

1st INSCIC
8th
Yala Rajabhat University
21-22 Feb 2023



PROCEEDING

รายงานสืบเนื่องจาก

การประชุมวิชาการระดับชาติ
ด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีเครือข่ายภาคใต้ ครั้งที่ 8 และ
การประชุมวิชาการระดับนานาชาติ
ด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีเครือข่ายภาคใต้ ครั้งที่ 1

The 8th National Conference on Science and Technology 2023 (NSCIC2023) and
The 1st International Conference on Science and Technology 2023 (INSCIC2023)

วันที่ 21-22 กุมภาพันธ์ 2566
คณะวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและการเกษตร
มหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา

รายงานสืบเนื่องจากงานประชุมวิชาการระดับชาติด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีเครือข่ายภาคใต้ ครั้งที่ 8 และ
งานประชุมวิชาการระดับนานาชาติด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีเครือข่ายภาคใต้ ครั้งที่ 1
The 8th National Conference on Science and Technology 2023: NSCIC2023 and
the 1st International Conference on Science and Technology 2023: INSCIC2023

จัดพิมพ์โดย คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา
พิมพ์ครั้งที่ 1
ปีที่พิมพ์ 2566

เลขมาตรฐานสากลประจำหนังสืออิเล็กทรอนิกส์ 978-616-8297-28-5
ข้อมูลทางบรรณานุกรมของหอสมุดแห่งชาติ
National Library of Thailand Cataloging in Publication data

ISBN (e-book) 978-616-8297-28-5

สงวนลิขสิทธิ์โดย

มหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา
133 ถนนเทศบาล 3 ตำบลสะเตง อำเภอเมืองยะลา
จังหวัดยะลา 95000 โทรศัพท์ 073 299 699

จัดพิมพ์แบบ อิเล็กทรอนิกส์

การพัฒนากระบวนการขึ้นรูปบอลยางพาราโดยใช้แม่พิมพ์จากเครื่องพิมพ์สามมิติ

Development of Para Rubber Ball Forming Process Using Molds from 3D Printers

นุรีย์ฮะ บีนีมะเร๊ะ¹ นุริฮิซาตีฮ์ โชมอูภัย¹ ซาฟิรา หะยียูนุ¹ อับดุลอานัส ยือโระ¹

นุรุซฮาดดา บินดุลลือฮะ¹ และดารีกา จาเอะฮะ^{1*}

Nureeyah Berneemareh¹ Nurhisatee Chomuphai¹ Safira Hayiyunu¹ Abdulanas Yerroh

Nursuhada Bindulloh¹ and Darika Jaaoh^{1*}

¹สาขาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและการเกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา อำเภอเมือง จังหวัดยะลา 95000

¹Physics Program, Faculty of Science Technology and Agriculture, Yala Rajabhat University, Muang, Yala, Thailand

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

บทคัดย่อ

การพัฒนากระบวนการขึ้นรูปบอลยางพาราโดยใช้แม่พิมพ์จากเครื่องพิมพ์สามมิติ มีขั้นตอนเริ่มต้นจากการออกแบบและขึ้นรูปแม่พิมพ์จากพลาสติก ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene) ที่มีจุดหลอมเหลวสูงจากเครื่องพิมพ์สามมิติ แล้วหาสภาวะที่เหมาะสมในการขึ้นรูปบอลยางพาราด้วยแม่พิมพ์ข้างต้น และเปรียบเทียบสมบัติทางกลของบอลยางพารากับบอลยางสังเคราะห์พอลิยูรีเทนที่มีจำหน่ายในท้องตลาด พบว่าแม่พิมพ์ที่ได้มีลักษณะสมบูรณ์ตามการออกแบบและสามารถนำมาขึ้นรูปขึ้นทดสอบบอลยางพาราโดยผ่านการนั่งเป็นเวลา 1 ชั่วโมงได้โดยแม่พิมพ์ไม่เกิดการสึกหรอหรือเสียหาย ขึ้นทดสอบบอลยางพาราถูกนำมาให้ความร้อนภายใต้สภาวะการอบ 3 เงื่อนไข คือ 19, 19.5 และ 20 ชั่วโมง จากการพิจารณาลักษณะทางกายภาพและสมบัติเชิงกล เงื่อนไขในการนั่งด้วยแม่พิมพ์จากเครื่องพิมพ์สามมิติ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และให้ความร้อนโดยการอบ 19 ชั่วโมง ถือเป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการขึ้นรูปขึ้นทดสอบบอลยางพารา เนื่องจากเนื้อยางที่ได้มีลักษณะเป็นโฟมที่มีรูพรุนขนาดเล็กและกระจายอย่างสม่ำเสมอ เมื่อพิจารณาสมบัติทางกลพบว่ามีความเค้นอัดและความสามารถในการต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างสูงกว่าบอลยางสังเคราะห์พอลิยูรีเทน โดยดูได้จากมอดูลัสของยังที่มีค่าสูงกว่า และมีสมบัติการกระดอนตัวในแนวตั้งสูงสุด ถือได้ว่าสมบัติทางกลของบอลยางพาราที่ขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์จากเครื่องพิมพ์สามมิติ เทียบเท่ากับบอลยางสังเคราะห์พอลิยูรีเทนที่มีจำหน่ายในท้องตลาด โดยกระบวนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ด้วยแม่พิมพ์จากเครื่องพิมพ์สามมิตินี้เป็นกระบวนการสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับยางพาราโดยใช้เทคโนโลยีและนวัตกรรมมาบูรณาการภายใต้หลักเศรษฐกิจ BCG Model

คำสำคัญ : ยางพารา แม่พิมพ์ เครื่องพิมพ์สามมิติ สมบัติทางกล ความเค้นอัด

Abstract

The development of a rubber ball forming process using a mold from a 3D printer has an initial step of designing and forming a mold from ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene) plastic with a high melting point using a 3D printer. Then determine the optimal conditions for forming rubber balls with the molds. Also, compare the mechanical properties of rubber balls to those of commercially available synthetic rubber balls manufactured of polyurethane. The resulting mold was confirmed to be complete according to the design and could be used to mold the rubber ball test component by steaming for 1 hour without the mold wearing out or deteriorating. Rubber ball samples were heated under three

different curing conditions: 19, 19.5, and 20 hours. By considering the physical and mechanical properties, the optimal condition for producing rubber ball test specimens were autoclaving with a 3D printer mold for 1 hour and heating for 19 hours. Due to their small pore cell and equally distributed. When considering the mechanical properties, the results show that the compressive stress and the Young's modulus were higher than polyurethane synthetic rubber balls. Additionally, it offers the greatest rebound resilience. It can be considered that the mechanical properties of Para rubber balls from 3D-printed mold are comparable to commercially available polyurethane synthetic rubber balls. Under the BCG Model, the process of forming products with molds from the 3D printer adds value to Para rubber by merging technology and innovation.

Keywords: Para rubber, Molds, 3D printer, Mechanical property, Compression stress

บทนำ

ห่วงโซ่อุปทานของอุตสาหกรรมยางพาราไทย ประกอบด้วยอุตสาหกรรมขั้นต้น (Upstream Rubber Industry) หมายถึงเกษตรกรผู้ปลูกยางพารา กรีดน้ำยางสด บางรายอาจมีการแปรรูปยางเบื้องต้นในรูปของยางแท่ง ยางก้อนถ้วย เศษยาง ยางแผ่นดิบ ยางเครพ เป็นต้น ซึ่งผลผลิตยางขั้นต้นเกือบทั้งหมดของไทยใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมขั้นกลางหรืออุตสาหกรรมยางพาราแปรรูป (Intermediate Rubber Industry) คือการนำผลผลิตยางขั้นต้นมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ยางขั้นกลาง เช่น ยางแท่ง น้ำยางข้น ยางผสม ยางสกิม ที่มีลักษณะและคุณสมบัติเหมาะสมสำหรับเป็นวัตถุดิบในการผลิตผลิตภัณฑ์ยางในอุตสาหกรรมขั้นปลายหรืออุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ยาง (Downstream Rubber Industry) อาทิ ยางรถยนต์ ถุงมือยาง ถุงยางอนามัย ยางยืด ที่นอนยางพารา โฟมยาง เป็นต้น จากนโยบายการแก้ปัญหาการค้าพาราตกต่ำและรักษาเสถียรภาพราคาพาราของภาครัฐ โดยการส่งเสริมนวัตกรรมยางพาราเพื่อพัฒนาการผลิตและการแปรรูปสินค้าและผลิตภัณฑ์ยางพาราภายในประเทศมากขึ้น

หนึ่งในการขับเคลื่อนนโยบายนี้คือการวิจัยและพัฒนาการแปรรูปยางธรรมชาติเป็นผลิตภัณฑ์โฟมยางหรือยางพองน้ำที่ทำจากน้ำยางธรรมชาติให้มีลักษณะเป็นรูพรุน หลักการสำคัญของการผลิตยางพองน้ำคือ การทำให้เกิดฟองอากาศหรือฟองแก๊สต่าง ๆ ขึ้นภายในเนื้อยางแล้วทำให้ฟองยางคงรูปด้วยกระบวนการวัลคาไนซ์ (Vulcanization) ด้วยสารเคมีและอาศัยความร้อนเป็นตัวช่วยภายในแม่พิมพ์โดยวิธีการนึ่งหรืออบ แต่การทำผลิตภัณฑ์โฟมจากยางธรรมชาติโดยทั่วไปนั้นยังประสบปัญหาเรื่องกระบวนการผลิตในแต่ละขั้นตอนยังไม่ดีพอ ทำให้ได้เนื้อโฟมไม่สม่ำเสมอรวมทั้งมีการสึกหรอของแม่พิมพ์กรรมวิธีทำให้ยางสุกโดยการนึ่ง (อุณหภูมิ 100 - 120°C) ก่อให้เกิดปัญหาเรื่องการสึกหรอของแม่พิมพ์ (ปูนพลาสติก) การใช้แม่พิมพ์โลหะและแม่พิมพ์พลาสติกจะใช้เวลาในการคงรูปของยางน้อยกว่าแม่พิมพ์ปูนพลาสติกและผิวของชิ้นงานจะเรียบกว่า ส่วนคุณภาพของเนื้อโฟมภายในใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าแม่พิมพ์โลหะมีความคงทนในการใช้งานสูงแต่การผลิตแม่พิมพ์โลหะใช้เวลานานและมีราคาแพง ทำให้สูญเสียโอกาสทางการผลิต ไม่สามารถสนองความต้องการของตลาดได้อย่างทันทั่วทั้ง จากข้อจำกัดข้างต้น การออกแบบแม่พิมพ์พลาสติกจากเครื่องพิมพ์สามมิติเป็นทางเลือกที่ประหยัดและรวดเร็วสำหรับการสร้างต้นแบบแม่พิมพ์เพื่อผลิตชิ้นงานตามรูปแบบต่าง ๆ แม้กระทั่งรูปแบบที่ซับซ้อนจากโปรแกรมออกแบบชิ้นงานสามมิติ เช่น CAD (Computer Aided Design), sketchUp, tinkercad เป็นต้น สามารถผลิตแม่พิมพ์ออกมาในระยะเวลาเพียงไม่กี่ชั่วโมง ด้วยเครื่องพิมพ์เพียงเครื่องเดียวและรวดเร็วกว่าการผลิตแม่พิมพ์โลหะที่ต้องใช้การผลิตหลายขั้นตอนโดยช่างมืออาชีพในการผลิตซึ่งต้องอาศัยความเชี่ยวชาญและอาจต้องใช้เวลาในขณะนั้นที่เครื่องพิมพ์สามมิติสามารถทำงานได้อย่างแม่นยำเช่นเดียวกันและยังสามารถลดความเสี่ยงของความผิดพลาดจากการทำงานด้วยมือได้อีกด้วย ปัจจุบันการพัฒนาของเครื่องพิมพ์สามมิติสามารถออกแบบชิ้นงานและสั่งพิมพ์ออกมาได้อย่างมีมาตรฐาน รวมถึงงานออกแบบที่ซับซ้อนซึ่งต้องใช้

เวลาในการผลิตด้วยมือที่นานแต่เครื่องพิมพ์นี้ก็สามารถสั่งพิมพ์ออกมาได้ในระยะเวลาอันสั้นและได้งานพิมพ์ที่ถูกต้องตามหลักเรขาคณิตที่ต้องการ

ปัจจุบันเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติระบบฉีดเส้นวัสดุ FDM (Fuse Deposition Modeling) เป็นวิธีสร้างชิ้นงานสามมิติที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย (Tymrak, Kreiger *et al.*, 2014) เนื่องจากการใช้งานที่คุ้มค่าเมื่อเทียบกับเทคนิคอื่น ๆ และใช้งานและบำรุงรักษาง่าย (Fateri, Kaouk *et al.* 2018), (Pandzic, Hodzic *et al.* 2019) ซึ่ง FDM ถูกนำไปใช้ในการสร้างต้นแบบอย่างรวดเร็ว (Rapid Prototyping) เส้นพลาสติกที่นิยมใช้มากที่สุดในเครื่องพิมพ์สามมิติระบบ FDM คือพลาสติก PLA (Polylactic acid) และ ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene) วัสดุทั้งสองชนิดเป็นเทอร์โมพลาสติกหรือพลาสติกที่หลอมใหม่ได้โดยใช้ความร้อน ที่นิยมใช้กันทั้ง 2 ตัวนี้เพราะทั้งคู่สามารถทำให้เป็นเส้นและสามารถจัดเก็บเป็นม้วนได้ แต่ ABS กับ PLA มีคุณสมบัติแตกต่างกันในหลาย ๆ เรื่อง เช่น ความแข็งและยืดหยุ่น ลักษณะภายนอกของชิ้นงาน การย่อยสลาย และจุดหลอมเหลว PLA มีจุดหลอมเหลวอยู่ที่ 180-220 องศาเซลเซียสและมี Glass Transition Temperature (T_g) อยู่ที่ 60-65 องศาเซลเซียส ในขณะที่ ABS มีจุดหลอมเหลวอยู่ที่ 200-250 องศาเซลเซียส และมี T_g อยู่ที่ 105 องศาเซลเซียส

งานวิจัยนี้ต้องการพัฒนากระบวนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์โพนียงพาราโดยใช้แม่พิมพ์จากเครื่องพิมพ์สามมิติ ด้วยการออกแบบแม่พิมพ์พลาสติก ABS ที่มีจุดหลอมเหลวสูงกว่า เป็นทรงกลมเพื่อขึ้นรูปบอลลายพาราขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6.30 เซนติเมตร และหาสภาวะที่เหมาะสมในการขึ้นรูปบอลลายด้วยแม่พิมพ์จากเครื่องพิมพ์สามมิติ แล้วนำมาทดสอบเพื่อเปรียบเทียบสมบัติทางกลกับบอลลายสังเคราะห์จากพอลิยูรีเทนที่มีจำหน่ายในท้องตลาด หากสมบัติของชิ้นงานพาราที่ได้เทียบเท่าชิ้นงานที่ผลิตจากบอลลายสังเคราะห์ จะเป็นการสร้างกระบวนการขึ้นรูปเพื่อเพิ่มมูลค่าให้กับผลิตภัณฑ์พาราในอุตสาหกรรมปลายน้ำด้วยเทคโนโลยีและนวัตกรรมตามหลักเศรษฐกิจ BCG Model

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อพัฒนากระบวนการขึ้นรูปบอลลายพาราด้วยแม่พิมพ์จากเครื่องพิมพ์สามมิติโดยการหาสภาวะที่เหมาะสมในการขึ้นรูปบอลลายพาราและเปรียบเทียบสมบัติทางกลของบอลลายพารากับบอลลายสังเคราะห์

วิธีดำเนินการวิจัย

การพัฒนากระบวนการขึ้นรูปบอลลายพาราด้วยแม่พิมพ์จากเครื่องพิมพ์สามมิติมีขั้นตอนการดำเนินการ 3 ขั้นตอน คือ การออกแบบและขึ้นรูปแม่พิมพ์จากเครื่องพิมพ์สามมิติ การเตรียมน้ำยางคอมปาวด์และขึ้นรูปบอลลายพารา และ การทดสอบสมบัติทางกล โดยมีรายละเอียดการดำเนินการวิจัยแต่ละขั้นตอนดังนี้

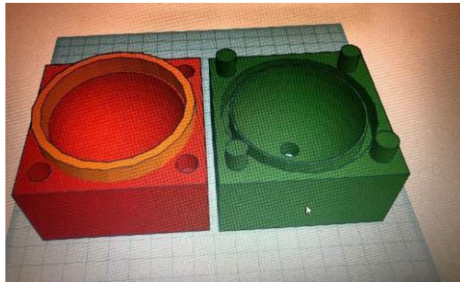
ขั้นตอนที่ 1 การออกแบบและขึ้นรูปแม่พิมพ์จากเครื่องพิมพ์สามมิติ

ออกแบบแม่พิมพ์โดยใช้โปรแกรม Tinkercad ให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 6.30 เซนติเมตร เพื่อขึ้นรูปเป็นบอลลายพาราทรงกลม โดยออกแบบแม่พิมพ์ 2 ชิ้น (บน-ล่าง) ให้มีสลักยึดป้องกันแรงดันจากการขยายตัวของโพนียงขณะทำการขึ้นรูป เมื่อนำแม่พิมพ์ทั้งสองชิ้นมาประกบกันจะมีรูทรงเป็นลูกบาศก์ขนาดความกว้าง 8 เซนติเมตรและแม่พิมพ์ขึ้นบนออกแบบให้มีช่องสำหรับน้ำยางคอมปาวด์ดังภาพที่ 1 หลังจากนั้นนำไฟล์โมเดล 3 มิติ เข้าโปรแกรม xyzmakerSuite และทำการพิมพ์แม่พิมพ์ขนาดข้างต้น ด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติยี่ห้อ da Vinci รุ่น 1.0 Pro โดยใช้วัสดุฉีด ABS filament

ขั้นตอนที่ 2 การเตรียมน้ำยางคอมปาวด์และขึ้นรูปบอลลายพารา

น้ำยางคอมปาวด์มีสูตรการผสมดังตารางที่ 1 โดยเริ่มจากการกวนน้ำยางข้น (60% HA Latex) ด้วยเครื่องกวนสาร 5 นาทีเพื่อกำจัดแอมโมเนียที่อยู่ในน้ำยางข้น เติมน้ำช่วยทำให้เกิดฟอง (10% K-oleate) ลงในน้ำยางข้น ซึ่งเหมาะสมในการผลิตเซลล์โพนียงขนาดเล็ก จากนั้นกวนน้ำยางต่อเนื่องด้วยความเร็วสูงในช่วงแรกเพื่อให้ได้ฟองที่มีปริมาณเพิ่ม 2 เท่า ทำการเติมสารทำให้ยางคงรูป (50% Sulphur) สารตัวเร่ง (50% ZMBT) และสารป้องกันการเสื่อมสภาพ (50% Wingstay L) จากนั้นกวนต่อ 5 นาที เพื่อให้สารเคมีกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอและทำให้เกิดฟองละเอียด ลดระดับความเร็วลงหลังจากได้

ความละเอียดของฟองน้ำตามต้องการแล้ว ทำการเติมสารกระตุ้น (50% ZnO) และสารตัวเร่ง (33% DPG) กวนน้ำยางต่อ เพื่อให้สารเคมีกระจายตัว ทำการเติมสารช่วยให้ฟองจับตัว (20% SSF) ตีฟองจนสารเคมีกระจายตัวอย่างทั่วถึง จึงเทใส่แม่พิมพ์จากเครื่องพิมพ์สามมิติปล่อยให้ยางเกิดเจล 5 นาที หลังจากนั้นนำไปนึ่งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แยกชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ จากนั้นทำการอบให้ความร้อนด้วยตู้อบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส โดยในขั้นตอนนี้จะทำการเปรียบเทียบเวลาในการอบ 3 เงื่อนไขคือ 19 ชั่วโมง 19.5 ชั่วโมง และ 20 ชั่วโมง แล้วนำชิ้นงานบอลงวางพาราที่ขึ้นรูปได้มาทดสอบสมบัติทางกลในขั้นต่อไป



ภาพที่ 1 แม่พิมพ์บอลงวางที่ออกแบบโดยใช้โปรแกรม Tinkercad

ตารางที่ 1 สูตรการผสมน้ำยางคอมปาวด์

Materials	Dry weight (phr)
60% HA Latex	100
10% K-oleate	2.0
50% Sulphur	2.0
50% ZMBT	4.0
50% Wingstay L	1.0
50% ZnO	5.0
33% DPG	1.0
20% SSF	0.35

ขั้นตอนที่ 3 การทดสอบสมบัติทางกลของบอลงวางพารา

งานวิจัยนี้พิจารณาสมบัติทางกลของบอลงวางพาราจากการทดสอบค่าความต้านทานแรงกด ค่ายังมอดูลัส และค่าการดูดซับพลังงานของบอลงวาง การทดสอบแรงกด (compression test) ใช้ชุดทดสอบ Force gauge motorized test โดยให้แรงกดกับชิ้นทดสอบด้วยอัตราเร็วในการกดคงที่และบันทึกค่าแรงกดที่เปลี่ยนไปตามระยะการยุบตัวของชิ้นทดสอบ แล้วนำผลที่ได้ไปคำนวณและพล็อต Stress-Strain curve

การทดสอบค่ายังมอดูลัส (Young's modulus) จากการทดสอบแรงกด โดยใช้หลักการให้แรงกดกับชิ้นทดสอบด้วยอัตราเร็วในการกดคงที่และบันทึกค่าแรงกด (Compression Force) ที่เปลี่ยนไปตามระยะการยุบตัวของวัสดุโดยขณะชิ้นทดสอบยุบตัวจะเกิดแรงต้านในเนื้อวัสดุ ซึ่งแรงต้านของชิ้นทดสอบนี้มีค่าเท่ากับแรงในการกดที่อ่านค่าได้จากหัววัดแรง จึงนำมาคำนวณค่ายังมอดูลัสดังสมการที่ (1)

$$Y = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{F_0}{A \Delta l} \quad (1)$$

เมื่อ γ คือ ค่ายังมอดูลัส (Pa), σ คือ ความเค้น (Stress) (N/m^2), ϵ คือ ความเครียด (Strain), F คือ แรงกด (N), A คือ พื้นที่รับแรงกด (m^2), l_0 คือ ความหนาเริ่มต้น (m) และ Δl คือ ความหนาที่เปลี่ยนไป (m)

สมบัติการกระดอนตัวในแนวตั้ง (Vertical rebound resilience tester) ทดสอบโดยใช้เครื่อง Resiliometer อิงตามมาตรฐาน ASTM D-2632 โดยการตัดตัวอย่างขึ้นทดสอบเป็นแผ่นกลมขนาดความหนา 1.6 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 4.4 เซนติเมตร ทดสอบโดยการปล่อยให้หัว hammer ตกลงมากระทบกับชิ้นงานแล้วกระเด้งกลับขึ้นไปในแนวตั้ง บันทึกค่าจุดที่กระเด้งขึ้น

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

จากการออกแบบและขึ้นรูปแม่พิมพ์บอลยางจากเครื่องพิมพ์สามมิติ ได้แม่พิมพ์รูปทรงกลมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 6.3 เซนติเมตร มีสลักและช่องสำหรับเทน้ำยางคอมพาวด์เข้าไปในแม่พิมพ์ และช่องว่างสำหรับประกบแม่พิมพ์บน-ล่างเข้าด้วยกันตามภาพที่ 2 แม่พิมพ์ที่ได้มีลักษณะสมบูรณ์ตามการออกแบบในโปรแกรม Tinkercad และชิ้นส่วนบนและล่างของแม่พิมพ์สามารถนำมาประกบกันได้สนิท



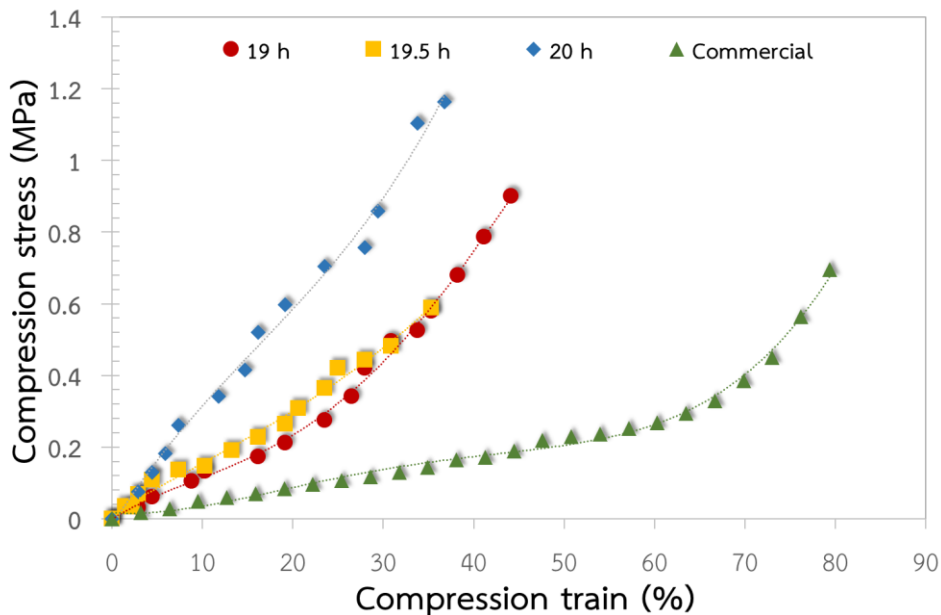
ภาพที่ 2 แม่พิมพ์บอลยาง ABS filament จากเครื่องพิมพ์สามมิติยี่ห้อ da Vinci รุ่น 1.0 Pro

เมื่อนำแม่พิมพ์ที่ได้จากภาพที่ 2 มาขึ้นรูปน้ำยางคอมพาวด์โดยผ่านการนั่งเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ภายใต้สภาวะการอบ 3 เจริญไซ คือ 19, 19.5 และ 20 ชั่วโมง ตามลำดับ ได้ขึ้นทดสอบดังภาพที่ 3 บอลยางพาราทั้ง 3 เจริญไซมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6.30 เซนติเมตร ตามขนาดของแม่พิมพ์ที่สร้างขึ้น แต่สังเกตได้ว่าจะมีเศษยางส่วนเกินเกิดขึ้นตรงรอยประกบระหว่างเบ้าเนื่องจากแม่พิมพ์ยังมีช่องว่างให้น้ำยางเกิดการไหลเข้าไปได้ในขณะนั่ง ต้องใช้วิธีการตัดแต่งเศษยางส่วนเกินออก ลักษณะของขึ้นทดสอบพบว่า บอลยางที่ผ่านการอบ 19 และ 19.5 ชั่วโมง เนื้อยางมีลักษณะเป็นโฟมที่มีรูพรุนขนาดเล็กและกระจายอย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งชิ้น ในขณะที่พบเนื้อสัมผัสที่มีความแข็งบางส่วนเกิดขึ้นบนชิ้นทดสอบบอลยางที่ผ่านการอบ 20 ชั่วโมง อาจเกิดจากการอบที่ใช้เวลานานเกินไปจนเกิดการสะสมของอนุมูลอิสระบนชิ้นทดสอบที่มีความหนาไม่สม่ำเสมอจนเกิดรอยไหม้ (Burn) ขึ้นที่ผิวชิ้นงานได้



ภาพที่ 3 ลักษณะบอลยางพาราที่ขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์จากเครื่องพิมพ์สามมิติ

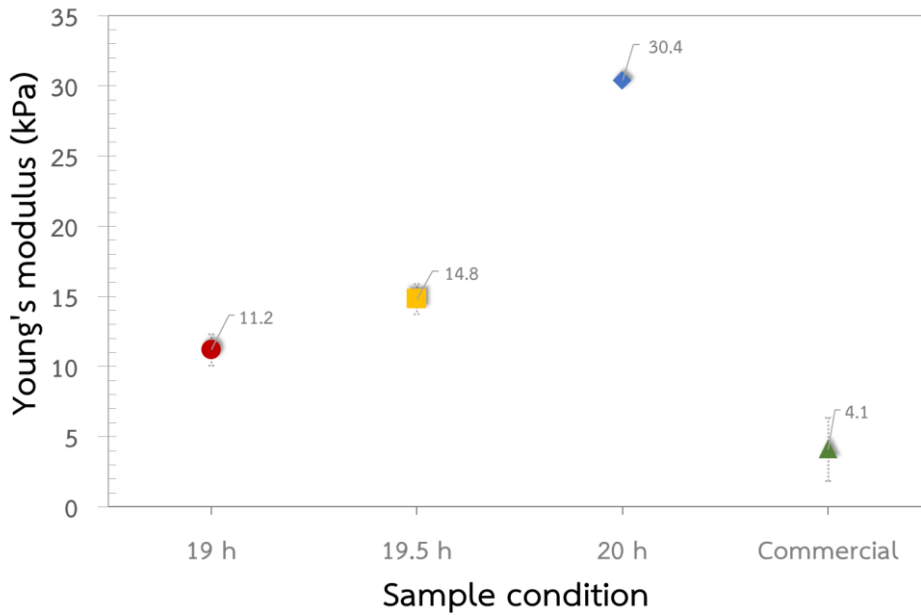
การประเมินพฤติกรรมเชิงกลของขึ้นทสดอบบอลลอยางพาราภายใต้สภาวะการอบ 19, 19.5 และ 20 ชั่วโมง ถูกทดสอบที่อุณหภูมิห้อง โดยการทดสอบ Compression test เปรียบเทียบกับบอลลอยางสังเคราะห์ที่จำหน่ายทางการค้า ผลการทดสอบแสดงผล Stress-Strain curve ดังภาพที่ 4 เส้นโค้งของทั้งบอลลอยางพาราและบอลลอยางสังเคราะห์มีลักษณะคล้ายกัน โดยเริ่มต้นจะแสดง Elastic region ซึ่งเป็นพฤติกรรมของวัสดุที่มีความยืดหยุ่น (Elastic behavior) หากพิจารณาชนิดของยาง พบว่าบอลลอยางพารามีค่าความชันของกราฟที่สูงกว่าบอลลอยางสังเคราะห์ เนื่องจากโพลียูรีเทน (Polyurethane foam) มีความหนาแน่นสัมพัทธ์ต่ำกว่าโพลียูรีเทนธรรมชาติจึงทำให้ค่าความเค้นอัด (compression stress) ต่ำ ผลจากชนิดของยางนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ (Boudjemaa *et al.*, 2021) และเมื่อพิจารณาเวลาในการอบขึ้นทสดอบบอลลอยางพารา จะพบว่า curve จะมีการเลื่อนไปในทิศทางที่มี compression stress สูงขึ้น แต่ความสามารถในการยึดตัวลดลง ทั้งนี้เนื่องจากขึ้นทสดอบที่อบ 20 ชั่วโมงมีเนื้อสัมผัสที่แข็งบางส่วนจากการสะสมความร้อนสูงจนเกิดการไหม้บริเวณผิวชิ้นงาน ทำให้โมเลกุลส่วนนั้นสูญเสียสภาพยืดหยุ่นและส่งผลให้ compression stress สูงขึ้นและ compression strain ลดลง



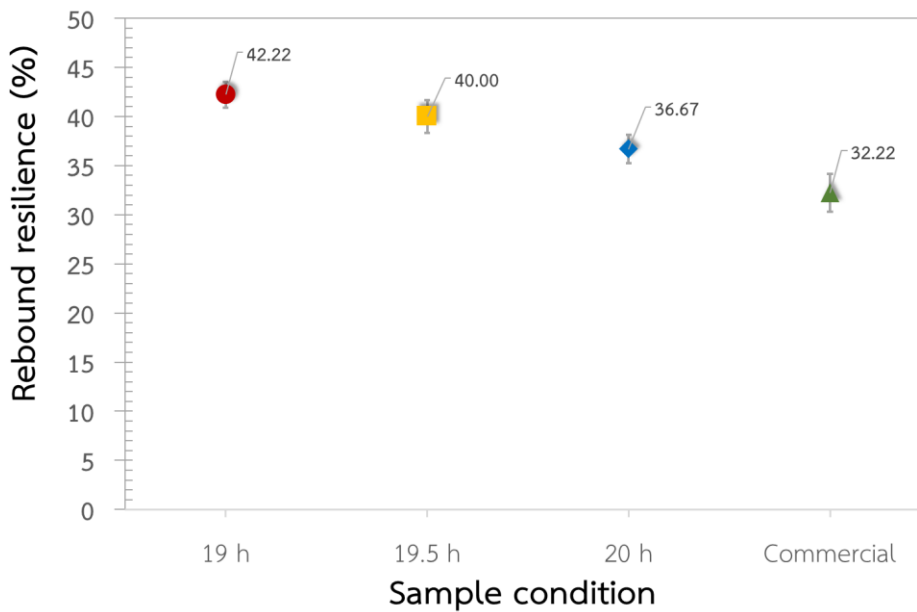
ภาพที่ 4 Stress-Strain Curve จากการทดสอบ Compression Test ของขึ้นทสดอบบอลลอยางพาราที่สภาวะการอบ 3 เงื่อนไขเปรียบเทียบกับบอลลอยางสังเคราะห์

จากผลการทดสอบ compression test ช่วงที่มีค่า compression strain ต่ำ (<25%) โดยปกติจะอยู่ในช่วง 20-50% ตามมาตรฐาน ASTM 575-91 เป็นช่วงที่วัสดุแสดงพฤติกรรมตาม Hooke's Law ซึ่งมีการตอบสนองแบบเชิงเส้นเมื่อได้รับแรงกดและสามารถคืนสู่รูปร่างได้ทั้งหมดเมื่อนำแรงเค้นจากภายนอกออก จากลักษณะดังกล่าวสามารถนำไปคำนวณหา ค่านอดูลัสของยัง (Young's modulus) ได้ดังสมการที่ (1) ผลการวิเคราะห์แสดงดังภาพที่ 5 พบว่าค่า Young's modulus ของบอลลอยางพาราภายใต้เงื่อนไขการอบ 19, 19.5 และ 20 ชั่วโมง มีค่า 11.2, 14.8 และ 30.4 kPa ตามลำดับ ในขณะที่บอลลอยางสังเคราะห์พอลิยูรีเทนมีค่านอดูลัสของยังต่ำกว่าขึ้นทสดอบบอลลอยางพาราทั้งสามเงื่อนไข โดยมีค่าอยู่ที่ 4.1 kPa แสดงให้เห็นว่าขึ้นทสดอบบอลลอยางพารามีความสามารถในการต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างสูงกว่าบอลลอยางพอลิยูรีเทน และหากระดับการเชื่อมโยงของโมเลกุลยาง (crosslink density) สูงขึ้นค่านอดูลัสของยังจะมีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย แต่ในกรณีของการเพิ่มเวลาในการอบขึ้นทสดอบไม่ได้ส่งผลให้สายโซ่โมเลกุลในยางมีปริมาณ crosslink density สูงขึ้น แต่เวลาในการอบที่มาก

เกินไปโดยเฉพาะที่เวลาการอบ 20 ชั่วโมงกลับทำให้ชิ้นงานเกิดการไหม้ที่ผิวบางส่วนจนสายโซ่โมเลกุลในยางยับตัวได้ยากขึ้น ส่งผลต่อค่ามอดูลัสที่สูงขึ้น



ภาพที่ 5 Young's modulus ของบอลยางพาราภายใต้เงื่อนไขการอบ 19, 19.5 และ 20 ชั่วโมง เปรียบเทียบกับบอลยางสังเคราะห์พอลิยูรีเทน



ภาพที่ 6 Rebound resilience ของบอลยางพาราภายใต้เงื่อนไขการอบ 19, 19.5 และ 20 ชั่วโมง เปรียบเทียบกับบอลยางสังเคราะห์พอลิยูรีเทน

ในการทดสอบสมบัติการกระดอนตัวในแนวดิ่ง (Rebound resilience) ของชิ้นทดสอบทั้งบอลยางพาราและบอลยางพอลิยูรีเทน ทำการปล่อยลูกตุ้มที่ระดับความสูง 60 เซนติเมตรให้ตกกระทบชิ้นทดสอบ จากนั้นอ่านค่าตำแหน่งการกระดอนกลับ ผลการวิเคราะห์ค่า rebound resilience มีค่าลดลงจาก 42.22% เป็น 36.67% เมื่อเพิ่มสภาวะการอบชิ้นทดสอบจาก 19 ชั่วโมงเป็น 20 ชั่วโมง ในกรณีของบอลยางพารา แนวโน้มลดลงนี้เกิดจากการเปลี่ยนรูปพลังงานจากพลังงาน

กลเป็นพลังงานความร้อนที่สะสมในเนื้อเยื่อมากขึ้น ทำให้ค่า rebound resilience ต่ำลง (Pöschl and Vašina, 2021) และ บอลยางพอลิยูรีเทนมีค่า rebound resilience 32.22% ต่ำกว่ายางธรรมชาติ เนื่องจากยางธรรมชาติมีสมบัติการกระด้าง กระดอนสูง (สูงกว่ายางสังเคราะห์ชนิดอื่น ๆ ทั้งหมด ยกเว้นยาง BR) และในระหว่างการเปลี่ยนแปลงของรูปร่าง ยางจะ สูญเสียพลังงานในรูปของความร้อนน้อย มีค่า hysteresis ต่ำ ยางธรรมชาติจึงมีความร้อนสะสมต่ำ

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

การพัฒนากระบวนการขึ้นรูปบอลยางพาราโดยใช้แม่พิมพ์จากเครื่องพิมพ์สามมิติ ด้วยการออกแบบแม่พิมพ์ พลาสติก ABS ที่มีจุดหลอมเหลวสูงเพื่อให้ทนต่ออุณหภูมิในขณะขึ้นรูป แม่พิมพ์ที่ได้มีลักษณะสมบูรณ์ตามการออกแบบและ สามารถนำมาขึ้นรูปขึ้นทดสอบบอลยางพาราโดยการนั่งเป็นเวลา 1 ชั่วโมงได้โดยแม่พิมพ์ไม่เกิดการสึกหรอหรือเสียหาย ขึ้นทดสอบบอลยางพาราถูกนำมาให้ความร้อนภายใต้สภาวะการอบ 3 เงื่อนไข คือ 19, 19.5 และ 20 ชั่วโมง พบว่าบอลยางที่ ผ่านการอบ 19 และ 19.5 ชั่วโมง เนื้อเยื่อมีลักษณะเป็นโฟมที่มีรูพรุนขนาดเล็กและกระจายอย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งชิ้น ในขณะที่ ขึ้นทดสอบบอลยางพาราที่ผ่านการอบ 20 ชั่วโมง พบเนื้อสัมผัสแข็งบางส่วนขึ้นที่ผิวชิ้นงาน เงื่อนไขเวลาในการอบที่มาก เกินไปทำให้ค่า compression stress สูงขึ้นแต่ความสามารถในการยืดตัว หรือ compression strain ลดลง อย่างไรก็ตาม ขึ้นทดสอบบอลยางพาราภายใต้สภาวะการอบทั้งสามเงื่อนไขมีค่า compression stress สูงกว่าบอลยางสังเคราะห์พอลิ ยูรีเทน

ขึ้นทดสอบบอลยางพารามีความสามารถในการต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างสูงกว่าบอลยางพอลิยูรีเทนโดยดู ได้จากมอดูลัสของยังที่มีค่าสูงกว่า แต่ในกรณีของค่ามอดูลัสยังที่มีค่าสูงสุดที่ 30.4 kPa ในกรณีขึ้นทดสอบบอลยางที่ผ่านการอบ เป็นเวลา 20 ชั่วโมง เกิดขึ้นเนื่องจากสายโซ่โมเลกุลในยางขยับตัวได้ยากตรงส่วนที่เกิดรอยไหม้จมนเนื้อสัมผัสแข็งและส่งผลทำให้ สมบัติการกระดอนตัวในแนวตั้ง (Rebound resilience) ต่ำกว่าเงื่อนไขในการอบ 19 ชั่วโมงซึ่งถือว่าเป็นสภาวะที่เหมาะสม ที่สุดสำหรับการอบขึ้นทดสอบบอลยางพาราเมื่อนำสมบัติทางกลมาเปรียบเทียบกับบอลยางสังเคราะห์จากพอลิยูรีเทนที่มี จำหน่ายในท้องตลาดแล้ว สมบัติทางกลของบอลยางพาราที่ขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์จากเครื่องพิมพ์สามมิติเทียบเท่ากับบอลยาง สังเคราะห์พอลิยูรีเทน ในงานวิจัยต่อยอดสามารถเพิ่มการออกแบบแม่พิมพ์จากเครื่องพิมพ์สามมิติให้มีความซับซ้อนและตรง ตามความต้องการของผู้ผลิตชิ้นงานยางพารา ถือเป็น การสร้างกระบวนการขึ้นรูปเพื่อเพิ่มมูลค่าให้กับผลิตภัณฑ์ยางพาราโดยใช้ เทคโนโลยีและนวัตกรรมมาบูรณาการภายใต้ BCG Model

เอกสารอ้างอิง

- Boudjemaa, I., Sahli, A., Benkhetto, A., & Benbarek, S. (2021). Effect of multi-layer prosthetic foam liner on the stresses at the stump–prosthetic interface. *Frattura Ed Integrita Strutturale*, 15(56), 187–194. <https://doi.org/10.3221/IGF-ESIS.56.15>
- Fateri, M., Kaouk, A., Cowley, A., Siarov, S., Palou, MV., González, FG., Marchant, R., Cristoforetti, S., Sperl, M. (2018). Feasibility study on additive manufacturing of recyclable objects for space applications, *Additive Manufacturing*, 24, 400-404.
- Pandžić, A., Hodžić, D., Milovanović, A., Pandžić, A., & Milovanović, A. (2019). Effect of infill type and density on tensile properties of pla material for fdm process siramm (Structural Integrity and Reliability of Advanced Materials obtained through additive Manufacturing) View project 30th daaam international symposium on intelligent manufacturing and automation effect of infill type and density on tensile properties of PLA material for FDM process.
- Pöschl, M.; Vašina, M. (2021). Study of the Mechanical, Sound Absorption and Thermal Properties of Cellular Rubber Composites Filled with a Silica Nanofiller. *Materials*, 14(23), 7450.

Tymrak, B. M., Kreiger, M., & Pearce, J. M. (2014). Mechanical Properties of Components Fabricated with Open-Source 3-D Printers Under Realistic Environmental Conditions. *Materials & Design*, 58, 242. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.02.038>