

แก้ไขความผิด (Erratum)

กระบวนการเตรียม ขึ้นรูปและสมบัติเชิงกล/ไฟฟ้าของวัสดุเชิงประกอบ MWCNT/RVNRL

Preparation, Processing and Mechanical/ Electrical Properties of MWCNT/RVNRL Composites

บุษราภรณ์ มุณห์เหล็ก (Budsaraphorn Moonlek)* เอกชัย วิมลมาลา (Ekachai Wimolmala)**

ดร.เกียรติศักดิ์ แสนบุญเรือง (Dr.Kiadtisak Saenboonruang)***

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ ศึกษาและพัฒนาวัสดุป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่ผ่านกระบวนการคงรูปด้วยรังสีแกมมา โดยการเติมสารตัวเติมประเภทคาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังหลายชั้น ปริมาณ 0, 2, 4 และ 6 phr และการใช้เส้นใยไหมเพื่อเพิ่มสมบัติการนำไฟฟ้าและสมบัติเชิงกลของชิ้นงาน ผลการวิจัยพบว่า เมื่อมีการเติม MWCNT ค่ามอดูลัสแรงดึง ความต้านทานต่อแรงดึง และค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด มีแนวโน้มลดลง แต่ส่งผลทำให้ค่าความแข็งที่ผิวและค่าการนำไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้น ในขณะที่การใช้เส้นใยไหมในวัสดุเชิงประกอบที่มีการเติม MWCNT ปริมาณ 6 phr ซึ่งเป็นปริมาณที่ส่งผลทำให้ชิ้นงานมีค่าการนำไฟฟ้าสูงสุด สามารถเพิ่มค่าความแข็งและค่าความต้านทานต่อแรงดึงให้เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับชิ้นงานที่ไม่มีการใช้เส้นใยไหม ดังนั้น ผลการวิจัยโดยรวมแสดงให้เห็นว่าการเติมสารตัวเติม MWCNT และการใช้เส้นใยไหมกับวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ ทำให้ชิ้นงานมีสมบัติโดยรวมที่สามารถนำไปใช้ในการพัฒนาเป็นวัสดุป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

ABSTRACT

This work aimed to study and to develop EMI shielding materials based on radiation-vulcanized natural rubber latex (RVNRL) with the addition of multi-walled carbon nanotubes (MWCNT) (0, 2, 4 and 6 part per hundred parts of rubber; phr) and the use of silk fibers to improve both mechanical and electrical properties of the materials. The results showed that the addition of MWCNT led to the decreases in tensile modulus, tensile strength, and elongation at break, but increased the values of hardness and electrical conductivity. In addition, the use of silk fibers resulted in the increases of hardness and tensile strength in the composites with 6-phr MWCNT, which presented highest electrical conductivity. In summary, the overall results suggested that the uses of MWCNT and silk fibers improved overall properties of the MWCNT/RVNRL composites, presenting the potential to use the developed composites as EMI shielding materials.

คำสำคัญ: ยางธรรมชาติ คาร์บอนนาโนทิวบ์ รังสีแกมมา

Keywords: Natural rubber, Carbon nanotube, Gamma rays

* นักศึกษา หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชารังสีประยุกต์และไอโซโทป ภาควิชารังสีประยุกต์และไอโซโทป คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

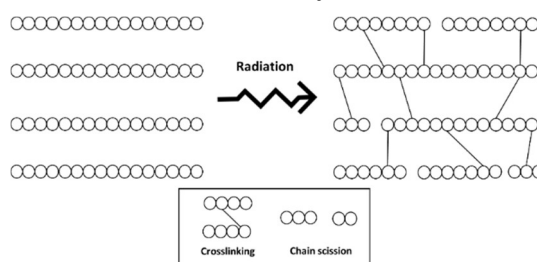
** รองศาสตราจารย์ กลุ่มวิจัยการผลิตและขึ้นรูปพอลิเมอร์ คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

*** ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชารังสีประยุกต์และไอโซโทป คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

บทนำ

ยางธรรมชาติเป็นหนึ่งในพืชเศรษฐกิจที่มีความสำคัญต่อเศรษฐกิจของประเทศไทยที่สามารถผลิตและส่งออกยางธรรมชาติทั้งในรูปแบบของน้ำยางดิบและผลิตภัณฑ์แปรรูปได้สูงเป็นลำดับต้นๆ ของโลก นำรายได้เข้าประเทศเป็นจำนวนมาก ทั้งนี้ความต้องการและรูปแบบการใช้ยางธรรมชาติในปัจจุบันได้เพิ่มสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากยางธรรมชาติมีคุณสมบัติเด่นในด้านความยืดหยุ่นและโค้งงอที่ดี ทนทาน มีความสามารถในการขึ้นรูปได้หลายรูปแบบ อีกทั้งสามารถย่อยสลายโดยใช้กระบวนการทางชีวภาพได้ โดยปกติ กระบวนการคงรูปของยางธรรมชาติหรือกระบวนการวัลคาไนซิง (Vulcanization) นั้น นิยมใช้ผงกำมะถัน (Sulphur) ร่วมกับสารเร่งปฏิกิริยาต่างๆ เพื่อช่วยให้ยางธรรมชาติมีความแข็งแรงและสมบัติเชิงกลโดยรวมที่ดีขึ้น เหมาะต่อการนำไปใช้ประโยชน์ แต่ทั้งนี้พบว่า สารเคมีเหล่านี้รวมถึงผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการคงรูปยางธรรมชาติ เช่น สารไนโตรซามีน (Nitrosamine) (Incavo, Schafer, 2006) มีความเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมและสิ่งมีชีวิตต่างๆ เนื่องจากสามารถก่อให้เกิดมะเร็งกับผู้ใช้งานได้ ดังนั้นการเลือกใช้กระบวนการคงรูปด้วยวิธีอื่น ที่มีความปลอดภัยสูงกว่า จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่ง ที่สามารถเพิ่มความปลอดภัยให้กับผู้ใช้และผู้ผลิตผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติได้

กระบวนการคงรูปยางธรรมชาติ โดยใช้รังสีแกมมา (Gamma vulcanization; GV หรือ Radiation vulcanization; RV) เป็นกระบวนการคงรูปวิธีการหนึ่งที่สามารถเพิ่มความปลอดภัยให้กับผู้ผลิตและผู้ใช้ยางธรรมชาติได้ เนื่องจากกระบวนการคงรูปดังกล่าว สามารถลดปริมาณ/ชนิดของสารเคมีอันตรายที่ใช้ในกระบวนการคงรูปให้น้อยลง ซึ่งหลักการของกระบวนการ RV มีดังนี้คือ รังสีแกมมาเข้าไปทำปฏิกิริยาและเกิดการถ่ายโอนพลังงานกับโมเลกุลของน้ำที่อยู่ในน้ำยางธรรมชาติและ/หรือกับโมเลกุลของยางธรรมชาติโดยตรง ทำให้เกิดอนุมูลอิสระ (Free radicals) ขึ้นในน้ำยาง ซึ่งสามารถทำให้เกิดการจับพันธะระหว่างคาร์บอนกับคาร์บอน (C-C bond) ที่อยู่คนละสายโซ่โมเลกุล จนเกิดการเชื่อมโยงพันธะข้าม (Crosslinking) ของสายโซ่โมเลกุลขึ้น เกิดเป็นโครงสร้างแบบร่างแห ส่งผลทำให้น้ำยางธรรมชาติมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น กระบวนการคงรูปโดยใช้รังสีแกมมา แสดงได้ดังภาพที่ 1 โดยน้ำยางธรรมชาติที่ได้จากกระบวนการคงรูปด้วยรังสีแกมมานั้น (Radiation vulcanized natural rubber latex; RVNRL) สามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติได้เช่นเดียวกับการใช้กำมะถัน นอกจากนี้พบว่า สามารถเก็บรักษา RVNRL ได้นานกว่ายางธรรมชาติที่ผ่านการคงรูปด้วยกำมะถัน (Sulphur vulcanized natural rubber latex; SVNRL) เนื่องจาก เมื่อมีการหยดฉายรังสีแกมมากับน้ำยางธรรมชาติแล้วนั้น กระบวนการเชื่อมโยงพันธะข้ามของโมเลกุลยางหยดลง ส่งผลทำให้น้ำยางที่เก็บรักษา มีลักษณะและ โครงสร้างใกล้เคียงกับตอนหลังฉายรังสีแกมมา นอกจากนี้ RVNRL ยังไม่มีสารเคมีที่เป็นพิษตกค้างอยู่ในผลิตภัณฑ์อีกด้วย ผลิตภัณฑ์ที่ได้จึงมีความปลอดภัยสูงกว่า SVNRL (Scagliusi et al., 2012)



ภาพที่ 1 กระบวนการคงรูปยางธรรมชาติโดยใช้รังสีแกมมา เพื่อให้เกิดการเชื่อมโยงข้ามของสายโซ่โมเลกุล

แต่ทั้งนี้พบว่า แผ่นยางที่ได้จากการ RVNRL มีสมบัติเชิงกลโดยรวมที่ต่ำกว่า SVNRL เนื่องจากการเชื่อมโยงข้ามแบบ C-C ซึ่งมีความแข็งแรงของพันธะที่น้อยกว่า SVNRL ซึ่งเป็นแบบ C-S-C ดังนั้น เพื่อเป็นการเพิ่มความแข็งแรงให้กับชิ้นงานที่ผลิตจาก RVNRL จึงมีการนำแผ่นยาง RVNRL เสริมแรงด้วยเส้นใยต่างๆ เช่น เส้นใยไหมหรือเส้นใยไพลอน ซึ่งเส้นใยดังกล่าวสามารถเพิ่มความแข็งแรงให้กับแผ่นยางได้อย่างมีนัยสำคัญ ดังเห็นได้จากงานวิจัยของ Smitthipong et al. (2016) ซึ่งทำการศึกษาถึงการนำเส้นใยไหมและเส้นใยไพลอนมาเสริมแรงแผ่นยางธรรมชาติ ซึ่งผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าแผ่นยางธรรมชาติที่เสริมแรงด้วยเส้นใยทั้งสองชนิดมีสมบัติเชิงกลโดยรวมที่เพิ่มขึ้น โดยเส้นใยไหมสามารถเพิ่มสมบัติเชิงกลโดยรวมให้กับแผ่นยางได้ดีกว่าการใช้เส้นใยไพลอน

ตามที่ได้กล่าวมาข้างต้น การประยุกต์ใช้แผ่นยางธรรมชาติสามารถเกิดขึ้นได้หลากหลายรูปแบบ โดยหนึ่งในการประยุกต์ใช้ที่เป็นไปได้ในปัจจุบัน คือ การใช้แก้ปัญหาด้านอิเล็กทรอนิกส์ โดยเฉพาะการรบกวนของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Interference; EMI) ต่ออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ ซึ่งในปัจจุบัน ระบบอิเล็กทรอนิกส์มีความละเอียดอ่อนและซับซ้อนมากขึ้น ดังนั้น สนามแม่เหล็กไฟฟ้าเหล่านี้สามารถส่งผลกระทบต่อการทำงานของระบบหรือเครื่องมือต่างๆ เช่น ระบบการทำงานของเครื่องมือทางการแพทย์ ระบบระบบนำทางแบบคลื่นวิทยุหรือการให้บริการด้านความปลอดภัย ซึ่งอาจนำไปสู่ความผิดปกติที่ไม่พึงประสงค์หากไม่ได้รับการดูแลอย่างเหมาะสม โดยคุณสมบัติหนึ่งที่สำคัญของวัสดุที่สามารถนำมาใช้ป้องกันการรบกวนของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า คือ สมบัติการนำไฟฟ้าของวัสดุ โดยวัสดุที่สามารถนำไฟฟ้าที่ดี จะสามารถป้องกันคลื่นรบกวนได้ดีกว่าวัสดุที่เป็นฉนวน (Gao et al., 2018) แต่ทั้งนี้พบว่า ยางธรรมชาติมีสมบัติในการนำไฟฟ้าที่ต่ำ (Kaewunruen, Meesit, 2016) ดังนั้น เพื่อเป็นการเพิ่มความสามารถในการป้องกันการรบกวนของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าต่ออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ของวัสดุที่ผลิตจากยางธรรมชาติให้มีประสิทธิภาพที่สูงขึ้น จำเป็นต้องมีการเติมสารตัวเติมที่มีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้าที่ดีกับยางธรรมชาติเพื่อเป็นการลดความต้านทานโดยรวมและเพิ่มความสามารถในการนำไฟฟ้าให้สูงขึ้น

คาร์บอนนาโนทิวบ์หรือท่อคาร์บอนนาโน (Carbon nanotubes; CNT) แบบผนังชั้นเดียว (Single-walled carbon nanotubes; SWCNT) หรือแบบผนังหลายชั้น (Multi-walled carbon nanotubes; MWCNT) สามารถนำมาใช้เพิ่มประสิทธิภาพในการนำไฟฟ้าของแผ่นยางธรรมชาติได้ ซึ่งในอดีต มีการนำ CNT ใช้เป็นสารตัวเติมในวัสดุหลักต่างๆ ซึ่งนอกจากทำหน้าที่เป็นสารตัวเติมเสริมแรง (Reinforcing filler) แล้ว CNT สามารถเพิ่มสมบัติการนำไฟฟ้าให้กับวัสดุได้เช่นกัน ดังจะเห็นได้จากผลงานวิจัยที่ผ่านมา มีการใช้ CNT เพื่อเพิ่มสมบัติเชิงกลและการเข้ากันของยางธรรมชาติ (Peng et al., 2010) และการใช้ MWCNT เป็นสารตัวเติมในยางซิลิโคน (Silicon Rubber; SR) ในปริมาณ 1%, 1.5%, 2.5% และ 4% ซึ่งผลการวิจัยพบว่า MWCNT สามารถเพิ่มสมบัติการนำไฟฟ้าให้เพิ่มขึ้น และสามารถป้องกันการรบกวนของสนามไฟฟ้าของแผ่นยางซิลิโคนได้ดี โดยการเติม MWCNT ที่ปริมาณ 4% สามารถป้องกันการรบกวนของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าได้สูงที่สุด (Vas, Thomas, 2015)

ดังนั้น งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและพัฒนาวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่ผ่านกระบวนการคงรูปด้วยรังสีแกมมา ที่มีสมบัติในการป้องกันการรบกวนของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ด้วยการเติมสารตัวเติมชนิด MWCNT ปริมาณ 0, 2, 4 และ 6 ส่วนในน้ำหนักยางร้อยละ (Parts per hundred part of rubber by weight; phr) นอกจากนี้ เพื่อ

เป็นการเพิ่มความแข็งแรงให้กับวัสดุเชิงประกอบ MWCNT/RVNRL จึงมีการใช้เส้นใยไหมเสริมแรงให้กับแผ่นยางขึ้นงาน โดยมีการทดสอบสมบัติต่างๆ ที่สำคัญ ได้แก่ สมบัติเชิงกลต่อแรงดึง (Tensile properties) สมบัติทางสัณฐานวิทยา (Morphology) และสมบัติการนำไฟฟ้า (Electrical conductivity) ซึ่งผลงานวิจัยนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานที่ต้องการวัสดุที่มีความยืดหยุ่นที่สูงและสามารถป้องกันการรบกวนของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดี เช่น ใช้ในอุปกรณ์ส่ง/รับคลื่นวิทยุในการสื่อสารหรือเครื่องมือทางการแพทย์ เป็นต้น นอกจากนี้ ผลการวิจัยนี้เป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับยางธรรมชาติที่ผลิตภายในประเทศไทยให้เพิ่มขึ้น เป็นการเพิ่มรายได้ให้กับกลุ่มเกษตรกร อุตสาหกรรม และผลิตภัณฑ์ในประเทศไทยได้เป็นอย่างดี

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาผลของ MWCNT ต่อสมบัติเชิงกลและสมบัติการนำไฟฟ้าของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่ผ่านกระบวนการคงรูปด้วยรังสีแกมมา
2. เพื่อศึกษาผลของเส้นใยไหม ต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่ผ่านกระบวนการคงรูปด้วยรังสีแกมมา

วิธีการวิจัย

สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

สารเคมีที่ใช้ในการวิจัยและผู้จำหน่าย/ผู้ผลิตของสารเคมีดังกล่าว แสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 วัสดุดิบและสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

Material/Chemicals	Supplier/Company
NRL (Natural rubber latex) 60%	Rubber Authority of Thailand
MWCNT	Richest Group, Shanghai, China.
PDDA (Poly(diallyl-dimethylammonium chloride)) 20%	Chemical express Co., LTD., Thailand.
SDS (Sodium dodecyl sulfate) 90 %	Chemical express Co., LTD., Thailand.
NH ₃ (Ammonia) 1.5%	Gammaco Co., LTD., Thailand.
KOH (Potassium hydroxide) 10%	Gammaco Co., LTD., Thailand.
H ₂ SO ₄ (Sulfuric acid)	Scitrader Co., LTD., Thailand.
HNO ₃ (Nitric acid)	Scitrader Co., LTD., Thailand.
n-BA (N-butyl acrylate)	VIV Interchem Co., Ltd., Thailand.

วัสดุเสริมแรง เส้นใยไหม จากร้านรัศมีไหมไทย มีน้ำหนักต่อหน่วยพื้นที่ $74.46 \pm 0.01 \text{ g/m}^2$ ตามมาตรฐาน

ASTM D 3776

ตารางที่ 2 การทดสอบเส้นด้าย (Yarn tests) ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 1059

Fabric	Yarn count	Tex
Silk	Warp yarn	4.77 ± 0.10 per mm
	Weft yarn	7.39 ± 0.24 per mm

การเตรียม RVNRL

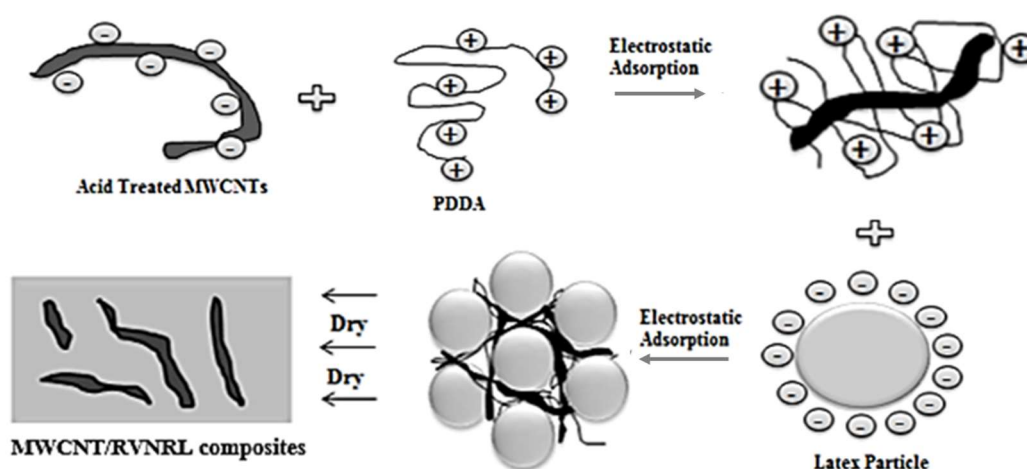
ผสม NRL 60 % 8.33 kg กับสารละลาย NH_3 1.5 % 1.67 kg โดยใช้เครื่องกวนสารเป็นเวลา 30 นาที จากนั้นเติม KOH 10% 125 g และ n-BA 250 g กวนให้เข้ากันเป็นเวลา 90 นาที แล้วจึงนำน้ำยางที่ผสมได้ บรรจุใส่ภาชนะแล้วนำไปฉายรังสีแกมมา ด้วยปริมาณรังสี 14 kGy ณ สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์ (องครักษ์) ทั้งนี้ น้ำยางที่ผ่านการฉายรังสีแกมมาแล้ว ทำการเก็บรักษาโดยการควบคุมอุณหภูมิในตู้ความเย็น (ประมาณ 4°C) ก่อนการผสมกับ MWCNT และการขึ้นรูปชิ้นงาน

การเตรียมสารตัวเติม MWCNT ที่ผ่านการปรับผิวด้วยกรดผสมระหว่าง $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{HNO}_3$

เติม MWCNT 1.08 g ในกรดผสมระหว่าง $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{HNO}_3$ (อัตราส่วน 3:1) ปริมาตร 20 ml ให้ความร้อนด้วยเตาให้ความร้อน (Hotplate) อุณหภูมิ 80° เป็นเวลา 90 นาที จากนั้นจึงเติมน้ำกลั่น ปริมาตร 800 ml และกรองด้วยกระดาษกรองแล้วจึงนำ MWCNT ที่ผ่านการปรับผิว อบด้วยเตาอบลมร้อน (Hot air oven) อุณหภูมิ 100° เป็นเวลา 12 ชั่วโมง จนกระทั่ง MWCNT แห้ง

การผสม RVNRL กับ MWCNT และการขึ้นรูปยาง

ผสม SDS 0.5 g กับ MWCNT ที่ผ่านการปรับผิวด้วยกรดผสม ปริมาณ 0, 1, 2 และ 3 g ซึ่งเปรียบเทียบได้กับปริมาณความเข้มข้นของ MWCNT ที่ 0, 2, 4 และ 6 phr ตามลำดับ จากนั้นเติมน้ำกลั่น ปริมาตร 100 ml แล้วนำไปเข้าเครื่องเขย่า ultrasonic เป็นเวลา 30 นาที ปรับค่า pH ให้เป็น 10 ด้วย 0.2 M KOH เพื่อให้โมเลกุล MWCNT เป็นประจุลบแล้วจึงเติมสารละลาย PDDA ซึ่งมีประจุบวก ปริมาตร 50 ml ปั่นด้วยเครื่องกวนสาร เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นผสม RVNRL ปริมาณ 100 g เป็นเวลา 24 ชม. กระบวนการเตรียมวัสดุเชิงประกอบ MWCNT/RVNRL แสดงได้ดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 แสดงกระบวนการเตรียมวัสดุเชิงประกอบ MWCNT/RVNRL (Peng et al., 2010)

เมื่อกวนน้ำยางเสร็จ เทน้ำยางลงบนแม่พิมพ์ที่มีความหนาประมาณ 1 mm วางผ้าไหมที่ผ่านการชุบน้ำยางบนน้ำยางในแม่พิมพ์ แล้วจึงเทน้ำยางอีก 1 mm ดังภาพที่ 3 ปล่อยให้แผ่นยางแห้งในอุณหภูมิห้อง ประมาณ 3 วัน จากนั้น นำแผ่นยางที่ได้ ไปทำการอัดขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดระบบความดันสูง โดยใช้ความดัน 600 psi อุณหภูมิ 70° เป็นเวลา 20 นาที สำหรับชิ้นงาน 1 แผ่น เพื่อให้การเข้ากันของแผ่นยางและเส้นใยไหมดีขึ้น และลดฟองอากาศที่อาจเกิดขึ้นในขั้นตอนของการตากแห้ง ทั้งนี้ เพื่อเปรียบเทียบผลของผ้าไหมต่อสมบัติเชิงกลของชิ้นงาน คณะวิจัยฯ ทำการทดสอบแผ่นยาง MWCNT/RVNRL หนา 2 mm ที่ไม่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยไหม โดยใช้ขั้นตอนและกระบวนการเดียวกับชิ้นงานทดสอบที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยไหม



ภาพที่ 3 แสดงการจัดวางแผ่นยางกับเส้นใยไหม

การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบ MWCNT/RVNRL

นำแผ่นวัสดุเชิงประกอบ ทดสอบลักษณะทางกายภาพและลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) จากบริษัท Philips รุ่น XL30 ประเทศญี่ปุ่น และทดสอบสมบัติเชิงกลด้านมอดุลัสแรงดึง (Tensile modulus) การต้านทานแรงดึง (Tensile strength) เปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด (Elongation at break) ตามมาตรฐาน ASTM D412-06 ด้วยเครื่อง Universal Testing Machine จากบริษัท Shimadzu รุ่น Autograph AG-I 5kN ประเทศญี่ปุ่น โดยใช้ความเร็วในการดึง 500 mm/min และทดสอบค่าความแข็ง (Hardness) ตามมาตรฐาน ASTM D2240-03 (Shore A) ด้วยเครื่อง Hardness Tester รุ่น GS-719G จากบริษัท Teclock ประเทศญี่ปุ่น

การทดสอบสมบัติการนำไฟฟ้าของวัสดุเชิงประกอบ MWCNT/RVNRL

ให้ความต่างศักย์ไฟฟ้ากระแสตรงจากเครื่องกำเนิดศักย์ไฟฟ้าสูง (High voltage power supply) ยี่ห้อ KEITHLEY รุ่น 247 (ความต่างศักย์ที่ใช้เท่ากับ 500 V) ไปยังแผ่นวัสดุเชิงประกอบ MWCNT/RVNRL ทำการวัดกระแสไฟฟ้า (Current) ที่ได้ โดยใช้เครื่องวัดกระแสไฟฟ้าความละเอียดระดับพิโคแอมแปร์ (Pico-ammeter) ยี่ห้อ KEITHLEY รุ่น 6485 คำนวณค่าคงที่ความต้านทานเชิงปริมาตร (Volume resistivity; ρ) ตามสมการที่ 1

$$\rho = \frac{A \times V}{t \times I} \quad (1)$$

โดยที่ A คือ พื้นที่หน้าตัดตัวอย่าง (cm^2)

V คือ ความต่างศักย์ที่ให้กับตัวอย่าง (V)

t คือ ความหนาตัวอย่าง (cm)

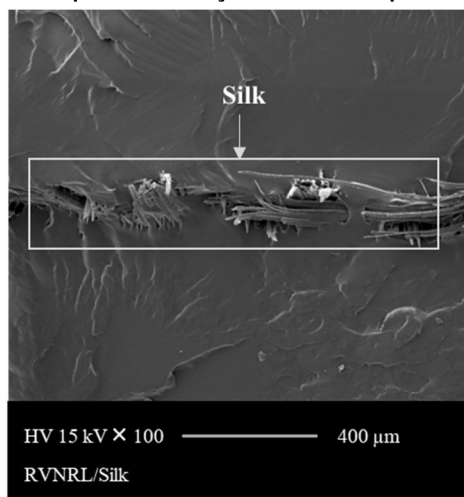
I คือ กระแสไฟฟ้าที่วัดได้ (A)

ทั้งนี้ ค่าคงที่การนำไฟฟ้า (Electrical conductivity; σ) มีความสัมพันธ์กับค่า ρ ตามสมการที่ 2

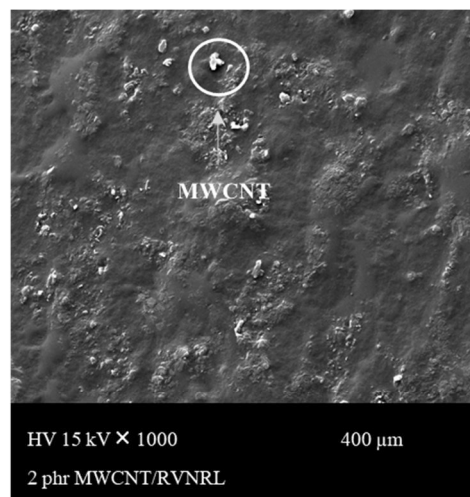
$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (2)$$

ผลการวิจัย

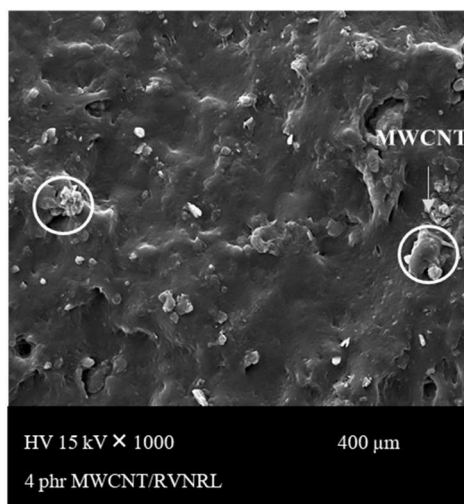
โครงสร้างจุลภาคและสัณฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบ MWCNT/RVNRL



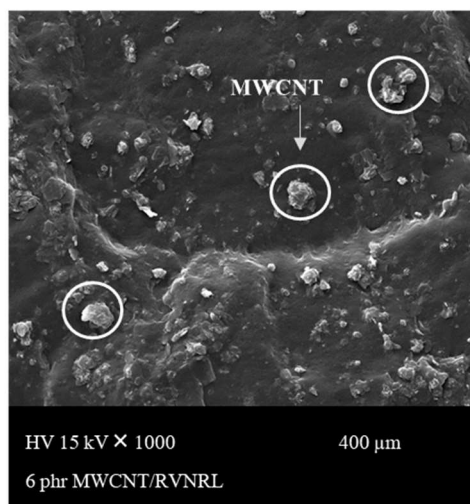
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

ภาพที่ 4 โครงสร้างสัณฐานวิทยาจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

(ก) วัสดุเชิงประกอบ RVNRL/Silk

(ข) วัสดุเชิงประกอบ RVNRL ที่เติมสารตัวเติม MWCNT ปริมาณ 2 phr

(ค) วัสดุเชิงประกอบ RVNRL ที่เติมสารตัวเติม MWCNT ปริมาณ 4 phr

(ง) วัสดุเชิงประกอบ RVNRL ที่เติมสารตัวเติม MWCNT ปริมาณ 6 phr

สมบัติเชิงกลและสมบัติการนำไฟฟ้าของวัสดุเชิงประกอบ MWCNT/RVNRL
 ตารางที่ 3 สมบัติเชิงกลและสมบัติการนำไฟฟ้าของวัสดุเชิงประกอบ MWCNT/RVNRL ($\pm$ SD)

Sample	MWCNT content (phr)	Mechanical properties				Electrical conductivity ($\times 10^{-9}$)(S/cm)
		Tensile modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Hardness (Shore A)	
NR	0	0.33 $\pm$ 0.03	3.21 $\pm$ 2.14	1030 $\pm$ 16	20 $\pm$ 1	1.39 $\pm$ 0.60
RVNRL	0	0.53 $\pm$ 0.02	17.22 $\pm$ 1.11	1340 $\pm$ 10	21 $\pm$ 1	3.88 $\pm$ 0.23
	2	0.42 $\pm$ 0.05	5.75 $\pm$ 0.68	1044 $\pm$ 20	26 $\pm$ 1	4.24 $\pm$ 0.20
	4	0.54 $\pm$ 0.03	5.76 $\pm$ 0.83	1070 $\pm$ 33	27 $\pm$ 1	4.35 $\pm$ 0.21
	6	0.53 $\pm$ 0.04	3.39 $\pm$ 0.37	675 $\pm$ 26	32 $\pm$ 1	4.37 $\pm$ 0.21
NR/Silk	0	0.98 $\pm$ 0.09	2.24 $\pm$ 0.02	34.0 $\pm$ 1.3	28 $\pm$ 1	0.03 $\pm$ 0.12
RVNRL/Silk	0	1.49 $\pm$ 0.24	7.04 $\pm$ 2.06	38.0 $\pm$ 2.9	33 $\pm$ 1	0.07 $\pm$ 0.01
	2	0.77 $\pm$ 0.03	4.85 $\pm$ 0.10	24.4 $\pm$ 0.1	34 $\pm$ 2	4.40 $\pm$ 0.27
	4	1.00 $\pm$ 0.06	4.25 $\pm$ 0.21	23.1 $\pm$ 1.1	35 $\pm$ 1	5.08 $\pm$ 0.26
	6	0.97 $\pm$ 0.13	5.10 $\pm$ 0.54	25.0 $\pm$ 1.1	42 $\pm$ 2	6.94 $\pm$ 0.48

อภิปรายและสรุปผลการวิจัย

สมบัติการนำไฟฟ้าของวัสดุเชิงประกอบ MWCNT/RVNRL

จากตารางที่ 2 วัสดุเชิงประกอบ MWCNT/RVNRL ที่มีการปรับเปลี่ยนปริมาณสารตัวเติม MWCNT ตั้งแต่ 0, 2, 4 และ 6 phr มีค่าการนำไฟฟ้าสูงขึ้นตามปริมาณสารตัวเติมที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากสารตัวเติม MWCNT มีสมบัติการนำไฟฟ้าที่สูงกว่าวัสดุที่เป็นฉนวนไฟฟ้า (ค่าการนำไฟฟ้าของ MWCNT อยู่ระหว่าง 10^6 - 10^7 S/m ในขณะที่วัสดุยางทั่วไป มีค่าการนำไฟฟ้าประมาณ 10^{-14} S/m) ดังนั้นเมื่อมีการเติมสารตัวเติม MWCNT ในวัสดุยาง จึงส่งผลทำให้ อิเล็กตรอน (กระแสไฟฟ้า) สามารถเคลื่อนที่ในตัวกลางได้ง่ายขึ้น ทำให้ค่าการนำไฟฟ้าสูงขึ้นตามปริมาณการเพิ่มสารตัวเติม MWCNT โดยผลการวิจัยพบว่า ที่ปริมาณ 6 phr ของ MWCNT ซึ่งเป็นปริมาณสูงสุดของ MWCNT ที่ใช้ในการวิจัย ชิ้นงานมีค่าการนำไฟฟ้าสูงสุด ดังนั้น สารตัวเติม MWCNT สามารถช่วยเพิ่มความสามารถในการนำไฟฟ้าให้กับ ชิ้นงานได้ดีขึ้น ทั้งนี้ในชิ้นงานที่ใช้เส้นใยไหมและไม่ใช้เส้นใยไหม (เส้นใยไหมมีค่าการนำไฟฟ้าประมาณ 1.96×10^{-2} S/m) เมื่อมีการเสริมยางด้วยเส้นใยไหมส่งผลให้มีค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเนื่องจากเส้นใยไหมมีค่าการนำไฟฟ้าสูงกว่าวัสดุยางทั่วไป ซึ่งส่งผลดีต่อการนำไปประยุกต์ใช้ในการพัฒนาเป็นวัสดุป้องกันการรบกวนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

สมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบ MWCNT/RVNRL

จากผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบ MWCNT/RVNRL ดังแสดงในตารางที่ 2 ที่มีการเติมสารตัวเติม MWCNT โดยปรับเปลี่ยนปริมาณที่ 0, 2, 4 และ 6 phr พบว่าการเติมสารตัวเติม MWCNT ส่งผลทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด ค่ามอดุลัสแรงดึง และค่าความต้านทานแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบมีแนวโน้มที่ลดลง เนื่องจากสารตัวเติม MWCNT ไม่สามารถเกิดอันตรกิริยากับยางได้ และเมื่อเติมสารตัวเติมในปริมาณที่เพิ่มขึ้น อาจทำให้เกิดการเกาะกลุ่มกันของสารตัวเติมด้วยตัวเอง (Filler-filler interaction) จึงส่งผลทำให้การยึดเกาะระหว่างสารตัวเติม

กับเมทริกซ์ของยางและการกระจายตัวของ MWCNT ในชิ้นงานทดลอง (Boochathum, Rongtongaram, 2016) การเกาะกลุ่มของ MWCNT ในเมทริกซ์ยังสามารถมองเห็นได้จากภาพกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ภาพที่ 4ข-4ง นอกจากนี้ เมื่อเติมสารตัวเติม MWCNT ส่งผลทำให้วัสดุมีค่าความแข็งแรงเพิ่มขึ้นตามปริมาณ MWCNT ที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากสารตัวเติม MWCNT เป็นอนุภาคที่มีความแข็ง (Rigidity) สูง ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงโดยรวมของวัสดุเชิงประกอบเพิ่มขึ้น

ทั้งนี้เมื่อพิจารณาสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบ MWCNT/RVNRL ที่เสริมแรงด้วยเส้นใยไหม ซึ่งแสดงในภาพที่ 4ก แสดงให้เห็นถึงการแทรกตัวหรือการเข้ากันของวัสดุเชิงประกอบยางกับเส้นใยไหมที่ดี โดยการทดสอบสมบัติเชิงกลของชิ้นงาน พบว่า ชิ้นงานที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยไหม มีค่ามอดุลัสแรงดึงและค่าความแข็งแรงที่สูงกว่าชิ้นงานที่ไม่มีการเสริมด้วยเส้นใยไหม ทั้งนี้เนื่องจากเส้นใยไหมทำหน้าที่เป็นตัวเสริมแรง (Reinforcement) ในวัสดุเชิงประกอบยาง และมีค่าความแข็งแรง (Rigidity) ที่สูงกว่าวัสดุยาง จึงส่งผลทำให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงที่ผิวโดยรวมเพิ่มขึ้น ส่วนค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด และค่าความต้านทานแรงดึงมีค่าที่ลดลง เนื่องจากวัสดุเส้นใยไหมมีสมบัติความยืดหยุ่นต่ำ เมื่อเติมในวัสดุเชิงประกอบยาง จึงส่งผลทำให้วัสดุเชิงประกอบยางมีการยืดตัวและยืดหยุ่นลดลง แต่เมื่อพิจารณาวัสดุเชิงประกอบ MWCNT/RVNRL ที่ปริมาณ 6 phr พบว่าค่าความต้านทานแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบ MWCNT/RVNRL ที่เสริมแรงด้วยเส้นใยไหมมีค่าความต้านทานแรงดึงที่สูงกว่าวัสดุเชิงประกอบที่ไม่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยไหม

เมื่อพิจารณาผลการวิจัยโดยรวม เห็นได้ว่า สารตัวเติม MWCNT สามารถเพิ่มความสามารถในการนำไฟฟ้าของวัสดุเชิงประกอบยางตามปริมาณสารตัวเติมที่เพิ่มขึ้น (สูงสุดที่ปริมาณ 6 phr) ซึ่งเหมาะต่อการนำไปประยุกต์ใช้ในการพัฒนาเป็นวัสดุป้องกันการรบกวนจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ แต่ทั้งนี้สมบัติเชิงกลโดยรวม โดยเฉพาะค่าการต้านทานแรงดึง มีค่าลดลงจากการเติมสารตัวเติม MWCNT ในปริมาณที่สูงขึ้น ดังนั้น เพื่อให้วัสดุเชิงประกอบยางสามารถคงสภาพความแข็งแรงของวัสดุไว้ การใช้เส้นใยไหมเป็นวัสดุเสริมแรงจึงเป็นทางเลือกที่มีประสิทธิภาพ ดังเห็นได้จากค่าการต้านทานแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่มีการเติม MWCNT ปริมาณ 6 phr และใช้เส้นใยไหมเสริมแรงมีสมบัติโดยรวมสูงกว่าชิ้นงานที่ไม่มีการใช้เส้นใยไหม

ดังนั้น ผลการวิจัยสามารถสรุปได้ว่า

- การเติม MWCNT ลงใน RVNRL ส่งผลทำให้ค่าความแข็งแรง และค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นแต่ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด ค่ามอดุลัสแรงดึง และค่าความต้านทานแรงดึงมีค่าลดลง
- การใช้เส้นใยไหมในวัสดุเชิงประกอบ MWCNT/RVNRL ส่งผลทำให้ค่าความแข็งแรงและค่ามอดุลัสแรงดึงเพิ่มขึ้น แต่ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาดและค่าความต้านทานแรงดึงมีค่าลดลง ยกเว้นชิ้นงานที่มีการเติม MWCNT ที่ปริมาณ 6 phr พบว่าค่าความต้านทานแรงดึงของชิ้นงานที่มีการใช้เส้นใยไหมมีค่าสูงกว่าชิ้นงานที่ไม่มีการใช้เส้นใยไหม

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณทุนสนับสนุนงานวิจัยจากคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และได้รับการสนับสนุนการวิจัยภายใต้แผนงานเสริมสร้างศักยภาพและพัฒนานักวิจัยรุ่นใหม่ ตามทิศทางการวิจัยและนวัตกรรม ประเภทบัณฑิตศึกษาจากสำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ ประจำปี 2562 นอกจากนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณสถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) และกลุ่มวิจัยการผลิตและขึ้นรูปพอลิเมอร์ (P-PROF) สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุ คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี และบริษัทไอวีอินเตอร์เคม จำกัด และศูนย์ทดสอบผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ (PTEC) ที่ให้ความอนุเคราะห์วัสดุอุปกรณ์ในการทดลอง และเครื่องมือในการทดสอบ

เอกสารอ้างอิง

- Boochathum P, Rongtongaram N. Influence of chloroacetate group on physical properties of natural rubber and its interaction with fillers. *Appl Polym Sci* 2016; 43076.
- Gao S, Chen X, Pan F, Song K. Effect of secondary phase on the electromagnetic shielding effectiveness of magnesium alloy. *Sci Rep* 2018; 8(1): 1625.
- Incavo J, Schafer M. Simplified method for the determination of N-nitrosamines in rubber vulcanizates. *Anal Chim Acta* 2006; 557(1-2): 256-261.
- Kaewunruen S, Meesit R. Sensitivity of crumb rubber particle sizes on electrical resistance of rubberized concrete. *Cogent Eng* 2016; 3(1): 1126937.
- Peng Z, Feng C, Luo Y, Li Y, Kong L. Self-assembled natural rubber/multi-walled carbon nanotube composites using latex compounding techniques. *Carbon* 2010; 48(15): 4497-4503.
- Scagliusi S, Cardoso E, Lugao A. Effect of gamma radiation on chlorobutyl rubber vulcanized by three different crosslinking systems. *Radiat Phys Chem* 2012; 81(9): 1370-1373.
- Smitthipong W, Suethao S, Shah D, Vollrath F. Interesting green elastomeric composites: Silk textile reinforced natural rubber. *Polym Test* 2016; 55: 17-24.
- Vas J, Thomas M. Electromagnetic shielding effectiveness of multi-walled carbon nanotube filled silicone rubber. *Proceeding of the 13th INCEMIC: IEEE*; 2015: 55-59.