การเตรียมอิลาสโตเมอร์กำบังรังสีปลอดตะกั่วจากคอมโพสิตยางธรรมชาติผสมกับสารประกอบออกไซด์

Preparation of Lead-Free Radiation Shielding Elastomer Based on Natural Rubber/Metal Oxides Composites

ศิริลักษณ์ อินต่อม

Sirilak Intom

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีพอลิเมอร์
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Science in Polymer Science and Technology
Prince of Songkla University

2562

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร

การเตรียมอิลาสโตเมอร์กำบังรังสีปลอดตะกั่วจากคอมโพสิตยางธรรมชาติผสมกับสารประกอบออกไซด์

Preparation of Lead-Free Radiation Shielding Elastomer Based on Natural Rubber/Metal Oxides Composites

ศิริลักษณ์ อินต่อม
Sirilak Intom

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีพอลิเมอร์
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Science in Polymer Science and Technology
Prince of Songkla University
2562
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์ การเตรียมอิลาสโตเมอร์กำบังรังสีปลอดตะกั่วจากคอมโพสิตยางธรรมชาติผสมกับสารประกอบออกไซด์

ผู้เขียน นางสาวศิริลักษณ์ อินต่อม

สาขาวิชา วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีพอลิเมอร์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

.....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เอกวิภู กาลกรณ์สุรปราณี)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

.....

(รองศาสตราจารย์ ดร.จักรพงษ์ แก้วขาว)

คณะกรรมการสอบ

.....ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิธินาถ แซ่ตั้ง)

.....กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.จักรพงษ์ แก้วขาว)

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เอกวิภู กาลกรณ์สุรปราณี)

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เมธี พรมสวัสดิ์)

.....กรรมการ

(ดร.ศิริประภา แก้วแจ้ง)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีพอลิเมอร์

.....

(ศาสตราจารย์ ดร.ดำรงศักดิ์ ฟ้ารุ่งสาง)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้มาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเอง และได้แสดงความขอบคุณบุคคลที่มีส่วนช่วยเหลือแล้ว

ลงชื่อ.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เอกวิภู กาลกรณ์สุรปราณี)
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ลงชื่อ.....
(นางสาวศิริลักษณ์ อินต่อม)
นักศึกษา

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน และไม่ได้ถูกใช้ในการยื่นขออนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ.....
(นางสาวศิริลักษณ์ อินต่อม)
นักศึกษา

ชื่อวิทยานิพนธ์ การเตรียมอิลาสโตเมอร์กำบังรังสีปลอดตะกั่วจากคอมโพสิตยางธรรมชาติผสมกับสารประกอบออกไซด์

ผู้เขียน นางสาวศิริลักษณ์ อินต่อม
สาขาวิชา วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีพอลิเมอร์
ปีการศึกษา 2562

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้สามารถเตรียมอิลาสโตเมอร์กำบังรังสีปลอดตะกั่วจากคอมโพสิตระหว่างยางธรรมชาติกับสารตัวเติมสำหรับการกำบังรังสีได้สำเร็จ สภาวะที่เหมาะสมคือ การใช้ยางธรรมชาติผสมกับบิสมัทออกไซด์ปริมาณ 150 ส่วนโดยร้อยส่วนเมื่อเทียบกับยาง สามารถยืนยันสภาวะที่เหมาะสมได้จากสมบัติเชิงกลที่ดีเยี่ยมได้แก่ มอดูลัสที่ระยะยืดร้อยละ 100 ความแข็ง ความต้านทานต่อแรงดึง ระยะยืด ณ จุดขาด และจากประสิทธิภาพในการลดทอนรังสีแกมมา และรังสีเอ็กซ์ที่ดีซึ่งพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสี เลขอะตอมยังผล (Z_{eff}) ความหนาแน่นอิเล็กตรอน (N_e) ความหนาครึ่งค่า (*HVL*) และความหนาเทียบเท่าตะกั่ว อิลาสโตเมอร์กำบังรังสีปลอดตะกั่วที่เตรียมจากยางธรรมชาติจากสภาวะที่เหมาะสม เมื่อเทียบกับวัสดุกำบังรังสีชนิดอื่น ๆ มีประสิทธิภาพในการกำบังรังสีแกมมาได้ดีกว่ากระจกเชิงพาณิชย์ เซอร์เพนไทน์ คอนกรีต และเฮมาไทต์-เซอร์เพนไทน์ และมีประสิทธิภาพในการกำบังรังสีเอ็กซ์ได้ดีกว่ากระจกเชิงพาณิชย์ และกระจกกำบังรังสีเอ็กซ์ ดังนั้นคอมโพสิตยางธรรมชาติที่พัฒนาขึ้นจากงานวิจัยนี้สามารถใช้เป็นวัสดุกำบังรังสีปลอดตะกั่วที่มีความยืดหยุ่นสูง และกำบังรังสีได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ วัสดุคอมโพสิต วัสดุกำบังรังสี รังสีแกมมา รังสีเอ็กซ์ ยางธรรมชาติ โลหะออกไซด์

Thesis Title Preparation of Lead-Free Radiation Shielding Elastomer Based on Natural Rubber/Metal Oxides composites

Author Miss Sirilak Intom

Major Program Polymer Science and Technology
Academic Year 2019

ABSTRACT

Lead-free radiation shielding elastomer based on natural rubber/ radiation shielding fillers composites was successfully prepared. The optimum conditions was found using natural rubber matrix with bismuth oxide filler for 150 phr. This was confirmed by mechanical properties including modulus at 100% elongation, hardness, tensile strength, elongation at break and also confirmed by good radiation shielding properties including attenuation coefficient, effective atomic number (Z_{eff}), effective electron density (N_e), half value layer (*HVL*) and lead equivalent. The prepared radiation shielding elastomer based on natural rubber composites by suitable condition give better gamma radiation shielding those of commercial window, serpentine, ordinary concrete, hematite- serpentine and greater x-rays radiation shielding those that commercial window and x-rays window. Therefore, the developed natural rubber composites in this research can be used as efficient lead-free flexible radiation shielding materials.

Key words: Composite, Radiation shielding material, Gamma ray, X-ray, Natural rubber, Metal oxides

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เพราะได้รับความกรุณา และความช่วยเหลือจาก ผศ.ดร.เอกวิภู กาลกรณ์สุรปราณี และรศ.ดร.จักรพงษ์ แก้วขาวที่คอยให้คำปรึกษาและคำแนะนำในการดำเนินงานวิจัยเสมอมา อีกทั้งช่วยตรวจทาน และแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ในการเขียนวิทยานิพนธ์ และขอขอบพระคุณ ผศ.ดร. นิธินาถ แซ่ตั้ง ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.เมธี พรมสวัสดิ์ อาจารย์ดร.ศิริประภา แก้วแจ้งที่รับเป็นกรรมการสอบ และกรุณาให้ความช่วยเหลือในการตรวจทานแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ และเจ้าหน้าที่ รวมถึงสมาชิกทุกท่านในภาควิชาวิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยีวัสดุที่คอยให้ความช่วยเหลือ คอยเป็นกำลังใจที่ดีในการทำวิจัยครั้งนี้ตลอดมา ผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณทุนสนับสนุนงานวิจัยจากสถาบันวิจัยนวัตกรรมยางพารา มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้ทุนสนับสนุนการทำวิจัยในหลักสูตรปริญญาโทเป็นระยะเวลา 2 ปี และขอขอบพระคุณ รศ.ดร. จักรพงษ์ แก้วขาว อาจารย์ดร.วุฒิชัย ไชยภักษา นางสาววิราภรณ์ หงส์ทอง สมาชิกศูนย์วิจัยแห่งความเป็นเลิศทางเทคโนโลยีแก้วและวัสดุศาสตร์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐมทุกท่าน และ รศ.ดร.สุชาติ โกทันย์ อาจารย์ดร.ศิริประภา แก้วแจ้ง ภาควิชารังสีเทคนิค มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่คอยให้ความรู้ คำแนะนำ และเป็นแรงบันดาลใจที่ดีในงานวิจัยนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ที่ให้ทุนสนับสนุนการวิจัยครั้งนี้ และภาควิชาวิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยีวัสดุ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ แลปแก้ว ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม และภาควิชารังสีเทคนิค มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่ได้อนุเคราะห์วัสดุ อุปกรณ์ และสถานที่ในการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณบิดา มารดา ญาติมิตร เพื่อน ครูอาจารย์ และผู้มีพระคุณทุกท่านที่ให้การสนับสนุนคอยเป็นกำลังใจ และให้การอบรมสั่งสอนที่ดีแก่ผู้วิจัยตลอดมา หวังเป็นอย่างยิ่งว่าวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะมีประโยชน์แก่ผู้ที่สนใจไม่มากก็น้อย

ศิริลักษณ์ อินต่อม

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	(5)
Abstract	(6)
กิตติกรรมประกาศ	(7)
บทที่ 1 บทนำ	**1**
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎี เอกสาร และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	**4**
2.1 ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับรังสี	4
2.1.1.1 ต้นกำเนิดรังสี	4
2.1.1.2 ชนิดของรังสี	5
2.1.1.3 ประโยชน์ของรังสี	7
2.1.1.4 อันตรายที่เกิดจากรังสี	8
2.1.1.5 การป้องกันอันตรายจากรังสี	9
2.1.1.6 อันตรกิริยาของโฟตอนเมื่อเคลื่อนที่ผ่านตัวกลาง	11
2.1.1.7 การหาค่าการกำบังรังสี	14
2.1.1.8 การวัดรังสี	17
2.1.2 วัสดุเชิงประกอบ หรือวัสดุคอมโพสิต	20
2.1.2.1 วัสดุผสมที่เสริมแรงด้วยอนุภาค	21
2.1.2.2 วัสดุเสริมแรงด้วยเส้นใย	22
2.1.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวัสดุคอมโพสิต	22
2.1.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวัสดุคอมโพสิตเพื่อกำบังรังสี	26
2.1.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาพอลิเมอร์กำบังรังสี	27
บทที่ 3 สารเคมี อุปกรณ์ เครื่องมือ และวิธีการทดลอง	**31**
3.1 สารเคมี	31
3.2 อุปกรณ์ และเครื่องมือ	34
3.3 วิธีการทดลอง	38
3.2.1 การศึกษาการเตรียมสูตรยางธรรมชาติผสมบิสมัทออกไซด์โดยมีการแปรปริมาณของบิสมัทออกไซด์	38

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2.2 การศึกษาการเตรียมสูตรยางธรรมชาติผสมสารตัวเติมสำหรับการกำบังรังสีโดยมีการแปรชนิดของสารตัวเติมสำหรับการกำบังรังสี	39
3.2.3 การศึกษาผลการเตรียมยางกำบังรังสี โดยมีการแปรชนิดของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์เป็นสารกำบังรังสี	40
3.2.4 การศึกษาผลของการเปรียบเทียบสมบัติเชิงกล และสมบัติทางด้านรังสีระหว่างบิสมัทออกไซด์ และตะกั่วออกไซด์ในยางธรรมชาติ	40
3.2.5 การทดสอบสมบัติคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่เตรียมได้	41
3.2.5.1 การทดสอบเวลาคงรูปของยางธรรมชาติ	41
3.2.5.2 การทดสอบปริมาณการเชื่อมขวางของยางธรรมชาติ	41
3.2.5.3 การทดสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยา และการกระจายตัวของธาตุ	42
3.2.5.4 การทดสอบสมบัติเชิงกล	42
3.2.5.5 การทดสอบสมบัติทางด้านรังสี	44
3.5.5.6 การทดสอบสมบัติเชิงกลของคอมโพสิตของยางธรรมชาติหลังได้รับรังสี	47
บทที่ 4 ผลการทดลอง และวิจารณ์ผลการทดลอง	**48**
4.1 ผลของการเตรียมสูตรยางธรรมชาติผสมบิสมัทออกไซด์ โดยมีการแปรปริมาณของบิสมัทออกไซด์	48
4.1.1 ผลของการแปรปริมาณบิสมัทออกไซด์ ต่อระยะเวลาในการคงรูปคอมโพสิตของยางธรรมชาติ	48
4.1.2 ผลของการแปรปริมาณบิสมัทออกไซด์ต่อปริมาณการเชื่อมขวางของคอมโพสิตของยางธรรมชาติ	49
4.1.3 ผลของการแปรปริมาณบิสมัทออกไซด์ ต่อการกระจายตัว และปริมาณการกระจายตัวของธาตุของบิสมัทออกไซด์ในคอมโพสิตของยางธรรมชาติ	50
4.1.4 ผลของการแปรปริมาณบิสมัทออกไซด์ ต่อสมบัติเชิงกลของคอมโพสิตของยางธรรมชาติ	52
4.1.5 ผลของการแปรปริมาณบิสมัทออกไซด์ ต่อสมบัติทางด้านรังสีของคอมโพสิตของยางธรรมชาติ	58

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.1.6 ผลของการทดสอบสมบัติเชิงกลหลังผ่านการกำบังรังสีที่มีการฉายรังสีซ้ำ 10 และ 20 ครั้งของคอมโพสิตของยางธรรมชาติ	65
4.2 ผลของการเตรียมสูตรยางธรรมชาติผสมสารตัวเติมสำหรับการกำบังรังสีที่ปริมาณ 150 phr โดยมีการแปรชนิดของสารตัวเติมสำหรับการกำบังรังสี	71
4.2.1 ผลของการแปรชนิดของสารตัวเติมสำหรับการกำบังรังสีต่อระยะเวลาในการคงรูปของคอมโพสิตของยางธรรมชาติ	71
4.2.2 ผลของการแปรชนิดของสารตัวเติมสำหรับการกำบังรังสีต่อปริมาณการเชื่อมขวางของคอมโพสิตของยางธรรมชาติ	72
4.2.3 ผลของการแปรชนิดของสารตัวเติมสำหรับการกำบังรังสีต่อการกระจายตัว และปริมาณการกระจายตัวของธาตุในคอมโพสิตของยางธรรมชาติ	72
4.2.4 ผลของการแปรชนิดของสารตัวเติมสำหรับการกำบังรังสีต่อสมบัติเชิงกลของคอมโพสิตของยางธรรมชาติ	75
4.2.5 ผลของการแปรชนิดของสารตัวเติมสำหรับการกำบังรังสีต่อสมบัติการลดทอนรังสีของคอมโพสิตของยางธรรมชาติ	78
4.3 ผลของการเตรียมยางธรรมชาติกำบังรังสี โดยมีการแปรชนิดของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์เป็นสารกำบังรังสี	88
4.3.1 ผลของการแปรชนิดของยางที่แตกต่างกัน ต่อระยะเวลาในการคงรูปของคอมโพสิตของยางธรรมชาติ ที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์เป็นสารกำบังรังสี	88
4.3.2 ผลของการแปรชนิดของยางธรรมชาติที่แตกต่างกัน ต่อปริมาณการเชื่อมขวางของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์เป็นสารกำบังรังสี	89
4.3.3 ผลของการแปรชนิดของยางที่แตกต่างกันต่อการกระจายตัว และปริมาณการกระจายตัวของบิสมัทออกไซด์ในคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์เป็นสารกำบังรังสี	89
4.3.4 ผลของการแปรชนิดของยางธรรมชาติต่อสมบัติเชิงกลของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์เป็นสารกำบังรังสี	91
4.3.5 ผลของการแปรชนิดของยางธรรมชาติต่อสมบัติการลดทอนรังสีของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีเติมบิสมัทออกไซด์เป็นสารกำบังรังสี	96

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.3.6 ผลของการทดสอบสมบัติเชิงกลหลังผ่านการกำบังรังสีที่มีการฉายรังสีซ้ำ 10 และ 20 ครั้งของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการแปรชนิดของยางธรรมชาติ และเติมบิสมัทออกไซด์เป็นสารกำบังรังสี 103

4.4 ผลของการเปรียบเทียบคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์ หรือตะกั่วออกไซด์เป็นสารกำบังรังสี 108

4.4.1 ผลการเปรียบเทียบคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์ หรือตะกั่วออกไซด์เป็นสารกำบังรังสี ต่อระยะเวลาในการคงรูปของคอมโพสิตของยางธรรมชาติ 108

4.4.2 ผลของการเปรียบเทียบคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์ หรือตะกั่วออกไซด์เป็นสารกำบังรังสีต่อปริมาณการเชื่อมขวางของคอมโพสิตของยางธรรมชาติ 109

4.4.3 ผลของการเปรียบเทียบคอมโพสิตของยางธรรมชาติมีการเติมบิสมัทออกไซด์ หรือตะกั่วออกไซด์เป็นสารกำบังรังสีต่อการกระจายตัวของสารในคอมโพสิตของยางธรรมชาติ 109

4.4.4 ผลของการเปรียบเทียบคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์ หรือตะกั่วออกไซด์เป็นสารกำบังรังสีต่อสมบัติเชิงกลของคอมโพสิตของยางธรรมชาติ 111

4.4.5 ผลของการเปรียบเทียบคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์ หรือตะกั่วออกไซด์เป็นสารกำบังรังสีต่อสมบัติการลดทอนรังสีของคอมโพสิตของยางธรรมชาติ 115

4.4.6 ผลของการทดสอบสมบัติเชิงกลหลังผ่านการกำบังรังสีที่มีการฉายรังสีซ้ำ 10 และ 20 ครั้งของคอมโพสิตของยางธรรมชาติมีการเติมบิสมัทออกไซด์ออกไซด์ และตะกั่วออกไซด์เป็นสารกำบังรังสี 123

บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง **128**

5.1 การศึกษาการเตรียมสูตรยางธรรมชาติผสมบิสมัทออกไซด์ โดยมีการแปรปริมาณของบิสมัทออกไซด์ 128

5.2 การศึกษาการเตรียมสูตรยางธรรมชาติผสมสารตัวเติมสำหรับการกำบังรังสี โดยมีการแปรชนิดของสารตัวเติมสำหรับการกำบังรังสี 128

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.3 การศึกษาผลการเตรียมคอมโพสิตของยางธรรมชาติ โดยมีการแปรชนิดของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์เป็นสารกำบังรังสี	128
5.4 การศึกษาผลการเปรียบเทียบคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์ หรือตะกั่วออกไซด์เป็นสารกำบังรังสี	129
บรรณานุกรม	130
ภาคผนวก	
- ภาคผนวก ก	137
- ภาคผนวก ข	140
- ภาคผนวก ค	166
- ภาคผนวก ง	177
- ภาคผนวก จ	193
ประวัติผู้เขียน	199

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

3.1	สูตรในการเตรียมคอมโพสิตของยางธรรมชาติกับสารบิสมัทออกไซด์ (Bi_2O_3)	38
3.2	สูตรในการเตรียมคอมโพสิตของยางธรรมชาติกับสารตัวเติมสำหรับการกำบังรังสี	39
3.3	สูตรในการเตรียมคอมโพสิตของยางกับสารบิสมัทออกไซด์ (Bi_2O_3)	40
3.4	สูตรในการเตรียมคอมโพสิตของยางธรรมชาติกับสารบิสมัทออกไซด์ (Bi_2O_3) หรือตะกั่วออกไซด์ (PbO)	41
4.1	ระยะเวลาในการคงรูปยางของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีปริมาณของบิสมัทออกไซด์ที่แตกต่างกัน	49
4.2	ปริมาณของการเชื่อมขวางของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีปริมาณของบิสมัทออกไซด์ที่แตกต่างกัน	50
4.3	ร้อยละปริมาณการกระจายตัวของธาตุในคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการแปรปริมาณของบิสมัทออกไซด์	51
4.4	มอดูลัสที่ระยะยืด 100% (Modulus at 100% elongation) และความแข็ง (Hardness) ของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีปริมาณของบิสมัทออกไซด์ที่แตกต่างกัน	52
4.5	ความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile strength) และระยะยืด ณ จุดขาด (% Elongation at break) ของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีปริมาณของบิสมัทออกไซด์ที่แตกต่างกัน	53
4.6	ความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) ของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีปริมาณของบิสมัทออกไซด์ที่แตกต่างกัน	56
4.7	มอดูลัสที่ระยะยืด 100% และความแข็ง หลังผ่านการกำบังรังสีที่มีการฉายรังสีซ้ำ 10 และ 20 ครั้งของคอมโพสิตของยางธรรมชาติ	66
4.8	ความต้านทานต่อแรงดึง และระยะยืด ณ จุดขาด หลังผ่านการกำบังรังสีที่มีการฉายรังสีซ้ำ 10 และ 20 ครั้งของคอมโพสิตของยางธรรมชาติ	67
4.8	ความถ่วงจำเพาะ หลังผ่านการกำบังรังสีที่มีการฉายรังสีซ้ำ 10 และ 20 ครั้งของคอมโพสิตของยางธรรมชาติ	68

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
4.9	ปริมาณการเชื่อมขวาง หลังผ่านการกำบังรังสีของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีบิสมัทออกไซด์ปริมาณ 150 phr	68
4.10	ระยะเวลาในการคงรูปยางของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีชนิดของสารตัวเติมสำหรับการกำบังรังสีที่แตกต่างกัน	71
4.11	ปริมาณการเชื่อมขวางของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีชนิดของสารตัวเติมสำหรับการกำบังรังสีที่แตกต่างกัน	72
4.12	ร้อยละปริมาณการกระจายตัวของธาตุในคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการแปรชนิดของสารตัวเติมสำหรับการกำบังรังสี	74
4.13	มอดูลัสที่ระยะยืด 100 % และความแข็งของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการแปรชนิดของสารตัวเติมสำหรับการกำบังรังสีที่แตกต่างกัน	75
4.14	ความต้านทานต่อแรงดึง และระยะยืด ณ จุดขาดของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการแปรชนิดของสารตัวเติมสำหรับการกำบังรังสีที่แตกต่างกัน	76
4.15	ความถ่วงจำเพาะของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการแปรชนิดของสารตัวเติมสำหรับการกำบังรังสีที่แตกต่างกัน	77
4.16	ระยะเวลาในการคงรูปยางของคอมโพสิตของยางธรรมชาติ โดยมีการแปรชนิดของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์เป็นสารกำบังรังสี	88
4.17	ปริมาณการเชื่อมขวางของคอมโพสิตของยางธรรมชาติ โดยมีการแปรชนิดของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์เป็นสารกำบังรังสี	89
4.18	ร้อยละปริมาณการกระจายตัวของธาตุในคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการแปรชนิดของยางธรรมชาติที่แตกต่างกัน	90
4.19	มอดูลัสที่ระยะยืด 100% และความแข็งของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการแปรชนิดของยางธรรมชาติ และเติมบิสมัทออกไซด์เป็นสารกำบังรังสี	92

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
4.20	ความต้านทานต่อแรงดึง และระยะยืด ณ จุดขาดของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการแปรชนิดของยางธรรมชาติ และเติมบิสมัทออกไซด์เป็นสารกำบังรังสี	93
4.21	ความถ่วงจำเพาะของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการแปรชนิดของยางธรรมชาติ และเติมบิสมัทออกไซด์เป็นสารกำบังรังสี	94
4.22	มอดูลัสที่ระยะยืด 100% และความแข็ง หลังผ่านการกำบังรังสีที่มีการฉายรังสีซ้ำ 10 และ 20 ครั้งของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการแปรชนิดของยางธรรมชาติ และเติมบิสมัทออกไซด์เป็นสารกำบังรังสี	103
4.23	ความต้านทานต่อแรงดึง และระยะยืด ณ จุดขาด หลังผ่านการกำบังรังสีที่มีการฉายรังสีซ้ำ 10 และ 20 ครั้งของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการแปรชนิดของยางธรรมชาติ และเติมบิสมัทออกไซด์เป็นสารกำบังรังสี	104
4.24	ความถ่วงจำเพาะ หลังผ่านการกำบังรังสีที่มีการฉายรังสีซ้ำ 10 และ 20 ครั้งของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการแปรชนิดของ ยางธรรมชาติ และเติมบิสมัทออกไซด์เป็นสารกำบังรังสี	105
4.25	ปริมาณการเชื่อมขวาง หลังผ่านการกำบังรังสีที่มีการฉายรังสีซ้ำ 10 และ 20 ครั้งของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการแปรชนิดของยางธรรมชาติ และเติมบิสมัทออกไซด์เป็นสารกำบังรังสี	106
4. 26	ระยะเวลาในการคงรูปยางของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์ หรือตะกั่วออกไซด์เป็นสารกำบังรังสี	108
4.27	ปริมาณการเชื่อมขวางของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์หรือตะกั่วออกไซด์เป็นสารกำบังรังสี	109
4.28	ร้อยละปริมาณการกระจายตัวของธาตุในคอมโพสิตของยางธรรมชาติเปรียบเทียบระหว่างคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์หรือตะกั่วออกไซด์เป็นสารกำบังรังสี	111
4.29	มอดูลัสที่ระยะยืด 100% และความแข็งของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่เปรียบเทียบระหว่างยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสทมัทออกไซด์ หรือตะกั่วออกไซด์	112

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
4.30	ความต้านทานต่อแรงดึง และระยะยืด ณ จุดขาดของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่เปรียบเทียบระหว่างยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสทมัทออกไซด์หรือตะกั่วออกไซด์	113
4.31	ความถ่วงจำเพาะของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่เปรียบเทียบระหว่างยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสทมัทออกไซด์ หรือตะกั่วออกไซด์	114
4.32	มอดูลัสที่ระยะยืด 100% และความแข็ง หลังผ่านการกำบังรังสีที่มีการฉายรังสีซ้ำ 10 และ 20 ครั้งของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์ และตะกั่วออกไซด์เป็นสารกำบังรังสี	123
4.33	ความต้านทานต่อแรงดึง และระยะยืด ณ จุดขาด หลังผ่านการกำบังรังสีที่มีการฉายรังสีซ้ำ 10 และ 20 ครั้งของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์ และตะกั่วออกไซด์เป็นสารกำบังรังสี	125
4.34	ความถ่วงจำเพาะ หลังผ่านการกำบังรังสีที่มีการฉายรังสีซ้ำ 10 และ 20 ครั้งของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์ และตะกั่วออกไซด์เป็นสารกำบังรังสี	126
4.35	ปริมาณการเชื่อมขวาง หลังผ่านการกำบังรังสีที่มีการฉายรังสีซ้ำ 10 และ 20 ครั้งของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์ และตะกั่วออกไซด์เป็นสารกำบังรังสี	127

สารบัญรูปภาพ

รูปที่ **หน้า**

2.1	แถบพลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	4
2.2	การแตกตัวเป็นไอออน และสถานการณ์กระตุ้นของธาตุออกซิเจน	6
2.3	ความสามารถในการทะลุทะลวงของรังสีแอลฟา รังสีเบต้า และรังสีแกมมา	7
2.4	ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริค	12
2.5	การกระเจิงแบบคอมป์ตัน (Compton Scattering)	13
2.6	ปรากฏการณ์แพรโปรดักชัน (Pair Production)	14
2.6	ระบบการวัดรังสี	18
2.7	วงจรการทำงานของระบบการวัดรังสีแบบซินทิลเลชัน (Scintillator)	19
2.8	ลักษณะต่าง ๆ ของเฟสที่กระจายตัวอยู่ในเมทริกซ์ที่ส่งผลต่อสมบัติสุดท้ายของวัสดุคอมโพสิต	21
3.1	โครงสร้างของยางธรรมชาติ (Natural Rubber)	31
3.2	โครงสร้างของยางธรรมชาติอิพอกไซด์ (Epoxide Natural Rubber: ENR)	32
3.3	เครื่องผสมยางแบบปิด (Internal mixer)	34
3.4	เครื่องรีโอมิเตอร์แบบดายน์เคลื่อนที่ (Moving Die Rheometers: MDR)	34
3.5	เครื่องอัดเบ้า (Compression molding)	35
3.6	เครื่องทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง (Universal testing machine	35
3.7	เครื่องวัดความแข็ง (Hardness tester)	36
3.8	เครื่องวัดความถ่วงจำเพาะ (Specific tester)	36
3.9	กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM)	37
3.10	ชุดอุปกรณ์การทดลองการกระเจิงคอมป์ตัน	37
3.11	เครื่องวัดการดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ (X-ray)	38
3.12	ตัวอย่างที่ใช้ทดสอบรูปดัมเบล	42
3.13	แหล่งกำเนิดรังสีแกมมา และแผนภาพโครงสร้างแหล่งกำเนิดรังสีแกมมา	44
3.14	หัววัดรังสี Nal (Tl) Scintillation และแผนภาพแสดงโครงสร้างหัววัดรังสีแกมมา	45
3.15	ชุดอุปกรณ์ และแผนภาพการทดลองการกระเจิงคอมป์ตัน	45
3.16	กราฟของจำนวนโฟตอนที่นับได้จากหัววัดรังสี	46

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

3.17 ชุดอุปกรณ์การทดสอบทางด้านรังสีเอ็กซเรย์ 46

4.1 การกระจายตัวของบิสมัทออกไซด์ในคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีปริมาณของบิสมัทออกไซด์ที่แตกต่างกัน 51

4.2 มอดูลัสที่ระยะยืด 100% และความแข็งของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีปริมาณของบิสมัทออกไซด์ที่แตกต่างกัน 53

4.3 ความต้านทานต่อแรงดึง และระยะยืด ณ จุดขาดของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีปริมาณของบิสมัทออกไซด์ที่แตกต่างกัน 54

4.4 กระบวนการส่งผ่านแรงของวัสดุคอมโพสิตที่มีการกระจายตัวของสารแตกต่างกัน ซึ่งส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิต 55

4.5 ความถ่วงจำเพาะของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีปริมาณของบิสมัทออกไซด์ที่แตกต่างกัน 56

4.6 สัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเชิงมวล (Total mass attenuation coefficient: μ_m) ของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีปริมาณของบิสมัทออกไซด์ที่แตกต่างกัน ทดสอบด้วยรังสีแกมมาที่พลังงาน 223-662 keV 58

4.7 เลขอะตอมยังผล (Effective atomic number: Z_{eff}) ของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีปริมาณของบิสมัทออกไซด์ที่แตกต่างกัน ทดสอบด้วยรังสีแกมมาที่พลังงาน 223-662 keV 59

4.8 ความหนาแน่นอิเล็กตรอน (Effective atomic density: N_{el}) ของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีปริมาณของบิสมัทออกไซด์ที่แตกต่างกัน ทดสอบด้วยรังสีแกมมาที่พลังงาน 223-662 keV 59

4.9 ความหนาครึ่งค่า (Haft value layer: HVL) และความหนาเทียบเท่าตะกั่ว (Lead equivalent) ของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีปริมาณของบิสมัทออกไซด์ที่แตกต่างกัน ทดสอบด้วยรังสีแกมมาที่พลังงาน 662 keV 60

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

4.10 เปรียบเทียบความหนาครึ่งค่าของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีปริมาณของบิสมัทออกไซด์ที่แตกต่างกันกับกระจกเชิงพาณิชย์ (commercial window) เซอร์เพนไทน์ (serpentine) คอนกรีต (ordinary concrete) และเฮมาไทด์-เซอร์เพนไทน์ (hematite-serpentine) ทดสอบด้วยรังสีแกมมาที่พลังงาน 662 keV 61

4.11 สัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเชิงเส้น (Linear attenuation coefficient: μ) ของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีปริมาณของบิสมัทออกไซด์ที่แตกต่างกัน ทดสอบด้วยรังสีเอ็กซ์ที่พลังงาน 50- 120 kVp 63

4.12 ความหนาครึ่งค่า และความหนาเทียบเท่าตะกั่วของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีปริมาณของบิสมัทออกไซด์ที่แตกต่างกัน ทดสอบด้วยรังสีเอ็กซ์ที่พลังงาน 120 kVp 64

4.13 เปรียบเทียบความหนาครึ่งค่าของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีปริมาณของบิสมัทออกไซด์ที่แตกต่างกันกับกระจกเชิงพาณิชย์ (commercial window) และกระจกกำบังรังสีเอ็กซ์ (X -ray window) ทดสอบด้วยรังสีเอ็กซ์ที่พลังงาน 120 kVp 65

4.14 มอดูลัสที่ระยะยืด 100% และความแข็ง หลังผ่านการกำบังรังสีที่มีการฉายรังสีซ้ำ 10 และ 20 ครั้งของคอมโพสิตของยางธรรมชาติ 66

4.15 ความต้านทานต่อแรงดึง และระยะยืด ณ จุดขาด หลังผ่านการกำบังรังสีที่มีการฉายรังสีซ้ำ 10 และ 20 ครั้งของคอมโพสิตของยางธรรมชาติ 67

4.16 ความถ่วงจำเพาะ หลังผ่านการกำบังรังสีที่มีการฉายรังสีซ้ำ 10 และ 20 ครั้งของคอมโพสิตของยางธรรมชาติ 68

4.17 การกระจายตัว และสัณฐานวิทยาของสารตัวเติมสำหรับการกำบังรังสีในคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการแปรชนิดของสารตัวเติมสำหรับการกำบังรังสีที่แตกต่างกัน 73

4.18 มอดูลัสที่ระยะยืด 100% และความแข็งของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการแปรชนิดของสารตัวเติมสำหรับการกำบังรังสีที่แตกต่างกัน 75

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

4.19 ความต้านทานต่อแรงดึง และระยะยืด ณ จุดขาดของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการแปรชนิดของสารตัวเติมสำหรับการกำบังรังสีที่แตกต่างกัน 76

4.20 ความถ่วงจำเพาะของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการแปรชนิดของสารตัวเติมสำหรับการกำบังรังสีที่แตกต่างกัน 77

4.21 สัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเชิงมวลของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการแปรชนิดของสารตัวเติมสำหรับการกำบังรังสีที่แตกต่างกัน ทดสอบด้วยรังสีแกมมาที่พลังงาน 223-662 keV 79

4.22 เลขอะตอมยังผลของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการแปรชนิดของสารตัวเติมสำหรับการกำบังรังสีที่แตกต่างกัน ทดสอบด้วยรังสีแกมมาที่พลังงาน 223-662 keV 79

4.23 ความหนาแน่นอิเล็กตรอนของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการแปรชนิดของสารตัวเติมสำหรับการกำบังรังสีที่แตกต่างกัน ทดสอบด้วยรังสีแกมมาที่พลังงาน 223-662 keV 80

4.24 ความหนาครึ่งค่า และความหนาเทียบเท่าตะกั่วของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการแปรชนิดของสารตัวเติมสำหรับการกำบังรังสีที่แตกต่างกัน ทดสอบด้วยรังสีแกมมาที่พลังงาน 662 keV 80

4.25 เปรียบเทียบความหนาครึ่งค่าของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีชนิดของสารตัวเติมสำหรับการกำบังรังสีที่แตกต่างกันกับกระจกเชิงพาณิชย์ เซอร์เพนไทน์คอนกรีต และเฮมาไทด์-เซอร์เพนไทน์ ทดสอบด้วยรังสีแกมมาที่พลังงาน 662 keV 81

4.26 สัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเชิงเส้นของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการแปรชนิดของสารตัวเติมสำหรับการกำบังรังสีที่แตกต่างกัน ทดสอบรังสีด้วยเอ็กซ์ที่พลังงาน 50–120 kVp 84

4.27 ความหนาครึ่งค่า และความหนาเทียบเท่าตะกั่วของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการแปรชนิดของสารตัวเติมสำหรับการกำบังรังสีที่แตกต่างกัน ทดสอบด้วยรังสีเอ็กซ์ที่พลังงาน 120 kVp 84

4.29 การกระจายตัวของบิสมัทออกไซด์ในคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการแปรชนิดของยางธรรมชาติที่แตกต่างกัน 90

4.30 มอดูลัสที่ระยะยืด 100% และความแข็งของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการแปรชนิดของยางธรรมชาติ และเติมบิสมัทออกไซด์เป็นสารกำบังรังสี 92

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

4.31 ความต้านทานต่อแรงดึง และระยะยืด ณ จุดขาดของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการแปรชนิดของยางธรรมชาติ และเติมบิสมัทออกไซด์เป็นสารกำบังรังสี 93

4.32 ความถ่วงจำเพาะของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการแปรชนิดของยางธรรมชาติ และเติมบิสมัทออกไซด์เป็นสารกำบังรังสี 94

4.33 สัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเชิงมวลของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการแปรชนิดของยางธรรมชาติ และเติมบิสมัทออกไซด์เป็นสารกำบังรังสีทดสอบด้วยรังสีแกมมาที่พลังงาน 223-662 keV 96

4.34 เลขอะตอมยังผลของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการแปรชนิดของยางธรรมชาติ และเติมบิสมัทออกไซด์เป็นสารกำบังรังสี ทดสอบด้วยรังสีแกมมาที่พลังงาน 223-662 keV 97

4.35 ความหนาแน่นอิเล็กตรอนของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการแปรชนิดของยางธรรมชาติ และเติมบิสมัทออกไซด์เป็นสารกำบังรังสี ทดสอบด้วยรังสีแกมมาที่พลังงาน 223-662 keV 97

4.36 ความหนาครึ่งค่าของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการแปรชนิดของยางธรรมชาติ และเติมบิสมัทออกไซด์เป็นสารกำบังรังสี ทดสอบด้วยรังสีแกมมาที่พลังงาน 662 keV 98

4.37 เปรียบเทียบความหนาครึ่งค่าของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการแปรชนิดของยางธรรมชาติ และเติมบิสมัทออกไซด์เป็นสารกำบังรังสีทดสอบที่รังสีกับกระจกเชิงพาณิชย์ เซอร์เพนไทน์ คอนกรีต และเฮมาไทต์-เซอร์เพนไทน์ ทดสอบด้วยรังสีแกมมาพลังงาน 662 keV 99

4.38 สัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเชิงเส้น ของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการแปรชนิดของยางธรรมชาติ และเติมบิสมัทออกไซด์เป็นสารกำบังรังสี ทดสอบด้วยรังสีเอ็กซ์ที่พลังงาน 50-120 kVp 100

4.39 ความหนาครึ่งค่า และความหนาเทียบเท่าตะกั่วของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการแปรชนิดของยางธรรมชาติ และเติมบิสมัทออกไซด์เป็นสารกำบังรังสีทดสอบด้วยรังสีเอ็กซ์พลังงาน 120 kVp 101

4.40 เปรียบเทียบความหนาครึ่งค่าของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการแปรชนิดของยางธรรมชาติ และเติมบิสมัทออกไซด์เป็นสารกำบังรังสีกับกระจกเชิงพาณิชย์และกระจกกำบังรังสีเอ็กซ์ ทดสอบด้วยรังสีเอ็กซ์พลังงาน 120 kVp 101

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

4.41 มอดูลัสที่ระยะยืด 100% และความแข็ง หลังผ่านการกำบังรังสีที่มีการฉายรังสีซ้ำ 10 และ 20 ครั้งของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการแปรชนิดของยางธรรมชาติ และเติมบิสมัทออกไซด์เป็นสารกำบังรังสี 104

4.42 ความต้านทานต่อแรงดึง และระยะยืด ณ จุดขาด หลังผ่านการกำบังรังสีที่มีการฉายรังสีซ้ำ 10 และ 20 ครั้งของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการแปรชนิดของยางธรรมชาติ และเติมบิสมัทออกไซด์เป็นสารกำบังรังสี 105

4.43 ความถ่วงจำเพาะ หลังผ่านการกำบังรังสีที่มีการฉายรังสีซ้ำ 10 และ 20 ครั้งของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการแปรชนิดของยางธรรมชาติ และเติมบิสมัทออกไซด์เป็นสารกำบังรังสี 106

4.44 การกระจายตัว และสัณฐานวิทยาของสารที่ทำหน้าที่ในการกำบังรังสีเปรียบเทียบระหว่างสารประกอบออกไซด์ และตะกั่วในยางธรรมชาติ 110

4.45 มอดูลัสที่ระยะยืด 100% และความแข็งของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่เปรียบเทียบระหว่างยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสทมัทออกไซด์ หรือตะกั่วออกไซด์ 112

4.46 ความต้านทานต่อแรงดึง และระยะยืด ณ จุดขาดของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่เปรียบเทียบระหว่างยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสทมัทออกไซด์ หรือตะกั่วออกไซด์ 113

4.47 ความถ่วงจำเพาะของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่เปรียบเทียบระหว่างยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสทมัทออกไซด์ หรือตะกั่วออกไซด์ 114

4.48 สัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเชิงมวลของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่เปรียบเทียบระหว่างยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสทมัทออกไซด์ หรือตะกั่วออกไซด์เป็นสารกำบังรังสี ทดสอบด้วยรังสีแกมมาที่พลังงาน 223-662 keV 116

4.49 เลขอะตอมยังผลของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่เปรียบเทียบระหว่างยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสทมัทออกไซด์ หรือตะกั่วออกไซด์เป็นสารกำบังรังสี ทดสอบด้วยรังสีแกมมาที่พลังงาน 223-662 keV 116

4.50 ความหนาแน่นอิเล็กตรอนของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่เปรียบเทียบระหว่างยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสทมัทออกไซด์ หรือตะกั่วออกไซด์เป็นสารกำบังรังสี ทดสอบด้วยรังสีแกมมาที่พลังงาน 223-662 keV 117

4.51 ความหนาครึ่งค่า และความหนาเทียบเท่าตะกั่วของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่เปรียบเทียบระหว่างยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสทมัทออกไซด์ หรือตะกั่วออกไซด์เป็นสารกำบังรังสี ทดสอบด้วยรังสีแกมมาที่พลังงาน 662 keV 117

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

4.52 เปรียบเทียบความหนาครึ่งค่าของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมสารประกอบออกไซด์ และตะกั่วเป็นสารกำบังรังสี กับกระจกเชิงพาณิชย์ เซอร์เพนไทน์ คอนกรีต และเฮมาไทต์-เซอร์เพนไทน์ ทดสอบด้วยรังสีแกมมาที่พลังงาน 662 keV 118

4.53 สัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเชิงเส้นของการเปรียบเทียบคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์ และตะกั่วออกไซด์เป็นสารกำบังรังสี ทดสอบด้วยรังสีเอ็กซ์ที่พลังงาน 50-120 kVp 120

4.54 ความหนาครึ่งค่า และความหนาเทียบเท่าตะกั่วของการเปรียบเทียบคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์ และตะกั่วออกไซด์เป็นสารกำบังรังสี ทดสอบด้วยรังสีเอ็กซ์ที่พลังงาน 120 kVp 121

4.55 เปรียบเทียบความหนาครึ่งค่าของการเปรียบเทียบคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์ และตะกั่วออกไซด์เป็นสารกำบังรังสี กับกระจกเชิงพาณิชย์ และกระจกกำบังรังสีเอ็กซ์ ทดสอบด้วยรังสีเอ็กซ์ที่พลังงาน 120 kVp 121

4.56 มอดูลัสที่ระยะยืด 100% และความแข็ง หลังผ่านการกำบังรังสีที่มีการฉายรังสีซ้ำ 10 และ 20 ครั้งของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์ และตะกั่วออกไซด์เป็นสารกำบังรังสี 124

4.57 ความต้านทานต่อแรงดึง และระยะยืด ณ จุดขาด หลังผ่านการกำบังรังสีที่มีการฉายรังสีซ้ำ 10 และ 20 ครั้งของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์ และตะกั่วออกไซด์เป็นสารกำบังรังสี 125

4.58 ความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) หลังผ่านการกำบังรังสีที่มีการฉายรังสีซ้ำ 10 และ 20 ครั้งของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์ และตะกั่วออกไซด์เป็นสารกำบังรังสี 126

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มา และความสำคัญ

ตะกั่ว (Lead; Pb) เป็นธาตุที่นิยมนำมาผลิตเป็นวัสดุกำบังรังสี เนื่องจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีพลังงานสูง เช่น รังสีเอ็กซ์ รังสีแกมมา จะถูกดูดกลืนได้ดีโดยธาตุที่มีเลขอะตอม (Atomic number; Z) สูง หรือธาตุหนัก ซึ่งตะกั่วมีเลขอะตอมเท่ากับ 82 โดยธาตุที่มีเลขอะตอมที่สูงขึ้นจะดูดกลืน หรือสามารถกำบังรังสีได้ดีขึ้น[1] อย่างไรก็ตามการใช้วัสดุกำบังรังสีที่ทำมาจากตะกั่วยังมีข้อเสียหลายประการ ได้แก่ (1)วัสดุกำบังรังสีที่ทำมาจากตะกั่วมีน้ำหนักค่อนข้างมาก เมื่อผู้ปฏิบัติงานด้านรังสีใช้งานเป็นเวลานานจะทำให้เกิดความเมื่อยล้า ซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพในการทำงาน[2] (2)วัสดุป้องกันรังสีที่ทำมาจากตะกั่วแตกหักได้ง่าย เนื่องจากตะกั่วมีคุณสมบัติที่มีความแข็งเปราะ หากมีการใช้งานที่ไม่ระมัดระวังอาจเกิดการแตกร้าวได้ ซึ่งรอยแตกหัก หรือรอยร้าวจะส่งผลให้วัสดุกำบังรังสีมีประสิทธิภาพในการลดทอนรังสีได้น้อยลง หรือไม่สามารถลดทอนรังสีได้ และอาจมีความเสี่ยงต่อผู้ปฏิบัติงานด้านรังสี โดยทางกฎหมายได้แนะนำไม่ให้ใช้วัสดุป้องกันรังสีที่มีขนาดของรอยแตกมากกว่า 15 ตารางมิลลิเมตร[3] (3)เพิ่มภาระในการทำงานให้กับผู้ปฏิบัติงานด้านรังสี เนื่องจากกฎหมายได้กำหนดให้วัสดุกำบังรังสีที่ทำมาจากตะกั่วต้องทำการทดสอบด้วยวิธีฟลูออโรสโกปิก (Fluoroscopic) อย่างน้อยปีละครั้ง เพื่อสังเกตรอยแตกที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้างของวัสดุกำบังรังสี (4)วัสดุกำบังรังสีที่ทำมาจากตะกั่วจะมีกระบวนการขึ้นรูปยาก เนื่องจากตะกั่วมีจุดหลอมเหลวที่สูง (จุดหลอมเหลวของตะกั่วเท่ากับ 327.46 °C)[4] (5)วัสดุกำบังรังสีที่ทำมาจากตะกั่วมีความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile strength) และความต้านทานต่อการคืบ (Creep resistance) ต่ำกว่าวัสดุกำบังรังสีชนิดอื่น[5] และ (6)ตะกั่วมีความเป็นพิษสูง เมื่อตะกั่วเข้าสู่ร่างกายจะส่งผลกระทบต่อระบบการทำงานของร่างกาย เช่น อาการในระบบเลือด จะมีอาการเลือดจาง อ่อนเพลีย และร่างกายซีด เนื่องจากตะกั่วไปขัดขวางการสังเคราะห์ฮีโมโกลบิน ทำให้มีปริมาณฮีโมโกลบินในเลือดลดลง อาการในระบบกระดูก และกล้ามเนื้อ ตะกั่วจะเกิดการสะสมในเนื้อเยื่อกระดูก และกล้ามเนื้อต่าง ๆ ทำให้เกิดอาการปวดเมื่อยตามข้อ และกระดูก ซึ่งมักพบอาการกระดูกผุ และกระดูกหักง่ายตามมา ส่วนอาการทางกล้ามเนื้อจะทำให้ผู้ป่วยเมื่อยล้า และกล้ามเนื้ออ่อนแรงได้[6]

จากข้อด้อยดังกล่าวจึงทำให้นักวิจัยมีความพยายามที่จะใช้โลหะออกไซด์ชนิดอื่น ๆ เพื่อกำบังหรือลดทอนปริมาณของรังสี เช่น ทอเรียมไดออกไซด์ (Thorium dioxide; ThO_2)[7] ไดโบรอนไตรออกไซด์ (Diboron trioxide; B_2O_3)[8] แบเรียมซัลเฟต (Barium sulfate; $BaSO_4$) เป็นต้น

อย่างไรก็ตามการใช้วัสดุกำบังรังสีเพียงอย่างเดียวยังมีข้อด้อยเรื่องน้ำหนักและความไม่อ่อนตัวของวัสดุ ทำให้เป็นอุปสรรคในการนำไปใช้งานสำหรับกำบังรังสีแบบเจาะจงพื้นที่ได้ ซึ่งจากการตรวจเอกสารทำให้ทราบว่ามีงานวิจัยจำนวนมากที่ผสมพอลิเมอร์กับสารประกอบกลุ่มที่กำบังรังสีได้ เช่น การผสมพอลิยูริเทน (Polyurethane; PU) กับแบเรียมซัลเฟต (Barium sulfate; $BaSO_4$)[9] ยางแท่งเกรด STR 5L กับผงเฟอไรต์ และยางสังเคราะห์ชนิดเอทธิลีนโพรพิลีนไดอีน (Polyethylene diene; EPDM) กับเขม่าดำ[11] เป็นต้น

ยางธรรมชาติ หรือยางพารา (Natural rubber) เป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทย ซึ่งสายพันธุ์ที่พบมากในประเทศไทยคือ Hevea Brasiliensis มีสมบัติที่โดดเด่นหลายประการ เช่น สมบัติด้านความยืดหยุ่น การทนทานต่อการฉีกขาด และความต้านทานต่อการกระแทก เป็นต้น[12] การผสมวัสดุอื่นลงในยางธรรมชาติจะทำให้วัสดุเชิงประกอบหรือวัสดุคอมโพสิต (Composites) ที่เตรียมได้มีสมบัติที่ผสมผสานระหว่างสมบัติของยางธรรมชาติ และสารตัวเติมที่สามารถนำไปใช้งานตามความต้องการได้

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาวัสดุกำบังรังสีปลอดตะกั่วที่มีความยืดหยุ่น สามารถกำบังรังสีแบบเจาะจงพื้นที่ได้ และมีน้ำหนักเบาในรูปของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติ และสารตัวเติมโลหะออกไซด์ ซึ่งสนใจศึกษาผลของปริมาณสารตัวเติมเป็นวัสดุกำบังรังสีได้แก่ แบเรียมคาร์บอเนต (Barium Carbonate; $BaCO_3$; BC) บิสมัทออกไซด์ (Bismuth oxide; Bi_2O_3; BO) และแบเรียมซัลเฟต (Barium sulfate; $BaSO_4$; BS) ชนิดของยางธรรมชาติ ได้แก่ ยางธรรมชาติที่ไม่ผ่านการดัดแปรโมเลกุล (Unmodified natural rubber; NR) ยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่มีอิพอกไซด์ร้อยละ 25 โดยโมล (Epoxidized natural rubber 25; ENR 25) และยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่มีอิพอกไซด์ร้อยละ 50 โดยโมล (Epoxidized natural rubber 50; ENR 50) ต่อความถ่วงจำเพาะ สมบัติเชิงกลสัณฐานวิทยา และสมบัติการลดทอนรังสีของวัสดุคอมโพสิตที่เตรียมได้ ทางผู้วิจัยเชื่อว่า งานวิจัยนี้สามารถเป็นส่วนหนึ่งในการช่วยให้ผู้ปฏิบัติงานด้านรังสี และผู้ป่วยลดความเสี่ยงจากผลกระทบที่เกิดจากการสัมผัสรังสีได้

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาสูตร ส่วนผสมระหว่างยางธรรมชาติ และสารตัวเติมสำหรับการกำบังรังสี (Radiation shielding fillers) ที่มีสมบัติเชิงกลที่ดี และประสิทธิภาพในการกำบังรังสีสูงสุด

1.2.2 เพื่อผลิตผลิตภัณฑ์ต้นแบบวัสดุกำบังรังสีที่ยืดหยุ่นได้ปราศจากสารตะกั่วที่มียางธรรมชาติเป็นเนื้อพื้น

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1.3.1 ศึกษาการเตรียมวัสดุคอมโพสิตที่ประกอบด้วยยางธรรมชาติผสมบิสมัทออกไซด์โดยมีการแปรปริมาณบิสมัทออกไซด์ที่ปริมาณ 0 10 20 40 80 120 และ 150 ส่วนโดยร้อยละเมื่อเทียบกับยาง (phr)

1.3.2 ศึกษาชนิดของสารตัวเติมสำหรับการกำบังรังสี ได้แก่ แบเรียมคาร์บอเนต บิสมัทออกไซด์ และแบเรียมซัลเฟต

1.3.3 ศึกษาการเตรียมวัสดุคอมโพสิตกำบังรังสีที่ยืดหยุ่นได้ โดยมีการแปรชนิดของยางธรรมชาติ ได้แก่ ยางธรรมชาติที่ไม่ผ่านการดัดแปรโมเลกุล ยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่มีอิพอกไซด์ร้อยละ 25 โดยโมล และยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่มีอิพอกไซด์ร้อยละ 50 โดยโมล

1.3.4 ศึกษาการเปรียบเทียบสมบัติเชิงกล และสมบัติทางด้านรังสีระหว่างบิสมัทออกไซด์ และตะกั่วออกไซด์ในยางธรรมชาติ

1.3.5 ทดสอบสมบัติของวัสดุคอมโพสิตที่เตรียมได้ได้แก่ สมบัติเชิงกล (Mechanical properties) การกระจายตัวของบิสมัทออกไซด์ และปริมาณของธาตุในวัสดุคอมโพสิตด้วยเทคนิคเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซ็นต์แบบกระจายพลังงาน (Energy dispersive X-ray spectrometer; EDX) สมบัติการกำบังรังสีหลังการบ่ม (Aging properties) สมบัติด้านการลดทอนรังสีแกมมา และรังสีเอ็กซ์ (Related radiation shielding properties) สมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิตหลังการผ่านการกำบังรังสี (Mechanical properties after radiation shielding) และเปรียบเทียบสมบัติต่าง ๆ กับวัสดุป้องกันรังสี (กลุ่มเดียวกัน) ในเชิงพาณิชย์

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทราบสูตร ชนิด และปริมาณของสารประกอบออกไซด์ ชนิดของยางธรรมชาติที่เหมาะสมในการเตรียมวัสดุคอมโพสิตปลอดตะกั่วที่ยืดหยุ่นได้ และให้ประสิทธิภาพในการกำบังรังสีสูงที่สุด

1.4.2 สามารถเพิ่มมูลค่ายางพารา ขยายขอบเขตการใช้งานยางพารา และสามารถนำผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปจำหน่ายในเชิงพาณิชย์ได้

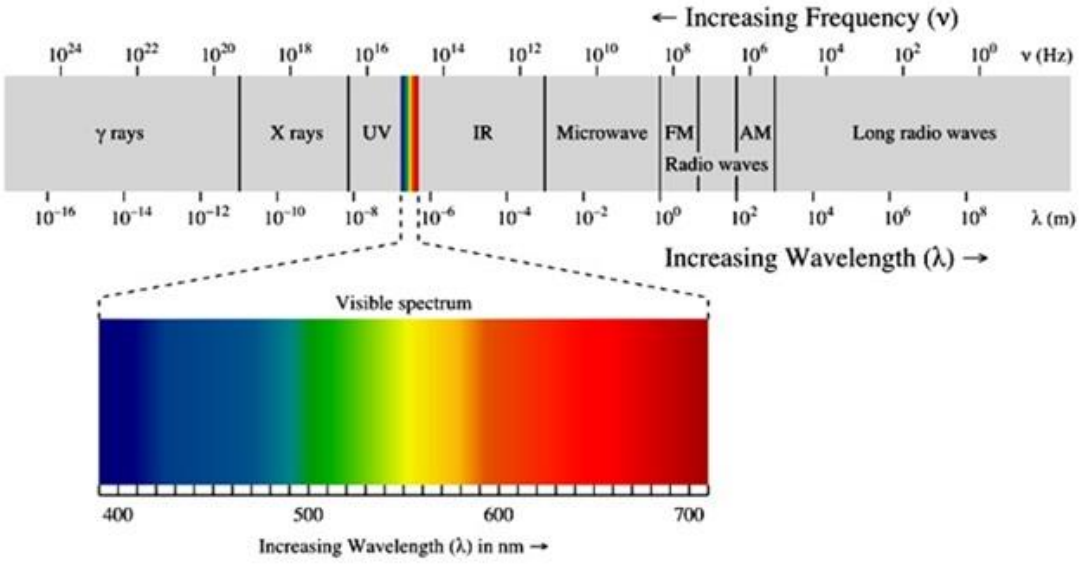
บทที่ 2

ทฤษฎี เอกสาร และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับรังสี

รังสี (Radiation) คือ พลังงานที่แผ่ออกมาจากแหล่งกำเนิดของรังสีสามารถเคลื่อนที่จากแหล่งหนึ่งไปยังอีกแหล่งหนึ่งได้ซึ่งสามารถทะลุวัตถุต่าง ๆ ได้โดยการเดินทางผ่านอากาศ[13] ซึ่งรังสีจะอยู่ในลักษณะของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่น และความถี่ที่แตกต่างกันได้แก่ คลื่นวิทยุ คลื่นไมโครเวฟ รังสียูวี รังสีอินฟาเรด รังสีเอ็กซ์ รังสีแกมมา ดังแสดงในรูปที่ 1 หรืออยู่ในรูปของอนุภาคที่มีพลังงานสะสมอยู่ทั้งที่มี และไม่มีประจุได้แก่ รังสีแอลฟา รังสีเบต้า เป็นต้น



รูปที่ 2.1 แถบพลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า
(แหล่งที่มา: http://www.satriwit3.ac.th/external_newsblog.php?links=1241)

2.1.1.1 ต้นกำเนิดรังสี

ต้นกำเนิดรังสีแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ ต้นกำเนิดรังสีที่มีอยู่ในธรรมชาติ หรือต้นกำเนิดรังสีที่มีอยู่ทั่วไป (Background radiation) ได้แก่ รังสีที่มาจากนอกโลก หรือรังสีคอสมิก (Cosmic radiation) พุ่งเข้าสู่โลกในทุกทิศทาง โดยส่วนหนึ่งมาจากดวงอาทิตย์ และอีก

ส่วนหนึ่งมาจากต้นกำเนิดรังสีที่ไม่ทราบแหล่งกำเนิดที่แน่นอน รังสีคอสมิกประกอบไปด้วยอนุภาคต่าง ๆ เช่น โปรตอน นิวตรอน อิเล็กตรอน แอลฟา เป็นต้น ซึ่งอนุภาคเหล่านี้มีพลังงานที่สูง แต่ถูกบรรยากาศของโลกกั้นไว้จึงเหลือส่งมาถึงพื้นโลกเป็นส่วนน้อย และมีพลังงานไม่สูงมากนัก[14] และต้นกำเนิดรังสีที่มนุษย์ประดิษฐ์ขึ้น (Man-made radiation) เช่น รังสีทางด้านการแพทย์ รังสีด้านอาวุธสงคราม และรังสีเพื่อประโยชน์ทางอุตสาหกรรมต่าง ๆ เป็นต้น[15]

2.1.1.2 ชนิดของรังสี

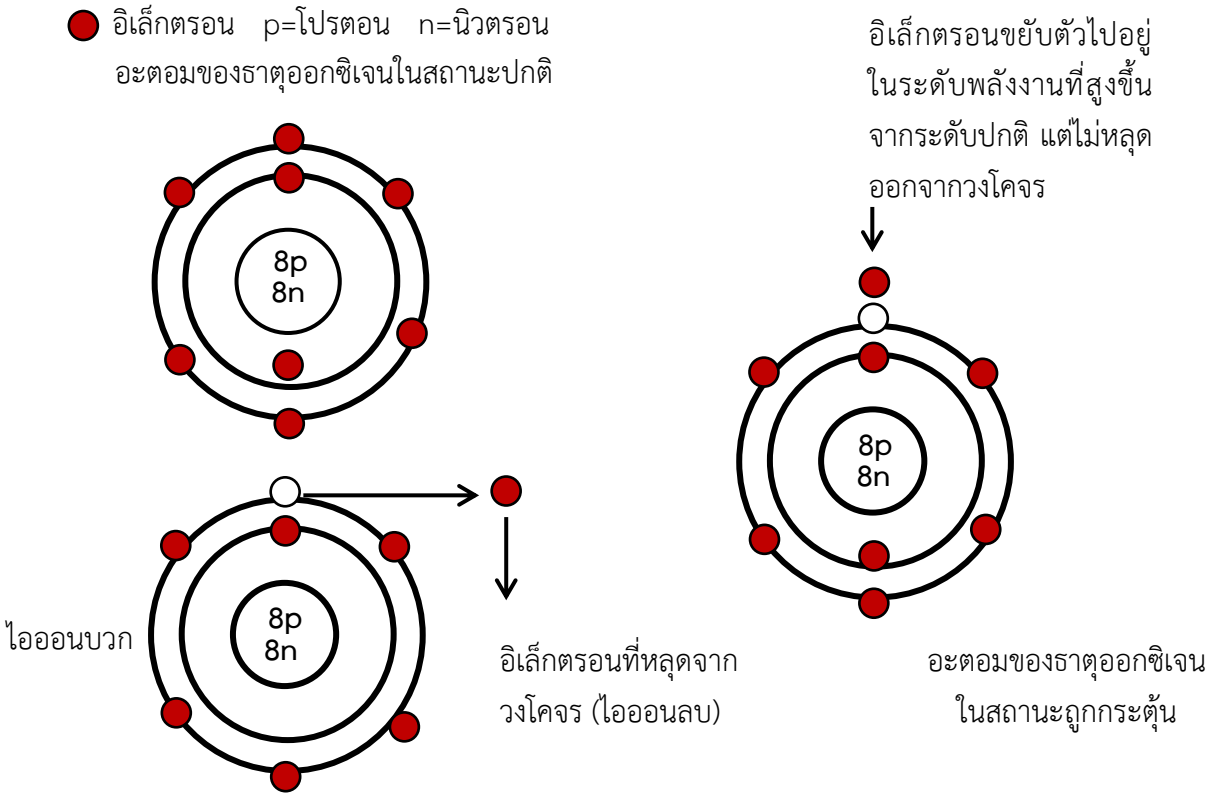
รังสีมีหลายชนิดสามารถแบ่งเป็นประเภทต่าง ๆ ได้ ดังนี้

1. แบ่งตามลักษณะของรังสี

- รังสีที่เป็นอนุภาค เช่น รังสีแอลฟา รังสีบีตา รังสีนิวตรอน รังสีคอสมิก เป็นต้น
- รังสีที่เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เช่น คลื่นวิทยุ รังสีอินฟาเรด รังสีอัลตราไวโอเลต รังสีความร้อน รังสีเอ็กซ์ รังสีแกมมา เป็นต้น

2. แบ่งตามอันตรกิริยาที่รังสีมีต่ออะตอมของตัวกลางที่วิ่งผ่าน

- รังสีที่ทำให้เกิดการแตกตัวของประจุ หรือรังสีก่อไอออน (Ionizing radiation) คือ รังสีที่ตกกระทบวัตถุหรือตัวกลางใด ๆ ทำให้อิเล็กตรอนที่รังสีถ่ายเทพลังงานให้เกิดการหลุดออกจากวงโคจรของอะตอมกลายเป็นอิเล็กตรอนอิสระ ทำให้เกิดคู่ไอออนขึ้นมาคือ อิเล็กตรอนที่หลุดจากวงโคจรจะเป็นไอออนลบ ส่วนอะตอมจะเป็นไอออนบวก เนื่องจากเกิดการสูญเสียอิเล็กตรอนในวงโคจรไปทำให้มีปริมาณของโปรตอนในนิวเคลียสมากกว่า อะตอมเหล่านี้จะทำให้ตัวมันเองเกิดความเสถียรขึ้น โดยการปลดปล่อยรังสีที่มีพลังงาน หรือมวลสารที่มากเกินไปออกมาเรียกว่า กัมมันตภาพรังสี (Radioactivity) ตัวอย่างการแตกตัวเป็นไอออน และสถานการณ์กระตุ้นของธาตุออกซิเจนแสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 การแตกตัวเป็นไอออน และสถานการณ์กระตุ้นของธาตุออกซิเจน
(ดัดแปลงมาจาก: สารานุกรมไทยสำหรับเยาวชนฯ/ เล่มที่ 38/ เรื่องที่ 7 รังสี/ ประเภทของรังสี)

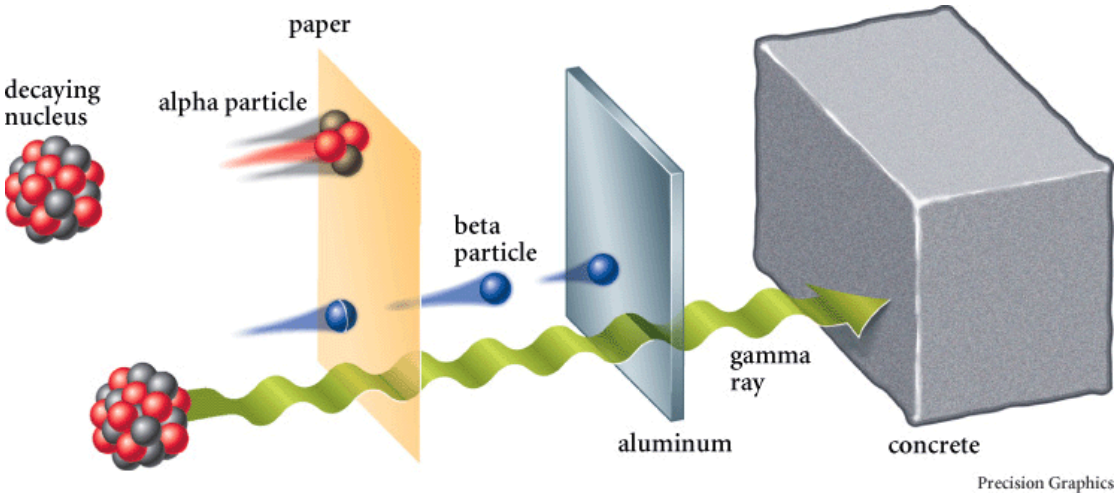
โดยรังสีที่ทำให้เกิดการแตกตัวของประจุมักพบได้ 4 ชนิดหลักดังนี้

รังสีแอลฟา (สัญลักษณ์ α ; ${}^{4}_{2}He$) หรืออนุภาคแอลฟาเป็นอนุภาคที่เป็นนิวเคลียสของธาตุฮีเลียม (He) มีโปรตรอน และนิวตรอนอย่างละ 2 อนุภาคมีประจุไฟฟ้า +2 เลขมวลเท่ากับ 4 สามารถถูกยับยั้งได้ด้วยกระดาษ และผิวหนังของร่างกาย

รังสีเบต้า (สัญลักษณ์ β) เป็นอนุภาคที่มีพฤติกรรมเหมือนอิเล็กตรอน แต่ออกมาจากนิวเคลียสมีประจุไฟฟ้าเท่ากับ -1 มีมวลเท่ากับอิเล็กตรอน (น้อยมาก) สามารถเคลื่อนที่ได้ในระยะสั้น และมีสามารถทะลุทะลวงปานกลางซึ่งสามารถทะลุผ่านแผ่นโลหะบาง ๆ ได้ และมีความเร็วเท่ากับความเร็วแสง[16]

รังสีเอ็กซ์ (X-ray) เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วงประมาณ 1.3×10^{-11} ถึง 4.8×10^{-11} เมตรจึงจัดเป็นรังสีที่ไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า และนอกจากนี้ยังเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ไม่มีประจุไม่สามารถเบี่ยงเบนในสนามแม่เหล็ก และสนามไฟฟ้าได้มีความสามารถในการเคลื่อนที่ทะลุผ่านวัสดุที่ไม่หนาจนเกินไป และมีความหนาแน่นน้อย ๆ ได้ เช่น ไม้ เนื้อเยื่อคน เป็นต้น และจะมีอำนาจในการทะลุทะลวงลดลงเมื่อเคลื่อนที่ผ่านวัตถุที่มีความหนาแน่นมาก ๆ เช่น ตะกั่ว กระดูก แพลตินัม เป็นต้น[17]

รังสีแกมมา (Gamma ray สัญลักษณ์ γ) เป็นรังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเช่นเดียวกับรังสีเอ็กซ์ แต่มีความยาวคลื่นสั้น หรือมีความถี่สูงกว่า และมีอำนาจในการทะลุทะลวงสูงกว่ารังสีเอ็กซ์ ผ่านผิวหนังได้หลายนิ้ว และทะลุทะลวงวัตถุส่วนใหญ่ที่มีความหนาแน่นมาก ๆ ได้[18] โดยความสามารถในการทะลุทะลวงของรังสีแอลฟา รังสีเบต้า และรังสีแกมมาแสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ความสามารถในการทะลุทะลวงของรังสีแอลฟา รังสีเบต้า และรังสีแกมมา
(แหล่งที่มา: http://www.krusarawut.net/wp/?p=12063)

- รังสีที่ไม่ทำให้เกิดการแตกตัวของประจุ หรือรังสีชนิดไม่ก่อไอออน (Non-ionizing radiation) คือ รังสีที่ตกกระทบวัตถุหรือตัวกลางใด ๆ ไม่สามารถก่อให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออนในอะตอมของตัวกลางที่รังสีนั้นวิ่งผ่าน และเกิดการถ่ายเทพลังงานให้กับอะตอมของตัวกลางส่งผลให้อิเล็กตรอนเกิดการเคลื่อนตัวสูงขึ้นจากวงโคจร แล้วตกลงสู่วงโคจรเดิมอีก ปรากฏการณ์แบบนี้เรียกว่า อะตอมอยู่ในสถานะถูกกระตุ้น (Excited state) รังสีพวกนี้เป็นรังสีที่มีพลังงานไม่สูงมากนัก เช่น รังสีความร้อน ไมโครเวฟ เลเซอร์ รังสีอัลตราไวโอเลต คลื่นวิทยุ เป็นต้น [16]

2.1.1.3 ประโยชน์ของรังสี

1. ทางด้านการแพทย์

- รังสีวินิจฉัยได้แก่ การเอ็กซเรย์ทั่วไป การตรวจพิเศษทางรังสีเพื่อใช้ในการวินิจฉัยโรค

- รังสีรักษาได้แก่ รังสีในทางการแพทย์ที่ใช้รักษาโรคมะเร็ง เช่น รังสีแกมมา ซึ่งเกิดจากการสลายตัวของสารกัมมันตรังสีบางชนิด และรังสีเอ็กซ์ที่เกิดจากเครื่องผลิต

รังสี ซึ่งอาศัยหลักการทำงานเหมือนเครื่องถ่ายภาพเอ็กซเรย์ กล่าวคือ อิเล็กตรอนจะวิ่งไปชนตัวกลางและปล่อยรังสีเอ็กซ์ออกมาซึ่งรังสีทั้ง 2 ชนิดสามารถทำให้เนื้อมะเร็งตายได้เหมือนกัน โดยการตายของเนื้อมะเร็งมี 2 ลักษณะคือ เซลล์ตายในทันที และเซลล์สูญเสียคุณสมบัติในการแบ่งเซลล์ การใช้รังสีรักษาในการรักษามะเร็งกระทำได้โดยการฉายรังสีไปยังตำแหน่งที่เป็นโรค ซึ่งสามารถฉายรังสีคลุมก้อนมะเร็งทั้งหมด และต่อมน้ำเหลืองบริเวณใกล้เคียงได้

- เวชศาสตร์นิวเคลียร์คือ วิทยาการด้านการแพทย์สาขาหนึ่งซึ่งเกี่ยวข้องกับการใช้สารกัมมันตรังสีในการตรวจวินิจฉัย หรือรักษาโรคบางชนิด เช่น โรคต่อมไทรอยด์ โรคเกี่ยวกับกระดูก หัวใจ เป็นต้น

2. ทางด้านดาราศาสตร์

- ใช้เพื่อถ่ายภาพดาราจักรที่ตามนุษย์มองไม่เห็น

3. ทางด้านความมั่นคง และอากาศยาน

- ใช้ถ่ายภาพเพื่อค้นหาวัตถุอันตราย วัตถุระเบิด ซึ่งใช้มากในสนามบินสำหรับตรวจสัมภาระของผู้โดยสาร

4. ทางด้านอุตสาหกรรม

- การวิเคราะห์แร่ธาตุด้วยเทคนิคเชิงนิวเคลียร์ สำหรับการสำรวจทรัพยากรในประเทศ (Neutron activation and x-ray fluorescence analysis)

- การใช้รังสีแกมมาเพื่อฆ่าเชื้อในเครื่องมือเวชภัณฑ์ ใช้ตรวจสอบและถ่ายรอยเชื่อมโลหะ หาความสึกหรอโดยไม่ทำลายชิ้นงานมีทั้งการใช้รังสีเอ็กซ์ รังสีแกมมา และรังสีนิวตรอน

- ใช้ในการสำรวจหาแหล่งน้ำมันดิบ ความชื้นใต้ดิน ฯลฯ ด้วยรังสีนิวตรอน เป็นต้น

2.1.1.4 อันตรายที่เกิดจากรังสี

1. ผู้ใช้งานทางด้านรังสี หรือผู้ที่ได้รับรังสีในปริมาณมากมีโอกาสเป็นหมัน เสียความรู้สึกทางเพศ มีบุตรยาก (Sterility, Impotence, Impaired fertility)

2. รังสีทำให้อายุสั้น (Nonspecific life shortening)

3. รังสีทำให้สภาพร่างกายทรุดโทรมแก่เร็ว (Radiation induced aging) จะมีความผิดปกติในเนื้อเยื่อต่าง ๆ

4. รังสีทำให้เกิดเป็นเลนส์ตาต้อกระจก (Radiation cataract genesis) เมื่อเลนส์ได้รับรังสีจะทำให้มีการบวมของใยเซลล์ (Cell fiber) มีการขุ่นมัวทางด้านหลังของเลนส์

5. ผลของรังสีต่อกระดูก (Late effect on bone) เมื่อกระดูกได้รับรังสี เซลล์ตัวอ่อนของกระดูกจะถูกทำลายส่งผลให้ให้เซลล์กระดูกตายผลที่ตามมาคือ กระดูกสั้น กระดูกอักเสบเรื้อรัง กระดูกตายหักง่าย

6. ผลของรังสีต่อผม รากผมหรือขน (Hair follicle) จะไวต่อรังสี เมื่อได้รับรังสีจะทำให้ผมเกิดการร่วง ผมที่งอกมาใหม่มีโอกาสเปลี่ยนเป็นสีขาว หรือสีเทา

7. รังสีทำให้เกิดเป็นมะเร็ง (Radiation carcinogenesis) รังสีทำให้เซลล์เกิดการกลายพันธุ์ และเป็นมะเร็งได้หลาย ๆ ชนิด เช่น มะเร็งเต้านม มะเร็งปอด มะเร็งปากมดลูก มะเร็งกระเพาะปัสสาวะ มะเร็งลำไส้ใหญ่ มะเร็งตา มะเร็งไต มะเร็งต่อมหมวกไต มะเร็งเม็ดเลือด มะเร็งต่อมน้ำเหลือง มะเร็งกระดูก มะเร็งผิวหนัง เป็นต้น

8. รังสีมีผลต่อทารกในครรภ์ รังสีทำให้ทารกในครรภ์มีอวัยวะผิดปกติ สมองพิการ หรือทำให้เด็กมีโอกาสเกิดเป็นมะเร็งตั้งแต่อายุยังน้อย ๆ[19]

2.1.1.5 การป้องกันอันตรายจากรังสี

ICRP (International commission radiological protection) ได้กำหนดหลักการในการป้องกันอันตรายจากรังสี โดยเรียกหลักการพื้นฐานเหล่านี้ว่า ALARA (As low as reasonably achievable principles) ดังนี้

1.Justification of practice คือ การยึดหลักการว่าจะไม่มีการทำงานใด ๆ อย่างเด็ดขาด ถ้าไม่มีแผนการปฏิบัติงานที่มีการป้องกันอันตรายจากรังสีที่ดีพอ

2. Optimization คือ การคำนวณ และประเมินเพื่อหาทางเลือกที่ดีที่สุดโดยการนำเอาปัจจัยต่าง ๆ เช่น เศรษฐกิจ สังคม และสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะการป้องกันอันตรายจากรังสี เพื่อให้ได้แนวทางมาตรการ หรือแนวปฏิบัติที่ดีและคุ้มค่าที่สุด

3. Individual dose limitation คือ การกำหนดระดับรังสีที่ยอมรับได้ [20]

หลักการปฏิบัติให้ได้รับปริมาณรังสีให้ต่ำที่สุดตามหลักการพื้นฐาน ALARA

1. เทคนิคพื้นฐานของการควบคุมอันตรายจากต้นกำเนิดรังสีที่อยู่ภายนอกร่างกายมี 3 วิธีคือ

1.1 เวลา (Time) ผู้ปฏิบัติงานทางด้านรังสีจะต้องใช้เวลาในการปฏิบัติงานให้น้อยที่สุด เพื่อป้องกันไม่ให้ร่างกายได้รับรังสีเกินมาตรฐานที่กำหนดไว้ การที่ผู้ปฏิบัติงานด้านรังสีใช้เวลาในการทำงานน้อยที่สุดในการปฏิบัติงานกับรังสี จะทำให้ผู้ปฏิบัติงานได้รับปริมาณรังสีน้อยลง ปริมาณรังสีที่ได้รับมีความสัมพันธ์กับปริมาณรังสีจากต้นกำเนิดรังสี ดังสมการที่ 2.1

$$D = RT \tag{2.1}$$

เมื่อ D คือ ปริมาณรังสีที่ได้รับ

R คือ ปริมาณรังสีจากต้นกำเนิดรังสี

T คือ เวลาที่ผู้ปฏิบัติงานใช้ขณะปฏิบัติงานกับรังสี

1.2 ระยะทาง (Distance) ปริมาณรังสีจะลดลงตามระยะห่างจากต้นกำเนิดรังสีกล่าวคือ หากผู้ปฏิบัติงานสามารถทำงานให้ห่างจากต้นกำเนิดรังสีได้มาก ผู้ปฏิบัติงานจะได้รับปริมาณรังสีน้องลง ซึ่งปริมาณรังสีที่ได้รับจะแปรผกผันกับระยะห่างจากต้นกำเนิดรังสียกกำลังสองดังสมการที่ 2.2

$$I = \frac{k}{d^2} \tag{2.2}$$

เมื่อ I คือ ปริมาณรังสีที่วัดได้

d คือ ระยะห่างจากต้นกำเนิดรังสี

k คือ ค่าคงที่ซึ่งเปลี่ยนไปตามชนิดของต้นกำเนิดรังสี

1.3 เครื่องกำบังรังสี (Shielding) ปริมาณรังสีจะลดลง เมื่อผ่านเครื่องกำบังรังสี แต่จะลดลงมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับพลังงานของรังสี สมบัติ ความหนาแน่น และความหนาของวัสดุกำบังรังสีซึ่งเป็นอุปกรณ์กำบังรังสีที่วางกั้นระหว่างสิ่งมีชีวิต และต้นกำเนิดรังสี ซึ่งอุปกรณ์กำบังรังสีสามารถดูดกลืนรังสีได้บางส่วนหรืออาจจะได้ทั้งหมด ดังนั้นผู้ปฏิบัติงานควรเลือกอุปกรณ์กำบังรังสีที่เหมาะสมกับชนิดของต้นกำเนิดรังสีเพื่อลดปริมาณของรังสีที่ได้รับ

2. การควบคุมต้นกำเนิดรังสี และการติดป้ายเตือนเป็นอีกกระบวนการหนึ่งของการจัดการเพื่อป้องกัน หรือลดระดับอันตรายจากรังสี เช่น

2.1 การจำแนกพื้นที่ เช่น พื้นที่ควบคุม พื้นที่ปฏิบัติงาน

2.2 ตรวจสอบพื้นที่และการได้รับรังสีของแต่ละบุคคลเป็นประจำ

2.3 กำหนดกฎเกณฑ์และเงื่อนไขในการทำงาน

2.4 ทำรายละเอียดของต้นกำเนิดรังสีแต่ละพื้นที่

2.5 ฝึกอบรมการป้องกันอันตรายจากรังสีสำหรับผู้ปฏิบัติงาน

2.6 ติดป้ายเตือนที่ชัดเจน และเพียงพอให้ถูกต้อง[21]

2.1.1.6 อันตรกิริยาของโฟตอนเมื่อเคลื่อนที่ผ่านตัวกลาง (Photon interaction)

รังสีแกมมาเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในลักษณะอนุภาคเรียกว่า โฟตอน ซึ่งมีคุณสมบัติที่สามารถเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางได้ และเมื่อโฟตอนเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางจะเกิดอันตรกิริยาต่าง ๆ กับตัวกลางดังนี้

1. การกระเจิงแบบโคฮีเรนท์ (Coherent scattering)

การกระเจิงแบบโคฮีเรนท์ เป็นอันตรกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างโฟตอนและอะตอมของตัวกลาง อิเล็กตรอนชั้นนอกของอะตอมในตัวกลางที่มีแรงยึดเหนี่ยวกับอะตอมเพียงเล็กน้อยถูกโฟตอนพุ่งเข้าชน โดยโฟตอนเกิดการสูญเสียพลังงานน้อยมากจนไม่สามารถนำมาคิดค่าได้ และทิศทางของโฟตอนแทบจะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง ดังนั้นกระบวนการกระเจิงแบบโคฮีเรนท์จะเกิดขึ้นเมื่อโฟตอน หรือรังสีแกมมาพลังงานต่ำพุ่งเข้าชนกับตัวกลางที่มีเลขอะตอมสูง

2. อันตรกิริยาโฟโตอิเล็กทริก (Photoelectric interaction)

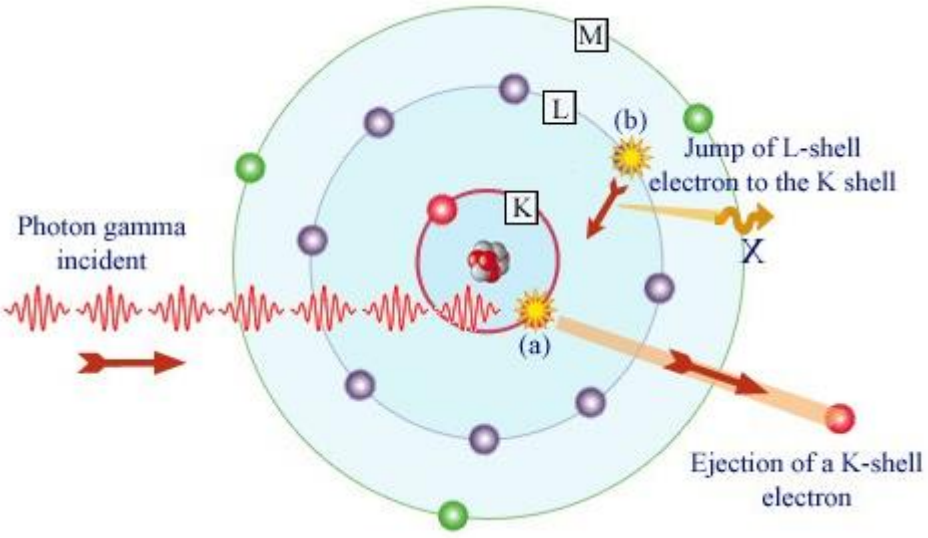
อันตรกิริยาโฟโตอิเล็กทริก เป็นอันตรกิริยาที่เกิดขึ้นเมื่อโฟตอน หรือรังสีแกมมามีพลังงานน้อย โดยโฟตอนพุ่งเข้าชนกับอะตอมของตัวกลาง โฟตอนเกิดการถ่ายโอนพลังงานทั้งหมดให้กับอิเล็กตรอนในวงโคจร ส่งผลให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากอะตอมของตัวกลางด้วยพลังงานจนล์ดังภาพที่ 2.4 ซึ่งเรียกอิเล็กตรอนที่หลุดออกมาจากอะตอมว่า โฟโตอิเล็กตรอน (Photoelectron) เมื่ออิเล็กตรอนเกิดการหลุดออกจากอะตอม อิเล็กตรอนในวงนอกที่อยู่ถัดไปจะเข้ามาแทนที่ในตำแหน่งของอิเล็กตรอนที่หลุดออกไป ทำให้เกิดการคายพลังงานในรูปของรังสีเอ็กซ์เฉพาะ (Characteristic X-ray) ในบางครั้งรังสีเอ็กซ์ที่เกิดขึ้นจะชนกับอิเล็กตรอนที่อยู่วงนอกกว่า ทำให้อิเล็กตรอนเกิดการหลุดออกจากอะตอมเรียกอิเล็กตรอนเหล่านั้นว่า ออเจอร์ อิเล็กตรอน (Auger electron) สรุปได้ว่า การเกิดโฟโตอิเล็กทริกเป็นการดูดกลืนรังสีแกมมาทั้งหมด แล้วปล่อยอิเล็กตรอนและรังสีเอ็กซ์ที่มีพลังงานต่ำออกมาสามารถอธิบายได้จากสมการที่ 2.3

$$E_e = E_\gamma - E_b \tag{2.3}$$

เมื่อ E_e คือ พลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนที่หลุดออกจากอะตอม

E_γ คือ พลังงานทั้งหมดของโฟตอน

E_b คือ พลังงานที่ใช้ในการทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากอะตอม มีค่าเท่ากับพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนในวงโคจรนั้น



รูปที่ 2.4 ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริค
(แหล่งที่มา: https://www.nuclear-power.net)

3. การกระเจิงคอมป์ตัม (Compton scattering)

การกระเจิงแบบคอมป์ตันจะเกิดขึ้นเมื่อโฟตอนมีพลังงานระดับกลางพุ่งเข้าชนกับอะตอมของตัวกลาง โฟตอนเกิดอันตรกิริยากับอิเล็กตรอนที่อยู่ในวงโคจร โดยโฟตอนจะสูญเสียพลังงานบางส่วนให้กับอิเล็กตรอน ส่งผลให้อิเล็กตรอนเกิดการหลุดออกจากวงโคจรในทิศทางทำมุมกับทิศทางเดิมเรียกอิเล็กตรอนที่หลุดออกมาว่า คอมตัน อิเล็กตรอน (Compton electron) ซึ่งสามารถหาค่าพลังงานจลน์ได้จากสมการที่ 2.4 และโฟตอนจะกระเจิงออกมาในทิศทางทำมุมกับทิศทางเดิม และมีความยาวคลื่นมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.5

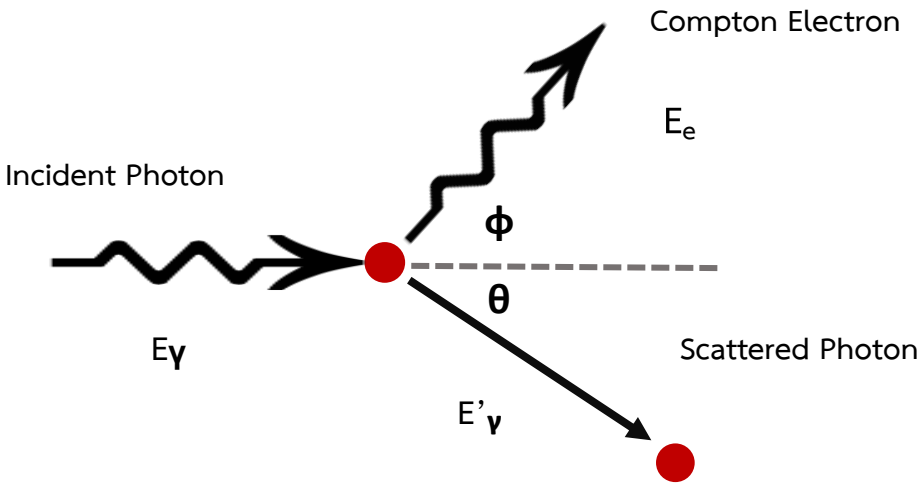
$$E_e = E_\gamma - E_\gamma^{'} - E_b \tag{2.4}$$

เมื่อ E_e คือ พลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนที่ส่งออกมา

E_γ คือ พลังงานทั้งหมดของโฟตอน

$E_\gamma^{'}$ คือ พลังงานของโฟตอนที่กระเจิง

E_b คือ พลังงานที่ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากอะตอม (พลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอน)



รูปที่ 2.5 การกระเจิงแบบคอมป์ตัน (Compton scattering)
(ดัดแปลงมาจาก: https://atomic1073.wordpress.com)

เนื่องจากค่าพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนในวงโคจรมีค่าน้อยกว่าพลังงานของโฟตอนมาก เมื่อโฟตอนที่ตกกระทบจะทำให้มีพลังงานมากขึ้นทำให้ทั้งมุม Ø และ θ ถูกบีบให้แคบลง โดยในระหว่างเกิดการกระเจิงแบบคอมป์ตันจะมีการเปลี่ยนแปลงความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์ และรังสีแกมมาในระดับนาโนเมตรซึ่งสามารถหาความยาวคลื่นของโฟตอนที่กระเจิงได้ดังสมการที่ 2.5

$$\lambda' = \lambda + \Delta\lambda \qquad (2.5)$$

เมื่อ $\Delta\lambda$ คือ ความยาวคลื่นที่มีความถี่อ้างอิงกับความยาวคลื่นของคอมป์ตัน (Compton wavelength) มีค่าเท่ากับ $0.00243(1-\cos\theta)$

θ คือ มุมกระเจิงของโฟตอน

λ คือ ความยาวคลื่นของโฟตอนที่ตกกระทบ

λ' คือ ความยาวคลื่นของโฟตอนที่กระเจิง

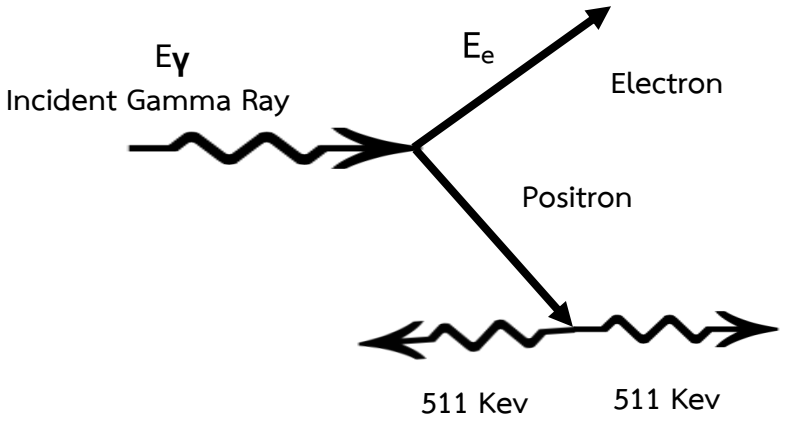
ดังนั้นค่าพลังงานของโฟตอนที่กระเจิง (E'_λ) หาได้จากสมการที่ 2.6

$$E'_\gamma = \frac{E_\gamma}{1+(E_\gamma / me^2)(1-\cos\theta)} \qquad (2.6)$$

เมื่อ me^2 คือ พลังงานของอิเล็กตรอนที่หยุดนิ่งมีค่าเท่ากับ 0.511 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ (Mev)

4. ปรากฏการณ์แพร์โปรดักชัน (Pair production)

ปรากฏการณ์แพร์โปรดักชั่น จะเกิดขึ้นเมื่อตัวกลางมีเลขอะตอมที่มีค่ามาก และโฟตอนมีพลังงานอย่างน้อย 1.02 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ โฟตอนจะวิ่งเข้าไปในสนามไฟฟ้ารอบ ๆ นิวเคลียสของอะตอมในตัวกลาง พลังงานโฟตอนทั้งหมดเปลี่ยนไปเป็นมวล และพลังงานจลน์ของโพซิตรอน (Positron) และอิเล็กตรอนทำให้ทั้งสองหลุดออกจากอะตอม แต่โพซิตรอนไม่สามารถที่จะอยู่ในธรรมชาติได้ ดังนั้นในขณะที่โพซิตรอนเกิดการเคลื่อนที่จะสูญเสียพลังงานไปเรื่อย ๆ และเมื่อโพซิตรอนมีพลังงานต่ำลงจะเกิดการรวมตัวกับอิเล็กตรอนเกิดเป็น 2 โฟตอน และเคลื่อนที่ออกในทิศทางตรงกันข้ามกันเรียกโฟตอนเหล่านี้ว่า แอนนิฮิเล-ชันโฟตอน (Annihilation photons) ซึ่งแต่ละโฟตอนมีพลังงานประมาณ 0.511 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์[22] ปรากฏการณ์แพรโปรดักชันแสดงดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ปรากฏการณ์แพรโปรดักชัน (Pair production)
(ดัดแปลงมาจาก: https://physics.stackexchange.com/questions/326267/the-feynman-diagram-for-pair-production)

2.1.1.7 การหาค่าการกำบังรังสี

1. สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล

โฟตอนจะเกิดอันตรกิริยาต่าง ๆ กับตัวกลาง เมื่อโฟตอนเคลื่อนที่ผ่านตัวกลาง โดยที่โฟตอนบางส่วนเกิดการดูดกลืนพลังงานที่ถ่ายเทให้กับตัวกลาง บางส่วนเกิดการกระเจิงในขณะที่เกิดอันตรกิริยา หรือบางส่วนอาจเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางโดยไม่เกิดอันตรกิริยาใด ๆ โดยโฟตอนที่ถูกดูดกลืนพลังงาน หรือเกิดการกระเจิงส่งผลให้ปริมาณโฟตอนลดลงเมื่อเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางเรียกว่า การลดทอนปริมาณโฟตอน (Attenuation) หรือการลดทอนรังสีซึ่งขึ้นอยู่กับความ

หนาของตัวกลางกล่าวคือ เมื่อความหนาของตัวกลางเพิ่มมากขึ้นปริมาณของโฟตอนที่เคลื่อนที่ผ่านตัวกลางจะยิ่งลดลง เนื่องจากมีระยะทางให้เกิดการดูดกลืนพลังงาน หรือเกิดการกระเจิงของโฟตอนมากขึ้น สามารถอธิบายได้ดังสมการที่ 2.7

$$I = I_0 e^{-\mu x} \tag{2.7}$$

เมื่อ I คือ ปริมาณโฟตอนก่อนที่จะเคลื่อนที่ผ่านตัวกลาง

I_0 คือ ปริมาณโฟตอนที่เคลื่อนที่ออกจากตัวกลาง

x คือ ความหนาของตัวกลางที่โฟตอนเคลื่อนที่ผ่าน (เซนติเมตร)

μ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น (Linear attenuation coefficient)

ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นจะขึ้นอยู่กับพลังงานของรังสี เลขอะตอมของตัวกลาง และความหนาแน่นของตัวกลาง

ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล (Mass attenuation coefficient) ของตัวกลางสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.8 หรือสมการที่ 2.9

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho} \tag{2.8}$$

$$\mu_m = \frac{\ln(\frac{I_0}{I})}{\rho} \tag{2.9}$$

เมื่อ μ_m คือ ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล (ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม; cm^2/g)

ρ คือ ความหนาแน่นของตัวกลาง (กรัมต่อตารางเซนติเมตร; g/cm^3)

สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของตัวกลางที่เป็นสารประกอบ หรือของผสมซึ่งเป็นค่าทางทฤษฎีสามารถคำนวณได้โปรแกรม WinXCom โดยใช้สมการที่ 2.10

$$\mu_m = \sum_i w_i (\mu_m)_i \tag{2.10}$$

เมื่อ w_i คือ เศษส่วนโดยน้ำหนัก (Weight fraction) ของธาตุในสารประกอบ

$(\mu_m)_i$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลเฉพาะตัวของธาตุในสารประกอบ[23]

2. เลขอะตอมยังผล (Effective atomic number)

เลขอะตอมยังผลคือ ค่าเฉลี่ยของเลขอะตอมในตัวกลางที่เป็นสารประกอบ หรือของผสมซึ่งค่าที่ได้อาจจะไม่คงที่ ขึ้นอยู่กับอันตรกิริยาระหว่างโฟตอนจากรังสีตกกระทบกับตัวกลางนั้น สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 1.11

$$Z_{eff} = \frac{\sigma_{t,a}}{\sigma_{t,el}} \tag{2.11}$$

เมื่อ $\sigma_{t,a}$ คือ ค่าภาคตัดขวางรวมเชิงอะตอม (Total atomic cross-section) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 1.12

$$\sigma_{t,a} = \frac{\mu_m}{N_a \sum_i^n (\frac{W_i}{A_i})} \tag{2.12}$$

และ $\sigma_{t,el}$ คือ ค่าภาคตัดขวางรวมเชิงอิเล็กตรอน (Total electronics cross-section) คำนวณได้จากสมการที่ 2.13

$$\sigma_{t,el} = \frac{1}{N_A} \sum_i^n \frac{f_i A_i}{Z_i} (\mu_m)_i \tag{2.13}$$

เมื่อ N_A คือ เลขอะโวกาโดร (Avogadro number) มีค่าเท่ากับ 6.02 x 10^{23} อะตอมต่อโมล

A_i คือ เลขอะตอม (Mass number) ของธาตุแต่ละชนิดในตัวกลาง (กรัมต่อโมล; g/mol)

f_i คือ อัตราส่วนระหว่างจำนวนอะตอมของธาตุแต่ละธาตุในตัวกลางต่อมวล 1 กรัม (N_i) กับจำนวนอะตอมทั้งหมดของตัวกลางต่อมวล 1 กรัม ($\sum_i N_i$) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.14 [24]

$$f_i = \frac{N_i}{\sum_i N_i} \tag{2.14}$$

โดยที่

$$N_i = N_A \frac{W_i}{A_i} \tag{2.15}$$

3. ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน (Effective electron density)

ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนคือ จำนวนอิเล็กตรอนของอะตอมในตัวกลางที่เป็นสารประกอบ หรือส่วนผสมต่อมวล 1 กรัม คำนวณได้จากสมการที่ 2.16

$$N_e = \frac{\mu_m}{\sigma_{t,el}} \tag{2.16}$$

เมื่อ N_e คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน (อิเล็กตรอนต่อกรัม; electron/g)

4. ความหนาครึ่งค่าของวัสดุ (Half value layer; *HVL*)

ความหนาครึ่งค่าของวัสดุคือ ความหนาของวัสดุที่สามารถกั้นรังสี และทำให้ปริมาณรังสีลดลงครึ่งหนึ่งจากปริมาณรังสีเดิมที่ผ่านเข้ามาสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.17

$$HVL = \frac{\ln 2}{\mu} \tag{2.17}$$

เมื่อ μ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น (ต่อเซนติเมตร) คำนวณได้จาก $\mu_m \times \rho$

5. ความหนาเทียบเท่าตะกั่ว (Lead equivalent)

ความหนาเทียบเท่าตะกั่ว เป็นการเปรียบเทียบความสามารถในการกำบังรังสีของวัสดุคอมโพสิตสำหรับการกำบังรังสีกับตะกั่ว โดยใช้ความหนาเป็นตัวแปรในการเปรียบเทียบ [23]

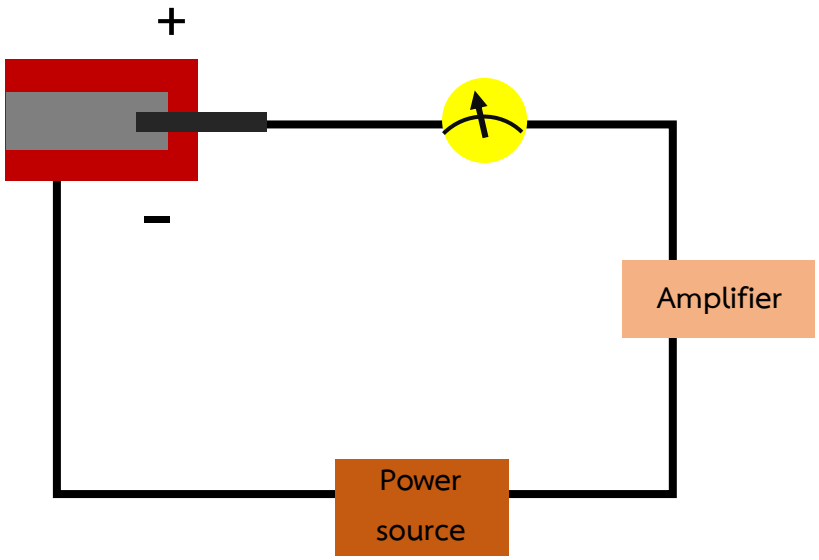
$$Leadequivalent = \frac{\mu_{composite}}{\mu_{Pb}} x thickness_{composites} \tag{2.18}$$

2.1.1.8 การวัดรังสี

งานวิจัยทั่วไปที่ใช้เทคนิคทางนิวเคลียร์จะต้องเกี่ยวข้องกับการวัดรังสี โดยเครื่องวัดรังสีมีหลายประเภทซึ่งมีหลักการทำงาน และมีประสิทธิภาพในการวัดรังสีแตกต่างกัน ดังนั้นความรู้ด้านการวัดรังสีจะช่วยให้สามารถเลือกใช้เครื่องวัดรังสีได้อย่างเหมาะสม และวิเคราะห์ข้อมูลได้ถูกต้อง นอกจากนี้การตรวจวัดรังสีจะช่วยให้เกิดความมั่นใจว่ามีความปลอดภัยจากการทำงานที่เกี่ยวข้องกับกัมมันตภาพรังสี

หลักการวัดรังสี โดยรังสีในที่นี่หมายถึง รังสีก่อไอออน และการวัดรังสีนี้ก็หมายรวมถึงการตรวจหา และการวัดรังสี เนื่องจากรังสีเป็นแสงที่ตามนุษย์ไม่สามารถมองเห็นหรือสัมผัสได้จึงจำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ หรือเครื่องมือที่สามารถตรวจหาวัดกัมมันตภาพหรือปริมาณรังสีได้เรียกว่า เครื่องวัดรังสี (Radiation detector) ระบบการวัดรังสีประกอบด้วยอุปกรณ์ที่สำคัญสองส่วนคือ หัววัดรังสี (Detector) ทำหน้าที่เป็นตัวกลางรับรังสี และเป็นบริเวณที่เกิดอันตรกิริยาต่าง ๆ ขึ้น และส่วนที่เป็นชุดอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์วัด และแสดงผลทำหน้าที่ตรวจวัดผลที่เกิดจากอันตรกิริยาซึ่งจะถูกเปลี่ยนเป็นสัญญาณไฟฟ้า หลังจากการนับหรือการวิเคราะห์สัญญาณแล้วจึงแสดงผลเป็นตัวเลข เสียง หรือภาพ

การตรวจทางเวชศาสตร์นิวเคลียร์ หัววัดรังสี (Detector) เป็นอุปกรณ์พื้นฐานที่มีความสำคัญในการวัดปริมาณรังสีซึ่งหัววัดรังสีมีหลายชนิดจะใช้งานแบบไหนนั้นขึ้นอยู่กับจุดประสงค์ และชนิดของรังสี โดยระบบการวัดรังสีแสดงดังรูปที่ 2.6



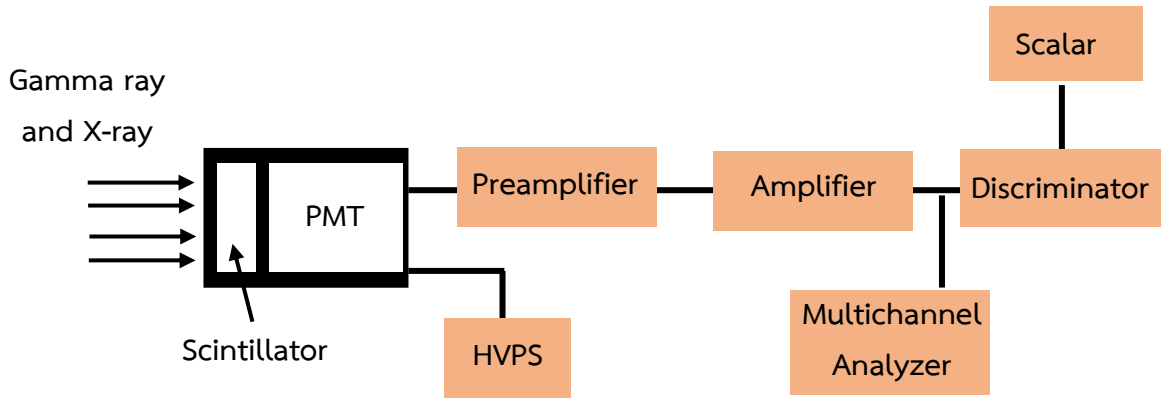
รูปที่ 2.7 ระบบการวัดรังสี

(ดัดแปลงมาจาก: http://www.mt.mahidol.ac.th)

อย่างที่กล่าวไปข้างต้นว่าหัววัดรังสีเป็นส่วนที่รับรังสี และส่วนที่เกิดอันตรกิริยาขึ้น ซึ่งจะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับชนิดของหัววัด ขอกล่าวถึงหลักการทำงานของหัววัดรังสีทั้งสามชนิด โดยสังเขปดังต่อไปนี้

1. หัววัดรังสีแบบซินทิลเลชัน (Scintillator)

หัววัดรังสีแบบซินทิเลชันเป็นเครื่องมือที่นิยมใช้กันมากที่สุด ส่วนใหญ่ใช้วัดรังสีแกมมา และรังสีเอ็กซ์ โดยรูปร่าง และลักษณธของเครื่องมือประกอบด้วย ตัวเรืองแสง (Scintillator) สามารถปล่อยแสงออกมาเมื่อรังสีพุ่งเข้าชน และหลอดทวีคูณแสง (Photomultiplier tube; PMT) ซึ่งจะทำหน้าที่รับแสง และเพิ่มอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นหรือเกิดการขยายสัญญาณ เนื่องจากความเข้มแสงจากซินทิลเลชันมีค่าน้อยมากจึงจำเป็นที่จะต้องทำการขยายสัญญาณก่อน ซึ่งมีกำลังขยายประมาณ 10^4-10^7 เท่า ระบบวัดรังสีแบบซินทิลเลชันแสดงดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.8 วงจรการทำงานของระบบการวัดรังสีแบบซินทิลเลชัน (Scintillator)
(ดัดแปลงมาจาก: http://www.lib.ku.ac.th)

หลักการทำงานซินทิลเลชันดูดกลืนรังสีแกมมา หรือรังสีเอ็กซ์ทำให้อิเล็กตรอนถูกกระตุ้นจากสภาวะพัก (Ground state) สู่สภาวะกระตุ้น (Activator excited state) หลังจากนั้นอิเล็กตรอนคายพลังงานออกมาในรูปโฟตอนแสงในขณะที่อิเล็กตรอนกลับลงสู่สภาวะพัก แสงจากผลึกซินทิลเลเตอร์ตกกระทบที่โฟโตแคโทดของหลอดทวีคูณแสง โฟโตแคโทดจะปล่อยอิเล็กตรอนออกมา โดย High voltage power supply (HPVS) ทำหน้าที่สร้างแรงดัน หรือกระแสไฟฟ้าของวงจร แรงดันไฟฟ้าสูงที่ป้อนเข้าสู่หลอดทวีคุณแสงจะทำให้เกิดการขยายจำนวนอิเล็กตรอนปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron) เพิ่มขึ้นเป็นจำนวนมากซึ่งถือว่าเป็นการขยายสัญญาณ อิเล็กตรอนที่เพิ่มขึ้นเหล่านี้จะถูกส่งต่อสู่ขั้วแอโนด และกลายเป็นสัญญาณเอาต์พุต จากนั้นอิเล็กตรอนถูกส่งไปยังวงจรภายนอกเรียกว่า แอมพลิฟายเออร์ (Amplifier) เพื่อทำการขยายสัญญาณ สัญญาณนี้จะถูกส่งไปยังเครื่องวิเคราะห์แบบมัลติเชนแนล (Multichannel analyzer) เพื่อทำการวิเคราะห์สเปกตรัมของรังสีแกมมาที่ทำการนับวัดได้

2. หัววัดรังสีแบบสารกึ่งตัวนำ

พัฒนามาจากความก้าวหน้าในการประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำให้มีสมบัติตามต้องการ สารกึ่งตัวนำที่เป็นหัววัดรังสีคือ เจอร์มาเนียม (Germanium) และซิลิคอน (Silicon) ซึ่งหลักการทำงานเมื่อรังสีกระทบหัววัดชนิดสารกึ่งตัวนำจะเกิดการแตกตัวได้คู่อิเล็กตรอนโฮล (Electron - hold) ซึ่งจะถูกเปลี่ยนเป็นสัญญาณไฟฟ้าที่มีขนาดเป็นสัดส่วนกับพลังงานของรังสี

3. หัววัดรังสีแบบแก๊ส

หัววัดรังสีแบบแก๊สประกอบด้วยแคโทด (Cathode) มีรูปร่างเป็นทรงกระบอกทำมาจากทองแดง และมีเส้นลวดเป็นแอโนด (Anode) อยู่กึ่งกลางกระบอก และเส้นลวดต่ออยู่กับแหล่งจ่ายไฟตรงที่มีค่ามากประมาณ 250-100 โวลต์ ซึ่งภายในกระบอกมีแก๊สอยู่

สำหรับหลักการทำงานคือเมื่อรังสีผ่านเข้าสู่หัววัดรังสีที่มีประจุ เช่น รังสีเบตา หรือรังสีแอลฟาจะทำให้อะตอมของแก๊สเกิดการแตกตัวได้ไอออนคู่ออกมาซึ่งประกอบด้วยอิเล็กตรอน และไอออนบวก (Positive ion) จำนวนไอออนขึ้นอยู่กับจำนวน และชนิดของรังสีที่มีประจุผ่าน อิเล็กตรอนเข้าสู่แอโนด และไอออนบวกเข้าสู่แคโทดทำให้เกิดการไหลของกระแสขึ้นในวงจรเกิดเป็นสัญญาณ ซึ่งขนาดของสัญญาณขึ้นอยู่กับอิเล็กตรอนที่เข้าสู่แอโนด หลังจากนั้นสัญญาณจะถูกส่งไปยังเครื่องนับ [24]

4. โปรแกรม WinXcom

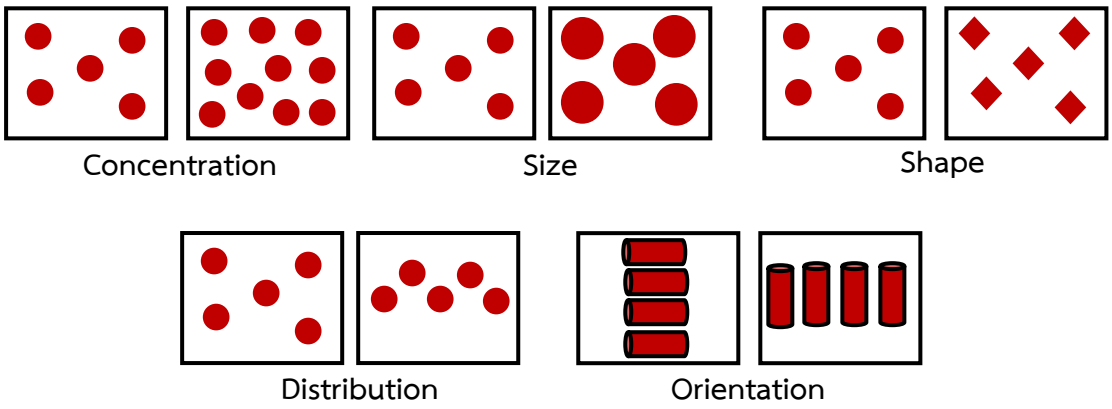
ข้อมูลการดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ และรังสีแกมมาต้องใช้ข้อมูลทางวิทยาศาสตร์ และการประยุกต์ทางการแพทย์ โดยโปรแกรม WinXCom ใช้สำหรับหาค่าภาคตัดขวาง (Cross-Section) หรือค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล (Mass attenuation coefficient) ของการเกิดอันตรกิริยา Incoherent และ Coherent การดูดกลืนแบบโฟโตอิเล็กทริค แพร์โปรดักชัน สำหรับธาตุบริสุทธิ์ สารประกอบ และสารผสม และเป็นโปรแกรมที่น่าเชื่อถือยอมรับในระดับนานาชาติ[25]

2.1.2 วัสดุเชิงประกอบ หรือวัสดุคอมโพสิต (Composite materials)

วัสดุเชิงประกอบ หรือวัสดุคอมโพสิตหมายถึง วัสดุที่เกิดจากการรวมกันของวัสดุมากกว่าหนึ่งชนิดขึ้นไปแล้วทำให้สมบัติของวัสดุรวมดีขึ้น สำหรับความหมายเชิงวิศวกรรมของวัสดุคอมโพสิตหมายถึง วัสดุที่ประกอบขึ้นจากวัสดุที่มีสมบัติแตกต่างกันตั้งแต่สองชนิดขึ้นไปโดยไม่เกิดการรวมตัวเป็นเนื้อเดียวกันทำให้สมบัติของวัสดุคอมโพสิตที่ได้มีสมบัติร่วมกันของวัสดุที่เป็นองค์ประกอบ ดังนั้นการทำนาย หรือคาดคะเนสมบัติของวัสดุคอมโพสิตจึงไม่สามารถทำนายได้จากวัสดุที่เป็นองค์ประกอบชนิดใดเพียงชนิดเดียว องค์ประกอบของวัสดุคอมโพสิตได้แก่ วัสดุที่เป็นเนื้อหลัก และเป็นเฟสต่อเนื่องเรียกว่า เมทริกซ์ (Matrix) และวัสดุที่กระจายตัวอยู่ในวัสดุเนื้อหลักนั้นเรียกว่าเฟสกระจาย (Dispersion) โดยเมทริกซ์จะทำหน้าที่ห่อหุ้มสารเสริมแรงและทำให้วัสดุคอมโพสิตเป็นรูปร่างขึ้น ส่วนเฟสกระจายทำหน้าที่เสริมสมบัติให้กับเมทริกซ์ และทำให้วัสดุคอมโพสิตมีสมบัติตามต้องการ[26] วัสดุคอมโพสิตเริ่มต้นกลางคริสต์ศตวรรษที่ 20 ซึ่งเป็นยุคที่มีความก้าวหน้าทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ฟีนอลพอลิมัลดีไฮด์ (Phenol formaldehyde resin) หรือเรซินฟีนอลิก (Phenolic resin) เป็นพอลิเมอร์สังเคราะห์ชนิดแรกที่ถูกผลิต และจัดจำหน่าย หลังจากนั้นได้มีการผลิตเรซินยูเรียฟอร์มัลดีไฮด์ (Urea formaldehyde resin) พอลิเอสเตอร์ชนิดไม่อิ่มตัว (Unsaturated polyester resin) และอีพอกซี (Epoxy) ออกมาตามลำดับ และในเวลาต่อมามีการพัฒนากระบวนการการผลิตเส้นใยที่มีขนาด หรือเส้นผ่านศูนย์กลางที่เล็กมากจากแก้วหลอมเหลวเรียกว่า เส้นใยแก้ว (Glass fiber) ออกสู่ตลาดเพื่อใช้งานเป็นฉนวนกันความร้อน การนำพอลิเมอร์และเส้นใยแก้วมาประกอบกลายเป็นจุดเริ่มต้นของนวัตกรรมการผลิตวัสดุคอมโพสิตในปัจจุบัน[27] ระยะเริ่มต้นความต้องการวัสดุที่มีความแข็งแรง และขึ้นรูปให้มีรูปร่างซับซ้อนได้กลายเป็นแรงผลักดัน

ให้เกิดการนำเอาเส้นใยแก้วที่มีความแข็งแรงสูงมาเสริมแรงให้กับเรซินพอลิเมอร์เกิดเป็นวัสดุคอมโพสิตที่ทนแรงกระทำ และในเวลาต่อมาวัสดุคอมโพสิตก็เริ่มมีการพัฒนาเพื่อการใช้งานมากขึ้นเรื่อย ๆ โดยใช้เป็นส่วนประกอบของชิ้นส่วนที่ต้องการความแข็งแรง และการเปลี่ยนชนิดของพอลิเมอร์ที่ใช้เป็นเมทริกซ์ซึ่งจะทำให้ได้วัสดุคอมโพสิตที่มีสมบัติที่หลากหลายและมีสมบัติแตกต่างกันตามจุดประสงค์ในการประยุกต์ใช้งาน[28]

โดยสมบัติของวัสดุคอมโพสิตที่ได้จะขึ้นอยู่กับสมบัติของวัสดุเริ่มต้น อัตราส่วนของวัสดุเริ่มต้นแต่ละชนิด และลักษณะของเฟสที่กระจายตัวอยู่ วัสดุคอมโพสิตที่เกิดจากเมทริกซ์ และเฟสที่กระจายตัวชนิดเดียวกัน แต่ถ้ามีความเข้มข้น ขนาด รูปร่าง ลักษณะการกระจาย หรือการจัดเรียงตัวของเฟสที่กระจายที่แตกต่างกัน วัสดุคอมโพสิตที่ได้จะมีสมบัติที่ไม่เหมือนกัน ลักษณะต่าง ๆ ของเฟสที่กระจายตัวอยู่ในเมทริกซ์ที่ส่งผลต่อสมบัติสุดท้ายของวัสดุคอมโพสิตแสดงดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.9 ลักษณะต่าง ๆ ของเฟสที่กระจายตัวอยู่ในเมทริกซ์ที่ส่งผลต่อสมบัติสุดท้ายของวัสดุคอมโพสิต

(ดัดแปลงมาจาก: http://ftiebusiness.com/knowledge-detail.php)

วัสดุคอมโพสิตแบ่งออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่

2.1.2.1 วัสดุผสมที่เสริมแรงด้วยอนุภาค (Particle-reinforced)

วัสดุผสมที่เสริมแรงด้วยอนุภาคประกอบด้วยเนื้อพื้นที่เป็นเนื้อเดียวต่อเนื่องกันและมีการเสริมแรง หรือเพิ่มสมบัติให้กับเนื้อพื้นด้วยการเติมสารเสริมแรงแบบเม็ดผง เช่น วัสดุคอมโพสิตของทังสเตนคาร์ไบด์กับโคบอลต์ ทังสเตนคาร์ไบด์มีความแข็งสูง แต่ทังสเตนคาร์ไบด์มีข้อเสียคือ มีความจำเพาะสูง และแตกหักง่าย เมื่อผสมกับโคบอลต์ทำให้วัสดุที่ได้มีความแข็งสูง และมีความต้านทานการแตกหักที่ดีขึ้น เพราะโคบอลต์มีความเหนียว และคอยดูดกลืนพลังงาน ยางล้อรถยนต์ที่มีเนื้อพื้นเป็นยาง และมีการผสมคาร์บอนแบล็ค หลังจากการยางได้ผ่านกระบวนคงรูปแล้ว ยางล้อรถยนต์ที่ได้จะมีความแข็งแรง ความแกร่ง และความต้านทานการสึกกร่อนมากขึ้น เป็นต้น

2.1.2.2 วัสดุผสมที่เสริมแรงด้วยเส้นใย (Fiber-reinforced)

1. วัสดุผสมที่เสริมแรงด้วยเส้นใยยาว และมีการจัดเรียงตัวเป็นระเบียบ

เป็นการผสมเส้นใยให้กระจายตัวอย่างเป็นระเบียบอยู่ในเมทริกซ์ เช่น การผสมเส้นใยของซิลิกอนคาร์ไบด์ในแก้วเพื่อเพิ่มความแกร่ง (Fracture toughness) เป็นต้น

2. วัสดุคอมโพสิตเสริมแรงโดยเส้นใยสั้น (Short fiber-reinforced composites) แบ่งได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่

- วัสดุคอมโพสิตเสริมแรงโดยเส้นใยสั้นเรียงตัวเป็นระเบียบ (Aligned discontinuous fiber-reinforced composites) มีสมบัติทางกลที่ดี เมื่อต้องรับโหลดในทิศทางเดียวกับทิศทางการจัดเรียงตัวของเส้นใย ดังนั้นวัสดุคอมโพสิตชนิดนี้จะมีสมบัติเป็นแบบ Anisotropy

- วัสดุคอมโพสิตเสริมแรงโดยเส้นใยสั้นเรียงตัวแบบสุ่ม (Randomly oriented discontinuous fiber reinforced composites) หรือไม่มีการจัดเรียงตัวในทิศทางใดทิศทางหนึ่งทำให้วัสดุชนิดนี้มีสมบัติที่เท่ากันในทุกทิศทางเรียกว่า Isotropy

หากใช้เฟสเนื้อพื้นเป็นเกณฑ์ในการจำแนกชนิดของวัสดุคอมโพสิตสามารถที่ถูกจำแนกได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่

1. วัสดุคอมโพสิตเนื้อพื้นพอลิเมอร์ (Polymer matrix composites, PMC) วัสดุคอมโพสิตที่มีเมทริกซ์เป็นพอลิเมอร์ และเฟสที่กระจายหรือเฟสเสริมแรงเป็นได้ทั้งพอลิเมอร์โลหะ และเซรามิกส์

2. วัสดุคอมโพสิตเนื้อพื้นโลหะ (Metal matrix composites, MMC) วัสดุคอมโพสิตที่มีเมทริกซ์เป็นโลหะ และส่วนมากมีเฟสกระจายตัวที่เป็นโลหะ หรือเซรามิกส์ เพื่อเพิ่มความแข็ง (Hardness) ความแข็งแรง (Tensile strength) และความต้านทานความคืบ (Creep resistance) เป็นต้น

3. วัสดุคอมโพสิตเนื้อพื้นเซรามิกส์ (Ceramic matrix composites, CMC) วัสดุคอมโพสิตที่มีเซรามิกส์เป็นเมทริกซ์ และเนื่องด้วยเซรามิกซ์มีความเพาะสูง ดังนั้นเฟสกระจายตัวที่เลือกมาผสมกับเมทริกซ์ต้องสามารถเพิ่มความแกร่ง (Fracture toughness, K_C) ให้กับเมทริกซ์ได้[29]

2.1.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวัสดุคอมโพสิต

ซึ่งเป็นงานวิจัยที่มุ่งเน้นการปรับปรุงสมบัติต่าง ๆ ของพอลิเมอร์ โดยการเติมสารตัวเติมลงในพอลิเมอร์ เช่น

H.Y.Chen และคณะ (2015)[30] ได้ทำการศึกษาการเติมแคลเซียมซัลเฟต (Calcium sulfate; $CaSO_4$) ที่ผ่านการปรับปรุงผิวหน้าด้วยกระบวนการไฮดรอกซิเลชัน (hydroxylation) โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxyl; NaOH) เป็นตัวทำละลายเพื่อเพิ่มหมู่ไฮดรอกซิล (-OH)

ลงบนผิวของแคลเซียมซัลเฟต และกราฟด้วยอะมิโนโพพิลไตรเมทท็อกซี่ไซเลน (Amino propyl trimethoxy silane; APS) หลังจากนั้นผสมลงในพอลิไวนิลคลอไรด์ (Polyvinyl chloride; PVC) โดยแคลเซียมซัลเฟตทำหน้าที่เป็นเฟสเสริมแรงให้กับพอลิไวนิลคลอไรด์ที่ทำหน้าที่เป็นเนื้อพื้น จากการทดสอบแสดงให้เห็นว่า แคลเซียมซัลเฟตที่ผ่านการปรับปรุงผิวหน้าจะให้ค่าความต้านทานต่อแรงกระแทก (Impact strength) และความแข็งแกร่งต่อการโค้งงอ (Flexural strength) เพิ่มขึ้น เนื่องจากแคลเซียมซัลเฟตผสมเข้ากันได้ดีกับพอลิไวนิลคลอไรด์ และเป็นผลมาจากบริเวณผิวหน้าของแคลเซียมซัลเฟตมีหมู่ไฮดรอกซิลเพิ่มขึ้นเมื่อทำการปรับปรุงผิวหน้าด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่สามารถเกิดปฏิกิริยากับหมู่ไซลานอลที่ปลายสายโซ่ของอะมิโนโพพิลไตรเมทท็อกซี่ไซเลนได้ โดยปลายสายโซ่อีกด้านหนึ่งของอะมิโนโพพิลไตรเมทท็อกซี่ไซเลนเป็นหมู่อะมิโน ($-NH_2$) ทำปฏิกิริยากับพอลิไวนิลคลอไรด์ทำให้เกิดอันตรกิริยาที่ดีระหว่างกัน เมื่อให้แรงกับวัสดุคอมโพสิต แรงจะเคลื่อนที่ไปยังเฟสของเนื้อพื้นก่อน และจะทำการถ่ายโอนแรงจากเนื้อพื้นไปยังเฟสเสริมแรง หากเกิดอันตรกิริยาที่ดีต่อกันจะเกิดการถ่ายโอนแรงได้อย่างต่อเนื่องส่งผลให้สมบัติเชิงกลมีค่าเพิ่มขึ้น

สุปราณี และคณะ (2016)[31] ศึกษาสมบัติเชิงกลและสัณฐานวิทยาของคอมโพสิตชีวภาพที่ผลิตจากพอลิแลคติกแอสิด (PLA) โดยมีเส้นใยสับปะรด (PALF) เป็นสารเสริมแรง เส้นใยสับปะรดที่ใช้สกัดได้จากใบสับปะรดด้วยวิธีเชิงกล (ใช้เครื่องขูดใบ) ตรวจสอบสัณฐานวิทยาของพื้นผิวและสมบัติความทนต่อแรงดึงของเส้นใยด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็คตรอนแบบส่องกราดและเครื่องทดสอบแรงดึงอเนกประสงค์ ก่อนเตรียมคอมโพสิตเส้นใยสับปะรดจะถูกตัดให้มีความยาวประมาณ 1-3 มม. และผสมกับพอลิแลคติกแอสิดด้วยเครื่องผสมแบบเกลียวคู่ (Twin-screw extruder) ในปริมาณเส้นใยร้อยละ 10-50 ก่อนที่จะขึ้นรูปเป็นชิ้นงานด้วยเครื่องขึ้นรูปแบบฉีด (Injection molding) การทดสอบแรงดึงของคอมโพสิตตามวิธีมาตรฐาน ASTM D638 พบว่าค่ามอดุลัสของยัง (Young's modulus) ของคอมโพสิตเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้น โดยคอมโพสิตที่มีปริมาณเส้นใยร้อยละ 50 มีค่ามอดุลัสของยังเพิ่มขึ้นจากพอลิแลคติกแอสิดร้อยละ 68 ส่วนคอมโพสิตที่มีปริมาณเส้นใยร้อยละ 40 มีค่ามอดุลัสของยังเพิ่มขึ้นจากพอลิแลคติกแอสิดร้อยละ 48 แต่มีค่าความหนืดขณะหลอม (Melt viscosity) ต่ำกว่าคอมโพสิตที่มีปริมาณเส้นใยร้อยละ 50 นอกจากนี้ เพื่อปรับปรุงความเข้ากันได้ของพอลิแลคติกแอสิดกับเส้นใย งานวิจัยนี้ยังได้เติมสารคู่ควบ (Coupling agent) มาเลอิกแอนไฮไดร์ร้อยละ 10 ลงในคอมโพสิตที่มีปริมาณเส้นใยร้อยละ 40 ผลที่ได้พบว่าค่ามอดุลัสของยังของคอมโพสิตเพิ่มจาก 3.8 เป็น 5.1 GPa หรือเพิ่มขึ้นร้อยละ 34

S.Tang และคณะ(2007), F.Yang และคณะ (2008)[32-33] รายงานว่าการปรับปรุงสมบัติความต้านทานต่อการแตกหัก (Fracture toughness) ของซิลิคอนคาร์ไบด์ (Silicon carbide; SiC) มีข้อดีหลายประการ เช่น น้ำหนักเบา แข็งแรง ทนทานต่อการสึกหรอ ทนต่ออุณหภูมิได้สูง เป็นต้น และซิลิคอนคาร์ไบด์ก็ยังมีข้อเสียคือ ซิลิคอนคาร์ไบด์เป็นวัสดุที่มีความเปราะจึงต้องเติมวัสดุ

คาร์บอนที่มีความยาวของเส้นใยต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (Aspect ratio) ที่สูงลงในซิลิคอนคาร์ไบด์ เช่น เส้นใยคาร์บอน (Carbon fiber) แกรไฟต์ (Graphite flake) ท่อนาโนคาร์บอน (Carbon nanotube; CNTs) เป็นต้น เพื่อปรับปรุงความต้านทานต่อการแตกหักให้ดีขึ้น F. Yang และคณะ (2009)[34] ทำการศึกษาเส้นใยคาร์บอนสั้น (Short carbon fiber) เสริมแรงในวัสดุคอมโพสิตที่ผสมระหว่างเซอร์โคเนียม ไดบอไรด์ (Zirconium diboride; ZrB_2) และซิลิคอนคาร์ไบด์ โดยทำการผสมด้วยวิธีการอัดขึ้นรูปด้วยความร้อน จากผลการทดลองพบว่าความต้านทานต่อการแตกหักมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 4.3 เมกะพาสคัลเป็น 6.6 เมกะพาสคัล Z. Wang และคณะ (2009)[35] ผสมกราไฟล์แบบแผ่น (Graphite flake) เข้าไปในวัสดุคอมโพสิตที่ผสมเซอร์โคเนียมไดบอไรด์ (Zirconium diboride ; ZrB_2) ร้อยละ 20 โดยปริมาตร ซิลิคอนคาร์ไบด์สามารถปรับปรุงความต้านทานต่อการแตกหักให้สูงขึ้นได้ถึงร้อยละ 35 เมื่อเทียบกับวัสดุคอมโพสิตที่ไม่มีการเติมกราไฟล์แบบแผ่น และ C.Pengcheng และคณะ (2018) [36] ทำการศึกษาการปรับปรุงความต้านทานต่อการแตกหัก โดยการเติมท่อนาโนคาร์บอนลงในซิลิคอนคาร์ไบด์ที่มีการปรับปรุงผิวหน้าด้วยวิธี HF treatment เพื่อกำจัดซิลิคอนไดออกไซด์ (Silicon dioxide; SiO_2) บนผิวหน้าของซิลิคอนคาร์ไบด์ส่งผลให้เกิดอันตรกิริยาบริเวณผิวหน้า (Interfacial reactions) ระหว่างท่อนาโนคาร์บอนและซิลิคอนไดออกไซด์ให้ดีขึ้นจากการทดลองพบว่า ค่าความต้านทานต่อการแตกหักเพิ่มขึ้นจาก 4.4 เมกะพาสคัลเป็น 5.4 เมกะพาสคัล

A.R.Bhattacharyya และคณะ (2003)[37] ได้ทำการเตรียมวัสดุคอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีน (Polypropylene; PP) และท่อนาโนคาร์บอนผนังหนึ่งชั้น (Single-walled Carbon Nanotube; SWCN) โดยใช้การผสมแบบหลอม (Melt blending method) และทำการตรวจสอบกระบวนการเกิดผลึกของวัสดุคอมโพสิต จากผลการทดลองพบว่า การเติมท่อนาโนคาร์บอนผนังหนึ่งชั้นไม่สามารถเปลี่ยนแปลงชนิดของผลึกของพอลิโพรพิลีนได้ แต่สามารถทำหน้าที่เป็นตัวเร่งในการก่อผลึก (Nucleating agent) ในพอลิโพรพิลีนส่งผลให้อัตราการเกิดผลึกขอวัสดุคอมโพสิตเพิ่มขึ้น มีสเฟียร์รูไลท์ (Spherules) ขนาดเล็ก และมีการกระจายตัวของขนาดผลึกที่แคบ ส่งผลให้วัสดุคอมโพสิตมีสมบัติเชิงกลที่เพิ่มขึ้น T.Y.Zhou และคณะ (2016)[38] ได้ทำการเตรียมวัสดุคอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีน และท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้น (Multi-walled MWCNT) โดยใช้วิธีการผสมแบบหลอม (Melt blending method) ทำการศึกษาขนาด และปริมาณของท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้นที่มีผลต่อสมบัติทางความร้อน และเสถียรภาพทางความร้อนของวัสดุคอมโพสิต จากการทดสอบการวิเคราะเชิงความร้อนด้วยเทคนิคการวัดการเปลี่ยนแปลงมวล เมื่ออุณหภูมิ หรือเวลาเปลี่ยนไป (Thermogravimetric analysis; TGA) พบว่า อุณหภูมิในการสลายตัว (Decomposition temperature; T_d) ของวัสดุคอมโพสิตเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณของท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้น เนื่องจากท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้นมีลักษณะที่เป็นท่อ และมีผนังหลาย

ชั้นอาจทำให้เกิดการขัดขว้าง (Barrier function) ของท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้นการส่งผ่านความร้อนจึงทำได้ยากขึ้น และเมื่อค่าความยาวของเส้นใยต่อเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มขึ้น ค่าอุณหภูมิในการสลายตัวจะเพิ่มขึ้นเช่นกัน เนื่องจากเกิดเส้นทางคดเคี้ยว (Tortuous path) ในวัสดุคอมโพสิตมากขึ้น ซึ่งการเกิดเส้นทางคดเคี้ยวจะทำให้การส่งผ่านความร้อนเกิดได้ช้าลง ดังนั้นท่อนาโนคาร์บอนสามารถเพิ่มความเสถียรทางความร้อนให้กับพอลิเมอร์ได้ นอกจากนี้ท่อนาโนคาร์บอนยังสามารถเพิ่มสมบัติเชิงกลให้กับพอลิเมอร์ได้อีกด้วย

P.L.Teh และคณะ (2008)[39] ทำการศึกษาปัจจัยของการเติมซิลิกาหลอม (Fused silica) ใยแก้วผง (Glass powder) และซิลิกา (Mineral silica) ลงในอิพ๊อกซี่ (Epoxy) ที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลด้านไดนามิก (Dynamic properties) จากผลการทดลองสารตัวเติมทั้งสามทำให้ค่าสมบัติเชิงกลด้านไดนามิกของอิพ๊อกซี่เพิ่มขึ้น เนื่องจากสารตัวเติมเหล่านี้จัดเป็นสารตัวเติมประเภทเสริมแรงเข้ากันได้ดีกับอิพ๊อกซี่ที่ทำหน้าที่เป็นเนื้อพื้น และบนผิวหน้าของอนุภาคของสารตัวเติมมีหมู่ฟังก์ชันที่สามารถเกิดปฏิกิริยากับอิพ๊อกซี่ได้ทำให้เกิดอันตรกิริยาที่ดีระหว่างกัน

S.Zhang และคณะ (2011)[40] ทำการศึกษาการนำความร้อน (Heat conduction) ความต้านทานต่อการกระแทก (Impact strength) และความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile strength) ของพอลิเอททิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (High-density polyethylene; HDPE) ที่มีการเติมอะลูมิเนียมออกไซด์ (Aluminium oxide; Al_2O_3) จากการทดลองพบว่า สมบัติเชิงกลเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเติมอะลูมิเนียมออกไซด์ในปริมาณที่เหมาะสมเนื่องจากอะลูมิเนียมออกไซด์มีอนุภาคที่แข็งสามารถเสริมแรงให้กับพอลิเอททิลีนชนิดความหนาแน่นสูงได้ และการมีอะลูมิเนียม (Al) เป็นองค์ประกอบจะสามารถนำความร้อนได้ดี เนื่องจากอะลูมิเนียมเป็นโลหะที่มีสมบัติในการนำความร้อนได้ ซึ่งมีผลการทดลองที่คล้ายกันของ M.A.Onitiri และคณะ (2018)[34] ที่ทำการศึกษาปัจจัยในการเติมหางแร่ (Iron ore tailings) ที่มีขนาด และปริมาณที่แตกต่างกันลงในวัสดุคอมโพสิตอิพ๊อกซี่ จากผลการทดลองพบว่า ค่าความต้านทานต่อการกระแทกของวัสดุคอมโพสิตเพิ่มขึ้น เมื่อหางแร่มีขนาดเล็กลงเป็นผลมาจากมีพื้นที่ผิวสัมผัสกับอิพ๊อกซี่มากเกิดการส่งผ่านแรงได้มากเช่นกัน นอกจากนี้การเติมหางแร่ที่มีองค์ประกอบของเหล็กซึ่งมีสมบัติการนำความร้อนได้ดีจะส่งผลให้วัสดุคอมโพสิตเกิดการนำความร้อนได้ดีขึ้นด้วย

รังสิมา และคณะ (2002)[41] ศึกษาการเตรียมวัสดุคอมโพสิตระหว่างพอลิเอททิลีนชนิดความหนาแน่นสูง และไมก้าหรือทัลคัมที่ส่งผลต่อการแพร่ผ่านของแก๊สออกซิเจน และสมบัติเชิงกล จากการศึกษาพบว่า ในการผสมไมก้าร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก และทัลคัมร้อยละ 25 โดยน้ำหนักมีผลทำให้การแพร่ผ่านของแก๊สออกซิเจนในพลาสติกผสมลดลงประมาณร้อยละ 60 เมื่อเทียบกับพอลิเอททิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ไม่มีการเติมสารตัวเติม เนื่องจากไมก้า หรือทัลคัมทำหน้าที่เป็น

สารที่ช่วยเร่งในการเกิดผลึก (Nucleating agent) ของพอลิเอททิลีนชนิดความหนาแน่นสูงทำให้พลาสติกผสมมีผลึกมีขนาดเล็ก ปริมาณมาก และมีความหนาแน่นสูง ทำให้แก๊สซึ่งมีโมเลกุลขนาดเล็กซึมผ่านได้ยากขึ้น

2.1.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวัสดุคอมโพสิตเพื่อกำบังรังสี

จากงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้นมีวัตถุประสงค์เช่นเดียวกันคือ ต้องการพัฒนาวัสดุคอมโพสิตให้มีคุณสมบัติที่หลากหลาย เพื่อขยายขอบเขตการใช้งานของวัสดุคอมโพสิตให้กว้างขึ้น หรือสามารถนำไปใช้งานในด้านที่เฉพาะเจาะจงมากยิ่งขึ้น ซึ่งในปัจจุบันนักวิจัยได้มีการพัฒนาวัสดุคอมโพสิตที่สามารถนำมาใช้งานเฉพาะด้านได้ เช่น การเติมโลหะออกไซด์ลงในพอลิเมอร์ เพื่อเป็นวัสดุที่สามารถลดทอนรังสีได้ ซึ่งในปัจจุบันมีการนำรังสีเอ็กซ์ และรังสีแกมมามาใช้งานอย่างแพร่หลาย ทั้งด้านการแพทย์ การเกษตร และในอุตสาหกรรมต่าง ๆ แต่เนื่องจากรังสีเอ็กซ์และรังสีแกมมา เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีพลังงานสูงจัดเป็นรังสีก่อไอออน ซึ่งเป็นอันตรายต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม หากผู้ปฏิบัติงานทางด้านรังสีได้รับรังสีในปริมาณที่มากเกินไป อาจส่งผลร้ายแรงต่อสุขภาพและร่างกาย เช่น อาจส่งผลกระทบให้เกิดความเสี่ยงในการเกิดเซลล์มะเร็งเพิ่มสูงขึ้น ดังนั้นจึงมีความจำเป็น และสำคัญอย่างยิ่งในการหาวิธีป้องกันรังสีดังกล่าว จึงมีการคิดค้นผลิตวัสดุป้องกันรังสีเพื่อให้ผู้ปฏิบัติงานทางด้านรังสีสามารถป้องกันและลดโอกาสที่จะได้รับรังสีจนก่อให้เกิดอันตรายได้[42]

K.Singh และคณะ (2002)[43] ทำการศึกษาความสามารถในการกำบังรังสีของแก้วบอเรตในสูตร $xBi_2O_3(1-x)B_2O_3$ เมื่อ x เท่ากับ 0.30 0.35 0.40 0.45 และ 0.55 ศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเชิงมวลโดยใช้โปรแกรม WinXCom ที่ระดับช่วงพลังงาน 356-1332 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ (keV) พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเชิงมวลเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของบิสมัท และค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเชิงมวลลดลงเมื่อเพิ่มระดับพลังงานของรังสีแกมมา

P.Kamonpan และคณะ (2005)[44] ทำการศึกษาสมบัติของแก้วตะกั่วป้องกันรังสีแก้วตะกั่วได้ถูกเตรียมขึ้นโดยกระบวนวิธีการหลอมที่มีปริมาณตะกั่วออกไซด์ตั้งแต่ร้อยละ 41.6 – 75.5 โดยน้ำหนัก จากนั้นได้ทำการตรวจสอบผลกระทบของเงื่อนไขกระบวนการเตรียมแก้วต่อการสร้างตัวของเฟส และการแน่นตัวของแก้วตะกั่วเพื่อหาสภาวะในการหลอม โดยพบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมในการหลอมแก้วมีค่าอยู่ในช่วง 1,150 ถึง 1,250 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิในการอบอ่อนอยู่ที่ 500 องศาเซลเซียส สีของแก้วตะกั่วที่ได้มีสีเหลืองจนถึงสีเหลืองอมเขียวตามปริมาณตะกั่วออกไซด์ที่เพิ่มขึ้น และยังพบว่า แก้วตะกั่วมีโครงสร้างเป็นแบบอสัณฐาน ส่วนค่าความหนาแน่น ค่าดรรชนีหักเห และสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ของแก้วมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณตะกั่วออกไซด์เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า แก้วตะกั่วที่เผาที่อุณหภูมิ 1,150 องศาเซลเซียส และเผาแช่เป็นเวลา 4 ชั่วโมงมีค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีเอ็กซ์สูงที่สุดซึ่งเหมาะสำหรับการนำไปเป็นวัสดุกำบังรังสี

ซึ่งการทำวัสดุป้องกันรังสีโดยใช้แก้วพบข้อเสียคือ กระบวนการขึ้นรูปต้องใช้อุณหภูมิสูงในการหลอมแก้วส่งผลต่อต้นทุนการผลิต และแก้วเป็นวัสดุที่มีความเปราะ หากไม่ทำการเก็บรักษา หรือมีการใช้งานที่ไม่ระมัดระวังอาจเกิดการแตกหักได้ง่าย จึงได้มีการคิดค้นนำวัสดุที่มีความหนาสูงมาใช้แทนแก้ว

ดนุพล และคณะ (2008)[45] ทำการศึกษาการนำคอนกรีตมาเป็นวัสดุป้องกันรังสี โดยคอนกรีตที่มีความหนา 20 เซนติเมตร สามารถกำบังรังสีได้เทียบเท่ากับตะกั่วหนา 4 เซนติเมตร นอกจากนี้ยังมีสมบัติทนความร้อน ไม่ทำปฏิกิริยาเคมีกับไอโซโทปรังสี ทนการกัดกร่อนนานกว่าระยะเวลารังสีเสื่อมสลายหมด และทนทานต่อแรงกระแทก ทำการศึกษาคุณลักษณะของคอนกรีตผสมมวลรวมแบไรต์ และเพอร์ไลต์ดิบบดเป็นแร่ในอัตตราส่วนที่แตกต่างกันได้แก่ ร้อยละ 10 20 และ 30 โดยปริมาตร ซึ่งอัตตราส่วนที่แตกต่างกันของเพอรไลต์ดิบมีผลต่อสมบัติทางกายภาพ เชิงกล และการฉายรังสีแกมมาของคอนกรีตมวลหนัก จากผลการทดสอบพบว่า คอนกรีตแบไรต์ผสมเพอร์ไลต์ร้อยละ 10 โดยปริมาตรสามารถลดทอนรังสีแกมมาได้ดีที่สุด โดยเฉพาะเมื่อนำมาวางซ้อนกันให้หนา 15 มิลลิเมตรสามารถลดทอนรังสีแกมมาที่ส่งผ่านได้ดี

2.1.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาพอลิเมอร์กำบังรังสี

จากงานวิจัยข้างต้นปัญหาที่พบคือ วัสดุกำบังรังสีไม่มีสมบัติความยืดหยุ่นที่สามารถโค้งงอตามรูปร่างของอวัยวะที่ต้องการป้องกันรังสีซึ่งอาจส่งผลทำให้รังสีเกิดการสัมผัสกับผิวหนัง หรืออวัยวะนั้น ๆ ได้จึงได้มีการพัฒนาวัสดุป้องกันรังสีให้มีสมบัติความยืดหยุ่นมากขึ้น เพื่อให้สามารถโค้งงอตามรูปร่างของอวัยวะ และป้องกันรังสีแบบเฉพาะพื้นที่ได้ โดยใช้ยางหรือพอลิเมอร์อื่นเป็นวัสดุเพิ่มความยืดหยุ่น

K.Kalayanee และคณะ(2008)[46] ทำการศึกษาการเตรียมยางธรรมชาติเกรด STR 5L ผสมกับผงเฟอร์ไรต์ที่เป็นวัสดุเหลือทิ้งจากโรงงาน และผงเขม่าดำในอัตราส่วนต่าง ๆ จากนั้นนำมาทดสอบประสิทธิภาพการลดทอนรังสีแกมมาที่เกิดจากแหล่งกำเนิดรังสีชนิดอะเมริเซียม (^{241}Am; พลังงาน 59.8 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์) โดยแปรค่าความหนาของแผ่นยาง 1-5 มิลลิเมตร จากการศึกษาพบว่า ประสิทธิภาพการป้องกันรังสีแปรผันตรงตามปริมาณของผงเฟอร์ไรต์ที่ผสม และความหนาของแผ่นยางที่เพิ่มขึ้น ยางธรรมชาติ STR 5L ผสมผงเขม่าดำ 20 ส่วนโดยร้อยส่วนเมื่อเทียบกับยาง และผงเฟอร์ไรต์ 100 ส่วนโดยร้อยส่วนเมื่อเทียบกับยาง มีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเชิงเส้นเท่ากับ 2.31 ต่อเซนติเมตร โดยยางธรรมชาติเกรด STR 5L ผสมผงเขม่าดำสูงสุด 20 ส่วนโดยร้อยส่วนเมื่อเทียบกับยางและผงเฟอร์ไรต์สูงสุด 100 ส่วนโดยร้อยส่วนเมื่อเทียบกับยาง ความหนา 3-5 มิลลิเมตร เป็นวัสดุที่สามารถใช้เป็นวัสดุสำหรับการกำบังรังสีที่มีความยืดหยุ่นจากยางธรรมชาติ การผสมผงเฟอร์ไรต์ลงไปในเนื้อยางธรรมชาติเกรด STR 5L มีผลให้ยางผสมมีค่าความทนทานต่อแรงดึงลดลง

แต่ช่วยเสริมค่าความแข็งของชิ้นงานให้เพิ่มขึ้นอย่างมาก นอกจากนี้ค่าความหนาแน่นของวัสดุคอมโพสิตสูงขึ้นเมื่อปริมาณของผงเฟอร์ไรต์ และปริมาณของเขม่าดำเพิ่มขึ้น

นรินทร์ (2011)[47] เตรียมวัสดุคอมโพสิตผสมระหว่างยางธรรมชาติ และแก้วสำหรับใช้เป็นวัสดุกำบังรังสี การศึกษาประสิทธิภาพการดูดกลืนรังสีของวัสดุคอมโพสิต โดยพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีซึ่งในงานวิจัยนี้ทำการเตรียมวัสดุคอมโพสิต โดยใช้ผงแก้วตะกั่ว และแก้วในรูปผงละเอียดถูกนำไปผสมในเมทริกซ์น้ำยางและยางธรรมชาติชนิดแท่งเกรด STR-5L โดยใช้เครื่องบดผสมสองลูกกลิ้ง และระบบยางคงรูปด้วยกำมะถัน ผงแก้วสูงสุดที่สามารถเติมได้มีค่าร้อยละ 200 ซึ่งจะทำให้วัสดุคอมโพสิตมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นจาก 0.8 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร เมื่อยังไม่ได้เติมแก้วเป็น1.8 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร ผลการทดสอบการดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ที่พลังงานต่ำกว่า 60 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์พบว่า วัสดุคอมโพสิตทุกตัวสามารถกำบังรังสีได้ โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเชิงเส้นประมาณ 3-5 ต่อเซนติเมตร ผลการทดสอบการดูดกลืนรังสีแกมมาที่พลังงานโฟตอนเท่ากับ 122 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ พบว่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีมีค่าใกล้เคียงกับการทดลองการกำบังรังสีเอ็กซ์

นพวรรณ และคณะ (2014)[48] ทำการศึกษาแผ่นเส้นใยนาโนคอมโพสิตพอลิยูรีเทนผสมแบเรียมซัลเฟต ($PU/BaSO_4$) และพอลิไวนิลลิดีนฟลูออไรด์ผสมแบเรียมซัลเฟต ($PVDF/BaSO_4$) สามารถเตรียมได้ด้วยเทคนิคการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต จากการทดลองพบว่า แผ่นเส้นใยพอลิยูรีเทนที่ผสมแบเรียมซัลเฟตเท่ากับร้อยละ 71.28 ของน้ำหนักพอลิเมอร์ และพอลิไวนิลลิดีนฟลูออไรด์ผสมแบเรียมซัลเฟตเท่ากับร้อยละ 54.16 ของน้ำหนักพอลิเมอร์สามารถป้องกันรังสีเอ็กซ์ได้ร้อยละ 40 ซึ่งช่วยลดความเสี่ยงจากอันตรายของรังสีต่อสุขภาพสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นแผ่นป้องกันอวัยวะ เมื่อต้องการถ่ายภาพบริเวณอวัยวะที่ไวต่อรังสี เช่น นัยน์ตา ฯลฯ นอกจากนี้เมื่อนำแผ่นเส้นใยนาโนไปเคลือบสารแขวนลอยแบเรียมซัลเฟต โดยมีพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เป็นตัวประสานและซ้อนทับกันจนมีความหนา 1,600 ไมโครเมตรสามารถป้องกันรังสีเอ็กซ์ได้ร้อยละ 80 ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้แสดงให้เห็นว่า แผ่นเส้นใยนาโนทั้งแบบคอมโพสิตที่มีส่วนผสมของแบเรียมซัลเฟต และแบบที่เคลือบสารแขวนลอยแบเรียมซัลเฟตสามารถนำมาใช้เป็นแผ่นป้องรังสีเอ็กซ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และมีงานวิจัยที่คล้ายกันของทิวาวัลย์ (2017)[10] งานวิจัยนี้มีเป้าหมายผลิตวัสดุกำบังรังสีเอ็กซ์ทดแทนโลหะตะกั่ว และต้องการวัสดุที่มีความยืดหยุ่นจึงเลือกใช้พอลิยูริเทน อิลาสโตเมอร์เกรดความแข็งชอร์เอเท่ากับ 60 ทั้งนี้เนื่องจากวัสดุสามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นได้ที่อุณหภูมิห้อง และสามารถผสมแบเรียมซัลเฟตซึ่งดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ได้ดี ความสามารถในการลดทอนรังสีเอ็กซ์พิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเอ็กซ์ซึ่งจะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นกับปริมาณสารดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ ความหนาของแผ่นคอมโพสิต และพลังงานของรังสีเอ็กซ์ จากการทดลองพบว่า พลังงานของรังสีเอ็กซ์ 60 กิโลโวลต์ให้ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเอ็กซ์เชิงเส้น และสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเอ็กซ์

เชิงมวลของแผ่นคอมโพสิตพอลิยูริเทนผสมกับแบเรียมซัลเฟตที่มีแบเรียมซัลเฟต 50 กรัมต่อพอลิยูริเทน 100 กรัมมีค่าเท่ากับ 3.289 ต่อเซนติเมตร และ 2.401 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม ตามลำดับ

กีรติกานต์ และคณะ (2016)[49] ทำการศึกษาชนิด และปริมาณของสารตัวเติมป้องกันรังสีชนิดกรดบอริก โบรอนออกไซด์ และผงตะกั่ว โดยปรับเปลี่ยนปริมาณที่ 0 10 20 30 40 และ 50 ส่วนโดยร้อยส่วนเมื่อเทียบกับยางในวัสดุคอมโพสิตของยางธรรมชาติ และวัสดุคอมโพสิตของยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื้อยไม้ ทำการทดสอบเวลาการคงรูปของยาง (Cure time) สมบัติเชิงกล และสมบัติด้านรังสี ผลการทดสอบพบว่า การเติมกรดบอริกในวัสดุคอมโพสิตยางที่มีการเติมและไม่มีการเติมผงขี้เลื้อยไม้ ส่งผลทำให้เวลาในการคงรูปของยางเพิ่มขึ้น ส่วนการเติมโบรอนออกไซด์ในวัสดุคอมโพสิตยางที่มีการเติม และไม่มีการเติมผงขี้เลื่อยไม่มีผลต่อเวลาในการคงรูปของยาง และสมบัติเชิงกลโดยรวมของวัสดุคอมโพสิตยางที่มีการเติมและไม่มีการเติมผงขี้เลื้อยไม้มีแนวโน้มลดลงยกเว้นค่าความแข็งที่ผิวที่มีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนการเติมผงตะกั่วในวัสดุคอมโพสิตยางไม่ส่งผลต่อเวลาในการคงรูปของยาง และมีสมบัติเชิงกลโดยรวมไม่ต่างกัน จากการศึกษาสมบัติด้านรังสีพบว่าการเติมกรดบอริกและโบรอนออกไซด์ปริมาณ 50 ส่วนโดยร้อยส่วนเมื่อเทียบกับยางในวัสดุคอมโพสิตยางที่มีการเติมและไม่มีการเติมผงขี้เลื้อยไม้มีความสามารถต้านทานต่อรังสีเทียบเท่าเกณฑ์เป้าหมาย

T.Ozdemir และคณะ (2018)[50] ทำการเตรียมวัสดุกำบังรังสีจากวัสดุคอมโพสิตผสมระหว่างยางเอทธิลีนโพรพิลีนไดอีน (Ethylene-propylene diene rubber; EPDM) และตะกั่วออกไซด์ (PbO) จากการทดลองพบว่า เมื่อมีการเติมตะกั่วออกไซด์ ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเพิ่มขึ้น โดยค่านี้แสดงให้เห็นว่า ยางเอทธิลีนโพรพิลีนไดอีนถูกปรับปรุงให้เป็นวัสดุกำบังรังสีแบบยืดหยุ่นซึ่งสามารถลดทอนรังสีเอ็กซ์และแกมมาได้ เนื่องจากตะกั่วออกไซด์มีตะกั่ว (Pb) เป็นองค์ประกอบซึ่งตะกั่วมีเลขอะตอมที่สูง (เลขอะตอม = 82) สามารถดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีพลังงานสูงได้ และนอกจากนี้ยังมีการศึกษาโดยนำบิทมัสออกไซด์ (Bismuth oxide; Bi_2O_3) ร้อยละ 40 โดยน้ำหนักผสมกับตะกั่วออกไซด์ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักเติมลงในยางเอทธิลีนโพรพิลีนไดอีน พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับยางเอทธิลีนโพรพิลีนไดอีนที่เติมตะกั่วออกไซด์เพียงอย่างเดียว เนื่องจากบิสมัทออกไซด์มีบิสมัทเป็นองค์ประกอบซึ่งบิสมัทมีเลขอะตอมเท่ากับ 83 สามารถดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีพลังงานสูงได้เช่นเดียวกับตะกั่ว

งานวิจัยที่กล่าวไปข้างต้นมีการใช้เนื้อพื้นเป็นพลาสติก และยางสังเคราะห์ที่มีความยืดหยุ่นน้อย งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ที่จะพัฒนาวัสดุกำบังรังสีปลอดตะกั่วที่มีความยืดหยุ่นสูง โดยมีสารตัวเติมสำหรับกำบังรังสีที่มีธาตุที่สามารถดูดกลืนรังสีได้ และใช้ยางธรรมชาติเป็นเนื้อพื้นที่มีสมบัติความยืดหยุ่นที่ดีกว่าพลาสติก และยางสังเคราะห์อื่น ๆ เพื่อให้ได้วัสดุกำบังรังสีที่มีความยืดหยุ่น

มากขึ้น สามารถโค้งงอได้ตามรูปแบบของอวัยวะ หรือพื้นที่ที่ต้องการใช้งาน หรือสามารถเป็นวัสดุกำบังรังสีแบบเจาะจงพื้นที่ได้

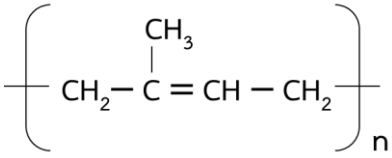
บทที่ 3

วิธีการวิจัย

3.1 สารเคมี

3.1.1 ยางธรรมชาติ (Natural rubber) เกรด STR 5L

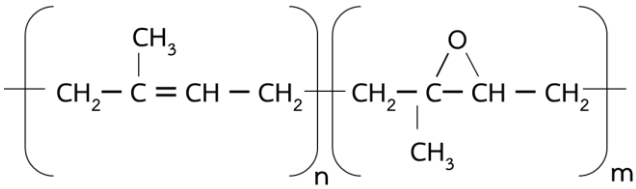
ยางธรรมชาติมีชื่อทางเคมีคือ *cis*-1,4-polyisoprene ในหนึ่งโมเลกุลจะประกอบด้วยหน่วยของไอโซพรีน (C_5H_8) มาต่อกันเป็นสายโซ่ยาวแบบเส้นตรง และยางธรรมชาติเป็นวัสดุที่มีความยืดหยุ่นสูง มีค่าความถ่วงจำเพาะประมาณ 0.92 และในการทดลองนี้จะใช้ยางธรรมชาติชนิดแท่งเกรด STR 5L (Standard thai rubber 5L) ซึ่งใช้สำหรับเป็นพอลิเมอร์หลัก โดยจะทำให้วัสดุคอมโพสิตมีความยืดหยุ่น สามารถหักงอได้ตามต้องการ ผลิตโดย บริษัท ฉลองลาเท็กซ์ จำกัด ประเทศไทย โครงสร้างของยางธรรมชาติแสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 โครงสร้างของยางธรรมชาติ (Natural rubber)

3.1.2 ยางธรรมชาติอิพอกซิไดซ์ (Epoxidised natural rubber; ENR)

ยางธรรมชาติอิพอกซิไดซ์ (Epoxidised natural rubber; ENR) มีสูตรโครงสร้างทางเคมีคือ $C_{10}H_{16}O$ ซึ่งเป็นยางที่ได้จากการเติมออกซิเจนเข้าไปในสายโซ่โมเลกุลของยางบริเวณพันธะคู่เกิดเป็นวงแหวนอิพอกไซด์ขึ้นภายในโมเลกุล โดยยางธรรมชาติอิพอกซิไดซ์เกิดผ่านปฏิกิริยาอิพอกซิเดชัน (Epoxidation) ซึ่งงานวิจัยนี้ศึกษาระดับหมู่อิพอกไซด์ที่ร้อยละ 25 และ 50 โดยมวล โดยยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่ได้จึงมีความเป็นขั้วสูงกว่ายางธรรมชาติทั่วไปทำให้สามารถผสมเข้ากันได้ดีขึ้นกับสารเคมีที่มีความเป็นขั้ว นอกจากนี้ยางธรรมชาติอิพอกซิไดซ์ยังทนต่อความร้อน และน้ำมันได้ดี ซึ่งใช้สำหรับเป็นพอลิเมอร์หลัก โดยจะทำให้วัสดุคอมโพสิตมีความยืดหยุ่น สามารถหักงอได้ตามต้องการ ผลิตโดย บริษัท เมืองใหม่ กัตทรี จำกัด ประเทศไทย โครงสร้างของยางธรรมชาติอิพอกไซด์แสดงดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 โครงสร้างของยางธรรมชาติอิพอกไซด์ (Epoxide natural rubber; ENR)

3.1.3 แบเรียมคาร์บอเนต (Barium carbonate; $BaCO_3$)

แบเรียมคาร์บอเนต (Barium carbonate; $BaCO_3$) เป็นสารที่มีส่วนประกอบของแบเรียม ลักษณะเป็นผงสีขาว มีน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 197.34 กรัมต่อโมล ความหนาแน่นเท่ากับ 4.29 กรัมต่อตารางเซนติเมตร และมีจุดหลอมเท่ากับ 811 องศาเซลเซียส ทำหน้าที่เป็นเฟสกระจายในยางธรรมชาติ ซึ่งถือเป็นวัสดุที่สามารถลดทอนรังสีได้ ผลิดโดย บริษัท Alfa Aesar Co., Massachusetts ประเทศสหรัฐอเมริกา

3.1.4 บิสมัทออกไซด์ (Bismuth oxide; Bi_2O_3)

บิสมัทออกไซด์ (Bismuth oxide; Bi_2O_3) เป็นสารที่มีส่วนประกอบของบิสมัท ลักษณะเป็นผงสีเหลือง มีน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 465.96 กรัมต่อโมล ความหนาแน่นเท่ากับ 8.9 กรัมต่อตารางเซนติเมตร และมีจุดหลอมเท่ากับ 817 องศาเซลเซียส ทำหน้าที่เป็นเฟสกระจายในยางธรรมชาติซึ่งถือเป็นวัสดุที่สามารถลดทอนรังสีได้ ผลิดโดย บริษัท Alfa Aesar Co., Massachusetts ประเทศสหรัฐอเมริกา

3.1.5 แบเรียมซัลเฟต (Barium sulfate; $BaSO_4$)

แบเรียมซัลเฟต (Barium sulfate; $BaSO_4$) เป็นสารที่มีส่วนประกอบของแบเรียม ลักษณะเป็นผงสีขาว มีน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 233.38 กรัมต่อโมล ความหนาแน่นเท่ากับ 4.5 กรัมต่อตารางเซนติเมตร และมีจุดหลอมเท่ากับ 1,580 องศาเซลเซียส ทำหน้าที่เป็นเฟสกระจายในยางธรรมชาติซึ่งถือเป็นวัสดุที่สามารถลดทอนรังสีได้ ผลิดโดย บริษัท Alfa Aesar Co., Massachusetts ประเทศสหรัฐอเมริกา

3.1.6 ตะกั่วออกไซด์ (Lead oxides; PbO)

ตะกั่วออกไซด์ (Lead oxides; PbO) เป็นสารที่มีส่วนประกอบของตะกั่ว ลักษณะเป็นผงสีครีม มีน้ำหนักโมเลกุล 241.20 กรัมต่อโมล ความหนาแน่น 9.53 กรัมต่อตารางเซนติเมตร และจุดหลอมเหลวเท่ากับ 888 องศาเซลเซียส ทำหน้าที่เป็นเฟสกระจายในยางธรรมชาติซึ่งถือเป็นวัสดุที่สามารถลดทอนรังสีได้ ผลิดโดย บริษัท Alfa Aesar Co., Massachusetts ประเทศสหรัฐอเมริกา

3.1.7 กรดสเตรียริก (Stearic acid)

กรดสเตรียริก (Stearic acid) เป็นกรดไขมันที่มีสูตรโครงสร้างทางเคมีคือ $C_{18}H_{36}O_2$ ลักษณะเป็นผลึกสีขาว มันเงา มีกลิ่นหืนของไขมัน น้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 284.48 กรัมต่อโมล ความหนาแน่นเท่ากับ 0.94 กรัมต่อตารางเซนติเมตร และมีจุดหลอมเท่ากับ 361 องศาเซลเซียส ทำหน้าที่เป็นสารกระตุ้นช่วยให้สารตัวเร่งสามารถทำงานได้เร็วขึ้น ผลิตโดย บริษัท บางกอก เคมีคอล จำกัด ประเทศไทย

3.1.8 ซิงค์ออกไซด์ (Zine oxide; ZnO)

ซิงค์ออกไซด์ (Zine oxide; ZnO) เป็นสารอนินทรีย์ที่มีลักษณะเป็นผงสีขาว น้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 81.38 กรัมต่อโมล ความหนาแน่นเท่ากับ 5.61 กรัมต่อตารางเซนติเมตร และมีจุดหลอมเท่ากับ 1,975 องศาเซลเซียส ทำหน้าที่เป็นสารกระตุ้นช่วยให้สารตัวเร่งสามารถทำงานได้เร็วขึ้น ผลิตโดย บริษัท บริษัท ไทย-ไลซาท จำกัด ประเทศไทย

3.1.9 บิวทิลเบนโซไธอะโซลซัลฟีนาไมด์ (*N-tert.*butyl-2-benzothiazole sulfonamide; TBBS)

บิวทิลเบนโซไธอะโซลซัลฟีนาไมด์ (*N-tert.*butyl-2-benzothiazole sulfonamide; TBBS) มีสูตรโครงสร้างทางเคมีคือ $C_{11}H_{14}N_2S_2$ ลักษณะเป็นเม็ดสีเหลืองอ่อน มีกลิ่นเหม็นเฉพาะตัว น้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 238.37 กรัมต่อโมล ความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 1.26 - 1.32 และมีจุดหลอมเท่ากับ 105 องศาเซลเซียส ทำหน้าที่เป็นสารตัวเร่งช่วยให้เกิดกระบวนการวัลคาไนซ์ หรือเกิดการเชื่อมขวางได้เร็วขึ้น ผลิตโดย บริษัท สยาม เคมีคอล จำกัด ประเทศไทย

3.1.10 กำมะถัน (Sulfur; S)

กำมะถัน (Sulfur; S) เป็นธาตุเคมีที่มีสัญลักษณ์ S และเลขอะตอมเท่ากับ 16 เป็นอโลหะที่มีอยู่ทั่วไป ไม่มีรสหรือกลิ่น มีลักษณะเป็นผงสีเหลือง น้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 32.065 กรัมต่อโมล ความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.07 และมีจุดหลอมเท่ากับ 115.21 องศาเซลเซียส ทำหน้าที่เป็นสารเชื่อมขวางซึ่งกำมะถันจะเกิดการเชื่อมขวางกับสายโซ่โมเลกุลของยาง บริษัท สยาม เคมีคอล จำกัด ประเทศไทย

3.2 อุปกรณ์ และเครื่องมือ

3.2.1 เครื่องผสมยางแบบปิด (Internal mixer)

เครื่องผสมยางแบบปิด (Internal mixer) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการบดผสมยางธรรมชาติและสารเคมีเข้าด้วยกัน ผลิตโดย บริษัท Yong Fong Machinery ประเทศไต้หวัน เครื่องผสมยางแบบปิดแสดงดังรูปที่ 3.3

รูปที่ 3.3 เครื่องผสมยางแบบปิด (Internal mixer)

3.2.2 เครื่องหาเวลาคงรูปของยาง (Moving die rheometers; MDR)

เครื่องหาเวลาคงรูปของยางด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์แบบดายน์เคลื่อนที่ (Moving die rheometers; MDR) เป็นเครื่องมือที่ใช้หาเวลาในการคงรูปของยาง (Cure time; t_{c90}) ซึ่งเป็นตัวแปรที่ใช้กำหนดเวลาในการอัดเบ้าของยาง เพื่อให้ยางเกิดการวัลคาไนซ์ (Vulcanization) หรือการทำให้ยางเกิดการคงรูป เครื่องรีโอมิเตอร์แบบดายน์เคลื่อนที่แสดงดังรูปที่ 3.4

รูปที่ 3.4 เครื่องรีโอมิเตอร์แบบดายน์เคลื่อนที่ (Moving die rheometers; MDR)

3.2.3 เครื่องอัดเบ้า (Compression molding)

เครื่องอัดเบ้า (Compression molding) เป็นเครื่องมือสำหรับอัดยางเข้าเบ้าพิมพ์ โดยใช้ระบบไฮโดรลิก ให้ความร้อนด้วยไฟฟ้า ความดันสูงสุด 200 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (kg/cm^2) ที่ยึดเบ้าพิมพ์ขนาด 18x18 นิ้ว โดยใช้เครื่องอัดเบ้ารุ่น LCC 140 ผลิตโดยบริษัท TANG-MASTER Co., LTD. ประเทศไต้หวัน เครื่องอัดเบ้าแสดงดังรูปที่ 3.5

รูปที่ 3.5 เครื่องอัดเบ้า (Compression molding)

3.2.4 เครื่องทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง (Universal testing machine)

เพื่อใช้ทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile strength), มอดูลัสที่ระยะยืดร้อยละ 100 (Modulus at 100% elongation) และระยะยืดจนขาด (% Elongation at break) โดยใช้ universal testing machine รุ่น H10KS ผลิตโดยบริษัท Hounsfield ประเทศอังกฤษ เครื่องทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงแสดงดังรูปที่ 3.6

รูปที่ 3.6 เครื่องทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง (Universal testing machine)

3.2.5 เครื่องวัดความแข็ง (Hardness tester)

เพื่อใช้วัดความแข็งของคอมโพสิตของยางธรรมชาติโดยใช้เครื่องวัดความแข็งแบบ Shore durometer ความแข็งที่ทดสอบได้มีหน่วยเป็น Shore A ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 2240 ใช้เครื่องทดสอบรุ่น Frank GmbH ผลิตจากประเทศเยอรมัน เครื่องวัดความแข็งแสดงดังรูปที่ 3.7

รูปที่ 3.7 เครื่องวัดความแข็ง (Hardness tester)

3.2.6 เครื่องวัดความถ่วงจำเพาะ (Specific tester)

เครื่องวัดความถ่วงจำเพาะ (Specific tester) ใช้วัดความหนาแน่น หรือความถ่วงจำเพาะ โดยทำการทดสอบตามมาตรฐาน ISO 2781: 2008 (Method A) ใช้เทคนิคการเปรียบเทียบน้ำหนักตัวอย่างในอากาศ และน้ำ เครื่องทดสอบรุ่น ML204 ผลิตโดยบริษัท Mettler Toledo ประเทศนิวซีแลนด์ เครื่องวัดความถ่วงจำเพาะแสดงดังรูปที่ 3.8

รูปที่ 3.8 เครื่องวัดความถ่วงจำเพาะ (Specific tester)

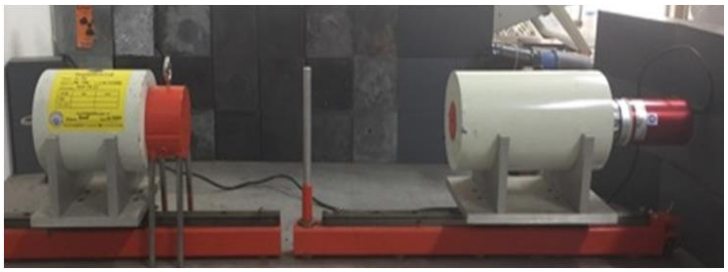
3.2.7 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM)

เพื่อทดสอบสัณฐานวิทยา และการกระจายตัวของของธาตุในยางธรรมชาติด้วยเทคนิคเอ็กซ์เรย์ ฟลูออเรสเซ็นต์แบบกระจายพลังงาน (Energy dispersive X-ray fluorescence spectrometer; EDX) โดยใช้เครื่องทดสอบรุ่น SEM Quanta 400 FEI ผลิตจากประเทศเนเธอร์แลนด์ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงดังรูปที่ 3.9

รูปที่ 3.9 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope; SEM)

3.2.8 เครื่องวัดการดูดกลืนรังสีแกมมา (Gamma ray detector)

วัดการดูดกลืนรังสีแกมมา แหล่งกำเนิดรังสีใช้ซีเซียม (^{137}Cs) พลังงาน 662 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ และใช้เทคนิคการกระเจิงคอมป์ตัน เพื่อเปลี่ยนพลังงานรังสีแกมมา หัววัดรังสีชนิด Nal(Tl) และทำการประมวลผลโดย Multi channel analyzer (MCA) ชุดอุปกรณ์การทดลองการกระเจิงคอมป์ตันแสดงดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 ชุดอุปกรณ์การทดลองการกระเจิงคอมป์ตัน

3.2.8 เครื่องวัดการดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ (X-ray detector)

วัดคุณสมบัติการป้องกันรังสีเอ็กซ์ด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิจิตอลความถี่สูงยี่ห้อ Shimadzu รุ่น RAD Speed Pro ผลิตจากประเทศญี่ปุ่น โดยใช้หัวนับวัดแบบกึ่งตัวนำ ทำการวัดที่พลังงาน 50-120 กิโลโวลต์สูงสุดซึ่งเป็นพลังงานที่ใช้ในทางด้านรังสีวินิจฉัย และให้กระแสไฟฟ้าที่ 40 มิลลิแอมแปร์ (mAs) เครื่องวัดการดูดกลืนรังสีเอ็กซ์แสดงดังรูปที่ 3.11

รูปที่ 3.11 เครื่องวัดการดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ (X-ray detector)

3.2 วิธีการทดลอง

3.2.1 การศึกษาการเตรียมสูตรยางธรรมชาติผสมบิสมัทออกไซด์ โดยมีการแปรปริมาณของบิสมัทออกไซด์

ขั้นตอนที่ 1 บดยางธรรมชาติเกรด STR 5L ในเครื่องผสมแบบปิด (Internal mixer) เป็นเวลา 10 นาที

ขั้นตอนที่ 2 เติมสารกระตุ้น บิสมัทออกไซด์ สารต้านการเสื่อม สารตัวเร่ง กำมะถัน ตามลำดับ สูตรแสดงดังตารางที่ 3.1 โดยใช้สภาวะในการผสมที่ 60 องศาเซลเซียส และความเร็วรอบของโรเตอร์เท่ากับ 60 รอบต่อนาที

ตารางที่ 3.1 สูตรในการเตรียมคอมโพสิตของยางธรรมชาติกับสารบิสมัทออกไซด์ (Bi_2O_3)

Ingredients	phr
ยางธรรมชาติเกรด STR 5L	100
Stearic acid	1
ZnO	5
Bi_2O_3	0, 10, 20, 40, 80, 120, 150
TBBS	1
Sulfur	2.5

ขั้นตอนที่ 3 ทดสอบเวลาสุกของยางด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์แบบดายน์เคลื่อนที่ และวัลคาไนซ์ยางคอมพาวนด์ด้วยเครื่องอัดเบ้า (Compression molding) ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เพื่อเตรียมชิ้นทดสอบ

3.2.2 การศึกษาการเตรียมสูตรยางธรรมชาติผสมสารประกอบออกไซด์ โดยมีการแปรชนิดของสารตัวเติมสำหรับการกำบังรังสี

ขั้นตอนที่ 1 บดยางธรรมชาติเกรด STR 5L ในเครื่องผสมแบบปิดเป็นเวลา 10 นาที

ขั้นตอนที่ 2 เติมสารกระตุ้น สารประกอบออกไซด์ สารต้านการเสื่อม สารตัวเร่ง กำมะถัน ตามลำดับ สูตรแสดงดังตารางที่ 3.2 โดยใช้สภาวะในการผสมที่ 60 องศาเซลเซียส และความเร็วรอบของโรเตอร์เท่ากับ 60 รอบต่อนาที

ตารางที่ 3.2 สูตรในการเตรียมคอมโพสิตของยางธรรมชาติกับสารตัวเติมสำหรับการกำบังรังสี

Ingredients	phr
ยางธรรมชาติเกรด STR 5L	100
Stearic acid	1
ZnO	5
**BC, BS หรือ BO	ปริมาณที่ดีที่สุดจาก 2.1.1
TBBS	1
Sulfur	2.5

หมายเหตุ: **แบเรียมคาร์บอเนต ($BaCO_3$; BC) แบเรียมซัลเฟต ($BaSO_4$; BS) และบิสมัทออกไซด์ (Bi_2O_3; BO)

ขั้นตอนที่ 3 ทดสอบเวลาสุกของยางด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์แบบดายน์เคลื่อนที่ และวัลคาไนซ์ยางคอมพาวนด์ด้วยเครื่องอัดเบ้าที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เพื่อเตรียมชิ้นทดสอบ

3.2.3 การศึกษาผลการเตรียมยางกำบังรังสี โดยมีการแปรชนิดของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์เป็นสารกำบังรังสี

ขั้นตอนที่ 1 บดยางธรรมชาติเกรด STR 5L ในเครื่องผสมแบบปิด (Internal mixer) เป็นเวลา 10 นาที

ขั้นตอนที่ 2 เติมสารกระตุ้น บิสมัทออกไซด์ สารต้านการเสื่อม สารตัวเร่ง กำมะถัน ตามลำดับ สูตรแสดงดังตารางที่ 3.3 โดยใช้สภาวะในการผสมที่ 60 องศาเซลเซียส และความเร็วรอบของโรเตอร์เท่ากับ 60 รอบต่อนาที

ตารางที่ 3.3 สูตรในการเตรียมคอมโพสิตของยางกับสารบิสมัทออกไซด์ (Bi_2O_3)

Ingredients	phr
**STR 5L	100
Stearic acid	1
ZnO	5
Bi_2O_3	ปริมาณที่ดีที่สุดจาก 2.1.1
TBBS	1
Sulfur	2.5

หมายเหตุ: ** เปลี่ยนชนิดของยางเป็น ENR 25 และ ENR 50

ขั้นตอนที่ 3 ทดสอบเวลาสุกของยางด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์แบบดายน์เคลื่อนที่ และวัลคาไนซ์ยางคอมพาวนด์ด้วยเครื่องอัดเบ้า (Compression molding) ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เพื่อเตรียมชิ้นทดสอบ

3.2.4 การศึกษาผลของการเปรียบเทียบสมบัติเชิงกล และสมบัติทางด้านรังสีระหว่างบิสมัทออกไซด์ และตะกั่วออกไซด์ในยางธรรมชาติ

ขั้นตอนที่ 1 บดยางธรรมชาติเกรด STR 5L ในเครื่องผสมแบบปิดเป็นเวลา 10 นาที

ขั้นตอนที่ 2 เติมสารกระตุ้น สารบิสมัทออกไซด์ หรือตะกั่วออกไซด์ สารต้านการเสื่อม สารตัวเร่ง กำมะถัน ตามลำดับ สูตรแสดงดังตารางที่ 3.4 โดยใช้สภาวะในการผสมที่ 60 องศาเซลเซียส และความเร็วรอบของโรเตอร์เท่ากับ 60 รอบต่อนาที

ตารางที่ 3.4 สูตรในการเตรียมคอมโพสิตของยางธรรมชาติกับสารบิสมัทออกไซด์ (Bi_2O_3) หรือตะกั่วออกไซด์ (PbO)

Ingredients	phr
STR 5L	100
Stearic acid	1
ZnO	5
Bi_2O_3 หรือ PbO	ปริมาณที่ดีที่สุดจาก 2.1.1
TBBS	1
Sulfur	2.5

ขั้นตอนที่ 3 ทดสอบเวลาสุกของยางด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์แบบดายน์เคลื่อนที่ และวัลคาไนซ์ยางคอมพาวนด์ด้วยเครื่องอัดเบ้า (Compression molding) ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เพื่อเตรียมชิ้นทดสอบ

3.2.5 การทดสอบสมบัติคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่เตรียมได้

3.2.5.1 การทดสอบเวลาคงรูปของยางธรรมชาติ

ทำการทดสอบด้วยเครื่อง moving die rheometer 200 เตรียมชิ้นตัวอย่างหนัก 4-4.5 กรัม ทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที โดยค่าการทดสอบ M_L คือค่าทอร์คต่ำสุด M_H คือค่าทอร์คสูงสุด และ t_{c90} ถือเป็นเวลาในการคงรูปของยางในเครื่องอัดเบ้า

3.2.5.2 การทดสอบปริมาณการเชื่อมขวางของยางธรรมชาติ

เตรียมตัวอย่างขนาดกว้าง 1 เซนติเมตร และยาว 1 เซนติเมตร ชั่งน้ำหนักตัวอย่างก่อนแช่ลงในโทลูอีนเป็นเวลา 72 ชั่วโมง ชั่งน้ำหนักตัวอย่างหลังแช่ ทำการอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส อบจนกว่าน้ำหนักตัวอย่างจะคงที่ หลังจากนั้นนำมาคำนวณดังสมการที่ (3.1)

$$v = \frac{-\ln(1-v_r) + v_r + xv_r^2}{v_s(v_r^{\frac{1}{3}}) - 0.5v_r} \qquad (3.1)$$

เมื่อ v_r = Volume fraction ของตัวอย่างหลังจากแช่ในทูโลอีน

v_s = Molar volume ของสารละลาย

x = Interaction parameter[51]

3.2.5.3 การทดสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยา และการกระจายตัวของธาตุ

การทดสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาทดสอบโดยเตรียมผงของสารเคมีได้แก่ แบเรียมคาร์บอเนต (Barium carbonate; $BaCO_3$; BC) บิสมัทออกไซด์ (Bismuth oxide; Bi_2O_3; BO) แบเรียมซัลเฟต (Barium sulfate; $BaSO_4$; BS) และตะกั่วออกไซด์ (Lead oxide; PbO) ติดบน stub โดยทำการศึกษาที่กำลังขยาย 500x 2500x และ 10000x โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด และการทดสอบการกระจายตัวของธาตุทดสอบโดยเตรียมตัวอย่างเป็นชิ้นติดลงบน stub และทำการเคลือบตัวอย่างด้วยทองคำ ใช้เทคนิคเอ็กซ์เรย์ ฟลูออเรสเซ็นต์แบบกระจายพลังงาน และศึกษาปริมาณธาตุในคอมโพสิตของยางธรรมชาติสามารถคำนวณได้ดังสมการ (3.2) และ (3.3)

$$Ratio\ of\ elements\ (\%) = \frac{Molecular\ weight\ of\ elements}{Molecular\ weight\ of\ chemicals}\ x100 \qquad (3.2)$$

$$Ratio\ of\ elements\ (wt\%) = \frac{Ratio\ of\ elements\ (\%)\ x\ Ratio\ of\ chemicals\ (wt\%)}{100} \qquad (3.3)$$

เมื่อ $ratio\ of\ chemicals\ (wt\%) = \frac{phr\ of\ chemicals}{phr\ total}\ x100$

3.2.5.4 การทดสอบสมบัติเชิงกล

การทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile strength) มอดูลัส (Modulus 100%) และระยะยืดจนขาด (%Elongation at break) ทดสอบตาม ASTM D 412 โดยการเตรียมชิ้นตัวอย่างเป็นรูปดัมเบลแบบ die C (รูปที่ 3.12) โดยมีความกว้างเท่ากับ 3.65 มิลลิเมตร ตัวอย่างละ 5 ชิ้น วัดความหนาของชิ้นตัวอย่าง 3 จุด และหาค่าเฉลี่ยความหนา

รูปที่ 3.12 ตัวอย่างที่ใช้ทดสอบรูปดัมเบล

หลังจากนั้นทำการทดสอบด้วยเครื่อง Universal testing machine รุ่น H10KS และใช้ load cell 100 นิวตัน ดึงด้วยอัตราเร็ว 500 มิลลิเมตร/นาที อ่านค่าแรงที่ใช้ดึงเมื่อตัวอย่างยางยืดออก 1 เซนติเมตร ค่าแรงที่ใช้ดึงเมื่อตัวอย่างยางขาด และความยาว สุดท้ายของตัวอย่างยางที่ขาด นำมาคำนวณจะได้ค่าการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง มอดูลัสที่ระยะยืดร้อยละ 100 และระยะยืดจนขาด ตามลำดับ

การคำนวณ

$$\text{Modulus at 100\% elongation (MPa)} = \frac{F}{A} \quad (3.4)$$

โดย

F = แรงดึงที่ทำให้ชิ้นทดสอบยืดออก 100% (นิวตัน)

A = พื้นที่หน้าตัดของชิ้นทดสอบขณะยังไม่ยืด (ตารางมิลลิเมตร)

$$\text{Elongation at bleak (\%)} = \frac{L\text{-}L_0}{L_0} x100 \quad (3.5)$$

โดย

L = ระยะที่ชิ้นทดสอบสามารถยืดตัวได้จนขาด

L_0 = ระยะกำหนดก่อนทำการทดสอบ มีหน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์ (%)

$$\text{Tensile strength (MPa)} = \frac{F}{A} \quad (3.6)$$

โดย

F = แรงดึงที่ทำให้ชิ้นทดสอบขาด (นิวตัน)

A = พื้นที่หน้าตัดของชิ้นทดสอบขณะยังไม่ยืด (ตารางมิลลิเมตร)

มีหน่วยเป็นนิวตัน/ตารางมิลลิเมตร (N/mm^3) หรือกิโลกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (kg/cm^2) ในหน่วย SI มีหน่วยเป็นเมกกะปาสคาล (MPa) 1MPa = 10.197 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

การทดสอบความแข็ง (Hardness testing)

ทดสอบความแข็งตามมาตรฐาน ASTM D 2240 เป็นการวัดค่าความแข็งแบบ Shore A ทดสอบด้วยเครื่องวัดความแข็งแบบ Shore A ใช้ชิ้นทดสอบที่มีความหนาอย่างน้อย 6 มิลลิเมตร ให้หัวกดกดตัวอย่างยางค้างไว้ 30 วินาที แล้วจึงอ่านค่าที่ได้วัดความแข็งของชิ้นตัวอย่างทั้งหมด 5 จุดแล้วนำมาคำนวณหาค่าเฉลี่ย

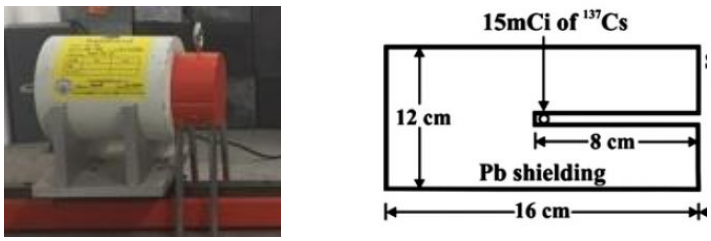
การทดสอบความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity)

การทดสอบความถ่วงจำเพาะด้วยเครื่องรุ่น ML204 โดยใช้วิธีแบบไฮโดรสเทติก (Hydrostatic method) คือการหาขนาด หรือปริมาตรของวัตถุโดยการใช้วิธีการแทนที่น้ำ และชั่งน้ำหนักน้ำที่ถูกแทนที่ ซึ่งจะทำการชั่งวัสดุจำนวนหนึ่งภายใต้สภาวะอากาศ และนำวัสดุจำนวนเดิมมาทำการชั่งในน้ำซึ่งเป็นตัวกลางที่ใช้ น้ำหนักที่หายไปจากผลต่างที่ชั่งในอากาศ และในน้ำจะมีค่าเท่ากับปริมาตรของน้ำที่ถูกแทนที่ อ่านค่าความถ่วงจำเพาะของวัสดุได้จากเครื่องทดสอบ

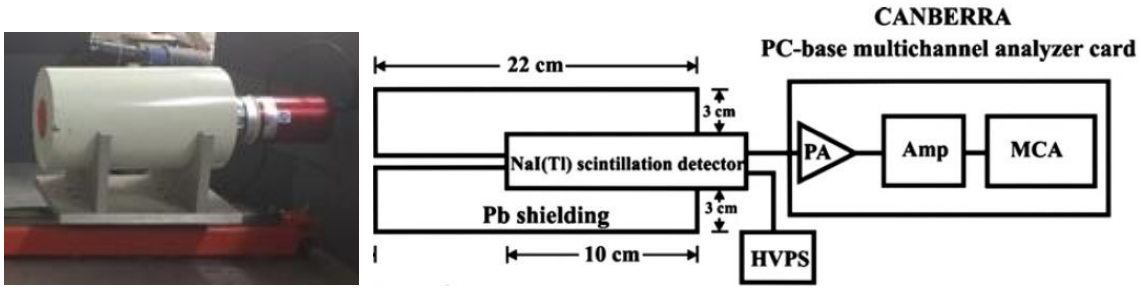
3.2.5.5 การทดสอบสมบัติทางด้านรังสี

การวัดการดูดกลืนรังสีแกมมา (Gamma ray detection)

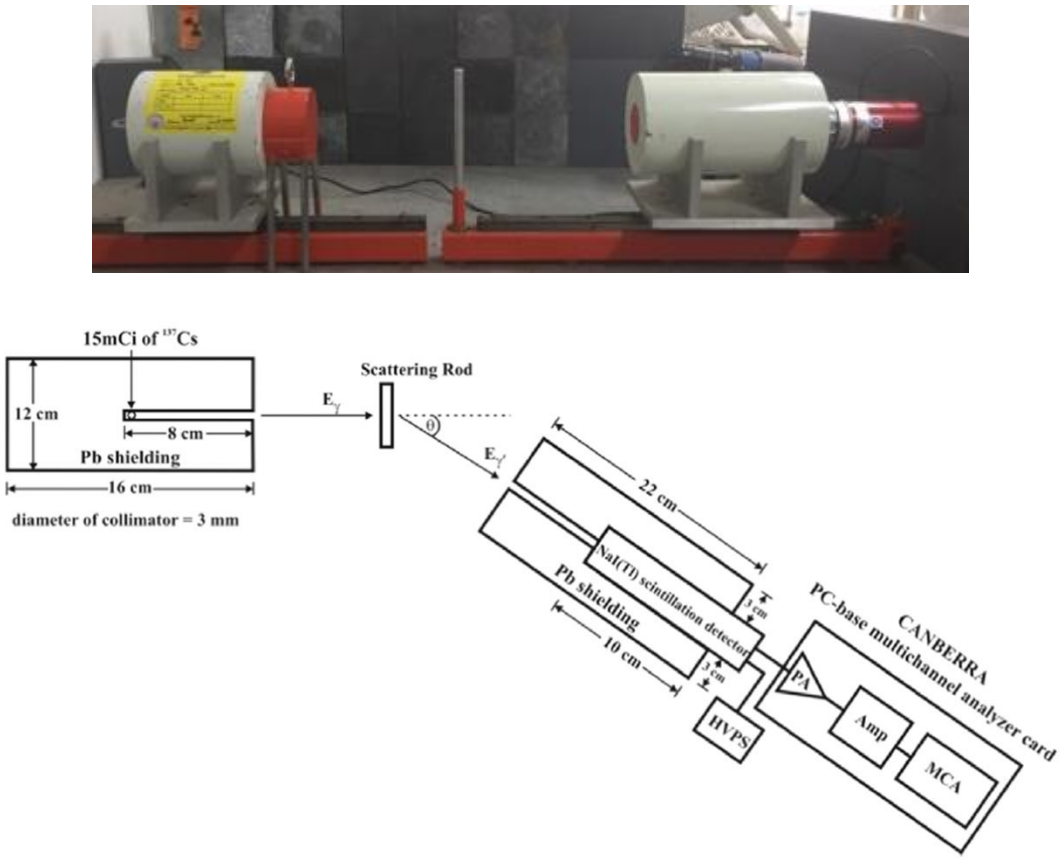
เตรียมชิ้นตัวอย่างเป็นรูปวงกลมเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 2.5 เซนติเมตร หนา 1 เซนติเมตร ซึ่งในการทดลองนี้ทำการทดลองโดยการเปลี่ยนแปลงมุมในการกระเจิงแสง 0°-120° ซึ่งมีค่าพลังงานอยู่ในช่วง 223-662 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ และใช้เวลาการทดสอบ 10,000-25,000 วินาที รังสีแกมมาฉายออกมาจากแหล่งกำเนิดของรังสีที่ถูกคลุมด้วยตะกั่ว แหล่งกำเนิดรังสีแกมมา และแผนภาพโครงสร้างแหล่งกำเนิดรังสีแกมมาแสดงดังรูปที่ 3.13 ใช้หัวนับวัดรังสี Nal (Tl) Scintillation CANBERRA BICRON model 2M2/2 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2x2 $inch^3$ ปริมาณของรังสีที่นับวัดได้จะถูกประมวลผลโดย multichannel analyzer ซึ่งหัววัดรังสีนับวัดรังสี และแผนภาพแสดงโครงสร้างหัววัดรังสีแกมมาแสดงดังรูปที่ 3.14 ชุดอุปกรณ์ และแผนภาพการทดลองการกระเจิงคอมป์ตันแสดงดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.13 แหล่งกำเนิดรังสีแกมมา และแผนภาพโครงสร้างแหล่งกำเนิดรังสีแกมมา



รูปที่ 3.14 หัววัดรังสี Nal (Tl) Scintillation และแผนภาพแสดงโครงสร้างหัววัดรังสีแกมมา



รูปที่ 3.15 ชุดอุปกรณ์ และแผนภาพการทดลองการกระเจิงคอมป์ตัน
(ดัดแปลงมาจาก: N. Chanthima et al. 2017. Development of BaO-ZnO-B_2O_3 glasses as a radiation shielding material. Radiat. Phys. Chem. 137, 72-77.)

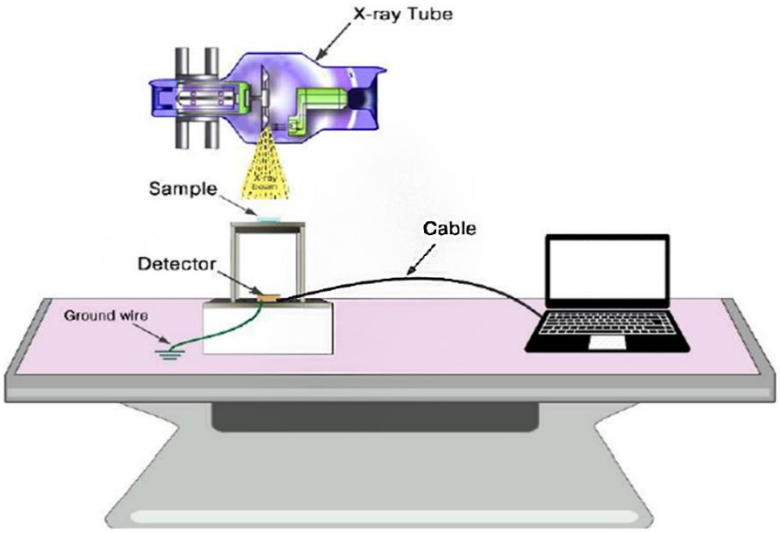
หลังจากนั้นทำการหาพื้นที่ใต้กราฟซึ่งพื้นที่ใต้กราฟหมายถึง จำนวนโฟตอนที่วัดได้แสดงดังรูปที่ 3.14 และคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์เชิงมวล (Total mass attenuation coefficient; μ_m) ค่าเลขอะตอมยังผล (Effective atomic number; Z_{eff}) ค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอน (Effective

electron density; N_{el}) ความหนาครึ่งค่า (Half value layer; HVL) และค่าการกำบังรังสีเทียบเท่าตะกั่ว (Lead equivalend) ตามสมการ 2.9 2.11 2.16 2.17 และ 2.18 ตามลำดับ

รูปที่ 3.16 กราฟของจำนวนโฟตอนที่นับได้จากหัววัดรังสี

การวัดการดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ (X-ray detection)

เตรียมตัวอย่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 เซนติเมตร และหนา 1 เซนติเมตร ทำการจัดตั้งอุปกรณ์ทดสอบโดยระยะห่างระหว่างหลอดเอ็กซเรย์กับขาตั้งตัวอย่างห่างกัน 56 เซนติเมตร และระยะห่างระหว่างขาตั้งตัวอย่างกับพื้นห่างกัน 56 เซนติเมตร ทำการจัดแสงไฟให้มีขนาด 2x2 เซนติเมตร โดยหัวนับวัดจะต้องอยู่กึ่งกลางของแสงไฟ ในการทดลองนี้ทำการทดสอบที่รังสีเอ็กซ์พลังงาน 50-120 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์สูงสุด (kilovoltage peak; kVp) ชุดอุปกรณ์การทดสอบทางด้านรังสีเอ็กซเรย์แสดงดังรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 ชุดอุปกรณ์การทดสอบทางด้านรังสีเอ็กซเรย์

(แหล่งที่มา: High transparency La_2O_3-CaO-B_2O_3-SiO_2 glass for diagnosis x-rays shielding material application. Radiat. Phys. Chem. 160, 41—47)

3.5.5.6 การทดสอบสมบัติเชิงกลของคอมโพสิตของยางธรรมชาติ หลังได้รับรังสี

ทำการเลือกคอมโพสิตของยางธรรมชาติสูตรที่ดีที่สุดในแต่ละขั้นตอนมาเตรียมชิ้นตัวอย่างเป็นแผ่นสี่เหลี่ยมขนาดกว้าง 15 เซนติเมตร ยาว 15 เซนติเมตรและหนา 0.1 เซนติเมตร ซึ่งในการทดลองนี้ทำการทดลองโดยการใช้มุมในการกระเจิงแสง 0° ซึ่งมีค่าพลังงานเท่ากับ 662 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ และทำการฉายรังสี 10 และ 20 ครั้ง ครั้งละ 100 วินาที หลังจากนั้นนำตัวอย่างที่ผ่านการฉายรังสีมาทดลองสมบัติเชิงกลตามหัวข้อที่ 3.2.5.4 เพื่อเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงกล หลังจากคอมโพสิตของยางธรรมชาติได้รับรังสี

บทที่ 4

ผลการทดลอง และวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 ผลของการเตรียมสูตรยางธรรมชาติผสมบิสมัทออกไซด์ โดยมีการแปรปริมาณของบิสมัทออกไซด์

ทำการศึกษาผลของปริมาณบิสมัทออกไซด์ (Bi_2O_3; BO) ที่มีผลต่อสมบัติของคอมโพสิตของยางธรรมชาติ (NR composites) บิสมัทออกไซด์จัดเป็นสารตัวเติม (Filler) ชนิดหนึ่งที่ช่วยเพิ่มคุณสมบัติด้านกำบังรังสีให้กับคอมโพสิตของยางธรรมชาติ โดยในขั้นตอนนี้ทำการแปรปริมาณของบิสมัทออกไซด์ ที่ 0 10 20 40 80 100 120 และ 150 ส่วนโดยร้อยละเมื่อเทียบกับยางซึ่งการแปรปริมาณจะส่งผลต่อสมบัติเชิงกล และสมบัติทางด้านรังสีคอมโพสิตของยางธรรมชาติโดยตรง ผลที่ได้แสดงดังผลการทดลองที่ 4.1.1-4.1.6

4.1.1 ผลของการแปรปริมาณบิสมัทออกไซด์ต่อระยะเวลาในการคงรูปคอมโพสิตของยางธรรมชาติ

ระยะเวลาในการคงรูปยาง (Cure time; t_{c90}) หรือระยะเวลาในการวัลคาไนซ์เป็นระยะเวลาที่สารกำมะถันซึ่งทำหน้าที่เป็นสารเชื่อมขวาง หรือสารวัลคาไนซ์ (Vulcanizing agent) เมื่อได้รับความร้อนจะเกิดปฏิกิริยากับสายโซ่โมเลกุลของยาง ทำให้สายโซ่โมเลกุลของยางเกิดการเชื่อมขวางระหว่างกัน[52] โดยการทดลองระยะเวลาในการคงรูปยางใช้เครื่องรีโอมิเตอร์แบบดายน์เคลื่อนที่หรือ MDR และมีการให้ความร้อนกับคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณที่แตกต่างกันของบิสมัทออกไซด์ในคอมโพสิตของยางธรรมชาติต่อระยะเวลาในการคงรูปยางแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ระยะเวลาในการคงรูปยางของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีปริมาณของบิสมัทออกไซด์ที่แตกต่างกัน

BO contents (phr)	Cure time; t_{c90} (min)
0	8.44
10	7.50
20	7.47
40	7.39
80	7.29
120	7.10
150	6.22

ตารางที่ 4.1 แสดงระยะเวลาในการคงรูปยางของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีปริมาณของบิสมัทออกไซด์ที่แตกต่างกันพบว่า เมื่อปริมาณของบิสมัทออกไซด์เพิ่มขึ้นระยะเวลาในการคงรูปของยางมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากบิสมัทออกไซด์จัดเป็นสารประกอบออกไซด์ที่นอกจากจะทำหน้าที่เป็นสารกำบังรังสียังทำหน้าที่เป็นสารช่วยกระตุ้น (Co-activator) ทำหน้าที่เป็นตัวกระตุ้นให้สารตัวเร่งทำงานได้เร็วขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Keeratikarn N., et al., (2017)[53] ดังนั้นคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีบิสมัทออกไซด์สามารถเกิดปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ได้เร็วกว่าคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่ไม่มีการเติมบิสมัทออกไซด์ซึ่งผลการทดลองนี้สอดคล้องกับผลการทดลองปริมาณการเชื่อมขวาง (Crosslink density) ของคอมโพสิตของยางธรรมชาติ ผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณที่แตกต่างกันของบิสมัทออกไซด์ในคอมโพสิตของยางธรรมชาติต่อปริมาณการเชื่อมขวางของคอมโพสิตของยางธรรมชาติแสดงในตารางที่ 4.2

4.1.2 ผลของการแปรปริมาณบิสมัทออกไซด์ต่อปริมาณการเชื่อมขวางของคอมโพสิตของยางธรรมชาติ

ยางธรรมชาติจะมีความแข็งแรงมากขึ้น เมื่อสายโซ่โมเลกุลของยางเกิดการเชื่อมขวางกัน ซึ่งความแข็งแรงของยางจะขึ้นอยู่กับปริมาณการเชื่อมขวางที่เกิดขึ้นสามารถทดสอบหาปริมาณการเชื่อมขวางได้ดังหัวข้อที่ 3.2.5.2 และผลการทดสอบหาปริมาณการเชื่อมขวางของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีปริมาณของบิสมัทออกไซด์ที่แตกต่างกันแสดงในตารางที่ 4.2

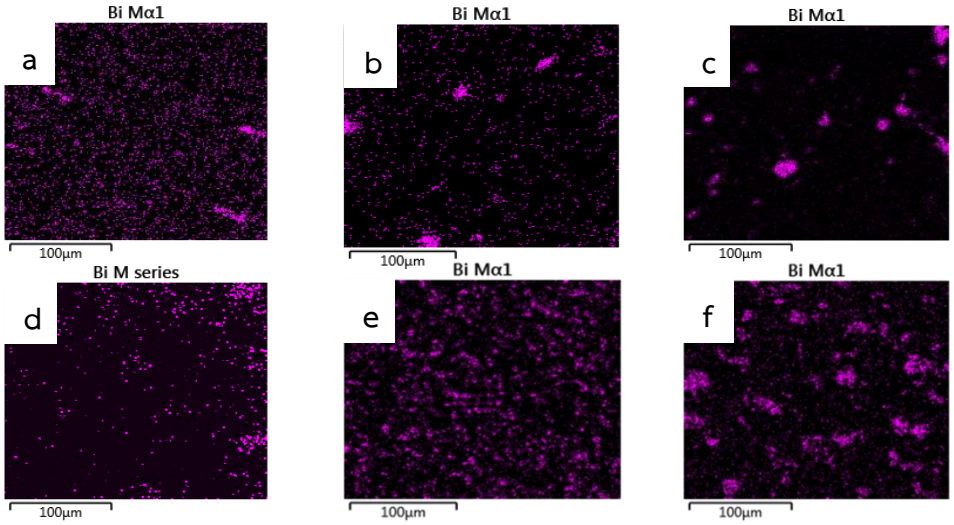
ตารางที่ 4.2 ปริมาณของการเชื่อมขวางของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีปริมาณของบิสมัทออกไซด์ที่แตกต่างกัน

BO Contents (phr)	Crosslink density ($x10^{-4}g/cm^3$)
0	3.12 ±0.00010
10	4.84 ±0.00011
20	6.33 ±0.00015
40	8.12 ±0.00015
80	12.3 ±0.00010
120	23.9 ±0.00011
150	26.3 ±0.00011

จากผลการทดลองปริมาณการเชื่อมขวางของคอมโพสิตของยางธรรมชาติในตารางที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่า เมื่อปริมาณของบิสมัทออกไซด์เพิ่มขึ้น ปริมาณการเชื่อมขวางจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเช่นกัน เนื่องจากบิสมัทออกไซด์ทำหน้าที่เป็นสารช่วยกระตุ้นที่มีผลต่อปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์ทำให้ปริมาณพันธะเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่โมเลกุลของยางเพิ่มมากขึ้น ผลที่ได้สอดคล้องกันกับงานวิจัยของ T. Donruedee., et al., (2018)[54] ศึกษาการเตรียมวัสดุกำบังรังสีที่มีความยืดหยุ่น และปลอดตะกั่วจากยางธรรมชาติผสมกับโลหะออกไซด์ ได้แก่ เหล็กออกไซด์ ทังสเตนออกไซด์ และบิสมัทออกไซด์ที่ปริมาณ 100 300 และ 500 ส่วนโดยร้อยละเมื่อเทียบกับยางพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของโลหะออกไซด์ทำให้ปริมาณการเชื่อมขวางเพิ่มขึ้น เนื่องจากสารประกอบออกไซด์ทั้งสามชนิดทำหน้าที่เป็นสารกระตุ้นสารตัวเร่ง ปฏิกิริยาวัลคาไนซ์เกิดได้เร็วขึ้นส่งผลให้ปริมาณการเชื่อมขวางเพิ่มขึ้นเช่นกัน

4.1.3 ผลของการแปรปริมาณบิสมัทออกไซด์ ต่อการกระจายตัว และปริมาณการกระจายตัวของธาตุของบิสมัทออกไซด์ในคอมโพสิตของยางธรรมชาติ

การกระจายตัวของสารส่งผลโดยตรงต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิต เนื่องจากเมื่อทำการให้แรงกับวัสดุแรงจะเคลื่อนที่ไปยังส่วนที่เนื้อพื้น (Matrix phase) ก่อนหลังจากนั้นจะส่งผ่านแรงไปยังส่วนที่กระจาย (Distribution phase) ถ้าวัสดุมีการกระจายตัวของสารที่ดีจะทำให้เกิดการส่งผ่านแรงได้อย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้วัสดุรับแรงได้ดีซึ่งการทดสอบการกระจายตัวของบิสมัทออกไซด์เริ่มจากการนำตัวอย่างเคลือบทอง และทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด โดยใช้เทคนิคเอ็กซ์เรย์ ฟลูออเรสเซ็นต์แบบกระจายพลังงาน ผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณที่แตกต่างกันของบิสมัทออกไซด์ในคอมโพสิตของยางธรรมชาติต่อการกระจายตัวของบิสมัทออกไซด์ในคอมโพสิตของยางธรรมชาติแสดงในรูปที่ 4.1 และปริมาณการกระจายตัวของธาตุในคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่ได้จากการคำนวณตามสมการที่ (3.2) และ (3.3) แสดงในตารางที่ 4.3



รูปที่ 4.1 การกระจายตัวของบิสมัทในคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีปริมาณของบิสมัทออกไซด์ที่แตกต่างกัน a) 10 phr b) 20 phr c) 40 phr d) 80 phr e) 120 phr และ f) 150 phr

ตารางที่ 4.3 ร้อยละปริมาณการกระจายตัวของธาตุในคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการแปรปริมาณของบิสมัทออกไซด์

Elements	BO Contents (phr)						
	0	10	20	40	80	120	150
C	81.714	74.876	69.094	59.850	47.217	38.988	34.480
H	10.981	10.062	9.285	8.043	6.345	5.239	4.634
O	1.000	1.779	2.437	3.489	4.927	5.863	6.376
Zn	3.668	3.361	3.102	2.687	2.120	1.750	1.548
Bi	0.000	7.506	13.853	24.000	37.868	46.901	51.849
N	0.107	0.098	0.091	0.079	0.062	0.051	0.045
S	2.529	2.317	2.138	1.852	1.461	1.207	1.067

รูปที่ 4.1 แสดงการกระจายตัวของบิสมัทออกไซด์ในคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่ปริมาณต่าง ๆ พบว่า เมื่อปริมาณของบิสมัทออกไซด์เพิ่มขึ้น ความสามารถในการกระจายตัวของสารจะลดลง เนื่องจากปริมาณของบิสมัทออกไซด์ที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้การผสมสารเข้ากับยางธรรมชาติได้ยากขึ้น และทำให้บิสมัทออกไซด์เกิดการเกาะกลุ่มกันเอง (Agglomeration) มากกว่าที่จะกระจายตัวใน

ยางธรรมชาติซึ่งบริเวณที่เกิดการเกาะกลุ่มกันของสารถือเป็นจุดอ่อนของวัสดุที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของคอมโพสิตของยางธรรมชาติโดยตรง

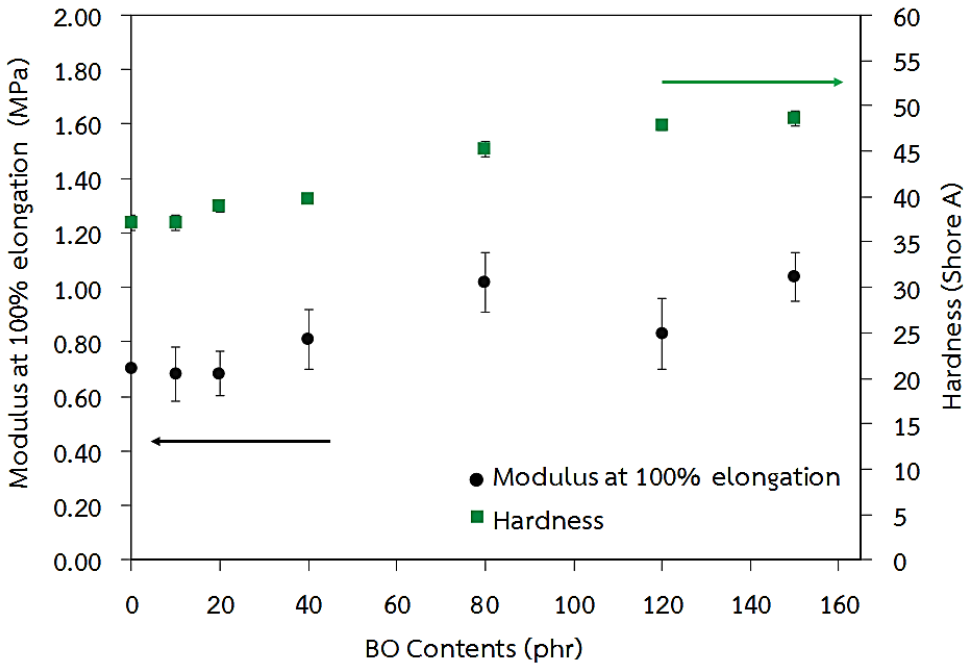
ตารางที่ 4.3 แสดงร้อยละปริมาณการกระจายตัวของธาตุในคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการแปรปริมาณของบิสมัทออกไซด์จากตารางจะเห็นได้ว่า เมื่อปริมาณของบิสมัทออกไซด์เพิ่มขึ้น ปริมาณบิสมัทมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเช่นกัน ซึ่งการเพิ่มขึ้นของบิสมัทอาจส่งผลต่อสมบัติการลดทอนรังสี เนื่องจากบิสมัทจัดเป็นธาตุที่มีเลขอะตอมสูงสามารถดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีพลังงานสูงได้

4.1.4 ผลของการแปรปริมาณบิสมัทออกไซด์ต่อสมบัติเชิงกลของคอมโพสิตของยางธรรมชาติ

ทำการทดสอบสมบัติเชิงกลโดยการเตรียมตัวอย่างเป็นรูปดรัมเบล ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 412 ผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณที่แตกต่างกันของบิสมัทออกไซด์ในคอมโพสิตของยางธรรมชาติต่อสมบัติเชิงกลแสดงในตารางที่ 4.4-4.6 และรูปที่ 4.2-4.4

ตารางที่ 4.4 มอดูลัสที่ระยะยืด 100% (Modulus at 100% elongation) และความแข็ง (Hardness) ของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีปริมาณของบิสมัทออกไซด์ที่แตกต่างกัน

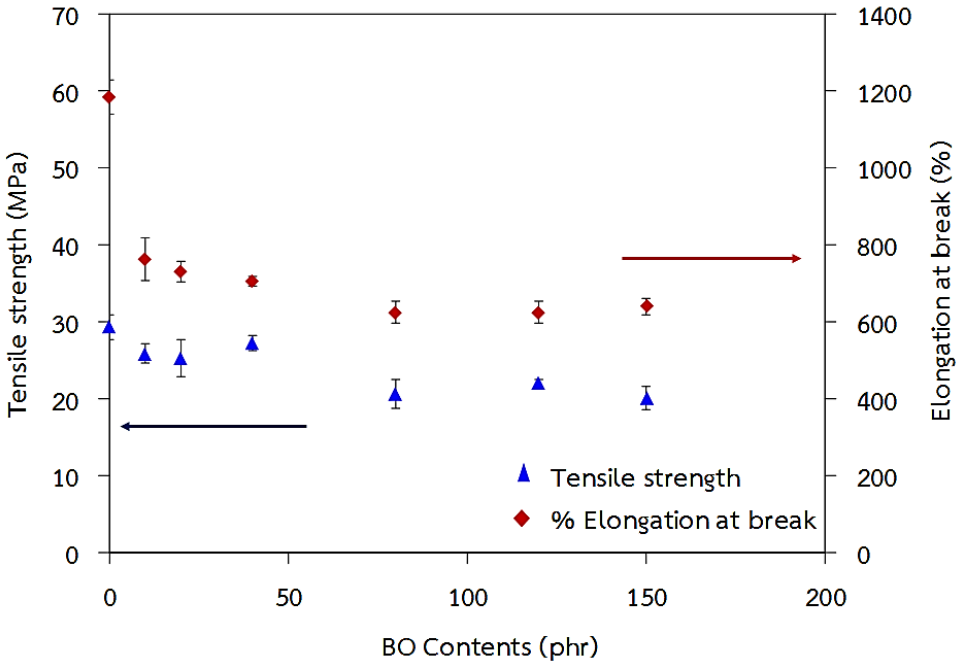
BO Contents (phr)	Modulus at 100% elongation (MPa)	Hardness (Shore A)
0	0.70 ±0.01	37.20 ±0.84
10	0.68 ±0.10	37.20 ±0.84
20	0.68 ±0.08	39.00 ±0.71
40	0.81 ±0.11	39.80 ±0.84
80	1.02 ±0.11	45.20 ±0.45
120	0.83 ±0.13	47.80 ±0.84
150	1.04 ±0.09	48.60 ±0.89



รูปที่ 4.2 มอดูลัสที่ระยะยืด 100% และความแข็งของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีปริมาณของบิสมัทออกไซด์ที่แตกต่างกัน

ตารางที่ 4.5 ความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile strength) และระยะยืด ณ จุดขาด (% Elongation at break) ของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีปริมาณของบิสมัทออกไซด์ที่แตกต่างกัน

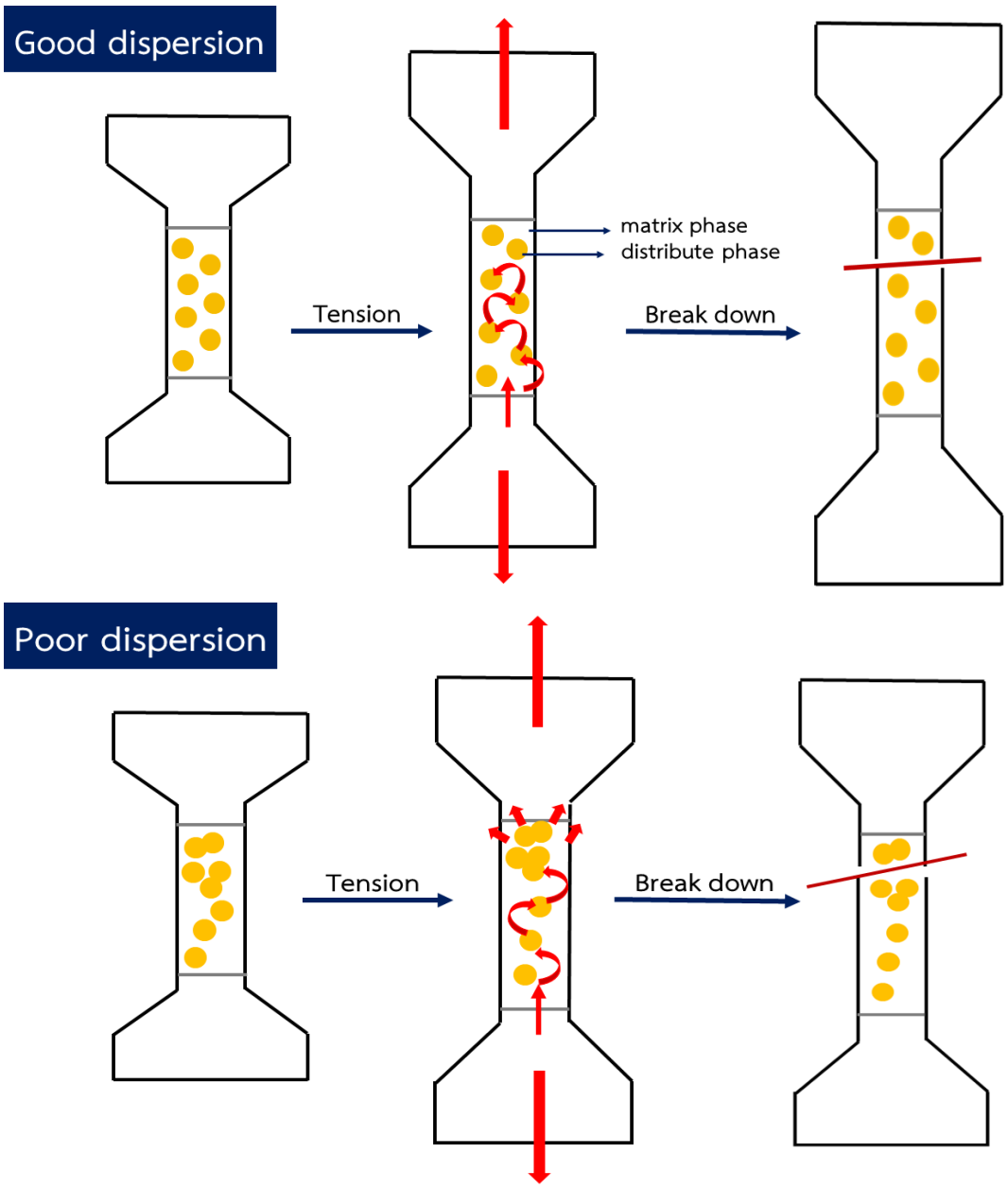
BO contents (phr)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)
0	29.31 ±1.60	1,183 ±45
10	25.90 ±1.21	763 ±54
20	25.22 ±2.41	730 ±27
40	27.25 ±1.00	706 ±13
80	20.66 ±1.88	625 ±29
120	22.08 ±0.37	625 ±29
150	20.13 ±1.53	640 ±22



รูปที่ 4.3 ความต้านทานต่อแรงดึง และระยะยืด ณ จุดขาดของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีปริมาณของบิสมัทออกไซด์ที่แตกต่างกัน

จากตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.2 แสดงค่ามอดูลัสที่ระยะยืด 100% และค่าความแข็ง ของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีปริมาณของบิสมัทออกไซด์ที่แตกต่างกันพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณบิสมัทออกไซด์ส่งผลให้ค่ามอดูลัสที่ระยะยืด 100% และค่าความแข็งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากบิสมัทออกไซด์จัดเป็นสารที่มีอนุภาคแข็ง เมื่อเติมลงในยางธรรมชาติอนุภาคของบิสมัทออกไซด์จะเข้าแทรกระหว่างสายโซ่โมเลกุลของยางส่งผลให้สายโซ่โมเลกุลของยางถูกจำกัดการเคลื่อนที่ หรือความสามารถในการเคลื่อนที่ของสายโซ่โมเลกุลของยางลดลง

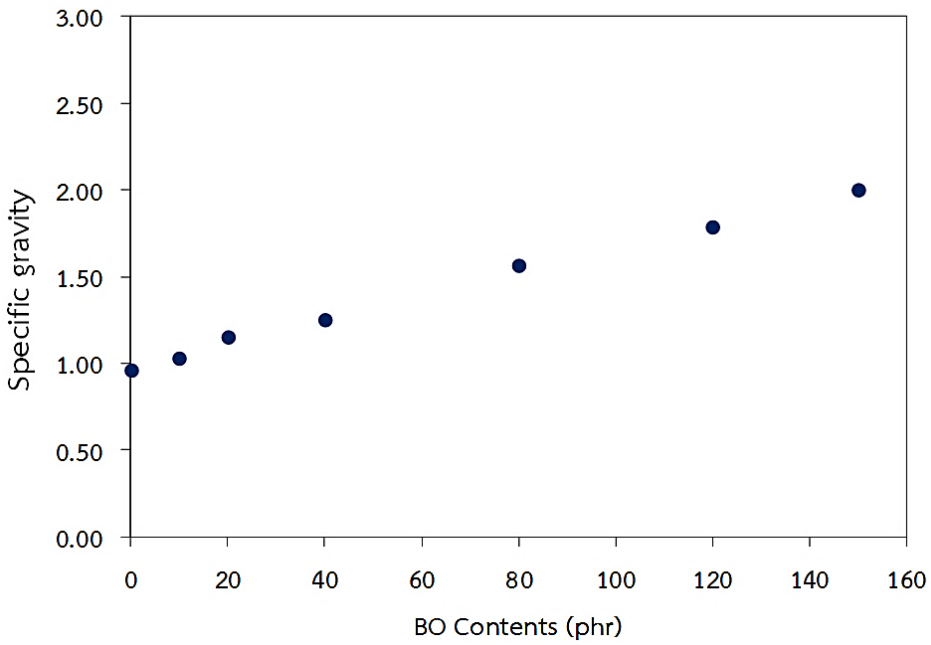
ในทางกลับกันการเพิ่มขึ้นของบิสมัทออกไซด์ในคอมโพสิตของยางธรรมชาติส่งผลต่อความสามารถในการกระจายตัวของสารดังแสดงในรูปที่ 4.1 ความสามารถในการกระจายตัวน้อยลงเมื่อปริมาณของบิสมัทออกไซด์เพิ่มขึ้นเป็นปัจจัยที่ทำให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึง และค่าระยะยืด ณ จุดขาดของวัสดุคอมโพสิตของยางธรรมชาติมีแนวโน้มลดลงซึ่งสามารถอธิบายได้จากรูปที่ 4.4 แสดงกระบวนการส่งผ่านแรงของวัสดุคอมโพสิตที่มีการกระจายตัวของสารแตกต่างกันซึ่งส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิตกล่าวคือ วัสดุคอมโพสิตจะประกอบไปด้วยสองส่วนได้แก่ ส่วนที่เป็นเนื้อพื้น (matrix) และเฟสกระจาย (distribute phase) เมื่อให้แรงดึงยืดกับวัสดุคอมโพสิตแรงจะต้อง



รูปที่ 4.4 กระบวนการส่งผ่านแรงของวัสดุคอมโพสิตที่มีการกระจายตัวของสารที่ดี (Good dispersion) และการกระจายตัวของสารที่ไม่ดี (poor dispersion) ซึ่งส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิต

ตารางที่ 4.6 ความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) ของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีปริมาณของบิสมัทออกไซด์ที่แตกต่างกัน

BO Contents (phr)	Specific gravity
0	0.9630 ±0.0070
10	1.0370 ±0.0040
20	1.1560 ±0.0070
40	1.2580 ±0.0020
80	1.5680 ±0.0030
120	1.7940 ±0.0040
150	2.0040 ±0.0050



รูปที่ 4.5 ความถ่วงจำเพาะของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีปริมาณของบิสมัทออกไซด์แตกต่างกัน

เคลื่อนที่ไปยังส่วนของเนื้อพื้นก่อน หลังจากนั้นจะทำการถ่ายโอนแรงไปยังส่วนเสริมแรง หากวัสดุคอมโพสิตมีการกระจายตัวของสารที่ดี การถ่ายโอนแรงจะเกิดได้อย่างต่อเนื่อง วัสดุคอมโพสิตสามารถรับแรงได้ดีส่งผลให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึง และระยะยืด ณ จุดขาดสูง ในขณะเดียวกัน หากวัสดุคอมโพสิตมีการกระจายตัวของสารที่ไม่ดี การส่งผ่านแรงจากเนื้อพื้นไปยังส่วนเสริมแรงจะเกิดได้อย่างไม่ต่อเนื่อง บริเวณที่เกิดการร่วมตัวกันของสารจะเป็นบริเวณที่เกิดช่องว่าง และไม่เกิดการรับแรง หรือเป็นบริเวณที่เนื้อพื้นทำหน้าที่เป็นส่วนที่รับแรงเพียงส่วนเดียวเท่านั้น วัสดุจึงเกิดการ

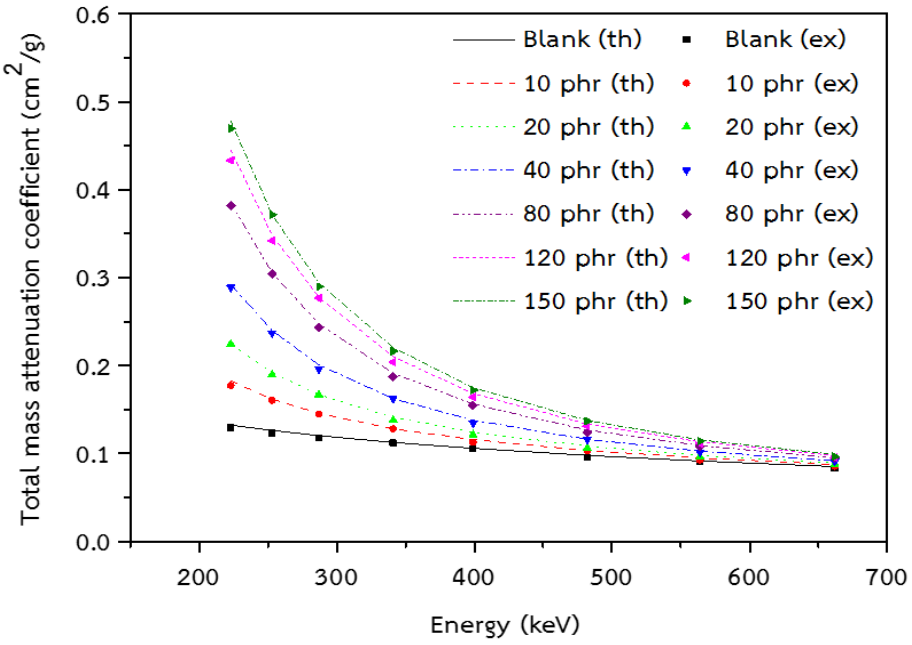
แตกหัก หรือฉีกขาดออกจากกันได้ง่ายส่งผลให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึง และระยะยืด ณ จุดขาดต่ำ ผลการทดลองความต้านทานต่อแรงดึง และระยะยืด ณ จุดขาดแสดงในตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.3

สำหรับค่าความถ่วงจำเพาะของคอมโพสิตของยางธรรมชาติ (ความถ่วงจำเพาะของยางธรรมชาติเท่ากับ 0.92) ที่มีปริมาณของบิสมัทออกไซด์ที่แตกต่างกันแสดงในตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.5 จะเห็นได้ว่า ค่าความถ่วงจำเพาะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณของบิสมัทออกไซด์(ความถ่วงจำเพาะของบิสมัทออกไซด์เท่ากับ 8.9)[56] เนื่องบิสมัทออกไซด์มีค่าความถ่วงจำเพาะที่สูง เมื่อเติมลงในยางธรรมชาติเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความถ่วงจำเพาะของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่เตรียมได้เพิ่มขึ้น

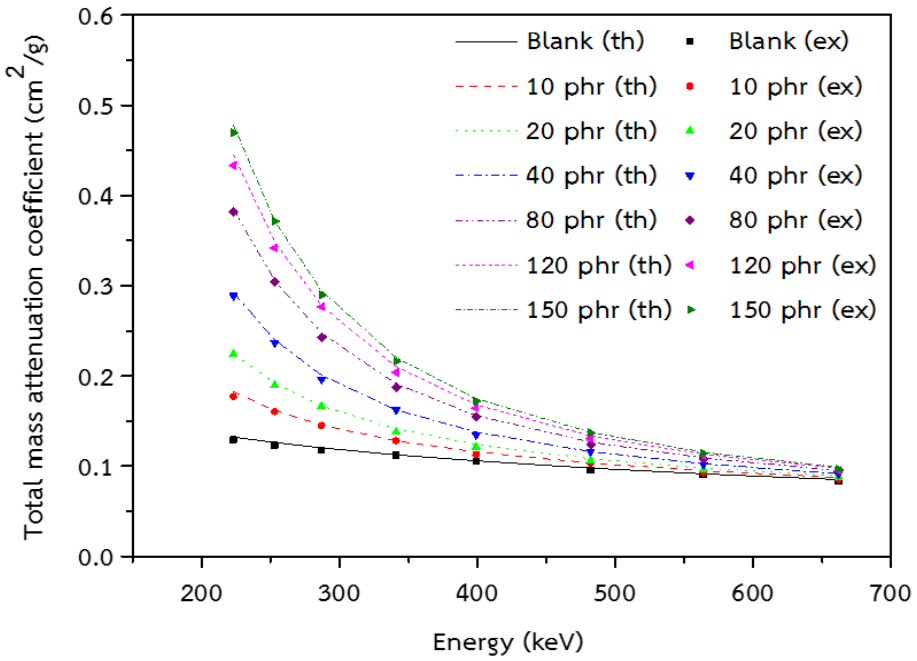
4.1.5 ผลของการแปรปริมาณบิสมัทออกไซด์ต่อสมบัติทางด้านรังสีของคอมโพสิตของยางธรรมชาติ

4.1.5.1 ผลของการแปรปริมาณบิสมัทออกไซด์ต่อสมบัติการลดทอนรังสีแกมมา (Gamma ray attenuation) ของคอมโพสิตของยางธรรมชาติ

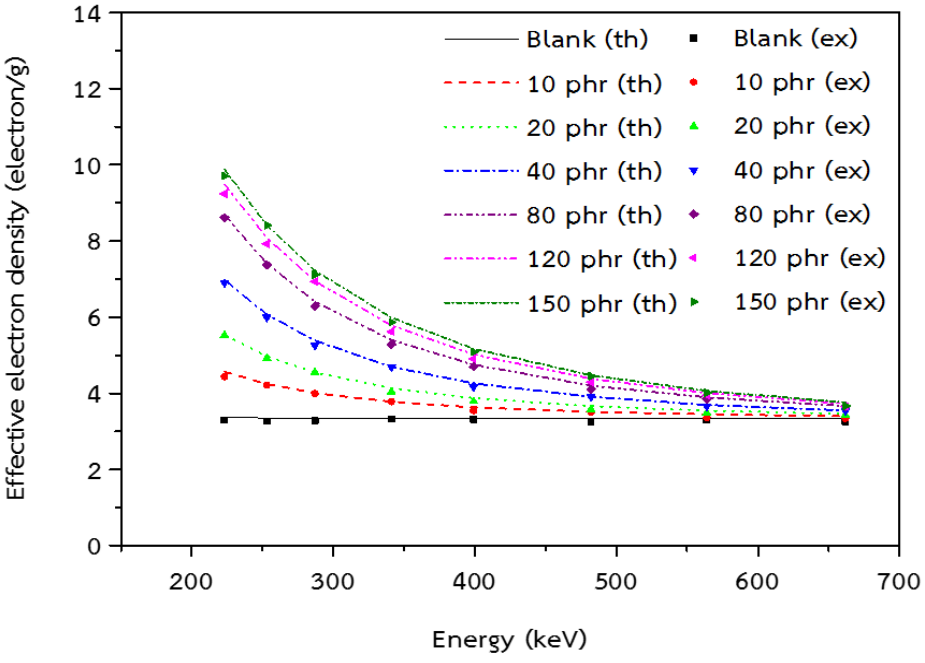
คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีพลังงานสูงสามารถถูกดูดกลืนได้ดีด้วยธาตุหนัก หรือธาตุที่มีเลขอะตอมสูง บิสมัทออกไซด์จัดเป็นธาตุหนักที่สามารถดูดกลืน หรือลดทอนปริมาณของรังสีได้ ทำศึกษาปริมาณที่ต่างกันของบิสมัทออกไซด์ที่มีผลต่อการลดทอนรังสีแกมมาของคอมโพสิตของยางธรรมชาติทำการทดสอบที่พลังงานในช่วง 223-662 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณที่แตกต่างกันของบิสมัทออกไซด์ในคอมโพสิตของยางธรรมชาติต่อความสามารถในการลดทอนรังสีแกมมาของคอมโพสิตของยางธรรมชาติ แสดงในรูปที่ 4.6-4.10



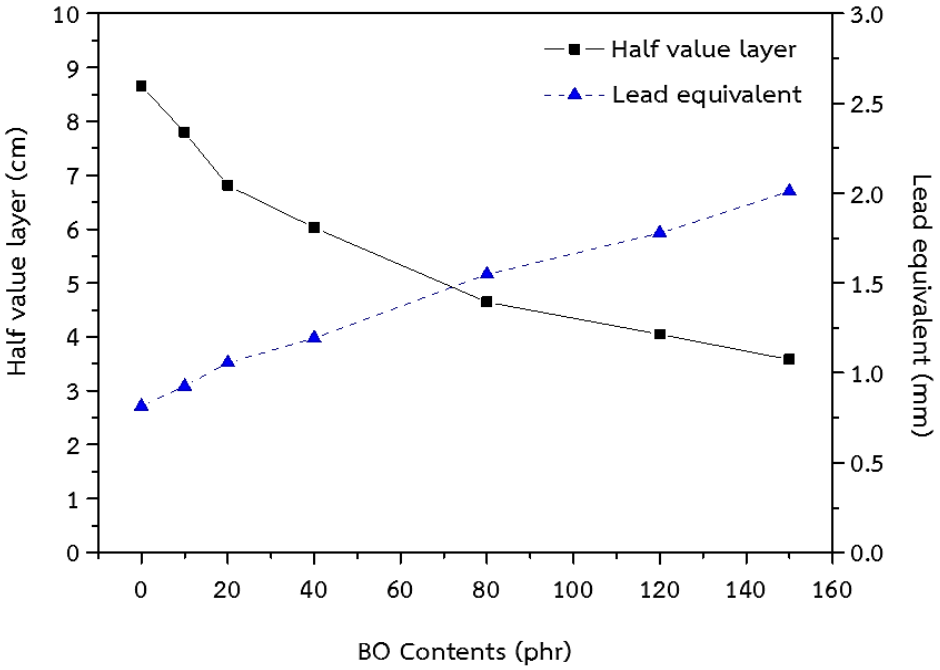
รูปที่ 4.6 สัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเชิงมวล (Total mass attenuation coefficient; μ_m) ของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีปริมาณของบิสมัทออกไซด์ที่แตกต่างกัน ทดสอบด้วยรังสีแกมมาที่พลังงาน 223-662 keV



รูปที่ 4.7 เลขอะตอมยังผล (Effective atomic number; Z_{eff}) ของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีปริมาณของบิสมัทออกไซด์ที่แตกต่างกัน ทดสอบด้วยรังสีแกมมาที่พลังงาน 223-662 keV

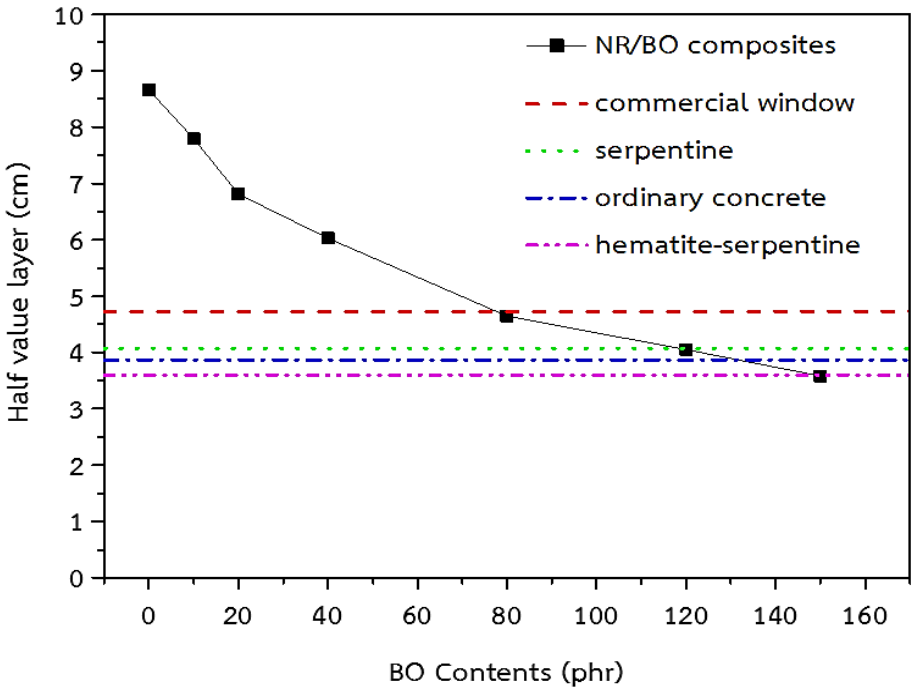


รูปที่ 4.8 ความหนาแน่นอิเล็กตรอน (Effective atomic density; N_e) ของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีปริมาณของบิสมัทออกไซด์ที่แตกต่างกัน ทดสอบด้วยรังสีแกมมาที่พลังงาน 223-662 keV



รูปที่ 4.9 ความหนาครึ่งค่า (Haft value layer; *HVL*) และความหนาเทียบเท่าตะกั่ว (*Lead equivalent*) ของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีปริมาณของบิสมัทออกไซด์ที่แตกต่างกัน ทดสอบด้วยรังสีแกมมาที่พลังงาน 662 keV

รูปที่ 4.6 แสดงสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเชิงมวลของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีปริมาณของบิสมัทออกไซด์ที่แตกต่างกัน จากผลการศึกษาพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเชิงมวลเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณของบิสมัทออกไซด์เพิ่มขึ้นหมายความว่า คอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีปริมาณของบิสมัทออกไซด์ที่เพิ่มขึ้น สามารถดูดกลืน หรือลดทอนปริมาณของรังสีแกมมาได้มากขึ้น ตามทฤษฎีที่กล่าวมาข้างต้นว่า การลดทอนปริมาณรังสีจะเกิดขึ้นได้เมื่อรังสีแกมมาเกิดอันตรกิริยา (interaction) กับอิเล็กตรอนในอะตอมของสสารในคอมโพสิตของยางธรรมชาติ รูปที่ 4.7 แสดงเลขอะตอมยังผลของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีปริมาณของบิสมัทออกไซด์ที่แตกต่างกัน เลขอะตอมยังผลบ่งบอกถึงจำนวนอิเล็กตรอนที่วิ่งวนรอบนิวเคลียสของอะตอมที่เป็นกลาง[57] และรูปที่ 4.8 แสดงความหนาแน่นอิเล็กตรอนของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีปริมาณของบิสมัทออกไซด์ที่แตกต่างกัน จากทั้งสองรูปจะเห็นได้ว่า เลขอะตอมยังผล และความหนาแน่นอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของบิสมัทออกไซด์กล่าวคือ อิเล็กตรอนมีจำนวนเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของบิสมัทออกไซด์ ดังนั้นอันตรกิริยาระหว่างรังสีแกมมา หรือโฟตอน และอิเล็กตรอนมีโอกาสเกิดได้มากขึ้นเช่นกัน โดยส่วนสำคัญที่สามารถดูดกลืน หรือลดทอนรังสีได้ดีคือบิสมัทซึ่งเป็นธาตุหนักที่เป็นองค์ประกอบของบิสมัทออกไซด์ ส่งผลให้ยางธรรมชาติที่มีปริมาณของบิสมัทออกไซด์ในปริมาณ



รูปที่ 4.10 เปรียบเทียบความหนาครึ่งค่าของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีปริมาณของบิสมัทออกไซด์ที่แตกต่างกันกับกระจกเชิงพาณิชย์ (commercial window) เซอร์เพนไทน์ (serpentine) คอนกรีต (ordinary concrete) และเฮมาไทด์-เซอร์เพนไทน์ (hematite-serpentine)[43] ทดสอบด้วยรังสีแกมมาที่พลังงาน 662 keV

มากมีโอกาสเกิดอันตรกิริยากับรังสีแกมมาได้มากเช่นกัน คอมโพสิตของยางธรรมชาติจึงสามารถลดทอนปริมาณรังสีแกมมาได้มากขึ้น อย่างไรก็ตามความสามารถในการลดทอนรังสีจะลดลงเมื่อเพิ่มพลังงานของรังสีแกมมาสังเกตได้จากคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีปริมาณของบิสมัทออกไซด์ที่เท่ากัน เนื่องจากที่รังสีพลังงานต่ำมีความสามารถในการทะลุงทะลวงผ่านวัสดุได้น้อยกว่ารังสีที่พลังงานสูงหมายความว่า ความสามารถในการลดทอนรังสีของคอมโพสิตของยางธรรมชาติลดลงเมื่อเพิ่มพลังงานรังสีแกมมาให้สูงขึ้น นอกจากนี้ผลการทดลองทั้งสามผลการทดลองมีค่าการทดลอง (ex) ที่ใกล้เคียงกับค่าทางทฤษฎี (th) ที่คำนวณได้จากโปรแกรม WinXCom สามารถยืนยันได้ว่าผลการทดลองที่ได้มีความแม่นยำ และถูกต้องตรงตามทฤษฎี

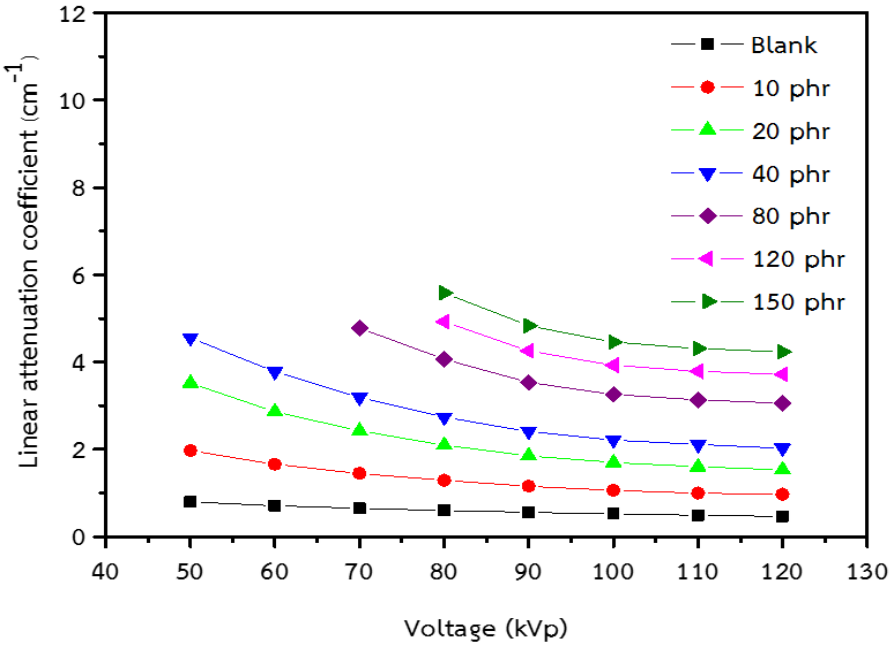
รูปที่ 4.9 แสดงค่าความหนาครึ่งค่า และความหนาเทียบเท่าตะกั่วของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีปริมาณของบิสมัทออกไซด์ที่แตกต่างกัน ทำการทดสอบรังสีแกมมาที่พลังงาน 662 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ โดยค่าความหนาครึ่งค่าหมายถึง ความหนาของวัสดุซึ่งสามารถลดทอนปริมาณรังสีลงไปครึ่งหนึ่งจากพลังงานของรังสีเดิม จากรูปจะเห็นได้ว่า เมื่อเพิ่มปริมาณบิสมัทออกไซด์ ค่าความหนาครึ่งค่าลดลงแสดงว่า คอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีบิสมัทออกไซด์เพิ่มขึ้นสามารถลดทอนปริมาณรังสีลงไปครึ่งหนึ่งได้โดยคอมโพสิตของยางธรรมชาติจะมีความหนาที่ลดลง และค่าความหนา

เทียบเท่าตะกั่วเป็นการเปรียบเทียบความสามารถในการลดทอนปริมาณของรังสีของคอมโพสิตของยางธรรมชาติกับตะกั่ว ยกตัวอย่างจากในรูปที่ 4.9 คอมโพสิตของยางธรรมชาติที่ไม่มี และมีการเติมบิสมัทออกไซด์หนา 13 มิลลิเมตรเท่ากัน แต่ความสามารถในการลดทอนปริมาณรังสีต่างกันคือ คอมโพสิตของยางธรรมชาติที่ไม่มีการเติมบิสมัทออกไซด์สามารถลดทอนปริมาณรังสีได้เทียบเท่ากับตะกั่วหนา 0.75 มิลลิเมตร ในขณะที่คอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์ 150 ส่วนโดยร้อยละเมื่อเทียบกับยาง สามารถลดทอนปริมาณรังสีได้เทียบเท่ากับตะกั่วหนา 2 มิลลิเมตรที่รังสีแกมมาพลังงานเดียวกัน ซึ่งผลการทดลองมีแนวโน้มเช่นเดียวกับค่าความหนาครึ่งค่าแสดงว่า การเติมปริมาณบิสมัทออกไซด์ลงในคอมโพสิตของยางธรรมชาติทำให้วัสดุสามารถลดทอนปริมาณรังสีได้มากขึ้นดูได้จากค่าความหนาครึ่งค่าที่ลดลง และความหนาเทียบเท่าตะกั่วที่เพิ่มขึ้น

รูปที่ 4.10 แสดงการเปรียบเทียบความหนาครึ่งค่าของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีปริมาณของบิสมัทออกไซด์ที่แตกต่างกันกับวัสดุกำบังรังสีชนิดต่าง ๆ ที่พลังงานรังสีแกมมาเท่ากับ 662 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ เมื่อทำการพิจารณาค่าความหนาครึ่งค่าจากรูปที่ 4.10 พบว่า การเติมบิสมัทออกไซด์ที่มีปริมาณ 80 ส่วนโดยร้อยละเมื่อเทียบกับยางในคอมโพสิตของยางธรรมชาติสามารถกำบังรังสีแกมมาได้เทียบเท่ากับกระจกเชิงพาณิชย์ เมื่อเพิ่มปริมาณบิสมัทออกไซด์เป็น 120 ส่วนโดยร้อยละเมื่อเทียบกับยาง สามารถกำบังรังสีแกมมาได้ดีกว่ากระจกเชิงพาณิชย์ เซอร์เพนไทน์ และคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีบิสมัทออกไซด์ 150 ส่วนโดยร้อยละเมื่อเทียบกับยางสามารถกำบังรังสีแกมมาได้ดีกว่ากระจกเชิงพาณิชย์ เซอร์เพนไทน์ คอนกรีต และเฮมาไทด์-เซอร์เพนไทน์ จากการทดลองสมบัติทางด้านรังสีแกมมาจะเห็นได้ว่า คอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์ปริมาณ 150 ส่วนโดยร้อยละเมื่อเทียบกับยางสามารถลดทอน หรือกำบังรังสีแกมมาได้ดีที่สุดเมื่อเทียบกับคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่ปริมาณต่าง ๆ โดยปริมาณของบิสมัทออกไซด์ที่เหมาะสมจะนำมาผลิตเป็นวัสดุกำบังรังสีแกมมาที่มีความยืดหยุ่นสูง สามารถยืดตัวได้มากกว่าร้อยละ 600 และปลอดสารตะกั่วอยู่ในช่วงปริมาณ 80-150 ส่วนโดยร้อยละเมื่อเทียบกับยาง

4.1.5.2 ผลของการแปรปริมาณบิสมัทออกไซด์ต่อสมบัติการลดทอนรังสีเอ็กซ์ (X-ray attenuation) ของคอมโพสิตของยางธรรมชาติ

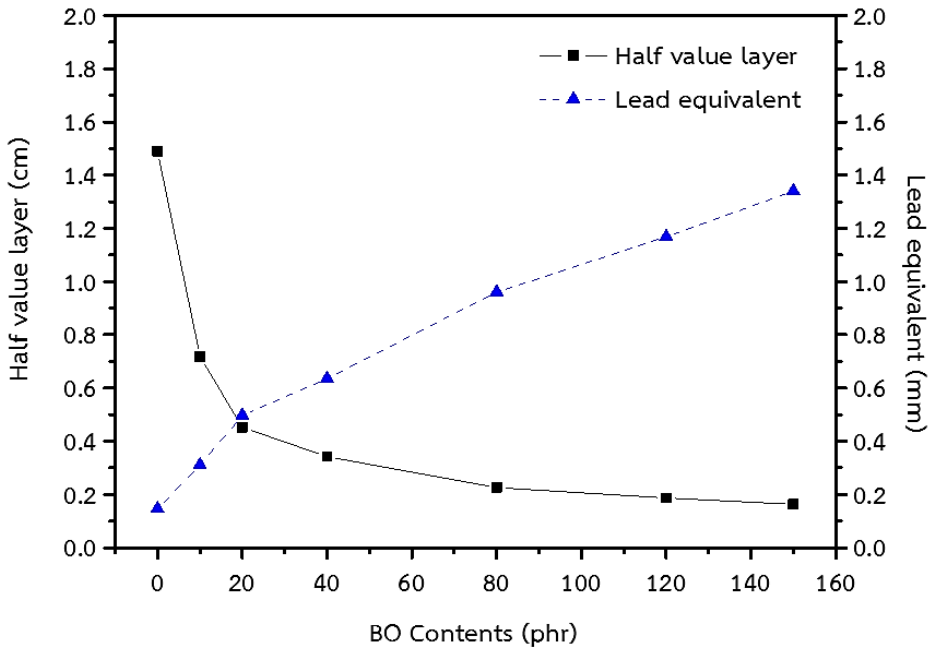
รังสีเอ็กซ์ (X-ray) จัดเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีพลังงานสูงซึ่งในปัจจุบันมีการใช้งานอย่างแพร่หลาย โดยรังสีเอ็กซ์สามารถก่ออันตรายแก่ผู้ใช้งานได้ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องมีวัสดุในการกำบังรังสีเอ็กซ์ เพื่อป้องกันอันตรายที่จะเกิดขึ้น ในขั้นตอนนี้เป็นการทดสอบสมบัติการลดทอนรังสีเอ็กซ์ของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีพลังงานในช่วง 50-120 กิโลโวลต์สูงสุด ผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณที่แตกต่างกันของบิสมัทออกไซด์ในคอมโพสิตของยางธรรมชาติต่อความสามารถในการลดทอนรังสีเอ็กซ์ของคอมโพสิตของยางธรรมชาติแสดงในรูปที่ 4.11-4.13



รูปที่ 4.11 สัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเชิงเส้น (Linear attenuation coefficient; μ) ของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีปริมาณของบิสมัทออกไซด์ที่แตกต่างกัน ทดสอบด้วยรังสีเอ็กซ์ที่พลังงาน 50- 120 kVp

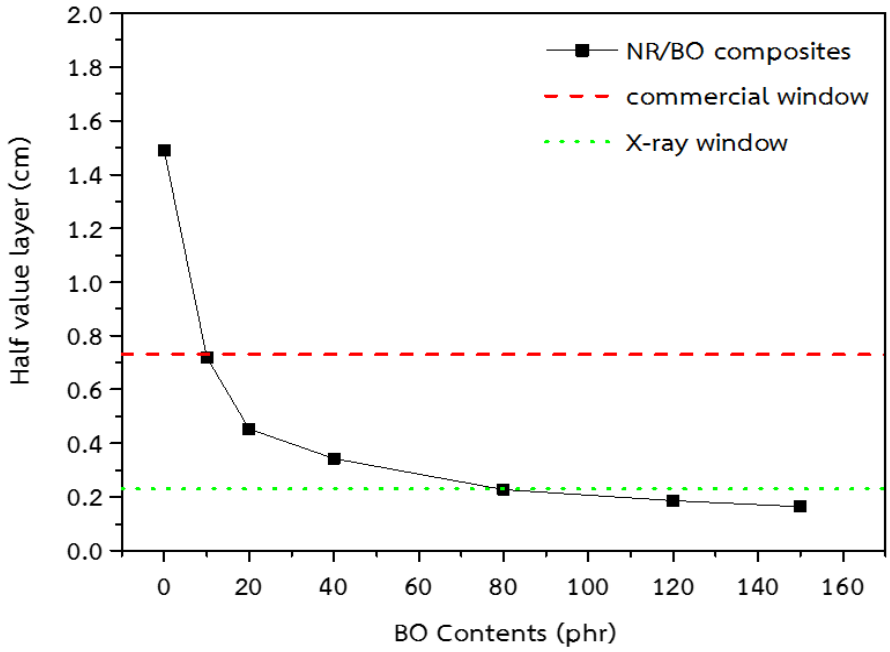
รูปที่ 4.11 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเชิงเส้นของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีปริมาณของบิสมัทออกไซด์ที่แตกต่างกัน จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า เมื่อเพิ่มปริมาณบิสมัทออกไซด์สัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเชิงเส้นมีค่าเพิ่มขึ้น อย่างที่กล่าวไปข้างต้นว่า การลดทอนรังสีจะเกิดขึ้นได้เมื่อรังสีเกิดอันตรกิริยากับอิเล็กตรอนในอะตอมล้อมนิวเคลียสของตัวกลางนั่นหมายความว่า การเติมบิสมัทออกไซด์เป็นการเพิ่มอิเล็กตรอนในอะตอมส่งผลให้เกิดอันตรกิริยาระหว่างรังสีเอ็กซ์และอิเล็กตรอนในอะตอมเพิ่มมากขึ้น คอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีปริมาณบิสมัทออกไซด์ที่เพิ่มขึ้นสามารถลดทอน หรือกำบังรังสีเอ็กซ์ได้ดีขึ้น

รูปที่ 4.12 แสดงค่าความหนาครึ่งค่า และความหนาเทียบเท่าตะกั่วของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีปริมาณของบิสมัทออกไซด์ที่แตกต่างกันที่พลังงาน 120 กิโลโวลต์สูงสุด จากผลการทดลองค่าความหนาครึ่งค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณบิสมัทออกไซด์แสดงว่า คอมโพสิตของยางธรรมชาติสามารถลดทอนปริมาณของรังสีเอ็กซ์ได้ครึ่งหนึ่งจากพลังงานของรังสีเดิม โดยใช้ความหนาที่ลดลง และค่าความหนาเทียบเท่าตะกั่วเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณบิสมัทออกไซด์ โดยในการทดลองหาค่าความหนาเทียบเท่าตะกั่วกำหนดให้คอมโพสิตของยางธรรมชาติมีความหนาเท่ากันคือ 13 มิลลิเมตร หมายความว่า คอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีปริมาณบิสมัทออกไซด์เพิ่มขึ้น สามารถลดทอน หรือกำบังรังสีได้ดีขึ้น



รูปที่ 4.12 ความหนาครึ่งค่า และความหนาเทียบเท่าตะกั่วของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีปริมาณของบิสมัทออกไซด์ที่แตกต่างกัน ทดสอบด้วยรังสีเอ็กซ์ที่พลังงาน 120 kVp

เมื่อนำคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์เปรียบเทียบกับกระจกเชิงพาณิชย์ และกระจกกำบังรังสีเอ็กซ์พบว่า คอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีปริมาณบิสมัทออกไซด์เท่ากับ 10 20 และ 40 ส่วนโดยร้อยละเมื่อเทียบกับยางสามารถกำบังรังสีเอ็กซ์ได้ดีกว่ากระจกเชิงพาณิชย์ และเมื่อเพิ่มปริมาณของบิสมัทออกไซด์เป็น 80 120 150 ส่วนโดยร้อยละเมื่อเทียบกับยางสามารถกำบังรังสีเอ็กซ์ได้ดีกว่ากระจกเชิงพาณิชย์ และกระจกกำบังรังสีเอ็กซ์ สังเกตการเปรียบเทียบวัสดุกำบังรังสีเอ็กซ์ชนิดต่าง ๆ ได้จากรูปที่ 4.13 จากผลการทดลองสมบัติการลดทอนรังสีเอ็กซ์ทั้งหมดพบว่า คอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีบิสมัทออกไซด์ปริมาณ 150 ส่วนโดยร้อยละเมื่อเทียบกับยางให้สมบัติทางด้านรังสีเอ็กซ์ที่ดีที่สุด และคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีปริมาณบิสมัทออกไซด์เท่ากับ 80 120 และ 150 ส่วนโดยร้อยละเมื่อเทียบกับยางเป็นปริมาณที่เหมาะสมที่จะนำมาผลิตเป็นวัสดุกำบังรังสีเอ็กซ์ เนื่องจากมีความสามารถในการกำบังรังสีได้ดีกว่ากระจกเชิงพาณิชย์ และกระจกกำบังรังสีเอ็กซ์ซึ่งเป็นวัสดุที่นิยมนำมากำบังรังสีเอ็กซ์



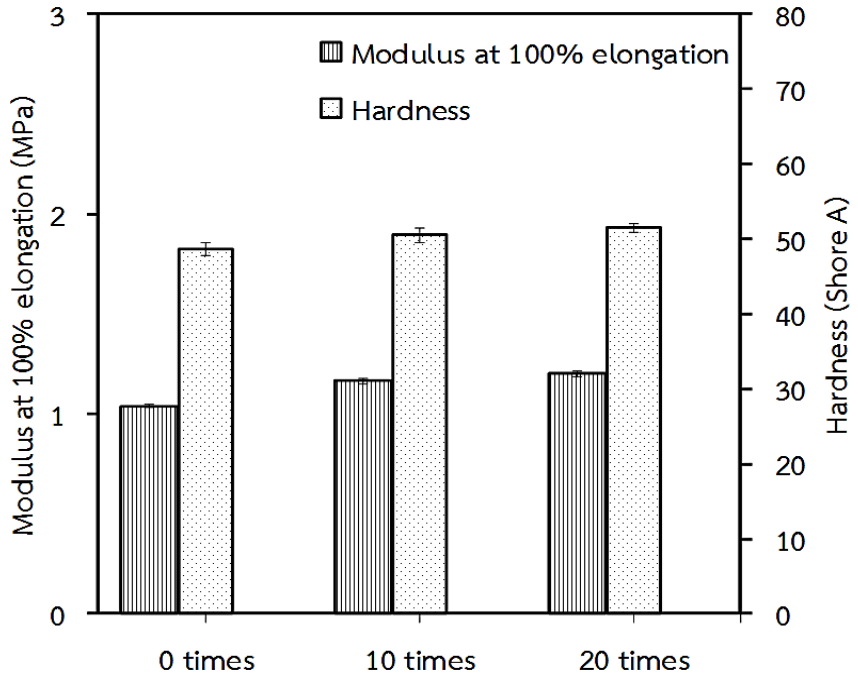
รูปที่ 4.13 เปรียบเทียบความหนาครึ่งค่าของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีปริมาณของบิสมัทออกไซด์ที่แตกต่างกันกับกระจกเชิงพาณิชย์ (commercial window) และกระจกกำบังรังสีเอ็กซ์ (X -ray window) ทดสอบด้วยรังสีเอ็กซ์ที่พลังงาน 120 kVp

4.1.6 ผลของการทดสอบสมบัติเชิงกลหลังผ่านการกำบังรังสีที่มีการฉายรังสีซ้ำ 10 และ 20 ครั้งของคอมโพสิตของยางธรรมชาติ

เมื่อพิจารณาสมบัติเชิงกล และสมบัติด้านการลดทอนรังสีของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีปริมาณของบิสมัทออกไซด์เท่ากับ 0 10 20 40 80 120 และ 150 ส่วนโดยร้อยละเมื่อเทียบกับยางพบว่า คอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์ปริมาณ 150 ส่วนโดยร้อยละเมื่อเทียบกับยางให้สมบัติเชิงกลอยู่ในเกณฑ์ที่ดี และให้ค่ากำบังรังสีแกมมา และรังสีเอ็กซ์ที่ดีที่สุดจึงเลือกคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์ปริมาณ 150 ส่วนโดยร้อยละเมื่อเทียบกับยางทำการฉายรังสี 10 และ 20 ครั้ง ครั้งละ 100 วินาที โดยการใช้มุมในการกระเจิงแสง 0° ซึ่งมีค่าพลังงานเท่ากับ 662 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ผลการทดลองสมบัติเชิงกลหลังได้รับรังสีของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์ปริมาณ 150 ส่วนโดยร้อยละเมื่อเทียบกับยางแสดงในตารางที่ 4.7-4.9 และรูปที่ 4.13-4.15

ตารางที่ 4.7 มอดูลัสที่ระยะยืด 100% และความแข็ง หลังผ่านการกำบังรังสีที่มีการฉายรังสีซ้ำ 10 และ 20 ครั้งของคอมโพสิตของยางธรรมชาติ

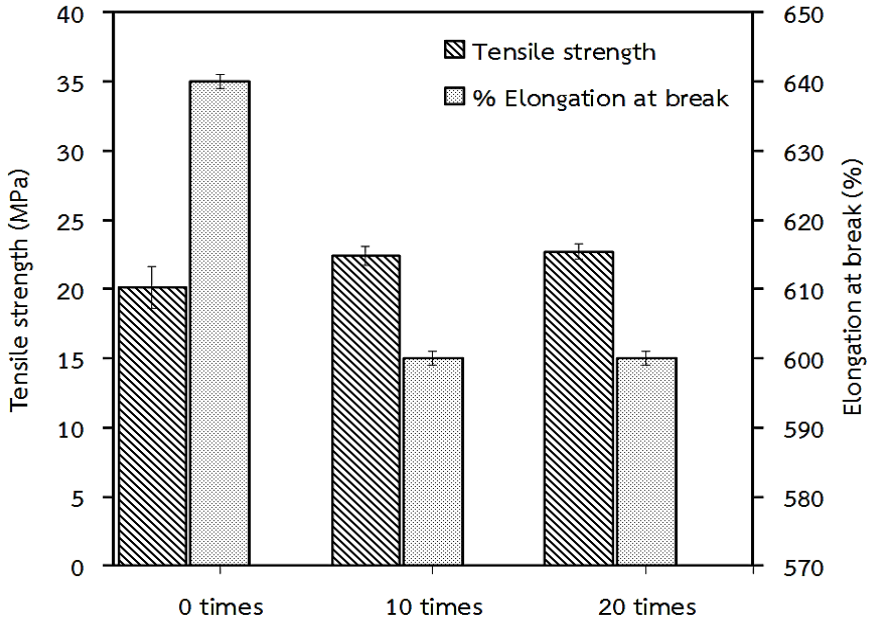
Radiation shielding (times)	Modulus at 100% elongation (MPa)	Hardness (Shore A)
0	1.04 ±0.01	48.60 ±0.84
10	1.17 ±0.02	50.50 ±1.00
20	1.20 ±0.01	51.50 ±0.58



รูปที่ 4.14 มอดูลัสที่ระยะยืด 100% และความแข็ง หลังผ่านการกำบังรังสีที่มีการฉายรังสีซ้ำ 10 และ 20 ครั้งของคอมโพสิตของยางธรรมชาติ

ตารางที่ 4.8 ความต้านทานต่อแรงดึง และระยะยืด ณ จุดขาด หลังผ่านการกำบังรังสีที่มีการฉายรังสีซ้ำ 10 และ 20 ครั้งของคอมโพสิตของยางธรรมชาติ

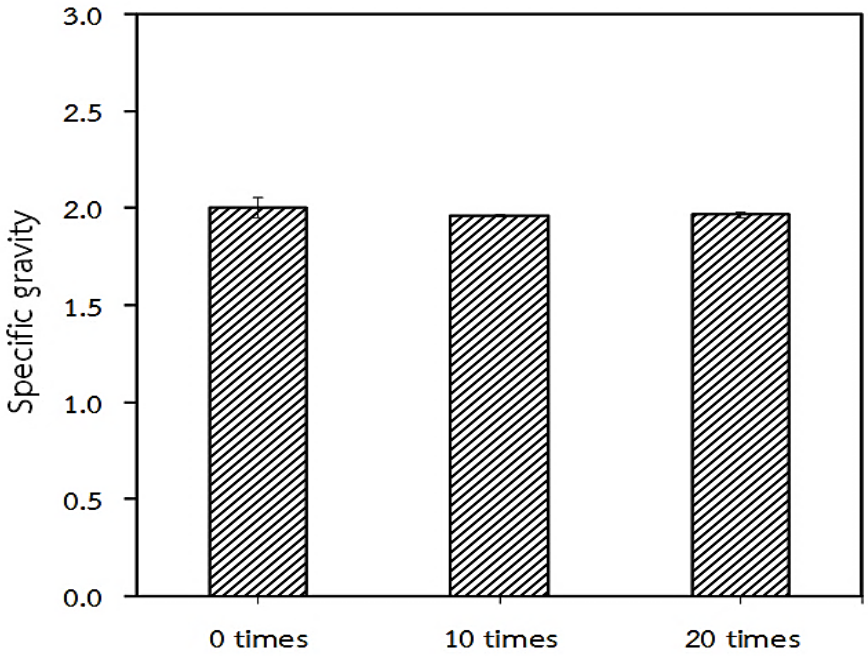
Radiation shielding (times)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)
0	20.13 ±1.53	640 ±22
10	22.42 ±0.66	600 ±0
20	22.69 ±0.55	600 ±30



รูปที่ 4.15 ความต้านทานต่อแรงดึง และระยะยืด ณ จุดขาด หลังผ่านการกำบังรังสีที่มีการฉายรังสีซ้ำ 10 และ 20 ครั้งของคอมโพสิตของยางธรรมชาติ

ตารางที่ 4.8 ความถ่วงจำเพาะหลังผ่านการกำบังรังสีที่มีการฉายรังสีซ้ำ 10 และ 20 ครั้งของคอมโพสิตของยางธรรมชาติ

Radiation shielding (times)	Specific gravity
0	2.004 ±0.005
10	1.964 ±0.003
20	1.966 ±0.011



รูปที่ 4.16 ความถ่วงจำเพาะหลังผ่านการกำบังรังสีที่มีการฉายรังสีซ้ำ 10 และ 20 ครั้งของคอมโพสิตของยางธรรมชาติ

ตารางที่ 4.9 ปริมาณการเชื่อมขวางหลังผ่านการกำบังรังสีของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีบิสมัทออกไซด์ปริมาณ 150 phr

Radiation shielding (times)	Crosslink density ($x10^{-3}g/cm^3$)
0	2.63 ±0.00012
10	2.84 ±0.00011
20	2.90 ±0.00011

จากตารางที่ 4.7 และรูปที่ 4.14 แสดงค่ามอดูลัสที่ระยะยืด 100% และความแข็ง หลังผ่านการกำบังรังสีของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์ปริมาณ 150 ส่วนโดยร้อยละเมื่อเทียบกับยางพบว่า ค่ามอดูลัส และความแข็งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อคอมโพสิตของยางธรรมชาติได้รับรังสีที่พลังงาน 662 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์เป็นจำนวน 10 และ 20 ครั้งซึ่งมีแนวโน้มเช่นเดียวกับค่าความต้านทานต่อแรงดึงสังเกตได้จากตารางที่ 4.8 และรูปที่ 4.15 ซึ่งเป็นผลมาจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณการเชื่อมขวาง หมายความว่า คอมโพสิตของยางธรรมชาติสามารถเชื่อมขวางได้เพิ่มขึ้น เมื่อคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่ได้รับรังสี และปริมาณการเชื่อมขวางที่เพิ่มขึ้นนี้ยังส่งผลต่อค่าระยะยืด ณ จุดขาดลดลง แสดงในตารางที่ 4.8 และรูปที่ 4.15 หมายความว่า คอมโพสิตของยางธรรมชาติมีความสามารถในการยืดหยุ่นลดลง เนื่องจากการเชื่อมขวางเปรียบเสมือนจุดที่ตรึงสายโซ่โมเลกุลของยางทำให้สายโซ่โมเลกุลของยางเกิดการเคลื่อนไหว หรือเกิดการยืดตัวได้น้อยลง ดังนั้นคอมโพสิตของยางธรรมชาติหลังจากได้รับรังสีจะมีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น ในขณะเดียวกันคอมโพสิตของยางธรรมชาติจะมีความยืดหยุ่นที่ลดลง นอกจากนี้รังสีที่ทำให้เกิดการเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่โมเลกุลของยางที่เพิ่มขึ้นนี้ไม่มีผลต่อค่าความถ่วงจำเพาะของคอมโพสิตของยางธรรมชาติสังเกตได้จากตารางที่ 4.9 และรูปที่ 4.16

ดังนั้นคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์ปริมาณ 150 ส่วนโดยร้อยละเมื่อเทียบกับยางเป็นปริมาณที่เหมาะสมที่สุดที่จะนำมาทำเป็นวัสดุกำบังรังสีปลอดตะกั่วที่มีความยืดหยุ่น โดยคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์ปริมาณ 150 ส่วนโดยร้อยละเมื่อเทียบกับยางมีค่ามอดูลัสที่ระยะยืด 100% เท่ากับ 1.04 เมกะพาสคัล ความแข็งชอร์เอเท่ากับ 48.6 ความต้านทานต่อแรงดึงเท่ากับ 20.13 เมกะพาสคัล และระยะยืด ณ จุดขาดเท่ากับร้อยละ 640 สำหรับสมบัติการลดทอนรังสีแกมมาคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์ปริมาณ 150 ส่วนโดยร้อยละเมื่อเทียบกับยาง ทดสอบด้วยรังสีแกมมาที่พลังงาน 662 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ มีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเชิงมวลที่พลังงานเท่ากับ 0.0989 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม ความหนาครึ่งค่า 3.5816 เซนติเมตร และคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์ปริมาณ 150 ส่วนโดยร้อยละเมื่อเทียบกับยางที่มีความหนา 13 เซนติเมตรสามารถลดทอนรังสีแกมมาได้เทียบเท่ากับตะกั่วหนา 2.0093 มิลลิเมตร และสมบัติการลดทอนรังสีเอ็กซ์คอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์ปริมาณ 150 ส่วนโดยร้อยละเมื่อเทียบกับยาง ทดสอบด้วยรังสีเอ็กซ์ที่พลังงาน 120 กิโลโวลต์สูงสุดมีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเชิงเส้นเท่ากับ 4.2311 ต่อเซนติเมตร ความหนาครึ่งค่าเท่ากับ 0.1637 เซนติเมตร และคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์ปริมาณ 150 ส่วนโดยร้อยละเมื่อเทียบกับยางที่มีความหนา 13 เซนติเมตรสามารถลดทอนรังสีเอ็กซ์ได้เทียบเท่ากับตะกั่วหนา 1.3401 มิลลิเมตร และเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับวัสดุกำบังรังสีชนิดอื่นพบว่า คอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์ปริมาณ 150 ส่วนโดย

ร้อยละเมื่อเทียบกับยางสามารถกำบังรังสีได้ดีกว่าวัสดุทุกชนิดที่นำมาเปรียบเทียบ และคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่เตรียมได้เมื่อผ่านการฉายรังสีจะมีความต้านทานต่อแรงดึงเพิ่มขึ้น โดยคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์ปริมาณ 150 ส่วนโดยร้อยละเมื่อเทียบกับยาง เมื่อผ่านการฉายรังสีแกมมาที่พลังงาน 662 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ซ้ำกัน 10 ครั้งมีความต้านทานต่อแรงดึงเท่ากับ 22.42 เมกะพาสคัล และ 20 ครั้งมีค่าความต้านทานต่อแรงดึงเท่ากับ 22.69 เมกะพาสคัล

นอกจากปริมาณของสารตัวเติมสำหรับการกำบังรังสีจะมีผลต่อสมบัติของคอมโพสิตของยางธรรมชาติแล้ว งานวิจัยนี้ยังสนใจที่จะศึกษาชนิดของสารตัวเติมสำหรับการกำบังรังสีที่มีชนิดต่างกัน ซึ่งปัจจัยดังกล่าวอาจส่งผลต่อสมบัติเชิงกล และสมบัติการลดทอน หรือกำบังรังสีของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่เตรียมได้

4.2 ผลของการเตรียมสูตรยางธรรมชาติผสมสารตัวเติมสำหรับการกำบังรังสีที่ปริมาณ 150 ส่วนโดยร้อยละเมื่อเทียบกับยาง โดยมีการแปรชนิดของสารตัวเติมสำหรับการกำบังรังสี

ชนิดของสารตัวเติมสำหรับการกำบังรังสีที่นำมาศึกษาได้แก่ แบเรียมคาร์บอเนต ($BaCO_3$; BC) แบเรียมซัลเฟต ($BaSO_4$; BS) และบิสมัทออกไซด์ (Bi_2O_3; BO) โดยสารตัวเติมสำหรับการกำบังรังสีแต่ละชนิดจะมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันซึ่งจะส่งผลโดยตรงต่อสมบัติของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่เตรียมได้

4.2.1 ผลของการแปรชนิดของสารตัวเติมสำหรับการกำบังรังสีต่อระยะเวลาในการคงรูปของคอมโพสิตของยางธรรมชาติ

ระยะเวลาในการคงรูปของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการแปรชนิดของโลหะออกไซด์ที่แตกต่างกันแสดงในตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 ระยะเวลาในการคงรูปยางของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีชนิดของสารตัวเติมสำหรับการกำบังรังสีที่แตกต่างกัน

Types of radiation shielding fillers	Cure time; t_{c90} (min)
BC	7.10
BO	6.22
BS	7.37

จากตารางที่ 4.10 แสดงระยะเวลาในการคงรูปยางหรือ t_{c90} ของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีชนิดของโลหะออกไซด์ที่แตกต่างกันพบว่า คอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์ใช้เวลาในการคงรูปยางน้อยที่สุด เมื่อเทียบกับคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมแบเรียมคาร์บอเนต และคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมแบเรียมซัลเฟตอย่างที่กล่าวไปในหัวข้อที่ 4.1.1 แล้วว่า บิสมัทออกไซด์จัดเป็นโลหะออกไซด์นอกจากจะเป็นสารที่ใช้ในการกำบังรังสีแล้วยังทำหน้าที่เป็นสารกระตุ้นสารตัวเร่งส่งผลให้สารตัวเร่งสามารถเร่งการเกิดปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ระหว่างกำมะถัน และสายโซ่โมเลกุลของยางได้เร็วขึ้นซึ่งผลการทดลองนี้มีความสอดคล้องกับผลการทดลองปริมาณการเชื่อมขวางของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่แสดงในตารางที่ 4.11

4.2.2 ผลของการแปรชนิดของสารตัวเติมสำหรับการกำบังรังสีต่อปริมาณการเชื่อมขวางของคอมโพสิตของยางธรรมชาติ

ปริมาณการเชื่อมขวางที่เกิดขึ้นในยางธรรมชาติ นอกจากจะขึ้นอยู่กับปริมาณกำมะถัน ชนิดของสารตัวเร่ง ยังขึ้นอยู่กับชนิดของสารกระตุ้นที่ใส่เข้าไปในยางด้วย เนื่องจากสารกระตุ้นจะทำหน้าที่เร่งสารตัวเร่งให้ทำหน้าที่ได้เร็วขึ้น ผลการทดลองปริมาณการเชื่อมขวางของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีชนิดของสารตัวเติมสำหรับการกำบังรังสีที่แตกต่างกันแสดงในตารางที่ 4.11

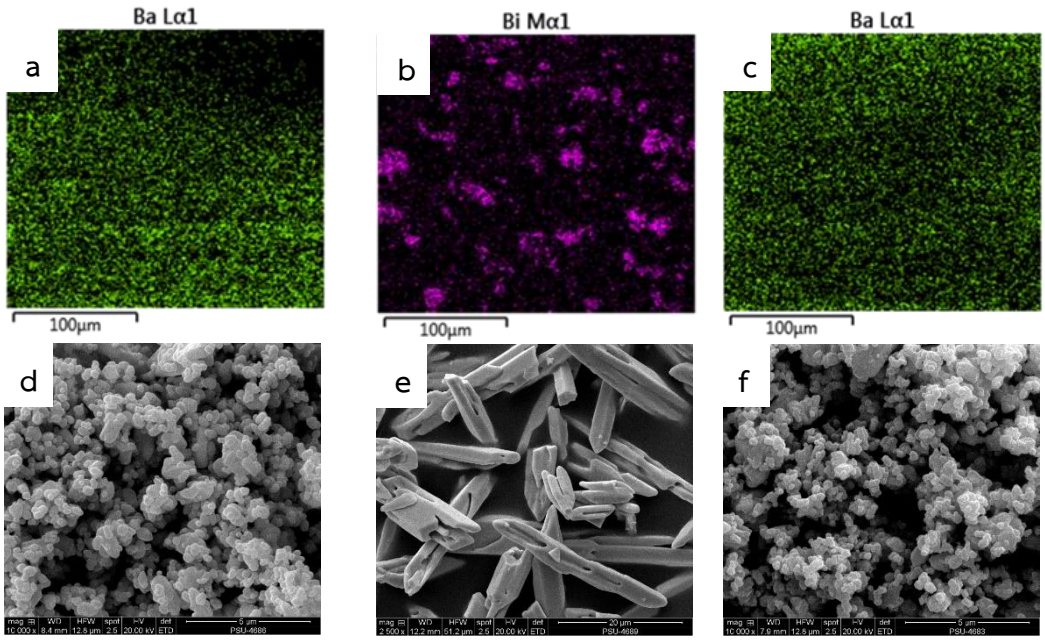
ตารางที่ 4.11 ปริมาณการเชื่อมขวางของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีชนิดของสารตัวเติมสำหรับการกำบังรังสีที่แตกต่างกัน

Types of radiation shielding fillers	Crosslink density ($x10^{-3}$ g/cm^3)
BC	1.58 ±0.00022
BO	2.63 ±0.00011
BS	1.46 ±0.00012

ตารางที่ 4.11 แสดงปริมาณการเชื่อมขวางของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีชนิดของสารตัวเติมสำหรับการกำบังรังสีที่แตกต่างกันจะเห็นได้ว่า คอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์ให้ปริมาณการเชื่อมขวางสูงกว่าคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมแบเรียมคาร์บอเนต และคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมแบเรียมซัลเฟต เนื่องจากบิสมัทออกไซด์ทำหน้าที่เป็นสารกระตุ้น ทำให้ตัวเร่งเร่งสารกำมะถันให้เกิดปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์เร็วขึ้น การเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่โมเลกุลของยางจึงเกิดได้มากขึ้นเช่นกัน ซึ่งจะส่งผลดีต่อสมบัติเชิงกลของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่เตรียมได้

4.2.3 ผลของการแปรชนิดของสารตัวเติมสำหรับการกำบังรังสีต่อการกระจายตัว และปริมาณการกระจายตัวของธาตุในคอมโพสิตของยางธรรมชาติ

ทดสอบการกระจายตัว และลักษณะทางสัณฐานวิทยาของโลหะออกไซด์ที่เติมลงในยางธรรมชาติซึ่งผลการทดสอบการกระจายตัวที่ได้จากเทคนิคเอ็กซ์เรย์ ฟลูออเรสเซ็นต์แบบกระจายพลังงาน และสัณฐานวิทยา ทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยายที่ 1000x ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.17 และปริมาณการกระจายตัวของธาตุในคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่ได้จากการคำนวณตามสมการที่ (3.2) และ (3.3) แสดงในตารางที่ 4.12



รูปที่ 4.17 การกระจายตัว และสัณฐานวิทยาของสารตัวเติมสำหรับการกำบังรังสีในคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการแปรชนิดของสารตัวเติมสำหรับการกำบังรังสีที่แตกต่างกัน

a) คือ การกระจายตัวของแบเรียมในคอมโพสิตของยางธรรมชาติ

b) คือ การกระจายตัวของบิสมัทในคอมโพสิตของยางธรรมชาติ

c) คือ การกระจายตัวของแบเรียมในคอมโพสิตของยางธรรมชาติ

d) คือ สัณฐานวิทยาของแบเรียมคาร์บอเนต

e) คือ สัณฐานวิทยาของบิสมัทออกไซด์

f) คือ สัณฐานวิทยาของแบเรียมซัลเฟต

ตารางที่ 4.12 ร้อยละปริมาณการกระจายตัวของธาตุในคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการแปรชนิดของสารตัวเติมสำหรับการกำบังรังสี

Elements	Types of radiation shielding fillers		
	BC	BO	BS
C	37.998	34.480	34.480
H	4.634	4.634	4.634
O	14.482	6.376	16.272
Zn	1.548	1.548	1.548
Bi	-	51.849	-
Ba	40.226	-	34.012
N	0.045	0.045	0.045
S	1.067	1.067	9.009

รูปที่ 4.17 แสดงการกระจายตัว และสัณฐานวิทยาของโลหะออกไซด์ในคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการแปรชนิดของโลหะออกไซด์ที่แตกต่างกันจากรูปจะเห็นได้ว่า คอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์เกิดการเกาะกลุ่มกันของบิสมัทออกไซด์ หรือเกิดการกระจายตัวที่ไม่ดี เนื่องจากบิสมัทออกไซด์มีลักษณะเป็นแท่งยาว มีขนาดอนุภาคที่ใหญ่กว่าแบเรียมคาร์บอเนต และแบเรียมซัลเฟต ส่งผลให้บิสมัทออกไซด์เกิดการกระจายตัวในยางธรรมชาติได้ไม่ดี เมื่อเปรียบเทียบกับคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมแบเรียมคาร์บอเนต และคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมแบเรียมซัลเฟต ซึ่งผลการทดลองนี้สอดคล้องกันกับงานวิจัยของ Y.H. Lee., et al., (2018)[58]

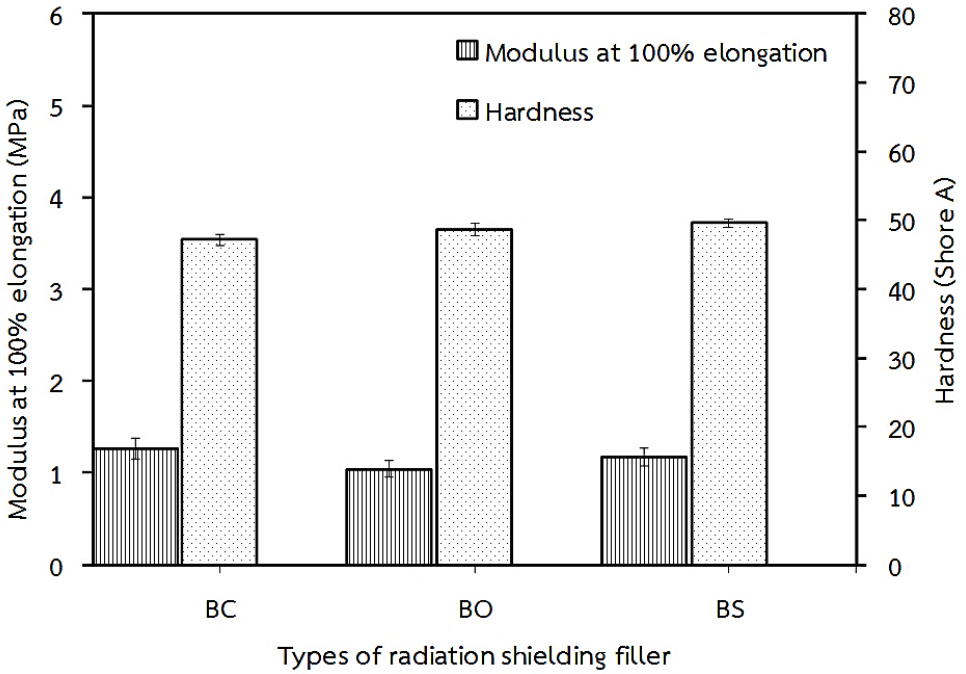
ตารางที่ 4.12 แสดงร้อยละปริมาณการกระจายตัวของธาตุในคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการแปรชนิดของโลหะออกไซด์ ทำการเปรียบเทียบธาตุที่เป็นส่วนสำคัญในการลดทอนรังสีได้แก่ ธาตุแบเรียม และบิสมัท จากตารางจะเห็นได้ว่า คอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์มีปริมาณของธาตุบิสมัทอยู่มากกว่าธาตุแบเรียมที่เป็นส่วนประกอบของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมแบเรียมคาร์บอเนต และคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมแบเรียมซัลเฟตซึ่งปริมาณของธาตุที่กระจายตัวอยู่ในคอมโพสิตของยางธรรมชาติอาจส่งผลต่อสมบัติในการลดทอนรังสีของคอมโพสิตของยางธรรมชาติ

4.2.4 ผลของการแปรชนิดของสารตัวเติมสำหรับการกำบังรังสีต่อสมบัติเชิงกลของคอมโพสิตของยางธรรมชาติ

สมบัติเชิงกลเป็นตัวบ่งชี้ความแข็งแรงของคอมโพสิตของยางธรรมชาติ เมื่อทำการเติมชนิดของสาร หรือปริมาณของสารที่เปลี่ยนแปลงไปจะส่งผลให้สมบัติเชิงกลเปลี่ยนไปเช่นกัน ผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างชนิดที่แตกต่างกันของสารตัวเติมสำหรับการกำบังรังสีในคอมโพสิตของยางธรรมชาติต่อสมบัติเชิงกลแสดงในตารางที่ 4.13-4.15 และรูปที่ 4.18-4.20

ตารางที่ 4.13 มอดูลัสที่ระยะยืด 100 % และความแข็งของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการแปรชนิดของสารตัวเติมสำหรับการกำบังรังสีที่แตกต่างกัน

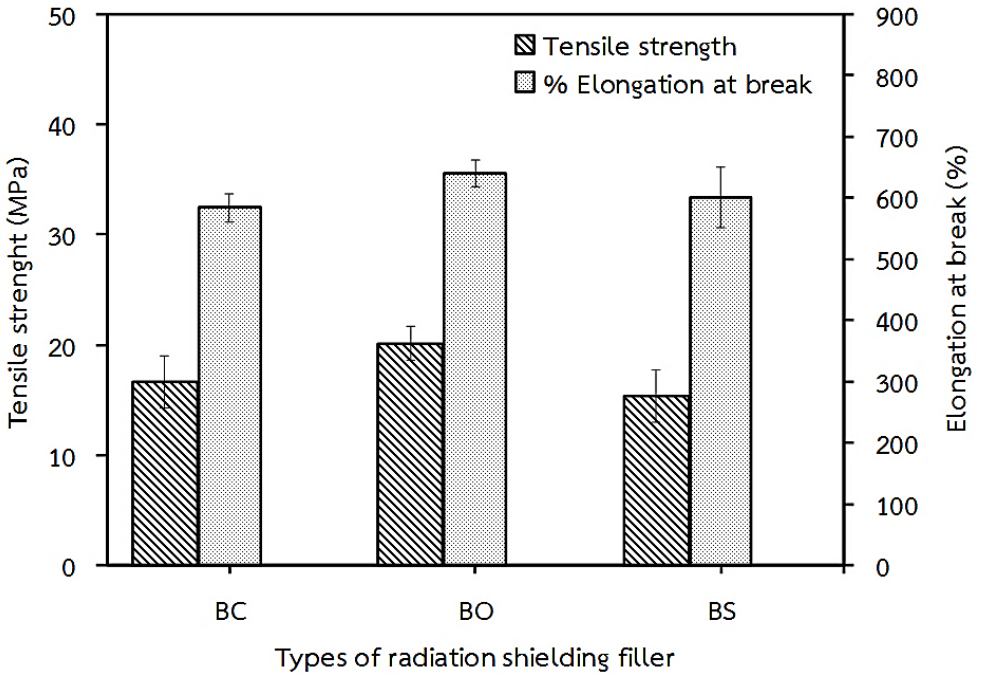
Types of radiation shielding fillers	Modulus at 100% elongation (MPa)	Hardness (Shore A)
BC	1.26 ±0.11	47.20 ±0.84
BO	1.04 ±0.09	48.60 ±0.89
BS	1.17 ±0.10	49.60 ±0.55



รูปที่ 4.18 มอดูลัสที่ระยะยืด 100% และความแข็งของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการแปรชนิดของสารตัวเติมสำหรับการกำบังรังสีที่แตกต่างกัน

ตารางที่ 4.14 ความต้านทานต่อแรงดึง และระยะยืด ณ จุดขาด ของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการแปรชนิดของสารตัวเติมสำหรับการกำบังรังสีที่แตกต่างกัน

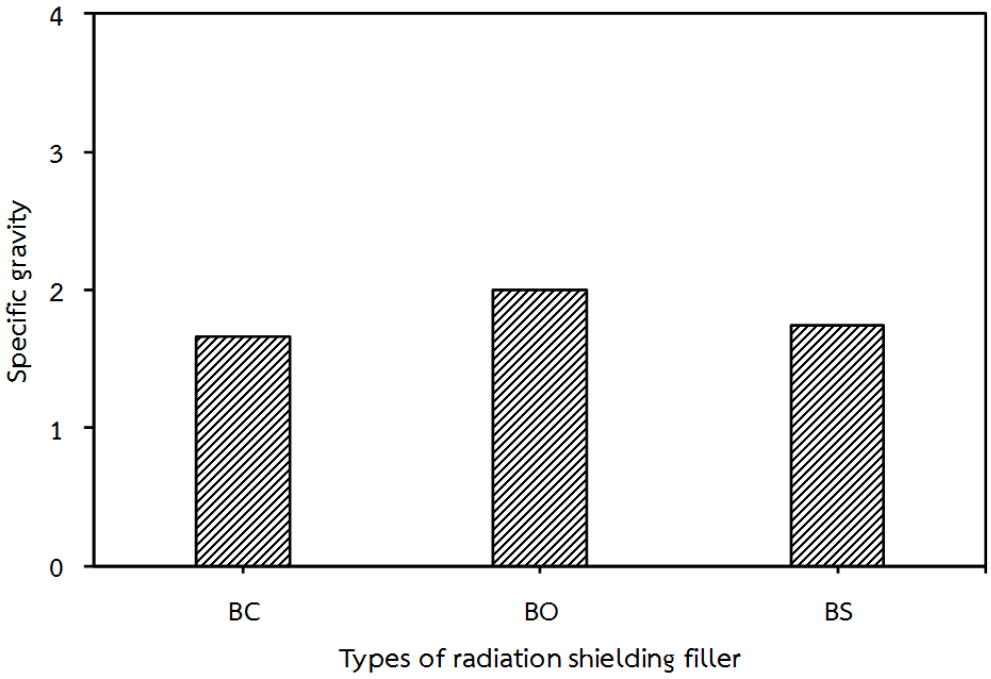
Types of radiation shielding fillers	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)
BC	16.60 ±2.34	584 ±23
BO	20.13 ±1.54	640 ±22
BS	15.33 ±2.37	600 ±50



รูปที่ 4.19 ความต้านทานต่อแรงดึง และระยะยืด ณ จุดขาดของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการแปรชนิดของสารตัวเติมสำหรับการกำบังรังสีที่แตกต่างกัน

ตารางที่ 4.15 ความถ่วงจำเพาะของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการแปรชนิดของสารตัวเติมสำหรับการกำบังรังสีที่แตกต่างกัน

Types of radiation shielding fillers	Specific gravity
BC	1.665 ±0.005
BO	2.004 ±0.005
BS	1.745±0.005



รูปที่ 4.20 ความถ่วงจำเพาะของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการแปรชนิดของสารตัวเติมสำหรับการกำบังรังสีที่แตกต่างกัน

ตารางที่ 4.13 และรูปที่ 4.18 แสดงมอดูลัสที่ระยะยืด 100% และความแข็งของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการแปรชนิดของสารตัวเติมสำหรับการกำบังรังสีที่แตกต่างกันจะเห็นได้ว่า คอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมแบเรียมคาร์บอเนต คอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์ และคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมแบเรียมซัลเฟตให้ค่ามอดูลัสที่ระยะยืด 100% และความแข็งที่ไม่ต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากแบเรียมคาร์บอเนต บิสมัทออกไซด์ และแบเรียมซัลเฟตเป็นอนุภาคของแข็งที่เติมลงในยางธรรมชาติปริมาณที่เท่ากันคือ 150 ส่วนโดยร้อยละเมื่อเทียบกับยาง

อย่างไรก็ตามความต้านทานต่อแรงดึง และระยะยืด ณ จุดขาดของคอมโพสิตของยางธรรมชาติแสดงในตารางที่ 4.14 และรูปที่ 4.19 พบว่า คอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัท

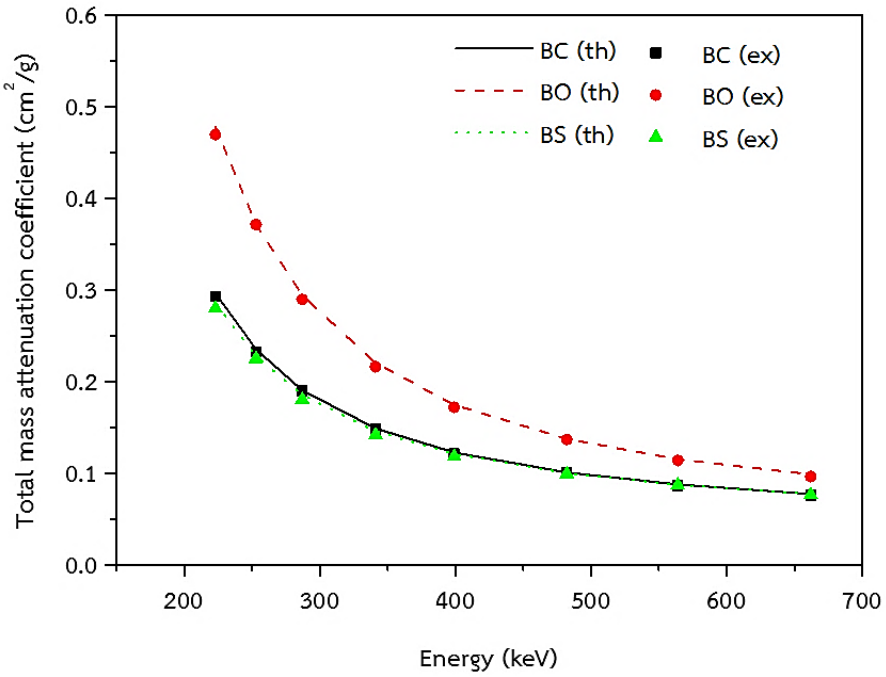
ออกไซด์ให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงสูงกว่าคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมแบเรียมคาร์บอเนต และคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมแบเรียมซัลเฟต เนื่องจากมีปริมาณการเชื่อมขวางของสายโซ่โมเลกุลยางมากกว่าสังเกตได้จากตารางที่ 4.11 โดยจุดเชื่อมขวางที่เกิดขึ้นจะทำหน้าที่เป็นจุดที่ตรึงสายโซ่โมเลกุลยางซึ่งเป็นการจำกัดการเคลื่อนที่ของสายโซ่โมเลกุลยางส่งผลให้สายโซ่โมเลกุลยางเกิดการเคลื่อนที่ หรือเกิดการเคลื่อนไหวได้ยากขึ้นจึงต้องใช้แรงดึงสูงขึ้นเพื่อให้สายโซ่โมเลกุลยางเกิดการขาดออกจากกัน

ผลการทดลองความถ่วงจำเพาะแสดงในตารางที่ 4.15 และรูปที่ 4.20 จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า คอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์ให้ค่าความถ่วงจำเพาะสูงกว่ายางธรรมชาติที่มีการเติมแบเรียมคาร์บอเนต และคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมแบเรียมซัลเฟต เนื่องจากบิสมัทออกไซด์มีความถ่วงจำเพาะที่สูงกว่าทั้งแบเรียมคาร์บอเนต และแบเรียมซัลเฟต (ความถ่วงจำเพาะของบิสมัทออกไซด์เท่ากับ 8.9 ความถ่วงจำเพาะของแบเรียมคาร์บอเนตเท่ากับ 4.30[59] และความถ่วงจำเพาะของแบเรียมซัลเฟตเท่ากับ 4.35[60])

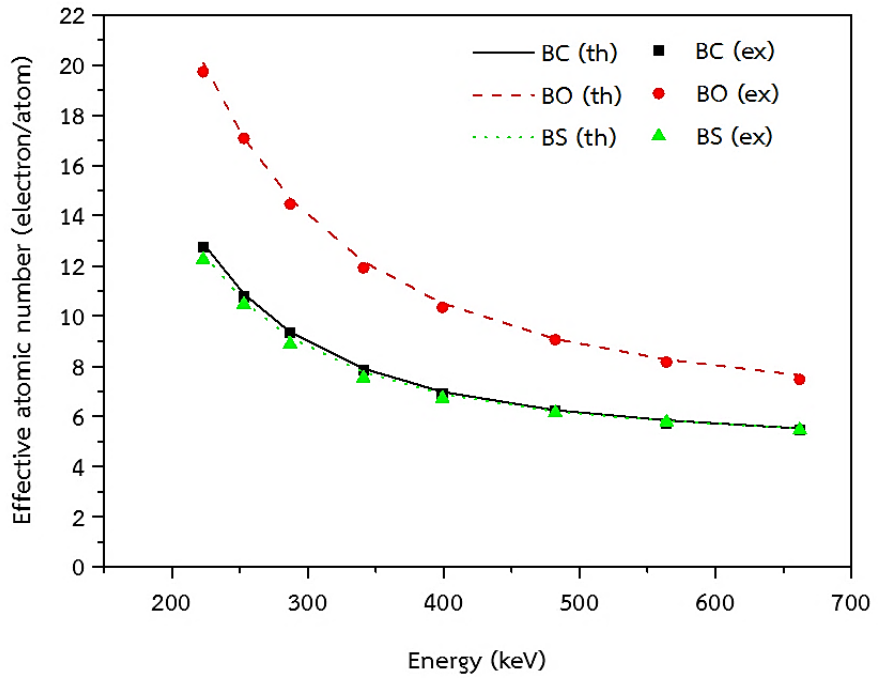
4.2.5 ผลของการแปรชนิดของสารตัวเติมสำหรับการกำบังรังสีต่อสมบัติการลดทอนรังสีของคอมโพสิตของยางธรรมชาติ

4.2.5.1 ผลของการแปรชนิดของสารตัวเติมสำหรับการกำบังรังสีต่อสมบัติการลดทอนรังสีแกมมา (Gamma ray attenuation) ของคอมโพสิตของยางธรรมชาติ

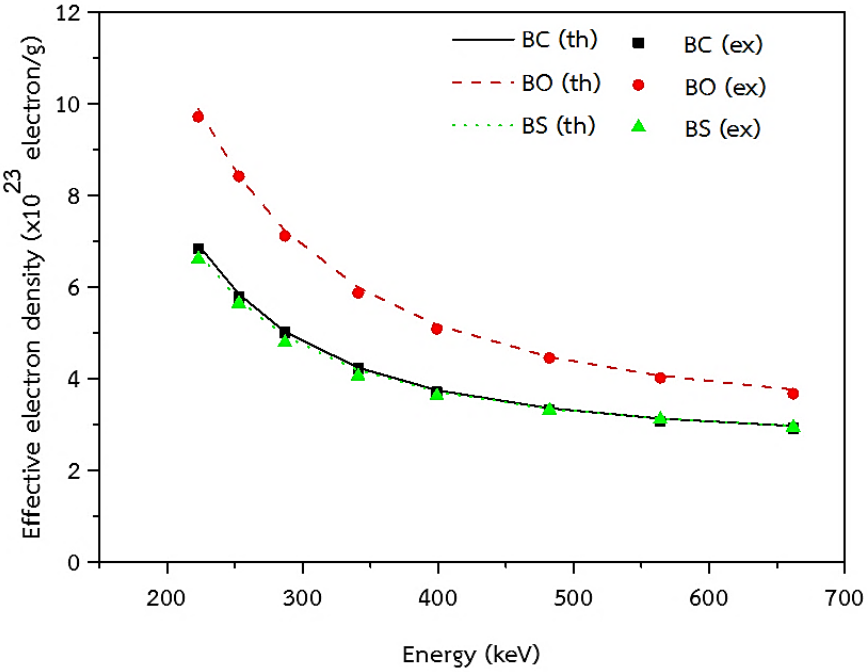
สารตัวเติมสำหรับการกำบังรังสีแต่ละชนิดมีเลขอะตอมที่แตกต่างกัน ซึ่งความแตกต่างของเลขอะตอมจะส่งผลต่อสมบัติการลดทอนรังสีโดยตรง ทำการทดสอบการลดทอนรังสีแกมมาที่พลังงานช่วง 223-662 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ผลการทดลองสมบัติการลดทอนรังสีแกมมาแสดงในรูปที่ 4.21 – 4.25



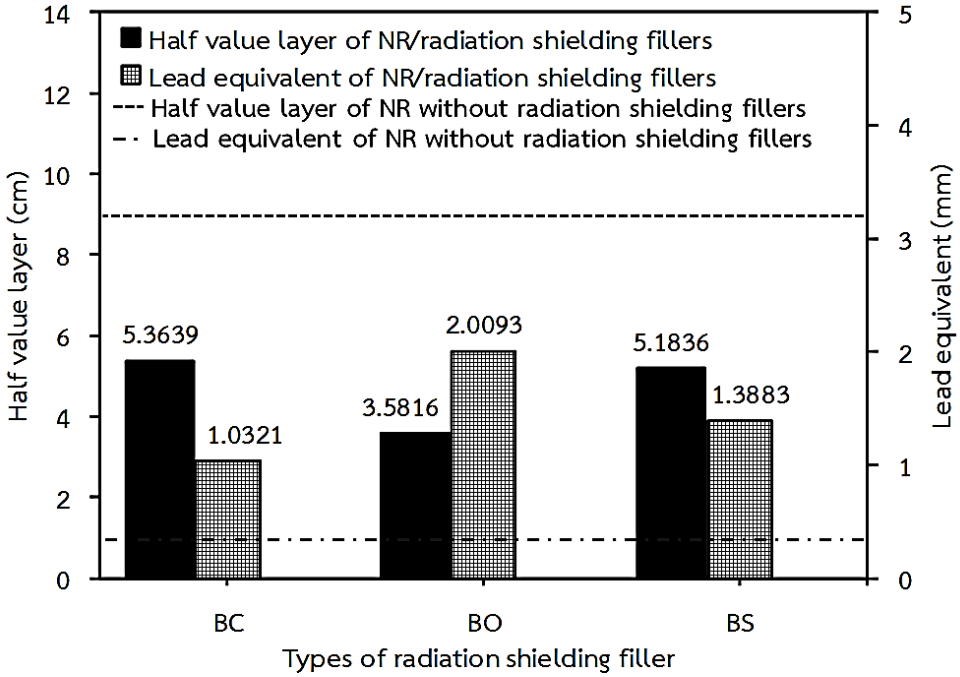
รูปที่ 4.21 สัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเชิงมวลของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการแปรชนิดของสารตัวเติมสำหรับการกำบังรังสีที่แตกต่างกัน ทดสอบด้วยรังสีแกมมาที่พลังงาน 223-662 keV



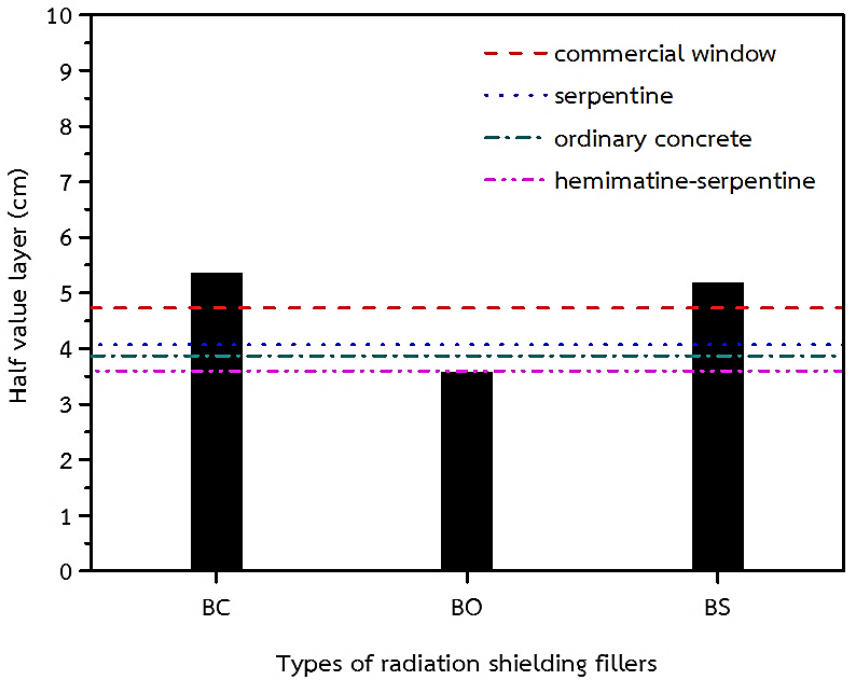
รูปที่ 4.22 เลขอะตอมยังผลของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการแปรชนิดของสารตัวเติมสำหรับการกำบังรังสีที่แตกต่างกัน ทดสอบด้วยรังสีแกมมาที่พลังงาน 223-662 keV



รูปที่ 4.23 ความหนาแน่นอิเล็กตรอนของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการแปรชนิดของสารตัวเติมสำหรับการกำบังรังสีที่แตกต่างกัน ทดสอบด้วยรังสีแกมมาที่พลังงาน 223-662 keV



รูปที่ 4.24 ความหนาครึ่งค่า และความหนาเทียบเท่าตะกั่วของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการแปรชนิดของสารตัวเติมสำหรับการกำบังรังสีที่แตกต่างกัน ทดสอบด้วยรังสีแกมมาที่พลังงาน 662 keV



รูปที่ 4.25 เปรียบเทียบความหนาครึ่งค่าของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีชนิดของสารตัวเติมสำหรับการกำบังรังสีที่แตกต่างกันกับกระจกเชิงพาณิชย์ เซอร์เพนไทน์ คอนกรีต และเฮมาไทต์-เซอร์เพนไทน์[43] ทดสอบด้วยรังสีแกมมาที่พลังงาน 662 keV

รูปที่ 4.21 แสดงสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเชิงมวลของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการแปรชนิดของสารตัวเติมสำหรับการกำบังรังสีที่แตกต่างกันทำการทดสอบด้วยรังสีแกมมาที่มีพลังงานระหว่าง 223-662 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์พบว่า คอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์ให้ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเชิงมวลมากที่สุด เมื่อเทียบกับยางธรรมชาติที่มีการเติมแบเรียมคาร์บอเนต และคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมแบเรียมซัลเฟตซึ่งยางธรรมชาติที่มีการเติมแบเรียมคาร์บอเนต และคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมแบเรียมซัลเฟตให้ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเชิงมวลที่ใกล้เคียงกันแสดงให้ทราบว่า คอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์สามารถลดทอนรังสีแกมมาได้ดีกว่าคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมแบเรียมคาร์บอเนต และแบเรียมซัลเฟต ทั้งนี้เป็นผลมาจากเลขอะตอม โดยบิสมัทออกไซด์มีส่วนประกอบของธาตุบิทมัส (Bi) ที่มีเลขอะตอมสูงกว่าแบเรียม (Ba) ซึ่งเป็นธาตุที่เป็นส่วนประกอบของแบเรียมคาร์บอเนต และแบเรียมซัลเฟต (เลขอะตอมของบิสมัทเท่ากับ 83 และเลขอะตอมของแบเรียมเท่ากับ 56) อย่างที่กล่าวไปข้างต้นว่า คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีพลังงานสูงสามารถถูกดูดกลืนได้ด้วยธาตุที่มีเลขอะตอมที่สูง เนื่องจากเลขอะตอมเป็นตัวเลขที่บ่งบอกถึงปริมาณของอิเล็กตรอนในอะตอมที่สามารถเกิดปฏิกิริยากับรังสี หรือโฟตอน และทำให้อะตอมเกิดการดูดกลืนรังสี โดยรังสีที่ผ่านออกมาจะมีความเข้มข้น หรือพลังงานที่ลดลงไปจากรังสีเดิม

ปริมาณของอิเล็กตรอนในอะตอมของคอมโพสิตของยางธรรมชาติ สามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 4.22 จะเห็นได้ว่า คอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์ให้ค่าเลขอะตอมยังผลมากกว่าคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมแบเรียมคาร์บอเนต และคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมแบเรียมซัลเฟตแสดงว่า คอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์มีปริมาณอิเล็กตรอนในอะตอมมากกว่ามีโอกาสเกิดปฏิกิริยากับรังสีได้มากกว่า และเกิดการดูดกลืนรังสีได้มากกว่าเช่นกันซึ่งผลการทดลองนี้สอดคล้องกับผลการทดลองในรูปที่ 4.23 แสดงความหนาแน่นอิเล็กตรอนของคอมโพสิตของยางธรรมชาติจะสังเกตได้ว่า คอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์ให้ค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอนที่มากกว่าคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมแบเรียมคาร์บอเนต และคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมแบเรียมซัลเฟต โดยผลทดลองทั้งสามผลการทดลองสามารถยืนยันได้ว่า คอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์สามารถลดทอนรังสีแกมมาได้ดีกว่าคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมแบเรียมคาร์บอเนต และคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมแบเรียมซัลเฟต นอกจากนี้ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเชิงมวล ค่าอะตอมยังผล และค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอนที่ได้จากการทดลอง (ex) มีค่าใกล้เคียงกับค่าทางทฤษฎี (th) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากโปรแกรม WinXCom สามารถยืนยันได้ว่าผลการทดลองที่ได้มีความแม่นยำ และถูกต้องตรงตามทฤษฎี

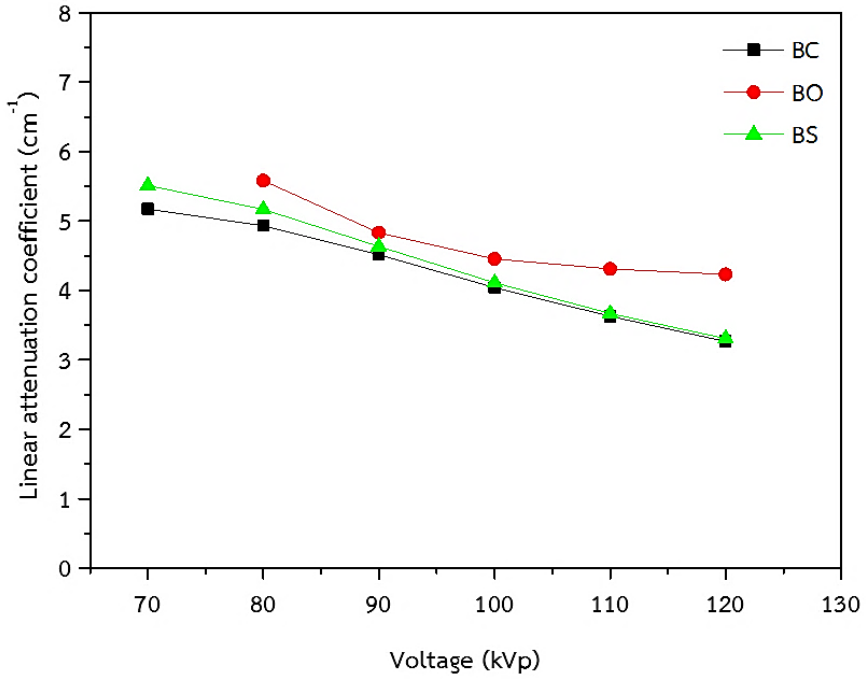
รูปที่ 4.24 แสดงความหนาครึ่งค่า และความหนาเทียบเท่าตะกั่วของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการแปรชนิดของสารตัวเติมสำหรับกำบังรังสีที่แตกต่างกัน ทดสอบด้วยรังสีแกมมาที่พลังงาน 662 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์จากผลการทดลองพบว่า ยางธรรมชาติที่ไม่มีการเติมสารตัวเติมสำหรับการกำบังรังสี (NR without radiation shielding fillers) มีค่าความหนาครึ่งค่าที่สูงกว่าคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมสารตัวเติมสำหรับการกำบังรังสี และมีค่าความหนาเทียบเท่าตะกั่วน้อยกว่าคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมสารตัวเติมสำหรับการกำบังรังสีแสดงให้ทราบว่า เมื่อเติมสารตัวเติมสำหรับกำบังรังสีลงในยางธรรมชาติส่งผลให้ยางธรรมชาติสามารถลดทอนปริมาณ หรือกำบังรังสีแกมมาได้ดีขึ้น และคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์ให้ค่าความหนาครึ่งค่าของคอมโพสิตของยางธรรมชาติมากกว่าคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมแบเรียมคาร์บอเนต และคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมแบเรียมซัลเฟตหมายความว่า คอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์สามารถลดทอนปริมาณรังสีแกมมาได้ครึ่งหนึ่งจากรังสีเดิมโดยคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์มีความหนาน้อยกว่าคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมแบเรียมคาร์บอเนต และคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมแบเรียมซัลเฟต ส่วนค่าความหนาเทียบเท่าตะกั่วคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์สามารถลดทอนรังสีแกมมาได้เทียบเท่ากับตะกั่วที่มีความหนาประมาณ 2 มิลลิเมตร ในขณะที่คอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมแบเรียมคาร์บอเนต และคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมแบเรียม

ซัลเฟตสามารถลดทอนรังสีแกมมาได้เทียบเท่ากับตะกั่วหนาประมาณ 1.5 มิลลิเมตร โดยการทดสอบหาค่าความหนาครึ่งค่ามีการกำหนดความหนาของคอมโพสิตของยางธรรมชาติเท่ากันคือ 13 มิลลิเมตรแสดงว่า คอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์สามารถลดทอนรังสีแกมมาได้ดีกว่าคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมแบเรียมคาร์บอเนต และคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมแบเรียมซัลเฟต

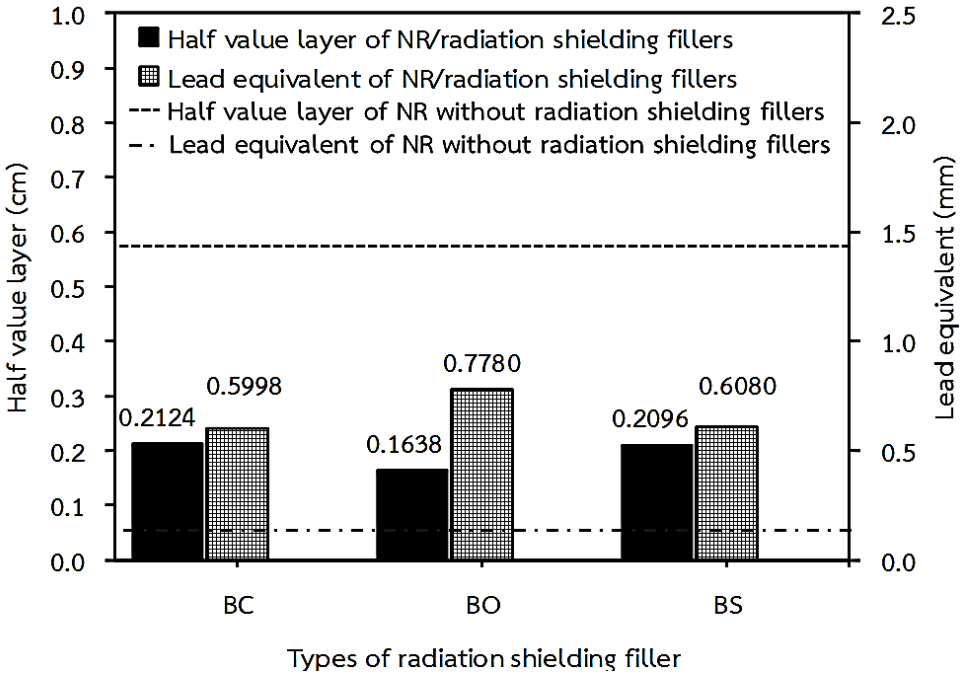
เมื่อนำคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมแบเรียมคาร์บอเนต บิสมัทออกไซด์ และแบเรียมซัลเฟตปริมาณ 150 ส่วนโดยร้อยละเมื่อเทียบกับยาง เปรียบเทียบกับวัสดุกำบังรังสีแกมมาได้แก่ กระจกเชิงพาณิชย์ เซอร์เพนไทน์ คอนกรีต และเฮมาไทต์-เซอร์เพนไทน์ ดังรูปที่ 4.25 ซึ่งทำการทดลองที่พลังงาน 662 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ จากรูปจะเห็นได้ว่า คอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์มีค่าความหนาครึ่งค่าน้อยกว่าวัสดุกำบังรังสีแกมมาทั้งหมดที่นำมาเปรียบเทียบนั่นแสดงว่า คอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์สามารถกำบังรังสีแกมมาได้ดีกว่าวัสดุกำบังรังสีแกมมาทั้งหมดที่นำมาเปรียบเทียบ ในขณะเดียวกันคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมแบเรียมคาร์บอเนต และคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมแบเรียมซัลเฟตมีค่าความหนาครึ่งค่าที่สูงกว่าวัสดุกำบังรังสีแกมมาทั้งหมดที่นำมาเปรียบเทียบแสดงว่า คอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมแบเรียมคาร์บอเนต และแบเรียมซัลเฟตสามารถกำบังรังสีได้น้อยกว่าวัสดุกำบังรังสีแกมมาทั้งหมดที่นำมาเปรียบเทียบ ดังนั้นคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์เหมาะสมที่สุดที่จะนำมาผลิตเป็นวัสดุกำบังรังสีแกมมาที่มีความยืดหยุ่น และปลอดตะกั่ว

4.2.5.2 ผลของการแปรชนิดของสารตัวเติมสำหรับการกำบังรังสีต่อสมบัติการลดทอนรังสีเอ็กซ์ (X-ray attenuation) ของคอมโพสิตของยางธรรมชาติ

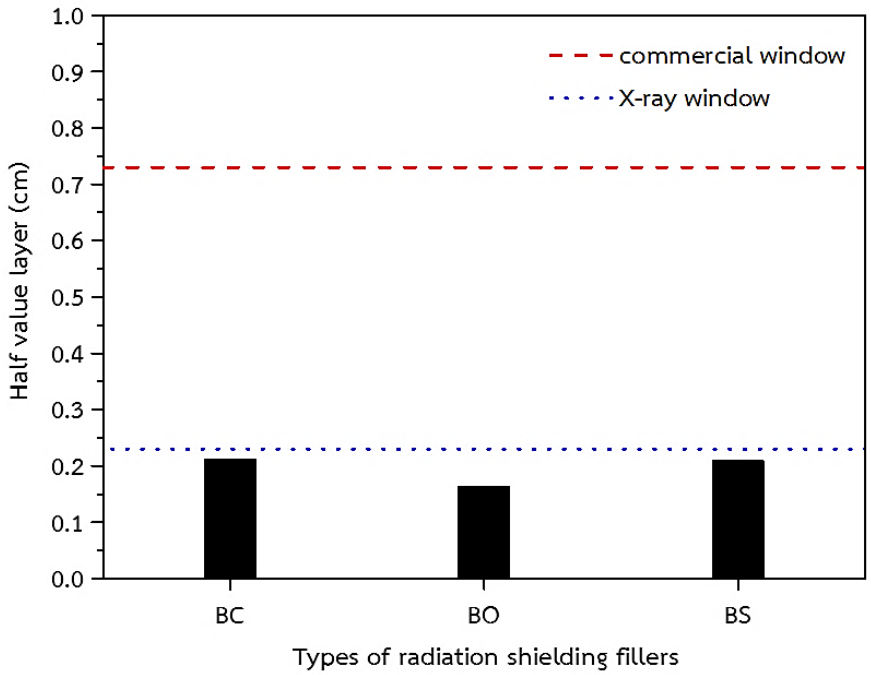
ผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างการแปรชนิดของสารตัวเติมสำหรับการกำบังรังสีในคอมโพสิตของยางธรรมชาติต่อความสามารถในการลดทอนรังสีเอ็กซ์แสดงในรูปที่ 4.26-4.28



รูปที่ 4.26 สัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเชิงเส้นของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการแปรชนิดของสารตัวเติมสำหรับการกำบังรังสีที่แตกต่างกัน ทดสอบรังสีด้วยเอ็กซ์ที่พลังงาน 50–120 kVp



รูปที่ 4.27 ความหนาครึ่งค่า และความหนาเทียบเท่าตะกั่วของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการแปรชนิดของสารตัวเติมสำหรับการกำบังรังสีที่แตกต่างกัน ทดสอบด้วยรังสีเอ็กซ์ที่พลังงาน 120 kVp



รูปที่ 4.28 เปรียบเทียบความหนาครึ่งค่าของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการแปรชนิดของสารตัวเติมสำหรับการกำบังรังสีที่แตกต่างกันกับกระจกเชิงพาณิชย์ และกระจกกำบังรังสีเอ็กซ์ ทดสอบด้วยรังสีเอ็กซ์ที่พลังงาน 120 kVp

รูปที่ 4.26 แสดงสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเชิงเส้นของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการแปรชนิดของสารตัวเติมสำหรับการกำบังรังสีที่แตกต่างกัน ทำการทดสอบรังสีเอ็กซ์ที่พลังงานในช่วง 50 – 120 กิโลโวลต์สูงสุดจะเห็นได้ว่า คอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมแบเรียมคาร์บอเนต บิสมัทออกไซด์ และแบเรียมคาร์บอเนต แนวโน้มของผลการทดลองเช่นเดียวกับการทดลองการลดทอนรังสีแกมมากล่าวคือ คอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์ให้ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเชิงเส้นมากกว่าคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมแบเรียมคาร์บอเนต และคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมแบเรียมซัลเฟตแสดงว่า คอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์สามารถลดทอนรังสีเอ็กซ์ได้ดีที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมแบเรียมคาร์บอเนต และคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมแบเรียมซัลเฟต เนื่องจากบิสมัทออกไซด์มีส่วนประกอบของบิสมัทซึ่งมีเลขอะตอมมากกว่าแบเรียมที่เป็นส่วนประกอบของแบเรียมคาร์บอเนต และแบเรียมซัลเฟตซึ่งรังสีเอ็กซ์จัดเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีพลังงานสูงสามารถถูกดูดกลืนได้ดีด้วยธาตุที่มีเลขอะตอมสูงยิ่งธาตุที่มีเลขอะตอมสูงก็จะสามารถดูดกลืนพลังงาน หรือความเข้มของรังสีได้สูงขึ้นส่งผลให้เกิดการลดทอนรังสีเอ็กซ์ได้ดีขึ้นเช่นกัน

รูปที่ 4.27 แสดงความหนาครึ่งค่า และความหนาเทียบเท่าตะกั่วของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการแปรชนิดของสารตัวเติมสำหรับการกำบังรังสีที่แตกต่างกัน ทำการทดสอบด้วยรังสี

เอ็กซ์ที่พลังงานเท่ากับ 120 กิโลโวลต์สูงสุดจากผลการทดลองพบว่า ยางธรรมชาติที่ไม่มีการเติมสารตัวเติมสำหรับการกำบังรังสีมีค่าความหนาครึ่งค่ามากกว่า และมีค่าความหนาเทียบเท่าตะกั่วน้อยกว่าคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมสารตัวเติมสำหรับการกำบังรังสีแสดงให้ทราบว่า สารตัวเติมสำหรับการกำบังรังสีสามารถเพิ่มสมบัติการลดทอน หรือกำบังรังสีเอ็กซ์ให้กับยางธรรมชาติได้ เมื่อสังเกตคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีชนิดของสารตัวเติมสำหรับการกำบังรังสีที่แตกต่างกันพบว่า คอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์ให้ค่าความหนาครึ่งค่าน้อยกว่าคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมแบเรียมคาร์บอเนต และคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมแบเรียมซัลเฟตแสดงว่า คอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์มีความหนาน้อยที่สุดที่สามารถลดทอนปริมาณ หรือความเข้มรังสีเอ็กซ์ได้ครึ่งหนึ่งจากรังสีเดิม หรือกล่าวอีกอย่างหนึ่งคือ คอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์สามารถลดทอนรังสีเอ็กซ์ได้ดีกว่าคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมแบเรียมคาร์บอเนต และคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมแบเรียมซัลเฟต ในขณะที่คอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์ให้ค่าความหนาเทียบเท่าตะกั่วที่มากกว่าคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมแบเรียมคาร์บอเนต และคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมแบเรียมซัลเฟตแสดงว่า คอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีความหนา 13 มิลลิเมตรเท่ากัน คอมโพสิตของยางธรรมชาติที่เติมบิสมัทออกไซด์สามารถลดทอนรังสีเอ็กซ์ได้เทียบเท่ากับตะกั่วหนา 0.8 มิลลิเมตร ในขณะที่คอมโพสิตของยางธรรมชาติทีมีการเติมแบเรียมคาร์บอเนต และแบเรียมซัลเฟตสามารถลดทอนรังสีเอ็กซ์ได้เทียบเท่ากับตะกั่วหนา 0.6 มิลลิเมตร เป็นอีกหนึ่งผลการทดลองที่สามารถยืนยันได้ว่า คอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์สามารถลดทอนรังสีเอ็กซ์ได้ดีที่สุด

รูปที่ 4.28 แสดงการเปรียบเทียบคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการแปรชนิดของโลหะออกไซด์ที่แตกต่างกันกับวัสดุกำบังรังสีเอ็กซ์ได้แก่ กระจกเชิงพาณิชย์ และกระจกกำบังรังสีเอ็กซ์ พบว่า คอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมแบเรียมคาร์บอเนต บิสมัทออกไซด์ และแบเรียมซัลเฟตให้ค่าความหนาครึ่งค่าน้อยกว่าวัสดุกำบังรังสีเอ็กซ์ทั้งหมดที่นำมาเปรียบเทียบแสดงให้เห็นว่าคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมแบเรียมคาร์บอเนต บิสมัทออกไซด์ และแบเรียมซัลเฟตสามารถกำบังรังสีเอ็กซ์ได้ดีกว่าวัสดุกำบังรังสีเอ็กซ์ทั้งหมดที่นำมาเปรียบเทียบ

ดังนั้นบิสมัทออกไซด์เป็นชนิดของสารตัวเติมสำหรับการกำบังรังสีที่เหมาะสมที่สุดที่จะนำมาทำเป็นวัสดุกำบังรังสีปลอดตะกั่วที่มีความยืดหยุ่น โดยคอมโพสิตของยางธรรมชาติ ที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์มีค่ามอดูลัสที่ระยะยืด 100 % เท่ากับ 1.04 เมกะพาสคัล ความแข็งชอร์เอเท่ากับ 48.6 ความต้านทานต่อแรงดึงเท่ากับ 20.13 เมกะพาสคัล และระยะยืด ณ จุดขาดเท่ากับร้อยละ 640 ซึ่งมีสมบัติเชิงกลที่สูงมากพอที่จะนำมาผลิตเป็นวัสดุกำบังรังสี โดยคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์มีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมาเชิงมวลเท่ากับ 0.0989 ตาราง

เซนติเมตรต่อกรัม ความหนาครึ่งค่า 3.5816 เซนติเมตร คอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์ที่มีความหนา 13 เซนติเมตรสามารถลดทอนรังสีแกมมาได้เทียบเท่ากับตะกั่วหนา 2.0093 มิลลิเมตร และมีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเอ็กซ์เชิงเส้นเท่ากับ 4.2311 ต่อเซนติเมตร ความหนาครึ่งค่าเท่ากับ 0.1637 เซนติเมตร คอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์ที่มีความหนา 13 เซนติเมตร สามารถลดทอนรังสีเอ็กซ์ได้เทียบเท่ากับตะกั่วหนา 1.3401 มิลลิเมตร เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับวัสดุกำบังรังสีชนิดอื่นพบว่า คอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์สามารถกำบังรังสีแกมมาได้ดีกว่าวัสดุทุกชนิดที่นำมาเปรียบเทียบ และคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมสารตัวเติมสำหรับการกำบังรังสีทั้งสามชนิดสามารถกำบังรังสีเอ็กซ์ได้ดีกว่ากระจกกำบังรังสี และกระจกกำบังรังสีเอ็กซ์

4.3 ผลของการเตรียมยางธรรมชาติกำบังรังสี โดยมีการแปรชนิดของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์เป็นสารกำบังรังสี

ขั้นตอนนี้ศึกษาชนิดของยางธรรมชาติได้แก่ ยางธรรมชาติที่ไม่ผ่านการดัดแปรโมเลกุล (Natural rubber; NR; 0) ยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่มีอิพอกไซด์ร้อยละ 25 โดยโมล (Epoxides natural rubber 25; ENR 25; 25) และยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่มีอิพอกไซด์ร้อยละ 50 โดยโมล (Epoxides natural rubber 50; ENR 50; 50) โดยยางธรรมชาติอิพอกไซด์เป็นยางธรรมชาติที่ผ่านการสังเคราะห์ให้มีโครงสร้างคล้ายยางธรรมชาติที่ไม่ผ่านการดัดแปรโมเลกุลแต่มีบางส่วนตรงตำแหน่งพันธะคู่ที่ถูกเปลี่ยนเป็นวงแหวนอิพอกไซด์ทำให้ยางธรรมชาติชนิดนี้มีสมบัติเด่นกว่ายางธรรมชาติที่ไม่ผ่านการดัดแปรโมเลกุลในด้านของความทนทานต่อความร้อน และความทนทานต่อน้ำมัน เนื่องจากยางธรรมชาติอิพอกไซด์มีพันธะคู่ที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาลดลง อีกทั้งยังมีความเป็นขั้วมากขึ้นจากหมู่อิพอกไซด์ภายในสายโซ่โมเลกุล สำหรับตัวเลขที่ตามหลังคำว่า ยางธรรมชาติอิพอกไซด์เป็นตัวเลขที่บ่งบอกถึงปริมาณวงแหวนอิพอกไซด์ที่เกิดขึ้นภายในสายโซ่โมเลกุลยาง ในขั้นตอนนี้จะทำการเติมบิทมัสออกไซด์ปริมาณ 80 ส่วนโดยร้อยละเมื่อเทียบกับยางลงในยางธรรมชาติที่ไม่ผ่านการดัดแปรโมเลกุล เปรียบเทียบกับยางธรรมชาติที่ผ่านการดัดแปรเป็นยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่ระดับอิพอกไซด์ร้อยละ 25 และ 50 โดยมวล

4.3.1 ผลของการแปรชนิดของยางที่แตกต่างกัน ต่อระยะเวลาในการคงรูปของคอมโพสิตของยางธรรมชาติ ที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์เป็นสารกำบังรังสี

ระยะเวลาในการคงรูปของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการแปรชนิดของยางธรรมชาติที่แตกต่างกัน และเติมบิสมัทออกไซด์เป็นสารกำบังรังสี แสดงในตารางที่ 4.16

ตารางที่ 4.16 ระยะเวลาในการคงรูปยางของคอมโพสิตของยางธรรมชาติ โดยมีการแปรชนิดของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์เป็นสารกำบังรังสี

Epoxide contents (%)	Cure time; t_{c90} (min)
0	7.29
25	8.14
50	8.16

จากตารางที่ 4.16 แสดงระยะเวลาในการคงรูปยางของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีชนิดของยางธรรมชาติที่แตกต่างกันพบว่า คอมโพสิตของยางธรรมชาติที่ไม่ผ่านการดัดแปรโมเลกุลใช้เวลาในการคงรูปยางน้อยกว่าคอมโพสิตของยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่มีอิพอกไซด์ร้อยละ 25 โดยโมล และคอมโพสิตของยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่มีอิพอกไซด์ร้อยละ 50 โดยโมล เนื่องจากยางธรรมชาติที่

ไม่ผ่านการดัดแปรโมเลกุลมีพันธะคู่ภายในโครงสร้างมากกว่ายางธรรมชาติอิพอกไซด์ซึ่งพันธะคู่มีตำแหน่งว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยา สามารถเกิดปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์กับกำมะถันได้ดีจึงส่งผลให้คอมโพสิตของยางธรรมชาติที่ไม่ผ่านการดัดแปรโมเลกุลใช้เวลาน้อยในการ คงรูปยาง

4.3.2 ผลของการแปรชนิดของยางธรรมชาติที่แตกต่างกันต่อปริมาณการเชื่อมขวางของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์เป็นสารกำบังรังสี

ผลการทดลองปริมาณการเชื่อมขวางของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการแปรชนิดของยางธรรมชาติที่แตกต่างกันแสดงในตารางที่ 4.17

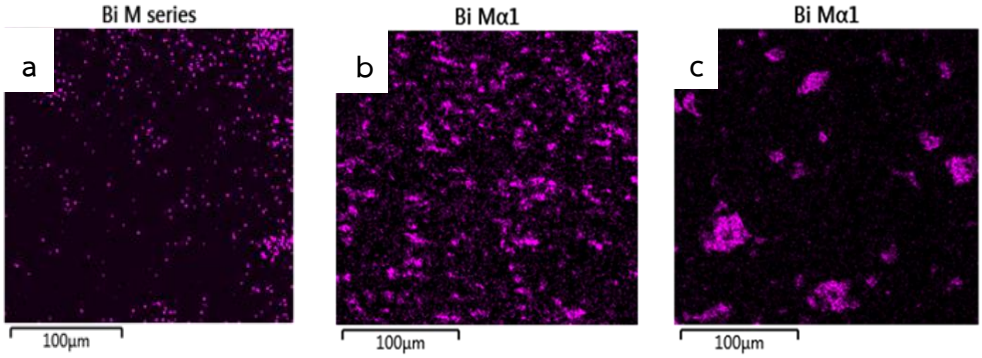
ตารางที่ 4.17 ปริมาณการเชื่อมขวางของคอมโพสิตของยางธรรมชาติ โดยมีการแปรชนิดของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์เป็นสารกำบังรังสี

Epoxide contents (%)	Crosslink density ($x10^{-3}$ cm^2/g)
0	1.23 ±0.00010
25	1.21 ±0.00020
50	1.15 ±0.00015

จากตารางที่ 4.17 แสดงปริมาณการเชื่อมขวางของคอมโพสิตของยางธรรมชาติจะเห็นได้ว่าคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่ไม่ผ่านการดัดแปรโมเลกุล คอมโพสิตของยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่มีอิพอกไซด์ร้อยละ 25 โดยโมล และคอมโพสิตของยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่มีอิพอกไซด์ร้อยละ 50 โดยโมลมีปริมาณการเชื่อมขวางที่ใกล้เคียงกัน เนื่องจากภายในระบบมีการเติมกำมะถัน สารตัวเร่งและสารกระตุ้นในปริมาณที่เท่ากัน ดังนั้นชนิดของยางไม่มีผลต่อการเพิ่ม หรือลดปริมาณการเชื่อมขวางของคอมโพสิตของยางธรรมชาติอย่างมีนัยสำคัญ

4.3.3 ผลของการแปรชนิดของยางที่แตกต่างกันต่อการกระจายตัว และปริมาณการกระจายตัวของบิสมัทออกไซด์ในคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์เป็นสารกำบังรังสี

การกระจายตัวของสารที่เติมลงในยางธรรมชาติจะกระจายตัวได้มากน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับชนิด และคุณสมบัติของสาร เช่น สารที่ไม่มีขั้วจะกระจายตัวได้ดีในยางที่ไม่มีขั้วกล่าวคือ สิ่งที่มีคุณสมบัติคล้ายกันจะสามารถเข้ากันได้ดี ผลการทดลองการกระจายตัวของบิสมัทออกไซด์ในยางธรรมชาติต่างชนิดกันแสดงในรูปที่ 4.29 และปริมาณการกระจายตัวของธาตุในคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการแปรชนิดของยางธรรมชาติจากการคำนวณตามสมการที่ (3.2) และ (3.3) แสดงในตารางที่ 4.18



รูปที่ 4.29 การกระจายตัวของบิสมัทในคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการแปรชนิดของยางธรรมชาติที่แตกต่างกัน a) คือ คอมโพสิตของยางธรรมชาติที่ไม่ผ่านการดัดแปรโมเลกุล b) คือ คอมโพสิตของยางธรรมชาติที่อิพอกไซด์ที่มีอิพอกไซด์ร้อยละ 25 และ c) คือ คอมโพสิตของยางธรรมชาติที่อิพอกไซด์ที่มีอิพอกไซด์ร้อยละ 50

ตารางที่ 4.18 ร้อยละปริมาณการกระจายตัวของธาตุในคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการแปรชนิดของยางธรรมชาติที่แตกต่างกัน

Elements	Epoxide contents (%)		
	0	25	50
C	47.217	47.190	47.190
H	6.345	6.200	6.200
O	4.927	5.100	5.100
Zn	2.120	2.120	2.120
Bi	37.868	37.868	37.868
N	0.062	0.062	0.062
S	1.461	1.461	1.461

รูปที่ 4.29 แสดงการกระจายตัวของบิสมัทออกไซด์ในคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการแปรชนิดของยางธรรมชาติที่แตกต่างกันจะเห็นได้ว่า คอมโพสิตของยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่มีอิพอกไซด์ร้อยละ 25 โดยโมลมีการกระจายตัวของบิสมัทออกไซด์ได้ดีกว่าคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่ไม่ผ่านการดัดแปรโมเลกุล และคอมโพสิตของยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่มีอิพอกไซด์ร้อยละ 50 โดยโมล อย่างที่กล่าวไปข้างต้นแล้วว่า ยางธรรมชาติอิพอกไซด์เป็นยางที่มีวงแหวนอิพอกไซด์ภายในโครงสร้างของสายโซ่โมเลกุลนั่นหมายความว่า ยางสังเคราะห์ชนิดนี้มีความเป็นขั้ว สามารถเข้ากันได้ดีกับบิสมัทออกไซด์ซึ่งจัดเป็นสารที่มีขั้วเช่นเดียวกัน ในทางกลับกันยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่มี

อิพอกไซด์ร้อยละ 50 โดยโมลก็จัดเป็นยางธรรมชาติที่ผ่านการดัดแปรโมเลกุลที่มีความเป็นขั้ว และความเป็นขั้วของยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่มีอิพอกไซด์ร้อยละ 50 โดยโมลยังสูงกว่ายางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่มีอิพอกไซด์ร้อยละ 25 โดยโมลอีกด้วยแต่บิสมัทออกไซด์กลับกระจายตัวในยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่มีอิพอกไซด์ร้อยละ 50 โดยโมลได้ต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับยางธรรมชาติที่ไม่ผ่านการดัดแปรโมเลกุล และยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่มีอิพอกไซด์ร้อยละ 25 โดยโมลเป็นผลมาจากเมื่อเกิดการดัดแปรโมเลกุลจะเกิดการตัดสายโซ่โมเลกุลของยางร่วมด้วย โดยการตัดสายโซ่โมเลกุลเกิดขึ้นจากการเปลี่ยนพันธะคู่ในยางธรรมชาติที่ไม่ผ่านการดัดแปรโมเลกุลเป็นวงแหวนอิพอกไซด์ทำให้สายโซ่โมเลกุลสั้นลงซึ่งส่งผลโดยตรงต่อความหนืดเริ่มต้นของยางหรือค่า P_0 ลดลง (ความหนืดเริ่มต้นของยางธรรมชาติที่ไม่ผ่านการดัดแปรโมเลกุลเท่ากับ 53.0 ยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่มีอิพอกไซด์ร้อยละ 25 เท่ากับ 21.3 และยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่มีอิพอกไซด์ร้อยละ 50 เท่ากับ 19.3) ส่งผลให้แรงเฉือนที่เกิดขึ้นภายในเครื่องผสมแบบปิดลดลงเช่นกัน การกระจายตัวของสารจึงเกิดได้ไม่ดีทำให้สารเกิดการเกาะกลุ่มกันเองมากกว่าที่จะกระจายตัวในเนื้อยางอย่างสม่ำเสมอ ซึ่งการกระจายตัวของสารจะส่งผลโดยตรงต่อสมบัติเชิงกลของคอมโพสิตของยางธรรมชาติ

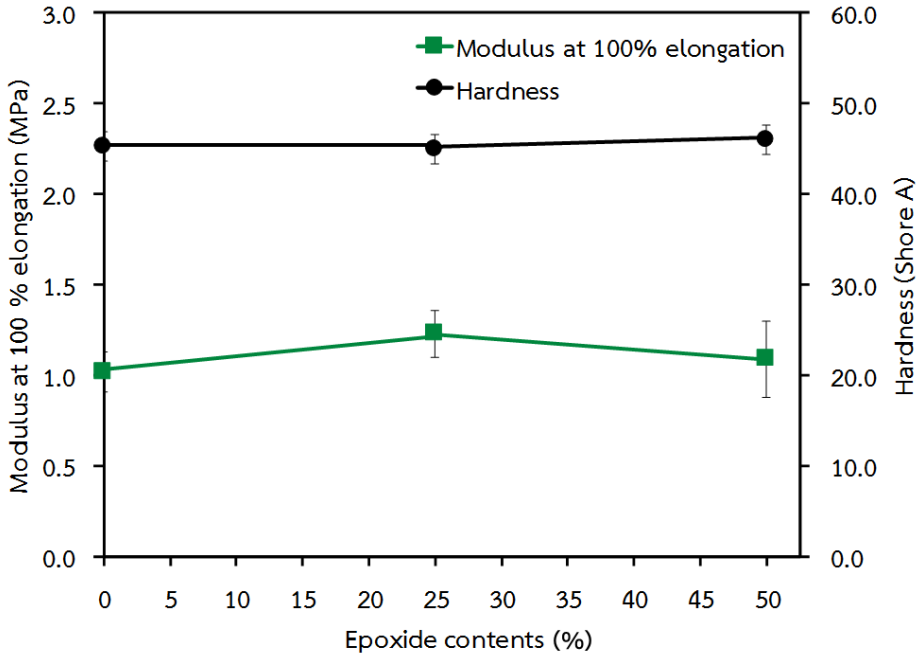
ตารางที่ 4.18 แสดงร้อยละปริมาณการกระจายตัวของธาตุในคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการแปรชนิดของยางธรรมชาติจากตารางจะเห็นได้ว่า คอมโพสิตของยางธรรมชาติที่ไม่ผ่านการดัดแปรโมเลกุล คอมโพสิตของยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่มีอิพอกไซด์ร้อยละ 25 โดยโมล และคอมโพสิตของยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่มีอิพอกไซด์ร้อยละ 50 โดยโมลมีปริมาณของธาตุส่วนใหญ่ที่เท่ากัน แต่มีธาตุบางตัวของคอมโพสิตของยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่มีอิพอกไซด์ร้อยละ 25 โดยโมล และคอมโพสิตของยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่มีอิพอกไซด์ร้อยละ 50 โดยโมลที่ไม่เท่ากับคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่ไม่ผ่านการดัดแปรโมเลกุลได้แก่ ธาตุคาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) ลดลง และออกซิเจน (O) เพิ่มขึ้น เนื่องจากยางธรรมชาติอิพอกไซด์มีวงแหวนอิพอกไซด์ภายในโครงสร้างจึงทำให้ยางธรรมชาติอิพอกไซด์มีปริมาณของออกซิเจนมากกว่า และมีปริมาณของคาร์บอน และไฮโดรเจนลดลง

4.3.4 ผลของการแปรชนิดของยางธรรมชาติต่อสมบัติเชิงกลของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์เป็นสารกำบังรังสี

การทดลองสมบัติเชิงกลของคอมโพสิตของยางธรรมชาติ โดยทำการแปรชนิดของยางธรรมชาติเพื่อเป็นสารกำบังรังสี ผลการทดลองสมบัติเชิงกลแสดงในตารางที่ 4.19-4.21 และรูปที่ 4.30-4.32

ตารางที่ 4.19 มอดูลัสที่ระยะยืด 100% และความแข็งของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการแปรชนิดของยางธรรมชาติ และเติมบิสมัทออกไซด์เป็นสารกำบังรังสี

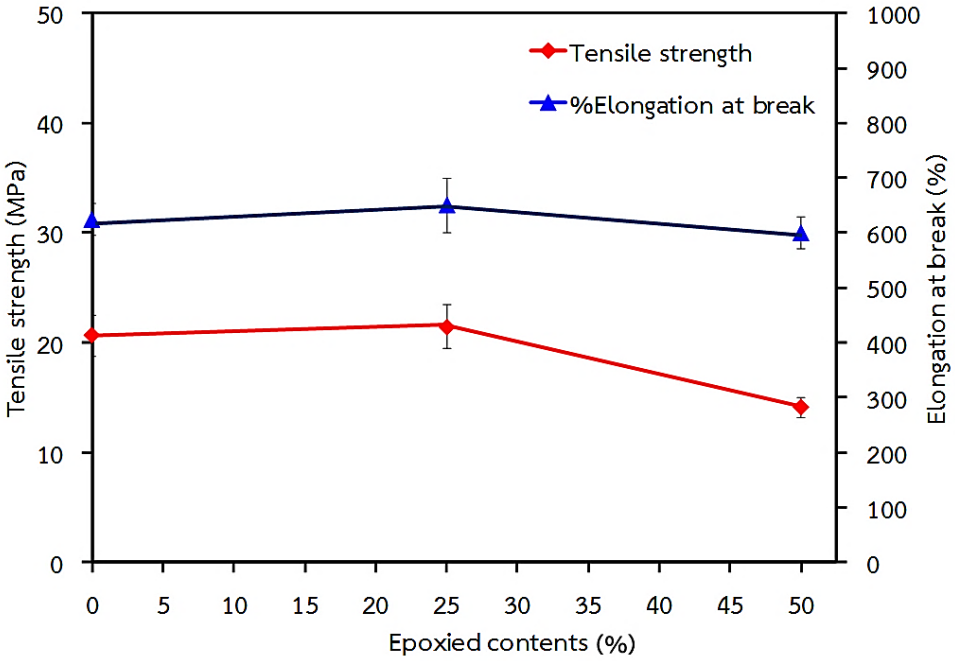
Epoxide contents (%)	Modulus at 100% elongation (MPa)	Hardness (Shore A)
0	1.02 ±0.11	45.20 ±0.45
25	1.23 ±0.13	45.00 ±0.89
50	1.09 ±0.21	46.00 ±0.45



รูปที่ 4.30 มอดูลัสที่ระยะยืด 100% และความแข็งของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการแปรชนิดของยางธรรมชาติ และเติมบิสมัทออกไซด์เป็นสารกำบังรังสี

ตารางที่ 4.20 ความต้านทานต่อแรงดึง และระยะยืด ณ จุดขาดของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการแปรชนิดของยางธรรมชาติ และเติมบิสมัทออกไซด์เป็นสารกำบังรังสี

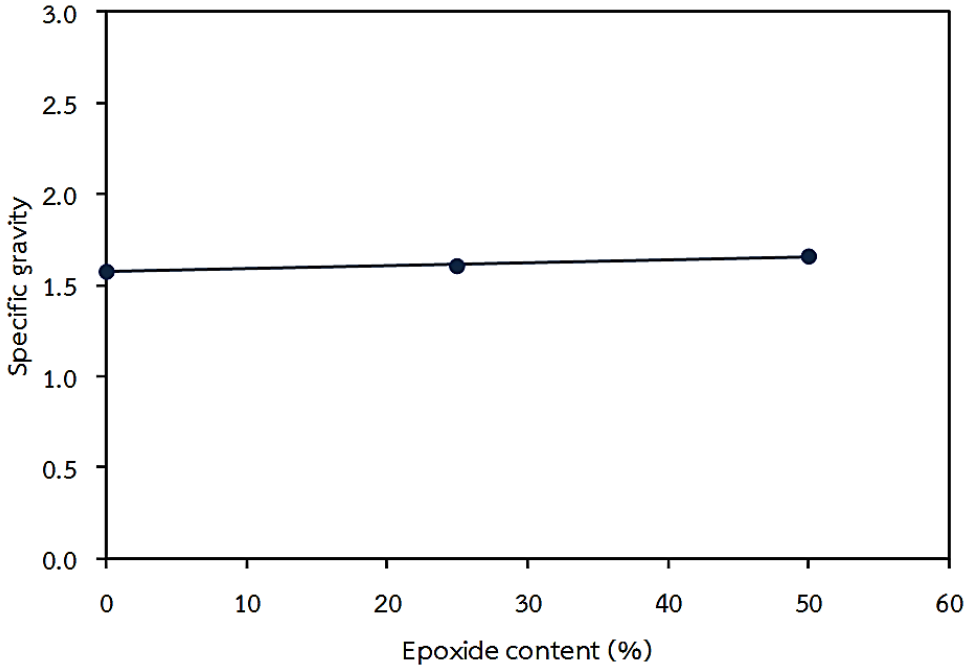
Epoxide contents (%)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)
0	20.66 ±1.88	625 ±29
25	21.42 ±1.99	650 ±50
50	14.10 ±0.87	600 ±29



รูปที่ 4.31 ความต้านทานต่อแรงดึง และระยะยืด ณ จุดขาดของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการแปรชนิดของยางธรรมชาติ และเติมบิสมัทออกไซด์เป็นสารกำบังรังสี

ตารางที่ 4.21 ความถ่วงจำเพาะของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการแปรชนิดของยางธรรมชาติและเติมบิสมัทออกไซด์เป็นสารกำบังรังสี

Epoxide contents (%)	Specific gravity
0	1.568 ±0.003
25	1.601 ±0.004
50	1.653 ±0.024



รูปที่ 4.32 ความถ่วงจำเพาะของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการแปรชนิดของยางธรรมชาติ และเติมบิสมัทออกไซด์เป็นสารกำบังรังสี

ตารางที่ 4.19 และรูปที่ 4.30 แสดงค่ามอดูลัสที่ระยะยืด 100% และความแข็งของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการแปรชนิดของยางธรรมชาติ และเติมบิสมัทออกไซด์เป็นสารกำบังรังสี จากผลการทดลองพบว่า คอมโพสิตของยางธรรมชาติที่ไม่ผ่านการดัดแปรโมเลกุล คอมโพสิตของยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่มีอิพอกไซด์ร้อยละ 25 โดยโมล และคอมโพสิตของยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่มีอิพอกไซด์ร้อยละ 50 โดยโมลให้ค่ามอดูลัสที่ระยะยืด 100% และความแข็งที่ใกล้เคียงกัน เนื่องจากเติมบิสมัทออกไซด์ในปริมาณที่เท่ากัน และคอมโพสิตของยางธรรมชาติทั้งสามชนิดมีปริมาณการเชื่อมขวางที่ใกล้เคียงกันสังเกตได้จากตารางที่ 4.17 ส่งผลให้ค่าดังกล่าวไม่ต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ 4.20 และรูปที่ 4.31 แสดงค่าความต้านทานต่อแรงดึง และระยะยืด ณ จุดขาดของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการแปรชนิดของยางธรรมชาติ และเติมบิสมัทออกไซด์เป็น

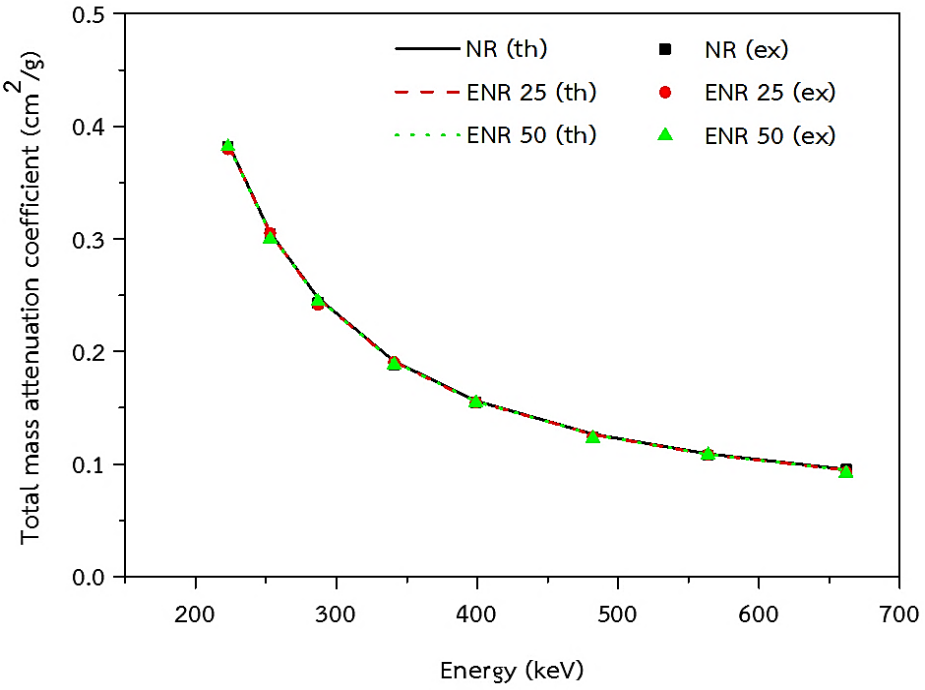
สารกำบังรังสี จากรูปจะเห็นได้ว่า คอมโพสิตของยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่มีอิพอกไซด์ร้อยละ 25 โดยโมลให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงมากกว่าคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่ไม่ผ่านการดัดแปรโมเลกุล และคอมโพสิตของยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่มีอิพอกไซด์ร้อยละ 50 โดยโมลเป็นผลมาจากการกระจายตัวที่ดีของบิสมัทออกไซด์ที่เติมลงในยางธรรมชาติอิพอกไซด์อย่างที่กล่าวไปข้างต้นแล้วว่าการกระจายตัวของสารมีผลต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิตในเรื่องของการส่งผ่านแรง หากวัสดุคอมโพสิตมีการกระจายตัวของสารที่ดีการส่งผ่านแรงก็จะเป็นไปอย่างต่อเนื่องทำให้วัสดุคอมโพสิตเกิดการรับแรงได้ดี และส่งผลต่อความแข็งแรงที่ดีอีกด้วย ในทางกลับกันหากวัสดุคอมโพสิตมีการกระจายตัวของสารที่ไม่ดีก็จะส่งผลต่อการถ่ายโอนแรงที่ไม่ต่อเนื่องจากเนื้อพื้นไปยังเฟสกระจาย วัสดุคอมโพสิตเกิดการรับแรงได้ไม่ดี สมบัติด้านความแข็งแรงจะลดลงเช่นเดียวกับคอมโพสิตของยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่มีอิพอกไซด์ร้อยละ 50 โดยโมลที่ให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงน้อยที่สุด เมื่อเทียบกับคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่ไม่ผ่านการดัดแปรโมเลกุล และคอมโพสิตของยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่มีอิพอกไซด์ร้อยละ 25 โดยโมล นอกจากนั้นการกระจายตัวที่ไม่ดีของสารยังส่งผลต่อค่าระยะยืด ณ จุดขาด เนื่องจากบริเวณที่เกิดการเกาะกลุ่มกันของสารจัดเป็นบริเวณที่มีเป็นจุดอ่อนของวัสดุคอมโพสิตกล่าวคือ จุดที่เกิดการเกาะกลุ่มกันนี้จะเป็นจุดที่เกิดการขาดเมื่อให้แรงดึงกับวัสดุคอมโพสิต ดังนั้นคอมโพสิตของยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่มีอิพอกไซด์ร้อยละ 50 โดยโมลมีการกระจายตัวที่ไม่ดีจึงทำให้มีค่าระยะยืด ณ จุดขาดต่ำกว่าคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่ไม่ผ่านการดัดแปรโมเลกุล และคอมโพสิตของยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่มีอิพอกไซด์ร้อยละ 25 โดยโมล

ตารางที่ 4.21 และรูปที่ 4.32 แสดงความถ่วงจำเพาะของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการแปรชนิดของยางธรรมชาติ และเติมบิสมัทออกไซด์เป็นสารกำบังรังสีซึ่งเติมในปริมาณที่เท่ากันจากรูปจะเห็นได้ว่า คอมโพสิตของยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่มีอิพอกไซด์ร้อยละ 25 โดยโมล และคอมโพสิตของยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่มีอิพอกไซด์ร้อยละ 50 โดยโมลให้ค่าความถ่วงจำเพาะมากกว่าคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่ไม่ผ่านการดัดแปรโมเลกุลเล็กน้อย เนื่องจากชนิดของยางที่ต่างกันมีความถ่วงจำเพาะเริ่มต้นเฉพาะที่ต่างกัน โดยยางธรรมชาติอิพอกไซด์มีความถ่วงจำเพาะมากกว่ายางธรรมชาติที่ไม่ผ่านการดัดแปรโมเลกุล (ความถ่วงจำเพาะของยางธรรมชาติอิพอกไซด์ประมาณ 1 [61] และความถ่วงจำเพาะของยางธรรมชาติที่ไม่ผ่านการดัดแปรโมเลกุลประมาณ 0.92 [62] ส่งผลให้ค่าความถ่วงจำเพาะของคอมโพสิตของยางธรรมชาติต่างกันเล็กน้อย

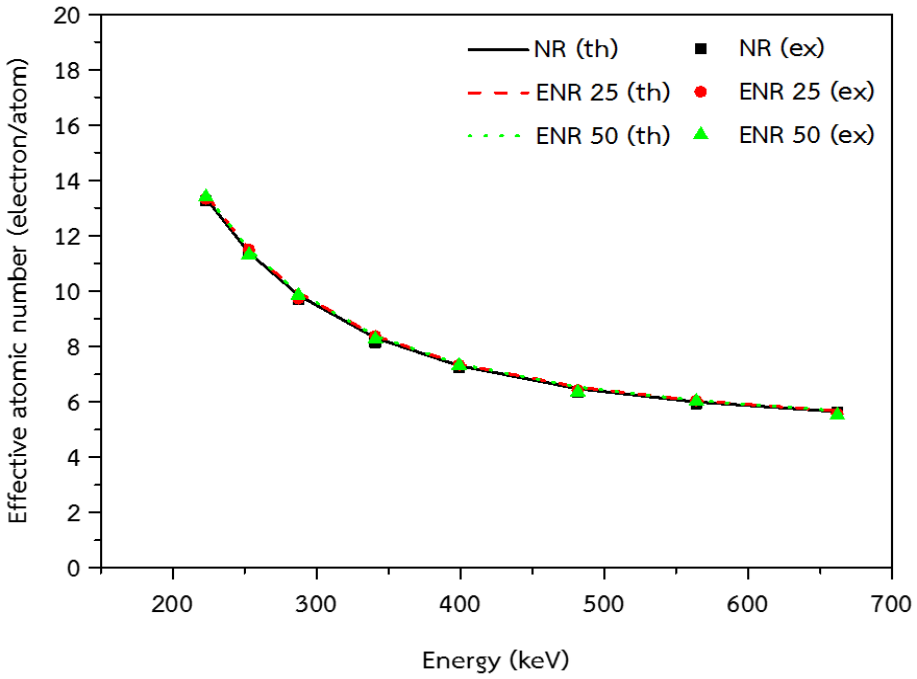
4.3.5 ผลของการแปรชนิดของยางธรรมชาติต่อสมบัติการลดทอนรังสีของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีเติมบิสมัทออกไซด์เป็นสารกำบังรังสี

4.3.5.1 ผลของการแปรชนิดของยางธรรมชาติต่อสมบัติการลดทอนรังสีแกมมา (Gamma ray attenuation) ของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีเติมบิสมัทออกไซด์เป็นสารกำบังรังสี

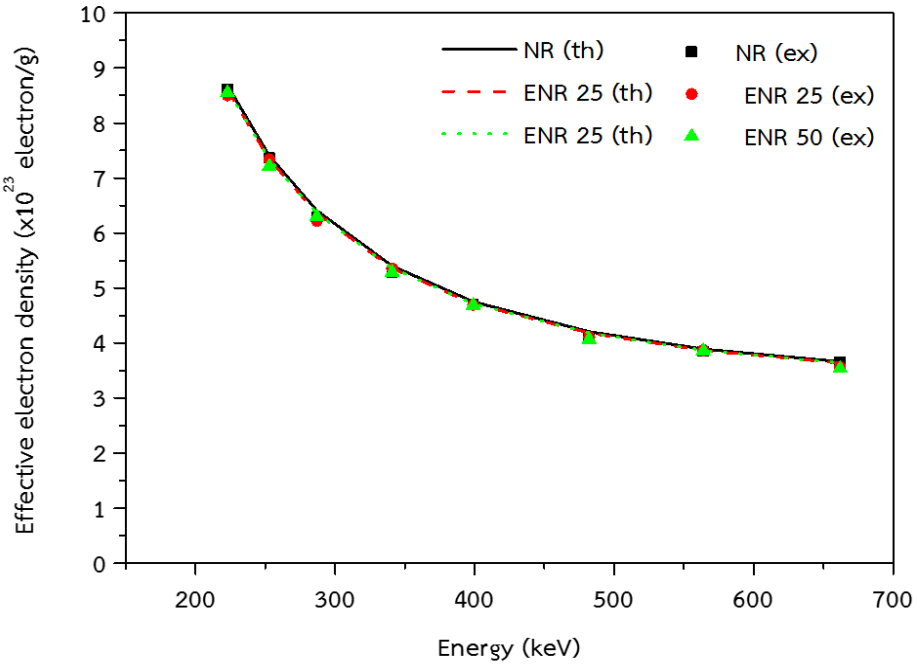
ผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการแปรชนิดของยาง และเติมบิสมัทออกไซด์เป็นสารกำบังรังสีต่อความสามารถในการลดทอนรังสีแกมมาของคอมโพสิตของยางธรรมชาติแสดงในรูปที่ 4.33-4.37



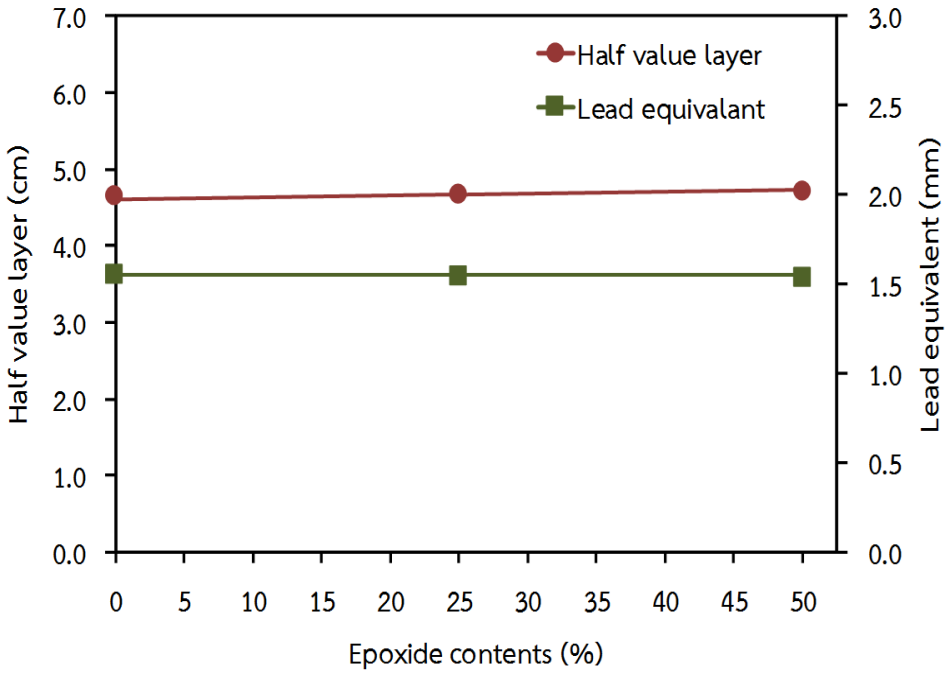
รูปที่ 4.33 สัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเชิงมวลของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการแปรชนิดของยางธรรมชาติ และเติมบิสมัทออกไซด์เป็นสารกำบังรังสี ทดสอบด้วยรังสีแกมมาที่พลังงาน 223-662 keV



รูปที่ 4.34 เลขอะตอมยังผลของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการแปรชนิดของยางธรรมชาติ และเติมบิสมัทออกไซด์เป็นสารกำบังรังสี ทดสอบด้วยรังสีแกมมาที่พลังงาน 223-662 keV



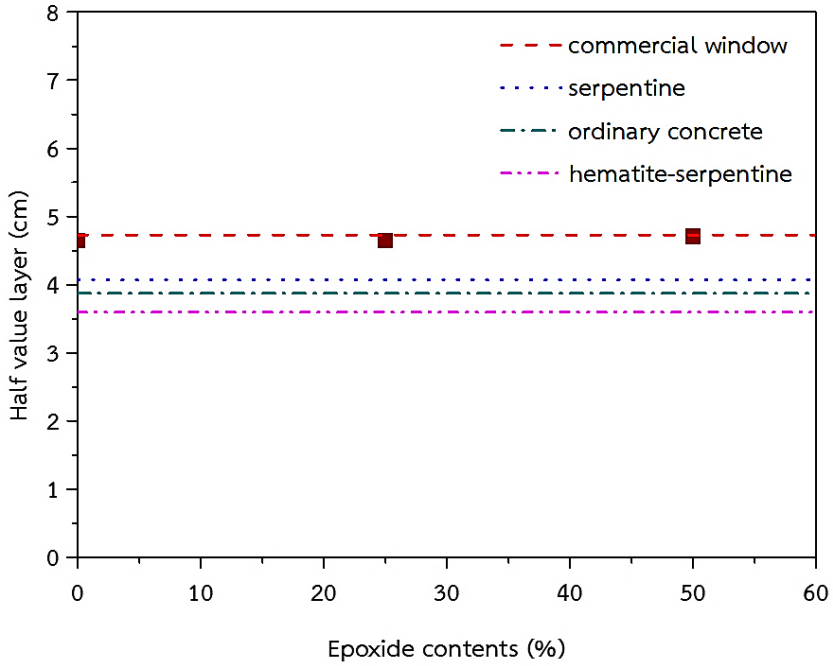
รูปที่ 4.35 ความหนาแน่นอิเล็กตรอนของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการแปรชนิดของยางธรรมชาติ และเติมบิสมัทออกไซด์เป็นสารกำบังรังสี ทดสอบด้วยรังสีแกมมาที่พลังงาน 223-662 keV



รูปที่ 4.36 ความหนาครึ่งค่าของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการแปรชนิดของยางธรรมชาติ และเติมบิสมัทออกไซด์เป็นสารกำบังรังสี ทดสอบด้วยรังสีแกมมาที่พลังงาน 662 keV

รูปที่ 4.33 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเชิงมวลของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการแปรชนิดของยางธรรมชาติ และเติมบิสมัทออกไซด์เป็นสารกำบัง โดยทำการทดสอบรังสีแกมมาที่มีพลังงานในช่วง 223-662 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์จากผลการทดลองพบว่า คอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการแปรชนิดของยางธรรมชาติจากตารางจะเห็นได้ว่า คอมโพสิตของยางธรรมชาติที่ไม่ผ่านการดัดแปรโมเลกุล คอมโพสิตของยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่มีอิพอกไซด์ร้อยละ 25 โดยโมล และคอมโพสิตของยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่มีอิพอกไซด์ร้อยละ 50 โดยโมลให้ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเชิงมวลที่ใกล้เคียงกันนั่นหมายความว่า คอมโพสิตของยางธรรมชาติสามารถลดทอนรังสีได้มีประสิทธิภาพใกล้เคียงกัน

ผลการทดลองค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเชิงมวลสามารถยืนยันได้จากค่าเลขอะตอมยังผล และค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในรูปที่ 4.34 และรูปที่ 4.35 ของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการแปรชนิดของยางธรรมชาติจากตารางจะเห็นได้ว่า คอมโพสิตของยางธรรมชาติที่ไม่ผ่านการดัดแปรโมเลกุล คอมโพสิตของยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่มีอิพอกไซด์ร้อยละ 25 โดยโมล และคอมโพสิตของยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่มีอิพอกไซด์ร้อยละ 50 โดยโมลให้ค่าเลขอะตอมยังผล และค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนไม่ต่างกันอย่างมีนัยสำคัญนั่นยืนยันได้ว่า จำนวนอิเล็กตรอนที่สามารถเกิดปฏิกิริยากับรังสี หรือโฟตอน จนเกิดการดูดกลืน หรือลดทอนรังสีมีจำนวนที่ใกล้เคียงกัน



รูปที่ 4.37 เปรียบเทียบความหนาครึ่งค่าของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการแปรชนิดของยางธรรมชาติ และเติมบิสมัทออกไซด์เป็นสารกำบังรังสีทดสอบที่รังสีกับกระจกเชิงพาณิชย์ เซอร์เพนไทน์ คอนกรีต และเฮมาไทด์-เซอร์เพนไทน์[43] ทดสอบด้วยรังสีแกมมาพลังงาน 662 keV

ดังนั้นชนิดของยางธรรมชาติไม่มีผลต่อการกำบังรังสีเท่ากับปริมาณ หรือชนิดของสารที่ทำหน้าที่เป็นสารกำบังรังสี นอกจากนั้นค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเชิงมวล เลขอะตอมยังผล และความหนาแน่นอิเล็กตรอนที่ได้จากการทดลอง (ex) มีค่าใกล้เคียงกับค่าทางทฤษฎี (th) ที่ได้จากโปรแกรม WinXCom สามารถยืนยันได้ว่า ผลการทดลองที่ได้มีความแม่นยำ และถูกต้องตรงตามทฤษฎี

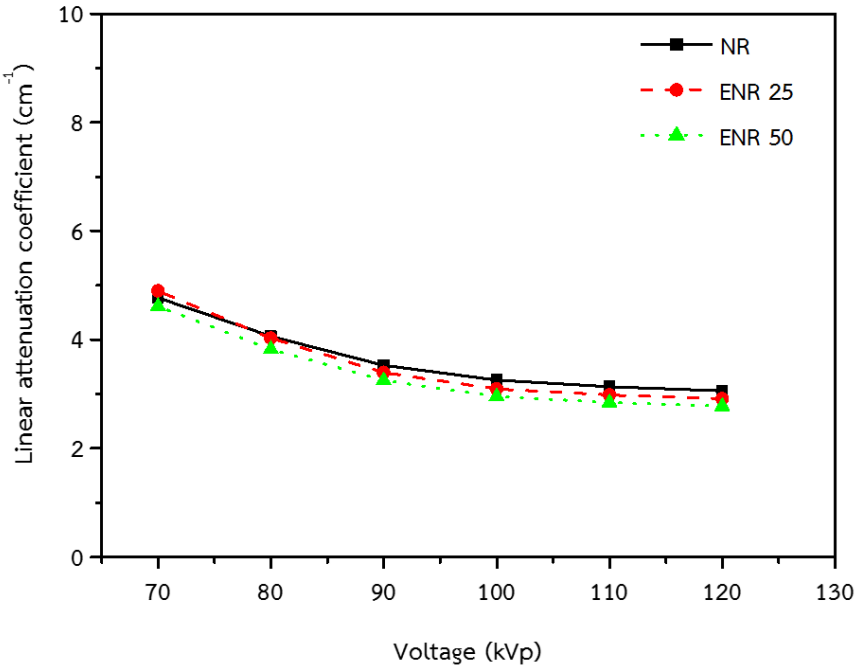
รูปที่ 4.36 แสดงความหนาครึ่งค่า และความหนาเทียบเท่าตะกั่วของคอมโพสิตของยางธรรมชาติมีการแปรชนิดของยาง และเติมบิสมัทออกไซด์เป็นสารกำบังรังสี ทำการทดสอบที่รังสีแกมมาที่มีพลังงานเท่ากับ 662 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ จากผลการทดลองพบว่า คอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการแปรชนิดของยางธรรมชาติจากตารางจะเห็นได้ว่า คอมโพสิตของยางธรรมชาติที่ไม่ผ่านการดัดแปรโมเลกุล คอมโพสิตของยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่มีอิพอกไซด์ร้อยละ 25 โดยโมล และคอมโพสิตของยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่มีอิพอกไซด์ร้อยละ 50 โดยโมลมีค่าความหนาครึ่งค่า และความหนาเทียบเท่าตะกั่วที่ใกล้เคียงกัน หมายความว่า คอมโพสิตของยางธรรมชาติทั้งสามชนิดสามารถลดทอนความเข้ม หรือพลังงานรังสีได้ครึ่งหนึ่งจากรังสีเดิมโดยมีความหนาที่เท่ากัน และคอมโพสิตของยางธรรมชาติทั้งสามชนิดสามารถกำบังรังสีได้เทียบเท่ากับตะกั่วที่มีความหนาประมาณ 1.5 มิลลิเมตร

รูปที่ 4.37 แสดงเปรียบเทียบค่าความหนาครึ่งค่าระหว่างคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการแปรชนิดของยางธรรมชาติจากตารางจะเห็นได้ว่าคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่

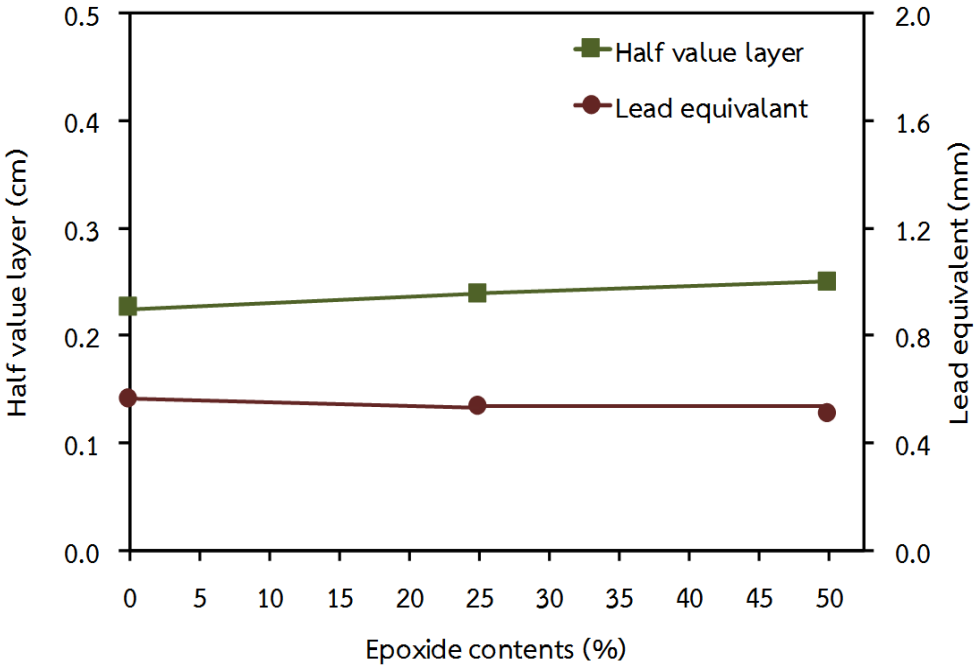
ไม่ผ่านการดัดแปรโมเลกุล คอมโพสิตของยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่มีอิพอกไซด์ร้อยละ 25 โดยโมล และคอมโพสิตของยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่มีอิพอกไซด์ร้อยละ 50 โดยโมล ทำการทดสอบที่รังสีแกมมาที่มีพลังงานเท่ากับ 662 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์พบว่า คอมโพสิตของยางธรรมชาติทั้งสามชนิดให้ค่าความหนาครึ่งค่าน้อยกว่ากระจกเชิงพาณิชย์เพียงชนิดเดียวเท่านั้น แสดงว่า คอมโพสิตของยางธรรมชาติทั้งสามชนิดสามารถกำบังรังสีแกมมาได้ดีกว่ากระจกเชิงพาณิชย์ และสามารถกำบังรังสีได้น้อยกว่าเซอร์เพนไทน์ คอนกรีต และเฮมาไทต์-เซอร์เพนไทน์

4.3.5.2 ผลของชนิดของการแปรชนิดของยางธรรมชาติต่อสมบัติการลดทอนรังสีเอ็กซ์ (X-ray attenuation) ของคอมโพสิตของยางธรรมชาติ และเติมบิสมัทออกไซด์เป็นสารกำบังรังสี

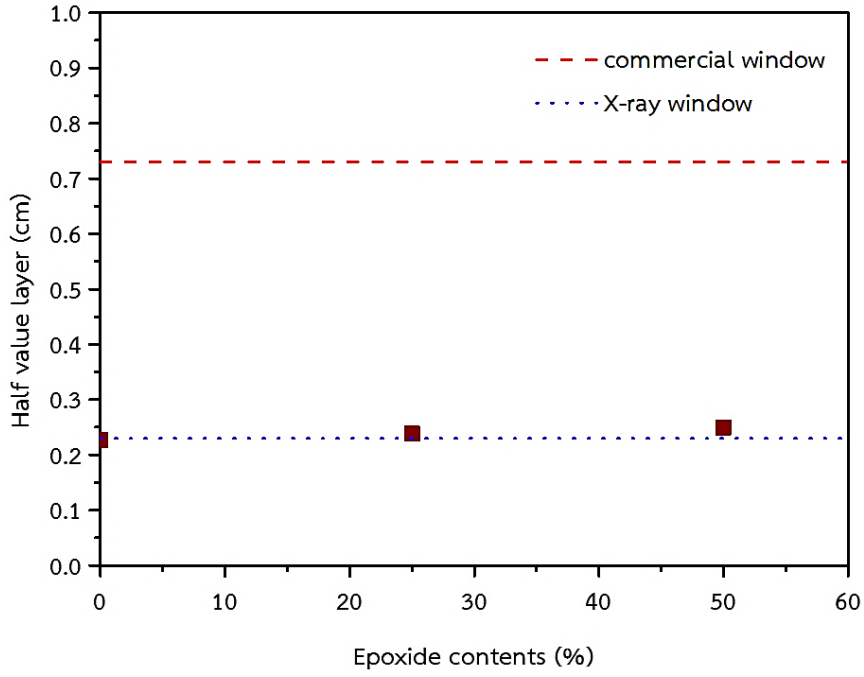
ผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการแปรชนิดของยางธรรมชาติ และเติมบิสมัทออกไซด์เป็นสารกำบังรังสีต่อความสามารถในการลดทอนรังสีเอ็กซ์ของคอมโพสิตของยางธรรมชาติแสดงในรูปที่ 4.38-4.40



รูปที่ 4.38 สัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเชิงเส้นของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการแปรชนิดของยางธรรมชาติ และเติมบิสมัทออกไซด์เป็นสารกำบังรังสี ทดสอบด้วยรังสีเอ็กซ์ที่พลังงาน 50-120 kVp



รูปที่ 4.39 ความหนาครึ่งค่า และความหนาเทียบเท่าตะกั่วของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการแปรชนิดของยางธรรมชาติ และเติมบิสมัทออกไซด์เป็นสารกำบังรังสี ทดสอบด้วยรังสีเอ็กซ์พลังงาน 120 kVp



รูปที่ 4.40 เปรียบเทียบความหนาครึ่งค่าของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการแปรชนิดของยางธรรมชาติ และเติมบิสมัทออกไซด์เป็นสารกำบังรังสีกับกระจกเชิงพาณิชย์ และกระจกกำบังรังสีเอ็กซ์ทดสอบด้วยรังสีเอ็กซ์พลังงาน 120 kVp

รูปที่ 4.38 แสดงสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเชิงเส้นของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการแปรชนิดของยาง และเติมบิสมัทออกไซด์เป็นสารกำบังรังสี โดยทำการทดสอบรังสีเอ็กซ์ที่มีพลังงานในช่วง 50-120 กิโลโวลต์สูงสุดพบว่า ผลการทดลองมีแนวโน้มเช่นเดียวกับการทดสอบคุณสมบัติการลดทอนรังสีแกมมากล่าวคือ คอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการแปรชนิดของยางธรรมชาติจากตารางจะเห็นได้ว่าคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่ไม่ผ่านการดัดแปรโมเลกุล คอมโพสิตของยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่มีอิพอกไซด์ร้อยละ 25 โดยโมลและคอมโพสิตของยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่มีอิพอกไซด์ร้อยละ 50 โดยโมลให้ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเชิงเส้นที่ใกล้เคียงกัน หมายความว่า คอมโพสิตของยางธรรมชาติทั้งสามชนิดมีความสามารถในการลดทอนรังสีไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

รูปที่ 4.39 แสดงความหนาครึ่งค่า และความหนาเทียบเท่าตะกั่ว ของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการแปรชนิดของยางธรรมชาติ และเติมบิสมัทออกไซด์เป็นสารกำบังรังสีทดสอบด้วยรังสีเอ็กซ์ที่มีพลังงานเท่ากับ 120 กิโลโวลต์สูงสุด จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า คอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการแปรชนิดของยางธรรมชาติจากตารางจะเห็นได้ว่า คอมโพสิตของยางธรรมชาติที่ไม่ผ่านการดัดแปรโมเลกุลคอมโพสิตของยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่มีอิพอกไซด์ร้อยละ 25 โดยโมลและคอมโพสิตของยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่มีอิพอกไซด์ร้อยละ 50 โดยโมลมีค่าความหนาครึ่งค่า และความหนาเทียบเท่าตะกั่วที่ใกล้เคียงกันแสดงว่า คอมโพสิตของยางธรรมชาติทั้งสามชนิดมีความหนาเท่ากันที่สามารถลดทอนปริมาณ หรือความเข้มของรังสีได้ครึ่งหนึ่งจากพลังงาน หรือความเข้มของรังสีเดิม หรือกล่าวคือ รังสีจะถูกคอมโพสิตของยางธรรมชาติดูดกลืนรังสีได้ครึ่งหนึ่ง และรังสีอีกครึ่งหนึ่งสามารถทะลุผ่านออกมาจากคอมโพสิตของยางธรรมชาติได้ และคอมโพสิตของยางธรรมชาติทั้งสามชนิดสามารถกำบังรังสีเอ็กซ์ได้เทียบเท่าตะกั่วที่มีหนาประมาณ 0.25 มิลลิเมตร โดยทำการเปรียบเทียบคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่ความหนาเท่ากันคือ 13 มิลลิเมตร

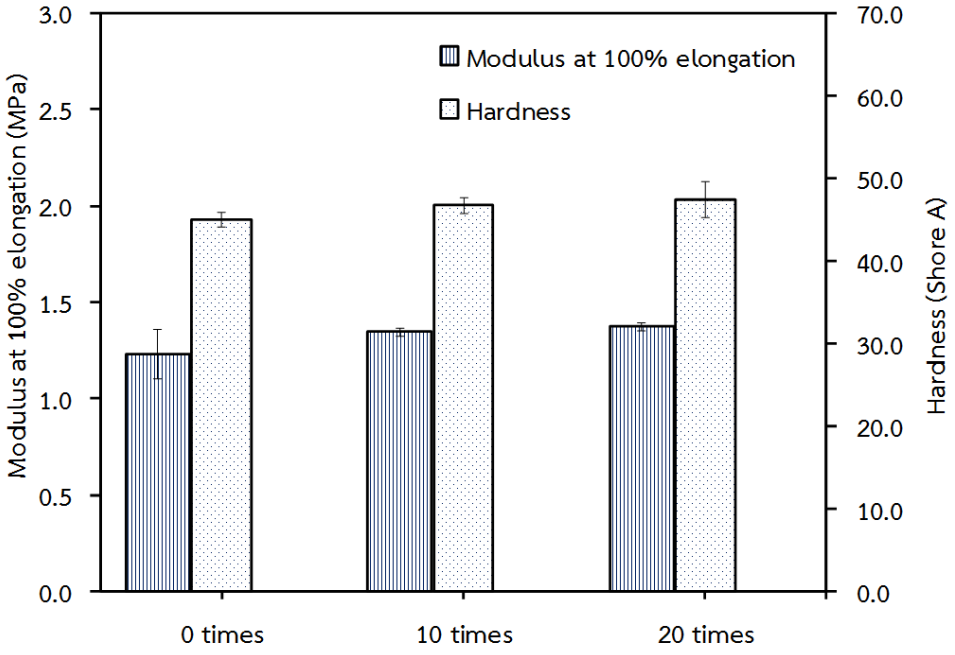
นอกจากนี้เมื่อนำคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการแปรชนิดของยางธรรมชาติ และเติมบิสมัทออกไซด์เป็นสารกำบังรังสีกับกระจกเชิงพานิชย์ และกระจกกำบังรังสีเอ็กซ์ แสดงในรูปที่ 4.40 พบว่า คอมโพสิตของยางธรรมชาติทั้งสามชนิดสามารถกำบังรังสีเอ็กซ์ได้ดีกว่ากระจกเชิงพานิชย์ และกระจกกำบังรังสีเอ็กซ์ เนื่องจากมีค่าความหนาครึ่งค่าที่น้อยกว่ากระจกเชิงพานิชย์ และกระจกกำบังรังสีเอ็กซ์ ดังนั้นเมื่อทำการพิจารณาจากสมบัติเชิงกล และสมบัติทางด้านรังสีเอ็กซ์สามารถกล่าวได้ว่า คอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการแปรชนิดของยางธรรมชาติจากตารางจะเห็นได้ว่า คอมโพสิตของยางธรรมชาติที่ไม่ผ่านการดัดแปรโมเลกุล และคอมโพสิตของยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่มีอิพอกไซด์ร้อยละ 25 โดยโมลเหมาะสมที่จะนำมาผลิตเป็นยางธรรมชาติกำบังรังสีเอ็กซ์ที่มีความยืดหยุ่น และปลอดตะกั่ว

4.3.6 ผลของการทดสอบสมบัติเชิงกลหลังผ่านการกำบังรังสีที่มีการฉายรังสีซ้ำ 10 และ 20 ครั้งของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการแปรชนิดของยางธรรมชาติ และเติมบิสมัทออกไซด์เป็นสารกำบังรังสี

เมื่อพิจารณาสมบัติเชิงกล และสมบัติด้านการลดทอนรังสีของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการแปรชนิดของยางธรรมชาติได้แก่ ยางธรรมชาติที่ไม่ผ่านการดัดแปรโมเลกุลยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่มีอิพอกไซด์ร้อยละ 25 โดยโมลและยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่มีอิพอกไซด์ร้อยละ 50 โดยโมลที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์ปริมาณ 80 ส่วนโดยร้อยละเมื่อเทียบกับยางพบว่าสมบัติเชิงกล และสมบัติด้านการลดทอนรังสีแกมมา และรังสีเอ็กซ์ คอมโพสิตของยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่มีอิพอกไซด์ร้อยละ 25 โดยโมลที่ให้สมบัติที่เหมาะสมกล่าวคือ มีสมบัติเชิงกลที่ดีที่สุดและมีสมบัติการกำบังรังสีที่มีประสิทธิภาพจึงนำสภาวะดังกล่าวมาทำการฉายรังสี 10 และ 20 ครั้ง ครั้งละ 100 วินาที โดยการใช้มุมในการกระเจิงแสง 0° ซึ่งมีค่าพลังงานเท่ากับ 662 กิโลโวลต์สูงสุดซึ่งผลการทดลองสมบัติเชิงกลหลังได้รับรังสีของคอมโพสิตของยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่มีอิพอกไซด์ร้อยละ 25 โดยโมลแสดงในตารางที่ 4.22-4.24 และรูปที่ 4.41-4.43

ตารางที่ 4.22 มอดูลัสที่ระยะยืด 100% และความแข็ง หลังผ่านการกำบังรังสีที่มีการฉายรังสีซ้ำ 10 และ 20 ครั้งของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการแปรชนิดของยางธรรมชาติ และเติมบิสมัทออกไซด์เป็นสารกำบังรังสี

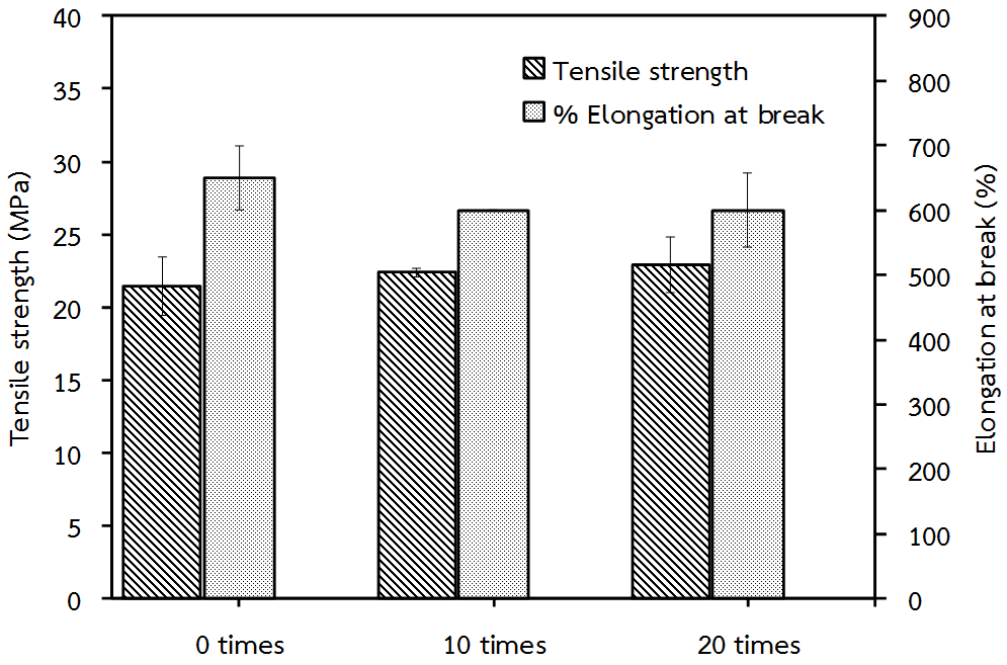
Radiation shielding (times)	Modulus at 100% elongation (MPa)	Hardness (Shore A)
0	1.23 ±0.13	45.00 ±0.89
10	1.35 ±0.02	46.75 ±0.96
20	1.38 ±0.02	47.45 ±2.22



รูปที่ 4.41 มอดูลัสที่ระยะยืด 100% และความแข็ง หลังผ่านการกำบังรังสีที่มีการฉายรังสีซ้ำ 10 และ 20 ครั้งของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการแปรชนิดของยางธรรมชาติ และเติมบิสมัทออกไซด์เป็นสารกำบังรังสี

ตารางที่ 4.23 ความต้านทานต่อแรงดึง และระยะยืด ณ จุดขาด หลังผ่านการกำบังรังสีที่มีการฉายรังสีซ้ำ 10 และ 20 ครั้งของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการแปรชนิดของยางธรรมชาติ และเติมบิสมัทออกไซด์เป็นสารกำบังรังสี

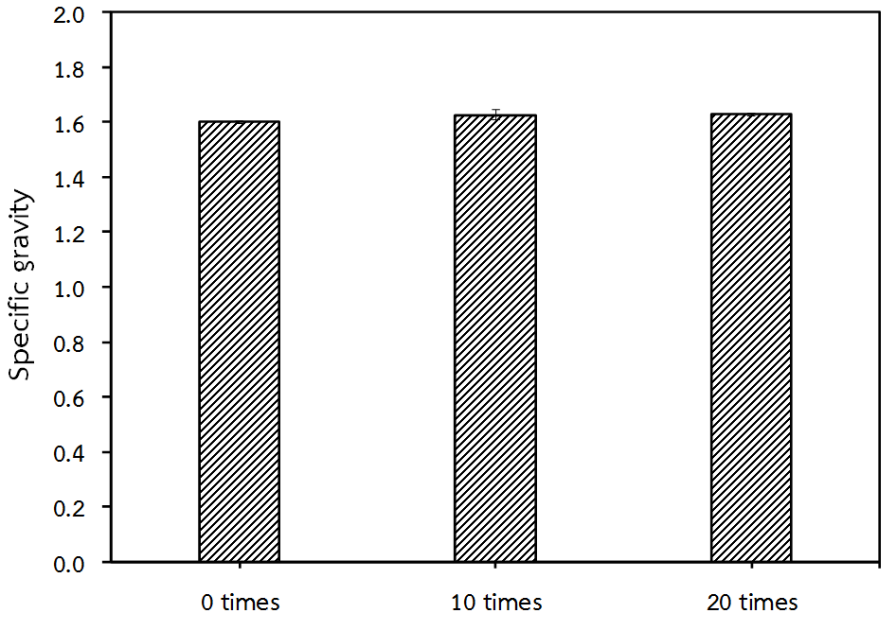
Radiation shielding (times)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)
0	21.42 ±1.99	650.00 ±50.00
10	22.39 ±0.34	600.00 ±0.00
20	22.95 ±1.89	600.00 ±57.74



รูปที่ 4.42 ความต้านทานต่อแรงดึง และระยะยืด ณ จุดขาด หลังผ่านการกำบังรังสีที่มีการฉายรังสีซ้ำ 10 และ 20 ครั้งของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการแปรชนิดของยางธรรมชาติ และเติมบิสมัทออกไซด์เป็นสารกำบังรังสี

ตารางที่ 4.24 ความถ่วงจำเพาะ หลังผ่านการกำบังรังสีที่มีการฉายรังสีซ้ำ 10 และ 20 ครั้งของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการแปรชนิดของยางธรรมชาติ และเติมบิสมัทออกไซด์เป็นสารกำบังรังสี

Radiation shielding (times)	Specific gravity
0	1.601 ±0.004
10	1.626 ±0.018
20	1.628 ±0.004



รูปที่ 4.43 ความถ่วงจำเพาะ หลังผ่านการกำบังรังสีที่มีการฉายรังสีซ้ำ 10 และ 20 ครั้งของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการแปรชนิดของยางธรรมชาติ และเติมบิสมัทออกไซด์เป็นสารกำบังรังสี

ตารางที่ 4.25 ปริมาณการเชื่อมขวางหลังผ่านการกำบังรังสีที่มีการฉายรังสีซ้ำ 10 และ 20 ครั้งของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการแปรชนิดของยางธรรมชาติ และเติมบิสมัทออกไซด์เป็นสารกำบังรังสี

Radiation shielding (times)	Crosslink density (x10^{-3} cm^2/g)
0	1.21 ±0.00020
10	1.38 ±0.00028
20	1.42 ±0.00019

จากตารางที่ 4.22 แสดงค่ามอดูลัสที่ระยะยืด 100% และความแข็ง หลังผ่านการกำบังรังสีของคอมโพสิตของยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่มีอิพอกไซด์ร้อยละ 25 โดยโมลจากผลการทดลองพบว่า เมื่อคอมโพสิตของยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่มีอิพอกไซด์ร้อยละ 25 โดยโมลได้รับรังสีแกมมาทำให้ค่ามอดูลัสที่ระยะยืด 100% และความแข็งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นแสดงว่า คอมโพสิตของยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่มีอิพอกไซด์ร้อยละ 25 โดยโมลจะต้องใช้แรงเพิ่มขึ้นในการทำให้ คอมโพสิตของยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่มีอิพอกไซด์ร้อยละ 25 โดยโมลเกิดการยืด หรือคอมโพสิตของยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่มีอิพอกไซด์ร้อยละ 25 โดยโมลมีความแข็งเพิ่มขึ้นเป็นผลมาจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณการเชื่อมขวางซึ่งผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.25 โดยการเพิ่มขึ้นของปริมาณการเชื่อม

ขวางเมื่อได้รับรังสีนั้นยังส่งผลให้คอมโพสิตของยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่มีอิพอกไซด์ร้อยละ 25 โดยโมลมีความต้านทานต่อแรงดึงที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อเกิดการเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่โมเลกุลของยางจะทำให้ยางเกิดการเคลื่อนที่ หรือเกิดการเคลื่อนไหวได้ยากขึ้นจึงต้องใช้แรงดึงเพิ่มขึ้นเพื่อทำให้คอมโพสิตของยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่มีอิพอกไซด์ร้อยละ 25 โดยโมลขาดออกจากกัน และการที่สายโซ่โมเลกุลเกิดการเคลื่อนไหวได้ยากขึ้นนั่นหมายความว่าวัสดุมีความยืดหยุ่นที่ลดลงสังเกตได้จากค่าระยะยืด ณ จุดขาด แสดงในรูปที่ 4.25 และการได้รับรังสีแกมมาของคอมโพสิตของยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่มีอิพอกไซด์ร้อยละ 25 โดยโมลไม่มีผลต่อความถ่วงจำเพาะ ผลการทดลองแสดงในตารางที่ 24 และรูปที่ 43

จากผลการทดลองจึงสรุปได้ว่าปริมาณหมู่อิพอกไซด์บนยางธรรมชาติมีผลต่อสมบัติเชิงกล แต่ไม่มีผลต่อประสิทธิภาพในการลดทอนปริมาณ หรือกำบังรังสีของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่เตรียมได้ โดยคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีหมู่อิพอกไซด์ร้อยละ 25 โดยโมลให้สมบัติเชิงกลดีที่สุดมีค่ามอดูลัสเท่ากับ 1.23 เมกะพาสคัล ความแข็งชอร์เอเท่ากับ 45 ความต้านทานต่อแรงดึงเท่ากับ 21.42 เมกะพาสคัล และระยะยืด ณ จุดขาดเท่ากับร้อยละ 650 สำหรับสมบัติการลดทอนรังสีแกมมา และรังสีเอ็กซ์พบว่า คอมโพสิตของยางธรรมชาติทั้งสามชนิดมีการลดทอนปริมาณหรือกำบังรังสีได้ไม่ต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ คอมโพสิตของยางธรรมชาติทั้งสามชนิดสามารถกำบังรังสีแกมมา และรังสีเอ็กซ์ได้ดีกว่ากระจกเชิงพาณิชย์ และสามารถกำบังรังสีเอ็กซ์ได้เทียบเท่ากับกระจกกำบังรังสีเอ็กซ์ ซึ่งเมื่อคอมโพสิตของยางธรรมชาติผ่านการฉายรังสีจะส่งผลให้คอมโพสิตของยางธรรมชาติมีค่าความต้านทานต่อแรงดึงเพิ่มขึ้น

4.4 ผลของการเปรียบเทียบคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์ หรือตะกั่วออกไซด์เป็นสารกำบังรังสี

เป็นที่ทราบกันดีว่าวัสดุกำบังรังสีส่วนใหญ่ผลิตมาจากตะกั่ว เนื่องจากตะกั่วสามารถขึ้นรูป หรือรีดเป็นแผ่นบางได้ง่าย และมีราคาถูก แต่ตะกั่วมีความเป็นพิษสูงซึ่งองค์กรอนามัยโลก (World Health Organization; WHO) มีการรณรงค์ และมีมาตรการที่ป้องกันความเสี่ยงคือ ใช้กฎหมาย การกำหนดมาตรฐานระดับความปลอดภัย รวมทั้งระบบเฝ้าระวัง ตรวจสอบและศึกษาวิจัยวัสดุที่ผลิตจากสารตะกั่ว นับว่าตะกั่วเป็นปัญหาต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อมอย่างยิ่ง ในขั้นตอนนี้จึงได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบคุณสมบัติของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์ (BO) หรือตะกั่วออกไซด์ (PbO) ปริมาณ 150 ส่วนโดยร้อยละเมื่อเทียบกับยาง เพื่อนำคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่ไร้ตะกั่วมาผลิตเป็นวัสดุกำบังรังสีทดแทนวัสดุกำบังรังสีที่ทำมาจากตะกั่ว

4.4.1 ผลของการเปรียบเทียบคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์ หรือตะกั่วออกไซด์เป็นสารกำบังรังสี ต่อระยะเวลาในการคงรูปของคอมโพสิตของยางธรรมชาติ

ผลการทดลองเปรียบเทียบระยะเวลาในการคงรูปยางของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์ หรือตะกั่วออกไซด์เป็นสารกำบังรังสีแสดงในตารางที่ 4.25

ตารางที่ 4.26 ระยะเวลาในการคงรูปยางของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์หรือตะกั่วออกไซด์เป็นสารกำบังรังสี

Types of metal oxides	Cure time; t_{c90} (min)
BO	6.22
PbO	6.50

ตารางที่ 4.25 แสดงระยะเวลาในการคงรูปของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์ หรือตะกั่วออกไซด์ จากผลการทดลองพบว่า คอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์ หรือตะกั่วออกไซด์ใช้เวลาในการคงรูปยางที่ใกล้เคียงกัน และมีเวลาในการคงรูปยางได้เร็วกว่ายางธรรมชาติที่ไม่มีการเติมโลหะออกไซด์ซึ่งเวลาในการคงรูปของยางธรรมชาติที่ไม่มีการเติมโลหะออกไซด์เท่ากับ 8.44 นาทีสังเกตได้จากตารางที่ 4.1 นั่นหมายความว่า ทั้งบิสมัทออกไซด์ และตะกั่วออกไซด์จัดเป็นสารประกอบออกไซด์ที่นอกจากจะทำหน้าที่เป็นสารกำบังรังสีแล้วยังทำหน้าที่เป็นสารกระตุ้นที่ช่วยกระตุ้นสารตัวเร่งให้ทำงานได้เร็วขึ้น ส่งผลให้ปฏิกิริยาวัลคาไนซ์เกิดได้เร็วขึ้นเช่นกัน

4.4.2 ผลของการเปรียบเทียบคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์ หรือตะกั่วออกไซด์เป็นสารกำบังรังสีต่อปริมาณการเชื่อมขวางของคอมโพสิตของยางธรรมชาติ

ผลการทดลองเปรียบเทียบปริมาณการเชื่อมขวางของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีสารกำบังรังสีต่างชนิดกันได้แก่บิสมัทออกไซด์ หรือตะกั่วออกไซด์แสดงในตารางที่ 4.26

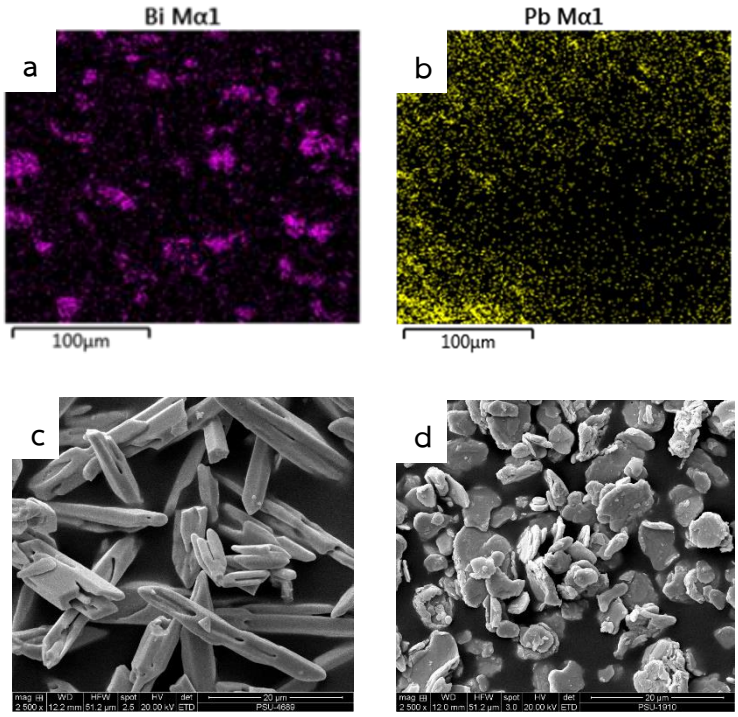
ตารางที่ 4.27 ปริมาณการเชื่อมขวางของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์ หรือตะกั่วออกไซด์เป็นสารกำบังรังสี

Types of metal oxides	Crosslink density ($x10^{-3}cm^2/g$)
BO	2.63 ±0.00012
PbO	2.95 ±0.00026

ตารางที่ 4.26 แสดงปริมาณการเชื่อมขวางของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์ หรือตะกั่วออกไซด์เป็นสารกำบังรังสีพบว่า คอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์ และคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมตะกั่วออกไซด์มีปริมาณการเชื่อมขวางที่ใกล้เคียงกัน เนื่องจากสารทั้งสองชนิดจัดเป็นสารประกอบออกไซด์ที่ทำหน้าที่เป็นทั้งสารกำบังรังสีและสารกระตุ้น

4.4.3 ผลของการเปรียบเทียบคอมโพสิตของยางธรรมชาติมีการเติมบิสมัทออกไซด์ หรือตะกั่วออกไซด์เป็นสารกำบังรังสีต่อการกระจายตัวของสารในคอมโพสิตของยางธรรมชาติ

ผลการทดสอบการกระจายตัว และสัณฐานวิทยาของบิสมัทออกไซด์ หรือตะกั่วออกไซด์ในคอมโพสิตของยางธรรมชาติแสดงในรูปที่ 4.44 และปริมาณการกระจายตัวของธาตุในคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเปรียบเทียบคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์ หรือตะกั่วออกไซด์เป็นสารกำบังรังสีสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (3.2) และ (3.3) แสดงในตารางที่ 4.27



รูปที่ 4.44 การกระจายตัว และสัณฐานวิทยาของสารที่ทำหน้าที่ในการกำบังรังสีเปรียบเทียบระหว่างสารประกอบออกไซด์ และตะกั่วในยางธรรมชาติ a) คือ การกระจายตัวของบิสมัทในคอมโพสิตของยางธรรมชาติ b) คือ การกระจายตัวของตะกั่วในคอมโพสิตของยางธรรมชาติ c) คือ สัณฐานวิทยาของบิสมัทออกไซด์ d) คือ สัณฐานวิทยาของตะกั่วออกไซด์

ตารางที่ 4.28 ร้อยละปริมาณการกระจายตัวของธาตุในคอมโพสิตของยางธรรมชาติเปรียบเทียบระหว่างคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์ หรือตะกั่วออกไซด์เป็นสารกำบังรังสี

Elements	Types of metal oxides	
	BO	PbO
C	34.480	34.480
H	4.634	4.634
O	6.376	4.566
Zn	1.548	1.548
Bi	51.849	-
Pb	-	53.660
N	0.045	0.045
S	1.067	1.067

รูปที่ 4.44 แสดงการกระจายตัว และสัณฐานวิทยาของสารที่ทำหน้าที่ในการกำบังรังสีเปรียบเทียบระหว่างสารประกอบออกไซด์ และตะกั่วในยางธรรมชาติจากรูป 4.44a และ b จะเห็นได้ว่า ตะกั่วสามารถกระจายตัวในยางธรรมชาติได้ดีกว่าบิสมัท เนื่องจากอนุภาคของตะกั่วออกไซด์มีลักษณะกลม และมีขนาดอนุภาคที่เล็กกว่าจึงสามารถกระจายตัวในยางธรรมชาติได้ดีกว่าบิสมัทออกไซด์ที่มีลักษณะเป็นแท่ง และมีขนาดอนุภาคที่ใหญ่กว่าสังเกตได้จากรูปที่ 4.44c และ d แสดงสัณฐานวิทยาของบิสมัทออกไซด์ และตะกั่วออกไซด์ ตามลำดับ

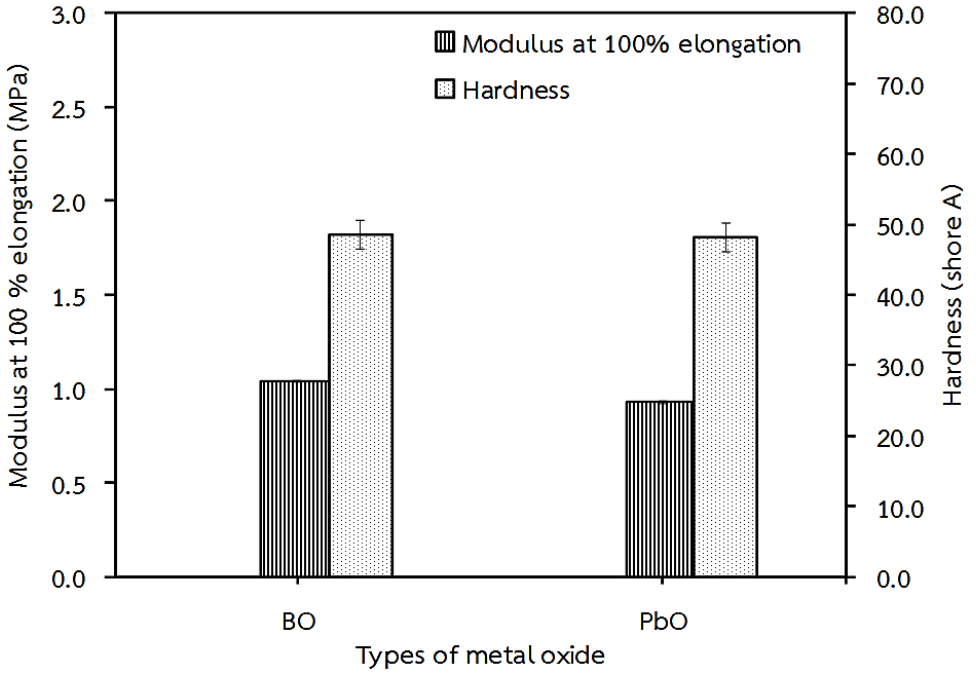
ตารางที่ 4.26 แสดงร้อยละปริมาณการกระจายตัวของธาตุในคอมโพสิตของยางธรรมชาติเปรียบเทียบระหว่างคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์ และคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมตะกั่วออกไซด์จะเห็นได้ว่า คอมโพสิตของยางธรรมชาติทั้งสองชนิดให้ปริมาณของธาตุที่ใกล้เคียงกัน เนื่องจากมีการเติมสารต่าง ๆ ลงในคอมโพสิตของยางธรรมชาติในปริมาณเท่ากัน

4.4.4 ผลของการเปรียบเทียบคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์ หรือตะกั่วออกไซด์เป็นสารกำบังรังสีต่อสมบัติเชิงกลของคอมโพสิตของยางธรรมชาติ

เปรียบเทียบผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์ และตะกั่วออกไซด์เป็นสารกำบังรังสีต่อสมบัติเชิงกล ผลการทดลองแสดงในตารางที่ 4.26-4.28 และรูปที่ 4.45-4.47

ตารางที่ 4.28 มอดูลัสที่ระยะยืด 100% และความแข็งของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่เปรียบเทียบระหว่างยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์ หรือตะกั่วออกไซด์

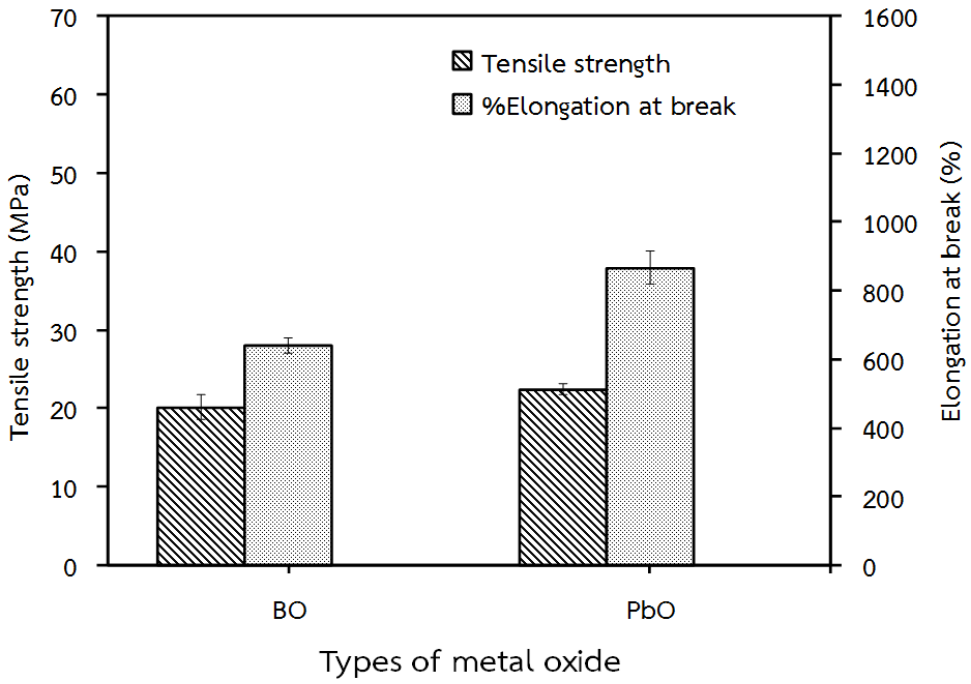
Types of metal oxide	Modulus at 100% elongation (MPa)	Hardness (Shore A)
BO	1.04 ±0.09	48.60 ±0.89
PbO	0.83 ±0.06	47.20 ±0.40



รูปที่ 4.45 มอดูลัสที่ระยะยืด 100% และความแข็งของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่เปรียบเทียบระหว่างยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์ หรือตะกั่วออกไซด์

ตารางที่ 4.30 ความต้านทานต่อแรงดึง และระยะยืด ณ จุดขาดของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่เปรียบเทียบระหว่างยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์ หรือตะกั่วออกไซด์

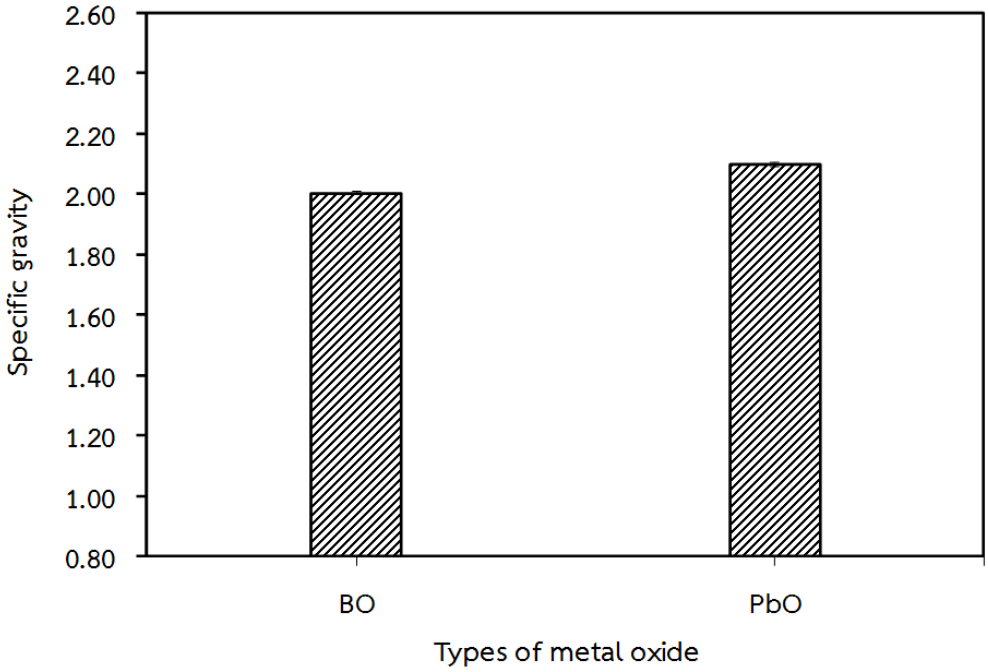
Types of metal oxide	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)
BO	20.13 ±1.54	640 ±22
PbO	22.41 ±0.68	867 ±47



รูปที่ 4.46 ความต้านทานต่อแรงดึง และระยะยืด ณ จุดขาดของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่เปรียบเทียบระหว่างยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์ หรือตะกั่วออกไซด์

ตารางที่ 4.31 ความถ่วงจำเพาะของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่เปรียบเทียบระหว่างยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์ หรือตะกั่วออกไซด์

Types of metal oxide	Specific gravity
BO	2.004 ±0.005
PbO	2.100 ±0.007



รูปที่ 4.47 ความถ่วงจำเพาะของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่เปรียบเทียบระหว่างยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์ หรือตะกั่วออกไซด์

ตารางที่ 4.28 และรูปที่ 4.45 แสดงค่ามอดูลัสที่ระยะยืด 100% และความแข็งของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่เปรียบเทียบระหว่างยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์ หรือตะกั่วออกไซด์ จากผลการทดลองพบว่า คอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์ และคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมตะกั่วออกไซด์มีค่ามอดูลัสที่ระยะยืด 100% และความแข็งที่ใกล้เคียงกันอย่างมีนัยสำคัญเป็นผลมาจากการเติมบิสมัทออกไซด์ และตะกั่วออกไซด์ลงในยางธรรมชาติในปริมาณที่เท่ากันคือ 150 ส่วนโดยร้อยละเมื่อเทียบกับยาง และคอมโพสิตของยางธรรมชาติทั้งสองชนิดมีปริมาณการเชื่อมขวางที่ใกล้เคียงกันสังเกตได้จากตารางที่ 4.26

ตารางที่ 4.29 และรูปที่ 4.46 แสดงค่าความต้านทานต่อแรงดึง และระยะยืด ณ จุดขาดของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่เปรียบเทียบระหว่างบิสมัทออกไซด์ และตะกั่วออกไซด์พบว่า คอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมตะกั่วออกไซด์ให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงมากกว่าคอมโพสิตของ

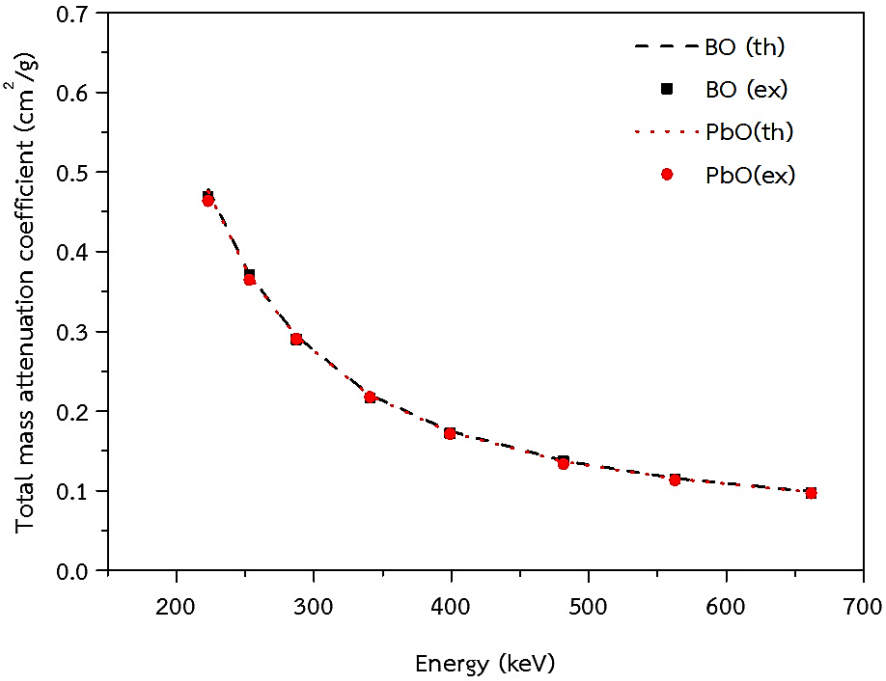
ยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์ เนื่องจากตะกั่วออกไซด์สามารถกระจายตัวในยางธรรมชาติได้ดีกว่าบิสมัทออกไซด์ ผลการกระจายตัวของคอมโพสิตของยางธรรมชาติแสดงในรูปที่ 4.44 ซึ่งการกระจายตัวที่ดีของตะกั่วออกไซด์ในยางธรรมชาติ ส่งผลให้คอมโพสิตของยางธรรมชาติถ่ายโอนแรงได้อย่างต่อเนื่องคอมโพสิตของยางธรรมชาติเกิดการรับแรงได้ดี ในทางกลับกันคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่เกิดการเกาะกลุ่มกันของบิสมัทออกไซด์ทำให้เกิดการส่งผ่านแรงที่ไม่ต่อเนื่องส่งผลให้คอมโพสิตของยางธรรมชาติมีความต้านทานต่อแรงดึงน้อยกว่าคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมตะกั่วออกไซด์ นอกจากนี้การกระจายตัวที่ไม่ดีของบิสมัทออกไซด์ในยางธรรมชาติยังส่งผลให้ค่าระยะยืด ณ จุดขาดน้อยกว่าคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมตะกั่วออกไซด์หมายความว่า คอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์มีความสามารถในการยืดได้น้อยกว่าคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมตะกั่วออกไซด์ เนื่องจากบริเวณที่เกิดการเกาะกลุ่มกันเป็นบริเวณที่เกิดการส่งผ่านแรงที่ไม่ต่อเนื่อง ดังนั้นบริเวณดังกล่าวจะไม่สามารถช่วยรับแรงจากยางธรรมชาติที่เป็นเนื้อพื้นได้ส่งผลให้ยางธรรมชาติต้องทำหน้าที่เป็นตัวรับแรงเพียงลำพัง คอมโพสิตของยางธรรมชาติจึงเกิดการขาดได้ง่ายในบริเวณที่เกิดการเกาะกลุ่มกันของบิสมัทออกไซด์

ตารางที่ 4.28 และรูปที่ 4.47 แสดงค่าความถ่วงจำเพาะของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่เปรียบเทียบระหว่างบิสมัทออกไซด์ และตะกั่วออกไซด์ จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า คอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมตะกั่วออกไซด์ให้ค่าความถ่วงจำเพาะที่มากกว่าคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์เล็กน้อย เนื่องจากตะกั่วออกไซด์มีค่าความถ่วงจำเพาะที่มากกว่าบิสมัทออกไซด์ (ความถ่วงจำเพาะของตะกั่วออกไซด์เท่ากับ 9.53[63] ความถ่วงจำเพาะของบิสมัทออกไซด์เท่ากับ 8.90)

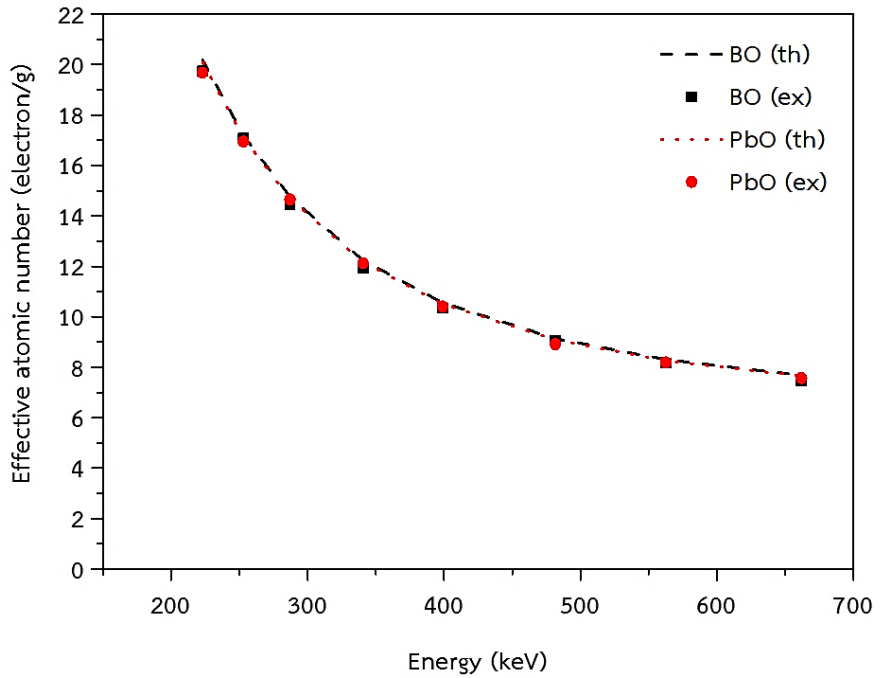
4.4.5 ผลของการเปรียบเทียบคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์ หรือตะกั่วออกไซด์เป็นสารกำบังรังสีต่อสมบัติการลดทอนรังสีของคอมโพสิตของยางธรรมชาติ

4.4.5.1 ผลของการเปรียบเทียบคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์ หรือตะกั่วออกไซด์เป็นสารกำบังรังสีต่อสมบัติการลดทอนรังสีแกมมา (Gamma ray attenuation) ของคอมโพสิตของยางธรรมชาติ

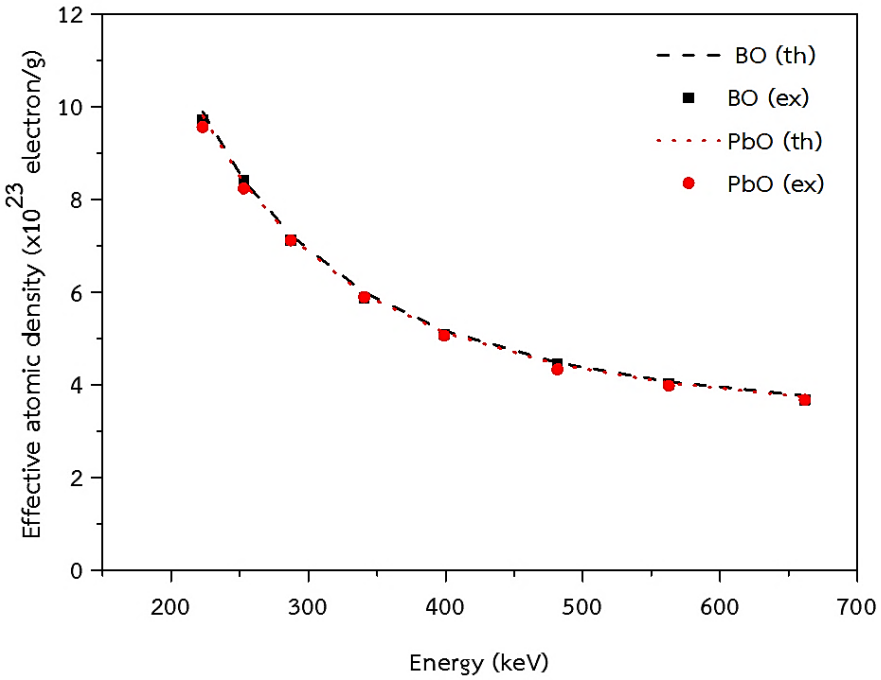
ผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างการเปรียบเทียบคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์ และตะกั่วออกไซด์เป็นสารกำบังรังสีต่อความสามารถในการลดทอนรังสีแกมมาของคอมโพสิตของยางธรรมชาติ แสดงในรูปที่ 4.48-4.52



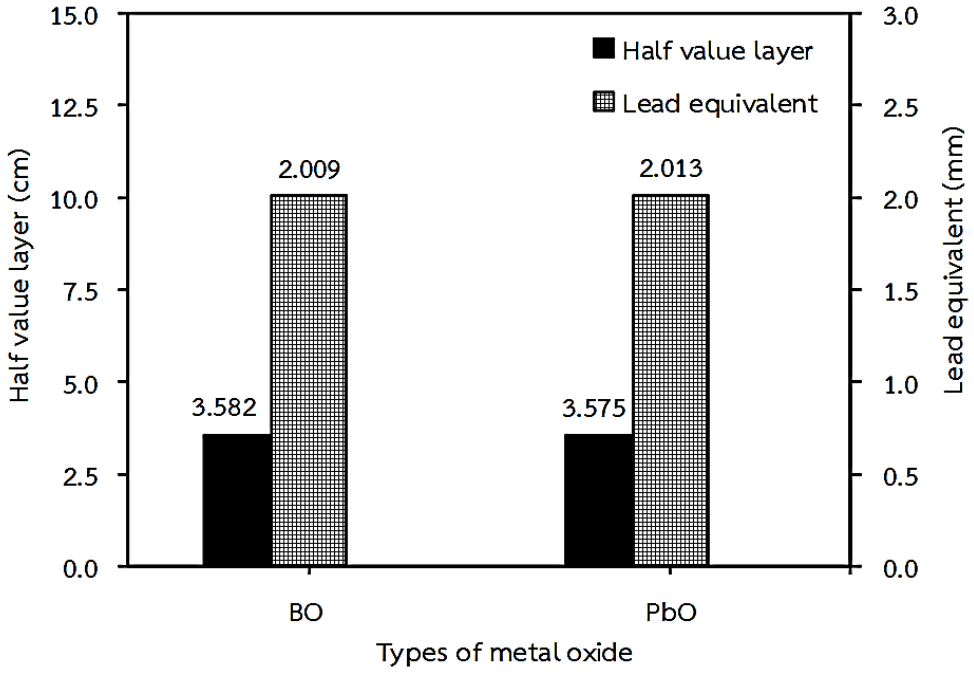
รูปที่ 4.48 สัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเชิงมวลของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่เปรียบเทียบระหว่างยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์ หรือตะกั่วออกไซด์เป็นสารกำบังรังสี ทดสอบด้วยรังสีแกมมาที่พลังงาน 223-662 keV



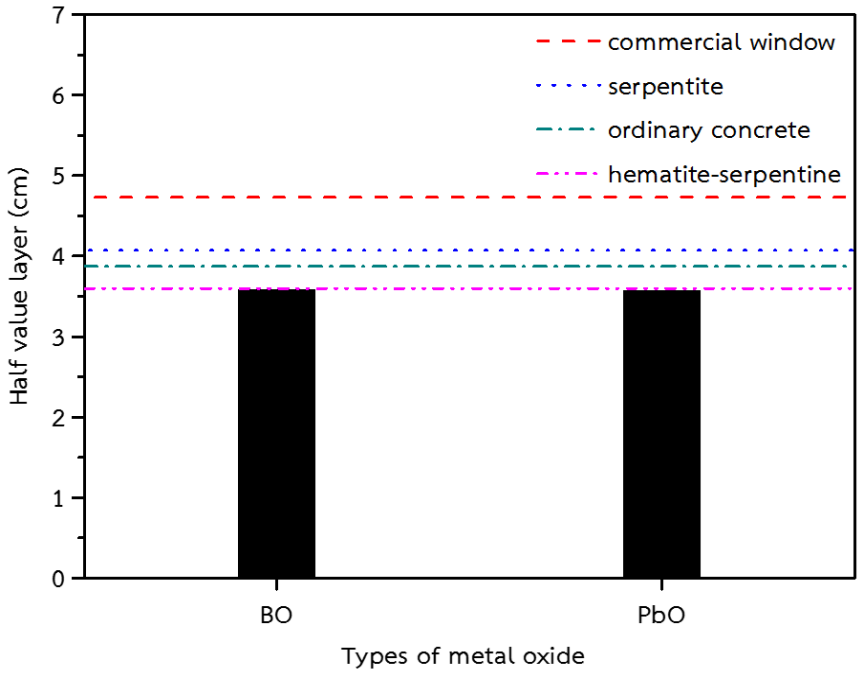
รูปที่ 4.49 เลขอะตอมยังผลของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่เปรียบเทียบระหว่างยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์ หรือตะกั่วออกไซด์เป็นสารกำบังรังสี ทดสอบด้วยรังสีแกมมาที่พลังงาน 223-662 keV



รูปที่ 4.50 ความหนาแน่นอิเล็กตรอนของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่เปรียบเทียบระหว่างยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์ หรือตะกั่วออกไซด์เป็นสารกำบังรังสี ทดสอบด้วยรังสีแกมมาที่พลังงาน 223-662 keV



รูปที่ 4.51 ความหนาครึ่งค่า และความหนาเทียบเท่าตะกั่วของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่เปรียบเทียบระหว่างยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์ หรือตะกั่วออกไซด์เป็นสารกำบังรังสี ทดสอบด้วยรังสีแกมมาที่พลังงาน 662 keV



รูปที่ 4.52 เปรียบเทียบความหนาครึ่งค่าของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมสารประกอบออกไซด์ และตะกั่วเป็นสารกำบังรังสี กับกระจกเชิงพาณิชย์ เซอร์เพนไทน์ คอนกรีต และเฮมาไทต์-เซอร์เพนไทน์[43] ทดสอบด้วยรังสีแกมมาที่พลังงาน 662 keV

รูปที่ 4.48 แสดงสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเชิงมวลของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่เปรียบเทียบระหว่างบิสมัทออกไซด์ และตะกั่วออกไซด์ในยางธรรมชาติ ทำการทดสอบด้วยรังสีแกมมาที่มีพลังงานในช่วง 223-662 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์พบว่า คอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์ และคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมตะกั่วออกไซด์ให้ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเชิงมวลที่ใกล้เคียงกันเป็นผลมาจากบิสมัทออกไซด์ และตะกั่วออกไซด์มีส่วนประกอบของธาตุบิสมัท และตะกั่ว ตามลำดับ ซึ่งธาตุทั้งสองมีเลขอะตอมที่ใกล้เคียงกัน โดยบิสมัทมีเลขอะตอมเท่ากับ 83 และตะกั่วมีเลขอะตอมเท่ากับ 82 ซึ่งผลการทดลองค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเชิงมวลมีแนวโน้มเช่นเดียวกับผลการทดลองของเลขอะตอมยังผล และความหนาแน่นอิเล็กตรอนของคอมโพสิตของยางธรรมชาติ

รูปที่ 4.49 และรูปที่ 4.50 แสดงเลขอะตอมยังผล และความหนาแน่นอิเล็กตรอนของการเปรียบเทียบคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์ และตะกั่วออกไซด์เป็นสารกำบังรังสี ทดสอบด้วยรังสีแกมมาที่พลังงาน 223-662 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ซึ่งทั้งสองผลการทดลองให้ค่าเลขอะตอมยังผล และความหนาแน่นของอิเล็กตรอนของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์ และคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมตะกั่วออกไซด์ที่ใกล้เคียงกัน โดยเลขอะตอมยังผลจะบ่งชี้ถึงจำนวนอิเล็กตรอนในอะตอม และความหนาแน่นอิเล็กตรอนจะบ่งบอกถึงจำนวนอิเล็กตรอนต่อกรัม ผลการทดลองที่ให้ค่าใกล้เคียงกันแสดงว่าคอมโพสิตของยางธรรมชาติทั้ง

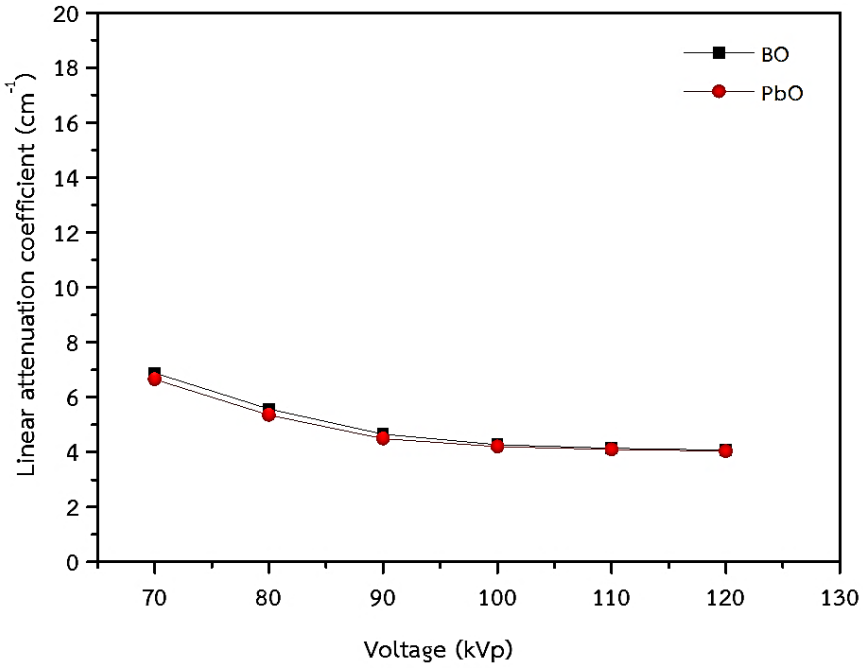
สองชนิดมีจำนวนอิเล็กตรอนไม่ต่างกัน ดังนั้นการเกิดปฏิกิริยาระหว่างรังสี กับอิเล็กตรอน หรือเกิดการดูดกลืนรังสีมีโอกาสเกิดขึ้นเท่ากัน คอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์ หรือตะกั่วออกไซด์ลงในยางธรรมชาติมีความสามารถในการลดทอนรังสีได้เช่นเดียวกัน นอกจากนี้ผลการทดลองทั้งสามผลการทดลอง (ex) ให้ค่าที่ใกล้เคียงกับค่าทางทฤษฎี (th) ที่ได้จากโปรแกรม WinXCom สามารถยืนยันได้ว่าผลการทดลองที่ได้มีความแม่นยำ และถูกต้องตรงตามทฤษฎี

รูปที่ 4.51 แสดงค่าความหนาครึ่งค่า และความหนาเทียบเท่าตะกั่วของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่เปรียบเทียบระหว่างบิสมัทออกไซด์ และตะกั่วออกไซด์ในยางธรรมชาติ ทำการทดสอบด้วยรังสีแกมมาที่มีพลังงานเท่ากับ 662 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ จากรูปจะเห็นได้ว่า คอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์ และคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมตะกั่วออกไซด์มีค่าความหนาครึ่งค่า และความหนาเทียบเท่าตะกั่วที่ใกล้เคียงกันนั่นหมายความว่า คอมโพสิตของยางธรรมชาติทั้งสองชนิดใช้ความหนาเท่ากันที่สามารถลดทอนปริมาณ หรือความเข้มของรังสีได้ครึ่งหนึ่งจากพลังงาน หรือความเข้มรังสีเดิม และความสามารถในการลดทอนรังสีได้เทียบเท่ากับตะกั่วที่มีความหนาประมาณ 2 มิลลิเมตร ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า คอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์ และคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมตะกั่วออกไซด์มีความสามารถในการลดทอนรังสีได้เหมือนกัน

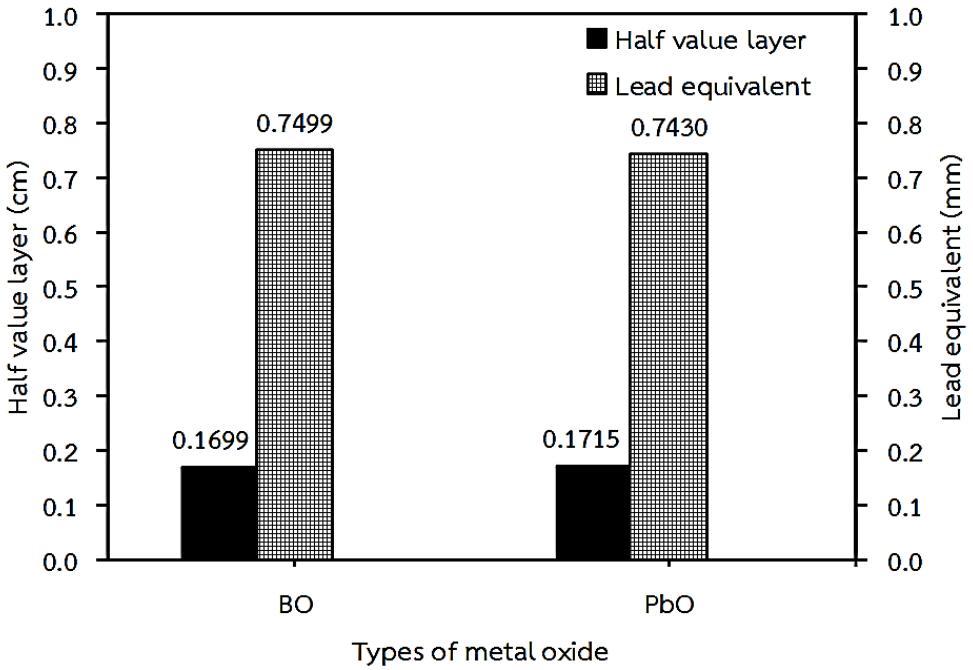
เมื่อนำค่าความหนาครึ่งค่าของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์ และคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมตะกั่วออกไซด์มาเปรียบเทียบกับวัสดุกำบังรังสีแกมมาได้แก่ กระจกเชิงพาณิชย์ เซอร์เพนไทน์ คอนกรีต และเฮมาไทด์-เซอร์เพนไทน์ จากรูปที่ 4.52 จะเห็นได้ว่า คอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์ และคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมตะกั่วออกไซด์มีค่าความหนาครึ่งค่าน้อยกว่าวัสดุกำบังรังสีทั้งหมดที่นำมาเปรียบเทียบ ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า คอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์ และคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมตะกั่วออกไซด์สามารถกำบังรังสีแกมมาได้ดีกว่าวัสดุกำบังรังสีแกมมาทั้งหมดที่นำมาเปรียบเทียบ

4.2.6.2 ผลของการเปรียบเทียบคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์ออกไซด์ และตะกั่วออกไซด์เป็นสารกำบังรังสีต่อสมบัติการลดทอนรังสีเอ็กซ์ (X-ray attenuation) ของคอมโพสิตของยางธรรมชาติ

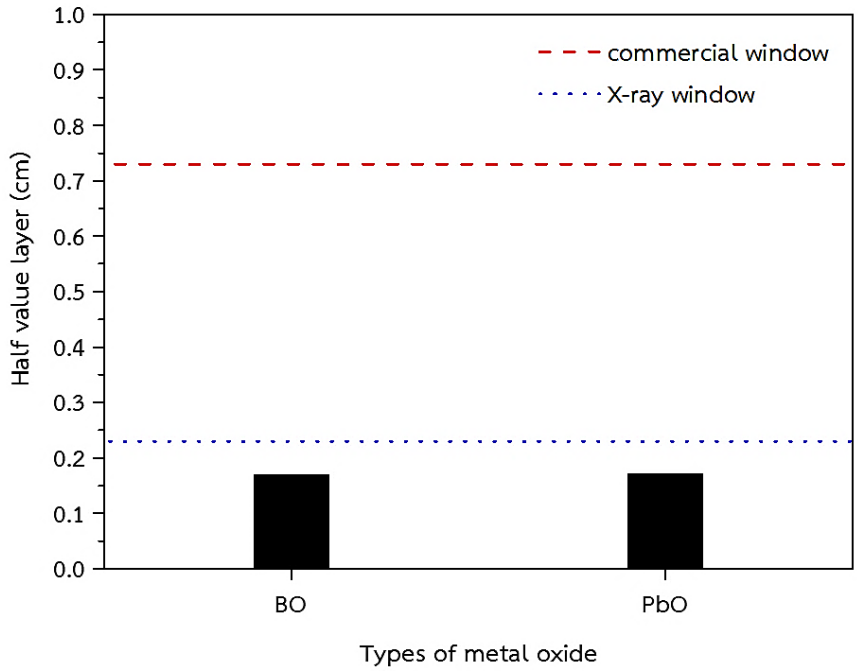
ผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างชนิดของสารที่ทำหน้าที่ในการกำบังรังสีเปรียบเทียบระหว่างสารประกอบออกไซด์ และตะกั่วในยางธรรมชาติ ต่อความสามารถในการลดทอนรังสีเอ็กซ์ของคอมโพสิตของยางธรรมชาติ แสดงในรูปที่ 4.53-4.55



รูปที่ 4.53 สัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเชิงเส้นของการเปรียบเทียบคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์ และตะกั่วออกไซด์เป็นสารกำบังรังสี ทดสอบด้วยรังสีเอ็กซ์ที่พลังงาน 50-120 kVp



รูปที่ 4.54 ความหนาครึ่งค่า และความหนาเทียบเท่าตะกั่วของการเปรียบเทียบคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์ และตะกั่วออกไซด์เป็นสารกำบังรังสี ทดสอบด้วยรังสีเอ็กซ์ที่พลังงาน 120 kVp



รูปที่ 4.55 เปรียบเทียบความหนาครึ่งค่าของการเปรียบเทียบคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์ และตะกั่วออกไซด์เป็นสารกำบังรังสี กับกระจกเชิงพาณิชย์ และกระจกกำบังรังสีเอ็กซ์ ทดสอบด้วยรังสีเอ็กซ์ที่พลังงาน 120 kVp

รูปที่ 4.53 แสดงสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเชิงเส้นของการเปรียบเทียบคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์ และตะกั่วออกไซด์เป็นสารกำบังรังสี ทำการทดสอบด้วยรังสีเอ็กซ์ที่มีพลังงาน 50-120 กิโลโวลต์สูงสุดซึ่งเป็นพลังงานช่วงที่ใช้ในงานด้านรังสีวิจฉัย จากรูปจะเห็นได้ว่า คอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์ และคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมตะกั่วออกไซด์มีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเชิงเส้นที่ใกล้เคียงกันเป็นผลมาจากธาตุบิสมัท และตะกั่วที่เป็นส่วนประกอบของบิสมัทออกไซด์ และตะกั่วออกไซด์ ตามลำดับที่มีเลขอะตอมใกล้เคียงกันแสดงว่า คอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์ และคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมตะกั่วออกไซด์สามารถลดทอนรังสีเอ็กซ์ได้เช่นเดียวกัน

รูปที่ 4.54 แสดงค่าความหนาครึ่งค่า และความหนาเทียบเท่าตะกั่วของการเปรียบเทียบคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์ และตะกั่วออกไซด์เป็นสารกำบังรังสี ทำการทดสอบด้วยรังสีเอ็กซ์พลังงาน 120 กิโลโวลต์สูงสุด จากรูปจะเห็นได้ว่า คอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์ และคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมตะกั่วออกไซด์มีค่าความหนาครึ่งค่าที่ใกล้เคียงกันแสดงว่า คอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์ หรือตะกั่วออกไซด์ที่ความหนาประมาณ 0.18 เซนติเมตร คอมโพสิตของยางธรรมชาติสามารถลดทอนความเข้มของรังสีลงครึ่งหนึ่งจากความเข้มของรังสีเดิม และคอมโพสิตของยางธรรมชาติทั้งสองชนิดที่มีความหนา 13 มิลลิเมตรสามารถลดทอนรังสีได้เทียบเท่าตะกั่วหนาประมาณ 0.8 มิลลิเมตร

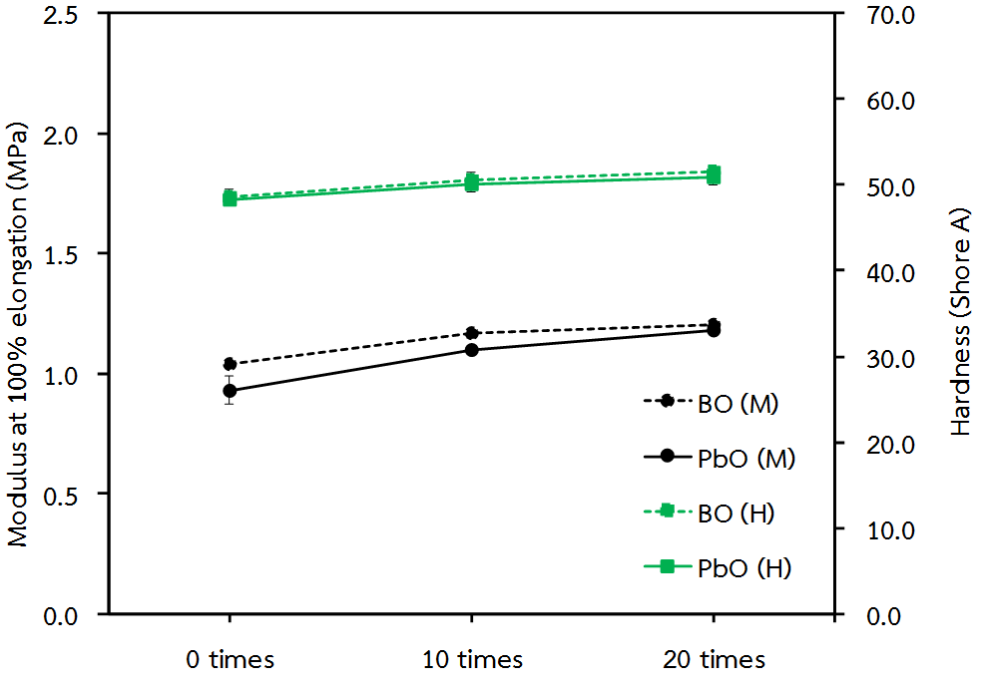
นำค่าความหนาครึ่งค่าของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์ และคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมตะกั่วออกไซด์เปรียบเทียบกับกระจกเชิงพาณิชย์ และกระจกกำบังรังสีเอ็กซ์พบว่า คอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์ และคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมตะกั่วออกไซด์มีค่าความหนาครึ่งค่าที่น้อยกว่ากระจกเชิงพาณิชย์ และกระจกกำบังรังสีเอ็กซ์แสดงว่า คอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์ หรือตะกั่วออกไซด์ปริมาณ 150 ส่วนโดยร้อยละเมื่อเทียบกับยางสามารถกำบังรังสีเอ็กซ์ได้ดีกว่ากระจกเชิงพาณิชย์ และกระจกกำบังรังสีเอ็กซ์ สังเกตได้จากรูปที่ 4.55 ดังนั้นจากผลการทดลองทางด้านรังสีแกมมา และรังสีเอ็กซ์จึงสามารถสรุปได้ว่า คอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์ สามารถนำมาใช้เป็นวัสดุกำบังรังสีที่มีความยืดหยุ่น ทดแทนวัสดุกำบังรังสีที่มีส่วนผสมของตะกั่วได้

4.4.6 ผลของการทดสอบสมบัติเชิงกลหลังผ่านการกำบังรังสีที่มีการฉายรังสีซ้ำ 10 และ 20 ครั้งของคอมโพสิตของยางธรรมชาติมีการเติมบิสมัทออกไซด์ออกไซด์ และตะกั่วออกไซด์เป็นสารกำบังรังสี

ในขั้นตอนนี้จะเป็นการเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของพิจารณาสมบัติเชิงกล และสมบัติด้านการลดทอนรังสีของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์ และตะกั่วออกไซด์ที่ปริมาณ 150 ส่วนโดยร้อยละเมื่อเทียบกับยาง โดยทำการฉายรังสี 10 และ 20 ครั้ง ครั้งละ 100 วินาที โดยการใช้มุมในการกระเจิงแสง 0° ซึ่งมีค่าพลังงานเท่ากับ 662 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ซึ่งผลการทดลองสมบัติเชิงกลหลังได้รับรังสีของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมโลหะออกไซด์เป็นสารกำบังรังสีแสดงในตารางที่ 4.31-4.33 และรูปที่ 4.56-4.58

ตารางที่ 4.32 มอดูลัสที่ระยะยืด 100% และความแข็ง หลังผ่านการกำบังรังสีที่มีการฉายรังสีซ้ำ 10 และ 20 ครั้งของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์ และตะกั่วออกไซด์เป็นสารกำบังรังสี

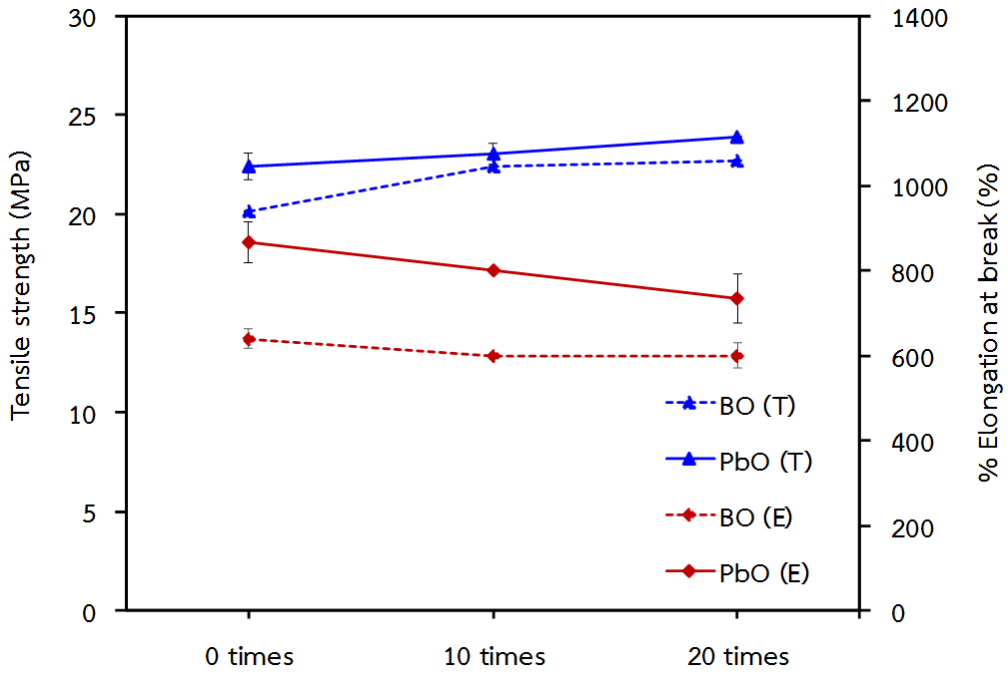
Radiation shielding (times)	BO		PbO	
	Modulus at 100% elongation (MPa)	Hardness (Shore A)	Modulus at 100% elongation (MPa)	Hardness (Shore A)
0	1.04 ±0.01	48.60 ±0.84	0.93 ±0.06	48.20 ±0.40
10	1.17 ±0.02	50.50 ±1.00	1.10 ±0.01	50.00 ±0.82
20	1.20 ±0.01	51.50 ±0.58	1.18 ±0.00	50.90 ±0.96



รูปที่ 4.56 มอดูลัสที่ระยะยืด 100% และความแข็ง หลังผ่านการกำบังรังสีที่มีการฉายรังสีซ้ำ 10 และ 20 ครั้งของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์ และตะกั่วออกไซด์เป็นสารกำบังรังสี

ตารางที่ 4.32 ความต้านทานต่อแรงดึง และระยะยืด ณ จุดขาด หลังผ่านการกำบังรังสีที่มีการฉายรังสีซ้ำ 10 และ 20 ครั้งของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์ และตะกั่วออกไซด์เป็นสารกำบังรังสี

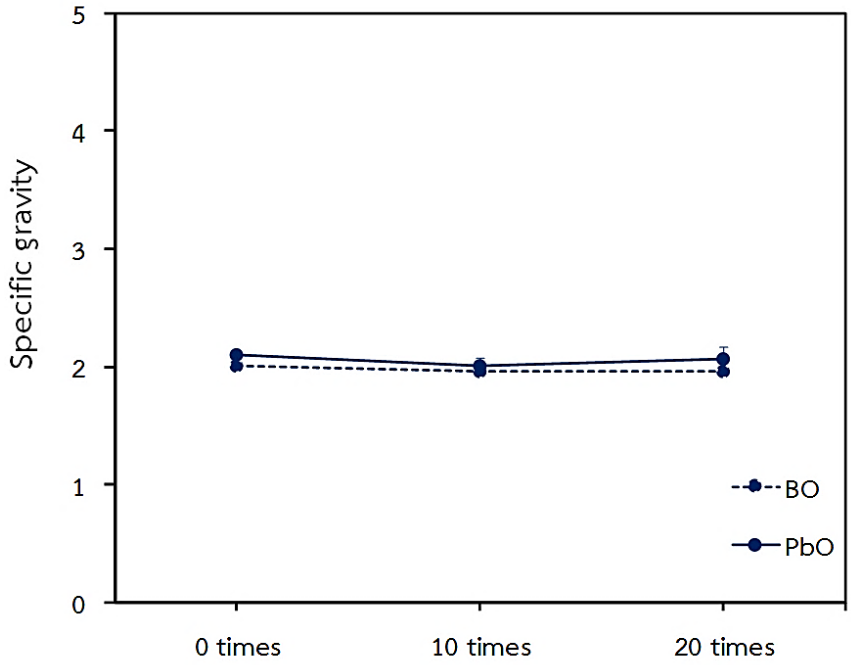
Radiation shielding (times)	BO		PbO	
	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)
0	20.13 ±0.01	640.00 ±22.00	22.41 ±0.68	867.00 ±47.00
10	22.42 ±0.02	600.00 ±0.00	23.01 ±0.52	800.00 ±0.00
20	22.69 ±0.01	600.00 ±30.00	23.89 ±0.01	733.00 ±57.74



รูปที่ 4.57 ความต้านทานต่อแรงดึง และระยะยืด ณ จุดขาด หลังผ่านการกำบังรังสีที่มีการฉายรังสีซ้ำ 10 และ 20 ครั้งของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์ และตะกั่วออกไซด์เป็นสารกำบังรังสี

ตารางที่ 4.34 ความถ่วงจำเพาะ หลังผ่านการกำบังรังสีที่มีการฉายรังสีซ้ำ 10 และ 20 ครั้งของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์ และตะกั่วออกไซด์เป็นสารกำบังรังสี

Radiation shielding	Specific gravity	
(times)	BO	PbO
0	2.004 ±0.050	2.100 ±0.007
10	1.964 ±0.003	2.013 ±0.062
20	1.966 ±0.011	2.066 ±0.105



รูปที่ 4.58 ความถ่วงจำเพาะ หลังผ่านการกำบังรังสีที่มีการฉายรังสีซ้ำ 10 และ 20 ครั้งของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์ และตะกั่วออกไซด์เป็นสารกำบังรังสี

ตารางที่ 4.35 ปริมาณการเชื่อมขวาง หลังผ่านการกำบังรังสีที่มีการฉายรังสีซ้ำ 10 และ 20 ครั้งของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์ และตะกั่วออกไซด์เป็นสารกำบังรังสี

Times	Crosslink density (x10^{-3} cm^2/g)	
	BO	PbO
0	2.63 ±0.00012	2.95 ±0.00026
10	2.84 ±0.00012	2.97 ±0.00019
20	2.90 ±0.00010	3.01 ±0.00047

จากผลการทดลองสมบัติเชิงกลในตารางที่ 4.31-4.33 และรูปที่ 4.56-4.58 จะเห็นได้ว่าผลการทดลองสมบัติเชิงกลทั้งหมดมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับหัวข้อที่ 4.1.6 กล่าวคือเมื่อคอมโพสิตของยางธรรมชาติได้รับรังสีแกมมาทำให้สายโซ่โมเลกุลของยางมีโอกาสเกิดการปฏิกิริยาการเชื่อมขวางขึ้น ส่งผลให้มีปริมาณการเชื่อมขวางเพิ่มขึ้น สมบัติเชิงกลของคอมโพสิตของยางธรรมชาติเพิ่มขึ้น ในขณะเดียวกันคอมโพสิตของยางธรรมชาติจะมีความยืดหยุ่นลดลง ซึ่งเมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์ และตะกั่วออกไซด์จะเห็นได้ว่าคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมตะกั่วออกไซด์ยังคงให้ความต้านทานต่อแรงดึงที่ดีกว่าคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์เนื่องจากการกระจายตัวที่ดีของตะกั่วออกไซด์และการกระจายตัวที่ด้อยกว่าของบิสมัทออกไซด์ในยางธรรมชาติยังส่งผลต่อความต้านทานต่อแรงดึงของคอมโพสิตของยางธรรมชาติหลังผ่านการกำบังรังสีที่มีการฉายรังสีซ้ำ 10 และ 20 ครั้ง โดยหลังจากการกำบังรังสีความถ่วงจำเพาะของคอมโพสิตของยางธรรมชาติไม่เปลี่ยนแปลง

ตะกั่วมีความเป็นพิษสูง ดังนั้นหากต้องการหาโลหะออกไซด์ที่สามารถนำมาเป็นวัสดุกำบังรังสีที่มีคุณสมบัติที่เทียบเท่ากับตะกั่ว บิสมัทออกไซด์จึงเหมาะที่จะนำมาใช้ทดแทนตะกั่วซึ่งคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์ให้สมบัติเชิงกลที่ดี และสามารถลดทอนปริมาณหรือกำบังรังสีได้เทียบเท่ากับคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมตะกั่วออกไซด์ และคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมโลหะออกไซด์มีสมบัติเชิงกลเพิ่มขึ้นได้อีกหลังผ่านการฉายรังสีซ้ำ 10 – 20 ครั้ง

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 การศึกษาการเตรียมสูตรยางธรรมชาติผสมบิสมัทออกไซด์ โดยมีการแปรปริมาณของบิสมัทออกไซด์

ผลการศึกษาการเตรียมคอมโพสิตของยางธรรมชาติ ที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์ที่ปริมาณ 0 10 20 40 80 120 และ 150 ส่วนโดยร้อยละเมื่อเทียบกับยางพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณของบิสมัทออกไซด์ ส่งผลให้สมบัติเชิงกลลดลง ความแข็ง และความถ่วงจำเพาะเพิ่มขึ้น ในทางกลับกันสมบัติในการลดทอนรังสีของคอมโพสิตของยางธรรมชาติเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณของบิสมัทออกไซด์ และเมื่อทำการเปรียบเทียบสมบัติการกำบังรังสีระหว่างคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์ในปริมาณต่าง ๆ กับวัสดุกำบังรังสีพบว่า คอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีบิสมัทออกไซด์ปริมาณ 150 ส่วนโดยร้อยละเมื่อเทียบกับยางให้สมบัติทางด้านการกำบังรังสีที่ดีที่สุด และคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีปริมาณบิสมัทออกไซด์เท่ากับ 80 120 และ 150 phr เป็นปริมาณที่เหมาะสมที่จะนำมาผลิตเป็นวัสดุกำบังรังสี นอกจากนี้คอมโพสิตของยางธรรมชาติที่เตรียมได้ เมื่อผ่านการฉายรังสีซ้ำ 10 ครั้ง และ 20 ครั้งจะมีความต้านทานต่อแรงดึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ตามลำดับ

5.2 การศึกษาการเตรียมสูตรยางธรรมชาติผสมสารตัวเติมสำหรับการกำบังรังสี โดยมีการแปรชนิดของสารตัวเติมสำหรับการกำบังรังสี

ผลการศึกษาการเตรียมคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมสารตัวเติมสำหรับการกำบังรังสีเป็นสารกำบังรังสี โดยมีการแปรชนิดของสารตัวเติมสำหรับการกำบังรังสีได้แก่ แบเรียมคาร์บอเนต บิสมัทออกไซด์ และแบเรียมซัลเฟตที่ปริมาณ 150 ส่วนโดยร้อยละเมื่อเทียบกับยางพบว่า คอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์ให้สมบัติเชิงกล และสมบัติการลดทอนรังสีที่ดีที่สุด นอกจากนี้เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับวัสดุกำบังรังสีชนิดต่าง ๆ คอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์สามารถกำบังรังสีได้ดีกว่าทุกวัสดุกำบังรังสีที่นำมาเปรียบเทียบ

5.3 การศึกษาผลการเตรียมคอมโพสิตของยางธรรมชาติ โดยมีการแปรชนิดของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์เป็นสารกำบังรังสี

ผลการศึกษาการเตรียมคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์ที่ปริมาณ 80 ส่วนโดยร้อยละเมื่อเทียบกับยาง โดยมีการแปรชนิดของยางธรรมชาติได้แก่ ยางธรรมชาติที่ไม่ผ่านการดัดแปรโมเลกุล ยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่มีอิพอกไซด์ร้อยละ 25 โดยโมล และยางธรรมชาติ

อิพอกไซด์ที่มีอิพอกไซด์ร้อยละ 50 พบว่า ยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่มีอิพอกไซด์ร้อยละ 25 โดยโมลที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์ให้สมบัติเชิงกลที่ดีที่สุด และชนิดของยางธรรมชาติไม่มีผลต่อการลดทอนรังสีของคอมโพสิตของยางธรรมชาติ ผลการเปรียบเทียบคอมโพสิตของยางธรรมชาติกับวัสดุกำบังรังสีแกมมาพบว่า คอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์ที่ปริมาณ 80 ส่วนโดยร้อยละเมื่อเทียบกับยางสามารถกำบังรังสีได้ดีกว่ากระจกเชิงพาณิชย์ และสามารถกำบังรังสีได้น้อยกว่าเซอร์เพนไทน์ คอนกรีต และเฮมาไทด์-เซอร์เพนไทน์ ในขณะเดียวกันคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์ที่ปริมาณ 80 ส่วนโดยร้อยละเมื่อเทียบกับยางสามารถกำบังรังสีเอ็กซ์ได้ดีกว่าวัสดุกำบังรังสีทุกชนิดที่นำมาเปรียบเทียบ นอกจากนี้คอมโพสิตของยางธรรมชาติที่เตรียมได้ เมื่อผ่านการฉายรังสีจะมีความต้านทานต่อแรงดึงเพิ่มขึ้น

5.4 การศึกษาผลการเปรียบเทียบคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์ หรือตะกั่วออกไซด์เป็นสารกำบังรังสี

ผลการศึกษาการเปรียบเทียบคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์ และตะกั่วออกไซด์ที่ปริมาณ 150 ส่วนโดยร้อยละเมื่อเทียบกับยางพบว่า คอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมตะกั่วออกไซด์ให้สมบัติเชิงกลที่ดีกว่า และคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์และตะกั่วออกไซด์ให้สมบัติการลดทอนรังสีที่ไม่ต่างกัน เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับวัสดุกำบังรังสีชนิดต่าง ๆ พบว่า คอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์ และตะกั่วออกไซด์มีประสิทธิภาพในการกำบังรังสีได้ดีกว่าวัสดุกำบังรังสีทุกชนิดที่นำมาเปรียบเทียบ ถึงอย่างไรก็ตามตะกั่วมีความเป็นพิษสูงซึ่งเป็นอันตรายต่อร่างกาย และสิ่งแวดล้อม ถ้าหากคำนึงถึงความปลอดภัยในการใช้งานคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมตะกั่วออกไซด์จึงไม่เหมาะอย่างยิ่งที่จะนำมาผลิตเป็นวัสดุที่สัมผัสกับผิวหนัง ดังนั้นคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์เหมาะสมที่สุดที่จะนำมาผลิตเป็นวัสดุกำบังรังสีที่มีความยืดหยุ่น นอกจากนี้คอมโพสิตของยางธรรมชาติที่เตรียมได้ เมื่อผ่านการฉายรังสีจะมีความต้านทานต่อแรงดึงเพิ่มขึ้น

สภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมคอมโพสิตของยางธรรมชาติสำหรับการกำบังรังสีคือ ยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์ 150 ส่วนโดยร้อยละเมื่อเทียบกับยางให้สมบัติเชิงกลสูงพอที่จะนำมาผลิตเป็นวัสดุกำบังรังสีที่มีความยืดหยุ่นสูง และสามารถกำบังรังสีแกมมา และรังสีเอ็กซ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์ปริมาณ 150 ส่วนโดยร้อยละเมื่อเทียบกับยางสามารถกำบังรังสีแกมมาได้ดีกว่ากระจกเชิงพาณิชย์ และสามารถกำบังรังสีได้น้อยกว่าเซอร์เพนไทน์ คอนกรีต และเฮมาไทด์-เซอร์เพนไทน์ นอกจากนี้ยังสามารถกำบังรังสีเอ็กซ์ได้ดีกว่ากระจกเชิงพาณิชย์ และกระจกกำบังรังสีเอ็กซ์

บรรณานุกรม

[1] บุญรักษ์ กาญจนวรวณิชย์. 2552. แผ่นเส้นใยนาโนคอมโพสิตป้องกันรังสีเอ็กซ์. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะ และวัสดุแห่งชาติ: กรุงเทพฯ.

[2] M. Finnerty and P. Brennan. 2005. Protective aprons in imaging departments: manufacturer stated lead equivalence values require validation. *Radiology* 15: 1477—1484.

[3] K. Lambert and T. McKeon. 2001. Inspection of lead aprons: criteria for rejection. *Health Physical* 80: 67—69.

[4] ศูนย์การเรียนรู้อุตสาหกรรมเหมืองแร่. 2011. ตะกั่ว. กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่ กระทรวงอุตสาหกรรม. กรุงเทพฯ.

[5] G.Flora, D.Gupta and A.Tiwari. 2012. Toxicity of lead: a review with recent updates. *Toxicology* 5: 47—58.

[6] กุลธิดา ถาวรกิจการ และกิจชัย ศิริวัฒน์. 2542. พิษจากโลหะตะกั่ว. ศูนย์ข้อมูลพิษวิทยา. กรุงเทพฯ.

[7] บทความสมาคมนิวเคลียร์แห่งประเทศไทย. 2550. ทอเรียมไดออกไซด์. สมาคมนิวเคลียร์แห่งประเทศไทย. http://www.nst.or.th/article/article494/article49409.htm (สืบค้นเมื่อ 2 พฤษภาคม 2561)

[8] J. Chayanit and W. Doonyapong. 2014. Innovative neutron shielding material composing of natural rubber-stryrene butadiene rubber blends and diboron trioxide. Chulalongkorn University. http: / / cuir. car. chula. ac. th/ handle/ 123456789/ 45903 (accessed 2 May 2018)

[9] ทิวาวัลย์ อธิชาติกุล, นพวรรณ ชนัญพานิช, วิทิต ผึ่งกัน และชลดา สุวรรณบูรณ์. 2560. สัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเอ็กซ์ของแผ่นคอมโพสิต Pu/$BaSO_4$. *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ* 27(1): 159—168.

[11] K. Kalayanee , S. Lek, B. Tripob and N. Sompong. 2008. Ferrite-STR 5L Rubber Composites as Gamma Radiation shildings. *Khon Kaen University research journal* 13(2): 269—271.

[12] วราภรณ์ ขจรไชยกุล. 2549. ยางธรรมชาติ: การผลิต และการใช้งาน. สำนักกองทุนสนับสนุนงานวิจัย (สกว.). http://www.electron.rmutphysics.com/sciencenews (สืบค้นเมื่อ 19 มกราคม 2561)

[13] บทความศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ. 2550. ถาม-ตอบปัญหาวัสดุศาสตร์. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ. https://www.mtec.or.th/academic-services/mtec-question-answer/1950 (สืบค้นเมื่อ 2 พฤษภาคม 2561)

[14] สารานุกรมไทยสำหรับเยาวชนฯ. 2015. รังสี และประเภทของรังสี. มหาวิทยาลัยมหิดล. http://www.mt.mahidol.ac.th/elearning/instrumentation/radiation.htm (สืบค้นเมื่อ 2 พฤษภาคม 2561)

[15] การเรียนรู้วิทยาศาสตร์โลก และอวกาศ. 2003. คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า. ฟิสิกส์ราชมงคล http://www.rumtphysics.com/physicsoldfront/100/2/emw1.htm (สืบค้นเมื่อ 2 พฤษภาคม 2561)

[16] นายธีรพงษ์ แสงสิทธิ์. 2008.กัมมันตรังสี. http://nakhamwit.ac.th/Content.html (สืบค้นเมื่อ 2 พฤษภาคม 2561)

[17] ผศ.ปรียา อนุพงษ์องอาจ. 2008. รังสีเอ็กซ์. ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรังสิต. http://www.rmutphysics.com/physics/quantum19.htm (สืบค้นเมื่อ 2 พฤษภาคม 2561)

[18] นางสาวเจือทิพย์ ภูริจิตราวงศ์, นางสาวสาวิตรี จันทร์สอน และนางสาวสุภาพร ศรีสุวรรณ. 2551. รังสีคืออะไร. มหาวิทยาลัยมหิดล. http://www.mt.mahidol.ac.th/e-learning/instrumentation/NMP_chap1_47/page/2_radiation.htm (สืบค้นเมื่อ 2 พฤษภาคม 2561)

[19] อนุกรรมการความปลอดภัยทางรังสี. 2555. อันตรายของรังสี. แนวทางปฏิบัติเพื่อความปลอดภัยทางรังสี. หน้า 6—12. กรุงเทพมหานคร: ทองสุขพริ๊นท์.

[20] อาจารย์มลุลี. 2560. ความรู้พื้นฐานด้านความปลอดภัยทางรังสี สำหรับผู้ปฏิบัติงานกับเครื่องกำเนิดรังสีและสารกัมมันตรังสี. http://www.si.mahidol.ac.th/th/division/admin/news.pdf (สืบค้นเมื่อ 4 พฤษภาคม 2561)

[21] ประชุมการควบคุมคุณภาพการวินิจฉัยด้วยเอ็กซเรย์. 2553. หลักการปฏิบัติให้ได้รับปริมาณรังสีให้ได้น้อยที่สุด. โรงพยาบาลมนารมย์. https://www.gotoknow.org/posts/387359 (สืบค้นเมื่อ 4 พฤษภาคม 2561)

[22] ชวลิต วงษ์เอก. 2550. Interaction of radiation with matter. มหาวิทยาลัยมหิดล. http://www.coshem.mahidol.ac.th/downloads/RadiationTrainingDay1/อันตรกิริยาของรังสี.ชวลิต.pdf (สืบค้นเมื่อ 4 พฤษภาคม 2561)

[23] P.Yasaka, N.Pattanaboonmee, HJ.Kim, P.Limkitjaroenporn and J.Kaewkhao. 2014. Gamma radiation shielding and optical properties measurement of zine bismuth borate glasses. *Annals of Nuclear Energy* 68: 4—9.

[24] K. Kridsiri, J. Kaewkhao, A. Pokaipisit, W. Chewpraditkul and P. Limsuwan. 2009. Gamma-rays shielding properties of xPbO(100-x) B_2O_3 glasses system at 662 keV. *Annals of Nuclear Energy* 36: 1360—1365.

[25] สายทอง ก้งทอง. 2556. การสังเคราะห์แก้วบอโรซิลิเกตจากขี้เถ้าแกลบสำหรับประยุกต์ใช้เป็นแก้วกำบังรังสี. วิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม.

[26] D. Hull and T.W. Clyne. 1996. An introduction to composite materials. Cambridge University. www.book.google.co.th (accessed 2 January 2018)

[27] K. K. Chawla. 2001. Fibrous Reinforcements for composites: Overview. in Encyclopedia of Materials. 3160—3167. Amsterdam: Elsevier.

[28] หฤทภัค กีรติเสวี, ฉัตรชัย วีระนิติสกุล และอภิรัตน์ เลาห์บุตรี. 2010. ภาพรวมของวัสดุเชิงประกอบ (An Overview of Composite Materials). วิศวกรรมสาร 22(70): 18—19.

[29] thai composites. 2547. นิยามของวัสดุคอมโพสิต. Thai composites. http://www.thaitechno.net/knowledge_detail.php (สืบค้นเมื่อ 3 พฤษภาคม 2561)

[30] H.Y.Chen, J.Wang, P.Y.Ma, J.Liang, L.Xiang. 2015. Influence of hydroxylation on fabrication of PVC/$CaSO_4$ composites. *Applied Surface Science* 357: 2320—2326.

[31] ผศ. ดร. สุปราณี แก้วภิรมย์ และผศ. ดร. ศิริเดช บุญแสง. 2016. คอมโพสิตรักษ์สิ่งแวดล้อมจากพอลิแลคติกแอซิดและเส้นใยสับปะรด. รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ และสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

[32] S. Tang, J. Deng and S. Wang and W. Liu. 2007. Fabrication and characterization of an ultrahigh-temperature carbon fiber-reinforced ZrB_2-SiC matrix composite. *American Ceramic Society* 90: 3320—3322.

[33] F. Yang, X. Zhang, J. Han and S. Du. 2008. Preparation and properties of ZrB_2-SiC ceramic composites reinforced by carbon nanotubes. *Inorganic Materials* 23: 950—954.

[34] F. Yang, X. Zhang, J. Han and S. Du. 2008. Characterization of hot-pressed short carbon fiber reinforced ZrB_2- SiC ultra- high temperature ceramic composites. *Alloys and Compounds* 472: 395—399.

[35] W.Yiguang, L.Wen, C.Laifei and Z.Litong. 2009. Preparation and Properties of 2D C/ZrB_2-SiC ultrahigh temperature. *Materials Science and Engineering* 524: 129—131.

[36] C.Pengcheng, J.Siyi, C.Yanhui and R.Pinggen. 2018. Improved fracture toughness of CNTs/SiC composites by HF treatment. *Alloys and Compounds*m73: 42—46.

[37] AR.Bhattacharyya, TV.Sreekumar, T.Liu, S. Kumar, LM. Erieson, RH. Hauge. 2003. Crystallization and orientation studies in polypropylene/ single walled carbon nanotubes composites. *Polymer* 44(8): 2373—2377.

[38] T.Y. Zhou, Gary C.P. Tsui, J.Z. Liang, S.Y. Zou, C.Y. Tang, Vesna Miskovic-Stankovic. 2016. Thermal properties and thermal stability of PP/MWCNT composites. *Composites* Part B. 90: 107—114.

[39] P.L. Teh, M. Jaafar, H.M. Akil. 2018. Factors of the use of fused silica, glass powder and silica minerals in epoxy (epoxy) on dynamic properties. Polymer. *advanced technology* 19: 308—315.

[40] S. Zhang, X.Y. Cao, Y.M. Ma. 2011. Conducted thermal conductivity, impact and tensile tests on Al2O3/high density polyethylene (HDPE) composites. *Express polymer* 5: 581—590.

[41] M. A. Onitiri, E.T. Akinlabi. 2018. Thermal conductivity and impact properties of iron ore tailings filled epoxy composites. *Proceedings* 5: 79—83.

[42] รังสิมา หญีตสอน, นฤมล เครือองอาจกุล, สุพจ โชติวรรณ และวิวรรณ ธรรมมงคล. 2002. HDPE ผสมไมก้าหรือทาวคัม: สมบัติการแพร่ผ่านของแก๊สออกซิเจน และสมบัติเชิงกล. *วารสารวิชาการพระจองเกล้าพระนครเหนือ* 12(3): 48—56.

[43] K. Sing. 2002. Gamma-ray attenuation coefficients in bismuth borate glasses. *Nuclear and Methods in Physics Research B* 194: 1—6.

[44] P.Kamonpan, C.Nipaphat, C.Wittawat and R.Gobwute. 2005. Preparation of lead glass using as a radiation protected Material. *Science and Technology* 2(1): 41—50.

[45] ดนุพร ตันนโยภาส, วิชัย นกแก้ว และชิดพล เอียดปาน. 2551. คุณลักษณะของคอนกรีตกำบังรังสีแกมมาผสมมวลรวมแบไรต์ และหินแกรไฟต์ดิบบด, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรม ครั้งที่ 6. 10-12 พฤษภาคม 2551 ณ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. สงขลา: คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

[46] K. Kalayanee , S. Lek, B. Tripob and N. Sompong. 2008. Ferrite-STR 5L Rubber Composites as Gamma Radiation shildings. *Khon Kaen University research journal* 13(2): 269—271.

[47] นรินทร์ สิริกุลรัตน์. 2552. การเตรียม และวิเคราะห์ประสิทธิภาพการป้องกันรังสีของวัสดุผสมแก้ว-ยาง. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรบัณฑิต, ภาควิชาฟิสิกส์ และวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ และมหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

[48] นพวรรณ ชนัญพานิชย์ และอุทุมมา มัฆะเนมี. 2554. แผ่นเส้นใยนาโนคอมโพสิตป้องกันรังสีเอ็กซ์. การประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยีนิวเคลียร์ ครั้งที่ 12. 6-7 กรกฎาคม 2554 ณ โรงแรมแชงกรีลา กรุงเทพมหานคร.

[49] กีรติกานต์ นิลของ, เอกชัย วิมลมาลา, ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ และเกียรติศักดิ์ แสนบุญเรือง. 2560. วัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื้อยไม้. การประชุมวิชาการมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 54. 2-5 กุมภาพันธ์ 2559 ณ.มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์: 287—294.

[50] T. Ozdemira, A.Gungora, K. Akbaya, H.Uzuna and Y.Babuccuoglub. 2018. Nano lead oxide and epdm composite for development of polymer-based radiation shielding material: Gamma irradiation and attenuation tests. *Radiation Physics and Chemistry* 144: 248—255.

[51] J.Johns, C.Nakason, A.Thitithammawong, P.Klinpituksa. 2012. Method to vulcanize natural rubber from medium ammonia latex by using glutaraldehyde. *Rubber chemistry and Technology* 85(4): 565—575.

[52] โครงการพัฒนาอุตสาหกรรมยางคอมพาวด์เพื่อยกระดับมูลค่าผลิตภัณฑ์ เพื่อสนับสนุนอุตสาหกรรมยานยนต์ และเครื่องมือแพทย์. 2014. สถาบันพลาสติก. http://rubber.oie.go.th/box/Article/25239/.pdf (สืบค้นเมื่อ 29 เมษายน 2562)

[53] K.Ninyong, E.Wimolmala, N.Sombatsompop, K. Saenboonruang, 2017. Potential use of NR and wood/NR composites as thermal neutron shielding materials. *Polymer Testing* 59: 336—343.

[54] T. Donruedee, R. Anawat, P. Worawat, S. Kiadtisak, 2018. Flexible, lead-free, gamma-shielding material based on natural rubber/metal oxide composites. *Iranian Polymer* 27: 33—41.

[55] S.H. El-Sabbagh, A.A. Yehia, 2007. Detection of crosslink density by difference methods for natural rubber blended with SBR and NBR. *Egyptian Journal of Solids* 30: 157—173.

[56] READ. 2018. Bismuth Oxide Powder (Bi_2O_3). Reade International Corp. https://www.reade.com/products/bismuth-oxide-powder-bi2o3 (accessed 29 April 2019)

[57] วรวิทย์ จันทร์สุวรรณ. 2554. เลขอะตอม เลขมวลและไอโซโทป. BOONMAWONG WEB. https://boonmawong.wordpress.com/ (สืบค้นเมื่อ 1 พฤษภาคม 2562)

[58] Y. H. Lee, M. Cho, J.D. Nam, Y. Lee, 2018. Effect of ZnO particle sizes on thermal aging behavior of natural rubber vulcanizates. *Polymer Degradation and Stability* 148: 50—55.

[59] CAMEO Chemicals. 2016. BARIUM CARBONATE. CAMEO Chemicals. https://cameochemicals.noaa.gov/chemical/8302 (สืบค้นเมื่อ 24 มิถุนายน 2562)

[60] Dr. Kamar Shah Ariffin. 2015. Barite (BARIUM). Mineral Perindustrian. http://lidarmax.altervista.org/lidar/SCIE%20CHIMICHE/BARIO%20generici/Baryte.pdf (สืบค้นเมื่อ 24 มิถุนายน 2562)

[61] เสาวนีย์ ก่อวุฒิกุลรังษี และกนกวรรณ หัตถิยา. 2558. การใช้เยื่อกระดาษหนังสือพิมพ์เป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติ. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. http://dmhost2.psu.ac.th/~rumpsu/index.php/psu-research (สืบค้นเมื่อ 25 มิถุนายน 2562)

[62] POLYTECH INDUSTRY Co., ltd. 2554. ยางธรรมชาติ. RUBBER. http://polytech-rubber.blogspot.com/2011/07/rubber.html (สืบค้นเมื่อ 25 มิถุนายน 2562)

[63] READE Certifications. 2018. Litharge (Lead (II) Oxide), Lead Monoxide. READE. https://www.reade.com/products/litharge-lead-ii-oxide-lead-monoxide (สืบค้นเมื่อ 26 มิถุนายน 2562)

ภาคผนวก ก.

ค่าทอร์คสูงสุด (M_H), ค่าทอร์คต่ำสุด (M_L) และปริมาณการเชื่อมขวาง (torque differences; Δ M) ที่ได้จากเครื่องรีโอมิเตอร์แบบดายน์เคลื่อนที่ (moving die rheometer; MDR)

ตารางที่ 1ก ค่าทอร์คสูงสุด (M_H), ค่าทอร์คต่ำสุด (M_L) และปริมาณการเชื่อมขวาง (torque differences; Δ M) ของวัสดุคอมโพสิตยางธรรมชาติที่มีการแปรปริมาณของบิสมัทออกไซด์ที่แตกต่างกัน

BO contents (phr)	M_H (dNm)	M_L (dNm)	Δ M (dNm)
0	6.10	0.39	5.71
10	6.28	0.47	5.81
20	7.00	0.36	6.64
40	7.53	0.47	7.06
80	9.74	0.42	9.32
120	9.86	0.34	9.52
150	10.47	0.39	10.08

ตารางที่ 2ก ค่าทอร์คสูงสุด (M_H), ค่าทอร์คต่ำสุด (M_L) และปริมาณการเชื่อมขวาง (torque differences; Δ M) ของวัสดุคอมโพสิตยางธรรมชาติที่มีการแปรชนิดของสารกำบังรังสีที่แตกต่างกัน

Types of radiation shielding fillers	M_H (dNm)	M_L (dNm)	Δ M (dNm)
BC	10.05	0.71	9.34
BO	10.47	0.39	10.08
BS	10.24	0.29	9.95

ตารางที่ 3ก ค่าทอร์คสูงสุด (M_H), ค่าทอร์คต่ำสุด (M_L) และปริมาณการเชื่อมขวาง (torque differences; Δ M) ของวัสดุคอมโพสิตยางธรรมชาติที่มีการแปรชนิดของยางธรรมชาติ และเติมบิสมัทออกไซด์เป็นสารกำบังรังสี

Epoxide contents (%)	M_H (dNm)	M_L (dNm)	Δ M (dNm)
0	10.47	0.39	10.08
25	7.53	0.47	7.06
50	7.37	0.36	7.01

ตารางที่ 4ก ค่าทอร์คสูงสุด (M_H), ค่าทอร์คต่ำสุด (M_L) และปริมาณการเชื่อมขวาง (torque differences; Δ M) ของวัสดุคอมโพสิตยางธรรมชาติที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์ และตะกั่วออกไซด์เป็นสารกำบังรังสี

Epoxide contents (%)	M_H (dNm)	M_L (dNm)	Δ M (dNm)
BO	10.47	0.39	10.08
PbO	10.15	0.31	9.84

ภาคผนวก ข.

ต้นฉบับบทความวิจัย

Intom S., Kalkornsuranee E., Johns J., Kotan S., Keawjang S., Hongtong W., Chaiphaksa W. and Kaewkhao J. 2018. Mechanical and radiation shielding properties of flexible material based on natural rubber/ Bi_2O_3 composites

Manuscript Details

Manuscript number	RPC_2019_1331
Title	Mechanical and radiation shielding properties of flexible material based on natural rubber/ Bi2O3 composites
Article type	Full Length Article

Abstract

The purpose of this investigation have been developed lead-free and flexible radiation shielding materials. Composites of natural rubber (NR) were prepared by incorporating bismuth oxide (Bi2O3) with various loading levels. The variation mechanical properties of the composite with different loading levels have been studied. The gamma ray shielding properties were measured with 137Cs (662 keV) source by Compton scattering technique. The X-ray shielding characterization were measured with high frequency digital radiography X-ray machine Shimadzu model RAD Speed Pro. The results show that addition of Bi2O3 into natural rubber enhances the modulus at 100 % elongation, hardness and specific gravity of the composites, whereas tensile strength and elongation at break reduces. For gamma ray shielding properties, the experimental values of mass attenuation coefficients (□m), effective atomic number(Zeff), effective electron densities (Ne) and lead equivalent of the NR composites were found to increase with the increasing of Bi2O3 concentrations, while these value were decrease with the increasing of photon energy from 223 keV to 662 keV. The half value layer (HVL) values of all samples were decreased with the increasing of Bi2O3 concentrations. The NR of 150 phr Bi2O3 composites found to be the lowest HVL values in comparison with commercial window, serpentine, ordinary concrete and hemimatite-serpentine. For X-ray shielding properties, the linear attenuation coefficient (□) and lead equivalent (dPb) were increased with increased Bi2O3 add in NR and show the decreasing of X-ray energies range.

Keywords	Natural rubber composites, Bismuth oxides, Radiation shielding, X-ray, Gamma ray.
Taxonomy	Electrochemistry, Radiation Physics
Corresponding Author	Jakrapong Kaewkhao
Corresponding Author's Institution	Nakhon Pathom Rajabhat University
Order of Authors	Sirilak Intom, Ekwipoo Kalkornsurapranee, Jobish Johns, Siriprapa Kaewjaeng, suchart kothan, Wirapron Hongtong, Wuttichai Chaiphaksa, Jakrapong Kaewkhao
Suggested reviewers	B. Eraiah, JAYASANKAR C.K., juniastel rajagukguk

Submission Files Included in this PDF

File Name [File Type]

Cover Letter.docx [Cover Letter]

Research Highlights.docx [Highlights]

MUS Radiation.docx [Manuscript File]

Fig.docx [Figure]

Tables.docx [Table]

To view all the submission files, including those not included in the PDF, click on the manuscript title on your EVISE Homepage, then click 'Download zip file'.

From,

Date: 02/09/2019

Dr. Jakrapong Kaewkhao
Center of Excellence in Glass Technology and Materials Science,
Nakhon Pathom Rajabhat University,
Meuang, Nakhon Pathom, 73000, Thailand

To
Editor in Chief
Radiation Physics and Chemistry

I herewith sending our manuscript entitled: "Mechanical and radiation shielding properties of flexible material based on natural rubber/ Bi_2O_3 composites" for the publication in your reputed journal. The manuscript suits the standards as it discuss the radiation shielding properties of natural rubber.

Thanking You
Yours Sincerely,
Dr. Jakrapong Kaewkhao

Research Highlights

- Compton scattering technique were used to measure gamma-ray shielding properties with ^{137}Cs source.
- Enhancement in the radiation shielding properties were observed with addition of Bi_2O_3 in natural rubber.
- Addition of Bi_2O_3 content decreases half value layer (HVL).
- NR of 150 phr Bi_2O_3 composites found to be the lowest HVL values in comparison with commercial window

Mechanical and radiation shielding properties of flexible material based on natural rubber/ Bi_2O_3 composites

Sirilak Intom[a], Ekwipoo Kalkornsurapranee[a], Jobish Johns[b], Siriprapa Kaewjaeng[c], Suchart Kothan[c], Wirapron Hongtong[d], Wuttichai Chaiphaksa[d,e], **Jakrapong Kaewkhao[d,e*]**

[a] *Department of Materials Science and Technology, Faculty of Science, Prince of Songkla University, Hat-Yai, Thailand.*
[b] *R&D Center, Department of Physics, Rajarajeswari College of Engineering, Bangalore, INDIA.*
[c] *Department of Radiologic Technology, Faculty of Associated Medical Sciences, Chiang Mai University, Chiang Mai, Thailand.*
[d] *Physics Program, Faculty of Science and Technology, Nakhon Pathom Rajabhat University, Nakhon Pathom, Thailand.*
[e] *Center of Excellence in Glass Technology and Materials Science (CEGM), Nakhon Pathom Rajabhat University, Nakhon Pathom, Thailand*

ABSTRACT

The purpose of this investigation have been developed lead-free and flexible radiation shielding materials. Composites of natural rubber (NR) were prepared by incorporating bismuth oxide (Bi_2O_3) with various loading levels. The variation mechanical properties of the composite with different loading levels have been studied. The gamma ray shielding properties were measured with ^{137}Cs (662 keV) source by Compton scattering technique. The X-ray shielding characterization were measured with high frequency digital radiography X-ray machine Shimadzu model RAD Speed Pro. The results show that addition of Bi_2O_3 into natural rubber enhances the modulus at 100 % elongation, hardness and specific gravity of the composites, whereas tensile strength and elongation at break reduces. For gamma ray shielding properties, the experimental values of mass attenuation coefficients (μ_m), effective atomic number(Z_{eff}), effective electron densities (N_e) and lead equivalent of the NR composites were found to increase with the increasing of Bi_2O_3 concentrations, while these value were decrease with the increasing of photon energy from 223 keV to 662 keV. The half value layer (HVL) values of all samples were decreased with the increasing of Bi_2O_3 concentrations. The NR of 150 phr Bi_2O_3 composites found to be the lowest HVL values in comparison with commercial window, serpentine, ordinary concrete and hemimatite-serpentine. For X-ray shielding properties, the linear attenuation coefficient (μ) and lead equivalent (dPb) were increased with increased Bi_2O_3 add in NR and show the decreasing of X-ray energies range.

Keyword: Natural rubber composites, Bismuth oxides, Radiation shielding, X-ray, Gamma ray.

1. Introduction

X-ray and gamma ray are used in industries, hospitals and laboratories for various purposes. Such types of radiations have significant side effects and hazardous to health. As a safety measure, radiation protection is desperately needed to avoid the exposure of radiation. Providing protection to human, animals and environment from high energy electromagnetic radiation is termed as radiation shielding. Various types of shielding materials with better radiation resistivity have been developed and reported in literature. Lead can be used as a common material for radiation shielding due to its low cost and high atomic number (Z=82). Highly energetic electromagnetic waves such as X-ray and gamma ray will be absorbed by materials with high atomic number or heavy metals. Absorption capacity of radiation is higher in cases of shielding material with higher atomic number. However, lead has several disadvantages such as heavy weight, easy to crack, harmful to humen health and environment (Demayo et al., 1982; Ozdemira et al., 2018). Hence, researchers have attempted to develop alternative lead-free radiation shielding materials. Concrete is an example for lead-free shielding material which consists of barite, perlite and tungsten oxides (WO_3) (Topcu, 2003; Bektas et al., 2005; Tekin et al., 2017). Heavy-metal oxide glasses and borate glass system consisting of Bi_2O_3 (El-Khayatt, 2014; Kaewkhao, 2010). Radiation shielding materials are generally made up of concrete or glass with heavy weight and non-flexible. These are the drawbacks of using such materials in specific areas. In view of this, researchers have been developed flexible-lead free-radiation shielding materials by adding various compounds as fillers into a polymer matrix to shield or reduce energy of radiation. polyurethane/barium sulfate composites, STR 5L/ferried/carbon black composites and natural rubber/iron oxide (Fe_3O_4) composites are the complex materials reported in the literature (Tiwawn, 2017; Kalayanee, 2008; Donruedee, 2018). However, radiation shielding materials are less flexible due to the brittle nature of synthetic polymers on incorporating with fillers.

In the present investigation, a lead-free, radiation protection at specific areas, flexible and lightweight shielding material based on natural rubber with addition various amount of bismuth oxide (Bi_2O_3). bismuth oxide has relatively high Z value (Z=83), high density, high melting point and available in the form of fine powder (Chanthima et al., 2017). Mechanical properties of the radiated shielding materials were investigated using tensile testing to determine modulus at 100%, tensile strength and elongation at break. In addition, specific gravity and hardness of radiation shielding materials are also investigated. The material developed can be used as a safe protective jacket by both the radiation workers and the patients during the medical exposure to minimize the exposure onto tissues and organs. For example: glove, apron, underwear and wristband for radiation shielding.

2. Materials and methods

2.1. Materials

The details of ingredients used to prepare composites of natural rubber are summarized in Table 1.

2.2. Preparation of composites

The mixtures of NR and other ingredients were prepared using an internal mixer (HAAK PolyLab OS, USA) at 60 °C with a rotor speed of 60 rpm. The preparation of composites consits of mastication and compounding. For mastication, NR was masticated in an internal mixer for 10 min. Further, ZnO, Stearic acid, TBBS, Bi_2O_3 and Sulfur were added into the masticated rubber for compounding and the mixing time was about 20-25 minutes. After compounding, cure time (t_{c90}) and torque differences were measured using moving die rheometer (MDR) and Vulcanization of rubber occurs during compression molding (LCC 140, Taiwan) at 150 °C.

2.3. Cure characteristics

The cure time (t_{c90}) and torque differences were evaluated using moving die rheometer (MDR type, Alpha RPA 2000, USA) according to ASTM D 5289 at a test temperature of 150 °C and test time 30 min. The cure time determined from rheometer was used to vulcanize NR composites in a compression molding.

2.4. Dispersion analysis

The nature of distribution of bismuth (Bi) particles in NR composites were studied by using an EDX spectrometer attached to scanning electron microscope (SEM Quanta 400 FEI, Netherland). The specimens were mounted on aluminum stubs using carbon tape and then coated with a thin layer of gold to prevent charging before scanning. The elemental composition of chemicals present in NR composites were calculated from two steps.

Step 1: Calculating the ratio of elements in percentage by Equation1

$$\text{Ratio of element}(\%) = \frac{\text{Molecular weight of element}}{\text{Molecular weight of chemical}} \times 100 \quad (1)$$

Step 2: Calculating the ratio of elements in weight percentage by Equation 2

$$\text{Ratio of element (wt\%)} = \frac{\text{Ratio of element (\%)} \times \text{Ratio of chemical}}{100} \quad (2)$$

Where

$$\text{Ratio of chemical (wt\%)} = \frac{\text{phr of chemical}}{\text{phr}_{\text{total}}} \times 100 \quad (3)$$

2.5. Mechanical properties

The tensile properties such as modulus at 100 % elongation, ultimate tensile strength and elongation at break were measured using universal testing machine (Hounsfield, model H10KS, England) according to the ASTM D 412 method at a crosshead speed of 500 mm/min. The surface

hardness was tested using Shore A durometer (Frank GmbH, Hamburg, Germany) according to ASTM D 2240. The specific gravity (Mettler Toledo ML204, New Zealand) was measured using the procedures of ISO 2781:2008 (Method A) by comparative measurement of samples mass in air and water.

2.5. *Radiation shielding*

2.5.1 Theoretical background

The mass attenuation coefficient (μ_m) of experimental was calculated using the relation (Singh et al., 2006)

$$\mu_m = \frac{1}{\rho t} \ln\left(\frac{I_o}{I}\right) \tag{4}$$

where, ρ is the density of material (g/cm^3), I_0 and I are the incident and transmitted intensities respectively and t is the thickness of NR composites (cm)

Theoretical values of the mass attenuation coefficients of mixture or compound have been investigated by WinXCom program with base on mixture rule (Singh et al. 2002)

$$\mu_m = \sum w_i (\mu_m)_i \tag{5}$$

where, w_i weight fraction of each element in NR composites, $(\mu_m)_i$ is mass attenuation coefficient for individual element in NR composites. The mass attenuation coefficients value can be used to determine the total atomic cross-section ($\sigma_{t,a}$) by the following relation

$$\mu_m = \frac{(\mu_m)_{composite}}{N_A \sum w_i A_i} \tag{6}$$

where, N_A is Avogadro's number (6.02×10^{23} mol^{-1}), A_i is atomic weight of constituent element of composites. Also the total electronic cross-section ($\sigma_{t,el}$) for the element is expressed by the following equation

$$\sigma_{t,el} = \frac{1}{N_A} \sum_i^n \frac{f_i A_i}{Z_i} (\mu_m)_i \tag{7}$$

where, f_i is the number of atoms of element i relative to the total number of atoms of all elements in composites, Z_i is the atomic number of the element in composites. Total atomic cross-section and total electronic cross-section are related to effective atomic number (Z_{eff}) of the composites is calculated by following the formula (Singh et al., 2005)

hardness was tested using Shore A durometer (Frank GmbH, Hamburg, Germany) according to ASTM D 2240. The specific gravity (Mettler Toledo ML204, New Zealand) was measured using the procedures of ISO 2781:2008 (Method A) by comparative measurement of samples mass in air and water.

2.5. *Radiation shielding*

2.5.1 Theoretical background

The mass attenuation coefficient (μ_m) of experimental was calculated using the relation (Singh et al., 2006)

$$\mu_m = \frac{1}{\rho t} \ln\left(\frac{I_o}{I}\right) \tag{4}$$

where, ρ is the density of material (g/cm^3), I_0 and I are the incident and transmitted intensities respectively and t is the thickness of NR composites (cm)

Theoretical values of the mass attenuation coefficients of mixture or compound have been investigated by WinXCom program with base on mixture rule (Singh et al. 2002)

$$\mu_m = \sum w_i (\mu_m)_i \tag{5}$$

where, w_i weight fraction of each element in NR composites, $(\mu_m)_i$ is mass attenuation coefficient for individual element in NR composites. The mass attenuation coefficients value can be used to determine the total atomic cross-section ($\sigma_{t,a}$) by the following relation

$$\mu_m = \frac{(\mu_m)_{composite}}{N_A \sum w_i A_i} \tag{6}$$

where, N_A is Avogadro's number (6.02×10^{23} mol^{-1}), A_i is atomic weight of constituent element of composites. Also the total electronic cross-section ($\sigma_{t,el}$) for the element is expressed by the following equation

$$\sigma_{t,el} = \frac{1}{N_A} \sum_i^n \frac{f_i A_i}{Z_i} (\mu_m)_i \tag{7}$$

where, f_i is the number of atoms of element i relative to the total number of atoms of all elements in composites, Z_i is the atomic number of the element in composites. Total atomic cross-section and total electronic cross-section are related to effective atomic number (Z_{eff}) of the composites is calculated by following the formula (Singh et al., 2005)

$$Z_{eff} = \frac{\sigma_{t,a}}{\sigma_{t,el}} \quad (8)$$

The electron density can be defined as the number of electrons per unit mass, and it can be mathematically written as follows

$$N_e = \frac{\mu_m}{\mu_{t,el}} \quad (9)$$

The half value layer (HVL) is define in term of the mass attenuation coefficient relates half value layer to linear attenuation coefficient (μ) (Singh et al et al., 2006)

$$HVL = 0.693/\mu \quad (10)$$

when, linear attenuation coefficient (μ) can be calculated by

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho} \quad (11)$$

Lead equivalent thickness is written as (Biswas et al., 2016).

$$d_{Pb} = \frac{\mu_{composite}}{\mu_{Pb}} x\ d_{composite} \quad (12)$$

where, μ_{Pb} is the linear attenuation coefficient of lead, d_{Pb} is the lead equivalent thickness, $\mu_{composite}$ is the linear attenuation coefficients of NR composites and $d_{composite}$ is the thickness of NR composites. In is work, the thickness of NR composites is 10 mm, has been used to compared with lead thickness

2.5.2 Measurement of gamma shielding properties

Experimental values of mass attenuation coefficient were measured by the Compton scattering technique with narrow beam transmission used for selected gamma rays energy.

The schematic of the gamma ray shielding properties measurement by Compton scattering technique shown in Fig. 1. The source system is mounted on a composite of adjustable stands. The stands can move in transverse direction for proper beam alignment. The ^{137}Cs radioactive source of 15^{mCi} (555 MBq) strength was obtained from the Office of Atom for Peace (OAP), Thailand. An aluminum rod was act as the scattering rod. The Compton scattered rays using a 2 □ × 2 □ NaI(Tl) scintillator detector having an energy resolution of 8% at 662 keV (BICRON model 2M2/2) with CANBERRA photomultiplier tube base model 802-5. The optimum distances between the source and the scatterer was chosen to be 20 cm and 20 cm between the scatterer and detector. The

spectra were recorded using a CANBERRAPC based multi-channel analyzer (MCA). The spectrum on the MCA of detector gave instance counts in each of 1024 bins divided by voltage. This work measuring gamma ray shielding properties by varying the scattering angles (30^{o}-120^{o}) to produce gamma rays of different energies range of 223 keV -662 keV.

2.5.3 Measurement of X-ray shielding properties

The X-ray shielding efficiency is estimate by different category in partial interaction parameters such as linear attenuation coefficient (μ) and half value layer (HVL). The X-ray shielding characterization were measured with high frequency digital radiography X-ray machine Shimadzu model RAD Speed Pro operated at 50-120 kVp and 40 mA. The full function meter (RMI 242) with optical fiber to detect the transmission spectra used for recorded the spectra. The optimum set up distance between the X-ray tube to the NR composites samples and from NR composites samples to detector were found equally at 50 cm separation distance, and distance between detectors to table about 30 cm. The validity of X-ray transmission technique had been confirmed with an energy calibration of the system. The schematic diagram of the measurement X-ray shielding properties shown in Fig. 2.

3. Result and discussion

3.1 Cure time

Cure time is an important parameter during rubber processing and the final property of rubber depends on cure time**.** The cure time of NR/Bi_2O_3 composites with various compositions are depicted in Table 2. The cure time of composites are lower than NR without Bi_2O_3. This may be attributed to the existence of Bi_2O_3 as a metal oxide acts as co-activators during the vulcanization process. The results of addition of metal oxide group into rubber composites have agreement with the previous work(Worawat et ai., 2018). It results in lowering the cure time of composites.

The difference in torque is directly related with the actual crosslinking density of rubber. Table 3 shows the maximum torque (M_H), minimum torque (M_L) and torque differences (Δ M) of NR and its composites. The torque differences between its maximum and minimum values of the composites are found to be increased as increasing the contents of Bi_2O_3. The presence of metal oxides performs as a co-activator during the chemical process of vulcanization. It develops interaction between the molecular chains of rubber and sulfur, which leads to increase the cross-linking density of natural rubber.

3.2. Dispersion Analysis

SEM has been employed to determine the nature of dispersion of particulates in the natural rubber matrix. Figure 3 shows the SEM images of NR composites with different fillers phr. Element content

of the filler Bi_2O_3 in NR composites is detected by EDX technique and depicted in Table 4. SEM microphotographs of Bi_2O_3 incorporated natural rubber composites show different morphologies on increasing the filler content. A fine and uniform distribution is observed for 10 phr filled natural rubber composite. Analysis revealed that the uniformity of particle distribution reduces on increasing the content of Bi_2O_3. Agglomeration of Bi_2O_3 particles occurs in the NR matrix as seen in the SEM images. The amount of Bi element is increased on the addition of Bi_2O_3 as shown in Table 4.

3.3. Mechanical properties

Tensile properties and hardness of natural rubber composites filled with Bi_2O_3 are investigated with respect to filler concentrations. Modulus at 100% elongation and Hardness of Bi_2O_3 incorporated natural rubber are shown in Fig. 4. An increase in modulus can be seen with an escalation of filler concentration in natural rubber. The presence of Bi_2O_3 increases the crosslink density of natural rubber as discussed in the previous section. Metal oxides act as co-activators and speed up the crosslinking reaction during vulcanization (Donruedee at el., 2018). Addition of Bi_2O_3 increases the crosslink density of rubber and these hard metal oxide particles enhances the stiffness of matrix material. Therefore, the modulus and hardness of natural rubber are considerably increased upon the addition of Bi_2O_3. Fig. 5. shows the dependence of tensile strength and elongation at break on the concentration of fillers. Tensile strength of the composite is found to be reduced on increasing the concentration of Bi_2O_3. As a polar substance, Bi_2O_3 becomes agglomerated and it shows a poor dispersion in non-polar rubber matrix. It weakens the elastomeric phases and decreases the tensile strength. The elastic modulus and elongation at break are inversely proportional to each other. The rigid nature of Bi_2O_3 caused in reducing the flexibility of natural rubber, thus a reduced manner is observed in the elongation at break. Hetrogeneous distribution of fillers deteriorates the interface and the elasticity of the resulting composite decreases. Variation of specific gravity of natural rubber on the addition of Bi_2O_3 is as shown in Fig. 6. An increasing trend in specific gravity is noticed as increasing the concentration of filler particles. Bi_2O_3 has higher density (D= 8.90 g/cm3) and leading to an increase in the specific gravity of the composites.

3.4. Radiation Shielding Properties

3.4.1 Gamma ray Shielding Properties

Total mass attenuation coefficient (μ_m) of the NR/ Bi_2O_3 composite were prepared with a concentration of Bi_2O_3 10, 20, 40, 80, 120 and 150 phr as can be seen in Fig. 7. The experimental of μ_m were measured with Cs-137 source at an energy of 663 keV and measured at seven different angles from 30°-120° using Al scattering rod for scattered photon energy. It was found

seven photon energies were in the range of 223-662 keV. These value is based on the principle of Compton scattering technique. The experimental were compared with theoretical values which were calculate using WinXCom program. The result of μ_m show that the NR/ Bi_2O_3 composites are higher values when increase in Bi_2O_3 content. This is due to concentration of Bi_2O_3 because of Bi (208.98) are very heavy of atomic weight. The trend of experimental values of μ_m are in good agreement with the theoretical values. The μ_m of all NR/ Bi_2O_3 sample decrease with the increasing of photon energy, these indicate the dependence of μ_m value on the photon energy.

Fig. 8. shows the effective atomic number (Z_{eff}) of NR composites and were calculated from equation (7). It was found that Z_{eff} will be increased with the increasing of Bi_2O_3 concentration and those were decreased with increasing of the photon energies which the same trend of the μ_m , owing to higher atomic number increasing of Bi_2O_3 have an impact on the probability of the interaction between photon energy with electron in the matter. Nevertheless, the results of Z_{eff} are shown in good agreement with theoretical values.

The effective electron density (N_e) of NR composite is shown in Fig. 9. It is seen that the increasing of density by adding Bi_2O_3 into the structure of the NR/ Bi_2O_3 composite have an effect on the N_e value. The N_e is having a high value when increase of Bi_2O_3 and indicates that there are more number of virtual electron per unit mass of NR composite. Moreover, the N_e results show similar trends with μ_m and Z_{eff}. The trends shows that decreases exponentially when increasing photon energy.

Fig. 10. show half value layer (HVL) and lead equivalent of NR/Bi_2O_3 composites measured using gamma ray in the energy at 622 keV. It was seen that HVL were decreased with the increasing of Bi_2O_3 concentration due to the increasing of mass attenuation coefficient and density which effects to increasing of the gamma rays attenuation. For the results of lead equivalent of NR/Bi_2O_3 composite consisting Bi_2O_3. The results found that lead equivalent were increased with the increasing of Bi_2O_3 concentration which the gamma ray shielding equivalent thickness of lead 2.0093 mm for 150 phr Bi_2O_3 is observed. Fig.11. show the comparison of gamma ray shielding properties of NR/Bi_2O_3 composites with commercial window, serpentine, ordinary concrete and hemimatite-serpentine measured at 662 keV gamma ray from Cs-137 source. It indicates that, the gamma ray shielding of NR/ Bi_2O_3 composites with 10, 20 and 40 phr Bi_2O_3 lower than commercial window. However, Composites with 80 phr of Bi_2O_3 shown the gamma ray shielding better than commercial window. The composite with 80 phr Bi_2O_3 was no difference HVL value of serpentine show that it can be gamma shielding equivalent to serpentine. Eventually, composite with 150 phr Bi_2O_3 shows better gamma ray shielding compared to ordinary concrete and hemimatite-serpentine. This result is

an important for the development flexible, lead free radiation shielding material. It is concluded that, the thicker shielding materials can be replaced by such types of flexible materials with better shileding properties.

3.4.2 X-ray Shielding Properties

Linear attenuation coefficient of NR/Bi_2O_3 composites with various Bi_2O_3 concentrations measured using X-rays in the energy range 50 kVp -120 kVp shown in Fig. 12. It was seen that the linear attenuation coefficient was increased with the increasing Bi_2O_3 concentration and those decreased with increasing of the X-ray energy ranges due to increase of density have an effect on the linear attenuation coefficient which more likely to interact. It means NR/Bi_2O_3 composites can be better X-ray attenuation when increased amount of Bi_2O_3. However, it should be aware when put more a concentration of Bi_2O_3 due to morphology transformation which correspond to the tensile strength and elongation at break of natural rubber composite as shown in Fig. 5.

Fig. 13. show half value layer (HVL) and lead equivalent of NR composites with various Bi_2O_3 concentrations measured using X-rays in the energy at 120 kVp. The HVL values were decreased and increased values of lead equivalent with increased of Bi_2O_3 concentration due to the increasing of density and linear attenuation coefficient have an effect to more radiation attenuation of NR composite. Fig. 14. show the comparison of X-ray shielding properties of NR/ Bi_2O_3 composites with commercial window and X-ray window measured at 120 kVp. It indicates that, the X-ray attenuation of NR/ Bi_2O_3 composites with 10, 20, 40 and 80 phr the Bi_2O_3 exhibit better than commercial window. NR/ Bi_2O_3 composites with 120 and 150 phr the Bi_2O_3 show the X-ray attenuation better than both commercial window and X-ray window. It is clearly the concentration of Bi_2O_3 with 120 and 150 phr to candidate for application in flexible radiation shielding materials such glove and mask.

4. Conclusion

Flexible radiation shielding material based on NR/Bi_2O_3 composites were successfully prepared and developed. Increased concentration of Bi_2O_3 in natural rubber were enhanced the modulus at 100 % elongation, hardness and specific gravity of natural rubber, whereas tensile strength and elongation at break reduces.

- Increased concentration of Bi_2O_3 effect to the experimental values of mass attenuation coefficients (μ_m), effective atomic number (Z_{eff}), effective electron densities (N_e) and lead equivalent of the NR composites were increase and these were decrease with the increasing of photon energy from 223 keV to 662 keV. The half value layer (HVL) values of all sample were decrease with the

increasing of Bi_2O_3 concentrations. The half value layer (HVL) values of all sample were decrease with the increasing of Bi_2O_3 concentrations. The NR/150 phr Bi_2O_3 compositions has the lowest HVL values in comparison when compared with commercial window, serpentine, ordinary concrete and hemimatite- serpentine

- For X-ray shielding properties, the linear attenuation coefficient (μ) and lead equivalent (dPb) were increased with increased Bi_2O_3 add in NR and show the decreasing of X-ray energies range. The NR of all Bi_2O_3 compositions show lower HVL when compared with X-rays shielding window and commercial window.

Based on the studies related to tensile properties and radiation shielding effects, it can be concluded that flexible and lead-free NR/Bi_2O_3 composites is possibility for application to radiation shielding material or protective wear.

Acknowledgement

The authors gratefully acknowledge financial support by a grant from Natural Rubber Innovation Research Institute, Prince of Songkla University, Thailand (contact number SCI601063s), and we would like to the Department of Radiologic Technology, Faculty of Associated Medical Sciences, Chiang Mai University and Center of Excellence in Glass Technology and Materials Science (CEGM), Rajabhat Naknow Phathom University for providing research instruments.

References

Bektas, F., Turanli, L. and Monteiro, P.J.M., 2005. Use of perlite powder to suppress the alkali–silica reaction. Cem. Conc. Res. 35(10), 2014–2017.

Biswas, R., Sahadath, H., Mollah, A.S., Fazlul Huq, Md., Radiat, J., 2016. Calculation of gamma-ray attenuation parameters for locally developed shielding material: Polyboron. Rad. Res. Appl. Sci. 9, 26–34.

Chanthima, N., Kaewkhao, J., Limkitjaroenporn, P., Tuscharoen, S., Kothan, S., Tungjai, M., Kaewjaeng, S., Sarachai, S., Limsuwan, P., 2017. Development of BaO-ZnO-B_2O_3 glasses as a radiation shielding material. Radiat. Phys. Chem. 137, 72–77.

Demayo, A., Taylor, M.C., Taylor, K.W., Hodson, P.V., Hammond, P.B., 1982. Toxic effects of lead and lead compounds on human health, aquatic life, wildlife plants, and livestock. Crit. Rev. Environ. Control 12, 257–305.

El-Khayatt, AM., Ali, AM., Singh, VP., 2014. Photon attenuation coefficients of heavy-metal oxide glasses by MCNP code, XCOM program and experimental data: a comparison study. Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A. 35, 207–212.

Kaewjang, S., Maghanemi, U., Kothan, S., Kim, H.J., Limkitjaroenporn, P., Kaewkhao, J., 2014. New gadolinium-based glasses for gamma-rays shielding materials. Nucl. Eng. Des. 280, 21–26.

Kaewjaeng, S., Kothan, S., Chaiphaksa, W., Chanthima, N., Rajaramakrishna, R., Kim, H.J., Kaewkhao, J., 2019. High transparency La_2O_3-CaO-B_2O_3-SiO_2 glass for diagnosis x-rays shielding material application. Radiat. Phys. Chem. 160, 41–47.

Kaewkhao, J., Pokaipisit, A., Limsuwan, P., 2010. Study on borate glass system containing with Bi_2O_3 and BaO for gamma-rays shielding materials: comparison with PbO. Nucl. Mater. 399, 38–40.

Kalayanee, K., Lek, S., Tripob, B., Sompong, N., 2008. Ferrite-STR 5L rubber composites as gamma radiation shildings. KKU res. J. 13(2), 269–271.

Ozdemira, T., Gungora, A., Akbaya, K., Uzuna, H., Babuccuoglub, Y., 2018. Nano lead oxide and epdm composite for development of polymer based radiation shielding material: gamma irradiation and attenuation tests. Radiat. Phys. Chem. 144, 248–255.

Singh, K., Singh, H., Sharma, V., Nathuram, R., Khanna, A., Kumar, R., Bhatti, S.S., Sahota, H.S., 2002. Gamma-ray attenuation coefficient in bismuth borate glass. Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. B. 194(1), 1–6.

Singh, K., Singh, H., Sharma, G., Gerward, L., Khanna, A., Kumar, R., Nathuram, R., Sahota, H.S., 2005. Gamma-ray shielding properties of CaO-SrO-B_2O_3 glass system. Radiat. Meas. 72, 225–228.

Singh, N., Singh, K.J., Singh, K., Singh, H., 2006. Gamma-ray attenuation studies of PbO–BaO–B_2O_3 glass system. Radiat. Meas. 41, 84–88.

Tekin, HO., Singh, VP., Manici, T., 2017. Effects of micro-sized and nano sized WO_3 on mass attenuation coefficients of concrete by using MCNPX code. Appl. Radiat. Isotopes. 121, 122–125.

Tiwawn, A., Noppavan, C., Vithit P., Chonlada, S., 2017. X-ray Attenuation coefficient of PU/$BaSO_4$ composites sheet. KMUTNB. J. 27(1), 159–168.

Topcu, I.B., 2003. Properties of Heavy weight Concrete Produced with Barite. Cem. Concr. Res. 33(6), 815–822.

Worawat, P., Ekachai, W., Kiadtisak, S., 2018. Properties of lead-free gamma-ray shielding materials from metal oxide/EPDM rubber composites. Radiat. Phys. Chem. 153, 1–9.

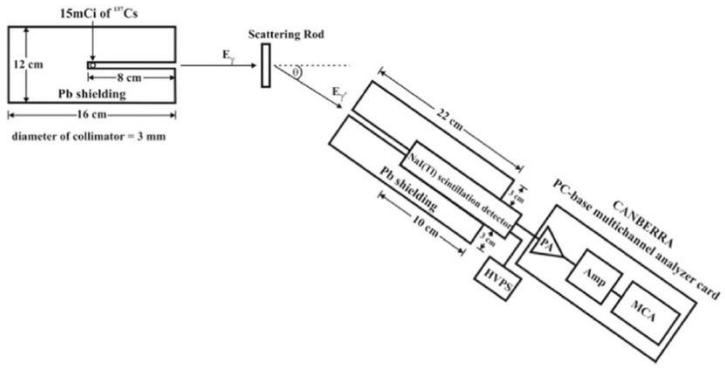


Fig. 1. Schematic of the mass attenuation coefficient measurement by Compton scattering technique (Chantima et al., 2017).

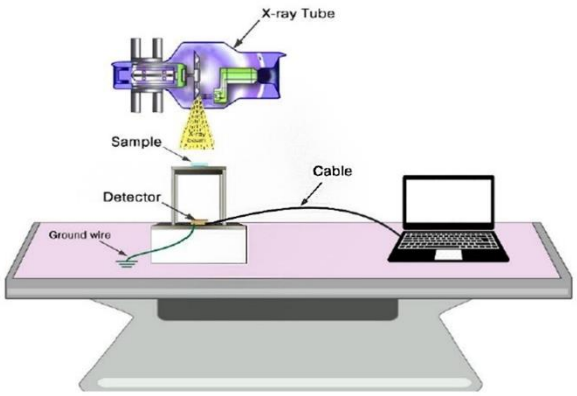


Fig. 2. Schematic diagram of the X-ray transmission technique (Kaewjang et al., 2019).

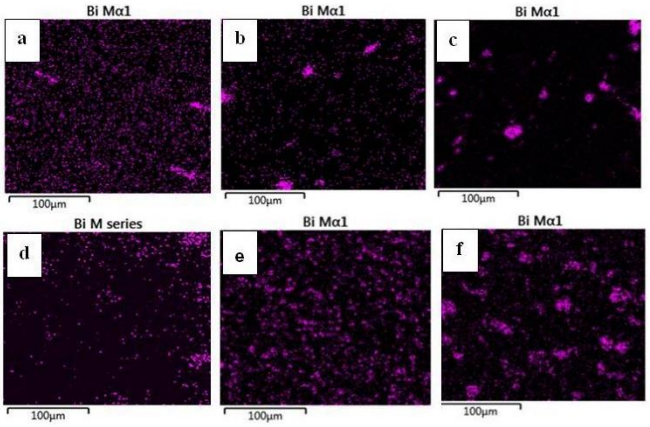


Fig. 3. SEM images of NR/ Bi_2O_3 composites with addition a) 10 phr, b) 20 phr, c) 40 phr, d) 80 phr, e) 120 phr and f) 150 phr.

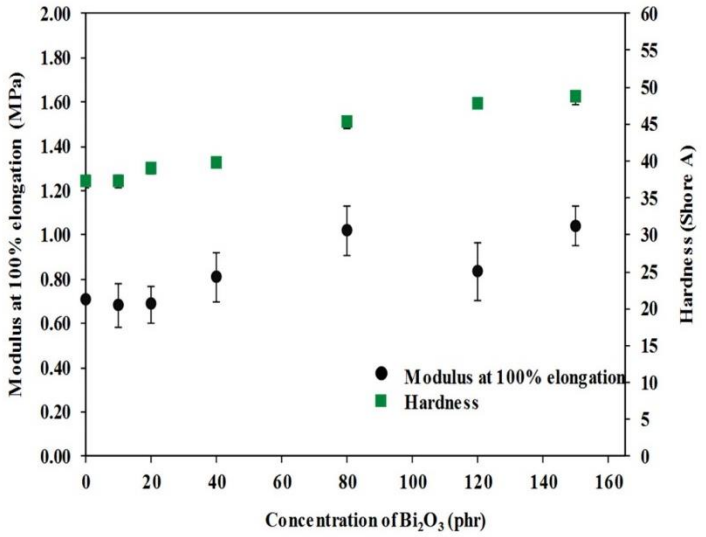


Fig. 4. Modulus at 100 % elongation and Hardness of natural rubber composite with different Bi_2O_3 loading levels.

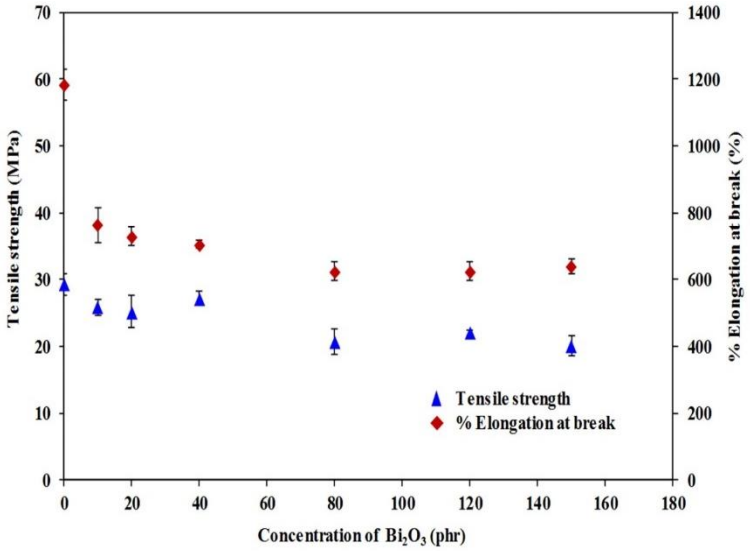


Fig. 5. Tensile strength and % Elongation at break of natural rubber composite with different Bi_2O_3 loading levels.

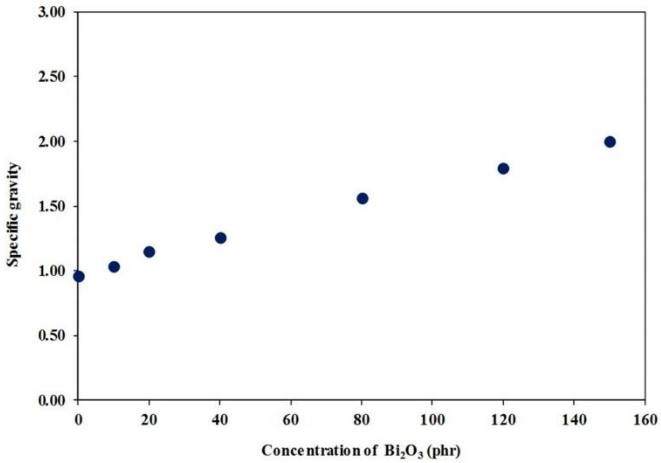


Fig. 6. Specific gravity of natural rubber composite with different Bi_2O_3 loading levels.

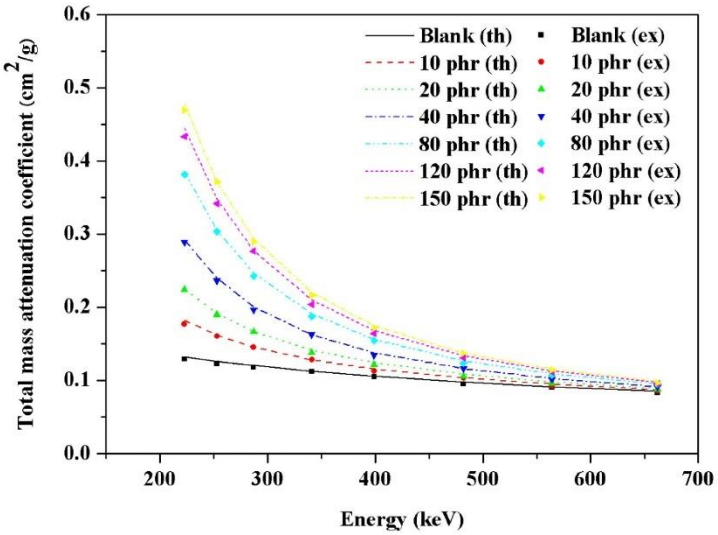


Fig. 7. Total mass attenuation coefficient of NR composites with various Bi_2O_3 concentrations measured using gamma rays with energy 223 keV-662 keV.

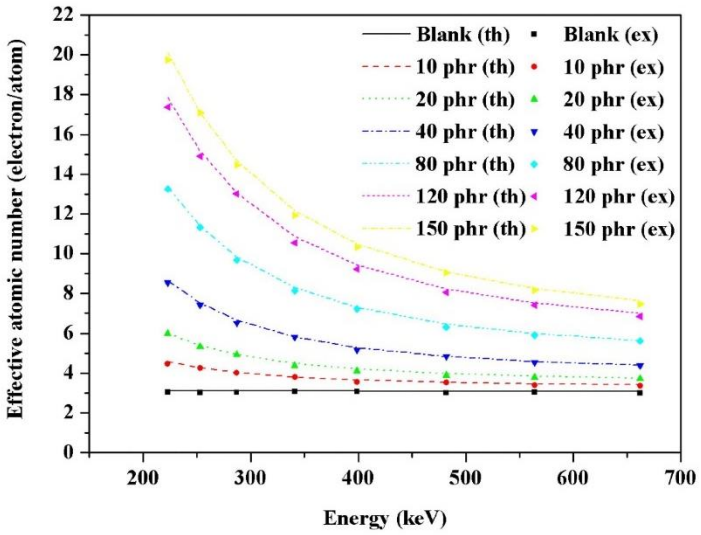


Fig. 8. Effective atomic number (Z_{eff}) of NR composites with various Bi_2O_3 concentrations measured using gamma rays with energy 223 keV-662 keV.

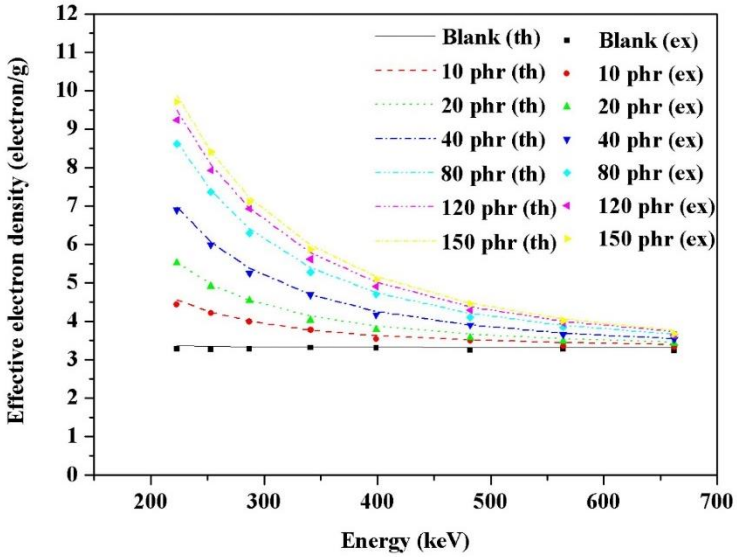


Fig. 9. Effective electron density (N_e) of NR composites with various Bi_2O_3 concentrations measured using gamma rays with energy 223 keV-662 keV.

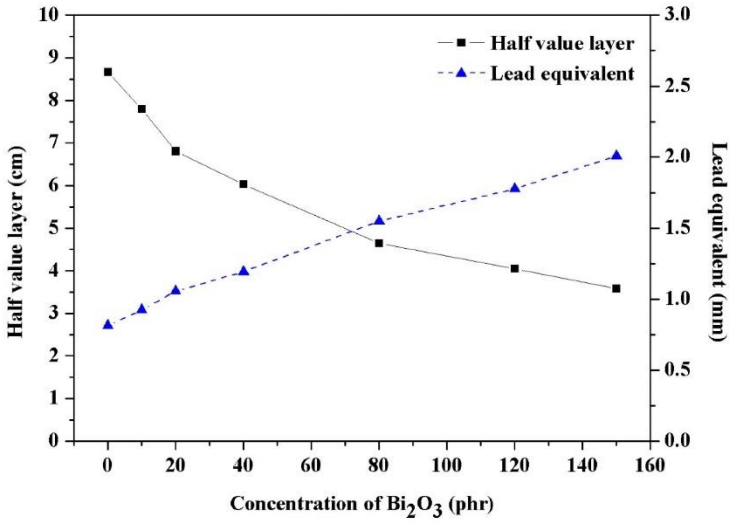


Fig. 10. Half value layer (HVL) and Lead equivalent (dPb) of NR composites with various Bi_2O_3 concentrations measured using gamma ray in the energy at 622 keV.

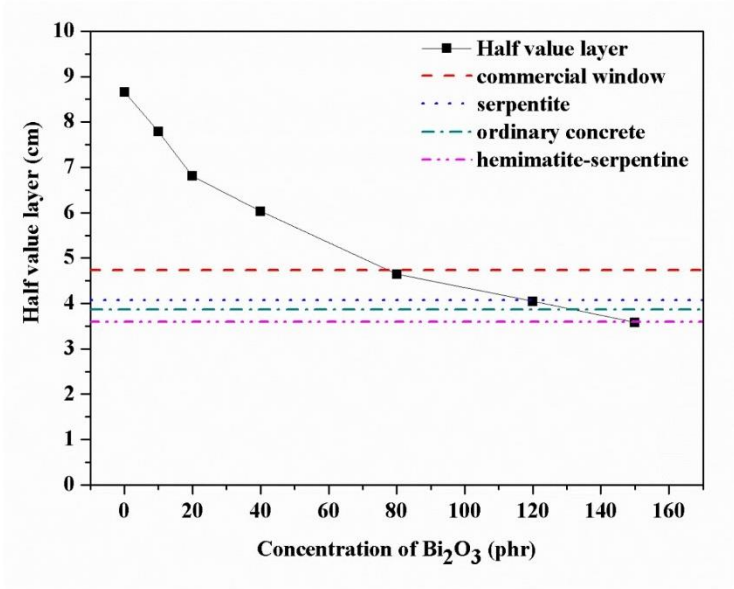


Fig. 11. The half value layer of NR composites with Bi_2O_3 in comparison to commercial window, serpentine, ordinary concrete and hemimatite-serpentine (Singh, 2002) at 662 keV.

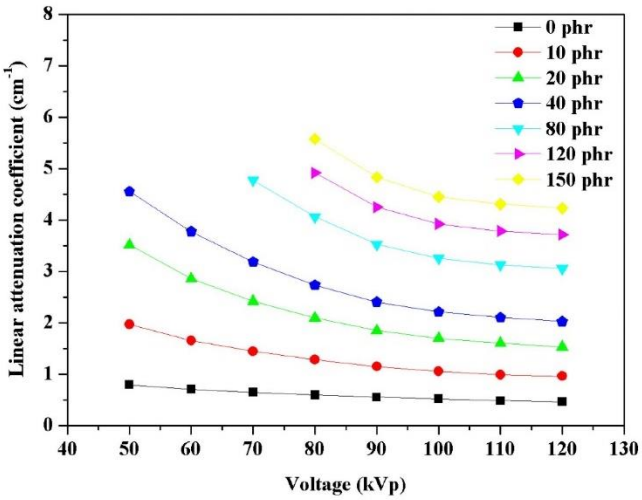


Fig. 12. Linear attenuation coefficient of NR composites with various Bi_2O_3 concentrations measured using X-rays in the energy range 50 kVp -120 kVp.

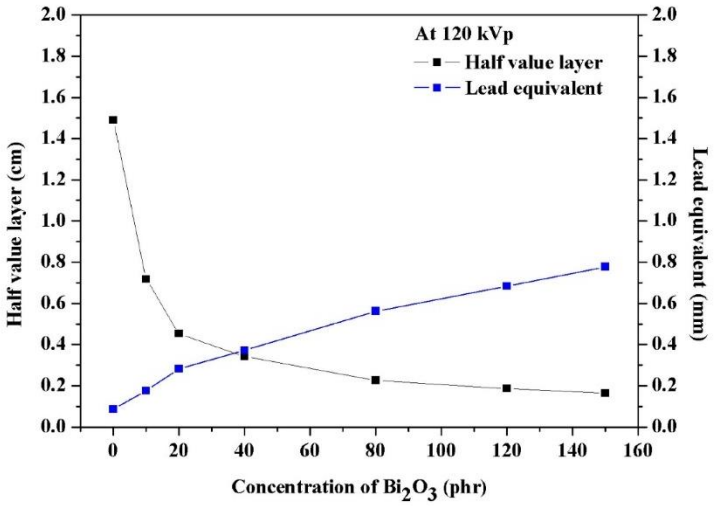


Fig. 13. Half value layer (HVL) and Lead equivalent (dPb) of NR composites with various Bi_2O_3 concentrations measured using X-rays in the energy at 120 kVp.

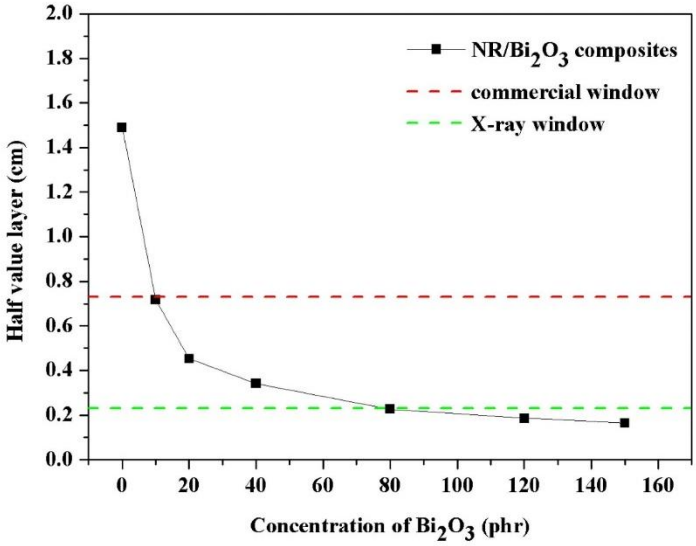


Fig. 14. The half value layer of NR composites with Bi_2O_3 in comparison to commercial window and X-ray window at 120 kVp.

Table 1. Ingredients of NR/ Bi_2O_3 composites and their role during the process.

	Content (phr)[a]	Function	Supplier
Natural rubber (NR, STR5L)	100	Polymer	Chalong latex industry.Co., Phuket (Thailand)
Stearic acid	1	Activator	Imperial Industrial Chemicals Co., Ltd. Bangkok, (Thauland)
Zinc Oxide; ZnO	5	Activator	Thai-Lysaght Co., Ltd., Phranakhon Si Ayutthaya, (Thailand)
N-tert-butyl-2-benzthiazyl sulphenamide; TBBS	1	Accelerator	Siam Chemicals Co., Samutprakarn (Thailand)
Sulfur (S)	2.5	Vulcanizing Agent	Siam Chemicals Co., Samutprakarn (Thailand)
Bismuth oxides (Bi_2O_3)	0, 10, 20, 40, 80, 120 and 150 (0, 8.37, 15.44, 26.76, 42.22, 52.29 and 57.80 wt%, respectively)	Radiation Shielding	Alfa Aesar Co., Massachusetts (USA)

[a]phr: parts per hundred parts of rubber

Table 2

Cure times of natural rubber composite with different Bi_2O_3 loading levels.

Content (phr)	Cure time (t_{c90}, min)
0	8.44
10	7.50
20	7.47
40	7.39
80	7.29
120	7.10
150	6.22

Table 3

Maximum torque (M_H), minimum torque (M_L) and torque differences (ΔM) of NR composites for different Bi_2O_3 loading levels.

Bi_2O_3 Content (phr)	M_H (dNm)	M_L (dNm)	ΔM (dNm)
0	6.10	0.39	5.71
10	6.28	0.47	5.81
20	7.00	0.36	6.64
40	7.53	0.47	7.06
80	9.74	0.42	9.32
120	9.86	0.34	9.52
150	10.47	0.39	10.08

Table 4

The element contents in NR/ Bi_2O_3 composites.

Elements	wt% of element in rubber composites						
	0	10	20	40	80	120	150
C	81.714	74.876	69.094	59.850	47.217	38.988	34.480
H	10.981	10.062	9.285	8.043	6.345	5.239	4.634
O	1.001	1.779	2.437	3.489	4.927	5.864	6.376
Zn	3.669	3.361	3.102	2.687	2.120	1.750	1.548
Bi	0.0000	7.506	13.853	24.000	37.868	46.902	51.849
N	0.107	0.098	0.091	0.079	0.062	0.051	0.045
S	2.529	2.317	2.138	1.852	1.461	1.207	1.067

ภาคผนวก ค.

ต้นฉบับบทความวิจัย

Intom S., Kalkornsuranee E., Johns J., Kotan S., Keawjang S., Hongtong W., Chaiphaksa W. and Kaewkhao J. 2018. Preparation of lead-free radiation shielding elastomer based on natural rubber/bismuth oxide composites: effect of epoxidized group on natural rubber

การประชุมวิชาการระดับชาติ "ราชมงคลสุรินทร์ ครั้งที่ 10"
"วิจัยและนวัตกรรม นำสู่การพัฒนาอย่างยั่งยืน" ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสุรินทร์
RSNC2019
The 10th Rajamangala Surin National Conference

การเตรียมอิลาสโตเมอร์กำบังรังสีปลอดตะกั่วจากคอมโพสิตยางธรรมชาติผสมกับบิสมัทออกไซด์: ผลของปริมาณหมู่อิพอกไซด์บนยางธรรมชาติ

Preparation of Lead-free Radiation Shielding Elastomer Based on Natural Rubber/Bismuth Oxide Composites: Effect of Epoxidized Group on Natural Rubber

ศิริลักษณ์ อินต่อม*[1] เอกวิภู กาลกรณ์สุรปราณี[2] ศิริประภา แก้วแจ้ง[3] สุชาติ โกทันย์[4] วิราภรณ์ หงส์ทอง[5] วุฒิชัย ไชยภักษา[6] และจักรพงษ์ แก้วขาว[7]

ภาควิชาวิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยีวัสดุ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์[12]
ภาควิชารังสีเทคนิค คณะเทคนิคการแพทย์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่[34]
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม[567]
ผู้เขียนประสานงาน *E-mail yingsirilak_29@hotmail.com*

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเตรียมวัสดุกำบังรังสีที่มีความยืดหยุ่น ศึกษาผลของชนิดของยางธรรมชาติคอมโพสิต (*ยางธรรมชาติที่ไม่ผ่านการดัดแปรโมเลกุล (unmodified NR) ยาง*อิพอกไซด์ 25 (*ENR* 25) และ*ยาง*อิพอกไซด์ 50 (*ENR* 50)) ที่มีการเติมสารบิสมัทออกไซด์ (BO) ต่อสมบัติเชิงกล (มอดูลัส 100% ความต้านทานต่อแรงดึง ระยะยืด ณ จุดขาด ความแข็ง และความถ่วงจำเพาะ) และสมบัติการกำบังรังสี (สัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเชิงเส้น (μ) ความหนาครึ่งค่า (HVL) ความหนาเทียบเท่าตะกั่ว) ทั้งแกมมา และเอ็กซ์ จากการศึกษาสมบัติเชิงกลพบว่า ยางธรรมชาติคอมโพสิตมีมอดูลัสที่ระยะยืด 100 % และความแข็งที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ในส่วนของความต้านทานต่อแรงดึง และระยะยืด ณ จุดขาดพบว่า วัสดุคอมโพสิต*ยางธรรมชาติ*อิพอกไซด์ 25 (ENR 25/BO composite) ให้สมบัติที่ดีกว่าวัสดุคอมโพสิต*ยาง*ธรรมชาติที่ไม่ดัดแปรโมเลกุล (unmodified NR/BO composite) และวัสดุคอมโพสิต*ยางธรรมชาติ*อิพอกไซด์ 50 (ENR 50/BO composite) ตามลำดับ โดยวัสดุคอมโพสิตยางอิพ็อกไซด์ทั้ง 2 ชนิด (ENR 25 และ ENR 50) มีความถ่วงจำเพาะที่มากกว่าวัสดุคอมโพสิตยางธรรมชาติที่ไม่ดัดแปรโมเลกุลเล็กน้อย ด้านสมบัติการกำบังรังสีที่มีการเปรียบเทียบค่าความหนาครึ่งค่า (HVL) จากการทดสอบพบว่า ยางธรรมชาติคอมโพสิตที่เตรียมได้สามารถกำบังรังสีแกมมาได้เทียบเท่า และสามารถกำบังรังสีเอ็กซ์ได้ดีกว่ากระจกกำบังรังสีที่มีการใช้ในเชิงพาณิชย์ ยางคอมโพสิตที่พัฒนาขึ้นจากงานวิจัยนี้สามารถผลิตเป็นวัสดุกำบังรังสีปลอดตะกั่วที่มีความยืดหยุ่นและกำบังรังสีได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: วัสดุกำบังรังสี วัสดุคอมโพสิต ยางธรรมชาติ ยางธรรมชาติอิพ็อกไซด์ บิสมัทออกไซด์

Abstract

The main aim of this research is to prepare flexible radiation shielding materials. The effect of different natural rubber types (i.e., unmodified NR, ENR 25 and ENR 50) *based on rubber* composites with bismuth

oxide(Bi_2O_3: BO) on mechanical (i.e. modulus at 100% elongation, tensile strength, elongation at break, hardness and specific gravity) and shielding properties (half value layer, HVL) of gamma ray and X-ray linear attenuation coefficient (μ) half value layer (HVL) and lead equivalent of x-ray) were investigated. It was found that all type of rubber composites gave no significantly different values in term of modulus and hardness. The ENR 25/BO composite exhibited higher tensile strength, elongation at break than those of unmodified NR/BO and ENR 50/BO composites, respectively. Both ENR 25 and ENR 50 with BO composites have slightly higher specific gravity than that of unmodified NR/BO composite. The developed rubber composites (i.e., ENR 25/BO) provided the same gramma shielding properties in term of HVL value and better performance in term of X ray radiation shielding (half value layer,HVL)) properties than commercial shielding window. The developed rubber composites in this research can be used as efficient lead-free flexible radiation shielding materials.

Keywords: Radiation shielding material, Composites, Natural rubber, Epoxides natural rubber, Bismuth oxide

บทนำ

ตะกั่ว (lead : Pb) เป็นธาตุที่นิยมนำมาผลิตเป็นวัสดุกำบัง หรือลดทอนรังสี เนื่องจากตะกั่วมีเลขอะตอมเท่ากับ 82 ซึ่งเป็นธาตุที่มีเลขอะตอม (atomic number : Z) สูง โดยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีพลังงานสูง เช่น รังสีเอ็กซ์ รังสีแกมมา จะถูกดูดกลืนได้ดีโดยธาตุที่มีเลขอะตอมสูง หรือธาตุหนัก[3] อย่างไรก็ตามการใช้วัสดุกำบังรังสีที่ทำมาจากตะกั่วยังมีข้อเสียหลายประการ ได้แก่ วัสดุกำบังรังสีที่ทำมาจากตะกั่วมีน้ำหนักมาก แตกหักได้ง่าย มีความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile strength) และความต้านทานต่อการคืบ (Creep resistance) ต่ำกว่าวัสดุกำบังรังสีชนิดอื่น[7] และตะกั่วมีความเป็นพิษสูงอันตรายต่อผู้ใช้งาน และสิ่งแวดล้อม องค์การอนามัยโลก (WHO) และสำนักงานกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติจึงมีมาตรการในการลดวัสดุที่ผลิตมาจากตะกั่ว ด้วยเหตุนี้จึงทำให้นักวิจัยมีความพยายามที่จะใช้โลหะออกไซด์ชนิดอื่น ๆ เพื่อกำบัง หรือลดทอนกำลังของรังสีทดแทนการใช้ตะกั่ว เช่น แบเรียมซัลเฟต (Barium sulfate: $BaSO_4$) ไดโบรอนไตรออกไซด์ (Diboron dioxide: B_2O_3)[9] ทอเรียมไดออกไซด์ (Thorium dioxide: ThO_2)[2] เป็นต้น อย่างไรก็ตามการใช้วัสดุกำบังรังสีเพียงอย่างเดียวยังมีข้อด้อยเรื่องความไม่อ่อนตัวของวัสดุ ทำให้วัสดุมีข้อจำกัดในการใช้งานสำหรับกำบังรังสีในพื้นที่ที่มีความโค้งงอ และมีลักษณะเฉพาะ จากการตรวจเอกสารทำให้ทราบว่ามีการวิจัยจำนวนมากที่ผสมพอลิเมอร์กับสารประกอบกลุ่มที่กำบังรังสีได้ เช่น ยางธรรมชาติเกรด STR 5L ผสมกับผงเฟอไรต์ และเขม่าดำ ซึ่งเป็นสารตัวเติมผสมกับยางสังเคราะห์ชนิดเอทธิลีนโพรพิลีนไดอีน (Polyethylenediene: EPDM)[5] ยางธรรมชาติเกรด STR 5L ผสมกับเหล็กออกไซด์ (Iron oxide: Fe_3O_4) และทังสเตนออกไซด์ (tungsten oxide: W_2O_3)[6] พอลิยูริเทน (Polyurethane: PU) ผสมกับแบเรียมซัลเฟต[1] เป็นต้น วัสดุที่พัฒนาขึ้นดังกล่าว สามารถกำบังรังสีได้ระดับหนึ่ง แต่ยังมีข้อด้อยบางประการ เช่น สมบัติเชิงกล และความสามารถในการยืดต่ำ เป็นต้น ส่งผลให้ไม่สามารถผลิตเป็นวัสดุกำบังรังสีที่สามารถสวมใส่ได้

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาวัสดุกำบังรังสีปลอดตะกั่วที่มีความยืดหยุ่น สามารถกำบังรังสีเฉพาะจุดได้ ซึ่งสนใจนำบิสมัทออกไซด์ (Bi_2O_3: BO) ที่ทำหน้าที่เป็นวัสดุกำบัง หรือลดทอนพลังงานของรังสี ผสมเข้ากับยางที่มีชนิดที่แตกต่างกัน 3 ชนิด ได้แก่ *ยางธรรมชาติไม่ดัดแปรโมเลกุล (Natural rubber: unmodified NR) ยางธรรมชาติที่มีหมู่อิ*-พอกไซด์เท่ากับ 25 (Epoxidized Natural Rubber 25: *ENR* 25) และ*ยางธรรมชาติที่มีหมู่*อิพอกไซด์เท่ากับ 50 (Epoxidized

การทดสอบเวลาคงรูปของยาง

ทำการทดสอบเวลาคงรูปของยางตามมาตรฐาน ASTM D 5289 โดยใช้เครื่อง Moving Die Rheometers (MDR) เตรียมตัวอย่างเป็นแผ่นสี่เหลี่ยมน้ำหนัก 5 กรัม ใช้อุณหภูมิในการทดสอบ 150 องศาเซลเซียส และเวลาในการทดสอบ 30 นาที ค่าการทดสอบ t_{c90} ถือเป็นเวลาในการคงรูปของยางในเครื่องอัดเบ้า

การทดสอบปริมาณการเชื่อมขวางของยาง

เตรียมตัวอย่างขนาดกว้าง 1 เซนติเมตร และยาว 1 เซนติเมตร ชั่งน้ำหนักตัวอย่างก่อนแช่ลงในโทลูอีนเป็นเวลา 72 ชั่วโมง ชั่งน้ำหนักตัวอย่างหลังแช่ ทำการอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส อบจนกว่าน้ำหนักตัวอย่างจะคงที่ หลังจากนั้นนำมาคำนวณดังสมการที่ (1)

$$V=\frac{-\ln(1-v_r)-v_r-xv_r^2}{v_s\left(v_r^{\frac{1}{3}}\right)-0.5v_r} \qquad (1)$$

เมื่อ v_r = volume fraction ของตัวอย่างหลังจากแช่ในโทลูอีน

v_s = Molar volume ของสารละลาย

x = Interaction parameter[8]

ทดสอบการกระจายตัวของธาตุ

ทดสอบการกระจายตัวของธาตุในตัวอย่างโดยเตรียมชิ้นตัวอย่างติดลงบน stub และทำการเคลือบตัวอย่างด้วยทองคำ ใช้เทคนิค Energy Dispersive X-Ray Fluorescence Spectrometer (EDX) โดยใช้เครื่องทดสอบรุ่น SEM Quanta 400 FEI

การทดสอบสมบัติเชิงกล

การทดสอบสมบัติเชิงกลได้แก่ มอดูลัสที่ระยะยืด 100 % (modulus at 100 % elongation) ความต้านทานต่อแรงดึง (tensile strength) และระยะยืด ณ จุดขาด (elongation at break) ทดสอบตาม ASTM D 412 โดยการเตรียมชิ้นตัวอย่างเป็นรูปดัมเบล โดยมีความกว้างเท่ากับ 3.65 มิลลิเมตร โดยใช้ universal testing machine รุ่น H10KS ทดสอบความแข็ง (hardness) ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 2240 โดยใช้เครื่อง Shore A durometer รุ่น Frank GmbH และความถ่วงจำเพาะ (specific gravity) โดยทำการทดสอบตามมาตรฐาน ISO 2781:2008 (Method A) ใช้เทคนิคการเปรียบเทียบน้ำหนักตัวอย่างในอากาศ และน้ำ เครื่องทดสอบรุ่น ML204

การทดสอบสมบัติทางด้านรังสี

การวัดการดูดกลืนรังสีแกมมา (Gamma ray)

ค่าทางทฤษฎีของสมบัติทางด้านรังสีแกมมาสามารถคำนวณได้จากโปรแกรม WinXcom และค่าจากการทดสอบสามารถตรวจวัดโดยใช้เทคนิคการกระเจิงคอมป์ตัน เครื่องทดสอบมีแหล่งกำเนิดรังสี Cs-137 ความแรงของปริมาณรังสีที่สารกัมมันตรังสีสลายตัวต่อหน่วยเวลาเท่ากับ 15^{mCi} (555 MBq) พลังงาน 662 keV ใช้หัววัดรังสีชนิด NaI(Tl) และทำการประมวลผลโดย Multi Channel Analyzer (MCA) เตรียมชิ้นตัวอย่างเป็นรูปวงกลมเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 2.5 เซนติเมตร

หนา 1 เซนติเมตร ทำการทดสอบที่มุมในการกระเจิงแสงเท่ากับ 120° ซึ่งมีค่าพลังงานเท่ากับ 662 keV และใช้เวลาการทดสอบ 25,000 วินาที สามารถคำนวณหาค่าความหนาครึ่งค่า (Half value layer: HVL) ตามสมการที่ 5

การวัดการดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ (X-ray)

การทดสอบการดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ ทำการทดสอบโดยใช้เครื่อง high frequency digital radiography X-ray machine Shimadzu model RAD Speed Pro operated ที่พลังงานในช่วง 50-120 kVp ค่ากระแสไฟฟ้าที่ให้กับหลอดเอ็กซเรย์เท่ากับ 40 mAs และใช้ full function meter (RMI 242) ในการบันทึกสเปกตรัม เตรียมตัวอย่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 เซนติเมตร และหนา 1 เซนติเมตร ทำการจัดตั้งอุปกรณ์ทดสอบโดยระยะห่างระหว่างหลอดเอ็กซเรย์กับขาตั้งตัวอย่างห่างกัน 56 เซนติเมตร และระยะห่างระหว่างขาตั้งตัวอย่างกับพื้นห่างกัน 56 เซนติเมตร ทำการจัดแสงไฟให้มีขนาด 2x2 เซนติเมตร โดยหัวนับวัดจะต้องอยู่กึ่งกลางของแสงไฟ สามารถคำนวณสัมประสิทธิ์เชิงเส้น ความหนาครึ่งค่า และความหนาเทียบเท่าตะกั่ว ตามสมการที่ 2 5 และ 6 ตามลำดับ

ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น (linear mass attenuation coefficient: μ)
ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นจะขึ้นอยู่กับพลังงานของรังสี เลขอะตอมของตัวกลาง และความหนาแน่นของตัวกลาง

$$I=I_0 e^{-\mu x} \quad (2)$$

เมื่อ I_0 คือ ปริมาณโฟตอนก่อนที่จะเคลื่อนที่ผ่านตัวกลาง
I คือ ปริมาณโฟตอนที่เคลื่อนที่ออกจากตัวกลาง
x คือ ความหนาของตัวกลางที่โฟตอนเคลื่อนที่ผ่าน (cm)
μ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น (Linear Attenuation Coefficient: cm^{-1})

ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล (Mass Attenuation Coefficient)

$$\mu_m = \mu/\rho \quad (3)$$

$$\mu_m = \frac{ln(I_0/I)}{\rho} \quad (4)$$

เมื่อ μ_m คือ ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล (cm^2/g)
ρ คือ ความหนาแน่นของตัวกลาง (g/cm^3)

ความหนาครึ่งค่าของวัสดุ (Half Value Layer: HVL)
ความหนาครึ่งค่าของวัสดุ คือ ความหนาของวัสดุที่สามารถกั้นรังสี และทำให้ปริมาณรังสีลดลงครึ่งหนึ่งจากปริมาณรังสีเดิมที่ผ่านเข้ามา สามารถคำนวณได้จาก

$$HVL=\frac{\ln 2}{\mu} \quad (5)$$

เมื่อ μ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น (cm^{-1}) คำนวณได้จาก $\mu_m \times \rho$

ความหนาเทียบเท่าตะกั่ว (Lead equivalent)

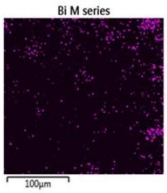
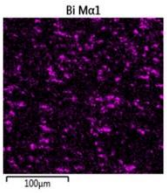
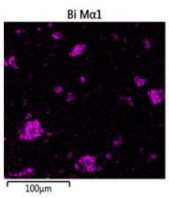
ความหนาเทียบเท่าตะกั่ว เป็นการเปรียบเทียบความสามารถในการกำบังรังสีของวัสดุคอมโพสิตสำหรับการกำบังรังสีกับตะกั่ว โดยใช้ความหนาเป็นตัวแปรในการเปรียบเทียบ [11]

$$Lead\ equivalent = \frac{\mu_{composite}}{\mu_{Pb}} \times thickness_{composite} \quad (6)$$

ผลการวิจัย

การทดสอบสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติคอมโพสิตที่การแปรชนิดของยางธรรมชาติ ได้แก่ unmodified NR, ENR 25 และ ENR 50 ที่มีการเติมบิสมัทออกไซด์ ผลการทดสอบสมบัติเชิงกล และสมบัติการลดทอนรังสีแกมมาแสดงในตารางที่ 1

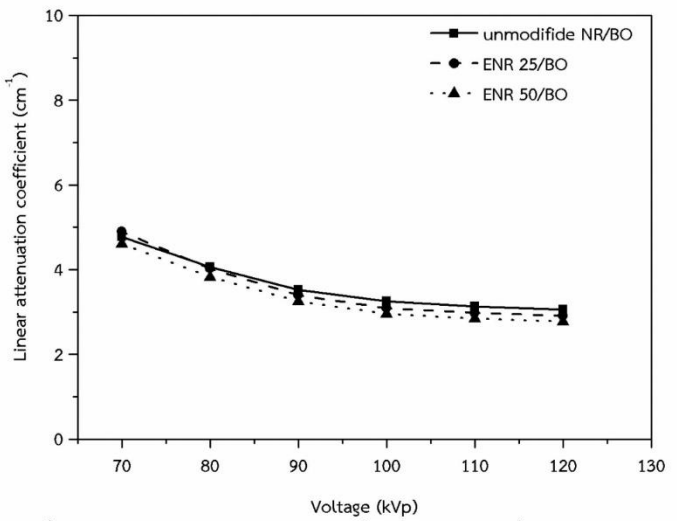
ตารางที่ 2 สมบัติเชิงกล และสมบัติการลดทอนรังสีแกมมา (gamma ray) ของยางคอมโพสิตที่มีการใช้ยางที่มีปริมาณอิพอกไซด์ในยางธรรมชาติต่างกัน

Properties	Unmodified NR/BO	ENR 25/BO	ENR 50/BO
Modulus at 100% elongation (MPa)	1.02 ±0.11	1.23 ±0.13	1.09 ±0.21
Tensile strength (MPa)	20.66 ±1.88	21.42 ±1.99	14.10 ±0.87
% Elongation at break	625 ±29	650 ±50	600 ±29
Hardness (shore A)	45.20 ±0.45	45.00 ±0.89	46.00 ±0.45
Specific gravity	1.568 ±0.003	1.601 ±0.004	1.653 ±0.024
Crosslink density	$1.23 \times 10^{-3} \pm 1.04 \times 10^{-4}$	$1.21 \times 10^{-3} \pm 2.04 \times 10^{-4}$	$1.15 \times 10^{-3} \pm 1.54 \times 10^{-4}$
Dispersion by EDX technique			
HVL of gamma shielding (cm)*	4.6376	4.6637	4.7058

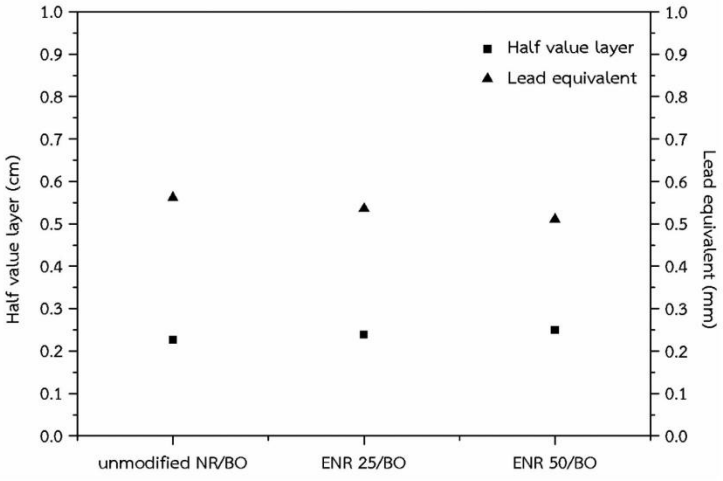
*commercial window = 4.7300 cm

สมบัติการลดทอนรังสีเอ็กซ์ (X-ray)

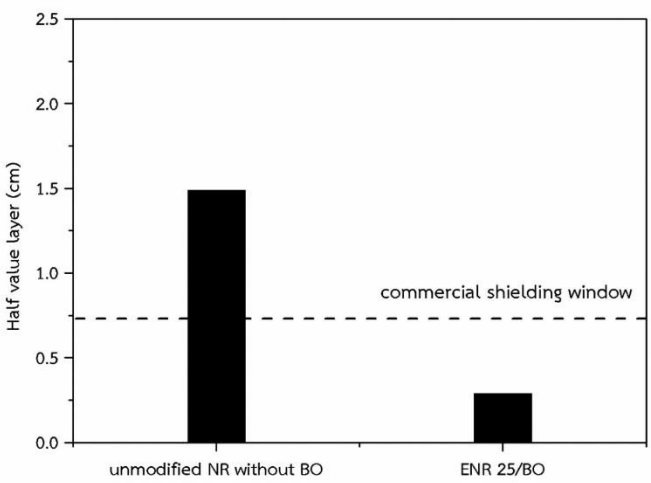
ผลการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างยางคอมโพสิตที่มีการแปรชนิดของยางธรรมชาติ และเติมบิสมัทออกไซด์เป็นสารกำบังรังสี ต่อความสามารถในการลดทอนรังสีเอ็กซ์ของ NR composites แสดงในรูปที่ 1-3



รูปที่ 1 สัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเชิงเส้นของของยางคอมโพสิตที่มีการใช้ยางธรรมชาติที่มีปริมาณอิพอกไซด์ในยางธรรมชาติต่างกัน ทดสอบรังสีเอ็กซ์ที่พลังงาน 50-120 kVp



รูปที่ 2 ความหนาครึ่งค่า และความหนาเทียบเท่าตะกั่วของของยางธรรมชาติคอมโพสิตที่มีการใช้ยางที่มีปริมาณอิพอกไซด์ในยางธรรมชาติต่างกัน ทดสอบที่รังสีเอ็กซ์พลังงาน 120 kVp



รูปที่ 3 เปรียบเทียบความหนาครึ่งค่าของของยางอิพอกไซด์ 25 คอมโพสิตกับ ยางธรรมชาติที่ไม่มีการเติมบิสมัทออกไซด์ (BO) commercial shielding window ที่รังสีเอ็กซ์พลังงาน 120 kVp

การอภิปรายผล

การทดสอบสมบัติเชิงกล

จากตารางที่ 2 แสดงค่ามอดูลัสที่ระยะยืด 100% (Modulus at 100% elongation) และความแข็ง (Hardness) ของยางคอมโพสิตที่มีการแปรชนิดของยาง และเติมบิสมัทออกไซด์เป็นสารกำบังรังสีปริมาณ 80 phr จากผลการทดสอบพบว่า unmodified NR/BO, ENR 25/BO และ ENR 50/BO composites ให้ค่ามอดูลัสที่ระยะยืด 100% และความแข็งที่ใกล้เคียงกัน เนื่องจากเติม BO ในปริมาณที่เท่ากัน และยางคอมโพสิตทั้ง 3 ชนิดมีปริมาณการเชื่อมขวางที่ใกล้เคียงกันสามารถสังเกตได้จากตารางที่ 2 โดยพบว่าปริมาณการเชื่อมขวาง (crosslink density) ของยางคอมโพสิตทั้ง 3 มีปริมาณความหนาแน่นของการเชื่อมขวางที่ใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตามค่าความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile strength) และระยะยืด ณ จุดขาด (% Elongation at break) ของยางคอมโพสิตที่มีการแปรชนิดของยาง และเติมบิสมัทออกไซด์เป็นสารกำบังรังสี จากตารางที่ 2 มีค่าต่างกัน โดยพบว่า ENR 25/BO composites ให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงมากกว่า unmodified NR/BO composites และ ENR 50/BO composites ตามลำดับ ส่วนนี้เป็นผลโดยตรงมาจากการกระจายตัวที่ดีของ BO ที่เติมลงใน ENR 25 การกระจายตัวของ BO ในยางคอมโพสิตที่มีการแปรชนิดของยางที่แตกต่างกันสังเกตได้จากตารางที่ 2 จะเห็นได้ว่า ENR 25 มีการกระจายตัวของ BO ได้ดีกว่า unmodified NR เนื่องจากยางชนิด ENR เป็นยางที่มีวงแหวนออกซิไดซ์ภายในโครงสร้างของสายโซ่โมเลกุล ซึ่งผ่านการดัดแปรให้โมโลกุลยางชนิดนี้มีความเป็นขั้ว สามารถเข้ากันได้ดีกับ BO ซึ่งจัดเป็นสารที่

มีขั้วเช่นเดียวกันได้ดี ส่งผลให้สมบัติเชิงกลมีแนวโน้มที่ดีขึ้น อย่างไรก็ตามในกรณีของยางชนิด ENR 50 ถึงแม้มีการดัดแปรโมเลกุลให้ความเป็นขั้วเช่นกัน แต่เนื่องด้วยกระบวนการดัดแปรที่มีการเติมหมู่อิพอกไซด์ลงไปในโมเลกุลปริมาณสูงส่งผลให้น้ำหนักโมเลกุลโดยภาพรวมต่ำลง ซึ่งน้ำหนักโมเลกุลที่ต่ำลงจะส่งผลโดยตรงต่อความหนืด และความสามารถในการกระจายตัวของ BO ใน ENR 50 (กล่าวคือสายโซ่โมเลกุลสั้นลง จะส่งผลต่อความหนืดเริ่มต้นของยางลดลง แรงเฉือนที่เกิดขึ้นภายในเครื่องผสมแบบปิดจึงลดลงตามไปด้วยการกระจายตัวของสารจึงเกิดได้ไม่ดีทำให้สารเกิดการเกาะกลุ่มกันเองมากกว่าที่จะกระจายตัวในเนื้อยางอย่างสม่ำเสมอ) ซึ่งการกระจายตัวของสารจะส่งผลโดยตรงต่อสมบัติเชิงกลของยางคอมโพสิต ซึ่งการกระจายตัวของสารมีผลต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิตในเรื่องของการส่งผ่านแรง หากวัสดุคอมโพสิตมีการกระจายตัวของสารที่ดีการส่งผ่านแรงก็จะเป็นไปอย่างต่อเนื่อง ทำให้วัสดุคอมโพสิตเกิดการรับแรงได้ดี และส่งผลต่อความแข็งแรงที่ดีอีกด้วย ในทางกลับกันหากวัสดุคอมโพสิตมีการกระจายตัวของสารที่ไม่ดี ก็จะส่งผลต่อการถ่ายโอนแรงที่ไม่ต่อเนื่องจากเนื้อพื้นไปยังเฟสกระจาย วัสดุคอมโพสิตเกิดการรับแรงได้ไม่ดี สมบัติด้านความแข็งแรงจะลดลงเช่นเดียวกับ ENR 50/BO composites ที่ให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงน้อยที่สุด เมื่อเทียบกับ ENR 25/BO composites และ NR/BO composites นอกจากนั้นการกระจายตัวที่ไม่ดีของสารยังส่งผลต่อค่าระยะยืด ณ จุดขาด เนื่องจากบริเวณที่เกิดการเกาะกลุ่มกันของสารจัดเป็นบริเวณที่มีเป็นจุดอ่อนของวัสดุคอมโพสิต กล่าวคือจุดที่เกิดการเกาะกลุ่มกันนี้จะเป็นจุดที่เกิดการขาดเมื่อให้แรงดึงกับวัสดุคอมโพสิต ดังนั้น ENR 50/BO composites มีการกระจายตัวที่ไม่ดีจึงทำให้มีค่าระยะยืด ณ จุดขาดต่ำกว่า ENR 25/BO composites และ unmodified NR/BO composites โดยความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) ของยางธรรมชาติคอมโพสิตที่มีการแปรชนิดของยางธรรมชาติชนิดต่าง ๆ และเติมบิสมัทออกไซด์เป็นสารกำบังรังสี ซึ่งเติมในปริมาณที่เท่ากัน จากรูปจะเห็นได้ว่า ENR 25/BO composites และ ENR 50/BO composites ให้ค่าความถ่วงจำเพาะมากกว่า unmodified NR/BO composites เล็กน้อย เนื่องจากธรรมชาติของวัตถุดิบ ENR มีความถ่วงจำเพาะมากกว่า unmodified NR เล็กน้อย (ความถ่วงจำเพาะของ ENR ประมาณ 1 [4] และความถ่วงจำเพาะของ NR ประมาณ 0.92 [10])

การทดสอบสมบัติทางด้านรังสี

สมบัติการลดทอนรังสีแกมมา

ตารางที่ 2 แสดงความหนาครึ่งค่า (Haft value layer: HVL) ของยางคอมโพสิตที่ทำการทดสอบโดยใช้รังสีแกมมาที่มีพลังงานเท่ากับ 662 keV จากผลการทดสอบพบว่าคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่เตรียมได้ทั้ง 3 ชนิด มีค่าความหนาครึ่งค่าและความหนาเทียบเท่าตะกั่วที่ใกล้เคียงกัน (ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ) หมายความว่ายางคอมโพสิตทั้ง 3 ชนิดสามารถลดทอนความเข้ม หรือพลังงานรังสีได้ครึ่งหนึ่งจากรังสีเดิมโดยมีความหนาที่เท่ากัน และเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับวัสดุกำบังรังสีที่นิยมใช้ทั่วไปพบว่ายางคอมโพสิตทั้ง 3 ชนิดให้ค่าความหนาครึ่งค่าน้อยกว่า commercial shielding window นั่นหมายความว่ายางคอมโพสิตทั้ง 3 ชนิดสามารถลดทอนรังสีได้ดีกว่าหรือเทียบเท่ากับ commercial shielding window ที่เป็นวัสดุที่ใช้เป็นวัสดุหลักในการกำบังรังสี

สมบัติการลดทอนรังสีเอ็กซ์

รูปที่ 1 แสดงสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเชิงเส้นของยางคอมโพสิตที่มีการแปรชนิดของยาง และเติมบิสมัทออกไซด์เป็นสารกำบังรังสี โดยทำการทดสอบรังสีเอ็กซ์ที่มีพลังงานในช่วง 50-120 kVp พบว่าผลการทดสอบมีแนวโน้มเช่นเดียวกับการทดสอบคุณสมบัติการลดทอนรังสีแกมมากล่าวคือ unmodified NR/BO ENR 25/BO และ ENR 50/BO composites ให้ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเชิงเส้นที่ใกล้เคียงกัน กล่าวคือยางคอมโพสิตทั้ง 3 ชนิดมีความสามารถในการลดทอนรังสีเอ็กซ์ที่ใกล้เคียงกัน

รูปที่ 2 แสดงความหนาครึ่งค่า และความหนาเทียบเท่าตะกั่วของยางคอมโพสิตที่มีการแปรชนิดของยาง และเติมบิสมัทออกไซด์เป็นสารกำบังรังสีทดสอบรังสีเอ็กซ์ที่มีพลังงานเท่ากับ 120 kVp จากผลการทดสอบพบว่า unmodified NR/BO ENR 25/BO และ ENR 50/BO composites มีค่าความหนาครึ่งค่า และความหนาเทียบเท่าตะกั่วที่ใกล้เคียงกัน แสดงว่ายางคอมโพสิตทั้ง 3 ชนิดมีความหนาเท่ากันที่สามารถลดทอนพลังงาน หรือความเข้มของรังสีได้ครึ่งหนึ่งจากพลังงานหรือความเข้มของรังสีเดิม หรือกล่าวคือรังสีจะถูกยางคอมโพสิตดูดกลืนรังสีได้ครึ่งหนึ่ง และรังสีอีกครึ่งหนึ่งสามารถทะลุผ่านออกมาจากยางคอมโพสิตได้ และยางคอมโพสิตทั้ง 3 ชนิดสามารถกำบังรังสีเอ็กซ์ได้เทียบเท่าตะกั่วที่มีหนาประมาณ 0.25 มิลลิเมตร โดยทำการเปรียบเทียบยางคอมโพสิตที่ความหนาเท่ากันคือ 13 มิลลิเมตร

บทสรุป

การเตรียมยางธรรมชาติคอมโพสิตปลอดตะกั่วที่มีคุณสมบัติสามารถกำบังรังสีได้ดี โดยการใช้ส่วนผสมระหว่างยางธรรมชาติที่มีหมู่อิพอกไซด์และบิสมัสออกไซด์ พบว่า ENR 25/BO composites เหมาะสมที่สุดเพราะมีสมบัติเชิงกลสูงที่สุด ทำให้มีค่าความต้านทานต่อแรงดึงมากกว่า unmodified NR/BO composites และ ENR 50/BO composites ตามลำดับ เมื่อทำการทดสอบที่รังสีเอ็กซ์พลังงาน 120 kVp พบว่า ENR 25/ BO composites สามารถกำบังรังสีเอ็กซ์ได้ดีกว่า NR without BO และ commercial window ตามลำดับ ดังนั้น ENR 25/BO composites เหมาะสมที่จะนำมาผลิตเป็นวัสดุกำบังรังสีเอ็กซ์ที่ปลอดตะกั่ว อีกทั้งมีความยืดหยุ่น และมีความต้านทานต่อแรงดึงสูง สามารถกำบังรังสีเฉพาะจุดหรือบริเวณที่ต้องการความโค้งงอได้ ยางคอมโพสิตปราศจากตะกั่วที่พัฒนาขึ้น มีความสามารลดทอนรังสีแกมมา และกำบังรังสีเอกซ์ได้ดีกว่าแบบกระจก วัสดุที่เตรียมได้จึงมีความเป็นไปได้สูงที่จะพัฒนาในเชิงพาณิชย์และเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติกำบังรังสีชนิดสวมใส่ได้

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณสถาบันวิจัย และพัฒนานวัตกรรมยางพารา สำหรับการสนุบสนุนทุนวิจัย (สัญญาเลขที่ SCI6010635) ขอขอบคุณสาขาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ ศูนย์ถ่ายทอดเทคโนโลยียาง มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ สาขาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม และสาขารังสีเทคนิค คณะเทคนิคการแพทย์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่อำนวยความสะดวก ด้านสถานที่ การใช้เครื่องมือ และอุปกรณ์ตลอดการดำเนินงานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

[1] ทิวาวัลย์ อธิชาติกุล, นพวรรณ ชนัญพานิช, วิทิต ผึ่งกัน และชลดา สุวรรณบูรณ์. (2560). สัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเอ็กซ์ของแผ่นคอมโพสิต Pu/$BaSO_4$. ปีที่ 27. วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. ฉบับที่ 1. หน้า 159–168

[2] บทความสมาคมนิวเคลียร์แห่งประเทศไทย. (2550). ทอเรียมไดออกไซด์. เข้าถึงเมื่อ (2 พฤษภาคม 2561). เข้าถึงได้จาก (http://www.nst.or.th/article/article494/article49409.htm)

[3] บุญรักษ์ กาญจนวรวณิชย์. (2552). แผ่นเส้นใยนาโนคอมโพสิตป้องกันรังสีเอ็กซ์. เข้าถึงเมื่อ (2 พฤษภาคม 2561). เข้าถึงได้จาก (https://www.mtec.or.th/post-knowledges/4070/)

[4] เสาวนีย์ ก่อวุฒิกุลรังษี และกนกวรรณ หัตถิยา. (2558). การใช้เยื่อกระดาษหนังสือพิมพ์เป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติ. เข้าถึงเมื่อ (25 มิถุนายน 2562). เข้าถึงได้จาก (http://dmhost2.psu.ac.th/~rumpsu/index.php/psu-research)

[5] Chayanit J. and Doonyapong W. (2014). Innovative neutron shielding material composing of natural rubber- stryrene butadiene rubber blends and diboron trioxide. Access (2 May 2018). Available (http://cuir.car.chula.ac.th/handle/123456789/45903)

[6] Donruedee T., Anawat R., Worawat P and Kiadtisak S. (2018). Flexible, lead-free, gamma-shielding material based on natural rubber/metal oxide composites. Iran. Polym. Vol. 27. pp. 33–41

[7] Flora G., Gupta D.and Tiwari A. (2012). Toxicity of lead: a review with recent updates. Toxicology. Vol. 5. pp. 47–58

[8] Johns J., Nakason C., Thitithammawong A. and Klinpituksa P. (2012). Method to vulcanize natural rubber from medium ammonia latex by using glutaraldehyde. Rubber Chem. Technol. Vol. 85. No. 4. pp. 565–575

[9] Kalayanee K., Lek S., Tripob B. and Sompong N. (2008). Ferrite-STR 5L Rubber Composites as Gamma Radiation shildings. KKU research journal. Vol. 13. No. 2. pp. 269–271

[10] POLYTECH INDUSTRY Co., ltd. (2554). ยางธรรมชาติ. RUBBER. เข้าถึงเมื่อ (25 มิถุนายน 2562). เข้าถึงได้จาก (http://polytech-rubber.blogspot.com/2011/07/rubber.html)

[11] Yasaka P., Pattanaboonmee N., Kim HJ., Limkitjaroenporn P. and Kaewkhao J. (2014). Gamma radiation shielding and optical properties measurement of zine bismuth borate glasses. Ann. Nucl. Energy. Vol. 68. pp. 4–9

ภาคผนวก ง.

ต้นฉบับบทความวิจัย

Intom S., Kalkornsuranee E., Johns J., Hongtong W., Chaiphaksa W. and Kaewkhao J. 2018. Flexible radiation shielding materials based on natural rubber/ bismuth oxides (Bi_2O_3) and natural rubber/lead oxides (PbO) composites

Journal of
Reinforced Plastics and Composites

Flexible Gamma Radiation Shielding Materials based on Natural Rubber and Bismuth, Lead Oxide Composites

Journal:	*Journal of Reinforced Plastics and Composites*
Manuscript ID	JRP-19-0693
Manuscript Type:	Invitation Only: Papers from Materials Research Society of Thailand, International Conference
Date Submitted by the Author:	26-Sep-2019
Complete List of Authors:	Intom, Sirilak; Prince of Songkla University - Hat Yai Campus, Materials Science and Technology Kalkornsuranee, Ekwipoo ; Prince of Songkla University - Hat Yai Campus, Materials Science and Technology Johns, Jobish; RajaRajeswari College of Engineering, Physics Hongtong, Wiraporn ; Nakhon Pathom Rajabhat University, Physics Program Chaiphaksa, Wuttichai ; Nakhon Pathom Rajabhat University, Physics Program Kaewkhao, Jakrapong; Nakhon Pathom Rajabhat University, Physics Program
Keyword:	Natural Rubber, Lead Oxide, Composites, Radiation shielding, Gamma ray, Bismuth Oxide
Abstract:	This work aims to compare the performance between natural rubber (NR)/lead oxide (PbO) composite and natural rubber (NR)/ bismuth oxide (BO) composite for gamma radiation shielding applications. The results indicated that both NR/BO and NR/PbO composites have no significantly different in term of modulus and hardness values while the NR/PbO composite exhibited higher tensile strength, elongation at break and specific gravity than that of NR/BO composite. Gamma radiation shielding properties in terms of mass attenuation coefficient (μm), effective atomic number (Zeff), effective electron density (Ne) and half value layer (HVL) have been also studied. It is seen that both composites gave good and no significantly different on radiation shielding properties. In addition, the developed NR/PbO and NR/BO composited have better radiation shielding than that of the neat natural rubber (without radiation shielding fillers), commercial window and ordinary concrete. The developed material in this work can be used as efficient flexible radiation shielding materials. However, as a radiation shielding material lead is not suitable to use due to its toxicity to the human body and the environment. Therefore, NR with BO is better appropriate choice for producing flexible radiation shielding material such as glove, apron, underwear and wristband.

SCHOLARONE™
Manuscripts

Flexible Gamma Radiation Shielding Materials based on Natural Rubber and Bismuth, Lead Oxide Composites

Sirilak Intom[1*], Ekwipoo Kalkornsuranee[1], Jobish Johns[2], Wiraporn Hongtong[3], Wuttichai Chaiphaksa[3] and Jakrapong Kaewkhao[3]

[1]Department of Materials Science and Technology, Faculty of Science, Prince of Songkla University, Hat-Yai, Thailand.
[2]R&D Center, Department of Physics, Rajarajeswari College of Engineering, Bangalore, INDIA.
[3]Physics Program, Faculty of Science and Technology, Nakhon Pathom Rajabhat University, Nakhon Pathom, Thailand.

E-mail: yingsirilak_29@hotmail.com

Abstract: This work aims to compare the performance between natural rubber (NR)/lead oxide (PbO) composite and natural rubber (NR)/ bismuth oxide (BO) composite for gamma radiation shielding applications. The results indicated that both NR/BO and NR/PbO composites have no significantly different in term of modulus and hardness values while the NR/PbO composite exhibited higher tensile strength, elongation at break and specific gravity than that of NR/BO composite. Gamma radiation shielding properties in terms of mass attenuation coefficient (μ_m), effective atomic number (Z_{eff}), effective electron density (N_e) and half value layer (HVL) have been also studied. It is seen that both composites gave good and no significantly different on radiation shielding properties. In addition, the developed NR/PbO and NR/BO composited have better radiation shielding than that of the neat natural rubber (without radiation shielding fillers), commercial window and ordinary concrete. The developed material in this work can be used as efficient flexible radiation shielding materials. However, as a radiation shielding material lead is not suitable to use due to its toxicity to the human body and the environment. Therefore, NR with BO is better appropriate choice for producing flexible radiation shielding material such as glove, apron, underwear and wristband.

Keyword: Natural rubber, Bismuth Oxide, Lead Oxide, Composites, Radiation shielding, Gamma ray.

For Peer Review

1. Introduction

Gamma rays are high energy electromagnetic radiation, which penetrates deeply into the material. Recently, radioactive isotopes have been used extremely in many fields such as industry, agriculture and medicine. The most commonly used ionizing radiations are gamma and X-rays [1]. These radiations are harmful to the cells of organisms [2]. Therefore, it is need to produce radiation shielding materials. Normally, using concrete as a radiation shielding is uncomfortable due to heavy weight and difficult to transport from one place to another. Evaporation of water on exposing high

energy radiations forms crack in the concrete due to its brittle and non-flexibility nature. These are the limitations of concrete in case of radiation shielding applications. There are many research works reported the successfully prepared glass/Pb composites as shielding materials [3,4,5]. However, radiation shielding materials based on glass/lead composites are easy to crack and dangerous to human health. Therefore, many researchers [6,7] attempted to prepare polymer composites with other metal oxide as shielding materials to overcome the previous drawbacks of the glass/Pb composites. For example, Le Chang and co-workers prepared Tungsten/epoxy composites by blending epoxy resin with different weight percent of tungsten contents. This is to obtain better toughness together with shielding properties for the materials. From this study, the shielding properties of the composites increased with increment of tungsten contents [8]. However, epoxy is rigid and non-flexible. Therefore, this research aims to develop flexible shielding material based on natural rubber (NR) composites. The mechanical and shielding properties of NR composites with different radiation shielding filler types (i.e., Bismuth oxides (BO) and lead oxides (PbO)) and without radiation shielding fillers (neat NR) were investigated. Cure characteristics, particle distribution, mechanical and shielding properties of the NR composites were studied and compared.

2. Details experimental

2.1. Materials

Compositions of NR composites and their role are given in Table 1.

Table 1 Ingredient of NR composites with addition BO and PbO

Chemicals	Content (phr)[a]	Functions	Supplier
Natural rubber (NR, STR5L)	100	Polymer	Chalong latex industry.Co., Phuket (Thailand)
Stearic acid	1	Activator	Imperial Industrial Chemicals Co., Ltd. Bangkok, (Thauland)
Zinc Oxide; ZnO	5	Activator	Thai-Lysaght Co., Ltd., Phranakhon Si Ayutthaya, (Thailand)
N-tert-butyl-2-benzthiazyl sulphenamide; TBBS	1	Accelerator	Siam Chemicals Co., Samutprakarn (Thailand)
Sulfur (S)	2.5	Vulcanizing Agent	Siam Chemicals Co., Samutprakarn (Thailand)
Bismuth oxides (BO) or Lead oxide (PbO)	150 (57.80 wt%)	Radiation Shielding	Alfa Aesar Co., Massachusetts (USA)

[a]phr: parts per hundred parts of rubber

For Peer Review

2.2. Preparation of NR composites

The NR composite were prepared by using internal mixer (HAAK PolyLab OS, USA) at 60 °C with a rotor speed of 60 rpm. In this work, the preparation of NR composites were divided by two steps including mastication and compounding. First, the NR was masticated in an internal mixer for 10 min. ZnO, Stearic acid, TBBS, BO or PbO and Sulfur were then added with the mixing time of 25 min. The obtained compounds were further measured the scorch (T_{s2}) and cure time (t_{c90}) using Moving die rheometer (MDR). Vulcanization of rubber takes place by compression molding (LCC 140, Taiwan) at 150 °C.

2.3. Testing

2.3.1 Cure characteristics

The cure time (t_{c90}) of NR composites were evaluated using Moving disk rheometer (MDR type, Alpha RPA 2000, USA) according to the ASTM D 5289 at a testing temperature of 150 °C with testing time for 30 min. The obtained cure time was then used for vulcanizing the NR composites by compression molding.

2.3.2. Dispersion Analysis

The distribution of bismuth (Bi) and Lead (Pb) elements in NR composites were investigated using an EDX spectrometer attached to scanning electron microscope (SEM Quanta 400 FEI, Netherland). The specimens were mounted on aluminum stubs using carbon tape and then coated with a thin layer of gold to prevent charging before the observation. The elements present in NR composites were calculated by the following equations:

First step: the ratio of elements in mole percentage,

$$\text{Ratio of element}\,(\%) = \frac{\text{Molecular weight of element}}{\text{Molecular weight of chemical}} \times 100 \quad (1)$$

Second step: The ratio of elements in weight percentage,

$$\text{Ratio of element (wt\%)} = \frac{\text{Ratio of element (\%)} \times \text{Ratio of chemical}}{100} \quad (2)$$

when $$\text{Ratio of chemical (wt\%)} = \frac{\text{phr of chemical}}{\text{phr}_{\text{total}}} \times 100 \quad (3)$$

2.3.3. Mechanical properties

The mechanical properties in terms of modulus at 100% elongation, tensile strength and elongation at break were measured by using a universal testing machine (Hounsfield, model H10KS, England) according to the ASTM D 412 method using dumbbell-shaped test with a crosshead speed of 500 mm/min. The surface hardness of the composite was tested using Shore A durometer (Frank GmbH, Hamburg, Germany) according to ASTM D 2240. The specific gravity was measured by comparative measurement of mass in air and water according to ISO 2781:2008 (Method A) (Mettler Toledo ML204, New Zealand)

2.3.4. Gamma ray radiation shielding properties

Experimental values of mass attenuation coefficient were measured by the Compton scattering technique for selected gamma ray energy.

The schematic diagram of gamma ray shielding properties measurement by Compton scattering technique is shown in Figure 1. The radiation source is mounted on a composite with adjustable stands. The stands can move in transverse direction for proper beam alignment. The ^{137}Cs radioactive source of 15^{mCi} (555 MBq) strength was obtained from the Office of Atom for Peace (OAP), Thailand. An aluminum rod was used as the scattering rod. The Compton scattered rays using a 2 × 2 NaI(Tl) scintillator detector having an energy resolution of 8% at 662 keV (BICRON model 2M2/2) with CANBERRA photomultiplier tube (base model 802-5). The optimum distances between source and the scatterer was chosen to be 20 cm and 20 cm between the scatterer and detector. The spectra were recorded using a CANBERRAPC based multi-channel analyzer (MCA). The spectrum on the MCA of detector provides instant counts in each of 1024 bins divided by voltage. Gamma ray shielding properties were measured by varying the scattering angles (30°-120°) to produce gamma ray of different energies in the range 223 keV -662 keV.

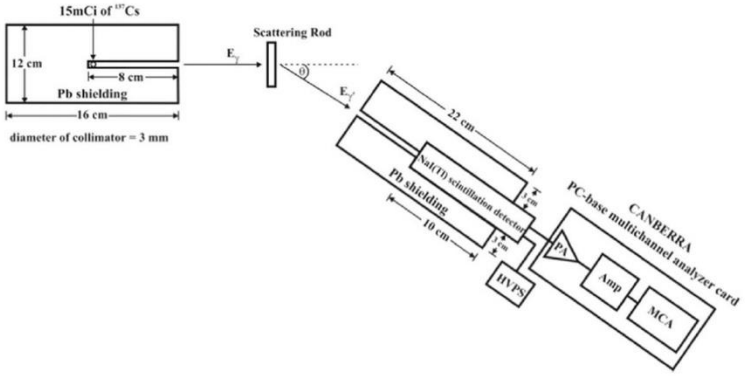


Figure 1. Schematic diagram of mass attenuation coefficient measurement by Compton scattering technique [9].

Gamma ray attenuation properties of NR/BO and NR/PbO composites have been calculated by using equations (4-8)

$$\mu_m = \frac{I}{\rho t}\ln\left(\frac{I_o}{I}\right) \quad (4)$$

when μ_m is the mass attenuation coefficient, ρ is the density of material (g/cm^3), $I_0$and I are the incident and transmitted intensities respectively and t is the thickness of NR composites (cm)

$$Z_{eff} = \frac{\sigma_{t,a}}{\sigma_{t,el}} \quad (5)$$

when Z_{eff} is effective atomic number (electron/atom), $\sigma_{t,el}$ is the total electronic cross-section and $\sigma_{t,a}$ is the total atomic cross-section[10].

$$N_e = \frac{\mu_m}{\sigma_{t,el}} \quad (6)$$

when N_e is the effective electron density (electron/g)

The half value layer (HVL) is a thickness that reduce intensity of radiation by half.

$$\mathrm{HVL} = 0.693/\mu \quad (7)$$

when HVL is the half value layer and μ is linear attenuation coefficient [11].

$$d_{Pb} = \frac{\mu_{composite}}{\mu_{Pb}} \times d_{composite} \quad (8)$$

when d_{Pb} is lead equivalent thickness μ_{Pb} is the linear attenuation coefficient of lead, , $\mu_{composite}$ is the linear attenuation coefficients of NR composites and $d_{composite}$ is the thickness of NR composites. NR composites with thickness 13 mm, has been used to calculate d_{Pb} in this work.

Theoretical values of the gamma attenuation properties of NR, NR/BO and NR/PbO composites have been calculated by WinXCom program [12].

3. Result and discussion

3.1 Cure time

Cure time (t_{c90}) of the neat NR (i.e, without radiation shielding fillers), the NR composite with BO and PbO are depicted in Table 2. It can be seen that the NR composite with both radiation shielding fillers (BO and PbO) provided shorter cure time than the one without radiation filler. This is due to the radiation shielding fillers consisting metal oxide which can be acted as also co-activators. This result gave good agreement with the previous work [13]. Furthermore, M_{II} and ΔM of the NR composites with radiation shielding fillers provided higher than that of the neat NR. This can attributed by the rigid particles of metal oxide insert into the NR chains and this caused obstruction of the mobility of NR chain. However, the NR composites with both radiation shielding fillers showed not significantly different in term of cure behaviors, maximum torque (M_{II}), minimum torque (M_L), and torque difference (ΔM). From this results clearly showed that the crosslink density of both composites are the same.

Table 2 Cure times, maximum torque (M_H), minimum torque (M_L), and torque differences (ΔM) of neat NR, NR with BO and PbO composites

Materials	M_H (dNm)	M_L(dNm)	ΔM (dNm)	Cure time (t_{c90}, min)
Neat NR	6.10	0.39	5.71	8.44
NR/BO	10.47	0.39	10.08	6.22
NR/PbO	10.39	0.35	10.04	6.50

3.2. Dispersion Analysis

Figure 2 shows the SEM microphotographs of NR composites with BO and PbO. The distribution image of bismuth (Bi) and lead (Pb) in NR composites were obtained by EDX technique. The data obtained from Figure 2 reveals that the NR composites with PbO exhibits better distribution than the NR composites with BO. This is due to the smaller particle size of PbO with higher surface area as shown in figure 2. The amounts of elements (which is benefit for calculating for equation 1-3) present in NR composites are given in Table 3.

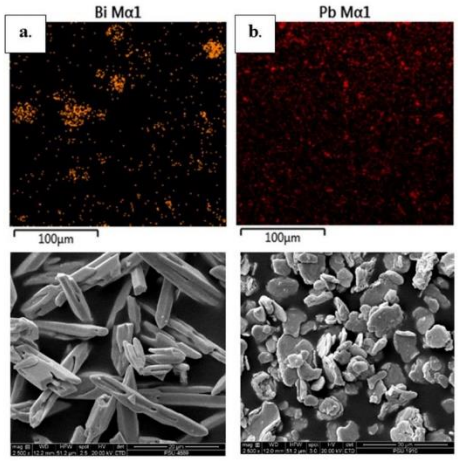


Figure 2. Element mapping distributions in NR matrix and morphology of radiation shielding fillers (**a)** BO and **(b)** PbO.

Table 3 The element contents in NR composites

Distribution of elements	NR/BO	NR/PbO
C	34.515	34.515
H	4.605	4.605
O	6.378	5.062
Zn	1.546	1.546
Bi	51.849	-
Pb	-	53.660
N	0.045	0.045
S	1.067	1.067

3.3. Mechanical properties

Figure 3 shows the values of modulus at 100 % elongation and hardness of NR composites with BO and PbO. It is seen that both composites provided higher value compared with the one without both radiation shielding filler. This is due to the addition of rigid particles leads to increase the rigidity nature of rubber molecules. However, there is no significantly different in term of modulus and hardness of the different composites due to the same amount of filler particles in both. Figure 4 shows tensile strength and elongation at break of the NR composites with BO and PbO. The experiment shows that NR/PbO composite has better tensile strength and elongation at break than the NR/BO composite. This can be explained by better dispersion of PbO than BO in NR matrix as shown in Figure 2. Greater distribution leads to better interfacial adhesion and higher tension resistance. On the other hand, poor distribution becomes more agglomeration of filler nature. Therefore, it gave lower tension resistance as shown in Figure 5.

Figure 6 shows specific gravity of the composites. It is seen that the NR/PbO composite has more specific gravity than the one of NR/ BO composite due to higher density nature of PbO (density of BO = 8.90[14] and PbO =9.53[15])

FOR PEER REVIEW

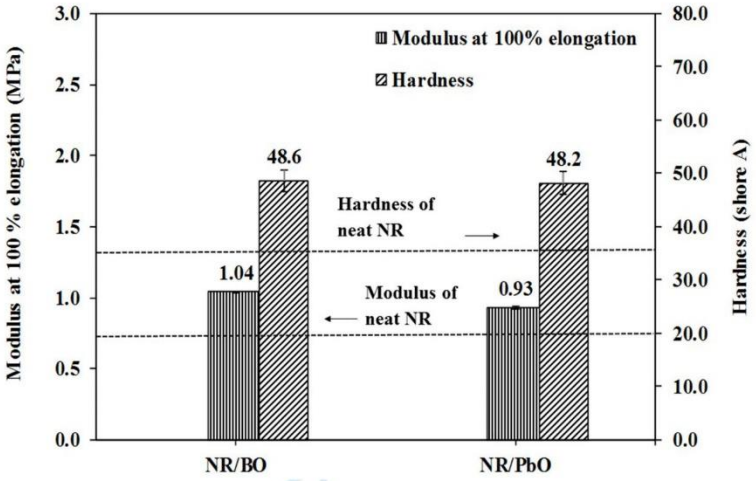


Figure 3. modulus at 100% elongation and hardness of neat NR, NR with BO and PbO composites.

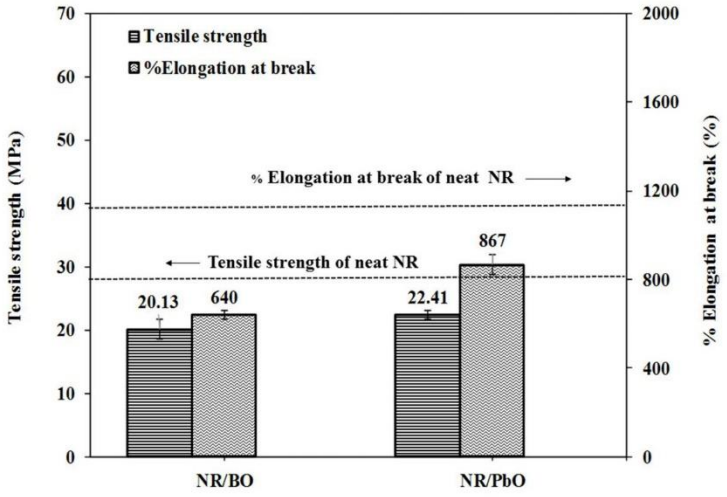


Figure 4. Tensile strength and %Elongation at break of neat NR, NR with BO and PbO composites.

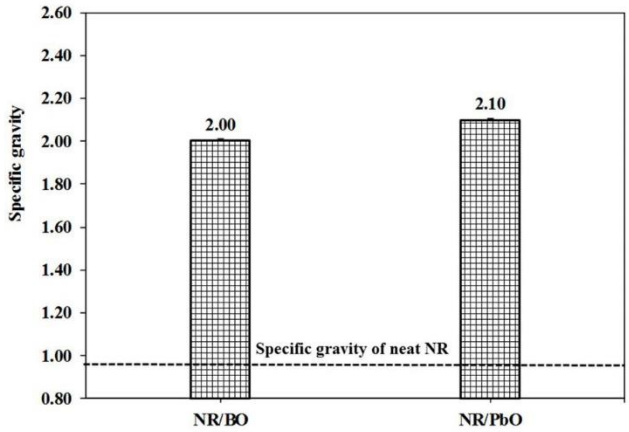


Figure 5. Specific gravity of neat NR, NR with BO and PbO composites.

3.4. Gamma Radiation Shielding

Gamma radiation shielding properties of NR composites with a concentration of 150 phr BO and PbO have been studied. The experiment is conducted with the help of Cs-137 source with energy 663 keV and photon energy varies in the range of 223-662 keV. The angle varies from 30°-120° using Al scattering rod. The values of μ_m, Z_{eff} and N_e of NR/BO and NR/PbO composites measured using gamma ray are as shown in Figures 6-8. It was found that both NR/radiation shielding filler composites have higher gamma ray attenuation value than the neat NR. It can be proven that gamma attenuation can be improved by adding BO and PbO. However, the gamma ray attenuation value of NR/BO and NR/PbO composites are not significantly difference. It shows that NR/BO composite exhibits efficient attenuation as NR/PbO composite and the experimental values of μ_m, Z_{eff} and N_e are in good agreement with the theoretical values. Gamma ray attenuation value of all NR/BO and NR/PbO composites decreases with increasing photon energy. This indicates the dependence of gamma ray attenuation value on the energy of photon.

Figure 9 shows half value layer (HVL) and lead equivalent (dPb) of NR/BO and NR/PbO composites measured using gamma ray with energy 622 keV. It is seen that HVL decreased with increasing lead equivalent by addition of BO and PbO into NR. It means that NR/radiation shielding fillers composites can be improved gamma ray attenuation. HVL and lead equivalent of NR/BO and NR/PbO composites are not significantly difference due to the similar mass attenuation coefficient which leads to similar gamma ray attenuation. Figure10 shows the comparison of HVL of neat NR, NR/BO and NR/PbO composites with commercial window serpentine, ordinary concrete, rs 253 and hemimatite-serpentine measured with 662 keV gamma ray by using Cs-137 source. It indicates that the HVL values of NR/BO and NR/PbO composites showed lower value than the neat NR, commercial window, serpentine, ordinary concrete, rs 253 and hemimatite-serpentine. It can be seen that NR/BO and NR/PbO composites gave better gamma ray attenuation when compared to other shielding materials. From the results, it can be concluded that flexible shielding materials were successfully developed by addition of both BO and PbO into NR

composites with the same shielding efficiency. However, lead (Pb) is one of the carcinogenic agent that harm to the human body and environment. Therefore, NR/BO composite is a better appropriate choice for producing flexible radiation shielding materials.

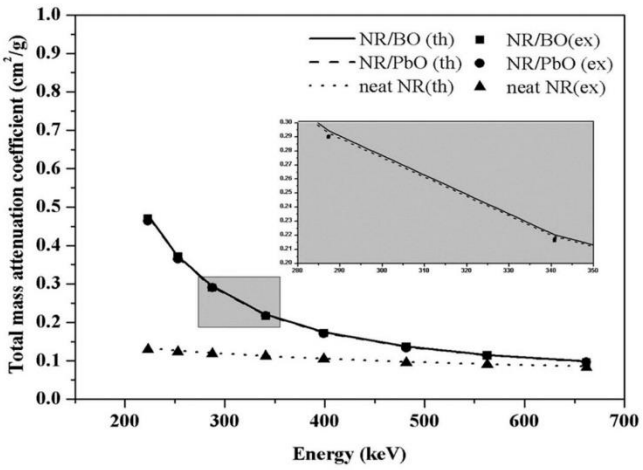


Figure 6. Total mass attenuation coefficient of neat NR, NR with BO and PbO composites measured using gamma ray with energy 223 keV-662 keV.

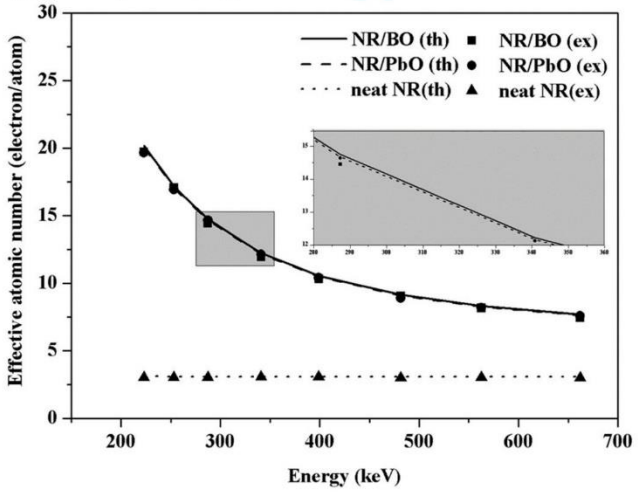


Figure 7. Effective atomic number (Z_{eff}) of neat NR, NR with BO and PbO composites measured using gamma ray with energy 223 keV-662 keV.

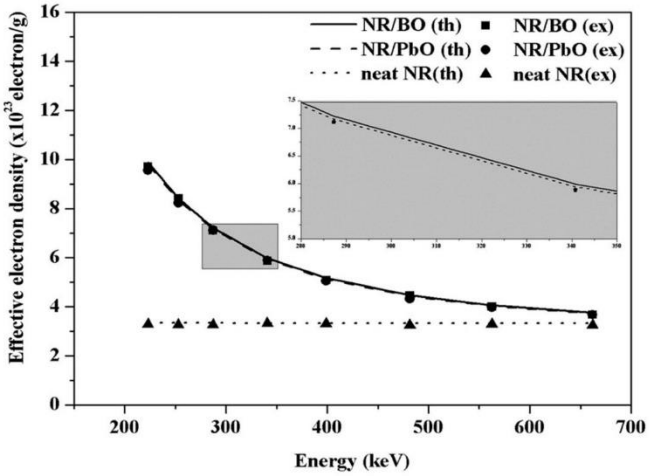


Figure 8. Effective electron density (N_{el}) of neat NR, NR with BO and PbO composites measured using gamma ray with energy 223 keV-662 keV.

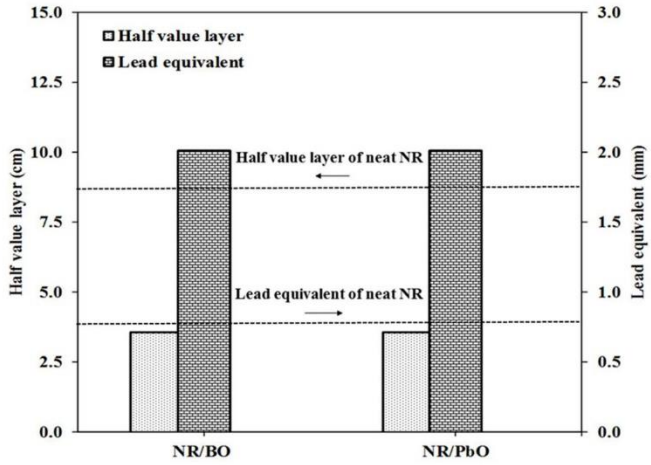


Figure 9. Half value layer (HVL) and Lead equivalent (dPb) of neat NR, NR with BO and PbO composites measured using gamma ray with energy at 662 keV.

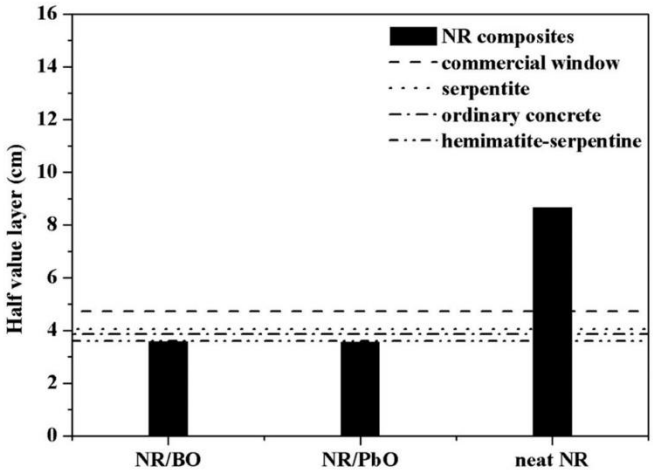


Figure 10. The half value layer of neat NR, NR/BO and NR/PbO composites in comparison to commercial window, serpentine, ordinary concrete and hemimatite-serpentine at 662 keV[12].

4. Conclusion

The flexible shielding materials based on natural rubber (NR) composites were successfully prepared. The results indicated that the composite based on NR with both shielding fillers (i.e., BO and PbO) gave higher modulus at 100 % elongation, hardness, specific gravity and radiation shielding (i.e., mass attenuation coefficient, effective atomic number, effective electron density, half value layer and lead equivalent) properties while lower tensile strength and elongation at break than that of the one without radiation shielding fillers (Neat NR). The developed composites based on natural rubber provided better gamma ray attenuation than those of commercial window, serpentine, ordinary concrete, rs 253 and hemimatite-serpentine with better elasticity. The knowledge finding from this study can be applied in many new forms as elastic wearable shielding applications.

Acknowledgement

The authors gratefully acknowledge financial support by a grant from Natural Rubber Innovation Research Institute, Prince of Songkla University, Thailand (grant number SCI601063s) and we would like to the Department of Radiologic Technology, Faculty of Associated Medical Sciences, Chiang Mai University and Center of Excellence in Glass Technology and Materials Science (CEGM), Nakhon Pathom Rajabhat University for providing research instruments and all facilities.

Reference

1. Marisa K. Radiation, https://www.mtec.or.th/post-knowledges/3923/. (2018, accessed 20 November 2018).

2. Thai Junior Encyclopedia Project. Types of radiation, http://kanchanapisek.or.th/kp6/sub/book/book.php?book=38&chap=7&page=t38-7-infodetail06.html. (2012, accessed 20 November 2018).

3. Shams AM. Effective atomic number and mass attenuation coefficient of PbO–BaO–B_2O_3 glass system. Radiat. Phys. Chem. 2016; 120: 33–37.

4. Yasaka P, Pattanaboonmee N, Kim HJ, et al. Gamma radiation shielding and optical properties measurement of zine bismuth borate glasses. Ann. Nucl. Energy 2014; 68: 4–9.

5. Kridsiri K, Kaewkhao J, Pokaipisit A, et al. Gamma-rays shielding properties of xPbO(100-x) B_2O_3 glasses system at 662 keV. Ann. Nucl. Energy 2009; 36: 1360–1365.

6. Chayanit J and Doonyapong W, Innovative neutron shielding material composing of natural rubber-stryrene butadiene rubber blends and diboron trioxide. Chulalongkorn University, http://cuir.car.chula.ac.th/handle/123456789/45903 (2014, accessed 2 May 2018).

7. Kalayanee K, Lek S, Tripob B, et al. Ferrite-STR 5L Rubber Composites as Gamma Radiation shildings. KKU research journal 2008; 13: 269–271.

8. Le C, Yan Z, Yujian L, et al. Preparation and characterization of tungsten/epoxy composites for gamma ray radiation shielding. Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. B. 2015; 356–357: 88–93.

9. Chanthima N, Kaewkhao J, Limkitjaroenporn P, S.Tuscharoen, et al. Development of BaO-ZnO-B_2O_3 glasses as a radiation shielding material. Radiat. Phys. Chem. 2017; 137: 72–77.

10. Singh K, Singh H, Sharma G, et al. Gamma-ray shielding properties of CaO-SrO-B_2O_3 glass system. Radiat. Meas. 2005; 72: 225–228.

11.Singh N, Singh KJ, Singh K, et al. Gamma-ray attenuation studies of PbO–BaO–B_2O_3 glass system. Radiat. Meas. 2006; 41: 84–88.

12. Singh K, Singh H, Sharma V, et al. Gamma-ray attenuation coefficient in bismuth borate glass. Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. B. 2002; 194: 1–6.

13. Worawat P, Ekachai W and Kiadtisak S. Properties of lead-free gamma-ray shielding material from metal oxide/EPDM rubber composites. Radiat. Phys. Chem. 2018; 153: 1–9.

14. Reade international corp. Bismuth Oxide Powder (Bi_2O_3), https://www.reade.com/products/bismuth-oxide-powder-bi2o3 (2018, accessed 8 January 2019).

15. Pubchem. Lead monoxide, https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Lead_monoxide#section=Top (2005, accessed 8 January 2019).

For Peer Review

ภาคผนวก จ.

(ร่าง) อนุสิทธิบัตร

อิลาสโตเมอร์กำบังรังสีปลอดตะกั่วยืดหยุ่นสูงจากคอมโพสิตของยางธรรมชาติผสมกับสารประกอบออกไซด์ด้วยวิธีการผสมที่ใช้ระยะเวลาสั้น

รายละเอียดการประดิษฐ์

ชื่อที่แสดงถึงการประดิษฐ์

อิลาสโตเมอร์กำบังรังสีปลอดตะกั่วยืดหยุ่นสูงจากคอมโพสิตยางธรรมชาติผสมกับสารประกอบออกไซด์ด้วยวิธีการผสมที่ใช้ระยะเวลาสั้น

สาขาวิทยาการที่เกี่ยวข้องกับการประดิษฐ์

วิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยีอิลาสโตเมอร์กำบังรังสีปลอดตะกั่วจากคอมโพสิตยางธรรมชาติผสมกับสารประกอบออกไซด์ด้วยวิธีการผสมที่ใช้ระยะเวลาสั้น

ภูมิหลังของศิลปะหรือวิทยาการที่เกี่ยวข้อง

ตะกั่ว (lead; Pb) เป็นธาตุที่นิยมนำมาใช้ทำเป็นวัสดุป้องกันรังสี เนื่องจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีพลังงานสูง เช่น รังสีเอกซ์ รังสีแกมมา จะถูกดูดซับได้ดีโดยธาตุที่มีเลขอะตอมมาก (ธาตุหนัก) เช่น ตะกั่ว (เลขอะตอม = 82) ทองคำ (เลขอะตอม = 79) หรือแม้แต่ยูเรเนียม (เลขอะตอม = 92) โดยธาตุที่มีเลขอะตอมสูงจะยิ่งดูดซับรังสีได้ดี โดยทั่วไปอุตสาหกรรมนิยมใช้ตะกั่วเป็นวัสดุป้องกันรังสี อย่างไรก็ตามการใช้วัสดุป้องกันรังสีที่ทำมาจากตะกั่วก็ยังมีข้อเสียหลายประการ ได้แก่ (1)วัสดุป้องกันรังสีที่ทำมาจากตะกั่วจะมีน้ำหนักมาก เมื่อผู้ปฏิบัติงานด้านรังสีใช้งานเป็นเวลานานจะทำให้เกิดความเมื่อยล้า ซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพในการทำงาน(2)วัสดุป้องกันรังสีที่ทำมาจากตะกั่วจะแตกหักได้ง่าย เนื่องจากตะกั่วมีคุณสมบัติที่มีความแข็งเปราะ หากมีการใช้งานที่ไม่ระมัดระวังอาจเกิดการแตกร้าวได้ ซึ่งรอยแตกหักหรือรอยร้าวจะส่งผลให้วัสดุป้องกันรังสีมีประสิทธิภาพในการลดทอนรังสีได้น้อยลง หรือไม่สามารถลดทอนรังสีได้ และอาจมีความเสี่ยงต่อผู้ปฏิบัติงานด้านรังสี และ (3)ตะกั่วมีความเป็นพิษสูง เมื่อตะกั่วเข้าสู่ร่างกายจะส่งผลกระทบต่อระบบการทำงานของร่างกาย เช่น อาการในระบบเลือด จะมีอาการของเลือดจาง อ่อนเพลีย และร่างกายซีด อาการในระบบกระดูก และกล้ามเนื้อ เมื่อตะกั่วเกิดการสะสมในเนื้อเยื่อกระดูก และกล้ามเนื้อต่างๆ จะทำให้เกิดอาการปวดเมื่อยตามข้อ และกระดูก ซึ่งมักพบอาการกระดูกผุ และหักง่ายตามมาอาการทางกล้ามเนื้อจะทำให้ผู้ป่วยเมื่อยล้า และกล้ามเนื้ออ่อนแรง จากข้อด้อยดังกล่าวจึงทำให้มีความพยายามในการใช้โลหะออกไซด์ชนิดอื่น ๆ เพื่อกำบังหรือลดทอนกำลังของรังสี เช่น ทอเรียมไดออกไซด์ (Thorium dioxide; ThO_2) ไดโบรอนไตรออกไซด์ (Diboron dioxide; B_2O_3) แบเรียมซัลเฟต (Barium sulfate; $BaSO_4$) เป็นต้น อย่างไรก็ตามการใช้วัสดุกำบังรังสีเพียงอย่างเดียวยังมีข้อด้อยเรื่องน้ำหนักและความไม่อ่อนตัวของวัสดุ ทำให้เป็นอุปสรรคในการนำไปใช้กำบังรังสีในพื้นที่ที่มีลักษณะเฉพาะ

ดังนั้นจึงมีการพัฒนาวัสดุป้องกันรังสีที่ทำมาจากยางธรรมชาติซึ่งมีสมบัติที่โดดเด่นหลายประการ เช่น สมบัติด้านความยืดหยุ่น การทนทานต่อการฉีกขาด และความต้านทานต่อการกระแทก เป็นต้น ซึ่งจะทำให้วัสดุสามารถโค้งงอ และไม่เกิดการแตกหัก หรือเกิดรอยร้าวได้ง่าย สามารถป้องกันรังสีเฉพาะจุดได้ โดยทำการผสมกับสารประกอบออกไซด์ ทำหน้าที่ในการดูดกลืนรังสี ทำให้ได้วัสดุกำบังรังสีที่ปลอดตะกั่ว ซึ่งวัสดุชนิดนี้สามารถช่วยให้ผู้ปฏิบัติงานด้านรังสีและผู้ป่วยลดความเสี่ยงในการสัมผัสรังสีกับเนื้อเยื่อและอวัยวะต่าง ๆ ได้

รายงานเกี่ยวกับวัสดุที่เกี่ยวข้องโดยผู้เขียนเลือกทบทวนวรรณกรรมเฉพาะกลุ่มที่มีลักษณะและเพื่อจุดประสงค์ใกล้เคียงกันมีรายละเอียดดังนี้

K.Kalayanee (2008) และคณะ ทำการศึกษาการเตรียมยางธรรมชาติ STR 5L ผสมกับผงเฟอร์ไรต์ที่เป็นวัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานและผงเขม่าดำในอัตราส่วนต่าง ๆ แล้วนำมาทดสอบประสิทธิภาพการป้องกันรังสีแกมมา จากการศึกษาพบว่ายางธรรมชาติ STR 5L ผสมกับผงเฟอร์ไรต์ที่และผงเขม่าดำสามารถนำมาเป็นวัตถุกันรังสีที่มีความยืดหยุ่นแบบยางธรรมชาติ นอกจากนี้การผสมผงเฟอร์ไรต์ ลงไปในเนื้อยาง STR 5L มีผลให้ยางผสมมีค่าความทนทานต่อแรงดึงลดลง แต่ช่วยเสริมค่าความแข็งของชิ้นงาน ให้เพิ่มขึ้นอย่างมาก

นรินทร์ (2011) เตรียมวัสดุผสมยาง-แก้วที่เหมาะสมสำหรับใช้เป็นวัสดุกันรังสี การศึกษาประสิทธิภาพการดูดกลืนรังสีของวัสดุผสมยาง-แก้ว โดยพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสี รวมทั้ง หาแนวทางประยุกต์วัสดุผสมยาง-แก้วในการป้องกันรังสี ในการวิจัยนี้ได้เตรียมวัสดุผสมแก้ว-ยางโดยใช้ผงแก้วตะกั่วและแก้วบิสมัท ถูกนำไปผสมในเมทริกซ์น้ำยาง และยางธรรมชาติชนิดแท่ง STR-5L โดยใช้เครื่องบดผสมสองลูกกลิ้ง และระบบยางคงรูปด้วยกำมะถัน พบว่า ผงแก้วมีสมบัติเป็นสารตัวเติมชนิดเสริมแรงคล้ายซิลิกาในกระบวนการผลิตยาง และผลการทดสอบการดูดกลืนรังสีเอกซ์ พบว่า วัสดุผสมแสดงสมบัติการป้องกันรังสีได้ เมื่อพลังงานสูงสุดของโฟตอนรังสีเอกซ์สูงขึ้น วัสดุผสมแสดงการดูดกลืนรังสีได้ดี

กีรติกานต์ และคณะ (2012) ทำการศึกษาชนิดและปริมาณของสารตัวเติมป้องกันรังสีชนิดกรดบอริก โบรอนออกไซด์ และผงตะกั่วในวัสดุคอมโพสิตยางธรรมชาติ และวัสดุคอมโพสิตยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื้อยไม้จากการศึกษาสมบัติด้านรังสีพบว่า การเติมกรดบอริกและโบรอนออกไซด์ในวัสดุคอมโพสิตยางที่เติม และไม่เติมผงขี้เลื้อยไม้สามารถต้านทานต่ออนุภาคนิวตรอนเพิ่มขึ้น และมีความสามารถต้านทานต่อรังสีเทียบเท่าเกณฑ์เป้าหมาย ส่วนการเติมผงตะกั่วในวัสดุเชิงประกอบยางสามารถต้านทานต่อรังสีแกมมาเพิ่มขึ้นเล็กน้อย

T.Ozdemir และคณะ (2018) ทำการเตรียมวัสดุป้องกันรังสีจากวัสดุคอมโพสิต EPDM/Nano lead oxide (PbO) จากการทดลองพบว่าเมื่อมีการเติม PbO สามารถลดทอนรังสีเอกซ์ และแกมมาได้ เนื่องจาก PbO มีตะกั่ว (Pb) เป็นองค์ประกอบซึ่ง Pb มีเลขอะตอมที่สูง (เลขอะตอม = 82) สามารถดูดซับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีพลังงานสูงได้ และนอกจากนี้ยังมีการศึกษาโดยนำบิทมัสออกไซด์ (Bismuth Oxide; Bi_2O_3) ผสมกับ PbO เติมลงใน EPDM พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับ EPDM ที่เติม PbO เพียงอย่างเดียว เนื่องจาก Bi_2O_3 มีบิสมัท (Bi) เป็นองค์ประกอบซึ่ง Bi มีเลขอะตอมเท่ากับ 83 สามารถดูดซับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีพลังงานสูงได้เช่นเดียวกับ Pb ในปีเดียวกันนี้ วรวัฒน์ และคณะได้ทำการเตรียมวัสดุกำบังรังสีปลอดตะกั่วสำหรับการกำบังรังสีแกมมาจาก EPDM ผสมกับโลหะออกไซด์ ได้แก่ Fe_3O_4 W_2O_3 และ Bi_2O_3 พบว่าเมื่อปริมาณโลหะออกไซด์เพิ่มขึ้นสามารถกำบังรังสีแกมมาได้ดีขึ้น และ Bi_2O_3 สามารถกำบังรังสีได้ดีที่สุด เนื่องจากประกอบด้วยอะตอมของบิสมัท (Bi) ซึ่งมีเลขอะตอมมากกว่า เหล็ก (Fe) และทังสเตน (W) และ Donruedee และคณะ ทำการเตรียมวัสดุกำบังรังสีแกมมาจากยางธรรมชาติผสมโลหะออกไซด์ ได้แก่ เหล็กออกไซด์ (Fe_3O_4) ทังสเตนออกไซด์ (W_2O_3) และ บิสมัทออกไซด์ (Bi_2O_3) พบว่า

สามารถเตรียมวัสดุกำบังรังสีที่มีความยืดหยุ่นได้ร้อยละ 600 และยางธรรมชาติที่มีการเติม Bi_2O_3 สามารถกำบังรังสีแกมมาได้ดีที่สุด เนื่องจากมีเลขอะตอมสูงกว่า Fe_3O_4 และ W_2O_3

จากการทบทวนการประดิษฐ์ดังกล่าวถึงแม้จะมีการนำบิสมัทออกไซด์ หรือโลหะออกไซด์ชนิดอื่นผสมในยางธรรมชาติเพื่อทำเป็นวัสดุกำบังรังสีแล้ว แต่ยังไม่มีการรายงานการประดิษฐ์วัสดุกำบังรังสีจากยางธรรมชาติผสมด้วยโลหะออกไซด์ปลอดตะกั่วร่วมกับสารเติมแต่งที่ทำให้วัสดุที่เตรียมได้มีความสามารถในการยืดสูงมากกว่าร้อยละ 800 ได้ และทำการผสมด้วยวิธีที่ใช้ระยะเวลาไม่เกิน 20 นาที ในเครื่องผสมแบบปิดซึ่งสามารถลดการสูญเสียสารเคมีได้อีกด้วย การประดิษฐ์นี้ได้ทำการออกแบบวัสดุกำบังรังสีแกมมา และรังสีเอกซ์ที่ปลอดตะกั่ว และสามารถป้องกันรังสีเฉพาะจุดได้ ซึ่งวัสดุชนิดนี้สามารถช่วยให้ผู้ปฏิบัติงานด้านรังสี และผู้ป่วยลดความเสี่ยงในการสัมผัสรังสีกับเนื้อเยื่อและอวัยวะต่าง ๆ ได้

ลักษณะและความมุ่งหมายของการประดิษฐ์

การประดิษฐ์นี้เป็นการพัฒนาอิลาสโตเมอร์กำบังรังสีปลอดตะกั่วจากคอมโพสิตยางธรรมชาติผสมกับสารประกอบออกไซด์ด้วยวิธีการผสมที่ใช้ระยะเวลาสั้น

ความมุ่งหมายของการประดิษฐ์นี้ คือ ผลิตวัสดุกำบังรังสีปลอดตะกั่ว จากยางธรรมชาติผสมกับโลหะออกไซด์ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารกำบังรังสี ทำการผสมด้วยเครื่องผสมแบบปิด โดยการใช้ระยะเวลาในการผสมไม่เกิน 20 นาที และสามารถลดการสูญเสียสารเคมีได้ ซึ่งคอมโพสิตยางธรรมชาติที่เตรียมได้มีข้อเด่นหลายประการ ได้แก่ มีความยืดหยุ่นสูงถึงร้อยละ 800 สามารถงอ หรือโค้งตามอวัยวะที่ต้องการกำบังรังสีได้ เกิดการแตก หรือเปราะได้ยากมีอายุการใช้งานนานขึ้น มีความปลอดภัยต่อผู้ใช้งานและไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากวัสดุชนิดนี้เป็นวัสดุสำหรับการกำบังรังสีที่ปลอดตะกั่ว ดังนั้นอิลาสโตเมอร์กำบังรังสีปลอดตะกั่วจากคอมโพสิตยางธรรมชาติผสมกับสารประกอบออกไซด์จึงมีประโยชน์อย่างยิ่งสำหรับงานทางด้านการกำบังรังสี

การเปิดเผยการประดิษฐ์โดยสมบูรณ์

ตามการประดิษฐ์นี้ ได้เสนอสิ่งประดิษฐ์อิลาสโตเมอร์กำบังรังสีปลอดตะกั่วจากคอมโพสิตยางธรรมชาติผสมกับสารประกอบออกไซด์ด้วยวิธีการผสมที่ใช้ระยะเวลาสั้น ซึ่งมีส่วนประกอบหลักอยู่สามส่วน คือ ยางธรรมชาติ (1) สารประกอบออกไซด์ (2) และสารเติมแต่งเสริมความยืดหยุ่น (3) โดยยางธรรมชาติจะเป็นส่วนประกอบหลักที่ทำหน้าที่ส่วนที่ให้ความยืดหยุ่นแก่วัสดุ สารประกอบออกไซด์ทำหน้าที่เป็นสารที่ช่วยในการดูดกลืนรังสี และการผสมวัสดุคอมโพสิตยางธรรมชาติเข้ากับสารประกอบออกไซด์จะทำให้วัสดุคอมโพสิตยางธรรมชาติมีความสามารถในการกำบังรังสีได้

อิลาสโตเมอร์กำบังรังสีปลอดตะกั่วตามสิ่งประดิษฐ์นี้หมายถึง วัสดุที่ประกอบด้วยยางธรรมชาติที่มีการเติมสารเคมี สารเติมแต่ง หรืออาจเรียกว่ายางคอมพาวนด์ และสารประกอบออกไซด์ซึ่งผ่านกระบวนการผสมด้วยเครื่องผสมที่มีแรงเฉือน หลังจากนั้นนำมาขึ้นรูป และวัลคาไนซ์ด้วยเครื่องอัดเบ้า

ตัวอย่างส่วนส่วนผสมของอิลาสโตเมอร์กำบังรังสีปลอดตะกั่วยืดหยุ่นสูงของการประดิษฐ์นี้ดังแสดง

ตัวอย่างที่ 1 ส่วนประกอบของอิลาสโตเมอร์กำบังรังสีปลอดตะกั่ว เพื่อประยุกต์ใช้เป็นวัสดุกำบังรังสี

1.	ยางธรรมชาติ	ในปริมาณ	100	ส่วนโดยน้ำหนักยาง
2.	กรดสเตียริก	ในปริมาณ	0.5- 3	ส่วนโดยน้ำหนักยาง
3.	ซิงค์ออกไซด์	ในปริมาณ	0.5-10	ส่วนโดยน้ำหนักยาง
4.	บิวทิลเบนโซไธอะโซลซัลฟีนาไมด์	ในปริมาณ	0.5-5	ส่วนโดยน้ำหนักยาง
5.	สารประกอบออกไซด์	ในปริมาณ	40-150	ส่วนโดยน้ำหนักยาง
6.	กำมะถัน	ในปริมาณ	1.0-3.5	ส่วนโดยน้ำหนักยาง

กระบวนการการเตรียมวัสดุมีขั้นตอน ดังนี้

การเตรียมยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติก

บดยางธรรมชาติด้วยเครื่องผสมแบบปิดเป็นเวลา 10 นาที ผสมสารเคมีลำดับที่ 2, 3, 4, 5และ 6 ตามลำดับ ทำการผสมเป็นเวลา 20 นาที หลังจากนั้นขึ้นรูปวัสดุด้วยเครื่องอัดเบ้า โดยมีการใช้อุณหภูมิในการขึ้นรูป 150 องศาเซลเซียส

จากการทดสอบเบื้องต้น พบว่าวัสดุชนิดนี้มีความยืดหยุ่นสูง มีระยะยืดจนขาดสูงกว่าร้อยละ 800 สามารถโค้งงอตามอวัยวะที่ต้องการกำบังรังสีได้ โดยไม่เกิดการร้าว หรือแตกของวัสดุเมื่อทำการโค้งงอ สามารถลดทอนรังสีแกมมา และรังสีเอ็กซ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

วิธีการในการประดิษฐ์ที่ดีที่สุด

ดังที่ได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อการเปิดเผยการประดิษฐ์โดยสมบูรณ์

ข้อถือสิทธิ

1. อิลาสโตเมอร์กำบังรังสีปลอดตะกั่วที่ประกอบด้วยยางธรรมชาติ สารประกอบออกไซด์ และสารเติมแต่งเสริมความยืดหยุ่นด้วยวิธีการผสมที่ใช้ระยะเวลาสั้น

2. ยางธรรมชาติ ตามข้อถือสิทธิที่ 1 ที่ซึ่งหมายถึง ยางธรรมชาติ หรือยางดัดแปรโมเลกุลในรูปแบบแห้ง ได้แก่ ยางแผ่นผึ่งแห้ง ยางแผ่นรมควัน ยางแท่ง และยางอิพ็อกไซด์

3. สารประกอบออกไซด์ ตามข้อถือสิทธิที่ 1 ที่ซึ่งหมายถึงสารที่มีเลขอะตอมสูง และสามารถเป็นสารกำบังรังสีได้ ได้แก่ บิสมัทออกไซด์ แบเรียมคาร์บอเนต แบเรียมซัลเฟต

4. สารเติมแต่ง ตามข้อถือสิทธิที่ 1 ที่ซึ่งหมายถึง สารที่เพิ่มคุณสมบัติให้กับยางธรรมชาติ ได้แก่ กรดสเตียริก

ซิงค์ออกไซด์ บิวทิลเบนโซไธอะโซลซัลฟีนาไมด์ กำมะถัน

5. วิธีการผสมที่ใช้ระยะเวลาสั้น ตามข้อถือสิทธิที่ 1 ที่ซึ่งหมายถึงการผสมยางธรรมชาติเข้ากับสารประกอบออกไซด์ และสารเติมแต่งด้วยเครื่องผสมแบบปิด (Internal mixer)

บทสรุป

วัสดุกำบังรังสีปลอดตะกั่ว จากยางธรรมชาติผสมกับโลหะออกไซด์ด้วยวิธีการผสมที่ใช้ระยะเวลาไม่เกิน 20 นาทีด้วยเครื่องผสมแบบปิดที่มีความยืดหยุ่นสูงถึงร้อยละ 800 สามารถงอ หรือโค้งตามอวัยวะที่ต้องการกำบังรังสีได้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล นางสาวศิริลักษณ์ อินต่อม
รหัสประจำตัวนักศึกษา 6010220057
วุฒิการศึกษา

วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิทยาศาสตรบัณฑิต (สาขาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2559

ทุนการศึกษา

- ทุนวิจัยเพื่อสร้างฐานองค์ความรู้ขั้นสูง ระดับปริญญาโท จากสถาบันนวัตกรรมยางพารา มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ประจำปีงบประมาณ 2560
- ทุนบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

ศิริลักษณ์ อินต่อม เอกวิภู กาลกรณ์สุรปราณี โจบิส จอร์น วิราภรณ์ หงส์ทอง วุฒิชัย ไชยภักษา และจักรพงษ์ แก้วขาว การประชุมวิชาการระดับนานาชาติ “The 2nd Materials Research Society of Thailand International Conference” เมื่อวันที่ 10-12 กรกฎาคม 2562 ณ โรงแรมซายน์ เมืองพัทยา จังหวัดชลบุรี

ศิริลักษณ์ อินต่อม เอกวิภู กาลกรณ์สุรปราณี โจบิส จอร์น สุชาติ โกทันย์ ศิริประภา แก้วแจ้ง วิราภรณ์ หงส์ทอง วุฒิชัย ไชยภักษา และจักรพงษ์ แก้วขาว การประชุมวิชาการระดับชาติราชมงคลสุรินทร์ ครั้งที่ 10 ภายใต้หัวข้อ “วิจัยและนวัตกรรม นำสู่การพัฒนาอย่างยั่งยืน” ณ มหาวิทยาลัยราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสุรินทร์ จังหวัดสุรินทร์

รางวัล

รางวัลชนะเลิศในการนำเสนอผลงานวิจัยกลุ่มเกษตร วิทยาศาสตร์ และวิทยาศาสตร์สุขภาพ ภาคบรรยาย จากการประชุมวิชาการระดับชาติราชมงคลสุรินทร์ ครั้งที่ 10 ภายใต้หัวข้อ “วิจัยและนวัตกรรม นำสู่การพัฒนาอย่างยั่งยืน” ณ มหาวิทยาลัยราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสุรินทร์ จังหวัดสุรินทร์