



การใช้ก๊าซอาร์กอนเพื่อเพิ่มการหน่วงการติดไฟของโฟมยางธรรมชาติ

ภูริณัฐ ชาดะเวที และ มัทนา ชังคมโนน*

สาขาวิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

รุ่งโรจน์ เกาะคุ

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

* ผู้สนับสนุนประสานงาน โทรศัพท์ 09 1849 0677 อีเมล: kmatthana@eng.psu.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2023.07.020

รับเมื่อ 1 กรกฎาคม 2564 แก้ไขเมื่อ 25 สิงหาคม 2564 ตอบรับเมื่อ 2 กันยายน 2564 เผยแพร่ออนไลน์ 27 กรกฎาคม 2566

© 2023 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

โฟมยางธรรมชาติสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ได้หลากหลาย เนื่องจากมีข้อดีหลายประการ เช่น กันกระแทกได้ดี เป็นฉนวนกันความร้อน และดูดซับเสียงได้ดี เป็นต้น แต่โฟมยางธรรมชาติยังมีข้อจำกัด คือ เป็นวัสดุที่ติดไฟได้ง่ายและลุกลามไฟได้อย่างรวดเร็ว งานวิจัยนี้จึงนำเสนอวิธีการปรับปรุงข้อจำกัดดังกล่าวของโฟมยางธรรมชาติ โดยการใช้ฟองอากาศ (AF) และฟองก๊าซอาร์กอน (ArF) ขนาดเล็ก ที่อัตราการไหลของก๊าซเข้าคงที่ 100 มิลลิลิตรต่อนาที โดยกระบวนการบับบลิ้ง ลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคและสมบัติการหน่วงไฟของโฟมยางที่ผลิตได้ถูกศึกษาโดยเปรียบเทียบกับหมอนยางพาราที่วางขายตามท้องตลาดซึ่งผลิตจากกระบวนการดันลอย (DF) โดยการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และเครื่องทดสอบการลามไฟ (Flammability Tester; UL94) ตามลำดับ ผลการวิจัยพบว่า ArF หน่วงการลุกลามไฟได้ดีที่สุด และดีกว่า DF ถึง 2.5 เท่า ทั้งนี้เนื่องจากโครงสร้างทางจุลภาคที่แตกต่างกัน และผลจากการมีก๊าซอาร์กอนในโฟมยาง นอกจากนี้โฟมยางที่ผลิตจากกระบวนการบับบลิ้งมีความหนาแน่นมากกว่าโฟมยางที่ผลิตจากกระบวนการดันลอย

คำสำคัญ: ยางธรรมชาติ โฟมยาง บับเบิลโฟม สารหน่วงไฟ ฟองก๊าซอาร์กอน



Enhancement of Flame Retardancy of Natural Rubber (NR) Latex Foam by Using Argon Gas

Purinut Chatawetee and Matthana Khangkhamano*

Department of Mining and Materials Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkhla University, Songkla, Thailand
Rungrote Kokoo

Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangkok, Thailand

* Corresponding Author, Tel. 09 1849 0677, E-mail: kmatthana@eng.psu.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2023.07.020

Received 1 July 2021; Revised 25 August 2021; Accepted 2 September 2021; Published online: 27 July 2023

© 2023 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

Natural rubber (NR) latex foam can be applied to several products due to its many advantages, such as cushioning performance, and thermal and acoustic insulation, but it is flammable. This research presented a strategy to improve flame retardancy of the NR latex foam. NR latex foams were fabricated using microbubbles of air (AF) and argon (ArF) at a constant inlet gas flow rate of 100 mL/min. Microstructure and flame retardancy of the bubbled foams were investigated in comparison with that of the commercial Dunlop foam (DF), using SEM and UL-94, respectively. Interestingly, the presence of argon and a microstructure of fine cell size with flawless interconnected network of the ArF led to an enhanced flame retardancy of the NR latex foam. Besides, the foams produced by bubbling process appeared to have higher density than the commercial DF.

Keywords: Natural Rubber, Latex Foam, Bubbled Foam, Flame Retardancy, Argon Bubbles

Please cite this article as: P. Chatawetee, M. Khangkhamano, and R. Kokoo, "Enhancement of flame retardancy of natural rubber (NR) latex foam by using argon gas," *The Journal of KMUTNB*, vol. 33, no. 4, pp. 1–11, ID. 234-025200, Jul.–Sep. 2023 (in Thai).

1. บทนำ

โฟมยางธรรมชาติ เป็นผลิตภัณฑ์จากน้ำยางชั้น มีลักษณะภายในเป็นรูพรุน โดยอาศัยการให้น้ำยางเกิดเป็นฟอง [1] ซึ่งในปัจจุบันโฟมยางธรรมชาติได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในชีวิตประจำวันมากขึ้น โดยการนำไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น หมอน เบาะ โซฟา เฟอร์นิเจอร์ และฉนวนบุผนัง จากโฟมยางธรรมชาติ เป็นต้น ทั้งนี้เนื่องจากโฟมยางธรรมชาติมีความยืดหยุ่น ความเหนียว ความนุ่ม และทนต่อแรงกระแทก [2] ถึงแม้ข้อดีจากการนำยางธรรมชาติมาใช้งานเป็นที่น่าสนใจ แต่การใช้งานโฟมยางธรรมชาติในอาคารบ้านเรือน สำนักงาน รวมถึงสถานที่ที่มีความเสี่ยงต่อความปลอดภัยเมื่อเกิดอัคคีภัยยังไม่แพร่หลายเท่าที่ควร เพราะยางธรรมชาติมีสมบัติคือ ติดไฟง่ายและลุกลามไฟอย่างรวดเร็ว เนื่องจากมีโครงสร้างเป็นพันธะไฮโดรคาร์บอน ดังนั้นเพื่อเพิ่มพื้นที่การใช้งานโฟมยางธรรมชาติ สมบัติการติดไฟง่ายควรได้รับการปรับปรุง

ซึ่งการที่จะชะลอการลุกลามไฟของยางธรรมชาติสามารถทำได้โดยการเติมสารหน่วงไฟลงไปในเนื้อยางก่อนการขึ้นรูป สารหน่วงไฟเหล่านี้มีหลายประเภทได้แก่ สารหน่วงไฟประเภทโลหะออกไซด์ สารหน่วงไฟประเภทฮาโลเจน สารหน่วงไฟประเภทฟอสฟอรัส และสารหน่วงไฟประเภทอินทรีย์ เป็นต้น [3], [4] ซึ่งการเติมสารหน่วงไฟแต่ละตัวมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกัน เช่น การเติมสารหน่วงไฟจำพวกอินทรีย์ ได้แก่ แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์และอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ มีข้อดีคือ ไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม แต่ประสิทธิภาพการหน่วงไฟต่ำ [3] ในขณะที่สารหน่วงไฟประเภทฮาโลเจน เช่น แอนติโมนีไดรอกไซด์ สารหน่วงไฟโบรมีน มีประสิทธิภาพในการยับยั้งการลุกลามไฟได้ดี แต่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากเกิดการปลดปล่อยสารพิษ เช่น สารไดออกซินและฟิวแรน ในระหว่างการเผาไหม้ [5]

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ที่จะชะลอการลุกลามไฟของโฟมยางธรรมชาติ โดยมุ่งเน้นความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เพื่อให้ผู้ใช้งานมีความปลอดภัยมากขึ้นเมื่อโฟมยางธรรมชาติเกิดการติดไฟ โดยมีวัตถุประสงค์ที่จะบรรจุก๊าซเฉื่อยอาร์กอนในโฟมยางธรรมชาติ เพื่อช่วยหน่วงการ

ลุกลามไฟของโฟมยางในขณะเผาไหม้ เนื่องจากก๊าซอาร์กอนไม่เป็นพิษและไม่สลายตัวเมื่อเกิดเพลิงไหม้ นอกจากนี้ก๊าซอาร์กอนยังมีความเสถียรแม้จะอยู่ในสภาพแวดล้อมที่มีอุณหภูมิสูง [6] โดยวิธีการที่จะบรรจุก๊าซเฉื่อยในโฟมยางนั้นงานวิจัยนี้เลือกใช้วิธีบับบลิง (Bubbling technique) ซึ่ง Sirikulchaikij และคณะ [7] เคยได้รายงานผลการทดลองการขึ้นรูปโฟมยางธรรมชาติโดยใช้อากาศมาแล้ว ซึ่งเป็นวิธีทางเลือกที่ทำได้ง่ายและไม่ซับซ้อนหรืออุปกรณ์ที่ซับซ้อนในการขึ้นรูปโฟมยาง เพียงแค่อาศัยแผ่นกรอง (Diffuser) ในการปล่อยอากาศหรือก๊าซเข้าสู่รูน้ำยางคอมพาวด์เพื่อทำให้เกิดฟอง ซึ่งเป็นวิธีที่น่าสนใจสำหรับการบรรจุก๊าซที่ต้องการในโฟมยางได้ แตกต่างจากกระบวนการดันลอย (Dunlop process) (เป็นวิธีที่นิยมใช้ขึ้นรูปโฟมยางในปัจจุบัน) ซึ่งต้องอาศัยการปั่นหรือการกวนน้ำยางให้เกิดฟองอากาศ [1] ซึ่งมีความสะดวกน้อยกว่าในการที่จะบรรจุก๊าซอาร์กอนในชิ้นงานโฟมยาง

โดยกระบวนการบับบลิง เป็นกระบวนการอย่างง่ายที่นำมาใช้ในขั้นตอนการทำโฟม (Foaming) ซึ่งอาศัยการปล่อยก๊าซผ่านแผ่นกรองเข้าสู่รูน้ำยางโดยตรง ทำให้เกิดฟองก๊าซจำนวนมากอยู่ภายใน ซึ่งวิธีนี้นิยมนำไปประยุกต์ใช้ในงานทางด้านบำบัดน้ำเสีย งานทางการแพทย์ และการแยกของแข็งออกจากของเหลว เป็นต้น [8]–[11] ในงานวิจัยนี้กระบวนการบับบลิงถูกใช้ในการสร้างฟองก๊าซอาร์กอนเพื่อผลิตโฟมยางธรรมชาติ ซึ่งการใช้เทคนิคนี้ในการผลิตโฟมยางนอกจากจะช่วยให้บรรจุก๊าซอาร์กอนในโฟมยางได้อย่างง่ายยังช่วยให้ได้โฟมยางที่เซลล์โฟมมีลักษณะค่อนข้างกลมกระจายตัวสม่ำเสมอและเชื่อมต่อกันอย่างต่อเนื่องทั่วทั้งชิ้นงาน [7] ซึ่งจะช่วยในการควบคุมสมบัติต่างๆ ของโฟมยาง เช่น ความนุ่ม และความหนาแน่น ให้มีความสม่ำเสมอทั่วทั้งชิ้นงานได้อีกด้วย

ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จะศึกษาความสามารถในการลุกลามไฟและสมบัติทางกายภาพของโฟมยางธรรมชาติที่ผลิตจากฟองก๊าซอาร์กอนเปรียบเทียบกับโฟมยางธรรมชาติที่ผลิตจากฟองอากาศและหมอนยางพาราธรรมชาติที่วางขายตามท้องตลาด

2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

2.1 สารเคมี

น้ำยางชั้นชนิดแอมโมเนียสูง (HA Latex) จัดซื้อจากบริษัท ผลิตอุตสาหกรรมน้ำยางชั้น จำกัด ประเทศไทย โพแทสเซียมโอเลต (Potassium Oleate) กำมะถัน (Sulfur; S) ซิงค์ไดเอทิลไดโธโอคาร์บาเมต (Zinc Diethyldithiocarbamate; ZDEC), ซิงค์เมอร์แคปโตเบนโซไทอาโซล (Zinc 2-mercaptobenzothiazole; ZMBT) และวิงสเตย์แอล (WINGSTAY L) จัดซื้อจากบริษัท ลักกี้ไฟร์ จำกัด ซิงค์ออกไซด์ (Zinc Oxide; ZnO) ไดฟีนิลกวานิดีน (Diphenyl Guanidine; DPG) โซเดียมซิลิโคฟลูออไรด์ (Sodium Silicofluoride; SSF) และหมอนยางพารา จัดซื้อจากสหกรณ์กองทุนสวนยางบ้านหนองครก จำกัด

2.2 อุปกรณ์

ปั๊มลมโรตารี 50 ลิตร 3 แรงม้า ยี่ห้อ PUMA รุ่น XM-2550 ก๊าซอาร์กอนความบริสุทธิ์ 99 เปอร์เซ็นต์ แม่พิมพ์อะลูมิเนียมขนาด 1 ปอนด์ บับเบิลคอลัมน์ ยี่ห้อ Robu ปริมาตร 1000 มิลลิลิตร ขนาดรูพรุน (P5) 1–1.6 ไมครอน เครื่องชั่งดิจิตอลทศนิยม 2 ตำแหน่ง รุ่น DYB-300 ยี่ห้อ E-Scale เครื่องวัดอัตราการไหลของก๊าซ รุ่น FBC ยี่ห้อ NEW-FLOW เครื่องตีฟอง รุ่น HOM-150123 ยี่ห้อ HOMEMATE และตู้อบแห้งลมร้อน (Drying ovens) รุ่น SLW 240 ยี่ห้อ POL-EKO APARATURA

2.3 การขึ้นรูปโฟมยางธรรมชาติ

อัตราส่วนสารเคมีที่ใช้ในการขึ้นรูปโฟมยางแต่ละชิ้นงานแสดงดังตารางที่ 1 และสัญลักษณ์ของชิ้นงานตัวอย่างโฟมยางแสดงดังตารางที่ 2 ซึ่งกระบวนการผลิตโฟมยางธรรมชาติโดยกระบวนการบับลิงมีขั้นตอนดังนี้

2.3.1 เริ่มจากการนำน้ำยางชั้นมาผสมกับโพแทสเซียมโอเลต กำมะถัน ซิงค์ไดเอทิลไดโธโอคาร์บาเมต ซิงค์เมอร์แคปโตเบนโซไทอาโซล และวิงสเตย์แอล

2.3.2 นำน้ำยางคอมพาวด์ (Latex Compound) ที่ได้บรรจุลงในบับเบิลคอลัมน์ ดังรูปที่ 1 โดยกำหนดให้อัตราการไหล

เข้าของอากาศและก๊าซอาร์กอนคงที่ ที่ 100 มิลลิลิตรต่อนาที เมื่อก๊าซเข้าที่ใช้ในการขึ้นรูปไหลผ่านแผ่นกรอง (Diffuser) ที่มีขนาดรูพรุน 1–1.6 ไมครอน เข้าสู่ถังน้ำยางคอมพาวด์ที่บรรจุในบับเบิลคอลัมน์ (Bubble Column) และปล่อยให้ขยายตัวจนเต็มบับเบิลคอลัมน์โดยใช้เวลา 8 นาที (Foaming) ซึ่งบับเบิลคอลัมน์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 124 มิลลิเมตร และมีความสูง 115 มิลลิเมตร

2.3.3 เทฟองน้ำยางที่ได้ลงในภาชนะกวน เติมซึ่งค็อกไซด์และไดฟีนิลกวานิดีนลงไป กวนด้วยความเร็วรอบต่ำเป็นระยะเวลา 1 นาที

2.3.4 เติมโซเดียมซิลิโคฟลูออไรด์ แล้วกวนต่ออีก 15 วินาที (Gelling)

2.3.5 นำฟองน้ำยางที่ได้บรรจุลงในแม่พิมพ์ ทิ้งไว้ให้ฟองน้ำยางเกิดการเจลในแม่พิมพ์

2.3.6 หลังจากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง 30 นาที (Curing) ดังรูปที่ 1

ตารางที่ 1 อัตราส่วนสารเคมีที่ใช้ในการขึ้นรูปโฟมยางธรรมชาติ

สารเคมี	น้ำหนัก	
	แห้ง (phr)	เปียก (g)
60% HA latex	100	166.67
10% Potassium Oleate	1.5	15
50% Sulfur	2	4
50% ZDEC	2	4
50% ZMBT	2	4
50% Wingstay L	2	4
50% ZnO	5	10
33% DPG	1.4	4.24
12.5% SSF	0.25	2

ตารางที่ 2 สัญลักษณ์ของชิ้นงานตัวอย่างโฟมยาง

ตัวอย่าง	สัญลักษณ์
หมอนโฟมยางธรรมชาติ	DF
โฟมยางจากฟองอากาศ	AF
โฟมยางจากฟองก๊าซอาร์กอน	ArF



รูปที่ 1 แผนภาพแสดงขั้นตอนการขึ้นรูปโฟมยาง

2.4 การวิเคราะห์

2.4.1 ลักษณะทางสัณฐานวิทยา

ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของโฟมยางธรรมชาติตรวจสอบโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) ยี่ห้อ FEI® รุ่น Quanta 400 ที่แรงดันไฟฟ้า 20 กิโลโวลต์ ซึ่งการเตรียมตัวอย่างขึ้นงานเพื่อการตรวจสอบ เริ่มจากการเตรียมขึ้นงานโฟมยางธรรมชาติขนาด $0.5 \times 1 \times 2$ ลูกบาศก์เซนติเมตร แล้วนำไปติดกับแท่นวางขึ้นงานด้วยเทปคาร์บอน ก่อนจะ

นำเข้าสู่เครื่อง SEM

การวิเคราะห์การกระจายของขนาดเซลล์โฟม ทำได้โดยการนำภาพ SEM มาหาขนาดเซลล์โฟมเฉลี่ย จากจำนวนเซลล์โฟมอย่างน้อย 50 เซลล์ โดยใช้ ImageJ Software

2.4.2 การหาค่าความหนาแน่น

การหาค่าความหนาแน่นของขึ้นงานโฟมยาง ตามมาตรฐาน ASTM D 3574-95 ทำได้โดยการเตรียมขึ้นงานโฟมยางให้มีขนาด $2.0 \times 2.0 \times 2.0$ ลูกบาศก์เซนติเมตร หลังจากนั้นนำขึ้นงานที่เตรียมไว้ไปชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งและมีสูตรคำนวณ ดังสมการที่ (1)

$$\rho_{foam} = \frac{M}{V} \quad (1)$$

ซึ่ง ρ_{foam} คือ ความหนาแน่นของขึ้นงานทดสอบ (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)

M คือ น้ำหนักของขึ้นงานทดสอบ (กรัม) และ

V คือ ปริมาตรของขึ้นงานทดสอบ (ลูกบาศก์เซนติเมตร) และการหาจำนวนเซลล์ของโฟมยางมีสูตรคำนวณ ดังสมการที่ (2) [12]

$$N = \frac{6}{\pi d^3} \left(\frac{\rho_{rubber}}{\rho_{foam}} - 1 \right) \quad (2)$$

ซึ่ง N คือ จำนวนเซลล์ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร (เซลล์ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)

ρ_{rubber} คือ ความหนาแน่นของยาง (1.09 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)

ρ_{foam} คือ ความหนาแน่นของโฟมยาง (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)

2.4.3 การห่อัฏการลุกลามไฟ

การห่อัฏการลุกลามไฟของโฟมยาง ตามมาตรฐาน ASTM D4986 หรือ ISO/DIS 9772.3 โดยทดสอบอฏการลุกลามไฟแบบแนวนอน (Horizontal Burning Foamed Material Test) ด้วยเครื่องทดสอบการลามไฟ (FTT UL-94, United Kingdom) เริ่มจากการเตรียมขึ้นงานโฟมยางให้มีขนาด $150 \times 50 \times 10$ ลูกบาศก์มิลลิเมตร และเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 23 ± 2 องศาเซลเซียส ที่ความชื้นสัมพัทธ์ $50 \pm 5\%RH$

เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ก่อนนำไปทดสอบอัตราการลุกลามไฟ และมีสูตรคำนวณ ดังสมการที่ (3)

$$V = \frac{60L}{t} \quad (3)$$

ซึ่ง V คือ อัตราการเผาไหม้ของชิ้นงาน (มิลลิเมตรต่อนาที)
 L คือ ความยาวของชิ้นงานที่ถูกเผาไหม้ (มิลลิเมตร)
 t คือ เวลาที่ชิ้นงานถูกเผาไหม้ที่ระยะ 25–125 มิลลิเมตร (วินาที)

2.4.4 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน

การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเครื่องดีพีเพอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential Scanning Calorimetry; DSC) รุ่น DSC7 ยี่ห้อ Perkin Elmer, USA เพื่อวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของตัวอย่างเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นหรือลดลงภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนที่ควบคุม ซึ่งตัวอย่างที่ผลิตได้จะได้รับความร้อนจากอุณหภูมิ 25–400 องศาเซลเซียส ที่อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที โดยน้ำหนักตัวอย่างที่ใช้ทดสอบระหว่าง 5–6.5 มิลลิกรัม

2.4.5 การหาหมู่ฟังก์ชัน

การหาหมู่ฟังก์ชันโดยใช้เทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (Fourier transform Infrared Spectroscopy; FTIR) โดยใช้โหมดเอทีอาร์ (Attenuated Total Reflectance; ATR) รุ่น Vertex 70 ยี่ห้อ Bruker ความยาวคลื่นที่ใช้อุณหภูมิในช่วง 4000–400 เซนติเมตร⁻¹

3. ผลการทดลอง

จากการทดลองขึ้นรูปโฟมยางด้วยกระบวนการบับลิงโดยใช้อากาศและอาร์กอน ที่อัตราการไหลของก๊าซขาเข้าคงที่ 100 มิลลิลิตรต่อนาที ซึ่งมีผลการทดลองและการวิเคราะห์ดังนี้

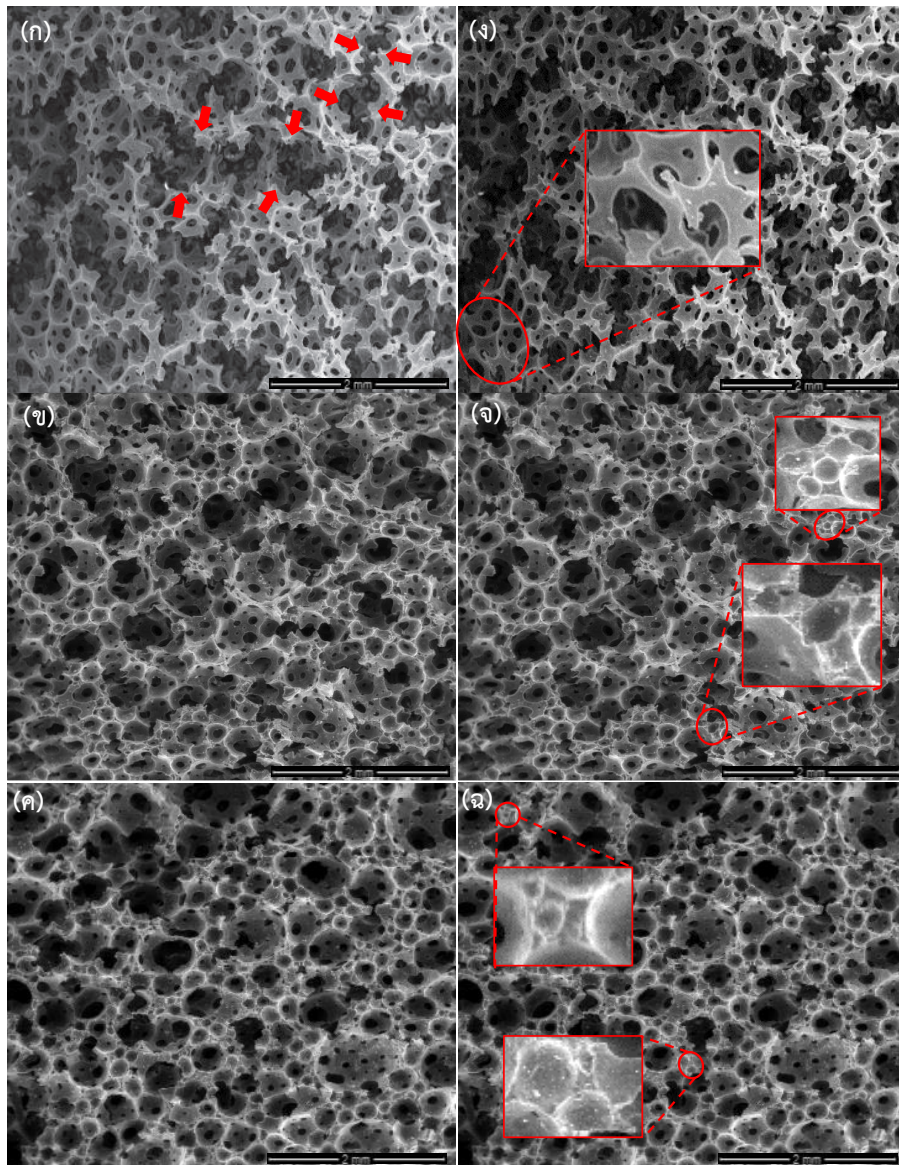
3.1 ลักษณะทางสัณฐานวิทยา

รูปที่ 2 แสดงภาพถ่ายภาคตัดขวางของชิ้นงาน DF AF และ ArF จะเห็นได้ว่าชิ้นงานทั้งสามประกอบด้วยรูพรุนจำนวนมากกระจายอยู่ทั่วทั้งชิ้นงาน และเมื่อทำการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานทั้งสามด้วย SEM (รูปที่ 3)

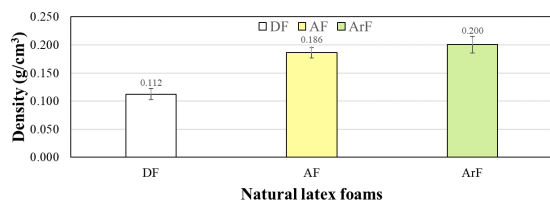
จะเห็นถึงโครงสร้างรูพรุน ลักษณะรูปร่างและขนาดของเซลล์โฟม และการเชื่อมต่อของเซลล์โฟมที่ชัดเจนยิ่งขึ้น ซึ่งจะพบว่าลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานโฟมยางขึ้นอยู่กับการบับลิง กล่าวคือเซลล์โฟมของ DF ซึ่งผลิตจากการบับลิงด้วยอากาศโดยอาศัยการปั่นด้วยความเร็วรอบสูงเพื่อให้เกิดฟอง พบการฉีกขาดของเซลล์โฟมจำนวนมากอย่างต่อเนื่องทั่วทั้งชิ้นงาน (สังเกตได้จากลูกศรสีแดงในรูปที่ 3(ก) นอกจากนี้ยังพบว่า เซลล์โฟมที่ได้จาก DF เป็นเซลล์เปิดทั้งหมดไม่พบเซลล์ปิดในโครงสร้าง ในขณะที่ AF และ ArF ซึ่งผลิตจากการบับลิงด้วยอาร์กอน โดยที่อัตราการไหลขาเข้าเท่ากัน คือ 100 มิลลิลิตรต่อนาที ซึ่งใช้ฟองอากาศและอาร์กอนตามลำดับ เซลล์โฟมที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยกระบวนการนี้จะมีลักษณะค่อนข้างกลม และการเชื่อมต่อของเซลล์โฟมที่ค่อนข้างสมบูรณ์ต่อเนื่องทั้งชิ้นงาน (รูปที่ 3(ข) และ 3(ค) ตามลำดับ) นอกจากนี้ยังพบโครงสร้างเซลล์ปิดอยู่ในบางพื้นที่ของชิ้นงานโฟมยางทั้งสอง ดังเช่นแสดงในรูปที่ 3(จ) และ 3(ฉ) ตามลำดับ ซึ่งขนาดเซลล์เฉลี่ยของ DF AF และ ArF คือ 259, 231 และ 226 ไมครอน ตามลำดับ เมื่อพิจารณาเฉพาะ AF และ ArF พบว่า ArF มีขนาดเซลล์เล็กกว่า AF ทั้งที่ผลิตจากการบับลิงด้วยกระบวนการเดียวกันและที่อัตราการไหลเท่ากัน แสดงให้เห็นว่าชนิดของก๊าซที่ใช้ในการทำให้เกิดฟองมีผลต่อขนาดของเซลล์โฟม ทั้งนี้ในทางทฤษฎีขนาดของเซลล์หรือฟองอากาศที่ผลิตจากการบับลิงขึ้นอยู่กับการพาความร้อนที่สำคัญต่างๆ เช่น ขนาดรูพรุนของแผ่นกรอง อัตราการไหลของก๊าซขาเข้า สมบัติของวัสดุของเหลว และสมบัติของก๊าซที่ป้อน เช่น น้ำหนักโมเลกุล และความหนาแน่น [13] ซึ่ง ณ ที่นี้ค่าน้ำหนักโมเลกุลของอากาศและอาร์กอน เท่ากับ 28.96 และ 39.95 กรัมต่อโมล [14] ตามลำดับ และค่าความหนาแน่นของอากาศและอาร์กอนเท่ากับ 1.20 และ 1.66 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร [15] ตามลำดับ ซึ่งความแตกต่างทางด้านน้ำหนักโมเลกุลและความหนาแน่นของก๊าซทั้งสองนี้ส่งผลต่อขนาดเซลล์ของโฟมยาง ซึ่งก๊าซที่มีค่าน้ำหนักโมเลกุลและความหนาแน่นมากกว่า มีผลทำให้ขนาดเซลล์โฟมเล็กลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kulkarni และคณะ [16] เนื่องจากผลต่างของความหนาแน่นระหว่างสองวัสดุคลดลง



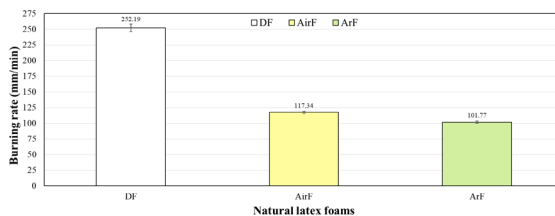
รูปที่ 2 ภาคนัดขวางทางมหภาคของโฟมยาง (ก) DF (ข) AF และ (ค) ArF



รูปที่ 3 ภาคนัดขวางโครงสร้างทางจุลภาคของโฟมยาง (กำลังขยาย 25 เท่า) (ก) DF (ข) AF และ (ค) ArF และบริเวณกรอบสีแดงแสดงถึงความแตกต่างของเซลล์เปิดและเซลล์ปิดของโฟมยาง (ง) DF (จ) AF และ (ฉ) ArF



รูปที่ 4 ความหนาแน่นของโฟมยาง DF AF และ ArF



รูปที่ 5 อัตราการลุกลามไฟของโฟมยาง DF AF และ ArF

3.2 สมบัติความหนาแน่น

รูปที่ 4 แสดงค่าความหนาแน่นของโฟมยาง AF และ ArF ที่ผลิตจากกระบวนการบับบลิ้งเปรียบเทียบกับหมอนโฟมยางพารา DF ที่วางขายในท้องตลาดซึ่งผลิตโดยกระบวนการดันลอป จะเห็นได้ว่าความหนาแน่นเฉลี่ยของ DF, AF และ ArF มีค่าเท่ากับ 0.112, 0.186 และ 0.200 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ทั้งนี้ความแตกต่างของค่าความหนาแน่นของโฟมยางทั้งสามชนิด เนื่องจากความแตกต่างทางโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน ซึ่งชิ้นงานที่มีขนาดเซลล์โฟมใหญ่ที่สุดซึ่ง DF รองลงมาเป็น AF และ ArF ตามลำดับ และเมื่อคำนวณจำนวนเซลล์ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของโฟมยาง DF AF และ ArF พบว่ามีค่าเท่ากับ 9.61×10^5 , 13.48×10^5 และ 14.13×10^5 เซลล์ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ตามลำดับ นั่นหมายความว่า ถ้าพิจารณาที่ปริมาตรเท่ากันโฟมยางที่มีขนาดเซลล์โฟมใหญ่จะให้จำนวนเซลล์ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรน้อยกว่าโฟมยางที่มีขนาดเซลล์โฟมเล็ก ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Ma และคณะ [17] ส่งผลให้ปริมาณเนื้อยางต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรน้อยกว่า และแสดงถึงน้ำหนักของโฟมยางต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรที่น้อยกว่าเช่นกัน ดังนั้นค่าความหนาแน่นของโฟมยางทั้งสามชนิดจึงเป็นไปตามลำดับจากน้อยไปหามาก ดังนี้ DF, AF และ ArF

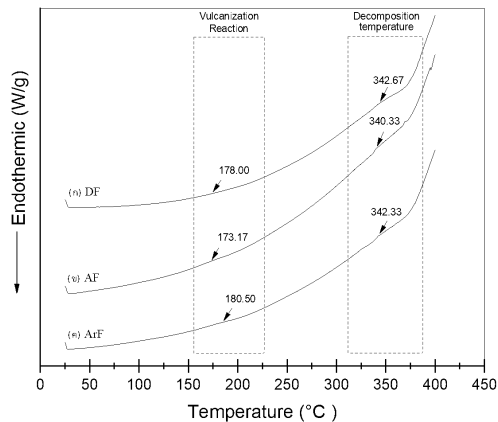
3.3 สมบัติการลุกลามไฟ

รูปที่ 5 แสดงอัตราการลุกลามไฟของโฟมยาง DF AF และ ArF ซึ่งพบว่าชิ้นงานทั้งสามมีความสามารถในการต้านทานการลุกลามไฟได้ต่างกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งหมอนโฟมยางที่วางขายตามท้องตลาดมีค่าอัตราการลุกลามไฟ (UL-94) เท่ากับ 257 มิลลิเมตรต่อวินาที ในขณะที่โฟมยาง AF และ ArF

มีค่าอัตราการลุกลามไฟเท่ากับ 122 และ 101 มิลลิเมตรต่อวินาที ตามลำดับ จะเห็นว่าโฟมยางที่หน่วงการลุกลามไฟได้ดีที่สุดคือโฟมยางที่ผลิตจากกระบวนการบับบลิ้ง ArF ทั้งนี้เนื่องจากสองเหตุผลหลัก คือ โครงสร้างทางจุลภาคและสมบัติของก๊าซที่ใช้ในการผลิตโฟมยางดังกล่าว กล่าวคือเซลล์โฟมมีขนาดเล็กและเชื่อมต่อกันอย่างสมบูรณ์ ซึ่งส่งผลให้จำนวนเซลล์ต่อปริมาตรเพิ่มขึ้น [13], [14] ทำให้เมื่อเทียบปริมาณเนื้อยางต่อปริมาตรที่เท่ากัน ArF จะมีปริมาณเนื้อยางที่มากที่สุด และนอกจากนี้ อาจมีก๊าซอาร์กอนบรรจุอยู่ชิ้นงานโฟมยางในพื้นที่ที่เป็นเซลล์ปิด (รูปที่ 3(ง)) ซึ่งเมื่อชิ้นงานโฟมยาง ArF เกิดการเผาไหม้ ก๊าซอาร์กอนซึ่งมีสมบัติไม่ติดไฟที่บรรจุอยู่ภายในโฟมยางจะถูกปลดปล่อยออกมาเจือจางกับออกซิเจนในอากาศทำให้ลุกลามไฟได้ช้าลง เมื่อเทียบกับชิ้นงานโฟมยาง AF ที่มีขนาดเซลล์โฟมใหญ่กว่าซึ่งผลิตจากฟองอากาศ และ DF ที่ประกอบด้วยเซลล์เปิดทั่วทั้งชิ้นงาน มีขนาดเซลล์โฟมใหญ่ที่สุด และเซลล์โฟมฉีกขาดทั่วทั้งชิ้นงาน ทำให้เมื่อ DF เกิดการเผาไหม้จึงมีการลุกลามไฟที่รวดเร็วที่สุด และเร็วกว่าโฟมยางที่ผลิตจากกระบวนการบับบลิ้งถึงสองเท่า

3.4 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน

เทคนิคดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential Scanning Calorimetry; DSC) เป็นเทคนิคที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของโฟมยางธรรมชาติ โดยข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์บ่งบอกถึงอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาวัลคาไนเซชัน (Vulcanization Reaction) และอุณหภูมิการสลายตัว (Decomposition Temperature) ของชิ้นงานโฟมยาง [18], [19] ผลที่ได้

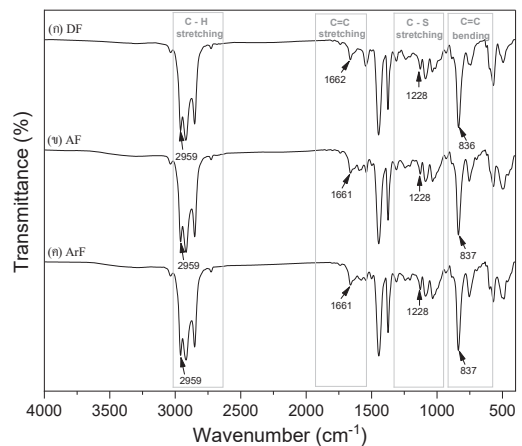


รูปที่ 6 เทอร์โมแกรมการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของ โฟมยาง (ก) DF (ข) AF และ (ค) ArF

ปรากฏดังรูปที่ 6 ซึ่งพบว่ามี 2 พิกที่เกี่ยวข้อ คือ พิกที่หนึ่งของ DF, AF และ ArF เกิดขึ้นที่ 178, 173.17 และ 180.50 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ในเซชันโฟมยางธรรมชาติ โดยปฏิกิริยานี้เกิดขึ้นได้เนื่องจากการกักเก็บที่อยู่ในโฟมยางจะทำให้เกิดการเชื่อมขวาง (Cross-linking) ของโครงสร้างภายในโฟมยาง [18] ส่งผลให้โครงสร้างของยางมีความแข็งแรงมากขึ้น ในขณะที่พิกที่สองของ DF, AF และ ArF เกิดขึ้นที่ 342.67, 340.33 และ 342.33 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ซึ่งอยู่ในช่วงอุณหภูมิการสลายตัวของโฟมยางธรรมชาติ [18] จากที่กล่าวมาข้างต้น จะเห็นได้ว่า โฟมยางที่ผลิตได้ไม่มีสิ่งแปลกปลอมอื่นเจือปน มีเพียงส่วนประกอบของยางธรรมชาติเท่านั้น

3.5 หมู่ฟังก์ชัน

เทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (Fourier transform Infrared Spectroscopy ; FTIR) ถูกนำไปใช้เพื่อศึกษาหมู่ฟังก์ชันของโฟมยางธรรมชาติที่นำมาเปรียบเทียบระหว่างตัวอย่างอ้างอิงกับโฟมยางธรรมชาติที่ผลิตได้จากกระบวนการบับบลิ้ง (DF, AF และ ArF) ดังรูปที่ 7 แสดงให้เห็นแถบการสั่นสะเทือนระหว่าง 3,000 ถึง 2,850 เซนติเมตร⁻¹ กล่าวถึง หมู่ C-H [20] แบบยืดออกจากหมู่ฟังก์ชัน CH₃ ซึ่งปรากฏอยู่ที่ตำแหน่งเดียวกัน คือ 2,959



รูปที่ 7 หมู่ฟังก์ชันของโฟมยาง (ก) DF (ข) AF และ (ค) ArF

เซนติเมตร⁻¹ ในขณะที่แถบการสั่นสะเทือนในช่วง 1,672 เซนติเมตร⁻¹ ระบุถึงหมู่ C=C แบบยืดออก [21] ซึ่งปรากฏอยู่ที่ตำแหน่งประมาณ 1,662 (DF) 1661 (AF) และ 1661 (ArF) เซนติเมตร⁻¹ นอกจากนี้แถบการสั่นสะเทือนระหว่าง 1,171–935 เซนติเมตร⁻¹ ระบุถึงหมู่ C-S แบบยืดออก [21] ซึ่งเป็นหมู่ที่แสดงถึงการเชื่อมขวางของโครงสร้างโฟมยางธรรมชาติ เนื่องจากการกักเก็บที่เติมลงไป [22] โดยปรากฏอยู่ที่ตำแหน่งเดียวกัน คือ 1,228 เซนติเมตร⁻¹ และแถบการสั่นสะเทือนประมาณ 840 เซนติเมตร⁻¹ ระบุถึงหมู่ C=C แบบงอ [21] ซึ่งปรากฏอยู่ที่ตำแหน่งประมาณ 836 (DF) 837 (AF) และ 837 (ArF) เซนติเมตร⁻¹ ตามลำดับ จากการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของ DF AF และ ArF สามารถวิเคราะห์ได้ว่าการใช้ก๊าซที่แตกต่างกันในการผลิตโฟมยางธรรมชาติไม่มีผลต่อหมู่ฟังก์ชัน และโครงสร้างทางเคมีของโฟมยาง แถบการสั่นสะเทือนที่ปรากฏไม่ได้มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แต่ทั้งนี้การใช้ก๊าซต่างกันั้นส่งผลต่อโครงสร้างทางจุลภาคและสมบัติทางกายภาพอื่นๆ เช่น ความหนาแน่น และสมบัติการหน่วงไฟ ตามที่กล่าวไว้ข้างต้น

4. สรุปการทดลอง

ก๊าซอาร์กอนได้ถูกใช้ในการผลิตโฟมยางธรรมชาติด้วยกระบวนการบับบลิ้ง เพื่อศึกษาสมบัติการหน่วงไฟ โครงสร้าง

ทางจุลภาค สมบัติทางความร้อน และหมู่ฟังก์ชันของโพลียาซิติรอล โดยเปรียบเทียบกับโพลียาซิติรอลที่ผลิตจากฟองอากาศด้วยกระบวนการเดียวกันและโพลียาซิติรอลที่ผลิตจากกระบวนการดันลอปที่วางขายตามท้องตลาดพบว่า ก๊าซอาร์กอนมีส่วนช่วยยับยั้งการลุกลามไฟของโพลียาซิติรอลได้ถึง 2.5 เท่าของโพลียาซิติรอลที่วางขายตามท้องตลาด เนื่องจากก๊าซอาร์กอนเป็นก๊าซเฉื่อยที่ไม่ติดไฟและมีความเสถียรในสภาพแวดล้อมที่มีอุณหภูมิสูง ซึ่งการค้นพบนี้สามารถนำไปสู่การปรับปรุงและพัฒนาโพลียาซิติรอลให้มีการหน่วงไฟมากขึ้นโดยการใช้สารหน่วงไฟที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมร่วมกับก๊าซอาร์กอนในการผลิตโพลียาซิติรอล นอกจากนี้ในส่วนโครงสร้างทางจุลภาคของโพลียาซิติรอลจากกระบวนการบับบลิ้ง (AF และ ArF) มีลักษณะใกล้เคียงกันซึ่งต่างจากโพลียาซิติรอลที่วางขายตามท้องตลาด และในส่วนสมบัติทางความร้อน และหมู่ฟังก์ชันของโพลียาซิติรอลนั้นมีความใกล้เคียงกันมาก โดยไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากสถาบันวิจัยและพัฒนานวัตกรรมยางพารา มหาลยสงขลานครินทร์ สัญญาเลขที่ ENG6201096S; ทุนบัณฑิตวิศกรรมศาสตร์ และทุนอุดหนุนการวิจัยเพื่อวิทยานิพนธ์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ขอขอบคุณศูนย์วิจัยความเป็นเลิศด้านโลหะและวิศวกรรมวัสดุ (CEMME) และภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ สำหรับสนับสนุนสิ่งอำนวยความสะดวก

เอกสารอ้างอิง

- [1] V. Thongrueng, C. Dechwayukul, J. Soontho, and Y. Rukkachatsuwan, "Development of natural rubber foam processing," Department of Mechanical Engineering, Faculty of Songkla University Hatyai, Songkla, Rep. RDG4650053, Mar. 2004 (in Thai).
- [2] S. Phomrak, A. Nimpaloon, B. M. Z. Newby, and M. Phisalaphong, "Natural rubber latex foam reinforced with micro-and nanofibrillated cellulose via dunlop method," *Polymers (Basel)*, vol. 12, no. 9, pp. 1–16, 2020.
- [3] L. Wan, C. Deng, Z. Y. Zhao, H. Chen, and Y. Z. Wang, "Flame retardation of natural rubber: Strategy and recent progress," *Polymers (Basel)*, vol. 12, no. 2, pp. 1–25, 2020.
- [4] A. R. R. Menon, "Flame-retardant characteristics of natural rubber modified with a bromo derivative of phosphorylated cashew nut shell liquid," *Journal of Fire Sciences*, vol. 15, no. 1, pp. 3–13, 1997.
- [5] S. D. Shaw, A. Blum, R. Weber, K. Kannan, D. Rich, D. Lucas, C. P. Koshland, D. Dobraca, S. Hanson, and L. S. Birnbaum, "Halogenated flame retardants: Do the fire safety benefits justify the risks?," *Reviews on Environmental Health*, vol. 25, no. 4, pp. 261–305, 2010.
- [6] Y. H. Kim, M. Lee, I. J. Hwang, and Y. J. Kim, "Noise reduction of an extinguishing nozzle using the response surface method," *Energies*, vol. 12, no. 22, pp. 1–13, 2019.
- [7] S. Sirikulchaikij, R. Kokoo, and M. Khangkhamano, "Natural rubber latex foam production using air microbubbles: Microstructure and physical properties," *Materials Letters*, vol. 260, no. 1, pp. 126916, 2019.
- [8] Z. Xiao, T. Bin Aftab, and D. Li, "Applications of micro-nano bubble technology in environmental pollution control," *Micro & Nano Letters*, vol. 14, no. 7, pp. 782–787, 2019.
- [9] M. Zhang, L. Qiu, and G. Liu, "Basic characteristics and application of micro-nano bubbles in water treatment," presented at the IOP

- Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020.
- [10] A. Agarwal, W. J. Ng, and Y. Liu, "Principle and applications of microbubble and nanobubble technology for water treatment," *Chemosphere*, vol. 84, no. 9, pp. 1175–1180, 2011.
- [11] T. Parivatphun, S. Sangkert, J. Meesane, R. Kokoo, and M. Khangkhamano, "Constructed microbubble porous scaffolds of polyvinyl alcohol for subchondral bone formation for osteoarthritis surgery," *Biomedical Materials*, vol. 15, no. 5, pp. 1–13, 2020.
- [12] W. Harnnarongchai and K. Chaochanchaikul, "Effect of blowing agent on cell morphology and acoustic absorption of natural rubber foam," *Applied Mechanics and Materials*, vol. 804, no. 1, pp. 25–29, 2015.
- [13] K. Hecht, O. Bey, J. Ettmüller, P. Graefen, R. Friehmelt, and M. Nilles, "Effect of gas density on gas holdup in bubble columns," *Chemie Ingenieur Technik*, vol. 87, no. 6, pp. 762–772, 2015.
- [14] D. P. Gatley, S. Herrmann, and H. J. Kretzschmar, "A Twenty-First century molar mass for dry air," *HVAC&R Research*, vol. 14, no. 5, pp. 655–662, 2008.
- [15] I. G. Reilly, D. S. Scott, T. J. W. Debruijn, and D. Macintyre, "The role of gas phase momentum in determining gas holdup and hydrodynamic flow regimes in bubble column operations," *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, vol. 72, no. 1, pp. 3–12, 1994.
- [16] A. A. Kulkarni and J. B. Joshi, "Bubble formation and bubble rise velocity in gas-liquid systems: A review," *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 44, no. 16, pp. 5873–5931, 2005.
- [17] D. Ma, M. Liu, Y. Zu, and C. Tang, "Two-dimensional volume of fluid simulation studies on single bubble formation and dynamics in bubble columns," *Chemical Engineering Science*, vol. 72, pp. 61–77, 2012.
- [18] C. Schick, "Differential scanning calorimetry (DSC) of semicrystalline polymers," *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, vol. 395, no. November 2009, pp. 1589–1611, 2014.
- [19] J. Johns and V. Rao, "Thermal stability, morphology, and X-ray diffraction studies of dynamically vulcanized natural rubber/chitosan blends," *Journal of Materials Science*, vol. 44, no. 15, pp. 4087–4094, 2009.
- [20] M. L. Kravich and J. L. Koenig, "FTIR analysis of silica-filled natural rubber," *Rubber Chemistry and Technology*, vol. 71, no. 2, pp. 300–309, 1998.
- [21] S. Suethao, W. Ponloa, S. Phongphanphanee, J. Wong-Ekkabut, and W. Smitthipong, "Current challenges in thermodynamic aspects of rubber foam," *Scientific Reports*, vol. 11, no. 1, pp. 1–12, 2021.
- [22] S. Suethao, S. Phongphanphanee, J. Wong-Ekkabut, and W. Smitthipong, "The relationship between the morphology and elasticity of natural rubber foam based on the concentration of the chemical blowing agent," *Polymers (Basel)*, vol. 13, no. 7, 2021.