

รายงานฉบับสมบูรณ์

ทุนอุดหนุนการวิจัยจากเงินอุดหนุนทั่วไปจากรัฐบาลประจำปีงบประมาณ 2560

ชื่อโครงการ

การเตรียมเซอร์โคเนียความหนาแน่นสูงโดยกระบวนการฉีดขึ้นรูปวัสดุผง
และการเผาผนึกโดยไม่ใช้ความดัน

สัญญา เลขที่ GB-A_60_060_62_01

ผู้วิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐริตา ชวนเกริกกุล

สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กรกฎาคม 2561

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการดำเนินงานจากทุนอุดหนุนการวิจัยจากเงินอุดหนุนทั่วไปจากรัฐบาลประจำปีงบประมาณ 2560 ผู้วิจัยขอขอบคุณศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ และภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์เตาเผาอุณหภูมิสูงสำหรับการเผาชิ้นงานบางส่วนในโครงการวิจัยนี้ ขอขอบคุณ สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ในการทำวิจัย ตลอดจนบุคลากรทุกฝ่าย ที่มีส่วนช่วยให้โครงการวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ชื่อโครงการวิจัย การเตรียมเซอร์โคเนียความหนาแน่นสูงโดยกระบวนการฉีดขึ้นรูปวัสดุผง และการเผาผนึกโดยไม่ใช้ความดัน

ชื่อผู้วิจัย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐฐิตา ชวนเกริกกุล
เดือนและปีที่ทำวิจัยเสร็จ กรกฎาคม 2561

บทคัดย่อ

ชิ้นงานเซอร์โคเนียสามารถผลิตได้โดยกระบวนการฉีดขึ้นรูปวัสดุผง อุณหภูมิของน้ำที่ใช้ในการกำจัดตัวประสานชนิดพอลิเอทิลีนไกลคอล ส่งผลต่ออัตราการกำจัดตัวประสาน โดยอุณหภูมิที่สูงกว่าจะช่วยให้ตัวประสานถูกกำจัดได้รวดเร็วกว่า ค่าความแข็งแรงของชิ้นงานหลังกำจัดตัวประสานมีค่าสูงกว่าค่าความแข็งแรงของชิ้นงานหลังฉีดขึ้นรูป โดยมีค่าเป็น 3.02 และ 0.80 MPa ตามลำดับ ดังนั้นชิ้นงานหลังจากแช่น้ำแล้ว ยังคงมีความแข็งแรงสามารถนำเคลื่อนย้ายเพื่อไปทำการทดลองในขั้นตอนต่อไปได้ ค่าความหนาแน่นของชิ้นงานหลังเผาที่อุณหภูมิ 1300 องศาเซลเซียส มีค่า 5.67 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งเทียบได้เป็นร้อยละ 93 ของความหนาแน่นตามทฤษฎี ค่าความแข็งแรงของชิ้นงานหลังเผา มีค่าเป็น 143.9 เมกกะปาสคาล และชิ้นงานมีการหดตัวอยู่ในช่วง 22-25 % การดำเนินงานต่อไปจะเพิ่มความหนาแน่นของชิ้นงานโดยการเพิ่มอุณหภูมิในการเผา

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

Researcher: Assistant Professor Dr. Nutthita Chuankrerkkul

Date: July 2018

Abstract

Zirconia specimens were successfully produced by powder injection moulding technique. The binder (PEG) could be removed by water immersion method. 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 specimens sintered at 1300 °C was 5.67 g/cm³ i.e. 93% of the theoretical value. Specimens sintered at 1300 °C also had bending strength of 143.9 MPa and 22-25% shrinkage. Increasing sintering temperature will be performed in the future work for the density improvement.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ii
บทคัดย่อ	iii
สารบัญ	iv
สารบัญตาราง	v
สารบัญรูป	vi
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 วรรณกรรมปริทรรศน์	2
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน	5
3.1 เครื่องฉีดขึ้นรูปวัสดุผงระดับห้องปฏิบัติการ	5
3.2 การฉีดขึ้นรูปวัสดุผง	6
บทที่ 4 ผลการทดลองและการอภิปรายผล	8
4.1 ผลการศึกษาลักษณะเฉพาะของผงวัสดุและตัวประสาน	8
4.2 ผลของการฉีดขึ้นรูป	9
4.3 ผลการศึกษาการกำจัดตัวประสาน	10
4.4 ผลการศึกษาสมบัติเชิงกลของชิ้นงาน	11
4.5 ผลการศึกษาสมบัติทางกายภาพของชิ้นงาน	11
บทที่ 5 สรุปผลการดำเนินงาน	12
บรรณานุกรม	13
ภาคผนวก การนำเสนอผลงานจากส่วนหนึ่งของโครงการวิจัย	15
ประวัติผู้วิจัย	16

สารบัญตาราง

		หน้า
ตารางที่ 3.1	ส่วนผสมที่ใช้ในการทดลองฉีดขึ้นรูปวัสดุผง	6
ตารางที่ 4.1	ค่าความแข็งแรงของชิ้นงานเซอร์โคเนีย หลังฉีดขึ้นรูป หลังกำจัดตัวประสาน และหลังเผา	11

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 กระบวนการฉีดขึ้นรูปวัสดุผง (powder injection moulding)	2
รูปที่ 2.2 ผลิตภัณฑ์เซอริโคเนียที่ผลิตโดยกระบวนการฉีดขึ้นรูปวัสดุผง	4
รูปที่ 3.1 เครื่องฉีดขึ้นรูปวัสดุผงระดับห้องปฏิบัติการ	5
รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานด้วยกระบวนการฉีดขึ้นรูปวัสดุผง	7
รูปที่ 3.3 แม่พิมพ์สำหรับฉีดขึ้นรูปชิ้นงาน	7
รูปที่ 4.1 ลักษณะผงเซอริโคเนียจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	8
รูปที่ 4.2 ผลจากเครื่อง Thermogravimetric analysis ของ PEG และ PVB	9
รูปที่ 4.3 ชิ้นงานที่ได้จากการฉีดขึ้นรูปวัสดุผง	9
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงร้อยละตัวประสาน PEG ที่คงเหลือในชิ้นงาน เมื่อแช่ในน้ำที่มีอุณหภูมิ ต่าง ๆ กัน	10

บทที่ 1

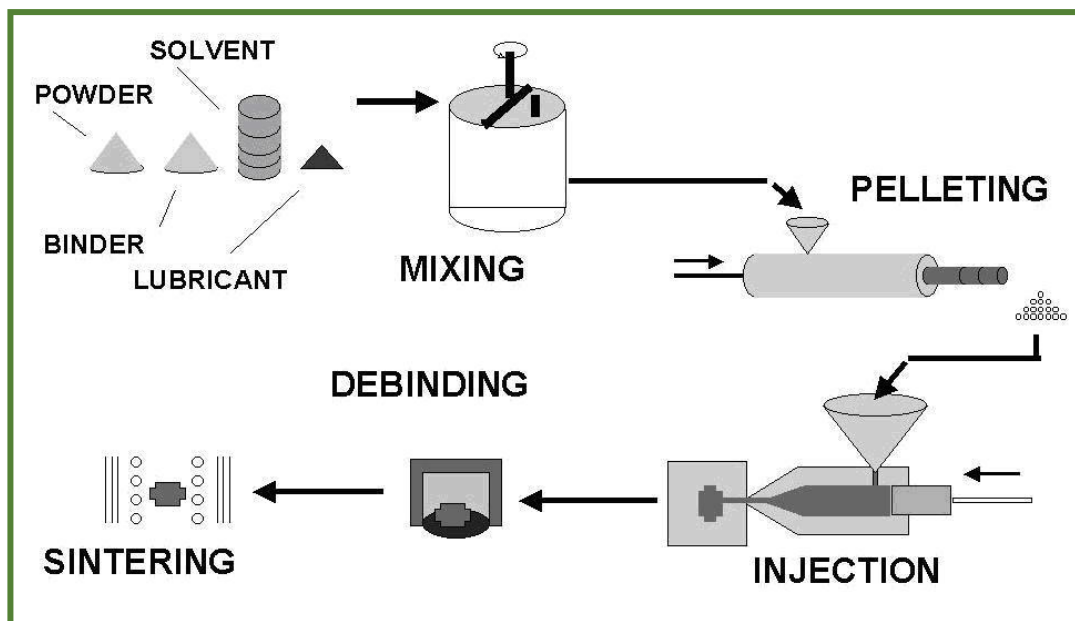
บทนำ

กระบวนการฉีดขึ้นรูปวัสดุผง เป็นกรรมวิธีที่เหมาะสมสำหรับการผลิตชิ้นส่วนที่มีขนาดเล็ก และมีรูปร่างซับซ้อน เป็นกระบวนการผลิตที่ได้รับความสนใจอย่างแพร่หลายในการผลิตผลิตภัณฑ์คุณภาพสูง ทั้งชิ้นงานทางการแพทย์ ชิ้นส่วนในอุตสาหกรรม รวมทั้งชิ้นส่วน อุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ในชีวิตประจำวัน สามารถผลิตได้ทั้งวัสดุที่เป็น โลหะ เซรามิก หรือวัสดุเชิงประกอบ เซอร์โคเนียเป็นวัสดุเซรามิกที่ได้รับความนิยมในการนำมาใช้งานประเภทต่างๆ การเผาผนึกเป็นขั้นตอนสำคัญในการผลิตเซรามิกให้มีคุณภาพสูง การผลิตให้ได้ชิ้นงานความหนาแน่นสูงมักต้องใช้อุณหภูมิเผาผนึกแบบที่มีความดันร่วมด้วย ซึ่งไม่สะดวกกับการผลิตในปริมาณมาก รวมทั้งยังมีค่าใช้จ่ายสูง ดังนั้นถ้าสามารถเลือกการเผาผนึกแบบไม่ใช้ความดันมาเป็นทางเลือก โดยทำการศึกษาตัวแปรต่างๆในกระบวนการขึ้นรูปให้เหมาะสม จะทำให้ช่วยลดค่าใช้จ่ายในการผลิตได้

วัตถุประสงค์ของโครงการนี้ เพื่อพัฒนากระบวนการผลิตที่เหมาะสมในการผลิตชิ้นงานเซอร์โคเนีย โดยกระบวนการฉีดขึ้นรูปวัสดุผงและการเผาแบบไม่ใช้ความดัน

บทที่ 2 วรรณกรรมปริทรรศน์

กระบวนการขึ้นรูปวัสดุผงมีอยู่หลายวิธี ซึ่งจะแตกต่างกันไปตามลักษณะการนำไปใช้งาน ไม่ว่าจะเป็นการอัดขึ้นรูป (dry pressing) การรีดขึ้นรูป (extrusion) การหล่อแบบ (slip casting) ตลอดจนการฉีดขึ้นรูป (powder injection moulding) ซึ่งแต่ละวิธีก็จะมีข้อดี และข้อจำกัดแตกต่างกันไป สำหรับกระบวนการฉีดขึ้นรูปวัสดุผง มีจุดเด่นสำหรับการขึ้นรูปชิ้นส่วนที่มีขนาดเล็กและรูปร่างซับซ้อน เป็นการขึ้นรูปให้มีลักษณะใกล้เคียงรูปร่างสุดท้าย (near-net shape) และสามารถผลิตได้ในปริมาณมาก ขั้นตอนการผลิตจะประกอบด้วย การผสมผงวัสดุกับตัวประสาน การฉีดขึ้นรูป การกำจัดตัวประสาน และการเผาซินเทอร์ (German and Bose, 1997) นอกเหนือจากการผลิตชิ้นส่วนอุตสาหกรรมแล้ว กระบวนการฉีดขึ้นรูปวัสดุผงยังสามารถใช้ในการผลิตตัวเรือนและสายนาฬิกาได้ (Williams, 2008) โดยใช้วัสดุประเภทเหล็กกล้าไร้สนิม หรือเซรามิกประเภทคาร์ไบด์ และเซอร์โคเนีย นอกจากนี้ยังสามารถนำมาผลิตเป็นวัสดุอุปกรณ์สำหรับใช้ในทางการแพทย์และทันตกรรม ได้เช่นกัน แผนภาพแสดงขั้นตอนของกระบวนการฉีดขึ้นรูปวัสดุผง แสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 กระบวนการฉีดขึ้นรูปวัสดุผง (powder injection moulding)

ที่มา http://portal.uc3m.es/portal/page/portal/grupos_investigacion/tecnologia_polvos/powder_technology_research_group

การเลือกชนิดตัวประสานและวิธีในการกำจัดเป็นขั้นตอนที่สำคัญในกระบวนการผลิต การกำจัดตัวประสานโดยการให้ความร้อนเพียงอย่างเดียวจะใช้เวลาานานมาก ซึ่งทำให้สิ้นเปลืองพลังงานและค่าใช้จ่าย เพื่อแก้ปัญหาเหล่านี้จึงได้มีการศึกษาวิจัยตัวประสานผสมที่องค์ประกอบส่วนใหญ่สามารถกำจัดได้โดยใช้ตัวทำละลาย โดยส่วนมากตัวประสานชนิดที่เป็นแว็กซ์จะถูกละลายด้วยเฮปแทนซึ่งเป็นสารเคมี ดังนั้นการพัฒนาตัวประสานที่สามารถละลายน้ำได้จึงมีความน่าสนใจ อันจะทำให้เป็นกระบวนการผลิตที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและลดค่าใช้จ่ายได้อีกด้วย

กลุ่มวิจัยของมหาวิทยาลัยเซฟฟิลด์ ประเทศอังกฤษได้พัฒนาตัวประสานที่มีองค์ประกอบหลักเป็นพอลิเอทิลีนไกลคอล ที่สามารถละลายน้ำได้ และองค์ประกอบรองคือพอลิเมทิลเมทาคริเลท ที่จะถูกกำจัดออกไปในขณะให้ความร้อนเพื่อทำการเผาซินเทอร์ (Chuankrerkkul, 2006) ตัวประสานผสมนี้ถูกนำมาใช้ในการผลิตวัสดุชนิดที่เป็นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรดต่างๆ (Anwar และคณะ 1995 Omar และคณะ 1999 และ Newell และคณะ 2005) ตัวประสานชนิดนี้ยังได้รับการพัฒนาให้สามารถใช้ได้กับเซรามิกผสมระหว่างอนอร์ไทด์กับซิลิเกต (Wong, 2003) ตลอดจนวัสดุประเภทที่สแตนคาร์ไบด์-โคบอลต์ฮาร์ดเมทัลอีกด้วย (Chuankrerkkul 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) กับตัวประสานชนิดพอลิไวนิลบิวทิลอล (PVB) ในการขึ้นรูปวัสดุเซรามิก เช่น อะลูมินา และวัสดุเชิงประกอบเนื้อพื้นอะลูมินา (Chomsirigul และคณะ 2014 และ Chuankrerkkul และคณะ 2016)

จากการค้นคว้างานวิจัยที่เกี่ยวข้องและจากการสืบค้นข้อมูลต่างๆ ทำให้เห็นว่างานวิจัยในโครงการนี้ที่จะพัฒนากระบวนการผลิตที่เหมาะสมในการผลิตชิ้นงานเซอร์โคเนีย โดยกระบวนการฉีดขึ้นรูปวัสดุผงและการเผาแบบไม่ใช้ความดัน และถ้าใช้ตัวประสานที่สามารถละลายน้ำได้ จะทำให้โครงการมีความน่าสนใจ โดยถ้าประสบความสำเร็จ จะทำให้ลดการใช้สารเคมี ได้กระบวนการผลิตที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ประหยัดพลังงาน ลดค่าใช้จ่าย และสามารถนำไปพัฒนาต่อยอดเพื่อผลิตเป็นชิ้นส่วนสำหรับการใช้งานประเภทต่างๆได้

ตัวอย่างผลิตภัณฑ์เซรามิกที่ผลิตโดยกระบวนการฉีดขึ้นรูปวัสดุผง แสดงดังรูปที่ 2.2 อาทิเช่น แบริกเก็ตเซรามิกทันตกรรมที่ทำจากเซอร์โคเนีย เซรามิกเฟอร์ูลสำหรับเชื่อมต่อเส้นใยนำแสง หรือสายและตัวเรือนนาฬิกาที่ทำจากเซอร์โคเนีย เป็นต้น



Dental brackets made from zirconia (Courtesy COBY)



Zirconia ferrules for fiber optic connectors
(Courtesy Senko Advanced Components)



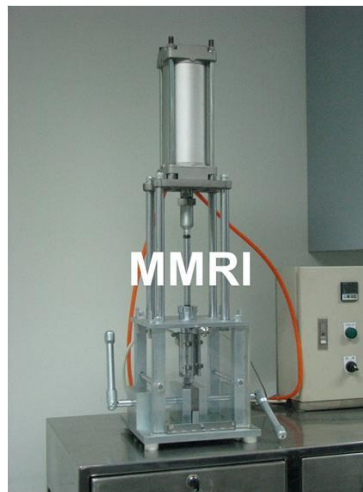
Zirconia watch parts for the luxury market (Courtesy Inmatec)

รูปที่ 2.2 ผลิตภัณฑ์เซอรัคโคเนียที่ผลิตโดยกระบวนการฉีดขึ้นรูปวัสดุผง
(ที่มา: www.pim-international.com)

บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน

3.1 เครื่องฉีดขึ้นรูปวัสดุผงระดับห้องปฏิบัติการ

เครื่องฉีดขึ้นรูปวัสดุผงระดับห้องปฏิบัติการ(รูปที่ 3.1) ที่ได้จัดสร้างขึ้นเพื่อใช้ในการดำเนินงานโครงการวิจัยนี้ เป็นเครื่องฉีดแบบใช้กระบอกลม โดยโครงการนี้เลือกใช้ปั๊มลมซึ่งควบคุมการทำงานโดยใช้ไฟฟ้า เพื่อให้สะดวกกับการปฏิบัติงาน เมื่อใช้งานจนหมดลมถึง 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 และพอลิไวนิลพิวทีรอล ปริมาณร้อยละ 85 และ 15 โดยน้ำหนักตามลำดับ เตรียมเป็นส่วนผสมที่มีปริมาณผงวัสดุเป็นร้อยละ 36 - 40 โดยปริมาตร (36 -40 vol% powder loading)

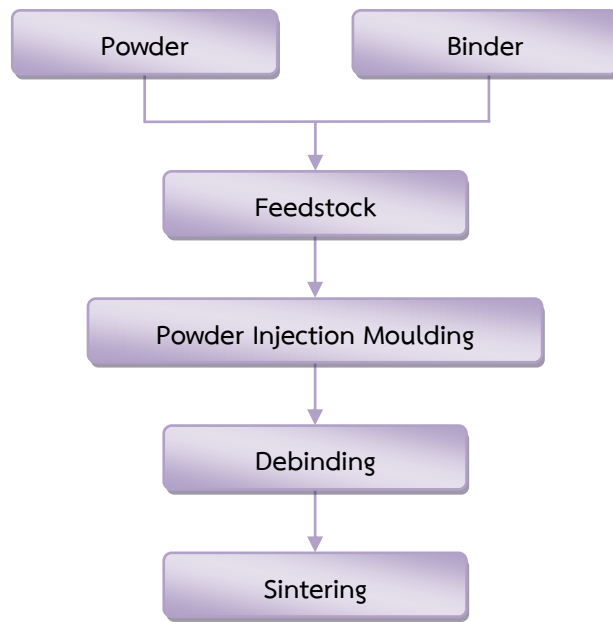
ทำการฉีดขึ้นรูปโดยใช้เครื่องฉีดขึ้นรูปวัสดุผงระดับห้องปฏิบัติการ เตรียมเป็นชิ้นงานขนาด 5 x 5 x 55 มิลลิเมตร เพื่อเตรียมชิ้นงานสำหรับการศึกษาการกำจัดตัวประสานโดยการแช่น้ำ และศึกษาอุณหภูมิการเผาไหม้ที่เหมาะสม ขั้นตอนการทดลองสามารถสรุปได้ตามแผนภาพในรูปที่ 3.1 สำหรับงานวิจัยนี้ดำเนินการโดยใช้เครื่องฉีดขึ้นรูปวัสดุผงระดับห้องปฏิบัติการ

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. นำไปทำการเผาซินเทอร์ที่อุณหภูมิ 1300-1400 องศาเซลเซียส และใช้เวลาในการรักษาอุณหภูมิสูงสุด 1 ชั่วโมง

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมที่ใช้ในการทดลองฉีดขึ้นรูปวัสดุผง

ZrO ₂	Powder loading (vol%)	PEG (wt%)	PVB (wt%)
Z36	36	85	15
Z38	38	85	15
Z40	40	85	15



รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานด้วยกระบวนการฉีดขึ้นรูปวัสดุผง

ลักษณะแม่พิมพ์แสดงดังรูปที่ 3.3



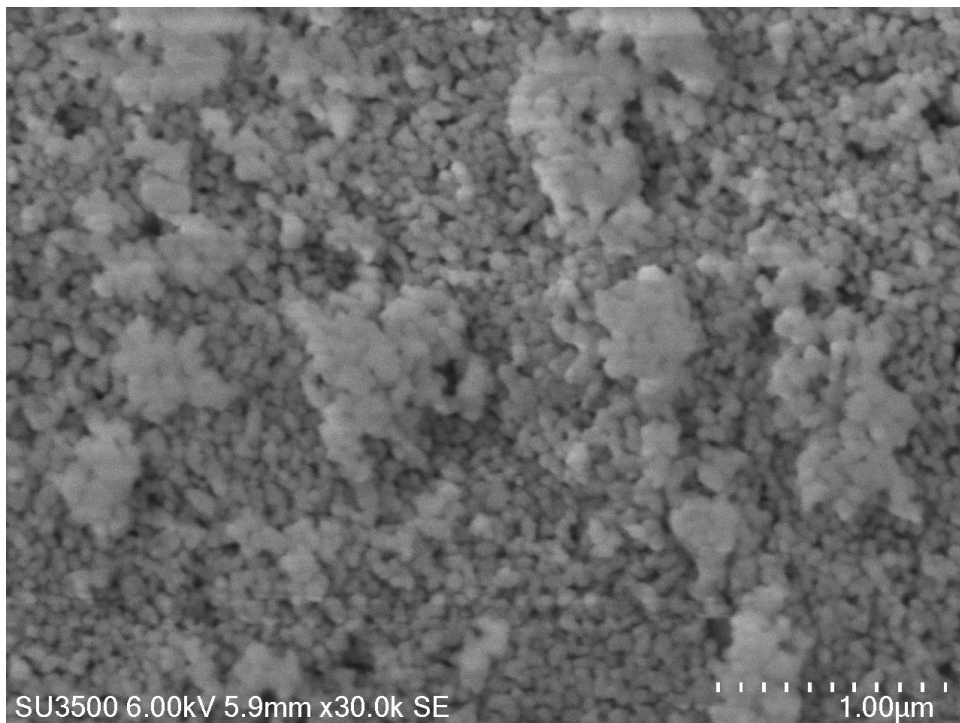
รูปที่ 3.3 แม่พิมพ์สำหรับฉีดขึ้นรูปชิ้นงาน

บทที่ 4

ผลการทดลองและการอภิปรายผล

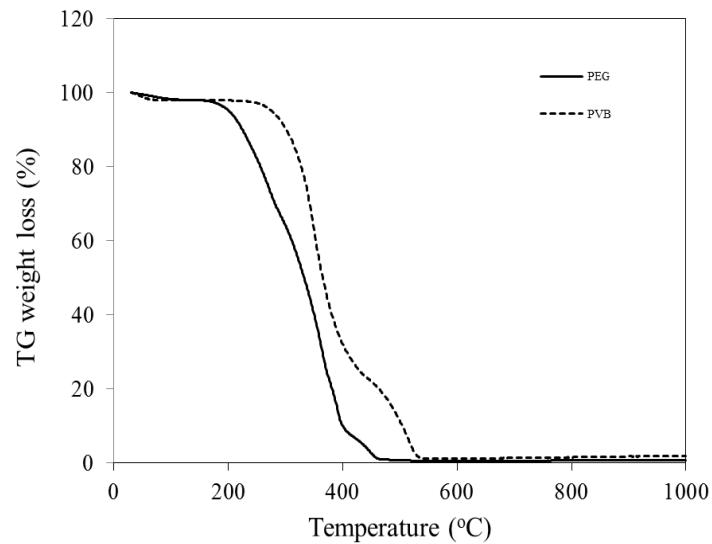
4.1 ผลการศึกษาลักษณะเฉพาะของผงวัสดุและตัวประสาน

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

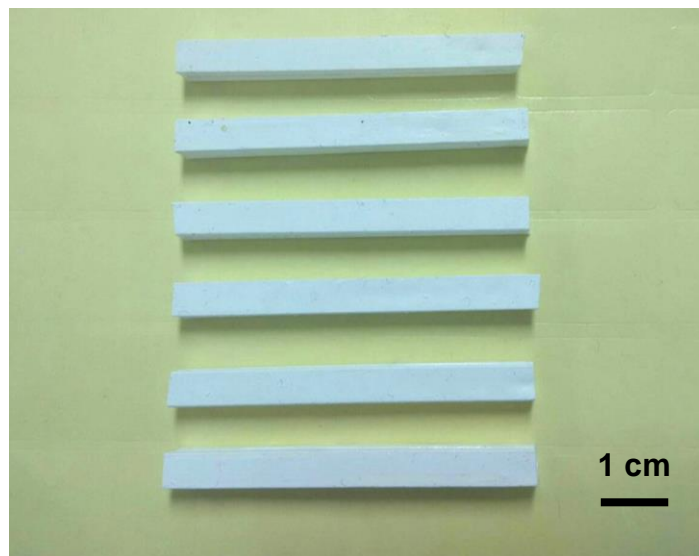
ตัวประสานที่ใช้งานวิจัยนี้ ได้แก่ PEG และ PVB รูปที่ 4.2 แสดงการสลายตัวของสารทั้งสองชนิดที่อุณหภูมิต่าง ๆ จากแผนภาพพบว่า PEG เริ่มสลายที่อุณหภูมิประมาณ 200°C และจะสลายหมดที่อุณหภูมิประมาณ 450°C สำหรับ PVB จะเริ่มสลายที่อุณหภูมิประมาณ 300°C และจะสลายหมดที่อุณหภูมิประมาณ 550°C อย่างไรก็ตาม งานวิจัยนี้ได้เลือกใช้การกำจัดตัวประสาน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



รูปที่ 4.2 ผลจากเครื่อง Thermogravimetric analysis ของ PEG และ PVB

4.2 ผลของการฉีดขึ้นรูป

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

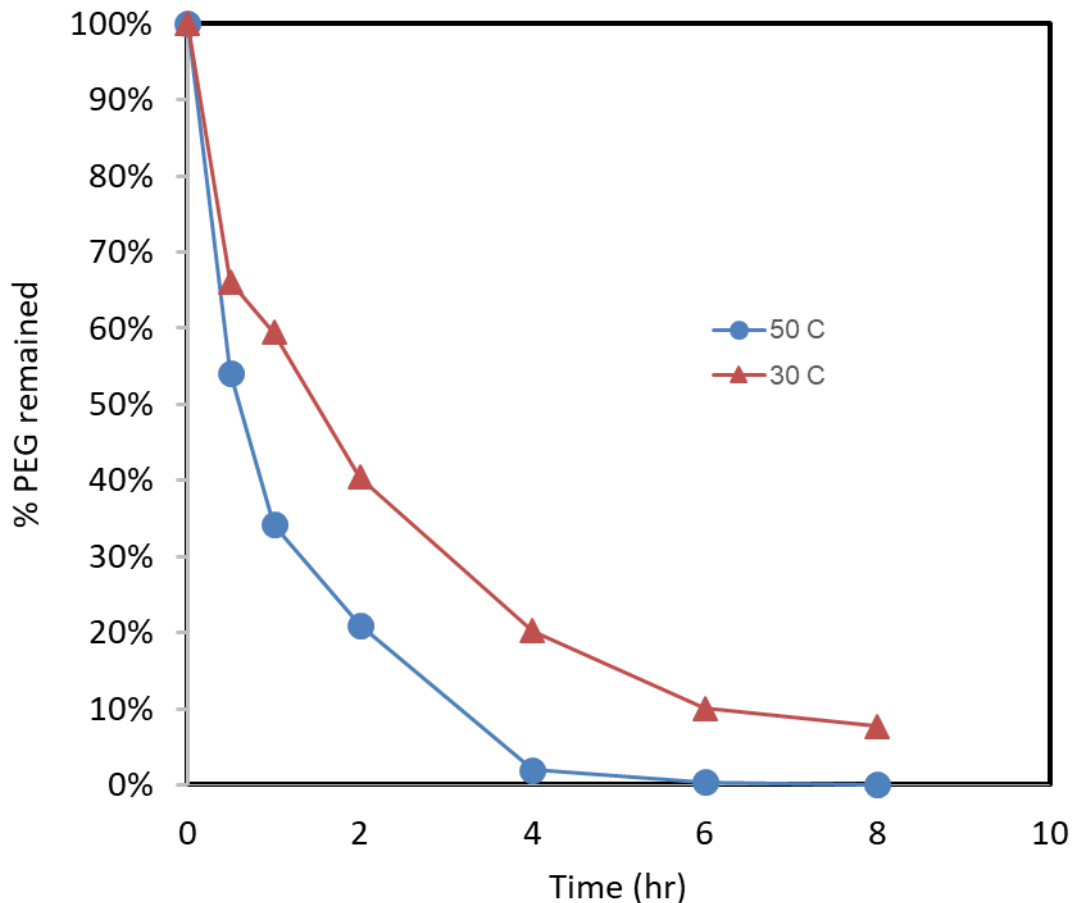


รูปที่ 4.3 ชิ้นงานที่ได้จากการฉีดขึ้นรูปวัสดุผง

4.3 ผลการศึกษาการกำจัดตัวประสาน

จากการศึกษาในเบื้องต้น พบว่าเมื่อนำชิ้นงานที่ผ่านการฉีดขึ้นรูปมาแช่ในน้ำ โดยกำหนดให้ใช้อุณหภูมิของน้ำ เป็น 30 และ 50 องศาเซลเซียส จะพบระหว่างการแช่น้ำ 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 กราฟแสดงผลของเวลาในการแช่น้ำต่อการกำจัดตัวประสาน แสดงดังรูปที่ 4.5

ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยอื่นๆ ที่ผ่านมา ซึ่งพบว่าอุณหภูมิของตัวทำละลายที่สูงกว่า สามารถทำให้ตัวประสานถูกกำจัดออกมาได้มากกว่า นอกจากนี้จะพบว่าอัตราการกำจัดตัวประสานจะเร็วในช่วงแรก (ภายในเวลา 2 ชั่วโมงแรก) สังเกตได้จากความชันของกราฟ และหลังจากนั้นอัตราการกำจัดตัวประสานจะค่อยๆ ลดลง



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงร้อยละตัวประสาน PEG ที่คงเหลือในชิ้นงาน เมื่อแช่ในน้ำที่มีอุณหภูมิต่างๆกัน

4.4 ผลการศึกษาสมบัติเชิงกลของชิ้นงาน

ผลจากการวัดค่าความแข็งแรงของชิ้นงานด้วยเทคนิค 3-point bending test แสดงดังตารางที่ 4.1 ซึ่งพบว่า ความแข็งแรงของชิ้นงานที่ได้จากการฉีดยีนรูป (green strength) มีค่าต่ำกว่าความแข็งแรงของชิ้นงานที่ผ่านการกำจัดตัวประสานชนิด PEG (หลังแช่น้ำ) แล้ว (brown strength) ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากค่าความแข็งแรงของชิ้นงานเกิดจากความแข็งแรงที่เกิดจากตัวประสานชนิด PVB ยึดจับกับอนุภาควัสดุผง โดยในสถานะที่เป็นชิ้นงานที่ได้จากการฉีดยีนรูป (green) จะมีทั้งตัวประสานชนิด PEG และ PVB อยู่ในชิ้นงาน การยึดจับอนุภาคของ PVB อาจจะไม่เต็มที่ เนื่องจากมีการรบกวนจาก PEG และเมื่อแช่น้ำเพื่อกำจัด PEG ออกไปแล้ว จะหลงเหลืออยู่เพียงแต่ PVB เท่านั้น (brown) จึงทำให้การยึดอนุภาคเป็นไปได้ดีกว่า

เมื่อเปรียบเทียบค่าความแข็งแรงของชิ้นงานหลังเผาที่อุณหภูมิ 1300 และ 1350 องศาเซลเซียส จะพบว่าเมื่อความแตกต่างของอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาเพียงแค่ 50 องศาเซลเซียสในการทดลองนี้ ไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าความแข็งแรงของชิ้นงาน

ตารางที่ 4.1 ค่าความแข็งแรงของชิ้นงานเซอร์โคเนีย หลังฉีดยีนรูป (Green strength) หลังกำจัดตัวประสาน (Brown strength) และหลังเผา (Sintered strength)

สูตร	Green strength (MPa)	Brown strength (MPa)	Strength (1300 °C) (MPa)
Z38	0.80 ± 0.05	3.02 ± 0.16	143.9 ± 26.1

4.5 ผลการศึกษาสมบัติทางกายภาพของชิ้นงาน

เมื่อทำการวัดค่าความหนาแน่นของชิ้นงานหลังเผา โดยอาศัยหลักการแทนที่ด้วยน้ำ พบว่าเมื่อทำการเผาผนึก (sintering) ชิ้นงานที่อุณหภูมิ 1300 องศาเซลเซียส ชิ้นงานมีความหนาแน่นเป็น 5.67 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร หรือคิดเป็นร้อยละ 93 ของค่าความหนาแน่นตามทฤษฎี (6.05 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร) ในการทำการทดลองช่วงต่อไป คาดว่าจะเพิ่มอุณหภูมิในการเผาเป็น 1400 องศาเซลเซียส ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้ชิ้นงานเกิดการเชื่อมติดกันได้มากขึ้นส่งผลให้ค่าความหนาแน่นเพิ่มขึ้น

ชิ้นงานที่ผ่านการเผาซินเทอร์ที่อุณหภูมิ 1300 องศาเซลเซียส มีค่าร้อยละการหดตัวอยู่ในช่วง 22-25 % ซึ่งเป็นไปตามสมมุติฐานที่ว่า ชิ้นงานจะหดตัวมากเนื่องจาก มีปริมาณของแข็งในส่วนผสมค่อนข้างต่ำ (น้อยกว่าร้อยละ 40 โดยปริมาตร)

บทที่ 5

สรุปผลการดำเนินงาน

ชิ้นงานเซอร์โคเนียสามารถผลิตได้โดยกระบวนการฉีดขึ้นรูปวัสดุผง อุณหภูมิของน้ำที่ใช้ในการกำจัดตัวประสานชนิดพอลิเอทิลีนไกลคอล ส่งผลต่ออัตราการกำจัดตัวประสาน โดยอุณหภูมิที่สูงกว่าจะช่วยให้ตัวประสานถูกกำจัดได้รวดเร็วกว่า แต่จะสิ้นเปลืองพลังงาน ค่าความแข็งแรงของชิ้นงานหลังกำจัดตัวประสานมีค่าสูงกว่าค่าความแข็งแรงของชิ้นงานหลังฉีดขึ้นรูป โดยมีค่าเป็น 3.02 และ 0.80 MPa ตามลำดับ ดังนั้นชิ้นงานหลังจากแช่น้ำแล้ว ยังคงมีความแข็งแรงสามารถนำเคลื่อนย้ายเพื่อไปทำการทดลองในขั้นตอนต่อไปได้

ค่าความแข็งแรงของชิ้นงานหลังเผาที่อุณหภูมิ 1300 องศาเซลเซียส มีค่าเป็น 143.9 เมกะปาสคาล ค่าความหนาแน่นของชิ้นงานหลังเผา มีค่า 5.67 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งเทียบได้เป็นร้อยละ 93 ของความหนาแน่นตามทฤษฎี ชิ้นงานมีการหดตัวอยู่ในช่วง 22-25 % เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 1300 องศาเซลเซียส

โดยการดำเนินงานระยะต่อไป จะทำการผลิตชิ้นงานเพิ่มเติม และเพิ่มอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาเป็น 1400 องศาเซลเซียส องค์ความรู้ที่ได้จากการดำเนินงานนี้ สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการผลิตชิ้นส่วนเซรามิกวิศวกรรมชนิดอื่นๆ และ/หรือวัสดุผงชนิดต่างๆ เพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งานได้หลากหลายประเภท

ส่วนหนึ่งของผลงานที่ได้จากโครงการวิจัยเรื่องนี้ ได้นำเสนอในการสัมมนาที่ Doshisha University ประเทศญี่ปุ่น เมื่อเดือนกรกฎาคม 2561 ในขณะที่ได้รับทุนจากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยให้ไปทำวิจัย ณ ต่างประเทศ เป็นเวลา 1 เดือน

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

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.

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.

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. 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

ภาคผนวก

ส่วนหนึ่งของผลงานที่ได้จากโครงการวิจัยเรื่องนี้ ได้นำเสนอในการสัมมนาที่ Doshisha University ประเทศญี่ปุ่น เมื่อเดือนกรกฎาคม 2561 ในขณะที่ได้รับทุนจากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ให้ไปทำวิจัย ณ ต่างประเทศ เป็นเวลา 1 เดือน



ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ - นามสกุล

ดร. ณัฐธิตา ชวนเกริกกุล

Dr. Nutthita Chuankrerkkul

ตำแหน่งปัจจุบัน

ผู้ช่วยศาสตราจารย์

หน่วยงานและสถานที่ติดต่อได้สะดวก

สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ซอยจุฬาลงกรณ์ 12 ถนนพญาไท แขวงวังใหม่

เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330

โทร. 02-218-4243 โทรสาร 02-611-7586

E-mail : Nutthita.C@chula.ac.th

ประวัติการศึกษา

มหาวิทยาลัย	ปริญญา	สาขาวิชา	ปีที่ได้รับ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	วิทยาศาสตรบัณฑิต	วัสดุศาสตร์	2540
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต	เทคโนโลยีเซรามิก	2542
University of Sheffield, UK	Doctor of Philosophy	Engineering Materials	2549

สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ

วัสดุศาสตร์ กระบวนการขึ้นรูปวัสดุผง

สาขาวิทยาศาสตร์กายภาพและคณิตศาสตร์

สาขาวิศวกรรมศาสตร์และอุตสาหกรรมวิจัย

ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัยทั้งภายในและภายนอกประเทศ

หัวหน้าโครงการวิจัย

1. การเตรียมวัสดุเชิงประกอบเหล็กกล้าไร้สนิมกับทั้งสแตนคาร์ไบด์โดยวิธีทางโลหะผง
แหล่งทุน: สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.)
2. สถานภาพของจริยธรรมและมาตรการความปลอดภัยนาโนเทคโนโลยีในประเทศไทย
แหล่งทุน: ศูนย์นวัตกรรมนาโนเทคโนโลยี ภายใต้โครงการจุฬาฯ 100 ปี
3. การฉีดขึ้นรูปวัสดุผง
แหล่งทุน: สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา
4. การพัฒนาตัวประสานผสมสำหรับการฉีดขึ้นรูปวัสดุผงแม่เหล็กเฟอร์ไรต์
แหล่งทุน : ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ
5. กระบวนการฉีดขึ้นรูปวัสดุผงทั้งสแตนคาร์ไบด์นิกเกิล
แหล่งทุน : ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ

6. การพัฒนาเทคนิคการเตรียมตัวเรือนด้วยกระบวนการฉีดขึ้นรูปวัสดุผง
แหล่งทุน : สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ

งานวิจัยที่ทำเสร็จแล้ว

1. การพัฒนาตัวประสานผสมสำหรับการฉีดขึ้นรูปวัสดุผงแม่เหล็กเฟอร์ไรต์ (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. การพัฒนากระบวนการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนปราศจากการใช้ฟลักซ์ด้วยวัสดุเคลือบโลหะ
โครงสร้างนาโน (ผู้ร่วมวิจัย)
แหล่งทุน : สถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย 2552
6. การพัฒนากระบวนการฉีดขึ้นรูปวัสดุผงอะลูมินาโดยใช้ตัวประสานที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม
(หัวหน้าโครงการ)
แหล่งทุน : สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

งานวิจัยที่กำลังทำ

1. การเตรียมเซอร์โคเนียความหนาแน่นสูงโดยกระบวนการฉีดขึ้นรูปวัสดุผง และการเผาผนึกโดยไม่ใช้
ความดัน (หัวหน้าโครงการ)
แหล่งทุน : สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
สถานภาพ: ดำเนินการไปแล้ว ร้อยละ 50
2. การผลิตชิ้นงานที่มีรูพรุนสำหรับแอโนดของเซลล์เชื้อเพลิงออกไซด์ของแข็งด้วยการฉีดขึ้นรูปวัสดุผง
(หัวหน้าโครงการ)
แหล่งทุน : มูลนิธิกระจกเงา
สถานภาพ: ดำเนินการไปแล้ว ร้อยละ 95

ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่

1. Sooksaen, P. and **Chuankrerkkul, N.** (2017) "Morphology-design and semiconducting characteristics of zinc oxide nanostructures under microwave irradiation." Integrated Ferroelectrics, Vol. 177, 90-102.
2. **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.

3. 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.
4. 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.
5. **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.
6. 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).
7. 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).
8. **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.
9. 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.
10. 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.
11. 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.
12. **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.

13. Chomsirigul, N., Khuanthong, O., Sooksaen, 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.
14. Sooksaen, 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.
15. 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.
16. 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.
17. 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.
18. 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.
19. 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.
20. **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.
21. **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.
22. 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

23. **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.
24. 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.
25. 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.
26. 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.
27. 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.
28. **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.
29. 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.
30. 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.
31. 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.
32. Wangyao, P., **Chuankrerkkul, N.**, Polsilapa, S., Sopon, 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.
33. **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.

34. **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.

35. **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.

36. 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.