บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาขั้นตอนการเตรียม และลักษณะเฉพาะของผลิตภัณฑ์ซิลิคอนไนไตรด์ความหนาแน่นสูง พบว่าสามารถเตรียมได้ในระดับห้องปฏิบัติการ โดยการควบคุมสมบัติของสารตั้งต้น และกระบวนการที่เกี่ยวข้องให้อยู่ในสภาวะที่สามารถทำให้ชิ้นงานที่ผลิตได้มีความหนาแน่นและสมบัติเชิงกลที่อุณหภูมิห้องสูง ผลการทดลองในขั้นตอนต่าง ๆ สามารถสรุปได้ดังนี้

<u>การควบคุมกระบวนการเตรียมชิ้นงาน</u>

1. การเลือกใช้ผงซิลิคอนไนไตรด์เฟสแอลฟาเป็นสารตั้งต้น ร่วมกับการเลือกใช้สารปรับปรุงสมบัติเช่น อะลูมิเนียมออกไซด์ และอิทเทรียมออกไซด์ ในอัตราส่วนร้อยละ 3 และร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก สามารถผลิตซิลิคอนไนไตรด์ที่มีค่าความหนาแน่นทางทฤษฎีได้มากกว่าร้อยละ 98 และมีสมบัติเชิงกลอยู่ในเกณฑ์สูง

2. การควบคุมขั้นตอนการเตรียมแกรนูลและชิ้นงานกรีน มีความสำคัญต่อค่าความหนาแน่นที่ได้รับ ซึ่งในการทดลองนี้จะควบคุมให้พื้นที่ผิวจำเพาะ (BET surface area) มีค่ามากกว่า 10 ตารางเมตรต่อกรัม และเลือกใช้ความดันไอโซสแตติค (CIP) ที่ระดับความดันเท่ากับ 250 เมกกะปาสคาล เพื่อให้ชิ้นงานกรีนที่ได้มีความหนาแน่นเริ่มต้นสูงที่สุด

3. การศึกษาสมบัติด้านเทอร์โมแกรมของแกรนูลมีความสำคัญ เพราะเป็นประโยชน์ต่อการพิจารณาเลือกใช้ระดับอุณหภูมิและเวลาในการไล่สารเพิ่มการยึดเกาะและการแคลไซน์เพื่อไม่ให้เกิดการตกค้างเป็นอินคลูชันขึ้นภายในเนื้อของชิ้นงาน ซึ่งอาจจะเป็นสาเหตุที่ทำให้สมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์มีค่าลดลง

4. การนำชิ้นงานไปผ่านการแคลไซน์ก่อนการทำแคปซูลเป็นสิ่งจำเป็น เพราะการแคลไซน์จะช่วยไล่สารประกอบประเภทไฮเดรท หรือคาร์บอเนตให้สลายตัวออกจากชิ้นงาน รวมทั้งดึงกาซที่ขังอยู่ภายในชิ้นงานออกจนหมด ซึ่งเป็นผลดีต่อการ HIP ที่ต้องใช้แคปซูล ในการ

ทดลองนี้ได้เลือกใช้การแคลไซน์ที่ระดับอุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส เวลา 2 ชั่วโมง ภายใต้ความดันสูญญากาศ เท่ากับ 0.1 ทอร์

5. การใช้แก้ว Pyrex® เป็นวัสดุทำแคปซูล ให้ผลเป็นที่น่าพอใจ เพราะสามารถเตรียมเป็นแคปซูลได้ง่ายที่อุณหภูมิไม่สูงมาก และสามารถทำให้ชิ้นงานมีความหนาแน่นทางทฤษฎีได้มากกว่าร้อยละ 98

6. การใช้สารเคลือบป้องกันปฏิกิริยาที่เป็นส่วนผสมระหว่างโบรอนไนไตรด์ กราไฟต์ และซิลิคอนไนไตรด์ และใช้เทคนิคการเคลือบแบบ 2 ชั้น ให้ผลด้านการป้องกันปฏิกิริยากับแก้วที่ดี และการขจัดแคปซูลแก้วที่ติดแน่นกับผิวของชิ้นงานภายหลังการ HIP เสร็จสิ้น สามารถทำได้โดยง่าย

สมบัติของผลิตภัณฑ์

1. สมบัติด้านการหดตัวของชิ้นงาน พบว่าแฟคเตอร์การหดตัวเชิงเส้นมีค่าประมาณ 0.83 ถึง 0.84 ซึ่งค่อนข้างคงที่ แสดงให้เห็นว่า แฟคเตอร์ด้านอุณหภูมิ ความดัน และเวลาที่ใช้ในการทดลองนี้ ไม่มีส่วนช่วยเสริมการหดตัวของชิ้นงาน

2. ค่าความหนาแน่นของชิ้นงานที่ผ่านการ HIP ที่ระดับอุณหภูมิเท่ากับ 1750 และ 1850 องศาเซลเซียส มีค่าสูงมากกว่าร้อยละ 98 ของค่าความหนาแน่นทางทฤษฎี

3. ปริมาณออกซิเจนที่อยู่บนผิวอนุภาคซิลิคอนไนไตรด์ในระดับร้อยละ 0.75 โดยน้ำหนัก ทำให้เกิดเฟสอิทเทรียมซิลิเกต (Y_2SiO_5) ซึ่งจะเป็นผลดีต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุที่อุณหภูมิห้อง

4. การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิการ HIP ทำให้ค่าความแข็งของชิ้นงานสูงขึ้น

5. ค่า Fracture toughness สูงขึ้น เมื่อใช้อุณหภูมิการ HIP สูงขึ้น เพราะอุณหภูมิมีอิทธิพลต่อโครงสร้างจุลภาคและรูปแบบของเฟสของเหลวที่เกิดขึ้น

6. ในการทดลองนี้ การเปลี่ยนแปลงเฟสจากแบบแอลฟาเป็นแบบเบตาเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ที่ระดับอุณหภูมิการ HIP อย่างน้อยเท่ากับ 1650 องศาเซลเซียส

7. การใช้เทคนิคอินเดนท์เทชัน ในการวัดค่า Young's modulus และ Fracture toughness ให้ค่าที่ไม่แตกต่างจากวิธีการวัดแบบอื่นมาก การสังเกตนี้ได้จากการเปรียบเทียบกับสมบัติของซิลิคอนไนไตรด์ ที่มีการระบุไว้ทั่วไปในเอกสารงานวิจัย

ข้อจำกัดของการวิจัย

ในการวิจัยครั้งนี้มีข้อจำกัดที่มีผลต่อการศึกษาหลายประการ คือ

1. ไม่สามารถศึกษาปริมาณของเฟสเบตาที่เปลี่ยนแปลงไปได้ ทำให้การศึกษาผลด้านกลไกการเปลี่ยนรูปไม่สามารถอธิบายได้ชัดเจนมากพอ

2. ขนาดของผลิตภัณฑ์ที่ได้มีขนาดเล็ก ยากต่อการเลือกใช้วิธีตรวจวัดค่าของสมบัติเชิงกล

3. ค่าใช้จ่ายด้านวัสดุ และอุปกรณ์ค่อนข้างสูง ทำให้เกิดข้อจำกัดด้านการออกแบบการทดลองแบบทำซ้ำ

4. ส่วนใหญ่ต้องใช้อุปกรณ์การตรวจสอบวัสดุที่มีเทคโนโลยีสูงและซับซ้อน

ข้อเสนอแนะ

ในการวิจัยและทดลองนี้ มีข้อเสนอแนะเกี่ยวกับการวิจัยในขั้นต่อไป และการประยุกต์ผลวิจัย ดังนี้

1. สามารถทำการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของซิลิคอนไนไตรด์ที่ผ่านการ HIP ให้มีสมบัติที่สูงขึ้นอีกได้โดยวิธีการทำ Heat treatment ซึ่งจะช่วยปรับปรุงสมบัติของเฟสแก้วที่หลงเหลืออยู่ตามขอบเกรนให้มีสมบัติที่ทำให้ซิลิคอนไนไตรด์สามารถใช้งานที่อุณหภูมิสูงขึ้นได้

2. การศึกษาเฟสในลักษณะเชิงปริมาณ จะทำให้สามารถทราบกลไกการเปลี่ยนแปลงเฟสของซิลิคอนไนไตรด์ได้ชัดเจนขึ้น

3. การเลือกใช้สารปรับปรุงสมบัติมีความสำคัญ จึงควรพิจารณาเลือกใช้ประเภทและปริมาณในอัตราที่เหมาะสม เพื่อให้ได้สมบัติที่ตรงกับความต้องการ

4. การใช้หลอดแก้วทำแคปซูลนี้มีความเหมาะสมต่อชิ้นงานขนาดเล็ก รูปร่างไม่ซับซ้อน ส่วนใหญ่จึงเป็นการใช้ทดลองในระดับห้องปฏิบัติการเท่านั้น ถ้าต้องการพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ในเชิงการผลิต ควรเปลี่ยนแปลงวิธีการทำแคปซูล

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย