

การผลิตเซรามิกรูพรุนจากแก้วโซดาไลม์เพื่อเป็นวัสดุกักเก็บและปลดปล่อยน้ำมันหอมระเหย

PRODUCTION OF POROUS CERAMICS FROM SODA-LIME GLASS FOR COLLECTING AND RELEASING ESSENTIAL OILS

สุธาทิพย์ ทองเล่ม^{1*} เปมิกา ขำวีระ¹ และ ณรงค์ฤทธิ์ หล้าพันธ์²

¹สาขาวิชานวัตกรรมและเทคโนโลยีผลิตภัณฑ์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร
กรุงเทพมหานคร 10220

²สาขาวิชาวิทยาศาสตร์เครื่องสำอาง คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร
กรุงเทพมหานคร 10220

Sutatip Thonglem^{1*}, Pemika Khamweera¹ and Narongrit Lahpun²

¹Product Innovation and Technology Program, Faculty of Science and Technology,
Phranakhon Rajabhat University Bangkok 10220

²Cosmetic Science Program, Faculty of Science and Technology,
Phranakhon Rajabhat University Bangkok 10220

*E-mail: sutatip.t@pnru.ac.th

Received: 29-03-2023

Revised: 19-05-2023

Accepted: 25-05-2023

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อผลิตเซรามิกรูพรุนจากแก้วโซดาไลม์เพื่อใช้เป็นวัสดุกักเก็บและปลดปล่อยน้ำมันหอมระเหย ทำโดยการนำแก้วโซดาไลม์มาบดให้เป็นผงผสมกับ 10% สารสารถลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ในอัตราส่วน 1:1 1:1.5 1:2 1:2.5 1:3 และ 1:3.5 (g/ml) ขึ้นรูปโดยหล่อลงแม่พิมพ์ซิลิโคน นำไปเผาที่อุณหภูมิ 700 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จะได้เซรามิกรูพรุนประเภทแมโครพอร์สที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 50 นาโนเมตร โดยเซรามิกรูพรุนที่ดีที่สุดในการทดลองนี้คืออัตราส่วน 1:2.5 ซึ่งแสดงค่าความพรุนสูงสุด (34.50%) ค่าการดูดซึมน้ำสูงสุด (21.43%) และมีความหนาแน่นต่ำที่สุด (1.607 g/cm³) จากนั้นนำเซรามิกรูพรุนเงื่อนไขนี้ไปกักเก็บน้ำมันหอมระเหยโดยการหยดน้ำมันหอมระเหยมะกรูดและมะนาวบรรจุลงในเซรามิกรูพรุน ศึกษาอัตราการระเหยของน้ำมันหอมระเหยทั้งสองชนิด พบว่าอัตราการระเหยของน้ำมันหอมระเหยที่บรรจุลงในเซรามิกรูพรุนจะสูงกว่าน้ำมันหอมระเหยที่อยู่ในบรรยากาศ นั่นคือรูพรุนในเซรามิกจะเพิ่มอัตราการระเหยของน้ำมันหอมระเหยซึ่งจะช่วยการกระจายกลิ่นของน้ำมันหอมระเหยในบรรยากาศได้ดีขึ้น

คำสำคัญ: แก้วโซดาไลม์ เซรามิกรูพรุน ความพรุน การดูดซึมน้ำ น้ำมันหอมระเหย

ABSTRACT

This research aimed to produce porous ceramics from soda lime glass for collecting and releasing essential oils. The soda lime glass was ground into powders, then mixed with 10% polyvinyl alcohol solution in 1:1, 1:1.5, 1:2, 1:2.5, 1:3 and 1:3.5 (g:ml). These mixtures were molded by casting them into a silicone mold, dried, and calcined at 700 °C for 3 hours. It was found that the porous ceramics showed mesoporous structure with a diameter of more than 50 μm. The best porous ceramic sample in this work was the 1:2.5 sample, which showed the highest porosity (34.50%), highest water absorption values (21.43%) and lowest density (1.607 g/cm³). Then the kaffir lime and key lime oils were collected into the best porous ceramic sample by dropping essential oils into these ceramics. Studying the evaporation rates of both types of essential oil, it was found that the evaporation rates of the essential oils contained in the porous ceramic were higher than those of the essential oils in the atmosphere. The pores in the porous ceramics increased the evaporation rate of essential oils which also, increased the volatility in the atmosphere.

Keywords: Soda lime glass, Porous ceramics, Porosity, Water absorption, Essential oil

บทนำ

วัสดุรูพรุน (Porous materials) เป็นวัสดุที่มีช่องว่างหรือโพรงขนาดเล็กภายในโครงสร้าง มีพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนสูง ลักษณะของรูพรุนมี 2 แบบ คือ รูพรุนแบบเปิด (Open pores) โดยที่รูพรุนมีการเชื่อมต่อไปที่ผิวของวัสดุ ถูกนำไปใช้งานด้านต่าง ๆ เช่น เป็นตัวดูดซับ เป็นคตะลิสต์ และเซ็นเซอร์ และ รูพรุนแบบปิด (Closed pores) เป็นรูพรุนที่ไม่เปิดสู่ภายนอก นำไปใช้งานจำพวกเป็นวัสดุในการเก็บเสียง การเป็นฉนวนกันความร้อนหรือเป็นวัสดุสำหรับโครงสร้างที่ต้องการน้ำหนักเบา วัสดุรูพรุนสามารถแบ่งได้ตามขนาดของรูพรุนตามนิยามของสหภาพเคมีบริสุทธิ์และเคมีประยุกต์ระหว่างประเทศ (International Union of Pure and Applied Chemistry) หรือที่มีชื่อย่อเรียกว่า IUPAC โดยจัดแบ่งได้เป็น 3 ประเภทคือ ไมโครพอร์รัส (Microporous) เป็นรูพรุนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 2 nm เมโซพอร์รัส (Mesoporous) เป็นรูพรุนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 2 – 50 nm และ แมโครพอร์รัส (Macroporous) เป็นรูพรุนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 50 nm ขึ้นไป (Li et al., 2001; Rungrojchaipon, 2011)

เซรามิกรูพรุน (Porous ceramics) เป็นวัสดุรูพรุนชนิดหนึ่งที่น่าสนใจ รูพรุนมีทั้งแบบเปิดและแบบปิด เซรามิกที่มีรูพรุนแบบเปิดนิยมใช้เป็นตัวกรองสาร ส่วนเซรามิกที่มีรูพรุนแบบปิดนิยมใช้เป็นตัวฉนวนกันความร้อน เซรามิกรูพรุนมีสมบัติเด่นหลายด้าน ได้แก่ น้ำหนักเบา ความหนาแน่นต่ำ พื้นที่ผิวสูง การนำความร้อนต่ำ เป็นฉนวนความร้อนที่ดี มีสมบัติการไหลผ่านสูง มีความแข็งแรงเชิงกลดี ทนต่อการขีดสีและการกัดกร่อนของสารเคมีที่อุณหภูมิสูง และทนต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอย่างฉับพลัน สามารถขึ้นรูปได้หลากหลายรูปแบบ เช่น ท่อกลวง ท่อตัน แผ่นรวงผึ้ง โฟม และสามารถพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ เช่น ไม้กรองน้ำ เบ้าเผาสาร แผ่นรองเผา ฉนวนในเตาเผา เป็นต้น (Mongkolkachit & Sinjaroenlert, 2018).

งานวิจัยนี้มีแนวคิดจะผลิตเซรามิกที่มีรูพรุนแบบเปิดขนาดเล็ก ซึ่งรูพรุนเปิดนี้จะทำให้เกิดแรงแคปิลลารี (Capillary) ทำหน้าที่ในการดูดของเหลวเข้าไปกักเก็บไว้ภายใน (Punsukmtana et al., 2013) เซรามิกรูพรุนที่ผลิตได้นี้ จะสามารถใช้เป็นวัสดุสำหรับกักเก็บน้ำมันหอมระเหยซึ่งเป็นของเหลวชนิดหนึ่งที่มีกลิ่นเฉพาะตัวและสามารถระเหยได้ ในบรรยากาศ เมื่อเซรามิกรูพรุนถูกนำไปกักเก็บน้ำมันหอมระเหยแล้ว น้ำมันหอมระเหยที่อยู่ภายในจะกระจายออกมาสู่บรรยากาศได้ดีเพราะเซรามิกรูพรุนจะทำให้ น้ำมันหอมระเหยมีพื้นที่ผิวสัมผัสกับอากาศสูงกว่าน้ำมันหอมระเหย ในปริมาณเท่ากันแต่บรรจุในภาชนะเหมาะสำหรับใช้เป็นผลิตภัณฑ์เซรามิกกระจายกลิ่นเพื่อปรับอากาศ ในบริเวณต่าง ๆ เช่น อาคาร บ้านเรือน ในรถยนต์ เป็นต้น ซึ่งน้ำมันหอมระเหยจะมีกลิ่นเฉพาะตัว มีคุณสมบัติช่วยลดความเครียด ช่วยในเรื่องปัญหาระบบทางเดินหายใจ บรรเทาอาการโรคหอบหืด ลดกลิ่นและเพิ่มความสดชื่นในบรรยากาศ และมีฤทธิ์ ในการต้านเชื้อจุลินทรีย์ต่าง ๆ (Cruz-Valenzuela et al., 2016; Samadi et al., 2017) โดยเฉพาะอย่างยิ่งในปัจจุบัน ประเทศไทยกำลังเผชิญกับผลกระทบจากฝุ่น PM2.5 ซึ่งเป็นฝุ่นละอองขนาดเล็กที่กระจายอยู่ทั่วไปภายในอากาศ ซึ่งเกิดจากการจราจร กิจกรรมในชุมชน การเผาในที่โล่ง เป็นต้น ฝุ่นละอองขนาดเล็กเหล่านี้ยังสามารถกระจาย จากภายนอกอาคารเข้าสู่ภายในอาคารได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งห้องภายในอาคารที่เป็นระบบเปิด ปริมาณฝุ่น PM2.5 มีปริมาณไม่ต่างจากพื้นที่ภายนอกอาคาร ซึ่งฝุ่น PM2.5 จะมีเชื้อจุลินทรีย์ก่อโรคต่าง ๆ อยู่ร่วมด้วยทำให้เกิดโรค บางชนิดได้ เช่น โรคภูมิแพ้ โรคเกี่ยวกับระบบทางเดินหายใจ และโรคผิวหนังบางชนิด (Khawgrib et al., 2021) ส่งผลทำให้น้ำมันหอมระเหยได้รับความนิยมสูงขึ้นในการใช้เป็นเครื่องหอมปรับอากาศภายในบ้าน

นอกจากนี้เซรามิกรูพรุนเมื่อพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ปรับอากาศด้วยการนำมาเก็บน้ำมันหอมระเหย สามารถทดแทนการใช้ผลิตภัณฑ์ปรับอากาศที่มีในท้องตลาดอื่น ๆ และช่วยลดการเกิดขยะในครัวเรือนจากผลิตภัณฑ์ เครื่องหอมต่าง ๆ ได้ เพราะสามารถใช้ซ้ำได้อย่างต่อเนื่องด้วยการหดย่น้ำมันหอมระเหยเพิ่มเติมเมื่อกลิ่นหมดไป แนวคิด การใช้เซรามิกรูพรุนกักเก็บและควบคุมการปลดปล่อยน้ำมันหอมระเหยนี้ได้จากงานวิจัยของ Booppha et al. (2010) ซึ่งได้นำน้ำมันหอมระเหยของตะไคร้หอมไปกักเก็บไว้ในเซรามิกรูพรุน รูพรุนนี้จะควบคุมการปลดปล่อยน้ำมันหอมระเหย ตะไคร้หอมในรังผึ้งได้เป็นระยะเวลาหนึ่ง ให้น้ำมันหอมระเหยนี้ควบคุมและจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดโรคในรังผึ้งได้ และจากการศึกษาของงานวิจัยของ Punsukmtana et al. (2013) ซึ่งผลิตเซรามิกจากดินสำเร็จรูป พอร์ซเลนและเติม อะลูมินาเข้าไปจะช่วยลดการหดตัวของเซรามิกจากกระบวนการแปรของของแข็งในระหว่างการเผาซินเตอร์ได้ ทำให้ ได้เซรามิกหลังเผามีรูพรุนแบบเปิดที่สามารถดูดซึมของเหลวคือน้ำหอมเข้าไปในเนื้อเซรามิกได้และปลดปล่อย กลิ่นน้ำหอมได้ดี

ในงานวิจัยนี้จะผลิตเซรามิกรูพรุนจากแก้วโซดาไลม์ซึ่งเป็นขยะที่เหลือจากการบริโภคผลิตภัณฑ์จำพวก เครื่องดื่มประเภทต่าง ๆ ตามท้องตลาดทั่วไป ถึงแม้จะสามารถนำไปรีไซเคิลได้แต่กลับมีปริมาณไม่มากนักเมื่อเทียบกับ ปริมาณการผลิตขวดแก้วถึงหลายหมื่นตันต่อปี นอกจากนี้แก้วโซดาไลม์เป็นวัสดุที่มีความเสถียร และไม่เป็นพิษ ต่อร่างกายและสิ่งแวดล้อมจึงเหมาะสำหรับผลิตเป็นเซรามิกรูพรุนสำหรับกักเก็บน้ำมันหอมระเหย เมื่อน้ำมันหอม ระเหยระเหยออกจากเซรามิกรูพรุนนี้ก็จะไม่มีสารอันตรายปะปนมาด้วย อีกทั้งอุณหภูมิในการเผาซินเตอร์แก้วโซดาไลม์ ให้เป็นเซรามิกจะต่ำกว่าเซรามิกที่ผลิตจากวัสดุชนิดอื่นที่ต้องเผาที่อุณหภูมิสูงกว่า 1000 °C เช่น ซิลิกา (SiO₂) อะลูมินา (Al₂O₃) พอร์ซเลน (Porcelain) เป็นต้น จากการศึกษางานวิจัยของ Monich et al. (2018) พบว่า แก้วโซดาไลม์ชนิดหยาบ เมื่อทำการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางความร้อน (Differential Thermal Analysis, DTA) จะพบว่าช่วงอุณหภูมิ T_g (glass transition temperature) ถึงอุณหภูมิ T_c (Crystallization temperature) อยู่ในช่วง 620-850 °C แก้วโซดาไลม์เมื่อให้ความร้อนถึงอุณหภูมิ T_g อุณหภูมิของแก้วจะเริ่มมีการเคลื่อนที่เพื่อเปลี่ยนสถานะแล้ว

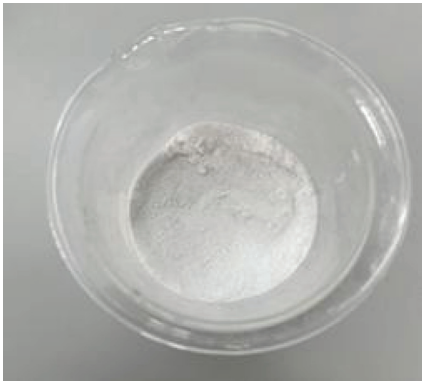
จะเปลี่ยนสถานะเป็นเซรามิกเมื่อถึงอุณหภูมิ T_c ดังนั้นอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการเผาซินเตอร์ของแก้วโซดาไลม์ จึงอยู่ในช่วง $620-850\text{ }^{\circ}\text{C}$ นี้ โดยในการทดลองนี้จะเลือกเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ $700\text{ }^{\circ}\text{C}$

การผลิตเซรามิกรูปทรงจะใช้วิธีการอย่างง่ายในการสร้างรูปทรงจากการหลุดออกของสารบางชนิดในระหว่างกระบวนการเผาซินเตอร์ อาศัยกลไกจากกระบวนการทางกายภาพ (Physical process) คือ การระเหย (Evaporation) กับ การระเหิด (Sublimation) หรือปฏิกิริยาทางเคมี (Chemical reaction) คือ การเผาไหม้ (Combustion) กับ การสลายตัว (Pyrolysis) ของสารที่เลือกใช้นั้น (Sopyan et al., 2007; Thonglem, 2010) จากงานวิจัยของ Thonglem et al. (2013) สามารถผลิตแก้วเซรามิกรูปทรงเคลือบฟอสเฟตโดยใช้เทคนิคการสร้างรูปทรงจากการระเหิดออกของการบู่ในระหว่างกระบวนการเผาซินเตอร์ที่มีขนาดของรูปทรงในระดับ $150-400\text{ }\mu\text{m}$ ได้และมีความพรุนสูงถึง 50%

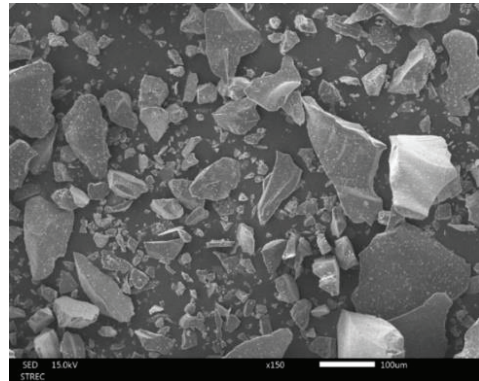
ดังนั้นวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้จะทำการผลิตเซรามิกรูปทรงจากผงแก้วโซดาไลม์ด้วยการผสมกับสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่อัตราส่วนต่าง ๆ ศึกษาสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ความหนาแน่น ความพรุน การดูดซึมน้ำ และโครงสร้างทางจุลภาค เพื่อหาเงื่อนไขเซรามิกรูปทรงที่สามารถกักเก็บของเหลวได้ดีที่สุดในงานวิจัยนี้ จากนั้นนำเซรามิกเงื่อนไขนี้ไปทดสอบลักษณะการปลดปล่อยน้ำมันหอมระเหยซึ่งจะทำการทดสอบกับน้ำมันหอมระเหย 2 ชนิดเปรียบเทียบกัน โดยจะเลือกใช้น้ำมันหอมระเหยจากผิวมะกรูดและผิวมะนาว จากวัตถุดิบที่พบในพื้นที่อำเภอย้ายบาศาล จังหวัดลพบุรี นำมาสกัดด้วยวิธีการกลั่นด้วยน้ำ (Hydro-distillation) สำหรับทดสอบ เนื่องจากมะกรูดและมะนาวเป็นพืชตระกูลซิตรัสซึ่งน้ำมันหอมระเหยจากพืชกลุ่มนี้นิยมนำไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ปรับอากาศ อีกทั้งมะกรูดและมะนาวเป็นพืชเศรษฐกิจที่นิยมปลูกเป็นจำนวนมากในประเทศรวมถึงในเขตพื้นที่อำเภอย้ายบาศาล จังหวัดลพบุรี ซึ่งเป็นพื้นที่บริการวิชาการของมหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครและคณะผู้วิจัยมีความสนใจในการพัฒนาผลิตภัณฑ์จากมะกรูดและมะนาวในพื้นที่เพื่อเพิ่มมูลค่าทางการตลาด

วิธีการ

ผงแก้วโซดาไลม์ได้จากการนำขวดแก้วโซดาไลม์มาบดให้ละเอียดร่อนด้วยตะแกรงไนลอน 80 US Mesh ทำให้อนุภาคที่จะผ่านตะแกรงจะมีขนาดตั้งแต่ $180\text{ }\mu\text{m}$ ลงไป ดังแสดงในภาพที่ 1 (ก) เมื่อศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของผงแก้วโซดาไลม์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 150 เท่า (150X) ดังแสดงในภาพที่ 1 (ข) พบว่า อนุภาคของผงแก้วมีขนาดแตกต่างกัน ขนาดของผงแก้วโซดาไลม์ที่บดละเอียดมีขนาดอยู่ในช่วง $20-100\text{ }\mu\text{m}$ โดยมีค่าเฉลี่ยขนาดอนุภาคเท่ากับ $58.626\pm 42.797\text{ }\mu\text{m}$ จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Image J



(ก)



(ข)

ภาพที่ 1 (ก) ลักษณะทางกายภาพ และ (ข) ลักษณะสัณฐานวิทยาที่ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 150 เท่า ของผงแก้วโซดาไลม์

ต่อมาผสมผงแก้วโซดาไลม์กับ 10 wt% สารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ในอัตราส่วน 1:1 1:1.5 1:2 1:2.5 1:3 และ 1:3.5 (g:ml) จากนั้นเทลงไปในแม่พิมพ์ซิลิโคนขนาด 2.5 cm x 2.5 cm x 2 cm (กว้าง x ยาว x สูง) นำไปอบให้แข็งตัวที่อุณหภูมิ 50 °C เป็นเวลา 3 วัน และเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 700 โดยให้อัตราการขึ้นลงของอุณหภูมิเป็น 20 °C/นาที เป็นเวลา 3 ชั่วโมง และศึกษาลักษณะสมบัติต่าง ๆ ดังนี้

- การหดตัวเชิงปริมาตร (Volume shrinkage) ของเซรามิกรูปทรงแปดหน้า ด้วยสมการที่ 1 เมื่อกำหนดให้ V_0 คือปริมาตรของชิ้นงานก่อนเผา และ V_1 คือ ปริมาตรของเซรามิกรูปทรงแปดหน้าหลังเผา

$$\text{Volume shrinkage (\%)} = \frac{V_0 - V_1}{V_0} \times 100 \dots\dots\dots(1)$$

- ศึกษาค่าความหนาแน่นรวม (Bulk density) ค่าความพรุนปรากฏ (Apparent porosity) และค่าการดูดซึมน้ำ (Water absorption) ของเซรามิกรูปทรงแปดหน้า โดยประยุกต์ใช้หลักการของอาร์คิมิดีส (Archimedes Principle) ตามมาตรฐาน ASTM C20 โดยใช้ชุดอุปกรณ์วัดความหนาแน่น (Density determination kit; Sartorius รุ่น YDK03) ประกอบกับเครื่องชั่งดิจิตอล 4 ตำแหน่ง (Analytical Balance; Sartorius รุ่น PRACTUM224-1S) หลักการของอาร์คิมิดีสทำได้ดังนี้ นำชิ้นงานเซรามิกแห้งที่อบให้ความร้อน ประมาณ 100 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง มาชั่งในอากาศ น้ำหนักที่ได้บันทึกเป็น m_1 ต่อมนำเซรามิกแช่ในน้ำ เพื่อให้ น้ำเข้าไปแทนที่อากาศในรูพรุน กระตุ้นด้วยการต้มในน้ำเดือด เป็นเวลา 6 ชั่วโมง และแช่ทิ้งไว้อีก 24 ชั่วโมง นำชิ้นงานที่ผ่านการต้มและแช่น้ำค้างคืนแล้ว ไปชั่งในน้ำ บันทึกเป็น m_2 จากนั้นนำชิ้นงานที่ผ่านการแช่ค้างคืนแล้ว ไปชั่งในอากาศ บันทึกเป็น m_3 จากข้อมูลข้างต้น คำนวณหาค่าความหนาแน่น (ρ) ของเซรามิก ด้วยสมการ 2 คำนวณหาค่าร้อยละความพรุนที่ปรากฏของเซรามิก ด้วยสมการ 3 และคำนวณค่าการดูดซึมน้ำ (WA) ด้วยสมการ 4 โดยในการทดลองนี้ศึกษาที่อุณหภูมิ 28 °C ดังนั้น ρ_0 เท่ากับ 0.996262 g/cm³

$$\rho = \frac{m_1}{m_3 - m_2} \rho_0 \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$\text{Apparent porosity (\%)} = \frac{m_3 - m_1}{m_3 - m_2} \times 100 \quad \dots\dots\dots(3)$$

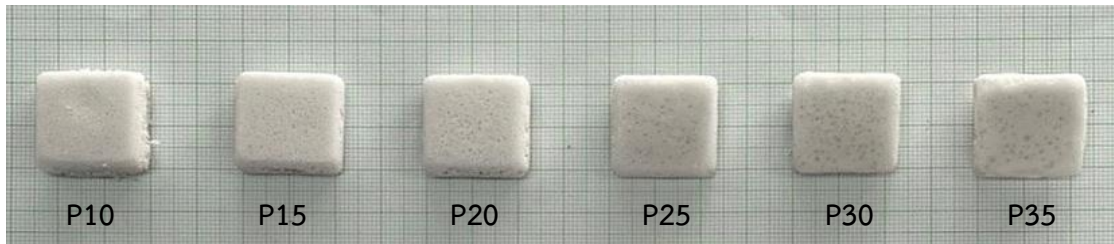
$$\text{WA} = \frac{m_3 - m_1}{m_1} \times 100 \quad \dots\dots\dots(4)$$

- ศึกษาลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscopy, SEM: JEOL, JSM-IT500HR)
- ศึกษาลักษณะการปลดปล่อยน้ำมันหอมระเหยมะกรูดและมะนาวของเซรามิกรูพรุน โดยประยุกต์วิธีจากงานวิจัยของ Janatova et al. (2015) ที่ใช้วิธีหดย่น้ำมันหอมระเหยลงบนเซรามิกรูพรุนและวัดค่าน้ำหนักที่ลดลงเมื่อเวลาผ่านไป โดยในงานวิจัยนี้จะหดย่น้ำมันหอมระเหยปริมาณ 0.3 g ลงในเซรามิกรูพรุนและชั่งน้ำหนักทุกชั่วโมงเป็นเวลา 6 ชั่วโมง เทียบกับน้ำมันหอมระเหย 0.3 g ที่ไม่ได้หดย่นลงในเซรามิกรูพรุน จากนั้นคำนวณร้อยละการระเหยออกของน้ำมันหอมระเหย โดยเปรียบเทียบน้ำหนักของน้ำมันหอมระเหยที่ลดลงกับน้ำหนักน้ำมันหอมระเหยก่อนการทดลอง

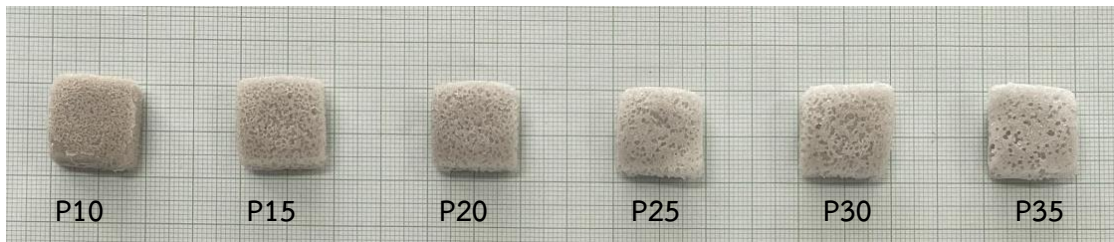
ผลการทดลองและวิจารณ์

1. ลักษณะทางกายภาพของเซรามิกรูพรุน

เซรามิกรูพรุนที่ถูกเตรียมจากผงแก้วโซดาไลม์ผสมกับ 10 wt% สารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ในอัตราส่วน 1:1 1:1.5 1:2 1:2.5 1:3 และ 1:3.5 (g:ml) จะมีการกำหนดชื่อของสารตัวอย่างเป็น P10 P15 P20 P25 P30 และ P35 ตามลำดับ เทดลองไปในแม่พิมพ์ซิลิโคนขนาด 2.5 cm x 2.5 cm x 2 cm (กว้าง x ยาว x สูง) หลังอบให้แห้งแล้วขนาดชิ้นงานตัวอย่างมีการหดตัวเล็กกว่าแม่พิมพ์ซิลิโคน ลักษณะชิ้นงานหลังอบแสดงดังภาพที่ 2 (ก) เมื่อนำไปเผาที่อุณหภูมิ 700 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ลักษณะชิ้นงานหลังเผา แสดงในภาพที่ 2 (ข) จะหดตัวเล็กลงอีกครั้งและชิ้นงานหลังเผามีการกระจายตัวของรูพรุนเกิดขึ้นจากการหลุดออกของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์และน้ำ เมื่อพิจารณาการหดตัวของชิ้นงานหลังเผาเทียบกับขนาดของชิ้นงานก่อนเผา พบว่าชิ้นงานอัตราส่วน 1:1 (P10) จะมีการหดตัวสูงที่สุดประมาณ 42% จากนั้นการหดตัวจะลงเมื่อเพิ่มปริมาณสารละลายโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ จนถึงช่วงอัตราส่วน 1:2 ถึง 1:3.5 การหดตัวจะใกล้เคียงกันประมาณ 30% ดังภาพที่ 3

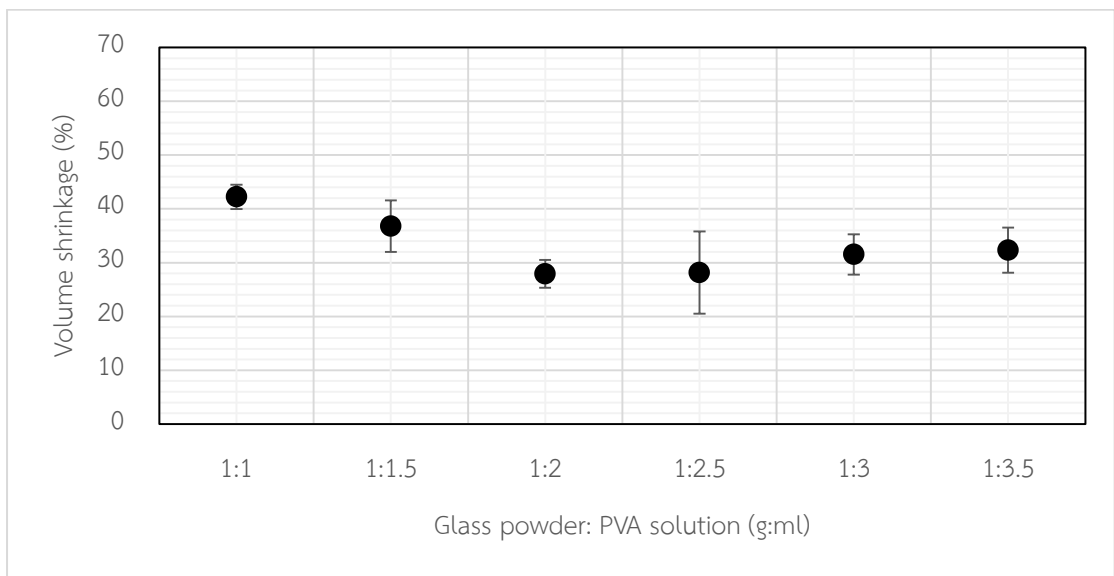


(ก)



ภาพที่ 2 ชิ้นงานที่ขึ้นรูปโดยนำผงแก้วผสมกับสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ในอัตราส่วน 1:1 ถึง 1:3.5

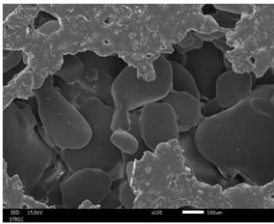
(ก) ก่อนเผาและ (ข) หลังเผา ที่อุณหภูมิ 700 °C



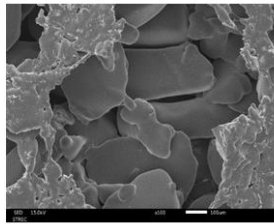
ภาพที่ 3 การหดตัวเชิงปริมาณของเซรามิกพูนหลังเผาที่ได้จากผงแก้วผสมสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ที่อัตราส่วน 1:1 ถึง 1:3.5

2. ลักษณะโครงสร้างทางจุลภาค

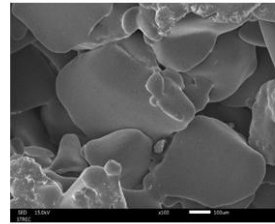
โครงสร้างทางจุลภาคของเซรามิกรูพรุนเงื่อนไขต่าง ๆ ถูกศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 100 เท่า (100X) แสดงดังภาพที่ 4 พบว่ามีการกระจายตัวของรูพรุนในเนื้อเซรามิกทุกเงื่อนไขอย่างเห็นได้ชัด และรูพรุนของเซรามิกทุกเงื่อนไขมีลักษณะใกล้เคียงกัน รูพรุนมีรูปร่างไม่แน่นอน เนื่องจากเป็น รูพรุนจากการระเหยออกของสารที่เตรียมให้เป็นของเหลวในเบื้องต้น รูพรุนที่ได้เป็นรูพรุนประเภทแมคโครพอร์รัส (Macroporous) ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 50 μm



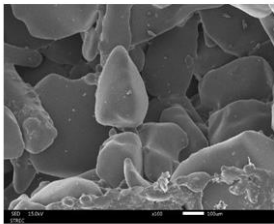
P10



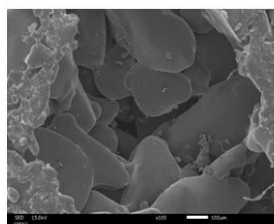
P15



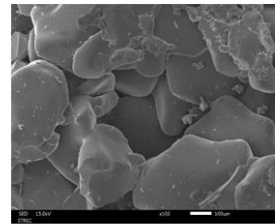
P20



P25



P30



P35

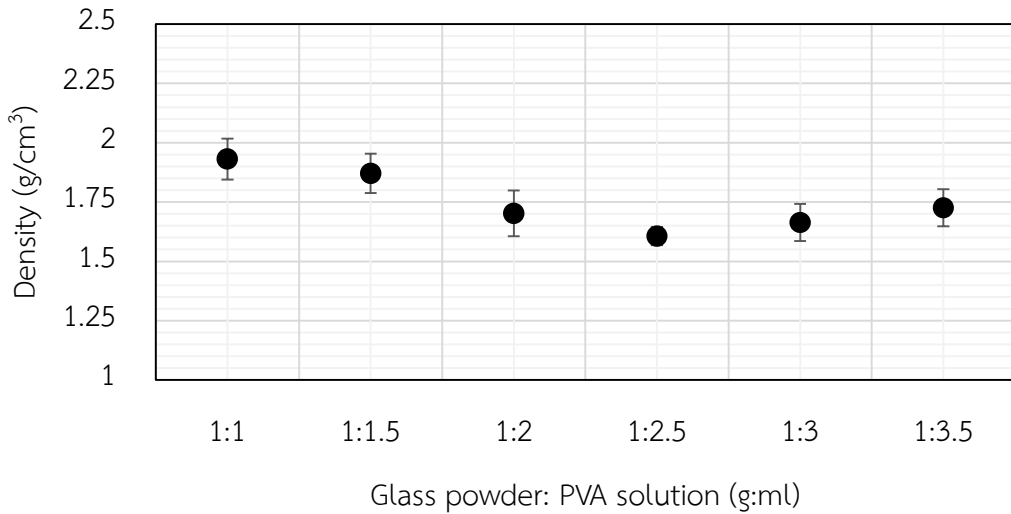
ภาพที่ 4 โครงสร้างทางจุลภาคของเซรามิกรูพรุนจากผงแก้วผสมสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์
อัตราส่วน 1:1 ถึง 1:3.5

3. ความหนาแน่น ความพรุนปรากฏ และการดูดซึมน้ำ

การศึกษาความหนาแน่นรวม ความพรุนปรากฏ และการดูดซึมน้ำ ของชิ้นงานเซรามิกรูพรุนหลังการเผาซินเตอร์ จะใช้วิธีการแช่ของอาร์คิมิดีส มาตรฐาน ASTM C20 (Archimedes immersion technique with ASTM C20 standard test methods) ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง (28 °C) โดยใช้น้ำกลั่นไร้ประจุ (Deionized water) เป็นสารมาตรฐานในการแช่ชิ้นงาน เรียกวิธีการนี้ว่าเทคนิคการดูดซึมน้ำ (Water absorption) ผลการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

3.1 ความหนาแน่น

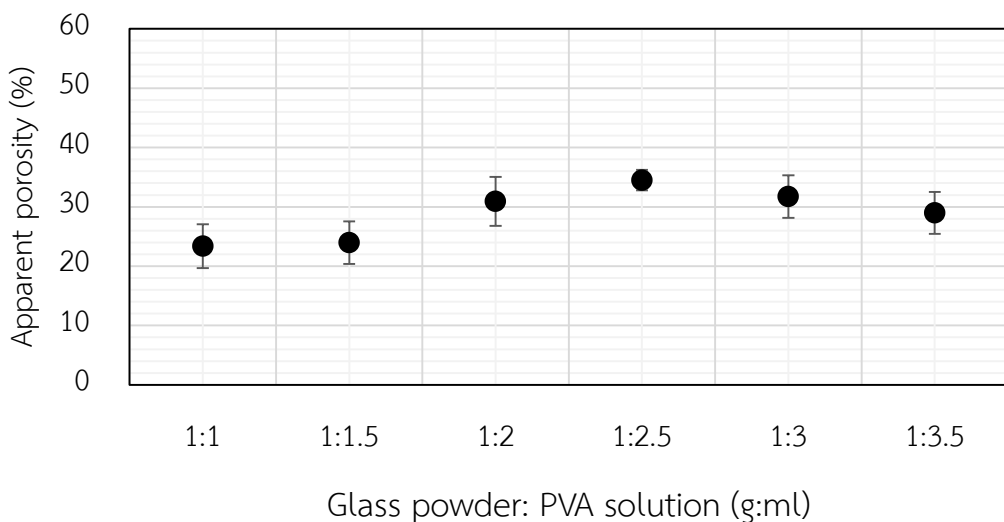
ความหนาแน่นของชิ้นงานเซรามิกรูพรุนมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ จนกระทั่งมีค่าต่ำที่สุดที่อัตราส่วน 1:2.5 หรือชิ้นงาน P25 มีค่าความหนาแน่นต่ำที่สุดเฉลี่ย 1.607 g/cm^3 จากนั้นค่าความหนาแน่นจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอีกครั้งหนึ่ง แสดงดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 ค่าความหนาแน่นของเซรามิกรูปทรงที่ได้จากผงแก้วผสมสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ที่อัตราส่วน 1:1 ถึง 1:3.5

3.2 ความพรุนปรากฏ

ความพรุนปรากฏของชิ้นงานเซรามิกรูปทรง มีลักษณะดังภาพที่ 6 จากกราฟจะเห็นได้ว่าค่าความพรุนปรากฏของชิ้นงานเซรามิกรูปทรงมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ก่อนเผาขึ้นเตอร์ จนกระทั่งถึง 1:2.5 หรือชิ้นงาน P25 มีความพรุนปรากฏสูงที่สุด โดยมีความพรุนเฉลี่ย เท่ากับ 34.50% จากนั้นค่าความพรุนปรากฏจะลดลงเมื่อเพิ่มสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ดังนั้นในงานวิจัยนี้ชิ้นงาน P25 จึงมีค่าความพรุนสูงที่สุด

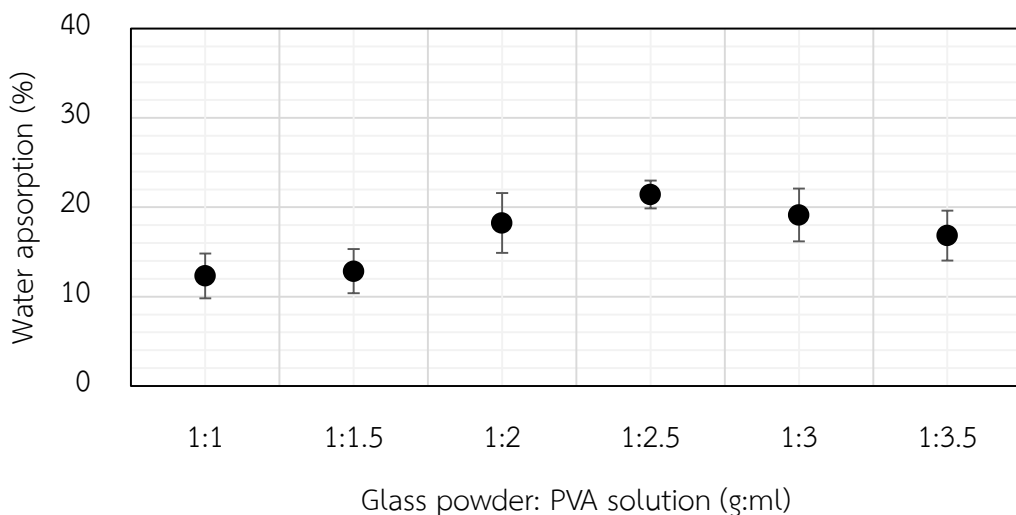


ภาพที่ 6 ค่าความพรุนปรากฏของเซรามิกรูปทรงที่ได้จากผงแก้วผสมสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ที่อัตราส่วน 1:1 ถึง 1:3.5

การหดตัวของเซรามิกรูปทรงแปดหน้าเป็นผลจากการผืนึกกันของอนุภาคแก้วโซดาไลม์ในระหว่างเผาซินเตอร์ โดยแก้วโซดาไลม์เป็นแก้วที่มีองค์ประกอบของโซเดียม (Na) ซึ่งเป็นธาตุที่ทำหน้าที่เป็นฟลักซ์หรือสารช่วยหลอมที่ทำให้อุณหภูมิในการเผาซินเตอร์ต่ำลง เพราะเกิดกลไกของการเผาแบบมีเฟสของเหลว (Liquid phase sintering) ที่สามารถเคลื่อนย้ายได้ง่าย (Guechi et al., 2004) การเคลื่อนย้ายของเฟสของเหลวไปตามรูปทรงแปดหน้าในการเผาจึงส่งผลทำให้เซรามิกรูปทรงแปดหน้าหลังเผามีการหดตัวค่อนข้างสูง เห็นได้จากชิ้นงานอัตราส่วน 1:1 (P10) จะมีการหดตัวสูงมากถึงประมาณ 42% ทั้งยังส่งผลทำให้ความหนาแน่นของชิ้นงานนี้สูงที่สุดและความพรุนต่ำที่สุดอีกด้วย ดังนั้นจึงได้มีการเพิ่มปริมาณสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ เพื่อเพิ่มพื้นที่ในการกระจายตัวของผงแก้วโซดาไลม์ให้มากขึ้น ซึ่งการเพิ่มปริมาณสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ส่งผลทำให้มีแนวโน้มของการหดตัวเชิงปริมาตรลดลง ความหนาแน่นลดลง และความพรุนปรากฏสูงขึ้น แต่เมื่อเพิ่มปริมาณสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์สูงกว่าอัตราส่วน 1:2.5 (P25) แนวโน้มการหดตัวเชิงปริมาตรกลับสูงขึ้น ความหนาแน่นสูงขึ้นและความพรุนปรากฏลดลงคาดว่าเป็นผลจากสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่มีมากเกินไปในระหว่างการขึ้นรูปทำให้เกิดการแยกชั้นของสารละลาย พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ส่วนหนึ่งที่ไม่ฝังแก้วโซดาไลม์กระจายอยู่ไปอยู่บริเวณด้านบนของชิ้นงานก่อนเผา เมื่อนำไปเผาก็สลายตัวไปโดยไม่มีส่วนทำให้เกิดรูปทรงแปดหน้าทำให้การหดตัวของเซรามิกรูปทรงแปดหน้าเริ่มคงที่ อีกทั้งน้ำหนักของชิ้นสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่แยกออกมามียังไปกดทับผงแก้วโซดาไลม์ที่กระจายอยู่ด้านล่าง ทำให้การกระจายของผงแก้วโซดาไลม์ลดลง เซรามิกหลังเผาอัตราส่วน 1:3 (P30) และ 1:3.5 (P35) จึงมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น ความพรุนปรากฏลดลง

3.3 ค่าการดูดซึมน้ำ

ค่าการดูดซึมน้ำของของชิ้นงานเซรามิกรูปทรงแปดหน้ามีลักษณะดังภาพที่ 7 จากกราฟจะเห็นว่าแนวโน้มของค่าการดูดซึมน้ำสอดคล้องกับค่าความพรุนปรากฏ โดยในช่วงแรกค่าการดูดซึมน้ำจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ จนมีค่ามากที่สุดที่เงื่อนไข P25 เท่ากับ 21.43% จากนั้นค่าการดูดซึมน้ำจะลดลง จะเห็นว่าแนวโน้มของค่าความหนาแน่นของเซรามิกรูปทรงแปดหน้าจะสวนทางกับค่าความพรุนปรากฏและค่าการดูดซึมน้ำ



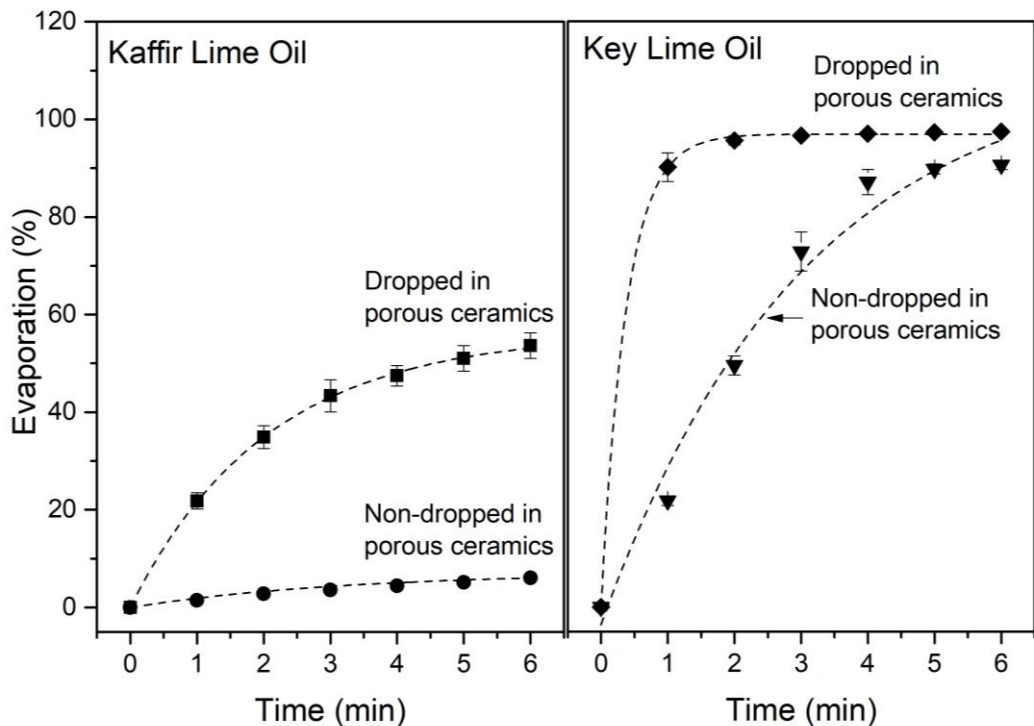
ภาพที่ 7 ค่าการดูดซึมน้ำของเซรามิกรูปทรงแปดหน้าที่ได้จากผงแก้วผสมสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ที่อัตราส่วน 1:1 ถึง 1:3.5

เมื่อพิจารณาค่าความหนาแน่น ค่าความพรุนปรากฏ และค่าการดูดซึมน้ำของเซรามิกรูปทรง
ทุกเงื่อนไขพร้อมกัน พบว่าเซรามิกรูปทรงที่ดีที่สุดในการทดลองนี้ คือเซรามิกรูปทรงที่ได้จากผงแก้วผสมสารละลาย
พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่อัตราส่วน 1:2.5 (P25) เเผาที่อุณหภูมิ 700 °C ซึ่งเป็นเซรามิกรูปทรงที่มีค่าความพรุนสูงที่สุด
สามารถดูดซึมน้ำของเหลวได้มากที่สุดซึ่งสามารถบรรจุน้ำมันหอมระเหยได้สูงที่สุด

4. ศึกษาการระเหยออกของน้ำมันหอมระเหยเซรามิกรูปทรง

การศึกษากการระเหยออกของน้ำมันหอมระเหยจากเซรามิกรูปทรงจะศึกษาโดยใช้น้ำมันหอมระเหย
2 ชนิด คือน้ำมันหอมระเหยมะกรูดและมะนาวทำโดยหยดน้ำมันหอมระเหยปริมาณ 0.3 g ลงในเซรามิกรูปทรง
และวัดค่าน้ำหนักที่ลดลงทุกชั่วโมงเป็นเวลา 6 ชั่วโมง เทียบกับน้ำมันหอมระเหย 0.3 g ที่ไม่ได้หยดลงในเซรามิกรูปทรง
ค่าการระเหยของน้ำมันหอมระเหยจากเปลือกผิวมะกรูดและมะนาว แสดงดังภาพที่ 8

เมื่อเปรียบเทียบการระเหยของน้ำมันหอมระเหยจากผิวมะกรูดและมะนาวที่ไม่ได้หยดลงในเซรามิก
รูปทรง พบว่าน้ำมันหอมระเหยจากผิวมะกรูดจะมีอัตราการระเหยประมาณร้อยละ 0.97 ต่อชั่วโมง ซึ่งช้ากว่าน้ำมันหอมระเหย
จากผิวมะนาวที่มีอัตราการระเหยประมาณร้อยละ 21.91 ต่อชั่วโมง ในช่วง 4 ชั่วโมงแรก จากนั้นอัตราการระเหย
จะเริ่มคงที่เมื่อน้ำมันหอมระเหยระเหยออกไปแล้วประมาณ 90% ในขณะที่การระเหยของน้ำมันหอมระเหย
ที่หยดลงในเซรามิกรูปทรงจะมีอัตราการระเหยสูงกว่าน้ำมันหอมระเหยที่ไม่ได้หยดลงในเซรามิกรูปทรง โดยเฉพาะอย่างยิ่ง
น้ำมันหอมระเหยจากผิวมะนาวการระเหยสูงถึง 90% ในชั่วโมงแรก แสดงให้เห็นว่าการหยดน้ำมันหอมระเหยลงใน
เซรามิกรูปทรง จะช่วยการกระจายกลิ่นของน้ำมันหอมระเหยในบรรยากาศได้ดีขึ้น



ภาพที่ 8 การระเหยของน้ำมันหอมระเหยจากเปลือกผิวมะกรูด เมื่อหยด (□) และไม่หยด (●) ลงเซรามิกรูปทรง
และน้ำมันหอมระเหยจากผิวมะนาว เมื่อหยด (◆) และไม่หยด (▼) ลงเซรามิกรูปทรง

อัตราการระเหยของน้ำมันหอมระเหยจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีที่อยู่ น้ำมันหอมระเหยชนิดนั้น ๆ จากการศึกษางานวิจัยของ Duanyai et al. (2020) ซึ่งศึกษาสมบัติของน้ำมันหอมระเหยของพืชสมุนไพรหลากหลายชนิดที่พบในอำเภอวังหิน จังหวัดศรีสะเกษ พบว่าน้ำมันหอมระเหยของผิวมะกรูดและมะนาวที่สกัดด้วยวิธีการกลั่นด้วยน้ำพบสารสำคัญดังนี้ สารสำคัญในน้ำมันผิวมะกรูด คือ เบต้าไพเนน (β -pinene) 25.92% ดีลิมอนีน (D-Limonene) 20.80% ซาบินีน (Sabinene) 16.84% และ ซิโตรเนลลัล (Citronellal) 13.56% สารสำคัญในน้ำมันผิวมะนาว คือ ดีลิมอนีน (D-Limonene) 58.01% เบต้าไพเนน (β -pinene) 17.78% พาราไซเมเนน (p-cymenene) 10.27% และ ซาบินีน (Sabinene) 2.64% มีคุณสมบัติดังตารางที่ 1 เมื่อพิจารณาองค์ประกอบทางเคมีจะพบว่าน้ำหนักโมเลกุลโดยรวมของน้ำมันจากผิวมะกรูดมีค่าสูงกว่าน้ำมันจากผิวมะนาว โดยเฉพาะอย่างยิ่งในน้ำมันผิวมะกรูดมีซิโตรเนลลัลจะมีน้ำหนักโมเลกุลสูงกว่าสารสำคัญชนิดอื่น ๆ และจากเอกสารข้อมูลความปลอดภัยของสารเคมี (Material safety data sheet; MSDS) ยังระบุว่าซิโตรเนลลัลมีจุดเดือด 207 °C ซึ่งสูงกว่าสารสำคัญอื่นๆ ที่พบในน้ำมันหอมระเหยทั้ง 2 ชนิด จึงส่งผลให้การระเหยของน้ำมันจากผิวมะกรูดระเหยได้ช้ากว่าน้ำมันจากผิวมะนาว จะเห็นได้ว่าเซรามิกรูปทรงที่ผลิตขึ้นนี้สามารถนำไปพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์เซรามิกสำหรับกักเก็บและกระจายกลิ่นสารระเหยจำพวกน้ำมันหอมระเหยหรือน้ำหอมเพื่อปรับอากาศได้

นอกจากนี้ น้ำมันหอมระเหยแต่ละชนิดจะเหมาะกับเซรามิกรูปทรงที่มีความพรุนแตกต่างกัน โดยสามารถพิจารณาจากสารสำคัญที่พบในน้ำมันหอมระเหยที่เลือกใช้ว่ามีน้ำหนักโมเลกุลและจุดเดือดในระดับใด หากน้ำมันหอมระเหยนั้นมีองค์ประกอบของสารสำคัญที่น้ำหนักโมเลกุลต่ำหรือจุดเดือดต่ำ อาจเลือกใช้เซรามิกรูปทรงที่มีความพรุนสูงที่สามารถกักเก็บน้ำมันหอมระเหยได้เป็นจำนวนมากเพื่อเพิ่มระยะเวลาในการระเหยของน้ำมันหอมระเหยนั้นให้สูงขึ้น แต่ถ้าน้ำมันหอมระเหยที่เลือกใช้ว่ามีน้ำหนักโมเลกุลสูงหรือจุดเดือดสูงซึ่งจะระเหยได้ช้า ก็สามารถเลือกใช้เซรามิกรูปทรงที่มีความพรุนต่ำกว่าที่สามารถกักเก็บน้ำมันหอมระเหยในปริมาณที่ต่ำกว่าได้

ตารางที่ 1 แสดงสูตรทางเคมี ปริมาณ และจุดเดือด ของสารสำคัญที่พบในน้ำมันหอมระเหยจากผิวมะกรูดและมะนาว (Duanyai et al., 2020)

ชนิดน้ำมันหอมระเหย	สารสำคัญ	สูตรทางเคมี	ปริมาณสารสำคัญ (%)	จุดเดือด (°C)
ผิวมะกรูด	β -pinene	$C_{10}H_{16}$	25.92	169 – 179 °C
	D-Limonene	$C_{10}H_{16}$	20.80	175 – 178 °C
	Sabinene	$C_{10}H_{16}$	16.84	163 – 164 °C
	Citronellal	$C_{10}H_{18}O$	13.56	207 °C
ผิวมะนาว	D-Limonene	$C_{10}H_{16}$	58.01	175 – 178 °C
	β -pinene	$C_{10}H_{16}$	17.78	169 – 179 °C
	p-cymenene	$C_{10}H_{12}$	10.27	176 °C
	Sabinene	$C_{10}H_{16}$	2.64	163 – 164 °C

สรุป

ขวดแก้วโซดาโลมที่เป็นขยะที่เหลือจากการบริโภคผลิตภัณฑ์จำพวกเครื่องดื่มประเภทต่าง ๆ ตามท้องตลาดทั่วไป สามารถนำไปผลิตเป็นเซรามิกกรุพูนได้ด้วยเทคนิคอย่างง่ายด้วยการนำไปดัดให้ละเอียดผสมกับสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์ซิลิโคน เผาที่อุณหภูมิ 700 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ได้ เซรามิกกรุพูนเงื่อนไขที่ดีที่สุดของงานวิจัยนี้คือ เซรามิกกรุพูนที่เตรียมจากอัตราส่วน 1:2.5 หรือชั้นงาน P25 ได้ รูพูนประเภทแมคโครพอร์ส ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 50 μm ค่าความพรุนสูงที่สุด 34.50% และค่าการดูดซึมน้ำสูงที่สุด 21.429% ในขณะที่มีความหนาแน่นต่ำที่สุด 1.607 g/cm^3 เมื่อนำน้ำมันหอมระเหยบรรจุลงในเซรามิกกรุพูน ทำให้อัตราการระเหยของน้ำมันหอมระเหยสูงขึ้น ช่วยการกระจายกลิ่นของน้ำมันหอมระเหยในบรรยากาศได้ดีขึ้นเมื่อเทียบกับน้ำมันหอมระเหยที่ไม่ได้หยดลงในเซรามิกกรุพูน จะเห็นได้ว่าเซรามิกกรุพูนที่ผลิตขึ้นนี้สามารถนำไปพัฒนาเป็นวัสดุกักเก็บและกระจายกลิ่นของน้ำมันหอมระเหยได้

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ สำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.) และ มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร ที่พิจารณาอนุมัติทุนวิจัย งบประมาณด้านวิจัยและนวัตกรรม ประเภท Fundamental Fund ประจำปีงบประมาณ 2565 รหัสโครงการ 169914 ทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- Booppha, B., Eittsayeam, S., Pengpat, K., & Chantawannakul, P. (2010). Development of bioactive ceramics to control mite and microbial diseases in bee farms. **Advanced Materials Research**, **93-94**, 553-557.
- Cruz-Valenzuela, M.R., Tapia-Rodríguez, M.R., Vazquez-Armenta, F.J., Silva-Espinoza, B.A., & Ayala-Zavala, J.F. (2016). Lime (*Citrus aurantifolia*) Oils. **Essential Oils in Food Preservation, Flavor and Safety**, 531–537.
- Duanyai, S., Manok, S., & Rodpo, P. (2020). Antioxidant and Antimicrobial Activities of Essential Oil from Thai Herbs to Microorganisms Causing Dermatitis. **KKU Science Journal**, **48**(1), 76-85. (In Thai)
- Guechi, A., Achour, S., & Harabi, A. (2004). Effect of Temperature and Na_2CO_3 Additions on Sintering and Crystallisation of Anorthite. **Key Engineering Materials**, **264**, 257–260.
- Janatova, A., Bernardos, A., Smid, J., Frankova, A., Lhotka, M., Kourimská, L., Pulkrabek, J., & Kloucek, P. (2015). Long-term antifungal activity of volatile essential oil components released from mesoporous silica materials. **Industrial Crops and Products**, **67**, 216–220.
- Khawgrib, S., Chaiyanan, S., Chaiyanan, S., Niyomtoon, I., & Patampa, S. (2021). Impact of PM2.5 on Building Hygiene, A Case Study of Chanthaburi National Archives. **Phranakhon Rajabhat Research Journal (Science and Technology)**, **16**(2), 34-44. (In Thai)

