รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ

การผลิตแผ่นกำบังอนุภาคนิวตรอนและรังสีแกมมาจากวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ ระยะที่ 2

โดย ผศ. ดร.เกียรติศักดิ์ แสนบุญเรือง และคณะ

กรกฎาคม 2560

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ

การผลิตแผ่นกำบังอนุภาคนิวตรอนและรังสีแกมมาจากวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ ระยะที่ 2

สัญญาเลขที่ RDG5850094

คณะผู้วิจัย

1. ผศ. ดร.เกียรติศักดิ์ แสนบุญเรือง
2. รศ. เอกชัย วิมลมาลา
3. ศ. ดร.ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ
4. นางสาวกีรติกานต์ นิลยอง

สังกัด

ภาควิชารังสีประยุกต์และไอโซโทป คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สายวิชาเทคโนโลยีวัสดุ คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

กรกฎาคม 2560

สนับสนุนโดยสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.)

และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย วช. – สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

บทสรุปผู้บริหาร

โครงการ “การผลิตแผ่นกำบังอนุภาคนิวตรอนและรังสีแกมมาจากวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้” ได้ดำเนินโครงการต่อเนื่อง ตั้งแต่ พ.ศ. 2557-2558 โดยการนำวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ ที่มีการเติมสารตัวเติมป้องกันรังสี 3 ชนิด ดังนี้ กรดบอริก โบรอนออกไซด์ และผงตะกั่ว และศึกษาถึงปริมาณของสารตัวเติมที่ 0 ถึง 80 ส่วนในยางร้อยส่วน (Parts per hundred of rubber; phr) ในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติและวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ ตรวจสอบสมบัติการป้องกันอนุภาคนิวตรอน เวลาที่ยางคงรูป และสมบัติเชิงกล ผลจากการศึกษาพบว่า การเติมโบรอนออกไซด์ส่งผลทำให้วัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติมีความต้านทานต่ออนุภาคนิวตรอนดีกว่ากรดบอริกในทุกสัดส่วนปริมาณของสารตัวเติม โดยการเติมโบรอนออกไซด์ในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ /วัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ ส่งผลทำให้เวลาที่ยางคงรูปยางลดลง การเติมโบรอนออกไซด์ในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ ส่งผลทำให้ความแข็งของผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น ส่วนความต้านทานแรงดึง การยืดตัวของวัสดุมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณของสารตัวเติม ส่วนการเติมผงตะกั่วไม่ส่งผลต่อเวลาคงรูปยาง แต่ทำให้สมบัติเชิงกลโดยรวมลดลงตามปริมาณของสารตัวเติม อย่างไรก็ตามสามารถป้องกันรังสีแกมมาที่เกิดจากการดูดซับนิวตรอนได้ นอกจากนี้ จากการทดสอบใช้งานจริง พบว่าวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่มีโบรอนออกไซด์ ที่ปริมาณ 80 phr มีความสามารถในการป้องกันอนุภาคนิวตรอนได้

ผลจากงานวิจัยนี้ สามารถใช้เป็นต้นแบบแผ่นกำบังอนุภาคนิวตรอน ที่มีสมบัติเชิงกลโดยรวมและการป้องกันรังสีที่ดี สามารถใช้ทดแทนผลิตภัณฑ์แผ่นยางป้องกันรังสีเกรดการค้าที่นำเข้าจากต่างประเทศได้อย่างมีประสิทธิภาพ เป็นวัสดุเชิงประกอบป้องกันรังสี ที่สามารถนำไปใช้ตามหน่วยงานด้านรังสี เช่น โรงพยาบาล สถานศึกษา ศูนย์วิจัยฯ และสถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์ เป็นต้น โดยต้นทุนผลิตภัณฑ์จากงานวิจัยมีราคาต่ำกว่าผลิตภัณฑ์ป้องกันรังสีเกรดการค้าได้

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาชนิดและปริมาณของสารตัวเติมป้องกันรังสี 3 ชนิด ดังนี้ กรดบอริก โบรอนออกไซด์ และผงตะกั่ว โดยปรับเปลี่ยนปริมาณที่ 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 ส่วนในยางร้อยส่วน (Parts per hundred of rubber; phr) ในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ ตรวจสอบสมบัติด้านรังสี เวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูป เวลาที่ยางคงรูป ผลต่างแรงบิด และสมบัติเชิงกล จากการศึกษาสมบัติด้านรังสี พบว่า การเติมโบรอนออกไซด์ส่งผลทำให้วัสดุเชิงประกอบยางมีความต้านทานต่ออนุภาคนิวตรอนได้ดีกว่ากรดบอริกในทุกสัดส่วนปริมาณของสารตัวเติม นอกจากนี้พบว่า การเติมกรดบอริกในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ ส่งผลทำให้เวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูปและเวลาคงรูปยางเพิ่มขึ้น แต่ส่งผลทำให้ผลต่างแรงบิดลดลง ส่วนในกรณีการเติมโบรอนออกไซด์ในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ ไม่ส่งผลต่อเวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูป แต่ส่งผลทำให้เวลาที่ยางคงรูปและผลต่างแรงบิดลดลง ส่วนวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ที่เติมผงตะกั่วไม่ส่งผลต่อเวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูป เวลาคงรูปยาง และผลต่างแรงบิด การศึกษาสมบัติเชิงกล พบว่า การเติมกรดบอริกในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ ส่งผลทำให้ความแข็งที่ผิว มอดุลัสแรงดึง ความต้านทานแรงดึง เปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด และความต้านทานต่อแรงฉีกขาดลดลง ส่วนการเติมโบรอนออกไซด์ในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ ส่งผลทำให้มอดุลัสแรงดึง ความต้านทานต่อแรงดึง เปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด และความต้านทานต่อแรงฉีกขาดลดลง ยกเว้นค่าความแข็งที่ผิว และพบว่า การเติมกรดบอริกและโบรอนออกไซด์ในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ มีความแข็งที่ผิวและมอดุลัสแรงดึงที่สูงกว่ากรณีการเติมกรดบอริกและโบรอนออกไซด์ในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่ไม่มีผงขี้เลื่อยไม้ ในกรณีการเติมผงตะกั่วในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ ส่งผลทำให้ความต้านทานแรงดึง และเปอร์เซนต์การยืดตัว ณ จุดขาดลดลง ส่วนความแข็งที่ผิว และมอดุลัสแรงดึงไม่เปลี่ยนแปลง นอกจากนี้ในงานวิจัยศึกษาปริมาณการเติมสารตัวเติมป้องกันรังสีชนิดโบรอนออกไซด์ โดยปรับเปลี่ยนปริมาณที่ 60, 70 และ 80 ส่วนในยางร้อยส่วน (Parts per hundred of rubber; phr) ในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ ตรวจสอบสมบัติด้านรังสี เวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูป เวลาที่ยางคงรูป ผลต่างแรงบิด และสมบัติเชิงกล จากการศึกษาสมบัติด้านรังสี พบว่า การเติมโบรอนออกไซด์ ส่งผลทำให้วัสดุเชิงประกอบยางมีความต้านทานต่ออนุภาคนิวตรอน

เพิ่มขึ้นเล็กน้อย และเหมาะสมที่ปริมาณการเติม 80 phr นอกจากนี้พบว่า การเติมโบรอนออกไซด์ที่ปริมาณ 60 - 80 phr ในวัสดุเชิงประกอบยาง พบว่า เวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูปและเวลาคงรูปยางเพิ่มขึ้น ผลต่างแรงบิดลดลง การศึกษาสมบัติเชิงกล พบว่า การเติมโบรอนออกไซด์ที่ปริมาณ 60-80 phr ในวัสดุเชิงประกอบยาง ทำให้สมบัติเชิงกลโดยรวมลดลง ยกเว้นค่าความแข็งที่ผิว และศึกษาสมบัติด้านอนุภาคนิวตรอนและรังสีแกมมาของแผ่นกำบังรังสีที่ความหนาต่างๆ โดยเลือกสัดส่วนที่เหมาะสมเพื่อปรับเปลี่ยนความหนา ดังนี้ 2.5, 5, 7.5, 10, 12.5, 15, 17.5 และ 20 มิลลิเมตร สำหรับชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบยางที่ผสมผงโบรอนออกไซด์ที่ปริมาณ 80 phr และที่ความหนา 5, 10, 15 และ 20 มิลลิเมตร สำหรับชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบยางที่ผสมผงตะกั่วที่ปริมาณ 50 phr จากการศึกษาสมบัติด้านรังสี พบว่า วัสดุเชิงประกอบยางที่เติมโบรอนออกไซด์ที่ปริมาณ 80 phr พบว่า มีจำนวนอนุภาคนิวตรอนผ่านแผ่นวัสดุเชิงประกอบยางลดลง ตามความหนาที่เพิ่มขึ้น ส่วนการเติมผงตะกั่วในวัสดุเชิงประกอบยางที่ปริมาณ 50 phr ส่งผลทำให้มีจำนวนรังสีแกมมาที่เกิดจากการดูดซับนิวตรอนผ่านแผ่นวัสดุเชิงประกอบยางลดลง ตามความหนาที่เพิ่มขึ้น และชิ้นงานจากงานวิจัยนี้มีราคาต่ำกว่าชิ้นงานเกรดการค้า และชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติและวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ ที่เติมโบรอนออกไซด์ที่ปริมาณ 80 phr ทดสอบใช้งานจริงเป็นระยะเวลา 5 เดือน ส่งผลทำให้มีความสามารถในการป้องกันอนุภาคนิวตรอนมีแนวโน้มลดลงเพียงเล็กน้อยตามระยะเวลาการทดสอบ

คำสำคัญ: กรดบอริก/ โบรอนออกไซด์/ ผงขี้เลื่อยไม้/ ผงตะกั่ว/ ยางธรรมชาติ/ สมบัติเชิงกล/ สมบัติด้านรังสี

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 composites and wood sawdust/natural rubber composites. The interested properties that are investigated include radiation properties, scorch time, cure time, delta torque and mechanical properties. In the case of radiation properties, adding boron oxide to the composites improve neutron shielding properties with better efficiency than adding boric acid at the same contents. Results indicate that adding boric acid to the composites increases the scorch time and cure time, but decreases the delta torque, while boron oxide does not significantly affect the scorch time, but decreases the cure time and delta torque, and lead powder does not significantly affect the scorch time and cure time. In the case of mechanical properties, boric acid decreases hardness, tensile modulus at 100% elongation, tensile strength, elongation at break, and tear strength, while boron oxide decreases tensile modulus at 100% elongation, tensile strength, elongation at break, and tear strength but increases hardness. Results indicate that adding boric acid and boron oxide to the wood sawdust/natural rubber composite have higher hardness and tensile modulus at 100% elongation than adding boric acid and boron oxide to the natural rubber composite. Lead powders decrease tensile strength and elongation at break but do not affect hardness and tensile modulus at 100% elongation. In addition, this research investigates effects of contents of boron oxide by varying contents from 60 to 80 phr (parts per hundred of rubber) in 10-phr increments in natural rubber composite and wood sawdust/natural rubber composite. The results show that adding boron oxide to the composites increases neutron shielding properties with the content of 80 phr give the highest shielding performance. The results also indicate that adding boron oxide with the contents of 60-80 phr to the composites increases the scorch time and cure time, but decreases the delta torque. In the case of mechanical properties, adding boron oxide decreases overall mechanical properties, but increases hardness. To investigate effects of thickness of samples in radiation shielding properties, 80-phr boron oxide in composites with thicknesses of 2.5, 5, 7.5, 10, 12.5, 15, 17.5, and 20 mm, and 50-phr lead powders in composites with thicknesses of 5, 10, 15, and 20 mm are tested. The results show that the increase in thickness of composites with 80-phr boron oxide decreases neutrons transmission ratios, which replied the improvement in neutron shielding properties. This also the

same case as the results for composites with 50-phr lead powders. Furthermore, products from this research have lower cost of manufacture than commercial-graded products. The composites also have been used in real applications for 5 months and only show a slight decrease in neutron shielding properties.

Keywords: Boric acid/ Boron oxide/ Lead power/ Mechanical Properties/ Natural rubber/ Radiation properties/ Wood sawdust

สารบัญ

หน้า

บทสรุปผู้บริหาร		ก
บทคัดย่อภาษาไทย		ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ		ง
สารบัญ		ฉ
รายการตาราง		ฏ
รายการรูปประกอบ		ฐ
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	8
2.2.3.1	เกรดของผงเขม่าดำ	8
2.2.3.2	สมบัติของผงเขม่าดำ	9
2.2.3.3	กลไกการเสริมแรง	10
2.2.4	ผงขี้เลื่อยไม้	10

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.2.4.1	เซลลูโลส	10
2.2.4.2	เฮมิเซลลูโลส	11
2.2.4.3	ลิกนิน	12
2.2.5	สารกระตุ้นปฏิกิริยา	12
2.2.5.1	ซิงค์ออกไซด์	13
2.2.5.2	กรดสเตียริก	13
2.2.6	สารตัวเร่งปฏิกิริยา	13
2.2.6.1	เมอร์แคปโตเบนโซไทอะโซล	13
2.2.6.2	ไดฟีนิลกัวนิดีน	14
2.2.7	พลาสติกไซเซอร์	14
2.2.8	สารป้องกันยางเสื่อมสภาพ	14
2.3	เทคโนโลยีการผสมยาง	15
2.3.1	การบดย่อยยางหรือมาสติเคชัน	15
2.3.2	เครื่องผสมยางแบบ 2 ลูกกลิ้ง	15
2.4	ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับรังสี	16
2.4.1	แหล่งกำเนิดรังสี	17
2.4.2	อนุภาคนิวตรอน	17
2.4.2.1	อันตรกิริยาของนิวตรอนกับสสาร	18
2.4.3	รังสีแกมมา	19
2.4.4	ปัจจัยหลักที่มีผลต่อการป้องกันรังสี	20
2.4.5	อันตรายจากรังสีต่อสิ่งมีชีวิต	23
2.4.6	การป้องกันอันตรายจากรังสี	27
2.4.6.1	วัสดุที่ใช้ป้องกันรังสี	28
2.5	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	29
3. วัตถุดิบและขั้นตอนการดำเนินงาน		**33**
3.1	วัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย	33
3.1.1	ยางธรรมชาติ	33
3.1.2	ซิงค์ออกไซค์	33

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.1.3	กรดสเตียริก	33
3.1.4	เมอร์แคปโตเบนโซไทอะโซล	33
3.1.5	ไดฟีนิลกัวนิดีน	34
3.1.6	เขม่าดำชนิดมาสเตอร์แบท	34
3.1.7	ผงขี้เลื่อยไม้	34
3.1.8	กำมะถัน	34
3.1.9	สารคู่ควบไซเลน	34
3.1.10	สารเพิ่มเสถียรภาพต่อรังสียูวี	34
3.1.11	สารแอนตี้ออกซิแดนท์	35
3.1.12	สารป้องกันปฏิกิริยากับโอโซน	35
3.1.13	กรดบอริก	35
3.1.14	โบรอนออกไซด์	35
3.1.15	ผงตะกั่ว	35
3.2	สูตรส่วนประกอบยางที่ใช้ในงานวิจัย	36
3.3	แผนการดำเนินงานวิจัย	36
4. ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง		**52**
4.1	การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพ ลักษณะทางสัณฐานวิทยา และการวิเคราะห์ขนาดของอนุภาคสารตัวเติมป้องกันรังสี	53
4.2	การป้องกันอนุภาคนิวตรอน สมบัติการคงรูปของยาง และสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้	54
4.2.1	การป้องกันอนุภาคนิวตรอนของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ที่เติมสารตัวเติมกรดบอริก และโบรอนออกไซด์	54
4.2.2	สมบัติการคงรูปของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ ที่เติมสารตัวเติมกรดบอริก และโบรอนออกไซด์	56

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.2.3	สมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ ที่เติมสารตัวเติมกรดบอริก และโบรอนออกไซด์	58
4.3	การป้องกันอนุภาคนิวตรอน สมบัติการคงรูปของยาง สมบัติเชิงกล และความหนาที่ส่งผลต่อการป้องกันรังสีของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติและวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ที่เติมสารตัวเติมโบรอนออกไซด์	64
4.3.1	การป้องกันอนุภาคนิวตรอนของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ที่เติมสารตัวเติมโบรอนออกไซด์	65
4.3.2	สมบัติการคงรูปของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ที่เติมสารตัวเติมโบรอนออกไซด์	66
4.3.3	สมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ที่เติมสารตัวเติมโบรอนออกไซด์	
4.3.4	ผลของความหนาของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ที่เติมโบรอนออกไซด์ที่ส่งผลต่อการป้องกันอนุภาคนิวตรอน	70
4.4	การทดสอบสมบัติการคงรูปของยาง สมบัติเชิงกล และความหนาที่ส่งผลต่อการป้องกันรังสีแกมมาของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ที่เติมผงตะกั่ว	74
4.4.1	สมบัติการคงรูป และสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ที่เติมสารตัวเติมผงตะกั่ว	74
4.4.2	ผลของความหนาของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ที่เติมผงตะกั่วที่ส่งผลต่อการป้องกันรังสีแกมมา	77
4.5	ผลสมบัติด้านรังสีของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ที่เติมโบรอนออกไซด์หลังการใช้งานเป็นระยะเวลา 5 เดือน	80

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ **82**

5.1 สรุปผลการทดลอง 82

5.1.1 ผลการป้องกันอนุภาคนิวตรอนของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ที่มีการเติมสารตัวเติมป้องกันรังสีชนิดกรดบอริก และโบรอนออกไซด์ 82

5.1.2 ผลการทดสอบเวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูป เวลาที่ยางคงรูป ค่าผลต่างแรงบิดและสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ที่มีการเติมสารตัวเติมป้องกันรังสีชนิดกรดบอริกและโบรอนออกไซด์ 82

5.1.3 ผลการทดสอบเวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูป เวลาที่ยางคงรูป ค่าผลต่างแรงบิดและสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ที่มีการเติมสารตัวเติมป้องกันรังสีชนิดผงตะกั่ว 83

5.1.4 ผลของความหนาของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ที่เติมสารตัวเติมโบรอนออกไซด์ และผงตะกั่ว ที่ส่งผลต่อการป้องกันรังสี 83

5.1.5 ผลของการทดสอบความต้านทานอนุภาคนิวตรอนในงานจริงเป็นระยะเวลา 5 เดือน 84

5.2 การวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์ 84

5.3 ข้อเสนอแนะ 86

เอกสารอ้างอิง **87**

ภาคผนวก ก **92**

ภาคผนวก ข **97**

ภาคผนวก ค **99**

ภาคผนวก ง **101**

ภาคผนวก จ **110**

ภาคผนวก ฉ **112**

รายการตาราง

ตาราง		หน้า
2.1	ผลกระทบต่อร่างกายเทียบกับปริมาณรังสีที่ได้รับ (หน่วยมิลลิซีเวิร์ต)	24
2.2	ปริมาณรังสีที่แต่ละบุคคลอาจได้รับในหนึ่งปี (โดยประมาณ)	25
3.1	สูตรส่วนประกอบยางที่ใช้ในงานวิจัย	36
4.1	ลักษณะทางกายภาพ ลักษณะทางสัณฐานวิทยา และขนาดของอนุภาคสารตัวเติมป้องกันรังสีชนิดกรดบอริก โบรอนออกไซด์ และผงตะกั่ว	53
4.2	เวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูป เวลาที่ยางคงรูป และผลต่างแรงบิดของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ ที่เติมสารตัวเติมป้องกันรังสีชนิดกรดบอริก และโบรอนออกไซด์	56
4.3	ระยะเวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูป เวลาที่ยางคงรูป และผลต่างแรงบิดของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ ที่เติมสารตัวเติมป้องกันรังสีชนิดกรดบอริก และโบรอนออกไซด์	57
4.4	เวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูป เวลาที่ยางคงรูป และผลต่างแรงบิดของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ ที่เติมสารตัวเติมป้องกันรังสีชนิดโบรอนออกไซด์	67
4.5	สมบัติการคงรูป และสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ ที่เติมสารตัวเติมป้องกันรังสีชนิดผงตะกั่ว	75
5.1	การเปรียบเทียบราคาวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่มีและไม่มีผงขี้เลื่อยไม้ ที่เติมสารตัวเติมโบรอนออกไซด์ กับผลิตภัณฑ์เกรดการค้า (ไม่รวมค่าเครื่องจักรและแรงงาน)	85
ก.1	ผลการวิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของสารตัวเติมป้องกันรังสี	93
ข.1	ผลสมบัติด้านรังสี สมบัติการคงรูป และสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ที่เติมโบรอนออกไซด์	98

รายการรูปประกอบ

รูป		หน้า
2.1	โครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ	6
2.2	โครงสร้างการเชื่อมโยงแบบต่างๆ (1) มอนอซัลฟิดิก (2) ไดซัลฟิดิกท(3) พอลิซัลฟิดิก (4) สายโซ่กำมะถัน (5) โครงสร้างแบบวง และ (6) หมู่ไทออล	7
2.3	โครงสร้างของผงเขม่าดำ	8
2.4	โครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส	11
2.5	โครงสร้างทางเคมีของเฮมิเซลลูโลส	11
2.6	โครงสร้างทางเคมีของลิกนิน	12
2.7	เครื่องบดผสมระบบเปิดแบบ 2 ลูกกลิ้ง	16
2.8	สเปกตรัมของรังสี	17
2.9	การสลายของนิวตรอนอิสระ	18
2.10	รังสีแกมมาจากโคบอลต์ 60	19
2.11	ลำนิวตรอนที่มีพลังงานเข้าชนชิ้นงานในแนวตั้งฉาก	21
2.12	อนุภาคความเข้ม (I_0) ผ่านความหนาของชิ้นงาน (x) ความเข้มลดลงเป็น (I)	22
2.13	ความผิดปกติของระบบไขกระดูกเมื่อได้รับรังสี	26
2.14	ความผิดปกติของระบบทางเดินอาหารเมื่อได้รับรังสี	27
2.15	กลไกการเกิดอันตรกิริยาของโบรอน-10 กับนิวตรอน	29
3.1	ขั้นตอนและรายละเอียดการดำเนินงานตอนที่ 1	37
3.2	ขั้นตอนและรายละเอียดการดำเนินงานตอนที่ 2	38
3.3	ขั้นตอนและรายละเอียดการดำเนินงานตอนที่ 3	39
3.4	เครื่องคัดขนาดแบบสั่น	40
3.5	เครื่องกวนสารละลาย	41
3.6	เครื่องผสมระบบปิดความเร็วสูง	41
3.7	ตู้อบชิ้นงาน	42
3.8	เครื่องบดผสมลูกกลิ้งคู่	43
3.9	เครื่องรีโอมิเตอร์แบบจานแกว่ง	43
3.10	เครื่องอัดขึ้นรูปร้อนระบบแรงดัน	44
3.11	เครื่องทดสอบความต้านทานต่ออนุภาคนิวตรอน	45
3.12	แบบตัดชิ้นงานทดสอบชนิด Die C	46

รายการรูปประกอบ (ต่อ)

รูป		หน้า
3.13	เครื่องทดสอบแรงดึง	46
3.14	เครื่องทดสอบความแข็ง	47
3.15	เครื่องเคลือบตัวอย่างด้วยผงทอง	48
3.16	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	48
3.17	เครื่องทดสอบความต้านทานต่อรังสีแกมมา	50
3.18	ชุดทดสอบอนุภาคนิวตรอนในหน่วยงานรังสีวิทยา	51
3.19	ทดสอบวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่มีสารตัวเติมป้องกันรังสีทดลองใช้กำบังอนุภาคนิวตรอน	51
4.1	ผลการทดลองและลำดับการวิเคราะห์ผลการทดลอง	52
4.2	ความต้านทานต่ออนุภาคนิวตรอนของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ ที่มีการเติมสารตัวเติมป้องกันรังสีชนิดกรดบอริก และโบรอนออกไซด์	55
4.3	สมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ ที่มีการเติมสารตัวเติมป้องกันรังสีชนิดกรดบอริก และโบรอนออกไซด์ โดย (ก) ความแข็งที่ผิว และ (ข) มอดุลัสแรงดึง	59
4.4	ค่าความต้านทานแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ ที่มีการเติมสารตัวเติมป้องกันรังสีชนิดกรดบอริก และโบรอนออกไซด์	60
4.5	ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ ที่มีสารตัวเติมที่ปริมาณ 50 phr (กำลังขยาย 50 เท่า) โดย (ก) และ (ข) กรดบอริก (ค) และ (ง) โบรอนออกไซด์	61
4.6	สมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ ที่มีการเติมสารตัวเติมชนิดกรดบอริก และโบรอนออกไซด์ โดย (ก) เปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด และ(ข) ความต้านทานต่อการฉีกขาด	62
4.7	ผิวชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ ที่เติมสารตัวเติมป้องกันรังสีที่ปริมาณ 50 phr โดย (ก) และ (ข) กรดบอริก (ค) และ (ง) โบรอนออกไซด์	63

รายการรูปประกอบ (ต่อ)

รูป **หน้า**

4.8 ชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ ที่เติมสารตัวเติมชนิดกรดบอริกที่ความหนา 10 มิลลิเมตร 64

4.9 ค่าความต้านทานต่ออนุภาคนิวตรอนของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติและวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ ที่มีการเติมสารตัวเติมป้องกันรังสีชนิดโบรอนออกไซด์ 65

4.10 สมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ ที่มีการเติมสารตัวเติมป้องกันรังสีชนิดโบรอนออกไซด์ โดย (ก) ความแข็งที่ผิว และ (ข) มอดุลัสแรงดึง 68

4.11 สมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ ที่มีการเติมสารตัวเติมป้องกันรังสีชนิดโบรอนออกไซด์ โดย (ก) ความต้านทานแรงดึง และ (ข) เปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด 69

4.12 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของ ก) วัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และ ข) วัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ ที่เติมโบรอนออกไซด์ที่ปริมาณ 80 phr (กำลังขยาย 50 เท่า) 70

4.13 อนุภาคนิวตรอนที่สามารถผ่านแผ่นกำบังที่ความหนาต่างๆ 71

4.14 แบบจำลองของอนุภาคนิวตรอนที่สามารถผ่านแผ่นกำบังที่ความหนาต่างๆ 73

4.15 ภาพโครงสร้างจุลภาคของ ก) วัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และ ข) วัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ ที่เติมผงตะกั่วที่ปริมาณ 50 phr (กำลังขยาย 50 เท่า) 76

4.16 ความต้านทานต่อรังสีแกมมาของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ที่มีการเติมสารตัวเติมป้องกันรังสีชนิดผงตะกั่ว 77

4.17 รังสีแกมมาที่สามารถผ่านแผ่นกำบังที่ความหนาต่างๆ 78

4.18 แบบจำลองของรังสีแกมมาที่สามารถผ่านแผ่นกำบังที่ความหนาต่างๆ 79

4.19 ความต้านทานต่ออนุภาคนิวตรอนของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ ที่มีการเติมสารตัวเติมป้องกันรังสีชนิดโบรอนออกไซด์ หลังทดสอบใช้งานจริงเป็นระยะเวลา 5 เดือน

ก.1 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคของสารตัวเติมป้องกันรังสีชนิดกรดบอริก 94

ก.2 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคของสารตัวเติมป้องกันรังสีชนิดโบรอนออกไซด์ 95
ก.3 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคของสารตัวเติมป้องกันรังสีชนิดผงตะกั่ว 96

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ในปัจจุบันยางธรรมชาติเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทย เห็นได้จากการทำรายได้ให้กับประเทศจากการส่งออกยางดิบ ผลิตภัณฑ์แปรรูปจากยาง และไม้ยางสูงเป็นอันดับต้นของโลก ซึ่งราคาของยางดิบในปัจจุบันมีการผันผวนตามกลไกความต้องการในตลาดโลก ทำให้รายได้ของเกษตรกรด้านยางธรรมชาติมีรายได้ที่ไม่แน่นอน การผันผวนของราคายางดิบเป็นปัจจัยหนึ่งที่ผลักดันให้มีการส่งเสริมการทำวิจัยเพื่อเพิ่มคุณภาพและมูลค่าของยางธรรมชาติ โดยมีการแปรรูปวัตถุดิบยางธรรมชาติให้เป็นผลิตภัณฑ์จากยางที่มีมูลค่าเพิ่มขึ้น และในด้านของการนำยางธรรมชาติไปใช้ประโยชน์ด้านการป้องกันด้านรังสี ได้มีการทำวิจัยโดยการเติมผงตะกั่วในยางธรรมชาติเพื่อยับยั้งรังสีแกมมา และมีการนำสารประกอบที่มีโบรอนชนิดต่างๆ เติมในวัสดุเชิงประกอบยาง เช่น กรดบอริก (H_3BO_3) และโบรอนออกไซด์ (B_2O_3) เพื่อใช้ในการยับยั้งอนุภาคนิวตรอน ซึ่งอนุภาคนิวตรอนเป็นอนุภาคที่ไม่มีประจุทำให้ยากต่อการป้องกันที่อาจหลุดจากโรงไฟฟ้านิวเคลียร์/เตาปฏิกรณ์ [1] หรือห้องฉายรังสีในโรงพยาบาล ดังนั้น การวิจัยจึงเป็นประโยชน์ต่อการป้องกันรังสีในบริเวณดังกล่าว และงานวิจัยนำวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ทำเป็นแผ่นหลังคายาง ที่มีสมบัติโดยรวมเป็นที่น่าพอใจ และอาจมีการขยายผลนำไปทดลองใช้เป็นวัสดุอุปกรณ์ในอาคารหรือผนังห้องด้านรังสีในงานวิจัยนี้จึงเป็นการศึกษาและพัฒนาต่อยอดงานวิจัยให้ยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้สามารถป้องกันหรือยับยั้งรังสีชนิดต่างๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งทำให้การพัฒนาเป็นไปอย่างต่อเนื่อง เป็นประโยชน์ต่อทั้งภาคอุตสาหกรรมและภาคเกษตร อีกทั้งเป็นการเพิ่มมูลค่าของผลิตภัณฑ์จากยางธรรมชาติให้มีความมั่นคงและยั่งยืน

จากงานวิจัยที่ผ่านมาของกลุ่มวิจัยการผลิตและขึ้นรูปพอลิเมอร์ (กลุ่มวิจัย P-PROF) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี [2-3] ศึกษาการนำยางธรรมชาติเป็นวัตถุดิบหลักผลิตผลิตภัณฑ์หลังคายาง โดยการนำยางธรรมชาติผสมกับผงขี้เลื่อยไม้ยางพาราและสารเคมีชนิดอื่น เพื่อเพิ่มสมบัติให้กับยางธรรมชาติให้เหมาะสมต่อการนำไปใช้งานได้จริง ที่มีสมบัติเชิงกลด้านความแข็งแรง ทนทานต่อสภาพภูมิอากาศ และความเป็นฉนวนความร้อนที่ดี แต่ทั้งนี้ในงานวิจัยนี้มีแนวคิดขยายผลจากสมบัติทางกายภาพที่ดีของวัสดุยางธรรมชาติผสมขี้เลื่อยไม้ ให้มีความสามารถในการป้องกันหรือลดปริมาณรังสีได้ ซึ่งมีงานวิจัยยังไม่เป็นที่แพร่หลาย และมีผู้ทำศึกษาวิจัยวัสดุป้องกันทางด้านรังสีน้อยมาก

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาชนิดและปริมาณการใช้สารป้องกันรังสี ได้แก่ กรดบอริก ผงโบรอนออกไซด์ และผงตะกั่วเป็นสารตัวเติมที่ใช้ในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ เพื่อผลิตแผ่นกำบังรังสี ให้มีความสามารถในการป้องกันอนุภาคนิวตรอนและรังสีแกมมาได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้คาดว่าผลจากการวิจัยวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ที่ผสมสารป้องกันรังสี เพื่อใช้ในการป้องกันรังสีโดยเฉพาะอนุภาคนิวตรอนและรังสีแกมมา เป็นทางเลือกใหม่ด้านวัสดุที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อหน่วยงานที่มีการใช้รังสีโดยตรง และการออกแบบที่นำไปใช้ประโยชน์กับผู้ใช้งานทางด้านรังสีเป็นอย่างยิ่ง

วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาผลของชนิด และปริมาณสารตัวเติมป้องกันรังสี ได้แก่ กรดบอริก โบรอนออกไซด์ และผงตะกั่ว ที่เติมในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ ที่มีต่อสมบัติเชิงกล และสมบัติทางกายภาพ
2. เพื่อศึกษาผลของปริมาณสารป้องกันรังสีและความหนาของผลิตภัณฑ์แผ่นกำบังรังสีจากวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ ที่มีต่อการป้องกันอนุภาคนิวตรอนและรังสีแกมมา

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. วัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย ดังนี้
   - ยางธรรมชาติ (Natural rubber) เกรด STR 20
   - สารเคมีที่ใช้ในกระบวนการผสมยาง ได้แก่ สารเร่งและกระตุ้นปฏิกิริยา สารเร่งปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ สารคงรูปและสารแต่งเติมอื่นๆ ได้แก่ สารเพิ่มเสถียรภาพต่อรังสียูวี สารแอนตี้-ออกซิแดนท์ และสารป้องกันปฏิกิริยากับโอโซน
   - สารเติมแต่งเสริมแรงชนิดผงเขม่าดำ (Carbon black) เกรด HAF N330 และผงขี้เลื่อยไม้ (Wood sawdust)
   - สารตัวเติมป้องกันรังสี ได้แก่ กรดบอริก (Boric acid, H_3BO_3) ผงโบรอนออกไซด์ (Boron oxide, B_2O_3) และผงตะกั่ว (Lead powder)
2. การผสมส่วนประกอบกับสารเคมีโดยการใช้เครื่องบดผสมลูกกลิ้งคู่ (Two roll mill) และขึ้นรูปชิ้นงานโดยใช้เครื่องอัดขึ้นรูปร้อนระบบแรงดัน (Hot compression molding)

3. การทดสอบเวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูปและเวลาที่ยางคงรูปด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์แบบจานแกว่ง (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. การทดสอบสมบัติกายภาพ
   - การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM)
6. ทำการปรับเปลี่ยนความหนาของชิ้นงานทดสอบ และทดสอบการป้องกันการผ่าน (ความเข้ม) ของรังสีนิวตรอน และรังสีแกมมา
7. นำชิ้นงานที่มีสมบัติด้านรังสีเหมาะสมทดสอบใช้งานจริง โดยใช้อุปกรณ์ในห้องปฏิบัติการ

1.4 วิธีการดำเนินงานวิจัยโดยสังเขป

1. ศึกษาข้อมูลเบื้องต้นวัสดุป้องกันรังสี ทฤษฎีการป้องกันรังสี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับยางธรรมชาติ สารตัวเติมและสารเคมีในวัสดุยาง กระบวนการผสมยาง การขึ้นรูป และการทดสอบสมบัติด้านต่างๆ ของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ
2. เตรียมวัตถุดิบที่ใช้ในงานวิจัย ได้แก่ ยางธรรมชาติ ผงขี้เลื่อยไม้ยางพารา สารเคมีที่ใช้ในกระบวนการผสมยาง เช่น ผงเขม่าดำ สารป้องกันโอโซน สารวัลคาไนซ์ยาง และสารตัวเติมป้องกันรังสี คือ กรดบอริก ผงโบรอนออกไซด์ และผงตะกั่ว
3. ศึกษาชนิดและปริมาณ สารตัวเติมชนิด กรดบอริก ผงโบรอนออกไซด์ และผงตะกั่วที่เติมในวัสดุ เชิงประกอบยางธรรมชาติที่มีต่อสมบัติเชิงกล และสมบัติทางกายภาพ
4. เตรียมการผสมและขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบแผ่นยางธรรมชาติ ทำการปรับเปลี่ยนปริมาณสารป้องกันรังสีชนิดกรดบอริก ผงโบรอนออกไซด์ และผงตะกั่วในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่มีการเติมผงเขม่าดำ และวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติที่มีการเติมผงเขม่าดำกับผงขี้เลื่อยไม้ด้วยเครื่องบดผสมลูกกลิ้งคู่ อุณหภูมิการผสมอยู่ระหว่าง 30 ถึง 50 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที
5. ทดสอบเวลาที่ยางเริ่มการคงรูป (Scorch time) เวลาที่ยางคุงรูปที่ 90% (Cure time) ด้วยเครื่อง Oscillating disk rheometer, ODR และขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปร้อนด้วยระบบแรงดันที่

อุณหภูมิขึ้นรูป 160 องศาเซลเซียส ใช้เวลาขึ้นรูปที่ยางคงรูป 90% (tc90) ที่ได้จากเครื่อง Oscillating disk rheometer, ODR ด้วยเครื่องขึ้นรูปร้อนระบบแรงดันเป็นแผ่นชิ้นงาน

6. ตรวจสอบสมบัติทางกายภาพและทดสอบสมบัติเชิงกล
7. เตรียมการผสมและขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติในสัดส่วนที่เหมาะสม โดยทำการปรับเปลี่ยนความหนาของชิ้นงานทดสอบที่ 2.5, 5, 7.5, 10, 12.5, 15, 17.5 และ 20 มิลลิเมตร สำหรับชิ้นงานเติมโบรอนออกไซด์ และความหนาที่ 5, 10, 15 และ 20 มิลลิเมตร สำหรับชิ้นงานเติมผงตะกั่ว
8. ตรวจสอบด้านสารกัมมันตรังสีต่างๆ ด้วยอุปกรณ์การวัดทางรังสีจากภาควิชารังสีประยุกต์ และไอโซโทป คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และ/หรือสถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ
9. นำชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่ผสมขี้เลื่อยไม้ที่มีสารตัวเติมต่างๆ ทดสอบการป้องกันรังสี โดยทำการปรับเปลี่ยนความเข้มของรังสี ปรับเปลี่ยนความหนาชิ้นงานทดสอบ และนำชิ้นงานทดสอบใช้งานจริง
10. วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

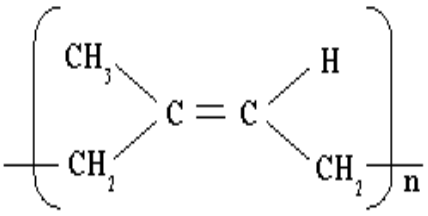
1. **ด้านวิชาการ** ทราบผลของชนิดและปริมาณสารตัวเติมป้องกันรังสี ที่เติมในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้
2. **ด้านเศรษฐศาสตร์และภาคอุตสาหกรรม** ได้สูตรและความหนาที่เหมาะสมในการผลิตแผ่นกำบังรังสีจากวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้อาจนำมาทดแทนหรือเป็นทางเลือกของวัสดุกำบังรังสีทางการค้าที่นำเข้าจากต่างประเทศ
3. **ด้านสังคมและประโยชน์สาธารณะ** ส่งเสริมและเพิ่มทางเลือกในการใช้วัสดุด้านกำบังรังสี สำหรับหน่วยงานรังสีวิทยาและผู้ที่เกี่ยวข้อง ที่อาจขยายผลนำไปใช้ในงานป้องกันรังสี และวัสดุในงานก่อสร้างที่ป้องกันรังสีชนิดต่างๆ ที่ผลิตจากวัตถุดิบยางธรรมชาติในประเทศ

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับยางธรรมชาติ

2.1.1. โครงสร้างของยางธรรมชาติ

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



รูปที่ 2.1 โครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ [4]

2.1.1.1 สมบัติของยางธรรมชาติ

โดยทั่วไปยางธรรมชาติมีโครงสร้างการจัดเรียงตัวของโมเลกุลอสัณฐาน (Amorphous) แต่บางสภาวะโมเลกุลของยางสามารถจัดเรียงตัวค่อนข้างเป็นระเบียบที่อุณหภูมิต่ำหรือเมื่อถูกดึงยืด จึงสามารถเกิดผลึก (Crystallize) ได้ การเกิดผลึกที่อุณหภูมิต่ำ (Low temperature crystallization) ทำให้ยางแข็งมากขึ้น แต่ถ้าอุณหภูมิสูงยางอ่อนตัวและกลับสู่สภาพเดิม ในขณะที่การเกิดผลึกเนื่องจากการยืดตัว (Strain Induced Crystallization) ทำให้ยางมีสมบัติเชิงกลดี คือยางมีความทนต่อแรงดึง (Tensile strength) ความทนต่อการฉีกขาด (Tear resistance) สูง และลักษณะเด่นของยางธรรมชาติมีความยืดหยุ่นสูง (High elasticity) เมื่อแรงภายนอกที่มากระทำหมดไป ยางกลับคืนสู่รูปร่างและขนาดเดิม (หรือใกล้เคียง) อย่างรวดเร็ว อีกทั้งมีสมบัติเด่นในด้านการเหนียวติดกัน (Tack) เป็นสมบัติสำคัญของการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ต้องอาศัยการประกอบ การ

ยึดเกาะชิ้นส่วนต่างๆ เข้าด้วยกัน นอกจากนี้ ยางธรรมชาติมีสมบัติเด่นด้านความเป็นฉนวนไฟฟ้า เนื่องจากมีค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ (Specific resistivity) ที่สูง [4]

2.2 สารเคมีที่ใช้ในยาง

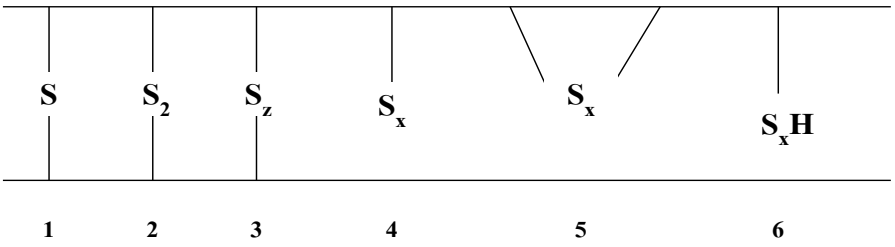
ยางดิบมีข้อจำกัดในการใช้งานเนื่องจากมีสมบัติเชิงกลต่ำและมีลักษณะทางกายภาพที่ไม่เสถียร โดยยางจะอ่อนตัวและเหนียวเยิ้มเมื่ออุณหภูมิสูง และมีความแข็งเปราะเมื่ออุณหภูมิต่ำ ดังนั้นการใช้งานจึงต้องมีการผสมยางกับสารเคมีต่างๆ เช่น กำมะถัน ผงเขม่าดำ และสารตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นต้น ซึ่งยางที่ทำปฏิกิริยากับสารเคมีต่างๆ เรียกว่า วัลคาไนเซชัน (Vulcanization) หรือยางที่ผ่านการคงรูปแล้ว มีความเสถียรไม่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิและมีสมบัติเชิงกลดีขึ้น

2.2.1 สารคงรูปยาง

สารคงรูปยางเป็นองค์ประกอบสำคัญที่ต้องผสมในยางเพื่อทำให้ยางเกิดปฏิกิริยาทางเคมี ที่เรียกว่าปฏิกิริยาวัลคาไนซ์เซชั่นหรือปฏิกิริยาคงรูป ส่งผลทำให้โมเลกุลของยางเกิดการเชื่อมโยงตำแหน่งที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาเป็นโครงสร้างตาข่าย 3 มิติ (Crosslinking) ทำให้ยางมีความยืดหยุ่นสูง มีความทนทาน และมีความเสถียรไม่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ [5] ซึ่งการคงรูปยางทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงที่สำคัญ ดังนี้

- ยางเปลี่ยนโครงสร้างจากแบบเชิงเส้นเป็นแบบตาข่าย ทำให้ยางเปลี่ยนสภาพจากพลาสติกเป็นอิลาสติกที่มีความแข็งแรงมากขึ้น
- ทำให้ชิ้นงานยางไม่ละลายในตัวทำละลายอินทรีย์
- ทำให้สมบัติเชิงกลด้านความต้านทานต่อแรงดึง ความต้านทานการขัดถู และความต้านทานการฉีกขาดเพิ่มขึ้น
- ทำให้ยางมีความต้านทานต่อความร้อน และแสงเพิ่มขึ้น สามารถใช้งานในช่วงอุณหภูมิที่กว้างขึ้น

สารคงรูปยางที่สำคัญต่อยางธรรมชาติ ได้แก่ กำมะถัน เนื่องจากกำมะถันเป็นสารคงรูปยางที่นิยมใช้มาก ราคาต้นทุนต่ำ ในการคงรูปสามารถเกิดขึ้นได้เร็ว ซึ่งการคงรูปด้วยกำมะถันนิยมใช้กับยางที่มีพันธะคู่อยู่ในโมเลกุลยาง เมื่อใส่กำมะถันเข้าไปในยางแล้วนำไปให้ความร้อนยางเกิดการคงรูปทำให้ยางมีสมบัติดีขึ้น คือ เมื่อยางได้รับความร้อนยางไม่อ่อนนิ่ม หรือเยิ้มเหนียว ไม่มีกลิ่น ไม่ละลายในตัวทำละลาย เป็นต้น การเชื่อมโยงโมเลกุลด้วยกำมะถันอาจเกิดขึ้นได้หลายรูปแบบ แสดงดังรูปที่ 2.2 ซึ่งการเชื่อมโยงอาจเกิดผ่านพันธะมอนอซัลฟิดิก (Monosulfidic) ไดซัลฟิดิก (Disulfidic) หรือ พอลิซัลฟิดิก (Polysulfidic) ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของปริมาณกำมะถันต่อสารตัวเร่งปฏิกิริยา



รูปที่ 2.2 โครงสร้างการเชื่อมโยงแบบต่างๆ (1) มอนอซัลฟิดิก (2) ไดซัลฟิดิก (3) พอลิซัลฟิดิก (4) สายโซ่กำมะถัน (5) โครงสร้างแบบวง และ (6) หมู่ไทออล [5]

2.2.2 สารตัวเติม

สารตัวเติม คือ สารอื่นๆ ที่ไม่ใช่ยาง เช่น ผงเขม่าดำ ผงขี้เลื่อยไม้ เป็นต้น ซึ่งสารตัวเติมเป็นองค์ประกอบที่เติมเข้าไปในยางเพื่อจุดประสงค์หลายอย่าง เช่น เสริมแรงให้ยางมีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น เพื่อทำให้ยางคอมพาวด์มีสมบัติที่เหมาะกับกระบวนการผลิต หรือเพื่อลดต้นทุน โดยสารตัวเติมที่เติมในยางมี 3 ลักษณะ [5] ดังนี้

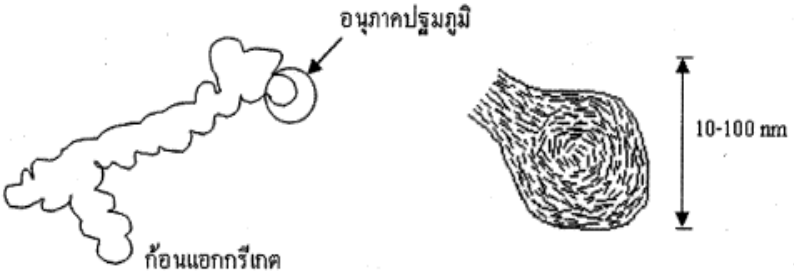
1) **สารตัวเติมลักษณะเป็นอนุภาค (Particles filler)** ได้แก่ ผงเขม่าดำ แคลเซียมคาร์บอเนต และเถ้าชนิดต่างๆ เป็นต้น
2) **สารตัวเติมลักษณะเป็นเส้นใย (Fibrous filler)** ได้แก่ ผงขี้เลื่อยไม้ และใยฝ้าย เป็นต้น
3) **สารตัวเติมเรซิน (Resinous filler)** ได้แก่ สไตรีนเรซิน และฟีนอลฟอร์มาลดีไฮด์เรซิน เป็นต้น

สารตัวเติมลักษณะเป็นอนุภาคที่ใช้ในอุตสาหกรรมสามารถแบ่งออกตามประสิทธิภาพของการเสริมแรงได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ คือ

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

2.2.3 ผงเขม่าดำ

ผงเขม่าดำเป็นสารตัวเติมเสริมแรงที่นิยมใช้กันมากในอุตสาหกรรมยางที่ไม่เน้นสีของผลิตภัณฑ์ ซึ่งได้จากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ของผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม องค์ประกอบหลักของผงเขม่าดำคือธาตุคาร์บอน อนุภาคของผงเขม่าดำมีโครงสร้างกึ่งแกรไฟต์ แสดงดังรูปที่ 2.3 ซึ่งโครงสร้างอะตอมของคาร์บอนจัดเรียงตัวเป็นชั้นๆ ขนานกัน โดยส่วนใหญ่ใช้ผงเขม่าดำที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคปฐมภูมิอยู่ในช่วง 10 ถึง 100 นาโนเมตร [4]



รูปที่ 2.3 โครงสร้างของผงเขม่าดำ [4]

2.2.3.1 เกรดของผงเขม่าดำ

ปัจจุบันนิยมใช้มาตรฐาน ASTM ในการตั้งชื่อและแบ่งเกรดของผงเขม่าดำ โดยใช้อักษร “ N ” เริ่มต้นสำหรับผงเขม่าดำที่ให้อัตราเร็วของปฏิกิริยาคงรูปปกติ (Normal curing) ตามด้วยตัวเลขสามตัว ตัวเลขแรกบอกถึงขนาดของอนุภาคปฐมภูมิ ตัวเลขที่สองมักใช้ซ้ำกับตัวเลขตัวแรกซึ่งไม่มีความหมายใดๆ และตามด้วยตัวเลขที่สามคือศูนย์ ซึ่งผงเขม่าดำที่นิยมใช้มีหลายเกรด เช่น N220, N330 และ N550 เป็นต้น โดยมีหน้าที่เสริมแรงให้ยางมีสมบัติด้านความต้านทานการขัดถู ความทนทานต่อแรงดึง และความทนทานต่อการฉีกขาดสูง ยางมีสมบัติการกระเด้งกระดอนที่ดี มีกระบวนการผลิตที่ง่ายเหมาะกับการเลือกนำมาใช้กับยางธรรมชาติ [4]

2.2.3.2 สมบัติของเขม่าดำ

ขนาดอนุภาคและพื้นที่ผิวจำเพาะ

อนุภาคของเขม่าดำมีรูปร่างเป็นทรงกลมเป็นอนุภาคที่ถูกหลอมอยู่รวมกันเป็นกลุ่มก้อน เรียกว่าแอกกริเกต ซึ่งขอบเขตของเขม่าดำขึ้นอยู่กับขนาดอนุภาคปฐมภูมิ ผงเขม่าดำที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมยางทั่วไปมีขนาดของอนุภาคปฐมภูมิในช่วง 19-95 นาโนเมตร โดยทั่วไปเขม่าดำที่มีขนาดของอนุภาคปฐมภูมิเล็กมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงสามารถเสริมความแข็งแรงให้ยางได้ดี

โครงสร้าง

โครงสร้างของเขม่าดำบ่งบอกถึงลักษณะเกาะกลุ่มกันของอนุภาคเขม่าดำเกิดเป็นแอกกริเกต นอกจากนี้การเกาะกลุ่มกันเป็นแอกกริเกตแต่ละกลุ่มสามารถเกาะกลุ่มกันได้อย่างหลวมๆ ด้วยแรงดึงดูดแวนเดอวาลล์เกิดเป็นโครงสร้างทุติยภูมิที่เรียกว่า แอกโกลเมอเรต ซึ่งโครงสร้างแบบนี้ถูกทำลายได้ง่ายด้วยแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการผสม โดยทั่วไปโครงสร้างของผงเขม่าดำสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 แบบตามระดับของการเกาะกลุ่มกันเป็นก้อน คือ โครงสร้างแบบต่ำ (Low structure) โครงสร้างแบบปกติ (Normal structure) และโครงสร้างแบบสูง (High structure) เขม่าดำที่มีโครงสร้างแบบต่ำ คือ เขม่าดำที่มีอนุภาคปฐมภูมิเกาะกันเป็นกลุ่มก้อนอย่างหน่าแน่นทำให้มีรูพรุนหรือช่องว่างภายในน้อย ส่วนเขม่าดำที่มีโครงสร้างแบบสูง คือ เขม่าดำที่มีอนุภาคปฐมภูมิเกาะกันอย่างหลวมๆ ทำให้มีรูพรุนภายในมาก [4]

สมบัติทางเคมีของพื้นผิว

เขม่าดำประกอบด้วยอะตอมของธาตุคาร์บอนประมาณ 90 ถึง 95 เปอร์เซ็นต์ ส่วนองค์ประกอบอื่นได้แก่ ไฮโดรเจน และออกซิเจน พื้นผิวของเขม่าดำประกอบด้วยหมู่ฟังชั่นเคมีมาก เมื่อผงเขม่าดำมีปริมาณออกซิเจนมากขึ้นทำให้ยางมีระยะเวลาเริ่มเกิดการคงรูปที่นานขึ้น อัตราเร็วการคงรูปและค่ามอดุลัสที่ต่ำลง

ความเป็นรูพรุนของอนุภาค

พื้นผิวของเขม่าดำมีลักษณะเป็นรูพรุน ซึ่งการวัดระดับความเป็นรูพรุนของเขม่าดำสามารถทำได้โดยการเปรียบเทียบพื้นที่ผิวเขม่าดำที่ได้จากการคำนวณขนาดของอนุภาคที่ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน หรือการดูดซับแก๊สไนโตรเจนที่เรียกว่า เทคนิค BET

การนำไฟฟ้าและความร้อน

เขม่าดำสามารถนำไฟฟ้าและความร้อนได้เป็นอย่างดี โดยการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นตามโครงสร้างและพื้นที่ผิวของเขม่าดำที่เพิ่มขึ้น หมู่ฟังชั่นเคมีที่อยู่บนพื้นผิวโดยเฉพาะหมู่ที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบมีผลต่อสมบัติทางไฟฟ้าของเขม่าดำ คือทำให้ความสามารถในการนำไฟฟ้าของเขม่าดำลดลง

2.2.3.3 กลไกการเสริมแรง

อันตรกิริยาระหว่างยางกับสารตัวเติม (Rubber-filler interaction) จัดเป็นกลไกการเสริมแรงอย่างหนึ่ง ซึ่งประสิทธิภาพในการเสริมของผงเขม่าดำขึ้นอยู่กับอันตรกิริยาหรือแรงกระทำระหว่างยางกับผงเขม่าดำ โดยอันตรกิริยาที่เกิดขึ้นอยู่ในรูปของแรงแวนเดอวาลส์ซึ่งไม่กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งพื้นผิวของผงเขม่าดำ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับโครงสร้างทางเคมีบนพื้นผิวของสารตัวเติมนั้นๆ เมื่อเกิดอันตรกิริยาระหว่างยางกับผงเขม่าดำ ส่งผลทำให้ยางมีความต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้ เนื่องจากสายโซ่โมเลกุลยางมีความสามารถในการเคลื่อนที่น้อยลง

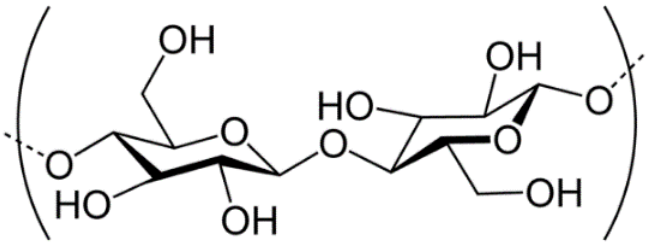
2.2.4 ผงขี้เลื่อยไม้

ขี้เลื่อยไม้ (Sawdust or wood dust) เป็นของเหลือใช้จากการเลื่อยไม้ มีลักษณะเป็นผงไม้ละเอียด โดยมีสารอินทรีย์เป็นองค์ประกอบหลัก คือ เซลลูโลส (Cellulose) เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) และลิกนิน (Lignin) [6]

2.2.4.1 เซลลูโลส (cellulose)

เป็นสารประกอบที่มีมากที่สุดของเนื้อไม้มีโครงสร้างอัดกันแน่นเป็นเส้นตรงไม่มีกิ่ง มีสูตรโครงสร้างทางเคมี คือ $(C_6H_{10}O_5)_n$แสดงดังรูปที่ 2.4 ซึ่งประกอบด้วย 1,4-เบตา-ดี-กลูโคไพราโนส (1,4-β-D-glucopyranose)

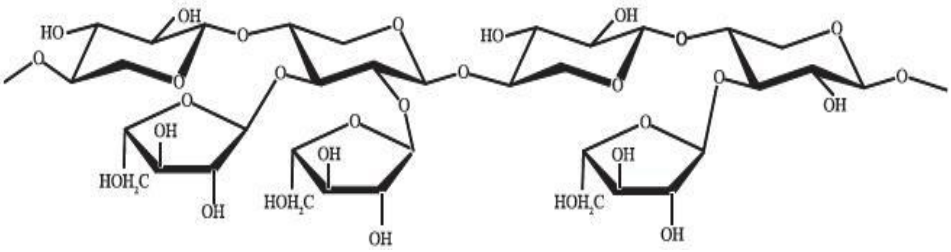
เชื่อมกับพันธะ 1,4-กลูโคซิดิก (1,4-glucosidic bond) โดยมีค่า Degree of polymerization อยู่ในช่วงประมาณ 100 ถึงมากกว่า 10,000 ซึ่งเซลลูโลสไม่ละลายในน้ำตัวทำละลายอินทรีย์สะเทิน (Neutral organic solvent) เช่น เบนซีน แอลกอฮอล์ และอีเธอร์ แต่ละลายได้ดีในกรดเกลือและกรดกำมะถันเข้มข้น



รูปที่ 2.4 โครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส [7]

2.2.4.2 เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose)

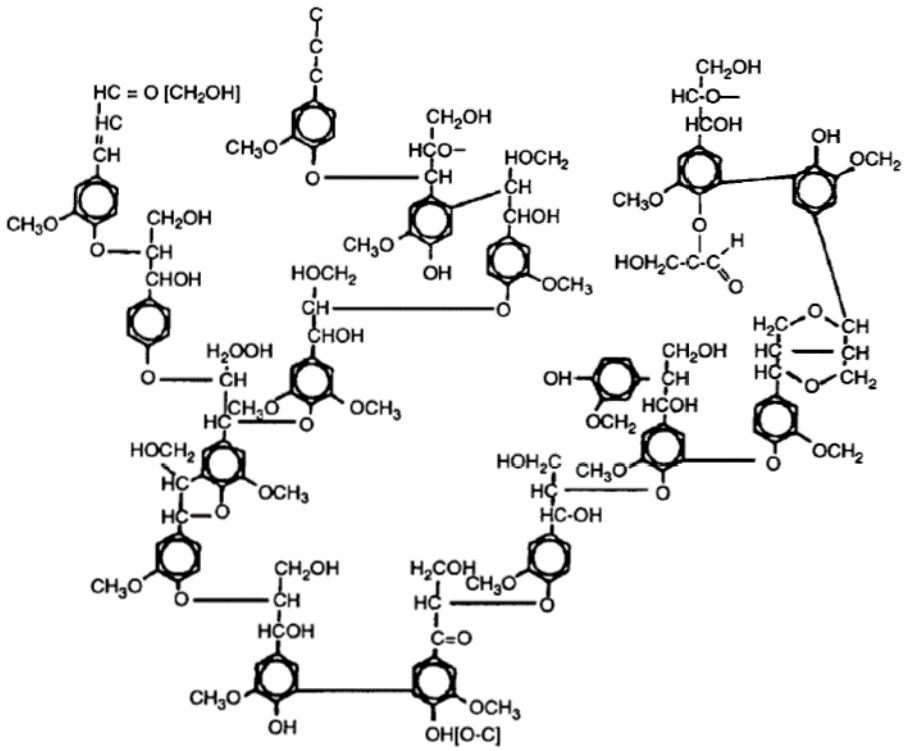
เฮมิเซลลูโลสที่พบในไม้เนื้ออ่อนมีประมาณ 25-30 เปอร์เซ็นต์ ส่วนประกอบในไม้เนื้อแข็งมีประมาณ 30-35 เปอร์เซ็นต์ ลักษณะทางกายภาพของเฮมิเซลลูโลสเป็นโมเลกุลขนาดเล็กสีขาว และมีลักษณะโครงสร้างเป็นกิ่งจับกันแบบหลวมๆ แสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 โครงสร้างทางเคมีของเฮมิเซลลูโลส [8]

2.2.4.3 ลิกนิน (Lignin)

ลิกนินเป็นอีกส่วนประกอบที่สำคัญของไม้ โดยพบในส่วนของผนังเซลล์ ทำให้ผนังเซลล์แข็งแรง ซึ่งพบในไม้เนื้อแข็ง (Hardwood) ประมาณ 20 ถึง 25 เปอร์เซ็นต์ ส่วนในไม้เนื้ออ่อน (Softwood) ประมาณ 25 ถึง 30 เปอร์เซ็นต์ พืชล้มลุก (Grasses) และพืชชั้นต่ำทั่วๆไป แต่ไม่พบใน lichens, mosses, fungi, mushrooms ลักษณะโครงสร้างของลิกนินประกอบด้วยหน่วยซ้ำของฟีนิลโพรพานอยด์ (Phenyl propanoid) ประกอบเป็นโมเลกุลใหญ่ [9] แสดงดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 โครงสร้างทางเคมีของลิกนิน [10]

2.2.5 สารกระตุ้นปฏิกิริยา

สารกระตุ้นปฏิกิริยา (Activator) ทำหน้าที่เพิ่มอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาคงรูป โดยเข้าไปกระตุ้นสารตัวเร่งปฏิกิริยาให้มีประสิทธิภาพการทำงานสูงขึ้นและเข้าทำปฏิกิริยากับกำมะถันที่มีอยู่ในยางอย่างรวดเร็ว ทำให้ยางมีอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาสูงขึ้น และช่วยในการกระจายตัวในสารเคมีต่างๆ ในเนื้อยาง [5]

2.2.5.1 ซิงค์ออกไซด์

ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide; ZnO) เป็นสารกระตุ้นวัลคาไนซ์ที่นิยมใช้มากในโรงงานอุตสาหกรรมในปริมาณตั้งแต่ 3-5 phr ส่งผลทำให้ยางที่ได้มีค่ามอดุลัสสูงและมีลักษณะโปร่งใส ถ้าใช้ซิงค์ออกไซด์ในปริมาณมากกว่า 5 phr ทำให้การถ่ายเทความร้อนในยางเร็วขึ้น

2.2.5.2 กรดสเตียริก

กรดสเตียริก (Stearic acid) หรือกรดไขมัน เป็นสารกระตุ้นวัลคาไนซ์ที่สำคัญอย่างหนึ่ง นิยมใช้กรดสเตียริกที่มีส่วนผสมระหว่างกรดอิลิฟาติกอิ่มตัว ซึ่งมีจำนวนคาร์บอนในช่วง 12-18 อะตอม เมื่อกรดสเตียริกทำงานร่วมกับซิงค์ออกไซด์ ส่งผลทำให้ประสิทธิภาพในการกระตุ้นปฏิกิริยาสูงขึ้น และเกิดเป็นสารประกอบที่สามารถละลายในยางได้ง่าย ปริมาณการใช้กรดสเตียริกขึ้นอยู่กับชนิดของยางที่ใช้ ซึ่งในการผสมสารเคมีในยางธรรมชาติส่วนใหญ่ใส่กรดสเตียริกประมาณ 1-4 phr

2.2.6 สารตัวเร่งปฏิกิริยา

สารตัวเร่งปฏิกิริยา (Accelerator) จัดเป็นตัวสำคัญสำหรับระบบการคงรูปยางด้วยกำมะถัน การเติมสารตัวเร่งปฏิกิริยาในยางปริมาณเพียงเล็กน้อยช่วยทำให้ปฏิกิริยาระหว่างยาง และกำมะถันเกิดได้เร็วขึ้น ช่วยลดระยะเวลาในการคงรูปยางและยางคงรูปที่ได้มีความหนาแน่นของการเชื่อมขวางสูงขึ้น ส่งผลทำให้ยางคงรูปมีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น [4]

2.2.6.1 เมอร์แคปโตเบนโซไทอะโซล

เมอร์แคปโตเบนโซไทอะโซล (Mercaptobenzothiazole, MBT) จัดเป็นสารตัวเร่งปฏิกิริยาในกลุ่มเมอร์แคปโตที่สำคัญตัวหนึ่ง สารตัวเร่งปฏิกิริยากลุ่มนี้ใช้ได้กับยางเกือบทุกประเภท ทำให้ยางมีอัตราเร็วคงรูปปานกลาง ซึ่งยางคงรูปที่ได้มีสมบัติเชิงกลที่ดีและมีความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพสูง สารตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดนี้จึงนิยมใช้กับยางธรรมชาติ

2.2.6.2 ไดฟีนิลกัวนิดีน

ไดฟีนิลกัวนิดีน (Diphenylguanidine, DPG) จัดเป็นสารตัวเร่งปฏิกิริยาในกลุ่มกัวนิดีนที่สำคัญตัวหนึ่งที่ไม่นิยมนำมาใช้เป็นสารตัวเร่งปฏิกิริยาปฐมภูมิ เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาต่ำกว่าสารตัวเร่งในปฏิกิริยาในกลุ่มอื่นๆ และส่งผลต่อสมบัติของยางคงรูปที่ได้ไม่ดี จึงนิยมนำไปใช้เป็นสารตัวเร่งปฏิกิริยาทุติยภูมิร่วมกับสารตัวเร่งปฏิกิริยาปฐมภูมิในกลุ่มเมอร์แคปโต เพื่อเพิ่มอัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาคงรูป และความหนาแน่นของการเชื่อมโยงของพันธะ (Crosslink density)

2.2.7 พลาสติกไซเซอร์

พลาสติกไซเซอร์ (Plasticizers) หมายถึง สารที่เติมในยาง ส่งผลทำให้ยางเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้ดีขึ้น เพื่อเพิ่มความยืดหยุ่นและความสามารถในการใช้งาน ซึ่งถ้าใช้ในปริมาณไม่เกิน 5 ส่วนในยาง 100 ส่วน เรียกว่า สารช่วยในกระบวนการผลิต (Processing aids) ช่วยในการแปรรูปและช่วยทำให้การผสมสารเคมีในยางได้ง่ายขึ้น โดยพลาสติกไซเซอร์มีหน้าที่ช่วยในการแปรรูปยาง เปลี่ยนแปลงสมบัติของยาง ลดต้นทุนการผลิต เพื่อใช้งานในอุณหภูมิต่ำ และลดพลังงานในการแปรรูปยาง [5]

2.2.8 สารป้องกันยางเสื่อมสภาพ

โครงสร้างโมเลกุลของยางทั่วไปโดยเฉพาะยางธรรมชาติมีพันธะคู่ค่อนข้างมาก ยางจึงเสื่อมสภาพได้ง่ายในสภาวะการใช้งานที่สัมผัสกับแสงแดด ออกซิเจน โอโซน ความร้อน หรือโลหะที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และการใช้งานที่มีการหักงอเชิงกลตลอดเวลา ดังนั้นการเติมสารป้องกันการเสื่อมสภาพในยางจึงเป็นสิ่งจำเป็นที่ช่วยป้องกันหรือชะลอการเสื่อมสภาพของยาง และช่วยเพิ่มอายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์ยาง โดยสารป้องกันยางเสื่อมสภาพที่ใช้ในงานวิจัย ได้แก่ สารเพิ่มเสถียรภาพต่อรังสียูวี (UV Stabilizer) สารแอนตี้ออกซิแดนท์ (Anti-oxidant) และสารป้องกันปฏิกิริยากับโอโซน (Anti-Ozonant) [4]

2.3 เทคโนโลยีการผสมยาง

2.3.1 การบดย่อยยางหรือมาสติเคชัน (Mastication)

การบดผสมยางเป็นสิ่งที่สำคัญที่สุดในกระบวนการผลิตยาง โดยเริ่มจากการบดย่อยยาง เนื่องจากยางแท่งอยู่ในสภาวะของแข็งที่มีความหนืดสูงมากจึงทำให้ผสมกับสารเคมีได้ยาก โดยเฉพาะยางธรรมชาติ เพราะยางธรรมชาติมีน้ำหนักโมเลกุลและความหนืดเริ่มต้นสูงมาก ดังนั้น จำเป็นต้องมีการบดย่อยยางเพื่อลดความหนืดของยางก่อนเติมสารเคมีต่างๆ ลงไป ขั้นตอนการบดย่อยยางนี้มีชื่อเรียกทางเทคนิคว่า “มาสติเคชัน” (Mastication) ซึ่งในระหว่างการบดย่อยยางโมเลกุลของยางถูกตัดขาดด้วยแรงเฉือนทำให้น้ำหนักโมเลกุลของยางลดลง ส่งผลทำให้ยางมีความหนืดต่ำลงหรือทำให้ยางอ่อนและไหลได้มากขึ้นทำให้สารเคมีต่างๆ ที่เติมลงไปสามารถเข้าไปรวมเป็นเนื้อเดียวกัน (Incorporation) กับเนื้อยางได้ง่าย [11]

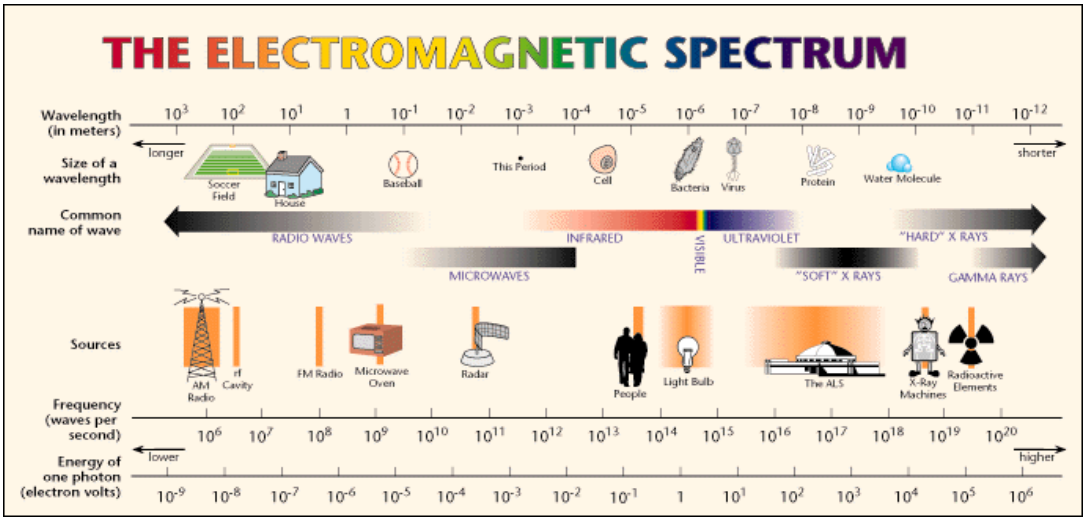
2.3.2 เครื่องผสมยางแบบ 2 ลูกกลิ้ง

เครื่องมือที่ใช้ผสมยางกับสารเคมีต่างๆ ใช้เป็นเครื่องบดผสมระบบเปิดแบบ 2 ลูกกลิ้ง (Two roll mill) เครื่องบดผสมประกอบด้วยลูกกลิ้ง 2 ลูก วางในแนวนอนให้แกนลูกกลิ้งขนานกัน ดังรูปที่ 2.7 หมุนเข้าหากันในทิศทางตรงกันข้ามและความเร็วที่ต่างกัน ทำให้เกิดแรงเฉือนที่จำเป็นต่อการบดผสมยางกับสารเคมียาง ในการผสมยางกับสารเคมียาง เริ่มจากการใส่ยางลงช่องระหว่างลูกกลิ้งยางถูกรีดออกมาเป็นแผ่นรอบลูกกลิ้งด้านหน้า จากนั้นจึงเติมสารเคมียางพร้อมกับการกรีดยางแผ่นและพับไปมาในขณะที่เติมสารเคมีลงไปในยาง ซึ่งยางที่ตัดพับถูกใส่กลับไปยังช่องระหว่างลูกกลิ้ง แรงเฉือนที่เกิดขึ้นช่วยให้สารเคมีต่างๆ กระจายตัวเข้ากับเนื้อยางได้ดี [11]

รูปที่ 2.7 เครื่องบดผสมระบบเปิดแบบ 2 ลูกกลิ้ง (Two roll mill)

2.4 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับรังสี

รังสี (Radiation) คือ พลังงานที่แผ่ออกมาจากต้นกำเนิดรังสีที่ไม่เสถียรผ่านอากาศหรือสสาร แบ่งเป็น 2 ชนิด คือ พลังงานที่แผ่ออกมาจากต้นกำเนิดรังสีในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งพลังงานรูปแบบนี้ไม่มีทั้งมวลและประจุ เช่น คลื่นวิทยุ ไมโครเวฟ รังสีอินฟราเรด ความร้อน แสงสว่าง รังสีอัลตราไวโอเลต รังสีแกมมา รังสีเอ็กซ์ เป็นต้น อีกชนิดหนึ่งคือพลังงานที่แผ่ออกมาเป็นกระแสของอนุภาคที่เคลื่อนที่เร็ว (Fast radiation) ซึ่งพลังงานรูปแบบนี้มีทั้งมวลและประจุ เช่น รังสีแอลฟา รังสีบีตา รังสีคอสมิก เป็นต้น หรือมีเฉพาะมวลแต่ไม่มีประจุ เช่น อนุภาคนิวตรอน [12] ดังแสดงรูปที่ 2.8 แสดงความยาวคลื่นและความถี่ของรังสีที่เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแต่ละชนิด



รูปที่ 2.8 สเปกตรัมของรังสี [13]

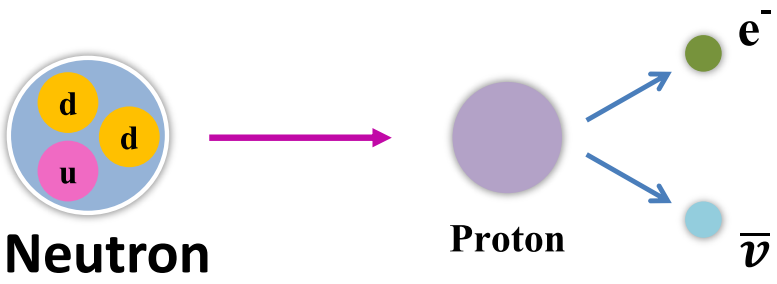
2.4.1 แหล่งกำเนิดรังสี

แหล่งกำเนิดรังสีมีอยู่หลายแหล่ง สามารถแบ่งเป็น 2 ประเภทหลักๆ [12] คือ

1. รังสีที่มีอยู่ทั่วไป (Background radiation) ได้แก่ รังสีจากธรรมชาติ เช่น รังสีจากสินแร่ อากาศ หายใจน้ำ อาหารที่บริโภคและในอากาศมีรังสีที่แผ่ออกมาจากดวงอาทิตย์และรังสีคอสมิกที่แผ่กระจายมาถึงโลก
2. รังสีที่มนุษย์ผลิตขึ้น (Man- made radiation) เช่น เกิดจากการเดินเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู ระเบิดนิวเคลียร์ เครื่องเร่งอนุภาค เครื่องเอกซเรย์ การผลิตสารรังสีจากปฏิกิริยานิวเคลียร์ เป็นต้น

2.4.2 อนุภาคนิวตรอน

อนุภาคนิวตรอน (Neutron, n) เป็นอนุภาคที่มีมวลมากกว่าโปรตอนเล็กน้อย ไม่มีประจุไฟฟ้าจึงไม่สามารถทำให้ตัวกลางเกิดการแตกตัวเป็นไอออนได้โดยตรง มีอำนาจในการทะลุทะลวงสูงกว่าแกมมา อนุภาคนิวตรอนไม่สามารถอยู่อย่างอิสระจะสลายตัวไปเป็นอิเล็กตรอน โปรตอน และนิวทริโน [12] ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 การสลายของนิวตรอนอิสระ

จำแนกนิวตรอนได้ตามพลังงานและความเร็ว ดังนี้ [12]

1. **นิวตรอนช้า (Slow neutron)** หมายถึง อนุภาคนิวตรอนที่มีพลังงานต่ำกว่า 1 keV อาจจำแนกได้เป็น
   - เทอร์มัลนิวตรอน (Thermal neutron) มีพลังงานเฉลี่ย 0.025 eV
   - เรโซแนนซ์นิวตรอน (Resonance neutron) มีพลังงานอยู่ในช่วง 1-100 eV
2. **นิวตรอนเร็ว (Fast Neutron)** หมายถึง อนุภาคนิวตรอนที่มีพลังงานสูงกว่า 1 keV อาจจำแนกได้เป็น
   - นิวตรอนปานกลาง (Intermediate neutron) มีพลังงานอยู่ในช่วง 1-500 keV
   - นิวตรอนพลังงานสูง (High energy neutron) มีพลังงานอยู่ในช่วง 0.5-20 MeV
   - นิวตรอนสัมพัทธภาพ (Relativistic neutron) มีพลังงานสูงกว่า 20 MeV

2.4.2.1 อันตรกิริยาของนิวตรอนกับสสาร

นิวตรอนเป็นอนุภาคที่ไม่มีประจุ เมื่อเข้าชนกับสสารเกิดการเคลื่อนที่ผ่านอิเล็กตรอนเข้าทำอันตรกิริยากับนิวเคลียสของสสารโดยตรง ผลของอันตรกิริยาอาจให้นิวตรอนมีพลังงานลดลง หรือให้อนุภาคอื่นๆออกมา ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของสสารและพลังงานของนิวตรอน ซึ่งจำแนกประเภทของอันตรกิริยาได้ดังนี้ [12]

1. การชนแบบยืดหยุ่น (Elastic collision)

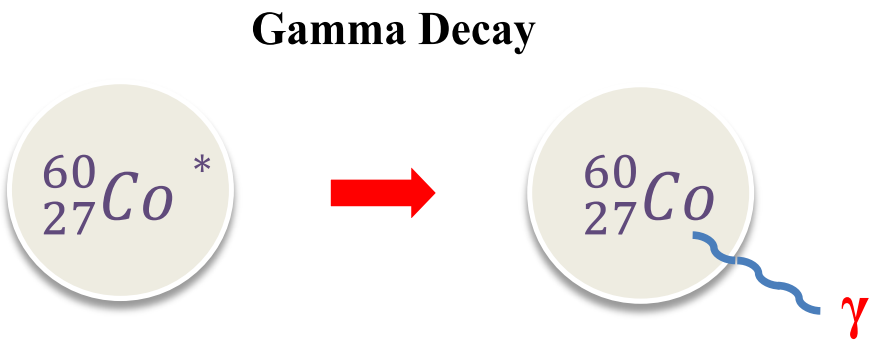
นิวตรอนที่มีพลังงานสูงมักเกิดการชนแบบยืดหยุ่นกับสสารที่มีเลขอะตอมต่ำ ในการชนแบบนี้ทำให้โมเมนตัมและพลังงานไม่สูญหาย โดยนิวตรอนถ่ายเทพลังงานให้กับนิวเคลียสของสสาร ทำให้มีพลังงานลดลง จึงเรียกกระบวนการนี้ว่า การลดพลังงานนิวตรอน (Neutron moderation)

2. การชนแบบไม่ยืดหยุ่น (Inelastic collision)

การชนแบบไม่ยืดหยุ่น ส่วนใหญ่เกิดกับนิวตรอนที่มีพลังงานมากกว่า 0.5 MeV เข้าปะทะกับนิวเคลียสของธาตุหนักๆ เช่น เหล็ก และยูเรเนียม นิวตรอนทำให้นิวเคลียสของตัวกลางเข้าสู่สถานะกระตุ้นและกลับเข้าสู่สถานะพื้น โดยสูญเสียพลังงานออกมาในรูปรังสีแกมมา

2.4.3 รังสีแกมมา

รังสีแกมมา (Gamma rays, γ) เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดคลื่นสั้นที่แผ่ออกมาจากนิวเคลียส มีพลังงานสูง ไม่มีมวลและไม่มีประจุ มีความยาวคลื่นประมาณ 0.1 nm ถึงน้อยกว่า 10^{-5} nm เกิดจากการสลายตัวของนิวเคลียสที่ไม่เสถียรหรือเกิดจากปฏิกิริยานิวเคลียร์ เกิดร่วมกับอนุภาคแอลฟาและอนุภาคบีตา ตัวอย่างเช่น นิวเคลียสของโคบอลต์-60 ที่อยู่ในสถานะกระตุ้น มีการปลดปล่อยพลังงานส่วนเกินออกมาในรูปแบบของรังสีแกมมา ซึ่งหลังจากปล่อยรังสีแกมมาออกมาแล้วนิวเคลียสของโคบอลต์-60 ลดระดับพลังงานกลับมาอยู่ในสภาวะที่เสถียร (Ground state) [14] แสดงดังรูปที่ 2.10 โดยที่รังสีแกมมามีพลังงานสูงในการทะลุทะลวง ดังนั้น การป้องอันตรายจากรังสี ต้องเลือกใช้วัสดุที่มีความหนาแน่นสูง เช่น แท่งตะกั่วหรือคอนกรีตหนาเป็นวัตถุกำบังรังสี



รูปที่ 2.10 รังสีแกมมาจากโคบอลต์ 60

สมการการสลายตัวของสารกัมมันตรังสีที่ให้รังสีแกมมา สามารถแสดงได้ดังนี้

$$({}^{A}_{Z}X)_{excited} \rightarrow {}^{A}_{Z}X + \gamma$$

ซึ่งการสลายตัวของธาตุโคบอลต์ 60 สามารถแสดงได้ดังนี้

$${}^{60}_{27}Co^{*} \rightarrow {}^{60}_{27}Co + \gamma$$

2.4.4 ปัจจัยหลักที่มีผลต่อการป้องกันรังสี

ปัจจัยหลักที่มีผลต่อการป้องกันรังสี คือ ความหนาแน่นของตัววัตถุและค่าภาคตัดขวาง (Cross section) ของวัตถุกับรังสีที่แพร่ผ่าน โดยปัจจัยที่มีผลต่อการป้องกันรังสีมีหลักการ ดังนี้

1. ความหนาแน่นของวัตถุ โดยที่วัตถุที่มีความหนาแน่นมาก เช่น ตะกั่ว (Lead) หรือเหล็กกล้า (Steel) มีความสามารถป้องกันรังสีก่อไอออนที่ดีกว่าวัตถุที่มีความหนาแน่นน้อย เช่น คอนกรีตหรือหินแกรนิต ทั้งนี้เนื่องจากการที่วัตถุมีความหนาแน่นมาก มีจำนวนอะตอมต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรที่สูง จึงสามารถทำปฏิกิริยาก่อไอออนกับรังสีได้ดี ทำให้พลังงานของรังสีมีการถ่ายโอนพลังงานให้กับวัตถุชนิดนั้นเป็นจำนวนมาก ในระยะทางที่สั้น

2. วัตถุที่มีค่าภาคตัดขวางกับรังสีก่อไอออนที่สูง สามารถทำปฏิกิริยาก่อไอออนได้ดีกว่าวัตถุที่มีค่าภาคตัดขวางต่ำในปริมาตรที่เท่ากัน ซึ่งหากรังสีแพร่ผ่านวัตถุที่มีค่าภาคตัดขวางที่สูงแล้ว รังสีจะมีการสูญเสียพลังงานจากการถ่ายโอนพลังงานให้กับวัตถุที่มากกว่า

2.1 ภาคตัดขวาง (Cross section) หรือพื้นที่ภาคตัดขวางที่แท้จริง (Effective cross-sectional area) ของนิวเคลียส แสดงค่าความน่าจะเป็นที่รังสีเข้าใกล้หรือชนกับนิวเคลียสของวัสดุแล้วเกิดปฏิกิริยา โดยภาคตัดขวางแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ ภาคตัดขวางจุลภาค และภาคตัดขวางมหภาค [15]

2.1.1 ภาคตัดขวางจุลภาค (Microscopic cross section) คือค่าความน่าจะเป็นที่นิวเคลียสเกิดปฏิกิริยากับรังสี (I_0) ที่ผ่านเข้าชนกับนิวเคลียส โดยค่าภาคตัดขวางจุลภาคเปรียบเสมือนพื้นที่ทั้งหมดที่นิวเคลียสสามารถทำ

ปฏิกิริยากับรังสีได้ (N_A) แสดงดังรูปที่ 2.11 หน่วยของภาคตัดขวางจึงเป็นหน่วยของพื้นที่ (ตารางเมตร) แสดงความสัมพันธ์ ดังสมการที่ 1

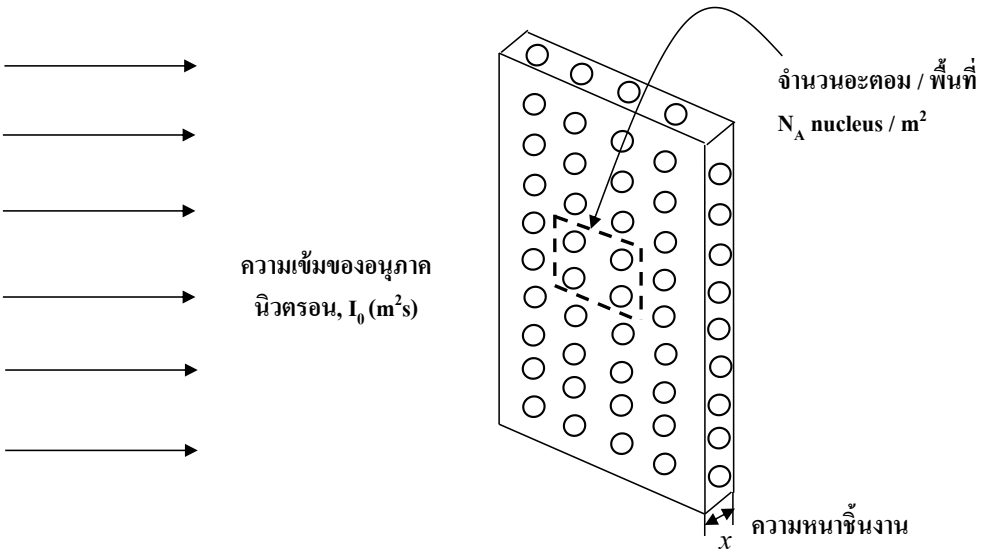
$$\mathbf{R = \sigma I_0 N_A} \qquad (1)$$

เมื่อ σ คือ ภาคตัดขวาง (m^2)

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

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

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



รูปที่ 2.11 ลำนิวตรอนที่มีพลังงานเข้าชนชิ้นงานในแนวตั้งฉาก [15]

ในกรณีที่วัสดุมีค่าภาคตัดขวางมาก หมายถึง โอกาสที่นิวเคลียสในวัสดุเกิดปฏิกิริยากับรังสีมากและถ้าวัสดุมีค่าภาคตัดขวางน้อย หมายถึง โอกาสที่นิวเคลียสในวัสดุเกิดปฏิกิริยากับรังสีน้อย

2.1.2 ภาคตัดขวางมหภาค (Macroscopic cross section) แสดงถึงความน่าจะเป็นที่รังสีเข้าไปในชิ้นงาน แล้วเกิดปฏิกิริยากับวัตถุหรือชิ้นงาน โดยมีหน่วยต่อเมตร แสดงความสัมพันธ์**ดังสมการที่ 2**

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

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

N คือ ความหนาแน่นของอะตอม หน่วย (นิวเคลียส/m^3)

σ คือ ภาคตัดขวางจุลภาคทั้งหมด หน่วย (m^2/นิวเคลียส)

2.2 การวัดภาคตัดขวางเมื่อใช้ชิ้นงานหนา เมื่อใช้ชิ้นงานหนา (Thick Target) จำนวนอนุภาคที่เข้าทำปฏิกิริยาลดลงตามระยะทางที่เคลื่อนที่ผ่านไป แสดงดังรูปที่ 2.12 เนื่องจากสูญเสียอนุภาคไปในส่วนที่เข้าทำปฏิกิริยา ความเข้มของอนุภาคที่ผ่านออกจากชิ้นงาน (I) จึงมีค่าน้อยกว่าก่อนเข้าทำปฏิกิริยา (I_0) ซึ่งมีความสัมพันธ์กัน ดังสมการที่ 3

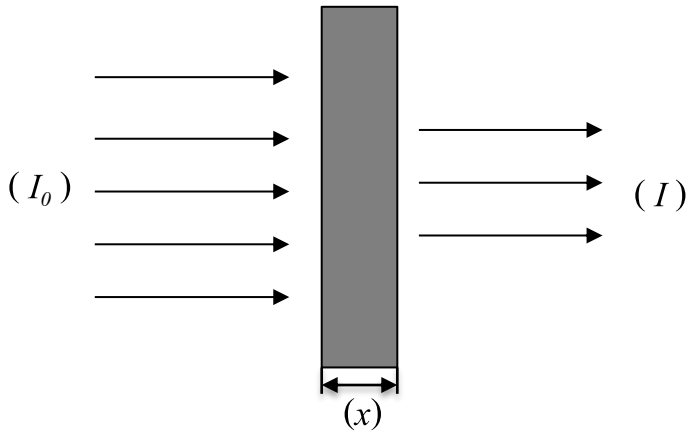
$$I = I_0 e^{-N\sigma x}$$

เมื่อ I_0 คือ ความเข้มของอนุภาคก่อนทำปฏิกิริยา

I คือ ความเข้มของอนุภาคหลังทำปฏิกิริยา

σ คือ ภาคตัดขวาง หน่วย (ตารางเซนติเมตร)

x คือ ความหนาของชิ้นงาน หน่วย (เซนติเมตร)



รูปที่ 2.12 อนุภาคความเข้ม (I_0) ผ่านความหนาของชิ้นงาน (x) ความเข้มลดลงเป็น (I) [12]

การแพร่ของอนุภาคนิวตรอนมีความสำคัญในการเกิดปฏิกิริยาของรังสี เนื่องจากอนุภาคนิวตรอนถูกปลดปล่อยในบริเวณที่มีการใช้ปฏิกิริยานิวเคลียร์ เช่น ในบริเวณเตาปฏิกรณ์ หรือโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ โดยอนุภาคนิวตรอนเป็นอนุภาคที่ไม่มีประจุจึงทำให้โอกาสในการเกิดปฏิกิริยาที่ต่ำ ส่งผลทำให้การป้องกันอนุภาคนิวตรอนเป็นไปได้ยากกว่าการป้องกันรังสีโดยทั่วไป ดังนั้นการป้องกันอนุภาคนิวตรอน จึงมีการใช้ปฏิกิริยาชนิดอื่นในการยับยั้งอนุภาคนิวตรอน ซึ่งในปัจจุบันปฏิกิริยานิวเคลียร์เป็นกระบวนการที่นำมาใช้งานอย่างแพร่หลาย โดยมีการนำสารที่มีค่าภาคตัดขวางกับนิวตรอนสูง เช่น สารโบรอน-10 หรือลิเทียม-6 เป็นส่วนประกอบหลักของวัตถุที่ใช้ป้องกันรังสี ซึ่งสารโบรอนหรือลิเทียมนี้ สามารถเปลี่ยนนิวตรอนให้เป็นอนุภาคที่มีประจุ เช่น อนุภาคแอลฟา หรืออนุภาคโปรตอน ตัวอย่างของปฏิกิริยานิวเคลียร์ระหว่างนิวตรอนกับโบรอน-10 แสดงดังนี้

$$^{10}B + n \longrightarrow {}^{7}Li + \alpha + 2.79\ MeV\ (6\%)$$

$$^{10}B + n \longrightarrow {}^{7}Li^{*} + \alpha + 2.31\ MeV\ (94\%)$$

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

2.4.5 อันตรายจากรังสีต่อสิ่งมีชีวิต

ปัจจุบันในสิ่งแวดล้อมมีรังสีเกิดขึ้นตามธรรมชาติ ได้แก่ รังสีคอสมิกจากอวกาศ และรังสีจากเรดอนซึ่งเป็นธาตุกัมมันตรังสีที่มีอยู่ในอากาศ หิน ดิน และต้นไม้ นอกจากนี้มีรังสีจากสิ่งประดิษฐ์ที่มนุษย์สร้างขึ้น เช่น การทดลองทางนิวเคลียร์ อุตสาหกรรมนิวเคลียร์ การตรวจและการรักษาโรคด้วยรังสี รวมทั้งอาหารและเครื่องดื่ม ซึ่งประชาชนอาจได้รับตลอดเวลา และหลีกเลี่ยงไม่ได้ รังสีเหล่านี้เรียกว่า รังสีพื้นฐาน (Background radiation) ซึ่งปริมาณรังสีที่แต่ละบุคคลอาจได้รับในหนึ่งปีขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง [16] แสดงดังตารางที่ 2.1

การเกิดอันตรายจากรังสีต่อมนุษย์ แบ่งได้ 2 กลุ่มใหญ่ คือ

1. การได้รับรังสีจากแหล่งกำเนิดรังสีจากภายนอก (External exposure) ความรุนแรงของการบาดเจ็บขึ้นอยู่กับความแรงของแหล่งกำเนิดและระยะเวลาที่ได้รับ
2. การได้รับสารกัมมันตรังสีเข้าสู่ร่างกาย (Internal exposure) มักพบในกรณีมีการรั่วไหลของสารกัมมันตรังสีที่เป็นก๊าซของเหลวหรือฝุ่นละอองจากแหล่งเก็บสารกัมมันตรังสี

ซึ่งโครงสร้างและอวัยวะต่างๆ ในร่างกายของมนุษย์ประกอบด้วยเซลล์ต่างๆ หลายชนิด โดยที่เซลล์ 1 เซลล์ มีส่วนประกอบที่สำคัญ 2 ส่วน คือ น้ำ ประมาณ 80 เปอร์เซ็นต์ และสารอินทรีย์/สารอนินทรีย์ ประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้น เมื่อรังสีผ่านเซลล์ รังสีทำอันตรกิริยากับส่วนประกอบต่างๆ ภายในเซลล์ เกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ และทางเคมีขึ้น ทำให้เกิดผลกระทบทางชีววิทยาในภายหลัง โดยปริมาณรังสีที่ส่งผลกระทบต่อร่างกายมนุษย์ แสดงดังตารางที่ 2.2 ซึ่งผลกระทบของรังสีที่ส่งผลต่ออวัยวะต่างๆ เช่น ผลของรังสีต่อไขกระดูก (Bone marrow) ระบบทางเดินอาหาร (Digestive system) ผิวหนัง และดวงตา [16] เป็นต้น

ตารางที่ 2.1 ผลกระทบต่อร่างกายเทียบกับปริมาณรังสีที่ได้รับ (หน่วยมิลลิซีเวิร์ต)

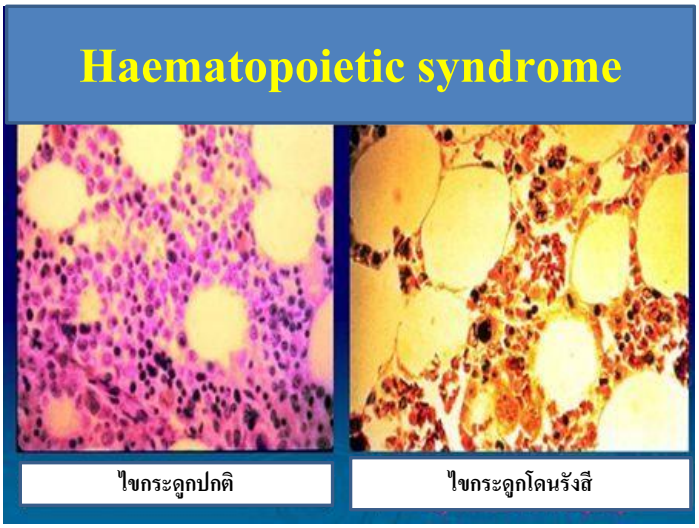
ปริมาณรังสี (มิลลิซีเวิร์ต)	**ผลกระทบจากการได้รับรังสีในปริมาณต่างๆ**
2.2	เป็นระดับรังสีปกติในธรรมชาติที่มนุษย์แต่ละคนได้รับใน 1 ปี
5	เกณฑ์สูงสุดที่อนุญาตให้สาธารณชนได้รับใน 1 ปี
50	เกณฑ์สูงสุดที่อนุญาตให้ผู้ปฏิบัติงานทางรังสีได้รับใน 1 ปี
250	ไม่ปรากฏอาการผิดปกติใดๆทั้งระยะสั้นและระยะยาว
500	เม็ดเลือดขาวลดลงเล็กน้อย
1,000	มีอาการคลื่นไส้ และอ่อนเพลีย เม็ดเลือดขาวลดลง
3,000	อ่อนเพลีย อาเจียน ท้องเสีย เม็ดเลือดขาวลดลง ผมร่วง เบื่ออาหาร ตัวซีด คอแห้ง มีไข้ อายุสั้น อาจเสียชีวิตภายใน 3-6 สัปดาห์
6,000	อ่อนเพลีย อาเจียน ท้องร่วงภายใน 1-2 ชั่วโมง เม็ดเลือดขาวลดลงอย่างรวดเร็ว ผมร่วง มีไข้ อักเสบบริเวณปากและลำคออย่างรุนแรง มีเลือดออก มีโอกาสเสียชีวิตถึงร้อยละ 50 ภายใน 2-6 สัปดาห์
10,000	มีอาการเหมือนข้างต้น ผิวหนังพองบวม ผมร่วง อาจเสียชีวิตภายใน 2-3 สัปดาห์

ตารางที่ 2.2 ปริมาณรังสีที่แต่ละบุคคลอาจได้รับในหนึ่งปี (โดยประมาณ)

องค์ประกอบ	**แหล่งกำเนิดรังสี**	**ปริมาณรังสีที่ได้รับ**
1. แหล่งที่อยู่อาศัย	1. รังสีคอสมิกจากอวกาศที่ระดับน้ำทะเล	0.26 mSv
	2. หินและดิน	0.30 mSv
	3. บ้านที่สร้างด้วยซีเมนต์หรืออิฐ	0.07 mSv
2. สิ่งที่เข้าสู่ร่างกาย	1. อาหารและน้ำดื่ม	0.03 mSv
	2. อากาศที่หายใจ	2.0 mSv
3. การดำเนินชีวิตประจำวัน	1. โทรทัศน์	0.01 mSv
	2. จอคอมพิวเตอร์	0.01 mSv
	3. ฝุ่นกัมมันตรังสีในอากาศ	0.01 mSv
	4. การเดินทางโดยเครื่องบิน	0.005 mSv/h
4. การตรวจรักษาทางการแพทย์	**รังสีเอกซเรย์**	
	1. ทรวงอก	0.06 mSv
	2. มือ แขน ขา ฟัน	0.01 mSv
	3. กะโหลกศีรษะ / คอ	0.20 mSv
	4. กระดูกเชิงกราน / ตะโพก	0.65 mSv
	รังสีเอกซเรย์คอมพิวเตอร์	
	1. ศีรษะหรือร่างกาย	1.1 mSv
	2. เภสัชกรรมรังสีหรือไทรอยด์	0.14 mSv

ผลของรังสีต่อไขกระดูก (Bone marrow)

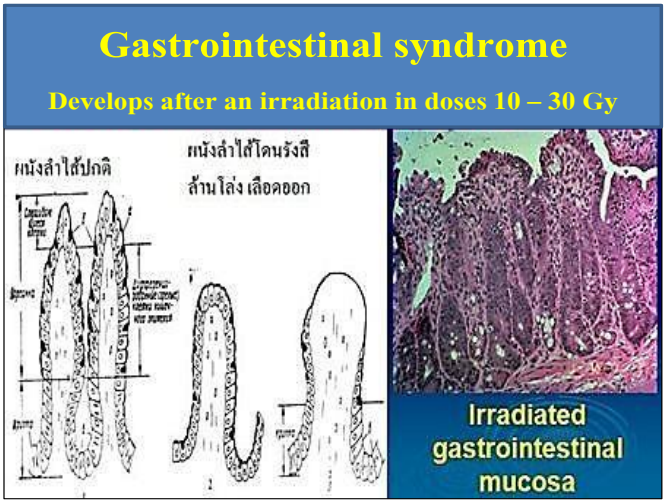
ไขกระดูกเป็นแหล่งผลิตของเซลล์เม็ดเลือดแดง เม็ดเลือดขาว และเกล็ดเลือด ซึ่งเซลล์เหล่านี้ไวต่อรังสีมาก เมื่อได้รับรังสีสูงแบบเฉียบพลันทั่วทั้งร่างกายที่ปริมาณรังสี 0.7 เกรย์ ส่งผลทำให้มีอาการผิดปกติ คือ การติดเชื้อและการเสียเลือดเนื่องมาจากไขกระดูกถูกทำลาย [13] แสดงดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 ความผิดปกติของระบบไขกระดูกเมื่อได้รับรังสี [17]

ผลของรังสีต่อระบบทางเดินอาหาร (Digestive system)

ระบบทางเดินอาหารประกอบด้วยส่วนต่างๆ รวมทั้งปาก หลอดอาหาร กระเพาะอาหาร ลำไส้เล็ก และลำไส้ใหญ่ ผลของรังสีที่มีผลต่อระบบทางเดินอาหาร คือ ส่วนของปากและหลอดอาหาร ซึ่งมีความไวต่อรังสีน้อย เมื่อได้รับรังสีที่ปริมาณสูง ส่งผลทำให้เกิดการอักเสบและเกิดแผลที่เยื่อบุภายในปาก ส่วนลำไส้เล็กเป็นส่วนอวัยวะที่มีความไวต่อรังสีมากที่สุด โดยเกิดขึ้นเมื่อได้รับรังสีเฉียบพลันทั่วร่างกายสูงเกิน 10 เกรย์ เมื่อระบบทางเดินอาหารเปลี่ยนแปลงหรือได้รับความเสียหาย ส่งผลทำให้เกิดการติดเชื้อ เสียสมดุลของน้ำและเกลือแร่ โดยผู้ป่วยอาจเสียชีวิตภายในระยะเวลา 2 สัปดาห์ [13] แสดงดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 ความผิดปกติของระบบทางเดินอาหารเมื่อได้รับรังสี [17]

ผลของรังสีต่อผิวหนัง

ความรุนแรงของอาการหลังการได้รับรังสี คล้ายกับการบาดเจ็บที่เกิดจากการถูกไฟลวก อาการเฉียบพลันที่อาจเกิดกับผิวหนังหลังจากได้รับรังสีได้แก่ ผิวแดง ลอก อักเสบ พุพอง อาการเรื้อรัง ได้แก่ ผิวบาง พังผืด แผลเป็น สีผิวเข้มหรือจางลง นอกจากนี้บริเวณรากผมเป็นบริเวณที่ไวต่อรังสี ซึ่งรังสีปริมาณปานกลางสามารถทำให้ผมหรือขนร่วงชั่วคราว [13]

ผลของรังสีต่อดวงตา

ตาต้อกระจกสามารถสังเกตได้จากความขุ่นมัวของเลนส์ตา โดยส่วนใหญ่ตาต้อกระจกมีความสัมพันธ์ขึ้นกับอายุ เมื่ออายุมากขึ้นโอกาสที่เป็นต้อกระจกสูงขึ้น ซึ่งรังสีนิวตรอนมีประสิทธิภาพทำให้เกิดตาต้อกระจกได้มากเช่นกัน เมื่อได้รับรังสีปริมาณน้อยกว่า 2.5 เกรย์ ไม่ทำให้เกิดตาต้อกระจก แต่ทำให้เกิดการแบ่งตัวของเซลล์ในเลนส์ตาลดลงและมีการทำลายเซลล์บางส่วน ปริมาณรังสีต่ำสุดที่ทำให้เกิดตาต้อกระจกคือ 5 เกรย์ และสามารถทำให้เกิดตาต้อกระจกได้เมื่อรับรังสีเป็นเวลาที่ต่อเนื่อง [13]

2.4.6 การป้องกันอันตรายจากรังสี

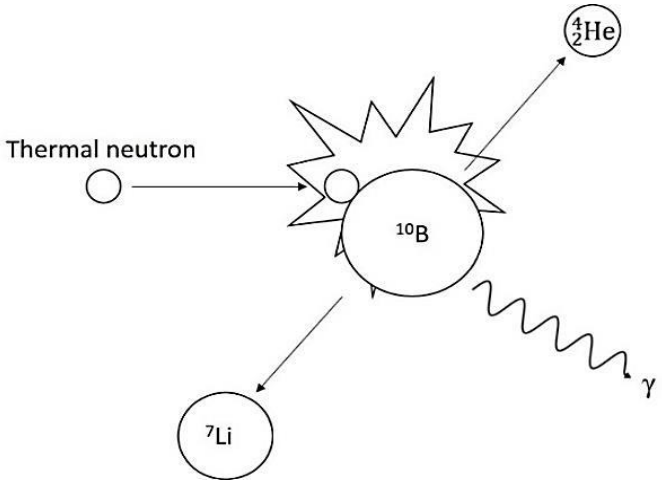
รังสีทุกชนิดล้วนมีอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต จึงต้องทำการป้องกันไม่ให้ร่างกายได้รับรังสี หรือได้รับรังสีในปริมาณน้อยที่สุด แต่ในการทำงานบางประเภทไม่สามารถหลีกเลี่ยงการสัมผัสกับรังสีได้ ดังนั้น ควรมีหลักยึดถือเพื่อปฏิบัติดังนี้

1. เวลาของการเผย (Time of exposure) โดยใช้เวลาในการทำงานในบริเวณที่มีรังสีให้สั้นที่สุด
2. ระยะทาง (Distance) การทำงานเกี่ยวกับรังสีควรอยู่ห่างจากแหล่งกำเนิดรังสีมากๆ ทั้งนี้เพราะความเข้มของรังสีแปรผกผันกับกำลังสองของระยะทาง
3. เครื่องกำบัง (Shielding) เครื่องกำบังที่วางกั้นระหว่างคนกับแหล่งกำเนิดรังสีดูดกลืนบางส่วนหรือทั้งหมดของรังสี ดังนั้นในกรณีที่ต้องทำงานใกล้กับสารกัมมันตรังสีและต้องใช้เวลานานในการปฏิบัติงาน เราจำเป็นต้องใช้เครื่องกำบังช่วยป้องกันหรือลดปริมาณรังสี

2.4.6.1 วัสดุที่ใช้ป้องกันรังสี (Shielding materials)

ในปัจจุบันมีการใช้ผงตะกั่วผสมกับพลาสติกชนิดพอลิเอทิลีน [18] โดยขึ้นรูปเป็นแผ่นตะกั่วบางแล้วเคลือบด้วยพอลิเอทิลีน อีกทั้งมีการใช้แผ่นตะกั่วบริสุทธิ์ในการป้องกันรังสีแกมมา ส่วนการป้องกันรังสีนิวตรอนมีการใช้พลาสติกชนิดพอลิเอทิลีน และยางซิลิโคนผสมกับผงโบรอนบริสุทธิ์ หรือผงกรดบอริก โดยสารทั้งสองชนิดสามารถเก็บประจุการปล่อยรังสีแกมมาออกมาภายนอก หรืออนุภาคนิวตรอนขนาดเล็กได้ ซึ่งการใช้งานในเตาปฏิกรณ์หรือในโรงพยาบาลสร้างอุปกรณ์ป้องกันรังสีในรูปแบบกล่องที่มีความหนาต่างกันโดยความหนาของกล่องขึ้นอยู่กับพลังงานและปริมาณของรังสี แต่ทั้งนี้การใช้งานวัสดุป้องกันรังสีเป็นเวลานานอาจทำให้วัสดุเกิดการเสื่อมสภาพของวัสดุ โดยที่กลไกการเสื่อมสภาพเกิดขึ้นได้ 2 กรณี คือ

1. การเสื่อมสภาพทางกายภาพ โดยเกิดจากความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างที่นิวตรอนทำปฏิกิริยานิวเคลียร์กับโบรอน โดยรังสีทำให้ชิ้นงานพอลิเอทิลีนมีการเปราะและแตกหักได้ง่าย ซึ่งรอยแตกที่ผิวชิ้น ทำให้อนุภาคนิวตรอนหรือรังสีแกมมา สามารถทะลุผ่านวัสดุชิ้นงานได้
2. การเสื่อมสภาพทางสมบัติป้องกันรังสี เมื่อแผ่นชิ้นงานพอลิเอทิลีนหรือยางซิลิโคนที่ผสมสารโบรอนได้รับอนุภาคนิวตรอน ทำให้เกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์ ที่เปลี่ยนโครงสร้างของโบรอนให้กลายเป็นลิเทียม แสดงดังรูปที่ 2.15 ซึ่งหากมีการใช้งานเป็นเวลานานและต่อเนื่อง ปริมาณของสารโบรอนในแผ่นพอลิเอทิลีนหรือยางลดลง ส่งผลทำให้ความสามารถในการป้องกันนิวตรอนลดลงด้วย



รูปที่ 2.15 กลไกการเกิดอันตรกิริยาของโบรอน-10 กับนิวตรอน

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปัจจุบันมีการวิจัยเกี่ยวกับวัสดุที่ใช้ในการป้องกันรังสีจากวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ ที่วิจัยและใช้ประโยชน์ในเชิงอุตสาหกรรมกันอย่างแพร่หลาย จากงานวิจัยเกี่ยวกับยางธรรมชาติได้เพิ่มจำนวนมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งแสดงถึงความสำคัญประสิทธิภาพ และความหลากหลายในการนำไปใช้ประโยชน์ของยางธรรมชาติได้เป็นอย่างดี เช่นการนำยางธรรมชาติไปผสมกับวัสดุเหลือใช้เป็นสารตัวเติม เช่น ผงขี้เลื่อยไม้เป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติที่ปรับปรุงสมบัติด้านความแข็งแรง จากงานวิจัยของณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ และคณะ (2552) [2] และงานวิจัย Wattana และคณะ (2012) [3] ศึกษาผลของอิทธิพลของสารตัวเติมผงขี้เลื่อยไม้ที่เติมในยางธรรมชาติ และสารเคลือบผิวแผ่นยางด้วยพอลิยูริเทน พบว่า เมื่อเติมผงขี้เลื่อยไม้ในวัสดุเชิงประกอบยางส่งผลทำให้สมบัติเชิงกลด้านความแข็ง มอดุลัสแรงดึงเพิ่มขึ้น แต่สมบัติด้านความต้านทานแรงดึง และการยืดตัวลดลง สารเคลือบผิวยึดเกาะผิวยางติดได้ดี

ในด้านของการนำวัสดุยางธรรมชาติไปใช้ประโยชน์ในการป้องกันรังสีโดยงานวิจัยของ Gwaily และ คณะ (2002) [19-21] 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% เมื่อเทียบกับการใช้โบรอนคาร์ไบด์บริสุทธิ์ และสามารถป้องกันรังสีแกมมาได้เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณผงตะกั่วเพิ่มขึ้น และศึกษาการบวมตัวของยางในสารละลาย พบว่ายางธรรมชาติที่มีสารตัวเติมดังกล่าวข้างต้น การบวมตัวลดลงตามปริมาณผงตะกั่วที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้มีการศึกษาการป้องกันอนุภาคนิวตรอนจากวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ โดยการนำยางธรรมชาติที่มีสารตัวเติมผงเขม่าดำ 40 phr ผสมกับกรดบอริก (H_3BO_3) ที่มีโบรอนเป็นองค์ประกอบ มีการปรับเปลี่ยนปริมาณกรดบอริกที่ 0-30 phr พบว่า วัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่มีสารตัวเติมผงเขม่าดำผสมกับกรดบอริกที่ปริมาณ 30 phr สามารถลดปริมาณอนุภาคนิวตรอนได้ นอกจากนี้งานวิจัยของศิรกุล กาญจนปฐมพร (2555) [22] ศึกษาปริมาณของโบรอนออกไซด์เพื่อผลิตเป็นวัสดุกำบังอนุภาคนิวตรอน โดยปรับเปลี่ยนปริมาณโบรอนออกไซด์ที่ 1, 3 และ 5 phr ในน้ำยางผสมระหว่างน้ำยางธรรมชาติและน้ำยางสไตรีนบิวทาไดอีนในอัตราส่วนต่างๆ ร่วมกับสารเสริมแรง คือ ผงเขม่าดำ เกรด N330 ปริมาณ 0.5 และ 1 phr พบว่าชิ้นงานที่มีความสามารถในการลดอนุภาคนิวตรอนมากที่สุดคือ ชิ้นงานที่มีส่วนผสมของโบรอนออกไซด์ 3 phr และผงเขม่าดำ 0.5 phr โดยความหนาของชิ้นงานที่เหมาะสมในการกำบังอนุภาคนิวตรอนคือ 1.2 เซนติเมตร สามารถลดอนุภาคนิวตรอนได้ 81% สำหรับการวิจัยการนำยางธรรมชาติประยุกต์ใช้ในการกำบังรังสี และด้านความหนาที่มีผลต่อการป้องกันรังสี เช่นโครงการวิจัยศึกษาการผลิตแผ่นกำบังรังสีแกมมา และอิทธิพลของความหนาที่มีต่อการป้องกันรังสีแกมมาของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมเลตออกไซด์ [23] โดยมีการปรับเปลี่ยนความหนาตั้งแต่ 2.5 ถึง 10 เซนติเมตร พบว่า ประสิทธิภาพการป้องกันรังสีแกมมาเพิ่มขึ้น เมื่อความหนาของชิ้นงานเพิ่มขึ้น และงานวิจัยของกัลยาณี คุปตานนท์ และคณะ (2551) [24] ศึกษาอิทธิพลของความหนาที่มีต่อการป้องกันรังสีแกมมาของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงเฟอร์ไรต์ โดยใช้แผ่นยางที่มีความหนา 1 ถึง 5 มิลลิเมตรเปรียบเทียบกับแผ่นเหล็ก และแผ่นอะลูมิเนียมที่มีความหนาอยู่ในช่วงเดียวกัน พบว่ายางผสมผงเฟอร์ไรต์สูงสุด 100 phr ความหนา 3 ถึง 5 มิลลิเมตร มีประสิทธิภาพการลดทอนรังสีดีกว่ายางธรรมชาติและแผ่นอะลูมิเนียมตามความหนาที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากผงเฟอร์ไรต์และผงตะกั่ว เป็นธาตุโลหะหนักที่มีมวลอะตอมสูง ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนสูง และมีภาคตัดขวางสูง จึงทำให้ช่วยเสริมประสิทธิภาพการป้องกันรังสีของยางธรรมชาติให้สูงขึ้นนอกจากนี้ Onjun และคณะ (2014) [25] ศึกษาการนำยางธรรมชาติผสมสารบอแรกซ์ กรดบอริก และผงตะกั่ว พบว่า ความสามารถในการป้องกันรังสีแกมมาและนิวตรอนเพิ่มขึ้นเมื่อความหนาและปริมาณส่วนผสมของสารตัวเติมเพิ่มขึ้น นอกจากงานวิจัยที่มีการเติมสารตัวเติมป้องกันรังสีในกลุ่มของโบรอนในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และเติมโบรอนในยางซิลิโคน งานวิจัยของ Hao Chai และคณะ (2015) [26] ศึกษาการนำยางซิลิโคนผสมสารตัวเติมป้องกันรังสีชนิดโบรอนคาร์ไบด์ ที่ปริมาณ 0-70 phr พบว่า การเติมโบรอนคาร์ไบด์ในวัสดุเชิงประกอบยางซิลิโคน ทำให้สมบัติเชิงกลโดยรวมลดลง ยกเว้นค่าความแข็งที่ผิว และส่งผลทำให้ความสามารถในการป้องกันอนุภาคนิวตรอนเพิ่มขึ้นตามปริมาณสารตัวเติมที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ Kemaloglu และคณะ (2010) [27] ศึกษาการนำยางซิลิโคนผสมสารโบรอนไนไตรด์ที่ปริมาณ

0-60 phr พบว่า ค่าความต้านทานแรงดึง และเปอร์เซนต์การยืดตัว ณ จุดขาด มีค่าลดลง แต่ค่ามอดุลัสแรงดึง และความค่าแข็งที่ผิวมีค่าสูงขึ้นตามปริมาณสารตัวเติมที่เพิ่มขึ้น

นอกจากนี้มีการศึกษาสารตัวเติมกลุ่มโบรอนที่มีต่อระบบวัลคาไนซ์ โดย Feniak [28] จดสิทธิบัตรการใช้สารตัวเติมประกอบโบรอนชนิดต่างๆ เช่น Boron oxide หรือกลุ่ม Boric acid เติมใน Halogenated butyl rubber โดยเปรียบเทียบกับการเติม Magnesium oxide โดยที่ Halogenated butyl rubber มีค่าการสุกตัวอย่างรวดเร็วก่อนกำหนด ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้กระบวนการผสมยางกับสารเคมี ด้วยกระบวนการผสมด้วยเครื่องผสมยางแบบปกติ พบว่า การเติมกลุ่มสารประกอบโบรอนในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติส่งผลทำให้เวลาที่ยางเกิดการคงรูป (Scorch time) เพิ่มขึ้นมากกว่าการเติมด้วยสารตัวเติมกลุ่ม Magnesium oxide ซึ่งเป็นการช่วยเพิ่มเวลาการคงรูปยางในระหว่างกระบวนการผลิตได้ดีขึ้น ส่วนสิทธิบัตรของ Larson, M.P. และ Larson, L.M. [29] มีการใช้เทคนิครังสีแกมมาในการวัลคาไนซ์ยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ โดยทำให้ยางเกิดการเชื่อมโยงพันธะ (Crosslinking) ได้ดีกว่าวิธีวัลคาไนซ์แบบปกติ

จากการวิจัยวัสดุยางธรรมชาติใช้ในการป้องกันรังสีมีการพัฒนาไปอย่างต่อเนื่อง ทั้งนี้เนื่องจากได้เล็งเห็นถึงความสำคัญของการป้องกันรังสีที่ใช้ทางอุตสาหกรรมและทางการแพทย์อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งในอนาคตอาจมีความเป็นไปได้สูงที่ประเทศไทยและมีโครงการสร้างโรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์ขึ้นในอนาคต ซึ่งจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องมีการศึกษาค้นคว้าวัสดุที่สามารถยับยั้งป้องกันอนุภาคนิวตรอนได้อย่างมีประสิทธิภาพ เพื่อนำไปใช้เป็นวัสดุก่อสร้างที่มีสมบัติด้านความแข็งแรง เช่น หลังคา ผนัง แผงกั้นตัวอาคารในโรงไฟฟ้านิวเคลียร์และบริเวณใกล้เคียงหรือห่อหุ้มตัวกำเนิดรังสีต่างๆ ดังนั้น งานวิจัยนี้มีเป้าหมายในการพัฒนาวัสดุสำหรับการใช้งานยับยั้งหรือการป้องกันรังสี โดยต่อยอดองค์ความรู้จากงานวิจัยโครงการ “การผลิตหลังคายางจากวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้” ที่มีสมบัติเชิงกลและความเป็นฉนวนกันรังสีความร้อนที่ดี และยังพบงานวิจัยค่อนข้างน้อยที่ศึกษาเกี่ยวกับแผ่นกำบังรังสีจากยางธรรมชาติ และแผ่นกำบังรังสีจากยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ ในงานวิจัยนี้จึงพัฒนาต่อยอดงานวิจัยโดยนำวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ ให้สามารถป้องกันหรือยับยั้งรังสีชนิดต่างๆ ได้อย่างประสิทธิภาพ เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่องานด้านรังสีในภาคอุตสาหกรรม ทางการแพทย์ และภาคการเกษตร และเป็นการเพิ่มมูลค่าของวัตถุยางธรรมชาติที่ผลิตได้ในประเทศให้มีความมั่นคงและยั่งยืน

บทที่ 3 วัตถุดิบและขั้นตอนการดำเนินงาน

3.1 วัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

วัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ได้แก่ ยางธรรมชาติ ซิงค์ออกไซด์ กรดสเตียริก เมอร์แคปโตเบ็นโซไธอาโซล ไดฟีนิลกัวนิดีน เขม่าดำชนิดมาสเตอร์แบท ผงขี้เลื่อยไม้ กำมะถัน สารคู่ควบไซเลน สารเพิ่มเสถียรภาพต่อรังสียูวี สารแอนตี้ออกซิแดนท์ สารป้องกันปฏิกิริยากับโอโซน สารตัวเติมป้องกันรังสีชนิดกรดบอริก โบรอนออกไซด์ และผงตะกั่ว โดยสารเคมีและสารตัวเติมแต่ละชนิดมีหน้าที่และรายละเอียดดังนี้

3.1.1 ยางธรรมชาติ (Natural rubber)

ยางธรรมชาติชนิดยางแท่ง เกรด Standard Thai Rubber (STR 20) เป็นวัสดุหลัก (Matrix phase) ในงานวิจัยนี้ เนื่องจากยางธรรมชาติมีการใช้กันอย่างแพร่หลายในโรงงานอุตสาหกรรม ราคาถูก และมีสมบัติเด่นในด้านความยืดหยุ่น ความทนทานต่อแรงดึง และความทนทานต่อการฉีกขาดที่อุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิต่ำ จากบริษัท พีไอ อินดัสทรี จำกัด

3.1.2 ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide; ZnO)

ซิงค์ออกไซด์เป็นสารกระตุ้นปฏิกิริยา (Activator) ในปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ในกระบวนการผลิตยาง ที่ทำหน้าที่กระตุ้นให้สารตัวเร่งปฏิกิริยามีประสิทธิภาพการทำงานสูงขึ้น และเพิ่มอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาคงรูปของยาง จากบริษัท ไทย - ไลซาท จำกัด

3.1.3 กรดสเตียริก (Stearic acid)

กรดสเตียริกเป็นสารกระตุ้นร่วม (Co-activator) ในปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ในกระบวนการผลิตยาง ที่ทำงานร่วมกับซิงค์ออกไซด์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการกระตุ้นปฏิกิริยา ส่งผลทำให้การเกิดปฏิกิริยาคงรูปเร็วขึ้น จากบริษัท อิมพีเรียล อินดัสเตรียล เคมิคอล จำกัด

3.1.4 เมอร์แคปโตเบนโซไทอะโซล (Mercaptobenzothiazole, MBT)

เมอร์แคปโตเบนโซไทอะโซลเป็นสารตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดปฐมภูมิ (Primary accelerator) ที่ใช้ในกระบวนการคงรูปด้วยระบบกำมะถัน เพื่อเร่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาระหว่างยางกับกำมะถันให้เร็วขึ้น ลดเวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูป ทำให้ยางคงรูปมีความหนาแน่นของการเชื่อมโยงและมีสมบัติเชิงกลดีขึ้น จากบริษัท ซีเอ็มซี แอดวานซ์ จำกัด

3.1.5 ไดฟีนิลกัวนิดีน (Diphenylguanidine; DPG)

ไดฟีนิลกัวนิดีนเป็นสารตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดทุติยภูมิ (Secondary accelerator) ทำงานร่วมกับสารตัวเร่งปฏิกิริยาปฐมภูมิในกระบวนการคงรูปยาง เพื่อให้สารตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสองชนิดทำงานแบบเสริมกัน (Synergistic effect) ส่งผลทำให้ยางมีอัตราการคงรูปเร็วขึ้น จากบริษัท สยามเคมิคอล จำกัด (มหาชน)

3.1.6 เขม่าดำชนิดมาสเตอร์แบท (Carbon black master batch)

ผงเขม่าดำเป็นสารเสริมแรงที่นิยมทางการค้า ทำหน้าที่ช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกล ซึ่งเขม่าดำที่ใช้เป็นเกรด N330 ชนิดมาสเตอร์แบทที่มีส่วนผสมระหว่างยางธรรมชาติ 62% และผงเขม่าดำ 38% จากบริษัท พีไอ อินดัสทรี จำกัด

3.1.7 ผงขี้เลื่อยไม้ (Wood sawdust)

ผงขี้เลื่อยไม้เป็นสารตัวเติม ทำหน้าที่ช่วยเพิ่มสมบัติด้านมอดุลัสและความแข็ง ลดต้นทุนในการผลิต โดยมีขนาดอนุภาคประมาณ 200-300 ไมครอน ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์จาก บริษัท วี.พี. วู๊ด จำกัด

3.1.8 กำมะถัน (Sulfur)

กำมะถัน (Sulfur) เป็นสารคงรูปหรือสารวัลคาไนซ์ที่ทำให้โมเลกุลยางเกิดการเชื่อมโยงกันเป็นโครงสร้างตาข่าย 3 มิติ เมื่อผ่านปฏิกิริยาวัลคาไนซ์เซชันในกระบวนการผลิตยาง ซึ่งกำมะถันนิยมใช้กับยางทุกชนิดที่มีพันธะคู่ในโมเลกุล จากบริษัท ซีออน แอดวานซ์ โพลีมิกซ์ จำกัด

3.1.9 สารคู่ควบไซเลน (Silane coupling)

สารคู่ควบไซเลนเป็นสารช่วยทำให้ขั้นตอนการผสมยางกับผงขี้เลื่อยไม้ทำได้ง่ายขึ้น ทำให้ผงขี้เลื่อยไม้กระจายตัวในยางได้ดี และช่วยเพิ่มอันตรกิริยาระหว่างยางกับผงขี้เลื่อยไม้ ส่งผลทำให้ยางคงรูปมีสมบัติเชิงกลดีขึ้น ซึ่งสารคู่ควบไซเลนที่ใช้เป็นชนิด N-2-(Aminoethyl)-3-aminopropyltrimethoxysilane (KBM 603A) โดยสูตรโครงสร้างของสารคู่ควบไซเลนประกอบด้วยหมู่อะมิโน (NH_2) คือ $(CH_3O)_3SiC_3H_6NHC_2H_4NH_2$) จากบริษัท คิสโก้ (ที) จำกัด

3.1.10 สารเพิ่มเสถียรภาพต่อรังสียูวี (UV stabilizer)

สารเพิ่มเสถียรภาพต่อรังสียูวี เป็นสารป้องกันการเสื่อมสภาพของยางจากแสง รังสียูวี และความร้อน เกรดที่ใช้เป็นเกรด CHIGUARD 234 ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท เบ็นไมเยอร์ เคมีคอล (ที) จำกัด

3.1.11 สารแอนตี้ออกซิแดนท์ (Anti-oxidant)

สารแอนตี้ออกซิแดนท์ เป็นสารป้องกันการเกิดออกซิเดชั่น ป้องกันการเสื่อมสภาพของยางจากการทำปฏิกิริยากับออกซิเจน ในสภาวะที่มีความร้อน และแรงเฉือนในกระบวนการผลิต และช่วยยืดอายุการใช้งานไม่ให้เสื่อมสภาพเร็ว เกรดที่ใช้เป็นเกรด TY 1076 จากบริษัท โกลบอล คอนเน็คชั่นส์ จำกัด (มหาชน)

3.1.12 สารป้องกันปฏิกิริยากับโอโซน (Anti-ozonant)

สารป้องกันปฏิกิริยากับโอโซน เป็นสารป้องกันหรือลดการเกิดรอยแตกของยางจากการเกิดปฏิกิริยาระหว่างโอโซนกับยาง ที่ใช้เป็นเกรด REDEZON 515P ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท เบ็นไมเยอร์ เคมีคอล (ที) จำกัด

3.1.13 กรดบอริก (Boric acid)

กรดบอริกเป็นสารตัวเติม ทำหน้าที่ป้องกันอนุภาคนิวตรอน กรดบอริกที่ใช้เป็นเกรด AR. (AJAX) ลักษณะเป็นผงสีขาว มีความบริสุทธิ์ 99.5% ค่าความถ่วงจำเพาะ 1.435 น้ำหนักโมเลกุล 61.83 g/mole จุดเดือด 300 ˚C และจุดหลอมเหลว 169 ˚C จากบริษัท สยามเบต้า กรุ๊พ จำกัด

3.1.14 โบรอนออกไซด์ (Boron oxide)

ผงโบรอนออกไซด์เป็นสารตัวเติม ทำหน้าที่ป้องกันอนุภาคนิวตรอ ผงโบรอนออกไซด์ที่ใช้มีลักษณะเป็นผงสีขาว และมีความบริสุทธิ์ 99% ค่าความถ่วงจำเพาะ 2.46 และจุดเดือด 1860 ˚C จากบริษัท ซิกม่า-อัลดริช (ประเทศไทย) จำกัด

3.1.15 ผงตะกั่ว (Lead powder)

ผงตะกั่วเป็นสารตัวเติม ทำหน้าที่ป้องกันรังสีแกมมา โดยผงตะกั่วที่ใช้มีความบริสุทธิ์ 99.9% ค่าความถ่วงจำเพาะ 11.3 น้ำหนักโมเลกุล 207.2 g/mole จุดเดือด 1740 ˚C และจุดหลอมเหลว 327.4 ˚C จากบริษัท ปุณ อินจิเนียริ่ง จำกัด

3.2 สูตรส่วนประกอบยางที่ใช้ในงานวิจัย

สูตรส่วนประกอบยางที่ใช้ในงานวิจัย แสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สูตรส่วนประกอบยางที่ใช้ในงานวิจัย

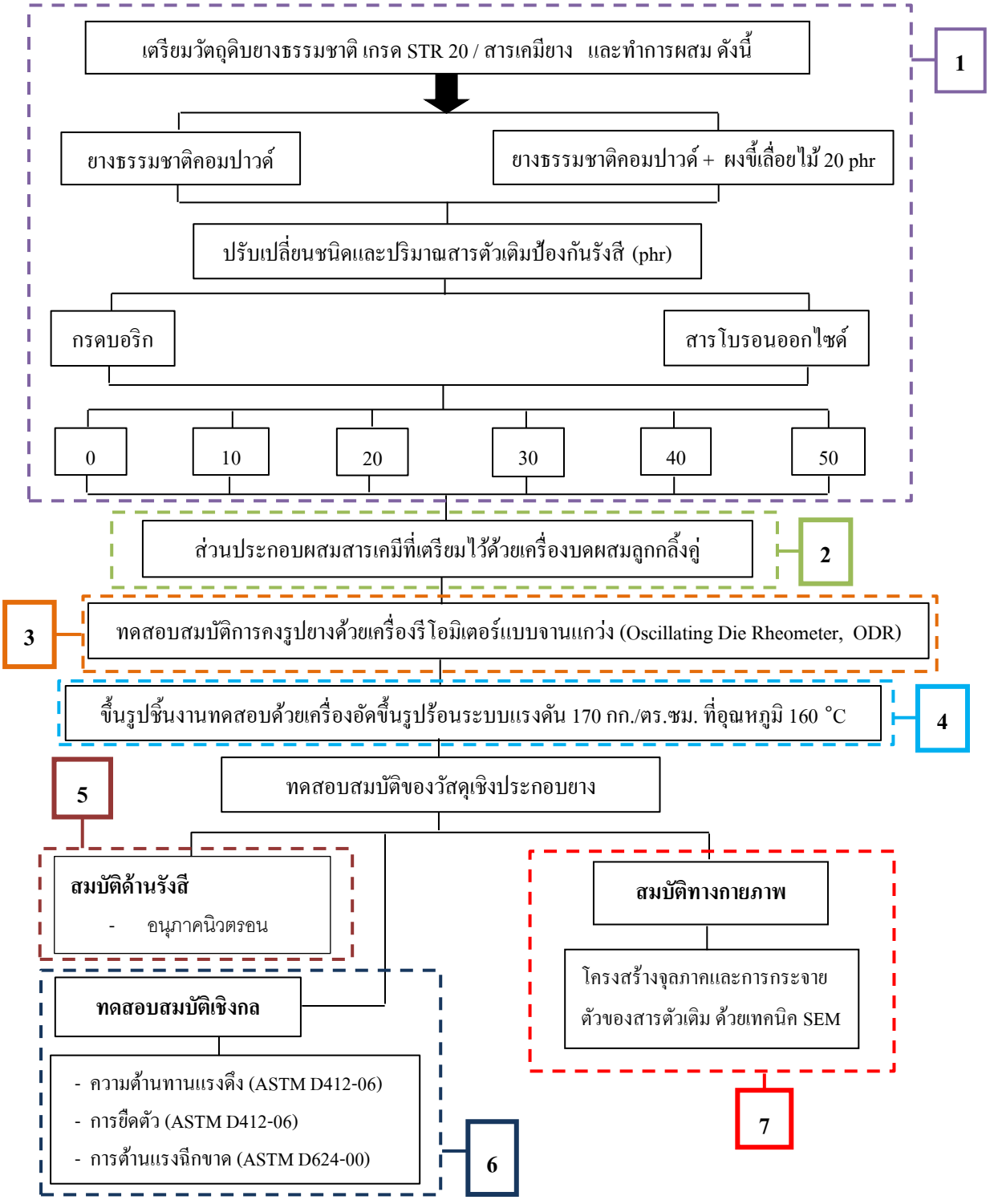
สารเคมี	**ปริมาณ** (phr*)	**หน้าที่**
Natural rubber (STR 20)	100 (Part)	Matrix
Zinc oxide; ZnO	5.0	Activator
Stearic acid	2.0	Activator
Mercaptobenzthaisoles; MBT	0.5	Accelerator
Diphenylguanidine; DPG	2	Accelerator
Sulphur powder 450 mesh	3.0	Cross-linker
Carbon black (HAF N330)	40.0	Reinforcement
Wood sawdust (WS)	20.0	Filler
Silane coupling (KBM 603A)	0.5% / Weight wood sawdust	Coupling agent
UV stabilizer (CHIGUARD 234)	0.1	UV absorber
Anti-oxidant (TY 1076)	0.5	Anti-oxidant
Anti-ozonant (REDEZON 515P)	3.0	Anti-Ozonant
Boron oxide (B_2O_3)	Varying from 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70 and 80	Radiation protection agent
Boric acid (H_3BO_3) Lead powder (Pb)	Varying from 10, 20, 30, 40 and 50	Radiation protection agent

*phr: part per hundred of rubber by weight

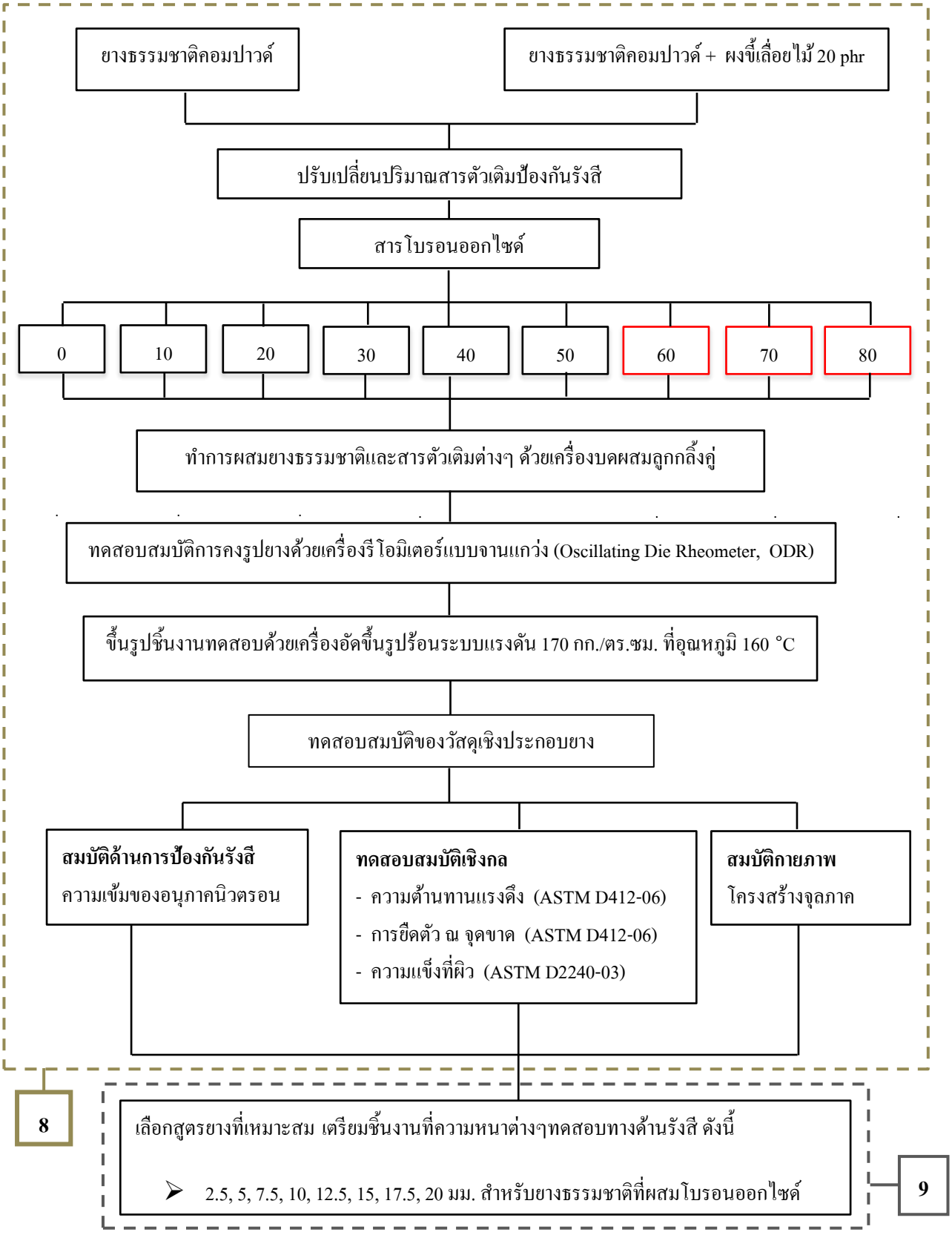
3.3 แผนการดำเนินงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้ศึกษาชนิดและปริมาณการใช้สารตัวเติมป้องกันรังสี ได้แก่ กรดบอริก ผงโบรอนออกไซด์ และผงตะกั่ว เป็นสารตัวเติมที่ใช้ในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ เพื่อผลิตแผ่นกำบังรังสีให้มีความสามารถในการป้องกันอนุภาคนิวตรอนและรังสีแกมมาได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยแบ่งแผนการดำเนินงานวิจัยออกเป็น 3 ส่วน ดังนี้ ส่วนที่ 1 ทำการผสมยางธรรมชาติ และสารเคมียาง ปรับเปลี่ยนปริมาณสารตัวเติมชนิดกรดบอริก และโบรอนออกไซด์ และดำเนินการจัดเตรียมวัสดุที่มีสมบัติและคุณลักษณะที่ใช้ในงานวิจัย และทดสอบสมบัติต่างๆ แสดงดังในรูปที่ 3.1 ส่วนที่ 2 ทำการผสมยางธรรมชาติ และสารเคมียาง ปรับเปลี่ยน

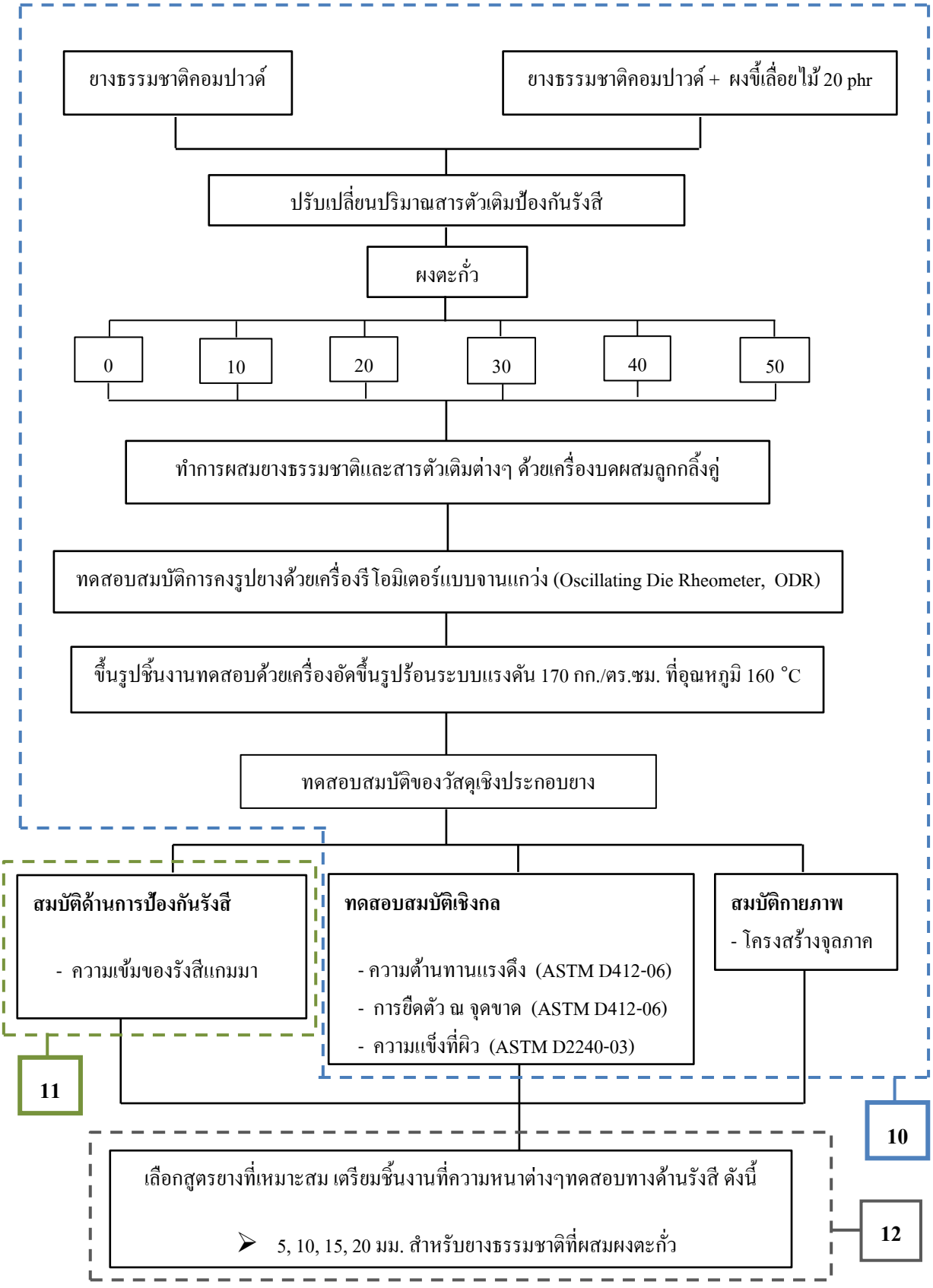
ปริมาณสารตัวเติมชนิดโบรอนออกไซด์ และเลือกสูตรยางที่เหมาะสมที่สุดนำมาปรับเปลี่ยนความหนา และทดสอบสมบัติด้านรังสีและสมบัติเชิงกล แสดงดังในรูปที่ 3.2 และส่วนที่ 3 ทำการผสมยางธรรมชาติ และสารเคมียาง ปรับเปลี่ยนปริมาณสารตัวเติมชนิดผงตะกั่ว และเลือกสูตรยางที่เหมาะสมนำมาปรับเปลี่ยนความหนา และทดสอบสมบัติด้านรังสีและสมบัติเชิงกล แสดงดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนและรายละเอียดการดำเนินงานตอนที่ 1



รูปที่ 3.2 ขั้นตอนและรายละเอียดการดำเนินงานตอนที่ 2



รูปที่ 3.3 ขั้นตอนและรายละเอียดการดำเนินงานตอนที่ 3

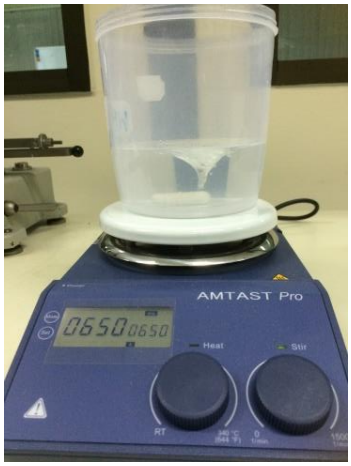
รายละเอียดของแผนงานวิจัยตอนที่ 1

งานหมายเลข 1 เตรียมวัตถุดิบผสมระหว่างยางธรรมชาติ สารตัวเติม และสารเคมียาง
ในงานวิจัยนี้แบ่งการผสมออกเป็น 2 ส่วนดังนี้ ส่วนที่ 1 เตรียมวัตถุดิบผสมระหว่างยางธรรมชาติกับเขม่าดำชนิดมาสเตอร์แบทปริมาณคงที่ 40 phr และปรับเปลี่ยนชนิดและปริมาณสารตัวเติมป้องกันรังสี ได้แก่ กรดบอริก และผงโบรอนออกไซด์ ที่ปริมาณ 0 - 50 phr ส่วนที่ 2 เตรียมวัตถุดิบผสมระหว่างยางธรรมชาติกับเขม่าดำชนิดมาสเตอร์แบทที่ปริมาณคงที่ 40 phr และผงขี้เลื่อยไม้ที่ปริมาณคงที่ 20 phr และปรับเปลี่ยนชนิดและปริมาณสารตัวเติมป้องกันรังสี ได้แก่ กรดบอริก และผงโบรอนออกไซด์ ที่ปริมาณ 0 - 50 phr ซึ่งวิธีการเตรียมผงขี้เลื่อยไม้ที่ใช้ในการผสมในส่วนที่ 2 เริ่มจากนำผงขี้เลื่อยไม้มาคัดขนาดอนุภาคด้วยเครื่องคัดขนาดอนุภาคแบบสั่น (Sieve shaker) ยี่ห้อ FRITSCH จากประเทศเยอรมนี แสดงดังรูปที่ 3.4 และตะแกรงขนาด 200 เมซ (Mesh) หรือ 75 ไมครอน โดยการนำตะแกรงวางบนเครื่องคัดขนาดแบบสั่น และใส่ผงขี้เลื่อยไม้ในตะแกรงเมื่อเครื่องสั่นทำให้อนุภาคของผงขี้เลื่อยไม้ที่มีขนาดอนุภาคที่เล็กกว่าช่องตะแกรงคัดขนาดอนุภาค

รูปที่ 3.4 เครื่องคัดขนาดแบบสั่น (Sieve shaker)

จากนั้นนำผงขี้เลื่อยไม้ที่ผ่านการคัดขนาดทำการปรับปรุงผิวด้วยสารคู่ควบไซเลนเพื่อเพิ่มอันตรกิริยาระหว่างยางกับสารตัวเติม ซึ่งสารคู่ควบไซเลนทำหน้าที่เป็นสารเชื่อมประสาน และทำหน้าที่ช่วยให้กระจายตัวในยางได้ดีในยาง โดยวิธีการปรับปรุงผิวของผงขี้เลื่อยไม้ดังนี้

- เตรียมสารละลายสารคู่ควบไซเลน เกรด KBM 603A ปริมาณ 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยชั่งสารคู่ควบไซเลน 0.5 กรัม หยดในน้ำ DI ปริมาณ 99.5 กรัม และใส่แท่งแม่เหล็กเพื่อกวนสารละลายเป็นเวลา 30 นาที ด้วยเครื่องกวนสารละลาย (Magnetic stirrer) แสดงดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 เครื่องกวนสารละลาย (Magnetic stirrer)

- ผสมผงขี้เลื่อยไม้และสารละลายสารคู่ควบไซเลนด้วยเครื่องผสมระบบปิดความเร็วสูง (High speed mixer) รุ่น LMXS จากบริษัท Lab tech engineering จำกัด ประเทศไทย แสดงดังรูปที่ 3.6 โดยนำสารละลายสารคู่ควบไซเลนและผงขี้เลื่อยไม้ใส่ในเครื่องผสม จากนั้นทำการอบให้แห้งในตู้อบ (Oven) รุ่น GT-7017-L จากบริษัท GOTECH Testing Machine ประเทศไต้หวัน แสดงดังรูปที่ 3.7 ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

รูปที่ 3.6 เครื่องผสมระบบปิดความเร็วสูง (High speed mixer)

รูปที่ 3.7 ตู้อบชิ้นงาน (Controlled Temperature Oven)

งานหมายเลข 2 นำส่วนประกอบของยางผสมสารเคมีที่เตรียมไว้ด้วยเครื่องบดผสมลูกกลิ้งคู่ จากแผนงานหมายเลขที่ 1 นำวัตถุดิบ สารตัวเติม และสารเคมีต่างๆที่เตรียมไว้ผสมด้วยเครื่องบดผสมลูกกลิ้งคู่ (Two roll mill) จากบริษัท ยง ฟง แมชชีนเนอรี จำกัด ดังแสดงในรูปที่ 3.8 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) และสารกระตุ้นปฏิกิริยาชนิดกรดสเตียริค (Stearic acid) เวลา 5 นาที
3. ผสมสารตัวเติม ผงเขม่าดำหรือผงขี้เลื่อยไม้หรือสารตัวเติมป้องกันรังสี และสารเพิ่มเสถียรภาพต่อรังสียูวี สารแอนตี้ออกซิแดนท์ สารป้องกันปฏิกิริยากับโอโซน เวลา 10 นาที
4. ผสมสารเร่งการกระตุ้นปฏิกิริยาเมอร์แคปโตเบ็นโซไธอาโซล (Mercaptobenzo thiazole, MBT) และสารเร่งการกระตุ้นปฏิกิริยาไดฟีนิลกัวนิดีน (Diphenylguanidine, DPG) เวลา 5 นาที
5. ผสมสารคงรูปยางชนิดกำมะถัน (Sulphur) เวลา 5 นาที

รูปที่ 3.8 เครื่องบดผสมลูกกลิ้งคู่ (Two roll mill)

งานหมายเลข 3 การทดสอบสมบัติการคงรูปยาง

นำยางคอมปาวด์ที่ได้จากเครื่องบดผสมลูกกลิ้งคู่ไปทดสอบเวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูป (ts_1) และเวลาในการคงรูปยางที่ 90 เปอร์เซ็นต์ (tc_{90}) ของแต่ละสูตรด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์แบบจานแกว่ง (Oscillating Die Rheometer; ODR) จาก บริษัท โกเท็ค เท็ดดิ่ง แมชชีน อินดัสเตรียล จำกัด รุ่น GT 70 - 70 S2, ประเทศไต้หวัน ตามมาตรฐาน ASTM D2084 - 01 แสดงดังรูปที่ 3.9 โดยในการทดสอบใช้ชิ้นงานยางคอมปาวด์ประมาณ 9-10 กรัม อุณหภูมิในการทดสอบ 160 องศาเซลเซียส

รูปที่ 3.9 เครื่องรีโอมิเตอร์แบบจานแกว่ง (Oscillating Die Rheometer; ODR)

งานหมายเลข 4 การเตรียมชิ้นงานแผ่นยางที่คงรูปด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปร้อนระบบแรงดัน

นำสารประกอบยางคอมปาวด์เตรียมขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปด้วยความร้อนระบบแรงดัน (Compression moulding machine) รุ่น LP-20M จาก บริษัท แลป เทค อินจิเนียริ่ง จำกัดประเทศไทย ดังรูปที่ 3.10 โดยให้ชิ้นงานมีความหนา 2 มิลลิเมตร อุณหภูมิการขึ้นรูป 160 องศาเซลเซียส แรงดันปิดแม่พิมพ์ 170

กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และใช้เวลาในการคงรูปยางตามค่า tc_{90} ของแต่ละสูตรยางจากเครื่องรีโอมิเตอร์แบบจานแกว่ง (ODR)

รูปที่ 3.10 เครื่องอัดขึ้นรูปร้อนระบบแรงดัน (Compression moulding machine)

งานหมายเลข 5 การทดสอบทางด้านรังสี

นำชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบยางที่เติมผงเขม่าดำ ผงขี้เลื่อยไม้ และสารตัวเติมป้องกันรังสี ที่ผ่านการขึ้นรูปของแต่ละสูตรวัดความต้านทานต่ออนุภาคนิวตรอน ดังรายละเอียดต่อไปนี้

- นำชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่เติมผงกรดบอริก และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่เติมผงโบรอนออกไซด์ ในทุกปริมาณการเติม ทดสอบความต้านทานต่ออนุภาคนิวตรอน โดยในงานวิจัยนี้ใช้ระบบ Integral counting system ในการทดสอบ เริ่มจากการใส่ Sources นิวตรอนจาก ^{241}Am/Be เข้าไปในเครื่องทดสอบ ใช้หัววัดนิวตรอนรังสีชนิดบรรจุก๊าซ He-3 (Gas-filled detector) และใช้แผ่น HDPE เป็นตัวลดพลังงาน (Moderator) จากนิวตรอนพลังงานสูง (Fast neutron) เป็นนิวตรอนพลังงานต่ำ (Thermal neutron) เนื่องจาก HDPE มีจำนวนของไฮโดรเจนที่สูงซึ่งเหมาะต่อการลดพลังงานของนิวตรอน และวางชิ้นงานทดสอบบนแผ่น HDPE ห่างจากหัววัดรังสี 5 เซนติเมตร โดยหัววัดรังสีต่อเข้ากับเครื่องขยายสัญญาณเบื้องต้น (Preamplifier) เครื่องขยายสัญญาณ (Amplifier) ยี่ห้อ CANBERRA รุ่น 2022 และเครื่อง HV Power supply ยี่ห้อ ORTEC รุ่น 659 ทำการทดสอบจำนวน 5 ครั้งๆ ละ 100 วินาทีต่อชิ้นงาน ซึ่งค่านับวัดที่ได้เกิดจากเครื่องนับจำนวนนิวตรอน (Counter) ยี่ห้อ ORTEC รุ่น 770 แสดงดังรูปที่ 3.11 โดยขนาดชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบกว้าง 15 เซนติเมตร ยาว 15 เซนติเมตร และหนา 2 มิลลิเมตร และคำนวณหาค่าความต้านทานต่ออนุภาคนิวตรอน แสดงดังสมการที่ 1

สูตรการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น (Linear attenuation coefficient, μ)

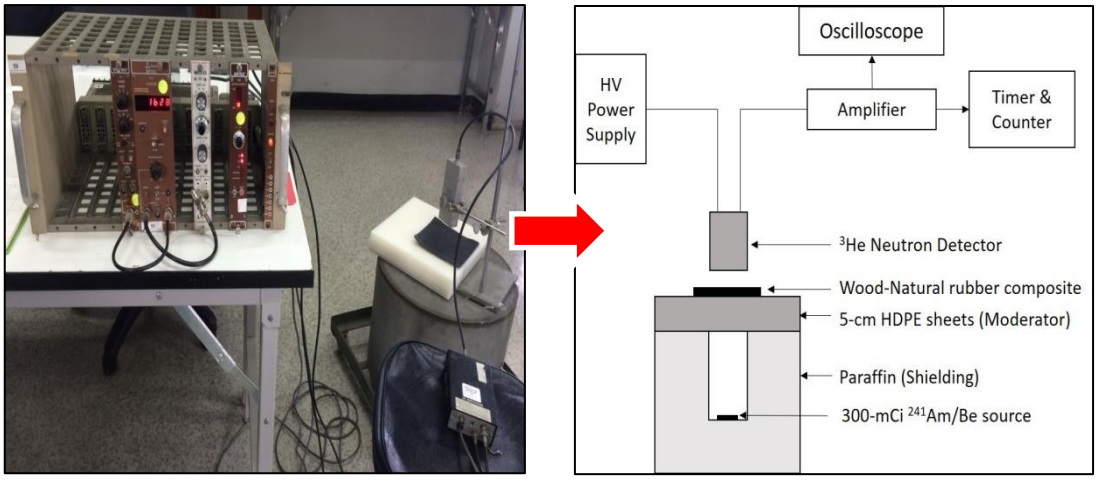
$$\frac{I}{I_0} = e^{-\mu x}$$

$$\mu = \frac{-\ln(\frac{I}{I_0})}{x} \quad (1)$$

โดย I_0 คือ ความเข้มของรังสีก่อนผ่านชิ้นงาน

I คือ ความเข้มของรังสีหลังผ่านชิ้นงาน

x คือ ความหนาของชิ้นงาน



รูปที่ 3.11 เครื่องทดสอบความต้านทานต่ออนุภาคนิวตรอน

หมายเลข 6 การทดสอบสมบัติเชิงกล

เตรียมชิ้นงานทดสอบด้านความต้านทานแรงดึง ดังนี้ ค่ามอดุลัสแรงดึงที่การยืดตัว 100 เปอร์เซ็นต์ ความต้านทานต่อแรงดึง เปอร์เซ็นต์การยืดตัวที่จุดขาด เป็นรูปดัมเบลล์ ชนิด Die C และเตรียมชิ้นงานทดสอบความต้านทานต่อการฉีกขาด แสดงดังรูปที่ 3.12 โดยรายละเอียดการทดสอบสมบัติเชิงกลแสดงดังต่อไปนี้

รูปที่ 3.12 แบบตัดชิ้นงานทดสอบชนิด Die C

- ทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงดึง และเปอร์เซ็นต์การยืดตัวที่จุดขาด ด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง (Universal testing machine) จาก บริษัท ชิมาสุ จำกัด รุ่น Autograph AG-I ประเทศญี่ปุ่น ตามมาตรฐานทดสอบ ASTM D412 - 06 และทดสอบความต้านทานต่อการฉีกขาด ตามมาตรฐานทดสอบ ASTM D624 - 00 ความเร็วในการดึงที่ 500 มิลลิเมตรต่อนาที ดังรูปที่ 3.13

รูปที่ 3.13 เครื่องทดสอบแรงดึง

- ทดสอบค่าความแข็งที่ผิวของแผ่นยางที่คงรูป ด้วยเครื่องทดสอบความแข็ง (Durometer) จาก บริษัท เทคล็อค จำกัด ตามมาตรฐาน ASTM D2240-03 (Shore A) แสดงดังรูปที่ 3.14

รูปที่ 3.14 เครื่องทดสอบความแข็ง (Durometer)

หมายเลข 7 การทดสอบทางกายภาพ

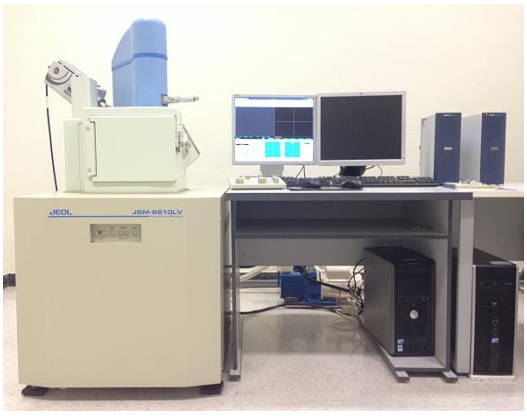
- **การทดสอบทางกายภาพ**

เพื่อดูโครงสร้างจุลภาคและการกระจายตัวของสารตัวเติมในวัสดุเชิงประกอบยางของด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) โดยปรับระยะโฟกัสของลำอิเล็กตรอนให้เลนส์ใกล้วัตถุ (Objective lens) ลงไปบนผิวชิ้นงานที่ต้องการศึกษา หลังจากลำอิเล็กตรอนกราดลงบนชิ้นงานทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron) และแปลงเป็นสัญญาณภาพ ขั้นตอนการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและการกระจายตัวของสารตัวเติมในวัสดุเชิงประกอบยาง ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ดังนี้

- เตรียมชิ้นงานทดสอบโดยนำเทปกาวคาร์บอนติดลงบนแท่นอะลูมิเนียม (Stub) จากนั้นนำชิ้นงานที่ต้องการทดสอบหักชิ้นงานให้มีขนาดเล็ก และวางลงบนเทปกาวคาร์บอน จากนั้นนำชิ้นงานไปเคลือบด้วยทองคำ ด้วยเครื่องเคลือบตัวอย่างด้วยผงทอง (Ion sputtering device) รุ่น SPI-MODULE ยี่ห้อ SPI Supplies จากประเทศอังกฤษ แสดงดังรูปที่ 3.15 ความต่างศักย์ 10 กิโลโวลต์ และกระแสไฟฟ้าในการเคลือบ 15 แอมแปร์ เวลา 60 วินาที

รูปที่ 3.15 เครื่องเคลือบตัวอย่างด้วยผงทอง (Ion sputtering device)

- นำชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบด้วยทองคำ วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคและการกระจายตัวของสารตัวเติมในวัสดุเชิงประกอบยาง ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) รุ่น JSM-6610LV ยี่ห้อ JEOL จากประเทศญี่ปุ่น แสดงดังรูปที่ 3.16 ความต่างศักย์ 10 กิโลโวลต์ และกระแสไฟฟ้า 15 แอมแปร์



รูปที่ 3.16 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)

รายละเอียดของแผนงานวิจัยตอนที่ 2

งานหมายเลข 8 เตรียมวัตถุดิบผสมระหว่างยางธรรมชาติ สารตัวเติม และสารเคมียาง

แผนงานวิจัยในตอนที่ 2 แบ่งการผสมออกเป็น 2 ส่วนดังนี้ ส่วนที่ 1 เตรียมวัตถุดิบผสมระหว่างยางธรรมชาติกับเขม่าดำชนิดมาสเตอร์แบทปริมาณคงที่ 40 phr และปรับเปลี่ยนปริมาณสารตัวเติมชนิดโบรอนออกไซด์ ที่ปริมาณ 60, 70 และ 80 phr (เพิ่มเติมจากงานในส่วนที่ 1) ส่วนที่ 2 เตรียมวัตถุดิบผสมระหว่าง

ยางธรรมชาติกับเขม่าดำชนิดมาสเตอร์แบทปริมาณคงที่ 40 phr และผงขี้เลื่อยไม้ที่ปริมาณคงที่ 20 phr และปรับเปลี่ยนปริมาณสารตัวเติมป้องกันรังสีชนิดผงโบรอนออกไซด์ ที่ปริมาณ 60, 70 และ 80 phr ผสมด้วยเครื่องบดผสมลูกกลิ้งคู่ (Two roll mill) จากบริษัท ยง ฟง แมชชีนเนอรี จำกัด ดังแสดงในรูปที่ 3.8 ตามส่วนประกอบของยางที่แสดงในตารางที่ 3.1 โดยใช้เวลาในการผสมสารประกอบยางที่ 30 นาทีเท่ากันทุกส่วน โดยขั้นตอนการผสมเช่นเดียวกันงานหมายเลข 2 จากนั้นทดสอบสมบัติการคงรูปยางโดยใช้เครื่อง Oscillating Die Rheometer และขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปร้อนระบบแรงดัน จากนั้นนำชิ้นงานทดสอบสมบัติด้านรังสี สมบัติเชิงกล และสมบัติทางกายภาพของสูตรยางธรรมชาติผสมผงโบรอนออกไซด์ โดยขั้นตอนการทดสอบเช่นเดียวกับงานหมายเลข 3-7

งานหมายเลข 9 เลือกสูตรยางที่เหมาะสม ปรับเปลี่ยนความหนาทดสอบทางด้านรังสี
ในงานวิจัยนี้ได้เลือกสูตรส่วนผสมที่มีคุณภาพดี คือ วัสดุเชิงประกอบยางที่เติมโบรอนออกไซด์ที่ปริมาณ 80 phr เพื่อนำมาปรับเปลี่ยนความหนาทดสอบสมบัติด้านรังสี โดยเตรียมชิ้นงานทดสอบทางด้านรังสีที่มีความหนา 2.5, 5, 7.5, 10, 12.5, 15, 17.5, 20 มิลลิเมตร ด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปร้อนระบบแรงดัน (Hot press)

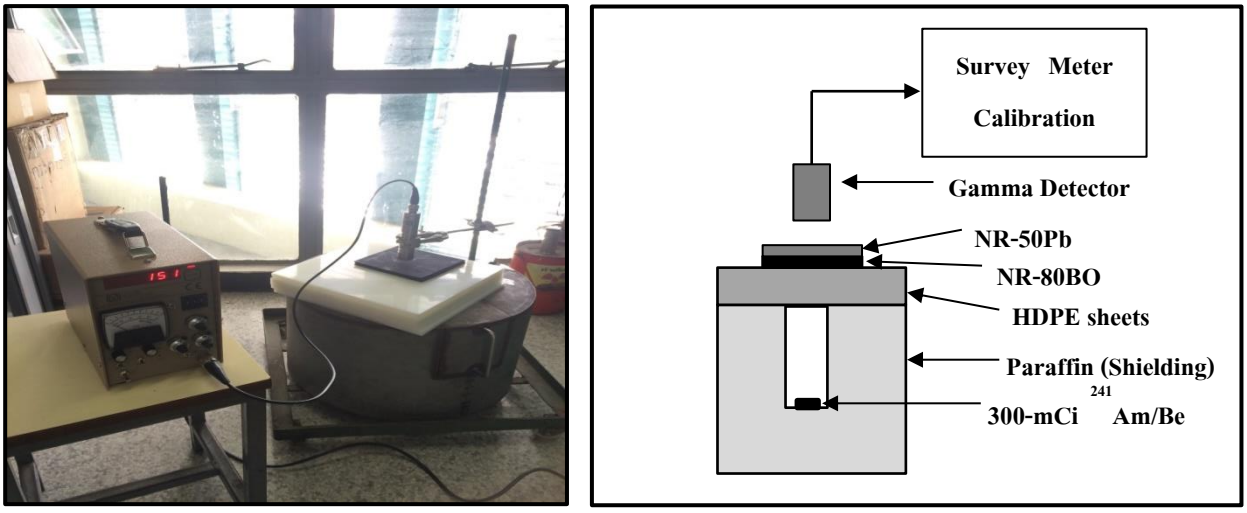
รายละเอียดของแผนงานวิจัยตอนที่ 3

งานหมายเลข 10 เตรียมวัตถุดิบผสมระหว่างยางธรรมชาติ สารตัวเติม และสารเคมียาง
แผนงานวิจัยในตอนที่ 3 แบ่งการผสมออกเป็น 2 ส่วนดังนี้ ส่วนที่ 1 เตรียมวัตถุดิบผสมระหว่างยางธรรมชาติกับเขม่าดำชนิดมาสเตอร์แบทปริมาณคงที่ 40 phr และปรับเปลี่ยนปริมาณสารตัวเติมป้องกันรังสีชนิดผงตะกั่ว ที่ปริมาณ 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 phr ส่วนที่ 2 เตรียมวัตถุดิบผสมระหว่างยางธรรมชาติกับเขม่าดำชนิดมาสเตอร์แบทปริมาณคงที่ 40 phr และผงขี้เลื่อยไม้ที่ปริมาณคงที่ 20 phr และปรับเปลี่ยนปริมาณสารตัวเติมป้องกันรังสีชนิดผงตะกั่ว ที่ปริมาณ 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 phr ผสมด้วยเครื่องบดผสมลูกกลิ้งคู่ (Two roll mill) จากบริษัท ยง ฟง แมชชีนเนอรี จำกัด ดังแสดงในรูปที่ 3.8 ตามส่วนประกอบของยาง แสดงในตารางที่ 3.1 โดยใช้เวลาในการผสมสารประกอบยางที่ 30 นาทีเท่ากันทุกส่วน โดยขั้นตอนการผสมเช่นเดียวกันงานหมายเลข 2 จากนั้นทดสอบสมบัติการคงรูปยางโดยใช้เครื่อง Oscillating Die Rheometer และขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปร้อนระบบแรงดัน ทดสอบสมบัติเชิงกล และสมบัติทางกายภาพของสูตรยางธรรมชาติผสมผงโบรอนออกไซด์ โดยขั้นตอนการทดสอบเช่นเดียวกับงานวิจัยในขั้นตอนที่ 1

หมายเลข 11 การทดสอบทางด้านรังสี

นำชิ้นงานยางที่ผ่านการขึ้นรูปของแต่ละสูตรวัดความต้านทานต่อรังสีแกมมาที่หลุดจากการดูดจับนิวตรอน ดังรายละเอียดต่อไปนี้

- จากนั้นนำชิ้นงานทดสอบสมบัติด้านรังสีแกมมามาที่เกิดจากการดูดจับนิวตรอน โดยเริ่มจากนำชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่เติมผงตะกั่วทุกปริมาณการเติมทดสอบความต้านทานต่อรังสีแกมมา ซึ่งวางเป็นชั้นซ้อนประกบแผ่นกับชิ้นงานยางธรรมชาติผสมผงโบรอนออกไซด์ โดยในการวัดใช้หัววัดรังสีแกมมาโดยตรง และต่อเข้ากับเครื่องวัดความเข้มของรังสี (Survey meter calibration) ยี่ห้อ LUDLUM รุ่น 2200 ซึ่งค่าที่ได้จากเครื่องนับจำนวนรังสีแกมมา (Counter) แสดงดังรูปที่ 3.17 และคำนวณค่าความต้านทานต่อรังสีแกมมาที่หลุดจากการดูดจับนิวตรอน



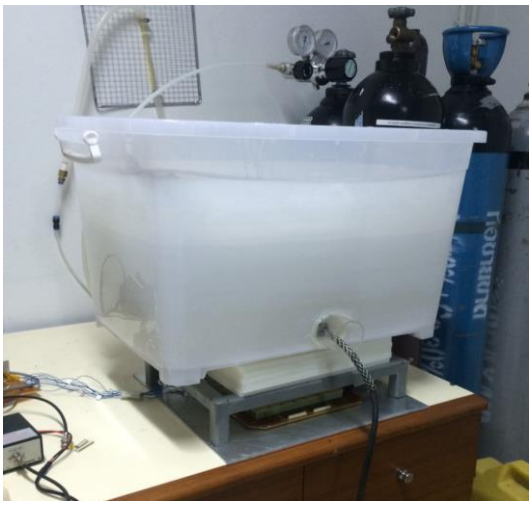
รูปที่ 3.17 เครื่องทดสอบความต้านทานต่อรังสีแกมมา

งานหมายเลข 12 เลือกสูตรยางที่เหมาะสมที่สุด ปรับเปลี่ยนความหนาทดสอบทางด้านรังสี

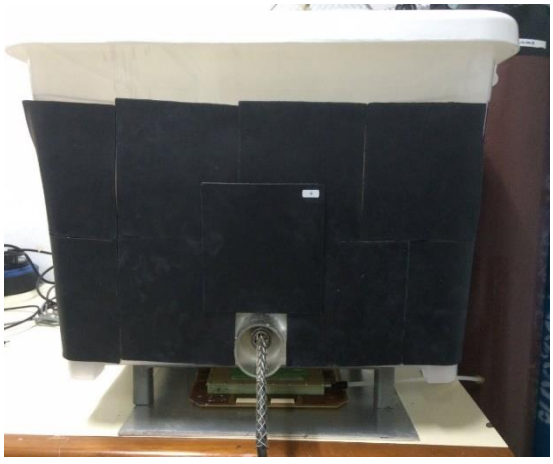
ในงานวิจัยนี้ได้เลือกสูตรส่วนผสมที่มีคุณภาพดีที่สุด คือ วัสดุเชิงประกอบยางที่เติมผงตะกั่ว ที่ปริมาณ 50 phr เพื่อนำมาปรับเปลี่ยนความหนาทดสอบสมบัติด้านรังสีแกมมาที่เกิดจากการดูดจับนิวตรอน โดยเตรียมชิ้นงานทดสอบทางด้านรังสีที่มีความหนา 5, 10, 15, 20 มิลลิเมตร ด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปร้อนระบบแรงดัน (Hot press)

รายละเอียดของแผนงานวิจัยตอนที่ 4

นำชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ที่เติมโบรอนออกไซด์ที่ปริมาณ 80 phr ทดลองใช้งานจริงในหน่วยงานรังสีวิทยา โดยนำแผ่นวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติกั้นรอบกล่องที่มีแหล่งกำเนิดนิวตรอน ซึ่งกล่องทดลองมีขนาด 56 x 48 x 40 เซนติเมตร แสดงดังรูปที่ 3.18 และรูปที่ 3.19 ทำการทดสอบเป็นเวลา 5 เดือน และนำแผ่นชิ้นงานที่ผ่านการใช้งานในทดสอบสมบัติด้านรังสีที่เวลา 1, 2, 3, 4 และ 5 เดือน



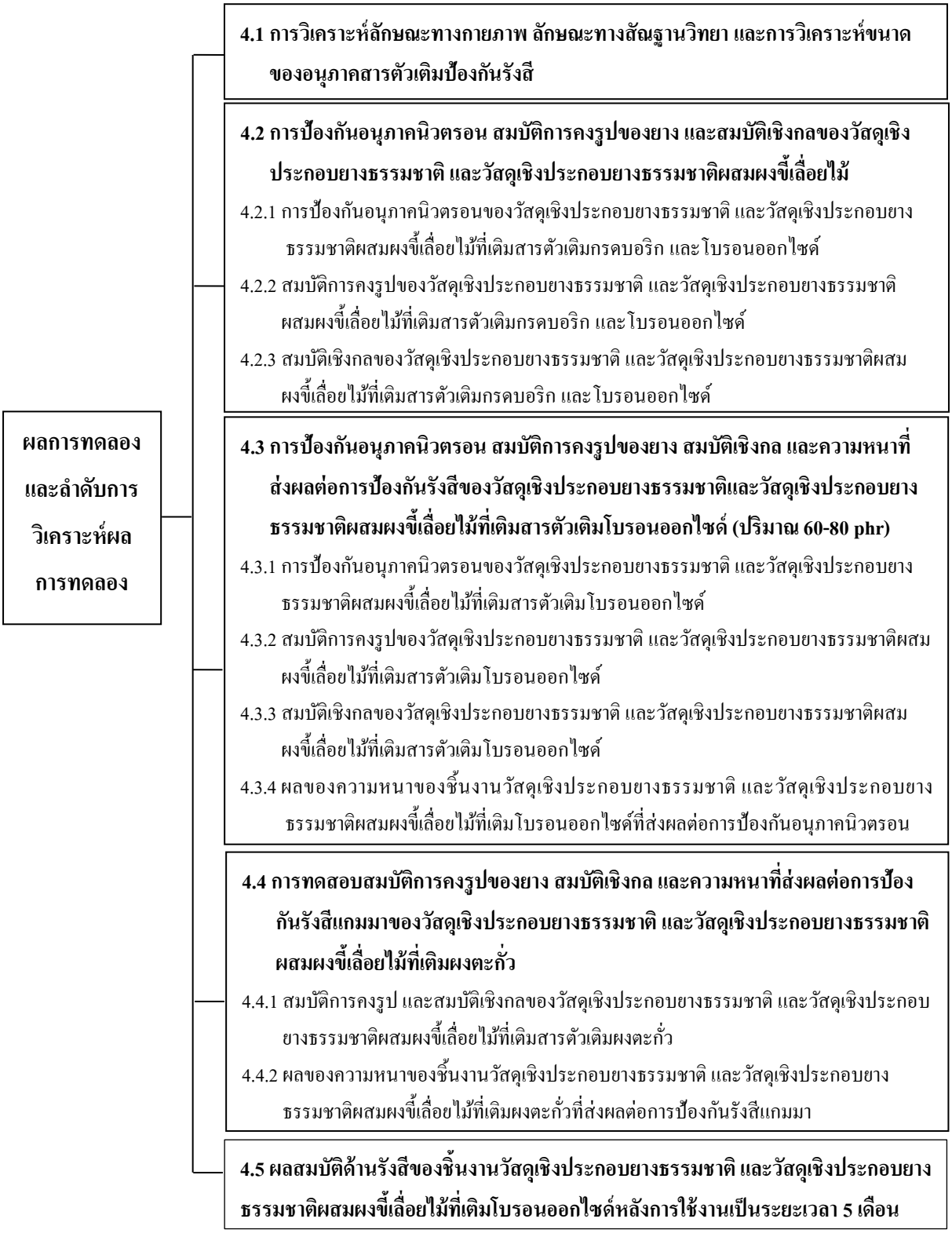
รูปที่ 3.18 ชุดทดสอบอนุภาคนิวตรอนในหน่วยงานรังสีวิทยา



รูปที่ 3.19 ทดสอบวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่มีสารตัวเติมป้องกันรังสีทดลองใช้กำบังอนุภาคนิวตรอน

บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

ผลการทดลองและลำดับในการวิเคราะห์ผลการทดลอง แสดงดังรูปที่ 4.1

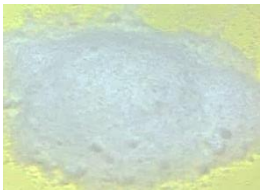
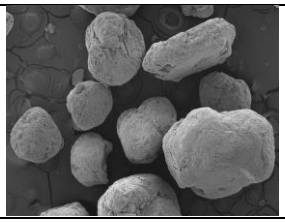
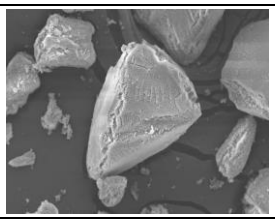
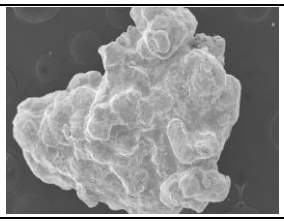


รูปที่ 4.1 ผลการทดลองและลำดับการวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพ ลักษณะทางสัณฐานวิทยา และการวิเคราะห์ขนาดของอนุภาคสารตัวเติมป้องกันรังสี

การตรวจสอบคุณลักษณะและขนาดของอนุภาคสารตัวเติมป้องกันรังสีชนิดกรดบอริก โบรอนออกไซด์ และผงตะกั่ว ที่ใช้เป็นสารตัวเติมป้องกันรังสีที่ผสมกับยางธรรมชาติเพื่อผลิตเป็นแผ่นกำบังอนุภาคนิวตรอนและรังสีแกมมา โดยตรวจสอบลักษณะทางกายภาพด้วยภาพถ่ายลักษณะภายนอกและความละเอียดของเม็ดอนุภาค ส่วนการศึกษาโครงสร้างสัณฐานวิทยาเพื่อตรวจสอบลักษณะรูปร่างของอนุภาค และลักษณะพื้นผิวของอนุภาคด้วยเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) และตรวจสอบขนาดอนุภาคของสารตัวเติมป้องกันรังสีทั้ง 3 ชนิด ด้วยเครื่อง Mastersizer-2000, Malvern Instruments Limited แสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ลักษณะทางกายภาพ ลักษณะทางสัณฐานวิทยา และขนาดของอนุภาคสารตัวเติมป้องกันรังสีชนิดกรดบอริก โบรอนออกไซด์ และผงตะกั่ว

สารตัวเติมป้องกันรังสี	กรดบอริก	โบรอนออกไซด์	ผงตะกั่ว
ลักษณะทางกายภาพ			
ลักษณะทางสัณฐานวิทยา			
ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (ไมครอน)	288	269	450

จากตารางที่ 4.1 แสดงลักษณะทางกายภาพ ลักษณะทางสัณฐานวิทยา และขนาดของอนุภาคสารตัวเติมป้องกันรังสีชนิดกรดบอริก โบรอนออกไซด์ และผงตะกั่ว ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพ พบว่า กรดบอริก และโบรอนออกไซด์มีลักษณะเป็นผงสีขาวละเอียดไม่เกาะกลุ่มกัน ส่วนผงตะกั่วมีลักษณะเป็นผงขนาดเล็กสีเทาเข้ม และบางส่วนมีการเกาะกลุ่มกัน และกรณีผลการวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยา พบว่า กรดบอริกมีลักษณะรูปร่างเป็นเม็ดมนมีขนาดใหญ่ และมีพื้นผิวไม่เรียบ ส่วนโบรอนออกไซด์มี

ลักษณะรูปร่างเป็นอนุภาคแท่งเหลี่ยม และมีพื้นผิวไม่เรียบ และผงตะกั่วมีอนุภาคขนาดใหญ่ รูปร่างที่ไม่แน่นอน และมีพื้นผิวไม่เรียบ และเมื่อทำการวิเคราะห์ขนาดของอนุภาคสารตัวเติมป้องกันรังสีทั้ง 3 ชนิด พบว่า กรดบอริกและโบรอนออกไซด์ มีขนาดของอนุภาคเฉลี่ยที่ใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 269 – 288 ไมครอน ส่วนผงตะกั่วมีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 450 ไมครอน (แสดงข้อมูลในภาคผนวก ก)

4.2 การป้องกันอนุภาคนิวตรอน สมบัติการคงรูปของยาง และสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้

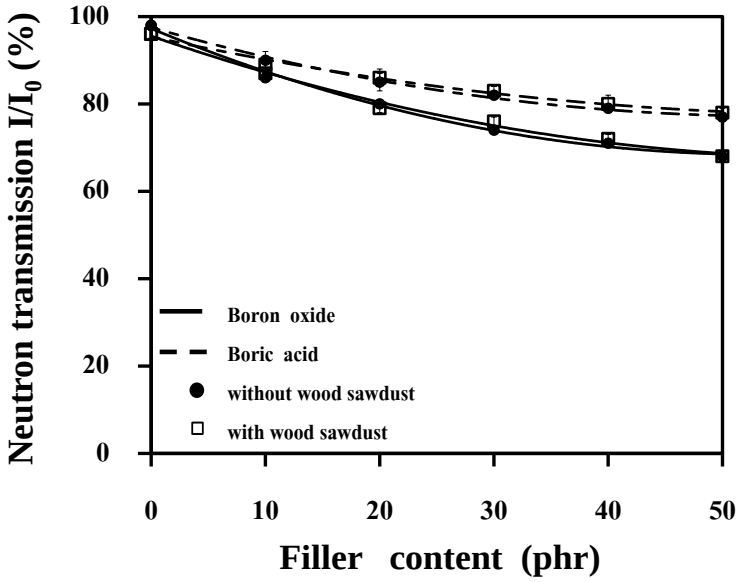
การทดสอบสมบัติด้านรังสีในการป้องกันอนุภาคนิวตรอน ทดสอบสมบัติการคงรูปของยาง ได้แก่ เวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูป เวลาที่ยางคงรูป และค่าผลต่างแรงบิด และทดสอบสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ (ไม่เติมผงขี้เลื่อยไม้) และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ ที่มีการเติมสารตัวเติมป้องกันรังสีชนิดกรดบอริก และโบรอนออกไซด์ โดยปรับเปลี่ยนปริมาณสารตัวเติมที่ 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 phr ซึ่งทดสอบสมบัติด้านรังสีด้วยระบบ Integral counting system ทดสอบเวลาที่ยางเริ่มเกิดการ คงรูป เวลาที่ยางคงรูป และค่าผลต่างแรงบิดด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์แบบจานแกว่ง ส่วนการทดสอบสมบัติเชิงกล ศึกษาค่าความแข็งที่ผิว มอดุลัสแรงดึง ความต้านทานต่อแรงดึง เปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด และความต้านทานต่อการฉีกขาด

4.2.1 การป้องกันอนุภาคนิวตรอนของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ที่เติมสารตัวเติมกรดบอริก และโบรอนออกไซด์

การทดสอบสมบัติการป้องกันอนุภาคนิวตรอนของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ (ไม่เติมผงขี้เลื่อยไม้) และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ที่เติมสารตัวเติมป้องกันรังสีชนิดกรดบอริก และโบรอนออกไซด์ที่ปริมาณ 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 phr แสดงดังรูปที่ 4.2

จากรูปที่ 4.2 แสดงผลของชนิดและปริมาณสารตัวเติมป้องกันรังสีของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ ที่ส่งผลต่อความสามารถในการป้องกันอนุภาคนิวตรอน พบว่า การเติมโบรอนออกไซด์ และกรดบอริกส่งผลทำให้มีจำนวนอนุภาคนิวตรอนผ่านชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติมีแนวโน้มลดลง ตามปริมาณสารตัวเติมที่เพิ่มขึ้น โดยการเติมโบรอนออกไซด์มีจำนวนอนุภาคนิวตรอนผ่านชิ้นงานจาก 98 เปอร์เซ็นต์ ลดลงถึง 68 เปอร์เซ็นต์ และการเติมกรดบอริกมีจำนวนอนุภาคนิวตรอนผ่านชิ้นงานจาก 98 เปอร์เซ็นต์ ลดลงถึง 77 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากสารตัวเติมชนิดโบรอนออกไซด์ และกรดบอริกมีโบรอน-10 (Boron-10) เป็นส่วนประกอบเมื่อสัมผัสกับอนุภาคนิวตรอน

นิวเคลียสของโบรอน-10 สามารถดูดซับ (Absorb) อนุภาคนิวตรอนไว้ภายใน [21] และเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นลิเทียม-7 พร้อมกับปล่อยรังสีแกมมาออกมา ($^{10}B + n \longrightarrow {}^{7}Li^{*} + \gamma$) ซึ่งส่งผลทำให้วัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติมีความสามารถในการป้องกันอนุภาคนิวตรอนเพิ่มขึ้น และเมื่อพิจารณาถึงกรณีการเติมกรด บอริก และโบรอนออกไซด์ในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ พบว่า มีค่าความต้านทานต่ออนุภาคนิวตรอนที่ใกล้เคียงกัน ทั้งนี้เนื่องจาก ผงขี้เลื่อยไม้มีหน้าที่เป็นสารตัวเติมเพิ่มเนื้อ (Extender filler) จึงไม่มีสมบัติในการป้องกันรังสี และพบอีกว่าการเติมสารโบรอนออกไซด์มีความสามารถป้องกันอนุภาคนิวตรอนที่สูงกว่าการเติมกรดบอริก เนื่องจากวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่เติมโบรอนออกไซด์ที่มีโบรอนเป็นองค์ประกอบที่ปริมาณ 31 % ซึ่งมีปริมาณของโบรอนมากกว่าวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่เติมกรดบอริกที่มีโบรอนเป็นองค์ประกอบที่ปริมาณ 18 %



รูปที่ 4.2 ความต้านทานต่ออนุภาคนิวตรอนของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ ที่มีการเติมสารตัวเติมป้องกันรังสีชนิดกรดบอริก และ โบรอนออกไซด์

4.2.2 สมบัติการคงรูปของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ที่เติมสารตัวเติมกรดบอริก และโบรอนออกไซด์

การศึกษาสมบัติการคงรูปยางแบ่งออกเป็นการศึกษาเวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูป (Scorch time; ts_1) เวลาที่ยางคงรูปที่ 90 เปอร์เซ็นต์ (Cure time; tc_{90}) และผลต่างแรงบิด (Delta torque) ของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ (ไม่เติมผงขี้เลื่อยไม้) แสดงดังตารางที่ 4.2 และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ (Wood Sawdust; WS) แสดงดังตารางที่ 4.3 ที่มีการเติมสารตัวเติมป้องกันรังสี ได้แก่ กรดบอริก (Boric Acid; BA) และโบรอนออกไซด์ (Boron Oxide; BO) โดยปรับเปลี่ยนปริมาณสารตัวเติมที่ 10, 20, 30, 40 และ 50 phr ด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์แบบจานแกว่ง

ตารางที่ 4.2 เวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูป เวลาที่ยางคงรูป และผลต่างแรงบิดของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ ที่เติมสารตัวเติมป้องกันรังสีชนิดกรดบอริก และโบรอนออกไซด์

Cure properties	**NR compound with boric acid** (phr)					
	0	**10**	**20**	**30**	**40**	**50**
Scorch time (sec)	34 ± 2	40 ± 5	47 ± 5	49 ± 2	74 ± 9	81 ± 3
Cure time (sec)	184 ± 1	196 ± 8	228 ± 3	272 ± 3	433 ± 10	609 ± 8
Delta torque (dN m)	74 ± 11	51 ± 5	33 ± 0	26 ± 0	20 ± 0	20 ± 0
Cure properties	**NR compound with boron oxide** (phr)					
	0	**10**	**20**	**30**	**40**	**50**
Scorch time (sec)	34 ± 2	37 ± 1	35 ± 2	37 ± 3	35 ± 2	33 ± 2
Cure time (sec)	184 ± 1	138 ± 2	99 ± 2	101 ± 3	97 ± 0	98 ± 3
Delta torque (dN m)	74 ± 11	35 ± 0	39 ± 1	41 ± 1	45 ± 1	44 ± 0

จากตารางที่ 4.2 แสดงผลของชนิดและปริมาณสารตัวเติมป้องกันรังสีที่ส่งผลต่อเวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูป เวลาที่ยางคงรูป และผลต่างแรงบิดของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ เมื่อพิจารณาเวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูป พบว่า การเติมโบรอนออกไซด์ไม่ส่งผลต่อเวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูป แต่การเติมกรดบอริกส่งผลทำให้เวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูปมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น (เวลานานขึ้น) ทั้งนี้เนื่องจากกรดบอริกมีฤทธิ์เป็นกรดทำให้หน่วงปฏิกิริยาก่อนเกิดการคงรูปของยาง [4]

เมื่อพิจารณาเวลาที่ยางคงรูป พบว่า การเติมกรดบอริกส่งผลทำให้เวลาการคงรูปของยางมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณสารตัวเติมที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากกรดบอริกเป็นสารเคมีที่มีฤทธิ์เป็นกรดที่หน่วงประสิทธิภาพการทำงานของสารกระตุ้น (Activator) และสารตัวเร่งปฏิกิริยา (Accelarator) ทำให้เวลาการเกิดปฏิกิริยาคงรูปเพิ่มขึ้น [30] ส่วนในกรณีการเติมโบรอนออกไซด์ ส่งผลทำให้เวลาในการคงรูปยางลดลง เนื่องจากผงโบรอนออกไซด์มีส่วนประกอบของโลหะออกไซด์ ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารกระตุ้นร่วม (Co-activator) ในการเกิดปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ ทำให้เกิดปฏิกิริยาคงรูปเกิดได้เร็วขึ้น ส่งผลทำให้เวลาที่ยางคงรูปลดลง [31]

สำหรับค่าผลต่างแรงบิด (Delta torque) เป็นผลต่างระหว่างค่าแรงบิดต่ำสุดและค่าแรงบิดสูงสุด ซึ่งบ่งบอกถึงปริมาณพันธะเชื่อมขวางของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ พบว่า การเติมกรดบอริกและโบรอนออกไซด์ ส่งผลทำให้วัสดุเชิงประกอบยางมีค่าผลต่างแรงบิดมีแนวโน้มลดลง ตามปริมาณสารตัวเติมที่เพิ่มขึ้น และการเติมกรดบอริกมีค่าผลต่างแรงบิดที่ต่ำกว่ากรณีการเติมโบรอนออกไซด์ เนื่องจากกรดบอริกและโบรอนออกไซด์เกิดการเกาะกลุ่มกัน และเข้าไปขัดขวางการเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่โมเลกุลยางกับซัลเฟอร์ ทำให้มีปริมาณพันธะเชื่อมขวาง และค่าผลต่างแรงบิดลดลง

ตารางที่ 4.3 ระยะเวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูป เวลาที่ยางคงรูป และผลต่างแรงบิดของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ ที่เติมสารตัวเติมป้องกันรังสีชนิดกรดบอริกและโบรอนออกไซด์

Cure properties	**Wood sawdust/ NR compound with boric acid** (phr)					
	0	**10**	**20**	**30**	**40**	**50**
Scorch time (sec)	42 ± 8	56 ± 6	101 ± 11	155 ± 10	159 ± 11	214 ± 23
Cure time (sec)	222 ± 12	376 ± 12	1080 ± 11	1533 ± 11	1566 ± 10	1609 ± 41
Delta torque (dN m)	79 ± 1	33 ± 2	15 ± 0	9 ± 1	8 ± 0	7 ± 1
Cure properties	**Wood sawdust/ NR compound with boron oxide** (phr)					
	0	**10**	**20**	**30**	**40**	**50**
Scorch time (sec)	42 ± 8	41 ± 4	49 ± 11	43 ± 3	41 ± 3	49 ± 3
Cure time (sec)	222 ± 2	206 ± 7	202 ± 10	173 ± 2	125 ± 2	1021 ± 67
Delta torque (dN m)	9 ± 1	65 ± 0	55 ± 2	40 ± 1	28 ± 1	23 ± 1

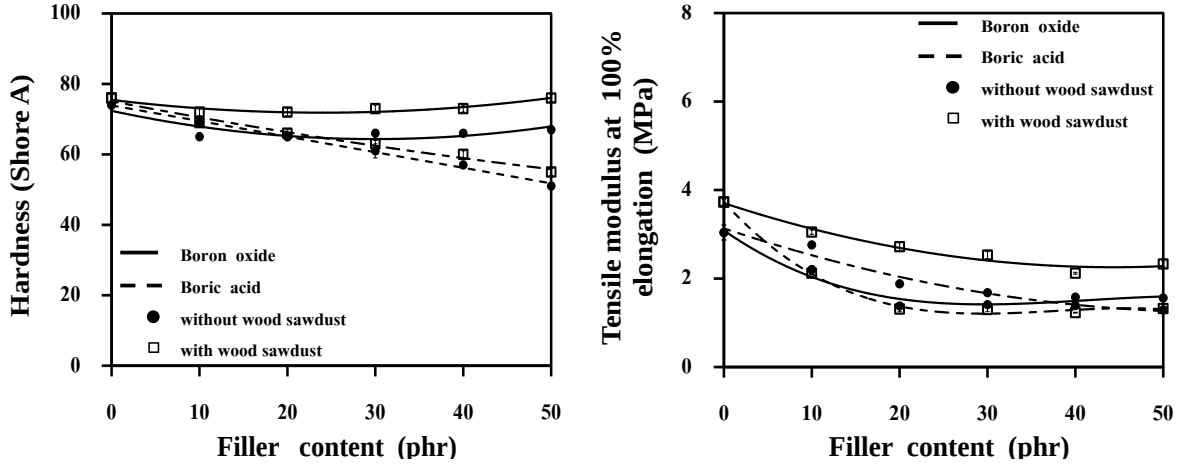
จากตารางที่ 4.3 แสดงผลของชนิดและปริมาณสารตัวเติมป้องกันรังสีที่ส่งผลต่อเวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูป เวลาที่ยางคงรูป และผลต่างแรงบิดของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ เมื่อพิจารณาเวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูป และเวลาที่ยางคงรูปของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ที่เติมกรดบอริก พบว่า การเติมกรดบอริกส่งผลทำให้เวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูป และเวลาที่ยางคงรูปมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ตามปริมาณสารตัวเติมที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากกรดบอริกเป็นสารเคมีที่มีฤทธิ์เป็นกรดที่หน่วงประสิทธิภาพการทำงานของสารกระตุ้น (Activator) และสารตัวเร่งปฏิกิริยา (Accelarator) ทำให้เวลาการเกิดปฏิกิริยาคงรูปเพิ่มขึ้น ส่วนในกรณีการเติมโบรอนออกไซด์ ไม่ส่งผลต่อเวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูป แต่ส่งผลทำให้เวลาในการคงรูปยางมีแนวโน้มลดลง ตามปริมาณสารตัวเติมที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากผงโบรอนออกไซด์มีส่วนประกอบของโลหะออกไซด์ ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารกระตุ้นร่วม (Co-activator) ในการเกิดปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ ทำให้เกิดปฏิกิริยาคงรูปเกิดได้เร็วขึ้น ส่งผลทำให้เวลาที่ยางคงรูปลดลง ส่วนในกรณีการเติมโบรอนออกไซด์ที่ปริมาณ 50 phr พบว่า เวลาคงรูปของยางเพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องจาก ปริมาณสารตัวเติมที่เพิ่มขึ้นเข้าไปขัดขวางการทำงานของสารกระตุ้น (Activator) และสารตัวเร่งปฏิกิริยา (Accelarator) และเมื่อพิจารณาการเติมกรดบอริก และโบรอนออกไซด์ในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ มีเวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูป และเวลาที่ยางคงรูป สูงกว่าในกรณีการเติมกรดบอริก และโบรอนออกไซด์ในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่ไม่เติมผงขี้เลื่อยไม้ ทั้งนี้เนื่องจาก ผงขี้เลื่อยไม้มีหมู่ไฮดรอกซิลบริเวณพื้นผิวมากจึงเกิดการเกาะกลุ่มกัน และเข้าไปดูดซับสารกระตุ้น (Activator) และสารตัวเร่งปฏิกิริยา (Accelarator) จึงทำให้การเกิดปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ช้าลง [32]

สำหรับค่าผลต่างแรงบิด (Delta torque) เป็นผลต่างระหว่างค่าแรงบิดต่ำสุดและค่าแรงบิดสูงสุด ซึ่งบ่งบอกถึงปริมาณพันธะเชื่อมขวางของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ พบว่า การเติมกรดบอริก และโบรอนออกไซด์ ส่งผลทำให้วัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้มีค่าผลต่างแรงบิดมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณสารตัวเติมที่เพิ่มขึ้น และมีค่าผลต่างแรงบิดต่ำกว่าในกรณีการเติมกรดบอริก และโบรอนออกไซด์ในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่ไม่เติมผงขี้เลื่อยไม้ ทั้งนี้เนื่องจาก สายโซ่โมเลกุลของยางที่มีการเชื่อมขวางกับซัลเฟอร์มีขนาดสั้นลง

4.2.3 สมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ที่เติมสารตัวเติมกรดบอริก และโบรอนออกไซด์

การศึกษาสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ (ไม่เติมผงขี้เลื่อยไม้) และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ ที่เติมสารตัวเติมป้องกันรังสีชนิดกรดบอริก และโบรอนออกไซด์ที่ปริมาณ 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 phr โดยทดสอบดังนี้ ค่าความแข็งที่ผิว (Hardness) มอดุลัสแรงดึง (Tensile modulus)

ความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile strength) เปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด (Elongation at break) และความต้านทานต่อแรงฉีกขาด (Tear strength) แสดงดังรูปที่ 4.3 - 4.6 ตามลำดับ



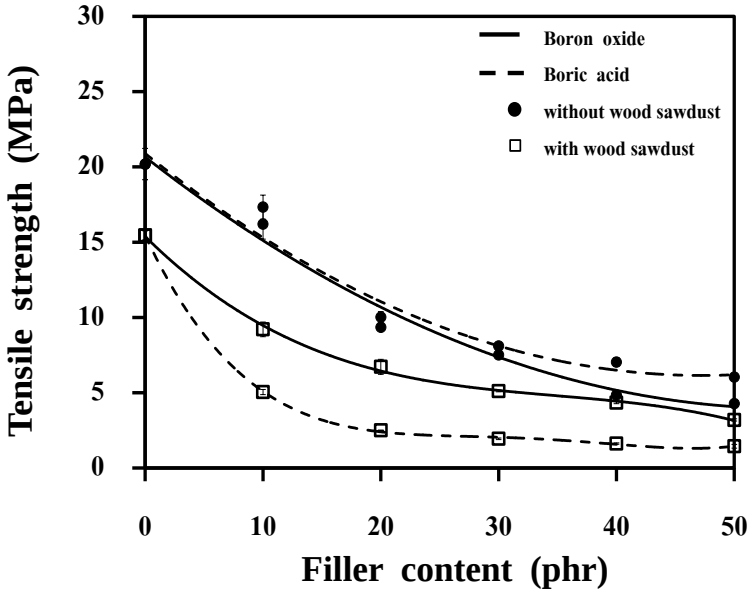
(ก) (ข)

รูปที่ 4.3 สมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ ที่มีการเติมสารตัวเติมป้องกันรังสีชนิดกรดบอริก และโบรอนออกไซด์ โดย (ก) ความแข็งที่ผิว และ (ข) มอดุลัสแรงดึง

สำหรับค่าความแข็งที่ผิวของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ แสดงดังรูปที่ 4.3 (ก) พบว่า การเติมกรดบอริกในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ ส่งผลทำให้ความแข็งที่ผิวมีแนวโน้มลดลง ตามปริมาณสารตัวเติมที่เพิ่มขึ้น อยู่ในช่วง 60 – 74 Shore A ส่วนในกรณีการเติมโบรอนออกไซด์มีค่าความแข็งที่ผิวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ตามปริมาณสารตัวเติมที่เพิ่มขึ้น อยู่ในช่วง 73 – 76 Shore A และเมื่อพิจารณาการเติมกรดบอริก และโบรอนออกไซด์ในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ มีความแข็งที่ผิวสูงกว่าทั้งกรณีการเติมกรดบอริก และโบรอนออกไซด์ในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่ไม่เติมผงขี้เลื่อยไม้ ทั้งนี้เนื่องจาก การเติมผงขี้เลื่อยไม้ที่อนุภาคมีความแข็งแกร่ง (Rigidity) สูง จึงทำให้ค่าความแข็งที่ผิวโดยรวมเพิ่มขึ้น

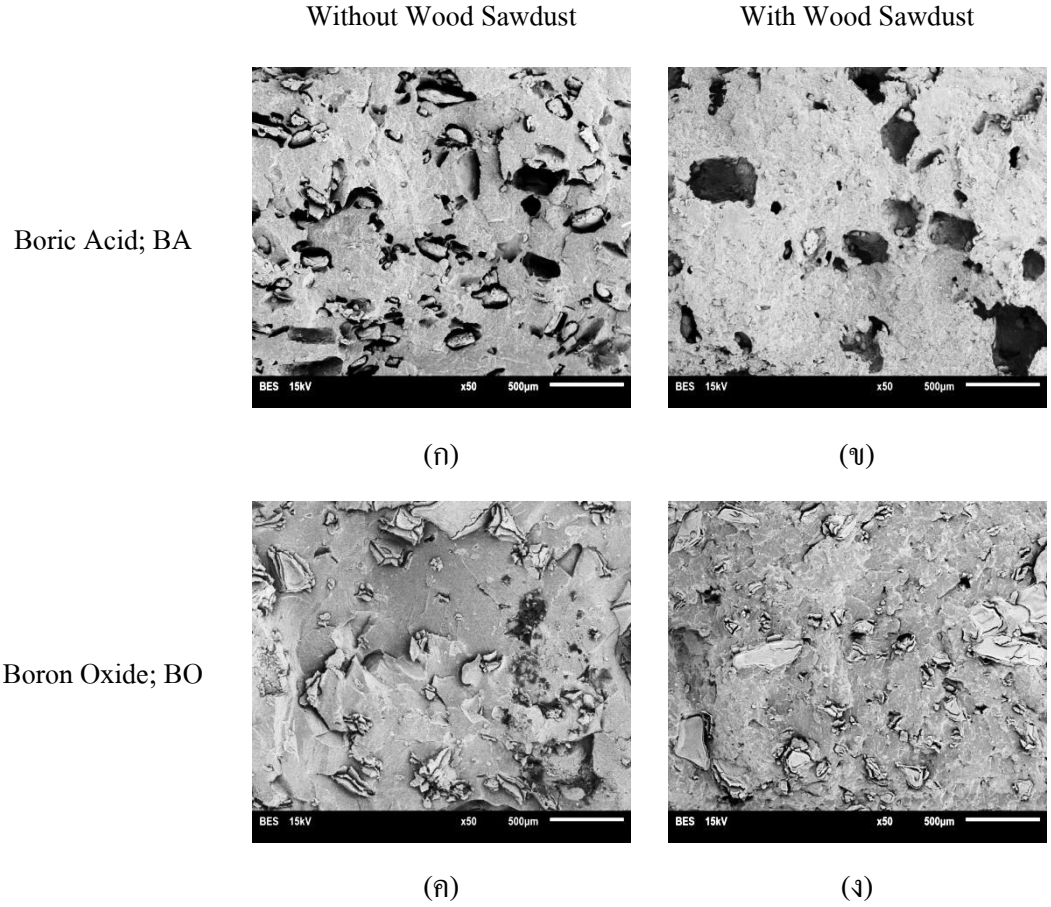
สำหรับค่ามอดุลัสแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ แสดงดังรูปที่ 4.3 (ข) พบว่า การเติมกรดบอริก และโบรอนออกไซด์ในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ ส่งผลทำให้ค่ามอดุลัสแรงดึงมีแนวโน้มลดลง ตามปริมาณสารตัวเติมที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากยางมีปริมาณพันธะเชื่อมขวาง (Crosslink density) ที่ลดลง ตามปริมาณสารตัวเติมที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับค่าผลต่างแรงบิด จึงส่งผลทำให้ยางมีความต้านทานต่อการเสียรูปที่ไม่ดี และเมื่อพิจารณาการเติมโบรอนออกไซด์ในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้

เลื่อยไม้ พบว่า มีค่ามอดุลัสแรงดึงสูงกว่ากรณีการเติมกรดบอริก และโบรอนออกไซด์ในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่ไม่เติมผงขี้เลื่อยไม้ ทั้งนี้เนื่องจาก การเติมผงขี้เลื่อยไม้ซึ่งมีความแข็งแกร่ง (Rigidity) สูง จึงทำให้วัสดุเชิงประกอบยางมีความต้านทานต่อการเสียรูปที่ดี



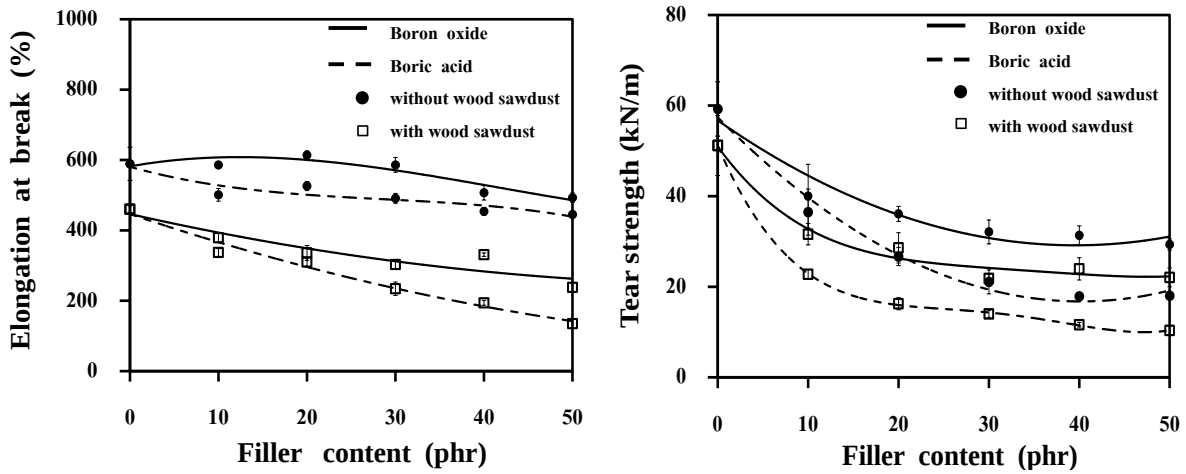
รูปที่ 4.4 ความต้านทานแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ ที่มีการเติมสารตัวเติมป้องกันรังสีชนิดกรดบอริก และโบรอนออกไซด์

จากรูปที่ 4.4 แสดงผลของชนิดและปริมาณสารตัวเติมป้องกันรังสีที่มีต่อความต้านทานแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ พบว่า การเติมกรดบอริก และโบรอนออกไซด์ ส่งผลทำให้ความต้านทานแรงดึงมีแนวโน้มลดลง ตามปริมาณสารตัวเติมที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจาก เกิดอันตรกิริยาระหว่างสายโซ่โมเลกุลยางกับสารตัวเติมที่ต่ำ (Poor interfacial compatibility) แสดงดังภาพถ่ายโครงสร้างทางสัณฐานวิทยา ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM) ในรูปที่ 4.5 (ก) และ (ค) และเมื่อพิจารณาถึงการเติมกรดบอริก และโบรอนออกไซด์ในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ มีค่าความต้านทานแรงดึงที่ต่ำกว่าการเติมกรดบอริกและโบรอนออกไซด์ในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่ไม่เติมผงขี้เลื่อยไม้ ทั้งนี้เนื่องจาก ผงขี้เลื่อยไม้มีหมู่ไฮดรอกซิลบนพื้นผิว ง่ายต่อการดูดซับความชื้น เมื่อได้รับความร้อนขณะขึ้นรูปชิ้นงาน ทำให้ความชื้นที่มีอยู่ภายในชิ้นงานระเหยออกเกิดเป็นรูพรุน [32] ซึ่งมีรูพรุนที่มีความลึกและขนาดที่ใหญ่กว่ากรณีที่ไม่เติมผงขี้เลื่อยไม้ ดังแสดงในรูปที่ 4.5 (ข) และ (ง)



รูปที่ 4.5 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ ที่มีสารตัวเติมที่ปริมาณ 50 phr (กำลังขยาย 50 เท่า) โดย (ก) และ (ข) กรดบอริก (ค) และ (ง) โบรอนออกไซด์

สำหรับค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด ของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ แสดงดังรูปที่ 4.6 (ก) พบว่า การเติมกรดบอริก และโบรอนออกไซด์ในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ ส่งผลทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาดมีแนวโน้มลดลง ตามปริมาณสารตัวเติมที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจาก ปริมาณสารตัวเติมที่เพิ่มขึ้นเข้าไปแทนที่เฟสยางธรรมชาติที่เป็นวัสดุหลัก จึงทำให้มีการยืดตัวและความเป็นอิลาสติกลดลง และเมื่อพิจารณาการเติมกรดบอริก และโบรอนออกไซด์ในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ มีค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด ต่ำกว่ากรณีการเติมกรดบอริก และโบรอนออกไซด์ ในวัสดุเชิงประกอบธรรมชาติที่ไม่เติมผงขี้เลื่อยไม้ ทั้งนี้เนื่องจาก ผงขี้เลื่อยไม้เข้าไปแทนที่ยางธรรมชาติที่เป็นเนื้อวัสดุหลัก ทำให้ส่วนที่เป็นเนื้อยางลดลง (Dilution effect) ส่งผลให้วัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติมีการยืดตัวและมีสมบัติความเป็นอิลาสติก (Elasticity) ลดลง



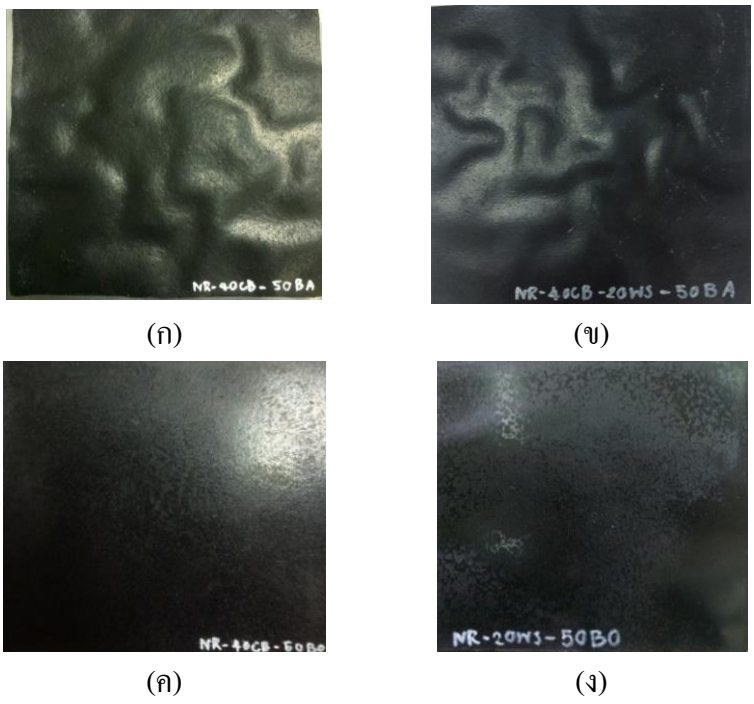
รูปที่ 4.6 สมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ ที่มีการเติมสารตัวเติมชนิดกรดบอริก และโบรอนออกไซด์ โดย (ก) เปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด และ(ข) ความต้านทานต่อการฉีกขาด

สำหรับค่าความต้านทานต่อการฉีกขาด ของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ แสดงดังรูปที่ 4.6 (ข) พบว่า การเติมกรดบอริก และโบรอนออกไซด์ ในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ ส่งผลทำให้ค่าความต้านทานต่อแรงฉีกขาดของยางมีแนวโน้มลดลง ตามปริมาณสารตัวเติมที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากเกิดอันตรกิริยาระหว่างเฟสยางกับสารตัวเติมที่ไม่ดี เกิดรูพรุนภายในชิ้นงานเมื่อเติมกรดบอริก และเกิดการเกาะกลุ่มกันของโบรอนออกไซด์ ทำให้เกิดความไม่ต่อเนื่องของเฟสยาง ส่งผลทำให้ความต้านทานต่อการฉีกขาดของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติลดลง [33] ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับผลของค่าความต้านทานแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบยาง

ลักษณะชิ้นงานที่ขึ้นรูปหลังการปรับเปลี่ยนความหนา

จากผลการทดสอบของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ (ไม่เติมผงขี้เลื่อยไม้) และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ที่เติมสารตัวเติมป้องกันรังสีชนิดผงกรดบอริกที่ปริมาณ 50 phr เมื่อทำการขึ้นรูปชิ้นงาน พบว่า ชิ้นงานมีผิวหน้าที่ไม่เรียบ แสดงดังรูปที่ 4.7 ก) และ ข) เมื่อเปรียบเทียบกับผิวชิ้นงานที่เติมโบรอนออกไซด์ที่มีลักษณะผิวที่เรียบ แสดงดังรูปที่ 4.7 ค) และ ง) จึงส่งผลทำให้ค่าสมบัติเชิงกลโดยรวมลดลง และมีความสามารถในการป้องกันอนุภาคนิวตรอนได้น้อยกว่าวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่เติมสารตัวเติมป้องกันรังสีชนิดผงโบรอนออกไซด์ และเมื่อนำมาขึ้นรูปที่ความหนา 10 มิลลิเมตร พบว่า ชิ้นงานเกิดการบวมตัวในขณะขึ้นรูปชิ้นงานมีขนาดที่ใหญ่กว่าแบบแม่พิมพ์ทำให้ไม่สามารถควบคุมขนาดของชิ้นงานได้ และทำให้ชิ้นงานเกิดการเสื่อมสภาพ เนื่องจาก ขณะขึ้นรูปชิ้นงานยางคอมปาวด์ไหลเข้าเต็ม

แม่พิมพ์และอุณหภูมิขึ้นรูปสูงขึ้นเรื่อยๆ ทำให้ยางเกิดการขยายตัวและเกิดแรงดันภายในชิ้นงานยาง ซึ่งขณะขึ้นรูปยางที่บริเวณพื้นผิวเริ่มเกิดการคงรูป ทำให้มีแรงดันภายในดันทะลุพื้นผิวยาง ทำให้เกิดรอยแตกและรอยฉีกขาดของยาง (Backrind) [11] แสดงดังรูปที่ 4.8 ดังนั้น งานวิจัยนี้พบว่าการทดลองปรับเปลี่ยนความหนาของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่เติมกรดบอริกไม่สามารถขึ้นรูปได้ที่ชิ้นงานที่มีความหนาตั้งแต่ 10 มิลลิเมตร



(ก) (ข)

(ค) (ง)

รูปที่ 4.7 ผิวชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ ที่เติมสารตัวเติมป้องกันรังสีที่ปริมาณ 50 phr โดย (ก) และ (ข) กรดบอริก (ค) และ (ง) โบรอนออกไซด์

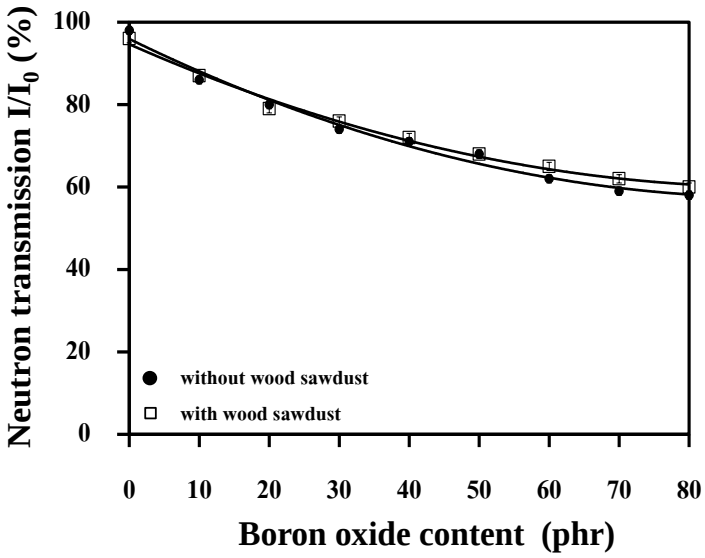
รูปที่ 4.8 ชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ ที่เติมสารตัวเติมชนิดกรดบอริกที่ความหนา 10 มิลลิเมตร

4.3 การป้องกันอนุภาคนิวตรอน สมบัติการคงรูปของยาง สมบัติเชิงกลและความหนาที่ส่งผลต่อการป้องกันรังสีของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติและวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ที่เติมสารตัวเติมโบรอนออกไซด์

จากการศึกษาสมบัติด้านรังสีของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ (ไม่เติมผงขี้เลื่อยไม้) และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ที่เติมสารตัวเติมป้องกันรังสีชนิดกรดบอริกและโบรอนออกไซด์ พบว่า การเติมโบรอนออกไซด์ส่งผลทำให้วัสดุเชิงประกอบยางมีความสามารถในการป้องกันรังสีได้ดีกว่าการเติมกรดบอริก และมีแนวโน้มที่สามารถป้องกันอนุภาคนิวตรอนได้เพิ่มขึ้น เมื่อส่วนผสมของโบรอนออกไซด์เพิ่มขึ้น ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงทำการปรับเปลี่ยนปริมาณของโบรอนออกไซด์เพิ่มขึ้น ดังนี้ 60, 70 และ 80 phr และทำการทดสอบสมบัติด้านรังสี ได้แก่ การป้องกันอนุภาคนิวตรอน ทดสอบสมบัติการคงรูปของยาง ได้แก่ เวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูป เวลาที่ยางคงรูป และผลต่างแรงบิด และสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติและวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ที่มีการเติมสารตัวเติมโบรอนออกไซด์ ทดสอบสมบัติด้านรังสีด้วยระบบ Integral counting system ทดสอบเวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูป และเวลาที่ยางคงรูปด้วยเครื่อง รีโอมิเตอร์แบบจานแกว่ง ส่วนการทดสอบสมบัติเชิงกล ทางด้านความแข็งที่ผิว มอดุลัสแรงดึง ความต้านทานต่อแรงดึง และเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด

4.3.1 การป้องกันอนุภาคนิวตรอนของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ที่เติมสารตัวเติมโบรอนออกไซด์

การทดสอบการป้องกันอนุภาคนิวตรอนของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ (ไม่เติมผงขี้เลื่อยไม้) และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ที่เติมสารตัวเติมป้องกันรังสีชนิดโบรอนออกไซด์ที่ปริมาณ 0 - 80 phr แสดงดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 ค่าความต้านทานต่ออนุภาคนิวตรอนของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติและวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ ที่มีการเติมสารตัวเติมป้องกันรังสีชนิดโบรอนออกไซด์

จากรูปที่ 4.9 แสดงผลของชนิดและปริมาณสารตัวเติมป้องกันรังสีของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ ที่ส่งผลต่อความสามารถในการป้องกันอนุภาคนิวตรอน พบว่า การเติมโบรอนออกไซด์เพิ่มขึ้นที่ปริมาณ 60 - 80 phr ทำให้มีจำนวนอนุภาคนิวตรอนผ่านชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติมีแนวโน้มลดลง ตามปริมาณสารตัวเติมที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากสารตัวเติมโบรอนออกไซด์มีโบรอน-10 (Boron-10) เป็นส่วนประกอบเมื่อสัมผัสกับอนุภาคนิวตรอน นิวเคลียสของโบรอน-10 สามารถดูดซับ (Absorb) อนุภาคนิวตรอนไว้ภายใน [21] และเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นลิเทียม-7 พร้อมกับปล่อยรังสีแกมมาออกมา ($^{10}B + n \longrightarrow {}^{7}Li^{*} + \gamma$) ซึ่งส่งผลทำให้วัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติมีความสามารถในการป้องกันอนุภาคนิวตรอนเพิ่มขึ้น

4.3.2 สมบัติการคงรูปของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ที่เติมสารตัวเติมโบรอนออกไซด์

การศึกษาสมบัติการคงรูปยาง ดังนี้ เวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูป (Scorch time; ts_1) เวลาที่ยางคงรูปที่ 90 เปอร์เซ็นต์ (Cure time; tc_{90}) และค่าผลต่างแรงบิด (Delta torque) ของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ (ไม่เติมผงขี้เลื่อยไม้) และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ (Wood Sawdust; WS) แสดงดังตารางที่ 4.4 ที่มีการเติมสารตัวเติมป้องกันรังสีชนิดโบรอนออกไซด์ (Boron Oxide; BO) โดยปรับเปลี่ยนปริมาณสารตัวเติมที่ 0 - 80 phr ด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์แบบจานแกว่ง

จากตารางที่ 4.4 แสดงผลของชนิดและปริมาณสารตัวเติมป้องกันรังสีที่มีต่อเวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูป เวลาที่ยางคงรูป และผลต่างแรงบิดของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ ที่ปรับเปลี่ยนปริมาณสารตัวเติมป้องกันรังสีชนิดโบรอนออกไซด์เพิ่มขึ้น ที่ปริมาณ 60, 70 และ 80 phr เมื่อพิจารณาเวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูป และเวลาที่ยางคงรูป พบว่า การเติมโบรอนออกไซด์ในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ ส่งผลทำให้เวลาที่เริ่มเกิดการคงรูป และเวลาที่ยางคงรูปเพิ่มขึ้น ตามปริมาณโบรอนออกไซด์ที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจาก ปริมาณสารตัวเติมที่มากขึ้นเข้าไปขัดขวางการทำงานของสารกระตุ้น (Activator) และสารตัวเร่งปฏิกิริยา (Accelarator) ให้เกิดปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์ที่นานขึ้น จึงส่งผลทำให้ยางเกิดการคงรูปได้ช้าลง ส่วนการเติมโบรอนออกไซด์ที่ปริมาณ 60 phr ในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่ไม่เติมผงขี้เลื่อยไม้ มีเวลาที่ยางคงรูปเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับปริมาณการเติมอื่นๆ (ซึ่งทำการตรวจเช็กและทำซ้ำเป็นจำนวนหลายครั้ง) และเมื่อพิจารณาการเติมโบรอนออกไซด์ในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ มีเวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูป และเวลาที่ยางคงรูป สูงกว่าการเติมโบรอนออกไซด์ในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่ไม่เติมผงขี้เลื่อยไม้ ทั้งนี้เนื่องจาก ผงขี้เลื่อยไม้มีหมู่ไฮดรอกซิลบริเวณพื้นผิวมากจึงเกิดการเกาะกลุ่มกัน และเข้าไปดูดซับสารกระตุ้น (Activator) และสารตัวเร่งปฏิกิริยา (Accelarator) จึงทำให้การเกิดปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ช้าลง [34]

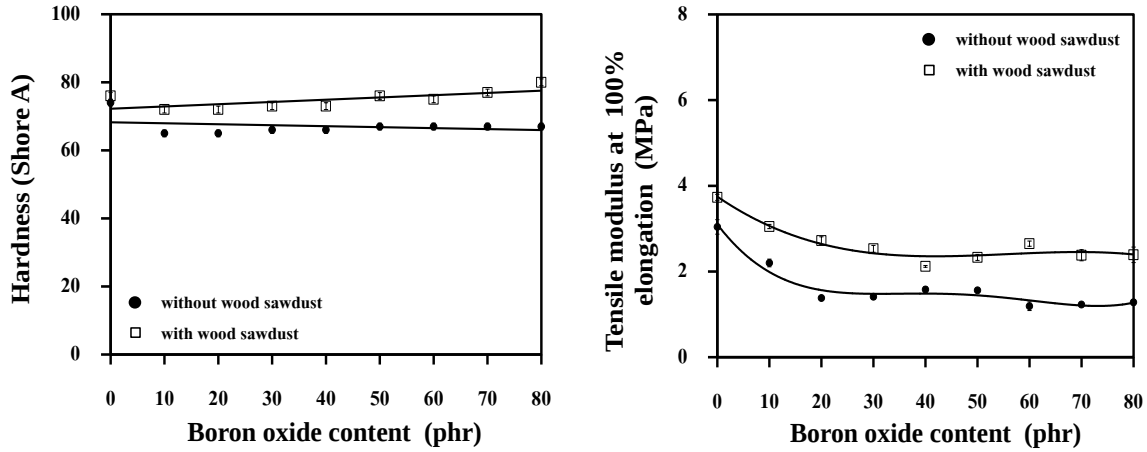
สำหรับค่าผลต่างแรงบิด (Delta torque) ของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ พบว่า การเติมโบรอนออกไซด์ที่ปริมาณ 60 – 80 phr ส่งผลทำให้วัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้มีค่าผลต่างแรงบิดมีแนวโน้มลดลง ตามปริมาณสารตัวเติมที่เพิ่มขึ้น และเมื่อพิจารณาการเติมโบรอนออกไซด์ในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ มีค่าผลต่างแรงบิดต่ำกว่าในกรณีการเติมโบรอนออกไซด์ในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่ไม่เติมผงขี้เลื่อยไม้ ทั้งนี้เนื่องจาก ผงขี้เลื่อยไม้เกิดการเกาะกลุ่มกัน และเข้าไปขัดขวางการเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่โมเลกุลยางกับซัลเฟอร์ ทำให้มีปริมาณพันธะเชื่อมขวางลดลง

ตารางที่ 4.4 เวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูป เวลาที่ยางคงรูป และผลต่างแรงบิดของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ ที่เติมสารตัวเติมป้องกันรังสีชนิดโบรอนออกไซด์

Sample code content (phr)	**Cure properties**			**Sample code content** (phr)	**Cure properties**		
	Scorch time (sec)	**Cure time** (sec)	**Delta torque** (dN m)		**Scorch time** (sec)	**Cure time** (sec)	**Delta torque** (dN m)
NR Compound	34 ± 2	184 ± 1	74 ± 11	**NR-WS**	42 ± 8	222 ± 12	79 ± 1
Boron oxide : BO							
NR-10BO	41 ± 3	109 ± 2	35 ± 0	**NR-WS-10BO**	41 ± 4	206 ± 7	655 ± 0
NR-20BO	35 ± 2	99 ± 2	39 ± 1	**NR-WS-20BO**	49 ± 11	202 ± 9	55 ± 2
NR-30BO	37 ± 3	101 ± 3	41 ± 1	**NR-WS-30BO**	43 ± 3	173 ± 2	40 ± 1
NR-40BO	35 ± 2	97 ± 0	45 ± 1	**NR-WS-40BO**	41 ± 3	125 ± 2	28 ± 1
NR-50BO	33 ± 2	98 ± 3	44 ± 0	**NR-WS-50BO**	49 ± 3	1021 ± 67	23 ± 1
NR-60BO	47 ± 3	1065 ± 52	18 ± 0	**NR-WS-60BO**	51 ± 1	1421 ± 28	17 ± 1
NR-70BO	43 ± 4	155 ± 3	28 ± 2	**NR-WS-70BO**	56 ± 6	1461 ± 44	15 ± 1
NR-80BO	31 ± 19	147 ± 13	22 ± 9	**NR-WS-80BO**	76 ± 2	1553 ± 11	11 ± 0

4.3.3 สมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ที่เติมสารตัวเติมโบรอนออกไซด์

การศึกษาสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ (ไม่เติมผงขี้เลื่อยไม้) และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ ที่เติมสารตัวเติมป้องกันรังสีชนิดโบรอนออกไซด์ที่ปริมาณ 0 - 80 phr โดยทดสอบดังนี้ ค่าความแข็งที่ผิว (Hardness) มอดุลัสแรงดึง (Tensile modulus) ความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile strength) และเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด (Elongation at break) แสดงดังรูปที่ 4.10 - 4.12 ตามลำดับ ดังนี้

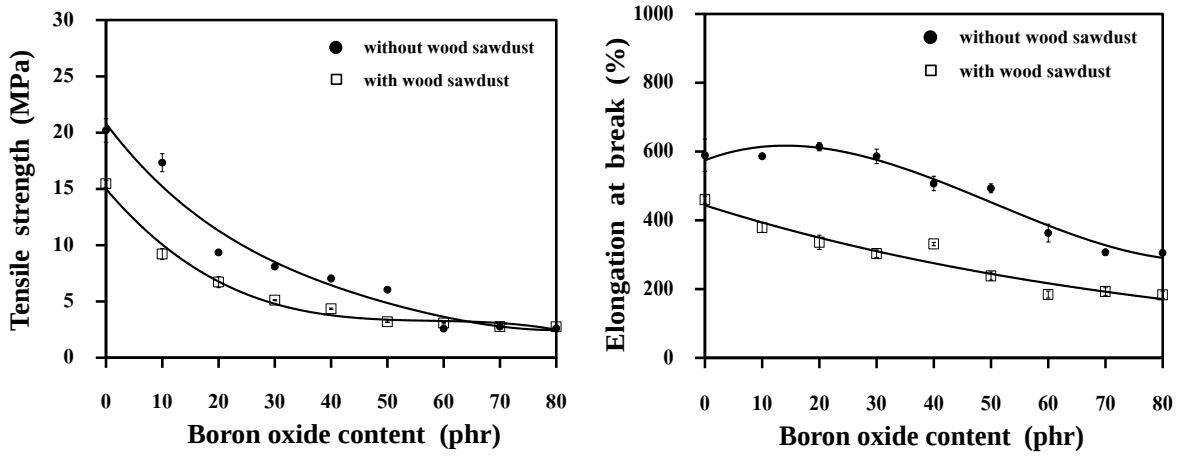


(ก) (ข)

รูปที่ 4.10 สมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ ที่มีการเติมสารตัวเติมป้องกันรังสีชนิดโบรอนออกไซด์ โดย (ก) ความแข็งที่ผิว และ (ข) มอดุลัสแรงดึง

สำหรับค่าความแข็งที่ผิวของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ แสดงดังรูปที่ 4.10 (ก) พบว่า การเติมโบรอนออกไซด์ที่ปริมาณ 60 – 80 phr ในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ ส่งผลทำให้ค่าความแข็งที่ผิวไม่เปลี่ยนแปลง และการเติมโบรอนออกไซด์ในปริมาณที่ 60 – 80 phr ในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ ส่งผลทำให้ค่าความแข็งที่ผิวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ตามปริมาณสารตัวเติมที่เพิ่มขึ้น มีค่าอยู่ในช่วง 76 – 80 Shore A และเมื่อพิจารณาการเติมโบรอนออกไซด์ในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ มีค่าความแข็งที่ผิวสูงกว่าวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่ไม่เติมผงขี้เลื่อยไม้ ทั้งนี้เนื่องจาก การเติมผงขี้เลื่อยไม้ซึ่งเป็นอนุภาคที่มีความแข็งแกร่ง (Rigidity) สูง จึงทำให้ความแข็งที่ผิวของวัสดุเชิงประกอบยางโดยรวมเพิ่มขึ้น

สำหรับค่ามอดุลัสแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ แสดงดังรูปที่ 4.10 (ข) พบว่า การเติมโบรอนออกไซด์ที่ปริมาณ 60 – 80 phr ในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ ส่งผลทำให้ค่ามอดุลัสแรงดึงมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องจาก ยางมีปริมาณพันธะเชื่อมขวาง (Crosslink) ที่ลดลง ตามปริมาณสารตัวเติมที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับค่าผลต่างแรงบิด จึงส่งผลทำให้ยางนิ่มและมีความต้านทานต่อการเสียรูปที่ไม่ดี และเมื่อพิจารณาการเติมโบรอนออกไซด์ในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ มีค่ามอดุลัสแรงดึงสูงกว่ากรณีการเติมโบรอนออกไซด์ในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่ไม่เติมผงขี้เลื่อยไม้ ทั้งนี้เนื่องจาก การเติมผงขี้เลื่อยไม้ซึ่งมีความแข็ง (Rigidity) จึงทำให้ยางมีความต้านทานต่อการเสียรูปที่ดีกว่า



(ก) (ข)

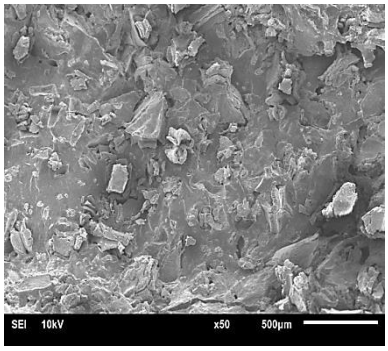
รูปที่ 4.11 สมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ ที่มีการเติมสารตัวเติมป้องกันรังสีชนิดโบรอนออกไซด์ โดย (ก) ความต้านทานแรงดึง และ (ข) เปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด

สำหรับค่าความต้านทานแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ แสดงดังรูปที่ 4.11 (ก) พบว่า การเติมโบรอนออกไซด์เพิ่มขึ้นที่ปริมาณ 60 – 80 phr ในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ ส่งผลทำให้ค่าความต้านแรงดึงมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย ตามปริมาณสารตัวเติมที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจาก สารตัวเติมที่มากขึ้นทำให้เกิดการเกาะกลุ่มกันเอง (Filler-filler interaction) [35 - 37] แสดงดังภาพถ่ายโครงสร้างทางสัณฐานวิทยา ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM) ในรูปที่ 4.12 (ก) และ (ข) ในกรณีการเติมโบรอนออกไซด์ในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่ไม่เติมผงขี้เลื่อยไม้ เห็นได้ว่า มีความไม่เข้ากันของเฟสยางและสารตัวเติม และในกรณีการเติมโบรอนออกไซด์ในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ เห็นได้ว่า อนุภาคของสารตัวเติมเกิดการเกาะกลุ่มและจากการที่อันตรกิริยาระหว่างกลุ่มก้อนของโบรอนออกไซด์และเฟสยางที่ไม่ดีซึ่งเป็นจุดศูนย์รวมของความเค้น (Stress concentration) [35] จึงทำให้เกิดความเสียหายของชิ้นงานได้ง่าย จึงส่งผลทำให้วัสดุเชิงประกอบยางมีความต้านทานต่อแรงดึงลดลง

สำหรับเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด ของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ แสดงดังรูปที่ 4.11 (ข) พบว่า การเติมโบรอนออกไซด์ที่ปริมาณ 60 – 80 phr ในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ ส่งผลทำให้เปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาดมีแนวโน้มลดลง ตามปริมาณสารตัวเติมที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจาก ปริมาณสารตัวเติมที่เพิ่มขึ้นเข้าไปแทนที่ยางธรรมชาติที่เป็นเนื้อวัสดุหลัก ส่งผลให้วัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติมีการยืดตัว

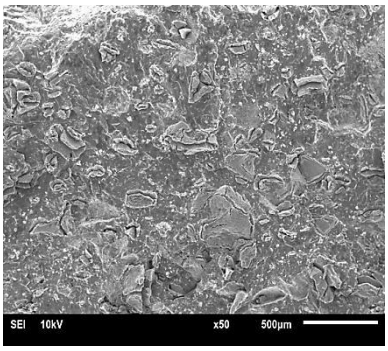
และมีสมบัติความเป็นอิลาสติก (Elasticity) ลดลง และเมื่อพิจารณาการเติมโบรอนออกไซด์ที่ปริมาณ 60 – 80 phr ในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ มีค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด ต่ำกว่ากรณีการโบรอนออกไซด์ที่ปริมาณ 60 – 80 phr ในวัสดุเชิงประกอบธรรมชาติที่ไม่เติมผงขี้เลื่อยไม้ ทั้งนี้เนื่องจาก ผงขี้เลื่อยไม้เข้าไปแทนที่ยางธรรมชาติที่เป็นเนื้อวัสดุหลัก ทำให้ส่วนที่เป็นเนื้อยางลดลง (Dilution effect) ส่งผลให้วัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติมีการยืดตัวและมีสมบัติความเป็นอิลาสติก (Elasticity) ลดลง

Without Wood Sawdust



(ก)

With Wood Sawdust

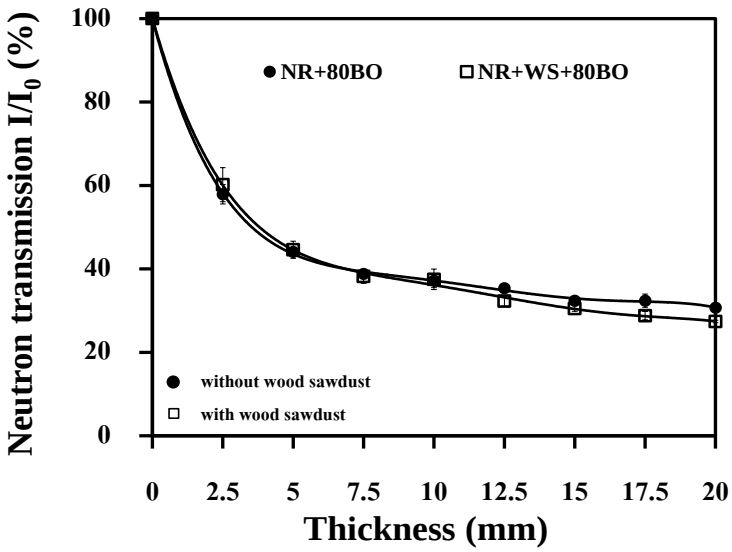


(ข)

รูปที่ 4.12 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของ ก) วัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และ ข) วัสดุเชิง ประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ ที่เติมโบรอนออกไซด์ที่ปริมาณ 80 phr (กำลังขยาย 50 เท่า)

4.3.4 ผลของความหนาของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ที่เติมโบรอนออกไซด์ที่ส่งผลต่อการป้องกันอนุภาคนิวตรอน

งานวิจัยนี้ได้เลือกสูตรวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่เติมและไม่เติมผงขี้เลื่อยไม้ที่เติมโบรอนออกไซด์ปริมาณ 80 phr ซึ่งพิจารณาจากผลของสมบัติด้านรังสี โดยการเติมโบรอนออกไซด์ที่ปริมาณ 80 phr ทำให้มีจำนวนอนุภาคนิวตรอนผ่านชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติมีแนวโน้มลดลงเพียงเล็กน้อย และเมื่อเพิ่มโบรอนออกไซด์ที่ปริมาณ 100 phr ไม่เห็นการเปลี่ยนแปลงของอัตราการลดลงของจำนวนอนุภาคนิวตรอน และส่งผลทำให้สมบัติเชิงกลโดยรวมลดลง (แสดงในตารางข้อมูลภาคผนวก ข) และทำการปรับเปลี่ยนความหนาชิ้นงานที่ 2.5, 5, 7.5, 10, 12.5, 15, 17.5 และ 20 มิลลิเมตร นำมาทดสอบการป้องกันอนุภาคนิวตรอน โดยทดสอบสมบัติด้านรังสีด้วยระบบ Integral counting system แสดงดังรูปที่ 4.13

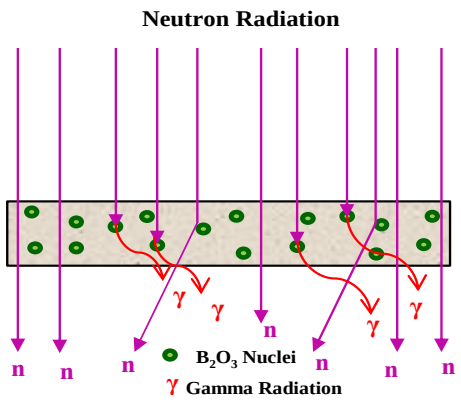
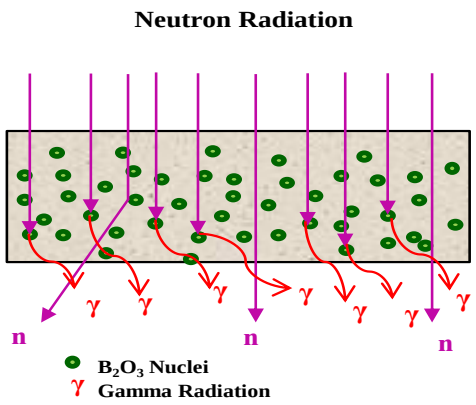
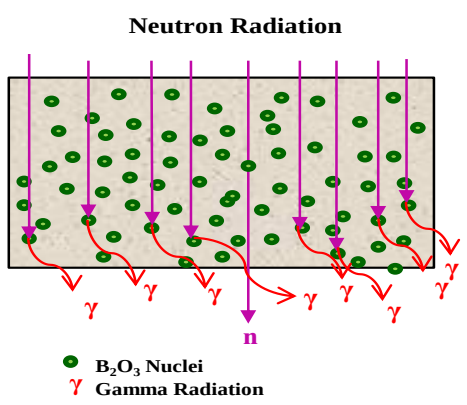
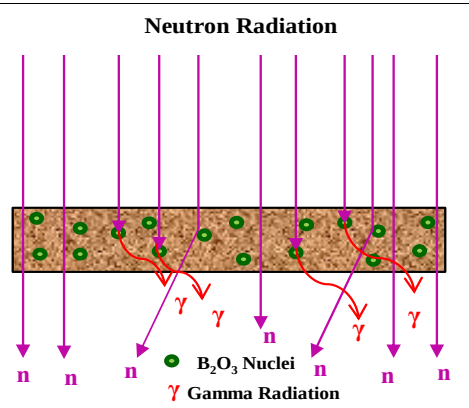
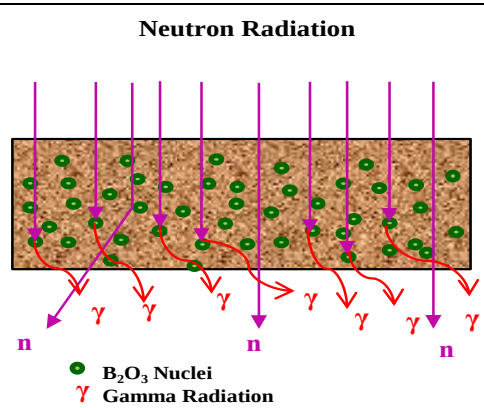
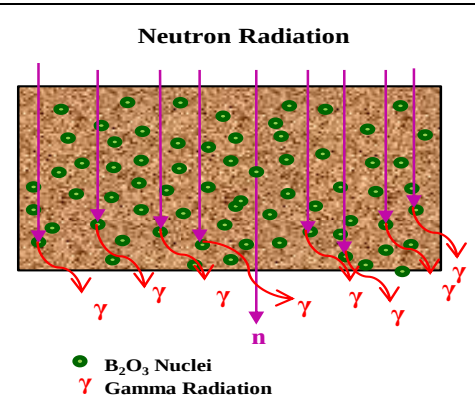


รูปที่ 4.13 อนุภาคนิวตรอนที่สามารถผ่านแผ่นกำบังที่ความหนาต่างๆ

จากรูปที่ 4.13 แสดงจำนวนอนุภาคนิวตรอนที่สามารถผ่านแผ่นวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ที่เติมโบรอนออกไซด์ที่ปริมาณ 80 phr พบว่า การเติมโบรอนออกไซด์ที่ปริมาณ 80 phr ส่งผลทำให้มีจำนวนอนุภาคนิวตรอนที่ผ่านแผ่นวัสดุเชิงประกอบยางมีแนวโน้มลดลง เมื่อความหนาของชิ้นงานเพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้วัสดุเชิงประกอบยางมีความสามารถในการป้องกันอนุภาคนิวตรอนเพิ่มขึ้นตามความหนาของชิ้นงาน เนื่องจาก การเพิ่มความหนาของชิ้นงานทำให้วัสดุเชิงประกอบยางมีปริมาณของโบรอน-10 ที่มากขึ้น จึงสามารถดูดซับ (Absorb) อนุภาคนิวตรอนไว้จากการทำปฏิกิริยากับนิวเคลียสโบรอนได้มากขึ้น [21] ซึ่งจากการทดลองอัตราการลดลงของอนุภาคนิวตรอนเกิดขึ้นอย่างชัดเจนที่ความหนา 5 มิลลิเมตร และความหนาที่ 7.5 – 20 มิลลิเมตรมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องจาก ชิ้นงานที่มีความหนา 5 มิลลิเมตร สามารถต้านทานต่ออนุภาคนิวตรอนได้ถึง 56 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อทำการเพิ่มความหนาจึงมีจำนวนอนุภาคนิวตรอนผ่านชิ้นงานที่ลดลง สามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลองแสดงดังรูปที่ 4.14

จากรูปที่ 4.14 แสดงแบบจำลองของอนุภาคนิวตรอนที่สามารถผ่านแผ่นกำบังที่ความหนาต่างๆ พบว่า ชิ้นงานที่เติมโบรอนออกไซด์ที่ความหนา 2.5 มิลลิเมตร สามารถดูดซับอนุภาคนิวตรอนไว้ภายในนิวเคลียสของโบรอนได้ 40 เปอร์เซนต์ และเมื่อทำการเพิ่มความหนาที่ 5 มิลลิเมตร อัตราการลดลงของการป้องกันอนุภาคนิวตรอนเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งสามารถป้องกันอนุภาคนิวตรอนได้ 56 เปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้เนื่องจากชิ้นงานมีปริมาณโบรอนที่มากขึ้น เมื่ออนุภาคนิวตรอนพุ่งชนชิ้นงาน นิวเคลียสของโบรอนที่อยู่ภายในชิ้นงานสามารถดูดซับอนุภาคนิวตรอนได้เพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลทำให้มีจำนวนอนุภาคนิวตรอนคงเหลือหลุดผ่านชิ้นงานมีปริมาณลดลง เมื่อเพิ่มความหนาที่ 7.5 – 20 มิลลิเมตร (จากรูปที่ 4.13) จึงเห็นอัตราการป้องกัน

อนุภาคนิวตรอนลดลงเพียงเล็กน้อย ซึ่งชิ้นงานที่ความหนา 5 มิลลิเมตร มีความเหมาะสมในด้านการป้องกันอนุภาคนิวตรอน เนื่องจาก สามารถลดอัตราการผ่านของนิวตรอนได้มาก ในขณะที่ขนาดและรูปร่างของชิ้นงานมีความสมบูรณ์ ซึ่งแตกต่างจากชิ้นงานความหนาที่ 20 มิลลิเมตร ที่สามารถลดอัตราการผ่านของนิวตรอนได้มากกว่าแต่ได้ชิ้นงานที่มีรูปร่างและขนาดไม่สมบูรณ์ตามแบบแม่พิมพ์ขึ้นรูป

	Incoming thermal neutrons	Incoming thermal neutrons	Incoming thermal neutrons
NR compound without Wood Sawdust			
NR compound with Wood Sawdust			
Thickness (mm)	2.5	5	7.5

รูปที่ 4.14 แบบจำลองของอนุภาคนิวตรอนที่สามารถผ่านแผ่นกำบังที่ความหนาต่างๆ

4.4 การทดสอบสมบัติการคงรูปของยาง สมบัติเชิงกล และความหนาที่ส่งผลต่อการป้องกันรังสีแกมมาของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ที่เติมผงตะกั่ว

จากการศึกษาสมบัติด้านรังสีของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ (ไม่เติมผงขี้เลื่อยไม้) และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ที่เติมสารตัวเติมป้องกันรังสีชนิดกรดบอริกและโบรอนออกไซด์ พบว่า การเติมโบรอนออกไซด์และกรดบอริก ส่งผลทำให้วัสดุเชิงประกอบยางมีความสามารถในการป้องกันอนุภาคนิวตรอนได้เพิ่มขึ้น ซึ่งหลังจากการดูดจับอนุภาคนิวตรอนทำให้เกิดรังสีแกมมาขึ้น (ดังรูปที่ 4.14) ดังนั้นในงานวิจัยนี้ จึงสนใจศึกษาการเติมสารตัวเติมป้องกันรังสีชนิดผงตะกั่ว เพื่อป้องกันรังสีแกมมาที่หลุดจากการดูดจับนิวตรอน โดยปรับเปลี่ยนปริมาณของผงตะกั่วที่ 10, 20, 30, 40 และ 50 phr และทดสอบสมบัติการคงรูปของยาง ได้แก่ เวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูป เวลาที่ยางคงรูป และผลต่างแรงบิด และทดสอบสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติและวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ที่มีการเติมสารตัวเติมป้องกันรังสีชนิดผงตะกั่ว โดยทดสอบสมบัติด้านรังสีด้วยระบบ Integral counting system ทดสอบเวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูป และเวลาที่ยางคงรูปด้วยเครื่อง รีโอมิเตอร์แบบจานแกว่ง ส่วนการทดสอบสมบัติเชิงกล ด้านความแข็งที่ผิว มอดุลัสแรงดึง ความต้านทานต่อแรงดึง และเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด

4.4.1 สมบัติการคงรูป และสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ที่เติมสารตัวเติมผงตะกั่ว

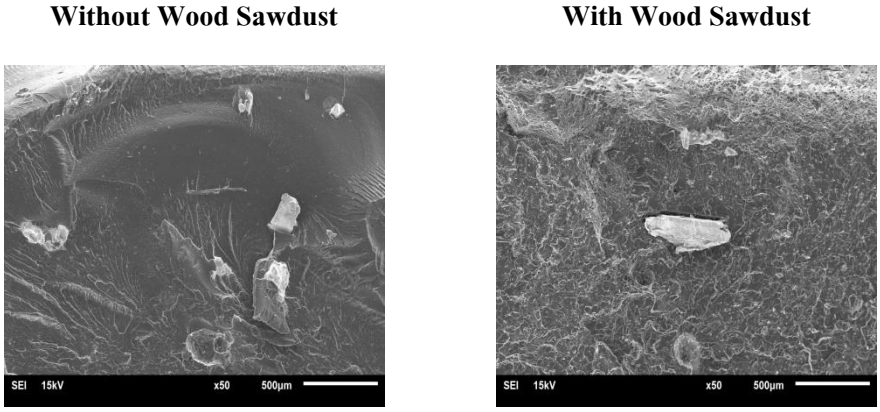
การศึกษาสมบัติการคงรูปยางแบ่งออกเป็นการศึกษาเวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูป (Scorch time; ts_1) เวลาที่ยางคงรูปที่ 90 เปอร์เซ็นต์ (Cure time; tc_{90}) และค่าผลต่างแรงบิด (Delta torque) ของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ (ไม่เติมผงขี้เลื่อยไม้) และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ (Wood Sawdust; WS) แสดงดังตารางที่ 4.5 ที่มีการเติมสารตัวเติมป้องกันรังสีชนิดผงตะกั่ว (Lead powder; Pb) โดยปรับเปลี่ยนปริมาณสารตัวเติมที่ 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 phr ด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์แบบจานแกว่ง และศึกษาสมบัติเชิงกล ดังนี้ ค่าความแข็งที่ผิว (Hardness) มอดุลัสแรงดึง (Tensile modulus) ความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile strength) และเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด (Elongation at break) แสดงดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 สมบัติการคงรูป และสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ ที่เติมสารตัวเติมป้องกันรังสีชนิดผงตะกั่ว

Sample code content (phr)	Cure properties			Mechanical properties			
	Scorch time (sec)	**Cure time** (sec)	**Delta torque** (dN m)	**Tensile Modulus at 100% elongation** (MPa)	**Tensile Strength** (MPa)	**Elongation at break** (%)	**Hardness** (Shore A)
Lead powder : Pb							
NR	34 ± 2	184 ± 1	74 ± 11	3.75 ± 0.02	14.47 ± 0.99	316 ± 19	74 ± 1
NR-10Pb	35 ± 2	200 ± 2	93 ± 0	3.69 ± 0.06	11.02 ± 1.22	262 ± 26	70 ± 2
NR-20Pb	34 ± 3	205 ± 2	95 ± 0	3.66 ± 0.04	9.21 ± 2.45	228 ± 52	70 ± 1
NR-30Pb	35 ± 2	206 ± 3	96 ± 0	3.66 ± 0.07	7.80 ± 0.99	197 ± 22	71 ± 1
NR-40Pb	34 ± 1	204 ± 2	97 ± 0	3.53 ± 0.04	7.89 ± 1.46	213 ± 34	70 ± 2
NR-50Pb	34 ± 1	208 ± 4	97 ± 0	3.59 ± 0.10	6.48 ± 1.37	178 ± 33	71 ± 1
Lead powder : Pb (WS)							
NR-WS	42 ± 8	222 ± 12	79 ± 1	3.73 ± 0.07	15.45 ± 0.31	460 ± 10	76 ± 1
NR-WS-10Pb	40 ± 5	250 ± 13	79 ± 17	4.03 ± 0.05	14.04 ± 1.07	391 ± 24	75 ± 1
NR-WS-20Pb	38 ± 1	220 ± 2	85 ± 0	3.70 ± 0.08	13.39 ± 0.56	411 ± 11	75 ± 1
NR-WS-30Pb	38 ± 3	219 ± 1	86 ± 1	3.62 ± 0.12	12.10 ± 0.59	387 ± 29	75 ± 1
NR-WS-40Pb	37 ± 1	220 ± 0	87 ± 1	3.45 ± 0.15	11.07 ± 0.60	372 ± 8	75 ± 1
NR-WS-50Pb	37 ± 3	222 ± 2	86 ± 0	3.52 ± 0.02	10.94 ± 0.25	368 ± 8	76 ± 1

จากตารางที่ 4.5 แสดงเวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูป เวลาที่ยางคงรูป และผลต่างแรงบิด และสมบัติเชิงกลทางด้านความแข็งที่ผิว มอดุลัสแรงดึง ความต้านทานต่อแรงดึง และเปอร์เซนต์การยืดตัว ณ จุดขาด เมื่อพิจารณาสมบัติการคงรูป พบว่า การเติมผงตะกั่วในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ ไม่ส่งผลต่อสมบัติการคงรูป เนื่องจาก ผงตะกั่วไม่เกิดปฏิกิริยาทางเคมีกับวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ

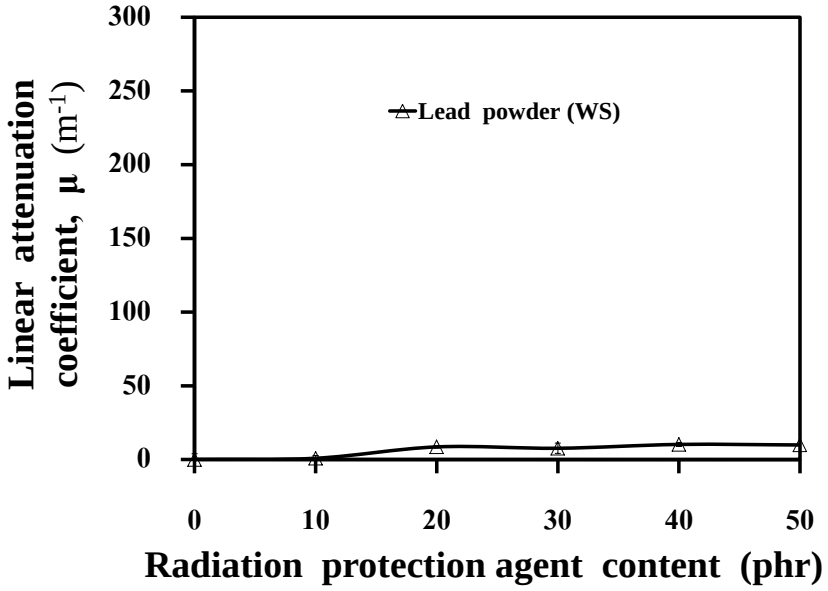
เมื่อพิจารณาสมบัติเชิงกล พบว่า การเติมผงตะกั่วในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ ไม่ส่งผลต่อค่าความแข็งที่ผิว ซึ่งการเติมผงตะกั่วที่ปริมาณ 50 phr เปรียบเสมือนกับการเติมโบรอนออกไซด์ที่ปริมาณ 10 – 20 phr เนื่องจาก ผงตะกั่วมีน้ำหนักมวลที่มากกว่าโบรอนออกไซด์ และไม่ส่งผลต่อค่ามอดุลัสแรงดึง เนื่องจากผงตะกั่วไม่ส่งผลต่อปฏิกิริยาการเชื่อมโยงพันธะของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ แต่ส่งผลทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงมีแนวโน้มลดลง ตามปริมาณสารตัวเติมที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่อง ผงตะกั่วมีค่าความหนาแน่น (Density) น้ำหนักที่ค่อนข้างสูงมาก ซึ่งค่าความต่างของความหนาแน่นของยางธรรมชาติ และผงตะกั่วค่อนข้างมาก จึงส่งผลทำให้เป็นสารตัวเติมกระจายในเฟสยางได้ยาก ดังแสดงภาพถ่ายโครงสร้างทางสัณฐานวิทยา ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM) ในรูปที่ 4.15 (ก) และ (ข) และผงตะกั่วไม่สามารถเกิดพันธะทางเคมีกับยางได้จึงที่ไม่มีการเสริมแรงในวัสดุยาง ส่วนผลของเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาดของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ พบว่า การเติมผงตะกั่ว ส่งผลทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด มีแนวโน้มลดลง ตามปริมาณสารตัวเติมที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากอนุภาคของผงตะกั่วเข้าไปแทนที่ยางธรรมชาติที่เป็นเนื้อวัสดุหลัก ทำให้ความต่อเนื่องของเฟสยางลดลง ส่งผลทำให้วัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติมีการยืดตัว และความเป็นอิลาสติกของยางลดลง



(ก) (ข)

รูปที่ 4.15 ภาพโครงสร้างจุลภาคของ ก) วัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และ ข) วัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ ที่เติมผงตะกั่วที่ปริมาณ 50 phr (กำลังขยาย 50 เท่า)

ค่าการต้านทานรังสีแกมมม่าของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่เติมตะกั่ว (จากรายงานการวิจัย ระยะที่ 1)

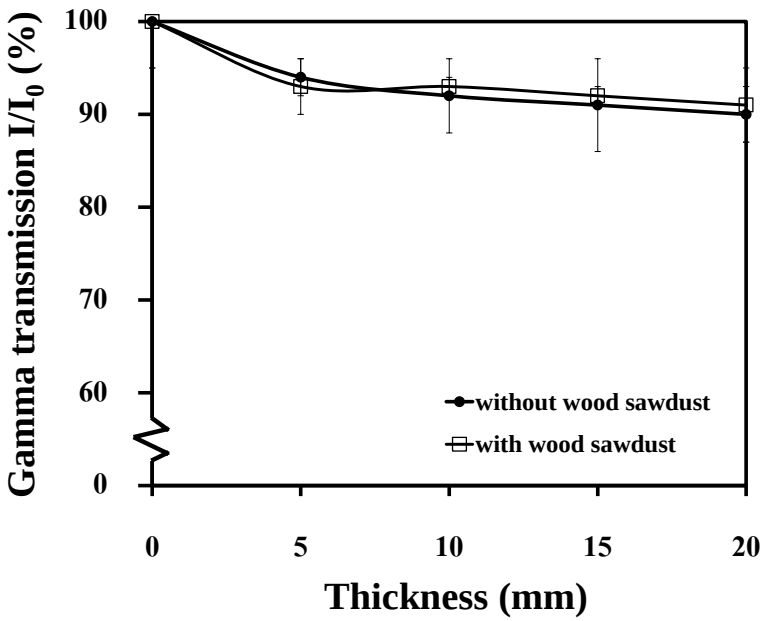


รูปที่ 4.16 ความต้านทานต่อรังสีแกมมาของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ที่มีการเติมสารตัวเติมป้องกันรังสีชนิดผงตะกั่ว

จากรูปที่ 4.16 แสดงผลของชนิดและปริมาณสารตัวเติมป้องกันรังสีที่ส่งผลต่อความสามารถในการป้องกันรังมีแกมมา พบว่า การเติมผงตะกั่วส่งผลทำให้ความสามารถในการป้องกันรังสีแกมมามีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่มีการเติมผงตะกั่วมีความหนาแน่นโดยรวมเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ซึ่งความหนาแน่นของวัสดุส่งผลต่อความสามารถในการป้องกันรังสีแกมมา

4.4.2 ผลของความหนาของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ที่เติมผงตะกั่วที่ส่งผลต่อการป้องกันรังสีแกมมา

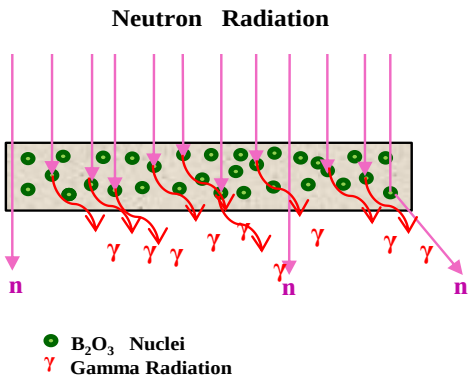
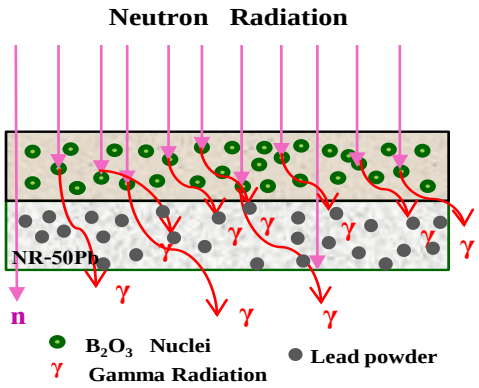
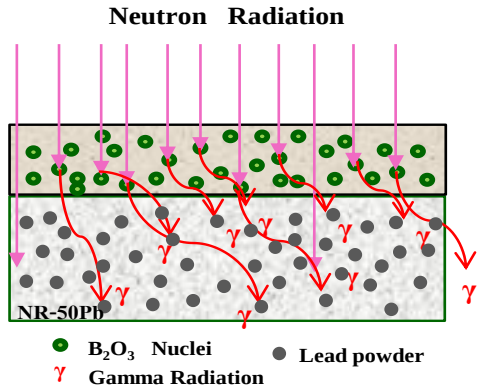
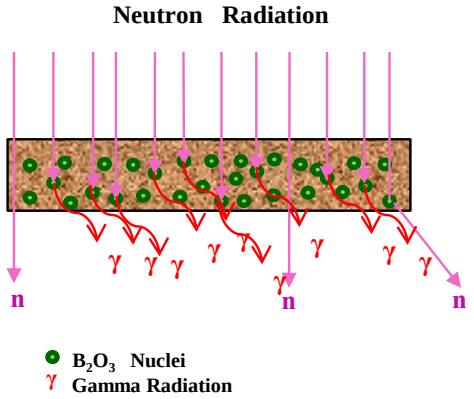
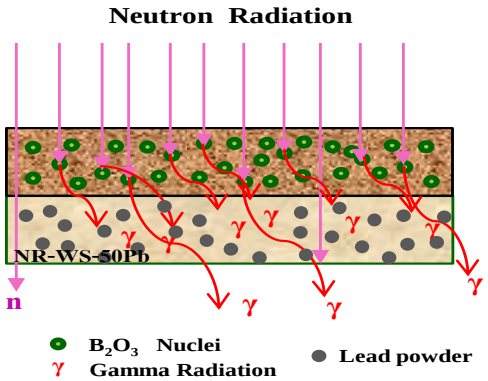
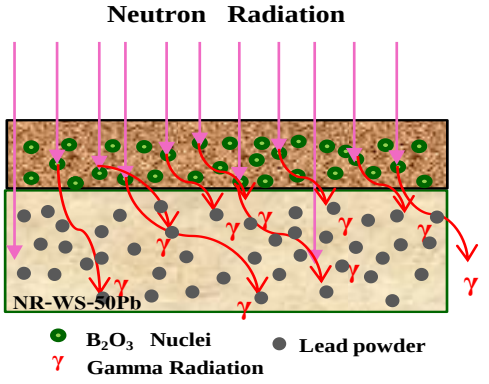
จากงานวิจัยนี้ได้เลือกสูตรวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ (ไม่เติมผงขี้เลื่อยไม้) และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผง ขี้เลื่อยไม้ที่เติมผงตะกั่วที่ปริมาณ 50 phr ปรับเปลี่ยนความหนาที่ 5, 10, 15 และ 20 มิลลิเมตร นำมาทดสอบรังสีแกมมาที่ผ่านแผ่นกำบังรังสีที่ความหนาต่างๆ โดยใช้แผ่นชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่เติมสารตัวเติมป้องกันรังสีชนิดโบรอนออกไซด์ที่ปริมาณ 80 phr ความหนาชิ้นงานที่ 5 มิลลิเมตร แสดงดังรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 รังสีแกมมาที่สามารถผ่านแผ่นกำบังที่ความหนาต่างๆ

จากรูปที่ 4.16 แสดงจำนวนรังสีแกมมาที่เกิดจากการดูดซับนิวตรอนที่สามารถผ่านแผ่นวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ที่เติมผงตะกั่วที่ปริมาณ 50 phr พบว่า รังสีแกมมาที่เกิดจากการดูดซับนิวตรอนมีจำนวนรังสีที่ผ่านแผ่นวัสดุเชิงประกอบยางมีแนวโน้มลดลง ตามความหนาของชิ้นงานที่เพิ่มขึ้น จึงส่งผลทำให้วัสดุเชิงประกอบยางมีความสามารถในการป้องกันรังสีแกมมาที่หลุดจากการดูดซับนิวตรอนเพิ่มขึ้นตามความหนาของชิ้นงาน เนื่องจากวัสดุเชิงประกอบยางที่มีการเติมผงตะกั่วมีจำนวนของตะกั่วโดยรวมเพิ่มขึ้น ซึ่งการเพิ่มขึ้นของตะกั่ว ส่งผลทำให้มีความสามารถในการป้องกันรังสีแกมมาที่ดี ซึ่งจากการทดลองอัตราการลดลงอย่างชัดเจนที่ความหนา 5 มิลลิเมตร และความหนาที่10 – 20 มิลลิเมตร มีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องจาก ชิ้นงานที่มีความหนา 5 มิลลิเมตร สามารถป้องกันรังสีแกมมาที่หลุดจากการดูดจับอนุภาคนิวตรอนได้ 10 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อความหนาชิ้นงานเพิ่มขึ้น จึงมีจำนวนอนุภาคนิวตรอนผ่านชิ้นงานที่ลดลง อธิบายได้ด้วยแบบจำลอง แสดงดังรูปที่ 4.17

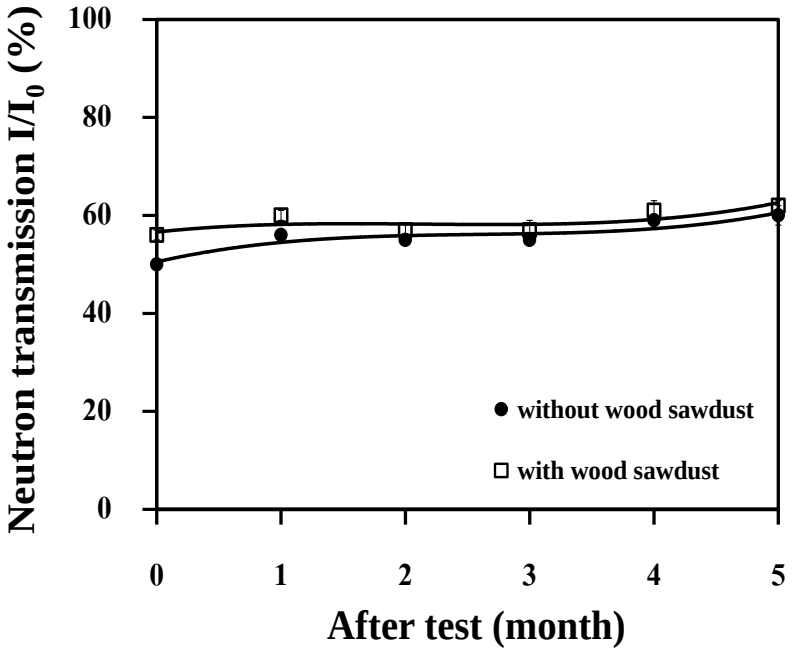
จากรูปที่ 4.17 แสดงแบบจำลองของรังสีแกมมาที่เกิดจากการดูดซับอนุภาคนิวตรอนที่สามารถผ่านแผ่นกำบังที่ความหนาต่างๆ เห็นได้ว่า ชิ้นงานที่เติมโบรอนออกไซด์ที่ความหนา 5 มิลลิเมตร สามารถดูดซับอนุภาคนิวตรอนไว้ภายในนิวเคลียสของโบรอนพร้อมกับปล่อยรังสีแกมมาออกมา ดังนั้น จึงนำชิ้นงานที่เติมผงตะกั่วที่ความหนาต่างๆ วางซ้อนกับชิ้นงานที่เติมโบรอนออกไซด์เพื่อป้องกันรังสีแกมมาที่เกิดจากการดูดซับนิวตรอน พบว่า ชิ้นงานที่เติมผงตะกั่วที่ความหนา 5 มิลลิเมตร สามารถป้องกันรังสีแกมมาได้ 10 เปอร์เซ็นต์ และมีจำนวนรังสีแกมมาที่คงเหลือหลุดผ่านชิ้นงานมีปริมาณลดลง เมื่อเพิ่มความหนาชิ้นงานที่ 10 - 20 มิลลิเมตร จึงเห็นอัตราการลดลงของการป้องกันรังสีแกมมาเพียงเล็กน้อย

	Incoming thermal neutrons	Incoming thermal neutrons	Incoming thermal neutrons
NR compound without Wood Sawdust			
NR compound with Wood Sawdust			
Thickness (mm)	(without NR-50Pb)	10	15

รูปที่ 4.18 แบบจำลองของรังสีแกมมาที่สามารถผ่านแผ่นกำบังที่ความหนาต่างๆ

4.5 ผลสมบัติด้านรังสีของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ที่เติมโบรอนออกไซด์หลังการใช้งานเป็นระยะเวลา 5 เดือน

งานวิจัยนี้ได้เลือกสูตรวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่เติมและไม่เติมผงขี้เลื่อยไม้ที่เติมโบรอนออกไซด์ปริมาณ 80 phr ซึ่งพิจารณาจากผลของสมบัติด้านรังสี นำมาทดสอบใช้งานจริงเป็นระยะเวลา 5 เดือน และทดสอบสมบัติการป้องกันอนุภาคนิวตรอน โดยทดสอบสมบัติด้านรังสีด้วยระบบ Integral counting system แสดงดังรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.19 ความต้านทานต่ออนุภาคนิวตรอนของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ ที่มีการเติมสารตัวเติมป้องกันรังสีชนิดโบรอนออกไซด์ หลังทดสอบใช้งานจริงเป็นระยะเวลา 5 เดือน

จากรูปที่ 4.18 แสดงผลการป้องกันรังสีของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้หลังทดสอบใช้งานจริงเป็นระยะเวลา 1 - 5 เดือน ที่ส่งผลต่อความสามารถในการป้องกันอนุภาคนิวตรอน พบว่า ชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่ผ่านการใช้งานจริง ทำให้มีจำนวนอนุภาคนิวตรอนผ่านชิ้นงานมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ตามระยะเวลาทดสอบที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากสารตัวเติมโบรอนออกไซด์มีโบรอน-10 (Boron-10) เป็นส่วนประกอบเมื่อสัมผัสกับอนุภาคนิวตรอน นิวเคลียสของโบรอน-10 สามารถดูดซับ (Absorb) อนุภาคนิวตรอนไว้ภายใน [21] และเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นลิเทียม-7

พร้อมกับปล่อยรังสีแกมมาออกมา ($^{10}B + n \longrightarrow {}^{7}Li^{*} + \gamma$) เมื่อชิ้นงานสัมผัสกับอนุภาคนิวตรอนในระยะเวลานานขึ้นทำให้โบรอนถูกเปลี่ยนเป็นลิเทียม-7 อีกทั้งผงโบรอนออกไซด์เกิดออกสู่ผิวของแผ่นยาง ส่งผลทำให้ปริมาณของโบรอนออกไซด์ลดลง จึงส่งผลทำให้ชิ้นงานมีความสามารถในการป้องกันอนุภาคนิวตรอนลดลงตามระยะเวลาในการทดสอบ

นอกจากนี้ พบว่า การเติมโบรอนออกไซด์ในชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้มีการกระจายตัวในเนื้อยาง จึงส่งผลทำให้ชิ้นงานมีความสามารถในการป้องกันอนุภาคนิวตรอนที่เพิ่มขึ้น ตามปริมาณโบรอนออกไซด์ที่เพิ่มขึ้น และการเติมผงขี้เลื่อยไม้ไม่ส่งผลต่อการป้องกันรังสี จึงส่งผลทำให้ชิ้นงานที่มีผงขี้เลื่อยไม้มีความสามารถในการป้องกันอนุภาคนิวตรอนใกล้เคียงกับชิ้นงานที่ไม่มีผงขี้เลื่อยไม้ (แสดงดังภาคผนวก ค.)

เมื่อเปรียบเทียบสมบัติการกำบังอนุภาคนิวตรอนกับวัสดุชนิดอื่น พบว่า วัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ที่มีปริมาณของโบรอนออกไซด์ 80 phr มีค่า HVL (Half Value Layer) หรือค่าความหนาของชิ้นงานที่สามารถลดจำนวนนิวตรอนลงครึ่งหนึ่ง เท่ากับ 3.5 มม. ซึ่งดีกว่าวัสดุกำบังชนิดอื่น เช่น คอนกรีตทั่วไป (HVL = 5-6 ซม.) หรือ วัสดุเชิงประกอบระหว่างยางธรรมชาติและสไตรีนบิวทาไดอีน (HVL = 10 มม.) ซึ่งแสดงวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ที่พัฒนาขึ้นนี้มีคุณสมบัติที่ดี เหมาะแก่การนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป

บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1 ผลการป้องกันอนุภาคนิวตรอนของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ที่มีการเติมสารตัวเติมป้องกันรังสีชนิดกรดบอริก และโบรอนออกไซด์

- การเติมโบรอนออกไซด์ที่ปริมาณ 80 phr ในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ เหมาะสมต่อความต้านทานอนุภาคนิวตรอน
- การเติมผงขี้เลื่อยไม้ไม่ส่งผลต่อการป้องกันอนุภาคนิวตรอน

5.1.2 ผลการทดสอบเวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูป เวลาที่ยางคงรูป ค่าผลต่างแรงบิด และสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ที่มีการเติมสารตัวเติมป้องกันรังสีชนิดกรดบอริก และโบรอนออกไซด์

- การเติมกรดบอริกในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ ส่งผลทำให้เวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูป และเวลาที่ยางคงรูปเพิ่มขึ้น ตามปริมาณสารตัวเติมที่เพิ่มขึ้น
- การเติมโบรอนออกไซด์ในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ที่ปริมาณ 0 - 50 phr ไม่ส่งผลต่อเวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูป แต่ทำให้เวลาที่ยางคงรูปลดลง ตามปริมาณสารตัวเติมที่เพิ่มขึ้น ส่วนการเติมโบรอนออกไซด์ที่ปริมาณ 60 -80 phr ในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ ส่งผลทำให้เวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูป และเวลาที่ยางคงรูปเพิ่มขึ้น ตามปริมาณสารตัวเติมที่เพิ่มขึ้น
- การเติมกรดบอริกและโบรอนออกไซด์ที่ปริมาณ 0 – 80 phr ในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ ส่งผลทำให้ค่าผลต่างแรงบิดมีแนวโน้มลดลง ตามปริมาณสารตัวเติมที่เพิ่มขึ้น
- การเติมกรดบอริกในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ ส่งผลทำให้สมบัติเชิงกล ด้านความแข็งที่ผิว มอดุลัสแรงดึง ความต้านทานแรงดึง

เปอร์เซนต์การยืดตัว ณ จุดขาด และความต้านทานต่อแรงฉีกขาดมีค่าลดลง ตามปริมาณสารตัวเติมที่เพิ่มขึ้น

- การเติมโบรอนออกไซด์ในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ ส่งผลทำให้สมบัติเชิงกล ด้านมอดุลัสแรงดึง ความต้านทานแรงดึง เปอร์เซนต์การยืดตัว ณ จุดขาด และความต้านทานต่อแรงฉีกขาดมีค่าลดลง ตามปริมาณสารตัวเติมที่เพิ่มขึ้น ยกเว้นค่าความแข็งที่ผิว
- การเติมกรดบอริกและโบรอนออกไซด์ในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ มีความแข็งที่ผิวและมอดุลัสแรงดึงที่สูงกว่ากรณีการเติมกรดบอริกและโบรอนออกไซด์ในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่ไม่เติมผงขี้เลื่อยไม้

5.1.3 ผลการทดสอบเวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูป เวลาที่ยางคงรูป ค่าผลต่างแรงบิด และสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ที่มีการเติมสารตัวเติมป้องกันรังสีชนิดผงตะกั่ว

- การเติมผงตะกั่วในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ ไม่ส่งผลต่อเวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูป เวลาที่ยางคงรูป และผลต่างแรงบิด
- การเติมผงตะกั่วในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ ส่งผลทำให้ความต้านทานแรงดึง และเปอร์เซนต์การยืดตัว ณ จุดขาดลดลง ส่วนความแข็งที่ผิวและมอดุลัสแรงดึงไม่เปลี่ยนแปลง โดยการเติมผงขี้เลื่อยไม้ทำให้สมบัติเชิงกลโดยรวมสูงกว่ากรณีที่ไม่เติมผงขี้เลื่อยไม้

5.1.4 ผลของความหนาของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ที่เติมสารตัวเติมโบรอนออกไซด์ และผงตะกั่ว ที่ส่งผลต่อการป้องกันรังสี

- การเติมโบรอนออกไซด์ที่ปริมาณ 80 phr ในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ที่ความหนาต่างๆ ส่งผลทำให้มีจำนวนอนุภาคนิวตรอนผ่านแผ่นวัสดุเชิงประกอบยางลดลง ตามความหนาของชิ้นงาน และมีอัตราการลดลงอย่างชัดเจนที่ความหนา 5 มิลลิเมตร
- การเติมผงตะกั่วที่ปริมาณ 50 phr ในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ที่ความหนาต่างๆ ส่งผลทำให้มีจำนวนรังสีแกมมาที่เกิดจากการดูดซับนิวตรอนผ่านแผ่นวัสดุเชิงประกอบยางลดลง ตามความหนาของชิ้นงาน และมีอัตราการลดลงที่ความหนา 5 มิลลิเมตร

5.1.5 ผลของการทดสอบความต้านทานอนุภาคนิวตรอนในงานจริงเป็นระยะเวลา 5 เดือน

- ชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติและวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ ที่เติมโบรอนออกไซด์ที่ปริมาณ 80 phr ส่งผลทำให้มีความสามารถในการป้องกันอนุภาคนิวตรอนมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย ตามระยะเวลาการทดสอบ

5.2 การวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์

ตารางที่ 5.1 แสดงการเปรียบเทียบราคาของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่มีและไม่มีผงขี้เลื่อยไม้ ที่เติมสารตัวเติมป้องกันรังสี พบว่า วัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่เติมโบรอนออกไซด์ที่ปริมาณ 80 phr ราคาคอมพาวด์ต่อกิโลกรัม คิดเป็น 2,623.25 บาท ส่วนวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ที่เติมโบรอนออกไซด์ที่ปริมาณ 80 phr ราคาคอมพาวด์ต่อกิโลกรัม คิดเป็น 2,420.36 บาท ซึ่งสูตรที่มีผงขี้เลื่อยไม้มีราคาถูกกว่าสูตรที่ไม่มีผงขี้เลื่อยไม้ ในส่วนนี้เป็นการเปรียบเทียบต้นทุนการผลิตการผลิตด้านวัสดุ (ไม่รวมถึงค่าเครื่องจักร และค่าแรงงาน) เพื่อวิเคราะห์ผลวิจัยเชิงเศรษฐศาสตร์สำหรับการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมจริง และเมื่อเปรียบเทียบราคาของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ ที่เติมสารตัวเติมโบรอนออกไซด์ที่ปริมาณ 80 phr กับผลิตภัณฑ์เกรดการค้า พบว่า วัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่มีและไม่มีผงขี้เลื่อยไม้ ที่เติมโบรอนออกไซด์มีราคาถูกกว่าผลิตภัณฑ์เกรดการค้า โดยผลิตภัณฑ์ยางเกรดการค้ามีราคาต่อกิโลกรัม คิดเป็น 3,760 บาท

ตารางที่ 5.1 การเปรียบเทียบราคาวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่มีและไม่มีผงขี้เลื่อยไม้ ที่เติมสารตัวเติมโบรอนออกไซด์ (ไม่รวมค่าเครื่องจักรและแรงงาน) กับผลิตภัณฑ์เกรดการค้า

สารเคมี	ปริมาณ (phr)	ราคา/กก. (บาท/กก.)	สูตรที่ไม่มีผงขี้เลื่อยไม้	สูตรที่มีผงขี้เลื่อยไม้
			โบรอนออกไซด์	โบรอนออกไซด์
Natural rubber STR 20	100	47	4.70	4.70
ZnO (Zinc Oxide)	5	79	0.39	0.39
Stearic acid	2	53	0.11	0.11
Mercaptobenzothiasoles, MBT	0.5	170	0.09	0.09
Diphenylguanidine, DPG	3	150	0.45	0.45
Sulfur Powder 450 Mash	4	23	0.09	0.09
Carbon black (N330)	40	45	1.80	1.80
Wood Sawdust	20	2	-	0.04
Silane coupling (KBM 603 A)	0.1	3,000	-	0.30
UV Stabilizer (GHIGUARD 234)	0.1	2,000	0.20	0.20
Antioxidant (TY 1076)	0.5	900	0.45	0.45
Antiozonant (REDEZON 515 P)	3	106	0.32	0.32
Boron oxide; (B_2O_3)	80	7,700	616.00	616.00
ราคารวม (บาท)			624.59	624.94
ปริมาณสารเคมีที่ใช้ (กรัม)			238.1	258.2
ราคาคอมพาวด์ (บาท/กก.)			2,623.25	2,420.36
ผลิตภัณฑ์ยางเกรดการค้าราคา 3,760 บาท/กิโลกรัม*				

ราคายาง ณ วันที่ 20/07/59 ที่มา: http://www.rubberthai.com/price/today%20price/fob_price.htm

* Neutron Shielding Rubber, 2013, "**Showa-Rubber Co.,Ltd**., challenging the potential of rubber " (Japan)

5.3 ข้อเสนอแนะ

- ควรศึกษาสารตัวเติมป้องกันรังสีชนิดอื่นๆ เช่น ซาเมอร์เรียมออกไซด์ โบรอนคาร์ไบด์ และโบรอนไนไตรด์ เป็นต้น ในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ และทดสอบสมบัติด้านรังสีและสมบัติด้านความเป็นฉนวนกันไฟฟ้า
- ควรมีการศึกษาถึงปริมาณความเข้มของรังสีในการทดสอบ ที่ส่งผลต่อวัสดุเชิงประกอบยางเติมสารป้องกันรังสี

เอกสารอ้างอิง

1. สมพร จองคำ และ อารีรัตน์ คอนดวงแก้ว**, บทความสมาคมนิวเคลียร์แห่งประเทศไทย : โรงไฟฟ้านิวเคลียร์**, [Online], Available: http://www.nst.or.th/article/notes01/article010.html, [24 กรกฎาคม 2560].

2. ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ, เอกชัย วิมลมาลา, ธีระศักดิ์ หมากผิน และ ชัชวาลย์ กันทะลา, 2552, "การพัฒนาวัสดุและเทคโนโลยีการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์หลังคายางจากวัสดุผสมยาง ธรรมชาติกับผงขี้เลื่อยไม้" - **การประชุมวิชาการวิจัยยางพารา โครงการวิจัยแห่งชาติ: ยางพารา ฝ่ายอุตสาหกรรม สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (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 TiO_2/PU Topcoat for Roofing Applications", **Journal of Vinyl & Additive Technology**, Vol. 18, No. 3, pp. 184-191.

4. พงษ์ธร แซ่อุย, 2548, **"ยาง: ชนิดสมบัติและการใช้งาน"**, ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (เอ็มเทค), พิมพ์ครั้งที่ 2, หน้า 9-12, 30, 41, 54, 75-82.

5. เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร์, 2539, **"เทคโนโลยียาง"**, ภาควิชาวัสดุศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, หน้า 103, 141-147.

6. Levin E., 1971, **"Wood in Building"**, Compon Printing Ltd., UK. pp. 13-18.

7. Rowell, R.M., 2005, **Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites**, Chapter 3, CRC Press, Danvers, pp. 1-12.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

8. Sjostrom, E., 1992, **Wood Chemistry Fundamentals and Applications**, 2nd ed., Academic Press,Inc., USA., p. 11.

9. Bowyer, J.L., Shmulsky, R. and Haygreen, J.G., 2007, **Forest Products and Wood Science: An Introduction**, 5th ed, Blackwell Publishing Ltd.

10. สมภพ เลิศลักขณากุล, 2544, **ไม้เทียมพอลิเมอร์คอมโพสิตเส้นใยธรรมชาติจากพอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC) และเส้นใยยูคาลิปตัส**, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

11. พงษ์ธร แซ่อุย และ ชาคริต สิริสิงห, 2550, **"ยาง: กระบวนการผลิตและการทดสอบ"**, สำนักพิมพ์ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (เอ็มเทค), พิมพ์ครั้งที่ 1, หน้า 5-15.

12. นวลฉวี รุ่งธนเกียรติ, 2545, **"วิทยาศาสตร์นิวเคลียร์"**, สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, พิมพ์ครั้งที่ 1, หน้า 72-75, 103-105, 192-194.

13. **"การป้องกันอันตรายจากรังสี ระดับ 2"**, สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ กระทรวงวิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยี, สำนักพิมพ์คุรุสภาลาดพร้าว, หน้า 5, 8, 10-11.

14. กรรติกา ศิริเสนา, 2550, **"กัมมันตภาพรังสี พลังงานนิวเคลียร์ มนุษย์ สิ่งแวดล้อม และสังคม"**, สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, พิมพ์ครั้งที่ 1, หน้า 3-16.

15. **"ภาคตัดขวางนิวเคลียร์ (Nuclear Cross Sections)",** [Online] Available: http://e-book.ram.edu/e-book/p/PH426(50)/PH426-2.pdf. [24 กรกฎาคม 2560].

16. **"รังสีกับมนุษย์"**, [Online] Available: https://sites.google.com/site/supod45/sc30113/22557/room16/rangsi-kab-mnusy. [24 กรกฎาคม 2560].

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

17. สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ, **"จะเกิดอะไรขึ้น หากสารกัมมันตภาพรังสีเข้าสู่ร่างกายมากเกินไป",** [Online] Available: http://health.kapook.com/view24286.html. [24 กรกฎาคม 2560].

18. Elmahroug, Y., Tellili, B. and Souga, C., 2013, "Calculation of Gamma and Neutron Shielding Parameters for Some Materials Polyethylene-Based", **International Journal of Physics and Research (IJPR)**, Vol. 3, No. 1, pp. 33-40.

19. 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.

20. Gwaily, 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.

21. Gwaily, 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.

22. ศิรกุล กาญจนปฐมพร, 2555, **"การใช้โบรอนออกไซด์เพื่อผลิตเป็นวัสดุกำบังรังสีนิวตรอน"**, วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, สาขาวิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี ภาควิชาวิศวกรรมนิวเคลียร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

23. สมหมาย ช่างเขียน, 2553, "วัสดุกำบังรังสีแกมมาที่ผลิตจากยางธรรมชาติผสมเลดออกไซด์", **บทความวิจัยยางธรรมชาติ เล่มที่ 5**, โครงการวิจัยแห่งชาติ ยางพารา ฝ่ายอุตสาหกรรม สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย, หน้า 42-48.

24. กัลยาณี คุปตานนท์, เล็ก สีคง, ไตรภพ ผ่องสุวรรณ และ สมพงษ์ นนทพันธ์, 2551, "การใช้ยาง STR 5L ผสมผงเฟอร์ไรต์ป้องกันรังสีแกมมา", **วารสารวิจัย มข.**, ฉบับที่ 13 มีนาคม, หน้า 269-278.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

25. 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.

26. Chai, H., Tang, X., Ni, M., Chen, F., Zhang, Y., Chen, D. and Qiu, Y., 2015, "Preparation and Properties of Flexible Flame-Retardant Neutron Shielding Material Based on Methyl Vinyl Silicone Rubber", **Journal of Nuclear Materials**, Vol. 464, pp. 210–215.

27. Kemaloglu, S., Ozkoc G. and Aytac, A., 2010, "Properties of Thermally Conductive Micro and Nano Size Boron Nitride Reinforced Silicon Rubber Composites", **Thermochimica Acta**, Vol. 499, Nos. 1-2, pp. 40–47.

28. Feniak, G., 1975, "Scorch Retarders for Halaogenated Butyl", **U.S. Patent 3,865,763**.

29. Larson, M.P. and Larson, L.M., 1996, "Gamma Radiation Treated Material", **U.S.Patent 5,540,876**.

30. Osabohien, E. and Egboh, S.H.O., 2008, "Utilization of Bowstring Hemp Fiber as a Filler in Natural Rubber Compounds", **Journal of Applied Polymer Science**, Vol. 107, No. 1, pp. 210-214.

31. Sombatsompop, N., Wimolmala, E. and Markpin, T., 2007, "Fly-ash Particles and Precipitated Silica as Fillers in Rubbers. II. Effects of Silica Content and Si69-treatment in Natural Rubber/Styrene–butadiene Rubber Vulcanizates", **Journal of Applied Polymer Science**, Vol. 104, No. 5, pp. 3396-3405.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

32. Sombatsompop, N., Kantala, C. and Wimolmala, E., 2005, "Wood Sawdust Fibres as a Secondary Filler in Carbon Black Filled NR Vulcanizates", **Polymers & Polymer Composites**, Vol. 14, No. 4, pp. 1-17.

33. Agarwal, K., Setua, D. K. and Sekhar, K., 2005, "Scanning Electron Microscopy Study on the Influence of Temperature on Tear Strength and Failure Mechanism of Natural Rubber Vulcanizates", **Polymer Testing**, Vol. 24, No. 6, pp. 781-789.

34. Omnes, B., Thuillier, S., Pilvin, P., Grohens, Y. and Gillet, S., 2008, "Effective Properties of Carbon Black Filled Natural Rubber: Experiments and Modeling", **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, Vol. 39, No. 7, pp. 1141-1149.

35. Landel, R.F. and Nielsen, L.E., 1993, "Mechanical Properties of Polymers and Composites", 2nd Edition, Marcel Dekker, New York.

36. Pukanszky, B., Voros, G., 1993, "Mechanism of Interfacial Interactions in Particulate Filled Composites", **Composite Interfaces**, Vol. 1, No. 5, pp. 411-427.

37. Yoshinobu N., Miho Y., Masayoshi O., and Tsunetaka M., 1992, "Effects of Particle Size on Mechanical and Impact Properties of Epoxy Resin Filled with Spherical Silica", **Journal of Applied Polymer Science**, Vol. 45, No.7, pp. 1281-1289.

ภาคผนวก ก

ผลการวิเคราะห์ขนาดและการกระจายขนาดอนุภาคของสารตัวเติมป้องกันรังสี

ด้วยเครื่อง Mastersizer-2000

ตารางที่ ก.1 ผลการวิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของสารตัวเติมป้องกันรังสี

สารตัวเติมป้องกันรังสี	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (ไมครอน)/ จำนวนครั้งที่ทำการวิเคราะห์			ค่าเฉลี่ยขนาดอนุภาค (ไมครอน)
	1	2	3	
Boric acid				
ค่าเฉลี่ยของขนาดอนุภาค (โดยปริมาตร)	289.61	287.95	289.16	288.91 ± 0.86
10% โดยปริมาตรที่มีขนาดน้อยกว่าหรือเท่ากับ	75.61	75.02	76.72	75.78 ± 0.87
50% โดยปริมาตรที่มีขนาดน้อยกว่าหรือเท่ากับ	252.29	251.74	252.77	252.27 ± 0.51
90% โดยปริมาตรที่มีขนาดน้อยกว่าหรือเท่ากับ	562.97	558.02	558.83	559.94 ± 2.66
Boron oxide				
ค่าเฉลี่ยของขนาดอนุภาค (โดยปริมาตร)	271.11	269.70	269.04	269.95 ± 1.06
10% โดยปริมาตรที่มีขนาดน้อยกว่าหรือเท่ากับ	101.46	100.53	100.50	100.83 ± 0.55
50% โดยปริมาตรที่มีขนาดน้อยกว่าหรือเท่ากับ	253.22	251.41	251.43	252.02 ± 1.04
90% โดยปริมาตรที่มีขนาดน้อยกว่าหรือเท่ากับ	469.59	467.44	465.04	467.36 ± 2.28
Lead powder				
ค่าเฉลี่ยของขนาดอนุภาค (โดยปริมาตร)	449.92	451.98	449.92	450.61 ± 1.19
10%โดยปริมาตรที่มีขนาดน้อยกว่าหรือเท่ากับ	191.08	199.22	198.32	196.20 ± 4.46
50% โดยปริมาตรที่มีขนาดน้อยกว่าหรือเท่ากับ	399.52	402.98	400.20	400.90 ± 1.84
90% โดยปริมาตรที่มีขนาดน้อยกว่าหรือเท่ากับ	791.33	783.38	781.46	785.39 ± 5.23

Sample: Boric acid

System Details

Accessory Name :	Scirocco 2000	**Beam Length (mm) :**	10.00	**Obscuration (%) :**	2.00	**Residual (%) :**	0.197
Particle RI :	1.456	**Absorption :**	0.1	**Dispersant Name :**	Dry dispersion	**Dispersant RI :**	1.000

Result Statistics

Distribution Type :	Volume	**Concentration :**	0.0089 %Vol	**Specific Surface Area :**	0.0443 m²/g		
Mean Diameters :		**D (0.1) :**	75.61 um	**D (0.5) :**	252.29 um	**D (0.9) :**	562.97 um
D [4,3] :	289.61 um	**D [3,2] :**	135.5 um	**Span :**	1.932	**Uniformity :**	0.595

Size (µm)	Volume In %
0.020	0.00
0.023	0.00
0.027	0.00
0.032	0.00
0.037	0.00
0.043	0.00
0.050	0.00
0.059	0.00
0.068	0.00
0.080	0.00
0.093	0.00
0.108	0.00
0.126	0.00
0.147	

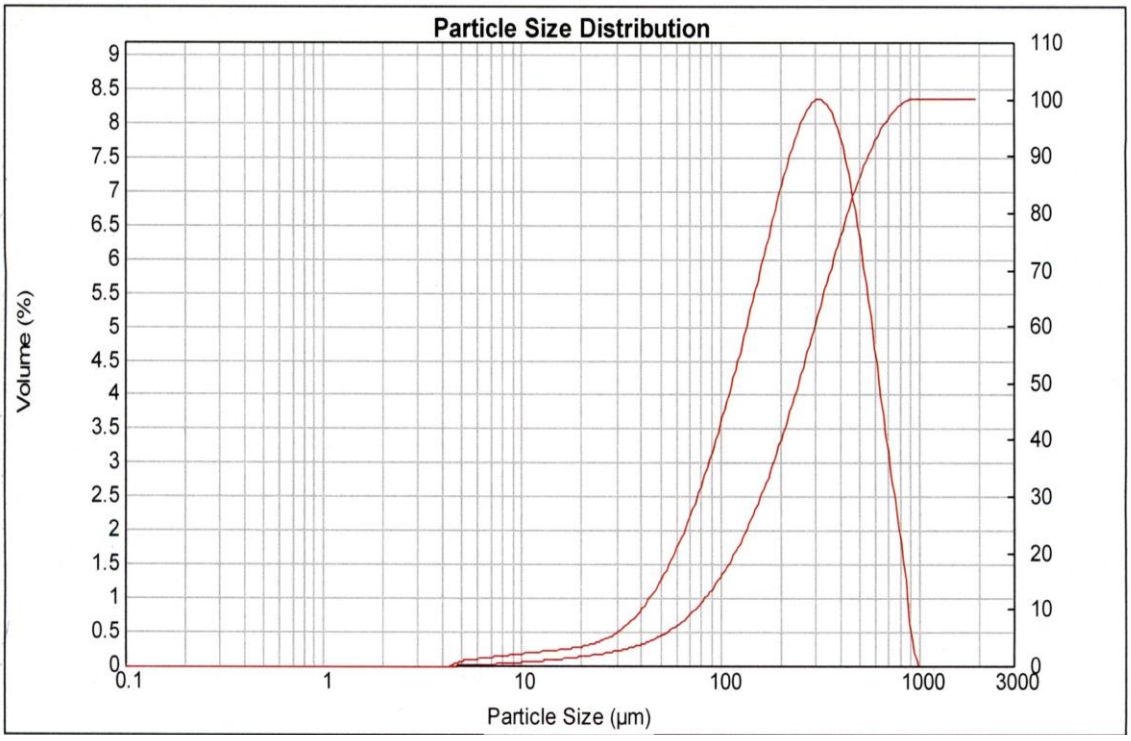
Size (µm)	Volume In %
0.147	0.00
0.172	0.00
0.200	0.00
0.233	0.00
0.272	0.00
0.317	0.00
0.370	0.00
0.431	0.00
0.502	0.00
0.586	0.00
0.683	0.00
0.796	0.00
0.928	0.00
1.082	

Size (µm)	Volume In %
1.082	0.00
1.262	0.00
1.471	0.00
1.715	0.00
2.000	0.00
2.332	0.00
2.719	0.00
3.170	0.00
3.696	0.00
4.309	0.00
5.024	0.03
5.857	0.09
6.829	0.11
7.962	0.13

Size (µm)	Volume In %
7.962	0.16
9.283	0.18
10.823	0.20
12.619	0.22
14.713	0.24
17.154	0.27
20.000	0.31
23.318	0.37
27.187	0.46
31.698	0.61
36.957	0.81
43.089	1.08
50.238	1.42
58.573	

Size (µm)	Volume In %
58.573	1.84
68.291	2.32
79.621	2.88
92.832	3.50
108.234	4.20
126.191	4.95
147.128	5.75
171.539	6.56
200.000	7.32
233.183	7.94
271.871	8.31
316.979	8.33
369.570	7.92
430.887	

Size (µm)	Volume In %
430.887	7.06
502.377	5.82
585.729	4.36
682.910	2.85
796.214	1.40
928.318	0.02
1082.339	0.00
1261.915	0.00
1471.285	0.00
1715.392	0.00
2000.000	



รูปที่ ก.1 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคของสารตัวเติมป้องกันรังสีชนิดกรดบอริก

Sample: Boron oxide

System Details

Accessory Name :	Scirocco 2000	**Beam Length (mm) :**	10.00	**Obscuration (%) :**	1.64	**Residual (%) :**	0.412
Particle RI :	1.625	**Absorption :**	0.1	**Dispersant Name :**	Dry dispersion	**Dispersant RI :**	1.000

Result Statistics

Distribution Type :	Volume	**Concentration :**	0.0085 %Vol	**Specific Surface Area :**	0.0383 m²/g		
Mean Diameters :		**D (0.1) :**	101.46 um	**D (0.5) :**	253.22 um	**D (0.9) :**	469.59 um
D [4,3] :	271.11 um	**D [3,2] :**	156.77 um	**Span :**	1.454	**Uniformity :**	0.444

Size (µm)	Volume In %
0.020	0.00
0.023	0.00
0.027	0.00
0.032	0.00
0.037	0.00
0.043	0.00
0.050	0.00
0.059	0.00
0.068	0.00
0.080	0.00
0.093	0.00
0.108	0.00
0.126	0.00
0.147	

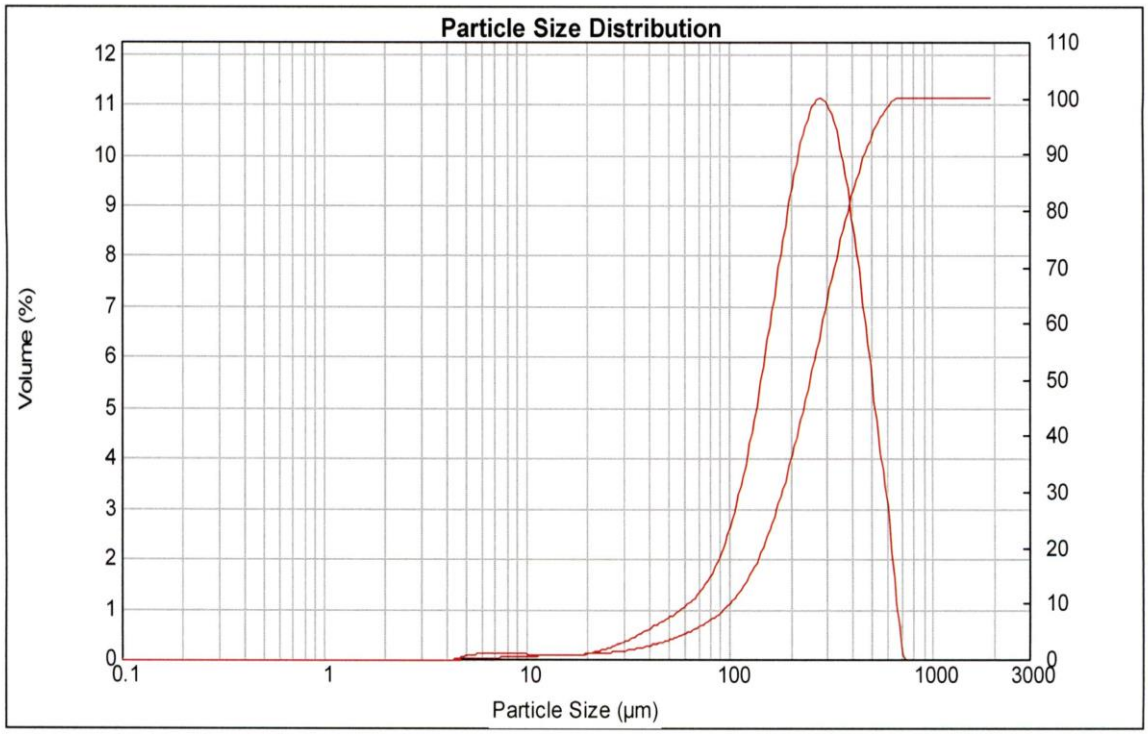
Size (µm)	Volume In %
0.147	0.00
0.172	0.00
0.200	0.00
0.233	0.00
0.272	0.00
0.317	0.00
0.370	0.00
0.431	0.00
0.502	0.00
0.586	0.00
0.683	0.00
0.796	0.00
0.928	0.00
1.082	

Size (µm)	Volume In %
1.082	0.00
1.262	0.00
1.471	0.00
1.715	0.00
2.000	0.00
2.332	0.00
2.719	0.00
3.170	0.00
3.696	0.00
4.309	0.03
5.024	0.10
5.857	0.12
6.829	0.12
7.962	

Size (µm)	Volume In %
7.962	0.12
9.283	0.11
10.823	0.09
12.619	0.08
14.713	0.08
17.154	0.10
20.000	0.14
23.318	0.21
27.187	0.32
31.698	0.45
36.957	0.59
43.089	0.74
50.238	0.91
58.573	

Size (µm)	Volume In %
58.573	1.10
68.291	1.39
79.621	1.84
92.832	2.53
108.234	3.56
126.191	4.92
147.128	6.54
171.539	8.26
200.000	9.81
233.183	10.85
271.871	11.14
316.979	10.52
369.570	9.04
430.887	

Size (µm)	Volume In %
430.887	6.98
502.377	4.67
585.729	2.48
682.910	0.06
796.214	0.00
928.318	0.00
1082.339	0.00
1261.915	0.00
1471.285	0.00
1715.392	0.00
2000.000	



รูปที่ ก.2 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคของสารตัวเติมป้องกันรังสีชนิดโบรอนออกไซด์

Sample: Lead powder

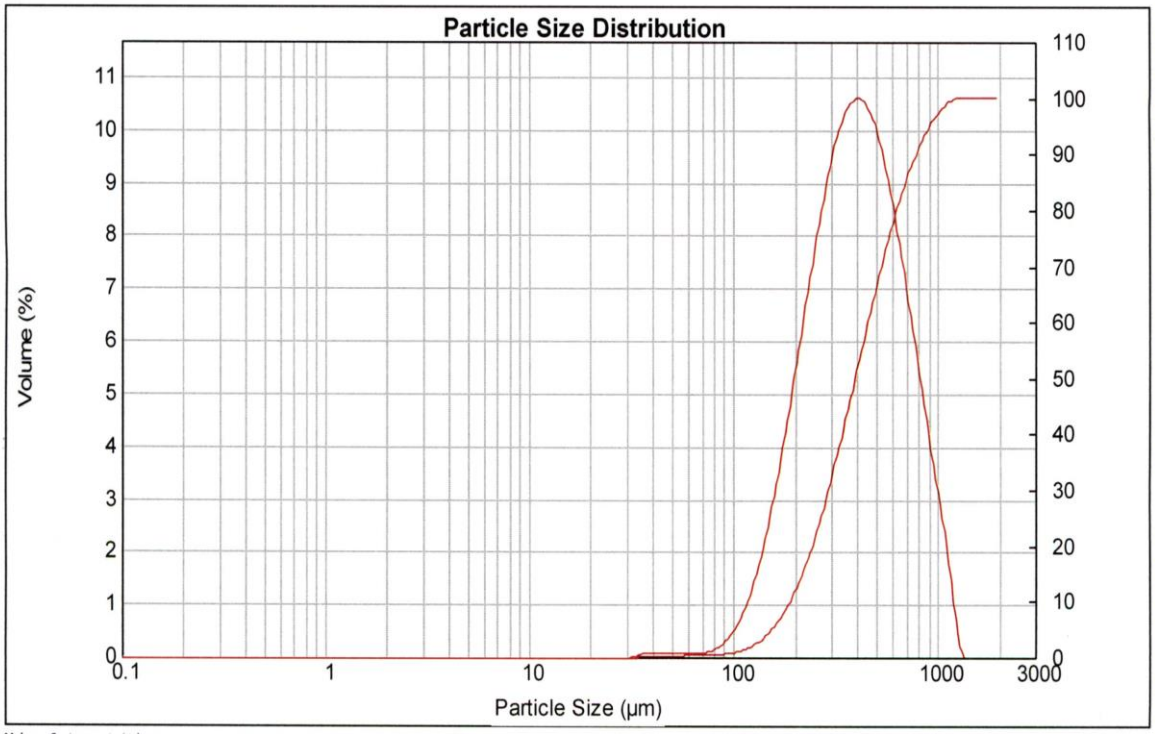
System Details

Accessory Name :	Scirocco 2000	**Beam Length (mm) :**	10.00	**Obscuration (%) :**	1.55	**Residual (%) :**	0.918
Particle RI :	2.010	**Absorption :**	0.1	**Dispersant Name :**	Dry dispersion	**Dispersant RI :**	1.000

Result Statistics

Distribution Type :	Volume	**Concentration :**	0.0173 %Vol	**Specific Surface Area :**	0.0181 m²/g		
Mean Diameters :		**D (0.1) :**	191.08 um	**D (0.5) :**	399.52 um	**D (0.9) :**	791.33 um
D [4,3] :	449.92 um	**D [3,2] :**	332.21 um	**Span :**	1.502	**Uniformity :**	0.46

Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %
0.020	0.00	0.147	0.00	1.082	0.00	7.962	0.00	58.573	0.07	430.887	10.43
0.023	0.00	0.172	0.00	1.262	0.00	9.283	0.00	68.291	0.10	502.377	9.61
0.027	0.00	0.200	0.00	1.471	0.00	10.823	0.00	79.621	0.21	585.729	8.29
0.032	0.00	0.233	0.00	1.715	0.00	12.619	0.00	92.832	0.49	682.910	6.66
0.037	0.00	0.272	0.00	2.000	0.00	14.713	0.00	108.234	1.01	796.214	4.95
0.043	0.00	0.317	0.00	2.332	0.00	17.154	0.00	126.191	1.84	928.318	3.24
0.050	0.00	0.370	0.00	2.719	0.00	20.000	0.00	147.128	3.00	1082.339	1.56
0.059	0.00	0.431	0.00	3.170	0.00	23.318	0.00	171.539	4.45	1261.915	0.02
0.068	0.00	0.502	0.00	3.696	0.00	27.187	0.00	200.000	6.08	1471.285	0.00
0.080	0.00	0.586	0.00	4.309	0.00	31.698	0.05	233.183	7.72	1715.392	0.00
0.093	0.00	0.683	0.00	5.024	0.00	36.957	0.09	271.871	9.15	2000.000	
0.108	0.00	0.796	0.00	5.857	0.00	43.089	0.10	316.979	10.17		
0.126	0.00	0.928	0.00	6.829	0.00	50.238	0.08	369.570	10.63		
0.147		1.082		7.962		58.573		430.887			



รูปที่ ก.3 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคของสารตัวเติมป้องกันรังสีชนิดผงตะกั่ว

ภาคผนวก ข

ผลสมบัติด้านรังสี สมบัติการคงรูป และสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ที่เติมโบรอนออกไซด์ที่ปริมาณ 50 - 100 phr

ตารางที่ ข.1 ผลสมบัติด้านรังสี สมบัติการคงรูป และสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ที่เติมโบรอนออกไซด์

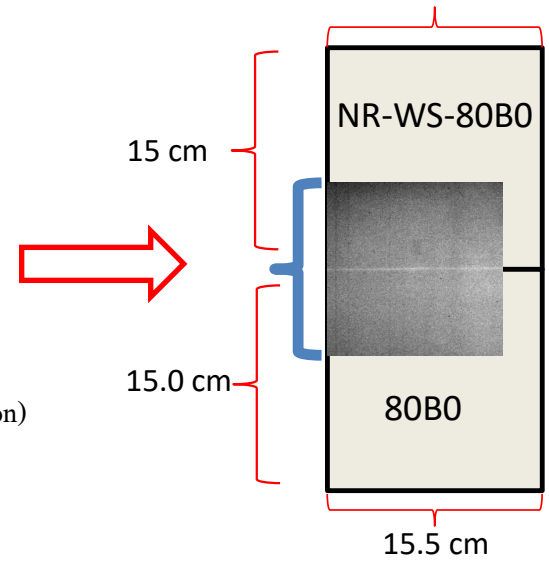
Properties	without Wood Sawdust					
	NR	**NR-50BO**	**NR-60BO**	**NR-70BO**	**NR-80BO**	**NR-100BO**
Neutron transmission I/I_0 (%)	96 ± 1	68 ± 1	65 ± 1	62 ± 1	60 ± 1	54 ± 1
Scorch Time (ts_1) (sec)	34 ± 2	33 ± 2	47 ± 3	43 ± 4	31 ± 19	51 ± 2
Cure Time (tc_{90}) (sec)	184 ± 1	98 ± 3	1065 ± 52	155 ± 3	147 ± 13	182 ± 4
Tensile modulus at 100% elongation (MPa)	3.04 ± 0.17	1.56 ± 0.05	1.19 ± 0.1	1.23 ± 0.02	1.28 ± 0.06	1.64 ± 0.05
Tensile strength (MPa)	20.19 ± 1.04	6.04 ± 0.16	2.58 ± 0.06	2.76 ± 0.15	2.60 ± 0.09	2.94 ± 0.09
Elongation at break (%)	589 ± 47	493 ± 13	363 ± 26	307 ± 8	305 ± 6	286 ± 14
Hardness (shore A)	74 ± 1	67 ± 1	63 ± 1	64 ± 1	65 ± 1	67 ± 1
Properties	**with Wood Sawdust**					
	NR-WS	**NR-WS-50BO**	**NR-WS-60BO**	**NR-WS-70BO**	**NR-WS-80BO**	**NR-WS-100BO**
Neutron transmission I/I_0 (%)	98 ± 1	68 ± 1	62 ± 1	59 ± 1	58 ± 1	54 ± 1
Scorch Time (ts_1) (sec)	42 ± 8	49 ± 3	51 ± 1	56 ± 6	76 ± 2	82 ± 5
Cure Time (tc_{90}) (sec)	222 ± 12	1021 ± 67	1421 ± 28	1461 ± 44	1553 ± 11	1504 ± 3
Tensile modulus at 100% elongation (MPa)	3.73 ± 0.07	2.33 ± 0.07	2.65 ± 0.06	2.38 ± 0.13	2.39 ± 0.18	1.93 ± 0.51
Tensile strength (MPa)	15.45 ± 0.31	3.19 ± 0.07	2.53 ± 0.06	2.62 ± 0.04	2.73 ± 0.13	1.76 ± 0.09
Elongation at break (%)	460 ± 10	238 ± 12	174 ± 2	184 ± 17	169 ± 12	183 ± 20
Hardness (shore A)	73 ± 1	76 ± 1	75 ± 1	77 ± 1	80 ± 1	80 ± 1

ภาคผนวก ค

ผลการวิเคราะห์ Imaging plate ด้วยเทคนิค Neutron radiography

Experimental condition

Technique:	Neutron radiography
Radiation source:	Am-Be 50Ci
Source to detector: distance:	60 cm
Exposure time:	90 minutes
Area of test:	5 cm x 12 cm (NR-WS-80B0)
	5 cm x 12 cm (80B0)
Scanner:	GE FLA7000 (100 µm resolution)
Analysis software:	Image J



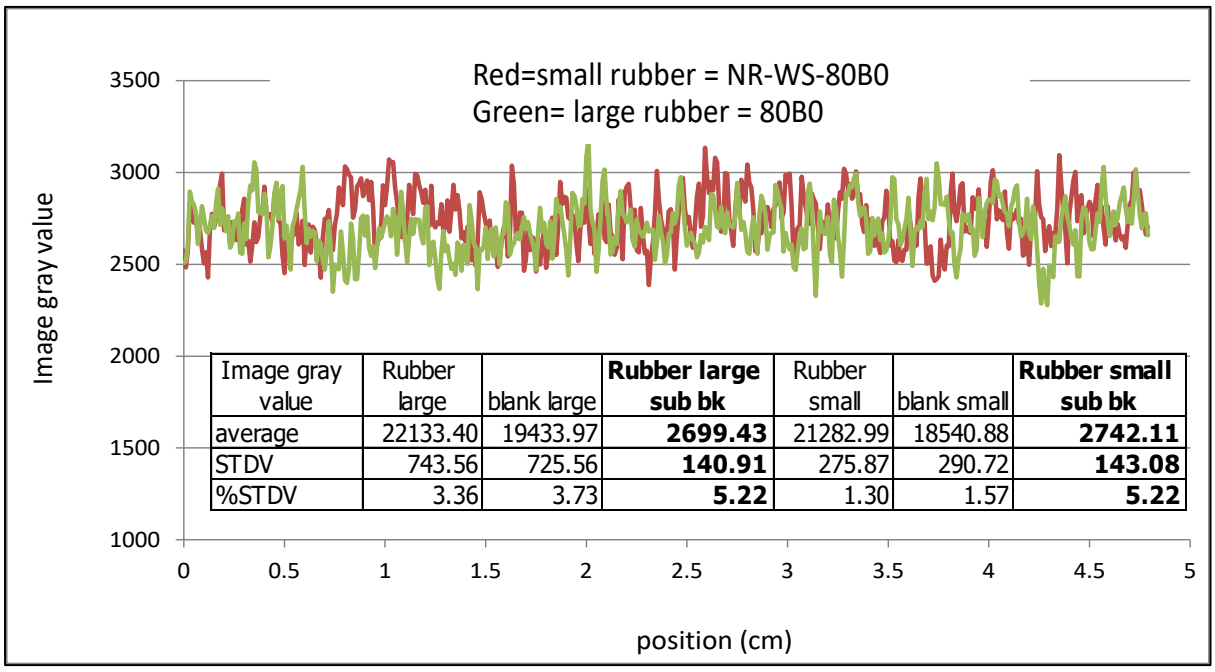


Image gray value	Rubber large	blank large	**Rubber large sub bk**	Rubber small	blank small	**Rubber small sub bk**
average	22133.40	19433.97	**2699.43**	21282.99	18540.88	**2742.11**
STDV	743.56	725.56	**140.91**	275.87	290.72	**143.08**
%STDV	3.36	3.73	**5.22**	1.30	1.57	**5.22**

ภาคผนวก ง

ผลงานตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับนานาชาติ

เรื่อง “Potential use of NR and wood/NR composites as thermal neutron shielding materials” ในวารสารวิชาการ Polymer Testing

[Ninyong K, Wimolmala E, Sombatsompop N and Saenboonruang K, 2017,
Potential Use of NR and wood/NR Composites as Thermal Neutron Shielding Materials,
Polymer Testing, Vol. 59 (May), pp. 336-343.]

Polymer Testing 59 (2017) 336–343

Contents lists available at ScienceDirect

Polymer Testing

journal homepage: www.elsevier.com/locate/polytest

Material Properties

Potential use of NR and wood/NR composites as thermal neutron shielding materials

Keeratikarn Ninyong [a], Ekachai Wimolmala [a, **], Narongrit Sombatsompop [a], Kiadtisak Saenboonruang [b, *]

[a] Polymer Processing and Flow (P-PROF) Research Group, Division of Materials Technology, School of Energy, Environment and Materials, King Mongkut's University of Technology Thonburi (KMUTT), 126 Pracha-Uthit, Thungkru, Bangkok 10140, Thailand

[b] Department of Applied Radiation and Isotopes, Faculty of Science, Kasetsart University (KU), 50 Ngamwongwan Rd, Ladyao, Chatuchak, Bangkok 10900, Thailand

ARTICLE INFO

Article history:
Received 6 January 2017
Available online 24 February 2017

Keywords:
Radiation shielding
Neutron shielding
Mechanical properties
Wood/natural rubber
Natural rubber
Radiation protective agent

ABSTRACT

This work investigated thermal neutron shielding, cure characteristics and mechanical properties of natural rubber (NR) and wood/NR composites with addition of either boron oxide (B_2O_3) or boric acid (H_3BO_3) for potential use as flexible shielding materials. The results showed that increase in the B_2O_3 or H_3BO_3 content from 0 to 80 phr and 0–50 phr in 10-phr increments, respectively, could improve thermal neutron shielding properties but reduced overall tensile properties, while the addition of 20-phr wood particles in wood/NR composites improved surface hardness and dimensional stability. Furthermore, the values of the Half Value Layer (HVL), which represent the required thickness of material to attenuate half of the incoming neutrons, were evaluated at a content of 80-phr B_2O_3 by varying thickness of both NR and wood/NR composites from 2.5 mm to 20.0 mm in 2.5-mm increments. The results indicated that the HVL values were approximately the same at 3.5 mm. Hence, the overall properties investigated in this work suggested great potential of these composites to be used as effective thermal neutron shielding materials.

© 2017 Elsevier Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

Since the discovery of neutrons by James Chadwick in 1932, neutron knowledge and technology have been significantly improved due to the fast growing numbers of neutron applications, including neutron imaging [1,2], Boron Neutron Capture Therapy (BNCT) for cancer treatments [3], explosive detection [4], and elemental analysis [5]. Despite great benefits to humankind, exposure to excessive doses of neutrons could fatally harm workers and the general public [6,7]. To ensure a safe working environment, a radiation safety principle called "As Low As Reasonably Achievable" or "ALARA" is applied for all nuclear-related activities [8]. Along with distance and time management, shielding is one of the three important parts of ALARA, and its importance is especially emphasized in some unavoidable cases where workers are required to work in close proximity to radioactive sources for extended periods of time [9].

Since neutrons are electrically neutral, they cannot be easily stopped via electromagnetic interactions in the same way that charged particles can. Instead, shielding against thermal neutrons relies on nuclear interactions between neutrons and some high-neutron-absorption-cross-section nuclei. These interactions would convert neutrons to charged particles, such as protons or alpha particles, which are much easier to shield due to their very short ranges in most solid materials, typically at micrometer levels. Specifically, in the case of ^{10}B nuclei, which have a relatively high neutron absorption cross section of 3835 barns and are widely used as active thermal neutron protective agents, the interaction between an incoming thermal neutron and a ^{10}B nucleus yields a ^{7}Li and a 1.47-MeV alpha particle emitted in opposite directions to each other for momentum conservation.

Several neutron shielding materials have been developed and their qualities have been greatly improved in the past decade. For structural materials requiring strength and hardness, such as in spacecraft or in nuclear facilities, polyethylene (PE)-based neutron

* Corresponding author.
** Corresponding author.
E-mail addresses: ekachai.wim@kmutt.ac.th (E. Wimolmala), fscikssa@ku.ac.th (K. Saenboonruang).

http://dx.doi.org/10.1016/j.polymertesting.2017.02.020
0142-9418/© 2017 Elsevier Ltd. All rights reserved.

shielding materials are preferable choices due to their toughness and resistance to abrasion [10]. Examples of PE-based materials are PE/boron nitride composites in space radiation shielding [11], PE/flexboron sheets in high-energy linear accelerator mazes [12], and HDPE/nano-B_4C composites in general neutron facilities [13]. On the other hand, for applications that require flexibility of neutron shielding materials, such as the cover of a cylindrical neutron source, ethylene-propylene based materials could be used [14]. Furthermore, to increase performance of materials, additional properties, such as flame retardation and heat resistance, have also been introduced to existing shielding materials [15–17].

Natural rubber (NR), of which Thailand is the world's No.1 producer and exporter, shows great potential to be used as an alternative flexible neutron shielding material due to its flexibility, resistant to abrasion, toughness and high hydrogen content for neutron moderation. Examples of NR used in thermal neutron shielding materials are composites of NR/borax [18], NR/B_4C [19] and NR/H_3BO_3 [18–20]. However, NR composites still have room for further development to improve the dimensional stability and surface hardness by introducing wood particles into the matrix. Previously, wood/NR composites were developed for use in roofing applications [21] where strength, UV protection, and thermal insulation were important. Since wood particles have high rigidity, they promote better dimensional stability, higher stiffness, and higher surface hardness to the composites. Considering the success of wood/NR composites in roofing applications, the expansion of possible uses to other applications, especially as thermal neutron shield sheets, is interesting. To further increase the shielding properties, varying the content of either boron oxide (B_2O_3) or boric acid (H_3BO_3) has been introduced to the mixtures to study their changes in cure characteristics, mechanical properties, morphology and thermal neutron shielding properties.

2. Experimental

2.1. Materials and chemicals

Natural rubber (NR, STR20) used as the main matrix for this work was supplied by PI Industry Co., Ltd. Bangkok, (Thailand). The vulcanizing formulation, which includes all the chemicals and their suppliers, for making NR and wood/NR composites is given in Table 1.

2.2. Neutron protective agents

Two boron compounds were used as neutron protective agents; boron oxide (B_2O_3) supplied by Sigma-Aldrich Co., Ltd. (Singapore) and boric acid (H_3BO_3) supplied by Siam Beta Group Co., Ltd. Samutprakarn, (Thailand). B_2O_3 or H_3BO_3 were mixed with the ingredients shown in Table 1 at contents varying from 0 to 80 phr and 0 to 50 phr in 10-phr increments, respectively.

2.3. Preparation of NR and wood/NR composites

The NR and wood/NR composites were prepared by masticating the NR on a laboratory two roll mill (Yong Fong Machinery Co., Ltd., Samut Sakhon, Thailand) for 5 min. The masticated NR was then compounded with the prepared chemicals and neutron protective agents for a further 25 min. It should be noted that the wood/NR composites had additional 20-phr wood particles to improve hardness and dimensional stability [22]. The wood particles were chemically surface-treated with a silane coupling agent (KBM 603A supplied by KISCO (T) Co., Ltd., Bangkok, Thailand), oven-dried for 6 h at 100 °C until constant weight was achieved before the treated wood particles were mixed with the rubber. The experimental procedures for surface treatment of wood particles using KBM 603A can be found elsewhere [23].

2.4. Cure characteristics

The scorch time (t_{s1}), cure time at 90%, (t_{c90}) and torque differences were evaluated using an oscillating die rheometer (ODR GT 70-70-S2, GOTECH Testing Machine, Inc., Taichung, Taiwan) following ISO 3417 at a test temperature of 160 °C. The determined cure time was used for vulcanizing the NR and wood/NR composites in a hydraulic press at 160 kg/cm^2 using 2.5, 10.0 or 20.0 mm thick and 15 cm × 15 cm molds.

2.5. Mechanical properties

The tensile properties consisting of tensile modulus, tensile strength and elongation at break for NR and wood/NR vulcanizates were investigated using a universal testing machine (Autograph AG-I 5 kN, Shimadzu, Tokyo, Japan), according to ISO 37. It should be noted that, for comparative purposes, the tensile "modulus" in this work was reported at 100% elongation, the level to which the hardest rubber compound could be stretched. The tensile testing speed used for all specimens was 500 mm/min. The hardness for all NR and wood/NR vulcanizates was tested according to ISO 868 using a durometer (Shore A) Model GS-719G (Japan).

2.6. Scanning electron microscope studies

A scanning electron microscope (SEM) JEOL (JSM-6610LV) was used to study the distribution of fillers in NR and wood/NR vulcanizates at 10-kV accelerating voltage with back-scattered electrons (BSE). It should be noted that the samples were coated with gold using an SPI Supplies (SPI-MODULE, England) ion sputtering device for 60 s before performing SEM.

Table 1
Material formulations of NR and wood/NR composites including chemicals and their suppliers.

Ingredient	Content (phr[a])	Supplier
Natural rubber (STR 20)	100 (part)	PI Industry Co., Ltd. Bangkok, (Thailand)
Zinc oxide; ZnO	5.0	Thai-Lysaght Co., Ltd. Pathum Thani, (Thailand)
Stearic acid	2.0	Imperial Industrial Chemicals Co., Ltd. Bangkok, (Thailand)
Mercaptobenzthaisoles; MBT	0.5	CMC advance Co., Ltd. Samut Sakhon, (Thailand)
Diphenylguanidine; DPG	2.0	Siam Chemicals Co., Ltd. Samutprakarn, (Thailand)
Sulphur powder 450 mesh	3.0	Zeon advanced Polymix Co., Ltd. Bangkok, (Thailand)
Carbon black (HAF N330)	40.0	PI Industry Co., Ltd. Bangkok, (Thailand)
Wood particles treated with 0.5 wt% Silane coupling agent	20.0	V.P. Wood Co., Ltd. Samutprakarn, (Thailand)
UV stabilizer (CHIGUARD 234)	0.1	Behn Meyer Chemical (T) Co., Ltd. Bangkok, (Thailand)
Anti-oxidant (TY 1076)	0.5	Global Connections PLC. Samutprakarn, (Thailand)
Anti-ozonant (REDEZON 515P)	3.0	Behn Meyer Chemical (T) Co., Ltd. Bangkok, (Thailand)

[a] phr: parts per hundred of rubber by weight.

2.7. Neutron shielding properties

The neutron transmission ratios for all NR and wood/NR samples were tested at the Thailand Institute of Nuclear Technology (TINT) using the experimental setup shown in Fig. 1.

The neutron source used in the tests was a 300-mCi ^{241}Am/Be sealed in a thick paraffin cylinder used as a radial neutron shield. On the top of the cylinder, an open 10-cm-diameter slot was covered with a stack of 5-cm high-density-polyethylene (HDPE) sheets for thermalizing emitted fast neutrons. The selection of 5-cm HDPE sheets was based on the highest yield of thermal neutrons measured by a 50.8 mm × 19.8 mm x 140.9 mm rectangular ^{3}He-filled neutron detector. Samples of 15 cm × 15 cm NR and wood/NR vulcanizates were placed between HDPE sheets and the neutron detector with a space of approximately 5 cm between HDPE sheets and the neutron detector. The neutron detector was powered by a high voltage power supply and its output was sent through a set of amplifiers for signal processing. An oscilloscope was used for visual inspection of signals and background noise. Signals that were larger than threshold levels were counted for a duration of 1 min using a timer/counter module. For each sample, five independent tests were performed and averaged counts (I) were recorded. Averaged counts without samples placed between HDPE sheets and the detector were recorded as the initial or reference counts (I_0).

Two cases of the neutron shielding properties in NR and wood/NR composites were investigated in this work. The first investigation examined the relationship between the B_2O_3 or H_3BO_3 content and neutron shielding properties by varying the B_2O_3 or H_3BO_3 content from 0 to 80 phr and 0–50 phr in 10-phr increments, respectively. Averaged numbers of the neutron detection count (I) were recorded to calculate neutron transmission ratios (I/I_0). The second investigation involved examining the relationship between the thickness of samples and their neutron shielding properties by calculating the neutron transmission ratio (I/I_0) for thickness of samples that varied from 2.5 to 20.0 mm in 2.5-mm increments.

3. Results and discussion

3.1. Cure characteristics

As shown in Table 2, the scorch and cure times of NR and wood/NR composites with H_3BO_3 increased with increasing H_3BO_3 content. This could be because H_3BO_3 acted as an acidic retardant on activators and accelerators, thus increasing both the scorch and cure times [24]. On the other hand, for composites with B_2O_3, scorch times were relatively constant but cure times gradually decreased with increasing B_2O_3 content up to 50 phr in NR composites and 40 phr in NR/wood composites, but increased with greater B_2O_3 contents, especially in the case of wood/NR composites. These effects could be explained by the fact that B_2O_3, which is a metal oxide, could act as a co-activator during the chemical vulcanization processes when appropriately added to the composites, hence reducing the cure times of the NR and wood/NR composites. However, too much B_2O_3 could inversely obstruct the action of activators and accelerators, thus increasing cure times [25]. Another interesting result was that the wood/NR composites had slightly higher scorch and cure times than the NR composites because hydroxyl groups in wood particles could absorb activators and accelerators and slow down the chemical vulcanization processes [22]. In terms of the torque difference between the maximum torque and minimum torque, which represents crosslink density, the values decreased with increasing B_2O_3 and H_3BO_3 content, with faster rates in the case of H_3BO_3. This behavior resulted from both B_2O_3 and H_3BO_3 being agglomerated which interrupted connections between the molecular chains of rubber by sulfur, thus leading to a decrease in crosslinking and lower torque differences.

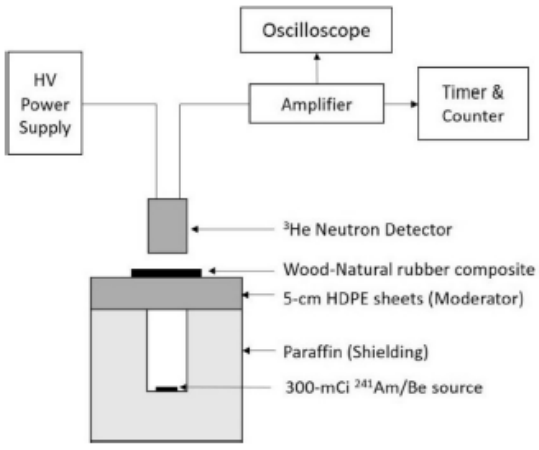


Fig. 1. Setup for neutron transmission ratio tests.

3.2. Mechanical properties

As shown in Table 3 and Table 4, the surface hardness (Shore A) of the NR and wood/NR composites with B_2O_3 was roughly constant for all contents, while gradually decreased in the case of the composites with H_3BO_3. On the other hand, the tensile stress at 100% elongation, tensile strength and elongation at break tended to decrease with increasing B_2O_3 and H_3BO_3 contents, because both B_2O_3 and H_3BO_3 reduced the crosslink density and torque differences with greater effect in the case of H_3BO_3. This behavior led to the decrease in overall mechanical properties, which could be seen from the morphology of the NR composites and wood/NR composites with either 50-phr H_3BO_3 or 50-phr B_2O_3 shown in Fig. 2a-2b. Furthermore, the filler-filler interaction from adding too much B_2O_3, which caused the decrease in tensile properties, could also be observed in Fig. 3. It should be noted that the wood/NR composites generally had lower tensile properties than the NR composites due to a dilution effect by the wood particles in the NR matrix. This effect would also involve poor interfacial compatibility of fillers, as shown in the SEM images in Fig. 2c–d, which show more voids, and the decrease in crosslink density of the NR composites seen in the torque differences in Table 2. Detailed discussion of the effects of wood particles can be found elsewhere [22]. Despite causing the decrease in tensile properties, the rigidity of wood particles could improve dimensional stability of the NR composites, as shown in Fig. 4. The wood/NR composites and NR composites with 80-phr B_2O_3 had an initial size of 15 cm × 15 cm; however, after leaving both composites at room temperature for 150 days, the dimensions of the wood/NR composites expanded to 16 cm × 16 cm, while the NR composite expanded to 18 cm × 18 cm. These dimensional expansions of NR and wood/NR composites were caused by the addition of B_2O_3, which was regarded as solid lubricant that reduced the crosslink densities of the vulcanizates as evidenced by the decreases in torque differences given in Table 2. This claim was supported by the results of T. Ozdemir et al. [26], who found lower crosslink densities and higher creep rates in EPDM when B_2O_3 was added. It was noted that the wood/NR composites had less dimensional expansion than the NR vulcanizates. This was due to the higher rigidities of the wood/NR composites as a result of wood particles.

Table 2
Scorch time, cure time, and torque differences of NR composites and wood/NR composites with additions of B_2O_3 or H_3BO_3. Numbers after ± represent the standard deviation of the average values.

B_2O_3 content (phr)	NR composites			Wood/NR composites		
	Scorch time (sec)	Cure time (sec)	Torque differences (dN m)	Scorch time (sec)	Cure time (sec)	Torque differences (dN m)
0	34 ± 2	184 ± 1	74 ± 11	42 ± 8	222 ± 12	79 ± 1
10	37 ± 1	138 ± 2	35 ± 1	41 ± 4	206 ± 7	65 ± 1
20	35 ± 2	99 ± 2	39 ± 1	49 ± 11	202 ± 9	55 ± 2
30	37 ± 3	101 ± 3	41 ± 1	43 ± 3	173 ± 2	40 ± 1
40	35 ± 2	97 ± 1	45 ± 1	41 ± 3	125 ± 2	28 ± 1
50	33 ± 2	98 ± 3	44 ± 1	49 ± 3	1021 ± 67	23 ± 1
60	47 ± 3	1065 ± 52	18 ± 1	51 ± 1	1421 ± 28	17 ± 1
70	43 ± 4	155 ± 3	28 ± 2	56 ± 6	1461 ± 44	15 ± 1
80	31 ± 19	147 ± 13	22 ± 9	76 ± 2	1553 ± 11	11 ± 1
H_3BO_3 content (phr)	Scorch time (sec)	Cure time (sec)	Torque differences (dN m)	Scorch time (sec)	Cure time (sec)	Torque differences (dN m)
0	34 ± 2	184 ± 1	74 ± 11	42 ± 8	222 ± 12	79 ± 1
10	40 ± 5	196 ± 8	51 ± 5	56 ± 6	376 ± 12	33 ± 2
20	47 ± 5	228 ± 3	33 ± 0	101 ± 11	1080 ± 11	15 ± 0
30	49 ± 2	272 ± 3	26 ± 0	155 ± 10	1533 ± 11	9 ± 1
40	74 ± 9	433 ± 10	20 ± 0	159 ± 11	1566 ± 10	8 ± 0
50	81 ± 3	609 ± 8	20 ± 0	214 ± 23	1609 ± 41	7 ± 1

Table 3
Mechanical properties of NR composites with the additions of B_2O_3 or H_3BO_3. Numbers after ± represent the standard deviation of the average values.

B_2O_3 content (phr)	Hardness (Shore A)	Tensile modulus at 100% elongation (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)
0	74 ± 1	3.04 ± 0.17	20.19 ± 1.04	589 ± 47
10	65 ± 1	2.20 ± 0.09	17.33 ± 0.80	586 ± 2
20	65 ± 1	1.38 ± 0.03	9.35 ± 0.20	614 ± 12
30	66 ± 1	1.41 ± 0.06	8.10 ± 0.22	586 ± 21
40	66 ± 1	1.58 ± 0.06	7.04 ± 0.29	507 ± 21
50	67 ± 1	1.56 ± 0.05	6.04 ± 0.16	493 ± 13
60	63 ± 1	1.19 ± 0.01	2.58 ± 0.06	363 ± 26
70	64 ± 1	1.23 ± 0.02	2.76 ± 0.15	307 ± 8
80	65 ± 1	1.28 ± 0.06	2.60 ± 0.09	305 ± 6
H_3BO_3 content (phr)	Hardness (Shore A)	Tensile modulus at 100% elongation (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)
0	74 ± 1	3.04 ± 0.17	20.19 ± 1.04	589 ± 47
10	69 ± 1	2.76 ± 0.05	16.20 ± 1.00	501 ± 18
20	65 ± 1	1.88 ± 0.02	10.02 ± 0.37	526 ± 13
30	61 ± 2	1.68 ± 0.04	7.51 ± 0.17	491 ± 14
40	57 ± 1	1.39 ± 0.04	4.85 ± 0.09	454 ± 11
50	51 ± 1	1.29 ± 0.03	4.28 ± 0.07	445 ± 8

Table 4
Mechanical properties of wood/NR composites with the additions of B_2O_3 or H_3BO_3. Numbers after ± represent the standard deviation of the average values.

B_2O_3 content (phr)	Hardness (Shore A)	Tensile modulus at 100% elongation (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)
0	76 ± 1	3.73 ± 0.07	15.45 ± 0.31	460 ± 10
10	72 ± 1	3.05 ± 0.05	9.21 ± 0.49	379 ± 14
20	72 ± 1	2.72 ± 0.09	6.72 ± 0.50	336 ± 21
30	73 ± 1	2.53 ± 0.08	5.11 ± 0.05	303 ± 11
40	73 ± 1	2.12 ± 0.02	4.34 ± 0.07	331 ± 5
50	76 ± 1	2.33 ± 0.07	3.19 ± 0.06	238 ± 2
60	75 ± 1	2.65 ± 0.06	2.53 ± 0.06	174 ± 2
70	77 ± 1	2.38 ± 0.13	2.62 ± 0.04	184 ± 17
80	80 ± 1	2.39 ± 0.18	2.73 ± 0.13	169 ± 12
H_3BO_3 content (phr)	Hardness (Shore A)	Tensile modulus at 100% elongation (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)
0	76 ± 1	3.73 ± 0.07	15.45 ± 0.31	460 ± 10
10	69 ± 1	2.12 ± 0.03	5.04 ± 0.17	337 ± 11
20	66 ± 1	1.31 ± 0.06	2.50 ± 0.02	310 ± 12
30	63 ± 1	1.30 ± 0.05	1.94 ± 0.05	234 ± 19
40	60 ± 1	1.23 ± 0.01	1.62 ± 0.05	194 ± 7
50	55 ± 1	1.32 ± 0.05	1.44 ± 0.12	135 ± 14

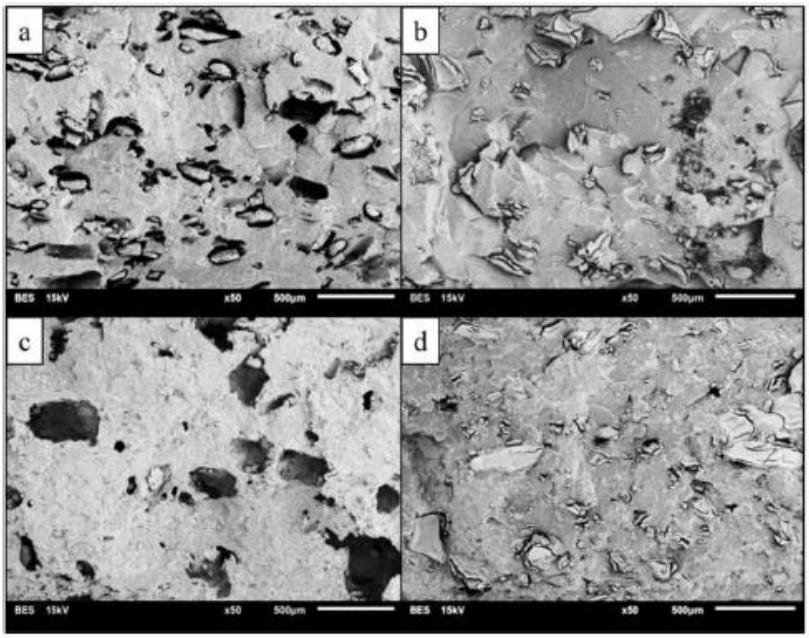


Fig. 2. SEM images of (a) NR composites with 50-phr H_3BO_3, (b) NR composites with 50-phr B_2O_3, (c) wood/NR composites with 50-phr H_3BO_3, and (d) wood/NR composites with 50-phr B_2O_3.

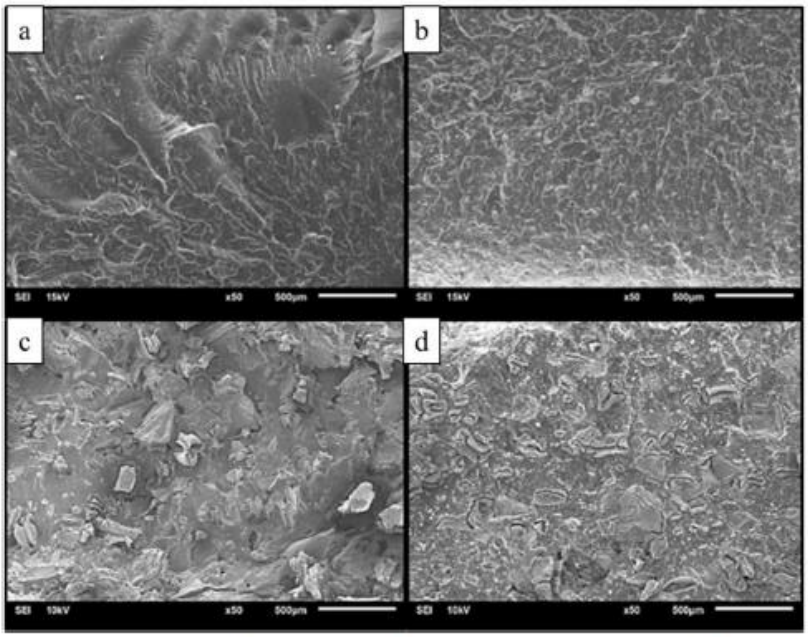


Fig. 3. SEM images of (a) NR composites, (b) wood/NR composites, (c) NR composites with 80-phr B_2O_3 and (d) wood/NR composites with 80-phr B_2O_3.

When considering the surface characteristics of the NR composites and wood/NR composites with 50-phr B_2O_3 or 50-phr H_3BO_3, the 2.5-mm-thick NR composites and wood/NR composites with H_3BO_3 showed wavy surfaces, while the 2.5-mm-thick NR and wood/NR composites with B_2O_3 had much smoother surfaces, as shown in Fig. 5a–d. Furthermore, when attempting to prepare 10-mm-thick NR and wood/NR samples with 50-phr H_3BO_3, the samples showed cracks along the edges, as seen in Fig. 5e–f, and

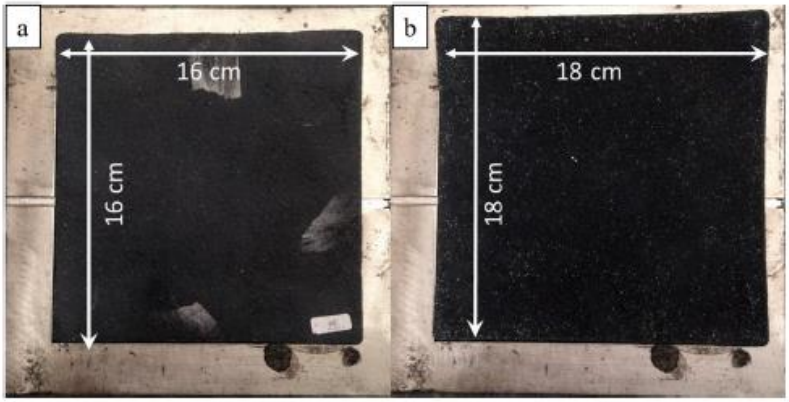


Fig. 4. An improvement in dimensional stability of (a) wood/NR composites compared to (b) NR composites. NR composites and wood/NR composites were mixed with 80-phr B_2O_3. The initial size of samples was 15 cm × 15 cm and they were kept at room temperature for 150 days.

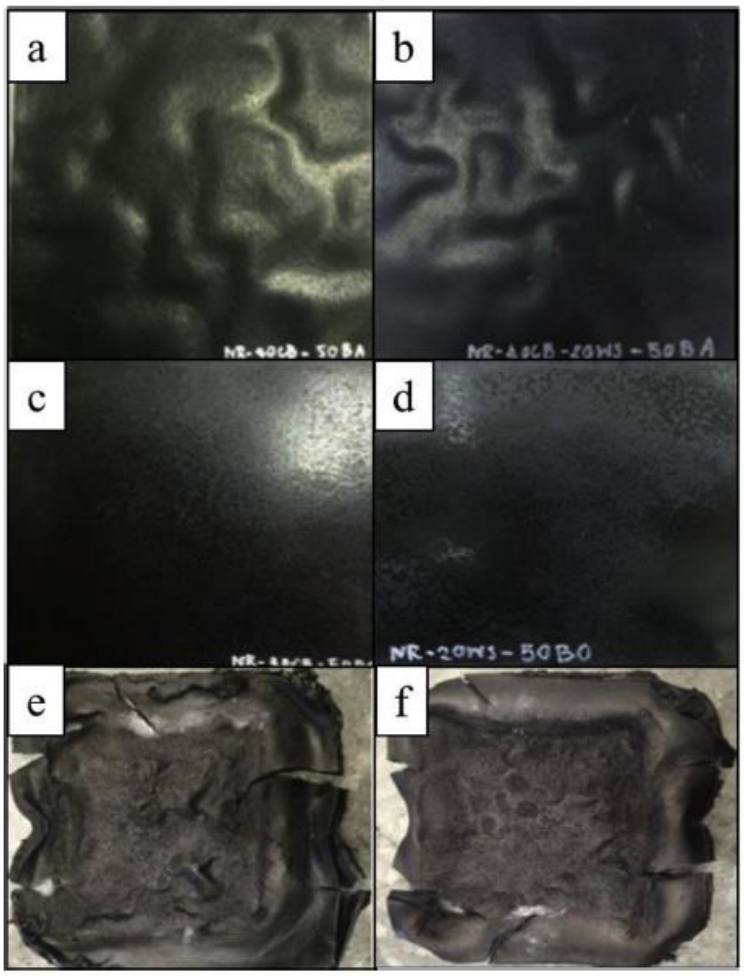


Fig. 5. Wavering surfaces of (a) 2.5-mm-thick NR composites with 50-phr H_3BO_3 and (b) 2.5-mm-thick wood/NR composites with 50-phr H_3BO_3, and smooth surfaces of (c) 2.5-mm-thick NR composites with 50-phr B_2O_3 and (d) 2.5-mm-thick wood/NR composites with 50-phr B_2O_3. Figures (e) and (f), which are a 10-mm-thick NR composites with 50-phr H_3BO_3 and a 10-mm-thick wood/NR composites with 50-phr H_3BO_3, respectively, show cracks along edges during molding processes.

these samples could not be successfully prepared. These results could be due to the prolonged curing of the NR composites containing H_3BO_3. This led to uneven curing between the inner and outer parts across the sample thickness, with the outer surface curing much faster while the inner still heated up and expanded, resulting in surface cracks. On the other hand, the 10-mm and 20-mm samples with up to 80-phr B_2O_3 could be successfully prepared.

3.3. Neutron shielding properties

As shown in Table 5, for 2.5-mm-thick NR and wood/NR samples, the ability to shield thermal neutrons improved as the B_2O_3 or H_3BO_3 contents increased. This improvement could be seen by the decrease in the neutron transmission ratios (I/I_0) from ~98% (0 phr) to ~58% (80 phr) in the case of B_2O_3 and from ~98% (0 phr) to ~77% (50 phr) in the case of H_3BO_3. This was due to the increase in numbers of ^{10}B nuclei, which led to more interactions and better neutron attenuation [19,20]. However, for the same B_2O_3 and H_3BO_3 content, composites with B_2O_3 had lower neutron transmission ratios than composites with H_3BO_3 due to the higher percentage of boron nuclei in B_2O_3 (31% by weight of boron nuclei in B_2O_3 and 18% by weight of boron nuclei in H_3BO_3). Schemes to show how the increase in content of B_2O_3 or H_3BO_3 could increase the number of interactions and improve the thermal neutron shielding properties are shown in Fig. 6, in which Fig. 6b has twice the number of ^{10}B nuclei compared to Fig. 6a, leading to higher chances of interactions between thermal neutrons and ^{10}B nuclei and better thermal neutron absorption inside the material.

Another interesting neutron shielding property was the relationship between the thickness of sample and the neutron transmission ratio. As shown in Fig. 7, the ability to shield neutrons using NR composites and wood/NR composites improved as the shielding material became thicker. The effect could be seen in the decrease in the neutron transmission ratios (I/I_0) from 100% to ~37% (10 mm) and ~28% (20 mm) in both composites, where the values of Half Value Layer (HVL), which represent the required thickness of materials to attenuate half of the incoming neutrons, were approximately the same at 3.5 mm. These values were better than the HVL results in typical concrete (HVL ~ 5–6 cm) [27] and NR/Styrene butadiene rubber (SBR) with 60-phr B_2O_3 (HVL ~ 10 mm) [28]. Schemes to show how the increase in the thicknesses of the NR composites and wood/NR composites led to the increase in numbers of ^{10}B nuclei and the improvement in the neutron shielding ability are shown in Fig. 8.

As a result, the NR and wood/NR composites with the additions of either B_2O_3 or H_3BO_3 feature flexibility, a favorable environmental profile and high neutron shielding properties, thus showing great potential to be used as flexible thermal neutron shielding materials.

Table 5
Neutron transmission ratios (I/I_0) of 2.5-mm-thick NR and wood/NR composites with the addition of B_2O_3 or H_3BO_3. Numbers after ± represent the standard deviation of the average values.

Neutron transmission ratios; I/I_0 (%)		
B_2O_3 content (phr)	NR composites	Wood/NR composites
0	98.2 ± 0.1	95.6 ± 0.1
10	85.9 ± 0.1	87.4 ± 0.1
20	79.6 ± 0.1	79.5 ± 0.1
30	73.7 ± 0.1	75.6 ± 0.1
40	70.6 ± 0.1	71.8 ± 0.1
50	68.1 ± 0.1	68.5 ± 0.1
60	62.2 ± 0.1	65.2 ± 0.1
70	58.9 ± 0.1	62.1 ± 0.1
80	57.9 ± 0.1	60.2 ± 0.1
H_3BO_3 content (phr)	NR composites	Wood/NR composites
0	98.2 ± 0.1	95.6 ± 0.1
10	90.2 ± 0.1	89.1 ± 0.1
20	84.9 ± 0.1	86.2 ± 0.1
30	81.5 ± 0.1	82.9 ± 0.1
40	79.3 ± 0.1	80.1 ± 0.1
50	77.3 ± 0.1	78.3 ± 0.1

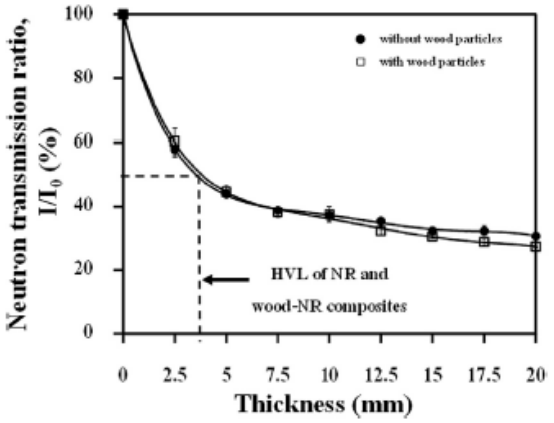


Fig. 7. Neutron transmission ratio (I/I_0) of NR and wood/NR composites contained 80-phr B_2O_3 with varying thicknesses.

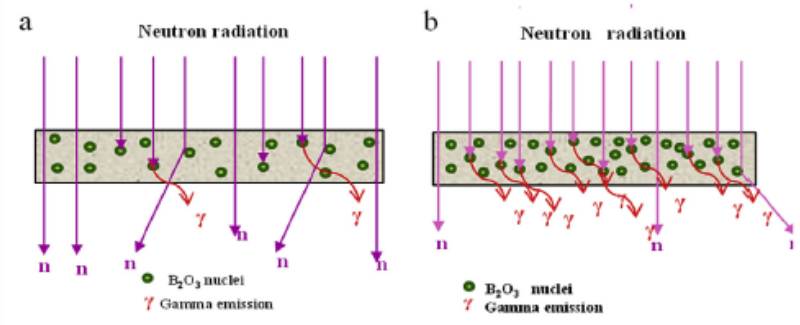


Fig. 6. Schemes of the relationship between contents of B_2O_3 or H_3BO_3 and neutron shielding properties.

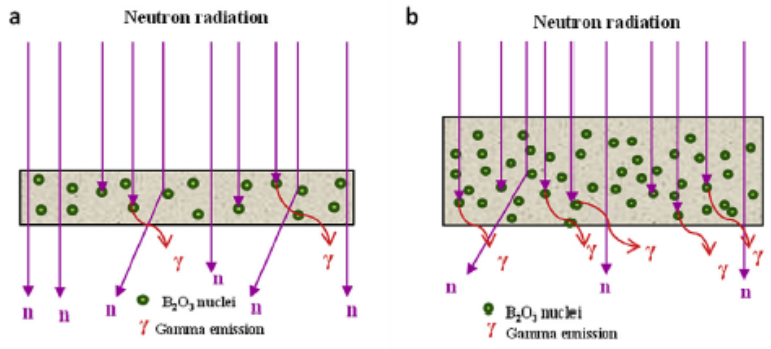


Fig. 8. Schemes of the relationship between thicknesses of (a) NR composites and wood/NR composites (thin) and (b) NR composites and wood/NR composites (thick) neutron shielding properties.

4. Conclusions

Flexible thermal neutron shielding materials based on NR and wood/NR composites with addition of B_2O_3 or H_3BO_3 were developed. The results showed that wood particles provided dimensional stability and surface hardness improvement in the wood/NR composites, while the B_2O_3 and H_3BO_3 worked effectively as active fillers to shield thermal neutrons. Furthermore, the results showed that increase in the content of B_2O_3 or H_3BO_3 from 0 to 80 phr and 0–50 phr in 10-phr increments, respectively, improved thermal neutron shielding ability but slightly reduced overall tensile properties. The HVL values for both NR and wood/NR composites with the addition of 80-phr B_2O_3 were approximately the same at 3.5 mm. Based on the experimental results in this work, it could be concluded that NR and wood/NR composites have great potential to be used as flexible and effective thermal neutron shielding materials.

Acknowledgements

This work was supported by the Thailand Research Fund under Grant number RDG5750096 and Grant number RDG5850094; and the Office of the Higher Education Commission (OHEC) under the National Research University (NRU) Program. We would also like to express our appreciation to the Thailand Institute of Nuclear Technology (TINT) for their support regarding equipment and facilities.

References

[1] D. Kramer, J. Zhang, R. Shimoi, E. Lehmann, A. Wokaun, K. Shinohara, G.G. Scherer, In situ diagnostic of two-phase flow phenomena in polymer electrolyte fuel cells by neutron imaging: Part A. experimental, data treatment, and quantification, Electrochim. Acta 50 (2005) 2603.
[2] J. Zhang, D. Kramer, R. Shimoi, Y. Ono, E. Lehmann, A. Wokaun, K. Shinohara, G.G. Scherer, In situ diagnostic of two-phase flow phenomena in polymer electrolyte fuel cells by neutron imaging: Part B. material variations, Electrochim. Acta 51 (2006) 2715.
[3] S. Chandra, T. Ahmed, R.F. Barth, G.W. Kabalka, J. Microsc, Quantitative Evaluation of Boron Neutron Capture Therapy (BNCT) Drugs for Boron Delivery and Retention at Subcellular-scale Resolution in Human Glioblastoma Cells with Imaging Secondary Ion Mass Spectrometry (SIMS), vol 254, 2014, p. 146.
[4] Z.D. Whetstone, K.J. Kearfott, A review of conventional explosives detection using active neutron interrogation, J. Radioanal. Nucl. Chem. 301 (2014) 629.
[5] A. Ittipongse, R. Fungklin, Neutron activation for analyzing elements in material, Key. Eng. Mater 675–676 (2016) 700.
[6] L. Walsh, Neutron relative biological effectiveness for solid cancer incidence in the Japanese A-bomb survivors: an analysis considering the degree of independent effects from γ-ray and neutron absorbed doses with hierarchical partitioning, Radiat. Environ. Biophys. 52 (2013) 29.
[7] J. Kiefer, Biological Radiation Effects, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1990.
[8] T.J. McGiff, R.A. Danforth, E.E. Herschaft, Maintaining radiation exposures as low as reasonably achievable (ALARA) for dental personnel operating portable hand-held x-ray equipment, Health. Phys. 103 (2) (2012) 179.
[9] T. Tanimoto, N. Uchida, Y. Kodama, T. Teshima, S. Taniguchi, Safety of workers at the Fukushima Daiichi nuclear power plant, Lancet 377 (2011) 1489.
[10] C. Harrison, E. Burgett, N. Hertel, E. Grulke, Polyethylene/boron composites for radiation shielding applications, AIP Conf. Proc. 969 (2008) 484.
[11] C. Harrison, S. Weaver, C. Bertelsen, E. Burgett, N. Hertel, E. Grulke, Polyethylene/boron nitride composites for space radiation shielding, J. Appl. Polym. Sci. 109 (2008) 2529.
[12] R. Lalonde, The effect of neutron-moderating materials in higher-energy linear accelerator mazes, Phys. Med. Biol. 42 (1997) 335.
[13] J. Kim, B. Lee, Y.R. Uhm, W.H. Miller, Enhancement of thermal neutron attenuation of nano-B_4C, -BN dispersed neutron shielding polymer nanocomposites, J. Nucl. Mater 453 (1–3) (2014) 48.
[14] T. Lida, H. Taniuchi, K. Fujisawa, Highly effective neutron shielding for transport/storage packaging, Intl. J. Radioact. Mat. Transp. 2 (1–3) (1991) 79.
[15] A.M. Sukegawa, Y. Anayama, S. Ohnishi, S. Sakurai, A. Kaminaga, K. Okuno, Development of flexible neutron-shielding resin as an additional shielding material, J. Nucl. Sci. Technol. 48 (2011) 585.
[16] A.M. Sukegawa, Y. Anayama, K. Okuno, S. Sakurai, A. Kaminaga, Flexible heat resistant neutron shielding resin, J. Nucl. Mater 417 (2011) 850.
[17] H. Chai, X. Tang, M. Ni, F. Chen, Y. Zhang, D. Chan, Y. Qiu, Preparation and properties of flexible flame-retardant neutron shielding material based on methyl vinyl silicone rubber, J. Nucl. Mater 464 (2015) 210.
[18] O. Onjun, N. Laothong, R. Picha, W. Ratanathongchai, T. Onjun, Natural rubber blocks as thermal neutron shields, Prog. Nucl. Sci. Techn 4 (2014) 631.
[19] S.E. Gwaily, M.M. Badawy, H.H. Hassan, M. Madani, Characterization and neutron shielding behavior of dehydrated magnesium borate minerals synthesized via solid-state method, Polym. Test 21 (2002) 129.
[20] S.E. Gwaily, H.H. Hassan, M.M. Badawy, M. Madani, Natural rubber composites as thermal neutron radiation shields: II – H3BO3/NR composites, Polym. Test 21 (2002) 513.
[21] W. Yamsaengsung, N. Sombatsompop, Foam characteristics, peel strength and thermal conductivity for wood/NR and expanded EPDM laminates for roofing applications, J. Macromol. Sci. Phys. 47 (2008) 967.
[22] N. Sombatsompop, C. Kantala, E. Wimolmala, Wood sawdust fibres as a secondary filler in carbon black filled NR vulcanizates, Polym. Polym. Compos 14 (2006) 331.
[23] N. Sombatsompop, K. Chaochanchaikul, Average mixing torque, tensile and impact properties, and thermal stability of poly(vinyl chloride)/sawdust composites with different silane coupling agents, J. Appl. Polym. Sci. 96 (2005) 213.
[24] E. Osabohien, S.H.O. Egboh, Utilization of bowstring hemp fiber as a filler in natural rubber compounds, J. Appl. Polym. Sci. 107 (2008) 210.
[25] N. Sombatsompop, E. Wimolmala, T. Markpin, Fly-ash particles and precipitated silica as fillers in rubbers: part II. Effects of silica content and Si69-treatment in NR/SBR vulcanizates, J. Appl. Polym. Sci. 104 (2007) 3396.
[26] T. Ozdemir, A. Gungor, I.A. Reyhancan, Flexible neutron shielding composite material of EPDM rubber with boron trioxide: mechanical, thermal investigations and neutron shielding tests, Radiat. Phys. Chem. 131 (2017) 7.
[27] M.H. Kharita, M. Takeyeddin, M. Alnassar, S. Yousef, Development of special radiation shielding concretes using natural local materials and evaluation of their shielding characteristics, Progr. Nucl. Energ 50 (2008) 33.
[28] C. Jumpee, D. Wongsawang, Innovative neutron shielding materials composed of natural rubber-styrene butadiene rubber blends, boron oxide and iron (III) oxide, J. Phys. Conf. Ser. 611 (2015) 012.

ภาคผนวก จ

สมบัติเชิงกลหลังการใช้งานจริง เวลา 5 เดือน

ชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ที่เติมโบรอนออกไซด์

Properties	without Wood Sawdust (Month)				
	1	2	3	4	5
Tensile modulus at 100% elongation (MPa)	1.39 ± 0.07	0.64 ± 0.02	0.36 ± 0.01	0.99 ± 0.06	0.60 ± 0.01
Tensile strength (MPa)	2.98 ± 0.07	1.62 ± 0.07	0.47 ± 0.02	1.11 ± 0.03	1.39 ± 0.05
Elongation at break (%)	320 ± 11	308 ± 11	209 ± 19	146 ± 18	290 ± 12
Hardness (Shore A)	63 ± 1	62 ± 1	49 ± 1	70 ± 1	61 ± 1
Properties	**with Wood Sawdust (Month)**				
	1	2	3	4	5
Tensile modulus at 100% elongation (MPa)	1.52 ± 0.06	0.96 ± 0.04	0.99 ± 0.02	1.00 ± 0.06	1.04 ± 0.02
Tensile strength (MPa)	2.11 ± 0.09	1.00 ± 0.05	1.05 ± 0.03	1.10 ± 0.07	1.22 ± 0.05
Elongation at break (%)	225 ± 7	123 ± 4	130 ± 8	139 ± 6	153 ± 13
Hardness (Shore A)	72 ± 1	71 ± 1	69 ± 1	69 ± 1	68 ± 1

ภาคผนวก ฉ

การเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลและสมบัติการกำบังรังสี ชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ที่เติมโบรอนออกไซด์ กับผลิตภัณฑ์แผ่นกำบังรังสีเกรดการค้า

Properties	Commercials product [1]	NR Composites With B_2O_3 at 60-80 phr [2]	Wood/NR Composites With B_2O_3 at 60-80 phr [2]
Tensile strength (MPa)[3]	6.48	2.58-2.76	2.53-2.73
Elongation at break (%)[3]	432	305-363	169-184
Hardness (Shore A) [3]	69	63-65	75-80
Linear attenuation coefficient, μ (m^{-1}) [4]	169.75 (5.13 mm)	189.92-218.60 (2.5 mm)	171.08-203.00 (2.5 mm)
Applications	แผ่นหุ้มเครื่องปฏิกรณ์ /แผ่นผนังห้องปฏิบัติการทางรังสี/ ชุดป้องกันรังสี		

[1] Neutron Shielding Rubber, 2013," Showa-Rubber Co., Ltd., challenging the potential of "rubber. (Japan)

[2] Ninyong K, Wimolmala E, Sombatsompop N and Saenboonruang K, 2017, Potential Use of NR and wood/NR Composites as Thermal Neutron Shielding Materials, **Polymer Testing,** Vol. 59 (May): pp. 336-343.

[3] ผลทดสอบโดยห้องปฏิบัติการกลุ่มวิจัย P-PROF, มจธ.

[4] ผลทดสอบโดยห้องปฏิบัติการสถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (สทน.)