

## ผลของเงื่อนไขการขึ้นรูปด้วยการหล่อแบบสลิปต่อการแตกร้าว ของชิ้นงานซิลิโคนคาร์ไบด์ที่เผาแบบประสานด้วยไนไตรด์

มานะ ชิวชื่น<sup>1\*</sup> และ อภิวัฒน์ มุตตามระ<sup>2</sup>

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี 12120

\* Corresponding Author: mcheewachuen@gmail.com

<sup>1</sup> นักศึกษาระดับปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์

<sup>2</sup> ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์

### ข้อมูลบทความ

### บทคัดย่อ

#### ประวัติบทความ :

รับเพื่อพิจารณา : 20 กุมภาพันธ์ 2562

แก้ไข : 21 สิงหาคม 2562

ตอบรับ : 10 ตุลาคม 2562

#### คำสำคัญ :

ความแข็งแรงก่อนเผา /

ความหนาแน่นก่อนเผา /

ซิลิโคนคาร์ไบด์ประสานด้วยไนไตรด์ /

เอ็นพีไอเอสซี / พลาสติก /

อัตราการดูดซึมน้ำ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของเงื่อนไขการขึ้นรูปด้วยการหล่อแบบสลิปต่อการแตกร้าวของชิ้นงานซิลิโคนคาร์ไบด์ที่เผาแบบประสานด้วยไนไตรด์เนื่องจากการจับยกเพื่อเคลื่อนย้ายชิ้นงานในกระบวนการผลิต ทั้งนี้ ทดลองโดยกำหนดตัวแปรเป็นความละเอียดของวัตถุดิบซิลิโคนคาร์ไบด์ตั้งแต่ ~49, ~52, ~68 และ ~71 ไมครอน ร่วมกับการใช้ซิลิโคนที่มีความละเอียด ~11 ไมครอน รวมทั้งหมด 4 สูตร และทดสอบอัตราการดูดซึมน้ำของแบบพลาสติก รวมถึงทดสอบความชื้นของแบบก่อนการหล่อชิ้นงาน เพื่อหาค่าตัวแปรที่ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงก่อนเผา พบว่า ค่าความละเอียดของวัตถุดิบซิลิโคนคาร์ไบด์ที่ให้ค่าความหนาแน่นและค่าความแข็งแรงก่อนเผาสูงที่สุด คือ ~68 ไมครอน ตามด้วย ~71, ~52 และ ~49 ไมครอน ส่วนปัจจัยอื่นที่ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงก่อนเผาสูง คือ การดูดซึมน้ำของแบบพลาสติกควรอยู่ที่ระหว่าง 0.4-0.6 กรัมต่อตารางเซนติเมตรต่อนาที่ และความชื้นของแบบก่อนการหล่อชิ้นงานไม่ควรเกิน ร้อยละ 6.5 การควบคุมตัวแปรทั้ง 3 ตัวทำให้ได้ค่าความแข็งแรงก่อนการเผาในช่วง 35 ถึง 55 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และให้สมบัติทางกายภาพของชิ้นงานหลังการเผาดีขึ้นด้วย

---

## The Effect of Slip Casting Conditions upon Cracking of Nitride-Bonded Silicon Carbide

Mana Cheewachuen<sup>1\*</sup> and Apiwat Muttamara<sup>2</sup>

Thammasat University, Klong luang, Pathumthani 12120

\* Corresponding Author: [mcheewachuen@gmail.com](mailto:mcheewachuen@gmail.com).

<sup>1</sup> Master Student, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering.

<sup>2</sup> Assistant Professor, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering.

---

### Article Info

### Abstract

#### Article History:

Received: February 20, 2019

Revised: August 21, 2019

Accepted: October 10, 2019

---

#### Keywords:

Green Strength /

Green Density /

Nitride Bonded Silicon Carbide (NBSC) /

Plaster / Water Absorption Rate

This study aimed to investigate the effect of slip casting conditions upon cracking of Nitride Bonded Silicon Carbide (NBSC) as a result of transportation and handling in subsequent production processes. NBSC of four different compositions were fabricated by varying the silicon carbide particle size distribution in terms of D50 at ~49, ~52, ~68 and ~71 microns. The particles were mixed with silicon with the particle size of ~11 micron in a plaster mould. Water absorption rate of the plaster was then tested, along with moisture remaining in the plaster prior to casting, to identify the factors affecting NBSC green strength. Results showed that green strength and green density of the ~68 micron mixture exhibited the highest results; this was followed in descending order by the samples with the silicon carbide particles of ~71, ~52, and ~49 microns. Water absorption rate of plaster in the range of 0.4 to 0.6 g/cm<sup>2</sup>/min resulted in higher green strength; the remaining moisture prior to casting should be limited to under 6.5%. By controlling all the factors affecting NBSC green strength improvement of the strength in the range of 35 - 55 kg/cm<sup>2</sup> was achieved; physical properties after firing were likewise improved.

---

## 1. บทนำ

ปัจจุบันอุตสาหกรรมเซรามิก ล้วนต้องพึ่งพาการใช้พลังงานเป็นอย่างมากโดยเฉพาะกระบวนการเผาโดยในปัจจุบันนิยมใช้อุปกรณ์รองรับชิ้นงานในเตาเผาแบบซิลิคอนคาร์ไบด์ขั้นสูง (Advanced Silicon Carbide kiln furniture) ประเภท ซิลิคอนคาร์ไบด์ประสานด้วยไนไตรด์ (Nitride Bonded Silicon Carbide (NBSC)) เพราะมีสมบัติด้านความแข็งแรงสูงมาก ทำให้สามารถลดความหนาของอุปกรณ์รองรับชิ้นงานในเตาเผา ลด ส่งผลให้น้ำหนักของอุปกรณ์รองรับชิ้นงานในเตาเผานั้นลดลง แต่ยังสามารถรับน้ำหนักได้เท่าเดิม ทำให้ประหยัดพลังงานที่ใช้ในการเผาได้ แต่เนื่องจากในกระบวนการผลิตนี้ ชิ้นงานก่อนเผาจะมีความแข็งแรงต่ำมาก ทำให้เกิดของเสียจำนวนมากจากการเคลื่อนย้ายไปในกระบวนการถัดๆ ไป ทำให้ต้นทุนสูงและไม่สามารถแข่งขันได้ ดังนั้นผู้วิจัยจึงต้องการศึกษาเพื่อพัฒนาความแข็งแรงก่อนเผาของ ซิลิคอนคาร์ไบด์ประสานด้วยไนไตรด์ ด้วยการควบคุมปัจจัยตัวแปรที่เหมาะสม ในขั้นตอนการผสมและการหล่อ เพื่อให้ความหนาแน่นของชิ้นงานหลังการหล่อสูงขึ้นส่งผลให้ความแข็งแรงก่อนการเผาสูงขึ้น เมื่อมีการผลิตและเคลื่อนย้ายในกระบวนการปกติแล้วของเสียร้ายในกระบวนการผลิตลดลง ทำให้ปริมาณผลผลิต (Yield) สูงขึ้น โดยที่ไม่กระทบ

ต่อสมบัติหลังเผาของชิ้นงาน

## 2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 ความรู้เกี่ยวกับซิลิคอนคาร์ไบด์ประสานด้วยไนไตรด์

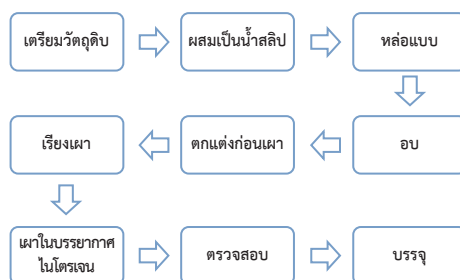
ซิลิคอนคาร์ไบด์ประสานด้วยไนไตรด์ สังเคราะห์จากการผสมซิลิคอนคาร์ไบด์เข้ากับ ซิลิคอนแล้วนำไปขึ้นรูปจากนั้นนำไปเผาในบรรยากาศไนโตรเจน เพื่อให้เกิดซิลิคอนไนไตรด์จากการทำปฏิกิริยาของ ซิลิคอน และก๊าซไนโตรเจน เรียกปฏิกิริยานี้ว่า รีแอคชั่นบอนด์ (Reaction Bond) [1][2] ดังนี้



### 2.2 กระบวนการผลิต

ขึ้นรูปโดยการเทแบบ โดยนำวัตถุดิบมาผสมเป็นน้ำดินแล้วมาเทลงในแบบพลาสติก ซึ่งจัดทำในรูปร่างที่ต้องการ รอบจนแข็งได้แล้วแกะแบบออกมาแล้วนำไปอบจะได้ชิ้นงานหลังอบ จากนั้นจึงนำไปเผาในบรรยากาศไนโตรเจน ตามรูปที่ 1 [3-4]

#### กระบวนการผลิต ซิลิคอนคาร์ไบด์ ประสานด้วยไนไตรด์



รูปที่ 1 กระบวนการผลิต ซิลิคอนคาร์ไบด์ ประสานด้วยไนไตรด์

## 2.3 สมบัติหลังการหล่อ

### 2.3.1 ความแข็งแรงก่อนเผา

งานวิจัยของ Pizette และคณะ [5] อธิบายความแข็งแรงก่อนเผาเกิดจากแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals)

ระหว่างอนุภาค โดยการจะทำให้ความแข็งแรงก่อนเผา สูงขึ้นได้ต้องอาศัยการเพิ่มการกดให้ติดกันแน่น (Compaction) ภายในโดยเพิ่มจุดเชื่อมต่อของอนุภาคเพื่อให้เกิดความแข็งแรงสูงขึ้นหรือเพิ่มความหนาแน่นก่อนเผาให้มากขึ้นนั่นเอง [5]

**2.3.2 แนวทางการทดลอง**

งานวิจัยของ Rakshit และคณะ [6] ที่เกี่ยวกับผลของขนาดวัตถุดิบซิลิคอนคาร์ไบด์ ที่มีค่าความหยาบเฉลี่ยตั้งแต่ 9.7 ไมครอน 13.8 ไมครอน และ 60.0 ไมครอน และส่วนผสมของทั้ง 3 ขนาด กับซิลิคอนที่มีขนาดอนุภาค 4.8 ไมครอน พบว่าขนาดของวัตถุดิบที่ให้ความหนาแน่นสูงที่สุดคือการใช้ซิลิคอนคาร์ไบด์แบบผสม ในอัตราส่วน (ละเอียด : กลาง : หยาบ = 30 : 35 : 35 ตามน้ำหนัก) มีรูพรุนที่ต่ำและมีขนาดรูพรุนที่เล็ก ส่งผลให้มีความหนาแน่นก่อนเผาที่สูง และความแข็งแรงหลังเผาสูงไปด้วย [6]

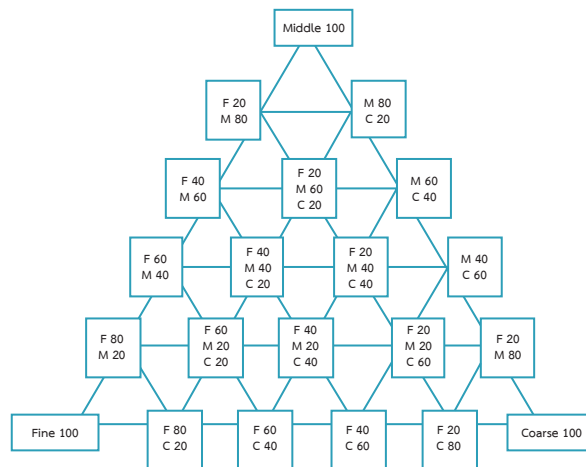
**2.4 การศึกษาขนาดและปริมาณรูพรุน**

ศึกษาโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบส่องกราด (scanning electron microscope) รุ่น JSM-IT200 จากบริษัท Jeol (Japan) แล้วเปรียบเทียบขนาดและร้อยละปริมาณรูพรุนโดยวิธีตาราง ซึ่งรูพรุนนี้จะส่งผลให้ ความแข็งแรงหลังอบลดลง และทำให้ชิ้นงานระหว่างการใช้งานทำปฏิกิริยากับออกซิเจน ทำปฏิกิริยาออกซิเดชัน [7] ส่งผลให้อายุการใช้งานของซิลิคอนคาร์ไบด์ประสานด้วยไนไตรด์สั้นลงได้

**3. การดำเนินการวิจัย**

จากปัจจัยที่กล่าวมาแล้วในข้อที่ 2.3.2 นำมาปรับใช้กับการวิจัยครั้งนี้โดยนำผงซิลิคอนคาร์ไบด์ที่มีความละเอียด D50 2.5 ไมครอน 18 ไมครอน และ 120 ไมครอน มาผสมกันเพื่อหา

อัตราส่วนการผสมที่ทำให้เกิดการยึดเกาะตัวกันสูง เพื่อให้เกิดความหนาแน่นที่สูง ตามรูปที่ 2 แล้วเลือก 4 อัตราส่วนการผสมที่นำไปผสมเป็นน้ำดิน แล้วหาค่าขนาดการกระจายตัวของอนุภาควัดโดยเครื่อง Laser Particle Size Analyzer (dry) จากนั้นนำไปหล่อในแบบพลาสติกที่จัดเตรียมไว้ รูปร่างเป็นแท่งทดสอบสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาด 140x20x6 มม. นำชิ้นงานไปอบ แล้วหาค่าความหนาแน่นหลังการอบ และค่าความแข็งแรงหลังการอบของชิ้นงาน เปรียบเทียบกับค่าความหนาแน่นหลังการอบ แล้วนำไปเผาเพื่อตรวจสอบสมบัติทางกายภาพหลังการเผา โดยค่าความหนาแน่นอ้างอิงมาตรฐาน ASTM C 830-00 (06) ค่าความแข็งแรงวัดจากค่า Modulus of Rupture แบบ 3 Points Bending โดยใช้เครื่อง Universal Testing Machine รุ่น AG-IS จากบริษัท Shimadzu (Japan) และทดสอบอัตราการดูดซึมน้ำของแบบพลาสติกที่มีผลต่อความหนาแน่นและความแข็งแรงของชิ้นงานในช่วงระหว่าง 0.4 ถึง 0.8 กรัมต่อตารางเซนติเมตรต่อनाที่ศึกษาจากน้ำหนักของแบบพลาสติกที่เพิ่มขึ้นหลังการหล่อจากการศึกษาแบบจำนวน 3 ชุดทำซ้ำ 3 ครั้ง โดยมีปัจจัยที่เป็นตัวแปรควบคุมคือเวลาการหล่อแบบ อยู่ที่ 15 + 1 นาที น้ำหนักของน้ำดินที่เทลงไปอยู่ที่ 50-60 กรัม/ชิ้นทดสอบ ค่าความชื้นที่น้ำดินอยู่ที่ 10-15 เดซิพาสกาลวินาที ค่าความชื้นอยู่ที่ร้อยละ 11.3-12.4 ค่าความเป็นกรดต่างอยู่ที่ (pH) 7.8-8.4 อุณหภูมิขณะทำการหล่อแบบควบคุมที่ 20-27 องศาเซลเซียส [8-12]



รูปที่ 2 การออกแบบการทดลองเพื่อหาอัตราส่วนที่ทำให้เกิดความหนาแน่นของวัตถุดิบสูง

#### 4. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

จากผลการทดลอง ทำการวิเคราะห์ผลการทดลองได้ดังนี้

##### 4.1 ค่าขนาดการกระจายตัวต่อค่าการยึดเกาะตัวของวัสดุดิบที่เหมาะสม เพื่อปรับปรุงความหนาแน่น และความแข็งแรงก่อนเผาของชิ้นงาน

จากการวิจัยของ Rakshit และคณะ [6] ทำให้ทราบว่า การใช้วัสดุดิบซิลิคอนคาร์ไบด์ที่หยาบจะมีผลให้ความหนาแน่นสูงขึ้น เนื่องจากรูพรุนภายในชิ้นงานจะลดลง และหากมีการผสมกันอย่างได้อัตราส่วนแล้วนั้นจะทำให้ขนาดของรูพรุนโดยรวมลดลง ส่งผลให้ความหนาแน่นสูงขึ้น และความแข็งแรงก่อนเผาสูงขึ้นด้วยเช่นกัน โดยความสัมพันธ์ของขนาดอนุภาคต่อความหนาแน่นของวัสดุดิบเป็นดังรูปที่ 3 ขนาดของอนุภาคที่หยาบขึ้นจะทำให้ความหนาแน่นสูงขึ้นตามไปด้วย แต่การเลือกขนาดของอนุภาคเพื่อนำมาผสมเป็นน้ำดินนั้น เนื่องจากปริมาณสารอินทรีย์ สารช่วยกระจายตัว และน้ำที่ใช้ผสมมีการกำหนดเป็นค่าคงที่ เพราะหากมีการใช้สารอินทรีย์หรือน้ำในการผสมมากขึ้นจะส่งผลต่อปริมาณรูพรุนภายในชิ้นงานหลังการเผา และส่งผลเสียต่อสมบัติทาง

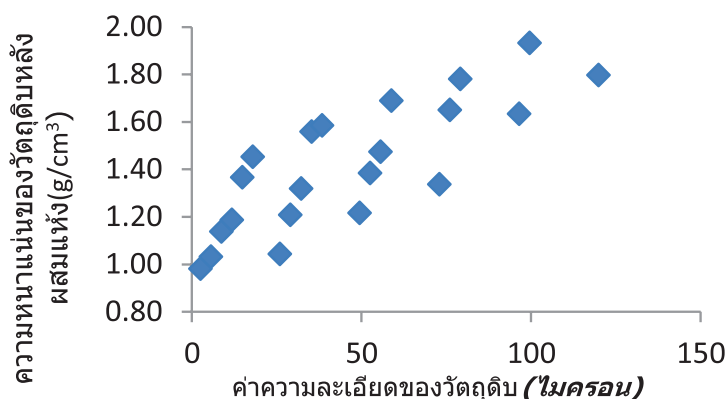
กายภาพหลังการเผาได้ ทางผู้วิจัยจึงเลือก 4 อัตราส่วนการผสมที่สามารถผสมเป็นน้ำดินได้ มีค่าขนาดการกระจายตัวอยู่ที่ 49, 52, 68 และ 71 ไมครอนเพื่อมาทดลองต่อไป

ผลจากการนำน้ำดินที่ใช้ขนาดอนุภาคต่างกันทั้ง 4 สูตรมาหล่อจากนั้นนำมาหาค่าความหนาแน่นของชิ้นงานหลังอบ และค่าความแข็งแรงหลังอบ พบว่าสูตรที่ใช้วัสดุดิบที่หยาบกว่าจะมีแนวโน้มที่จะมีความหนาแน่นและความแข็งแรงหลังอบสูงกว่า ดังรูปที่ 4 และ 5 เพราะความพรุนตัวในชิ้นงานต่างกัน ศึกษาความสัมพันธ์ของความหนาแน่นและความแข็งแรงหลังอบ ดังรูปที่ 6 และทำการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นได้ดังสมการที่ 2

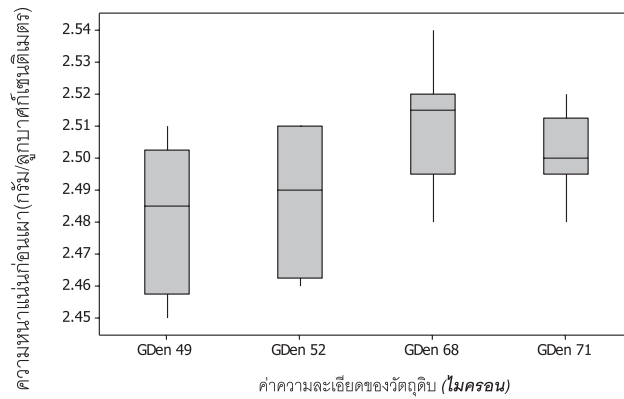
$$\text{Green strength} = (-684) + 290 * \text{Green Density} \quad (2)$$

$$R\text{-sq (adj)} = 68.6\%$$

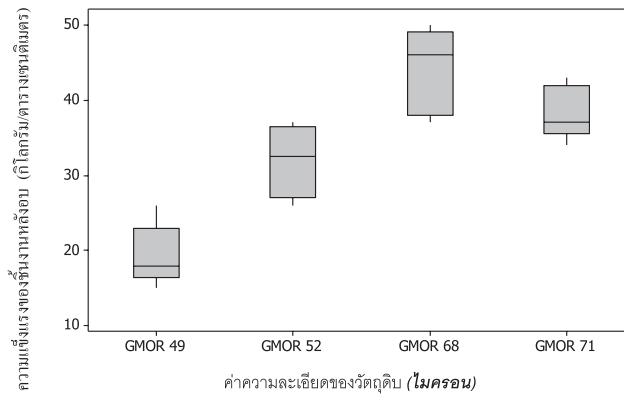
จะพบว่าความหนาแน่นและความแข็งแรงหลังอบมีความสัมพันธ์แบบแปรตามกัน โดยจะมีการศึกษาปริมาณรูพรุนหลังการเผาโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเพื่อยืนยันผลการทดลองอีกครั้ง



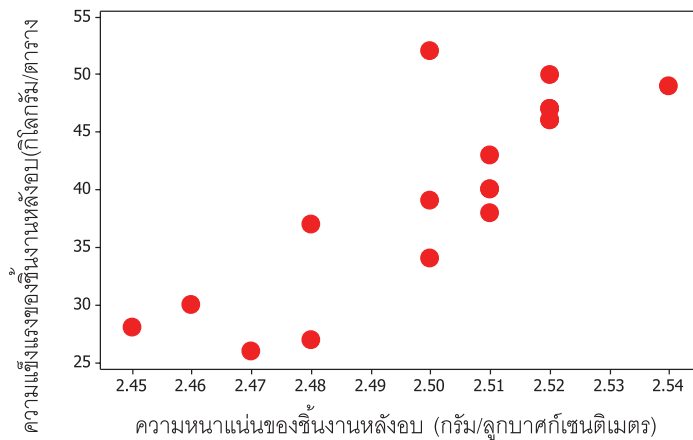
รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ของความแข็งแรงวัสดุดิบกับความหนาแน่น



รูปที่ 4 ค่าความหนาแน่นของชั้นงานหลังอบที่ขนาดอนุภาคของวัสดุดิบแตกต่างกัน



รูปที่ 5 ค่าความแข็งแรงของชั้นงานหลังอบที่ขนาดอนุภาคของวัสดุดิบแตกต่างกัน

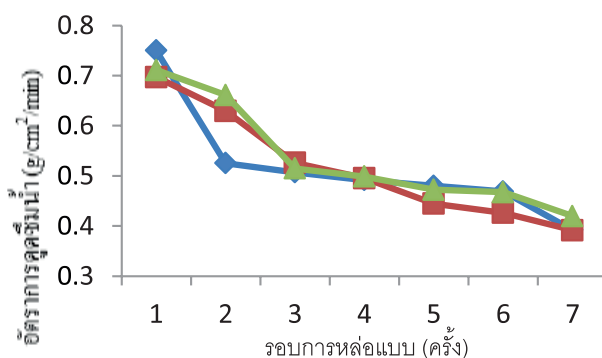


รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ของความหนาแน่นหลังอบกับความแข็งแรงหลังอบ

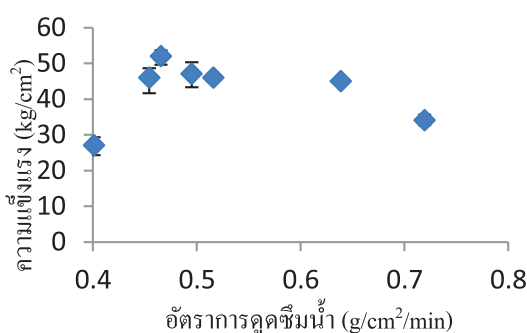
#### 4.2 อัตราการดูดซึมน้ำของแบบพลาสติก ต่อความแข็งแรงของชิ้นงาน

ผลจากการศึกษาอัตราการดูดซึมน้ำของแบบพลาสติก โดยศึกษาผ่านน้ำหนักของแบบพลาสติกที่เพิ่มขึ้น หลังการหล่อ พบว่าหากเริ่มต้นอัตราการดูดซึมน้ำของแบบพลาสติกที่ประมาณ 0.7 กรัมต่อตารางเซนติเมตรต่อนาที หลังการหล่อแต่ละรอบอัตราการดูดซึมน้ำจะค่อยๆ ลดลงจนเหลือประมาณ 0.4 กรัมต่อตารางเซนติเมตรต่อนาที ตามรูปที่ 7 จากนั้นนำชิ้นงานที่หล่อได้ไปอบและหาค่าความแข็งแรงได้ดังรูปที่ 8 พบว่าอัตราการดูดซึมน้ำที่เหมาะสมทำให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงก่อนการเผาที่สูง โดยแบบพลาสติกต้องมีอัตราการ

ดูดซึมน้ำอยู่ในช่วงระหว่าง 0.45 – 0.60 กรัมต่อตารางเซนติเมตรต่อนาที เนื่องจากอัตราการดูดซึมน้ำที่เร็วเกินไปในเวลาหล่อแบบที่เท่ากัน จะส่งผลให้ผิวหน้าของชิ้นงานแข็ง ความชื้นยังคงค้างอยู่ภายในไม่สามารถออกได้ เกิดเป็นรูพรุนภายในทำให้ความแข็งแรงต่ำ ส่วนอัตราการดูดซึมน้ำที่ช้าเกินไปในเวลาหล่อแบบที่เท่ากัน จะส่งผลให้แบบไม่สามารถดูดน้ำออกจากชิ้นงานได้หมด ส่งผลให้มีรูพรุนตกค้างอยู่ภายในเช่นเดียวกัน และทำให้ความแข็งแรงต่ำ โดยจะมีการศึกษาปริมาณรูพรุนหลังการเผา โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเพื่อยืนยันผลการทดลองภายหลัง



รูปที่ 7 อัตราการดูดซึมน้ำของแบบพลาสติก ต่อรอบการหล่อแบบพลาสติก 3 ชุด โดยใช้ความละเอียดที่ 52 ไมครอน



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ของอัตราการดูดซึมน้ำของแบบกับความแข็งแรงหลังอบของชิ้นงาน

#### 4.3 ความชื้นของชิ้นงานหลังการแกะแบบต่อ ความแข็งแรงของชิ้นงาน

ผลจากการศึกษาความชื้นหลังการหล่อของ

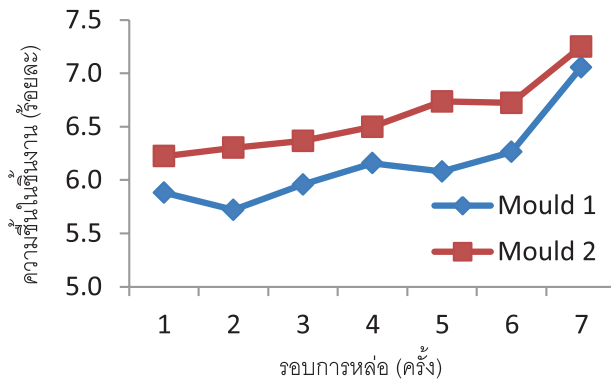
ชิ้นงานหลังการแกะแบบโดยการตรวจสอบน้ำหนักหลังการหล่อเปรียบเทียบกับน้ำหนักชิ้นงานหลังการอบ พบว่าแต่ละรอบการหล่อชิ้นงานจะส่งผลให้ชิ้นงานหลังการแกะแบบมีความ

ชั้นที่เพิ่มขึ้นตามรูปที่ 9 โดยรอบการหล่อที่มากขึ้นส่งผลให้ ความชื้นสูงขึ้นโดยตรง และทำให้ชิ้นงานที่ได้อ่อนนุ่มและเสีย รูปทรงได้ง่าย เกิดการบิดเบี้ยว และอาจเกิดรอยร้าวเล็กๆ ได้ บนผิว หลังจากแกะออกจากแบบแล้วนำไปอบเพื่อหาค่าความ แข็งแรงหลังอบ เปรียบเทียบกับค่าความชื้นของชิ้นงานดังรูป

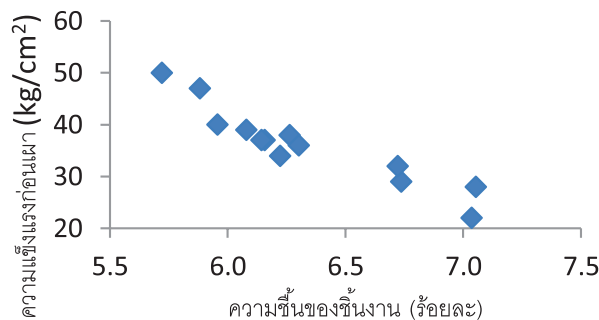
ที่ 10 และทำการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นได้ตั้งสมการที่ 3

$$\text{Green strength} = 131 - (14.9 * \text{Moisture}) \quad (3)$$

$$R\text{-sq (adj)} = 80.0\%$$



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ของรอบการหล่อกับความชื้นตกค้างในชิ้นงาน



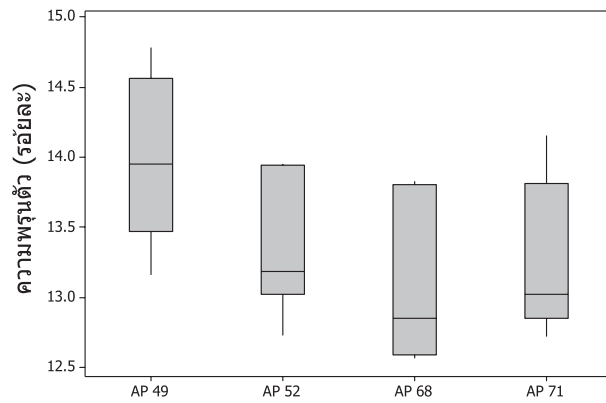
รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ของความชื้นของชิ้นงานกับความแข็งแรงก่อนเผาของชิ้นงานโดยใช้ความละเอียดที่ 52 ไมครอน

จะพบว่าความชื้นของชิ้นงานหลังการแกะแบบมีความสัมพันธ์กับความแข็งแรงหลังอบโดยความชื้นสูงหมายถึงยังมี น้ำตกค้างอยู่ในชิ้นงานและทำให้เกิดรูพรุน โดยจะมีการศึกษา ปริมาณรูพรุนหลังการเผาโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบ ส่องกราดเพื่อยืนยันผลการทดลองภายหลัง เห็นได้ว่าความชื้น ตกค้างในชิ้นงานส่งผลให้ความแข็งแรงลดต่ำลง ดังนั้นเพื่อ ป้องกันปัญหาจึงควรควบคุมรอบการหล่อ เพื่อไม่ให้มีความชื้น ตกค้างในชิ้นงานที่มากเกินไปและทำให้ความแข็งแรงต่ำ จนเกิด ของเสียขึ้นในกระบวนการ

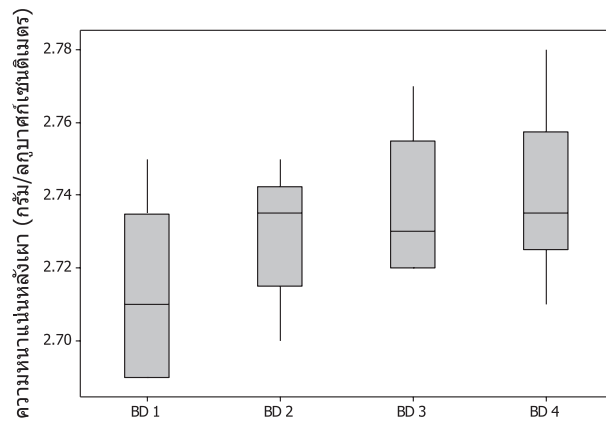
#### 4.4 สมบัติทางกายภาพหลังเผาของชิ้นงาน

จากการเผาในบรรยากาศไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 1500 องศาเซลเซียส ได้ผลตามรูปที่ 11 ถึง 13 โดยนำตัวอย่างจาก การทดลองข้อ 4.1 มาทำการเผา จากผลการทดลองสามารถ สรุปได้ว่าสมบัติทางกายภาพหลังเผาของอัตราส่วนที่ปรับปรุง มีค่าความพรุนตัวลดลง และมีค่าความหนาแน่น และค่าความ แข็งแรงหลังเผาเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่อเทียบกับสูตรมาตรฐาน และทั้งหมดผ่านเกณฑ์กำหนดของผลิตภัณฑ์

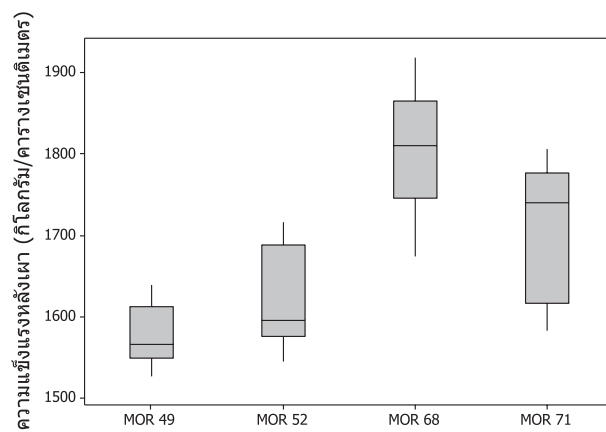




รูปที่ 11 ค่าความพรุนตัวของชิ้นงานหลังเผาที่ขนาดอนุภาคของวัสดุดิบแตกต่างกัน



รูปที่ 12 ค่าความหนาแน่นของชิ้นงานหลังเผาที่ขนาดอนุภาคของวัสดุดิบแตกต่างกัน



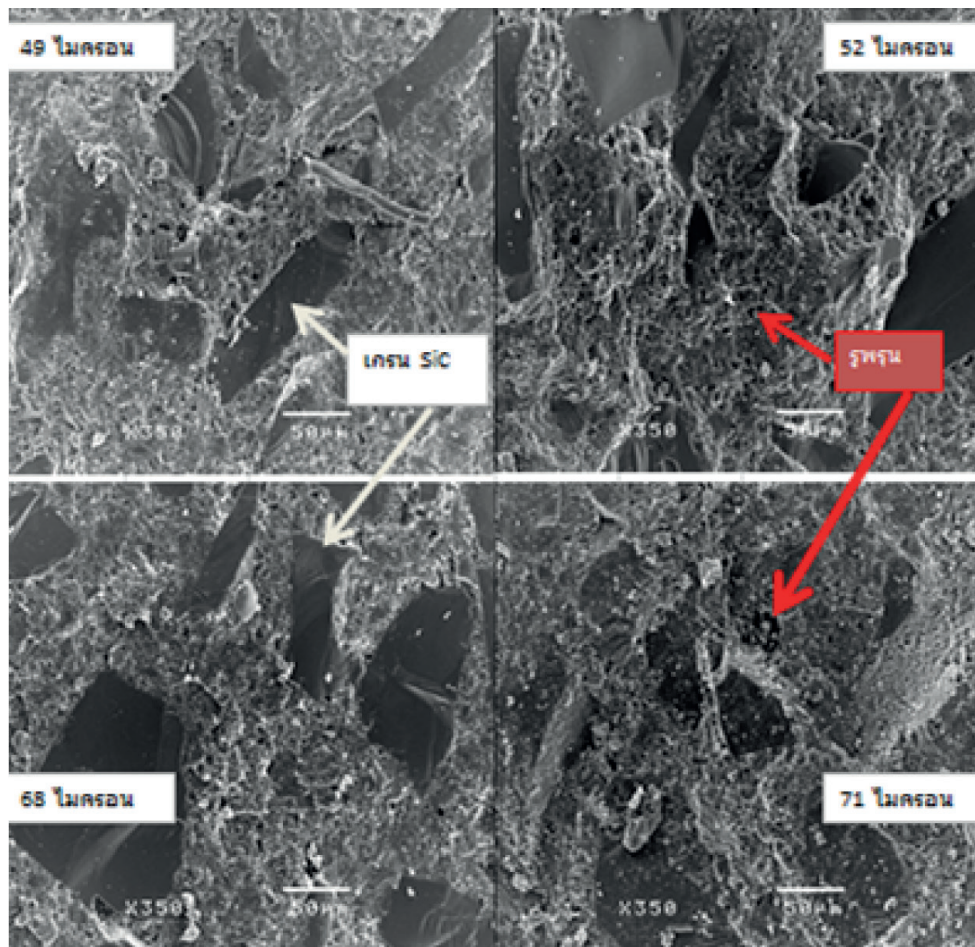
รูปที่ 13 ค่าความแข็งแรงของชิ้นงานหลังเผาที่ขนาดอนุภาคของวัสดุดิบแตกต่างกัน

#### 4.5 รูพรุนและโครงสร้างภายใน โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

##### 4.5.1 เปรียบเทียบรูพรุนและโครงสร้างภายในของชิ้นงานหลังการเผาที่ใช้วัตถุดิบที่มีขนาดอนุภาคต่างกัน

ดังรูปที่ 14 โดยเปรียบเทียบที่กำลังขยาย 350 เท่า พบว่าปริมาณรูพรุนของการใช้วัตถุดิบหยาบที่ 68 ไมครอน มีปริมาณน้อยที่สุดซึ่งสอดคล้องกับผลของการทดลองข้อ 4.1 และสมบัติหลังเผาของชิ้นงาน และการใช้วัตถุดิบละเอียดจะ

ส่งผลให้พบรูพรุนเป็นจำนวนมาก จากการวิเคราะห์ขนาด และสัดส่วนปริมาณรูพรุนด้วยวิธีตีตาราง จะพบว่าเป็นไปตามผลการทดลองที่ผ่านมา คือ ที่ขนาดอนุภาค 68 ไมครอนจะมีทั้งขนาดรูพรุนที่เล็ก และปริมาณรูพรุนน้อยที่สุด ส่วนที่ขนาดอนุภาค 71 ไมครอน แม้จะมีปริมาณรูพรุนน้อยแต่ขนาดของรูพรุนที่พบจะมีขนาดใหญ่ ส่วนที่ขนาดอนุภาค 49 และ 52 ไมครอน พบทั้งขนาดรูพรุนที่ใหญ่กว่า และปริมาณรูพรุนที่พบก็สูงกว่า จึงทำให้ความแข็งแรงต่ำ ตามตารางที่ 1



รูปที่ 14 รูพรุนและโครงสร้างภายในของซิลิคอนคาร์ไบด์ประสานด้วยไนไตรด์ที่ใช้วัตถุดิบตั้งต้นที่ความละเอียดต่างๆ

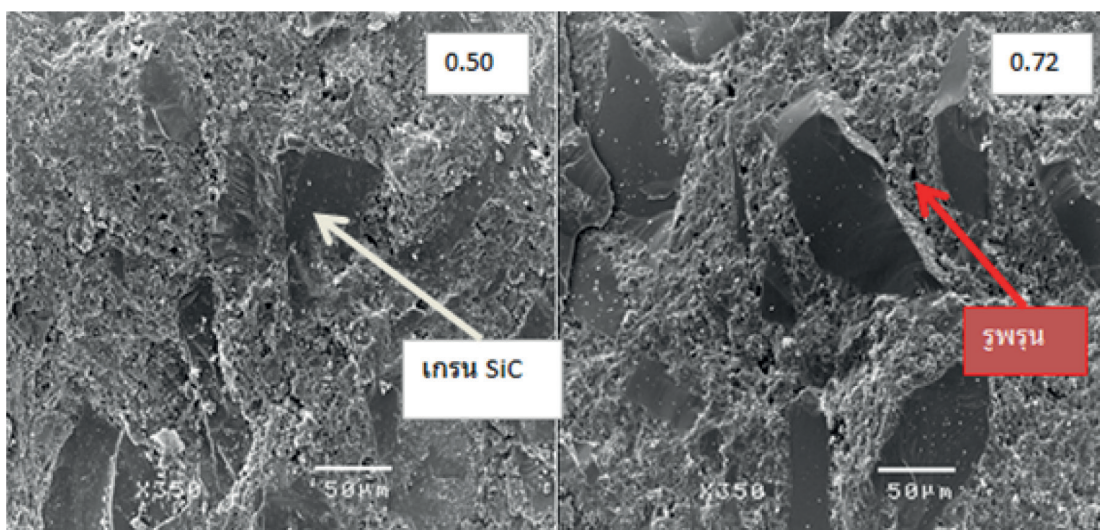
ตารางที่ 1 ผลการคำนวณขนาดรูพรุนและสัดส่วนปริมาณรูพรุนของชิ้นงานที่ใช้ขนาดอนุภาคต่างๆ โดยวิธีตาราง

ตัวอย่าง ที่	ขนาด อนุภาค (ไมครอน)	ขนาดรู พรุน (ไมครอน)	สัดส่วน ปริมาณรู พรุน (ร้อยละ)
1	49	4.7	4.4
2	52	4.1	5.0
3	68	3.5	2.2
4	71	4.1	2.8

4.5.2 เปรียบเทียบรูพรุนและโครงสร้างภายใน  
ของชิ้นงานหลังการเผาที่ใช้แบบที่มีอัตรา  
การดูดซึมน้ำต่างกัน

ดังรูปที่ 15 โดยเปรียบเทียบที่กำลังขยาย 350 เท่า  
พบว่าปริมาณรูพรุนของการใช้แบบที่มีอัตราการดูดซึมน้ำ 0.5

กรัมต่อตารางเซนติเมตรน้อยกว่าที่มีปริมาณน้อยที่สุดซึ่งสอดคล้อง  
กับผลของการทดลองข้อ 4.2 และการใช้แบบที่มีอัตราการดูดซึมน้ำ  
สูงเกินไปก็พบรูพรุนตกค้างอยู่ภายในทำให้ความแข็งแรงต่ำ  
ตามตารางที่ 2



รูปที่ 15 รูพรุนและโครงสร้างภายในของซิลิคอนคาร์ไบด์ประสานด้วยไนไตรด์ ที่อัตราการดูดซึมน้ำของแบบ 0.5  
และ 0.72 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร/นาที่

ตารางที่ 2 ผลการคำนวณขนาดรูพรุนและสัดส่วนปริมาณรูพรุนของชิ้นงานที่ใช้แบบพลาสติกที่มีอัตราการดูดซึมน้ำต่างกัน โดยวิธีตีตาราง

ตัวอย่าง ที่	อัตราการดูด ซึมน้ำ (กรัม/ ลูกบาศก์ เซนติเมตร/ นาที่)	ขนาดรู พรุน  (ไมครอน)	สัดส่วน ปริมาณรู พรุน  (ร้อยละ)
1	0.50	2.7	2.1
2	0.72	3.6	3.7

4.5.3 เปรียบเทียบรูพรุนและโครงสร้างภายใน  
ของชิ้นงานหลังการเผาที่ความชื้นหลังการ  
หล่อต่างกัน

พบว่าปริมาณรูพรุนของการชิ้นงานที่มีความชื้นร้อยละ

5.9 มีปริมาณรูพรุนน้อยซึ่งสอดคล้องกับผลของการทดลองข้อ  
4.3 ตามตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลการคำนวณขนาดรูพรุนและสัดส่วนปริมาณรูพรุนของชิ้นงานที่มีความชื้นหลังการแกะแบบต่างกัน โดยวิธีตีตาราง

ตัวอย่าง ที่	ความชื้น (ร้อยละ)	ขนาดรู พรุน (ไมครอน)	สัดส่วน ปริมาณรู พรุน (ร้อยละ)
1	5.9	3.0	2.8
2	7.1	6.9	5.9

ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า ค่าขนาดการกระจายตัวของ  
อนุภาคผงซิลิโคนคาร์ไบด์ ที่เหมาะสมที่สุดอยู่ที่ 68 ไมครอน  
และอัตราการดูดซึมน้ำของแบบพลาสติกอยู่ที่ 0.4-0.6 กรัม

ต่อตารางเซนติเมตรต่อนาที่ และชิ้นงานควรมีความชื้นไม่เกิน  
ร้อยละ 6.5 ทำให้ได้ค่าความแข็งแรงหลังการอบเพิ่มขึ้น และ  
ได้สมบัติทางกายภาพหลังการเผาที่ดีขึ้นด้วยเช่นกัน

## 5. สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาอัตราการดูดซึมน้ำของแบบพลาสติก โดยอัตราการดูดซึมน้ำที่เร็วหรือช้าเกินไปจะส่งผลต่อความแข็งแรงก่อนเผาของชิ้นงาน และจากนั้นได้ทำการศึกษาร้อยละความชื้นของชิ้นงานหลังการแกะแบบ โดยพบว่ารอบการหล่อชิ้นงานที่มากเกินไปจะส่งผลให้ชิ้นงานหลังการแกะแบบมีความชื้นสูงและอาจทำให้เกิดรอยร้าว จนส่งผลต่อความแข็งแรงก่อนเผาของชิ้นงานได้ การควบคุมอัตราการดูดซึมน้ำและควบคุมรอบการหล่อของแบบพลาสติก มีผลทำให้ชิ้นงานที่ได้มีความแข็งแรงก่อนการเผาสูงขึ้นเช่นกัน รวมทั้งไม่เกิดการบิดเบี้ยวของรูปร่างของชิ้นงานในระหว่างการเคลื่อนย้ายชิ้นงานหลังการหล่อ วิธีการแก้ไขคือควบคุมปริมาณน้ำในแบบตั้งต้นและควบคุมไม่ให้รอบการหล่อมากเกินไปต่อการอบแบบ 1 ครั้ง ซึ่งสามารถควบคุมให้ความชื้นบริเวณผิวหน้าของชิ้นงานหลังการแกะแบบไม่มากเกินไปร้อยละ 6.5 ทำให้ลดโอกาสการเกิดของเสียได้

## 6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณกองทุนวิจัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ที่สนับสนุนงานวิจัย

## 7. เอกสารอ้างอิง

- Ramachandra Rao, R. and Kannan, T.S., 2002, "Slip Cast Nitride-bonded Silicon Carbide Bodies," *Materials Chemistry and Physics*, 75 (1-3), pp. 270-275.
- Kishan Reddy, N., 2002, "Reaction-bonded Silicon Carbide Refractories," *Materials Chemistry and Physics*, 76 (1), pp. 78-81.
- Wangmooklang, N., Sujirote, K., Wasanapiarnpong, T. and Jinawath, S., 2007, "Properties of  $\text{Si}_3\text{N}_4$  Ceramics Sintered in Air and Nitrogen Atmosphere Furnaces," *Journal of the Ceramic Society of Japan*, 115 (1348), pp. 974-977.
- Shigetaka, W., Chaiyapak, P., Jinawath, S., Wasanapiarnpong T. and Yano, T., 2004, "Sintering of  $\text{Si}_3\text{N}_4$  Ceramics in Air Atmosphere Furnace (Part 2) - Agglomeration of Packing Powder and Deterioration of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  Crucible," *Journal of the Ceramic Society of Japan*, 112 (4), pp. 234-237
- Pizette, P., Martin, C.L., Delette, G., Sans, F. and Geneves, T., 2013, "Green Strength of Binder-free Ceramics," *Journal of the European Ceramic Society*, 33 (5) pp. 975-984.
- Rakshit, J. and Das, P.K., 2002, "Effect of Microstructure on the High Temperature Strength of Nitride Bonded Silicon Carbide Composite," *Bulletin of Materials Science*, 25 (5) pp. 387-390.
- Niranatlumpong, P., 2002, "Oxidation and Spallation Mechanism of Thermal Barrier Coating at  $1100^\circ\text{C}$ ," *KMUTT Research and Development Journal*, 25 (1), pp. 55-67.
- Ramachandra Rao, R., Roopa, H.N. and Kannan, T.S., 1999, "Effect of pH on the Dispersability of Silicon Carbide Powders in Aqueous Media," *Ceramics International*, 25 (3) pp. 223-230.
- Ramachandra Rao, R., Roopa, H.N. and Kannan, T.S., 1999, "Dispersion, Slip Casting and Reaction Nitridation of Silicon-silicon Carbide Mixtures," *Journal of the European Ceramic Society*, 19 (12), pp. 2145-2153.
- Lee, J.S., Mun, J.H., Han, B.D. and Kim, H.D., 2004, "Effect of Raw-Si Particle Size on the Properties of Sintered Reaction-Bonded Silicon Nitride," *Ceramics International*, 30 (6) pp. 965-976
- Sillapasa, K., Danchaivijit, S. and Sujirote, K., 2005, "Effects of Silicon Powder Size on the Processing of Reaction-Bonded Silicon Nitride," *Journal of Metals, Materials and Minerals*, 15 (2) pp. 97-102.
- Ovregård, H., 2013, Silicon for Silicon Nitride Based Products, Master of Materials Science and Engineering Thesis, Department of Materials Science and Engineering, Norwegian University of Science and Technology.

