การฉีดขึ้นรูปผงอะลูมินาและวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์

นายจุฑาเทพ สุรวัฒนา

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีเซรามิก ภาควิชาวัสดุศาสตร์
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2554
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย
The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

POWDER INJECTION MOULDING OF ALUMINA AND
ALUMINA/TUNGSTEN CARBIDE COMPOSITES

Mr. Juthathep Surawatthana

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science in Ceramic Technology

Department of Materials Science
Faculty of Science
Chulalongkorn University

Academic Year 2011

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การฉีดขึ้นรูปผงอะลูมินาและวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์
โดย	นายจุฑาเทพ สุรวัฒนา
สาขาวิชา	เทคโนโลยีเซรามิก
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	อาจารย์ ดร.วันทนีย์ พุกกะคุปต์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	อาจารย์ ดร.ณัฏฐิตา ชวนเกริกกุล

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ หารหนองบัว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุพัตรา จินาวัฒน์)

.... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(อาจารย์ ดร.วันทนีย์ พุกกะคุปต์)

.... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(อาจารย์ ดร.ณัฏฐิตา ชวนเกริกกุล)

.... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนากร วาสนาเพียรพงศ์)

.... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.เรืองเดช ธงศรี)

จุฑาเทพ สุรวัฒนา : การฉีดขึ้นรูปผงอะลูมินาและวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์ (POWDER INJECTION MOULDING OF ALUMINA AND ALUMINA/TUNGSTEN CARBIDE COMPOSITES) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : อ.ดร.วันทนีย์ พุกกะคุปต์, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม : อ.ดร.ณัฏฐิตา ชวนเกริกกุล, 85 หน้า.

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษากระบวนการฉีดขึ้นรูปผงอะลูมินาและวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์ โดยใช้ตัวประสานร่วมระหว่างพอลิเอทิลีนไกลคอลและพอลิไวนิลบิวทิรอล วัตถุดิบตั้งต้นได้แก่ ผงอะลูมินาและผงทังสเตนคาร์ไบด์ วัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์ประกอบด้วยอะลูมินาต่อทังสเตนคาร์ไบด์ในอัตราส่วน 90:10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตัวประสานประกอบด้วยพอลิเอทิลีนไกลคอลและพอลิไวนิลบิวทิรอล อัตราส่วนระหว่างพอลิเอทิลีนไกลคอลต่อพอลิไวนิลบิวทิรอลได้แก่ 80:20 85:15 และ 90:10 โดยน้ำหนักและใช้กรดสเตียริคเป็นสารเติมแต่ง ผสมผงวัสดุและตัวประสานดังกล่าวให้เข้ากันโดยใช้ปริมาณผงวัสดุตั้งแต่ 44 ถึง 52 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร อุณหภูมิการฉีดอยู่ในช่วง 190 - 210 องศาเซลเซียส ขึ้นกับส่วนผสมของวัสดุ ศึกษาการกำจัดตัวประสานชนิดพอลิเอทิลีนไกลคอลทำโดยการแช่น้ำที่อุณหภูมิ 30 45 และ 60 องศาเซลเซียสและตามด้วยการกำจัดตัวประสานชนิดพอลิไวนิลบิวทิรอล โดยการให้ความร้อนที่ 400 องศาเซลเซียส จากนั้นนำชิ้นงานไปเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมงในบรรยากาศอาร์กอน วิเคราะห์และตรวจสอบลักษณะสมบัติของชิ้นงานหลังการฉีดขึ้นรูป ชิ้นงานหลังการกำจัดตัวประสานด้วยน้ำและชิ้นงานหลังการเผาผนึก ได้แก่ ความหนาแน่น รูพรุนปรากฏ ความต้านทานการดัดโค้ง ความแข็ง และโครงสร้างจุลภาค ผลการศึกษาพบว่าการใช้ตัวประสานร่วมคงรูปร่างชิ้นงานได้ อัตราการละลายของตัวประสานชนิดพอลิเอทิลีนไกลคอลขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของน้ำและสามารถกำจัดตัวประสานได้มากกว่า 95 เปอร์เซ็นต์ภายในระยะเวลา 5 ชั่วโมง ส่วนตัวประสานชนิดพอลิไวนิลบิวทิรอล ที่คงเหลือยังช่วยให้ชิ้นงานคงรูปร่างอยู่ได้ หลังเผาผนึกพบว่าทั้งความต้านทานการดัดโค้ง ความแข็ง และความหนาแน่นเกี่ยวข้องโดยตรงกับปริมาณของผงวัสดุ งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าการฉีดขึ้นรูปผงอะลูมินาและวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์โดยใช้ตัวประสานร่วมที่ละลายน้ำได้สามารถทำได้และนำไปประยุกต์กับอุตสาหกรรมได้

ภาควิชา วัสดุศาสตร์	ลายมือชื่อนิสิต
สาขาวิชา เทคโนโลยีเซรามิก	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
ปีการศึกษา 2554	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

5272258023 : MAJOR CERAMIC TECHNOLOGY

KEYWORDS : POWDER INJECTION MOULDING , ALUMINA, ALUMINA - TUNGSTEN CARBIDE, PEG/PVB BINDER

JUTHATHEP SURAWATTHANA : POWDER INJECTION MOULDING OF ALUMINA AND ALUMINA/TUNGSTEN CARBIDE COMPOSITES. ADVISOR : WANTANEE BUGGAKUPTA, Ph. D., CO-ADVISOR : NUTTHITA CHUANKRERKKUL, Ph. D., 85 pp.

This study focuses on alumina and alumina/tungsten carbide composites fabricated by powder injection moulding using a PEG/PVB co-binder. The starting powders are alumina and alumina/tungsten carbide. The alumina/tungsten carbide composites with the ratio of Al_2O_3 to WC of 90:10 wt%, were also prepared. The binder, consists of polyethylene glycol (PEG) and polyvinyl butyral (PVB). The ratios of PEG:PVB were ranged from 80:20, 85:15 and 90:10 wt% whereas stearic acid (SA) was used as an additive. Both powders and binders were mixed thoroughly and the powder loadings were varied from 44 to 52 vol%. The injection moulded temperatures were ranged from 190 to 210 ºC, depending on the feedstock makeup. Double debinding steps were carried out using water leaching at 30, 45 and 60 ºC to remove PEG and thermal debinding at 400 ºC for PVB removal. Then, the specimens were sintered at 1600 ºC for 2 hours in argon. Characteristics of the as-injected, the as-leached and the as-sintered including density, apparent porosity, flexural strength, hardness as well as microstructure were determined. The results revealed that these co-binders offered dimensional stability. PEG removal depended on water temperatures and more than 95% of PEG binder could be easily removed within 5 hours. A small amount of the remained PVB could sustain the shapes. Flexural strength, hardness and density after sintering of both alumina and alumina/tungsten carbide directly involved with powder loadings. The present work suggested that alumina and alumina/tungsten carbide particulate composites can be fabricated by powder injection moulding using a water soluble co-binder. This technique is possible to be applied in industrial practice.

Department : Materials Science	Student's Signature ....
Field of Study : Ceramic Technology	Advisor's Signature ....
Academic Year : 2011	Co-advisor's Signature ....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยดี ต้องขอขอบคุณความช่วยเหลือทั้งในด้านวิชาการและการดำเนินงานวิจัย จากบุคคลและหน่วยงานต่างๆ ดังนี้

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ อาจารย์ ดร.วันทนีย์ พุกกะคุปต์ และอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม อาจารย์ ดร. ณัฏฐิตา ชวนเกริกกุล ที่ให้ความรู้ ความช่วยเหลือ และช่วยชี้แนะแนวทางในการแก้ปัญหาในการทำงานวิจัยและการดำเนินชีวิต

คณาจารย์และเจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทุกท่านที่ให้ความรู้และคำชี้แนะ ตลอดจนอำนวยความสะดวกในด้านต่างๆ

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่านสำหรับคำแนะนำ และการตรวจแก้ไขรูปเล่มวิทยานิพนธ์ จนทำให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้มีความสมบูรณ์มากขึ้น

ขอขอบคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธนากร วาสนาเพียรพงศ์ ที่เอื้อเฟื้อให้ใช้งานเตาแกรไฟต์ที่ควบคุมบรรยากาศอาร์กอน พร้อมทั้งให้ความรู้และคำชี้แนะในการใช้เครื่องมือต่างๆ

ขอขอบคุณศูนย์ความเป็นเลิศด้านปิโตรเคมีและเทคโนโลยีวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ศูนย์นวัตกรรมนาโนเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และโครงการส่งเสริมนวัตกรรมทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ภายใต้แผนพัฒนาวิชาการจุฬา 100 ปี รวมไปถึงสำนักงานกองทุนสนับสนุนงานวิจัย (สกว.) โครงการที่ MRG5408121 ที่ให้งบประมาณและเงินทุนในการทำวิจัยและการนำเสนอผลงานวิจัย

ขอขอบคุณคุณธนากร เทพามาตย์ เจ้าหน้าที่ประจำเครื่องมือ SEM จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ช่วยอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือวิเคราะห์ผลการทดลอง

ขอขอบคุณพี่ๆ น้องๆ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่เป็นกำลังใจและให้ความช่วยเหลือมาโดยตลอด

ขอขอบคุณครอบครัว ที่คอยอบรมสั่งสอน ให้การสนับสนุนและคอยเป็นกำลังใจ อีกทั้งมอบโอกาสและประสบการณ์ที่มีคุณค่าให้โดยเสมอมา จนกระทั่งงานวิจัยนี้สำเร็จลงได้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ...จ
กิตติกรรมประกาศ ....ฉ
สารบัญ ....ช
สารบัญตาราง .... ฏ
สารบัญภาพ.. ฏ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ ....ฒ
บทที่ 1 บทนำ..1
    1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1
    1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย 2
    1.3 ขอบเขตของการวิจัย..3
    1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง...4
    2.1 วัสดุเชิงประกอบ 4
    2.2 กระบวนการฉีดขึ้นรูปผง...7
2.3 การพัฒนาตัวประสานที่ละลายน้ำได้.. 18
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย..23
    3.1 วัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้ในการวิจัย...23
    3.2 การเตรียมผงตัวอย่าง 24
        3.2.1 สัณฐานวิทยา..24
        3.2.2 การกระจายตัวของอนุภาคของผงวัตถุดิบ 24

หน้า

3.3 ระเบียบวิธีทดลอง 24
3.3.1 การออกแบบการทดลอง.......... 24
3.3.2 การเตรียมตัวอย่าง.......... 25
3.2.2.1 ตัวประสานและผงวัสดุ 25
3.2.2.2 การเตรียมชิ้นงานวัสดุอะลูมินา.......... 26
3.2.2.3 ชิ้นงานผงวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์ 26
3.4 การวิเคราะห์สมบัติของตัวอย่าง 30
3.4.1 การกำจัดตัวประสานชนิด PEG.......... 30
3.4.2 ความต้านทานต่อการดัดโค้ง.......... 31
3.4.2.1 ชิ้นงานก่อนการเผาและชิ้นงานตัวอย่างหลังจากกำจัดตัวประสาน PEG 31
3.4.2.2 ชิ้นงานหลังจากการเผาผนึก 31
3.4.3 ความหนาแน่นของชิ้นงานหลังเผา 32
3.4.4 ความแข็ง 33
3.4.5 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน.......... 34
บทที่ 4 ผลการทดลองและการอภิปรายผล 35
4.1 ลักษณะเฉพาะของผงวัตถุดิบ 35
4.1.1 สัณฐานวิทยา.......... 35
4.1.2 การกระจายตัวของอนุภาค 36
4.1.3 ตรวจสอบการสลายด้วยความร้อนของตัวประสานชนิด PVB 39

หน้า

4.2 ผลการศึกษาการฉีดขึ้นรูปวัสดุอะลูมินา 40
4.2.1 อุณหภูมิและเวลาในการกำจัดตัวประสาน 40
4.2.2 ปริมาณผงวัสดุในส่วนผสมต่อลักษณะสมบัติของชิ้นงาน 41
4.2.2.1 ความต้านทานการดัดโค้ง 41
4.2.2.2 ความหนาแน่นและรูพรุนปรากฏ 42
4.2.2.3 ความแข็ง 43
4.2.2.4 โครงสร้างจุลภาค 44
(1) ชิ้นงานตัวอย่างหลังจากการฉีดขึ้นรูป 44
(2) ชิ้นงานตัวอย่างหลังจากกำจัดตัวประสานชนิด PEG 46
(3) ชิ้นงานตัวอย่างหลังจากผ่านการเผาผนึก 48
4.2.3 อัตราส่วนระหว่างตัวประสานชนิด PEG กับตัวประสานชนิด PVB 52
4.2.3.1 ความต้านทานการดัดโค้ง 52
4.2.3.2 ความหนาแน่นและรูพรุนปรากฏ 53
4.2.3.3 ความแข็ง 55
4.3 ผลของการศึกษาการฉีดขึ้นรูปผงวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์ 56
4.3.1 อุณหภูมิและเวลาในการกำจัดตัวประสาน 56
4.3.2 ปริมาณผงวัสดุในส่วนผสมต่อลักษณะสมบัติของชิ้นงาน 57
4.3.2.1 ความต้านทานการดัดโค้ง 57
4.3.2.2 ความหนาแน่นและรูพรุนปรากฏ 58
4.3.2.3 โครงสร้างจุลภาค 60
(1) ชิ้นงานตัวอย่างหลังจากการฉีดขึ้นรูป 60
(2) ชิ้นงานตัวอย่างหลังจากกำจัดตัวประสานชนิด PEG 61
(3) ชิ้นงานตัวอย่างหลังจากผ่านการเผาผนึก 62

หน้า

4.3.3 อัตราส่วนระหว่างตัวประสานชนิด PEG กับตัวประสานชนิด PVB และการเติมกรดสเตียริค...... 65
4.3.3.1 ความต้านทานการดัดโค้ง 65
4.3.3.2 ความหนาแน่นและรูพรุนปรากฏ 68
4.3.3.3 ความแข็ง.. 69
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ 71
5.1 สรุปผลการทดลอง 71
5.2 ข้อเสนอแนะ 72
รายการอ้างอิง.. 73
ภาคผนวก.. 76
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.. 85

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ ข – 1.1 อุณหภูมิและเวลาในการกำจัดตัวประสาน 79
ตารางที่ ข – 1.2 ปริมาณผงวัสดุตั้งแต่ 44 – 52 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร 79
ตารางที่ ข – 1.2.1 ความต้านทานการดัดโค้ง..79
ตารางที่ ข – 1.2.2 ความหนาแน่นและรูพรุนปรากฏ 80
ตารางที่ ข – 1.2.3 ความแข็ง 80
ตารางที่ ข – 1.3 อัตราส่วนระหว่างตัวประสานชนิด PEG กับตัวประสานชนิด PVB..................81
ตารางที่ ข – 1.3.1 ความต้านทานการดัดโค้ง..81
ตารางที่ ข – 1.3.2 ความหนาแน่นและรูพรุนปรากฏ 81
ตารางที่ ข – 1.3.3 ความแข็ง 81
ตารางที่ ข – 2.1 อุณหภูมิและเวลาในการกำจัดตัวประสาน 82
ตารางที่ ข – 2.2 ปริมาณผงวัสดุตั้งแต่ 44 – 52 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร 82
ตารางที่ ข – 2.2.1 ความต้านทานการดัดโค้ง..82
ตารางที่ ข – 2.2.2 ความหนาแน่นและรูพรุนปรากฏ 83
ตารางที่ ข – 2.2.3 ความแข็ง 83
ตารางที่ ข – 2.3 อัตราส่วนระหว่างตัวประสานชนิด PEG กับตัวประสานชนิด PVB
และการเติมกรดสเตียริค 84
ตารางที่ ข – 2.3.1 ความต้านทานการดัดโค้ง..84
ตารางที่ ข – 2.3.2 ความหนาแน่นและรูพรุนปรากฏ 84
ตารางที่ ข – 2.3.3 ความแข็ง 84

สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่ 2.1 รอยแตกในวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์ 5
ภาพที่ 2.2 โครงสร้างจุลภาคของวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์ที่เติม Mg-PSZ ที่ อัตราส่วน 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (หมายเลข 3 คือ Mg-PSZ).. 6
ภาพที่ 2.3 รูปแบบชิ้นงานที่ซับซ้อนที่ผลิตด้วยกระบวนการฉีดขึ้นรูป 8
ภาพที่ 2.4 ขั้นตอนกระบวนการฉีดขึ้นรูป.. 9
ภาพที่ 2.5 โครงสร้างจุลภาของชิ้นงาน (a) ไม่เติมตัวประสาน (b) เติมตัวประสาน 12
ภาพที่ 2.6 โครงสร้างจุลภาคของรอยหักของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบทังสเตนคาร์ไบด์ที่มีโคบอลต์ 8 เปอร์เซ็นต์ ณ อุณหภูมิ 1460 องศาเซลเซียส 13
ภาพที่ 2.7 (a) เปอร์เซ็นต์ของตัวประสานที่ถูกกำจัดของชิ้นงานเหล็กกล้าไรสนิมที่ฉีดขึ้นรูป (b) เปอร์เซ็นต์ของตัวประสานที่ถูกกำจัดของชิ้นงานเหล็กที่ฉีดขึ้นรูป 14
ภาพที่ 2.8 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักตัวประสานที่ถูกกำจัด ณ อุณหภูมิ 25 40 และ 55 องศาเซลเซียส 17
ภาพที่ 2.9 ผลของอุณหภูมิของการกำจัดตัวประสานต่อการกำจัดตัวประสานชนิด PEG ด้วยวิธีการแช่น้ำ ณ เวลาต่างๆ 19
ภาพที่ 2.10 โครงสร้างจุลภาครอยหักชิ้นงานอะลูมินา (a) ผิวหน้าชิ้นงาน (b) ภายในชิ้นงาน โดย (ก) หลังจากฉีดขึ้นรูป (ข) เวลา 5 นาที (ค) เวลา 2 ชั่วโมง (ง) เวลา 3 ชั่วโมง แช่น้ำที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส 20
ภาพที่ 3.1 เครื่องฉีดขึ้นรูปแบบที่มีแท่งดัน.. 27
ภาพที่ 3.2 เตาแกรไฟต์ที่ควบคุมบรรยากาศอาร์กอน 27
ภาพที่ 3.3 แผนผังงานวิจัยวัสดุอะลูมินาและวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์.. 28
ภาพที่ 3.4 แผนงานวิจัยเปรียบเทียบอัตราส่วนตัวประสานของปริมาณผงวัสดุ 52 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร.. 29
ภาพที่ 4.1 ลักษณะทางสัณฐานทางวิทยาของผงวัตถุดิบจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบส่องกราด (a) ผงอะลูมินา (b) ผงทังสเตนคาร์ไบด์ 35
ภาพที่ 4.2 (a) การกระจายขนาดอนุภาคของผงวัสดุตั้งต้น (b) การกระจายขนาดของอนุภาคสะสมของผงวัสดุตั้งต้น.. 37

หน้า

ภาพที่ 4.3 (a) การกระจายขนาดอนุภาคของผงวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์ (b) การกระจายขนาดของอนุภาคสะสมของผงวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์................. 38
ภาพที่ 4.4 การสลายตัวประสานชนิด PVB ด้วยความร้อน 39
ภาพที่ 4.5 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่ตัวประสาน PEG หายไปจากชิ้นงานตัวอย่างวัสดุอะลูมินา ที่อุณหภูมิต่างๆ ภายในระยะเวลา 5 ชั่วโมง 40
ภาพที่ 4.6 ความต้านทานต่อการดัดโค้งของชิ้นงานตัวอย่างของวัสดุอะลูมินาหลังจากฉีดขึ้นรูป หลังกำจัดตัวประสานชนิด PEG และหลังเผาผนึก ตามปริมาณผงวัสดุอะลูมินาต่างๆ 42
ภาพที่ 4.7 ความหนาแน่นและรูพรุนปรากฏของวัสดุอะลูมินาหลังจากเผาผนึก ณ อุณหภูมิ 1600 องศาเซลเซียส ที่อัตราส่วนของตัวประสานชนิด PEG กับชนิด PVB เท่ากับ 85 : 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก.............. 43
ภาพที่ 4.8 ความแข็งของชิ้นงานตัวอย่างของวัสดุอะลูมินาและวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์ที่ปริมาณผงวัสดุต่างๆ 44
ภาพที่ 4.9 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานวัสดุอะลูมินาหลังจากฉีดขึ้นรูปที่ปริมาณผงวัสดุต่างๆ กัน............ 45
ภาพที่ 4.10 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานวัสดุอะลูมินาหลังจากกำจัดตัวประสานชนิด PEG ที่ปริมาณผงวัสดุต่างๆ กัน 47
ภาพที่ 4.11 โครงสร้างจุลภาคของรอยหักของชิ้นงานวัสดุอะลูมินาหลังจากผ่านกระบวนการเผาผนึกที่ปริมาณผงวัสดุต่างๆ กัน 49
ภาพที่ 4.12 โครงสร้างจุลภาคของผิวหน้าของชิ้นงานอะลูมินาหลังจากผ่านกระบวนการขัดผิวหน้าที่ปริมาณผงวัสดุต่างๆ กัน 51
ภาพที่ 4.13 ความต้านทานต่อการดัดโค้งของชิ้นงานวัสดุอะลูมินาหลังจากฉีดขึ้นรูป หลังกำจัดตัวประสานชนิด PEG และหลังเผาผนึก ตามอัตราส่วนของตัวประสาน 53
ภาพที่ 4.14 ความหนาแน่นและรูพรุนปรากฏของชิ้นงานวัสดุอะลูมินาหลังจากฉีดขึ้นรูป หลังกำจัดตัวประสานชนิด PEG และหลังผ่านการเผาผนึก ตามอัตราส่วนของตัวประสาน................ 54
ภาพที่ 4.15 ความแข็งของชิ้นงานวัสดุอะลูมินา ณ ปริมาณของอัตราส่วนตัวประสานที่แตกต่างกัน 55
ภาพที่ 4.16 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่ตัวประสานชนิด PEG หายไปจากชิ้นงานตัวอย่างของวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์ ณ อุณหภูมิต่างๆ ภายในระยะเวลา 5 ชั่วโมง... 56

หน้า

ภาพที่ 4.17 ความต้านทานต่อการดัดโค้งของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์ หลังจากฉีดขึ้นรูป หลังจากแช่น้ำ และหลังเผาผนึก ตามปริมาณผงวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์ โดยตัวประสานชนิด PEG เท่ากับ 85 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก 58
ภาพที่ 4.18 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์หลังจากฉีดขึ้นรูปที่ปริมาณผงวัสดุต่างๆ กัน 60
ภาพที่ 4.19 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์หลังจากกำจัดตัวประสาชนิด PEG ที่ปริมาณผงวัสดุต่างๆ กัน 61
ภาพที่ 4.20 โครงสร้างจุลภาคของรอยหักของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์ หลังจากผ่านกระบวนการเผาผนึกที่ปริมาณผงวัสดุต่างๆ กัน 63
ภาพที่ 4.21 โครงสร้างจุลภาคของผิวหน้าของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์ หลังจากผ่านกระบวนการขัดผิวหน้าที่ปริมาณผงวัสดุต่างๆ กัน 64
ภาพที่ 4.22 ความต้านทานการดัดโค้งของชิ้นงานตัวอย่างวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์ หลังจากฉีดขึ้นรูป หลังกำจัดตัวประสาน PEG และหลังผ่านการเผาผนึกที่ปริมาณผงวัสดุเท่ากับ 52 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร 67
ภาพที่ 4.23 ความหนาแน่นและรูพรุนปรากฏของชิ้นงานตัวอย่างผงวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์ หลังจากฉีดขึ้นรูป หลังกำจัดตัวประสานชนิด PEG และหลังผ่านเผาผนึกที่ปริมาณผงวัสดุเท่ากับ 52 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร...................................... 69
ภาพที่ 4.24 ความแข็งของชิ้นงานตัวอย่างของวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์ ณ ปริมาณของอัตราส่วนตัวประสานที่แตกต่างกัน ที่ปริมาณผงวัสดุเท่ากับ 52 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร 70
ภาพที่ ก - 1 การกระจายขนาดอนุภาคของอะลูมินาชนิด A32 77
ภาพที่ ก - 2 การกระจายขนาดอนุภาคของทังสเตนคาร์ไบด์ 77
ภาพที่ ก - 3 การกระจายขนาดอนุภาคของวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์................. 78

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

$\bar{d}$	= ความยาวเส้นทแยงมุมของรอยกดเฉลี่ย (มิลลิเมตร)
$Density_{total}$	= ความหนาแน่นรวม
D_1, D_2	= ความหนาแน่นจริงของผงวัสดุตั้งต้น 1 และ 2 (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)
H_V	= ค่าความแข็ง (กิกะพาสคัล)
L	= ความกว้างของจุดรองรับตัวอย่าง (มิลลิเมตร)
M_1, M_2	= น้ำหนักของของผงวัสดุ 1 และ 2 (กรัม)
P	= แรงที่ใช้กด (นิวตัน)
ρ_{bulk}	= ความหนาแน่นรวม (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)
ρ_{th}	= ความหนาแน่นเชิงทฤษฎี (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)
ρ_{water}	= ความหนาแน่นของน้ำ (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)
t	= ความหนาของตัวอย่าง (มิลลิเมตร)
V_1, V_2	= ปริมาตรของผงวัสดุตั้งต้น 1 และ 2 (ลูกบาศก์เซนติเมตร)
w	= ความกว้างของตัวอย่าง (มิลลิเมตร)
W_{dry}	= น้ำหนักแห้งของตัวอย่าง (กรัม)
W_{sat}	= น้ำหนักเปียกของตัวอย่าง (กรัม)
W_{sus}	= น้ำหนักของตัวอย่างในน้ำ (กรัม)
W_{total}	= น้ำหนักของสารตั้งต้นทั้งหมด (กรัม)
σ_f	= ความต้านทานต่อการดัดโค้ง (เมกะพาสคัล)

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

วัสดุเซรามิกเป็นวัสดุที่นำมาใช้ในการตัดแต่งโลหะได้ เนื่องมาจากเซรามิกมีความแข็งสูง ทนความร้อนได้ดี ทนต่อการสึกกร่อนและเฉื่อยต่อปฏิกิริยาทางเคมี วัสดุตัดที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก ได้แก่ วัสดุเชิงประกอบทังสเตนคาร์ไบด์/โคบอลต์ ที่มีจุดเด่นคือความแข็งความแข็งแรงและความเหนียวสูง โลหะโคบอลต์ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวประสานอนุภาคคาร์ไบด์มักเกิดปัญหาการเสียรูปโดยถาวรที่อุณหภูมิสูงส่งผลให้ความแข็งแรงลดลง อะลูมินาเป็นวัสดุเซรามิกซึ่งแม้จะสมบัติด้อยกว่ากับทังสเตนคาร์ไบด์/โคบอลต์เล็กน้อย แต่ไม่เกิดการเสียรูปถาวรจากความร้อน อย่างไรก็ตามอะลูมินายังมีข้อด้อยเช่นเดียวกับเซรามิกทั่วไปคือค่อนข้างเปราะ จากปัญหานี้จึงได้นำอะลูมินาและทังสเตนคาร์ไบด์มาใช้ร่วมกันเป็นวัสดุเชิงประกอบ เพื่อปรับปรุงสมบัติทางด้านความแข็ง ความแข็งแรงและความเหนียว[1]

อะลูมินาและวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์มีสมบัติด้านความแข็ง ความแข็งแรงและความเหนียว รวมไปถึงทนทานต่อการสึกกร่อนสูง วัสดุทั้งสองชนิดนี้จึงมักใช้งานเป็นวัสดุตัดในอุตสาหกรรมการตกแต่งชิ้นงานโลหะ เช่น อุตสาหกรรมยานยนต์ เป็นต้น การขึ้นรูปชิ้นงานอะลูมินาและวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์มีหลายวิธี ตัวอย่างเช่น วิธีการอัดขึ้นรูปและการอัดร้อน[2] โดยทั่วไปวิธีการอัดผงเหมาะกับชิ้นงานที่มีรูปทรงไม่ซับซ้อนหรือมีรายละเอียดไม่มากนัก ข้อดีของการอัดผงคือผงวัตถุดิบอัดตัวแน่นทำให้ความหนาแน่นสูง แต่มักพบว่า ผิวหน้าของชิ้นงานอาจเรียบไม่เท่ากัน และเกิดการแยกชั้นหลังจากขึ้นรูปและผ่านการเผา การตกแต่งชิ้นงานทั้งก่อนและหลังเผาทำได้ยากเสี่ยงต่อความเสียหายของชิ้นงานหรือเกิดเป็นตำหนิง่าย ทำให้ต้องสูญเสียวัตถุดิบและการนำวัตถุดิบกลับมาใช้ใหม่ทำได้ยาก อย่างไรก็ตามวัสดุตัดอะลูมินาและวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์สามารถขึ้นรูปได้ด้วยวิธีการฉีดขึ้นรูป กระบวนการฉีดขึ้นรูปมีข้อได้เปรียบกว่าการขึ้นรูปผงแบบอื่นตรงที่ชิ้นงานมีผิวเรียบสวยงาม สามารถนำส่วนที่ขึ้นรูปผิดพลาดกลับมาขึ้นรูปใหม่ได้อีกครั้งโดยไม่ต้องผ่านกระบวนการบดย่อย รวมไปถึงสามารถผลิตชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อนได้ในปริมาณมาก

ขั้นตอนทั่วไปในการฉีดขึ้นรูปเริ่มจากการเตรียมส่วนผสมระหว่างผงวัสดุและตัวประสาน การฉีดขึ้นรูป การกำจัดตัวประสานและการเผาผนึก ซึ่งขั้นตอนเหล่านี้จะมีลักษณะแตกต่างกันออกไปตามชนิดและสมบัติของวัตถุดิบและตัวประสานที่ใช้ ตลอดจนรูปร่างของชิ้นงานที่ต้องการด้วย

งานวิจัยนี้เป็นการขึ้นรูปผงอะลูมินาและวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์ด้วยการฉีดขึ้นรูปโดยการเลือกใช้ตัวประสานที่ช่วยทำให้เกิดการไหลตัวและสามารถฉีดขึ้นรูปได้ ศึกษาส่วนผสมระหว่างผงวัสดุกับตัวประสานรวมไปถึงวิธีกำจัดตัวประสานด้วยวิธีที่ประหยัดพลังงานและลดมลพิษเป็นหลัก ซึ่งครอบคลุมการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการผสมผงอะลูมินาและวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์กับตัวประสานที่มีต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติเชิงกล โดยใช้ชนิดของตัวประสานและปริมาณอัตราส่วนของตัวประสานต่างกัน ตัวประสานที่จะเลือกใช้ฉีดขึ้นรูปได้แก่ พอลิเอทิลีนไกลคอล (Polyethylene glycol; PEG) พอลิไวนิลบิวทิรอล (Polyvinyl butyral; PVB) และกรดสเตียริค (Stearic acid; SA) จากนั้นจึงศึกษาวิธีการกำจัดตัวประสานก่อนนำไปเผาผนึกและทดสอบสมบัติของชิ้นงานได้เพื่อปรับปรุงสมบัติให้เหมาะสมสำหรับการฉีดขึ้นรูป เพื่อให้ได้ชิ้นงานที่สามารถนำไปใช้งานได้ต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาผลของปริมาณผงอะลูมินาและผงวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์กับตัวประสานต่อสมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพและโครงสร้างจุลภาคของวัสดุอะลูมินาและวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์ ที่ผลิตโดยกระบวนการฉีดขึ้นรูป

1.2.2 เพื่อศึกษาการกำจัดตัวประสานโดยใช้น้ำของชิ้นงานวัสดุอะลูมินาและวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์ที่ได้จากกระบวนการฉีดขึ้นรูปวัสดุผง

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 วัสดุผงตั้งต้น ได้แก่ ผงอะลูมินาและผงทังสเตนคาร์ไบด์ โดยเตรียมเป็นผงวัสดุ 2 ชนิด คือ ผงอะลูมินา และผงวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์ โดยที่วัสดุเชิงประกอบ ดังกล่าวประกอบด้วยอัตราส่วนผสมระหว่างผงอะลูมินาต่อผงทังสเตนคาร์ไบด์เท่ากับ 90:10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

1.3.2 ตัวประสาน เตรียมจากพอลิเอทีลีนไกลคอลและพอลิไวนิลบิวทิรอล ผสมในอัตราส่วนระหว่างพอลิเอทีลินไกลคอลต่อพอลิไวนิลบิวทิรอล ตั้งแต่ 80:20 85:15 และ 90:10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และมีการเติมกรดสเตียริคเป็นสารเติมแต่ง

1.3.3 ปริมาณของผงวัสดุต่อตัวประสานอยู่ในช่วง 44 – 52 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร

1.3.4 ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการฉีดขึ้นรูป ได้แก่ ชนิดของผงวัสดุ ปริมาณผงวัสดุ สัดส่วนของของพอลิเอทิลีนไกลคอลต่อพอลิไวนิลบิวทิรอล ในอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการแช่น้ำ บทบาทของกรดสเตียริคต่อลักษณะสมบัติของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยการฉีดขึ้นรูปผง

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้ชิ้นงานวัสดุอะลูมินาและวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์ที่มีสมบัติเชิงกลดีที่ผลิตโดยการฉีดขึ้นรูป และวิธีกำจัดตัวประสานที่เป็นมิตรแก่สิ่งแวดล้อม

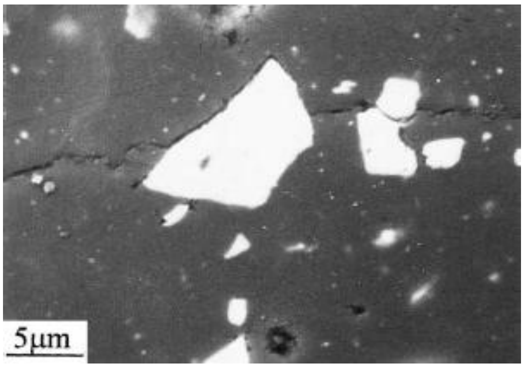
บทที่ 2
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 วัสดุเชิงประกอบ

วัสดุเชิงประกอบ คือวัสดุที่ประกอบด้วยการรวมตัวกันของวัสดุตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป โดยวัสดุชนิดแรกจะเป็นเนื้อวัสดุ ส่วนวัสดุชนิดอื่นๆ กระจายตัวอยู่ในเนื้อพื้นของวัสดุชนิดแรก โดยหลักการทั่วไปของวัสดุเชิงประกอบที่ผลิตขึ้น เพื่อปรับปรุงข้อบกพร่องของวัสดุเพียงชนิดเดียวที่ผลิตในเชิงวัสดุวิศวกรรมในด้านสมบัติต่าง เช่น ความแข็งแรง ความแข็ง การต้านทานสึกหรอ การต้านทานแรงเสียดสี เป็นต้น ให้มีสมบัติดังกล่าวเพิ่มขึ้น ตัวอย่างเช่นวัสดุอะลูมินาโดยทั่วไปมีสมบัติเด่นอาทิเช่น จุดหลอมเหลวสูง ความแข็งสูง ทนต่อการสึกหรอและเฉื่อยต่อปฏิกิริยาทางเคมี จึงได้นำไปมีประโยชน์ไปในหลายด้านอาทิเช่น ลูกบด อิฐทนไฟ วัสดุอิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น แต่วัสดุอะลูมินามีข้อจำกัดคือความเปราะของชิ้นงานหลังจากผ่านการเผาผนึก จึงได้มีการพัฒนาปรับปรุงข้อด้อยดังกล่าวโดยการนำวัสดุอะลูมินาทำเป็นวัสดุเชิงประกอบด้วยการเติมผงวัสดุชนิดอื่นลงไป เช่น ผงทังสเตนคาร์ไบด์ ผงเซอร์โคเนีย ผงไนไตรด์ เป็นต้น ผงทังสเตนคาร์ไบด์เป็นผงวัสดุเซรามิกประเภทหนึ่งที่ไม่ได้มีออกไซด์เป็นองค์ประกอบ สมบัติเด่นของผงชนิดนี้ คือมีความแข็ง มักนำผงดังกล่าวไปใช้งานในด้านอุตสาหกรรมโลหะเป็นส่วนใหญ่ ทั้งผลิตชิ้นส่วนของเครื่องจักรกลของโลหะหนัก เช่น แม่พิมพ์โลหะ ตลับลูกปืน และวัสดุเครื่องมือตัด ซึ่งผงทังสเตนคาร์ไบด์มักจะนำมาใช้กับผลิตภัณฑ์ทางด้านวัสดุเซรามิก เพื่อปรับปรุงสมบัติของวัสดุเซรามิกให้ดียิ่งขึ้น จากปัญหาของวัสดุอะลูมินาที่พบจึงนำผงทังสเตนคาร์ไบด์เติมจนเกิดวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์ ที่มีความแข็งแรง ความแข็งและความเหนียวเพิ่มมากขึ้น

L. Wang และคณะ[34] ได้ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความแข็ง ความเหนียว และการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างเฉียบพลัน เพื่อปรับปรุงให้มีสมบัติดังกล่าวเพิ่มมากขึ้น ปัจจัยดังกล่าวได้แก่ ปริมาณผงทังสเตนคาร์ไบด์ในวัสดุอะลูมินาซึ่งจะได้เป็นวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์ โดยอัตราส่วนของผงทังสเตนคาร์ไบด์ที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วย 6 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดผ่านความร้อนที่อุณหภูมิ 1450 กับ 1550 องศาเซลเซียส และนำไปลดอุณหภูมิอย่างรวดเร็วที่ 20 – 520 องศาเซลเซียส จากผลการศึกษาพบว่าปัจจัยทั้งสองดังกล่าวมีผลที่คล้ายกัน ในการปรับปรุงให้วัสดุเชิงประกอบมีสมบัติเชิงกลดีขึ้นเนื่องมาจากอนุภาคทังสเตนคาร์ไบด์และการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างเฉียบพลัน ส่งผลให้ขนาดของเกรน

ในเนื้อพื้นวัสดุเชิงประกอบลดลงจากเดิมเมื่อเทียบกับวัสดุอะลูมินาเพียงอย่างเดียว ในขณะที่การกระจายตัวของอนุภาคทังสเตนคาร์ไบด์ในเนื้อพื้น มีผลยับยั้งให้รอยแตกเกิดการขยายตัวได้ช้าลงหรือเกิดการเบี่ยงเบนไปจากเดิม จึงทำให้สมบัติที่กล่าวมามีค่าเพิ่มขึ้นหลังจากการเติมผงทังสเตนคาร์ไบด์



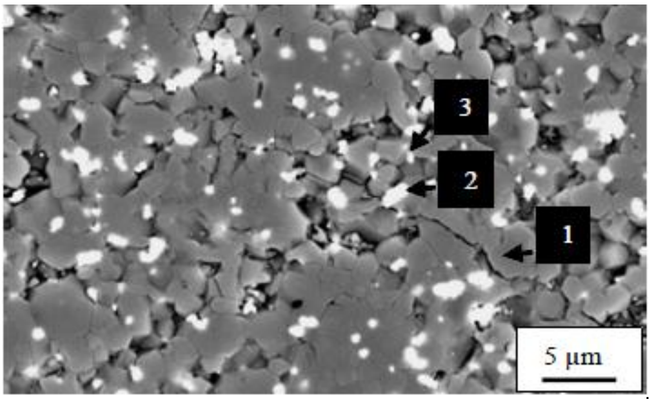
ภาพที่ 2.1 รอยแตกในวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์[4]

W. Acchar และคณะ[56] ได้ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อโครงสร้างจุลภาคและพฤติกรรมในการเผาผนึก โดยการเติมผงทังสเตนคาร์ไบด์เพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์ โดยเติมผงทังสเตนคาร์ไบด์ด้วยอัตราส่วน 5 - 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และขึ้นรูปด้วยวิธีอัดผ่านความร้อนที่อุณหภูมิ 1450 องศาเซลเซียส พบว่าโครงสร้างที่เติมผงอนุภาคทังสเตนคาร์ไบด์ที่ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เกิดการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ เมื่อเกิดรอยแตกทำให้ยับยั้งการขยายตัวของรอยแตกได้น้อยลง ในขณะที่พฤติกรรมในการเผาผนึกในอัตราส่วนเดียวกันเทียบกับการเติม Y_2O_3 ในอัตราส่วน 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักความแตกต่างในบรรยากาศการเผาแบบปกติ มีผลต่อสมบัติของวัสดุเชิงประกอบด้านความแข็งและความเหนียว การอัดขึ้นรูปผ่านความร้อนเป็นปัจจัยที่ทำให้วัสดุเชิงประกอบมีค่าเพิ่มขึ้นแต่จากการเติม Y_2O_3 กลับไม่มีผลเท่าที่ควรแต่ในทางกลับกัน Y_2O_3 ที่เติมลงไปนั้นจะส่งผลต่อความหนาแน่นให้มีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเท่านั้น

W. Acchar และคณะ[7] ศึกษาสมบัติเชิงกลของวัสดุอะลูมินาด้วยการเติมผงทังสเตนคาร์ไบด์ โดยเตรียมผงอะลูมินาขนาดอนุภาค 2.3 ไมครอน และผงทังสเตนคาร์ไบด์ ขนาดอนุภาค 1 ไมครอน โดยมีอัตราส่วนปริมาณการเติมผงทังสเตนคาร์ไบด์เท่ากับ 0 5 10 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดร้อนทิศทางเดียวที่อุณหภูมิ 1600 องศาเซลเซียส ภายใต้ความดัน 20 เมกะพาสคัล ภายใต้บรรยากาศอาร์กอน หลังจากผ่านการขึ้นรูปนำชิ้นงานทดสอบสมบัติได้แก่ ความหนาแน่น ทดสอบด้วยหลักการแทนที่ของของเหลว (Archimedes' method) ความแข็งและความเหนียวทดสอบด้วยหัวกดวิกเกอร์ส จากการศึกษาพบว่าความหนาแน่นของชิ้นงานมีค่าเฉลี่ยประมาณ 97.6 – 99 เปอร์เซ็นต์ทางทฤษฎี ส่วนความแข็งและความเหนียวที่ขึ้นรูปแบบอัดร้อนของวัสดุอะลูมินา

เพียงอย่างเดียวมีสมบัติทั้งสองที่กล่าวมามีค่าน้อยกว่าเมื่อเทียบกับวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์ ขณะเดียวกันอัตราส่วนการเพิ่มผงทังสเตนคาร์ไบด์มีผลทำให้สมบัติเชิงกลทั้งสองดังกล่าวเพิ่มขึ้นและมีค่ามากสุดที่อัตราส่วนผงทังสเตนคาร์ไบด์เท่ากับ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โครงสร้างจุลภาคเมื่อมีการเติมผงทังสเตนคาร์ไบด์เกิดการกระจายตัวของอนุภาคดังกล่าวในเนื้อวัสดุอะลูมินา ทำให้เกิดการปรับปรุงสมบัติทางกลให้ดียิ่งขึ้น

J. Boonpo และคณะ[8] ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคารไบด์โดยการเติมแมกนีเซีย-เซอร์โคเนียสเถียร เตรียมผงอะลูมินาและผงทังสเตนคาร์ไบด์เท่ากับ 90 และ 10 ในอัตราส่วนเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและเซอร์โคเนียเสถียรบางส่วน(Mg-PSZ)ด้วยการโดปแมกนีเซีย ลงไปในส่วนผสมตั้งแต่ 0 – 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เผาที่อุณหภูมิ 1600 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศอาร์กอนเป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อศึกษาปัจจัยที่ผลต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์ จากการศึกษาพบว่า Mg-PSZ ที่อัตราส่วน 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เกิดการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในโครงสร้างวัสดุเชิงประกอบดังกล่าวดังภาพที่ 2.2 การเกิดรอยแตกภายในโครงสร้างจุลภาคมีทั้งการแตกตามขอบเกรนและแตกผ่านเกรน ในขณะที่สมบัติเชิงกลด้านความเหนียวมีค่าสูงสุดเมื่อเติม Mg-PSZ ที่อัตราส่วน 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ส่วนด้านความแข็งมีค่าสูงสุดได้จากการเติม Mg-PSZ ที่อัตราส่วน 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก นอกจากนี้ความหนาแน่นที่มีค่าใกล้เคียงกับวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์อีกด้วย



ภาพที่ 2.2 โครงสร้างจุลภาคของวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์ที่เติม Mg-PSZ ที่อัตราส่วน 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (หมายเลข 3 คือ Mg-PSZ)[8]

จากงานวิจัยที่กล่าวมาวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์มักใช้วิธีการขึ้นรูปแบบการอัดหรือการอัดร้อนเป็นส่วนใหญ่ ข้อดีจากการขึ้นรูปดังกล่าวส่งผลให้ชิ้นงานแข็งและเปราะจึงก่อให้เกิดข้อจำกัดในการตกแต่ง โดยเฉพาะเมื่อชิ้นงานที่ต้องการผลิตมีรายละเอียดมากขึ้นจึงได้มีการพัฒนาวิธีการขึ้นรูปที่สามารถนำผงวัสดุกลับมาใช้ใหม่ได้ และยังเป็นลดต้นทุนการผลิตได้อีกด้วย

2.2 กระบวนการฉีดขึ้นรูปผง

กระบวนการฉีดขึ้นรูปวัสดุผงเป็นเทคนิคที่สามารถขึ้นรูปให้มีรูปร่างใกล้เคียงกับชิ้นงานต้นแบบเหมาะสำหรับการผลิตชิ้นงานที่มีขนาดปานกลางจนถึงชิ้นงานขนาดเล็กที่มีรูปร่างซับซ้อนรวมไปถึงสามารถผลิตชิ้นงานได้หลากหลายวัสดุ เช่น เซรามิก โลหะ และฮาร์ดเมทัล เทคโนโลยีการฉีดขึ้นรูปผงเป็นที่รู้จักกันมามากกว่า 40 ปี[9]

กระบวนการฉีดขึ้นรูปเป็นกระบวนการใช้กันอย่างแพร่หลาย สำหรับการผลิตเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) เทอร์โมเซ็ตติ้ง (Thermosetting) ในทางเครื่องมือเครื่องใช้ทางวัสดุวิศวกรรมและสินค้าอุปโภคบริโภคที่ใช้ในชีวิตประจำวัน ซึ่งสามารถช่วยในการผลิตได้ในปริมาณมากและชิ้นส่วนที่มีรูปร่างซับซ้อน ราคาต้นทุนต่ำ มีความแม่นยำในการผลิตชิ้นงานสูง ต่อมาได้มีการพัฒนานำอนุภาคของแข็งมาฉีดขึ้นรูปเรียกว่า กระบวนการฉีดขึ้นรูปผง (Powder injection moulding) โดยนำผงโลหะและ/หรือผงเซรามิกผสมกับตัวประสานชนิดพอลิเมอร์ฉีดเข้าไปในแม่พิมพ์ หลังจากกำจัดตัวประสานและผ่านการเผาผนึก สุดท้ายได้ชิ้นงานโลหะ โลหะผสม และเซรามิกที่มีความหนาแน่นสูง กระบวนการฉีดขึ้นรูปผงมีผลดีในเชิงอุตสาหกรรมได้แก่ 1) ความซับซ้อนของรูปร่าง : กระบวนการฉีดขึ้นรูปผงสามารถฉีดขึ้นรูปได้จริงและมีความหลากหลายทางด้านรูปทรงเรขาคณิต (ดังแสดงในภาพที่ 2.3) 2) รูปร่างใกล้เคียงชิ้นงานต้นแบบ: ชิ้นส่วนที่ซับซ้อนสามารถผลิตได้โดยไม่ต้องสูญเสียค่าใช้จ่ายในการตกแต่งชิ้นงาน เช่น ทังสเตนคาร์ไบด์ วัสดุเชิงประกอบ โลหะผสม และเซรามิก 3) ราคาต้นทุน: กระบวนการฉีดขึ้นรูปผงสามารถทำให้มีขนาดชิ้นงานใกล้เคียงกับต้นแบบ ซึ่งช่วยลดค่าใช้จ่ายในการผลิตเกือบเป็นศูนย์ในระหว่างกระบวนการผลิตและยังสามารถนำชิ้นส่วนที่ไม่ได้ใช้แล้วกลับมารีไซเคิลใหม่ได้ดังนั้นสำหรับการผลิตที่มีปริมาณจำนวนมากของส่วนประกอบชิ้นงานที่ซับซ้อนขนาดเล็กกระบวนการฉีดขึ้นรูปผงมีความเป็นไปได้เพื่อผลิตชิ้นส่วนที่มีวิธีการประหยัดมากขึ้นด้วยการประหยัดสูงสุดถึง 80 เปอร์เซ็นต์[10]

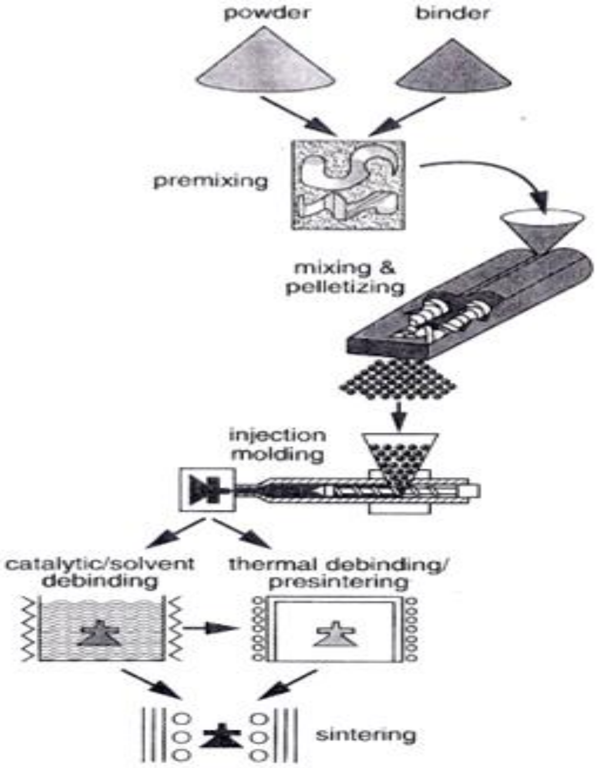
ภาพที่ 2.3 รูปแบบชิ้นงานที่ซับซ้อนที่ผลิตด้วยกระบวนการฉีดขึ้นรูป(10)

ขั้นตอนการกระบวนการฉีดขึ้นรูปโดยทั่วไป (ดังแสดงในภาพที่2.4) นำผงวัสดุผสมกับวัสดุตัวประสาน ซึ่งตัวประสานมักจะประกอบไปด้วยคือ พอลิเมอร์และขี้ผึ้ง (Wax) จนกลายเป็นของผสม (Feedstock) พร้อมสำหรับนำวัตถุดิบดังกล่าวไปฉีดขึ้นรูป จากนั้นได้ชิ้นงานหลังจากการฉีดขึ้นรูป แกะออกจากแม่พิมพ์ แล้วแยกส่วนที่ไม่ใช้ชิ้นงานออกแล้วสามารถนำไปขึ้นรูปใหม่ได้ หลังจากนั้นนำงานชิ้นงานกำจัดตัวประสานและขั้นตอนสุดท้ายคือ การเผาผนึก เพื่อทำให้มีความหนาแน่นสูงไม่ต่ำกว่า 95 เปอร์เซ็นต์ การตรวจสอบกระบวนการฉีดขึ้นรูปผงวัสดุ สามารถแบ่งออกได้เป็น 5 ประเภท ได้แก่[9]

1) ลักษณะเฉพาะของวัตถุดิบที่ฉีดขึ้นรูป แบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ ผงวัสดุกับตัวประสาน ผงวัสดุที่ใช้กระบวนการฉีดขึ้นรูปผงวัสดุจะต้องมีขนาดอนุภาคละเอียดน้อยกว่า 20 ไมครอน โดยเฉลี่ยมักในช่วง 5 ถึง 10 ไมครอน สำหรับผงวัสดุที่เป็นโลหะ ส่วนผงเซรามิกมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ1 ถึง 2 ไมครอน ปริมาณผงวัสดุที่มากที่สุดที่สามารถฉีดขึ้นรูป สำหรับผงโลหะเท่ากับ 60 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ส่วนผงเซรามิกเท่ากับ 55 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ซึ่งจะช่วยในการไหลตัว ลดเวลากำจัดตัวประสาน และชิ้นงานสามารถคงรูปอยู่ได้หลังจากผ่านการกำจัดตัวประสาน

ตัวประสานที่ใช้ในการฉีดวัสดุผงแบ่งเป็น 3 ชนิด คือ (1) พอลิเมอร์ ประกอบไปด้วยชนิดเทอร์โมพลาสติกและเทอร์โมเซ็ตติ้งได้ถูกนำมาใช้ในบางครั้งเพื่อลดแรงตึงผิว และเพิ่มสมบัติการไหลตัวของวัสดุผสมขณะในการฉีดขึ้นรูป (2) ขี้ผึ้งประกอบด้วยขี้ผึ้งหรือของผสมระหว่างขี้ผึ้งและน้ำมัน ตัวประสานนี้ทำหน้าที่ยึดอนุภาคไว้และลดแรงตึงผิวในการฉีดขึ้นรูป และ (3) เจลประกอบด้วยตัวทำละลายพอลิเมอร์ที่สามารถเติมลงไปในของผงวัตถุดิบที่สำหรับฉีดขึ้นรูป

ด้วยความร้อนหรือในรูปของแข็ง และกำจัดด้วยวิธีการละลายออกจากผลิตภัณฑ์ตัวประสานที่ใช้ดังกล่าวเป็นส่วนช่วยให้ความแข็งแรงและทำให้รูปร่างในการฉีดขึ้นรูปมีความซับซ้อนได้มากขึ้น สำหรับการฉีดขึ้นรูปผงวัสดุที่น้อยกว่าวัสดุตัวประสานเมื่อผ่านกระบวนการเผาผนึกทำให้ชิ้นงานเกิดการหดตัวสูงกว่าเมื่อเทียบกับความหนาแน่น



ภาพที่ 2.4 ขั้นตอนกระบวนการฉีดขึ้นรูป[10]

ลักษณะตัวประสานที่ดีควรจะมีสมบัติยืดหยุ่นดี เพื่อสะดวกในขั้นตอนระหว่างการผสม เสริมความแข็งแรงกับชิ้นงานหลังจากการฉีดขึ้นรูป เมื่อผ่านกระบวนการกำจัด ตัวประสาน ตัวประสานที่ผสมกับผงวัสดุจะต้องกำจัดออก ชิ้นงานสามารถคงรูปและไม่มีผลกระทบต่อสมบัติในขั้นตอนสุดท้ายของผลิตภัณฑ์ การสลายตัวของตัวประสานควรทำได้รวดเร็วและไม่หลงเหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์สุดท้าย กระบวนการทั้งหมดของการกำจัดตัวประสานไม่ควรมีผลข้างเคียงกับสิ่งแวดล้อม ตัวประสานที่นำมาใช้ในการฉีดขึ้นรูปควรจะมีหลายชนิดและควรคำนึงค่าใช้จ่ายข้างต้นของกระบวนการกำจัดตัวประสานอีกด้วย

2) การผสมวัตถุดิบสำหรับการฉีดขึ้นรูป การผสมของวัตถุดิบจะต้องให้มีลักษณะคล้ายของหนืดให้มีการไหลตัวที่ดีเหมาะสำหรับการฉีดขึ้นรูป กระบวนการนี้เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นในเครื่องมือชุดผสม เช่น ชุดใบมีดผสมหรือในเครื่องผสมอย่างต่อเนื่องโดยใช้สกรูคู่ พร้อมเข้าสู่กระบวนการฉีดขึ้นรูป ขณะที่อุณหภูมิในระหว่างผสมจะต้องสูงกว่าจุดหลอมละลายของตัวประสาน ในด้านประสิทธิภาพของการผสมเครื่องผสมแบบสกรูคู่จะผสมได้มีประสิทธิภาพดีกว่าชุดใบมีดผสม ทำให้การกระจายตัวของวัสดุตัวประสานข้ากับผงวัสดุเป็นเนื้อเดียวกัน แต่ก็เกิดการเสื่อมสภาพขององค์ประกอบวัสดุตัวประสานบางส่วนได้

3) กระบวนการฉีดขึ้นรูปผง เครื่องมือที่ใช้เป็นแม่พิมพ์ในกระบวนการฉีดขึ้นรูปแบบเดิมที่ใช้ในอุตสาหกรรมพลาสติก ต่อมาเมื่อมีการพัฒนานำมาใช้ฉีดขึ้นรูปผงจึงต้องมีการปรับเปลี่ยนอุปกรณ์ของชิ้นส่วนผสมให้มีขนาดเล็กลง เพื่อช่วยลดการสึกหรอและเพิ่มประสิทธิภาพในการทำให้เป็นเนื้อเดียวกันระหว่างช่วงผสม ชิ้นงานหลังจากการฉีดขึ้นรูปมีขนาดใหญ่กว่า 17 – 22 เปอร์เซ็นต์(เชิงเส้น) เทียบกับชิ้นงานหลังเผาผนึก แม้ว่าแม่พิมพ์จะเหมือนกันเมื่อเทียบกับพลาสติก วัตถุดิบที่ใช้สำหรับกระบวนการฉีดขึ้นรูปผงมีพฤติกรรมทางทฤษฎีและความร้อนที่แตกต่างกันเกิดจากหลายปัจจัยของสมบัติทางกายภาพของวัสดุผสม เช่น ปริมาณผงวัสดุรูปร่างของผงวัตถุดิบ ความหนืดของวัสดุผสมขึ้นอยู่กับประเภทของตัวประสาน และความแตกต่างในความหนาแน่นระหว่างวัสดุตัวประสานกับผงวัสดุที่ใช้ในการฉีดขึ้นรูป เป็นต้น

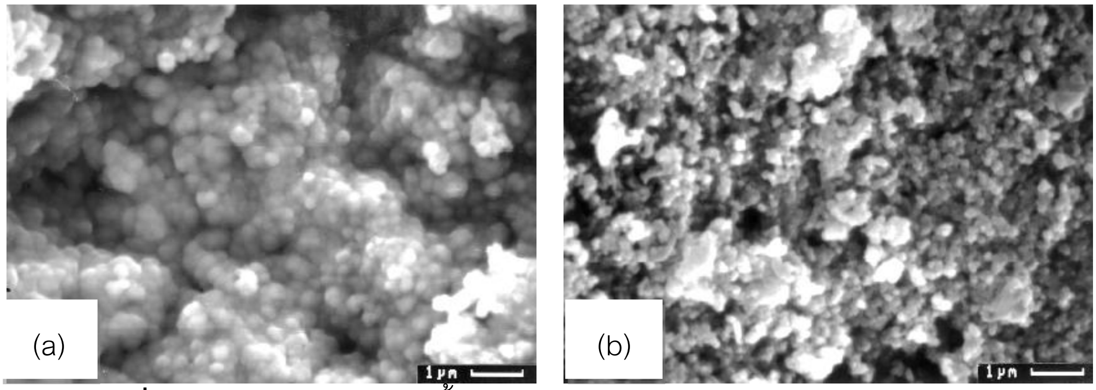
4) การกำจัดตัวประสาน[10] สำหรับกระบวนการกำจัดตัวประสานในอดีตต้องใช้เวลากำจัดนานจึงได้มีการพัฒนาออกแบบเพื่อลดข้อบกพร่องทางด้านเวลา โดยใช้ตัวประสานให้มีหลายองค์ประกอบและบางชนิดก็สามารถละลายน้ำหรือตัวทำละลายทางอินทรีย์ได้ กระบวนการกำจัดตัวประสานมักจะประกอบด้วย 2 ขั้นตอน ในขั้นตอนแรกส่วนใหญ่จะกำจัดตัวประสานออกจากชิ้นงานเพื่อให้เกิดรูพรุน ในขั้นตอนที่สองคือการย่อยสลายด้วยความร้อน ซึ่งจะช่วยให้เกิดการเชื่อมกันของอนุภาค บางครั้งมักอาจอยู่ในกระบวนการเผาผนึก กระบวนการกำจัดตัวประสานในทฤษฎีตัวประสานที่ต้องการ ควรเป็นวัสดุที่กำจัดได้อย่างรวดเร็ว ไม่เกิดพิษต่อสิ่งแวดล้อมสามารถใช้กับผงวัสดุที่มีสมบัติแตกต่างกันได้ และการเปลี่ยนรูปร่างของชิ้นงานไม่ควรเกิดขึ้นโดยทั่วไปแบ่งวิธีกำจัดตัวประสานออกเป็น 2 แบบที่มักพบในการกำจัดตัวประสานในปัจจุบัน

4.1) การกำจัดด้วยวิธีการใช้ตัวทำละลาย วิธีการนี้เกี่ยวข้องกับการนำชิ้นงานหลังจากฉีดขึ้นรูปแช่ในของเหลว ของเหลวที่ใช้กำจัดตัวประสาน เช่น ตัวทำละลายอินทรีย์ น้ำ เป็นต้น องค์ประกอบของตัวประสานจะมีทั้งละลายได้และไม่เกิดการละลาย ตัวประสานที่ไม่ละลายจะทำหน้าที่เป็นตัวยึดของผงวัสดุให้คงรูปร่างอยู่ได้ วิธีการนี้สามารถกำจัดตัวประสานได้มากกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ของตัวประสานที่อยู่ในชิ้นงานด้วยวิธีการแพร่ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับการเคลื่อนไหวของโมเลกุลตัวประสานภายในชิ้นงาน ปัจจัยที่สำคัญ คือ อุณหภูมิ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น การแพร่ของโมเลกุลตัวประสานเกิดได้เร็ว ส่วนตัวประสานที่ไม่ละลายก็จะถูกนำไปกำจัดในขั้นตอนถัดไป ส่วนใหญ่โดยทั่วไปจะใช้ตัวประสาน 2 ประเภท ในการฉีดขึ้นรูปผง ตัวประสานในประเภทแรกจะถูกละลาย ส่วนประเภทที่สองจะเป็นตัวให้ความแข็งแรงและยึดเกาะอนุภาคของผงให้เกาะกันอยู่ได้ก่อนที่จะถูกนำไปกำจัดด้วยวิธีทางความร้อนต่อไป ข้อดีคือ ใช้เวลากำจัดตัวประสานน้อย สามารถนำตัวทำละลายกลับมาใช้ใหม่ได้ พร้อมกับควบคุมกระบวนการได้ง่าย ซึ่งจะเกิดบริเวณที่พื้นผิวแล้วค่อยๆ กระจายเข้าไปภายในชิ้นงานส่วนข้อเสียที่สำคัญที่สุดคือ การเกิดพิษของตัวทำละลาย ยกเว้นน้ำ และชิ้นงานอาจเกิดอาการบวม (Swelling) ทำให้แตกหักหรือสูญเสียรูปร่างได้

4.2) การกำจัดด้วยความร้อน ตัวประสานกำจัดโดยความร้อนด้วยการเพิ่มอุณหภูมิ พอลิเมอร์จะย่อยสลายด้วยการระเหยแพร่กระจายออกจากพื้นผิวของชิ้นงาน ซึ่งวิธีการกำจัดด้วยความร้อนนี้สามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้ทั้งบรรยากาศทั่วไปและสุญญากาศ ข้อดีคือ กระบวนการกำจัดตัวประสานทำได้ในในการเผาในครั้งเดียว มีความปลอดภัย และลงทุนต่ำเมื่อใช้กับการกำจัดในบรรยากาศทั่วไป ส่วนข้อเสียที่มักพบคือ ใช้เวลานานและยังขึ้นอยู่กับความหนาของชิ้นงาน พร้อมทั้งเกิดการระเหยขององค์ประกอบบางอย่างและส่งผลให้เกิดข้อบกพร่องในชิ้นงาน

5) กระบวนการเผาผนึก เป็นกระบวนการสุดท้ายในกระบวนการฉีดขึ้นรูปด้วยผงวัสดุ ในการเผาผนึกจะทำให้ความหนาแน่นและสมบัติเชิงกลเพิ่ม ในระหว่างการเผาส่วนประกอบจะหดลดลง 17–22 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสำหรับกระบวนการนี้จะต้องกำจัดตัวประสานให้หมดออกจากชิ้นงาน ตั้งแต่เริ่มต้นของการเผาผนึก หากมีตัวประสานตกค้างภายในชิ้นงานจะส่งผลให้สมบัติเปลี่ยนไปและไม่สามารถแก้ไขได้

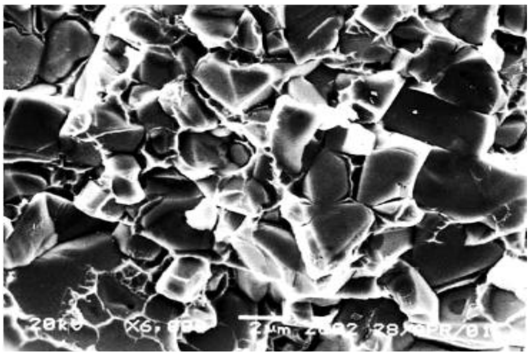
J. Tseng และคณะ [11] ศึกษาลักษณะโครงสร้างจุลภาคของวัสดุเซอร์โคเนีย เพื่อเปรียบเทียบระหว่างผงวัสดุเพียงอย่างเดียวกับการเติมตัวประสานหลังจากกำจัดตัวประสาน โดยเตรียมผงเซอร์โคเนียที่ประกอบด้วยอิตเทรียมออกไซด์ (Y_2O_3) 3 เปอร์เซ็นต์โดยโมล ขนาดอนุภาคของผงเท่ากับ 0.25 ไมครอน ตัวประสานที่ใช้ได้แก่ พาราฟินไข ไวนิลอะซิเตต (Vinyl acetate) และกรดสเตียริค โดยปริมาณของผงวัสดุมีค่าเท่ากับ 50 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ผสมเข้ากันด้วยวิธีบดผสมเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นฉีดขึ้นรูปชิ้นงานเป็นแท่งทรงกระบอกขนาด 4 มิลลิเมตร × 5 มิลลิเมตร × 60 มิลลิเมตร ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ความดันในการฉีด 100 เมกะพาสคัล จากการศึกษาพบว่าหลังผ่านวิธีการกำจัดตัวประสานชิ้นงานที่ประกอบด้วยวัสดุผงเซอร์โคเนียเพียงอย่างเดียวเทียบกับการใส่ตัวประสานที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียสดังภาพที่ 2.5 เห็นได้ว่าโครงสร้างจุลภาคที่มีตัวประสานเกิดรูพรุนของชิ้นงาน ส่วนชิ้นงานที่มีเพียงผงวัสดุเซอร์โคเนียมีอนุภาคของผงเรียงชิดติดกัน



ภาพที่ 2.5 โครงสร้างจุลภาของชิ้นงาน (a) ไม่เติมตัวประสาน (b) เติมตัวประสาน[11]

Z. Baojun และคณะ[12] ได้ศึกษาการนำตัวประสานชนิดต่างๆ ที่นำมาใช้การฉีดขึ้นรูปเพื่อปรับปรุงให้เข้ากับวัสดุเชิงประกอบโดยเตรียมผงวัสดุเชิงประกอบทังสเตนคาร์ไบด์ที่มีโคบอลต์ 8 เปอร์เซ็นต์ ตัวประสานชนิดพาราฟินไข พอลิโพรไพลีน พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงผสมกันที่ 150 องศาเซลเซียส นำวัตถุดิบที่ได้ฉีดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส กำจัดตัวประสานด้วยวิธีการแช่สารละลายเฮปเทนเป็นเวลา 5 ชั่วโมง แล้วนำเผาผนึกในเตาสุญญากาศ 1400 องศาเซลเซียส ภายใต้ความดันแบบสุญญากาศ 20 พาสคัล จากการศึกษาพบว่าการฉีดขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบทังสเตนคาร์ไบด์ที่มีโคบอลต์ 8 เปอร์เซ็นต์ เปรียบเทียบกับการขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดร้อนในด้านสมบัติเชิงกลของวัสดุทั้งสอง ผลที่ได้จากการทดลองดังกล่าว คือ การทดสอบความแข็งแรงของการแตกตามขวาง (Transverse rupture strength) มีค่าเท่ากันที่ 2500 เมกะพาสคัล เช่นเดียวกันกับความหนาแน่นที่เท่ากับ 14.72 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ส่วนค่าความแข็งของชิ้นงานวัสดุทั้งสอง

ที่ขึ้นรูปต่างชนิดกันมีค่าใกล้เคียงกัน ขณะเดียวกันเมื่อเพิ่มปริมาณผงวัสดุตั้งแต่ 55 57 60 และ 62 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร พบว่ามีความหนาแน่นเฉลี่ยเท่ากับ 99.43 เปอร์เซ็นต์ตามทฤษฎี ส่วนเปอร์เซ็นต์การหดตัวของชิ้นงานขึ้นอยู่กับปริมาณของผงวัสดุเชิงประกอบ โดยที่ปริมาณผงวัสดุเท่ากับ 62 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร มีเปอร์เซ็นต์การหดตัวน้อยที่สุดเมื่อใช้วิธีการฉีดขึ้นรูป ส่วนโครงสร้างจุลภาคดังภาพที่ 2.6 มีลักษณะรูปผลึกคล้ายสี่เหลี่ยมเรียงชิดติดกันจนไม่ปรากฏรูพรุนหลังจากการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1460 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากผลการทดลองดังกล่าวที่ฉีดขึ้นรูปและเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1400 องศาเซลเซียส ส่งผลให้สมบัติเชิงกลและทางกายภาพของชิ้นงานได้สมบัติดีที่สุด

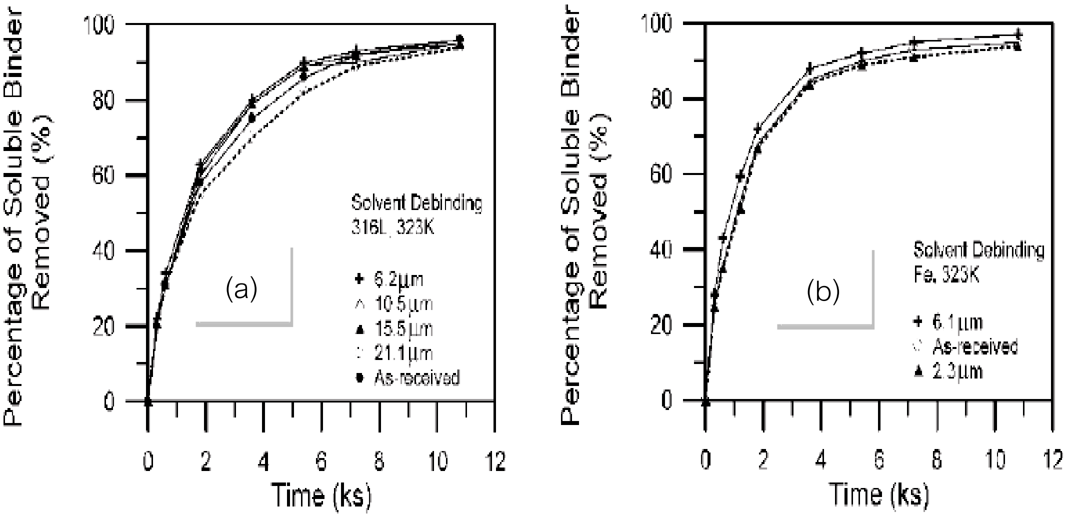


ภาพที่ 2.6 โครงสร้างจุลภาคของรอยหักของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบทังสเตนคาร์ไบด์ที่มีโคบอลต์ 8 เปอร์เซ็นต์ ณ อุณหภูมิ 1460 องศาเซลเซียส[12]

V.B. Oliveria และคณะ[13] ศึกษาอุณหภูมิของการกำจัดตัวประสานต่อความหนาของชิ้นงานที่ฉีดขึ้นรูปของวัสดุอะลูมินา โดยได้เตรียมผงอะลูมินาที่มีอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 0.8 ไมครอนกับตัวประสานชนิดพอลิโพรไพลีน(polypropylene) พาราฟินไข และกรดสเตียริค ด้วยการเตรียมปริมาณผงวัสดุเท่ากับ 60 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ฉีดขึ้นรูปให้มีลักษณะชิ้นงาน 3 แบบ คือ แบบที่ 1 ขนาดชิ้นงาน 12.3 มิลลิเมตร × 18.0 มิลลิเมตร × 1.8 มิลลิเมตร แบบที่ 2 ขนาดชิ้นงาน 5.5 มิลลิเมตร × 12.0 มิลลิเมตร × 3.7 มิลลิเมตร และแบบที่ 3 ขนาดชิ้นงาน 9.0 มิลลิเมตร × 25 มิลลิเมตร × 3.7 มิลลิเมตร จากนั้นนำชิ้นงานทั้ง 3 แบบ กำจัดตัวประสานด้วยการแช่ตัวทำละลายเฮกเซน (Hexane) ที่อุณหภูมิ 20 40 และ 60 องศาเซลเซียส จากการศึกษาพบว่า การแช่ชิ้นงานที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ชิ้นงานแบบที่ 1 สามารถกำจัดตัวประสานได้ดีกว่าแบบที่ 2 และแบบที่ 3 เนื่องมาจากพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานที่มีมากกว่า ทำให้ตัวประสานที่อยู่ในชิ้นงานละลายออกมาในปริมาณที่มากกว่าพื้นที่ตัดของชิ้นงานที่น้อย และเมื่อนำชิ้นงานทั้ง 3 แบบ มาทดสอบที่อุณหภูมิ 20 และ 40 องศาเซลเซียส เพิ่มเติมยังแสดงให้เห็นว่า อุณหภูมิของตัวทำละลายเฮกเซน

มีต่อการละลายของตัวประสานเช่นเดียวกันและเมื่ออุณหภูมิของสารละลายต่ำลง อัตราการละลายของตัวประสานออกจากชิ้นงานมีค่าลดลงตามลำดับอุณหภูมิที่เกิดขึ้นซึ่งมีแนวโน้มเหมือนกันทั้งขนาดชิ้นงาน 3 แบบ ของการฉีดขึ้นรูป

K.S. Hwang และคณะ[14] ศึกษาขนาดอนุภาคของผงวัสดุที่ใช้ในการฉีดขึ้นรูปและระยะเวลาการกำจัดตัวประสาน โดยเตรียมผงเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316L กับผงเหล็ก ซึ่งผงวัสดุทั้งสองดังกล่าวมักนิยมใช้ในกระบวนการฉีดขึ้นรูปแบบผงโลหะ โดยมีปริมาณผงวัสดุทั้งสองที่ใช้ในฉีดขึ้นรูปเท่ากับ 65 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร พร้อมทั้งมีการใช้ขนาดอนุภาคต่างๆ กัน และตัวประสานชนิดพอลิโพรไพลีน (Polypropylene) 44 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พาราฟินไข 55 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและกรดสเตียริค 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ฉีดขึ้นรูปชิ้นงานให้มีความกว้างขนาดเท่ากับ 10 มิลลิเมตร ความยาว 100 มิลลิเมตร และความหนา 2 – 4 มิลลิเมตร กำจัดตัวประสานด้วยวิธีการแช่ตัวทำละลายเฮปเทนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส แล้วอบให้แห้งในสุญญากาศที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากการศึกษาพบว่าการกำจัดตัวประสานด้วยตัวทำละลายเฮปเทน มีลักษณะแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น โดยที่ขนาดอนุภาคของผงวัสดุทั้งสองไม่มีผลต่อปริมาณของตัวประสานที่ถูกละลายด้วยตัวทำละลายเฮปเทน



ภาพที่ 2.7 (a) เปอร์เซ็นต์ของตัวประสานที่ถูกกำจัดของชิ้นงานเหล็กกล้าไรสนิมที่ฉีดขึ้นรูป[14]
(b) เปอร์เซ็นต์ของตัวประสานที่ถูกกำจัดของชิ้นงานเหล็กที่ฉีดขึ้นรูป[14]

Y. Li และคณะ[15] ศึกษาการเพิ่มปริมาณผงวัสดุในการฉีดขึ้นรูปที่มีต่อสมบัติหลังเผานึก โดยเตรียมผงเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel) ความหนาแน่นเท่ากับ 7.89 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร โดยใช้ปริมาณผงวัสดุ 60 64 68 และ 72 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร อัตราส่วนของตัวประสานประกอบด้วย พาราฟินไข 65 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พอลิเอทิลีนไวนิลอะซิเตต (Polyethlene vinyl acetale) 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และกรดสเตียริค 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก นำมาผสมกันจนเป็นวัตถุดิบ (Feedstock) โดยผ่านกระบวนการอัดขึ้นรูปให้เป็นแกรนูล (Granule) จากนั้นนำมาฉีดขึ้นรูปให้มีลักษณะเป็นแท่งทรงกระบอก กำจัดตัวประสานด้วยการแช่ตัวทำละลายเฮปเทนที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส จากการศึกษาพบว่าหลังผ่านกระบวนการเผาผนึกที่ปริมาณของผงวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิมที่ฉีดขึ้นรูปเท่ากับ 72 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร มีสมบัติเชิงกลดีที่สุดทั้งความหนาแน่นความต้านทานแรงดึงและความแข็ง เนื่องมาจากการเพิ่มปริมาณผงวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิมในการฉีดขึ้นรูป โครงสร้างจุลภาคหลังจากผ่านการเผาผนึกที่ปริมาณผงวัสดุเท่ากับ 72 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ปรากฏรูพรุนน้อยกว่า (ดูที่หน้า 49) เมื่อเทียบกับปริมาณผงวัสดุที่ 60 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร

P. Thomas และคณะ[16] ศึกษาการสมบัติการไหลตัวของตัวประสานและการไหลตัวของวัตถุดิบสำหรับการฉีดขึ้น พร้อมทั้งปัจจัยของอุณหภูมิในการกำจัดตัวประสานและสมบัติของวัสดุอะลูมินาหลังจากเผาผนึก โดยเตรียมผงอะลูมินาและตัวประสาน 3 ชนิด ได้แก่ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง พาราฟินไข และกรดสเตียริค เพื่อศึกษาลักษณะการไหลตัวของตัวประสานกับอะลูมินามีผลต่อสมบัติเชิงกลด้วยวิธีการฉีดขึ้นรูป โดยอัตราส่วนของผงอะลูมินาระหว่าง 50 – 60 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ฉีดขึ้นรูปขนาด 62.7 มิลลิเมตร × 12 มิลลิเมตร × 3 มิลลิเมตร ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ส่วนวิธีการกำจัดตัวประสานใช้ 2 แบบ คือ ใช้ตัวทำละลายด้วยตัวทำละลายเอ็น-เฮปเทนที่อุณหภูมิตั้งแต่ 25 – 60 องศาเซลเซียส และสุดท้ายนำไปเผาที่อุณหภูมิ 1500 – 1650 องศาเซลเซียส จากการศึกษาพบว่าพฤติกรรมการไหลตัวของตัวประสานที่ผสมกันระหว่างความหนาแน่นสูงพอลิเอทิลีนกับพาราฟินไขและพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงเพียงอย่างเดียว เกิดลักษณะการไหลตัวแบบซูโดพลาสติก(Pseudoplastic) ส่วนพาราฟินไขเพียงอย่างเดียว เกิดลักษณะการไหลตัวแบบนิวโตเนียน(Newtonian) ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส และเมื่อเติมกรดสเตียริคในส่วนผสมของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงกับพาราฟินไขก็มีลักษณะแบบซูโดพลาสติกเช่นเดียวกันที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ในขณะที่เมื่อนำผงอะลูมินาผสมกับตัวเชื่อมประสานดังกล่าวก็ยังพบว่าพฤติกรรมการไหลตัวก็เป็นแบบซูโดพลาสติกอีกเช่นกัน ในขณะที่ความสัมพันธ์ระหว่างการไหลตัวของตัวประสานกับตัวประสานและตัวประสานกับอะลูมินา พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนตัวประสานเพิ่มขึ้นจะทำให้พฤติกรรมการไหลตัวแบบซูโดพลาสติกมีแนวโน้ม

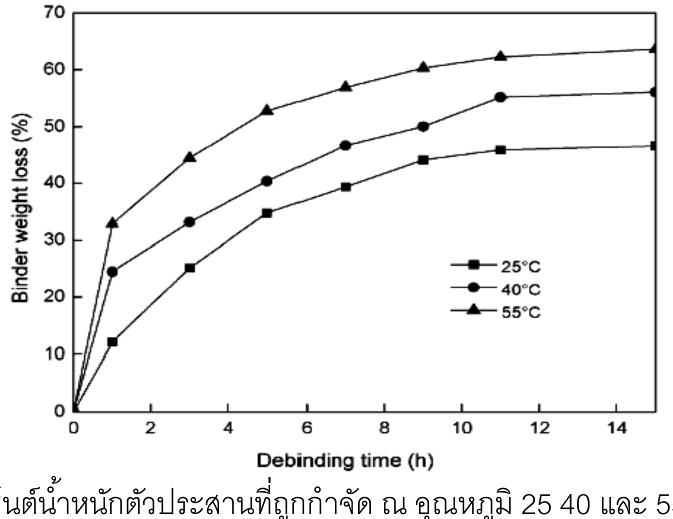
ลดลง เนื่องจากอัตราส่วนตัวประสานเพิ่มขึ้น เมื่อถูกกำจัดออกจะเกิดรูพรุนภายในเนื้อชิ้นงานปริมาณสูง ส่งผลให้สมบัติเชิงกลของชิ้นงานมีค่าลดลง เมื่อนำไปแช่ในตัวทำละลายเอ็น-เฮปเทนที่อุณหภูมิสูงจะทำให้พาราฟินไขละลายออกจากชิ้นงานได้เร็วกว่าเอ็น-เฮปเทนที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า ส่วนความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับอุณหภูมิในการเผาผนึกพบว่าที่อุณหภูมิ 1600 องศาเซลเซียส จะมีค่าความหนาแน่นเข้าใกล้ 99.6 เปอร์เซ็นต์ทางทฤษฎี นอกจากนี้โครงสร้างจุลภาคที่เผาผนึกที่อุณหภูมิที่ 1600 องศาเซลเซียสในระยะเวลา 2 4 6 และ 8 ชั่วโมงจะพบว่าขนาดของเกรนจะโตขึ้นตามระยะเวลาในการเผาผนึกที่มากขึ้น ซึ่งระยะเวลาในการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1600 องศาเซลเซียส ที่ระยะเวลา 2 ชั่วโมงจะให้สมบัติเชิงกลที่ดีที่สุด

V.V. Ivzhenko และคณะ[17] ศึกษาอุณหภูมิและความดันในการฉีดขึ้นรูปเพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลของวัสดุอะลูมิเนียมไนไตรด์ โดยเตรียมผงอะลูมิเนียมไนไตรด์ที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ 2 ตารางเมตรต่อกรัม พร้อมเติมผงอิตเทรียมออกไซด์ (Y_2O_3) 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ผสมให้เข้ากันด้วยวิธีการบดผสม เป็นเวลา 4 นาที จนได้ผงวัสดุเชิงประกอบ ตัวประสานที่ใช้ประกอบด้วยพาราฟินไขและขี้ผึ้งไขในอัตราส่วนเท่ากับ 94 : 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ฉีดขึ้นรูปด้วยความดัน 2 ถึง 9.5 เมกะพาสคัล ให้ชิ้นงานมีขนาด 32 มิลลิเมตร × 45 มิลลิเมตร × 6.3 มิลลิเมตร การกำจัดตัวประสานใช้วิธีแบบสุญญากาศและเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที จากการศึกษาพบว่าความหนาแน่นกับความแข็งแรงของชิ้นงานที่ฉีดขึ้นรูปของผงวัสดุเชิงประกอบอะลูมิเนียมไนไตรด์/อิตเทรียมออกไซด์มีปัจจัยที่ควบคุมสองอย่าง คือ อุณหภูมิกับความดันในการฉีดขึ้นรูป โดยความหนาแน่นของชิ้นงานที่มีค่ามากที่สุด คือ การฉีดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 83 องศาเซลเซียสและความดันในการฉีดขึ้นรูป 9.5 เมกะพาสคัล ขณะเดียวกันความแข็งแรงของชิ้นงานกลับพบว่าชิ้นงานที่ฉีดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 76 องศาเซลเซียส มีค่าความแข็งแรงเฉลี่ยมากที่สุด

D. Li และคณะ[18] ศึกษาอุณหภูมิการเผาผนึกที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุที่ผ่านการฉีดขึ้นรูปโดยเตรียมผงเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 440C กับตัวประสานชนิด พาราฟินไข น้ำมันถั่วลิสงบริสุทธิ์ (Pure peanut oil) และพอลิโอเลฟิน(Polyolefin) ปริมาณผงวัสดุเท่ากับ 57 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ผสมกับตัวประสานที่กล่าวมา ที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นนำวัตถุดิบฉีดขึ้นรูป กำจัดตัวประสานด้วยการแช่สารละลายเมทิลลีนไดคลอไรด์จากนั้นผ่านการเผาผนึกภายใต้เตาสุญญากาศที่อุณหภูมิ 1200 – 1260 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาทีจากการศึกษาพบว่า เมื่อกำจัดตัวประสานด้วยเมทิลลีนไดคลอไรด์ ตัวประสานชนิดไขและน้ำมันถูกกำจัดออกจากชิ้นงาน 62เปอร์เซ็นต์ เมื่อระยะเวลาผ่านไป 6 ชั่วโมง ขณะเดียวกันความหนาแน่นของ

ชิ้นงานจะมีค่าสูงสุดที่อุณหภูมิ เผาผนึกเท่ากับ 1260 องศาเซลเซียส ส่วนความต้านทานแรงดึงและความแข็งมีค่าสูงสุดที่อุณหภูมิเผาผนึกเท่ากับ 1240 องศาเซลเซียส จากการศึกษาดังกล่าว อุณหภูมิที่ทำให้สมบัติของวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 440C ได้สมบัติเชิงกลที่ดีสุดคืออยู่ในช่วงอุณหภูมิ 1240 องศาเซลเซียส

C. Jigui และคณะ[19] ได้ศึกษาสมบัติเชิงกลและโครงสร้างของการฉีดขึ้นรูปโลหะผสมระหว่างผงทังสเตนคาร์ไบด์และผงทองแดง โดยใช้ผงทองแดง 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตัวประสานประกอบไปด้วย พาราฟินไข พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง เอทิลีนไวนิลอะซิเตด และกรดสเตียริค ผสมผงวัสดุกับตัวประสานที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 40 นาที เพื่อเตรียมวัตถุดิบไปฉีดขึ้นรูปให้มีลักษณะชิ้นงานเป็นแท่งทรงสี่เหลี่ยม กระบวนการกำจัดตัวประสานแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ การใช้สารละลาย โดยแช่ชิ้นงานลงในน้ำมันก๊าด(Kerosene) จากนั้นนำไปให้เผาให้ความร้อนที่ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ภายใต้บรรยากาศไฮโดรเจน สุดท้ายนำไปผ่านกระบวนการเผาผนึกตั้งแต่ 1050 ถึง 1150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากการศึกษาพบว่า การกำจัดตัวประสานด้วยการแช่น้ำมันก๊าดที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส สามารถกำจัดตัวประสานชนิดพาราฟินไขและกรดสเตียริคได้ดีกว่าอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสดังภาพที่ 2.7 หลังจากผ่านกระบวนการเผาผนึก ความหนาแน่นของชิ้นงานขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ใช้เผาผนึก ซึ่งอุณหภูมิเผาผนึกที่ 1150 องศาเซลเซียส มีความหนาแน่นประมาณ 96 เปอร์เซ็นต์ตามทฤษฎี ส่วนการหดตัวของชิ้นงานที่อุณหภูมิดังกล่าวมีเปอร์เซ็นต์การหดตัวมากที่สุด สมบัติเชิงกลด้านแรงอัดที่อุณหภูมิ 1150 องศาเซลเซียส มีค่ามากที่สุดเท่ากับ 58 กิโลนิวตัน

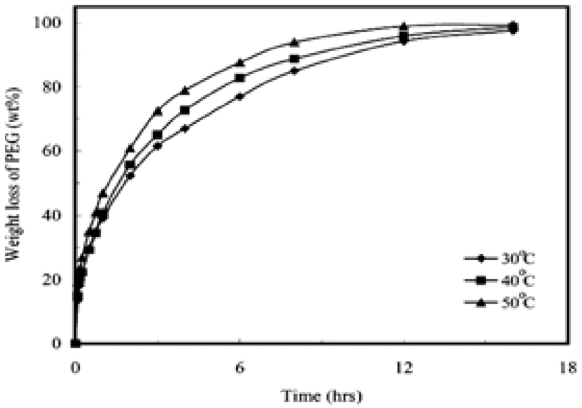


ภาพที่ 2.8 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักตัวประสานที่ถูกกำจัด ณ อุณหภูมิ 25 40 และ 55 องศาเซลเซียส[19]

2.3 การพัฒนาตัวประสานที่ละลายน้ำได้

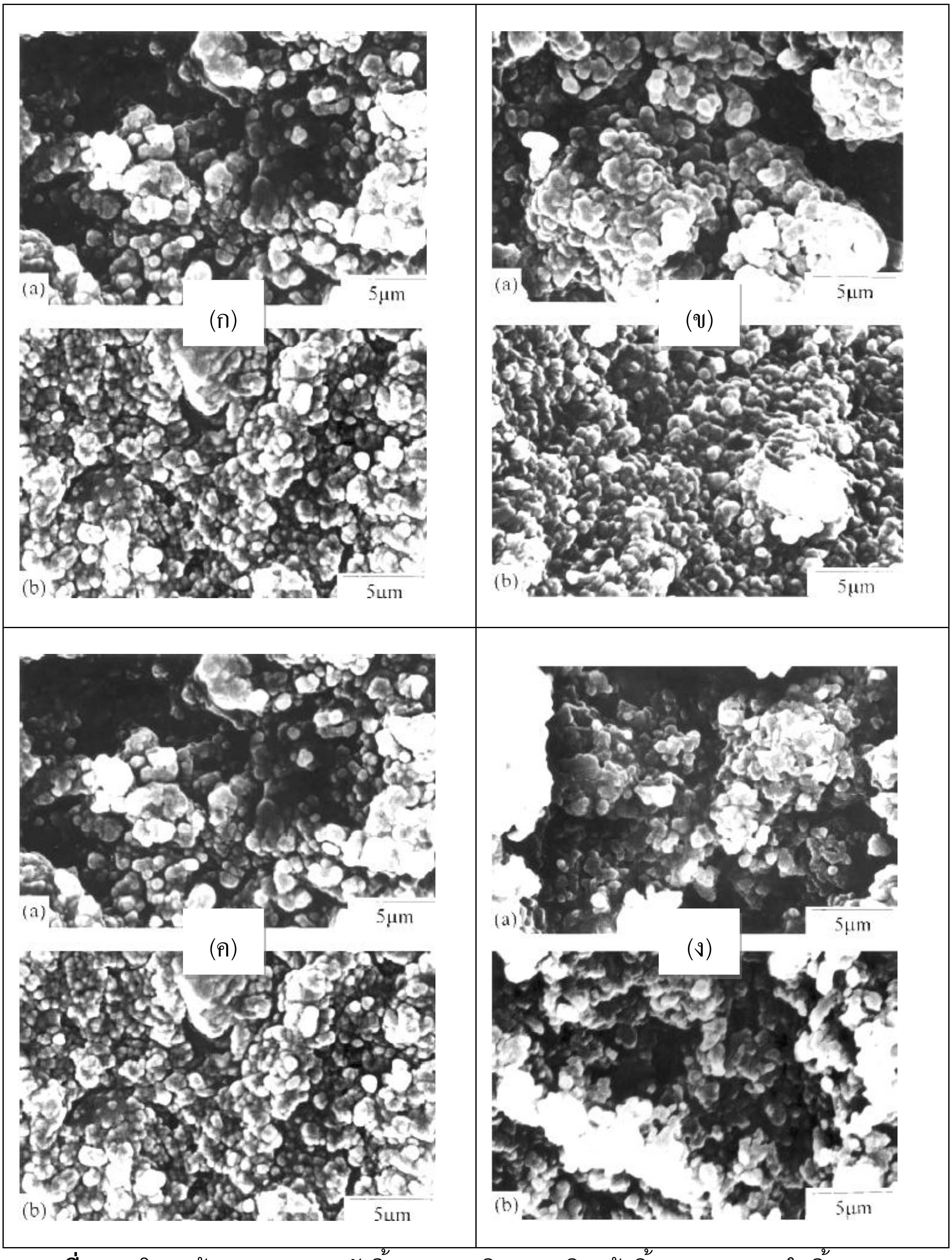
ในอดีตกระบวนการฉีดขึ้นรูปผงวัสดุมักใช้ตัวประสานที่เป็นสารพอลิเมอร์เป็นองค์ประกอบหลักสำหรับการฉีดขึ้นรูป ตัวประสานเพียงชนิดในกลุ่มดังกล่าวมักจะใช้วิธีการกำจัดตัวประสานด้วยทางความร้อนซึ่งเป็นวิธีการที่เสียเวลานานมากพร้อมกับพลังงานและค่าใช้จ่ายที่เกิดจากวิธีการดังกล่าว ต่อมาจึงได้มีการพัฒนาเลือกใช้ตัวประสานในกลุ่มดังกล่าวเพิ่มมากขึ้นโดยใช้ตัวประสานตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไปในกระบวนการฉีดขึ้นรูปผงวัสดุ โดยวิธีการกำจัดตัวประสานก็เริ่มมีการนำวิธีการกำจัดตัวประสานด้วยการแช่ตัวทำละลายอนินทรีย์มาช่วยในการกำจัดตัวประสาน จากนั้นจึงใช้วิธีทางความร้อนในขั้นตอนต่อไป ขณะเดียวกันการพัฒนาการกำจัดตัวประสานเหล่านี้ก็มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมทั้งมลพิษทางน้ำและทางอากาศ เพื่อแก้ปัญหาที่เกิดกับสิ่งแวดล้อมจึงได้มีการพัฒนาตัวประสานที่ละลายน้ำได้ ซึ่งนอกจากจะเป็นมิตรแก่สิ่งแวดล้อมเป็นการช่วยลดค่าใช้จ่ายของสารละลายที่มีราคาสูงในปัจจุบันแล้วยังช่วยในการลดระยะเวลาการเผาผนึกได้อีกด้วย

W. Yang และคณะ[20] ศึกษาผลของอุณหภูมิต่อน้ำของการกำจัดตัวประสานที่ใช้ในการฉีดขึ้นรูป โดยเตรียมผงอะลูมินาและตัวประสาน และกำจัดตัวประสานด้วยการละลายน้ำได้แก่ พอลิเอทิลีนไกลคอล พาราฟินไข และกรดสเตียริค อัตราส่วนของผงอะลูมินาและตัวประสานเท่ากับ 55 และ 45 ในอัตราส่วนเปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ฉีดขึ้นรูปให้เป็นรูปสี่เหลี่ยมมุมฉากขนาด 75 มิลลิเมตร × 5 มิลลิเมตร × 4 มิลลิเมตร ที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส และทำให้แห้งที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส และไปแช่น้ำที่มีอุณหภูมิ 30 กับ 50 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 5 นาที – 8 ชั่วโมง และทำให้แห้งที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง จากการศึกษาพบว่าการแช่น้ำที่อุณหภูมิสูงจะทำให้พอลิเอทิลีนไกลคอลละลายออกจากชิ้นงานได้เร็วกว่าน้ำที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า ในขณะเดียวกันอัตราปฏิกิริยาของการกำจัดตัวประสานสามารถเกิดได้สูงในช่วงเวลาเริ่มต้นและเริ่มลดลงเมื่อเวลาผ่านไป ขณะที่โครงสร้างจุลภาคที่ผิวและในเนื้อของอะลูมินามีลักษณะแนวโน้มที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและเวลาที่ใช้กำจัดตัวประสานกลไกในการกำจัดตัวประสานเกี่ยวข้องกับวิธีการแพร่จากความเข้มข้นสูงไปสู่ความเข้มข้นต่ำ และจะเข้าสู่สมดุลเมื่อระยะเวลาผ่านไป 3.5 ชั่วโมง และสิ้นสุดปฏิกิริยาของการกำจัดตัวประสาน



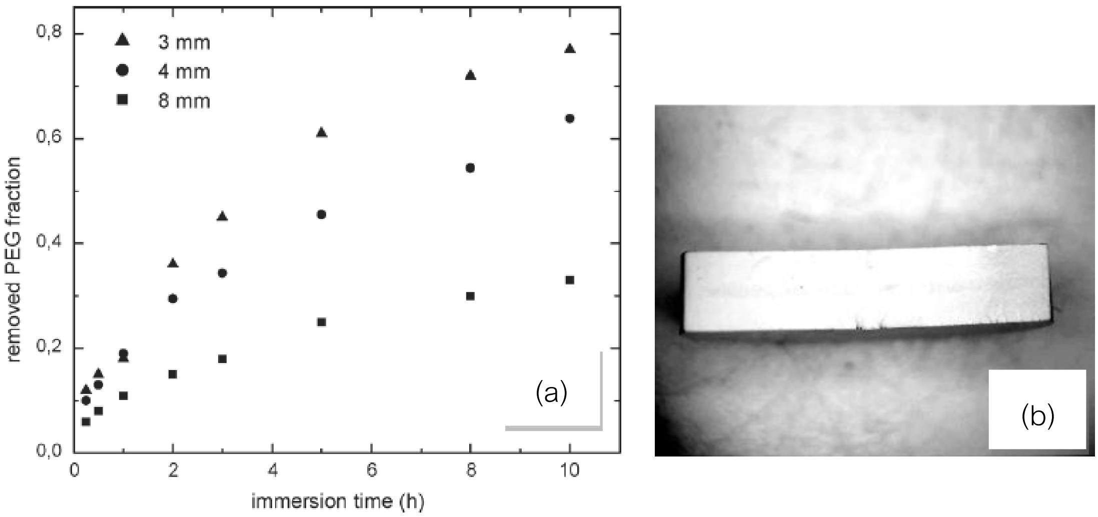
ภาพที่ 2.9 ผลของอุณหภูมิของการกำจัดตัวประสานต่อการกำจัดตัวประสานชนิด PEG ด้วยวิธีการแช่น้ำ ณ เวลาต่างๆ[20]

จากรูปที่แสดงในภาพที่ 2.10 ที่แสดงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานอะลูมินา เห็นได้ว่ารูป (ก) คือชิ้นงานหลังจากการฉีดขึ้นรูป (a) ผิวหน้าของชิ้นงานมีการเกาะรวมตัวกันของผงวัสดุกับตัวประสานชนิดพอลิเอทิลีนไกลคอลกันหนาแน่น ส่วน (b) ภายในเนื้อชิ้นงานก็มีลักษณะเช่นเดียวกันกับผิวหน้าของชิ้นงานแต่มีลักษณะการเกาะของผงวัสดุกับตัวประสานที่หนาแน่นกว่าได้ชัดเจน รูป(ข) เมื่อระยะเวลาผ่านไป 5 นาที (a)ผิวหน้าของชิ้นงานเริ่มเกิดช่องว่างเมื่อตัวประสานชนิดพอลิเอทิลีนไกลคอลถูกละลายในจำนวนเล็กน้อย ส่วน (b)ภายในเนื้อชิ้นงานก็เกิดการละลายของตัวประสานเช่นเดียวกับผิวหน้าชิ้นงานแต่อัตราการเกิดได้น้อยกว่า รูป(ง) เมื่อระยะเวลาผ่านไป 3 ชั่วโมง (a) ผิวหน้าของชิ้นงานเกิดช่องว่างจากการละลายของตัวประสานชนิดพอลิเอทิลีนไกลคอลเป็นจำนวนมากอัตราการละลายเริ่มลดลง ส่วน (b) ภายในชิ้นงานเกิดช่องว่างชัดเจนระหว่างผงวัสดุอะลูมินาเมื่อเปรียบเทียบกับรูป(ก) ส่วน (b) หลังจากตัวประสานชนิดพอลิเอทิลีนไกลคอล



ภาพที่ 2.10 โครงสร้างจุลภาครอยหักชิ้นงานอะลูมินา (a) ผิวหน้าชิ้นงาน (b) ภายในชิ้นงาน โดย (ก) หลังจากฉีดขึ้นรูป (ข) เวลา 5 นาที (ค) เวลา 2 ชั่วโมง (ง) เวลา 3 ชั่วโมง แช่น้ำที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส[20]

V.A. Krauss และคณะ[21] ศึกษาการกำจัดตัวประสานชนิดพอลิเอทิลีนไกลคอลด้วยการแช่น้ำ โดยเตรียมผงอะลูมินากับตัวประสานชนิดพอลิเอทิลีนไกลคอล พอลิไวนิลบิวทิรอล โดยปริมาณผงวัสดุเท่ากับ 55 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร และตัวประสานชนิดพอลิเอทิลีนไกลคอลกับพอลิไวนิลบิวทิรอล ในอัตราส่วน 2:1 ผสมให้เข้ากันที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ฉีดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 175 องศาเซลเซียส ลักษณะชิ้นงานเป็นแท่งทรงกลมความยาว 165 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 24 – 28 มิลลิเมตร และมีความหนาต่างๆ กัน คือ 3 4 และ 8 มิลลิเมตร จากนั้นนำชิ้นงานผ่านกระบวนการกำจัดตัวประสานที่อุณหภูมิห้อง จากการศึกษาพบว่าขนาดความหนาของชิ้นงานที่ฉีดขึ้นรูปของผงวัสดุอะลูมินากับตัวประสานมีผลต่อการกำจัดตัวประสานชนิดพอลิเอทิลีนไกลคอลดังภาพที่ 2.11 (a) เห็นได้ว่าชิ้นงานที่มีความหนา 3 มิลลิเมตร ตัวประสานชนิดพอลิเอทิลีนไกลคอลถูกกำจัดออกจากชิ้นงานได้มากกว่าชิ้นงานที่มีความหนา 8 มิลลิเมตร เมื่อเวลาผ่านไป หลังจากผ่านกำจัดตัวประสานชนิดพอลิเอทิลีนไกลคอลยังสามารถคงรูปอยู่ได้ดังภาพที่ 2.12 (b)



ภาพที่ 2.12 (a) สัดส่วนของตัวประสานที่ถูกกำจัดออกจากชิ้นงานเปรียบเทียบกับความหนา[21]
(b) ภาพถ่ายชิ้นงานหลังจากกำจัดตัวประสานที่เวลา 3 ชั่วโมง[21]

N. Chuankrerkkul และคณะ[22] ศึกษากระบวนการกำจัดตัวประสานของวัสดุฮาร์ดเมทัลที่ฉีดขึ้นรูปด้วยการแช่น้ำ โดยเตรียมผงทังสเตนคาร์ไบด์และผงโคบอลต์ เพื่อศึกษาการลดเวลาในการกำจัดตัวประสานในกระบวนการฉีดขึ้นรูป โดยอัตราส่วนของผงทังสเตนคาร์ไบด์และผงโคบอลต์เท่ากับ 94 และ 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ขณะเดียวกันตัวประสานที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่ พอลิเอทิลีนไกลคอล พอลิเมทิลเมทาคริเลท(Polymethyl methacrylate) ในอัตราส่วนของพอลิเอทิลีนไกลคอลกับพอลิเมทิลเมทาคริเลทเท่ากับ 85 และ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ฉีดขึ้นรูปให้เป็นรูปสี่เหลี่ยมมุมฉากขนาด 5 มิลลิเมตร × 5 มิลลิเมตร × 55 มิลลิเมตร ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส และความดันที่ใช้ฉีดขึ้นรูปอยู่ที่ 44 เมกะพาสคัล ส่วนวิธีการกำจัดตัวประสานชนิดพอลิเอทิลีนไกลคอลจะใช้วิธีการแช่น้ำที่อุณหภูมิ 40 กับ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลาตั้งแต่ 30 นาที ถึง 6 ชั่วโมงและสุดท้ายนำไปเผาที่อุณหภูมิ 1375 - 1500 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 30 60 และ 120 นาทีพบว่า การแช่น้ำที่อุณหภูมิสูงจะทำให้พอลิเอทิลีนไกลคอลละลายออกจากชิ้นงานได้เร็วกว่าน้ำที่มีอุณหภูมิต่ำเช่นเดียวกับ W. Yang[20] นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณพอลิเมทิลเมทาคริเลททำให้ความหนาแน่นและความแข็งของชิ้นงานมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นหลังจากผ่านการกำจัดพอลิเอทิลีนไกลคอล ความแข็งแรงของชิ้นงานอยู่ในช่วงระหว่าง 14 – 17 เมกะพาสคัลและความหนาแน่นของชิ้นงานมีค่ามากกว่า 95 เปอร์เซ็นต์ตามค่าที่ได้จากทฤษฎี

จากงานวิจัยที่กล่าวขั้นต้นกระบวนการฉีดขึ้นรูปผงวัสดุมักประยุกต์ใช้กับวัสดุเซรามิกหรือวัสดุโลหะเป็นส่วนใหญ่ โดยมีตัวประสานที่ใช้ประกอบไปด้วยพาราฟินไข พอลิโพรไพลีน พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง และกรดสเตียริค เป็นองค์ประกอบหลัก ตัวประสานที่กล่าวมานี้ส่วนใหญ่แล้วต้องใช้ตัวทำละลายทางอินทรีย์ซึ่งได้แก่ เฮกเซน เฮปเทน ในการกำจัดตัวประสาน ซึ่งจะทำให้เกิดพิษแก่สิ่งแวดล้อม ต่อมาจึงได้มีงานวิจัยที่ศึกษาการนำตัวประสานชนิดอื่นที่สามารถละลายในน้ำได้ทำให้เกิดเป็นมิตรแก่สิ่งแวดล้อม โดยตัวประสานที่สามารถละลายน้ำได้ คือ ตัวประสานชนิดพอลิเอทิลีนไกลคอล ซึ่งได้นำมาใช้ควบคู่กับตัวประสานอื่นๆ ที่ไม่เกิดการละลายน้ำ และตัวประสานที่ยังอยู่ในชิ้นงานที่ถูกฉีดขึ้นรูปจะทำหน้าที่ให้ผงวัสดุเกาะรวมตัวเป็นรูปคงอยู่ได้จึงทำให้งานวิจัยนี้สนใจนำผงอะลูมินาและวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์กับตัวประสานชนิดพอลิเอทิลีนไกลคอลฉีดขึ้นรูปและใช้วิธีการกำจัดตัวประสานให้เป็นมิตรแก่สิ่งแวดล้อม สมบัติของชนิดตัวประสานที่เลือกมาใช้ในการทดลองครั้งนี้ได้แก่ ตัวประสานชนิดพอลิเอทิลีนไกลคอลที่สามารถละลายน้ำได้ จุดหลอมเหลว ณ อุณหภูมิ 44 ถึง 48 องศาเซลเซียส ตัวประสานชนิดพอลิไวนิลบิวทิรอลที่ไม่สามารถละลายน้ำได้ แต่ละลายได้ในสารละลายประเภทคลอโรฟอร์ม (Chloroform) และกรดสเตียริคที่สามารถละลายน้ำได้เพียงเล็กน้อย

บทที่ 3
วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้ทำการฉีดขึ้นรูปผงอะลูมินาและผงวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์ โดยใช้ตัวประสานที่ประกอบไปด้วยพอลิเอทิลีนไกลคอล(Polyethylene glycol,PEG) พอลิไวนิลบิวทิรอล (Polyvinyl butyral,PVB) เป็นหลัก และกำจัดตัวประสานชนิด PEG ด้วยวิธีการแช่น้ำ ต่อจากนั้นนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส และทำการเผาผนึกแบบปราศจากแรงดันที่อุณหภูมิ 1600 องศาเซลเซียส บรรยากาศในอาร์กอน ซึ่งบทนี้ได้กล่าวถึงวัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง ตัวแปรในการทดลอง เทคนิคการเตรียมชิ้นงาน การวัดสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกล รวมทั้งการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค ซึ่งแบ่งออกเป็นหัวข้อ ต่างๆ ดังต่อไปนี้

3.1 วัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

วัตถุดิบหลักที่ใช้ในการทดลองนี้แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ ผงอะลูมินา (A32 จากบริษัท Nippon Light Metal ประเทศญี่ปุ่น) เป็นอะลูมินาที่มีความบริสุทธิ์มากกว่าร้อยละ 99.99 โดยน้ำหนัก และใช้ผงทังสเตนคาร์ไบด์ (จากบริษัท ATI Alldyne ประเทศสหรัฐอเมริกา) เป็นเนื้อผงวัสดุ

สำหรับตัวประสานที่ใช้แบ่งออกเป็น 3 ชนิด คือ พอลิเอทิลีนไกลคอล (PEG) (โมเลกุลเฉลี่ย 1500 จากบริษัท Acros Organics ประเทศเบลเยียม) พอลิไวนิลบิวทิรอล (PVB) (จากบริษัท Acros Organics ประเทศเบลเยียม) และกรดสเตียริค (SA) (จากบริษัท Ajax Finechem ตัวแทนจำหน่ายประเทศไทย)

3.2 การเตรียมผงตัวอย่าง

3.2.1 สัณฐานวิทยา

ตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาของผงอะลูมินา ผงทังสเตนคาร์ไบด์ โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope) (JSM-6480LV, JEOL) สำหรับการเตรียมตัวอย่างก่อนนำไปทดสอบทำโดยติดเทปกาวคาร์บอนด้านบนของแท่งยึดชิ้นงานวงกลม และโรงผงตัวอย่างให้กระจายลงบนเทปกาวคาร์บอน จากนั้นใช้ลูกยางเป่าลมเป่าลมผงที่ไม่ยึดติดบนแท่นยึดชิ้นงานวงกลมออก จากนั้นฉาบผิวด้วยทองเพื่อให้เกิดการนำไฟฟ้าบนผิวหน้าของผงตัวอย่างที่ทดสอบ ต่อจากนั้นจึงนำแท่งยึดชิ้นงานวงงกลมเข้าเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและใช้ความต่างศักย์ 15 กิโลโวลต์

3.2.2 การกระจายตัวของอนุภาคของผงวัตถุดิบ

ตรวจสอบการกระจายขนาดอนุภาคของผงอะลูมินา ผงทังสเตนคาร์ไบด์ และผงวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์ โดยนำผงตัวอย่างทั้งสามมากระจายตัวในน้ำกลั่น และใช้เทคนิค Laser Light Scattering (Particle Size Analyzer, Mastersizer 2000, Malvern)

3.3 ระเบียบวิธีทดลอง

3.3.1 การออกแบบการทดลอง

สำหรับการทดลองในงานวิจัยนี้ได้แบ่งออกเป็น 2 ส่วน กล่าวคือ

การทดลองส่วนที่ 1 เป็นการทดลองเพื่อหาปริมาณของผงวัสดุ(Powder loading) กับตัวประสานที่สามารถฉีดขึ้นรูปด้วยผงวัสดุอะลูมินาและวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์โดยมีอัตราส่วนของตัวประสานชนิด PEG และ PVB เท่ากับ 85 กับ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเป็นอัตราส่วนของตัวประสานคงที่ โดยอัตราส่วนส่วนผงวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์มีอัตราส่วนระหว่างอะลูมินาและทังเสตนคาร์ไบด์ร้อยละ 90 : 10 โดยน้ำหนัก ต่อจากนั้นกำจัดตัวประสานด้วยวิธีแช่น้ำและเผาตามลำดับ ณ อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส และทำการเผาผนึก ณ อุณหภูมิ 1600 องศาเซลเซียส ตามขั้นตอนในด้วยภาพที่ 3.3

การทดลองตอนที่ 2 เป็นการทดลองเพื่อหาอัตราส่วนผสมของตัวประสานชนิด PEG และ PVB ในชิ้นงานฉีดขึ้นรูปด้วยผงอะลูมินาและผงวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์ อัตราส่วนตัวประสานชนิด PEG ร้อยละ 90 85 80 โดยน้ำหนัก และชนิด PVB ร้อยละ 10 15 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ส่วนผงวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์ยังมีการเพิ่ม SA ในอัตราส่วนร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก แล้วผ่านกระบวนการเช่นเดียวกับการทดลองที่ 1 ในภาพที่ 3.4

3.3.2 การเตรียมตัวอย่าง

แบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ

3.2.2.1 ตัวประสานและผงวัสดุ

➢ ผงวัสดุอะลูมินา

1) เตรียมส่วนผสมผงวัสดุอะลูมินากับตัวประสานชนิด PVB โดยชั่งน้ำหนักในอัตราส่วนร้อยละ 10 15 และ 20 โดยน้ำหนัก จากนั้นเตรียมเอทานอล 150 มิลลิลิตร ผสมกับผงวัสดุดังกล่าวข้างต้นให้เข้ากันด้วยการกวนเป็นเวลา 15 นาที ด้วยแท่งกวนแม่เหล็ก (magnetic stirrer)

2) นำส่วนผสมจากข้อ 1) ที่เข้ากันแล้วอบแห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส แล้วนำวัตถุดิบอบแห้งบดให้เป็นผง

➢ ผงวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์

1) เตรียมส่วนผสมผงอะลูมินา ผงทังสเตนคาร์ไบด์ ตัวประสานชนิด PVB ตามอัตราส่วนเช่นเดียวกับผงวัสดุอะลูมินา และบดผสมผงวัตถุดิบและตัวประสานในเอทานอลให้เข้ากันด้วยลูกบดอะลูมินาเป็นเวลา 4 ชั่วโมง

2) คัดแยกลูกบดออกจากวัตถุดิบและอบแห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส แล้วนำวัตถุดิบอบแห้งบดให้เป็นผงเช่นเดียวกันกับผงวัสดุอะลูมินา

➢ ผงวัตถุดิบสำหรับฉีดขึ้นรูป

เตรียมตัวประสานชนิด PEG ในอัตราส่วนร้อยละ 90 85 และ 80 โดยน้ำหนัก ทำให้เป็นของเหลวด้วยการอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส แล้วนำไปผสมให้เข้ากับผงวัสดุอะลูมินาและผงวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์ที่บดเป็นผงจากการเตรียมผงวัสดุอะลูมินาและผงวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์จนกลายเป็นของผสม (Feedstock)

3.2.2.2 **การเตรียมชิ้นงานวัสดุอะลูมินา**

1) ขึ้นรูปผงส่วนผสมวัสดุอะลูมินาจากหัวข้อ 3.2.2.1 ด้วยเครื่องฉีดขึ้นรูปแบบที่มีแท่งดัน (Plunger – type injection moulding machine) ขนาดของแม่พิมพ์ที่ฉีดชิ้นงานนั้นมีพื้นที่ภาคตัดขวางเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 5 มิลลิเมตร × 5 มิลลิเมตร และมีความยาว 55 มิลลิเมตร ดังแสดงในภาพที่ 3.1

2) นำชิ้นงานตัวอย่างที่ผ่านการฉีดขึ้นรูปแล้วขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 120 เพื่อแต่งผิวชิ้นงานให้เรียบ นำตัวอย่างชิ้นงานไปกำจัดตัวประสานชนิด PEG ด้วยวิธีการแช่น้ำ แล้วอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส

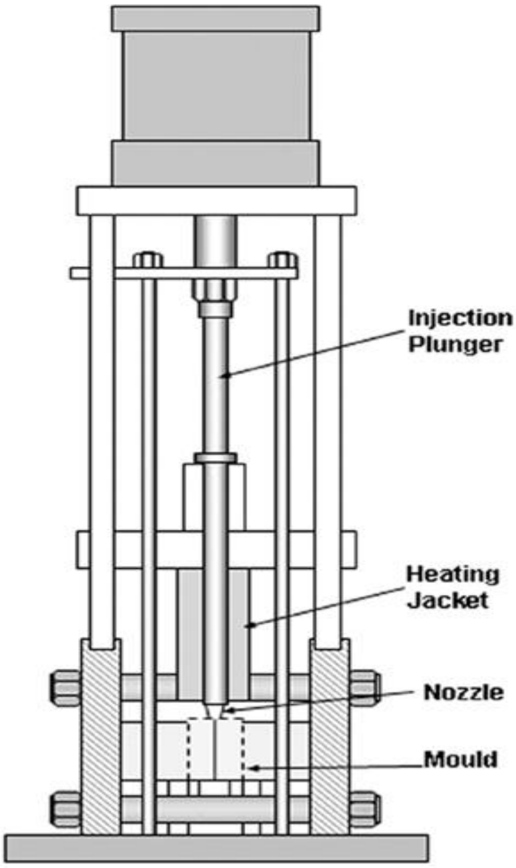
3) นำตัวอย่างชิ้นงานที่ผ่านอบแห้งมาเผาไล่ตัวประสานด้วยความร้อน (Thermal debinding) ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เพื่อกำจัดตัวประสานชนิด PVB

4) นำตัวอย่างชิ้นงานใส่ในแม่แบบแกรไฟต์ที่เคลือบด้วยโบรอนไนไตรด์ แล้วนำไปเผาในเตาแกรไฟต์ที่ควบคุมบรรยากาศอาร์กอน (ดังแสดงในภาพที่ 3.2) โดยใช้อุณหภูมิการเผาที่อุณหภูมิ 1600 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง

3.2.2.3 **ชิ้นงานผงวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์**

1) นำส่วนผสมผงวัสดุเชิงประกอบ จากหัวข้อ 3.2.2.1 ขึ้นรูปด้วยเครื่องฉีดขึ้นรูปแบบที่มีแท่งดัน ขนาดของแม่พิมพ์ที่ฉีดชิ้นงานนั้นมีพื้นที่ภาคตัดขวางเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 5 มิลลิเมตร × 5 มิลลิเมตร และมีความยาว 55 มิลลิเมตร

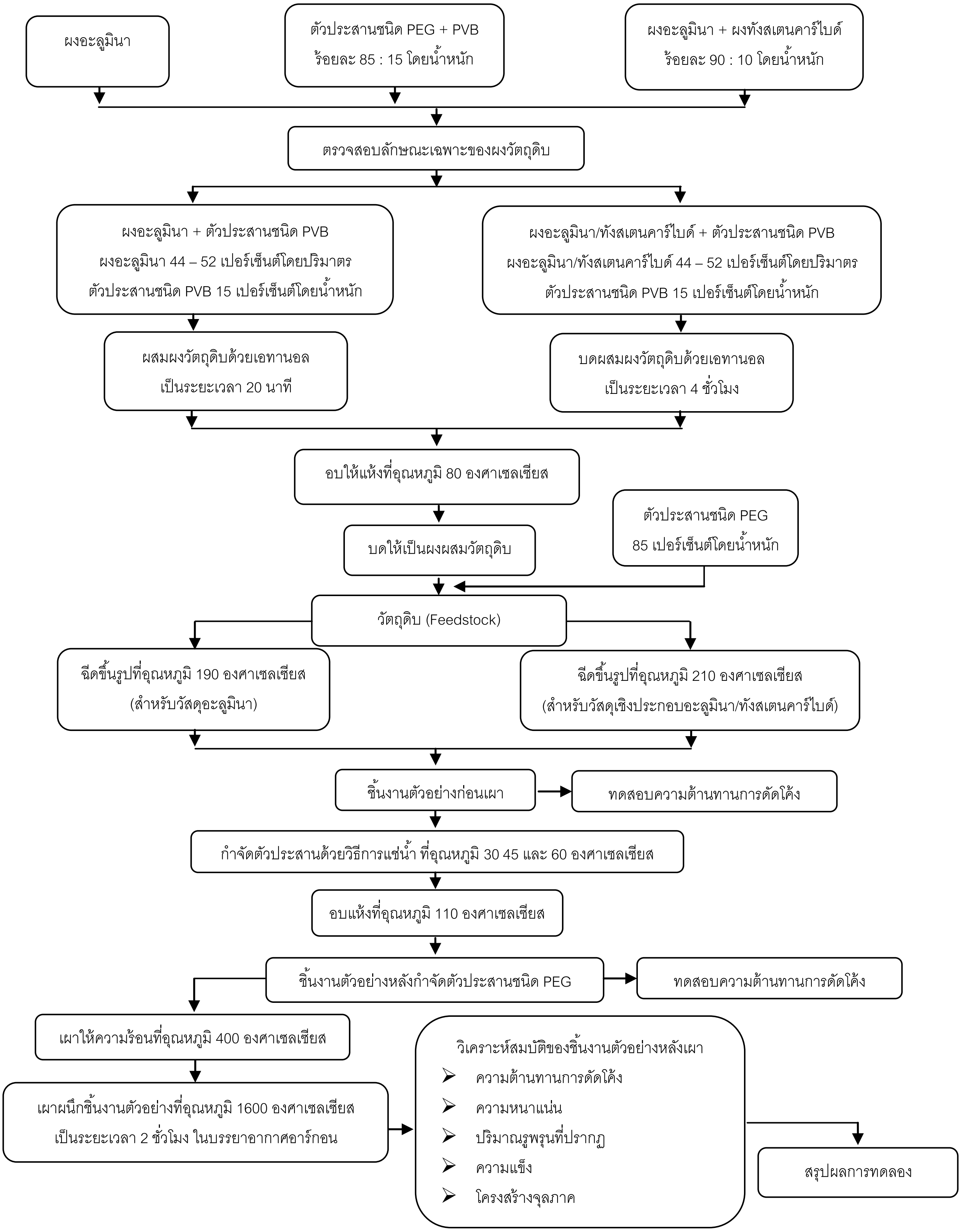
2) นำตัวอย่างชิ้นงานที่ผ่านการฉีดขึ้นรูปผ่านกระบวนการข้อ 3 และ 4 ในหัวข้อ 3.2.2.2



ภาพที่ 3.1 เครื่องฉีดขึ้นรูปแบบที่มีแท่งดัน (Plunger – type injection moulding machine)[22]

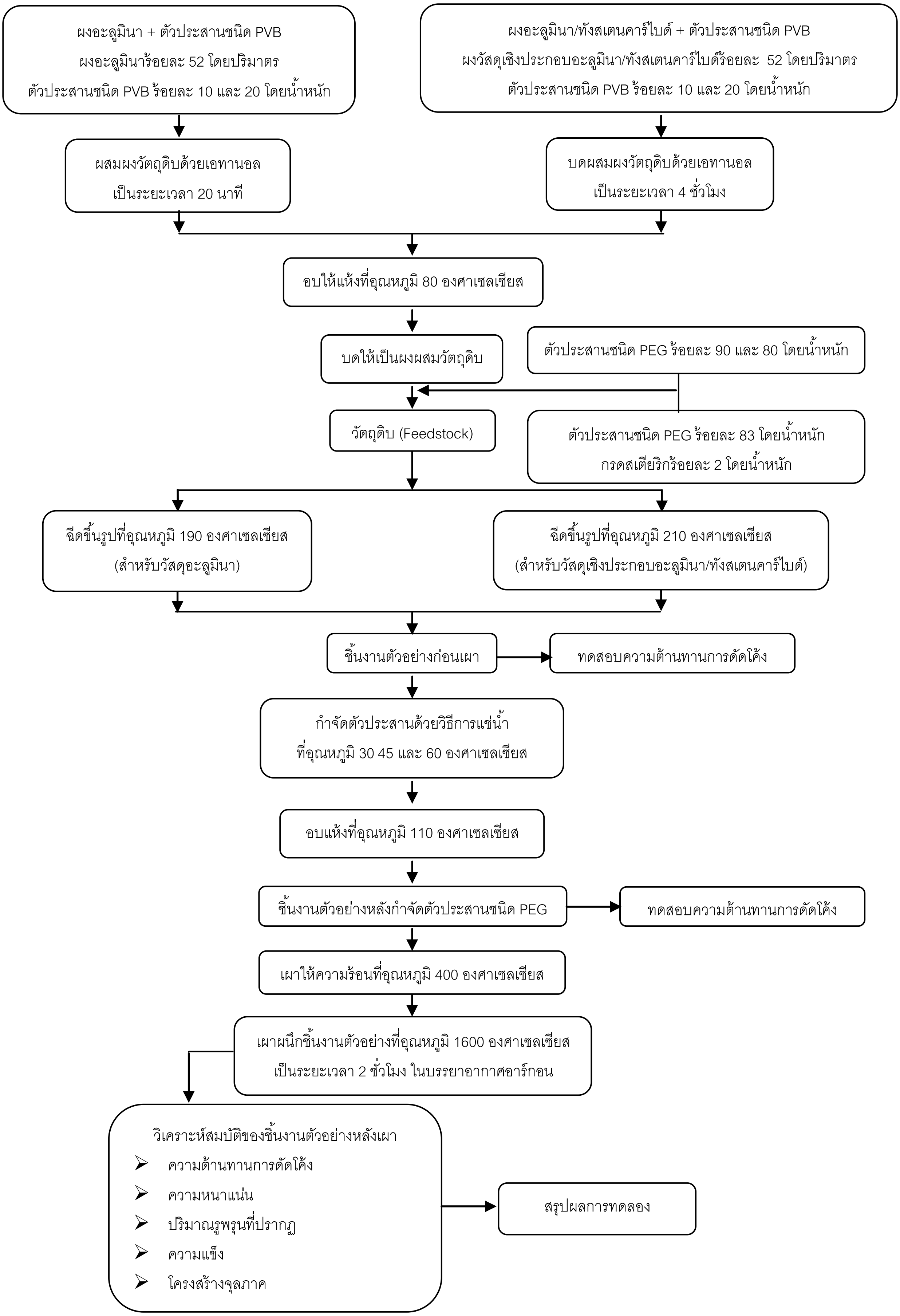
ภาพที่ 3.2 เตาแกรไฟต์ที่ควบคุมบรรยากาศอาร์กอน

การทดลองที่ 1



ภาพที่ 3.3 แผนผังงานวิจัยวัสดุอะลูมินาและวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์

การทดลองที่ 2



ภาพที่ 3.4 แผนงานวิจัยเปรียบเทียบอัตราส่วนตัวประสานของปริมาณผงวัสดุ 52 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร

3.4 การวิเคราะห์สมบัติของตัวอย่าง

3.4.1 การกำจัดตัวประสานชนิด PEG

การกำจัดตัวประสานชนิด PEG ด้วยการแช่น้ำ (Water leaching) โดยใช้อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (Water bath) ที่อุณหภูมิ 30 45 และ 60 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เป็นระยะเวลา 30 นาที ถึง 5 ชั่วโมง ก่อนกำจัดตัวประสานนำชิ้นงานตัวอย่างที่ผ่านการขึ้นรูปชั่งน้ำหนักแล้วจดบันทึกค่าน้ำหนักเอาไว้ ต่อจากนั้นนำชิ้นงานตัวอย่างแช่น้ำตามอุณหภูมิดังกล่าว เมื่อครบตามกำหนดเวลา นำชิ้นงานตัวอย่างอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส สุดท้ายนำชิ้นงานตัวอย่างชั่งน้ำหนักอีกครั้งหนึ่ง น้ำหนักที่หายไปของชิ้นงานตัวอย่าง คือ น้ำหนักของตัวประสาน PEG ที่ถูกกำจัดไปออกจากชิ้นงานตัวอย่าง

วิธีการคำนวณหาเปอร์เซ็นต์น้ำหนัก PEG ที่ถูกกำจัดออกจากชิ้นงานตัวอย่างมีดังต่อไปนี้

1) น้ำหนัก PEG ที่หายไป = น้ำหนักหลังจากฉีดขึ้นรูป – น้ำหนักหลังแช่น้ำและแห้ง (3.1)

2) $$\text{เปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่ PEG ที่หายไป} = \frac{\text{น้ำหนัก PEG ที่หายไป}}{\text{น้ำหนัก PEG ในชิ้นงาน}} \times 100 \qquad (3.2)$$

3.4.2 **ความต้านทานต่อการดัดโค้ง** (Flexural strength)

ความต้านทานต่อการดัดโค้งของวัสดุด้วยวิธีการทดสอบแรงดังโค้งแบบ 3 จุด ตาม ASTM : Designation C 1161-02c โดยใช้เครื่อง Universal testing machine (5882, Instron) โดยแบ่งเป็นการทดสอบชิ้นงานตัวอย่าง 3 ลักษณะมีขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานตัวอย่างดังต่อไปนี้

3.4.2.1 **ชิ้นงานก่อนการเผา** (Green specimens) **และชิ้นงานตัวอย่างหลังจากกำจัดตัวประสาน** PEG (Brown specimens)

หลังจากการฉีดขึ้นรูปชิ้นงานตัวอย่างแล้ว นำชิ้นงานตัวอย่างตกแต่งเป็นทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดประมาณ 4 - 5 มิลลิเมตร × 4 - 5 มิลลิเมตร ×30 - 45 มิลลิเมตร ด้วยเครื่องขัดให้ได้ระนาบด้วยกระดาษทรายเบอร์ 120 แบ่งชิ้นงานที่เตรียมได้ออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 นำไปทดสอบความต้านทานการดัดโค้ง ส่วนที่ 2 นำชิ้นงานไปกำจัดตัวประสานชนิด PEG ด้วยวิธีการแช่น้ำเป็น 24 ชั่วโมง จากนั้นอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียสแล้วนำไปทดสอบความต้านทานการดัดโค้งต่อไป

3.4.2.2 **ชิ้นงานหลังจากการเผาผนึก** (Sintered specimens)

ตกแต่งชิ้นงานทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดกว้าง × หนา × ยาว ประมาณ 3 – 4 มิลลิเมตร × 3 - 4 มิลลิเมตร × 28 – 40 มิลลิเมตร ขัดชิ้นงานให้ได้ระนาบด้วยจานขัดเพชรเบอร์ 170 ด้วยเครื่องขัด จากนั้นนำชิ้นงานตัวอย่างไปเตรียมไปทดสอบ โดยมีตัวแปรในการทดสอบได้แก่ ความกว้างของจุดรองรับตัวอย่าง (L) เท่ากับ 20 มิลลิเมตร ความเร็วในการกดดัดโค้งเท่ากับ 0.2 มิลลิเมตรต่อนาที และจำนวนตัวอย่างเท่ากับ 7 ชิ้น บันทึกค่าความหนา (d) และความกว้างของชิ้นงาน (b) ตลอดจนค่าแรงกระทำ (P) ที่ได้ขณะชิ้นงานแตกหักและคำนวณความต้านทานต่อการดัดโค้ง (σ_f) ดังสมการ

$$\text{Flexural strength} \quad (\sigma_f) = \frac{3PL}{2bd^2} \tag{3.3}$$

3.4.3 **ความหนาแน่นของชิ้นงานหลังเผา** (Density of sintered specimens)

ความหนาแน่นหลังเผาของตัวอย่างหรือความหนาแน่นรวม (bulk density , ρ_{bulk}) ใช้หลักการแทนที่ของของเหลว (Archimedes' method) โดยคำนวณความหนาแน่นรวมจากน้ำหนักที่ชั่งได้ตาม ASTM : Designation C830-93 และคำนวณความหนาแน่นเชิงทฤษฎีจากกฎของผสม (Rule of mixtures) แล้วคำนวณความหนาแน่นสัมพันธ์จากความหนาแน่นรวมและความหนาแน่นเชิงทฤษฎี

สำหรับวิธีการหาความหนาแน่นรวมโดยใช้หลักอาร์คิมีดิสทำได้โดยนำตัวอย่างชิ้นงานหลังจากการทดสอบความต้านทานต่อการดัดโค้งใส่ในบีกเกอร์ต้มชิ้นงานตัวอย่างในน้ำกลั่นเป็นระยะเวลา 5 ชั่วโมง หลังจากทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง นำตัวอย่างชิ้นงานหลังจากแช่น้ำเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง ชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง โดยชั่งน้ำหนักตัวอย่างชิ้นงานน้ำหนักเปียก (W_{sat}) น้ำหนักของตัวอย่างชิ้นงานในน้ำ (W_{sus}) นำชิ้นงานตัวอย่างอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส จากนั้นชั่งน้ำหนักแห้งของตัวอย่างชิ้นงาน (W_{dry}) คำนวณความหนาแน่นรวม (W_{total}) ความหนาแน่นเชิงทฤษฎี (ρ_{th}) ความหนาแน่นสัมพัทธ์ (%TD) และปริมาณรูพรุนจริงปรากฏ (Apparent porosity) ดังสมการ (3.4) - (3.6) ตามลำดับ

$$\text{Bulk density} \quad (\rho_{bulk}) = \frac{W_{dry}}{W_{sat}-W_{sus}} \times \rho_{water} \tag{3.4}$$

$$\text{Relative density (\%TD)} \quad = \frac{\rho_{bulk}}{\rho_{th}} \times 100 \tag{3.5}$$

$$\text{Apparent porosity (\%)} \quad = \frac{W_{sat} - W_{dry}}{W_{sat} - W_{sus}} \tag{3.6}$$

ความหนาแน่นของอะลูมินา และทังสเตนคาร์ไบด์ มีค่าเท่ากับ 3.97 และ 15.8 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร[23] ความหนาแน่นของวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์ที่มีอัตราส่วน 90 : 10 โดยน้ำหนัก คือ 4.29 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ดังสมการ (3.7)

$$\text{Density}_{total} = \frac{M_{total}}{V_{total}} = \frac{M_1+M_2}{\frac{M_1}{D_1}+\frac{M_2}{D_2}} \tag{3.7}$$

3.4.4 **ความแข็ง** (Hardness)

ความแข็งใช้เทคนิคการกดด้วยหัวกดวิกเกอร์สโดยใช้เครื่อง Vickers hardness tester (HV-50A, Laizhou Huayin Taiwan) และใช้แรงกด 10 กิโลกรัม เป็นระยะเวลา 15 วินาที หลังจากนั้น ทำการคำนวณหาความแข็งของตัวอย่างโดยวัดเส้นทแยงมุมของรอยกด (d_1 และ d_2) บนตัวอย่าง ตาม ASTM : Designation C 1327-03 การเตรียมชิ้นงานตัวอย่างก่อนทำการวัดความแข็ง สามารถเตรียมได้ดังขั้นตอนต่อไปนี้

ทำตัวเรือนชิ้นงานเพื่อสะดวกในการจับสำหรับการขัดผิวหน้าโดยการทาวาสลีน บนผิวหน้าของแผ่นใส่ที่วางอยู่ในถาดและรอบด้านในของท่อพีวีซีซึ่งใช้เป็นแบบหล่อเรือนชิ้นงาน ตัวอย่าง ต่อจากนั้นนำท่อพีวีซีวางบนแผ่นใส่ที่วางอยู่บนถาดและอุดบริเวณรอยรั่วของท่อพีวีซี กับผิวสัมผัสของแผ่นใสด้วยดินน้ำมัน วางตัวอย่างชิ้นงานบนแผ่นใสด้านในของท่อพีวีซี แล้วนำเรซินอีพอกซีที่ผสมกับสารช่วยในการแข็งตัวในอัตราส่วน 60 : 40 หลังจากนั้นปล่อยให้เรซินอีพอกซีแข็งตัว 24 ชั่วโมง จนสามารถนำตัวเรือนชิ้นงานออกจาแบบท่อพีวีซีได้ เตรียมผิวของชิ้นงานตัวอย่างด้วยขัดผิว โดยใช้วิธีขัดหยาบด้วยกระดาษทรายเบอร์ 120 240 600 800 1200 และ 2500 ตามลำดับ หลังจากเปลี่ยนเบอร์ของกระดาษทรายทุกครั้งให้ล้างอนุภาคที่เกาะผิว หน้าชิ้นงานตัวอย่าง ด้วยน้ำกลั่นและสั่นด้วยเครื่องสั่นสะเทือนความถี่สูงอีกครั้งหนึ่ง หลังจากขัดผิวหน้าชิ้นงาน ตัวอย่างด้วยวิธีการขัดหยาบ ขั้นตอนต่อมานำตัวเรือนชิ้นงานผ่านวิธีการขัดละเอียดด้วยผงเพชร ขนาด 3 ไมครอนและ 1 ไมครอน ตามลำดับ บนผ้าสักหลาดหลังจากเปลี่ยนเบอร์กระดาษทรายให้ล้างอนุภาคที่เกาะผิวหน้าชิ้นงานตัวอย่างด้วยน้ำกลั่นและนำเข้าเครื่องสั่นสะเทือนคลื่นความถี่สูง อีกครั้งหนึ่ง เช็ดผิวหน้าชิ้นงานตัวอย่างให้แห้งและเช็ดด้วยเอทานอลให้แห้งอีกครั้งนำชิ้นงานตัวอย่าง ไปกดเพื่อวัดความแข็งด้วยหัวกดวิกเกอร์สโดยใช้แรงกด 10 กิโลกรัม (P) เป็นระยะเวลา 15 วินาที จากนั้นวัดเส้นทแยงมุมของรอยกดที่เกิดขึ้นบนผิวตัวด้วยเครื่อง Vickers hardness tester หาค่าเฉลี่ยเส้นทแยงมุม ($\bar{d}$) แล้วคำนวณหาความแข็ง (H_V)

$$\text{Hardness } (H_v) = 1.8544 \times \left(\frac{P}{\bar{d}^2}\right) \tag{3.8}$$

3.4.5 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน (Microstructure)

การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานตัวอย่าง ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (JSM-6480LV, JEOL) ก่อนตรวจโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานตัวอย่าง ต้องนำชิ้นงานตัวอย่างติดเข้ากับภาชนะทรงกลมที่เป็นฐานวางชิ้นงานตัวอย่างด้วยเทปกาวคาร์บอน หลังจากนั้นติดชิ้นงานตัวอย่างเข้ากับก้านวางตัวอย่าง แล้วนำภาชนะทรงกลมที่ติดชิ้นงานตัวอย่างเรียบร้อยทำการฉาบผิวด้วยทองเพื่อให้เกิดการนำไฟฟ้า แล้วจึงนำเข้าเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเพื่อทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานตัวอย่าง การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคผิวหน้าของชิ้นงานตัวอย่าง แบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคชิ้นงานตัวอย่างก่อนเผา โดยตรวจสอบผิวหน้าบริเวณรอยหักของชิ้นงานตัวอย่าง หลังจากผ่านการทดสอบความต้านทานการดัดโค้ง ต่อจากนั้นนำส่วนชิ้นงานตัวอย่างติดเข้ากับก้านวางชิ้นงานตัวอย่างด้วยเทปกาวคาร์บอน จากนั้นนำก้านวางชิ้นงานตัวอย่างติดกับภาชนะทรงกลมที่เป็นฐานวางชิ้นงานด้วยเทปกาวคาร์บอนอีกครั้งหนึ่ง หลังจากนั้นฉาบผิวของชิ้นงานตัวอย่างด้วยทอง เพื่อทำให้เกิดการนำไฟฟ้า นำเข้าเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เพื่อตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานตัวอย่าง ส่วนที่ 2 ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาพของชิ้นงานตัวอย่างหลังจากกำจัดตัวประสานชนิด PEG โดยตรวจสอบผิวหน้าบริเวณรอยหักของชิ้นงานตัวอย่างหลังจากผ่านกระบวนการแช่น้ำที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง และอบแห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส จากนั้นนำไปทดสอบการต้านทานการดัดโค้ง แล้วนำชิ้นงานตัวอย่างไปผ่านกระบวนการเช่นเดียวกับส่วนที่ 1 เพื่อนำไปตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานตัวอย่างเช่นเดียวกัน ส่วนที่ 3 ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคชิ้นงานตัวอย่างหลังจากเผาผนึก ก่อนนำชิ้นงานตัวอย่างไปตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคต้องนำชิ้นงานตัวอย่างไปผ่านกระบวนขัดหยาบและขัดละเอียด แล้วนำชิ้นงานตัวอย่างออกจากตัวเรือนชิ้นงานและกัดผิวด้วยความร้อน(Thermal etching) ที่อุณหภูมิ 1550 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 15 นาที ในบรรยาอากาศอาร์กอน หลังจากนั้นนำชิ้นงานตัวอย่างติดเข้ากับก้านวางชิ้นงานด้วยเทปกาวคาร์บอน แล้วติดกับแท่งยึดวงกลมด้วยเทปกาวคาร์บอนเช่นเดียวกัน ต่อจากนั้นนำไปฉาบผิวด้วยทองเพื่อให้เกิดการนำไฟฟ้า หลังจากนั้นนำ แท่นยึดวงกลมเข้าเครื่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เพื่อทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของตัวอย่างชิ้นงาน

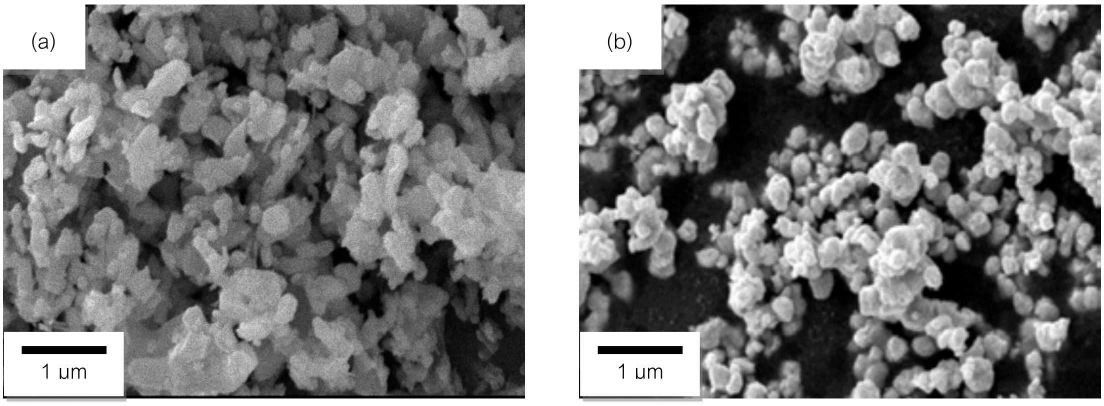
บทที่ 4
ผลการทดลองและการอภิปรายผล

สำหรับผลการทดลองในงานวิจัยนี้ได้แบ่งออกเป็น 3 ส่วน ส่วนที่หนึ่งการตรวจสอบลักษณะเฉพาะของผงวัตถุดิบ ส่วนที่สองเป็นเนื้อหาที่เกี่ยวกับผลการศึกษาการฉีดขึ้นรูปวัสดุอะลูมินาประกอบด้วยปัจจัยการกำจัดตัวประสาน ปริมาณผงวัสดุ อัตราส่วนของตัวประสาน และโครงสร้างจุลภาค ส่วนที่สามเป็นเนื้อหาที่เกี่ยวข้องกับผลการศึกษาการฉีดขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์ประกอบด้วยปัจจัยดังกล่าวเช่นเดียวกับวัสดุอะลูมินา

4.1 ลักษณะเฉพาะของผงวัตถุดิบ

4.1.1 สัณฐานวิทยา

ลักษณะสัณฐานวิทยาของผงอะลูมินา ผงทังสเตนคาร์ไบด์ สังเกตจากภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดดังแสดงในภาพที่ 4.1 พบว่าผงอะลูมินามีรูปร่างไม่แน่นอน มีขนาดใหญ่อนุภาคเกาะกลุ่มกัน ส่วนผงทังสเตนคาร์ไบด์มีรูปร่างไม่แน่นอนมีขนาดเล็กอนุภาคเกาะกลุ่มเช่นเดียวกันกับผงอะลูมินา นอกจากนี้ผงทั้งสองชนิดมีขนาดอนุภาคใกล้เคียงกันซึ่งสอดคล้องกับการกระจายขนาดอนุภาคที่วัดด้วยหลักการหักเหของรังสีตกกระทบบนอนุภาคของวัสดุ (laser light scattering) ดังแสดงในภาพที่ 4.2

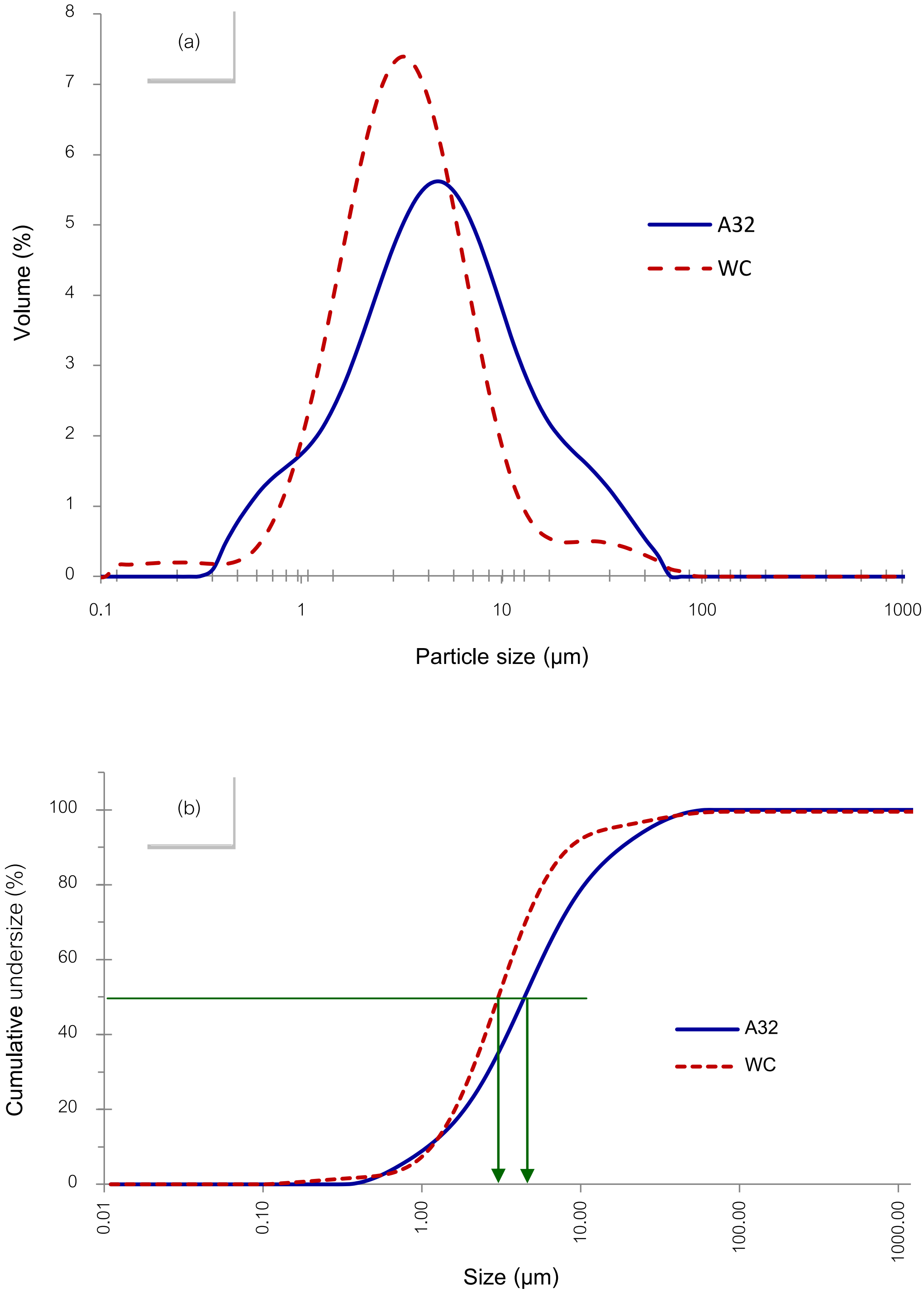


ภาพที่ 4.1 ลักษณะทางสัณฐานทางวิทยาของผงวัตถุดิบจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (a) ผงอะลูมินา (b) ผงทังสเตนคาร์ไบด์

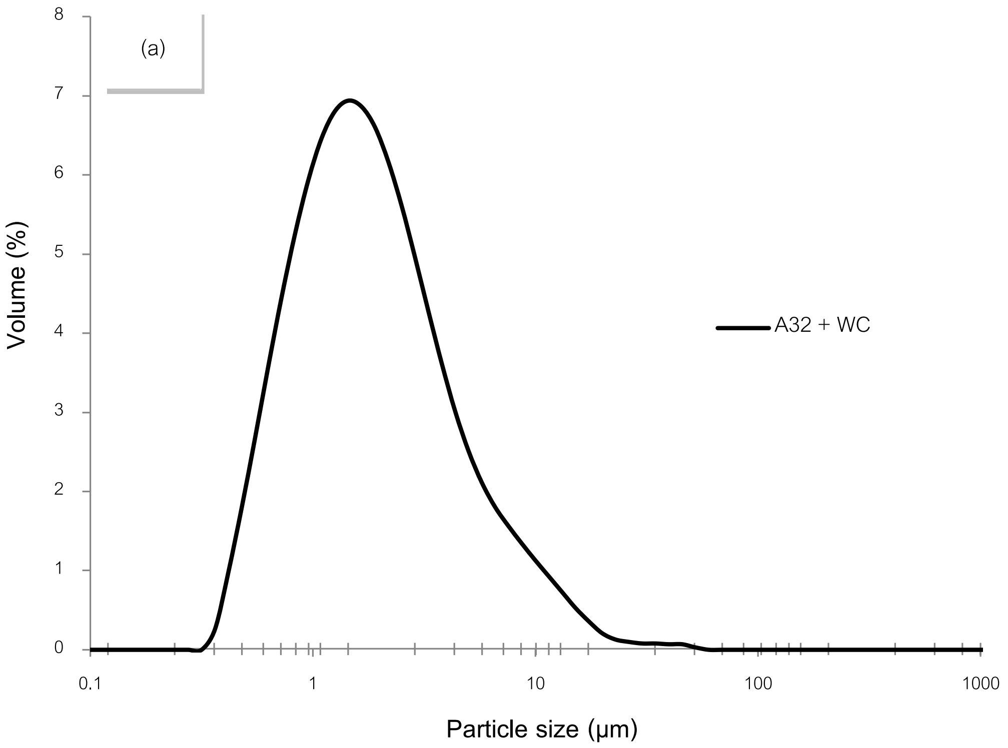
4.1.2 การกระจายตัวของอนุภาค

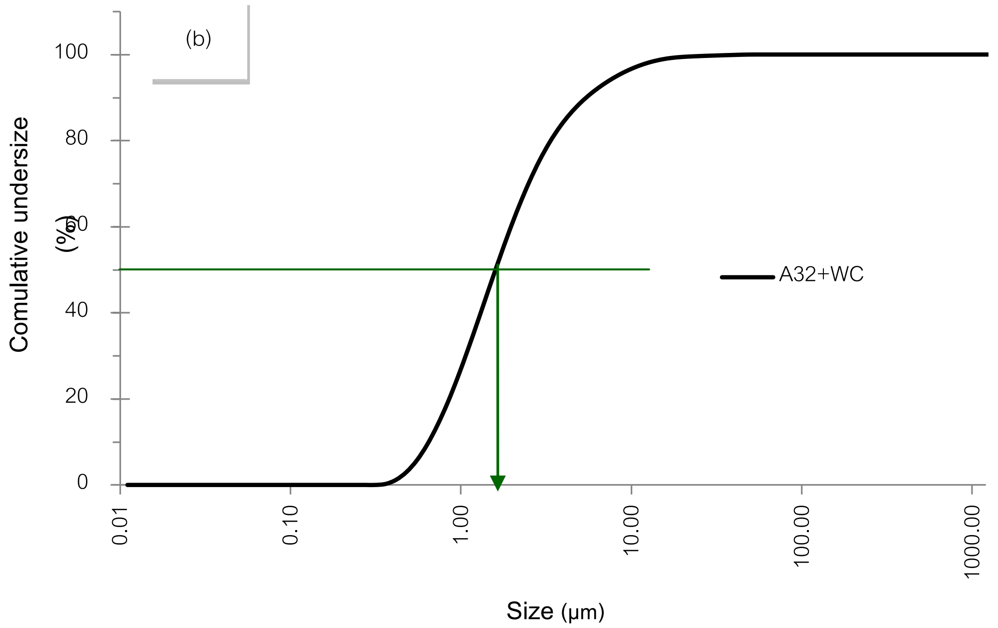
การกระจายขนาดอนุภาคของผงวัตถุดิบแสดงดังภาพที่ 4.2 พบว่าผงอะลูมินาชนิด A32 มีช่วงการกระจายขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 0.3 – 70 ไมครอน โดยมีช่วงของการกระจายขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่ปริมาณสะสมร้อยละ 50 (d50) มีค่าเท่ากับ 4.4 ไมครอน ส่วนผงทังสเตนคาร์ไบด์ มีช่วงการกระจายขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 0.1 – 91 ไมครอน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยที่ปริมาณสะสมร้อยละ 50 มีค่าเท่ากับ 3.0 ไมครอน และมีลักษณะการกระจายขนาดอนุภาคในช่วงแคบ

การกระจายขนาดอนุภาคของผงวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์ภายหลังการบดผสมดังภาพที่ 4.3 พบว่า มีช่วงกระจายขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 0.6 – 5.4 ไมครอน โดยมีช่วงของการกระจายขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่ปริมาณสะสมร้อยละ 50 มีค่าเท่ากับ 1.6 ไมครอน จากกราฟสังเกตได้ว่าภายหลังการบดผสมของผงวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์มีการกระจายขนาดอนุภาคเฉลี่ยมีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับผงอะลูมินาและผงทังสเตนคาร์ไบด์ เนื่องมาจากการบดผสมเป็นระยะเวลา 4 ชั่วโมง เพื่อให้ผงวัตถุดิบตั้งต้นทั้งสองดังกล่าวบดผสมเข้ากันและนำผงวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์ฉีดขึ้นรูปต่อไป



ภาพที่ 4.2 (a) การกระจายขนาดอนุภาคของผงวัสดุตั้งต้น (b) การกระจายขนาดของอนุภาคสะสมของผงวัสดุตั้งต้น

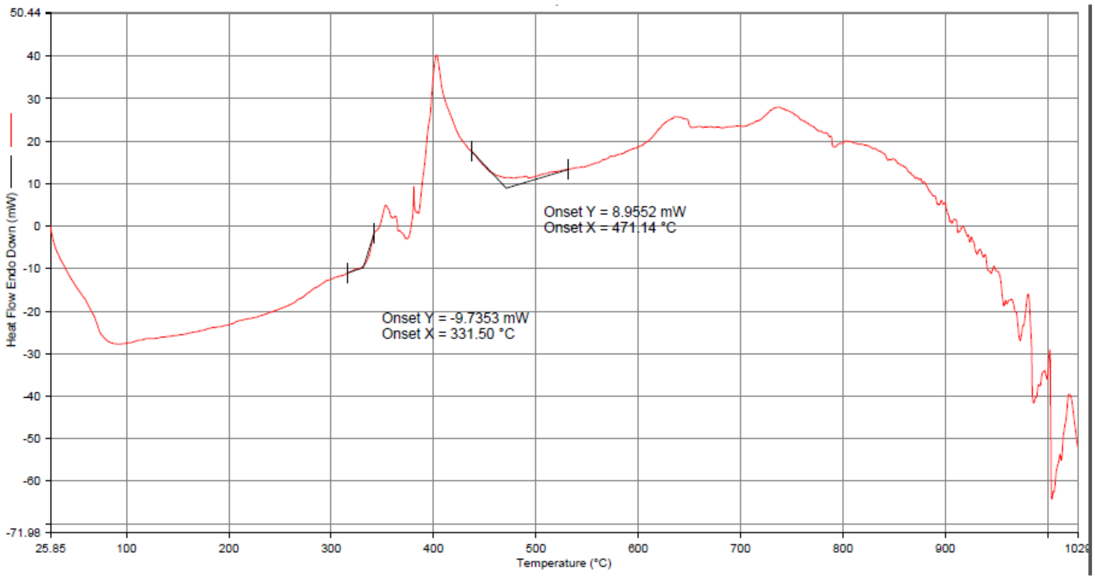




ภาพที่ 4.3 (a) การกระจายขนาดอนุภาคของผงวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์
(b) การกระจายขนาดของอนุภาคสะสมของผงวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์

4.1.3 **ตรวจสอบการสลายด้วยความร้อนของตัวประสานชนิด** PVB

ตรวจสอบการสลายตัวด้วยความร้อนของตัวประสานชนิด PVB ทดสอบด้วยเครื่อง Differential Thermal Analysis (DTA) จากกราฟพบว่า ตัวประสานชนิด PVB เริ่มการสลายพันธะเริ่มตั้งแต่อุณหภูมิที่ 100 องศาเซลเซียส จนกระทั่งสูงสุดที่อุณหภูมิ 470 องศาเซลเซียส จากผลการตรวจสอบการสลายตัวด้วยความร้อนจึงนำชิ้นงานหลังแช่น้ำให้ความร้อนที่ 400 องศาเซลเซียส และจากผลที่ได้จากภาพที่ 4.4 ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ S. Masia[24] และ A.K. Dhaliwal [25]

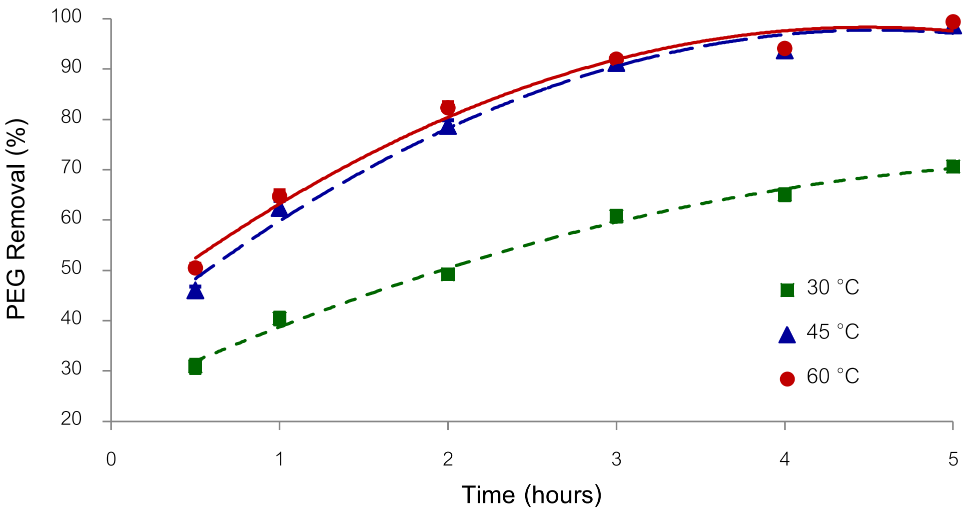


ภาพที่ 4.4 การสลายตัวประสานชนิด PVB ด้วยความร้อน

4.2 ผลการศึกษาการฉีดขึ้นรูปวัสดุอะลูมินา

4.2.1 อุณหภูมิและเวลาในการกำจัดตัวประสาน

การกำจัดตัวประสานด้วยการแช่น้ำ กระบวนการนี้เป็นวิธีการกำจัดตัวประสานชนิด PEG ที่อุณหภูมิแตกต่างกันโดยใช้อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ อุณหภูมิที่ใช้กำจัดตัวประสานได้แก่ 30 45 และ 60 องศาเซลเซียส ในระยะเวลา 5 ชั่วโมง โดยใช้ปริมาณผงวัสดุเท่ากับ 44 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรในการทดสอบดังแสดงในภาพที่ 4.5 ซึ่งสามารถวัดน้ำหนักของตัวประสานก่อนแช่น้ำและหลังแช่น้ำ พบว่าน้ำที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส สามารถกำจัดตัวประสานชนิด PEG ได้เกือบทั้งหมดในชิ้นงานตัวอย่าง ขณะที่ในช่วงเริ่มต้นของกระบวนการกำจัดตัวประสานจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว และค่อยๆ ลดลงเมื่อระยะเวลาผ่านไป เนื่องจากกระบวนการละลายจะเริ่มต้น บริเวณผิวหน้าของชิ้นงานตัวอย่างมีพื้นที่การละลายของตัวประสานได้ปริมาณมากกว่าบริเวณภายในโครงสร้าง ส่งผลให้ในระยะเวลาเริ่มต้นของการกำจัดตัวประสานเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ส่วนชิ้นงานตัวอย่างหลังจากการกำจัดตัวประสานสามารถคงรูปอยู่ได้เนื่องมาจากยังมีตัวประสานชนิด PVB ซึ่งไม่ละลายน้ำยังทำหน้าที่ยึดเกาะอนุภาคของผงวัสดุอะลูมินาหลังจากผ่านกระบวนการวิธีการแช่น้ำ ผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ W. Yang[20] และ N.Chankrerkkul[22] ซึ่งได้ใช้วัสดุอะลูมินาและวัสดุฮาร์ดเมทัลและตัวเชื่อมประสานชนิด PEG และกำจัดด้วยการแช่น้ำ ซึ่งให้ผลลักษณะเช่นเดียวกัน

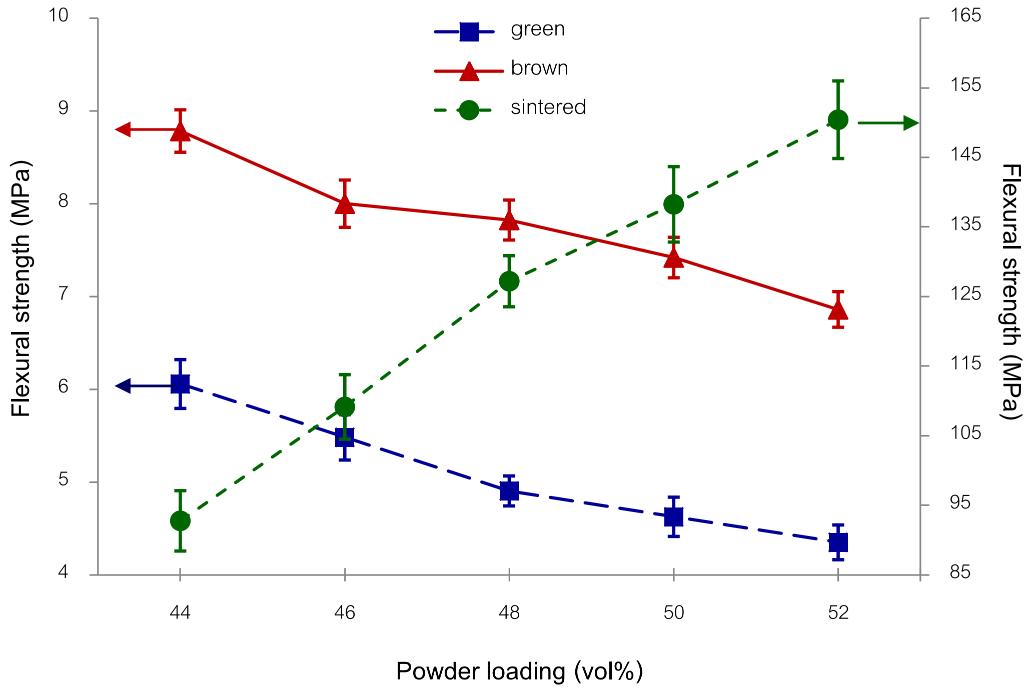


ภาพที่ 4.5 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่ตัวประสาน PEG หายไปจากชิ้นงานตัวอย่างวัสดุอะลูมินาที่อุณหภูมิต่างๆ ภายในระยะเวลา 5 ชั่วโมง

4.2.2 ปริมาณผงวัสดุในส่วนผสมต่อลักษณะสมบัติของชิ้นงาน

4.2.2.1 ความต้านทานการดัดโค้ง

ความต้านทานการดัดโค้งของชิ้นงานตัวอย่างของวัสดุอะลูมินาที่ปริมาณผงวัสดุเท่ากับ 44 46 48 50 และ 52 ส่วนตัวประสานชนิด PEG และ PVB เท่ากับ 85:15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แบ่งเป็นการทดสอบความต้านทานการดัดโค้งออกเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 ทดสอบชิ้นงานตัวอย่างวัสดุอะลูมินาหลังจากการฉีดขึ้นรูป (green specimen) ส่วนที่ 2 ทดสอบชิ้นงานตัวอย่างวัสดุอะลูมินาหลังจากกำจัดตัวประสานชนิด PEG ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 24 ชั่วโมง (brown specimen) ส่วนที่ 3 ทดสอบชิ้นงานตัวอย่างวัสดุอะลูมินาหลังจากเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1600 องศาเซลเซียส ค่าความต้านทานการดัดโค้งของชิ้นงานตัวอย่างวัสดุอะลูมินาแสดงดังภาพที่ 4.6 จากกราฟดังกล่าว พบว่าชิ้นงานตัวอย่างหลังจากการฉีดขึ้นรูปและหลังจากกำจัดตัวประสานชนิด PEG มีค่าลดลงตามปริมาณผงวัสดุอะลูมินาที่เพิ่มตามสัดส่วนที่ฉีดขึ้นรูป ชิ้นงานตัวอย่างหลังจากฉีดขึ้นรูปค่าความต้านทานการดัดโค้งมีค่าลดลง เกิดจากอัตราส่วนของตัวประสานที่สูงเกาะอยู่กับอนุภาคผงวัสดุอะลูมินาทำให้ชิ้นงานตัวอย่างวัสดุอะลูมินาที่ประกอบด้วยปริมาณผงวัสดุอะลูมินาต่อตัวประสานเท่ากับ 44 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร มีค่าความต้านทานการดัดโค้งมากที่สุด ส่วนชิ้นงานตัวอย่างหลังจากการกำจัดตัวประสาน PEG มีค่าความต้านทานการดัดโค้งลดลงเช่นเดียวกัน เนื่องจากปริมาณช่องว่างลดลงระหว่างอนุภาคของผงวัสดุอะลูมินากับตัวประสานชนิด PEG มีค่าลดลงตามปริมาณผงวัสดุอะลูมินาที่เพิ่มขึ้น จึงทำให้มีแนวโน้มค่าความต้านทานการดัดโค้งมีลักษณะเช่นเดียวกับชิ้นงานตัวอย่างหลังจากการฉีดขึ้นรูป และค่าความต้านการดัดโค้งมากที่สุดคือ ผงอะลูมินาเท่ากับ 44 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ส่วนค่าความต้านทานการดัดโค้งของชิ้นงานตัวอย่างหลังเผาผนึกจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณผงวัสดุอะลูมินาที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ปริมาณผงวัสดุอะลูมินาที่สามารถฉีดขึ้นรูปได้ด้วยอัตราส่วนตัวประสานทั้งสองชนิดที่ช่วยในการฉีดขึ้นรูป จากกราฟยังสังเกตได้ว่าชิ้นงานหลังแช่น้ำมีค่าความต้านทานการดัดโค้งเพิ่มมากกว่าชิ้นงานหลังจากฉีดขึ้นรูปเป็นผลเนื่องมาจากการอบแห้งหลังจากชิ้นงานผ่านการแช่น้ำ ตัวประสานชนิด PVB ที่ไม่สามารถละลายน้ำ เกิดปฏิกิริยาหลอมเข้ากับอนุภาคผงอะลูมินาดังแสดงในภาพที่ 4.4 ซึ่งเป็นกราฟแสดงการวิเคราะห์ทางความร้อนของตัวประสานชนิด PVB

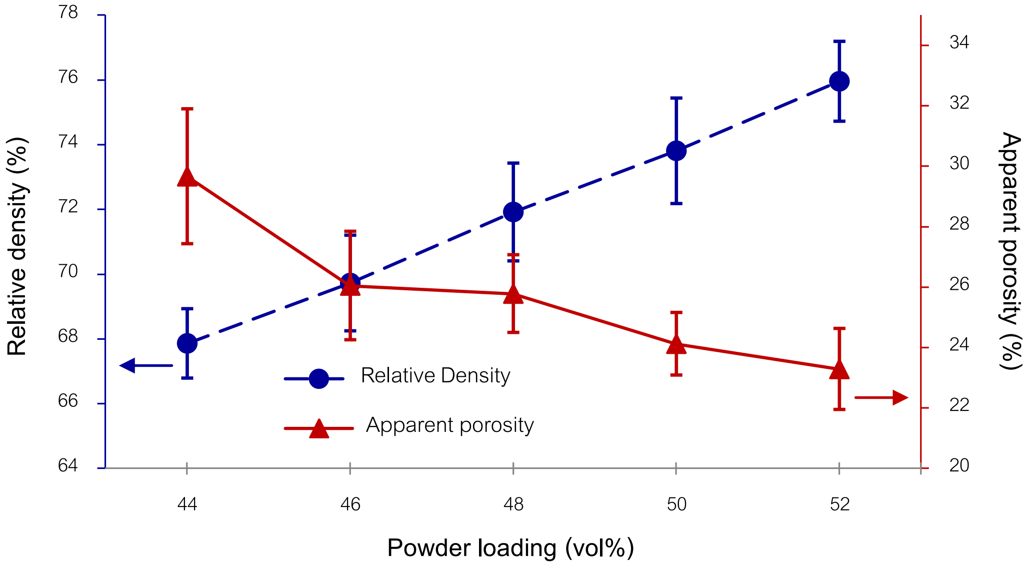


ภาพที่ 4.6 ความต้านทานต่อการดัดโค้งของชิ้นงานตัวอย่างของวัสดุอะลูมินาหลังจากฉีดขึ้นรูป หลังกำจัดตัวประสานชนิด PEG และหลังเผาผนึก ตามปริมาณผงวัสดุอะลูมินาต่างๆ

4.2.2.2 **ความหนาแน่นและรูพรุนปรากฏ**

ความหนาแน่นของชิ้นงานตัวอย่างวัสดุอะลูมินา ณ อุณหภูมิ 1600 องศาเซลเซียส จากการทดลองนี้ชี้ให้เห็นว่าความหนาแน่นของชิ้นงานตัวอย่างที่ฉีดขึ้นรูปเป็นชิ้นงานขึ้นอยู่กับปริมาณผงวัสดุและอัตราส่วนของตัวประสานทั้งชนิด PEG และ PVB ที่มีอัตราส่วนลดลงตามปริมาณผงวัสดุที่ใช้ในฉีดขึ้นรูปในแต่ละชิ้นงานตัวอย่างที่สามารถขึ้นรูปได้เมื่อสังเกตจากกราฟความหนาแน่นสัมพัทธ์ดังแสดงในภาพที่ 4.7 พบว่าวัสดุอะลูมินามีความหนาแน่นต่ำมากที่อัตราส่วนปริมาณผงวัสดุเท่ากับ 44 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรเนื่องมาจากปริมาณผงวัสดุอะลูมินามีจำนวนน้อย ทำให้มีผลความหนาแน่นเฉลี่ยเท่ากับ 66.87 เปอร์เซ็นต์ทางทฤษฎี หลังจากเพิ่มปริมาณผงวัสดุอะลูมินาในระหว่างกระบวนการฉีดขึ้นรูปส่งผลให้ความหนาแน่นสูงสุดที่ได้จากชิ้นงานตัวอย่างวัสดุอะลูมินาเฉลี่ยเท่ากับ 75.95 เปอร์เซ็นต์ทางทฤษฎี ในขณะเดียวรูพรุนปรากฏในตัวอย่างชิ้นงานตัวอย่างของวัสดุอะลูมินาเกิดจากการกำจัดตัวประสานชนิด PEG

ด้วยวิธีการแช่น้ำและขึ้นอยู่กับปริมาณผงวัสดุอะลูมินาที่ใช้ในการฉีดขึ้นรูป โดยมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณผงวัสดุที่เพิ่มขึ้นจาก 44 46 48 50 และ 52 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ดังแสดงในภาพที่ 4.5 จากการทดลองยังชี้ให้เห็นว่าชิ้นงานตัวอย่างที่ผ่านการฉีดขึ้นรูปยังมีข้อบกพร่องในด้านความหนาแน่นและรูพรุนปรากฏ ซึ่งเกิดจากตัวประสานที่ช่วยในกระบวนการฉีดขึ้นรูปและต้องกำจัดตัวประสานทั้งสองชนิดเพื่อลดระยะเวลาในการเผาผนึกต่อไป

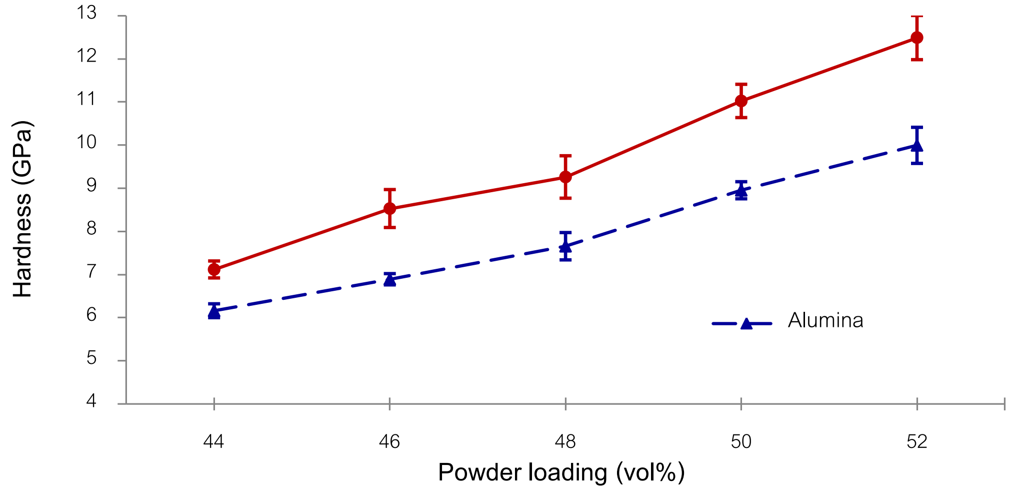


ภาพที่ 4.7 ความหนาแน่นและรูพรุนปรากฏของวัสดุอะลูมินาหลังจากเผาผนึก ณ อุณหภูมิ 1600 องศาเซลเซียส ที่อัตราส่วนของตัวประสานชนิด PEG กับชนิด PVB เท่ากับ 85 : 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

4.2.2.3 **ความแข็ง**

ค่าความแข็งของชิ้นงานตัวอย่างวัสดุอะลูมินาขึ้นอยู่กับปริมาณผงวัสดุอะลูมินาเป็นองค์ประกอบหลัก โดยค่าความแข็งที่ได้มีระดับน้อยและเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณผงวัสดุที่เพิ่มขึ้น ส่วนวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์ค่าความแข็งแรงขึ้นอยู่กับปริมาณผงทังสเตนคาร์ไบด์ที่เตรียมเป็นผงวัตถุดิบสำหรับนำไปฉีดขึ้นรูป กราฟในภาพที่ 4.8 แสดงให้เห็นว่าชิ้นงานตัวอย่างวัสดุอะลูมินาและวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์เผาผนึก ณ อุณหภูมิ 1600 องศาเซลเซียส พบว่าค่าความแข็งของวัสดุอะลูมินาที่ปริมาณผงวัสดุอะลูมินา 44 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 6.16 กิกะพาสคัล ในขณะที่วัสดุอะลูมินาที่มีค่าความแข็งเฉลี่ยเท่ากับ 9.99 กิกะพาสคัล เมื่อมีการเติมผงทังสเตนคาร์ไบด์ลงในวัสดุอะลูมินาจนเป็น

วัสดุเชิงประกอบเมื่อเทียบกับปริมาณผงอะลูมินาทังสเตนคาร์ไบด์ 44 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร มีค่าเพิ่มมากขึ้น และที่ปริมาณผงวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์สูงสุดที่ฉีดขึ้นรูปได้มีค่าความแข็งเฉลี่ยเท่ากับ 12.49 กิกะพาสคัล

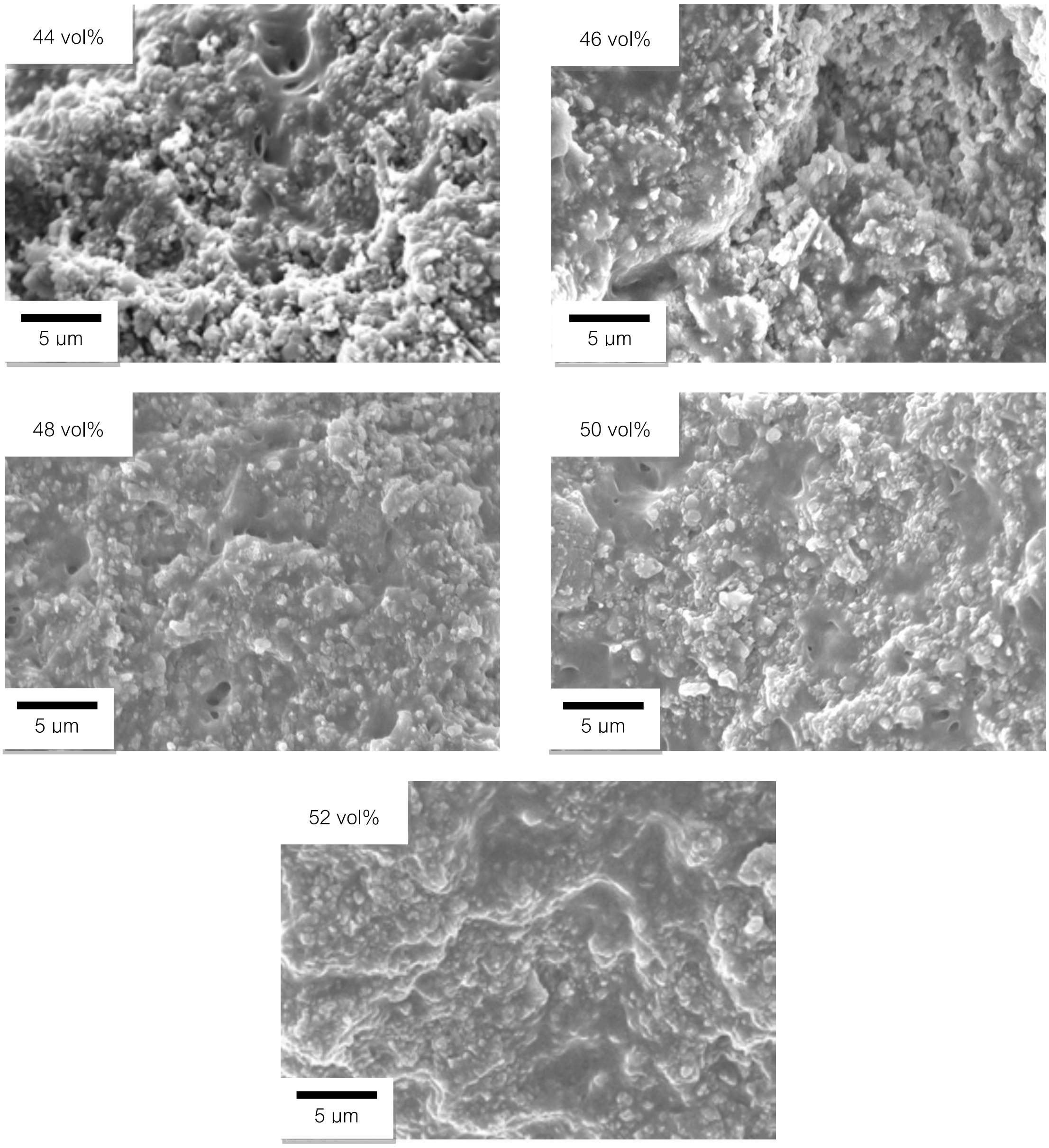


ภาพที่ 4.8 ความแข็งของชิ้นงานตัวอย่างของวัสดุอะลูมินาและวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์ที่ปริมาณผงวัสดุต่างๆ

4.2.2.4 **โครงสร้างจุลภาค**

(1) **ชิ้นงานตัวอย่างหลังจากการฉีดขึ้นรูป**

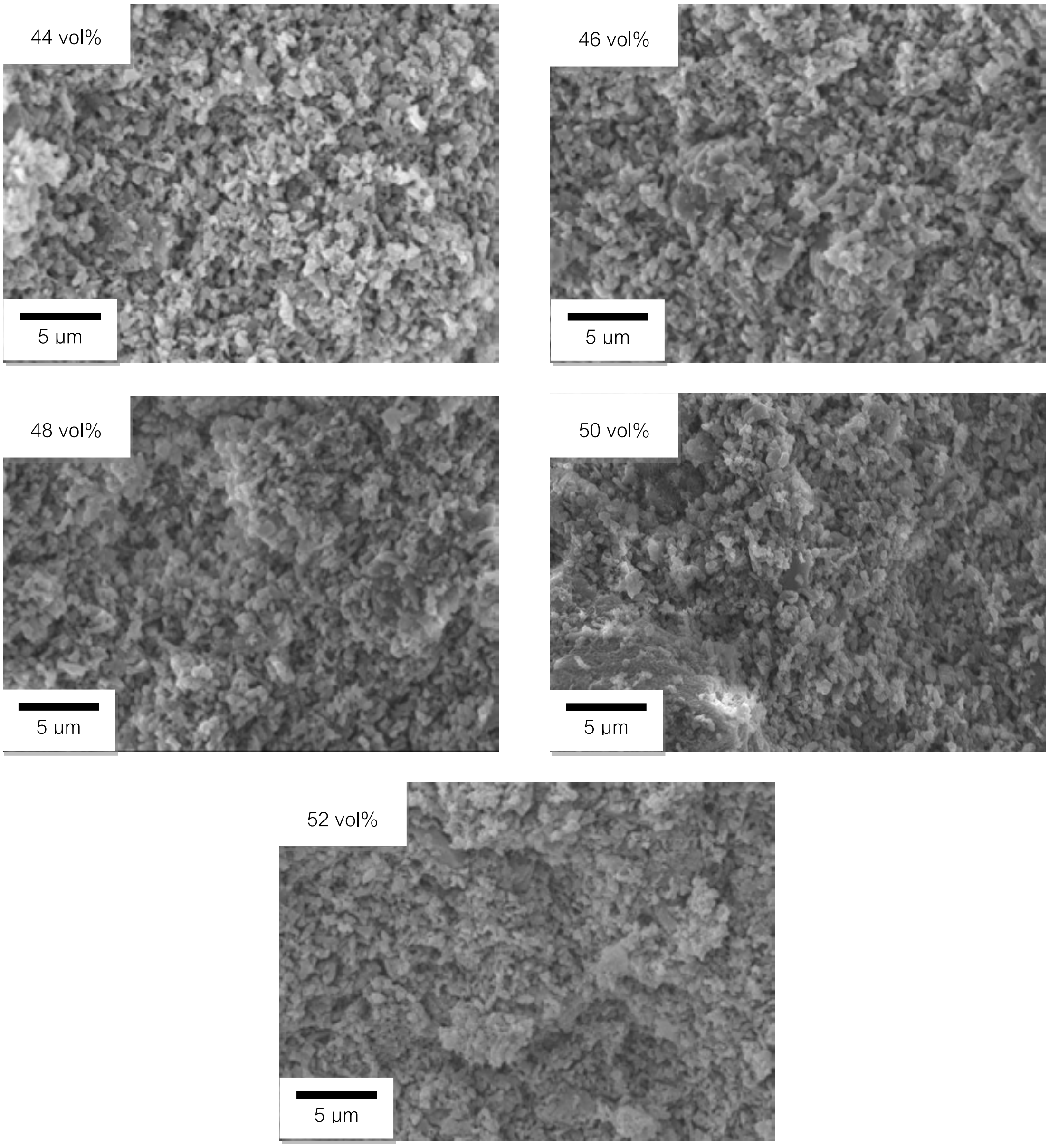
จากโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานตัวอย่างหลังจากการฉีดขึ้นรูปดังแสดงในภาพที่ 4.9 พบว่าโครงสร้างจุลภาคชิ้นงานตัวอย่างวัสดุอะลูมินามีขนาดอนุภาคใหญ่กว่าชิ้นงานตัวอย่างวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์ดังแสดงในภาพที่ 4.18 (ดูในหน้าที่ 62) สามารถสังเกตได้ที่ปริมาณของผงวัสดุเท่ากับ 44 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร เนื่องมาจากอนุภาคของผงทังสเตนคาร์ไบด์ปะปนแทรกอยู่ในระหว่างขั้นตอนการเตรียมผงสำหรับการฉีดขึ้นรูป ส่งให้ขนาดอนุภาคของวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์เล็ก อนุภาคของวัสดุทั้งสองเกาะกันอย่างหนาแน่นและพบช่องว่างแทรกอยู่ตามอนุภาคของวัสดุทั้งสอง ส่วนเมื่อมีการเพิ่มอัตราส่วนผงวัสดุร้อยละ 2 จนกระทั้งสามารถฉีดขึ้นรูปได้ที่ปริมาณผงวัสดุเท่ากับ 52 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ส่วนโครงสร้างจุลภาคของวัสดุอะลูมินาและวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์ที่อัตราส่วนเท่ากับ 52 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร พบว่าขนาดอนุภาคเรียงชิดติดกันจนไม่มีช่องว่างระหว่างอนุภาคและเกาะกลุ่มจนเป็นเนื้อเดียวกัน



ภาพที่ 4.9 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานวัสดุอะลูมินาหลังจากฉีดขึ้นรูปที่ปริมาณผงวัสดุต่างๆ กัน

(2) ชิ้นงานตัวอย่างหลังจากกำจัดตัวประสานชนิด PEG

จากโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานตัวอย่างหลังจากกำจัดตัวประสานชนิด PEG ณ อุณหภูมิน้ำ 30 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 24 ชั่วโมง ดังแสดงในภาพที่ 4.10 และ 4.19 จากการทดลองพบว่าโครงสร้างจุลภาคของวัสดุอะลูมินาและวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์ ณ ปริมาณผงวัสดุเท่ากับ 44 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร มีรูพรุนและช่องว่างแทรกอยู่กับอนุภาคของโครงสร้างจุลภาคของวัสดุอะลูมินาและวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์เป็นจำนวนมาก เมื่อเพิ่มปริมาณของผงวัสดุทั้งสองชนิดให้สูงขึ้นจนถึงระดับปริมาณผงวัสดุเท่ากับ52 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร พบว่ามีอนุภาคเรียงตัวชิดกันและหนาแน่นเพิ่มมากขึ้น ในขณะเดียวกันตัวประสานชนิด PEG สามารถกำจัดด้วยการแช่น้ำ ซึ่งเป็นวิธีที่เป็นมิตรแก่สิ่งแวดล้อม โดยใช้หลักการออสโมซิส (Osmosis) ของน้ำแพร่จากภายนอกชิ้นงานมีระดับความเข้มข้นน้อยเข้าไปภายในชิ้นงานตัวอย่างซึ่งมีระดับความเข้มข้นสูง จากผลที่ได้จากโครงสร้างจุลภาคชิ้นงานหลังกำจัดตัวประสานได้สอดคล้องกับวิจัยของ W. Yang[20] ส่งผลให้ตัวประสานชนิด PEG ที่เกาะรวมอยู่กับอนุภาคของผงอะลูมินาและผงวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์ละลายออกมาจากตัวชิ้นงานตัวอย่างที่ทดสอบ



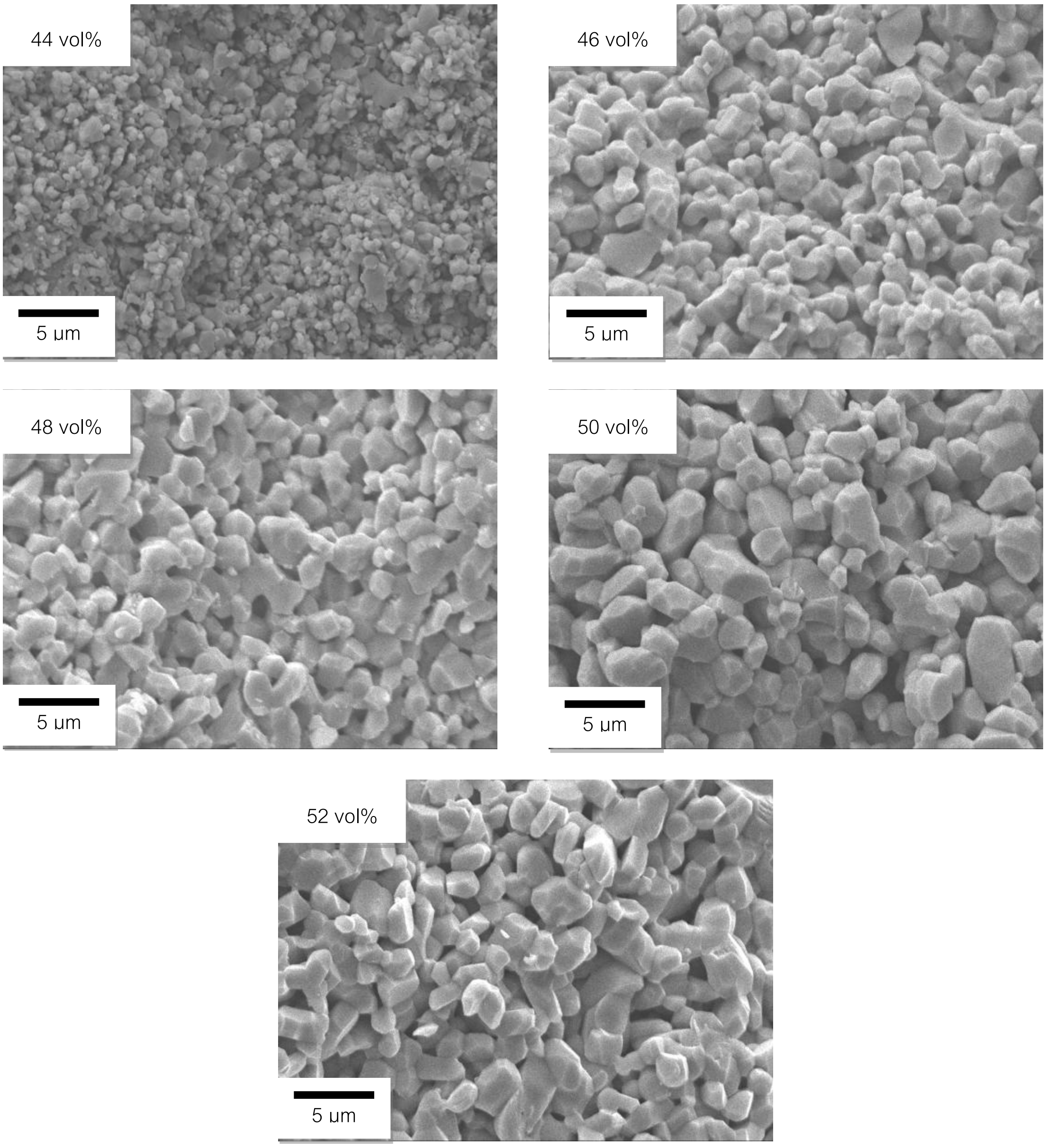
ภาพที่ 4.10 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานวัสดุอะลูมินาหลังจากกำจัดตัวประสานชนิด PEG ที่ปริมาณผงวัสดุต่างๆ กัน

(3) ชิ้นงานตัวอย่างหลังจากผ่านการเผาผนึก

แบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ ได้แก่

1) โครงสร้างจุลภาคของรอยหักหลังจากผ่านการทดสอบความแข็งแรง

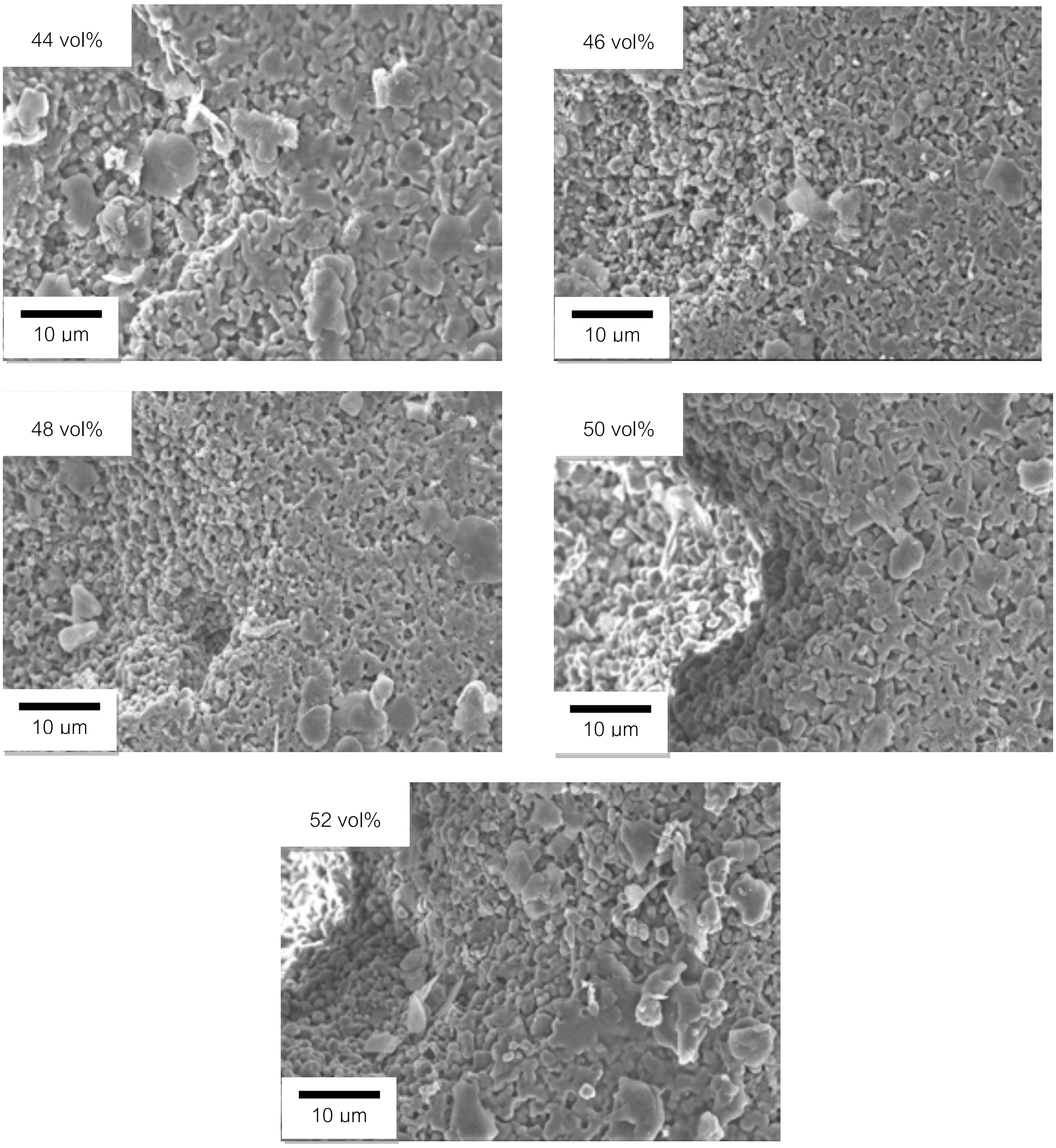
จากโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานตัวอย่างหลังจากผ่านการเผาผนึก ณ อุณหภูมิ1600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ภายใต้บรรยากาศอาร์กอน ดังแสดงในภาพที่ 4.11 พบว่าอนุภาคของผงวัสดุอะลูมินามีลักษณะค่อนข้างกลมคล้ายรูปหกเหลี่ยม ซึ่งอนุภาคของผงทั้งสองได้ขยายตัวจนอนุภาคมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อเทียบกับอนุภาคหลังกำจัดตัวประสานชนิด PEGในขณะเดียวกันยังพบว่าอนุภาคของวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์มีขนาดอนุภาคเล็กกว่าอนุภาคของวัสดุอะลูมินาดังแสดงในภาพที่4.20 เนื่องมาจากการเติมผงทังสเตนคาร์ไบด์ผลที่เกิดทำให้ของผงดังกล่าวช่วยหยุดยั้งการเจริญเติบโตของอนุภาคของผงอะลูมินา และยังทำให้ขนาดของอนุภาคของวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังเสตนคาร์ไบด์มีขนาดเล็กลงซึ่งเป็นส่วนช่วยให้สมบัติเชิงกลได้ดียิ่งขึ้น อีกปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลให้วัสดุอะลูมินาและวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์มีสมบัติเชิงกลเพิ่มมากขึ้น คือการเพิ่มขึ้นของปริมาณผงวัสดุทั้งสองส่งผลให้อนุภาคเรียงชิดติดกันทำให้ช่องว่างระหว่างอนุภาคลดลง ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบปริมาณผงวัสดุอะลูมินาและผงวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์ที่อัตราส่วนเท่ากับ 44 และ 52 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร จะเห็นได้ว่าช่องว่างระหว่างอนุภาคของชิ้นงานตัวอย่างทั้งผงวัสดุอะลูมินาและผงวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์มีจำนวนลดลงอย่างชัดเจน[15]



ภาพที่ 4.11 โครงสร้างจุลภาคของรอยหักของชิ้นงานวัสดุอะลูมินาหลังจากผ่านกระบวนการเผาผนึกที่ปริมาณผงวัสดุต่างๆ กัน

2) โครงสร้างจุลภาคของผิวหน้าชิ้นงานตัวอย่าง

จากโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานตัวอย่างหลังจากผ่านกระบวนการขัดผิวหน้าชิ้นงานด้วยวิธีการขัดหยาบและขัดละเอียด จากนั้นนำชิ้นงานตัวอย่างกัดผิวด้วยความร้อน ณ อุณหภูมิ 1550 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 15 นาที ดังแสดงในภาพที่ 4.12 เมื่อเปรียบเทียบลักษณะของผิวหน้าชิ้นงานตัวอย่างวัสดุอะลูมินาและวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์ พบว่าเกรนของวัสดุอะลูมินามีขนาดเกรนใหญ่กว่าวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์ ดังแสดงในภาพที่ 4.21 พร้อมทั้งการจัดเรียงตัวของเกรนในวัสดุเชิงประกอบมีการเรียงตัวเชื่อมติดกันซึ่งแตกต่างกับวัสดุอะลูมินาที่ยังพบช่องว่างระหว่าเกรน ขณะเดียวกันเมื่อปริมาณของผงวัสดุเพิ่มขึ้นส่งผลทำให้การจัดเรียงตัวของเกรนมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นเกิดผลดีต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุที่ฉีดขึ้นรูป



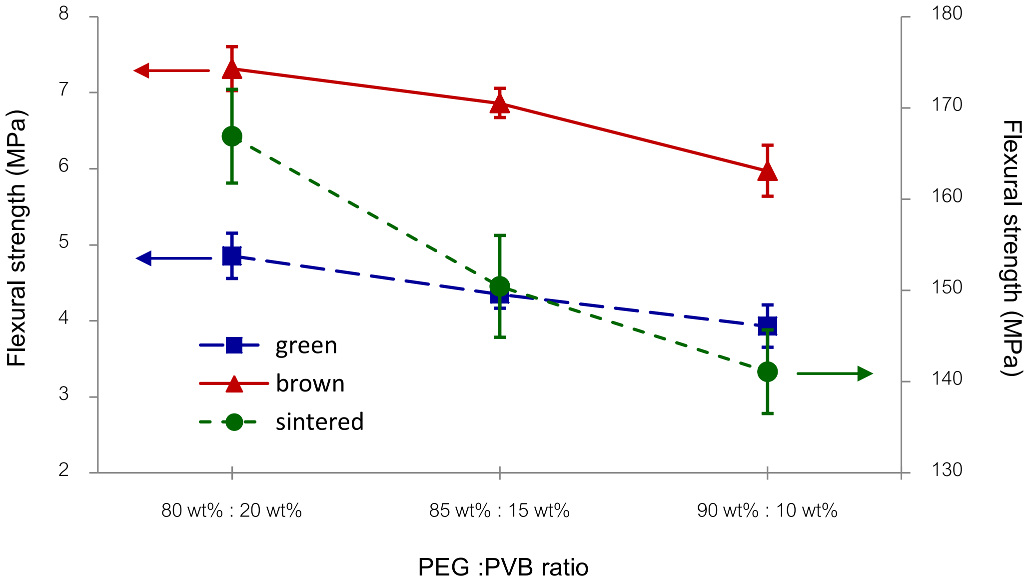
ภาพที่ 4.12 โครงสร้างจุลภาคของผิวหน้าของชิ้นงานอะลูมินาหลังจากผ่านกระบวนการขัดผิวหน้าที่ปริมาณผงวัสดุต่างๆ กัน

4.2.3 อัตราส่วนระหว่างตัวประสานชนิด PEG กับตัวประสานชนิด PVB

4.2.3.1 ความต้านทานการดัดโค้ง

การทดสอบความต้านทานการดัดโค้งแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 ทดสอบชิ้นงานตัวอย่างวัสดุอะลูมินาหลังจากการฉีดขึ้นรูป (green specimen) ส่วนที่ 2 ทดสอบชิ้นงานตัวอย่างวัสดุอะลูมินาหลังจากกำจัดตัวประสานชนิด PEG ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 24 ชั่วโมง (brown specimen) ส่วนที่ 3 ทดสอบชิ้นงานตัวอย่างวัสดุอะลูมินาหลังจากเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1600 องศาเซลเซียส ค่าความต้านทานการดัดโค้งของชิ้นงานตัวอย่างวัสดุอะลูมินาดังแสดงในภาพที่ 4.13 จากกราฟดังกล่าวพบว่าชิ้นงานตัวอย่างหลังจากการฉีดขึ้นรูปหลังจากกำจัดตัวประสานชนิด PEG และหลังจากผ่านกระบวนการเผาผนึกมีค่าลดลงตามปริมาณตัวประสานชนิด PVB ที่ลดลงตามอัตราส่วนที่ใช้ในกระบวนการฉีดขึ้นรูป ชิ้นงานตัวอย่างหลังจากการฉีดขึ้นรูป ค่าความต้านทานการดัดโค้งมีค่าลดลง ซึ่งเกิดจากปริมาณตัวประสานชนิด PEG ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งตัวประสานชนิด PEG ทำหน้าที่ช่วยในการไหลตัวของผงวัสดุในกระบวนการฉีดขึ้นรูป ขณะเดียวกันตัวประสานชนิด PVB เป็นส่วนที่ให้ความแข็งแรงของชิ้นงานตัวอย่าง ส่วนชิ้นงานตัวอย่างที่ผ่านกระบวนการกำจัดตัวประสานชนิด PEG ด้วยวิธีการแช่น้ำ ณ อุณหภูมิห้อง พบว่า ค่าความต้านทานการดัดโค้งมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับชิ้นงานหลังจากการฉีดขึ้นรูป ค่าความต้านทานการดัดโค้งหลังจากผ่านกระบวนการกำจัดตัวประสานที่อัตราส่วนตัวประสานชนิด PVB เท่ากับ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักมีค่าความต้านทานการดัดโค้งมากที่สุด เนื่องจากปริมาณรูพรุนที่เกิดขึ้นหลังจากผ่านกระบวนการกำจัดตัวประสานมีจำนวนน้อยเมื่อเทียบกับอัตราส่วนตัวประสานชนิด PVB เท่ากับ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ส่วนค่าความต้านทานการดัดโค้งของชิ้นงานตัวอย่างหลังจากผ่านกระบวนการเผาผนึกก็มีลักษณะคล้ายกับที่กล่าวมาเช่นเดียวกัน เมื่อผ่านกระบวนการเผาผนึกพบว่า ปริมาณตัวประสานชนิด PEG กับตัวประสานชนิด PVB เท่ากับ 90 กับ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีค่าความต้านทานค่าการดัดโค้งน้อยที่สุด เนื่องมากจากปริมาณรุพรุนที่เกิดเป็นจำนวนมาก เมื่อผ่านกระบวนการเผาผนึกอนุภาคของผงวัสดุอะลูมินาเกิดการขยายตัวของเกรนของอนุภาค เมื่อถึง ณ อุณหภูมิหนึ่งเกิดการหยุดการขยายตัวของเกรนทำให้ช่องว่างระหว่างอนุภาคของผงวัสดุอะลูมินายังคงเหลืออยู่ ส่งผลให้เมื่อนำไปทดสอบค่าความต้านทานการดัดโค้งมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับปริมาณตัวประสานชนิด PEG กับตัวประสานชนิด PVB เท่ากับ 80 กับ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ขณะเดียวกันหลังจากกำจัดตัวประสานชนิด PEG ด้วยการแช่น้ำ เมื่อเทียบอัตราส่วนของตัวประสานชนิด PVB ยังพบว่า

ชิ้นงานที่มีอัตราส่วนของตัวประสานชนิด PVB ยังคงเหลืออยู่ในชิ้นงานที่มากกว่าจะส่งผลให้ชิ้นงานหลังแช่น้ำมีค่าความต้านทานจากการดัดโค้งสูงกว่าและค่อยๆ ลดลงตามอัตราส่วนของตัวประสานชนิด PVB ที่ลดลงตามลำดับ เนื่องมาจากการอบแห้งหลังจากชิ้นงานผ่านการแช่น้ำตัวประสานชนิด PVB ที่ไม่สามารถละลายน้ำ เกิดปฏิกิริยาหลอมเข้ากับอนุภาคผงอะลูมินาดังแสดงในภาพที่ 4.4 ซึ่งเป็นกราฟแสดงการวิเคราะห์ทางความร้อนของตัวประสานชนิด PVB

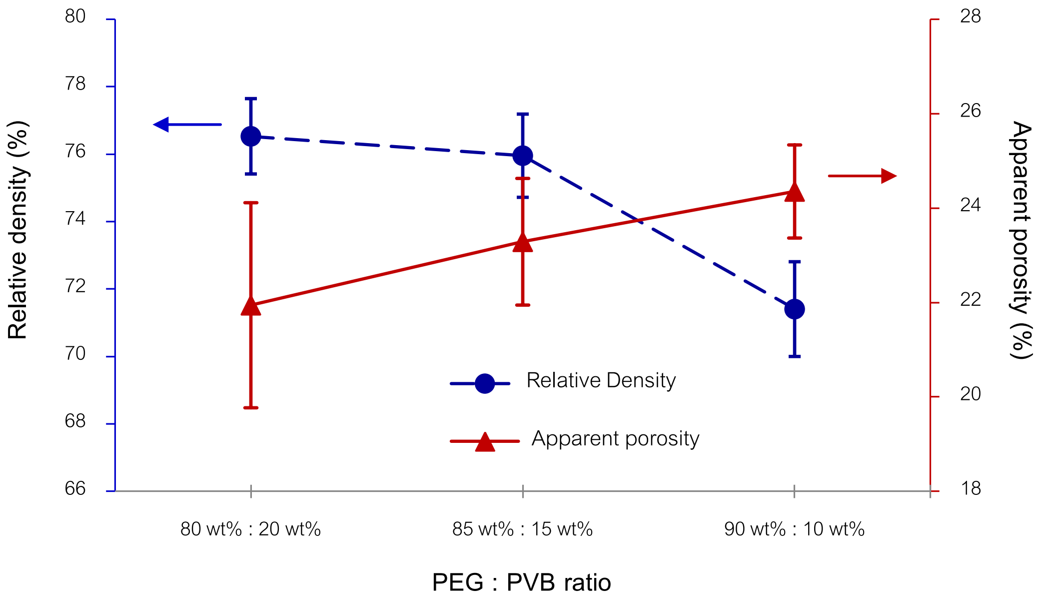


ภาพที่ 4.13 ความต้านทานต่อการดัดโค้งของชิ้นงานวัสดุอะลูมินาหลังจากฉีดขึ้นรูป หลังกำจัดตัวประสานชนิด PEG และหลังเผาผนึก ตามอัตราส่วนของตัวประสาน

4.2.3.2 **ความหนาแน่นและรูพรุนปรากฏ**

ความหนาแน่นของชิ้นงานตัวอย่างวัสดุอะลูมินา ณ ปริมาณผงวัสดุอะลูมินาเท่ากับ 52 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ผ่านกระบวนการเผาผนึก ณ 1600 องศาเซลเซียส จากการทดลองนี้แสดงให้ให้เห็นว่าความหนาแน่นของชิ้นงานตัวอย่างขึ้นอยู่กับปัจจัยที่ควบคุมได้แก่ ความแตกต่างของชนิดตัวประสาน PEG กับตัวประสานชนิด PVB ที่เป็นส่วนผสมกับผงวัสดุอะลูมินาก่อนนำไปฉีดขึ้นรูป จากกราฟความหนาแน่นสัมพัทธ์ดังแสดงแสดงในภาพที่ 4.14 พบว่าความหนาแน่นของวัสดุอะลูมินาที่ฉีดขึ้นรูปด้วยอัตราส่วนตัวประสานชนิด PEG กับตัวประสานชนิด PVB เท่ากับ 80 : 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีค่าความหนาแน่นมากที่สุด เมื่อลดปริมาณตัวประสานชนิด PVB อัตราส่วนร้อยละ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ทำให้ความหนาแน่นของชิ้นงานตัวอย่างวัสดุอะลูมินา

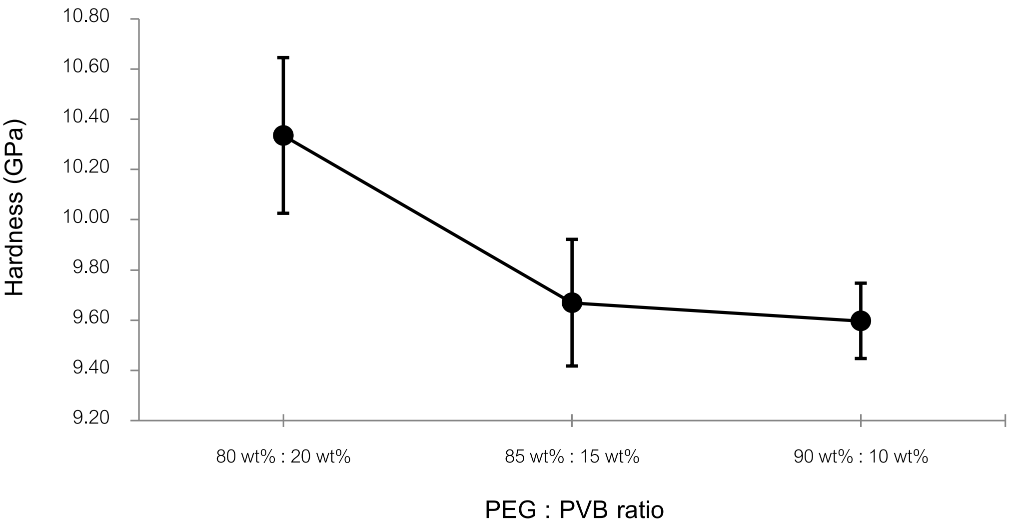
มีความหนาแน่นลดลง ในขณะเดียวกันรูพรุนปรากฏในชิ้นงานตัวอย่างวัสดุอะลูมินามีปรากฏมากขึ้นที่อัตราส่วนตัวประสานชนิด PEG กับตัวประสานชนิด PVB เท่ากับ 90:10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เนื่องจากกระบวนการฉีดขึ้นรูปที่อัตราส่วนตัวประสานชนิด PEG มีอัตราส่วนเพิ่มมากขึ้นจะทำให้การฉีด ชิ้นงานตัวอย่างทำได้ง่ายขึ้น ในทางกลับกันเมื่อผ่านกระบวนการกำจัดตัวประสานพบว่ารูพรุนปรากฏในชิ้นงานตัวอย่างวัสดุอะลูมินามีมากขึ้น เนื่องจากตัวประสานชนิด PEG ถูกกำจัดออกด้วยวิธีการแช่น้ำเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ส่งผลให้เกิดช่องว่างระหว่างอนุภาคเป็นจำนวนมาก เมื่อนำชิ้นงานตัวอย่างผ่านกระบวนการเผาผนึก อนุภาคของผงวัสดุอะลูมินาขยายตัวจนถึงอุณหภูมิ 1600 องศาเซลเซียส ผลที่เกิดขึ้นทำให้อนุภาคของผงวัสดุอะลูมินามีขนาดเกรนโตและรูพรุนปรากฏคงเหลืออยู่มาก เมื่อถึงอุณหภูมิ 1600 องศาเซลเซียส จึงทำให้ที่อัตราส่วนของตัวประสานชนิด PEG กับตัวประสานชนิด PVB เท่ากับ 90:10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีรูพรุนปรากฏมากกว่าเมื่อเทียบกับที่อัตราส่วนเท่ากับ 80:20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก



ภาพที่ 4.14 ความหนาแน่นและรูพรุนปรากฏของชิ้นงานวัสดุอะลูมินาหลังจากฉีดขึ้นรูป หลังกำจัดตัวประสานชนิด PEG และหลังผ่านการเผาผนึก ตามอัตราส่วนของตัวประสาน

4.2.3.3 ความแข็ง

ความแข็งของชิ้นงานตัวอย่างศึกษาจากการวัดรอยกดบนผิวชิ้นงาน ซึ่งผ่านกระบวนการขัดหยาบและขัดละเอียดตามลำดับ จากการทดลองนี้มีปัจจัยของอัตราส่วนของตัวประสานชนิด PEG กับตัวประสานชนิด PVB เป็นตัวชี้บ่งค่าความแข็งที่เกิดขึ้นกับชิ้นงานตัวอย่าง โดยใช้อัตราส่วนของผงวัสดุอะลูมินาที่ปริมาณผงวัสดุเท่ากับ 52 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรในกระบวนการฉีดขึ้นรูปชิ้นงานตัวอย่างอีกด้วย จากกราฟค่าความแข็งของวัสดุอะลูมินา ดังแสดงในภาพที่ 4.15 แสดงให้เห็นว่าค่าความแข็งของชิ้นงานตัวอย่างวัสดุอะลูมินาที่ฉีดขึ้นรูปด้วยตัวประสานชนิด PEG กับตัวประสานชนิด PVB ที่อัตราส่วนเท่ากับ 80:20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีค่าความแข็งมากที่สุด เนื่องมาจากตัวประสานชนิด PVB มีปริมาณเมื่อเทียบกับอัตราส่วนอื่นๆ หลังจากกำจัดตัวประสานด้วยวิธีการแช่น้ำเกิดช่องว่างระหว่างอนุภาคของผงวัสดุอะลูมินาจำนวนน้อยเมื่อเทียบกับอัตราส่วนเท่ากับ 90:10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก หลังจากผ่านกระบวนการเผาผนึกทำให้ช่องว่างยึดติดกันระหว่างอนุภาคผงวัสดุอะลูมินา ในขณะเดียวกันที่อัตราส่วนตัวประสานชนิด PEG กับตัวประสานชนิด PVB เท่ากับ 90:10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก การขยายโตของเกรนมีขนาดใหญ่ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงน้อยดังแสดงในภาพที่ 4.20

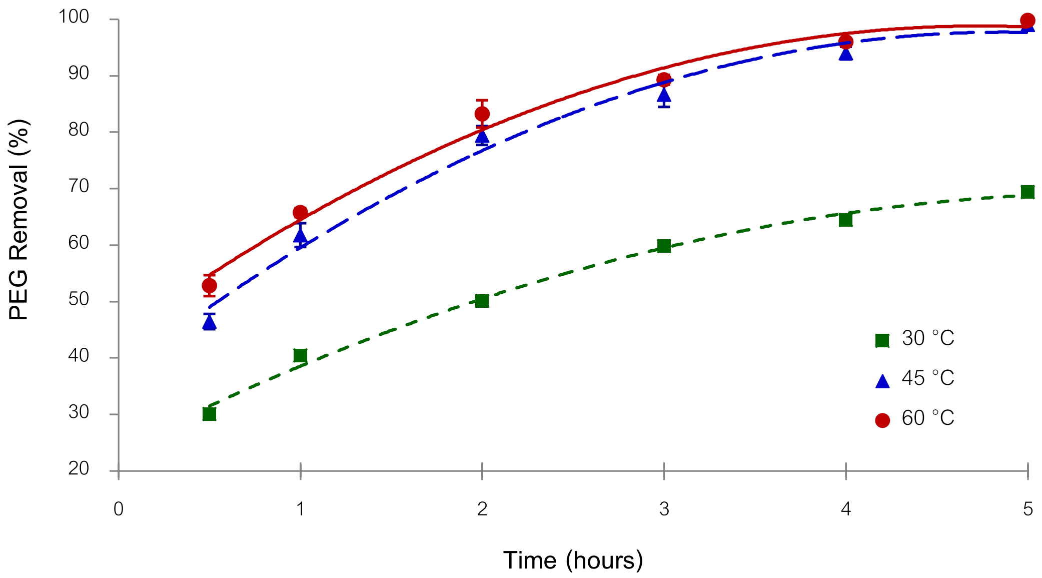


ภาพที่ 4.15 ความแข็งของชิ้นงานวัสดุอะลูมินา ณ ปริมาณของอัตราส่วนตัวประสานที่แตกต่างกัน

4.3 ผลของการศึกษาการฉีดขึ้นรูปผงวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์

4.3.1 อุณหภูมิและเวลาในการกำจัดตัวประสาน

การกำจัดตัวประสานด้วยการแช่น้ำ กระบวนการนี้เป็นวิธีการกำจัดตัวประสานชนิด PEG ที่อุณหภูมิแตกต่างกันโดยใช้อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ อุณหภูมิที่ใช้กำจัดตัวประสาน ได้แก่ 30 45 และ 60 องศาเซลเซียส ในระยะเวลา 5 ชั่วโมง โดยใช้ปริมาณผงวัสดุเท่ากับ 44 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ในการทดสอบดังแสดงในภาพที่ 4.16 ซึ่งสามารถวัดน้ำหนักของตัวประสานก่อนแช่น้ำและหลังแช่น้ำ พบว่าน้ำที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส สามารถกำจัดตัวประสานชนิด PEG ได้เกือบทั้งหมดในชิ้นงานตัวอย่าง ขณะที่ในช่วงเริ่มต้นของกระบวนการกำจัดตัวประสานจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและค่อยๆ ลดลงเมื่อระยะเวลาผ่านไป มีลักษณะคล้ายคลึงกับชิ้นงานวัสดุอะลูมินาดังแสดงในหัวข้อ 4.2.1.1 ส่วนชิ้นงานตัวอย่างหลังจากการกำจัดตัวประสานสามารถคงรูปอยู่ได้เนื่องมาจากยังมีตัวประสานชนิด PVB ซึ่งไม่ละลายน้ำยึดเกาะอนุภาคของผงวัสดุอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์หลังจากผ่านกระบวนการวิธีการแช่น้ำผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ W. Yang(20) และN.Chaunkrekkul(22) ซึ่งได้ใช้วัสดุอะลูมินาและวัสดุฮาร์ดเมทัลและตัวเชื่อมประสานชนิด PEG และกำจัดด้วยการแช่น้ำ ซึ่งให้ผลลักษณะเช่นเดียวกัน

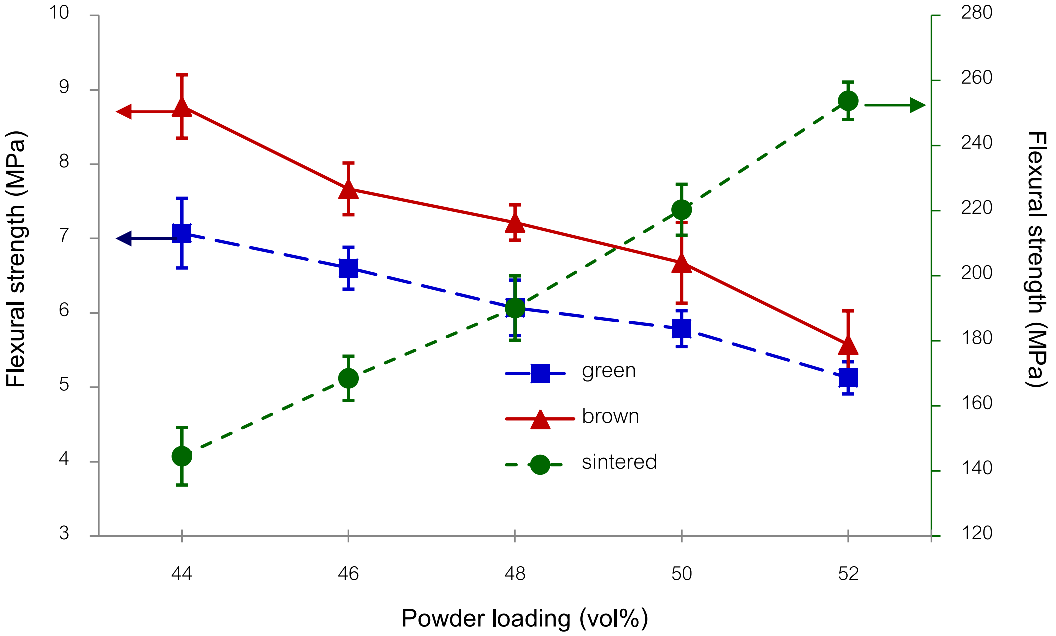


ภาพที่ 4.16 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่ตัวประสานชนิด PEG หายไปจากชิ้นงานตัวอย่างของวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์ ณ อุณหภูมิต่างๆ ภายในระยะเวลา 5 ชั่วโมง

4.3.2 ปริมาณผงวัสดุในส่วนผสมต่อลักษณะสมบัติของชิ้นงาน

4.3.2.1 ความต้านทานการดัดโค้ง

ค่าความต้านทานการดัดโค้งของชิ้นงานตัวอย่างวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์แสดงดังในภาพที่ 4.17 จากกราฟดังกล่าวพบว่าชิ้นงานตัวอย่างหลังจากการฉีดขึ้นรูปและหลังจากกำจัดตัวประสานชนิด PEG มีแนวโน้มลดลงเช่นเดียวกับวัสดุอะลูมินาเพียงอย่างเดียว อีกปัจจัยหนึ่ง ที่ส่งผลให้ค่าความต้านทานการดัดโค้งลดของชิ้นงานตัวอย่างหลังจากการฉีดขึ้นรูปและหลังจากกำจัดตัวประสานชนิด PEG คือการเพิ่มผงทังสเตนคาร์ไบด์ ทำให้การยึดเกาะของอนุภาคระหว่างผงอะลูมินากับผงทังสเตนคาร์ไบด์ลดน้อยลงเมื่อปราศจากตัวประสาน ส่วนค่าความต้านทานการดัดโค้งของชิ้นงานตัวอย่างหลังเผาผนึกจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนของปริมาณผงทังสเตนคาร์ไบด์ที่เพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนของผงวัตถุดิบที่ฉีดขึ้นรูปซึ่งความต้านทานการดัดโค้งมีค่าสุดเมื่อปริมาณผงอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์เท่ากับ 52 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร จากกราฟยังสังเกตได้ว่าชิ้นงานหลังแช่น้ำมีค่าความต้านทานการดัดโค้งเพิ่มมากกว่าชิ้นงานหลังจากฉีดขึ้นรูปเป็นผลเนื่องมาจากการอบแห้งหลังจากชิ้นงานผ่านการแช่น้ำตัวประสานชนิด PVB ที่ไม่สามารถละลายน้ำ เกิดปฏิกิริยาหลอมเข้ากับอนุภาคผงวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์ดังแสดงในภาพที่ 4.4 ซึ่งเป็นกราฟแสดงการวิเคราะห์ทางความร้อนของตัวประสานชนิด PVB



ภาพที่ 4.17 ความต้านทานต่อการดัดโค้งของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์ หลังจากฉีดขึ้นรูป หลังจากแช่น้ำ และหลังเผาผนึก ตามปริมาณผงวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์ โดยตัวประสานชนิด PEG เท่ากับ 85 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

4.3.2.2 **ความหนาแน่นและรูพรุนปรากฏ**

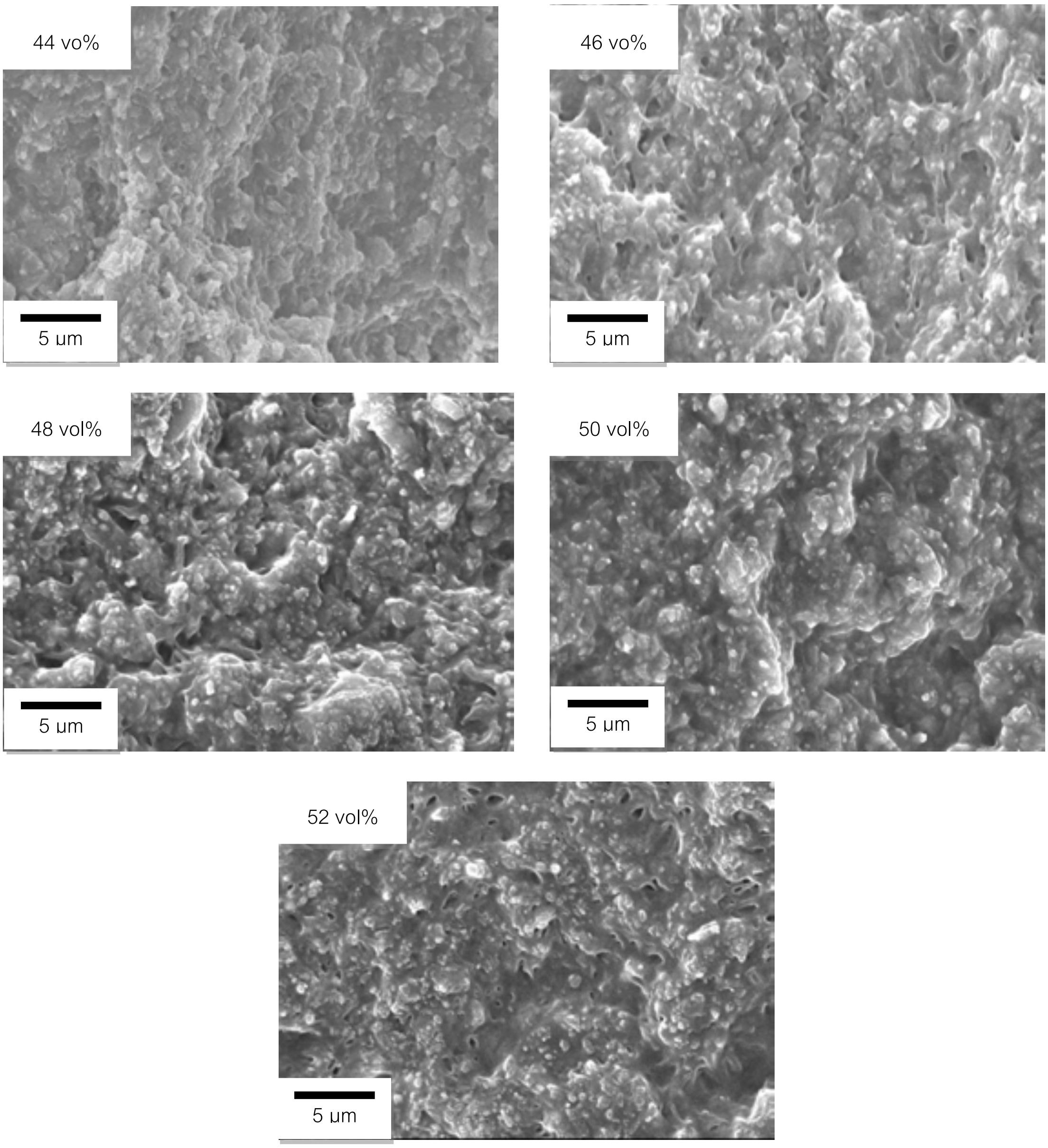
ความหนาแน่นของชิ้นงานตัวอย่างวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์ ณ อุณหภูมิ 1600 องศาเซลเซียส จากการทดลองนี้ชี้ให้เห็นว่าความหนาแน่นของชิ้นงานตัวอย่างที่ฉีดขึ้นรูปเป็นชิ้นงานมีปัจจัยที่ควบคุมได้แก่ ปริมาณผงวัสดุและอัตราส่วนของตัวประสานทั้งชนิด PEG และ PVB ที่มีอัตราส่วนลดลงตามปริมาณของผงวัสดุที่ใช้ในฉีดขึ้นรูปในแต่ละชิ้นงานตัวอย่างที่สามารถขึ้นรูปได้ พบว่าวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์มีความหนาแน่นลักษณะแนวโน้มเช่นเดียวกันกับวัสดุอะลูมินาดังแสดงในภาพที่ 4.7 ส่วนปัจจัยอีกอย่างหนึ่งที่ส่งผลให้วัสดุเชิงประกอบมีความหนาแน่นเพิ่มมากขึ้นก็คือการเพิ่มอัตราส่วนของผงทังสเตนคาร์ไบด์ในผงวัตถุดิบสำหรับการฉีดขึ้นรูป และอัตราส่วนของตัวประสานทั้งสองชนิดที่ลดลง ทำให้ค่าความหนาแน่นของวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์ที่น้อยที่สุดเฉลี่ยเท่ากับ 71.88 เปอร์เซ็นต์ทางทฤษฎี ส่วนผงวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์ที่สามารถฉีดขึ้นรูปได้โดยปริมาณผงวัสดุเท่ากับ 52 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรมีค่าความหนาแน่นสูงสุดเฉลี่ยเท่ากับ 81.89 เปอร์เซ็นต์

ทางทฤษฎี ในขณะเดียวรูพรุนปรากฏในตัวอย่างชิ้นงานตัวอย่างของวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์เกิดจากการกำจัดตัวประสานชนิด PEG ด้วยการแช่น้ำและปัจจัยที่สำคัญคือปริมาณผงวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์ที่ใช้ในการฉีดขึ้นรูป ซึ่งมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณผงวัสดุที่เพิ่มขึ้นจาก 44 46 48 50 และ 52 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานอะลูมินาพบว่าความหนาแน่นของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน ขณะรูพรุนปรากฏของวัสดุดังกล่าวมีลักษณะแนวโน้มลดลงเหมือนกับวัสดุอะลูมินา ปัจจัยที่ส่งผลต่อแนวโน้มทั้งสองในวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์คือการเติมผงทังสเตนคาร์ไบด์ จากการทดลองยังชี้ให้เห็นว่าชิ้นงานตัวอย่างที่ผ่านการ ฉีดขึ้นรูปยังมีข้อบกพร่องในด้านความหนาแน่นและรูพรุนปรากฏ ซึ่งเกิดจากตัวประสานที่ช่วยในกระบวนการฉีดขึ้นรูปและต้องกำจัดตัวประสานทั้งสองชนิดเพื่อลดระยะเวลาในการเผาผนึกต่อไป

4.3.2.3 **โครงสร้างจุลภาค**

(1) **ชิ้นงานตัวอย่างหลังจากการฉีดขึ้นรูป**

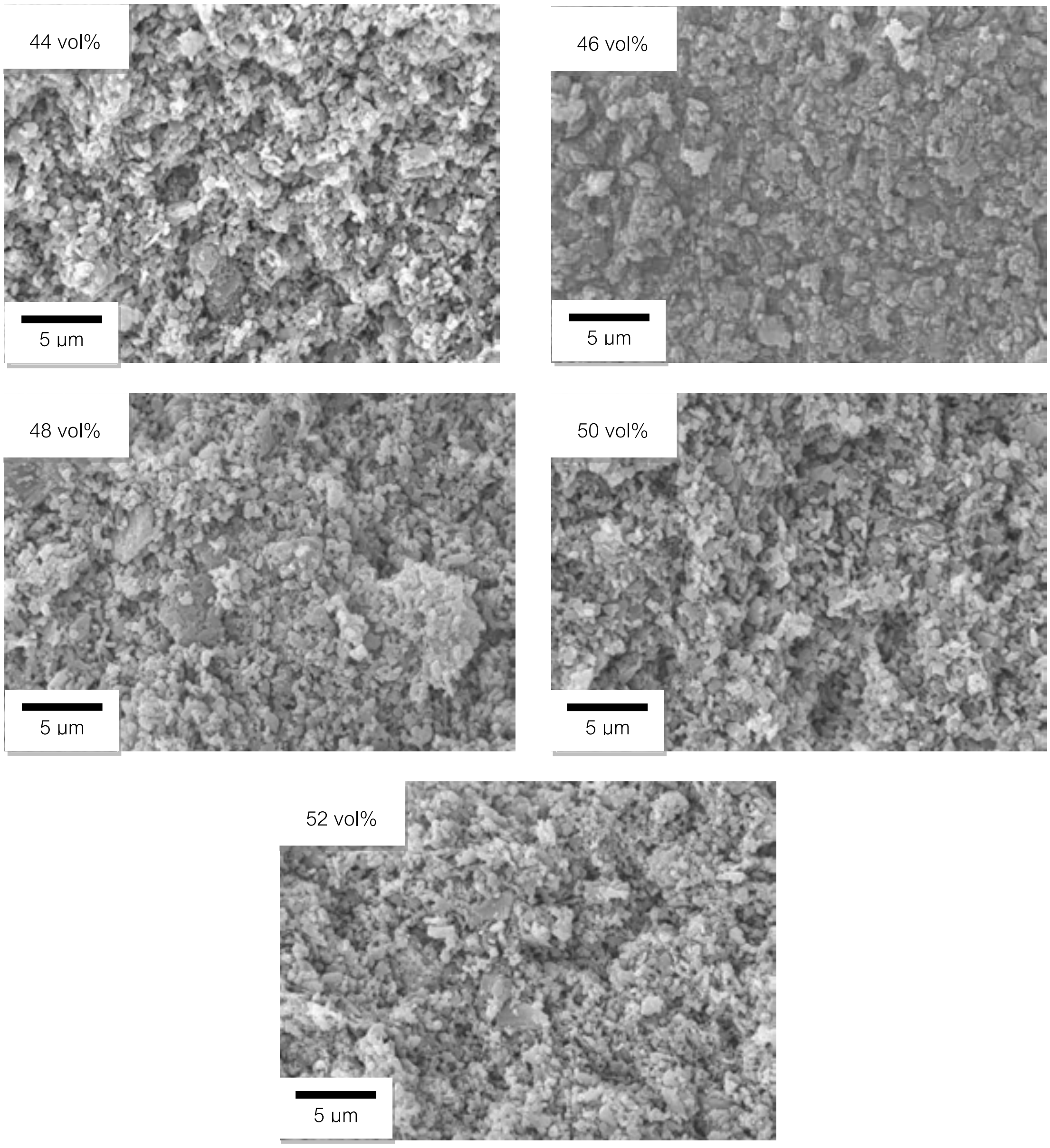
จากโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานตัวอย่างหลังจากการฉีดขึ้นรูปดังแสดงในภาพที่ 4.18 พบว่าโครงสร้างจุลภาคชิ้นงานตัวอย่างวัสดุอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์มีขนาดอนุภาคเล็กกว่าชิ้นงานตัวอย่างวัสดุอะลูมินาดังแสดงในภาพที่ 4.9 (ดูในหน้าที่ 47)



ภาพที่ 4.18 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์หลังจากฉีดขึ้นรูปที่ปริมาณผงวัสดุต่างๆ กัน

(2) **ชิ้นงานตัวอย่างหลังจากกำจัดตัวประสานชนิด** PEG

จากโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานตัวอย่างหลังจากกำจัดตัวประสานชนิด PEG ณ อุณหภูมิน้ำ 30 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 24 ชั่วโมง ดังแสดงในภาพที่ 4.19 จากการทดลองพบว่าโครงสร้างจุลภาคของวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์มีรูพรุนและช่องว่างแทรกอยู่เช่นเดียวกันกับวัสดุอะลูมินาดังในรูปที่ 4.10 (ดูในหน้าที่ 49)



ภาพที่ 4.19 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์หลังจากกำจัดตัวประสาชนิด PEG ที่ปริมาณผงวัสดุต่างๆ กัน

(3) ชิ้นงานตัวอย่างหลังจากผ่านการเผาผนึก

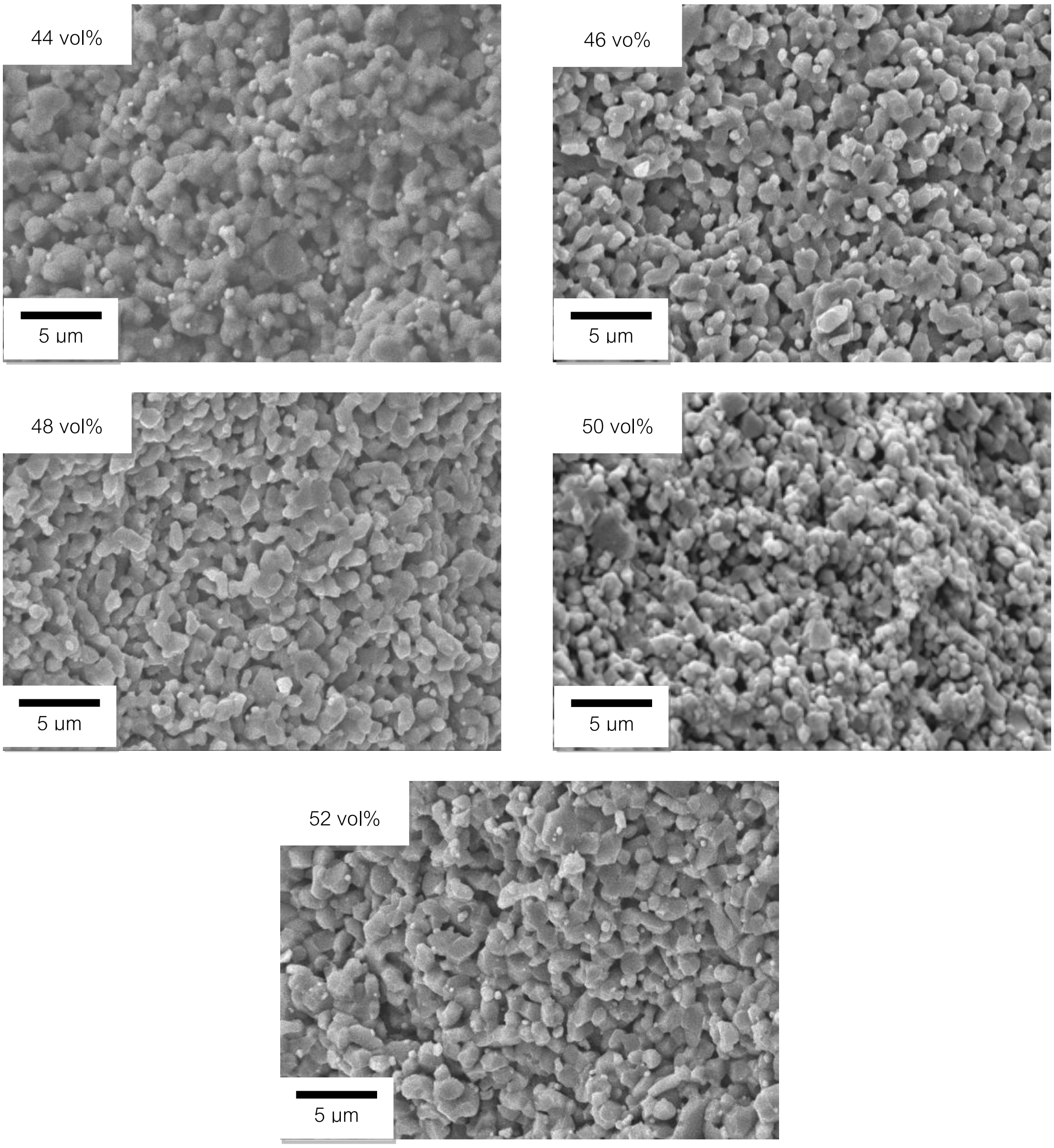
แบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ ได้แก่

1) โครงสร้างจุลภาคของรอยหักหลังจากผ่านการทดสอบความแข็งแรง

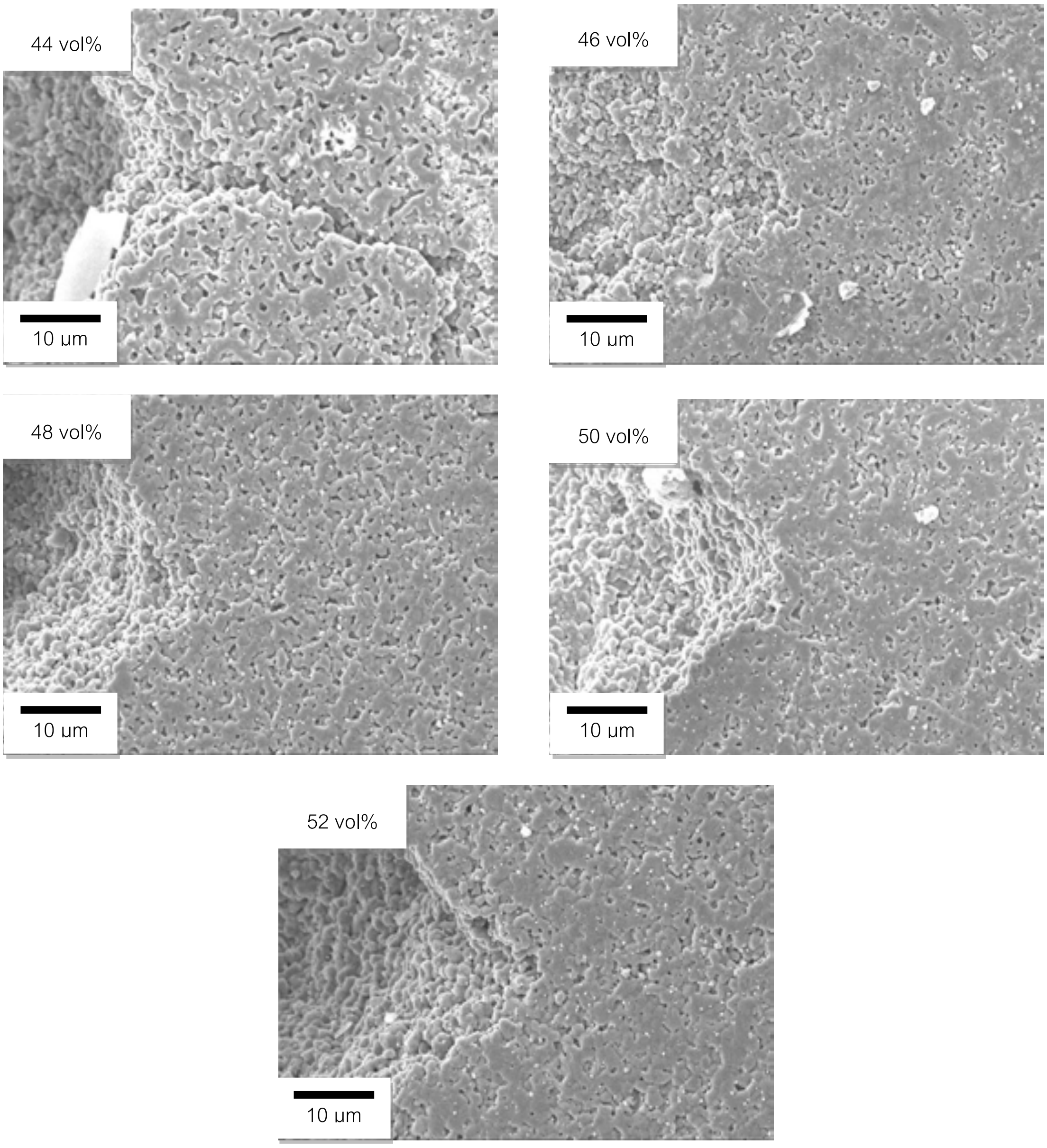
จากโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานตัวอย่างหลังจากผ่านการเผาผนึก ณ อุณหภูมิ1600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ภายใต้บรรยากาศอาร์กอน ดังแสดงในภาพที่ 4.20พบว่าอนุภาคของวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์มีขนาดอนุภาคเล็กกว่าอนุภาคของวัสดุอะลูมินาดังแสดงในภาพที่ 4.11 (ดูในหน้าที่ 51)

2) โครงสร้างจุลภาคของผิวหน้าชิ้นงานตัวอย่าง

จากโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานตัวอย่างหลังจากผ่านกระบวนการขัดผิวหน้าชิ้นงานด้วยวิธีการขัดหยาบและขัดละเอียด จากนั้นนำชิ้นงานตัวอย่างกัดผิวด้วยความร้อน ณ อุณหภูมิ 1550 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 15 นาที ดังแสดงในภาพที่ 4.21 พบว่าเกรนของวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์มีขนาดเกรนเล็กกว่าวัสดุอะลูมินาดังภาพที่ 4.12 (ดูหน้าที่ 53)



ภาพที่ 4.20 โครงสร้างจุลภาคของรอยหักของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์หลังจากผ่านกระบวนการเผาผนึกที่ปริมาณผงวัสดุต่างๆ กัน



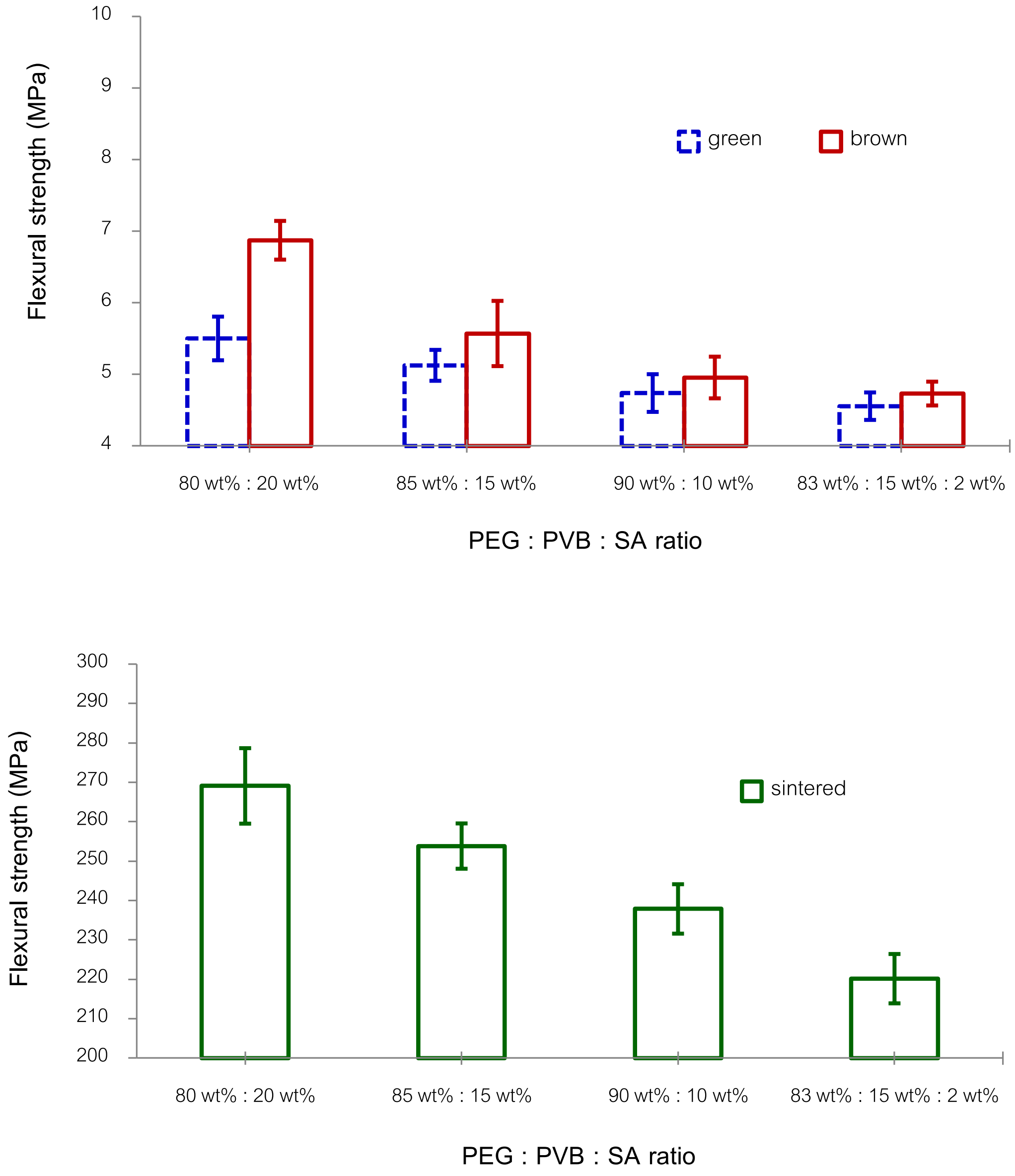
ภาพที่ 4.21 โครงสร้างจุลภาคของผิวหน้าของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์ หลังจากผ่านกระบวนการขัดผิวหน้าที่ปริมาณผงวัสดุต่างๆ กัน

4.3.3 อัตราส่วนระหว่างตัวประสานชนิด PEG กับตัวประสานชนิด PVB และการเติมกรดสเตียริค

4.3.3.1 ความต้านทานการดัดโค้ง

การทดสอบความต้านทานการดัดโค้งแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 ทดสอบชิ้นงานตัวอย่างวัสดุอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์หลังจากการฉีดขึ้นรูป (green specimen) ส่วนที่ 2 ทดสอบชิ้นงานตัวอย่างวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์หลังจากกำจัดตัวประสานชนิด PEG ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 24 ชั่วโมง (brown specimen) ส่วนที่ 3 ทดสอบชิ้นงานตัวอย่างวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์หลังจากเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1600 องศาเซลเซียส ค่าความต้านทานการดัดโค้งของชิ้นงานตัวอย่างวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์ที่ปริมาณผงวัสดุเท่ากับ 52 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรแสดงดังรูปที่ 4.22 จากกราฟพบว่าชิ้นงานตัวอย่างตัวอย่างหลังจากการฉีดขึ้นรูป หลังกำจัดตัวประสานชนิด PEG และหลังจากผ่านกระบวนการเผาผนึกมีแนวโน้มลดลงเช่นเดียวกับวัสดุอะลูมินาเพียงอย่างเดียว (ดังแสดงในภาพที่ 4.13) ขณะที่เมื่อเติมกรดสเตียริค 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ขณะทำการผสมวัตถุดิบ พบว่าวัตถุดิบที่เตรียมสำหรับการฉีดขึ้นรูปมีลักษณะไม่เหนียวไม่เข้ากันเมื่อเทียบกับการใช้ตัวประสานเพียงสองชนิดในการฉีดขึ้นรูปหลังจากผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูปกลับทำให้เกิดข้อบกพร่องกับชิ้นงานตัวอย่างวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์ด้านค่าความต้านทานการดัดโค้งมากที่สุด ทั้งหลังจากผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูป หลังกำจัดตัวประสานชนิด PEG และหลังจากผ่านการเผาผนึกเมื่อเปรียบเทียบค่าความต้านทานการดัดโค้งของชิ้นงานตัวอย่างวัสดุอะลูมินาและชิ้นงานตัวอย่างวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์ พบว่าเมื่อเติมผงทังสเตนคาร์ไบด์ลงไปส่งผลให้ค่าความต้านทานการดัดโค้งงอของวัสดุเชิงประกอบมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับวัสดุอะลูมินาเพียงอย่างเดียวในอัตราส่วนของตัวประสานชนิด PVB ที่ลดลงจากกระบวนการฉีดขึ้นรูป เนื่องมาจากอนุภาคทังสเตนคาร์ไบด์ที่เติมไปพร้อมกับผงวัสดุอะลูมินา ซึ่งทำหน้าที่ยับยั้งการเจริญเติบโตของเกรนของอนุภาคผงวัสดุอะลูมินา ทำให้ขนาดเกรนของวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์มีขนาดเล็กลงเมื่อเทียบกับวัสดุอะลูมินาเพียงอย่างเดียวสามารถดูได้จากภาพที่ 4.3 จากกราฟดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าขนาดอนุภาคของวัสดุเชิงประกอบมีขนาดอนุภาคเล็กลงเมื่อเทียบกับภาพที่ 4.2 และค่าความต้านทานการดัดโค้งที่มีค่ามากที่สุดของวัสดุอะลูมินาและวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์หลังจากผ่านการเผาผนึกเมื่อใช้ตัวประสานชนิด PEG กับตัวประสานชนิด PVB ในอัตราส่วนเท่ากับ 80:20 เปอร์เซ็นต์โดย

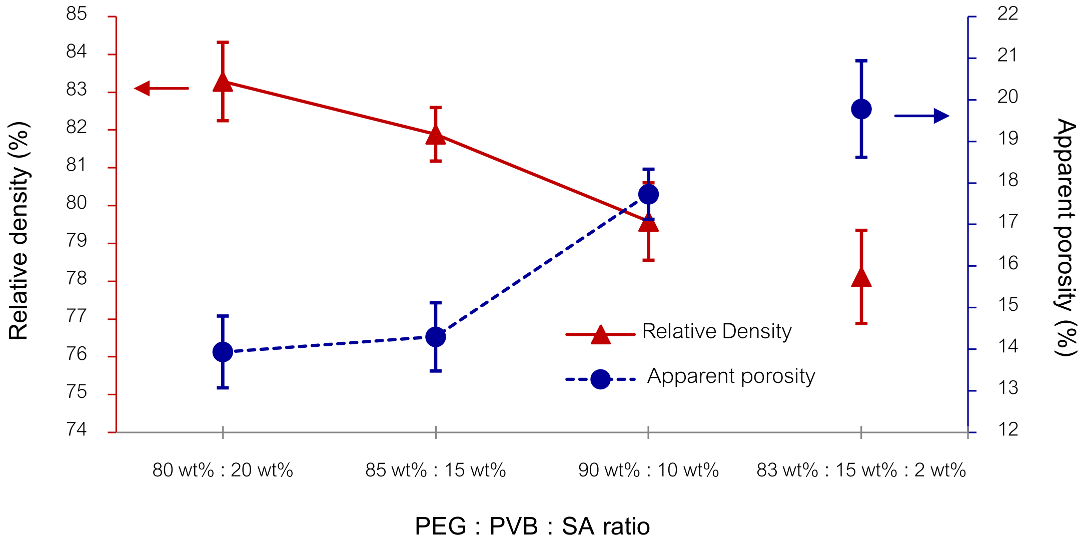
น้ำหนักในกระบวนการฉีดขึ้นรูป ขณะเดียวกันหลังจากกำจัดตัวประสานชนิด PEG ด้วยการแช่น้ำ เมื่อเทียบอัตราส่วนของตัวประสานชนิด PVB ยังพบว่าชิ้นงานที่มีอัตราส่วนของตัวประสานชนิด PVB ยังคงเหลืออยู่ในชิ้นงานที่มากกว่าจะส่งผลให้ชิ้นงานหลังแช่น้ำมีค่าความต้านทานจากการดัดโค้งสูงกว่าและค่อยๆ ลดลงตามอัตราส่วนของตัวประสานชนิด PVB ที่ลดลงตามลำดับ เนื่องมาจากการอบแห้งหลังจากชิ้นงานผ่านการแช่น้ำตัวประสานชนิด PVB ที่ไม่สามารถละลายน้ำ เกิดปฏิกิริยาหลอมเข้ากับอนุภาคผงวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์ดังแสดงในภาพที่ 4.4 ซึ่งเป็นกราฟแสดงการวิเคราะห์ทางความร้อนของตัวประสานชนิด PVB เมื่อเติมกรดสเตียริค 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แทนที่ตัวประสานชนิด PEG พบว่าค่าความต้านทานการดัดโค้งของชิ้นงานดังกล่าวมีค่าลดลง ทั้งหลังจากการฉีดขึ้นรูป หลังกำจัดตัวประสานชนิด PEG และหลังเผาผนึกเมื่อเทียบกับตัวประสานชนิด PEG กับตัวประสานชนิด PVB อัตราส่วนเท่ากับ 85:15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก



ภาพที่ 4.22 ความต้านทานการดัดโค้งของชิ้นงานตัวอย่างวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์ หลังจากฉีดขึ้นรูป หลังกำจัดตัวประสาน PEG และหลังผ่านการเผาผนึกที่ปริมาณผงวัสดุเท่ากับ 52 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร

4.3.3.2 ความหนาแน่นและรูพรุนปรากฏ

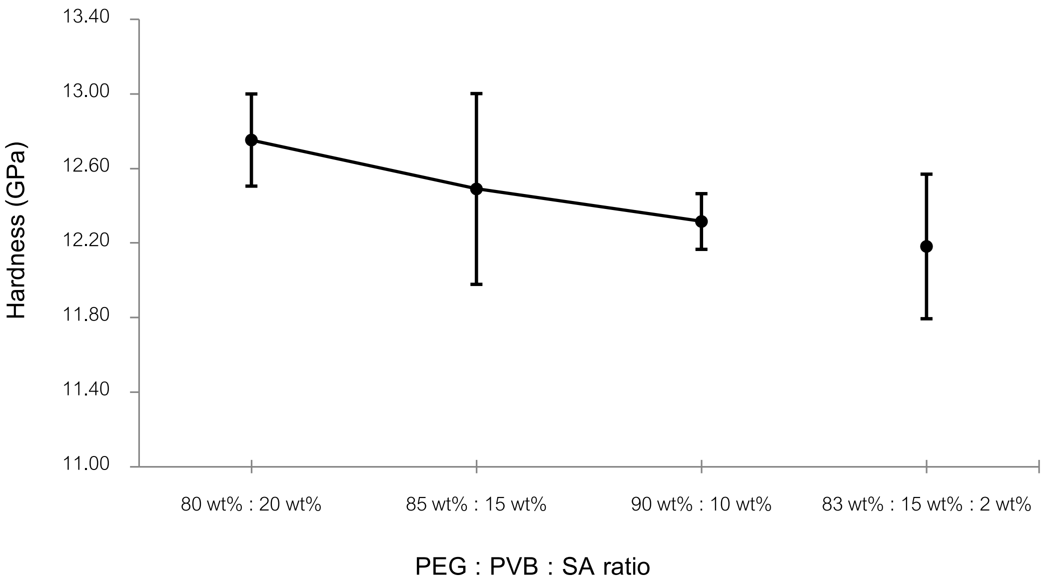
ความหนาแน่นของชิ้นงานตัวอย่างวัสดุอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์ ณ ปริมาณของผงวัสดุอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์เท่ากับ 52 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ผ่านกระบวนการเผาผนึก ณ 1600 องศาเซลเซียส จากการทดลองนี้แสดงให้ให้เห็นว่าความหนาแน่นของชิ้นงานตัวอย่างขึ้นอยู่กับปัจจัยที่ควบคุมได้แก่ ความแตกต่างของชนิดตัวประสาน PEG กับตัวประสานชนิด PVB ที่เป็นส่วนผสมกับผงวัสดุอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์ก่อนนำไปฉีดขึ้นรูป และยังเพิ่มกรดสเตียริค 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักอีกด้วย จากกราฟความหนาแน่นสัมพัทธ์ดังแสดงในภาพที่ 4.23 พบว่าความหนาแน่นในชิ้นงานตัวอย่างของวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์ที่ฉีดขึ้นรูปมีลักษณะแนวโน้มเช่นเดียวกันกับวัสดุอะลูมินา เมื่อเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นพบว่าวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์มีค่าความหนาแน่นที่มากกว่าวัสดุอะลูมินาเมื่อใช้ตัวประสานชนิด PEG กับตัวประสานชนิด PVB ที่อัตราส่วนเท่ากับ 90:10 85:15 และ 80:20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ปัจจัยที่มีผลให้มีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น ในวัสดุเชิงประกอบคือการเติมผงทังสเตนคาร์ไบด์ จึงทำให้หลังผ่านกระบวนการเผาผนึกได้ทำให้ลดขนาดของเกรนและช่วยให้รูพรุนถูกผนึกได้ดีกว่าวัสดุอะลูมินาเพียงอย่างเดียว จากผลดังกล่าวทำให้ความหนาแน่นของวัสดุเชิงประกอบที่ฉีดขึ้นรูปด้วยอัตราส่วนของตัวประสานที่กล่าวมามีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น ส่วนปริมาณรูพรุนปรากฏที่เกิดขึ้นก็มีจำนวนลดลง เนื่องมาจากจำนวนของเกรนเล็กลงภายในชิ้นงานตัวอย่างเมื่อผ่านกระบวนการเผาผนึกและปิดผนึกรูพรุนที่เกิดขึ้นได้ดียิ่งขึ้น ทำให้ที่อัตราส่วนตัวประสานทั้งสองชนิดที่เท่ากับ 80:20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีค่ารูพรุนปรากฏน้อยที่สุด ในขณะที่เมื่อเติมกรดสเตียริค 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ในวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์ก็ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นลดลงและรูพรุนปรากฏเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับการใช้ตัวประสานชนิด PEG กับตัวประสานชนิด PVB อัตราส่วนเท่ากับ 85:15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักในการฉีดขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์ เนื่องจากกรดสเตรียริคที่เติมลงไปตั้งแต่ในการเตรียมวัตถุดิบก่อนการฉีดขึ้นรูปมีผลทำให้วัตถุดิบไม่เกิดความเหนียวเกาะกันของตัวประสานชนิด PEG กับผงวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์ จึงส่งผลให้เมื่อผ่านกระบวนการกำจัดตัวประสาน กระบวนการเผาผนึก ทำให้สมบัติมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับการฉีดขึ้นรูปด้วยตัวประสานชนิด PEG และ ชนิด PVB



ภาพที่ 4.23 ความหนาแน่นและรูพรุนปรากฏของชิ้นงานตัวอย่างผงวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์ หลังจากฉีดขึ้นรูป หลังกำจัดตัวประสานชนิด PEG และหลังผ่านเผาผนึกที่ปริมาณผงวัสดุเท่ากับ 52 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร

4.3.3.3 **ความแข็ง**

ความแข็งของชิ้นงานตัวอย่างศึกษาจากการวัดรอยกดบนผิวชิ้นงาน ซึ่งผ่านกระบวนการขัดหยาบและขัดละเอียดตามลำดับ จากการทดลองนี้มีปัจจัยของอัตราส่วนของตัวประสานชนิด PEG กับตัวประสานชนิด PVB เป็นตัวชี้บ่งค่าความแข็งที่เกิดขึ้นกับชิ้นงานตัวอย่าง โดยใช้อัตราส่วนของผงวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์ที่ปริมาณของผงวัสดุเท่ากับ 52 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร และเพิ่มกรดสเตียริค 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ในกระบวนการฉีดขึ้นรูปชิ้นงานตัวอย่างอีกด้วย ส่วนวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์มีลักษณะแนวโน้มค่าความแข็งแรงเป็นไปในทิศทางเดียวกับวัสดุอะลูมินา(ในหัวข้อ 4.2.2.3) แต่พบว่ามีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบอัตราส่วนของตัวประสานที่ฉีดขึ้นรูปเท่ากันดังแสดงในภาพที่ 4.24 ปัจจัยที่ส่งผลให้ความแข็งแรงเพิ่มขึ้นเนื่องมาจากผงทังสเตนคาร์ไบด์ที่เติมไป ส่วนการเติมกรดสเตียริค 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ในวัสดุเชิงประกอบกลับส่งผลต่อให้ความแข็งของชิ้นงานดังกล่าวมีค่าลดลงปัจจัยที่ทำให้เกิดผลดังกล่าวเกิดจากการเติมกรดสเตียริคมีผลทำให้อนุภาคของผงวัสดุและตัวประสานชนิด PEG ไม่เกิดความเหนียวเกาะกันในขณะเตรียมผงวัสดุ จึงส่งผลให้วัสดุเชิงประกอบที่เติมกรดสเตียริคมีลักษณะสมบัติด้อยลงเมื่อเทียบกับการฉีดขึ้นรูปด้วยตัวประสานชนิด PEG กับตัวประสานชนิด PVB เท่ากับ 85:15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก



ภาพที่ 4.24 ความแข็งของชิ้นงานตัวอย่างของวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์ ณ ปริมาณของอัตราส่วนตัวประสานที่แตกต่างกัน ที่ปริมาณผงวัสดุเท่ากับ 52 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร

บทที่ 5
สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาผลของผงวัสดุอะลูมินาและผงวัสดุอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์กับตัวประสาน วิธีกำจัดตัวประสาน สมบัติเชิงกล โครงสร้างจุลภาคของวัสดุอะลูมินาและวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์ด้วยวิธีฉีดขึ้นรูป พร้อมทั้งศึกษาเปรียบเทียบผลของตัวประสาน สมบัติเชิงกลของวัสดุอะลูมินาและวัสดุอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์

5.1.1 การกำจัดตัวประสานชนิดที่แบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน ช่วยลดระยะเวลาการกำจัดตัวประสานให้ลดน้อยลง พร้อมทั้งการกำจัดตัวประสานชนิด PEG ด้วยการแช่น้ำเป็นวิธีการที่เป็นมิตรแก่สิ่งแวดล้อม ไม่เกิดของจากสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการและช่วยลดค่าใช้จ่าย

5.1.2 อุณหภูมิของน้ำที่ใช้กำจัดตัวประสานชนิดมีผลต่ออัตราการละลายตัวประสานชนิด PEG ที่อยู่ในชิ้นงานตัวจากการทดลองพบว่าน้ำที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส กำจัดตัวประสานชนิด PEG ได้เร็วที่สุด

5.1.3 ปริมาณผงวัสดุที่ใช้ในการฉีดขึ้นรูป มีผลต่อสมบัติของวัสดุอะลูมินาและวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์ หลังจากการฉีดขึ้นรูป หลังจากกำจัดตัวประสานชนิด PEG ความต้านทานการดัดโค้งมีแนวโน้มลดลง ตามปริมาณผงวัสดุที่เพิ่มขึ้น ขณะเดียวกันสมบัติของชิ้นงานตัวอย่างของวัสดุทั้งสองหลังผ่านการเผาผนึกทั้งความต้านทานการดัดโค้ง ความหนาแน่น ความแข็ง มีลักษณะแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณของผงวัสดุที่ฉีดขึ้นรูป ส่วนโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานตัวอย่างวัสดุอะลูมินาและวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์ หลังกำจัดตัวประสานชนิด PEG พบว่าเกิดช่องว่างระหว่างอนุภาคเกิดขึ้นและลดลงตามลำดับปริมาณผงวัสดุที่เพิ่มขึ้นตามการฉีดขึ้นรูป ส่วนหลังเผาผนึกอนุภาคของชิ้นงานตัวอย่างอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์มีขนาดอนุภาคเล็กกว่าชิ้นงานตัวอย่างวัสดุอะลูมินาและผิวหน้าชิ้นงานของวัสดุทั้งสองรูพรุนปรากฏมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณผงวัสดุที่เพิ่มในการฉีดขึ้นรูป

5.1.4 อัตราส่วนของตัวประสานชนิด PEG : PVB ที่ใช้ในการฉีดขึ้นรูป มีผลต่อสมบัติของวัสดุอะลูมินาและวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์ หลังจากการฉีดขึ้นรูป หลังจากกำจัดตัวประสานชนิด PEG ความต้านทานการดัดโค้งมีแนวโน้มลดลง ตามอัตราส่วนตัวประสานชนิด PVB ที่ลดลง ขณะเดียวกันสมบัติเชิงกลของชิ้นงานตัวอย่างของวัสดุทั้งสองหลังผ่านการเผาผนึก ทั้งความต้านทานการดัดโค้ง ความหนาแน่น ความแข็ง มีลักษณะแนวโน้มลดลงตามอัตราส่วนของตัวประสานชนิด PVB ที่ฉีดขึ้นรูป ในส่วนของวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์ที่เติมกรดสเตียริคร้อยละ 2 ลักษณะสมบัติทั้งก่อนและหลังการเผาผนึกมีสมบัติด้อยกว่ากับการไม่เติม

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 เพิ่มความดันในการฉีดขึ้นรูปให้มากขึ้น เพื่อทำให้วัตถุดิบไหลตัวเข้าสู่แม่พิมพ์ได้แน่นขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้สมบัติของชิ้นงานตัวอย่างมีค่าเพิ่มมากขึ้น

5.2.2 ข้อบกพร่องสำหรับการกำจัดตัวประสานชนิด PEG ที่พบคือ การควบคุมอุณหภูมิของน้ำที่เป็นไปได้ยาก จึงควบคุมอุณหภูมิที่ 30 องศาเซลเซียส เพื่อลดปัญหาการควบคุมอุณหภูมิส่งผลให้ต้องใช้เวลาการกำจัดตัวประสานนานขึ้น

5.2.3 ความหนาแน่นของชิ้นงาน เริ่มจากการเตรียมวัตถุสำหรับการฉีดขึ้นรูปด้วยการเพิ่มปริมาณของผงวัสดุให้เพิ่มและลดจำนวนของอัตราส่วนตัวประสาน พร้อมทั้งศึกษาตัวประสานชนิดอื่นๆ ที่สามารถไหลตัวได้ดียิ่งขึ้น เพื่อมาใช้ร่วมกับตัวประสานชนิด PEG ที่สามารถละลายน้ำได้

5.2.4 การกำจัดตัวประสานด้วยการแช่น้ำ สามารถปรับปรุงให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นด้วยการใช้น้ำในปริมาณที่มากขึ้นเพื่อให้อัตราการละลายของตัวประสานชนิด PEG เกิดได้เพิ่มมากขึ้น พร้อมทั้งใช้การไหลเวียนของน้ำเพื่อไม่ให้อาจเกิดการอิ่มตัวของตัวประสานที่ละลายออกจากชิ้นงาน

รายการอ้างอิง

(1) Like, Q., Xikun, L., Yang, P., Weimin, M., Guanming, Q. and Yanbin, S. Types, Performance and Application of Al_2O_3 System Ceramic Cutting Tool. Journal of Rare Earths 25, Supplement 2 (2007): 322-326.

(2) Atkinson, H. and Davies, S. Fundamental aspects of hot isostatic pressing: An overview. Metallurgical and Materials Transactions A 31 (2000): 2981-3000.

(3) Wang, L., Shi, J.-L., Gao, J.-H. and Yan, D.-S. Influence of tungsten carbide particles on resistance of alumina matrix ceramics to thermal shock. Journal of the European Ceramic Society 21 (2001): 1213-1217.

(4) Wang, L., Shi, J.-L., Hua, Z.-L., Gao, J.-H. and Yan, D.-S. The influence of addition of WC particles on mechanical properties of alumina–matrix composite. Materials Letters 50 (2001): 179-182.

(5) Acchar, W., Cairo and C. A., Segadaes, A. M. Effect of tungsten carbide additions on the microstructure and properties of hot-pressed alumina. Materials Science and Engineering: A 406 (2005): 74-77.

(6) Acchar, W., Martinelli, A. E., Vieira, F. A., Cair and C. A. A. Sintering behaviour of alumina–tungsten carbide composites. Materials Science and Engineering: A 284 (2000): 84-87.

(7) Acchar, W., Zollfrank, C. and Greil, P. Microstructure of alumina reinforced with tungsten carbide. Journal of Materials Science 41 (2006): 3299-3302.

(8) Boonpo J., W. B. and N. C. The influence of Mg-PSZ addition on microstructure and mechanical properties of Al_2O_3/WC composites. Proccedings of Pure and Applied Chemistry International Conference (PACCON) 210 (2010): 961-968.

(9) Vervoort, P. J., Vetter, R. and Duszczyk, J. Overview of powder injection molding. Advanced Performance Materials 3 (1996): 121-151.

(10) German, R. M. and Bose, A. Injection molding of metals and ceramics. Princeton, N.J., U.S.A.: Metal Powder Industries Federation, 1997.

(11) Tseng, W. J. and Hsu, C.-K. Cracking defect and porosity evolution during thermal debinding in ceramic injection moldings. Ceramics International 25 (1999): 461-466.

(12) Baojun, Z., Xuanhui, Q. and Ying, T. Powder injection molding of WC–8%Co tungsten cemented carbide. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials 20 (2002): 389-394.

(13) Oliveira, R. V. B., Soldi, V., Fredel, M. C. and Pires, A. T. N. Ceramic injection moulding: influence of specimen dimensions and temperature on solvent debinding kinetics. Journal of Materials Processing Technology 160 (2005): 213-220.

(14) Hwang, K., Shu, G., Lee and H. Solvent debinding behavior of powder injection molded components prepared from powders with different particle sizes. Metallurgical and Materials Transactions A 36 (2005): 161-167.

(15) Li, Y., Li, L., and Khalil, K. A. Effect of powder loading on metal injection molding stainless steels. Journal of Materials Processing Technology 183 (2007): 432-439.

(16) Thomas-Vielma, P., Cervera, A., Levenfeld, B. and Várez, A. Production of alumina parts by powder injection molding with a binder system based on high density polyethylene. Journal of the European Ceramic Society 28 (2008): 763-771.

(17) Ivzhenko, V., Fesenko, I., Novikov, N., Prikhna, T., Popov, V. and Sarnavskaya, G. Study of the effect of the injection molding parameters on physico-mechanical properties of aluminum nitride-based ceramics. Journal of Superhard Materials 30 (2008): 255-260.

(18) Li, D., Hou, H., Liang, L. and Lee, K. Powder injection molding 440C stainless steel. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 49 (2010): 105-110.

(19) Cheng, J., Wan, L., Cai, Y., Zhu, J., Song, P. and Dong, J. Fabrication of W–20wt.%Cu alloys by powder injection molding. Journal of Materials Processing Technology 210 (2010): 137-142.

(20) Yang, W.-W., Yang, K.-Y., Wang, M.-C. and Hon, M.-H. Solvent debinding mechanism for alumina injection molded compacts with water-soluble binders. Ceramics International 29 (2003): 745-756.

(21) Krauss, V. A., Oliveira, A. A. M., Klein, A. N., Al-Qureshi, H. A. and Fredel, M. C. A model for PEG removal from alumina injection moulded parts by solvent debinding. Journal of Materials Processing Technology 182 (2007): 268-273.

(22) Nutthita Chuankrerkkul, P. F. M. and H. A. D., Application of polyethylene glycol and polymethyl methacrylate as a binder for powder injection moulding of hardmetals, Chiang Mai Journal of Science 35(1), (2008): 188-195.

(23) วีระศักด์ อุดมกิจเดชา, เครื่องมือวิจัยทางวัสดุศาสตร์ : ทฤษฎีและหลักการทำงานเบื้องต้น.: 2543.

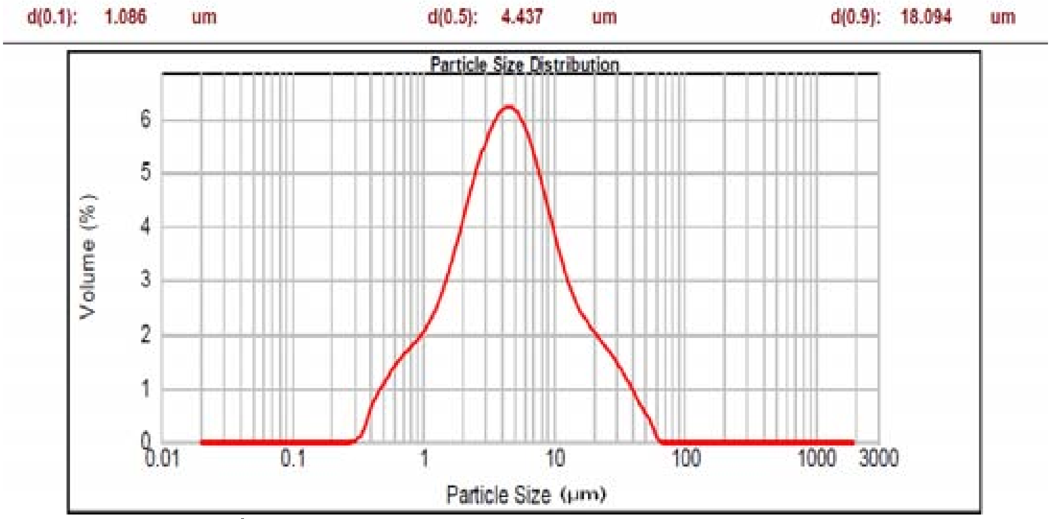
(24) SIFEVEN MASIA, P. D. C., WENDELL E. RHINE and H. KENT BOWEN. Effect of oxides on binder burnout during ceramics processing. Journal of Material Science 24 (1989): 1907-1912.

(25) Dhaliwal, A. K. and Hay, J. N. The characterization of polyvinyl butyral by thermal analysis. Thermochimica Acta 391 (2002): 245-255.

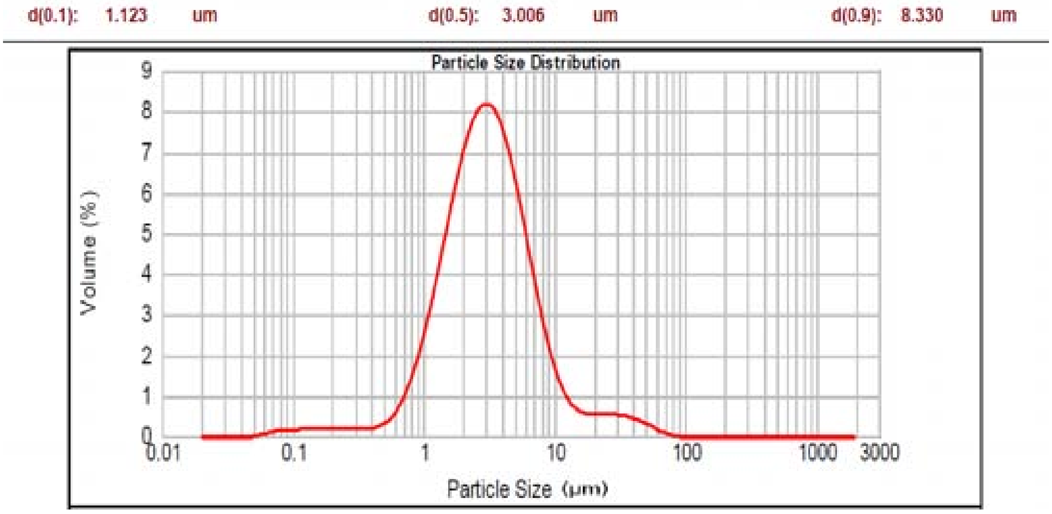
ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

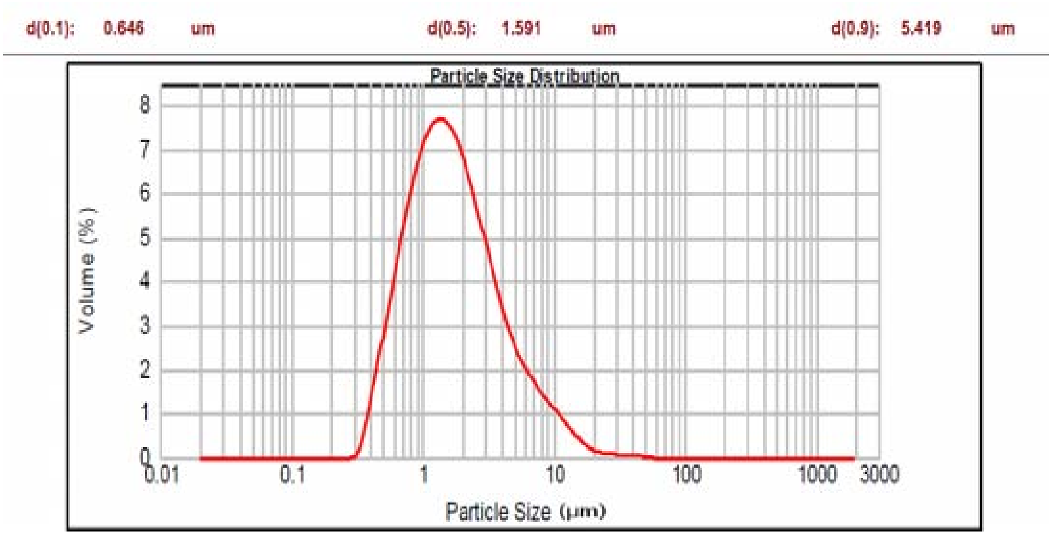
แสดงการกระจายขนาดอนุภาคด้วยเครื่อง Particle Size Analyzer รุ่น 2000 ผลิตโดยบริษัท Malvern โดยใช้เทคนิค Laser Light Scattering



ภาพที่ ก - 1 การกระจายขนาดอนุภาคของอะลูมินาชนิด A32



ภาพที่ ก - 2 การกระจายขนาดอนุภาคของทังสเตนคาร์ไบด์



ภาพที่ ก - 3 การกระจายขนาดอนุภาคของวัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์

ภาคผนวก ข

1) **วัสดุอะลูมินา**

ตารางที่ ข – 1.1 อุณหภูมิและเวลาในการกำจัดตัวประสาน

ระยะเวลาการแช่น้ำ (ชั่วโมง)	เปอร์เซ็นต์น้ำหนักเฉลี่ยที่ PEG หายไป (กรัม)		
	อุณหภูมิของน้ำ 30 องศาเซลเซียส	อุณหภูมิของน้ำ 45 องศาเซลเซียส	อุณหภูมิของน้ำ 60 องศาเซลเซียส
0.5	30.93 ± 1.31	46.05 ± 0.75	50.51 ± 0.82
1	40.45 ± 1.16	62.43 ± 1.40	64.73 ± 1.22
2	49.24 ± 0.92	78.73 ± 1.14	82.35 ± 1.11
3	60.79 ± 1.06	91.25 ± 0.99	92.01 ± 0.63
4	65.07 ± 1.09	93.75 ± 0.66	94.14 ± 0.61
5	70.67 ± 0.99	98.72 ± 0.71	99.43 ± 0.44

ตารางที่ ข – 1.2 ปริมาณผงวัสดุตั้งแต่ 44 – 52 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร

ตารางที่ ข – 1.2.1 ความต้านทานการดัดโค้ง

ปริมาณผงวัสดุ (เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร)	ความต้านทานการดัดโค้ง (เมกะพาสคัล)		
	หลังฉีดขึ้นรูป	หลังกำจัดตัวประสาน	หลักเผาผนึก
44	6.06 ± 0.26	8.78 ± 0.23	92.77 ± 4.34
46	5.48 ± 0.24	8.00 ± 0.25	109.14 ± 4.64
48	4.91 ± 0.16	7.83 ± 0.22	127.21 ± 3.67
50	4.63 ± 0.21	7.42 ± 0.22	138.26 ± 5.42
52	4.35 ± 0.19	6.86 ± 0.19	150.42 ± 5.58

ตารางที่ ข – 1.2.2 ความหนาแน่นและรูพรุนปรากฏ

ปริมาณผงวัสดุ (เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร)	ความหนาแน่นสัมพัทธ์(%)	รูพรุนปรากฏ (%)
44	67.86 ± 1.07	29.56 ± 2.23
46	69.72 ± 1.48	26.05 ± 1.80
48	71.91 ± 1.51	25.78 ± 1.29
50	73.80 ± 1.63	24.12 ± 1.04
52	75.95 ± 1.23	23.29 ± 1.34

ตารางที่ ข – 1.2.3 ความแข็ง

ปริมาณผงวัสดุ (เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร)	ความแข็ง (กิกะพาสคัล)
44	6.16 ± 0.16
46	6.89 ± 0.13
48	7.65 ± 0.32
50	8.95 ± 0.20
52	9.99 ± 0.42

ตารางที่ ข – 1.3 อัตราส่วนระหว่างตัวประสานชนิด PEG กับตัวประสานชนิด PVB

ตารางที่ ข – 1.3.1 ความต้านทานการดัดโค้ง

อัตราส่วนตัวประสานชนิด PEG : PVB SA	ความต้านทานการดัดโค้ง (เมกะพาสคัล)		
	หลังฉีดขึ้นรูป	หลังกำจัดตัวประสาน	หลักเผาผนึก
80 : 20	4.85 ± 0.30	7.31 ± 0.29	166.87 ± 5.13
85 : 15	4.35 ± 0.19	6.86 ± 0.19	150.42 ± 5.58
90 :10	3.93 ± 0.28	5.97 ± 0.34	141.07 ± 4.58

ตารางที่ ข – 1.3.2 ความหนาแน่นและรูพรุนปรากฏ

อัตราส่วนตัวประสานชนิด PEG : PVB SA	ความหนาแน่นสัมพัทธ์(%)	รูพรุนปรากฏ (%)
80 : 20	76.53 ± 1.12	21.94 ± 2.17
85 : 15	75.95 ± 1.23	23.29 ± 1.34
90 :10	71.40 ± 1.40	24.35 ± 0.99

ตารางที่ ข – 1.3.3 ความแข็ง

อัตราส่วนตัวประสานชนิด PEG : PVB SA	ความแข็ง (กิกะพาสคัล)
80 : 20	10.33 ± 0.31
85 : 15	9.67 ± 0.25
90 :10	9.60 ± 0.15

2) **วัสดุเชิงประกอบอะลูมินา/ทังสเตนคาร์ไบด์**

ตารางที่ ข – 2.1 อุณหภูมิและเวลาในการกำจัดตัวประสาน

ระยะเวลาการแช่น้ำ (ชั่วโมง)	เปอร์เซ็นต์น้ำหนักเฉลี่ยที่ PEG หายไป (กรัม)		
	อุณหภูมิของน้ำ 30 องศาเซลเซียส	อุณหภูมิของน้ำ 45 องศาเซลเซียส	อุณหภูมิของน้ำ 60 องศาเซลเซียส
0.5	30.12 ± 1.01	46.49 ± 1.34	52.85 ± 1.85
1	40.49 ± 0.66	61.81 ± 2.11	65.79 ± 0.80
2	50.13 ± 0.52	79.44 ± 1.67	83.26 ± 2.42
3	59.87 ± 0.22	86.88 ± 2.18	89.30 ± 0.87
4	64.49 ± 0.64	94.04 ± 1.13	96.02 ± 0.53
5	69.42 ± 0.17	99.05 ± 0.57	99.81 ± 0.04

ตารางที่ ข – 2.2 ปริมาณผงวัสดุตั้งแต่ 44 – 52 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร

ตารางที่ ข – 2.2.1 ความต้านทานการดัดโค้ง

ปริมาณผงวัสดุ (เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร)	ความต้านทานการดัดโค้ง (เมกะพาสคัล)		
	หลังฉีดขึ้นรูป	หลังกำจัดตัวประสาน	หลักเผาผนึก
44	7.07 ± 0.47	8.78 ± 0.43	144.54 ± 8.85
46	6.60 ± 0.28	7.67 ± 0.35	168.49 ± 6.80
48	6.07 ± 0.37	7.22 ± 0.24	190.09 ± 9.89
50	5.79 ± 0.24	6.67 ± 0.54	220.31 ± 7.83
52	5.13 ± 0.22	5.57 ± 0.46	253.81 ± 5.75

ตารางที่ ข – 2.2.2 ความหนาแน่นและรูพรุนปรากฏ

ปริมาณผงวัสดุ (เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร)	ความหนาแน่นสัมพัทธ์(%)	รูพรุนปรากฏ (%)
44	71.88 ± 1.04	22.93 ± 1.15
46	74.44 ± 0.57	21.87 ± 0.66
48	76.59 ± 1.03	19.65 ± 1.23
50	78.89 ± 0.88	17.59 ± 1.21
52	81.89 ± 0.86	14.30 ± 0.82

ตารางที่ ข – 2.2.3 ความแข็ง

ปริมาณผงวัสดุ (เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร)	ความแข็ง (กิกะพาสคัล)
44	7.12 ± 0.20
46	8.53 ± 0.44
48	9.26 ± 0.49
50	11.02 ± 0.39
52	12.49 ± 0.51

ตารางที่ ข – 2.3 อัตราส่วนระหว่างตัวประสานชนิด PEG กับตัวประสานชนิด PVB และการเติมกรดสเตียริค

ตารางที่ ข – 2.3.1 ความต้านทานการดัดโค้ง

อัตราส่วนตัวประสานชนิด PEG : PVB SA	ความต้านทานการดัดโค้ง (เมกะพาสคัล)		
	หลังฉีดขึ้นรูป	หลังกำจัดตัวประสาน	หลักเผาผนึก
80 : 20	5.50 ± 0.31	6.87 ± 0.27	269.08 ± 9.58
85 : 15	5.13 ± 0.22	5.57 ± 0.46	253.81 ± 5.75
90 :10	4.74 ± 0.26	4.96 ± 0.29	237.86 ± 6.27
83 : 15 : 2	4.56 ± 0.19	4.73 ± 0.17	220.16 ± 6.26

ตารางที่ ข – 2.3.2 ความหนาแน่นและรูพรุนปรากฏ

อัตราส่วนตัวประสานชนิด PEG : PVB SA	ความหนาแน่นสัมพัทธ์(%)	รูพรุนปรากฏ (%)
80 : 20	83.28 ± 1.04	13.94 ± 0.86
85 : 15	81.59 ± 0.71	14.30 ± 0.82
90 :10	79.58 ± 1.02	17.73 ± 0.60
83 : 15 : 2	78.12 ± 1.23	19.78 ± 1.16

ตารางที่ ข – 2.3.3 ความแข็ง

อัตราส่วนตัวประสานชนิด PEG : PVB SA	ความแข็ง (กิกะพาสคัล)
80 : 20	12.75 ± 0.25
85 : 15	12.49 ± 0.51
90 :10	12.32 ± 0.15
83 : 15 : 2	12.18 ± 0.39

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายจุฑาเทพ สุรวัฒนา เกิดวันที่ 3 สิงหาคม พ.ศ. 2529 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี หลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวัสดุศาสตร์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ เดือนกุมภาพันธ์ พ.ศ. 2552 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยและสำเร็จการศึกษาในปีการศึกษาปี 2554

การนำเสนอผลงานทางวิชาการระดับนานาชาติแบบ Poster presentation เรื่อง “Powder Injection Moulding of Al_2O_3 using PEG and PVB Binders” ในการประชุมทางวิชาการ The 2nd Research Symposium on Petroleum, Petrochemicals and Advanced Materials วันที่ 26 เมษายน พ.ศ. 2554 จัดโดย วิทยาลัยปิโตรเลียมและปิโตรเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ณ ศูนย์การประชุมแห่งชาติสิริกิติ์ กรุงเทพมหานคร และได้รับการตีพิมพ์ผลงานในรูปแบบ abstract

การนำเสนอผลงานทางวิชาการระดับนานาชาติแบบ Poster presentation เรื่อง “Properties of Porous Alumina Fabricated by Ceramic Injection Moulding using Environmentally Friendly Binder” ในการประชุมทางวิชาการ Chiang Mai International Conference on Biomaterials & Applications 2011 (CMICBA 2011) วันที่ 9 - 10 สิงหาคม พ.ศ. 2554 จัดโดย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ณ โรงแรมดิ เอ็มเพรส เชียงใหม่ และได้รับการตีพิมพ์ผลงานลงในวารสาร Advanced Materials Research Vol. 506 (2012) หน้า 238 - 241

การนำเสนอผลงานทางวิชาการระดับนานาชาติแบบ Oral presentation เรื่อง “Powder Injection Moulding of Alumina/Tungsten Carbide using Polyethylene Glycol and Polyvinyl Butyral Binders” ในการประชุมทางวิชาการ The 37th Congress on Science and Technology of Thailand (STT37) การประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทยครั้งที่ 37 (วทท37) วันที่ 10 - 12 ตุลาคม พ.ศ. 2554 จัดโดย สมาคมวิทยาศาสตร์แห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมป์ ร่วมกับคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล ณ โรงแรมเซ็นทาราแกรนด์ และบางกอกคอนเวนชันเซ็นเตอร์ กรุงเทพมหานคร และได้รับการตีพิมพ์ผลงานในรูปแบบ Proceeding