

# การพัฒนาเนื้อดินเพื่อทำเซรามิกกระจายกลิ่นหอม โดยประยุกต์ใช้เศษ แก้วและเปลือกหอยลาย

กฤตเมธ โถทอง และ ประภัสสร ประเทืองไทย\*

สาขาวิชาออกแบบผลิตภัณฑ์และบรรจุภัณฑ์ คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

E-mail: prapatsom.p@archd.kmutnb.ac.th\*

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาเนื้อดินสำหรับการผลิตเซรามิกที่สามารถกระจายกลิ่นหอม โดยใช้ดินพอร์ซเลนเป็นองค์ประกอบหลัก และประยุกต์ใช้วัสดุเหลือทิ้ง ได้แก่ เศษแก้วและเปลือกหอยลาย เป็นวัสดุผสม เพื่อลดต้นทุนการผลิตและเพิ่มคุณสมบัติทางกายภาพที่เหมาะสมต่อการกักเก็บและคายกลิ่นหอม เนื้อดินถูกออกแบบเป็นสูตรทั้งหมด 11 สูตร และขึ้นรูปเป็นแท่งดินทดสอบ ก่อนนำไปเผาที่อุณหภูมิ 800 และ 1,200 องศาเซลเซียส จากนั้นทำการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ค่าการหดตัวหลังการเผา และค่าการดูดซึมน้ำ ผลการทดลองพบว่า สูตรที่ 7 ซึ่งประกอบด้วยดินพอร์ซเลนร้อยละ 90 เศษแก้วร้อยละ 4 และเปลือกหอยลายร้อยละ 6 เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ให้ค่าการหดตัวต่ำและค่าการดูดซึมน้ำสูงที่สุด เหมาะสมต่อการนำไปใช้เป็นเนื้อดินสำหรับการผลิตเซรามิกกระจายกลิ่นหอม ผลการศึกษานี้สะท้อนศักยภาพของการใช้วัสดุเหลือทิ้งในการพัฒนาเนื้อดินสำหรับงานออกแบบผลิตภัณฑ์เชิงสร้างสรรค์ และสามารถต่อยอดสู่การพัฒนาเซรามิกอย่างยั่งยืนได้

**คำสำคัญ:** ดินพอร์ซเลน เศษแก้ว เปลือกหอยลาย เซรามิกหอม

# Development of Clay Bodies for Fragrance-diffusing Ceramics through the Application of Waste Glass and Patterned Seashell Fragments

**Kritmeth Thothong and Prapassorn Pratuangthai\***

Division of Innovative Ceramic Product Design Program, Department of Industrial Arts Technology, Faculty of Architecture and Design, King Mongkut's University of Technology North Bangkok.

E-mail: prapatsorn.p@archd.kmutnb.ac.th\*

## Abstract

This research aims to develop clay bodies for fragrance-diffusing ceramic production using porcelain clay as the primary material and incorporating waste materials, namely broken glass and patterned seashell fragments, as additives to reduce production costs and enhance physical properties suitable for fragrance absorption and release. Eleven clay body formulations were designed and formed into test bars, which were fired at temperatures of 800 and 1,200 degrees Celsius. The physical properties of the fired specimens were evaluated, including firing shrinkage and water absorption. The results indicated that Formulation No. 7, composed of 90% porcelain clay, 4% broken glass, and 6% patterned seashell fragments, when fired at 800 degrees Celsius, exhibited low firing shrinkage and the highest water absorption. This formulation was found to be suitable for use as a clay body for fragrance-diffusing ceramic production. The findings highlight the potential of utilizing waste materials to develop clay bodies with properties appropriate for creative product design and support further application in sustainable ceramic product development.

**Keywords:** Porcelain clay, Glass cullet, Patterned seashells, Scented ceramics

## 1. บทนำ

การออกแบบเซรามิกสำหรับการใช้งานด้านการกระจายกลิ่น (Fragrance-diffusing Ceramics) เช่น เซรามิกดูดซับน้ำมันหอมระเหยหรืออุปกรณ์กระจายกลิ่น จำเป็นต้องอาศัยเนื้อดินที่มีโครงสร้างรูพรุนในระดับเหมาะสม เพื่อให้สามารถดูดซับ (Absorb) และคาย (Release) สารระเหยได้อย่างต่อเนื่องและสม่ำเสมอ คุณสมบัติสำคัญที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ ค่าการดูดซึมน้ำ การหดตัวหลังการเผา และเสถียรภาพของโครงสร้างรูพรุน ซึ่งมีผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพการกักเก็บและการปลดปล่อยกลิ่นจากวัสดุเซรามิก [1,2]

งานวิจัยด้านวัสดุศาสตร์และการออกแบบวัสดุเชิงหน้าที่ในช่วงที่ผ่านมาให้ความสำคัญกับการพัฒนาเซรามิกรูพรุน (Porous Ceramics) จากวัสดุฐานดิน (Clay-based Ceramics) เนื่องจากสามารถควบคุมสมบัติทางกายภาพได้หลากหลาย ทั้งขนาดรูพรุน อัตราการดูดซึมน้ำ และความสามารถในการขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ [3,4] โดยการเติมวัสดุสร้างรูพรุน (Pore-forming Agents) เช่น เศษแก้ว ถั่วหรือวัสดุชีวภาพ สามารถช่วยปรับโครงสร้างภายในของเนื้อดินให้เหมาะสมกับการใช้งานด้านการดูดซับของเหลวหรือไอระเหยได้ [5]

ในกรณีของการใช้งานด้านน้ำมันหอมระเหย มีงานวิจัยรายงานว่าเซรามิกรูพรุนจากแก้วโซดา-ไลม์และวัสดุฐานดินสามารถดูดซับและคายกลิ่นจากน้ำมันหอมระเหยได้จริง โดยวัสดุที่มีค่าความพรุนและการดูดซึมน้ำในช่วงประมาณร้อยละ 20-35 แสดงประสิทธิภาพในการปลดปล่อยกลิ่นได้อย่างต่อเนื่องมากกว่าวัสดุเนื้อแน่น [6] นอกจากนี้ การควบคุมองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุผสม เช่น การเติมแคลเซียมคาร์บอเนตหรือแคลเซียมซิลิเกตจากวัสดุธรรมชาติ ยังช่วยเพิ่มศักยภาพการดูดซับสารอินทรีย์และสารระเหยได้อีกด้วย [7]

แม้ว่าจะมีงานวิจัยจำนวนมากที่มุ่งเน้นการพัฒนาเซรามิกรูพรุนสำหรับการกรองน้ำหรือการดูดซับมลพิษ แต่การศึกษาที่มุ่งพัฒนาเนื้อดินสำหรับการผลิตเซรามิกเพื่อการกระจายกลิ่นโดยเฉพาะ ซึ่งต้องคำนึงถึงทั้งการดูดซับ การคาย

กลิ่น และความเหมาะสมต่อการออกแบบผลิตภัณฑ์เชิงสร้างสรรค์ ยังมีอยู่อย่างจำกัด [8]

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาความเป็นไปได้ในการพัฒนาเนื้อดินฐานดินพอร์ซเลนที่มีโครงสร้างรูพรุนเหมาะสม โดยประยุกต์ใช้วัสดุผสมที่ช่วยสร้างรูพรุน เพื่อให้ได้เนื้อดินที่สามารถรองรับการดูดซับและคายกลิ่นจากน้ำมันหอมระเหยได้อย่างมีประสิทธิภาพ และสามารถนำไปต่อยอดสู่การออกแบบผลิตภัณฑ์เซรามิกเชิงสร้างสรรค์และยั่งยืนได้ในอนาคต

## 2. วัตถุประสงค์ของโครงการ/ผลงาน

1. เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตเซรามิกหอมโดยใช้เนื้อดินพอร์ซเลนผสมเศษแก้วและเปลือกหอยลาย
2. เพื่อศึกษาผลของอัตราส่วนผสมต่อการหดตัวและการดูดซึมน้ำของชิ้นงานหลังการเผา

## 3. ขอบเขตของการวิจัย

การวิจัยนี้ศึกษาผลของการใช้เศษแก้วและเปลือกหอยลายในอัตราส่วนรวมไม่เกินร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ผสมกับดินพอร์ซเลน เพื่อประเมินคุณสมบัติทางกายภาพของเนื้อดินที่เหมาะสมต่อการผลิตเซรามิกหอม โดยไม่ครอบคลุมการทดสอบสมบัติเชิงกลขั้นสูงหรือการทดสอบการคายกลิ่นโดยตรง

## 4. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

### 4.1 ทฤษฎีโครงสร้างรูพรุนของเซรามิก (Porous Ceramic Theory)

ทฤษฎีโครงสร้างรูพรุนอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณรูพรุน (Porosity) ขนาดและการเชื่อมต่อของรูพรุนกับสมบัติทางกายภาพของวัสดุเซรามิก เช่น การดูดซึมน้ำ ความสามารถในการแพร่ของของเหลว และเสถียรภาพของโครงสร้าง วัสดุที่มีโครงสร้างรูพรุนแบบเปิด (Open Porous Structure) จะเอื้อต่อการดูดซับและคายสารมากกว่าวัสดุเนื้อแน่น [9,10] ทฤษฎีนี้ถูกนำมาใช้เป็นพื้นฐานในการออกแบบเซรามิกรูพรุนสำหรับงานกรอง การดูดซับ และการใช้งานเชิงฟังก์ชันอื่น ๆ

## 2.2 ทฤษฎีการดูดซับและการแพร่ของสาร (Adsorption-Diffusion Theory)

การดูดซับและการคายสารในวัสดุรูพรุนเกิดจากกระบวนการดูดซับบนผิวภายในรูพรุน (Surface Adsorption) ร่วมกับการแพร่ของสารผ่านโครงสร้างรูพรุน (Diffusion) อัตราการคายสารขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวจำเพาะ ความต่อเนื่องของรูพรุน และความสามารถในการกักเก็บของเหลวภายในวัสดุ [11] ทฤษฎีนี้ถูกนำมาใช้อธิบายกลไกของเซรามิกที่ทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการดูดซับและปลดปล่อยน้ำมันหอมระเหยอย่างต่อเนื่อง

## 2.3 ทฤษฎีการเผาและการหลอมตัวของวัสดุผสม (Sintering and Glass Softening Theory)

กระบวนการเผาเซรามิกทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในของเนื้อดิน โดยเฉพาะเมื่อมีวัสดุผสมที่สามารถหลอมตัวได้ เช่น เศษแก้ว การหลอมตัวบางส่วน (Partial Vitrification) ส่งผลให้รูพรุนบางส่วนปิดตัวลง ทำให้ค่าการดูดซึมน้ำลดลงและค่าการหดตัวเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิการเผาสูงขึ้น [12] ทฤษฎีนี้ช่วยอธิบายผลของอุณหภูมิการเผาที่แตกต่างกันต่อสมบัติทางกายภาพของเนื้อดินในงานวิจัยนี้

## 2.4 ทฤษฎีบทบาทของสารเติมแต่งในเนื้อดิน (Additive and Pore-Forming Agent Theory)

สารเติมแต่งที่ไม่ให้ความเหนียว เช่น เศษแก้วหรือวัสดุแคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกหอย สามารถทำหน้าที่เป็นตัวปรับสมบัติและตัวสร้างรูพรุน เมื่อผ่านกระบวนการเผา จะเกิดการสลายตัวหรือเปลี่ยนเฟส ส่งผลให้เกิดช่องว่างภายในเนื้อดิน และเพิ่มค่าการดูดซึมน้ำของชิ้นงาน [13] แนวคิดนี้เป็นฐานสำคัญในการเลือกวัสดุผสมในงานวิจัยนี้

## 2.5 แนวคิดการออกแบบวัสดุเชิงหน้าที่ (Functional Material Design)

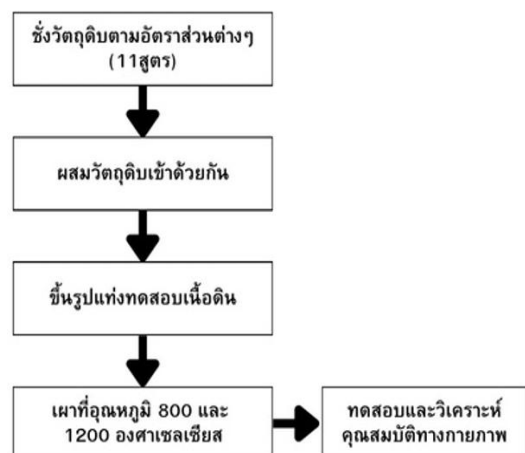
แนวคิดการออกแบบวัสดุเชิงหน้าที่มุ่งเน้นการออกแบบสมบัติวัสดุให้ตอบสนองการใช้งานเฉพาะด้าน มากกว่าการพิจารณาความแข็งแรงหรือความสวยงามเพียงอย่างเดียว วัสดุสำหรับเซรามิกกระจายกลิ่น จึงต้องได้รับการออกแบบให้มีสมดุลระหว่างการดูดซับการคายกลิ่น และความสามารถในการขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ [14]

## 4. วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยนี้ออกแบบสูตรเนื้อดินจำนวน 11 สูตร โดยกำหนดอัตราส่วนรวมของวัสดุผสม (เศษแก้วและเปลือกหอยลาย) ไม่เกินร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก เพื่อควบคุมความสามารถในการขึ้นรูปและลดความเสี่ยงต่อการเสียรูปของชิ้นงานระหว่างการเผา สูตรเนื้อดินถูกขึ้นรูปเป็นแท่งทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 12.7 มิลลิเมตร และความยาว 100 มิลลิเมตร สูตรละ 2 ชิ้น รวมทั้งสิ้น 22 ชิ้น

การเลือกอุณหภูมิการเผาที่ 800 และ 1,200 องศาเซลเซียส มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบผลของการเผาในช่วง “ยังไม่เกิดการหลอมตัวสมบูรณ์” กับช่วง “การหลอมตัวสูงของเนื้อดินพอร์ซเลน” ซึ่งส่งผลต่อโครงสร้างรูพรุน การหดตัว และการดูดซึมน้ำของชิ้นงาน อย่างไรก็ตาม งานวิจัยนี้ไม่ได้มุ่งประเมินสมบัติเชิงกลหรือความแข็งแรงของผลิตภัณฑ์ขั้นสุดท้าย

การทดสอบค่าการหดตัวหลังการเผาดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM C326 และการทดสอบค่าการดูดซึมน้ำเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C373 โดยใช้ค่าเฉลี่ยของชิ้นทดสอบในแต่ละสูตรเป็นตัวแทนในการวิเคราะห์ผล ขั้นตอนการทดสอบเนื้อดินและการเตรียมชิ้นงานดูได้ตามรูปที่ 1 - 2



รูปที่ 1 ขั้นตอนในการดำเนินการทดสอบเนื้อดิน



รูปที่ 2 การเตรียมชิ้นงาน

สำหรับตารางอัตราส่วนผสมระหว่างดินพอร์ซเลน เศษแก้ว และเปลือกหอยลาย โดยน้ำหนักเป็นไปดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 อัตราส่วนส่วนผสมระหว่างดินพอร์ซเลน เศษแก้ว และเปลือกหอยลายโดยน้ำหนัก

| ตัวอย่างที่ | วัตถุดิบ    |         |              | ผลรวม |
|-------------|-------------|---------|--------------|-------|
|             | ดินพอร์ซเลน | เศษแก้ว | เปลือกหอยลาย |       |
| 1           | 90          | 10      | 0            | 100   |
| 2           | 90          | 9       | 1            | 100   |
| 3           | 90          | 8       | 2            | 100   |
| 4           | 90          | 7       | 3            | 100   |
| 5           | 90          | 6       | 4            | 100   |
| 6           | 90          | 5       | 5            | 100   |
| 7           | 90          | 4       | 6            | 100   |
| 8           | 90          | 3       | 7            | 100   |
| 9           | 90          | 2       | 8            | 100   |
| 10          | 90          | 1       | 9            | 100   |
| 11          | 90          | 0       | 10           | 100   |

## 5. ผลการทดลอง

ดินพอร์ซเลน ดินขาวมีขนาดอนุภาคเล็กทำให้พอร์ซเลนมีเนื้อสัมผัสที่เรียบเนียนและละเอียด เผาได้ในอุณหภูมิที่สูง ในงานวิจัยนี้มีการผสมเศษแก้วและเปลือกหอยลายลงในดิน และมีการทดสอบคุณสมบัติหลายด้าน ดังนี้

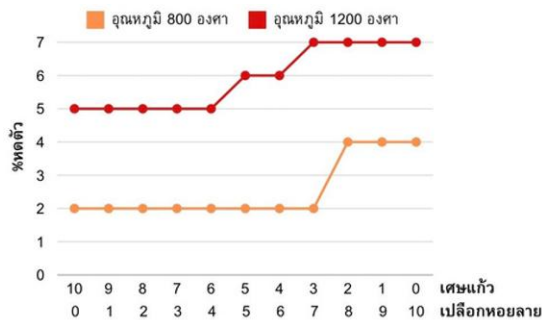
### 5.1 การหดตัวของชิ้นงานหลังการเผา

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิการเผาไหม้ อิทธิพลต่อค่าการหดตัวมากกว่าอัตราส่วนของวัสดุผสม โดยชิ้นงานที่เผาที่อุณหภูมิ 1,200 องศาเซลเซียสมีค่าการหดตัวสูงกว่าอย่างชัดเจน สะท้อนถึงการเกิดการหลอมตัวบางส่วนของเศษแก้วและเนื้อดินพอร์ซเลน ซึ่งส่งผลให้โครงสร้างภายในมีการยุบตัวมากขึ้น

ในช่วงอุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส สูตรที่ 1-8 มีค่าการหดตัวใกล้เคียงกัน แสดงว่าในช่วงอุณหภูมิดังกล่าว อัตราส่วนของเศษแก้วและเปลือกหอยลายยังไม่ส่งผลต่อพฤติกรรมของการหดตัวอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งสอดคล้องกับสภาวะที่วัสดุผสมยังไม่เกิดการหลอมตัวเต็มที่ แต่ในส่วนท้ายของกราฟแสดงให้เห็นว่า การใส่เศษแก้วในปริมาณมากและใส่เปลือกหอยลายในปริมาณน้อย ส่งผลให้ค่าร้อยละการหดตัวน้อย และยิ่งอุณหภูมิในการเผาสูงจะทำให้ค่าร้อยละการหดตัวเพิ่มสูงขึ้น โดยที่อุณหภูมิ 1,200 องศาเซลเซียสมีค่าร้อยละการหดตัวมากที่สุด (รูปที่ 4)



รูปที่ 3 ชิ้นงานที่เผาเสร็จแล้วในแต่ละสูตร

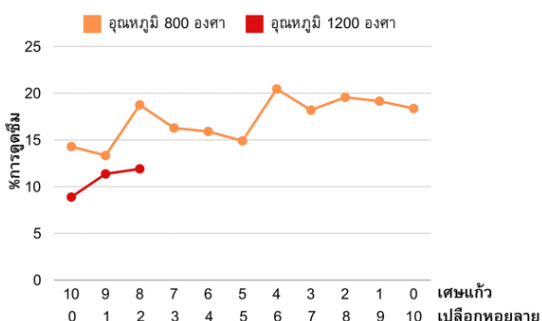


รูปที่ 4 อัตราการดูดตัวของชิ้นงานในอัตราส่วนต่าง ๆ

## 5.2 การดูดซึมน้ำของชิ้นงาน

ผลการทดสอบการดูดซึมน้ำพบว่า สูตรที่ 7 ซึ่งประกอบด้วยดินพอร์ซเลนร้อยละ 90 เศษแก้วร้อยละ 4 และเปลือกหอยลายร้อยละ 6 เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ให้ค่าการดูดซึมน้ำสูงสุด (ร้อยละ 20.45) แสดงถึงโครงสร้างรูพรุนแบบเปิดที่เอื้อต่อการดูดซับของเหลว

แนวโน้มโดยรวมพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณเปลือกหอยลาย ค่าการดูดซึมน้ำมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจเกิดจากการสลายตัวของแคลเซียมคาร์บอเนตระหว่างการเผา ส่งผลให้เกิดช่องว่างภายในเนื้อดิน อย่างไรก็ตาม การเผาที่อุณหภูมิ 1,200 องศาเซลเซียสทำให้หลายสูตรเกิดการหลอมติดกับชั้นเตา (Kiln shelf) จนไม่สามารถนำมาทดสอบการดูดซึมน้ำได้ ซึ่งสะท้อนถึงข้อจำกัดด้านความเหมาะสมของอุณหภูมิการเผาสำหรับสูตรที่มีวัสดุผสมในปริมาณสูง



รูปที่ 5 อัตราการดูดซึมน้ำของชิ้นงานในอัตราส่วนต่าง ๆ

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนของเศษแก้วและเปลือกหอยลายมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าการดูดตัวและการดูดซึมน้ำอย่างมีนัยสำคัญ โดยสูตรที่มีปริมาณเปลือกหอยลายสูงกว่าเศษแก้วมีแนวโน้มให้ค่าการดูดซึมน้ำสูงขึ้น ขณะที่อุณหภูมิการเผาที่สูงขึ้นส่งผลให้ค่าการดูดซึมน้ำลดลงเนื่องจากการหลอมตัวของวัสดุผสม

## 6. อภิปรายผล

ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่า การเติมเศษแก้วและเปลือกหอยลายสามารถทำหน้าที่เป็นตัวปรับโครงสร้างรูพรุนของเนื้อดินได้ โดยสูตรที่ให้สมดุลระหว่างค่าการดูดตัวต่ำและค่าการดูดซึมน้ำสูง เหมาะสมต่อการใช้งานในฐานะ “เนื้อดินสำหรับรองรับการดูดซับและคายกลืน” มากกว่าการใช้งานเชิงโครงสร้าง

แม้สูตรที่มีอัตราส่วนวัสดุผสมบางสูตรจะให้ค่าการดูดซึมน้ำใกล้เคียงกัน แต่เมื่อพิจารณาควบคู่กับปัจจัยด้านการเข้าถึงวัตถุดิบ ความเสถียรระหว่างการเผา และความสามารถในการขึ้นรูป สูตรที่ 7 แสดงศักยภาพในการประยุกต์ใช้งานมากที่สุดในการออกแบบผลิตภัณฑ์เซรามิก

อย่างไรก็ตาม การเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส แม้จะให้โครงสร้างรูพรุนที่เหมาะสม แต่ยังไม่สามารถยืนยันความแข็งแรงของชิ้นงานได้ งานวิจัยนี้จึงจำกัดผลลัพธ์ไว้ที่การพัฒนา “เนื้อดินต้นแบบ” สำหรับทดสอบเชิงฟังก์ชันในขั้นต่อไป

## 7. สรุปผล

งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าเนื้อดินพอร์ซเลนที่ผสมเศษแก้วและเปลือกหอยลายในสัดส่วนที่เหมาะสมสามารถพัฒนาให้มีโครงสร้างรูพรุนที่เอื้อต่อการดูดซับของเหลว โดยเฉพาะน้ำมันหอมระเหย สูตรที่ 7 ซึ่งให้ค่าการดูดซึมน้ำร้อยละ 20.45 และค่าการดูดตัวต่ำที่สุดในช่วงอุณหภูมิที่ศึกษา มีศักยภาพสูงสุดในการนำไปใช้เป็นเนื้อดินสำหรับผลิตภัณฑ์เซรามิกที่ทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการดูดซับและคายกลืน

อย่างไรก็ตาม งานวิจัยนี้ยังไม่ครอบคลุมการทดสอบความแข็งแรงเชิงกลและการทดสอบการคายกลีนโดยตรง ซึ่งควรได้รับการศึกษาเพิ่มเติมก่อนการนำไปใช้งานเชิงพาณิชย์

#### 8. ข้อเสนอแนะ

ควรมีการศึกษาผลของขนาดอนุภาควัสดุผสม การเพิ่มอุณหภูมิการเผาในช่วงกลาง และการทดสอบสมบัติเชิงกล รวมถึงการทดสอบการดูดซับและคายกลีนจากน้ำมันหอมระเหยโดยตรง เพื่อยืนยันความเหมาะสมของเนื้อดินต่อการใช้งานจริงในผลิตภัณฑ์เซรามิกเชิงสร้างสรรค์

#### เอกสารอ้างอิง

- [1] Thongloem, S., Khumweera, P., & Lahpun, N. (2023). Production of porous ceramics from soda-lime glass for collecting and releasing essential oils. *Porous Ceramics for Essential Oils Collection and Release*. (Open access). Thai Journal Online
- [2] Hettmann, K., et al. (2022). Porous coatings to control release rates of essential oils: functionalized calcium carbonate porous coating for essential oils. *Materials*, 15(6), 2155. [https://www.mdpi.com/1996-1944/15/6/2155?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.mdpi.com/1996-1944/15/6/2155?utm_source=chatgpt.com)
- [3] Khalil, A. K. A., & colleagues. (2024). Preparation and characterization of clay-based ceramic membranes from local clay for heavy metal removal. *Porous ceramic membranes from local clay*. (Open access). [https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10838747/?utm\\_source=chatgpt.com](https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10838747/?utm_source=chatgpt.com)
- [4] Dutra, L. F., & colleagues. (2019). Microstructural characterization of porous clay-based materials: influence of composition and firing temperature on pore size distribution and physical properties. *Materials*, 12(6), 946. [https://www.mdpi.com/1996-1944/12/6/946?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.mdpi.com/1996-1944/12/6/946?utm_source=chatgpt.com)
- [5] พูนสุขมานะ, ล., มาฆพัฒนศิลป์, อ., และ บางหลวง, ว. (2556). การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของเซรามิกพรุนเพื่อการพัฒนาเซรามิกกระจายกลีน. *Bulletin of Applied Science*, 2(2), 9-16. <https://doi.org/10.60136/bas.v2.2013.261>
- [6] Jabile, L. M., & colleagues. (2017). Development of porous ceramic diffuser from red clay and low-cost additives for water aeration diffuser application. *MJST Journal*, Vol.15 (2017) 113-129.
- [7] Rafya, M., et al. (2023). A kaolin-based ceramic membrane using exhausted essential oil residue as pore-forming agent: microfiltration and pore characterization. *Ceramic Membrane & Separation Science*. [https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0254058422013360?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0254058422013360?utm_source=chatgpt.com)
- [8] CU-Chula research group. (n.d.). การพัฒนาเซรามิกพรุนจากดินแดงท้องถิ่นและวัสดุเหลือทิ้งในอุตสาหกรรม. (Thai porous ceramics from red clay & industrial waste). <https://digiverse.chula.ac.th/Info/item/dc:15477>

- 
- [9] Studart, A. R., Gonzenbach, U. T., Tervoort, E., & Gauckler, L. J. (2006). Processing routes to macroporous ceramics: A review. *Journal of the American Ceramic Society*, 89(6), 1771-1789. <https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2006.01044.x>
- [10] Colombo, P. (2006). Conventional and novel processing methods for cellular ceramics. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 364(1838), 109-124. <https://doi.org/10.1098/rsta.2005.1693>
- [11] Ruthven, D. M. (1984). *Principles of adsorption and adsorption processes*. John Wiley & Sons.
- [12] Kingery, W. D., Bowen, H. K., & Uhlmann, D. R. (1976). *Introduction to ceramics* (2nd ed.). John Wiley & Sons.
- [13] Studart, A. R. (2012). Additive manufacturing of porous ceramics. *Journal of the American Ceramic Society*, 95(10), 3127-3140. <https://doi.org/10.1111/jace.12010>
- [14] Ashby, M. F., & Johnson, K. (2014). *Materials and design: The art and science of material selection in product design* (3rd ed.). Butterworth-Heinemann.