JPAGS
Journal of Physics & General Science

การใช้เส้นใยใบสับปะรดเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับเสียงในวัสดุยางธรรมชาติ

Utilizing Pineapple Leaf Fibers to Improve the Sound Absorption Properties of Natural Rubber Materials

ดาริกา จาเอาะ* ฟารีซะ ดีสะเอะ และนูรซูฮาดา บินดุลเล๊าะ

Darika Jaaoh*, Farisa Disaxea and Nursuhada Bindulloh

สาขาฟิสิกส์อุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและการเกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา จังหวัดยะลา

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

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

(Received: April 12, 2024, Revised: June 17, 2024, Accepted: August 14, 2024)

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มุ่งเน้นการพัฒนาวัสดุดูดซับเสียงจากยางธรรมชาติผสมเส้นใยใบสับปะรด เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับเสียงและลดมลพิษทางเสียงในสิ่งแวดล้อม การวิจัยนี้ใช้วิธีการทางกายภาพและทางกลเพื่อวิเคราะห์คุณสมบัติของแผ่นโฟมบุผนังที่มีส่วนผสมของเส้นใยใบสับปะรดในปริมาณต่าง ๆ พบว่า การเพิ่มปริมาณเส้นใยใบสับปะรดมีผลต่อความหนาแน่นและคุณสมบัติในการดูดซับเสียงของวัสดุ โดยแผ่นที่มีเส้นใย 3 ส่วนในยางร้อยส่วน ที่ความหนา 1.5 เซนติเมตร แสดงค่าการลดระดับเสียงสูงสุดเท่ากับ 0.36 ± 0.13 การวิเคราะห์ยังรวมถึง การทดสอบความหนาแน่นมีค่า 0.72 ± 0.02 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ค่าการดูดซับพลังงาน 86.7 ± 6.8 เปอร์เซ็นต์ และการทดสอบสมบัติทางเสียง โดยใช้ไมโครโฟนเดี่ยวเพื่อวัดความสามารถในการดูดซับเสียงที่ความถี่ 250, 500, 1,000, 2,000 และ 4,000 เฮิรตซ์ ผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่า เส้นใยใบสับปะรดสามารถปรับปรุงคุณสมบัติของโฟมยางธรรมชาติให้มีประสิทธิภาพในการดูดซับเสียงที่ความถี่ต่ำ (500 เฮิรตซ์) ได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียง 0.43 ± 0.07 สามารถสร้างศักยภาพในการใช้วัสดุธรรมชาติ เพื่อสิ่งแวดล้อมที่ยั่งยืนและลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

คำสำคัญ: ยางธรรมชาติ เส้นใยใบสับปะรด การดูดซับเสียง มลพิษทางเสียง การทดสอบสมบัติทางเสียง

ABSTRACT

This study focuses on developing sound-absorbing materials from natural rubber compounded with pineapple leaf fibers (PALF) to enhance sound absorption efficiency and reduce noise pollution in various environments. The research employs physical and mechanical methods to analyze the properties of wall panel foams incorporating varying amounts of PALF. Increasing the PALF content influences the material's density and sound absorption characteristics. The panel containing 3 parts per hundred rubbers of PALF, at a 1.5 cm thickness, demonstrates the highest noise reduction coefficient of 0.36 ± 0.13. Additional analyses include density testing yielding 0.72 ± 0.02 g/cm3, energy absorption of 86.7 ± 6.8%, and acoustic property evaluation using a single microphone method across various frequencies. The results show that PALF significantly enhances the low-frequency (500 Hz) sound absorption performance of natural rubber foams, achieving a sound absorption coefficient of 0.43 ± 0.07. These findings underscore the potential of natural materials in creating sustainable environments and mitigating environmental impacts.

Keywords: natural rubber, pineapple leaf fibers, sound absorption, noise pollution, acoustic properties testing

บทนำ

มลพิษทางเสียงเป็นปัญหาสิ่งแวดล้อมที่ส่งผลกระทบอย่างมากต่อคุณภาพชีวิตและสุขภาพของมนุษย์ ตามรายงานขององค์การอนามัยโลก (World Health Organization; WHO) มลพิษทางเสียงถือเป็นหนึ่งในปัจจัยเสี่ยงจากสิ่งแวดล้อมที่สำคัญที่สุด ในยุโรปมีผู้คนจำนวนมากที่สัมผัสกับระดับเสียงที่เกินกว่าค่าที่ WHO แนะนำ ในเมืองใหญ่ ๆ ทั่วโลก เสียงรบกวนจากการจราจร อุตสาหกรรม และการก่อสร้างถือเป็นสาเหตุหลักของมลพิษทางเสียง ตัวอย่างเช่น ในกรุงเทพมหานคร และปริมณฑล รายงานจากกรมควบคุมมลพิษได้แสดงให้เห็นว่าระดับเสียงในบางพื้นที่เกิน 70 เดซิเบลในช่วงเวลากลางวัน ซึ่งเกินกว่ามาตรฐานความปลอดภัยที่กำหนด [1] มีงานวิจัยทางด้านมลพิษทางเสียงรายงานว่า ผู้ที่อาศัยอยู่ในเมืองกำลังเผชิญกับสภาพแวดล้อมที่มีเสียงดัง และโดยเฉพาะเสียงจากการจราจรกลายเป็นส่วนหนึ่งของชีวิตคนเมือง มลพิษทางเสียงสามารถสร้างความเครียดอย่างมากต่อระบบการได้ยิน ระบบที่ไม่เกี่ยวกับการได้ยิน และระบบประสาทของผู้ที่อาศัยอยู่ในเมือง [2]-[3] ปริมาณเสียงรบกวนภายนอกที่เกิดจากกิจกรรมของมนุษย์มีแนวโน้มสูงขึ้น [4] ซึ่งส่งผลกระทบต่อชีวิตประจำวันรวมถึงการลดลงของความสามารถในการสื่อสาร การเพิ่มขึ้นของระดับความเครียด ความเหนื่อยล้าทางจิตใจ และคุณภาพการนอนหลับที่น้อยลง [5] ทั้งหมดนี้สามารถนำไปสู่ผลกระทบระยะยาวต่อสุขภาพ การทำงานและการใช้ชีวิต ดังนั้น การเลือกใช้วัสดุดูดซับเสียงในบริเวณพื้นที่ที่มีเสียงรบกวนเป็นการลดมลพิษทางเสียงและสร้างสภาพแวดล้อมที่ดีขึ้น การพัฒนาวัสดุดูดซับเสียงที่มีประสิทธิภาพและมีความยั่งยืนนั้น มีประเด็นสำคัญที่ต้องนำมาพิจารณา คือ การหาสมดุลระหว่างความสามารถในการดูดซับเสียงและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ความทนทานและความเสถียรของวัสดุ การผลิตและค่าใช้จ่าย ทั้งนี้ การพัฒนาวัสดุดูดซับเสียงจากวัสดุธรรมชาติอาจต้องเผชิญกับความท้าทายในด้านการผลิตและความคุ้มค่า การผลิตวัสดุเหล่านี้ต้องไม่เพียงแต่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม แต่ยังต้องสามารถผลิตได้ในราคาที่สามารถแข่งขันได้ในตลาด วัสดุธรรมชาติหลายชนิด เช่น เส้นใยใบสับปะรด ขี้เลื่อย หรือยางธรรมชาติ มีศักยภาพในการใช้เป็นวัสดุดูดซับเสียงที่ทั้งยั่งยืน มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยและมีประสิทธิภาพ ยังคงมีการวิจัย เพื่อพัฒนาการผลิตและประสิทธิภาพการดูดซับเสียงอย่างต่อเนื่อง นอกจากนี้ การใช้วัสดุธรรมชาติยังสนับสนุนเศรษฐกิจหมุนเวียนและการจัดการทรัพยากรอย่างยั่งยืน การใช้ของเสียจากการเกษตรหรืออุตสาหกรรมเป็นวัสดุดูดซับเสียงไม่เพียงแต่ช่วยลดมลพิษทางเสียงเท่านั้น แต่ยังช่วยลดของเสียและสนับสนุนระบบนิเวศที่ยั่งยืนด้วย

วัสดุดูดซับเสียงที่มีโครงสร้างรูพรุนเป็นหนึ่งในนวัตกรรมที่ได้รับความสนใจในการลดมลพิษทางเสียง น้ำยางธรรมชาติสามารถนำมาผลิตเป็นโฟมยาง โดยโครงสร้างรูพรุนทำหน้าที่ลดการสะท้อนและการกระจายของคลื่นเสียงในช่วงความถี่กว้าง [6]-[9] ช่วยลดเสียงก้องและเสียงรบกวนในห้องหรือพื้นที่ใช้สอย ลักษณะของโฟมยางสามารถขึ้นรูปเป็นรูปทรงและขนาดต่าง ๆ ได้ง่าย ทำให้สามารถติดตั้งได้ในพื้นที่ที่มีลักษณะเฉพาะตามความต้องการ ถึงแม้ว่า ข้อดีของโฟมยาง คือ สมบัติความยืดหยุ่น แต่สมบัติทางกล เช่น ความทนทานต่อการสึกหรอหรือการกระแทกซ้ำ การใช้งานระยะยาว หรือการใช้ในสภาพแวดล้อมที่มีการสึกหรอสูง อาจทำให้วัสดุเสื่อมสภาพได้เร็วขึ้น การแก้ไขข้อจำกัดนี้ อาจทำได้โดยการเลือกวัสดุที่มีความคงทนนำมาคอมโพสิตกับโฟมยาง เส้นใยใบสับปะรด (Pineapple leaf fiber; PALF) เป็นหนึ่งในวัสดุธรรมชาติที่ได้รับความสนใจมากขึ้น ไม่เพียงแต่ในด้านความแข็งแรงและทนทานสูง และประสิทธิภาพในการดูดซับเสียงที่ดี แต่ยังรวมถึงความยั่งยืนทางสิ่งแวดล้อมและการจัดการขยะจากการเกษตรได้อีกด้วย [10]-[12] จากงานวิจัยก่อนหน้าพบว่า แผ่นดูดซับเสียงจากอัตราส่วน PALF: น้ำยาง (ตัวประสาน) 90:10 มีค่าสัมประสิทธิ์การลดระดับเสียง (Noise reduction coefficient; NRC) สูงกว่า 0.5 ซึ่งสูงกว่าแผ่นดูดซับเสียงสังเคราะห์ที่มีอยู่ในท้องตลาด [13] การออกแบบและพัฒนาวัสดุดูดซับเสียงให้มีประสิทธิภาพต้องคำนึงถึงปัจจัยต่าง ๆ เช่น ขนาดของรูพรุน ความหนาแน่นของรูพรุน โดยทั่วไปรูพรุนขนาดเล็กมีประสิทธิภาพในการดูดซับเสียงช่วงความถี่สูง ในขณะที่รูพรุนขนาดใหญ่มีประสิทธิภาพในการดูดซับเสียงช่วงความถี่ต่ำ วัสดุที่มีความหนาแน่นของรูพรุนมากสามารถดูดซับเสียงได้ดีในช่วงความถี่กว้างขึ้น เนื่องจากรูพรุนจำนวนมากช่วยเพิ่มพื้นที่สัมผัส

กับคลื่นเสียง ช่วยลดการสะท้อนและการกระจายของคลื่นเสียง รูพรุนที่มีรูปทรงซับซ้อน หรือมีลักษณะเป็นเซลล์เปิดภายในที่แตกต่างกันนั้น สามารถเพิ่มกระจายของคลื่นเสียงและเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับเสียง

ด้วยเหตุนี้ การออกแบบวัสดุดูดซับเสียง จึงต้องพิจารณาถึงปัจจัยเหล่านี้ เพื่อให้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับเสียงในช่วงความถี่ที่ต้องการ การศึกษาการปรับโครงสร้างรูพรุนของวัสดุคอมโพสิตจากยางธรรมชาติโดยใช้เส้นใยใบสับปะรดไม่เพียงแต่เพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับเสียงเท่านั้น แต่ยังช่วยให้ตอบสนองต่อความต้องการที่แตกต่างกัน เพื่อการประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย และยังเป็นการเพิ่มวิธีจัดการกับมลพิษทางเสียงในสภาพแวดล้อมต่าง ๆ อย่างยั่งยืนและมีประสิทธิภาพ

วัตถุประสงค์

เพื่อหาอัตราส่วนผสมของน้ำยางธรรมชาติผสมเส้นใยใบสับปะรดที่เหมาะสมในการขึ้นรูป และศึกษาสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางกล และสมบัติทางเสียงของแผ่นโฟมบุผนังจากน้ำยางธรรมชาติผสมเส้นใยใบสับปะรด

การดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้มีการดำเนินงาน 3 ขั้นตอน ได้แก่ (1) การเตรียมเส้นใยใบสับปะรด (2) การเตรียมแผ่นโฟมบุผนังจากยางธรรมชาติผสมเส้นใยใบสับปะรด และ (3) การทดสอบและวิเคราะห์ความหนาแน่น อัตราการดูดซับพลังงาน สัมประสิทธิ์การดูดซับเสียงและสัมประสิทธิ์การลดระดับเสียง โดยมีรายละเอียด ดังนี้

ขั้นตอนการเตรียมเส้นใยใบสับปะรด ใบสับปะรดที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้ คือ ใบสับปะรดพันธุ์ปัตตาเวีย ซึ่งเป็นพันธุ์ที่นิยมปลูกมากที่สุดในจังหวัดยะลา ภาคใต้ของประเทศไทย คัดเลือกใบที่มีความยาว 80 – 100 เซนติเมตร ความกว้างใบ 4 – 5 เซนติเมตร ล้างทำความสะอาดใบสับปะรด แล้วตัดเป็นชิ้นเล็ก ๆ ขนาดประมาณ 3 เซนติเมตร นำไปตากแห้งเป็นเวลา 3 วัน เพื่อลดปริมาณความชื้นให้ลดเหลือน้อยที่สุด แล้วนำไปบดด้วยเครื่องปั่นให้เป็นผงละเอียด ใช้ตะแกรงร่อน เพื่อให้ได้อนุภาคขนาด 1-2 มิลลิเมตร โดยภาพที่ 1 แสดงลักษณะของใบสับปะรดและอนุภาค หลังจากผ่านกระบวนการแปรรูปใบสับปะรด นำอนุภาคเส้นใยใบสับปะรดที่ผ่านการแปรรูปมาแช่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 1.0 % และให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ซึ่งเป็นเวลาและความเข้มข้นที่เหมาะสมจากการทดสอบเบื้องต้นในการแยกเส้นใยออกจากเนื้อเยื่อใบและปรับสภาพผิวจนได้เป็นเส้นใยใบสับสับปะรด หลังจากนั้น ทำการล้างด้วยน้ำกลั่นจนกระทั่งค่า pH เป็นกลาง (pH = 7) เพื่อลดความเสี่ยงจากสารตกค้าง [14]-[15] นำไปตากแห้งในอากาศเป็นเวลา 24 ชั่วโมง และอบที่อุณหภูมิ 65 ℃ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

ภาพที่ 1 วัตถุดิบใบสับปะรดและอนุภาคหลังจากผ่านกระบวนการแปรรูปใบสับปะรด

ขั้นตอนการเตรียมแผ่นโฟมบุผนังจากยางธรรมชาติผสมเส้นใยใบสับปะรด แผ่นโฟมบุผนังจากยางธรรมชาติผสมเส้นใยใบสับปะรดถูกเตรียมขึ้นโดยผสมน้ำยางคอมปาวด์ใน 5 อัตราส่วน (S1-S5) ดังตารางที่ 1 เริ่มด้วยการผสมน้ำยางข้น (NR latex) กับผงอนุภาคเส้นใยใบสับปะรด (PALF) ที่กระจายตัวอยู่ในน้ำกลั่น (ในปริมาณ 0, 2, 3, 5 และ 7 phr ตามลำดับ) เป็นการเติมเซลลูโลสในขั้นตอนก่อนการวัลคาไนซ์ ซึ่งแสดงการกระจายตัวของเซลลูโลสได้ดีกว่าการเติมเซลลูโลสในกระบวนการก่อตัวเป็นโฟม [16] กำจัดแอมโมเนียในน้ำยางเป็นเวลา 5 นาที จากนั้น เติมส่วนผสมของสบู่โพแทสเซียมโอลิเอต (potassium oleate) เพื่อสร้างฟองจนปริมาตรเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่าของปริมาตรเริ่มต้น หลังจากเกิดฟองเติมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) กำมะถัน ซิงค์เมอร์แคปโตเบนโซไทอะโซล (ZMBT) และโลวินอกซ์ซีพีแอล (Lowinox CPL) ลงในโฟมและผสมด้วยการใช้ความเร็วต่ำเป็นเวลา 3 นาที จากนั้น เติมซิงค์ออกไซด์และไดฟีนิวกัวนิดีน (DPG) ซึ่งเป็นสารก่อเจลรองและผสมด้วยการใช้ความเร็วต่ำเป็นเวลา 2 นาที เมื่อครบเวลา ทำการเติมสารก่อเจลหลักโซเดียมซิลิโคฟลูออไรด์ (SSF) และผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันต่อไปอีก 1 นาที เทโฟมคอมปาวด์ลงในแม่พิมพ์อะลูมิเนียม และทิ้งไว้ให้เกิดเจลเป็นเวลา 5 นาที ที่อุณหภูมิห้อง จากนั้น นำไปวัลคาไนซ์ในเตาอบไอน้ำที่ 100 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยโฟมวัลคาไนซ์ถูกลอกออกจากแม่พิมพ์ และบ่มที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้น นำไปล้างด้วยน้ำกลั่น เพื่อกำจัดสารที่ยังตกค้าง และนำมาอบให้แห้งในเตาอบลมร้อนที่ 80 °C เป็นเวลา 5 ชั่วโมง ทำอัตราส่วนละ 3 ซ้ำ แสดงดังภาพที่ 2

ตารางที่ 1 สูตรน้ำยางคอมปาวด์

ส่วนประกอบ	TSC[a] (%)	น้ำหนักแห้ง (phr[b])				
		S1	S2	S3	S4	S5
น้ำยางข้น (NR latex)	60	100	100	100	100	100
โพแทสเซียมโอลิเอต (potassium oleate)	10	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (potassium hydroxide, KOH)	10	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
กำมะถัน (sulphur)	60	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2
ซิงค์เมอร์แคปโตเบนโซไธอะโซด์ (Zinc 2-mercaptobenzothiazole, ZMBT)	50	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
โลวินอกซ์ ซีพีแอล (Lowinox CPL)	50	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
ซิงค์ออกไซด์ (zinc oxide, ZnO)	50	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
ไดฟีนิวกัวนิดีน (diphenyl guanidine, DPG)	33.3	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
โซเดียมซิลิโคฟลูออไรด์ (sodium silicofluoride, SSF)	12.5	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
เส้นใยใบสับปะรด (PALF)	100	0	2	3	5	7

[a]TSC: Total Solids Content

[b]phr: parts per hundred rubber เป็นหน่วยวัดในอุตสาหกรรมยาง เพื่อแสดงปริมาณของสารเติมแต่ง โดยวัดเป็นส่วนของสารต่อยาง 100 ส่วน การใช้หน่วยนี้กับ น้ำหนักแห้ง (dry weight) เพื่อให้เป็นไปตามมาตรฐานที่ยอมรับในระบบอุตสาหกรรมยาง

การทดสอบและวิเคราะห์ผลการทดสอบหาค่าความหนาแน่นนั้น ได้ทำการทบสอบซ้ำ จำนวน 3 ครั้ง โดยชั่งมวลชิ้นทดสอบด้วยเครื่องชั่งดิจิตอล (OHAUS รุ่น PX323) และวัดขนาดด้วยดิจิตอลเวอร์เนียร์คาลิปเปอร์ (MITUTOYO รุ่น 500-150-30) จากนั้น ทำการคำนวณหาความหนาแน่น (ρ, g/cm^3) จากมวล ($\mathbf{M}$, g) และปริมาตร ($\mathbf{V}$, cm^3) ของชิ้นทดสอบ ดังสมการที่ (1)

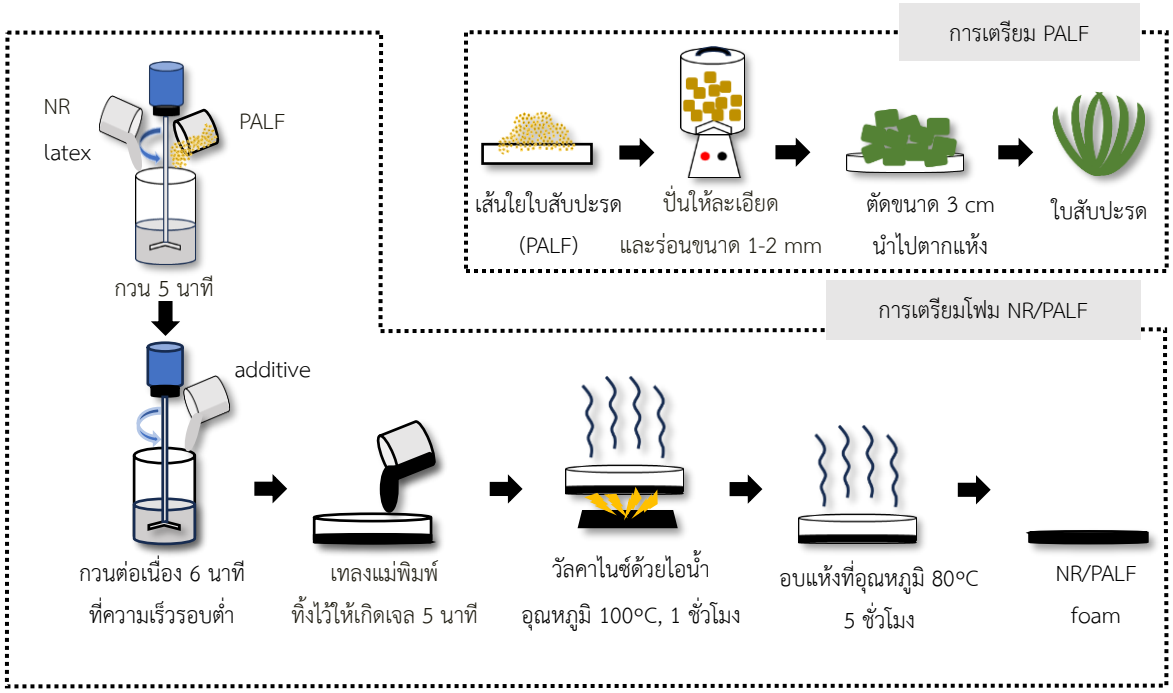
$$\rho = \frac{\mathbf{M}}{\mathbf{V}} \quad (1)$$

การทดสอบอัตราการดูดซับพลังงาน (Energy absorption ratio) นั้น ได้ใช้ชุดทดสอบ Ball rebound resilience อิงตามมาตรฐาน ASTM D3574 ทดสอบโดยการปล่อยตุ้มน้ำหนักให้ตกจากระดับความสูงที่กำหนด (h_1) ลงมากระทบบนผิวหน้าของชิ้นทดสอบ วัดและบันทึกค่าความสูงของการกระดอนกลับของลูกตุ้ม (h_2) หลังจากกระทบชิ้นทดสอบ สมการที่ใช้ในการคำนวณอัตราการดูดซับพลังงาน (E) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (2) - (3) ทำการทดสอบซ้ำจำนวน 3 ครั้ง ค่าอัตราการดูดซับพลังงานจะมีค่าระหว่าง 0 ถึง 1 โดยที่ 0 หมายถึง ไม่มีการดูดซับพลังงาน ลูกตุ้มกระดอนกลับเท่ากับความสูงเริ่มต้น และ 1 หมายถึง มีการดูดซับพลังงานทั้งหมด ลูกตุ้มไม่สามารถกระดอนกลับได้

$$E = 1 - \varepsilon^2 \tag{2}$$

โดยที่ ε คือ สัมประสิทธิ์การกระดอน (coefficient of restitution)

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{h_2}{h_1}} \tag{3}$$

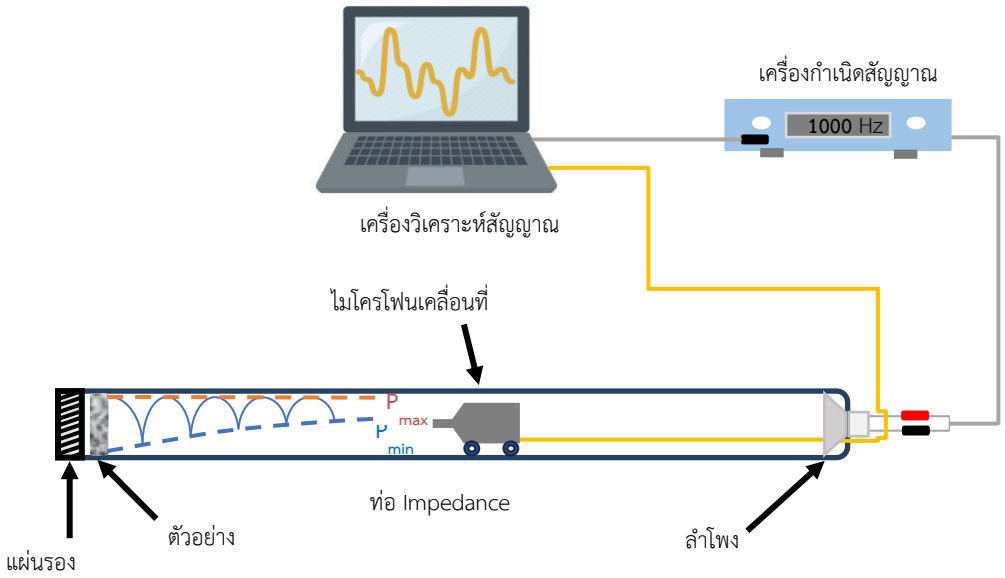


ภาพที่ 2 กระบวนการเตรียมแผ่นโฟมบุผนังจากยางธรรมชาติผสมเส้นใยใบสับปะรด

การทดสอบสมบัติทางเสียงด้วยวิธีการใช้ไมโครโฟนเดี่ยว (Single Microphone Method; SMM) เป็นวิธีการที่ใช้ไมโครโฟนเพียงตัวเดียวในการสร้างแบบจำลองการกระจายของแรงดันเสียง (sound pressure) ภายในท่อคลื่นนิ่ง วิธีนี้อ้างอิงสัญญาณที่วัดได้จากตำแหน่งต่าง ๆ สองตำแหน่งกลับไปยังแหล่งกำเนิดเสียง โดยไม่ต้องใช้ไมโครโฟนอ้างอิงในตำแหน่งอื่นของสนามคลื่นเสียง [17] การทดสอบด้วยวิธี SMM มีการเคลื่อนตำแหน่งไมโครโฟนระหว่างสองตำแหน่งที่เลือกไว้ จึงต้องระบุผลการวัดด้วยอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (Standing Wave Ratio; SWR)

ชุดทดสอบ SMM ออกแบบตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM C384-03 โดยชุดทดสอบ ประกอบด้วย ท่ออะคริลิคใสทรงกระบอกความยาว 2,200 มิลลิเมตร ความหนา 5 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 55 มิลลิเมตร ติดตั้งลำโพงขนาด 0.25 วัตต์ 8 โอห์ม ที่ปลายด้านหนึ่ง ชิ้นทดสอบติดตั้งที่ปลายด้านตรงข้ามกับลำโพงในแนวตั้งฉากกับทิศทางของคลื่นเสียงตก-

กระทบ เซนเซอร์วัดเสียง (Smart Q Sound Sensor, Data Harvest Product No. 3175) ช่วงการวัด 40 – 110 dBA ออกแบบให้เคลื่อนที่ได้ตามอัตราเร็วที่กำหนด โดยใช้มอเตอร์ควบคุมการเคลื่อนที่ และเครื่องกำเนิดสัญญาณ (function generator) ความถี่ตอบสนอง 100 - 5,000 Hz ทำหน้าที่สร้างสัญญาณเสียง ดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 ชุดทดสอบสมบัติทางเสียงด้วยวิธีการใช้ไมโครโฟนเดี่ยว

โดยเริ่มจากการเลื่อนหัววัดเสียงมาที่ตำแหน่งซ้ายมือ ป้อนเงื่อนไขเริ่มต้นที่ความถี่ 250 Hz เลื่อนเซนเซอร์วัดเสียงออกห่างจากชิ้นทดสอบด้วยอัตราเร็วคงที่ เพื่อวัดค่าระดับความดันเสียง (Sound Pressure Level; SPL) โดยบันทึกค่าระดับความดันเสียงสูงสุดตำแหน่งแรก (SPL_{max}, dBA) และระดับความดันเสียงต่ำสุดตำแหน่งแรก (SPL_{min}, dBA) การวัด SWR ในท่อคลื่นนิ่งโดยใช้เซนเซอร์เสียงที่ใช้หน่วย dBA และ A-weighting เป็นการปรับการวัดเสียงให้ตรงกับการรับรู้เสียงของมนุษย์ โดยลดผลกระทบจากเสียงรบกวน ช่วยให้การวัดมีความแม่นยำสูงและเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C384-03 ทำการทดสอบ 3 ซ้ำ และทดสอบที่ความถี่ 500, 1,000, 2,000 และ 4,000 Hz นำมาคำนวณค่าเฉลี่ยรากที่สองของความดันเสียงสูงสุดและต่ำสุดที่วัดได้ ($P_{rms,max}$ และ $P_{rms,min}$) จากนั้น คำนวณค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียง (Sound Absorption Coefficient, α) ตามมาตรฐาน ASTM C384-04 [18] ดังสมการที่ (3)

$$\alpha = 1 - \frac{(SWR-1)^2}{(SWR+1)^2} \tag{3}$$

โดยที่

$$SWR = \frac{P_{rms,max}}{P_{rms,min}}$$

$$P_{rms,max} = 10^{SPL_{max}/20}$$

และ

$$P_{rms,min} = 10^{SPL_{min}/20}$$

จากนั้น ทำการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การลดระดับเสียง (Noise Reduction Coefficient; NRC) โดยเป็นค่าซึ่งใช้ในการเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับเสียงของวัตถุต่างชนิดกัน โดยค่า NRC คือ ค่าเฉลี่ยเลขคณิตของสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียงที่ความถี่ 250, 500, 1,000, และ 2,000 Hz สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4)

$$\mathrm{NRC} = \frac{(\alpha_{250}+\alpha_{500}+\alpha_{1000}+\alpha_{2000})}{4} \quad (4)$$

ผลการวิจัย

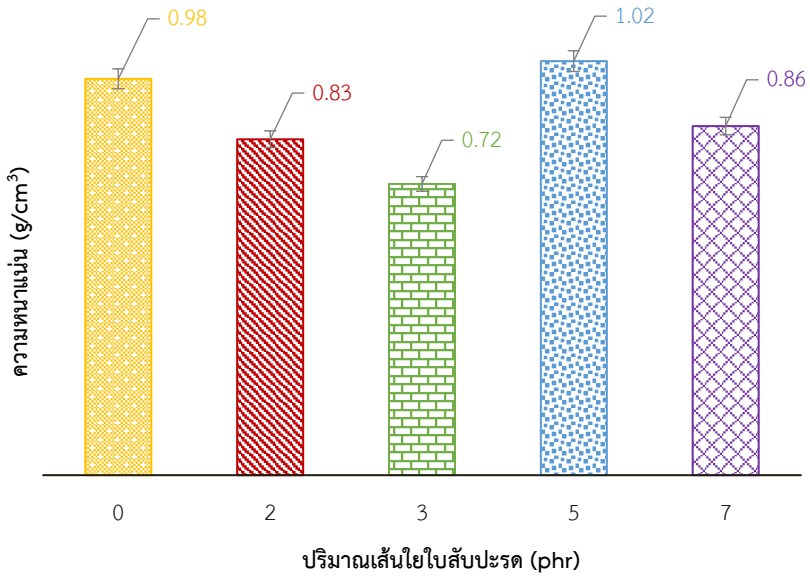
ในการวิจัยการปรับรูพรุน เพื่อการดูดซับเสียงจากแผ่นบุผนังยางธรรมชาติผสมเส้นใยใบสับปะรด ที่มีอัตราส่วนผสมของเส้นใยใบสับปะรดในปริมาณ 0, 2, 3, 5 และ 7 phr นั้น พิจารณาจากลักษณะทางกายภาพ ความหนาแน่นของแผ่นบุผนังยางธรรมชาติ การดูดซับพลังงาน สมบัติทางกล ค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียง และสัมประสิทธิ์การลดระดับเสียง

จากการศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการขึ้นรูปแผ่นโฟมบุผนังยางธรรมชาติผสมเส้นใยใบสับปะรด ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.5 เซนติเมตร จากภาพชิ้นทดสอบ ซึ่งถ่ายภาพด้วยเลนส์ Leica, RGB 40MP กำหนดระยะห่างระหว่างเลนส์และชิ้นทดสอบเท่ากัน โดยไม่ใช้กำลังขยาย พบว่า ลักษณะของแผ่นโฟมบุผนังยางธรรมชาติที่ไม่มีการเติมเส้นใยใบสับปะรด (0 phr) มีรูพรุนขนาดเล็ก ละเอียด และสม่ำเสมอ และโฟมมีลักษณะเป็นเซลล์ปิด ส่งผลให้ขึ้นรูปเป็นแผ่นโฟมบุผนังได้ง่าย เมื่อเพิ่มเส้นใยใบสับปะรดในปริมาณ 2 - 3 phr รูพรุนขยายขนาดใหญ่ขึ้น และในบางตำแหน่งรูพรุนขนาดเล็กเกิดการรวมตัวกันจนมีขนาดใหญ่ ที่ปริมาณ 3 phr รูพรุนมีขนาดใหญ่ขึ้นเล็กน้อย เมื่อเทียบกับ 2 phr แต่ยังคงสามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นโฟมบุผนังได้ เมื่อปริมาณเส้นใยสูงถึง 5 phr รูพรุนกว้างมากขึ้นอย่างชัดเจน และโฟมยางมีลักษณะแข็งขึ้น โดยเซลล์โฟมบางส่วนต่อถึงกันจนกลายเป็นเซลล์เปิด และที่ปริมาณ 7 phr พบว่า รูพรุนส่วนใหญ่ต่อถึงกันเป็นเซลล์เปิด และมีความแข็งมากขึ้น ทำให้เกิดการติดแม่พิมพ์บริเวณขอบด้านข้างเล็กน้อย การเพิ่มปริมาณสารตัวเติมส่งผลให้รูพรุนในเมทริกซ์ยางมีขนาดใหญ่ขึ้น เนื่องจากอนุภาคของสารตัวเติมอาจรบกวนการจัดเรียงตัวของโมเลกุลยาง และมีแนวโน้มรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อน เมื่อมีปริมาณมาก ทำให้เกิดช่องว่างขนาดใหญ่ในโครงสร้าง นอกจากนี้ สารตัวเติมยังอาจส่งผลต่อความหนืดของส่วนผสมและกระบวนการคงรูปของยาง ซึ่งมีผลต่อการเกิดและคงอยู่ของรูพรุน หากการยึดเกาะระหว่างสารตัวเติมกับเมทริกซ์ยางไม่ดีพอ อาจเกิดการแยกเฟสและช่องว่างขนาดใหญ่ ปัจจัยเหล่านี้ร่วมกันส่งผลให้เกิดรูพรุนขนาดใหญ่ขึ้นในเมทริกซ์ยาง เมื่อเพิ่มปริมาณสารตัวเติม ซึ่งสอดคล้องกับภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของพื้นที่หน้าตัดของโฟมยางธรรมชาติและโฟมยางธรรมชาติที่เสริมแรงด้วยเซลลูโลสจากใบสับปะรดในปริมาณต่าง ๆ [16] ดังนั้น อัตราส่วนที่เหมาะสมในการขึ้นรูปเป็นโฟมบุผนังสามารถผสมเส้นใยใบสับปะรดในยางธรรมชาติได้ในปริมาณ 0-5 phr ดังภาพที่ 4

ภาพที่ 4 ลักษณะแผ่นโฟมบุผนังยางธรรมชาติผสมเส้นใยใบสับปะรดในปริมาณ 0, 2, 3, 5 และ 7 phr (ซ้ายไปขวา)

จากผลการทดสอบความหนาแน่นของแผ่นโฟมบุผนังยางธรรมชาติผสมเส้นใยใบสับปะรด (PALF) พบว่า ปริมาณการเติม PALF มีผลต่อความหนาแน่นและลักษณะรูพรุนของวัสดุ ดังแสดงในภาพที่ 5 เมื่อไม่มีการเติม PALF (0 phr) วัสดุมีความหนาแน่นสูงที่ 0.98 $\pm$ 0.02 g/cm³ เนื่องจากลักษณะรูพรุนมีขนาดเล็กและกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ เมื่อเพิ่มปริมาณ

PALF เป็น 2-3 phr ความหนาแน่นของวัสดุลดลงเป็น 0.83 ± 0.02 g/cm³ และ 0.72 ± 0.01 g/cm³ ตามลำดับ สัมพันธ์กับการขยายขนาดของรูพรุน ทำให้ความหนาแน่นลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งอาจเกิดจากการรบกวนโครงสร้างของยางและการเพิ่มรูพรุน อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มปริมาณ PALF ในระดับสูงขึ้นเป็น 5 phr ความหนาแน่นของวัสดุกลับเพิ่มสูงขึ้นถึง 1.02 ± 0.03 g/cm³ ซึ่งอาจเป็นผลจากการเติมเต็มช่องว่าง หรือการจับตัวกันของ PALF ที่ทำให้เกิดความหนาแน่นสูงขึ้น สำหรับปริมาณ PALF ที่ 7 phr ความหนาแน่นลดลงเล็กน้อยเป็น 0.86 ± 0.02 g/cm³ บ่งชี้ถึงความไม่เสถียรของโครงสร้าง เมื่อมีปริมาณ PALF มากเกินไป จนเกิดการเกาะกลุ่มกันของเส้นใยทำให้วัสดุมีความแข็งมากขึ้น จากลักษณะของแผ่นโฟมในภาพที่ 4 เนื่องจากปริมาณเส้นใยมากเกินไป ทำให้เกิดการปิดกั้นช่องว่างของรูพรุน ซึ่งอาจส่งผลเสียต่อการดูดซับเสียง เนื่องจากลดพื้นที่สำหรับเสียงเข้าไปทำให้เกิดการสูญเสียพลังงาน

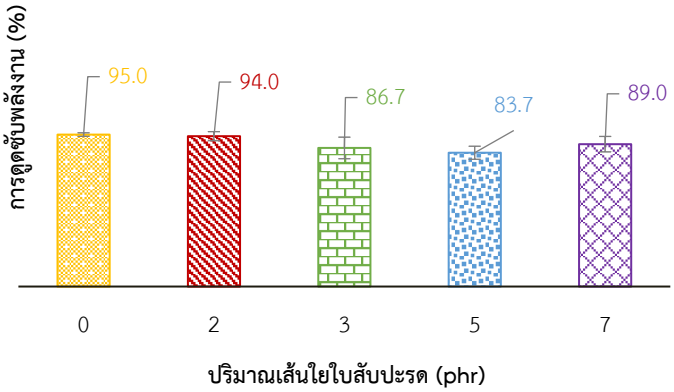


ภาพที่ 5 ความหนาแน่นของแผ่นโฟมบุผนังยางธรรมชาติผสมเส้นใยใบสับปะรดในปริมาณต่าง ๆ

จากการทดสอบการดูดซับพลังงานของแผ่นโฟมบุผนังยางธรรมชาติผสมเส้นใยใบสับปะรด (PALF) ในปริมาณต่าง ๆ แสดงผลดังภาพที่ 6 พบว่า มีค่าการดูดซับพลังงานลดลง เมื่อปริมาณเส้นใยใบสับปะรดเพิ่มขึ้น โดยชิ้นทดสอบที่ไม่มีเส้นใยใบสับปะรด แสดงการดูดซับพลังงานสูงสุดที่ 95.0 ± 1.1% ซึ่งสามารถอธิบายได้จากความหนาแน่นสูงและรูพรุนขนาดเล็กที่สามารถกระจายและดูดซับแรงกระแทกได้ดี แต่เมื่อเส้นใยใบสับปะรดเพิ่มขึ้นเป็น 2 phr และ 3 phr การดูดซับพลังงานยังคงสูงอยู่ที่ 94.0 ± 2.8 % และ 86.7 ± 6.8 % ตามลำดับ สะท้อนถึงความหนาแน่นที่ลดลง และรูพรุนที่ใหญ่ขึ้น ซึ่งช่วยในการป้องกันการกระแทก ค่าการดูดซับพลังงานต้องการค่าที่สูงที่สุด ดังนั้น เมื่อใส่ PALF 2-3 phr ค่าการดูดซับพลังงานลดลงเพียงเล็กน้อย ตามคุณสมบัติที่ต้องการ ในขณะที่ชิ้นทดสอบที่มีเส้นใย 5 phr และ 7 phr ค่าการดูดซับพลังงานลดลงเป็น 83.7 ± 4.1 % และ 89.0 ± 4.9 % เป็นผลมาจากความหนาแน่นที่เพิ่มขึ้น และการจัดเรียงตัวของเส้นใยที่ไม่ส่งเสริมการดูดซับแรงกระแทก ผลการทดสอบสะท้อนให้เห็นถึงความสำคัญของการทดสอบความสามารถของวัสดุในการดูดซับและกระจายพลังงานจากการกระแทกในแนวดิ่ง

จากภาพที่ 7 ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียง (α) กับความถี่ที่ความหนาต่าง ๆ สำหรับแผ่นโฟมบุผนังยางธรรมชาติผสมเส้นใยใบสับปะรด (PALF) ในอัตราส่วน 0, 2, 3, 5 และ 7 phr พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียงแตกต่างกัน เมื่อความถี่และความหนาของแผ่นโฟมเปลี่ยนแปลง โดยค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียงที่ความถี่ต่ำ

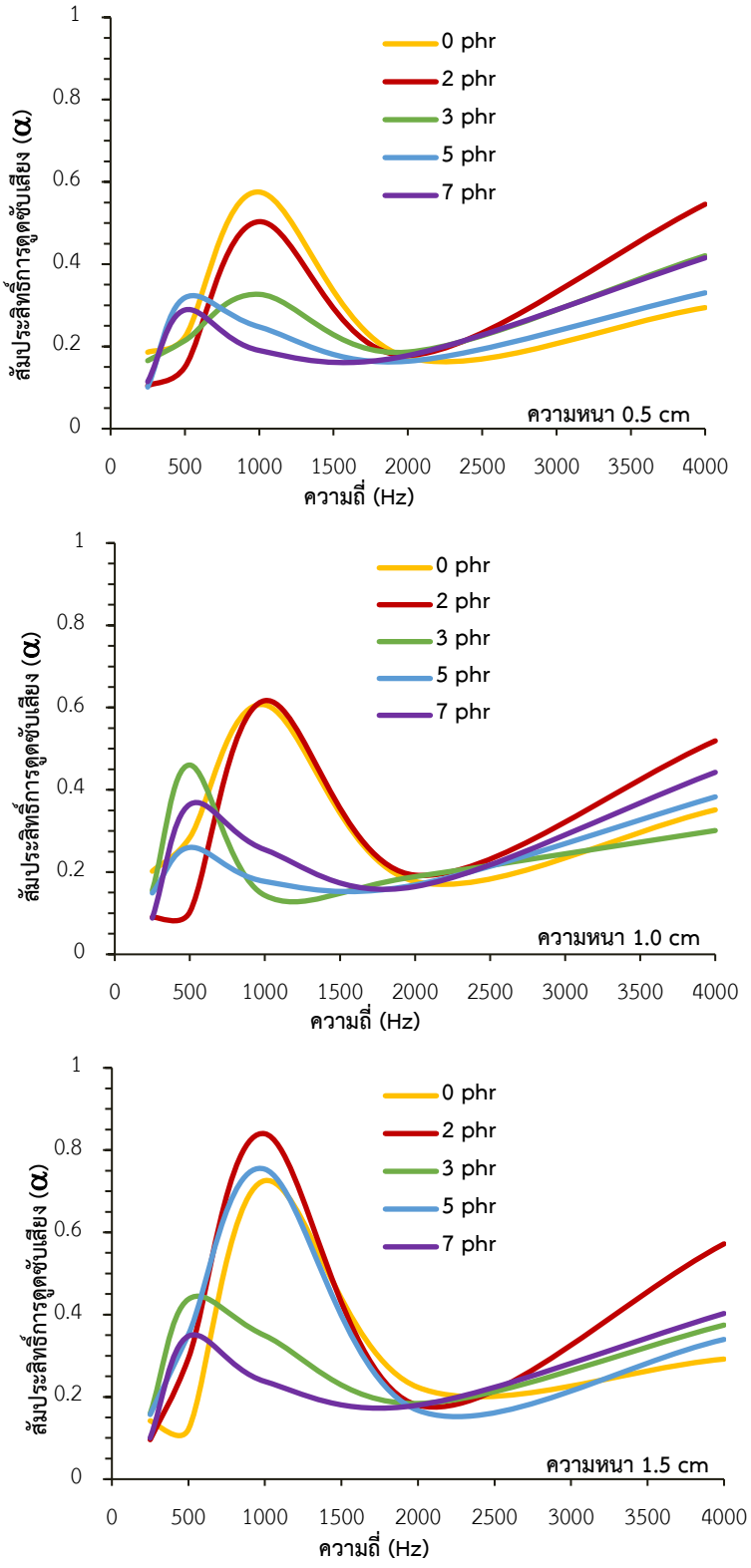
โดยทั่วไปมีค่าน้อยกว่า เมื่อเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียงที่ความถี่สูงกว่า โดยเมื่อพิจารณาความหนาของชิ้นทดสอบ 0.5 cm ดังภาพที่ 7 พบว่า ที่ความถี่ 1,000 Hz ชิ้นทดสอบที่มีปริมาณ PALF น้อย มีค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียงสูงกว่า ซึ่งสอดคล้องกับความถี่เรโซแนนซ์ของเนื้อยาง เมื่อเติม PALF ในปริมาณ 2 phr สามารถทำให้เกิดการกระจายตัวของเส้นใยที่ดีและโครงสร้างรูพรุนยังคงมีขนาดเล็กและสม่ำเสมอ สำหรับความถี่ 4,000 Hz แผ่นโฟมยางที่มีการเติม PALF แสดงค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียงที่สูงกว่าแผ่นโฟมยางที่ไม่เติมสารตัวเติม เนื่องจากความถี่นี้เป็นความถี่เรโซแนนซ์ของเส้นใยใบสับปะรดและผลที่เกิดขึ้นสอดคล้องกับรายงานวิจัยก่อนหน้านี้ [21]



ภาพที่ 6 การดูดซับพลังงานกับปริมาณเส้นใยใบสับปะรดในปริมาณต่าง ๆ

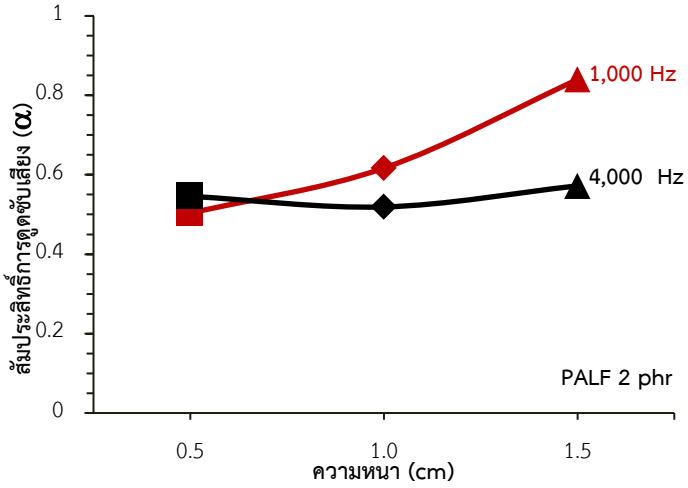
จากผลการวิเคราะห์ผลของสารตัวเติม พบว่า เมื่อปริมาณ PALF เพิ่มขึ้น แนวโน้มของการดูดซับเสียงที่ความถี่ต่ำเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยตัวแปร ดังนี้ รูพรุนขนาดใหญ่และการจัดเรียงที่เหมาะสมในแผ่นโฟม ส่งผลให้สามารถดูดซับคลื่นเสียงที่ความถี่ 500 Hz ได้ดีขึ้น และช่วงความถี่ของการดูดซับกว้าง โดยเมื่อเซลล์โฟมเปิดกว้างและลึก ได้สร้างเส้นทางที่ใหญ่กว่า สำหรับการเคลื่อนที่ของอากาศ ซึ่งช่วยในการกักเก็บพลังงานจากคลื่นเสียงที่ความถี่ต่ำ ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎี Helmholtz resonance เมื่อขนาดของเซลล์โฟมเล็กลง จุดสูงสุดของการดูดซับเลื่อนไปยังความถี่ต่ำลงและช่วงของการดูดซับแคบลง เนื่องจากมวลอากาศในช่องเปิดลดลง เกิดความต้านทานการไหลสถิตของวัสดุมากขึ้น [19]-[20] เมื่อเพิ่มความหนาของชิ้นทดสอบแผ่นโฟมยางที่มีปริมาณ PALF 2 phr จาก 0.5 cm เป็นสองเท่าและสามเท่า ค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียงมีค่าสูงขึ้น โดยเฉพาะความถี่ 1,000 Hz เพิ่มขึ้นจาก 0.50 $\pm$ 0.01 เป็น 0.84 $\pm$ 0.07 การที่ค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียงของชิ้นทดสอบ 5 phr ที่ความหนา 1.5 cm มีค่าสูงขึ้นอย่างมากที่ความถี่ 1,000 Hz นั้น ชิ้นทดสอบมีรูพรุนกว้างมากขึ้นอย่างชัดเจน เซลล์โฟมบางส่วนต่อถึงกันจนกลายเป็นเซลล์เปิด เมื่อความหนามากขึ้น ทำให้เกิดเป็นช่องอากาศคดเคี้ยว คลื่นเสียงเดินทางได้ระยะทางที่ไกลขึ้นภายในวัสดุ ค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียงสูงขึ้น เนื่องจากการสูญเสียพลังงานเสียงที่มากขึ้น ความหนาที่เพิ่มขึ้นของแผ่นโฟมทำให้มีพื้นที่ภายในเพิ่มขึ้นสำหรับการกระจายและลดพลังงานเสียง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของเส้นใยธรรมชาติที่เป็นทางเลือกที่ยั่งยืน และมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยกว่าวัสดุสังเคราะห์ [21] รวมถึงเพิ่มประสิทธิภาพในการกักเก็บและชะลอการส่งผ่านของพลังงานเสียง ส่งผลให้เสียงที่ความถี่ 500 Hz ถูกดูดซับได้มากขึ้น ลักษณะเส้นใย PALF ช่วยสร้างโครงสร้างรูพรุนภายในแผ่นโฟม ทำหน้าที่กระจายและลดแรงกระแทกของคลื่นเสียง รวมถึงขวางกั้นการผ่านของอากาศ ซึ่งช่วยลดความเร็วและพลังงานของคลื่นเสียง ส่งผลให้เกิดการดูดซับได้อย่างมี

ประสิทธิภาพ ดังนั้น การเพิ่มปริมาณ PALF และความหนาของแผ่นโฟมสับปะรดในอัตราส่วน 0, 2, 3, 5 และ 7 phr ที่ความหนาต่าง ๆ จึงมีศักยภาพในการปรับปรุงประสิทธิภาพการดูดซับ



ภาพที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียงกับความถี่ของแผ่นโฟมบุผนังยางธรรมชาติผสมเส้นใยใบสับปะรด

สำหรับสัมประสิทธิ์การลดระดับเสียง หรือ ความสามารถในการลดระดับเสียง (NRC) ของแผ่นบุผนังยางธรรมชาติผสมเส้นใยใบสับปะรด พบว่า แผ่นบุผนังยางธรรมชาติผสมเส้นใยใบสับปะรดในอัตราส่วน 3 phr และ 5 phr ความหนา 1.5 cm มีความสามารถในการลดระดับเสียงสูงที่สุดเท่ากับ 0.36 เมื่อเทียบกับแผ่นบุผนังยางธรรมชาติผสมเส้นใยใบสับปะรดอัตราส่วนอื่น ๆ ดังภาพที่ 9 และจัดอยู่ในประสิทธิภาพการดูดซับเสียงระดับปานกลาง นอกจากนี้ ยังได้เปรียบเทียบผลลัพธ์กับวัสดุอื่นจากการศึกษาก่อนหน้านี้ ได้แก่ แป้งข้าวโพดกับของเสียจากสิ่งทอ ในอัตราส่วน 75:25 ที่ความหนา 9.95 cm มีค่า NRC 0.28 [22] เส้นใยมะพร้าว ที่ความหนา 3.5 cm มีค่า NRC 0.515 [23] คอนกรีตจากขุยมะพร้าว ที่ความหนา 4.0 cm มีค่า NRC 0.285 [24] ขี้เลื่อย ที่ความหนา 3 cm มีค่า NRC 0.05 [25] และชานอ้อยกับถาดไข่ ที่ความหนา 5 cm มีค่า NRC 0.59) [26] จากการวิเคราะห์ข้อมูล พบว่า หากเพิ่มความหนาของแผ่นบุผนังโฟมยางธรรมชาติผสมเส้นใยใบสับปะรดอย่างน้อยสองเท่า ความสามารถในการลดระดับเสียงแนวโน้มที่ดีกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุชนิดอื่น ซึ่งเป็นข้อมูลในการพิจารณาเพื่อการนำไปปรับปรุงคุณภาพการดูดซับเสียงในอนาคต

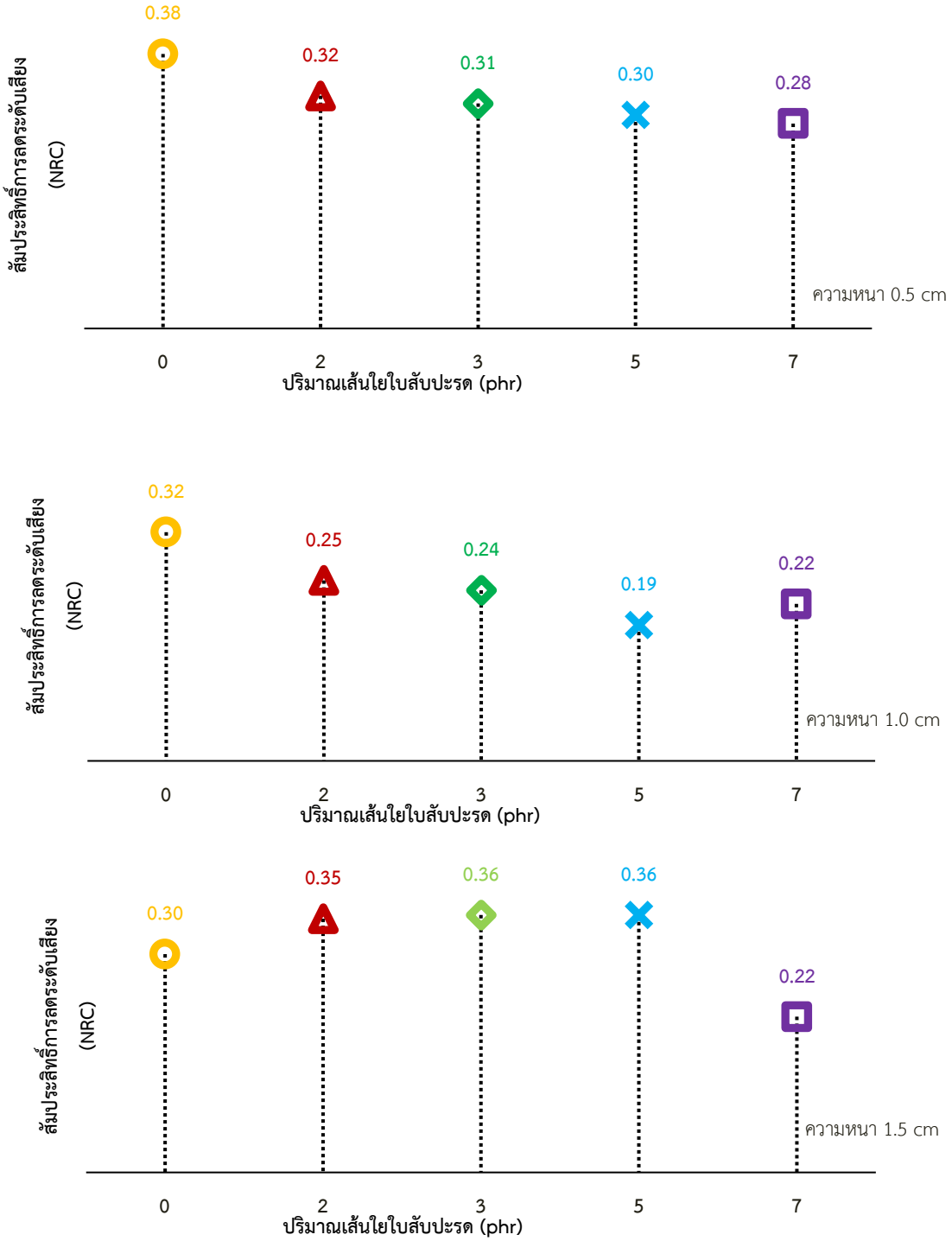


ภาพที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียงกับความหนาของแผ่นโฟมบุผนังยางธรรมชาติผสมเส้นใยใบสับปะรด 2 phr ที่ความถี่ 1,000 Hz และ 4,000 Hz

สรุปผลการวิจัย

การศึกษานี้ มุ่งเน้นการพัฒนาวัสดุดูดซับเสียงจากยางธรรมชาติผสมเส้นใยใบสับปะรด เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับเสียงและลดมลพิษทางเสียงในสิ่งแวดล้อม โดยการใช้วิธีการทางกายภาพและทางกลสำหรับการวิเคราะห์คุณสมบัติของแผ่นโฟมบุผนังที่มีส่วนผสมของเส้นใยใบสับปะรดในปริมาณต่าง ๆ ผลการวิจัยพบว่า การเพิ่มปริมาณ PALF ส่งผลให้ความหนาแน่นและคุณสมบัติในการดูดซับเสียงของวัสดุเปลี่ยนแปลงไปอย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะที่ความหนามากขึ้น ผลการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียง ระบุว่า ค่าดังกล่าวเพิ่มขึ้นที่ความถี่ต่ำ เมื่อเพิ่มปริมาณ PALF ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการกระจายและลดพลังงานเสียงที่ดีขึ้น นอกจากนี้ จากแบบจำลอง Johnson-Champoux-Allard (JCA) พบว่า ความเป็นรูพรุนของวัสดุแปรผันตรงกับค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียง กล่าวคือ เมื่อความหนาแน่นของวัสดุเพิ่มขึ้น ความเป็นรูพรุนจะลดลง ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียงลดลงตามลำดับ อย่างไรก็ตาม ยังมีปัจจัยอื่นที่มีผลต่อการดูดซับเสียงร่วมด้วย เช่น ขนาดและการกระจายตัวของรูพรุน ความคดเคี้ยวของเส้นทางการไหลของอากาศ และคุณสมบัติทางกลของวัสดุ ซึ่งต้องพิจารณาเพิ่มเติมในการวิเคราะห์คุณสมบัติการดูดซับเสียงของวัสดุพรุน สรุปว่า การเพิ่มปริมาณ PALF และความหนาของ

แผ่นโฟมยางธรรมชาติสามารถปรับปรุงประสิทธิภาพการดูดซับเสียงได้อย่างมีนัยสำคัญ และเป็นทางเลือกที่ยั่งยืนและส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยกว่าวัสดุสังเคราะห์



ภาพที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การลดระดับเสียงกับปริมาณของเส้นใยใบสับปะรดของชิ้นทดสอบที่มีความหนา 0.5 cm 1.0 cm และ 1.5 cm

เอกสารอ้างอิง

[1] กรมควบคุมมลพิษ, (2567, 25 มกราคม), สถานการณ์และการจัดการปัญหามลพิษทางอากาศและเสียงของประเทศไทย , [ออนไลน์]. จาก: https://www.pcd.go.th/wp-content/uploads/2022/11/pcdnew-2022-11-01_07-34-54_84 2781.pdf

[2] A. Mishra, S. Das, D. Singh and A. K. Maurya, “Effect of COVID-19 lockdown on noise pollution levels in an Indian city: A case study of Kanpur,” *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 28, no. 33, pp. 46007–46019, 2021.

[3] C. Asensio, I. Pavón and G. de Arcas, “Changes in noise levels in the city of Madrid during COVID-19 lockdown in 2020,” *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 148, no. 3, pp. 1748–1755, 2020.

[4] R. B. Hunashal and Y. B. Patil, “Assessment of noise pollution indices in the city of Kolhapur, India,” *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, vol. 37, pp. 448–457, 2012.

[5] S. Kallankandy and S. Deswal, “A comprehensive review of noise measurement, standards, assessment, geospatial mapping and public health,” *Ecological Questions*, vol. 34, no. 3, pp. 1–26, 2023.

[6] L. Cao, Q. Fu, Y. Si, B. Ding and J. Yu, “Porous materials for sound absorption,” *Composites Communications*, vol. 10, pp. 25–35, 2018.

[7] B. Huang, Q. Miao, X. Zuo, J. Yi, Y. Zhou and S. Chen, “Sound absorption performance and mechanism of aluminum foams with double main pore-porous cell wall structure,” *Advanced Engineering Materials*, vol. 25, no. 17, 2023.

[8] R. F. Madvari, M. J. Jafari, T. W. Hong, F. Laal and M. N. Sharak, “Effect of porosity, pore size, and pore-opening size optimized on the sound absorption coefficient of aluminum foam,” *Noise Control Engineering Journal*, vol. 71, no. 2, pp. 92–100, 2023.

[9] N. Rastegar, A. Ershad-Langroudi, H. Parsimehr and G. Moradi, “Sound-absorbing porous materials: A review on polyurethane-based foams,” *Iranian Polymer Journal*, vol. 31, no. 1, pp. 83–105, 2022.

[10] A. Putra, K. H. Or, Z. Selamat, M. Jailani, M. Nor, H. Hassan and I. Prasetiyo, “Sound absorption of extracted pineapple-leaf fibres,” *Applied Acoustics*, vol. 136, pp. 9-15, 2018.

[11] A. Putra, I. Prasetiyo and Z. Selamat, “Green acoustic absorber from pineapple leaf fibers,” *Green Energy and Technology*, pp. 143–165, 2020.

[12] T. N. F. T. Mat, N. S. Galip, K. Yahya, Z. Haron, N. Darus, I. H. Redzuan and A. S. F. A. Kassim, “Effect of pineapple leaf fibre composite material thickness on sound absorption performance,” *AIP Conference Proceedings*, vol. 2959, no. 1, 2023.

[13] T. N. F. T. Mat, K. Yahya, Z. Haron, N. Darus, I. H. Redzuan, N. S. Galip, A. S. F. A. Kassim and Z. Ibrahim, “Acoustic performance of pineapple leaf fibres bonded with natural rubber latex as a sound absorber,” *AIP Conference Proceedings*, vol. 2959, no. 1, 2023.

[14] E. W. Gaba, B. O. Asimeng, E. E. Kaufmann, S. K. Katu, E. J. Foster and E. K. Tiburu, “Mechanical and structural characterization of pineapple leaf fiber,” *Fibers*, vol. 9, no. 51, 2021.

[15] A. Saha, S. Kumar and A. Kumar, "Influence of pineapple leaf particulate on mechanical, thermal and biodegradation characteristics of pineapple leaf fiber reinforced polymer composite," *Journal of Polymer Research*, vol. 28, no. 2, 2021.

[16] S. Pinrat, P. Dittanet, A. Seubsai and P. Prapainainar, "Fabrication of natural rubber latex foam composite filled with pineapple-leaf cellulose fibres," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 2175, no. 1, 2022.

[17] M. G. Jones and P. E. Stiede, "Comparison of methods for determining specific acoustic impedance," *The Journal of the Acoustical Society of America,* vol. 101, no. 5, pp. 2694–2704, 1997.

[18] D. A. Russell, *Absorption Coefficients and Impedance*. Flint, Michigan: Kettering University, 2007.

[19] X. Liu, M. Liu and F. Xin, "Sound absorption of a perforated panel backed with perforated porous material: Energy dissipation of Helmholtz resonator cavity," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 185, pp. 109762, 2023.

[20] Z. Mei, H. Yang, Y. Ding, Y. Lyu, X. Cheng and J. Yang, "Ultra-broadband sound absorption via a parallel composite structure consisting of perforated panel resonators with tube bundles and porous material," *Applied Acoustics*, vol. 222, pp. 110071, 2024.

[21] T. Yang, L. Hu, X. Xiong, M. Petrů, M. T. Noman, R. Mishra and J. Militký, "Sound absorption properties of natural fibers: A review," *Sustainability*, vol. 12, pp. 8477, 2020.

[22] A. V. Balan and N. Shivasankaran, "Noise control using waste materials reinforced composites," *London Journal of Research in Science: Natural and Formal*, vol. 19, no. 2, pp. 47-54, 2019.

[23] F. Asdrubali, "Survey on the acoustical properties of new sustainable materials for noise control," in *Proceedings of the Euronoise 2006 Conference*, Tampere. 2006.

[24] I. Oancea, C. Bujoreanu, M. Budescu, M. Benchea and C. M. Grădinaru, "Considerations on sound absorption coefficient of sustainable concrete with different waste replacements," *Journal of Cleaner Production*, vol. 203, pp. 301–312, 2018.

[25] T. N. Izhar, L. M. Deraman, W. N. Ibrahim and N. A. Lutpi, "Investigation of noise reduction coefficient of organic material as indoor noise reduction panel," *Materials Science Forum*, vol. 803, pp. 317–324, 2015.

[26] M. Kaamin, N. F. Zaid, M. E. Daud, R. A. Rahman and H. Mubarak, "Analysis on absorption sound acoustic panels from egg tray with corn husk and sugar cane," *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*, vol. 8, no. 9S3, pp. 1426–1431, 2019.