

# การพัฒนาสูตรยางคอมพาวนด์สำหรับการวัลคาไนซ์ด้วยลำอิเล็กตรอน

## Development of compound rubber formula for electron beam vulcanization

5

ภัณฑิลา ภูมิระเบียบ<sup>1\*</sup>, อรวรรณ ปิ่นประยูร<sup>1</sup>, นิชาภา บัวสุวรรณ<sup>1</sup>, เกศินี เหมวิเชียร<sup>2</sup>

Pantila Bhumirabab<sup>1\*</sup>, Orawan Pinprayoon<sup>1</sup>, Nichapa Buasuwan<sup>1</sup>, Kasinee Hemvichian<sup>2</sup>

รับบทความ: 7 มีนาคม 2565 แก้ไขบทความ: 1 มิถุนายน 2565 ยอมรับตีพิมพ์: 14 มิถุนายน 2565

### บทคัดย่อ

การวัลคาไนซ์ยางด้วยลำอิเล็กตรอน (Electron beam) เป็นเทคนิคที่ให้อัตราเร็วในการวัลคาไนซ์สูง และมีความสม่ำเสมอมากกว่าการวัลคาไนซ์ด้วยระบบกัมมันต์ อีกทั้งมีการเติมสารเคมีลงในระบบน้อย ทำให้ไม่มีสารตกค้าง จึงเป็นวิธีที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม งานวิจัยนี้ใช้ยางแท่งในการพัฒนาสูตรยางคอมพาวนด์ที่วัลคาไนซ์ได้ด้วยลำอิเล็กตรอน โดยการศึกษาชนิดและปริมาณของสารไวต่อปฏิกิริยา (Sensitizers) คือ n-Butyl acrylate (n-BA) และ Trimethylolpropane trimethacrylate (TMPT) ในปริมาณ 3 phr และ 5 phr แล้วเปรียบเทียบค่าความแข็ง ความต้านแรงดึง ความยืดเมื่อขาด โมดูลัสที่ความยืดร้อยละ 300 และการยืดอยู่ตัวของแผ่นยางคอมพาวนด์ที่วัลคาไนซ์ด้วยลำอิเล็กตรอนที่ได้กับแผ่นยางคอมพาวนด์ที่วัลคาไนซ์ด้วยกัมมันต์ นอกจากนี้ ยังได้ศึกษาปริมาณรังสีจากลำอิเล็กตรอน (Dose) ที่เหมาะสมสำหรับการวัลคาไนซ์ยาง โดยการฉายลำอิเล็กตรอนที่มีพลังงานในการเร่งอนุภาคของอิเล็กตรอน 10 ล้านอิเล็กตรอนโวลต์ (MeV) ไปยังแผ่นยางที่มีปริมาณรังสีจากลำอิเล็กตรอนต่าง ๆ ได้แก่ 50 kGy, 100 kGy, 150 kGy และ 200 kGy จากการศึกษาพบว่าสูตรที่เหมาะสมสำหรับการวัลคาไนซ์ด้วยลำอิเล็กตรอนสำหรับผลิตภัณฑ์ยางที่ต้องการความยืดอยู่ต่ำคือสูตรที่ประกอบด้วยสารไวต่อปฏิกิริยาชนิด TMPT ในปริมาณ 5 phr และวัลคาไนซ์ที่ปริมาณรังสีจากลำอิเล็กตรอน 200 kGy อย่างไรก็ตาม สมบัติทางกายภาพของยางที่ได้จากการศึกษานี้ยังคงน้อยกว่าแผ่นยางคอมพาวนด์ที่ได้จากการวัลคาไนซ์ด้วยกัมมันต์

### Abstract

The electron beam (E-Beam) vulcanization system is a high-speed vulcanization technique, which offers products with better homogeneity than those obtained from sulfur vulcanization system. In addition, E-Beam vulcanization requires less chemicals than sulfur vulcanization, thus leaving fewer chemical residues and therefore making it an environmentally friendly process. In this study, Standard Thai Rubber (STR) was used to develop rubber compound formulae for electron beam vulcanization. Two types of sensitizer; n-Butyl acrylate (n-BA) and trimethylolpropane trimethacrylate (TMPT) along with their varied amount (3 phr and 5 phr) were studied and their physical properties (hardness, tensile strength, elongation at break, modulus at 300% elongation and tension set) of the rubber sheets were compared to those vulcanized with conventional sulfur system. The study of the optimum dose for electron beam irradiation for rubber vulcanization was carried out using an electron beam accelerator with accelerated energy of 10 million electron volts (MeV) at four different doses: 50 kGy, 100 kGy, 150 kGy and 200 kGy. From this study, it was found that the formulation containing 5 phr TMPT sensitizer, vulcanized with the electron beam at 200 kGy was considered suitable for vulcanizing rubber products which low tension set property is required. However, the physical properties of the e-beam vulcanized rubber obtained from this study were significantly lower than those prepared from sulfur-vulcanized system.

**คำสำคัญ:** ลำอิเล็กตรอน ปริมาณรังสีจากลำอิเล็กตรอน การวัลคาไนซ์ยาง สารไวต่อปฏิกิริยา

**Keywords:** Electron beam, E-Beam dose, Rubber vulcanization, Sensitizers

<sup>1</sup> กรมวิทยาศาสตร์บริการ

<sup>2</sup> สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ

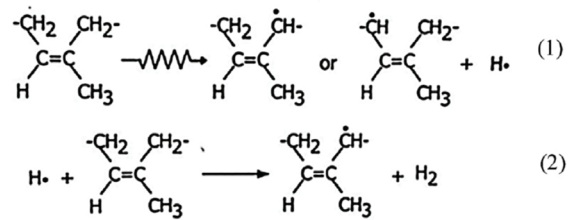
\* Corresponding author e-mail address: pantila@dss.go.th

## 1. บทนำ (Introduction)

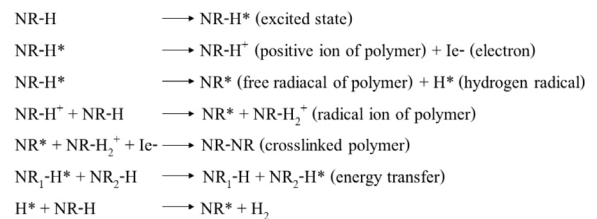
ประเทศไทยเป็นผู้ผลิตและส่งออกยางธรรมชาติมากที่สุดในโลก อย่างไรก็ตาม มากกว่าร้อยละ 90 ของการส่งออกในปี 2564 เป็นวัตถุดิบยางชั้นกลางทั้งที่เป็นยางแท่ง ยางแผ่น และน้ำยางข้น [1] การแปรรูปผลิตภัณฑ์ยางภายในประเทศยังมีสัดส่วนที่ต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณการผลิต ดังนั้น เพื่อให้สอดคล้องกับนโยบายของรัฐบาล Thailand 4.0 ที่ส่งเสริมการใช้นวัตกรรมมาขับเคลื่อนเศรษฐกิจ การพัฒนาผลิตภัณฑ์ยางใหม่หรือผลิตภัณฑ์เดิมโดยใช้เทคโนโลยีขั้นสูงที่มีประสิทธิภาพและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม จึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจอย่างมาก การทำผลิตภัณฑ์ยางส่วนใหญ่จะมีการรีดและบดผสมยางกับสารเคมีและทำให้คงรูปผ่านกระบวนการวัลคาไนเซชัน เพื่อให้ได้ยางที่มีคุณสมบัติเหมาะสมกับความต้องการใช้งาน โดยทั่วไปการวัลคาไนซ์หรือการทำให้ยางคงรูปแบ่งเป็น 3 ระบบใหญ่ ๆ [2] คือ ระบบการคงรูปด้วยกำมะถัน (Sulfur vulcanization) ระบบการคงรูปด้วยเปอร์ออกไซด์ (Peroxide vulcanization) และระบบการคงรูปด้วยสารเคมีอื่น ๆ ระบบการคงรูปด้วยกำมะถันเป็นระบบที่ได้รับความนิยมมากที่สุดเนื่องจากมีต้นทุนต่ำและเกิดปฏิกิริยารัลคาไนซ์ได้เร็ว ปัจจุบันได้มีการนำรังสีต่าง ๆ เช่น รังสีเอกซ์ (X-rays) รังสีแกมมา (Gamma ray) รังสีอัลตราไวโอเลต (Ultraviolet radiation, UV) และลำอิเล็กตรอน (Electron beam) มาใช้ในการวัลคาไนซ์ยางมากขึ้น งานวิจัยนี้เลือกการฉายลำอิเล็กตรอนมาใช้ในการศึกษาเนื่องจากลำอิเล็กตรอนเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นสั้น คือ  $10^{-7}$ - $10^{-4}$   $\mu\text{m}$  และมีความถี่ที่  $10^{21}$ - $10^{18}$  Hz [3] ซึ่งสูงกว่ารังสีอื่น ๆ ทำให้มีพลังงานและความสามารถในการทะลุทะลวงสูง ส่งผลให้มีอัตราเร็วในการวัลคาไนซ์สูงมาก ถือได้ว่าเป็นเทคโนโลยีการวัลคาไนซ์ยางที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม กล่าวคือ มีการเติมสารเคมีลงในระบบน้อย มีของเสียเกิดขึ้นในกระบวนการผลิตน้อย ไม่มีสารตกค้าง นอกจากนี้ ยังสามารถที่จะควบคุมการผลิตลำอิเล็กตรอนได้ด้วยการเปิด-ปิดสวิตช์ และยังสามารถประหยัดพลังงานเนื่องจากสามารถวัลคาไนซ์ได้ที่อุณหภูมิห้อง

เมื่อนำพอลิเมอร์ไปฉายรังสี พลังงานจากต้นกำเนิดรังสีจะถูกถ่ายโอนไปสู่พอลิเมอร์ ซึ่งพลังงานนี้จะก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างของพอลิเมอร์ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นได้แก่การเชื่อมขวางโมเลกุล (Crosslinking) การพอลิเมอร์ไรซ์ (Polymerization) การกรฟต์ (Grafting) การตัดสายโซ่ (Chain scission) และการเสื่อมสภาพ (Degradation) ขึ้นอยู่กับชนิดของพอลิเมอร์และปริมาณรังสีที่ใช้ กลไกที่เกิดขึ้นเมื่อฉายลำอิเล็กตรอนลงบนวัสดุจะเกิดการถ่ายเทพลังงานให้กับอิเล็กตรอนว่องวนนอกสุดที่โคจรรอบนิวเคลียสของวัสดุ และเกิดการหลุดออกจากอะตอมได้เป็นไอออนบวกและอิเล็กตรอนอิสระ (Free electron) อิเล็กตรอนบางตัวที่รับพลังงานจากลำอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ด้วย

ความเร็วสูงและมีพลังงานสูงขึ้น ทำให้เกิดเป็นอนุมูลอิสระ (Free radical) ดังนั้น เมื่อฉายลำอิเล็กตรอนลงบนยางจะสามารถเกิดปฏิกิริยาเคมีขึ้นทั้งการตัดสายโซ่และการเชื่อมขวางโมเลกุลไปพร้อม ๆ กัน ผลที่ได้จะขึ้นกับว่าปฏิกิริยาใดสามารถเกิดขึ้นได้มากกว่ากัน การเกิดอนุมูลอิสระของยางธรรมชาติในการฉายลำอิเล็กตรอนแสดงในรูปที่ 1 และกลไกการเชื่อมขวางโมเลกุลของยางธรรมชาติกับลำอิเล็กตรอน ซึ่งเกิดขึ้นโดยไม่ต้องให้ความร้อนและไม่มีการวัลคาไนซ์ แสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 1 การเกิดอนุมูลอิสระของยางธรรมชาติโดยการฉายลำอิเล็กตรอน [4]



รูปที่ 2 กลไกการเชื่อมขวางโมเลกุลของยางธรรมชาติกับลำอิเล็กตรอน [4]

ปัจจุบันได้มีการนำเทคโนโลยีลำอิเล็กตรอนไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น อุตสาหกรรมถุงมือยางและอุตสาหกรรมล้อยาง ในอุตสาหกรรมถุงมือยาง [5] มีการฉายลำอิเล็กตรอนในน้ำยางข้นแล้วนำน้ำยางนี้ไปทำเป็นผลิตภัณฑ์ต่อไป ส่วนในอุตสาหกรรมล้อยาง [6] การวัลคาไนซ์ยางล้อทั้งเส้นยังไม่ค่อยประสบความสำเร็จและยังไม่สามารถใช้งานได้จริง เพราะเป็นการใช้ลำอิเล็กตรอนฉายลงบนส่วนประกอบของยางล้อบางส่วนก่อน ได้แก่ ดอกยางและยางบุเคลือบผิวภายใน เพื่อทำการพรีวัลคาไนซ์ (Pre-vulcanization) แล้วจึงนำส่วนประกอบต่าง ๆ มาประกอบเป็นล้อยางแล้วนำไปวัลคาไนซ์ต่อจึงจะช่วยให้ล้อยางสามารถวัลคาไนซ์ได้อย่างทั่วถึงและสม่ำเสมอ การเลือกสภาวะที่ใช้ในการวัลคาไนซ์ยางด้วยลำอิเล็กตรอนจะส่งผลต่อสมบัติต่าง ๆ ของวัสดุ ไม่ว่าจะเป็นสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน สมบัติทางเคมี สมบัติการหลอมเหลว ขนาดของอนุภาค ความเข้ากันได้ของวัสดุ และสมบัติอื่น ๆ การใช้สารไวต่อปฏิกิริยา (Sensitizer) ในการวัลคาไนซ์ยางด้วยลำอิเล็กตรอนจะช่วยให้เกิดการเชื่อมขวางของโมเลกุลของพอลิเมอร์ได้เร็วขึ้น เป็นการลดปริมาณรังสีที่ใช้ใน

การวัลคาไนซ์ งานวิจัยนี้จึงได้พัฒนาสูตรยางคอมพาวนด์ที่สามารถวัลคาไนซ์ได้ด้วยล้าอเล็กตรอนแทนการวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถันสำหรับผลิตภัณฑ์ยางที่ต้องการความยืดหยุ่นตัวต่ำ โดยศึกษาชนิดและปริมาณของสารไวต่อปฏิกิริยาและปริมาณรังสีจากล้าอเล็กตรอนที่เหมาะสมสำหรับการวัลคาไนซ์ยาง เพื่อให้ได้สูตรยางที่มีความปลอดภัยสามารถใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร

## 2. วิธีการวิจัย (Experimental methods)

### 2.1 ยางและสารเคมี

2.1.1 ยางธรรมชาติ (Natural rubber,  $C_5H_8$ ): STR 5L

2.1.2 สารตัวเติม: แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate,  $CaCO_3$ ) CAS No. 471-34-1

2.1.3 สารกระตุ้นสารเร่งปฏิกิริยายางคงรูป: ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide,  $ZnO$ ) CAS No. 1314-13-2 และ กรดสเตียริก (Stearic acid,  $C_{18}H_{36}O_2$ ) CAS No. 57-11-4

2.1.4 สารเร่งปฏิกิริยายางคงรูป: ไดเบนโซไทอะไซด์ (Dibenzothiazyl disulfide; MBTS,  $C_{14}H_8N_2S_4$ ) CAS No. 120-78-5 และ เตตระเมทิลไทอูรัมไดซัลไฟด์ (Tetramethyl thiuram disulphide; TMTD,  $C_6H_{12}N_2S_4$ ) CAS No. 137-26-8

2.1.5 สารทำให้ยางคงรูป: กำมะถัน (Sulfur, S) CAS No. 7704-34-9

2.1.6 สารป้องกันการเสื่อมสภาพ: วินสเตย์ แอล (Wingstay-L,  $C_{21}H_{28}O$ ) CAS No. 68610-51-5

2.1.7 สารช่วยในการแปรรูปยาง: น้ำมันพาราฟิน (Paraffin oil,  $C_nH_{2n+2}$ ) CAS No. 8012-95-1

2.1.8 สารไวต่อปฏิกิริยา (Sensitizers) ระหว่างยางกับล้าอเล็กตรอน: นอร์มอล บิวทิล อะคริเลต (n-Butyl acrylate, n-BA,  $C_7H_{12}O_2$ ) CAS No. 141-32-2 และ ไตรเมทิลอลโพรเพน ไตรเมทาคริเลต (Trimethylolpropane trimethacrylate, TMPT,  $C_{18}H_{26}O_6$ ) CAS No. 3290-92-4

### 2.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

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

2.2.2 เครื่องบดผสมยางแบบสองลูกกลิ้ง (Two-rolls mill) ยี่ห้อ YFM (Yong Fong) รุ่น 0242

2.2.3 เครื่องอัดขึ้นรูป (Compression molding machine) ยี่ห้อ YFM (Yong Fong) รุ่น 0138

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

2.2.5 เครื่องหาอุณหภูมิและเวลาคงรูป (Moving die rheometer, MDR) ยี่ห้อ RECH PRO รุ่น rheo TECH MD+

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

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

2.2.8 เครื่องเร่งอนุภาคล้าอเล็กตรอน (Electron beam accelerator) ผลิตโดยบริษัท Mevex Corporation Ltd. รุ่น MB20-16 ประเทศแคนาดา

2.3 สูตรยางคอมพาวนด์ที่วัลคาไนซ์ด้วยกำมะถัน และสูตรยางที่ใช้ศึกษาการวัลคาไนซ์ด้วยล้าอเล็กตรอน ตารางที่ 1 แสดงสูตรยางคอมพาวนด์ที่วัลคาไนซ์ด้วยกำมะถัน (สูตร FS) ใช้เป็นสูตรเริ่มต้นในการปรับปรุงสูตรผสมของยางคอมพาวนด์ (Compound formulation) เพื่อให้ได้สูตรยางที่สามารถวัลคาไนซ์ได้ด้วยล้าอเล็กตรอน ด้วยการไม่ใช้สารเร่งปฏิกิริยายางคงรูป (TMTD และ MBTS) และสารทำให้ยางคงรูป (Sulfur)

ตารางที่ 1 สูตรยางคอมพาวนด์ที่วัลคาไนซ์ด้วยกำมะถัน (สูตร FS)

วัตถุดิบ	Parts per hundred of rubber (phr)
ยางธรรมชาติ : STR 5L	100
สารตัวเร่ง : Dibenzothiazyl disulfide	0.75
สารตัวเร่ง : Tetramethyl thiuram disulphide	0.375
สารกระตุ้นสารตัวเร่ง : Stearic acid	1
สารกระตุ้นสารตัวเร่ง : Zinc Oxide	1
สารตัวเติม : Calcium carbonate	25
สารช่วยในการแปรรูป : Paraffin oil	2
สารป้องกันการเสื่อมสภาพ : Wingstay-L	1
สารทำให้ยางคงรูป : Sulfur	1.25
รวม	132.37

ที่มา: ปรับจากสูตรยางคอมพาวนด์สำหรับผลิตยางรัดของ

การวัลคาไนซ์ยางด้วยล้าอเล็กตรอนจำเป็นต้องใช้สารไวต่อปฏิกิริยา [7] เพื่อให้ยางเกิดการเชื่อมขวางของโมเลกุลของพอลิเมอร์ได้เร็วขึ้นในระหว่างการฉายล้าอเล็กตรอน งานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาชนิดและปริมาณของสารไวต่อปฏิกิริยา และปริมาณรังสีจากล้าอเล็กตรอนที่เหมาะสมสำหรับการวัลคาไนซ์ยาง โดยได้ออกแบบการทดลองเป็น 3 ชุด ดังนี้

1) การศึกษาปริมาณรังสีจากล้าอเล็กตรอนที่เหมาะสม โดยใช้สารไวต่อปฏิกิริยาชนิดเดียวกันทำการวัลคาไนซ์ที่ปริมาณรังสีจากล้าอเล็กตรอนต่างกัน

- สารไวต่อปฏิกิริยา: n-BA (สูตร FBA3) ที่ปริมาณรังสีจากลำอิเล็กตรอน 50 kGy, 100 kGy, 150 kGy และ 200 kGy
- สารไวต่อปฏิกิริยา: TMPT [8] (สูตร FT3) ที่ปริมาณรังสีจากลำอิเล็กตรอน 50 kGy, 100 kGy, 150 kGy และ 200 kGy

2) การศึกษาปริมาณของสารไวต่อปฏิกิริยาระหว่างยางและลำอิเล็กตรอน โดยใช้สารไวต่อปฏิกิริยาชนิดเดียวกัน ในปริมาณต่างกัน

- สารไวต่อปฏิกิริยา: n-BA ในปริมาณ 3 phr (สูตร FBA3) และ 5 phr (สูตร FBA5)
- สารไวต่อปฏิกิริยา: TMPT ในปริมาณ 3 phr (สูตร FT3) และ 5 phr (สูตร FT5)

3) การศึกษาชนิดของสารไวต่อปฏิกิริยาระหว่างยางและลำอิเล็กตรอน โดยใช้สารไวต่อปฏิกิริยาต่างชนิดกันที่ปริมาณสารไวต่อปฏิกิริยาและปริมาณรังสีจากลำอิเล็กตรอนเดียวกัน

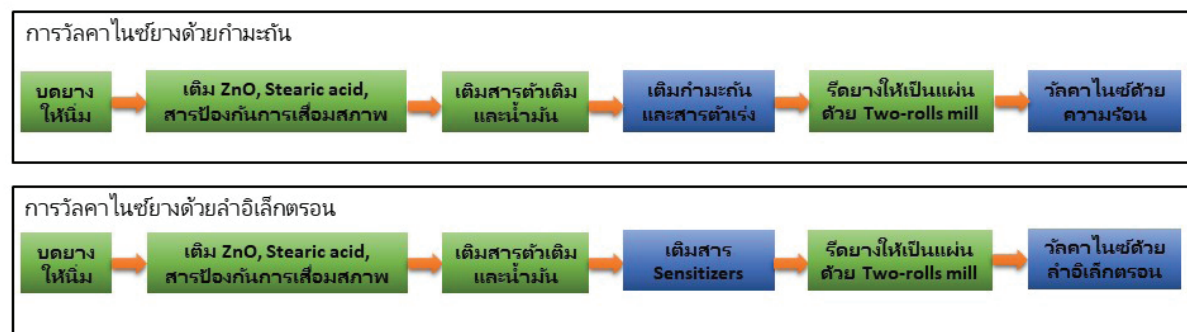
- ที่ปริมาณรังสีจากลำอิเล็กตรอนเดียวกัน: n-BA (สูตร FBA3, 3 phr) และ TMPT (สูตร FT3, 3 phr)
- ที่ปริมาณรังสีจากลำอิเล็กตรอนเดียวกัน: n-BA (สูตร FBA5, 5 phr) และ TMPT (สูตร FT5, 5 phr)

สูตรยางที่ใช้ในการศึกษาทดลองนี้แสดงไว้ในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 สูตรยางที่ใช้ศึกษาการวัลคาไนซ์ด้วยลำอิเล็กตรอน

วัตถุดิบ	Parts per hundred of rubber (phr)			
	FBA3	FBA5	FT3	FT5
Natural rubber	100	100	100	100
CaCO <sub>3</sub>	25	25	25	25
Wingstay-L	1	1	1	1
Paraffin oil	2	2	2	2
n-BA	3	5	-	-
TMPT	-	-	3	5
รวม	131	133	131	133

เมื่อได้สูตรยางเรียบร้อยแล้วก็จะคำนวณปริมาณยางและสารเคมีที่เหมาะสมเพื่อนำไปบดผสมด้วยเครื่องบดผสมระบบปิด และรีดเป็นแผ่นด้วยเครื่องบดผสมแบบสองลูกกลิ้ง สำหรับสูตรยางที่วัลคาไนซ์ด้วยกัมมันต์จะทำได้โดยง่าย โดยการใช้รูปด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปด้วยความร้อน ส่วนสูตรยางที่วัลคาไนซ์ด้วยลำอิเล็กตรอนจะทำได้โดยง่ายโดยการฉายลำอิเล็กตรอนที่มีพลังงานในการเร่งอนุภาคของอิเล็กตรอน 10 MeV ไปยังแผ่นยางด้วยปริมาณรังสีจากลำอิเล็กตรอนต่าง ๆ เพื่อหาปริมาณรังสีจากลำอิเล็กตรอนที่เหมาะสมในการวัลคาไนซ์ยาง โดยเปรียบเทียบความแข็ง ความต้านแรงดึง ความยืดเมื่อขาด มอดูลัสที่ความยืดร้อยละ 300 และความยืดอยู่ตัว กระบวนการผลิตยางคอมพาวนด์ที่วัลคาไนซ์ด้วยกัมมันต์และลำอิเล็กตรอนแสดงดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 กระบวนการผลิตยางคอมพาวนด์ด้วยกัมมันต์และลำอิเล็กตรอน

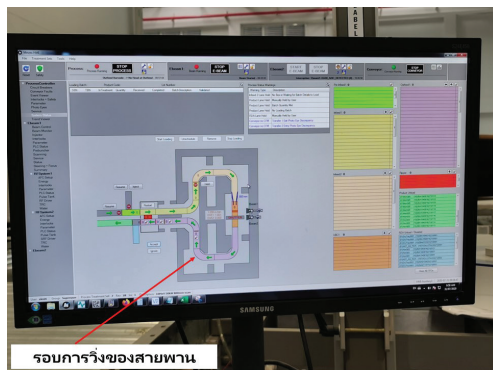


## 2.4 ขั้นตอนการวัลคาไนซ์ยางด้วยลำอิเล็กตรอน

การวัลคาไนซ์ด้วยลำอิเล็กตรอนทำโดยการฉายรังสีที่ปริมาณต่าง ๆ จำนวน 4 ระดับ ได้แก่ 50 kGy, 100 kGy, 150 kGy และ 200 kGy รูปที่ 4 แสดงวิธีการฉายลำอิเล็กตรอนโดยการวางแผ่นยางที่รีดเป็นแผ่นหนาประมาณ 2 mm ด้วยเครื่องแบบผสมแบบสองลูกกลิ้งลงในถาดรองแผ่นตัวอย่างไม่ให้ตัวอย่างซ้อนทับกันเพื่อให้แผ่นยางจะได้โดนรังสีอย่างทั่วถึง แล้วควบคุมถาดให้วิ่งไปตามสายพานด้วยความเร็วคงที่ 1.089 mm/min เมื่อถาดวิ่งไปถึงช่องปล่อยลำอิเล็กตรอน อิเล็กตรอนที่มีพลังงานในการเร่งอนุภาคของอิเล็กตรอนขนาด 10 MeV และกระแสลำอิเล็กตรอนขนาด 125 mA ก็จะถูกปล่อยลงมาบนแผ่นยาง เมื่อครบรอบสายพานดังรูปที่ 5 ก็จะได้ปริมาณลำอิเล็กตรอนที่ปล่อยออกมา 50 kGy ดังนั้นหากต้องการฉายลำอิเล็กตรอน 50 kGy, 100 kGy, 150 kGy และ 200 kGy จึงต้องฉายลำอิเล็กตรอนจำนวน 1 รอบ 2 รอบ 3 รอบ และ 4 รอบ ตามลำดับ



รูปที่ 4 ขั้นตอนการฉายลำอิเล็กตรอน



รูปที่ 5 ระบบควบคุมการทำงานของกระบวนการฉายลำอิเล็กตรอน

## 2.5 การทดสอบสมบัติทางกายภาพของแผ่นยางคอมพาวนด์

การทดสอบสมบัติทางกายภาพของแผ่นยางคอมพาวนด์ที่ได้จากสูตรยางที่วัลคาไนซ์ด้วยลำอิเล็กตรอน และสูตรยางที่วัลคาไนซ์ด้วยกำมะถัน รายการ ความแข็ง (Hardness)

ตามมาตรฐาน ISO 48-4: 2018 [9] ความต้านแรงดึง (Tensile strength) ความยืดเมื่อขาด (Elongation at break) โมดูลัสที่ความยืดร้อยละ 300 (Modulus at 300% elongation) ตามมาตรฐาน ISO 37: 2017 [10] และความยืดอยู่ตัวตามมาตรฐาน ISO 2285: 2019 [11] และวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติจากการทำซ้ำสูตรยางที่ได้จากการศึกษานี้ โดยใช้การทดสอบแบบเอฟ (F-test) และที (t-test) [12]

## 3. ผลและวิจารณ์ (Results and discussion)

### 3.1 สมบัติทางกายภาพของแผ่นยางคอมพาวนด์ที่วัลคาไนซ์ด้วยกำมะถัน

แผ่นยางคอมพาวนด์ที่วัลคาไนซ์ด้วยกำมะถันซึ่งเป็นสูตรควบคุมได้จากการขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 160°C เป็นเวลา 3.27 นาที ซึ่งเป็นอุณหภูมิและระยะเวลาการคงรูปที่ได้จากการวัดด้วยเครื่อง MDR แล้วทดสอบความแข็งแรงดึง ความยืดเมื่อขาด โมดูลัสที่ความยืดร้อยละ 300 และความยืดอยู่ตัว ผลการทดสอบแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 สมบัติทางกายภาพของแผ่นยางคอมพาวนด์ที่วัลคาไนซ์ด้วยกำมะถัน

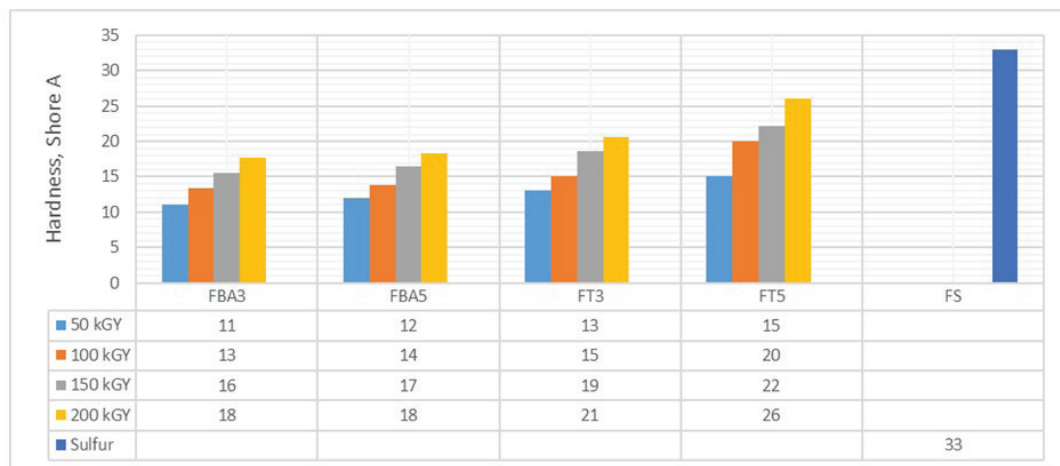
รายการ	ผลการทดสอบ
ความแข็ง, Shore A	33
ความต้านแรงดึง, MPa	19.0
ความยืดเมื่อขาด, %	673
โมดูลัสที่ความยืดร้อยละ 300, MPa	2.0
ความยืดอยู่ตัว, %	4.0

### 3.2 สมบัติทางกายภาพของแผ่นยางคอมพาวนด์ที่วัลคาไนซ์ด้วยลำอิเล็กตรอน

ส่วนนี้เป็นการศึกษาชนิดและปริมาณของสารไวต่อปฏิกิริยาระหว่างยางและลำอิเล็กตรอน และปริมาณรังสีจากลำอิเล็กตรอนที่เหมาะสมสำหรับการวัลคาไนซ์ยางโดยการเปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพของแผ่นยางคอมพาวนด์ รายการความแข็ง ความต้านแรงดึง ความยืดเมื่อขาด โมดูลัสที่ความยืดร้อยละ 300 และการยืดอยู่ตัว

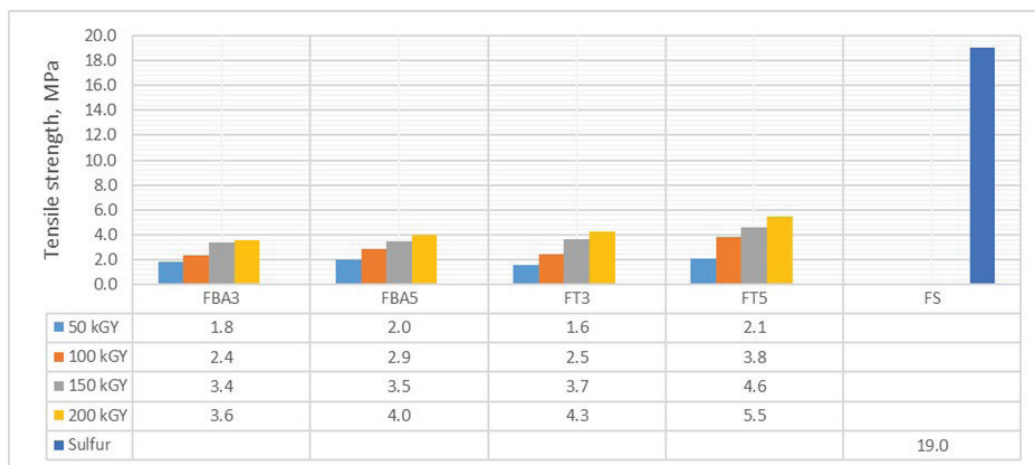
ผลการทดสอบค่าความแข็งสำหรับศึกษาชนิดและปริมาณของสารไวต่อปฏิกิริยา รวมทั้งปริมาณรังสีจากลำอิเล็กตรอนที่เหมาะสมในการวัลคาไนซ์ยางด้วยลำอิเล็กตรอนแสดงในรูปที่ 6 จากการศึกษาปริมาณรังสีจากลำอิเล็กตรอนที่เหมาะสมสำหรับวัลคาไนซ์ยาง 4 ระดับ คือ 50 kGy, 100 kGy, 150 kGy และ 200 kGy โดยใช้สารไวต่อปฏิกิริยาน-Ba และ TMPT ในปริมาณ 3 phr พบว่าทั้งสูตร FBA3 (n-Ba 3 phr) และ สูตร FT3 (TMPT 3 phr) ที่ปริมาณรังสีจากลำอิเล็กตรอน 50 kGy มีความแข็งแรงน้อยที่สุดในขณะที่

ปริมาณรังสีจากลำอิเล็กตรอน 100 kGy, 150 kGy และ 200 kGy มีค่าความแข็งไม่ต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นจึงสรุปเบื้องต้นได้ว่าปริมาณรังสีจากลำอิเล็กตรอน 50 kGy ไม่เหมาะสำหรับใช้วัลคาไนซ์ยางที่ใช้สารไวต่อปฏิกิริยาเป็น n-BA และ TMPT เมื่อเพิ่มปริมาณสารไวต่อปฏิกิริยาจาก 3 phr เป็น 5 phr พบว่าค่าความแข็งระหว่างสูตร FBA3 (n-BA 3 phr) และ FBA5 (n-BA 5 phr) ที่ปริมาณรังสีจากลำอิเล็กตรอนเดียวกันมีความแตกต่างกันเล็กน้อย และค่าความแข็งระหว่างสูตร FT3 (TMPT 3 phr) และ FT5 (TMPT 5 phr) มีแนวโน้มไปในทางเดียวกันกับสูตรที่ใช้ n-BA เป็นสารไวต่อปฏิกิริยาเมื่อเปรียบเทียบระหว่างสารไวต่อปฏิกิริยาทั้ง 2 ชนิดที่ปริมาณรังสีจากลำอิเล็กตรอนเดียวกัน พบว่าสูตรที่ใช้ TMPT เป็นสารไวต่อปฏิกิริยามีค่าความแข็งสูงกว่าสูตรที่ใช้ n-BA เล็กน้อย อย่างไรก็ตามค่าความแข็งที่มากที่สุดจากการทดลองนี้คือ สูตร FT5 ที่ปริมาณรังสีจากลำอิเล็กตรอน 200 kGy แต่ยังไม่พียงสูตรยางที่วัลคาไนซ์ด้วยกำมะถัน



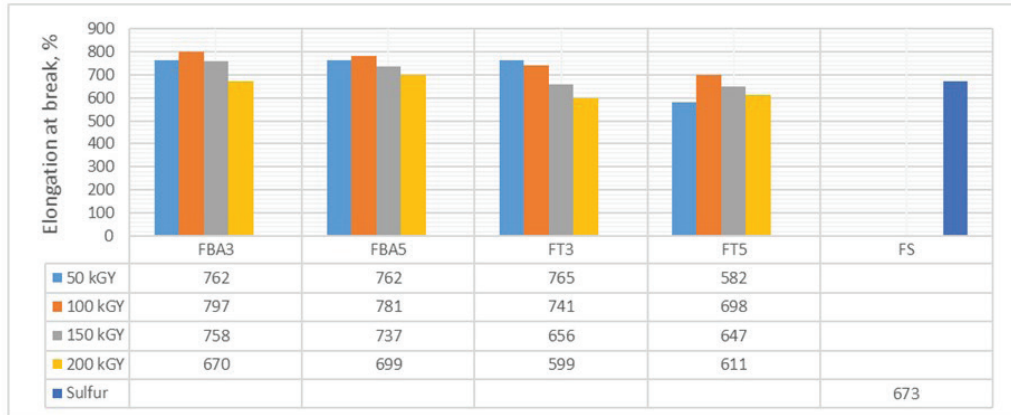
รูปที่ 6 ผลการทดสอบความแข็ง

รูปที่ 7 แสดงผลของการเปรียบเทียบค่าความต้านแรงดึงของสูตรยางที่มี n-BA และ TMPT เป็นสารไวต่อปฏิกิริยาในปริมาณ 3 phr ที่ปริมาณรังสีจากลำอิเล็กตรอน 50 kGy, 100 kGy, 150 kGy และ 200 kGy จะเห็นได้ว่าทั้งสูตร FBA3 (n-BA 3 phr) และสูตร FT3 (TMPT 3 phr) ที่ปริมาณรังสีจากลำอิเล็กตรอน 50 kGy มีค่าความต้านแรงดึงที่น้อยที่สุด และเมื่อเพิ่มปริมาณรังสีจากลำอิเล็กตรอนพบว่าค่าความต้านแรงดึงเพิ่มขึ้น ดังนั้นที่ปริมาณรังสีจากลำอิเล็กตรอน 200 kGy > 150 kGy > 100 kGy ตามลำดับ การเพิ่มปริมาณ n-BA และ TMPT จาก 3 phr เป็น 5 phr ที่ปริมาณรังสีจากลำอิเล็กตรอนระดับเดียวกัน พบว่าค่าความต้านแรงดึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างสารไวต่อปฏิกิริยาทั้ง 2 ชนิดพบว่าที่ปริมาณรังสีจากลำอิเล็กตรอนและปริมาณสารไวต่อปฏิกิริยาเดียวกันสูตรที่มี TMPT เป็นสารไวต่อปฏิกิริยามีค่าความต้านแรงดึงสูงกว่าสูตรที่ประกอบด้วย n-BA เล็กน้อย อย่างไรก็ตามค่าความต้านแรงดึงสูงสุดจากการทดลองนี้คือ สูตร FT5 ที่ปริมาณรังสีจากลำอิเล็กตรอน 200 kGy แต่ยังไม่พียงสูตรยางที่วัลคาไนซ์ด้วยกำมะถัน



รูปที่ 7 ผลการทดสอบความต้านแรงดึง

เมื่อพิจารณาค่าความยืดเมื่อขาดดังรูปที่ 8 สูตรยางที่มี n-BA และ TMPT เป็นสารไวต่อปฏิกิริยา ในปริมาณ 3 phr ที่ปริมาณรังสีจากลำอิเล็กตรอน 50 kGy, 100 kGy, 150 kGy และ 200 kGy พบว่าค่าความยืดเมื่อขาดทั้ง 2 สูตร (FBA3 และสูตร FT3) มีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณรังสีจากลำอิเล็กตรอนมากขึ้น และเมื่อเพิ่มปริมาณสารไวต่อปฏิกิริยาทั้ง 2 ชนิด จาก 3 phr เป็น 5 phr พบว่าค่าความยืดเมื่อขาดไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ และยังพบว่าสูตรยางที่วัลคาไนซ์ด้วยกำมะถันและสูตรยางที่ใช้สารไวต่อปฏิกิริยาทั้ง 2 ชนิด สูตร FBA3 (n-BA 3 phr) สูตร FBA5 (n-BA 5 phr) และสูตร FT5 (TMPT 5 phr) วัลคาไนซ์ที่ปริมาณรังสีจากลำอิเล็กตรอน 200 kGy ให้ค่าความยืดเมื่อขาดไม่แตกต่างกัน



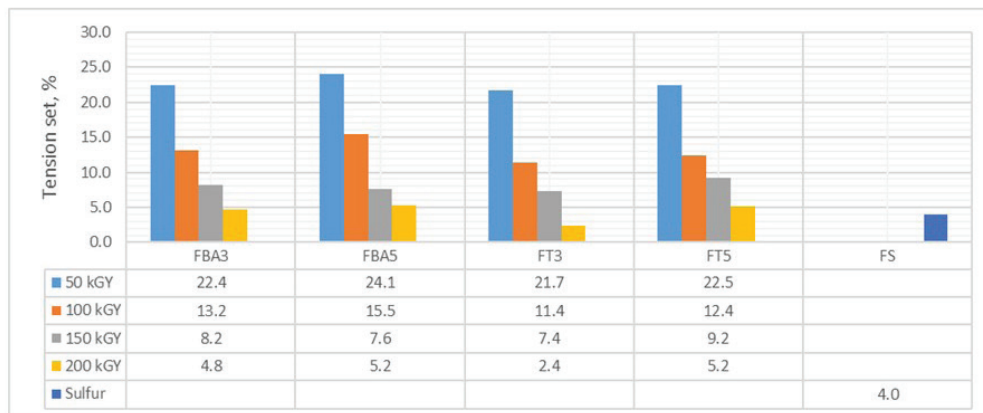
รูปที่ 8 ผลการทดสอบความยืดเมื่อขาด

ผลการทดสอบค่ามอดุลัสที่ความยืดร้อยละ 300 ดังรูปที่ 9 มีแนวโน้มเป็นไปในทางเดียวกับผลการทดสอบค่าความแข็งแรงและความต้านแรงดึง นั่นคือ สูตรยางที่มีสารไวต่อปฏิกิริยา n-BA และ TMPT ในปริมาณ 3 phr มีค่ามอดุลัสที่ความยืดร้อยละ 300 เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณรังสีจากลำอิเล็กตรอน และเมื่อเพิ่มปริมาณสารไวต่อปฏิกิริยาทั้ง 2 ชนิด จาก 3 phr เป็น 5 phr พบว่าค่ามอดุลัสที่ความยืดร้อยละ 300 แตกต่างกันเล็กน้อยที่ปริมาณรังสีจากลำอิเล็กตรอนระดับเดียวกัน และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างสารไวต่อปฏิกิริยาทั้ง 2 ชนิด พบว่าที่ปริมาณรังสีจากลำอิเล็กตรอนเดียวกันและปริมาณสารไวต่อปฏิกิริยาเดียวกันสูตรที่มี TMPT เป็นสารไวต่อปฏิกิริยามีค่ามอดุลัสที่ความยืดร้อยละ 300 สูงกว่าสูตรที่ประกอบด้วย n-BA เล็กน้อย อย่างไรก็ตามค่ามอดุลัสที่ความยืดร้อยละ 300 สูงสุดจากการทดลองนี้คือ สูตร FT5 ที่ปริมาณรังสีจากลำอิเล็กตรอน 200 kGy แต่ยังไม่พียงสูตรยางที่วัลคาไนซ์ด้วยกำมะถัน



รูปที่ 9 ผลการทดสอบมอดุลัสที่ความยืดร้อยละ 300

เมื่อพิจารณาค่าความยืดอยู่ตัวดังรูปที่ 10 สูตรยางที่มี n-BA และ TMPT เป็นสารไวต่อปฏิกิริยา ในปริมาณ 3 phr ที่ปริมาณรังสีจากลำอิเล็กตรอน 50 kGy, 100 kGy, 150 kGy และ 200 kGy พบว่าค่าความยืดอยู่ตัวของทั้งสูตร FBA3 และสูตร FT3 ลดลงเมื่อปริมาณรังสีจากลำอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้น และเมื่อเพิ่มปริมาณ n-BA และ TMPT จาก 3 phr เป็น 5 phr พบว่าค่าความยืดอยู่ตัวแตกต่างกันเล็กน้อย แสดงว่าการเพิ่มปริมาณสารไวต่อปฏิกิริยาไม่มีผลต่อค่าความยืดอยู่ตัว และสารไวต่อปฏิกิริยาทั้ง 2 ชนิดมีค่าความยืดอยู่ตัวใกล้เคียงกันที่ปริมาณรังสีจากลำอิเล็กตรอนและปริมาณสารไวต่อปฏิกิริยาเดียวกัน อย่างไรก็ตามสูตรยางที่มีค่าความยืดอยู่ตัวต่ำและใกล้เคียงกับสูตรยางที่วัลคาไนซ์ด้วยกำมะถัน คือสูตร FBA3 (n-BA 3 phr) สูตร FBA5 (n-BA 5 phr) และสูตร FT5 (TMPT 5 phr)



รูปที่ 10 ผลการทดสอบความยืดอยู่ตัว

จากผลของการศึกษานี้จะเห็นได้ว่าการเพิ่มขึ้นของปริมาณรังสีจากลำอิเล็กตรอนทำให้ค่าความแข็ง ความต้านแรงดึง และมอดุลัสที่ความยืดร้อยละ 300 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเชื่อมขวางของโมเลกุลของยางในระหว่างการฉายรังสี ซึ่งเกิดจากการผลึกอะตอมไฮโดรเจนออกจากสายโซ่ของยางธรรมชาติ และอะตอมไฮโดรเจนนี้ทำปฏิกิริยากับอะตอมไฮโดรเจนที่อยู่ใกล้เคียงก่อให้เกิดเป็นก๊าซไฮโดรเจนและอนุมูลอิสระ แล้วอนุมูลอิสระนี้จะถูกเติมเข้าไปในพันธะ C=C (C=C bond) ทำให้เกิดการเชื่อมขวางซึ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการเชื่อมขวางของยางธรรมชาติ ในขณะที่ความยืดเมื่อขาดมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณรังสีจากลำอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มปริมาณรังสีทำให้การเชื่อมขวางระหว่างโมเลกุลของยางดีขึ้น ส่งผลให้เกิดอุปสรรคในการขยายโมเลกุลของพันธะ C-C (C-C bond) จึงทำให้ความยืดเมื่อขาดลดลง แสดงให้เห็นว่าปริมาณรังสีจากลำอิเล็กตรอนมีผลต่อการเชื่อมขวางสายโซ่ของยางธรรมชาติ ดังจะเห็นได้จากสูตรยางที่ฉายลำอิเล็กตรอนที่ปริมาณรังสี 50 kGy ไม่สามารถทำให้ยางเกิดการวัลคาไนซ์โดยสมบูรณ์ได้ ดังนั้นเมื่อพิจารณาค่าความแข็ง ความต้านแรงดึง ความยืดเมื่อขาด มอดุลัสที่ความยืดร้อยละ 300 และค่าความยืดอยู่ตัว ที่ได้จากการทดลองนี้ พบว่าปริมาณรังสีจากลำอิเล็กตรอนที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการวัลคาไนซ์ยางคือ 200 kGy

เมื่อเปรียบเทียบสารไวต่อปฏิกิริยา 2 ชนิด ระหว่าง n-BA และ TMPT จากการทดลองนี้จะเห็นได้ว่า สูตรยางที่ประกอบด้วย TMPT ที่ระดับปริมาณรังสีจากลำอิเล็กตรอนเดียวกัน มีค่าความแข็ง ความต้านแรงดึง และมอดุลัสที่ความยืดร้อยละ 300 สูงกว่าสูตรยางที่ประกอบด้วย n-BA จึงอาจสรุปได้ว่า TMPT เป็นสารไวต่อปฏิกิริยาที่สามารถช่วยให้เกิดการเชื่อมขวางของโมเลกุลของพอลิเมอร์ได้ดีกว่า จากการวิจัยนี้พบว่าสูตรยางที่ประกอบด้วย TMPT เป็นสารไวต่อปฏิกิริยาในปริมาณ 5 phr ทำการวัลคาไนซ์ที่ปริมาณรังสีจากลำอิเล็กตรอน 200 kGy เป็นสูตรยางที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการวัลคาไนซ์ยางด้วยลำอิเล็กตรอน

อย่างไรก็ตาม จากการศึกษาพบว่าแผ่นยางคอมพาวนด์ที่วัลคาไนซ์ด้วยลำอิเล็กตรอนมีค่าความต้านแรงดึงต่ำกว่าแผ่นยางคอมพาวนด์ที่วัลคาไนซ์ด้วยกำมะถันเป็นอย่างมาก ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากการวัลคาไนซ์ด้วยลำอิเล็กตรอนเป็นการเชื่อมโครงข่าย (Network) ด้วยโครงสร้างภายในของยางเองโดยพลังงานจากลำอิเล็กตรอนจะเข้าไปชนโมเลกุลของยางทำให้เกิดการจัดพันธะระหว่างคาร์บอนกับคาร์บอน (C-C bond) ซึ่งต่างจากการวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถันที่ยางจะทำปฏิกิริยากับกำมะถันสร้างพันธะโคเวเลนต์เชื่อมระหว่างโซ่พอลิเมอร์ให้เป็นโมเลกุลเดียวกันเกิดพันธะระหว่างกำมะถันกับคาร์บอน (C-S bond)

ผลการเปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพของแผ่นยางคอมพาวนด์ที่ได้จากการวัลคาไนซ์ด้วยลำอิเล็กตรอนสูตรที่เหมาะสมจากการทดลองนี้ ซึ่งเป็นสูตรสำหรับผลิตภัณฑ์ยางที่ต้องการความยืดอยู่ตัวต่ำ คือ สูตร FT5 วัลคาไนซ์ที่ปริมาณรังสีจากลำอิเล็กตรอน 200 kGy กับแผ่นยางคอมพาวนด์ที่วัลคาไนซ์ด้วยกำมะถัน แสดงในตารางที่ 4



ตารางที่ 4 สมบัติทางกายของแผ่นยางคอมพาวนด์ที่วัลคาไนซ์ด้วยลำอิเล็กตรอนเปรียบเทียบกับแผ่นยางคอมพาวนด์ที่วัลคาไนซ์ด้วยกำมะถัน

รายการ	แผ่นยางคอมพาวนด์ที่วัลคาไนซ์ด้วย				
	กำมะถัน (สูตร FS)	ลำอิเล็กตรอน (สูตร FT5)			
		ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2	
		mean	SD	mean	SD
ความแข็ง, Shore A	33	26	0.52	26	0.41
ความต้านแรงดึง, MPa	19.0	5.5	0.39	5.8	0.18
ความยืดเมื่อขาด, %	673	611	8.53	628	6.47
มอดุลัสที่ความยืดร้อยละ 300, MPa	2.0	1.0	0.07	1.1	0.06
ความยืดอยู่ตัว, %	4.0	5.2	0.08	5.1	0.15

จากการทดลองซ้ำสูตรยางที่ได้จากการศึกษา (สูตร FT5) โดยวัลคาไนซ์ด้วยปริมาณรังสีจากลำอิเล็กตรอนเดียวกัน (200 kGy) แล้ววิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติโดยใช้การทดสอบแบบเอฟ (F-test) และที (t-test) ดังแสดงในตารางที่ 5 พบว่า ค่าความแข็ง ความต้านแรงดึง ความยืดเมื่อขาด มอดุลัสที่ความยืดร้อยละ 300 และความยืดอยู่ตัว ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ จึงสรุปได้ว่าการผสมและการวัลคาไนซ์สามารถทำได้

ตารางที่ 5 การวิเคราะห์ผลทางสถิติแบบ F-test และ t-test ของยางสูตร FT5

รายการ	F-test		t-test	
	$F_{cal}$	$F_{crit}$	$t_{cal}$	$t_{crit}$
ความแข็ง, Shore A	1.62	9.60	1.77	2.31
ความต้านแรงดึง, MPa	4.61	9.60	-1.80	2.31
ความยืดเมื่อขาด, %	1.74	9.60	-3.59	2.31
มอดุลัสที่ความยืดร้อยละ 300, MPa	1.37	9.60	-0.14	2.31
ความยืดอยู่ตัว, %	3.26	39.00	-1.50	2.78

#### 4. สรุป (Conclusion)

การศึกษการพัฒนาสูตรยางคอมพาวนด์สำหรับการวัลคาไนซ์ด้วยลำอิเล็กตรอนด้วยการปรับจากสูตรยางเริ่มต้นที่วัลคาไนซ์ด้วยกำมะถัน โดยการศึกษาชนิดและปริมาณของสารไวต่อปฏิกิริยาระหว่างยางและลำอิเล็กตรอน 2 ชนิดคือ n-Butyl acrylate (n-BA) และ Trimethylolpropane trimethacrylate (TMPT) ) ในปริมาณ 3 phr และ 5 phr แล้วเปรียบเทียบค่าความแข็ง ความต้านแรงดึง ความยืดเมื่อขาด มอดุลัสที่ความยืดร้อยละ 300 และการยืดอยู่ตัวของแผ่นยางคอมพาวนด์ที่ได้กับแผ่นยางคอมพาวนด์ที่วัลคาไนซ์ด้วยกำมะถัน และการศึกษาปริมาณรังสีจากลำอิเล็กตรอนที่เหมาะสมสำหรับวัลคาไนซ์ยางโดยการฉายลำอิเล็กตรอนที่มีพลังงานในการเร่งอนุภาคของอิเล็กตรอน 10 MeV ไปยังแผ่นยางที่มีปริมาณรังสีจากลำอิเล็กตรอนต่าง ๆ ได้แก่ 50 kGy, 100 kGy, 150 kGy และ 200 kGy พบว่าสูตรที่ประกอบด้วยสารไวต่อปฏิกิริยาชนิด TMPT ในปริมาณ 5 phr วัลคาไนซ์ที่มีปริมาณรังสีจากลำอิเล็กตรอน 200 kGy เป็นสูตรยางที่เหมาะสมสำหรับวัลคาไนซ์ผลิตภัณฑ์ที่ต้องการค่าการยืดอยู่ตัวต่ำ อย่างไรก็ตาม สมบัติทางกายภาพของยางที่ได้จากการศึกษานี้ยังคงน้อยกว่าแผ่นยางคอมพาวนด์ที่ได้จากการวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถัน

## 5. กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgement)

ขอขอบคุณสถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) เอื้อเพื่อการวัดคาบครึ่งยาลำไส้เล็กตรอน

## 6. เอกสารอ้างอิง (References)

- [1] ยางพารา [ออนไลน์]. กุมภาพันธ์ 2564 เข้าถึงจาก: [shorturl.at/nHNQ4](http://shorturl.at/nHNQ4) [อ้างถึงวันที่ 17 กุมภาพันธ์ 2565].
- [2] พงษ์ธร แห่อยู่. สารเคมียาง. ปทุมธานี : ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 2548. 4-9. ISBN:974-229-750-9.
- [3] การวัดคาบครึ่งยาลำไส้เล็กตรอน [ออนไลน์]. ธันวาคม 2557 เข้าถึงจาก: [shorturl.at/cflrP](http://shorturl.at/cflrP) [อ้างถึงวันที่ 3 มีนาคม 2565].
- [4] PHETARPORN, V., S. LOYKULNANT, C. KONGKAEW, A. SEUBSAI, and P. PRAPANINAINAR. *Composite properties of graphene-based materials/natural rubber vulcanized using electron beam irradiation*. New York : ELSEVIER. 2019, 413-424.
- [5] CHIRINOS, H., F. YOSHII, and K. MAKUUCHI. Natural rubber latex using gamma rays and electron beam radiation. *Kautschuk Gummi Kunststoffe*. 2007, 535-541.
- [6] KARAAGAC, B., A. AYTAC, and V. DENIZ. Application of radiation technology to rubber and tire industries. *Hacettepe Journal of Biology and Chemistry*. 2014, **42**(1), 24-34.
- [7] HAGUE, M.E., N.C. DAFADER, F. AKHTAR, and M.U. AHMED. Radiation dose required for the vulcanization of natural rubber latex. *Radiation Physics and Chemistry*. 1996, **48**(4), 505-510.
- [8] MANAILA, E., and others. Radiation vulcanization of natural rubber with polyfunctional monomers. *Polymer Bulletin*. 2014, **71**(1), 57-82.
- [9] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). ISO 48-4: 2018. *Rubber, vulcanized or thermoplastic-Determination of hardness-Part 4: Indentation hardness by durometer method (Shore hardness)*. Geneva, Switzerland: ISO. 2018.
- [10] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). ISO 37: 2017. *Rubber, vulcanized or thermoplastic-Determination of tensile stress-strain properties*. Geneva, Switzerland: ISO. 2017.
- [11] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). ISO 2285: 2019. *Rubber, vulcanized or thermoplastic-Determination of tension set under constant elongation, and of tension set, elongation and creep under constant tensile load*. Geneva, Switzerland: ISO. 2019.
- [12] จันทรัตน์ วรสรรพวิทย์. การใช้โปรแกรมสำเร็จรูป excel ในการทดสอบแบบเอฟและที. *วารสารสำนักบริหารและรับรองห้องปฏิบัติการ*. 2552, **5**(14), 12-19.