

อิทธิพลของรังสีแกมมาต่อคุณสมบัติของยางธรรมชาติ

ที่มีแกรฟีนออกไซด์เป็นสารตัวเติม

ธัญรดา มาศเสมอ¹, มานิตย์ จิตรภักดี²

^{1,2}ภาควิชารังสีประยุกต์และไอโซโทป คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาผลของการฉายรังสีแกมมาและสารตัวเติมแกรฟีนออกไซด์ต่อสมบัติเชิงกล ความต้านทานการบวมพองในน้ำมัน และสมบัติการทนต่อความร้อนของแผ่นฟิล์มยางซึ่งแผ่นฟิล์มยางถูกเตรียมขึ้นโดยการนำน้ำยางธรรมชาติที่ผ่านการฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณรังสี 20, 40, 60 และ 80 กิโลเกรย์ ผสมกับแกรฟีนออกไซด์ที่ได้สังเคราะห์ขึ้นด้วยวิธีการของฮัมเมอร์ที่ปริมาณ 0, 1, 3 และ 5 กรัม แล้วทำการทดสอบสมบัติต่าง ๆ พบว่าการวัลคาไนซ์ยางธรรมชาติด้วยวิธีการฉายรังสีแกมมามีผลทำให้ยางเกิดพันธะเชื่อมโยงภายในโมเลกุล โดยการฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณรังสี 60 กิโลเกรย์ ส่งผลให้แผ่นฟิล์มยางมีสมบัติด้านความทนต่อแรงดึง ความต้านทานการฉีกขาด และความทนต่อแรงดึงหลังการบ่มแรงด้วยความร้อนสูงสุด ในขณะที่การฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณรังสี 80 กิโลเกรย์ ส่งผลให้ความต้านทานการบวมพองในน้ำมันดีที่สุด และแผ่นฟิล์มยางที่มีการเติมแกรฟีนออกไซด์ปริมาณ 3 กรัม จะให้ค่าความทนต่อแรงดึง ความต้านทานการฉีกขาด และความต้านทานการบวมพองในน้ำมันสูงสุดในขณะที่การเติมแกรฟีนออกไซด์ที่ปริมาณ 5 กรัม จะทำให้แผ่นฟิล์มยางมีค่าความทนต่อแรงดึงหลังการบ่มแรงด้วยความร้อนสูงสุดและมีค่ามากกว่าความทนต่อแรงดึงก่อนการบ่มแรง แสดงให้เห็นว่าแผ่นฟิล์มยางมีคุณสมบัติการทนต่อความร้อนที่ดีเยี่ยม

คำสำคัญ: น้ำยางธรรมชาติ, แกรฟีนออกไซด์, รังสีแกมมา, สมบัติเชิงกล

Effect of Gamma Radiation on Some Properties of Natural Rubber Mixed with Graphene Oxide as a Novel Filler

Tanrada Massem¹, Manit Jitpukdee²

^{1,2}Department of Applied Radiation and Isotopes, Faculty of Science, Kasetsart University

ABSTRACT

This study was focused on the effect of gamma radiation and graphene oxide which was affected to mechanical properties, swelling resistance in oil and thermal aging resistance properties of natural rubber film. Natural rubber film was prepared from natural rubber latex with treated by gamma radiation dose 20, 40, 60 and 80 kGy and mixed with 0, 1, 3 and 5 g of graphene oxide synthesis according by Hummers method. The natural rubbers were vulcanization by using gamma irradiation showed the result of crosslinking within the molecule. Gamma irradiation at 60 kGy was increased the properties of natural rubber film, such as tensile strength, tear strength and thermal aging resistance, while the swelling resistance in oil was highest increased at 80 kGy. The tensile strength, tear strength and thermal aging resistance were increased when add 3 g of graphene oxide in the rubber film. While added 5 g of graphene oxide, the tensile strength after aging was increased and higher than the tensile strength before aging. The rubber film has excellent heat-resistant properties.

Keywords : Natural Rubber Latex, Graphene Oxide, Gamma Radiation, Mechanical Properties

บทนำ

ยางธรรมชาติเป็นพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งที่ได้รับพัฒนาการมากที่สุด ด้วยคุณสมบัติของยางธรรมชาติที่มีความยืดหยุ่นสูง มีความทนต่อแรงดึง ความทนต่อการสึกหรอ ความทนต่อการฉีกขาด และมีคุณสมบัติในด้านต่างๆที่พิเศษ (พงษ์ธร, 2548; วราภรณ์, 2549; Fred et al., 1971; Holfman, 1989; Ciullo et al., 1999; Makuuchi, 2003) จึงมีการนำยางธรรมชาติมาใช้ทำผลิตภัณฑ์ได้หลากหลายชนิดที่สามารถครอบคลุมกับทุกอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมยานยนต์ (ยาง และยางในรถ) อุตสาหกรรมทางวิศวกรรม (สายพาน, ท่อยาง และอะไหล่รถยนต์) และอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ทางการแพทย์ (ถุงมือ, สายยาง และหุ่นยาง) เป็นต้น โดยทั่วไปการแปรรูปผลิตภัณฑ์ยางในอุตสาหกรรมจำเป็นต้องนำมาผ่านกระบวนการวัลคาไนซ์ (Vulcanization) ซึ่งเป็นกระบวนการที่จะเปลี่ยนโครงสร้างโมเลกุลของยางจากเส้นตรง (Linear) ให้เป็นพันธะเชื่อมโยง (Cross-link) เพื่อทำให้ยางเกิดการคงรูป และมีคุณสมบัติเชิงกลที่ดีเหมาะแก่การนำไปใช้งานเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆได้อย่างเหมาะสม แต่กระบวนการวัลคาไนซ์ดังกล่าวเป็นกระบวนการที่มีการใช้สารเคมีในระบบการผลิตผลิตภัณฑ์ยาง เช่น กำมะถัน, เปอร์ออกไซด์ และซิงค์ออกไซด์ เป็นต้น และใช้พลังงานความร้อนสูง รวมถึงการใช้เวลามากในขั้นตอนการผลิต ซึ่งผลของการใช้สารเคมีที่กล่าวมาข้างต้นอาจทำให้มีสารตกค้างอยู่ในผลิตภัณฑ์ยางได้ สามารถก่อให้เกิดการระคายเคืองต่อผิวหนังหรือเกิดการแพ้ได้ อีกทั้งยังเป็นสารก่อมะเร็งจำพวกสารประกอบไนโตรซามีน (nitrosamine) (Findik et al., 2004) การวัลคาไนซ์ยางธรรมชาติ นอกจากกระบวนการวัลคาไนซ์แบบใช้สารเคมีแล้ว ยังมีกระบวนการวัลคาไนซ์โดยใช้วิธีการฉายรังสีที่มีพลังงานสูง เช่น การฉายรังสีแกมมา (Gamma irradiation)

ซึ่งเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่สามารถลดการใช้เวลาและพลังงานในกระบวนการผลิต รวมถึงลดการใช้สารเคมีที่อาจก่อให้เกิดอันตรายจากการตกค้างในตัวผลิตภัณฑ์ได้ การฉายรังสีแกมมานั้นสามารถทำให้โมเลกุลของยางเกิดการแตกตัวให้ฟรีเรดิคัล จึงทำให้เกิดการเชื่อมโยงพันธะภายในโมเลกุลของยางแบบพันธะคาร์บอน-คาร์บอน ทำให้ยางที่ได้นั้นมีคุณสมบัติที่ดีขึ้น ทั้งคุณสมบัติเชิงกลและความเสถียรต่อความร้อน อีกทั้งยังมีความบริสุทธิ์สูงเพราะไม่มีสารเคมีอื่นใดเจือปน จึงทำให้ระบบวัลคาไนซ์โดยใช้วิธีการฉายรังสีที่มีพลังงานสูงนั้นเหมาะสำหรับการผลิตอุปกรณ์หรือชิ้นส่วนทางการแพทย์ ซึ่งถือเป็นอุปกรณ์ที่ควรจะมีสารเคมีเจือปนน้อยที่สุด (Hitoshi, 1991)

แม้ว่ายางธรรมชาติจะมีคุณสมบัติเชิงกลที่ดีโดยไม่ต้องเติมสารตัวเติม เพราะยางสามารถตกผลึกได้เมื่อถูกยืด (Strain – induced crystallization) อย่างไรก็ตาม ยางดิบตามลำพังจะมีขีดจำกัดในการใช้งานเนื่องจากยางดิบมีคุณสมบัติเชิงกลต่ำ และด้วยลักษณะทางกายภาพที่ไม่เสถียรขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิมาก กล่าวคือ ยางจะอ่อนแ่ยมและเหนียวเหนอะหนะเมื่อร้อน แต่จะแข็งเปราะเมื่ออุณหภูมิต่ำ ด้วยเหตุนี้การใช้ประโยชน์จากยางธรรมชาติจึงจำเป็นต้องมีการผสมยางกับสารตัวเติม (Fillers) เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติต่าง ๆ ของผลิตภัณฑ์ยางให้ได้ตามมาตรฐานที่กำหนดและเหมาะแก่การนำไปใช้งานได้อย่างเหมาะสม ในปัจจุบันสารตัวเติมที่มีการใช้ในอุตสาหกรรมยางโดยส่วนใหญ่จะแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มหลัก ๆ คือ สารตัวเติมเสริมแรง (เขม่าดำ, ซิลิกา และเส้นใยต่าง ๆ) และสารตัวเติมไม่เสริมแรง (แคลเซียมคาร์บอเนต, เคลย์ และทัลคัม) โดยสารตัวเติมเสริมแรงนั้นจะมีขนาดอนุภาคที่เล็กกว่า และสามารถเกิดอันตรกิริยากับยางได้ดีกว่าสารตัวเติมไม่เสริมแรง (Choi et al., 2012) จึงทำให้ภาคอุตสาหกรรมที่ผลิตผลิตภัณฑ์ยางให้มี

ความแข็งแรงหรือมีคุณสมบัติเชิงกลที่ดีโดยส่วนใหญ่มีการเลือกใช้สารตัวเติมเสริมแรงในกระบวนการผลิต และในการใช้งานทางวิศวกรรมส่วนใหญ่การเติมสารตัวเติมเสริมแรงจะช่วยปรับปรุงคุณสมบัติของยางได้ดียิ่งขึ้น (พงษ์ธร, 2548; Makuuchi, 2003) “แกรฟีน” (Graphene) ถือเป็นวัสดุคาร์บอนชนิดหนึ่งที่ตั้งอยู่ในกลุ่มของสารตัวเติมเสริมแรง และได้มีการนำมาใช้เป็นสารตัวเติมในพอลิเมอร์อื่น ๆ อย่างกว้างขวาง เนื่องจากแกรฟีนมีคุณสมบัติเฉพาะตัวที่มีความโดดเด่นเช่น มีคุณสมบัติทางไฟฟ้า มีความยืดหยุ่นสูง มีคุณสมบัติเชิงกลและคุณสมบัติทางความร้อนที่ดีมาก เป็นต้น (Novoselov et al., 2004; Bolotin et al., 2008; Lee et al., 2008; Kim et al., 2011) ทำให้นักวิทยาศาสตร์ต่างให้ความสนใจในการนำแกรฟีนมาพัฒนาในรูปแบบต่างๆเพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุด และหลายงานวิจัยได้มีการใช้แกรฟีนที่อยู่ในรูปของแกรฟีนออกไซด์มาเป็นสารตัวเติมในพอลิเมอร์เช่นกัน โดยเฉพาะในยางธรรมชาติ เนื่องจากแกรฟีนออกไซด์นั้นสามารถนำมาผสมกับยางธรรมชาติที่อยู่ในรูปแบบของน้ำยางได้ดี และสามารถกระจายตัวอยู่ในน้ำยางได้ (Bai et al., 2011) จากลักษณะพิเศษของแกรฟีนออกไซด์ทำให้แกรฟีนออกไซด์นั้นมีความจำเพาะเจาะจงต่อการนำไปใช้งานในการปรับปรุงคุณสมบัติของพอลิเมอร์ได้ และที่มากกว่านั้นคือแกรฟีนออกไซด์สามารถสังเคราะห์ได้ในปริมาณมาก โดยแกรฟีนออกไซด์ที่สังเคราะห์นั้นเป็นแกรฟีนที่มีการดัดแปลงโครงสร้างทางเคมี (Chemical modified graphene) จากกระบวนการทำปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างแกรไฟต์กับกรดแก่ (Hummers et al., 1958, Subrahmanyam et al., 2008; Dreyer et al., 2009)

ดังนั้น ผู้วิจัยได้เล็งเห็นความสำคัญของสมบัติด้านความแข็งแรงของวัสดุคาร์บอน

ดังกล่าว จึงได้สังเคราะห์แกรฟีนที่อยู่ในรูปของแกรฟีนออกไซด์ด้วยวิธีทางเคมีโดยใช้วิธีการของฮัมเมอร์ (Hummer method) ที่ได้ปรับปรุงแล้ว (Hummers et al., 1958, Subrahmanyam, et al., 2008; Dreyer et al., 2009) เพื่อใช้เป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติ และตรวจสอบคุณลักษณะเฉพาะของแกรฟีนออกไซด์ด้วยเครื่องรามานสเปกโตรสโคปี (Raman spectroscopy) อีกทั้งยังเล็งเห็นถึงประโยชน์ของการเพิ่มอัตราเร็วในการผลิต การลดพลังงาน และการลดสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการผลิต ดังนั้นผู้วิจัยจึงมุ่งเน้นศึกษาการวัลคาไนซ์ยางธรรมชาติด้วยวิธีการฉายรังสีแกมมา โดยทำการศึกษาผลของปริมาณรังสีแกมมาต่อคุณสมบัติเชิงกล คุณสมบัติการทนต่อความร้อน และการบวมพองในน้ำมันของยางธรรมชาติที่มีแกรฟีนออกไซด์เป็นสารตัวเติม อีกทั้งยังศึกษาผลของปริมาณสารตัวเติมแกรฟีนออกไซด์ต่อคุณสมบัติเชิงกลของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติ

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาผลของการวัลคาไนซ์ด้วยวิธีการฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณรังสี 20, 40, 60 และ 80 กิโลเกรย์ (kGy) ต่อคุณสมบัติเชิงกล คุณสมบัติการทนต่อความร้อนของยาง และสมบัติการบวมพองในน้ำมันของยางธรรมชาติที่มีแกรฟีนออกไซด์เป็นสารตัวเติม

2. เพื่อศึกษาผลของการเติมแกรฟีนออกไซด์ที่ปริมาณ 1, 3 และ 5 กรัม ลงในน้ำยางธรรมชาติที่ผ่านกระบวนการฉายรังสีแกมมาต่อคุณสมบัติเชิงกลของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติ

ระเบียบวิธีวิจัย

งานวิจัยนี้ได้มีการเตรียมขึ้นตัวอย่างแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติสำหรับทดสอบคุณสมบัติเชิงกล สมบัติการบวมพองในน้ำมัน และ

คุณสมบัติการทนต่อความร้อนของยาง แผ่นฟิล์มยางธรรมชาติสำหรับทดสอบที่เตรียมได้นั้นจะมีขนาดความกว้าง 15 เซนติเมตร ความยาว 15 เซนติเมตร และมีความหนาของแผ่นฟิล์ม 2 มิลลิเมตร ซึ่งมีวิธีการดำเนินงานดังนี้

1. การเตรียมน้ำยางธรรมชาติสำหรับทำการวัลคาไนซ์ด้วยวิธีการฉายรังสีแกมมา ซึ่งจะถูกเตรียมขึ้นโดยทำการกรองน้ำยางชั้น 60% ด้วยตะแกรงกรอง แล้วเทลงในบีกเกอร์พร้อมทั้งกวนน้ำยางตลอดเวลา เติมน้ำสารละลายแอมโมเนีย (NH_3) 1% แล้วทำการกวนน้ำยางต่อเนื่องอีกประมาณ 15 นาที จึงเติมน้ำสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) 10% (พรพรรณ, 2540) หลังจากนั้นค่อยๆหยดสารละลายคลอโรฟอร์ม (CHCl_3) ซึ่งเป็นสารไวต่อปฏิกิริยา (Sensitizer) ทำหน้าที่ในการเร่งปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์เพื่อช่วยลดปริมาณรังสีที่ใช้ (Makuuchi, 2003) พร้อมทั้งกวนน้ำยางต่อเนื่องอีกประมาณ 1 ชั่วโมง นำน้ำยางที่เตรียมได้บรรจุใส่ขวดแก้วแบบมีฝาปิดแล้วนำไปฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณรังสี 20, 40, 60 และ 80 กิโลเกรย์ (kGy)

2. การเตรียมแผ่นฟิล์มยางสำหรับทดสอบ จะถูกเตรียมขึ้นโดยการนำน้ำยางที่ผ่านกระบวนการฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณรังสี 20, 40, 60 และ 80 กิโลเกรย์ (kGy) ตัวอย่างละ 75 กรัม ใส่ลงในบีกเกอร์ซึ่งตั้งอยู่บนเครื่องกวนสาร (Magnetic stirrer) พร้อมทั้งกวนน้ำยางตลอดเวลา ทำการเติมสารตัวเติมแกรฟีนออกไซด์ที่เตรียมได้จากขั้นตอนที่ 1 ปริมาณ 0, 1, 3 และ 5 กรัม หลังจากนั้นทำการกวนน้ำยางคอมปาวด์ต่อเนื่องอีกเป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้น้ำยางคอมปาวด์ผสมกันอย่างทั่วถึง นำน้ำยางคอมปาวด์ที่ได้บรรจุใส่ขวดแก้วพร้อมทั้งบ่มน้ำยางคอมปาวด์ทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วจึงนำน้ำยางคอมปาวด์มาเทลงบนแผ่นกระจกที่มีขนาด 15×15 เซนติเมตร ซึ่งปรับระดับให้อยู่บนแนวระนาบแล้ว

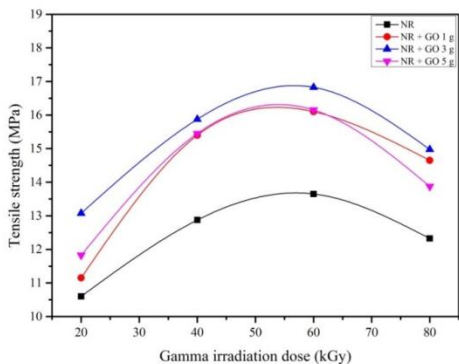
ให้ได้ความหนาของแผ่นฟิล์มยาง 2 มิลลิเมตร โดยการเกลี่ยให้ความหนาของน้ำยางคอมปาวด์เท่ากันหมดทั่วทั้งแผ่น พร้อมทั้งตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 72 ชั่วโมง เพื่อให้ น้ำยางคอมปาวด์เซ็ทตัว ทำการแกะแผ่นฟิล์มยางที่เซ็ทตัวแล้วออกจากเบ้ากระจกเบาๆพร้อมทั้งนำไปอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ซึ่งแสดงดังภาพที่ 2(b-c) แล้วนำแผ่นฟิล์มยางที่ได้ทำการทดสอบคุณสมบัติความทนต่อแรงดึง (Tensile strength), ความต้านทานการฉีกขาด (Tear strength), ความทนต่อความร้อน (Thermal aging resistance) และการบวมพองในน้ำมัน (Swelling)

ผลการวิจัย

1. ผลการทดสอบคุณสมบัติด้านความทนต่อแรงดึงของแผ่นฟิล์มยาง ผลที่ได้จากการทดลองแสดงดังภาพที่ 1 ซึ่งเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการฉายรังสีแกมมาต่อคุณสมบัติด้านความทนต่อแรงดึงของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติ (NR) และแผ่นฟิล์มยางที่มีการเติมแกรฟีนออกไซด์ที่ปริมาณ 1, 3 และ 5 กรัม พบว่าค่าความทนต่อแรงดึงของทุกตัวอย่างแผ่นฟิล์มยาง ทั้งแผ่นฟิล์มยางที่ไม่มีการเติมแกรฟีนออกไซด์และแผ่นฟิล์มยางที่มีการเติมแกรฟีนออกไซด์ปริมาณ 1, 3 และ 5 กรัม จะมีค่าความทนต่อแรงดึงของแผ่นฟิล์มยางสูงขึ้นตามปริมาณรังสีที่เพิ่มขึ้น และค่าความทนต่อแรงดึงมีแนวโน้มลดลงที่ปริมาณรังสี 80 กิโลเกรย์ (kGy) โดยช่วงของการฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณรังสี 60 กิโลเกรย์ (kGy) จะให้ค่าความทนต่อแรงดึงสูงสุดในทุกตัวอย่างแผ่นฟิล์มยาง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการวัลคาไนซ์ยางธรรมชาติด้วยวิธีการฉายรังสีแกมมามีผลทำให้เกิดพันธะเชื่อมโยงในโมเลกุลยางโดยรังสีแกมมาทำให้เกิดอนุมูลอิสระ (Free radical) บนสายโซ่โมเลกุลยาง อนุมูลอิสระที่

เกิดขึ้นจะทำปฏิกิริยาระหว่างกันจึงทำให้เกิดการเชื่อมโยงข้าม (Cross – link) ระหว่างสายโซ่โมเลกุลยาง ส่งผลให้ยางมีความแข็งแรงมากยิ่งขึ้น โดยปริมาณรังสีแกมมาจะส่งผลต่อความหนาแน่นของการเกิดพันธะเชื่อมโยงในโมเลกุลยาง กล่าวคือเมื่อเพิ่มปริมาณรังสีความหนาแน่นของการเกิดพันธะเชื่อมโยงในโมเลกุลยางจะเพิ่มขึ้น ดังนั้นเมื่อยางมีความหนาแน่นของการเกิดพันธะเชื่อมโยงในโมเลกุลสูง ยางก็จะมี ความแข็งแรงมากยิ่งขึ้น ส่งผลให้ยางมีความทนต่อแรงดึงสูงขึ้นด้วย (Makuuchi, 2003) ซึ่งจากผลการทดลองในงานวิจัย แผ่นฟิล์มยางมีค่าความทนต่อแรงดึงสูงสุดที่ปริมาณรังสี 60 กิโลเกรย์ (kGy) และค่าความทนต่อแรงดึงของแผ่นฟิล์มยางจะลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณรังสีต่อไปที่ 80 กิโลเกรย์ (kGy) ทำให้ทราบว่า การฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณรังสี 80 กิโลเกรย์ (kGy) อาจส่งผลให้เกิดการเสื่อมสลายของพันธะภายในโมเลกุลยาง โดยสายโซ่โมเลกุลยางขาดออกจากกัน (Degradation) ทำให้น้ำหนักโมเลกุลของยางลดลง (Zeid, 2008) ดังนั้นจึงส่งผลให้แผ่นฟิล์มยางที่ฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณรังสี 80 กิโลเกรย์ (kGy) มีคุณสมบัติด้านความทนต่อแรงดึงลดลง และเมื่อพิจารณาถึงปริมาณแกรฟีนออกไซด์ต่อค่าความทนต่อแรงดึงของแผ่นฟิล์มยาง พบว่าแผ่นฟิล์มยางที่มีการเติมแกรฟีนออกไซด์ปริมาณ 3 กรัม (NR + GO 3 g) จะให้ค่าความทนต่อแรงดึงสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับแผ่นฟิล์มยางที่ไม่เติมแกรฟีนออกไซด์ (NR) และแผ่นฟิล์มยางที่มีการเติมแกรฟีนออกไซด์ปริมาณ 1 และ 5 กรัม ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการเติมสารตัวเติมแกรฟีนออกไซด์สามารถช่วยเพิ่มคุณสมบัติด้านความทนต่อแรงดึงของแผ่นฟิล์มยางได้ เนื่องจากแกรฟีนออกไซด์จัดเป็นสารตัวเติมเสริมแรงประเภทหนึ่งที่มีขนาดอนุภาคระดับนาโน และยังมีพื้นที่ผิวในการสัมผัสกับสายโซ่โมเลกุลยางสูง

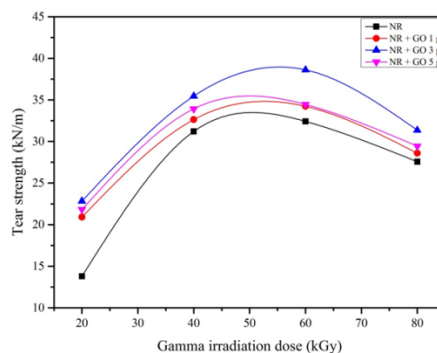
ส่งผลให้เกิดอันตรกิริยาที่รอยต่อระหว่างผิวของแกรฟีนออกไซด์และสายโซ่โมเลกุลยางได้มากขึ้น ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อการปรับปรุงคุณสมบัติของยาง (Du, 2012) ดังนั้นจึงส่งผลให้แผ่นฟิล์มยางมีความทนต่อแรงดึงมากยิ่งขึ้นตามปริมาณแกรฟีนออกไซด์ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งจากผลการทดลองในงานวิจัย แผ่นฟิล์มยางที่เติมแกรฟีนออกไซด์ปริมาณ 3 กรัม (NR + GO 3 g) จะมีค่าความทนต่อแรงดึงสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับแผ่นฟิล์มยางที่มีการเติมแกรฟีนออกไซด์ที่ปริมาณ 5 กรัม ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการเติมแกรฟีนออกไซด์ที่ปริมาณ 5 กรัม อาจไปยับยั้งความสามารถในการตกผลึกเมื่อถูกดึงยึด (Strain induced crystallization) ของยางธรรมชาติ เนื่องจากปกติยางธรรมชาติเป็นยางที่สามารถตกผลึกได้เมื่อยืดทำให้ยางธรรมชาติมีความทนต่อแรงดึงสูง ดังนั้นเมื่อถูกยับยั้งความสามารถในการตกผลึกเมื่อถูกดึงยึด (Strain induced crystallization) ส่งผลให้ยางมีความทนต่อแรงดึงลดลง (พงษ์ธร, 2547) อีกทั้งการเพิ่มปริมาณสารตัวเติม แม้ว่าจะเป็นการเพิ่มพื้นที่ที่ยางและสารตัวเติมจะเกิดอันตรกิริยาต่อกัน แต่ในขณะเดียวกันก็เป็น การเจือจางเนื้อยางให้มีปริมาณน้อยลงด้วยเช่นกัน การเติมสารตัวเติมประเภทเสริมแรงที่ไม่เหมาะสมอาจส่งผลทำให้ยางสูญเสียสมบัติความเป็นยางที่ดีบางประการไป (กรรณิกา, 2551) ด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงสามารถอธิบายได้ว่าการเติมแกรฟีนออกไซด์ที่ปริมาณ 5 กรัม ส่งผลให้แผ่นฟิล์มยางมีคุณสมบัติด้านความทนต่อแรงดึงลดลง ซึ่งเป็นปริมาณที่ไม่เหมาะสม โดยปริมาณที่เหมาะสมที่สุดที่ให้ค่าความทนต่อแรงดึงสูงสุดคือ การเติมแกรฟีนออกไซด์ปริมาณ 3 กรัม



ภาพที่ 1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการฉายรังสีแกมมาต่อคุณสมบัติด้านความทนต่อแรงดึงของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติ (NR) และแผ่นฟิล์มยางที่มีการเติมแกรฟีนออกไซด์ที่ปริมาณ 1, 3 และ 5 กรัม

2. ผลการทดสอบคุณสมบัติด้านความต้านทานการฉีกขาด ผลที่ได้จากการทดลองแสดงดังภาพที่ 2 พบว่าค่าความต้านทานการฉีกขาดของทุกตัวอย่างแผ่นฟิล์มยางเป็นในลักษณะทิศทางเดียวกันเช่นเดียวกับค่าความทนต่อแรงดึงของแผ่นฟิล์มยางคือ ค่าความต้านทานการฉีกขาดของทุกตัวอย่างแผ่นฟิล์มยางมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณรังสีที่สูงขึ้น และมีแนวโน้มลดลงที่ปริมาณรังสี 80 กิโลเกรย์ (kGy) โดยการฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณรังสี 60 กิโลเกรย์ (kGy) จะให้ค่าความต้านทานการฉีกขาดสูงสุดในทุกตัวอย่างแผ่นฟิล์มยาง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณรังสี 80 กิโลเกรย์ (kGy) ทำให้เกิดตัดทอนหรือขาดออกจากกันของสายโซ่โพลีเมอร์ (degradation) หรือเรียกว่าการเสื่อมสลายของพันธะ ทำให้น้ำหนักโพลีเมอร์ลดลง จึงส่งผลต่อคุณสมบัติด้านความต้านทานการฉีกขาดของยางที่ฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณรังสี 80 กิโลเกรย์ (kGy) ลดลงเมื่อพิจารณาถึงปริมาณแกรฟีนออกไซด์ต่อคุณสมบัติด้านความต้านทานการฉีกขาด พบว่าแผ่นฟิล์มยางที่มีการเติมแกรฟีนออกไซด์ปริมาณ 3 กรัม (NR + GO 3 g) จะให้ค่าความต้านทาน

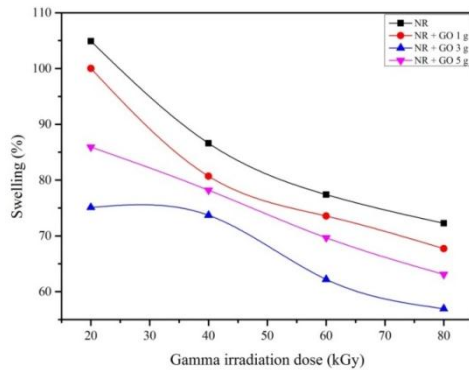
การฉีกขาดสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับแผ่นฟิล์มยางที่ไม่เติมแกรฟีนออกไซด์ (NR) และแผ่นฟิล์มยางที่มีการเติมแกรฟีนออกไซด์ปริมาณ 1 และ 5 กรัม ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าค่าความต้านทานการฉีกขาดมีแนวโน้มเพิ่มตามปริมาณสารตัวเติมที่เพิ่มขึ้น และจะมีค่าลดลงเมื่อเติมแกรฟีนออกไซด์ที่ปริมาณสูงสุดคือ ปริมาณ 5 กรัม ซึ่งโดยทั่วไปยางมีความสามารถตกผลึกได้เมื่อถูกดึงยืด (Strain induced crystallization) จะทำให้แรงที่ได้รับกระจายออกเนื่องจากผลึก ทำให้ความต้านทานการฉีกขาดสูง (พรพรรณ, 2540) ดังนั้นอาจเป็นไปได้ว่าการเติมแกรฟีนออกไซด์ที่ปริมาณ 5 กรัม อาจไปขัดขวางความสามารถตกผลึก (Strain induced crystallization) ของยางธรรมชาติ จึงทำให้ความต้านทานการฉีกขาดของยางลดลง และอาจเนื่องมาจากการเติมแกรฟีนออกไซด์ที่ปริมาณสูงอาจส่งผลให้สายโซ่โพลีเมอร์คลายตัวได้ยากขึ้น โดยในขณะที่ทดสอบแผ่นฟิล์มยางแรงถูกถ่ายโอนไปยังสายโซ่โพลีเมอร์ลดน้อยลง ประกอบกับเกิดการสะสมพลังงานไว้ที่บริเวณร่องบากของชั้นทดสอบแผ่นฟิล์มยาง ส่งผลให้ชั้นทดสอบแผ่นฟิล์มยางฉีกขาดได้ง่ายยิ่งขึ้น (Young et al, 1996)



ภาพที่ 2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการฉายรังสีแกมมาต่อคุณสมบัติด้านความต้านทานการฉีกขาดของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติ (NR) และแผ่นฟิล์มยางที่มีการเติมแกรฟีนออกไซด์ที่ปริมาณ 1, 3 และ 5 กรัม

3. ผลการทดสอบคุณสมบัติด้านการบวมพอง (Swelling) ในน้ำมัน IRM 903 ผลที่ได้จากการทดลองแสดงดังภาพที่ 3 ซึ่งเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการฉายรังสีแกมมาต่อคุณสมบัติด้านการบวมพอง (Swelling) ในน้ำมัน IRM 903 ของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติ (NR) และแผ่นฟิล์มยางที่มีการเติม แกรฟีนออกไซด์ที่ปริมาณ 1, 3 และ 5 กรัม พบว่า ค่าเปอร์เซ็นต์การบวมพองที่เปลี่ยนแปลงไปของทุกตัวอย่างแผ่นฟิล์มยางแปรผกผันตามปริมาณรังสี กล่าวคือ ค่าเปอร์เซ็นต์การบวมพองที่เปลี่ยนแปลงไปของทุกตัวอย่างแผ่นฟิล์มยางมีค่าลดลงตามปริมาณรังสีที่เพิ่มขึ้นที่ 20, 40, 60 และ 80 กิโลเกรย์ (kGy) ตามลำดับ โดยช่วงของการฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณรังสี 80 กิโลเกรย์ (kGy) แผ่นฟิล์มยางจะมีค่าเปอร์เซ็นต์การบวมพองที่เปลี่ยนแปลงไปต่ำสุด หรือมีความต้านทานการบวมพองมากยิ่งขึ้น ในขณะที่ช่วงของการฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณรังสี 20 กิโลเกรย์ (kGy) แผ่นฟิล์มยางจะมีค่าเปอร์เซ็นต์การบวมพองที่เปลี่ยนแปลงไปสูงสุด หรือมีความต้านทานการบวมพองน้อยลง จากผลการทดลองดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าการวัดคาโนซ์อย่างด้วยวิธีการฉายรังสีแกมมามีผลทำให้เกิดพันธะเชื่อมโยงในโมเลกุลยาง เมื่อเพิ่มปริมาณการฉายรังสีแกมมาเพิ่มขึ้น ปริมาณของการเกิดพันธะเชื่อมโยงในโมเลกุลยางก็จะเพิ่มขึ้น ทำให้น้ำมันแทรกตัวเข้าไปอยู่ในโมเลกุลยางได้ยาก (Makuuchi, 2003) จึงส่งผลให้แผ่นฟิล์มยางมีค่าเปอร์เซ็นต์การบวมพองที่เปลี่ยนแปลงไปน้อยลงเช่นกัน เมื่อพิจารณาถึงปริมาณแกรฟีนออกไซด์ต่อคุณสมบัติด้านการบวมพองในน้ำมัน พบว่าการบวมพองในน้ำมันมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณแกรฟีนออกไซด์ที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการบวมตัวจะเกิดขึ้นในเนื้อเยื่อเท่านั้น ซึ่งไม่ได้เกิดขึ้นกับแกรฟีนออกไซด์ ดังนั้นเมื่อมีเนื้อเยื่อในระบบน้อยลงการบวมตัวก็จะน้อยลงเช่นกัน

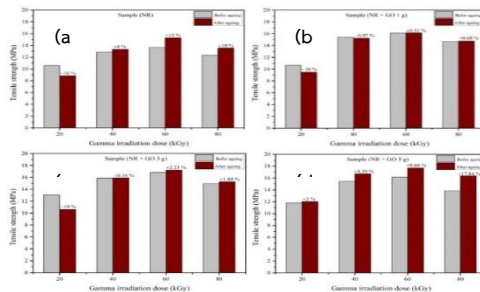
(Rakehonlatee et al, 2004) และนอกจากนี้อาจเป็นไปได้ว่าการเพิ่มปริมาณแกรฟีนออกไซด์มากขึ้นจะส่งผลให้การบวมพองในน้ำมันมีค่าลดลง อาจเนื่องมาจากแกรฟีนออกไซด์ที่ผสมในเนื้อเยื่อ ไปขัดขวางการแพร่ผ่านของน้ำมัน ทำให้มีการบวมพองลดลงหรืออาจมีความต้านทานการบวมพองเพิ่มมากขึ้น



ภาพที่ 3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการฉายรังสีแกมมาต่อคุณสมบัติด้านการบวมพอง (Swelling) ในน้ำมัน IRM 903 ของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติ (NR) และแผ่นฟิล์มยางที่มีการเติมแกรฟีนออกไซด์ที่ปริมาณ 1, 3 และ 5 กรัม

4. ผลการทดสอบคุณสมบัติด้านการทนต่อความร้อน ผลที่ได้แสดงดังภาพที่ 4 ซึ่งเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการฉายรังสีแกมมาต่อคุณสมบัติด้านความทนต่อแรงดึง ทั้งก่อนและหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อนของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติ (NR) และแผ่นฟิล์มยางที่มีการเติมแกรฟีนออกไซด์ที่ปริมาณ 1, 3 และ 5 กรัม จะเห็นได้ว่าโดยส่วนใหญ่แนวโน้มค่าความทนต่อแรงดึงของทุกตัวอย่างแผ่นฟิล์มยางหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อนมีค่าสูงขึ้นและมากกว่าค่าความทนต่อแรงดึงของแผ่นฟิล์มยางก่อนการบ่มเร่งด้วยความร้อน ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการเชื่อมขวางต่อเนื่องหลังจากการคงรูป

(Post curing) จึงส่งผลให้ค่าความทนต่อแรงดึงของแผ่นฟิล์มยางหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อนเพิ่มมากขึ้น (ณรงค์ฤทธิ์ และคณะ, 2551) อีกทั้งการฉายรังสีแกมมาจะทำให้โมเลกุลยางเกิดการแตกตัวให้อนุมูลอิสระ (Free - Radical) และจะเกิดพันธะเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลของยางด้วยพันธะคาร์บอน - คาร์บอน โดยพันธะคาร์บอนนี้จะมีความยาวของพันธะสั้น จึงทำให้ยางที่มีการเชื่อมโยงด้วยพันธะคาร์บอน - คาร์บอน มีความแข็งแรงมาก และมีความเสถียรต่อความร้อนสูง แสดงให้เห็นว่ายางที่ผ่านกระบวนการฉายรังสีแกมมาส่งผลให้มีคุณสมบัติด้านการทนต่อความร้อนที่ดี (Makuuchi, 2003) และเมื่อพิจารณาถึงปริมาณสารตัวเติม พบว่าแผ่นฟิล์มยางที่มีการเติมแกรฟีนออกไซด์ปริมาณ 5 กรัม (NR + GO 5 g) จะมีค่าความทนต่อแรงดึงหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อนเพิ่มขึ้นในทุกปริมาณการฉายรังสีที่ 20, 40, 60 และ 80 กิโลเกรย์ (kGy) อย่างมีนัยสำคัญ โดยมีค่าความทนต่อแรงดึงเพิ่มขึ้นที่ 2%, 8.10%, 9.60% และ 17.84% ตามลำดับ ซึ่งแสดงดังภาพที่ 16(d) การเพิ่มขึ้นของค่าความทนต่อแรงดึงหลังการบ่มเร่งของแผ่นฟิล์มยางอาจเนื่องมาจากการบ่มเร่งด้วยความร้อนทำให้ปริมาณการเกิดพันธะเชื่อมโยงมากขึ้นส่งผลให้ยางแข็งแรงยิ่งขึ้น (ณรงค์ฤทธิ์ และคณะ, 2551) นอกจากนี้แกรฟีนออกไซด์ยังมีการนำความร้อนที่เป็นเลิศ โดยมีค่าการนำความร้อนของแกรฟีนออกไซด์นั้นสูงกว่าสารตัวเติมชนิดอื่น ๆ เช่น ท่อนาโนคาร์บอน จึงทำให้แกรฟีนออกไซด์สามารถเป็นตัวเร่งให้เกิดการเชื่อมขวางได้มากยิ่งขึ้น (วิศณุสรณ์, 2557)



ภาพที่ 4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการฉายรังสีแกมมาต่อคุณสมบัติด้านความทนต่อแรงดึงทั้งก่อนและหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อนของ (a) แผ่นฟิล์มยางธรรมชาติ (NR) (b) แผ่นฟิล์มยางที่มีการเติมแกรฟีนออกไซด์ 1 กรัม (c) แผ่นฟิล์มยางที่มีการเติมแกรฟีนออกไซด์ 3 กรัม, (d) แผ่นฟิล์มยางที่มีการเติมแกรฟีนออกไซด์ 5 กรัม

สรุปและอภิปรายผล

จากการศึกษาผลของการฉายรังสีแกมมาต่อคุณสมบัติเชิงกล คุณสมบัติด้านการบวมพอง คุณสมบัติการทนต่อความร้อนของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติและแผ่นฟิล์มยางที่มีการเติมแกรฟีนออกไซด์ที่ปริมาณ 1, 3 และ 5 กรัม การฉายรังสีแกมมาช่วยให้คุณสมบัติด้านความทนต่อแรงดึง ความต้านทานฉีกขาด ความแข็งแรง ความต้านทานการบวมพองในน้ำมัน และการทนต่อความร้อนของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติและแผ่นฟิล์มยางที่มีการเติมแกรฟีนออกไซด์ที่ปริมาณ 1, 3 และ 5 กรัม เพิ่มขึ้นตามปริมาณรังสีที่สูงขึ้น โดยการฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณรังสี 60 กิโลเกรย์ (kGy) จะให้ค่าของคุณสมบัติด้านความทนต่อแรงดึง ความต้านทานฉีกขาด ความต้านทานการบวมพองในน้ำมัน และการทนต่อความร้อนที่ดีที่สุดในขณะที่คุณสมบัติด้านความแข็งแรงมีค่าสูงสุดที่การฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณรังสี 80 กิโลเกรย์ (kGy)

นอกจากนี้ยังมีการศึกษาเกี่ยวกับการใช้แกรฟีนออกไซด์เป็นสารตัวเติมในแผ่นฟิล์มยาง

พบว่า แกร์ฟีนออกไซด์จะส่งผลต่อคุณสมบัติเชิงกลของยาง คือ การใช้แกร์ฟีนออกไซด์ที่ปริมาณ 3 กรัม จะช่วยให้คุณสมบัติด้านความทนต่อแรงดึง ความต้านทานฉีกขาด ความต้านทานการบวมพองในน้ำมันดีที่สุดในขณะที่การใช้แกร์ฟีนออกไซด์ที่ปริมาณ 5 กรัม จะช่วยให้คุณสมบัติด้านความแข็งแรงและการทนต่อความร้อนของแผ่นฟิล์มยางที่ดีที่สุด เมื่อนำผลที่ได้จากการทดลองในด้านคุณสมบัติความทนต่อแรงดึงทั้งก่อนและหลังบ่มเร่งมาเปรียบเทียบกับมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 538 ซึ่งเป็นมาตรฐานเกี่ยวกับความทนต่อแรงดึงของถุงมือที่ผลิตจากน้ำยางธรรมชาติ พบว่า ค่าความทนต่อแรงดึงที่ได้จากผลการทดลอง โดยส่วนใหญ่มีค่าผ่านมาตรฐาน มอก. 538 ซึ่งค่าความทนต่อแรงดึงตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 538 ได้กำหนดไว้ คือ ค่าความทนต่อแรงดึงก่อนการบ่มเร่งต่ำสุด 12.5 นิวตัน ส่วนค่าความทนต่อแรงดึงหลังการบ่มเร่งต่ำสุด 9.5 นิวตัน (ศิริโรตม, 2553) แสดงให้เห็นว่าน้ำยางคอมพาวด์ที่ผ่านฉายรังสีแกมมาที่มีปริมาณรังสี 60 กิโลเกรย์ (kGy) และมีการเติมแกร์ฟีนออกไซด์ที่ปริมาณ 3 กรัม สามารถนำไปประยุกต์ใช้สำหรับเป็นวัตถุดิบในการผลิตถุงมือยางธรรมชาติได้ ซึ่งอาจเป็นถุงมือที่ใช้ในทางการแพทย์หรือถุงมือที่ต้องสัมผัสกับสารเคมีต่าง ๆ เป็นต้น

ข้อเสนอแนะ

เมื่อพิจารณาผลการทดลองซึ่งเป็นการศึกษาเบื้องต้น พบว่ายังมีประเด็นที่ต้องศึกษาให้ละเอียดขึ้นเพื่อนำยางคอมพาวด์ที่เตรียมได้ในสัดส่วนที่เหมาะสมไปใช้ประโยชน์ได้จริงต่อไปคือ ควรมีการนำน้ำยางคอมพาวด์ที่เตรียมได้ไปขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ถุงมือเพื่อให้ได้ข้อมูลที่จะประเมินความเป็นไปได้สำหรับการใช้งานในภาคอุตสาหกรรม

References

- Abou Zeid, M. M., Rabie, S. T., Nada, A. A., Khalil, A. M., & Hilal R. H. (2008). Effect of gamma irradiation on ethylene propylene diene terpolymer rubber composites. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B* 266: 111–116.
- Bai, X., Wan, C., Zhang, Y., & Zhai, Y. (2011). Reinforcement of hydrogenated carboxylated nitrile-butadiene rubber with exfoliated graphene oxide. *Carbon*, 49: 1608-1613.
- Saeoui, P. (2004). Rubber: Properties and uses, 10.
- Chartarrayawadee, W. (2014). Graphene pisode: Properties and applications. *Journal of Naresuan University, Phayao*, Vol. 7 No. 1 Jan.-Apr. 2014.
- Chaudhari, C. V., Bhardwaj, Y. K., Patil, N. D., Dubey, K. A., Kumar, V., & Sabharwal, S. (2005). Radiation-induced vulcanization of natural rubber latex in presence of styrene-butadiene rubber latex. *Radiation Physics and Chemistry*. 72: 613–618.
- Choi, W., & Lee, J.-W. (2012). *Graphene synthesis and application*. CRC Press Taylor & Francis Group.
- Daniel, R., Dreyer, Park S., Christopher, W., Bielawski, & Ruoff, R. S. (2009). The chemistry of graphene oxide. *Chemical Society Reviews*. Received 7 January 2017.

- Dreyer, D. R., Park, S., Bielawski, C. W., & Ruoff, R. S. (2010). The chemistry of grapheme oxide. *Chem. Soc. Rev.*, 39: 288.
- Du, J., & Cheng, H-M. (2012) The Fabrication, properties, and uses of Graphene/Polymer composites. **Macromolecular Chemistry and Physics**. 213: 10-11.
- Findik, F., Yilmaz, R., & Koksall, T. (2004). Investigation of mechanical and physical properties of several industrial rubbers. **Materials and Design**, 25: 269-276.
- Fred, W., & Billmeyer, J. R. (1971). **Textbook of Polymer Science, second edition**, John Wiley and Son, Inc: New York.
- Hatthapanit, K. (2008). Factors influencing reinforcement with filler. Rubber Science and Technology. **Journal of the Development of Thai Rubber Industry**, 2(2), 20.
- Haque, M. E., Dafader, N. C., Akhter, & Ahmed, M. U. (1996). Radiation dose required for the vulcanization of natural rubber latex. **Radiate. Phys. Chem.** Vol. 48, No. 4, pp. 505-510.
- Hummers, W. S., Jr, & Offeman, R. E. (1958). Preparation of graphitic oxide. **Journal of the American Chemistry Society**, 80: 1339.
- Kajornchaiyakul, V. (2006). **Natural rubber: Production and use**. Research Fund (TRF): Bangkok.
- Liu, X., Kuang, W., & Guo, B. (2015) Preparation of rubber/grapheneoxide composites with insitu interfacial design. **Polymer**, 553-562.
- Makuuchi, K. (2003). **An Introduction to radiation vulcanization of natural rubber latex**. Bangkok: T.R.I.Global Co., Ltd,
- Mao, Y., Zhang, S., Zhang, D., Chan, T. W., & Liu, L. (2014). **Enhancing graphene oxide reinforcing potential in composites by combined latex compounding and spray drying**. *Materials Research Express*, 1: 025009/1– 025009/13.
- National Institute of Nuclear Technology (Public Organization). (2017). **Gamma radiation machine**. Retrieved from: <http://www.tint.or.th/>, 24th March 2017 carbon films. *Science*, 306
- Nithi-Uthai, P. (1997). **Chemicals for rubber**. Faculty of Science and Technology: Prince of Songkla University Pattani Campus.
- Novoselov, K. S., Geim, A. K., Morozov, S. V., Jiang, D., Katsnelson, M. I., Grigorieva, I. V., Dubonos, S. V., & Firsov, A. A. (2004). Electric field effect in atomically thin Sombatsompop, N., Wimolmala, E., & Markpin. (2008). Mechanical properties and curing of natural rubber latex with SBR rubber containing fly ash as additive by coupling Si69 Silane to improve fly ash surface. **Rubber Research Vol. 3, National Research Council. Rubber Industry**.

- Rakchonlatee, S., Kuatrakul, T., Chunput, P., & Saeoue, P. (2004). Influence of rice husk ash in mixed filler on processability and mechanical properties of natural rubber. **Science and Technology**, 50-55
- Saeoui, P. (2005). Rubber chemicals. **National Metal and Materials Technology Center (MTEC)**, 70-75.
- Subrahmanyam, K. S., Vivekchand, S. C. R., Govindaraj, A., & Rao, C. N. R. (2008). A study of graphenes prepared by different methods: Characterization, properties and solubilization. **J. Mater. Chem.** 18: 1517.
- Thongpool, V., Panrer, A., Jaiyen, S., Srithong, S., Jaroensil, K., & Piriya Wong, V. (2015). **Effect of time for reduction of Graphene Oxide by potatoes.** The 3rd National Academic Conference Science and Technology Institute.
- Wang, O., Wang, F., & Cheng, K. (2009). Radiation. **Phys. Chem.** 78: 1001.
- Yamaoka, H. (1991). **Radiation Chemistry of polymer.** UNDP/IAEA/RAC Regional Training Course Radiation Chemistry Takasaki Radiation Chemistry Research Establishment. JAERI.
- Young, R. J., & Lovell, P. A. (1996). **Introduction to Polymers 2. Chapman & Hall, London.** 407-411.