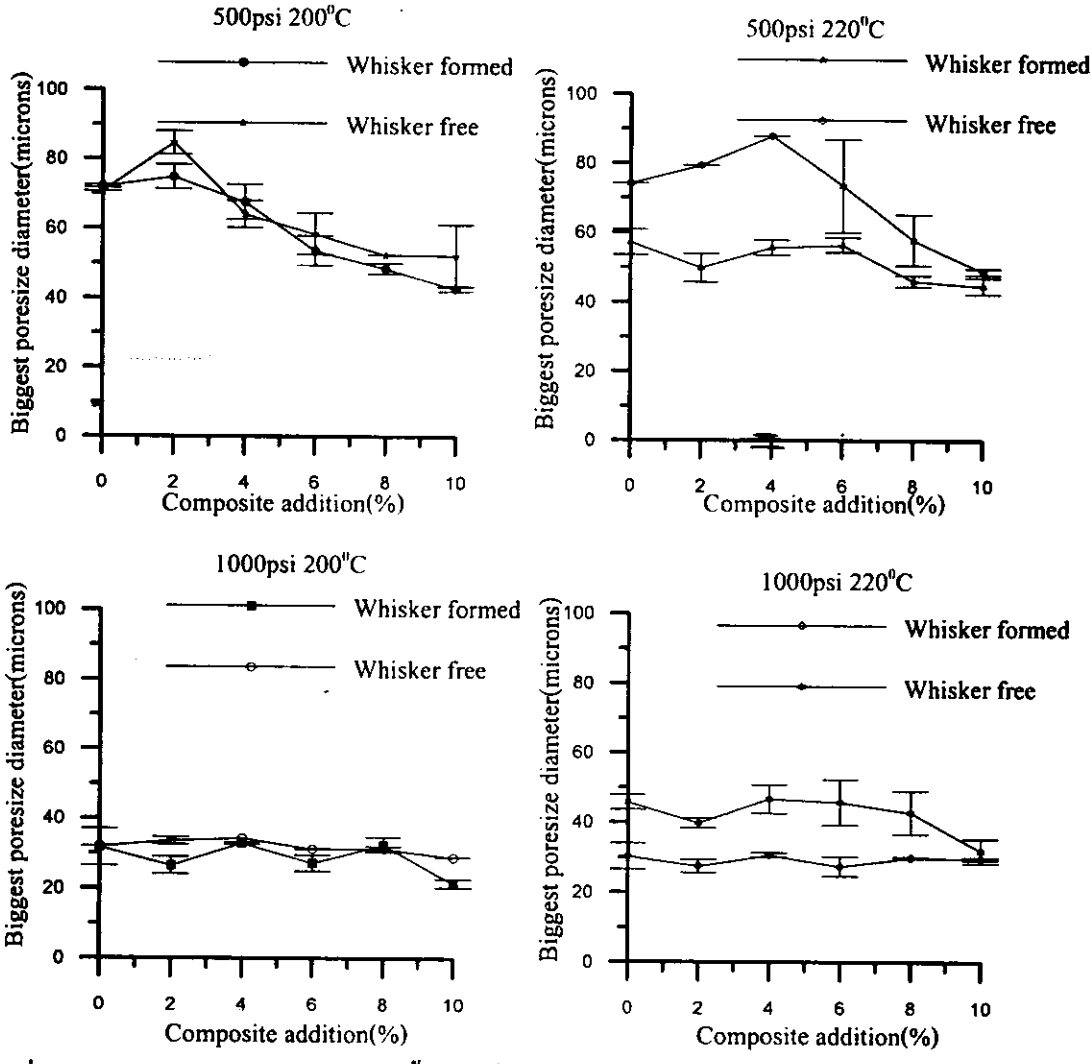
รูปที่ 4.31 กราฟความหนาแน่นของชิ้นงาน ที่อุณหภูมิและความดันต่างๆ เปรียบเทียบกันระหว่างชิ้นงานที่มีการฟอร์มตัวของวิสเคอร์ดีบุกกับชิ้นงานที่ไม่มีเส้นใยดีบุกเกิดขึ้น ที่ความดันอัดขึ้นรูปและอุณหภูมิอบผนึกต่างๆ กัน นาน 9 ชั่วโมง

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



รูปที่ 4.32 ค่าร้อยละของความพรุนตัวของชิ้นงาน ที่อุณหภูมิและความดันต่างๆ เปรียบเทียบกันระหว่าง ชิ้นงานที่มีการฟอร์มตัวของวิสเคอร์ดีบุกกับชิ้นงานที่ไม่มีวิสเคอร์ดีบุกเกิดขึ้นที่ความดันอัดขึ้นรูป และอุณหภูมิอบผนึกต่างๆ กัน นาน 9 ชั่วโมง

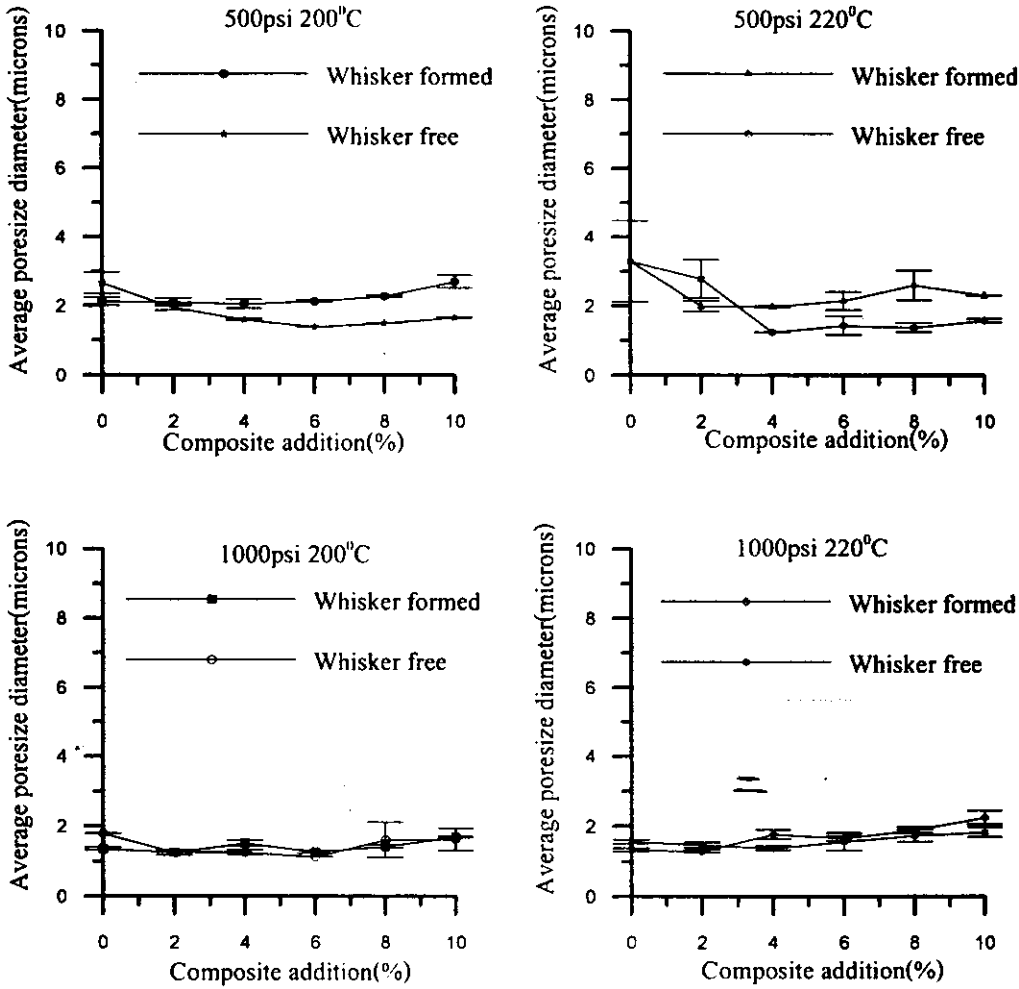
4.6.3 ขนาดรูพรุนโตสุด ขนาดของรูพรุนโตสุดที่ได้จากการคำนวณเมื่อนำมาเขียนกราฟดังรูปที่ 4.33 พบว่าขนาดรูพรุนโตสุดที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานได้รับอิทธิพลโดยตรงจากวิสเคอร์ดีบุกที่เกิดขึ้น จากกราฟแสดงให้เห็นว่าชิ้นงานที่มีวิสเคอร์ดีบุกเกิดขึ้นจะมีขนาดของรูพรุนเล็กลงเมื่อเทียบกับชิ้นงานที่ไม่มีวิสเคอร์ดีบุกทุกสัดส่วนของวัสดุผสม



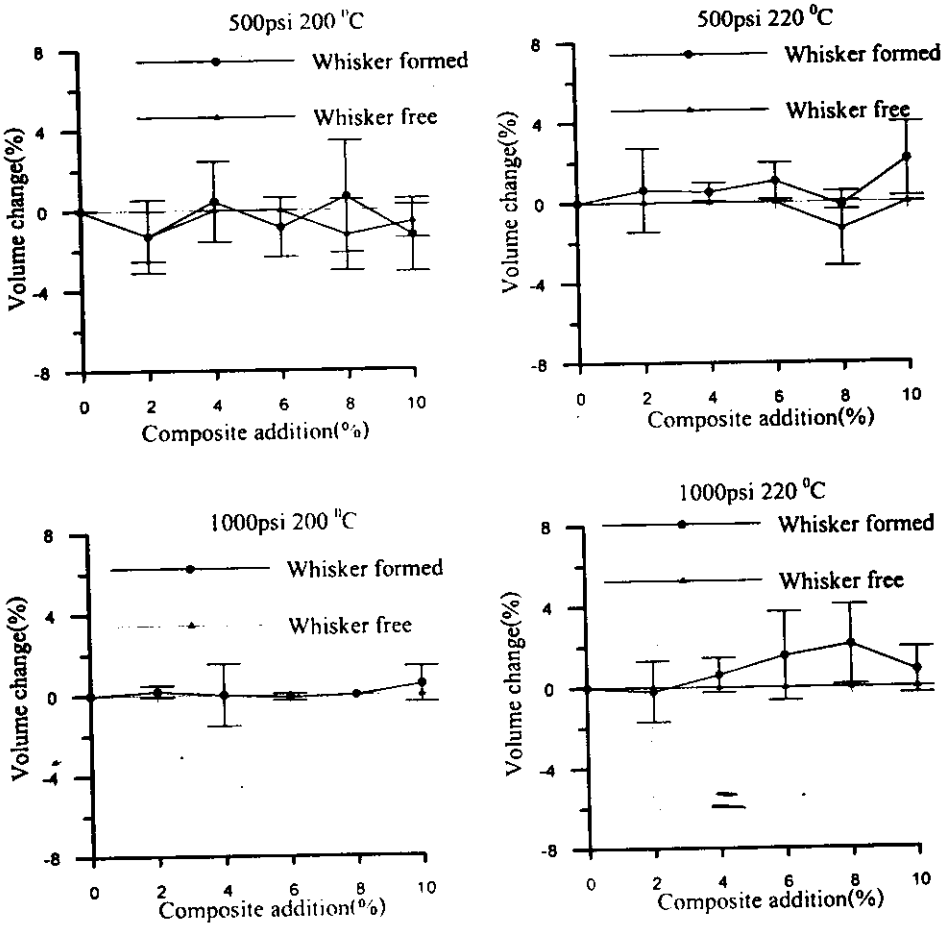
รูปที่ 4.33 **ขนาดรูพรุนโตสุดของชิ้นงานที่อุณหภูมิและความดันต่างๆ เปรียบเทียบกันระหว่างชิ้นงานที่มีการฟอร์มตัวของวิสเคอร์ดีบุกกับชิ้นงานที่ไม่มีวิสเคอร์ดีบุกเกิดขึ้นที่ความดันอัดขึ้นรูปและ อุณหภูมิอบผนึกต่างๆ กัน นาน 9 ชั่วโมง**

4.6.4 ขนาดรูพรุนเฉลี่ย ขนาดของรูพรุนเฉลี่ยที่ได้จากการคำนวณเมื่อนำมาเขียนกราฟดังรูปที่ 4.34 พบว่าขนาดรูพรุนเฉลี่ยที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานได้รับอิทธิพลโดยตรงจากวิสเดอร์ดีบุกที่เกิดขึ้น จะเห็นได้ว่าชิ้นงานที่มีการฟอร์มตัวของวิสเดอร์ดีบุก จะมีขนาดรูพรุนเฉลี่ยใหญ่กว่าชิ้นงานที่ไม่มีวิสเดอร์ดีบุกเกิดขึ้น ซึ่งอธิบายได้น่าจะมีสาเหตุจากการที่กลุ่มของวิสเดอร์ดีบุกที่เริ่มฟอร์มตัวพยามดันอนุภาคที่อยู่ใกล้เคียง เนื่องจากต้องการพื้นที่ว่างในการเติบโต ซึ่งขั้นตอนนี้เกิดระหว่างที่การอบผนึกเริ่มต้น ดังนั้นแรงที่เกิดจากการเติบโตของเส้นใยจึงน่าจะเพียงพอที่จะดันอนุภาคข้างเคียงซึ่งพร้อมเคลื่อนที่เนื่องจากอิทธิพลการอบผนึกอยู่แล้ว ซึ่งสอดคล้องกับปริมาตรหลังอบผนึกของชิ้นงานที่เพิ่มขึ้นดังรูปที่ 4.35 จะเห็นได้ว่าที่อุณหภูมิอบผนึก 220 องศาเซลเซียส ชิ้นงานที่มีการฟอร์มตัวของวิสเดอร์ดีบุกจะมีปริมาตรหลังอบผนึกเพิ่มขึ้น ขณะที่ชิ้นงานที่ไม่มีเส้นใยดีบุกเกิดขึ้นมีปริมาตรหลังอบผนึกค่อนข้างคงที่ ยกเว้นชิ้นงานที่ความดันอัดขึ้นรูป 500 psi อุณหภูมิอบผนึก 200 องศาเซลเซียส มีค่าค่อนข้างแกว่งและชิ้นงานบางส่วนมีการหดตัวเนื่องจาก ที่ความดันอัดขึ้นรูป 500 psi มีความแน่นตัวต่ำ ภายในชิ้นงานที่ผลิตได้จึงมีโอกาสที่จะมีพื้นที่ว่างพอสำหรับการเกิดวิสเดอร์ดีบุก

นอกจากนี้จากกราฟในรูปที่ 4.34 ที่ความดันอัดขึ้นรูป 1000 psi จะเห็นได้ว่า ชิ้นงานที่มีกับไม่มีวิสเดอร์ดีบุกเกิดขึ้น มีขนาดรูพรุนเฉลี่ยไม่แตกต่างกันมากนักเนื่องจากอิทธิพลของความดันมีเหนืออิทธิพลของวิสเดอร์ที่เกิดขึ้น

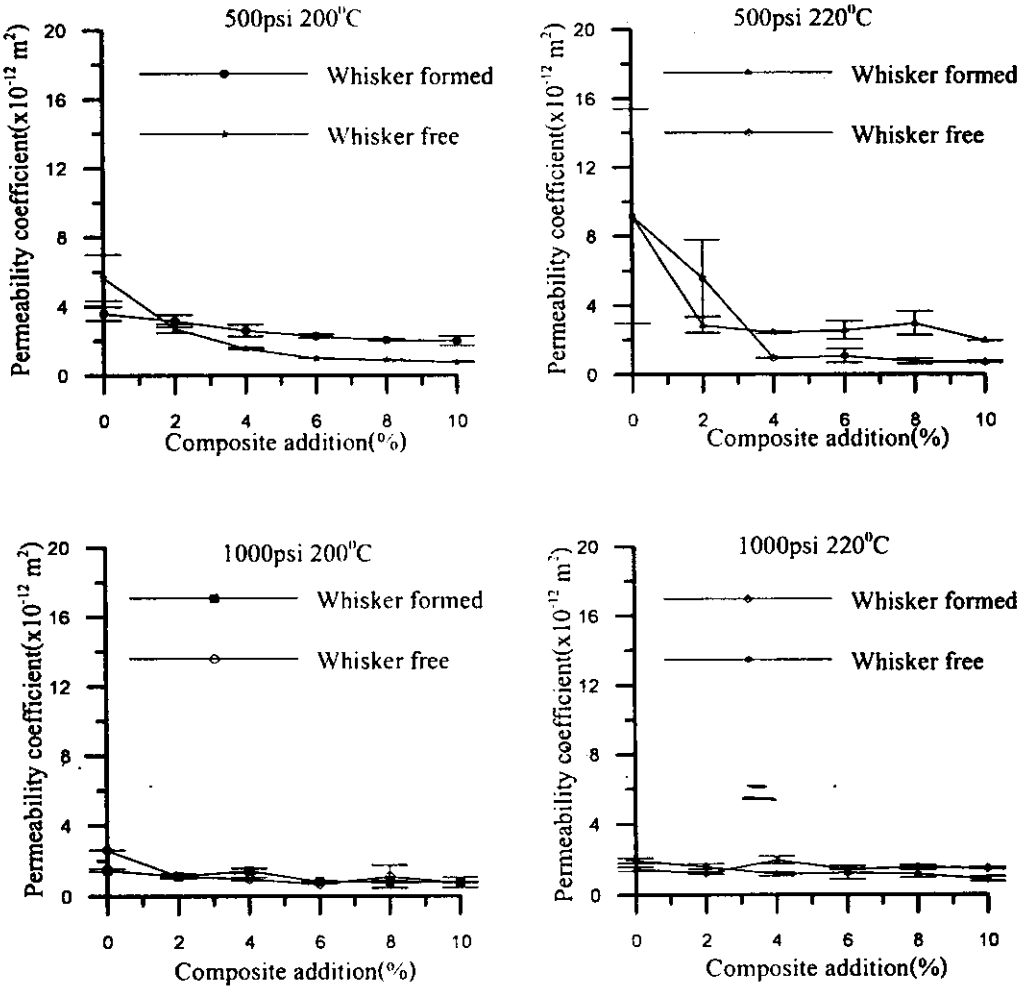


รูปที่ 4.34 ขนาดรูพรุนเฉลี่ยของชิ้นงาน เปรียบเทียบกันระหว่าง ชิ้นงานที่มีการฟอร์มตัวของวิสเคอร์ดีบุกกับชิ้นงานที่ไม่มีวิสเคอร์ดีบุกเกิดขึ้นที่ความดันอัดขึ้นรูปและ อุณหภูมิอบผนึกต่างๆ กัน นาน 9 ชั่วโมง



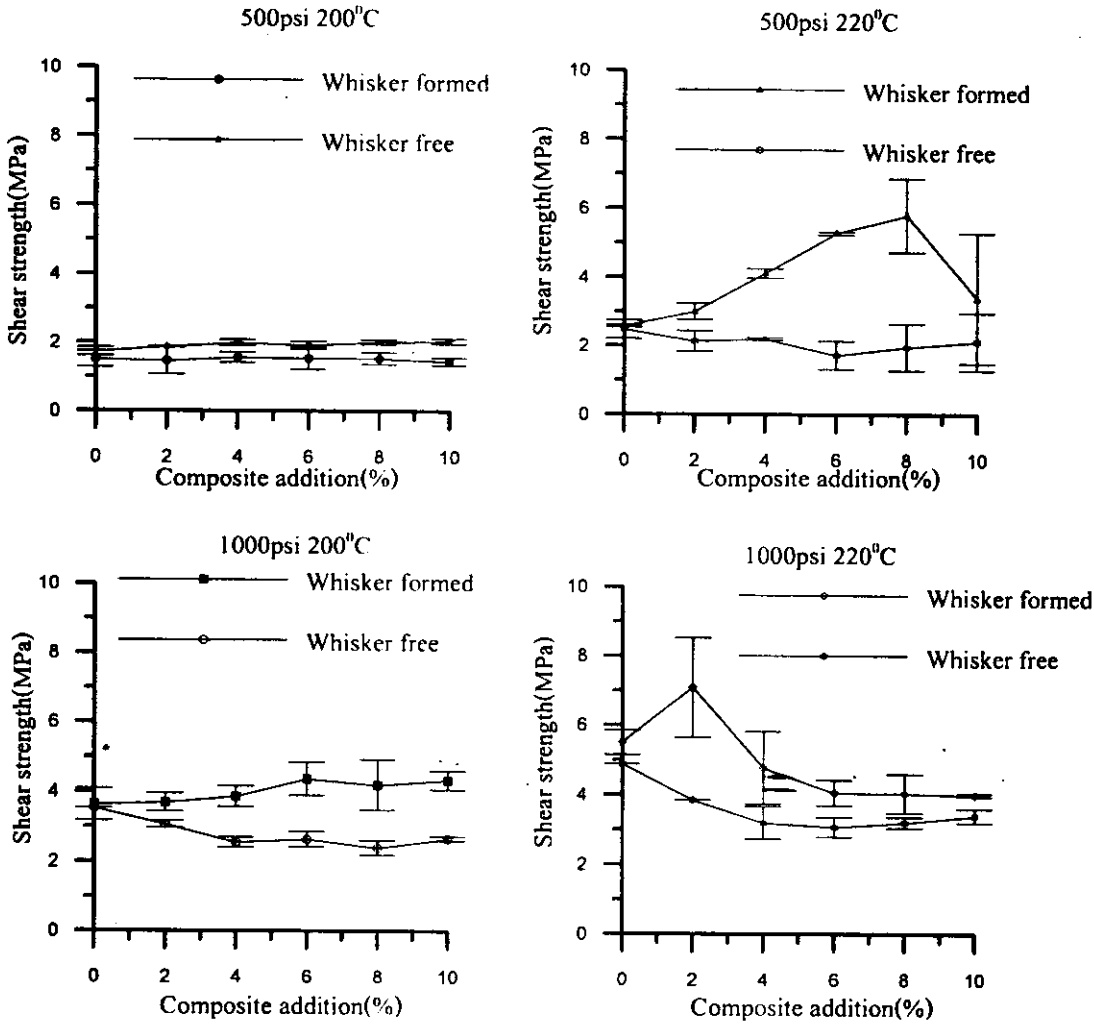
รูปที่ 4.35 การเปลี่ยนแปลงปริมาตรของชิ้นงานหลังอบผนึก เปรียบเทียบกันระหว่างชิ้นงานที่มีการฟอร์มตัวของวิสเคอร์ดีบุกกับชิ้นงานที่ไม่มีวิสเคอร์ดีบุกเกิดขึ้นที่ความดันอัดขึ้นรูปและ อุณหภูมิอบผนึกต่างๆ กัน นาน 9 ชั่วโมง

4.6.5 สัมประสิทธิ์การซึมผ่าน เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน มีความสัมพันธ์โดยตรงกับขนาดรูพรุนเฉลี่ย คือเมื่อขนาดรูพรุนเพิ่มย่อมส่งผลให้ความสามารถในการซึมผ่านของชิ้นงานสูงขึ้นตามไปด้วย ดังกราฟในรูปที่ 4.36 จะเห็นได้ว่าได้ว่าวิสเคอร์ดีบุกที่เกิดขึ้นเป็นปัจจัยที่มีผลต่อความ สามารถในการซึมผ่านของชิ้นงาน เนื่องจากเมื่อเทียบกับชิ้นงานที่ไม่มีวิสเคอร์ดีบุกแล้วชิ้นงานที่มีวิสเคอร์ดีบุกจะมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านสูงกว่า เช่นเดียวกับในกรณีของขนาดรูพรุนเฉลี่ย



รูปที่ 4.36 ความสามารถในการซึมผ่านของชิ้นงานขนาดรูพรุนโตสุดของชิ้นงานที่ เปรียบเทียบกันระหว่างชิ้นงานที่มีการฟอร์มตัวของวิสเคอร์ดีบุกกับชิ้นงานที่ไม่มีวิสเคอร์ดีบุกเกิดขึ้นที่ความดันอัดขึ้นรูปและ อุณหภูมิอบผนึกต่างๆ กัน นาน 9 ชั่วโมง

4.6.6 ความแข็งแรงเฉือน นำผลการทดสอบความแข็งแรงของชิ้นงานมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงเฉือนกับปริมาณวัสดุผสมที่เติมในชิ้นงาน เปรียบเทียบระหว่างชิ้นงานที่มีวิสเคอร์ดีบุกเกิดขึ้นกับชิ้นงานที่ไม่มีวิสเคอร์ดีบุกเกิดขึ้น ดังรูปที่ 4.37 จะเห็นได้ว่าชิ้นงานที่มีวิสเคอร์ดีบุกเกิดขึ้นมีความแข็งแรงสูงกว่าชิ้นงานที่ไม่มีการฟอร์มตัวของวิสเคอร์ดีบุก ซึ่งแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่า วิสเคอร์ดีบุกเกิดขึ้นในชิ้นงานมีอิทธิพลต่อความแข็งแรงของชิ้นงาน เนื่องจากวิสเคอร์ดีบุกที่เกิดขึ้นจะทำหน้าที่เป็นพันธะเชื่อมต่อระหว่างอนุภาคของดีบุกที่อยู่ใกล้กัน



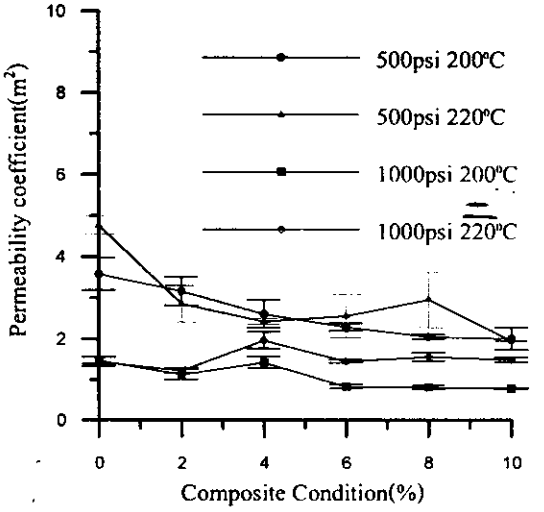
รูปที่ 4.37 **ความแข็งแรงเฉือนของชิ้นงานที่ใช้ผงวัสดุผสมที่มีวิสเคอร์ดีบุกเกิดขึ้นเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ไม่เกิดวิสเคอร์ดีบุกที่อุณหภูมิอบผนึก 200 องศาเซลเซียส ที่ 500 psi นาน 9 ชั่วโมง**

4.7 ภาพรวมของอิทธิพลต่างๆต่อสมบัติของวัสดุ

การทดลองทำให้ทราบว่า ความดันที่ให้แก่ชิ้นงานมีอิทธิพลอย่างมากต่อสมบัติของวัสดุพรุน เมื่อชิ้นงานได้รับความดันทำให้อนุภาคเรียงตัวกันชิดกันมากขึ้น ส่งผลให้ผิวสัมผัสของชิ้นงานมากขึ้นด้วย เมื่อทำการอบผนึกชิ้นงานก็จะมีการแพร่ที่ผิวได้ง่ายขึ้นเมื่อให้ความดันสูงขึ้น นอกจากนี้ปริมาณวัสดุผสมที่เติม วิสเคอร์ที่เกิดขึ้นและอุณหภูมิอบผนึกเป็นปัจจัยรองลงมา

มีปัจจัยที่มีผลโดยตรงต่อค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของอากาศ เมื่อนำผลการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของอากาศ มาเขียนกราฟเป็นภาพรวมดังรูปที่ 4.38 จะเห็นได้ว่า ความดันที่ใช้ขึ้นรูปเป็นปัจจัยที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของอากาศมากที่สุด เนื่องจากการอัดขึ้นรูปชิ้นงานด้วยความดันส่งผลให้มีการจัดเรียงตัวใหม่ของอนุภาค อนุภาคของวัสดุผสมจะไปเติมบริเวณของรูพรุนขนาดใหญ่ก่อน ทำให้อนุภาคมีพื้นที่ผิวสัมผัสกันมากขึ้น ขนาดรูพรุนเล็กลงทำให้ตัวกลางซึมผ่านได้น้อยลงเมื่อความดันอัดสูงขึ้น

ปัจจัยรองลงมาคือปริมาณวัสดุผสมที่เติมและวิสเคอร์ที่เกิดขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณวัสดุผสมค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของอากาศลดลง เนื่องจากอนุภาคของวัสดุผสมเข้าแทรกตรงตำแหน่งช่องว่าง (void) ทำให้พื้นที่ของช่องว่างลดลง ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของอากาศจึงลดลง

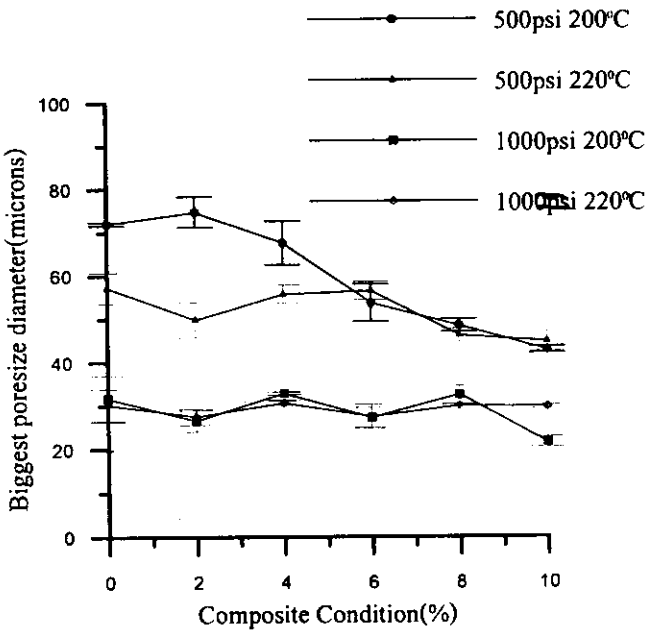


รูปที่ 4.38 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของชิ้นงานที่ใช้ผงวัสดุผสมที่มีวิสเคอร์ดีบุกเกิดขึ้นที่อุณหภูมิอบผนึก 200 องศาเซลเซียสและ 220 องศาเซลเซียส ที่ความดัน 500 และ 1000 psi นาน 9 ชั่วโมง

ปัจจัยที่มีผลโดยตรงต่อขนาดรูพรุนโตสุดของชิ้นงาน เมื่อนำผลการคำนวณขนาดรูพรุนโตสุดมาเขียนกราฟเป็นภาพรวมดังรูปที่ 4.39 จะเห็นได้ว่าความดันที่ใช้ขึ้นรูป เป็นปัจจัยที่มีผลต่อขนาดรูพรุนโตสุดของชิ้นงานมากที่สุด เนื่องจากการอัดขึ้นรูปชิ้นงานด้วยความดันส่งผลให้มีการจัดเรียงตัวใหม่ของอนุภาค ระยะห่างระหว่างอนุภาคดีบุกมีน้อยลง ส่งผลให้ขนาดรูพรุนโตสุดของชิ้นงานลดลง

ปัจจัยรองลงมาคือปริมาณวัสดุผสมที่เติมและวิสเดอร์ที่เกิดขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณวัสดุผสม ขนาดรูพรุนโตสุดของชิ้นงานลดลง เนื่องจากอนุภาคของวัสดุผสมเข้าแทรกตรงตำแหน่งช่องว่าง (void) ทำให้พื้นที่ของช่องว่างลดลง ดังนั้นขนาดรูพรุนโตสุดของชิ้นงานจึงลดลง

ปัจจัยอีกประการที่มีผลต่อชิ้นงานแต่ถูกบดบังด้วย อิทธิพลของความดันอัดขึ้นรูปและปริมาณวัสดุผสมที่เติมคืออิทธิพลของอุณหภูมิ จะเห็นได้ว่าที่ความดันอัดขึ้นรูป 500 psi เมื่อปริมาณผงวัสดุผสมน้อยกว่าร้อยละ 6 อุณหภูมิอบผนึกจะมีอิทธิพลต่อขนาดรูพรุนโตสุดอย่างชัดเจนอุณหภูมิอบผนึกสูงขึ้นทำให้ขนาดรูพรุนโตสุดลดลง เนื่องจากเมื่อเริ่มขั้นตอนแรกของการอบผนึก อุณหภูมิอบผนึกที่สูงกว่าจะทำ ให้เกิดคอคอดที่ผิวสัมผัสของอนุภาคมีการเพิ่มขนาดขึ้นเร็วกว่าขนาดของรูพรุนจึงเล็กลง



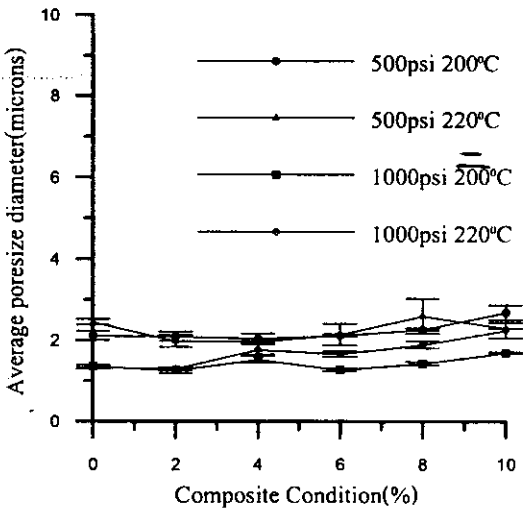
รูปที่ 4.39 เปรียบเทียบค่ารูพรุนโตสุดของชิ้นงานที่ใช้ผงวัสดุผสมที่มีเส้นใยดีบุกเกิดขึ้นที่อุณหภูมิอบผนึก 200 องศาเซลเซียสและ 220 องศาเซลเซียส ที่ความดัน 500 และ 1000 psi นาน 9 ชั่วโมง

ปัจจัยที่มีผลโดยตรงต่อขนาดรูพรุนเฉลี่ยของชิ้นงาน เมื่อนำผลการคำนวณขนาดรูพรุนเฉลี่ยมาเขียนกราฟเป็นภาพรวมดังรูปที่ 4.40 จะเห็นได้ว่าความดันที่ใช้ขึ้นรูปเป็นปัจจัยที่มีผลต่อขนาดรูพรุนเฉลี่ยของชิ้นงานมากที่สุด ซึ่งเกี่ยวเนื่องกับค่าร้อยละของความพรุนตัว(รูปที่ 4.18) และขนาดรูพรุนโตสุด (รูปที่ 4.39) จะเห็นได้ว่าเมื่อให้ความดันในการอัดขึ้นรูปชิ้นงานเพิ่มสูงขึ้น ร้อยละของความพรุนตัวและขนาดรูพรุนโตสุดจะลดลง ซึ่งจากสมการ 2.6 ที่ใช้ในการคำนวณเพื่อหา

ขนาดรูพรุนเฉลี่ย ขนาดรูพรุนเฉลี่ยจะแปรผกผันกับร้อยละของความพรุนตัวและแปรผันตรง กับค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของอากาศ ซึ่งจะได้ขนาดรูพรุนเฉลี่ยมีแนวโน้มไปในทางเดียวกันกับขนาดรูพรุนโตสุด

ปัจจัยรองลงมาคืออิทธิพลของอุณหภูมิอบผนึก จากกราฟ 4.40 จะเห็นได้ว่าชิ้นงานที่ความดันอัดขึ้นรูป 500 psi เมื่อให้อุณหภูมิอบผนึกที่ 220 องศาเซลเซียส กราฟมีแนวโน้มของขนาดรุพรุนเฉลี่ยเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากเกิดปรากฏการณ์ออสท์วาลด์ (Oswald ripening)

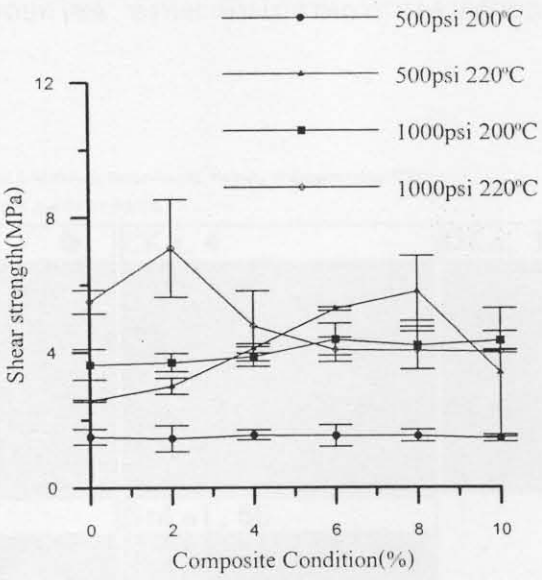
เมื่อเขียนกราฟภาพรวมความแข็งแรงของชิ้นงานดังรูปที่ 4.41 จะเห็นได้ว่าได้รับอิทธิพลโดยตรงจากความดันที่ใช้อัดขึ้นรูปโดยสัมพันธ์อยู่กับอิทธิพลของอุณหภูมิอบผนึก ชิ้นงานจะมีความแข็งแรงมากสุด เมื่ออัดขึ้นรูปด้วยความดัน 1000 psi และให้อุณหภูมิอบผนึกที่ 220 องศาเซลเซียส ซึ่งยังขึ้นอยู่กับปริมาณวัสดุที่เติมในชิ้นงานด้วย



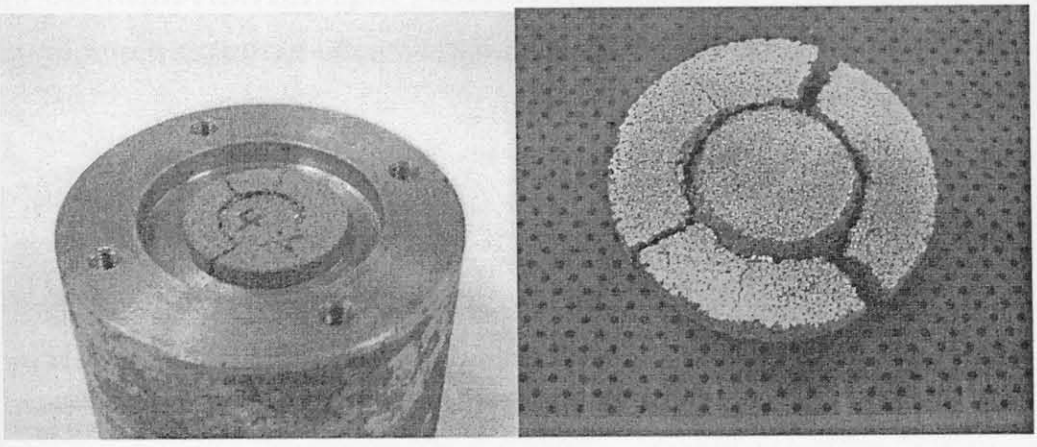
รูปที่ 4.40 เปรียบเทียบค่ารูพรุนเฉลี่ยของชิ้นงานที่ใช้ผงวัสดุผสมที่มีเส้นใยดีบุกเกิดขึ้นที่อุณหภูมิอบผนึก 200 องศาเซลเซียสและ 220 องศาเซลเซียส ที่ความดัน 500 และ 1000 psi นาน 9 ชั่วโมง

นอกจากนี้ ความดันยังมีอิทธิพลต่ออัตราการหดตัวเหนือกว่าอิทธิพลจากอุณหภูมิอบผนึก เนื่องจากการให้ความดันแก่ชิ้นงานก่อนอบผนึก ทำให้อนุภาคเรียงตัวชิดกันมากจนอิทธิพลของอุณหภูมิไม่สามารถทำให้ชิ้นงานหดตัวได้อีกทำให้ขนาดของชิ้นงานหลังอบผนึกไม่แตกต่างจากขนาดของชิ้นงานหลังอบผนึก

กล่าวโดยสรุปได้ว่าทุกปัจจัย มีอิทธิพลต่อสมบัติของชิ้นงานในลักษณะที่สัมพันธ์กันแต่ความดันที่ใช้อัดขึ้นรูปเป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อสมบัติของชิ้นงานวัสดุผสมดีบุกพรุน



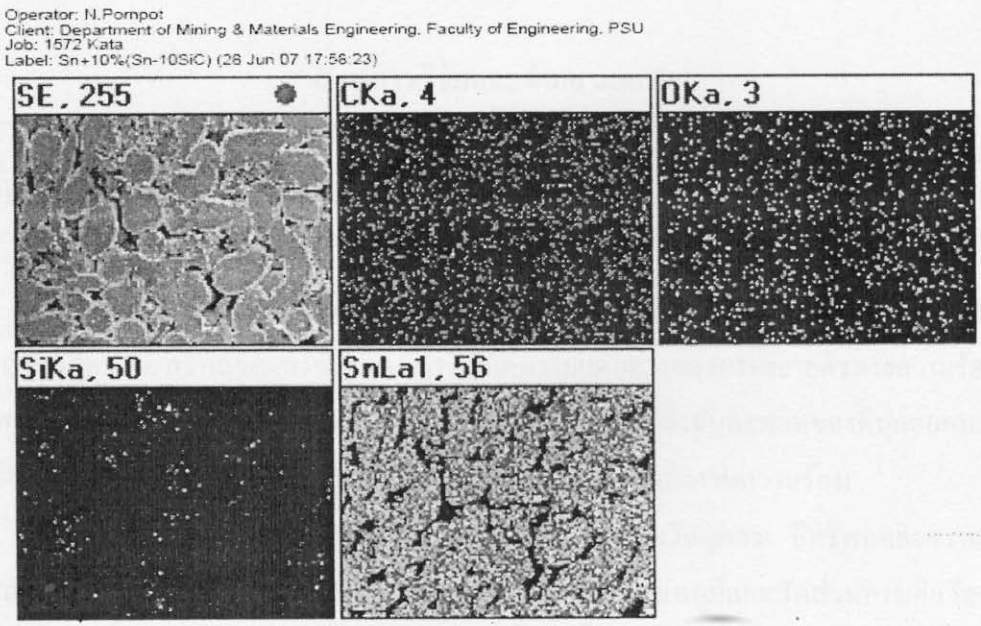
รูปที่ 4.41 เปรียบเทียบค่าความแข็งแรงเฉือนของชิ้นงานที่ใช้ผงวัสดุผสมที่มีวิสเคอร์ดีบุกเกิดขึ้นที่อุณหภูมิอบผนึก 200 องศาเซลเซียสและ 220 องศาเซลเซียส ที่ความดัน 500 และ 1000 psi นาน 9 ชั่วโมง



รูปที่ 4.42 ลักษณะชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบแรงเฉือน

ค่าความแข็งแรงของชิ้นงานวัสดุผสมพรุนที่ผลิตได้ค่อนข้างต่ำ เมื่อเทียบกับมาตรฐานของชิ้นงานบรอนซ์พรุน ด้วยเหตุผลประการแรกคือ ดีบุกเป็นโลหะที่มีค่าความแข็งต่ำ อีกประการซึ่งจะแห็นได้จากภาพถ่าย SEM รูปที่ 4.23 การเกิดคอคอดระหว่างอนุภาคของดีบุกไม่สมบูรณ์นัก

เนื่องจากอุปสรรคของชั้นออกไซด์ ดังที่จะเห็นในภาพการกระจายตัวของธาตุ ด้วยเทคนิค x-ray mapping รูปที่ 4.43



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