

**อิทธิพลของการเติมท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้นต่อสมบัติเชิงกล
และสมบัติทางไฟฟ้าของยางธรรมชาติ**

**Influence of Multi-wall Carbon Nanotube Addition on Mechanical Properties and
Electrical Properties of Natural Rubber**

ปฐมพงศ์ ชนะนิล* ศิริพร ไสสะอาด และศรตวรรษ สีหาราช

สาขาวิชาฟิสิกส์ ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์

มหาวิทยาลัยราชภัฏร้อยเอ็ด

*Email: p_chananil@hotmail.com

บทคัดย่อ

การศึกษาสมบัติเชิงกลและสมบัติทางไฟฟ้าของยางธรรมชาติผสมท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น โดยใช้ Polyoxyethylene (20) sorbitan monolaurate (Tween 20) เป็นสารลดแรงตึงผิวเพื่อให้ท่อนาโนคาร์บอนกระจายตัวได้ดี ในการเตรียมตัวอย่างมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณการเติมท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้นเป็นร้อยละ 0, 3, 4 และ 5 โดยน้ำหนัก ในสภาวะบรรยากาศปกติ เพื่อทดสอบและเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลและสมบัติทางไฟฟ้ารวมถึงการตรวจสอบพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ผลปรากฏว่าค่ามอดูลัสของยังและค่าทนต่อแรงดึงมีค่าเพิ่มขึ้น ตามปริมาณการเติมท่อนาโนคาร์บอนที่เพิ่มขึ้น และมีค่าสูงสุดที่ร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก โดยภาพพื้นผิวจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดพบว่าส่วนประกอบต่างๆ รวมทั้งท่อนาโนคาร์บอนมีการกระจายตัวในเนื้อยางได้ดีที่สุด และสภาพการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นตามปริมาณการเติมท่อนาโนคาร์บอนจนถึงปริมาณสูงที่สุดที่ได้ศึกษาคือร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก โดยมีแนวโน้มสูงขึ้นเรื่อยๆ เมื่อเพิ่มปริมาณท่อนาโนคาร์บอนต่อไปจากนั้นได้ศึกษาการเติมท่อนาโนคาร์บอนในปริมาณที่ใกล้เคียงกับร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก คือที่ร้อยละ 3.9 และ 4.1 โดยน้ำหนัก ผลปรากฏว่า การเติมท่อนาโนคาร์บอนในปริมาณร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก ยังคงให้ค่ามอดูลัสของยังและค่าทนต่อแรงดึงสูงที่สุด

คำสำคัญ: ยางธรรมชาติ ท่อนาโนคาร์บอน สมบัติเชิงกล สมบัติทางไฟฟ้า

Abstract

A study of mechanical and electrical properties of natural rubber blending with multi-wall carbon nanotubes using Polyoxyethylene (20) sorbitan monolaurate (Tween 20) as a surfactant for good dispersion of the carbon nanotubes. In preparation, the multi-wall carbon nanotubes contents were studied between 0-5 by weight in normal atmospheric conditions in order to investigate and compare mechanical and electrical properties including examine the surface with a scanning electron microscope. The results showed that the modulus and tensile strength were

increased as the carbon nanotube contents increases with a maximum of 4 percent by weight. The surface images from the scanning electron microscope showed that the composites including carbon nanotubes were dispersed best in rubber and the conductivity was increased due to the carbon nanotube contents increasing to the highest dose studied of 5 percent by weight which probably higher constantly when the carbon nanotube contents were increased. Then, carbon nanotubes contents were studied at approximately 4 percent by weight with 3.9 and 4.1, the result showed that the carbon nanotube contents at 4 percent by weight still provided the highest modulus and tensile strength

Keywords: Nature Rubber, Carbon Nanotube, Mechanical Properties, Electrical Properties

บทนำ

ยางธรรมชาติเป็นพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างของสายโซ่โมเลกุลประกอบด้วยคาร์บอนและไฮโดรเจน ทำใหยางธรรมชาติมีสมบัติไม่ทนน้ำมันปิโตรเลียมหรือน้ำมันพืช แต่เป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดี อีกทั้งสายโซ่โมเลกุลของยางธรรมชาติต่อกันเป็นสายยาวแบบเส้นตรง ทำใหสายโซ่โมเลกุลเคลื่อนไหวหักงอไปมาได้ ง่าย ส่งผลใหยางธรรมชาติคงสภาพยืดหยุ่นได้ดี สามารถใช้งานได้ดีที่อุณหภูมิต่ำ (Saatang, 2014) มีสมบัติเชิงกลที่ดี มีความยืดหยุ่นสูง มีความเหนียว มีความต้านทานต่อการขีดถู ทนต่อแรงดึงและต้านทานการฉีกขาดได้ดีแม้ไม่เติมสารเสริมแรงใดๆ จึงทำให้มีการนำยางธรรมชาติมาแปรรูปและผลิตให้เป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ อย่างมากมาย เช่น ยางล้อรถยนต์ ถังมือยาง สายพาน เฟอรัมเจอร์ อุปกรณ์ทางกีฬา และอุปกรณ์ทางการแพทย์ เป็นต้น ในการใช้งานแต่ละประเภทต้องการสมบัติของยางธรรมชาติที่แตกต่างกันออกไป จึงมีการปรับปรุงสมบัติต่างๆ ให้เหมาะสมต่อการใช้งานด้วย การปรับปรุงสมบัติของยางธรรมชาติให้ดีขึ้นนั้นทำได้โดยการเติมสารเสริมแรงที่มีสมบัติตามที่ต้องการลงไป ซึ่งสารเสริมแรงในยางธรรมชาติที่นิยมใช้มีหลายชนิด เช่น แกรไฟต์ ซิลิกา (Tangudom, 2012) นาโนเคลย์ (Sangchai, 2008) แกรฟีน (Hailan et al., 2017) แกรไฟต์ (Pumpradub, 2014) และท่อนาโนคาร์บอน (Sangchai, 2008, Kueseng et al., 2013) เป็นต้น ลงในยางธรรมชาติ เพื่อทำให้สมบัติเชิงกลของยางธรรมชาตินั้นดีขึ้นเป็นต้น ในการเติมสารเสริมแรงลงไป ไม่เพียงแต่ทำให้สมบัติของยางธรรมชาติดีขึ้น ยังสามารถเพิ่มสมบัติที่ยางธรรมชาติไม่มีได้อีกด้วย เช่นการเติมสารเสริมแรงจำพวกโลหะ หรือจำพวกที่นำไฟฟ้าได้ลงไปจะสมารถทำใหยางธรรมชาติที่มีสมบัติเป็นฉนวนสามารถนำไฟฟ้าได้ เป็นต้น

ปัจจุบันในกระบวนการแปรรูปผลิตภัณฑ์มีการเติมสารเสริมแรงหลายชนิด เพื่อทำใหยางมีคุณภาพที่ดีและใช้งานได้หลากหลายมากขึ้น แต่ที่กำลังได้รับความสนใจและมีการศึกษาอย่างกว้างขวางในปัจจุบัน คือ การเติมท่อนาโนคาร์บอน (Carbon Nanotube: CNTs) ซึ่ง CNTs นั้นเป็นสารจำพวกคาร์บอน (C) เช่นเดียวกับแกรไฟต์ และเพชร มีลักษณะเป็นท่อมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่ออยู่ในระดับนาโนเมตร (ประมาณ 15-30 นาโนเมตร) และสามารถยาวได้ถึง 10 ไมโครเมตร CNTs แบ่งเป็น 3 ชนิด คือ ท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังชั้นเดียว ท่อนาโนคาร์บอนแบบผนัง 2 ชั้น และท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น CNTs (Nuoclay, 2008, Sangchai, 2008) มีสมบัติที่สามารถเป็นได้ทั้งตัวนำไฟฟ้า

และสารกึ่งตัวนำที่มีความแข็งแรงสูง ระบายความร้อนได้ดี น้ำหนักเบา ทนต่อการกัดกร่อน มีความยืดหยุ่นอย่างมาก โดย CNTs และจากผลการทดสอบความเป็นพิษแบบเฉียบพลันเมื่อได้รับทางปาก พบว่าท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้นไม่พบผลกระทบเชิงลบที่มีต่อเซลล์ และไม่ทำให้เกิดการระคายเคืองหากมีการได้รับทางการสัมผัส (CERI) จึงทำให้ CNTs เป็นสารเสริมแรงที่นิยมนำมาใช้เพิ่มสมบัติให้กับผลิตภัณฑ์ต่างๆ

ในงานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาสมบัติของยางธรรมชาติที่เติมท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้นในปริมาณต่างๆทั้งสมบัติเชิงกลและสมบัติทางไฟฟ้า เนื่องจาก CNTs ชนิดนี้สามารถเตรียมได้ในปริมาณมาก และมีราคาถูกกว่าชนิดอื่น โดยศึกษาจากน้ำยางธรรมชาติที่มีอยู่ในท้องถิ่นภาคตะวันออกเฉียงเหนือเป็นน้ำยางจากต้นยางที่ปลูกในหมู่บ้านสายนาตง ตำบลโคกก่ง อำเภอขามเฒ่า จังหวัดอำนาจเจริญ พันธุ์ RIM60 มีอายุประมาณ 10 ปี มีเส้นรอบวง 70-80 เซนติเมตร

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อศึกษาสมบัติเชิงกลและสมบัติทางไฟฟ้าของยางธรรมชาติที่ผสมด้วยท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้นในอัตราส่วนต่างๆ

วัสดุอุปกรณ์และวิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาสมบัติเชิงกลและสมบัติทางไฟฟ้าของยางธรรมชาติที่เปลี่ยนแปลง เมื่อเติมท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น ในอัตราส่วนร้อยละ 3, 4 และ 5 โดยน้ำหนัก (Wt.%) ในสภาวะบรรยากาศปกติ ที่อุณหภูมิห้อง โดยยางธรรมชาติที่ใช้มีส่วนประกอบยางแห้งในน้ำยางสดร้อยละ 34.6

การเตรียมสารละลายท่อนาโนคาร์บอน

ผสมสารลดแรงตึงผิว Tween 20 ปริมาณ 1.25 กรัม ในน้ำกลั่น ปริมาณ 500 มิลลิลิตร ใช้แท่งแก้วคนสารคนจนเป็นเนื้อเดียวกัน จำนวน 3 บีกเกอร์ จากนั้นเติม CNTs. ปริมาณร้อยละ 3, 4 และ 5 โดยน้ำหนัก ลงในแต่ละบีกเกอร์ แล้วผสมให้เข้ากันด้วยเครื่อง Ultrasonic Bath เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

การผสมท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้นในยางธรรมชาติ

กรองน้ำยางด้วยตะแกรง เพื่อกำจัดสิ่งเจือปนในน้ำยางธรรมชาติ แล้วเทน้ำยางใส่ภาตแสดงเลขจำนวน 4 ภาต ภาตละ 500 มิลลิลิตร จากนั้นผสมกรดฟอรั่มิกส์ปริมาณ 0.68 กรัม เข้มข้นร้อยละ 2 โดยปริมาตร กับน้ำยางธรรมชาติที่เตรียมไว้ในแต่ละภาต แล้วคนด้วยแท่งแก้วคนสาร ประมาณ 3 นาที

หลังจากนั้น ผสมสารละลายท่อนาโนคาร์บอนที่เตรียมไว้ลงในภาตเตรียมยางธรรมชาติที่ผสมกรดฟอรั่มิกส์ โดยตาดแรกไม่เติมท่อนาโนคาร์บอน ภาตที่ 2, 3 และ 4 เติมท่อนาโนคาร์บอนปริมาณร้อยละ 3, 4 และ 5 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ แล้วกวนน้ำยางด้วยแผ่นกวนประมาณ 5 นาที แล้วปล่อยให้ยางแข็งตัวเป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อให้สามารถรีดขึ้นแผ่นได้ โดยรีดแผ่นยาง ด้วยเครื่องรีดแผ่นยางแบบ 2 ลูกกลิ้ง ให้ได้แผ่นยางหนา 3 มิลลิเมตร จึงนำแผ่นยางที่ได้ตากในที่ร่ม เป็นเวลา 7 วัน ให้ยางแห้งสนิท แล้วนำตัวอย่างยางไปทดสอบสมบัติเชิงกลและสมบัติทางไฟฟ้า

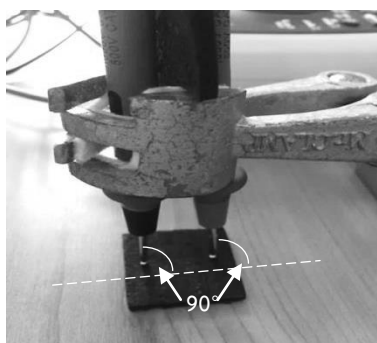
การทดสอบสมบัติเชิงกล

ตัดแผ่นยางด้วยเครื่องตัดแผ่นยาง โดยใช้ได (Dai) ตัดเป็นรูปดัมเบล ตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM D412-C แผ่นยางแห้งหนึ่งแผ่นสามารถตัดเป็นรูปดัมเบลตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM D412-C ได้ 4 ชิ้น

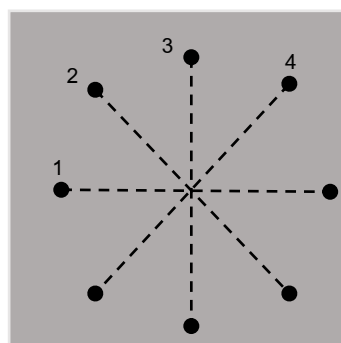
ทดสอบชิ้นงานที่เตรียมแล้วด้วยเครื่องทดสอบแรงดึงเอนกประสงค์ Instron รุ่น 3365, ประเทศสหรัฐอเมริกา เพื่อวิเคราะห์ความทนทานต่อแรงดึง ความเครียด และค่ามอดูลัสของยัง

การทดสอบสมบัติทางไฟฟ้า

ทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าด้วยเครื่องมัลติมิเตอร์แบบดิจิตอลยี่ห้อ Fluke รุ่น 289, ประเทศสหรัฐอเมริกา จัดอุปกรณ์การวัดโดยใช้ขาตั้งและที่หนีบจับปลายหัววัดให้ขั้วบวกและขั้วลบ ตั้งฉากกับชิ้นงานและห่างกัน 1 เซนติเมตร ดังภาพที่ 1 ก. ทำการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าของตัวอย่าง โดยหนึ่งตัวอย่างจะวัดจำนวน 4 ครั้ง ไม่ซ้ำจุด ดังภาพที่ 1 ข.



ก.



ข.

ภาพที่ 1 การจับหัววัดของเครื่องมัลติมิเตอร์แบบดิจิตอล (ก) และแสดงตำแหน่งการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าของตัวอย่าง (ข)

บันทึกค่าความต้านทานแล้วนำไปคำนวณหาค่าสภาพการนำไฟฟ้า จากสมการที่ 1 วิเคราะห์ผลจากค่าสภาพการนำไฟฟ้าของตัวอย่างที่ได้ต่อไป

$$\sigma = \frac{L}{RA} \quad (1)$$

- โดยที่ σ คือ สภาพการนำไฟฟ้า (โอห์ม.เมตร)⁻¹
 L คือ ระยะห่างของหัววัด (1 เซนติเมตร)
 R คือ ค่าความต้านทานที่ได้จากเครื่องมัลติมิเตอร์ (โอห์ม)
 A คือ พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงาน (ตารางเซนติเมตร)

การตรวจสอบพื้นผิวของชิ้นงาน

ตรวจสอบพื้นผิวของชิ้นงานโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM.6010LV, ประเทศญี่ปุ่น ในการตรวจสอบพื้นผิวตัวอย่าง ใช้กำลังขยาย 2,000 เท่า

ผลการวิจัย

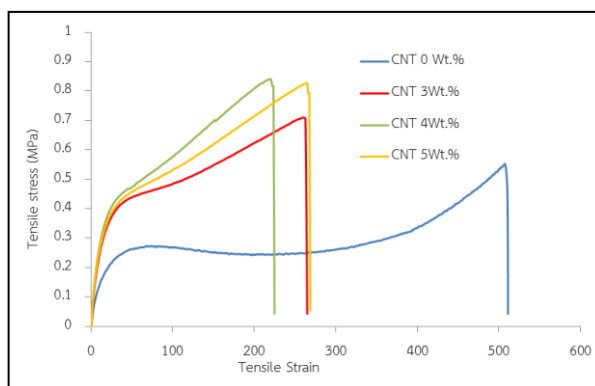
การศึกษาผลของการเติมท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้นที่มีต่อสมบัติเชิงกลและสมบัติทางไฟฟ้าของยางธรรมชาติ โดยการทดสอบหาค่ามอดูลัสของยังค่าความทนทานต่อแรงดึง ค่าความสามารถในการยืด สภาพการนำไฟฟ้า และตรวจสอบพื้นผิวของตัวอย่าง ได้ผลดังนี้

ผลการศึกษาสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติเมื่อเติมท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น

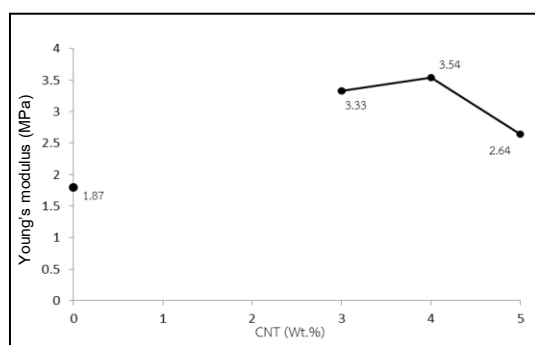
จากการศึกษาสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติผสมท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 3, 4 และ 5 โดยน้ำหนัก ด้วยเครื่องทดสอบแรงดึงอเนกประสงค์ พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นกับค่าความเครียดของชิ้นงานแสดงดังภาพที่ 2 โดยลักษณะกราฟความสัมพันธ์ของยางธรรมชาติที่ไม่เติมท่อนาโนคาร์บอน (ร้อยละ 0 โดยน้ำหนัก) เป็นกราฟที่แสดงสมบัติของตัวอย่างที่มีความนุ่มแต่เหนียว (Wuttikanokarn, 2007) ซึ่งเป็นสมบัติเฉพาะของยางธรรมชาติ เมื่อเติมท่อนาโนคาร์บอนในปริมาณร้อยละ 3, 4 และ 5 โดยน้ำหนัก กราฟความสัมพันธ์ของค่าความเค้นกับค่าความเครียดมีลักษณะที่คล้ายคลึงกับกราฟความสัมพันธ์ของวัสดุที่มีความแข็งและเหนียว เนื่องจากโดยธรรมชาติแล้วยางจะมีสมบัติที่นุ่ม แต่ผลจากการเติมท่อนาโนคาร์บอนซึ่งเป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงลงไป ทำให้สมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติมีการเปลี่ยนแปลงโดยจะมีความแข็งเพิ่มขึ้นตามสมบัติของท่อนาโนคาร์บอน นั้นแสดงว่าเมื่อเติมท่อนาโนคาร์บอนในยางธรรมชาติจะทำให้ยางมีความแข็งแรงมากขึ้น

จากผลการทดสอบ พบว่าค่ามอดูลัสของยังตัวอย่างยางธรรมชาติที่ไม่เติมท่อนาโนคาร์บอน มีค่า 1.87 MPa เมื่อเติมท่อนาโนคาร์บอนในปริมาณร้อยละ 3, 4 และ 5 โดยน้ำหนัก มีค่ายังมอดูลัส 3.33 MPa, 3.54 MPa และ 2.68 MPa ตามลำดับ ดังภาพที่ 3 (ก) ซึ่งจะเห็นว่าค่ามอดูลัสของยังจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณของท่อนาโนคาร์บอนที่เติมในยางธรรมชาติ และมีค่าสูงที่สุดเมื่อเติมท่อนาโนคาร์บอนร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก เนื่องจากท่อนาโนคาร์บอนที่เติมลงไปในยางธรรมชาติ จะกระจายตัวไปในเนื้อยางได้ดี ทำให้มีค่ามอดูลัสของยังเพิ่มตามปริมาณท่อนาโนคาร์บอน หลังจากนั้นลดลงเมื่อท่อนาโนคาร์บอนเพิ่มเป็นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก เนื่องจากปริมาณท่อนาโนคาร์บอนที่มากเกินไป จะทำให้เกิดการจับกันเป็นกลุ่มมากขึ้น (Sangchai, 2008) นอกจากนี้การเพิ่มปริมาณท่อนาโนคาร์บอนยังทำให้ค่าทนทานต่อแรงดึงของตัวอย่างเพิ่มขึ้นด้วย ดังแสดงในกราฟความสัมพันธ์ดังแสดงในภาพที่ 3 (ข) พบว่ามีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงคล้ายกับการเปลี่ยนแปลงของค่ามอดูลัสของยัง โดยให้ค่าทนทานต่อแรงดึงสูงสุดเมื่อเติมท่อนาโนคาร์บอนปริมาณร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก ที่ 26.88 MPa ในขณะที่ความทนทานต่อแรงดึงมากขึ้นก็จะส่งผลต่อความสามารถในการยืดของตัวอย่าง เนื่องจากสมบัติของท่อนาโนคาร์บอนที่มีความแข็งแรงสูงเมื่อเติมในปริมาณที่สูงขึ้น จะทำให้ตัวอย่างมีความสามารถในการยืดลดลงตามภาพที่ 3 (ค) ซึ่งจะเห็นว่าตัวอย่างที่เติมท่อนาโนคาร์บอนร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก มีค่าทนทานต่อแรงดึงมากที่สุด แต่จะมีค่าความสามารถใน

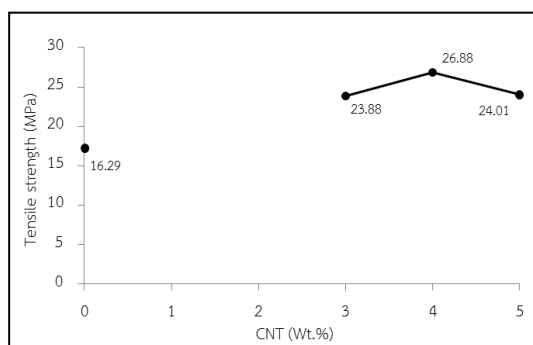
การยืดได้ต่ำที่สุด โดยยืดได้เพียงร้อยละ 252.58 และทุกตัวอย่างที่เติมท่อนาโนคาร์บอนจะมีความสามารถในการยืดน้อยกว่ายางธรรมชาติที่ไม่มีการเติมท่อนาโนคาร์บอน



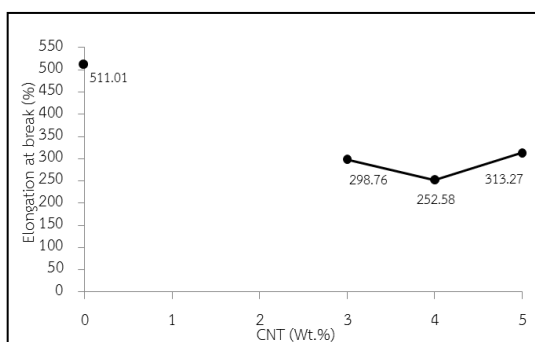
ภาพที่ 2 ความสัมพันธ์ค่าความเค้นและความเครียดของยางธรรมชาติที่เติมท่อนาโนคาร์บอนแบบผงหลายชั้นในปริมาณต่างๆ



(ก)



(ข)



(ค)

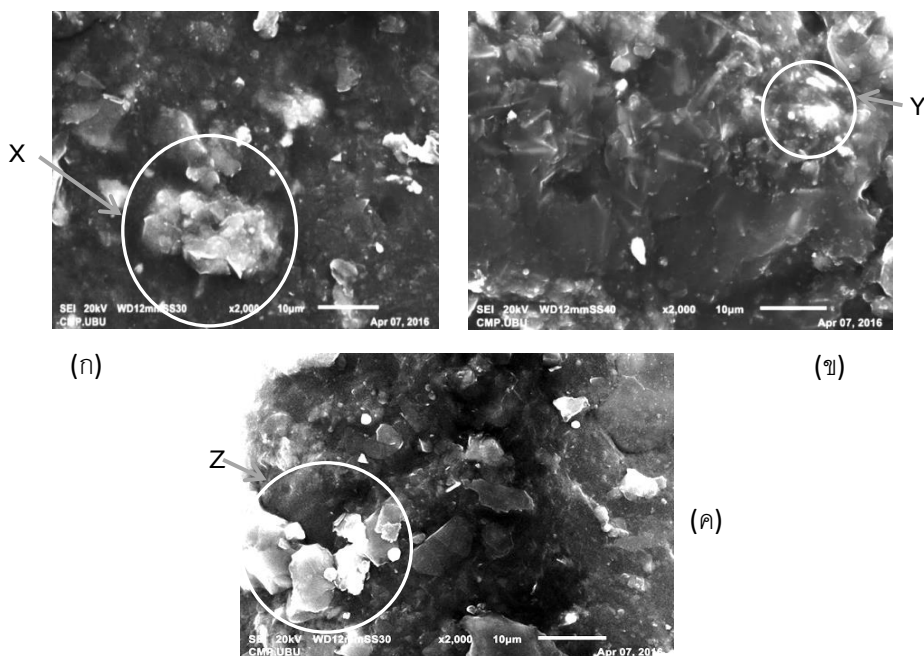
ภาพที่ 3 สมบัติเชิงกลของของยางธรรมชาติที่เติมท่อนาโนคาร์บอนแบบผงหลายชั้นในปริมาณต่างๆ

(ก) แสดงค่ามอดูลัสของยัง (ข) แสดงค่าความทนต่อแรงดึง (ค) แสดงค่าการยืด

ผลการตรวจสอบพื้นผิวของยางธรรมชาติเติมท่อนาโนคาร์บอนแบบผงหลายชั้น

จากผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติที่เติมท่อนาโนคาร์บอนในปริมาณที่เหมาะสมจะให้สมบัติเชิงกลที่ดี โดยสังเกตจากค่ามอดูลัสของยังและค่าทนทานต่อแรงดึง จะเห็นว่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณของท่อนาโนคาร์บอนจนมีค่าสูงที่สุดที่ร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก แต่เมื่อเติมท่อนาโนคาร์บอนมากขึ้น ทั้งค่ามอดูลัสของยังและค่าทนทานต่อแรงดึงกลับลดลง เมื่อตรวจสอบพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าในการเติมท่อนาโนคาร์บอนร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก จะเห็นส่วนประกอบต่างๆ รวมทั้งท่อนาโนคาร์บอนในเนื้อยางธรรมชาติเกาะกลุ่มกันเป็นก้อน ดังภาพที่ 4 (ก) ในวงกลมที่ X ก่อนมีขนาดประมาณ 20 ไมโครเมตร แสดงให้เห็นการกระจายตัวที่ไม่ดีของอนุภาคท่อนาโนคาร์บอนในเนื้อยางธรรมชาติจากการเกาะเป็นกลุ่มที่มีขนาดใหญ่ในบางบริเวณ

จากนั้นเมื่อเพิ่มปริมาณท่อนาโนคาร์บอนเป็นร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก พบว่า มีการเกาะกลุ่มกันของท่อนาโนคาร์บอนในเนื้อยางธรรมชาติน้อยมากดังแสดงในภาพที่ 4 (ข) ภายในวงกลม Y ซึ่งแสดงถึงท่อนาโนคาร์บอนมีการกระจายตัวได้ดี แต่เมื่อเติมท่อนาโนคาร์บอนเพิ่มเป็นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ปรากฏว่าท่อนาโนคาร์บอนและเนื้อยางได้เกาะกลุ่มกันเป็นก้อนที่มีขนาดโตขึ้นและมีจำนวนมากขึ้นดังแสดงในภาพที่ 4 (ค) ภายในวงกลม Z ซึ่งแสดงให้เห็นว่าปริมาณท่อนาโนคาร์บอนถ้าเติมมากเกินไปมีผลต่อการกระจายตัวของท่อนาโนคาร์บอนลดลง โดยการกระจายตัวของท่อนาโนคาร์บอนนั้นมีผลต่อสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติ หากมีการกระจายตัวที่ดีจะมีผลทำให้ค่ามอดูลัสของยังและค่าทนทานต่อแรงดึงมีค่าสูงตามไปด้วย



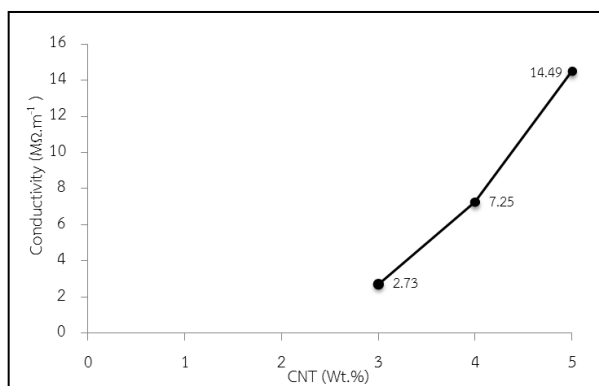
ภาพที่ 4 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (ก) ท่อนาโนคาร์บอนปริมาณร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก (ข) ท่อนาโนคาร์บอนปริมาณร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก และ (ค) ท่อนาโนคาร์บอนปริมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของยางธรรมชาติเติมท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น

เนื่องจากยางธรรมชาติที่เติมท่อนาโนคาร์บอนเป็นวัสดุตัวนำไฟฟ้าประเภทซูโดแอคทีฟ (Pseudo active) ซึ่งจะมีสมบัติทางไฟฟ้าขึ้นกับสมบัติทางไฟฟ้าของสารตัวเติม (Nuoclay, 2008) โดยสมบัติการนำไฟฟ้าของตัวอย่างเกิดจากท่อนาโนคาร์บอนที่กระจายเชื่อมต่อกันในเนื้อยาง และท่อนาโนคาร์บอนที่กระจายในเนื้อยางแต่ไม่เชื่อมต่อกัน ซึ่งในส่วนของท่อนาโนคาร์บอนที่ห่างกันเล็กน้อยจะสามารถนำไฟฟ้าได้แต่น้อยกว่าท่อนาโนคาร์บอนที่เชื่อมต่อกัน จากทฤษฎี Electron tunneling ที่อธิบายถึงสมบัติในการเป็นคลื่นของอิเล็กตรอน ทำให้อิเล็กตรอน สามารถเคลื่อนที่ข้ามหรือทะลุผ่านสิ่งกีดขวางได้ จากที่โดยปกติแล้วอิเล็กตรอนไม่สามารถข้ามผ่านไปได้ ซึ่งปรากฏการณ์นี้จะเกิดขึ้นเมื่อคลื่นของอิเล็กตรอน เคลื่อนที่ไปพบสิ่งกีดขวางที่มีความหนาประมาณ 1 นาโนเมตร และท่อนาโนคาร์บอนที่ห่างกันมากจะไม่สามารถเกิดการนำไฟฟ้าได้ (Supaka, 2004)

จากการทดสอบสภาพการนำไฟฟ้าพบว่า ยางธรรมชาติที่ไม่เติมท่อนาโนคาร์บอนมีความเป็นฉนวนไฟฟ้าสูงทำให้ค่าสภาพการนำไฟฟ้าต่ำมากๆ เมื่อเติมท่อนาโนคาร์บอนในปริมาณร้อยละ 3, 4 และ 5 โดยน้ำหนัก มีค่าสภาพการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเป็น 2.73, 7.25, และ 14.49 $\text{M}\Omega\cdot\text{m}^{-1}$ ตามลำดับ ดังภาพที่ 5 จะเห็นว่าค่าสภาพการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นตามปริมาณท่อนาโนคาร์บอนที่มากขึ้น โดยค่าสภาพการนำไฟฟ้าของตัวอย่างที่เติมท่อนาโนคาร์บอนปริมาณร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก อาจเกิดจากการกระโดดผ่านช่องว่างเป็นส่วนใหญ่ เนื่องจากปริมาณท่อนาโนคาร์บอนยังน้อย จึงทำให้ค่าการนำไฟฟ้ามีค่าน้อยด้วย เมื่อเพิ่มปริมาณท่อนาโนคาร์บอนมากขึ้นทำให้โอกาสในการเชื่อมต่อหรือซ้อนทับกันของท่อนาโนคาร์บอนมีมากขึ้นทำให้ค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นด้วย

จากการศึกษาทำให้ทราบว่าสมบัติเชิงกลและสมบัติทางไฟฟ้าของตัวอย่างเปลี่ยนแปลงตามปริมาณท่อนาโนคาร์บอนที่แตกต่างกัน ด้วยสาเหตุนี้จึงมีความสนใจศึกษาให้ละเอียดมากขึ้นโดยการเตรียมตัวอย่างที่เติมท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้นในปริมาณที่แตกต่างกันเล็กน้อย และใช้เงื่อนไขการศึกษาในเบื้องต้นที่ให้ค่ามอดูลัสของยังและค่าทนทานต่อแรงดึงสูงที่สุดคือร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก แล้วกำหนดปริมาณท่อนาโนคาร์บอนที่ใกล้เคียงกันคือร้อยละ 3.9 โดยน้ำหนัก และร้อยละ 4.1 โดยน้ำหนัก ในการศึกษา



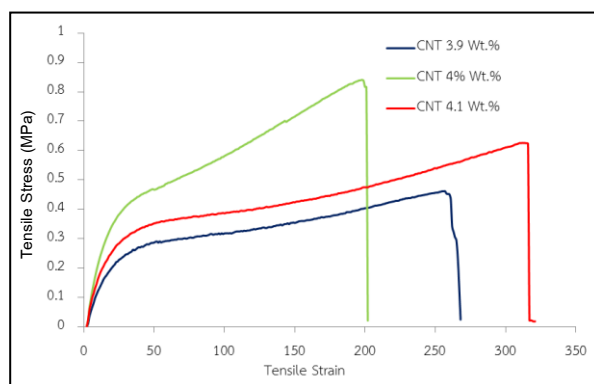
ภาพที่ 5 ค่าสภาพการนำไฟฟ้าของยางธรรมชาติเจือท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้นในปริมาณต่างๆ

ผลการศึกษาสมบัติเชิงกล

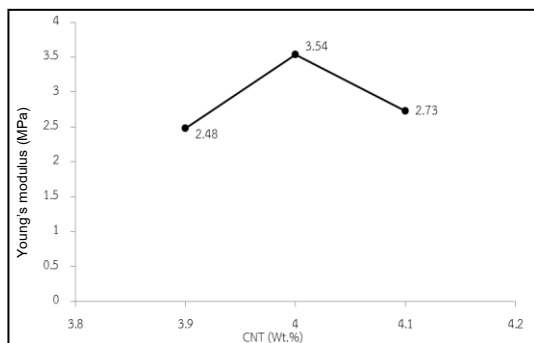
จากการทดสอบสมบัติเชิงกลพบว่าความสัมพันธ์ของค่าความเค้นและค่าความเครียดของตัวอย่าง ที่เติมท่อนาโนคาร์บอนร้อยละ 3.9 และ 4.1 โดยน้ำหนัก แสดงลักษณะของตัวอย่างที่มีความนิ่มและเหนียวดังแสดงในภาพที่ 6 โดยมีค่ามอดูลัสของยังเท่ากับ 2.48 MPa และ 2.73 MPa มีค่าทนทานต่อแรงดึง 13.9 MPa และ 18.81 MPa ตามลำดับ ซึ่งทั้งค่ามอดูลัสของยังและค่าทนทานต่อแรงดึงมีค่าต่ำกว่าในตัวอย่างที่เติมท่อนาโนคาร์บอนร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก ที่มีค่ามอดูลัสของยัง 3.54 MPa ดังแสดงในภาพที่ 7(ก) และมีค่าทนทานต่อแรงดึง 26.88 MPa ดังแสดงในภาพที่ 7(ข)

และเมื่อทดสอบความสามารถในการยืดของตัวอย่างปรากฏว่า ตัวอย่างที่เติมท่อนาโนคาร์บอนร้อยละ 3.9 โดยน้ำหนัก และร้อยละ 4.1 โดยน้ำหนัก มีความสามารถในการยืดมากกว่าตัวอย่างที่เติมท่อนาโนคาร์บอนร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก ดังแสดงในภาพที่ 7(ค)

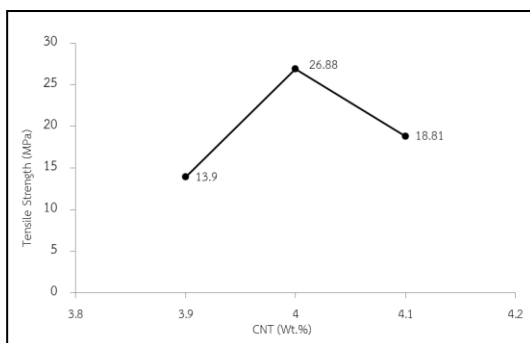
จากผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของตัวอย่างที่เติมท่อนาโนคาร์บอนในปริมาณที่ต่างกันเล็กน้อยแสดงให้เห็นว่าแม้ปริมาณท่อนาโนคาร์บอนจะแตกต่างกันเล็กน้อยเพียงร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก ก็มีผลต่อสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติ



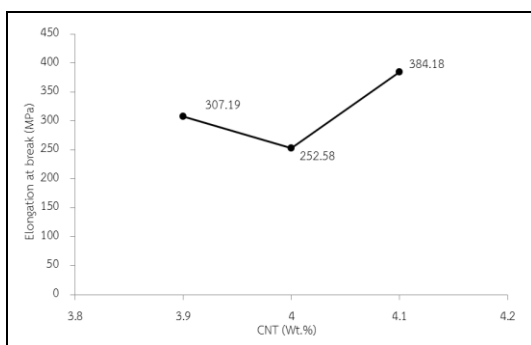
ภาพที่ 6 ความสัมพันธ์ค่าความเค้นและความเครียดของยางธรรมชาติที่เติมท่อนาโนคาร์บอนแบบผั้วหลายชั้นในปริมาณที่ต่างกันเล็กน้อย



(ก)



(ข)



(ค)

ภาพที่ 7 ค่าการยืดของยางธรรมชาติที่เติมท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้นในปริมาณที่ต่างกัน เล็กน้อย (ก) แสดงค่ามอดูลัสของยัง (ข) แสดงค่าความทนต่อแรงดึง (ค) แสดงค่าการยืด

ผลการตรวจสอบพื้นผิว

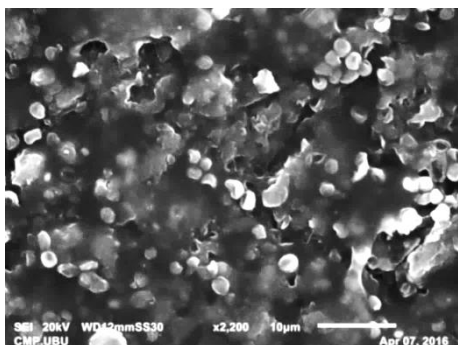
จากการตรวจสอบพื้นผิวของตัวอย่างยางธรรมชาติผสมท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าตัวอย่างที่เติมท่อนาโนคาร์บอนร้อยละ 3.9 โดยน้ำหนัก จะเห็นการรวมกลุ่มของส่วนประกอบต่างๆ รวมทั้งท่อนาโนคาร์บอนและเนื้อยางแห้งเป็นกลุ่มเล็กๆ กระจายทั่วพื้นผิวของตัวอย่าง ดังภาพที่ 8 (ก) เช่นเดียวกับตัวอย่างที่เติมท่อนาโนคาร์บอนร้อยละ 4.1 โดยน้ำหนัก จะเห็นการจับกันเป็นกลุ่มเล็กๆ กระจายทั่วพื้นผิว ดังภาพที่ 8 (ข) ซึ่งสอดคล้องกับค่ามอดูลัสของยังที่มีค่าใกล้เคียงกัน

ผลการทดสอบสมบัติทางไฟฟ้า

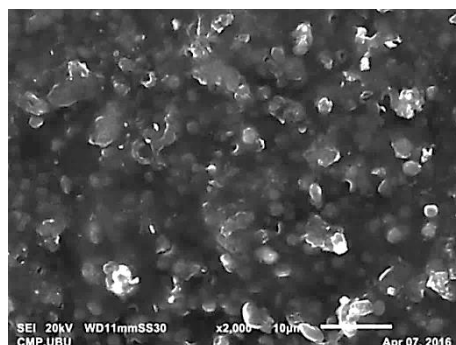
จากการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า พบว่า สภาพการนำไฟฟ้าของตัวอย่างมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณท่อนาโนคาร์บอนที่เติม ดังแสดงในภาพที่ 9 ซึ่งตัวอย่างที่เติมท่อนาโนคาร์บอนร้อยละ 3.9 โดยน้ำหนัก มีค่าสภาพการนำไฟฟ้า $3.75 \text{ M}\Omega \cdot \text{m}^{-1}$ ซึ่งสูงกว่าตัวอย่างที่เติมท่อนาโนคาร์บอนร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก แต่ต่ำกว่าตัวอย่างที่เติมร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก และตัวอย่างที่เติมท่อนาโนคาร์บอนร้อยละ 4.1 โดยน้ำหนัก

มีค่าสภาพการนำไฟฟ้า $10.75 \text{ M}\Omega.\text{m}^{-1}$ สูงกว่าตัวอย่างที่เติมร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก แต่ยังต่ำกว่าตัวอย่างที่เติมท่อนาโนคาร์บอนร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

ผลการทดสอบสมบัติทางไฟฟ้านี้แสดงให้เห็นว่าค่าสภาพการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นตามปริมาณการเติมท่อนาโนคาร์บอนในยางธรรมชาติ และแม้จะมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณท่อนาโนคาร์บอนเล็กน้อยก็มีผลต่อสมบัติทางไฟฟ้า

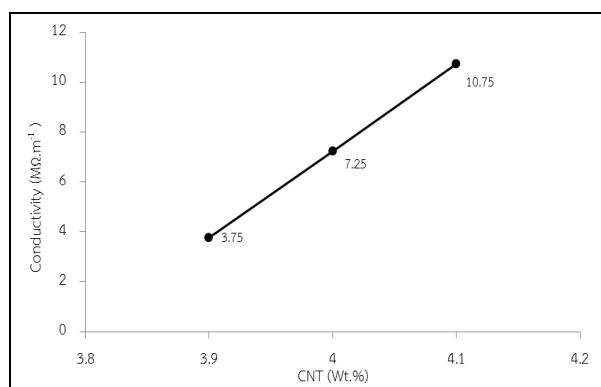


(ก)



(ข)

ภาพที่ 8 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (ก) ท่อนาโนคาร์บอนปริมาณร้อยละ 3.9 โดยน้ำหนัก และ (ข) ท่อนาโนคาร์บอนปริมาณร้อยละ 4.1 โดยน้ำหนัก



ภาพที่ 9 ค่าสภาพการนำไฟฟ้าของยางธรรมชาติเจือท่อนาโนคาร์บอนแบบผงหลายชั้นในปริมาณที่แตกต่างกันเล็กน้อย

อภิปรายผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาสมบัติเชิงกลและสมบัติทางไฟฟ้าของยางธรรมชาติผสมท่อนาโนคาร์บอนแบบผงหลายชั้นพบว่า ยางธรรมชาติที่เติมท่อนาโนคาร์บอนปริมาณร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก จะให้ค่าทนทานต่อแรงดึงและให้ค่ามอดูลัสของยังสูงที่สุด เนื่องจากอนุภาคต่างๆรวมทั้งท่อนาโนคาร์บอนมีการกระจายตัวในเนื้อยางได้ดี มีการจับตัวกันเป็นกลุ่มเล็กน้อย และเมื่อเตรียมตัวอย่างที่เติมท่อนาโนคาร์บอนที่ใกล้เคียงกับ

ตัวอย่างที่เติมร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก สมบัติเชิงกลยังให้ค่าทนทานต่อแรงดึงและค่ามอดูลัสของยังสูงที่สุด เช่นเดิม ดังนั้นในการเติมท่อนาโนคาร์บอนเป็นสารเสริมแรงในยางธรรมชาติเพื่อให้ได้สมบัติเชิงกลตามที่ต้องการ ต้องเติมในปริมาณที่เหมาะสมและแม่นยำเนื่องจากการเติมท่อนาโนคาร์บอนในปริมาณที่แตกต่างกันเล็กน้อยก็ทำให้สมบัติเชิงกลมีการเปลี่ยนแปลง โดยสมบัติทางไฟฟ้าของตัวอย่างจะให้ค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นตามปริมาณท่อนาโนคาร์บอนที่เติมลงไป

ข้อเสนอแนะ

ในการศึกษาครั้งนี้ ต้องการศึกษาศสมบัติเชิงกลและสมบัติทางไฟฟ้าที่ได้รับอิทธิพลมาจากการเติมท่อนาโนคาร์บอนเพียงอย่างเดียว จึงเตรียมตัวอย่างโดยมีกระบวนการเตรียมที่ง่าย และใช้สารเคมีเท่าที่จำเป็นในการทำยางแผ่นเท่านั้น ซึ่งในการเตรียมยางเพื่อนำไปใช้งานจริง จะมีขั้นตอนกระบวนการเตรียม และมีการเติมสารมากกว่านี้

เอกสารอ้างอิง

- Centre of Excellence on Environmental Research and Innovation CERI. *Nanosafety Database*. Retrieved from http://web.eng.nu.ac.th/eng2012/ceri/nanodatabase/info2.php?cat_id=11&p_id=311
- Hailan, K., Yinyin, T., Lei, Y., Feng, Y., Qinghong, F., David, H. (2017). Fabrication of Graphene/Natural Rubber Nanocomposites with High Dynamic Properties Through Convenient Mechanical Mixing. *Composites Part B*. 112: 1-7.
- Kueseng, P., Sae-oui, P., Rattanasom, N. (2013). Mechanical and Electrical Properties of Natural Rubber and Nitrile Rubber Blends Filled with Multi-wall Carbon Nanotube: Effect of Preparation Methods. *Polymer Testing*. 32: 731–738.
- Nuoclay. B. (2008). *Ternary Composites from Natural Rubber and Conductive Nanofillers for Electronic Sensor*. (Thesis of Master Degree, Prince of Songkla University).
- Pumpradub. S. (2014). *Production of Conducting Natural Rubber Composite by Graphite Waste from Metals Smelting Industry Modified by Chemical Process*. Full paper.
- Satang. N. (2014). Natural Rubber: Application as Starting Materials to Replace the Use of Raw Materials from Petroleum. *Journal of Burapha University*. 19(2): 199-209.
- Sangchai. W. (2008). *Properties of Natural Rubber Mixed with Carbon Nanotube and Nanoclays*. (Thesis of Master Degree. Prince of Songkla University).
- Supaka. N. (2004). *Electron Tunneling*. Retrieved from http://www.moe.go.th/datacenter/index.php?mod=Courses&op=showcontent&cid=140&qid=&lid=1174&sid=&page=&uid=&eid=&quiz_ansattempts=

- Tangudom. P. (2012). Cure Characteristics and Mechanical Properties of Rubbers Filled with Silica Hybrid Filler. *Proceedings the 4th Science Research Conference. Faculty of Science. Naresuan University: 44-49*
- Wuttikanokarn. J. (2007). *Physical Properties of Polymers Testing* [PDF Document]. King Mongkut's University of Technology Thonburi. Retrieved from <http://www.seem.kmutt.ac.th/research/pentec/download/MTT656%20-Chapter%206%20Polymer%20testing1.pdf>