



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การพัฒนาเนื้อดินและเคลือบสำหรับทำแบบพิมพ์เซรามิกขึ้นรูปถึงมือ

โดยวิธีการจุ่มในระดับอุตสาหกรรม

โดย นายอนุชา วรรณก้อน และคณะ

30 สิงหาคม 2561

สัญญาเลขที่ RDG60T0141

รายงานฉบับสมบูรณ์

โครงการ การพัฒนาเนื้อดินและเคลือบสำหรับทำแบบพิมพ์เซรามิกขึ้นรูปถุงมือยาง

โดยวิธีการจุ่มในระดับอุตสาหกรรม

คณะผู้วิจัย	สังกัด
1. นายอนุชา วรรณก้อน	ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ
2. นายปริญญ์ สมร่วง	ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ
3. นางสาวภัทรวรรณ เฉยเจริญ	ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ
4. นางวัชรี สอนลา	ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ

สนับสนุนโดยสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.)

และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย วช.สกว.ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

สัญญาเลขที่ RDG60T0141

โครงการ “การพัฒนาเนื้อดินและเคลือบสำหรับทำแบบพิมพ์เซรามิกขึ้นรูปถွ่มมือยาง

โดยวิธีการจุ่มในระดับอุตสาหกรรม”

รายงานฉบับสมบูรณ์

บทสรุปผู้บริหาร

โครงการวิจัยและพัฒนาเนื้อดินและเคลือบสำหรับทำแบบพิมพ์เซรามิกขึ้นรูปถွ่มมือยางโดยวิธีการจุ่มในระดับอุตสาหกรรมเป็นโครงการที่ได้รับทุนสนับสนุนจาก สกว. เพื่อส่งเสริมให้มีการผลิตแบบพิมพ์เซรามิกในประเทศ เนื่องจากปัจจุบันแบบพิมพ์ถွ่มมือยางส่วนใหญ่ต้องนำเข้ามาจากต่างประเทศ ทำให้มีราคาแพง และหากมีการชำรุดเสียหายหรือต้องการผลิตถွ่มมือในรูปแบบใหม่ จะต้องใช้เวลาในสั่งซื้อหรือเปลี่ยนแบบพิมพ์เป็นเวลานานทำให้เสียโอกาสและศักยภาพในการแข่งขันในตลาด

เริ่มต้นจากการวิจัยพัฒนาสูตรเนื้อดินจำนวน 12 สูตร เปรียบเทียบกับสูตรอ้างอิง (Body-R) โดยใช้ดินขาวในช่วง 40-65% ดินดำ 5-20% โซเดียมหรือโปแตสเซียมเฟลด์สปาร์ 15-30% และควอทซ์ 10-25% โดยน้ำหนัก นอกจากนั้นยังมีการพัฒนาสูตรเนื้อดินผสม (A85-A95) ที่ใช้เนื้อดินพอร์ซเลนผสมเสร็จ Clay-A และ Clay-B อีกจำนวน 3 สูตร เตรียมน้ำดิน ขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อ และเผาที่อุณหภูมิในช่วง 1250-1300°C ได้เป็นชิ้นงานเพื่อนำไปทดสอบคุณสมบัติที่สำคัญของความเป็นพอร์ซเลน ได้แก่ การหดตัว (shrinkage) การดูดซึมน้ำ (water absorption) ความทนต่อแรงดัด (bending strength) และการตกตัว (sagging) พบว่าได้สูตรดินที่เผาสุกตัวที่ 1280°C และมีสมบัติเหมาะสมใกล้เคียงกับสูตรดินสำเร็จรูปที่ใช้เป็นสูตรดินอ้างอิง Body-R ได้แก่ สูตร GFB-16 ที่เตรียมจากการผสมวัตถุดิบดินขาว 40% ดินดำ 18% ควอทซ์ 15% และโปแตสเซียมเฟลด์สปาร์ 27% และสูตรดินผสม A90 ซึ่งใช้ดิน Clay-A 90 ผสม Clay-B 10% มีสมบัติของพอร์ซเลนที่ดีที่สุด คือ มีการหดตัวหลังเผาในช่วง 11.38-13.29% การดูดซึมน้ำ 0.07-0.18% ความทนทานต่อแรงดัด 69.29-82.12 MPa และมีการตกตัวหลังเผา 6.17- 11.00 mm.

จากการตรวจสอบองค์ประกอบทางแร่ของเนื้อดินทั้งสามพบว่าประกอบด้วยผลึกของมัลไลต์และควอทซ์เป็นส่วนใหญ่ ส่วนสูตร GFB-16 ยังพบคอร์ันดัมเป็นส่วนประกอบด้วย ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเป็นเซรามิกประเภทพอร์ซเลนที่มีความแข็งแรงสูง หลังจากนั้นได้ทำการทดสอบความทนต่อการเปลี่ยนอุณหภูมิฉับพลันในช่วง 30-180°C ผ่าน 10 รอบโดยไม่มีการแตกร้าวทั้ง 3 สูตร และมีความทนต่อด่าง KOH เข้มข้น 20% ที่อุณหภูมิ 70°C ได้นาน 192, 168 และ 144 ชั่วโมง ตามลำดับ ในส่วนของการตรวจสอบลักษณะของผิวชิ้นงานก่อนและหลังการทดสอบความทนต่างด้วยการวัดความหยาบที่ผิว (roughness) พบว่าผิวของชิ้นงานสูตรดินอ้างอิง Body-R และ GFB-16 หลังการกัดกร่อนจะมีค่าความหยาบ Ra (Average roughness of profile) ลดลงเล็กน้อย ส่วนสูตร A90 มีค่าความหยาบเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะพื้นผิวที่สังเกตได้จากการตรวจสอบด้วยกล้อง SEM

สำหรับการพัฒนาต้นแบบแบบพิมพ์ในระดับห้องปฏิบัติการนั้น เริ่มต้นจากการพัฒนาแม่พิมพ์ปูนปลาสเตอร์รูปมือ ทำการปรับขนาดให้ได้ตามสเปคโดยคำนึงถึงการหัตถ์ที่ตำแหน่งต่างๆ โดยได้ทำการผลิตแบบพิมพ์จำนวน 3 ขนาด ได้แก่ ขนาด M, L และ XL และเผาที่ 1280°C พบว่าสูตรดินอ้างอิง Body-R สูตร GFB-16 และสูตร A90 สามารถทำเป็นต้นแบบแบบพิมพ์ได้ทุกสูตร โดยพบต้นแบบทั้งสามสูตรมีสมบัติใกล้เคียงกัน คือ มีความทนต่อการเปลี่ยนอุณหภูมิฉับพลัน ในช่วง 30-180°C ได้มากกว่า 10 รอบ ส่วนการทนต่อสารเคมีพบว่าได้ 369, 268 และ 280 ชั่วโมงตามลำดับ อย่างไรก็ตามพบว่าสูตร GFB-16 มักพบปัญหาตำหนิจากการบวมการผลิต จึงได้เลือกใช้สูตร A90 เป็นพื้นฐานในการพัฒนาเคลือบต่อไป

ในส่วนของการพัฒนาสูตรเคลือบ ได้ทำการเตรียมเคลือบใสจำนวน 2 สูตร ได้แก่ เคลือบพื้นฐานทั่วไป (GFG-15) ที่ประกอบด้วยโปแตสเฟลด์สปาร์ 35% ควอทซ์ 30% ดินขาว 20% และหินปูน 15% และสูตรเคลือบสังกะสี ที่มีโปแตสเฟลด์สปาร์ 32% ควอทซ์ 35% ดินขาว 15% หินปูน 8% ทัลคัม 8% และซิงค์ออกไซด์ 2% เปรียบเทียบกับเคลือบอ้างอิง 1 สูตร พบว่าทุกสูตรสามารถเคลือบได้ผลสำเร็จดี โดยการเคลือบผิวจะทำให้ชิ้นงานมีที่มีสมบัติความทนต่อต่างได้นานขึ้นถึง 4 เท่า

สำหรับต้นแบบภาคสนามนั้นได้ใช้สูตรดิน A90 ทำเป็นแบบพิมพ์รูปมือแบบไม่เคลือบ และมีการพ่นทรายให้มีผิวหยาบในบริเวณอุ้งมือเพื่อให้ได้รูปแบบเหมือนกับผลิตภัณฑ์ของโรงงาน หลังจากที่ได้ขยายสเกลการผลิต และนำแบบพิมพ์ที่ได้ไปทดลองใช้ในโรงงาน ซึ่งเป็นระบบสายพานและมีการผลิต 12 ชั่วโมงต่อกะวันละ 2 กะ โดยแบบพิมพ์หนึ่งจะใช้เวลาประมาณ 15 นาที ต่อรอบ พบว่าหลังการใช้งาน 34 วัน ต้นแบบแบบพิมพ์สูตรเนื้อดินที่พัฒนาขึ้นก็ยังสามารถใช้งานได้ดี สำหรับแนวทางการปรับปรุงแบบพิมพ์เซรามิกให้มีสมบัติที่ดีขึ้น อาจทำได้โดยเพิ่มความเรียบรอยของแบบพิมพ์ เช่น การลบรอยตะเข็บของแบบพิมพ์ และเพิ่มความทนต่อต่างเพื่อให้มีอายุการใช้งานมากขึ้น

ทั้งนี้ต้นแบบภาคสนามที่พัฒนาขึ้นนี้มีต้นทุนการผลิตประมาณ 21.96-36.17 บาทต่อชิ้น ซึ่งจะมีต้นทุนที่ถูกกว่าแม่พิมพ์ในท้องตลาด ซึ่งผลสำเร็จจากโครงการนี้ได้นำเสนอในงานประชุมวิชาการ และการเผยแพร่บทความในวารสารวิชาการในประเทศ เพื่อให้เป็นตัวอย่างและองค์ความรู้ที่จะช่วยผลักดันให้มีการผลิตแบบพิมพ์เซรามิกในประเทศ ซึ่งจะเป็นส่วนสำคัญในการเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันให้กับอุตสาหกรรมผู้ผลิตถุ่มีอย่างของประเทศต่อไป

สัญญาเลขที่ RDG60T0141

โครงการ “การพัฒนาเนื้อดินและเคลือบสำหรับทำแบบพิมพ์เซรามิกขึ้นรูปถุงมือยาง
โดยวิธีการจุ่มในระดับอุตสาหกรรม
รายงานฉบับสมบูรณ์

บทคัดย่อ

โครงการนี้ได้ดำเนินการวิจัยพัฒนาสูตรเนื้อดินจำนวน 12 สูตร โดยใช้วัตถุดิบประเภทดินขาว ดินดำ เฟลด์สปาร์ ควอร์ซ และดินผสมเสร็จจากซัพพลายเออร์ในประเทศ เตรียมน้ำดิน ขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อ และเผาที่อุณหภูมิในช่วง 1250-1300°C ได้เป็นชิ้นงานเพื่อนำไปทดสอบคุณสมบัติที่สำคัญของความเป็นพอร์ซเลน ได้แก่ การดูดซึมน้ำ ความแข็งแรง การทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิฉับพลัน การตกตัว พบว่าได้สูตรดินที่เผาสุกตัวที่ 1280°C และมีสมบัติเหมาะสมใกล้เคียงกับสูตรดินสำเร็จรูปที่ใช้เป็นสูตรดินอ้างอิง Body-R ได้แก่ สูตร GFB-16 ที่เตรียมจากการผสมวัตถุดิบโดยตรง และสูตรดินผสม A90 เมื่อนำสูตรดินทั้งสองไปทำเป็นต้นแบบแบบพิมพ์รูปมือเปรียบเทียบกับสูตรดินอ้างอิงแล้ว พบว่าสามารถทำเป็นต้นแบบแบบพิมพ์ที่ทนต่อการเปลี่ยนอุณหภูมิฉับพลัน และการทนต่อสารเคมี ผ่านตามวิธีการทดสอบภายใน อย่างไรก็ตามพบว่าสูตร GFB-16 มักพบปัญหาดำหนึ่จากกระบวนการผลิต จึงได้เลือกใช้สูตร A90 เป็นพื้นฐานในการพัฒนาเคลือบ ซึ่งจากพัฒนาสูตรเคลือบใส่จำนวน 2 สูตรเปรียบเทียบกับเคลือบอ้างอิง 1 สูตร พบว่าทุกสูตรสามารถเคลือบได้ผลสำเร็จดี โดยการเคลือบผิวจะทำให้ชิ้นงานที่มีสมบัติความทนต่อต่างได้นานขึ้นถึง 4 เท่า สำหรับต้นแบบภาคสนามนั้นได้ใช้สูตรดิน A90 ทำเป็นแบบพิมพ์รูปมือแบบไม่เคลือบ และมีการพันทรายให้มีผิวหยาบในบริเวณอุ้งมือเพื่อให้ได้รูปแบบเหมือนกับผลิตภัณฑ์ของโรงงาน หลังจากที่ได้ขยายสเกลการผลิต และนำแบบพิมพ์ที่ได้ไปทดลองใช้ในโรงงาน ซึ่งเป็นระบบสายพานและมีการผลิต 12 ชั่วโมงต่อกะ วันละ 2 กะ โดยแบบพิมพ์หนึ่งจะใช้เวลาประมาณ 15 นาที ต่อรอบ พบว่าหลังการใช้งาน 34 วัน ต้นแบบแบบพิมพ์สูตรเนื้อดินที่พัฒนาขึ้นก็ยังใช้งานได้ดี สำหรับแนวทางการปรับปรุงแบบพิมพ์เซรามิกให้มีสมบัติที่ดีขึ้น อาจทำได้โดยเพิ่มความเรียบร้อยของแบบพิมพ์ เช่น การลบรอยตะเข็บของแบบพิมพ์ และเพิ่มความทนต่อต่างเพื่อให้มีอายุการใช้งานมากขึ้น ทั้งนี้ต้นแบบภาคสนามที่พัฒนาขึ้นนี้มีต้นทุนการผลิตประมาณ 21.96- 36.17 บาทต่อชิ้น ซึ่งจะมีต้นทุนที่ถูกกว่าแม่พิมพ์ในท้องตลาด ซึ่งผลสำเร็จจากโครงการนี้ได้นำเสนอเป็นตัวอย่างและองค์ความรู้ที่จะช่วยผลักดันให้มีการผลิตแบบพิมพ์เซรามิกในประเทศ ซึ่งจะเป็นส่วนสำคัญในการเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันให้กับอุตสาหกรรมผู้ผลิตถุงมือยางของประเทศต่อไป

คำสำคัญ: เนื้อดินพอร์ซเลน เคลือบ แบบพิมพ์เซรามิก ถุงมือยาง

Abstract

This project has developed 12 body formulas by using raw materials as Kaolin, Ball clay, Feldspar, Quartz and mixed body from domestic suppliers. The mythology is preparing the body slip, forming by slip casting and fired at the temperature range 1250-1300°C. The obtained samples were measured the essential features of porcelain, which are the water absorption, bending strength, thermal shock resistance and sagging. After sintering at 1280°C, the GFB-16 formula that prepared from direct mixed of raw materials and the A90 mixed body formula have their properties closed to the reference Body-R. Then, they were further developed the former prototypes with the reference body formula. The results showed that the prototypes achieved the in-house testing of thermal shock resistance and alkaline resistance. However, the GFB-16 formula was found some defects caused by the production process. Therefore, A90 formula was chosen for the further research on glaze. The 2 basic glazes for porcelain were developed in comparison with the commercial reference glaze formula. The obtained glazes were all succeeded with the better result of 4 times of longer alkaline resistance the un-glazed one. For the field prototypes of the former, the mold for the former were made from plaster. The unglazed body formula A90 was used and the surface roughness by sandblasted in the palm area to meet the similar design of as the factory product was determined. After that, the prototype was up-scale produced and applied for running test in factory production. The prototype was set in the conveyor belt system of 15 min. per cycle and 15 hours duration per day. The result showed that after using in 34 days, the prototype from the latex glove with quality as good as the commercial former. However, It shall be required the neat improvement of the prototype in the future i.e. polishing the seam of prototype and increasing the alkaline resistance for the longer life-time. The developed field prototype has an estimated production cost around 21.96- 36.17 Baht per piece, lower than the former in the market currently. The success of this project is presented as a model and knowledge base that helps promoting the local-made ceramic former in Thailand, which will share a vital part in enhancing the competitiveness of Thai latex glove manufacturing onward.

Keyword: porcelain body, glaze, ceramic former, latex glove

สารบัญ

	หน้า
บทสรุปผู้บริหาร	I
บทคัดย่อ	III
1. บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	5
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	5
2. ทฤษฎีและการทบทวนวรรณกรรม	6
2.1 แนวคิดและหลักการที่เกี่ยวข้อง	6
2.2 การทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศที่เกี่ยวข้อง	14
3. วิธีการดำเนินงาน	19
3.1 วัสดุดิบ สารเคมี อุปกรณ์ และเครื่องมือที่ใช้ในการทำวิจัย	19
3.2 ขอบเขตการดำเนินงาน	20
3.3 กิจกรรมในโครงการ	20
3.4 วิธีการดำเนินวิจัย	24
3.5 แผนการดำเนินการ	31
4. ผลการดำเนินงานวิจัย	34
4.1 การเก็บรวบรวมข้อมูล	34
4.2 การพัฒนาเนื้อดินสำหรับทำแบบพิมพ์เซรามิก	35
4.3 การพัฒนาสูตรเคลือบ	61
4.4 การจัดทำแม่พิมพ์ปูนปลาสเตอร์รูปมือ	65
4.5 การพัฒนาต้นแบบระดับห้องปฏิบัติการ	69
4.6 การพัฒนาต้นแบบระดับภาคสนาม	75
4.7 ต้นทุนการผลิต	80
5. สรุปผลการดำเนินการ	82
เอกสารอ้างอิง	86
ภาคผนวก	88
ก. รายงานทางเทคนิคประกอบต้นแบบ	
ข. ข้อมูลประกอบรายงาน	
ค. เอกสารแนบ	

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างสูตรเคมี สำหรับการผลิตถุงมือยางธรรมชาติ ถุงมือแพทย์ ด้วยวิธีการจุ่มแบบพิมพ์	9
ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของแบบพิมพ์ของบริษัท Duratec refractory	29
ตารางที่ 3.2 สเปกขนาดของแบบพิมพ์เซรามิกที่ใช้เป็นแม่แบบ	30
ตารางที่ 3.3 แผนการบริหารแผนงานวิจัยและแผนการดำเนินงาน	32
ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมี (XRF) ของวัตถุดิบ ตัวอย่างแบบพิมพ์ และดินสำเร็จรูปเทียบกับสเปค	36
ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ของ Former และวัตถุดิบที่ใช้ในการวิจัย	36
ตารางที่ 4.3 สูตรเนื้อดินที่ใช้ในการทดลอง	40
ตารางที่ 4.4 ผลองค์ประกอบทางเคมี (XRF) ของสูตรเนื้อดินทดลองเทียบกับตัวอย่างแม่พิมพ์ (Former sample) และสูตรดินอ้างอิง (Body-R)	41
ตารางที่ 4.5 สัดส่วนวัตถุดิบแห้งต่อน้ำและปริมาณสารช่วยกระจายตัวที่ใช้ในสูตรทดลอง และผลการทดสอบคุณสมบัติของน้ำดินทดลอง (Slip Properties)	42
ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ ทางกล และทางความร้อนของชิ้นงานทดลอง	43
ตารางที่ 4.7 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ของ Former sample และเนื้อดินสูตรต่างๆ	54
ตารางที่ 4.8 ผลการทดสอบความทนทานต่อการเปลี่ยนอุณหภูมิเฉียบพลัน (Thermal Shock Resistance) ของชิ้นงานทดลองเทียบกับสูตรดินอ้างอิง	57
ตารางที่ 4.9 ผลการทดสอบความทนด่าง (Alkaline Resistance) ของชิ้นงานทดลองเทียบกับสูตรดินอ้างอิง	58
ตารางที่ 4.10 ผลการทดสอบค่าความหยابของผิวชิ้นงานสูตรทดลองเทียบกับสูตรอ้างอิงก่อน และหลังจากแช่ในสารละลายด่าง KOH	59
ตารางที่ 4.11 ภาพพื้นผิวของชิ้นงานทดลองก่อนและหลังจากแช่ในสารละลาย KOH เปรียบเทียบกัน ระหว่างเนื้อดินสูตรทดลองและสูตรอ้างอิง	60
ตารางที่ 4.12 องค์ประกอบทางเคมีของเคลือบอ้างอิง (Glaze-R)	62
ตารางที่ 4.13 ส่วนผสมของเคลือบพื้นฐานที่จะนำมาทดลองใช้และราคาวัตถุดิบ	62
ตารางที่ 4.14 ผลการศึกษาก่อนองค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบหลักที่ใช้ในสูตรเคลือบ ด้วยเทคนิค XRF	63
ตารางที่ 4.15 คุณสมบัติของน้ำเคลือบ ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของสูตรเคลือบที่ได้	64
ตารางที่ 4.16 ลักษณะของชิ้นงานเคลือบ (บนเนื้อดิน GFB-16 และ A90) ที่ได้หลังเผา	64
ตารางที่ 4.17 ความทนต่อต่างของชิ้นงานสูตรเคลือบที่ใช้กับเนื้อดินสูตร A90	65
ตารางที่ 4.18 ผลการทดสอบการวัดขนาดชิ้นงานแบบพิมพ์เซรามิกสูตรทดลองเทียบกับขนาดตามสเปค	71
ตารางที่ 4.19 ผลการทดสอบความทนทานต่อการเปลี่ยนอุณหภูมิเฉียบพลัน (Thermal Shock Resistance) ของชิ้นงานแบบพิมพ์เซรามิกทั้ง 3 สูตร	72

สารบัญตาราง (ต่อ)

	หน้า
ตารางที่ 4.20 ผลการทดสอบความทนต่าง (Alkaline Resistance) ของชิ้นงานแบบพิมพ์เซรามิก ทั้ง 3 สูตร	72
ตารางที่ 4.21 ความทนต่อต่างของชิ้นงานและต้นแบบสูตรเคลือบที่ใช้กับเนื้อดินสูตร A90	74
ตารางที่ 4.22 ผลการวัดขนาดของชิ้นงานต้นแบบแบบพิมพ์แบบผิวไม่เรียบและไม่มีเคลือบขนาด L เทียบกับสเปคของแบบพิมพ์ทางการค้า	77
ตารางที่ 4.23 ผลการทดสอบความทนทานต่อการเปลี่ยนอุณหภูมิเฉียบพลัน (Thermal Shock Resistance) และความทนต่าง (Alkaline Resistance) ของชิ้นงานต้นแบบภาคสนาม เทียบกับแบบพิมพ์ทางการค้าแบบผิวไม่เรียบ และไม่มีเคลือบ	78
ตารางที่ 4.24 ผลการสุ่มตรวจสอบคุณภาพถุงมืออย่างที่ผลิตจากแบบพิมพ์ที่พัฒนาขึ้น	79
ตารางที่ 4.25 การคำนวณต้นทุนวัตถุดิบของสูตรดินทดลองเทียบกับสูตรอ้างอิง	80
ตารางที่ 4.26 ต้นทุนการผลิตแบบพิมพ์เซรามิกสำหรับขึ้นรูปถุงมือยางชนิดที่ไม่มีเคลือบ	81
ตารางที่ 4.27 ต้นทุนการผลิตแบบพิมพ์เซรามิกสำหรับขึ้นรูปถุงมือยางชนิดที่มีเคลือบ	81
ตารางที่ 5.1 สมบัติของชิ้นงานสูตรที่มีสมบัติที่เหมาะสมกับการนำไปพัฒนาเป็นต้นแบบ	82
ตารางที่ 5.2 การเปรียบเทียบคุณสมบัติแบบพิมพ์เซรามิกสำหรับการขึ้นรูปถุงมือยาง	83

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1.1 ปริมาณการส่งออกผลิตภัณฑ์ถุงมือยางให้กับสหรัฐอเมริกาจากผู้ส่งออกหลัก 4 ประเทศ	2
รูปที่ 1.2 ปริมาณการส่งออกผลิตภัณฑ์ถุงมือยางให้กับสหภาพยุโรปจากผู้ส่งออกหลัก 4 ประเทศ	2
รูปที่ 1.3 ตลาดถุงมือยางธรรมชาติสำหรับงานอุตสาหกรรมในสหรัฐอเมริกา	3
รูปที่ 2.1 แผนภาพกระบวนการผลิตอย่างง่าย ผลิตภัณฑ์ถุงมือยางที่ใช้ในทางการแพทย์	7
รูปที่ 2.2 กระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ถุงมือยางที่ใช้ในทางการแพทย์	8
รูปที่ 2.3 ตัวอย่างแบบพิมพ์ (Formers) สำหรับผลิตถุงมือยาง	8
รูปที่ 3.1 ขนาดของฐานรองและชิ้นงานสำหรับทดสอบการตกตัว	26
รูปที่ 4.1 ลักษณะแบบพิมพ์ถุงมือยางและถุงมือยางที่ได้จากกระบวนการผลิต	34
รูปที่ 4.2 ลักษณะฐานของแบบพิมพ์และตัวยึดที่ติดตั้งกับสายการผลิต	34
รูปที่ 4.3 แบบพิมพ์เซรามิกขนาด M, L และ XL ที่จะใช้เป็นแม่แบบ	35
รูปที่ 4.4 XRD pattern ของ Former sample	37
รูปที่ 4.5 XRD pattern ของดินขาว	37
รูปที่ 4.6 XRD pattern ของดินดำ	38
รูปที่ 4.7 XRD pattern ของโปแตสเฟลด์สปาร์	38
รูปที่ 4.8 XRD pattern ของโซดาเฟลด์สปาร์	39
รูปที่ 4.9 XRD pattern ของควอทซ์	39
รูปที่ 4.10 ตัวอย่างชิ้นงานทดลองหลังอบแห้ง	45
รูปที่ 4.11 ตัวอย่างชิ้นงานทดลองหลังเผาที่อุณหภูมิ 1280°C	46
รูปที่ 4.12 ตัวอย่างการทดสอบระยะตกตัวของชิ้นงานหลังเผาที่อุณหภูมิ 1280°C	46
รูปที่ 4.13 การหัดตัวหลังเผาของชิ้นงานสูตร GFB-02-GFB-16 กับสูตรอ้างอิง Body-R	47
รูปที่ 4.14 การหัดตัวหลังเผาของชิ้นงานสูตร A85-A95 กับสูตรอ้างอิง Body-R ที่อุณหภูมิต่างๆ	47
รูปที่ 4.15 ความแข็งแรงหลังเผาของชิ้นงานสูตร GFB-02-GFB-16 กับสูตรอ้างอิง Body-R ที่อุณหภูมิต่างๆ	48
รูปที่ 4.16 ความแข็งแรงหลังเผาของชิ้นงานสูตร A85 - A95 กับสูตรอ้างอิง Body-R ที่อุณหภูมิต่างๆ	48
รูปที่ 4.17 การดูดซึมน้ำของชิ้นงานสูตร GFB-02 - GFB-16 กับสูตรอ้างอิง Body-R ที่อุณหภูมิต่างๆ	49
รูปที่ 4.18 การดูดซึมน้ำของชิ้นงานสูตร A85 - A95 กับสูตรอ้างอิง Body-R ที่อุณหภูมิต่างๆ	49
รูปที่ 4.19 ความพรุนตัวของชิ้นงานสูตร GFB-02 - GFB-16 กับสูตรอ้างอิง Body-R ที่อุณหภูมิต่างๆ	50
รูปที่ 4.20 ความพรุนตัวของชิ้นงานสูตร A85 - A95 กับสูตรอ้างอิง Body-R ที่อุณหภูมิต่างๆ	50
รูปที่ 4.21 ความหนาแน่นของชิ้นงานสูตร GFB-02 - GFB-16 กับสูตรอ้างอิง Body-R ที่อุณหภูมิต่างๆ	51

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.22 ความหนาแน่นของชิ้นงานสูตร A85 – A95 กับสูตรอ้างอิง Body-R ที่อุณหภูมิต่างๆ	51
รูปที่ 4.23 XRD pattern ของเนื้อดินสูตรอ้างอิง (Body-R)	53
รูปที่ 4.24 XRD pattern ของเนื้อดินสูตรทดลอง GFB-16	54
รูปที่ 4.25 XRD pattern ของเนื้อดินสูตรทดลอง A90	54
รูปที่ 4.26 (a)-(d) SEM Micrograph ที่กำลังขยาย 1000 เท่าของชิ้นงานต่างๆ	55
รูปที่ 4.27 (a)-(d) SEM Micrograph ที่กำลังขยาย 3000 เท่าของชิ้นงานต่างๆ	56
รูปที่ 4.28 ตัวอย่างชิ้นงานทดลองก่อนการทดสอบ Thermal Shock Resistance	57
รูปที่ 4.29 ตัวอย่างชิ้นงานทดลองหลังการทดสอบ Thermal Shock Resistance	57
รูปที่ 4.30 เครื่องทดสอบความหยาบพื้นผิวแบบไม่สัมผัส (Surface Roughness Tester–Non Contact)	58
รูปที่ 4.31 ลักษณะแบบพิมพ์เซรามิกชนิดที่ไม่มีเคลือบและมีเคลือบ	61
รูปที่ 4.32 ตัวอย่างแบบพิมพ์มือที่ใช้เป็นต้นแบบ (Model)	66
รูปที่ 4.33 การหล่อแบบพิมพ์ Master mold จากต้นแบบ (Model)	66
รูปที่ 4.34 การทำแม่พิมพ์ Case mold	67
รูปที่ 4.35 ตัวอย่างแม่พิมพ์สำหรับหล่อน้ำดิน (Working mold)	68
รูปที่ 4.36 ตัวอย่างการหล่อน้ำดินใน Working mold และการแกะแบบชิ้นงานเป็นต้นแบบแบบพิมพ์มือตามสูตรเนื้อดินต่างๆ	68
รูปที่ 4.37 ตัวอย่างแบบพิมพ์เซรามิกสูตรดินอ้างอิง Body-R ขนาด M, L และ XL (ตามลำดับซ้ายไปขวา)	70
รูปที่ 4.38 ตัวอย่างแบบพิมพ์เซรามิกสูตรดินทดลอง GFB-16 ขนาด M, L และ XL (ตามลำดับซ้ายไปขวา)	70
รูปที่ 4.39 ตัวอย่างแบบพิมพ์เซรามิกสูตรดินทดลอง A90 ขนาด M, L และ XL (ตามลำดับซ้ายไปขวา)	71
รูปที่ 4.40 ตัวอย่างต้นแบบห้องปฏิบัติการแบบพิมพ์เซรามิกแบบผิวเรียบเคลือบสูตรอ้างอิง (Glaze-R)	74
รูปที่ 4.41 ตัวอย่างต้นแบบห้องปฏิบัติการแบบพิมพ์เซรามิกแบบผิวเรียบ เคลือบสูตร GFG-15	74
รูปที่ 4.42 ตัวอย่างต้นแบบห้องปฏิบัติการแบบพิมพ์เซรามิกขนาด L แบบผิวเรียบ เคลือบสูตร GFG-25	75
รูปที่ 4.43 ความหยาบของผิวแบบพิมพ์ในระดับ 1-3 จากน้อยไปมาก	75
รูปที่ 4.44 ตัวอย่างต้นแบบภาคสนามแบบพิมพ์เซรามิกขนาด L แบบผิวไม่เรียบ (พ่นทราย) ไม่มีเคลือบ	76
รูปที่ 4.45 ลักษณะการใช้งานแบบพิมพ์เซรามิกในกระบวนการผลิตถุงมือยาง	78

กิตติกรรมประกาศ

โครงการนี้ได้รับการสนับสนุนงบประมาณการวิจัยพัฒนา จากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ในปีงบประมาณ 2559-2561 ทางทีมงานวิจัยจึงใคร่ขอขอบคุณหน่วยงานและคณะกรรมการ ผู้พิจารณาให้ทุนตลอดจนให้ข้อชี้แนะต่างๆ ในการทำวิจัย รวมถึงขอขอบคุณบริษัท วัฒนชัยรับเบอร์เมท จำกัด ที่ให้ความร่วมมือในการทำวิจัย ในการให้ข้อมูลและการให้ความอนุเคราะห์ตรวจสอบคุณภาพของแบบพิมพ์ และการนำแบบพิมพ์ไปใช้ในกระบวนการผลิตจริง ทีมงานวิจัย จึงขอขอบคุณทุกฝ่ายที่เกี่ยวข้อง ที่ให้การสนับสนุนและช่วยเหลือ จนทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ทีมวิจัย

30 สิงหาคม 2561

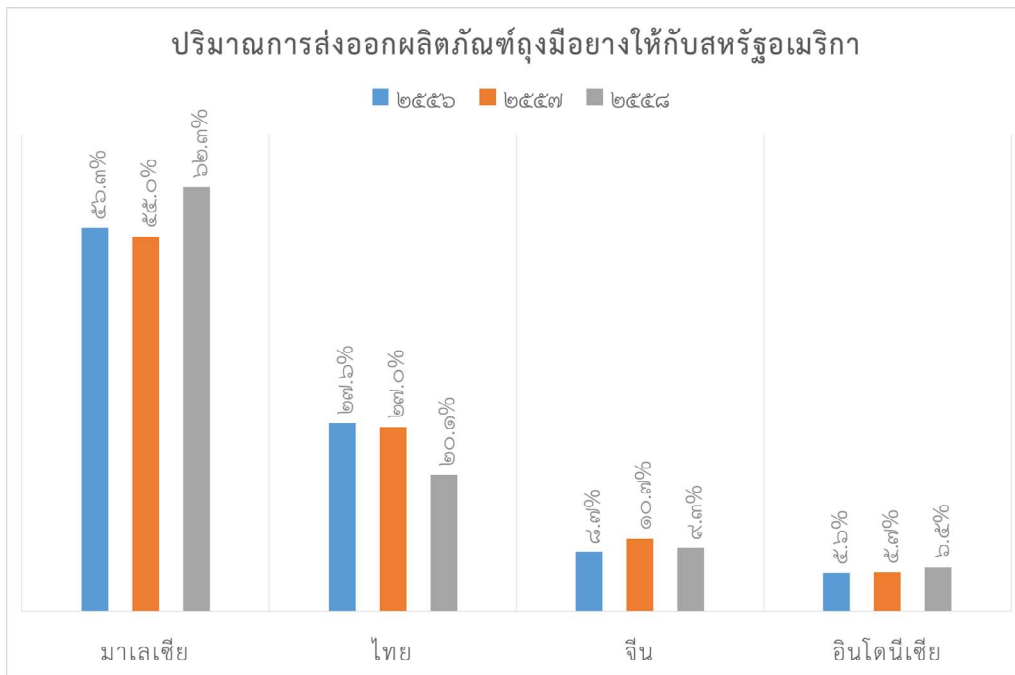
สัญญาเลขที่ RDG60T0141
โครงการ “การพัฒนาเนื้อดินและเคลือบสำหรับทำแบบพิมพ์เซรามิกขึ้นรูปถุงมือยาง
โดยวิธีการจุ่มในระดับอุตสาหกรรม”
รายงานฉบับสมบูรณ์

บทที่ 1
บทนำ

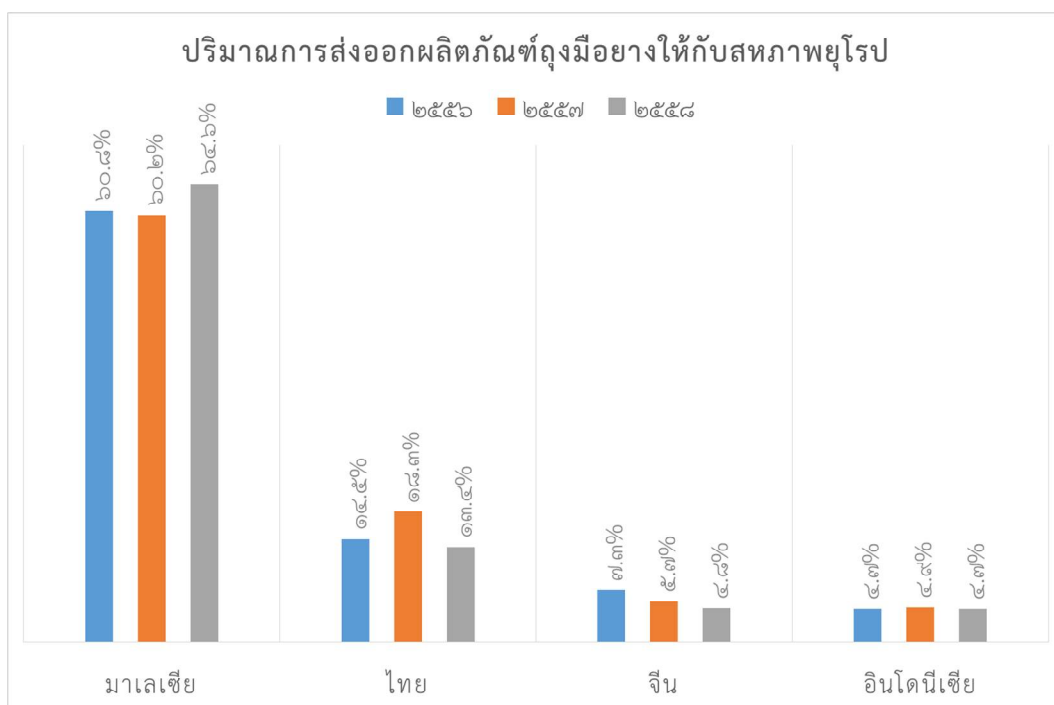
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

“ยางพารา” เป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทย ที่สามารถนำมาใช้ทำเป็นผลิตภัณฑ์ปลายน้ำได้หลากหลายชนิดครอบคลุมกับหลากหลายอุตสาหกรรม จึงทำให้อุตสาหกรรมยางและผลิตภัณฑ์ยาง มีบทบาททั้งในแง่ของการจ้างงานและการส่งออก เนื่องจากประเทศไทยมีศักยภาพสูงด้านวัตถุดิบที่เป็นข้อได้เปรียบประเทศคู่แข่ง สำหรับด้านการจ้างงานมีเกษตรกรกว่า 6 ล้านคน และแรงงานในอุตสาหกรรมกว่า 200,000 คน ในด้านการส่งออก อุตสาหกรรมยางและผลิตภัณฑ์ยางมีมูลค่าอยู่ในลำดับต้นๆ ของการส่งออกของไทย โดยในปี 2558 มีมูลค่าการส่งออกยาง 170,418.73 ล้านบาท และมูลค่าการส่งออกผลิตภัณฑ์ยางสูงถึง 230,374.20 ล้านบาท (สถาบันวิจัยยาง, 2559)

ในปี 2558 มีปริมาณการบริโภคยางของโลกรวม 26.8 ล้านตัน แบ่งออกได้เป็น ยางสังเคราะห์ 14.4 ล้านตัน และยางธรรมชาติ 12.4 ล้านตัน โดย International Rubber Study Group (IRSG) ได้รายงานถึงความสำคัญของภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ที่เป็นแหล่งเพาะปลูกยางพาราและแหล่งผลิตผลิตภัณฑ์ยางพาราขั้นต้นที่สำคัญของโลก ที่ปี 2558 มีผลผลิตยางพารารวมคิดเป็นร้อยละ 92 ของผลผลิตยางพาราโลก โดยประเทศไทยยังเป็นประเทศผู้ผลิตและส่งออกยางพาราอันดับหนึ่ง มีผลผลิต 4.5 ล้านตัน คิดเป็นสัดส่วน 35.7% ของผลผลิตโลก และมีปริมาณการส่งออกประมาณ 3.7 ล้านตัน แต่เมื่อพิจารณาที่อุตสาหกรรมปลายน้ำกลับพบว่า ผลิตภัณฑ์ถุงมือยางของไทยมีส่วนแบ่งการตลาดเพียง 17% ในขณะที่คู่แข่งสำคัญอย่างมาเลเซียที่มีพื้นที่ปลูกยางพาราและผลผลิตยางที่ต่ำกว่ากลับมีส่วนแบ่งการตลาดที่สูงถึง 51% โดยทั้งมาเลเซียและไทยมีสหรัฐอเมริกาและสหภาพยุโรปเป็นลูกค้าหลัก และมีอัตราการเติบโตเฉลี่ยสะสมของการส่งออกในช่วง 6 ปีที่ผ่านมาใกล้เคียงกันคือที่ร้อยละ 10 และ 11 ตามลำดับ ซึ่งใกล้เคียงกับอัตราการขยายตัวเฉลี่ยของความต้องการใช้ถุงมือยางของโลกที่ร้อยละ 10 (สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม, 2559)



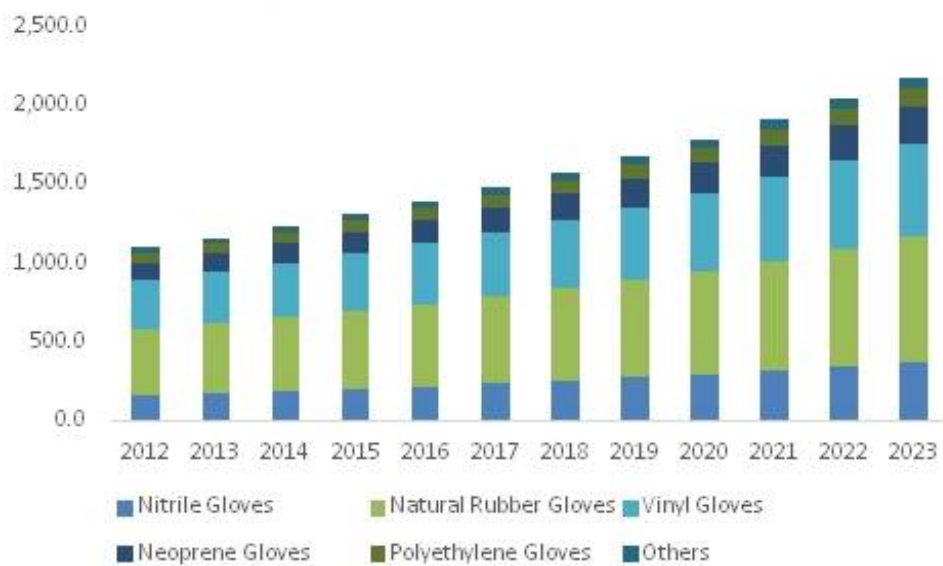
รูปที่ 1.1 ปริมาณการส่งออกผลิตภัณฑ์ถุ่มีอย่างให้กับสหรัฐอเมริกา
จากผู้ส่งออกหลัก 4 ประเทศ



รูปที่ 1.2 ปริมาณการส่งออกผลิตภัณฑ์ถุ่มีอย่างให้กับสหภาพยุโรป
จากผู้ส่งออกหลัก 4 ประเทศ

ตามรายงานผลการวิจัยฉบับใหม่โดย Global Market Insights, Inc. ระบุว่า ตลาดถุงมือยางธรรมชาติสำหรับงานอุตสาหกรรม มีมูลค่า 4,000 ล้านดอลลาร์สหรัฐ ในปี 2558 และคาดว่าจะเติบโตขึ้นร้อยละ 6.2 ในปี 2566 เนื่องจากอุปสงค์ถุงมือยางธรรมชาติสำหรับงานอุตสาหกรรมต่างๆ ที่เพิ่มขึ้น เช่น อุตสาหกรรมยานยนต์ น้ำมันและก๊าซ เหมืองแร่ แปรรูปอาหาร เคมี และอุตสาหกรรมการบิน ที่คาดว่าจะเป็นที่ปัจจัยขับเคลื่อนตลาดถุงมือยางธรรมชาติสำหรับงานอุตสาหกรรมของโลก นับเป็นโอกาสด้านการส่งออกให้กับผู้ประกอบการอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ยางในเชิงรุกทั้งตลาดการส่งออกใหม่ และการขยายตลาดการส่งออกที่มีอยู่เดิม (Global Market Insights Inc., 2559)

U.S. Industrial Safety Gloves Market size, by material, 2012-2023 (USD Million)



รูปที่ 1.3 ตลาดถุงมือยางธรรมชาติสำหรับงานอุตสาหกรรมในสหรัฐอเมริกา

แม้ว่าไทยจะมีข้อได้เปรียบในเรื่องของยางธรรมชาติ เนื่องจากเป็นผู้ผลิตและส่งออกยางธรรมชาติเป็นอันดับ 1 ของโลก รวมถึงการได้เปรียบเรื่องค่าแรงงาน แต่เมื่อได้ทำการวิเคราะห์ศักยภาพของอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ถุงมือยางไทยเมื่อเทียบกับประเทศมาเลเซีย โดยการวิเคราะห์ค่าดัชนีความได้เปรียบโดยเปรียบเทียบ (Revealed Competitive Advantage Index: RCA) โดยใช้หลักของการเปรียบเทียบส่วนแบ่งการส่งออกของสินค้าชนิดหนึ่งจากการส่งออกทั้งหมดของประเทศนั้นกับส่วนแบ่งของการส่งออกสินค้าชนิดดังกล่าวจากการส่งออกทั้งหมดของโลก พบว่ามาเลเซียมีค่า RCA ในการส่งออกเฉลี่ยในช่วงปี 2009-2014 สูงถึง 37 ขณะที่ประเทศไทยมีค่า RCA ในการส่งออกเพียง 12 หรือ มาเลเซียสูงกว่าเป็น 3 เท่าของไทย เนื่องจากหลายปัจจัย เช่น มาเลเซียมีบริษัทท้อปโกลฟ ที่เป็นผู้ผลิตและส่งออกถุงมือรายใหญ่ที่สุดของโลก มีเทคโนโลยีการผลิตและการตรวจสอบคุณภาพที่รวดเร็วและทันสมัย มีการพัฒนาและวิจัยผลิตภัณฑ์อย่างต่อเนื่อง

จะเห็นได้ว่า ปัญหาสำหรับผู้ประกอบการที่ใช้แบบพิมพ์ถุงมืออย่างเป็นเซรามิกในประเทศ คือ การที่ไม่มีผู้ผลิตแบบพิมพ์เซรามิกในประเทศ หรือมีผู้ผลิต แต่ก็ผลิตเพื่อส่งออกไปยังตัวแทนขายในต่างประเทศ ทำให้ผู้ประกอบการในประเทศต้องทำการจัดหาแบบพิมพ์เซรามิกโดยการนำเข้าต่างประเทศ โดยเฉพาะแบบพิมพ์ถุงมือที่ใช้ในอุตสาหกรรมยางวิศวกรรมและอุตสาหกรรม จะพบปัญหามากกว่า เนื่องจากเป็นแบบพิมพ์ที่ต้องใช้ฝีมือและประสบการณ์ในการผลิตที่ต้องสั่งสมมา การผลิตแต่ละครั้งต้องใช้เวลาเพราะเป็นงานฝีมือ และเมื่อแบบพิมพ์เสียหายและชำรุด ก็จำเป็นต้องใช้เวลาในการซ่อมแซมและปรับแต่ง ซึ่งถ้าหากไม่มีแบบพิมพ์สำรอง ก็จะทำให้การผลิตหยุดชะงัก ส่งผลต่อกระบวนการผลิตทั้งระบบ ดังนั้น การพัฒนาอุตสาหกรรมผู้ผลิตแบบพิมพ์เซรามิก ที่เป็นบริษัทคนไทยที่ผลิตและจำหน่ายในประเทศ ให้เกิดขึ้น จึงมีความสำคัญต่อห่วงโซ่ของการผลิตในกระบวนการอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ยางของไทยเป็นอย่างยิ่ง

ปัจจัยสำคัญที่ทำให้ไม่เกิดอุตสาหกรรมเซรามิกผู้ผลิตแบบพิมพ์ถุงมือ ในประเทศนั้น เกิดจากการขาดองค์ความรู้ และงานวิจัยและพัฒนาที่ผู้ประกอบการเซรามิกจะสามารถเข้าถึงและนำมาใช้ให้เป็นประโยชน์ได้ ถึงแม้ว่าการผลิตเซรามิกจำพวกพอร์ซเลน ในรูปแบบต่างๆ เช่น เครื่องใช้บนโต๊ะอาหาร ลูกถ้วยไฟฟ้า จะไม่ใช่เรื่องใหม่สำหรับอุตสาหกรรมเซรามิกในประเทศ แต่การใช้สูตรเนื้อดินและเคลือบ รวมถึงกระบวนการเตรียมและการขึ้นรูปที่เหมาะสมในการผลิตแบบพิมพ์เซรามิกนั้น จะมีความแตกต่างกัน โดยเฉพาะในเรื่องที่เกี่ยวกับความทนทานต่อการกัดกร่อนสารเคมี ซึ่งไม่ว่าจะเป็นการปรับสูตร การเปลี่ยนวัตถุดิบ วิธีการเตรียมน้ำดินและเคลือบ วิธีขึ้นรูปที่ซับซ้อนขึ้น และการเผาที่อุณหภูมิใดๆ ล้วนแล้วแต่เป็นปัจจัยที่ต้องทำการวิจัยเพื่อให้ผู้ผลิตสามารถผลิตได้ถูกต้อง และมีความเสียหายจากการผลิตน้อยที่สุด

ในโครงการนี้ เป็นโครงการที่เกี่ยวกับการพัฒนาเนื้อดินและเคลือบสำหรับทำแบบพิมพ์เซรามิกขึ้นรูปถุงมือยางโดยวิธีการจุ่มในระดับอุตสาหกรรม โดยจะมีการดำเนินการวิจัยและพัฒนาทั้งในเรื่องที่เกี่ยวกับ สูตรเนื้อดินและเคลือบ วิธีการเตรียมที่เหมาะสมในการนำไปขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อ อุณหภูมิการเผาที่เหมาะสม และการวิเคราะห์ทดสอบคุณสมบัติ เพื่อการนำไปผลิตแบบพิมพ์เซรามิกในรูปแบบต่างๆ รวมถึงจะมีการดำเนินการออกแบบ และเตรียมแม่พิมพ์ปูนปลาสเตอร์สำหรับการทำแบบพิมพ์ถุงมือ (case mould และ working mould) ตามขั้นตอนของการผลิตแม่พิมพ์เซรามิกโดยวิธีการหล่อ หลังจากนั้นจะนำงานวิจัยทั้งสองส่วน คือ ในส่วนของสูตรดินและเคลือบที่พัฒนาขึ้น กับแม่พิมพ์ปูนปลาสเตอร์ที่พัฒนาขึ้น มาทดลองใช้ด้วยกัน เพื่อทำเป็นต้นแบบแบบพิมพ์เซรามิกขึ้นรูปถุงมือ ทั้งในระดับห้องปฏิบัติการ และจะทำการขยายสเกลการผลิตเป็นระดับภาคสนาม เพื่อนำไปทดลองใช้งานจริงในกระบวนการผลิตถุงมือยาง ด้วยขอบเขตของงานดังกล่าว โครงการนี้จึงจะสามารถตอบโจทย์ความต้องการของผู้ประกอบการอุตสาหกรรมผลิตถุงมือยาง และผู้ที่สนใจ จะทำการผลิตแบบพิมพ์เซรามิก ที่จะเป็นอุตสาหกรรมสนับสนุน ได้เป็นอย่างดี เนื่องจากมีความครอบคลุมทั้งกระบวนการผลิตแบบพิมพ์ถุงมือยางเซรามิก รวมถึงผลการทดลองการนำต้นแบบที่ได้ไปใช้งานจริงในโรงงานผู้ผลิตถุงมือยาง

โครงการวิจัยนี้ เป็นการวิจัยเพื่อสร้างนวัตกรรมการเพิ่มมูลค่าของสินค้าและบริการ สามารถตอบสนองต่อแผนพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ ฉบับที่ 11 (พ.ศ.2555-2559) ยุทธศาสตร์การปรับโครงสร้างเศรษฐกิจสู่การเติบโตอย่างมีคุณภาพและยั่งยืน ที่ให้ความสำคัญกับการพัฒนาวิทยาศาสตร์

เทคโนโลยี วิจัย และนวัตกรรม ให้เป็นพลังขับเคลื่อนการปรับโครงสร้างเศรษฐกิจให้เติบโตอย่างมีคุณภาพและยั่งยืน และสนับสนุนต่อการดำเนินงานตามนโยบายและแผนวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและนวัตกรรมแห่งชาติ ฉบับที่ 1 (พ.ศ.2555-2564) ยุทธศาสตร์ที่ 2 การเพิ่มขีดความสามารถ ความยืดหยุ่น และนวัตกรรม ในภาคเกษตร ผลิตและบริการ ด้วย วทน. กลยุทธ์ที่ 2.2 วทน. เพื่อการสร้างมูลค่าเพิ่ม สร้างคุณค่าและนวัตกรรมรายสาขา ที่ให้ความสำคัญกับการพัฒนาวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี วิจัย และนวัตกรรม ให้เป็นพลังขับเคลื่อนการปรับตัวรองรับเศรษฐกิจสีเขียว มุ่งเน้นการสร้าง ความแตกต่าง และสนับสนุนต่อ นโยบายและยุทธศาสตร์การวิจัยของชาติ ฉบับที่ 8 (พ.ศ.2555-2559) ที่เน้นการบูรณาการด้านการวิจัยที่สอดคล้องกับแนวนโยบายและยุทธศาสตร์การพัฒนาประเทศ ตามยุทธศาสตร์การวิจัยที่ 2 การสร้างศักยภาพและความสามารถในการพัฒนาทางเศรษฐกิจ มุ่งเน้นการวิจัยเพื่อการพัฒนาประสิทธิภาพการผลิตทางอุตสาหกรรม การพัฒนาด้านพลังงาน โลจิสติกส์ และเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร โดยส่งเสริมและสนับสนุนการวิจัยและพัฒนาในภาคเอกชน และส่งเสริมการนำกระบวนการวิจัย ผลงานวิจัย องค์ความรู้ นวัตกรรม และเทคโนโลยีจากงานวิจัยไปใช้ประโยชน์อย่างเป็นรูปธรรม โดยความร่วมมือของภาคส่วนต่างๆ

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

การพัฒนาเนื้อดินและเคลือบสำหรับทำแบบพิมพ์เซรามิกขึ้นรูปถွ่มมื่ออย่างโดยวิธีการจุ่มในระดับอุตสาหกรรม จะให้ความสำคัญกับการพัฒนาบนพื้นฐานการวิจัยและนวัตกรรม มีผลงานวิจัยที่มีคุณภาพ และสามารถนำองค์ความรู้และนวัตกรรมจากงานวิจัยไปใช้ให้เกิดประโยชน์ได้จริง ประกอบด้วย 3 วัตถุประสงค์หลัก ดังนี้

- 1) เพื่อวิจัยและพัฒนาเนื้อดินและเคลือบที่เหมาะสมสำหรับการทำแบบพิมพ์เซรามิกขึ้นรูปถွ่มมื่ออย่างโดยวิธีการจุ่ม
- 2) พัฒนาต้นแบบในระดับห้องปฏิบัติการแบบพิมพ์เซรามิกขึ้นรูปถွ่มมื่ออย่างโดยวิธีการจุ่มในระดับอุตสาหกรรมด้วยสูตรเนื้อดินและเคลือบที่พัฒนาขึ้น
- 3) ขยายสเกลการผลิตต้นแบบพิมพ์เซรามิกขึ้นรูปถွ่มมื่ออย่างโดยวิธีการจุ่ม เพื่อนำไปทดลองใช้จริงในการผลิตถွ่มมื่ออย่างในอุตสาหกรรมการผลิตถွ่มมื่ออย่าง

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) เนื้อดินและเคลือบที่เหมาะสมสำหรับการทำแบบพิมพ์เซรามิกขึ้นรูปถွ่มมื่ออย่างโดยวิธีการจุ่ม
- 2) ต้นแบบในระดับภาคสนามแบบพิมพ์เซรามิกขึ้นรูปถွ่มมื่ออย่างโดยใช้สูตรเนื้อดินและเคลือบที่พัฒนาขึ้น
- 3) องค์ความรู้การทำแบบพิมพ์เซรามิกขึ้นรูปถွ่มมื่ออย่างโดยวิธีการจุ่มในระดับอุตสาหกรรม เพื่อสนับสนุนการเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันให้กับอุตสาหกรรมไทย

บทที่ 2

ทฤษฎีและการทบทวนวรรณกรรม

2.1 แนวคิดและหลักการที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 กระบวนการผลิตถุงมือยาง

ถุงมือยางสามารถแบ่งตามลักษณะการใช้งานออกได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่

2.1.1.1 ถุงมือยางที่ใช้ในการแพทย์ (Medical Glove) ซึ่งแบ่งย่อยได้เป็น 2 ชนิด

- ถุงมือยางตรวจโรค (Examination Glove) ถุงมือชนิดนี้จะมีชนิดแบบที่มีแป้ง (Powdered) และไม่มีแป้ง (Non-Powdered) ถุงมือชนิดนี้มีความบาง กระชับมือ ความยาวอยู่แค่ข้อมือ การผลิตต้องออกแบบให้เหมาะกับการใช้งาน คือสวมใส่ง่าย และเป็นถุงมือที่ใช้ครั้งเดียวแล้วทิ้ง เพื่อป้องกันการกระจายของเชื้อโรค ราคาจะถูกกว่าถุงมือที่ใช้ในงานศัลยกรรม ผลิตภัณฑ์ถุงมือยางตรวจโรคนี้ ต้องเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีมาตรฐานตาม มอก.1056 เล่ม 1-2556 ถุงมือสำหรับการตรวจวินิจฉัยทางการแพทย์ชนิดใช้ครั้งเดียว เล่ม 1: เกณฑ์กำหนดสำหรับถุงมือที่ทำจากน้ำยางและสารละลายยาง

- ถุงมือยางศัลยกรรม (Surgical Glove) ถุงมือชนิดนี้จะมีเนื้อบาง แข็งแรง ยาวถึงข้อศอก ขั้นตอนการผลิตที่สำคัญคือกระบวนการฆ่าเชื้อ ซึ่งต้องใช้รังสีแกมมา ทำให้มีราคาค่อนข้างแพง การบรรจุหีบห่อจะมีความประณีตกว่าถุงมือแบบอื่น เนื่องจากต้องปลอดเชื้อ 100% ต้องสะดวกเวลาแกะใช้งาน และจะไม่มีการนำกลับมาใช้ใหม่ ถุงมือยางประเภทนี้ต้องมีมาตรฐานตาม มอก.538-2548 ถุงมือยางปราศจากเชื้อสำหรับการศัลยกรรมชนิดใช้ครั้งเดียว

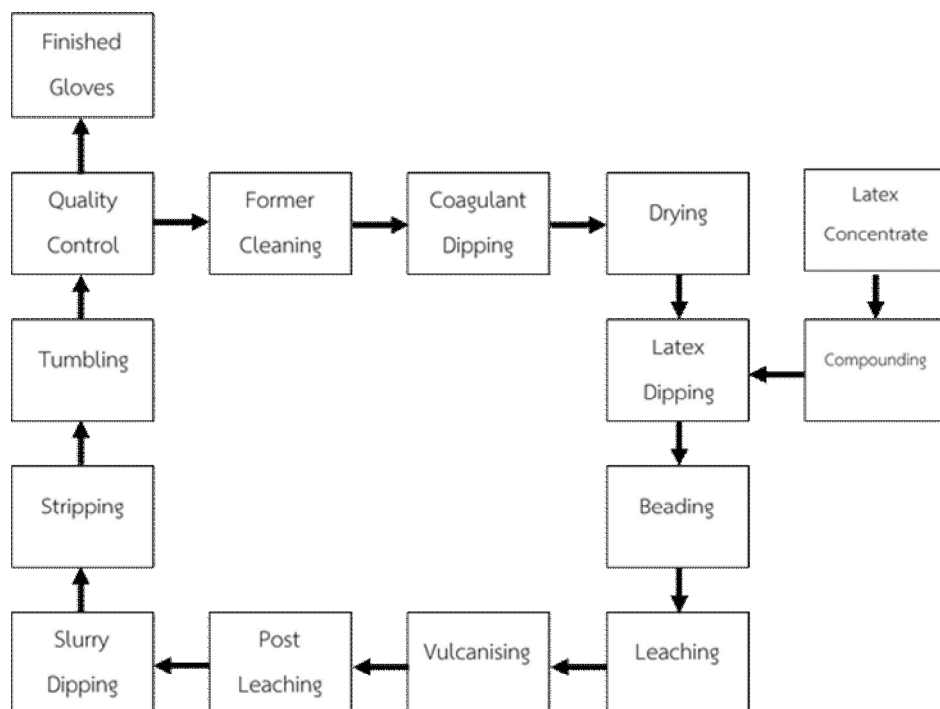
ถุงมือยางที่ใช้ในทางการแพทย์นี้ทั้งสองชนิดนี้ นับเป็นสินค้าที่เข้าข่ายเครื่องมือแพทย์ ทางสำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา (อย.) กระทรวงสาธารณสุข จึงประกาศให้เป็นสินค้าที่ต้องมีการควบคุม และกำหนดมาตรฐานการผลิตและการนำเข้า ตามประกาศในราชกิจจานุเบกษา 25 ธันวาคม 2555 สำหรับถุงมือสำหรับตรวจโรค และประกาศในราชกิจจานุเบกษา 24 พฤษภาคม 2547 สำหรับถุงมือสำหรับการศัลยกรรม เพื่อให้ผลิตภัณฑ์ทั้งสองชนิดนี้มีความเหมาะสม ปลอดภัย และเป็นสากล

2.1.1.2 ถุงมือยางที่ใช้ในงานบ้าน (Household Glove) ถุงมือชนิดนี้จะมีขนาดใหญ่ แข็งแรงทนทาน เนื้อหนากว่าถุงมือยางที่ใช้ในการแพทย์ เนื่องจากต้องสัมผัสกับน้ำผงซักฟอก หรือน้ำยาทำความสะอาดต่างๆ จะออกแบบให้มีอายุใช้งานได้นาน และมักมีการออกแบบให้มีสีสันทนสวยงาม สวมใส่สบาย นุ่มมือ บรรจุหีบห่ออย่างประณีตสวยงาม เพื่อดึงดูดแม่บ้าน เพราะเป็นสินค้าอุปโภคบริโภค ต่างจากถุงมือที่ใช้ในการแพทย์ ถุงมือยางประเภทนี้ต้องมีมาตรฐานตาม มอก.2476-2552 ถุงมือยางที่ใช้ในงานบ้าน

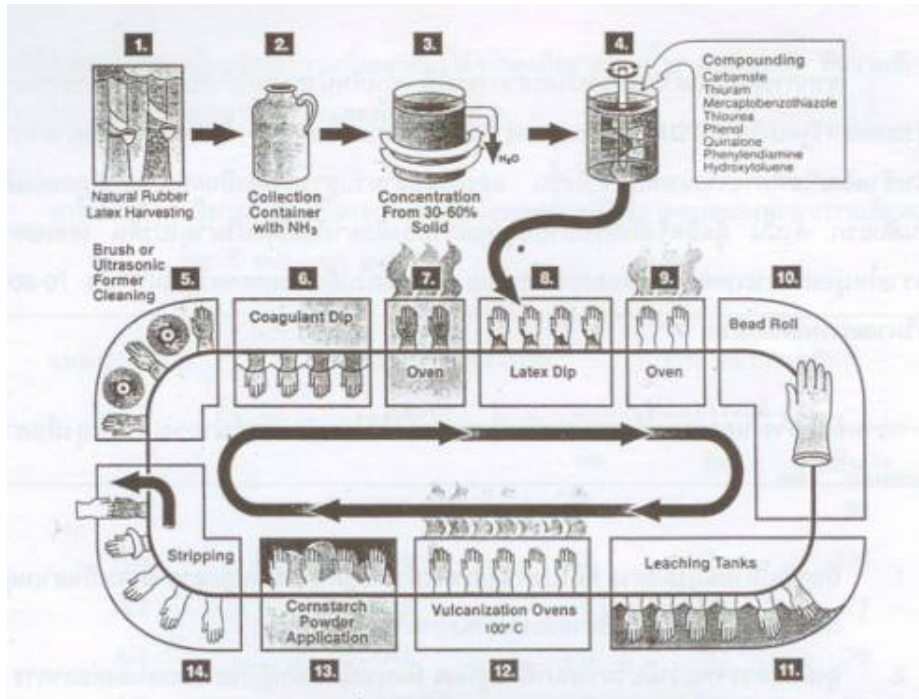
2.1.1.3 ถุงมือยางที่ใช้ในอุตสาหกรรม (Industrial Glove) เช่น อุตสาหกรรมอาหาร ไฟฟ้า

อิเล็กทรอนิกส์ ฯลฯ ถุงมือประเภทนี้จะมีขนาดใหญ่ แข็งแรง ดูเทอะทะ ไม่สวยงาม แต่ต้องมีความทนทานต่อการใช้งานในโรงงานอุตสาหกรรม การบรรจุหีบห่อไม่จำเป็นต้องสวยงาม เนื่องจากไม่ใช่สินค้าสำหรับผู้บริโภค ถุงมือยางประเภทนี้มีมาตรฐานควบคุมขึ้นอยู่กับการอุตสาหกรรมที่นำไปใช้งาน เช่น มอก.2505-2553 ถุงมือยางที่ใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร เป็นต้น

สำหรับกระบวนการผลิตถุงมือยางใช้เทคนิคการจุ่มโดยใช้สารช่วยน้ำยางจับตัว (Coagulant Dipping) ซึ่งมีหลักการทั่วไป คือ จุ่มแบบพิมพ์ (Formers) ลงในสารช่วยจับตัวก่อน แล้วจึงจุ่มแบบพิมพ์ที่มีสารดังกล่าวเคลือบผิวแล้วลงในน้ำยางคอมพาวด์ จนเกิดการฟอร์มเจลยางแบบบางๆ บนผิวแบบพิมพ์ แล้วจึงยกขึ้นจากน้ำยางคอมพาวด์เพื่อผ่านไปที่กระบวนการขั้นตอนต่อไป โดยทั่วไปถุงมือมี 2 ชนิด คือ ชนิดที่มีแป้ง (Powdered Gloves) และชนิดไม่มีแป้ง (Powder-free Gloves) โดยถุงมือชนิดที่มีแป้งจะสวมใส่ได้ง่าย เพราะแป้งในถุงมือนอกจากจะทำหน้าที่หล่อลื่นแล้ว ยังดูดซับความชื้นขณะที่เราสวมใส่ถุงมือด้วย อย่างไรก็ตามสำหรับผู้แพ้โปรตีนในแป้ง และกลุ่มคนที่รำคาญจากการเปื้อนของฝุ่นแป้ง ก็สามารถเลือกใช้ถุงมือชนิดที่ไม่มีแป้งได้



รูปที่ 2.1 แผนภาพกระบวนการผลิตอย่างง่าย ผลิตภัณฑ์ถุงมือยางที่ใช้ในทางการแพทย์



รูปที่ 2.2 กระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ถุงมือยางที่ใช้ในการแพทย์

โดยกระบวนการผลิตถุงมือยางที่ใช้ในการแพทย์ มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1) การล้างแม่พิมพ์ (Formers Cleaning) ถือได้ว่าเป็นกระบวนการสำคัญมากขั้นตอนหนึ่งของการผลิตถุงมือยาง ในกรณีที่แบบพิมพ์สกปรกอาจจะทำให้ถุงมือที่ผลิตเกิดรอยร้าวได้ ปกติการทำทำความสะอาดแบบพิมพ์ (Formers) จะใช้กรดและด่างในการทำทำความสะอาด โดยกรดจะใช้ H_2SO_4 หรือ HCl และด่างจะใช้ $NaOH$ หรือ KOH หลังจากนั้นก็ล้างออกด้วยน้ำสะอาด



รูปที่ 2.3 ตัวอย่างแบบพิมพ์ (Formers) สำหรับผลิตถุงมือยาง

2) การอบแม่พิมพ์ (Oven1) เป็นการระเหยน้ำที่ติดเป็นฟิล์มบนแบบพิมพ์ให้แห้งจนหมด ก่อนที่จะจุ่มแบบพิมพ์ในถังสารช่วยจับตัว (Coagulant Tank) ช่วงระยะการอบแห้งขึ้นอยู่กับความเร็วของสายพานหรือกำลังการผลิตของสายพานการผลิต

3) การจุ่มสารช่วยจับตัว (Coagulant Dipping) สาร Coagulant เป็นสารละลายที่มีส่วนผสมของ CaNO_3 หรือ CaCl_2 ผสมกับ CaCO_3 ซึ่ง CaNO_3 หรือ CaCl_2 เป็นสารช่วยในการจับตัวของอนุภาคบางส่วน CaCO_3 เป็นตัวป้องกันการติดแบบพิมพ์ โดยอุณหภูมิของแบบพิมพ์ที่ลงจุ่มในถัง Coagulant ต้องมีอุณหภูมิประมาณ $50-60^\circ\text{C}$ เพื่อป้องกันไม่ให้น้ำยาจับตัวและเสียสภาพ โดยปกติในถัง Coagulant จะต้องมีการกวนอยู่เสมอเพื่อป้องกันการตกตะกอนของ Coagulant และมีการไหลไปในทิศทางเดียวกันกับทิศทางของแบบพิมพ์

4) การอบแห้งสาร Coagulant (Oven2) เป็นการทำให้สาร Coagulant บนผิวแบบพิมพ์แห้งก่อนที่จะลงจุ่มในถังน้ำยางคอมพาวด์ (Compound Latex)

5) การจุ่มน้ำยางคอมพาวด์ (Latex Dipping) เป็นกระบวนการเคลือบแผ่นฟิล์มน้ำยาง บนแบบพิมพ์มือ โดยมี CaCO_3 ในสาร Coagulant เป็นสารป้องกันการจับตัวระหว่างฟิล์มน้ำยางกับแบบพิมพ์มือ กระบวนการนี้ถือได้ว่ามีความสำคัญมากในกระบวนการผลิตถุงมือยาง เพราะคุณภาพของถุงมือยางขึ้นอยู่กับกระบวนการนี้เป็นส่วนใหญ่ โดยปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพถุงมือยางคือ อุณหภูมิของแบบพิมพ์มือ ความเร็วลงจุ่มระหว่างแบบพิมพ์มือและความเร็วของน้ำยางในถัง อุณหภูมิของน้ำยาง และคุณภาพของน้ำยางคอมพาวด์ถึงน้ำยางจะต้องออกแบบให้มีการกวนแบบช้าเพื่อป้องกันไม่ให้น้ำยางตกตะกอน และต้องมีการไหลตามทิศทางของการเคลื่อนที่ของแบบพิมพ์มือ น้ำยางคอมพาวด์ จะประกอบด้วยน้ำยางชั้นและสารเคมี ซึ่งสูตรเคมีจะมีความแตกต่างไปตามแต่ละผลิตภัณฑ์ เช่น ตัวอย่างสูตรเคมีสำหรับถุงมือยางธรรมชาติ ถุงมือแพทย์ จะประกอบด้วยสารเคมีต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 1.1

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างสูตรเคมี สำหรับการผลิตถุงมือยางธรรมชาติ ถุงมือแพทย์ ด้วยวิธีการจุ่มแบบพิมพ์

สารเคมี	น้ำหนักแห้ง (phr: ส่วนในร้อยของน้ำหนักยางแห้ง)
60% น้ำยางชั้น	100
10% KOH	0.3
20% Potassium laurate	0.2
50% Sulphur	0.5
50% ZDC	0.75
40% SDBE	0.5
40% Wingstay L	0.75
50% ZnO	0.4

6) การอบหมาดฟิล์มถุงมือ (Oven3) เป็นการให้ความร้อนทำให้ฟิล์มถุงมืออย่างแห้งพอหมาด เพื่อให้สามารถม้วนขอบถุงมืออย่างได้ อุณหภูมิในตู้อบจะอยู่ที่ประมาณ 100-120°C โดยแหล่งความร้อนอาจใช้ ก๊าซ LPG หรือเป็นไอน้ำจากหม้อไอน้ำ

7) การม้วนขอบถุงมือ (Beading) ถุงมือหลังจากการจุ่มในถังน้ำยางจะมีลักษณะของขอบไม่เท่ากันและไม่สวยงาม รวมถึงขอบถุงมือไม่แข็งแรง การม้วนขอบถุงมือจึงเป็นวิธีการแก้ปัญหาดังกล่าว

8) การล้างฟิล์มถุงมือ (Leaching) หลังจากการขึ้นรูปในถังน้ำยาง การล้างฟิล์มถุงมือจะเป็นการชะล้างสารเคมีที่ปนเปื้อนอยู่บนเนื้อยาง และยังเป็น การลดปริมาณโปรตีนในถุงมืออีกด้วย โดยอุณหภูมิในถังล้างจะอยู่ระหว่าง 60-70°C ใช้เวลาในการล้างนานประมาณ 5-10 นาที

9) การอบแห้ง (Oven4) เป็นการอบให้ถุงมืออย่างแห้งและทำให้เนื้อยางคงรูป เป็นกระบวนการที่สำคัญอีกกระบวนการหนึ่งที่ส่งผลต่อความแข็งแรงของถุงมืออย่าง อีกทั้งกระบวนการนี้เป็นกระบวนการที่ต้องใช้พลังงานมากที่สุดของการผลิต และยังมีประสิทธิภาพการใช้พลังงานต่ำ การอบแห้งจะใช้อุณหภูมิไม่เกิน 100-120°C นานประมาณ 30 นาที

10) การจุ่มแป้ง (Powder) เป็นกระบวนการเพื่อให้การถอดถุงมือทำได้ง่ายและสะดวกขึ้น ถุงมืออย่างไม่ติดกับแบบพิมพ์มือ

11) การอบแห้ง (Oven5) เป็นการอบถุงมืออย่างที่ผ่านการจุ่มน้ำแป้งให้แห้ง เพื่อการถอดจะได้สะดวกไม่เปื้อนจากน้ำแป้ง

12) การถอดถุงมือ (Striping) การถอดถุงมือเป็นขั้นตอนสุดท้ายในสายพานการผลิตถุงมืออย่าง ปัจจุบันการถอดถุงมือมีทั้งที่ใช้พนักงานถอด และการใช้เครื่องถอด

นอกจากนี้ ถุงมืออย่างที่ผลิตในโรงงานอุตสาหกรรมยังต้องผ่านกระบวนการอีกหลายขั้นตอน เพื่อให้ถุงมืออย่างทางการแพทย์สามารถใช้งานได้อย่างปลอดภัย คือ

1) การอบถุงมือให้ยางคงรูป เนื่องจากถุงมืออย่างที่ออกจากสายพานการผลิตยังมีความชื้นสูง และอาจจะยังคงรูปไม่สมบูรณ์ จึงต้องผ่านกระบวนการอบให้มีความชื้นอยู่ในค่าที่เหมาะสม หรือไม่มีความชื้นเหลืออยู่เลย ซึ่งจะทำให้มีลักษณะการคงรูปมากขึ้น ปกติจะใช้ตู้อบแบบลูกกลิ้งขนาดใหญ่ เพื่อให้สามารถอบถุงมือได้คราวละมากๆ

2) การทดสอบถุงมืออย่าง โดยใช้สายตา การใช้ลมเป่าให้ถุงมือโป่ง และการใช้น้ำในการทดสอบการรั่วซึม

3) การบรรจุกล่อง เพื่อรอส่งจำหน่าย

2.1.2 เนื้อดินเซรามิก

ในการผลิตเซรามิก สิ่งสำคัญสิ่งหนึ่งคือดิน (Clay) สำหรับดินที่ใช้ในการผลิตเซรามิกนี้ บางครั้งอาจได้จากแหล่งวัตถุดิบโดยตรง หรืออาจต้องนำดินจากแหล่งมาผ่านกระบวนการเพื่อกรอง และแยกสิ่งเจือปนต่างๆ ออก ซึ่งโดยส่วนมากจำเป็นต้องนำดินจากแหล่งมาผ่านกระบวนการให้ดินสะอาดขึ้น รวมทั้งนำดินนั้นมาผสมกับวัตถุดิบชนิดอื่น เช่น หินประเภทต่างๆ หรือออกไซด์ (Oxide) เพื่อให้มีสมบัติเหมาะสมที่สามารถนำมาใช้ขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ได้ตามความต้องการ เรียกดินหรืออัตราส่วนผสมของดินกับวัตถุดิบอื่นๆ นี้ว่าเนื้อดินเซรามิก (Ceramic Body)

เนื้อดินเซรามิกจึงหมายถึง การนำวัตถุดิบตั้งแต่หนึ่งชนิดขึ้นไป มาผสมเข้าด้วยกันตามสัดส่วน โดยมีเป้าหมายที่แน่นอนว่าจะทำผลิตภัณฑ์ชนิดใด ทั้งนี้เพื่อให้เนื้อเซรามิกมีสมบัติถูกต้อง และมีคุณภาพดีตามต้องการ (ทวี พรหมพุกษ์, 2523, หน้า 77) ดังนั้นการเตรียมเนื้อดิน มีวัตถุประสงค์เพื่อ เปลี่ยนแปลงความเหนียวและการหดตัวของเนื้อเซรามิก พัฒนาให้เนื้อเซรามิกมีการบิดงอแตกร้าวน้อยที่สุด เปลี่ยนแปลงระดับอุณหภูมิในการเผาของเนื้อเซรามิกให้สูงขึ้นหรือต่ำลง และปรับปรุงสมบัติในการหล่อของเนื้อเซรามิก

2.1.2.1 ประเภทของเนื้อเซรามิก

การแบ่งชนิดของเนื้อเซรามิก สามารถแบ่งได้ตามลักษณะของผลิตภัณฑ์หรือประเภทของอุตสาหกรรมที่ใช้เนื้อเซรามิกนั้นๆ ซึ่งสามารถแบ่งเนื้อเซรามิกที่ใช้ในอุตสาหกรรมได้เป็น 7 ประเภท ดังนี้

1) เนื้อเซรามิกที่ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตผลิตภัณฑ์ในงานก่อสร้าง (Building Materials) ซึ่งเนื้อเซรามิกสำหรับอุตสาหกรรมประเภทนี้ แบ่งออกได้ตามชนิดของผลิตภัณฑ์ ดังต่อไปนี้

- อิฐ (Brick) ได้แก่ อิฐธรรมดา (Common Brick) อิฐผิว (Facing Bricks) อิฐเบา (Hollow Bricks) เป็นต้น
- กระเบื้อง (Tile) ได้แก่ กระเบื้องมุงหลังคา (Roofing Tiles) กระเบื้องปูพื้น (Floor Tiles) กระเบื้องบุผนัง (Wall Tiles) และกระเบื้องโมเสค (Mosaic) เป็นต้น
- เครื่องสุขภัณฑ์ (Sanitary Ware) ได้แก่ เครื่องสุขภัณฑ์ชนิดเอิร์ทเธรนแวร์ (Sanitary Earthenware) เครื่องสุขภัณฑ์ชนิดวิเทรียสไชนา (Vitreous China Sanitary Ware) เครื่องสุขภัณฑ์จากดินทนไฟ (Fireclay Sanitary Ware) เครื่องสุขภัณฑ์ชนิดสโตนแวร์ (Stoneware Sanitary Ware) เป็นต้น

2) เนื้อเซรามิกที่ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตผลิตภัณฑ์ในครัวเรือน (House Ware) แบ่งตามประเภทของผลิตภัณฑ์ เพื่อการใช้งานได้ดังต่อไปนี้

- เครื่องใช้บนโต๊ะอาหาร ซึ่งทำจากเนื้อเซรามิกหลายประเภท ได้แก่ สโตนแวร์ เอิร์ทเธรนแวร์ วิเทรียสไชนา อเมริกันโฮเทลไชนา อเมริกันเฮาส์โฮลด์ไชนา (American Household China) โบนไชนา และพอร์ซเลนแบบแข็งแกร่ง เป็นต้น
- ผลิตภัณฑ์สำหรับใช้ในเตาอบ (Ovenproof Ware) หรือผลิตภัณฑ์ทนความร้อน (Heat Resistant Ware)
- ผลิตภัณฑ์ทางศิลปะ

3) เนื้อเซรามิกในอุตสาหกรรมผลิตอุปกรณ์ทางเคมีเพื่อใช้ในห้องทดลอง และผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในอุตสาหกรรมทั่วไป เช่น หลอดด้ายสำหรับอุตสาหกรรมทอผ้า ไส้กรองน้ำ (Filter) กระเบื้องสำหรับปูพื้นโต๊ะในห้องทดลอง เป็นต้น ซึ่งเนื้อเซรามิกจะมีสมบัติต่างกันไปตามความต้องการด้านสมบัติ การผลิตและการขึ้นรูป โดยเนื้อเซรามิกที่ใช้ เช่น สโตนแวร์สีขาว อิฐและกระเบื้องทนการกัดกร่อนของกรด (Acid Resisting Bricks and Tiles) พอร์ซเลนทนต่อสารเคมี เป็นต้น

4) เนื้อเซรามิกที่ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตผลิตภัณฑ์ทางเคมีและวิศวกรรม เช่น เนื้อเซรามิกชนิดมัลไต์พอร์ซเลน เซอร์คอนพอร์ซเลน ซิลิกอนคาร์ไบด์ (Silicon Carbide) เนื้อเซรามิกอลูมินาสูง (High Alumina) เซอร์เมต เป็นต้น ส่วนมากเป็นเนื้อเซรามิกที่มีส่วนผสมของดินต่ำ โดยจะใช้วัตถุดิบเป็นออกไซด์ในการขึ้นรูป เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติพิเศษ นำไปใช้เป็นชิ้นส่วนของเครื่องจักร หรืองานเฉพาะอื่นๆ เช่น งานที่ต้องมีการเสียดสีสูง ชิ้นงานต้องการความแข็งแรงสูง มีความทนทานต่ออุณหภูมิสูงมากๆ เป็นต้น

5) เนื้อเซรามิกที่ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตผลิตภัณฑ์ทางไฟฟ้า (Insulator) และอุปกรณ์ประกอบในงานอิเล็กทรอนิกส์ (Electronics) ต่างๆ ซึ่งเนื้อเซรามิกที่ใช้ เช่น พอร์ซเลนแรงดึงต่ำ (Low-Tension Porcelain) พอร์ซเลนแรงดึงสูง (High-Tension Porcelain) มัลไต์พอร์ซเลนแรงดึงสูง (High-Tension Mullite Porcelain) เซอร์คอนพอร์ซเลนส์ คอร์เดียไรต์ เป็นต้น

6) เนื้อเซรามิกที่ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตผลิตภัณฑ์วัสดุทนไฟ ได้แก่เนื้อเซรามิกที่มีสมบัติในการทนอุณหภูมิสูงได้ดี ซึ่งสามารถแบ่งเนื้อเซรามิกตามสมบัติของวัตถุดิบได้เป็น 3 ชนิด คือ วัสดุทนไฟชนิดกรด (Acid Refractories) วัสดุทนไฟชนิดกลาง (Neutral Refractories) และวัสดุทนไฟชนิดด่าง (Basic Refractories) นิยมนำมาใช้ทำอุปกรณ์ภายในเตาเผา (Kiln Furniture) โดยแบ่งระดับความทนไฟตามระดับของไพโรเมตริกโคน (Pyrometric Cone; P.C.E.) เป็น 4 ระดับดังนี้ คือ

ทนไฟระดับต่ำ (Low Heat)	P.C.E. 19 – 28
ทนไฟระดับปานกลาง (Intermediate Heat)	P.C.E. 28 – 30
ทนไฟระดับสูง (High Heat)	P.C.E. 30 – 33
ทนไฟระดับสูงมาก (Super Heat)	P.C.E. สูงกว่า 33

7) เนื้อเซรามิกที่ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตผลิตภัณฑ์ฉนวนกันความร้อน เป็นเนื้อเซรามิกที่ทำจากวัตถุดิบเช่นเดียวกับอิฐก่อสร้าง หรืออิฐทนไฟทั่วไป แต่เนื้อเซรามิกที่เป็นฉนวนกันความร้อน (Thermal Insulation Body) จะมีรูพรุนสูง เพื่อไม่ให้ผลิตภัณฑ์ที่ทำจากเนื้อเซรามิกชนิดนี้นำความร้อน (จากสมบัติของอากาศที่เป็นตัวนำความร้อนที่เร็วกว่าของแข็ง) ซึ่งเนื้อเซรามิกชนิดนี้นำมาใช้ทำอิฐฉนวน (Insulator Brick) โดยแบ่งเป็น 3 กลุ่มตามการใช้งานดังนี้คือ อิฐฉนวนทนความร้อนต่ำ (Low Temperature) ใช้กับอุณหภูมิสูงกว่า 400°C อิฐฉนวนความร้อนปานกลาง (Intermediate Temperature) ใช้กับอุณหภูมิสูงกว่า 900°C และอิฐฉนวนความร้อนสูง (High Temperature) ใช้กับอุณหภูมิสูงกว่า 1150°C

2.1.2.2 เนื้อเซรามิกพอร์ซเลน

เนื้อเซรามิกพอร์ซเลนโดยทั่วไปจะเตรียมได้จากการผสมวัตถุดิบหลายประเภท จำพวกดิน และหินชนิดต่างๆ ซึ่งเนื้อจะมีสีขาว เผาถึงจุดสุกตัว เผาในอุณหภูมิตั้งแต่ 1250°C ขึ้นไป ส่วนผสมของเนื้อเซรามิก ประกอบด้วย หินเขียวหนุมาน หินฟันม้า ดินขาว และดินดำ หลังเผามีความแข็งแกร่ง น้ำและของเหลวไม่สามารถซึมผ่านได้ เนื้อละเอียด แต่เนื้อเซรามิกหลังการผสมวัตถุดิบเข้าด้วยกัน จะมีความเหนียว น้อยเนื่องจากมีดินดำในส่วนผสมต่ำ การขึ้นรูปจึงนิยมใช้การหล่อแบบ และนิยมนำเนื้อเซรามิกชนิดนี้ไปทำผลิตภัณฑ์ประเภทเครื่องใช้บนโต๊ะอาหาร อุปกรณ์ทางไฟฟ้า และภาชนะที่ใช้ในห้องทดลอง เป็นต้น ซึ่งเนื้อเซรามิกพอร์ซเลน แบ่งออกเป็น 5 ประเภท ตามสมบัติและการใช้งาน คือ เนื้อเซรามิกพอร์ซเลนแบบบอบบาง (Soft Porcelain) เนื้อเซรามิกพอร์ซเลนแบบแข็งแกร่ง (Hard Porcelain) เนื้อเซรามิกพอร์ซเลนเพื่อใช้งานทางไฟฟ้า (Electrical Porcelain) เนื้อเซรามิกพอร์ซเลนชนิดที่ทนต่อสารเคมี (Chemical Porcelain) และเนื้อเซรามิกมัลไลต์พอร์ซเลน (Mullite Porcelain)

เนื้อเซรามิกพอร์ซเลนมีการนำไปใช้งานได้ดังต่อไปนี้

1) **เครื่องใช้บนโต๊ะอาหาร** เครื่องใช้บนโต๊ะอาหารที่มีเนื้อเซรามิกพอร์ซเลน จะมีความแข็งแกร่งสูง มีความแข็งแรงมาก โปร่งแสง และเนื้อสีขาว โดยเตรียมเนื้อเซรามิกอยู่ในรูปของน้ำดิน จากวัตถุดิบพวกดินขาว ดินดำ หินฟันม้า และหินเขียวหนุมาน เผาที่อุณหภูมิ $1250\text{--}1300^{\circ}\text{C}$ และเผาเคลือบที่อุณหภูมิต่ำกว่าเผาดิบ นอกจากนี้หากต้องการเครื่องใช้บนโต๊ะอาหารที่มีคุณภาพสูง สีขาวบริสุทธิ์ โปร่งแสง ทนทานต่อแรงกล และแรงดูดซึด ทนการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกระทันหัน สามารถใช้เนื้อพอร์ซเลนแบบแข็งแกร่งได้

2) **อุปกรณ์ทางเคมี อุตสาหกรรมและวิศวกรรม** เป็นผลิตภัณฑ์จากเนื้อเซรามิกพอร์ซเลนที่ใช้ในห้องปฏิบัติการเคมี (Laboratory) รวมทั้งเป็นอุปกรณ์สำหรับเครื่องจักรกลที่ใช้ผลิตในอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมผลิตกรดไฮโดรคลอริก อุตสาหกรรมกลั่นน้ำมัน อุตสาหกรรมสิ่งทอ อุตสาหกรรมผลิตยาง อีกทั้งวัสดุเพื่อใช้งานบด เช่น หม้อบด ลูกบด และวัสดุกรุภายในหม้อบด ซึ่งเนื้อเซรามิกพอร์ซเลนที่ใช้ จะเป็นชนิดแข็งแกร่งที่มีสีขาว มีความหนาแน่นสูง ป้องกันการกัดกร่อนของสารเคมีได้ดี มีความแข็งแรงทางกลสูง ทนการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกระทันหันได้ดีกว่าเนื้อเซรามิกสโตนแวร์ โดยที่มีความหนาของผลิตภัณฑ์น้อยกว่า

หากมีความต้องการให้มีสมบัติดีขึ้น คือ มีความแข็งแกร่งสูงขึ้น มีความแข็งสูงขึ้น ทนอุณหภูมิสูง (สูงกว่า 1500°C) ทนการกัดกร่อนของกรดโลหะหลอมและแก้ว ต้องใช้เนื้อเซรามิกมัลไลต์พอร์ซเลน โดยหลังการเผาต้องมีการทดสอบสมบัติให้เป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนดสำหรับการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมแต่ละประเภท แต่มาตรฐานส่วนใหญ่จะกำหนดให้เนื้อเซรามิกพอร์ซเลนแบบแข็งแกร่งหลังเผา ต้องสามารถทนการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจาก 250°C มาที่น้ำอุณหภูมิ 15°C ได้ โดยไม่แตกร้าวเสียหาย นอกจากนี้เนื้อเซรามิก ต้องสามารถป้องกันการเกิดปฏิกิริยาเคมีของกรดและด่าง ที่ 100°C ได้นาน 4 ชั่วโมง รวมทั้งสมบัติอื่นตามลักษณะการใช้งาน เช่น ความแข็ง ความแข็งแรง การทนต่อการขัดสี เป็นต้น

3) **อุปกรณ์ทางไฟฟ้า** อุปกรณ์ทางไฟฟ้า ที่ผลิตได้จากเนื้อเซรามิกพอร์ซเลน อาจจะเป็นทั้งเนื้อเซรามิกพอร์ซเลนเพื่อใช้งานทางไฟฟ้าธรรมดา หรือเป็นชนิดมัลไลต์พอร์ซเลนที่มีสมบัติด้านการทนอุณหภูมิได้สูงกว่าและดีกว่า นอกจากจะใช้ผลิตเป็นลูกถ้วยไฟฟ้าแล้ว ยังใช้ผลิตอุปกรณ์ทางไฟฟ้าอื่น เช่น ปลั๊ก

(Sparking Plugs) และฟิวส์ (Fuse Cores) เป็นต้น โดยที่มัลไลต์พอร์ซเลนจะมีส่วนผสมของหินและแร่ที่ให้ อลูมินามาก เช่น ไคยาไนต์ (Kyanite) แอนดาลูไซต์ (Andalusite) แต่หากเป็นเนื้อเซรามิกพอร์ซเลนเพื่อใช้งานทางไฟฟ้าจะประกอบด้วยอัตราส่วนผสมของดินขาว และดินดำมากกว่า ทำให้อุณหภูมิการเผาของเนื้อเซรามิกทั้งสองประเภทแตกต่างกัน นั่นคือ เนื้อเซรามิกพอร์ซเลนเพื่อใช้งานทางไฟฟ้า จะเผาที่อุณหภูมิ 1300–1350°C หรืออาจเผาได้ถึง 1400°C ส่วนเนื้อเซรามิกมัลไลต์พอร์ซเลน เผาที่ 1460–1480°C

4) **เครื่องประดับตกแต่ง และงานศิลปะ** เนื้อเซรามิกพอร์ซเลนสามารถนำมาใช้ผลิตเป็นเครื่อง ตกแต่ง เครื่องประดับ และของใช้ได้เช่นเดียวกัน เพราะเนื้อเซรามิกพอร์ซเลนมีความขาว และมีความโปร่งใส ทำให้สามารถใช้สีผสมในเนื้อเซรามิกได้อย่างสวยงาม ชิ้นงานหลังเผาจะมีคุณค่า บอบบาง น่าถนอม เป็นผลให้ ชิ้นงานที่ได้จากเนื้อเซรามิกพอร์ซเลนนี้มีราคาสูง และนิยมผลิตงานที่มีความประณีต การผลิตส่วนมากใช้ วิธีการขึ้นรูปโดยการปั้นด้วยมือ หรือการหล่อแม่พิมพ์พลาสติก นิยมใช้สีผสมในเนื้อเซรามิก และใช้เคลือบ ใส เพื่อแสดงความสวยงามและความโปร่งแสงของเนื้อเซรามิก

2.1.3 เคลือบเซรามิก

เคลือบ คือ ชั้นบางๆ ของแก้วที่ฉาบบนผิวผลิตภัณฑ์เซรามิกอย่างต่อเนื่อง โดยทั่วไปแล้ว เตรียมได้จากการหลอมส่วนผสมของสารประกอบซิลิเกต มีลักษณะโปร่งใส แข็งแกร่ง ทนต่อการกัดและต่างได้ เป็นอย่างดี โดยทั่วไปแล้วเคลือบมีคุณสมบัติทางฟิสิกส์และเคมีคล้ายแก้ว คือ มีความแข็ง ไม่ละลายหรือ ละลายได้น้อยมากในสารละลายเคมี นอกจากกรดกัดแก้ว (HF) และด่างแก่ (Strong base) และไม่ยอมให้ ของเหลวและก๊าซซึมผ่านได้ แต่เคลือบจะมีส่วนประกอบทางเคมีซับซ้อนกว่าแก้ว เคลือบที่พบเห็นโดยทั่วไปจะ มีความมันวาวและสะท้อนแสงได้ สามารถมองเห็นเนื้อดินที่เคลือบ เคลือบชนิดนี้เรียกว่า เคลือบใส (Transparent or clear glaze) แต่ถ้าผิวไม่มัน เรียกว่าเคลือบด้าน (Matt glaze) ส่วนเคลือบที่สามารถปิดบัง ผิวของเนื้อดินได้เรียกเคลือบชนิดนี้ว่า เคลือบทึบ (Opaque glaze) จะมีสีหรือไม่มีสีก็ได้ขึ้นอยู่กับส่วนผสม ของเคลือบ โดยทั่วไปสามารถจำแนกชนิดของเคลือบตามลักษณะของเคลือบ (Characteristic) คือ

1) **เคลือบใส (Transparent or Clear glaze)** เป็นเคลือบที่มีลักษณะใสเหมือนแก้ว
2) **เคลือบทึบ (Opaque glaze)** เป็นเคลือบที่ใช้ปิดบังผิวของเนื้อดินที่มีสีหรือสีไม่ขาว
3) **เคลือบสี (Colored glaze)** เคลือบที่มีสีต่างๆ เตรียมได้จากการผสมสีผงเซรามิก (สีสะเตน) หรือออกไซด์ที่ให้สี (Coloring Oxide) เข้าไปในส่วนผสมของเคลือบ

4) **เคลือบด้าน (Matt glaze)** เป็นเคลือบที่มีลักษณะผิวเรียบไม่มัน เนื่องจากการตกผลึกเล็กๆ ของสารบางตัว หรือการที่สารบางตัวไม่ละลายหรือละลายไม่หมด

5) **เคลือบร่วน (Crackle glaze)** เป็นเคลือบที่มีรอยแตกร่วนทั่วทั้งผิวของเคลือบ มักนิยมใช้ หมึกสีดำหรือแดงทำให้แทรกซึมลงไปตามรอยแตก ทำให้สวยงามมากขึ้น แต่ไม่เหมาะที่จะใช้เป็นภาชนะใส่ อาหาร เพราะการทำความสะอาดอาจไม่ทั่วถึง

6) **เคลือบผลึก (Crystalline glaze)** เป็นเคลือบที่มีผลึกลอยอยู่ในชั้นของเคลือบ อาจเป็นผลึก รูปเข็ม รูปพัด หรือเป็นดอกดวง ซึ่งจะต้องเผาให้เย็นตัวช้ากว่าปกติเพื่อให้มีลักษณะเป็นดอก คล้ายรูปพัดเกิดจากผลึกของวิลเลมไมต์ (willemite)

7) **เคลือบประกายมุก (Luster glaze)** เป็นเคลือบที่มีผิวมัน แวววาวมาก มีประกายคล้ายหยอมุก เมื่อใส่สารให้สี (Coloring oxide) จะได้เคลือบสีที่ลักษณะเฉพาะตัวสวยงามมาก เหมาะสำหรับใช้ตกแต่งผลิตภัณฑ์พวกเครื่องประดับตกแต่ง ไม่เหมาะสำหรับผลิตภัณฑ์ที่ใช้ใส่อาหารเพราะมักมีส่วนผสมของตะกั่ว

จะเห็นได้ว่าองค์ความรู้ที่เกี่ยวข้องกับเนื้อดินและเคลือบสำหรับการผลิตแบบพิมพ์เซรามิกสำหรับขึ้นรูปถลุงมือยาง ตลอดจนคุณสมบัติที่จำเป็นต่างๆ นั้น มีไม่เพียงพอ จึงเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้ไม่มีผู้ประกอบการเซรามิกของไทย จะมีการลงทุน ดำเนินการผลิตและขายแบบพิมพ์เซรามิกในประเทศได้

2.2 การทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศ (Information) ที่เกี่ยวข้อง

Abdelhamid Harabi และคณะวิจัย (2016) ได้ทำการศึกษาผลของอุณหภูมิในการเผา Sintering และการเติมบอริกออกไซด์ (B_2O_3) ที่มีต่อคุณสมบัติทางกลของการพัฒนาสูตรใหม่สำหรับพอร์ซเลนชนิด Dental porcelain (DP) ทำการศึกษาโดยใช้วัตถุดิบท้องถิ่นในอัลจีเรีย ได้เลือกสูตรผสมจากการทดลองก่อนหน้านี้ นำมาศึกษาต่อซึ่งประกอบด้วย แร่เฟลด์สปาร์ 75 wt.%, ควอร์ตซ์ 20 wt.% และดินเกาลิน 5 wt.% ทำการทดลองโดยเผา Sintering สูตรผสมนี้ที่อุณหภูมิต่างๆ ระหว่าง 1100–1250°C พบว่าสถานะในการเผา sintering ที่เหมาะสมซึ่งให้ค่าความหนาแน่น และคุณสมบัติทางกลของ DP ที่ดีที่สุด คือการเผาที่อุณหภูมิ 1200°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยมีค่า Bulk density 2.47 g/cm³ ค่าความแข็งแรง Three point flexural strength (3PFS) 149 MPa และค่าความแข็ง Martens micro-hardness เท่ากับ 2600 MPa ซึ่งค่า 3PFS ที่ได้มีค่ามากกว่าวัสดุชนิด Hydroxyapatite (HA) ถึงประมาณ 4 เท่า (HA มีค่าประมาณ 37 MPa) สำหรับการเผา sintering ที่สภาวะเดียวกัน อย่างไรก็ตาม ในการทดลองนี้ สามารถลดอุณหภูมิในการเผา sintering ลงได้ประมาณ 25 และ 50°C โดยการเติม B_2O_3 เพิ่มลงในสูตรปริมาณ 3 และ 5 wt.% ตามลำดับ แต่การเติม B_2O_3 เพื่อช่วยลดอุณหภูมิเผานั้น ไม่ได้เป็นการช่วยปรับปรุงคุณสมบัติทางกล และความหนาแน่นของตัวอย่างแต่อย่างใด

O. Turkmen และคณะวิจัย (2015) ได้ศึกษาถึงผลของการเติมวอลลาสโตไนต์ (Wollastonite) ที่มีการ Sintering ของวัสดุพอร์ซเลนชนิดแข็ง (Hard porcelain) ซึ่งเตรียมส่วนผสมเป็นน้ำสลิปเพื่อขึ้นรูปด้วยวิธีการหล่อแบบ วัตถุดิบในสูตรพอร์ซเลนประกอบด้วย ควอร์ตซ์ 25 wt.%, โปแทสเซียมเฟลด์สปาร์ 25 wt.% และดินขาวเกาลิน 50 wt.% ได้ทำการแทนที่โปแทสเซียมเฟลด์สปาร์ในสูตรด้วยวอลลาสโตไนต์ในปริมาณตั้งแต่ 1-5 wt.% เพื่อให้เห็นถึงผลกระทบที่มีต่อพฤติกรรมในขณะเผา และคุณสมบัติทางเทคนิคที่เกิดขึ้นกับผลิตภัณฑ์สำเร็จหลังผ่านการเผา sintering แล้ว ที่อุณหภูมิ 1250, 1275 และ 1300°C สำหรับการศึกษาพฤติกรรมการไหลตัวของน้ำสลิป ได้ทำการทดลองใช้สารช่วยกระจายลอยตัว (Dispersants) หลายๆ ตัวเปรียบเทียบกัน ผลที่ได้พบว่า การแทนที่โปแทสเซียมเฟลด์สปาร์บางส่วนด้วยวอลลาสโตไนต์ใน

ปริมาณ 1 wt.% ทำให้ช่วยลดอุณหภูมิในการเผา sintering วัสดุพอร์ซเลนชนิดแข็งลงได้ 25-50°C โดยไม่ส่งผลกระทบต่อรูปร่าง (Pyroplastic deformation) ของชิ้นงานในขณะทำการเผา การเพิ่มปริมาณของวอลลาสโตไนต์ที่มากขึ้น 2-5 wt.% จะทำให้ชิ้นงานในขณะเผาเกิดการเสียรูปและเกิดการระเบิดในเนื้อชิ้นงาน โดยการเติมวอลลาสโตไนต์ที่ 2 wt.% จะทำให้ชิ้นงานเกิดการเสียรูปเฉพาะที่การเผาอุณหภูมิสูง 1300°C เท่านั้น แต่สำหรับการเติมวอลลาสโตไนต์ที่ 3-5 wt.% จะทำให้ชิ้นงานในขณะเผาเกิดการเสียรูปและเกิดการระเบิดได้ตั้งแต่อุณหภูมิเผา 1275 – 1300°C การลดลงของอุณหภูมิในการเผาพอร์ซเลนด้วยการเติมวอลลาสโตไนต์นั้น เกิดจากปริมาณ glass phase ที่เพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเนื้อพอร์ซเลนที่มีแต่เฟลด์สปาร์เป็นฟลักซ์ เนื่องจากวอลลาสโตไนต์เป็นวัตถุดิบที่มีปริมาณของแคลเซียมออกไซด์อยู่สูงมาก ทำให้สามารถเพิ่มปริมาณ glass phase ในเนื้อพอร์ซเลน และช่วยปรับปรุงคุณสมบัติด้านความหนืด (Viscosity) ได้ และยังทำให้ช่วงในการเผาพอร์ซเลนกว้างขึ้นด้วย

Habib Sahlaoui และคณะวิจัย (2013) ได้ศึกษาผลกระทบของชั้นผิวเคลือบและสภาวะในการเผา (อุณหภูมิและระยะเวลาในการเผา) ที่มีต่อพฤติกรรมการเกิด Thermal shock ของเครื่องใช้บนโต๊ะอาหารพอร์ซเลน โดยใช้เนื้อดินพอร์ซเลนจากโรงงานทั่วไปที่ประกอบด้วยดินเกาลิน 50 wt.%, ควอร์ตซ์ 25 wt.% และเฟลด์สปาร์ 25 wt.% ทำการเปรียบเทียบโดยใช้เนื้อดินเดียวกันแต่ใช้เคลือบ 2 ชนิด ที่มีองค์ประกอบต่างกัน และทำการเผาที่สภาวะต่างกัน 3 สภาวะได้แก่ 1) เผาที่อุณหภูมิ 1340°C เป็นเวลา 25 ชั่วโมงในเตาแบบ Tunnel 2) เผาที่อุณหภูมิ 1360°C เป็นเวลา 7.5 ชั่วโมง โดยใช้เตาแบบ Fast-firing ที่มีความยาว 36 เมตร และ 3) เผาที่อุณหภูมิ 1370°C เป็นเวลา 7.5 ชั่วโมง โดยใช้เตาแบบ Fast-firing ที่มีความยาว 60 เมตร เปรียบเทียบคุณสมบัติทางกลของทั้ง 6 ตัวอย่าง จากการวัดค่า 3-point Bending, Thermal Shock Cycle และ ลักษณะการเกิดรอยแตกร้าว (Cracks Characterization) ทั้งจำนวนรอยแตกร้าว และความยาวของรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้น ผลที่ได้พบว่าชิ้นตัวอย่างสามารถทนต่อการเกิด Thermal Shock ได้ดีที่ความแตกต่างของอุณหภูมิ (ΔT) เท่ากับ 180°C และเริ่มสังเกตเห็นรอยแตกร้าวที่ ΔT เท่ากับ 230°C โดยเคลือบทั้งสองชนิดที่ศึกษานั้นให้ผลที่คล้ายกัน โดยพบว่าชิ้นเคลือบที่มีปริมาณอลูมินาต่อซิลิกาในสัดส่วนที่สูงกว่านั้น จะมีความสามารถทนทานต่อการเกิด Thermal Shock ได้มากกว่า และการเผาแบบช้าๆ ที่อุณหภูมิต่ำ (ในสภาวะการเผาที่ 1) นั้น จะส่งผลดีต่อความต้านทานในการเกิด Thermal Shock ของเนื้อพอร์ซเลนได้ดีกว่าแต่อย่างไรก็ตามการเผาที่เร็วกว่าและใช้อุณหภูมิสูงแตกต่างกันเล็กน้อยในสภาวะที่ 2 และ 3 นั้น ไม่ได้ส่งผลกระทบต่อการลดความต้านทานต่อการเกิด Thermal Shock ของชิ้นงานมากนัก

A. Tucci และคณะวิจัย (2007) ทำการศึกษาหาสูตรผสมใหม่สำหรับเนื้อดินกระเบื้อง ประเภทสโตนแวร์พอร์ซเลน เพื่อปรับปรุงคุณลักษณะทางกลของวัสดุ โดยเริ่มจากสูตรผสมของเนื้อดินกระเบื้องสโตนแวร์พอร์ซเลนทางอุตสาหกรรมทั่วไป แล้วแทนที่โซเดียมเฟลด์สปาร์ซึ่งทำหน้าที่เป็นฟลักซ์ในสูตรด้วยฟลักซ์ชนิดที่รุนแรงกว่าคือ Spodumene นอกจากนั้นยังได้ใช้ผงอะลูมินา 2 ชนิด ได้แก่ ผงอะลูมินาความบริสุทธิ์สูง และผงบอไซด์ที่ผ่านการเผาแคลไซน์ (ส่วนผสมของอะลูมินา มัลไลต์ และควอร์ตซ์) นำมาทดลองเติมในส่วนผสมเพื่อเป็นตัวช่วยเสริมแรงและเพิ่มคุณสมบัติด้านความแข็งแรง โดยเติมผงอะลูมินาความบริสุทธิ์สูงในปริมาณ 15 wt.% และเติมผงบอไซด์แคลไซน์ที่ 20.5 wt.% ผลที่ได้ของวัสดุผสมที่ทดลองนี้ ทำให้เกิดการปรับปรุง

โครงสร้างระดับจุลภาคเป็นอย่างมาก ส่งผลให้ชิ้นงานมีความแข็ง (Hardness) และความเหนียว (Fracture Toughness) ที่เพิ่มขึ้น และยังทำให้ค่าความพรุนตัว (Bulk Porosity) และค่าเฉลี่ยของขนาดรูพรุนมีค่าที่ลดลงด้วย ความเป็นเนื้อเดียวกันของโครงสร้างจุลภาคที่เพิ่มสูงขึ้นมีความเป็นไปได้ที่จะช่วยลดความเสียหายทางกลของวัสดุให้ลดลงได้ นอกจากนั้นการเติม Spodumene ในส่วนผสม ช่วยทำให้เกิด Liquid Phase ที่มีความหนืดต่ำในระหว่างการเกิด Sintering และทำให้เกิดการเชื่อมโครงสร้างที่แข็งแรงร่วมกันระหว่างออกไซด์ที่เติมเข้าไป (อะลูมินา และมัลไลต์) และเฟสที่เป็นแก้ว (Glassy Phase)

Janusz Partyka and Jerzy Lis (2012) ได้ศึกษาเกี่ยวกับขนาดอนุภาค (Grain Size) ของวัสดุที่มีผลต่อความทนทานต่อการกัดกร่อนสารเคมี โดยใช้กับเนื้อดินสุกัณฑ์เผาที่อุณหภูมิ 1230°C แล้วนำชิ้นทดสอบที่ได้ไปแช่ในสารละลายกรด HCl ที่ pH = 18.8 สารละลายด่าง NaOH ที่ pH = 13.5 และในน้ำยาทำความสะอาดสุกัณฑ์ตามท้องตลาดทั่วไป (pH = 9.5) โดยควบคุมอุณหภูมิที่ 40°C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง จากนั้นทำการตรวจสอบค่าความมันวาวของผิวเคลือบ ค่าความเรียบของผิวเคลือบ และตรวจสอบลักษณะผิวเคลือบที่ได้จากค่าความละเอียดของอนุภาคที่แตกต่างกันเปรียบเทียบก่อนและหลังการทดสอบโดยใช้กล้อง OM รวมทั้งตรวจสอบน้ำหนักที่หายไปของผิวเคลือบหลังแช่ชิ้นทดสอบไว้ในสารละลายที่อุณหภูมิ 40°C เป็นเวลา 240 ชั่วโมง จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่าการแยกบดวัสดุประเภท Hard Materials และเลือกใช้ขนาดความละเอียดที่เหมาะสม ก่อนนำไปผสมกับวัสดุประเภท Soft Materials ที่แยกบดมาเช่นกัน จะช่วยให้สูตรเคลือบมีลักษณะผิวเคลือบที่ดีขึ้นและทนต่อการกัดกร่อนสารเคมีทั้งกรดและด่างได้ดีขึ้น ซึ่งช่วงความละเอียดที่เหมาะสมของวัสดุจะต้องมีการศึกษาต่อไป

Linda Froberg and et al., (2009) ได้ศึกษาความทนต่อสารเคมีของเคลือบด้านที่มีผลึกแตกต่างกัน ได้แก่ Diopside, Plagioclase, Anorthite, Wollastonite และ Pseudowollastonite โดยเคลือบถูกเผาอย่างรวดเร็วในเตาเผาอุตสาหกรรมและเผาแบบปกติในเตาเผาห้องปฏิบัติการ โดยทดลองจุ่มเคลือบในของเหลวที่ต่างกัน ได้แก่ น้ำบริสุทธิ์ (pH 5.7) สารละลายกรดซิตริก (pH 1.5) สารละลายกรด HCl (pH 2.9) น้ำยาทำความสะอาด (pH 9.1) และสารละลาย KOH (pH 13.4) แล้วทำการตรวจสอบลักษณะผิวเคลือบที่เปลี่ยนไปโดยใช้กล้อง SEM และ Confocal Microscopy นอกจากนี้ยังทำการตรวจสอบความเข้มข้นของไอออนที่เปลี่ยนแปลงของกรด HCl ด้วยเทคนิค ICP-AES จากผลการทดลองสรุปได้ว่าเคลือบที่มีผลึก Diopside มีความทนต่อสารเคมีทุกชนิดได้ดี เคลือบที่มีผลึก Plagioclase จะถูกกัดกร่อนเฉพาะในสารละลายกรดที่มีความเข้มข้นมากๆ ส่วนเคลือบที่ผิวหน้ามีผลึกในกลุ่ม Wollastonite จะทนการกัดกร่อนได้น้อยมาก โดยจะถูกกัดกร่อนได้ง่ายทั้งในสารละลายกรดไปจนถึงสารละลายด่างอ่อน โดยผลึก Wollastonite ของเคลือบที่เผาแบบปกติจะมีความทนต่อการกัดกร่อนได้ดีกว่าผลึกที่อยู่ในเคลือบที่เผาแบบรวดเร็ว ซึ่งอาจเนื่องมาจากกึ่งก้านของผลึกที่มีอลูมินาเป็นองค์ประกอบมีขนาดที่ใหญ่กว่า จึงมีความทนต่อการกัดกร่อนได้ดีกว่า

Linda Froberg and et al., (2007) ได้ศึกษาชนิดของผลึกที่ผิวเคลือบที่มีผลต่อความทนต่อการกัดกร่อนสารเคมีในสูตรเคลือบทดลองจำนวน 15 สูตร ซึ่งถูกเผาแบบรวดเร็วในเตาเผาอุตสาหกรรมและเผาแบบปกติในเตาเผาห้องปฏิบัติการ โดยทดลองจุ่มในสารละลายที่มีค่า pH แตกต่างกัน จากนั้นทำการตรวจสอบ

องค์ประกอบผลึกและผิวเคลือบที่เปลี่ยนแปลงไปด้วยเทคนิค XRD และ SEM/EDX ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าผิวเคลือบที่มีผลึกกลุ่ม Wollastonite จะถูกกัดกร่อนด้วยสารละลายทุกค่า pH และจะถูกกัดกร่อนมากที่สุดในการละลายต่าง ขณะที่ผลึก Diopside, Quartz และ Corundum ไม่พบการกัดกร่อนเกิดขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าช่วงรอยต่อระหว่างชั้นเคลือบ (Interfacial Layer) รอบๆ ผลึกของเฟลด์สปาร์ รวมทั้งชั้นของ Glassy Phase จะเกิดการกัดกร่อนมากทั้งในสถานะที่มีความเป็นกรดและด่าง

Leena Hupa and et al., (2005) ได้ศึกษาคุณสมบัติความทนทานต่อสารเคมีและความยากง่ายในการทำมาหาความสะอาดผิวของสูตรเคลือบมันและเคลือบด้านจำนวน 15 สูตร ที่มีองค์ประกอบทางเคมี และชนิดของผลึกที่แตกต่างกัน โดยทดลองจุ่มในน้ำยาทำความสะอาดที่มีฤทธิ์เป็นด่างอ่อนๆ จากนั้นทำการเคลือบผิวด้วย Soil Film แล้วเช็ดออกเพื่อดูความเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นทั้งในด้านความเรียบขรุขระ และสีเคลือบ ด้วยเทคนิค SEM/EDXA และ COM จากการทดลองแสดงให้เห็นว่าผิวเคลือบที่มีผลึกกลุ่ม Wollastonite จะถูกกัดกร่อนด้วยสารละลายที่มีน้ำยาทำความสะอาดผสมได้ง่าย ซึ่งส่งผลทำให้ผิวเคลือบนั้นทำความสะอาดได้ยากขึ้น ส่วนผลึกอื่นๆ ที่อยู่ใ้ผิวเคลือบ เช่น Diopside และ Quartz ไม่พบการกัดกร่อน และความยากง่ายในการทำมาหาความสะอาดของเคลือบที่มีองค์ประกอบของผลึกเพียงสองชนิดนี้ไม่พบว่ามีารเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้น

ลออานวล ยศพงษ์ (2556) ได้นำเสนอวิธีการใหม่โดยการพ่นละอองด้วยไฟฟ้า (Electrospray) มาประยุกต์ใช้ กับการเคลือบสารช่วยการจับตัวของยางลงบนผิวของแผ่นเซรามิกส์ตัวอย่าง เปรียบเทียบกับวิธีการจุ่มและการพ่นด้วยความดัน สำหรับแผ่นเซรามิกส์ตัวอย่างจากการเคลือบสารช่วยการจับตัวของยางจะถูกนำไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เพื่อดูลักษณะของผิวสารเคลือบ การกระจายตัวของสารเคลือบ ผลการทดลองพบว่า การเคลือบสารช่วยการจับตัวของยางด้วยเทคนิคการพ่นละอองด้วยไฟฟ้าทำให้ผิวเคลือบมีความราบเรียบ การกระจายตัวของสารเคลือบที่สม่ำเสมอมากกว่าเทคนิคการพ่นละอองด้วยแรงดัน และเทคนิคการจุ่ม

จากการทบทวนวรรณกรรมข้างต้น ก็จะได้เห็นว่าม้งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาเนื้อดินและเคลือบประเภทพอร์ซเลนอยู่พอสมควร แต่ก็ไม่ได้เป็นงานวิจัยเฉพาะ ที่จะตอบโจทย์ของผู้ผลิตแบบพิมพ์เซรามิกสำหรับขึ้นรูปถุงมือยางได้ และยังไม่ม้งานวิจัยที่จะแสดงถึงผลของการนำผลงานวิจัยต่างๆ เหล่านี้ ไปต่อยอดในการทำเป็นแบบพิมพ์เซรามิกเพื่อการใช้งานจริงในกระบวนการผลิตถุงมือยาง

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 วัตถุดิบ สารเคมี อุปกรณ์ และเครื่องมือที่ใช้ในการทำวิจัย

3.1.1 วัตถุดิบและสารเคมี

- 1) ดินขาวระนอง (MRD-STD)
- 2) ดินดำแม่ทาน (MRD Whiteplas N8)
- 3) ดินสำเร็จรูป PFA, PEA, PBA
- 4) โพลีเอทิลีนฟลด์สปาร์
- 5) โซเดียมฟลด์สปาร์
- 6) ควอทซ์
- 7) แคลเซียมคาร์บอเนต
- 8) ทัลคัม
- 9) ซิงค์ออกไซด์
- 10) สารละลายโซเดียมซิลิเกต (Dispersant)
- 11) สารละลาย Deflok2870 (Dispersant)
- 12) ปูนปลาสเตอร์
- 13) เมทิลีนบลู

3.1.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

- 1) เครื่องชั่งดิจิตอล
- 2) เครื่องกวนผสม (Mixer/ Stirer)
- 3) เครื่องบดน้ำดิน/น้ำเคลือบ (Ball Mill)
- 4) ตะแกรงกรอง (ASTM Sieves)
- 5) ถ้วยวัดความหนาแน่น (Density Cup/ Pycnometer)
- 6) ถ้วยวัดการไหลตัว (Ford Viscosity Cup)
- 7) นาฬิกาจับเวลา
- 8) เทอร์โมมิเตอร์
- 9) แม่พิมพ์พลาสติกขึ้นรูปขึ้นตัวอย่าง
- 10) เวอร์เนียร์คาลิเปอร์ และ ไม้บรรทัด
- 11) เตารีดไฟฟ้า
- 12) เตาเผาไฟฟ้า
- 13) เครื่องวัดความหนืด (Brookfield Viscometer)

- 14) เครื่องวัดขนาดอนุภาคน้ำดิน (Particle Size Distribution, Malvern)
- 15) เครื่องทดสอบความแข็งแรง (3-point bending strength, Universal testing machine, Instron)
- 16) เครื่องวัดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน (Dilatometer, CTE)
- 17) เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี (X-ray Fluorescence, XRF)
- 18) เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ (X-ray Diffraction, XRD)
- 19) เครื่องวัดความหยาบพื้นผิว (Surface Roughness Tester)
- 20) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Scanning Electron Microscope, SEM)

3.2 ขอบเขตการดำเนินงาน

โครงการวิจัยนี้ จะดำเนินการวิจัยและพัฒนาเนื้อดินและเคลือบสำหรับทำแบบพิมพ์เซรามิกขึ้นรูปถุงมือยางโดยวิธีการจุ่มในระดับอุตสาหกรรมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพเทคโนโลยีการผลิตและส่วนสนับสนุน โดยให้ความสำคัญกับการเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันให้กับอุตสาหกรรมผู้ผลิตผลิตภัณฑ์ถุงมือยางที่เป็นของคนไทย โดยมีขอบเขตของการวิจัย ดังต่อไปนี้

3.2.1 ด้านพื้นที่

การวิจัยและพัฒนาเนื้อดินและเคลือบสำหรับทำแบบพิมพ์เซรามิกขึ้นรูปถุงมือยางนี้ จะดำเนินการวิจัยในระดับห้องปฏิบัติการที่ ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ และจะเข้าร่วมดำเนินการพัฒนาต้นแบบแบบพิมพ์ในระดับภาคสนามกับ ศูนย์พัฒนาอุตสาหกรรมเซรามิก จ.ลำปาง

3.2.2 ด้านเนื้อหาการวิจัย

การวิจัยมีกรอบการดำเนินงานดังต่อไปนี้

- 1) วิจัยและพัฒนาเนื้อดินและเคลือบสำหรับทำแบบพิมพ์เซรามิกขึ้นรูปถุงมือยาง
- 2) พัฒนาต้นแบบในระดับห้องปฏิบัติการของแบบพิมพ์เซรามิกขึ้นรูปถุงมือยางโดยใช้สูตรเนื้อดินและเคลือบที่พัฒนาขึ้น
- 3) ขยายสเกลการผลิตต้นแบบแบบพิมพ์เซรามิกขึ้นรูปถุงมือยาง เพื่อนำไปทดลองใช้จริงในกระบวนการผลิตถุงมือยาง

3.2.3 ด้านระยะเวลา

การวิจัยใช้ระยะเวลาในการดำเนินงาน 1 ปี

3.3 กิจกรรมในโครงการ

การดำเนินการวิจัยตามกรอบการวิจัยและพัฒนาผลิตภัณฑ์เดิมและผลิตภัณฑ์ใหม่ที่มีศักยภาพทางการตลาด (อุตสาหกรรมปลายน้ำ) มุ่งเน้นที่ความสำเร็จในการพัฒนาเนื้อดินและเคลือบสำหรับทำแบบพิมพ์เซรามิกขึ้นรูปถุงมือยาง ในระยะเวลาการทำวิจัย 1 ปี

3.3.1 การพัฒนาสูตรเนื้อดินและเคลือบพอร์ซเลน

เป็นการเก็บรวบรวมข้อมูลสูตรเนื้อดินและเคลือบพอร์ซเลนอ้างอิง เพื่อทดลองหาส่วนผสมที่เหมาะสม โดยมีกิจกรรมดังต่อไปนี้

กิจกรรมที่ 1 การรวบรวมข้อมูลสูตรเนื้อดินและเคลือบพอร์ซเลนอ้างอิง

เพื่อเป็นการเก็บรวบรวมข้อมูลสูตรเนื้อดินและเคลือบพอร์ซเลนอ้างอิง เนื่องจากแบบพิมพ์เซรามิกต้องมีความแข็งแรง มีการหดตัวต่ำ สามารถทนต่ออุณหภูมิสูงและการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลันได้ และสามารถทนต่อการกัดกร่อนจากการใช้กรดหรือด่างในกระบวนการขึ้นรูปลงมือได้ โดยศึกษาข้อมูลวัตถุดิบเพื่อเลือกวัตถุดิบที่เหมาะสมในการนำมาทดลองหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมสำหรับใช้งาน ทำการศึกษาสมบัติของวัตถุดิบที่เกี่ยวข้อง

กิจกรรมที่ 2 การพัฒนาสูตรเนื้อดินและเคลือบพอร์ซเลน

จากสูตรเนื้อดินและเคลือบพอร์ซเลนอ้างอิงที่ได้ทำการศึกษา ทำการพัฒนาเป็นสูตรเนื้อดินและเคลือบพอร์ซเลนต้นแบบ โดยเป็นเนื้อดินและเคลือบที่มีความแข็งแรง มีการหดตัวต่ำ สามารถทนต่ออุณหภูมิสูง และการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลันได้ และสามารถทนต่อการกัดกร่อนจากการใช้กรดในกระบวนการขึ้นรูปลงมือได้ และเนื่องจากมีผิวเคลือบมีความมันคล้ายแก้ว ทำให้ถุงมือยางที่ขึ้นรูปแล้ว จะไม่มีการเกาะติดกับแบบพิมพ์ซึ่งจะเป็นสาเหตุที่ทำให้ถุงมือยางฉีกขาดหรือเกิดตำหนิ ทั้งนี้สูตรเนื้อดินและเคลือบพอร์ซเลนต้นแบบต้องมีสมบัติ ดังนี้

- สูตรเนื้อดินและเคลือบพอร์ซเลน ที่เผาสุกตัวที่ 1250-1300°C
- สามารถขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อแบบกลวง เป็นรูปร่างมือที่มีความซับซ้อน
- คุณสมบัติหลังเผามีการหดตัวต่ำ มีความแข็งแรงสูง และทรงตัวได้ดี

กิจกรรมที่ 3 การทดสอบสมบัติเนื้อดินและเคลือบพอร์ซเลนที่ได้พัฒนาขึ้น

เมื่อได้พัฒนาสูตรเนื้อดินและเคลือบพอร์ซเลนต้นแบบแล้ว จะทำการทดสอบสมบัติของเนื้อดินและเคลือบเพื่อให้สามารถนำข้อมูลมาใช้ในการปรับปรุงอัตราส่วนผสมของเนื้อดินและเคลือบ ปรับปรุงวิธีการทำงานปรับปรุงอุณหภูมิและบรรยากาศการเผา เพื่อให้มีสมบัติเหมาะสมต่อการใช้งาน โดยทำการทดสอบดังต่อไปนี้

- การดูดซึมน้ำ (Water Absorption)
- ความแข็งแรงการดัดงอ (Flexural Strength)
- การขยายตัวเนื่องจากความร้อน (Coefficient of Thermal Expansion) เนื่องจากแม่พิมพ์ต้องทนต่อความร้อนสูง ทำให้ต้องมีค่า CTE ที่ต่ำเนื่องจากต้องใช้ยึดติดกับเครื่องจักรที่เป็นระบบอัตโนมัติ จึงจะต้องไม่แตกเสียหายจากการขยายหรือหดตัวเนื่องจากความร้อน
- ความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิโดยกะทันหัน (Thermal Shock Resistance) การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่รวดเร็วโดยกะทันหัน ทำให้อุณหภูมิของแบบพิมพ์เกิดความแตกต่างกันระหว่างผิวนอก

และภายใน ซึ่งความแตกต่างกันนี้จะมีผลให้ผลิตภัณฑ์เกิดการแตกร้าวได้ เนื่องจากแบบพิมพ์ต้องมีการใช้งาน จุ่มในน้ำยางร้อน ทำให้แห้ง และถอดถุงมือออก เป็น Cycle ที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอยู่ตลอดเวลา

- ความทนทานต่อสภาพกัดกร่อน (Resistance Against Corrosive Media) เนื่องจากแบบพิมพ์ ต้องมีการใช้สาร Coagulant ที่ช่วยในการจับตัวอนุภาคของยาง ซึ่งประกอบไปด้วย CaCl_2 หรือ CaNO_3 และ สารที่ช่วยป้องกันการติดแบบพิมพ์ ได้แก่ CaCO_3 และต้องทนต่อการล้างทำความสะอาดด้วยสารละลายที่มี สภาพทั้งกรดและด่าง เช่น H_2SO_4 , HCl , NaOH และ KOH เป็นต้น

3.3.2 การพัฒนาต้นแบบระดับห้องปฏิบัติการ

ผลการทดสอบสมบัติของเนื้อดินและเคลือบ ที่นำไปปรับปรุงอัตราส่วนผสมของเนื้อดินและเคลือบ ทำให้มีสมบัติเหมาะสมต่อการใช้งาน จะได้นำสูตรเนื้อดินและเคลือบไปพัฒนาเป็นต้นแบบแบบพิมพ์ระดับ ห้องปฏิบัติการ ตามกิจกรรมต่อไปนี้

กิจกรรมที่ 4 การพัฒนาแบบพิมพ์เซรามิกขึ้นรูปถุงมือยาง

ทีมวิจัยจะทำการศึกษารูปแบบ และคุณลักษณะของแบบพิมพ์เซรามิกขึ้นรูปถุงมือยาง โดยจะได้ พัฒนาเป็นแม่พิมพ์ขึ้นรูป (Working Mould) สำหรับการขึ้นรูปแบบพิมพ์เซรามิกขึ้นรูปถุงมือยาง ดังกิจกรรม ย่อยต่อไปนี้

- การพัฒนาต้นแบบแบบพิมพ์เซรามิกขึ้นรูปถุงมือยาง (Prototype) โดยทำการออกแบบแบบ พิมพ์เซรามิกขึ้นรูปถุงมือยางตรวจโรค (Examination Glove) ที่มีรูปแบบและขนาดที่เหมาะสมสำหรับการ นำไปใช้ในการผลิตโดยเครื่องจักรในกระบวนการผลิตถุงมือยางด้วยวิธีการจุ่ม

- การพัฒนาแม่พิมพ์ขึ้นรูป (Working Mould) และแม่พิมพ์เซรามิกต้นแบบ (Case Mould) นำ ต้นแบบแบบพิมพ์เซรามิกขึ้นรูปถุงมือยาง มาทำแม่พิมพ์ขึ้นรูป (Working Mould) สำหรับการขึ้นรูปแบบพิมพ์ เซรามิก และนำแม่พิมพ์ขึ้นรูปที่ได้ ไปทำเป็นแม่พิมพ์เซรามิกต้นแบบ (Case Mould) สำหรับการผลิตแม่พิมพ์ ขึ้นรูปจำนวนมากขึ้นต่อไป

กิจกรรมที่ 5 การพัฒนาต้นแบบระดับห้องปฏิบัติการ

จากแม่พิมพ์ขึ้นรูป (Working Mould) ที่ได้รับในกิจกรรมที่ 4 นำสูตรเนื้อดินและเคลือบพอร์ซเลน ต้นแบบ ไปทำการขึ้นรูป และผลิตต้นแบบระดับห้องปฏิบัติการของสูตรดินและเคลือบสำหรับทำแบบพิมพ์ เซรามิกขึ้นรูปถุงมือยาง ซึ่งในการดำเนินการดังกล่าว จะทำการขึ้นรูปแบบพิมพ์เซรามิกขึ้นรูปถุงมือยาง จำนวนไม่ต่ำกว่า 10 ชิ้น

เมื่อได้พัฒนาต้นแบบระดับห้องปฏิบัติการของสูตรดินและเคลือบสำหรับทำแบบพิมพ์เซรามิกขึ้นรูปถุง มือยางแล้ว จะได้นำต้นแบบไปให้โรงงานผู้ผลิตถุงมือยางทำการทดลองขึ้นรูปถุงมือยางในเบื้องต้น เพื่อทดสอบ การใช้งานจริง ผลการทดสอบจะใช้เพื่อพิจารณาทำการปรับปรุงทั้งสูตรเนื้อดินและเคลือบ และแบบพิมพ์ขึ้น รูป เพื่อให้ได้ต้นแบบแบบพิมพ์ที่มีความเหมาะสมต่อการใช้งาน และการนำไปขยายขนาดการผลิตแบบพิมพ์ ต่อไป

โดยได้จัดทำแผนงานดำเนินงานไว้ดังนี้

- ออกแบบแบบพิมพ์สำหรับถุงมือทั่วไป ขนาด M L XL ทั้งหมด 3 แบบ
- จัดทำ case mold 1 ชุด/แบบ รวมทั้งหมด 3 ชุด
- working mold 2 ชุด/แบบ รวมทั้งหมด 6 ชุด
- ต้นแบบแบบพิมพ์ 3 ชิ้น/สูตร/แบบ รวมทั้งหมด 27 ชิ้น
(สูตรทดลอง 1, สูตรทดลอง 2 และสูตรอ้างอิง ทำการขึ้นรูป เผาแบบไม่มีเคลือบ)
- ต้นแบบแบบพิมพ์ ขนาด L จำนวน 60 ชิ้น
(สูตรทดลอง 1, สูตรทดลอง 2 และสูตรอ้างอิง ทำการขึ้นรูป เผาแบบไม่มีเคลือบ)

ซึ่งในขั้นตอนนี้จะได้ชิ้นงานแบบพิมพ์จำนวน 10 ชิ้น/สูตร รวมจำนวน 30 ชิ้น จะทำการทดสอบ เบื้องต้นที่ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ ส่วนที่เหลือจำนวน 10 ชิ้น/สูตร รวมจำนวน 30 ชิ้น จะส่งให้โรงงานเพื่อให้ทดสอบเบื้องต้นว่ามีความเหมาะสมในการนำไปใช้ในกระบวนการผลิตหรือไม่ สูตรเนื้อดินที่มีคุณสมบัติที่เหมาะสมจะนำมาเขียนเป็นต้นแบบห้องปฏิบัติการ

สำหรับต้นแบบสูตรเคลือบ จะทำใช้แบบพิมพ์ประมาณ 80 ชิ้น เพื่อทดลองสูตรเคลือบ 1, สูตรเคลือบ 2, สูตรเคลือบ 3 และสูตรอ้างอิง โดยใช้แบบพิมพ์ 20 ชิ้น/สูตร (เผาปกติ จากนั้นเคลือบทั้งมือ แล้วเผาเคลือบอีกครั้งหนึ่ง) เพื่อนำมาทำการทดสอบคุณสมบัติต่างๆ ต่อไป โดยจะเลือกสูตรเคลือบที่เหมาะสมนำมาเขียนเป็นต้นแบบห้องปฏิบัติการเช่นเดียวกัน

3.3.3 การพัฒนาต้นแบบระดับภาคสนาม

สูตรเนื้อดินที่พัฒนาขึ้นสามารถนำไปใช้ได้กับถุงมืออย่างทุกประเภท แต่ในการทดลองทำต้นแบบภาคสนามจะทำต้นแบบแบบพิมพ์ที่ใช้ในกระบวนการผลิตถุงมืออย่างแบบตรวจโรค โดยอาจต้องทำการปรับปรุงในส่วนของการผลิต และแบบพิมพ์ขึ้นรูปอีกเล็กน้อยทำให้มีสมบัติที่เหมาะสมกับการผลิตในจำนวนที่มากขึ้น เพื่อให้สามารถนำไปทดลองใช้ในกระบวนการผลิต ตามกิจกรรมดังต่อไปนี้

กิจกรรมที่ 6 การพัฒนาต้นแบบระดับภาคสนาม

หลังจากการพัฒนาต้นแบบห้องปฏิบัติการที่มีสมบัติที่เหมาะสมแล้ว จะดำเนินการขยายขนาดการผลิต โดยการทำต้นแบบระดับภาคสนามของแบบพิมพ์ขึ้นรูปถุงมืออย่าง โดยจะทำการเผาในโรงงานเซรามิกที่มีเตาเผาขนาดใหญ่และสามารถเผาที่อุณหภูมิสูงสำหรับเผาผลิตภัณฑ์พอร์ซเลน โดยจะทำการเตรียมแบบพิมพ์เซรามิกขึ้นรูปถุงมือมาทำการเผา จากนั้นนำต้นแบบของแบบพิมพ์เซรามิกขึ้นรูปถุงมืออย่าง ไปให้โรงงานผู้ผลิตถุงมืออย่างทำการทดลองขึ้นรูปถุงมือในกระบวนการผลิตจริง

โดยแบบพิมพ์ที่ใช้งานจริง จะต้องมีการทำผิวหยาบในบางบริเวณ เพื่อให้ถุงมืออย่างที่ได้มีส่วนขรุขระที่ช่วยในการจับยึดสิ่งของได้ไม่ลื่นไหล จึงต้องมีการพัฒนากระบวนการทำแบบพิมพ์ให้มีผิวหยาบโดยการพ่นทราย ซึ่งต้องมีการปรับปรุงวัสดุที่ใช้ในการพ่น วิธีการ ความเร็ว ความแรงของการพ่น เป็นต้น หลังจากนี้โรงงานได้ตรวจสอบ และเลือกตัวอย่างที่มีความเหมาะสมที่จะสามารถนำไปทดลองใช้เป็นแบบพิมพ์ใน

กระบวนการผลิตจริงได้ จึงจะขยายสเกลการผลิตสูตรเนื้อดินดังกล่าว ส่งให้โรงงานทดลองในกระบวนการผลิตจริงประมาณ 80 ขึ้น

3.3.4 การนำเสนอผลการวิจัยและพัฒนา

กิจกรรมที่ 7 รายงานผลการดำเนินงานฉบับสมบูรณ์

ผลการนำต้นแบบแบบพิมพ์ระดับภาคสนามไปใช้ในกระบวนการผลิตถุงมียาง จะได้นำมาประเมินผลการใช้งาน เป็นข้อมูลผลการดำเนินงานโครงการ สรุปเป็นรายงานผลการดำเนินการโครงการฉบับสมบูรณ์ ที่รายงานผลการวิจัยต้นแบบสูตรเนื้อดินและเคลือบ การทำต้นแบบระดับปฏิบัติการ การทำต้นแบบระดับภาคสนาม และการนำแบบพิมพ์ไปใช้งานในกระบวนการผลิตถุงมียาง

3.4 วิธีการดำเนินวิจัย

3.4.1 วิธีการตรวจสอบวัตถุดิบ

สำหรับขั้นตอนแรก เป็นการรวบรวมวัตถุดิบ และวัตถุดิบที่เป็นดินสำเร็จรูปเพื่อใช้เป็นสูตรดินอ้างอิงเพื่อนำมาวิเคราะห์ และตรวจสอบโดยมีรายละเอียดวิธีการดำเนินงานวิจัย ดังนี้

- 1) วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค XRF (Bruker model S8 Tiger) ตัวอย่างแม่พิมพ์เซรามิกสำหรับขึ้นรูปถุงมียางจากโรงงาน (Former) และวัตถุดิบที่นำมาใช้ในการทำวิจัย ได้แก่ ดินขาว ดินดำ โปแตสเฟลด์สปาร์ โซดาเฟลด์สปาร์ ควอทซ์ และดินสำเร็จรูป
- 2) วิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ด้วยเทคนิค XRD (Bruker AXS Model D8 Discover) ของวัตถุดิบที่นำมาใช้ในการทำวิจัย ได้แก่ ดินขาว ดินดำ โปแตสเฟลด์สปาร์ โซดาเฟลด์สปาร์ และควอทซ์
- 3) ตรวจสอบความชื้นของวัตถุดิบแต่ละตัวเพื่อนำมาใช้ในการคำนวณปริมาณน้ำที่ต้องเติมในสูตรดินทดลอง

3.4.2 วิธีการเตรียมน้ำดินและขึ้นงานทดสอบ

สำหรับขั้นตอนต่อไปเป็นการพัฒนาสูตรดิน จากวัตถุดิบที่มีอยู่ อ้างอิงกับองค์ประกอบทางเคมีของสูตรอ้างอิง ให้มีค่าที่ใกล้เคียงกัน จากนั้นทำการเตรียมน้ำดิน โดยมีรายละเอียดวิธีการทำวิจัย ดังนี้

- 1) ชั่งน้ำหนักส่วนผสมตามสูตรทดลอง ทำการบดส่วนผสมน้ำดินด้วยเครื่องบด High speed mill เป็นเวลา 10 นาที สำหรับสูตรที่ใช้ดินสำเร็จรูป ใช้การกวนผสมในเครื่องกวนน้ำดินเป็นเวลาประมาณ 1 ชม. ให้ส่วนผสมเข้ากันดี
- 2) ตรวจสอบคุณสมบัติของน้ำดินทดลอง ได้แก่ ค่าความหนาแน่น (g/cm^3) ค่าการไหลตัว (วินาที) ค่าความหนืด (เซ็นติพอยซ์) ค่าเปลี่ยนขนาดอนุภาคน้ำดิน ค่าการก้างตะแกรง 325 เมช (%) และอัตราการล่อน้ำดินที่ 30 นาที (มม.)

น้ำดินที่เตรียมได้จากสูตรต่างๆ นำมาทำเป็นชิ้นงานสำหรับการทดสอบคุณสมบัติต่างๆ โดยจะขึ้นรูปโดยวิธีหล่อแบบเป็นแท่งเหลี่ยมขนาด $70 \times 20 \times 10$ มม. ทิ้งไว้ในแม่พิมพ์เป็นเวลา 1 วัน จึงทำการแกะ

แบบ ชัดแต่งชิ้นงาน และนำชิ้นงานเข้าอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส อย่างน้อย 24 ชั่วโมง ก่อนนำไปเผาที่อุณหภูมิทดลอง 1250, 1280 และ 1300°C โดยใช้ Heating rate 5°C/นาที, Soaking 60 นาที

3.4.3 วิธีการทดสอบชิ้นงาน

ชิ้นงานที่ได้นำไปทดสอบคุณสมบัติต่างๆ ดังรายละเอียดต่อไปนี้

1) การทดสอบการหดตัวเชิงเส้น (Linear shrinkage)

การหดตัวของชิ้นงานหลังอบแห้งและหลังเผาที่อุณหภูมิ 1250, 1280 และ 1300°C ตามวิธีการทดสอบในมาตรฐาน ASTM C 326-03 ซึ่งทำได้โดยวัดขนาดความยาวของชิ้นงานทดสอบหลังการอบแห้งหรือหลังการเผาเทียบกับความยาวเริ่มต้นหลังจากการแกะแบบชิ้นงาน จากนั้นนำมาคำนวณเป็นค่าเปอร์เซ็นต์การหดตัวเชิงเส้น ดังสมการ

$$S = \frac{L_0 - L_1}{L_0} \times 100$$

เมื่อ S คือ เปอร์เซ็นต์การหดตัวเชิงเส้นของชิ้นงานหลังอบแห้งหรือหลังเผา (%)

L_0 คือ ความยาวของชิ้นงานหลังจากการขึ้นรูป (มิลลิเมตร)

L_1 คือ ความยาวของชิ้นงานหลังการอบแห้งหรือหลังการเผา (มิลลิเมตร)

2) การทดสอบสมบัติทางกายภาพ (Physical properties)

สมบัติทางกายภาพ ได้แก่ การดูดซึมน้ำ (Water absorption) ความพรุนตัวปรากฏ (Apparent porosity) และความหนาแน่นทั้งก้อน (Bulk density) ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 373-88 (1999) มีวิธีการทดสอบดังต่อไปนี้

- อบชิ้นทดสอบให้น้ำหนักคงที่ ในเตาอบที่อุณหภูมิ 100°C จากนั้นทิ้งไว้ให้เย็นใน Desiccator หาค่าน้ำหนักของชิ้นทดสอบในหน่วยกรัม บันทึกเป็นค่า D
- ต้มชิ้นทดสอบในน้ำเดือดเป็นเวลา 5 ชั่วโมง และแช่ชิ้นงานเหล่านั้นให้เย็นตัวในน้ำต่อไปอีก 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นชั่งน้ำหนักชิ้นทดสอบแต่ละชิ้นขณะแขวนลอยในน้ำในหน่วยกรัม บันทึกเป็นค่า S
- ใช้ผ้าหมาดๆ ซับน้ำส่วนเกินบริเวณผิวหน้าของชิ้นทดสอบออกโดยการกลิ้งชิ้นงานบนผ้าเบาๆ ชั่งน้ำหนักชิ้นทดสอบนั้นทันที เพื่อลดความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการระเหยของน้ำออกจากชิ้นงานให้น้อยที่สุด บันทึกค่าเป็นค่าน้ำหนักที่อิ่มตัวไปด้วยน้ำ (M) ในหน่วยกรัม
- ทำการคำนวณหาค่าต่างๆ ดังนี้
 - คำนวณปริมาตรภายนอก (Exterior volume), V, ในหน่วย cm^3
$$V = M - S$$
 - คำนวณค่าความพรุนตัวปรากฏ (Apparent porosity), P, ในหน่วย %
$$P = [(M - D) / V] \times 100$$

- คำนวณค่าการดูดซึมน้ำ (Water absorption), A, ในหน่วย %

$$A = [(M - D) / D] \times 100$$
- คำนวณค่าความหนาแน่นทั้งก้อน (Bulk density), B, ในหน่วย g/cm³

$$B = D / V$$

3) การทดสอบความต้านทานแรงดัด (3-point bending strength)

ความแข็งแรงของชิ้นงานทดสอบเป็นความต้านทานต่อแรงดัดตามมาตรฐาน ASTM C 674-88 (1999) โดยใช้เครื่อง Universal testing machine (Instron, 55R4502) คำนวณค่าความแข็งแรง ตามสูตรดังนี้

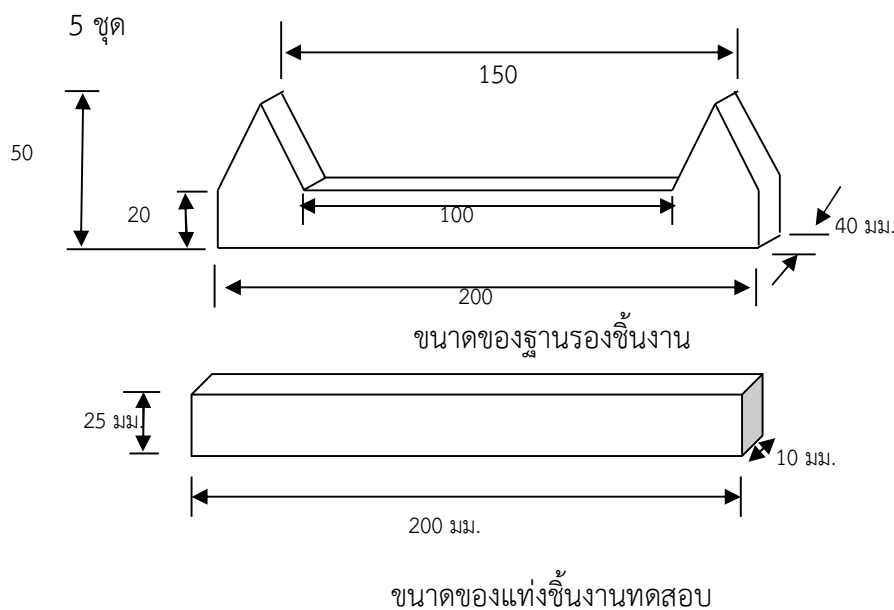
$$M = 3PL / 2bd^2$$

- เมื่อ
- M = Modulus of Rupture, psi (หรือ MPa)
 - P = แรงกดที่ทำให้ชิ้นงานเกิดการแตกหัก, ปอนด์ฟุต (หรือ นิวตัน)
 - L = ระยะห่างระหว่างฐานรองรับชิ้นงาน, นิ้ว (หรือ มิลลิเมตร)
 - b = ขนาดความกว้างของชิ้นงาน, นิ้ว (หรือ มิลลิเมตร)
 - d = ขนาดความหนาของชิ้นงาน, นิ้ว (หรือ มิลลิเมตร)

4) การทดสอบการตกตัวของชิ้นทดสอบ (Sagging)

การทดสอบการตกตัว มีวิธีการทดสอบดังต่อไปนี้

- นำน้ำดินที่ต้องการจะทดสอบเทลงในแม่พิมพ์ชุด Warpage Mold ซึ่งประกอบไปด้วย ส่วนฐานรอง (หล่อกลวง) และแท่งชิ้นงานทดสอบ (หล่อตัน) ให้ได้ฐานรองและแท่งชิ้นงานทดสอบที่มีลักษณะและขนาดดังรูปที่ 2.1 โดยให้เตรียมชุดชิ้นงานทดสอบจำนวน



รูปที่ 3.1 ขนาดของฐานรองและชิ้นงานสำหรับทดสอบการตกตัว

- ทิ้งไว้จนเนื้อดินร้อนออกจากแม่พิมพ์ แล้วจึงแกะชิ้นงานทดสอบออก จากนั้นปล่อยให้แห้งในอากาศเป็นเวลา 1 คืน
- นำชุดทดสอบที่ได้ไปอบในเตาอบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 110 °C เป็นเวลาอย่างน้อย 12 ชั่วโมง
- ใช้เศษผ้าหรือกระดาษทรายตกแต่งชิ้นงานทดสอบให้ได้ฉาก
- นำชุดชิ้นงานทดสอบที่อบแห้งแล้วไปเผาในเตาเผาตามสภาวะและอุณหภูมิที่ต้องการทดสอบ โดยวางแท่งชิ้นงานทดสอบไว้บนฐานรองให้สมดุลกันทั้งสองข้าง
- นำชุดชิ้นงานทดสอบออกจากเตาเผา และรอให้ชิ้นงานเย็นตัว
- ใช้เวอร์เนียคาลิเปอร์วัดระยะจากแนวราบจนถึงจุดต่ำสุดของส่วนโค้งของชิ้นงานทดสอบแต่ละชิ้น บันทึกค่าที่อ่านได้ในหน่วยมิลลิเมตร
- ทำการหาค่าเฉลี่ยระยะการตกตัวของชิ้นงานทดสอบทั้ง 5 ชิ้น และรายงานผลที่ได้

5) การทดสอบการขยายตัวเนื่องจากความร้อน (Thermal expansion)

วิธีการวัดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวความร้อนเชิงเส้น (Linear Coefficient of Thermal Expansion, CTE) ในช่วงอุณหภูมิ 25 – 500°C ตามมาตรฐาน ASTM C 372–94 (2001) โดยใช้เครื่อง Dilatometer (Netzsch รุ่น DIL 402 PC) ซึ่งเตรียมชิ้นทดสอบเป็นแท่งเหลี่ยม ความหนาประมาณ 5 มิลลิเมตร ยาวประมาณ 25 มิลลิเมตร ทำการทดสอบในสภาวะการเผาแบบใช้อากาศปกติ (Static air) อัตราการให้ความร้อน (Heating rate) และอัตราการเย็นตัว (Cooling rate) เท่ากับ 5°C/นาที การหาค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน มีจุดประสงค์เพื่อให้ทราบค่าการขยายตัวของเนื้อดินและเคลือบระหว่างทำการเผาที่ช่วงอุณหภูมิดังกล่าว ซึ่งจะเป็นประโยชน์สำหรับการนำสูตรเนื้อดินเหล่านี้ไปประยุกต์ใช้กับสูตรเคลือบเซรามิกต่างๆ ต่อไป โดยสูตรเคลือบกับสูตรเนื้อดินเซรามิกนั้นจะต้องมีค่าการขยายตัวที่สัมพันธ์กันในระหว่างการเผา หากมีความแตกต่างกันมากจะเป็นสาเหตุทำให้เกิดตำหนิต่างๆ บนผลิตภัณฑ์หลังเผาได้ เช่น ตำหนิเคลือบร้าว เคลือบร่อน เป็นต้น

การวัดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนเชิงเส้นนั้น เป็นการวัดค่าความยาวของชิ้นงานที่เปลี่ยนแปลงไปเทียบกับค่าความยาวเริ่มต้น ในระหว่างการให้ความร้อนแก่ชิ้นงานจากอุณหภูมิหนึ่งไปยังอีกอุณหภูมิหนึ่ง ดังแสดงในสมการต่อไปนี้

$$\alpha(T_2, T_1) = \frac{\left[\frac{dL}{L_0} \right]_{T_2} - \left[\frac{dL}{L_0} \right]_{T_1}}{T_2 - T_1}$$

เมื่อ α คือ ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนเชิงเส้นจากช่วงอุณหภูมิ T_1 ถึง T_2 (K^{-1})

L_0 คือ ความยาวเริ่มต้นของชิ้นงานที่อุณหภูมิห้อง (มิลลิเมตร)

dL/L_0 คือ ความยาวของชิ้นงานที่เปลี่ยนแปลงไปเทียบกับค่าความยาวเริ่มต้น (ไม่มีหน่วย)

T_1 คือ อุณหภูมิเริ่มต้นที่ต้องการวัด ($^{\circ}C$)

T_2 คือ อุณหภูมิสุดท้ายที่ต้องการวัด ($^{\circ}C$)

6) การทดสอบความทนทานต่อการเปลี่ยนอุณหภูมิเฉียบพลัน (Thermal Shock Resistance)

ใช้วิธีการทดสอบอ้างอิงตาม In-house Testing ของโรงงานผลิตถุงมือยาง รายละเอียดดังนี้

- นำชิ้นงานเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ $180^{\circ}C$ เป็นเวลา 1 ชม.
- นำออกมาจุ่มลงในน้ำที่ผสม Methylene Blue ที่อุณหภูมิห้องโดยทันที ($25-30^{\circ}C$)
- ทำการตรวจสอบรอยแตกร้าว โดยดูจากสีน้ำเงินของ Methylene Blue ที่ซึมไปตามรอยแตกของชิ้นงาน รายงานผลรอบที่พบรอยร้าวของชิ้นงาน
- ทำซ้ำวิธีการเดิมจนครบ 10 รอบ หากไม่พบรอยแตกร้าวถือว่าผ่านการทดสอบ

7) การทดสอบความทนด่างของชิ้นงาน (Alkaline Resistance)

ใช้วิธีการทดสอบอ้างอิงตาม In-house Testing ของโรงงานผลิตถุงมือยาง รายละเอียดดังนี้

- เตรียมสารละลายด่าง โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ที่ความเข้มข้น $20 \pm 1\%$ โดยใช้ อุณหภูมิ $70 \pm 2^{\circ}C$
- ตรวจสอบลักษณะของผิวชิ้นงานก่อนนำไปแช่ในสารละลายด่างดังกล่าว ว่ามีลักษณะผิวเรียบ ไม่มีรอยแตกร้าว หรือสีกร่อนก่อนทดสอบ
- นำชิ้นงานทดลองแช่ในสารละลายด่าง แล้วนำขึ้นมาตรวจสอบดูลักษณะการสีกร่อนของผิวชิ้นงานทุกวัน
- นำชิ้นงานไปทดลองจุ่มในน้ำยาง (เหมือนในกระบวนการผลิตถุงมือ) แล้วนำแผ่นยางที่ได้มาตรวจสอบดูรอยร้าว

3.4.4 วิธีการทดสอบแบบพิมพ์

สำหรับวิธีการทดสอบแบบพิมพ์เซรามิกนั้น จากการสืบค้นข้อมูลในเบื้องต้นพบว่า ถุงมือยางที่ใช้ในทางการแพทย์เป็นสินค้าที่ต้องมีคุณภาพ และได้มาตรฐานตามการควบคุมของสำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา (อย.) แต่สำหรับตัวแบบพิมพ์เซรามิกที่ใช้ในการขึ้นรูปนั้น ยังไม่มี

มาตรฐานในการควบคุมโดยตรง เพราะฉะนั้นวิธีการตรวจสอบแบบพิมพ์ที่เป็นเซรามิกประเภทพอร์ซเลน จึงมักขึ้นอยู่กับบริษัทผู้ผลิตเป็นหลัก และมักจะแสดงเฉพาะค่าการทดสอบเท่านั้น เช่น แบบพิมพ์ของบริษัท Duratec refractory จะมีคุณสมบัติ ดังนี้

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของแบบพิมพ์ของบริษัท Duratec refractory

Physical Properties		Size Tolerance (mm)	
Hardness(Mohs)	9	Height	total length:
			fingers: +/-2
Water Absorption	<0.25%	Circumference	fingers: +/-2
			others:+/-3
Fastness to Acid	≥99%	Base plate	55×25mm +/-2mm
Fastness to Alkali	≥99%	Thickness	3mm+/-0.5
Heat Fastness	400°C	Remark	Customized tolerance is available upon requests
Flexural Strength	800 kg/cm ²		

อ้างอิง: <http://www.duratec-refractory.com/html/Products/48.Html>

ในส่วน of โรงงานผู้ผลิตถุงมือยางที่มีการใช้แบบพิมพ์เซรามิกนั้น ก็จำเป็นต้องมีวิธีการทดสอบแบบพิมพ์ที่สั่งซื้อเข้ามา ก่อนนำไปใช้งานเช่นเดียวกัน ซึ่งมักเป็นวิธีการทดสอบที่พัฒนาขึ้นมาใช้เอง เพื่อให้สอดคล้องกับกระบวนการผลิตจริงมากที่สุด (In-house Testing) จากข้อมูลที่มีวิจัยได้รับจากทางโรงงานที่เข้าร่วมโครงการ สามารถสรุปวิธีการทดสอบแบบพิมพ์เซรามิกในห้องปฏิบัติการของโรงงาน เพื่อใช้เป็นวิธีการทดสอบแบบพิมพ์เซรามิกที่พัฒนาขึ้น ก่อนนำไปใช้จริงในโรงงาน โดยวิธีการทดสอบมีรายละเอียด ดังต่อไปนี้

1) การตรวจสอบสเปกขนาดแบบพิมพ์ (Dimension)

- วัดขนาดแบบพิมพ์ที่ตำแหน่งต่างๆ เทียบกับแบบ drawing บันทึกผลเป็น มม.
- ชั่งน้ำหนักแบบพิมพ์ บันทึกค่าเป็นกรัม
- เปรียบเทียบขนาดตามจุดต่างๆ และน้ำหนักของแบบพิมพ์ โดยควบคุมความเบี่ยงเบนให้เป็นไปตามมาตรฐานตามข้อมูลของโรงงานที่แสดงไว้ในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 สเปคขนาดของแบบพิมพ์เซรามิกที่ใช้เป็นแม่แบบ

Spec (mm.)	M	L	XL
Height	380 ± 3	380 ± 3	380 ± 3
Palm length textured	205 ± 3	214 ± 3	220 ± 3
Palm circumference	203 ± 3	224 ± 3	242 ± 3
Wrist circumference	182 ± 3	195 ± 3	203 ± 3
Beading circumference (300 mm. from tip of middle finger)	203 ± 3	209 ± 3	220 ± 3
Finger length 1)	54 ± 2	58 ± 2	63 ± 2
2)	72 ± 2	76 ± 2	75 ± 2
3)	85 ± 2	88 ± 2	88 ± 2
4)	75 ± 2	77 ± 2	78 ± 2
5)	58 ± 2	58 ± 2	65 ± 2
Finger circumference 1)	68 ± 2	73 ± 2	79 ± 2
2)	60 ± 2	66 ± 2	70 ± 2
3)	65 ± 2	68 ± 2	71 ± 2
4)	58 ± 2	62 ± 2	68 ± 2
5)	51 ± 2	55 ± 2	60 ± 2
Base holder slot			
Width	27 ± 2	27 ± 2	27 ± 2
Length	56 ± 2	56 ± 2	56 ± 2
Base diameter	79 ± 2	79 ± 2	79 ± 2
Weight (g)	700-900	800-1000	850-1050
Clearance length from thumb to last	Max 130	Max 130	Max 130

2) การทดสอบความทนทานต่อการเปลี่ยนอุณหภูมิเฉียบพลัน (Thermal Shock Resistance)

- นำแบบพิมพ์เซรามิกเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 180°C เป็นเวลา 1 ชม.
- จากนั้นนำออกมาจุ่มลงในน้ำที่อุณหภูมิห้องทันที ยกชิ้นงานขึ้นตรวจสอบดูรอยแตกร้าว
- ตรวจสอบการแตกร้าว โดยการดูด้วยตาเปล่า และการเคาะฟังเสียงที่ผิดปกติด้วยไม้บรรทัด (โดยทีมวิจัย แนะนำให้โรงงานตรวจสอบรอยแตกร้าวเพิ่มเติม ด้วยวิธีการใช้ผงสี

Methylene Blue ผสมลงในถังน้ำสำหรับจุ่มชิ้นงาน เพื่อให้สังเกตเห็นรอยแตกได้ง่ายและชัดเจนขึ้น จากการดูรอยสีน้ำเงินของ Methylene Blue ที่ซึมไปตามรอยแตกของชิ้นงาน)

- รายงานผลรอบที่พบรอยแตกร้าวของชิ้นงานทดสอบ
- ทำซ้ำตามวิธีการเดิมจนครบ 10 รอบ หากไม่พบรอยแตกร้าวถือว่าผ่านการทดสอบ

3) การทดสอบความทนต่าง (Alkaline Resistance)

มาตรฐานผลิตภัณฑ์พอร์ซเลนอื่นๆ ที่ใกล้เคียง ได้แก่ มอก.2398 กระเบื้องเซรามิก; เล่ม 13-2551 วิธีหาความทนสารเคมี และ ISO 10545-13: 1995 Ceramic tiles; Part 13 Determination of chemical resistance หรือ BS 3402 Quality of vitreous china sanitary appliances; Appendix C Tests for chemical resistance ซึ่งแต่ละมาตรฐานจะมีวิธีการทดสอบที่คล้ายคลึงกัน แต่อาจจะมีการเตรียมตัวอย่างเป็นชิ้นงานขนาดต่างๆ กัน หรือการใช้ชนิดของสารละลายต่าง และอุณหภูมิต่างกัน เป็นต้น สำหรับในงานวิจัยนี้จะทำการทดสอบแบบพิมพ์ตามวิธีการทดสอบของโรงงานที่เข้าร่วมโครงการ โดยมีรายละเอียด ดังนี้

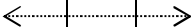
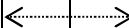
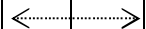
- เตรียมสารละลายต่าง โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ที่ความเข้มข้น $20 \pm 1\%$ โดยใช้ อุณหภูมิ $70 \pm 2^\circ\text{C}$
- ตรวจสอบลักษณะของผิวชิ้นงานก่อนนำไปแช่ในสารละลายต่างดังกล่าว ว่ามีลักษณะผิวเรียบ ไม่มีรอยแตกร้าว หรือสีกร่อนก่อนทดสอบ
- นำชิ้นงานทดลองแช่ในสารละลายต่าง แล้วนำขึ้นมาตรวจสอบดูลักษณะการสีกร่อนของผิวชิ้นงานทุกวัน
- นำชิ้นงานไปทดลองจุ่มในน้ำยาง (เช่นเดียวกับในกระบวนการผลิตถุงมือ) แล้วนำแผ่นยางที่ได้มาตรวจสอบดูรอยร้าว
- ถ้าแผ่นยางยังไม่มีรอยร้าวให้แช่ชิ้นทดสอบในสารละลายต่างต่อไปเรื่อยๆ และนำขึ้นมาตรวจสอบผิว และจุ่มน้ำยางดูรอยร้าวเป็นระยะๆ
- บันทึกเวลารวมทั้งหมดที่แช่ชิ้นงานในสารละลายต่าง (ชั่วโมง) ก่อนจะเห็นว่าผิวชิ้นงานสีกร่อน และแผ่นยางที่ทดลองจุ่มมีรอยร้าวเกิดขึ้น

3.5 แผนการดำเนินการ

3.5.1 แผนงานวิจัย

โครงการการพัฒนาเนื้อดินและเคลือบสำหรับทำแบบพิมพ์เซรามิกขึ้นรูปถุงมือยางโดยวิธีการจุ่มในระดับอุตสาหกรรม จะใช้ระยะเวลาการทำวิจัย 1 ปี โดยขั้นตอนแผนการดำเนินงาน มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ตารางที่ 3.3 แผนการบริหารแผนงานวิจัยและแผนการดำเนินงาน

แผนงานวิจัย	เดือน												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1) การพัฒนาสูตรเนื้อดินและเคลือบพอร์ซเลน													
1.1 การรวบรวมข้อมูลสูตรเนื้อดินและเคลือบพอร์ซเลนอ้างอิง													
1.2 การพัฒนาสูตรเนื้อดินและเคลือบพอร์ซเลน													
1.3 การทดสอบสมบัติเนื้อดินและเคลือบพอร์ซเลนที่ได้พัฒนาขึ้น													
2) การพัฒนาต้นแบบระดับห้องปฏิบัติการ													
2.1 การพัฒนารูปแบบแบบพิมพ์เซรามิก													
2.2 การพัฒนาต้นแบบระดับห้องปฏิบัติการ													
2.3 การทดสอบการใช้งานต้นแบบในอุตสาหกรรม													
3) การพัฒนาต้นแบบระดับภาคสนาม													
3.1 การพัฒนาต้นแบบระดับภาคสนาม													
3.2 การทดสอบการใช้งานต้นแบบในอุตสาหกรรม													
4) การนำเสนอผลการวิจัยและพัฒนา													
4.1 รายงานผลการดำเนินการโครงการฉบับสมบูรณ์													

3.5.2 แผนการถ่ายทอดเทคโนโลยีหรือผลการวิจัยสู่กลุ่มเป้าหมายเมื่อสิ้นสุดการวิจัย

ผลการดำเนินงานโครงการ จะได้มีการเผยแพร่ผลงานทางวิชาการ ผ่านรายงานผลการดำเนินการโครงการฉบับสมบูรณ์ ที่รายงานผลการวิจัยต้นแบบสูตรเนื้อดินและเคลือบ การทำต้นแบบระดับปฏิบัติการ การทำต้นแบบระดับภาคสนาม และการนำแบบพิมพ์ไปใช้งานในกระบวนการผลิตถุงมือยาง เป็นข้อมูลให้กับโรงงานเซรามิกและผู้ที่สนใจทั่วไป ได้เกิดการเรียนรู้ ซึ่งจะก่อให้เกิดผลกระทบเป็นวงกว้าง เป็นการพัฒนาต่อไปในระดับคลัสเตอร์ และทั้งอุตสาหกรรม

บทที่ 4

ผลการดำเนินการวิจัย

การดำเนินงานโครงการตามกิจกรรมต่างๆ ได้ผลดังต่อไปนี้

4.1 การเก็บรวบรวมข้อมูล

ทีมงานวิจัยได้เดินทางไปเยี่ยมชมผู้ผลิตถุงมือยางแห่งหนึ่ง เพื่อศึกษาลักษณะแบบพิมพ์ และการใช้งานจริงในกระบวนการผลิตของโรงงาน ซึ่งโรงงานแห่งนี้เป็นผู้ผลิตถุงมือยางรายใหญ่แห่งหนึ่งของประเทศ ปัจจุบันแบบพิมพ์ส่วนใหญ่ ใช้ของบริษัทมาเลเซีย และเป็นแบบพิมพ์ชนิดมือกลางหรือถุงมือแพทย์ และเป็นแบบชนิดไม่เคลือบ ซึ่งในสายการผลิตหนึ่งจะใช้ประมาณ 22,000 ชิ้น ในหนึ่งรอบการผลิตจะมีใช้เวลาประมาณ 45 นาที/รอบ ใน 1 วันจะผลิตประมาณ 32 รอบ

นอกจากนี้ทางโรงงานยินดีที่จะรับเป็นผู้ทำการทดลองนำต้นแบบแบบพิมพ์เซรามิกไปใช้ในกระบวนการผลิตจริงของโรงงาน พร้อมกันนี้ได้มอบตัวอย่างแบบพิมพ์เพื่อนำมาใช้เป็นแม่แบบ ดังแสดงในรูปที่ 4.1-4.3 และกรุณาให้ข้อมูลขนาดมาตรฐานของถุงมือขนาด M, L และ XL ดังแสดงไว้แล้วในตารางที่ 3.2



รูปที่ 4.1 ลักษณะแบบพิมพ์ถุงมือยางและถุงมือยางที่ได้จากกระบวนการผลิต



รูปที่ 4.2 ลักษณะฐานของแบบพิมพ์และตัวยึดที่ติดตั้งกับสายการผลิต



รูปที่ 4.3 แบบพิมพ์เซรามิกขนาด M, L และ XL ที่จะใช้เป็นแม่แบบ

4.2 การพัฒนาเนื้อดินสำหรับทำแบบพิมพ์เซรามิก

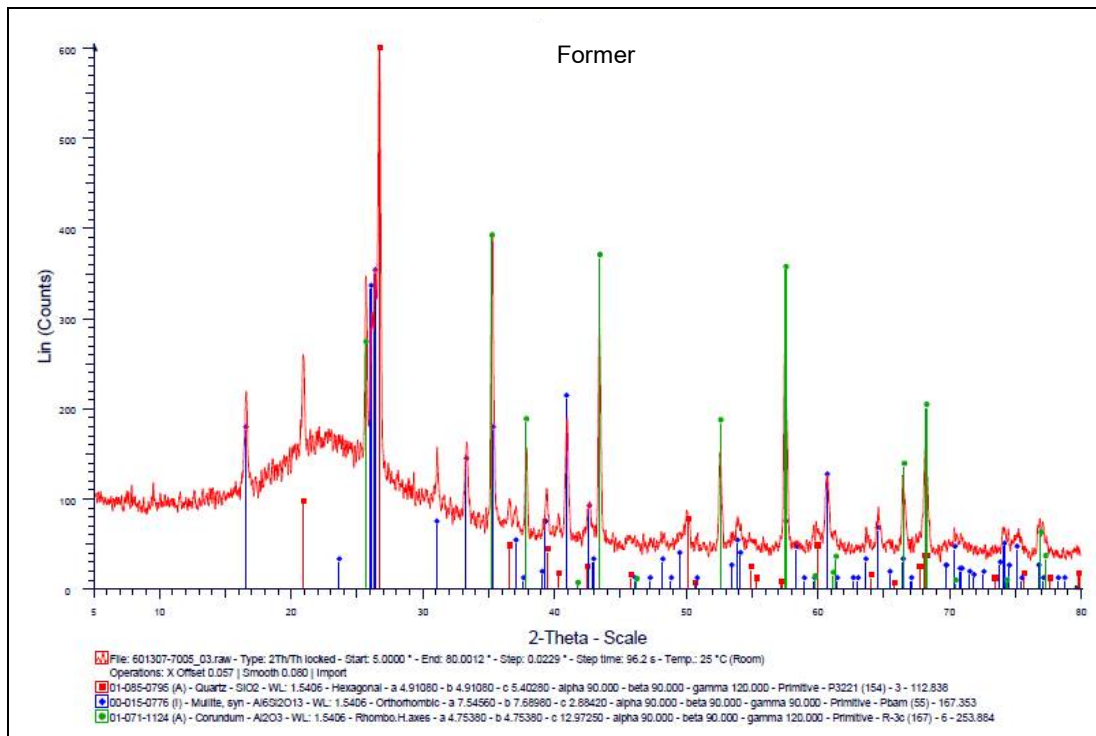
ได้ใช้แบบพิมพ์เซรามิกที่มีขายในท้องตลาดเป็นตัวอย่างอ้างอิง (Former Sample) และเลือกใช้เนื้อดินที่มีขายในท้องตลาด ที่ซัพพลายเออร์ได้แนะนำว่าเป็นเนื้อดินสำเร็จรูปที่สามารถใช้ผลิตแบบพิมพ์เซรามิกสำหรับขึ้นรูปถุงมือยางได้ (Body-R) และเนื้อดินสำเร็จรูป 2 ชนิด (Clay-A และ Clay-B) ที่ทีมวิจัยมีแนวทางที่จะสามารถใช้ผสมกันเพื่อพัฒนาสูตรที่มีความเหมาะสมมากขึ้น แบบพิมพ์ที่เป็นตัวอย่างอ้างอิง เนื้อดินสำเร็จรูปที่รวบรวมได้ทั้งหมด นำมาวิเคราะห์ทดสอบเบื้องต้น พร้อมกับวัตถุดิบที่ใช้ในการทำวิจัย ได้แก่ ดินขาว ดินดำ โปแตสเฟลด์สปาร์ โซดาเฟลด์สปาร์ ควอทซ์ ดังนี้

1) วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค XRF (Bruker model S8 Tiger) ตัวอย่างแบบพิมพ์เซรามิก (Former Sample) และดินสำเร็จรูป Body-R, Clay-A และ Clay-B เทียบกับสเปคที่ได้จากผู้จำหน่าย (ภาคผนวก ข. 1) และผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบที่นำมาใช้ในการทำวิจัย ได้แก่ ดินขาว ดินดำ โปแตสเฟลด์สปาร์ โซดาเฟลด์สปาร์ ควอทซ์ ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.1 ซึ่งจะเห็นว่าวัตถุดิบต่างๆ มีองค์ประกอบทางเคมีตามที่สมควร สำหรับดินสำเร็จรูปนั้นจะเห็นว่ามีองค์ประกอบที่ใกล้เคียงกับสเปคที่ได้จากผู้ผลิต

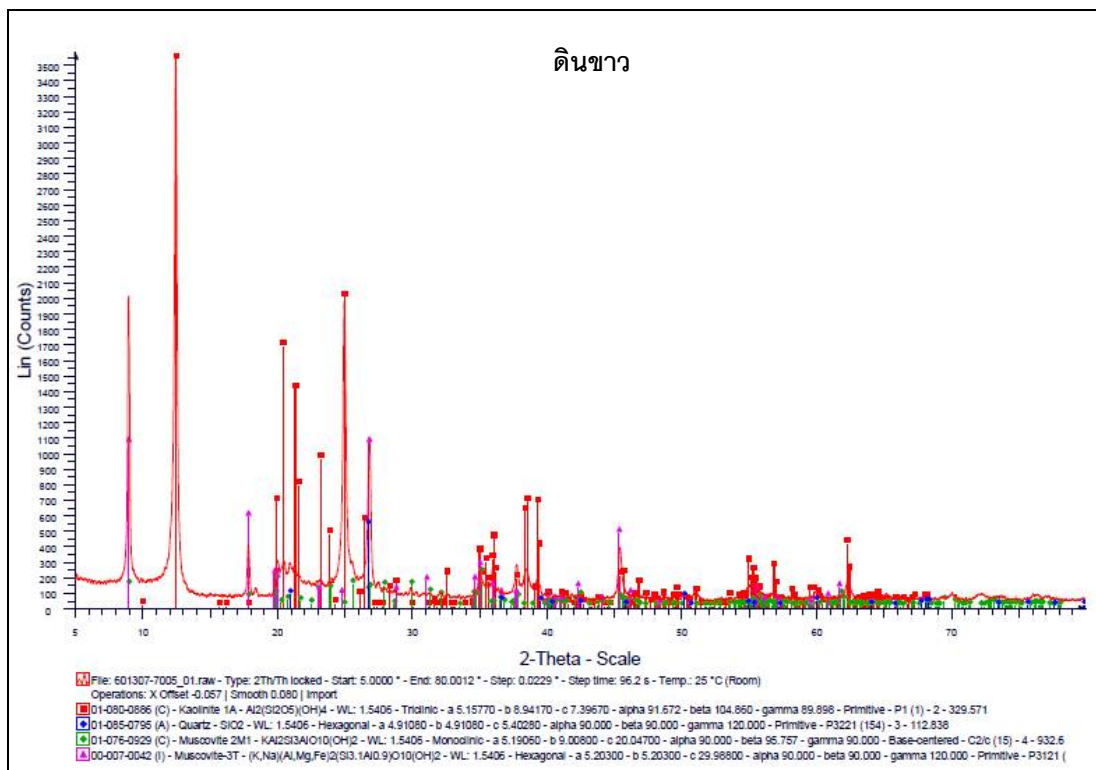
2) วิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ด้วยเทคนิค XRD (Bruker AXS Model D8 Discover) ของวัตถุดิบที่นำมาใช้ในการทำวิจัย ได้แก่ ดินขาว ดินดำ โปแตสเฟลด์สปาร์ โซดาเฟลด์สปาร์ และควอทซ์ เทียบกับตัวอย่างแบบพิมพ์เซรามิก ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.4-4.9 และ ตารางที่ 4.2 จะเห็นว่าพ้อยตัวอย่างแบบพิมพ์มีปริมาณของ Al_2O_3 สูงถึง 33.46% ซึ่งนับว่าเป็นปริมาณที่สูงมากใกล้เคียงกับดินขาว ซึ่งมีปริมาณ Al_2O_3 อยู่ประมาณ 36%

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบ ตัวอย่างแบบพิมพ์ และดินสำเร็จรูปวิเคราะห์ด้วย XRF เทียบกับสเปค

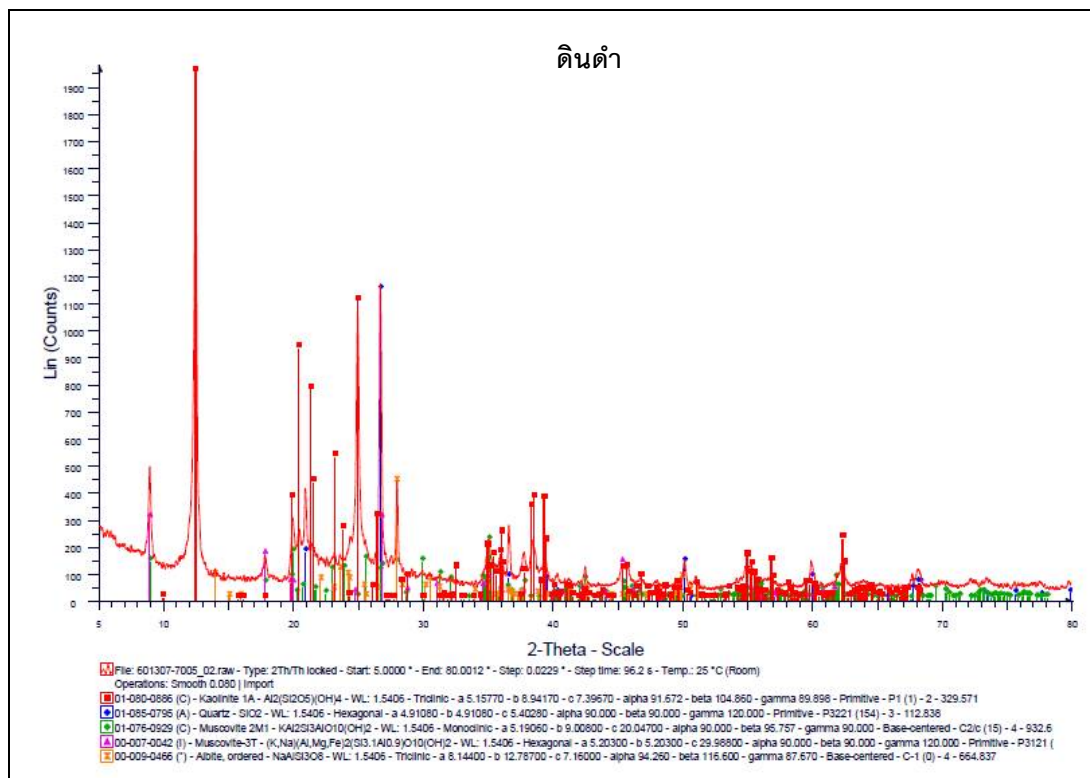
องค์ประกอบ (%โดยน้ำหนัก)	ดินขาว	ดินดำ	โปแตส เฟลด์สปาร์	โซดา เฟลด์สปาร์	ควอทซ์	Former Sample	Body-R	Clay-A	Clay-B	Body-R (spec)	Clay-A (spec)	Clay-B (spec)
SiO ₂	48.00	56.50	66.74	68.52	99.5	59.78	62.30	62.10	58.50	64.70	60.50	63.30
Al ₂ O ₃	36.00	26.50	18.44	17.55	0.13	33.46	23.90	24.10	26.40	22.60	27.60	22.70
Na ₂ O	0.01	0.34	3.09	8.06	-	1.66	1.24	0.82	0.53	1.26	1.14	0.60
K ₂ O	2.10	2.17	11.26	0.75	-	3.15	2.68	4.33	3.74	2.85	3.65	3.81
Rb ₂ O	-	-	-	-	-	-	0.04	0.04	0.06	-	-	-
MgO	0.01	0.28	0.2	0.58	-	0.16	0.12	0.29	0.25	0.08	0.11	0.19
CaO	0.01	0.25	0.01	1.77	0.04	0.40	0.21	0.17	0.13	0.22	0.09	0.20
BaO	-	-	-	-	-	0.11	0.01	<0.01	0.01	-	-	-
TiO ₂	0.05	0.46	0.01	0.29	-	0.15	0.06	0.23	0.25	0.06	0.03	0.20
ZrO ₂	-	-	-	-	-	-	-	0.01	0.01	-	-	-
P ₂ O ₅	-	-	-	-	-	0.14	0.05	0.03	0.04	-	-	-
MnO	-	-	-	-	-	-	0.01	0.01	0.02	-	-	-
Fe ₂ O ₃	1.30	1.25	0.1	0.2	0.03	0.65	0.41	0.77	0.90	0.41	0.52	0.95
SO ₃	-	-	-	-	-	-	0.02	0.03	0.02	-	-	-
Cl	-	-	-	-	-	-	0.02	0.01	0.01	-	-	-
LOI	12.50	10.80	0.19	1.24	0.30	0.35	6.01	5.17	6.49	7.82	6.36	7.85



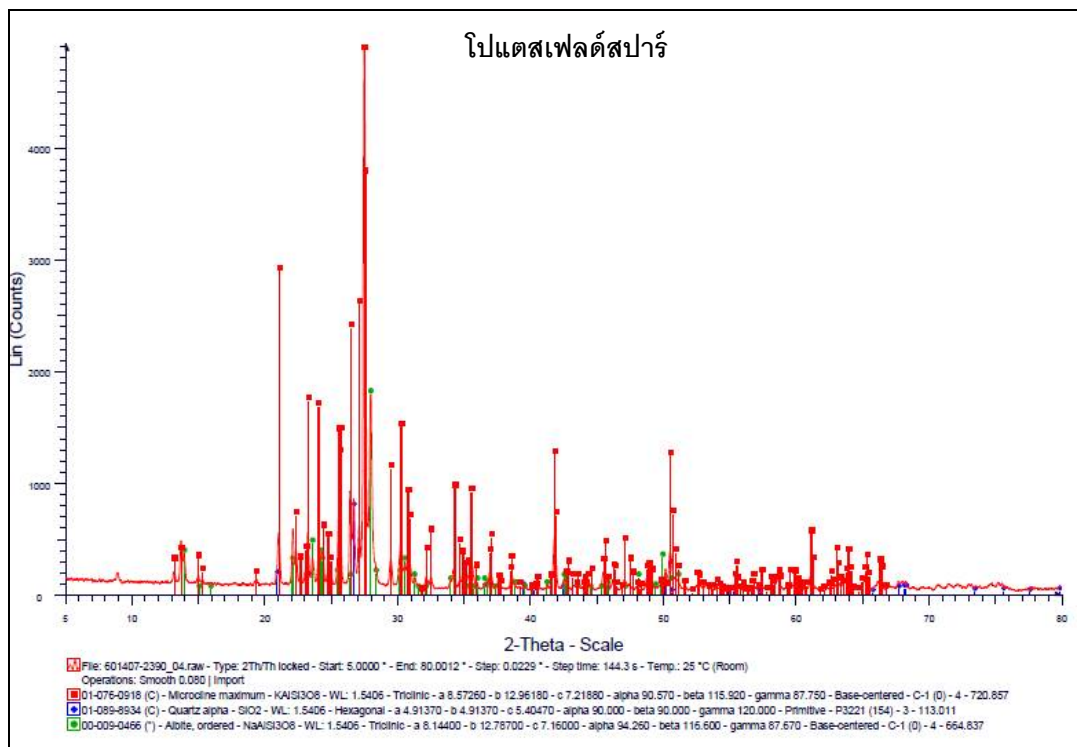
รูปที่ 4.4 XRD pattern ของ Former sample



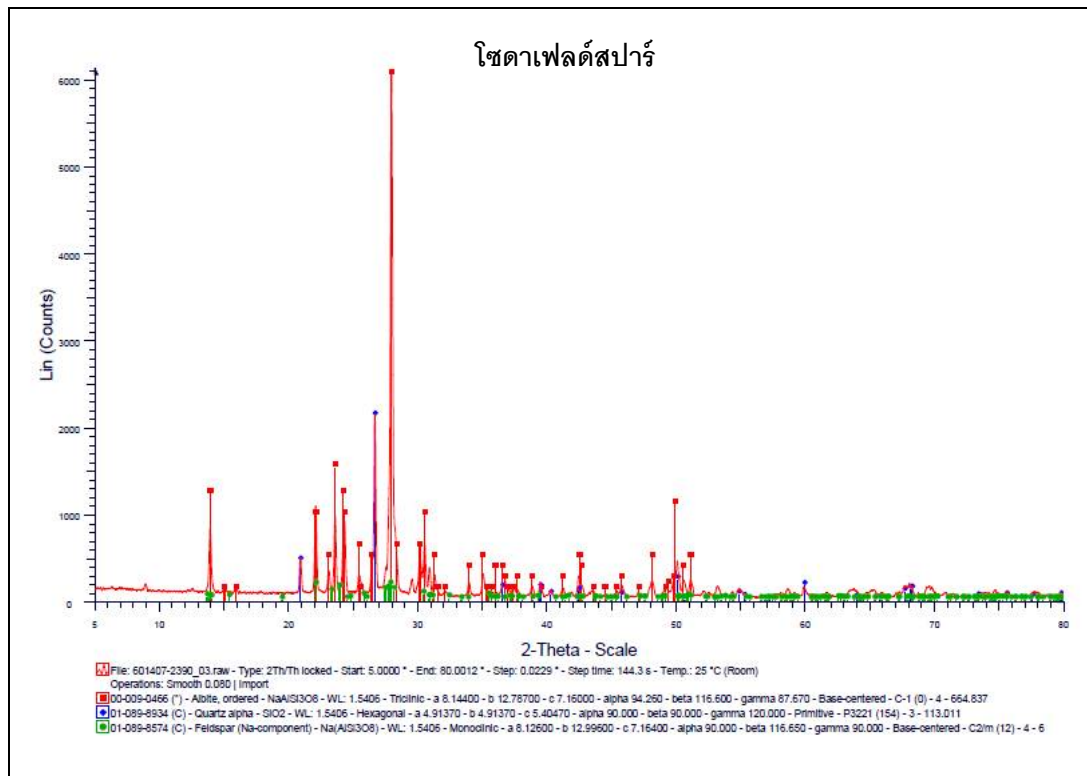
รูปที่ 4.5 XRD pattern ของดินขาว



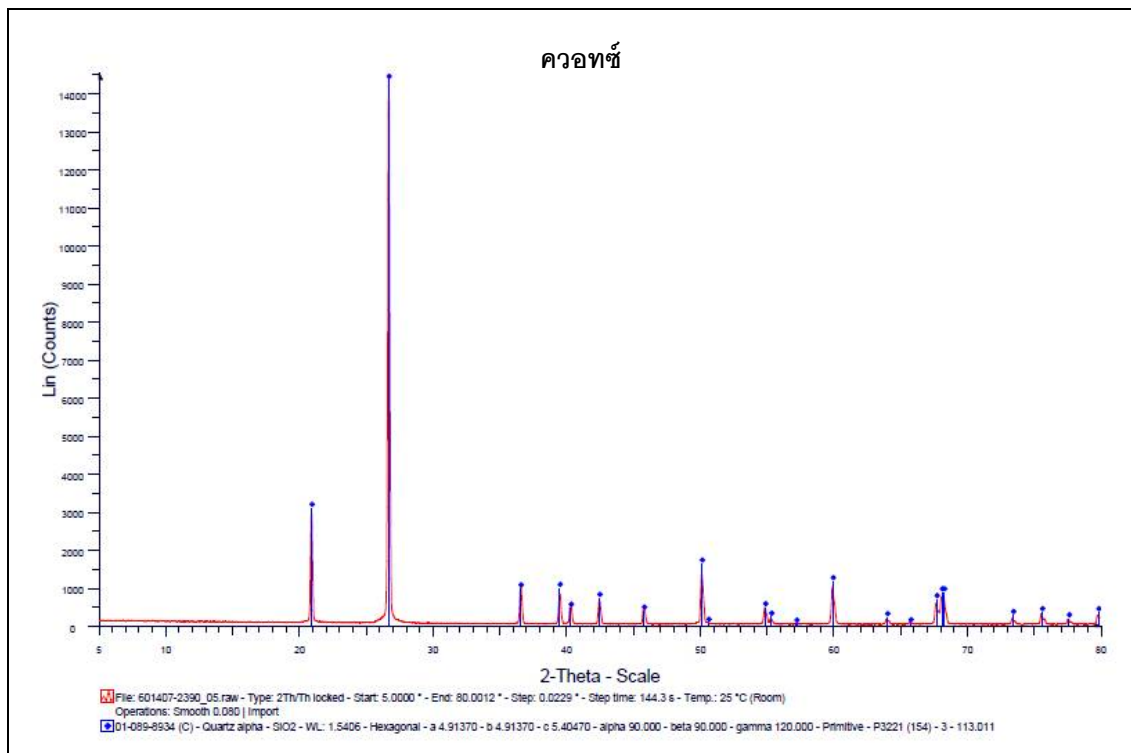
รูปที่ 4.6 XRD pattern ของดินดำ



รูปที่ 4.7 XRD pattern ของโปแตสเฟลด์สปาร์



รูปที่ 4.8 XRD pattern ของโซดาเฟลด์สปาร์



รูปที่ 4.9 XRD pattern ของควอทซ์

ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ของ Former และวัตถุดิบที่ใช้ในการวิจัย

ตัวอย่าง	ชื่อสารประกอบ
ตัวอย่างแบบพิมพ์ (Former sample)	Quartz, Mullite, Corundum
ดินขาว	Kaolinite, Quartz, Muscovite
ดินดำ	Kaolinite, Quartz, Muscovite, Albite
โปแตสเฟลด์สปาร์	Microcline, Quartz alpha, Albite
โซดาเฟลด์สปาร์	Albite, Quartz alpha, Feldspar (Na-component)
ควอทซ์	Quartz alpha

จากผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ของตัวอย่างแบบพิมพ์ เปรียบเทียบกับวัตถุดิบ พบว่าตัวอย่างแบบพิมพ์มีปริมาณของ Al_2O_3 สูงมาก น่าจะผ่านการเผาที่อุณหภูมิมากกว่า $1300^{\circ}C$ เนื้อดินจึงจะสามารถสุกตัว และได้เฟสความแข็งแรงสูงของ Mullite เป็นองค์ประกอบ แต่ในงานวิจัยนี้มีเป้าหมายในการเผาที่อุณหภูมิไม่เกิน $1300^{\circ}C$ และใช้วัตถุดิบที่สามารถหาได้ทั่วไป ประกอบกับเนื้อดินสำเร็จรูปที่มีขายในท้องตลาด จะมีปริมาณ Al_2O_3 อยู่ในช่วง 22.60-26.40% จึงไม่สามารถที่จะทำแบบพิมพ์ที่มีคุณภาพสูงดังกล่าว อย่างไรก็ตามในงานวิจัยก็จะเริ่มต้นจากสูตรที่ใช้ดินขาวให้มากที่สุด แต่จะจำกัดอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาอยู่ในช่วง $1250-1300^{\circ}C$ จากข้อมูลดังกล่าว ใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาสูตรเพื่อใช้ในการทดลอง ทั้งหมด 12 สูตร โดยแบ่งเป็น 2 กลุ่ม คือ สูตร GFB-02 ถึง GFB-16 ซึ่งเป็นสูตรที่พัฒนาจากส่วนผสมวัตถุดิบโดยตรง และ สูตรผสมจากเนื้อดินสำเร็จรูป A85-A95 ดังมีรายละเอียดดังนี้

ตารางที่ 4.3 สูตรเนื้อดินที่ใช้ในการทดลอง

ชื่อสูตร	วัตถุดิบที่ใช้ (% โดยน้ำหนัก)							
	ดินขาว	ดินดำ	ควอทซ์	โปแตสเฟลด์สปาร์	โซดาเฟลด์สปาร์	Clay-A	Clay-B	รวม
GFB-02	60	5	10	25	-	-	-	100
GFB-04	50	15	10	25	-	-	-	100
GFB-06	55	5	10	30	-	-	-	100
GFB-09	55	5	15	25	-	-	-	100
GFB-12	50	5	15	30	-	-	-	100
GFB-13	45	8	22	25	-	-	-	100
GFB-14	45	8	22	15	10	-	-	100
GFB-15	38	17	25	20	-	-	-	100
GFB-16	40	18	15	27	-	-	-	100
A95	-	-	-	-	-	95	5	100
A90	-	-	-	-	-	90	10	100
A85	-	-	-	-	-	85	15	100

ตารางที่ 4.4 ผลองค์ประกอบทางเคมี (XRF) ของสูตรเนื้อดินทดลองเทียบกับตัวอย่างแม่พิมพ์ (Former sample) และสูตรดินอ้างอิง (Body-R)

องค์ประกอบ (%โดยน้ำหนัก)	Former sample	Body- R	GFB- 02	GFB- 04	GFB- 06	GFB- 09	GFB- 12	GFB- 13	GFB- 14	GFB- 15	GFB- 16	A95	A90	A85
SiO ₂	59.98	70.19	62.83	63.78	63.43	65.08	65.68	68.51	68.84	70.11	66.55	66.70	66.57	66.45
Al ₂ O ₃	33.57	24.52	30.83	29.74	29.70	28.78	27.65	25.58	25.53	24.50	26.90	26.09	26.24	26.40
Na ₂ O	1.67	1.37	0.80	0.84	0.95	0.80	0.95	0.81	1.33	0.69	0.91	0.87	0.85	0.84
K ₂ O	3.16	3.09	4.38	4.39	4.83	4.26	4.71	4.10	3.05	3.59	4.45	4.63	4.60	4.58
Rb ₂ O	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.04	0.05	0.05
MgO	0.16	0.09	0.07	0.10	0.08	0.07	0.08	0.08	0.12	0.10	0.12	0.31	0.31	0.31
CaO	0.40	0.24	0.03	0.05	0.03	0.03	0.03	0.04	0.22	0.06	0.06	0.18	0.18	0.18
BaO	0.11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
TiO ₂	0.15	0.07	0.06	0.11	0.06	0.06	0.06	0.07	0.10	0.11	0.12	0.25	0.25	0.25
ZrO ₂	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.01	0.01	0.01
P ₂ O ₅	0.14	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.03	0.03	0.03
MnO	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.01	0.01	0.01
Fe ₂ O ₃	0.65	0.44	0.99	0.98	0.92	0.92	0.85	0.81	0.82	0.83	0.88	0.84	0.84	0.85
SO ₃	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.03	0.03	0.03
Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

ตารางที่ 4.5 สัดส่วนวัตถุดิบแห้งต่อน้ำและปริมาณสารช่วยกระจายตัวที่ใช้ในสูตรทดลอง และผลการทดสอบคุณสมบัติของน้ำดินทดลอง (Slip Properties)

ชื่อสูตร ทดลอง	ปริมาณ วัตถุดิบ (%)	ปริมาณน้ำ (%)	ปริมาณสารช่วย กระจายตัว (%)		ความ หนาแน่นน้ำ ดิน (g/cm ³)	การไหล ตัว (วินาที)	กากค้ำ ตะแกรง 325 mesh (%)	อัตราการ หล่อที่ 30 นาที่ (มม.)	ความหนืด น้ำดิน (cP)	ขนาดอนุภาค น้ำดินเฉลี่ย D [4,3] (μm)
			Deflok 2870	Sodium Silicate						
GFB-02	64	36	0.37	0.2	1.65 - 1.66	37 - 38	0.88	6	392.4	13.32
GFB-04	64	36	0.37	0.2	1.65	25 - 28	1.03	5	258.1	12.35
GFB-06	65	35	0.37	0.3	1.66 - 1.67	38 - 39	1.09	6	314.7	14.95
GFB-09	64	36	0.37	0.5	1.65	24 - 33	0.81	5.5	285.7	16.20
GFB-12	65	35	0.37	-	1.65 - 1.68	28 - 38	0.71	6	298.7	12.65
GFB-13	65	35	0.37	0.2	1.68	33 - 37	1.58	6	280.6	12.75
GFB-14	65	35	0.37	0.2	1.67 - 1.68	35 - 42	1.98	6	296.3	14.84
GFB-15	65	35	0.4	-	1.68	28	0.46	5	306.3	13.55
GFB-16	65	35	0.4	-	1.68 - 1.69	35	0.46	4	329.7	13.49
A95	65	35	0.1	-	1.71	25	0.94	5	250.0	10.27
A90	65	35	0.1	-	1.71	22	0.85	6	249.1	10.36
A85	65	35	0.1	-	1.71	26	1.10	5	262.1	9.44
Body-R	65	35	-	-	1.67	26 - 29	-	5	276.9	9.32

ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ ทางกล และทางความร้อนของชิ้นงานทดลอง

ชื่อสูตร ทดลอง	การหดตัว หลังอบแห้ง (%)	การหดตัวหลังเผา (%)			ความ แข็งแรงก่อน เผา (MPa)	ความแข็งแรงหลังเผา (MPa)			การดูดซึมน้ำ (%)		
		1250°C	1280°C	1300°C		1250°C	1280°C	1300°C	1250°C	1280°C	1300°C
GFB-02	3.86±0.70	12.07±0.71	12.49±0.31	13.04±0.86	1.98±0.11	21.64±2.54	35.57±2.25	42.06±0.43	7.68±0.17	5.11±0.29	3.25±0.09
GFB-04	1.90±0.22	11.11±0.36	12.00±0.34	12.38±0.53	2.90±0.13	22.75±1.56	37.36±3.94	48.60±1.21	3.95±0.36	0.87±0.46	0.23±0.33
GFB-06	3.01±0.41	11.13±0.98	13.58±0.64	13.59±0.97	1.87±0.22	21.65±1.69	41.32±3.36	49.44±1.81	3.07±0.93	2.32±0.12	0.75±0.27
GFB-09	0.94±0.65	11.27±0.33	12.04±1.44	12.57±1.23	1.34±0.10	22.11±3.70	36.35±4.19	49.63±6.54	4.66±0.44	3.49±0.40	1.81±0.12
GFB-12	4.51±0.59	12.55±2.28	13.08±2.32	12.97±2.37	2.26±0.10	25.15±1.09	55.72±2.75	63.48±2.99	4.40±0.25	0.81±0.39	0.07±0.12
GFB-13	1.23±0.47	10.74±0.44	12.07±0.64	12.77±2.07	2.07±0.09	26.80±2.13	54.37±2.20	75.00±4.22	4.91±0.22	1.66±0.11	0.11±0.10
GFB-14	1.43±0.21	11.07±0.47	12.80±0.28	12.58±0.11	1.98±0.08	24.45±0.09	64.86±2.69	64.50±4.51	3.57±0.56	0.18±0.06	0.05±0.04
GFB-15	3.65±0.99	11.70±0.92	13.46±0.73	14.12±0.45	3.27±0.22	37.73±4.79	62.43±3.59	70.48±4.07	4.21±0.29	0.45±0.22	0.10±0.04
GFB-16	1.48±0.60	11.59±0.45	11.18±0.86	11.38±0.89	3.48±0.20	43.06±1.12	72.55±1.94	62.88±0.97	1.08±0.17	0.18±0.09	0.09±0.08
A95	2.12±0.67	14.43±0.69	13.88±0.64	13.69±0.88	2.31±0.09	90.45±2.28	81.48±2.29	82.53±3.35	0.08±0.03	0.06±0.03	0.03±0.04
A90	3.73±0.97	13.26±1.94	14.14±1.31	12.50±0.40	2.59±0.08	76.73±3.17	82.12±1.73	76.05±3.80	0.07±0.05	0.07±0.07	0.01±0.03
A85	3.89±0.99	13.96±0.43	13.30±0.96	14.40±1.62	2.88±0.13	76.76±0.93	73.56±3.05	74.33±3.19	0.02±0.03	0.00±0.00	0.00±0.00
Body-R	2.91±0.84	14.05±1.57	14.16±1.01	13.29±0.29	2.81±0.29	37.02±0.00	69.29±2.68	68.91±2.31	0.00±0.00	0.10±0.05	0.00±0.00

ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ ทางกล และทางความร้อนของชิ้นงานทดลอง (ต่อ)

ชื่อสูตร ทดลอง	ความพรุนตัว (%)			ความหนาแน่นชิ้นงาน (g/cm ³)			ระยะตกตัว หลังเผา (มม.)	ค่าสัมประสิทธิ์การ ขยายตัวที่ 25-500°C (×10 ⁻⁶ /K)
	1250°C	1280°C	1300°C	1250°C	1280°C	1300°C	1280°C	
GFB-02	15.67 ± 0.30	11.10 ± 0.59	7.26 ± 0.23	2.04 ± 0.01	2.17 ± 0.01	2.24 ± 0.01	-	5.7903
GFB-04	8.81 ± 0.74	1.47 ± 0.68	0.53 ± 0.76	2.23 ± 0.02	2.33 ± 0.00	2.33 ± 0.03	-	5.4533
GFB-06	8.03 ± 0.02	5.26 ± 0.25	1.75 ± 0.64	2.23 ± 0.01	2.27 ± 0.01	2.33 ± 0.00	-	4.4203
GFB-09	10.10 ± 0.87	7.75 ± 0.81	4.13 ± 0.28	2.17 ± 0.02	2.22 ± 0.02	2.29 ± 0.01	-	5.7248
GFB-12	9.68 ± 0.53	1.86 ± 0.88	0.16 ± 0.27	2.20 ± 0.00	2.30 ± 0.01	2.36 ± 0.01	11.50 ± 1.00	5.7241
GFB-13	10.61 ± 0.42	3.79 ± 0.26	0.27 ± 0.24	2.16 ± 0.02	2.28 ± 0.00	2.34 ± 0.01	-	6.5436
GFB-14	8.61 ± 0.69	0.42 ± 0.14	0.11 ± 0.11	2.22 ± 0.01	2.32 ± 0.00	2.35 ± 0.01	11.00 ± 0.00	6.5997
GFB-15	9.25 ± 0.63	1.06 ± 0.50	0.25 ± 0.10	2.16 ± 0.09	2.32 ± 0.01	2.41 ± 0.12	11.83 ± 0.29	6.8443
GFB-16	2.50 ± 0.40	0.42 ± 0.21	0.22 ± 0.20	2.31 ± 0.00	2.32 ± 0.11	2.39 ± 0.00	11.00 ± 1.00	5.8733
A95	0.20±0.07	0.14±0.08	0.07±0.09	2.49±0.01	2.51±0.00	2.51±0.02	14.83±0.76	7.0523
A90	0.17±0.11	0.17±0.18	0.04±0.08	2.47±0.01	2.50±0.00	2.50±0.00	9.83±0.76	7.2377
A85	0.04±0.08	0.00±0.00	0.00±0.00	2.48±0.01	2.49±0.00	2.48±0.00	9.50±0.00	6.9321
Body-R	0.00 ± 0.00	0.25 ± 0.11	0.00 ± 0.00	2.44 ± 0.00	2.45 ± 0.00	2.44 ± 0.01	6.17 ± 0.76	6.9433

ทำการคำนวณค่าออกไซด์สูตรส่วนผสมเปรียบเทียบกับสูตรอ้างอิงที่ผ่านการคำนวณ normalization แล้วได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.4 จากนั้นทำการชั่ง และผสมวัตถุดิบตามสูตร เตรียมเป็นน้ำดิน โดยทำตรวจวัดและควบคุมคุณสมบัติของน้ำดิน ให้มีความเหมาะสมกับการขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อ ดังตารางที่ 4.5

จากน้ำดินสูตรต่างๆ นำไปขึ้นรูปเป็นชิ้นงานโดยวิธีการหล่อ ได้ผลดังตัวอย่างแสดงในรูปที่ 4.10 โดยเปรียบเทียบสมบัติของน้ำดินหล่อ ดังรายละเอียดในตารางที่ 4.5 แล้ว ในกลุ่มของ GFB-02 ถึง GFB-16 พบว่า สูตรดินที่ให้ผลคุณสมบัติที่ดีใกล้เคียงกับสูตรดินอ้างอิง Body-R มากที่สุด คือสูตร GFB-16 ซึ่งเป็นสูตรที่ประกอบด้วย ดินขาว 40% ดินดำ 18% ควอทซ์ 15% และ โปแตสเซิลด์สปาร์ 27% ในการบดผสมน้ำดิน เตรียมโดยใช้สัดส่วนน้ำหนักวัตถุดิบแห้งต่อน้ำในปริมาณ 65:35 และใช้สารช่วยกระจายตัวชนิด Deflok 2870 ปริมาณ 0.4% โดยน้ำหนัก คุณสมบัติของน้ำดินที่ได้ มีค่าความหนาแน่น 1.68-1.69 g/cm³ ค่าการไหลตัว 35 วินาที ค่าความหนืดน้ำดิน 329.7 เซนติพอยซ์ ขนาดอนุภาคน้ำดินเฉลี่ย 13.49 ไมครอน ซึ่งใกล้เคียงกับดินอ้างอิง Body-R โดยมีค่ามากกว่าเล็กน้อย (ดินอ้างอิง Body-R มีค่าความหนาแน่น 1.67 g/cm³ ค่าการไหลตัว 26-29 วินาที ค่าความหนืดน้ำดิน 276.9 เซนติพอยซ์ ขนาดอนุภาคน้ำดินเฉลี่ย 9.32 ไมครอน) สำหรับค่าอัตราการหล่อน้ำดินที่ 30 นาทีนั้น พบว่า สูตรทดลอง GFB-16 มีค่าเท่ากับ 4 มม. ซึ่งต่ำกว่าสูตรอ้างอิง Body-R เล็กน้อยที่เท่ากับ 5 มม.

สำหรับการพัฒนาสูตรดินทดลองในกลุ่มของ A85-A95 ซึ่งใช้ดินสำเร็จรูปนั้น พบว่าสูตรที่ให้ผลการทดลองดีที่สุด คือ สูตรดิน A90 ซึ่งเตรียมได้จากดิน Clay-A 90% ผสมกับ Clay-B 10% ในการเตรียมผสมน้ำดินใช้ปริมาณดินแห้งต่อปริมาณน้ำในสูตรทดลองเท่ากับ 65:35 โดยใช้สารช่วยกระจายตัวคือ โซเดียมซิลิเกต 0.1%โดยน้ำหนัก คุณสมบัติของน้ำดินที่ได้ มีค่าความหนาแน่นสูงถึง 1.71 g/cm³ ค่าการไหลตัวดีมากที่ 22 วินาที ค่าความหนืดน้ำดิน 249.1 เซนติพอยซ์ ขนาดอนุภาคน้ำดินเฉลี่ย 10.36 ไมครอน และอัตราการหล่อน้ำดินที่ 30 นาที เท่ากับ 6 มม. ซึ่งให้ผลคุณสมบัติต่างๆ ของน้ำดินที่ดีกว่าสูตรดินอ้างอิง (Body-R)

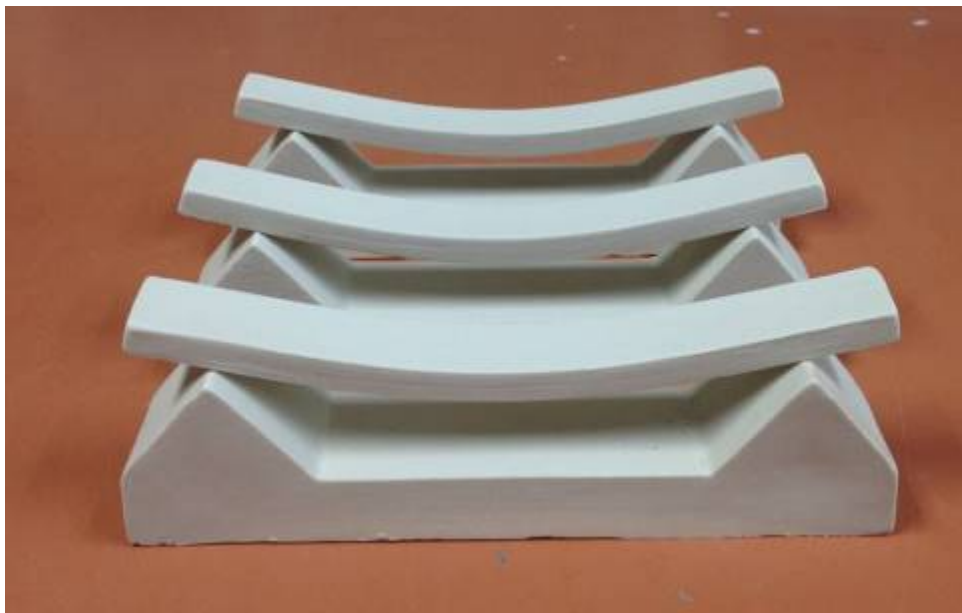


รูปที่ 4.10 ตัวอย่างชิ้นงานทดลองหล่ออบแห้ง

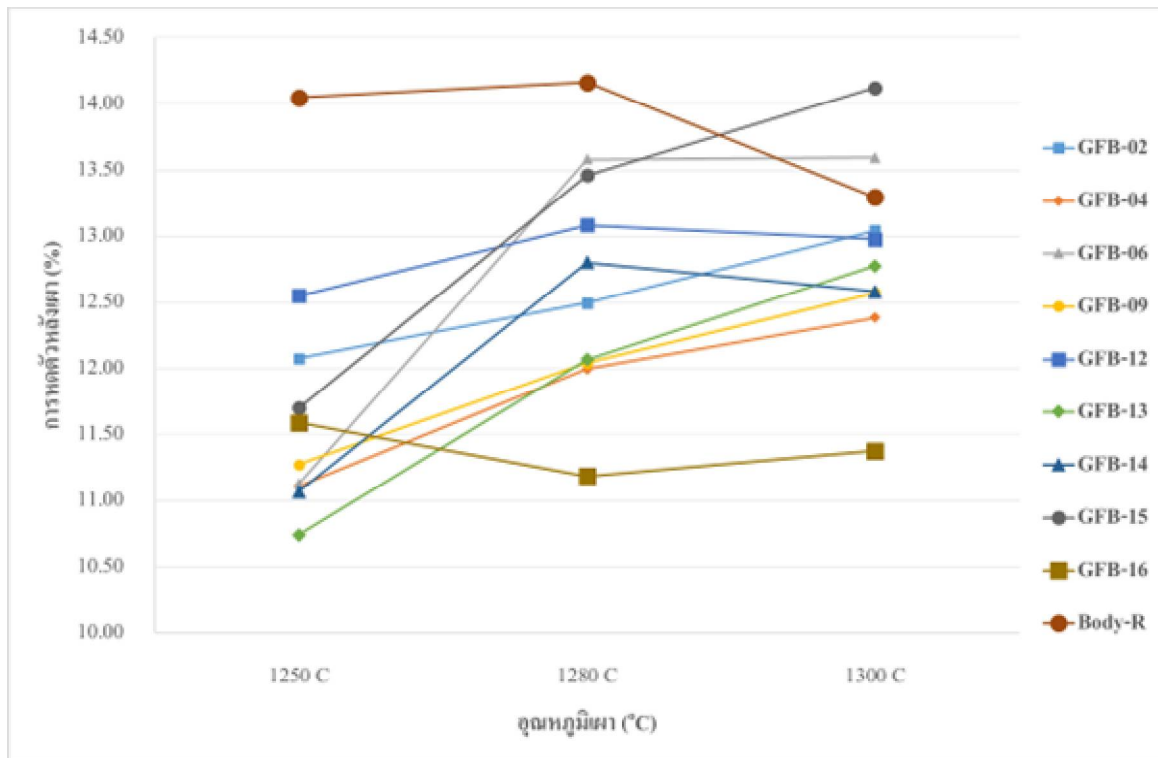
ชิ้นงานหลังจากการเผาที่อุณหภูมิต่างๆ ดังตัวอย่างแสดงในรูปที่ 4.11 นำไปวิเคราะห์ทดสอบคุณสมบัติการตกตัว (sagging) ดังแสดงในรูปที่ 4.12 และทดสอบคุณสมบัติอื่นๆ แล้วได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.6 แล้วนำค่าต่างๆ ไปพล็อตกราฟ ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.13-4.22



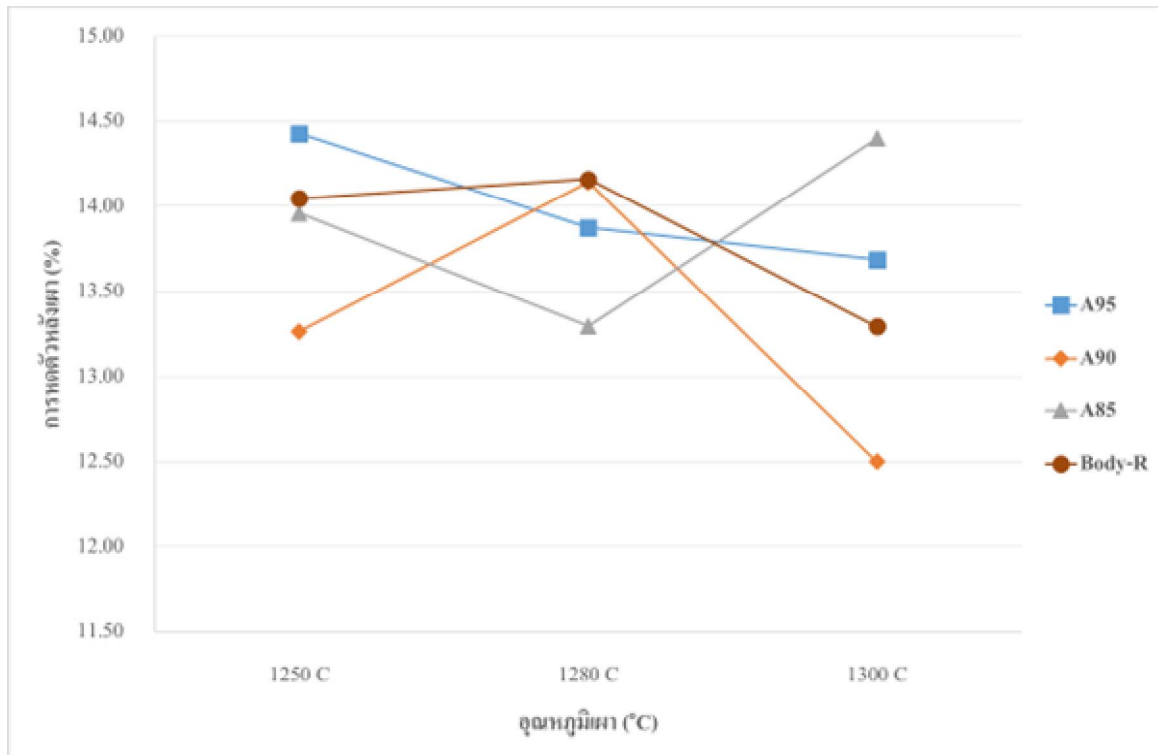
รูปที่ 4.11 ตัวอย่างชิ้นงานทดลองหลังเผาที่อุณหภูมิ 1280°C



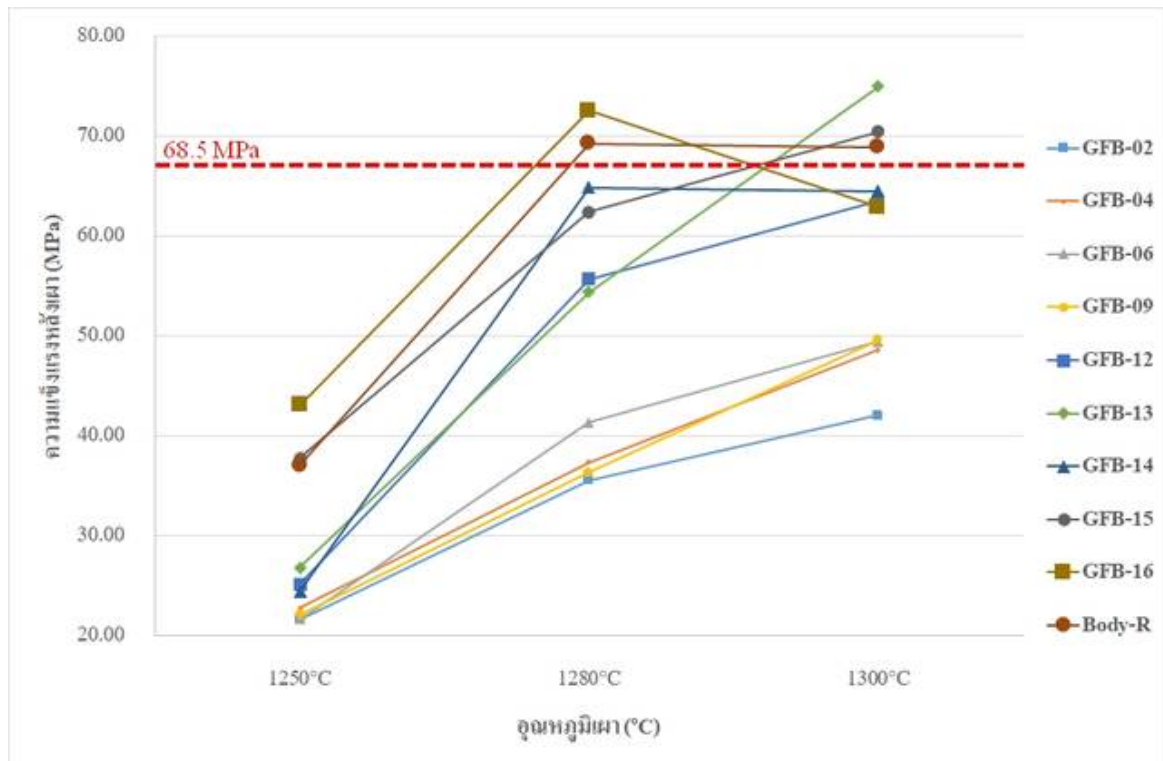
รูปที่ 4.12 ตัวอย่างการทดสอบระยะตกตัวของชิ้นงานหลังเผาที่อุณหภูมิ 1280°C



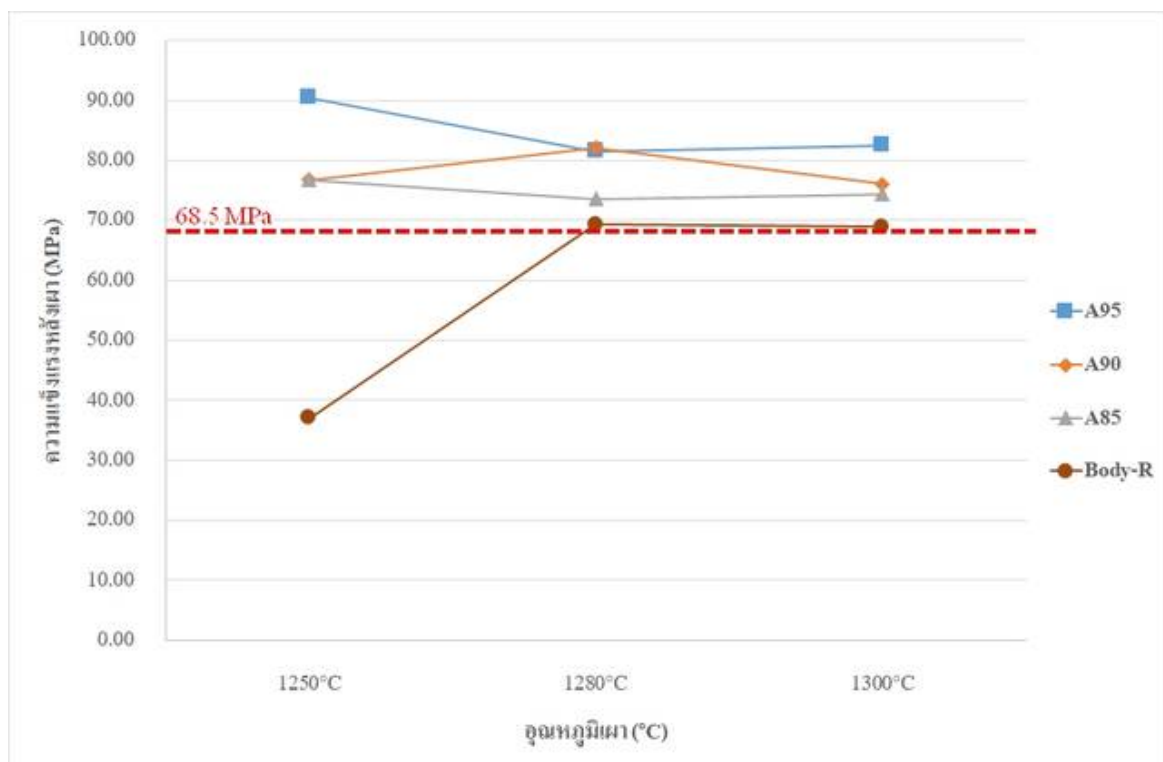
รูปที่ 4.13 การหดตัวหลังเผาของชิ้นงานสูตร GFB-02 - GFB-16 กับสูตรอ้างอิง Body-R ที่อุณหภูมิต่างๆ



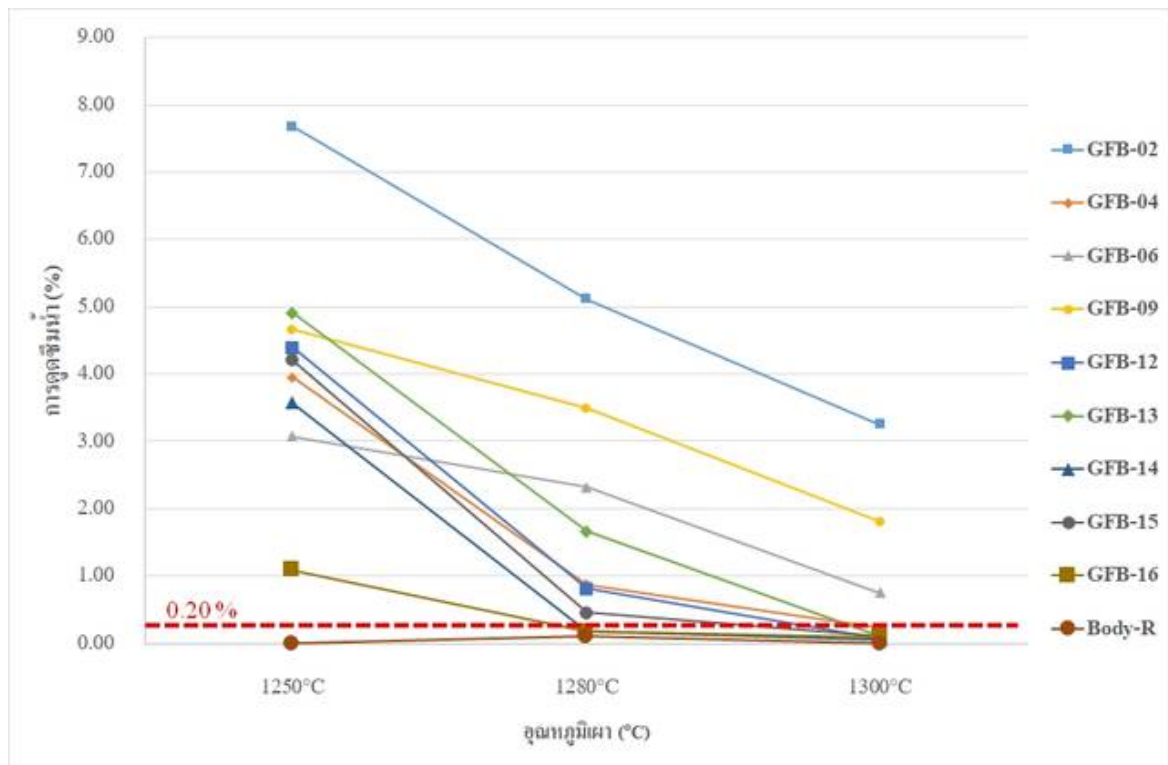
รูปที่ 4.14 การหดตัวหลังเผาของชิ้นงานสูตร A85 - A95 กับสูตรอ้างอิง Body-R ที่อุณหภูมิต่างๆ



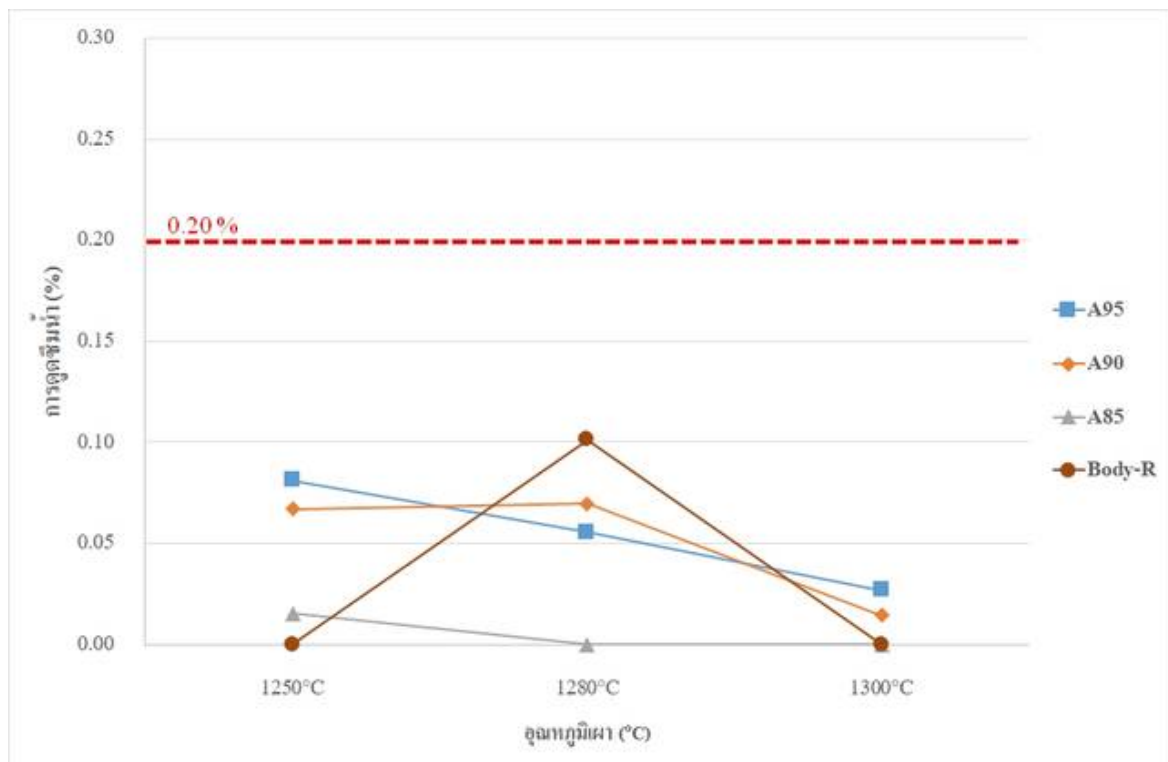
รูปที่ 4.15 ความแข็งแรงหลังเผาของชิ้นงานสูตร GFB-02 - GFB-16 กับสูตรอ้างอิง Body-R ที่อุณหภูมิต่างๆ



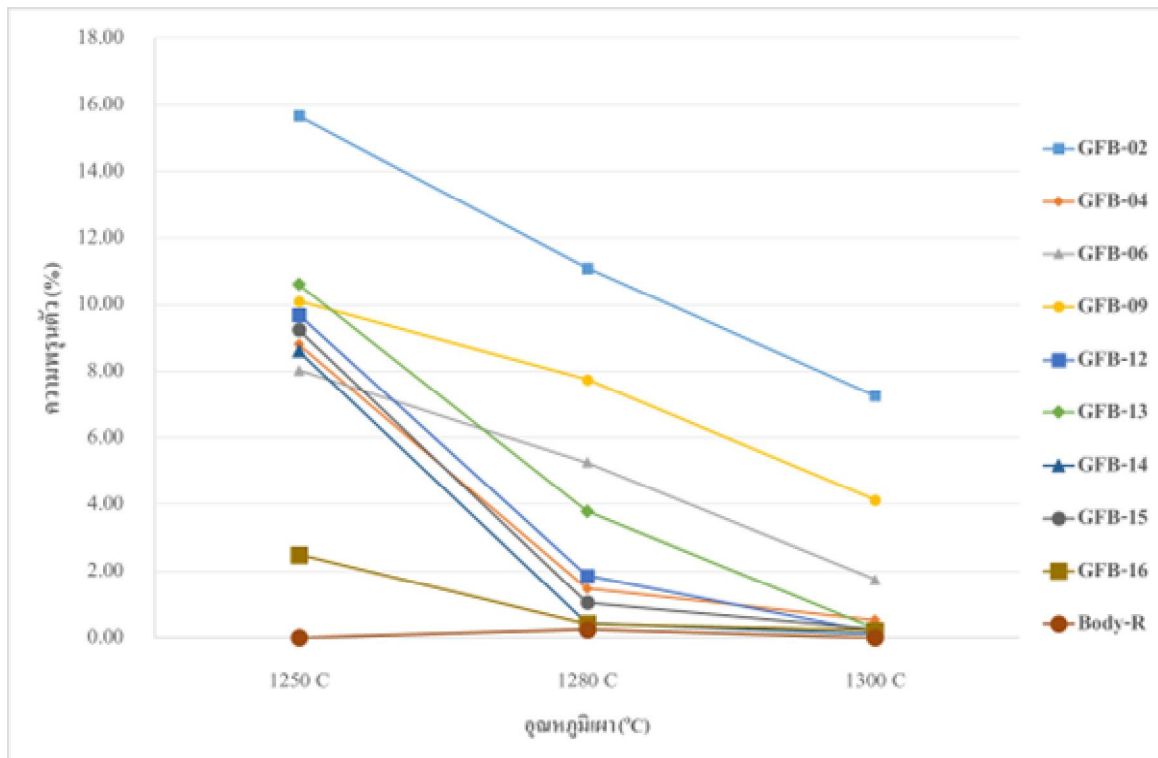
รูปที่ 4.16 ความแข็งแรงหลังเผาของชิ้นงานสูตร A85 - A95 กับสูตรอ้างอิง Body-R ที่อุณหภูมิต่างๆ



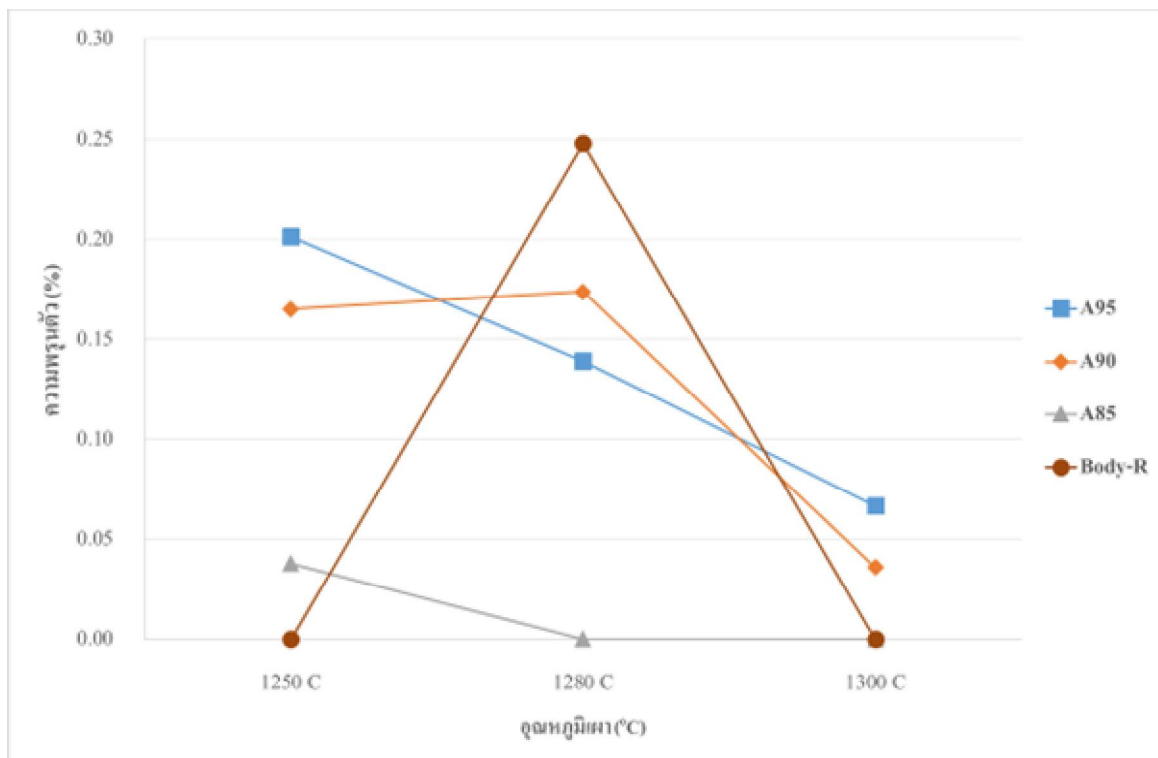
รูปที่ 4.17 การดูดซึมน้ำของชิ้นงานสูตร GFB-02 - GFB-16 กับสูตรอ้างอิง Body-R ที่อุณหภูมิต่างๆ



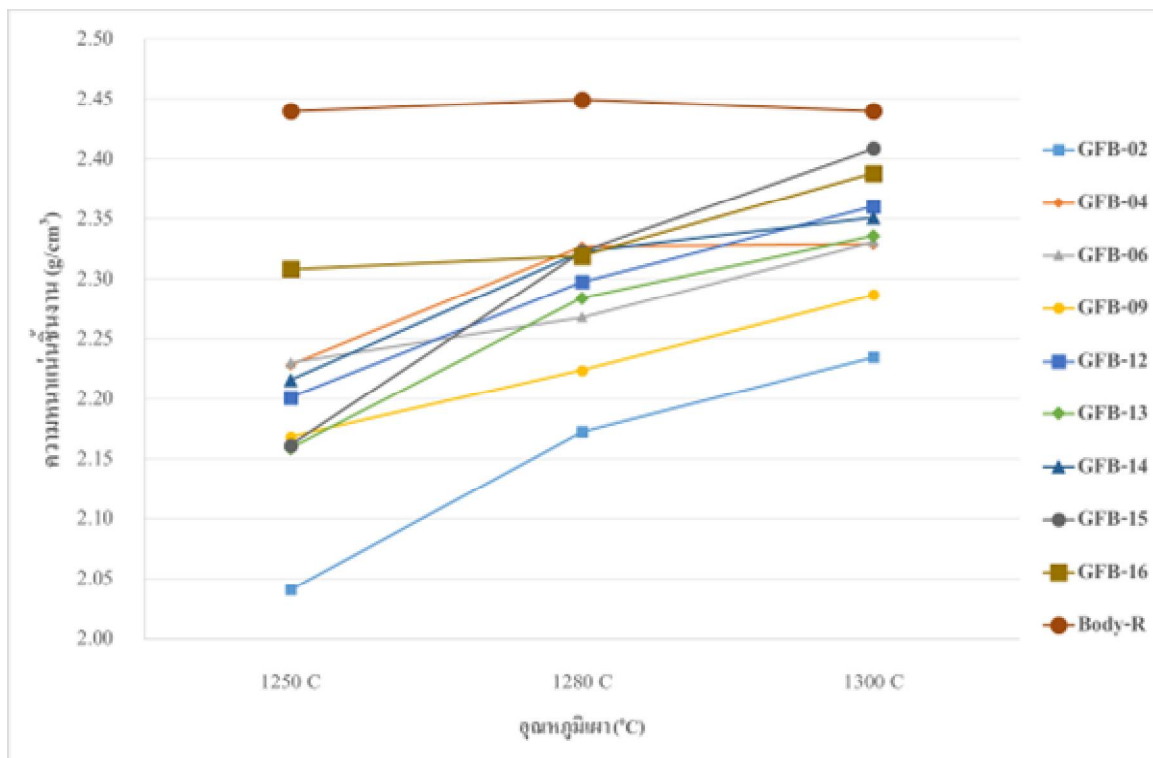
รูปที่ 4.18 การดูดซึมน้ำของชิ้นงานสูตร A85 - A95 กับสูตรอ้างอิง Body-R ที่อุณหภูมิต่างๆ



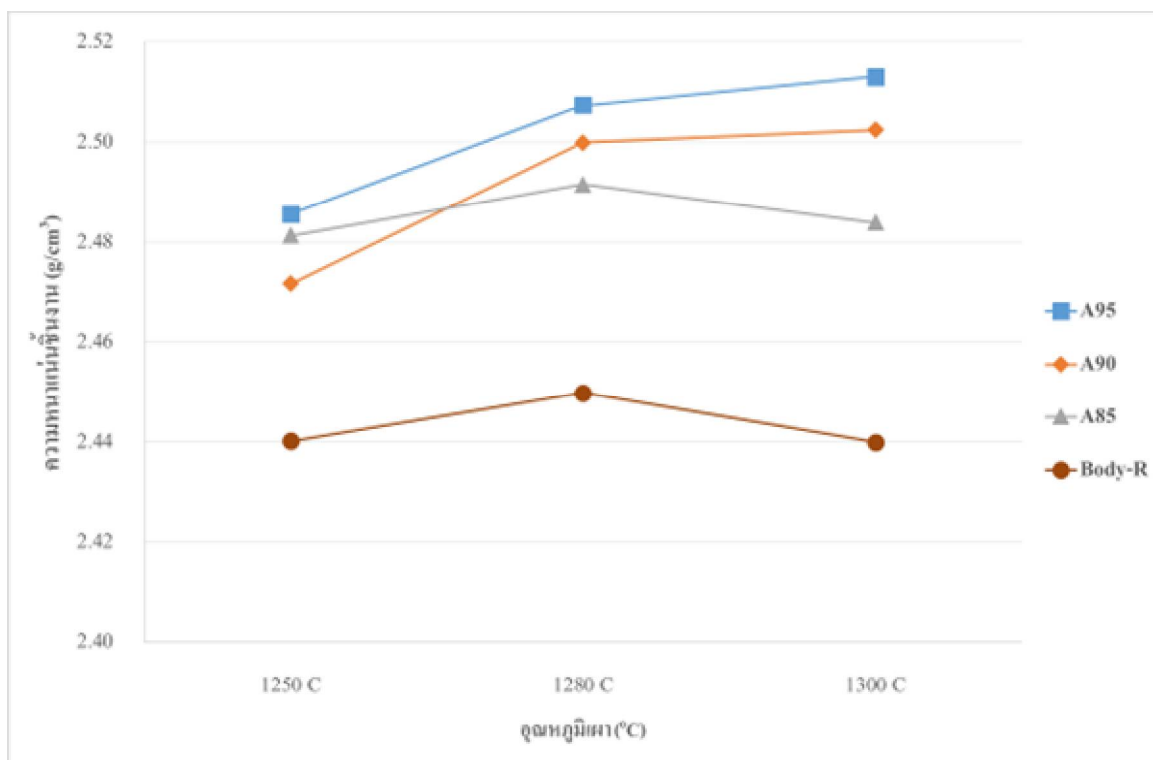
รูปที่ 4.19 ความพรุนตัวของชิ้นงานสูตร GFB-02 - GFB-16 กับสูตรอ้างอิง Body-R ที่อุณหภูมิต่างๆ



รูปที่ 4.20 ความพรุนตัวของชิ้นงานสูตร A85 - A95 กับสูตรอ้างอิง Body-R ที่อุณหภูมิต่างๆ



รูปที่ 4.21 ความหนาแน่นของชิ้นงานสูตร GFB-02 - GFB-16 กับสูตรอ้างอิง Body-R ที่อุณหภูมิต่างๆ



รูปที่ 4.22 ความหนาแน่นของชิ้นงานสูตร A85 - A95 กับสูตรอ้างอิง Body-R ที่อุณหภูมิต่างๆ

คุณสมบัติการหดตัวของเนื้อดินนับว่ามีความสำคัญ เพื่อให้สามารถออกแบบแม่พิมพ์ที่มีการเผื่อขนาดไว้ถูกต้อง เมื่อขึ้นรูปขึ้นงานโดยการหล่อและเผาแล้วก็จะทำให้ได้แบบพิมพ์ที่มีขนาดถูกต้องตามสเปก สูตรดินที่ทำการทดลองทั้งหมด จะมีค่าการหดตัวก่อนเผาอยู่ในช่วง 1.23-4.51% และมีการหดตัวหลังเผาที่อุณหภูมิ 1280°C อยู่ในช่วง 11.18-14.43% ซึ่งนับว่าใกล้เคียงกับสูตรอ้างอิง Body-R ที่มีค่าเป็น 2.91% และ 14.16% ตามลำดับ โดยสูตรดินในกลุ่ม GFB-02 ถึง GFB-16 นั้น สูตร GFB-15 จะให้ค่าการหดตัวก่อนและหลังเผาใกล้เคียงกับสูตรอ้างอิง คือมีค่าเท่ากับ 3.65% และ 13.46% ตามลำดับ และสูตรดินในกลุ่มของสูตรดินผสม A85 - A95 นั้น สูตร A90 จะให้ค่าการหดตัวก่อนและหลังเผาใกล้เคียงกับสูตรอ้างอิง คือมีค่าเท่ากับ 3.73% และ 14.14% ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาคุณสมบัติด้านความแข็งแรงของชิ้นงานพบว่าส่วนใหญ่จะมีค่าสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิในการเผาสูงขึ้น สำหรับสูตรดินในกลุ่ม GFB นั้น พบว่าจะมีค่าความแข็งแรงก่อนเผาอยู่ในช่วง 1.34-3.48 MPa โดย GFB-16 มีค่าความแข็งแรงก่อนเผาที่ดีที่สุดเท่ากับ 3.48 MPa ซึ่งมากกว่าสูตรดินอ้างอิง Body-R (2.81 MPa) สำหรับค่าความแข็งแรงหลังเผาที่อุณหภูมิเผาที่ 1280°C นั้นมีค่าอยู่ในช่วง 35.57-72.55 MPa สูตร GFB-16 ให้ผลที่ดีที่สุด 72.55 MPa ซึ่งสูงกว่าสูตรดินอ้างอิง Body-R (69.29 MPa) แต่สำหรับที่อุณหภูมิ 1300°C นั้นค่าความแข็งแรงของสูตรอ้างอิง Body-R จะสูงกว่าเล็กน้อย ซึ่งน่าจะมาจากองค์ประกอบทางเคมีของสูตรอ้างอิงนั้นมีค่า Al_2O_3 สูงกว่า จึงทำให้เนื้อดินสุกตัวและมีความแข็งแรงสูงกว่าที่อุณหภูมิสูงขึ้น อย่างไรก็ตามเนื้อดินพอร์ซเลนที่มีอะลูมินาสูงที่เหมาะสมกับการทำแบบพิมพ์นั้น (เส้นสีแดงในกราฟ) ควรมีความแข็งแรงหลังเผาสูงไม่น้อยกว่า 68.65 MPa (700 kg/cm² : ภาคผนวก ข.1 หน้า 2) ในกลุ่มเนื้อดิน GFB จึงมีเพียงสูตร GFB-16 เท่านั้นที่มีความแข็งแรงสูงพอ สำหรับสูตรในกลุ่มของสูตรดินผสม A85 - A95 นั้น พบว่ามีความแข็งแรงก่อนเผา 2.31-2.88 MPa ซึ่งใกล้เคียงกับสูตรอ้างอิง Body-R (2.81 MPa) และมีค่าความแข็งแรงหลังเผาที่อุณหภูมิ 1280°C อยู่ในช่วง 73.56-82.12 MPa ซึ่งดีกว่าสูตรอ้างอิง Body-R (69.29 MPa) โดยสูตรที่ดีที่สุดคือ สูตร A90

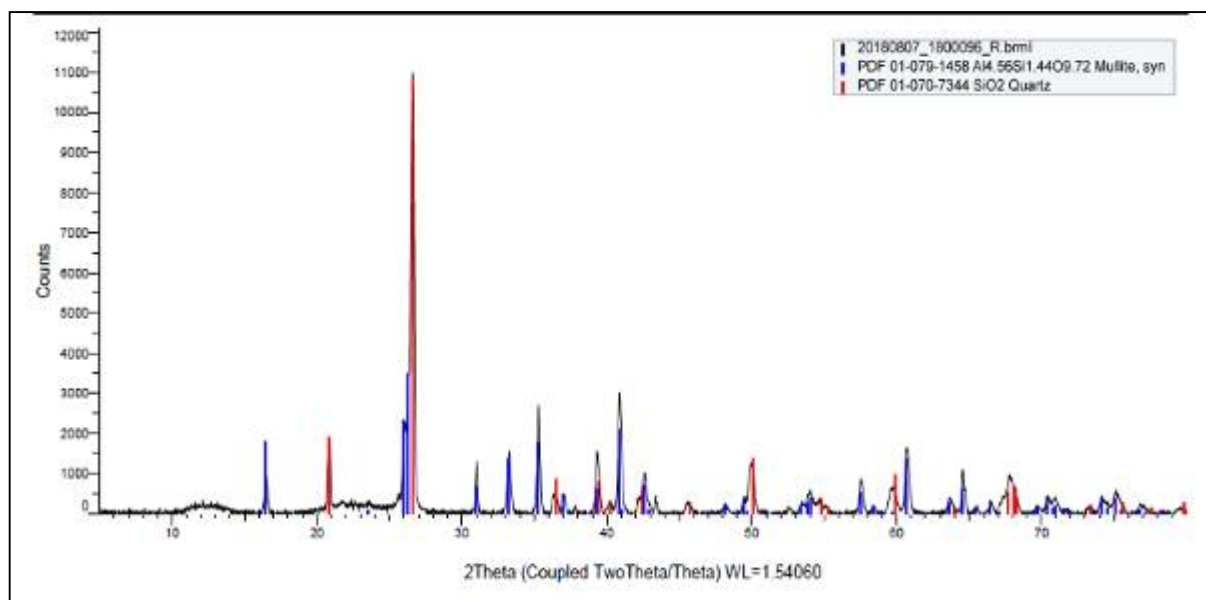
สำหรับค่าการดูดซึมน้ำ และความพรุนตัวของชิ้นงานหลังเผา พบว่ามีค่าลดลงตามอุณหภูมิเผาที่เพิ่มขึ้น โดยพื้นฐานแล้วพอร์ซเลนที่มีค่าการดูดซึมน้ำและความพรุนตัวที่ต่ำ ก็จะเป็นพอร์ซเลนที่มีคุณภาพดี โดยพบว่าหลังการเผาที่อุณหภูมิ 1280°C สูตรอ้างอิง Body-R นั้นมีค่าการดูดซึมน้ำหลังเผาที่ 0.1% และค่าความพรุนตัวที่ 0.25% ส่วนสูตรทดลองในกลุ่ม GFB02 – GFB-16 นั้น จะมีค่าการดูดซึมน้ำและความพรุนตัวค่อนข้างสูงอยู่ในช่วง 0.18-5.11% และ 0.42-11.10% โดยสูตรที่ GFB-16 จะให้ค่าต่ำที่สุดอยู่ที่ 0.18% และ 0.42% ตามลำดับ โดยพอร์ซเลนที่มีอะลูมินาสูง (เส้นสีแดงในกราฟ) ควรจะมีการดูดซึมน้ำไม่เกิน 0.2% (ภาคผนวก ข.1 หน้า 2) ซึ่งในกลุ่มเนื้อดิน GFB นั้น จึงมีเพียงสูตร GFB-4, 12 และ 16 เท่านั้นที่มีคุณสมบัติที่เหมาะสม ส่วนสูตรในกลุ่ม A85 – A95 นั้นจะให้ค่าการดูดซึมน้ำ และค่าความพรุนตัวที่ต่ำอยู่ในช่วง 0-0.07% และ 0-0.17% ตามลำดับ ซึ่งเป็นค่าที่ดี และมีความใกล้เคียงกับสูตรอ้างอิงทุกสูตร สำหรับค่าความหนาแน่น นั้น เป็นสมบัติที่ตรวจสอบเพื่อประมาณน้ำหนักของชิ้นงานให้เป็นไปตามสเปกของแบบพิมพ์ ค่าความหนาแน่นของชิ้นงานหลังเผามีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิการเผา โดยหลังเผาที่อุณหภูมิ 1280°C ของชิ้นงานทดลองทุกสูตรอยู่ในช่วง 2.17-2.51 g/cm³ ซึ่งใกล้เคียงกับสูตรอ้างอิงซึ่งมีค่าเท่ากับ 2.45 g/cm³

สำหรับคุณสมบัติระยะตกตัวนั้น เป็นคุณสมบัติที่ตรวจสอบเพิ่มเติมภายหลัง เฉพาะสูตรที่มีแนวโน้มจะถูกเลือกไปใช้ในการทดลองทำแบบพิมพ์ และตรวจสอบหลังเผาที่ 1280°C เพื่อเป็นตัวที่จะช่วยชี้ให้เห็นว่าสูตรดินที่มีระยะการตกตัวสูง ก็จะมีโอกาสที่จะทำให้แบบพิมพ์มีการเสียรูปทรงได้ง่าย ซึ่งจากสูตรทดลองทั้งหมดมีค่าระยะการตกตัวอยู่ในช่วง 9.50-11.83 มม. ซึ่งสูงกว่าสูตรดินอ้างอิง Body-R ที่มีค่าเท่ากับ 6.17 มม.

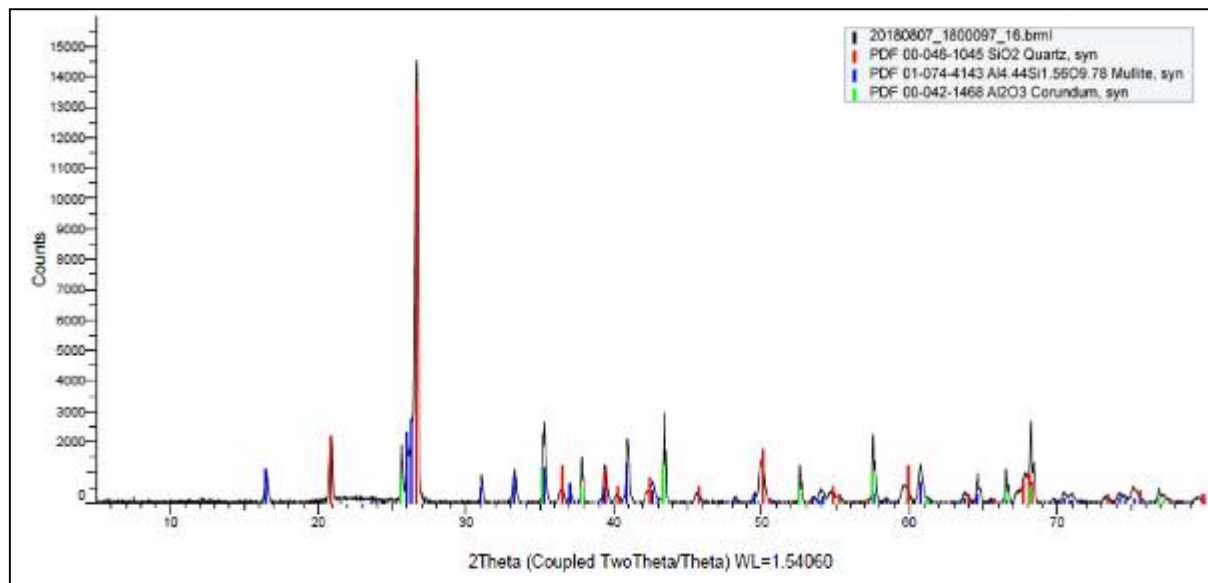
ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน (CTE) จำเป็นต้องใช้เพื่อเป็นตัวช่วยพิจารณาความสามารถในการยึดติดกับเคลือบ โดยสูตรดินอ้างอิง Body-R มีค่า CTE ในช่วงอุณหภูมิ 25-500°C เท่ากับ $6.9433 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ โดยสูตรทดลองในกลุ่ม GFB มีค่าอยู่ระหว่าง $4.4203 - 6.8443 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ และสูตรทดลองในกลุ่มดินสำเร็จรูปอยู่ในช่วง $6.9321 - 7.2377 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ซึ่งสูตรทดลองทั้งสองกลุ่มที่ให้ผลใกล้เคียงกับสูตรดินอ้างอิงมากที่สุดได้แก่ สูตร GFB-15 และ A85 ตามลำดับ

นอกจากนี้ ได้นำชิ้นงานทดลองทั้งสองสูตรไปตรวจสอบโครงสร้างผลึกที่เกิดขึ้นภายในเนื้อชิ้นงานหลังเผาที่อุณหภูมิ 1280°C ด้วยเทคนิค XRD (BRUKER, D8 ADVANCE) และ SEM (JEOL รุ่น JSM7800F (Prime)) เปรียบเทียบกับเนื้อดินสูตรอ้างอิง และเนื้อดินแบบพิมพ์ทางการค้า (Former sample) ได้ผลแสดงดังรูป 4.23-4.25

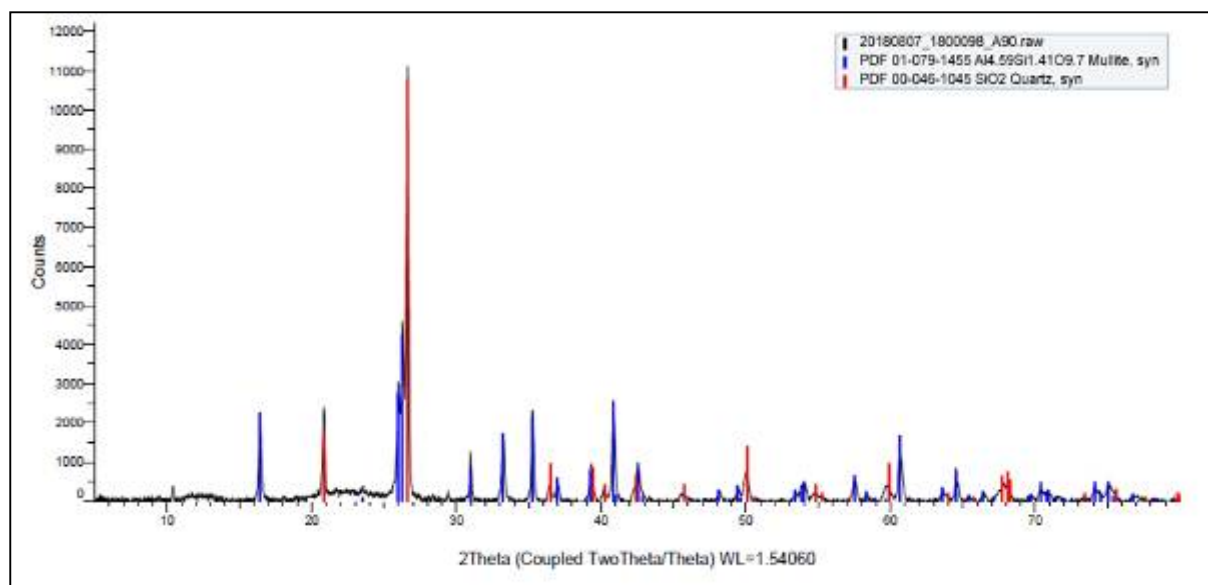
สรุปผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ด้วยเทคนิค XRD ของชิ้นงานทดลองเทียบกับสูตรดินอ้างอิงและตัวอย่างแบบพิมพ์ทางการค้า (Former sample) ได้ดังตารางที่ 4.7 โดยลักษณะโครงสร้างผลึกของ Mullite และ Quartz ที่พบในเนื้อชิ้นงานต่างๆ ด้วยเทคนิค SEM ที่กำลังขยาย 1000 และ 3000 เท่า แสดงดังรูปที่ 4.26-4.27 ตามลำดับ



รูปที่ 4.23 XRD pattern ของเนื้อดินสูตรอ้างอิง (Body-R)



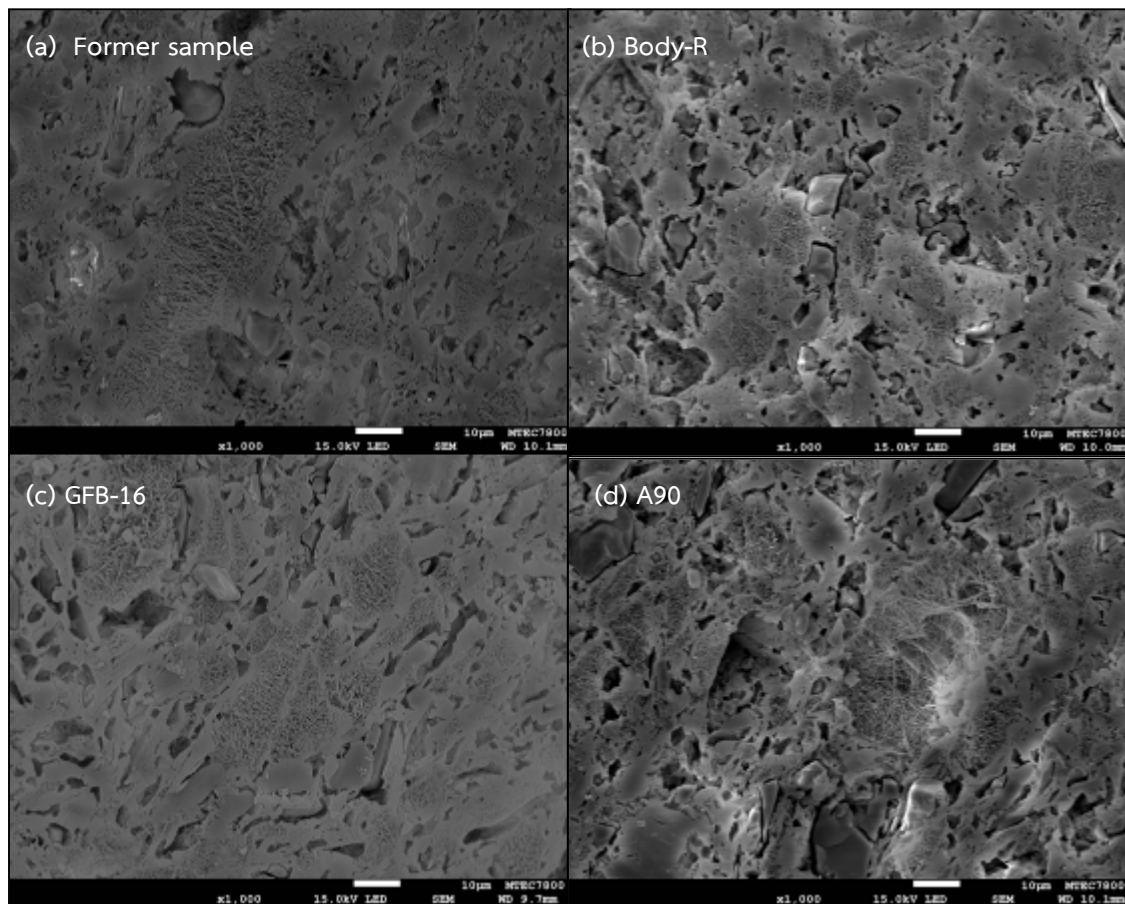
รูปที่ 4.24 XRD pattern ของเนื้อดินสูตรทดลอง GFB-16



รูปที่ 4.25 XRD pattern ของเนื้อดินสูตรทดลอง A90

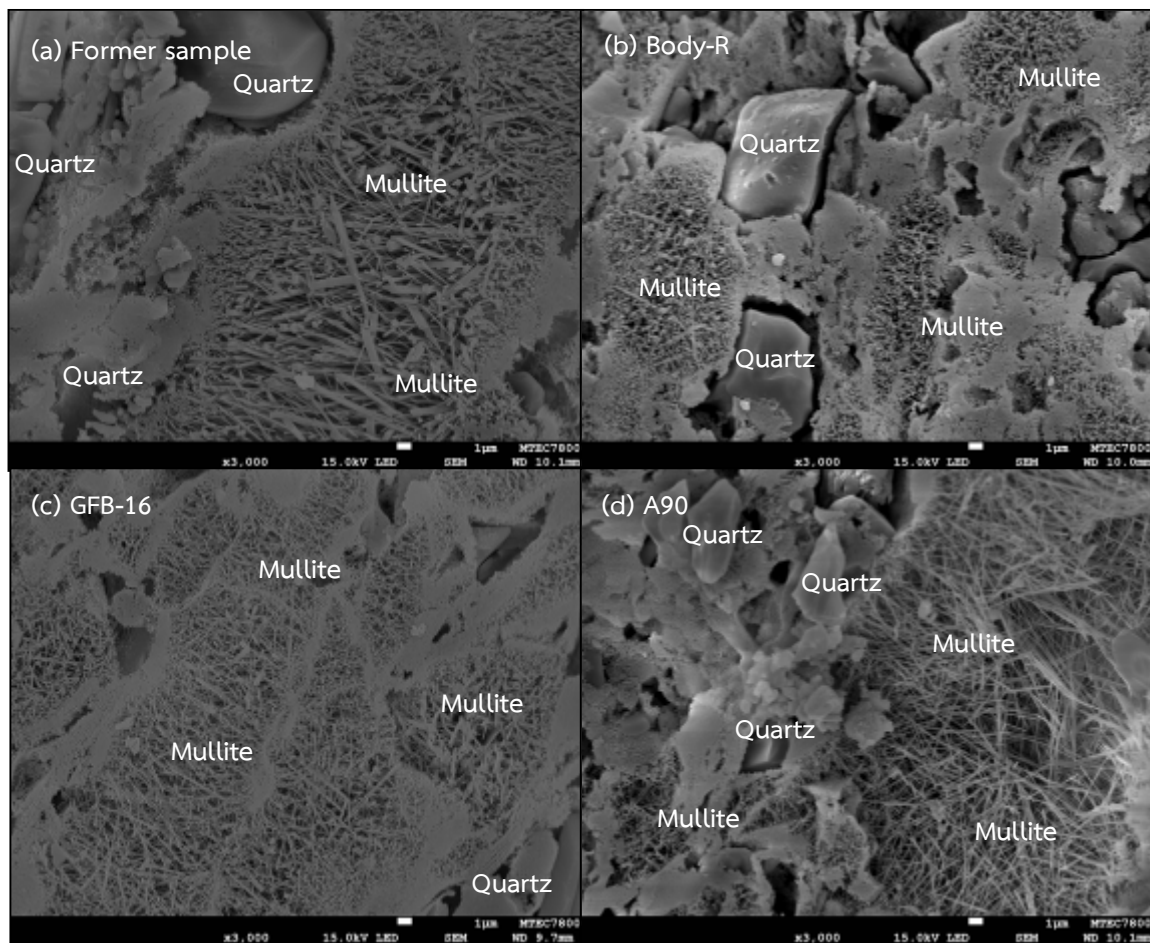
ตารางที่ 4.7 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ของ Former sample และเนื้อดินสูตรต่างๆ

ตัวอย่าง	ชื่อสารประกอบ
ตัวอย่างแบบพิมพ์ (Former sample)	Mullite, Quartz, Corundum
สูตรดินอ้างอิง (Body-R)	Mullite, Quartz
สูตรดิน GFB-16	Mullite, Quartz, Corundum
สูตรดิน A90	Mullite, Quartz



รูปที่ 4.26(a)-(d) SEM Micrograph ที่กำลังขยาย 1000 เท่าของชิ้นงานต่างๆ

(a) Former sample, (b) สูตรอ้างอิง Body-R, (c) สูตรทดลอง GFB-16 และ (d) สูตรทดลอง A90



รูปที่ 4.27(a)-(d) SEM Micrograph ที่กำลังขยาย 3000 เท่าของชิ้นงานต่างๆ

(a) Former sample, (b) สูตรอ้างอิง Body-R, (c) สูตรทดลอง GFB-16 และ (d) สูตรทดลอง A90

จากผลการทดลองและค่าคุณสมบัติของสูตรเนื้อดินต่างๆ ทั้งสองกลุ่ม โดยเปรียบเทียบกับสูตรอ้างอิง Body-R แล้ว พบว่าสูตรทดลองในกลุ่ม GFB นั้น สูตรที่ให้ผลดีที่สุด สามารถเตรียมน้ำดินได้ง่าย และให้ผลคุณสมบัติหลังเผาที่ 1280°C ใกล้เคียงกับสูตรดินอ้างอิงมากที่สุด เป็นสูตร GFB-16 และสูตรทดลองในกลุ่มดินสำเร็จรูปเป็นสูตร A90 ดังนั้นทีมวิจัยจึงได้เลือกสองสูตรนี้ไปทดลองทำเป็นต้นแบบแบบพิมพ์เซรามิก (Glove Former) เปรียบเทียบกับสูตรอ้างอิงต่อไป โดยได้ทดสอบคุณสมบัติที่จำเป็นต่อการใช้งานแบบพิมพ์สำหรับอุตสาหกรรมผลิตถุงมืออย่างก่อนนำไปขึ้นรูปเป็นต้นแบบด้วย เพื่อให้แน่ใจถึงความสามารถในการนำไปใช้งานจริงในกระบวนการผลิต ได้แก่ การทดสอบความทนทานต่อการเปลี่ยนอุณหภูมิเฉียบพลัน (Thermal Shock Resistance) และ การทดสอบความทนต่างของชิ้นงาน (Alkaline Resistance) โดยใช้วิธีการทดสอบอ้างอิงตาม In-house Testing ได้ผลการทดสอบความทนทานต่อการเปลี่ยนอุณหภูมิเฉียบพลันก่อนและหลังการทดสอบ ดังรูปที่ 4.28-4.29 และตารางที่ 4.8 ส่วนผลการทดสอบความทนต่างของชิ้นงานทดลอง แสดงไว้ในตารางที่ 4.9 ตามลำดับ



รูปที่ 4.28 ตัวอย่างชิ้นงานทดลองก่อนการทดสอบ Thermal Shock Resistance



รูปที่ 4.29 ตัวอย่างชิ้นงานทดลองหลังการทดสอบ Thermal Shock Resistance

ตารางที่ 4.8 ผลการทดสอบความทนทานต่อการเปลี่ยนอุณหภูมิเฉียบพลัน (Thermal Shock Resistance) ของชิ้นงานทดลองเทียบกับสูตรดินอ้างอิง

สูตรเนื้อดิน	ทดสอบครั้งที่ 1 (180 – 27 °C)	ทดสอบครั้งที่ 2 (180 – 30 °C)	หมายเหตุ
Body-R (อ้างอิง)	ไม่ผ่าน (แตกรอบที่ 3)	ผ่าน (10 รอบ ไม่แตกร้า)	ทำการทดสอบจำนวน 3 ชิ้นต่อสูตรทดลอง
GFB-16	ผ่าน (10 รอบ ไม่แตกร้า)	ผ่าน (10 รอบ ไม่แตกร้า)	
A90	ไม่ผ่าน (แตกรอบที่ 5)	ผ่าน (10 รอบ ไม่แตกร้า)	

ตารางที่ 4.9 ผลการทดสอบความทนต่าง (Alkaline Resistance) ของชิ้นงานทดลองเทียบกับสูตรดินอ้างอิง

สูตรเนื้อดิน	ระยะเวลาการแช่ต่างจนผิวชิ้นงานเสีย (ชั่วโมง)
Body-R (อ้างอิง)	192
GFB-16	168
A90	144

จากในตารางที่ 4.8 จะเห็นว่าการทดสอบความทนต่อการเปลี่ยนอุณหภูมิฉับพลันครั้งแรก โดยการแช่น้ำเย็น 27°C ตามวิธีการทดสอบ In-house ของศูนย์ฯ จะทำให้โอกาสเกิดการแตกร้าวได้ง่ายกว่า จึงได้ปรับเปลี่ยนตามวิธีของโรงงาน ซึ่งจะใช้น้ำที่อุณหภูมิห้องซึ่งจะประมาณ 30°C และทดสอบครั้งที่ 2 ก็จะทำให้ชิ้นงานทั้งหมดผ่านการทดสอบเปลี่ยนอุณหภูมิฉับพลันได้ 10 รอบ

สำหรับการทดสอบความทนต่อต่าง ดังผลแสดงในตารางที่ 4.9 พบว่าจะมีความทนต่างได้ในช่วง 144-192 ชั่วโมง โดยสูตร Body-R จะมีความทนต่อต่างได้นานที่สุด นอกจากนั้นยังได้นำชิ้นงานไปทดสอบวัดค่าความหยาบของผิวชิ้นงานด้วยเครื่องวัดความหยาบพื้นผิวแบบไม่สัมผัส (Surface Roughness Tester - Non contact, ALICONA รุ่น INFINITEFOCUS SL, Austria) ดังรูปที่ 4.30 เปรียบเทียบกันระหว่างเนื้อดินสูตรทดลองและสูตรอ้างอิง ทั้งก่อนและหลังจากแช่ในสารละลายต่าง KOH ที่ความเข้มข้น 20%, อุณหภูมิ 70°C จนผิวชิ้นงานเสีย โดยค่าความหยาบพื้นผิวเฉลี่ยที่วัดได้แสดงดังตารางที่ 4.10 และภาพถ่ายของพื้นผิวชิ้นงานทดลองที่ได้จากเครื่องวัดแสดงดังตารางที่ 4.11 ตามลำดับ



รูปที่ 4.30 เครื่องทดสอบความหยาบพื้นผิวแบบไม่สัมผัส (Surface Roughness Tester – Non Contact)

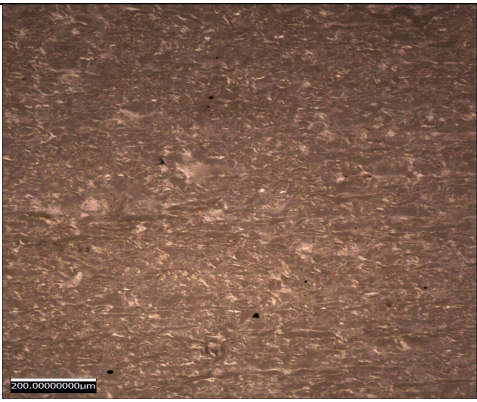
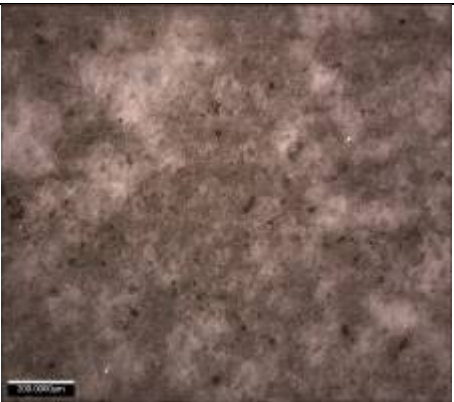
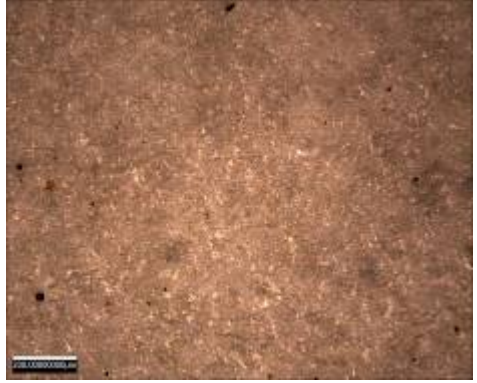
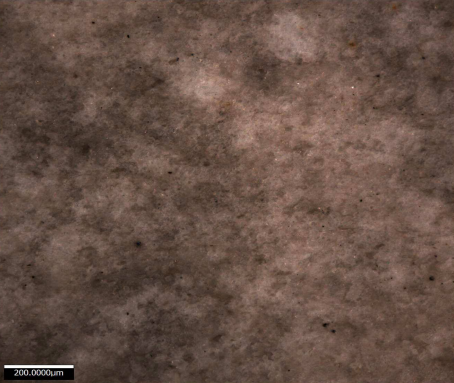
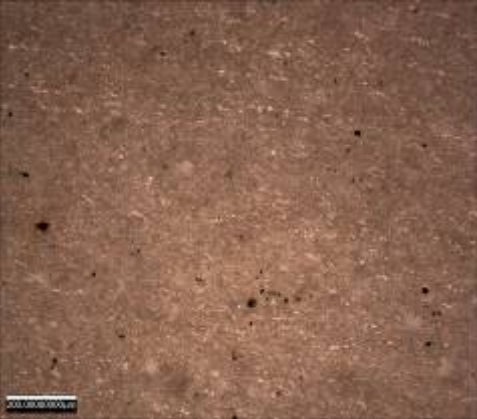
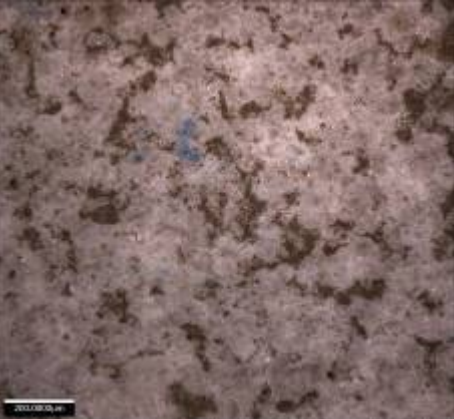
ตารางที่ 4.10 ผลการทดสอบค่าความหยาบของผิวชิ้นงานสูตรทดลองเทียบกับสูตรอ้างอิงก่อนและหลังจากแช่ในสารละลายต่าง KOH

สูตรเนื้อดิน / ค่าความหยาบพื้นผิว	ก่อนแช่สารละลาย KOH		หลังแช่สารละลาย KOH	
	Ra (nm.)	Sa (nm.)	Ra (nm.)	Sa (nm.)
Body-R	2,848.67	4,162.00	1,782.67	3,389.00
GFB-16	1,551.33	2,533.00	964.11	1,575.00
A90	1,559.67	2,810.00	2,087.67	2,857.00
หมายเหตุ : Ra = Average roughness of profile Sa = Average height of selected area				

จากผลการวัดความหยาบพื้นผิวของชิ้นงานดังแสดงในตารางและภาพข้างต้นพบว่า สูตรดินอ้างอิงและสูตรทดลอง GFB-16 มีความทนต่อการกัดกร่อนของสารละลายต่างได้มากกว่าสูตรดิน A90 ซึ่งสอดคล้องกับผลของระยะเวลาในการแช่ชิ้นงานในสารละลายต่างจนกระทั่งผิวของชิ้นงานเสียหายตามวิธีการทดสอบของโรงงานผลิตถุงมือยาง ดังตารางที่ 4.10 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าชิ้นงานทดลองที่ทนต่อการแช่ในสารละลายต่างได้มากที่สุด คือ สูตรดินอ้างอิง (Body-R) ซึ่งระยะเวลาในการแช่ต่างจนผิวชิ้นงานเสียอยู่ที่ 192 ชม. ลำดับถัดมาคือ สูตร GFB-16 ที่ระยะเวลา 168 ชม. และ สูตร A90 มีระยะเวลาที่ทนต่อการแช่ต่างจนกระทั่งผิวเสียน้อยที่สุด คือ 144 ชม. ตามลำดับ

จากผลการวิเคราะห์ทดสอบชิ้นงานทดลองทั้งหมดดังกล่าวมาแล้วในข้างต้น ทั้งในส่วนของคุณสมบัติทางกายภาพ ทางกล ทางความร้อน และการทดสอบที่จำเป็นต่อการนำไปใช้งานจริงในอุตสาหกรรมการผลิตถุงมือยาง ได้แก่ การทนต่อการเกิด Thermal Shock และ ความทนต่อการกัดกร่อนของสารละลายต่าง พบว่าสูตรดินทดลอง GFB-16 และสูตรดิน A90 มีความเหมาะสมที่จะนำไปขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต้นแบบแบบพิมพ์เซรามิกเพื่อนำไปทดลองใช้ในอุตสาหกรรมผลิตถุงมือยางต่อไป โดยจากการตรวจสอบโครงสร้างผลึกที่เกิดขึ้นภายในเนื้อชิ้นงานหลังเผาด้วยเทคนิค XRD และ SEM เพิ่มเติม พบว่าชิ้นงานทดลองทั้งสองสูตรนั้น มีการหลอมตัวและสุกตัวที่ดี มีความพรุนตัวน้อย ค่อนข้างใกล้เคียงกับเนื้อชิ้นงานของตัวอย่างแบบพิมพ์ทางการค้า (Former sample) ถึงแม้จะเผาที่อุณหภูมิต่ำกว่าที่ 1280°C ก็ตาม โดยภายในเนื้อชิ้นงานหลังเผาพบผลึกของ Mullite และ Quartz เป็นองค์ประกอบหลักเช่นเดียวกัน ทั้งเนื้อดินสูตรทดลองทั้งสองสูตร สูตรดินอ้างอิง และชิ้นงานตัวอย่างแบบพิมพ์ (Former sample) โดยชิ้นงานสูตรทดลอง GFB-16 และชิ้นงานตัวอย่างแบบพิมพ์ จะพบผลึกของ Corundum เป็นองค์ประกอบรองเพิ่มเติมอีกด้วย

ตารางที่ 4.11 ภาพพื้นผิวของชิ้นงานทดลองก่อนและหลังจากแช่ในสารละลาย KOH เปรียบเทียบกันระหว่างเนื้อดินสูตรทดลองและสูตรอ้างอิง

สูตรเนื้อดิน	ก่อนแช่สารละลาย KOH	หลังแช่สารละลาย KOH
Body-R (อ้างอิง)		
GFB-16		
A90		

4.3 การพัฒนาสูตรเคลือบ

จากการสอบถามรวบรวมข้อมูลและจากการสอบถามผู้ประกอบการ พบว่าแบบพิมพ์เซรามิกชนิดมีเคลือบสำหรับใช้ในการขึ้นรูปถุงมือนั้น จะใช้ในกระบวนการผลิตถุงมือชนิดที่มีแป้น เพื่อป้องกันการติดผิวระหว่างถุงมืออย่างกับแบบพิมพ์ แต่ปัจจุบันในกระบวนการผลิตจะใช้แคลเซียมสเตียเรตแทนแป้น และสามารถ ใช้แบบพิมพ์เซรามิกที่ไม่ต้องเคลือบเลยก็ได้ ถึงแม้ว่าแบบพิมพ์เซรามิกแบบเคลือบจะมีความทนต่างได้ดีกว่า แต่ก็จะมีต้นทุนที่สูงกว่า ปัจจุบันจึงไม่เป็นที่นิยมใช้แล้ว อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้ก็จะทำการพัฒนาสูตรเคลือบสำหรับแบบพิมพ์เซรามิกที่ใช้ในการขึ้นรูปถุงมืออย่างด้วย เพื่อเป็นทางเลือกให้กับผู้ประกอบการในกรณี ที่อาจมีความจำเป็นต้องใช้ในกระบวนการผลิต โดยจะทำการพัฒนาสูตรเคลือบพื้นฐานชนิดเคลือบใส ที่เหมาะสม สำหรับเนื้อดินพอร์ซเลนที่พัฒนาขึ้น เผาที่อุณหภูมิ 1280°C ทดลองใช้งานและเปรียบเทียบคุณสมบัติกับสูตรเคลือบสำเร็จที่มีจำหน่ายในท้องตลาดทั่วไป โดยลักษณะของแบบพิมพ์เซรามิกสำหรับขึ้นรูปถุงมือชนิดที่มีเคลือบและไม่มีเคลือบ แสดงดังรูปที่ 4.31



รูปที่ 4.31 ลักษณะแบบพิมพ์เซรามิกชนิดที่ไม่มีเคลือบและมีเคลือบ

จากคุณสมบัติของเนื้อดินพอร์ซเลนที่พัฒนาขึ้น พบว่าเคลือบพื้นฐานที่เหมาะสมที่จะพัฒนาขึ้นเพื่อใช้เป็นเคลือบตัวอย่างในกรณีที่ต้องการทำแบบพิมพ์เซรามิกแบบชนิดที่มีเคลือบ ควรจะมีคุณสมบัติ ดังนี้

ลักษณะเคลือบ	เคลือบใส
อุณหภูมิการเผา	1280 – 1300 °C
ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน 25-500°C	$115 - 150 \times 10^{-7} \text{ }^{\circ}\text{C}$

ซึ่งทีมวิจัยได้ค้นหาเคลือบสำเร็จรูปที่มีสมบัติดังกล่าว ที่มีขายในท้องตลาดจากบริษัทหนึ่ง มาใช้เป็นเคลือบอ้างอิง Glaze-R และเคลือบดังกล่าวมีสมบัติเพิ่มเติม คือ มีความหนาแน่น 2.77 g/cm³ มีค่าการขยายตัวเชิงเส้นที่ 500°C อยู่ระหว่าง 0.18-0.23% และมีองค์ประกอบทางเคมี (XRF) ดังนี้

ตารางที่ 4.12 องค์ประกอบทางเคมีของเคลือบอ้างอิง (Glaze-R)

องค์ประกอบทางเคมี	% โดยน้ำหนัก
KNaO	5.5
CaO/MgO	8.5
ZnO	5.0
Al ₂ O ₃	10.0
SiO ₂	66.0
LOI	5.5

สำหรับสูตรเคลือบที่จะพัฒนาขึ้น จะใช้ข้อมูลจากฐานข้อมูลเคลือบของศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ จึงได้เลือกสูตรเคลือบพื้นฐานที่เหมาะสมมา 2 สูตร โดยมีส่วนผสมของวัตถุดิบ ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4.13 ส่วนผสมของเคลือบพื้นฐานที่จะนำมาทดลองใช้และราคาวัตถุดิบ

ส่วนผสม (% โดยน้ำหนัก)	GFG-15	GFG-25	ราคาวัตถุดิบ (บาท/กิโลกรัม)
โปแตสเซิลด์สปาร์	35	32	5
ควอทซ์	30	35	5
ดินขาว	20	15	4.5
หินปูน	15	8	4
ทัลคัม	-	8	9
ซิงค์ออกไซด์	-	2	160
โซเดียมซิลิเกต (เติมเพิ่ม)	0.15	0.15	20
ต้นทุนวัตถุดิบ (บาท/กิโลกรัม)	4.78	8.29	

สำหรับขั้นตอนการพัฒนาสูตรเคลือบสำหรับแบบพิมพ์เซรามิกที่ใช้ขึ้นรูปลงมืออย่าง มีขั้นตอนการทดลองดังนี้

- 1) ศึกษาองค์ประกอบทางเคมี (โดยเทคนิค XRF: Bruker model S8 Tiger) ของวัตถุดิบที่ใช้ ได้แก่ โปแตสเซิลด์สปาร์ ควอทซ์ ดินขาว หินปูน ทัลคัม และซิงค์ออกไซด์ ผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 4.14
- 2) บดส่วนผสมสูตรเคลือบด้วยหม้อบด High speed mill เป็นเวลา 10 นาที โดยใช้สัดส่วนน้ำต่อของแข็งเท่ากับ 1:1 บดผสมให้เข้ากัน แบ่งส่วนผสมจำนวน 100 กรัมไปหาปริมาณกากค้ำตะแกรง 325 เมช แล้วกรองส่วนผสมที่เหลือผ่านตะแกรงขนาด 100 เมช วัดความ

หนาแน่น และอัตราการไหลตัวของน้ำเคลือบ ก่อนนำไปใช้งาน โดยควบคุมให้อยู่ในช่วง 1.44-1.48 g/cm³ และ 11-13 วินาที ตามลำดับ

- 3) แบ่งน้ำเคลือบส่วนหนึ่งไปอบแห้งเพื่อนำไปอัดขึ้นรูปเป็นชิ้นงานสำหรับทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน (CTE) โดยคุณสมบัติของน้ำเคลือบที่ได้และค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน (CTE) ของเคลือบแสดงดังตารางที่ 4.15
- 4) ทำการชุบเคลือบบนชิ้นงานทดลองที่ผ่านการเผาปัสกิตมาแล้ว
- 5) นำชิ้นงานที่ชุบเคลือบแล้วไปเข้าเผาในเตาไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 1280°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมงด้วยอัตราการขึ้นไฟ 5°C/นาที ลักษณะของชิ้นงานที่ได้หลังเผา แสดงดังตารางที่ 4.16

ตารางที่ 4.14 ผลการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบหลักที่ใช้ในสูตรเคลือบ ด้วยเทคนิค XRF

องค์ประกอบทางเคมี (%โดยน้ำหนัก)	วัตถุดิบ					
	ดินขาว	โปแตสเซิลด์สปาร์	ควอทซ์	หินปูน	ทัลคัม	ซิงค์ออกไซด์
SiO ₂	48.00	66.74	99.5	0.17	42.88	0.04
Al ₂ O ₃	36.00	18.44	0.13	0.05	-	-
Na ₂ O	0.01	3.09	-	-	-	-
K ₂ O	2.10	11.26	-	-	-	0.04
SrO	-	-	-	0.03	-	-
MgO	0.01	0.2	-	0.91	36.80	1.04
CaO	0.01	0.01	0.04	55.68	1.10	0.01
BaO	-	-	-	-	0.02	-
TiO ₂	0.05	0.01	-	0.01	-	-
HfO ₂	-	-	-	0.01	-	0.11
P ₂ O ₅	-	-	-	0.01	0.02	0.05
MnO	-	-	-	0.01	0.01	-
Fe ₂ O ₃	1.30	0.1	0.03	0.06	0.15	-
SO ₃	-	-	-	0.02	-	0.16
ZnO				0.01	-	98.31
LOI	12.50	0.19	0.30	43.02	19.00	0.30
Total	99.98	100.04	100.00	99.99	99.98	100.06

ตารางที่ 4.15 คุณสมบัติของน้ำเคลือบ ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของสูตรเคลือบที่ได้

Glaze Formula	% Solid	% Water	% Sodium Silicate	Slip Density (g/cm ³)	Flow rate (s)	Residue on 325 mesh (%)	CTE @25-500°C (x10 ⁻⁶ /K)	ต้นทุน (บาท/กก.)
Glaze-R	50	50	-	1.48	12.52	0	10.32	10.00
GFG-15	50	50	0.15	1.45	11.23	1.99	7.79	4.78
GFG-25	50	50	0.15	1.44	11.30	1.84	8.85	8.29

ตารางที่ 4.16 ลักษณะของชิ้นงานเคลือบ (บนเนื้อดิน GFB-16 และ A90) ที่ได้หลังเผา

เนื้อดิน/เคลือบ	Glaze-R	GFG-15	GFG-25
GFB-16			
A90			

- 6) ตรวจสอบคุณสมบัติหลังเผาของชิ้นทดสอบ ได้แก่ ความทนทานต่อสารละลายต่าง KOH ตามวิธีการทดสอบดังต่อไปนี้
- เตรียมสารละลายต่างโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ที่ความเข้มข้น $20 \pm 1\%$ โดยใช้อุณหภูมิ $70 \pm 2^\circ\text{C}$
 - ตรวจสอบลักษณะของผิวชิ้นงานก่อนนำไปแช่ในสารละลายต่างดังกล่าว ว่ามีลักษณะผิวเรียบ ไม่มีรอยแตกร้าว หรือสีกร่อนก่อนทดสอบ
 - นำชิ้นงานทดลองแช่ในสารละลายต่าง แล้วนำขึ้นมาตรวจสอบดูลักษณะการสีกร่อนของผิวชิ้นงานทุกวัน
 - นำชิ้นงานไปทดลองจุ่มในน้ำยาง (เหมือนในกระบวนการผลิตถุงมือ) แล้วนำแผ่นยางที่ได้มาตรวจสอบดูรอยร้าว

- ถ้าแผ่นยางยังไม่มีรูรั่วให้แช่ขึ้นทดสอบในสารละลายต่างต่อไปเรื่อยๆ และนำขึ้นมาตรวจสอบผิวและจุ่มน้ำยางดูรอยรั่วเป็นระยะๆ
- บันทึกเวลารวมทั้งหมดที่แช่ขึ้นงานในสารละลายต่าง (ชั่วโมง) ก่อนจะเห็นว่าผิวขึ้นงานสีก็กร่อนและแผ่นยางที่ทดลองจุ่มมีรอยรูรั่วเกิดขึ้น ผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 4.17

ตารางที่ 4.17 ความทนต่อต่างของชิ้นงานสูตรเคลือบที่ใช้กับสูตรเนื้อดิน A90

สูตรเคลือบ	ความทนทานต่อสารละลาย KOH (ชั่วโมง)
A90 (unglazed)	144
A90 with Glaze-R	808
A90 with FGG-15	712
A90 with GFG-25	808

จะเห็นว่าสูตรเคลือบทั้ง 3 สูตร สามารถใช้งานได้ดีกับสูตรเนื้อดิน A90 และหลังการทดสอบความทนต่าง พบว่าชิ้นงานที่เคลือบแล้วมีชั่วโมงการทนต่างเพิ่มสูงขึ้นอยู่ในช่วง 712-808 ชั่วโมง ซึ่งจะเห็นว่าชิ้นงานที่เคลือบจะมีความทนต่อต่างได้นานกว่าชิ้นงานที่ไม่ได้เคลือบมากกว่า 4 เท่าขึ้นไป

4.4 การจัดทำแม่พิมพ์ปูนปลาสเตอร์รูปมือ

การพัฒนาต้นแบบแบบพิมพ์เซรามิก จะต้องมีการทำเป็นแบบพิมพ์รูปมือ ซึ่งต้องเริ่มตั้งแต่การทำแม่พิมพ์ปูนปลาสเตอร์ เริ่มต้นด้วยกระบวนการทำโมเดลหล่อแม่พิมพ์ปลาสเตอร์ Master mold, Case mold และ Working mold จนกระทั่งถึงการหล่อน้ำดินเพื่อขึ้นรูปเป็นชิ้นงานแบบพิมพ์มือเซรามิกนั้น แสดงขั้นตอนและวิธีการดังรูปต่อไปนี้

- 1) ทำการกลึงหรือแต่งปูนปลาสเตอร์ให้เป็นโมเดลต้นแบบ ตามขนาดสเปคของแบบพิมพ์ทางการค้าที่กำหนด (M, L, XL) ตัวอย่างโมเดลแบบพิมพ์ต้นแบบ แสดงดังรูป 4.32
- 2) อัตราส่วนระหว่างปูนปลาสเตอร์ต่อน้ำในการทำแม่พิมพ์คือ ปูนปลาสเตอร์ 1.5 ส่วน ต่อน้ำ 1 ส่วน หมักทิ้งไว้ 1 นาที จากนั้นกวนผสมให้เข้ากันเป็นเวลา 3 นาที แล้วนำมาขึ้นรูปหล่อเป็นแม่พิมพ์
- 3) ทำการ Copy block mold ของโมเดลแบบพิมพ์มือ จำนวน 3 ชิ้นงาน ประกอบด้วย ด้านซ้าย ด้านขวา และฐาน โดยทาน้ำสบู่บนต้นแบบให้ทั่ว ประมาณ 4-5 รอบ แล้วใช้ฟองน้ำชุบน้ำ เช็ดน้ำสบู่ออกให้หมด จากนั้นจึงเทปูนปลาสเตอร์หล่อเป็นแบบพิมพ์ Master mold แสดงดังรูป 4.33



รูปที่ 4.32 ตัวอย่างแบบพิมพ์มือที่ใช้เป็นต้นแบบ (Model)



รูปที่ 4.33 การหล่อแบบพิมพ์ Master mold จากต้นแบบ (Model)

- 4) ทำแม่พิมพ์ Case mold เพื่อใช้ในการหล่อแม่พิมพ์ใช้งาน (Working mold) ให้มีจำนวนมาก สำหรับใช้หล่อน้ำดินต่อไป แสดงดังรูป 4.34



รูปที่ 4.34 การทำแม่พิมพ์ Case mold

- 5) ทำการหล่อแม่พิมพ์ Working mold หลายๆ ชุดจากแม่พิมพ์ Case mold ที่ทำขึ้น เพื่อนำไปใช้งานหล่อน้ำดินเป็นชิ้นงานแบบพิมพ์มือตามสูตรทดลองต่างๆ ต่อไป



รูปที่ 4.35 ตัวอย่างแม่พิมพ์สำหรับหล่อน้ำดิน (Working mold)



รูปที่ 4.36 ตัวอย่างการหล่อน้ำดินใน Working mold และการแกะแบบขึ้นงานเป็นต้นแบบแบบพิมพ์มือตามสูตรเนื้อดินต่างๆ

4.5 การพัฒนาต้นแบบระดับห้องปฏิบัติการ

เนื้อดินพอร์ซเลนที่พัฒนาขึ้นนี้เหมาะสมที่จะนำไปทำแบบพิมพ์เซรามิกสำหรับขึ้นรูปถุงมือยางได้ทุกประเภท แต่ในการทำต้นแบบในงานวิจัยนี้ได้ทำเป็นต้นแบบแบบพิมพ์ถุงมือทางการแพทย์เท่านั้น เพื่อให้เหมาะสมกับการผลิตของโรงงานที่จะนำไปทดลองใช้ เนื่องจากมีการผลิตถุงมือประเภทนี้เป็นผลิตภัณฑ์หลัก

4.5.1 ต้นแบบห้องปฏิบัติการสูตรเนื้อดิน

ทำการพัฒนาต้นแบบแบบพิมพ์เซรามิกขึ้นรูปถุงมือยางในระดับห้องปฏิบัติการ จากสูตรเนื้อดินทดลองทั้งสองสูตร ได้แก่ สูตร GFB-16 และ A90 เปรียบเทียบกับสูตรดินอ้างอิง (Body-R) รวมทั้งสิ้น 3 สูตร โดยมีขั้นตอนการดำเนินงานดังนี้

- ออกแบบแบบพิมพ์สำหรับถุงมือทั่วไป ตามมาตรฐานของโรงงาน ขนาด M L และ XL เพื่อทำเป็นแม่แบบ (Master mold) แบบละ 1 ชุด
- จัดทำแม่พิมพ์ Case mold 1 ชุด/แบบ รวมทั้งหมด 3 ชุด
- จัดทำแม่พิมพ์ใช้งาน (Working mold) แบบละ 2 ชุด รวมทั้งหมด 6 ชุด
- เตรียมน้ำดินหล่อทั้ง 3 สูตร ตามวิธีการในหัวข้อการพัฒนาสูตรเนื้อดินข้างต้น (2.2.2) และทำการตรวจสอบคุณสมบัติต่างๆ ของน้ำดินให้อยู่ในช่วงที่กำหนด
- ขึ้นรูปต้นแบบแบบพิมพ์แบบไม่เคลือบ ด้วยวิธีการหล่อในแม่พิมพ์พลาสติกที่จัดทำขึ้นจำนวน 3 ชิ้น/สูตร/แบบ รวมทั้งหมด 27 ชิ้น และทำการเผาที่อุณหภูมิ 1280°C
- ขึ้นรูปต้นแบบแบบพิมพ์ขนาด L แบบไม่มีเคลือบ จากสูตรดินทั้ง 3 สูตร สูตรละ 20 ชิ้น รวมจำนวน 60 ชิ้น และทำการเผาที่อุณหภูมิ 1280°C
- ทำการตรวจสอบคุณสมบัติของแบบพิมพ์ที่จำเป็นต่อการนำไปใช้ในกระบวนการผลิตถุงมือยาง ได้แก่ ขนาดและน้ำหนักของแบบพิมพ์ ความทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเฉียบพลัน (Thermal shock resistance) และความทนต่อการกัดกร่อนของสารละลายด่าง (Alkaline resistance) โดยทำการทดสอบทั้งที่ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ และส่งให้โรงงานผู้ผลิตถุงมือยางร่วมทดสอบให้ด้วย

จากการทำแบบพิมพ์รูปมือ โดยใช้วิธีการหล่อแบบในแม่พิมพ์ปูนพลาสติก ของสูตรดินอ้างอิง และสูตรดินทดลองทั้งสองสูตร พบว่าสามารถผลิตเป็นชิ้นงานต้นแบบแบบพิมพ์เซรามิกได้ ทั้งนี้ในกระบวนการผลิตโดยการหล่อชิ้นงานต้นแบบแบบพิมพ์เซรามิกจากสูตรดินทดลองทั้งสองสูตร (GFB-16 และ A90) เทียบกับสูตรดินอ้างอิง Body-R นั้น พบว่า น้ำดินสูตรทดลอง GFB-16 จะค่อนข้างหล่อชิ้นงานได้ยาก แกะชิ้นงานออกจากแบบได้ช้า และชิ้นงานที่ได้ค่อนข้างมีผิวที่หยาบ จึงได้ทำการเพิ่มปริมาณดินเหนียว Ball clay ลงไปในสูตรอีกเล็กน้อยประมาณ 3% และทำการบดน้ำดินในหม้อบด (Ball mill) ให้นานขึ้น เพื่อเพิ่มความละเอียดของน้ำดินหล่อ จึงจะสามารถทำการหล่อชิ้นงานได้ดีขึ้น ตัวอย่างชิ้นงานแบบพิมพ์เซรามิกทั้ง 3 สูตร (Body-R, GFB-16, A90) และ 3 ขนาด (M, L, XL) ที่ได้ทำเป็นต้นแบบระดับห้องปฏิบัติการ หลังเผาที่อุณหภูมิ 1280°C แสดงดังรูปที่ 4.37- 4.39



รูปที่ 4.37 ตัวอย่างแบบพิมพ์เซรามิกสูตรดินอ้างอิง Body-R ขนาด M, L และ XL (ตามลำดับซ้ายไปขวา)



รูปที่ 4.38 ตัวอย่างแบบพิมพ์เซรามิกสูตรดินทดลอง GFB-16 ขนาด M, L และ XL (ตามลำดับซ้ายไปขวา)



รูปที่ 4.39 ตัวอย่างแบบพิมพ์เซรามิกสูตรดินทดลอง A90 ขนาด M, L และ XL (ตามลำดับซ้ายไปขวา)

ผลการทดสอบต้นแบบแบบพิมพ์เซรามิกทั้ง 3 สูตรที่ได้พัฒนาขึ้น ตามรายละเอียดวิธีการทดสอบในการนำไปใช้งานในอุตสาหกรรมผลิตถุงมือยาง ได้แก่ การวัดขนาดให้ได้ตามสเปค ความทนต่อการเปลี่ยนอุณหภูมิฉับพลัน และความทนต่อต่าง ได้ผลแสดงดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 4.18 ผลการทดสอบการวัดขนาดชิ้นงานแบบพิมพ์เซรามิกสูตรทดลองเทียบกับขนาดตามสเปค

Spec. (mm.)	ขนาดแบบพิมพ์ที่ ใช้เป็นแม่แบบ (L)	สูตรดินทดลอง		
		Body-R	GFB-16	A90
Height	380 ± 3	378	375	382
Palm length textured	214 ± 3	-	-	-
Palm circumference	224 ± 3	214	214	217
Wrist circumference	195 ± 3	183	183	185
Beading circumference (300 mm. from tip of middle finger)	209 ± 3	215	212	210
Finger length 1)	58 ± 2	56	56	57
2)	76 ± 2	74	74	74
3)	88 ± 2	84	86	87
4)	77 ± 2	74	74	75
5)	58 ± 2	58	57	60

Spec. (mm.)	ขนาดแบบพิมพ์ที่ใช้เป็นแม่แบบ (L)	สูตรดินทดลอง		
		Body-R	GFB-16	A90
Finger circumference 1)	73 ± 2	65	72	72
2)	66 ± 2	54	54	56
3)	68 ± 2	57	59	57
4)	62 ± 2	53	55	55
5)	55 ± 2	46	46	45
Base holder slot				
Width	27 ± 2	28	31	29
Length	56 ± 2	55	56	56
Base diameter	79 ± 2	74	75	76
Weight (g)	800-1000	730	787	771
Clearance length from thumb to last	Max 130	124	122	128

ตารางที่ 4.19 ผลการทดสอบความทนทานต่อการเปลี่ยนอุณหภูมิเฉียบพลัน (Thermal Shock Resistance) ของชิ้นงานแบบพิมพ์เซรามิกทั้ง 3 สูตร

สูตรดิน	ผลทดสอบ	หมายเหตุ
Body-R	ผ่าน (10 รอบ ไม่แตกร้าว)	ทำการทดสอบ 2 ครั้ง ที่โรงงานผลิต ถุงมือยางที่เข้าร่วมโครงการ
GFB-16	ผ่าน (10 รอบ ไม่แตกร้าว)	
A90	ผ่าน (10 รอบไม่แตกร้าว)	

ตารางที่ 4.20 ผลการทดสอบความทนด่าง (Alkaline Resistance) ของชิ้นงานแบบพิมพ์เซรามิกทั้ง 3 สูตร

สูตรทดลอง	ระยะเวลาแช่ในสารละลายด่าง KOH 20%, 70°C จนกระทั่งพบผิวชิ้นงานเสีย (ชั่วโมง)		หมายเหตุ
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	
Body-R	392	369	- ทำการทดสอบ 2 ครั้ง ที่โรงงานผลิตถุงมือยางที่เข้าร่วมโครงการ - ในการทดสอบครั้งแรก ชิ้นงานสูตร GFB-16 ตรวจพบรอยแตกที่ง่ามนิ้วโป้ง จึงไม่ได้ทำการทดสอบ
GFB-16	-	268	
A90	175	280	

จากผลการวัดขนาดและน้ำหนักของชิ้นงานหลังเผาในตารางที่ 4.18 พบว่าขนาดของชิ้นงานในบางสูตรทดลองและบางจุดเท่านั้นที่ยังไม่ผ่านตามสเปคของแบบพิมพ์ทางการค้า เช่น Palm circumference, Wrist circumference, Beading circumference, Finger length, Finger circumference รวมถึงน้ำหนักของชิ้นงานหลังเผายังมีค่าต่ำกว่าเกณฑ์เล็กน้อย ซึ่งจะต้องทำการปรับขนาดของแม่พิมพ์พลาสติกที่ใช้หล่อขึ้นรูปชิ้นงาน และเพิ่มระยะเวลาในการหล่อชิ้นงานเพื่อให้ได้ชิ้นงานที่มีน้ำหนักเพิ่มขึ้นผ่านตามเกณฑ์ในขั้นตอนการทำให้ชิ้นงานต้นแบบในระดับภาคสนามต่อไป

สำหรับการทดสอบคุณสมบัติของชิ้นงานหลังเผาผ่านการทดสอบที่จำเป็นต่อการนำไปใช้งานในอุตสาหกรรมผลิตตุ๊กตาดังได้แก่ ความทนทานต่อการเปลี่ยนอุณหภูมิเฉียบพลัน (Thermal Shock Resistance) และความทนทานของผิวชิ้นงาน (Alkaline Resistance) ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.19 – 4.20 พบว่าในครั้งแรกสูตร GFB-16 ไม่ผ่านการทดสอบเนื่องจากพบตำหนิก่อน ในครั้งที่ 2 ได้มีการปรับปรุงกระบวนการเตรียมน้ำดิน และการหล่อขึ้นรูปให้ดีขึ้น จึงสามารถได้แบบพิมพ์ที่ไม่มีตำหนิ และนำมาทดสอบได้ตามปกติ โดยพบว่าเนื้อดินสูตรทดลองทั้งสองสูตร (GFB-16 และ A90) จะมีความสามารถในการทนทานได้น้อยกว่าเนื้อดินสูตรอ้างอิง (Body-R)

อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาความสามารถในการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยวิธีการหล่อในแม่พิมพ์พลาสติกนั้น พบว่าการเตรียมน้ำดินหล่อสูตร GFB-16 จะทำได้ยากกว่าน้ำดินสูตร A90 โดยจะต้องทำการบดวัตถุดิบหลายตัวเข้าด้วยกันซึ่งใช้เวลาในการบดค่อนข้างนาน จึงได้น้ำดินที่มีการไหลตัวที่ดีและง่ายต่อการเทลงในแม่พิมพ์ขณะทำการหล่อขึ้นรูป รวมถึงเวลาที่ใช้ในการหล่อของน้ำดินสูตรทดลอง GFB-16 จะใช้เวลานานกว่าสูตร A90 จึงจะสามารถแกะชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์พลาสติกได้ ดังนั้นจากผลในด้านการใช้งานน้ำดินขณะหล่อชิ้นงานที่แตกต่างกันดังกล่าวนี้ ทางทีมวิจัยจึงได้พิจารณาเลือกสูตรน้ำดิน A90 เป็นสูตรต้นแบบเพื่อนำไปขึ้นรูปเป็นชิ้นงานสำหรับการทดลองเคลือบ และการทำแบบพิมพ์รูปมือเพื่อนำไปทดสอบคุณสมบัติและการนำไปใช้งานในโรงงานผลิตตุ๊กตาดัง เพื่อทำเป็นเป็นต้นแบบภาคสนามต่อไป

4.5.2 ต้นแบบห้องปฏิบัติการสูตรเคลือบ

จากสูตรเคลือบที่ได้ผลดีทั้งสูตรเคลือบอ้างอิงและสูตรเคลือบที่พัฒนาขึ้นทั้งสองสูตร นำมาเคลือบบนแบบพิมพ์รูปมือ ที่ใช้สูตรเนื้อดิน A90 เนื่องจากสามารถทำเป็นแบบพิมพ์ได้ง่ายกว่าสูตร GFB-16 ดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น พบว่าสามารถเคลือบแล้วได้ผลดี ดังแสดงไว้รูปที่ 4.40-4.42 และจากการทดสอบความทนต่อต่าง ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.21

จะเห็นว่าต้นแบบห้องปฏิบัติการสูตรเคลือบทั้ง 3 สูตร สามารถใช้งานได้ดีกับสูตรเนื้อดิน A90 และหลังการทดสอบความทนต่าง พบว่าต้นแบบที่เคลือบแล้วมีชั่วโมงการทนต่างเพิ่มสูงขึ้นอยู่ในช่วง 1152-1176 ชั่วโมง เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างแบบพิมพ์ทางการค้า ที่โรงงานให้ข้อมูลว่าจะมีความทนต่อต่างประมาณ 500 ชั่วโมง ซึ่งจะเห็นได้ว่าชิ้นงานที่เคลือบจะมีความทนต่อต่างได้นานกว่าตัวอย่างแบบพิมพ์ประมาณ 2 เท่าขึ้นไป

ตารางที่ 4.21 ความทนต่อต่างของต้นแบบสูตรเคลือบที่ใช้กับสูตรเนื้อดิน A90

สูตรเคลือบ	ความทนทานต่อสารละลาย KOH (ชั่วโมง)
ตัวอย่างแบบพิมพ์	500
A90 (unglazed)	120
A90 with Glaze-R	1152
A90 with GFG-15	1176
A90 with GFG-25	1176



รูปที่ 4.40 ตัวอย่างต้นแบบห้องปฏิบัติการแบบพิมพ์เซรามิกแบบผิวเรียบ เคลือบสูตรอ้างอิง (Glaze-R)



รูปที่ 4.41 ตัวอย่างต้นแบบห้องปฏิบัติการแบบพิมพ์เซรามิกแบบผิวเรียบ เคลือบสูตร GFG-15



รูปที่ 4.42 ตัวอย่างต้นแบบห้องปฏิบัติการแบบพิมพ์เซรามิกแบบผิวเรียบ เคลือบสูตร GFG-25

4.6 การพัฒนาต้นแบบระดับภาคสนาม

ทำการพัฒนาต้นแบบแบบพิมพ์เซรามิกในระดับภาคสนามโดยใช้สูตรเนื้อดิน A90 ขึ้นรูปเป็นชิ้นงานขนาดไซส์ L เผาที่อุณหภูมิ 1280°C โดยได้มีการพ่นทรายเพื่อทำให้มีผิวหยาบ 3 ระดับจากน้อยไปมาก ดังรูปที่ 4.43 แล้วให้โรงงานพิจารณาเลือกระดับความหยาบที่เหมาะสม แล้วผิวหยาบที่เหมาะสม คือ ต้องมีความหยาบในระดับ 3 ขึ้นไป ซึ่งเป็นการพ่นด้วยทรายขนาด 0.37 มม. และมีการพ่นซ้ำ 2 ครั้ง



รูปที่ 4.43 ความหยาบของผิวแบบพิมพ์ในระดับ 1-3 จากน้อยไปมาก

เมื่อกำหนดความหนาผิวที่โรงงานต้องการแล้ว จึงได้ทำการผลิตเป็นจำนวนมาก เพื่อนำไปให้โรงงานทดลองใช้ในกระบวนการผลิตจริงประมาณ 100 ชิ้น ดังตัวอย่างแสดงในรูปที่ 4.45



รูปที่ 4.44 ตัวอย่างต้นแบบภาคสนามแบบพิมพ์เซรามิกขนาด L แบบผิวไม่เรียบ (ฟันทราย) ไม่มีเคลือบ

โดยก่อนนำเข้าสู่กระบวนการผลิต โรงงานก็ได้มีการทดสอบขนาดและความทนทานต่อ Thermal shock และความทนต่าง ตามวิธีการปกติของโรงงาน ได้ผลการทดสอบ แสดงดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4.22 ผลการวัดขนาดของชิ้นงานต้นแบบแบบพิมพ์แบบผิวไม่เรียบและไม่มีเคลือบขนาด L เทียบกับสเปคของแบบพิมพ์ทางการค้า

Spec. (mm.)	แบบพิมพ์ทางการค้า ที่ใช้เป็นแม่แบบขนาด L	ต้นแบบชนิดผิวไม่เรียบ และ ไม่มีเคลือบ (พันทราย)
Height	380 ± 3	381
Palm length textured	214 ± 3	214
Palm circumference	224 ± 3	223
Wrist circumference	195 ± 3	195
Beading circumference (300 mm. from tip of middle finger)	209 ± 3	211
Finger length 1)	58 ± 2	57
2)	76 ± 2	75
3)	88 ± 2	89
4)	77 ± 2	76
5)	58 ± 2	59
Finger circumference 1)	73 ± 2	75
2)	66 ± 2	67
3)	68 ± 2	69
4)	62 ± 2	63
5)	55 ± 2	56
Base holder slot		
Width	27 ± 2	29
Length	56 ± 2	57
Base diameter	79 ± 2	77
Weight (g)	800-1000	832
Clearance length from thumb to last	Max 130	127

ตารางที่ 4.23 ผลการทดสอบความทนทานต่อการเปลี่ยนอุณหภูมิเฉียบพลัน (Thermal Shock Resistance) และความทนด่าง (Alkaline Resistance) ของชิ้นงานต้นแบบภาคนามเทียบกับแบบพิมพ์ทางการค้าแบบผิวไม่เรียบ และไม่มีเคลือบ

ตัวอย่างแบบพิมพ์	ความทนทานต่อการเกิด Thermal Shock	ความทนด่าง (Alkaline Resistance)
ต้นแบบภาคนาม	ผ่าน (10 รอบ ไม่แตกร้าว)	ผิวแบบพิมพ์เสียที่ 120 ชั่วโมง
แบบพิมพ์ทางการค้า	ผ่าน (10 รอบ ไม่แตกร้าว)	ผิวแบบพิมพ์เสียที่ 500 ชั่วโมง

จากผลการทดสอบต้นแบบแบบพิมพ์เซรามิกภาคนามในข้างต้น พบว่าชิ้นงานต้นแบบมีคุณสมบัติที่สำคัญต่อการนำไปใช้ในกระบวนการผลิตจริงในโรงงานผ่านตามเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ทั้งในด้านขนาดและน้ำหนักของชิ้นงานหลังเผา ความทนทานต่อการเปลี่ยนอุณหภูมิเฉียบพลัน (Thermal Shock Resistance) และความสามารถในการทนด่าง (Alkaline Resistance) โดยชิ้นงานต้นแบบจะมีค่าความทนด่างที่น้อยกว่าแบบพิมพ์ทางการค้า ซึ่งอาจทำให้อายุการใช้งานของแบบพิมพ์ในกระบวนการผลิตสูงมียางสั้นกว่าเล็กน้อย

ทั้งนี้ทางโรงงานได้ทดลองนำชิ้นงานต้นแบบไปทดลองผลิตสูงมียางในกระบวนการผลิตจริง จำนวน 5 ชิ้น และทำการสุ่มตรวจคุณภาพสูงมียางที่ผลิตได้ทุกๆ 12 ชั่วโมง (1 กะ) ซึ่งจะทำให้การผลิต 2 กะต่อวัน เท่ากับจะมีการสุ่มตรวจ 2 ครั้งต่อวัน ดังแสดงในรูปที่ 4.45 โดยในการตรวจสอบนั้นเจ้าหน้าที่จะทำการสุ่มตรวจไปเรื่อยๆ จนกว่าสูงมียางที่ผลิตได้จะพบรอยร้าวตามจุดต่างๆ จึงจะเลิกใช้แบบพิมพ์นั้นๆ และบันทึกจำนวนเวลาที่สามารถใช้งานแบบพิมพ์ได้ ซึ่งผลการตรวจสอบคุณภาพสูงมียางจากการสุ่มตรวจ แสดงได้ดังตาราง 4.24



รูปที่ 4.45 ลักษณะการใช้งานแบบพิมพ์เซรามิกในกระบวนการผลิตสูงมียาง

ตารางที่ 4.24 ผลการสุ่มตรวจสอบคุณภาพถุงมือยางที่ผลิตจากแบบพิมพ์ที่พัฒนาขึ้น

วันที่	จำนวน ต.ย.สุ่ม ตรวจ	รายละเอียดการตรวจสอบถุงมือ					
		ยาว (มม.)	กว้าง (มม.)	น้ำหนัก (กรัม)	ม้วน ขอบ	การ ถอด	ลักษณะถุงมือ
1	5	240-247	108-110	4.80-4.84	✓	✓	ปกติ
2	5	240-245	108-110	4.68-4.80	✓	✓	คราบเคมี คราบสกปรก
3	5	240-245	108-110	5.26-4.76	✓	✓	คราบเคมี คราบสกปรก
5	5	240-245	108-110	5.04	✓	✓	คราบเคมี ง่ำมบาง
7	5	240-245	108-110	5.06-5.12	✓	✓	ง่ำมบาง
9	5	240-245	108-110	5.20-5.10	✓	✓	ง่ำมบาง
12	5	240-246	108-110	4.84-4.98	✓	✓	คราบขาว ง่ำมบาง
15	5	240-247	108-110	5.04-5.08	✓	✓	ง่ำมบาง
18	5	240-248	108-110	4.98-5.08	✓	✓	ง่ำมบาง คราบเคมี
22	5	240-245	108-110	5.00-5.04	✓	✓	ง่ำมบาง คราบเคมี
25	5	240-250	108-110	5.06-5.12	✓	✓	คราบเคมี
28	5	240-245	108-110	5.08-5.24	✓	✓	ง่ำมบาง คราบเคมี
30	5	240-250	108-110	5.04-5.24	✓	✓	ง่ำมบาง
34	3	240-246	108-110	5.10	✓	✓	ง่ำมบาง คราบเคมี

จากการตรวจสอบแบบพิมพ์ต้นแบบในสายการผลิต พบว่าแบบพิมพ์ต้นแบบสามารถใช้ผลิตถุงมือยางได้ปกติตามสภาวะการทำงานจริงในกระบวนการผลิตของโรงงาน ในช่วงวันที่ 2-5 จะพบว่ามีการบกพร่องบ้าง และหลังจากนั้น พบว่าถุงมือยางมีความบางเล็กน้อยบริเวณง่ามนิ้ว ทั้งนี้การเกิดคราบ และถุงมือบางบริเวณง่ามนิ้ว เป็นข้อสังเกตที่ยังไม่ถึงขั้นเป็นตำหนิ และอาจเกิดขึ้นเนื่องจากสภาวะการเตรียมน้ำยาง และความเร็วในการขึ้นรูป มากกว่าปัญหาที่จะเกิดขึ้นจากแบบพิมพ์ ตลอดระยะเวลาการผลิตในสายการผลิตนี้รวม 34 วัน พบว่าต้นแบบแบบพิมพ์สามารถใช้งานได้ปกติ ไม่พบความเสียหายของแบบพิมพ์และถุงมือยางที่ผลิตได้

พร้อมกันนี้ผู้ประกอบการได้ให้ข้อสังเกตและข้อคิดเห็นเกี่ยวกับต้นแบบแบบพิมพ์ที่ส่งให้ทางโรงงานได้ ทดลองนำไปใช้ในครั้งนี้อย่าง คุณสมบัติต่างๆ มีความเหมาะสมในการนำไปใช้งานได้ แต่น่าจะสามารถปรับปรุงความทนทานให้มากขึ้น ซึ่งจะทำให้สามารถยืดอายุการใช้งานของแบบพิมพ์ให้ยาวนานขึ้น และการขัดแต่งผิวของชิ้นงานก่อนเข้าเฝ้าที่ยังไม่เรียบร้อยมากนัก โดยพบว่าชิ้นงานบางชิ้นยังมีการขัดแต่งที่ไม่ดีพอ ชิ้นงานมีรอยตะเข็บและรอยบวมที่ผิวในบางจุด ซึ่งอาจส่งผลต่อถุงมือยางที่ผลิตได้ ทำให้ถุงมือที่ได้เป็นรอย และผิวไม่สม่ำเสมอเท่ากันทั้งชิ้น ซึ่งการปรับปรุงกระบวนการผลิตแบบพิมพ์ของผู้ประกอบการเซรามิก ก็เป็นส่วนหนึ่งที่ต้องจำเป็นในการพัฒนาการผลิตแบบพิมพ์ให้มีคุณภาพดีขึ้นต่อไป

4.7 ต้นทุนการผลิต

ต้นทุนวัตถุดิบที่ใช้ในการทำเนื้อดินทั้ง 3 สูตร สามารถคำนวณได้ ดังแสดงในตารางที่ 4.25

ตารางที่ 4.25 การคำนวณต้นทุนวัตถุดิบของสูตรดินทดลองเทียบกับสูตรอ้างอิง

วัตถุดิบที่ใช้	สูตรอ้างอิง Body-R		สูตรทดลอง GFB-16		สูตรทดลอง A90	
	สัดส่วน ใช้ (%)	ราคา (บาท/กก.)	สัดส่วน ใช้ (%)	ราคา (บาท/กก.)	สัดส่วน ใช้ (%)	ราคา (บาท/กก.)
ดิน Body-R	100	16.10				
ดิน Clay-A					90	16.08
ดิน Clay-B					10	7.23
ดินขาว			40	4.50		
ดินเหนียวดำ			18	6.00		
ควอร์ตซ์			15	5.00		
โพแทสเซิลด์สปาร์			27	5.00		
สารช่วยกระจายตัว (Deflok2870)			0.4	100	0.1	100
รวมต้นทุน (บาทต่อกก.)		16.10		5.38		15.30

แบบพิมพ์หลังเผาแล้วซึ่งจะมีน้ำหนักประมาณ 800-900 กรัม/ชิ้น เมื่อประเมินจากน้ำหนักที่จะหายไปหลังเผาประมาณ 10-15% จะทำให้มีปริมาณการใช้วัตถุดิบเนื้อดินแห้งประมาณ 900-1100 กรัม/ชิ้น ซึ่งก็จะทำให้มีต้นทุนวัตถุดิบสำหรับสูตร Body-R = 14.49-17.71 บาท/ชิ้น สูตร GFB-16 = 4.82-5.92 บาท/ชิ้น และสูตร A90 13.78-16.83 บาท/ชิ้น ส่วนต้นทุนการเผาของแบบพิมพ์ไม่เคลือบ ซึ่งทำการเผาในบรรยากาศรีดักชันที่อุณหภูมิ 1280°C ประมาณ 12 ชั่วโมง ใช้แก๊สประมาณ 2 ถัง (ถังละ 1,200 x 2 = 2,400 บาท) โดยเตาเผาที่ใช้ขนาด 1 Q บรรจุชิ้นงานแบบพิมพ์รูปมือประมาณได้ประมาณ 130-140 ชิ้น ซึ่งเมื่อคำนวณต้นทุนการเผาอยู่ที่ประมาณ 17.14-18.46 บาท/ชิ้น เมื่อประเมินต้นทุนวัตถุดิบและต้นทุนการเผาแล้วจะสามารถแสดงได้ในตารางที่ 4.26

ในกรณีที่มีการเคลือบ ตามตารางที่ 4.15 ต้นทุนของเคลือบอ้างอิง Glaze-R ราคา 10.00 บาท/กก. เคลือบ GFG-15 ราคา 4.78 บาท/กก. และเคลือบ GFG-25 ราคา 8.29 บาท/กก. ซึ่งในการเคลือบแบบพิมพ์ 1 ชิ้น จะใช้เคลือบน้ำหนักแห้งประมาณ 200-300 กรัม/ชิ้น จึงจะมีต้นทุนเคลือบสำหรับสูตร Glaze-R = 2.50-3.67 บาท/ชิ้น สูตร GFG-15 = 1.20-1.59 บาท/ชิ้น และสูตร GFG-25 = 2.07-2.76 บาท/ชิ้น แบบพิมพ์ชนิดเคลือบจะต้องมีการเผา 2 ครั้ง คือเผาบิสกิตที่ 750°C ก่อนแล้วจึงจะทำการเผาเคลือบที่อุณหภูมิ 1280°C ใช้แก๊สรวม 2 ครั้ง ประมาณ 2.5 ถัง (1,200 x 2.5 = 3,000 บาท) ก็จะทำให้มีต้นทุนการเผา 21.43-23.08 บาท/ชิ้น เมื่อประเมินต้นทุนวัตถุดิบและต้นทุนการเผาแบบพิมพ์ชนิดเคลือบ เมื่อใช้เนื้อดินเป็นสูตร

A90 ซึ่งมีต้นทุนประมาณ 13.78-16.83 บาท/ชิ้น รวมกับต้นทุนของเคลือบแต่ละสูตรแล้วก็จะสามารถแสดงได้ในตารางที่ 4.27

ตารางที่ 4.26 ต้นทุนการผลิตแบบพิมพ์เซรามิกสำหรับขึ้นรูปถุงมือยางชนิดที่ไม่มีเคลือบ

แบบพิมพ์	ต้นทุนวัตถุดิบ บาท/ชิ้น	ต้นทุนหลังเผา บาท/ชิ้น	ต้นทุนรวม บาท/ชิ้น
สูตร Body-R	14.49-17.71	17.14-18.46	31.63-36.17
สูตร GFB-16	4.82-5.92	17.14-18.46	21.96-24.38
สูตร A90	13.78-16.83	17.14-18.46	30.92-35.29

ตารางที่ 4.27 ต้นทุนการผลิตแบบพิมพ์เซรามิกสำหรับขึ้นรูปถุงมือยางชนิดที่มีเคลือบ

แบบพิมพ์	ต้นทุนวัตถุดิบ บาท/ชิ้น	ต้นทุนหลังเผา บาท/ชิ้น	ต้นทุนรวม บาท/ชิ้น
สูตร Glaze-R	16.28-20.50	21.43-23.08	37.71-43.58
สูตร GFG-15	14.98-18.42	21.43-23.08	36.41-41.50
สูตร GFG-25	15.85-19.59	21.43-23.08	37.28-42.67

จะเห็นว่าต้นทุนวัตถุดิบและเคลือบของการผลิตแบบพิมพ์ชนิดไม่เคลือบเผาที่อุณหภูมิต่ำ 1280°C จะอยู่ที่ประมาณ 21.96-36.17 บาท/ชิ้น ในส่วนของแบบพิมพ์ชนิดที่มีเคลือบจะมีต้นทุนที่สูงขึ้นเป็น 36.41-43.58 บาท/ชิ้น หรือเพิ่มขึ้นประมาณ 20% ขึ้นไป

เมื่อเปรียบเทียบกับราคาของแบบพิมพ์เซรามิกสำหรับขึ้นรูปถุงมือยางในท้องตลาดจะมีราคาประมาณ ชิ้นละ 200 บาทขึ้นไป ก็จะทำให้เห็นว่าสูตรเนื้อดินที่พัฒนาขึ้น น่าจะมีศักยภาพพอสมควรที่นำไปขยายสเกลการผลิต และทำเป็นผลิตภัณฑ์ส่งให้กับอุตสาหกรรมการผลิตถุงมือยางได้ในราคาที่ถูกลง เพราะแบบพิมพ์ในท้องตลาดจะมีต้นทุนวัตถุดิบที่สูงกว่าเนื่องจากใช้เนื้อดินที่ทำการเผาที่อุณหภูมิสูงกว่า 1300°C จึงกล่าวได้ว่าการเลือกใช้เนื้อดินที่พัฒนาขึ้นในโครงการนี้มาทำเป็นแบบพิมพ์เซรามิกสำหรับขึ้นรูปถุงมือยาง นอกจากจะเป็นการพัฒนาผลิตภัณฑ์ทางเลือกให้กับอุตสาหกรรมเซรามิกในประเทศแล้ว การใช้ผลิตภัณฑ์ในประเทศทดแทนการนำเข้า ก็จะช่วยลดต้นทุน เสริมสร้างความสามารถในการแข่งขันของอุตสาหกรรมแปรรูปยางในตลาดโลกได้เป็นอย่างดี

บทที่ 5

สรุปผลการดำเนินการ

5.1 สรุปผล

จากการวิจัยพัฒนาสูตรเนื้อดินจำนวน 12 สูตร เปรียบเทียบกับสูตรอ้างอิง (Body-R) โดยใช้ดินขาว ในช่วง 40-65% ดินดำ 5-20% โซเดียมหรือโปแตสเซียมเฟลด์สปาร์ 15-30% และควอทซ์ 10-25% โดยน้ำหนัก นอกจากนั้นยังมีการพัฒนาสูตรเนื้อดินผสม (A85-A95) ที่ใช้เนื้อดินพอร์ซเลนผสมเสร็จ Clay-A และ Clay-B อีกจำนวน 3 สูตร เตรียมน้ำดิน ขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อ และเผาที่อุณหภูมิในช่วง 1250-1300°C ได้เป็นชิ้นงานเพื่อนำไปทดสอบคุณสมบัติที่สำคัญของความเป็นพอร์ซเลน ได้แก่ การหดตัวหลังเผา (shrinkage) การดูดซึมน้ำ (water absorption) ความทนต่อแรงดัด (bending strength) และการตกตัว (sagging) พบว่าได้สูตรดินที่เผาสุกตัวที่ 1280°C และมีสมบัติเหมาะสมใกล้เคียงกับสูตรดินสำเร็จรูปที่ใช้เป็นสูตรดินอ้างอิง Body-R ได้แก่ สูตร GFB-16 ที่เตรียมจากการผสมวัตถุดิบดินขาว 40% ดินดำ 18% ควอทซ์ 15% และโปแตสเซียมเฟลด์สปาร์ 27% และสูตรดินผสม A90 ซึ่งใช้ดิน Clay-A 90 ผสม Clay-B 10% มีสมบัติของพอร์ซเลนที่ดีที่สุด แสดงดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 สมบัติของชิ้นงานสูตรที่มีสมบัติที่เหมาะสมกับการนำไปพัฒนาเป็นต้นแบบ

Formula	Shrinkage (%)	Water absorption (%)	Bending strength (MPa)	Sagging (cm.)
Body-R	13.29±0.29	0.10±0.05	69.29±2.68	6.17±0.76
GFB-16	11.38±0.89	0.18±0.09	72.55±1.94	11.00±1.00
A90	12.50±0.40	0.07±0.07	82.12±1.73	9.83±0.76

จากการตรวจสอบองค์ประกอบทางแร่ของเนื้อดินทั้งสามพบว่าประกอบด้วยผลึกของมัลไลต์และควอทซ์เป็นส่วนใหญ่ ส่วนสูตร GFB-16 ยังพบคอแรนดัมเป็นส่วนประกอบด้วย ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเป็นเซรามิกประเภทพอร์ซเลนที่มีความแข็งแรงสูง หลังจากนั้นได้ทำการทดสอบความทนต่อการเปลี่ยนอุณหภูมิฉับพลัน ในช่วง 30-180°C ผ่าน 10 รอบโดยไม่มีการแตกร้าวทั้ง 3 สูตร และมีความทนต่อต่าง KOH เข้มข้น 20% ที่อุณหภูมิ 70°C ได้นาน 192, 168 และ 144 ชั่วโมง ตามลำดับ ในส่วนของการตรวจสอบลักษณะของผิวชิ้นงานก่อนและหลังการทดสอบความทนต่างด้วยการวัดความหยาบที่ผิว (roughness) พบว่าผิวของชิ้นงานสูตรดินอ้างอิง Body-R และ GFB-16 หลังการกัดกร่อนจะมีค่าความหยาบ Ra (Average roughness of profile) ลดลงเล็กน้อย ส่วนสูตร A90 มีค่าความหยาบเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะพื้นผิวที่สังเกตได้จากการตรวจสอบด้วยกล้อง SEM

สำหรับการพัฒนาต้นแบบแบบพิมพ์ในระดับห้องปฏิบัติการนั้น เริ่มต้นจากการพัฒนาแม่พิมพ์ปูนปลาสเตอร์รูปมือ ทำการปรับขนาดให้ได้ตามสเปคโดยคำนึงถึงการหดตัวที่ตำแหน่งต่างๆ โดยได้ทำการผลิต

แบบพิมพ์จำนวน 3 ขนาด ได้แก่ ขนาด M, L และ XL และเผาที่ 1280°C พบว่าสูตรดินอ้างอิง Body-R สูตร GFB-16 และสูตร A90 สามารถทำเป็นต้นแบบแบบพิมพ์ได้ทุกสูตร โดยพบต้นแบบทั้งสามสูตรมีสมบัติใกล้เคียงกัน คือ มีความทนต่อการเปลี่ยนอุณหภูมิฉับพลัน ในช่วง 30-180°C ได้มากกว่า 10 รอบ ส่วนการทนต่อสารเคมีพบว่าได้ 369, 268 และ 280 ชั่วโมงตามลำดับ อย่างไรก็ตามพบว่าสูตร GFB-16 มักพบปัญหาตำหนิจากกระบวนการผลิต จึงได้เลือกใช้สูตร A90 เป็นพื้นฐานในการพัฒนาต่อไป

ในส่วนของการพัฒนาสูตรเคลือบ ได้ทำการเตรียมเคลือบสีจำนวน 2 สูตร ได้แก่ เคลือบพื้นฐานทั่วไป (GFG-15) ที่ประกอบด้วยโปแตสเซิลด์สปาร์ 35% ควอทซ์ 30% ดินขาว 20% และหินปูน 15% และสูตรเคลือบสังกะสี ที่มีโปแตสเซิลด์สปาร์ 32% ควอทซ์ 35% ดินขาว 15% หินปูน 8% ทัลคัม 8% และซิงค์ออกไซด์ 2% เปรียบเทียบกับเคลือบอ้างอิง 1 สูตร พบว่าทุกสูตรสามารถเคลือบได้ผลสำเร็จดี โดยการเคลือบผิวจะทำให้ชิ้นงานมีสมบัติความทนต่อต่างได้นานขึ้นถึง 4 เท่า

สำหรับต้นแบบภาคนามนั้นได้ใช้สูตรดิน A90 ทำเป็นแบบพิมพ์รูปมือแบบไม่เคลือบ และมีการพ่นทรายให้มีผิวหยาบในบริเวณอุ้งมือเพื่อให้ได้รูปแบบเหมือนกับผลิตภัณฑ์ของโรงงาน หลังจากที่ได้ขยายสเกลการผลิต และนำแบบพิมพ์ที่ได้ไปทดลองใช้ในโรงงาน ซึ่งเป็นระบบสายพานและมีการผลิต 12 ชั่วโมงต่อกะวันละ 2 กะ และแบบพิมพ์หนึ่งจะใช้เวลาประมาณ 15 นาที ต่อรอบ พบว่าหลังการใช้งาน 34 วัน ต้นแบบแบบพิมพ์สูตรเนื้อดินที่พัฒนาขึ้นก็ยังใช้งานได้ดี ทั้งนี้ต้นแบบภาคนามที่พัฒนาขึ้นนี้มีต้นทุนการผลิตประมาณ 21.96-36.17 บาท/ชิ้น ซึ่งผลสำเร็จจากโครงการนี้ได้นำเสนอเป็นตัวอย่างและองค์ความรู้ที่จะช่วยผลักดันให้มีการผลิตแบบพิมพ์เซรามิกในประเทศ ซึ่งจะเป็นส่วนสำคัญในการเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันให้กับอุตสาหกรรมผู้ผลิตตุ๊กตาดินเผาของประเทศไทยต่อไป

ตารางที่ 5.2 การเปรียบเทียบคุณสมบัติแบบพิมพ์เซรามิกสำหรับการขึ้นรูปตุ๊กตาดินเผา

คุณสมบัติ	แบบพิมพ์ทางการค้า	ต้นแบบภาคนาม แบบไม่เคลือบ	ต้นแบบภาคนาม แบบเคลือบ
ต้นทุน/ชิ้น	N/A (ราคาซื้อประมาณ 200 บาท/ชิ้น)	30.92-35.29 บาท/ชิ้น	37.28-42.67 บาท/ชิ้น
ลักษณะทางกายภาพ	มีขนาดและลักษณะของแบบพิมพ์เป็นไปตามข้อกำหนด	เนื่องจากเป็นต้นแบบ การผลิตยังไม่สามารถควบคุมได้เต็มที่ จึงยังมีความไม่เรียบร้อย เช่น รอยตะเข็บที่เกิดจากแม่พิมพ์ เป็นต้น	แบบพิมพ์จะมีความมันที่ผิว ที่อาจส่งผลกระทบต่อ การแกะแบบ และการทำแบบพิมพ์ที่มีผิวหยาบ เฉพาะจุด ก็ทำได้ยากขึ้น
ความทนทานต่อการเกิด Thermal Shock	ผ่าน (10 รอบ ไม่แตกร้าว)	ผ่าน (10 รอบ ไม่แตกร้าว)	ผ่าน (10 รอบ ไม่แตกร้าว)

คุณสมบัติ	แบบพิมพ์ทางการค้า	ต้นแบบภาคสนาม แบบไม่เคลือบ	ต้นแบบภาคสนาม แบบเคลือบ
ความทนต่าง (Alkaline Resistance)	ผิวแบบพิมพ์เสียที่ ประมาณ 500 ชั่วโมง	ผิวแบบพิมพ์เสียที่ 120 ชั่วโมง	ผิวแบบพิมพ์เสียที่ 1176 ชั่วโมง
ข้อดีและข้อเสีย	มีต้นทุน/ชิ้น สูงกว่า เนื่องจากใช้เนื้อดินที่เผาที่ อุณหภูมิสูง ทำให้มีความ ทนต่างได้นาน แต่การเผา สูงกว่า 1300°C จะทำให้ ผู้ผลิตเซรามิกส่วนใหญ่ใน ประเทศไม่สามารถทำการ ผลิตได้ด้วยเครื่องมือที่มี อยู่ในปัจจุบัน	มีต้นทุน/ชิ้น ต่ำกว่าแบบ พิมพ์ทางการค้า อายุการ ใช้งานน้อยกว่า แต่การเผา ที่อุณหภูมิ 1280°C จะทำ ให้ผู้ผลิตเซรามิกใน ประเทศสามารถทำการ ผลิตได้ด้วยเครื่องมือที่มี อยู่	ความทนต่อต่างสูงขึ้น แต่ กระบวนการผลิตจะ ยุ่งยากและมีขั้นตอนมาก ขึ้น โอกาสที่จะมีของเสีย เกิดได้มากขึ้น และการ นำไปใช้งานใน กระบวนการผลิตถุงมือ ยาง ก็จะมีข้อจำกัด
ความเหมาะสมใน การใช้งาน	เหมาะสำหรับการใช้งาน ใน line การผลิต ผลิตภัณฑ์ปริมาณมาก และมีการผลิตที่ต่อเนื่อง ตลอดปี	เหมาะสำหรับการใช้งาน ใน line การผลิตระยะสั้น มีรูปแบบแบบพิมพ์ที่ หลากหลาย ต้องการความ รวดเร็ว และต้นทุนที่ถูก จากการสั่งทำได้ใน ประเทศ	แบบพิมพ์แบบมีเคลือบ นั้นเหมาะกับกระบวนการ ผลิตถุงมือยางแบบมีแบ่ง เท่านั้น ซึ่งปัจจุบันถุงมือ ยางที่ตลาดต้องการส่วน ใหญ่จะเป็นถุงมือยางแบบ ที่ไม่มีแบ่ง
ความคุ้มค่าในทาง เศรษฐศาสตร์	ในกรณีที่ไม่มีการผลิตใน ปริมาณมากอาจไม่มีความ จำเป็นในการใช้แบบพิมพ์ ที่มีคุณภาพสูง ซึ่งจะทำให้ ต้นทุนการผลิตสูงขึ้น	ในกรณีที่ไม่มีการผลิตใน ปริมาณมาก ความต่อเนื่อง ในการถูกแช่ในสารเคมีไม่ นาน กระบวนการกัด กร่อนจากต่าง ก็จะไม่ค่อย มีผลมากนัก แบบพิมพ์จะ ถูกล้างเก็บไว้ ก่อนนำมาใช้ งานในครั้งต่อไปได้ ต้นแบบแบบพิมพ์นี้ก็จะยัง สามารถนำมาใช้งานได้อีก หลายๆ ครั้ง	การเคลือบผิวสามารถทำ ให้อายุการใช้งานยาวนาน ขึ้น ในขณะที่ต้นทุนแบบ พิมพ์จะสูงขึ้น ไม่มากนัก แต่ผู้ประกอบการส่วน ใหญ่ก็ไม่เห็นความจำเป็น ในจุดนี้ เนื่องจากแบบ พิมพ์ที่ไม่มีเคลือบก็ สามารถใช้งานได้นาน เพียงพอแล้ว

5.2 ข้อเสนอแนะ

ทีมวิจัยพบว่าในงานวิจัยมีความยุ่งยากในขั้นตอนของการจัดทำแม่พิมพ์ปูนปลาสเตอร์เพื่อให้ได้ขนาดแบบพิมพ์หลังเผา ณ จุดต่างๆ ตรงตามสเปคทั้ง 3 ขนาด ซึ่งอาจจะทำให้ใช้เวลาในการปรับเปลี่ยนแม่พิมพ์หลายครั้ง ซึ่งอาจจะไม่ใช่ส่วนที่จำเป็นในการทำต้นแบบสูตรดินในระดับห้องปฏิบัติการ ซึ่งสุดท้ายก็จะใช้ในการทดลองใช้งานจริงเพียงขนาด L เพียงขนาดเดียวเท่านั้น จึงควรกำหนดขนาดการทำแบบพิมพ์เพียงขนาดเดียวเท่านั้น

ในส่วนของสูตร GFB-16 ถึงแม้ในการทดสอบชิ้นงานจะให้สมบัติของฟอร์ชเลนที่ดีมาก แต่ในการขึ้นรูปทำเป็นแบบพิมพ์พบว่ามีปัญหาในเรื่องของการควบคุมคุณสมบัติของน้ำดิน การหล่อขึ้นรูป ซึ่งทำให้เกิดตำหนิ ผิวยาบ หรือรอยร้าวเล็กๆ ขึ้นในแบบพิมพ์ที่ได้ ซึ่งต่อมาส่งผลให้การทดสอบการทนการเปลี่ยนอุณหภูมิฉับพลัน และความทนต่าง ได้น้อยกว่าที่ควรจะเป็น ซึ่งหากแก้ไขและควบคุมการเตรียมน้ำดินให้มีสมบัติที่เหมาะสมแล้ว ก็จะช่วยทำให้แบบพิมพ์ที่ได้มีตำหนิน้อยลง และมีคุณสมบัติโดยรวมที่ดีเช่นเดียวกัน ซึ่งในส่วนของผู้ประกอบการมีข้อเสนอแนะเกี่ยวกับการปรับปรุงความเรียบร้อยของแบบพิมพ์ เช่น การลบรอยตะเข็บของแบบพิมพ์ และเพิ่มความทนต่อต่างเพื่อให้มีอายุการใช้งานมากขึ้น

โดยการเพิ่มความทนต่อต่างเพื่อให้มีอายุการใช้งานมากขึ้นนั้น อาจทำได้โดยการเพิ่มปริมาณอะลูมินาในเนื้อดิน แต่จะต้องทำการเผาที่อุณหภูมิสูงกว่า 1300°C เพื่อให้เนื้อดินสุกตัว ซึ่งจะส่งผลต่อต้นทุนการผลิตที่สูงขึ้น และการถ่ายทอดเทคโนโลยีไปสู่อุตสาหกรรมเซรามิกทั่วไปก็อาจจะทำได้ยากขึ้น เพราะผู้ผลิตเซรามิกส่วนใหญ่จะมีเตาเผาที่อุณหภูมิไม่เกิน 1300°C การปรับเปลี่ยนเตาเผาจึงเป็นอีกหัวข้อใหญ่ที่ทางผู้ผลิตเซรามิกจะพิจารณาในการปรับเปลี่ยนการผลิต อีกแนวทางหนึ่งในการเพิ่มความทนต่อต่าง คือ การใช้แบบพิมพ์ที่มีเคลือบ ซึ่งจากงานวิจัยนี้จะเห็นได้ว่าช่วยเพิ่มความทนต่อต่างได้นานมากขึ้นไม่น้อยกว่า 4 เท่า แต่การใช้เคลือบก็จะต้องมีความเหมาะสมกับกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ลงมืออย่างบางประเภทเท่านั้น การศึกษาการใช้แบบพิมพ์ที่มีเคลือบให้ใช้งานได้ในกระบวนการผลิตทั่วไปนั้น จึงควรมีโรงงานผู้ผลิตลงมืออย่าง ที่มีความพร้อมหรือสามารถที่ปรับเปลี่ยนกระบวนการผลิตไปพร้อมกับการใช้แบบพิมพ์แบบที่มีเคลือบ เข้าร่วมในการทำโครงการวิจัยด้วย

เอกสารอ้างอิง

- 1) สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม. (2558) รายงานสรุปภาวะเศรษฐกิจอุตสาหกรรมปี 2558 และแนวโน้มปี 2559. กระทรวงอุตสาหกรรม.
- 2) สถิติยางไทย. สถาบันวิจัยยาง การยางแห่งประเทศไทย. สืบค้น 6 ธันวาคม 2559 จาก http://www.rubberthai.com/statistic/stat_index.htm
- 3) Thailand Board of Investment. (2016) **Thailand: The World's Leader in Natural Rubber Production**. August 2016 vol. 26 no. 8
- 4) สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม. (2559) รายงานการศึกษาเชิงลึก เรื่อง อนาคตถุงมือยางไทยในตลาดโลก. กระทรวงอุตสาหกรรม.
- 5) Global Market Insights Inc. (2016) **Industrial Safety Gloves Market Size By Material**. September 2016
- 6) CIMB Group Berhad. (2016) **Rubber Gloves: Loosening its grip**. Industrial Goods and Services - Malaysia Equity research.
- 7) ทนงศักดิ์ วัฒนา และ ศุภัสกรรณ์ หลิมเฮงฮะ. เทคโนโลยีการผลิตถุงมือยางทางการแพทย์ (**Medical Latex Glove**). วารสารส่งเสริมเทคโนโลยี. ฉบับที่ 249. มิถุนายน-กรกฎาคม 2554, 67-72.
- 8) ทวี พรหมพฤกษ์. (2523) **เครื่องเคลือบดินเผาเบื้องต้น**. กรุงเทพฯ: โอเดียนสโตร์.
- 9) Felix Singer, Sonja S. Singer. (1963). **Industrial ceramics**. Chemical Publishing Co.
- 10) Harabi, A., Guerfa, F., Harabi, E., Benhassine, M. T., Foughali, L., & Zaiou, S. (2016). **Preparation and characterization of new dental porcelains, using K-feldspar and quartz raw materials. Effect of B₂O₃ additions on sintering and mechanical properties**. Materials Science and Engineering: C, 65, 33-42.
- 11) Turkmen, O., Kucuk, A., & Akpinar, S. (2015). **Effect of wollastonite addition on sintering of hard porcelain**. Ceramics International, 41(4), 5505-5512.
- 12) Sahlaoui, H., Makhlof, K., & Sidhom, H. (2013). **Comparative Study of the Thermal Shock Resistance of an Industrial Tableware Porcelain**. Journal of Engineering, 2013.
- 13) Tucci, A., Esposito, L., Malmusi, L., & Rambaldi, E. (2007). **New body mixes for porcelain stoneware tiles with improved mechanical characteristics**. Journal of the European Ceramic Society, 27(2), 1875-1881.
- 14) Partyka, J., & Lis, J. (2012). **Chemical corrosion of sanitary glazes of variable grain size composition in acid and basic aqueous solution media**. Ceramics International, 38(1), 553-560.

- 15) Fröberg, L., Hupa, L., & Hupa, M. (2009). **Corrosion of the crystalline phases of matte glazes in aqueous solutions.** Journal of the European Ceramic Society, 29(1), 7-14.
- 16) Fröberg, L., Kronberg, T., Törnblom, S., & Hupa, L. (2007). **Chemical durability of glazed surfaces.** Journal of the European Ceramic Society, 27(2), 1811-1816.
- 17) Hupa, L., Bergman, R., Fröberg, L., Vane-Tempest, S., Hupa, M., Kronberg, T., Pesonen-Leinonen, E., & Sjöberg, A. M. (2005). **Chemical resistance and cleanability of glazed surfaces.** Surface science, 584(1), 113-118.
- 18) ลออนวล ยศพงษ์ (2556) **การพัฒนาวิธีพ่นละอองไฟฟ้าสำหรับการเคลือบแม่พิมพ์เซรามิกส์ด้วยสารช่วยการจับตัวยาง.** สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย. สืบค้น 9 ธันวาคม 2559 จาก http://elibrary.trf.or.th/project_content.asp?PJID=RDG5250079

สัญญาเลขที่ RDG5750048

โครงการ “การพัฒนาเนื้อดินและเคลือบสำหรับทำแบบพิมพ์เซรามิกขึ้นรูปถุงมือยาง
โดยวิธีการจุ่มในระดับอุตสาหกรรม”
รายงานฉบับสมบูรณ์

ภาคผนวก ก. รายงานเชิงเทคนิคประกอบต้นแบบ

- 1) ต้นแบบห้องปฏิบัติการสูตรเนื้อดินพอร์ซเลนสำหรับทำแบบพิมพ์ขึ้นรูปถุงมือยางโดยวิธีการจุ่ม
- 2) ต้นแบบห้องปฏิบัติการสูตรเคลือบพอร์ซเลนสำหรับทำแบบพิมพ์ขึ้นรูปถุงมือยางโดยวิธีการจุ่ม
- 3) ต้นแบบภาคสนามแบบพิมพ์พอร์ซเลนสำหรับทำแบบพิมพ์ขึ้นรูปถุงมือยางโดยวิธีการจุ่ม

ภาคผนวก ข. ข้อมูลประกอบรายงาน

- 1) เอกสารอ้างอิงดินสำเร็จรูป
- 2) รายการวิเคราะห์ทดสอบคุณสมบัติเซรามิกตามมาตรฐาน

ภาคผนวก ค. เอกสารแนบ

- 1) ร่างบทความสำหรับเผยแพร่ เนื้อดินพอร์ซเลนสำหรับทำแบบพิมพ์ถุงมือยาง
- 2) ตารางเปรียบเทียบกิจกรรมและผลลัพธ์ที่ได้จากการดำเนินงาน
- 3) รายงานการนำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์อย่างเป็นรูปธรรม

ภาคผนวก ก.

รายงานเชิงเทคนิคประกอบต้นแบบ

-
- 1) ต้นแบบห้องปฏิบัติการสูตรเนื้อดินพอร์ซเลนสำหรับทำแบบพิมพ์ขึ้นรูปถลุงมือ
โดยวิธีการจุ่ม

ภาคผนวก ก.

รายงานเชิงเทคนิคประกอบต้นแบบ

- 2) ต้นแบบห้องปฏิบัติการสูตรเคลือบพอร์ซเลนสำหรับทำแบบพิมพ์ขึ้นรูปถွ่งมีอย่าง
โดยวิธีการจุ่ม

ภาคผนวก ก.

รายงานเชิงเทคนิคประกอบต้นแบบ

- 3) ต้นแบบภาคสนามแบบพิมพ์ฟอร์มสำหรับทำแบบพิมพ์ขึ้นรูปถွ่งมือยางโดย
วิธีการจุ่ม

ภาคผนวก ข.

ข้อมูลประกอบรายงาน

1) เอกสารอ้างอิงดินสำเร็จรูป

- Common porcelain

Clay-B = ดินสำเร็จรูป PBA

- Alumina porcelain and white porcelain

Clay-A = ดินสำเร็จรูป PEA

Body-R = ดินสำเร็จรูป PFA

ภาคผนวก ข.

ข้อมูลประกอบรายงาน

2) รายการวิเคราะห์ทดสอบคุณสมบัติเซรามิกตามมาตรฐาน

- ASTM C326-03: Standard Test Method for Drying and Firing Shrinkages of Ceramic Whiteware Clays
- ASTM C373-88 (1999): Standard Test Method for Water Absorption, Bulk Density, Apparent Porosity, and Apparent Specific Gravity of Fired Whiteware Products
- ASTM C674-88 (1999): Standard Test Methods for Flexural Properties of Ceramic Whiteware Materials
- ASTM C372-94 (2001): Standard Test Method for Linear Thermal Expansion of Porcelain Enamel and Glaze Frits and Fired Ceramic Whiteware Products by the Dilatometer Method

ภาคผนวก ค.

เอกสารแนบ

-
- 1) ร่างบทความสำหรับเผยแพร่ เนื่อดินพอร์ซเลนสำหรับทำแบบพิมพ์ถุงมือยาง

ภาคผนวก ค.

เอกสารแนบ

2) ตารางเปรียบเทียบกิจกรรมและผลลัพธ์ที่ได้จากการดำเนินงาน

ภาคผนวก ค.

เอกสารแนบ

3) รายงานการนำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์อย่างเป็นรูปธรรม

ภาคผนวก ก.

รายงานเชิงเทคนิคประกอบต้นแบบ

- 1) ต้นแบบห้องปฏิบัติการสูตรเนื้อดินพอร์ซเลนสำหรับทำแบบพิมพ์ขึ้นรูปถลุงมือ
โดยวิธีการจุ่ม

รายงานเชิงเทคนิค
ประกอบต้นแบบการวิจัย พัฒนาและวิศวกรรม
(ต้นแบบห้องปฏิบัติการ)

ชื่อผลิตภัณฑ์ต้นแบบ: สูตรเนื้อดินพอร์ซเลนสำหรับทำแบบพิมพ์เซรามิกขึ้นรูปถ่วงมืออย่างโดยวิธีการจุ่ม
ชื่อโครงการ: การพัฒนาเนื้อดินและเคลือบสำหรับทำแบบพิมพ์เซรามิกขึ้นรูปถ่วงมืออย่าง
โดยวิธีการจุ่มในระดับอุตสาหกรรม

คณะผู้วิจัย

- ดร. อนุชา วรรณก้อง
- นาง วชิร สอนลา
- น.ส. ภัทรวรรณ เฉยเจริญ
- นาย. ปริญญา สมร่วง

หน่วยงานที่สังกัด

ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ

สนับสนุนทุนวิจัยโดย

สนับสนุนโดยสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.)
และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)

1. บทคัดย่อ

ต้นแบบสูตรเนื้อดินสำหรับแบบพิมพ์เซรามิกขึ้นรูปถุงมือยางโดยวิธีการจุ่มในระดับห้องปฏิบัติการ เป็นเป้าหมายหนึ่งของโครงการการพัฒนาเนื้อดินและเคลือบสำหรับทำแบบพิมพ์เซรามิกสำหรับขึ้นรูปถุงมือยางโดยวิธีการจุ่ม ซึ่งในโครงการได้ดำเนินการวิจัยพัฒนาสูตรเนื้อดินพอร์ซเลนจำนวน 9 สูตร เปรียบเทียบกับสูตรอ้างอิง (Body-R) โดยใช้ดินขาวในช่วง 40-65% ดินดำ 5-20% โซเดียมหรือโปแตสเซียมเฟลด์สปาร์ 15-30% และควอทซ์ 10-25% โดยน้ำหนัก นอกจากนั้นยังมีการพัฒนาสูตรเนื้อดินผสม (A85-A95) ที่ใช้เนื้อดินพอร์ซเลนผสมเสร็จ Clay-A และ Clay-B อีกจำนวน 3 สูตร เริ่มต้นด้วยการเตรียมน้ำดิน ขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อและเผาที่อุณหภูมิในช่วง 1250-1300°C ได้เป็นชิ้นงานเพื่อนำไปทดสอบคุณสมบัติที่สำคัญของความเป็นพอร์ซเลน ได้แก่ การหดตัว (shrinkage) การดูดซึมน้ำ (water absorption) ความทนต่อแรงดัด (bending strength) และการตกตัว (sagging) พบว่าได้สูตรดินที่เผาสุกตัวที่ 1280°C และมีสมบัติเหมาะสมใกล้เคียงกับสูตรดินสำเร็จรูปที่ใช้เป็นสูตรดินอ้างอิง Body-R ได้แก่ สูตร GFB-16 ที่เตรียมจากการผสมวัตถุดิบดินขาว 40% ดินดำ 18% ควอทซ์ 15% และโปแตสเซียมเฟลด์สปาร์ 27% และสูตรดินผสม A90 ซึ่งใช้ดิน Clay-A 90 ผสม Clay-B 10% มีสมบัติของพอร์ซเลนที่ดีที่สุด คือ มีการหดตัวหลังเผาในช่วง 11.38-13.29% การดูดซึมน้ำ 0.07-0.18% ความทนทานต่อแรงดัด 69.29-82.12 MPa และมีการตกตัวหลังเผา 6.17- 11.00 mm. จากนั้นนำสูตรดินทั้งสามไปทำเป็นต้นแบบแบบพิมพ์รูปถุงมือได้ทุกสูตร โดยพบต้นแบบทั้งสามสูตรมีสมบัติใกล้เคียงกัน คือ มีความทนต่อการเปลี่ยนอุณหภูมิฉับพลัน ในช่วง 30-180°C ได้มากกว่า 10 รอบ ส่วนการทนต่อค่า KOH 20% ที่อุณหภูมิ 70°C พบว่าทนได้ 369, 268 และ 280 ชั่วโมงตามลำดับ

2. บทนำ

“ยางพารา” เป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทย มีบทบาททั้งในแง่ของการจ้างงานและการส่งออก ซึ่งอุตสาหกรรมยางและผลิตภัณฑ์ยางมีมูลค่าอยู่ในลำดับต้นๆ ของการส่งออกของไทย โดยในปี 2558 มีมูลค่าการส่งออกยาง 170,418.73 ล้านบาท และมูลค่าการส่งออกผลิตภัณฑ์ยางสูงถึง 230,374.20 ล้านบาท (สถาบันวิจัยยาง, 2559) ถึงแม้ว่าไทยจะมีข้อได้เปรียบในเรื่องของยางธรรมชาติ เนื่องจากเป็นผู้ผลิตและส่งออกยางธรรมชาติเป็นอันดับ 1 ของโลก รวมถึงการได้เปรียบเรื่องค่าแรงงาน แต่เมื่อได้ทำการวิเคราะห์ศักยภาพของอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ถุงมือยางไทยเมื่อเทียบกับประเทศมาเลเซีย โดยการวิเคราะห์ค่าดัชนีความได้เปรียบโดยเปรียบเทียบ (Revealed Competitive Advantage Index: RCA) โดยใช้หลักของการเปรียบเทียบส่วนแบ่งการส่งออกของสินค้าชนิดหนึ่งจากการส่งออกทั้งหมดของประเทศนั้นกับส่วนแบ่งของการส่งออกสินค้าชนิดดังกล่าวจากการส่งออกทั้งหมดของโลก พบว่ามาเลเซียมีค่า RCA ในการส่งออกเฉลี่ยในช่วงปี 2009-2014 สูงถึง 37 ขณะที่ประเทศไทยมีค่า RCA ในการส่งออกเพียง 12 หรือ มาเลเซียสูงกว่าเป็น 3 เท่าของไทย เนื่องมาจากหลายปัจจัย เช่น มาเลเซียมีบริษัท ท้อปโกลฟ ที่เป็นผู้ผลิตและส่งออกถุงมือรายใหญ่ที่สุดของโลก มีเทคโนโลยีการผลิตและการตรวจสอบคุณภาพที่รวดเร็วและทันสมัย มีการวิจัยและพัฒนาผลิตภัณฑ์อย่างต่อเนื่อง

จะเห็นได้ว่า ปัญหาสำหรับผู้ประกอบการที่ใช้แบบพิมพ์ถุงมือยางเป็นเซรามิกในประเทศ คือ การที่ไม่มี

ผู้ผลิตแบบพิมพ์เซรามิกในประเทศ หรือมีผู้ผลิต แต่ก็ผลิตเพื่อส่งออกไปยังตัวแทนขายในต่างประเทศ ทำให้ผู้ประกอบการในประเทศต้องทำการจัดหาแบบพิมพ์เซรามิกโดยการนำเข้าต่างประเทศ โดยเฉพาะแบบพิมพ์ถุงมือที่ใช้ในอุตสาหกรรมยางวิศวกรรมและอุตสาหกรรม จะพบปัญหามากกว่า เนื่องจากเป็นแบบพิมพ์ที่ต้องใช้ฝีมือและประสบการณ์ในการผลิตที่ต้องสั่งสมมา การผลิตแต่ละครั้งต้องใช้เวลาเพราะเป็นงานฝีมือ และเมื่อแบบพิมพ์เสียหายและชำรุด ก็จำเป็นต้องใช้เวลาในการซ่อมแซมและปรับแต่ง ซึ่งถ้าหากไม่มีแบบพิมพ์สำรอง ก็จะทำให้การผลิตหยุดชะงัก ส่งผลต่อกระบวนการผลิตทั้งระบบ ดังนั้น การพัฒนาอุตสาหกรรมผู้ผลิตแบบพิมพ์เซรามิก ที่เป็นบริษัทคนไทยที่ผลิตและจำหน่ายในประเทศ ให้เกิดขึ้น จึงมีความสำคัญต่อห่วงโซ่ของการผลิตในกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ยางของไทยเป็นอย่างยิ่ง

ในโครงการนี้ เป็นโครงการที่เกี่ยวกับการพัฒนาเนื้อดินพอร์ซเลนสำหรับทำแบบพิมพ์เซรามิกขึ้นรูปถุงมือยางโดยวิธีการจุ่มในระดับอุตสาหกรรม โดยจะมีการดำเนินการวิจัยและพัฒนาทั้งในเรื่องที่เกี่ยวกับ สูตรเนื้อดิน วิธีการเตรียมที่เหมาะสมในการนำไปขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อ อุณหภูมิการเผาที่เหมาะสม และการวิเคราะห์ทดสอบคุณสมบัติ เพื่อทำเป็นต้นแบบแบบพิมพ์เซรามิกขึ้นรูปถุงมือในระดับห้องปฏิบัติการ

3. วัตถุประสงค์

- 1) เพื่อวิจัยและพัฒนาเนื้อดินพอร์ซเลนที่เหมาะสมสำหรับการทำแบบพิมพ์เซรามิกขึ้นรูปถุงมือยางโดยวิธีการจุ่ม
- 2) พัฒนาดัชนีแบบในระดับห้องปฏิบัติการแบบพิมพ์เซรามิกขึ้นรูปถุงมือยางโดยวิธีการจุ่มในระดับอุตสาหกรรมด้วยสูตรเนื้อดินที่พัฒนาขึ้น

4. สรุปสถานะภาพของงานที่จะทำจนถึงปัจจุบัน

4.1. การพัฒนาสูตรเนื้อดิน

- 1) ดำเนินการรวบรวมวัตถุดิบสำเร็จรูปเพื่อเป็นสูตรอ้างอิง และวัตถุดิบทั่วไปสำหรับการพัฒนาสูตรเนื้อดินและเคลือบ เพื่อทำการวิเคราะห์ และตรวจสอบคุณสมบัติ ดังต่อไปนี้

- วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค X-ray fluorescence (XRF) (Bruker model S8 Tiger) ของตัวอย่างแม่พิมพ์เซรามิกสำหรับขึ้นรูปถุงมือยางจากโรงงาน (Former) และวัตถุดิบที่นำมาใช้ในการทำวิจัย ได้แก่ ดินขาว ดินดำ โปแตสเฟลด์สปาร์ โซดาเฟลด์สปาร์ ควอทซ์ และดินสำเร็จรูป

- วิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ด้วยเทคนิค X-ray diffraction (XRD) (Bruker AXS Model D8 Discover) ของวัตถุดิบที่นำมาใช้ในการทำวิจัย ได้แก่ ดินขาว ดินดำ โปแตสเฟลด์สปาร์ โซดาเฟลด์สปาร์ และควอทซ์

- วิเคราะห์ความชื้นของวัตถุดิบ เพื่อการคำนวณปริมาณของน้ำสำหรับเติมในสูตรดินทดลอง

- 2) การพัฒนาสูตรดิน จากวัตถุดิบที่มีอยู่ อ้างอิงกับองค์ประกอบทางเคมีของสูตรอ้างอิง จากนั้นทำการเตรียมสูตรดิน โดยทำการชั่งน้ำหนักส่วนผสมตามสูตรดินทดลอง บดผสมด้วยเครื่องบด High speed mill

ให้ส่วนผสมเข้ากันดี ตรวจสอบคุณสมบัติ ความหนาแน่น (g/cm^3) การไหลตัว (วินาที) ความหนืด (เซ็นติพอยซ์) ค่าเฉลี่ยขนาดอนุภาคน้ำดิน กากค้ำตะแกรง 325 เมช (%) และอัตราการหล่อน้ำดินที่ 30 นาที (มม.) ของน้ำดินสูตรทดลอง

3) ทำการขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อแบบเป็นแท่งเหลี่ยมขนาด $70 \times 20 \times 10$ มม. แกะแบบ ชัดแต่งชิ้นงาน แล้วนำชิ้นงานเข้าอบที่อุณหภูมิ 100°C อย่างน้อย 24 ชั่วโมง ก่อนนำไปเผาที่อุณหภูมิทดลอง 1250 1280 และ 1300°C

4) ทำการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพต่างๆ ดังต่อไปนี้

- การทดสอบหาค่าการหดตัวเชิงเส้นของชิ้นงานหลังอบแห้งและหลังเผาที่อุณหภูมิ 1250 1280 และ 1300°C ตามวิธีการทดสอบในมาตรฐาน ASTM C 326-03

- การทดสอบค่าการดูดซึมน้ำ (Water absorption) ค่าความพรุนตัวปรากฏ (Apparent porosity) และค่าความหนาแน่นทั้งก้อน (Bulk density) ตามมาตรฐาน ASTM C 373-88 (1999)

- การทดสอบค่าความแข็งแรงของชิ้นงานหลังเผาแบบ 3-point bending strength ตามมาตรฐาน ASTM C 674-88 (1999) โดยใช้เครื่อง Universal testing machine (Instron, 55R4502)

- การทดสอบการตกตัวของชิ้นทดสอบ (Sagging)

- การทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนเชิงเส้น (CTE) ในช่วงอุณหภูมิ 25 – 500°C ตามมาตรฐาน ASTM C 372-94 (2001) โดยใช้เครื่อง Dilatometer (Netzsch รุ่น DIL 402 PC)

4.2. การพัฒนาต้นแบบแบบพิมพ์เซรามิกขึ้นรูปถွ่มมือยาง

1) ดำเนินการออกแบบแบบพิมพ์สำหรับถွ่มมือยางทั่วไป ทั้งหมด 3 รูปแบบ จำนวนรูปแบบละ 3 ขนาด คือ ขนาดกลาง (Size M) ขนาดใหญ่ (Size L) และขนาดใหญ่พิเศษ (Size XL)

2) จากแบบพิมพ์ที่ทำการออกแบบ นำมาจัดทำเป็น Case Mold รูปแบบละ 1 ชุด และ Working Mold รูปแบบละ 2 ชุด เพื่อให้สามารถขึ้นรูปแบบพิมพ์เซรามิกขึ้นรูปถွ่มมือยางได้

3) ทำการขึ้นรูปแบบพิมพ์โดยวิธีการหล่อแบบ ต้นแบบแบบพิมพ์จำนวนรูปแบบละ 3 ชิ้น ต่อสูตรดินแต่ละสูตร (สูตรอ้างอิง สูตรทดลอง 1 และสูตรทดลอง 2) แล้วทำการเผาแบบไม่มีเคลือบ เพื่อทำการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพต่างๆ ตามมาตรฐานการทดสอบแบบพิมพ์ของโรงงานผลิตผลิตภัณฑ์ถွ่มมือยาง

4) ทำการขึ้นรูปต้นแบบแบบพิมพ์ ขนาด L (เกรด A) จำนวนรูปแบบละ 10 ชิ้น ต่อสูตรดินแต่ละสูตร (สูตรอ้างอิง สูตรทดลอง 1 และสูตรทดลอง 2) รวมเป็นจำนวน 30 ชิ้น เพื่อทำการทดสอบเบื้องต้นที่ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ และจำนวนรูปแบบละ 10 ชิ้น ต่อสูตรดินแต่ละสูตร รวมเป็นจำนวน 30 ชิ้น เพื่อส่งทำการทดสอบการทนต่อการเปลี่ยนอุณหภูมิฉับพลัน และการทนต่อต่าง

5. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

เนื้อเซรามิกพอร์ซเลนโดยทั่วไปจะเตรียมได้จากการผสมวัตถุดิบหลายประเภท จำพวกดิน และหินชนิดต่างๆ ซึ่งเนื้อจะมีสีขาว เผาถึงจุดสุกตัว เผาในอุณหภูมิตั้งแต่ 1250°C ขึ้นไป ส่วนผสมของเนื้อเซรามิก

ประกอบด้วย หินเขียวหนุมาน หินฟันม้า ดินขาว และดินดำ หลังเผามีความแข็งแกร่ง น้ำและของเหลวไม่สามารถซึมผ่านได้ เนื้อละเอียด แต่เนื้อเซรามิกหลังการผสมวัตถุดิบเข้าด้วยกัน จะมีความเหนียวน้อยเนื่องจากมีดินดำในส่วนผสมต่ำ การขึ้นรูปจึงนิยมใช้การหล่อแบบ และนิยมนำเนื้อเซรามิกชนิดนี้ไปทำผลิตภัณฑ์ประเภทเครื่องใช้บนโต๊ะอาหาร อุปกรณ์ทางไฟฟ้า และภาชนะที่ใช้ในห้องทดลอง เป็นต้น ซึ่งเนื้อเซรามิกพอร์ซเลน แบ่งออกเป็น 5 ประเภท ตามสมบัติและการใช้งาน คือ เนื้อเซรามิกพอร์ซเลนแบบบอบบาง (Soft Porcelain) เนื้อเซรามิกพอร์ซเลนแบบแข็งแกร่ง (Hard Porcelain) เนื้อเซรามิกพอร์ซเลนเพื่อใช้งานทางไฟฟ้า (Electrical Porcelain) เนื้อเซรามิกพอร์ซเลนชนิดที่ทนต่อสารเคมี (Chemical Porcelain) และเนื้อเซรามิกมัลไลต์พอร์ซเลน (Mullite Porcelain)

เนื้อเซรามิกพอร์ซเลนมีการนำไปใช้งานได้ดังต่อไปนี้

1) เครื่องใช้บนโต๊ะอาหาร เครื่องใช้บนโต๊ะอาหารที่มีเนื้อเซรามิกพอร์ซเลน จะมีความแข็งแกร่งสูง มีความแข็งแรงมาก โปร่งแสง และเนื้อสีขาว โดยเตรียมเนื้อเซรามิกอยู่ในรูปของน้ำดิน จากวัตถุดิบพวกดินขาว ดินดำ หินฟันม้า และหินเขียวหนุมาน เผาที่อุณหภูมิ 1250–1300°C และเผาเคลือบที่อุณหภูมิต่ำกว่าเผา ดิบ นอกจากนี้หากต้องการเครื่องใช้บนโต๊ะอาหารที่มีคุณภาพสูง สีขาวบริสุทธิ์ โปร่งแสง ทนทานต่อแรงกล และแรงขีดข่วน ทนการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกะทันหัน สามารถใช้เนื้อพอร์ซเลนแบบแข็งแกร่งได้

2) อุปกรณ์ทางเคมี อุตสาหกรรมและวิศวกรรม เป็นผลิตภัณฑ์จากเนื้อเซรามิกพอร์ซเลนที่ใช้ในห้องปฏิบัติการเคมี (Laboratory) รวมทั้งเป็นอุปกรณ์สำหรับเครื่องจักรกลที่ใช้ผลิตในอุตสาหกรรม เช่น ในอุตสาหกรรมผลิตกรดไฮโดรคลอริก อุตสาหกรรมกลั่นน้ำมัน อุตสาหกรรมสิ่งทอ อุตสาหกรรมผลิตยาง อีกทั้งวัสดุเพื่อใช้งานบด เช่น หม้อบด ลูกบด และวัสดุกรุภายในหม้อบด ซึ่งเนื้อเซรามิกพอร์ซเลนที่ใช้ จะเป็นชนิดแข็งแกร่งที่มีสีขาว มีความหนาแน่นสูง ป้องกันการกัดกร่อนของสารเคมีได้ดี มีความแข็งแรงทางกลสูง ทนการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกระทันหันได้ดีกว่าเนื้อเซรามิกสโตนแวร์ โดยที่มีความหนาของผลิตภัณฑ์น้อยกว่า

หากมีความต้องการให้มีสมบัติดีขึ้น คือ มีความแข็งแกร่งสูงขึ้น มีความแข็งสูงขึ้น ทนอุณหภูมิสูง (สูงกว่า 1500°C) ทนการกัดกร่อนของกาโลทะเลอมและแก้ว ต้องใช้เนื้อเซรามิกมัลไลต์พอร์ซเลน โดยหลังการเผาต้องมีการทดสอบสมบัติให้เป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนดสำหรับการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมแต่ละประเภท แต่มาตรฐานส่วนใหญ่จะกำหนดให้เนื้อเซรามิกพอร์ซเลนแบบแข็งแกร่งหลังเผา ต้องสามารถทนการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจาก 250°C มาที่น้ำอุณหภูมิ 15°C ได้ โดยไม่แตกร้าเสียหาย นอกจากนี้เนื้อเซรามิกต้องสามารถป้องกันการเกิดปฏิกิริยาเคมีของกรดและด่าง ที่ 100°C ได้นาน 4 ชั่วโมง รวมทั้งสมบัติอื่นตามลักษณะการใช้งาน เช่น ความแข็ง ความแข็งแรง การทนต่อการขีดสี เป็นต้น

3) อุปกรณ์ทางไฟฟ้า อุปกรณ์ทางไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเนื้อเซรามิกพอร์ซเลน อาจจะเป็นทั้งเนื้อเซรามิกพอร์ซเลนเพื่อใช้งานทางไฟฟ้าธรรมดา หรือเป็นชนิดมัลไลต์พอร์ซเลนที่มีสมบัติด้านการทนอุณหภูมิได้สูงกว่าและดีกว่า นอกจากจะใช้ผลิตเป็นลูกถ้วยไฟฟ้าแล้ว ยังใช้ผลิตอุปกรณ์ทางไฟฟ้าอื่น เช่น ปลั๊ก (Sparking Plugs) และฟิวส์ (Fuse Cores) เป็นต้น โดยที่มัลไลต์พอร์ซเลนจะมีส่วนผสมของหินและแร่ที่ให้ลูมินามาก เช่น ไคยาไนต์ (Kyanite) แอนดาลูไซต์ (Andalusite) แต่หากเป็นเนื้อเซรามิกพอร์ซเลนเพื่อใช้งานทางไฟฟ้า

จะประกอบด้วยอัตราส่วนผสมของดินขาว และดินดำมากกว่า ทำให้อุณหภูมิการเผาของเนื้อเซรามิกทั้งสองประเภทแตกต่างกัน นั่นคือ เนื้อเซรามิกพอร์ซเลนเพื่อใช้งานทางไฟฟ้า จะเผาที่อุณหภูมิ 1300–1350°C หรืออาจเผาได้ถึง 1400°C ส่วนเนื้อเซรามิกมัลต์พอร์ซเลน เผาที่ 1460–1480°C

4) เครื่องประดับตกแต่ง และงานศิลปะ เนื้อเซรามิกพอร์ซเลนสามารถนำมาใช้ผลิตเป็นเครื่องตกแต่ง เครื่องประดับ และของใช้ได้เช่นเดียวกัน เพราะเนื้อเซรามิกพอร์ซเลนมีความขาว และมีความโปร่งใส ทำให้สามารถใช้สีผสมในเนื้อเซรามิกได้อย่างสวยงาม ชิ้นงานหลังเผามีคุณค่า บอบบาง น่าถนอม เป็นผลให้ชิ้นงานที่ได้จากเนื้อเซรามิกพอร์ซเลนนี้มีราคาสูง และนิยมผลิตงานที่มีความประณีต การผลิตส่วนมากใช้วิธีการขึ้นรูปโดยการปั้นด้วยมือ หรือการหล่อแม่พิมพ์พลาสติก นิยมใช้สีผสมในเนื้อเซรามิก และใช้เคลือบใสเพื่อแสดงความสวยงามและความโปร่งแสงของเนื้อเซรามิก

6. คุณลักษณะของต้นแบบที่ได้เสนอไว้ในข้อเสนอโครงการฯ

สูตรเนื้อดินพอร์ซเลนอ้างอิงที่ได้ทำการศึกษา ทำการพัฒนาเป็นสูตรเนื้อดินต้นแบบ โดยเป็นเนื้อดินที่มีความแข็งแรง มีการหดตัวต่ำ สามารถทนต่ออุณหภูมิสูง และการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลันได้ และสามารถทนต่อการกัดกร่อนจากการใช้กรดในกระบวนการขึ้นรูปลงมือได้อย่างดี ทั้งนี้สูตรเนื้อดินพอร์ซเลนต้นแบบต้องมีสมบัติ ดังนี้

- 1) สูตรเนื้อดินพอร์ซเลน ที่เผาสุกตัวที่ 1250-1300°C
- 2) สามารถขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อแบบกลวง เป็นรูปร่างมือที่มีความซับซ้อน
- 3) คุณสมบัติหลังเผามีการหดตัวต่ำ มีความแข็งแรงสูง และทรงตัวได้ดี

7. การออกแบบและการสร้าง

คณะผู้วิจัยได้ดำเนินการศึกษากระบวนการผลิตลงมืออย่าง การวิจัยเพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์แบบพิมพ์เซรามิก โดยปรับปรุงสูตรเนื้อดินและสูตรเคลือบ และรูปแบบของต้นแบบแบบพิมพ์ ดั้งขั้นตอนการทดลองต่อไปนี้

7.1. การจัดหาและวิเคราะห์ทดสอบวัตถุดิบ

ใช้แบบพิมพ์เซรามิกจากท้องตลาดเป็นตัวอย่างอ้างอิง (Former Sample) และเลือกใช้เนื้อดินสำเร็จรูปที่มีคุณสมบัติเหมาะสมกับการผลิตเป็นแบบพิมพ์เซรามิกสำหรับขึ้นรูปลงมืออย่าง เป็นสูตรเนื้อดินอ้างอิง (Body-R) ทีมวิจัยจะได้นำวัตถุดิบที่ใช้ในการทำวิจัย ได้แก่ ดินขาว ดินดำ โปแตสเฟลด์สปาร์ โซดาเฟลด์สปาร์ ควอทซ์ และเนื้อดินสำเร็จรูป 2 ชนิด (Clay-A และ Clay-B) มาทำการวิเคราะห์ทดสอบเบื้องต้น เพื่อเป็นข้อมูลในการวิจัยและพัฒนาเนื้อดิน โดย วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค XRF วิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ด้วยเทคนิค XRD เพื่อใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาสูตรเนื้อดินทดลอง

7.2. การพัฒนาสูตรและเตรียมน้ำดิน

จากสูตรเนื้อดินทดลอง ทำการชั่งน้ำหนักและผสมวัตถุดิบตามสูตรทดลอง เตรียมเป็นน้ำดิน โดยทำตรวจวัดและควบคุมคุณสมบัติของน้ำดิน เพื่อให้มีความเหมาะสมกับการขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อ โดยทดสอบ

สัดส่วนวัตถุดิบแห้งต่อปริมาณของน้ำและสารช่วยกระจายตัว ทดสอบคุณสมบัติของน้ำดินทดลอง (Slip Properties) อันได้แก่ ความหนาแน่นน้ำดิน (g/cm^3) การไหลตัว (วินาที) กราก้างตะแกรง 325 mesh (%) อัตราการหล่อที่ 30 นาที (มม.) ความหนืดน้ำดิน (cP) และขนาดอนุภาคน้ำดินเฉลี่ย D (μm)

7.3. การเตรียมชิ้นงานทดสอบ

สูตรน้ำดินทดลองสูตรต่างๆ นำมาขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อเป็นชิ้นงานสำหรับการทดสอบคุณสมบัติต่างๆ ของเนื้อดิน โดยขึ้นรูปเป็นแท่งเหลี่ยมขนาด $70 \times 20 \times 10$ มม. ทำการแกะออกจากแบบและขัดแต่งชิ้นงาน นำเข้าอบที่อุณหภูมิ 100°C อย่างน้อย 24 ชั่วโมง ก่อนนำไปเผาที่อุณหภูมิทดลอง 1250, 1280 และ 1300°C โดยใช้ Heating rate $5^\circ\text{C}/\text{นาท}$, Soaking 60 นาที จากนั้นจึงนำไปทดสอบคุณสมบัติต่างๆ ดังนี้ การหดตัวหลังอบแห้ง (%) การหดตัวหลังเผา (%) ความแข็งแรงก่อนเผา (MPa) ความแข็งแรงหลังเผา (MPa) การดูดซึมน้ำ (%) ความพรุนตัว (%) ความหนาแน่นชิ้นงาน (g/cm^3) ระยะตกตัวหลังเผา (มม.) และค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวที่ $25\text{--}500^\circ\text{C}$ ($\times 10^{-6}/\text{K}$) ทำการคัดเลือกสูตรดินที่มีคุณสมบัติเหมาะสม ผลิตเป็นต้นแบบแบบพิมพ์ต่อไป

7.4. การพัฒนาต้นแบบแบบพิมพ์เซรามิกขึ้นรูปถွ่งมือยาง

ดำเนินการออกแบบแบบพิมพ์สำหรับถွ่งมือยางทั่วไป ทั้งหมด 3 รูปแบบ จำนวนรูปแบบละ 3 ขนาด คือ ขนาดกลาง (Size M) ขนาดใหญ่ (Size L) และขนาดใหญ่พิเศษ (Size XL) เพื่อจัดทำเป็น Case Mold รูปแบบละ 1 ชุด และ Working Mold รูปแบบละ 2 ชุด เพื่อให้สามารถขึ้นรูปแบบพิมพ์เซรามิกขึ้นรูปถွ่งมือยางได้ ทำการขึ้นรูปแบบพิมพ์โดยวิธีการหล่อแบบ ต้นแบบแบบพิมพ์จำนวนรูปแบบละ 3 ชิ้น ต่อสูตรดินแต่ละสูตร (สูตรอ้างอิง สูตรทดลอง 1 และสูตรทดลอง 2) แล้วทำการเผาแบบไม่มีเคลือบ เพื่อทำการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพต่างๆ ตามมาตรฐานการทดสอบแบบพิมพ์ของโรงงานผลิตผลิตภัณฑ์ถွ่งมือยาง

7.5. การทดสอบคุณสมบัติต้นแบบแบบพิมพ์เซรามิกขึ้นรูปถွ่งมือยาง

ทำการขึ้นรูปต้นแบบแบบพิมพ์ ขนาด L (เกรด A) จากสูตรดินแต่ละสูตร (สูตรอ้างอิง สูตรทดลอง 1 และสูตรทดลอง 2) โดยทำการทดสอบคุณสมบัติที่จำเป็นต่อการใช้งานแบบพิมพ์ เพื่อให้มั่นใจถึงความสามารถในการนำไปใช้งานในกระบวนการผลิต ได้แก่ การทดสอบความทนทานต่อการเปลี่ยนอุณหภูมิเฉียบพลัน (Thermal Shock Resistance) และ การทดสอบความทนต่างของชิ้นงาน (Alkaline Resistance) โดยใช้วิธีการทดสอบอ้างอิงตาม In-house Testing ของโรงงานผลิตถွ่งมือยาง

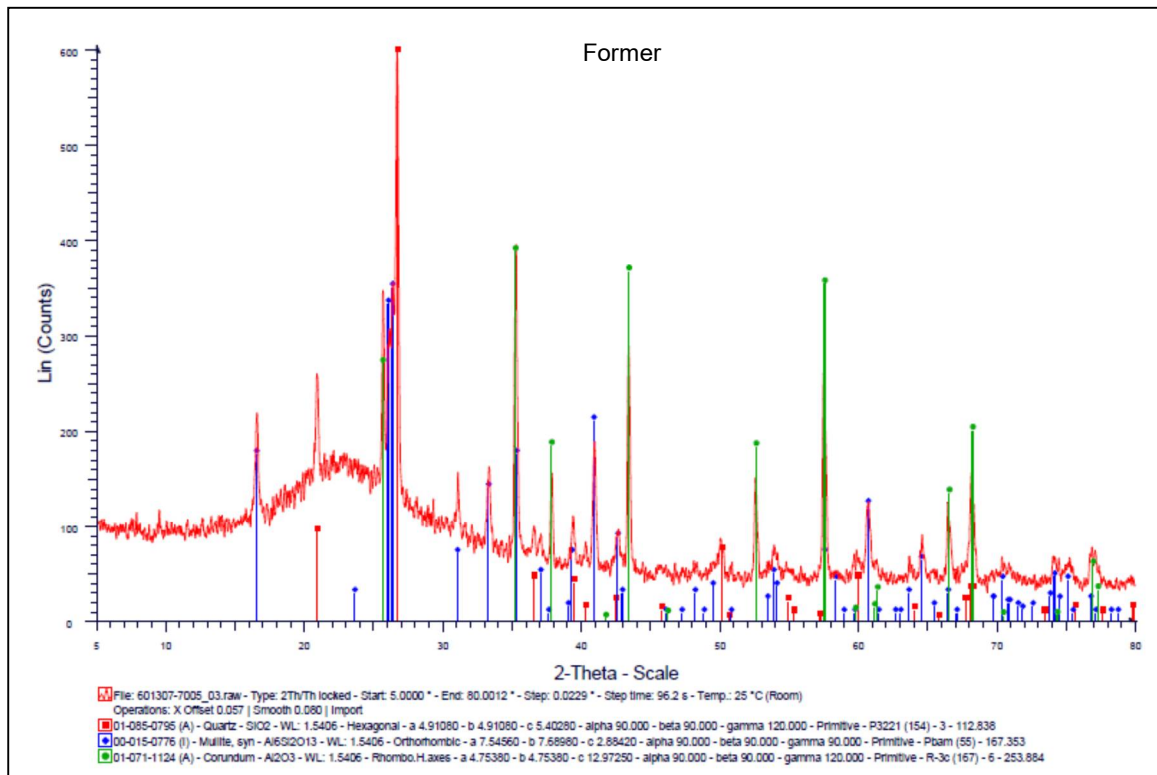
8. การทดสอบและผลการทดสอบ

8.1. การวิเคราะห์ทดสอบวัตถุดิบและการพัฒนาสูตรดิน

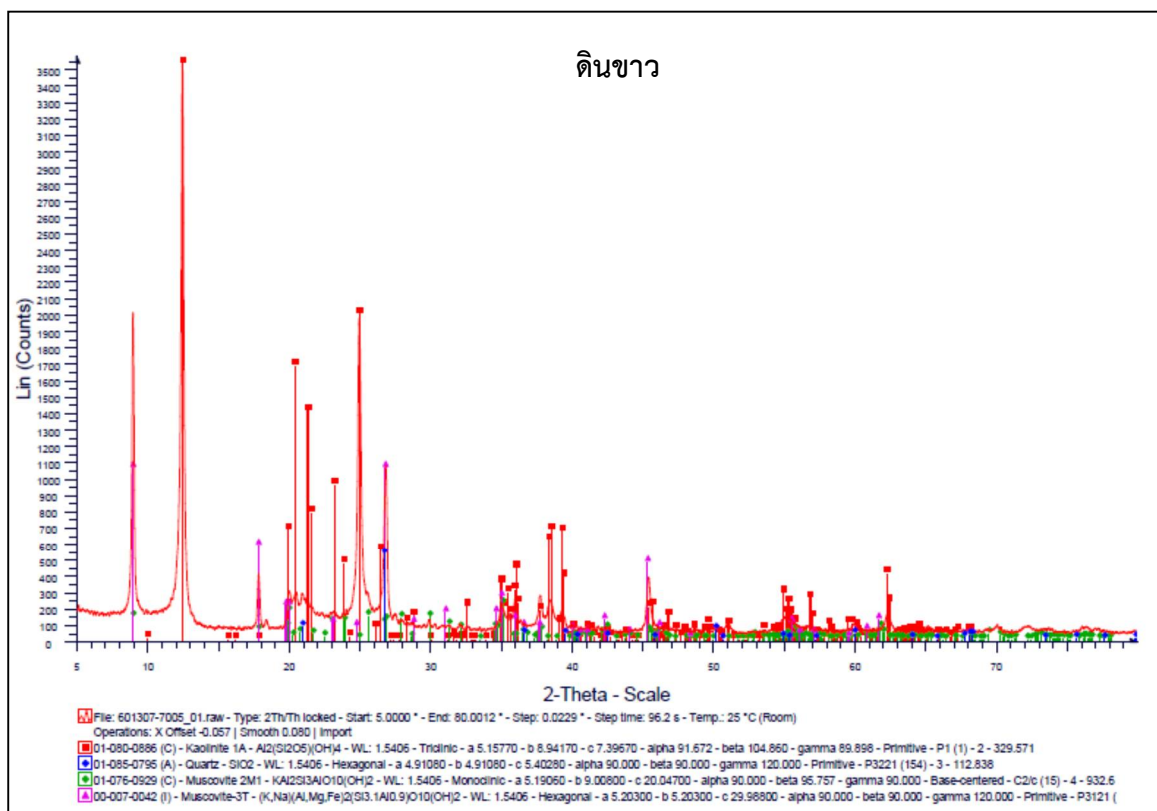
ทำการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค XRF วิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ด้วยเทคนิค XRD ของวัตถุดิบที่ใช้ในการทำวิจัย ได้แก่ ดินขาว ดินดำ โปแตสเฟลด์สปาร์ โซดาเฟลด์สปาร์ ควอทซ์ และเนื้อดินสำเร็จรูป 2 ชนิด (Clay-A และ Clay-B) เพื่อใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาสูตรเนื้อดินทดลอง โดยองค์ประกอบทางเคมีเป็นดังตารางที่ 2 และองค์ประกอบทางแร่เป็นดังตารางที่ 3 ภาพที่ 4-9

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างแบบพิมพ์ วัตถุดิบและดินสำเร็จรูปโดยเทคนิค XRF

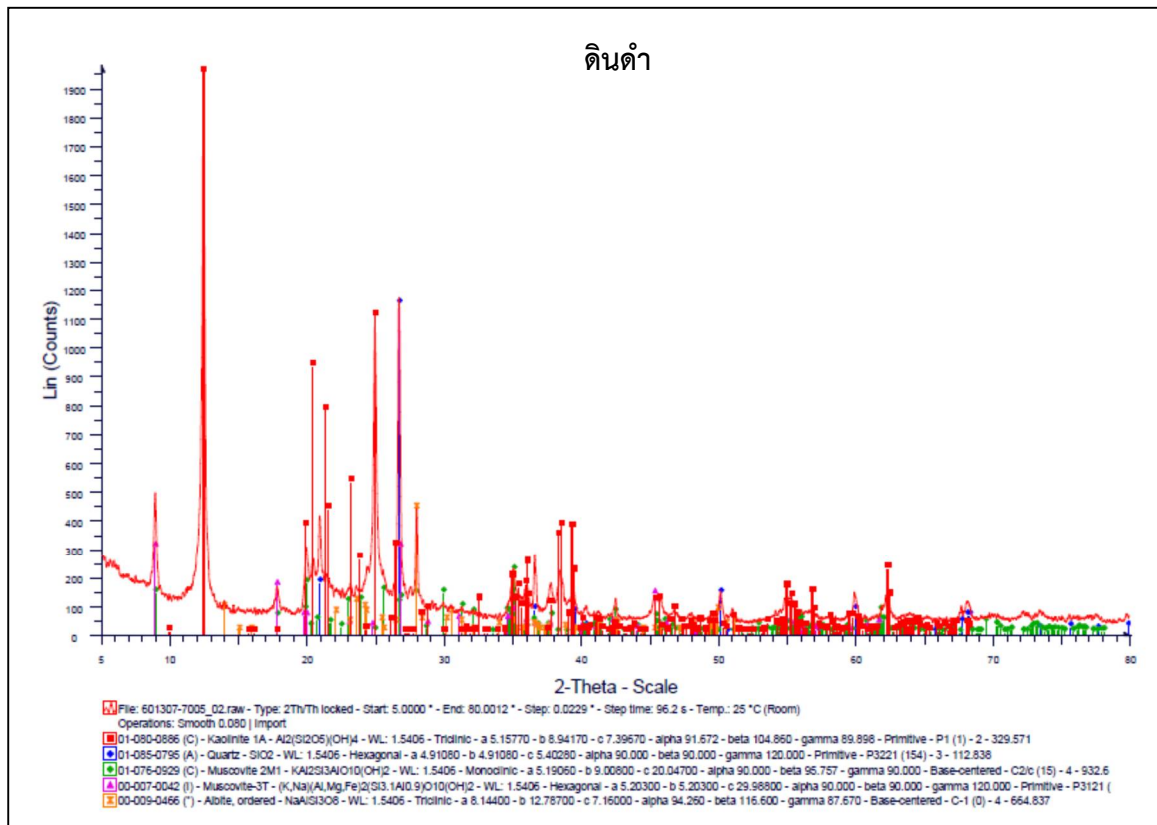
องค์ประกอบทางเคมี (%โดยน้ำหนัก)	Former Sample	Body-R	Clay-A	Clay-B	วัตถุดิบ				
					ดินขาว	ดินดำ	โปแตสเฟลต์สปาร์	โซดาเฟลต์สปาร์	ควอทซ์
SiO ₂	59.78	64.70	62.10	58.50	48.00	56.50	66.74	68.52	99.5
Al ₂ O ₃	33.46	22.60	24.10	26.40	36.00	26.50	18.44	17.55	0.13
Na ₂ O	1.66	1.26	0.82	0.53	0.01	0.34	3.09	8.06	-
K ₂ O	3.15	2.85	4.33	3.74	2.10	2.17	11.26	0.75	-
Rb ₂ O	-	-	0.04	0.06	-	-	-	-	-
MgO	0.16	0.08	0.29	0.25	0.01	0.28	0.2	0.58	-
CaO	0.40	0.22	0.17	0.13	0.01	0.25	0.01	1.77	0.04
BaO	0.11	-	<0.01	0.01	-	-	-	-	-
TiO ₂	0.15	0.06	0.23	0.25	0.05	0.46	0.01	0.29	-
ZrO ₂	-	-	0.01	0.01	-	-	-	-	-
P ₂ O ₅	0.14	-	0.03	0.04	-	-	-	-	-
MnO	-	-	0.01	0.02	-	-	-	-	-
Fe ₂ O ₃	0.65	0.41	0.77	0.90	1.30	1.25	0.1	0.2	0.03
SO ₃	-	-	0.03	0.02	-	-	-	-	-
LOI	0.35	7.82	7.06	9.13	12.50	10.80	0.19	1.24	0.30



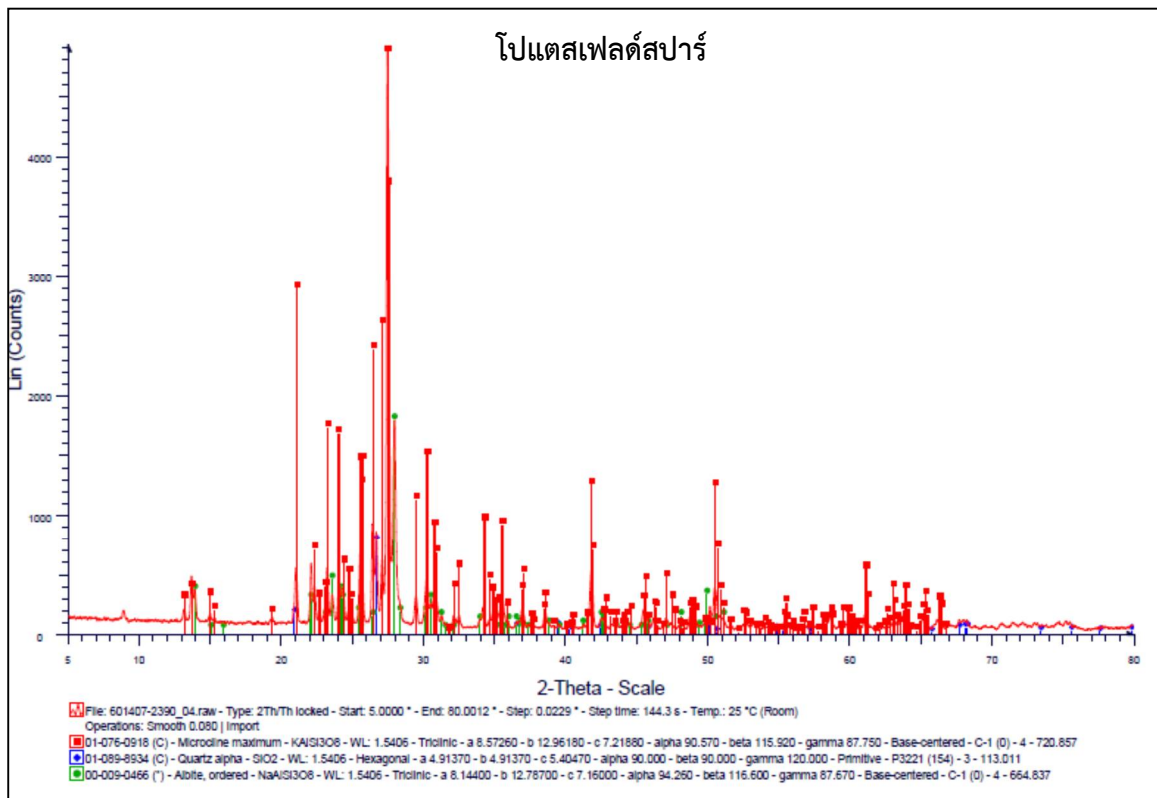
รูปที่ 4 XRD pattern ของ Former sample



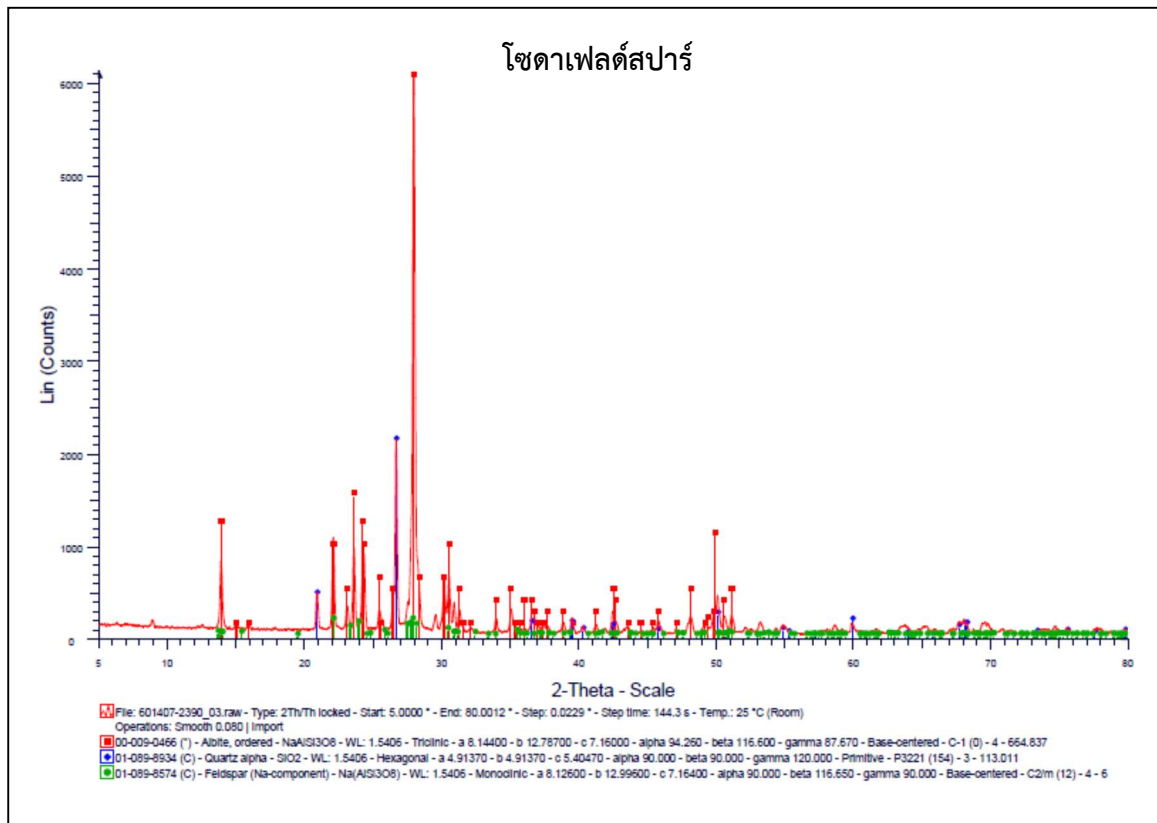
รูปที่ 5 XRD pattern ของดินขาว



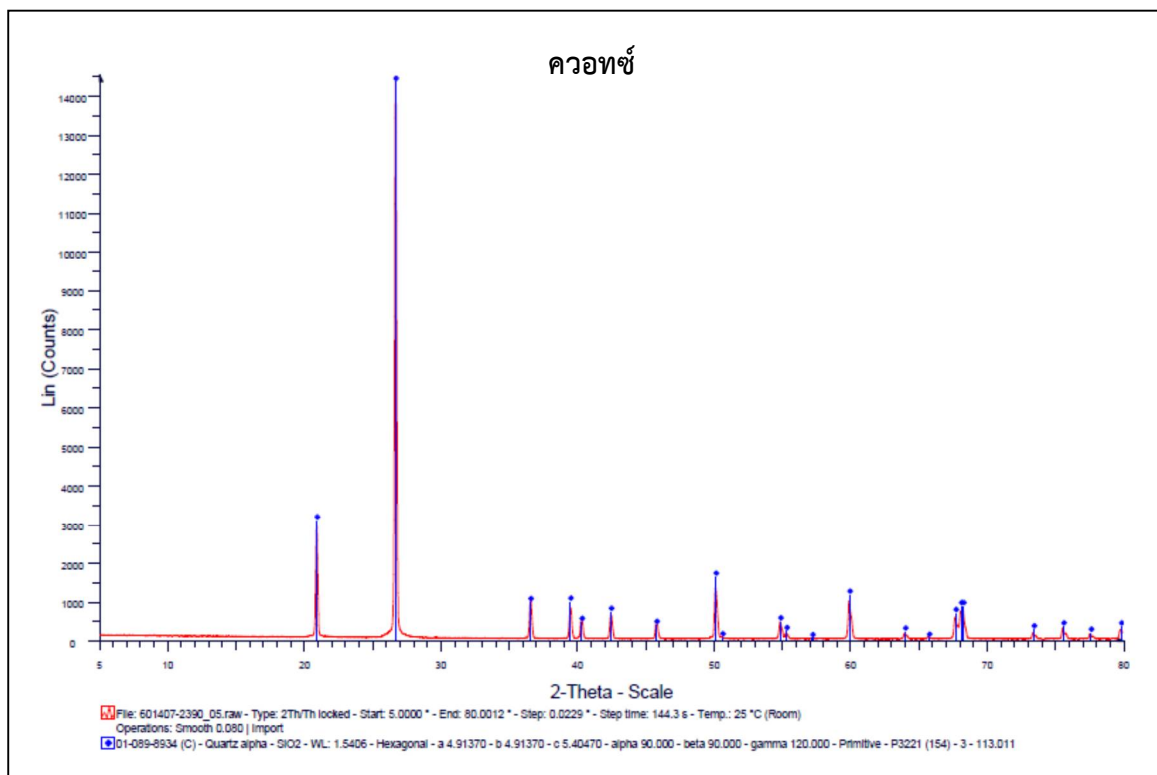
รูปที่ 6 XRD pattern ของดินดำ



รูปที่ 7 XRD pattern ของโปแตสเฟลด์สปาร์



รูปที่ 8 XRD pattern ของโซดาเฟลด์สปาร์



รูปที่ 9 XRD pattern ของควอทซ์

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ของ Former และวัตถุดิบที่ใช้ในการวิจัย

ตัวอย่าง	ชื่อสารประกอบ
ตัวอย่างแบบพิมพ์ (Former sample)	Quartz, Mullite, Corundum
ดินขาว	Kaolinite, Quartz, Muscovite
ดินดำ	Kaolinite, Quartz, Muscovite, Albite
โปแตสเฟลด์สปาร์	Microcline, Quartz alpha, Albite
โซดาเฟลด์สปาร์	Albite, Quartz alpha, Feldspar (Na-component)
ควอทซ์	Quartz alpha

จากผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี และองค์ประกอบทางแร่ของตัวอย่างแบบพิมพ์ เปรียบเทียบกับเนื้อดินสำเร็จรูปและวัตถุดิบ พบว่าตัวอย่างแบบพิมพ์มีปริมาณของ Al_2O_3 สูงถึง 33.46% ซึ่งใกล้เคียงกับดินขาว จึงทำให้เมื่อเผาแล้วได้เฟสความแข็งแรงสูงของ Mullite เป็นองค์ประกอบ จึงคาดว่าเป็นแบบพิมพ์ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิมากกว่า 1300°C เนื้อดินจึงจะสามารถสุกตัวได้ จากข้อมูลดังกล่าว ใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาสูตรการทดลอง จำนวน 12 สูตร โดยแบ่งเป็น 2 กลุ่มทดลอง คือ สูตรเนื้อดิน GFB ซึ่งพัฒนาจากส่วนผสมวัตถุดิบ และ สูตรเนื้อดิน A ที่เป็นส่วนผสมของเนื้อดินสำเร็จรูป ดังรายละเอียดต่อไปนี้

ตารางที่ 4 สูตรทดลองในการพัฒนาเนื้อดินสำหรับทำแบบพิมพ์เซรามิก

ชื่อสูตร	วัตถุดิบ (% โดยน้ำหนัก)							
	ดินขาว	ดินดำ	ควอทซ์	โปแตสเฟลด์สปาร์	โซดาเฟลด์สปาร์	Clay-A	Clay-B	รวม
GFB-02	60	5	10	25	-	-	-	100
GFB-04	50	15	10	25	-	-	-	100
GFB-06	55	5	10	30	-	-	-	100
GFB-09	55	5	15	25	-	-	-	100
GFB-12	50	5	15	30	-	-	-	100
GFB-13	45	8	22	25	-	-	-	100
GFB-14	45	8	22	15	10	-	-	100
GFB-15	38	17	25	20	-	-	-	100
GFB-16	40	18	15	27	-	-	-	100
A95	-	-	-	-	-	95	5	100
A90	-	-	-	-	-	90	10	100
A85	-	-	-	-	-	85	15	100

8.2. การเตรียมน้ำดินและคุณสมบัติของน้ำดิน

จากสูตรดินทดลองทั้ง 12 สูตร ทำการชั่งน้ำหนักและผสมวัตถุดิบตามสูตรทดลอง เตรียมเป็นน้ำดิน โดยทำตรวจวัดและควบคุมคุณสมบัติของน้ำดิน เพื่อให้มีความเหมาะสมกับการขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อ โดยทดสอบสัดส่วนวัตถุดิบแห้งต่อปริมาณของน้ำและสารช่วยกระจายตัว ทดสอบคุณสมบัติของน้ำดินทดลอง (Slip Properties) อันได้แก่ ความหนาแน่นน้ำดิน (g/cm^3) การไหลตัว (วินาที) ผ่านค้ำตะแกรง 325 mesh (%) อัตราการหล่อที่ 30 นาที (มม.) ความหนืดน้ำดิน (cP) และขนาดอนุภาคน้ำดินเฉลี่ย D (μm) ผลการทดสอบเป็นดังตารางที่ 5

เมื่อเปรียบเทียบสมบัติของน้ำดินแล้วนั้น ในกลุ่มของ GFB-02 – GFB-16 พบว่าสูตรดินที่ให้ผลคุณสมบัติที่ดีใกล้เคียงกับสูตรดินอ้างอิง Body-R มากที่สุด คือสูตร GFB-16 ซึ่งเป็นสูตรที่ประกอบด้วย ดินขาว 40% ดินดำ 18% ควอर्थ 15% และ โปแตสเฟลด์สปาร์ 27% เตรียมการบดผสมน้ำดินโดยใช้สัดส่วนน้ำหนักวัตถุดิบแห้งต่อน้ำในปริมาณ 65:35 และใช้สารช่วยกระจายตัวชนิด Deflok 2870 ปริมาณ 0.4% โดยน้ำหนักคุณสมบัติของน้ำดินที่ได้ มีค่าความหนาแน่น $1.68\text{--}1.69 \text{ g/cm}^3$ ค่าการไหลตัว 35 วินาที ค่าความหนืดน้ำดิน 329.7 cP ขนาดอนุภาคน้ำดินเฉลี่ย $13.49 \mu\text{m}$ ซึ่งใกล้เคียงกับดินอ้างอิง Body-R โดยมีค่ามากกว่าเล็กน้อย (ดินอ้างอิง Body-R มีค่าความหนาแน่น 1.67 g/cm^3 ค่าการไหลตัว 26-29 วินาที ค่าความหนืดน้ำดิน 276.9 cP ขนาดอนุภาคน้ำดินเฉลี่ย $9.32 \mu\text{m}$) สำหรับค่าอัตราการหล่อน้ำดินที่ 30 นาทีนั้น พบว่า สูตรทดลอง GFB-16 มีค่าเท่ากับ 4 มม. ซึ่งต่ำกว่าสูตรอ้างอิง Body-R เล็กน้อยที่เท่ากับ 5 มม.

สำหรับการพัฒนาสูตรดินทดลองในกลุ่มของ A85 – A95 ซึ่งใช้ดินสำเร็จรูปนั้น พบว่าสูตรที่ให้ผลการทดลองที่ดีที่สุด คือ สูตรดิน A90 ซึ่งเตรียมได้จากดิน Clay-A 90% ผสมกับ Clay-B 10% ในการเตรียมผสมน้ำดินใช้ปริมาณดินแห้งต่อปริมาณน้ำในสูตรทดลองเท่ากับ 65:35 โดยใช้สารช่วยกระจายตัวคือ สารละลายโซเดียมซิลิเกต 0.1% โดยน้ำหนัก คุณสมบัติของน้ำดินที่ได้ มีค่าความหนาแน่นสูงถึง 1.71 g/cm^3 ค่าการไหลตัวดีมากที่ 22 วินาที ค่าความหนืดน้ำดินเท่ากับ 249.1 cP ขนาดอนุภาคน้ำดินเฉลี่ย $10.36 \mu\text{m}$ และอัตราการหล่อน้ำดินที่ 30 นาที เท่ากับ 6 มม. ซึ่งให้ผลคุณสมบัติต่างๆ ของน้ำดินที่ดีกว่าสูตรดินอ้างอิง (Body-R)

ตารางที่ 5 สัดส่วนวัตถุดิบแห้งต่อน้ำและปริมาณสารช่วยกระจายตัวที่ใช้ในสูตรทดลอง และผลการทดสอบคุณสมบัติของน้ำดินทดลอง (Slip Properties)

ชื่อสูตร ทดลอง	ปริมาณ วัตถุดิบ (%)	ปริมาณ น้ำ (%)	ปริมาณสารช่วย กระจายตัว (%)		ความหนาแน่น น้ำดิน (g/cm ³)	การไหล ตัว (วินาที)	กากค้ำ ตะแกรง 325 mesh (%)	อัตราการ หล่อที่ 30 นาที (มม.)	ความหนืด น้ำดิน (cP)	ขนาดอนุภาค น้ำดินเฉลี่ย D [4,3] (μm)
			Deflok 2870	Sodium Silicate						
GFB-02	64	36	0.37	0.2	1.65 - 1.66	37 - 38	0.88	6	392.4	13.32
GFB-04	64	36	0.37	0.2	1.65	25 - 28	1.03	5	258.1	12.35
GFB-06	65	35	0.37	0.3	1.66 - 1.67	38 - 39	1.09	6	314.7	14.95
GFB-09	64	36	0.37	0.5	1.65	24 - 33	0.81	5.5	285.7	16.20
GFB-12	65	35	0.37	-	1.65 - 1.68	28 - 38	0.71	6	298.7	12.65
GFB-13	65	35	0.37	0.2	1.68	33 - 37	1.58	6	280.6	12.75
GFB-14	65	35	0.37	0.2	1.67 - 1.68	35 - 42	1.98	6	296.3	14.84
GFB-15	65	35	0.4	-	1.68	28	0.46	5	306.3	13.55
GFB-16	65	35	0.4	-	1.68 - 1.69	35	0.46	4	329.7	13.49
A95	65	35	0.1	-	1.71	25	0.94	5	250.0	10.27
A90	65	35	0.1	-	1.71	22	0.85	6	249.1	10.36
A85	65	35	0.1	-	1.71	26	1.10	5	262.1	9.44
Body-R	65	35	-	-	1.67	26 - 29	-	5	276.9	9.32

ตารางที่ 6 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ ทางกล และทางความร้อนของชิ้นงานทดลอง

ชื่อสูตร ทดลอง	การหดตัว หลังอบแห้ง (%)	การหดตัวหลังเผา (%)			ความ แข็งแรงก่อน เผา (MPa)	ความแข็งแรงหลังเผา (MPa)			การดูดซึมน้ำ (%)		
		1250°C	1280°C	1300°C		1250°C	1280°C	1300°C	1250°C	1280°C	1300°C
GFB-02	3.86±0.70	12.07±0.71	12.49±0.31	13.04±0.86	1.98±0.11	21.64±2.54	35.57±2.25	42.06±0.43	7.68±0.17	5.11±0.29	3.25±0.09
GFB-04	1.90±0.22	11.11±0.36	12.00±0.34	12.38±0.53	2.90±0.13	22.75±1.56	37.36±3.94	48.60±1.21	3.95±0.36	0.87±0.46	0.23±0.33
GFB-06	3.01±0.41	11.13±0.98	13.58±0.64	13.59±0.97	1.87±0.22	21.65±1.69	41.32±3.36	49.44±1.81	3.07±0.93	2.32±0.12	0.75±0.27
GFB-09	0.94±0.65	11.27±0.33	12.04±1.44	12.57±1.23	1.34±0.10	22.11±3.70	36.35±4.19	49.63±6.54	4.66±0.44	3.49±0.40	1.81±0.12
GFB-12	4.51±0.59	12.55±2.28	13.08±2.32	12.97±2.37	2.26±0.10	25.15±1.09	55.72±2.75	63.48±2.99	4.40±0.25	0.81±0.39	0.07±0.12
GFB-13	1.23±0.47	10.74±0.44	12.07±0.64	12.77±2.07	2.07±0.09	26.80±2.13	54.37±2.20	75.00±4.22	4.91±0.22	1.66±0.11	0.11±0.10
GFB-14	1.43±0.21	11.07±0.47	12.80±0.28	12.58±0.11	1.98±0.08	24.45±0.09	64.86±2.69	64.50±4.51	3.57±0.56	0.18±0.06	0.05±0.04
GFB-15	3.65±0.99	11.70±0.92	13.46±0.73	14.12±0.45	3.27±0.22	37.73±4.79	62.43±3.59	70.48±4.07	4.21±0.29	0.45±0.22	0.10±0.04
GFB-16	1.48±0.60	11.59±0.45	11.18±0.86	11.38±0.89	3.48±0.20	43.06±1.12	72.55±1.94	62.88±0.97	1.08±0.17	0.18±0.09	0.09±0.08
A95	2.12±0.67	14.43±0.69	13.88±0.64	13.69±0.88	2.31±0.09	90.45±2.28	81.48±2.29	82.53±3.35	0.08±0.03	0.06±0.03	0.03±0.04
A90	3.73±0.97	13.26±1.94	14.14±1.31	12.50±0.40	2.59±0.08	76.73±3.17	82.12±1.73	76.05±3.80	0.07±0.05	0.07±0.07	0.01±0.03
A85	3.89±0.99	13.96±0.43	13.30±0.96	14.40±1.62	2.88±0.13	76.76±0.93	73.56±3.05	74.33±3.19	0.02±0.03	0.00±0.00	0.00±0.00
Body-R	2.91±0.84	14.05±1.57	14.16±1.01	13.29±0.29	2.81±0.29	37.02±0.00	69.29±2.68	68.91±2.31	0.00±0.00	0.10±0.05	0.00±0.00

ตารางที่ 6 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ ทางกล และทางความร้อนของชิ้นงานทดลอง (ต่อ)

ชื่อสูตร ทดลอง	ความพรุนตัว (%)			ความหนาแน่นชิ้นงาน (g/cm ³)			ระยะตกตัว หลังเผา (มม.)	ค่าสัมประสิทธิ์การ ขยายตัวที่ 25-500°C (×10 ⁻⁶ /K)
	1250°C	1280°C	1300°C	1250°C	1280°C	1300°C	1280°C	
GFB-02	15.67 ± 0.30	11.10 ± 0.59	7.26 ± 0.23	2.04 ± 0.01	2.17 ± 0.01	2.24 ± 0.01	-	5.7903
GFB-04	8.81 ± 0.74	1.47 ± 0.68	0.53 ± 0.76	2.23 ± 0.02	2.33 ± 0.00	2.33 ± 0.03	-	5.4533
GFB-06	8.03 ± 0.02	5.26 ± 0.25	1.75 ± 0.64	2.23 ± 0.01	2.27 ± 0.01	2.33 ± 0.00	-	4.4203
GFB-09	10.10 ± 0.87	7.75 ± 0.81	4.13 ± 0.28	2.17 ± 0.02	2.22 ± 0.02	2.29 ± 0.01	-	5.7248
GFB-12	9.68 ± 0.53	1.86 ± 0.88	0.16 ± 0.27	2.20 ± 0.00	2.30 ± 0.01	2.36 ± 0.01	11.50 ± 1.00	5.7241
GFB-13	10.61 ± 0.42	3.79 ± 0.26	0.27 ± 0.24	2.16 ± 0.02	2.28 ± 0.00	2.34 ± 0.01	-	6.5436
GFB-14	8.61 ± 0.69	0.42 ± 0.14	0.11 ± 0.11	2.22 ± 0.01	2.32 ± 0.00	2.35 ± 0.01	11.00 ± 0.00	6.5997
GFB-15	9.25 ± 0.63	1.06 ± 0.50	0.25 ± 0.10	2.16 ± 0.09	2.32 ± 0.01	2.41 ± 0.12	11.83 ± 0.29	6.8443
GFB-16	2.50 ± 0.40	0.42 ± 0.21	0.22 ± 0.20	2.31 ± 0.00	2.32 ± 0.11	2.39 ± 0.00	11.00 ± 1.00	5.8733
A95	0.20±0.07	0.14±0.08	0.07±0.09	2.49±0.01	2.51±0.00	2.51±0.02	14.83±0.76	7.0523
A90	0.17±0.11	0.17±0.18	0.04±0.08	2.47±0.01	2.50±0.00	2.50±0.00	9.83±0.76	7.2377
A85	0.04±0.08	0.00±0.00	0.00±0.00	2.48±0.01	2.49±0.00	2.48±0.00	9.50±0.00	6.9321
Body-R	0.00 ± 0.00	0.25 ± 0.11	0.00 ± 0.00	2.44 ± 0.00	2.45 ± 0.00	2.44 ± 0.01	6.17 ± 0.76	6.9433

8.3. ผลการทดสอบคุณสมบัติเนื้อดินทดลอง

สูตรน้ำดินทดลองสูตรต่างๆ นำมาขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อเป็นชิ้นงานสำหรับการทดสอบคุณสมบัติต่างๆ ของเนื้อดิน โดยขึ้นรูปเป็นแท่งเหลี่ยมขนาด $70 \times 20 \times 10$ มม. ทำการแกะออกจากแบบและขัดแต่งชิ้นงาน นำเข้าอบที่อุณหภูมิ 100°C อย่างน้อย 24 ชั่วโมง ก่อนนำไปเผาที่อุณหภูมิทดลอง 1250 , 1280 และ 1300°C โดยใช้ Heating rate $5^{\circ}\text{C}/\text{นาท}$, Soaking 60 นาที จากนั้นจึงนำไปทดสอบคุณสมบัติต่างๆ ดังนี้ การหดตัวหลังอบแห้ง (%) การหดตัวหลังเผา (%) ความแข็งแรงก่อนเผา (MPa) ความแข็งแรงหลังเผา (MPa) การดูดซึมน้ำ (%) ความพรุนตัว (%) ความหนาแน่นชิ้นงาน (g/cm^3) ระยะตกตัวหลังเผา (มม.) และค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวที่ $25\text{-}500^{\circ}\text{C}$ ($\times 10^{-6}/\text{K}$) ผลการทดสอบเป็นดังตารางที่ 6

การหดตัวของเนื้อดินนั้นมีความสำคัญต่อการออกแบบต้นแบบแบบพิมพ์ ที่เมื่อขึ้นรูปชิ้นงานโดยวิธีการหล่อน้ำดินและเผาที่อุณหภูมิที่ต้องการ จะได้แบบพิมพ์ที่มีขนาดถูกต้องตามกำหนด สูตรดินทดลองทั้งหมด มีค่าการหดตัวหลังอบแห้งอยู่ระหว่าง $1.23\text{-}4.51\%$ และมีการหดตัวหลังเผาที่อุณหภูมิ 1280°C ระหว่าง $11.18\text{-}14.43\%$ ซึ่งใกล้เคียงกับสูตรอ้างอิง Body-R ที่มีค่าเท่ากับ 2.91% และ 14.16% ตามลำดับ โดยสูตรดินทดลองในกลุ่ม GFB นั้น สูตร GFB-15 ให้ค่าการหดตัวหลังอบแห้งและการหดตัวหลังเผาใกล้เคียงกับสูตรอ้างอิง คือเท่ากับ 3.65% และ 13.46% ตามลำดับ และสูตรดินในกลุ่มของสูตรดินผสม A นั้น สูตร A90 จะให้ค่าการหดตัวหลังอบแห้งและการหดตัวหลังเผาใกล้เคียงกับสูตรอ้างอิง คือมีค่าเท่ากับ 3.73% และ 14.14% ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาคุณสมบัติด้านความแข็งแรงของเนื้อดิน พบว่าส่วนใหญ่จะมีค่าที่เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเผาสูงขึ้น สำหรับสูตรดินในกลุ่ม GFB นั้น มีค่าความแข็งแรงก่อนเผาระหว่าง $1.34\text{-}3.48$ MPa โดยสูตรดินทดลอง GFB-16 มีค่าความแข็งแรงก่อนเผาดีที่สุดเท่ากับ 3.48 MPa ซึ่งมากกว่าสูตรดินอ้างอิง Body-R (2.81 MPa) สำหรับค่าความแข็งแรงหลังเผาที่อุณหภูมิเผา 1280°C นั้นมีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง $35.57\text{-}72.55$ MPa โดยสูตรทดลอง GFB-16 ค่าความแข็งแรงที่ดีที่สุด 72.55 MPa และมากกว่าสูตรดินอ้างอิง Body-R (69.29 MPa) แต่สำหรับที่อุณหภูมิเผา 1300°C นั้นค่าความแข็งแรงของสูตรอ้างอิง Body-R จะสูงกว่าเล็กน้อย ซึ่งน่าจะมาจากองค์ประกอบทางเคมีของสูตรอ้างอิงนั้นมีค่า Al_2O_3 สูงกว่า ที่ทำให้เนื้อดินสุกตัวและมีความแข็งแรงสูงกว่าที่อุณหภูมิสูงขึ้น สำหรับสูตรในกลุ่มของสูตรดินผสม A นั้น พบว่ามีความแข็งแรงก่อนเผาระหว่าง $2.31\text{-}2.88$ MPa ซึ่งใกล้เคียงกับสูตรอ้างอิง Body-R (2.81 MPa) และมีค่าความแข็งแรงหลังเผาที่อุณหภูมิ 1280°C อยู่ระหว่าง $73.56\text{-}82.12$ MPa ซึ่งมากกว่าสูตรอ้างอิง Body-R (69.29 MPa) โดยสูตรดินทดลองที่มีความแข็งแรงดีที่สุด คือ สูตร A90

การดูดซึมน้ำและความพรุนตัวของสูตรดินทดลอง มีค่าลดลงตามอุณหภูมิเผาที่เพิ่มขึ้น โดยหลังการเผาที่อุณหภูมิ 1280°C นั้น สูตรอ้างอิง Body-R มีค่าการดูดซึมน้ำที่ 0.1% และค่าความพรุนตัวที่ 0.25% ส่วนสูตรดินทดลองในกลุ่ม GFB นั้น มีค่าการดูดซึมน้ำระหว่าง $0.18\text{-}5.11\%$ และความพรุนตัวระหว่าง $0.42\text{-}11.10\%$ โดยสูตรทดลอง GFB-16 มีการดูดซึมน้ำและความพรุนตัวต่ำที่สุดที่ 0.18% และ 0.42% ตามลำดับ สำหรับสูตรทดลอง A85 – A95 นั้นมีค่าการดูดซึมน้ำและค่าความพรุนตัวที่ต่ำ อยู่ในช่วงระหว่าง $0\text{-}0.07\%$

และ 0-0.17% ตามลำดับ ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมและใกล้เคียงกับสูตรอ้างอิง สำหรับค่าความหนาแน่นนั้น เป็นสมบัติที่ทำการตรวจสอบเพื่อประมาณน้ำหนักของชิ้นงานให้เป็นไปตามคุณสมบัติของแบบพิมพ์ ซึ่งค่าความหนาแน่นของชิ้นงานหลังเผามีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิการเผา โดยที่อุณหภูมิเผา 1280°C ชิ้นงานทดลองทุกสูตรดินมีความหนาแน่นระหว่าง 2.17-2.51 g/cm³ ซึ่งใกล้เคียงกับสูตรอ้างอิงซึ่งมีค่าเท่ากับ 2.45 g/cm³

ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน (CTE) เป็นคุณสมบัติจำเป็นในการพิจารณาความสามารถในการยึดติดของเนื้อดินกับเคลือบ โดยสูตรดินอ้างอิง Body-R มีค่า CTE ในช่วงอุณหภูมิ 25-500°C เท่ากับ $6.9433 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ โดยสูตรดินทดลองในกลุ่ม GFB นั้น มีค่า CTE อยู่ระหว่าง $4.4203 - 6.8443 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ และสูตรดินทดลองในกลุ่มดินสำเร็จรูป A อยู่ระหว่าง $6.9321 - 7.2377 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ซึ่งสูตรดินทดลองทั้งสองกลุ่มที่ให้ผลค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนใกล้เคียงกับสูตรดินอ้างอิงมากที่สุดได้แก่สูตร GFB-15 และ A85 ตามลำดับ

สำหรับคุณสมบัติระยะตกตัวนั้น ทำการตรวจสอบเฉพาะสูตรดินทดลองที่มีคุณสมบัติเหมาะสมที่จะนำไปใช้ในการทดลองขึ้นรูปเป็นแบบพิมพ์ โดยระยะการตกตัวหลังเผาที่ 1280°C ของสูตรดินทดลองมีค่าระหว่าง 9.50-11.83 มม. ซึ่งสูงกว่าสูตรดินอ้างอิง Body-R ที่มีค่าเท่ากับ 6.17 มม.

จากผลการทดสอบคุณสมบัติของสูตรดินทดลองเปรียบเทียบกับสูตรอ้างอิง Body-R นั้น คณะวิจัยจึงได้เลือกนำสูตรดินทดลอง GFB-16 และสูตรดินทดลอง A90 ไปทดลองทำเป็นต้นแบบแบบพิมพ์เซรามิก (Glove Former) โดยเป็นสูตรทดลองที่สามารถเตรียมน้ำดินได้ง่าย และให้ผลคุณสมบัติหลังเผาที่ 1280°C ใกล้เคียงกับสูตรดินอ้างอิง

8.4. การพัฒนาต้นแบบแบบพิมพ์เซรามิกขึ้นรูปถุงมือยาง

ดำเนินการออกแบบแบบพิมพ์สำหรับถุงมือยางทั่วไป 3 ขนาด คือ ขนาดกลาง (Size M) ขนาดใหญ่ (Size L) และขนาดใหญ่พิเศษ (Size XL) เพื่อจัดทำเป็น Case Mold และ Working Mold เพื่อให้สามารถขึ้นรูปแบบพิมพ์เซรามิกขึ้นรูปถุงมือยางได้ ทำการขึ้นรูปแบบพิมพ์โดยวิธีการหล่อแบบจากสูตรดินทดลองทั้งสองสูตร (GFB-16 และ A90) เพื่อเปรียบเทียบกับสูตรดินอ้างอิง Body-R โดยนำดินสูตรทดลอง GFB-16 จะค่อนข้างขึ้นรูปชิ้นงานได้ยาก และชิ้นงานออกจากโมลด์ได้ช้า และให้ผิวชิ้นงานหล่อที่ค่อนข้างหยาบ จึงได้ทำการปรับสูตรดินโดยเพิ่มปริมาณดินเหนียว (Ball clay) อีกประมาณ 3% และทำการบดน้ำดินในหม้อบด (Ball mill) ให้นานขึ้น เพื่อเพิ่มความละเอียดของน้ำดินหล่อ ให้ทำการหล่อขึ้นรูปชิ้นงานได้ดีขึ้น ชิ้นงานแบบพิมพ์เซรามิกจากสูตรดินอ้างอิงและสูตรดินทดลองทั้ง 3 สูตร (Body-R, GFB-16, A90) ทั้ง 3 ขนาด (M, L, XL) ที่ขึ้นรูปเป็นต้นแบบระดับห้องปฏิบัติการ หลังการเผาที่อุณหภูมิ 1280°C แสดงดังรูปที่ 10-12



รูปที่ 10 แบบพิมพ์เซรามิกสูตรดินอ้างอิง Body-R ขนาด M, L และ XL (ตามลำดับจากซ้ายไปขวา)



รูปที่ 11 แบบพิมพ์เซรามิกสูตรดินทดลอง GFB-16 ขนาด M, L และ XL (ตามลำดับจากซ้ายไปขวา)



รูปที่ 12 แบบพิมพ์เซรามิกสูตรดินทดลอง A90 ขนาด M, L และ XL (ตามลำดับจากซ้ายไปขวา)

8.5. ผลการทดสอบคุณสมบัติต้นแบบแบบพิมพ์เซรามิกขึ้นรูปถุงมือยาง

การทดสอบคุณสมบัติต้นแบบแบบพิมพ์เซรามิก อ้างอิงตามการทดสอบของโรงงานผู้ผลิตถุงมือยาง ที่มีวิธีการทดสอบแบบพิมพ์ที่สั่งซื้อเข้ามาก่อนนำไปใช้งาน เป็นวิธีการทดสอบที่พัฒนาขึ้น (In-house Testing) โดยวิธีการทดสอบมีรายละเอียด ดังต่อไปนี้

1) การทดสอบความทนทานต่อการเปลี่ยนอุณหภูมิเฉียบพลัน (Thermal Shock Resistance)

ทำการทดสอบโดยนำแบบพิมพ์เซรามิกเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 180°C เป็นเวลา 1 ชม. จากนั้นนำออกมาจุ่มลงในน้ำที่อุณหภูมิห้องทันที ยกชิ้นงานขึ้นตรวจสอบดูรอยแตกร้าว สังเกตด้วยตาเปล่า และการเคาะ ฟังเสียงที่ผิดปกติด้วยไม้บรรทัด รายงานผลรอบที่พบรอยแตกร้าวของชิ้นงานทดสอบ ทำซ้ำตามวิธีการเดิมจนครบ 10 รอบ หากไม่พบรอยแตกร้าวถือว่าผ่านการทดสอบ

ตารางที่ 7 ผลการทดสอบความทนทานต่อการเปลี่ยนอุณหภูมิเฉียบพลัน (Thermal Shock Resistance) ของชิ้นงานแบบพิมพ์เซรามิกทั้ง 3 สูตร

สูตรดิน	ผลทดสอบ	หมายเหตุ
Body-R	ผ่าน (10 รอบ ไม่แตกร้าว)	ทำการทดสอบ 2 ครั้ง ที่โรงงานผลิตถุงมือยาง
GFB-16	ผ่าน (10 รอบ ไม่แตกร้าว)	
A90	ผ่าน (10 รอบ ไม่แตกร้าว)	

2) การทดสอบความทนต่าง (Alkaline Resistance)

ทำการตรวจสอบลักษณะของผิวชิ้นงานว่ามีลักษณะผิวเรียบ ไม่มีรอยแตกร้าวหรือสีกร่อน ก่อนนำไปแช่ในสารละลายต่าง โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ที่ความเข้มข้น $20 \pm 1\%$ โดยควบคุมอุณหภูมิสารละลายที่ $70 \pm 2^\circ\text{C}$ แล้วนำชิ้นมาตรวจสอบดูลักษณะการสีกร่อนของผิวชิ้นงานทุกวัน นำชิ้นงานไปทดลองจุ่มในน้ำยาง แล้วนำแผ่นยางที่ได้มาตรวจสอบดูรอยร้าว บันทึกเวลารวมทั้งหมดที่แช่ชิ้นงานในสารละลายต่าง (ชั่วโมง) ก่อนจะเห็นว่าผิวชิ้นงานเริ่มสีกร่อน และแผ่นยางที่ทดลองจุ่มมีรอยร้าวเกิดขึ้น

ตารางที่ 8 ผลการทดสอบความทนต่าง (Alkaline Resistance) ของชิ้นงานแบบพิมพ์เซรามิกทั้ง 3 สูตร

สูตรทดลอง	ระยะเวลาแช่ในสารละลายต่าง KOH 20%, 70°C จนกระทั่งพบผิวชิ้นงานเสีย (ชั่วโมง)	
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2
Body-R	392	369
GFB-16	*	268
A90	175	280

หมายเหตุ 1. ทำการทดสอบ 2 ครั้ง ที่โรงงานผลิตถุงมือยาง
2. ในการทดสอบครั้งแรก ชิ้นงานสูตร GFB-16 ตรวจพบรอยแตกที่ง่ามนิ้วโป้ง จึงไม่ทำการทดสอบ

9. วิเคราะห์และสรุปผลการทดสอบ

ผลการทดสอบชิ้นงานต้นแบบแบบพิมพ์เซรามิกขึ้นรูปถุงมือยางโดยวิธีการจุ่มในระดับห้องปฏิบัติการแสดงให้เห็นว่า สามารถใช้สูตรดินทดลองทั้งสองสูตร GFB-16 และ A90 เป็นสูตรดินสำหรับการผลิตแบบพิมพ์เซรามิกขึ้นรูปถุงมือยางโดยวิธีการจุ่มได้ โดยคุณสมบัติของแบบพิมพ์หลังผ่านการทดสอบที่จำเป็นต่อการนำไปใช้งานในอุตสาหกรรมผลิตถุงมือยาง ได้แก่ ความทนทานต่อการเปลี่ยนอุณหภูมิเฉียบพลัน (Thermal Shock Resistance) และความทนต่างของผิวชิ้นงาน (Alkaline Resistance) โดยเนื้อดินสูตรทดลองทั้งสองสูตรมีความสามารถในการทนต่างได้น้อยกว่าเนื้อดินสูตรอ้างอิง Body-R

สำหรับความสามารถในการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยวิธีการหล่อในแม่พิมพ์ปูนปลาสเตอร์นั้น พบว่าการเตรียมน้ำดินหล่อสูตร GFB-16 จะทำได้ยากกว่าน้ำดินสูตร A90 เล็กน้อย เนื่องจากต้องทำการบดผสมวัตถุดิบหลายชนิดเข้าด้วยกัน และใช้เวลาในการบดค่อนข้างนาน จึงได้น้ำดินที่มีการไหลตัวที่ดีและเหมาะสมต่อการเทลงในแม่พิมพ์เพื่อทำการหล่อขึ้นรูป รวมถึงเวลาที่ใช้ในการหล่อของน้ำดินสูตรทดลอง GFB-16 จะใช้เวลานานกว่าสูตร A90 จึงจะสามารถแกะชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ปูนปลาสเตอร์ได้ ดังนั้นจากผลการเตรียมน้ำดินหล่อและการใช้งานน้ำดิน คณะวิจัยจึงได้พิจารณาเลือกสูตรน้ำดิน A90 เป็นสูตรต้นแบบแบบพิมพ์เซรามิกสำหรับขึ้นรูปถุงมือยางแบบจุ่มในระดับห้องปฏิบัติการ ซึ่งสามารถทำได้จากการใช้ดินผสม Clay-A 90% Clay-B

10% มีสมบัติการหดตัวหลังเผาที่ 1280°C 14.14% การดูดซึมน้ำ 0.07% ความทนต่อแรงดัด 82.12 MPa การตกตัว 9.83 มม. และทนต่อการเปลี่ยนอุณหภูมิฉับพลันในช่วง 20-180°C ได้มากกว่า 10 รอบ และมีความทนต่าง KOH 20% ที่ 70°C ได้ไม่น้อยกว่า 280 ชั่วโมง

10. ข้อสรุปเกี่ยวกับสมรรถภาพของต้นแบบ

สูตรดินทดลองที่เหมาะสมในการพัฒนาเป็นต้นแบบแบบพิมพ์เซรามิกขึ้นรูปถွ่งมือโดยวิธีการจุ่ม สูตร GFB-16 มีส่วนผสมดังต่อไปนี้ โปแตสเฟลด์สปาร์ 27% ควอทซ์ 15% ดินขาว 40% และดินดำ 18% โดยน้ำหนักของส่วนผสมทั้งหมด และสูตรดินสำเร็จรูป A90 ที่มีส่วนผสม Clay-A 90% และ Clay-B 10% โดยน้ำหนักของส่วนผสมทั้งหมด นอกจากนี้ยังใช้สาร Deflok 2870 เป็นสารช่วยกระจายตัวเพิ่มเติมในปริมาณ 0.1-0.4% ของน้ำหนักรวมในสูตร ที่เมื่อทำการทดสอบคุณสมบัติของต้นแบบแล้วนั้น พบว่าชิ้นงานต้นแบบมีคุณสมบัติสำคัญที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้งานในกระบวนการผลิตของโรงงานผลิตถွ่งมืออย่างได้จริง โดยผ่านตามเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ทั้งในด้านขนาดและน้ำหนักของชิ้นงานหลังเผา ความทนทานต่อการเปลี่ยนอุณหภูมิฉับพลัน (Thermal Shock Resistance) และความสามารถในการทนต่าง (Alkaline Resistance) โดยชิ้นงานต้นแบบจะมีค่าความทนต่างที่น้อยกว่าแบบพิมพ์ทางการค้า ซึ่งอาจทำให้อายุการใช้งานของแบบพิมพ์ในกระบวนการผลิตถွ่งมือสั้นกว่าเล็กน้อย

11. ทรรศนะทางปัญญา

-

12. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ผู้สนับสนุนงบประมาณในการทำวิจัย บริษัท วัฒนชัยรับเบอร์เมท จำกัด เอื้อเฟื้อข้อมูลและให้ความอนุเคราะห์การทดสอบที่เกี่ยวข้อง และศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ ผู้ให้การสนับสนุนเครื่องมือในการดำเนินงาน

13. บรรณานุกรม

- 1) สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม. (2558) รายงานสรุปภาวะเศรษฐกิจอุตสาหกรรมปี 2558 และแนวโน้มปี 2559. กระทรวงอุตสาหกรรม.
- 2) สถิติยางไทย. สถาบันวิจัยยาง การยางแห่งประเทศไทย. สืบค้น 6 ธันวาคม 2559 จาก http://www.rubberthai.com/statistic/stat_index.htm
- 3) Thailand Board of Investment. (2016) Thailand: The World's Leader in Natural Rubber Production. August 2016 vol. 26 no. 8
- 4) สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม. (2559) รายงานการศึกษาเชิงลึก เรื่อง อนาคตถွ่งมือยางไทยในตลาดโลก. กระทรวงอุตสาหกรรม.

5) Global Market Insights Inc. (2016) **Industrial Safety Gloves Market Size By Material**. September 2016

6) ทนงศักดิ์ วัฒนา และ ศุภัสชกรณ์ หลิมเฮงฮะ. **เทคโนโลยีการผลิตถุงมือยางทางการแพทย์ (Medical Latex Glove)**. วารสารส่งเสริมเทคโนโลยี. ฉบับที่ 249. มิถุนายน-กรกฎาคม 2554, 67-72.

7) ทวี พรหมพฤกษ์. (2523) **เครื่องเคลือบดินเผาเบื้องต้น**. กรุงเทพฯ: โอเดียนสโตร์.

8) Felix Singer, Sonja S. Singer. (1963). **Industrial ceramics**. Chemical Publishing Co.

9) Harabi, A., Guerfa, F., Harabi, E., Benhassine, M. T., Foughali, L., & Zaiou, S. (2016). **Preparation and characterization of new dental porcelains, using K-feldspar and quartz raw materials. Effect of B₂O₃ additions on sintering and mechanical properties**. Materials Science and Engineering: C, 65, 33-42.

10) Turkmen, O., Kucuk, A., & Akpinar, S. (2015). **Effect of wollastonite addition on sintering of hard porcelain**. Ceramics International, 41(4), 5505-5512.

11) Sahlaoui, H., Makhlouf, K., & Sidhom, H. (2013). **Comparative Study of the Thermal Shock Resistance of an Industrial Tableware Porcelain**. Journal of Engineering, 2013.

12) Tucci, A., Esposito, L., Malmusi, L., & Rambaldi, E. (2007). **New body mixes for porcelain stoneware tiles with improved mechanical characteristics**. Journal of the European Ceramic Society, 27(2), 1875-1881.

ภาคผนวก ก.

รายงานเชิงเทคนิคประกอบต้นแบบ

- 2) ต้นแบบห้องปฏิบัติการสูตรเคลือบพอร์ซเลนสำหรับทำแบบพิมพ์ขึ้นรูปถลุงมือ
อย่าง โดยวิธีการจุ่ม

รายงานเชิงเทคนิค
ประกอบต้นแบบการวิจัย พัฒนาและวิศวกรรม
(ต้นแบบห้องปฏิบัติการ)

ชื่อผลิตภัณฑ์ต้นแบบ: สูตรเคลือบสำหรับแบบพิมพ์เซรามิกขึ้นรูปถุงมือยางโดยวิธีการจุ่ม
ชื่อโครงการ: การพัฒนาเนื้อดินและเคลือบสำหรับทำแบบพิมพ์เซรามิกขึ้นรูปถุงมือยาง
โดยวิธีการจุ่มในระดับอุตสาหกรรม

คณะผู้วิจัย

1. ดร.อนุชา วรรณก้อง
2. นางวัชรีย์ สอนลา
3. น.ส. ภัทรวรรณ เอยะเจริญ
4. นายปริญญ์ สมร่วง

หน่วยงานที่สังกัด

ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ

สนับสนุนทุนวิจัยโดย

สนับสนุนโดยสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.)

และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)

รายงานเชิงเทคนิค

ต้นแบบสูตรเคลือบสำหรับแบบพิมพ์เซรามิกขึ้นรูปถွ่มมืออย่างโดยวิธีการจุ่ม

1. บทคัดย่อ

ต้นแบบสูตรเคลือบสำหรับแบบพิมพ์เซรามิกขึ้นรูปถွ่มมืออย่างโดยวิธีการจุ่ม เป็นต้นแบบที่พัฒนาขึ้นเพื่อใช้กับแบบพิมพ์เซรามิกสำหรับขึ้นรูปถွ่มมืออย่าง โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้แบบพิมพ์เซรามิกมีความทนต่อการกัดต่างมากขึ้น เนื่องจากในกระบวนการผลิตถွ่มมืออย่างโดยวิธีการจุ่ม แบบพิมพ์ที่ใช้ต้องสัมผัสกับน้ำยา และสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการผลิต การผลิตแบบพิมพ์เซรามิกแบบมีเคลือบจะสามารถเพิ่มความทนทานต่อการกัดกร่อนของน้ำยาและสารเคมีได้ดีขึ้น โดยในงานวิจัยนี้จะพัฒนาเคลือบพื้นฐานที่เหมาะสมสำหรับเนื้อดินพอร์ซเลนที่พัฒนาขึ้น เผาที่อุณหภูมิ 1280°C เพื่อเป็นทางเลือกให้กับอุตสาหกรรม โดยส่วนผสมในสูตรเคลือบประกอบด้วยโปแตสเซิลด์สปาร์ 32-35% ควอทซ์ 30-35% ดินขาว 20-25% หินปูน 8-15% ทัลคัม 0-8% และซิงค์ออกไซด์ 0-2% โดยน้ำหนัก ทั้งนี้จะเปรียบเทียบกับคุณสมบัติเบื้องต้นกับเคลือบใสสำหรับเนื้อดินพอร์ซเลนที่จำหน่ายในท้องตลาดทั่วไป ได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของชิ้นงานที่อุณหภูมิ 25-500°C (Coefficient of Thermal Expansion, CTE) พบว่าต้นแบบสูตรเคลือบมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนอยู่ระหว่าง $7.79-8.85 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำกว่าสูตรเคลือบทางการค้าที่นำมาใช้อ้างอิงเล็กน้อย ($10.32 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$) และเมื่อเปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของเนื้อดินพอร์ซเลนที่พัฒนาขึ้น พบว่าเนื้อดินมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวอยู่ระหว่าง $5.87-7.24 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับสูตรเคลือบทดลองมากกว่าสูตรเคลือบทางการค้า และจากผลการทดสอบความทนทานต่อสารละลายต่าง KOH พบว่าสูตรเนื้อดินที่เคลือบผิวด้วยสูตรเคลือบต้นแบบ หลังเผาจะเพิ่มความทนทานต่อการกัดกร่อนได้ดีขึ้น จากเดิมชิ้นงานที่ไม่มีเคลือบทนได้ 144 ชั่วโมง เพิ่มขึ้นเป็น 712-808 ชั่วโมงในชิ้นงานที่เคลือบด้วยสูตรเคลือบต้นแบบ ดังนั้นต้นแบบสูตรเคลือบที่ได้จึงมีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้ในการผลิตเป็นต้นแบบแบบพิมพ์เซรามิกสำหรับใช้ขึ้นรูปถွ่มมืออย่างโดยวิธีการจุ่มต่อไป

2. บทนำ

จากการสอบถามรวบรวมข้อมูลและจากการสอบถามผู้ประกอบการ พบว่าแบบพิมพ์เซรามิกชนิดมีเคลือบสำหรับใช้ในการขึ้นรูปถွ่มมือนั้น จะใช้ในกระบวนการผลิตถွ่มมือชนิดที่มีแป้ง เพื่อป้องกันการติดผิวระหว่างถွ่มมืออย่างกับแบบพิมพ์ แต่ปัจจุบันในกระบวนการผลิตจะใช้แคลเซียมสเตียเรตแทนแป้ง และสามารถใส่แบบพิมพ์เซรามิกที่ไม่ต้องเคลือบเลยก็ได้ ถึงแม้ว่าแบบพิมพ์เซรามิกแบบเคลือบจะมีความทนต่างได้ดีกว่า แต่ก็จะมีต้นทุนที่สูงกว่า ปัจจุบันจึงไม่เป็นที่นิยมใช้แล้ว อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้จะทำการพัฒนาสูตรเคลือบสำหรับแบบพิมพ์เซรามิกที่ใช้ในการขึ้นรูปถွ่มมืออย่างด้วย เพื่อเป็นทางเลือกให้กับผู้ประกอบการในกรณีที่ต้องการความจำเป็นต้องใช้ในกระบวนการผลิต โดยจะทำการพัฒนาสูตรเคลือบพื้นฐานชนิดเคลือบใส ที่เหมาะสมสำหรับเนื้อดินพอร์ซเลนที่พัฒนาขึ้น เผาที่อุณหภูมิ 1280°C ทดลองใช้งานและเปรียบเทียบกับสูตรเคลือบสำเร็จที่มีจำหน่ายในท้องตลาดทั่วไป

3. วัตถุประสงค์

- 1) เพื่อพัฒนาสูตรเคลือบพื้นฐานที่เหมาะสมสำหรับเนื้อดินพอร์ซเลนที่พัฒนาขึ้น เป็นทางเลือกสำหรับนำไปใช้ผลิตเป็นแบบพิมพ์เซรามิกขึ้นรูปถุงมือยางโดยวิธีการจุ่ม
- 2) เพื่อพัฒนาต้นแบบแบบพิมพ์เซรามิกขึ้นรูปถุงมือยางโดยวิธีการจุ่มในระดับห้องปฏิบัติการ ทั้งแบบมีเคลือบและไม่มีเคลือบ

4. สรุปสถานภาพของงานที่ทำจนถึงปัจจุบัน

ได้ต้นแบบสูตรเคลือบใสสำหรับแบบพิมพ์เซรามิกขึ้นรูปถุงมือยางโดยวิธีการจุ่ม โดยมีส่วนผสมในสูตรเคลือบ ประกอบด้วยโปแตสเฟลด์สปาร์ 32-35% ควอทซ์ 30-35% ดินขาว 20-25% หินปูน 8-15% ทัลคัม 0-8% และซิงค์ออกไซด์ 0-2% โดยต้นแบบสูตรเคลือบที่ได้มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของชิ้นงานที่อุณหภูมิ 25-500°C (Coefficient of Thermal Expansion, CTE) อยู่ระหว่าง $7.79-8.85 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ซึ่งใกล้เคียงกับค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของเนื้อดินพอร์ซเลนที่พัฒนาขึ้น (ระหว่าง $5.87-7.24 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$) ต้นแบบสูตรเคลือบช่วยให้เนื้อดินมีความทนทานต่อสารละลายต่าง KOH ได้มากขึ้น จากเดิมเนื้อดินที่ไม่มีเคลือบทนได้ 144 ชั่วโมง เพิ่มขึ้นเป็น 712-808 ชั่วโมง เมื่อมีการเคลือบขึ้นทดสอบด้วยสูตรเคลือบต้นแบบดังกล่าว และเมื่อนำไปทดลองใช้จริงกับต้นแบบแบบพิมพ์เซรามิกสำหรับขึ้นรูปถุงมือยางจำนวน 40 ชิ้น พบว่าสามารถใช้งานได้ดี ไม่มีปัญหาการแตกร้าว จึงเป็นทางเลือกให้กับผู้ประกอบการในการนำไปใช้ผลิตเป็นต้นแบบแบบพิมพ์เซรามิกชนิดมีเคลือบสำหรับใช้ในการขึ้นรูปถุงมือยางโดยวิธีการจุ่มต่อไป

5. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

เคลือบ คือ ชั้นบางๆ ของแก้วที่ฉาบอยู่บนผิวผลิตภัณฑ์เซรามิกอย่างต่อเนื่อง โดยทั่วไปแล้วเตรียมได้จากการหลอมส่วนผสมของสารประกอบซิลิเกต มีลักษณะโปร่งใส แข็งแกร่ง ทนต่อการดัดและต่างได้เป็นอย่างดี โดยทั่วไปแล้วเคลือบมีคุณสมบัติทางฟิสิกส์และเคมีคล้ายแก้ว คือ มีความแข็ง ไม่ละลายหรือละลายได้น้อยมากในสารละลายเคมี นอกจากกรดกัดแก้ว (HF) และด่างแก่ (Strong base) และไม่ยอมให้ของเหลวและก๊าซซึมผ่านได้ แต่เคลือบจะมีส่วนประกอบทางเคมีซับซ้อนกว่าแก้ว เคลือบที่พบเห็นโดยทั่วไปจะมีความมันวาวและสะท้อนแสงได้ สามารถมองเห็นเนื้อดินที่เคลือบ เคลือบชนิดนี้เรียกว่า เคลือบใส (Transparent or clear glaze) แต่ถ้าผิวไม่มัน เรียกว่าเคลือบด้าน (Matt glaze) ส่วนเคลือบที่สามารถปิดบังผิวของเนื้อดินได้เรียกเคลือบชนิดนี้ว่า เคลือบทึบ (Opaque glaze) จะมีสีหรือไม่สีก็ได้ขึ้นอยู่กับส่วนผสมของเคลือบ

โดยทั่วไปสามารถจำแนกชนิดของเคลือบตามลักษณะของเคลือบ (Characteristic) คือ

1. **เคลือบใส (Transparent or Clear glaze)** เป็นเคลือบที่มีลักษณะใสเหมือนแก้ว
2. **เคลือบทึบ (Opaque glaze)** เป็นเคลือบที่ใช้ปิดบังผิวของเนื้อดินที่มีสีหรือสีไม่ขาว
3. **เคลือบสี (Colored glaze)** เคลือบที่มีสีต่างๆ เตรียมได้จากการผสมสีผงเซรามิก (สีสะเตน) หรือออกไซด์ที่ให้สี (Coloring Oxide) เข้าไปในส่วนผสมของเคลือบ

4. **เคลือบด้าน (Matt glaze)** เป็นเคลือบที่มีลักษณะผิวเรียบไม่มัน เนื่องจากการตกผลึกเล็กๆ ของสารบางตัว หรือการที่สารบางตัวไม่ละลายหรือละลายไม่หมด
5. **เคลือบราน (Crackle glaze)** เป็นเคลือบที่มีรอยแตกรานทั่วทั้งผิวของเคลือบ มักนิยมใช้หมึกสีดำหรือแดงทำให้แทรกซึมลงไปตามรอยแตก ทำให้สวยงามมากขึ้น แต่ไม่เหมาะที่จะใช้เป็นภาชนะใส่อาหาร เพราะการทำความสะอาดอาจไม่ทั่วถึง
6. **เคลือบผลึก (Crystalline glaze)** เป็นเคลือบที่มีผลึกลอยอยู่ในชั้นของเคลือบ อาจเป็นผลึกรูปเข็ม รูปพัด หรือเป็นดอกดวง ซึ่งจะต้องเผาให้เย็นตัวช้ากว่าปกติผลึกที่มีลักษณะเป็นดอก คล้ายรูปพัดเกิดจากผลึกของวิลเลมไมต์ (willemite)
7. **เคลือบประกายมุก (Luster glaze)** เป็นเคลือบที่มีผิวมัน แวววาวมาก มีประกายคล้ายหอยมุก เมื่อใส่สารให้สี (Coloring oxide) จะได้เคลือบสีที่ลักษณะเฉพาะตัวสวยงามมาก เหมาะสำหรับใช้ตกแต่งผลิตภัณฑ์พวกเครื่องประดับตกแต่ง ไม่เหมาะกับผลิตภัณฑ์ใช้ใส่อาหารเพราะมักมีส่วนผสมของตะกั่ว

Habib Sahlaoui และคณะวิจัย (2013) ได้ศึกษาผลกระทบของชั้นผิวเคลือบและสภาวะในการเผา (อุณหภูมิและระยะเวลาในการเผา) ที่มีต่อพฤติกรรมในการเกิด Thermal shock ของเครื่องใช้บนโต๊ะอาหาร พอร์ซเลน โดยใช้เนื้อดินพอร์ซเลนจากโรงงานทั่วไปที่ประกอบด้วยดินเกาลิน 50 wt.%, ควอทซ์ 25 wt.% และเฟลด์สปาร์ 25 wt.% ทำการเปรียบเทียบโดยใช้เนื้อดินเดียวกันแต่ใช้เคลือบ 2 ชนิด ที่มีองค์ประกอบต่างกัน และทำการเผาที่สภาวะต่างกัน 3 สภาวะได้แก่ 1) เผาที่อุณหภูมิ 1340°C เป็นเวลา 25 ชั่วโมงในเตาแบบ Tunnel 2) เผาที่อุณหภูมิ 1360°C เป็นเวลา 7.5 ชั่วโมง โดยใช้เตาแบบ Fast-firing ที่มีความยาว 36 เมตร และ 3) เผาที่อุณหภูมิ 1370°C เป็นเวลา 7.5 ชั่วโมง โดยใช้เตาแบบ Fast-firing ที่มีความยาว 60 เมตร เปรียบเทียบคุณสมบัติทางกลของทั้ง 6 ตัวอย่าง จากการวัดค่า 3-point Bending, Thermal Shock Cycle และ ลักษณะการเกิดรอยแตกร้าว (Cracks Characterization) ทั้งจำนวนรอยแตกร้าว และความยาวของรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้น ผลที่ได้พบว่าชั้นตัวอย่างสามารถทนต่อการเกิด Thermal Shock ได้ดีที่ความแตกต่างของอุณหภูมิ (ΔT) เท่ากับ 180°C และเริ่มสังเกตเห็นรอยแตกร้าวที่ ΔT เท่ากับ 230°C โดยเคลือบทั้งสองชนิดที่ศึกษานั้นให้ผลที่คล้ายกัน โดยพบว่าชั้นเคลือบที่มีปริมาณอลูมินาต่อซิลิกาในสัดส่วนที่สูงกว่านั้น จะมีความสามารถทนทานต่อการเกิด Thermal Shock ได้มากกว่า และการเผาแบบช้าๆ ที่อุณหภูมิต่ำ (ในสภาวะการเผาที่ 1) นั้น จะส่งผลดีต่อความต้านทานในการเกิด Thermal Shock ของเนื้อพอร์ซเลนได้ดีกว่า แต่อย่างไรก็ตามการเผาที่เร็วกว่าและใช้อุณหภูมิสูงแตกต่างกันเล็กน้อยในสภาวะที่ 2 และ 3 นั้น ไม่ได้ส่งผลกระทบต่อการลดความต้านทานต่อการเกิด Thermal Shock ของชิ้นงานมากนัก

Janusz Partyka and Jerzy Lis (2012) ได้ศึกษาเกี่ยวกับขนาดอนุภาค (Grain Size) ของวัตถุดิบที่มีผลต่อความทนทานต่อการกัดกร่อนสารเคมี โดยใช้กับเนื้อดินสุกัณฑ์เผาที่อุณหภูมิ 1230°C แล้วนำขึ้นทดสอบที่ได้ไปแช่ในสารละลายกรด HCL ที่ pH = 1.8 สารละลายด่าง NaOH ที่ pH = 13.5 และในน้ำยาทำความสะอาดสุขภัณฑ์ตามท้องตลาดทั่วไป (pH = 9.5) โดยควบคุมอุณหภูมิที่ 40°C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง จากนั้นทำการตรวจสอบค่าความมันวาวของผิวเคลือบ ค่าความเรียบของผิวเคลือบ และตรวจสอบลักษณะผิว

เคลือบที่ได้จากค่าความละเอียดของอนุภาคที่แตกต่างกันเปรียบเทียบก่อนและหลังการทดสอบโดยใช้กล้อง OM รวมทั้งตรวจสอบน้ำหนักที่หายไปของผิวเคลือบหลังแช่ขึ้นทดสอบไว้ในสารละลายที่อุณหภูมิ 40°C เป็นเวลา 240 ชั่วโมง จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่า การแยกบดวัตถุดิบประเภท Hard Materials และเลือกใช้ขนาดความละเอียดที่เหมาะสม ก่อนนำไปผสมกับวัตถุดิบประเภท Soft Materials ที่แยกบดมาเช่นกัน จะช่วยให้สูตรเคลือบมีลักษณะผิวเคลือบที่ดีขึ้นและทนต่อการกัดกร่อนสารเคมีทั้งกรดและด่างได้ดีขึ้น ซึ่งช่วงความละเอียดที่เหมาะสมของวัตถุดิบจะต้องมีการศึกษาต่อไป

Linda Froberg and et al., (2009) ได้ศึกษาความทนต่อสารเคมีของเคลือบด้านที่มีผลึกแตกต่างกัน ได้แก่ Diopside, Plagioclase, Anorthite, Wollastonite และ Pseudowollastonite โดยเคลือบถูกเผาอย่างรวดเร็วจนในเตาเผาอุตสาหกรรมและเผาแบบปกติในเตาเผาห้องปฏิบัติการ โดยทดลองจุ่มเคลือบในของเหลวที่ต่างกัน ได้แก่ น้ำบริสุทธิ์ (pH 5.7) สารละลายกรดซิตริก (pH 1.5) สารละลายกรด HCl (pH 2.9) น้ำยาทำความสะอาด (pH 9.1) และสารละลาย KOH (pH 13.4) แล้วทำการตรวจสอบลักษณะผิวเคลือบที่เปลี่ยนไปโดยใช้กล้อง SEM และ Confocal Microscopy นอกจากนี้ยังทำการตรวจสอบความเข้มข้นของไอออนที่เปลี่ยนแปลงของกรด HCl ด้วยเทคนิค ICP-AES จากผลการทดลองสรุปได้ว่าเคลือบที่มีผลึก Diopside มีความทนต่อสารเคมีทุกชนิดได้ดี เคลือบที่มีผลึก Plagioclase จะถูกกัดกร่อนเฉพาะในสารละลายกรดที่มีความเข้มข้นมากๆ ส่วนเคลือบที่ผิวหน้ามีผลึกในกลุ่ม Wollastonite จะทนการกัดกร่อนได้น้อยมาก โดยจะถูกกัดกร่อนได้ง่ายทั้งในสารละลายกรดไปจนถึงสารละลายด่างอ่อน โดยผลึก Wollastonite ของเคลือบที่เผาแบบปกติจะมีความทนต่อการกัดกร่อนได้ดีกว่าผลึกที่อยู่ในเคลือบที่เผาแบบรวดเร็ว ซึ่งอาจเนื่องมาจากกักกันของผลึกที่มีอลูมินาเป็นองค์ประกอบมีขนาดที่ใหญ่กว่า จึงมีความทนต่อการกัดกร่อนได้ดีกว่า

Linda Froberg and et al., (2007) ได้ศึกษาชนิดของผลึกที่ผิวเคลือบที่มีผลต่อความทนต่อการกัดกร่อนสารเคมีในสูตรเคลือบทดลองจำนวน 15 สูตร ซึ่งถูกเผาแบบรวดเร็วในเตาเผาอุตสาหกรรมและเผาแบบปกติในเตาเผาห้องปฏิบัติการ โดยทดลองจุ่มในสารละลายที่มีค่า pH แตกต่างกัน จากนั้นทำการตรวจสอบองค์ประกอบผลึกและผิวเคลือบที่เปลี่ยนแปลงไปด้วยเทคนิค XRD และ SEM/EDX ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าผิวเคลือบที่มีผลึกกลุ่ม Wollastonite จะถูกกัดกร่อนด้วยสารละลายทุกค่า pH และจะถูกกัดกร่อนมากที่สุด ในสารละลายด่าง ขณะที่ผลึก Diopside, Quartz และ Corundum ไม่พบการกัดกร่อนเกิดขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าช่วงรอยต่อระหว่างชั้นเคลือบ (Interfacial Layer) รอบๆ ผลึกของเฟลด์สปาร์ รวมทั้งชั้นของ Glassy Phase จะเกิดการกัดกร่อนมากทั้งในสภาวะที่มีความเป็นกรดและด่าง

Leena Hupa and et al., (2005) ได้ศึกษาคุณสมบัติความทนทานต่อสารเคมีและความยากง่ายในการทำความสะอาดผิวของสูตรเคลือบมันและเคลือบด้านจำนวน 15 สูตร ที่มีองค์ประกอบทางเคมี และชนิดของผลึกที่ต่างกัน โดยทดลองจุ่มในน้ำยาทำความสะอาดที่มีฤทธิ์เป็นด่างอ่อนๆ จากนั้นทำการเคลือบผิวด้วย Soil Film แล้วเช็ดออกเพื่อดูความเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นทั้งในด้านความเรียบขรุขระ และสีเคลือบ ด้วยเทคนิค SEM/EDXA และ COM จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าผิวเคลือบที่มีผลึกกลุ่ม Wollastonite จะถูกกัดกร่อนด้วยสารละลายที่มีน้ำยาทำความสะอาดผสมได้ง่าย ซึ่งส่งผลทำให้ผิวเคลือบนั้นทำความสะอาดได้ยาก

ขึ้น ส่วนผลึกอื่นๆ ที่อยู่ในผิวเคลือบ เช่น Diopside และ Quartz ไม่พบการกัดกร่อน และความยากง่ายในการทำ ความสะอาดของเคลือบที่มีองค์ประกอบของผลึกเพียงสองชนิดนี้ไม่พบว่ามี การเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้น

จะเห็นได้ว่าการวิจัยและพัฒนาสูตรเคลือบสำหรับผลิตภัณฑ์เซรามิกส่วนใหญ่จะเน้นเพื่อการแก้ไข ปัญหาความทนทานต่อการกัดกร่อนของสารเคมี และเนื่องจากแบบพิมพ์เซรามิกที่ใช้ในกระบวนการผลิตถุงมือ ยางโดยวิธีการจุ่มจะต้องมีการสัมผัสกับน้ำยางและสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการผลิตอยู่ตลอดอายุการใช้งาน ดังนั้นการพัฒนาสูตรเคลือบสำหรับแบบพิมพ์เซรามิกดังกล่าวจึงเป็นทางเลือกให้กับผู้ประกอบการที่จะช่วยเพิ่ม ประสิทธิภาพของแบบพิมพ์เซรามิกให้มีความทนทานต่อการกัดกร่อนของสารเคมีมากขึ้น มีอายุการใช้งานที่ ยาวนานขึ้น

6. คุณลักษณะ

ต้นแบบสูตรเคลือบสำหรับแบบพิมพ์เซรามิกขึ้นรูปถุงมือยางโดยวิธีการจุ่ม เป็นต้นแบบที่พัฒนาขึ้นเพื่อ ทดลองใช้กับต้นแบบแบบพิมพ์เซรามิกสำหรับขึ้นรูปถุงมือยาง เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติความทนทานต่อการกัด กร่อนของสารเคมีของแบบพิมพ์เซรามิก โดยเป็นสูตรเคลือบพื้นฐานชนิดเคลือบใส มีส่วนผสมจากวัตถุดิบเซรา มิกทั่วไป สูตรเคลือบต้นแบบมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนอยู่ระหว่าง $7.79-8.85 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ซึ่ง ใกล้เคียงกับค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของสูตรเนื้อดินที่พัฒนาได้ นอกจากนี้ต้นแบบสูตรเคลือบ ที่ได้ยังช่วยเพิ่มความทนทานต่อการกัดกร่อนของสารเคมีของเนื้อดินได้มากขึ้น จากเดิมขึ้นทดสอบที่ผลิตจาก เนื้อดินแบบไม่มีเคลือบสามารถทนต่อสารละลายต่าง KOH ได้ 144 ชั่วโมง สามารถทนทานได้นานขึ้นเป็น 712-808 ชั่วโมง เมื่อมีการเคลือบชิ้นงานด้วยสูตรเคลือบต้นแบบดังกล่าว

7. การออกแบบและการสร้าง

การพัฒนาต้นแบบสูตรเคลือบสำหรับแบบพิมพ์เซรามิกขึ้นรูปถุงมือยาง มีขั้นตอนการทดลองดังนี้

7.1 ศึกษาองค์ประกอบทางเคมี (โดยเทคนิค XRF: Bruker model S8 Tiger) ของวัตถุดิบที่ใช้ ได้แก่ โปแตสเฟลด์สปาร์ ควอทซ์ ดินขาว หินปูน ทัลคัม และซิงค์ออกไซด์

7.2 ชั่งส่วนผสมตามสูตรดังตารางต่อไปนี้

วัตถุดิบ	% (โดยน้ำหนักแห้ง)	
	GFG-15	GFG-25
โปแตสเฟลด์สปาร์	35	32
ควอทซ์	30	35
ดินขาว	20	15
หินปูน	15	8
ทัลคัม	-	8
ซิงค์ออกไซด์	-	2
สารละลายโซเดียมซิลิเกต (addition)	0.15	0.15

7.3 บดส่วนผสมสูตรเคลือบด้วยหม้อบด High speed mill เป็นเวลา 10 นาที โดยใช้สัดส่วนน้ำต่อของแข็งเท่ากับ 1:1 บดผสมให้เข้ากัน แบ่งส่วนผสมจำนวน 100 กรัมไปหาปริมาณกากค้างตะแกรง 325 เมช แล้วกรองส่วนผสมที่เหลือผ่านตะแกรงขนาด 100 เมช วัดความหนาแน่น และอัตราการไหลตัวของน้ำเคลือบ ก่อนนำไปใช้งาน โดยควบคุมให้ค่าความหนาแน่นอยู่ในช่วง $1.44\text{--}1.48\text{ g/cm}^3$ และค่าการไหลตัวอยู่ระหว่าง 11-13 วินาที ตามลำดับ

7.4 ชุบเคลือบบนชิ้นงานทดลองที่ผ่านการเผาปัสกิตมาแล้ว

7.5 นำชิ้นงานที่ชุบเคลือบแล้วไปเข้าเผาในเตาไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 1280°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมงด้วยอัตราการขึ้นไฟ $5^{\circ}\text{C}/\text{นาที}$

7.6 แบ่งน้ำเคลือบส่วนหนึ่งไปอบแห้งเพื่อนำไปอัดขึ้นรูปเป็นชิ้นงานสำหรับทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน (CTE)

7.7 ตรวจสอบคุณสมบัติหลังเผาของชิ้นทดสอบ ได้แก่ ความทนทานต่อสารละลายต่าง KOH ตามวิธีการทดสอบดังต่อไปนี้

- เตรียมสารละลายต่าง โปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ที่ความเข้มข้น $20\pm 1\%$ โดยใช้อุณหภูมิ $70\pm 2^{\circ}\text{C}$
- ตรวจสอบลักษณะของผิวชิ้นงานก่อนนำไปแช่ในสารละลายต่างดังกล่าว ว่ามีลักษณะผิวเรียบ ไม่มีรอยแตกร้าว หรือสีที่กร่อนก่อนทดสอบ
- นำชิ้นงานทดลองแช่ในสารละลายต่าง แล้วนำขึ้นมาตรวจสอบดูลักษณะการสึกกร่อนของผิวชิ้นงานทุกวัน
- นำชิ้นงานไปทดลองจุ่มในน้ำยาง (เหมือนในกระบวนการผลิตถุงมือ) แล้วนำแผ่นยางที่ได้มาตรวจสอบดูรอยร้าว
- ถ้าแผ่นยางยังไม่มีรูร้าวให้แช่ชิ้นทดสอบในสารละลายต่างต่อไปเรื่อยๆ และนำขึ้นมาตรวจสอบผิวและจุ่มน้ำยางดูรอยร้าวเป็นระยะๆ
- บันทึกเวลารวมทั้งหมดที่แช่ชิ้นงานในสารละลายต่าง (ชั่วโมง) ก่อนจะเห็นว่าผิวชิ้นงานสึกกร่อนและแผ่นยางที่ทดลองจุ่มมีรอยร้าวเกิดขึ้น

7.8 นำต้นแบบสูตรเคลือบไปทดลองใช้กับต้นแบบแบบพิมพ์เซรามิกที่ใช้ในการขึ้นรูปถุงมืออย่างโดยวิธีการจุ่ม จำนวน 20 ชิ้น/สูตร เพื่อดูประสิทธิภาพการนำไปใช้งานจริง

8. การทดสอบและผลการทดสอบ

8.1 ผลการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบหลักที่ใช้ในสูตรเคลือบ ด้วยเทคนิค XRF แสดงดังตารางต่อไปนี้

องค์ประกอบทางเคมี (%โดยน้ำหนัก)	วัตถุดิบ					
	ดินขาว	โปแตสเฟลด์สปาร์	ควอทซ์	หินปูน	ทัลคัม	ซิงค์ออกไซด์
SiO ₂	48.00	66.74	99.5	0.17	42.88	0.04
Al ₂ O ₃	36.00	18.44	0.13	0.05	-	-
Na ₂ O	0.01	3.09	-	-	-	-
K ₂ O	2.10	11.26	-	-	-	0.04
SrO	-	-	-	0.03	-	-
MgO	0.01	0.2	-	0.91	36.80	1.04
CaO	0.01	0.01	0.04	55.68	1.10	0.01
BaO	-	-	-	-	0.02	-
TiO ₂	0.05	0.01	-	0.01	-	-
HfO ₂	-	-	-	0.01	-	0.11
P ₂ O ₅	-	-	-	0.01	0.02	0.05
MnO	-	-	-	0.01	0.01	-
Fe ₂ O ₃	1.30	0.1	0.03	0.06	0.15	-
SO ₃	-	-	-	0.02	-	0.16
ZnO				0.01	-	98.31
LOI	12.50	0.19	0.30	43.02	19.00	0.30
Total	99.98	100.04	100.00	99.99	99.98	100.06

8.2 ผลการวัดคุณสมบัติของน้ำเคลือบและค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของสูตรเคลือบที่ได้ และต้นทุนวัตถุดิบแสดงดังตารางต่อไปนี้

Glaze Formula	% Solid	% Water	% Sodium Silicate	Slip Density (g/cm ³)	Flow rate (s)	Residue on 325 mesh (%)	CTE @25-500°C (x10 ⁻⁶ /K)	ต้นทุน (บาท/กก.)
Glaze-R	50	50	-	1.48	12.52	0	10.32	10.00
GFG-15	50	50	0.15	1.45	11.23	1.99	7.79	4.78
GFG-25	50	50	0.15	1.44	11.30	1.84	8.85	8.29

8.3 ลักษณะของชิ้นงานเคลือบ (บนเนื้อดิน GFB-16 และ A90) ที่ได้หลังเผา แสดงดังต่อไปนี้

เนื้อดิน/เคลือบ	Glaze-R	GFG-15	GFG-25
GFB-16			
A90			

8.4 ตรวจสอบคุณสมบัติความทนทานต่อสารละลายต่าง KOH ของต้นแบบสูตรเคลือบที่ใช้กับสูตรดินพอร์ซเลน A90 ที่พัฒนาขึ้น ผลการทดสอบแสดงดังต่อไปนี้

	ความทนทานต่อสารละลาย KOH (ชั่วโมง)
A90 (unglazed)	144
A90 with Glaze-R	808
A90 with FG-15	712
A90 with GFG-25	808

8.5 เมื่อนำต้นแบบสูตรเคลือบไปทดลองใช้กับต้นแบบแบบพิมพ์เซรามิก A90 จำนวน 20 ชิ้น/สูตร เผาที่ 1280°C พบว่าสูตรเคลือบทั้งสองสูตรสามารถใช้งานได้ดี ไม่มีปัญหาการแตกร้าว เมื่อทำการตรวจสอบความทนต่างของแบบพิมพ์เซรามิกเคลือบ ได้ผลดังตารางต่อไปนี้

สูตรเคลือบ	ความทนทานต่อสารละลาย KOH (ชั่วโมง)
ตัวอย่างแบบพิมพ์	500
A90 (unglazed)	120
A90 with Glaze-R	1152
A90 with GFG-15	1176
A90 with GFG-25	1176

จะเห็นว่าต้นแบบห้องปฏิบัติการสูตรเคลือบทั้ง 3 สูตร สามารถใช้งานได้ดีกับสูตรเนื้อดิน A90 และหลังการทดสอบความทนต่าง พบว่าต้นแบบที่เคลือบแล้วมีชั่วโมงการทนต่างเพิ่มสูงขึ้นอยู่ในช่วง 1152-

1176 ชั่วโมง เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างแบบพิมพ์ทางการค้า ที่โรงงานให้ข้อมูลว่าจะมีความทนต่อต่างประมาณ 500 ชั่วโมง ซึ่งจะเห็นได้ว่าชิ้นงานที่เคลือบจะมีความทนต่อต่างได้นานกว่าตัวอย่างแบบพิมพ์ประมาณ 2 เท่าขึ้นไป ลักษณะแบบพิมพ์เซรามิก ที่ใช้เนื้อดินสูตรดิน A90) กับเคลือบอ้างอิง และสูตรเคลือบที่พัฒนาขึ้น แสดงดังภาพต่อไปนี้



ตัวอย่างแบบพิมพ์เซรามิก (Body A90) กับเคลือบสูตรอ้างอิง (Glaze-R)



ตัวอย่างแบบพิมพ์เซรามิก (Body A90) กับเคลือบสูตร GFG-15



ตัวอย่างแบบพิมพ์เซรามิก (Body A90) กับเคลือบสูตร GFG-25

9. วิเคราะห์และสรุปผลการทดสอบ

ผลการวิจัยและพัฒนาต้นแบบสูตรเคลือบสำหรับแบบพิมพ์เซรามิกขึ้นรูปถุงมืออย่างโดยวิธีการจุ่ม ในระดับห้องปฏิบัติการพบว่าสูตรเคลือบสีพื้นฐานที่ได้สามารถใช้งานได้ดีกับเนื้อดินที่พัฒนาขึ้น เปรียบเทียบกับเคลือบสีที่จำหน่ายทางการค้ามีลักษณะใกล้เคียงกัน สีของชิ้นงานที่ได้หลังเผาจะขึ้นอยู่กับเนื้อดินที่ใช้ เคลือบมีลักษณะมันวาว ไม่แตกร้าว มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนใกล้เคียงกับเนื้อดินที่พัฒนาขึ้น การบดผสมในหม้อบด High speed mill ทำได้ง่าย แต่จำเป็นต้องใช้สารละลายโซเดียมซิลิเกตเพื่อช่วยในการกระจายตัวในปริมาณ 0.15% ในขณะที่เคลือบสำเร็จจะใช้แค่เพียงการตีผสมในน้ำตามอัตราส่วนที่ผู้ขายแนะนำ ลักษณะของน้ำเคลือบที่ได้มีความใกล้เคียงกับเคลือบสำเร็จ ขั้นตอนการชุบเคลือบทำได้ง่าย ความหนาของชั้นเคลือบจะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของน้ำเคลือบที่ใช้และระยะเวลาในการจุ่มชิ้นงาน เนื่องจากต้นแบบสูตรเคลือบเป็นเคลือบที่เตรียมจากวัตถุดิบจึงมีปริมาณกากค้างตะแกรง 325 เมช เหลืออยู่ในปริมาณมากกว่าเคลือบสำเร็จ เพราะเคลือบสำเร็จมักจะถูกลบละเอียดและกรองมาเรียบร้อยแล้วก่อนที่จะทำการอบแห้งเพื่อจำหน่าย และเนื่องจากเป็นเคลือบใสและมีการควบคุมคุณสมบัติของน้ำเคลือบให้ใกล้เคียงกับการใช้เคลือบสำเร็จ การชุบเคลือบของสูตรต้นแบบจึงทำได้ง่าย เผาแล้วให้ชิ้นงานที่มีลักษณะเรียบ มันวาว ไม่มีตำหนิเช่นเดียวกับการใช้เคลือบสำเร็จ ซึ่งจากการทดสอบความทนทานต่อสารละลายต่างจะเห็นว่าชิ้นงานทดสอบที่มีเคลือบจะมีความทนทานต่อการกัดกร่อนของสารละลายต่างได้มากขึ้น จากเดิม 144 ชั่วโมง เป็น 712-808 ชั่วโมง และจากการทดลองใช้เคลือบกับต้นแบบแบบพิมพ์เซรามิกจริงสามารถใช้งานได้ดี ไม่มีปัญหาการแตกร้าว จึงเป็นอีกทางเลือกให้ผู้ประกอบการนำไปทดลองใช้กับแบบพิมพ์เซรามิกสำหรับขึ้นรูปถุงมืออย่างโดยวิธีการจุ่ม และทำการตรวจสอบคุณสมบัติที่จำเป็นในการทดลองระดับภาคสนามต่อไป

10. ข้อสรุปเกี่ยวกับสมรรถภาพของต้นแบบ

สูตรการทดลองที่เหมาะสมในการพัฒนาเป็นต้นแบบสูตรเคลือบสำหรับแบบพิมพ์เซรามิกขึ้นรูปถุงมือยางโดยวิธีการจุ่ม คือ สูตร GFG-25 ที่มีส่วนผสมดังต่อไปนี้ โปแตสเซิลด์สปาร์ 32-35% ควอทซ์ 30-35% ดินขาว 20-25% หินปูน 8-15% ทัลคัม 0-8% และซิงค์ออกไซด์ 0-2% โดยน้ำหนักของส่วนผสมทั้งหมด นอกจากนี้ยังใช้สารละลายโซเดียมซิลิเกตเป็นสารช่วยกระจายตัวเพิ่มเติมในปริมาณ 0.15% ของน้ำหนักวัตถุดิบรวมในสูตร โดยต้นแบบสูตรเคลือบมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนอยู่ระหว่าง $7.79-8.85 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ และจากผลการทดสอบความทนทานต่อสารละลายต่าง KOH พบว่าสูตรเนื้อดินที่เคลือบผิวด้วยสูตรเคลือบต้นแบบ หลังเผาจะเพิ่มความทนทานต่อการกัดกร่อนได้ดีขึ้น จากเดิมชิ้นงานที่ไม่มีเคลือบทนได้ 144 ชั่วโมงเพิ่มเป็น 712-808 ชั่วโมงในชิ้นงานที่เคลือบด้วยสูตรเคลือบต้นแบบ ซึ่งได้ทดลองนำต้นแบบสูตรเคลือบดังกล่าวไปใช้กับต้นแบบ A90 แบบพิมพ์เซรามิกขนาด L แล้วพบว่าสูตรเคลือบได้ดี ไม่มีการแตกร้าว และจากการทดสอบพบว่ามีความทนต่อต่างได้นานถึง 1176 ชั่วโมง

11. ทรัพย์สินทางปัญญา

-

12. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ผู้สนับสนุนงบประมาณในการทำวิจัย บริษัท วัฒนชัยรับเบอร์เมท จำกัด เอื้อเฟื้อข้อมูลและให้ความอนุเคราะห์การทดสอบที่เกี่ยวข้อง และศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ ผู้ให้การสนับสนุนเครื่องมือในการดำเนินงาน

13. บรรณานุกรม

- 1) วรรณดา ต.แสงจันทร์ และ ลดา พันธุ์สุขุมธนา, เคลือบเซรามิก, เอกสารประกอบการอบรม, กรมวิทยาศาสตร์บริการ, ออนไลน์เข้าถึงได้จาก http://siweb.dss.go.th/dss_doc/dss_doc/show_discription_doc.asp?ID=1150
- 2) Janusz Partyka and Jerzy Lis, Chemical corrosion of sanitary glazes of variable grain size composition in acid and basic aqueous solution media, *Ceramics International* 38 (2012) 553–560.
- 3) Habib Sahlaoui et al., Comparative Study of the Thermal Shock Resistance of an Industrial Tableware Porcelain, *Journal of Engineering* (2013), <http://dx.doi.org/10.1155/2013/972019>.
- 4) Leena Hupa et al., Chemical resistance and cleanability of glazed surfaces, *Surface Science* 584 (2005) 113.

- 5) Linda Fröberg et al., Chemical durability of glazed surfaces, Journal of the European Ceramic Society 27 (2007) 1811–1816.
- 6) Linda Fröberg et al., Corrosion of the crystalline phases of matte glazes in aqueous solutions, Journal of the European Ceramic Society 29 (2009) 7–14.

ภาคผนวก ก.

รายงานเชิงเทคนิคประกอบต้นแบบ

- 3) ต้นแบบภาคสนามแบบพิมพ์ฟอร์มสำหรับทำแบบพิมพ์ขึ้นรูปถွ่งมือยางโดย
วิธีการจุ่ม

รายงานเชิงเทคนิค
ประกอบต้นแบบการวิจัย พัฒนาและวิศวกรรม
(ต้นแบบภาคสนาม)

ชื่อผลิตภัณฑ์ต้นแบบ: แบบพิมพ์ฟอร์มสำหรับขึ้นรูปลงมืออย่างโดยวิธีการจุ่ม
ชื่อโครงการ: การพัฒนาเนื้อดินและเคลือบสำหรับทำแบบพิมพ์เซรามิกขึ้นรูปลงมืออย่าง
โดยวิธีการจุ่มในระดับอุตสาหกรรม

คณะผู้วิจัย

1. ดร. อนุชา วรรณก้อง
2. นาง. วัชรีย์ สอนลา
3. น.ส. ภัทรวรรณ เฉยเจริญ
4. นาย. ปริณญา สมร่วง

หน่วยงานที่สังกัด

ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ

สนับสนุนทุนวิจัยโดย

สนับสนุนโดยสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.)
และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)

1. บทคัดย่อ

ต้นแบบแบบพิมพ์พอร์ซเลนสำหรับขึ้นรูปถุงมือยางโดยวิธีการจุ่มในระดับภาคสนาม เป็นเป้าหมายหนึ่งของโครงการการพัฒนาเนื้อดินและเคลือบสำหรับทำแบบพิมพ์เซรามิกสำหรับขึ้นรูปถุงมือยางโดยวิธีการจุ่ม ซึ่งในโครงการได้ดำเนินการเตรียมแม่พิมพ์ปูนปลาสเตอร์รูปมือ ให้มีขนาดที่ถูกต้อง สอดคล้องกับการหัดตัวหลังเผาที่เหมาะสม จากนั้นใช้สูตรดินผสม A90 ทำเป็นน้ำดิน และหล่อขึ้นเป็นแบบพิมพ์รูปมือจำนวน 80 ชิ้น ตกแต่งผิวลรอยตะเข็บ และพันทรายบริเวณอุ้งมือให้มีผิวหยาบตามรูปแบบถุงมือยางที่เป็นผลิตภัณฑ์ของโรงงาน แล้วเผาที่อุณหภูมิ 1280°C จากนั้นส่งต้นแบบไปให้โรงงานทำการทดลองใช้ในกระบวนการผลิตจริง ซึ่งโรงงานจะมีการตรวจสอบขนาดให้ได้ตามมาตรฐาน วัดความทนต่อการเปลี่ยนอุณหภูมิฉับพลัน ในช่วง 30-180°C ได้มากกว่า 10 รอบ ส่วนการทนต่อด่าง KOH 20% ที่อุณหภูมิ 70°C พบว่าทนได้ > 150 ชั่วโมงตามลำดับ การทดสอบใช้แบบพิมพ์ในโรงงาน ซึ่งมีระบบการผลิตแบบสายพานและมีการผลิต 12 ชั่วโมงต่อกะวันละ 2 กะ และแบบพิมพ์หนึ่งจะใช้เวลาประมาณ 15 นาที ต่อรอบ พบว่าหลังการใช้งาน 30 วัน ต้นแบบแบบพิมพ์สูตรเนื้อดินที่พัฒนาขึ้นก็ยังใช้งานได้ดี ทั้งนี้ต้นแบบภาคสนามที่พัฒนาขึ้นนี้มีต้นทุนวัตถุดิบและการเผารวมอยู่ที่ 30.92-35.29 บาทต่อชิ้น

2. บทนำ

“ยางพารา” เป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทย มีบทบาททั้งในแง่ของการจ้างงานและการส่งออก ซึ่งอุตสาหกรรมยางและผลิตภัณฑ์ยางมีมูลค่าอยู่ในลำดับต้นๆ ของการส่งออกของไทย โดยในปี 2558 มีมูลค่าการส่งออกยาง 170,418.73 ล้านบาท และมูลค่าการส่งออกผลิตภัณฑ์ยางสูงถึง 230,374.20 ล้านบาท (สถาบันวิจัยยาง, 2559) ถึงแม้ว่าไทยจะมีข้อได้เปรียบในเรื่องของยางธรรมชาติ เนื่องจากเป็นผู้ผลิตและส่งออกยางธรรมชาติเป็นอันดับ 1 ของโลก รวมถึงการได้เปรียบเรื่องค่าแรงงาน แต่เมื่อได้ทำการวิเคราะห์ศักยภาพของอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ถุงมือยางไทยเมื่อเทียบกับประเทศมาเลเซีย โดยการวิเคราะห์ค่าดัชนีความได้เปรียบโดยเปรียบเทียบ (Revealed Competitive Advantage Index: RCA) โดยใช้หลักของการเปรียบเทียบส่วนแบ่งการส่งออกของสินค้าชนิดหนึ่งจากการส่งออกทั้งหมดของประเทศนั้นกับส่วนแบ่งของการส่งออกสินค้าชนิดดังกล่าวจากการส่งออกทั้งหมดของโลก พบว่ามาเลเซียมีค่า RCA ในการส่งออกเฉลี่ยในช่วงปี 2009-2014 สูงถึง 37 ขณะที่ประเทศไทยมีค่า RCA ในการส่งออกเพียง 12 หรือ มาเลเซียสูงกว่าเป็น 3 เท่าของไทย เนื่องมาจากหลายปัจจัย เช่น มาเลเซียมีบริษัท ท็อปโกลฟ ที่เป็นผู้ผลิตและส่งออกถุงมือรายใหญ่ที่สุดของโลก มีเทคโนโลยีการผลิตและการตรวจสอบคุณภาพที่รวดเร็วและทันสมัย มีการวิจัยและพัฒนาผลิตภัณฑ์อย่างต่อเนื่อง

จะเห็นได้ว่า ปัญหาสำหรับผู้ประกอบการที่ใช้แบบพิมพ์ถุงมือยางเป็นเซรามิกในประเทศ คือ การที่ไม่มีผู้ผลิตแบบพิมพ์เซรามิกในประเทศ หรือมีผู้ผลิต แต่ก็ผลิตเพื่อส่งออกไปยังตัวแทนขายในต่างประเทศ ทำให้ผู้ประกอบการในประเทศต้องทำการจัดหาแบบพิมพ์เซรามิกโดยการนำเข้าต่างประเทศ โดยเฉพาะแบบพิมพ์ถุงมือที่ใช้ในอุตสาหกรรมยางวิศวกรรมและอุตสาหกรรม จะพบปัญหามากกว่า เนื่องจากเป็นแบบพิมพ์ที่ต้องใช้ฝีมือและประสบการณ์ในการผลิตที่ต้องสั่งสมมา การผลิตแต่ละครั้งต้องใช้เวลาเพราะเป็นงานฝีมือ และเมื่อ

แบบพิมพ์เสียหายและชำรุด ก็จำเป็นต้องใช้เวลาในการซ่อมแซมและปรับแต่ง ซึ่งถ้าหากไม่มีแบบพิมพ์สำรอง ก็จะทำให้การผลิตหยุดชะงัก ส่งผลต่อกระบวนการผลิตทั้งระบบ ดังนั้น การพัฒนาอุตสาหกรรมผู้ผลิตแบบพิมพ์เซรามิก ที่เป็นบริษัทคนไทยที่ผลิตและจำหน่ายในประเทศ ให้เกิดขึ้น จึงมีความสำคัญต่อห่วงโซ่ของการผลิตในกระบวนการอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ยางของไทยเป็นอย่างยิ่ง

ในโครงการนี้ เป็นโครงการที่เกี่ยวกับการพัฒนาเนื้อดินพอร์ซเลนสำหรับทำแบบพิมพ์เซรามิกขึ้นรูปถุงมือยางโดยวิธีการจุ่มในระดับอุตสาหกรรม โดยจะมีการดำเนินการวิจัยและพัฒนาทั้งในเรื่องที่เกี่ยวกับ สูตรเนื้อดินพอร์ซเลน วิธีการเตรียมที่เหมาะสมในการนำไปขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อ อุณหภูมิการเผาที่เหมาะสม และการวิเคราะห์ทดสอบคุณสมบัติ เพื่อการนำไปผลิตแบบพิมพ์เซรามิกในรูปแบบต่างๆ เพื่อทำเป็นต้นแบบแบบพิมพ์เซรามิกขึ้นรูปถุงมือ ทั้งในระดับห้องปฏิบัติการ และจะทำการขยายสเกลการผลิตเป็นระดับภาคสนาม เพื่อนำไปทดลองใช้งานจริงในกระบวนการผลิตถุงมือยาง

3. วัตถุประสงค์

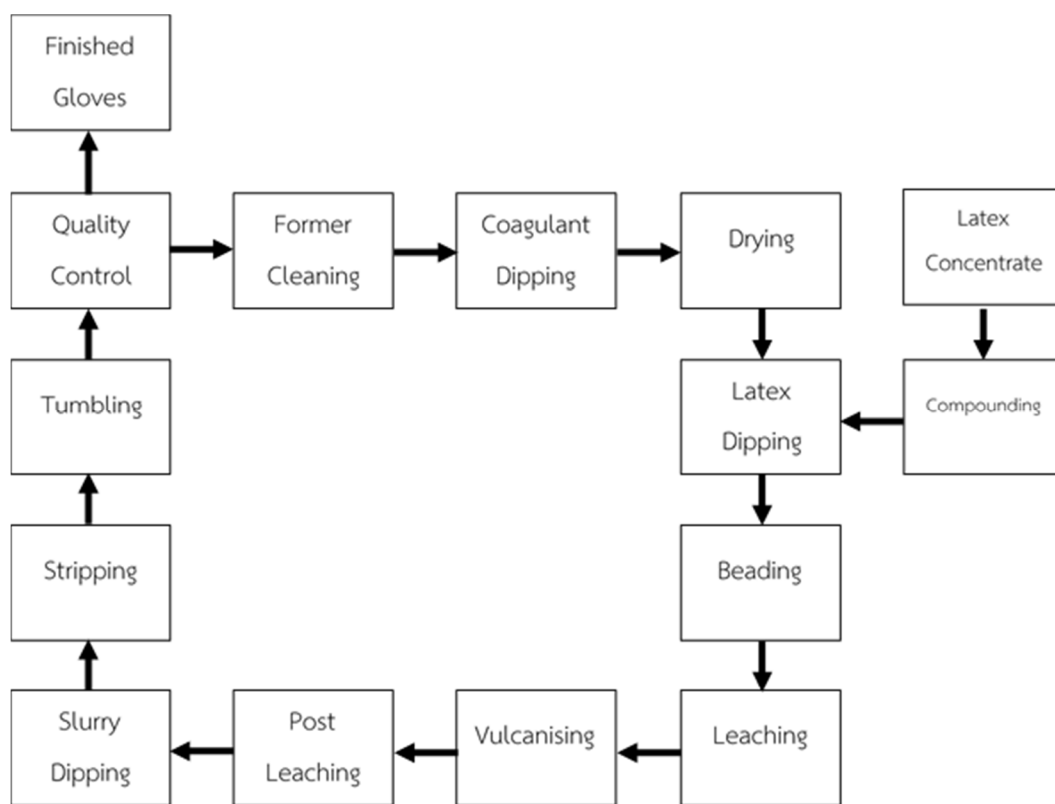
- 1) เพื่อทำการขยายสเกลการผลิตแบบพิมพ์พอร์ซเลนสำหรับรูปถุงมือยางโดยวิธีการจุ่มด้วยสูตรเนื้อดินที่พัฒนาขึ้น
- 2) เพื่อนำแบบพิมพ์ที่พัฒนาขึ้นไปทดลองใช้จริงกระบวนการผลิตจริงในโรงงาน

4. สรุปสถานะภาพของงานที่จะทำจนถึงปัจจุบัน

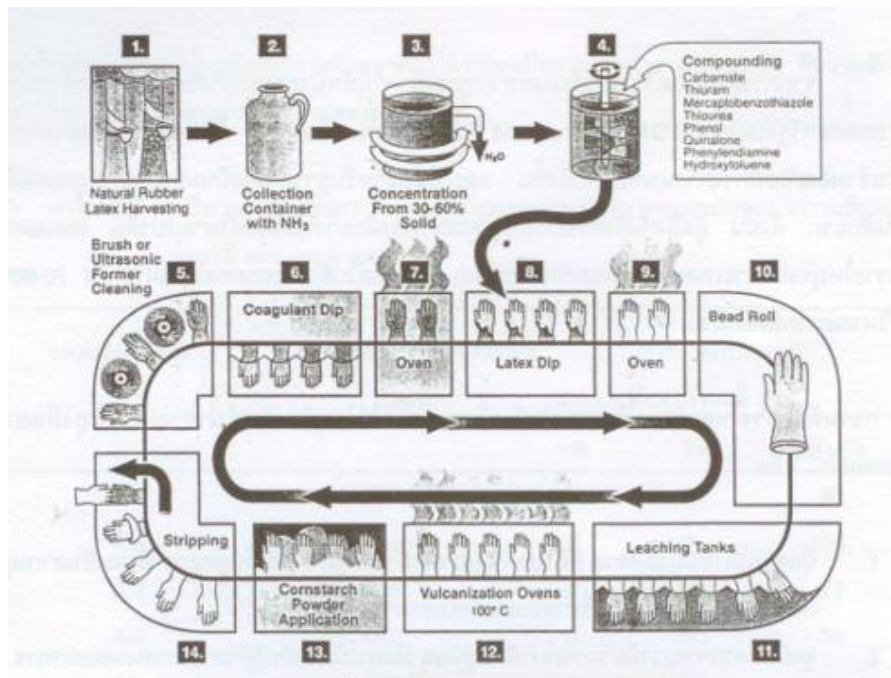
- 1) ได้มีการพัฒนาเนื้อดินที่เหมาะสมสำหรับการนำไปทดลองผลิตเป็นแบบพิมพ์รูปมือแล้ว 2 สูตร ได้แก่ สูตร GFB-16 และสูตร A90 และเตรียมสูตรอ้างอิง Body-R เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบ
- 2) หลังจากการตรวจสอบคุณสมบัติเบื้องต้น พบว่าสูตรเนื้อดินที่มีความเหมาะสมสำหรับขยายสเกลการผลิต ได้แก่ สูตร A90 ซึ่งเป็นสูตรผสมระหว่าง Clay-A 90% และ Clay-B 10%
- 3) ดำเนินการออกแบบแบบพิมพ์สำหรับรูปมือยางทั่วไป ขนาดใหญ่ (Size L) โดยต้องคำนึงการหดตัวหลังเผาของสูตร A90 เพื่อให้มีสเปคและขนาดที่ตำแหน่งต่างๆ ที่ถูกต้องตามมาตรฐานของโรงงาน
- 4) แบบพิมพ์ที่ทำการออกแบบ นำมาจัดทำเป็น Case Mold รูปแบบละ 1 ชุด และ Working Mold รูปแบบละ 2 ชุด เพื่อให้สามารถขึ้นรูปแบบพิมพ์เซรามิกขึ้นรูปถุงมือยางได้
- 5) ทำการขึ้นรูปแบบพิมพ์จำนวนประมาณ 80-100 ชิ้น แล้วทำการพ่นทรายบริเวณอุ้งมือ เพื่อให้ได้หลังจากการขึ้นรูปแล้วจะได้ถุงมือยางที่มีรูปแบบตามผลิตภัณฑ์ของโรงงาน
- 6) ทำการเผาแบบพิมพ์ที่อุณหภูมิ 1280°C ตรวจสอบคุณภาพเพื่อทำการส่งมอบให้โรงงาน เพื่อนำไปทดลองใช้ในสายการผลิต
- 7) ติดตามผล เก็บข้อมูล ประเมินผลการใช้แบบพิมพ์ที่พัฒนาขึ้นในกระบวนการผลิตถุงมือยาง

5. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

กระบวนการผลิตถุงมือยางใช้เทคนิคการจุ่มโดยใช้สารช่วยน้ำยางจับตัว (Coagulant Dipping) ซึ่งมีหลักการทั่วไป คือ จุ่มแบบพิมพ์ (Formers) ลงในสารช่วยจับตัวก่อน แล้วจึงจุ่มแบบพิมพ์ที่มีสารดังกล่าวเคลือบผิวแล้วลงในน้ำยางคอมพาวด์ จนเกิดการฟอร์มเจลยางแบบบางๆ บนผิวแบบพิมพ์ แล้วจึงยกขึ้นจากน้ำยางคอมพาวด์เพื่อผ่านไปที่กระบวนการขั้นตอนต่อไป โดยทั่วไปถุงมือมี 2 ชนิด คือ ชนิดที่มีแป้ง (Powdered Gloves) และชนิดไม่มีแป้ง (Powder-free Gloves) โดยถุงมือชนิดที่มีแป้งจะสวมใส่ได้ง่ายเพราะแป้งในถุงมือนอกจากจะทำหน้าที่หล่อลื่นแล้ว ยังดูดซับความชื้นขณะที่เราสวมใส่ถุงมือด้วย อย่างไรก็ตามสำหรับผู้แพ้โปรตีนในแป้ง และกลุ่มคนที่รำคาญจากการเปื้อนของฝุ่นแป้ง ก็สามารถเลือกใช้ถุงมือชนิดที่ไม่มีแป้งได้



รูปที่ 1 แผนภาพกระบวนการผลิตอย่างง่าย ผลิตภัณฑ์ถุงมือยางที่ใช้ในทางการแพทย์



รูปที่ 2 กระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ถุงมือยางที่ใช้ในทางการแพทย์

กระบวนการผลิตถุงมือยางที่ใช้ในการแพทย์ มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1) การล้างแม่พิมพ์ (Formers Cleaning) ถือได้ว่าเป็นกระบวนการสำคัญมากขั้นตอนหนึ่งของการผลิตถุงมือยาง ในกรณีที่แบบพิมพ์สกปรกอาจจะทำให้ถุงมือที่ผลิตเกิดรอยร้าวได้ ปกติการทำทำความสะอาดแบบพิมพ์ (Formers) จะใช้กรดและด่างในการทำทำความสะอาด โดยกรดจะใช้ H_2SO_4 หรือ HCL และด่างจะใช้ NaOH หรือ KOH หลังจากนั้นก็ล้างออกด้วยน้ำสะอาด



รูปที่ 3 ตัวอย่างแบบพิมพ์ (Formers) สำหรับผลิตถุงมือยาง

2) การอบแม่พิมพ์ (Oven1) เป็นการระเหยน้ำที่ติดเป็นฟิล์มบนแบบพิมพ์ให้แห้งจนหมด ก่อนที่จะจุ่มแบบพิมพ์ในถังสารช่วยจับตัว (Coagulant Tank) ช่วงระยะการอบแห้งขึ้นอยู่กับความเร็วของสายพานหรือกำลังการผลิตของสายพานการผลิต

3) การจุ่มสารช่วยจับตัว (Coagulant Dipping) สาร Coagulant เป็นสารละลายที่มีส่วนผสมของ CaNO_3 หรือ CaCl_2 ผสมกับ CaCO_3 ซึ่ง CaNO_3 หรือ CaCl_2 เป็นสารช่วยในการจับตัวของอนุภาคยาง ส่วน CaCO_3 เป็นตัวป้องกันการติดแบบพิมพ์ โดยอุณหภูมิของแบบพิมพ์ที่ลงจุ่มในถัง Coagulant ต้องมีอุณหภูมิประมาณ $50-60^\circ\text{C}$ เพื่อป้องกันไม่ให้น้ำยาจับตัวและเสียสภาพ โดยปกติในถัง Coagulant จะต้องมีการกวนอยู่เสมอเพื่อป้องกันการตกตะกอนของ Coagulant และกวนไปในทิศทางเดียวกันกับทิศทางของแบบพิมพ์

4) การอบแห้งสาร Coagulant (Oven2) เป็นการทำให้สาร Coagulant บนผิวแบบพิมพ์แห้ง ก่อนที่จะลงจุ่มในถังน้ำยางคอมพาวด์ (Compound Latex)

5) การจุ่มน้ำยางคอมพาวด์ (Latex Dipping) เป็นกระบวนการเคลือบแผ่นฟิล์มน้ำยาง บนแบบพิมพ์มือ โดยมี CaCO_3 ในสาร Coagulant เป็นสารป้องกันการจับตัวระหว่างฟิล์มน้ำยางกับแบบพิมพ์มือ กระบวนการนี้ถือได้ว่ามีความสำคัญมากในกระบวนการผลิตถุงมือยาง เพราะคุณภาพของถุงมือยางขึ้นอยู่กับกระบวนการนี้เป็นส่วนใหญ่ โดยปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพถุงมือยางคือ อุณหภูมิของแบบพิมพ์มือ ความเร็วลงจุ่มระหว่างแบบพิมพ์มือและความเร็วของน้ำยางในถัง อุณหภูมิของน้ำยาง และคุณภาพของน้ำยางคอมพาวด์ ถึงน้ำยางจะต้องออกแบบให้มีการกวนแบบช้าเพื่อป้องกันไม่ให้น้ำยางตกตะกอน และต้องมีการไหลตามทิศทางของการเคลื่อนที่ของแบบพิมพ์มือ น้ำยางคอมพาวด์ จะประกอบด้วยน้ำยางข้นและสารเคมี ซึ่งสูตรเคมีจะมีความแตกต่างกันไปตามแต่ละผลิตภัณฑ์ เช่น ตัวอย่างสูตรเคมีสำหรับถุงมือยางธรรมชาติ ถุงมือแพทย์ จะประกอบด้วยสารเคมีต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ตัวอย่างสูตรเคมี สำหรับการผลิตถุงมือยางธรรมชาติ ถุงมือแพทย์ ด้วยวิธีการจุ่มแบบพิมพ์

สารเคมี	น้ำหนักแห้ง (phr: ส่วนในร้อยของน้ำหนักยางแห้ง)
60% น้ำยางข้น	100
10% KOH	0.3
20% Potassium laurate	0.2
50% Sulphur	0.5
50% ZDC	0.75
40% SDBE	0.5
40% Wingstay L	0.75
50% ZnO	0.4

6) การอบหุ้มฟิล์มถุงมือ (Oven3) เป็นการให้ความร้อนทำให้ฟิล์มถุงมือยางแห้งพอหุ้มเพื่อให้สามารถม้วนขอบถุงมือยางได้ อุณหภูมิในตู้อบจะอยู่ที่ประมาณ 100-120°C โดยแหล่งความร้อนอาจใช้ก๊าซ LPG หรือเป็นไอน้ำจากหม้อไอน้ำ

7) การม้วนขอบถุงมือ (Beading) ถุงมือยางหลังจากการจุ่มในถังน้ำยางจะมีลักษณะของขอบไม่เท่ากันและไม่สวยงาม รวมถึงขอบถุงมือไม่แข็งแรง การม้วนขอบถุงมือจึงเป็นวิธีการแก้ปัญหาดังกล่าว

8) การล้างฟิล์มถุงมือ (Leaching) หลังจากการขึ้นรูปในถังน้ำยาง การล้างฟิล์มถุงมือจะเป็นการชะล้างสารเคมีที่ปนเปื้อนอยู่บนเนื้อยาง และยังเป็น การลดปริมาณโปรตีนในถุงมืออีกด้วย โดยอุณหภูมิในถังล้างจะอยู่ระหว่าง 60-70°C ใช้เวลาในการล้างนานประมาณ 5-10 นาที

9) การอบแห้ง (Oven4) เป็นการอบให้ถุงมือยางแห้งและทำให้เนื้อยางคงรูป เป็นกระบวนการที่สำคัญอีกกระบวนการหนึ่งที่ส่งผลต่อความแข็งแรงของถุงมือยาง อีกทั้งกระบวนการนี้เป็นกระบวนการที่ต้องใช้พลังงานมากที่สุดของการผลิต และยังมีประสิทธิภาพการใช้พลังงานต่ำ การอบแห้งจะใช้อุณหภูมิไม่เกิน 100-120°C นานประมาณ 30 นาที

10) การจุ่มแป้ง (Powder) เป็นกระบวนการเพื่อให้การถอดถุงมือทำได้ง่ายและสะดวกขึ้น ถุงมือยางไม่ติดกับแบบพิมพ์มือ

11) การอบแห้ง (Oven5) เป็นการอบถุงมือยางที่ผ่านการจุ่มน้ำแป้งให้แห้ง เพื่อการถอดจะได้สะดวกไม่เปื้อนจากน้ำแป้ง

12) การถอดถุงมือ (Striping) การถอดถุงมือเป็นขั้นตอนสุดท้ายในสายพานการผลิตถุงมือยาง ปัจจุบันการถอดถุงมือมีทั้งที่ใช้พนักงานถอด และการใช้เครื่องถอด

นอกจากนี้ ถุงมือยางที่ผลิตในโรงงานอุตสาหกรรมยังต้องผ่านกระบวนการอีกหลายขั้นตอน เพื่อให้ถุงมือยางทางการแพทย์สามารถใช้งานได้อย่างปลอดภัย คือ

1) การอบถุงมือให้ยางคงรูป เนื่องจากถุงมือยางที่ออกจากสายพานการผลิตยังมีความชื้นสูง และอาจจะยังคงรูปไม่สมบูรณ์ จึงต้องผ่านกระบวนการอบให้มีความชื้นอยู่ในค่าที่เหมาะสม หรือไม่มีความชื้นเหลืออยู่เลย ซึ่งจะทำให้มีลักษณะการคงรูปมากขึ้น ปกติจะใช้ตู้อบแบบลูกกลิ้งขนาดใหญ่ เพื่อให้สามารถอบถุงมือได้คราวละมากๆ

2) การทดสอบถุงมือยาง โดยการใช้สายตา การใช้ลมเป่าให้ถุงมือโป่ง และการใช้น้ำในการทดสอบการรั่วซึม

3) การบรรจุกล่อง เพื่อรอส่งจำหน่าย

6. การออกแบบและการสร้าง

6.1. การเตรียมแม่พิมพ์ปูนปลาสเตอร์

การพัฒนาต้นแบบแบบพิมพ์เซรามิก จะต้องมีการทำเป็นแบบพิมพ์รูปมือ ซึ่งต้องเริ่มตั้งแต่การทำแม่พิมพ์ปูนปลาสเตอร์ เริ่มต้นด้วยกระบวนการทำโมเดลหล่อแม่พิมพ์ปลาสเตอร์ Master mold, Case mold และ Working mold จนกระทั่งถึงการหล่อน้ำดินเพื่อขึ้นรูปเป็นชิ้นงานแบบพิมพ์มือเซรามิกนั้น แสดงขั้นตอนและวิธีการดังรูปต่อไปนี้

- 1) ทำการกลึงหรือแต่งปูนปลาสเตอร์ให้เป็นโมเดลต้นแบบ ตามขนาดสเปคของแบบพิมพ์ทางการค้าที่กำหนด (ขนาด L) ตัวอย่างโมเดลแบบพิมพ์ต้นแบบ แสดงดังรูป 4
- 2) อัตราส่วนระหว่างปูนปลาสเตอร์ต่อน้ำในการทำแม่พิมพ์คือ ปูนปลาสเตอร์ 1.5 ส่วน ต่อน้ำ 1 ส่วน หมักทิ้งไว้ 1 นาที จากนั้นกวนผสมให้เข้ากันเป็นเวลา 3 นาที แล้วนำมาขึ้นรูปหล่อเป็นแม่พิมพ์
- 3) ทำการ Copy block mold ของโมเดลแบบพิมพ์มือ จำนวน 3 ชิ้นงาน ประกอบด้วย ด้านซ้าย ด้านขวา และฐาน โดยทาน้ำสบู่บนต้นแบบให้ทั่ว ประมาณ 4-5 รอบ แล้วใช้ฟองน้ำชุบน้ำ เช็ดน้ำสบู่ออกให้หมด จากนั้นจึงเทปูนปลาสเตอร์หล่อเป็นแบบพิมพ์ Master mold แสดงดังรูป 5
- 4) ทำแม่พิมพ์ Case mold เพื่อใช้ในการหล่อแม่พิมพ์ใช้งาน (Working mold) ให้มีจำนวนมากสำหรับใช้หล่อน้ำดินต่อไป แสดงดังรูป 6
- 5) ทำการหล่อแม่พิมพ์ Working mold หลากหลาย ชุดจากแม่พิมพ์ Case mold ที่ทำขึ้น เพื่อนำไปใช้งานหล่อน้ำดินเป็นชิ้นงานแบบพิมพ์มือตามสูตรทดลองต่างๆ ต่อไป

6.2. การเตรียมน้ำดินสูตร A90

ทำการชั่งดิน Clay-A 90% ผสมกับ Clay-B 10% ในการเตรียมผสมน้ำดินใช้ปริมาณดินแห้งต่อปริมาณน้ำในสูตรทดลองเท่ากับ 65:35 โดยใช้สารช่วยกระจายตัวคือ สารละลายโซเดียมซิลิเกต 0.1% โดยน้ำหนัก คุณสมบัติของน้ำดินที่ได้ มีค่าความหนาแน่นสูงถึง 1.71 g/cm^3 ค่าการไหลตัวดีมากที่ 22 วินาที ค่าความหนืดน้ำดินเท่ากับ 249.1 cP ขนาดอนุภาคน้ำดินเฉลี่ย $10.36 \mu\text{m}$ และอัตราการหล่อน้ำ การทดสอบคุณสมบัติเนื้อดินทดลอง



รูปที่ 4 ตัวอย่างแบบพิมพ์มือที่ใช้เป็นต้นแบบ (Model)



รูปที่ 5 การหล่อแบบพิมพ์ Master mold จากต้นแบบ (Model)



รูปที่ 6 การทำแม่พิมพ์ Case mold



รูปที่ 7 ตัวอย่างแม่พิมพ์สำหรับหล่อน้ำดิน (Working mold)



รูปที่ 8 ตัวอย่างการหล่อน้ำดินใน Working mold และการแกะแบบชิ้นงานเป็นต้นแบบ
แบบพิมพ์มือตามสูตรเนื้อดินต่างๆ

6.3 การหล่อขึ้นรูปและการตกแต่ง

ทำการพัฒนาต้นแบบแบบพิมพ์เซรามิกในระดับภาคสนามโดยใช้สูตรเนื้อดิน A90 ขึ้นรูปเป็นชิ้นงานขนาดไซส์ L เผาที่อุณหภูมิ 1280°C โดยได้มีการพ่นทรายเพื่อให้มีผิวหยาบ 3 ระดับจากน้อยไปมาก ดังรูปที่ 9 แล้วให้โรงงานพิจารณาเลือกกระดบความหยาบที่เหมาะสม แล้วผิวหยาบที่เหมาะสม คือ ต้องมีความหยาบในระดับ 3 ขึ้นไป ซึ่งเป็นการพ่นด้วยทรายขนาด 0.37 มม. และมีการพ่นซ้ำ 2 ครั้ง



รูปที่ 9 ความหยาบของผิวแบบพิมพ์ในระดับ 1-3 จากน้อยไปมาก

6.4 การเผา

ทำการเผาในเตาแก๊สในบรรยากาศรีดักชัน ที่อุณหภูมิ 1280°C ใช้เวลาในการเผารวม 12 ชั่วโมง



รูปที่ 10 ตัวอย่างต้นแบบภาคนามแบบพิมพ์เซรามิกขนาด L แบบผิวไม่เรียบ (พ่นทราย) ไม่มีเคลือบ

7. การทดสอบและผลการทดสอบ

การทดสอบคุณสมบัติต้นแบบแบบพิมพ์เซรามิก อ้างอิงตามการทดสอบของโรงงานผู้ผลิตถุงมือยาง ที่มีวิธีการทดสอบแบบพิมพ์ที่สั่งซื้อเข้ามาก่อนนำไปใช้งาน เป็นวิธีการทดสอบที่พัฒนาขึ้น (In-house Testing) โดยวิธีการทดสอบมีรายละเอียด ดังต่อไปนี้

1) ขนาดและน้ำหนักชิ้นงาน (Dimension)

วัดขนาดชิ้นงานที่ตำแหน่งต่างๆ เทียบกับแบบ drawing บันทึกผลเป็น มม. เปรียบเทียบขนาดตามจุดต่างๆ และน้ำหนักของแบบพิมพ์ โดยควบคุมความเบี่ยงเบนให้เป็นไปตามมาตรฐานที่แสดงไว้ในตารางที่ 2

2) การทดสอบความทนทานต่อการเปลี่ยนอุณหภูมิเฉียบพลัน (Thermal Shock Resistance)

ทำการทดสอบโดยนำแบบพิมพ์เซรามิกเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 180°C เป็นเวลา 1 ชม. จากนั้นนำออกมาจุ่มลงในน้ำที่อุณหภูมิห้องทันที ยกชิ้นงานขึ้นตรวจสอบดูรอยแตกร้าว สังเกตด้วยตาเปล่า และการเคาะ ฟังเสียงที่ผิดปกติด้วยไม้บรรทัด รายงานผลรอบที่พบรอยแตกร้าวของชิ้นงานทดสอบ ทำซ้ำตามวิธีการเดิมจนครบ 10 รอบ หากไม่พบรอยแตกร้าวถือว่าผ่านการทดสอบ

3) การทดสอบความทนด่าง (Alkaline Resistance)

ทำการตรวจสอบลักษณะของผิวชิ้นงานว่ามีลักษณะผิวเรียบ ไม่มีรอยแตกร้าวหรือสีกร่อน ก่อนนำไปแช่ในสารละลายด่าง โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ที่ความเข้มข้น $20 \pm 1\%$ โดยควบคุมอุณหภูมิ สารละลายที่ $70 \pm 2^\circ\text{C}$ แล้วนำชิ้นมาตรวจสอบดูลักษณะการสีกร่อนของผิวชิ้นงานทุกวัน นำชิ้นงานไปทดลองจุ่มในน้ำยาง แล้วนำแผ่นยางที่ได้มาตรวจสอบดูรอยร้าว บันทึกเวลารวมทั้งหมดที่แช่ชิ้นงานในสารละลายด่าง (ชั่วโมง) ก่อนจะเห็นว่าผิวชิ้นงานเริ่มสีกร่อน และแผ่นยางที่ทดลองจุ่มมีรอยร้าวเกิดขึ้น

ตารางที่ 2 ผลการวัดขนาดของชิ้นงานต้นแบบแบบพิมพ์แบบผิวไม่เรียบและไม่มีเคลือบขนาด L เทียบกับสเปคของแบบพิมพ์ทางการค้า

Spec. (mm.)	แบบพิมพ์ทางการค้า ที่ใช้เป็นแม่แบบขนาด L	ต้นแบบชนิดผิวไม่เรียบ และไม่มีเคลือบ (พ่นทราย)
Height	380 ± 3	381
Palm length textured	214 ± 3	214
Palm circumference	224 ± 3	223
Wrist circumference	195 ± 3	195
Beading circumference (300 mm. from tip of middle finger)	209 ± 3	211
Finger length		
1)	58 ± 2	57
2)	76 ± 2	75
3)	88 ± 2	89
4)	77 ± 2	76
5)	58 ± 2	59

Spec. (mm.)	แบบพิมพ์ทางการค้า ที่ใช้เป็นแม่แบบขนาด L	ต้นแบบชนิดผิวไม่เรียบ และไม่มีเคลือบ (พ่นทราย)
Finger circumference		
1)	73 ± 2	75
2)	66 ± 2	67
3)	68 ± 2	69
4)	62 ± 2	63
5)	55 ± 2	56
Base holder slot		
Width	27 ± 2	29
Length	56 ± 2	57
Base diameter	79 ± 2	77
Weight (g)	800-1000	832
Clearance length from thumb to last	Max 130	127

จากผลการทดสอบต้นแบบแบบพิมพ์เซรามิกภาคสนามในข้างต้น พบว่าชิ้นงานต้นแบบมีคุณสมบัติที่สำคัญต่อการนำไปใช้ในกระบวนการผลิตจริงในโรงงานผ่านตามเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ทั้งในด้านขนาดและน้ำหนักของชิ้นงานหลังเผา ความทนทานต่อการเปลี่ยนอุณหภูมิเฉียบพลัน (Thermal Shock Resistance) และความสามารถในการทนด่าง (Alkaline Resistance) โดยชิ้นงานต้นแบบจะมีค่าความทนด่างที่น้อยกว่าแบบพิมพ์ทางการค้า ซึ่งอาจทำให้อายุการใช้งานของแบบพิมพ์ในกระบวนการผลิตถุงมือยางสั้นกว่าเล็กน้อย

ทั้งนี้ทางโรงงานได้ทดลองนำชิ้นงานต้นแบบไปทดลองผลิตถุงมือยางในกระบวนการผลิตจริง จำนวน 5 ชิ้น และทำการสุ่มตรวจคุณภาพถุงมือยางที่ผลิตได้ทุกๆ 12 ชั่วโมง (1 กะ) ซึ่งจะทำให้การผลิต 2 กะต่อวัน เท่ากับจะมีการสุ่มตรวจ 2 ครั้งต่อวัน ดังแสดงในรูปที่ 11 โดยในการตรวจสอบนั้นเจ้าหน้าที่จะทำการสุ่มตรวจไปเรื่อยๆ จนกว่าถุงมือยางที่ผลิตได้จะพบรอยร้าวตามจุดต่างๆ จึงจะเลิกใช้แบบพิมพ์นั้นๆ และบันทึกจำนวนเวลาที่สามารยใช้งานแบบพิมพ์ได้ ซึ่งผลการตรวจสอบคุณภาพถุงมือยางจากการสุ่มตรวจ ในช่วง 1-12 วันแรก แสดงได้ดังตาราง 3



รูปที่ 11 ลักษณะการใช้งานแบบพิมพ์เซรามิกในกระบวนการผลิตถุงมือยาง

ตารางที่ 3 ผลการสุ่มตรวจสอบคุณภาพถุงมือยางที่ผลิตจากแบบพิมพ์ที่พัฒนาขึ้น

วันที่	จำนวน ต.ย.สุ่ม ตรวจ	รายละเอียดการตรวจสอบถุงมือ					
		ยาว (มม.)	กว้าง (มม.)	น้ำหนัก (กรัม)	ม้วน ขอบ	การ ถอด	ลักษณะถุงมือ
1	5	240-247	108-110	4.80-4.84	✓	✓	ปกติ
2	5	240-245	108-110	4.68-4.80	✓	✓	คราบเคมี คราบสกปรก
3	5	240-245	108-110	5.26-4.76	✓	✓	คราบเคมี คราบสกปรก
5	5	240-245	108-110	5.04	✓	✓	คราบเคมี ง่ำมบาง
7	5	240-245	108-110	5.06-5.12	✓	✓	ง่ำมบาง
9	5	240-245	108-110	5.20-5.10	✓	✓	ง่ำมบาง
12	5	240-246	108-110	4.84-4.98	✓	✓	คราบขาว ง่ำมบาง
15	5	240-247	108-110	5.04-5.08	✓	✓	ง่ำมบาง
18	5	240-248	108-110	4.98-5.08	✓	✓	ง่ำมบาง คราบเคมี
22	5	240-245	108-110	5.00-5.04	✓	✓	ง่ำมบาง คราบเคมี
25	5	240-250	108-110	5.06-5.12	✓	✓	คราบเคมี
28	5	240-245	108-110	5.08-5.24	✓	✓	ง่ำมบาง คราบเคมี
30	5	240-250	108-110	5.04-5.24	✓	✓	ง่ำมบาง
34	3	240-246	108-110	5.10	✓	✓	ง่ำมบาง คราบเคมี

จากผลการตรวจสอบแบบพิมพ์ต้นแบบในสายการผลิต พบว่าแบบพิมพ์ต้นแบบสามารถใช้ผลิตถุงมือ
 ยางได้ปกติตามสภาวะการทำงานจริงในกระบวนการผลิตของโรงงาน ในช่วงวันที่ 2-5 จะพบว่ามีการบกพร่อง
 บ้าง และหลังจากนั้นจะพบว่าถุงมือที่มีความบางเล็กน้อยบริเวณง่ามนิ้ว ทั้งนี้การเกิดคราบ และถุงมือบาง
 บริเวณง่ามนิ้ว เป็นข้อสังเกตที่ยังไม่ถือเป็นตำหนิ และอาจเกิดขึ้นเนื่องจากสภาวะการเตรียมน้ำยาง และ
 ความเร็วในการขึ้นรูป มากกว่าปัญหาที่จะเกิดขึ้นจากแบบพิมพ์ ตลอดระยะเวลาการผลิตในสายการผลิตนี้รวม
 ทั้งหมด 34 วัน พบว่าต้นแบบแบบพิมพ์ฯ สามารถใช้งานได้ปกติ ไม่พบความเสียหายของแบบพิมพ์ต้นแบบ
 และถุงมือยางที่ผลิตได้

พร้อมกันนี้ผู้ประกอบการได้ให้ข้อสังเกตและข้อคิดเห็นเกี่ยวกับต้นแบบแบบพิมพ์ที่ส่งให้ทางโรงงานได้
 ทดลองนำไปใช้ในครั้งนี้ว่า คุณสมบัติต่างๆ มีความเหมาะสมในการนำไปใช้งานได้ แต่น่าจะสามารถปรับปรุง
 ความทนทานให้มากขึ้น ซึ่งจะทำให้สามารถยืดอายุการใช้งานของแบบพิมพ์ให้ยาวนานขึ้น และการขัดแต่งผิว
 ของชิ้นงานก่อนเข้าเผาที่ยังไม่เรียบร้อยมากนัก โดยพบว่าชิ้นงานบางชิ้นยังมีการขัดแต่งที่ไม่ดีพอ ชิ้นงานมีรอย
 ตะเข็บและรอยบุ๋มที่ผิวในบางจุด ซึ่งอาจส่งผลต่อถุงมือยางที่ผลิตได้ ทำให้ถุงมือที่ได้เป็นรอย และผิวไม่
 สม่ำเสมอเท่ากันทั้งชิ้น ซึ่งการปรับปรุงกระบวนการผลิตแบบพิมพ์ของผู้ประกอบการเซรามิก ก็เป็นส่วนหนึ่ง
 จำเป็นในการพัฒนาการผลิตแบบพิมพ์ให้มีคุณภาพดีขึ้นต่อไป

7. ต้นทุนการผลิต

เนื้อดิน A90 จะมีต้นทุนวัตถุดิบอยู่ที่ 15.30 บาท/กก. แบบพิมพ์หลังเผาแล้วซึ่งจะมีน้ำหนักประมาณ
 800-900 กรัม/ชิ้น เมื่อประเมินจากน้ำหนักที่จะหายไปหลังเผาประมาณ 10-15% จะทำให้มีปริมาณการใช้
 วัตถุดิบเนื้อดินแห้งประมาณ 900-1100 กรัม/ชิ้น ซึ่งก็จะทำให้มีต้นทุนวัตถุดิบสำหรับสูตร อยู่ที่ 13.78-16.83
 บาท/ชิ้น ส่วนต้นทุนการเผาของแบบพิมพ์ไม่เคลือบ ซึ่งทำการเผาในบรรยากาศรีดักชันที่อุณหภูมิ 1280°C
 ประมาณ 12 ชั่วโมง ใช้แก๊สประมาณ 2 ถึง (ถึงละ $1,200 \times 2 = 2,400$ บาท) โดยเตาเผาที่ใช้ขนาด 1 Q บรรจุ
 ชิ้นงานแบบพิมพ์รูปมือประมาณได้ประมาณ 130-140 ชิ้น ซึ่งเมื่อกำนวณต้นทุนการเผาอยู่ที่ประมาณ 17.14-
 18.46 บาท/ชิ้น ดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ต้นทุนการผลิตแบบพิมพ์เซรามิกสำหรับขึ้นรูปถุงมือยางชนิดที่ไม่มีเคลือบ

แบบพิมพ์	ต้นทุนวัตถุดิบ บาท/ชิ้น	ต้นทุนหลังเผา บาท/ชิ้น	ต้นทุนรวม บาท/ชิ้น
สูตร A90	13.78-16.83	17.14-18.46	30.92-35.29

8. วิเคราะห์และสรุปผลการทดสอบ

ผลการพัฒนาต้นแบบแบบพิมพ์เซรามิกสำหรับขึ้นรูปถุงมือยางโดยวิธีการจุ่ม โดยใช้สูตรดิน A90 พบว่าสามารถทำการผลิตได้ที่อุณหภูมิต่ำที่ 1280°C เมื่อเปรียบเทียบกับแบบพิมพ์ทั่วไป ที่จะทำให้การเผาที่อุณหภูมิสูงกว่า 1300°C แบบพิมพ์ต้นแบบผ่านการทดสอบด้านสเปค ความทนต่อการเปลี่ยนอุณหภูมิฉับพลัน ความทนต่าง ตามวิธีการทดสอบปกติของโรงงาน โดยชิ้นงานต้นแบบจะมีค่าความทนต่างที่น้อยกว่าแบบพิมพ์ทางการค้า ซึ่งอาจจะทำให้อายุการใช้งานของแบบพิมพ์ในกระบวนการผลิตถุงมือยางสั้นกว่าเล็กน้อย ทั้งนี้เมื่อนำไปใช้ทดลองในกระบวนการผลิตจริง ก็พบว่าสามารถใช้งานได้ดี โดยแบบพิมพ์ที่พัฒนาขึ้นนี้มีต้นทุนการผลิตที่ต่ำกว่าของแบบพิมพ์เซรามิกสำหรับขึ้นรูปถุงมือยางในท้องตลาด ซึ่งจะมีราคาประมาณชิ้นละ 200 บาทขึ้นไป จึงอาจกล่าวได้ว่าสูตรเนื้อดินที่พัฒนาขึ้น น่าจะมีศักยภาพพอสมควรที่นำไปขยายสเกลการผลิต และทำเป็นผลิตภัณฑ์ส่งให้กับอุตสาหกรรมการผลิตถุงมือยางได้ในราคาที่ถูกลง ซึ่งนอกจากจะเป็นการพัฒนาผลิตภัณฑ์ทางเลือกให้กับอุตสาหกรรมเซรามิกในประเทศแล้ว การใช้ผลิตภัณฑ์ในประเทศทดแทนการนำเข้า ก็จะช่วยลดต้นทุน เสริมสร้างความสามารถในการแข่งขันของอุตสาหกรรมแปรรูปยางในตลาดโลกได้เป็นอย่างดี

9. ข้อสรุปเกี่ยวกับสมรรถภาพของต้นแบบ

สูตรดินทดลองที่เหมาะสมในการพัฒนาเป็นต้นแบบแบบพิมพ์เซรามิกขึ้นรูปถุงมือยางโดยวิธีการจุ่ม สูตรดินผสม A90 ที่มีส่วนผสมของ Clay-A 90% และ Clay-B 10% โดยน้ำหนักของส่วนผสมทั้งหมด นอกจากนี้ยังใช้สาร Deflok 2870 เป็นสารช่วยกระจายตัวเพิ่มเติมในปริมาณ 0.1-0.4% ของน้ำหนักวัตถุดิบรวมในสูตร ที่เมื่อทำการทดสอบคุณสมบัติของต้นแบบแล้วนั้น พบว่าชิ้นงานต้นแบบมีคุณสมบัติสำคัญที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้งานในกระบวนการผลิตของโรงงานผลิตถุงมือยางได้จริง โดยผ่านตามเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ทั้งในด้านขนาดและน้ำหนักของชิ้นงานหลังเผา ความทนทานต่อการเปลี่ยนอุณหภูมิเฉียบพลัน (Thermal Shock Resistance) ในช่วง 30-180°C มากกว่า 10 รอบ และความสามารถในการทนต่าง (Alkaline Resistance) ในสารละลาย KOH 20% ที่ 70°C ไม่น้อยกว่า 150 ชั่วโมง และมีต้นทุนวัตถุดิบและต้นทุนในการเผารวม 30.92-35.29 บาท/ชิ้น

10. ทรรศนะทางปัญญา

-

11. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ผู้สนับสนุนงบประมาณในการทำวิจัย บริษัท วัฒนชัยรับเบอร์เมท จำกัด เอื้อเพื่อข้อมูลและให้ความอนุเคราะห์การทดสอบที่เกี่ยวข้อง และศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ ผู้ให้การสนับสนุนเครื่องมือใน

การดำเนินงาน

12. บรรณานุกรม

- 1) สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม. (2558) รายงานสรุปภาวะเศรษฐกิจอุตสาหกรรมปี 2558 และแนวโน้มปี 2559. กระทรวงอุตสาหกรรม.
- 2) สถิติยางไทย. สถาบันวิจัยยาง การยางแห่งประเทศไทย. สืบค้น 6 ธันวาคม 2559 จาก http://www.rubberthai.com/statistic/stat_index.htm
- 3) Thailand Board of Investment. (2016) **Thailand: The World's Leader in Natural Rubber Production**. August 2016 vol. 26 no. 8
- 4) สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม. (2559) รายงานการศึกษาเชิงลึก เรื่อง อนาคตถุงมือยางไทยในตลาดโลก. กระทรวงอุตสาหกรรม.
- 5) Global Market Insights Inc. (2016) **Industrial Safety Gloves Market Size By Material**. September 2016
- 6) CIMB Group Berhad. (2016) **Rubber Gloves: Loosening its grip**. Industrial Goods and Services - Malaysia Equity research.
- 7) ทนงศักดิ์ วัฒนา และ ศุภัสสรณ์ หลิมเฮงฮะ. เทคโนโลยีการผลิตถุงมือยางทางการแพทย์ (**Medical Latex Glove**). วารสารส่งเสริมเทคโนโลยี. ฉบับที่ 249. มิถุนายน-กรกฎาคม 2554, 67-72.
- 8) ทวี พรหมพลกุล. (2523) **เครื่องเคลือบดินเผาเบื้องต้น**. กรุงเทพฯ: โอเดียนสโตร์.
- 9) Felix Singer, Sonja S. Singer. (1963). **Industrial ceramics**. Chemical Publishing Co.
- 10) Harabi, A., Guerfa, F., Harabi, E., Benhassine, M. T., Foughali, L., & Zaiou, S. (2016). **Preparation and characterization of new dental porcelains, using K-feldspar and quartz raw materials. Effect of B₂O₃ additions on sintering and mechanical properties**. Materials Science and Engineering: C, 65, 33-42.
- 11) Turkmen, O., Kucuk, A., & Akpinar, S. (2015). **Effect of wollastonite addition on sintering of hard porcelain**. Ceramics International, 41(4), 5505-5512.
- 12) Sahlaoui, H., Makhlouf, K., & Sidhom, H. (2013). **Comparative Study of the Thermal Shock Resistance of an Industrial Tableware Porcelain**. Journal of Engineering, 2013.
- 13) Tucci, A., Esposito, L., Malmusi, L., & Rambaldi, E. (2007). **New body mixes for porcelain stoneware tiles with improved mechanical characteristics**. Journal of the European Ceramic Society, 27(2), 1875-1881.

ภาคผนวก ข.

ข้อมูลประกอบรายงาน

1) เอกสารอ้างอิงดินสำเร็จรูป

- Common porcelain

Clay-B = ดินสำเร็จรูป PBA

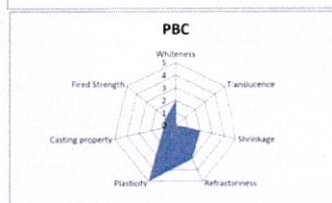
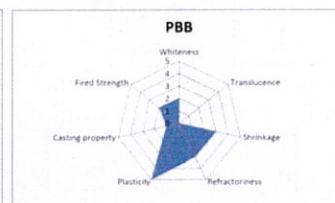
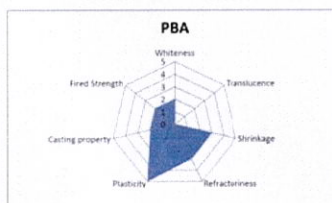
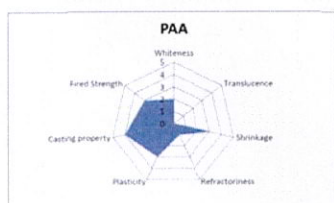
- Alumina porcelain and white porcelain

Clay-A = ดินสำเร็จรูป PEA

Body-R = ดินสำเร็จรูป PFA

COMMON PORCELAIN

Chemical Analysis	Unit	PAA	PBA	PBB	PBC
SiO ₂	%	67.10%	63.30%	61.40%	69.42%
Al ₂ O ₃	%	20.40%	22.70%	23.40%	18.92%
Fe ₂ O ₃	%	0.74%	0.95%	1.02%	0.79%
TiO ₂	%	0.17%	0.20%	0.20%	0.17%
CaO	%	0.15%	0.20%	0.18%	0.17%
MgO	%	0.16%	0.19%	0.19%	0.16%
K ₂ O	%	4.30%	3.81%	4.11%	3.18%
Na ₂ O	%	0.77%	0.60%	0.67%	0.50%
Loss of ignition	%	6.06%	7.85%	8.74%	6.54%
Physical Properties	Unit	PAA	PBA	PBB	PBC
Slip density	g/cm ³	1.71-1.75	1.68-1.72	1.68-1.72	1.68-1.72
Sodium Silicate 42-43 Be'	%w/w	0.15-0.35	0.20-0.45	0.25-0.60	0.25-0.60
Viscosity	poise	2.0-4.0	2.5-5.0	4.0-7.0	3.0-4.0
Fluidity	°swg	280-330	-	-	-
Thixotropy 5 min	°swg	15-45	-	-	-
Casting rate 30 min	mm	3.0-4.0	-	-	-
Green strength	kg/cm ²	35-50	55-85	60-95	50-70
Fired Properties	Unit	PAA	PBA	PBB	PBC
Temperature	°C	1200°C OF	1280°C RF	1200°C OF	1280°C RF
Drying shrinkage	%	2.00-4.00	2.00-4.00	3.00-5.00	3.00-5.00
Total shrinkage	%	11.50-13.00	12.00-14.00	10.50-12.50	12.00-14.00
Sagging	cm.	0.30-0.75	0.90-1.50	0.20-0.60	0.50-1.00
Water absorption	%	0.40-0.80	0.00-0.14	3.00-5.50	0.00-0.14
Fired strength	kg/cm ²	450-650	700-900	370-600	650-800
Color after firing	L	78.80-84.74	75.37-77.21	85.25-87.36	76.63-78.78
	a	2.05-3.87	(-0.78,-0.40)	1.29-2.48	-0.80,-0.30
	b	12.06-15.71	2.50-3.32	13.27-15.10	4.85-7.18
COE. 25-500°C	x10 ⁻⁷ /K	170-200	160-190	160-190	160-190
%Expansion at 500 °C	%	0.28-0.32	0.26-0.30	0.25-0.30	0.25-0.30



Head Office / Factory : 99/1 M.2, Asia Rd., T. Bannmor, A. Promburi, Singburi 16120, Thailand.

Tel. +66(0)3659 9825-7 Fax. +66(0)3659 9736

Sales Office : 18 Soi Hathairat 22, Hathairat Rd., Samwatawantok, Klongsamwa, Bangkok 10510.

Tel. +66(0)2915 9811 Fax. +66(0)2906 5373

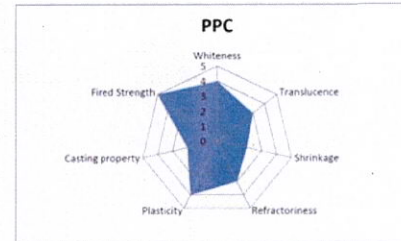
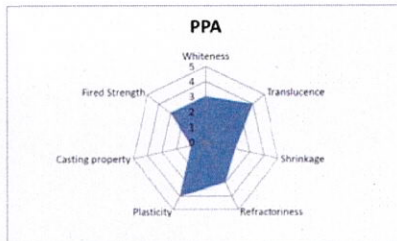
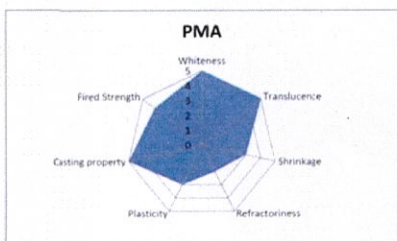
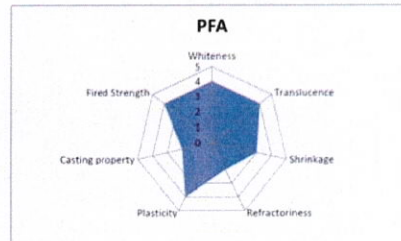
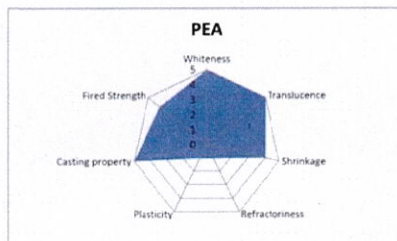
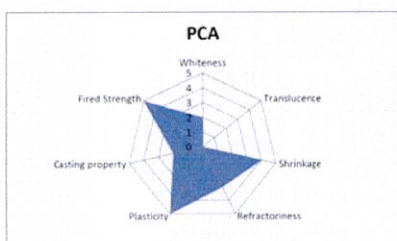
E-mail : marketing-sing@compoundclay.net

Website : <http://www.compoundclay.net>



ALUMINA PORCELAIN AND WHITE PORCELAIN

Chemical Analysis	Unit	PCA	PEA	PFA	PMA	PPA	PPC
SiO ₂	%	48.80%	60.50%	64.70%	66.82%	71.20%	60.10%
Al ₂ O ₃	%	39.30%	27.60%	22.60%	21.45%	18.80%	31.32%
Fe ₂ O ₃	%	0.89%	0.52%	0.41%	0.12%	0.67%	0.68%
TiO ₂	%	0.27%	0.03%	0.06%	0.02%	0.13%	0.32%
CaO	%	0.25%	0.09%	0.22%	0.21%	0.12%	0.22%
MgO	%	0.24%	0.11%	0.08%	0.15%	0.14%	0.12%
K ₂ O	%	3.09%	3.65%	2.85%	3.96%	2.34%	2.20%
Na ₂ O	%	0.65%	1.14%	1.26%	0.92%	0.28%	0.56%
Loss of ignition	%	6.05%	6.36%	7.82%	6.11%	6.13%	4.48%
Physical Properties	Unit	PCA	PEA	PFA	PMA	PPA	PPC
Slip density	g/cm ³	1.75-1.78	1.68-1.72	1.68-1.72	1.70-1.75	1.75-1.78	1.75-1.78
Dispex	%w/w	0.30-0.50	0.10-0.20	0.25-0.50	0.10-0.20	0.40-0.60	0.30-0.50
Viscosity	poise	2.0-4.0	2.0-3.0	2.5-4.0	2.0-4.0	3.0-8.0	3.0-5.0
Fluidity	°swg	-	325-340	280-340	280-340	280-330	280-320
Thixotropy 5 min	°swg	-	15-25	15-45	10-30	10-30	15-45
Casting rate 30 min	mm	-	5.5-7.0	3.5-5.0	5.0-6.0	4.5-5.0	4.5-6.0
Green strength	kg/cm ²	50-75	15-30	30-60	30-45	40-60	45-60
Fired Properties	Unit	PCA	PEA	PFA	PMA	PPA	PPC
Temperature	°C	1280°C RF	1200°C OF 1280°C RF	1200°C OF 1280°C RF	1280°C RF 1350°C RF	1280°C RF	1280°C RF
Drying shrinkage	%	3.00-5.50	1.00-2.50	1.00-2.50	2.00-3.50	1.50-3.00	2.00-3.50
Total shrinkage	%	13.00-15.00	10.00-12.00	12.00-14.00	11.20-12.80	12.00-14.00	12.00-13.60
Sagging	cm.	0.50-1.00	0.50-0.90	1.00-1.50	0.40-0.70	0.50-1.20	0.80-1.20
Water absorption	%	0.00-0.14	2.50-4.00	0.00-0.14	0.00-2.00	0.00-0.14	0.00-0.20
Fired strength	kg/cm ²	1000-1250	450-650	920-1,000	520-800	900-950	800-1,000
Color after firing	L	77.05-79.39	93.40-95.55	90.05-91.19	90.73-93.76	86.29-88.25	88.96-90.89
	a	1.51-1.83	0.30-0.95	(-1.25, -1.10)	(-0.05, 0.88)	(-1.55, -1.16)	(-1.27, -0.86)
	b	16.26-19.10	5.50-6.50	1.30-1.70	5.74-7.28	1.09-1.36	0.73-1.25
COE, 25-500°C	x10 ⁻⁷ /K.	160-190	190-220	190-220	155-190	180-210	125-160
%Expansion at 500°C	%	0.25-0.30	0.30-0.35	0.30-0.35	0.25-0.30	0.29-0.33	0.20-0.25



Head Office / Factory : 99/1 M.2, Asia Rd., T. Bannmor, A. Promburi, Singburi 16120, Thailand.

Tel. +66(0)3659 9825-7 Fax. +66(0)3659 9736

Sales Office : 18 Soi Hathairat 22, Hathairat Rd., Samwatawontok, Klongsamwa, Bangkok 10510.

Tel. +66(0)2915 9811 Fax. +66(0)2906 5373

E-mail : marketing-sing@compoundclay.net

Website : <http://www.compoundclay.net>



ภาคผนวก ข.

ข้อมูลประกอบรายงาน

2) รายการวิเคราะห์ทดสอบคุณสมบัติเซรามิกตามมาตรฐาน

- ASTM C326-03: Standard Test Method for Drying and Firing Shrinkages of Ceramic Whiteware Clays
- ASTM C373-88 (1999): Standard Test Method for Water Absorption, Bulk Density, Apparent Porosity, and Apparent Specific Gravity of Fired Whiteware Products
- ASTM C674-88 (1999): Standard Test Methods for Flexural Properties of Ceramic Whiteware Materials
- ASTM C372-94 (2001): Standard Test Method for Linear Thermal Expansion of Porcelain Enamel and Glaze Frits and Fired Ceramic Whiteware Products by the Dilatometer Method

ภาคผนวก ค.

เอกสารแนบ

-
- 1) ร่างบทความสำหรับเผยแพร่ เนื่อดินพอร์ซเลนสำหรับทำแบบพิมพ์ถุงมือยาง

เนือดินพอร์ชเลนสำหรับทำแบบพิมพ์ถุงมือยาง

ดร.อนุชา วรรณก้อน และทีมวิจัย CGL

แบบพิมพ์เซรามิกสำหรับขึ้นรูปถุงมือยางโดยวิธีการจุ่ม เป็นแบบพิมพ์ที่มีสมบัติเหมาะสมและมีการใช้งานกันทั่วไปในโรงงานผู้ผลิตถุงมือยาง เนื่องจากในกระบวนการผลิตถุงมือยางนั้นเป็นกระบวนการผลิตแบบสายพาน ที่มีการยืดแบบพิมพ์ไว้แล้วผ่านการจุ่มในสารละลายต่างๆ ที่มีทั้งกรดและด่างเพื่อทำความสะอาดแบบพิมพ์ สารเคมีที่ช่วยทำให้น้ำยางไม่จับกับแบบพิมพ์ และจุ่มน้ำยางซึ่งจะแข็งตัว (vulcanization) เมื่อถูกอบที่อุณหภูมิ 120°C หลังจากที่มีลอกถุงมือยางที่แข็งตัวออกแล้ว ก็จะต้องผ่านกระบวนการล้างทำความสะอาดอีกเป็นวงจรไปเรื่อยๆ จึงทำให้แบบพิมพ์ที่ใช้ต้องมีความทนทานต่อสารเคมีและการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลัน ทั้งนี้ประเภทของเซรามิกที่มีคุณสมบัติเหมาะสม ได้แก่ เนือดินประเภทพอร์ชเลน ซึ่งมีการผลิตในประเทศไม่มากนัก และยังมีน้อยรายยิ่งขึ้น ถ้าเป็นพอร์ชเลนสำหรับทำแบบพิมพ์ถุงมือยาง จึงทำให้ผู้ผลิตถุงมือยาง ส่วนใหญ่ต้องนำเข้าแบบพิมพ์พอร์ชเลนจากต่างประเทศ



รูปที่ 1 ลักษณะแบบพิมพ์ถุงมือยางและถุงมือยางที่ได้จากกระบวนการผลิต

ประเทศไทยนับว่าเป็นประเทศผู้ผลิตวัตถุดิบยางรายใหญ่ของโลก แต่กลับมีมูลค่าการแปรรูปยางค่อนข้างน้อยเมื่อเทียบกับประเทศเพื่อนบ้าน โดยส่วนใหญ่จะเป็นการแปรรูปวัตถุดิบยางเป็นถุงมือยาง ซึ่งจะมีแนวโน้มความต้องการที่สูงขึ้นทั้งในเชิงปริมาณ คุณภาพ และรูปแบบที่หลากหลายมากขึ้น จึงนับได้ว่าเป็นอุตสาหกรรมการแปรรูปยางที่สำคัญของประเทศ อย่างไรก็ตามในกระบวนการผลิตนั้น จะต้องใช้แบบพิมพ์เซรามิกพอร์ชเลนดังกล่าวข้างต้น ทีมงานวิจัยของ MTEC จึงได้รับการสนับสนุนจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) เพื่อการพัฒนาเนือดินและเคลือบพอร์ชเลน สำหรับใช้ทำแบบพิมพ์ขึ้นรูปถุงมือยางโดยวิธีการจุ่ม เป็นงานวิจัยเพื่อเป็นองค์ความรู้ให้กับผู้ประกอบการเซรามิกในประเทศที่มีความสนใจจะพัฒนาผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าเพิ่มสูงขึ้น แทนที่ผลิตภัณฑ์เครื่องใช้บนโต๊ะอาหารที่มีภาวะการแข่งขันในตลาดสูงในปัจจุบัน นอกจากนี้ยังมีวัตถุประสงค์เพื่อลดอุณหภูมิในการเผาผลาญให้ต่ำกว่า 1300°C เพื่อให้เป็นปัจจัยหนึ่งในการลดต้นทุนเพื่อให้สามารถแข่งขันได้กับแบบพิมพ์ที่นำเข้าจากต่างประเทศ

งานวิจัยเริ่มจากการพัฒนาเนื้อดินพอร์ซเลน โดยใช้วัตถุดิบที่ได้จากซัพพลายเออร์ในประเทศ ได้แก่ ดินขาว ดินดำ โซเดียมและโปแตสเซียมเฟลด์สปาร์ และควอทซ์ ซึ่งมีองค์ประกอบทางเคมี ที่วิเคราะห์ได้จากเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์ (XRF) แสดงดังตารางที่ 1 ทั้งนี้ได้เตรียมสูตรดิน จำนวน 12 สูตรเปรียบเทียบกับสูตรอ้างอิง (Body-R) โดยใช้ดินขาวในช่วง 40-65% ดินดำ 5-20% โซเดียมหรือโปแตสเซียมเฟลด์สปาร์ 15-30% และควอทซ์ 10-25% โดยน้ำหนัก นอกจากนั้นยังมีการพัฒนาสูตรเนื้อดินผสม (A85-A95) ที่ใช้เนื้อดินพอร์ซเลนผสมเสร็จ Clay-A และ Clay-B อีกจำนวน 3 สูตร เพื่อให้สามารถขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อได้ง่ายขึ้น และให้สามารถเผาสุกตัวได้ที่อุณหภูมิไม่เกิน 1300°C

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบและดินผสมเสร็จที่ใช้ในการทดลอง

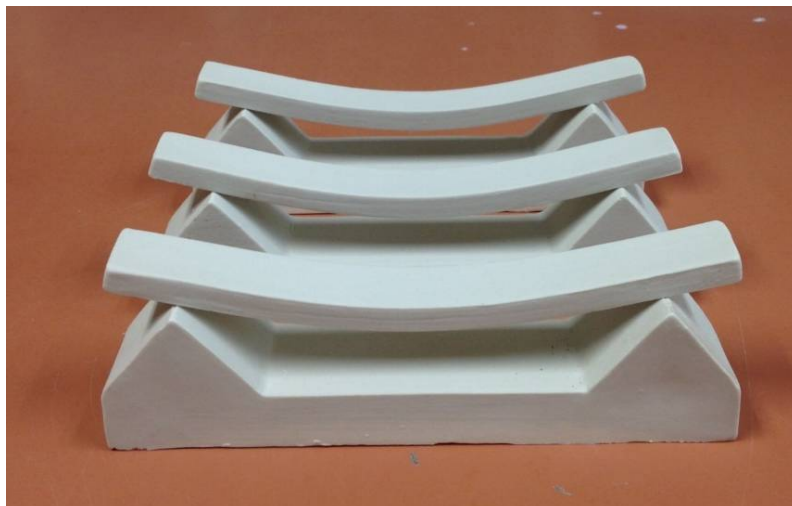
Oxide	Clay-A	Clay-B	Body-R	Kaolin	Ball clay	K-Feldspar	Na-Feldspar	Quartz
SiO ₂	58.50	62.10	64.70	48.00	56.50	66.74	68.52	99.5
Al ₂ O ₃	26.40	24.10	22.60	36.00	26.50	18.44	17.55	0.13
Na ₂ O	0.53	0.82	1.26	0.01	0.34	3.09	8.06	-
K ₂ O	3.74	4.33	2.85	2.10	2.17	11.26	0.75	-
Rb ₂ O	0.06	0.04	-	-	-	-	-	-
MgO	0.25	0.29	0.08	0.01	0.28	0.2	0.58	-
CaO	0.13	0.17	0.22	0.01	0.25	0.01	1.77	0.04
BaO	0.01	<0.01	-	-	-	-	-	-
TiO ₂	0.25	0.23	0.06	0.05	0.46	0.01	0.29	-
ZrO ₂	0.01	0.01	-	-	-	-	-	-
P ₂ O ₅	0.04	0.03	-	-	-	-	-	-
MnO	0.02	0.01	-	-	-	-	-	-
PbO	<0.01	<0.01	-	-	-	-	-	-
Fe ₂ O ₃	0.90	0.77	0.41	1.30	1.25	0.1	0.2	0.03
SO ₃	0.02	0.03	-	-	-	-	-	-
Cl	0.01	0.01	-	-	-	-	-	-
LOI %	9.13	7.06	7.82	12.50	10.80	0.19	1.24	0.3
Sum	100.00	100.00	100.00	99.98	98.55	100.04	98.96	100.00

ทำการเตรียมวัตถุดิบตามสูตรที่กำหนด บดผสมและทำเป็นน้ำดินแล้ว ทำการหล่อขึ้นรูปเป็นชิ้นงาน ทดสอบ แล้วเผาช่วงอุณหภูมิ 1250-1300°C ชิ้นงานที่ได้นำมาทดสอบสมบัติทั่วไป ได้แก่ การหดตัว การตกตัว

(sagging) ความหนาแน่น ความพรุนตัว การดูดซึมน้ำ ความต้านทานแรงกด เพื่อดูความเป็นพอร์ชเลน ซึ่งจากสูตรที่พัฒนาขึ้นหลังการเผาที่อุณหภูมิ 1280°C สูตร 16 พบว่ามีเพียงสูตร 16 ที่มีสมบัติความเป็นพอร์ชเลนใกล้เคียงกับสูตรอ้างอิง Body-R ที่สามารถเผาสุกตัวได้ที่อุณหภูมิ 1280°C ส่วนสูตรที่ใช้เนื้อดินผสมระหว่าง Clay-A และ Clay-B พบว่าสูตร A90 ให้สมบัติที่ดีที่สุดในกลุ่ม ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 สมบัติของชิ้นงานสูตรที่มีสมบัติที่เหมาะสมกับการนำไปพัฒนาเป็นต้นแบบ

Formula	Shrinkage (%)	Water absorption (%)	Bending strength (MPa)	Sagging (mm.)
Body-R	13.29±0.29	0.10±0.05	69.29±2.68	6.17±0.76
GFB-16	11.38±0.89	0.18±0.09	72.55±1.94	11.00±1.00
A85	14.40±1.62	0.00±0.00	73.56±3.05	14.83±0.76
A90	12.50±0.40	0.07±0.07	82.12±1.73	9.83±0.76
A95	13.69±0.88	0.06±0.03	81.48±2.29	9.50±0.00



รูปที่ 2 ตัวอย่างที่ใช้วัด sagging

ทีมวิจัยจึงได้เลือกสูตรอ้างอิง (Body-R) สูตรที่ 16 (GFB-16) และสูตรดินผสม (A90) รวมจำนวน 3 สูตร มาทำเป็นชิ้นงานต้นแบบรูปมือ โดยขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อด้วยแม่พิมพ์ปูนปลาสเตอร์ ซึ่งต้องมีการออกแบบและจัดทำแม่พิมพ์ปูนปลาสเตอร์ให้ถูกต้อง โดยต้องเผื่อขนาดแม่พิมพ์ในแต่ละส่วนให้มีขนาดใหญ่กว่า เพื่อให้ได้ขนาดที่ถูกต้องหลังจากการหดตัวหลังเผา จึงต้องมีการปรับแก้หลายครั้งจนได้ค่าขนาดที่มีความคลาดเคลื่อนจากต้นแบบไม่เกิน ± 2 มม. ตามตำแหน่งต่างๆ เช่น เส้นรอบวง ความกว้างยาวของนิ้วมือ อุ้งมือ และข้อมือ เป็นต้น

เมื่อได้ต้นแบบแบบพิมพ์พอร์ชเลนรูปมือแล้ว ได้ทำการทดสอบความทนต่อสารเคมีและความทนต่อการเปลี่ยนอุณหภูมิฉับพลัน โดยการทดสอบความทนต่อสารเคมีนั้นได้ใช้วิธีการแช่ในสารละลาย KOH เข้มข้น

20% ที่อุณหภูมิ 70°C แล้วนำออกมาตรวจสอบตำหนิเป็นระยะๆ ส่วนการทดสอบความทนต่อการเปลี่ยนอุณหภูมิฉับพลัน ใช้วิธีการอบที่อุณหภูมิ 180°C และนำออกแช่ในน้ำเย็นทันทีจำนวน 10 รอบ ตรวจสอบดูการแตกร้าว นอกจากนั้นได้ทำการตรวจวัดความขรุขระของผิวหลังการแช่ โดยใช้เครื่องวัดความหยาบ Surface Roughness Tester (Alicona InfiniteFocus) ได้ผลการทดสอบ ดังแสดงในตารางที่ 3



รูปที่ 3 การทำแม่พิมพ์ต้นแบบแบบพิมพ์รูปมือ

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบความทนทานต่อสารเคมีและการเปลี่ยนอุณหภูมิฉับพลันของต้นแบบ

สูตร	ความทนทานต่อการเปลี่ยนอุณหภูมิฉับพลัน	ความทนทานต่อสารเคมี	ความหยาบ (nm.)	
			ก่อนแช่	หลังแช่
Body-R	ไม่ผ่าน (2 รอบ)	พบตำหนิหลังแช่ 392 ชั่วโมง	4,162.00 ± 55.58	3,389.00 ± 138.34
GFB-16	ไม่ผ่าน (2 รอบ)	พบตำหนิก่อนทดสอบ	2,533.00 ± 86.63	2,857.00 ± 301.64
A90	ผ่าน (10 รอบ)	พบตำหนิหลังแช่ 172 ชั่วโมง	2,810.00 ± 28.22	2,857.00 ± 301.64

จากผลการทดสอบในตารางที่ 3 จะเห็นว่าคุณสมบัติยังไม่ค่อยดีนัก แต่จากการวิเคราะห์พบว่าปัญหาที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่มาจากกระบวนการเตรียมวัตถุดิบ การควบคุมสมบัติของน้ำดิน การขึ้นรูป และการควบคุมเตาเผา ซึ่งทีมวิจัยยังไม่ค่อยมีความชำนาญมากนัก จึงทำให้แบบพิมพ์ที่ได้มักจะเกิดตำหนิ ก่อนที่จะทำการ

ทดสอบ อย่างไรก็ตามพบว่าสูตร A90 มีคุณสมบัติที่ดี และมีความสม่ำเสมอในการผลิตมากกว่าสูตรอื่น จึงจะเป็นสูตรที่เลือกใช้เพื่อทำการผลิตจำนวนมาก การนำไปเข้าใช้จริงในกระบวนการผลิตต่อไป

ทั้งนี้ผลิตภัณฑ์ถุงมือยางตามต้นแบบจะต้องมีการทำผิวหยาบเป็นบางบริเวณ โดยเฉพาะบริเวณอุ้งมือ ซึ่งจะเป็นบริเวณที่ใช้จับถือของได้โดยไม่ลื่นหลุดโดยง่าย ทีมวิจัยจึงได้เลือกใช้วิธีการพ่นทราย ในบริเวณที่ต้องการผิวหยาบดังกล่าว โดยได้ศึกษาขนาดเม็ดทรายและความแรงในการพ่น เพื่อให้ได้ผิวที่มีความหยาบมากน้อยต่างๆ กัน ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 ตรวจสอบระดับการทำผิวหยาบ 3 ระดับ

พบว่าที่ระดับความหยาบ 3 มีความใกล้เคียงกับความหยาบผิวที่ต้องการในการผลิตถุงมือยาง ซึ่งเมื่อได้ทำการผลิตในปริมาณที่มากขึ้น แล้วนำไปทดลองใช้งานจริงในกระบวนการผลิตของโรงงานแห่งหนึ่งในจังหวัดชลบุรี ตามรูปที่ 5 เป็นเวลา 30 วัน พบว่ายังคงสามารถใช้งานได้เป็นปกติเช่นเดียวกับแบบพิมพ์ทั่วไป



รูปที่ 5 การนำแบบพิมพ์ที่พัฒนาขึ้นไปทดลองใช้จริงในกระบวนการผลิตถุงมือยาง

แบบพิมพ์หลังเผาแล้วซึ่งจะมีน้ำหนักประมาณ 800-900 กรัม/ชิ้น เมื่อประเมินจากน้ำหนักที่จะหายไปหลังเผาประมาณ 10-15% จะทำให้มีปริมาณการใช้วัตถุดิบเนื้อดินแห้งประมาณ 900-1100 กรัม/ชิ้น ซึ่งก็จะทำให้มีต้นทุนวัตถุดิบสำหรับสูตร Body-R = 14.49-17.71 บาท/ชิ้น สูตร GFB-16 = 4.82-5.92 บาท/ชิ้น และสูตร A90 13.78-16.83 บาท/ชิ้น ส่วนต้นทุนการเผาของแบบพิมพ์ไม่เคลือบ ซึ่งทำการเผาในบรรยากาศรีดักชันที่อุณหภูมิ 1280°C ประมาณ 12 ชั่วโมง ใช้แก๊สประมาณ 2 ถัง (ถังละ 1,200 x 2 = 2,400 บาท) โดยเตาเผาที่ใช้ขนาด 1 Q บรรจุชิ้นงานแบบพิมพ์รูปมือประมาณได้ประมาณ 130-140 ชิ้น ซึ่งเมื่อคำนวณต้นทุนการเผาอยู่ที่ประมาณ 17.14-18.46 บาท/ชิ้น เมื่อประเมินต้นทุนวัตถุดิบและต้นทุนการเผาแล้วจะสามารถแสดงได้ในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ต้นทุนการผลิตแบบพิมพ์เซรามิกสำหรับชิ้นรูปถูงมือน้อยางชนิดที่ไม่มีเคลือบ

แบบพิมพ์	ต้นทุนวัตถุดิบ บาท/ชิ้น	ต้นทุนหลังเผา บาท/ชิ้น	ต้นทุนรวม บาท/ชิ้น
สูตร Body-R	14.49-17.71	17.14-18.46	31.63-36.17
สูตร GFB-16	4.82-5.92	17.14-18.46	21.96-24.38
สูตร A90	13.78-16.83	17.14-18.46	30.92-35.29

จะเห็นว่าต้นทุนวัตถุดิบของการผลิตแบบพิมพ์ชนิดไม่เคลือบเผาที่อุณหภูมิต่ำ 1280°C จะอยู่ที่ประมาณ 21.96-36.17 บาท/ชิ้น เมื่อเปรียบเทียบกับราคาของแบบพิมพ์เซรามิกสำหรับชิ้นรูปถูงมือน้อยางในท้องตลาดจะมีราคาประมาณชิ้นละ 200 บาทขึ้นไป ก็จะทำให้เห็นว่าสูตรเนื้อดินที่พัฒนาขึ้น น่าจะมีศักยภาพพอสมควรที่นำไปขยายสเกลการผลิต อย่างไรก็ตามยังคงมีรายละเอียดเล็กๆ น้อยๆ ที่ต้องปรับแก้ต่อไปเกี่ยวกับการออกแบบบริเวณผิวที่จะพันทราย และระดับความสูงต่ำของความหยาบ เป็นต้น สำหรับสูตรที่ 16 เอง ก็พบว่าสามารถปรับให้มีคุณสมบัติที่ดีขึ้นได้ หลังจากการแก้ปัญหาเรื่องการเตรียมดิน และการขึ้นรูปเพื่อลดตำหนิที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิต อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้ได้แสดงให้เห็น การใช้เนื้อดินผสม ก็เป็นทางเลือกที่ดีการทำแบบพิมพ์พอร์ซเลนอย่างหนึ่ง โดยผู้ประกอบการไม่จำเป็นต้องลงทุนในส่วนเครื่องมือในการเตรียมดินเอง และสามารถทำได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 1300°C ได้เช่นเดียวกัน

ภาคผนวก ค.

เอกสารแนบ

2) ตารางเปรียบเทียบกิจกรรมและผลลัพธ์ที่ได้จากการดำเนินงาน

สัญญาเลขที่ RDG60T0141

โครงการ “การพัฒนาเนื้อดินและเคลือบสำหรับทำแบบพิมพ์เซรามิกขึ้นรูปถุงมือยาง
โดยวิธีการจุ่มในระดับอุตสาหกรรม”

เอกสารแนบ ข. ตารางเปรียบเทียบกิจกรรมและผลลัพธ์ที่ได้จากการดำเนินงาน

กิจกรรม	ผลลัพธ์ที่ได้	ความสำเร็จ
1. การรวบรวมข้อมูลสูตรเนื้อดินและเคลือบพอร์ซเลนอ้างอิง	1. ข้อมูลเกี่ยวกับองค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติของสูตรเนื้อดินและเคลือบพอร์ซเลนอ้างอิง	100%
2. การพัฒนาสูตรเนื้อดินและเคลือบพอร์ซเลน อย่างละ 1 สูตร	2.1 สูตรเนื้อดินพอร์ซเลนที่พัฒนาขึ้น 2 สูตร คือ สูตร GFB-16 และ A90 2.2 สูตรเคลือบพอร์ซเลนที่พัฒนาขึ้น 2 สูตร คือ สูตร GFG-15 และ GFG-25	200%
3. การทดสอบสมบัติของเนื้อดินและเคลือบพอร์ซเลนที่พัฒนาขึ้น	3. สมบัติของเนื้อดินและเคลือบพอร์ซเลนที่พัฒนาขึ้น เช่น การหดตัว การดูดซึมน้ำ การทนต่อการเปลี่ยนอุณหภูมิฉับพลัน และการทนต่อต่าง	100%
4. การพัฒนาแบบพิมพ์ขึ้นรูปถุงมือยางปูนพลาสติก	4. แบบพิมพ์ขึ้นรูปถุงมือยางปูนพลาสติก (working mold) จำนวน 10 ชิ้น	100%
5. การพัฒนาต้นแบบระดับห้องปฏิบัติการสูตรเนื้อดินและเคลือบสำหรับทำแบบพิมพ์เซรามิกขึ้นรูปถุงมือยาง 1 ต้นแบบ	5.1 ต้นแบบระดับห้องปฏิบัติการสูตรเนื้อดินพอร์ซเลนสำหรับทำแบบพิมพ์ขึ้นรูปถุงมือยางโดยวิธีการจุ่ม 1 ต้นแบบ 5.2 ต้นแบบระดับห้องปฏิบัติการสูตรเคลือบพอร์ซเลนสำหรับทำแบบพิมพ์ขึ้นรูปถุงมือยางโดยวิธีการจุ่ม 1 ต้นแบบ	200%
6. การพัฒนาต้นแบบระดับภาคสนาม	6.1 แบบพิมพ์ขึ้นรูปถุงมือยางขนาด L จำนวน 120 ชิ้น (ส่งให้โรงงาน 100 ชิ้น ใช้ทดลองเคลือบ 20 ชิ้น) 6.2 ต้นแบบภาคสนามแบบพิมพ์พอร์ซเลนสำหรับขึ้นรูปถุงมือยางโดยวิธีการจุ่ม 1 ต้นแบบ	120%

ลงชื่อ..... (หัวหน้าโครงการวิจัยผู้รับทุน)

(นายอนุชา วรรณก้อน)

วันที่.....30 สิงหาคม 2561.....

ภาคผนวก ค.

เอกสารแนบ

3) รายงานการนำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์อย่างเป็นรูปธรรม

การรายงานการนำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์อย่างเป็นรูปธรรม

๑. ชื่อโครงการ / กิจกรรมที่ได้รับการสนับสนุน...การพัฒนาเนื้อดินและเคลือบสำหรับทำแบบพิมพ์ขึ้นรูปลงมืออย่าง.....
.....โดยวิธีการจุ่มในระดับอุตสาหกรรม.....
๒. ชื่อนักวิจัย.....ดร.อนุชา วรณก้อง.....
๓. งบประมาณที่ได้รับการสนับสนุน.....๒,๐๐๒,๖๑๐.....บาท
๔. ปีงบประมาณที่ดำเนินการ ๒๕๖๐
๕. การนำผลผลิตจากงานวิจัยไปสู่การใช้ประโยชน์ ☒ มีการนำไปใช้ประโยชน์ ☐ ยังไม่มีการนำไปใช้ประโยชน์
๖. ช่วงเวลาที่งานวิจัยได้นำไปสู่การใช้ประโยชน์.....ปี พ.ศ.๒๕๖๑.....
๗. เป้าหมายดำเนินการการเผยแพร่ผลงานในงานประชุมวิชาการ.....
๘. พื้นที่การใช้ประโยชน์จ.ชลบุรี.....
๙. รูปแบบการใช้ประโยชน์จากงานวิจัยตามข้อ ๗ และ ๘ (สามารถเลือกได้มากกว่า ๑ รูปแบบ เนื่องจากถ้าเป็นเรื่องเดียวกันสามารถนำไปใช้มากกว่า ๑ มิติได้)
 - ☐ ๙.๑. การใช้ประโยชน์มีนโยบาย ได้แก่ การนำข้อมูลไปประกอบการตัดสินใจในการบริหาร / กำหนดนโยบาย โดย
 - ☐ ได้รับหนังสือขอข้อมูลเพื่อใช้ประกอบการตัดสินใจในเรื่องใดเรื่องหนึ่ง
 - ☐ ได้รับหนังสือเรียนเชิญให้ข้อมูลประกอบการตัดสินใจ / กำหนดนโยบาย
 - ☐ อื่นๆ(โปรดระบุ).....
 - ☐ ๙.๒. การใช้ประโยชน์มีมติเศรษฐกิจ / พาณิชย์ โดย
 - ☐ ได้รับหนังสือหรือหลักฐานอื่น แสดงความสนใจเพื่อเจรจาธุรกิจ
 - ☐ มีการซื้อ - ขาย เทคโนโลยีระหว่างนักวิจัยและผู้นำไปใช้ประโยชน์
 - ☐ อื่นๆ(โปรดระบุ).....
 - ☐ ๙.๓. การใช้ประโยชน์มีมติการพัฒนาสังคม / ชุมชน / ท้องถิ่น โดย
 - ☐ การถ่ายทอดเทคโนโลยีที่ได้รับจากงานวิจัยในชุมชน / ท้องถิ่น (อบรม , คู่มือ , แผ่นพับ , โปสเตอร์ , เว็บไซต์ ฯลฯ)
 - ☐ ได้รับหนังสือเรียนเชิญให้ความรู้จากชุมชน / องค์กร / หน่วยงานในพื้นที่ต่างๆ
 - ☐ อื่นๆ (โปรดระบุ).....
 - ☐ ๙.๔. การใช้ประโยชน์มีมติวิชาการ โดย
 - ☐ ได้มีการอ้างอิงผลงานที่ตีพิมพ์วารสารวิชาการระดับประเทศ / ระดับนานาชาติ
 - ☐ ได้รับหนังสือเรียนเชิญเป็นวิทยากรเพื่อให้ความรู้ในกรอบของผลงานวิจัยจากหน่วยงานต่างๆ
 - ☐ อื่นๆ(โปรดระบุ).....การเผยแพร่งานวิจัยในงานประชุม/สัมมนา.....
 -1. งานประชุมวิชาการ การผลักดันผลงานวิจัยทางพาราสู่การใช้ประโยชน์.....
 -2. STEM 2018.....(International Conference on Science and Technology of Emerging Materials 2018).....
๑๐. รายละเอียดผลการดำเนินงานตามข้อ ๙ เกิดการเปลี่ยนแปลงจากการนำผลผลิตจากงานวิจัยไปใช้อย่างไร
.....ผลงานวิจัยได้ถูกนำไปเผยแพร่สู่สาธารณะ จึงทำให้เป็นที่รู้จักมากขึ้น.....

หมายเหตุ : การรายงานการนำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์ ต้องสื่อให้ทราบถึงการนำงานวิจัยไปใช้ประโยชน์อย่างชัดเจน
ดังนั้นต้องแนบเอกสารเป็นหลักฐาน เช่น รูปถ่าย หนังสือเชิญ หนังสือแสดงความต้องการหรือเอกสารที่แสดงได้ว่ามีการนำ
ผลงานไปใช้จริง

๑๑. รูปภาพประกอบกิจกรรมหรือ รูปภาพแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นเปรียบเทียบกับก่อน – หลังการนำผลผลิตจากงานวิจัยไปใช้ประโยชน์ (พร้อมคำบรรยายกิจกรรมโดยย่อ ที่แสดงถึงวัน เดือน ปี ที่จัดกิจกรรม)

๑๑.๑ ได้รับการเชิญให้นำผลงานไปจัดแสดงในงานประชุมวิชาการ การผลักดันผลงานวิจัยทางพาราสุการใช้ประโยชน์ จัดโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) และการยางแห่งประเทศไทย (กยท.) ที่โรงแรมมิราเคิล แกรนด์ คอนเวนชั่น กรุงเทพฯ วันที่ ๓๐ เมษายน ๒๕๖๐ ดังรูป



๑๑.๒ ได้นำเสนอผลงาน oral presentation เรื่อง Porcelain Body Preparation and Characterization for Dipping Former Usage in Latex Glove Manufacturing ในงานประชุมวิชาการ STEMa 2018 จัดขึ้นที่โรงแรมฮอติเคย์อินน์ จ.ชลบุรี ระหว่างวันที่ ๑๘-๒๐ กรกฎาคม ๒๕๖๑ (เอกสารแนบ)

หมายเหตุ : การรายงานการนำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์ ต้องสื่อให้ทราบถึงการนำงานวิจัยไปใช้ประโยชน์อย่างชัดเจน ดังนั้นต้องแนบเอกสารเป็นหลักฐาน เช่น รูปถ่าย หนังสือเชิญ หนังสือแสดงความต้องการหรือเอกสารที่แสดงได้ว่ามี การนำผลงานไปใช้จริง

Porcelain Body Preparation and Characterization for Dipping Former Usage in Latex Glove Manufacturing

Anucha Wannagon^{1*}, Watcharee Sornlar¹, Pattarawan Choeycharoen¹
and Parinya Somrang¹

¹ MTEC, National Science and Technology Development Agency (NSTDA),
114 Thailand Science Park, Phahonyothin Rd.,
Khlong Nueng, Khlong Luang, Pathum Thani 12120, Thailand

**corresponding author, E-mail: anuchaw@mtec.or.th*

Abstract

In latex glove manufacturing, porcelain is the most promising ceramic body for the dipping former usage, not only because of its best physical properties but also the good thermal shock and chemical resistances. However, the porcelain formula and the characterizing method which are suitable for this application are not openly studied enough, especially in Thailand. In this work, we developed the porcelain bodies which were prepared from local raw materials and fired at low temperatures between 1250-1300°C. After the physical properties such as; shrinkage, water absorption and 3-point bending strength were measured, the properties needed for the dipping former application which are thermal shock and chemical resistances were tested. The in-house methods were developed for the tests. In comparison with the reference porcelain body, the results showed that the developed body after firing at 1280°C has the comparable properties. The surface roughness and the corrosion after testing were also investigated. The hand-shaped dipping former was then tried to prepare from some porcelain bodies. Finally, the dipping former that passed the test were set into the production line of the latex glove manufacturing. The result was evaluated and discussed for further development to the better porcelain body and the lower cost of production.

Keywords: Porcelain, dipping former, latex glove, thermal shock, chemical resistance