

สมบัติการคงรูป เชิงกล และการกำบังอนุภาคนิวตรอนและรังสีแกมมาของ วัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงซีลี้อยไม้

Cure Characteristics, Mechanical and Neutron/Gamma Shielding properties of Wood-Natural Rubber Composites

กิริติกานต์ นิลยง^{1*}, เอกชัย วิมลมาลา¹, ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ¹ และ เกียรติศักดิ์ แสนบุญเรือง²

Keeratikarn Ninyong^{1*}, Ekachai Wimolmala¹, Narongrit Sombatsompop¹ and Kiadtisak Saenboonruang²

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาชนิดและปริมาณของสารตัวเติมป้องกันรังสีชนิดกรดบอริก โบรอนออกไซด์ และผงตะกั่ว โดยปรับเปลี่ยนปริมาณที่ 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 ส่วนในยางร้อยละ (phr) ในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงซีลี้อยไม้ ตรวจสอบเวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูป เวลาที่ยางคงรูป สมบัติเชิงกล และสมบัติด้านรังสี ผลการวิจัยพบว่า การเติมกรดบอริกในวัสดุเชิงประกอบยางที่เติมและไม่เติมผงซีลี้อยไม้ ส่งผลทำให้เวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูปและเวลาที่ยางคงรูปเพิ่มขึ้น ส่วนการเติมโบรอนออกไซด์ในวัสดุเชิงประกอบยางที่เติมและไม่เติมผงซีลี้อยไม้ ส่งผลทำให้เวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูปและเวลาที่ยางคงรูปลดลง และสมบัติเชิงกลโดยรวมของวัสดุเชิงประกอบยางที่เติมและไม่เติมผงซีลี้อยไม้มีแนวโน้มลดลง ยกเว้นค่าความแข็งที่ผิว ส่วนการเติมผงตะกั่วในวัสดุเชิงประกอบยางไม่ส่งผลต่อเวลาการคงรูปยาง และมีสมบัติเชิงกลโดยรวมไม่ต่างกัน จากการศึกษาสมบัติด้านรังสี พบว่า การเติมกรดบอริกและโบรอนออกไซด์ที่ปริมาณการเติม 50 phr ในวัสดุเชิงประกอบยางที่เติมและไม่เติมผงซีลี้อยไม้สามารถต้านทานต่ออนุภาคนิวตรอนเพิ่มขึ้น และมีความสามารถต้านทานต่อรังสีเทียบเท่าเกณฑ์เป้าหมาย ส่วนการเติมผงตะกั่วในวัสดุเชิงประกอบยางสามารถต้านทานต่อรังสีแกมมาเพิ่มขึ้นเล็กน้อย

ABSTRACT

This research aims to investigate effects of radiation protection agents: boric acid, boron oxide, and lead powders, with the contents of 0, 10, 20, 30, 40, and 50 phr (parts per hundred of rubber) in natural rubber composite and wood-natural rubber composite. Properties that are investigated include scorch time, cure time, mechanical properties, and radiation shielding properties. Results indicate that adding boric acid to the composites increases the scorch time and cure time, while boron oxide decreases the scorch time and cure time. Moreover, all mechanical properties but hardness decrease as the contents of the radiation agents increases. On the other hand, lead powder does not significantly affect the scorch time, cure time, and mechanical properties. In the case of radiation shielding properties, the ability to shield neutrons increases as the content of boric acid and boron oxide increases. Specifically, at the 50 phr boron oxide content, the neutron shielding properties pass the properties targets measured from commercial products. In addition to boric acid and boron oxide, lead powder can shield gamma ray, however, in small percentages.

Key Words: Natural rubber / Filler / Mechanical properties / Radiation properties

*Corresponding author; e-mail address: Inking_001@hotmail.com

¹กลุ่มวิจัย P-PROF คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

¹P-PROF research group, School of Energy, Environment and Materials, King Mongkut's University of Technology Thonburi

²ภาควิชารังสีประยุกต์และไอโซโทป คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

²Department of Applied Radiation and Isotope, Faculty of Science, Kasetsart University

คำนำ

ปัจจุบันมีการนำรังสีไปประยุกต์ใช้ประโยชน์ในงานต่างๆ เช่น การรักษาโรคในงานด้านการแพทย์ การตรวจสอบวัสดุด้านอุตสาหกรรม และการถนอมอาหารและเมล็ดพันธุ์ในด้านเกษตร เป็นต้น แต่การใช้งานด้านรังสีอาจให้โทษต่อร่างกายมนุษย์ เมื่อมีการสัมผัสกับรังสีเป็นเวลานาน และในระยะที่ใกล้เกินไป หรือกรณีที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงรังสีได้ ดังนั้นในงานทั่วไปจึงมีการนำแผ่นกำบังรังสีมาใช้ในงานต่างๆ เช่น วัสดุพอลิเอทิลีนผสมผงโบรอน แต่วัสดุดังกล่าวไม่สามารถตัดโค้งได้ ดังนั้น จึงมีการนำวัสดุยางธรรมชาติซึ่งมีความยืดหยุ่นที่ดี ไปใช้ในการป้องกันรังสีโดยการเติมผงตะกั่วเพื่อยับยั้งรังสีแกมมา (Gwaily และ Madani, 2002) และสารประกอบที่มีโบรอนเป็นองค์ประกอบ เช่น กรดบอริก (H_3BO_3) และโบรอนออกไซด์ (B_2O_3) เติมในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ เพื่อใช้ในการยับยั้งอนุภาคนิวตรอน (Gwail S.E. et al, 2002) ซึ่งอนุภาคนิวตรอนเป็นอนุภาคที่ไม่มีประจุ ทำให้ยากต่อการป้องกัน อนุภาคนิวตรอนสามารถเกิดขึ้นได้จากการใช้งานด้านรังสีในหน่วยงานต่างๆ เช่น โรงไฟฟ้านิวเคลียร์หรือเตาปฏิกรณ์ และห้องฉายรังสีในโรงพยาบาล เป็นต้น

จากงานวิจัยที่ผ่านมาของกลุ่มวิจัยการผลิตและขึ้นรูปพอลิเมอร์ (กลุ่มวิจัย P-PROF) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี (ณรงค์ฤทธิ และคณะ, 2552; Hamaviriyaporn N. et al, 2012) ที่มีการศึกษานำยางธรรมชาติผสมกับผงซีลีเนียมยางพาราและสารเคมีชนิดต่างๆ เพื่อเพิ่มสมบัติเชิงกลให้กับยางธรรมชาติให้เหมาะสมต่อการนำไปใช้งานได้จริง ที่มีสมบัติเชิงกลด้านความแข็งแรง ทนทานต่อสภาพภูมิอากาศ และความชื้นเป็นอันดับหนึ่งที่ดี ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงมีการต่อยอดองค์ความรู้จากงานวิจัยที่ผ่านมาที่มีการนำผงซีลีเนียมเป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติ โดยมีแนวคิดขยายผลจากสมบัติทางเชิงกลที่ดีมาใช้งานด้านกำบังรังสีและความร้อนที่เกิดจากการใช้งาน ซึ่งมีงานวิจัยทางวัสดุด้านป้องกันรังสีน้อยมาก ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงศึกษาชนิดและปริมาณการใช้สารป้องกันรังสี (กรดบอริก ผงโบรอนออกไซด์ และผงตะกั่ว) เป็นสารตัวเติมในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ ทดสอบสมบัติการคงรูปยาง ทางเชิงกล ทางกายภาพ และความสามารถในการป้องกันอนุภาคนิวตรอนและรังสีแกมมา

อุปกรณ์และวิธีการ

เกณฑ์เป้าหมายผลิตภัณฑ์ป้องกันรังสี

คณะวิจัยได้นำชิ้นงานผลิตภัณฑ์ยางสำหรับใช้งานป้องกันรังสีที่นำเข้ามาจากบริษัท โชวา รับเบอร์ จำกัด ประเทศญี่ปุ่น ที่มีความหนา 5.13 เซนติเมตร (Data sheet Showa-Rubber Co., Ltd, 2013) โดยมีสมบัติเชิงกลด้านความแข็งแรงที่ผิว 69 ชอร์เอ ความต้านทานแรงดึง 6.48 เมกะปาสคาล เปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด 432 และค่าความสามารถในการป้องกันรังสี 169.75 ต่อเมตร

วัสดุ/สารเคมี ขั้นตอนการผลิต และการเตรียมชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ

ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษา 2 ระบบ ดังนี้ 1) เตรียมวัตถุดิบผสมระหว่างยางธรรมชาติกับเขม่าดำชนิดมาสเตอร์แบทที่ปริมาณคงที่ 40 phr และปรับเปลี่ยนปริมาณกรดบอริก ผงโบรอนออกไซด์ และผงตะกั่ว ที่ปริมาณ 0-50 phr และ 2) เตรียมวัตถุดิบผสมระหว่างยางธรรมชาติกับเขม่าดำชนิดมาสเตอร์แบทที่ปริมาณคงที่ 40 phr ที่เติมผงซีลีเนียมขนาดอนุภาค 75-100 ไมครอน ปริมาณคงที่ 20 phr และปรับเปลี่ยนปริมาณกรดบอริก ผงโบรอนออกไซด์ และผงตะกั่ว ที่ปริมาณ 0-50 phr ด้วยเครื่องบดผสมลูกกลิ้งคู่ (Two roll mill) จากบริษัท

ยง ฟง แมชชีนเนอรี จำกัด ตามส่วนประกอบของยางที่แสดงใน Table 1 เวลาในการผสม 30 นาที อุณหภูมิการผสมในช่วง 40-45 องศาเซลเซียส นำวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติเตรียมขึ้นรูปแผ่นขึ้นงานทดสอบด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปร้อน (Hot compression molding) จากบริษัท แลป เทคโนโลยี อินจิเนียริง จำกัด อุณหภูมิการขึ้นรูปที่ 160 องศาเซลเซียส แรงดันแม่พิมพ์ที่ 150 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และเตรียมขึ้นรูปขึ้นงานทดสอบสมบัติเชิงกลด้วยแม่พิมพ์ตัดเป็นรูปดัมเบลล์

Table 1 Formula of natural rubber compounds

Ingredients	Content (phr*)	Function	Commercial source
Natural Rubber: STR 20	100 (Part)	Matrix	PI Industry Co., Ltd.
Zinc oxide, ZnO	5	Activator	Thai-Lysaght Co., Ltd.
Stearic acid	3 (2)	Activator	Imperial Industrial Chemicals Co., Ltd.
Mercaptobenzthaisoles, MBT	2 (0.5)	Accelerator	CMC advance Co., Ltd.
Diphenylguanidine, DPG	3 (2)	Accelerator	Siam Chemicals Co., Ltd.
Sulphur powder	4 (3)	Cross-linker	Zeon advanced Polymix Co., Ltd.
Carbon Black master batch (HAF N330)	40	Reinforcing	PI Industry Co., Ltd.
Wood sawdust	20	Filler	V.P. Wood Co., Ltd.
Silane Coupling (KBM 603A)	0.5% / Weight Wood sawdust	Coupling agent	KISCO (T) Ltd.
UV Stabilizer (TINUVIN 234)	0.1	UV absorber	Behn Meyer Chemical (T) Co., Ltd.
Anti-oxidant (IRGANOX 1076)	0.5	Anti-oxidant	Global Connections PLC.
Anti-Ozonant (Enhance)	3	Anti-Ozonant	Behn Meyer Chemical (T) Co., Ltd.
Radiation protection agent			
- Boric acid	Varying from	Radiation	Siam Beta Group Co., Ltd.
- Boron oxide	0-50	protection agent	Sigma-Aldrich Co., Ltd.
- Lead powder			Pun Engineering Co., Ltd.

*phr : part per hundred of rubber by weight , numbers in () represents improved formula used in wood-natural rubber composites.

ขั้นตอนการทดสอบสมบัติการคงรูป สมบัติเชิงกล และโครงสร้างจุลภาค

นำยางคอมปาวด์ที่ได้จากเครื่องบดผสมลูกกลิ้งคู่ทดสอบเวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูป (ts_1) และเวลาในการคงรูปยางที่ 90 เปอร์เซ็นต์ (tc_{90}) ด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์แบบจานแกว่ง (Oscillating Disk Rheometer; ODR) จาก บริษัท โทเทค เทคโนโลยี แมชชีน อินดัสเตรียล จำกัด รุ่น GT 70 - 70 S2, ประเทศไต้หวัน ตามมาตรฐาน ASTM D2084 - 01 อุณหภูมิในการทดสอบ 160 องศาเซลเซียส ขึ้นรูปแผ่นขึ้นงานทดสอบสมบัติเชิงกล ด้านความต้านทานต่อแรงดึง และเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ตามมาตรฐาน ASTM D412-06 ด้วยเครื่อง Universal Testing Machine จากบริษัท ซิมาส จำกัด รุ่น Autograph AG-I 5kN ประเทศญี่ปุ่น และค่าความแข็งของขึ้นงานตามมาตรฐาน ASTM D2240-03 (Shore A) ด้วยเครื่องทดสอบความแข็งจากบริษัท เทคลิค จำกัด และวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพและสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) รุ่น JSM-6610LV ยี่ห้อ JEOL จากประเทศญี่ปุ่น ความต่างศักย์ 10 กิโลโวลต์ และกระแสไฟฟ้า 15 แอมแปร์

ขั้นตอนการทดสอบทางด้านรังสี

นำชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่เติมผงกรดบอริก และผงโบรอนออกไซด์ ทดสอบความต้านทานต่ออนุภาคนิวตรอน และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่เติมผงตะกั่ว ทดสอบความต้านทานต่อรังสีแกมมา โดยในงานวิจัยนี้ใช้ระบบ Integral counting system ทดสอบจำนวน 5 ครั้งต่อชิ้นงาน และคำนวณหาค่าความต้านทานต่ออนุภาคนิวตรอน และรังสีแกมมา (ที่หลุดจากการดูดซับอนุภาคนิวตรอน) ดังแสดงในสมการที่ 1

สูตรการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น (Linear attenuation coefficient, μ)

$$\frac{I}{I_0} = e^{-\mu x}$$

$$\mu = \frac{-\ln\left(\frac{I}{I_0}\right)}{x} \dots\dots\dots (1)$$

- โดยที่ I_0 คือ ความเข้มของรังสีก่อนผ่านชิ้นงาน
- I คือ ความเข้มของรังสีหลังผ่านชิ้นงาน
- x คือ ความหนาของชิ้นงาน

ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

ผลการตรวจสอบเวลาที่ยางเริ่มการคงรูป เวลาที่ยางคงรูป สมบัติเชิงกล และสมบัติด้านรังสีของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ ดังแสดงใน Table 2 และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงซีลีเนียม ดังแสดงใน Table 3 ที่มีการเติมสารตัวเติมชนิดกรดบอริก โบรอนออกไซด์ และผงตะกั่ว โดยปรับเปลี่ยนปริมาณที่ 10, 20, 30, 40 และ 50 phr พบว่า เมื่อเติมผงโบรอนออกไซด์ไม่ส่งผลต่อเวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูป แต่การเติมกรดบอริกส่งผลทำให้มีเวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูปมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย เนื่องจากผงกรดบอริกมีฤทธิ์เป็นกรดทำหน้าที่เป็นสารหน่วงปฏิกิริยาก่อนการเกิดการคงรูป และเมื่อพิจารณาเวลาที่ยางคงรูป พบว่า การเติมกรดบอริกที่ปริมาณเพิ่มขึ้นทำให้เวลาการคงรูปมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากกรดบอริกเป็นสารเคมีที่มีฤทธิ์เป็นกรดที่หน่วงประสิทธิภาพการทำงานของสารกระตุ้นและสารตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้เวลาการเกิดปฏิกิริยาการคงรูปเพิ่มขึ้น (พงษ์ธร, 2548) ส่วนในกรณีการเติมโบรอนออกไซด์ที่ปริมาณตั้งแต่ 10 phr พบว่า เวลาในการคงรูปยางลดลง เนื่องจากผงโบรอนออกไซด์มีส่วนประกอบของโลหะออกไซด์ ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารกระตุ้นร่วม (Co-activator) ในการเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ ปฏิกิริยาการคงรูปเกิดได้เร็วขึ้นทำให้เวลาที่ยางคงรูปลดลง และพบว่าเวลาการคงรูปไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อปริมาณโบรอนออกไซด์เพิ่มขึ้น ส่วนการเติมผงตะกั่วไม่ส่งผลต่อเวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูป และเวลาการคงรูปของยาง ทั้งนี้เนื่องจากผงตะกั่วไม่ทำปฏิกิริยาทางเคมีกับยางธรรมชาติ

ส่วนสมบัติเชิงกล พบว่า การเติมกรดบอริก และโบรอนออกไซด์ส่งผลทำให้ค่าความแข็งที่ผิว มอดุลัสแรงดึง ความต้านทานแรงดึง และเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด มีแนวโน้มลดลง เนื่องจากยางและสารตัวเติมดังกล่าวอาจจะมีปริมาณการเชื่อมขวาง (Crosslink density) ที่น้อย ทำให้วัสดุเชิงประกอบยางมีความสามารถต้านทานต่อการเสียดรูปที่ไม่ดี (ศิริกุล, 2555) และเกิดความไม่เข้ากันของสารตัวเติมกับเฟสของยางเมื่อเติมในปริมาณที่มากขึ้นเกิดการหลุดออกของสารตัวเติมเกิดรูพรุน ทำให้เกิดความไม่ต่อเนื่องของเฟสยางเมื่อเทียบกับ

ไม่เติมสารตัวเติม แสดงดัง Figure 1 (a และ b) ส่วนวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงซีลี้อยู่ไม่เติมผงโบรอนออกไซด์ที่ปริมาณ 50 phr แสดงดัง Figure 1 (c) ที่มีค่าสมบัติเชิงกลโดยรวมลดลง ส่วนกรณีการเติมผงตะกั่วไม่ส่งผลต่อค่าความแข็งที่ผิว และมอดุลัสแรงดึง แต่ทำให้ความต้านทานแรงดึง และเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด มีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้เนื่องมาจากผงตะกั่วมีค่าความหนาแน่น (Density) ค่อนข้างสูง จึงส่งผลทำให้เป็นสารตัวเติมกระจายในเฟสของยางได้ยาก และไม่เกิดพันธะทางเคมีกับยางธรรมชาติจึงไม่มีการเสริมแรงให้กับยาง อีกทั้งอนุภาคของผงตะกั่วเข้าไปแทนที่ยางธรรมชาติที่เป็นเนื้อวัสดุหลัก ทำให้ส่วนที่เป็นเฟสยางลดลง ส่งผลทำให้วัสดุเชิงประกอบยางมีการยืดตัวและมีสมบัติความเป็นอลาสติกของยางลดลง และพบว่า วัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงซีลี้อยู่ไม่มีความแข็งที่ผิวสูงกว่ากรณีไม่เติมผงซีลี้อยู่ไม่ เนื่องจากอนุภาคผงซีลี้อยู่ไม่มีความแข็งแกร่ง (Rigidity) สูง เมื่อเติมในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ ทำให้ค่าความแข็งที่ผิวโดยรวมเพิ่มขึ้น (ณรงค์ฤทธิ์ และคณะ, 2552)

Table 2 Cure, mechanical and radiation shielding properties of natural rubber composites

Sample code content (phr)	Cure properties		Mechanical properties				Radiation properties
	Scorch time (sec)	Cure time (sec)	Modulus; M100 (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Elongation at break (%)	Hardness (Shore A)	Linear attenuation coefficient, μ (m^{-1})
NR-CB	34 ± 2.12	184 ± 0.71	3.75 ± 0.02	14.47 ± 0.99	316 ± 19	74 ± 1	8.04 ± 6.57
Boric acid : BA							
NR-CB-10BA	40 ± 5.2	196 ± 7.94	2.76 ± 0.05	16.2 ± 1	501 ± 18	69 ± 1	45.99 ± 8.66
NR-CB-20BA	47 ± 4.51	228 ± 2.65	1.88 ± 0.02	10.02 ± 0.37	526 ± 13	65 ± 1	73.76 ± 9.92
NR-CB-30BA	49 ± 2.31	272 ± 2.65	1.68 ± 0.04	7.51 ± 0.17	491 ± 14	61 ± 2	90.1 ± 6.22
NR-CB-40BA	74 ± 8.74	433 ± 9.54	1.39 ± 0.04	4.85 ± 0.09	454 ± 11	57 ± 2	103.87 ± 6.54
NR-CB-50BA	81 ± 2.89	609 ± 7.94	1.29 ± 0.03	4.28 ± 0.07	445 ± 8	51 ± 1	114.62 ± 4.97
Boron oxide : BO							
NR-CB-10BO	41 ± 3.21	109 ± 1.53	1.09 ± 0.01	12.61 ± 0.57	784 ± 25	53 ± 1	64 ± 5.3
NR-CB-20BO	35 ± 1.73	99 ± 1.73	1.3 ± 0.03	9.38 ± 0.45	638 ± 22	57 ± 1	93.29 ± 3.99
NR-CB-30BO	37 ± 2.65	101 ± 2.65	1.41 ± 0.06	8.1 ± 0.22	586 ± 21	62 ± 1	128.62 ± 3.91
NR-CB-40BO	35 ± 1.53	97 ± 0	1.58 ± 0.06	7.04 ± 0.29	507 ± 21	66 ± 1	134.13 ± 2.96
NR-CB-50BO	33 ± 1.73	98 ± 2.65	2.03 ± 0.05	6.43 ± 0.23	432 ± 15	68 ± 1	153.95 ± 6.54
Lead powder : Pb							
NR-CB-10Pb	35 ± 1.53	200 ± 1.73	3.69 ± 0.06	11.02 ± 1.22	262 ± 26	70 ± 2	1.36 ± 3.85
NR-CB-20Pb	34 ± 2.89	205 ± 2.31	3.66 ± 0.04	9.21 ± 2.45	228 ± 52	69 ± 1	10.34 ± 3.18
NR-CB-30Pb	35 ± 2.31	206 ± 2.89	3.66 ± 0.07	7.8 ± 0.99	197 ± 22	71 ± 1	11.92 ± 3.63
NR-CB-40Pb	34 ± 1	204 ± 1.53	3.53 ± 0.04	7.89 ± 1.46	213 ± 34	70 ± 2	12.71 ± 4.06
NR-CB-50Pb	34 ± 1.15	208 ± 3.61	3.59 ± 0.1	6.48 ± 1.37	178 ± 33	71 ± 1	20.65 ± 3.88

จากผลทดสอบสมบัติด้านรังสี พบว่า การเติมโบรอนออกไซด์ และการเติมกรดบอริก ส่งผลทำให้วัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติมีความสามารถในการป้องกันอนุภาคนิวตรอนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ตามปริมาณของโบรอนออกไซด์และกรดบอริก ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ Onjun *et al* (2014) เนื่องจากสารตัวเติมทั้ง 2 ชนิดมีโบรอนเป็นส่วนประกอบเมื่อสัมผัสกับอนุภาคนิวตรอน นิวเคลียสของโบรอนสามารถดูดซับ (Absorbed) อนุภาค

นิวตรอนไว้ภายใน ซึ่งการดูดซับอนุภาคนิวตรอนไว้โดยการใช้ปฏิกิริยานิวเคลียร์นี้ นอกจากจะมีการปลดปล่อยอนุภาคแอลฟาแล้วยังมีการปลดปล่อยรังสีแกมมาออกมาด้วยเช่นกัน ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงศึกษาการเติมผงตะกั่วในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติเพื่อป้องกันรังสีแกมมาที่เกิดจากการดูดซับ (Absorbed) ของอนุภาคนิวตรอน โดยการเติมผงตะกั่วในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติทำให้มีความสามารถในการป้องกันรังสีแกมมาเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย เนื่องจากคุณสมบัติด้านความหนาแน่นของวัสดุส่งผลต่อความสามารถในการป้องกันรังสีแกมมาโดยตรง โดยสอดคล้องกับงานวิจัยของ Gwail S.E. *et al.* (2002) และพบอีกว่า การเติมกรดบอริกและผงไบรอนออกไซด์ที่ปริมาณ 50 phr ในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่เติมและไม่เติมผงซีลีเนียม มีค่าด้านรังสีเทียบเท่าเกณฑ์เป้าหมายผลิตภัณฑ์ โดยที่ค่าสมบัติเชิงกลโดยรวมลดลง ยกเว้นสมบัติด้านความแข็งที่ผิว

Table 3 Cure, mechanical and radiation shielding properties of wood-natural rubber composites with improved formula.

Sample code content (phr)	Cure properties		Mechanical properties				Radiation properties
	Scorch time (sec)	Cure time (sec)	Modulus; M100 (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Elongation at break (%)	Hardness (Shore A)	Linear attenuation coefficient, μ (m^{-1})
NR-CB-WS	42 ± 7.78	222 ± 12.02	3.73 ± 0.07	15.45 ± 0.31	460 ± 10	73 ± 1	20.04 ± 4.14
Boric acid : BA							
NR-CB-WS-10BA	56 ± 5.57	376 ± 11.53	2.12 ± 0.03	5.04 ± 0.17	337 ± 11	65 ± 1	51.33 ± 3.03
NR-CB-WS-20BA	101 ± 10.97	1080 ± 11	1.31 ± 0.06	2.5 ± 0.02	310 ± 12	60 ± 1	63.32 ± 11.19
NR-CB-WS-30BA	155 ± 10.26	1533 ± 11.13	1.3 ± 0.05	1.94 ± 0.05	234 ± 19	58 ± 1	87.42 ± 3.53
NR-CB-WS-40BA	1.59 ± 10.97	1566 ± 9.87	1.23 ± 0.01	1.62 ± 0.05	194 ± 7	57 ± 1	89.66 ± 8.14
NR-CB-WS-50BA	2.1 ± 23.33	1609 ± 41.01	1.32 ± 0.05	1.44 ± 0.12	135 ± 14	55 ± 1	97.67 ± 3.15
Boron oxide : BO							
NR-CB-WS-10BO	41 ± 3.79	206 ± 7.37	3.05 ± 0.05	9.21 ± 0.49	379 ± 14	70 ± 1	56.79 ± 6.6
NR-CB-WS-20BO	49 ± 10.61	202 ± 9.19	2.72 ± 0.09	6.72 ± 0.5	336 ± 21	72 ± 1	99.89 ± 4.75
NR-CB-WS-30BO	43 ± 2.52	173 ± 2.31	2.53 ± 0.08	5.11 ± 0.05	303 ± 11	70 ± 1	108.84 ± 4.08
NR-CB-WS-40BO	41 ± 2.89	125 ± 1.53	2.12 ± 0.02	4.34 ± 0.07	331 ± 5	73 ± 1	146.76 ± 7.89
NR-CB-WS-50BO	49 ± 2.52	1021 ± 67.12	2.33 ± 0.07	3.19 ± 0.07	238 ± 12	76 ± 1	169.68 ± 6.08
Lead powder : Pb							
NR-CB-WS-10Pb	40 ± 4.95	250 ± 12.73	4.03 ± 0.05	14.04 ± 1.07	391 ± 24	75 ± 1	0.89 ± 3.97
NR-CB-WS-20Pb	38 ± 1.15	220 ± 1.73	3.7 ± 0.08	13.39 ± 0.56	411 ± 11	75 ± 1	8.6 ± 1.93
NR-CB-WS-30Pb	38 ± 2.83	219 ± 1.41	3.62 ± 0.12	12.1 ± 0.59	387 ± 29	73 ± 1	7.67 ± 0.84
NR-CB-WS-40Pb	37 ± 0.71	220 ± 0	3.45 ± 0.15	11.07 ± 0.6	372 ± 8	75 ± 1	10.27 ± 3.49
NR-CB-WS-50Pb	37 ± 2.65	222 ± 1.73	3.52 ± 0.02	10.94 ± 0.25	368 ± 8	75 ± 1	9.91 ± 1.87

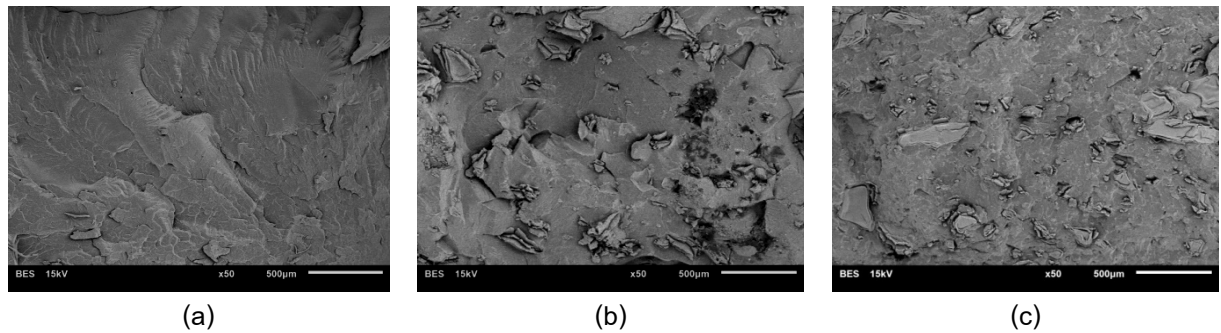


Figure 1 SEM images of the natural rubber composites (a) without radiation protection agent (b) natural rubber composites with boron oxide 50 phr and (c) wood-natural rubber composites with boron oxide 50 phr

สรุปผลการวิจัย

1. การเติมผงกรดบอริกในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงซีลีเนียมส่งผลทำให้ระยะเวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูปและเวลาที่ยางคงรูปเพิ่มขึ้น แต่การเติมผงโบรอนออกไซด์ในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงซีลีเนียมส่งผลทำให้เวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูปและเวลาที่ยางคงรูปลดลง ส่วนสมบัติเชิงกลโดยรวมของวัสดุเชิงประกอบยางที่เติมและไม่เติมผงซีลีเนียมไม่มีค่าลดลง ยกเว้นค่าความแข็งที่ผิว และการเติมผงตะกั่วในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงซีลีเนียมไม่ผลการทดลองเหมือนสารตัวเติมทั้ง 2 ชนิด
2. การเติมผงกรดบอริกและผงโบรอนออกไซด์ในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงซีลีเนียมส่งผลทำให้ค่าความต้านทานต่ออนุมูลภาคนิวตรอนเพิ่มขึ้น และมีค่าสูงสุดที่ปริมาณการเติม 50 phr และการเติมผงตะกั่วทำให้วัสดุเชิงประกอบยางต้านทานต่อรังสีแกมมาเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย
3. การเติมกรดบอริกและโบรอนออกไซด์ที่ปริมาณการเติม 50 phr ในวัสดุเชิงประกอบยางที่เติมและไม่เติมผงซีลีเนียม สามารถต้านทานต่ออนุมูลภาคนิวตรอนเพิ่มขึ้น และมีความสามารถต้านทานต่อรังสีเทียบเท่าเกณฑ์เป้าหมาย

กิตติกรรมประกาศ

คณะวิจัยฯ ขอขอบคุณทุนสนับสนุนการวิจัยจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) (สัญญาเลขที่ RDG5750096) และโครงการวิจัยมหาวิทยาลัยวิจัยแห่งชาติ (NRU) สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (สทน.) ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือทดสอบ บริษัท วี.พี. วู๊ด จำกัด (กรุงเทพฯ ประเทศไทย) ที่ให้ความอนุเคราะห์ผงซีลีเนียม และบริษัท เบ็นไมเยอร์ เคมีคอล (ที) จำกัด (กรุงเทพฯ ประเทศไทย) ที่ให้ความอนุเคราะห์ด้านสารเคมียาง

เอกสารอ้างอิง

- ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ, เอกชัย วิมลมาลา, อีระศักดิ์ หมากริน และ ชัชวาลย์ กันทะลา., 2552. **การพัฒนาวัสดุและเทคโนโลยีการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์หลังคayangจากวัสดุผสมยางธรรมชาติกับผงซีลี้อยไม้ - การประชุมวิชาการวิจัยยางพารา โครงการวิจัยแห่งชาติ: ยางพารา ฝ่ายอุตสาหกรรม สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (Research on NR. ศูนย์ประชุมอิมแพค เมืองทองธานี นนทบุรี.**
- พงษ์ธร แซ่อูย. 2548. **ยาง : ชนิดสมบัติและการใช้งาน.** ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ(เอ็มเทค).
- ศิริกุล กาญจนปฐมพร. 2555. **การใช้ไบรอนออกไซด์เพื่อผลิตเป็นวัสดุกำบังรังสีนิวตรอน.** วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- Gwail S.E. and Madani M. 2002. Lead-Natural Rubber Composites as Gamma Radiation Shields. II: High Concentration. *Polymer Composites* 23: 495-499.
- Gwail S.E., Hassan H.H., Badawy M.M. and Madani M. 2002. Natural Rubber Composites as Thermal Neutron Radiation Shields. *Polymer Testing* 21: 513-517.
- Hamaviriyaporn N., Sombatsompop N., markpin T., Kositchaiyong A. and Wimolmala E. 2012. Solar reflectance, Surface Adhesion and Thermal Conductivity of Wood/NR Composite Sheet with TiO₂/PU Topcoat for Roofing Applications. *Journal of Vinyl & Additive Technology* 18: 184-191.
- Neutron Shielding Rubber. 2013. Showa-Rubber Co.,Ltd., challenging the potential of rubber. (Japan). Available Source: <http://www.showa-rubber.co.jp/en/products/neutron.php>, October, 14, 2015.
- Onjun O., Laothong N., Picha R., Ratanathongchai W. and Onjun T. 2014. Natural Rubber blocks as Thermal Neutron Shields. *Progress in Nuclear Science and Technology* 4: 631-634.