

## การออกแบบและผลิตแม่พิมพ์ปูนปลาสเตอร์ต้นทุนต่ำสำหรับขึ้นรูปโฟมน้ำยาง

## Design and Fabrication of Cost-Effective Plaster Molds for Natural Rubber Foam

ดริกา จาอาห์\*, รุสนานี เปาะแฮ และนุรซุฮดา บินดุลเลาะห์

Darika Jaaoh\*, Rusnane Pohhae and Nursuhsda Bindulloh

สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและการเกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา จังหวัดยะลา

Department of Applied Physics, Faculty of Science, Technology and Agriculture, Yala Rajabhat University, Yala

\*Corresponding author e-mail: darika.j@yru.ac.th

(Received: April 9, 2025, Revised: November 12, 2025, Accepted: November 21, 2025)

## บทคัดย่อ

ด้วยความต้องการวัสดุย่อยสลายได้สำหรับงานกันกระแทกที่เพิ่มขึ้น งานวิจัยนี้มุ่งพัฒนาแม่พิมพ์ปูนปลาสเตอร์ต้นทุนต่ำสำหรับการขึ้นรูปโฟมน้ำยางธรรมชาติ โดยเปรียบเทียบแม่พิมพ์ที่มีขอบหนา 5 มม. และ 10 มม. ในด้านอายุการใช้งาน สมบัติกายภาพ และสมบัติการนำความร้อน เพื่อระบุความเหมาะสมในการใช้งานจริง ผลพบว่า แม่พิมพ์ขอบ 10 มม. มีความทนทานกว่า ใช้งานได้ 14 ครั้ง ขณะที่แบบ 5 มม. ใช้ได้ 6 ครั้ง โฟมจากแม่พิมพ์ขอบหนามีเซลล์ละเอียด หนาแน่นสูง และด้านการยุบตัวได้ดีกว่า โดยมีความหนาแน่น  $0.276 \text{ g/cm}^3$  และการยุบตัว 6.43 % เทียบกับ  $0.243 \text{ g/cm}^3$  และ 7.60 % ของแม่พิมพ์ขอบบาง ด้านสมบัติความร้อน แม่พิมพ์ขอบ 10 มม. มีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนสูงกว่า ( $0.6830 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ) เมื่อเทียบกับ 5 มม. ( $0.4674 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ) เนื่องจากความหนาที่มากช่วยลดอัตราการระเหยน้ำ ทำให้ผลึกแคลเซียมซัลเฟตไดไฮเดรตอัดตัวแน่น ความพรุนต่ำ และเกิดเส้นทางนำความร้อนต่อเนื่องกว่า ขณะที่แม่พิมพ์ขอบบางมีโพรงอากาศมากกว่า ส่งผลให้ค่าการนำความร้อนลดลง นอกจากนี้ ความหนาที่มากยังส่งผลให้เกิดการกระจายอุณหภูมิที่สม่ำเสมอและลดการสูญเสียความร้อน ทำให้ค่าการนำความร้อนที่วัดได้สะท้อนสมบัติแท้ของวัสดุได้แม่นยำขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ

**คำสำคัญ:** แม่พิมพ์ต้นทุนต่ำ ยางธรรมชาติ โฟมยางกันกระแทก ปูนปลาสเตอร์ วัสดุย่อยสลายได้

## ABSTRACT

Due to the increasing demand for biodegradable cushioning materials, this study develops a low-cost plaster mold for forming natural latex foam and compares molds with edge thicknesses of 5 mm and 10 mm in terms of service life, physical properties, and thermal behavior. Results show that the 10-mm mold is markedly more durable, withstanding 14 cycles before failure, whereas the 5-mm mold endures only 6 cycles. Microstructural analysis indicates that foam produced from the thicker mold features smaller, more uniform cells with higher density, resulting in better compression resistance and recovery. Foam from the 10-mm mold shows an average density of  $0.276 \text{ g/cm}^3$  and a compression set of 6.43 %, compared with  $0.243 \text{ g/cm}^3$  and 7.60 % for the 5-mm mold. For thermal performance, the 10-mm mold exhibits higher thermal conductivity ( $0.6830 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ) than the 5-mm mold ( $0.4674 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ). The greater thickness slows water evaporation during setting, promoting tighter packing of calcium sulfate dihydrate crystals, improved solid-phase continuity, and reduced porosity, all of which enhance heat-transfer pathways. In contrast, the thinner mold tends to develop air voids from rapid moisture loss, reducing structural continuity and thermal conductivity. The increased thickness also produces a more uniform internal temperature distribution and lowers surface heat loss, allowing measured conductivity to better represent the material's intrinsic properties.

**Keywords:** low-cost molds, natural rubber, shock-absorbing rubber foam, plaster of Paris, biodegradable materials

## บทนำ

ยางพาราเป็นทรัพยากรธรรมชาติที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจของประเทศไทย โดยสามารถนำมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์หลากหลายชนิด เช่น ยางรถยนต์ เครื่องมือแพทย์ และวัสดุกันกระแทก ยางพารามีสมบัติพิเศษ เช่น ความยืดหยุ่น ความแข็งแรง และความสามารถในการกันน้ำ และเป็นฉนวนไฟฟ้า ซึ่งทำให้ได้รับความนิยมในอุตสาหกรรมหลากหลายประเภท อย่างไรก็ตาม วัสดุกันกระแทกส่วนใหญ่ในปัจจุบันยังผลิตจากพอลิเมอร์สังเคราะห์ เช่น พอลิสไตรีน (polystyrene) และพอลิยูรีเทน (polyurethane) ซึ่งใช้เวลานานในการย่อยสลายและส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในระยะยาว [1]–[2] ด้วยกระแสการรณรงค์ด้านสิ่งแวดล้อมในระดับโลก เช่น กฎหมายของสหภาพยุโรปและสหรัฐอเมริกาที่มุ่งลดการใช้วัสดุที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ [3] ทำให้การพัฒนาวัสดุกันกระแทกที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมีความสำคัญเพิ่มมากขึ้น งานวิจัยก่อนหน้านี้ได้ทดลองใช้วัสดุหลากหลายรูปแบบ เช่น แป้งมันสำปะหลัง หรือ เส้นใยธรรมชาติร่วมกับน้ำยางพารา เพื่อสร้างวัสดุกันกระแทกที่สามารถย่อยสลายได้ในธรรมชาติ [4]–[6] แต่ยังคงมีข้อจำกัด เช่น ต้นทุนการผลิตที่สูง หรือ ความซับซ้อนในกระบวนการผลิตแม่พิมพ์

ทั้งนี้ ยางธรรมชาติ เมื่อผ่านกระบวนการวัลคาไนซ์แล้ว จะมีความทนทานต่อการย่อยสลายสูงขึ้น เมื่อเทียบกับยางที่ไม่วัลคาไนซ์ ดังนั้น แนวทางความยั่งยืนของงานวิจัยนี้ จึงมุ่งเน้นที่การลดการพึ่งพาวัสดุแม่พิมพ์ที่มีราคาสูงและใช้ยาก การออกแบบกระบวนการผลิตที่เป็นมิตรต่อผู้ประกอบการชุมชน และการใช้วัสดุแม่พิมพ์ต้นทุนต่ำ ซึ่งสามารถซ่อม หรือ ผลิตซ้ำได้ง่าย ชนิดของวัสดุแม่พิมพ์ที่ใช้ในการผลิตโฟมน้ำยางมีหลายประเภท เช่น แม่พิมพ์ปูนปลาสเตอร์ (plaster of Paris) ซึ่งมีต้นทุนต่ำและผลิตง่าย แต่มีข้อจำกัดด้านความเปราะและการนำความร้อนต่ำ แม่พิมพ์ซิลิโคน (silicone) ให้ผิวเรียบและถอดแบบง่าย แต่มีราคาสูง แม่พิมพ์โลหะ (metal) ทนความร้อนได้ดีและมีความทนทานสูง แต่ต้นทุนและน้ำหนักมาก เหมาะกับการผลิตระดับอุตสาหกรรม แม่พิมพ์เรซิน หรือ เรซินจากการพิมพ์สามมิติ (3D-printed resin) สามารถออกแบบรูปร่างซับซ้อนได้ดี แต่ทนความร้อนไม่มากนัก โดยงานวิจัยที่ผ่านมา ได้เปรียบเทียบคุณสมบัติของแม่พิมพ์เหล่านั้นในด้านต้นทุน การนำความร้อน และอายุการใช้งาน มีการศึกษาการผลิตและสมบัติของปูนปลาสเตอร์รีไซเคิลจากแม่พิมพ์อุตสาหกรรมที่หมดอายุการใช้งาน โดยเปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลกับปูนปลาสเตอร์ใหม่ พบว่า ปูนปลาสเตอร์ที่ผ่านกระบวนการรีไซเคิลและอบแห้งที่อุณหภูมิ 130 °C สามารถคงสมบัติได้ใกล้เคียงกับวัสดุใหม่ในด้านความหนาแน่น กำลังอัด และกำลังดัด ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงศักยภาพของการใช้วัสดุแม่พิมพ์จากปูนปลาสเตอร์ที่มีต้นทุนต่ำและสามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ [7] สำหรับการขึ้นรูปวัสดุโฟมในแม่พิมพ์นั้น มีปัจจัยที่ส่งผลโดยตรงต่อคุณสมบัติของวัสดุ โดยเฉพาะขนาดของแม่พิมพ์และอุณหภูมิระหว่างกระบวนการ ซึ่งมีผลต่อความหนาแน่นภายในเนื้อโฟมและความแข็งแรงเชิงกลของผลิตภัณฑ์ การเพิ่มอุณหภูมิการขึ้นรูปและการใช้แม่พิมพ์ขนาดใหญ่ช่วยลดความชันของความหนาแน่นและเพิ่มความสม่ำเสมอของโครงสร้างในโฟมยูรีเทน ซึ่งนำไปสู่การปรับปรุงสมบัติเชิงกลของวัสดุที่ผลิตได้ [8] นอกจากนี้ มีการศึกษาการขึ้นรูปโฟมยางซิลิโคนชนิด High-Consistency (HCR) โดยใช้แม่พิมพ์ซิลิโคนและสารก่อฟองหลายประเภท พบว่า ค่าการนำความร้อนและกลไกการเกิดฟองในระหว่างกระบวนการวัลคาไนซ์มีผลอย่างมากต่อขนาดรูพรุน ความหนาแน่น และความแข็งแรงของโฟม ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่า คุณสมบัติการถ่ายเทความร้อนของแม่พิมพ์นั้น เป็นปัจจัยสำคัญที่กำหนดโครงสร้างภายในของวัสดุ [9]

อย่างไรก็ตาม แม่พิมพ์ซิลิโคนให้พื้นผิวเรียบและสามารถถอดแบบได้ง่าย แต่มีต้นทุนสูงและอายุการใช้งานจำกัด เมื่อใช้ในอุณหภูมิสูงต่อเนื่อง อีกทั้งยังต้องใช้เครื่องมือเฉพาะทางในการขึ้นรูปและการอบยาง ในทางตรงกันข้าม แม่พิมพ์ปูนปลาสเตอร์ มีข้อได้เปรียบด้านความพร้อมใช้ในชุมชน ต้นทุนต่ำ และสามารถซ่อม หรือ ผลิตซ้ำได้ง่าย แม้มีข้อจำกัดด้านความเปราะและการนำความร้อนต่ำกว่าแม่พิมพ์ซิลิโคนก็ตาม ด้วยเหตุนี้ งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการใช้แม่พิมพ์ปูนปลาสเตอร์ต้นทุนต่ำเพื่อศึกษาผลของความหนาแน่นของแม่พิมพ์ต่อสมบัติการนำความร้อนและโครงสร้างของโฟมน้ำยาง ซึ่งจะช่วยสร้างแนวทางการผลิตวัสดุกันกระแทกที่มีความยั่งยืนและเหมาะสมกับการประยุกต์ใช้ในระดับชุมชนและอุตสาหกรรมขนาดเล็ก

## วัตถุประสงค์

เพื่อออกแบบและพัฒนาแม่พิมพ์ปูนปลาสเตอร์สำหรับการขึ้นรูปโพน้ำอย่างกันกระแทก โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแม่พิมพ์ที่มีความหนาของขอบแตกต่างกัน โดยพิจารณาในด้านความทนทานต่อการใช้งาน สมบัติการนำความร้อน ผลต่อสมบัติทางกายภาพ และสมบัติทางกลของโพน้ำอย่าง

## การดำเนินงานวิจัย

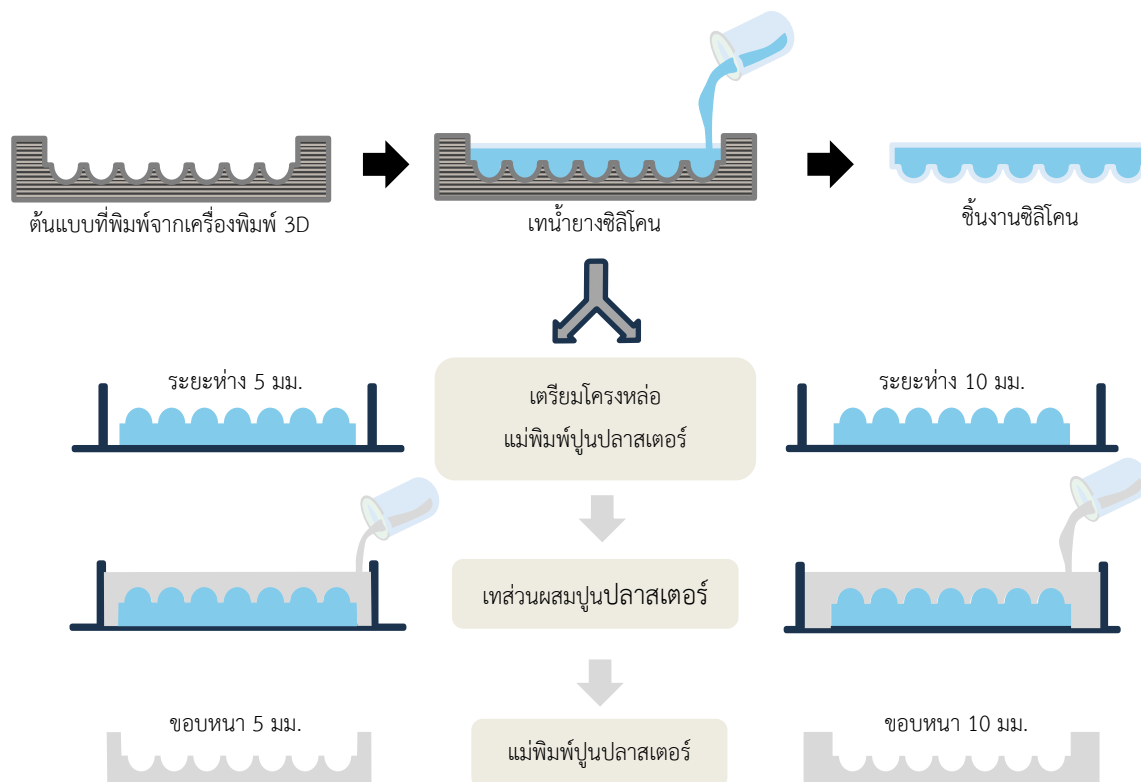
การออกแบบและพัฒนากระบวนการขึ้นรูปโพน้ำอย่างกันกระแทกด้วยแม่พิมพ์ปูนปลาสเตอร์ ประกอบด้วย 3 ขั้นตอน ดังนี้ ขั้นแรก เป็นการขึ้นรูปแม่พิมพ์ปูนปลาสเตอร์ที่มีความหนาของขอบแตกต่างกัน 2 ขนาด คือ 5 มิลลิเมตร และ 10 มิลลิเมตร เพื่อนำไปศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพ ขั้นที่สอง เป็นการขึ้นรูปโพน้ำอย่างกันกระแทก โดยใช้แม่พิมพ์ปูนปลาสเตอร์ที่ผลิตได้ และขั้นตอนสุดท้าย เป็นการทดสอบสมบัติของแม่พิมพ์และโพน้ำอย่างกันกระแทก โดยการทดสอบในงานวิจัยนี้ได้ กำหนดให้ใช้จำนวน 3 ซ้ำ/เงื่อนไข ( $n = 3$ ) โดยมีรายละเอียด ดังนี้

ขั้นตอนการขึ้นรูปแม่พิมพ์ปูนปลาสเตอร์แสดงดังภาพที่ 1 เริ่มจากการสร้างแบบจำลองแม่พิมพ์ โดยใช้โปรแกรม Tinkercad โดยกำหนดให้มีขนาด  $100 \times 150 \times 20$  มม.<sup>3</sup> และความหนาขอบ 2 มม. พื้นผิวด้านล่างออกแบบให้มีผิวหน้าแบบรังไข่ แบบจำลองดังกล่าวถูกบันทึกในรูปแบบไฟล์ .stl และอัปโหลดเข้าสู่โปรแกรม XYZ Ware Pro พิมพ์ต้นแบบโดยใช้ PLA filament ด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติ (XYZPrinting da Vinci 1.0 Pro) กำหนดความหนาของชั้นเลเยอร์ 0.2 มม. หล่อขึ้นงานซิลิโคนสำหรับขึ้นรูปแม่พิมพ์ปูนปลาสเตอร์ เริ่มจากการผสมส่วนประกอบน้ำยางซิลิโคนกับตัวทำแรงในอัตราส่วน 100 : 2 คนส่วนผสมให้เป็นเนื้อเดียวกัน เพื่อให้ได้ความสม่ำเสมอ จากนั้น เทน้ำยางซิลิโคนที่ผสมเสร็จแล้วลงในแม่พิมพ์ เทจากระดับสูงอย่างช้า ๆ เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดฟองอากาศ หลังจากนั้น ปล่อยให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง จนกระทั่งน้ำยางซิลิโคนเซตตัวเต็มที่ เมื่อเซตตัวแล้ว จึงทำการแกะขึ้นงานซิลิโคนออกจากแม่พิมพ์อย่างระมัดระวัง เพื่อรักษาความสมบูรณ์ของขึ้นงาน แสดงดังภาพที่ 2 จากนั้น จึงนำมาวางบนแผ่นรองฐาน ใช้แผ่นอะคริลิกเป็นวัสดุสำหรับกันขอบ วางให้มีระยะห่างจากขึ้นงานซิลิโคนด้านละ 5 มม. และ 10 มม. ตามลำดับ

ผสมปูนปลาสเตอร์กับน้ำในอัตราส่วน 2 : 1 คนผสมจนเป็นเนื้อเดียวกัน เทส่วนผสมลงในโครงหล่อที่เตรียมไว้ ปล่อยให้แห้งประมาณ 30 นาที เพื่อให้ปูนปลาสเตอร์เซตตัวเต็มที่ หลังจากนั้น แกะแม่พิมพ์ปูนปลาสเตอร์ออก จากนั้น ทำการตัดแต่งส่วนเกินของแม่พิมพ์ให้เรียบร้อย จนได้แม่พิมพ์ปูนปลาสเตอร์ขนาด  $120 \times 170 \times 30$  มม.<sup>3</sup> ขอบหนา 10 มม. และ  $110 \times 160 \times 30$  มม.<sup>3</sup> ขอบหนา 5 มม. ดังภาพที่ 3 (ก) และ (ข) ตามลำดับ เพื่อนำไปใช้ในการศึกษาประสิทธิภาพการขึ้นรูปโพน้ำอย่างกันกระแทกต่อไป

ขั้นตอนการขึ้นรูปโพน้ำอย่างกันกระแทก ได้ดำเนินการผสมน้ำยางธรรมชาติกับสารเคมีตามอัตราส่วนผสม ดังตารางที่ 1 เริ่มจากการนำน้ำยางขึ้น 60 % มาปั่นด้วยเครื่องกวนผสมที่ความเร็ว 1,400 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที เพื่อลดปริมาณแอมโมเนียในน้ำยาง โดยควบคุมอุณหภูมิในห้องผสม 25 °C และความชื้น 45-60 % จากนั้น เติมนิโพรเทสเซียมโอเลเอต และกวนผสมต่ออีก 5 นาที ด้วยความเร็วรอบเท่าเดิม จนกระทั่งโพนีมีปริมาตรเพิ่มขึ้นประมาณ 3 เท่า เติมน้ำแกมมัน (S) สารตัวเร่ง (ZMBT) และ CPL ลงในส่วนผสม พร้อมลดความเร็วในการกวนผสมเป็น 1,200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 3 นาที หลังจากนั้น เติมนิโพรโพลีโกลคอล (DPG) และซิงค์ออกไซด์ (ZnO) และกวนผสมต่อเป็นเวลา 3 นาที จากนั้น เติมนิโพรซิลิโกลฟลูออไรด์ (SSF) และกวนผสมต่ออีก 30 วินาที เพื่อรักษาเวลาการเกิดเจล เมื่อได้โพน้ำอย่างที่มีโพนีเล็กน้อย จากนั้น นำไปเทลงในแม่พิมพ์ปูนปลาสเตอร์ที่เตรียมไว้ ปล่อยให้แห้งเซตตัวที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 5 นาที ก่อนนำไปนึ่งด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 45 นาที หลังจากนั้น อบแห้งต่ออีก 2 ชั่วโมง 30 นาที ด้วยอุณหภูมิเดิมจนโพนีอย่างแห้งสนิท ทั้งนี้ เนื่องจากความหนาของแม่พิมพ์ส่งผลโดยตรงต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนในระหว่างกระบวนการขึ้นรูป จึงควบคุมระยะเวลาและอุณหภูมิให้เหมาะสมกับแต่ละแบบ โดยสำหรับแม่พิมพ์ขอบหนา 10 มม. ต้องใช้เวลาแห้งและอบแห้งนานกว่า

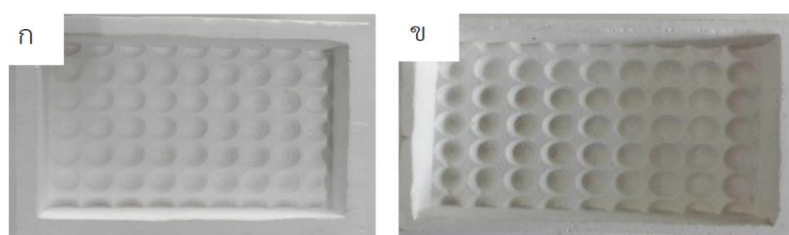
แม่พิมพ์ขอบ 5 มม. ประมาณ 10–15 นาที เพื่อให้การเซตตัวของโฟมน้ำยางสมบูรณ์ทั่วทั้งชิ้น ในขณะที่แม่พิมพ์บาง 5 มม. สามารถเซตตัวได้เร็วกว่า ด้วยการถ่ายเทความร้อนที่รวดเร็วจากนั้น นำชิ้นงานโฟมน้ำยางไปทดสอบสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกล



ภาพที่ 1 ขั้นตอนการขึ้นรูปแม่พิมพ์ปูนปลาสเตอร์



ภาพที่ 2 ชิ้นงานซิลิโคนสำหรับขึ้นรูปแม่พิมพ์ปูนปลาสเตอร์



ภาพที่ 3 แม่พิมพ์ปูนปลาสเตอร์ที่มีปริมาตรภายในเท่ากัน โดยมีขอบหนา (ก) 10 มม. และ (ข) 5 มม.

## ตารางที่ 1 อัตราส่วนผสมน้ำยางและสารเคมีสำหรับขึ้นรูปโพน้ำยางกันกระแทก

| น้ำยางและสารเคมี                                                 | TSC <sup>a</sup> (%) | ปริมาณ (phr <sup>b</sup> ) |
|------------------------------------------------------------------|----------------------|----------------------------|
| น้ำยางชั้น (NR latex)                                            | 60                   | 100                        |
| โพแทสเซียมโอเลต (potassium oleate)                               | 10                   | 1.4                        |
| กำมะถัน (sulphur)                                                | 50                   | 2.5                        |
| ซิงค์เมอร์แคปโตเบนโซไทอาโซล (zinc 2-mercaptobenzothiazole, ZMBT) | 50                   | 1.0                        |
| โลวิน็อกซ์ ซีพีแอล (lowinox CPL)                                 | 50                   | 1.0                        |
| ไดฟีนิลกวานิดีน (diphenyl guanidine, DPG)                        | 20                   | 0.5                        |
| ซิงค์ออกไซด์ (zinc oxide, ZnO)                                   | 50                   | 3.0                        |
| โซเดียมซิลิโคฟลูออไรด์ (sodium silicofluoride, SSF)              | 10                   | 0.5                        |

<sup>a</sup>TSC: Total Solids Content<sup>b</sup>phr: parts per hundred rubber

การทดสอบการดูดซึมน้ำของแม่พิมพ์ปูนปลาสเตอร์นั้น ได้ดำเนินการโดยการตัดตัวอย่างแม่พิมพ์ให้มีขนาดมาตรฐานที่กำหนดไว้อย่างชัดเจน จากนั้น นำตัวอย่างมาชั่งน้ำหนักในสภาพแห้ง ( $w_1$ ) ด้วยเครื่องชั่งความละเอียดสูง แล้วแช่ตัวอย่างในน้ำที่อุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากครบกำหนดเวลา นำตัวอย่างออกจากน้ำ และใช้กระดาษซับน้ำเช็ดให้ผิวแห้งเพียงพอ เพื่อชั่งน้ำหนักที่เกาะอยู่บนผิวด้านนอก ก่อนนำตัวอย่างไปชั่งน้ำหนักอีกครั้ง ( $w_2$ ) จากนั้น คำนวณค่าการดูดซึมน้ำ (Water Absorption) การวิเคราะห์โดยใช้ตู้อบลมร้อน Memmert ยี่ห้อ MEMMERT รุ่น UN160 ผลิตภัณฑ์จากประเทศเยอรมนี การทดสอบนี้ดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM C472 (Standard Test Methods for Physical Testing of Gypsum Plasters) ดังสมการที่ (1)

$$\text{Water Absorption (\%)} = \frac{w_2 - w_1}{w_1} \times 100 \quad (1)$$

การทดสอบความทนทานต่อการใช้งานซ้ำของแม่พิมพ์ปูนปลาสเตอร์นั้น ได้ดำเนินการโดยการนำแม่พิมพ์มาทดลองขึ้นรูปโพน้ำยางซ้ำ ๆ ภายใต้สภาวะการขึ้นรูปโพน้ำยางที่เหมือนกันทุกครั้ง โดยใช้สูตรน้ำยางและสารเคมีแต่งตามที่กำหนด หลังจากการขึ้นรูปโพน้ำยางในแต่ละรอบเสร็จสิ้น ได้ทำความสะอาดแม่พิมพ์และตรวจสอบการเกิดรอยแตกร้าว การทดลองดำเนินไปจนกว่าแม่พิมพ์ไม่สามารถใช้งานได้ บันทึกผลการเปลี่ยนแปลงของแม่พิมพ์ในแต่ละรอบ และเปรียบเทียบจำนวนรอบที่แม่พิมพ์แต่ละประเภทสามารถใช้งานได้มีประสิทธิภาพ

การทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของแม่พิมพ์ปูนปลาสเตอร์นั้น ได้ดำเนินการโดยนำตัวอย่างแม่พิมพ์ปูนปลาสเตอร์วางระหว่างแผ่นให้ความร้อนและแผ่นดูดซับความร้อนของเครื่องวัด โดยตั้งอุณหภูมิแหล่งกำเนิดความร้อนที่ด้านหนึ่งของตัวอย่าง และวัดอุณหภูมิที่อีกด้าน เพื่อบันทึกค่าความแตกต่างของอุณหภูมิ (temperature gradient) และค่าการถ่ายเทพลังงานความร้อน (heat flux) สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน  $k$  คำนวณได้ ดังนี้

$$k = \frac{q \cdot d}{\Delta T} \quad (2)$$

เมื่อ  $q$  คือ ค่าการถ่ายเทพลังงานความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ ( $W/m^2$ )  $d$  คือ ความหนาของตัวอย่าง (m) และ  $\Delta T$  คือ ความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างด้านสองฝั่งของตัวอย่าง การทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนอ้างอิงตามมาตรฐาน

ASTM E1530 (Standard Test Method for Evaluating the Thermal Transmission Properties of Materials) โดยใช้ Thermal Constant Analyser รุ่น TPS 2500S ยี่ห้อ Hot Disk ผลิตในประเทศสวีเดน

การทดสอบโฟมน้ำยางกันกระแทกนั้น เริ่มต้นด้วยการวิเคราะห์โครงสร้างจุลทรรศน์ โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope) ยี่ห้อ THERMO FISHER SCIENTIFIC Model QUANTA 400 ผู้ผลิต Thermo Fisher Scientific เพื่อศึกษาลักษณะโครงสร้างภายในของโฟม ตัวอย่างโฟมน้ำยางถูกเคลือบด้วยชั้นโลหะทองคำบาง เพื่อเพิ่มความคมชัดในการตรวจสอบ และภาพที่ได้ถูกบันทึก เพื่อนำมาวิเคราะห์เปรียบเทียบความแตกต่างของโฟมน้ำยางจากแม่พิมพ์ที่มีความหนาของขอบแตกต่างกัน

การทดสอบความหนาแน่น ได้ดำเนินการโดยการชั่งมวลตัวอย่างโฟมและวัดปริมาตรของตัวอย่าง จากนั้น คำนวณค่าความหนาแน่น ( $\rho$ ) โดยใช้สมการที่ (3) การทดสอบความหนาแน่นอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D3574 (Test A – Density of Flexible Cellular Materials)

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (3)$$

การทดสอบการยุบตัวเนื่องจากแรงอัด (Compression Set Test) โดยใช้เครื่อง Test stand LUTRON FS - 1001 โดยวางตัวอย่างโฟมน้ำยางไว้ที่จุดระหว่างแผ่นกดของเครื่องทดสอบแรงอัด จากนั้น กดโฟมตัวอย่างจนถึงความเครียด (strain) ที่ 50 % ของความหนาเดิม ( $t_0$ ) ค้างไว้เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง จากนั้น ปลดปล่อยแรงกดและวัดความหนาของตัวอย่างหลังการคืนตัว ( $t_f$ ) โดยคำนวณค่าการยุบตัวจากสมการที่ (4) การทดสอบนี้อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D395 (Method B – Compression Set Under Constant Deflection)

$$\text{Compression Set (\%)} = \frac{t_0 - t_f}{t_0} \times 100 \quad (4)$$

การทดสอบการดูดซับพลังงานนั้น ดำเนินการด้วยเครื่อง Drop Weight Impact Tester โดยวางตัวอย่างโฟมบนฐานรอง จากนั้น ปลดปล่อยมวลให้ตกกระแทกจากความสูงที่กำหนด ความสูงดังกล่าวใช้คำนวณพลังงานเริ่มต้น ( $E_i$ ) ขณะที่พลังงานที่เหลือหลังการกระแทก ( $E_r$ ) วัดจากเครื่องมือ โดยค่าการดูดซับพลังงานคำนวณตามสมการ (5) การทดสอบนี้อ้างอิงจากมาตรฐาน ASTM D1596 สำหรับการประเมินสมบัติการรองรับแรงกระแทกของวัสดุบรรจุภัณฑ์

$$\text{Energy Absorption (\%)} = \frac{E_i - E_r}{E_i} \times 100 \quad (5)$$

### ผลการวิจัยและอภิปรายผล

ผลการวิจัยนี้ นำเสนอผลลัพธ์ที่ได้จากการออกแบบและพัฒนาแม่พิมพ์ปูนปลาสเตอร์สำหรับการขึ้นรูปโฟมน้ำยางกันกระแทก โดยเน้นเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแม่พิมพ์ที่มีความหนาของขอบแตกต่างกัน ในแง่ความทนทาน สมบัติการนำความร้อน และผลต่อสมบัติทางกายภาพและทางกล นอกจากนี้ ยังมีการวิเคราะห์ต้นทุนการผลิต เพื่อนำไปประเมินความคุ้มค่าในการประยุกต์ใช้ในบริบทของชุมชนและอุตสาหกรรมขนาดเล็ก

### การเปรียบเทียบประสิทธิภาพแม่พิมพ์ปูนปลาสเตอร์ที่มีความหนาของขอบต่างกัน

จากผลการทดสอบค่าการดูดซึมน้ำของแม่พิมพ์ปูนปลาสเตอร์ที่มีความหนาของขอบต่างกัน ที่อุณหภูมิห้อง ( $25^\circ\text{C}$ ) แม่พิมพ์ขอบหนา 5 มม. มีน้ำหนักก่อนแช่น้ำ เท่ากับ 308.50 กรัม และหลังแช่น้ำ เท่ากับ 573.30 กรัม คิดเป็นอัตราการดูดซึมน้ำเท่ากับ 85.80 % ในขณะที่แม่พิมพ์ขอบหนา 10 มม. มีน้ำหนักก่อนแช่น้ำ เท่ากับ 403.30 กรัม และหลังแช่น้ำ เท่ากับ 557.73 กรัม คิดเป็นอัตราการดูดซึมน้ำเท่ากับ 38.28 % ดังตารางที่ 2 ซึ่งพบว่า แม่พิมพ์ขอบหนา 5 มม. มีการดูดซึมน้ำสูงกว่าแม่พิมพ์ขอบ 10 มม. ถึง 55.44 % ซึ่งแสดงให้เห็นว่า แม่พิมพ์ขอบหนามีโครงสร้างที่สามารถต้านทานการดูดซึมน้ำได้ดีกว่า

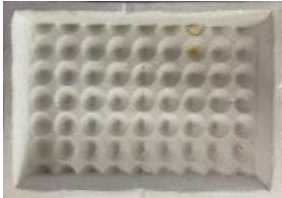
อันเป็นผลมาจากความหนาที่เพิ่มขึ้น ซึ่งช่วยลดโอกาสที่น้ำจะซึมเข้าสู่เนื้อวัสดุในเวลาเดียวกัน สมบัตินี้บ่งชี้ว่าแม่พิมพ์ขอบหนามีความคงทนต่อการใช้งานในสภาวะที่มีความชื้นได้ดีกว่า เช่น ในกระบวนการนึ่งพองนํ้ายาง

**ตารางที่ 2** ค่าการดูดซึมน้ำของแม่พิมพ์ปูนปลาสเตอร์ที่มีความหนาขอบต่างกัน

| ความหนาของขอบแม่พิมพ์ (มม.) | น้ำหนักก่อนแช่น้ำ<br>(กรัม) | น้ำหนักหลังแช่น้ำ<br>(กรัม) | การดูดซึมน้ำ<br>(%) |
|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|---------------------|
| 5                           | 308.50                      | 573.30                      | 85.80               |
| 10                          | 403.30                      | 557.73                      | 38.28               |

จากผลการทดลองพบว่า แม่พิมพ์ปูนปลาสเตอร์ที่มีขอบความหนา 10 มม. สามารถใช้งานซ้ำได้เฉลี่ย 14 รอบก่อนเกิดรอยแตกร้าวและไม่สามารถใช้งานต่อได้ ในขณะที่แม่พิมพ์ที่มีขอบความหนา 5 มม. ใช้งานได้เฉลี่ยเพียง 6 รอบ โดยมีรอยแตกร้าวและความเสียหายเกิดขึ้น หลังการใช้งานในรอบที่ 6 แสดงดังตารางที่ 3 ความแตกต่างนี้แสดงให้เห็นว่าแม่พิมพ์ขอบหนามีความแข็งแรงและคงทนต่อการใช้งานซ้ำในสภาวะเดียวกันได้ดีกว่า ความหนาที่เพิ่มขึ้นช่วยกระจายแรงและลดโอกาสการเกิดรอยแตกร้าวระหว่างการใช้งาน ผลการทดสอบนี้ สอดคล้องกับทฤษฎีเกี่ยวกับการกระจายแรงในวัสดุหนา ซึ่งสามารถรับแรงกดและแรงดึงได้ดีกว่า [10] ในกระบวนการนึ่งและอบ เพื่อขึ้นรูปพองนํ้ายาง ความหนาของแม่พิมพ์ช่วยป้องกันการสะสมความชื้น ลดการแตกร้าวจากแรงดันที่เกิดจากการเดือดของน้ำภายใน และช่วยคงความสมบูรณ์ของโครงสร้างแม่พิมพ์ในระหว่างการผลิต นอกจากนี้ การเพิ่มความหนายังลดการเสียรูปของชิ้นงานที่เกิดจากการบิดเบี้ยวของแม่พิมพ์

**ตารางที่ 3** ผลการทดสอบความทนทานต่อการใช้งานซ้ำของแม่พิมพ์ปูนปลาสเตอร์ที่มีความหนาขอบต่างกัน

| ความหนาของขอบแม่พิมพ์<br>(มม.) | สภาพก่อนใช้งาน                                                                      | สภาพหลังใช้งาน                                                                       | จำนวนครั้งที่<br>ใช้งานได้ |
|--------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|
| 5                              |  |  | 6                          |
| 10                             |  |  | 14                         |

เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของแม่พิมพ์ปูนปลาสเตอร์ที่มีความหนาขอบแตกต่างกัน พบว่าแม่พิมพ์ขอบหนา 10 มม. มีค่าการนำความร้อนเฉลี่ย  $0.6830 \text{ W/m}\cdot\text{K}$  ซึ่งสูงกว่าแม่พิมพ์ขอบบาง 5 มม. ที่มีค่า  $0.4674 \text{ W/m}\cdot\text{K}$  ดังแสดงในตารางที่ 4 แม้ว่าแม่พิมพ์ทั้งสองผลิตจากวัสดุชนิดเดียวกัน แต่ความหนาที่เพิ่มขึ้น ส่งผลต่อโครงสร้างจุลภาคและความหนาแน่นของเนื้อวัสดุอย่างมีนัยสำคัญ โดยในแม่พิมพ์ที่หนากว่า การเซตตัวของปูนปลาสเตอร์เกิดขึ้นภายใต้สภาวะที่การระเหยของน้ำเป็นไปอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้ผลึกแคลเซียมซัลเฟตไดไฮเดรต ( $\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) อัดตัวแน่นและ

เชื่อมต่อกันอย่างสม่ำเสมอ เกิดโครงสร้างที่มีความหนาแน่นสูงและมีรูพรุนภายในน้อยกว่า ซึ่งส่งผลให้เส้นทางการถ่ายเทความร้อนภายในเนื้อวัสดุมีความต่อเนื่องและมีประสิทธิภาพมากกว่า ในทางกลับกัน แม่พิมพ์ขอบบางมักเกิดการระเหยน้ำเร็วกว่าในช่วงการเซตตัว จึงเกิดโพรงอากาศขนาดเล็กแทรกอยู่ในเนื้อวัสดุ ทำให้ความต่อเนื่องของเฟสของแข็งลดลง ส่งผลให้การนำความร้อนโดยรวมลดลงตามสมการเชิงผสมของวัสดุพรุนที่ค่าการนำความร้อนของเฟสอากาศ ( $\approx 0.026 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ) ต่ำกว่าของเฟสของแข็งอย่างมีนัยสำคัญ

นอกจากนี้ ความหนาที่มากกว่ายังช่วยลดการสูญเสียพลังงานความร้อนจากการพาและการแผ่รังสีบริเวณผิวตัวอย่างชัดเจนทดสอบ ทำให้ค่าที่วัดได้สะท้อนสมบัติการนำความร้อนจริงของวัสดุได้แม่นยำยิ่งขึ้น ขณะที่ชิ้นงานที่บางกว่าเกิดความต่างของอุณหภูมิระหว่างสองผิวหน้าอย่างรวดเร็ว และสูญเสียพลังงานส่วนหนึ่งไปยังสิ่งแวดล้อม ส่งผลให้ค่าการนำความร้อนที่วัดได้ต่ำกว่าความเป็นจริงเล็กน้อย การมีความหนามากกว่ายังเอื้อต่อการกระจายอุณหภูมิภายในเนื้อแม่พิมพ์อย่างค่อยเป็นค่อยไป (uniform heat distribution) ส่งผลให้พลังงานความร้อนเคลื่อนที่ผ่านโครงสร้างผลึกได้อย่างต่อเนื่องและมีประสิทธิภาพมากกว่า

**ตารางที่ 4** ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของแม่พิมพ์ปูนปลาสเตอร์ที่มีความหนาขอบต่างกัน

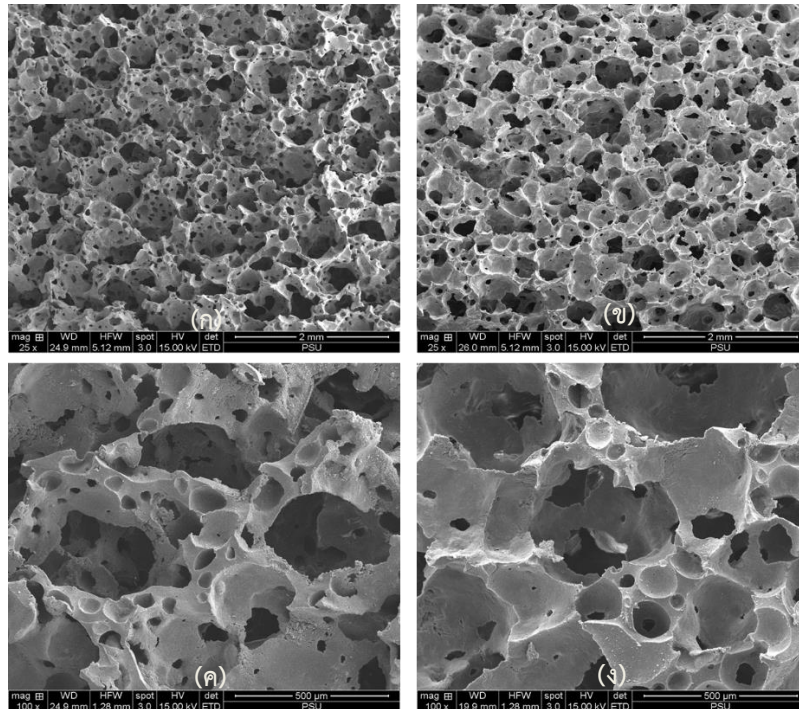
| ความหนาของขอบ<br>แม่พิมพ์ (มม.) | อุณหภูมิ ( $^{\circ}\text{C}$ ) | กำลังความร้อน<br>(mW) | เวลาในการวัด<br>(s) | การนำความร้อน<br>(W/mK) | ส่วนเบี่ยงเบน<br>มาตรฐาน |
|---------------------------------|---------------------------------|-----------------------|---------------------|-------------------------|--------------------------|
| 5                               | 25                              | 80.2                  | 20                  | 0.4674                  | 0.0025                   |
| 10                              | 25                              | 80.2                  | 20                  | 0.6830                  | 0.0032                   |

#### สมบัติของโฟมน้ำยางกันกระแทกจากแม่พิมพ์ที่มีความหนาขอบต่างกัน

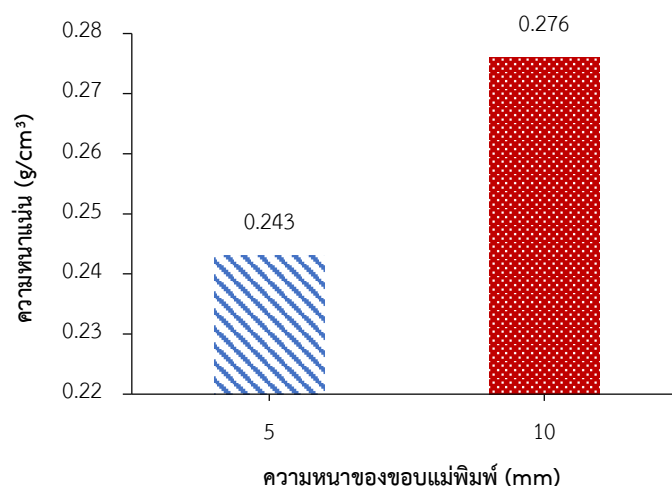
จากภาพสัณฐานวิทยา (ภาพที่ 2) แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างรูพรุนของโฟมน้ำยางที่ขึ้นรูปจากแม่พิมพ์ขอบหนา 5 มม. (ภาพ ก และ ข) มีรูพรุนขนาดเล็ก กระจายตัวหนาแน่น และมีผนังเซลล์บาง เมื่อเทียบกับโฟมน้ำยางที่ขึ้นรูปจากแม่พิมพ์ขอบหนา 10 มม. (ภาพ ค และ ง) ซึ่งมีรูพรุนที่ใหญ่กว่า การกระจายของรูพรุนตัวไม่สม่ำเสมอ และผนังเซลล์หนากว่า ความแตกต่างนี้ เกิดจากผลของความหนาแม่พิมพ์ต่อการถ่ายเทความร้อนในระหว่างกระบวนการขึ้นรูป โดยแม่พิมพ์ความหนา 5 มม. มีการกระจายความร้อนที่รวดเร็ว การถ่ายเทความร้อนที่รวดเร็วในแม่พิมพ์ขอบบางอาจทำให้โฟมเซตตัวไวส่งผลให้เซลล์โฟมมีความหนาและหนาแน่นมากขึ้น ในขณะที่แม่พิมพ์ขอบหนา 10 มม. มีการกระจายความร้อนอย่างช้า ๆ ความหนาของแม่พิมพ์ที่มากขึ้น ทำให้การถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นช้าลง ส่งผลให้เกิดเซลล์ขนาดใหญ่

แม้ดูเหมือนมีช่องว่างกว้างกว่า แต่เมื่อวัดค่าความหนาแน่นจริง กลับพบว่า โฟมยางที่ผลิตจากแม่พิมพ์ขอบหนา 10 มม. มีความหนาแน่นเฉลี่ย  $0.276 \text{ g/cm}^3$  ซึ่งสูงกว่าโฟมน้ำยางที่ผลิตจากแม่พิมพ์ขอบหนา 5 มม. ที่มีค่าเฉลี่ย  $0.243 \text{ g/cm}^3$  ดังแสดงในภาพที่ 3 ความแตกต่างนี้คิดเป็นประมาณ 13.6 % ซึ่งแม้ไม่สูงมากในเชิงปริมาณ แต่มีนัยสำคัญเชิงกระบวนการเนื่องจากความหนาของแม่พิมพ์ส่งผลต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนระหว่างการขึ้นรูป ทำให้เนื้อยางเซตตัวช้ากว่าและเกิดผนังเซลล์ที่หนาแน่นขึ้นในหลายบริเวณ ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นโดยรวมของโฟมสูงกว่า แม้ว่าขนาดรูพรุนใหญ่กว่าก็ตาม ผลนี้สอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ที่ศึกษาผลของอุณหภูมิและขนาดแม่พิมพ์ต่อสมบัติของโฟมยูรีเทน พบว่า การเพิ่มขนาดของแม่พิมพ์ช่วยลดความชันของความหนาแน่นภายในและเพิ่มความสม่ำเสมอของโครงสร้าง ส่งผลให้ความหนาแน่นโดยรวมของโฟมเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ [8] ดังนั้น ความแตกต่างของค่าความหนาแน่นที่ได้จากแม่พิมพ์ขอบ 5 และ 10 มม. ในงานวิจัยนี้จึงมีนัยสำคัญเชิงกระบวนการที่สัมพันธ์โดยตรงกับอัตราการถ่ายเทความร้อนและการเซตตัวของโฟมยาง ซึ่งมีผลต่อความหนาแน่นและความแข็งแรงของโฟมที่ผลิตได้ ส่วนโฟมจากแม่พิมพ์ขอบบางที่มีรูพรุนเล็กและกระจายตัวหนาแน่นในภาพที่ 2 อาจมีผนังเซลล์บางและช่องว่างภายในน้อย จึงมีค่าความหนาแน่นต่ำกว่า เมื่อวัดเป็นภาพรวมของทั้งชิ้นงาน

โฟมน้ำยางที่ผลิตจากแม่พิมพ์ขอบหนา 10 มม. มีค่าการยุบตัวเฉลี่ย 6.43 % ซึ่งน้อยกว่าโฟมน้ำยางที่ผลิตจากแม่พิมพ์ขอบบาง 5 มม. ที่มีค่าการยุบตัวเฉลี่ย 7.60 % แสดงให้เห็นในภาพที่ 4 ว่า โฟมจากแม่พิมพ์ขอบหนานั้น มีความสามารถในการคืนตัวได้ดีกว่า ซึ่งเป็นผลจากโครงสร้างภายในที่หนาแน่นและแข็งแรงกว่า โดยโฟมที่มีความหนาแน่นสูงมักมีผนังเซลล์หนาและทนทานต่อแรงอัด ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบความหนาแน่นและภาพ SEM ที่แสดงโครงสร้าง-



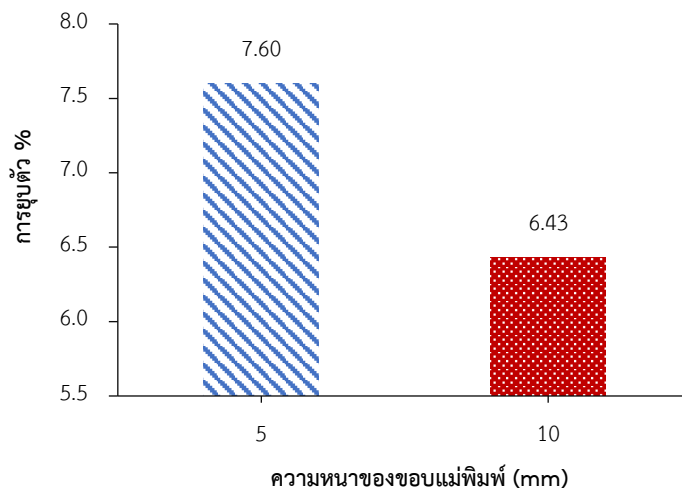
ภาพที่ 2 สันฐานวิทยาของโฟมน้ำยางกันกระแทกที่ขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ขอบหนา 5 มม. (ก) กำลังขยาย 25 เท่า (ข) กำลังขยาย 100 เท่า และแม่พิมพ์ขอบหนา 10 มม. (ค) กำลังขยาย 25 เท่า (ง) กำลังขยาย 100 เท่า



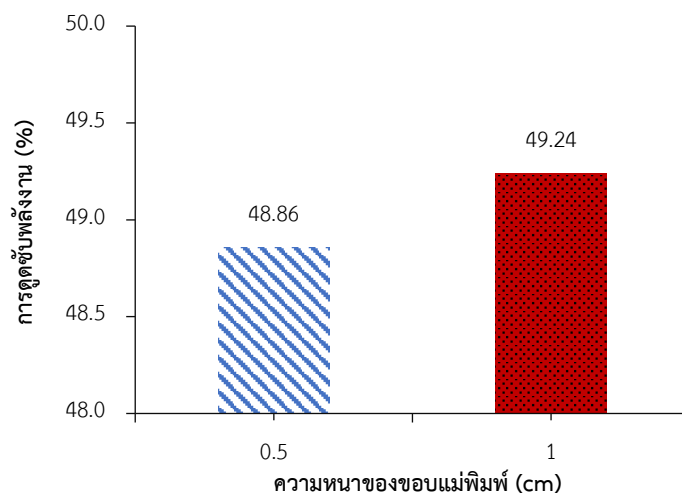
ภาพที่ 3 ค่าความหนาแน่นเฉลี่ยของโฟมยางที่ผลิตจากแม่พิมพ์ปูนปลาสเตอร์ขอบหนา 5 และ 10 มม.

รูปทรงที่ใหญ่กว่าและจัดเรียงตัวได้ดี ส่งผลให้ลดโอกาสการเกิดการเสียรูปถาวร เมื่อถูกแรงอัด ผลดังกล่าว สะท้อนให้เห็นว่า ความหนาของขอบแม่พิมพ์มีอิทธิพลต่อการกระจายความร้อนในระหว่างกระบวนการขึ้นรูป โดยแม่พิมพ์ขอบหนามีการถ่ายเทความร้อนที่ช้ากว่าแต่สม่ำเสมอมากกว่า ทำให้เนื้อยางเซตตัวอย่างคงที่และสร้างโครงสร้างภายในที่หนาแน่นกว่า ส่งผลให้โฟม

มีความแข็งแรงและคืนตัวได้ดีกว่าเมื่อถูกแรงอัด ขณะเดียวกัน โฟมน้ำยางจากแม่พิมพ์ขอบบาง 5 มม. ที่มีโครงสร้างรูพรุนละเอียดและความหนาแน่นต่ำกว่า แสดงการยุบตัวจากแรงอัดมากกว่า เนื่องจากความสามารถในการคืนตัวของเนื้อวัสดุลดลง



ภาพที่ 4 กราฟเปรียบเทียบค่าการยุบตัวเนื่องจากแรงอัดของโฟมยางที่ขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ขอบหนา 5 และ 10 มม.



ภาพที่ 5 ค่าการดูดซับพลังงานของโฟมยางที่ขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ขอบหนา 0.5 และ 1.0 ซม.

ผลการทดสอบการดูดซับพลังงาน แสดงให้เห็นว่า โฟมน้ำยางที่ผลิตจากแม่พิมพ์ขอบหนา 10 มม. มีประสิทธิภาพการดูดซับพลังงานเฉลี่ย 49.24 % ซึ่งสูงกว่าโฟมน้ำยางจากแม่พิมพ์ขอบบาง 5 มม. ที่มีประสิทธิภาพเฉลี่ย 48.86 % ดังภาพที่ 5 ความแตกต่างนี้ สะท้อนให้เห็นถึงผลกระทบของความหนาของแม่พิมพ์ต่อโครงสร้างและสมบัติการกระจายแรงของโฟมน้ำยางจากแม่พิมพ์ขอบหนา 10 มม. มีโครงสร้างรูพรุนที่ใหญ่กว่า (จากผล SEM) ส่งผลให้สามารถกระจายและดูดซับพลังงานจากแรงกระแทกได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น ในขณะที่โฟมน้ำยางจากแม่พิมพ์ขอบบาง 5 มม. ที่มีรูพรุนละเอียดและกระจายตัวแน่น มีพื้นที่รองรับแรงน้อยกว่า ส่งผลให้การดูดซับพลังงานลดลง

ผลการวิเคราะห์ยังสอดคล้องกับค่าการยุบตัวและความหนาแน่นของโฟมน้ำยาง โดยโฟมยางที่มีความหนาแน่นสูงกว่า (แม่พิมพ์ขอบหนา 10 มม.) สามารถรับแรงและกระจายพลังงานได้ดีกว่า ลดการเกิดความเสียหายภายในโครงสร้างเมื่อ

รับแรงกระแทก นอกจากนี้ การถ่ายเทความร้อนที่ช้าลงในแม่พิมพ์ขอบหนายังช่วยให้เกิดการเซตตัวของเนื้อยางที่มีความสม่ำเสมอมากขึ้น ทำให้โฟมน้ำยางมีความแข็งแรงและยืดหยุ่นมากพอในการดูดซับพลังงานได้สูงกว่า

อย่างไรก็ตาม แม้ว่าปูนปลาสเตอร์อาจมีอายุการใช้งาน (โดยรวม) จำกัดกว่าแม่พิมพ์พลาสติกในบางกรณี แต่ต้นทุนที่ต่ำและความยืดหยุ่นในการขึ้นรูป ยังคงทำให้แม่พิมพ์ปูนปลาสเตอร์เป็นทางเลือกที่คุ้มค่าและเหมาะสมสำหรับการผลิตวัสดุกันกระแทกในบริบทที่ต้องการความประหยัดและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

### สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าแม่พิมพ์ปูนปลาสเตอร์ต้นทุนต่ำ สามารถใช้ในการขึ้นรูปโฟมน้ำยางธรรมชาติได้อย่างมีประสิทธิภาพและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม แม่พิมพ์ขอบหนา 10 มม. ให้ความทนทานต่อการใช้งานซ้ำสูงกว่า และผลิตโฟมที่มีความหนาแน่นมากกว่า การยุบตัวต่ำกว่า และดูดซับพลังงานได้ดีกว่า เนื่องจากการถ่ายเทความร้อนที่สม่ำเสมอและการเซตตัวของเนื้อยางที่สมบูรณ์กว่า ขณะที่แม่พิมพ์ขอบบางเหมาะกับกระบวนการที่ต้องการความเร็วสูง จึงสามารถเลือกใช้ให้เหมาะสมกับวัตถุประสงค์การผลิตได้ การใช้แม่พิมพ์ปูนปลาสเตอร์ยังช่วยลดต้นทุนการผลิตได้อย่างมีประสิทธิภาพ และเป็นแนวทางการพัฒนาที่ตอบโจทย์ความยั่งยืนของวัสดุกันกระแทกจากยางธรรมชาติ ทั้งนี้ งานวิจัยในอนาคตควรพิจารณาการเสริมความทนทานของปูนปลาสเตอร์ หรือ ปรับสูตรการขึ้นรูป เพื่อเพิ่มสมบัติทางกลของแม่พิมพ์ให้ดียิ่งขึ้น

### เอกสารอ้างอิง

- [1] V. Jansen, "The fate of synthetic polymers – an analysis on the future of plastic waste," *Advances in Printing and Media Technology*, vol. 49, no. 1, pp. 54–64, 2023.
- [2] X. Zhang, Z. Yin, S. Xiang, H. Yan and H. Tian, "Degradation of polymer materials in the environment and its impact on the health of experimental animals: A review," *Polymers*, vol. 16, no. 19, pp. 1–33, 2024.
- [3] C. Manger, (2024, December 25), EU Policy Framework on Biobased, Biodegradable and Compostable Plastics, [Online]. Available: <https://www.european-bioplastics.org/eu-policy-framework-on-biobased-biodegradable-and-compostable-plastics/>
- [4] W. Sanhawong, P. Banhalee, S. Boonsang and S. Kaewpirom, "Effect of concentrated natural rubber latex on the properties and degradation behavior of cotton-fiber-reinforced cassava starch biofoam," *Industrial Crops and Products*, vol. 108, pp. 756–766, 2017.
- [5] K. Jitkokkruad, K. Jarukumjorn, C. Raksakulpiwat, S. Chaiwong, J. Rattanakaran and T. Trongsatitkul, "Effects of bamboo leaf fiber content on cushion performance and biodegradability of natural rubber latex foam composites," *Polymers*, vol. 15, no. 3, pp. 1–25, 2023.
- [6] P. Nooun, N. Chueangchayaphan, N. Ummarat and W. Chueangchayaphan, "Fabrication and properties of natural rubber/rice starch/activated carbon biocomposite-based packing foam sheets and their application to shelf life extension of 'Hom Thong' banana," *Industrial Crops and Products*, vol. 195, p. 1-10, 2023.
- [7] M. E. A. Sakib, H. Roy, M. L. Hasan and R. Dhar, "Manufacturing and characterization of recycled plaster of Paris from waste industrial molds: comparison of the physical and mechanical properties with pure

- plaster of Paris at distinct drying temperatures,” in *Proceedings of the International Conference on Mechanical, Industrial and Materials Engineering (ICMIME 2024)*, Rajshahi, Bangladesh, 2024.
- [8] D. Jackovich, B. O’Toole, M. C. Hawkins and L. Sapochak, “Temperature and mold size effects on physical and mechanical properties of a polyurethane foam,” *Journal of Cellular Plastics*, vol. 41, no. 2, pp. 153–168, 2005.
- [9] T. Hofmann, R. U. Giesen and H. P. Heim, “High consistency silicone rubber foams,” *Polymers*, vol. 16, no. 9, p. 1-11, 2024.
- [10] V. Nežerka, J. Nemeček and J. Zeman, “Micromechanics-based simulations of compressive and tensile testing on lime-based mortars,” *Mechanics of Materials*, vol. 105, pp. 49–60, 2017.