

บล็อกยางกำบังนิวตรอนและรังสีแกมมาจากยางธรรมชาติ

Neutron and gamma radiation shielding block from natural rubber

11

อรรสา อ่อนจันทร์¹, นิชาภา บัวสุวรรณ¹
Orasa Onjun¹, Nichapa Buasuwan¹

บทคัดย่อ

บล็อกยางกำบังนิวตรอนและรังสีแกมมาถูกพัฒนาขึ้นจากยางธรรมชาติผสมสารประกอบโบรอนและตะกั่วออกไซด์ โดยในการศึกษานี้เลือกศึกษาสารประกอบโบรอนสองประเภท คือ บอแรกซ์ (borax) และกรดบอริก (boric acid) ผลการศึกษาสมบัติการกำบังเทอร์มัลนิวตรอน (thermal neutron) จากต้นกำเนิดรังสีอเมริกันเบรลเลียม (Am241/Be) พบว่าบล็อกยางกำบังรังสีที่เตรียมขึ้นจากสารประกอบโบรอนทั้งสองประเภทมีความสามารถในการกำบังนิวตรอนได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งนี้ประสิทธิภาพการกำบังนิวตรอนจะเพิ่มขึ้นตามความหนาและปริมาณของธาตุโบรอนในบล็อกยางกำบังรังสี ถึงแม้ว่ากรดบอริกจะมีปริมาณของร้อยละของธาตุโบรอนต่อหน่วยน้ำหนักมากกว่าบอแรกซ์ แต่บล็อกยางกำบังรังสีที่ผสมสารบอแรกซ์สามารถกำบังนิวตรอนได้ดีกว่าบล็อกยางที่เตรียมจากกรดบอริก นอกจากนี้ยังได้ศึกษาสมบัติการกำบังรังสีแกมมาที่เกิดจากการการชนของนิวตรอนกับอะตอมของโบรอนโดยการเติมสารประกอบตะกั่วลงไปในบล็อกยางกำบังรังสีที่เตรียมขึ้นอีกด้วย ผลจากการศึกษาการกำบังรังสีแกมมาโดยการเตรียมบล็อกยางธรรมชาติที่เติมทั้งสารประกอบโบรอนและตะกั่วพบว่า สามารถการกำบังรังสีแกมมาได้ในระดับที่เกณฑ์กำหนดด้านความปลอดภัยไว้ งานวิจัยยังได้ศึกษาสมบัติทางกายภาพพื้นฐานของบล็อกยางกำบังรังสี ได้แก่ ความแข็ง ความต้านแรงดึงและความยืดเมื่อขาด พบว่าวัสดุกำบังรังสีที่มีปริมาณสารประกอบโบรอนสูงชันจะมีค่าสมบัติทางกายภาพลดลง

Abstract

A neutron and gamma radiation shielding block was developed based on natural rubber mixed with boron compounds and lead oxide. In this study, two types of boron compounds, including borax and boric acid, were considered. This shielding block was exposed to the radiation from an ²⁴¹Am/Be radiation source. It was found that both types of the rubber shielding blocks can efficiently reduce thermal neutrons, where its efficiency increases with the thickness and boron concentration. Although the amount of boron per weight of boric acid was higher than that of borax, the radiation shield efficiency of the rubber shielding block mixed with borax was higher. In addition, lead was mixed into the rubber shielding block to absorb the gamma ray radiated from the neutron absorption. It was found that the rubber shielding block with boron compound and lead can efficiently absorb both neutron and gamma radiation. However, the decrease of physical properties of those rubber shielding blocks, including hardness, tensile strength, and elongation at break, were also found.

คำสำคัญ: วัสดุกำบังรังสี, ยางธรรมชาติ, โบรอน, ตะกั่ว

Keywords: Radiation shielding, Natural rubber, Boron, Lead

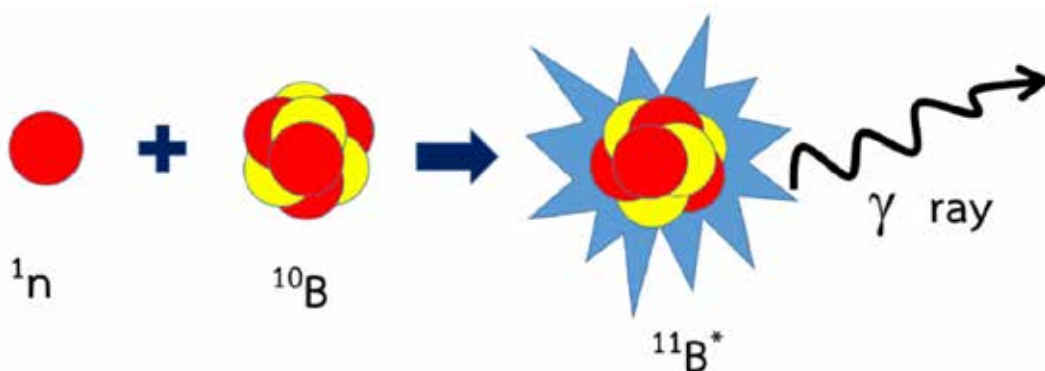
¹กรมวิทยาศาสตร์บริการ

*Corresponding author E-mail address: Orasa@dss.go.th

1. บทนำ (Introduction)

ปัจจุบันมีการประยุกต์ใช้ด้านกำเนิดรังสีในงานด้านต่างๆ มากมาย เช่น ด้านการศึกษา ด้านการวิจัย ด้านการแพทย์ ด้านอุตสาหกรรม และโรงไฟฟ้าพลังนิวเคลียร์ ในปัจจุบันนี้ กิจกรรมเหล่านี้มีแนวโน้มเพิ่มมากยิ่งขึ้น อาทิ การใช้วัสดุกำบังรังสีในการแพทย์ในส่วนของการรักษาโรคมะเร็ง เครื่องเอกซเรย์ และอุปกรณ์กักเก็บรังสีในโรงพยาบาล เพื่อสร้างความมั่นใจในความปลอดภัยสำหรับกิจกรรมที่เกี่ยวข้องกับรังสี การใช้วัสดุกำบังรังสี (radiation shield) เป็นมาตรการด้านความปลอดภัยที่ได้ผลอย่างดียิ่งและมีใช้กันอย่างแพร่หลาย ผลสัมฤทธิ์ในการลดปริมาณรังสีนั้นขึ้นอยู่กับสมบัติและความหนาของวัสดุกำบังรังสีรวมถึงความเข้มของรังสี การกำบังรังสีที่กล่าวถึงครอบคลุมทั้งการแผ่รังสีของอนุภาคนิวตรอนและอิเล็กตรอน และการแผ่รังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าพลังงานสูง ได้แก่ รังสีแกมมาและเอกซเรย์ จากการสำรวจพบว่าในปัจจุบันมีการใช้พอลิเอทิลีนหรือยางสังเคราะห์ผสมกับสารประกอบของโบรอนหรือลิเทียมในการผลิตวัสดุกำบังนิวตรอน และใช้ตะกั่วออกไซด์ในการผลิตวัสดุกำบังรังสีแกมมา แต่วัสดุกำบังรังสีเหล่านี้มีราคาค่อนข้างสูงและยังมีข้อจำกัดไม่ทั่วถึงในกิจกรรมทางด้านรังสีในหลายๆ ด้าน

การพัฒนาเทคโนโลยีวัสดุกำบังรังสีนี้เป็นสิ่งจำเป็นและมีประโยชน์ต่อภาคอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมการแพทย์ ด้านพลังงาน ด้านเกษตรและชีวภาพ นอกจากจะทำให้เกิดองค์ความรู้ด้านรังสีกับวัสดุแล้ว จะทำให้สามารถผลิตวัสดุกำบังที่มีความเหมาะสมและนำมาใช้ได้ตรงวัตถุประสงค์ของผู้ใช้มากขึ้น งานวิจัยนี้มีแนวความคิดที่นำยางธรรมชาติมาผสมกับสารประกอบของโบรอนเพื่อทำเป็นวัสดุกำบังนิวตรอนเนื่องจากภาคตัดขวางของการดูดกลืนนิวตรอนที่สูง (high neutron absorption cross section) [1-3] ของธาตุโบรอน ซึ่งประกอบด้วย 2 ไอโซโทป ได้แก่ โบรอน-10 (^{10}B) ประมาณร้อยละ 19.9 และโบรอน-11 (^{11}B) ประมาณร้อยละ 80.1 โบรอน-10 เป็นไอโซโทปที่มีภาคตัดขวางในการเกิดปฏิกิริยาจับนิวตรอน (neutron capture) ได้สูง สำหรับเทอร์มัลนิวตรอนเมื่อเกิดปฏิกิริยาแล้วนิวเคลียสประกอบ (compound nucleus) จะมีการปลดปล่อยรังสีแกมมาออกมา ดังปฏิกิริยาในรูปที่ 1 ดังนั้น การติดตั้งระบบกำบังนิวตรอนที่ใช้วัสดุที่มีส่วนผสมของโบรอน จึงจำเป็นต้องเพิ่มการป้องกันรังสีแกมมาจากปฏิกิริยาการจับนิวตรอนของโบรอนด้วย ทั้งนี้รังสีแกมมาเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าพลังงานสูงมีคุณสมบัติเช่นเดียวกับรังสีเอกซ์ที่สามารถทะลุผ่านร่างกายได้ การกำบังรังสีแกมมาต้องใช้วัสดุที่มีความหนาแน่นสูง เช่น ตะกั่วหรือยูเรเนียม เป็นต้น ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ตะกั่วออกไซด์เป็นสารกำบังรังสีแกมมา ซึ่งมีปรากฏอยู่ในงานวิจัยที่ผ่านมา [4-7] แต่การใช้ยางธรรมชาติเป็นวัสดุหลักสำหรับการทำวัสดุกำบังรังสีแกมมานั้นยังเป็นเรื่องที่ท้าทายและต้องศึกษาเพิ่มเติม ดังนั้นวัสดุกำบังรังสีจากยางธรรมชาติที่ได้จากงานวิจัยนี้จึงนับเป็นนวัตกรรมใหม่ที่เป็นการเพิ่มมูลค่าผลิตภัณฑ์ที่ทำจากยางธรรมชาติและรองรับการใช้วัสดุกำบังรังสีในกิจกรรมต่างๆ ในอนาคต



รูปที่ 1 รังสีแกมมาที่เกิดจากการชนของนิวตรอนกับโบรอน

2. วิธีการวิจัย (Experimental)

2.1 ยางและสารเคมี

ยางและสารเคมีที่ใช้ในการผลิตบล็อกยางกำบังรังสีแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ยางและสารเคมีที่ใช้ในการผลิตบล็อกยางกำบังรังสี

ยางและสารเคมี	คุณสมบัติ	ชื่อเคมี
ยางแท่ง (STR 5L)	ยางดิบ	Polyisoprene
บอแรกซ์ ($\text{B}_4\text{H}_7 \cdot 2\text{Na} \cdot 10\text{H}_2\text{O}$)	กำบังนิวตรอน	Sodium tetraborate (Borax)
กรดบอริก (H_3BO_3)	กำบังนิวตรอน	Boric acid
ตะกั่วออกไซด์ (PbO_2)	กำบังรังสีแกมมา	Lead Oxide
แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3)	สารตัวเติม	Calcium carbonate
ไดเบนโซไทอะโซลไดซัลไฟด์ (MBTS)	สารเร่งปฏิกิริยายางคงรูป	2,2-Dithio-bis-benzothiazole
ไดฟีนิลกวานิดีน (DPG)	สารเร่งปฏิกิริยายางคงรูป	Diphenyl guanidine

ตารางที่ 1 (ต่อ)

ซิงค์ ออกไซด์ (ZnO)	สารกระตุ้นสารเร่งปฏิกิริยาอย่างคงรูป	Zinc oxide
กรดสเตียริก	สารกระตุ้นสารเร่งปฏิกิริยาอย่างคงรูป	Stearic acid
สไตรีนต ฟีนอล (SPH)	สารด้านการออกซิเดชัน	2,4-di(α-Phenylethyl)-phenol
กำมะถัน	สารทำให้ยางคงรูป	Sulphur
พาราฟินิก ออยล์	สารช่วยให้ยางนุ่ม	Paraffinic oil
สีแดง	เพิ่มสีส้ม	Iron oxide

2.2 การเตรียมวัสดุกำบังรังสี

การผสมยางและสารเคมี กระทำในเครื่องบดผสมระบบปิด (internal mixer; YFM Serial No.0241) และเครื่องบดผสมระบบเปิดแบบสองลูกกลิ้ง (two-roll mill; YFM Serial No.0242) ยางที่ได้หลังจากที่ผสมสารเคมีต่างๆ เรียบร้อยแล้วจะเรียกว่า ยางคอมพาวด์ จากนั้นนำยางคอมพาวด์ที่ได้มาวัดลักษณะการคงรูป เพื่อหาระยะเวลาการคงรูป (ระยะเวลาสกรอร์ช; ts2 และระยะเวลาที่ใช้ในการคงรูป; t'90) ที่อุณหภูมิ 160 °C ด้วยเครื่องวัดการคงรูปของยาง (moving die rheometer; TECH PRO/rheo TECH MD+ รุ่น 111202) แล้วจึงใช้เวลาการคงรูปที่ได้มาเป็นแนวทางในการเตรียมชิ้นทดสอบสมบัติทางกายภาพ โดยใช้แม่พิมพ์และเครื่องอัดไฮดรอลิกพร้อมแผ่นความร้อน (hydraulic press with heated plates; YFM Serial No.0138) ขั้นตอนการเตรียมบล็อกยางกำบังรังสีแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 ขั้นตอนการเตรียมบล็อกยางกำบังรังสี

การออกสูตรยางเป็นขั้นตอนสำคัญซึ่งจะทำให้ผลิตภัณฑ์มีคุณสมบัติได้ตามที่ต้องการ ทั้งนี้เนื่องจากยางดิบที่ยังไม่ได้ผสมองค์ประกอบต่างๆ ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ จึงจำเป็นต้องผสมองค์ประกอบลงไปในยางเพื่อช่วยให้ยางมีสมบัติเหมาะสมกับความต้องการ สูตรยางพื้นฐานที่ใช้ในงานวิจัยนี้แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 สูตรยางพื้นฐานเพื่อที่จะนำไปพัฒนาสูตรการผลิตวัสดุกำบังรังสี

ส่วนประกอบ	phr*
ยาง STR 5L	100
CaCO ₃	100
Borax หรือ Boric acid หรือ Lead Oxide	Variable
Paraffinic Oil	5
ZnO	5
Stearic Acid	3
SPH	1
MBTS	1
DPG	0.5
สี	2
Sulphur	2

หมายเหตุ* phr ย่อมาจาก part per hundred rubber เป็นการบอกปริมาณของสารในสูตรยางเทียบกับ 100 ส่วนของยาง

การศึกษาลักษณะของปริมาณสารกำบังรังสีทั้ง 3 ชนิด คือ บอแรกซ์ กรดบอริก และตะกั่วออกไซด์ ในสูตรยางต่อสมบัติการกำบังรังสีของบล็อกยางทำได้โดยการแปรปริมาณของสารกำบังรังสีในบล็อกยางกำบังรังสี ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 การแปรปริมาณของสารกำบังรังสีในสูตรยางสำหรับเตรียมบล็อกยางกำบังรังสี

สูตรยาง	ปริมาณ (phr)		
	บอแรกซ์	กรดบอริก	ตะกั่วออกไซด์
RB00	-	-	-
SNB10	10	-	-
SNB20	20	-	-
SNB50	50	-	-
SNB100	100	-	-
SNBa10	-	10	-

ตารางที่ 3 (ต่อ)

SNBa20	-	20	-
SNBa50	-	50	-
SNBa100	-	100	-
SGL20	-	-	20
SGL50	-	-	50
SGL100	-	-	100
SNB100SGL100	100	-	100

2.3 การทดสอบสมบัติทางกายภาพ

2.3.1 ความแข็ง

วัดความแข็งตามวิธีการทดสอบมาตรฐาน ISO 7619-1:2010 โดยเครื่อง Durometer type A ตัวอย่างเป็นยางที่ผ่านการครูปแล้ว ความหนาประมาณ 1 เซนติเมตร โดยใช้เวลาสัมผัส 3 วินาที แล้วบันทึกผลการทดสอบ โดยทำการทดสอบพื้นที่แตกต่างกัน จำนวน 10 ครั้ง เพื่อนำมาหาค่าเฉลี่ย

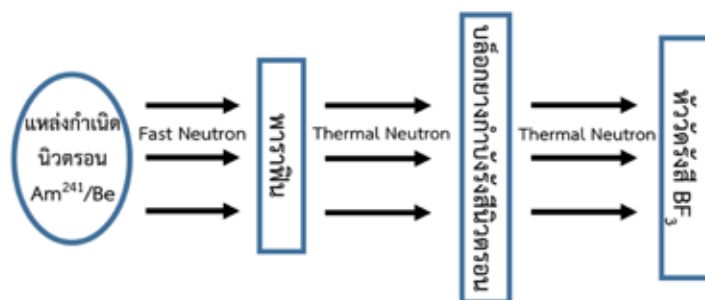
2.3.2 ความต้านแรงดึงและความยืดเมื่อขาด

ทดสอบหาค่าความต้านแรงดึงและความยืดเมื่อขาดของชิ้นทดสอบด้วยเครื่อง Universal testing machine Zwick, Z005 ขนาดของ load-cell 1 กิโลนิวตัน ชิ้นทดสอบเป็นรูปดัมเบล ทดสอบตามมาตรฐาน ISO 37:2011 ใช้ระยะ gauge length เท่ากับ 20 มิลลิเมตร ระยะของปากจับเท่ากับ 65 มิลลิเมตร และความเร็วในการเคลื่อนที่ของปากจับเท่ากับ 500 มิลลิเมตรต่อวินาที

2.4 การทดสอบการกำบังรังสี

2.4.1 การกำบังนิวตรอน

ทดสอบการกำบังนิวตรอนใช้เครื่องมือตามแผนภาพที่แสดงในรูปที่ 3 ที่มีต้นกำเนิดนิวตรอน $\text{Am}^{241}/\text{Be}$ (Americium/Beryllium) ปลดปล่อยให้อนุภาคนิวตรอนเร็ว (fast neutron) ออกมา จากนั้นทำการหน่วงความเร็วของอนุภาคนิวตรอนด้วยพาราฟิน อนุภาคนิวตรอนจะเกิดการชนกับอะตอมไฮโดรเจนของพาราฟิน จะเกิด thermalized เป็นเทอร์มัลนิวตรอน (thermal neutron) แล้วทำการวัดด้วยหัววัดนิวตรอน (BF_3 counter) ซึ่งจะต่อเข้ากับเครื่องขยายสัญญาณ ที่ตั้งค่าความต่างศักย์เป็น 1,300 โวลต์ และใช้เวลาในการวัด 100 วินาที โดยการวัดแต่ละครั้งจะเพิ่มความหนาของวัสดุกำบังรังสีครั้งละ 1 เซนติเมตร ทำการวัด 3 ชั่วโมง โดยค่าที่วัดได้ต้องนำมาหักลบกับค่ารังสีที่มีอยู่ในสิ่งแวดล้อม (black ground) แล้วนำค่าจริงที่ได้มาหาค่าเฉลี่ย



รูปที่ 3 แผนภาพแสดงชุดเครื่องมือทดสอบการกำบังนิวตรอน

2.4.2 การกำบังรังสีแกมมา

การทดสอบการกำบังรังสีแกมมาใช้เครื่องมือเดียวกับการวัดนิวตรอนแต่ทำการเปลี่ยนหัววัด โดยใช้หัววัดรังสีแกมมาแบบไกเกอร์ มุลเลอร์ เคาท์เตอร์ (Geiger-Muller counter, GM counter) โดยใช้ตะกั่วที่ถูกระดมเป็นต้นกำเนิดรังสีแกมมาทำการปรับค่าความต่างศักย์สูงเป็น 1,180 โวลต์ และใช้เวลาในการวัด 60 วินาที โดยการวัดแต่ละครั้งจะเพิ่มความหนาของวัสดุกำบังรังสีครั้งละ 1 เซนติเมตร ทำการวัด 3 ชั่วโมง โดยค่าที่วัดได้ต้องนำมาหักลบกับค่ารังสีที่มีอยู่ในสิ่งแวดล้อม (black ground) แล้วนำค่าจริงที่ได้มาหาค่าเฉลี่ย

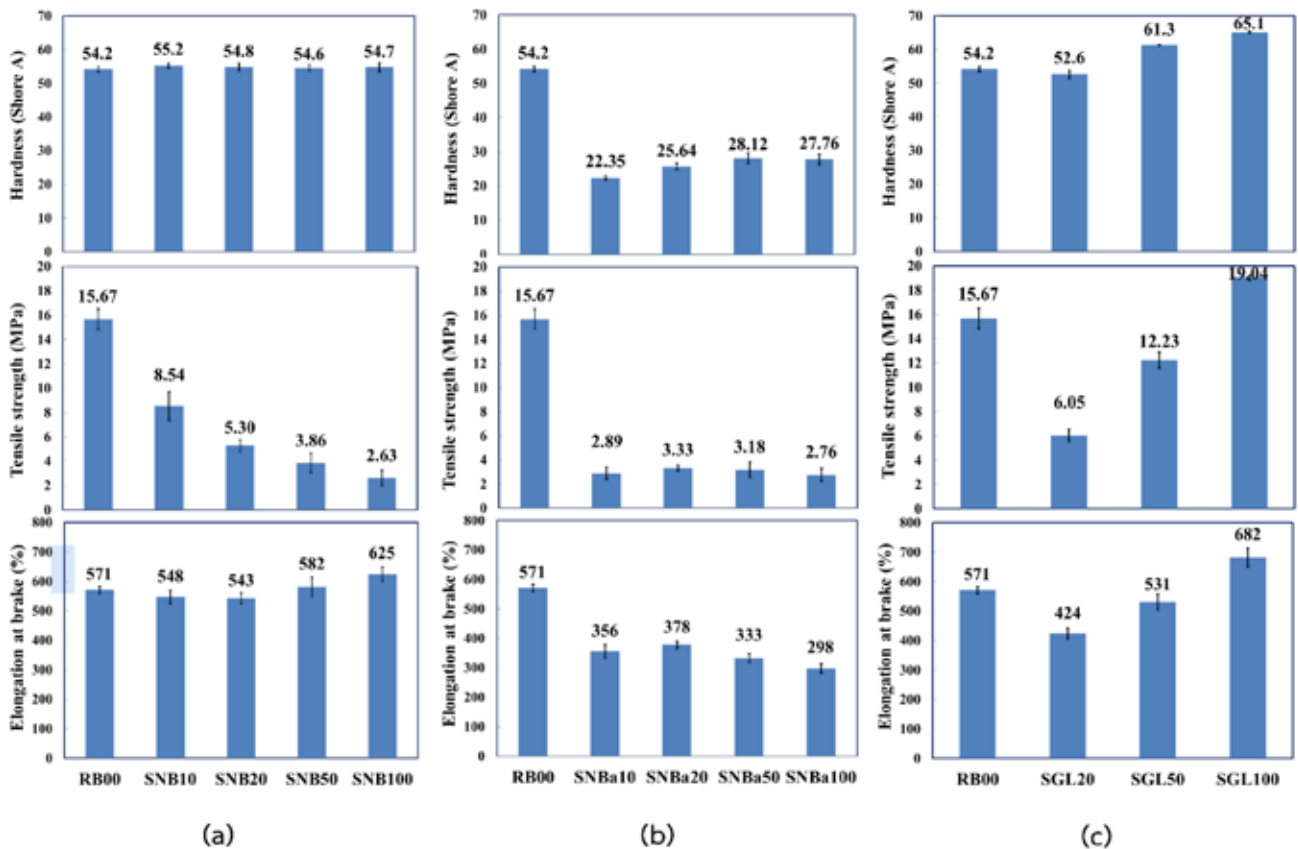
2.5 การกระจายตัวของอนุภาคในเนื้อยาง

การตรวจสอบการกระจายตัวของอนุภาคในเนื้อยางสามารถทำได้โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope) รุ่น JEOL JSM-6610LV สัญญาณภาพที่ได้จากหัววัด Secondary Electron Image (SEI) ศักย์เร่งอิเล็กตรอนที่ 10 กิโลโวลต์ กำลังขยาย 30 เท่า และ 1000 เท่า

3. ผลและวิจารณ์ (Results and Discussion)

3.1 สมบัติทางกายภาพของบล็อกยางกำบังรังสี

ผลทดสอบความแข็ง ความต้านแรงดึงและความยืดเมื่อขาด ของบล็อกยางกำบังรังสีของสูตรต่างๆ แสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 สมบัติค่าความแข็ง ค่าความต้านแรงดึงและค่าความยืดเมื่อขาดของบล็อกยางก้ำบังรังสีที่ใช้สารก้ำบังรังสี (a) บอแร็กซ์ (b) กรดบอริก (c) ตะกั่วออกไซด์

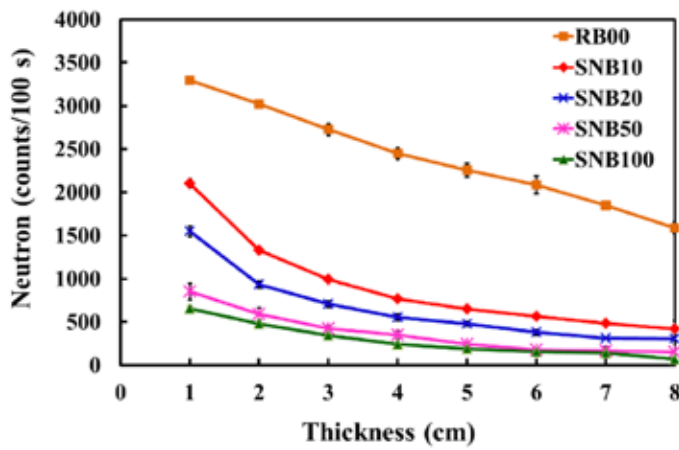
ผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพของบล็อกยางก้ำบังรังสีที่มีบอแร็กซ์เป็นสารก้ำบังนิวตรอนในปริมาณที่แตกต่างกัน (สูตร SNB10, SNB20, SNB50 และ SNB100) แสดงในรูปที่ 5 (a) พบว่าการเติมสารบอแร็กซ์ในบล็อกยางไม่ส่งผลให้ค่าความแข็งของยางเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ และค่าความแข็งระดับนี้วัสดุบล็อกยางสามารถทนทานต่อการเสียรูปเพียงพอสำหรับใช้เป็นบล็อกยางก้ำบังรังสี อย่างไรก็ตามเมื่อปริมาณบอแร็กซ์เพิ่มมากขึ้น ค่าความต้านแรงดึงลดลงอย่างชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับบล็อกยางสูตรที่ไม่มีสารก้ำบังรังสี (สูตร RB00) ในขณะที่ค่าความยืดเมื่อขาดลดลงเล็กน้อยเมื่อปริมาณบอแร็กซ์ในบล็อกยางก้ำบังรังสีสูงขึ้น เมื่อพิจารณาสมบัติความต้านแรงดึงและความยืดเมื่อขาดที่ลดลงเมื่อเติมบอแร็กซ์ในปริมาณมากขึ้นแล้วพบว่าจะไม่ส่งผลกระทบต่อการใช้งานของบล็อกยางก้ำบังรังสี เนื่องจากสมบัติแรงดึงดังกล่าวไม่ใช่ปัจจัยจำเป็นต่อการใช้งาน เนื่องจากลักษณะการใช้งานบล็อกยางก้ำบังรังสีไม่ถูกกระทำด้วยแรงดึงในทุกทิศทาง

รูปที่ 5 (b) แสดงสมบัติทางกายภาพของบล็อกยางก้ำบังรังสีที่มีกรดบอริกเป็นสารก้ำบังนิวตรอนในปริมาณที่แตกต่างกัน (สูตร SNBa10, SNBa20, SNBa50 และ SNBa100) ผลการทดสอบพบว่าเมื่อเติมกรดบอริกในสูตรยางส่งผลให้ค่าสมบัติทางกายภาพ คือ ความแข็ง ความต้านแรงดึงและความยืดเมื่อขาด ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากการใส่สารตัวเติม (กรดบอริก) ส่งผลให้ปริมาณการเชื่อมขวาง (crosslink density) ในเฟสยางลดลง และถ้าเติมในปริมาณที่สูงขึ้นจะทำให้เกิดโครงสร้างที่เป็นรูพรุนเนื่องจากการเชื่อมขวางที่ไม่ต่อเนื่องของเฟสยาง

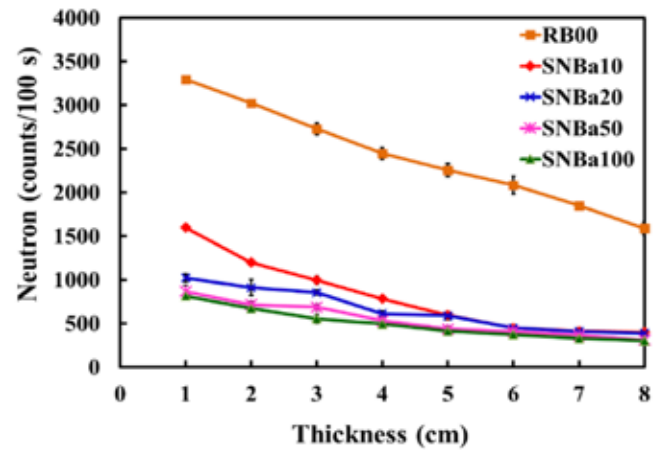
การเติมสารก้ำบังรังสีแกมมาชนิดตะกั่วออกไซด์ลงในสูตรยางส่งผลต่อสมบัติทางกายภาพของบล็อกยางดังแสดงในรูปที่ 5 (c) ซึ่งพบว่าค่าความแข็งของยางสูงขึ้นเมื่อปริมาณตะกั่วออกไซด์เพิ่มขึ้น ค่าความต้านแรงดึงและความยืดเมื่อขาดลดลงเมื่อเติมตะกั่วออกไซด์ในปริมาณ 20 phr (สูตร SGL20) อย่างไรก็ตามพบว่าสมบัติทั้งสามมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณตะกั่วออกไซด์ในบล็อกยางก้ำบังรังสี ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มปริมาณการเชื่อมขวางที่เกิดจากโลหะออกไซด์ (PbO₂) ปกติแล้วตะกั่วออกไซด์นอกจากจะทำหน้าที่เป็นสารตัวเติมที่มีสมบัติก้ำบังรังสีแล้วยังสามารถทำหน้าที่เป็นสารที่ทำให้ยางคงรูปได้อีกด้วย

3.2 สมบัติการก้ำบังรังสี

สมบัติการก้ำบังนิวตรอนของบล็อกยางก้ำบังรังสีที่เติมบอแร็กซ์และกรดบอริกแสดงในรูปที่ 6 จากผลการวัด พบว่าบล็อกยางที่มีสารประกอบของธาตุโบรอน ทั้งที่เป็นบอแร็กซ์และกรดบอริกเป็นองค์ประกอบสามารถก้ำบังนิวตรอนได้ดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับบล็อกยางที่ไม่ได้เติมสารประกอบของธาตุโบรอน (RB00) เมื่อปริมาณของสารบอแร็กซ์และกรดบอริกในบล็อกยางเพิ่มขึ้นความสามารถในการก้ำบังนิวตรอนเพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถเห็นได้จากค่านับวัด (count) ของนิวตรอนที่ในรูปที่ 6 (a) และ (b) ที่ลดลง ทั้งนี้สามารถอธิบายได้ว่าปริมาณของธาตุโบรอนที่มากขึ้นในบล็อกยาง ทำให้ความหนาแน่นของนิวเคลียสโบรอนที่สามารถดูดซับนิวตรอนได้เพิ่มสูงขึ้น ดังนั้นโอกาสที่จะถูกชนโดยนิวตรอนและจะดูดซับนิวตรอนไว้ก็สูงขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการก้ำบังรังสีสูงขึ้นตามปริมาณธาตุโบรอนในเนื้อยางที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบอีกว่าความหนาแน่นของบล็อกก้ำบังรังสีที่เพิ่มขึ้นสามารถก้ำบังรังสีได้ดีมากขึ้นซึ่งอธิบายได้ด้วยโอกาสการชนกันระหว่างนิวเคลียสของโบรอนกับนิวตรอนที่เพิ่มสูงขึ้นเช่นเดียวกัน จากผลของความสามารถในการป้องกันนิวตรอนสามารถสรุปได้ว่าการเติมสารบอแร็กซ์และกรดบอริกในปริมาณ 100 phr มีประสิทธิภาพการก้ำบังรังสีสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับการเติมสารก้ำบังรังสีปริมาณที่น้อยกว่า



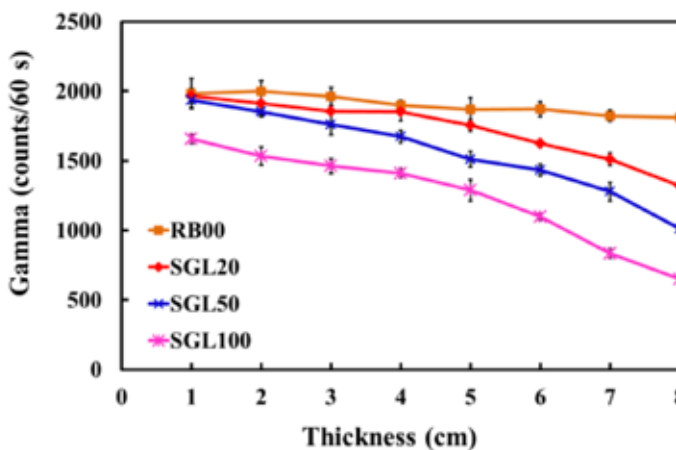
(a)



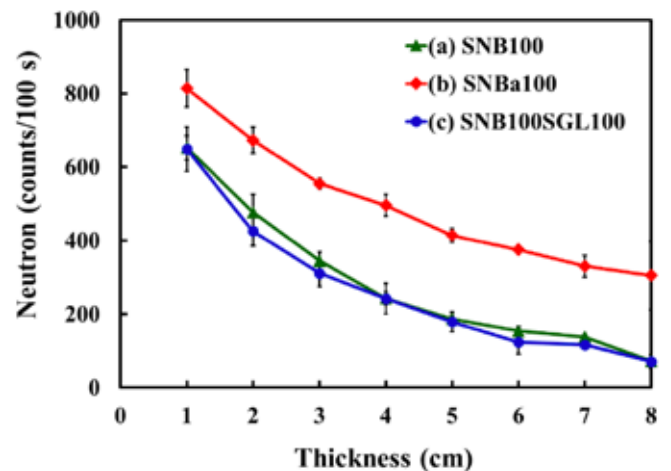
(b)

รูปที่ 6 สมบัติการกำบังนิวตรอนของบล็อกยางกำบังรังสีที่เติม (a) บอแรกซ์ (b) กรดบอริก

สมบัติการกำบังรังสีแกมมาของบล็อกยางกำบังรังสีที่เติมตะกั่วออกไซด์ในปริมาณต่าง ๆ (20, 50 และ 100 phr) แสดงในรูปที่ 7 ผลการนับวัดรังสีแกมมาแสดงให้เห็นชัดเจนว่าความสามารถในการกำบังรังสีแกมมาเพิ่มสูงขึ้นเมื่อปริมาณตะกั่วออกไซด์ในบล็อกยางสูงขึ้น ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า จากกราฟที่ได้จะเห็นว่าเมื่อเพิ่มความหนาของบล็อกยางที่ไม่มีส่วนผสมของตะกั่วความสามารถในการกำบังรังสีแกมมาไม่เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ แต่เมื่อพิจารณาบล็อกยางที่เติมตะกั่วออกไซด์ลงไปทั้ง 3 สูตร (SGL20, SGL50 และ SGL100) จะเห็นว่าความสามารถในการกำบังรังสีแกมมาเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความหนาของบล็อกยางกำบังรังสี



รูปที่ 7 สมบัติการกำบังรังสีแกมมาของบล็อกยางกำบังรังสีที่เติมตะกั่วออกไซด์

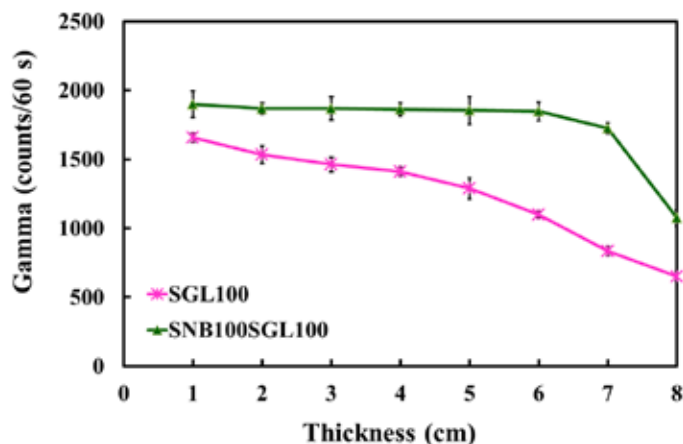


รูปที่ 8 การเปรียบเทียบความสามารถในการกำบังนิวตรอนของบล็อกยางกันรังสีที่เติม (a) บอแรกซ์-สูตร SNB100 (b) กรดบอริก-สูตร SNBa100 (c) บอแรกซ์ผสมตะกั่วออกไซด์-สูตร SNB100SGL100

การเปรียบเทียบความสามารถในการกำบังนิวตรอนของบล็อกยางกันรังสีที่เติมสารกำบังรังสีที่แตกต่างกันในปริมาณที่เท่ากัน นั่นคือ บอแรกซ์ (สูตร SNB100) กรดบอริก (สูตร SNBa100) และบอแรกซ์ผสมตะกั่วออกไซด์ (สูตร SNB100SGL100) แสดงในรูปที่ 7 เมื่อพิจารณาผลจากค่านับวัด (count) ของนิวตรอนแล้วพบว่า เมื่อเติมสารบอแรกซ์ (SNB100) และ กรดบอริก (SNBa100) ในปริมาณที่เท่ากันลงในบล็อกยาง ความสามารถในการกำบังรังสีแตกต่างกัน โดยบล็อกยางกำบังรังสีที่เติมสารบอแรกซ์มีประสิทธิภาพสูงกว่า ถึงแม้ว่าปริมาณของธาตุโบรอนในกรดบอริก (H_3BO_3 มีธาตุโบรอน 18% โดยน้ำหนัก) จะค่าสูงกว่าในสารบอแรกซ์ ($B_4H_{10}Na \cdot 10H_2O$ มีธาตุโบรอน 12% โดยน้ำหนัก) ซึ่งตามทฤษฎีแล้วควรจะมีสามารถในการกำบังรังสีมากกว่า แต่ผลที่ได้จากการคำนวณวัดของนิวตรอนตามรูปที่ 7 กลับไม่เป็นไปตามทฤษฎี ทั้งนี้สามารถอธิบายได้ว่าเกิดจากโครงสร้างที่มีลักษณะพรุนของบล็อกยางที่เติมกรดบอริกซึ่งเกิดขึ้นขณะที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดรีด โดยโครงสร้างที่มีลักษณะพรุนดังกล่าวทำให้ความหนาแน่นของธาตุโบรอนในบล็อกยางลดลงกว่าที่ควรจะเป็น ส่งผลให้ความสามารถในการกำบังนิวตรอนของบล็อกยางที่เติมกรดบอริกน้อยลงไปด้วย

เพื่อเป็นการตรวจสอบความสามารถในการกำบังนิวตรอนของบล็อกยางที่เติมบอแรกซ์ทั้งสูตรที่มีและไม่มีตะกั่วออกไซด์ (สูตร SNB100 และ SNB100SGL100) พบว่ามีประสิทธิภาพใกล้เคียงกันมาก ทั้งนี้เนื่องจากสารประกอบตะกั่วออกไซด์ที่เติมลงไปในบล็อกยาง SNB100SGL100 ไม่ได้มีคุณสมบัติในการกำบังนิวตรอนโดยตรงจึงไม่ส่งผลในทางที่เพิ่มหรือลดความสามารถในการกำบังนิวตรอนอย่างมีนัยสำคัญ

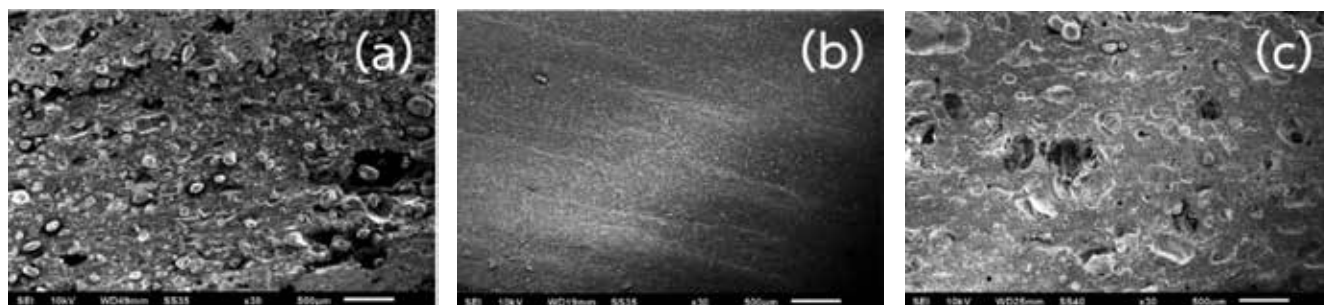
จากกราฟในรูปที่ 9 เห็นได้ชัดเจนว่าบล็อกยางที่มีส่วนประกอบของบอแรกซ์และตะกั่วออกไซด์มีพฤติกรรมที่แตกต่างออกไปจากสูตรที่ไม่มีบอแรกซ์ เมื่อพิจารณาความสามารถในการกำบังรังสีแกมมาของสูตร SNB100SGL100 พบว่า ในช่วงแรกเมื่อค่าความหนาเพิ่มขึ้นความสามารถในการกำบังรังสีลดลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้นจนถึงที่ความหนาประมาณ 6 เซนติเมตรค่าความสามารถในการกำบังรังสีจึงจะเพิ่มสูงขึ้น สังเกตจากค่านับวัดรังสีแกมมาที่ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้สามารถอธิบายได้ว่าแหล่งกำเนิดรังสีชนิด Am^{241}/Be ปลดปล่อยทั้งนิวตรอนและรังสีแกมมา เมื่อนิวตรอนมากระทบกับธาตุโบรอนที่อยู่ในบล็อกยางทำให้เกิดรังสีแกมมาขึ้นอีกบางส่วนจึงทำให้ปริมาณรังสีแกมมารวมเพิ่มขึ้น ดังนั้นค่าวัดรังสีแกมมาหลังจากการลดทอนด้วยธาตุตะกั่วจึงมีปริมาณมากกว่าปกติจนถึงระดับความหนาประมาณ 6 เซนติเมตร ระดับการดูดซับนิวตรอนโดยธาตุโบรอนเริ่มคงที่ รังสีแกมมาที่ดูดซับโดยธาตุตะกั่วจึงสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าจับวัดรังสีแกมมาที่ความหนาของบล็อกกันรังสี 6 เซนติเมตรลดลงอย่างมีนัยสำคัญตามที่เห็นได้จากเส้นกราฟ จากการศึกษาครั้งนี้จึงได้ข้อสังเกตที่เป็นประโยชน์ว่าการผสมสารประกอบของโบรอนและตะกั่วเข้าด้วยกันในบล็อกกำบังรังสีอาจทำให้ประสิทธิภาพการกำบังรังสีไม่เท่าที่ควรเนื่องจากตะกั่วบางส่วนที่อยู่ด้านหน้าของการชนกันของนิวตรอนและโบรอนไม่ได้ทำหน้าที่กำบังรังสีแกมมาที่เกิดขึ้น



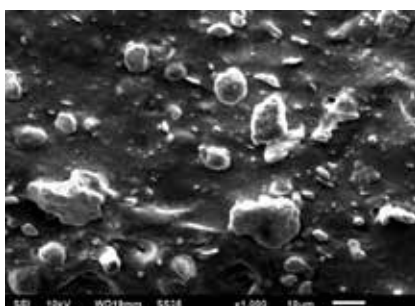
รูปที่ 9 สมบัติการกำบังรังสีแกมมาของบล็อกยางกำบังรังสีที่เติมตะกั่วออกไซด์สูตรที่ไม่มีและมีบอแรกซ์ (SNL100 และ SNB100SGL100)

3.3 การกระจายตัวของสารกำบังรังสีในเนื้อยาง

การกระจายตัวของสารกำบังรังสีในเนื้อยางเป็นอีกหนึ่งปัจจัยหลักที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำบังรังสีของบล็อกยางกำบังรังสี การกระจายตัวที่สม่ำเสมอทั่วทั้งบล็อกยางส่งผลให้การกำบังรังสีดีขึ้นอย่างชัดเจน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษา ภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 30 เท่า เพื่อพิสูจน์แสดงการกระจายตัวของสารกำบังรังสีในบล็อกยางกำบังรังสีที่เติมบอแรกซ์ (SNB100) ตะกั่วออกไซด์ (SGL100) และบอแรกซ์ผสมตะกั่วออกไซด์ (SNB100SGL100) ตามที่แสดงในรูปที่ 9 ภาพถ่าย SEM แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าการกระจายตัวของบอแรกซ์ (a) และตะกั่วออกไซด์ (b) เป็นไปอย่างสม่ำเสมอในเนื้อยาง และพบว่าอนุภาคของบอแรกซ์จะมีขนาดใหญ่กว่าตะกั่วออกไซด์ ส่วนบล็อกยางที่เติมทั้งบอแรกซ์และตะกั่วออกไซด์ (c) มีการกระจายตัวของสารทั้งสองอย่างสม่ำเสมอโดยไม่เกิดการจับก้อนและไม่เกิดปฏิกิริยาต่อกันซึ่งสามารถเห็นได้ชัดจากรูปที่ 10 ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 1000 เท่า ที่แสดงการกระจายตัวของบอแรกซ์และตะกั่วออกไซด์ในบล็อกยางกำบังรังสีสูตร SNB100SGL100



รูปที่ 10 ภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 30 เท่า แสดงการกระจายตัวของสารกำบังรังสีในบล็อกยางกำบังรังสีที่เติม (a) บอแรกซ์-สูตร SNB100 (b) ตะกั่วออกไซด์-สูตร SGL100 (c) บอแรกซ์ผสมตะกั่วออกไซด์-สูตร SNB100SGL100



รูปที่ 11 ภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า แสดงการกระจายตัวของบอแรกซ์และตะกั่วออกไซด์ในบล็อกยางกำบังรังสีสูตร SNB100SGL100

4. สรุป (Conclusion)

งานวิจัยได้ศึกษาสมบัติทางกายภาพพื้นฐานของบล็อกยางกำบังรังสีที่เตรียมขึ้นจากยางธรรมชาติและสารประกอบโบรอนและตะกั่ว ได้แก่ ความแข็งแรงดึงและความยืดเมื่อขาด พบว่าวัสดุกำบังรังสีที่มีปริมาณสารกำบังรังสีสูงขึ้นจะมีค่าสมบัติทางกายภาพลดลง แต่ไม่ส่งผลกระทบต่อการใช้งานจริง บล็อกยางกำบังรังสีที่เตรียมขึ้นจากสารประกอบโบรอนทั้งสองประเภทคือ บอแรกซ์ และกรดบอริก มีความสามารถในการกำบังนิวตรอนได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งนี้ความสามารถในการกำบังนิวตรอนจะเพิ่มขึ้นตามความหนาและปริมาณของสารประกอบโบรอนในบล็อกยางกำบังรังสี ถึงแม้ว่ากรดบอริกจะมีปริมาณของร้อยละของอะตอมโบรอนต่อหน่วยน้ำหนักมากกว่าบอแรกซ์ แต่บล็อกยางกำบังรังสีที่ผสมสารบอแรกซ์สามารถกำบังนิวตรอนได้ดีกว่าบล็อกยางที่เตรียมจากกรดบอริก ทั้งนี้เนื่องจากลักษณะโครงสร้างของบล็อกยางธรรมชาติผสมกรดบอริกมีความพรุนสูงทำให้ความหนาแน่นต่อปริมาตรของอะตอมโบรอนในบล็อกยางกำบังรังสีที่ผสมกรดบอริกลดลง นอกจากนั้นยังได้ศึกษาสมบัติการกำบังรังสีแกมมาที่เกิดจากการการชนของนิวตรอนกับอะตอมของโบรอนโดยการเติมสารประกอบตะกั่วออกไซด์ลงในบล็อกยางกำบังรังสีที่เตรียมขึ้น พบว่าความสามารถในการกำบังรังสีแกมมาเพิ่มสูงขึ้นเมื่อปริมาณตะกั่วออกไซด์ในบล็อกยางสูงขึ้นและความหนาของบล็อกยางเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามผลจากการศึกษาการกำบังรังสีแกมมาโดยการเตรียมบล็อกยางธรรมชาติที่เติมทั้งสารประกอบโบรอนและตะกั่วพบว่าสามารถการกำบังรังสีแกมมาได้ แต่ประสิทธิภาพการกำบังรังสีไม่ดีเท่าที่ควร เนื่องจากอนุภาคตะกั่วบางส่วนที่อยู่ด้านหน้าของการชนกันของนิวตรอนและโบรอนไม่ได้ทำหน้าที่กำบังรังสีแกมมาที่เกิดขึ้น

5. กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgements)

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ คุณวิเชียร รตนธงชัย และ ดร.รพพน พิชา จากสถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (สทน.) ที่ให้ความอนุเคราะห์การวัดสมบัติการกำบังนิวตรอนและรังสีแกมมาของบล็อกยางกำบังรังสีจากงานวิจัยนี้

6. เอกสารอ้างอิง (References)

- [1] CHILTON, A.B., J.K. SHULTIS and R.E. FAW. *Principles of Radiation Shielding*. Englewood Cliffs, NJ : Prentice-Hall, 1984.
- [2] SHULTIS, J.K. and R.E. FAW. *Radiation Shielding*. Englewood Cliffs, NJ : Prentice Hall, 1996.
- [3] PRICE, B.T., C.C. HORTEN and K.T. SPINNERY. *Radiation Shielding*. Elmsford, NY : Pergamon, 1957.
- [4] Harada, Y. and H. Nakahara, INPADDOC, JP patent application, 1989, 1-146620 [in Japanese].
- [5] EL-KHATIB, A. M., M. KASSEM and A.A. EZZAT. *J. Polym. Mater.* 1990, 7(1).
- [6] MATSUDA, K., H. NISHIKOWA and H. HARADA. INPADDOC. *JP patent application*. 1988, 63-716 [in Japanese]
- [7] KRAUS, W.B., M.B. GLASGOW, M.Y. KIM, D.L. OLMUIER, R.L. KIEFER, R.A. ORWOLL and S.A. THIBEAULT. *Anon-205th ACS National Meeting*. Washington, USA, 273 Paper, Polymer 23, 1993.