

การศึกษาคุณสมบัติเชิงความร้อนและเชิงกลของยางฟองน้ำ
ที่ใช้ซิลิกาแอโรเจลเป็นสารตัวเติม
**CHARACTERIZATION OF THERMAL AND MECHANICAL PROPERTY
OF LATEX FOAM RUBBER MIXED WITH SILICA AEROGEL-FILLER**

อัจฉรา อิมคำ พุฒคำ¹ นิพนธ์ ตันไพบูลย์กุล² สมชาย ลาดหาร² ยุวดี ไชยเชษฐ์²
กนกวรรณ สุภรณ์ทน² และอภิพงษ์ พุฒคำ^{2*}
Aichara Imkum Putkham¹, Nipon Tanpaiboonkul², Somchai Ladhan²,
Yuwadee Chaiyachet², Kanokwan Sukaranandana², and Apipong Putkham^{2*}

¹Faculty of Science, Naresuan University

²Faculty of Environment and Resource Studies, Mahasarakham University

*corresponding author e-mail: apipong.p@msu.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของปริมาณซิลิกาแอโรเจลต่อคุณสมบัติเชิงความร้อนและคุณสมบัติเชิงกลของฉนวนกันความร้อนยางฟองน้ำ โดยทำการขึ้นรูปยางฟองน้ำด้วยกระบวนการดันลอย พร้อมกับผสมซิลิกาแอโรเจลในปริมาณตั้งแต่ 0.00-20.00 ส่วนในร้อยส่วนของยางฟองน้ำที่ผ่านการขึ้นรูปแล้วจะนำไปตรวจสอบลักษณะพื้นผิวธาตุที่อยู่ในยางฟองน้ำ ทดสอบความหนาแน่น คุณสมบัติเชิงกล รวมถึงคุณสมบัติการนำและการต้านทานความร้อนของยางฟองน้ำ ผลการศึกษาพบว่าเมื่อเติมปริมาณซิลิกาแอโรเจลที่ 1.00 ส่วนในร้อยส่วน ส่งผลทำให้ยางฟองน้ำมีความหนาแน่น และค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนลดต่ำกว่ายางฟองน้ำที่ไม่เติมซิลิกาแอโรเจล โดยมีความหนาแน่นและค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่ 0.196 ± 0.0026 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และ 0.055 ± 0.0001 วัตต์ต่อเมตร-เคลวิน ตามลำดับ ในส่วนของคุณสมบัติความหนาแน่นและค่าการนำความร้อนของยางฟองน้ำมีแนวโน้มเพิ่มสูงมากขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณซิลิกาแอโรเจล อย่างไรก็ตามเมื่อเติมปริมาณซิลิกาแอโรเจลเกิน 10.00 ส่วนในร้อยส่วนจะส่งผลทำให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงของยางฟองน้ำมีค่าลดต่ำลง เนื่องจากซิลิกาแอโรเจลจะจับตัวกันเป็นมวลรวมทำให้ความสามารถในการเสริมแรงลดน้อยลง เมื่อนำค่าความหนาแน่นและค่าการนำความร้อนของยางฟองน้ำที่ผสมซิลิกาแอโรเจลที่ 1.00 ส่วนในร้อยส่วนมาเปรียบเทียบกับฉนวนความร้อนที่ผลิตขายเชิงพาณิชย์และจากรายงานการวิจัยพบว่ามีค่าใกล้เคียงกับฉนวนในเชิงพาณิชย์

คำสำคัญ: ยางธรรมชาติ แอโรเจล ยางฟองน้ำ ฉนวนความร้อน

Abstract

The main objective of this research aims to determine the effect of silica aerogel- filler on both thermal and mechanical property of latex foam rubber. The foam rubbers were produced by mixing with silica aerogel varied from 0.00-20.00 phr

via Dunlop process. The physical, elemental composition, mechanical and thermal property of the foam rubber mixed with silica aerogel was determined. It was found that both density and thermal conductivity coefficient of foam rubber, with silica aerogel at 1.00 phr, decreased to $0.196 \pm 0.0026 \text{ g/cm}^3$ and $0.055 \pm 0.0001 \text{ W/m.K}$, respectively. Further increase in the amount of silica aerogel increased both density and thermal conductivity coefficient of the foam rubber. Tensile strength also increased with increasing of the amount of silica aerogel. However, Tensile strength decreased when the amount of silica aerogel exceeded 10.00 phr due to large size of aerogel aggregate is formed and reduces the reinforcing effect. In conclusion, both density and thermal properties of foam rubber mixed with silica aerogel of 1.00 phr is comparable to the property of the commercial insulation.

Keywords: natural rubber, aerogel, latex foam rubber, insulation

บทนำ

ประเทศไทยมีการใช้ฉนวนกันความร้อนหลายชนิด เช่น ฉนวนใยแก้ว ฉนวนโพรพิลอิทีน ฉนวนโพรพิลยูรีเทน เป็นต้น อย่างไรก็ตามฉนวนกันความร้อนบางชนิดใช้สารซีเอฟซีซึ่งส่งผลต่อสภาวะโลกร้อนเป็นสารเป่าโฟม บางชนิดมีความหนาแน่นสูงน้ำหนักมากและเมื่อหมดอายุมีผลทำให้ฉนวนย่อยสลายในสิ่งแวดล้อมได้ยาก หลายชนิดมีส่วนประกอบตัวทำละลายที่มีกลิ่น เช่น ยูเรีย ฟอสมาติสท์ ฟีนอลฟอสมาติสท์ และไอโซไซยาเนต สารเหล่านี้ก่อให้เกิดความรำคาญและในระยะยาวอาจก่อให้เกิดมะเร็งขึ้นได้ นอกจากนี้ตัวทำละลายที่ผสมมักไม่ทนความร้อนหรือเมื่อเกิดการลุกไหม้จะปล่อยก๊าซไซยาไนด์ซึ่งผู้ที่สูดดมเข้าไปอาจเป็นอันตรายถึงชีวิตได้ ตามข้อกำหนดฉลากเขียวสำหรับผลิตภัณฑ์ฉนวนกันความร้อนได้เสนอไว้คือ การผลิตฉนวนประกอบอาคารนอกจากจะทำให้มีคุณสมบัตินำความร้อนต่ำ และน้ำหนักเบาแล้ว ควรพิจารณาถึงวัสดุที่ปลอดภัยต่อผู้ใช้และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมด้วย (environmentally-friendly material) (Green label broad of committee, 2011)

ปัจจุบันมีงานวิจัยในการนำยางพองน้ำหรือผลิตภัณฑ์โพรพอยใช้เป็นฉนวนความร้อนเนื่องจากยางพองน้ำมีรูพรุนที่เกิดจากฟองอากาศจำนวนมากในเนื้อยางทำให้น้ำความร้อนได้ต่ำ อีกทั้งยังส่งผลทำให้น้ำหนักเบา ความหนาแน่นต่ำ นอกจากนี้ยางพองน้ำยังมีความคงทนต่อสภาพแวดล้อมทั้งในและนอกอาคาร หากหมดอายุการใช้งานก็สามารถย่อยสลายได้ง่ายในสิ่งแวดล้อม ทั้งนี้เนื่องจากยางพองน้ำผลิตได้จากยางธรรมชาติที่มีการเติมก๊าซหรือสารที่ทำให้เกิดฟองเข้าไปผสม (blowing agent) แล้วทำใหยางคงรูปด้วยสารเคมีและความร้อน การเติมสารที่ทำให้เกิดฟองแม้จะมีผลทำให้เกิดฟองอากาศจำนวนมาก การนำความร้อนลดลง แต่หากเติมมากเกินไปจะส่งผลทำใหยางพองน้ำที่ได้ไม่แข็งแรง ยุบตัวและฉีกขาดง่าย (Dhevthong et al., 2008) ดังนั้นจึงมีผู้วิจัยปรับปรุงคุณสมบัติการนำความร้อนของยางพองน้ำโดยใช้สารตัวเติมอินทรีย์ เช่น นาโนเคลย์ ซิลิกา แคลเซียมคาร์บอเนต เป็นต้น สารตัวเติมนี้นอกจากจะทำหน้าที่เป็นสารช่วยก่อฟองอากาศในระหว่างกระบวนการผลิตยางพองน้ำยังช่วยเสริมคุณสมบัติอื่น ๆ ของยางพองน้ำด้วย เช่น เสริมความแข็งแรง เป็นต้น ทั้งนี้ขึ้นกับคุณสมบัติพื้นฐานของสารตัวเติมที่ผสมลงไป ดังนั้นหากมีการผสมสารตัวเติมที่มีความพรุนลงไปก็อาจจะส่งผลทำให้คุณสมบัติการนำความร้อนของยางพองน้ำลดลงด้วย (Khachonchaikul, 2016)

ซิลิกาแอโรเจล (silica-aerogel) สามารถเตรียมได้จากกระบวนการโซล-เจล ซึ่งใช้สารตั้งต้น คือ สารประกอบซิลิกา เช่น Tetraethyl Orthosilicate (TEOS), Tetrameth Oxysilane (TMOS) และซิลิกาจากเถ้าแกลบ เป็นต้น ซิลิกาแอโรเจลจัดเป็นสารตัวเติมตัวหนึ่งที่มีความพรุนสูง ($400-1000 \text{ m}^3/\text{g}$) น้ำหนักเบาและโดยทั่วไปมีความหนาแน่นต่ำในช่วง $0.003-0.20 \text{ g/cm}^3$ แอโรเจลประกอบไปด้วยอากาศในรูพรุนและอาจสูงถึงร้อยละ 98 ของปริมาตร ทำให้แอโรเจลเป็นฉนวนความร้อนที่ดี (He & Xia, 2015) ขณะที่แอโรเจลไม่ติดไฟและทนความร้อนได้ไม่น้อยกว่า 500 องศาเซลเซียส คุณสมบัติเหล่านี้ทำให้แอโรเจลถูกนำมาใช้ในงานเชิงพาณิชย์ เช่น ใช้เป็นวัสดุดูดซับ ตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการทางเคมี รวมถึงนำไปใช้เป็นวัสดุดูดซับเสียง เป็นต้น (Sachithanadam & Joshi, 2016) จากที่กล่าวมาข้างต้น หากนำแอโรเจลมาใช้เป็นสารตัวเติม นอกจากจะเพิ่มคุณสมบัติเชิงกลให้กับวัสดุที่ผลิตแล้วยังอาจทำให้วัสดุนั้นมีคุณสมบัติเป็นฉนวนความร้อนที่ดีขึ้นได้ (Neugebauer et al., 2014) ในการศึกษาครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของปริมาณซิลิกาแอโรเจลต่อคุณสมบัติการนำความร้อน การต้านทานความร้อน และความหนาแน่นของฉนวนยางพองน้ำ เพื่อจะได้เป็นข้อมูลเบื้องต้นในการประเมินความเป็นไปได้ในการนำไปใช้ต่อไป

วิธีดำเนินการวิจัย

1. สารเคมี

สารเคมีที่ใช้ในการสังเคราะห์ซิลิกาแอโรเจล ได้แก่ Tetraethyl orthosilicate (TEOS) เป็นสารเคมีเกรดวิเคราะห์ (analytical grade) จากบริษัท Aldrich Chemical Co. ส่วนสารเคมีที่ใช้ในการสังเคราะห์ยางพองน้ำ ได้แก่ น้ำยางธรรมชาติเข้มข้นร้อยละ 60 ชนิดแอมโมเนียต่ำ โพลแทสเซียม โอสิเอต กำมะถัน วิงสเตย์แอล ซิงค์ออกไซด์ ดีพีจี Zinc-N-diethyldithiocarbamate และ Zinc-2-mercaptobenzothiazole ได้มาจากบริษัทเคมีเคล แอนด์ แมตทีเรียลส์จำกัด

2. การสังเคราะห์ซิลิกาแอโรเจล

ซิลิกาแอโรเจลสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโซล-เจล ตามวิธีของ Punsombut et al. (2014) โดยใช้สารประกอบซิลิกาตั้งต้น คือ TEOS นำมาผ่านกระบวนการไฮโดไลซิส บ่มและทำให้แห้ง ที่ความดันบรรยากาศ อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ทำให้ได้ซิลิกาแอโรเจลที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะ $575 \text{ m}^2/\text{g}$ มีปริมาตรรูพรุน $0.54 \text{ cm}^3/\text{g}$ และขนาดรูพรุนเท่ากับ 7.80 นาโนเมตร จากนั้นนำซิลิกาแอโรเจลที่ได้มาบด อบให้แห้ง นำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาค Laser Coulter รุ่น LS 230 พบว่ามีค่าเฉลี่ยของขนาดอนุภาคซิลิกาแอโรเจล มีขนาดเฉลี่ย 233.60 ไมโครเมตร นำตัวอย่างซิลิกาแอโรเจลที่ได้เก็บไว้ในโถดูดความชื้นก่อนนำไปใช้

3. การสังเคราะห์ยางพองน้ำที่ใช้ซิลิกาแอโรเจลเป็นสารตัวเติม

ในการวิจัยนี้ใช้กระบวนการดันลอป (Dunlop process) ในการผลิตยางพองน้ำดังแสดงในภาพที่ 1 (Figure 1) โดยปรับปรุงสัดส่วนผสมจากผลการศึกษาของ Prakaimaneewong et al. (2010); Thongruang et al. (2004) โดยยางที่ใช้ในการศึกษานี้เป็นยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ โดยมีปริมาณเนื้อยางแห้งร้อยละ 60 ของปริมาณของแข็งทั้งหมด ส่วนซิลิกาแอโรเจลสังเคราะห์ได้นำมาทำให้อยู่ในรูปร้อยละ 25 ดิสเพิซชัน (dispersion) แล้วใช้เป็นสารตัวเติมในการสังเคราะห์ยางพองน้ำ โดยเติมในปริมาณ 0.00, 1.00, 2.50, 5.00, 10.00 และ 20.00 ส่วนในร้อยละ (phr) ตามลำดับ ส่วนสารเคมีอื่น ๆ ทำให้อยู่ในรูปของดิสเพิซชัน สรุปลำดับตารางที่ 1 (Table 1)

Table 1 Chemicals and dispersion ratio for producing rubber foam mixed with silica-aerogel

Chemicals	Dispersion (%)	Dry weight (phr)
Concentrated natural rubber	60.00	100.00
K-oleate	10.00	0.015
Sulfur	50.00	2.50
Zinc-N-diethyldithiocarbamate (ZDEC)	50.00	1.00
Zinc-2-mercaptobenzothiazole (ZMBT)	50.00	1.00
Wingstay-L	50.00	1.00
Zinc oxide (ZnO)	50.00	5.00
Diphenyl guanidine (DPG)	33.00	1.00
Sodium Silicofluoride (SSF)	12.50	0.45
Silica-aerogel	25.00	0.00 1.00 2.50 5.00 10.00 and 20.00

4. การตรวจสอบลักษณะโครงสร้างทางจุลภาค การทดสอบความหนาแน่น การนำความร้อน การต้านทานความร้อน และคุณสมบัติเชิงกลของยางพองน้ำ

การตรวจสอบลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของผิวยางพองน้ำทำโดยใช้กล้องจุลทรรศน์สเตอริโอรุ่น Olympus SZ Z-ILST และใช้ Energy Dispersive Spectrometry (EDS) วิเคราะห์ธาตุต่าง ๆ ที่มีอยู่ในยางพองน้ำ ในส่วนการทดสอบความหนาแน่นทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 3574-95 โดยตัดชิ้นงานให้เป็นรูปสี่เหลี่ยม นำชิ้นงานไปชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งละเอียดโดยมีสูตรคำนวณ ดังนี้

$$D = \frac{M}{V} \quad \dots\dots\dots(1)$$

โดยที่ **D** คือ ความหนาแน่นของชิ้นทดสอบ (g/cm^3)
M คือ น้ำหนักชิ้นทดสอบ (g)
V คือ ปริมาตรชิ้นทดสอบ (cm^3)

ค่าความสามารถในการนำความร้อนทดสอบด้วยโดยนำชิ้นยางพองน้ำขนาด 5×5 เซนติเมตร (กว้าง $\times$ ยาว) และหนา 1 เซนติเมตร มาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Thermal Conductivity Analyzer (Hot Disk TCA) โดยควบคุมอุณหภูมิห้องระหว่างการตรวจวัดที่ 25 องศาเซลเซียส จากนั้นนำค่าการนำความร้อนที่ได้มาคำนวณค่าความต้านทานความร้อนได้จากสมการ Termkok (2012) ดังนี้

$$R = \frac{\Delta X}{k} \quad \dots\dots\dots(2)$$

โดย **R** คือ ความต้านทานความร้อน ($\text{m}^2 \cdot \text{K/W}$)
 ΔX คือ ความหนาของชิ้นงาน (m)
k คือ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (W/m.K)

ส่วนการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของยางฟองน้ำทดสอบโดยใช้เครื่องทดสอบความทนต่อแรงดึง Instron 5565 universal testing machine เพื่อทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile strength)

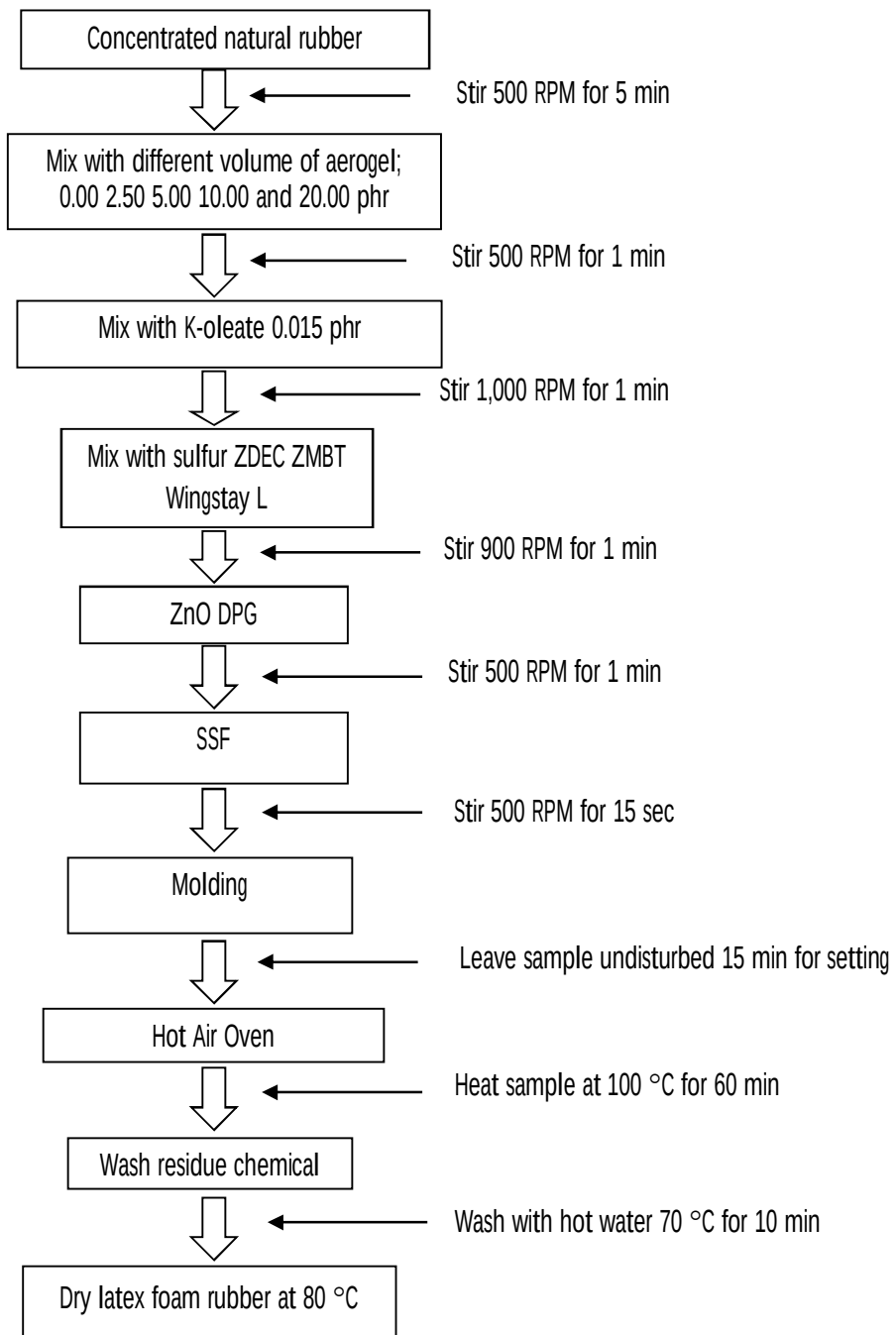


Figure 1 Production of rubber foam via Dunlop process mixed with aerogel filler

ผลการวิจัย

1. ผลของปริมาณซิลิกาแอโรเจลต่อความหนาแน่นของยางฟองน้ำ

ยางฟองน้ำที่ไม่มีการเติมซิลิกาแอโรเจลมีความหนาแน่นต่ำที่สุด คือ 0.180 g/cm^3 และเมื่อผสมสารตัวเติมซิลิกาแอโรเจลลงไปในกระบวนการทำยางฟองน้ำ มีผลทำให้ยางฟองน้ำมีความหนาแน่นสูงขึ้นตามปริมาณการเติมสารตัวเติมที่เพิ่มมากขึ้น ดังภาพที่ 2 (Figure 2) โดยยางฟองน้ำที่เติมแอโรเจล 1.00, 2.50, 5.00, 10.00 และ 20.00 phr ให้ยางฟองน้ำที่มีความหนาแน่น 0.196, 0.237, 0.255, 0.265 และ 0.283 g/cm^3 ตามลำดับ ค่าความหนาแน่นของยางฟองน้ำหลังจากมีการผสมซิลิกาแอโรเจลเพิ่มขึ้นคิดเป็นร้อยละ 8.83-57.30

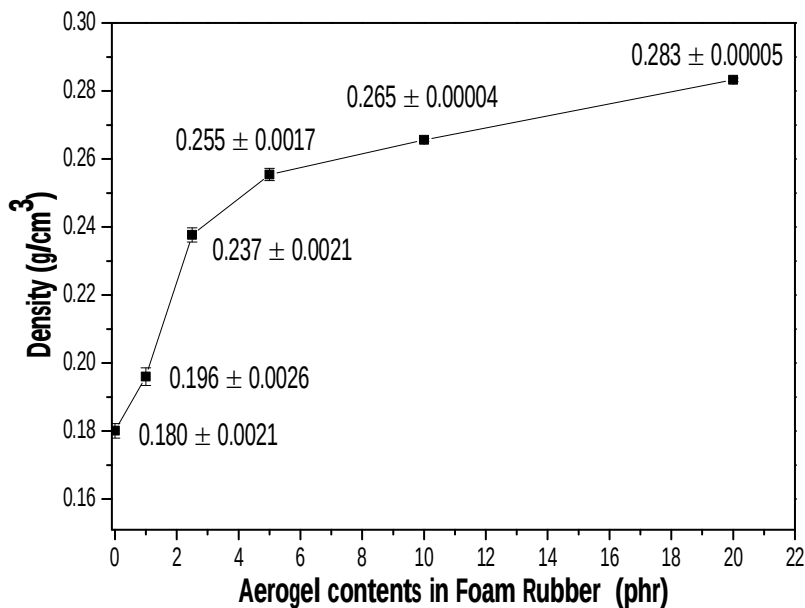


Figure 2 Density of rubber foam mixed with various concentrations of aerogel filler

เมื่อนำยางฟองน้ำที่สังเคราะห์ได้มาพิจารณาถึงโครงสร้างทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์สโตริโอ กำลังขยาย 0.80 เท่า พบว่าลักษณะฟองอากาศมีขนาดไม่เท่ากันกระจายแทรกตามเนื้อยาง เมื่อพิจารณาถึงปริมาณการผสมสารตัวเติมซิลิกาแอโรเจลในยางฟองน้ำ พบว่าเมื่อผสมสารตัวเติมซิลิกาแอโรเจลมากขึ้นมีผลทำให้ฟองอากาศในเนื้อยางมีขนาดเล็กลง และเนื้อยางฟองน้ำมีการเกาะตัวกันแน่นมากขึ้นและส่งผลให้ยางฟองน้ำมีความพรุนลดลง ได้ยางที่มีน้ำหนักมาก ความหนาแน่นต่ำ ดังแสดงในภาพที่ 3 (Figure 3)

จากการวิเคราะห์ด้วยด้วยเทคนิค EDS ภาพที่ 4 (Figure 4) พบว่ายางฟองน้ำที่เติมซิลิกาแอโรเจล 1.0 phr มีธาตุคาร์บอน (C) ร้อยละ 62.26 ธาตุออกซิเจน (O) ร้อยละ 8.79 ธาตุซิลิโคน ร้อยละ 6.64 ธาตุสังกะสี (Zn) ร้อยละ 20.16 และธาตุซิลิการ้อยละ 2.15 ซึ่งเป็นการยืนยันได้ว่ามีซิลิกาแอโรเจลผสมในเนื้อยางฟองน้ำ

2. ผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงความร้อน (Thermal properties)

ผลจากการทดสอบสัมประสิทธิ์การนำความร้อนพบว่า ยางพองน้ำที่มีการเติมซิลิกาแอโรเจล 1.00 phr มีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนลดลงจาก 0.067 เป็น 0.055 W/mK เมื่อเทียบกับยางพองน้ำที่ไม่เติมซิลิกาแอโรเจล อย่างไรก็ตามเมื่อเติมซิลิกาแอโรเจลในยางพองน้ำมากกว่า 1.00 phr ขึ้นไป พบว่าทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของยางพองน้ำเพิ่มสูงขึ้น อยู่ในช่วง 0.062-0.067 $\text{m}^2\text{W/K}$ ส่วนค่าความต้านทานความร้อนส่วนพองน้ำยางที่มีการเติมซิลิกาแอโรเจล 1.0 phr พบว่ามีค่าความต้านทานความร้อนสูงที่สุดคือ 0.1798 $\text{m}^2\text{W/K}$ รองลงมาคือยางเติมซิลิกาแอโรเจลที่ปริมาณ 5.0 10.0 phr และไม่เติมซิลิกาแอโรเจล โดยมีค่าการนำความร้อน 0.154 1.151 และ 0.148 $\text{m}^2\text{W/K}$ ตามลำดับ ส่วนยางพองน้ำที่มีการเติมซิลิกาแอโรเจลในปริมาณ 20.0 phr มีค่าความต้านทานความร้อนเท่ากับที่ไม่เติมซิลิกาแอโรเจล คือ 0.148 $\text{m}^2\text{W/K}$ ดังแสดงในตารางที่ 2 (Table 2)

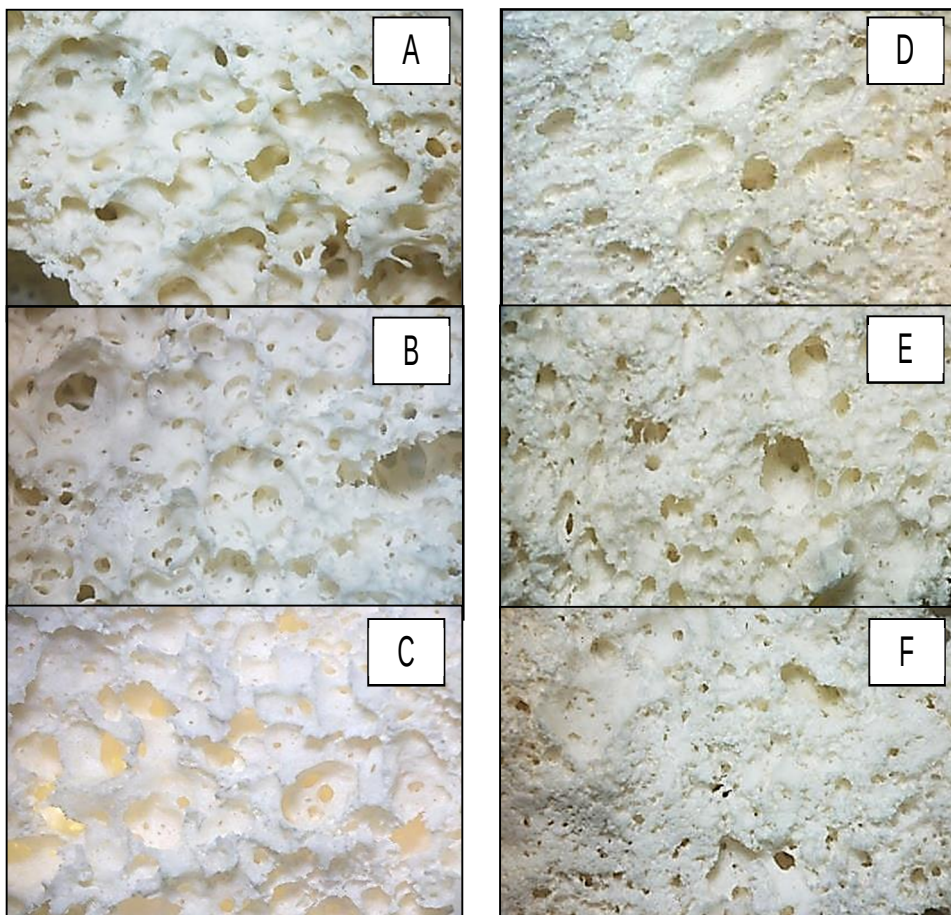


Figure 3 Stereo microscope images (0.8x) of porous rubber foam mixed with different volume of silica-aerogel A) 0 phr B) 1.00 phr C) 2.50 phr D) 5.00 E) 10.00 phr and F) 20.00 phr

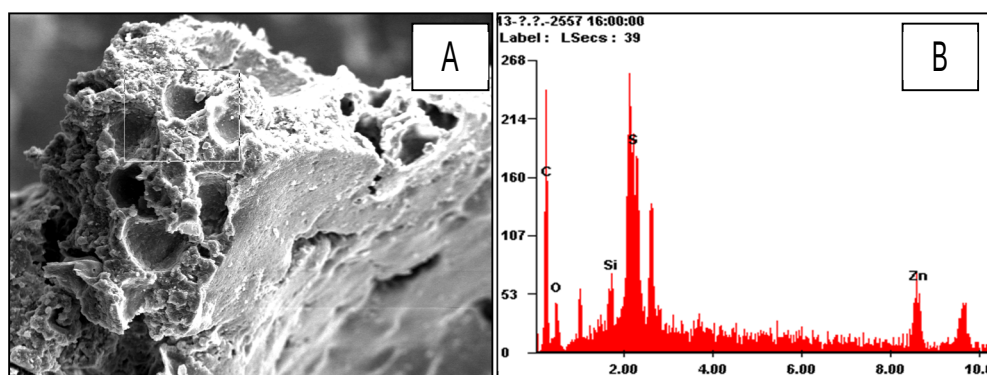


Figure 4 SEM image and EDS profile of rubber foam with silica-aerogel 1.00 phr
A) SEM scanning area and B) elemental composition

Table 2 Relationship between thermal conductivity coefficient, thermal resistant and volume of silica-aerogel in rubber foam

Samples	Thermal conductivity coefficient (W/m.K)	Thermal resistant ($m^2.K/W$)	References
1. Foam rubber with different volume of Silica-aerogel (phr)			This study
0.00	0.067±0.0017	0.148	
1.00	0.055±0.0001	0.179	
2.50	0.062±0.0014	0.160	
5.00	0.064±0.0002	0.154	
10.00	0.065±0.0001	0.151	
20.00	0.067±0.0001	0.148	
2. Foam rubber mixed with EVA	0.05	-	Lopattananon & Kaesaman (2014)
3. Glass fiber	0.0365	2.334	EPPO (2001)
4. Poly ethyenen foam	<0.023	-	EPPO (2001)
5. Polyurethane	0.017-0.045	1.086	EPPO (2001)
6. Cellulose insulation	0.029 - 0.045	1.875	Pakunworakij (2006)
7. plywood	0.138	0.067	Pakunworakij (2006)
8. Insulation oard form Corn cob	0.093	0.097	Pakunworakij (2006)
9. Insulation board form Bagasse	0.0724 - 0.0925	-	Surin (2001)
10. Insulation board form Rice Straw	0.0564 - 0.2543	-	Buasri (2001)
11. Insulation board from Durian peel coconut coir	0.1342	-	Nankongnab (2002)
12. Vetiver fiber and natural rubber latex insulation	0.0564	-	Patcharaphun et al. (2007)
13. Gymsum board	0.2820	-	Patcharaphun et al. (2007)
14. Aerogel	0.013-0.024	-	He & Xie (2015)
15. Glass fiber-aerogel	0.025-0.041	-	Yuan & Ding (2012)
16. Glass-aerogel	0.17-0.18	-	Gao & Jelle (2014)

3. ผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกล

ยางพองน้ำที่ไม่มีการผสมซิลิกาแอโรเจลมีความสามารถต้านทานต่อแรงดึงได้ 4.50 MPa แต่เมื่อผสมซิลิกาแอโรเจลลงในยางพองน้ำในปริมาณ 1.00, 2.50, 5.00 และ 10.00 phr ทำให้ยางพองน้ำมีความต้านทานต่อแรงดึงเพิ่มขึ้นเป็น 5.70, 8.90, 10.20 และ 11.30 ตามลำดับ หรือคิดเป็นค่าความต้านทานต่อแรงดึงเพิ่มขึ้นในช่วงร้อยละ 26.67-151.09 เมื่อเทียบกับยางพองน้ำที่ไม่มีการผสมซิลิกาแอโรเจล อย่างไรก็ตามเมื่อผสมซิลิกาแอโรเจลเข้าไปในปริมาณที่มากขึ้นคือ 20.00 phr พบว่า ค่าความต้านทานต่อแรงดึงของยางพองน้ำมีแนวโน้มลดลง โดยมีค่าความต้านทานต่อแรงดึงอยู่ที่ 9.50 MPa ดังแสดงในภาพที่ 5 (Figure 5)

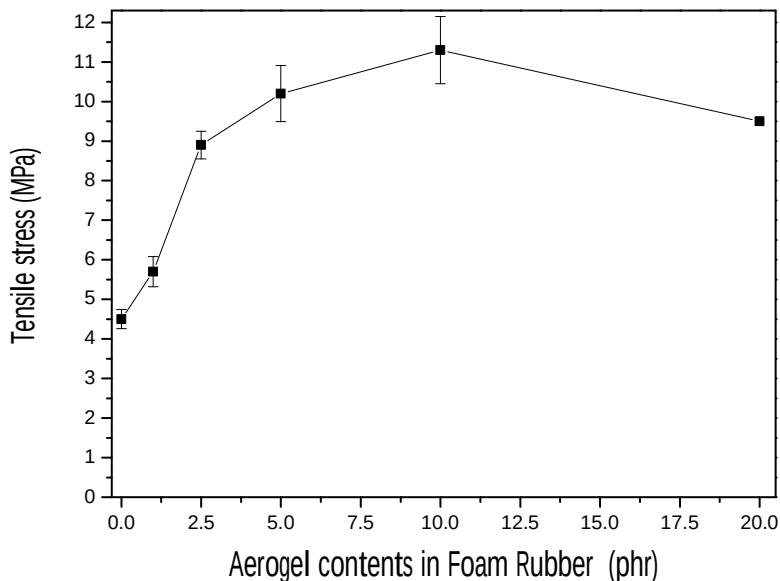


Figure 5 Tensile stress of rubber foam mixed with various volume of silica-aerogel

อภิปรายผล

สาเหตุที่ปริมาณของสารตัวเติมซิลิกาแอโรเจลที่ผสมในการผลิตยางพองน้ำมีอิทธิพลทำให้ยางพองน้ำมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นนั้น เนื่องจากเกิดอันตรกิริยา (interaction) ระหว่างสารตัวเติมและยางพองน้ำ (Filler-Rubber interaction) ซึ่งหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิล (-OH) ของซิลิกาแอโรเจลจะเกิดพันธะไฮโดรเจน (H-bond) กับหมู่ฟังก์ชันของยาง รวมถึงอาจเกิดแรงแวนเดอร์วาลส์ขึ้นระหว่างยางกับซิลิกา แอโรเจล มีผลทำให้ขนาดของฟองในยางมีขนาดเล็กลง ดังนั้นเมื่อเพิ่มปริมาณซิลิกาแอโรเจลยิ่งส่งผลให้เนื้อยางแน่นมากขึ้น ความพรุนลดลง (Peng et al., 2005) อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาความหนาแน่นของยางพองน้ำผสมซิลิกาแอโรเจลที่ความเข้มข้น 1.00 phr (0.196 g/cm^3) พบว่ามีค่าไม่เกินเกณฑ์ของกรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงาน (สนพ.) ที่แนะนำค่าเฉลี่ยความหนาแน่นของฉนวนกันความร้อนแบบเซลล์ปิดจากยางธรรมชาติไว้ไม่ควรเกิน $0.25\text{-}0.50 \text{ g/cm}^3$ (The Energy Policy and Planning Office, 2004) ในส่วนของค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของยางพองน้ำเมื่อเติมซิลิกาแอโรเจลในปริมาณน้อย คือ 1.00 phr ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของยางพองน้ำลดลง

ทั้งนี้เนื่องจากปริมาตรรูพรุนของซิลิกาแอโรเจลทำให้เกิดสถานะฉนวนขึ้นในยางพองน้ำ เมื่อเพิ่มปริมาณซิลิกาแอโรเจลมากขึ้นส่งผลให้ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของยางพองน้ำเพิ่มสูงขึ้น แสดงให้เห็นว่าอันตรกิริยาระหว่างสารตัวเติมและยางพองน้ำที่ทำให้พองในยางพองน้ำมีขนาดเล็กลง มีอิทธิพลต่อค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนมากกว่าปริมาตรรูพรุนของแอโรเจล (On et al., 2012)

เมื่อนำข้อมูลจากตารางที่ 2 (Table 2) และค่าความหนาแน่น สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุในเชิงพาณิชย์ที่แนะนำโดยกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (The Energy Policy and Planning Office, 2004) พบว่าวัสดุฉนวนสามารถแบ่งได้เป็นสองกลุ่ม คือ กลุ่มที่ 1 เป็นกลุ่มของวัสดุส่วนใหญ่ที่มีการผลิตขายในเชิงพาณิชย์ มีค่าความหนาแน่น ระหว่าง $0.045\text{-}0.20\text{ g/cm}^3$ และค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนระหว่าง $0.017\text{-}0.060\text{ (W/m.K)}$ เช่น เซลลูโลส โพลียูรีเทน โยแก้ว เป็นต้น ส่วนกลุ่มที่ 2 เป็นกลุ่มที่มีความหนาแน่นสูง มีค่าระหว่าง $0.40\text{-}1.30\text{ g/cm}^3$ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนมีค่าระหว่าง $0.086\text{-}0.190\text{ W/m.K}$ เช่น ฉนวนจากต้นมันสำปะหลัง ฉนวนจากขี้ข้าวโพดไฟเบอร์ซีเมนต์ และแผ่นไม้อัด ซึ่งเมื่อนำค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (0.055 W/m.K) และความหนาแน่น (0.196 g/cm^3) ของยางพองน้ำที่ใช้ซิลิกาแอโรเจลเป็นสารตัวเติมที่ปริมาณ 1.00 phr มาเปรียบเทียบกับวัสดุที่เป็นฉนวนข้างต้น พบว่าสามารถจัดให้อยู่ในกลุ่มที่ 1

ในส่วนของค่าความต้านทานต่อแรงดึงของยางพองน้ำพบว่ามีความเพิ่มขึ้นตามปริมาณซิลิกาแอโรเจลที่เพิ่มขึ้นตั้งแต่ 1.00-10.00 phr แสดงให้เห็นว่าสารตัวเติมเกิดอันตรกิริยากับยางมากขึ้น ทำให้เกิดการเสริมแรงในยางพองน้ำ อย่างไรก็ตามเมื่อเติมปริมาณซิลิกาแอโรเจลจนเลยระดับที่เหมาะสม มีผลทำให้อันตรกิริยาระหว่างสารตัวเติมและยางลดลง เกิดอันตรกิริยาระหว่างสารตัวเติมและสารตัวเติมเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ซิลิกาแอโรเจลที่เติมมากเกินไปเกิดเป็นมวลรวม (aggregate) จึงทำให้ความสามารถในการเสริมแรงลดลง (On et al., 2012)

สรุปผลการวิจัย

การผลิตยางพองน้ำโดยใช้ซิลิกาแอโรเจลเป็นสารตัวเติมเพื่อใช้เป็นฉนวนความร้อนจะต้องใช้ปริมาณซิลิกาแอโรเจลไม่เกิน 1.00 phr จึงจะทำให้ได้ยางพองน้ำที่มีน้ำหนักเบา ความหนาแน่นน้อย ความต้านทานความร้อนสูง รวมถึงมีคุณสมบัติการนำความร้อนต่ำใกล้เคียงกับฉนวนความร้อนที่มีขายในเชิงพาณิชย์

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณศูนย์วิจัยด้านสิ่งแวดล้อมและพลังงานที่ยั่งยืน สาขาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์ ศูนย์เครื่องมือกลาง มหาวิทยาลัยมหาสารคาม และศูนย์เครื่องมือกลาง คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนครสวรรค์ ที่ให้ความช่วยเหลือในการใช้เครื่องมือวิเคราะห์ ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยมหาสารคาม และสำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงานที่ให้ทุนสนับสนุนการวิจัย

เอกสารอ้างอิง

Buasri K. The Production of Thermal Insulation Boards form Rice Straw. Master degree thesis of engineering (Materials Technology). King Mongkuts University of Technology Thonburi; 2001.
Dhevthong S, Polkert S, Nilwong A. Study the Filler from Natural Material to Property Natural Latex Foam. Bangkok: The Thailand Research Fund; 2008.

- Gao T, Jelle BP. Lightweight and thermally insulating aerogel glass materials, *Applied Physics A*. 2014; 117(2): 799-808.
- Green label board of committee. Green label product criteria for insulation (TGL-14-R1-11). Bangkok: Thailand Environment Institute; 2011.
- He YL, Xie T. Advances of thermal conductivity models of nanoscale silica aerogel insulation material, *Applied Thermal Engineering*. 2015; 81: 28-50.
- Khachonchaikul V. Latex Technology. Bangkok: The Thailand Research Fund; 2016.
- Lopattananon N, Kaesaman A. Structure and Property Improvement of Nanocomposite Foams Based on Blend of Ethylene-Vinyl Acetate (EVA)/Natural Rubber (NR)/Nanoclay. Final research report: Prince of Songkla University; 2014.
- Nankongnab N. Development of Low Thermal Conductivity Particle-Boards with Optimized Durian Peel and Coconut Coir Mixture Ratio. Master degree thesis of Engineering (Energy Management Technology). King Mongkuts University of Technology Thonburi; 2002.
- Neugebauer A, Chen K, Tang A. et al. Thermal conductivity and characterization of compacted, granular silica aerogel, *Energy and Buildings*. 2014; 79: 47-57.
- On NK, Rashid AA, Nazlan MMM. et al. Thermal and mechanical behavior of natural rubber latex-silica aerogel film, *Journal of Applied Polymer Science*. 2012; 124: 3108-3116.
- Pakunworakij T, Puthipiroj P, Ottichai W. et al. Thermal Resistance Efficiency of Building Insulation Material from Agricultural Waste, *Journal of Architectural/Planning Research and Studies*. 2006; 4: 3-13.
- Pacharaphun S, Rakkomsuk P, Na Ranong N. et al. Thermal insulation produced from vetiver fiber and natural rubber latex, *Kasetsart Engineering Journal*. 2007; 62(20): 87-94.
- Peng CC, Göpfert A, Drechsler M. et al. "Smart" silica-rubber nanocomposites in virtue of hydrogen bonding interaction, *Polymers for Advanced Technologies*. 2005; 16(11-12): 770-782.
- Prakaimaneewong P, Na Ranong N, Wichitchonlachai N. et al. Development Formula and Technic for Latex Foam Rubbers Manufacture for Decreased Cost in Pilot Scale. Final research report. Bangkok: Postharvest and Processing Research and Development Division, Rubber Research Institute; 2010.
- Punsombut P, Putkham A, Imkum A. Preparation of carbon-silica composite aerogel via facile and environmental friendly method, *Journal of Science and Technology Mahasarakham University*, 2014; 10: 39-44.
- Sachithanadam M, Joshi SC. Acoustic performance of silica aerogel composites. *Silica Aerogel Composites: Novel Fabrication Methods*. Singapore: Springer Singapore; 2016: 109-132.
- Surin P. Studies of Process and Properties of Thermal Insulation Boards Produced from Bagasse. Master degree thesis of Engineering (Energy Management Technology). King Mongkuts University of Technology Thonburi; 2001.
- Termkok K. Determination of thermal conduction property of composite insulation, *Journal of Department of Science Service*. 2012; 60(190): 9-11.
- The Energy Policy and Planning Office. Guidelines for Selecting Building Materials and Insulation to Conserve Energy. Bangkok: Ministry of Energy; 2001.
- Thongruang W, Dechwayukul C, Suntho J. Development of Natural Rubber Foam Processing. Bangkok: The Thailand Research Fund; 2004.
- Yuan B, Ding S. Heat insulation properties of silica aerogel/glass fiber composites fabricated by press forming, *Materials Letters*. 2012; 75: 204-206.