

รายงานฉบับสมบูรณ์

ทุนอุดหนุนการวิจัยจากเงินอุดหนุนทั่วไปจากรัฐบาลประจำปีงบประมาณ 2561

ชื่อโครงการ

การเตรียมเซอร์โคเนียความหนาแน่นสูงโดยกระบวนการฉีดขึ้นรูปวัสดุผง
และการเผาผนึกโดยไม่ใช้ความดัน

สัญญา เลขที่ GB-B_61_099_62_02

ผู้วิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐริตา ชวนเกริกกุล

สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กรกฎาคม 2562

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการดำเนินงานจากทุนอุดหนุนการวิจัยจากเงินอุดหนุนทั่วไปจากรัฐบาลประจำปีงบประมาณ 2561 ผู้วิจัยขอขอบคุณศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ และภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์เตาเผาอุณหภูมิสูงสำหรับการเผาชิ้นงานบางส่วนในโครงการวิจัยนี้ ขอขอบคุณ สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ในการทำวิจัย ตลอดจนบุคลากรทุกฝ่าย ที่มีส่วนช่วยให้โครงการวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ชื่อโครงการวิจัย การเตรียมเซอร์โคเนียความหนาแน่นสูงโดยกระบวนการฉีดขึ้นรูปวัสดุผง และการเผาผนึกโดยไม่ใช้ความดัน

ชื่อผู้วิจัย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐฐิตา ชวนเกริกกุล
เดือนและปีที่ทำวิจัยเสร็จ กรกฎาคม 2562

บทคัดย่อ

กระบวนการฉีดขึ้นรูปวัสดุผงและการเผาผนึกโดยไม่ใช้ความดัน สามารถใช้เตรียมชิ้นงานจาก วัสดุเซรามิกชนิดเซอร์โคเนียที่มีความหนาแน่นมากกว่าร้อยละ 95 ของค่าความหนาแน่นตามทฤษฎีได้ ส่วนผสมสำหรับการฉีดขึ้นรูปประกอบด้วยผงเซอร์โคเนียที่มีขนาดอนุภาค 1 ไมโครเมตร ในปริมาณ ร้อยละ 38 โดยปริมาตร ตัวประสานที่ใช้ประกอบด้วยพอลิเอทิลีนไกลคอลซึ่งสามารถละลายน้ำได้ และพอลิไวนิลบิวทิลอลที่ถูกกำจัดด้วยการใช้ความร้อน ในอัตราส่วนร้อยละ 85 และ ร้อยละ 15 โดย น้ำหนัก การศึกษาการกำจัดตัวประสานโดยใช้น้ำพบว่า อุณหภูมิของน้ำส่งผลต่ออัตราการกำจัดตัว ประสาน โดยเมื่อใช้น้ำที่มีอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส จะสามารถกำจัดได้เร็วกว่าน้ำที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ค่าความแข็งแรงของชิ้นงานหลังจากฉีดขึ้นรูปและหลังการกำจัดตัวประสาน มีค่าเป็น 0.80 MPa และ 3.02 MPa ตามลำดับ ความหนาแน่นของชิ้นงานหลังเผามีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่ม อุณหภูมิในการเผาตั้งแต่ 1300 - 1400 องศาเซลเซียส ชิ้นงานมีการหดตัวอยู่ในช่วงร้อยละ 22-25

Research Project: Preparation of high density zirconia by powder injection moulding and pressureless sintering

Researcher: Assistant Professor Dr. Nutthita Chuankrerkkul

Date: July 2019

Abstract

Zirconia specimens with highest density of 95% of the theoretical value were successfully produced by a combination of powder injection moulding technique with a pressureless sintering. The feedstock comprised of zirconia powder having 1 micron size diameter at 38 vol% powder loading. The water soluble binder (polyethylene glycol, PEG) could be removed by water immersion method while the remaining polyvinyl butyral (PVB) was removed by thermal debinding. It was found that temperature of water affected rate of binder removal as the rate increased with higher temperature. The 3-point bending strength for as-leached specimens was higher than that of as-moulded specimens, values of 3.02 and 0.080 MPa, respectively. Density of sintered specimens increased with increasing sintering temperature from 1300 to 1400 °C. The shrinkage of 22-25 % was observed.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ii
บทคัดย่อ	iii
สารบัญ	iv
สารบัญตาราง	v
สารบัญรูป	vi
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 วรรณกรรมปริทรรศน์	2
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน	7
3.1 เครื่องฉีดขึ้นรูปวัสดุผงระดับห้องปฏิบัติการ	7
3.2 การฉีดขึ้นรูปวัสดุผง	8
บทที่ 4 ผลการทดลองและการอภิปรายผล	10
4.1 ผลการศึกษาลักษณะเฉพาะของผงวัสดุและตัวประสาน	10
4.2 ผลของการฉีดขึ้นรูป	11
4.3 ผลการศึกษาการกำจัดตัวประสาน	12
4.4 ผลการศึกษาสมบัติเชิงกลของชิ้นงาน	13
4.5 ผลการศึกษาสมบัติทางกายภาพของชิ้นงาน	13
บทที่ 5 สรุปผลการดำเนินงาน	15
บรรณานุกรม	16
ภาคผนวก การนำเสนอผลงานจากส่วนหนึ่งของโครงการวิจัย	19
ประวัติผู้วิจัย	20

สารบัญตาราง

		หน้า
ตารางที่ 2.1	ชนิดของตัวประสานและวิธีการกำจัดตัวประสาน ในส่วนผสมการฉีดยาขึ้นรูปเซอโรโคเนีย	5
ตารางที่ 3.1	ส่วนผสมที่ใช้ในการทดลองฉีดยาขึ้นรูปวัสดุผงเซอโรโคเนีย	8
ตารางที่ 4.1	ค่าความแข็งแรงของชิ้นงานเซอโรโคเนียสูตร Z38 หลังฉีดยาขึ้นรูปหลังกำจัดตัวประสาน และหลังเผาที่ 1300 - 1400 °C	13
ตารางที่ 4.2	ค่าความหนาแน่นของชิ้นงานสูตร Z36 และ Z38 หลังเผา ที่อุณหภูมิ 1300 1350 และ 1400 องศาเซลเซียส	13

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์จากกระบวนการฉีดขึ้นรูปวัสดุผง	2
รูปที่ 2.2 การเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการผลิตขึ้นส่วนที่มีความซับซ้อนต่างกัน	3
รูปที่ 2.3 กระบวนการฉีดขึ้นรูปวัสดุผง	3
รูปที่ 2.4 แผนภาพสมดุค (phase diagram) ของเซอร์โคเนีย-ยิตเทรีย	6
รูปที่ 3.1 เครื่องฉีดขึ้นรูปวัสดุผงระดับห้องปฏิบัติการ	7
รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานด้วยกระบวนการฉีดขึ้นรูปวัสดุผง	9
รูปที่ 3.3 แม่พิมพ์สำหรับฉีดขึ้นรูปชิ้นงาน	9
รูปที่ 4.1 ลักษณะผงเซอร์โคเนียจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	10
รูปที่ 4.2 ผลจากเครื่อง Thermogravimetric analysis ของ PEG และ PVB	11
รูปที่ 4.3 ชิ้นงานเซอร์โคเนียที่ได้จากการฉีดขึ้นรูปวัสดุผง	11
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงผลของเวลาในการแช่น้ำต่อการกำจัดตัวประสาน	12
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงร้อยละความหนาแน่นตามทฤษฎีของชิ้นงานสูตร Z36 และ Z38 ที่ผ่านการ เผาผนึก โดยใช้อุณหภูมิตั้งแต่ 1300 – 1400 องศาเซลเซียส	14

บทที่ 1

บทนำ

เซอร์โคเนียเป็นวัสดุเซรามิกที่ได้รับความนิยมในการนำมาใช้งานประเภทต่างๆ เนื่องจากมีสมบัติที่ดีเช่น ความแข็งแรงสูง ทนทานต่อการขัดสี และการกัดกร่อน กระบวนการฉีดขึ้นรูปวัสดุผงเป็นกรรมวิธีที่เหมาะสมสำหรับการผลิตชิ้นส่วนที่มีขนาดเล็ก และมีรูปร่างซับซ้อน เป็นกระบวนการผลิตที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในการผลิตผลิตภัณฑ์คุณภาพสูง อาทิเช่น ชิ้นส่วนเพื่อการใช้งานทางการแพทย์ ชิ้นส่วนในอุตสาหกรรม รวมทั้งชิ้นส่วนอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในชีวิตประจำวัน สามารถผลิตได้ทั้งวัสดุที่เป็น โลหะ เซรามิก หรือวัสดุเชิงประกอบ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีจุดประสงค์เพื่อจะพัฒนากระบวนการผลิตที่เหมาะสมในการผลิตชิ้นงานเซอร์โคเนีย โดยกระบวนการฉีดขึ้นรูปวัสดุผง

กระบวนการฉีดขึ้นรูปวัสดุผง เป็นกรรมวิธีที่เหมาะสมสำหรับการผลิตชิ้นส่วนที่มีขนาดเล็ก และมีรูปร่างซับซ้อน เป็นกระบวนการผลิตที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในการผลิตผลิตภัณฑ์คุณภาพสูง ทั้งชิ้นงานทางการแพทย์ ชิ้นส่วนในอุตสาหกรรม รวมทั้งชิ้นส่วน อุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ในชีวิตประจำวัน สามารถผลิตได้ทั้งวัสดุที่เป็น โลหะ เซรามิก หรือวัสดุเชิงประกอบ เซอร์โคเนียเป็นวัสดุเซรามิกที่ได้รับความนิยมในการนำมาใช้งานประเภทต่างๆ

การเผาผนึกเป็นขั้นตอนสำคัญในการผลิตเซรามิกให้มีคุณภาพสูง การผลิตให้ได้ชิ้นงานความหนาแน่นสูงมักต้องใช้เวลาเผาผนึกแบบที่มีความดันร่วมด้วย ซึ่งไม่สะดวกกับการผลิตในปริมาณมาก รวมทั้งยังมีค่าใช้จ่ายสูง ดังนั้นถ้าสามารถเลือกการเผาผนึกแบบไม่ใช้ความดันมาเป็นทางเลือก ซึ่งการทำการศึกษาตัวแปรต่างๆ ในกระบวนการขึ้นรูปให้เหมาะสม จะทำให้ได้ชิ้นงานที่มีความหนาแน่นสูง และจะทำให้ช่วยลดค่าใช้จ่ายในการผลิตได้

วัตถุประสงค์ของโครงการนี้ คือ

1. เพื่อศึกษาการผลิตเซอร์โคเนียด้วยกระบวนการฉีดขึ้นรูปวัสดุผง
2. เพื่อศึกษาผลของกระบวนการผลิต ต่อสมบัติของชิ้นงานที่เตรียมได้โดยการเผาแบบไม่ใช้

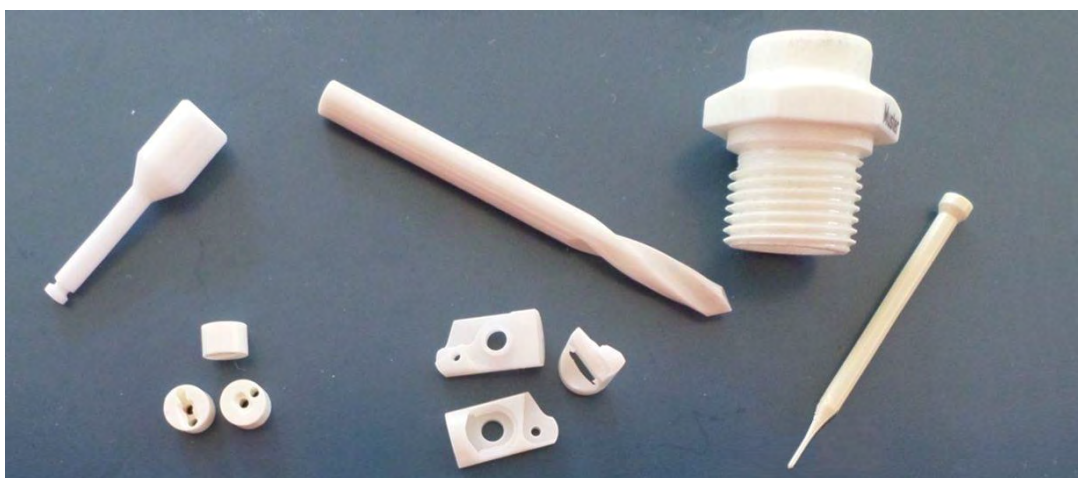
ความดัน

บทที่ 2

วรรณกรรมปริทรรศน์

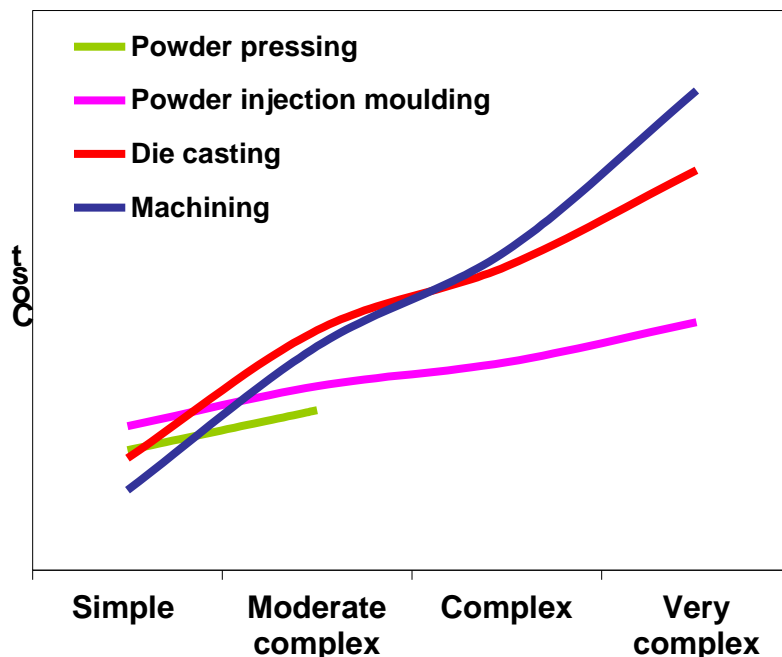
กระบวนการฉีดขึ้นรูปวัสดุผง (powder injection moulding)

เป็นกระบวนการที่เหมาะสมในการผลิตชิ้นส่วนที่มีขนาดเล็ก และมีรูปร่างซับซ้อน ทำให้เป็นหนึ่งในกระบวนการผลิตที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในการผลิตผลิตภัณฑ์คุณภาพสูงในการนำไปใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ เช่น อุปกรณ์ทางการแพทย์ ชิ้นส่วนที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม และอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้ในชีวิตประจำวัน กระบวนการนี้สามารถนำไปใช้ในการผลิตวัสดุที่เป็นโลหะ เซรามิก หรือวัสดุเชิงประกอบ รูปที่ 2.1 แสดงตัวอย่างผลิตภัณฑ์เซรามิกที่ได้จากกระบวนการฉีดขึ้นรูปวัสดุผง



รูปที่ 2.1 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์จากกระบวนการฉีดขึ้นรูปวัสดุผง
ที่มา <http://www.ceramic-parts.com>

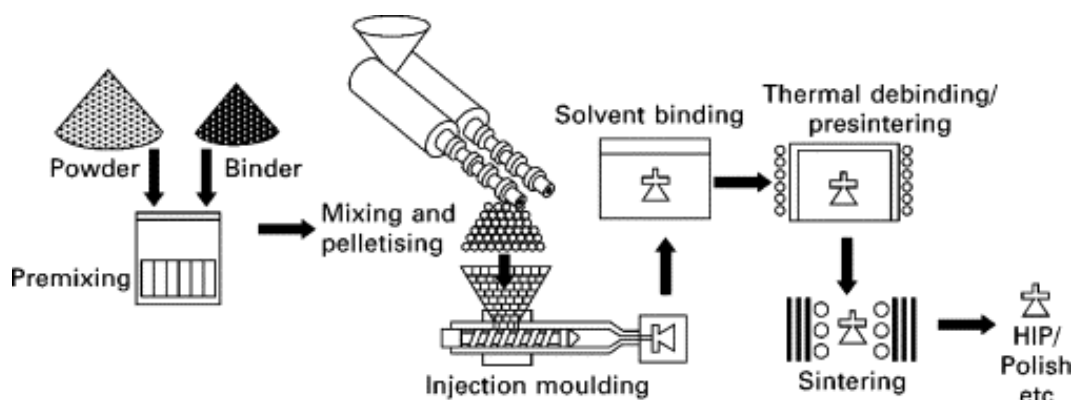
กระบวนการขึ้นรูปวัสดุผงมีอยู่หลายวิธี ซึ่งจะแตกต่างกันไปตามลักษณะการนำไปใช้งาน ไม่ว่าจะเป็นการอัดขึ้นรูป (dry pressing) การรีดขึ้นรูป (extrusion) การหล่อแบบ (slip casting) ตลอดจนการฉีดขึ้นรูป (powder injection moulding) ซึ่งแต่ละวิธีก็จะมีข้อดี และข้อจำกัดแตกต่างกันไป รูปที่ 2.2 แสดงการเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการผลิตชิ้นส่วนที่มีความซับซ้อนในระดับต่างๆ ด้วยกระบวนการขึ้นรูปที่แตกต่างกัน การอัดขึ้นรูปผง (powder pressing) มีค่าใช้จ่ายในกระบวนการผลิตที่ต่ำแต่มีข้อจำกัดที่ไม่สามารถใช้สำหรับการผลิตชิ้นส่วนที่มีรูปร่างซับซ้อน กระบวนการฉีดขึ้นรูปวัสดุผงเป็นกรรมวิธีที่ช่วยลดค่าใช้จ่ายในการผลิต เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการผลิตด้วยวิธีอื่นที่ใช้ในการผลิตชิ้นส่วนที่มีรูปร่างซับซ้อนสูง เช่น การตัดแต่ง (machining) ที่ต้องใช้เครื่องมือ หรือวัสดุตัดที่มีความแข็งแรงสูงและมีราคาแพงและยังมีเศษวัสดุเหลือทิ้งจากกระบวนการตัดแต่ง นอกจากนี้กระบวนการฉีดขึ้นรูปวัสดุผงยังสามารถผลิตชิ้นส่วนจากวัสดุที่มีจุดหลอมเหลวสูง เช่น วัสดุเซรามิก หรือโลหะบางชนิด ซึ่งยากต่อการขึ้นรูปโดยการหลอมและฉีดเข้าในแบบ (die casting) และมีค่าใช้จ่ายสูงเนื่องจากต้องใช้พลังงานสูงอีกด้วย



รูปที่ 2.2 การเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการผลิตชิ้นส่วนที่มีความซับซ้อนต่างกัน

(<http://www.egideuk.com>)

สำหรับกระบวนการฉีดขึ้นรูปวัสดุผง มีจุดเด่นสำหรับการขึ้นรูปชิ้นส่วนที่มีขนาดเล็กและรูปร่างซับซ้อน เป็นการขึ้นรูปให้มีลักษณะใกล้เคียงรูปร่างสุดท้าย (near-net shape) และสามารถผลิตได้ในปริมาณมาก ขั้นตอนการผลิตจะประกอบด้วย การผสมผงวัสดุกับตัวประสาน การฉีดขึ้นรูป การกำจัดตัวประสาน และการเผาขึ้นเทอร์ (German and Bose, 1997) นอกเหนือจากการผลิตชิ้นส่วนอุตสาหกรรมแล้ว กระบวนการฉีดขึ้นรูปวัสดุผงยังสามารถใช้ในการผลิตตัวเรือนและสายนาฬิกาได้ (Williams, 2008) โดยใช้วัสดุประเภทเหล็กกล้าไร้สนิม หรือเซรามิกประเภทคาร์ไบด์ และเซอร์โคเนีย นอกจากนี้ยังสามารถนำมาผลิตเป็นวัสดุอุปกรณ์สำหรับใช้ในทางการแพทย์และทันตกรรมได้เช่นกัน แผนภาพแสดงขั้นตอนของกระบวนการฉีดขึ้นรูปวัสดุผง แสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 กระบวนการฉีดขึ้นรูปวัสดุผง (powder injection moulding)

ที่มา <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/ceramic-injection-moulding>

การเลือกชนิดตัวประสานและวิธีในการกำจัดเป็นขั้นตอนที่สำคัญในกระบวนการผลิต การกำจัดตัวประสานโดยการให้ความร้อนเพียงอย่างเดียวจะใช้เวลาานานมาก ซึ่งทำให้สิ้นเปลืองพลังงาน และค่าใช้จ่าย เพื่อแก้ปัญหาเหล่านี้จึงได้มีการศึกษาวิจัยตัวประสานผสมที่องค์ประกอบส่วนใหญ่สามารถกำจัดได้โดยใช้ตัวทำละลาย โดยส่วนมากตัวประสานชนิดที่เป็นแว็กซ์จะถูกละลายด้วยเฮปแทนซึ่งเป็นสารเคมี ดังนั้นการพัฒนาตัวประสานที่สามารถละลายน้ำได้จึงมีความน่าสนใจ อันจะทำให้เป็นกระบวนการผลิตที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและลดค่าใช้จ่ายได้อีกด้วย

กลุ่มวิจัยของมหาวิทยาลัยเซฟฟิลด์ ประเทศอังกฤษได้พัฒนาตัวประสานที่มีองค์ประกอบหลักเป็นพอลิเอทิลีนไกลคอล ที่สามารถละลายน้ำได้ และองค์ประกอบรองคือพอลิเมทิลเมทาคริเลท ที่จะถูกกำจัดออกไปในขณะที่ให้ความร้อนเพื่อทำการเผาซินเทอร์ (Chuangkrerkkul, 2006) ตัวประสานผสมนี้ถูกนำมาใช้ในการผลิตวัสดุชนิดที่เป็นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรดต่างๆ (Anwar และคณะ 1995 Omar และคณะ 1999 และ Newell และคณะ 2005) ตัวประสานชนิดนี้ยังได้รับการพัฒนาให้สามารถใช้ได้กับเซรามิกผสมระหว่างอนอร์ไทด์กับซิลิเกต (Wong, 2003) ตลอดจนวัสดุประเภททั้งสแตนคาร์ไบด์-โคบอลต์ฮาร์ดเมทัลอีกด้วย (Chuangkrerkkul และคณะ, 2007)

รายละเอียดของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับตัวประสานชนิด PEG/PMMA อาทิเช่น มีการศึกษาการใช้ PEG ที่มี molecular weight ต่างๆกัน รวมทั้งการเลือกใช้วิธีการผสม 2 วิธี สำหรับวัสดุที่ไม่เกิดและวัสดุที่จะเกิดปฏิกิริยากับน้ำ ในวิธีแรกวัสดุจะถูกผสมกับ PMMA หลังจากนั้นละลาย PEG ในน้ำ แล้วค่อยๆเติมลงในส่วนผสมจนกลายเป็นสเลอรีที่มีความหนืดสูง หลังจากนั้นทำให้แห้งด้วยอุณหภูมิต่ำ และมีการกวนอย่างสม่ำเสมอเพื่อหลีกเลี่ยงการตกตะกอนหรือแยกชั้น หลังจากนั้นทำการรีดเพื่อลดฟองอากาศที่แทรกตัวอยู่ในส่วนผสม สำหรับวิธีการผสมวัสดุที่จะเกิดปฏิกิริยากับน้ำ จะทำโดยการผสม PMMA กับผงวัสดุ ก่อนที่จะนำไปผสมกับ PEG ที่ละลายมาในแอลกอฮอล์ หลังจากนั้นทำตามขั้นตอนเดียวกับวิธีแรก เมื่อนำชิ้นงานที่ผ่านการฉีดขึ้นรูปและทำการกำจัดตัวประสาน (โดยการแช่น้ำ) ไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM จะพบว่ามีช่องว่างต่อเนื่อง ซึ่งช่องว่างนี้จะช่วยให้การสลายตัวของ PMMA ที่อยู่ในสถานะที่เป็นก๊าซเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว

ต่อมาได้มีการนำมาประยุกต์ใช้กับการดำเนินงานวิจัยที่สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในช่วงระยะเวลา 10 ปีที่ผ่านมา โดยได้มีการพัฒนาตัวประสานที่มีองค์ประกอบหลักเป็นพอลิเอทิลีนไกลคอล (PEG) กับตัวประสานชนิดพอลิไวนิลบิวทิลโรล (PVB) ในการขึ้นรูปวัสดุเซรามิก เช่น อะลูมินา และวัสดุเชิงประกอบเนื้อพื้นอะลูมินา (Chomsirigul และคณะ 2014 และ Chuangkrerkkul และคณะ 2016)

ตัวอย่างชนิดของตัวประสานที่ใช้ในงานวิจัยในระยะเวลา 5 ปีที่ผ่านมา ซึ่งเกี่ยวกับการฉีดขึ้นรูปวัสดุเซรามิกเหนียว พบว่ามีการใช้ตัวประสานทั้งชนิดที่กำจัดด้วยความร้อน กำจัดด้วยตัวทำละลาย และการกำจัดด้วยน้ำ สรุปได้ ดังตารางที่ 2.1 โดยตัวทำละลายที่ใช้ ได้แก่ เฮกเซน หรือเฮปแทน ซึ่งมีความไวไฟ และการใช้น้ำในการกำจัดพอลิเอทิลีนไกลคอล

ตารางที่ 2.1 ชนิดของตัวประสานและวิธีการกำจัดตัวประสาน ในส่วนผสมการฉีดยาขึ้นรูปเซอร์โคเนีย

ชนิดของตัวประสาน	วิธีการกำจัดตัวประสาน	ที่มา
HDPE, LDPE, PW, MW, DBP and SA	Solvent debinding (heptane) and Thermal debinding	Zhao et al. (2019)
PW, PE, PP and SA	Solvent debinding (hexane) and Thermal debinding	Gal et al. (2019)
PW, HDPE, EVA, SA	Solvent debinding and Thermal debinding	Liu et al. (2018)
LDPE, HDPE and PW	Solvent debinding (kerosene) and Thermal debinding	Liu et al. (2018)
PW, PP, HDPE and SA	Solvent debinding (trichloroethylene) and Thermal debinding	He et al. (2018)
PEG, PMMA and SA	Solvent debinding (water) and Thermal debinding	Rajabi et al. (2015)

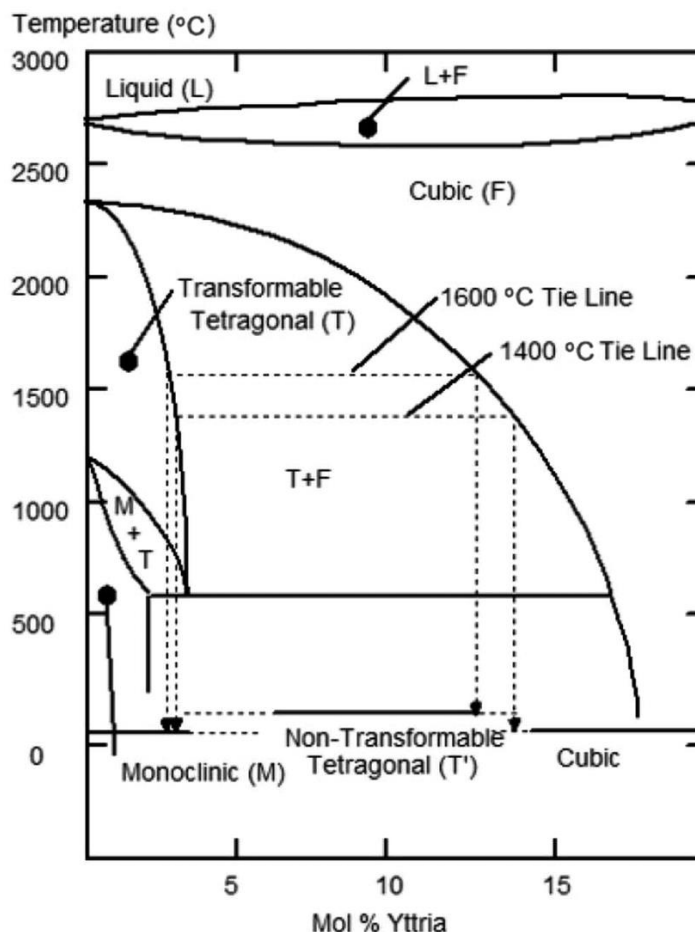
เซอร์โคเนีย (ZrO₂)

เซอร์โคเนียมไดออกไซด์มีสูตรทางเคมีคือ ZrO₂ เรียกโดยทั่วไปว่าเซอร์โคเนีย เป็นผลึกสีขาว พบในสินแร่ธรรมชาติ Baddeleyite มีโครงสร้างแบบโมโนคลินิก เมื่อเจือปนสารบางตัวจะให้โครงสร้างที่คงตัวสามารถนำไปสังเคราะห์ให้สีต่างๆ ใช้ในอุตสาหกรรมเกี่ยวกับเพชรพลอย

- *การผลิต* ได้จากการเผาสินแร่ที่เป็นสารประกอบของเซอร์โคเนียม เซอร์โคเนียไม่ทำปฏิกิริยากับสารเคมี การทำให้บริสุทธิ์ต้องเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของเซอร์โคเนียมเตตระคลอไรด์ก่อน

- *สมบัติของเซอร์โคเนีย* เซอร์โคเนียมไดออกไซด์จัดเป็นวัสดุประเภทเซรามิกมีโครงสร้างโมโนคลินิกที่อุณหภูมิห้องแต่จะเปลี่ยนเป็นเตตระโกนอลและลูกบาศก์ที่อุณหภูมิสูง การที่โครงสร้างลูกบาศก์เปลี่ยนเป็นเตตระโกนอลและโมโนคลินิกเมื่อเย็นตัวลงทำให้มีปริมาตรเพิ่มขึ้นและเกิดความเครียดซึ่งจะส่งผลให้เกิดการแตกร้าว ดังนั้นเพื่อลดปัญหาดังกล่าวจึงได้มีการเติมออกไซด์ของโลหะบางตัวเพื่อได้โครงสร้างที่เสถียรขึ้น ได้แก่ ยิตเรียมออกไซด์ (Y₂O₃) ซีเรียมออกไซด์ (Ce₂O₃) แคลเซียมออกไซด์ (CaO) หรือแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) เพื่อยับยั้งไม่ให้เกิดการเปลี่ยนวัฏจักรเกิดได้

สมบูรณ์ ทำให้สมบัติทางกลเปลี่ยนแปลงไป โดยเฉพาะเซอร์โคเนียที่เติมยิตเรียมร้อยละ 3 จะให้โครงสร้างแตกต่างจากการเติมออกไซด์ชนิดอื่น คือ จะให้ยิตเรียมเตตระโกนอลเซอร์โคเนียโพลีคริสตัล ที่มีวัฏภาคเตตระโกนอลกึ่งเสถียรมีความคงตัวที่อุณหภูมิห้องและถ้าขนาดเกรนเหมาะสมจะส่งผลให้ได้เซรามิกที่มีสมบัติทางกลดีขึ้น คือมีความแข็งแรง ความแข็งแกร่งดี ไม่เสียรูปง่าย



รูปที่ 2.4 แผนภาพสมดุล (phase diagram) ของเซอร์โคเนีย-ยิตเรียม ที่มา I. Birkby (1994)

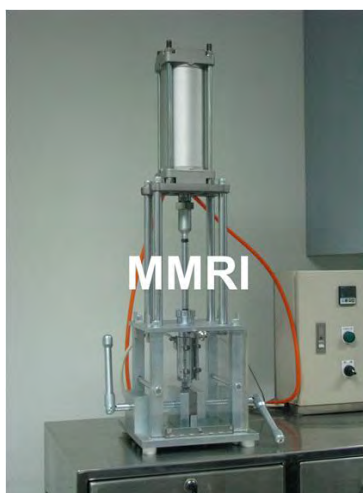
- *ประโยชน์และการใช้งาน* ใช้ผลิตวัสดุประเภทเซรามิกเพื่อการใช้งานในรูปแบบต่างๆ ได้แก่ วัสดุทนไฟ ฉนวนความร้อน สารขัดถู เซอร์โคเนียที่เสถียรใช้เป็นตัวตรวจจับออกซิเจน ส่วนประกอบในเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็ง โดยใช้เป็นวัสดุเชิงประกอบของเซอร์โคเนีย-ยิตเรียมออกไซด์ รวมทั้งนิยมนำมาใช้ในการพันเคลือบผิววัสดุอุปกรณ์ ชิ้นส่วนเครื่องจักรกล ที่ต้องการให้มีสมบัติทนต่อความร้อน ทนการกัดกร่อนสารเคมี ทนการสึกกร่อน สำหรับงานในโรงงานอุตสาหกรรมปิโตรเลียม หรือในโรงงานเกี่ยวกับสารเคมี ใช้ผลิตวัสดุทางการแพทย์ เช่น ใช้ทำหลักยึดของรากฟันเทียม ทำเดือยฟันสำหรับบูรณะฟัน

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงาน

3.1 เครื่องฉีดขึ้นรูปวัสดุผงระดับห้องปฏิบัติการ

เครื่องฉีดขึ้นรูปวัสดุผงระดับห้องปฏิบัติการ(รูปที่ 3.1) ที่ได้จัดสร้างขึ้นเพื่อใช้ในการดำเนินงานโครงการวิจัยนี้ เป็นเครื่องฉีดแบบใช้กระบอกลม โดยโครงการฯนี้เลือกใช้ปั๊มลมซึ่งควบคุมการทำงานโดยใช้ไฟฟ้า เพื่อให้สะดวกกับการปฏิบัติงาน เมื่อใช้งานจนลมหมดถัง โครงสร้างของเครื่องฉีดทำจากโลหะ เพื่อความแข็งแรง ขนาดตามสัดส่วนที่พอเหมาะกับการทำงาน และสามารถเคลื่อนย้ายได้ ความสูงระหว่างชั้นไม่น้อยกว่า 8 นิ้ว เพื่อให้สามารถยื่นมือเข้าไปจัดการกับส่วนประกอบต่างๆของเครื่องฉีด (กระบอกฉีด ตัววัดอุณหภูมิ ตัวให้ความร้อน) ส่วนเก็บส่วนผสม (Feedstock) มีรูปทรงเป็นทรงกระบอก โดยที่ส่วนปลายเป็นรูเปิดขนาดเล็ก เพื่อให้ส่วนผสมถูกฉีดเข้าไปในบริเวณช่องว่างของแม่พิมพ์ได้ ภายนอกล้อมรอบด้วย Heating jacket เป็นตัวให้ความร้อนกับ Feedstock และมี Thermocouple สำหรับวัดอุณหภูมิซึ่งจะมีระบบควบคุมไฟฟ้าต่อไว้ที่กล่องควบคุมด้วย ตัวควบคุมและปรับอุณหภูมิใช้แบบ Digital เพื่อให้สะดวกและง่ายในการบันทึกอุณหภูมิระหว่างการทดลอง ส่วนด้านล่างที่ใช้วางแม่พิมพ์ให้มีแผ่นเหล็กกันไว้สำหรับดันให้แม่พิมพ์ปิดสนิทในขณะทำการทดลอง โดยใช้แกนยึดสองฝั่งเป็นตัวดันมีแกนหมุนแบบเกลียวสำหรับดันแม่พิมพ์และแผ่นเหล็กให้แน่น



รูปที่ 3.1 เครื่องฉีดขึ้นรูปวัสดุผงระดับห้องปฏิบัติการ

3.2 การฉีดขึ้นรูปวัสดุผง

เตรียมวัสดุผงเซรามิกชนิดเซอร์โคเนีย ผสมกับตัวประสานที่ประกอบด้วยพอลิเอทิลีนไกลคอล (PEG) และพอลิไวนิลบิวทิลอล (PVB) ปริมาณร้อยละ 85 และ 15 โดยน้ำหนักตามลำดับ เตรียมเป็นส่วนผสมที่มีปริมาณผงวัสดุเป็นร้อยละ 36 - 40 โดยปริมาตร (36 -40 vol% powder loading) องค์ประกอบของส่วนผสมแสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมที่ใช้ในการทดลองฉีดขึ้นรูปวัสดุผงเซอร์โคเนีย

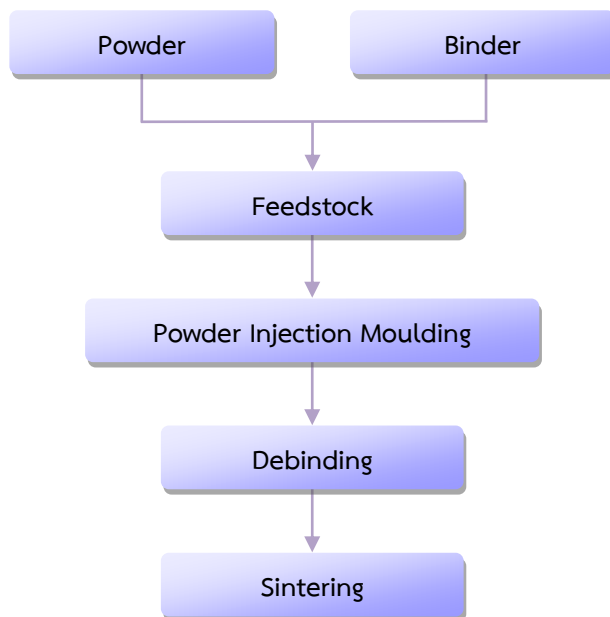
สูตร	Powder loading	PEG (wt%)	PVB (wt%)
Z36	36	85	15
Z38	38	85	15
Z40	40	85	15

ทำการฉีดขึ้นรูปโดยใช้เครื่องฉีดขึ้นรูปวัสดุผงระดับห้องปฏิบัติการ เตรียมชิ้นงานเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมขนาด 5 x 5 x 55 มิลลิเมตร เพื่อเตรียมชิ้นงานสำหรับการศึกษาการกำจัดตัวประสานโดยการแช่น้ำ และศึกษาอุณหภูมิการเผาพูนที่เหมาะสม ขั้นตอนการทดลองสามารถสรุปได้ตามแผนภาพในรูปที่ 3.2 สำหรับงานวิจัยนี้ดำเนินการโดยใช้เครื่องฉีดขึ้นรูปวัสดุผงระดับห้องปฏิบัติการ ลักษณะแม่พิมพ์แสดงดังรูปที่ 3.3

ในส่วนขั้นตอนการกำจัดตัวประสาน ทำการศึกษาเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิต่ออัตราการกำจัดตัวประสานชนิด PEG โดยนำชิ้นงานที่ผ่านการฉีดขึ้นรูปมาแช่ในน้ำ โดยใช้ น้ำที่มีอุณหภูมิและ 30 และ 50 องศาเซลเซียส ควบคุมอุณหภูมิของน้ำโดยใช้ Water Bath ที่มีระบบหมุนเวียนน้ำ เปรียบเทียบได้โดยการชั่งน้ำหนักของชิ้นงานหลังจากฉีดขึ้นรูปและหลังจากการแช่น้ำ เพื่อใช้ในการคำนวณน้ำหนักที่แตกต่างกันแล้วเทียบกับน้ำหนักของ PEG ที่มีอยู่ในชิ้นงาน และรายงานผลเป็นร้อยละโดยน้ำหนักของ PEG ที่ถูกกำจัดออกไป หลังจากนั้นนำชิ้นงานที่ได้หลังจากการกำจัดตัวประสานแล้ว ไปทำการเผาพูนโดยใช้อุณหภูมิ 1300 - 1400 องศาเซลเซียส และใช้เวลาการรักษาอุณหภูมิสูงสุด 1 ชั่วโมง

ขั้นตอนการทดลองประกอบด้วย

1. ชั่งส่วนผสมตามสูตรที่กำหนดไว้ (ตารางที่ 3.1)
2. ผสม PVB กับผงเซอร์โคเนีย แล้วนำเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส (บีกเกอร์ 1)
3. นำ PEG ใส่ตู้อบ ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส (บีกเกอร์ 2)
4. เทผงจากบีกเกอร์ 1 ลง บีกเกอร์ 2 แล้วใช้ spatula คนให้เข้ากัน
5. นำส่วนผสม (feedstock) ที่เตรียมได้ ใส่ลงในเครื่องฉีด โดยใช้อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส
6. นำชิ้นงานไปแช่ในน้ำ เพื่อกำจัดตัวประสาน
7. นำไปทำการเผาพูนที่อุณหภูมิ 1300-1400 องศาเซลเซียส และใช้เวลาในการรักษาอุณหภูมิสูงสุด 1 ชั่วโมง



รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานด้วยกระบวนการฉีดขึ้นรูปวัสดุผง



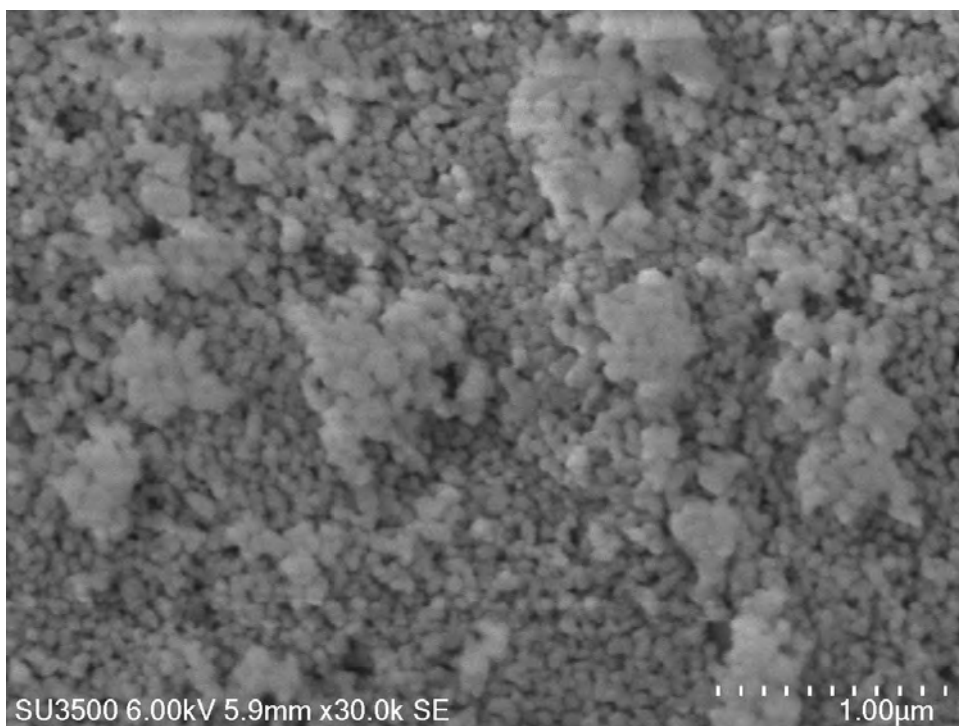
รูปที่ 3.3 แม่พิมพ์สำหรับฉีดขึ้นรูปชิ้นงาน

บทที่ 4

ผลการทดลองและการอภิปรายผล

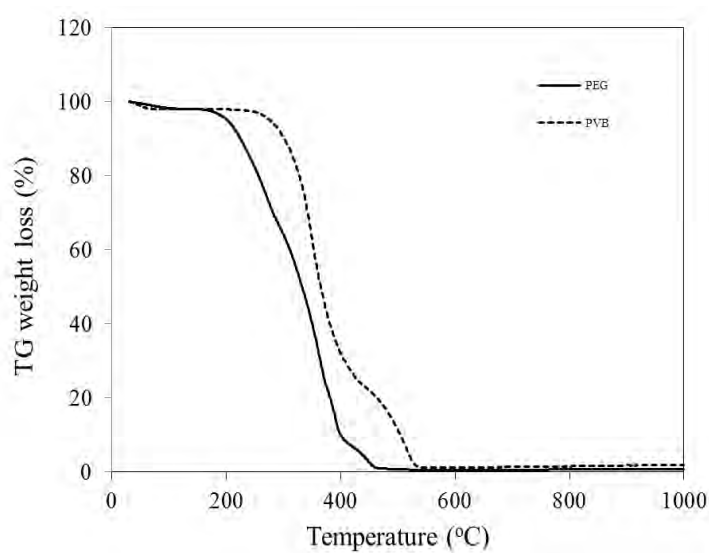
4.1 ผลการศึกษาลักษณะเฉพาะของผงวัสดุและตัวประสาน (Characterisation)

ผงเซอร์โคเนีย มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเล็กกว่า 1 ไมโครเมตร จากบริษัท Tosoh Corporation ประเทศญี่ปุ่น รูปที่ 4.1 แสดงลักษณะทางสัณฐานทางวิทยาของผงเซอร์โคเนียจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ผงเซอร์โคเนียมีการกระจายตัวกันสม่ำเสมอ การที่อนุภาคมีขนาดเล็กมากในระดับ submicron จะทำให้เตรียมส่วนผสมได้ปริมาณผงวัสดุไม่สูงมาก (ไม่เกินร้อยละ 40 โดยปริมาตร) ซึ่งจะทำให้ชิ้นงานมีการหดตัวหลังเผาสูง และการเผาเพื่อเพิ่มความหนาแน่นของชิ้นงานต้องใช้อุณหภูมิค่อนข้างสูง



รูปที่ 4.1 ลักษณะผงเซอร์โคเนียจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

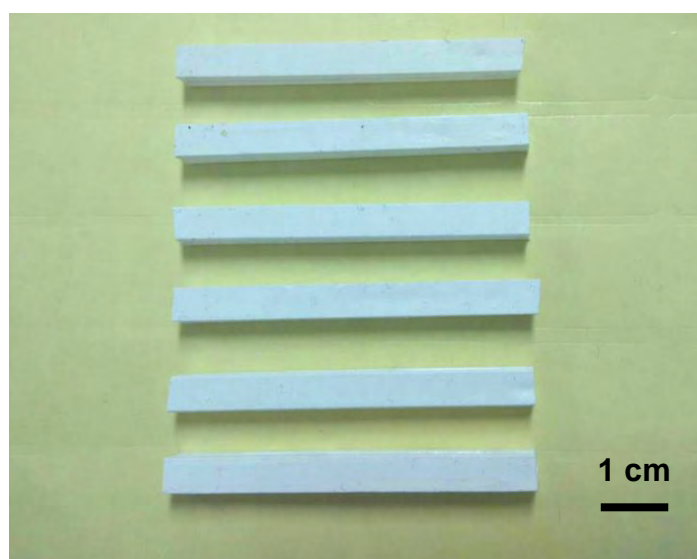
ตัวประสานที่ใช้งานวิจัยนี้ ได้แก่ PEG และ PVB รูปที่ 4.2 แสดงการสลายตัวของสารทั้งสองชนิดที่อุณหภูมิต่าง ๆ จากแผนภาพพบว่า PEG เริ่มสลายที่อุณหภูมิประมาณ 200°C และจะสลายหมดที่อุณหภูมิประมาณ 450°C สำหรับ PVB จะเริ่มสลายที่อุณหภูมิประมาณ 300°C และจะสลายหมดที่อุณหภูมิประมาณ 550°C อย่างไรก็ตาม งานวิจัยนี้ได้เลือกใช้การกำจัดตัวประสาน (PEG) โดยการละลายน้ำ ดังนั้นชิ้นงานที่ผ่านการแช่น้ำแล้ว จะเหลืออยู่เฉพาะ PVB เท่านั้น ซึ่งจะสามารถกำจัดออกได้โดยการให้ความร้อน ในขั้นตอนระหว่างการเพิ่มอุณหภูมิสู่การเผาซินเทอร์ของผงวัสดุ



รูปที่ 4.2 ผลจากเครื่อง Thermogravimetric analysis ของ PEG และ PVB

4.2 ผลของการฉีดขึ้นรูป (Powder injection moulding)

จากการเตรียมส่วนผสม และการฉีดขึ้นรูป พบว่า สูตร Z36 และสูตร Z38 สามารถทำการฉีดขึ้นรูปส่วนผสมของเซอร์โคเนียได้เต็มแม่พิมพ์ ชิ้นงานมีความสมบูรณ์ และมีความแข็งแรงเพียงพอที่จะนำไปทำการทดลองในขั้นตอนต่อไปได้ แต่เนื่องจากต้องการให้ชิ้นงานมีความหนาแน่นสูง จึงเลือกส่วนผสมที่มีปริมาณผงมากกว่า (Z38) เพื่อไปทำการทดลองในขั้นตอนต่อไป ส่วนสูตร Z40 นั้น ไม่สามารถเตรียมชิ้นงานให้เต็มแม่พิมพ์ด้วยเครื่องฉีดขึ้นรูประดับห้องปฏิบัติการ ทั้งนี้เนื่องจากส่วนผสมมีความหนืดสูง แต่ส่วนผสมที่มีปริมาณผงวัสดุมากนี้ อาจจะสามารถนำไปฉีดขึ้นรูปได้ หากใช้เครื่องมือระดับอุตสาหกรรม ที่มีขนาดใหญ่กว่าเครื่องระดับห้องปฏิบัติการ ตัวอย่างชิ้นงานที่ได้จากการฉีดขึ้นรูปวัสดุผง แสดงดังรูปที่ 4.3

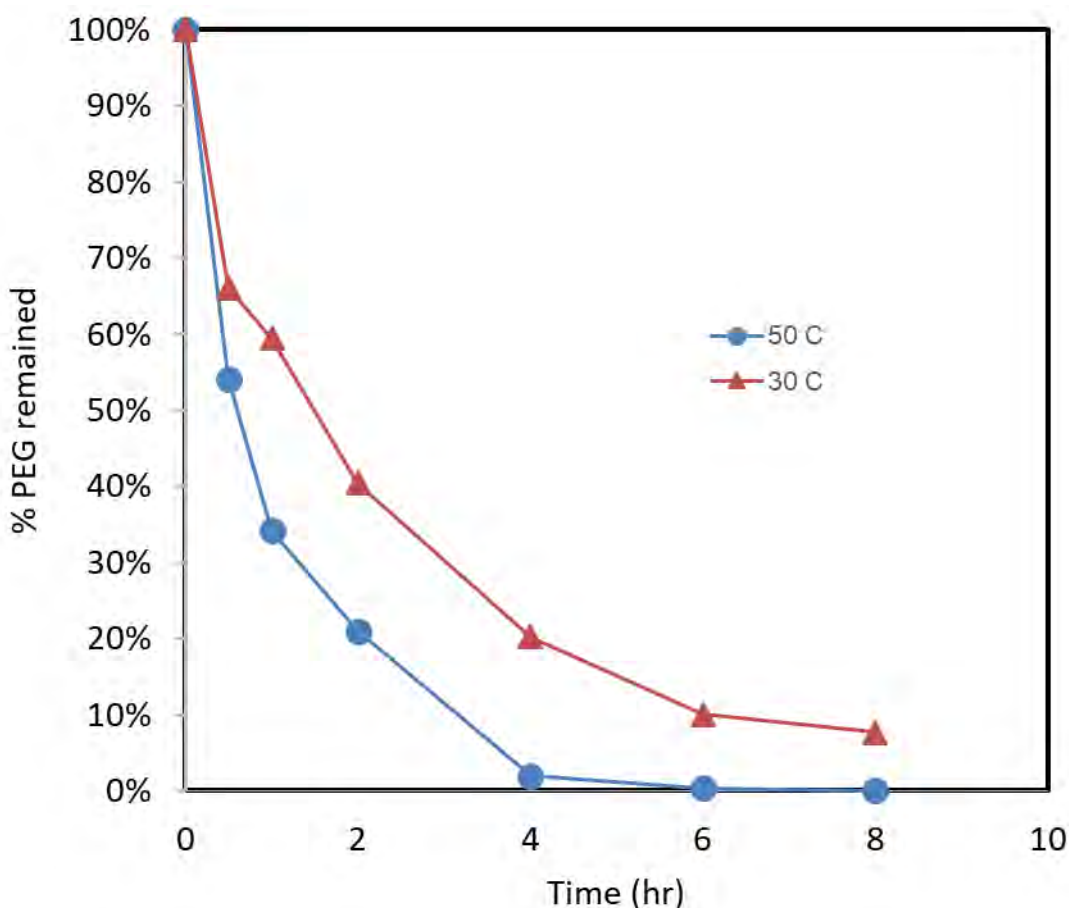


รูปที่ 4.3 ชิ้นงานเซอร์โคเนียที่ได้จากการฉีดขึ้นรูปวัสดุผง

4.3 ผลการศึกษาการกำจัดตัวประสาน (Debinding)

จากการศึกษาในเบื้องต้น พบว่าเมื่อนำชิ้นงานที่ผ่านการฉีดขึ้นรูปมาแช่ในน้ำ โดยกำหนดให้ใช้อุณหภูมิของน้ำ เป็น 30 และ 50 องศาเซลเซียส จะพบระหว่างการแช่ และหลังจากการแช่น้ำแล้ว ชิ้นงานยังสามารถคงรูปอยู่ได้ โดยเมื่อเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิของน้ำที่ใช้ในการกำจัดตัวประสาน จะพบว่า น้ำที่อุณหภูมิสูงกว่า จะทำให้ตัวประสานถูกกำจัดออกไปได้เร็วกว่า และมากกว่า และจากการทดลองนี้ยังได้ข้อสังเกตว่าถ้าใช้น้ำที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ปริมาณตัวประสานมากกว่าร้อยละ 90 สามารถถูกกำจัดออกไปได้ในเวลาเร็วกว่า 4 ชั่วโมง นอกจากนี้ยังพบว่า ปริมาณตัวประสานมากกว่าร้อยละ 90 จะถูกกำจัดออกไปได้ เมื่อใช้เวลา 8 ชั่วโมงทั้งในน้ำที่อุณหภูมิ 30 และ 50 องศาเซลเซียส กราฟแสดงร้อยละตัวประสาน PEG ที่คงเหลือในชิ้นงาน เมื่อแช่ในน้ำที่มีอุณหภูมิต่างๆกัน แสดงดังรูปที่ 4.4

ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยอื่นๆ ที่ผ่านมา ซึ่งพบว่าอุณหภูมิของตัวทำละลายที่สูงกว่า สามารถทำให้ตัวประสานถูกกำจัดออกมาได้มากกว่า นอกจากนี้จะพบว่าอัตราการกำจัดตัวประสานจะเร็วในช่วงแรก (ภายในเวลา 2 ชั่วโมงแรก) สังเกตได้จากความชันของกราฟ และหลังจากนั้นอัตราการกำจัดตัวประสานจะค่อยๆลดลง (Rajabi และคณะ 2015)



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงผลของเวลาในการแช่น้ำต่อการกำจัดตัวประสาน

4.4 ผลการศึกษาสมบัติเชิงกลของชิ้นงาน

ผลจากการวัดค่าความแข็งแรงของชิ้นงานด้วยเทคนิค 3-point bending test แสดงดังตารางที่ 4.1 ซึ่งพบว่าความแข็งแรงของชิ้นงานที่ได้จากการฉีดขึ้นรูป (green strength) มีค่าเป็น 0.8 MPa ซึ่งมีค่าต่ำกว่าความแข็งแรงของชิ้นงานที่ผ่านการกำจัดตัวประสานชนิด PEG (หลังแช่น้ำ) แล้ว ที่มีค่าเป็น 3.02 MPa (brown strength) ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากค่าความแข็งแรงของชิ้นงานเกิดจากความแข็งแรงที่เกิดจากตัวประสานชนิด PVB ยึดจับกับอนุภาควัสดุผง โดยในสถานะที่เป็นชิ้นงานที่ได้จากการฉีดขึ้นรูป (green) จะมีทั้งตัวประสานชนิด PEG และ PVB อยู่ในชิ้นงาน การยึดจับอนุภาคของ PVB อาจจะไม่เต็มที่ได้ เนื่องจากมีการรบกวนจาก PEG และเมื่อแช่น้ำเพื่อกำจัด PEG ออกไปแล้ว ในชิ้นงานจะมีตัวประสานหลงเหลืออยู่เพียงแค่ PVB เท่านั้น (brown) จึงทำให้การยึดอนุภาคเป็นไปได้ดีกว่า

ตารางที่ 4.1 ค่าความแข็งแรงของชิ้นงานเซอร์โคเนียสูตร Z38 หลังฉีดขึ้นรูป (Green strength) หลังกำจัดตัวประสาน (Brown strength) และหลังเผาที่ 1300 - 1400 °C (Sintered strength)

Condition	Strength (MPa)
หลังฉีดขึ้นรูป (green strength)	0.80 ± 0.05
หลังกำจัดตัวประสาน (brown strength)	3.02 ± 0.16
เผาที่ 1300 °C	143.9 ± 26.1
เผาที่ 1350 °C	160.1 ± 44.8
เผาที่ 1400 °C	169.4 ± 38.0

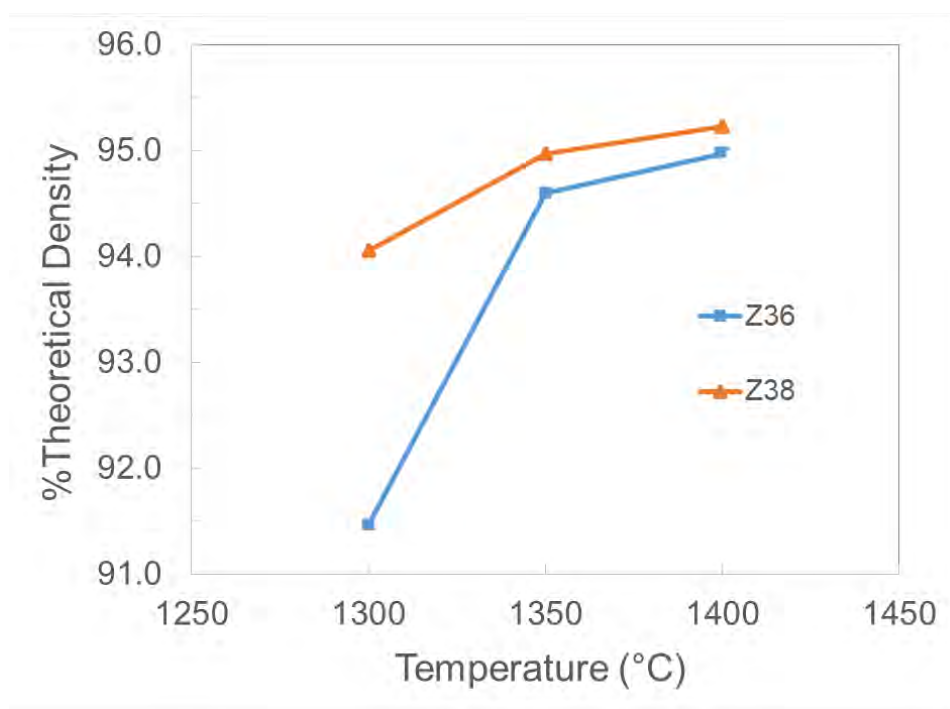
4.5 ผลการศึกษาสมบัติทางกายภาพของชิ้นงาน

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าความหนาแน่นของชิ้นงานหลังเผา ซึ่งวัดได้โดยอาศัยหลักการแทนที่ด้วยน้ำ (Archimedes method) พบว่าความหนาแน่นมีแนวโน้มที่จะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการเผาจาก 1300 1350 ไปจนถึง 1400 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.2 ค่าความหนาแน่นของชิ้นงานสูตร Z36 และ Z38 หลังเผา ที่อุณหภูมิ 1300 1350 และ 1400 องศาเซลเซียส

Sintering temperature	Z36	Z38
1300 °C	5.58 ± 0.06	5.74 ± 0.06
1350 °C	5.77 ± 0.08	5.79 ± 0.08
1400 °C	5.79 ± 0.04	5.81 ± 0.07

ค่าความหนาแน่นของชิ้นงาน Z38 ที่มีส่วนผสมเป็นเซอร์โคเนียอยู่ร้อยละ 38 มีค่ามากกว่าชิ้นงาน Z36 ที่มีส่วนผสมผงเซอร์โคเนียอยู่ร้อยละ 36 จากการทดลองพบว่า ชิ้นงานสูตร Z36 จะมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1300 องศาเซลเซียส แต่เมื่อใช้อุณหภูมิในการเผาผนึกเป็น 1350 และ 1400 องศาเซลเซียส ความหนาแน่นของชิ้นงานสูตร Z36 และ Z38 ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นของชิ้นงานที่ได้จากการฉีดขึ้นรูปวัสดุผงกับค่าความหนาแน่นตามทฤษฎี ดังแสดงในรูปที่ 4.5 พบว่าค่าความหนาแน่นของชิ้นงานสูตร Z38 มีค่าสูงกว่าร้อยละ 95 ของความหนาแน่นตามทฤษฎี เมื่อทำการเผาที่อุณหภูมิ 1400 องศาเซลเซียส ส่วนชิ้นงานสูตร Z38 ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1350 องศาเซลเซียส และชิ้นงานสูตร Z36 ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1350 และ 1400 องศาเซลเซียส จะมีความหนาแน่นสูงกว่าร้อยละ 94 ของความหนาแน่นตามทฤษฎี ในขณะที่ถ้าใช้อุณหภูมิในการเผาเป็น 1300 องศาเซลเซียส ชิ้นงานสูตร Z36 และ Z38 จะมีความหนาแน่นเป็นร้อยละ 91 และ 94 ของความหนาแน่นตามทฤษฎีตามลำดับ



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงร้อยละความหนาแน่นตามทฤษฎีของชิ้นงานสูตร Z36 และ Z38 ที่ผ่านการเผาผนึก โดยใช้อุณหภูมิตั้งแต่ 1300 – 1400 องศาเซลเซียส

นอกจากนี้ ชิ้นงานที่ผ่านการเผาผนึก มีค่าร้อยละการหดตัวอยู่ในช่วง 22-25 % ซึ่งเป็นไปตามสมมุติฐานที่ว่า ชิ้นงานจะหดตัวมากเนื่องจาก มีปริมาณของแข็งในส่วนผสมค่อนข้างต่ำ (น้อยกว่าร้อยละ 40 โดยปริมาตร)

บทที่ 5

สรุปผลการดำเนินงาน

การสรุปผลการดำเนินงานโครงการพบว่าเป็นไปตามวัตถุประสงค์ของโครงการ ซึ่งมีดังนี้

(1) เพื่อศึกษาการผลิตเซอร์โคเนียด้วยกระบวนการฉีดขึ้นรูป

ชิ้นงานเซอร์โคเนียสามารถผลิตได้โดยกระบวนการฉีดขึ้นรูปวัสดุผง โดยเลือกใช้ตัวประสานที่สามารถละลายน้ำได้ ซึ่งจะทำให้เป็นกระบวนการผลิตที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ลดการใช้สารเคมี และประหยัดค่าใช้จ่าย อุณหภูมิของน้ำที่ใช้ในการกำจัดตัวประสานชนิดพอลิเอทิลีนไกลคอล ส่งผลต่ออัตราการกำจัดตัวประสาน โดยอุณหภูมิที่สูงกว่าจะช่วยให้ตัวประสานถูกกำจัดได้รวดเร็วกว่า แต่จะสิ้นเปลืองพลังงาน ค่าความแข็งแรงของชิ้นงานหลังกำจัดตัวประสานมีค่าสูงกว่าค่าความแข็งแรงของชิ้นงานหลังฉีดขึ้นรูป โดยมีค่าเป็น 3.02 และ 0.80 MPa ตามลำดับ ดังนั้นชิ้นงานหลังจากแช่น้ำแล้วยังคงมีความแข็งแรงสามารถนำเคลื่อนย้ายเพื่อไปทำการทดลองในขั้นตอนต่อไปได้

(2) เพื่อศึกษาผลของกระบวนการผลิต ต่อสมบัติของชิ้นงานที่เตรียมได้โดยการเผาแบบไม่ใช้ความดัน

สมบัติทางกายภาพ และสมบัติเชิงกลของชิ้นงานหลังเผา มีแนวโน้มที่จะมีค่าสูงขึ้น เมื่อใช้อุณหภูมิในการเผาที่เพิ่มขึ้น ค่าความแข็งแรงของชิ้นงานหลังเผาที่อุณหภูมิ 1400 องศาเซลเซียส มีค่าสูงสุดที่วัดได้เป็น 169.4 เมกกะปาสคาล ชิ้นงานที่มีค่าความหนาแน่นสูงสุด คือชิ้นงานสูตร Z38 เมื่อเผาแบบไม่ใช้ความดัน โดยใช้อุณหภูมิ 1400 องศาเซลเซียส ความหนาแน่นมีค่าเป็น 5.81 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งเทียบได้เป็นร้อยละ 95 ของความหนาแน่นตามทฤษฎี ชิ้นงานหลังเผามีการหดตัวอยู่ในช่วง 22-25 %

ซึ่งผลการดำเนินงานโครงการวิจัยนี้ สามารถเป็นองค์ความรู้เบื้องต้นในการศึกษากระบวนการฉีดขึ้นรูปวัสดุเซรามิกชนิดเซอร์โคเนีย หรือเซรามิกชนิดอื่น ๆ รวมทั้งสามารถประยุกต์ใช้กับวัสดุเซอร์โคเนียที่มีการผสมอะลูมินา ที่เหมาะสำหรับการใช้งานที่ต้องการคุณสมบัติเฉพาะได้ต่อไป

องค์ความรู้ที่ได้จากโครงการวิจัยนี้ สามารถพัฒนาการขึ้นรูปและตรวจสอบลักษณะเฉพาะของแอโนดพอร์ซัน ชนิด निकелออกไซด์กับเซอร์โคเนีย (NiO-YSZ) ที่ผลิตจากกระบวนการฉีดขึ้นรูปวัสดุผง ซึ่งใช้ตัวประสานที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และต่อยอดไปสู่การเตรียมฟิล์มบางอิเล็กโทรไลต์ด้วยเทคนิคการตกสะสมอิเล็กโทรโพสิทีฟ บนแอโนดพอร์ซันที่ได้จากการผลิตโดยกระบวนการฉีดขึ้นรูปวัสดุผง สำหรับการประยุกต์ใช้งานเป็นเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็ง ซึ่งได้ตีพิมพ์เผยแพร่บทความเรื่อง Fabrication of yttria stabilized zirconia thin films on powder-injected anode substrates by electrophoretic deposition technique for solid oxide fuel cell application ในวารสารวิชาการระดับนานาชาติ Thin Solid Films Volume 660, 30 August 2018, Pages 741-748 (Impact factor 1.939)

นอกจากนี้ ส่วนหนึ่งของผลการดำเนินงานที่ได้จากโครงการวิจัยเรื่องนี้ ได้รับการตอบรับให้นำเสนอผลงานแบบปากเปล่า (Oral Presentation) ในการประชุมวิชาการระดับนานาชาติ International Conference on Traditional and Advanced Ceramics (ICTA2019) ระหว่างวันที่ 28 - 29 สิงหาคม 2562 ณ อิมแพค ฟอรัม เมืองทองธานี

บรรณานุกรม

M. Y. Anwar, P. F. Messer, B. Ellis and H. A. Davies, (1995) "Injection moulding of 316L stainless steel powder using novel binder systems", Powder Metallurgy, Vol. 38, No. 2, pp. 113-119.

H. I. Bakan, (2007) "Injection moulding of alumina with partially water soluble binder system and solvent debinding kinetics", Materials Science and Technology, Vol. 23, No. 7, pp. 787-791.

N. Chomsirigul, O. Khuanthong, Sooksanen, P. and N. Chuankrerkkul, (2014) "Influence of specimen dimensions and temperature on the debinding behavior of alumina feedstock" Key Engineering Materials, Vol. 608, pp. 170-174.

N. Chuankrerkkul, K. Somton, T. Wonglom, K. Dateraksa and P. Laoratanakul, (2016) "Physical and mechanical properties of Zirconia toughened alumina (ZTA) composites fabricated by powder injection moulding" Chiang Mai Journal of Science, Vol. 43 No. 2, pp. 375-380.

N. Chuankrerkkul, P. F. Messer and H. A. Davies, (2008) "Application of Polyethylene glycol and Polymethyl methacrylate as a Binder for Powder Injection Moulding of Hardmetals" Chiang Mai Journal of Science, Vol. 38 No. 2, pp. 113-119.

N. Chuankrerkkul (2006) Powder injection moulding of WC-Co hardmetals using a PEG/PMMA binder, PhD Thesis, The University of Sheffield, United Kingdom

C.W. Gal, S.S. Han, J.S. Han, D. Lin and S.J. Park, (2019) "Investigation of stainless steel 316L/zirconia joint part fabricated by powder injection molding", International Journal of Applied Ceramic Technology, Vol. 16 (1), pp. 315-323.

R.M. German and A. Bose, 1997, Injection molding of metals and ceramics, Metal Powder Industries Federation, Princeton, NJ.

W. H. Gitzen, 1970, Alumina as a Ceramic Material, The American Ceramic Society, Ohio.

J. He, Z. Shao, D.F. Khan, H. Yin, S. Elder, Q. Zheng and X. Qu, (2018) "Investigation of inhomogeneity in powder injection molding of nano zirconia", Powder Technology, Vol. 328, pp. 207-214.

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

L. Liu, Y.Y. Gao, X.T. Qi and M.X. Qi (2018) "Effects of wall slip on ZrO₂ rheological behavior in micro powder injection molding", *Ceramics International*, Vol. 44 (14), pp. 16282-16294.

W. Liu, J. Wen, Z. Xie and X. Yang (2018) "Powder modification mechanism, effects of binder compositions on the thermal behavior, and the mechanical properties of the ceramic injection molded system", *Ceramics International*, Vol. 44 (5), pp. 5646-5651.

A. J. Millan, R. Moreno and M. I. Nieto, (2001) "Aqueous injection moulding of alumina using agarose", *Materials Letters*, Vol. 47, No. 6 , pp. 324-328.

M. A. Newell, H. A. Davies, P. F. Messer and D. J. Greensmith, (2005) "Metal injection moulding of scissors using hardenable stainless steel powders", *Powder Metallurgy*, Vol. 48, No. 3 , pp. 227-230.

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

M. A. Omar, H. A. Davies, P. F. Messer and B. Ellis, (2001) "The influence of PMMA content on the properties of stainless steel compact", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 113, pp. 477-481.

J. Rajabi, H. Zakaria, N. Muhamad, A.B. Sulong and A. Fayyaz, (2015) "Fabrication of miniature parts using nano-sized powders and an environmentally friendly binder through micro powder injection molding" *Microsystem Technologies*, Vol. 21 (5), pp. 1131-1136.

J. Strauss, (2008) "The potential of PIM for the manufacture of precious metal jewellery", *Powder Injection Moulding International*, Vol. 2, pp. 50-54.

W. C. J. Wei, R. Y. Wu and S. J. Ho, (2001) "Effects of pressure parameters on alumina made by powder injection moulding", *Journal of the European Ceramic Society*, Vol. 20, No. 9 , pp. 1301-1310.

B. Williams, (2008) "Watch cases and bracelet parts: PIM moves upmarket", *Powder Injection Moulding International*, Vol. 2, pp. 31-32.

S. H. Wong (2003) Injection moulding of anorthite/mullite porcelain, PhD Thesis, The University of Sheffield, United Kingdom

M. Zhao, L. Qiao, J. Zheng, Y. Ying, J. Yu, W. Li and S. Che, (2019) "Investigation of the solvent debinding in the injection molding of ZrO₂ ceramics using LDEP, HDPE and wax binders", *Ceramics International*, Vol. 45 (3), pp. 3894-3901.

ภาคผนวก

ส่วนหนึ่งของผลงานที่ได้จากโครงการวิจัยเรื่องนี้ ได้รับการตอบรับให้นำเสนอแบบปากเปล่า (Oral Presentation) ในการประชุมวิชาการระดับนานาชาติ ICTA2019 : International Conference on Traditional and Advanced Ceramics ในวันที่ 29 สิงหาคม 2562



In conjunction with
ASEAN Ceramic 2019
The 8th Asia-Oceania Ceramic Federation Conference (AOCF-8)

ICTA2019

International Conference on Traditional and Advanced Ceramics 2019

August 28 – 29, 2019
IMPACT Forum (Sapphire 108-110),
Muang Thong Thani, Bangkok, THAILAND

Day II	Slot min	August 29, 2019	
08:30-09:00		Registration	
Session		Advanced Ceramics (ADV)	Ceramic Industrial Technology (IND)
09:00-09:15		ADV-I-XX: Dielectric and Magnetic Properties of Frustrated Compound TMFe_2O_4 Prof. Dr. Katsuhisa Tanaka Kyodai Graduate School of Engineering, Kyoto University, Japan	IND-I-XX: New Ceramic Tile Standards to Satisfy Consumer Needs and Expectations Richard Bowman Principal, Intertile Research Pty Ltd., Australia
09:15-09:30		ADV-I-XX: Nano Boron Carbide (B ₄ C) Reinforced Polymer Matrix Composites for Shielding and Engineering Applications: Issues and Challenges Prof. Dr. Cengiz Kaya Research and Graduate Policies Materials Science and Nano Engineering, Sabanci University, Turkey	IND-I-XX: An Opportunity of Industrial Wastes in Ceramic Manufacturing Dr. Pitak Laoratanakul National Metal and Materials Technology Center (MTEC), Thailand
09:30-09:45		ADV-O-026 Synthesis of Nano-Ceramic Materials Using Novel Water-Assisted Solid-State Reaction Method Kenji Toda Niigata University, Japan	IND-O-021 Influence of Black Rice Husk Ash on Physical and Thermal Properties in Chiang Mai Celadon Glazes Nophawan Dechboon Rajamangala University of Technology Lanna, Thailand
09:45-10:00		ADV-O-052 Excellent C doped TiO ₂ Photocatalyst for Methylene Blue Degradation Activity under Natural Solar Light As Compare with In/C Doping Samroeng Narakaew Lampang Rajabhat University, Thailand	IND-O-022 Effect of Thermal Expansion Coefficient of Dolomite and Stoneware on Crystallization Behavior in Willemite Glazes Nophawan Dechboon Rajamangala University of Technology Lanna, Thailand
10:00-10:15			
10:15-10:30			
10:30-11:00	30	Coffee Break	
Room		Sapphire 108	Sapphire 109
Session		Advanced Ceramics (ADV)	Glass and Coatings Technology (GLA)
11:00-11:15	1 15	ADV-I-XX: Crystallization Kinetics of In-Doped and (In-Cr) Co-Doped TiO ₂ Nanopowders Dr. Jim Low International Relations, The Australian Ceramic Society, Australia	GLA-O-034 Textured Glass Panel Supporter Enhanced Immobilized Titanium Dioxide for Photocatalytic Degradation of Methylene Blue Sittipong Augree Lampang Rajabhat University, Thailand
11:15-11:30	2 15	ADV-O-057 Surface Modification of Metal Oxide Nanomaterials via Liquid-Liquid Biphasic Systems Yoshiyuki Sugahara Waseda University, Japan	GLA-O-036 Synthesis and Characterization of TiO ₂ Thin Film by Sparking Technique for Perovskite-Sensitized Solar Cell Application Kamontip Jitjaiodngam Lampang Rajabhat University, Thailand
11:30-11:45	3 15	ADV-O-061 Powder Injection Moulding of Zirconia and Its Composites Using Water Soluble Binder System Nutttha Chuanakretkul Metallurgy and Materials Science Research Institute, Thailand	GLA-O-040 The Effect of Al ₂ O ₃ /SiO ₂ Ratio on the Structure and Properties of Aluminosilicate Glass for Biomaterial Application Ekarat Meechoowas Department of Science Service, Thailand
11:45-12:00	4 15		GLA-O-077 Influence of MgO Addition in a Ceramic Matt Glaze: Structural Evolution and Crystallization Niti Yongvanich Silpakorn University, Thailand
12:00-13:30	60	Lunch & Exhibition	
Session		Advanced Ceramics (ADV)	Ceramic Industrial Technology (IND)
13:30-13:45	5 15	ADV-O-071 Enhancement of Dye Absorption Ability and Photocatalytic Performance under Visible Light Irradiation of Bulk g-C ₃ N ₄ Tanaporn Narkbaekaw Chulalongkorn University, Thailand	IND-O-059 Pozzolanic Material from Waste Calcium Hydroxide and Recycled Glass Chiraporn Auechaitanukul King Mongkut's University of Technology Thonburi, Thailand
13:45-14:00	6 15	ADV-O-080 Study of High NIR Reflective Brown Pigment Krongkam Sirinukunwattana Department of Science Service, Thailand	IND-O-067 Water Resistant Blended Cements Containing Flue-Gas Desulfurization Gypsum, Portland Cement and Fly Ash for Structural Applications Supaporn Wansom National Metal and Materials Technology Center, Thailand
Session		Ceramic Art and Design (ART)	

แหล่งทุน : สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ

งานวิจัยที่สำเร็จแล้ว

1. การพัฒนาตัวประสานผสมสำหรับการฉีดยุติขึ้นรูปวัสดุผงแม่เหล็กเฟอร์ไรต์ (หัวหน้าโครงการ)
แหล่งทุน : ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ 2553
2. สถานภาพของจริยธรรมและมาตรการความปลอดภัยของนาโนเทคโนโลยีในประเทศไทย (หัวหน้าโครงการ)
แหล่งทุน : ศูนย์นวัตกรรมนาโนเทคโนโลยี ภายใต้โครงการจุฬาฯ 100 ปี 2551
3. เทคโนโลยีวัสดุสำหรับแม่พิมพ์คาร์ไบด์ (ผู้ร่วมวิจัย)
แหล่งทุน : สถาบันไทย-เยอรมัน 2550
4. โครงการยกระดับวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์สำหรับอุตสาหกรรมเซรามิก (ผู้ร่วมวิจัย)
แหล่งทุน : สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย 2551
5. การพัฒนากระบวนการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนปราศจากการใช้ฟลักซ์ด้วยวัสดุเคลือบโลหะโครงสร้างนาโน (ผู้ร่วมวิจัย)
แหล่งทุน : สถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย 2552
6. การพัฒนากระบวนการฉีดยุติขึ้นรูปวัสดุผงอะลูมินาโดยใช้ตัวประสานที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม (หัวหน้าโครงการ)
แหล่งทุน : สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

งานวิจัยที่กำลังทำ

1. การผลิตชิ้นงานที่มีรูพรุนสำหรับแอโนดของเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์ของแข็งด้วยการฉีดยุติขึ้นรูปวัสดุผง (หัวหน้าโครงการ)
แหล่งทุน : มูลนิธิกระจกเงา
สถานภาพ: ดำเนินการไปแล้ว ร้อยละ 95

ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่

1. Chauoon, S., Meepho, M., **Chuankrerkkul, N.**, Chaianansutcharit, S., Pornprasertsuk, R. (2018) "Fabrication of yttria stabilized zirconia thin films on powder-injected anode substrates by electrophoretic deposition technique for solid oxide fuel cell application." Thin Solid Films, Vol. 660, 741-748.
2. **Chuankrerkkul, N.**, Wasanapiampong, T., Noomun, K. (2018) "Powder injection moulding of dental ceramic brackets using water soluble binder." Chiang Mai Journal of Science, Vol. 45, 2190-2194.
3. Chakartnarodom, P., Prakaypan, W., Ineure, P., Kongkajun, N., **Chuankrerkkul, N.** (2018) "Feasibility study of using basalt fibers as the reinforcement phase in fiber-cement products." Key Engineering Materials, Vol. 766, 252-257.

4. Sooksaen, P. and **Chuankrerkkul, N.** (2017) "Morphology-design and semiconducting characteristics of zinc oxide nanostructures under microwave irradiation." *Integrated Ferroelectrics*, Vol. 177, 90-102.
5. **Chuankrerkkul, N.**, Chauoon, S., Meepho, M., Pornprasertsuk, R. (2017) "Characterisation of NiO-YSZ porous anode-support for solid oxide fuel cells fabricated by ceramic injection moulding." *Key Engineering Materials*, Vol. 751, 467-470.
6. Meepho, M., **Chuankrerkkul, N.**, Chauoon, S., Pornprasertsuk, R. (2017) "Process optimization and characterization of YSZ thin film electrolyte on anode substrate prepared by electrophoretic deposition technique." *Key Engineering Materials*, Vol. 751, 471-476.
7. Patcharawit, T., Ngeekoa, A., Tongkerd, W., Takhampom, S., Lapkeaw, S., **Chuankrerkkul, N.** (2017) "Mechanical properties of as-exposed Al-SiCp composite fabricated by powder injection moulding." *Key Engineering Materials*, Vol. 751, 60-69.
8. **Chuankrerkkul, N.**, Somton, K., Wonglom, T., Dateraksa, K., and Laoratanakul, P. (2016). "Physical and mechanical properties of Zirconia toughened alumina (ZTA) composites fabricated by powder injection moulding. " *Chiang Mai Journal of Science*, Vol. 43(2), 375-380.
9. Chakartnarodom, P., Kongkajun, N., and **Chuankrerkkul, N.** (2016) "Powder Injection molding of mullite: The study of binder dissolution behavior during debinding step using statistical methods. " Vol. 690. *Key Engineering Materials* (pp. 87-91).
10. Chakartnarodom, P., Kongkajun, N., and **Chuankrerkkul, N.** (2016) "Powder injection molding of mullite: The study of mechanical and physical properties of the sintered products using statistical methods. " Vol. 690. *Key Engineering Materials* (pp. 92-96).
11. **Chuankrerkkul, N.**, Charoenkijmongkol, R., Somboonthanasarn, P., Auechalitanukul, C. and McCuiston, Ryan C. (2015) "Microstructure and properties of zirconia toughened alumina fabricated by powder injection moulding." *Key Engineering Materials*, Vol. 659, 116-120.
12. Buggakupta, W., **Chuankrerkkul, N.** and Surawattana, J. (2015) "Effects of water temperatures on water-soluble binder removal in ceramic materials fabricated by powder injection moulding." *Key Engineering Materials*, Vol. 659, 90-95.
13. Chakartnarodom, P., Kongkajun, N. and **Chuankrerkkul, N.** (2015) "Application of statistical analysis in the powder injection molding (PIM) of mullite." *Key Engineering Materials*, Vol. 659, 53-57.

14. Rojhirunsakool, T., Thongpian, D., **Chuankrerkkul, N** and Wangyao, P (2015) "Effect of pre-weld heat treatment temperatures on TIG welded microstructures on nickel base superalloy, GTD-111." Key Engineering Materials, Vol. 658, 14-18.
15. **Chuankrerkkul, N.**, Buggakupta, W. and Surawattana, J. (2014) "Role of tungsten carbide reinforcement on alumina matrix composites fabricated by powder injection moulding." Key Engineering Materials, Vol. 608, 230-234.
16. Chomsirigul, N., Khuanthong, O., Sooksanen, P. and **Chuankrerkkul, N.** (2014) "Influence of specimen dimensions and temperature on the debinding behavior of alumina feedstock." Key Engineering Materials, Vol. 608, 170-174.
17. Sooksanen, P., Utama, N., Pratooyai, J., Chinsatit, P. and **Chuankrerkkul, N.** (2014) "Microstructure and dielectric properties of alumina addition on TiO₂-doped barium titanate ceramics." Ferroelectrics, Vol. 458, 118-121.
18. Wangyao, P., Pichaiwong, N., Visuttipitukul, P., **Chuankrerkkul, N.**, and Hirunyagird, J. (2014) "Effects of Ni and Ni + Co additions in P/M stainless steel 316L on sigma phase and oxide formations after long term heating." Advanced Materials Research, Vol. 894, 227-233.
19. Patcharawit, T., Klahan, S., Rupkrathok, P., and **Chuankrerkkul, N.** (2014) "Effects of mechanical alloying on microstructure and properties of powder injection moulded SiCp-reinforced aluminium composite." Applied Mechanics and Materials, Vol. 597, 103-108.
20. Patcharawit, T., Inpanya, B., and **Chuankrerkkul, N.** (2014) "Effects of sintering on microstructure and hardness of powder injection moulded aluminium composites." International Journal of Materials Engineering Innovation, Vol. 5, 151-158.
21. Rattanawaleedirojn, P., Saengkiattiyut, K., Boonyongmaneerat, Y., **Chuankrerkkul, N.**, and Saenapitak, S. (2014) " Effects of complexing agent concentration and bath pH on electroless nickel deposition for tungsten carbide powders." Advanced Materials Research, Vol. 970, 240-243.
22. Chakartnarodom, P. and **Chuankrerkkul, N.** (2014) " Statistical analysis of binder behavior during debinding step in Powder Injection Molding (PIM)." Advanced Materials Research, Vol. 970, 172-176.
23. **Chuankrerkkul, N.**, Boonyongmaneerat, Y., Saengkiattiyut, K., Rattanawaleedirojn, P. and Saenapitak, S. (2013) "Injection Moulding of Tungsten Carbide-Nickel Powders Prepared by Electroless Deposition." Key Engineering Materials, Vol. 545, 148-152.

24. **Chuankrerkkul, N.**, Sooksaen, P., Pakunthod, P., Kosalwit, T. and Pinthong, W. (2013) "Powder Injection Moulding of Alumina Using PEG/PVB Binder Systems." *Key Engineering Materials*, Vol. 545, 173-176.
25. Boonpo, J., Chaiyacote, V., **Chuankrerkkul, N.** and Buggakupta, W. (2013) "Influences of Cobalt and Zirconia on Microstructural Features and Mechanical Properties of the Al₂O₃/WC Composites." *Key Engineering Materials*, Vol. 545, 14-18
26. **Chuankrerkkul, N.** and Chakartnarodom, P. (2012) "Fabrication of Injection Moulded 304L Stainless Steels Reinforced with Tungsten Carbide Particles." *Materials Science Forum*, Vols. 706-709, 638-642.
27. Chaiyacote, V., Buggakupta, W., and **Chuankrerkkul, N.** (2012) "Effects of Co content on hardness and fracture toughness of Al₂O₃/WC-Co composites." *Journal of the Australian Ceramic Society*, Vol. 48(2), 253-256.
28. Surawattana, J., **Chuankrerkkul, N.** and Buggakupta, W. (2012) "Properties of Porous Alumina Fabricated by Ceramic Injection Moulding using Environmentally Friendly Binder." *Advanced Materials Research*, Vol. 506, 238-241.
29. Pichaiwong, N., Wangyao, P., Lothongkum, G., Visuttipitukul, P., Asavavisithchai, S., Tongsri, R., and **Chuankrerkkul, N.** (2012) "Effect of Co addition to heat-treated P/M 316L stainless steel on γ' -martensite formation and mechanical properties." *Materials Testing*, Vol. 54(11-12), 762-768.
30. Udomphol, T., Inpanya, B., and **Chuankrerkkul, N.** (2012) "Characterization of Feedstocks for Injection Moulded SiCp-Reinforced Al-4.5 wt%Cu Composite." *Advanced Materials Research*, Vols 383-390, 3234-3240.
31. **Chuankrerkkul, N.**, Borwornkiatkaew, W., Pornpijit, A., and Charojrochkul, S. (2011) "Processing, Microstructure and Properties of 316L Stainless Steel-Tungsten Carbide Composites." *Malaysian Journal of Microscopy*, Vol.7, 31-35.
32. Boonpo, J., Buggakupta, W., and **Chuankrerkkul, N.** (2011) "Microstructure and Mechanical Properties of Al₂O₃ Composites with Ca-PSZ Addition." *Malaysian Journal of Microscopy*, Vol. 7, 26-30.
33. Wangyao, P., Suwanchai, P., **Chuankrerkkul, N.**, Krongtong, V., Thueploy, A., and Homkrajai, W. (2010) "Microstructural analysis after reheat treatments and longterm heating in cast nickel base superalloy, GTD-111." *High Temperature Materials and Processes*, Vol.29 No. 4, 277-285.
34. Borwornkiatkaew, W., Pornpijit, A., Charojrochkul, S., and **Chuankrerkkul, N.** (2010). Metallography and Microstructure of Tungsten Carbide Particulate-Reinforced Stainless Steel Matrix Composites. *Journal of Microscopy Society of Thailand*, Vol.24 No.1, 33-36.

35. Wangyao, P., **Chuankrerkkul, N.**, Polsilapa, S., Sapon, P., and Homkrajai, W. (2009). "Gamma Prime Phase Stability after Long-Term Thermal Exposure in Cast Nickel Based Superalloy, IN-738." *Chiang Mai Journal of Science*, 36(3), 312-319.
36. **Chuankrerkkul, N.**, Messer, P.F. and Davies, H. A. (2008) "Application of Polyethylene glycol and Polymethyl methacrylate as a Binder for Powder Injection Moulding of Hardmetals. " *Chiang Mai Journal of Science*, Vol. 35 No.188-195.
37. **Chuankrerkkul, N.**, Messer, P. F. and Davies, H. A. (2008) "Flow and Void Formation in Powder Injection Moulding Feedstocks made with PEG/PMMA Binders Part I: Experimental Observations." *Powder Metallurgy*, Vol. 51 No. 1, 66-71.
38. **Chuankrerkkul, N.**, Messer, P. F. and Davies, H. A. (2008) "Flow and Void Formation in Powder Injection Moulding Feedstocks made with PEG/PMMA Binders Part II: Slip-band Model." *Powder Metallurgy*, Vol. 51 No. 1, 72-77.
39. Wangyao, P., Krongtong, V., Panich, P., **Chuankrerkkul, N.** and Lothongkum, G. (2007) "Effect of 12 Heat Treatment Conditions after HIP Process on Microstructural Refurbishment in Cast Nickel-Based Superalloy, GTD-111." *Journal of High Temperature Materials and Processes*, Vol.26, No. 2, 151-159.