

การพัฒนาวัสดุป้องกันรังสีโดยใช้ยางธรรมชาติผสมโบรอนออกไซด์และโลหะออกไซด์

Development of radiation shielding material based on natural rubber/boron oxide and metal oxide composites

3

นิชาภา บัวสุวรรณ¹, อรวรรณ ปิ่นประยูร¹, ศิริพร ช้างน้อย¹, ธิติ เรืองสีสำราญ²

Nichapa Buasuwan¹, Orawan Pinprayoon¹, Siriporn Changnoi¹, Thiti Rungseesumran²

รับบทความ: 28 เมษายน 2566 แก้ไขบทความ: 4 กันยายน 2566 ยอมรับตีพิมพ์: 25 กันยายน 2566

บทคัดย่อ

แผ่นยางป้องกันรังสีสำหรับผลิตชุดป้องกันรังสีนิวตรอน รังสีเอกซ์ และรังสีแกมมา ถูกพัฒนาขึ้นจากยางธรรมชาติผสมโบรอนออกไซด์สำหรับป้องกันรังสีนิวตรอน ตะกั่วออกไซด์และทังสเตนออกไซด์สำหรับป้องกันรังสีเอกซ์และรังสีแกมมา ผลการศึกษาสมบัติการป้องกันรังสีนิวตรอนจากต้นกำเนิดนิวตรอน²⁴¹Am-Be (Americium-Beryllium) พบว่า แผ่นยางป้องกันรังสีสูตรที่เติมสารโบรอนออกไซด์ 40 phr ให้ค่าการลดทอนรังสีนิวตรอนร้อยละ 18 ซึ่งดีกว่าวัสดุกำบังรังสีที่มีในท้องตลาดซึ่งทำมาจากพอลิเอทิลีน ที่ให้ค่าการลดทอนรังสีนิวตรอนร้อยละ 11 ที่ความหนาเท่ากัน คือ 2 mm แต่แผ่นยางที่เติมโบรอนออกไซด์เมื่อขึ้นรูปแล้วตัวแผ่นยางเกิดเกล็ดสีขาวเล็ก ๆ ทั่วทั้งแผ่น และสมบัติทางกายภาพความต้านแรงดึงต่ำมาก แผ่นยางสูตรนี้จึงยังไม่เหมาะสมที่จะนำมาผลิตเป็นชุดป้องกันรังสีงานวิจัยยังได้ศึกษาสมบัติการลดทอนรังสีเอกซ์โดยใช้เครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์และรังสีแกมมาจากต้นกำเนิดรังสีแกมมา¹³⁷Cs พบว่า ความสามารถในการลดทอนรังสีของแผ่นยางป้องกันรังสีเพิ่มสูงขึ้นเมื่อปริมาณตะกั่วออกไซด์และทังสเตนออกไซด์ในแผ่นยางสูงขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบค่าการลดทอนรังสีเอกซ์และรังสีแกมมา กับชุดป้องกันรังสีที่มีขายตามท้องตลาดที่ทำจากยางสังเคราะห์ พบว่า สูตรที่เติมตะกั่วออกไซด์ 500 phr มีค่าการลดทอนรังสีเอกซ์ ร้อยละ 87 ค่าการลดทอนรังสีแกมมา ร้อยละ 8.8 และสูตรที่เติมทังสเตนออกไซด์ 900 phr มีค่าการลดทอนรังสีเอกซ์ ร้อยละ 85 ค่าการลดทอนรังสีแกมมา ร้อยละ 8.3 ซึ่งดีกว่าชุดป้องกันรังสีที่มีขายตามท้องตลาด ที่มีค่าการลดทอนรังสีเอกซ์ ร้อยละ 84 ค่าการลดทอนรังสีแกมมา ร้อยละ 6.2 ที่ความหนาเท่ากัน คือ 2 mm จากผลการศึกษาสมบัติทางกายภาพพื้นฐานของแผ่นยางป้องกันรังสี ได้แก่ ความแข็ง ความต้านแรงดึง ความยืดเมื่อขาด และความต้านแรงฉีกขาด พบว่า แผ่นยางป้องกันรังสีสูตรที่เติมตะกั่วออกไซด์ 500 phr ที่มีปริมาณสารป้องกันรังสีสูงขึ้นจะมีค่าสมบัติทางกายภาพมีแนวโน้มลดลงอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ แต่แผ่นยางป้องกันรังสี สูตรที่เติมทังสเตนออกไซด์ 900 phr มีสมบัติความต้านแรงดึงต่ำมากจึงต้องพิจารณาการใช้งานอย่างเหมาะสมต่อไป

คำสำคัญ: ยางธรรมชาติ รังสี ชุดป้องกันรังสี

¹กองวัสดุวิศวกรรม กรมวิทยาศาสตร์บริการ

²สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน)

Abstract

Radiation protective rubber sheet for producing neutron radiation, X-rays and gamma rays protection suits are developed from natural rubber mixed with boron oxide for neutron radiation protection, lead oxide and tungsten oxide for protection against X-rays and gamma rays. The study of neutron radiation shielding properties from ^{241}Am -Be (Americium-Beryllium) neutron source found that, at the same thickness of 2 mm, rubber compound containing boron oxide 40 phr provided a neutron radiation attenuation value of 18 percent, gave better attenuation comparing to those with vary amounts of boron oxide. The neutron attenuation values are similar to shielding materials polyethylene which commercially available that gives a neutron radiation attenuation value of 11 percent. But the boron oxide filled rubber sheet, when formed, the rubber sheet formed small white flakes all over the sheet and the physical properties of the tensile strength were very low. Therefore, this formulation of rubber sheets is not suitable for the production of radiation protection suits. This research also studied the X-ray shielding properties by using X-ray source and gamma-ray generated from ^{137}Cs gamma-ray source. The efficiency of X-ray shielding increases with the amount of lead oxide and tungsten oxide. It was found that, at the same thickness of 2 mm, the formula with 500 phr lead oxide had an X-ray attenuation value of 87 percent and gamma ray attenuation value of 8.8 percent and the formula with 900 phr tungsten oxide had an X-ray attenuation value of 85 percent. Gamma rays 8.3 percent, which had better attenuation values than commercially available radiation protection suits had an X-ray attenuation value of 84 percent and a gamma ray attenuation value of 6.2 percent. Physical properties of radiation protection rubber sheet, namely hardness, tensile strength, elongation at break and tear strength are also studied. It was found that the radiation protection rubber sheet (500 phr) an increase in radiation protection substance resulted in a decrease in their physical properties to an acceptable level. However, the radiation protection rubber sheet with tungsten based (900 phr) has very low tensile properties, therefore proper application has to be more considered.

Keywords: Natural rubber, Radiation, Radiation protection suit

¹Engineering Materials Division, Department of Science Service

²Thailand Institute of Nuclear Technology

*Corresponding author e-mail address: nlowthon@dss.go.th

1. บทนำ (Introduction)

รังสี (Radiation) เป็นสิ่งที่สามารถพบได้ทั่วไปในธรรมชาติ โดยเกิดจากการสลายตัวของสารกัมมันตรังสีที่มีปะปนอยู่ในสิ่งแวดล้อม รังสีเป็นการแผ่พลังงานออกมาโดยอยู่ในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เช่น รังสีเอกซ์ และรังสีแกมมา เป็นต้น หรือในรูปของอนุภาคที่มีความเร็วสูง เช่น รังสีนิวตรอน รังสีแอลฟา และรังสีเบตา ปัจจุบันประเทศไทยมีการประยุกต์ใช้ต้นกำเนิดรังสีในงานด้านต่าง ๆ มากมาย ซึ่งกิจกรรมเหล่านี้มีแนวโน้มเพิ่มยิ่งขึ้น เช่น ด้านการศึกษา ด้านอุตสาหกรรม ด้านเกษตรกรรม และด้านสิ่งแวดล้อม ยกตัวอย่างมีการใช้รังสีแกมมาจากไอโซโทปโคบอลต์ 60 หรือ ซีเซียม 137 ฆ่าเชื้อโรคต่าง ๆ ในน้ำทิ้งจากชุมชนและจากโรงพยาบาลเพื่อป้องกันโรคระบาด [1] เป็นต้น อีกหนึ่งกิจกรรมที่ปัจจุบันมีการนำเทคโนโลยีทางด้านรังสีเข้ามามีบทบาทค่อนข้างมาก นั่นคือ กิจกรรมด้านการแพทย์ ซึ่งมีการนำรังสีมาใช้ 3 รูปแบบ คือ 1) รังสีวินิจฉัย (Radiation diagnostic) 2) เวชศาสตร์นิวเคลียร์ (Nuclear medicine) และ 3) รังสีรักษา (Radiation oncology) โดยทั่วไปมนุษย์สามารถสัมผัสรังสีจากสิ่งต่าง ๆ ในธรรมชาติรอบตัวเราอยู่ตลอดเวลา และยังสามารถสัมผัสรังสีได้จากกิจกรรมต่าง ๆ รังสีที่แผ่ออกมานั้นเมื่อผ่านเข้าไปสู่สิ่งมีชีวิตสามารถก่อให้เกิดผลกระทบต่องานมีชีวิตได้ โดยขึ้นอยู่กับปริมาณของรังสีที่ได้รับ ผลกระทบที่สามารถเกิดขึ้น เช่น เกิดเป็นผื่นแดงขึ้นตามผิวหนัง ผอมว่น เซลล์ตาย เป็นแผลเปื่อย เกิดการเปลี่ยนแปลง ส่งผลให้พันธุกรรมมีลักษณะเปลี่ยนไป หรือสามารถทำให้เสียชีวิตได้ ดังนั้นมีระบบป้องกันรังสีเพื่อป้องกันไม่ให้ร่างกายได้รับรังสีหรือได้รับในปริมาณน้อยที่สุด อย่างไรก็ตามเพื่อสร้างความมั่นใจในความปลอดภัยสำหรับกิจกรรมที่เกี่ยวข้องกับรังสี การใช้วัสดุกำบังรังสี (Radiation shielding) เป็นมาตรการด้านความปลอดภัยที่มีความสำคัญเนื่องจากมีประสิทธิภาพสูง ทำให้มีการนำไปใช้อย่างแพร่หลาย ทั้งนี้ผลสัมฤทธิ์ในการลดปริมาณรังสีนั้นจะขึ้นอยู่กับสมบัติและความหนาของวัสดุกำบังรังสีรวมถึงความเข้มของรังสีด้วย การใช้วัสดุกำบังรังสี เช่น ถุงมือป้องกันรังสี ชุดป้องกันรังสี อุปกรณ์ป้องกันรังสี และบล็อกป้องกันรังสี เป็นต้น

ชุดป้องกันรังสี เป็นมาตรการหนึ่งในการป้องกันอันตรายจากรังสี โดยเฉพาะผู้ปฏิบัติงานด้านการแพทย์ที่ใช้งานเครื่องเอกซเรย์ในห้องผ่าตัด ห้องหัตถการ และรังสีร่วมรักษา เป็นต้น ชุดป้องกันรังสีถูกออกแบบมาให้มีหลายรูปแบบเพื่อให้เหมาะสมต่อการใช้งาน เช่น ชุดป้องกันรังสีแบบเสื้อกั๊ก (Vest) แบบกระโปรง (Skirt) แบบขึ้นเดี่ยวคล้ายผ้ากันเปื้อน (Apron) แบบป้องกันบริเวณลำคอ (Thyroid shield) และแบบป้องกันบริเวณอวัยวะสืบพันธุ์ (Gonad shield) เป็นต้น จากการสำรวจ พบว่า ชุดป้องกันรังสีที่ใช้ส่วนใหญ่ผลิตมาจากแผ่นตะกั่ว ซึ่งมีน้ำหนักค่อนข้างมาก ไม่สามารถปรับให้กระชับเข้ากับรูปร่างผู้สวมใส่ได้ และเมื่อสวมใส่ไปนาน ๆ ทำให้เกิดอาการเมื่อยล้า นอกจากนี้ชุดป้องกันรังสีที่มีการใช้งานในปัจจุบันส่วนใหญ่มิมีราคาค่อนข้างสูง ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่มีขายในท้องตลาด เช่น เสื้อป้องกันรังสี มีราคาขายต่อ 1 ตัว อยู่ที่ประมาณ 20,000 บาท สารป้องกันรังสีที่ใช้เป็น ตะกั่ว และชุดป้องกันรังสีที่ใช้ในปัจจุบันส่วนใหญ่นำเข้าจากต่างประเทศ เนื่องจากไม่มีผู้ผลิต ในประเทศและประเทศไทยไม่ได้พัฒนาเทคโนโลยีเป็นของตนเอง ซึ่งมาตรการเพื่อสร้างความปลอดภัยให้แก่ผู้ปฏิบัติงาน และผู้เกี่ยวข้องที่ได้ผลดียิ่งและมีการใช้งานแพร่หลายงานวิจัยนี้ได้มีแนวความคิดที่จะพัฒนาวัสดุกำบังรังสี เพื่อเป็นอีกทางเลือกหนึ่งสำหรับผู้ปฏิบัติงานที่เกี่ยวข้องกับรังสี นั่นคือ ชุดป้องกันรังสี ดังนั้นแนวความคิดที่นำมายกรวมมา ผสมผสานกับสารป้องกันรังสี

เพื่อทำเป็นชุดป้องกันรังสีนี้ จึงเป็นอีกทางหนึ่งในการพัฒนาเทคโนโลยีวัสดุป้องกันรังสีขึ้นมาเอง งานวิจัยนี้ เลือการศึกษาสารป้องกันรังสี 3 ชนิด คือ 1) โบรอนออกไซด์ สำหรับป้องกันรังสีนิวตรอน เกียรติศักดิ์ แสนบุญเรือง และคณะ [2] ได้พัฒนาแผ่นกำบังอนุภาคนิวตรอนจากวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงซีลีออยม์ โดยศึกษาชนิดและปริมาณของสารตัวเติมป้องกันรังสี คือ กรดบอริก และโบรอนออกไซด์ พบว่า โบรอนออกไซด์ มีความสามารถในการป้องกันอนุภาคนิวตรอนดีที่สุด เพราะโบรอนออกไซด์มีความสามารถอันตรกิริยากับ นิวตรอนได้ดี 2) ตะกั่วออกไซด์ เป็นวัสดุป้องกันรังสีที่นิยมใช้กันมาก คือ ตะกั่ว (Lead) เนื่องจากตะกั่ว มีความหนาแน่นสูง เป็นสารที่มี Mass absorption coefficient สูงสำหรับรังสีแกมมาพลังงานต่ำ และมีราคาไม่แพง 3) ทังสเตนออกไซด์ Orasa Onjun และคณะ [3] ได้พัฒนาวัสดุกำบังรังสีโดยใช้ยางธรรมชาติ ผสมตะกั่วออกไซด์และทังสเตนออกไซด์เป็นสารป้องกันรังสี พบว่า สามารถกำบังรังสีแกมมาได้ในระดับที่ เกณฑ์กำหนดด้านความปลอดภัยระบุไว้ ซึ่งชุดป้องกันรังสีที่ถูกพัฒนาขึ้นจากยางธรรมชาตินี้ มีน้ำหนักเบา สวมใส่สบาย มีความยืดหยุ่น สามารถปรับขนาดให้กระชับเข้ากับรูปร่างของผู้สวมใส่ช่วยให้คล่องตัว เมื่อเคลื่อนไหวร่างกาย และไม่ก่อให้เกิดอาการเมื่อยล้าซึ่งทำให้ส่งผลกระทบต่อการทำงานได้ การพัฒนา วัสดุป้องกันรังสีนี้ยังก่อให้เกิดองค์ความรู้ด้านรังสีกับวัสดุ ทำให้สามารถผลิตวัสดุป้องกันรังสีที่มีความเหมาะสม และนำมาใช้ได้ตรงวัตถุประสงค์ของผู้ใช้มากขึ้น ประกอบกับ การที่ประเทศไทยเป็นแหล่งผลิตและส่งออก ยางธรรมชาติมากเป็นอันดับหนึ่งของโลก แต่มีปริมาณการใช้ยางธรรมชาติ ในประเทศน้อยมาก ผลิตภัณฑ์ ที่ได้จากงานวิจัยนี้จึงเป็นการส่งเสริมให้มีการใช้ยางธรรมชาติในประเทศให้มากขึ้น และช่วยเพิ่มมูลค่า ผลิตภัณฑ์ที่ทำจากยางธรรมชาติ อีกทั้งยังเป็นการสร้างนวัตกรรมใหม่ของภาคอุตสาหกรรมยางไทยที่มี ประโยชน์ต่อการพัฒนาประเทศในด้านต่าง ๆ อีกด้วย

2. วิธีการวิจัย (Experimental methods)

2.1 ยางและสารเคมี

ยางและสารเคมีที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัยแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ยางและสารเคมี

ยางและสารเคมี	คุณสมบัติ	ชื่อเคมี
ยางแท่ง (STR 5L)	ยางดิบ	Polyisoprene
โบรอนออกไซด์ (B ₂ O ₃)	สารกำบังรังสีนิวตรอน	Boron oxide
ตะกั่วออกไซด์ (Pb ₃ O ₄)	สารกำบังรังสีเอกซ์และรังสีแกมมา	Lead oxide
ทังสเตนออกไซด์ (WO ₃)	สารกำบังรังสีเอกซ์และรังสีแกมมา	Tungsten trioxide
แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO ₃)	สารตัวเติม	Calcium carbonate
ไซโคลเฮกซิลเบนโซไทอาโซล-2-ซัลโฟนาไมด์ (CBS)	สารเร่งปฏิกิริยายางคงรูป	N-Cyclohexylbenzothiazole-2-sulfonamide
ซิงค์ ออกไซด์ (ZnO)	สารกระตุ้นปฏิกิริยายางคงรูป	Zinc oxide
กรดสเตียริก	สารกระตุ้นปฏิกิริยายางคงรูป	Stearic acid

ยางและสารเคมี	คุณสมบัติ	ชื่อเคมี
สไตรีนต ฟีนอล (SPH)	สารต้านการออกซิเดชัน หรือ สารป้องกันยางเสื่อม	2,4-di(α -Phenylethyl)-phenol
กำมะถัน	สารทำให้ยางคงรูป	Sulphur
พาราฟินิก ออยล์	สารช่วยให้ยางนิ่ม	Paraffinic oil
ผงเขม่าดำ (N330)*	สารตัวเติมเสริมแรง	Carbon black (N330)
การประมาณค่า LOQ=($\bar{X}$ +10SD)	0.125 (125.1 ppm)	0.0130

2.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัยประกอบด้วย

2.2.1 เครื่องบดผสมระบบปิด (Internal mixer) ยี่ห้อ YFM (Yong Fong) รุ่น 0241

2.2.2 เครื่องผสมระบบเปิดแบบสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) ยี่ห้อ YFM (Yong Fong) รุ่น 0242

2.2.3 เครื่องขึ้นรูปยางแบบอัดร้อน (Hydraulic press with heated-plates) ยี่ห้อ YFM (Yong Fong) รุ่น 0138

2.2.4 เครื่องวัดอัตราการคงรูปของยาง (Moving die rheometer, MDR) ยี่ห้อ TECH PRO รุ่น rheo TECH MD+

2.2.5 เครื่องวัดความแข็ง (Durometer hardness tester) ยี่ห้อ Bareiss รุ่น Digitest II

2.2.6 เครื่องทดสอบสมบัติแรงดึง (Universal testing machine, UTM) ยี่ห้อ Zwick รุ่น Z005

2.2.7 เครื่องชั่ง (Electric balance) ความละเอียด 0.01 กรัม ยี่ห้อ Satorius รุ่น ED224S

2.2.8 ตู้อบ (Geer oven) ยี่ห้อ Yasuda รุ่น 102-SHF-SA

2.2.9 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope) ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-6610LV

2.2.10 ชุดเครื่องมือสำหรับวัดการป้องกันรังสีนิวตรอน จากต้นกำเนิดนิวตรอน ²⁴¹Am-Be (Americium-Beryllium)

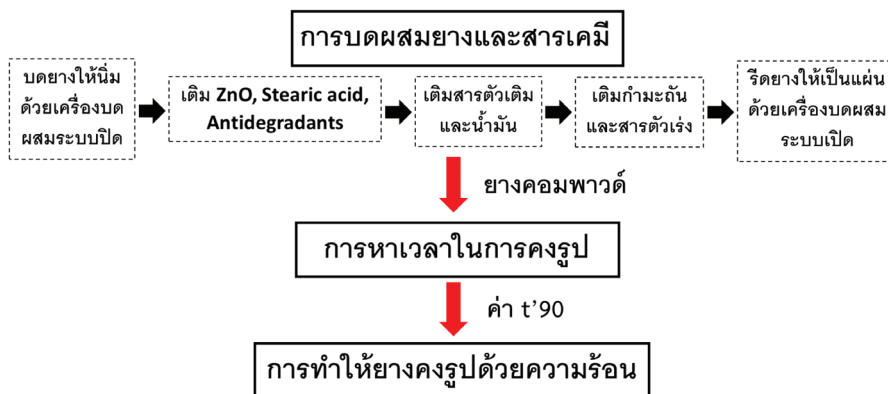
2.2.11 ชุดเครื่องมือสำหรับวัดการป้องกันรังสีเอกซ์ จากเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์ GE รุ่น ISOVOLT TITAN E 320 kV

2.2.12 ชุดเครื่องมือสำหรับวัดการป้องกันรังสีแกมมา จากต้นกำเนิดรังสีแกมมา ¹³⁷Cs

2.3 วิธีดำเนินงาน

2.3.1 ศึกษาและออกสูตรยางที่เหมาะสมที่มีส่วนผสมของยางธรรมชาติกับสารป้องกันรังสี

เตรียมยางคอมพาวด์โดยการผสมยางและสารเคมีตามสูตรพื้นฐาน (ตารางที่ 2) และสูตรการแปรปริมาณ (ตารางที่ 3) ในเครื่องบดผสมระบบปิดและเครื่องบดผสมระบบเปิดแบบสองลูกกลิ้ง จากนั้นนำยางคอมพาวด์ที่ได้มาหาเวลาในการคงรูปของยาง เพื่อสมบัติการคงรูปของยาง (ระยะเวลาสกอรัช; ts, และระยะเวลาที่ใช้ในการคงรูป; t₉₀) ที่อุณหภูมิ 160 °C ด้วยเครื่องวัดการคงรูปของยาง เวลาการคงรูปที่ได้มาใช้เตรียมขึ้นทดสอบสมบัติทางกายภาพ โดยใช้แม่พิมพ์และเครื่องอัดไฮดรอลิคพร้อมแผ่นความร้อน การเตรียมแผ่นยางสำหรับผลิตชุดป้องกันรังสีแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 ขั้นตอนการเตรียมแผ่นยางสำหรับผลิตชุดป้องกันรังสี

ตารางที่ 2 สูตรยางพื้นฐานเพื่อที่จะนำไปพัฒนาสูตรการผลิตชุดป้องกันรังสี (RP00)

ส่วนประกอบ	Phr ¹
ยาง STR 5L	100
CaCO ₃	แปรปริมาณ
โบรอนออกไซด์ หรือ ตะกั่วออกไซด์ หรือ ทังสเตนออกไซด์	แปรปริมาณ
Paraffinic Oil	5
ZnO	5
Stearic Acid	3
SPH	1
CBS	0.5
Carbon black (N330) ²	2
Sulphur	2

หมายเหตุ 1. phr = part per hundred parts of rubber (โดยน้ำหนัก)

2. งานวิจัยนี้ใช้ผงเขม่าดำในปริมาณน้อยมาก ซึ่งไม่ได้ต้องการสมบัติเสริมแรง ใช้เพื่อให้แผ่นยางมีสีดำเท่านั้น

การศึกษาผลกระทบของปริมาณสารป้องกันรังสีทั้ง 3 ชนิด คือ โบรอนออกไซด์ ตะกั่วออกไซด์ และ ทังสเตนออกไซด์ ในสูตรยางต่อสมบัติทางกายภาพและสมบัติการป้องกันรังสีของแผ่นยางสำหรับผลิตชุดป้องกันรังสี ทำได้โดยการแปรปริมาณของสารป้องกันรังสีในแผ่นยางสำหรับผลิตชุดป้องกันรังสี ดังแสดงในตารางที่ 3 โดยแผ่นยางสำหรับผลิตชุดป้องกันรังสีนิวตรอนใช้สารป้องกันรังสีเป็นสารประกอบโบรอน คือ โบรอนออกไซด์ ในขณะที่แผ่นยางสำหรับผลิตชุดป้องกันรังสีเอกซ์และรังสีแกมมาใช้สารป้องกันรังสีเป็นตะกั่วออกไซด์และทังสเตนออกไซด์ในการเตรียมแผ่นยางสำหรับผลิตชุดป้องกันรังสี ตามลำดับ ทั้งนี้การแปรปริมาณของโบรอนออกไซด์ ตะกั่วออกไซด์ และทังสเตนออกไซด์ มีการควบคุมให้ไม่เกิน 100 phr เมื่อรวมกับแคลเซียมคาร์บอเนต ยกเว้นสูตร PXGL60, PXGL70, PXGT60 และ PXGT70

ตารางที่ 3 การแปรปริมาณของแคลเซียมคาร์บอเนต และสารป้องกันรังสีในสูตรยางสำหรับผลิตชุดป้องกันรังสี

สูตรยาง	ปริมาณ (phr)			
	แคลเซียมคาร์บอเนต	โบรอนออกไซด์	ตะกั่วออกไซด์	ทังสเตนออกไซด์
RP00	100	-	-	-
PNBo1	90	10	-	-
PNBo3	80	20	-	-
PNBo5	60	40	-	-
PNBo10	30	70	-	-
PXGL5	85	-	15	-
PXGL10	75	-	25	-
PXGL20	55	-	45	-
PXGL40	-	-	100	-
PXGL60	-	-	270	-
PXGL70	-	-	500	-
PXGT5	85	-	-	15
PXGT10	75	-	-	25
PXGT20	50	-	-	50
PXGT40	-	-	-	100
PXGT60	-	-	-	375
PXGT70	-	-	-	900

2.4 การทดสอบสมบัติทางกายภาพ

2.4.1 การทดสอบค่าความแข็ง (Hardness) ตามวิธีการทดสอบมาตรฐาน ISO 7619-1:2010 โดยเครื่อง Durometer type A จำนวน 10 ครั้ง เพื่อนำมาหาค่าเฉลี่ย

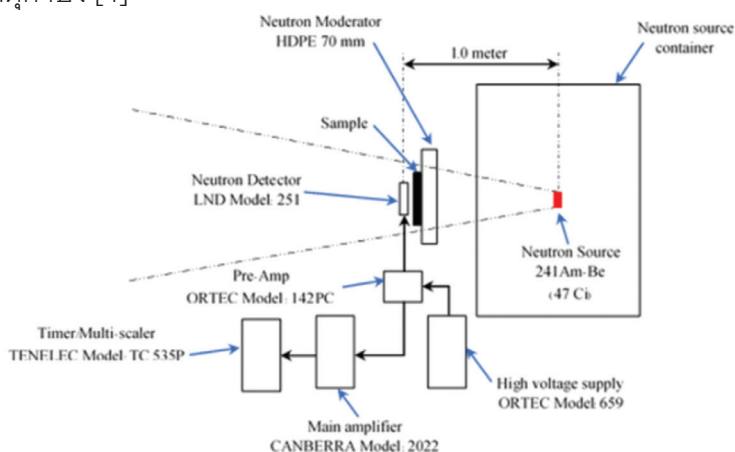
2.4.2 การทดสอบค่าความต้านแรงดึง (Tensile strength; MPa) ความยืดเมื่อขาด (Elongation at break; %) และความต้านแรงฉีกขาด (Tear strength; N/mm) ของชิ้นทดสอบด้วยเครื่อง Universal testing machine ขนาดของ Load-cell 1 KN สำหรับรายการความต้านแรงดึง และความยืดเมื่อขาด ทดสอบตามมาตรฐาน ISO 37:2017 ชิ้นทดสอบเป็นรูปดัมเบลชนิดที่ 1 ความเร็วในการเคลื่อนที่ของปากจับเท่ากับ 500 mm/min สำหรับรายการความต้านแรงฉีกขาด ทดสอบตามมาตรฐาน ISO 34-1:2015 ชิ้นทดสอบแบบมุม (Angle) ความเร็วในการเคลื่อนที่ของปากจับเท่ากับ 500 mm/min

2.4.3 การทดสอบการเร่งการเสื่อมอายุ (Aging) ทดสอบตามมาตรฐาน ISO 188 เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของความแข็ง ความต้านแรงดึง ความยืดเมื่อขาด และความต้านแรงฉีกขาด หลังการอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 72 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำตัวอย่างออกจากตู้อบ ควรปรับสภาวะชิ้นทดสอบไว้ไม่น้อยกว่า 16 ชั่วโมง แต่ไม่ควรเกิน 96 ชั่วโมง

2.5 การทดสอบการป้องกันรังสี

2.5.1 การป้องกันรังสีนิวตรอน

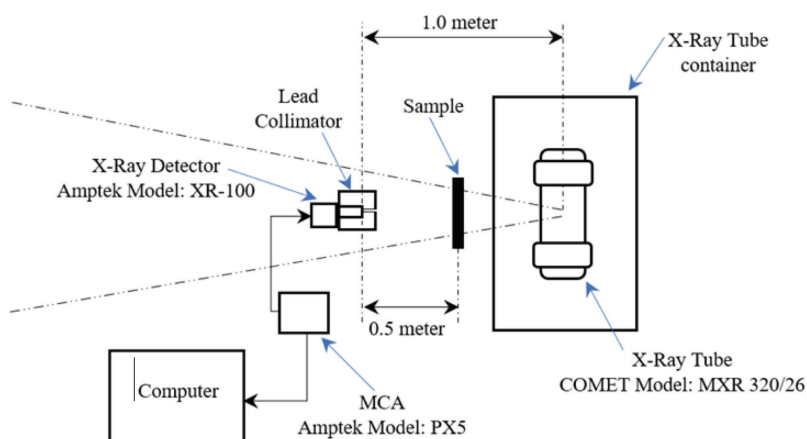
การทดสอบการป้องกันรังสีนิวตรอนใช้เครื่องมือที่จัดทำขึ้นตามแผนภาพที่แสดงในรูปที่ 2 ที่มีต้นกำเนิดนิวตรอน $^{241}\text{Am-Be}$ (Americium-Beryllium) ความแรงรังสี 47 คูรี ปลดปล่อยให้อนุภาคนิวตรอนพลังงานสูง (Fast neutron) ออกมาจากนั้นทำการหน่วงความเร็วของอนุภาคนิวตรอนด้วยพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง อนุภาคนิวตรอนจะถูกลดพลังงานลงเป็นนิวตรอนพลังงานต่ำ (Thermal neutron) แล้วทำการวัดด้วยหัววัด Neutron Detector LND Model: 251 ซึ่งจะต่อเข้ากับเครื่องขยายสัญญาณและนับสัญญาณ ใช้เวลาในการวัด 60 วินาที ทำการวัด 3 ซ้ำ โดยค่าที่วัดได้มาคำนวณร่วมกับจำนวนนับนิวตรอนเมื่อไม่มีวัสดุกำบัง [4]



รูปที่ 2 ชุดเครื่องมือสำหรับวัดการป้องกันรังสีนิวตรอน

2.5.2 การป้องกันรังสีเอกซ์

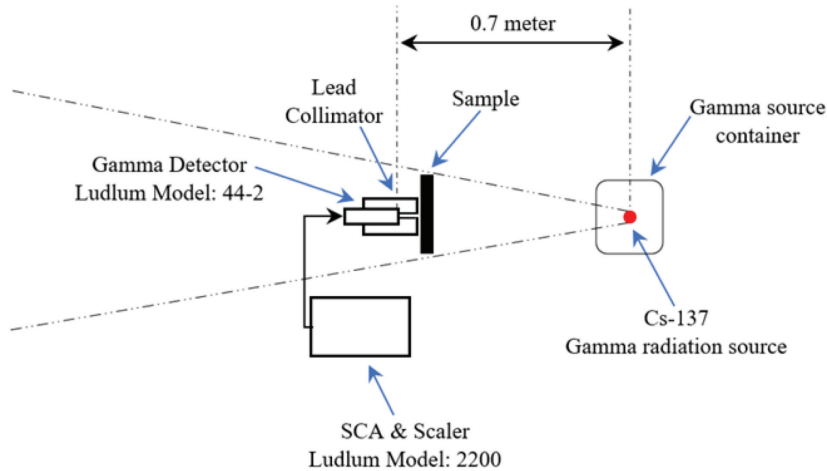
การทดสอบการป้องกันรังสีเอกซ์ใช้ระบบวัดตามแผนภาพที่แสดงในรูปที่ 3 ให้ช่วงพลังงาน 150 KeV โดยใช้เครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์ GE รุ่น ISOVOLT TITAN E 320 kV หัววัดรังสีแบบ Semi-Conductor Detector ชนิด Cadmium Telluride (CdTe) [5-7] ใช้เวลาในการวัด 200 วินาที ทำการวัด 3 ซ้ำ โดยค่าที่วัดได้ต้องนำมาหักลบกับค่ารังสีที่มีอยู่ในสิ่งแวดล้อม (Background) แล้วนำค่าจริงที่ได้มาหาค่าเฉลี่ย



รูปที่ 3 ระบบวัดการป้องกันรังสีเอกซ์

2.5.3 การป้องกันรังสีแกมมา

การทดสอบการป้องกันรังสีแกมมาใช้เครื่องมือที่จัดทำขึ้นตามแผนภาพที่แสดงในรูปที่ 4 มีต้นกำเนิดรังสีแกมมา ^{137}Cs ให้รังสีแกมมาพลังงาน 661.7 keV โดยใช้หัววัดรังสีแกมมาชนิดเรืองรังสี (Scintillation detector) ใช้เวลาในการวัด 60 วินาที ทำการวัด 3 ซ้ำ โดยค่าที่วัดได้ต้องนำมาหักลบกับค่ารังสีที่มีอยู่ในสิ่งแวดล้อม (Blackground) แล้วนำค่าจริงที่ได้มาหาค่าเฉลี่ย [4]



รูปที่ 4 แผนภาพแสดงชุดเครื่องมือสำหรับวัดการป้องกันรังสีแกมมา

2.6 การกระจายตัวของสารป้องกันรังสีในเนื้อยาง

การตรวจสอบการกระจายตัวของอนุภาคในเนื้อยางสามารถทำได้โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope) ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-6610LV สัญญาณภาพที่ได้จากหัววัด Secondary electron image (SEI) ศักย์เร่งอิเล็กตรอนที่ 10 kV กำลังขยาย 90 ระยะห่างระหว่าง Pole piece ของเลนส์ใกล้วัตถุกับผิวหน้าของตัวอย่าง (Working distance : WD) ปรับตามความเหมาะสม

3. ผลและวิจารณ์ (Results and discussion)

3.1 สมบัติทางกายภาพของแผ่นยางสำหรับผลิตชุดป้องกันรังสี

สมบัติการคงรูปของยางที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส ของแผ่นยางสำหรับผลิตชุดป้องกันรังสีจากยางธรรมชาติทั้ง 17 สูตร แสดงในตารางที่ 4 ซึ่งประกอบด้วย ระยะเวลาสกอรัช (Scorch time หรือ ts_1) ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ถึงระยะเวลาที่ยางยังคงสามารถไหลขึ้นรูปได้ ณ อุณหภูมินั้น ๆ และระยะเวลาที่ใช้ในการคงรูป (tc_{90})

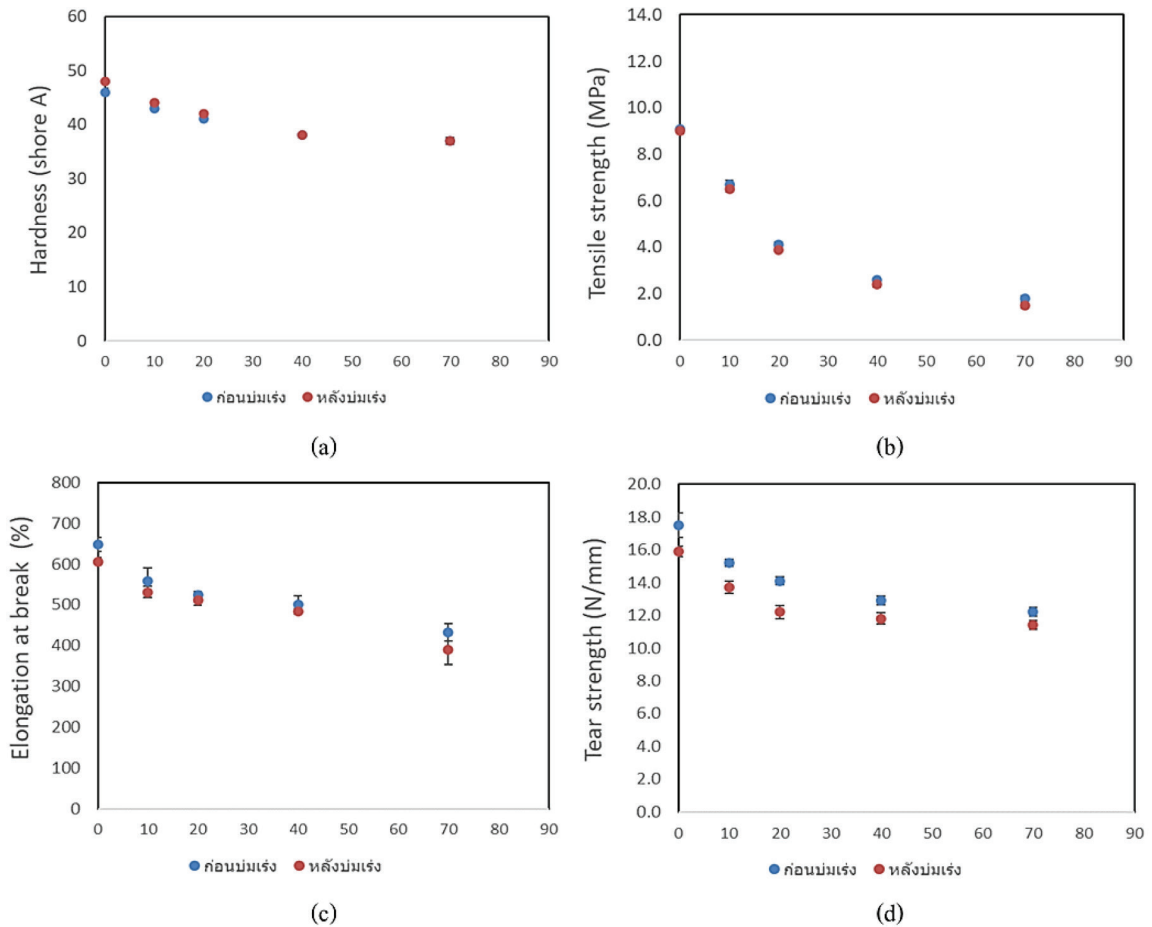
ตารางที่ 4 ค่าสมบัติการคงรูป ค่าความหนาแน่น ของยางสูตรต่าง ๆ

สูตรยาง	สมบัติการคงรูปของยาง		ความหนาแน่น (g/cm ³)
	ts ₁ (นาทื)	tc ₉₀ (นาทื)	
RP00	1.42	3.56	1.32
PNBo1	4.85	15.95	1.34
PNBo3	7.41	45.12	1.33
PNBo5	28.64	50.62	1.33
PNBo10	31.28	67.52	1.28
PXGL5	1.52	4.41	1.42
PXGL10	1.25	3.59	1.51
PXGL20	0.96	3.22	1.57
PXGL40	0.57	3.18	1.72
PXGL60	0.49	1.21	2.64
PXGL70	0.38	1.07	3.33
PXGT5	3.75	9.78	1.43
PXGT10	2.52	4.82	1.45
PXGT20	2.74	5.74	1.61
PXGT40	3.12	5.40	1.76
PXGT60	2.98	4.86	2.81
PXGT70	2.78	4.72	4.07
PXG*	-	-	4.55

หมายเหตุ * PXG คือ แผ่นยางของชุดป้องกันรังสีทางการค้า

ผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพของแผ่นยางสำหรับผลิตชุดป้องกันรังสีที่มีโบรอนออกไซด์เป็นสารป้องกันรังสีนิวตรอนในปริมาณที่แตกต่างกัน (สูตร PNBo1, PNBo3, PNBo5 และ PNBo10) เมื่อพิจารณาสมบัติการคงรูปแสดงในตารางที่ 4 ระยะเวลาที่ใช้ในการคงรูปเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของโบรอนออกไซด์สูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากโบรอนออกไซด์มีฤทธิ์เป็นกรด จึงทำหน้าที่เป็นสารหน่วงปฏิกิริยาก่อนการเกิดการคงรูป ทำให้ระยะเวลาที่ยางเกิดการคงรูปมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณโบรอนออกไซด์เพิ่มมากขึ้น และเมื่อพิจารณาค่าความหนาแน่น พบว่า ค่าความหนาแน่นลดลงเมื่อปริมาณสารป้องกันรังสีเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากสารป้องกันรังสีถูกเติมลงในสูตรดังกล่าวเข้าไปทดแทนปริมาณของสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตที่มีความหนาแน่นสูงกว่า ดังนั้นเมื่อปริมาณสารป้องกันรังสีเพิ่มขึ้นปริมาณสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตถูกปรับให้ลดลง ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นโดยรวมของแผ่นยางสำหรับผลิตชุดป้องกันรังสีลดลงแสดงในตารางที่ 4 สำหรับผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ค่าความแข็ง ค่าความต้านแรงดึง ค่าความยืด

เมื่อขาด และค่าความต้านแรงฉีกขาด พบว่า ลดลงอย่างมีนัยสำคัญโดยเฉพาะสูตร PNB010 ที่เติมโบรอน ออกไซด์ 70 phr มีค่าความต้านแรงดึงลดลงถึง 1.8 MPa ซึ่งถือว่าเป็นคุณสมบัติที่ต่ำมาก นอกจากนี้ การใส่สารตัวเติมไม่ว่าจะเป็นแคลเซียมคาร์บอเนตหรือโบรอนออกไซด์ ส่งผลให้ปริมาณการเชื่อมขวางใน เฟสยางลดลง และถ้าเติมลงในปริมาณที่สูงขึ้นจะทำให้เกิดการเชื่อมขวางที่ไม่ต่อเนื่องของเฟสยาง สำหรับ ผลของการบ่มเร่งด้วยความร้อน พบว่า แผ่นยางมีค่าความแข็ง ค่าความต้านแรงดึง ค่าความยืดเมื่อขาด และค่าความต้านแรงฉีกขาดลดลง

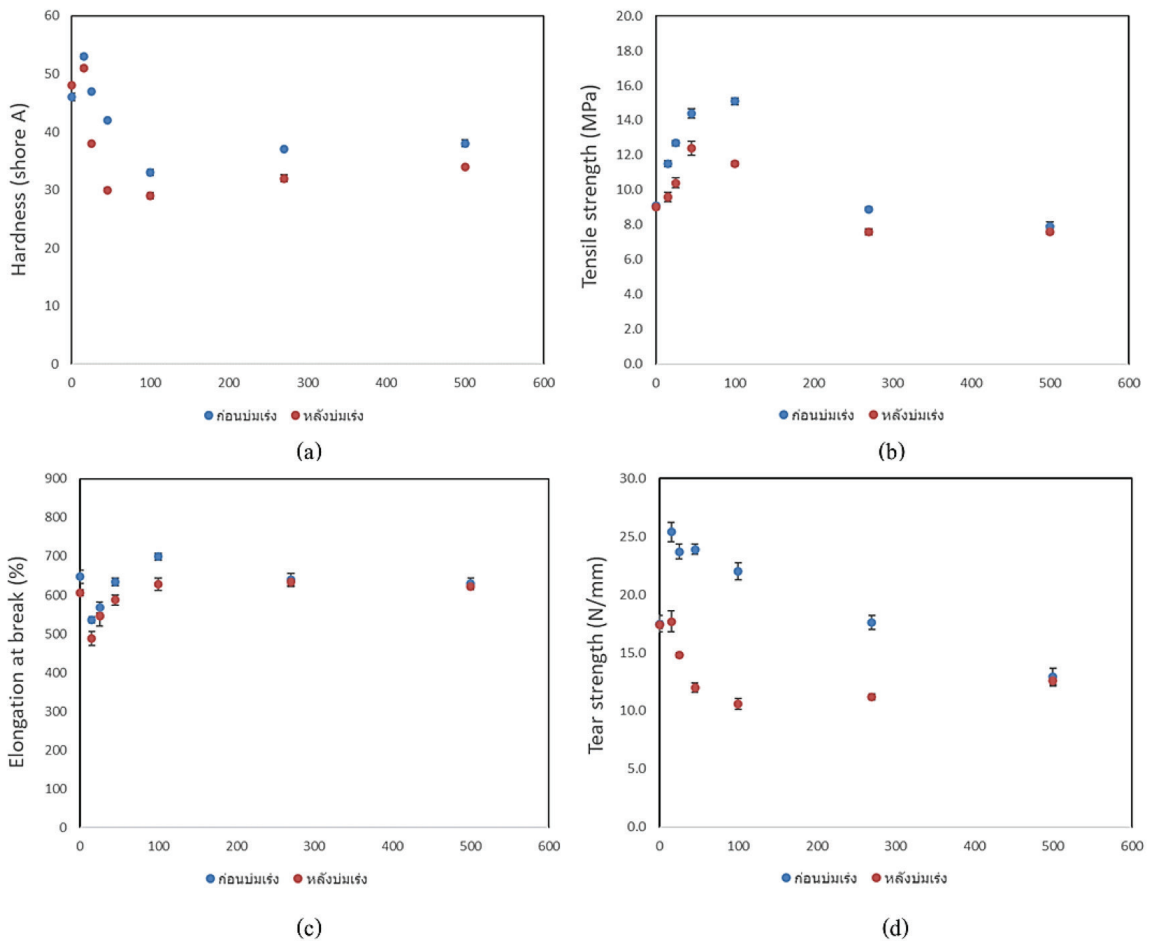


รูปที่ 5 สมบัติทางกายภาพของแผ่นยางสำหรับผลิตชุดป้องกันรังสี ที่เติมโบรอนออกไซด์เป็นสารป้องกันรังสี

(a) ค่าความแข็ง (b) ค่าความต้านแรงดึง (c) ค่าความยืดเมื่อขาด (d) ค่าความต้านแรงฉีกขาด

การเติมสารป้องกันรังสีชนิดตะกั่วออกไซด์เพื่อเป็นสารป้องกันรังสีเอกซ์และรังสีแกมมาลงในสูตรยาง (สูตร PXGL5, PXGL10, PXGL20, PXGL40, PXGL60 และ PXGL70) เมื่อพิจารณาสมบัติการคงรูป (ตารางที่ 4) พบว่า เมื่อเติมตะกั่วออกไซด์ลงในสูตรยางในปริมาณที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ระยะเวลาในการคงรูปลดลง ทั้งนี้การลดลงของระยะเวลาที่ใช้ในการคงรูปเมื่อเติมตะกั่วออกไซด์ซึ่งมีฤทธิ์เป็นด่างอ่อนและมีโลหะไฮเดรียมเป็นองค์ประกอบนั้นเกิดจากการที่โลหะไฮเดรียมส่งผลในทางกระตุ้นปฏิกิริยาการคงรูปของยาง โดยส่วนประกอบของโลหะออกไซด์ทำหน้าที่เป็นสารกระตุ้นร่วมของปฏิกิริยารีดอกซ์ของยาง ดังนั้น เมื่อปริมาณของตะกั่วออกไซด์เพิ่มขึ้น ระยะเวลาที่ใช้ในการคงรูปจึงลดลง สำหรับค่าความหนาแน่นของแผ่นยาง พบว่า เมื่อเติมตะกั่วออกไซด์ในแผ่นยางปริมาณที่สูงขึ้น ส่งผลให้สมบัติความหนาแน่นโดยรวม

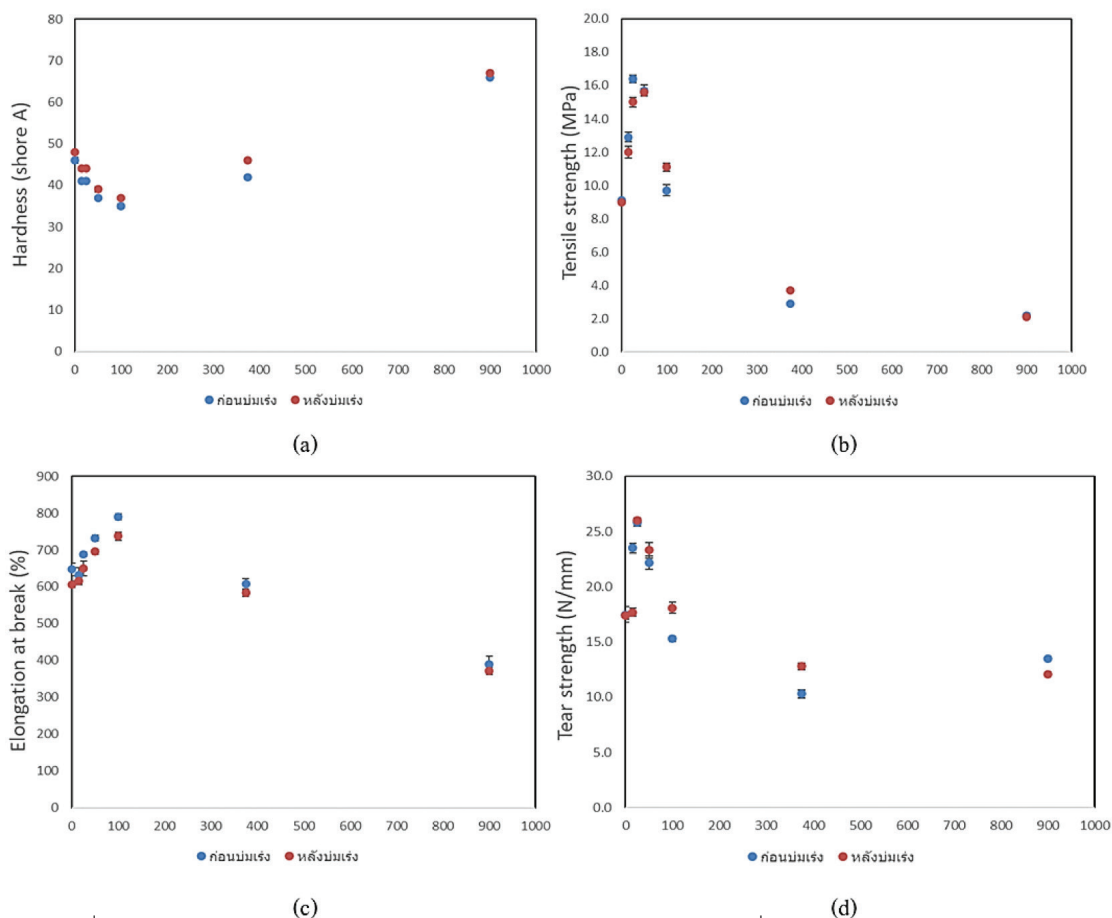
ของแผ่นยางเพิ่มสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากสารป้องกันรังสี คือ ตะกั่วออกไซด์ มีความหนาแน่นสูงกว่าสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตมาก ส่วนสมบัติทางกายภาพของแผ่นยางสำหรับผลิตชุดป้องกันรังสีดังแสดงในรูปที่ 6 เมื่อพิจารณาสมบัติความแข็ง พบว่า มีค่าลดลงเมื่อปริมาณของตะกั่วออกไซด์เพิ่มขึ้น ทั้งนี้ได้พิจารณาค่า Volume fraction ของสูตรยาง RP00 ที่มีสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนต 100 phr (ไม่มีตะกั่วออกไซด์) มีค่า Volume fraction เท่ากับ 0.234 กับสูตร PXGL40 มีตะกั่วออกไซด์ 100 phr (ไม่มีแคลเซียมคาร์บอเนต) มีค่า Volume fraction เท่ากับ 0.092 แสดงว่าที่ phr เท่ากันปริมาณเนื้อของสารตัวเติมต่างกัน สูตรที่เติมตะกั่วออกไซด์จะมีปริมาณเนื้อสารน้อยกว่าทำให้ค่าความแข็งของสูตรยางที่เพิ่มตะกั่วออกไซด์เพิ่มขึ้น จึงมีค่าลดลง ส่วนค่าความต้านแรงดึง ค่าความยืดเมื่อขาด และค่าความต้านแรงฉีกขาด ของสูตรที่เติมตะกั่วออกไซด์ 15 phr, 25 phr, 45 phr และ 100 phr มีค่าเพิ่มขึ้นตามลำดับ แต่เมื่อเพิ่มปริมาณตะกั่วออกไซด์มากขึ้นเป็น 270 phr และ 500 phr พบว่า มีค่าสมบัติทางกายภาพเหล่านี้ลดลง สำหรับผลของการบ่มเร่งด้วยความร้อน พบว่า แผ่นยางมีค่าความแข็ง ค่าความต้านแรงดึง ค่าความยืดเมื่อขาด และค่าความต้านแรงฉีกขาดลดลง



รูปที่ 6 ผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพของแผ่นยางสำหรับผลิตชุดป้องกันรังสี ที่เติมตะกั่วออกไซด์เป็นสารป้องกันรังสี (a) ค่าความแข็ง (b) ค่าความต้านแรงดึง (c) ค่าความยืดเมื่อขาด (d) ค่าความต้านแรงฉีกขาด

เมื่อพิจารณาสมบัติทางกายภาพของแผ่นยางสำหรับผลิตชุดป้องกันรังสีที่มีทั้งสแตนออกไซด์เป็นสารป้องกันรังสีเอกซ์และรังสีแกมมาในปริมาณที่แตกต่างกัน (สูตร PXGT5, PXGT10, PXGT20, PXGT40,

PXGT60 และ PXGT70) เมื่อพิจารณาสมบัติการคงรูป (ตารางที่ 4) พบว่า เมื่อเติมทั้งสเดนออกไซด์ลงในสูตรยางในปริมาณที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ระยะเวลาในการคงรูปลดลง เช่นเดียวกับแผ่นยางสำหรับผลิตชุดป้องกันรังสีโดยเติมตะกั่วออกไซด์เป็นสารป้องกันรังสี สำหรับค่าความหนาแน่นของแผ่นยาง พบว่า เมื่อเติมทั้งสเดนออกไซด์ในแผ่นยางปริมาณที่สูงขึ้น ส่งผลให้สมบัติความหนาแน่นโดยรวมของแผ่นยางก็เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากสารป้องกันรังสี คือ ทั้งสเดนออกไซด์ มีความหนาแน่นสูงกว่าสารตัวเดิมแคลเซียมคาร์บอเนตมาก สำหรับสมบัติทางกายภาพของแผ่นยางสำหรับผลิตชุดป้องกันรังสีดังแสดงในรูปที่ 6 พบว่า ค่าความแข็งของขึ้นทดสอบแผ่นยางสำหรับทำชุดป้องกันรังสีลดลงเมื่อเติมทั้งสเดนออกไซด์ลงในสูตรยาง โดยมีค่าความแข็งต่ำสุดเท่ากับ 35 Shore A ในสูตร PXGT40 โดยที่ความแข็งระดับนี้ชุดป้องกันรังสีที่เตรียมขึ้นสามารถทนทานต่อการเสียรูปเมื่อได้รับแรงกดในการใช้งานเป็นชุดป้องกันรังสีได้ อย่างไรก็ตาม ค่าความแข็งของยางสูตร PXGT70 เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเนื้อสารเพิ่มขึ้นโดยเทียบกับสูตร PXGT60 พิจารณาจากค่า Volume fraction ของสูตร PXGT70 เท่ากับ 0.509 มีค่าสูงเมื่อเทียบกับสูตร PXGT60 ที่มีค่า Volume fraction เท่ากับ 0.302 ส่วนค่าความต้านแรงดึงและค่าความต้านแรงฉีกขาดมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อปริมาณทั้งสเดนออกไซด์มากขึ้นจนถึงจุดสูงสุดในสูตร PXGT10 และมีแนวโน้มลดลงเมื่อเติมทั้งสเดนออกไซด์มากขึ้น ส่วนสมบัติความยืดเมื่อขาดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของทั้งสเดนออกไซด์เพิ่มขึ้นจนถึงจุดสูงสุดในสูตร PXGT40 จากนั้นมีแนวโน้มลดลง สำหรับผลของการบ่มเร่งด้วยความร้อน พบว่า แผ่นยางมีค่าความแข็ง ค่าความต้านแรงดึง ค่าความยืดเมื่อขาด และค่าความต้านแรงฉีกขาดลดลง

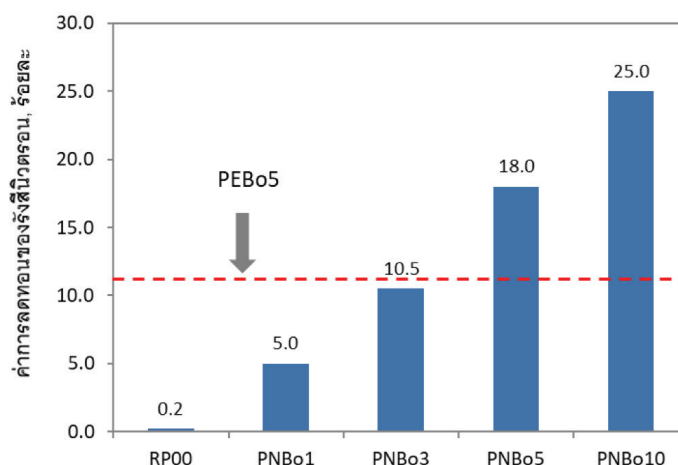


รูปที่ 7 ผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพของแผ่นยางสำหรับผลิตชุดป้องกันรังสี ที่เติมทั้งสเดนออกไซด์เป็นสารป้องกันรังสี (a) ค่าความแข็ง (b) ค่าความต้านแรงดึง (c) ค่าความยืดเมื่อขาด (d) ค่าความต้านแรงฉีกขาด

3.2 สมบัติการป้องกันรังสี

3.2.1 การป้องกันรังสีนิวตรอนของแผ่นยางที่เติมโบรอนออกไซด์

สมบัติการป้องกันรังสีนิวตรอนของแผ่นยางสำหรับผลิตชุดป้องกันรังสีที่เติมสารโบรอนออกไซด์คำนวณจากร้อยละการลดทอนของรังสีนิวตรอน พบว่า แผ่นยางป้องกันรังสีที่มีสารประกอบของธาตุโบรอนคือ โบรอนออกไซด์เป็นองค์ประกอบสามารถป้องกันนิวตรอนได้ดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับแผ่นยางที่ไม่ได้เติมสารประกอบของธาตุโบรอน (RP00) เมื่อสารโบรอนออกไซด์ในแผ่นยางป้องกันรังสีมีปริมาณเพิ่มขึ้นความสามารถในการป้องกันนิวตรอนก็เพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 8 ทั้งนี้สามารถอธิบายได้ว่าปริมาณของธาตุโบรอนที่มากขึ้นในแผ่นยางป้องกันรังสีทำให้ความหนาแน่นของนิวเคลียสโบรอนที่สามารถดูดซับนิวตรอนได้เพิ่มสูงขึ้น ดังนั้น โอกาสที่จะถูกชนโดยนิวตรอนและจะดูดซับนิวตรอนไว้ก็สูงขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการป้องกันรังสีสูงขึ้นตามปริมาณธาตุโบรอนในเนื้อยางที่เพิ่มขึ้น จากผลของความสามารถในการป้องกันรังสีนิวตรอนที่ความหนาแน่นเท่ากัน สรุปได้ว่าสูตร PNB010 ที่เติมโบรอนออกไซด์ 70 phr ให้ค่าการลดทอนรังสีนิวตรอนสูงสุด และเมื่อเปรียบเทียบค่าการลดทอนรังสีนิวตรอนกับวัสดุกำบังรังสีที่มีขายตามท้องตลาด (PEB05) ซึ่งทำมาจากพอลิเอทิลีนที่มีความหนาแน่นเท่ากัน พบว่า สูตร PNB010 มีค่าการลดทอนรังสีนิวตรอนสูงกว่าถึง 2 เท่า แต่เมื่อพิจารณาถึงเรื่องการผลิตต้นทุนในการผลิตและยังคงประสิทธิภาพในการป้องกันรังสีนิวตรอน สูตร PNB05 ที่เติมโบรอนออกไซด์ 40 phr ถือเป็นตัวเลือกที่ดีเพราะยังคงมีค่าการลดทอนรังสีนิวตรอนดีกว่าวัสดุกำบังรังสีที่มีขายตามท้องตลาด อย่างไรก็ตามแผ่นยางที่เติมโบรอนออกไซด์ทุกสูตรเมื่อขึ้นรูปแล้วตัวแผ่นยางเกิดมีเกล็ดสีขาวเล็ก ๆ ทั่วทั้งแผ่น โดยเฉพาะสูตรที่เพิ่มปริมาณโบรอนออกไซด์มากขึ้นยิ่งเห็นได้ชัด จึงสันนิษฐานได้ว่าเกิดจากตัวโบรอนออกไซด์เองที่ไม่ผสมอย่างสมบูรณ์เข้ากับยางคอมพาวด์แผ่นยางสูตรนี้จึงยังไม่เหมาะสมที่จะนำมาผลิตเป็นชุดป้องกันรังสี งานวิจัยจะต้องพัฒนาต่อไปในขั้นตอนผลิตและการขึ้นรูปเมื่อนำไปใช้งานจริง



รูปที่ 8 สมบัติการป้องกันรังสีนิวตรอนของแผ่นยางป้องกันรังสีที่เติมโบรอนออกไซด์และเปรียบกับวัสดุกำบังรังสีทางการค้าที่ทำจากพอลิเอทิลีน

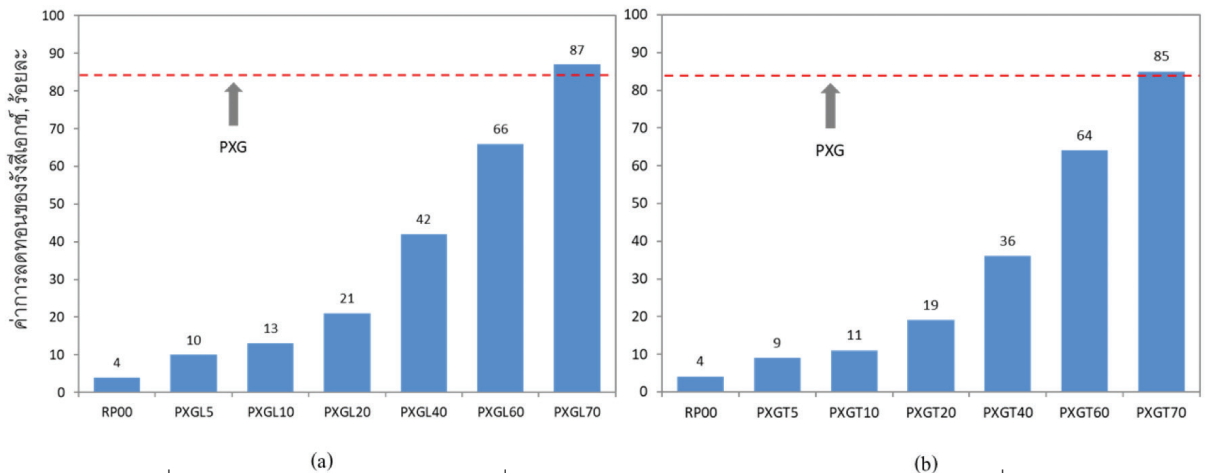
3.2.2 การป้องกันรังสีเอกซ์ของแผ่นยางที่เดิมตะกั่วออกไซด์ และทังสเตนออกไซด์

สมบัติการป้องกันรังสีเอกซ์ โดยใช้เครื่องเร่งอนุภาครังสี หัววัดรังสีแบบ Semi-conductor ชนิด Cadmium Telluride (CdTe) ช่วงพลังงาน 150 KeV ของชุดป้องกันรังสีที่เดิมสารตะกั่วออกไซด์และทังสเตนออกไซด์ในปริมาณต่าง ๆ ที่ความหนาเท่ากัน แสดงในรูปที่ 9 (a) และ (b) แสดงให้เห็นชัดเจนว่าความสามารถในการป้องกันรังสีเอกซ์เพิ่มสูงขึ้นเมื่อปริมาณสารตะกั่วออกไซด์และทังสเตนออกไซด์ในแผ่นยางป้องกันรังสีสูงขึ้น เมื่อพิจารณาค่าการลดทอนรังสีเอกซ์ของแผ่นตะกั่ว (Pb) มาตรฐาน พบว่า สูตร RP00, PXGL5, PXGL10, PXGL20, PXGL40, PXGL60 และ PXGL70 มีความหนาเทียบเท่าแผ่นตะกั่วมาตรฐานเท่ากับ 0.01, 0.02, 0.04, 0.07, 0.17, 0.34 และ 0.64 mmPb ตามลำดับ [8-9] ส่วนสูตร PXGT5, PXGT10, PXGT20, PXGT40, PXGT60 และ PXGT70 มีความหนาเทียบเท่าแผ่นตะกั่วมาตรฐานเท่ากับ 0.02, 0.04, 0.07, 0.14, 0.32 และ 0.59 mmPb ตามลำดับ [8-9] แสดงตารางที่ 5 ทั้งนี้มาตรฐานสำหรับการผลิตชุดป้องกันรังสีของเสื้อป้องกันรังสีเอกซ์และปกคอป้องกันรังสีเอกซ์ สำหรับชุดป้องกันรังสีด้านหน้ากำหนดให้มีค่าความหนาเทียบเท่าตะกั่วเท่ากับ 0.35 mmPb และ สำหรับชุดป้องกันรังสีด้านหลังกำหนดให้มีค่าความหนาเทียบเท่าตะกั่วเท่ากับ 0.25 mmPb [8]

ตารางที่ 5 เปรียบเทียบความหนาเทียบเท่าตะกั่วของสูตรยางป้องกันรังสีเอกซ์ที่เดิมตะกั่วออกไซด์ และทังสเตนออกไซด์

สูตรยาง เดิมตะกั่วออกไซด์	ความหนาเทียบเท่าแผ่น ตะกั่วมาตรฐาน (mmPb)	สูตรยาง เดิมทังสเตนออกไซด์	ความหนาเทียบเท่าแผ่น ตะกั่วมาตรฐาน (mmPb)
RP00	0.01	RP00	0.01
PXGL5	0.02	PXGT5	0.02
PXGL10	0.04	PXGT10	0.04
PXGL20	0.07	PXGT20	0.07
PXGL40	0.17	PXGT40	0.14
PXGL60	0.34	PXGT60	0.32
PXGL70	0.64	PXGT70	0.59
PXG	0.53	PXG	0.53

งานวิจัยยังได้เปรียบเทียบค่าการลดทอนรังสีเอกซ์กับชุดป้องกันรังสีที่มีขายตามท้องตลาด (PXG) แสดงในรูปที่ 7 (a) และ (b) ที่ทำจากยางสังเคราะห์ ซึ่งมีความหนาเทียบเท่าตะกั่วเท่ากับ 0.53 mmPb พบว่าค่าการลดทอนรังสีเอกซ์ของสูตร PXGL70 และสูตร PXGT70 มีค่าการลดทอนที่ดีกว่าชุดป้องกันรังสีที่มีขายตามท้องตลาด ดังนั้นสูตรที่เหมาะสมที่สุดสำหรับนำมาพัฒนาเป็นชุดป้องกันรังสีเอกซ์ของแผ่นยางที่เดิมตะกั่วออกไซด์ คือ สูตร PXGL70 และแผ่นยางที่เดิมทังสเตนออกไซด์ คือ สูตร PXGT70



รูปที่ 9 สมบัติการป้องกันรังสีเอกซ์โดยใช้เครื่องเร่งอนุภาครังสี ของแผ่นยางสำหรับผลิตชุดป้องกันรังสีที่เดิม (a) ตะกั่วออกไซด์ (b) ทังสเตนออกไซด์ และเปรียบเทียบกับชุดป้องกันรังสีทางการค้าที่ทำจากยางสังเคราะห์

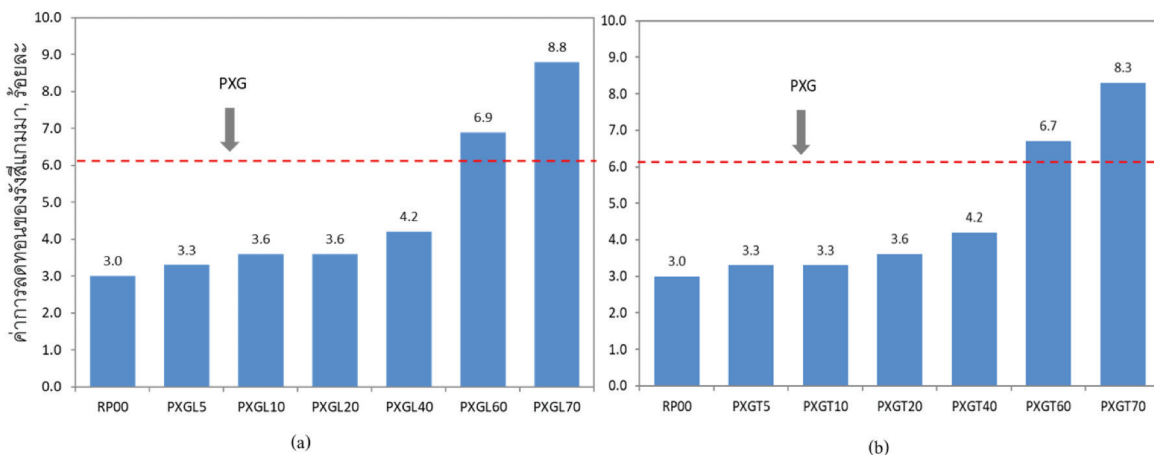
3.2.3 การป้องกันรังสีแกมมาของแผ่นยางที่เดิมตะกั่วออกไซด์ และทังสเตนออกไซด์

สมบัติการป้องกันรังสีแกมมาจากต้นกำเนิดรังสีแกมมา ^{137}Cs (662 keV) ของชุดป้องกันรังสีที่เดิมสารตะกั่วออกไซด์และทังสเตนออกไซด์ในปริมาณต่าง ๆ ที่ความหนาเท่ากัน แสดงในรูปที่ 10 (a) และ (b) ค่าการลดทอนรังสีแกมมาแสดงให้เห็นชัดเจนว่าความสามารถในการป้องกันรังสีแกมมาเพิ่มสูงขึ้นเมื่อปริมาณสารตะกั่วออกไซด์และทังสเตนออกไซด์ในแผ่นยางป้องกันรังสีสูงขึ้น เมื่อพิจารณาค่าการลดทอนรังสีแกมมาของแผ่นตะกั่ว (Pb) พบว่า สูตร RP00, PXGL5, PXGL10, PXGL20, PXGL40, PXGL60 และ PXGL70 มีความหนาเทียบเท่าตะกั่วเท่ากับ 0.01, 0.03, 0.07, 0.18, 0.36, 0.54 และ 0.77 mmPb ตามลำดับ [8-9] ส่วนสูตร PXGT5, PXGT10, PXGT20, PXGT40, PXGT60 และ PXGT70 มีความหนาเทียบเท่าตะกั่วเท่ากับ 0.02, 0.07, 0.17, 0.36, 0.51 และ 0.73 mmPb ตามลำดับ [8-9] แสดงดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 เปรียบเทียบความหนาเทียบเท่าตะกั่วของสูตรยางป้องกันรังสีแกมมาที่เดิมตะกั่วออกไซด์ และทังสเตนออกไซด์

สูตรยาง	ความหนาเทียบเท่าแผ่นตะกั่วมาตรฐาน (mmPb)	สูตรยางเดิมทังสเตนออกไซด์	ความหนาเทียบเท่าแผ่นตะกั่วมาตรฐาน (mmPb)
RP00	0.01	RP00	0.01
PXGL5	0.07	PXGT5	0.07
PXGL10	0.18	PXGT10	0.07
PXGL20	0.18	PXGT20	0.18
PXGL40	0.36	PXGT40	0.36
PXGL60	0.54	PXGT60	0.51
PXGL70	0.77	PXGT70	0.73
PXG	0.53	PXG	0.53

งานวิจัยยังได้เปรียบเทียบค่าการลดทอนรังสีแกมมาของชุดป้องกันรังสีที่มีขายตามท้องตลาด (PXG) แสดงในรูปที่ 8 (a) และ (b) ที่ทำจากยางสังเคราะห์ ซึ่งมีความหนาเทียบเท่าตะกั่วเท่ากับ 0.53 mmPb พบว่าค่าการลดทอนรังสีแกมมาของสูตร PXGL70 และสูตร PXGT70 มีค่าการลดทอนที่ดีกว่าชุดป้องกันรังสีที่มีขายตามท้องตลาด ดังนั้นสูตรที่เหมาะสมที่สุดสำหรับนำมาพัฒนาเป็นชุดป้องกันรังสีแกมมาของแผ่นยางที่เติมตะกั่วออกไซด์ คือ สูตร PXGL70 และแผ่นยางที่เติมทังสเตนออกไซด์ คือ สูตร PXGT70

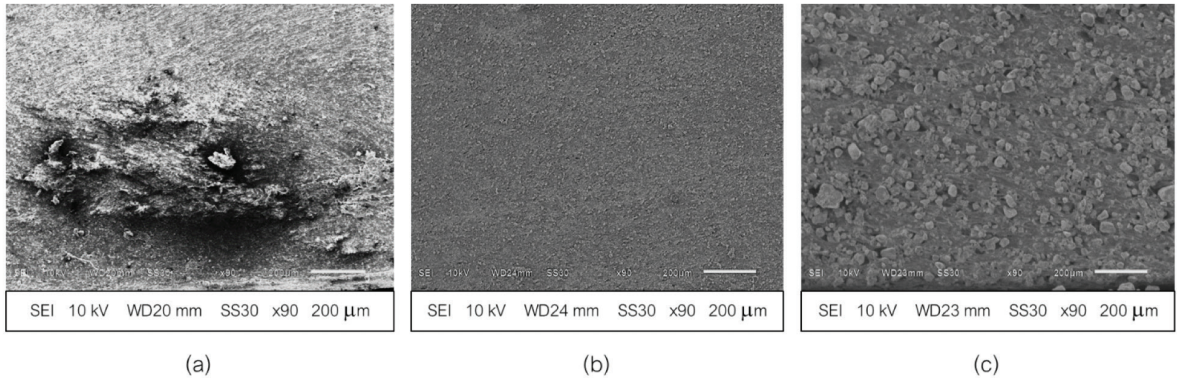


รูปที่ 10 สมบัติการป้องกันรังสีแกมมาของแผ่นยางสำหรับผลิตชุดป้องกันรังสีที่เติม
(a) ตะกั่วออกไซด์ (b) ทังสเตนออกไซด์ และเปรียบเทียบกับชุดป้องกันรังสีทางการค้าที่ทำจากยางสังเคราะห์

เมื่อพิจารณาผลของแคลเซียมคาร์บอเนตต่อการลดทอนรังสีของแผ่นยาง เนื่องจากมีสูตรยางบางสูตรที่มีการแปรปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต แสดงดังตารางที่ 3 พบว่า สูตร RP00 ที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนต 100 phr แต่ไม่ได้เติมสารป้องกันรังสี มีค่าการลดทอนรังสีเล็กน้อย (แสดงค่าการลดทอนรังสีของแผ่นยางสูตร RP00 ดังรูปที่ 8 9 และ 10) เมื่อเทียบกับสูตรที่เติมสารป้องกันรังสีที่เพิ่มขึ้น ซึ่งถือว่าแคลเซียมคาร์บอเนตอาจมีผลต่อการป้องกันรังสีเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

3.3 การกระจายตัวของสารป้องกันรังสีในเนื้อยาง

การกระจายตัวของสารป้องกันรังสีในเนื้อยางเป็นอีกหนึ่งปัจจัยหลักที่มีผลต่อประสิทธิภาพการป้องกันรังสีของแผ่นยางสำหรับผลิตชุดป้องกันรังสี การกระจายตัวที่สม่ำเสมอทั่วทั้งแผ่นยางส่งผลให้การป้องกันรังสีดีขึ้นอย่างชัดเจน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 90 เท่า เพื่อพิสูจน์แสดงการกระจายตัวของสารป้องกันรังสีในแผ่นยางป้องกันรังสีที่เติมโบรอนออกไซด์ (PNBo5) ตะกั่วออกไซด์ (PXGL70) และทังสเตนออกไซด์ (PXGT70) ภาพถ่าย SEM (รูปที่ 9) แสดงให้เห็นการกระจายตัวของตะกั่วออกไซด์ (b) และทังสเตนออกไซด์ (c) เป็นไปอย่างสม่ำเสมอในเนื้อยาง ถึงแม้อนุภาคของทังสเตนจะมีขนาดใหญ่กว่าตะกั่วออกไซด์ก็ตาม แต่ยังกระจายตัวได้ดีในเนื้อยาง ส่วนอนุภาคของโบรอนออกไซด์ (a) มีขนาดใหญ่ และจับตัวเป็นก้อน ไม่แตกกระจายทั่วแผ่นยาง ผลการถ่ายภาพ SEM ทำให้สันนิษฐานได้ว่าเป็นสาเหตุทำให้ แผ่นยางที่เติมโบรอนออกไซด์ที่มีอนุภาคขนาดใหญ่ อาจเป็นสาเหตุที่ทำให้การผสมของโบรอนออกไซด์กับยางเกิดชั้นยากและทำให้เกิดมีเกล็ดสีขาวเล็ก ๆ ทั่วทั้งแผ่นเมื่อขึ้นรูป



รูปที่ 11 ภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 90 เท่า แสดงการกระจายตัวของสารป้องกันรังสีในแผ่นยางสำหรับผลิตชุดป้องกันรังสีที่เดิม
(a) โบรอนออกไซด์-สูตร PNB05 (b) ตะกั่วออกไซด์-สูตร PXGL70 (c) ทังสเตนออกไซด์-สูตร PXGT70

3.4 การเปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพของสูตรยางที่ดีที่สุดจากงานวิจัยกับผลิตภัณฑ์ชุดป้องกันรังสีทางการค้า

ส่วนนี้เป็นการเปรียบเทียบผลของสมบัติทางกายภาพของสูตรยางที่ดีที่สุดจากงานวิจัยกับผลิตภัณฑ์ชุดป้องกันรังสีทางการค้า แสดงดังตารางที่ 7 พบว่า สมบัติทางกายภาพของความแข็งและความต้านแรงฉีกขาดของผลิตภัณฑ์ชุดป้องกันรังสีทางการค้า มีค่าที่มากกว่าสูตรจากงานวิจัย แต่สมบัติค่าความต้านแรงดึงและความยืดเมื่อขาดของสูตรจากงานวิจัยมีค่ามากกว่าผลิตภัณฑ์ชุดป้องกันรังสีทางการค้า ยกเว้นค่าความต้านแรงดึงของสูตร PXGT70 ที่มีค่า 2.2 MPa ซึ่งถือว่าต่ำมากสำหรับการใช้งานจริง จึงต้องพิจารณาการเลือกสูตรนี้มาใช้ให้เหมาะสม สำหรับสมบัติของการบ่มเร่งด้วยความร้อน พบว่า สูตรยางจากงานวิจัยและผลิตภัณฑ์ชุดป้องกันรังสีทางการค้ามีค่าการเปลี่ยนแปลงใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 7 การเปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพของสูตรยางจากงานวิจัยกับผลิตภัณฑ์ชุดป้องกันรังสีทางการค้า

สมบัติ	สูตรยางจากงานวิจัย		ผลิตภัณฑ์ชุดป้องกันรังสีทางการค้า
	PXGL70	PXGT70	
ความหนาแน่น (g/cm ³)	3.33 ± 0.02	4.07 ± 0.02	4.55 ± 0.03
ความแข็ง (shore A)	38 ± 0.6	66 ± 0.3	85 ± 0.4
ความต้านแรงดึง (MPa)	7.9 ± 0.2	2.2 ± 0.1	5.5 ± 0.4
ความยืดเมื่อขาด (%)	630 ± 13.3	390 ± 25.4	212 ± 3.7
ความต้านแรงฉีกขาด (N/mm)	12.9 ± 0.8	13.5 ± 0.2	22.7 ± 3.3
การบ่มเร่ง ที่ 70 °C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง			
-ความแข็งเปลี่ยนแปลง, Shore A	-4	+1	-3
-ความต้านแรงดึงเปลี่ยนแปลง, ร้อยละ	-4	-4	-1
-ความยืดเมื่อขาดเปลี่ยนแปลง, ร้อยละ	-1	-4	+2
-ความต้านแรงฉีกขาดเปลี่ยนแปลง, ร้อยละ	-2	-10	-8

4. สรุป (Conclusion)

แผ่นยางป้องกันรังสีสำหรับผลิตชุดป้องกันรังสีนิวตรอน รังสีเอกซ์และรังสีแกมมาถูกพัฒนาขึ้นจากยางธรรมชาติผสมโบรอนออกไซด์สำหรับป้องกันรังสีนิวตรอน ตะกั่วออกไซด์และทังสเตนออกไซด์สำหรับป้องกันรังสีเอกซ์และรังสีแกมมา โดยผลการศึกษาสมบัติการป้องกันรังสีนิวตรอนจากต้นกำเนิดนิวตรอน ²⁴¹Am-Be (Americium-Beryllium) พบว่า ที่ความหนาเท่ากัน คือ 2 mm แผ่นยางป้องกันรังสีสูตรที่เติมสารโบรอนออกไซด์ 40 phr สูตร BNBo5 ให้ค่าการลดทอนรังสีนิวตรอน ร้อยละ 18 ซึ่งดีกว่าวัสดุกำบังรังสีที่มีในท้องตลาดซึ่งทำมาจากพอลิเอทิลีน ที่ให้ค่าการลดทอนรังสีนิวตรอน ร้อยละ 11 แต่แผ่นยางที่เติมโบรอนออกไซด์ เมื่อขึ้นรูปแล้วตัวแผ่นยางเกิดเกล็ดสีขาวเล็ก ๆ ทั่วทั้งแผ่น ซึ่งสันนิษฐานจาก SEM ได้ว่าเกิดจากโบรอนออกไซด์ มีอนุภาคขนาดใหญ่ที่ไม่ผสมเข้ากับยางคอมพาวด์ และสมบัติทางกายภาพความต้านแรงดึงต่ำมาก แผ่นยางสูตรนี้จึงยังไม่เหมาะสมที่จะนำมาผลิตเป็นชุดป้องกันรังสี งานวิจัยยังต้องพัฒนาวิธีการที่เหมาะสมในการผสมโบรอนออกไซด์กับยางธรรมชาติต่อไป นอกจากนี้งานวิจัยยังได้ศึกษาสมบัติการลดทอนรังสีเอกซ์ โดยใช้เครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์ และศึกษาสมบัติการลดทอนรังสีแกมมาจากต้นกำเนิดรังสีแกมมา ¹³⁷Cs พบว่าความสามารถในการป้องกันรังสีของแผ่นยางป้องกันรังสีเพิ่มสูงขึ้นเมื่อปริมาณตะกั่วออกไซด์และทังสเตนออกไซด์ในแผ่นยางสูงขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบค่าการลดทอนรังสีเอกซ์และรังสีแกมมากับชุดป้องกันรังสีที่มีขายตามท้องตลาดที่ทำจากยางสังเคราะห์ พบว่า ค่าการลดทอนรังสีเอกซ์และรังสีแกมมาของสูตรที่เติมตะกั่วออกไซด์ 500 phr สูตร PXGL70 มีค่าการลดทอนรังสีร้อยละ 87 และ 8.8 ตามลำดับ และสูตรที่เติมทังสเตนออกไซด์ 900 phr สูตร PXGT70 มีค่าการลดทอนรังสีเอกซ์และรังสีแกมมาร้อยละ 85 และ 8.3 ตามลำดับซึ่งแผ่นยางทั้งสองสูตรมีค่าการลดทอนรังสีเอกซ์และรังสีแกมมาที่ดีกว่าชุดป้องกันรังสีที่มีขายตามท้องตลาดโดยค่าการลดทอนรังสีร้อยละ 84 และ 6.2 ตามลำดับ ที่ความหนาเท่ากัน คือ 2 mm งานวิจัยได้ศึกษาสมบัติทางกายภาพพื้นฐานของแผ่นยางป้องกันรังสี ได้แก่ ความแข็ง ความต้านแรงดึง ความยืดเมื่อขาด และความต้านแรงฉีกขาด พบว่า แผ่นยางป้องกันรังสี สูตร PXGL70 ที่มีปริมาณสารป้องกันรังสีสูงขึ้นจะมีค่าสมบัติทางกายภาพมีแนวโน้มลดลงอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ เมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพของแผ่นยางที่ใช้ผลิตชุดป้องกันรังสีทางการค้า แต่แผ่นยางป้องกันรังสี สูตร PXGT70 สมบัติความต้านแรงดึงมีค่าต่ำมากจึงต้องพิจารณาการใช้งานอย่างเหมาะสมต่อไป

5. กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgement)

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณกลุ่มยางและผลิตภัณฑ์ยาง กองวัสดุวิศวกรรม กรมวิทยาศาสตร์บริการ ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ เครื่องมือ และสนับสนุนการทำโครงการวิจัยนี้ ขอขอบคุณสถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (สทน.) ที่ให้ความอนุเคราะห์การวัดสมบัติการป้องกันรังสีนิวตรอน รังสีเอกซ์และรังสีแกมมาของแผ่นยางป้องกันรังสีจากงานวิจัยนี้

6. เอกสารอ้างอิง (References)

- [1] สมาคมโรคจากการประกอบอาชีพและสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย. ความรู้เกี่ยวกับรังสีเบื้องต้น [อินเทอร์เน็ต]. 2564 [เข้าถึงเมื่อ 12 มกราคม 2566]. เข้าถึงจาก: <https://www.aoed.org/articles/2020/september/radiation/>

- [2] เกียรติศักดิ์ แสนบุญเรือง, เอกชัย วิมลมาลา, ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ, กীরติกานต์ นิลยง. การผลิตแผ่นกำบังอนุภาคนิวตรอนและรังสีแกมมาจากวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงซีลี้อยู่ไม้ ระยะที่ 2: รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์. กรุงเทพฯ: สำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม; 2560.
- [3] อรสา อ่อนจันทร์, นิชาภา บัวสุวรรณ. บล็อกยางกำบังนิวตรอนและรังสีแกมมาจากยางธรรมชาติ. *Bulletin of Applied Sciences*. 2017;6(6):80-87.
- [4] Picha R, Channuie J, Khaweerat S, Liamsuwan T, Promping J, Ratanatongchai W, et al. Gamma and neutron attenuation properties of barite-cement mixture. *J Phys: Conf Ser*. 2015;611:012002.
- [5] Kato M, Chida K, Munehisa M, Sato T, Inaba Y, Suzuki M, Zuguchi M, et al. Non-lead protective aprons for the protection of interventional radiology physicians from radiation exposure in clinical settings: An initial study. *Diagnostics*. 2021;11(9):1613.
- [6] Mori H, Koshida K, Ishigamori O, Matsubara K. Evaluation of the effectiveness of X-ray protective aprons in experimental and practical fields. *Radiol Phys Technol*. 2014;7(1):158–66.
- [7] Kim SC, Choi JR, Jeon BK. Physical analysis of the shielding capacity for a lightweight apron designed for shielding low intensity scattering X-rays. *Sci Rep*. 2016;1-7.
- [8] International Electrotechnical Commission (IEC). Protective devices against diagnostic medical X-radiation – Part 3: Protective clothing, eyewear and protective patient shields. IEC 61331-3:2014. London, UK: IEC; 2014.
- [9] Büermann L. Determination of lead equivalent values according to IEC 61331-1:2014—Report and short guidelines for testing laboratories. *J Instrum*. 2016;11:T09002. doi: 10.1088/1748-0221/11/09/T09002