



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ

การผลิตแผ่นกำบังอนุภาคนิวตรอนและรังสีแกมมาจากวัสดุเชิงประกอบ
ยางธรรมชาติผสมผงซีลีอ์ไมท์

โดย ดร. เกียรติศักดิ์ แสนบุญเรือง และคณะ

30 พฤศจิกายน 2558

สัญญาเลขที่ RDG5750096

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ

การผลิตแผ่นกัมบังอนุภาคนิวตรอนและรังสีแกมมาจากวัสดุเชิงประกอบ
ยางธรรมชาติผสมผงจีเลียวไม้

คณะผู้วิจัย

สังกัด

- | | |
|----------------------------------|---|
| 1. ดร. เกียรติศักดิ์ แสนบุญเรือง | ภาควิหารังสีประยุกต์และไอโซโทป คณะวิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ |
| 2. รศ. เอกชัย วิมลมาลา | กลุ่มวิจัยการผลิตและขึ้นรูปพอลิเมอร์ (P-PROF)
สายวิชาเทคโนโลยีวัสดุ คณะพลังงานสิ่งแวดล้อม และวัสดุ |
| 3. นางสาวกิริติกานต์ นิลยง | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี |
| 4. ศ. ดร.ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ | กลุ่มวิจัยการผลิตและขึ้นรูปพอลิเมอร์ (P-PROF)
สายวิชาเทคโนโลยีวัสดุ คณะพลังงานสิ่งแวดล้อม และวัสดุ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี (ที่ปรึกษาโครงการ) |

สนับสนุนโดยสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.)

และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย วช. - สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

บทสรุปผู้บริหาร

โครงการวิจัยนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของชนิดและปริมาณสารป้องกันรังสีที่มีส่วนประกอบโบรอน ชนิดโบรอนออกไซด์ กรดบอริก และผงตะกั่ว ในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่มีการผสมผงขี้เถ้าไม้ ที่มีผลต่อสมบัติด้านการป้องกันอนุภาคนิวตรอน และรังสีแกมมาที่เกิดจากการกระเจิงของอนุภาคนิวตรอน โดยศึกษาผลสมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ และค่าการนำความร้อน เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ต้นแบบแผ่น กำบังอนุภาคนิวตรอน และแกมมาที่มีสมบัติทั้งทางรังสี และเชิงกล เทียบเท่าหรือดีกว่าผลิตภัณฑ์เป้าหมาย โดยมุ่งเน้นให้สามารถนำต้นแบบผลิตภัณฑ์ไปใช้งานได้จริงและมีประสิทธิภาพ ตามหน่วยงานที่มีการใช้ รังสี เช่น โรงพยาบาล สถานศึกษา และสถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์ เป็นต้น ผลการวิจัยโดยรวมพบว่า การเติมผงโบรอนออกไซด์ ส่งผลทำให้วัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติมีความต้านทานต่ออนุภาคนิวตรอนได้ ดีกว่าผงกรดบอริกในทุกสัดส่วนปริมาณของสารตัวเติม โดยที่การป้องกันอนุภาคนิวตรอนมีแนวโน้ม เพิ่มขึ้นตามปริมาณของสารตัวเติม ส่วนการเติมผงตะกั่วส่งผลทำให้วัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติสามารถ ต้านทานต่อรังสีแกมมาได้ และพบว่าสารตัวเติมชนิดผงโบรอนออกไซด์เติมในวัสดุเชิงประกอบยาง ธรรมชาติ และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เถ้าไม้ทำให้มีเวลาการคงรูปร่างลดลง แต่การเติมผง กรดบอริกทำให้เวลาคงรูปร่างมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และไม่พบการเปลี่ยนแปลงเมื่อเติมผงตะกั่ว ส่วนผลสมบัติ เชิงกล พบว่า การเติมผงกรดบอริกและโบรอนออกไซด์ในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และวัสดุเชิง ประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เถ้าไม้ส่งผลทำให้ค่ามอดูลัสแรงดึง ความต้านทานแรงดึง เปอร์เซ็นต์การ ยืดตัว ณ จุดขาด และความต้านทานต่อแรงฉีกขาดมีแนวโน้มลดลง ยกเว้นค่าความแข็งแรงที่ผิวเพิ่มขึ้น เมื่อเติม โบรอนออกไซด์ และในกรณีการเติมผงตะกั่ว พบว่าสมบัติเชิงกลโดยรวมมีแนวโน้มลดลง ยกเว้นค่าความ แข็งที่ผิวและค่ามอดูลัสแรงดึง และค่าความหนาแน่นของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่เติม และไม่เติมผง ขี้เถ้าไม้ เมื่อเติมสารป้องกันรังสี ทั้ง 3 ชนิด มีค่าอยู่ระหว่าง $1.053 - 1.4064 \text{ g/cm}^3$ และมีค่าการนำความร้อนที่ใกล้เคียงกัน โดยสูตรผลิตภัณฑ์จากงานวิจัยมีน้ำหนักน้อยกว่า และมีสมบัติความเป็นฉนวนกันความร้อนที่ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเกณฑ์เป้าหมาย

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาชนิดและปริมาณของสารตัวเติมป้องกันรังสี 3 ชนิด ดังนี้ ผงกรดยอดริก ผงโบรอนออกไซด์ และผงตะกั่ว โดยปรับเปลี่ยนปริมาณที่ 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 ส่วนในยางร้อยละ (Parts per hundred of rubber; phr) ในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงซีลีเนียมไม่ตรวจสอบสมบัติด้านรังสี เวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูป เวลาที่ยางคงรูป สมบัติเชิงกล ค่าความหนาแน่นและค่าการนำความร้อน จากการศึกษาสมบัติด้านรังสี พบว่า การเติมผงโบรอนออกไซด์ส่งผลทำให้วัสดุเชิงประกอบยางมีความต้านทานต่ออนุภาคนิวตรอนได้ดีกว่าผงกรดยอดริกในทุกสัดส่วนปริมาณของสารตัวเติม ส่วนการเติมผงตะกั่วส่งผลทำให้วัสดุเชิงประกอบยางสามารถต้านทานต่อรังสีแกมมา (ที่หลุดมาจากการดูดซับอนุภาคนิวตรอน) ได้ นอกจากนี้พบว่า การเติมสารตัวเติมชนิดผงกรดยอดริกในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงซีลีเนียมส่งผลทำให้เวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูปและเวลาคงรูปยางเพิ่มขึ้น ส่วนในกรณีการเติมสารตัวเติมชนิดผงโบรอนออกไซด์ในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงซีลีเนียมไม่ทำให้เวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูปและเวลาคงรูปยางลดลง ส่วนวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงซีลีเนียมที่เติมผงตะกั่วไม่ส่งผลต่อเวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูปและเวลาคงรูปยาง การศึกษาสมบัติเชิงกล พบว่า การเติมผงกรดยอดริกในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงซีลีเนียมส่งผลทำให้ค่าความแข็งที่ผิว ค่ามอดูลัสแรงดึง ความต้านทานแรงดึง เปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด และความต้านทานต่อแรงฉีกขาดลดลง ส่วนการเติมผงโบรอนออกไซด์ในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงซีลีเนียมไม่ทำให้ค่าความแข็งที่ผิวเพิ่มขึ้น ยกเว้นค่ามอดูลัสแรงดึง ความต้านทานต่อแรงดึง เปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด และความต้านทานต่อแรงฉีกขาดลดลง ในกรณีการเติมผงตะกั่วในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงซีลีเนียม ไม่ส่งผลต่อค่าความแข็งที่ผิวและค่ามอดูลัสแรงดึง แต่ความต้านทานแรงดึง เปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด และความต้านทานต่อแรงฉีกขาดมีแนวโน้มลดลง นอกจากนี้พบว่า การเติมสารตัวเติมป้องกันรังสีชนิดกรดยอดริก โบรอนออกไซด์ และผงตะกั่วในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่เติมและไม่เติมผงซีลีเนียมไม่มีความหนาแน่นอยู่ระหว่าง $1.053 - 1.4064 \text{ g/cm}^3$ และมีค่าการนำความร้อนที่ใกล้เคียงกัน และมีสมบัติความเป็นฉนวนกันความร้อนที่ดีกว่าเกณฑ์เป้าหมาย และพบว่า การเติมผงโบรอนออกไซด์ในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงซีลีเนียมที่ปริมาณ 50 phr มีค่าความต้านทานต่ออนุภาคนิวตรอนเทียบเท่ากับผลิตภัณฑ์จากเกณฑ์เป้าหมายของโครงการ

คำสำคัญ: ยางธรรมชาติ/ กรดยอดริก/ โบรอนออกไซด์/ ผงตะกั่ว/ สมบัติด้านรังสี/ สมบัติเชิงกล

Abstract

This research aims to investigate effects of three radiation protection agents: boric acid, boron oxide, and lead powders, with the contents of 0, 10, 20, 30, 40, and 50 phr (parts per hundred of rubber) in natural rubber composite and wood sawdust/natural rubber composite. The interested properties that are investigated include radiation properties, scorch time, cure time, mechanical properties, density and thermal conductivity. In the case of radiation properties, adding boron oxide to the composites can shield neutrons better than adding boric acid at the same contents, while lead powders can shield gamma ray, which emitted from neutron shielding. Results indicate that adding boric acid to the composites increases the scorch time and cure time, while boron oxide decreases the scorch time and cure time, and lead powder does not significantly affect the scorch time and cure time. In the case of mechanical properties, boric acid decreases hardness, modulus, tensile strength, elongation at break, and tear strength, while boron oxide increases hardness but decreases modulus, tensile strength, elongation at break, and tear strength. Lead powders do not affect hardness and modulus but decrease tensile strength, elongation at break, and tear strength. The densities of composites with boric acid, boron oxide, and lead powder are in between 1.053 – 1.4064 g/cm³, while thermal conductivity are about the same for each composite and are better insulators than the product target. Lastly, the composites with 50 phr of boron oxide has about the same ability to shield neutrons as the product target.

Keywords: natural rubber/ boric acid/ boron oxide/ lead powders/ radiation properties /

mechanical properties

สารบัญ

หน้า

บทสรุปผู้บริหาร	ก
บทคัดย่อ (ไทย)	ข
บทคัดย่อ (อังกฤษ)	ค
สารบัญ	ง
รายการตาราง	ช
รายการรูปประกอบ	ฅ

บทที่

1. บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.4 วิธีการดำเนินงานวิจัยโดยสังเขป	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับยางธรรมชาติ	5
2.1.1 โครงสร้างของยางธรรมชาติ	5
2.1.1.1 สมบัติของยางธรรมชาติ	5
2.2 สารเคมีที่ใช้ในยาง	6
2.2.1 สารคงรูปยาง	6
2.2.2 สารตัวเติม	7
2.2.3 ผงเขม่าดำ	7
2.2.3.1 เกรดของผงเขม่าดำ	8
2.2.3.2 สมบัติของผงเขม่าดำ	8
2.2.3.3 กลไกการเสริมแรง	9

2.2.4	ผงขี้เลื่อยไม้	9
2.2.4.1	เซลลูโลส (Cellulose)	9
	หน้า	
2.2.4.2	เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose)	10
2.2.4.3	ลิกนิน (Lignin)	10
2.2.5	สารกระตุ้นปฏิกิริยา	11
2.2.5.1	ซิงค์ออกไซด์	11
2.2.5.2	กรดสเตียริก	11
2.2.6	สารตัวเร่งปฏิกิริยา	11
2.2.6.1	เมอร์แคปโตเบนโซไทโอะโซล	11
2.2.6.2	ไคฟีนิลกวินิดีน	12
2.2.7	พลาสติกไซเซอร	12
2.2.8	สารป้องกันยางเสื่อมสภาพ	12
2.3	กระบวนการบดผสมยาง	12
2.4	ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับรังสี	13
2.4.1	แหล่งกำเนิดรังสี	14
2.4.2	รังสีแกมมา	14
2.4.3	อนุภาคนิวตรอน	15
2.4.4	ปัจจัยหลักที่มีผลต่อการป้องกันรังสี	15
2.4.5	วัสดุที่ใช้ป้องกันรังสี	17
2.5	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	18
3.	วัตถุดิบและขั้นตอนการดำเนินงาน	21
3.1	วัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย	21
3.2	สูตรส่วนประกอบยางที่ใช้ในงานวิจัย	23
3.3	แผนการดำเนินงานวิจัย	24
4.	ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง	34
4.1	ผลการทดสอบระยะเวลาที่ยางเริ่มเกิดคงรูป และเวลาที่ยางคงรูปของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ	35
4.1.1	การศึกษาระยะเวลาที่ยางเริ่มเกิดคงรูป และเวลาที่ยางคงรูป	35

4.2	ผลการทดสอบการป้องกันรังสี	37
		หน้า
4.3	ผลสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ	39
4.4	ผลการทดสอบระยะเวลาที่ยางเริ่มเกิดครรูป และเวลาที่ยางคงรูปของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงซีลี้อยไม้	50
4.5	ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงซีลี้อยไม้	51
4.6	ผลของสมบัติด้านรังสีของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงซีลี้อยไม้	60
4.7	ผลของค่าความหนาแน่น และการนำความร้อน ของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงซีลี้อยไม้	62
5.	สรุปผลการทดลอง	64
5.1	สรุปผลการทดลอง	64
5.1.1	ผลการทดสอบสมบัติด้านรังสีของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงซีลี้อยไม้ที่มีการเติมสารตัวเติมป้องกันรังสีชนิดผงกรดบอริก ผงโบรอนออกไซด์ และผงตะกั่ว	64
5.1.2	ผลการทดสอบระยะเวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูป เวลาที่ยางคงรูป สมบัติเชิงกล ค่าความหนาแน่น และค่าการนำความร้อนของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงซีลี้อยไม้ที่มีการเติมสารตัวเติมป้องกันรังสีชนิดผงกรดบอริก ผงโบรอนออกไซด์ และผงตะกั่ว	64
5.2	วิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์	65
5.3	ข้อเสนอแนะ	66
	เอกสารอ้างอิง	67

รายการตาราง

ตาราง	หน้า
3.1	สูตรส่วนประกอบที่ใช้ในงานวิจัย23
4.1	เกณฑ์การพัฒนาผลิตภัณฑ์แผ่นกำบังรังสี34
4.2	ค่าการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงกลหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อนของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่มีสารตัวเติมป้องกันรังสี47
4.3	ปรับสูตรและส่วนผสมของสารเคมีของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ48
4.4	ผลการทดสอบสมบัติเชิงกล และสมบัติด้านรังสีของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่ผ่านการปรับสูตรส่วนผสมของสารเคมี49
4.5	เปรียบเทียบค่าการเปลี่ยนแปลงของผลสมบัติเชิงกลหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อน60
4.6	ผลของค่าความหนาแน่น และค่าการนำความร้อนของวัสดุเชิงประกอบยาง63
5.1	สูตรส่วนผสม/ราคาของสารเคมีที่ใช้ในการผลิตแผ่นกำบังรังสี65

รายการรูปประกอบ

รูปที่	หน้า
2.1	โครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ
2.2	การเชื่อมโยงโมเลกุลด้วยกำมะถัน
2.3	โครงสร้างของผงเขม่าดำ
2.4	โครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส
2.5	โครงสร้างทางเคมีของเฮมิเซลลูโลส
2.6	โครงสร้างทางเคมีของลิกนิน
2.7	เครื่องบดผสมระบบเปิดแบบ 2 ลูกกลิ้ง (Two roll mill)
2.8	สเปกตรัมของรังสี
2.9	รังสีแกมมาจากโคบอลต์ 60
2.10	การสลายของนิวตรอนอิสระ
2.11	กลไกของโบรอนจับนิวตรอน
3.1	ขั้นตอนและรายละเอียดการดำเนินงาน
3.2	เครื่องบดผสมลูกกลิ้งคู่ (Two roll mill)
3.3	เครื่องรีโอมิเตอร์แบบจานแกว่ง (Oscillating Disk Rheometer; ODR)
3.4	เครื่องอัดขึ้นรูป้อนระบบแรงดัน (Compression moulding machine)
3.5	เครื่องทดสอบความต้านทานต่ออนุภาคนิวตรอน
3.6	เครื่องทดสอบความต้านทานต่อรังสีแกมมา
3.7	แบบตัดชิ้นงานทดสอบชนิด Die C
3.8	เครื่อง Universal Testing Machine
3.9	เครื่องทดสอบความแข็ง (Durometer)
3.10	เครื่องอบชิ้นงาน (Controlled Temperature Oven)
3.11	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)
3.12	ชุดอุปกรณ์วัดความหนาแน่นใช้ร่วมกับเครื่องชั่งไฟฟ้าอ่านละเอียด 4 ตำแหน่ง (Electronic Density Balance, FA)
3.13	เครื่องวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของวัสดุ (Thermal Conductivity Analysis, TCA)

- 4.1 ระยะเวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูปและเวลาที่ยางคงรูปของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่เติมสารตัวเติมป้องกันรังสีชนิดผงกรดบอริกและผงโบรอนออกไซด์ 35

รายการรูปประกอบ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.2 ระยะเวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูป และเวลาที่ยางคงรูป ของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่มีการเติมสารตัวเติมป้องกันรังสีชนิดผงตะกั่ว	36
4.3 ความต้านทานต่ออนุมูลอิสระของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่มีการเติมสารตัวเติมป้องกันรังสีชนิดผงกรดบอริก และผงโบรอนออกไซด์	37
4.4 ความต้านทานต่ออนุมูลอิสระของปริมาณโบรอนในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่มีการเติมสารตัวเติมป้องกันรังสีชนิดผงกรดบอริก และผงโบรอนออกไซด์	38
4.5 ความต้านทานต่อรังสีแกมมาของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่มีการเติมสารตัวเติมผงตะกั่ว	38
4.6 ค่าความแข็งที่ผิวของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่มีการเติมสารตัวเติมป้องกันรังสีชนิดผงกรดบอริก และผงโบรอนออกไซด์	39
4.7 ค่ามอดุลัสแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบยางที่มีการเติมสารตัวเติมป้องกันรังสีชนิดผงกรดบอริกและผงโบรอนออกไซด์	40
4.8 ค่าความแข็งที่ผิวของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่มีการเติมสารตัวเติมป้องกันรังสีชนิดผงตะกั่ว	41
4.9 ค่ามอดุลัสแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่มีการเติมสารตัวเติมป้องกันรังสีชนิดผงตะกั่ว	41
4.10 ค่าความต้านทานแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่มีการเติมสารตัวเติมป้องกันรังสีชนิดผงกรดบอริก และผงโบรอนออกไซด์	42
4.11 ค่าความต้านทานแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่มีการเติมสารตัวเติมป้องกันรังสีชนิดผงตะกั่ว	42
4.12 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ ที่มีสารตัวเติมป้องกันรังสีที่ปริมาณ 10 และ 50 phr (กำลังขยาย 50 เท่า) (a) ผงกรดบอริก 10 phr (b) ผงกรดบอริก 50 phr (c) ผงโบรอนออกไซด์ 10 phr (d) ผงโบรอนออกไซด์ 50 phr (e) ผงตะกั่ว 10 phr และ(f) ผงตะกั่ว 50 phr	43
4.13 เปรียบเทียบการยึดตัว ณ จุดขาดของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่มีการเติมสาร	

รายการรูปประกอบ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.14	เปอร์เซ็นต์การยึดตัว ณ จุดขาดของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่มีการเติมสารตัวเติมป้องกันรังสีชนิดผงตะกั่ว	45
4.15	ความต้านทานต่อแรงฉีกขาดของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่มีการเติมสารตัวเติมป้องกันรังสีชนิดผงกรบอริก และผงโบรอนออกไซด์	45
4.16	ความต้านทานต่อแรงฉีกขาดของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่มีการเติมสารตัวเติมป้องกันรังสีชนิดผงตะกั่ว	46
4.17	ระยะเวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูป และเวลาที่ยางคงรูปของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงซีลีเนียมที่มีการเติมสารตัวเติมป้องกันรังสีชนิด ผงกรบอริก และผงโบรอนออกไซด์	50
4.18	ระยะเวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูป และเวลาที่ยางคงรูป ของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงซีลีเนียมที่มีการเติมสารตัวเติมป้องกันรังสีชนิดผงตะกั่ว	51
4.19	ค่าความแข็งที่ผิวของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงซีลีเนียมที่มีการเติมสารตัวเติมป้องกันรังสีชนิดผงกรบอริก และผงโบรอนออกไซด์	51
4.20	ค่ามอดูลัสของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงซีลีเนียมที่มีการเติมสารตัวเติมป้องกันรังสีชนิดผงกรบอริก และผงโบรอนออกไซด์	52
4.21	ค่าความแข็งที่ผิวของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงซีลีเนียมที่มีการเติมสารตัวเติมป้องกันรังสีชนิดผงตะกั่ว	53
4.22	ค่ามอดูลัสของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงซีลีเนียมที่มีการเติมสารตัวเติมป้องกันรังสีชนิดผงตะกั่ว	53
4.23	ค่าความต้านทานแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงซีลีเนียมที่มีการเติมสารตัวเติมป้องกันรังสีชนิดผงกรบอริก และผงโบรอนออกไซด์	54
4.24	ค่าความต้านทานแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงซีลีเนียมที่มีการเติมสารตัวเติมป้องกันรังสีชนิดผงตะกั่ว	55
4.25	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงซีลีเนียมที่มีสารตัวเติมป้องกันรังสีที่ปริมาณ 10 และ 50 phr (กำลังขยาย 10,000 เท่า)	

- (a) ผงกรดบอริก 10 phr (b) ผงกรดบอริก 50 phr (c) ผงโบรอนออกไซด์ 10 phr
 (d) ผงโบรอนออกไซด์ 50 phr (e) ผงตะกั่ว 10 phr และ (f) ผงตะกั่ว 50 phr 56

รายการรูปประกอบ (ต่อ)

รูป	หน้า
4.26 เปอร์เซ็นต์การยึดตัว ณ จุดขาดของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงซีลี้อย ไม้ที่มีการเติมสารตัวเติมป้องกันรังสีชนิดผงกรดบอริก และผงโบรอนออกไซด์	57
4.27 เปอร์เซ็นต์การยึดตัว ณ จุดขาดของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงซีลี้อย ไม้ที่มีการเติมสารตัวเติมป้องกันรังสีชนิดผงตะกั่ว	58
4.28 ความต้านทานต่อแรงฉีกขาดของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงซีลี้อยไม้ ที่มีการเติมสารตัวเติมป้องกันรังสี ได้แก่ ผงกรดบอริก และผงโบรอนออกไซด์	58
4.29 ความต้านทานต่อแรงฉีกขาดของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงซีลี้อยไม้ ที่มีการเติมสารตัวเติมป้องกันรังสีชนิดผงตะกั่ว	59
4.30 ความต้านทานต่ออนุมูลภาคนิวตรอนของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงซีลี้อยไม้ ที่มีการเติมสารตัวเติมป้องกันรังสี ได้แก่ ผงกรดบอริก และผงโบรอนออกไซด์	60
4.31 ความต้านทานต่ออนุมูลภาคนิวตรอนของปริมาณโบรอนในวัสดุเชิงประกอบยาง ธรรมชาติผสมผงซีลี้อยไม้ที่มีการเติมสารตัวเติมป้องกันรังสีชนิดผงกรดบอริก และผงโบรอนออกไซด์	61
4.32 ความต้านทานต่อรังสีแกมมาของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงซีลี้อยไม้ ที่มีการเติมสารตัวเติมป้องกันรังสี ได้แก่ ผงกรดบอริก และผงโบรอนออกไซด์	62

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ในปัจจุบันยางธรรมชาติเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทย ซึ่งเห็นได้จากการทำรายได้ให้กับประเทศจากการส่งออกยางดิบ ผลิตภัณฑ์แปรรูปจากยาง และไม้ยางสูงเป็นอันดับต้นๆ ของโลก ถึงแม้ว่าการปลูกยางธรรมชาติจะได้รับการสนับสนุนจากภาครัฐ ราคาของยางดิบในปัจจุบันมีการผันผวนตามกลไกความต้องการของตลาดโลก ทำให้รายได้ของเกษตรกรด้านยางธรรมชาติมีรายได้ที่ไม่แน่นอน การผันผวนของราคายางดิบเป็นปัจจัยหนึ่งที่ผลักดันให้มีการส่งเสริมการทำวิจัยเพื่อเพิ่มคุณภาพและมูลค่าของยางธรรมชาติ โดยมีการแปรรูปวัตถุดิบยางธรรมชาติให้เป็นผลิตภัณฑ์จากยางที่มีมูลค่าเพิ่มขึ้น ในด้านการนำยางธรรมชาติไปใช้ประโยชน์ในการป้องกันด้านรังสี ได้มีงานวิจัยโดยการเติมผงตะกั่วในยางธรรมชาติเพื่อยับยั้งรังสีแกมมา และมีการนำสารประกอบที่มีโบรอนเป็นองค์ประกอบ เติมในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ เช่น กรดบอริก (H_3BO_3) และโบรอนออกไซด์ (B_2O_3) เพื่อใช้ในการยับยั้งอนุภาคนิวตรอน ซึ่งอนุภาคนิวตรอนเป็นอนุภาคที่ไม่มีประจุ ทำให้ยากต่อการป้องกัน อนุภาคนิวตรอนนี้ สามารถเกิดขึ้นได้จากการใช้งานด้านรังสีในหน่วยงานต่างๆ เช่น โรงไฟฟ้านิวเคลียร์หรือเตาปฏิกรณ์ [1] และห้องฉายรังสีในโรงพยาบาล เป็นต้น จากงานวิจัยวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เถ้าไม้เพื่อทำเป็นแผ่นหลังคayang ที่มีสมบัติโดยรวมเป็นที่น่าพอใจ สามารถขยายผลเพื่อนำไปพัฒนาใช้เป็นวัสดุอุปกรณ์ในอาคารหรือผนังห้องในบริเวณที่มีการใช้รังสี งานวิจัยนี้จึงเป็นการศึกษาและพัฒนาต่อของงานวิจัยให้ยางธรรมชาติผสมผงขี้เถ้าไม้สามารถป้องกันหรือยับยั้งรังสีชนิดต่างๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งทำให้การพัฒนาเป็นไปอย่างต่อเนื่อง เป็นประโยชน์ต่อทั้งภาคอุตสาหกรรมและภาคเกษตร และเป็นการเพิ่มมูลค่าของผลิตภัณฑ์จากยางธรรมชาติให้มีความมั่นคงและยั่งยืน

จากงานวิจัยที่ผ่านมาของกลุ่มวิจัยการผลิตและขึ้นรูปพอลิเมอร์ (กลุ่มวิจัย P-PROF) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี [2-3] ที่มีการศึกษาเพื่อนำยางธรรมชาติเป็นวัตถุดิบหลักผลิตผลิตภัณฑ์หลังคayang โดยการนำยางธรรมชาติผสมกับผงขี้เถ้าไม้ยางพาราและสารเคมีชนิดอื่น เพื่อเพิ่มสมบัติให้กับยางธรรมชาติให้เหมาะสมต่อการนำไปใช้งานได้จริง ที่มีสมบัติเชิงกลด้านความแข็งแรง ทนทานต่อสภาพภูมิอากาศ และความเป็นฉนวนความร้อนที่ดี แต่ทั้งนี้ในงานวิจัยมีแนวคิดขยายผลจากสมบัติทางกายภาพที่ดีของวัสดุยางธรรมชาติผสมขี้เถ้าไม้ ที่อาจจะมีความสามารถในการป้องกันหรือลดปริมาณรังสีได้ ซึ่งมีงานวิจัยไม่เป็นที่แพร่หลาย และมีผู้ทำศึกษาวิจัยวัสดุทางด้านรังสีน้อยมาก ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงสนใจทำการศึกษาชนิดและปริมาณการใช้สารป้องกันรังสี ได้แก่ กรดบอริก ผงโบรอนออกไซด์และผงตะกั่วเป็นสารตัวเติมที่ใช้ในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ เพื่อผลิตแผ่นกั้นรังสี ให้มีความสามารถในการป้องกันอนุภาคนิวตรอนและ

รังสีแกมมาได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ค่าที่ผลจากการวิจัยวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เถ้าไม้ที่ผสมสารป้องกันรังสี เพื่อใช้ในการป้องกันรังสีโดยเฉพาะอนุภาคนิวตรอนและรังสีแกมมา เป็นทางเลือกใหม่ด้านวัสดุที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อหน่วยงานที่มีการใช้รังสี

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อศึกษาผลของชนิด และปริมาณสารตัวเติมชนิดโบรอน กรดบอริก และผงตะกั่ว ที่เติมในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่มีต่อสมบัติด้านรังสี สมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ ค่าความหนาแน่น และค่าการนำความร้อน

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. วัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย ดังนี้
 - ยางธรรมชาติ (Natural rubber) เกรด STR 20
 - สารเคมีที่ใช้ในกระบวนการผสมยาง ได้แก่ สารเร่งและกระตุ้นปฏิกิริยา สารเร่งปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ สารคงรูปและสารแต่งเติมอื่นๆ ได้แก่ สารเพิ่มเสถียรภาพต่อรังสียูวี สารแอนติออกซิแดนท์ และสารป้องกันปฏิกิริยากับโอโซน
 - สารเติมแต่งเสริมแรงชนิดผงเขม่าดำ (Carbon black) เกรด HAF N330 และผงขี้เถ้าไม้ (Wood sawdust)
 - สารตัวเติมป้องกันรังสี ได้แก่ กรดบอริก (Boric acid, H_3BO_3) ผงโบรอนออกไซด์ (Boron oxide, B_2O_3) และผงตะกั่ว (Lead powder)
2. การผสมส่วนประกอบกับสารเคมีโดยใช้เครื่องบดผสมลูกกลิ้งคู่ (Two-roll mill) และขึ้นรูปชิ้นงานโดยใช้เครื่องอัดขึ้นรูปร้อนระบบแรงดัน (Hot compression molding)
3. การทดสอบสมบัติการคงรูปของยางด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์แบบจานแกว่ง (Oscillating Disk Rheometer, ODR) ตามมาตรฐาน ASTM D2084-01
4. การทดสอบสมบัติเชิงกล ได้แก่
 - การต้านทานต่อแรงดึง (Tensile strength), การยืดตัว (Elongation at break) ตามมาตรฐาน ASTM D412-06
 - การต้านแรงฉีกขาด (Tear strength) ตามมาตรฐาน ASTM D624-00
 - ความแข็งที่ผิว (Hardness Shore A) ตามมาตรฐาน ASTM D2240-03
5. ทดสอบการบ่มเร่ง
 - การบ่มเร่งสภาวะด้วยความร้อนตามมาตรฐาน ASTM D573-04

6. การทดสอบสมบัติกายภาพ
 - การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM)
7. การทดสอบความหนาแน่นด้วยชุดอุปกรณ์วัดความหนาแน่นใช้ร่วมกับเครื่องชั่งไฟฟ้าอ่านละเอียด 4 ตำแหน่ง (Electronic Density Balance, FA)
8. การทดสอบค่าการนำความร้อนด้วยเครื่องวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของวัสดุ (Thermal Conductivity Analysis, TCA)

1.4 วิธีการดำเนินงานวิจัยโดยสังเขป

1. ศึกษาข้อมูลเบื้องต้นวัสดุป้องกันรังสี ทฤษฎีการป้องกันรังสี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับยางธรรมชาติ สารตัวเติมและสารเคมีในวัสดุยาง กระบวนการผสมยาง การขึ้นรูป และการทดสอบสมบัติด้านต่างๆ ของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ
2. เตรียมวัตถุดิบที่ใช้ในงานวิจัย ได้แก่ ยางธรรมชาติ ผงซีลี้อยไม้ยางพารา สารเคมีที่ใช้ในกระบวนการผสมยาง เช่น ผงเขม่าดำ สารป้องกันโอโซน สารวัลคาไนซ์ยาง และสารตัวเติมป้องกันรังสี คือ กรดบอริก ผงโบรอนออกไซด์ และผงตะกั่ว
3. ศึกษาชนิดและปริมาณ สารตัวเติมชนิด กรดบอริก ผงโบรอนออกไซด์ และผงตะกั่วที่เติมในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่มีต่อสมบัติเชิงกล และสมบัติทางกายภาพ
4. เตรียมการผสมและขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบแผ่นยางธรรมชาติ โดยทำการปรับเปลี่ยนปริมาณสารป้องกันรังสีชนิดชนิดกรดบอริก ผงโบรอนออกไซด์ และผงตะกั่วในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่มีการเติมผงเขม่าดำ และวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติที่มีการเติมผงเขม่าดำกับผงซีลี้อยไม้ด้วยเครื่องบดผสมลูกกลิ้งคู่ อุณหภูมิการผสม 30 ถึง 50 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที
5. ทดสอบเวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูป (Scorch time) เวลาที่ยางคงรูปที่ 90% (Cure time) ด้วยเครื่อง Oscillating disk rheometer, ODR และขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปร้อนด้วยระบบแรงดันที่อุณหภูมิขึ้นรูป 160 องศาเซลเซียส ใช้เวลาขึ้นรูปที่ยางคงรูป 90% (tc90) ที่ได้จากเครื่อง Oscillating disk rheometer, ODR ด้วยเครื่องขึ้นรูปร้อนระบบแรงดันเป็นแผ่นชิ้นงาน
6. ตรวจสอบสมบัติทางกายภาพและทดสอบสมบัติเชิงกล และทดสอบการบ่มเร่งด้วยความร้อน
7. ตรวจสอบด้านรังสีด้วยอุปกรณ์การวัดทางรังสีจากภาควิชารังสีประยุกต์ และไอโซโทป คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และ/หรือสถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ
8. นำชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่ผสมซีลี้อยไม้ที่มีสารตัวเติมต่างๆ ทดสอบการป้องกันอนุภาคนิวตรอน และรังสีแกมมา
9. วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

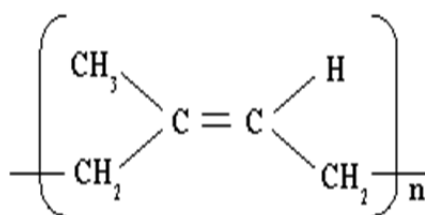
1. ด้านวิชาการ ทราบแนวทางการกระบวนการผลิต ชนิดและปริมาณของสารตัวเติมป้องกันรังสีที่เหมาะสม ที่เติมในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ ที่มีสมบัติโดยรวมเหมาะสมสำหรับการผลิตผลิตภัณฑ์แผ่นก้ำบังอนุภาคนิวตรอน และรังสีแกมมา
2. ด้านเศรษฐศาสตร์และภาคอุตสาหกรรม ได้สูตรและกระบวนการผลิตแผ่นก้ำบังรังสีจากวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ อาจนำมาทดแทน หรือเป็นทางเลือกของวัสดุก้ำบังรังสีทางการค้าที่นำเข้าจากต่างประเทศ
3. ด้านสังคมและประโยชน์สาธารณะ ส่งเสริมและเพิ่มทางเลือกในการใช้วัสดุด้านก้ำบังรังสี สำหรับหน่วยงานรังสีวิทยาและผู้ที่เกี่ยวข้อง ที่อาจขยายผลนำไปใช้ในงานป้องกันรังสี และวัสดุในงานก่อสร้างที่ป้องกันรังสีชนิดต่างๆ

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับยางธรรมชาติ

2.1.1. โครงสร้างของยางธรรมชาติ [4]

ยางธรรมชาติมีชื่อทางเคมีคือ ซิส-1,4-พอลิไอโซพรีน (Cis-1,4-polyisoprene) โดยที่โมเลกุลยางประกอบด้วยหน่วยของไอโซพรีน (C_5H_8) มาต่อกันเป็นสายยาว (แบบเส้นตรง) โดยทั่วไปยางธรรมชาติมีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยอยู่ในช่วง 200,000 ถึง 400,000 และมีการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลที่กว้างมาก ยางธรรมชาติมีความหนาแน่นเท่ากับ 0.93 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตรที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส และมีอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature, T_g) ประมาณ -72 องศาเซลเซียส โครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติแสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 โครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ [4]

2.1.1.1 สมบัติของยางธรรมชาติ [4]

โดยทั่วไปยางธรรมชาติมีโครงสร้างการจัดเรียงตัวของโมเลกุลอสัณฐาน (Amorphous) แต่บางสภาวะโมเลกุลของยางสามารถจัดเรียงตัวค่อนข้างเป็นระเบียบที่อุณหภูมิต่ำหรือเมื่อถูกดึงยืด จึงสามารถเกิดผลึก (Crystallize) ได้ การเกิดผลึกที่อุณหภูมิต่ำ (Low temperature crystallization) ทำให้ยางแข็งแรงมากขึ้น แต่ถ้าอุณหภูมิสูงยางอ่อนตัวและกลับสู่สภาพเดิม ในขณะที่การเกิดผลึกเนื่องจากการยืดตัว (Strain Induced Crystallization) ทำให้ยางมีสมบัติเชิงกลดี คือยางมีความทนต่อแรงดึง (Tensile strength) ความทนต่อการฉีกขาด (Tear resistance) สูง และลักษณะเด่นของยางธรรมชาติมีความยืดหยุ่นสูง (High elasticity) เมื่อแรงภายนอกที่มากระทำหมดไป ยางกลับคืนสู่รูปร่างและขนาดเดิม (หรือใกล้เคียง) อย่างรวดเร็ว อีกทั้งมีสมบัติดีในด้านการเหนียวติดกัน (Tack) เป็นสมบัติสำคัญของการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ต้องอาศัยการประกอบ การยึดเกาะชิ้นส่วนต่างๆ เข้าด้วยกัน นอกจากนี้ ยางธรรมชาติมีสมบัติเด่นด้านความเป็นฉนวนไฟฟ้า เนื่องจากมีค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ (Specific resistivity) ที่สูง

2.2 สารเคมีที่ใช้ในยาง

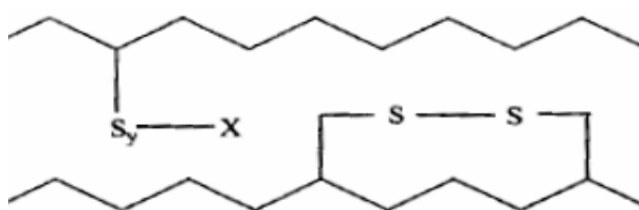
ยางดิบมีข้อจำกัดในการใช้งานเนื่องจากมีสมบัติเชิงกลต่ำและมีลักษณะทางกายภาพที่ไม่เสถียร โดยยางจะอ่อนตัวและเหนียวเมื่ออุณหภูมิสูง และจะมีความแข็งเปราะเมื่ออุณหภูมิต่ำ ดังนั้นการใช้งานจึงต้องมีการผสมยางกับสารเคมีต่างๆ เช่น กำมะถัน ผงเขม่าดำ และสารตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นต้น ซึ่งยางที่ทำปฏิกิริยากับสารเคมีต่างๆ เรียกว่า วัลคาไนเซชัน (Vulcanization) หรือยางที่ผ่านการคงรูปแล้ว มีความเสถียรไม่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิและมีสมบัติเชิงกลดีขึ้น

2.2.1 สารคงรูปยาง [5]

สารคงรูปยางเป็นองค์ประกอบสำคัญที่ต้องผสมในยางเพื่อให้ยางเกิดปฏิกิริยาทางเคมี ที่เรียกว่า ปฏิกิริยาวัลคาไนเซชันหรือปฏิกิริยาคงรูป ส่งผลให้โมเลกุลของยางเกิดการเชื่อมโยงตรงตำแหน่งที่ว่างไว้ต่อปฏิกิริยาเป็นโครงสร้างตาข่าย 3 มิติ (Crosslinking) ทำให้ยางมีความยืดหยุ่นสูง มีความทนทาน และมีความเสถียรไม่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ ซึ่งการคงรูปยางทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงที่สำคัญ ดังนี้

- 1) ยางเปลี่ยนโครงสร้างจากแบบเชิงเส้นเป็นแบบตาข่าย ทำให้ยางเปลี่ยนสภาพจากพลาสติกเป็นอพลาสติกที่มีความแข็งแรงมากขึ้น
- 2) ทำให้ชิ้นงานยางไม่ละลายในตัวทำละลายอินทรีย์
- 3) ทำให้สมบัติเชิงกลในด้านความต้านทานต่อแรงดึง ความต้านทานการฉีก และความต้านทานการฉีกขาดเพิ่มขึ้น
- 4) ทำให้ยางมีความต้านทานต่อความร้อน และแสงเพิ่มขึ้น สามารถใช้งานในช่วงอุณหภูมิที่กว้างขึ้น

สารคงรูปยางที่สำคัญต่อยางธรรมชาติ ได้แก่ กำมะถัน เนื่องจากกำมะถันเป็นสารคงรูปยางที่นิยมใช้มากที่สุด ราคาต้นทุนต่ำ ในการคงรูปสามารถเกิดขึ้นได้เร็ว ซึ่งการคงรูปด้วยกำมะถันนิยมใช้กับยางทุกชนิดที่มีพันธะคู่อยู่ในโมเลกุลยาง เมื่อใส่กำมะถันเข้าไปในยางแล้วนำไปให้ความร้อนยางเกิดการคงรูปทำให้ยางมีสมบัติดีขึ้น คือ เมื่อยางได้รับความร้อนยางไม่อ่อนนุ่ม หรือแข็งเหนียว ไม่มีกลิ่น ไม่ละลายในตัวทำละลาย เป็นต้น การเชื่อมโยงโมเลกุลด้วยกำมะถัน แสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 การเชื่อมโยงโมเลกุลด้วยกำมะถัน

2.2.2 สารตัวเติม [5]

สารตัวเติม คือ สารอื่นๆ ที่ไม่ใช่ยาง เช่น ผงเขม่าดำ ผงซีลี้อยไม้ เป็นต้น ซึ่งสารตัวเติมเป็นองค์ประกอบที่เติมเข้าไปในยางเพื่อจุดประสงค์หลายอย่าง เช่น เสริมแรงให้ยางมีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น เพื่อให้ยางคอมพาวด์มีสมบัติที่เหมาะสมกับกระบวนการผลิต หรือเพื่อลดต้นทุน โดยสารตัวเติมที่เติมในยางมี 3 ลักษณะ ดังนี้

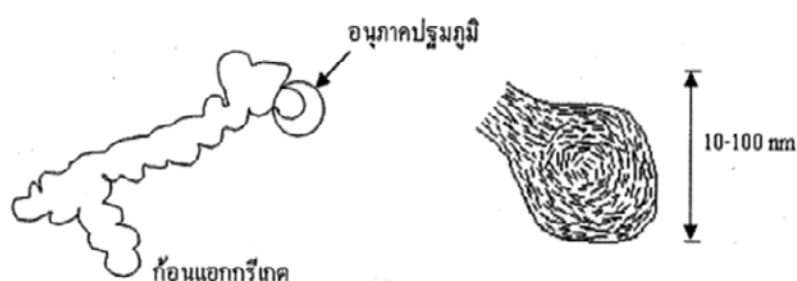
- 1) สารตัวเติมลักษณะเป็นอนุภาค (Particles filler) ได้แก่ ผงเขม่าดำ แคลเซียมคาร์บอเนต และถ่านหินต่างๆ เป็นต้น
- 2) สารตัวเติมลักษณะเป็นเส้นใย (Fibrous filler) ได้แก่ ผงซีลี้อยไม้ และใยฝ้าย เป็นต้น
- 3) สารตัวเติมเรซิน (Resinous filler) ได้แก่ สไตรีนเรซิน และฟีนอลฟอร์มาลดีไฮด์เรซิน เป็นต้น

สารตัวเติมลักษณะเป็นอนุภาคที่ใช้ในอุตสาหกรรมสามารถแบ่งออกตามประสิทธิภาพของการเสริมแรงได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ คือ

- 1) สารตัวเติมเสริมแรง (Reinforcing filler) เมื่อผสมกับยางส่งผลให้ยางมีสมบัติเชิงกลด้านความต้านทานต่อแรงดึง ความต้านทานต่อการฉีกขาด และความต้านทานต่อการขัดถูสูงขึ้น สารตัวเติมเสริมแรง ได้แก่ ผงเขม่าดำ และซิลิกา เป็นต้น
- 2) สารตัวเติมไม่เสริมแรง (Inert filler) มีราคาถูก นิยมนำมาผสมกับยางเพื่อลดต้นทุนการผลิต เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต ไซนาเคลย์ แบไรต์ และทัลคัม เป็นต้น

2.2.3 ผงเขม่าดำ [4]

ผงเขม่าดำเป็นสารตัวเติมเสริมแรงที่นิยมใช้กันมากในอุตสาหกรรมยางที่ไม่เน้นสีสรรของผลิตภัณฑ์ ซึ่งได้จากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ของผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม องค์ประกอบหลักของผงเขม่าดำคือธาตุคาร์บอน อนุภาคของผงเขม่าดำมีโครงสร้างกิ่งแกรไฟต์ แสดงดังรูปที่ 2.3 ซึ่งโครงสร้างอะตอมของคาร์บอนจัดเรียงตัวเป็นชั้นๆ ขนานกัน โดยส่วนใหญ่ใช้ผงเขม่าดำที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคปฐมภูมิอยู่ในช่วง 10 ถึง 100 นาโนเมตร



รูปที่ 2.3 โครงสร้างของผงเขม่าดำ

2.2.3.1 เกรดของผงเขม่าดำ

ปัจจุบันนิยมใช้มาตรฐาน ASTM ในการตั้งชื่อและแบ่งเกรดของผงเขม่าดำ โดยใช้อักษร “ N ” เริ่มต้นสำหรับผงเขม่าดำที่ให้อัตราเร็วของปฏิกิริยาคงรูปปกติ (Normal curing) ตามด้วยตัวเลขสามตัว ตัวเลขแรกบอกถึงขนาดของอนุภาคปฐมภูมิ ตัวเลขที่สองมักใช้ซ้ำกับตัวเลขตัวแรกซึ่งไม่มีความหมายใดๆ และตามด้วยตัวเลขที่สามคือศูนย์ ซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกใช้ผงเขม่าดำเกรด N330 มีหน้าที่เสริมแรงให้ยางมีสมบัติด้านความต้านทานการขัดถู ความทนทานต่อแรงดึง และความทนทานต่อการฉีกขาดสูง ยางมีสมบัติการกระเดื่องกระดอนที่ดี มีกระบวนการผลิตที่ง่ายเหมาะกับการเลือกนำมาใช้กับยางธรรมชาติ

2.2.3.2 สมบัติของเขม่าดำ

ขนาดอนุภาคและพื้นที่ผิวจำเพาะ

อนุภาคของเขม่าดำมีรูปร่างเป็นทรงกลมเป็นอนุภาคที่ถูกหลอมอยู่รวมกันเป็นกลุ่มก้อน เรียกว่าแอกริเกต ซึ่งขอบเขตของเขม่าดำขึ้นอยู่กับขนาดอนุภาคปฐมภูมิ ผงเขม่าดำที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมยางทั่วไปมีขนาดของอนุภาคปฐมภูมิในช่วง 19-95 นาโนเมตร โดยทั่วไปเขม่าดำที่มีขนาดของอนุภาคปฐมภูมิเล็กมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงสามารถเสริมความแข็งแรงให้ยางได้ดี

โครงสร้าง

โครงสร้างของเขม่าดำมีลักษณะเกาะกลุ่มกันของอนุภาคเขม่าดำเกิดเป็นแอกริเกต นอกจากนี้การเกาะกลุ่มกันเป็นแอกริเกตแต่ละกลุ่มสามารถเกาะกลุ่มกันได้อย่างหลวมๆ ด้วยแรงดึงดูดแวนเดอร์วาลส์เกิดเป็นโครงสร้างทุติยภูมิที่เรียกว่า แอกลอเมอร์เรต ซึ่งโครงสร้างแบบนี้ถูกทำลายได้ง่ายด้วยแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการผสม ส่งผลให้ผงเขม่าดำมีรูพรุนภายในเกิดขึ้น

สมบัติทางเคมีของพื้นผิว

เขม่าดำประกอบด้วยอะตอมของธาตุคาร์บอนประมาณ 90 ถึง 95 เปอร์เซ็นต์ ส่วนองค์ประกอบอื่นได้แก่ ไฮโดรเจน และออกซิเจน พื้นผิวของเขม่าดำประกอบไปด้วยหมู่ฟังก์ชันเคมีมาก เมื่อผงเขม่าดำมีปริมาณออกซิเจนมากขึ้นทำให้ยางมีค่าระยะเวลาเริ่มเกิดการคงรูปที่ยาวขึ้น อัตราเร็วการคงรูปและค่ามอดูลัสที่ต่ำลง

ความเป็นรูพรุนของอนุภาค

พื้นผิวของเขม่าดำมีลักษณะเป็นรูพรุน ซึ่งการวัดระดับความเป็นรูพรุนของเขม่าดำสามารถทำได้โดยการเปรียบเทียบพื้นที่ผิวของเขม่าดำที่ได้จากการคำนวณขนาดของอนุภาคที่วัดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน หรือการดูดซับแก๊สไนโตรเจนที่เรียกว่า เทคนิค BET

การนำไฟฟ้าและความร้อน

เขม่าดำสามารถนำไฟฟ้าและความร้อนได้เป็นอย่างดี โดยการนำไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นตามโครงสร้างและพื้นที่ผิวของเขม่าดำที่เพิ่มขึ้น หมู่ฟุ้งชั้นเคมีที่อยู่บนพื้นผิวโดยเฉพาะหมู่ที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบมีผลต่อสมบัติทางไฟฟ้าของเขม่าดำ คือทำให้ความสามารถในการนำไฟฟ้าของเขม่าดำลดลงอย่างมาก

2.2.3.3 กลไกการเสริมแรง

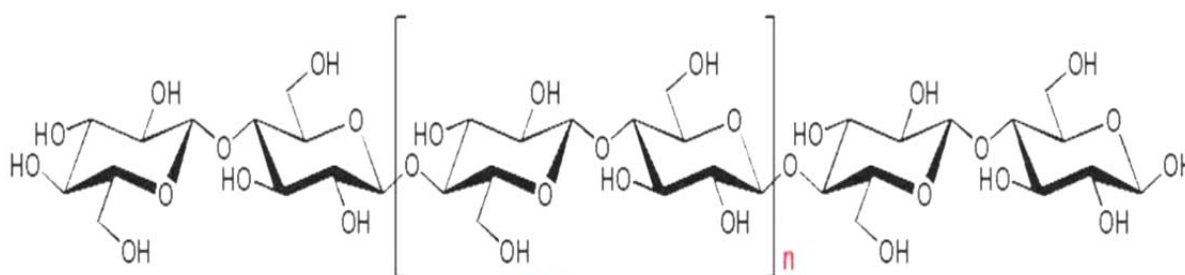
อันตรกิริยาระหว่างยางกับสารตัวเติม (Rubber-filler interaction) จัดเป็นกลไกการเสริมแรงอย่างหนึ่ง ซึ่งประสิทธิภาพในการเสริมของผงเขม่าดำขึ้นอยู่กับอันตรกิริยาหรือแรงกระทำระหว่างยางกับผงเขม่าดำ โดยอันตรกิริยาที่เกิดขึ้นอยู่ในรูปของแรงแวนเดอร์วาลส์ซึ่งไม่กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งพื้นผิวของผงเขม่าดำ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับโครงสร้างทางเคมีบนพื้นผิวของสารตัวเติมนั้นๆ เมื่อเกิดอันตรกิริยาระหว่างยางกับผงเขม่าดำ ส่งผลให้ยางมีความต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างสูงขึ้นเนื่องจากสายโซ่โมเลกุลยางมีความสามารถในการเคลื่อนที่น้อยลง

2.2.4 ผงขี้เลื่อยไม้ [6]

ขี้เลื่อยไม้ (Sawdust or wood dust) เป็นผลพลอยได้จากการเลื่อยไม้ มีลักษณะเป็นผงไม้ละเอียด โดยมีสารอินทรีย์เป็นองค์ประกอบจำนวนมาก คือ เซลลูโลส (Cellulose) เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) ลิกนิน (Lignin) และมีส่วนประกอบอื่นๆเล็กน้อยเช่นเพคติน (Pactin) และแป้ง (Starch) เป็นต้น

2.2.4.1 เซลลูโลส (cellulose)

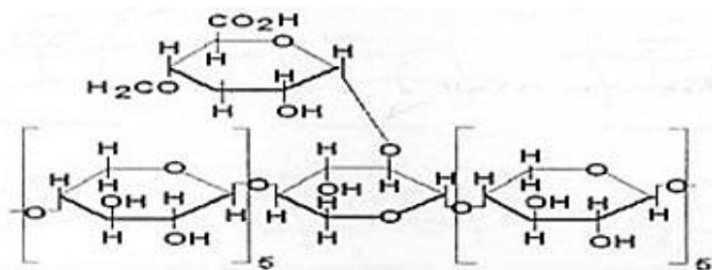
เป็นสารประกอบที่มีมากที่สุดของเนื้อไม้มีโครงสร้างอัดกันแน่นเป็นเส้นตรงไม่มีกิ่ง มีสูตรโครงสร้างทางเคมี คือ $(C_6H_{10}O_5)_n$ แสดงดังรูปที่ 2.4 ซึ่งประกอบด้วย 1,4-เบตา-D-กลูโคไพราโนส (1,4-β-D-glucopyranose) เชื่อมกับพันธะ 1,4-กลูโคซิดิก (1,4-glucosidic bond) โดยมีค่า Degree of polymerization อยู่ในช่วงประมาณ 100 ถึงมากกว่า 10,000 ซึ่งเซลลูโลสไม่ละลายในน้ำตัวทำละลายอินทรีย์สะเทิน (Neutral organic solvent) เช่น เบนซีน แอลกอฮอล์ และอีเทอร์ แต่ละลายได้ดีในกรดเกลือและกรดกำมะถันเข้มข้น



รูปที่ 2.4 โครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส[6]

2.2.4.2 เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose)

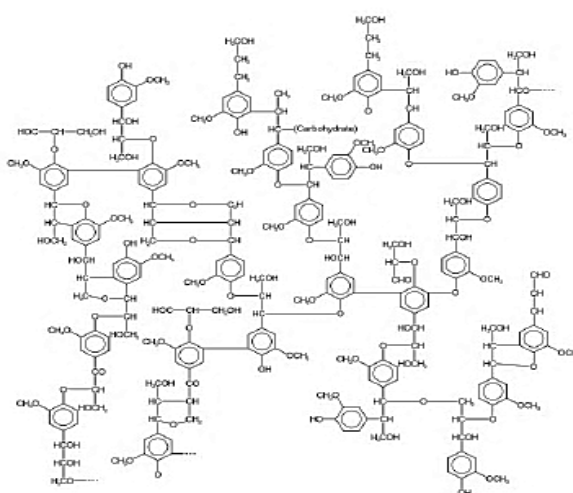
เฮมิเซลลูโลสที่พบในไม้เนื้ออ่อนมีประมาณ 25-30 เปอร์เซ็นต์ ส่วนในไม้เนื้อแข็งมีประมาณ 30-35 เปอร์เซ็นต์ ลักษณะทางกายภาพของเฮมิเซลลูโลสเป็นโมเลกุลขนาดเล็กสีขาว และมีลักษณะโครงสร้างเป็นกิ่งจับกันแบบหลวมๆ แสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 โครงสร้างทางเคมีของเฮมิเซลลูโลส [6]

2.2.4.3 ลิกนิน (Lignin)

เป็นสารโพลิเมอร์ที่ซับซ้อนกว่า cellulose กับ hemicellulose และเป็นโครงสร้างของผนังเซลล์ชนิดหนึ่ง พบในไม้เนื้อแข็ง (Hardwood), ไม้เนื้ออ่อน (Softwood), พืชล้มลุก (Grasses) และพืชชั้นต่ำทั่วไป แต่ไม่พบใน lichens, mosses, fungi, mushrooms ลักษณะโครงสร้างของลิกนินประกอบด้วยหน่วยซ้ำของฟีนิลโพรพานอยด์ (Phenyl propanoid) ประกอบเป็นโมเลกุลใหญ่ แสดงดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 โครงสร้างทางเคมีของลิกนิน [6]

2.2.5 สารกระตุ้นปฏิกิริยา [5]

สารกระตุ้นปฏิกิริยา (Activator) ทำหน้าที่เพิ่มอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาเชิงรูป โดยเข้าไปกระตุ้นสารตัวเร่งปฏิกิริยาให้มีประสิทธิภาพการทำงานสูงขึ้นและเข้าทำปฏิกิริยากับกำมะถันที่มีอยู่ในยางอย่างรวดเร็ว ทำให้อย่างมีอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาสูงขึ้น และช่วยในการกระจายตัวในสารเคมีต่างๆ ในเนื้อยาง

2.2.5.1 ซิงค์ออกไซด์

ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide; ZnO) เป็นสารกระตุ้นวัลคาไนซ์ที่นิยมใช้มากในโรงงานอุตสาหกรรมในปริมาณตั้งแต่ 3-5 phr ซิงค์ออกไซด์ที่มีอนุภาคนาขนาดเล็กสามารถลดปริมาณการใช้ให้เหลือเพียง 1 phr ส่งผลให้ยางที่ได้มีค่ามอดูลัสสูงและมีลักษณะโปร่งใส ถ้าใช้ซิงค์ออกไซด์ปริมาณสูงมากกว่า 5 phr ทำให้การถ่ายเทความร้อนในยางรวดเร็วขึ้น

2.2.5.2 กรดสเตียริก

กรดสเตียริก (Stearic acid) หรือกรดไขมัน เป็นสารกระตุ้นวัลคาไนซ์ที่สำคัญอย่างหนึ่ง นิยมใช้กรดสเตียริกที่มีส่วนผสมระหว่างกรดอิลิฟาคิกอิมตัว ซึ่งมีจำนวนคาร์บอนในช่วง 12-18 อะตอม เมื่อกรดสเตียริกทำงานร่วมกับซิงค์ออกไซด์ ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกระตุ้นปฏิกิริยาสูงขึ้น และเกิดเป็นสารประกอบที่สามารถละลายในยางได้ง่าย ปริมาณการใช้กรดสเตียริกขึ้นอยู่กับชนิดของยางที่ใช้โดยยางธรรมชาติมีกรดสเตียริกอยู่แล้วเล็กน้อยในการผสมสารเคมีในยางธรรมชาติทุกครั้งมักใส่กรดสเตียริกประมาณ 1-4 phr เพื่อแก้ปัญหาการบ่มที่แตกต่างกัน

2.2.6 สารตัวเร่งปฏิกิริยา [4]

สารตัวเร่งปฏิกิริยา (Accelerator) จัดเป็นตัวยุทธศาสตร์สำหรับระบบการคงรูปยางด้วยกำมะถัน การเติมสารตัวเร่งปฏิกิริยาในยางปริมาณเพียงเล็กน้อยช่วยให้ปฏิกิริยาระหว่างยาง และกำมะถันเกิดได้เร็วขึ้น ช่วยลดระยะเวลาในการคงรูปยางและยางคงรูปที่ได้มีความหนาแน่นของการเชื่อมโยงสูงขึ้น ส่งผลให้อย่างคงรูปมีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น

2.2.6.1 เมอร์แคปโทเบนโซไทอะโซล

เมอร์แคปโทเบนโซไทอะโซล (Mercaptobenzothiazole, MBT) จัดเป็นสารตัวเร่งปฏิกิริยาในกลุ่มเมอร์แคปโทที่สำคัญตัวหนึ่ง สารตัวเร่งปฏิกิริยาในกลุ่มนี้ใช้ได้กับยางเกือบทุกประเภท ทำให้อย่างมีอัตราเร็วคงรูปปานกลาง ซึ่งยางคงรูปที่ได้มีสมบัติเชิงกลที่ดีและมีความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพสูง สารตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดนี้จึงนิยมใช้กับยางธรรมชาติ

2.2.6.2 ไดฟีนิลกัวนิดีน

ไดฟีนิลกัวนิดีน (Diphenylguanidine, DPG) จัดเป็นสารตัวเร่งปฏิกิริยาในกลุ่มกัวนิดีนที่สำคัญตัวหนึ่งที่ไม่นิยมนำมาใช้เป็นสารตัวเร่งปฏิกิริยาปฏิกิริยา เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาค่อนข้างต่ำกว่าสารตัวเร่งปฏิกิริยาในกลุ่มอื่นๆ และส่งผลต่อสมบัติของยางคงรูปที่ได้ไม่ดี จึงนิยมนำไปใช้เป็นส่วนประกอบของสารตัวเร่งปฏิกิริยาทุกชนิดร่วมกับสารตัวเร่งปฏิกิริยาปฏิกิริยาในกลุ่มเมอร์แคปโต เพื่อเพิ่มอัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาของยางคงรูปและความหนาแน่นของการเชื่อมโยงของพันธะ (Crosslink density)

2.2.7 พลาสติไซเซอร์ [5]

พลาสติไซเซอร์ (Plasticizers) หมายถึง สารที่เติมลงไปในการผลิตยาง ส่งผลทำให้ยางเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้ดีขึ้น เพื่อเพิ่มความยืดหยุ่นและความสามารถในการใช้งาน ซึ่งถ้าใช้ในปริมาณไม่เกิน 5 ส่วนในยาง 100 ส่วน เรียกว่า สารช่วยในกระบวนการผลิต (Processing aids) ช่วยในการแปรรูปและช่วยให้การผสมสารเคมีในยางได้ง่ายขึ้น โดยพลาสติไซเซอร์มีหน้าที่ช่วยในการแปรรูปยาง เปลี่ยนแปลงสมบัติของยาง ลดต้นทุนการผลิต เพื่อใช้งานในอุณหภูมิต่ำ และลดพลังงานในการแปรรูปยาง

2.2.8 สารป้องกันยางเสื่อมสภาพ [4]

โครงสร้างโมเลกุลของยางทั่วไปโดยเฉพาะยางธรรมชาติมีพันธะคู่ค่อนข้างมาก ยางจึงเสื่อมสภาพได้ง่ายในสภาวะการใช้งานที่สัมผัสกับแสงแดด ออกซิเจน โอโซน ความร้อน หรือโลหะที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และการใช้งานที่มีการหักงอเชิงกลตลอดเวลา ดังนั้นการเติมสารป้องกันการเสื่อมสภาพในยางจึงเป็นสิ่งจำเป็นที่ช่วยป้องกันหรือชะลอการเสื่อมสภาพของยาง และช่วยเพิ่มอายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์ โดยสารป้องกันยางเสื่อมสภาพที่ใช้ในงานวิจัย ได้แก่ สารเพิ่มเสถียรภาพต่อรังสียูวี (UV Stabilizer) สารแอนติออกซิแดนท์ (Anti-oxidant) และสารป้องกันปฏิกิริยากับโอโซน (Anti-Ozonant)

2.3 กระบวนการบดผสมยาง [5]

การบดผสมยางเป็นสิ่งที่สำคัญที่สุดในกระบวนการผลิตยาง โดยร่วมด้วยการนำชิ้นยางเข้าไปยังระหว่างลูกกลิ้งที่กำลังหมุน โดยปรับความกว้างช่องเพื่อให้บดยาง เมื่อยางผ่านช่องลูกกลิ้ง 3 ถึง 4 ครั้ง ชิ้นยางเล็กๆเริ่มเกาะติดเป็นแผ่นเดียวกัน และสามารถพันรอบลูกกลิ้งได้ เพื่อให้เกิดความสม่ำเสมอในเนื้อยางต้องให้ยางผ่านลูกกลิ้งหลายๆ รอบ ซึ่งทำโดยการตัดยาง (Mill knife) ตัดยางที่พันรอบลูกกลิ้งลูกหน้า มืออีกข้างม้วนยางที่ถูกตัดเข้ามา โดยให้ม้วนยางทาบอยู่บนผิวลูกกลิ้งจนกองยางที่ค้างอยู่บนช่องระหว่างลูกกลิ้งหมดไป จึงใส่ม้วนยางที่ตัดไว้เข้าไปในช่องระหว่างลูกกลิ้งใหม่ ในขณะบดผสมยางสลับกับการใส่สารเคมี เพื่อให้สารเคมีกระจายตัวในเนื้อยาง การบดยางให้อ่อนตัวก่อนนี้ เรียกว่า แมสทิเคชัน (Mastication) ซึ่งเป็นกระบวนการทำให้โมเลกุลของยางที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงขาดออก น้ำหนักโมเลกุลจึงลดลง เครื่องมือที่ใช้ผสมยางกับสารเคมีต่างๆ ใช้เป็นเครื่องบดผสมระบบเปิดแบบ 2 ลูกกลิ้ง (Two roll mill) เครื่องบดผสม

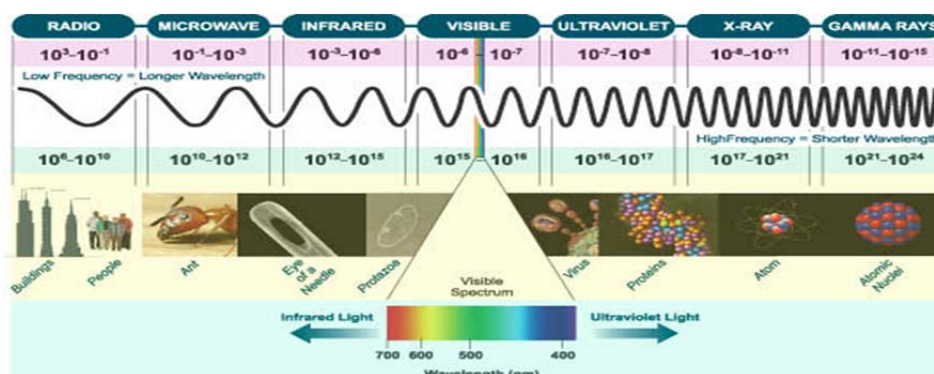
ประกอบด้วยลูกกลิ้ง 2 ลูก วางในแนวนอนให้แกนลูกกลิ้งขนานกัน ดังรูปที่ 2.7 ช่องว่างระหว่างลูกกลิ้ง (Nip หรือ gap) สามารถปรับระยะได้ ลูกกลิ้งทั้ง 2 หมุนในทิศทางตรงกันข้าม ขนาดและความเร็วของลูกกลิ้งมีความสำคัญในการควบคุมให้มีการกระจายตัวที่ดี



รูปที่ 2.7 เครื่องบดผสมระบบเปิดแบบ 2 ลูกกลิ้ง (Two roll mill)

2.4 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับรังสี [7]

รังสี (Radiation) คือ พลังงานที่แผ่ออกมาจากต้นกำเนิดรังสีที่ไม่เสถียรผ่านอากาศหรือสสาร แบ่งเป็น 2 ชนิด คือ พลังงานที่แผ่ออกมาจากต้นกำเนิดรังสีในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งพลังงานรูปแบบนี้ไม่มีทั้งมวลและประจุ เช่น คลื่นวิทยุ ไมโครเวฟ รังสีอินฟราเรด ความร้อน แสงสว่าง รังสีอัลตราไวโอเลต รังสีแกมมา รังสีเอกซ์ เป็นต้น อีกชนิดหนึ่งคือพลังงานที่แผ่ออกมาเป็นกระแสของอนุภาคที่เคลื่อนที่เร็ว (Fast radiation) ซึ่งพลังงานรูปแบบนี้มีทั้งมวลและประจุ เช่น รังสีแอลฟา รังสีบีตา รังสีคอสมิก เป็นต้น หรือมีเฉพาะมวลแต่ไม่มีประจุ เช่น อนุภาคนิวตรอน ดังแสดงรูปที่ 2.8 แสดงความยาวคลื่นและความถี่ของรังสีที่เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแต่ละชนิด



รูปที่ 2.8 สเปกตรัมของรังสี [8]

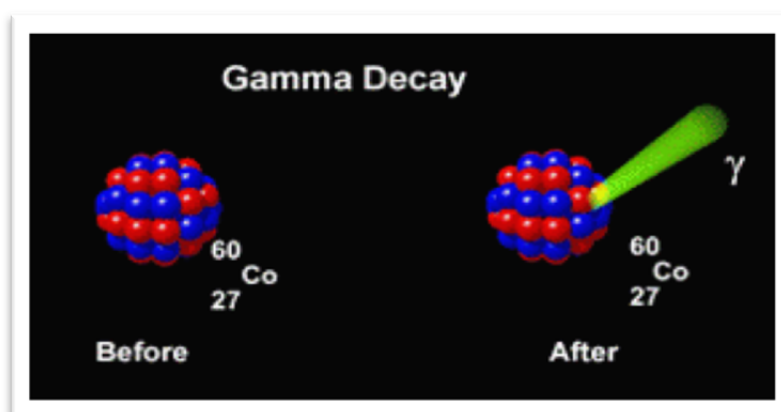
2.4.1 แหล่งกำเนิดรังสี

แหล่งกำเนิดรังสีมีอยู่มากหลายแหล่ง ซึ่งสามารถแบ่งเป็น 2 ประเภทหลักๆ คือ

1. รังสีที่มีอยู่ทั่วไป (Background radiation) ได้แก่ รังสีจากธรรมชาติ เช่น รังสีจากสินแร่ อากาศหายใจ น้ำ อาหารที่บริโภคและในห้วงอวกาศมีรังสีที่แผ่ออกมาจากดวงอาทิตย์และรังสีคอสมิกที่แผ่กระจายมาถึงโลก
2. รังสีที่มนุษย์ผลิตขึ้น (Man- made radiation) เช่น เกิดจากการเดินเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู ระเบิดนิวเคลียร์ เครื่องเร่งอนุภาค เครื่องเอ็กซเรย์ การผลิตสารรังสีจากปฏิกิริยานิวเคลียร์ เป็นต้น

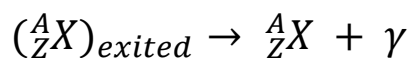
2.4.2 รังสีแกมมา [9]

รังสีแกมมา (Gamma Rays, γ) เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดคลื่นสั้นที่แผ่ออกมาจากนิวเคลียส มีพลังงานสูง ไม่มีมวลและไม่มีประจุ มีความยาวคลื่นประมาณ 0.1 nm ถึงน้อยกว่า 10^{-5} nm เกิดจากการสลายตัวของนิวเคลียสที่ไม่เสถียรหรือเกิดจากปฏิกิริยานิวเคลียร์ มักเกิดร่วมกับอนุภาคแอลฟาและอนุภาคบีตาดังตัวอย่างเช่น นิวเคลียสของโคบอลต์-60 ที่อยู่ในสถานะกระตุ้น จะมีการปลดปล่อยพลังงานส่วนเกินออกมาในรูปแบบของรังสีแกมมา ซึ่งหลังจากปล่อยรังสีแกมมาออกมาแล้วนิวเคลียสของโคบอลต์-60 จะลดระดับพลังงานกลับมาอยู่ในสถานะพื้นซึ่งมีความเสถียร แสดงดังรูปที่ 2.9 โดยที่รังสีแกมมามีพลังงานสูงในการทะลุทะลวง ดังนั้น การป้องกันอันตรายจากรังสี ต้องเลือกใช้วัสดุที่มีความหนาแน่นสูง เช่น แท่งตะกั่วหรือคอนกรีตหนา เป็นวัตถุกำบังรังสี

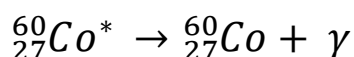


รูปที่ 2.9 รังสีแกมมาจากโคบอลต์ 60 [10]

สมการการสลายตัวของสารกัมมันตรังสีที่ให้งรังสีแกมมา สามารถแสดงได้ดังนี้

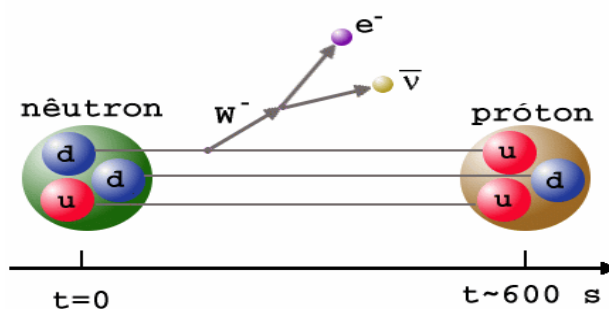


ซึ่งการสลายตัวของธาตุโคบอลต์ 60 สามารถแสดงได้ดังนี้



2.4.3 อนุภาคนิวตรอน [7]

อนุภาคนิวตรอน (Neutron, n) เป็นอนุภาคที่มีมวลมากกว่าโปรตอนเล็กน้อย ไม่มีประจุไฟฟ้าจึงไม่สามารถทำให้ตัวกลางเกิดการแตกตัวเป็นไอออนได้โดยตรง มีอำนาจในการทะลุทะลวงสูงกว่าแกมมา นิวตรอนไม่อาจอยู่อย่างอิสระจะสลายตัวไปเป็นอิเล็กตรอน โปรตอน และนิวทริโน แสดงดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 การสลายของนิวตรอนอิสระ [11]

2.4.4 ปัจจัยหลักที่มีผลต่อการป้องกันรังสี

ปัจจัยหลักที่มีผลต่อการป้องกันรังสี คือ ความหนาแน่นของตัววัตถุและค่าภาคตัดขวาง (Cross section) ของวัตถุกับรังสีที่แพร่ผ่าน โดยปัจจัยที่มีผลต่อการป้องกันรังสีมีหลักการ ดังนี้

1. ความหนาแน่นของวัตถุ โดยที่วัตถุที่มีความหนาแน่นมาก เช่น ตะกั่ว (Lead) หรือเหล็กกล้า (Steel) มีความสามารถป้องกันรังสีก่อกำไอออนที่ดีกว่าวัตถุที่มีความหนาแน่นน้อย เช่น คอนกรีตหรือหินแกรนิต ทั้งนี้ เนื่องจากการที่วัตถุมีความหนาแน่นมาก มีจำนวนอะตอมต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรที่สูง จึงสามารถทำปฏิกิริยาก่อกำไอออนกับรังสีได้ดี ทำให้พลังงานของรังสีมีการถ่ายโอนพลังงานให้กับวัตถุชนิดนั้นเป็นจำนวนมาก ในระยะทางที่สั้น

2. วัสดุที่มีค่าภาคตัดขวางกับรังสีก่อก่อไอออนที่สูง สามารถทำปฏิกิริยาก่อก่อไอออนได้ดีกว่าวัสดุที่มีค่าภาคตัดขวางต่ำในปริมาณที่เท่ากัน ซึ่งหากรังสีแพร่ผ่านวัสดุที่มีค่าภาคตัดขวางที่สูงแล้ว รังสีจะมีการสูญเสียพลังงานจากการถ่ายโอนพลังงานให้กับวัสดุที่มากกว่า

2.1 ภาคตัดขวาง (Cross section) หรือพื้นที่ภาคตัดขวางที่แท้จริง (Effective cross-sectional area) ของนิวเคลียส แสดงค่าความน่าจะเป็นที่รังสีจะเข้าใกล้หรือชนกับนิวเคลียสของวัสดุแล้วเกิดปฏิกิริยา โดยภาคตัดขวางแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ ภาคตัดขวางจุลภาค และภาคตัดขวางมหภาค [12]

2.1.1 ภาคตัดขวางจุลภาค (Microscopic cross section) คือค่าความน่าจะเป็นที่นิวเคลียสจะเกิดปฏิกิริยากับรังสีที่ผ่านเข้ามาใกล้หรือชนกับนิวเคลียส โดยค่าภาคตัดขวางจุลภาคเปรียบเสมือนพื้นที่ทั้งหมดที่นิวเคลียสสามารถทำปฏิกิริยากับรังสีได้ ดังนั้นหน่วยของภาคตัดขวางจึงเป็นหน่วยของพื้นที่ (ตารางเมตร) แสดงความสัมพันธ์ ดังสมการที่ 1

$$R = \sigma I_0 N_A \quad \dots\dots\dots (1)$$

เมื่อ σ คือ ภาคตัดขวาง (m^2)

R คือ จำนวนปฏิกิริยานิวเคลียร์ที่เกิดในวัสดุ ($1/m^2s$)

I_0 คือ ความเข้มของลำนิวตรอนที่เข้าชนเป้า ($neutron/m^2s$)

N_A คือ จำนวนอะตอม/พื้นที่ ($nucleus/m^2$)

ในกรณีที่วัสดุมีค่าภาคตัดขวางมาก หมายถึง โอกาสที่นิวเคลียสในวัสดุเกิดปฏิกิริยากับรังสีมาก

และถ้าวัสดุมีค่าภาคตัดขวางน้อย หมายถึง โอกาสที่นิวเคลียสในวัสดุเกิดปฏิกิริยากับรังสีน้อย

2.2.2 ภาคตัดขวางมหภาค (Macroscopic cross section) แสดงถึงค่าความน่าจะเป็นที่รังสีเข้าไปในชิ้นงาน แล้วเกิดปฏิกิริยากับวัตถุหรือชิ้นงาน โดยมีหน่วยต่อเมตร แสดงความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2

$$\Sigma_t = N\sigma_t = N\sigma \quad \dots\dots\dots (2)$$

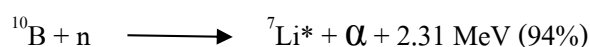
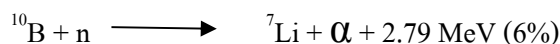
เมื่อ Σ_t คือ ภาคตัดขวางมหภาคทั้งหมด หน่วยคือ $(นิวเคลียส/m^3) / (m^2/นิวเคลียส)$ เท่ากับ m^{-1}

N คือ ความหนาแน่นของอะตอม หน่วยคือ $(นิวเคลียส/m^3)$

σ คือ ภาคตัดขวางจุลภาคทั้งหมด หน่วยคือ $(m^2/นิวเคลียส)$

การแพร่ของอนุภาคนิวตรอนมีความสำคัญในการเกิดปฏิกิริยาของรังสี เนื่องจากอนุภาคนิวตรอนถูกปลดปล่อยมากในบริเวณที่มีการใช้ปฏิกิริยานิวเคลียร์ เช่น ในบริเวณเตาปฏิกรณ์ หรือโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ โดยอนุภาคนิวตรอนเป็นอนุภาคที่ไม่มีประจุจึงทำให้โอกาสในการเกิดปฏิกิริยาที่ต่ำ ส่งผลให้การป้องกัน

อนุภาคนิวตรอนเป็นไปได้อย่างยากกว่าการป้องกันรังสีโดยทั่วไป ดังนั้นการป้องกันอนุภาคนิวตรอน จึงมีการใช้ปฏิกิริยาชนิดอื่นในการยับยั้งอนุภาคนิวตรอน ซึ่งในปัจจุบันปฏิกิริยานิวเคลียร์เป็นกระบวนการที่นำมาใช้งานอย่างแพร่หลาย โดยมีการนำสารที่มีค่าภาคตัดขวางกับนิวตรอนสูง เช่น สารโบรอน-10 หรือลิเทียม-6 เป็นส่วนประกอบหลักของวัตถุที่ใช้ป้องกันรังสี ซึ่งสาร โบรอนหรือลิเทียมนี้ สามารถเปลี่ยนนิวตรอนให้เป็นอนุภาคที่มีประจุ เช่น อนุภาคแอลฟา หรืออนุภาคโปรตอน ตัวอย่างของปฏิกิริยานิวเคลียร์ระหว่างนิวตรอนกับโบรอน-10 แสดงดังนี้

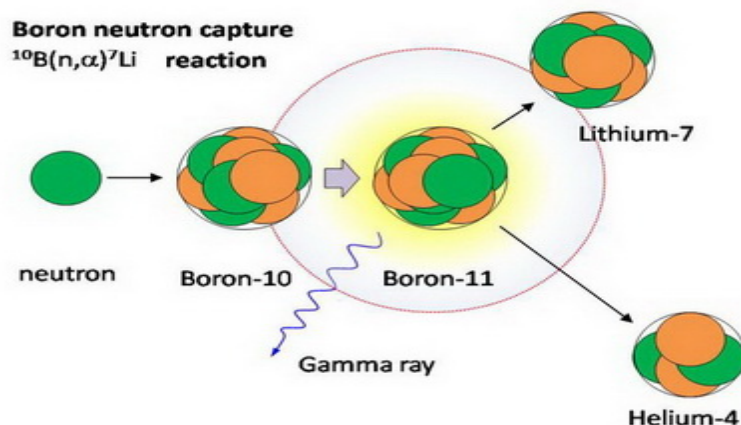


โดยที่ $^7\text{Li}^*$ คือลิเทียมที่อยู่ในระดับพลังงานกระตุ้น ทั้งที่ $^7\text{Li}^*$ สามารถปล่อยรังสีแกมมาพลังงาน 0.48 MeV ออกมา ซึ่งปฏิกิริยานี้ทำให้จำนวนของอนุภาคนิวตรอนมีจำนวนลดลง ซึ่งหากวัตถุป้องกันอนุภาคนิวตรอนที่มีการผสมโบรอนเพื่อป้องกันรังสีและมีความหนาที่เหมาะสม จะสามารถป้องกันอนุภาคนิวตรอนได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2.4.5 วัสดุที่ใช้ป้องกันรังสี

วัสดุที่ใช้ป้องกัน (Shielding materials) ของรังสีแกมมา ในปัจจุบันมีการใช้ผงตะกั่วผสมกับพลาสติกชนิดพอลิเอทิลีน [13] แบบขึ้นรูปเป็นแผ่น และแบบแผ่นตะกั่วบางแล้วเคลือบด้วยพอลิเอทิลีน ส่วนการป้องกันรังสีนิวตรอนนั้น มีการใช้พลาสติกชนิดพอลิเอทิลีนผสมกับผงสาร โบรอนบริสุทธิ์ หรือผงกรดบอริก โดยสารทั้งสองชนิดสามารถเก็บประจุการปล่อยรังสีแกมมา หรืออนุภาคนิวตรอนขนาดเล็กได้ ซึ่งการใช้งานในเตาปฏิกรณ์หรือในโรงพยาบาลสร้างอุปกรณ์ป้องกันรังสีในรูปแบบกล่องที่มีความหนาต่างกันโดยการกำหนดความหนาของกล่องขึ้นอยู่กับพลังงานและปริมาณของรังสี แต่ทั้งนี้การใช้งานวัสดุป้องกันรังสีเป็นเวลานาน อาจทำให้วัสดุเกิดการเสื่อมสภาพของวัสดุ โดยที่กลไกการเสื่อมสภาพเกิดขึ้นได้ 2 กรณี คือ

1. การเสื่อมสภาพทางกายภาพ โดยสาเหตุหลักเกิดจากความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างที่นิวตรอนทำปฏิกิริยานิวเคลียร์กับโบรอน โดยรังสีทำให้ชิ้นงานพอลิเอทิลีนมีการเปราะและแตกหักได้ง่าย ซึ่งรอยแตกที่ผิวชิ้นทำให้อนุภาคนิวตรอนหรือรังสีแกมมา สามารถทะลุผ่านวัสดุชิ้นงานได้
2. การเสื่อมสภาพทางสมบัติป้องกันรังสี เมื่อแผ่นชิ้นงานพอลิเอทิลีนที่ผสมสาร โบรอน ได้รับอนุภาคนิวตรอน ทำให้เกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์ ที่เปลี่ยนโครงสร้างของโบรอนให้กลายเป็นลิเทียมแสดงดังรูปที่ 2.11 ซึ่งหากมีการใช้งานเป็นเวลานานและต่อเนื่อง ปริมาณของสาร โบรอนในแผ่นพอลิเอทิลีนลดลง ส่งผลให้ความสามารถในการป้องกันนิวตรอนลดลงด้วย



รูปที่ 2.11 กลไกของโบรอนจับนิวตรอน[15]

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปัจจุบันมีการวิจัยเกี่ยวกับวัสดุที่ใช้ในการป้องกันรังสีจากวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ ที่วิจัยและใช้ประโยชน์ในเชิงอุตสาหกรรมกันอย่างแพร่หลาย จากงานวิจัยเกี่ยวกับยางธรรมชาติได้เพิ่มจำนวนมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งแสดงถึงความสำคัญประสิทธิภาพ และความหลากหลายในการนำไปใช้ประโยชน์ของยางธรรมชาติได้เป็นอย่างดี เช่นการนำยางธรรมชาติไปผสมกับวัสดุเหลือใช้เป็นสารตัวเติม เช่น พงจีเลื่อยไม้ เป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติที่ปรับปรุงสมบัติด้านความแข็งแรง จากงานวิจัยของณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมบัติ และคณะ (2552) [1] และงานวิจัยของ Hamaviriyaporn Wattana และคณะ (2012) [2] ศึกษาผลของอิทธิพลของสารตัวเติมพงจีเลื่อยไม้ที่เติมในยางธรรมชาติ และสารเคลือบผิวแผ่นยางด้วยพอลิยูรีเทน พบว่าเมื่อเติมพงจีเลื่อยไม้ในวัสดุเชิงประกอบยางส่งผลทำให้สมบัติเชิงกลด้านความแข็งแรง โมดูลัสแรงดึงเพิ่มขึ้น แต่สมบัติด้านความต้านทานแรงดึง และการยืดตัวลดลง สารเคลือบผิวยึดเกาะผิวยางติดได้ดี

ในด้านของการนำวัสดุยางธรรมชาติไปใช้ประโยชน์ในการป้องกันรังสีโดยงานวิจัยของ Gwaily และ Madani (2002) [15-17] ศึกษาปริมาณผงตะกั่วที่เติมในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ เพื่อป้องกันรังสีแกมมา โดยมีการปรับเปลี่ยนปริมาณผงตะกั่วที่ 100, 300, 500, 1500 และ 2000 phr พบว่า การเติมผงตะกั่วที่ปริมาณ 2000 phr ในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ ที่ความหนา 1 mm ทำให้ความสามารถในการป้องกันรังสีแกมมา ^{60}Co และ ^{137}Cs เทียบเท่ากับการใช้แผ่นตะกั่วบริสุทธิ์ ที่มีความหนา 0.336 mm และ 0.383 mm ตามลำดับ ทั้งนี้พบว่าสมบัติเชิงกล เช่น การต้านทานแรงดึง และการยืดตัวของชิ้นงานลดลงเมื่อปริมาณผงตะกั่วเพิ่มขึ้น และมีการวิจัยเพิ่มเติมโดยมีการปรับเปลี่ยนปริมาณผงตะกั่วผสมร่วมกับโบรอนคาร์ไบด์ (B_4C) ปริมาณคงที่ 20 phr ผงเขม่าดำปริมาณคงที่ 40 phr และไขพาราฟิน (Paraffin wax) ในปริมาณคงที่ 60 phr ในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ พบว่าประสิทธิภาพในการป้องกันนิวตรอนเพิ่มขึ้น 11.5% เมื่อเทียบกับ

การใช้โบรอนคาร์ไบด์บริสุทธิ์ และสามารถป้องกันรังสีแกมมาได้เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณผงตะกั่วเพิ่มขึ้น และศึกษาการบวมตัวของยางในสารละลาย พบว่ายางธรรมชาติที่มีสารตัวเติมดังกล่าวข้างต้น มีค่าการบวมตัวลดลงตามปริมาณผงตะกั่วที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้มีการศึกษาการป้องกันอนุภาคนิวตรอนจากวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ โดยการนำยางธรรมชาติที่มีสารตัวเติมผงเขม่าดำ 40 phr ผสมกับกรดบอริก (H_3BO_3) ที่มีโบรอนเป็นองค์ประกอบ มีการปรับเปลี่ยนปริมาณกรดบอริกที่ 0-30 phr พบว่า วัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่มีสารตัวเติมผงเขม่าดำผสมกับกรดบอริกที่ปริมาณ 30 phr สามารถลดปริมาณอนุภาคนิวตรอนได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้ งานวิจัยของศิริกุล กาญจนปฐมพร (2555) [18] ศึกษาปริมาณที่เหมาะสมของโบรอนออกไซด์เพื่อผลิตเป็นวัสดุกำบังอนุภาคนิวตรอน โดยปรับเปลี่ยนปริมาณโบรอนออกไซด์ที่ 1, 3 และ 5 phr ในน้ำยางผสมระหว่างน้ำยางธรรมชาติและน้ำยางสไตรีนบิวทาไดอินในอัตราส่วนต่างๆ ร่วมกับสารเสริมแรง คือ ผงเขม่าดำ (N330) ปริมาณ 0.5 และ 1 phr พบว่าชิ้นงานที่มีความสามารถในการลดอนุภาคนิวตรอนมากที่สุดคือ ชิ้นงานที่มีส่วนผสมของโบรอนออกไซด์ 3 phr และผงเขม่าดำ 0.5 phr โดยความหนาของชิ้นงานที่เหมาะสมในการกำบังอนุภาคนิวตรอนคือ 1.2 เซนติเมตรสามารถลดอนุภาคนิวตรอนได้ 81% สำหรับการวิจัยการนำยางธรรมชาติประยุกต์ใช้ในการกำบังรังสี และด้านความหนาที่มีผลต่อการป้องกันรังสี เช่น โครงการวิจัยศึกษาการผลิตแผ่นกำบังรังสีแกมมา และอิทธิพลของความหนาที่มีต่อการป้องกันรังสีแกมมาของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมเลดออกไซด์ [19] โดยมีการปรับเปลี่ยนความหนาตั้งแต่ 2.5 ถึง 10 เซนติเมตร พบว่า ประสิทธิภาพการป้องกันรังสีแกมมาเพิ่มขึ้น เมื่อความหนาของชิ้นงานเพิ่มขึ้น และงานวิจัยของกัลยาณี คุปตานนท์ และคณะ (2551) [20] ศึกษาอิทธิพลของความหนาที่มีต่อการป้องกันรังสีแกมมาของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงเฟอร์ไรต์ โดยใช้แผ่นยางที่มีความหนา 1-5 มิลลิเมตรเปรียบเทียบกับแผ่นเหล็ก และแผ่นอะลูมิเนียมที่มีความหนาอยู่ในช่วงเดียวกัน พบว่ายางผสมผงเฟอร์ไรต์สูงสุด 100 phr ความหนา 3-5 มิลลิเมตรมีประสิทธิภาพการลดทอนรังสีดีกว่ายางธรรมชาติและแผ่นอะลูมิเนียมตามความหนาที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากผงเฟอร์ไรต์และผงตะกั่ว จัดเป็นธาตุโลหะหนัก มีมวลอะตอมที่สูง ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนสูง และมีภาคตัดขวางสูง จึงทำให้ช่วยเสริมประสิทธิภาพการป้องกันรังสีของยางธรรมชาติให้สูงขึ้น นอกจากนี้ Onjun และคณะ [21] ศึกษาการนำยางธรรมชาติผสมสารบอแรกซ์ กรดบอริก และผงตะกั่ว พบว่า ความสามารถในการป้องกันรังสีแกมมาและนิวตรอนเพิ่มขึ้นเมื่อความหนาและปริมาณส่วนผสมของสารตัวเติมเพิ่มขึ้น

นอกจากนี้มีการศึกษาสารตัวเติมกลุ่มโบรอนที่มีต่อระบบวัลคาไนซ์ โดย Feniak [22] จัดสิทธิบัตรการใช้สารตัวเติมประกอบโบรอนชนิดต่างๆ เช่น Boron oxide หรือกลุ่ม Boric acid เดิมใน Halogenated butyl rubber โดยเปรียบเทียบกับกรณีเติม Magnesium oxide โดยที่ Halogenated butyl rubber มีค่าการสึกตัวอย่างรวดเร็วก่อนกำหนด ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้กระบวนการผสมยางกับสารเคมี ด้วยกระบวนการผสมด้วยเครื่องผสมยางแบบปกติ พบว่า การเติมกลุ่มสารประกอบโบรอนในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติส่งผลทำให้เวลาที่ยางเกิดการคงรูป (Scorch time) เพิ่มขึ้นมากกว่าการเติมด้วยสารตัวเติมกลุ่ม Magnesium oxide ซึ่งเป็น

การช่วยเพิ่มเวลาการคงรูปภายในระหว่างกระบวนการผลิตได้ดีขึ้น ส่วนสิทธิบัตรของ Larson และคณะ [23] มีการใช้เทคนิคครึ่งสีเกมมาในการวัลคาไนซ์ยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ โดยทำให้ยางเกิดการเชื่อมโยงพันธะ (Crosslinking) "ได้ดีกว่าวิธีวัลคาไนซ์แบบปกติ

จากการวิจัยวัสดุยางธรรมชาติใช้ในการป้องกันรังสีมีการพัฒนาไปอย่างต่อเนื่อง ทั้งนี้เนื่องจากได้เล็งเห็นถึงความสำคัญของการป้องกันรังสีที่ใช้ทางอุตสาหกรรมและการแพทย์อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งในอนาคตอาจมีความเป็นไปได้สูงที่ประเทศไทยและมีโครงการสร้างโรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์ขึ้นในอนาคต ซึ่งจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องมีการศึกษาค้นคว้าวัสดุที่สามารถยับยั้งป้องกันอนุภาคนิวตรอนได้อย่างมีประสิทธิภาพ เพื่อนำไปใช้เป็นวัสดุก่อสร้างที่มีสมบัติด้านความแข็งแรง เช่น หลังคา ผนัง แผงกั้นตัวอาคารในโรงไฟฟ้านิวเคลียร์และบริเวณใกล้เคียงหรือห่อหุ้มตัวกำเนิดรังสีต่างๆ ดังนั้น งานวิจัยนี้มีเป้าหมายในการพัฒนาวัสดุสำหรับการใช้งานยับยั้งหรือการป้องกันรังสี โดยต่อยอดองค์ความรู้จากงานวิจัยโครงการ “การผลิตหลังคาจากวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงซีเลียม” ที่มีสมบัติเชิงกลและความเป็นฉนวนกันรังสีความร้อนที่ดี และยังพบงานวิจัยค่อนข้างน้อยที่ศึกษาเกี่ยวกับแผ่นกำบังรังสีจากยางธรรมชาติ และแผ่นกำบังรังสีจากยางธรรมชาติผสมผงซีเลียม ในงานวิจัยนี้จึงมีความสนใจพัฒนาต่อยอดงานวิจัยโดยนำวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงซีเลียม ให้สามารถป้องกันหรือยับยั้งรังสีชนิดต่างๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อทางด้านรังสีในภาคอุตสาหกรรม ทางการแพทย์ และภาคการเกษตร และเป็นการเพิ่มมูลค่าของวัตถุดิบยางธรรมชาติที่ผลิตได้ในประเทศไทยให้มีความมั่นคงและยั่งยืน

บทที่ 3 วัตถุดิบและขั้นตอนการดำเนินงาน

3.1 วัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

วัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้ในโครงการงานวิจัย ได้แก่ ยางธรรมชาติ สารตัวเติมเสริมแรง และสารเคมีต่าง ๆ โดยสารเคมีและสารตัวเติมแต่ละชนิด โดยมีหน้าที่แตกต่างกัน ดังนี้

- **ยางธรรมชาติ (เกรด STR 20)**

ยางธรรมชาติชนิดยางแท่ง เกรด STR 20 ใช้เป็นวัสดุหลัก (Matrix phase) ในงานวิจัยนี้ เนื่องจากยางธรรมชาติมีการใช้กันอย่างแพร่หลายในโรงงานอุตสาหกรรม ราคาถูก และมีสมบัติเด่นในด้านความทนทาน ต่อแรงดึง ความยืดหยุ่น และความทนทานต่อการฉีกขาดสูง จากบริษัท PI Industry Co., Ltd.

- **ซิงค์ออกไซด์ (ZnO)**

สารกระตุ้นปฏิกิริยาซิงค์ออกไซด์ (Zinc Oxide, ZnO) เป็นสารกระตุ้นปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ ในกระบวนการผลิตยาง จากบริษัท Thai-Lysaght Co., Ltd.

- **กรดสเตียริก (Stearic acid)**

กรดสเตียริก (Stearic acid) เป็นสารกระตุ้นปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ในกระบวนการผลิตยาง จากบริษัท Imperial Industrial Chemicals Co., Ltd.

- **เมอร์แคปโตเบนโซไทอาโซล (Mercaptobenzothiazole, MBT)**

2 – mercaptobenzothiazole (MBT) สารตัวเร่งกลุ่มไทอะโซล เพื่อเร่งให้ตัวกระตุ้นเกิดปฏิกิริยาอย่างมีประสิทธิภาพ จากบริษัท CMC advance Co., Ltd.

- **ไดฟีนิลกวานิดีน (diphenylguanidine; DPG)**

Diphenyl guanidine (DPG) สารตัวเร่งปฏิกิริยาทุติยภูมิ นิยมใช้ร่วมกับสารตัวเร่งปฏิกิริยาในกลุ่มไทอะโซล จากบริษัท Siam Chemicals Co., Ltd.

- **เขม่าดำชนิดมาสเตอร์แบทช์ (Carbon black master batch)**

เขม่าดำเป็นสารเสริมแรงที่ใช้มากทางการค้า ทำหน้าที่ช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกล ซึ่งเขม่าดำที่ใช้เป็นเกรด N330 ชนิดมาสเตอร์แบทช์ที่มีส่วนผสมระหว่างยางธรรมชาติ 62% และผงเขม่าดำ 38% จากบริษัท PI Industry Co., Ltd.

- **ผงขี้เลื่อยไม้ (Wood sawdust)**

ผงขี้เลื่อยไม้เป็นสารตัวเติม ทำหน้าที่ช่วยเพิ่มสมบัติด้านมอดุลัสและความแข็ง ช่วยลดต้นทุนในการผลิต โดยมีขนาดอนุภาคประมาณ 200-300 ไมครอน ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์จาก บริษัท V.P. Wood Co., Ltd.

- **กำมะถัน (Sulfur)**

กำมะถัน (Sulfur) สารคงรูปยางในกระบวนการผลิตยาง โดยเชื่อมระหว่างสายโซ่โพลีเมอร์ (cross-link) ในยางที่มีพันธะคู่ จากบริษัท Zeon advanced Polymix Co., Ltd.

- **สารคู่ควบไซเลน (Silane Coupling)**

สารคู่ควบไซเลนช่วยเพิ่มอันตรกิริยาระหว่างยางกับผงขี้เลื่อยไม้ ซึ่งสารคู่ควบไซเลนที่ใช้เป็นชนิด KBM 603A จากบริษัท KISCO (T) Ltd.

- **สารเพิ่มเสถียรภาพต่อรังสียูวี (UV Stabilizer)**

สารเพิ่มเสถียรภาพต่อรังสียูวี เพื่อป้องกันการเสื่อมสภาพของยางจากแสงและความร้อน เกรดที่ใช้เป็นเกรด TINUVIN 234 จากบริษัท Behn Meyer Chemical(T) Co.,Ltd (Thailand)

- **สารแอนติออกซิแดนท์ (Anti-oxidant)**

สารแอนติออกซิแดนท์ เป็นสารป้องกันการเกิดออกซิเดชัน ป้องกันการเสื่อมสภาพของยางจากการทำปฏิกิริยากับออกซิเจน ในสภาวะที่มีความร้อน และแรงเฉือนในกระบวนการผลิต เกรดที่ใช้เป็นเกรด TY 1076 จากบริษัท Global Connections PLC.

- **สารป้องกันปฏิกิริยากับโอโซน (Anti-Ozonant)**

สารป้องกันปฏิกิริยากับโอโซน เพื่อป้องกันหรือลดการเกิดรอยแตกของยางจากการเกิดปฏิกิริยาระหว่างโอโซนกับยาง ที่ใช้เป็นเกรด REDEZON 515P จากบริษัท Behn Meyer Chemical(T) Co.,Ltd (Thailand)

- กรดบอริก (Boric Acid)

กรดบอริกเป็นสารตัวเติมป้องกันอนุมูลอิสระ ทำหน้าที่เพื่อดูดกลืนนิวตรอน กรดบอริกที่ใช้เป็นเกรด AR.(AJAX) ลักษณะเป็นผงสีขาว มีความบริสุทธิ์ 99.5% ค่าความถ่วงจำเพาะ 1.435 น้ำหนักโมเลกุล 61.83 g/mole จุดเดือด 300 °C และจุดหลอมเหลว 169 °C จากบริษัท Siam Beta Group Co.,Ltd.

- โบรอนออกไซด์ (Boron Oxide)

ผงโบรอนออกไซด์เป็นสารตัวเติม ทำหน้าที่ดูดกลืนนิวตรอน ผงโบรอนออกไซด์ที่ใช้มีลักษณะเป็นผงสีขาว และมีความบริสุทธิ์ 99% ค่าความถ่วงจำเพาะ 2.46 และจุดเดือด 1860 °C จากบริษัท Sigma-Aldrich Co., Ltd.

- ผงตะกั่ว (Lead Powder)

ผงตะกั่วเป็นสารตัวเติม ทำหน้าที่ป้องกันรังสีแกมมา โดยผงตะกั่วที่ใช้มีความบริสุทธิ์ 99.9% ค่าความถ่วงจำเพาะ 11.3 น้ำหนักโมเลกุล 207.2 g/mole จุดเดือด 1740 °C และจุดหลอมเหลว 327.4 °C จากบริษัท Pun Engineering Co., Ltd.

3.2 สูตรส่วนประกอบที่ใช้ในงานวิจัย

สูตรที่ใช้ในงานวิจัย มีส่วนประกอบต่างๆ แสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สูตรส่วนประกอบที่ใช้ในงานวิจัย

สารเคมี	ปริมาณ (phr*)	หน้าที่
Natural Rubber STR 20	100 (Part)	Matrix
Zinc Oxide; ZnO	5.0	Activator
Stearic acid	3.0	Activator
Mercaptobenzthaisoles, MBT	2.0	Accelerator
Diphenylguanidine, DPG	3.0	Accelerator

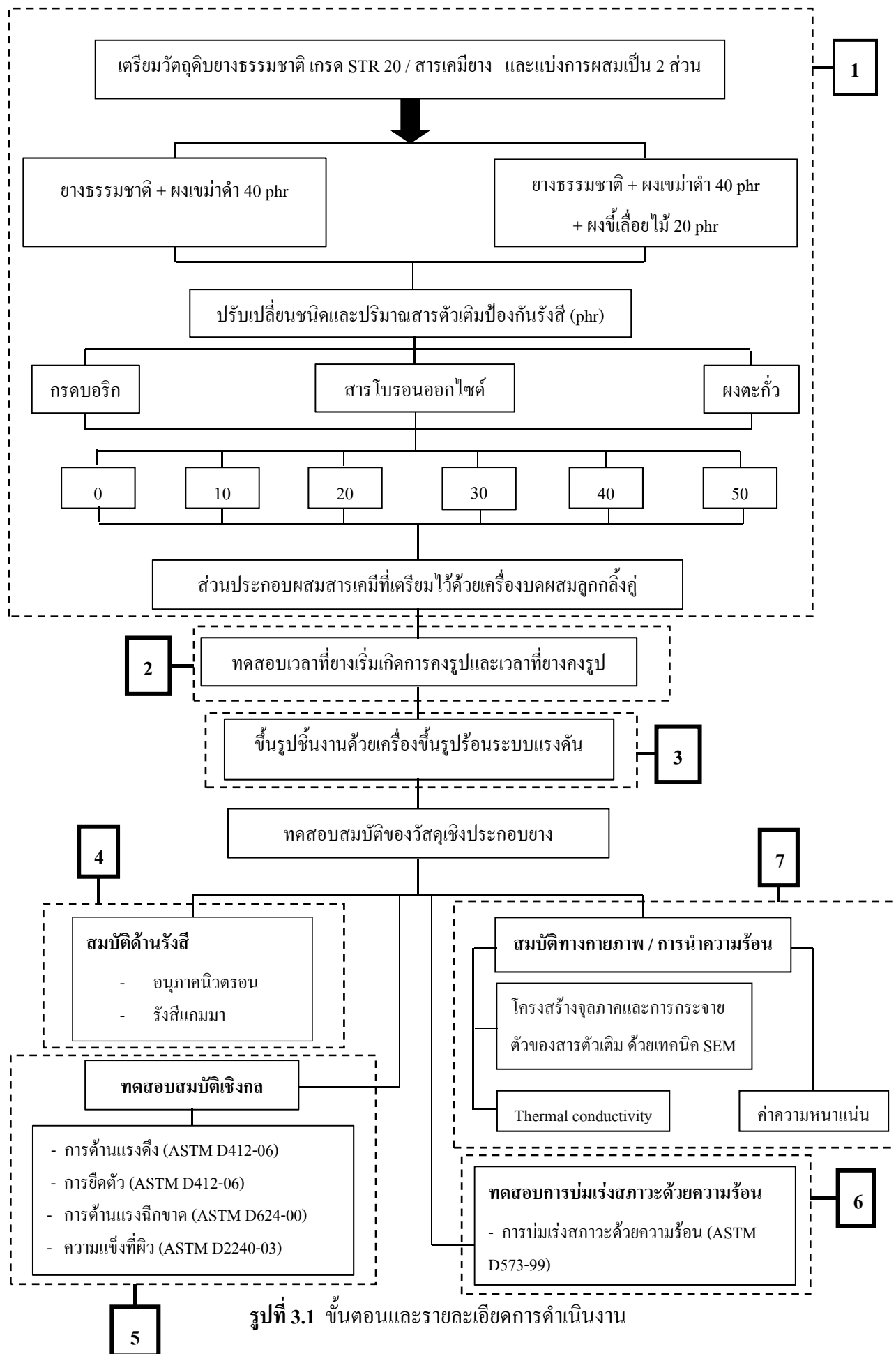
ตารางที่ 3.1 ส่วนประกอบของยางที่ใช้ในงานวิจัย (ต่อ)

สารเคมี	ปริมาณ (phr*)	หน้าที่
Sulphur powder 450 mesh	4.0	Cross-linker
Carbon Black Master batch (HAF N330)	40.0	Reinforcement
Wood sawdust	20.0	Filler
Silane Coupling (KBM 603A)	0.5% / Weight wood sawdust	Coupling agent
UV Stabilizer (TINUVIN 234)	0.1	UV absorber
Anti-oxidant (IRGANOX 1076)	0.5	Anti-oxidant
Anti - Ozonant	3.0	Anti-Ozonant
Radiation protection agent - Boric Acid - Boron Oxide - Lead Powder	Varying from 0-50	Radiation protection agent

*phr: part per hundred of rubber by weight

3.3 แผนการดำเนินงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้ศึกษา ชนิดและปริมาณการใช้สารตัวเติมป้องกันรังสี ได้แก่ กรดบอริก ผงโบรอนออกไซด์ และผงตะกั่ว เป็นสารตัวเติมที่ใช้ในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ เพื่อผลิตแผ่นกำบังรังสีให้มีความสามารถในการป้องกันอนุภาคนิวตรอนและรังสีแกมมาได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยทำการผสมยางธรรมชาติ และสารเคมียาง ปรับเปลี่ยนปริมาณสารตัวเติมทั้งสามชนิด ได้แก่ กรดบอริก ผงโบรอนออกไซด์ และผงตะกั่ว และดำเนินการจัดเตรียมวัสดุที่มีสมบัติและคุณลักษณะตามที่ต้องการ เพื่อใช้ในงานวิจัย และทดสอบสมบัติต่างๆ แสดงดังในรูปที่ 3.1



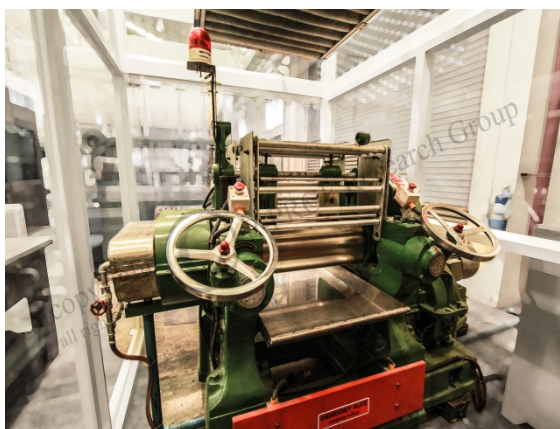
รูปที่ 3.1 ขั้นตอนและรายละเอียดการดำเนินงาน

รายละเอียดของแผนงาน

งานหมายเลข 1 เตรียมวัตถุดิบผสมระหว่างยางธรรมชาติ สารตัวเติม และสารเคมียาง

ในงานวิจัยนี้แบ่งการผสมออกเป็น 2 ส่วนดังนี้ ส่วนที่ 1 เตรียมวัตถุดิบผสมระหว่างยางธรรมชาติกับเขม่าดำชนิดมาสเตอร์แบทที่ปริมาณคงที่ 40 phr และปรับเปลี่ยนชนิดและปริมาณสารตัวเติมป้องกันรังสี ได้แก่ กรดบอริก ผงโบรอนออกไซด์ และผงตะกั่ว ที่ปริมาณ 0 - 50 phr ส่วนที่ 2 เตรียมวัตถุดิบผสมระหว่างยางธรรมชาติกับเขม่าดำชนิดมาสเตอร์แบทที่ปริมาณคงที่ 40 phr และผงซีลี้อยู่ในขนาดอนุภาค 75 ไมครอน ที่ปริมาณคงที่ 20 phr และปรับเปลี่ยนชนิดและปริมาณสารตัวเติมป้องกันรังสี ได้แก่ กรดบอริก ผงโบรอนออกไซด์ และผงตะกั่ว ที่ปริมาณ 0 - 50 phr ด้วยเครื่องบดผสมลูกกลิ้งคู่ (Two roll mill) จากบริษัท ยง ฟง แมชชีนเนอรี จำกัด ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ตามส่วนประกอบของยางที่แสดงในตารางที่ 3.1 โดยใช้เวลาในการผสมสารประกอบยางที่ 30 นาที โดยมีขั้นตอนการผสม ดังต่อไปนี้

- 1) นำยางธรรมชาติเกรด STR 20 บดผสม (Mastication) ในเครื่องบดผสมลูกกลิ้งคู่ (Two roll mill) เป็นเวลา 5 นาที
- 2) ผสมสารกระตุ้นปฏิกิริยาชนิดซิงค์ออกไซด์ (Zinc Oxide, ZnO) และสารกระตุ้นปฏิกิริยาชนิดกรดสเตียริก (Stearic acid) เวลา 5 นาที
- 3) ผสมสารตัวเติม ผงเขม่าดำหรือผงซีลี้อยู่ในหรือสารตัวเติมป้องกันรังสี และสารเพิ่มเสถียรภาพต่อรังสียูวี สารแอนติออกซิแดนท์ สารป้องกันปฏิกิริยากับโอโซน เวลา 10 นาที
- 4) ผสมสารเร่งการกระตุ้นปฏิกิริยาเมอร์แคปโทเบนโซไทอาโซล (Mercaptobenzo thiazole, MBT) และสารเร่งการกระตุ้นปฏิกิริยาไดฟีนิลกวานิดีน (Diphenylguanidine, DPG) เวลา 5 นาที
- 5) ผสมสารคงรูปยางชนิดกำมะถัน (Sulphur) เวลา 5 นาที



รูปที่ 3.2 เครื่องบดผสมลูกกลิ้งคู่ (Two roll mill)

หมายเลข 2 การทดสอบสมบัติการไหลและการคงรูปยาง

นำยางคอมปาวด์ที่ได้จากเครื่องบดผสมลูกกลิ้งคู่ไปทดสอบเวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูป (t_{90}) และเวลาในการคงรูปยางที่ 90 เปอร์เซ็นต์ (t_{90}) ของแต่ละสูตรด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์แบบจานแกว่ง (Oscillating Disk Rheometer; ODR) จาก บริษัท โกเท็ค เท็คดิง แมชชีน อินดัสเตรียล จำกัด รุ่น GT 70 - 70 S2, ประเทศไต้หวัน ตามมาตรฐาน ASTM D2084 - 01 แสดงดังรูปที่ 3.3 โดยในการทดสอบใช้ชิ้นงานยางคอมปาวด์อุณหภูมิในการทดสอบ 160 องศาเซลเซียส



รูปที่ 3.3 เครื่องรีโอมิเตอร์แบบจานแกว่ง (Oscillating Disk Rheometer; ODR)

หมายเลข 3 การเตรียมชิ้นงานแผ่นยางที่คงรูปด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปร้อนระบบแรงดัน

นำสารประกอบยางคอมปาวด์เตรียมขึ้นรูปขึ้นงานทดสอบด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปด้วยความร้อนระบบแรงดัน (Compression moulding machine) รุ่น LP-20M จาก บริษัท แลป เทค อินจิเนียริง จำกัด ประเทศไทย ดังรูปที่ 3.4 โดยให้ชิ้นงานมีความหนา 2 มิลลิเมตร อุณหภูมิการขึ้นรูป 160 องศาเซลเซียส แรงดันปิดแม่พิมพ์ 150 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และใช้เวลาในการคงรูปยางตามค่า t_{c90} ของแต่ละสูตรยางจากเครื่องรีโอมิเตอร์แบบจานแกว่ง (ODR)



รูปที่ 3.4 เครื่องอัดขึ้นรูปร้อนระบบแรงดัน (Compression moulding machine)

หมายเลข 4 การทดสอบทางด้านรังสี

นำชิ้นงานผ่านการขึ้นรูปของแต่ละสูตรวัดความต้านทานต่ออนุภาคนิวตรอน และรังสีแกมมา ดังรายละเอียดต่อไปนี้

- นำชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่เติมผงกรวดบอริก และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่เติมผงโบรอนออกไซด์ ในทุกปริมาณการเติม ทดสอบความต้านทานต่ออนุภาคนิวตรอน โดยในงานวิจัยนี้ใช้ระบบ Integral counting system ในการทดสอบ เริ่มจากการใส่ sources นิวตรอนเข้าไปในเครื่องทดสอบ ใช้หัววัดรังสีชนิดบรรจุก๊าซ He-3 (gas-filled detector) และใช้แผ่น HDPE เป็นตัวลดพลังงาน(shield block) จาก fast neutron เป็น thermal neutron เนื่องจาก HDPE มีไฮโดรเจนที่มาก และวางชิ้นงานทดสอบบนแผ่น HDPE ห่างจากหัววัดรังสี 5 เซนติเมตร โดยหัววัดรังสีต่อเข้ากับเครื่องขยายสัญญาณ (Preamplifier) เครื่องขยายเสียง (amplifier) และเครื่องตัดสินสัญญาณรบกวน (Discriminator) ทำการทดสอบจำนวน 5 ครั้งต่อชิ้นงาน เป็นเวลา 100 วินาทีต่อครั้ง ซึ่งค่าที่ได้จากเครื่องเป็นค่านับจำนวนนิวตรอน (Counter) แสดงดังรูปที่ 3.5 โดยขนาดชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบกว้าง 15 เซนติเมตร ยาว 15 เซนติเมตร และหนา 2 มิลลิเมตร และคำนวณหาค่าความต้านทานต่ออนุภาคนิวตรอน แสดงดังสมการที่ 3

สูตรการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น (Linear attenuation coefficient, μ)

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

$$\mu = \frac{-\ln(\frac{I}{I_0})}{x} \dots\dots\dots (3)$$

โดย I_0 คือ ความเข้มของรังสีก่อนผ่านชิ้นงาน
 I คือ ความเข้มของรังสีหลังผ่านชิ้นงาน
 X คือ ความหนาของชิ้นงาน



รูปที่ 3.5 เครื่องทดสอบความต้านทานต่ออนุภาคนิวตรอน

- นำชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่เติมผงตะกั่วทุกปริมาตรเดิมทดสอบความต้านทานต่อรังสีแกมมา โดยในการวัดใช้หัววัดรังสีแกมมาโดยตรง และต่อเข้ากับเครื่องนับจำนวนรังสี ซึ่งค่าที่ได้จากเครื่องเป็นค่านับจำนวนรังสีแกมมา (Counter) แสดงดังรูปที่ 3.6 โดยขนาดชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบกว้าง 18 เซนติเมตร ยาว 18 เซนติเมตร และหนา 10 มิลลิเมตร และคำนวณหาค่าความต้านทานต่อรังสีแกมมา แสดงดังสมการที่ 3



รูปที่ 3.6 เครื่องทดสอบความต้านทานต่อรังสีแกมมา

หมายเลข 5 การทดสอบสมบัติเชิงกล

เตรียมชิ้นงานทดสอบด้านความต้านทานแรงดึง ดังนี้ แก้วมอดุลัสแรงดึงที่การยืดตัว 100 เปอร์เซ็นต์ ความต้านทานต่อแรงดึง เปอร์เซ็นต์การยืดตัวที่จุดขาด เป็นรูปดัมเบลล์ ชนิด Die C และเตรียมชิ้นงานทดสอบความต้านทานต่อการฉีกขาด เป็นรูปปีกนก แสดงดังรูปที่ 3.7 โดยรายละเอียดการทดสอบสมบัติเชิงกลแสดงดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.7 แบบตัดชิ้นงานทดสอบชนิด Die C

- ทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงดึง และเปอร์เซ็นต์การยืดตัวที่จุดขาด ด้วยเครื่อง Universal Testing Machine จาก บริษัท ซิมาสู จำกัด รุ่น Autograph AG-I ประเทศญี่ปุ่น ตามมาตรฐานทดสอบ ASTM D412 - 06 และทดสอบความต้านทานต่อการฉีกขาด ตามมาตรฐานทดสอบ ASTM D624 - 00 ความเร็วในการดึงที่ 500 มิลลิเมตรต่อนาที ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 เครื่อง Universal Testing Machine

- ทดสอบค่าความแข็งที่ผิวของแผ่นยางที่คงรูป ด้วยเครื่องทดสอบความแข็ง (Durometer) จาก บริษัท เทคสล็อค จำกัด ตามมาตรฐาน ASTM D2240-03 (Shore A) แสดงดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 เครื่องทดสอบความแข็ง (Durometer)

หมายเลข 6 การทดสอบบ่มเร่งสภาวะขึ้นงานด้วยความร้อน (Thermal Aging)

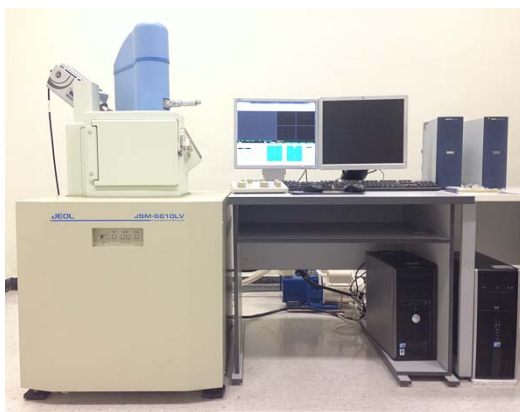
นำชิ้นงานที่ผ่านการตัดเป็นรูปคัมเบลล์ และรูปปีกนกของแต่ละสูตรยาง บ่มเร่งสภาวะด้วยความร้อนเพื่อทดสอบความต้านทานความร้อน (Thermal aging resistance) ของยางที่คงรูป ด้วยเครื่องอบขึ้นงาน (Controlled Temperature Oven) รุ่น GT-7017-L จาก บริษัท โกเท็ค เทคดิง แมชชีน อินดัสเตรียล จำกัด ประเทศไต้หวัน แสดงดังรูปที่ 3.10 ตามมาตรฐาน ASTM D573 – 99 โดยนำไปอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 96 ชั่วโมง จากนั้นจึงนำชิ้นงานออกมาทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลาอย่างน้อย 16 ชั่วโมง แล้วจึงนำชิ้นงานไปทดสอบเชิงกลต่อไป



รูปที่ 3.10 เครื่องอบขึ้นงาน (Controlled Temperature Oven)

หมายเลข 7 การทดสอบทางกายภาพ

นำชิ้นงานที่ได้จากการขึ้นรูป ไปตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) รุ่น JSM-6610LV ยี่ห้อ JEOL จากประเทศญี่ปุ่น แสดงดังรูปที่ 3.11 ความต่างศักย์ 10 กิโลโวลต์ และกระแสไฟฟ้า 15 แอมแปร์ โดยตรวจสอบการกระจายตัวระหว่างสารตัวเติมป้องกันรังสีกับยางธรรมชาติ



รูปที่ 3.11 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)

• การทดสอบค่าความหนาแน่น

นำชิ้นงานที่ได้จากการขึ้นรูปไปตรวจสอบค่าความหนาแน่น ด้วยชุดอุปกรณ์วัดความหนาแน่นใช้ร่วมกับเครื่องชั่งไฟฟ้าอ่านละเอียด 4 ตำแหน่ง (Electronic Density Balance, FA) รุ่น AB204-S ยี่ห้อ METTLER TOLEDO จากประเทศสวิตส์ แสดงดังรูปที่ 3.12 โดยเตรียมชิ้นงานทดสอบขนาดความกว้าง 10 มิลลิเมตร ความยาว 10 มิลลิเมตร ชั่งชิ้นงานในอากาศ และในของเหลว นำค่าที่ได้มาคำนวณตามสมการที่ 4

$$\text{Density: } \rho = \frac{A}{A-B}(\rho_o - \rho_L) + \rho_L \quad \dots\dots\dots (4)$$

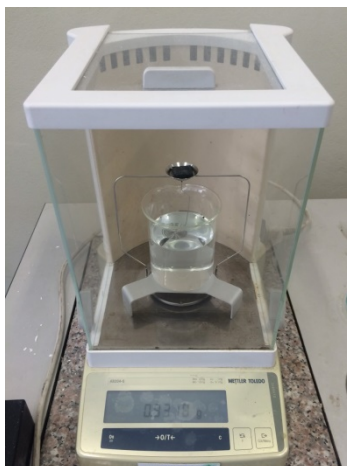
ρ = ความหนาแน่นของชิ้นงาน

A = น้ำหนักในอากาศ

B = น้ำหนักในของเหลว

ρ_o = ความหนาแน่นในของเหลว ณ อุณหภูมินั้น

ρ_L = ความหนาแน่นในอากาศ (0.0012 g/cm³)



รูปที่ 3.12 ชุดอุปกรณ์วัดความหนาแน่นใช้ร่วมกับเครื่องชั่งไฟฟ้าอ่านละเอียด 4 ตำแหน่ง
(Electronic Density Balance, FA)

- **การทดสอบค่าการนำความร้อน**

นำชิ้นงานที่ได้จากการขึ้นรูปไปตรวจสอบค่าการนำความร้อนด้วยเครื่องวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของวัสดุ (Thermal Conductivity Analysis, TCA) แสดงดังรูปที่ 3.13 โดยเตรียมชิ้นงานทดสอบขนาดความกว้าง 5 มิลลิเมตร ความยาว 5 มิลลิเมตร ความหนา 10 มิลลิเมตร ใช้อุณหภูมิห้องในการทดสอบช่วงการนำความร้อน 0.005 ถึง 500 วัตต์ต่อเมตร-เคลวิน



รูปที่ 3.13 เครื่องวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของวัสดุ (Thermal Conductivity Analysis, TCA)

บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

งานวิจัยโครงการนี้กำหนดเป้าหมายในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ โดยนำชิ้นงานผลิตภัณฑ์ที่มีการเติมสารตัวเติมในกลุ่มโบรอนสำหรับใช้งานป้องกันรังสี ที่นำเข้าจากประเทศญี่ปุ่น บริษัท โทวา รับเบอร์ จำกัด ขนาดชิ้นงานทดสอบ กว้าง 15 เซนติเมตร ยาว 15 เซนติเมตร และหนา 5.13 มิลลิเมตร [24] ทำการตรวจสอบสมบัติเชิงกลด้านความต้านทานแรงดึง การยืดตัว และค่าความแข็งที่ผิวจากห้องปฏิบัติการกลุ่มวิจัยการผลิตและขึ้นรูปพอลิเมอร์ (กลุ่มวิจัย P-PROF) มจร. และทดสอบสมบัติด้านรังสีจากห้องปฏิบัติการสถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (สทน.) เพื่อเป็นเกณฑ์การพัฒนาผลิตภัณฑ์แผ่นกำบังรังสี ดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 เกณฑ์การพัฒนาผลิตภัณฑ์แผ่นกำบังอนุภาคนิวตรอน

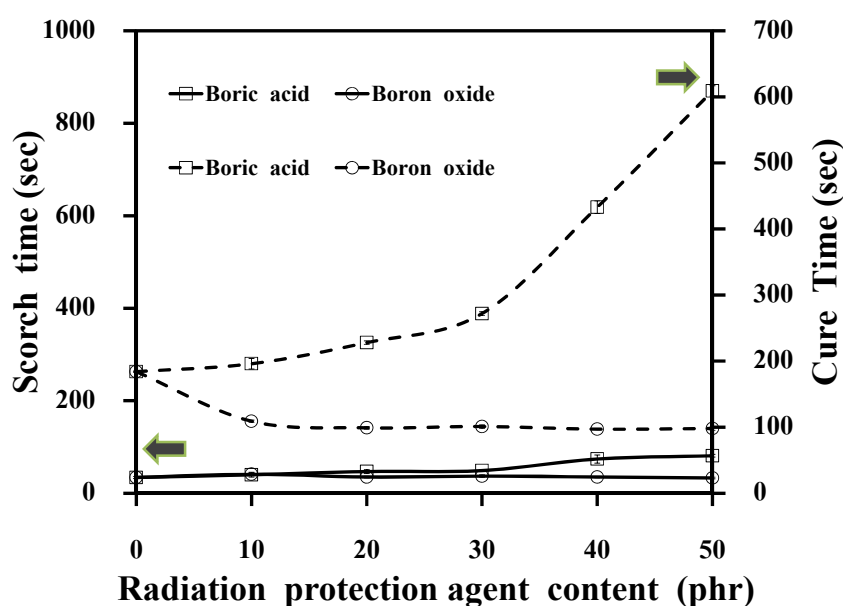
Properties	Target
ทดสอบสมบัติด้านรังสีจากห้องปฏิบัติการสถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (สทน.)	
Linear attenuation coefficient; μ (m^{-1})	≥ 169.75
ทดสอบสมบัติเชิงกลจากห้องปฏิบัติการกลุ่มวิจัยการผลิตและขึ้นรูปพอลิเมอร์ (กลุ่มวิจัย P-PROF)	
Tensile strength (MPa)	≥ 6.48
Elongation at break (%)	≥ 432
Hardness (Shore A)	≥ 69
Applications	แผ่นหุ้มเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ / แผ่นผนัง ห้องปฏิบัติการทางรังสี

4.1 ผลการทดสอบระยะเวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูป และเวลาที่ยางคงรูปของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ

การศึกษาระยะเวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูป และเวลาที่ยางคงรูป ของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่มีการเติมสารตัวเติมป้องกันรังสี ได้แก่ กรดบอริก โบรอนออกไซด์ และผงตะกั่ว โดยปรับเปลี่ยนปริมาณสารตัวเติมที่ 10, 20, 30, 40 และ 50 phr ด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์แบบจานแก้ว

4.1.1 การศึกษาระยะเวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูป และเวลาที่ยางคงรูป

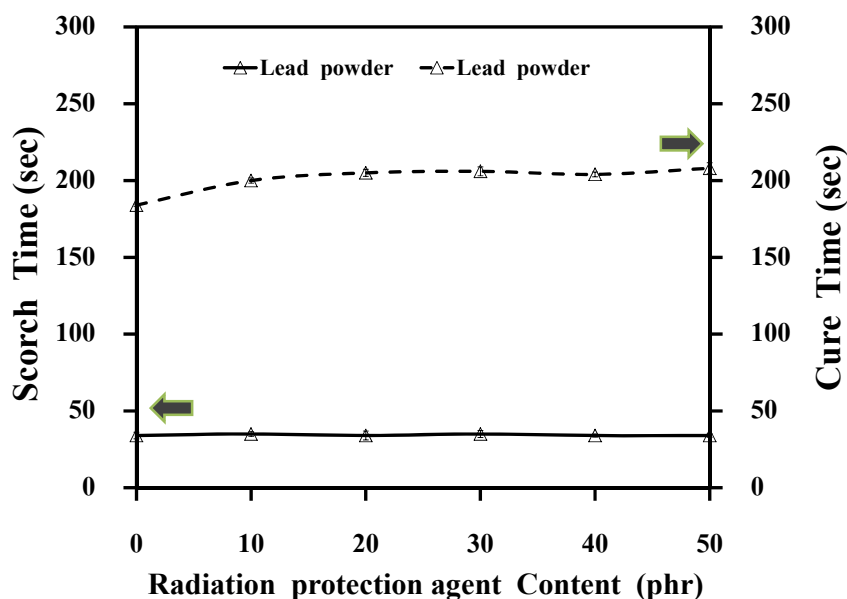
การศึกษาระยะเวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูป (Scorch time; ts_1) และเวลาที่ยางคงรูปที่ 90 เปอร์เซนต์ (Cure time; tc_{90}) ของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่มีการเติมสารตัวเติมป้องกันรังสี ได้แก่ ผงกรดบอริก และผงโบรอนออกไซด์ แสดงดังรูปที่ 4.1 และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่มีการเติมสารตัวเติมป้องกันรังสีชนิดผงตะกั่ว แสดงดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.1 ระยะเวลายางเริ่มเกิดการคงรูป และเวลาที่ยางคงรูป ของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่เติมสารตัวเติมป้องกันรังสีชนิดผงกรดบอริก และผงโบรอนออกไซด์

จากรูปที่ 4.1 แสดงผลของชนิดและปริมาณสารตัวเติมป้องกันรังสีที่ส่งผลต่อเวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูป และเวลาที่ยางคงรูปของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ เมื่อพิจารณาระยะเวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูปของยาง พบว่า การเติมผงโบรอนออกไซด์ไม่ส่งผลต่อระยะเวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูป แต่การเติมกรดบอริก ส่งผลทำให้เวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูปมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องจากผงกรดบอริกมีฤทธิ์เป็นกรดทำหน้าที่เป็นสารหน่วงปฏิกิริยาก่อนการเกิดการคงรูป [4] และเมื่อพิจารณาเวลาที่ยางคงรูป พบว่าการเติมกรดบอริกที่ปริมาณมากขึ้นส่งผลทำให้เวลาการคงรูปมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากกรดบอริกเป็น

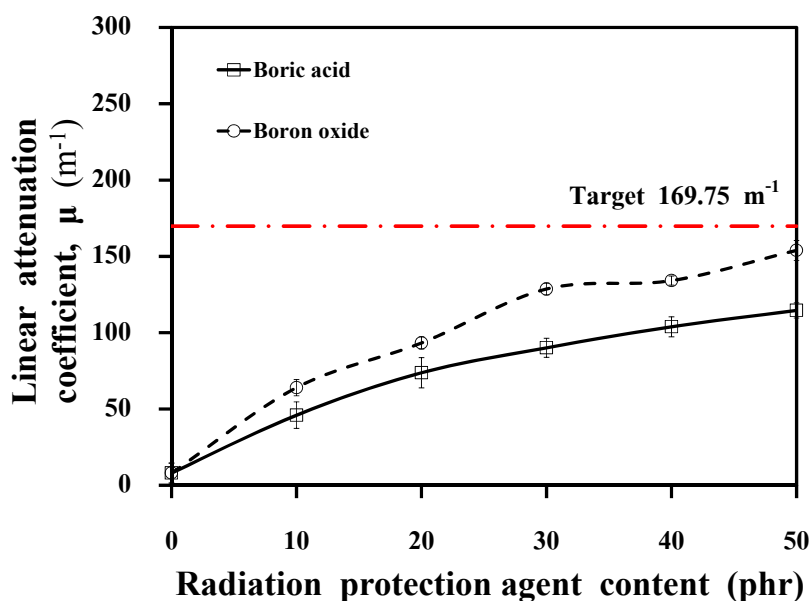
สารเคมีที่มีฤทธิ์เป็นกรดที่หน่วงประสิทธิภาพการทำงานของสารกระตุ้นและสารตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้เวลาการเกิดปฏิกิริยาของรูปนานขึ้น [4] ส่วนในกรณีการเติมโบรอนออกไซด์ (เส้นประ) ที่ 10 phr ส่งผลทำให้เวลาในการคงรูปลดลง เนื่องจากผงโบรอนออกไซด์มีส่วนประกอบของโลหะออกไซด์ ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารกระตุ้นร่วม (Co-activator) ในการเกิดปฏิกิริยาลดทาลินซ์ ทำให้เกิดปฏิกิริยาของรูปเกิดได้เร็วขึ้น ส่งผลทำให้เวลาที่คงรูปลดลง และเวลาการคงรูปไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อเพิ่มปริมาณโบรอนออกไซด์



รูปที่ 4.2 ระยะเวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูป และเวลาที่ยางคงรูป ของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่มีการเติมสารตัวเติมป้องกันรังสีชนิดผงตะกั่ว

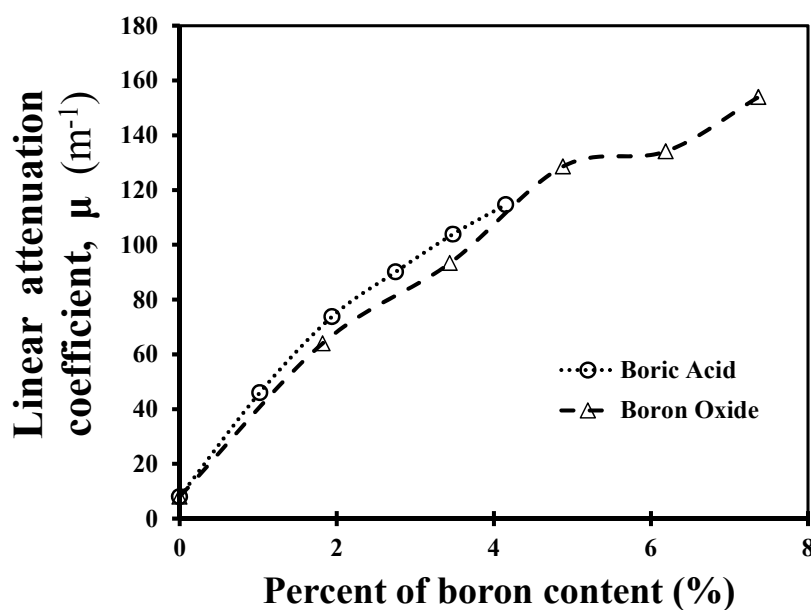
จากรูปที่ 4.2 แสดงผลของปริมาณผงตะกั่วที่ส่งผลต่อเวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูป และเวลาที่ยางคงรูป ของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ พบว่า การเติมผงตะกั่วไม่ส่งผลต่อเวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูป และเวลาการคงรูปของยาง ทั้งนี้เนื่องจากผงตะกั่วไม่ทำปฏิกิริยาทางเคมีกับยางธรรมชาติ

4.2 ผลการทดสอบการป้องกันด้านรังสี

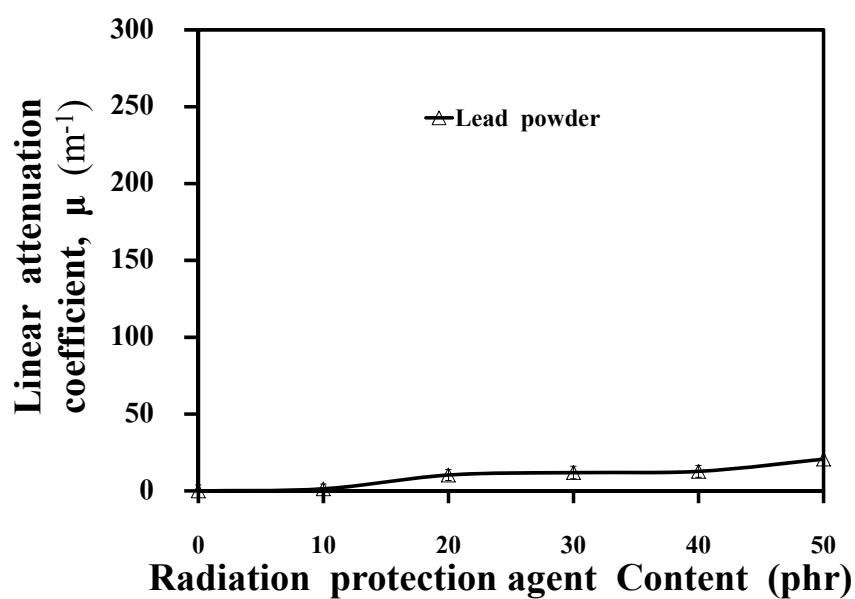


รูปที่ 4.3 ความต้านทานต่ออนุภาคนิวตรอนของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่มีการเติมสารตัวเติมป้องกันรังสีชนิดผงกรดบอริก และผงโบรอนออกไซด์

จากรูปที่ 4.3 แสดงผลของชนิดและปริมาณสารตัวเติมป้องกันรังสีที่ส่งผลต่อความสามารถในการป้องกันอนุภาคนิวตรอน พบว่า การเติมโบรอนออกไซด์ และการเติมกรดบอริกส่งผลทำให้วัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติมีความสามารถในการป้องกันอนุภาคนิวตรอนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณของโบรอนออกไซด์ และกรดบอริก เนื่องจากสารตัวเติมทั้ง 2 ชนิดมีโบรอนเป็นส่วนประกอบเมื่อสัมผัสกับอนุภาคนิวตรอน นิวเคลียสของโบรอนสามารถดูดซับ (Absorbed) อนุภาคนิวตรอนไว้ภายในเกิดเป็นธาตุกัมมันตรังสี (Radioactive element) ตัวใหม่ [26] หลังจากนั้นเกิดการสลายตัวของอนุภาคนิวตรอนให้เกิดรังสีแกมมาออกมา และพบอีกว่าการเติมสารโบรอนออกไซด์มีความสามารถป้องกันอนุภาคนิวตรอนที่สูงกว่าการเติมกรดบอริก เนื่องจากวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่เติมโบรอนออกไซด์ที่มีโบรอนเป็นองค์ประกอบที่ปริมาณ 7.3 % ซึ่งมีปริมาณของโบรอนมากกว่าวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่เติมกรดบอริกที่มีโบรอนเป็นองค์ประกอบที่ปริมาณ 4.14 % แสดงดังรูปที่ 4.4 โดยการเติมสารตัวเติมป้องกันรังสีชนิดกรดบอริก และโบรอนออกไซด์ พบว่ามีค่าความสามารถในการป้องกันอนุภาคนิวตรอนที่ยังไม่ผ่านเกณฑ์เป้าหมาย



รูปที่ 4.4 ความต้านทานต่ออนุภาคนิวตรอนของปริมาณโบรอนในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่มีการเติมสารตัวเติมป้องกันรังสีชนิดผงกรดบอริก และผงโบรอนออกไซด์



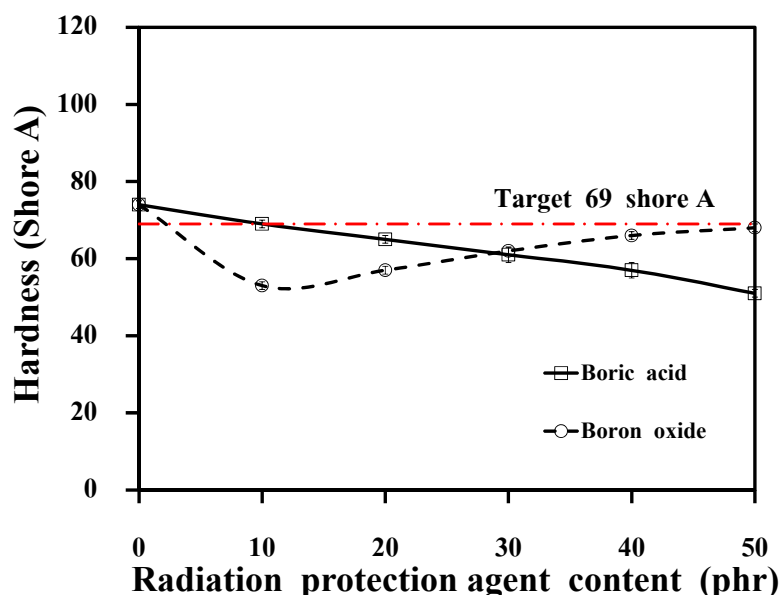
รูปที่ 4.5 ความต้านทานต่อรังสีแกมมาของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่มีการเติมสารตัวเติมผงตะกั่ว

จากรูปที่ 4.5 แสดงค่าความต้านทานต่อรังสีแกมมาของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่มีการเติมสารตัวเติมผงตะกั่ว พบว่า การเติมผงตะกั่วส่งผลทำให้มีความสามารถในการป้องกันรังสีแกมมามีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

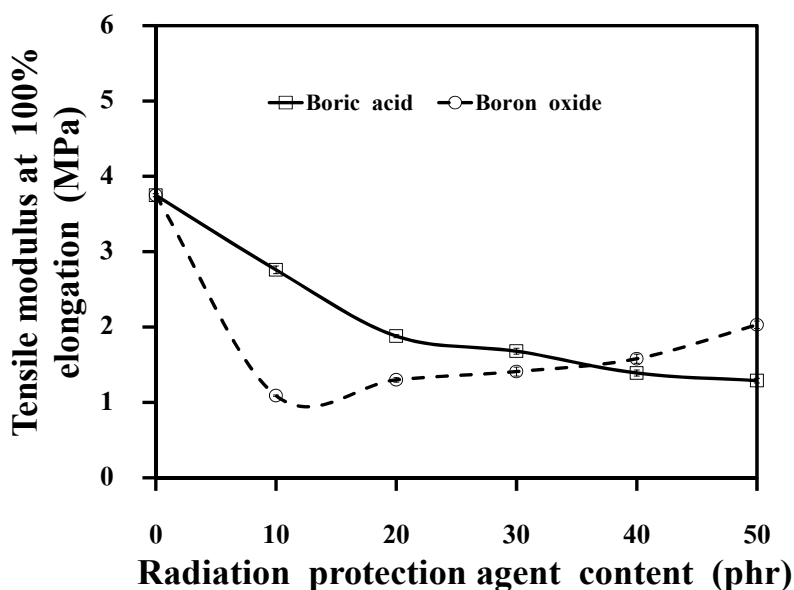
เนื่องจากวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่มีผงตะกั่ว ทำให้ค่าความหนาแน่นโดยรวมของวัสดุเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ซึ่งความหนาแน่นของวัสดุที่เพิ่มขึ้น ส่งผลต่อความสามารถในการป้องกันรังสีแกมมาที่ดีขึ้น [19]

4.3 ผลสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ

การศึกษาสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่ปรับเปลี่ยนชนิดและปริมาณ สารตัวเติมป้องกันรังสี ทดสอบดังนี้ ค่าความแข็งที่ผิว (Hardness) โมดูลัสแรงดึง (Modulus) ความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile strength) เปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด (Elongation at break) และความต้านทานต่อแรงฉีกขาด (Tear strength)

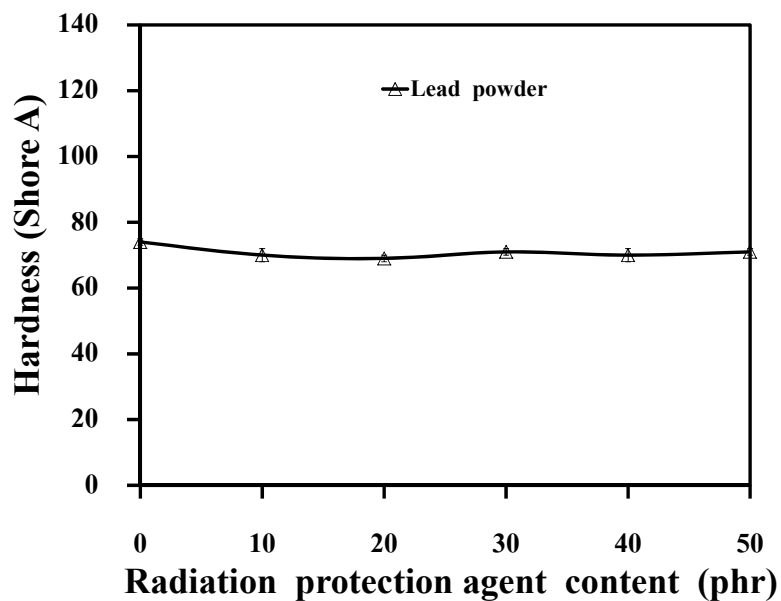


รูปที่ 4.6 ค่าความแข็งที่ผิวของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่มีการเติมสารตัวเติมป้องกันรังสีชนิดผงกรดบอริก และผงโบรอนออกไซด์



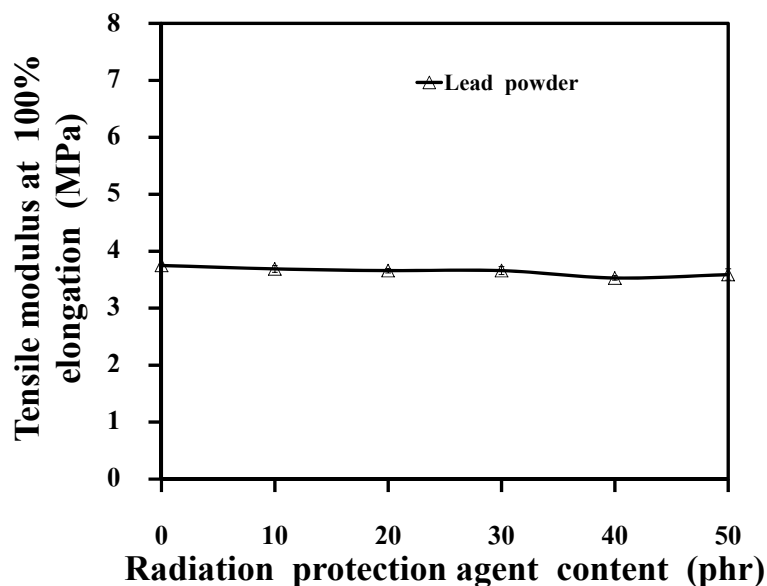
รูปที่ 4.7 ค่ามอดุลัสแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบยางที่มีการเติมสารตัวเติมป้องกันรังสีชนิดผงกรดบอริก และผงโบรอนออกไซด์

สำหรับค่าความแข็งที่ผิว และค่ามอดุลัสแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ แสดงดังรูปที่ 4.6 และรูปที่ 4.7 ตามลำดับ พบว่า เมื่อเติมกรดบอริกในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติส่งผลทำให้ค่าความแข็งที่ผิวมีแนวโน้มลดลง ส่วนในกรณีการเติมโบรอนออกไซด์ 10 phr ค่าความแข็งที่ผิวลดลง และค่าความแข็งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณผงโบรอนออกไซด์ และเมื่อพิจารณาค่ามอดุลัสแรงดึง พบว่า เมื่อเติมกรดบอริกและโบรอนออกไซด์ที่ปริมาณ 10 phr ส่งผลทำให้ค่ามอดุลัสแรงดึงมีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้เนื่องจากยางมีปริมาณการเชื่อมขวาง (Crosslink) ที่น้อย จึงส่งผลทำให้ยางนิ่มและมีความต้านทานต่อการเสียรูปที่ไม่ดี โดยการเติมสารตัวเติมป้องกันรังสีชนิดกรดบอริก และโบรอนออกไซด์ พบว่ามีค่าความแข็งที่ผิวยังไม่ผ่านเกณฑ์เป้าหมาย

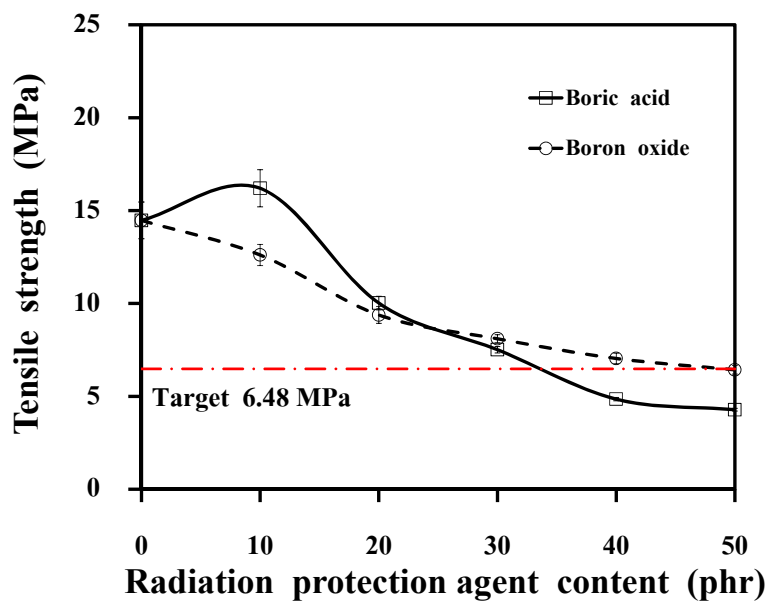


รูปที่ 4.8 ค่าความแข็งที่ผิวของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่มีการเติมสารตัวเติมป้องกันรังสีชนิดผงตะกั่ว

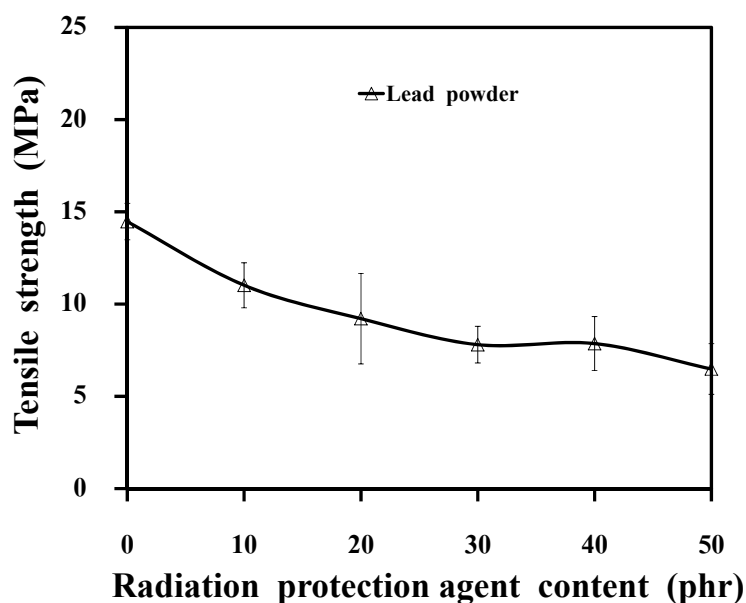
สำหรับค่าความแข็งที่ผิว และค่ามอดุลัสแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ แสดงดังรูปที่ 4.8 และรูปที่ 4.9 ตามลำดับ พบว่า เมื่อเติมผงตะกั่วไม่ส่งผลต่อค่าความแข็งที่ผิว และค่ามอดุลัสที่การยืดตัว 100% เนื่องจากผงตะกั่วไม่ส่งผลต่อปฏิกิริยาการเชื่อมโยงพันธะของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ



รูปที่ 4.9 ค่ามอดุลัสแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่มีการเติมสารตัวเติมป้องกันรังสีชนิดผงตะกั่ว



รูปที่ 4.10 ค่าความต้านทานแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่มีการเติมสารตัวเติมป้องกันรังสีชนิดผงกรดบอริก และผงโบรอนออกไซด์

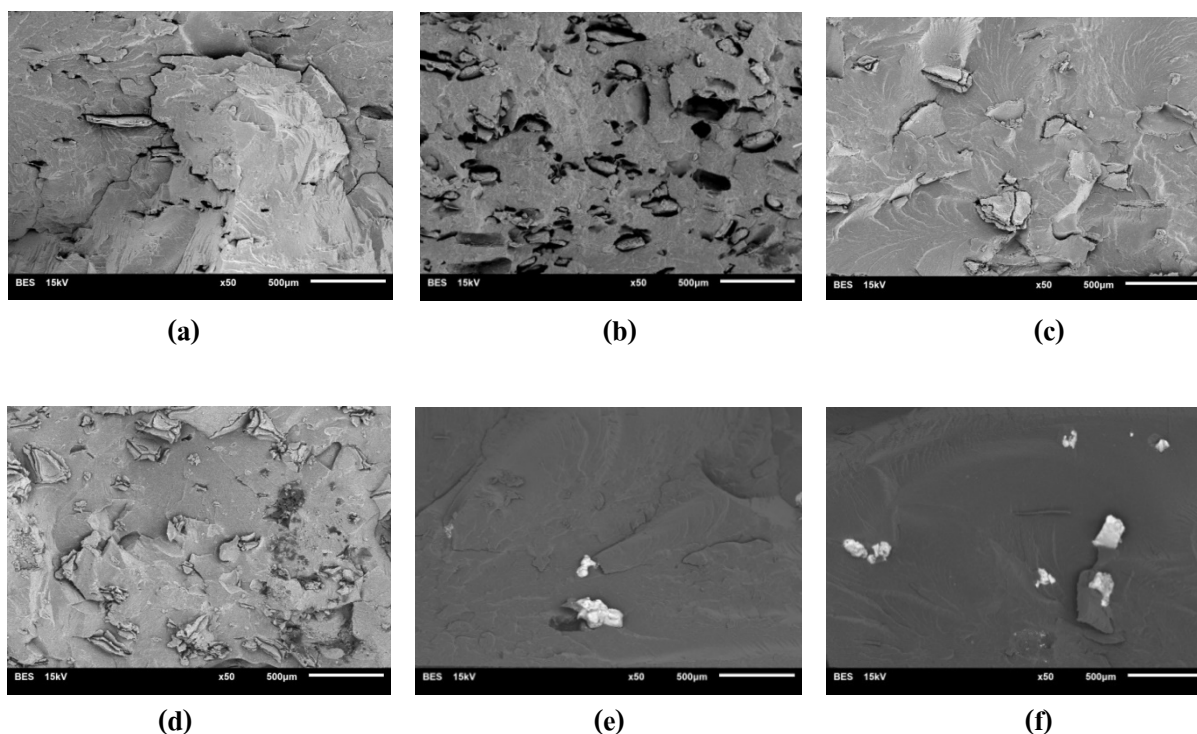


รูปที่ 4.11 ค่าความต้านทานแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่มีการเติมสารตัวเติมป้องกันรังสีชนิดผงตะกั่ว

จากรูปที่ 4.10 แสดงผลของชนิดและปริมาณสารตัวเติมป้องกันรังสีที่ส่งผลต่อความต้านทานแรงดึง พบว่าเมื่อเติมผงกรดบอริกและผงโบรอนออกไซด์ ส่งผลทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณสารตัวเติมทั้ง 2 ชนิด ทั้งนี้เนื่องจากความไม่เข้ากันของสารตัวเติมกับเฟสของยาง นอกจากนี้มีข้อสังเกตว่า

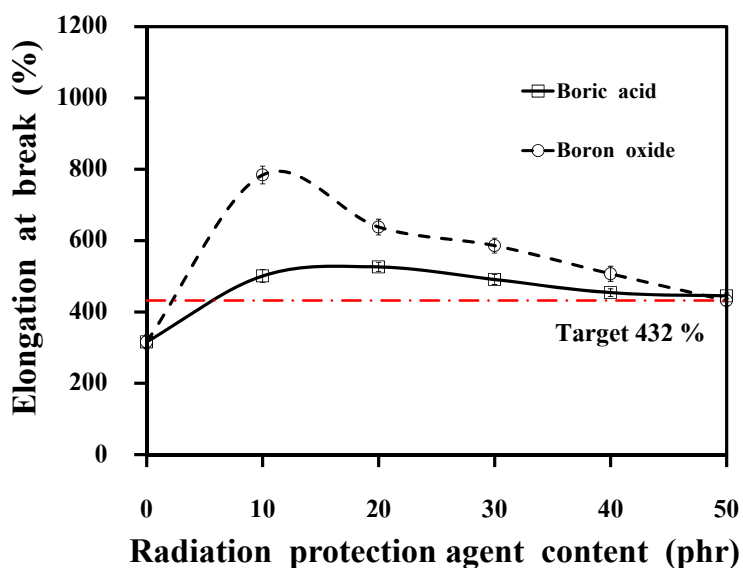
การเติมกรบอริกที่ปริมาณ 10 phr ค่าความต้านทานแรงดึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น อาจเป็นเพราะการเติมกรบอริกในปริมาณที่น้อย (10 phr) สารตัวเติมมีการกระจายตัวที่ค่อนข้างสม่ำเสมอในเฟสของยาง ดังแสดงภาพถ่ายโครงสร้างทางสัณฐานวิทยา ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM) แสดงดังรูปที่ 4.12 (a) ส่วนการเติมกรบอริกและโบรอนออกไซด์ที่ปริมาณมาก (50 phr) มีการหลุดออกของสารตัวเติมจากเฟสของยางเกิดเป็นรูพรุน ทำให้เกิดความไม่ต่อเนื่องของเฟสยาง ดังแสดงในรูปที่ 4.12 (b-d) เมื่อเปรียบเทียบกับเกณฑ์เป้าหมาย (Target) พบว่า วัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่เติมผงโบรอนออกไซด์ ผ่านเกณฑ์เป้าหมายทุกสัดส่วนการผสม

ในกรณีค่าความต้านทานแรงดึง ของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่มีการเติมสารตัวเติมป้องกันรังสีผงตะกั่ว แสดงดังจากรูปที่ 4.12 พบว่าการเติมผงตะกั่วส่งผลทำให้ความต้านทานแรงดึงมีแนวโน้มลดลง เช่นกัน ซึ่งผงตะกั่วมีค่าความหนาแน่น (Density) น้ำหนักที่ค่อนข้างสูงมาก ซึ่งค่าความต่างของความหนาแน่นของยางธรรมชาติ และผงตะกั่วค่อนข้างมาก จึงส่งผลทำให้เป็นสารตัวเติมกระจายในยางได้ยาก แสดงในภาพถ่าย SEM แสดงดังรูปที่ 4.12 (e-f) และผงตะกั่วไม่สามารถเกิดพันธะทางเคมีกับยางได้จึงที่ไม่มีการเสริมแรงในวัสดุยาง



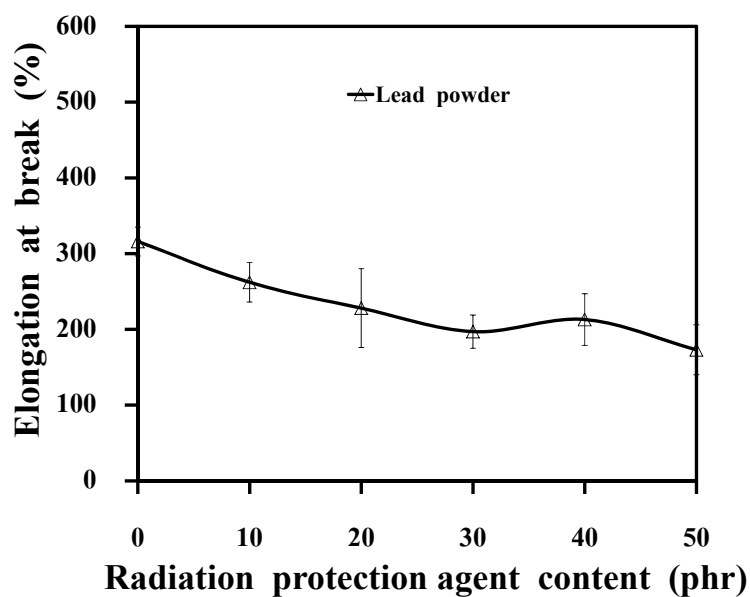
รูปที่ 4.12 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ ที่มีสารตัวเติมป้องกันรังสีที่ปริมาณ 10 และ 50 phr (กำลังขยาย 50 เท่า)

- (a) ผงกรบอริก 10 phr (b) ผงกรบอริก 50 phr (c) ผงโบรอนออกไซด์ 10 phr
(d) ผงโบรอนออกไซด์ 50 phr (e) ผงตะกั่ว 10 phr และ (f) ผงตะกั่ว 50 phr

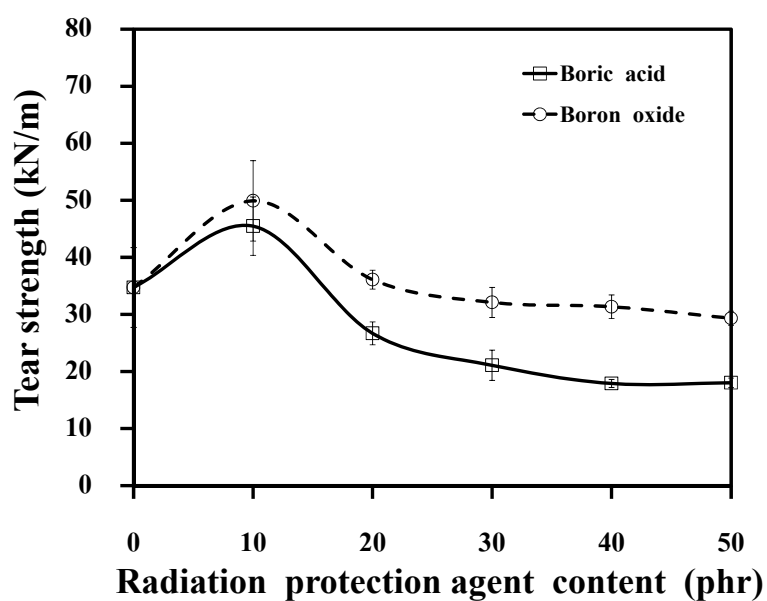


รูปที่ 4.13 เปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาดของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่มีการเติมสารตัวเติม ป้องกันรังสีชนิดผงกรดบอริก และผงโบรอนออกไซด์

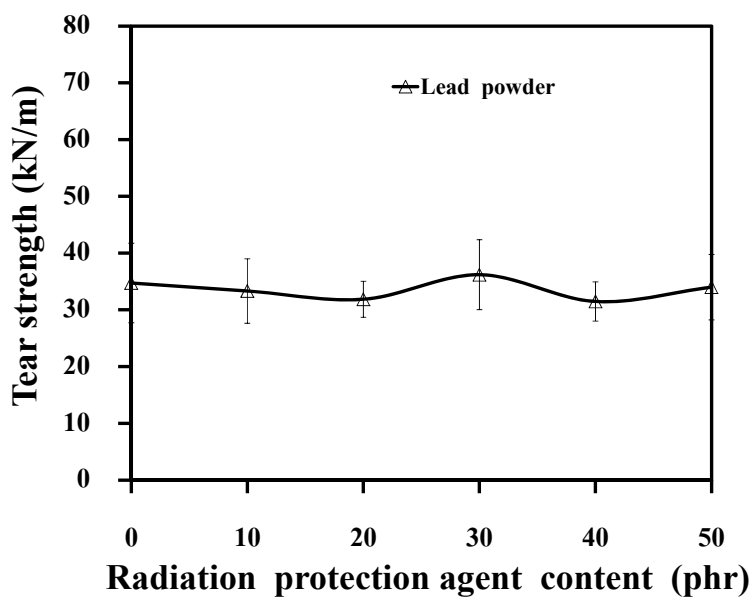
จากรูปที่ 4.13 แสดงผลของชนิดและปริมาณสารตัวเติมป้องกันรังสีที่ส่งผลต่อเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด พบว่า เมื่อเติมโบรอนออกไซด์ที่ 10 phr ส่งผลทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาดเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีการเติมสารตัวเติมที่ปริมาณน้อย ซึ่งส่งผลทำให้มีการกระจายตัวของสารตัวเติมในเฟสยางได้ดี และการยืดตัวมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยตามปริมาณสารตัวเติมทั้ง 2 ชนิดที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากอนุภาคของสารตัวเติมมีปริมาณมากขึ้นไปขัดขวางการเกิดผลึกของสายโซ่โพลิเมอร์ยางธรรมชาติจึงทำให้การดึงยืดลดลง ส่วนเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาดของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่เติมสารป้องกันรังสีผงตะกั่วที่ปริมาณต่างๆ แสดงในจากรูปที่ 4.14 พบว่าการเติมผงตะกั่ว ส่งผลทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด มีแนวโน้มลดลง เนื่องจากอนุภาคของผงตะกั่วเข้าไปแทนที่ยางธรรมชาติที่เป็นเนื้อวัสดุหลัก ทำให้ความต่อเนื่องของเฟสยางลดลง ส่งผลทำให้วัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติมีการยืดตัว และมีสมบัติความเป็นอีลาสติคของยางลดลง



รูปที่ 4.14 เปอร์เซนต์การยืดตัว ณ จุดขาดของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่มีการเติมสารตัวเติมป้องกันรังสีชนิดผงตะกั่ว



รูปที่ 4.15 ความต้านทานต่อแรงฉีกขาดของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่มีการเติมสารตัวเติมป้องกันรังสีชนิดผงกรดบอริก และผงโบรอนออกไซด์



รูปที่ 4.16 ความต้านทานต่อแรงฉีกขาดของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่มีการเติมสารตัวเติมป้องกันรังสีชนิดผงตะกั่ว

รูปที่ 4.15 แสดงผลของชนิดและปริมาณสารตัวเติมป้องกันรังสีที่ส่งผลต่อความต้านทานแรงฉีกขาดของยางพบว่า เมื่อเติมผงกรวดบอริกและผงโบรอนออกไซด์ส่งผลทำให้ค่าความต้านทานแรงฉีกขาดของยางมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณสารตัวเติมทั้ง 2 ชนิด ทั้งนี้เนื่องจากความไม่เข้ากันของสารตัวเติมกับเฟสของยาง นอกจากนี้ การเติมกรวดบอริกและโบรอนออกไซด์ที่ปริมาณ 10 phr ค่าความต้านทานแรงฉีกขาดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น อาจเนื่องจากการเติมกรวดบอริกในปริมาณที่น้อย (10 phr) มีการกระจายตัวที่ค่อนข้างสม่ำเสมอในเฟสของยาง

ในกรณีค่าความต้านทานแรงฉีกขาด ของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่มีการเติมสารตัวเติมป้องกันรังสีผงตะกั่วแสดงดังจากรูปที่ 4.16 พบว่าการเติมผงตะกั่วไม่ส่งผลต่อความต้านทานแรงฉีกขาด

ตารางที่ 4.2 แสดงผลสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติหลังการบ่มเร่งสภาวะด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เวลา 96 ชั่วโมง พบว่า วัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่ไม่เติมสารตัวเติมป้องกันรังสีค่าสมบัติเชิงกล ได้แก่ ค่าความแข็งที่ผิว ความต้านทานแรงดึง และเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากโมเลกุลของยางเกิดการเชื่อมโยงพันธะหลังการบ่มสุก (Postcuring) อย่างสมบูรณ์ ส่วนในกรณีการเติมสารตัวเติมป้องกันรังสีทั้ง 3 ชนิด ส่งผลให้ค่าสมบัติเชิงกล ได้แก่ ค่าความแข็งที่ผิว ความต้านทานแรงดึง และเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด มีแนวโน้มลดลง เนื่องมาจากยางธรรมชาติซึ่งเป็นวัสดุหลักเกิดการเสื่อมสภาพ (Degrade) เมื่อได้รับความร้อนเป็นเวลานาน

ตารางที่ 4.2 ค่าการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงกลหลังการบ่มเร่งสภาวะด้วยความร้อนของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่มีสารตัวเติมป้องกันรังสี

Sample code	% Change proprieties thermal aging (70 °C at 96 hour)			
	Tensile modulus at 100% elongation (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Elongation at break (%)	Hardness (Shore A)
NR-40CB	9.09	17.71	10	3
NR-40CB-10BA	9.58	1.21	-2	-4
NR-40CB-20BA	5.82	-14.48	-15	-3
NR-40CB-30BA	1.81	-13.46	-12	5
NR-40CB-40BA	-5.07	-25.64	-18	0
NR-40CB-50BA	-1.57	-26.28	-39	8
NR-40CB-10BO	-19.83	-42.25	-11	-8
NR-40CB-20BO	-21.64	-43.28	-13	-2
NR-40CB-30BO	-26.24	-47.71	-11	-5
NR-40CB-40BO	-27.67	-41.53	-7	-6
NR-40CB-50BO	-33.54	-46.08	-8	-6
NR-40CB-10Pb	-8.36	4.83	1	-1
NR-40CB-20Pb	-6.91	-8.28	-11	-1
NR-40CB-30Pb	2.72	-14.67	-14	3
NR-40CB-40Pb	9.14	-11.64	-18	3
NR-40CB-50Pb	8.96	-31.82	-33	3

หมายเหตุ : CB คือ ผงเขม่าดำ, BA คือ ผงกรดบอริก, BO คือ ผงโบรอนออกไซด์, Pb คือ ผงตะกั่ว

จากผลสมบัติเชิงกล และค่าความต้านทานอนุมูลอิสระและรังสีแกมมาของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่เติมสารตัวเติมป้องกันรังสีทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ ผงกรดบอริก ผงโบรอนออกไซด์ และผงตะกั่ว พบว่า สมบัติค่าความต้านทานอนุมูลอิสระของวัสดุป้องกันรังสี เป็นเป้าหมายหลักของงานวิจัยนี้ ขึ้นกับชนิดและปริมาณของสารป้องกันรังสี โดยพบว่า ปริมาณสารป้องกันรังสีที่เพิ่มขึ้น จะมีค่าการป้องกันรังสีใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์เป้าหมาย โดยที่วัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่มีการเติมผงโบรอนออกไซด์ที่ปริมาณสูงสุดในงานวิจัยนี้ (50 phr) มีสมบัติด้านรังสีใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์เป้าหมาย ดังแสดงในรูปที่ 4.3 โดยที่สมบัติเชิงกลโดยรวมของสูตรวัสดุเชิงประกอบที่ได้จากงานวิจัย ยังไม่ผ่านเกณฑ์เป้าหมาย ดังนั้น คณะวิจัยจึงทำการปรับปรุงสูตร โดยคาดหวังทำให้วัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติมีค่าผ่านเกณฑ์ก่อน โดยทำการปรับสูตรยาง และปริมาณส่วนผสมของสารเคมี แสดงดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 การปรับสูตรและส่วนผสมของสารเคมีของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ

สารเคมี	ปริมาณ (phr)	
	สูตรที่ 1 (ตารางที่ 3.1)	สูตรที่ 2 [25]
Natural Rubber; STR 20	100 (Part)	100 (Part)
Zinc Oxide; ZnO	5	5
Stearic acid	3	2
Mercaptobenzthaisoles, MBT	2	0.5
Diphenylguanidine, DPG	3	2
Sulphur powder 450 mesh	4	3
Carbon Black (HAF N330)	40	40
Wood sawdust	-	20
Silane Coupling (KBM 603A)	0.5% / Weight Wood sawdust	
UV Stabilizer (TINUVIN 234)	0.1	0.1
Anti-oxidant (IRGANOX 1076)	0.5	0.5
Anti-Ozonant (Enhance)	3	3
Radiation protection agent - Boric acid - Boron oxide - Lead powder	Varying from 0-50	

ในงานวิจัยนี้ใช้สูตรส่วนผสมของสารเคมีที่ปรับแล้วในการผสมวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงซีลี้อยไม้ที่มีการเติมสารตัวเติมป้องกันรังสีทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ ผงกรดบอริก ผงโบรอนออกไซด์ และผงตะกั่ว ทำการทดสอบสมบัติเชิงกล ของวัสดุเชิงประกอบยางที่เติมสารตัวเติมป้องกันรังสี ดังแสดงในตารางที่ 4.4

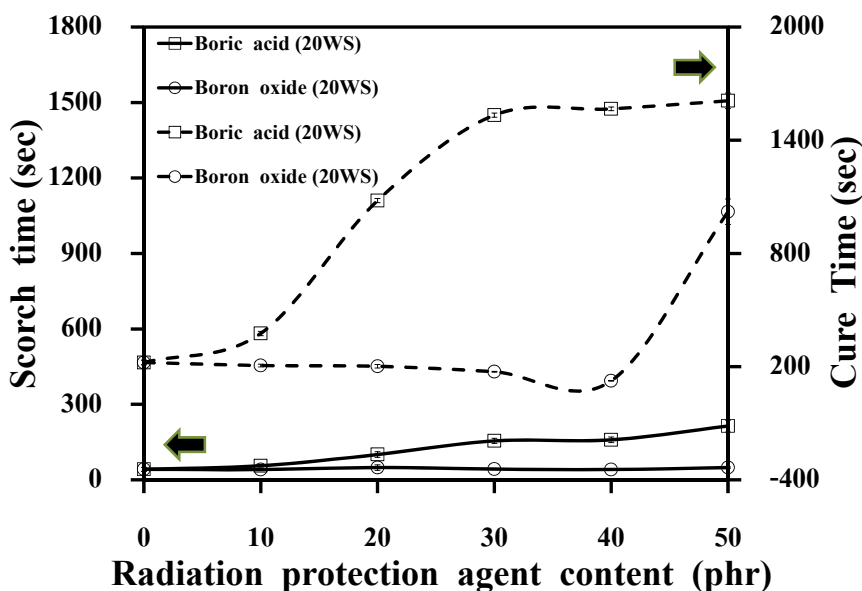
ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกล และสมบัติด้านรังสีของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่ผ่านการปรับสูตรส่วนผสมของสารเคมี

Properties	Target	สูตรที่ 1		สูตรที่ 2	
		ไม่เติมผง ซีลีเนียม	เติมผงซีลีเนียม	ไม่เติมผง ซีลีเนียม	เติมผงซีลีเนียม
Linear attenuation coefficient, μ (m^{-1})	169.75	153.95 ± 6.54	165.83 ± 3.41	180.23 ± 9.93	169.68 ± 6.08
Tensile strength (MPa)	6.48	6.43 ± 0.23	3.55 ± 0.34	12.3 ± 0.59	3.19 ± 0.07
Elongation at break (%)	432	432 ± 15	300 ± 11	384 ± 7	238 ± 12
Hardness (shore A)	69	71 ± 1	73 ± 2	66 ± 1	76 ± 1

จากตารางที่ 4.4 แสดงสมบัติของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงซีลีเนียม พบว่าวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่มีการปรับสูตรและมีการเติมผงโบรอนออกไซด์ที่ปริมาณ 50 phr ให้ค่าความต้านทานแรงดึง และความต้านทานต่ออนุมูลอิสระสูงกว่าวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติก่อนการปรับสูตร และในกรณีวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงซีลีเนียมที่มีการปรับสูตรและมีการเติมผงโบรอนออกไซด์ที่ปริมาณ 50 phr ให้ค่าความแข็งที่ผิวของยางสูงกว่ากรณีวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่ไม่ผสมผงซีลีเนียม และสูตรที่ผสมผงซีลีเนียมก่อนการปรับสูตร นอกจากนี้มีค่าความต้านทานต่ออนุมูลอิสระมีค่าเทียบเท่ากับเกณฑ์มาตรฐาน และสูงกว่าวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติก่อนการปรับสูตร

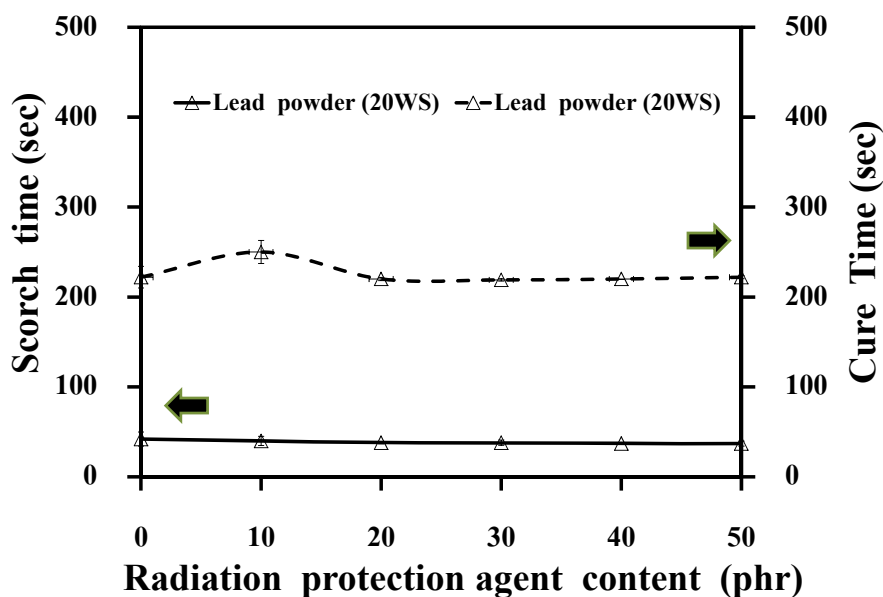
ดังนั้น คณะวิจัยได้ใช้สูตรส่วนประกอบยางธรรมชาติดังตารางที่ 4.3 ในสูตรที่ 2 เพื่อใช้ทดลองในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงซีลีเนียม

4.4 ผลการทดสอบระยะเวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูป และเวลาที่ยางคงรูปของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงจีเลอียัม



รูปที่ 4.17 ระยะเวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูป และเวลาที่ยางคงรูปของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงจีเลอียัมที่มีการเติมสารตัวเติมป้องกันรังสีชนิดผงกรดบอริก และผงโบรอนออกไซด์

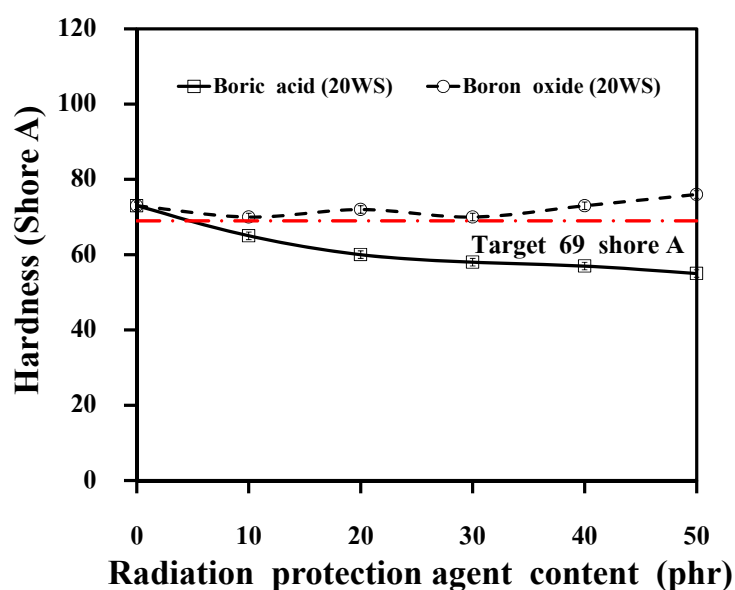
จากรูปที่ 4.17 แสดงผลของชนิดและปริมาณสารตัวเติมป้องกันรังสีต่อเวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูป และเวลาที่ยางคงรูป ของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมจีเลอียัม พบว่า เมื่อพิจารณาระยะเวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูปของยาง พบว่า การเติมผงโบรอนออกไซด์ไม่ส่งผลต่อระยะเวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูป แต่การเติมกรดบอริกส่งผลทำให้มีเวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูปมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากผงกรดบอริกมีฤทธิ์เป็นกรดทำหน้าที่เป็นสารหน่วงปฏิกิริยาก่อนการเกิดการคงรูป [4] และเมื่อพิจารณาผลของเวลาที่ยางคงรูป พบว่า การเติมกรดบอริกที่ปริมาณมากขึ้นส่งผลทำให้ระยะเวลาการคงรูปมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากกรดบอริกเป็นสารเคมีที่มีฤทธิ์เป็นกรดมักหน่วงประสิทธิภาพการทำงานของสารกระตุ้นและสารตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้เวลาการเกิดปฏิกิริยาคงรูปนานขึ้น [4] และในกรณีการเติมโบรอนออกไซด์ที่ 10-40 phr ไม่ส่งผลต่อเวลาในการคงรูปยาง แต่มีเวลาที่ยางคงรูปเพิ่มขึ้นที่ปริมาณ 50 phr เนื่องจากผงโบรอนออกไซด์มีปริมาณมากเกิดการดูดซับสารตัวเร่งปฏิกิริยาและสารกระตุ้นปฏิกิริยาให้มีประสิทธิภาพการทำงานช้าลง



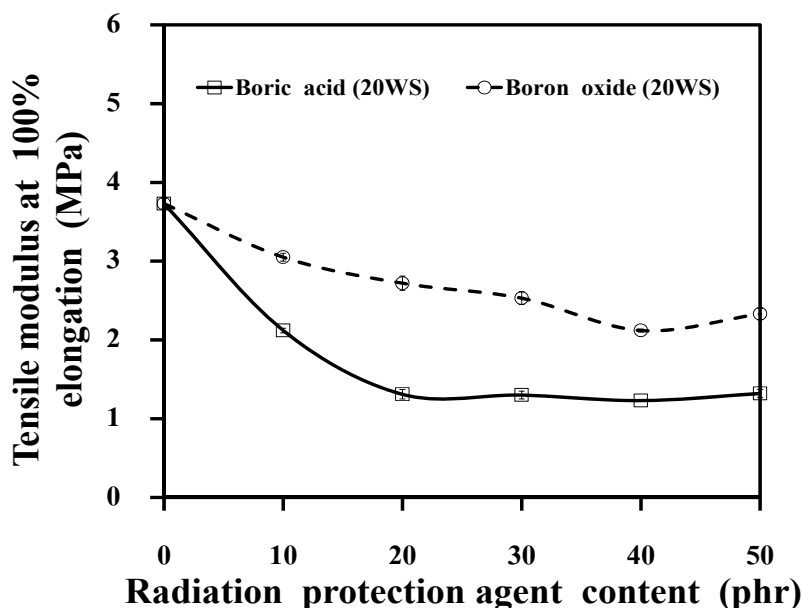
รูปที่ 4.18 ระยะเวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูป และเวลาที่ยางคงรูป ของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผง जिเลียวไมที่มีการเติมสารตัวเติมป้องกันรังสีชนิดผงตะกั่ว

จากรูปที่ 4.18 แสดงผลของปริมาณผงตะกั่วต่อเวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูปและเวลาที่ยางคงรูป พบว่า การเติมผงตะกั่วในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติไม่ส่งผลต่อเวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูปและเวลาที่ยางคงรูป เนื่องจากผงตะกั่วไม่ส่งผลต่อปฏิกิริยาลูกโซ่ในเซชันกับวัสดุยางธรรมชาติ

4.5 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผง जिเลียวไม

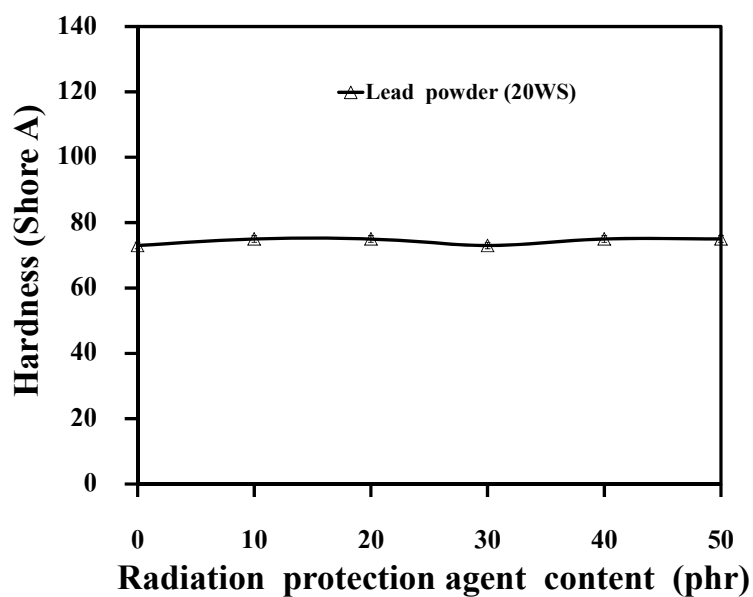


รูปที่ 4.19 ค่าความแข็งที่ผิวของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผง जिเลียวไมที่มีการเติมสารตัวเติมป้องกันรังสีชนิดผงกรดบอริก และผงโบรอนออกไซด์



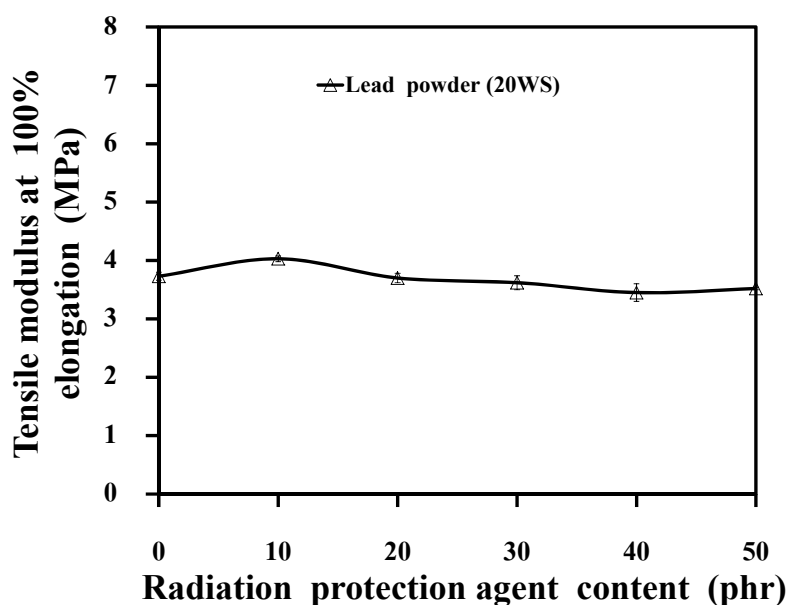
รูปที่ 4.20 ค่ามอดุลัสแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงซีลี้อยู่ไม้ที่มีการเติมสารตัวเติมป้องกันรังสีชนิดผงกรดบอริก และผงโบรอนออกไซด์

สำหรับค่าความแข็งที่ผิว และค่ามอดุลัสแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงซีลี้อยู่ไม้ที่เติมสารป้องกันรังสี แสดงดังรูปที่ 4.19 และรูปที่ 4.20 ตามลำดับ พบว่า เมื่อเติมกรดบอริกในวัสดุเชิงประกอบยางส่งผลทำให้ค่าความแข็งที่ผิวมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย อยู่ในช่วง 60 – 70 Shore A และในกรณีการเติมโบรอนออกไซด์ พบว่า ค่าความแข็งที่ผิวของวัสดุเชิงประกอบยางไม่เปลี่ยนแปลง อยู่ในช่วง 71-72 Shore A ทั้งนี้เนื่องจาก การเติมผงซีลี้อยู่ไม้ซึ่งมีความแข็ง (rigidity) จึงทำให้ค่าความแข็งโดยรวมเพิ่มขึ้น และพบอีกว่าเมื่อเติมกรดบอริกและผงโบรอนออกไซด์ส่งผลทำให้ค่ามอดุลัสแรงดึงมีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้เนื่องจากการเติมผงกรดบอริกและผงโบรอนออกไซด์ทำให้ยางมีปริมาณการเชื่อมขวาง (Crosslink) ที่ลดลง จึงส่งผลทำให้ยางมีความนิ่มและมีความต้านทานต่อการเสียรูปที่ไม่ดี

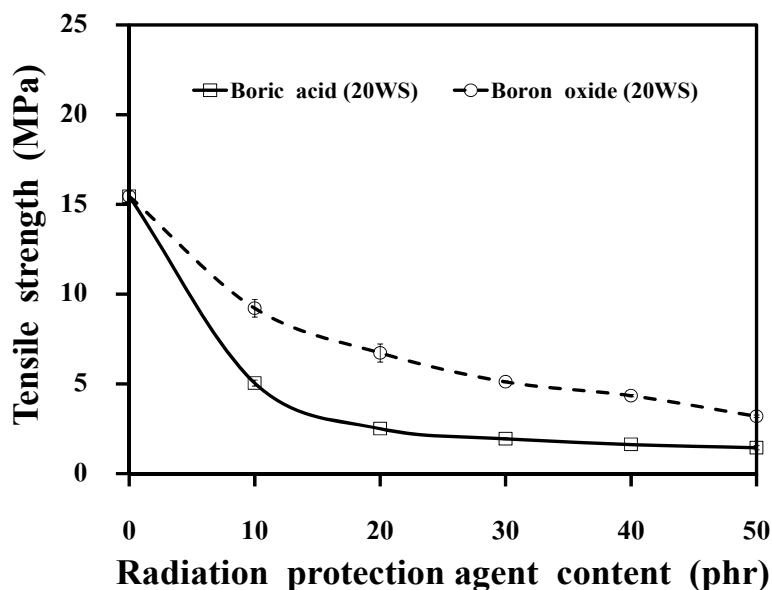


รูปที่ 4.21 ค่าความแข็งที่ผิวของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เถ้าไม้ที่มีการเติมสารตัวเติมป้องกันรังสีชนิดผงตะกั่ว

สำหรับค่าความแข็งที่ผิว และค่ามอดุลัสแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เถ้าไม้ที่เติมผงตะกั่ว แสดงดังรูปที่ 4.21 และรูปที่ 4.22 ตามลำดับ พบว่า เมื่อเติมผงตะกั่วไม่ส่งผลต่อค่าความแข็งที่ผิว และค่ามอดุลัสแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ

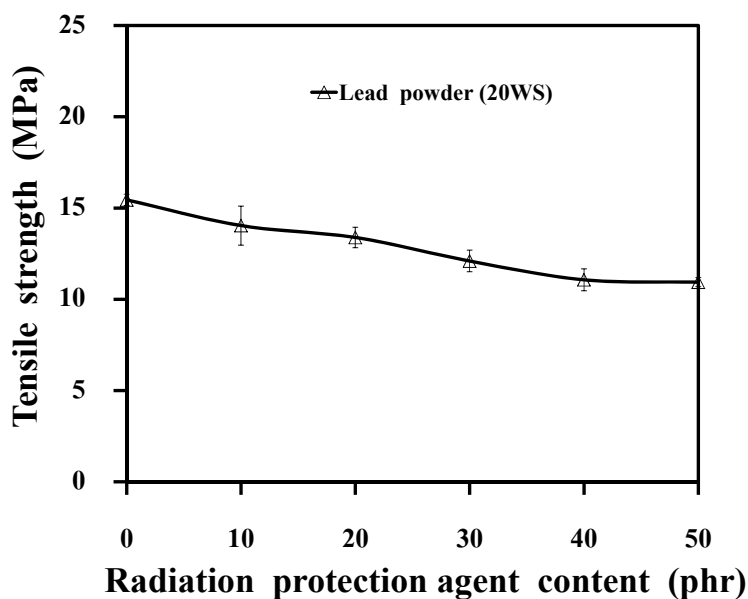


รูปที่ 4.22 ค่ามอดุลัสแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เถ้าไม้ที่มีการเติมสารตัวเติมป้องกันรังสีชนิดผงตะกั่ว



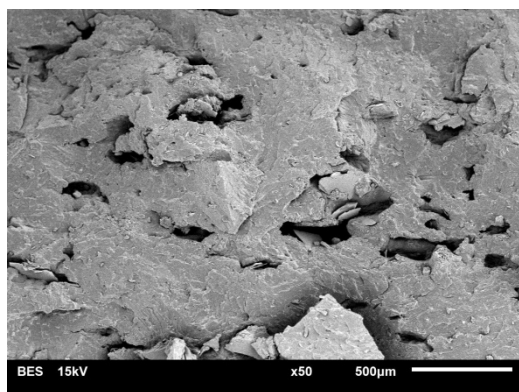
รูปที่ 4.23 ค่าความต้านทานแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงซีลีเนียมที่มีการเติมสารตัวเติมป้องกันรังสีชนิดผงกรดบอริก และผงโบรอนออกไซด์

จากรูปที่ 4.23 แสดงผลของชนิดและปริมาณสารตัวเติมป้องกันรังสีที่ส่งผลต่อความต้านทานแรงดึง พบว่าเมื่อเติมผงกรดบอริก และผงโบรอนออกไซด์ ส่งผลทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณสารตัวเติมทั้ง 2 ชนิด ทั้งนี้เนื่องจากความไม่เข้ากันของสารตัวเติมกับเฟสของยาง เมื่อเติมกรดบอริก และโบรอนออกไซด์ที่ปริมาณ 10-50 phr ทำให้เกิดการหลุดออกของสารตัวเติมเกิดเป็นรูพรุน และเกิดความไม่ต่อเนื่องของเฟสยางแสดงดังรูปที่ 4.25 (a-d) จากการตรวจสอบโครงสร้างทางสัณฐานวิทยา ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) ของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่เติมกรดบอริกและโบรอนออกไซด์ที่ปริมาณ 10 และ 50 phr แสดงดังรูปที่ 4.25 เมื่อเปรียบเทียบกับเกณฑ์เป้าหมาย (Target) พบว่า วัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่เติมผงโบรอนออกไซด์ที่ปริมาณ 10-20 phr ผ่านเกณฑ์เป้าหมายที่กำหนด

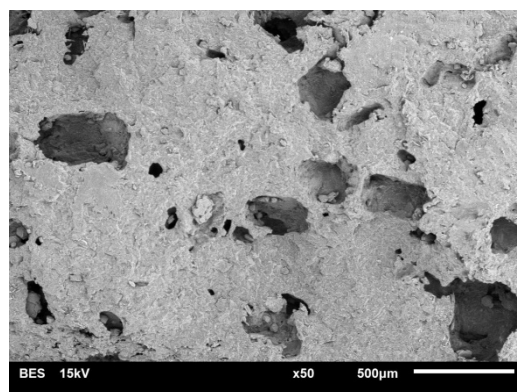


รูปที่ 4.24 ค่าความต้านทานแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงซีลีอียัมที่มีสารตัวเติมป้องกันรังสีชนิดผงตะกั่ว

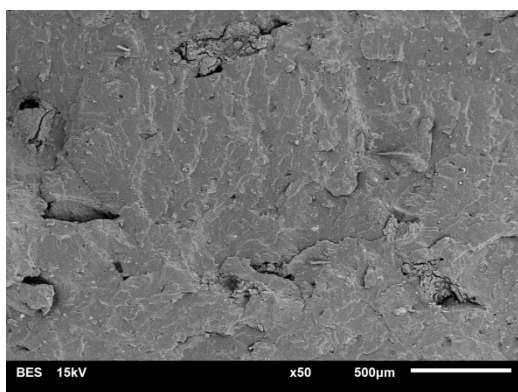
จากรูปที่ 4.24 แสดงผลของชนิดและปริมาณสารตัวเติมป้องกันรังสีที่ส่งผลต่อความต้านทานแรงดึง พบว่าการเติมผงตะกั่วส่งผลทำให้ความต้านทานแรงดึงมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากผงตะกั่วมีค่าความหนาแน่น (Density) น้ำหนักที่ค่อนข้างสูงมาก ซึ่งค่าความต่างของความหนาแน่นของยางธรรมชาติ และผงตะกั่วค่อนข้างมาก จึงส่งผลทำให้เป็นสารตัวเติมกระจายในเฟสยางได้ยาก แสดงในภาพถ่าย SEM แสดงดังรูปที่ 4.25 (e-f) และผงตะกั่วไม่สามารถเกิดพันธะทางเคมีกับยางได้จึงที่ไม่มีการเสริมแรงในวัสดุยาง



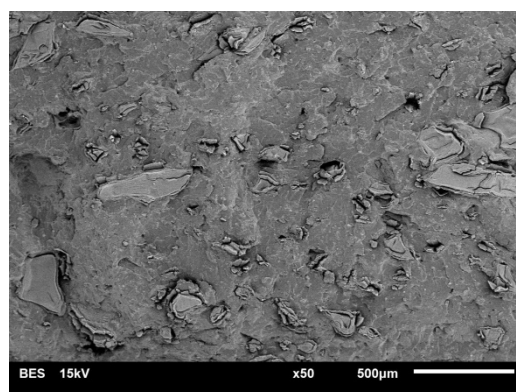
(a)



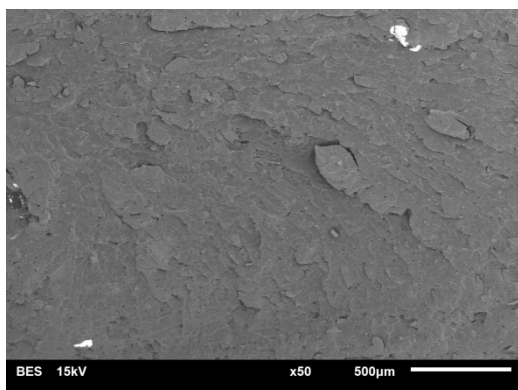
(b)



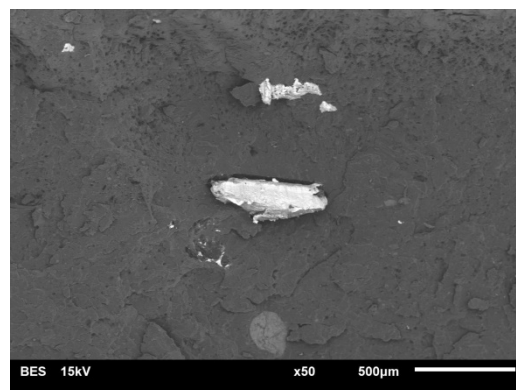
(c)



(d)



(e)



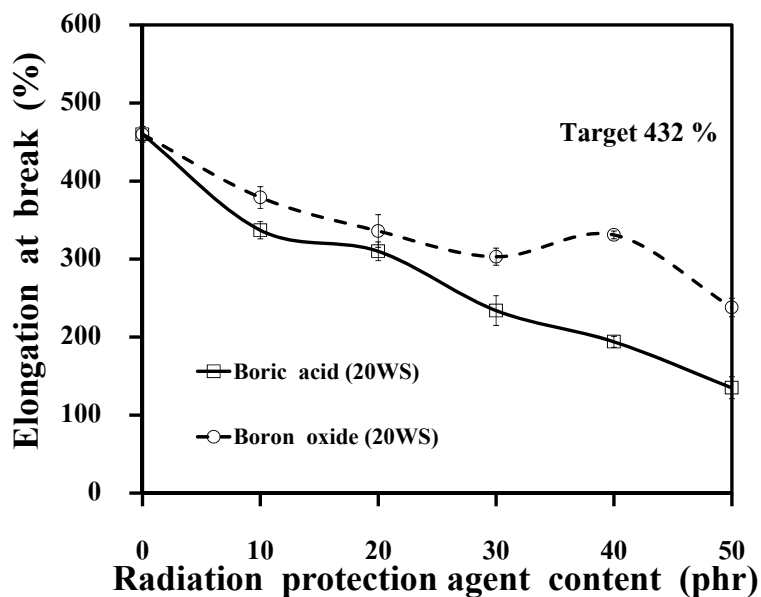
(f)

รูปที่ 4.25 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสม

ผงซีลีอ์ไมท์ที่มีสารตัวเติมป้องกันรังสีที่ปริมาณ 10 และ 50 phr (กำลังขยาย 10,000 เท่า)

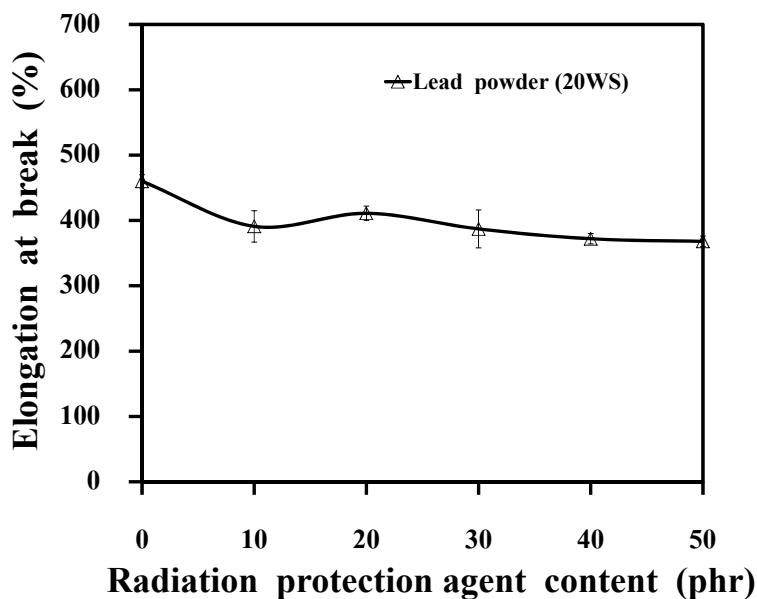
(a) ผงกรดบอริก 10 phr (b) ผงกรดบอริก 50 phr (c) ผงโบรอนออกไซด์ 10 phr

(d) ผงโบรอนออกไซด์ 50 phr (e) ผงตะกั่ว 10 phr และ (f) ผงตะกั่ว 50 phr

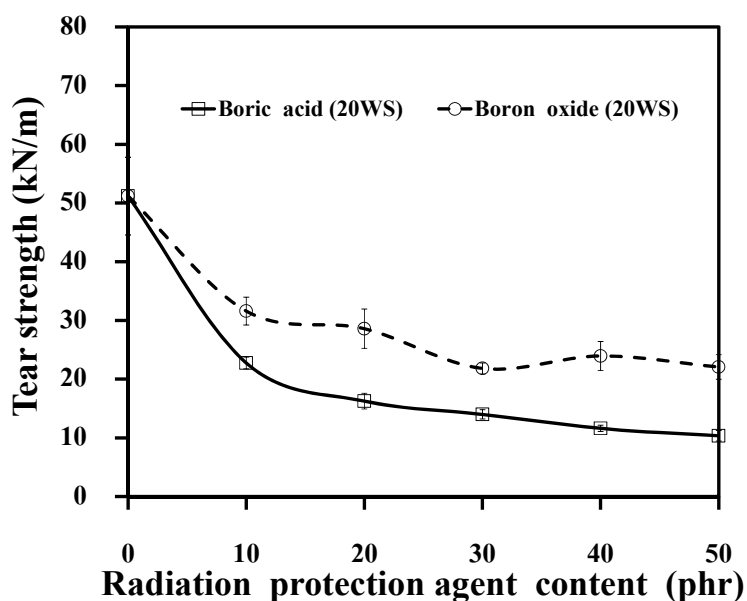


รูปที่ 4.26 เปอร์เซนต์การยืดตัว ณ จุดขาดของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงซีลี้อยู่ไม่มีการเติมสารตัวเติมป้องกันรังสีชนิดผงกรดบอริก และผงโบรอนออกไซด์

จากรูปที่ 4.26 แสดงผลของชนิดและปริมาณสารตัวเติมป้องกันรังสีที่ส่งผลต่อเปอร์เซนต์การยืดตัว ณ จุดขาด พบว่า เมื่อเติมกรดบอริกและโบรอนออกไซด์ส่งผลให้เปอร์เซนต์การยืดตัว ณ จุดขาดมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณสารตัวเติมทั้ง 2 ชนิดที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากอนุภาคของสารตัวเติมมีปริมาณมากขึ้นไปขัดขวางการเกิดผลึกของสายโซ่โพลิเมอร์ยางธรรมชาติจึงทำให้การดึงยืดลดลง ส่วนเปอร์เซนต์การยืดตัว ณ จุดขาดของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่เติมสารป้องกันรังสีผงตะกั่วที่ปริมาณต่างๆ แสดงในจากรูปที่ 4.27 พบว่าการเติมผงตะกั่ว ส่งผลทำให้ค่าเปอร์เซนต์การยืดตัว ณ จุดขาด มีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย เนื่องจากอนุภาคของผงตะกั่วเข้าไปแทนที่ยางธรรมชาติที่เป็นเนื้อวัสดุหลัก ทำให้ส่วนที่เป็นเนื้อยางลดลง ส่งผลให้วัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงซีลี้อยู่ไม่มีการยืดตัวและมีสมบัติความเป็นอลาสติกของยางลดลง



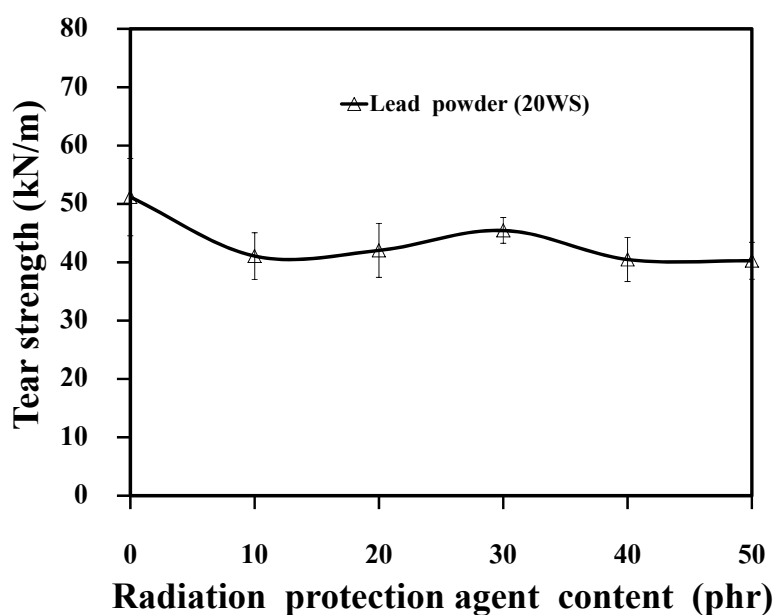
รูปที่ 4.27 เปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาดของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงซีลีเนียมที่มีการเติมสารตัวเติมป้องกันรังสีชนิดผงตะกั่ว



รูปที่ 4.28 ความต้านทานต่อแรงฉีกขาดของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงซีลีเนียมที่มีการเติมสารตัวเติมป้องกันรังสีชนิดผงกรดบอริก และผงโบรอนออกไซด์

รูปที่ 4.28 แสดงผลของชนิดและปริมาณสารตัวเติมป้องกันรังสีที่ส่งผลต่อความต้านแรงฉีกขาดของยางพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณผงกรดบอริก และผงโบรอนออกไซด์ที่ 10-50 phr ทำให้เกิดการหลุดออกของสารตัวเติมเกิดเป็นรูพรุน และเกิดความไม่ต่อเนื่องของเฟสยาง สอดคล้องกับผลการทดลองความต้านทานแรงดึง

ในกรณีค่าความต้านทานต่อแรงฉีกขาด ของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่มีการเติมสารตัวเติมป้องกันรังสีผงตะกั่วแสดงดังจากรูปที่ 4.29 พบว่า การเติมผงตะกั่วที่ปริมาณ 10-50 phr ส่งผลให้ค่าความต้านแรงฉีกขาดของยางมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากตะกั่วมีค่าหนาแน่นที่ค่อนข้างสูง จึงส่งผลทำให้เป็นสารตัวเติมกระจายในยางได้ยาก และผงตะกั่วไม่สามารถเกิดพันธะทางเคมีกับยางได้จึงที่ไม่มีการเสริมแรงในวัสดุยาง



รูปที่ 4.29 ความต้านทานต่อแรงฉีกขาดของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงซีลี้อยไม้ที่มีการเติมสารตัวเติมป้องกันรังสีชนิดผงตะกั่ว

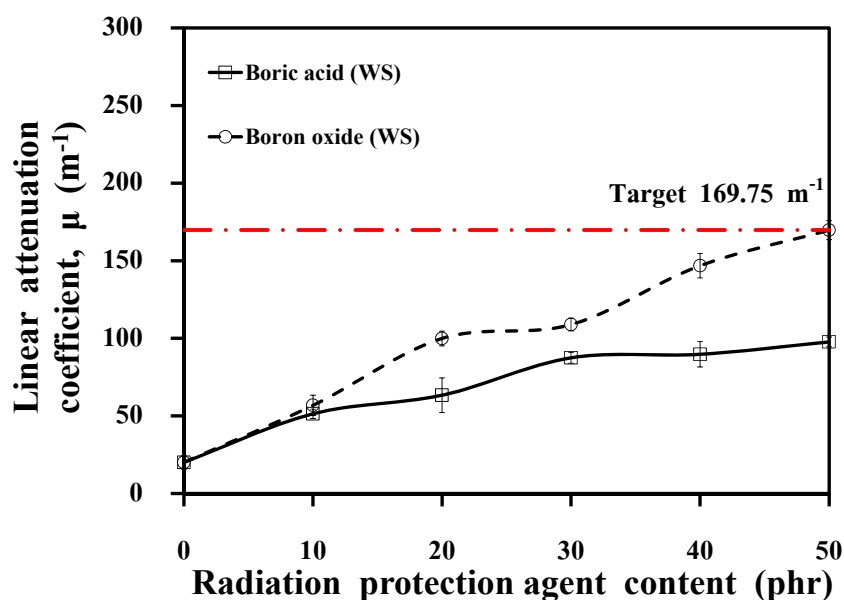
ตารางที่ 4.5 แสดงผลสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงซีลี้อยไม้หลังการบ่มเร่งด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 96 ชั่วโมง พบว่า วัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงซีลี้อยไม้ที่ไม่เติมสารตัวเติมป้องกันรังสีส่งผลทำให้ค่าความต้านทานแรงดึง และเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด มีแนวโน้มลดลง เนื่องจาก ภายในเนื้อยางเกิดเป็นรูพรุนเพิ่มขึ้น ส่วนในกรณีการเติมกรดบอริกส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงดึง และค่าความแข็งที่ผิวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด มีแนวโน้มลดลง เนื่องจากยางมีความเป็นออสติกลดลงที่มากจากการเกิดอันตรกิริยาระหว่างยางธรรมชาติกับผงซีลี้อยไม้ ส่วนในกรณีการเติมผงโบรอนออกไซด์ และผงตะกั่ว ส่งผลทำให้ค่าสมบัติเชิงกล ได้แก่ ค่าความแข็งที่ผิว ความต้านทานแรงดึง และเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด มีแนวโน้มลดลง เนื่องมาจากยางเกิดการเสื่อมสภาพ (Degradation) เมื่อได้รับความร้อนเป็นเวลานาน

ตารางที่ 4.5 เปรียบเทียบค่าการเปลี่ยนแปลงของผลสมบัติเชิงกลหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อน

Sample code	% Change properties thermal aging (70 °C at 96 hour)			
	Tensile modulus at 100% elongation (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Elongation at break (%)	Hardness (Shore A)
NR-40CB-20WS	9.65	-11.07	-12	3
NR-40CB-20WS-10BA	16.98	2.18	-11	5
NR-40CB-20WS-20BA	35.88	24	-8	8
NR-40CB-20WS-30BA	40	27.32	-15	9
NR-40CB-20WS-40BA	34.96	25.31	-14	0
NR-40CB-20WS-50BA	18.94	11.11	-17	2
NR-40CB-20WS-10BO	-1.64	-17.48	-14	-30
NR-40CB-20WS-20BO	-3.31	-20.54	-16	-24
NR-40CB-20WS-30BO	-17.79	-14.87	4	-19
NR-40CB-20WS-40BO	-9.91	-27.65	-19	-18
NR-40CB-20WS-50BO	-15.02	-22.26	-13	-20
NR-40CB-20WS-10Pb	-0.74	-21.87	-18	-7
NR-40CB-20WS-20Pb	11.35	-15.53	-19	-5
NR-40CB-20WS-30Pb	11.05	-2.64	-9	1
NR-40CB-20WS-40Pb	18.84	-9.3	-19	-1
NR-40CB-20WS-50Pb	17.61	-6.86	-17	0

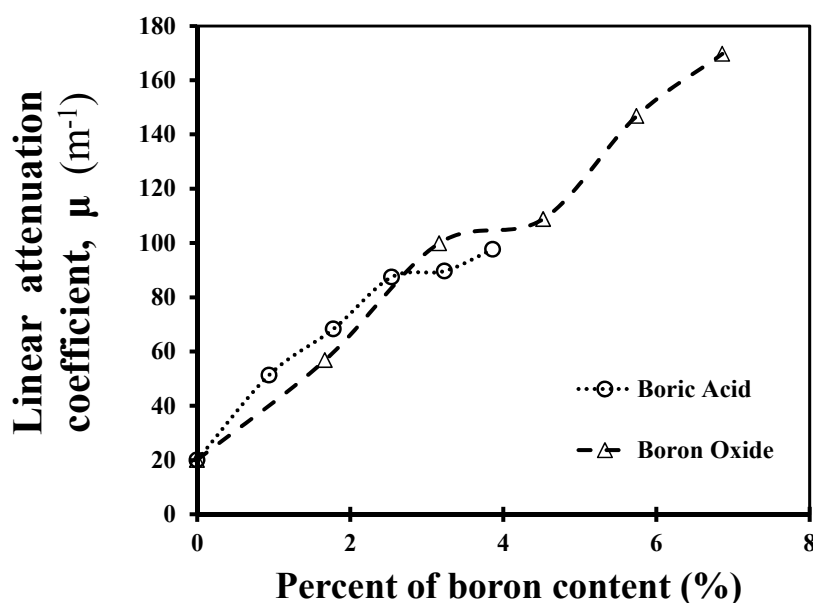
หมายเหตุ : *CB* คือ ผงเขม่าดำ, *WS* คือ ผงขี้เถ้า, *BA* คือ ผงกรดบอริก, *BO* คือ ผงโบรอนออกไซด์, *Pb* คือ ผงตะกั่ว

4.6 ผลของสมบัติด้านรังสีของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เถ้าไม้



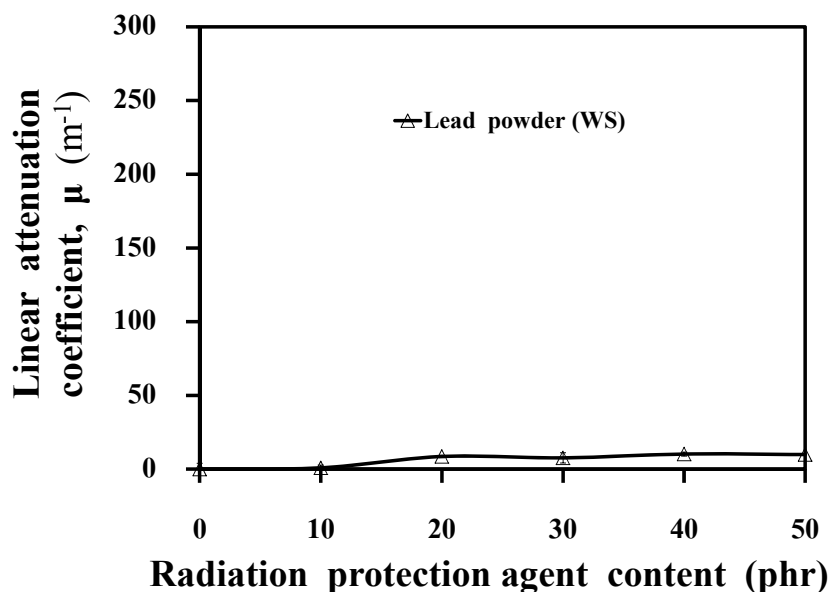
รูปที่ 4.30 ความต้านทานต่ออนุภาคนิวตรอนของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เถ้าไม้ที่มีการเติมสารตัวเติมป้องกันรังสีชนิดผงกรดบอริก และผงโบรอนออกไซด์

จากรูปที่ 4.30 แสดงผลของชนิดและปริมาณสารตัวเติมป้องกันรังสีที่ส่งผลต่อความสามารถในการป้องกันอนุภาคนิวตรอน พบว่า การเติมโบรอนออกไซด์ ส่งผลทำให้ความสามารถในการป้องกันอนุภาคนิวตรอนมีแนวโน้มสูงขึ้นตามปริมาณของโบรอนออกไซด์ที่เพิ่มขึ้น และผ่านเกณฑ์เป้าหมายการป้องกันอนุภาคนิวตรอนที่ปริมาณ 50 phr ส่วนในกรณีการเติมกรดบอริกที่ 10-40 phr ส่งผลทำให้ความสามารถในการป้องกันอนุภาคนิวตรอนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อปริมาณกรดบอริกเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.31 ความต้านทานต่ออนุภาคนิวตรอนของปริมาณโบรอนในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงจี เลื่อยไม้ที่มีการเติมสารตัวเติมป้องกันรังสีชนิดผงกรดบอริก และผงโบรอนออกไซด์

จากรูปที่ 4.31 แสดงความต้านทานต่ออนุภาคนิวตรอนของปริมาณโบรอนในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงจีเลื่อยไม้ เมื่อเปรียบเทียบปริมาณของโบรอน พบว่า การเติมผงโบรอนออกไซด์มีค่าความต้านทานต่ออนุภาคนิวตรอนที่สูงกว่าการเติมผงกรดบอริก เนื่องจากโบรอนออกไซด์มีปริมาณโบรอนที่มากกว่ากรดบอริก



รูปที่ 4.32 ความต้านทานต่อรังสีแกมมาของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงซีลี้อยู่ไม้ที่มีการเติมสารตัวเติมป้องกันรังสีชนิดผงตะกั่ว

จากรูปที่ 4.32 แสดงผลของชนิดและปริมาณสารตัวเติมป้องกันรังสีที่ส่งผลต่อความสามารถในการป้องกันรังสีแกมมา พบว่า การเติมผงตะกั่วส่งผลทำให้ความสามารถในการป้องกันรังสีแกมมามีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่มีการเติมผงตะกั่วมีความหนาแน่นโดยรวมเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ซึ่งความหนาแน่นของวัสดุส่งผลต่อความสามารถในการป้องกันรังสีแกมมา

4.7 ผลของค่าความหนาแน่น และการนำความร้อน ของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงซีลี้อยู่ไม้

ตารางที่ 4.6 แสดงผลของความหนาแน่น และค่าการนำความร้อนของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงซีลี้อยู่ไม้ มีข้อสังเกตเห็นว่า การเติมสารตัวเติมป้องกันรังสีชนิดกรดบอริก โบรอนออกไซด์ และผงตะกั่ว ที่ปริมาณการเติม 50 phr ในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงซีลี้อยู่ไม้มีค่าอยู่ระหว่าง $1.112 - 1.3505 \text{ g/cm}^3$ โดยมีค่าความหนาแน่นที่ใกล้เคียงกับวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่ไม่เติมผงซีลี้อยู่ไม้ซึ่งอยู่ในช่วง $1.053 - 1.4064$ โดยสังเกต พบว่า การเติมผงตะกั่ว (Pb) ทำให้ค่าความหนาแน่นเพิ่มขึ้น เนื่องจากค่าความหนาแน่นเริ่มต้นของตะกั่วมีค่ามาก จึงส่งผลทำให้ค่าความหนาแน่นของวัสดุเชิงประกอบยางโดยรวมเพิ่มขึ้น โดยค่าความหนาแน่นจากสูตรงานวิจัยมีค่าต่ำกว่าเกณฑ์ (การเติมกรดบอริก และโบรอนออกไซด์) ซึ่งแสดงถึงผลิตภัณฑ์โดยรวมมีน้ำหนักที่เบากว่า และเมื่อพิจารณาถึงค่าการนำความร้อน พบว่า การเติมสารตัวเติมป้องกันรังสีชนิดกรดบอริก โบรอนออกไซด์ และผงตะกั่ว ที่ปริมาณการเติม 50 phr ในวัสดุเชิงประกอบยางที่มี และไม่มีผงซีลี้อยู่ไม้ มีค่าการนำความร้อนอยู่ระหว่าง

0.1385 – 0.3065 W/m.K ซึ่งมีค่าการนำความร้อนที่ต่ำ ทั้งนี้เนื่องจากวัสดุยางธรรมชาติเป็นวัสดุหลัก (Matrix) มีค่าความเป็นฉนวนกันความร้อนที่ดี และมีค่าที่ต่ำกว่าเกณฑ์เป้าหมาย (Target)

ตารางที่ 4.6 ผลของความหนาแน่น และค่าการนำความร้อนของวัสดุเชิงประกอบยาง

Sample code	Density (g/cm ³)	Thermal conductivity (W/m.K)
Target	1.3735	0.6207 ± 0.0025
NR-40CB	1.1003	0.2527 ± 0.0002
NR-40CB-50BA	1.053	0.1385 ± 0.0008
NR-40CB-50BO	1.164	0.3007 ± 0.0001
NR-40CB-50Pb	1.4064	0.2762 ± 0.0011
NR-20WS	1.1121	0.2743 ± 0.0009
NR-20WS-50BA	1.726	0.2564 ± 0.002
NR-20WS-50BO	1.2111	0.3065 ± 0.0004
NR-20WS-50Pb	1.3696	0.2971 ± 0.0005

บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1 ผลการทดสอบสมบัติด้านรังสีของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงซีลี้อยไม้ที่มีการเติมสารตัวเติมป้องกันรังสีชนิดผงกรบอริก ผงโบรอนออกไซด์ และผงตะกั่ว

- การเติมผงกรบอริกและผงโบรอนออกไซด์ในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงซีลี้อยไม้ ทำให้ค่าความต้านทานต่ออนุภาคนิวตรอนเพิ่มขึ้นตามปริมาณสารตัวเติม
- การเติมผงตะกั่วส่งผลทำให้วัสดุเชิงประกอบยางสามารถต้านทานต่อรังสีแกมมาได้
- การเติมผงโบรอนออกไซด์ที่ปริมาณ 50 phr ในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงซีลี้อยไม้ มีค่าเทียบเท่ากับเกณฑ์มาตรฐาน

5.1.2 ผลการทดสอบเวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูป เวลาที่ยางคงรูป สมบัติเชิงกล ค่าความหนาแน่น และค่าการนำความร้อนของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงซีลี้อยไม้ที่มีการเติมสารตัวเติมป้องกันรังสีชนิดผงกรบอริก ผงโบรอนออกไซด์ และผงตะกั่ว

- การเติมผงกรบอริกในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงซีลี้อยไม้ส่งผลทำให้ระยะเวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูปและเวลาที่ยางคงรูปเพิ่มขึ้น
- การเติมผงโบรอนออกไซด์ในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงซีลี้อยไม้ส่งผลทำให้ระยะเวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูปและเวลาที่ยางคงรูปลดลง
- การเติมผงตะกั่วในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงซีลี้อยไม้ไม่ส่งผลต่อระยะเวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูปและเวลาที่ยางคงรูป
- การเติมผงกรบอริกในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงซีลี้อยไม้ส่งผลทำให้สมบัติเชิงกลโดยรวมมีค่าลดลง
- การเติมผงโบรอนออกไซด์ในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงซีลี้อยไม้ส่งผลทำให้สมบัติเชิงกลโดยรวมมีค่าลดลง ยกเว้นค่าความแข็งที่ผิว
- การเติมผงตะกั่วในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงซีลี้อยไม้ส่งผลให้สมบัติเชิงกลโดยรวมมีค่าลดลง ยกเว้นค่าความแข็งที่ผิวและค่ามอดุลัสแรงดึง
- เมื่อเปรียบเทียบกับเกณฑ์เป้าหมาย พบว่า การเติมผงโบรอนออกไซด์ในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติมีค่าความต้านทานแรงดึง และเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด ผ่านเกณฑ์เป้าหมาย

- การเติมสารตัวเติมป้องกันรังสีชนิดกรดบอริก โบรอนออกไซด์ และผงตะกั่วในวัสดุเชิงประกอบ ที่มีผงซีลีอ์ไม่มีความหนาแน่นสูงกว่าวัสดุเชิงประกอบที่ไม่มีผงซีลีอ์ไม่ และมีการนำความร้อนของวัสดุเชิงประกอบที่มีและไม่มีผงซีลีอ์ไม่ใกล้เคียงกัน และมีค่าต่ำกว่าเกณฑ์เป้าหมาย

5.2 วิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์

เมื่อวิเคราะห์เปรียบเทียบในเชิงเศรษฐศาสตร์ พบว่า วัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงซีลีอ์ไม่ มีราคาโดยรวมต่ำกว่าผลิตภัณฑ์เกรดการค้า (3,760 บาท/kg) ดังแสดงในตารางที่ 5.1 (ราคาไม่รวมค่าแรงงานและเครื่องจักร ราคา ณ วันที่ 30/11/2558)

ตารางที่ 5.1 สูตรส่วนผสม/ราคาของสารเคมีที่ใช้ในการผลิตแผ่นกำบังรังสี

สารเคมี	ปริมาณ (phr)	ราคาสารเคมี (บาท/กก)	ราคาสารเคมีที่ใช้
Natural Rubber STR 20	100 (Part)	53	5300
Zinc Oxide; ZnO	5	79	395
Stearic acid	3	53	159
Mercaptobenzthaisoles, MBT	2	170	340
Diphenylguanidine, DPG	3	150	450
Sulphur powder 450 mesh	4	23	92
Carbon Black (Masterbatch N 330)	40	45	1800
Wood sawdust	20	2	40
Silane Coupling (KBM 603A)	0.1	3,000	300
UV Stabilizer (GHIGUARD 234)	0.1	2000	200
Anti-oxidant (IRGANOX 1076)	0.1	900	90
Anti-Ozonant (REDEZON 515P)	3	106	318
Boric acid ; BA	50	696	34800
Boron oxide; BO		7,700	385000
Lead powder; Pb		994	49700
Total	230.3 kg	BA:7277, BO:14281, Pb: 7575	BA: 193 บาท/kg, BO:1713บาท/kg, Pb: 257บาท/kg

จากตารางที่ 5.1 แสดงสูตรส่วนผสมและราคาของสารเคมีที่ใช้ในการผลิตแผ่นกำบังรังสี (ราคาต่อกิโลกรัม) โดยวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่เติมกรดบอริกมีราคา 193 บาทต่อกิโลกรัม วัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่เติมผงโบรอนออกไซด์มีราคา 1,713 บาทต่อกิโลกรัม และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่เติม

ผงตะกั่วมีราคา 257 บาทต่อกิโลกรัม ซึ่งมีราคาต่ำกว่าเมื่อเทียบกับผลิตภัณฑ์เกรดการค้าที่มีราคา 3,760 บาทต่อกิโลกรัม [24]

5.3 ข้อเสนอแนะ

- ควรศึกษาผลของการเติมสารตัวเติมชนิดโบรอนออกไซด์ในปริมาณที่เพิ่มขึ้น ที่ส่งผลต่อวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติทางด้านทานต่ออนุมูลอิสระ
- ควรศึกษาการปรับเปลี่ยนความหนาของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่เติมผงตะกั่ว เพื่อให้มีความสามารถในการต้านทานต่อรังสีแกมมาที่เกิดจากการดูดซับอนุมูลอิสระที่เพิ่มขึ้น

เอกสารอ้างอิง

1. สมพร จงคำ และ อาริรัตน์ คอนดวงแก้ว, บทความสมคมนิวเคลียร์แห่งประเทศไทย : โรงไฟฟ้านิวเคลียร์[Online] Available : “<http://www.nst.or.th/article/notes01/article010.htm>”. [2 ธันวาคม 2558]
2. ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ, เอกชัย วิมลมาลา, ชีระศักดิ์ หมากรบิน และ ชัชวาลย์ กันทะลา, 2552, “การพัฒนาวัสดุและเทคโนโลยีการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์หลังคาจากวัสดุผสมยาง ธรรมชาติกับผงขี้เลื่อยไม้” - การประชุมวิชาการวิจัยยางพารา โครงการวิจัยแห่งชาติ: ยางพารา ฝ่าฝืนอุตสาหกรรมสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (Research on NR), เล่มที่ 4, 5-6 มิถุนายน 2552, ศูนย์ประชุมอิมแพค เมืองทองธานี นนทบุรี, หน้า 169-176.
3. Hamaviriyaporn N., Sombatsompop N., markpin T., Kositchaiyong A. and Wimolmala E., 2012, Solar reflectance, Surface Adhesion and Thermal Conductivity of Wood/NR Composite Sheet with TiO₂/PU Topcoat for Roofing Applications, **Journal of Vinyl & Additive Technology**, Vol. 18, No. 3, pp. 184-191.
4. พงษ์ธร แซ่ฮุย, 2548, ยาง : ชนิดสมบัติและการใช้งาน, ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ(เอ็มเทค), พิมพ์ครั้งที่ 2, หน้า 9-12, 30, 41, 54, 75-82.
5. เสาวรจน์ ช่วยจุลจตร์, 2539, เทคโนโลยียาง, ภาควิชาวัสดุศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, หน้า 103, 121, 125, 141, 146-147.
6. ส่วนประกอบของไม้, [Online], Available: “http://www.buranapagroup.com/knowledge_chemical.php” [2 ธันวาคม 2558]
7. นวลฉวี รุ่งธนเกียรติ, 2545, วิทยาศาสตร์นิวเคลียร์, สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, พิมพ์ครั้งที่ 1, หน้า 72-75.

8. คลื่นรังสีแม่เหล็กไฟฟ้า [Online] Available : “<https://www.gotoknow.org/posts/512263>”.
[2 ธันวาคม 2558]
9. กรรติกา ศิริเสนา, 2550, **กัมมันตภาพรังสี พลังงานนิวเคลียร์ มนุษย์ สิ่งแวดล้อม และสังคม**, สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, พิมพ์ครั้งที่ 1, หน้า 3-16.
10. ปรียา อนุพงษ์อ้ออาจ, รังสีแกมมา, [Online] Available : “http://www.rmutphysics.com/physics/oldfront/102/1/nuclear1/nuclear_9.htm” [2 ธันวาคม 2558]
11. สุรศักดิ์ พงศ์พันธุ์สุข, การสลายของนิวตรอนอิสระ, [Online] Available : “http://www.electron.rmutphysics.com/physicsglossary/index.php?option=com_content&task=view&id=4813&Itemid=0”. [2 ธันวาคม 2558]
12. ภาคตัดขวางนิวเคลียร์ (Nuclear Cross Sections) [Online] Available : [http://e-book.ram.edu/e-book/p/PH426\(50\)/PH426-2.pdf](http://e-book.ram.edu/e-book/p/PH426(50)/PH426-2.pdf). [2 ธันวาคม 2558]
13. ElmahrougY., Tellili B. & SougaC., 2013, Calculation of Gamma and Neutron Shielding parameters for some materials Polyethylene-based, International Journal of Physics and Research (IJPR), Vol.3, Issue 1,pp.33-40.
14. บทความสมาคมนิวเคลียร์แห่งประเทศไทย [Online] Available : “<http://www.nst.or.th/article/Article57/article57-001.html>”. [2 ธันวาคม 2558]
15. Gwaily S.E. and Madani M., 2002, Lead-Natural Rubber Composites as Gamma Radiation Shields. II: High Concentration, **Polymer Composites**, Vol. 23, No. 4, pp. 495-499.
16. Gwail S.E., Hassan H.H., Badawy M.M. and Madani M., 2002, Study of Electrophysical Characteristic of Lead-Natural Rubber Composites as Radiation Shields, **Polymer Composites**, Vol. 23, No. 6, pp. 1068-1075.

17. Gwail S.E., Hassan H.H., Badawy M.M. and Madani M., 2002, Natural Rubber Composites as Thermal Neutron Radiation Shields, **Polymer Testing**, Vol. 21, pp. 513-517.
18. ศิริกุล กาญจนปฐมพร, 2555, “การใช้โบรอนออกไซด์เพื่อผลิตเป็นวัสดุกำบังรังสีนิวตรอน”, วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี ภาควิชาวิศวกรรมนิวเคลียร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2555.
19. สมหมาย ช่างเขียน, 2553, “วัสดุกำบังรังสีแกมมาที่ผลิตจากยางธรรมชาติผสมเลดออกไซด์”, บทความวิจัยยางธรรมชาติ เล่มที่ 5, โครงการวิจัยแห่งชาติ ยางพารา ฝ่ายอุตสาหกรรม สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย, หน้า 42-48.
20. กัลยาณี คุปตานนท์, เล็ก สีกง, ไตรภพ ผ่องสุวรรณ และสมพงษ์ นนทพันธ์, 2551, “การใช้ยาง STR 5L ผสมผงเฟอร์ไรต์ป้องกันรังสีแกมมา”, วารสารวิจัย มช., ฉบับที่ 13 มีนาคม, หน้า 269-278.
21. Onjun O., Laothong N., Picha R., Ratanathongchai W. and Onjun T., 2014, Natural Rubber blocks as Thermal Neutron Shields, **Progress in Nuclear Science and Technology**, Vol. 4, pp. 631-634.
22. Feniak, G., 1975, Scorch Retarders for Halaogenated Butyl, **U.S. Patent 3,865,763**.
23. Larson, M.P. and Larson, L.M., 1996, Gamma Radiation Treated Material, **U.S. Patent 5,540,876**
24. Neutron Shielding Rubber, 2013,” **Showa-Rubber Co., Ltd.**, challenging the potential of “rubber. (Japan). “<http://www.showa-rubber.co.jp/en/products/neutron.php>”. [2 December 2015]

25. Katathikankul C, Kanking S, Niltui P, Isarangkura K, Wimolmala E & Sombatsompop N (2015)
A correlation between reinforcing effect and antibacterial performance of carbon black and silica filled NR vulcanizates containing HPQM-based Neusilin - **Polymers & Polymer Composites**, Vol. 23, No. 8, pp. 563-574.
26. Lehmann, B., Neutron Matter Interaction [Online] Available : “<http://www.psi.ch/niag/neutron-interaction-with-matter>” [2 December 2015]