



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การผลิตยางธรรมชาตินำไฟฟ้าจากผงกราไฟต์ที่เหลือจาก
อุตสาหกรรมหลอมโลหะ

โดย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริลักษณ์ พุ่มประดับ และคณะ

เมษายน 2555

บทสรุปย่อรายงานสำหรับผู้บริหาร

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย) การผลิตยางธรรมชาตินำไฟฟ้าจากผงกราไฟต์ที่เหลือจากอุตสาหกรรมหลอมโลหะ
(ภาษาอังกฤษ) Production of conducting natural rubber composite by graphite waste from metals smelting industry

ชื่อหัวหน้าโครงการ หน่วยงานสังกัด และที่อยู่

ชื่อ-สกุล ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศิริลักษณ์ พุ่มประดับ

หน่วยงาน ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ที่อยู่ ถนนพญาไท แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ ๑ 10330

โทรศัพท์ 02-218-7518, 086-090-2074

โทรสาร 02-255-5831

Email address sirilux.p@chula.ac.th, spoompradub@yahoo.com

นักศึกษา/ผู้ร่วมวิจัย นายศรุต ทองปรีชา

นายอมรเทพ คล้ายหาญ

งบประมาณทั้งโครงการ 140,000 บาท

ระยะเวลาดำเนินงาน 9 เดือน ตั้งแต่วันที่ 1 สิงหาคม 2554 ถึงวันที่ 30 เมษายน 2555

ปัญหาที่ท้าวิจัยและความสำคัญ

ผลิตภัณฑ์ที่ผลิตจากยางธรรมชาติเช่น ยางล้อรถยนต์ สายพานลำเลียง ท่อปั๊มก๊าซ เป็นต้น มีปัญหาการกักเก็บประจุที่พื้นผิวเนื่องจากยางธรรมชาติเป็นฉนวนไฟฟ้า จึงมีการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยมีแนวคิดที่จะนำผงกราไฟต์ที่เหลือจากอุตสาหกรรมหลอมโลหะมาใช้เป็นตัวนำไฟฟ้า(conductor) และสารตัวเติม (filler) ในยางธรรมชาติ เพื่อทดแทนการใช้คาร์บอนแบล็กในการผลิตผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติที่มีสมบัตินำไฟฟ้า ซึ่งจะช่วยลดปริมาณของเสียที่เกิดขึ้นจากโรงงานอุตสาหกรรมหลอมโลหะ

วัตถุประสงค์

ศึกษาผลของปริมาณผงกราไฟต์ต่อสมบัติเชิงกลและการนำไฟฟ้าของยางธรรมชาติที่ผ่านกระบวนการวัลคาไนเซชัน

ผลการดำเนินงาน

งานวิจัยนี้ศึกษาสมบัติของยางธรรมชาติที่ผสมกับผงกราไฟต์ที่เหลือจากอุตสาหกรรมหลอมโลหะ ในปริมาณต่างๆ ต่อค่าการนำไฟฟ้าโดยเปรียบเทียบกับคาร์บอนแบล็กอีก 2 ชนิดคือ เกรดนำไฟฟ้า (Printex XE 2B) และเกรด N339 เพื่อนำมาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติที่มีสมบัตินำไฟฟ้า โดยสูตรของยางคอมพอสิตที่ศึกษาแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มดังนี้

1. คอมพอสิตยางธรรมชาติผสมกับผงกราไฟต์ผงกราไฟต์มีองค์ประกอบของคาร์บอน 99.02% ลักษณะอนุภาคเป็นผลึกขนาดใหญ่ ประมาณ 10-30 ไมครอน ซึ่งมีพื้นที่ผิวจำเพาะ(specific surface area) ต่ำ เมื่อนำมาผสมกับยางธรรมชาติในสัดส่วนที่ต่างกัน (5 10 15 20 30 และ 40phr) พบว่าสมบัติความต้านแรงดึง และสมบัติความแข็งแรงเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเมื่อปริมาณสารตัวเติมเพิ่มขึ้น แต่การใช้ปริมาณสารตัวเติมที่เพิ่มขึ้นจะไม่ส่งผลต่อระยะยืด ณ จุดขาด การใช้ผงกราไฟต์ไม่ส่งผลต่อการปรับปรุงความทนทานต่อการฉีกขาด การทดสอบสมบัติเชิงกลหลังบ่ม

เร่งด้วยความร้อน พบว่าสมบัติเชิงกลลดลง วัสดุคอมพอสิตสามารถนำไฟฟ้าได้เมื่อผสมผงกราฟไฟต์ในสัดส่วนวิกฤติ(critical concentration) ที่ 60 phr โดยค่าการนำไฟฟ้าเท่ากับ 7.1×10^{-9} S/cm

2. คอมพอสิตยางธรรมชาติผสมกับคาร์บอนแบล็กเกรดนำไฟฟ้า(Printex XE 2B) คาร์บอนแบล็กเกรดนำไฟฟ้ามีองค์ประกอบของคาร์บอน 99.32% ลักษณะอนุภาคปฐภูมิเป็นทรงกลมขนาดเล็ก ขนาดอนุภาคประมาณ 20 nm มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง ($1130.4 \text{ m}^2/\text{g}$) เมื่อนำมาผสมกับยางธรรมชาติในสัดส่วนที่ต่างกัน (5 10 15 20 และ 25 phr) พบว่าค่าความต้านแรงดึง ความต้านแรงฉีก และความแข็งแรงสูงขึ้นเมื่อปริมาณสารตัวเติมเพิ่มขึ้น และเมื่อทดสอบสมบัติเชิงกลหลังบ่มเร่งด้วยความร้อน พบว่าสมบัติเชิงกลลดลง ในขณะที่วัสดุคอมพอสิตสามารถนำไฟฟ้าได้เมื่อผสมคาร์บอนแบล็กในสัดส่วนวิกฤติที่ 10 phr โดยค่าการนำไฟฟ้าเท่ากับ 2.7×10^{-4} S/cm
3. คอมพอสิตยางธรรมชาติผสมกับคาร์บอนแบล็กเกรด N339 คาร์บอนแบล็กเกรด N339 มีองค์ประกอบของคาร์บอน 99.67% ลักษณะอนุภาคปฐภูมิเป็นทรงกลมขนาดเล็ก ขนาดอนุภาคประมาณ 36 nm ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ $147.7 \text{ m}^2/\text{g}$ แต่ต่ำกว่าคาร์บอนแบล็กเกรดนำไฟฟ้า เมื่อนำมาผสมกับยางธรรมชาติในสัดส่วนที่ต่างกัน (5 10 15 20 30 และ 40 phr) พบว่าความต้านแรงดึง ความต้านแรงฉีก และความแข็งแรงสูงขึ้นเมื่อปริมาณสารตัวเติมเพิ่มขึ้น และเมื่อทดสอบสมบัติเชิงกลหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อน พบว่าสมบัติเชิงกลลดลง ในขณะที่วัสดุคอมพอสิตสามารถนำไฟฟ้าได้เมื่อผสมคาร์บอนแบล็กในสัดส่วนวิกฤติที่ 40 phr โดยค่าการนำไฟฟ้าเท่ากับ 2.3×10^{-6} S/cm

สรุปผลการวิจัย

ผงกราฟไฟต์ที่ได้จากอุตสาหกรรมหลอมโลหะสามารถนำมาใช้เป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติได้ โดยผงกราฟไฟต์ช่วยให้ผลิตภัณฑ์ยางมีสมบัติเชิงกล เช่น ค่ามอดูลัสและความแข็งแรงเพิ่มขึ้น แม้ว่าค่ามอดูลัสจะต่ำกว่าประมาณ 2-3 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับค่ามอดูลัสของผลิตภัณฑ์ยางที่ผสมกับคาร์บอนแบล็กเกรดนำไฟฟ้า หรือ N339 แต่ข้อดีของการใช้ผงกราฟไฟต์คือระยะยืด ณ จุดขาดจะไม่มีการเปลี่ยนแปลง เมื่อปริมาณการใช้ผงกราฟไฟต์เพิ่มขึ้น ในขณะที่การใช้คาร์บอนแบล็กทั้ง 2 เกรดให้ระยะยืด ณ จุดขาดลดลง เมื่อปริมาณสารตัวเติมเพิ่มขึ้น การใช้คาร์บอนแบล็กเกรด N339 ให้ค่าความต้านแรงดึงสูงที่สุด และค่าความต้านทานแรงดึงเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณสารตัวเติมเพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่าความต้านทานแรงดึงของผลิตภัณฑ์ที่ผสมผงกราฟไฟต์มีค่าใกล้เคียงกับการใช้คาร์บอนแบล็กเกรดนำไฟฟ้า การนำไฟฟ้าของวัสดุคอมพอสิตที่ผสมกับคาร์บอนแบล็กเกรดนำไฟฟ้ามีค่าสูงที่สุด (2.7×10^{-4} S/cm) ที่สัดส่วนวิกฤติที่ต่ำที่สุด (10 phr) เมื่อเทียบกับวัสดุคอมพอสิตที่ผสมกับคาร์บอนแบล็กเกรด N339 (2.3×10^{-6} S/cm ที่ 40 phr) และผงกราฟไฟต์ (7.1×10^{-9} S/cm ที่ 60 phr) ตามลำดับ พบว่าการใช้ผงกราฟไฟต์เป็นสารตัวเติมให้สมบัติเชิงกลและการนำไฟฟ้าที่ด้อยกว่า เมื่อเทียบกับคาร์บอนแบล็กทั้ง 2 เกรด เนื่องจากผงกราฟไฟต์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีพื้นที่ผิวจำเพาะต่ำกว่าคาร์บอนแบล็กทั้ง 2 ชนิด และมีอนุภาคเป็นผลึกขนาดใหญ่ จำเป็นต้องมีการตัดแปรพื้นผิวของผงกราฟไฟต์ เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวจำเพาะของผงกราฟไฟต์ให้มีสมบัติใกล้เคียงกับคาร์บอนแบล็กทั้ง 2 ชนิด ได้ ก็สามารถนำผงกราฟไฟต์มาทดแทนการใช้คาร์บอนแบล็กเพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลและการนำไฟฟ้าได้ ทั้งนี้การลดปริมาณการใช้คาร์บอนแบล็ก เป็นการลดการใช้ก๊าซธรรมชาติหรือน้ำมันปิโตรเลียมลง เนื่องจากเป็นสารตั้งต้นในการผลิตที่นับวันจะมีปริมาณลดน้อยลง นอกจากนี้การใช้ผงกราฟไฟต์ยังเป็นการนำวัสดุเหลือใช้มาก่อให้เกิดประโยชน์อีกด้วย

ข้อเสนอแนะ

1. ผงกราไฟต์เป็นสารตัวเติมที่เพิ่มสมบัติเชิงกลเช่น เช่น โมดูลัสและความแข็งแรงได้เพียงเล็กน้อย โดยไม่ส่งผลต่อค่าระยะยืด ณ จุดขาดถ้าต้องการเพิ่มสมบัติเชิงกลให้สูงขึ้นอาจจะต้องผสมกับสารตัวเติมที่ทำหน้าที่เสริมแรงชนิดอื่นๆ ร่วมด้วย
2. เนื่องจากค่าการนำไฟฟ้าของสารตัวเติมผงกราไฟต์ค่อนข้างต่ำ และต้องใช้ในปริมาณสูงเพื่อให้การนำไฟฟ้าดีขึ้น ดังนั้นควรจะมีการดัดแปรพื้นผิว หรือผสมกับสารตัวเติมชนิดนำไฟฟ้าอื่นเข้าร่วม เช่น ผงโลหะ, ท่อนาโนคาร์บอน เป็นต้น
3. ผงกราไฟต์มีขนาดอนุภาคที่เล็กลง พื้นที่ผิวเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ค่าการนำไฟฟ้าของวัสดุดีขึ้นได้

ผลงานทางวิชาการ

- นำเสนอในการประชุมวิชาการ “The Science Forum 2012” ครั้งที่ 20 ประจำปี 2555 ระหว่างวันที่ 19-20 เมษายน 2555 ณ อาคารมหามกุฏ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของผงกราไฟต์ต่อสมบัติการนำไฟฟ้าของคอมพอสิตยางธรรมชาติผสมร่วมผงกราไฟต์ที่เหลือจากอุตสาหกรรมหลอมโลหะ เปรียบเทียบกับการ์บอนแบล็ก 2 ชนิด ได้แก่ เกรดนำไฟฟ้า (Printex XE 2B) และเกรด N339 สมบัติเบื้องต้นของสารตัวเติม 3 ชนิด วิเคราะห์โดยเทคนิค proximate analysis, CHN analysis, surface area (BET), X-ray diffraction, X-ray fluorescence, thermal gravimetric analysis และ scanning electron microscope การศึกษาสมบัติการคงรูปของคอมพอสิตยางธรรมชาติผสมร่วมผงกราไฟต์และการ์บอนแบล็กทั้ง 2 ชนิด พบว่า ระยะเวลาที่อาจเกิดการคงรูป (scorch time) ลดลง เมื่อปริมาณสารตัวเติมเพิ่มขึ้น ในขณะที่ระยะเวลาที่เหมาะสมในการคงรูป (curing time, t_{90}) และแรงบิดสูงสุด (maximum torque) เพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามพบว่าการเติมการ์บอนแบล็กเกรดนำไฟฟ้าจะให้ค่าแรงบิดสูงสุดสูงกว่าการ์บอนแบล็กเกรด N339 และผงกราไฟต์ตามลำดับ ค่ามอดูลัสที่ระยะยืด 100% (M_{100}) และ 300% (M_{300}) ค่าความต้านแรงดึง (tensile strength) ค่าความต้านแรงฉีก (tear strength) และความแข็ง (hardness) ของคอมพอสิตยางธรรมชาติเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณสารตัวเติมเพิ่มขึ้น โดยที่สารตัวเติมการ์บอนแบล็กเกรด N339 จะสูงขึ้นมากกว่า การ์บอนแบล็กเกรดนำไฟฟ้าและผงกราไฟต์ตามลำดับ แต่ค่าระยะยืด ณ จุดขาด (elongation at break) จะลดลงเมื่อปริมาณสารตัวเติมเพิ่มขึ้น และเมื่อนำคอมพอสิตยางธรรมชาติมาผ่านการบ่มเร่งด้วยความร้อน (thermal aging) พบว่าสมบัติเชิงกลของคอมพอสิตยางธรรมชาติจะมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับก่อนการบ่มเร่งด้วยความร้อน นอกจากนี้ค่าการนำไฟฟ้า (conductivity) ของคอมพอสิตยางธรรมชาติผสมสารตัวเติมเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณสารตัวเติม โดยสารตัวเติมชนิดผงกราไฟต์มีสัดส่วนวิกฤติ (critical concentration) 60 phr (7.1×10^{-9} S/cm) เมื่อเปรียบเทียบกับสารตัวเติมชนิดการ์บอนแบล็กเกรดนำไฟฟ้าและเกรด N339 มีสัดส่วนวิกฤติที่ 10 phr (2.7×10^{-4} S/cm) และ 40 phr (2.3×10^{-6} S/cm) ตามลำดับ

คำสำคัญ: กราไฟต์; ยางธรรมชาติ; พอลิเมอร์นำไฟฟ้า; การ์บอนแบล็ก

ABSTRACT

In this study, the effect of graphite content on electrical conductivity and mechanical properties of natural rubber composite material was investigated. There are two kinds of carbon black used as a reference, i.e., conductive carbon black (Printex XE 2B) and furnace black N339. Characterization for all kinds of additives was verified by proximate analysis, CHN analysis, surface area (BET), thermogravimetric analysis, X-ray diffraction, X-ray fluorescence and scanning electron microscope, respectively. For the curing properties, scorch time of composite materials was decreased, while the optimum curing time (t_{90}) and the maximum torque were increased when the amount of filler loadings increased. However, the maximum torque of composite materials containing conductive carbon black was greater than N339 and graphite, respectively. The modulus at 100% (M_{100}), 300% (M_{300}), tensile strength, tear strength and hardness trended to be increased with the increase of filler contents, while the elongation at break seemed to be decreased with increasing filler contents. The mechanical properties of composite materials such as modulus, tear strength, hardness and elongation at break after thermal aging were decreased compared with before thermal aging. In addition, the electrical properties of composite materials trended to be increase with increasing filler contents. As observed, the critical concentration of graphite, carbon black (Printex XE 2B) and N339 was about 60 phr (7.1×10^{-9} S/cm), 10 phr (2.7×10^{-4} S/cm) and 40 phr (2.3×10^{-6} S/cm), respectively.

Keyword: carbon black, conducting polymer, graphite, natural rubber

สารบัญเรื่อง

	หน้า
บทสรุปรายงานสำหรับผู้บริหาร	ก
บทคัดย่อ	ง
Abstract	จ
สารบัญเรื่อง	ฉ
สารบัญตาราง	ซ
สารบัญรูปภาพ	ณ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญและความเป็นมาของโครงการ	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ทฤษฎี	1
1.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	8
บทที่ 2 สารเคมี อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง	
2.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	10
2.2 วิธีการดำเนินงานวิจัย	
2.2.1 ศึกษาสมบัติเบื้องต้นของสารตัวเดิมโดยเทคนิคต่างๆ	10
2.2.2 การเตรียมคอมพอสิตยางธรรมชาติ	12
2.2.3 การทดสอบสมบัติต่าง ๆ คอมปาวด์ยางธรรมชาติและคอมพอสิตยางธรรมชาติ	13
บทที่ 3 ผลการวิจัย	
3.1 ผลการวิเคราะห์สมบัติของผงกราไฟต์คาร์บอนแบล็กเกรดการนำไฟฟ้า (Printex XE 2B) และคาร์บอนแบล็กเกรด N339	16
3.2 สมบัติการคงรูปของคอมปาวด์ยางธรรมชาติผสมกับผงกราไฟต์คาร์บอนแบล็กเกรดการนำไฟฟ้า (Printex XE 2B) และคาร์บอนแบล็กเกรด N339	19
3.3 สมบัติเชิงกลก่อนและหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อน	21
3.4 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของคอมพอสิตยางธรรมชาติผสมกับสารตัวเดิม	26
3.5 สมบัติการนำไฟฟ้าของคอมพอสิตยางธรรมชาติ	27
บทที่ 4 วิจารณ์ผลการทดลอง	
4.1 การวิเคราะห์สมบัติของผงกราไฟต์คาร์บอนแบล็กเกรดการนำไฟฟ้า (Printex XE 2B) และคาร์บอนแบล็กเกรด N339	28
4.2 สมบัติการคงรูปของคอมปาวด์ยางธรรมชาติผสมกับผงกราไฟต์คาร์บอนแบล็กเกรดการนำไฟฟ้า (Printex XE 2B) และคาร์บอนแบล็กเกรด N339	29
4.3 สมบัติเชิงกลก่อนและหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อน	30
4.4 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของคอมพอสิตยางธรรมชาติผสมกับสารตัวเดิม	31
4.5 สมบัติการนำไฟฟ้าของคอมพอสิตยางธรรมชาติ	31
4.6 การวิเคราะห์ความคุ้มค่าต่อการพัฒนาเชิงพาณิชย์	32

บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	35
เอกสารอ้างอิง	37
ภาคผนวก ก	38
ภาคผนวก ข	40
ภาคผนวก ค	46
ภาคผนวก ง	47
ภาคผนวก จ	48
ภาคผนวก ฉ	56
สรุปข้อคิดเห็นของผู้ทรงคุณวุฒิต่อโครงการ	57

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1.1	สมบัติทางกายภาพของอิฐรูปของคาร์บอนในรูปแบบต่าง ๆ	3
1.2	สมบัติทั่วไปของเขม่าดำชนิดต่างๆ	4
2.1	สูตรการผสมคอมปาวด์ยาง	14
2.2	ขั้นตอนการบดผสมยาง	14
3.1	ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของสารตัวเติมทั้ง 3 ชนิด	16
3.2	ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบในสารตัวเติมทั้ง 3 ชนิดโดยเทคนิค X-ray fluorescence (XRF)	19
3.3	สมบัติการคงรูปของคอมปาวด์ยางธรรมชาติผสมกับสารตัวเติม	21
3.4	สมบัติเชิงกลของคอมพอสิตยางธรรมชาติผสมกับสารตัวเติม ก่อนและหลังการบ่มแรงด้วยความร้อน	25
4.1	การวิเคราะห์ต้นทุนวัสดุคอมพอสิตยางธรรมชาติผสมร่วมผงกราไฟต์ ณ จุดตัดส่วนวิกฤติที่ 60 phr (G-60)	33
4.2	การวิเคราะห์ต้นทุนวัสดุคอมพอสิตยางธรรมชาติผสมร่วมคาร์บอนแบล็กเกรดการนำไฟฟ้า (Printex XE 2B) ณ จุดตัดส่วนวิกฤติที่ 10 phr (CB-10)	33
4.3	การวิเคราะห์ต้นทุนวัสดุคอมพอสิตยางธรรมชาติผสมร่วมคาร์บอนแบล็กเกรด N339 ณ จุดตัดส่วนวิกฤติที่ 40 phr (NCB-40)	34
ข.1	ผลค่าการนำไฟฟ้าของคอมพอสิตยางธรรมชาติผสมร่วมผงกราไฟต์	40
ข.2	ผลค่าการนำไฟฟ้าของคอมพอสิตยางธรรมชาติผสมร่วมคาร์บอนแบล็กเกรดการนำไฟฟ้า (Printex XE 2B)	42
ข.3	ผลค่าการนำไฟฟ้าของคอมพอสิตยางธรรมชาติผสมร่วมคาร์บอนแบล็กเกรด N339	43

สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
1.1 โครงสร้างกราฟไฟต์	3
1.2 โครงสร้างของคาร์บอนแบล็กในระดับโมเลกุล	5
1.3 โครงข่ายการนำไฟฟ้าของสารตัวเติมในเนื้อยาง	5
1.4 คาร์บอนแบล็ก (ก) อนุภาคปฐมภูมิ (ข) การรวบรวมอนุภาค (aggregate) (ค) กลุ่มก้อนอนุภาค (agglomerate)	7
1.5 โครงสร้างของเขม่าดำ (ก) แบบสูง(ข) แบบต่ำ	7
1.6 ลักษณะทางพื้นผิวของสารตัวเติม (ก) คาร์บอนแบล็ก(ข) ซิลิกา	8
3.1 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยวิธี X-ray diffraction ของ (ก) ผงกราฟไฟต์(ข) คาร์บอนแบล็กเกรดการนำไฟฟ้า (Printex XE 2B) (ค) คาร์บอนแบล็กเกรด N339	17
3.2 ผลการวิเคราะห์การสลายตัวด้วยความร้อนโดยเทคนิค thermogravimetric analysis ของ (ก) ผงกราฟไฟต์(ข) คาร์บอนแบล็กเกรดการนำไฟฟ้า (Printex XE 2B) (ค) คาร์บอนแบล็กเกรด N339	18
3.3 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของ (ก) ผงกราฟไฟต์(ข) คาร์บอนแบล็กเกรดการนำไฟฟ้า (Printex XE 2B) (ค) คาร์บอนแบล็กเกรด N339ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	19
3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงบิดกับเวลาของคอมปาว์ดยางธรรมชาติผสมกับ(ก) ผงกราฟไฟต์ (ข) ผงเขม่าเกรดการนำไฟฟ้า (Printex XE 2B) และ (ค)คาร์บอนแบล็กเกรดN339	20
3.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด (stress-strain curve) ของคอมพอสิตยางธรรมชาติผสมกับ(ก) ผงกราฟไฟต์(ข)คาร์บอนแบล็กเกรดการนำไฟฟ้า(Printex XE 2B) (ค)คาร์บอนแบล็กเกรดN339 ก่อนการบ่มเร่งด้วยความร้อน และ (ง) ผงกราฟไฟต์(จ)คาร์บอนแบล็กเกรดการนำไฟฟ้า(Printex XE 2B) (ฉ)คาร์บอนแบล็กเกรดN339 หลังการบ่มเร่งด้วยความร้อน	22
3.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านแรงดึงและปริมาณสารตัวเติมของคอมพอสิตยางธรรมชาติผสมกับ(ก) ผงกราฟไฟต์(ข)คาร์บอนแบล็กเกรดนำไฟฟ้า (ค)คาร์บอนแบล็กเกรดN339 และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะยื ด จุดขาดและปริมาณสารตัวเติมของยางธรรมชาติผสมกับ (ง) ผงกราฟไฟต์ (จ)คาร์บอนแบล็กเกรดนำไฟฟ้า (ฉ)คาร์บอนแบล็กเกรดN339	23
3.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงฉีก (tear strength) ต่อปริมาณสารตัวเติมของคอมพอสิตยางธรรมชาติผสมรวมสารตัวเติมชนิดต่าง ๆ ก่อนและหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อน	24
3.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็ง (hardness) ต่อปริมาณสารตัวเติมของคอมพอสิตยางธรรมชาติผสมรวมสารตัวเติมชนิดต่าง ๆ (ก) ก่อนและ (ข) หลังการบ่มเร่งด้วยความร้อน	24
3.9 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของคอมพอสิตยางธรรมชาติผสมกับ(ก) ผงกราฟไฟต์ที่กำลังขยาย 1000 เท่า (ข) คาร์บอนแบล็กเกรดการนำไฟฟ้า (Printex XE 2B) ที่กำลังขยาย 5000 เท่า และ (ค) คาร์บอนแบล็กเกรด N339 ที่กำลังขยาย 5000 เท่าด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	26
3.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการนำไฟฟ้าและปริมาณการเติมสารตัวเติมของคอมพอสิตยางธรรมชาติผสมกับ(ก) ผงกราฟไฟต์ และ (ข) ผงเขม่าเกรดการนำไฟฟ้า (Printex XE 2B) (ค)คาร์บอนแบล็กเกรดN339(ง) เปรียบเทียบสารตัวเติมทั้ง 3 ชนิด	27

3.11	ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของคอมพอลิตยางธรรมชาติผสมกับ(ก) ผงกราไฟต์ที่กำลังขยาย 1000 เท่า (ข) คาร์บอนแบล็กเกรดการนำไฟฟ้า (Printex XE 2B) ที่กำลังขยาย 5000 เท่า และ (ค) คาร์บอนแบล็กเกรด N339 ที่กำลังขยาย 5000 เท่า ณ จุดตัดส่วนวิกฤติ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	27
ข.1	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสและความต่างศักย์ของคอมพอลิตยางธรรมชาติผสมรวมผงกราไฟต์ที่ตัดส่วนวิกฤติ 60 phr	45
ค.1	ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของคอมพอลิตยางธรรมชาติผสมกับ(ก) ผงกราไฟต์ที่กำลังขยาย 1000 เท่า (ข) คาร์บอนแบล็กเกรดการนำไฟฟ้า (Printex XE 2B) ที่กำลังขยาย 5000 เท่า และ (ค) คาร์บอนแบล็กเกรด N339 ที่กำลังขยาย 5000 เท่า ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	46
ค.2	ทางสัณฐานวิทยาของคอมพอลิตยางธรรมชาติผสมกับ(ก) ผงกราไฟต์ที่กำลังขยาย 1,000 และ 5,000 เท่าตามลำดับ (ข) คาร์บอนแบล็กเกรดการนำไฟฟ้า (Printex XE 2B) ที่กำลังขยาย 5,000 และ 20,000 เท่าตามลำดับ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	46

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและความเป็นมาของการวิจัย

ยางธรรมชาติ มีสมบัติความต้านแรงดึง ความต้านแรงฉีก และความต้านทานต่อการขัดถู (abrasion resistance) สูงจึงมีการนำยางธรรมชาติมาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น ยางล้อรถยนต์ สายพานลำเลียง ท่อปั๊มก๊าซ เป็นต้น แต่ผลิตภัณฑ์เหล่านี้มักเกิดปัญหาการกักเก็บประจุที่พื้นผิวเนื่องจากยางธรรมชาติเป็นฉนวนไฟฟ้า เมื่อเกิดการเสียดสีขึ้น ยางจะเก็บประจุไว้ที่พื้นผิวและไม่สามารถถ่ายเทไปสู่สิ่งแวดล้อมได้จึงต้องมีการแก้ไขปัญหานี้ที่เกิดขึ้นโดยการทำให้ผลิตภัณฑ์จากยางธรรมชาติสามารถนำไฟฟ้าได้เมื่อยางมีสมบัติการนำไฟฟ้าจะทำให้ประจุที่เกิดขึ้นสามารถถ่ายเทออกสู่สิ่งแวดล้อมได้ นอกจากนี้ประโยชน์ของการผลิตยางธรรมชาติที่นำไฟฟ้าได้ ยังสามารถนำไปใช้ผลิตเป็นตัวรับรู้ (sensor) ได้โดยอาศัยหลักการให้น้ำหนัก หรือความดันกดทับบนยางนำไฟฟ้า และแปลสัญญาณออกมาในรูปของค่าการนำไฟฟ้าหรือค่าความต้านทานได้ เป็นต้น การเพิ่มค่าการนำไฟฟ้าของยางสามารถทำได้หลายวิธีเช่น การใช้เทคนิคยางผสม (rubber blend) โดยนำยางที่มีขั้วผสมกับยางที่ไม่มีขั้ว ส่งผลให้ยางผสมที่ได้มีค่าการนำไฟฟ้าสูงขึ้นอีกวิธีหนึ่ง คือ การเติมสารตัวเติมหรือสารเคมีที่มีค่าการนำไฟฟ้าสูง ๆ ลงไปในสูตรการผสมยาง ซึ่งถือเป็นทางเลือกหนึ่งในการเพิ่มค่าการนำไฟฟ้าของยางได้ โดยทั่วไปสารตัวเติมหรือสารเคมีที่นิยมนำมาใช้ปรับปรุงสมบัติการนำไฟฟ้าของยางให้สูงขึ้นแบ่งได้เป็น 3 กลุ่มคือ ผงโลหะ พลาสติกไซเซอร และคาร์บอนแบล็ก การผสมสารตัวเติมหรือสารเคมีเหล่านี้ลงไปในยางธรรมชาติส่งผลให้ค่าการนำไฟฟ้าของยางสูงขึ้น แต่อาจส่งผลกระทบต่อสมบัติเชิงกลของยางอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้การใช้คาร์บอนแบล็กเป็นสารตัวเติมซึ่งเป็นที่นิยมในอุตสาหกรรม เนื่องจากสามารถเพิ่มสมบัติเชิงกลได้แล้วยังมีสมบัติการนำความร้อนและการนำไฟฟ้าได้ดี คาร์บอนแบล็กมีโครงสร้างเป็นกราฟต์ที่มีความต้านทานไฟฟ้าเชิงปริมาตรต่ำ ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยมีแนวคิดที่จะนำผงกราฟต์ที่เหลือจากอุตสาหกรรมหลอมโลหะมาใช้เป็นสารนำไฟฟ้าและสารตัวเติมในยางธรรมชาติเพื่อทดแทนการใช้คาร์บอนแบล็กในการเตรียมยางธรรมชาติที่มีสมบัตินำไฟฟ้าที่สามารถใช้ผลิตเป็นตัวรับรู้ ซึ่งจะช่วยลดปริมาณของเสียที่เกิดขึ้นจากโรงงานอุตสาหกรรมหลอมโลหะ ดังนั้นผู้วิจัยคาดหวังว่าการนำของเสียที่เกิดขึ้นจากโรงงานอุตสาหกรรมกลับมาพัฒนาผลิตภัณฑ์ยางเพื่อปรับปรุงสมบัติทั้งทางกายภาพและเชิงกลของผลิตภัณฑ์ได้นั้นถือเป็นการพัฒนาอุตสาหกรรมยางได้อย่างยั่งยืนต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์

ศึกษาผลของปริมาณผงกราฟต์ต่อสมบัติเชิงกลและการนำไฟฟ้าของยางธรรมชาติที่ผ่านกระบวนการวัลคาไนเซชัน

1.3 ทฤษฎี

ยางธรรมชาติ[1] มีชื่อทางเคมีคือ cis-1,4-polyisoprene (C_5H_8) จัดเป็นยางอเนกประสงค์ที่มีสมบัติเชิงพลวัตและสมบัติเชิงกลที่ดีจึงมักนำไปใช้ผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ แต่ยางธรรมชาติมีสมบัติความเป็นฉนวนสูงเพราะโครงสร้างโมเลกุลของยางธรรมชาติประกอบด้วยธาตุคาร์บอนและไฮโดรเจนซึ่งมีค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตี (electronegativity, EN) ต่ำจึงไม่สามารถทำให้เกิดขั้วได้ยางธรรมชาติจึงไม่นำไฟฟ้า

พอลิเมอร์โดยทั่วไปมีสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้าแต่ทำให้นำไฟฟ้าได้โดยการสังเคราะห์ให้เกิดโครงสร้างที่มีพันธะคู่สลับกับพันธะเดี่ยว (conjugated bond)[1] หรือทำให้นำไฟฟ้าได้โดยการเติมสารตัวเติมที่นำไฟฟ้าได้เช่นผงโลหะ (metal) คาร์บอนแบล็ก (carbon black) กราไฟต์ (graphite) ท่อนาโนคาร์บอน (carbon nanotube) และเส้นใยคาร์บอน (carbon fiber)

ลงในพอลิเมอร์ซึ่งทำหน้าที่เป็นเมทริกซ์ที่มีสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้า (insulator) โดยเมื่อผสมกันแล้วจะทำให้ได้วัสดุคอมพอสิตที่มีสมบัตินำไฟฟ้าได้ค่าการนำไฟฟ้าของคอมพอสิตขึ้นอยู่กับ การเชื่อมต่อกันของแต่ละอนุภาคของสารตัวเติมนำไฟฟ้าซึ่งขึ้นอยู่กับความเข้มข้นสมบัติของสารตัวเติมนำไฟฟ้าและการกระจายตัวของสารตัวเติมนำไฟฟ้าในพอลิเมอร์เมทริกซ์โดย ปริมาณของสารตัวเติมที่เติมลงไปผสมในเมทริกซ์ต้องมีปริมาณเกินกว่าสัดส่วนวิกฤติ (critical concentration) ที่เรียกว่า ปริมาณของสารตัวเติมในระดับนี้ว่าระดับที่น้อยที่สุดที่สามารถเกิดการเชื่อมโยงกันของอนุภาคได้ (percolation threshold) ซึ่งเป็นจุดที่สารตัวเติมนำไฟฟ้ามากพอที่จะเชื่อมโยงกันเป็นเครือข่ายทำให้ค่าการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์คอมพอสิตมากขึ้น สำหรับงานของพอลิเมอร์คอมพอสิตนำไฟฟ้าสามารถนำไปใช้ในหลายๆด้านเช่นตัวตรวจรู้ความดัน ทำแบตเตอรี่และ ขั้วไฟฟ้าในเซลล์เชื้อเพลิง

โดยทั่วไปการปรับปรุงสมบัติการนำไฟฟ้าของยาง สามารถทำได้ 2 วิธี ดังต่อไปนี้

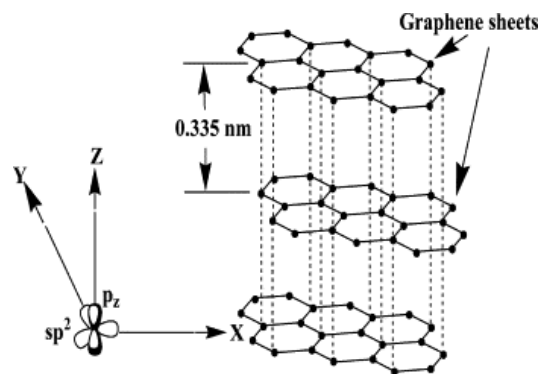
1) การเติมสารตัวเติมหรือสารเติมแต่งชนิดต่าง ๆ ลงไปในยาง การเติมสารตัวเติมที่นำไฟฟ้าได้ดีหรือการเติมสารเคมีที่มี ความเป็นขั้วสูงชนิดอื่น ๆ ลงไปในยางธรรมชาติจะส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ยางมีความสามารถในการนำไฟฟ้าสูงขึ้นแต่อย่างไร ก็ตามในการออกสูตรเคมียางนั้น มีการเติมสารเคมีหลายชนิด เช่น ซิงก์ออกไซด์ กรดสเตียริก สารตัวเร่งปฏิกิริยา รวมถึง สารป้องกันการเสื่อมสภาพในปริมาณเพียงเล็กน้อย จึงไม่ส่งผลกระทบต่อสมบัติการนำไฟฟ้าของยางอย่างมีนัยสำคัญ (ยกเว้น ในกรณีที่มีการเติมลงไปปริมาณที่สูงมากเท่านั้น) โดยทั่วไปสารตัวเติมหรือสารเคมีที่นิยมนำมาใช้เพื่อเพิ่มสมบัติการนำ ไฟฟ้าของยางให้สูงขึ้นแบ่งได้เป็น 3 กลุ่ม คือ ผงโลหะ พลาสติกไฮเซอร และคาร์บอนแบล็ก ซึ่งการเติมผงโลหะ เช่น ผง เงิน ผงทองแดง หรือผงอะลูมิเนียมเหล่านี้ลงไปยาง ส่งผลให้ค่าการนำไฟฟ้าของยางสูงขึ้นแต่การเติมผงโลหะจะไปส่งผล ต่อสมบัติเชิงกลของยางอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้และทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ง่าย การเติมพลาสติกไฮเซอรที่ ความเป็นขั้วสูงลงไปในยาง นอกจากจะช่วยให้ยางนิ่มและมีกระบวนการผลิตที่ง่ายขึ้นแล้ว ยังสามารถช่วยเพิ่มค่าการ นำไฟฟ้าให้แกยางได้อีกด้วยแต่เนื่องจากพลาสติกไฮเซอรมีความเป็นขั้วสูงจึงเหมาะที่จะใช้กับยางที่มีความเป็นขั้วสูงสุดท้าย การใส่คาร์บอนแบล็กเป็นสารตัวเติมทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ยางที่นำความร้อนและนำไฟฟ้าได้ดี เพราะคาร์บอนแบล็กมี โครงสร้างเป็นกราฟต์ที่มีค่าความต้านทานไฟฟ้าเชิงปริมาตร (volume resistivity) ต่ำมากคือประมาณ $10^{-3}-10^{-4}$ โอห์ม- เซนติเมตร ดังนั้น การเติมคาร์บอนแบล็กลงไปในยาง นอกจากจะส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของยางแล้ว ยังส่งผลทำให้ยางมีค่า การนำไฟฟ้าที่สูงขึ้นได้อีกด้วย

2) การใช้เทคนิคยางผสม (rubber blend) การนำยางที่มีความเป็นขั้วสูงไปผสมกับยางที่มีความเป็นขั้วต่ำจะช่วย ทำให้ยางผสมที่ได้มีค่าการนำไฟฟ้าสูงขึ้น เช่น การนำยางคลอโรพรีนไปผสมกับยางธรรมชาติก็จะทำให้ยางผสมที่ได้มีค่า การนำไฟฟ้าสูงขึ้น (ค่าการนำไฟฟ้าของยางผสมจะขึ้นอยู่กับปริมาณของยางที่มีขั้วที่เติมลงไป) เทคนิคการผสมยาง นั้น จำเป็นต้องทำด้วยความระมัดระวัง เพราะถ้าหากยางทั้งสองชนิดที่จะนำมาผสมกันมีความเป็นขั้วแตกต่างกันมากเกินไป ก็อาจส่งผลต่อสมบัติอื่น ๆ ของยางผสม โดยเฉพาะสมบัติเชิงกล

ในงานวิจัยนี้สนใจการนำผงกราฟต์ [2] ที่เหลือจากอุตสาหกรรมหลอมโลหะมาปรับปรุงสมบัติการนำไฟฟ้าในยาง ธรรมชาติเพื่อใช้ในการผลิตตัวรับรู้ความดัน โดยกราฟต์ถือเป็นอีกรูปหนึ่งของธาตุคาร์บอน ตารางที่ 1.1 แสดงสมบัติทาง กายภาพของอีกรูปของคาร์บอนในรูปแบบต่าง ๆ โครงสร้างผลึกเอกลักษณ์ของกราฟต์ประกอบด้วยโครงสร้างที่ขนานกัน ในสองมิติของกราฟีน (graphene) ซึ่งเป็นวงหกเหลี่ยมของอะตอมคาร์บอน (hexagonal ring) ต่อเนื่องกันที่เชื่อมกันด้วย พันธะซิกมาระหว่างคาร์บอนในวงหกเหลี่ยม และพันธะพายซึ่งเกิดขึ้นระหว่างชั้นของกราฟีนจากเลนส์อิเล็กตรอน (ดัง แสดงในรูปที่ 1.1) เมื่อวาเลนส์อิเล็กตรอนได้รับพลังงานมากพอ วาเลนส์อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ในแนวระนาบได้มากกว่า ในทิศตั้งฉากระนาบของกราฟีน ทำให้สภาพการนำไฟฟ้ามีค่าในระนาบเดียวกับวงหกเหลี่ยมของกราฟต์ดีกว่าเป็นหนึ่ง ล้านเท่าของในทิศทางตั้งฉากวงหกเหลี่ยมของคาร์บอน [3] เนื่องด้วยระหว่างชั้นต่างๆ (layer lattice) มีการยึดเหนี่ยวไม่

(slip ได้) จากแนววาเลนซ์และแนวการนำไฟฟ้าซ้อนกัน (overlap) เล็กน้อยจึงทำให้สามารถนำกระแสไฟฟ้าได้ (จัดเป็นวัสดุกึ่งตัวนำ) [4] ในชั้นโครงสร้างอะตอม (layer lattice) ของกราฟไฟต์จะมีอะตอมคาร์บอนไม่หนาแน่นเหมือนกับของเพชรกราฟไฟต์จึงมีความหนาแน่นน้อยกว่าเพชรค่าความเค้นความแข็ง โมดูลัสยืดหยุ่น (modulus of elasticity) ก็น้อยกว่าเพชรมากแต่กราฟไฟต์ทนความร้อนได้ดีกว่าเพชรชั้นโครงสร้างอะตอม (layer lattice) ของกราฟไฟต์สามารถเลื่อนไหล (slip) ในขณะที่รับภาระเลื่อนได้ง่ายกราฟไฟต์จึงเป็นสารหล่อลื่นแข็งให้การสัมผัสลื่นคู่ของวัสดุได้ดีเนื่องจากทนความร้อนและสารเคมีได้ดี จึงมีการนำกราฟไฟต์มาทำพื้นเบ้าหลอมโลหะ

สำหรับการนำไปใช้ประโยชน์ของกราฟไฟต์ในด้านสมบัติการนำไฟฟ้าของยางได้อย่างมีประสิทธิภาพนั้น จำเป็นต้องพิจารณาถึงการกระจายตัวในตัวกลางยาง นั้นหมายความว่าผงกราฟไฟต์ที่เกิดการกระจายตัวในตัวกลางยาง การจับกลุ่มของอนุภาคกราฟไฟต์ก็จะอยู่ห่างกันมากขึ้น ส่งผลให้การถ่ายเทอิเล็กตรอนเกิดขึ้นได้ยาก แต่ถ้าหากการจับกลุ่มของอนุภาคกราฟไฟต์อยู่ใกล้กัน จะทำให้อิเล็กตรอนมีช่องทางในการถ่ายเทได้มากขึ้น และถ้าการกระจายตัวของกลุ่มก้อนนี้น้อยลงจะส่งผลต่อค่าการนำไฟฟ้าที่น้อยลงเช่นกัน ดังนั้นการนำไฟฟ้าของยางจะเกิดขึ้นได้นั้นอนุภาคของกราฟไฟต์จะต้องมีการจัดเรียงเป็นกลุ่มก้อนที่ดีและการกระจายตัวที่ดีของกลุ่มก้อนนี้ด้วย



รูปที่ 1.1 โครงสร้างกราฟไฟต์ [2]

ตารางที่ 1.1 สมบัติทางกายภาพของอัญรูปของคาร์บอนในรูปแบบต่าง ๆ [2]

สมบัติ	อัญรูปของคาร์บอน				
	กราฟไฟต์	เพชร	ฟูลเลอร์รีน	SWCNT ¹	MWCNT ²
Specific gravity (g/cm ³)	1.9–2.3	3.5	1.7	0.8	1.8
Electrical conductivity (S/cm)	4000 ^p , 3.3 ^c	10 ⁻² –10 ⁻¹⁵	10 ⁻⁵	10 ² –10 ⁶	10 ³ –10 ⁵
Electron mobility (cm ² / (V s))	2 x 10 ⁴	1800	0.5–6	10 ⁵	10 ⁴ –10 ⁵
Thermal conductivity (W/(m K))	298 ^p , 2.2 ^c	900–2320	0.4	6000	2000
Coefficient of thermal expansion (K ⁻¹)	-1 x 10 ^{-6p} 2.9 x 10 ^{-5c}	(1–3) x 10 ⁶	6.2 x 10 ⁵	Negligible	Negligible
Thermal stability in air (°C)	450–650	<600	600	>600	>600

¹ท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังชั้นเดียว, ²ท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น, ^pในระนาบ, ^cทิศตั้งฉาก

เมื่อเปรียบเทียบกราฟไพล์กับคาร์บอนแบล็กคาร์บอนแบล็กจัดเป็นสารตัวเดิมที่นิยมนำใช้กันมากที่สุดในอุตสาหกรรมยาง [1]คาร์บอนแบล็กถือเป็นอีกรูปหนึ่งของคาร์บอนที่มีลักษณะโครงสร้างแตกต่างไปจากกราฟไพล์ คือ มีวงอะโรมาติกที่อยู่ติดกันในแนวระนาบคล้ายกราฟีน มีการเรียงเป็นชั้นและมีลักษณะทางพื้นผิวที่มีหมู่ฟังก์ชันเคมี เช่น ฟีนอล แอลกอฮอล์ คิวโนน ไฮดรอกซิลเกาะอยู่บนพื้นผิว (ดังแสดงในรูปที่ 1.2) ซึ่งจะมีผลต่อการหน่วงการถ่ายเทอิเล็กตรอนระหว่างกลุ่มก้อนของอนุภาคคาร์บอนแบล็ก[1] ปัจจุบันมีการแบ่งประเภทคาร์บอนแบล็กออกเป็น 4 ประเภท [4]และสมบัติทั่วไปของคาร์บอนแบล็กชนิดต่าง ๆ ได้สรุปไว้ในตารางที่ 1.2

1) เฟอร์เนชแบล็ก (furnace black) เป็นเขม่าดำที่ได้จากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ของน้ำมันที่มีโครงสร้างส่วนใหญ่เป็นแบบวงแหวน (highly aromatic oils) เขม่าดำกลุ่มนี้เป็นกลุ่มที่นำไปใช้กันมากที่สุดในอุตสาหกรรมยาง

2) ชาแนลแบล็ก (channel black) เป็นเขม่าดำที่ได้จากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ของก๊าซธรรมชาติ เขม่าดำกลุ่มนี้มักมีขนาดอนุภาคปฐุมภูมิที่เล็กมาก แต่เนื่องจากมีความเป็นกรดสูงทำให้เขม่าดำกลุ่มนี้มีฤทธิ์ในการหน่วงอัตราการเกิดปฏิกิริยาวัลคาไนเซชันของยางกับกำมะถัน

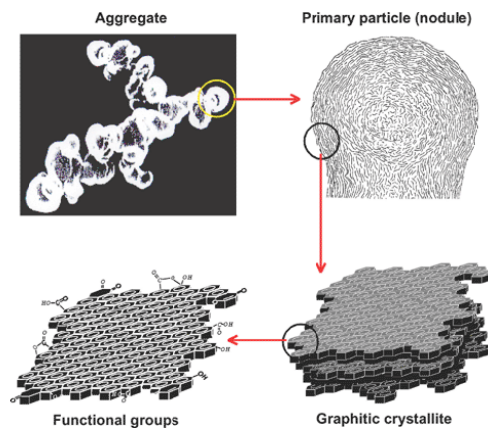
3) เทอร์มอลแบล็ก (thermal black) เป็นเขม่าดำที่ได้จากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ของก๊าซธรรมชาติ เขม่าดำกลุ่มนี้มักมีขนาดอนุภาคปฐุมภูมิที่ค่อนข้างใหญ่ จึงมีประสิทธิภาพในการเสริมแรงต่ำ

4) อะเซทิลีนแบล็ก (acetylene black) เป็นเขม่าดำที่ได้จากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ของก๊าซอะเซทิลีน เขม่าดำกลุ่มนี้มีความบริสุทธิ์สูงกว่าเขม่าดำกลุ่มอื่นๆ และมักนำไปใช้ในการผลิตยางที่มีสมบัตินำไฟฟ้าเพราะเป็นกลุ่มที่มีโครงสร้างสูง(high structure)

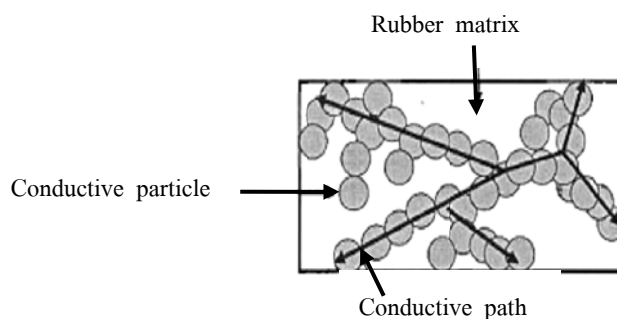
ตารางที่ 1.2สมบัติทั่วไปของเขม่าดำชนิดต่างๆ[5]

สมบัติ	Furnace Black	Channel Black	Thermal Black	Acetylene Black
เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของอนุภาคปฐุมภูมิ (nm)	17-70	12-29	150-500	35-50
เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของแอกกรีเกต(nm)	80-500	50-200	300-810	350-400
พื้นที่ผิวจำเพาะ (m ² /g)	20-200	120-150	6-15	60-70
การดูดซับน้ำมัน (mL/g)	0.67-1.95	-	0.30-0.46	3.0-3.5
pH	5-9.5	-	7-8	5-7
สายที่ระเหยได้ง่าย (%)	0.3-2.8	-	0.10-0.50	0.4
ไฮโดรเจน (%)	0.45-0.710	-	0.3-0.5	0.05-0.10
ออกซิเจน (%)	0.19-1.2	-	0.00-0.12	0.10-0.15
เบนซีนสกัด (%)	0.01-0.18	-	0.02-1.7	0.1
เถ้า (%)	0.1-1.0	-	0.02-0.38	0.00
ซัลเฟอร์(%)	0.05-1.5	-	0.00-0.25	0.02
ความหนาแน่น (g/mL)	1.80	-	-*	-*

* ไม่พบข้อมูล



รูปที่ 1.2 โครงสร้างของคาร์บอนแบล็กในระดับโมเลกุล [5]



รูปที่ 1.3 โครงข่ายการนำไฟฟ้าของสารตัวเติมในเนื้อยาง [7]

กลไกการนำไฟฟ้า (mechanism of electrical conduction) [6] ของวัสดุตัวนำไฟฟ้าประเภทวัสดุผสมตัวนำแบบซูโดแอคทีฟ (pseudo active) เนื่องจากวัสดุหลักคือยางธรรมชาติซึ่งทำหน้าที่เป็นเมทริกซ์ไม่ได้มีสมบัติในการนำไฟฟ้าโดยตรง แต่ต้องอาศัยการนำไฟฟ้าจากสารตัวเติม ซึ่งโดยทั่วไปความสามารถของวัสดุตัวนำไฟฟ้าประเภทนี้ขึ้นกับการสัมผัสกันของอนุภาคของวัสดุตัวเติม ดังนั้นปัจจัยที่ต้องคำนึงสำหรับกลไกการนำไฟฟ้า คือ สมบัติของสารตัวเติมความเข้มข้น รูปร่าง ขนาดของอนุภาค ลักษณะพื้นผิว ขนาดของการกระจายตัว การจัดเรียงตัวของอนุภาคของสารตัวเติม อิเล็กตรอนทันเนลลิง (electron tunneling) และรวมถึงสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมพอสิตที่ได้

ทฤษฎีกลไกการนำไฟฟ้าในวัสดุผสมโดยใช้สารตัวเติมนำไฟฟ้ากระจายแบบสุ่มแบ่งได้เป็น 3 ทฤษฎี ดังนี้

Conductive path theory การสร้างโครงข่ายหรือสายโซ่การนำไฟฟ้าของสารตัวเติมในเนื้อยาง (ดังรูปที่ 1.3) อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ผ่านจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่งด้วยสายโซ่ของสารตัวเติมเมื่อให้แรงดันไฟฟ้า ซึ่งสายโซ่ของสารตัวเติมเกิดจากอนุภาคหรือกลุ่มก้อนที่สัมผัสกันหรือติดกันดังนั้นการปรากฏการณ์การนำไฟฟ้าจึงเกิดขึ้นเมื่อสัดส่วนของสารตัวเติมสูงกว่าสัดส่วนวิกฤติ (critical concentration หรือ percolation limit)

Electron tunneling theory การนำไฟฟ้าของทฤษฎีนี้เกิดจากการที่อิเล็กตรอนสามารถกระโดดข้ามผ่านช่องว่าง หรือทันเนลลิงผ่านพลังงานของตัวกีดขวาง (barriers) ระหว่างองค์ประกอบของเนื้อยาง ซึ่งระยะห่างระหว่างช่องว่างจะอยู่ในช่วงที่อิเล็กตรอนสามารถกระโดดได้ (ระดับนาโนเมตร) ความแตกต่างระหว่างทฤษฎีแรกคือสัดส่วนของสารตัวเติมและสัดส่วนวิกฤติของทฤษฎีนี้จะต้องน้อยกว่าสัดส่วนในทฤษฎีแรก

Electric field radiation theory การไหลของอิเล็กตรอนเกิดจากการให้สนามไฟฟ้าระหว่างองค์ประกอบหรือช่องว่างของอนุภาคสารตัวเติม ซึ่ง 2 ทฤษฎีแรกที่กล่าวมาข้างต้นเป็นการนำแบบ ohmic แต่ทฤษฎีนี้เป็น การนำแบบ non-ohmic การที่จะใช้ทฤษฎีนี้ได้ก็ต่อเมื่อสัดส่วนตัวเติมน้อยกว่าสัดส่วนวิกฤติ แต่การใช้ทฤษฎีนี้จะเป็นจริงได้ก็ต่อเมื่อปริมาณสารตัวเติมสูงที่อุณหภูมิสูง [8]

นอกเหนือจากกลไกการนำไฟฟ้าที่มีผลมาจากสารตัวเติมที่ใส่ร่วมกับยางแล้ว ยังมีปัจจัยของสมบัติของสารตัวเติมที่มีอิทธิพลต่อการนำไฟฟ้าของสารตัวเติม [4] ดังนี้

1) ขนาดอนุภาคและพื้นที่ผิวจำเพาะ (particle size and specific surface area)

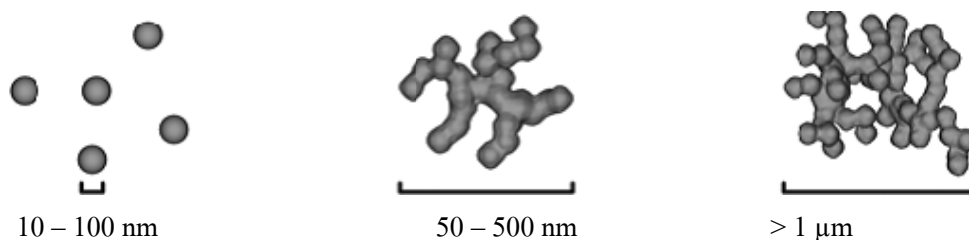
สารตัวเติมที่มีขนาดอนุภาคเล็กจะมีพื้นที่ผิวต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนัก (หรือมีพื้นที่ผิวจำเพาะ) สูง จะทำให้ยางมีการนำไฟฟ้าที่สูง โดยทั่วไปสารตัวเติม เช่น คาร์บอนแบล็กจะมีลักษณะอนุภาคปฐมภูมิเป็นทรงกลมและจะไม่อยู่กันอย่างเดี่ยวๆ แต่จะหลอมรวมกันหรืออยู่รวมกันเป็นกลุ่มก้อนที่เรียกว่าแอกริเกต (aggregate) เนื่องจากการหลอมรวมนี้มีแรงดึงดูดระหว่างกันด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ (ดังแสดงในรูปที่ 1.4) เกิดการจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อนที่มีขนาดใหญ่ขึ้นเรียกว่า แอกลอมเมอเรต (agglomerate) ซึ่งจะส่งผลต่อการนำไฟฟ้า ด้วยเหตุนี้ ขนาดของอนุภาคที่เล็กลงจะทำให้การหลอมรวมของอนุภาคเล็กลง เมื่อนำไปใส่ในยางการรวมกันเป็นกลุ่มก้อนที่เล็กลงก็จะกระจายตัวในเนื้อยาง ทำให้เกิดระยะห่างระหว่างกันลดลง จึงทำให้อิเล็กตรอนเกิดโครงข่ายในการถ่ายเทจากกลุ่มก้อนหนึ่งไปยังอีกกลุ่มก้อนหนึ่งได้ง่ายยิ่งขึ้น

2) โครงสร้างของสารตัวเติม (filler structure)

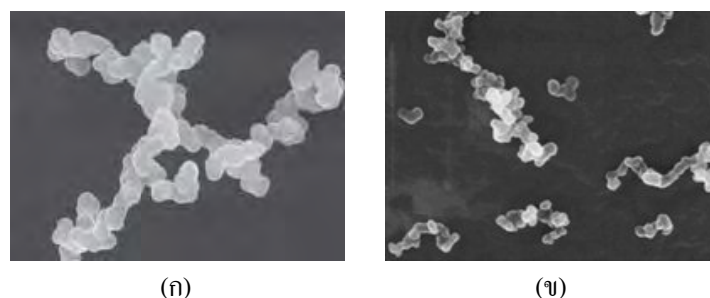
โครงสร้างของสารตัวเติมมีอิทธิพลต่อการนำไฟฟ้าอย่างมากเช่นเดียวกับขนาดอนุภาคและพื้นที่ผิวจำเพาะ ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้นว่าอนุภาคของสารตัวเติมบางชนิด เช่น คาร์บอนแบล็กจะไม่อยู่อย่างเดี่ยวๆ แต่จะหลอมรวมกันเป็นกลุ่มก้อน ซึ่งการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนดังกล่าวทำให้เกิดเป็นโครงสร้างของสารตัวเติมที่เรียกว่าโครงสร้างสารตัวเติมปฐมภูมิ (primary filler structure) โครงสร้างสารตัวเติมปฐมภูมิที่เกิดขึ้นจะมีความแข็งแรงสูงมากและไม่สามารถถูกทำลายได้ด้วยแรงเชิงกลในระหว่างกระบวนการผสม เมื่อโครงสร้างปฐมภูมิแต่ละก้อนมีแรงดึงดูดซึ่งกันและกันทำให้เกิดก้อนอนุภาคขนาดใหญ่เรียกว่าโครงสร้างสารตัวเติมทุติยภูมิ (secondary filler structure) ซึ่งโครงสร้างแบบนี้จะไม่แข็งแรงและสามารถถูกทำลายได้ด้วยแรงเชิงกล การเกาะกลุ่มกันเป็นโครงสร้างดังกล่าวส่งผลให้คาร์บอนแบล็กมีช่องว่างระหว่างอนุภาคเกิดขึ้น ซึ่งปริมาณของช่องว่างดังกล่าวจะเป็นตัวบ่งชี้ถึงระดับโครงสร้างของสารตัวเติม คาร์บอนแบล็กที่มีโครงสร้างยิ่งสูงจะมีปริมาณของช่องว่างภายในสูงขึ้น ดังนั้นแอกริเกตเหล่านี้จะมีความสามารถในการเกาะกลุ่มกันได้น้อยลง ด้วยเหตุนี้ คาร์บอนแบล็กที่มีโครงสร้างสูงเมื่อนำมาเติมลงไปในยางจะส่งผลให้ยางมีการนำไฟฟ้าสูงขึ้น เนื่องจากโครงสร้างสูงรูปร่างของการรวมกลุ่มของแอกริเกตยังไม่เป็นระเบียบมากขึ้น ช่วยเพิ่มช่องทางในการถ่ายเทอิเล็กตรอนได้มากขึ้น (ดังแสดงในรูปที่ 1.5) นอกจากนี้ทำให้มีปริมาณช่องว่างภายในมากขึ้น เมื่อเติมลงไปในยาง ยางส่วนหนึ่งจะเข้าไปอยู่ในช่องว่างเหล่านี้ แอกริเกตของเขม่าดำจะอยู่ใกล้กันมากขึ้น ส่งผลให้ยางในส่วนที่เป็นเมทริกซ์มีปริมาณลดลง การถ่ายเทอิเล็กตรอนก็สามารถเกิดได้ง่ายยิ่งขึ้น

3) การกระจายตัวของขนาดอนุภาค (particle size distribution)

การกระจายตัวของขนาดอนุภาคนั้นบ่งบอกถึงการอัดตัวกันของกลุ่มก้อนของสารตัวเติม เช่น การเติมคาร์บอนแบล็กที่มีการกระจายตัวของขนาดอนุภาคกว้างลงไปในยาง จะส่งผลให้ยางมีการนำไฟฟ้าสูงขึ้นจากการถ่ายเทอิเล็กตรอนสามารถถ่ายเทได้ง่ายยิ่งขึ้น เป็นเพราะว่าขนาดอนุภาคกว้างจะเกิดการอัดตัวกันได้ดีกว่า คาร์บอนแบล็กถ้าที่มีการกระจายตัวของขนาดอนุภาคแคบ จึงทำให้ระยะห่างระหว่างแต่ละกลุ่มก้อนของแอกริเกตหรือแอกลอมเมอเรตอยู่ในระดับต่ำลง



รูปที่ 1.4 คาร์บอนแบล็ก (ก) อนุภาคปฐุมภูมิ (ข) การรวบรวมอนุภาค (aggregate) (ค) กลุ่มก้อนอนุภาค (agglomerate) [9]



รูปที่ 1.5 โครงสร้างของเขม่าดำ (ก) แบบสูง (ข) แบบต่ำ [10]

4) ลักษณะทางพื้นผิว

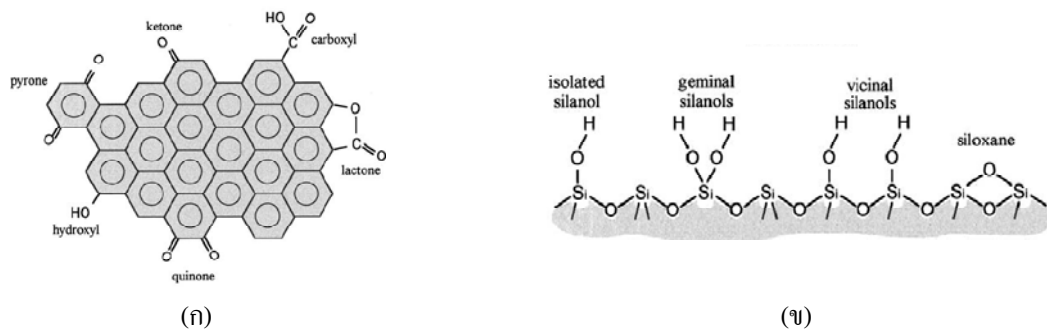
พื้นผิวของสารตัวเติมเป็นอีกอิทธิพลหนึ่งที่มีผลต่อค่าการนำไฟฟ้าของสารตัวเติม ทั้งพื้นผิวทางกายภาพ เช่น รูพรุน ความขรุขระบนพื้นผิว และพื้นผิวทางเคมี คาร์บอนแบล็กซึ่งพื้นผิวนั้นมีหมู่ฟังก์ชันเคมีมากมาย (ดังแสดงในรูปที่ 1.6) รวมถึงอนุมูลอิสระที่สามารถทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของยางได้ ซึ่งการมีหมู่ฟังก์ชันเคมีบนพื้นผิวในปริมาณมากอาจส่งผลให้การถ่ายเทอิเล็กตรอนระหว่างกลุ่มก้อนของอนุภาคเกิดได้ยากขึ้น เนื่องจากฟังก์ชันเคมีเหล่านี้จะเป็นตัวหน่วงอิเล็กตรอนทำให้ค่าการนำไฟฟ้าลดลง ทั้งนี้การที่หมู่ฟังก์ชันเคมีหรือองค์ประกอบที่ระเหยได้เหล่านี้มีในปริมาณมากมีส่วนในการหน่วงการถ่ายเทอิเล็กตรอนเช่นกัน ดังนั้น สารตัวเติมที่มีปริมาณสายที่ระเหยได้ได้ต่ำจัดว่าเป็นตัวนำไฟฟ้าได้ดีกว่าสารตัวเติมที่มีปริมาณสายที่ระเหยได้ได้สูง

5) ระดับการแตกตัวของสารตัวเติม

การแตกตัวของสารตัวเติมถ้าเกิดการแตกตัวที่ดี กลุ่มก้อนแอกกรีเกตก็จะอยู่ห่างกันมากขึ้นส่งผลให้การถ่ายเทอิเล็กตรอนเกิดขึ้นได้ยาก ด้วยเหตุดังกล่าว พบว่ายางที่มีระดับการแตกตัวของสารตัวเติมสูง แม้ว่าจะมีสมบัติเชิงกลที่ดี แต่ก็ทำให้ยางมีค่าการนำไฟฟ้าที่ต่ำกว่ายางที่มีระดับการแตกตัวของสารตัวเติมต่ำ

6) ปริมาณของสารตัวเติม

โดยทั่วไปแล้วการเติมสารตัวเติมช่วยเพิ่มค่าการนำไฟฟ้าลงไปในช่วงในปริมาณที่มากขึ้นย่อมส่งผลต่อค่าการนำไฟฟ้าของยางที่เพิ่มขึ้นอยู่แล้ว เช่น สารตัวเติมที่เป็นคาร์บอนแบล็ก โดยการเพิ่มปริมาณในช่วงแรก ๆ อาจส่งผลให้ค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างค่อยเป็นค่อยไปที่ละน้อย จนถึงจุดๆ หนึ่ง ที่การเพิ่มปริมาณของคาร์บอนแบล็กจะส่งผลต่อค่าการนำไฟฟ้าของยางสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว เรียกปริมาณของคาร์บอนแบล็ก ณ จุดนั้นว่า “Percolation threshold” ซึ่งจุดนี้ยังขึ้นกับชนิดของยางและความสามารถในการเข้าไปโอบล้อมพื้นผิวเขม่าดำของยาง แต่ไม่ได้ขึ้นกับโครงสร้างของคาร์บอนแบล็กแต่อย่างใด



รูปที่ 1.6 ลักษณะทางพื้นผิวของสารตัวเติม (ก) คาร์บอนแบล็ก (ข) ซิลิกา [11]

การเติมสารตัวเติมหรือสารเติมแต่งลงในยาง นอกจากจะส่งผลต่อการนำไฟฟ้าแล้วยังส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของยาง เช่น ความต้านแรงดึง ความต้านทานต่อการสึกหรอ ความแข็ง ความต้านแรงฉีก อันเนื่องมาจากอนุภาคของสารตัวเติมหรือสารเติมแต่งที่มีขนาดเล็กซึ่งจะไปแทรกตัวในช่องว่างของโครงสร้างยาง ทำให้สมบัติเชิงกลเปลี่ยนแปลงจากเดิม

1.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Azura, A. R. และคณะ [12] ศึกษาผลของการเติมคาร์บอนแบล็กในยางธรรมชาติต่อสมบัติเชิงกลและค่าการนำไฟฟ้า ในยางธรรมชาติ โดยปริมาณการเติมคาร์บอนแบล็กในช่วง 0 ถึง 50 phr (parts per hundred of rubber) และนำยางไปบ่มเร่งเป็นระยะเวลา 3 และ 6 วัน ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส พบว่ายางธรรมชาติที่มีการเติมคาร์บอนแบล็กในปริมาณที่สูงขึ้น จะค่าการนำไฟฟ้าสูงขึ้น แต่ค่าการนำไฟฟ้าสูงสุดและคงที่ที่ปริมาณคาร์บอนแบล็กเป็น 20 phr การบ่มเร่งยางเป็นระยะเวลา 6 วัน ส่งผลให้ค่าการนำไฟฟ้าจะสูงขึ้นเพียงเล็กน้อยแต่มีค่าความทนต่อแรงดึงลดลง เมื่อนำยางธรรมชาติมาวิเคราะห์โครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscopy: SEM) พบว่าการบ่มเร่งยาง 3 หรือ 6 วัน ยางจะเกิดรูจากการเคลื่อนที่ของคาร์บอนแบล็กที่เป็นผลมาจากความร้อนหรือการย่อยสลายของยาง ซึ่งทำให้สมบัติเชิงกลของยางที่เติมด้วยคาร์บอนแบล็กลดลง

Job, A. E. และคณะ [13] ศึกษาพอลิเมอร์ที่สามารถนำไฟฟ้าได้โดยการเติมคาร์บอนแบล็กลงในพอลิเมอร์การนำไฟฟ้าขององค์ประกอบพอลิเมอร์ขึ้นอยู่กับความหลากหลายของปัจจัยได้แก่ธรรมชาติของดินแบบพอลิเมอร์และชนิดขนาดโครงสร้างเรขาคณิต พื้นผิวและการสลายตัวของอนุภาคการทดสอบสภาพเช่นอุณหภูมิและความดันเป็นต้นการเตรียมองค์ประกอบของน้ำยางธรรมชาติและคาร์บอนแบล็กซึ่งมีขนาดอนุภาค 60-200 นาโนเมตรและมีขนาดพื้นผิว 16-24 ตารางเมตรต่อกรัมโดยใช้สารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ 25 มิลลิตรและคาร์บอนแบล็กใช้เวลาบ่ม 15 นาทีหลังจากนั้นเติมน้ำยางลงไปบ่มอีก 10 นาทีให้ความร้อน 65 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 6 ชั่วโมงแบ่งสัดส่วนของน้ำยางธรรมชาติต่อคาร์บอนแบล็กเป็น 95/5 90/10 85/15 80/20 และ 75/25 (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) พบว่าองค์ประกอบของยางที่มีสัดส่วนของคาร์บอนแบล็กมากสามารถนำไฟฟ้าได้ดีว่าองค์ประกอบของยางที่มีสัดส่วนของคาร์บอนแบล็กน้อย

Oliveira, F. A. และคณะ [14] ศึกษาผลของปริมาณคาร์บอนแบล็กในยางธรรมชาติต่อการนำไฟฟ้า และสมบัติเชิงกลของยาง เพื่อพัฒนาเป็นเครื่องอุปกรณ์ตรวจวัดความดัน โดยอาศัยหลักการแปลงสมบัติเชิงกลของยางต่อค่าการนำไฟฟ้า ตัวแปรสำคัญที่ศึกษาคือ ปริมาณคาร์บอนแบล็ก และความดันพบว่าค่าการนำไฟฟ้าแปรผันตรงกับปริมาณคาร์บอนแบล็กที่เติมลงไปยาง แต่เมื่อนำตัวอย่างที่มีปริมาณคาร์บอนแบล็กร้อยละ 5, 10, 15, 20 และ 25 ในยางธรรมชาติมาวัดค่าการนำไฟฟ้าที่ความดันตั้งแต่ 0 ถึง 2.5 เมกะปาสกาล พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับค่าการนำไฟฟ้าแปรผันตรง

ต่อกัน เป็นผลมาจากความดันจะส่งผลให้ยางที่มีการเติมด้วยคาร์บอนแบล็กมีโครงข่ายการนำไฟฟ้าอยู่ใกล้กันมากขึ้นเกิด การเชื่อมต่อเป็นเส้นทางให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ได้มากขึ้น และที่ปริมาณคาร์บอนแบล็กร้อยละ 20 ความสัมพันธ์ระหว่าง ความดันกับการนำไฟฟ้าแปรผันกันเป็นเส้นตรง ซึ่งเหมาะแก่การนำมาใช้เป็นเครื่องอุปกรณ์ตรวจวัดความดันมากที่สุด

Sau,K. P. และคณะ [15] ศึกษาผลของการใส่คาร์บอนไฟเบอร์(carbon fibre) ที่มีผลต่อการนำไฟฟ้าในยางสาม ประเภทนี้ ยางไนไตรล์ (nitrile rubber: NBR)ยางเอทิลีน-โพรพิรีนไดอีน(ethylene-propylene-diene rubber: EPDM) และ ยางผสมระหว่าง NBR และ EPDM อย่างละ 50%ตัวแปรสำคัญที่ใช้ศึกษาคือ ปริมาณคาร์บอนไฟเบอร์ที่ใส่ลงไปยางแต่ละ ชนิด และอุณหภูมิเมื่อใส่คาร์บอนไฟเบอร์ในยางสามชนิดโดยความยาวของคาร์บอนไฟเบอร์มีค่าประมาณ $10-20 \times 10^2$ มิลลิเมตรพบว่ายางไนไตรล์มีค่าความต้านทานไฟฟ้าเชิงปริมาตรต่ำที่สุด รองลงมาคือยางผสม NBR/EPDM (50/50) และ ยาง EPDM อีกทั้งยังต่ำกว่าในกรณีที่ยางทั้งสามชนิดมิได้ใส่คาร์บอนไฟเบอร์ เพราะยางไนไตรล์มีความเป็นขั้วจึงสามารถ นำไฟฟ้าได้มากกว่ายาง EPDM ซึ่งมีความเป็นฉนวนทางไฟฟ้า และเมื่อใส่คาร์บอนไฟเบอร์เข้าไปความต้านทานจะลดลง ตามปริมาณคาร์บอนไฟเบอร์ที่ใส่ กล่าวคือคาร์บอนไฟเบอร์ช่วยให้ยางนำไฟฟ้าได้มากขึ้น และค่าความต้านทานของยาง ทั้งสามชนิดจะเข้าสู่ค่าเดียวกันที่ร้อยละของคาร์บอนไฟเบอร์เดียวกัน และที่อุณหภูมิสูงขึ้น ส่งผลให้มีค่าความต้านทาน ไฟฟ้าเชิงปริมาตรของยางทั้งสามชนิดสูงขึ้นเช่นกัน นั่นหมายความว่าค่าการนำไฟฟ้าของยางทั้งสามชนิดแปรผกผันกับ อุณหภูมิ

Yigit,S. และคณะ [16] เตรียมพอลิเมอร์นำไฟฟ้าโดยการผสมระหว่างพอลิไทโอพรีน (polythiophene) ซึ่งเป็นพอลิเมอร์นำไฟฟ้ากับยางสังเคราะห์และยางธรรมชาติซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่เป็นฉนวนทางไฟฟ้าโดยกระบวนการไฟฟ้าเคมีพอลิเมอไรเซชัน(electrochemical polymerization) ของไทโอพรีนบนยางสังเคราะห์หรือยางธรรมชาติที่ฉาบอยู่บนขั้วแพลตตินัมตัวแปรสำคัญที่ศึกษา คือ ปริมาณยางทั้งสองชนิดที่มีผลต่อการนำไฟฟ้าของวัสดุคอมพอสิต พบว่าการผสมยางสังเคราะห์กับพอลิเมอร์ไทโอพรีนจะให้ค่าการนำไฟฟ้าที่ดีกว่าการผสมกับยางธรรมชาติ และเมื่อเพิ่มปริมาณยางธรรมชาติ/ยางสังเคราะห์ จะส่งผลให้ค่าการนำไฟฟ้าลดลง

Li, Z.และคณะ [17] ศึกษาผลของคาร์บอนแบล็กต่อสมบัติการนำไฟฟ้าที่เติมลงในยางเอทิลีน-โพรพิรีนไดอีน (ethylene-propylene-diene rubber: EPDM) โดยคาร์บอนแบล็กชนิดที่ใช้ในการทดลองแบ่งได้เป็น semi-reinforcement furnace black (SRF), fast extruding furnace black (FEF), high abrasion furnace black (HAF), conductive carbon black (CCB) และ spraying carbon black (SCB) ที่ปริมาณ 30 กรัม พบว่าการผสม CCB ในยาง EPDM ในปริมาณ 30 กรัม ให้การนำไฟฟ้าที่สูงที่สุด และมีค่า dielectric strength ต่ำที่สุด ซึ่งมีสมบัติเหมาะสมในการนำไปใช้เป็นพอลิเมอร์นำไฟฟ้าได้

บทที่ 2

สารเคมี อุปกรณ์ และวิธีการทดสอบ

2.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

2.1.1 ยางธรรมชาติ (natural rubber, NR) เกรด STR-5L	บริษัท พี ไอ อินดัสทรี จำกัด
2.1.2 ผงกราไฟต์ (graphite)	บริษัท มหาเมฆ จำกัด
2.1.3 คาร์บอนแบล็กPRINTEX® XE 2B (carbon black PRINTEX® XE 2B)	บริษัทEvonikจำกัด
2.1.4 คาร์บอนแบล็ก เกรด N339 (carbon black N339)	บริษัท ไทยโดไกคาร์บอนโปรดักท์ จำกัด
2.1.5 น้ำมันเนฟเทนิค (naphthenic oil)	บริษัท พี ไอ อินดัสทรี จำกัด
2.1.6 แอ็กทีฟซิงค์ออกไซด์ (active zinc oxide, ZnO)	บริษัท อูทิสเอ็นเตอร์ไพรส์ จำกัด
2.1.7 กรดสเตียริก (stearic acid)	บริษัท พี ไอ อินดัสทรี จำกัด
2.1.8 กำมะถัน (sulfur)	บริษัท สยามเคมี จำกัด
2.1.9 ไซโคลเฮกซิลเบนโซไทโอะซัลฟิไนด์ (n-cyclohexyl-2-benzothiazyl sulfenamide, CBS)	บริษัท พี ไอ อินดัสทรี จำกัด

2.2 วิธีการดำเนินงานวิจัย

2.2.1 ศึกษาสมบัติเบื้องต้นของสารตัวเติม(ผงกราไฟต์คาร์บอนแบล็ก เกรดนำไฟฟ้า (Printex XE 2B) และเกรด N339) โดยเทคนิคต่างๆ

2.2.1.1 การวิเคราะห์แบบประมาณโดยวิธี Proximate analysis

การวิเคราะห์โดยวิธี Proximate analysis ตามมาตรฐาน ASTM D3172 ประกอบด้วยการวิเคราะห์ความชื้น สายที่ระเหยได้ และคาร์บอนคงตัว โดยตัวอย่างต้องมีขนาดอนุภาคน้อยกว่า 75 ไมครอน

2.2.1.1.1 ความชื้น (moisture)

เตรียมตัวอย่างที่เป็นผงละเอียดชั่งน้ำหนัก 1 กรัม (เครื่องชั่งมีความละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง) ใส่ในภาชนะแล้วนำไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ $110 \pm 5^\circ\text{C}$ เป็นเวลาอย่างน้อย 2 ชั่วโมง (หรือจนกระทั่งน้ำหนักสุดท้ายคงที่) บันทึกน้ำหนักก่อนและหลังอบเพื่อคำนวณความชื้นที่อยู่บนผิวหน้าหรือภายในโครงสร้างของสารตัวเติมดังสมการที่ (2.1) (การคำนวณดูที่ภาคผนวก ก)

$$\text{ร้อยละความชื้น} = \frac{\text{น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ} - \text{น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ}}{\text{น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ}} \times 100 \quad (2.1)$$

2.2.1.1.2 สายที่ระเหยได้ (volatile matter)

เตรียมตัวอย่างที่เป็นผงละเอียดชั่งน้ำหนัก 1 กรัม ใส่ใน crucible ปิดฝาให้สนิทป้องกันการเกิดการเผาไหม้ระหว่างสารตัวเติมกับอากาศ แล้วนำไปวางในเตาเผา (furnace) แบบท่อแนวตั้งที่อุณหภูมิ $950 \pm 25^\circ\text{C}$ โดยวาง crucible อยู่บริเวณส่วนบนของท่อเป็นเวลา 2 นาที แล้วจึงเลื่อนลงไปตรงกลางท่อเป็นเวลาอีก 5 นาที รวมเป็นเวลาทั้งหมด 7 นาที บันทึกน้ำหนักก่อนและหลังอบเพื่อคำนวณสายที่ระเหยได้ของสารตัวเติมซึ่งต้องหักออกด้วยค่าความชื้นข้างต้น ดังสมการที่ (2.2)(การคำนวณดูที่ภาคผนวก ก)

$$\text{ร้อยละสายที่ระเหยได้} = \left[\frac{\text{น้ำหนักตัวอย่างก่อนเผา} - \text{น้ำหนักตัวอย่างหลังเผา}}{\text{น้ำหนักตัวอย่างก่อนเผา}} \times 100 \right] - \text{ร้อยละความชื้น} \quad (2.2)$$

2.2.1.1.3 เถ้า (ash)

เตรียมตัวอย่างที่เป็นผงละเอียดซึ่งน้ำหนัก 1 กรัม ใส่ใน crucible เปิดฝาเพื่อให้เกิดการเผาไหม้ระหว่างสารตัวเดิมกับอากาศร้อน แล้วนำไปวางในเตาเผาที่อุณหภูมิ $950 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 3 ชั่วโมงหรือจนกระทั่งเป็นเถ้า บันทึกน้ำหนักก่อนและหลังเผาเพื่อคำนวณเถ้าในของสารตัวเดิมดังสมการที่ (2.3) (การคำนวณดูที่ภาคผนวก ก)

$$\text{ร้อยละเถ้า} = \frac{\text{น้ำหนักตัวอย่างหลังเผา}}{\text{น้ำหนักตัวอย่างก่อนเผา}} \times 100 \quad (2.3)$$

2.2.1.1.4 คาร์บอนคงตัว (fixed carbon)

เป็นสารประกอบของคาร์บอน (carbonaceous Residue) ที่ไม่รวมเถ้าที่เหลือจากสารอินทรีย์หลังจากที่สายที่ระเหยได้ถูกไล่ออกไปแล้วซึ่งคำนวณได้ดังสมการที่ (2.4) (การคำนวณดูที่ภาคผนวก ก)

$$\text{ร้อยละคาร์บอนคงตัว} = 100 - (\text{ร้อยละความชื้น} + \text{ร้อยละเถ้า} + \text{ร้อยละสายที่ระเหยได้}) \quad (2.4)$$

2.2.1.2 การวิเคราะห์หาปริมาณ C, H, N ด้วยเครื่อง Elemental analyzer

เตรียมตัวอย่างที่เป็นผงละเอียดแล้วนำไปอบไล่ความชื้นออกจากตัวอย่างที่อุณหภูมิ $120 \text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง นำมาทำการวิเคราะห์หาองค์ประกอบของสารตัวเดิมด้วยเครื่อง Elemental analyzer รุ่น Perkin Elmer 2400 series II ประเทศสหรัฐอเมริกา ซึ่งสารตัวอย่าง 0.2 กรัม ใส่เข้าไปใน Sample holder สารตัวอย่างจะถูกเผาไหม้ภายใต้ ออกซิเจนบริสุทธิ์ 99.9% และถูกเปลี่ยนไปเป็นก๊าซชนิดต่างๆ จากนั้นก๊าซต่างๆ จะถูกส่งไปยังเครื่องตรวจจับ (detector) เพื่อทำการตรวจวัดปริมาณธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจนต่อไป

2.2.1.3 การวิเคราะห์พื้นที่ผิวโดย Brunauer-Emmett-Teller (BET) specific surface area

การวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะของสารตัวเดิม โดยอัดแก๊สไนโตรเจนให้เป็นของเหลวเกาะบนพื้นผิวของสารตัวอย่าง แล้วคำนวณโดยใช้วิธีของ Brunauer, Emmett and Teller หรือ BET ดังสมการที่ (2.5)

$$\frac{P}{V(P_0 - P)} = \frac{1}{V_m C} + \left[\frac{C-1}{V_m C} \right] \cdot \left(\frac{P}{P_0} \right) \quad (2.5)$$

เมื่อ	P	คือ ความดันของแก๊สที่เป็นตัวถูกดูดซับ
	P_0	คือ ความดันอิ่มตัวของแก๊สที่เป็นตัวถูกดูดซับ
	V	คือ ปริมาตรของแก๊สที่เป็นตัวถูกดูดซับทั้งหมดที่ความดัน P
	V_m	คือ ปริมาตรของแก๊สไนโตรเจนที่ใช้ในการหาค่าพื้นที่ผิวของวัสดุด้วยความหนา 1 ชั้น โมเลกุลเต็มพอดี
	C	คือ ค่าคงที่ที่ขึ้นอยู่กับพลังงานในการดูดซับ

จากสมการของ BET สามารถคำนวณหาพื้นที่ผิวจำเพาะของวัสดุได้โดยการนำค่าปริมาตรของแก๊สไนโตรเจนที่ใช้ในการคลุมผิวของสาร (V_m) ไปคำนวณหาจำนวนโมเลกุลของแก๊สไนโตรเจนที่ถูกดูดซับในสภาพ 1 ชั้นโมเลกุลแล้วนำไปคำนวณหาพื้นที่ผิวจำเพาะโดยใช้สมการ (2.6)

$$S_{sp} = \frac{N_A \cdot a_{max} \cdot S_0}{W} \quad (2.6)$$

เมื่อ	S_{sp}	คือ พื้นที่ผิวจำเพาะของวัสดุ
	N_A	คือ เลขอาโวกาโดร (6.02×10^{23})
	a_{max}	คือ จำนวนโมเลกุลของแก๊สที่ถูกดูดซับใน 1 ชั้นโมเลกุลหรือเท่ากับ $\frac{V_m}{22414}$
	S_0	คือ พื้นที่หน้าตัดของโมเลกุลของแก๊สที่ถูกดูดซับ (16.2×10^{-20})
	W	คือ น้ำหนักของวัสดุ

2.2.1.4 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเครื่อง X-Ray diffractometer (XRD)

การวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-Ray diffractometer ของ Bruker ประเทศสหรัฐอเมริกา ใช้หลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction) โดยใช้รังสี CuK_α ทำงานที่ 40 กิโลโวลต์และ 40 มิลลิแอมแปร์ แสดงค่ามุมการแทรกสอด (2θ) ตั้งแต่ 1° ถึง 50° และมีอัตราเร็วในการอ่านค่าเป็น 0.1 วินาทีต่อขั้นตอน โดยตัวอย่างที่ใช้มีลักษณะเป็นผงละเอียดที่บดไล่ความชื้นออกจากตัวอย่างที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

2.2.1.5 การวิเคราะห์โดยเทคนิค X-Ray fluorescence (XRF)

การวิเคราะห์หาองค์ประกอบของสารตัวเดิม โดยเทคนิค X-Ray fluorescence (XRF) ด้วยเครื่องของบริษัท Philips รุ่น PW 2400 ประเทศเนเธอร์แลนด์ โดยตัวอย่างที่ใช้วิเคราะห์ซึ่งเป็นผงละเอียดที่บดไล่ความชื้นออกจากตัวอย่างที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

2.2.1.6 การวิเคราะห์เชิงความร้อนโดยเทคนิค Thermal gravimetric analysis (TGA)

การวิเคราะห์อุณหภูมิการสลายตัวและน้ำหนักที่สูญหาย (weight loss) ของสารตัวเดิม โดยเครื่อง Perkin Elmer รุ่น Pyris Diamond ประเทศสหรัฐอเมริกา นำตัวอย่างที่บดเป็นผงละเอียดหลังจากไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมงไปชั่งน้ำหนักประมาณ 10 ± 0.5 มิลลิกรัม ใส่ลงในถาดแพลตตินัมให้ความร้อนอย่างต่อเนื่องจากอุณหภูมิห้องจนถึง $1,000^\circ\text{C}$ ที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 10°C ต่อนาที ภายใต้บรรยากาศอากาศ อัตราการไหลของอากาศ 50 มิลลิลิตรต่อนาที

2.2.2 การเตรียมคอมพอสิตยางธรรมชาติ

ตารางที่ 2.1 แสดงสูตรในการเตรียมคอมพาวด์ยางธรรมชาติโดยใช้เครื่องบดผสมแบบสองลูกกลิ้ง (two-roll mill) ของบริษัท LabTech Engineering (Thailand) ขั้นตอนการผสมแสดงดังตารางที่ 2.2 นำคอมพาวด์ยางที่เตรียมได้ไปทดสอบด้วยเครื่อง moving die rheometer (MDR) ยี่ห้อ TECHPRO รุ่น rheotech MD+ ประเทศสหรัฐอเมริกา ที่อุณหภูมิ 150°C เพื่อหาเวลาที่เหมาะสมในการคงรูปร่าง หลังจากนั้นนำคอมพาวด์ยางที่ได้ไปขึ้นรูปโดยใช้เครื่อง compression molding machine ของประเทศไทย ที่ความดัน 150 กิโลพาสคัล อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลา 10 นาที หลังจากนั้นนำยางที่ขึ้นรูปเรียบร้อยแล้วไปทดสอบสมบัติการนำไฟฟ้า สมบัติเชิงกล ผลของการบ่มเร่งด้วยความร้อนและลักษณะทางสัณฐานวิทยาต่อไป

การกำหนดชื่อชิ้นงานตัวอย่าง (sample code) สำหรับงานวิจัยนี้ แสดงดังต่อไปนี้ ตัวเลข 0, 5, 10, 15, 20, 30 และ 40 หมายถึงปริมาณสารตัวเดิมที่ผสมกับยาง ซึ่งตัวเลขเหล่านี้ตามหลังตัวอักษรหลักดังต่อไปนี้ NR

หมายถึง ยางธรรมชาติ CB หมายถึง คาร์บอนแบล็กชนิด PRINTEX® XE 2B, NCB หมายถึง คาร์บอนแบล็กเกรด N339 และ G หมายถึง ผงกราฟไฟต์ที่เหลือจากอุตสาหกรรมหลอมโลหะ โดยสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการวัลคาไนซ์ในหน่วยของส่วนในร้อยส่วนของยาง (parts by weight per hundred parts of rubber: phr)

2.2.3 การทดสอบสมบัติต่าง ๆ ของคอมปาวด์ยางธรรมชาติและคอมพอลิเตียกธรรมชาติ

2.2.3.1 การทดสอบสมบัติการคงรูป (cure characteristic) ของคอมปาวด์ยางธรรมชาติ

สมบัติการคงรูปของคอมปาวด์ยางถูกทดสอบโดยเครื่อง moving die rheometer (MDR) ยี่ห้อ TECHPRO รุ่น rheotech MD+ ประเทศสหรัฐอเมริกาที่อุณหภูมิ 150°C โดยหัวตาย (die) ถ่างจะบิดกลับไปกลับมาทำมุม 0.5 องศา ด้วยความถี่ 1.7 เฮิร์ต หรือ 100 รอบต่อนาที

2.2.3.2 การทดสอบสมบัติเชิงกล (mechanical properties) ของวัสดุคอมพอลิเตียกธรรมชาติ

2.2.3.2.1 การทดสอบความต้านแรงดึง (tensile testing)

ตัดชิ้นงานหลังผ่านกระบวนการวัลคาไนซ์ที่อุณหภูมิ 150°C ซึ่งต้องการเป็นรูปดัมเบล (die C) ตามมาตรฐาน ASTM D412 จำนวน 5 ชิ้น วัดระยะห่างเพื่อกำหนดตำแหน่งวัดความหนาจำนวน 3 ตำแหน่ง โดยใช้ไมโครมิเตอร์ที่มีความละเอียดของทศนิยม 3 ตำแหน่ง บันทึกค่าที่วัดได้โดยการหาค่าเฉลี่ย นำชิ้นงานที่เตรียมได้ไปทดสอบด้วยเครื่อง universal testing machine รุ่น INSTRON 3344 ประเทศสหรัฐอเมริกาที่อุณหภูมิห้องประมาณ 27°C ความเร็วในการทดสอบ 500 มิลลิเมตร/นาที ทำการทดสอบทั้งหมด 5 ครั้ง แล้วนำค่าที่ได้จากการทดลองมาหาค่าเฉลี่ย

2.2.3.2.2 การทดสอบความแข็ง (hardness)

ตัดชิ้นงานหลังผ่านกระบวนการวัลคาไนซ์ที่อุณหภูมิ 150°C ซึ่งต้องการวัดให้มีความหนา 6 มิลลิเมตร วางชิ้นทดสอบบนฐานสำหรับวางตัวอย่างของเครื่อง durometer type A ตามมาตรฐาน ASTM D2240 จากนั้นปล่อยหัว durometer ลงบนชิ้นงาน จับเวลา 1 วินาที อ่านค่าที่ได้และบันทึกผลทำการเปลี่ยนจุดที่ใช้วัดอีก 5 จุด นำค่าความแข็งที่วัดได้มาหาค่าเฉลี่ย

2.2.3.2.3 การทดสอบความต้านแรงฉีก (tear resistance)

เตรียมชิ้นงานเพื่อทดสอบความต้านแรงฉีก ตามมาตรฐาน ASTM D624 โดยตัดชิ้นงานแบบ die B มีความหนาประมาณ 2 มิลลิเมตร จำนวน 5 ชิ้น ใช้เครื่อง Tear Resistance Tester รุ่น INSTRON 3344 ประเทศสหรัฐอเมริกา ดึงด้วยความเร็วหัวจับ 500 มิลลิเมตร/นาที บันทึกค่าแรงที่ทำให้ชิ้นงานฉีกขาด เพื่อนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาค่าความต้านแรงฉีก (tear strength) ดังสมการ (2.7)

$$\text{ค่าความต้านทานแรงฉีก (N/mm)} = \frac{\text{แรงดึงจุดขาด (นิวตัน)}}{\text{ความหนาเริ่มต้นของชิ้นงาน (มิลลิเมตร)}} \quad (2.7)$$

2.2.3.3 การทดสอบสมบัติการบ่มเร่งด้วยความร้อน (thermal aging) ของคอมพอลิเตียก

นำแผ่นยางตัวอย่างไปอบเร่งด้วยเครื่อง Hot air oven ที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 22 ± 2 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำแผ่นยางหลังบ่มเร่งด้วยความร้อนมาทดสอบสมบัติเชิงกลตามที่กล่าวไปข้างต้น

ตารางที่ 2.1 สูตรการผสมคอมปาวด์ยาง(ในหน่วย phr¹) [18]

Sample code	NR-0	G-5	G-10	G-15	G-20	G-30	G-40	CB-5	CB-10	CB-15	CB-20	CB-25	NCB-5	NCB-10	NCB-15	NCB-20	NCB-30	NCB-40
ยาง STR 5L	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Filler ²	-	5	10	15	20	30	40	5	10	15	20	30	5	10	15	20	30	40
Naphthenic oil	-	0.5	1	1.5	2	3	4	0.5	1	1.5	2	3	0.5	1	1.5	2	3	4
Active zinc oxide	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Stearic acid	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
CBS ³	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Sulfur	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5

¹parts by weight per hundred parts of rubber, ²ผงกรรไฟต์ (G) คาร์บอนแบล็กเกรดนำไฟฟ้า (CB) และคาร์บอนแบล็ก เกรดN339 (NCB), ³*n*-cyclohexyl-2-benzothiazyl sulfenamide

14

ตารางที่ 2.2 ขั้นตอนการบดผสมยาง

ขั้นตอน	ระยะเวลาที่ใช้(นาที)	ระยะเวลารวม(นาที)
1. ปรับระยะห่างของลูกกลิ้ง 1.4 มิลลิเมตร และปรับอุณหภูมิของลูกกลิ้งมิให้เกิน 50 ± 5 องศาเซลเซียส	0	0
2. ใส่ยางธรรมชาติ และให้มันติดกับลูกกลิ้งหน้า และทำการตัดซ้าย ตัดขวา	2	2
3. ใส่ซิงค์ออกไซด์	2	4
4. ใส่กรดสเตริก	2	6
5. ใส่สารตัวเติมในปริมาณต่างๆตามสูตรการผสมยาง พร้อมทั้งใส่น้ำมันเนฟทานิกช่วยในการบดผสมยาง	6 ¹	12
6. ใส่สารตัวเร่งปฏิกิริยาCBS	2	14
7. ใส่กำมะถัน	2	18

¹ระยะเวลาการผสมสารตัวเติมปรับเปลี่ยนได้ตามปริมาณการเติมสารตัวเติม

2.2.3.4 ศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของสารตัวเติมและคอมพอสิตยางธรรมชาติผสมกับสารตัวเติมหลังผ่านกระบวนการจัดเฟอร์ไรต์ในเซชันด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM)

นำสารตัวเติมที่ใช้ทั้ง 3 ชนิด (คาร์บอนแบล็กเกรดนำไฟฟ้า คาร์บอนแบล็กชนิด N339 และผงกราไฟต์) ไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ตัดลงบนแผ่นโลหะรูปทรงกระบอกที่ติดเทปกาวสองหน้า แล้วนำไปเข้าทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-6400 ของประเทศญี่ปุ่น ภาวะการทำงานที่ความยาวคลื่น 10 ไมโครเมตรความต่างศักย์ 15 กิโลโวลต์และทำการบันทึกภาพเพื่อศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของสารตัวเติมแต่ละชนิด

ในกรณีของวัสดุคอมพอสิต นำชิ้นงานที่จะทดสอบไปพักในไนโตรเจนเหลวที่อุณหภูมิ -196 °C หลังจากทำการแช่เป็นเวลา 1 นาที นำชิ้นงานที่ได้ไปทำการส่องวิเคราะห์โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ดังภาวะข้างต้น

2.2.3.5 การทดสอบสมบัติการนำไฟฟ้า (electrical conductivity) ของวัสดุคอมพอสิตยางธรรมชาติ

เตรียมแผ่นคอมพอสิตยางธรรมชาติผสมร่วมสารตัวเติมเป็นวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร ความหนาประมาณ 2 มิลลิเมตร นำแผ่นตัวอย่างมาทดสอบด้วยการป้อนความต่างศักย์ 0 - 600 โวลต์ แล้วทำการอ่านค่ากระแสจากนั้นนำข้อมูลไปสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสในแนวแกนนอนและค่าความต่างศักย์ในแนวแกนตั้งเพื่อหาความชันจะได้ความต้านทาน แล้วจึงนำค่าความต้านทานดังกล่าวไปคำนวณดังสมการ (2.8)(การคำนวณดูที่ภาคผนวก ข) เพื่อหาค่าการนำไฟฟ้าเชิงปริมาตร

$$\text{การนำไฟฟ้าเชิงปริมาตร (S/cm)} = \frac{\text{ความหนา(เซนติเมตร)}}{\text{ความต้านทาน(โอห์ม)} \times \text{พื้นที่หน้าตัด (ตารางเซนติเมตร)}} \quad (2.8)$$

บทที่ 3

ผลการวิจัย

3.1 ผลการวิเคราะห์สมบัติของผงกราฟไฟต์คาร์บอนแบล็กเกรดการนำไฟฟ้า(Printex XE 2B) และคาร์บอนแบล็กเกรด N339

3.1.1 ผลการวิเคราะห์หาค่าประกอบโดยวิธี Proximate analysis และ CHN analysis

นำผงกราฟไฟต์คาร์บอนแบล็กเกรดการนำไฟฟ้า (Printex XE 2B) และคาร์บอนแบล็กเกรด N339 มาวิเคราะห์หาค่าประกอบของคาร์บอนคงตัว (fixed carbon) สารที่ระเหยได้ (volatile matter) เถ้า (ash) และความชื้น (moisture) โดยวิธี Proximate analysis และวิเคราะห์หาค่าประกอบของธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจน โดยวิธี CHN analysis ผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 3.1

3.1.2 การวิเคราะห์พื้นที่ผิวโดย Brunauer-Emmett-Teller (BET) specific surface area

ตารางที่ 3.1 แสดงผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะโดยวิธี BET ของผงกราฟไฟต์คาร์บอนแบล็กเกรดการนำไฟฟ้า (Printex XE 2B) และคาร์บอนแบล็กเกรด N339 ซึ่งเป็นพื้นที่ผิวทั้งหมดของอนุภาคสารตัวเต็ม

3.1.3 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกโดยเทคนิค X-ray diffraction (XRD)

รูปที่ 3.1 แสดงโครงสร้างผลึกของผงกราฟไฟต์คาร์บอนแบล็กเกรด Printex XE 2B และคาร์บอนแบล็กเกรด N339 ที่วิเคราะห์โดยเทคนิค X-ray diffraction

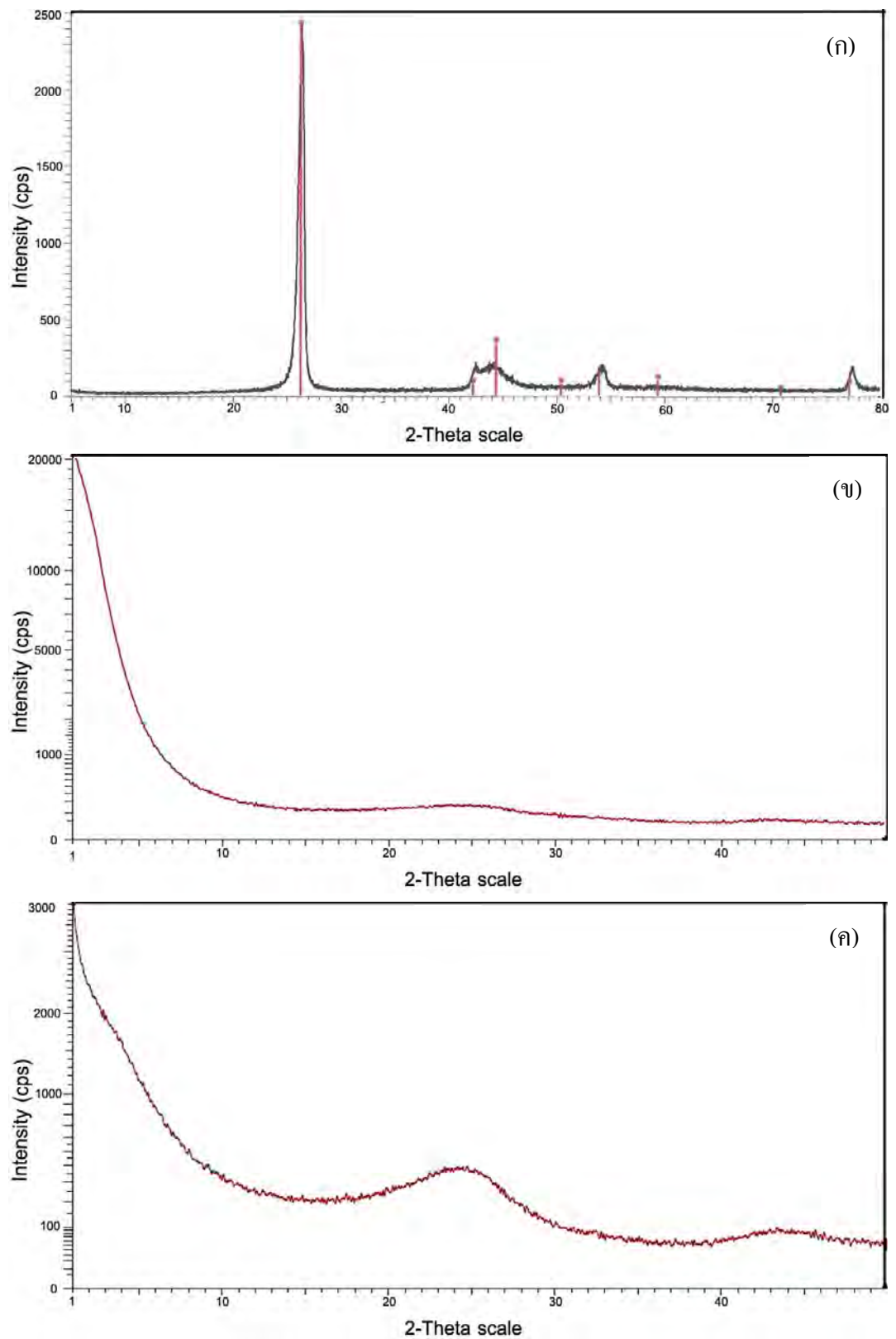
3.1.4 การวิเคราะห์หาค่าประกอบโดยเทคนิค X-ray fluorescence (XRF)

ผลการวิเคราะห์หาค่าประกอบของธาตุต่าง ๆ โดยเทคนิค X-ray fluorescence แสดงดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.1 ผลการวิเคราะห์หาค่าประกอบและพื้นที่ผิวของสารตัวเต็มทั้ง 3 ชนิด

Analysis	G ¹	CB ²	NCB ³
Proximate analysis			
Fixed Carbon (% wt.)	97.40	96.47	96.80
Volatile matter (% wt.)	1.12	2.39	1.47
Ash (% wt.)	1.32	0.57	0.90
Moisture (% wt.)	0.16	0.57	0.83
CHN analysis			
Carbon (% wt.)	99.02	99.32	99.67
Hydrogen (% wt.)	0.19	0.25	0.27
Nitrogen (% wt.)	0.43	0.42	0.04
Surface area			
BET ⁴ (m ² /g)	10.9	1130.4	147.7

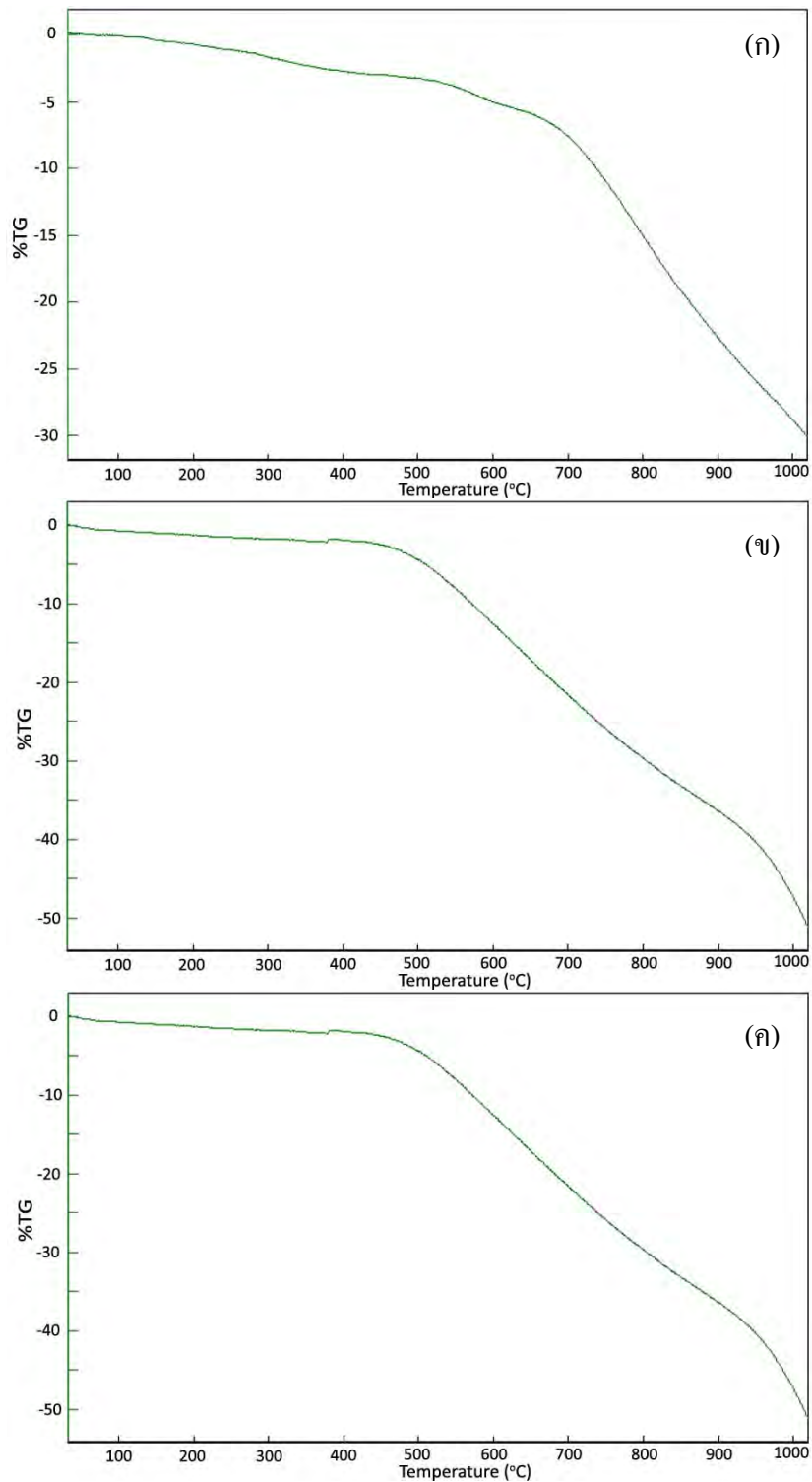
¹ ผงกราฟไฟต์, ² คาร์บอนแบล็กเกรดการนำไฟฟ้า (Printex XE 2B), ³ คาร์บอนแบล็กเกรด N339, ⁴ BET (Brunauer-Emmett-Teller)



รูปที่ 3.1 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยวิธี X-ray diffraction ของ (ก) ผงกราไฟต์ (ข) คาร์บอนแบล็กเกรดการนำไฟฟ้า (Printex XE 2B) (ค) คาร์บอนแบล็กเกรด N339

3.1.5 ผลการวิเคราะห์หาลักษณะประกอบโดยเทคนิค Thermogravimetric analysis (TGA)

รูปที่ 3.2 แสดงการสลายตัวทางความร้อนของสารตัวเต็มทั้ง 3 ชนิด โดยใช้เทคนิค Thermogravimetric analysis ที่อุณหภูมิ 40-1000 °C ด้วยอัตราการให้ความร้อน 10 °C/min ภายใต้บรรยากาศอากาศ



รูปที่ 3.2 ผลการวิเคราะห์การสลายตัวด้วยความร้อนโดยเทคนิค thermogravimetric analysis ของ (ก) ผงกราฟไฟต์(ข) คาร์บอนแบล็กเกรดการนำไฟฟ้า (Printex XE 2B) (ค) คาร์บอนแบล็กเกรด N339

3.1.6 ผลการวิเคราะห์หาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของผงกราฟไฟต์และคาร์บอนแบล็ก โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope)

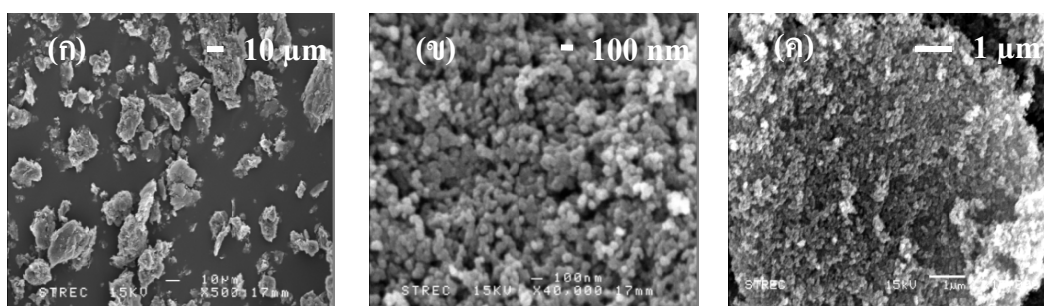
ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของผงกราฟไฟต์ ผงเขม่าเกรดการนำไฟฟ้า (Printex XE 2B) และผงเขม่าเกรด N339 โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงดังรูปที่ 3.3

3.2 สมบัติการคงรูปของคอมปาวด์อย่างธรรมชาติผสมกับผงกราฟไฟต์คาร์บอนแบล็กเกรดการนำไฟฟ้า(Printex XE 2B) และคาร์บอนแบล็กเกรด N339

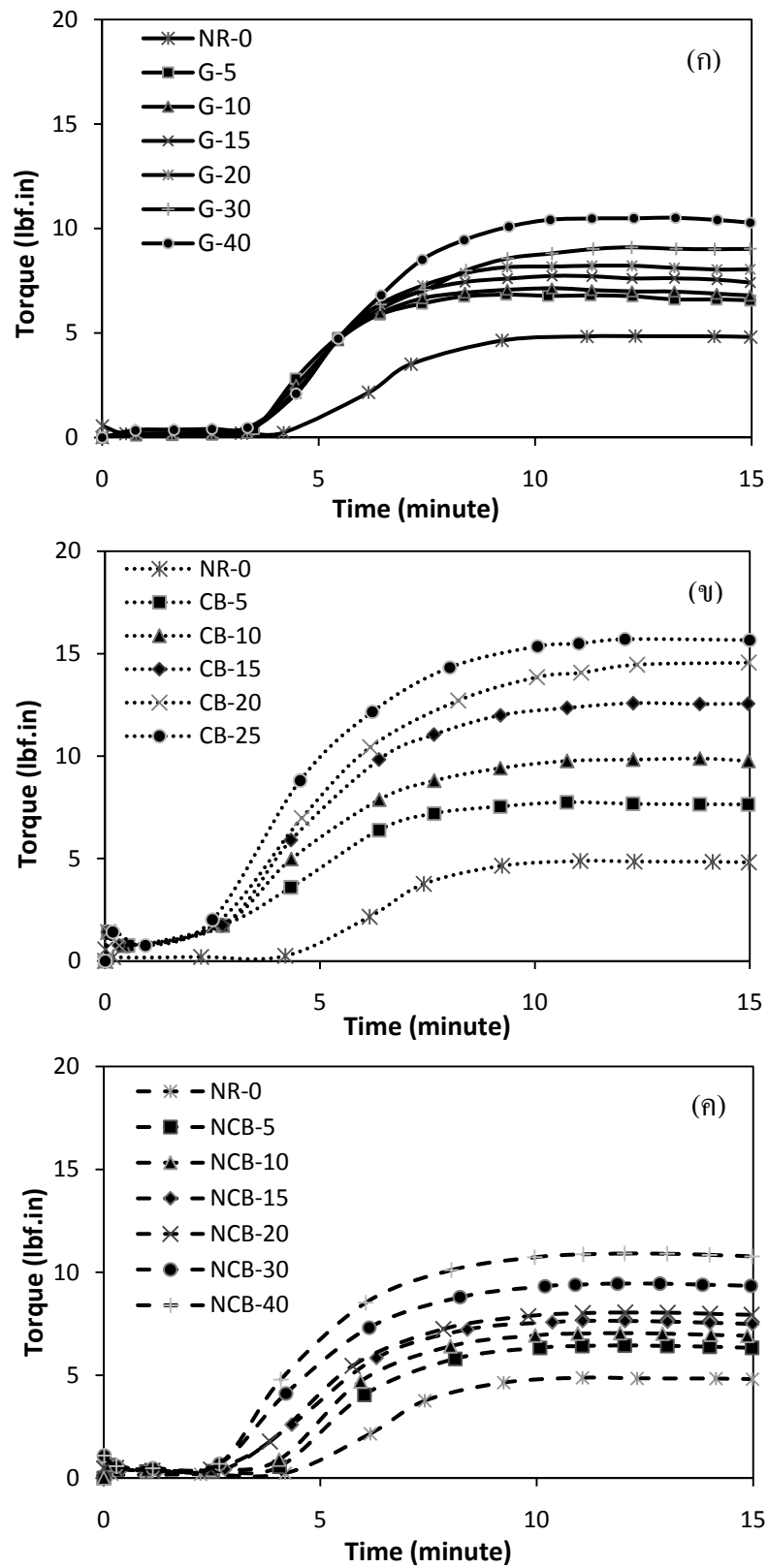
ตารางที่ 3.3 แสดงสมบัติการคงรูปของยางคอมปาวด์อย่างธรรมชาติผสมกับผงกราฟไฟต์คาร์บอนแบล็กเกรดการนำไฟฟ้า (Printex XE 2B) และคาร์บอนแบล็กเกรด N339 ในปริมาณต่าง ๆ โดยเครื่อง Moving die rheometer (MDR) ที่อุณหภูมิ 150 °C

ตารางที่ 3.2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบในสารตัวเดิมทั้ง 3 ชนิดโดยเทคนิค X-ray fluorescence (XRF)

สารตัวเดิม	องค์ประกอบ (% โดยน้ำหนัก)									
	Al ₂ O ₃	SiO ₂	SO ₃	MgO	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	NiO	CuO
G	0.038	0.064	0.125	-	0.024	0.084	0.033	0.543	0.025	0.025
CB	0.010	0.020	0.460	0.010	0.010	0.050	-	0.240	0.250	-
NCB	0.003	0.007	0.250	0.002	0.015	0.010	-	-	-	-



รูปที่ 3.3 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของ (ก) ผงกราฟไฟต์(ข) คาร์บอนแบล็กเกรดการนำไฟฟ้า (Printex XE 2B)และ (ค) คาร์บอนแบล็กเกรด N339ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



รูปที่ 3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงบิดกับเวลาของคอมปาว์ดอย่างธรรมชาติผสมกับ(ก) ผงกราไฟต์ (ข) ผงเขม่าแกรดการนำไฟฟ้า (Printex XE 2B) และ (ค) คาร์บอนแบล็กเกรด N339

ตารางที่ 3.3 สมบัติการคงรูปของคอมปาวด์ยางธรรมชาติผสมกับสารตัวเติม

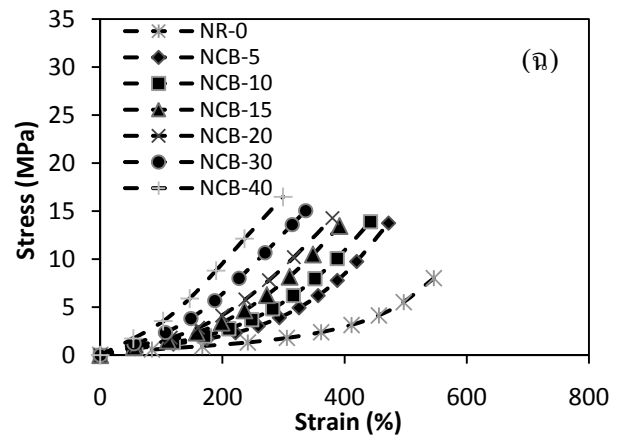
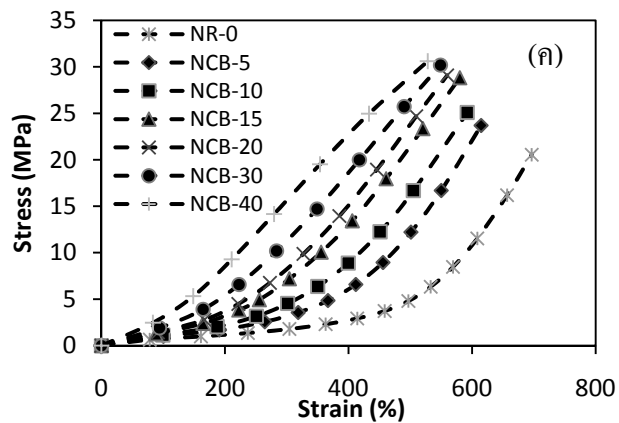
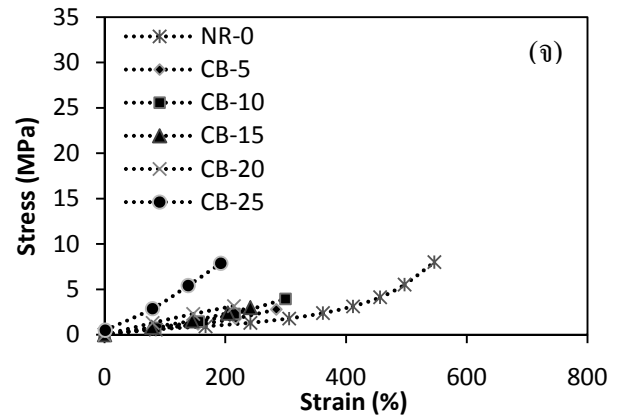
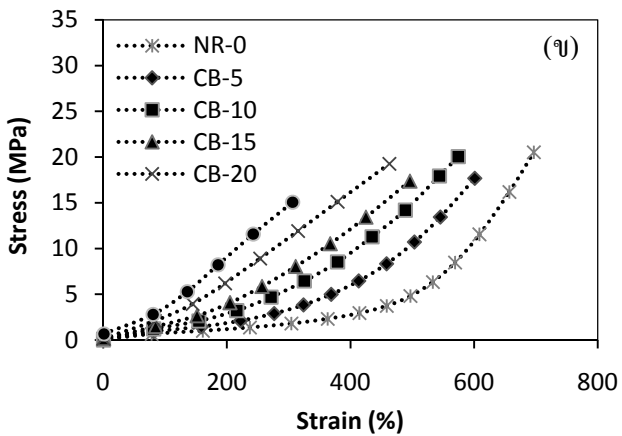
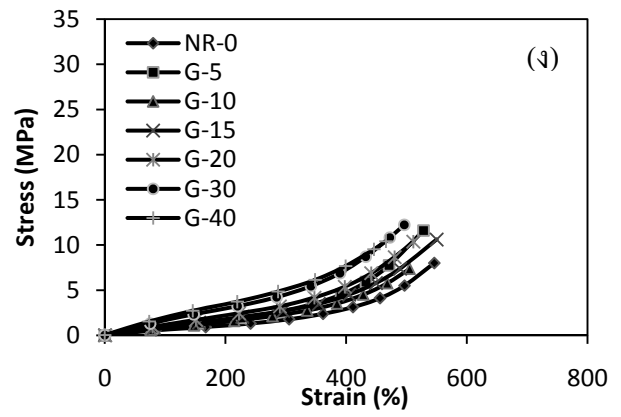
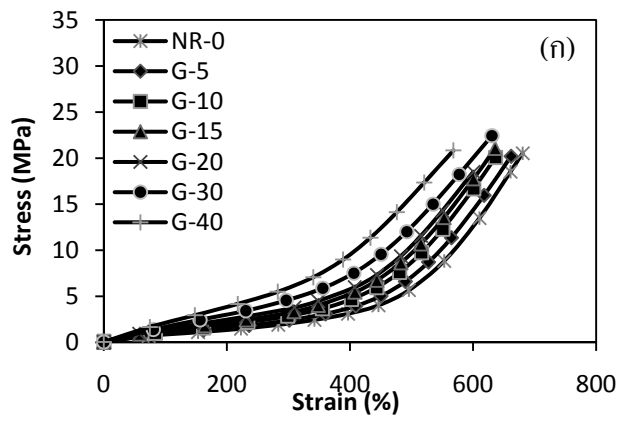
Sample	M _H ¹ (lbf.in)	M _L ² (lbf.in)	M _H -M _L ³ (lbf.in)	T _{s2} ⁴ (min)	T ₉₀ ⁵ (min)	Cure time ⁶ (min)
NR-0	5.47	0.15	5.32	5.81	8.27	10
G-5	6.84	0.09	6.75	4.19	6.84	10
G-10	7.14	0.09	7.05	4.33	7.02	10
G-15	7.74	0.15	7.59	4.45	7.33	10
G-20	8.25	0.14	8.11	4.49	7.64	10
G-30	9.10	0.33	8.77	4.44	8.26	10
G-40	10.53	0.30	10.23	4.40	8.41	10
CB-5	7.76	0.45	7.31	3.83	7.27	10
CB-10	9.91	0.75	9.16	3.38	8.17	10
CB-15	12.59	1.19	11.40	3.29	8.15	10
CB-20	14.05	2.77	13.28	3.06	8.80	10
CB-25	15.20	3.54	11.66	3.04	9.45	10
NCB-5	6.10	0.32	5.78	5.18	8.29	10
NCB-10	6.69	0.38	6.31	4.79	8.01	10
NCB-15	7.29	0.37	6.92	4.39	7.74	10
NCB-20	7.70	0.37	7.33	4.24	7.97	10
NCB-30	9.11	0.48	8.63	3.70	7.80	10
NCB-40	10.56	0.70	9.86	3.50	7.70	10

¹ค่าแรงบิดสูงสุด (maximum torque), ²ค่าแรงบิดต่ำสุด (minimum torque), ³ผลต่างระหว่างค่าแรงบิดสูงสุดกับแรงบิดต่ำสุด (M_H-M_L), ⁴ระยะเวลาที่ Yang จะเกิดการคงรูป (scorch time), ⁵ระยะเวลาขึ้นรูปที่เหมาะสม (optimum cure time), ⁶ระยะเวลาที่ใช้ในการขึ้นรูปจริง (cure time)

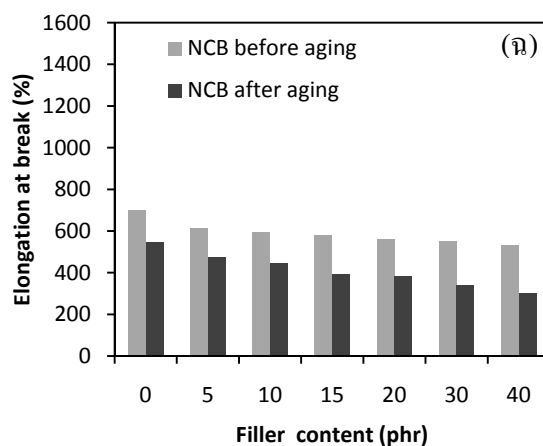
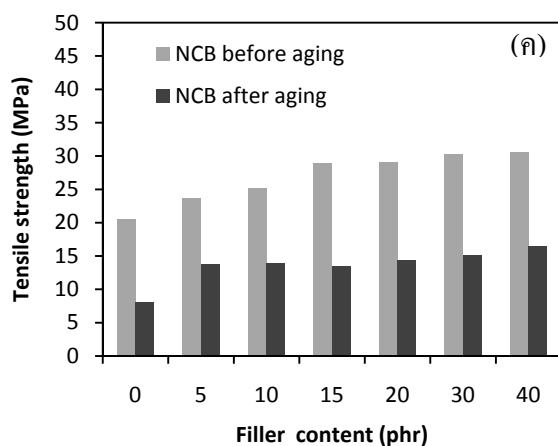
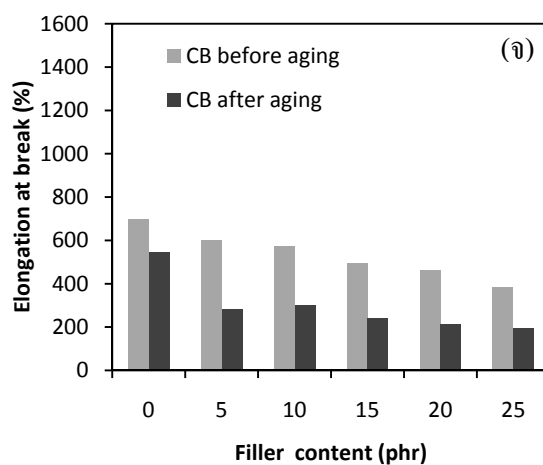
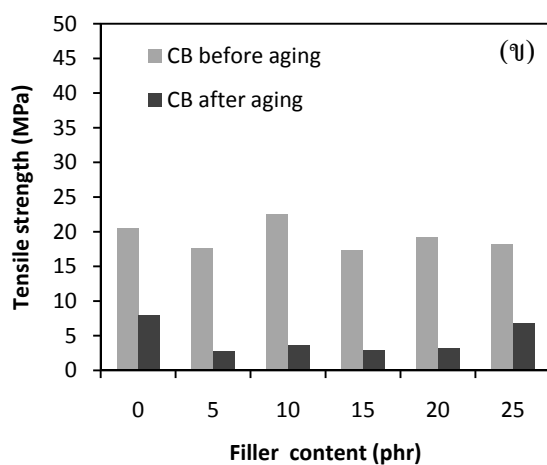
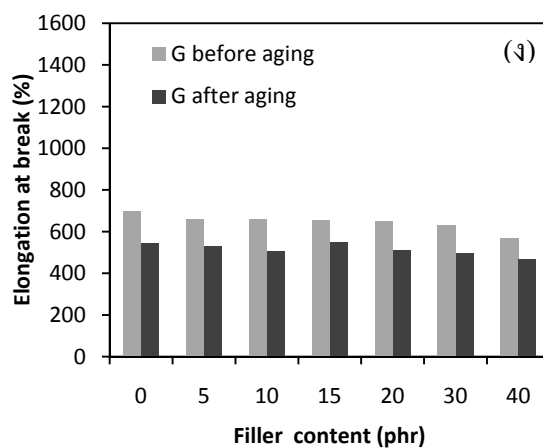
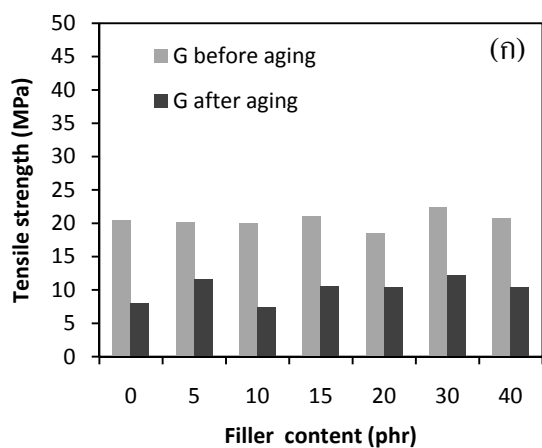
3.3 สมบัติเชิงกลก่อนและหลังการบ่มแรงด้วยความร้อน

3.3.1 การทดสอบความต้านแรงดึง

ตารางที่ 3.4 แสดงสมบัติความต้านแรงดึงของคอมพอสิตยางธรรมชาติผสมกับผงกราไฟต์คาร์บอนแบล็กเกรดการนำไฟฟ้า (Printex XE 2B) และคาร์บอนแบล็กเกรด N339 ในปริมาณต่าง ๆ ก่อนและหลังการบ่มแรงด้วยความร้อนโดยเครื่องทดสอบความต้านแรงดึง INSTRON รุ่น 3366 ที่อัตราเร็ว 500 mm/min



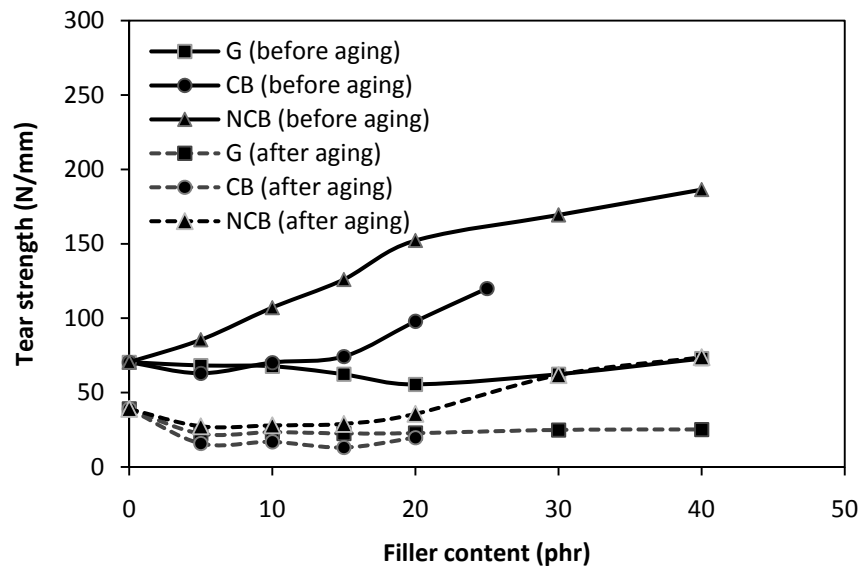
รูปที่ 3.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด (stress-strain curve) ของคอมพอลิเมอร์ยางธรรมชาติ ผสมกับ (ก) พงกราไฟต์ (ข) คาร์บอนแบล็กเกรดการนำไฟฟ้า (Printex XE 2B) (ค) คาร์บอนแบล็กเกรด N339 ก่อนการบ่มแรงด้วยความร้อน และ (ง) พงกราไฟต์ (จ) คาร์บอนแบล็กเกรดการนำไฟฟ้า (Printex XE 2B) (ฉ) คาร์บอนแบล็กเกรด N339 หลังการบ่มแรงด้วยความร้อน



รูปที่ 3.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านแรงดึงและปริมาณสารตัวเติมของคอมพอสิตยางธรรมชาติผสมกับ (ก) ผงกราไฟต์(ข)คาร์บอนแบล็กเกรดนำไฟฟ้า (ค)คาร์บอนแบล็กเกรดN339 และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะยืด ณ จุดขาดและปริมาณสารตัวเติมของยางธรรมชาติผสมกับ (ง) ผงกราไฟต์(จ)คาร์บอนแบล็กเกรดนำไฟฟ้า (Printex XE 2B)(ฉ)คาร์บอนแบล็กเกรดN339

3.3.2 การทดสอบความต้านแรงฉีก

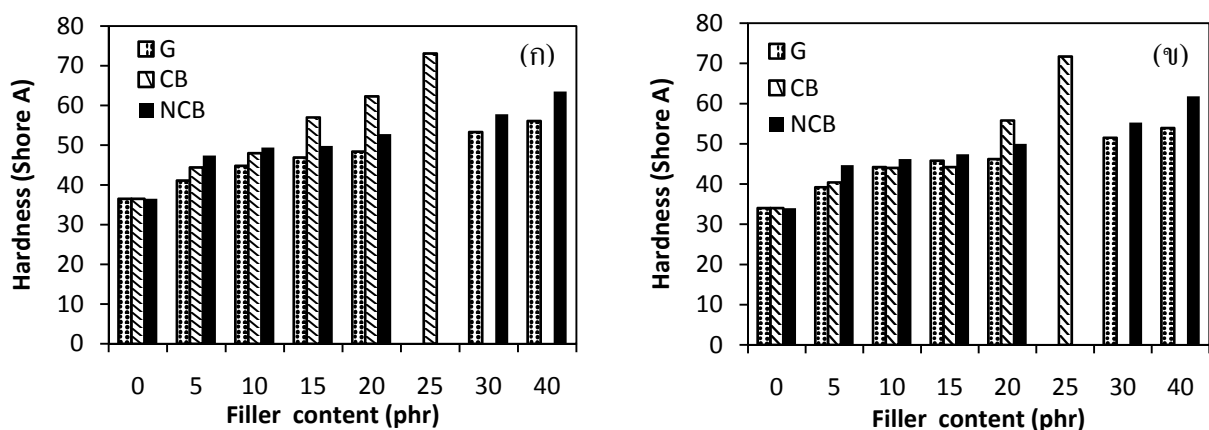
ตารางที่ 3.4 และรูปที่ 3.7 แสดงสมบัติความต้านแรงฉีกของคอมพอสิตยางธรรมชาติผสมกับผงกราไฟต์ คาร์บอนแบล็กเกรดการนำไฟฟ้า (Printex XE 2B) และคาร์บอนแบล็กเกรด N339 ในปริมาณต่าง ๆ ก่อนและหลังการบ่มแรงด้วยความร้อน โดยเครื่องทดสอบ Tear resistance tester รุ่น INSTRON 3344



รูปที่ 3.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านแรงฉีก (tear strength) ต่อปริมาณสารตัวเติมของคอมพอสิตยางธรรมชาติผสมร่วมสารตัวเติมชนิดต่าง ๆ ก่อนและหลังการบ่มแรงด้วยความร้อน

3.3.3 การทดสอบความแข็ง

ตารางที่ 3.4 และรูปที่ 3.8 แสดงสมบัติความแข็งของคอมพอสิตยางธรรมชาติผสมกับผงกราไฟต์ คาร์บอนแบล็กเกรดการนำไฟฟ้า (Printex XE 2B) และคาร์บอนแบล็กเกรด N339 ในปริมาณต่าง ๆ ก่อนและหลังการบ่มแรงด้วยความร้อน โดยเครื่อง durometer type A



รูปที่ 3.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็ง (hardness) ต่อปริมาณสารตัวเติมของคอมพอสิตยางธรรมชาติผสมร่วมสารตัวเติมชนิดต่าง ๆ (ก) ก่อนและ (ข) หลังการบ่มแรงด้วยความร้อน

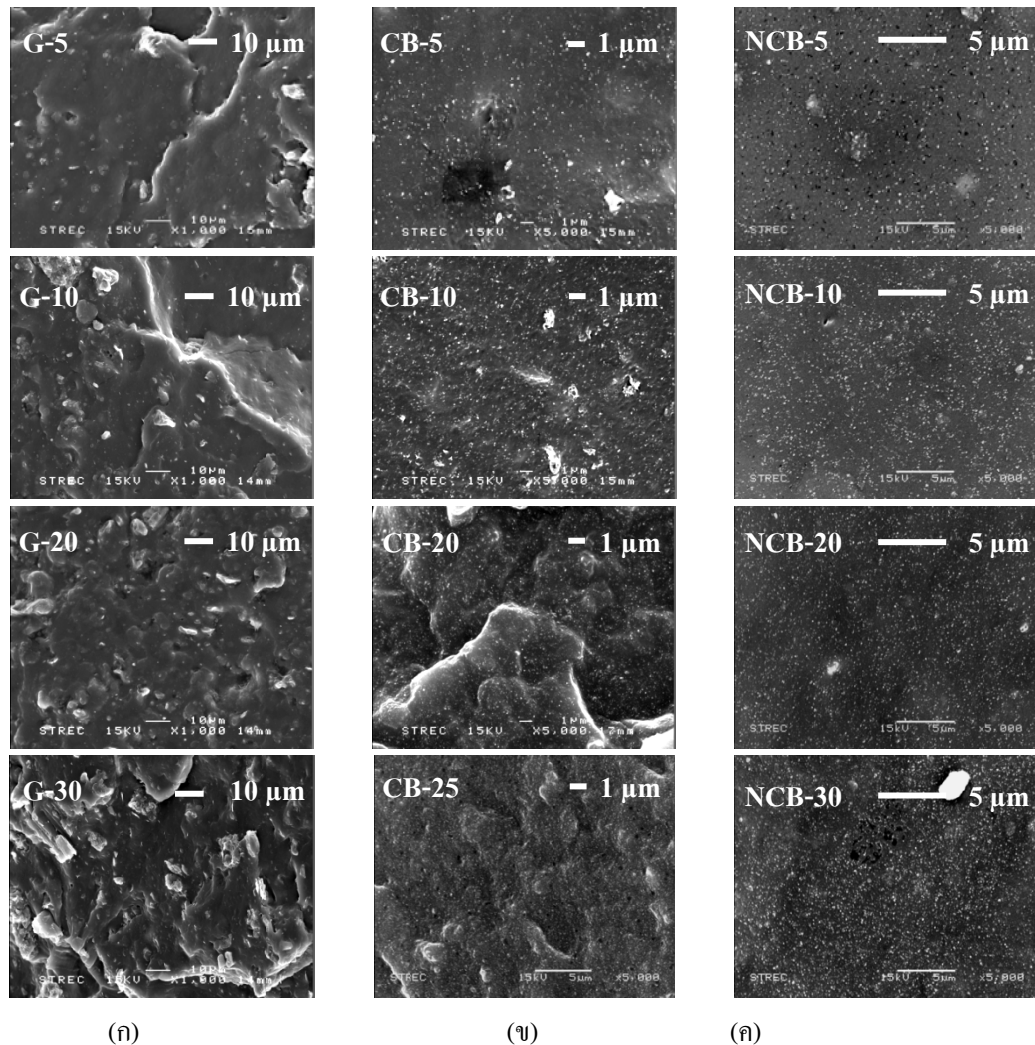
ตารางที่ 3.4 สมบัติเชิงกลของคอมพอสิตยางธรรมชาติผสมกับสารตัวเติมก่อนและหลังการบ่มแรงด้วยความร้อน

Sample	Before Aging							After Aging						
	M ₁₀₀ ¹	M ₃₀₀ ²	M ₅₀₀ ³	T _B ⁴	E _B ⁵	Tear	Hardness	M ₁₀₀ ¹	M ₃₀₀ ²	M ₅₀₀ ³	T _B ⁴	E _B ⁵	Tear	Hardness
	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(%)	(N/mm)	(Shore A)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(%)	(N/mm)	(Shore A)
NR-0	0.73	1.75	4.91	20.53	696.63	70.41	36.5	0.64	1.75	5.64	8.01	546.17	39.05	34.0
G-5	0.96	2.37	7.09	20.20	661.82	68.23	41.1	0.94	2.80	9.55	11.61	528.10	22.44	45.2
G-10	0.96	2.37	7.09	20.08	661.82	67.73	44.8	0.79	2.35	7.13	7.37	505.11	23.46	46.2
G-15	1.19	3.05	8.82	21.05	656.52	62.41	46.9	0.95	2.76	7.89	10.62	549.84	22.54	39.2
G-20	1.19	3.04	8.25	18.52	652.20	55.57	48.4	1.78	3.35	9.73	10.40	511.42	22.81	45.8
G-30	1.67	4.62	12.57	22.44	630.83	62.41	53.3	1.68	4.91	-	12.24	496.22	24.94	51.5
G-40	2.13	5.91	15.83	20.83	568.08	72.80	56.1	2.11	5.08	-	10.43	466.11	25.25	53.9
CB-5	1.03	3.32	10.50	17.67	601.08	63.00	44.4	0.75	-	-	2.79	284.42	15.88	40.4
CB-10	1.38	5.58	15.07	20.05	574.45	70.21	48.0	0.89	-	-	3.65	299.53	16.91	44.2
CB-15	1.68	7.53	-	17.36	496.04	74.27	57.0	1.02	-	-	2.98	241.42	13.15	44.0
CB-20	2.50	11.19	-	19.26	462.68	97.88	62.3	1.60	-	-	3.17	214.16	19.76	55.8
CB-25	3.23	14.07	-	18.20	385.13	120.90	73.1	3.67	-	-	6.77	194.04	34.10	71.7
NCB-5	0.99	3.17	22.48	23.68	614.60	85.50	47.4	1.00	4.08	-	13.75	472.14	27.40	44.7
NCB-10	1.14	8.88	16.21	25.07	592.13	107.10	49.4	1.12	5.52	-	13.90	442.43	28.00	46.2
NCB-15	1.41	6.95	21.42	28.82	580.17	126.00	49.8	1.35	7.62	-	13.45	391.81	29.00	47.4
NCB-20	1.54	8.22	23.81	29.05	559.75	152.20	52.8	1.53	9.15	-	14.28	379.98	35.70	50.0
NCB-30	2.03	11.25	26.41	30.18	548.93	169.40	57.8	2.17	12.64	-	15.05	336.21	61.80	55.3
NCB-40	3.04	15.58	29.11	30.61	528.35	186.40	63.5	3.39	16.48	-	16.49	299.45	73.80	61.8

¹ค่ามอดูลัสที่ระยะยืด 100 %, ²ค่ามอดูลัสที่ระยะยืด 300 %, ³ค่ามอดูลัสที่ระยะยืด 500 %, ⁴ค่าความเค้น ณ จุดขาด (tensile at break), ⁵ค่าระยะยืด ณ จุดขาด (elongation at break)

3.4 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของคอมพอสิตยางธรรมชาติผสมกับสารตัวเติม

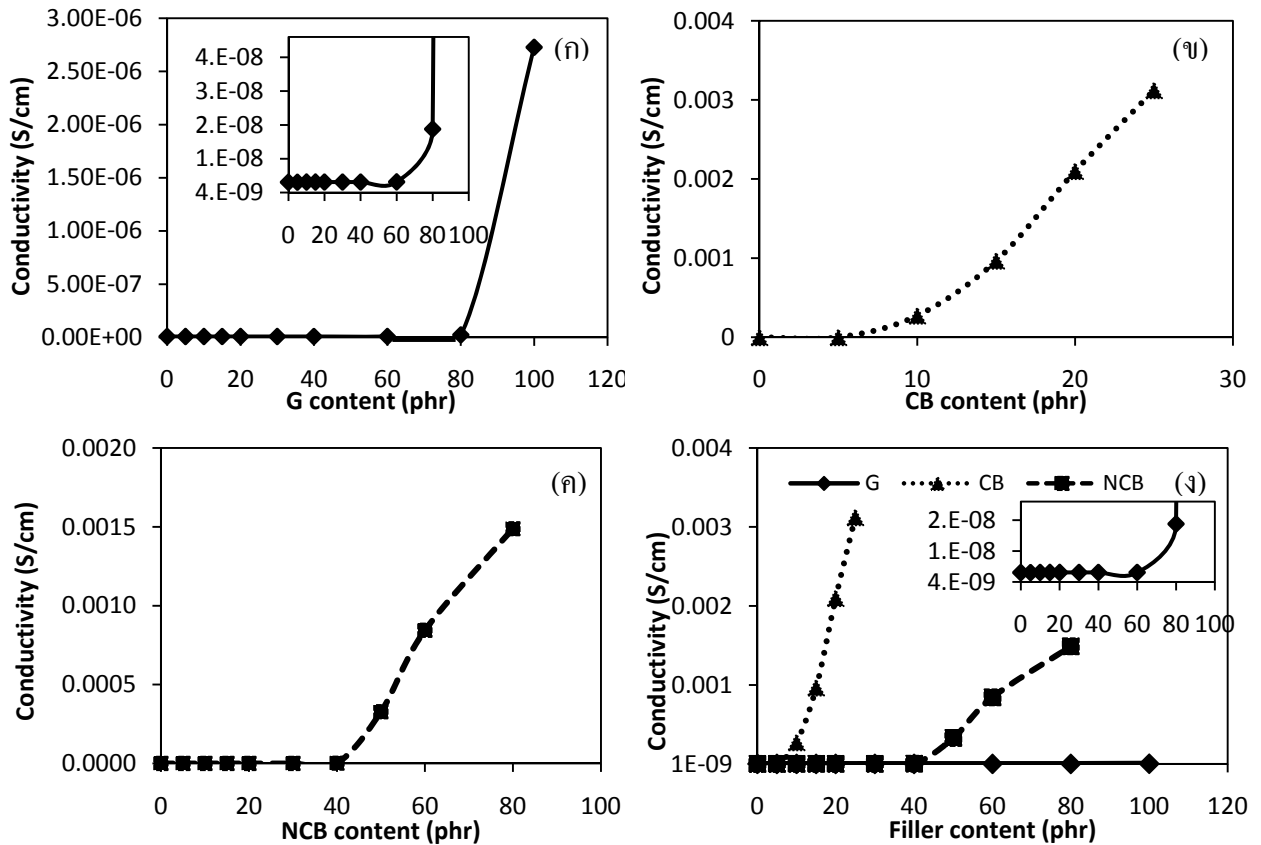
ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของยางคอมพอสิตผสมกับผงกราฟไฟต์ ผงเขม่าแกรดการนำไฟฟ้า (Printex XE 2B) และคาร์บอนแบล็กเกรด N339 โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงดังรูปที่ 3.9



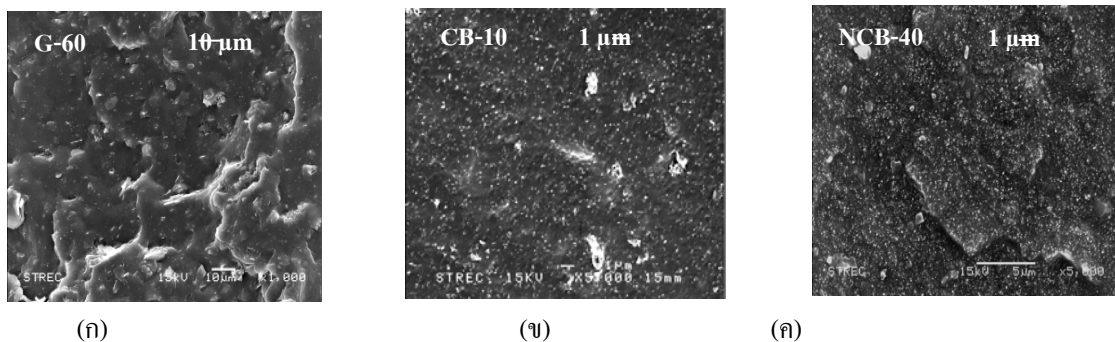
รูปที่ 3.9 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของคอมพอสิตยางธรรมชาติผสมกับ(ก) ผงกราฟไฟต์ที่กำลังขยาย 1000 เท่า (ข) คาร์บอนแบล็กแกรดการนำไฟฟ้า (Printex XE 2B) ที่กำลังขยาย 5000 เท่า และ (ค) คาร์บอนแบล็กเกรด N339 ที่กำลังขยาย 5000 เท่าด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

3.5 สมบัติการนำไฟฟ้าของคอมพอสิตยางธรรมชาติ

รูปที่ 3.10 สมบัติการนำไฟฟ้าของวัสดุคอมพอสิตยางธรรมชาติผสมกับผงกราฟไฟต์ ผงเขม่าแกรดการนำไฟฟ้า (Printex XE- 2B) และคาร์บอนแบล็กเกรด N339 และรูปที่ 3.11 แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยา ณ จุดสังเกตส่วนวิกฤติ



รูปที่ 3.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการนำไฟฟ้าและปริมาณการเติมสารตัวเติมของคอมพอสิตยางธรรมชาติผสมกับ(ก) ผงกราฟไฟต์ และ (ข) ผงเขม่าแกรดการนำไฟฟ้า (Printex XE 2B) (ค) คาร์บอนแบล็กเกรด N339 (ง) เปรียบเทียบสารตัวเติมทั้ง 3 ชนิด



รูปที่ 3.11 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของคอมพอสิตยางธรรมชาติผสมกับ(ก) ผงกราฟไฟต์ที่กำลังขยาย 1000 เท่า (ข) คาร์บอนแบล็กเกรดการนำไฟฟ้า (Printex XE 2B) ที่กำลังขยาย 5000 เท่า และ (ค) คาร์บอนแบล็กเกรด N339 ที่กำลังขยาย 5000 เท่า ณ จุดสังเกตส่วนวิกฤติด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

บทที่ 4

วิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 การวิเคราะห์สมบัติของผงกราฟไฟต์คาร์บอนแบล็ก และคาร์บอนแบล็กเกรด N339

4.1.1 การวิเคราะห์หาค่าประกอบโดยวิธี Proximate และ CHN analysis

ตารางที่ 3.1 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของผงกราฟไฟต์คาร์บอนแบล็กเกรดนำไฟฟ้า (Printex XE 2B) และคาร์บอนแบล็กเกรด N339 โดยวิธี Proximate analysis พบว่าผงกราฟไฟต์ที่ได้จากอุตสาหกรรมหลอมโลหะมีองค์ประกอบหลักคือคาร์บอนคงตัว 97.4% สายที่ระเหยได้ 1.1% เถ้า 1.3% และความชื้น 0.2% ตามลำดับ คาร์บอนแบล็กเกรดการนำไฟฟ้า(Printex XE 2B) มีองค์ประกอบหลักคือคาร์บอนคงตัว 96.4% สายที่ระเหยได้ 2.4% เถ้า 0.6% และความชื้น 0.6% ตามลำดับ และคาร์บอนแบล็กเกรด N339 มีองค์ประกอบหลักคือคาร์บอนคงตัว 96.8% สายที่ระเหยได้ 1.5% เถ้า 0.9% และความชื้น 0.8% ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าผงกราฟไฟต์มีส่วนประกอบของเถ้ามากที่สุดเนื่องจากในอุตสาหกรรมหลอมโลหะจะเกิดเถ้าจากกระบวนการเผาไหม้ซึ่งสามารถปนเปื้อนในส่วนผสมของผงกราฟไฟต์ได้ นอกจากนี้เมื่อทดสอบโดยวิธี elemental analysis พบว่า ผงกราฟไฟต์มีองค์ประกอบของธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจนเท่ากับ 99.02% 0.19% และ 0.43% ตามลำดับ คาร์บอนแบล็กเกรดการนำไฟฟ้ามีองค์ประกอบของธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจน เท่ากับ 99.32% 0.25% และ 0.42% ตามลำดับ และคาร์บอนแบล็กเกรด N339 มีองค์ประกอบของธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจนเท่ากับ 99.67% 0.27% และ 0.04% ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าสารตัวเดิมทั้ง 3 ชนิดมีองค์ประกอบของธาตุคาร์บอนสูงกว่าธาตุอื่นๆ เพราะโครงสร้างของสารตัวเดิมทั้งสามมีธาตุคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก

4.1.2 การวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวจำเพาะโดยวิธี BET

ตารางที่ 3.1 แสดงผลการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวจำเพาะโดยใช้สมการ Brunauer Emmett Teller (BET) ของสารตัวเดิมทั้ง 3 ชนิดพบว่าผงกราฟไฟต์มีพื้นที่ผิว $10.9 \text{ m}^2/\text{g}$ ซึ่งน้อยกว่าคาร์บอนแบล็กเกรดการนำไฟฟ้า ($1,130.4 \text{ m}^2/\text{g}$) และคาร์บอนแบล็กเกรด N339 ($147.7 \text{ m}^2/\text{g}$) ตามลำดับ โดยค่าพื้นที่ผิวจำเพาะที่คำนวณได้ถือเป็นตัวแปรสำคัญในการอธิบายลักษณะการกระจายตัวของสารตัวเดิมในตัวอย่างขงธรรมชาติ ซึ่งจะส่งผลต่อสมบัติเชิงกลและการนำไฟฟ้าของผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติต่อไป ดังที่กล่าวไปแล้วในบทที่ 1

4.1.3 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกโดยเทคนิค X-ray diffraction (XRD)

รูปที่ 3.1 แสดงผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของผงกราฟไฟต์ด้วยวิธี XRD พบว่า ผงกราฟไฟต์ (รูปที่ 3.1(ก)) มีความเป็นผลึกสูงกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับคาร์บอนแบล็กเกรด Printex XE 2B และคาร์บอนแบล็กเกรด N339 ซึ่งมีโครงสร้างผลึกแบบอสัณฐาน (รูปที่ 3.1(ข) และ (ค)) การศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกถือเป็นข้อมูลเบื้องต้นในการอธิบายลักษณะเฉพาะ (characteristic) ของสารแต่ละชนิด ซึ่งอาจจะมีผลต่อสมบัติเชิงกลและทางไฟฟ้าของผลิตภัณฑ์ได้ (จากข้อมูลที่ได้หลังการทดสอบสมบัติเชิงกลและการนำไฟฟ้า พบว่าลักษณะโครงสร้างผลึกแบบอสัณฐานของคาร์บอนแบล็กเพิ่มสมบัติเชิงกลและการนำไฟฟ้าได้ดีกว่าเมื่อเทียบกับผงกราฟไฟต์) โดยลักษณะโครงสร้างผลึกที่เปลี่ยนแปลงไปของสารแต่ละชนิดขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น อุณหภูมิและความดัน เป็นต้น

4.1.3 การวิเคราะห์หาค่าประกอบที่มีอยู่ในสารตัวเดิมโดยเทคนิค X-ray fluorescence (XRF)

ตารางที่ 3.2 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของผงกราฟไฟต์ในรูปของโลหะออกไซด์โดยเทคนิค X-ray fluorescence พบว่าในผงกราฟไฟต์ประกอบด้วย Fe_2O_3 เป็นปริมาณมากที่สุดคือ 0.543 % เมื่อเทียบกับคาร์บอนแบล็กทั้ง 2 ชนิด ซึ่งอาจมีส่วนช่วยในการปรับปรุงสมบัติการนำไฟฟ้าได้

4.1.4 การวิเคราะห์หาองค์ประกอบโดยเทคนิค Thermogravimetric analysis (TGA)

รูปที่ 3.2 แสดงผลการวิเคราะห์การสลายตัวของสารตัวเติมทั้ง 3 ชนิด พบว่าลักษณะการสลายตัวของสารตัวเติมทั้ง 3 ชนิดมีลักษณะคล้ายคลึงกัน โดยการสลายตัวในช่วงอุณหภูมิต่ำ ๆ ($< 100^{\circ}\text{C}$) เป็นการสลายตัวของความชื้นที่มีอยู่ในสารตัวเติม เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นประมาณ $350-400^{\circ}\text{C}$ เกิดการสลายตัวของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน มีการสลายตัวประมาณ 30-50 % และการสลายตัวในช่วงนี้ค่อนข้างกว้าง สุดท้ายเป็นเถ้าที่เหลืออยู่ โดยการสลายตัวของผงกราฟไฟต์เหลือเถ้า 70 % และคาร์บอนแบล็กทั้ง 2 ชนิด เหลือเถ้าประมาณ 50 % ตามลำดับ ซึ่งข้อมูลที่ได้ถือเป็นการทดสอบลักษณะเฉพาะของสารก่อนที่จะนำไปใช้งานต่อไป

4.1.5 การวิเคราะห์หาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของคาร์บอนแบล็กและผงกราฟไฟต์ โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

รูปที่ 3.3 (ก) แสดงลักษณะของผงกราฟไฟต์จากการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดด้วยกำลังขยาย 500 เท่าพบว่าลักษณะทางสัณฐานมีลักษณะเป็นผลึกขนาดใหญ่ ไม่สามารถมองเห็นอนุภาคปฐมภูมิได้ขนาดของผลึกอยู่ในช่วง 10-30 ไมโครเมตร ในขณะที่ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของคาร์บอนแบล็กทั้ง 2 เกรดดังรูปที่ 3.3(ข) และ(ค) พบว่าอนุภาคปฐมภูมิของคาร์บอนแบล็กมีลักษณะเป็นทรงกลมมีเส้นผ่าศูนย์กลางอยู่ในช่วง 10-100 นาโนเมตร และจะไม่อยู่กันอย่างเดี่ยว ๆ แต่จะอยู่รวมกันเป็นกลุ่มก้อนที่เรียกว่าแอกกรีเกต (aggregate) เนื่องจากการหลอมรวมนี้มีความแข็งแรงสูงระหว่างกันด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ เกิดการจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อนที่มีขนาดใหญ่ขึ้นเรียกว่า แอกลอมเมอเรต (agglomerate) โดยข้อมูลดังกล่าวสอดคล้องกับค่าพื้นที่ผิวที่วิเคราะห์โดยเทคนิค BET ซึ่งจะเห็นได้ว่าผงกราฟไฟต์มีพื้นที่ผิวน้อยที่สุดเนื่องจากผงกราฟไฟต์มีลักษณะเป็นผลึกขนาดใหญ่ ในขณะที่คาร์บอนแบล็กเกรดนำไฟฟ้ามีอนุภาคปฐมภูมิเป็นทรงกลมและมีขนาดเล็กกว่าคาร์บอนแบล็กเกรด N339 และผงกราฟไฟต์

4.2 สมบัติการคงรูปของคอมปาวด์ยางธรรมชาติผสมกับผงกราฟไฟต์คาร์บอนแบล็กเกรด Printex XE 2B และ คาร์บอนแบล็ก เกรด N339

รูป 3.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงบิดกับเวลาของคอมพอสิตยางธรรมชาติที่อุณหภูมิ 150°C โดยลักษณะของกราฟเป็นแบบ S-curve แบ่งเป็น 3 ช่วง คือช่วงที่ 1 เรียกว่าช่วงระยะเวลาที่ยางสามารถไหลได้ในแม่พิมพ์ก่อนเกิดการคงรูป หรือเวลาสกอ์ช (scorch time) ส่งผลให้ค่าแรงบิดที่เกิดขึ้นมีค่าต่ำ ช่วงที่ 2 สังเกตเห็นว่าความชันของกราฟที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเนื่องจากยางธรรมชาติเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมขวาง ส่งผลให้ค่าแรงบิดเพิ่มขึ้นอย่างมาก ในช่วงสุดท้ายลักษณะของกราฟเริ่มมีความชันคงที่ เรียกช่วงนี้ว่า optimum curetime เป็นช่วงที่ยางเกิดปฏิกิริยาวัลคาไนเซชันที่สมบูรณ์ตารางที่ 3.3 แสดงตารางสรุปสมบัติการคงรูปของยางธรรมชาติร่วมกับคาร์บอนแบล็กและผงกราฟไฟต์ในปริมาณต่างๆ

เมื่อพิจารณาค่าระยะเวลาที่ยางจะเกิดการคงรูป (scorch time, T_{90}) ของยางคอมพอสิตผสมกับสารตัวเติมทั้ง 3 ชนิดพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณสารตัวเติมจะส่งผลให้ค่าระยะเวลาที่ยางจะเกิดการคงรูปมีค่าลดลงโดยคาร์บอนแบล็กเกรดนำไฟฟ้า จะส่งผลให้เวลาสกอ์ชลดลงมากที่สุด รองลงมาคือคาร์บอนแบล็กเกรด N339 และผงกราฟไฟต์ ทั้งนี้อาจมีผลเนื่องจากบนพื้นผิวของโมเลกุลคาร์บอนแบล็กมีหมู่ฟังก์ชันที่สามารถช่วยเร่งเร่งการเชื่อมขวางในการทำปฏิกิริยา dehydrogenation (ดังรูปที่ 1.2) หรือการแตกพันธะคู่ทำให้ยางคงรูปได้เร็วขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับผงกราฟไฟต์ซึ่งให้สมบัติการคงรูปที่ต่างกัน อาจมีผลมาจากความแตกต่างของหมู่ฟังก์ชันทางเคมีบริเวณพื้นผิว

เมื่อพิจารณาค่าแรงบิดสูงสุด (maximum torque, M_H) ของยางคอมพอสิตผสมกับสารตัวเติมทั้ง 3 ชนิดพบว่าค่าแรงบิดสูงสุดจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณสารตัวเติมเนื่องจากสารตัวเติมจะไปด้านทานการบิดในระหว่าง

กระบวนการวัลคาไนเซชันทำให้ค่าแรงบิดสูงสุดมีค่ามากขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบกับสารตัวเดิมทั้ง 3 ชนิด คาร์บอนแบล็กเกรดนำไฟฟ้าจะให้ค่าแรงบิดสูงสุดเพิ่มขึ้นมากที่สุด รองลงมาคือผงเขม่าเกรด N339 และผงกราฟต์ทั้งนี้อาจมีผลมาจากคาร์บอนแบล็กเกรดนำไฟฟ้ามีอนุภาคนาโนขนาดเล็กและมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงที่สุดเมื่อผสมกับยางธรรมชาติจะสามารถเข้าไปแทรกในเนื้อยางธรรมชาติได้ดีกว่าคาร์บอนแบล็กเกรด N339 และผงกราฟต์ที่มีขนาดอนุภาคใหญ่กว่า

4.3 สมบัติเชิงกลก่อนและหลังการบ่มแรงด้วยความร้อน

4.3.1 การทดสอบความต้านแรงดึง(มาตรฐาน ASTM D412)

รูปที่ 3.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอมพอสิตยางธรรมชาติ ตารางที่ 3.4 สรุปค่ามอดูลัสที่ระยะยืด 100 300 และ 500 %ของระยะยืดค่าความต้านแรงดึง(T_B) และค่าระยะยืด ณ จุดขาด(E_B) ของยางธรรมชาติผสมกับผงกราฟต์คาร์บอนแบล็กเกรดนำไฟฟ้า (PrintexXE 2B) และคาร์บอนแบล็กเกรด N339 ในปริมาณต่าง ๆ กันก่อนและหลังการบ่มแรงด้วยความร้อน พบว่าสมบัติเชิงกลก่อนการบ่มแรงคือ ค่ามอดูลัสที่ 100 300 และ 500 %ของระยะยืด เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณสารตัวเดิมเพิ่มขึ้น เนื่องจากผลของการเสริมแรงของสารตัวเดิมทั้ง 3 ชนิด ในขณะที่ค่าระยะยืด ณ จุดขาด จะลดลงเมื่อปริมาณสารตัวเดิมทั้ง 3 ชนิดเพิ่มขึ้น ค่ามอดูลัสของผงกราฟต์มีค่าต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับคาร์บอนแบล็กทั้ง 2 ชนิด เนื่องจากผงกราฟต์มีพื้นที่ผิวจำเพาะที่ต่ำกว่าคาร์บอนแบล็กทั้ง 2 ชนิดจึงเกิดอันตรกิริยาระหว่างผงกราฟต์และเนื้อยางธรรมชาติน้อยสำหรับค่า T_B ของยางธรรมชาติผสมกับสารตัวเดิมทั้ง 3 ชนิดจะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณสารตัวเดิมเพิ่มขึ้นในขณะที่คาร์บอนแบล็กเกรดนำไฟฟ้าให้ค่า T_B ต่ำที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับผงกราฟต์และคาร์บอนแบล็กเกรด N339 แต่อย่างไรก็ตามพบว่าการใช้ผงกราฟต์เป็นสารตัวเดิมแม้ว่าจะให้ค่ามอดูลัสที่ต่ำ แต่ค่า E_B มีค่ามากที่สุดในปริมาณสารตัวเดิมเท่ากัน จึงทำให้คอมพอสิตมีความยืดหยุ่นที่ดีกว่า

รูปที่ 3.6 แสดงสมบัติเชิงกลหลังการบ่มแรงด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 22 ชั่วโมงพบว่า ค่า T_B และ E_B หลังการบ่มแรงของยางคอมพอสิตทั้ง 3 ชนิดลดลงเมื่อเทียบกับก่อนการบ่มแรงด้วยความร้อน เนื่องจากระบบการคงรูปของยางคอมพอสิตเป็นระบบวัลคาไนเซชันแบบดั้งเดิม(conventional vulcanization: CV system) การบ่มแรงด้วยความร้อนอาจจะไปทำลายพันธะเชื่อมขวาง (crosslink) ของซัลเฟอร์ระหว่างสายโซ่โมเลกุลของยางธรรมชาติ ส่งผลให้ยางคอมพอสิตสูญเสียสมบัติเชิงกล หรือการเกิดการเสื่อมสลายของสายโซ่พอลิเมอร์เกิดขึ้นโดยการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงความร้อนที่เกิดขึ้นจะเห็นได้ชัดในกรณีคาร์บอนแบล็กเกรดการนำไฟฟ้า (Printex XE 2B) เนื่องจากผงคาร์บอนเกรดนี้เป็นเกรดนำไฟฟ้าซึ่งสามารถถ่ายโอนความร้อนได้ดีกว่าผงกราฟต์และคาร์บอนแบล็กเกรด N339 ซึ่งมีความเป็นฉนวนไฟฟ้าสูงกว่า

4.3.2 การทดสอบความต้านแรงฉีก(มาตรฐาน ASTM D624)

รูปที่ 3.7แสดงค่าความต้านแรงฉีกก่อนและหลังการบ่มแรงของคอมพอสิตยางธรรมชาติผสมกับผงกราฟต์คาร์บอนแบล็กเกรดนำไฟฟ้า (Printex XE 2B) และคาร์บอนแบล็กเกรด N339 ในปริมาณต่าง ๆ กัน เมื่อพิจารณาก่อนการบ่มแรงพบว่าการเติมผงกราฟต์เป็นสารตัวเดิมไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความต้านแรงฉีกของยางคอมพอสิตซึ่งลักษณะของกราฟฟองที่เมื่อปริมาณผงกราฟต์เพิ่มขึ้นในขณะที่ค่าความต้านแรงฉีกของยางคอมพอสิตผสมกับคาร์บอนแบล็กเกรดนำไฟฟ้าและN339 จะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณสารตัวเดิมเพิ่มขึ้น โดยการเติมคาร์บอนแบล็กเกรด N339 ให้ค่าความต้านแรงฉีกของยางคอมพอสิตมีค่าสูงที่สุด เนื่องจากคาร์บอนแบล็กทั้ง 2 ชนิด มีอนุภาคนาโนเล็กจึงง่ายต่อการแทรกตัวในพอลิเมอร์ ซึ่งสามารถขัดขวางการถ่ายโอนพลังงาน ทำให้ความทนทานต่อการฉีกขาดดีกว่า เมื่อพิจารณาหลังการบ่มแรงด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 22 ชั่วโมง พบว่าค่าความต้านแรงฉีกจะมีค่าลดลง เพราะการบ่มแรงด้วยความร้อนอาจจะไปทำลายอันตรกิริยาระหว่างสารตัวเดิมกับพอลิเมอร์ลงได้

4.3.3 การทดสอบความแข็ง(มาตรฐาน ASTM D2240)

รูปที่ 3.8 แสดงค่าความแข็งก่อนและหลังการบ่มเร่งของยางธรรมชาติผสมกับผงกราไฟต์คาร์บอนแบล็กเกรดการนำไฟฟ้า(Printex XE 2B)และคาร์บอนแบล็กเกรด N339 ในปริมาณต่าง ๆ กัน พบว่าค่าความแข็งของยางคอมพอสิตก่อนการบ่มเร่งมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณสารตัวเติมเพิ่มขึ้น ซึ่งค่าดังกล่าวเช่นเดียวกับค่าแรงบิดสูงสุด เมื่อเปรียบเทียบค่าความแข็งของยางคอมพอสิตผสมกับสารตัวเติมแต่ละชนิด พบว่าคาร์บอนแบล็กเกรดการนำไฟฟ้าให้ค่าความแข็งของยางคอมพอสิตสูงกว่าคาร์บอนแบล็กเกรด N339 และผงกราไฟต์ในทุกๆปริมาณสารตัวเติมเนื่องจากคาร์บอนแบล็กเกรดการนำไฟฟ้าเป็นสารตัวเติมที่มีอนุภาคนาโนขนาดเล็กและพื้นที่ผิวจำเพาะสูง ทำให้มีอันตรกิริยา (interaction) ระหว่างสารตัวเติมกับพอลิเมอร์สูง ส่งผลต่อการเคลื่อนไหวยางอิสระของสายโซ่พอลิเมอร์ทำให้ยางคอมพอสิตมีความแข็งทนต่อแรงกดได้มากกว่า แต่อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาความแข็งของวัสดุหลังการบ่มเร่งพบว่าค่าความแข็งลดลงเพียงเล็กน้อยในทุกชนิดของสารตัวเติม

4.4 การทดสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยา

รูปที่ 3.9 แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของยางธรรมชาติผสมกับสารตัวเติมทั้ง 3 ชนิด โดยจุดสีขาวแสดงถึงอนุภาคของผงกราไฟต์หรือคาร์บอนแบล็ก ส่วนสีดำแสดงถึงตัวกลางยางธรรมชาติ อนุภาคของสารตัวเติมเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณสารตัวเติมเพิ่มมากขึ้น ขนาดอนุภาคของผงกราไฟต์มีขนาดค่อนข้างใหญ่ การกระจายตัวของอนุภาคเกิดได้ไม่ดี มีการเกาะกลุ่มกันเป็นก้อน เมื่อเปรียบเทียบกับคาร์บอนแบล็กทั้ง 2 ชนิด ซึ่งมีอนุภาคนาโนขนาดเล็ก การกระจายตัวในเนื้อยางธรรมชาติเกิดขึ้นได้ดี ด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงส่งผลให้สมบัติเชิงกลของคอมพอสิตยางธรรมชาติผสมกับผงกราไฟต์ด้อยลง เพราะความเข้ากันได้ยากระหว่างเฟสทั้ง 2

4.5 สมบัติการนำไฟฟ้า

รูปที่ 3.10 แสดงค่าการนำไฟฟ้าของยางธรรมชาติผสมกับสารตัวเติมทั้ง 3 ชนิด จะเห็นได้ว่าช่วงแรกของการนำไฟฟ้าต่ำมาก แสดงว่าวัสดุยังไม่สามารถแสดงสมบัติการนำไฟฟ้าได้ เนื่องจากยางธรรมชาติเป็นวัสดุที่เป็นฉนวนไฟฟ้า การใส่อนุภาคของสารตัวเติมภายในเนื้อพอลิเมอร์ที่มีกระจายตัวแยกออกจากกันจึงไม่สามารถเหนี่ยวนำให้อิเล็กตรอนสามารถเกิดการเคลื่อนที่ผ่านได้ ค่าการนำไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในช่วงนี้จึงต่ำ ช่วงที่ 2 ค่าการนำไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณสารตัวเติมสังเกตได้จากความชันที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วซึ่งปริมาณสารตัวเติมที่ทำให้ค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นนั้นจะเรียกว่า สัดส่วนวิกฤติ (critical concentration) โดยในช่วงนี้อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ผ่านสารตัวเติมที่เกาะกลุ่มกันเป็นก้อนหรือกระโดดข้ามช่องว่าง (gap) ระหว่างกลุ่มก้อนของการaggregate หรือ agglomerate ได้ โดยช่องว่างที่เกิดขึ้นต้องแคบพอที่ให้อิเล็กตรอนสามารถกระโดดข้ามผ่านได้ซึ่งลักษณะกราฟที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า percolation thresholdตามทฤษฎีของ percolation [6]ช่วงสุดท้ายจะเห็นว่าค่าการนำไฟฟ้าจะคงที่ที่ปริมาณสารตัวเติมมากกว่าสัดส่วนวิกฤติมาก ๆ เนื่องจากเกิดการนำไฟฟ้าสูงสุด สารตัวเติมภายในเนื้อยางจะเกิดโครงข่ายการนำไฟฟ้าทำให้ยางคอมพอสิตสามารถนำไฟฟ้าได้ทุกทิศทางแต่ก็ยังคงมีความเป็นฉนวนอยู่ตามชนิดของเนื้อพอลิเมอร์

เมื่อพิจารณาช่วงที่เรียกว่า สัดส่วนวิกฤติหรือสัดส่วนของการใส่สารตัวเติมที่ทำให้ค่าการนำไฟฟ้าเกิดขึ้นได้ของการใส่สารตัวเติมแต่ละชนิดพบว่า การใส่คาร์บอนแบล็กเกรดการนำไฟฟ้าให้สัดส่วนวิกฤติที่ 10 phrซึ่งให้ค่าการนำไฟฟ้าเท่ากับ 2.7×10^{-4} S/cm คาร์บอนแบล็กเกรด N339 ให้สัดส่วนวิกฤติที่ 40 phrให้ค่าการนำไฟฟ้าเท่ากับ 2.3×10^{-6} S/cm ผงกราไฟต์ให้สัดส่วนวิกฤติที่ 60 phrให้ค่าการนำไฟฟ้าเท่ากับ 7.1×10^{-9} S/cm จะเห็นได้ว่า คาร์บอนแบล็กเกรดการนำไฟฟ้าให้ค่าการนำไฟฟ้าสูงที่สุด โดยใส่ปริมาณสารตัวเติมน้อยที่สุด ทั้งนี้สามารถอธิบายได้ว่า คาร์บอนแบล็กเกรดการนำไฟฟ้ามีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงที่สุด และมีขนาดอนุภาคเล็ก ทำให้เกิดการกระจายตัวได้ดีในเนื้อยางธรรมชาติ ช่องว่างระหว่างอนุภาคแคบพอที่จะทำให้อิเล็กตรอนกระโดดผ่านได้ การนำไฟฟ้าจึงเกิดขึ้นได้ดี (รูปที่ 3.11) ต่างจาก

ในกรณีของคาร์บอนแบล็กเกรด N339 ให้จุดสัดส่วนวิกฤติที่สูงขึ้น เพราะพื้นที่ผิวสัมผัสต่ำกว่าคาร์บอนแบล็กเกรด การนำไฟฟ้า การกระจายตัวในเนื้อยางธรรมชาติไม่ดีเท่ากับผงเม้าดคาร์บอนนำไฟฟ้า ส่วนในกรณีของผงกราไฟต์ จุดสัดส่วนวิกฤติมีค่าสูงสุดที่สุด เนื่องจากอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ เกิดการเกาะกลุ่มกันทำให้การกระจายตัวของอนุภาคต่าง ๆ เกิดขึ้นได้น้อย ช่องว่างระหว่างอนุภาค หรือกลุ่ม aggregate หรือ agglomerate อยู่ห่างกันมาก อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ผ่านได้ยาก ค่าการนำไฟฟ้าจึงต่ำที่สุด หลังจากผ่านการพิจารณา ณ จุดวิกฤติ พบว่า ค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อปริมาณสารตัวเติมเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากการใส่สารตัวเติมที่มีสมบัติในการนำไฟฟ้าจะเป็นการเพิ่มเฟสการนำไฟฟ้าและเป็นการลดช่องว่างของกลุ่มสารตัวเติมที่เกิดการ aggregate หรือ agglomerate ทำให้อิเล็กตรอนเกิดการเคลื่อนที่ได้ดียิ่งขึ้น

4.6 การวิเคราะห์ความคุ้มค่าต่อการพัฒนาเชิงพาณิชย์

การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตวัสดุคอมพอสิตยางธรรมชาติผสมกับสารตัวเติมชนิดต่าง ๆ ณ จุดสัดส่วนวิกฤติของสารตัวเติมชนิดนั้น ๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.1 - 4.3 (การคำนวณดูที่ภาคผนวก ง) พบว่าวัสดุคอมพอสิตยางธรรมชาติผสมกับผงกราไฟต์ ซึ่งมีสัดส่วนวิกฤติสูงที่สุดที่ 60 phr มีต้นทุนในการผลิตเท่ากับ 211.437 บาท/batch (1 batch เท่ากับคอมปาวด์ยางหนัก 175.5 กรัม) เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับวัสดุคอมพอสิตยางธรรมชาติผสมกับคาร์บอนแบล็กเกรดการนำไฟฟ้า ซึ่งมีสัดส่วนวิกฤติที่ต่ำที่สุดที่ 10 phr และมีต้นทุนในการผลิตเท่ากับ 220.967 บาท/batch (1 batch เท่ากับคอมปาวด์ยางหนัก 120.5 กรัม) ในกรณีของวัสดุคอมพอสิตยางธรรมชาติผสมกับคาร์บอนแบล็กเกรด N339 ซึ่งมีสัดส่วนวิกฤติที่ 40 phr มีต้นทุนในการผลิตเท่ากับ 213.337 บาท/batch (1 batch เท่ากับคอมปาวด์ยางหนัก 153.5 กรัม) เมื่อเปรียบเทียบวัสดุคอมพอสิตทั้ง 3 ชนิด พบว่าวัสดุคอมพอสิตยางธรรมชาติผสมกับผงกราไฟต์มีต้นทุนต่ำที่สุด รองลงมาคือ คาร์บอนแบล็กเกรด N339 และเกรดการนำไฟฟ้า ตามลำดับ แต่อย่างไรก็ตามพบว่าค่าการนำไฟฟ้าของวัสดุทั้ง 3 ประเภทมีค่าที่ต่างกัน โดยวัสดุที่มีต้นทุนต่ำจะมีค่าการนำไฟฟ้าในระดับต่ำเนื่องจากไม่มีการดัดแปรพื้นผิวของสารตัวเติมก่อนนำไปใช้ ซึ่งแตกต่างจากการใช้คาร์บอนแบล็กเกรดนำไฟฟ้าหรือเกรด N339 มีการดัดแปรพื้นผิวของสารตัวเติมก่อนที่จะนำมาใช้ทำให้ต้นทุนในการผลิตสูงกว่า หากนำวัสดุดังกล่าวไปใช้ประโยชน์ในเชิงพาณิชย์จริง ต้องคำนึงถึงสมบัติของวัสดุที่พึงประสงค์ของผลิตภัณฑ์นั้น ๆ โดยผู้วิจัยมีความมุ่งหวังที่จะส่งเสริมให้มีการใช้วัสดุที่เหลือใช้ ซึ่งมีสมบัติที่เหมาะสมต่อการผลิตวัสดุนำไฟฟ้า เช่น การใช้ผงกราไฟต์ที่เหลือจากอุตสาหกรรมหลอมโลหะเป็นสารตัวเติมที่สามารถทำให้ยางธรรมชาติมีสมบัติในการนำไฟฟ้าได้ในระดับหนึ่ง แม้ว่าต้องใส่ในปริมาณมากก็ถือเป็น การลดปริมาณของเหลือใช้ อีกทั้งยังช่วยส่งเสริมกลไกการพัฒนาที่สะอาด (clean development mechanism, CDM) ใช้วัสดุธรรมชาติให้เกิดประโยชน์สูงสุด ลดการพึ่งพาวัสดุที่มาจากแหล่งฟอสซิล ซึ่งส่งผลกระทบต่อภาวะโลกร้อนต่อไป

ตารางที่ 4.1 การวิเคราะห์ต้นทุนวัสดุคอมพอสิตยางธรรมชาติผสมผงกราไฟต์ ณ จุดสัดส่วนวิกฤติที่ 60 phr (G-60)

รายการ	ราคา (บาท/กิโลกรัม)	ปริมาณที่ใช้ (กรัม)	ราคา (บาท)
ยางธรรมชาติ	102	100	10.2
ผงกราไฟต์	2	60	0.12
น้ำมันแอฟทานิก	70	6	0.42
แอททิฟิซันท์ออกไซด์	88	4	0.352
กรดสเตียริก	58	2	0.116
CBS	164	1	0.164
กำมะถัน	26	2.5	0.065
ราคาสารเคมีรวม (บาท)			11.437
รายการ	ราคาต่อหน่วย (บาท/batch)	ปริมาณที่ใช้ (batch)	
two-roll mill	100	1	100
compression molding	100	1	100
ราคาค่าบริการ (บาท)			200
ต้นทุนการผลิต (บาท/batch)			211.437

ตารางที่ 4.2 การวิเคราะห์ต้นทุนวัสดุคอมพอสิตยางธรรมชาติผสมร่วมคาร์บอนแบล็กเกรดการนำไฟฟ้า (Printex XE 2B) ณ จุดสัดส่วนวิกฤติที่ 10 phr (CB-10)

รายการ	ราคา (บาท/กิโลกรัม)	ปริมาณที่ใช้ (กรัม)	ราคา
ยางธรรมชาติ	102	100	10.2
คาร์บอนแบล็กเกรดนำไฟฟ้า	1000	10	10
น้ำมันแอฟทานิก	70	1	0.07
แอททิฟิซันท์ออกไซด์	88	4	0.352
กรดสเตียริก	58	2	0.116
CBS	164	1	0.164
กำมะถัน	26	2.5	0.065
ราคาสารเคมีรวม (บาท)			20.967
รายการ	ราคาต่อหน่วย	ปริมาณที่ใช้ (batch)	
two-roll mill	100	1	100
compression molding	100	1	100
ราคาค่าบริการ (บาท)			200
ต้นทุนการผลิต (บาท/batch)			220.967

ตารางที่ 4.3 การวิเคราะห์ต้นทุนวัสดุคอมพอสิตยางธรรมชาติผสมร่วมคาร์บอนแบล็กเกรด N339 ณ จุดสัดส่วนวิกฤติที่ 40 phr (NCB-40)

รายการ	ราคา (บาท/กิโลกรัม)	ปริมาณที่ใช้ (กรัม)	ราคา (บาท)
ยางธรรมชาติ	102	100	10.2
คาร์บอนแบล็กเกรด N339	55	40	2.2
น้ำมันเนฟทานิก	70	4	0.28
แอคติฟซิงค์ออกไซด์	88	4	0.352
กรดสเตียริก	58	2	0.116
CBS	164	1	0.164
กำมะถัน	26	2.5	0.065
ราคาสารเคมีรวม (บาท)			13.377
รายการ	ราคาต่อหน่วย (บาท/batch)	ปริมาณที่ใช้ (batch)	
two-roll mill	100	1	100
compression molding	100	1	100
ราคาค่าบริการ (บาท)			200
ต้นทุนการผลิต (บาท/batch)			213.377

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของยางธรรมชาติผสมกับผงกราไฟต์ที่เหลือจากอุตสาหกรรมหลอมโลหะในปริมาณต่างๆ ต่อค่าการนำไฟฟ้าโดยเปรียบเทียบกับคาร์บอนแบล็กอีก 2 ชนิดคือ เกรดนำไฟฟ้า (Printex XE 2B) และเกรด N339 เพื่อนำมาผลิตเป็นยางธรรมชาตินำไฟฟ้า โดยสูตรของยางคอมพอสิตที่ศึกษาแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มดังนี้

1. คอมพอสิตยางธรรมชาติผสมกับผงกราไฟต์ผงกราไฟต์มีองค์ประกอบของคาร์บอน 99.02% ลักษณะอนุภาคเป็นผลึกขนาดใหญ่ ประมาณ 10-30 ไมครอน ซึ่งมีพื้นที่ผิวจำเพาะต่ำ เมื่อนำมาผสมกับยางธรรมชาติในสัดส่วนที่ต่างกัน (5 10 15 20 30 และ 40phr) พบว่าสมบัติความต้านแรงดึง และความแข็งแรงเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเมื่อปริมาณสารตัวเติมเพิ่มขึ้น แต่การใช้ปริมาณสารตัวเติมที่เพิ่มขึ้นจะไม่ส่งผลต่อระยะยืด ณ จุดขาด การใช้ผงกราไฟต์ไม่ส่งผลต่อการปรับปรุงความต้านแรงดึง การทดสอบสมบัติเชิงกลหลังบ่มเร่งด้วยความร้อน พบว่าสมบัติเชิงกลลดลง วัสดุคอมพอสิตสามารถนำไฟฟ้าได้เมื่อผสมผงกราไฟต์ในสัดส่วนวิกฤติที่ 60 phr โดยค่าการนำไฟฟ้าเท่ากับ $7.1 \times 10^{-9} \text{ S/cm}$
2. คอมพอสิตยางธรรมชาติผสมกับคาร์บอนแบล็กเกรดนำไฟฟ้า(Printex XE 2B)คาร์บอนแบล็กเกรดนำไฟฟ้ามีองค์ประกอบของคาร์บอน 99.32% ลักษณะอนุภาคปฐุมภูมิเป็นทรงกลมขนาดเล็ก ขนาดอนุภาคประมาณ 20 nm มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง ($1130.4 \text{ m}^2/\text{g}$)เมื่อนำมาผสมกับยางธรรมชาติในสัดส่วนที่ต่างกัน(5 10 15 20 และ 25 phr) พบว่าค่าความต้านแรงดึงความต้านแรงฉีก และความแข็งแรงจะสูงขึ้นเมื่อปริมาณสารตัวเติมเพิ่มขึ้น และเมื่อทดสอบสมบัติเชิงกลหลังบ่มเร่งด้วยความร้อน พบว่าสมบัติเชิงกลลดลง ในขณะที่วัสดุคอมพอสิตสามารถนำไฟฟ้าได้เมื่อผสมคาร์บอนแบล็กในสัดส่วนวิกฤติที่ 10phr โดยค่าการนำไฟฟ้าเท่ากับ $2.7 \times 10^{-4} \text{ S/cm}$
3. คอมพอสิตยางธรรมชาติผสมกับคาร์บอนแบล็กเกรด N339คาร์บอนแบล็กเกรด N339มีองค์ประกอบของคาร์บอน 99.67% ลักษณะอนุภาคปฐุมภูมิเป็นทรงกลมขนาดเล็กขนาดอนุภาคประมาณ 36 nmค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ $147.7 \text{ m}^2/\text{g}$ แต่ต่ำกว่าคาร์บอนแบล็กเกรดนำไฟฟ้าเมื่อนำมาผสมกับยางธรรมชาติในสัดส่วนที่ต่างกัน (5 10 15 20 30 และ 40 phr) พบว่าความต้านแรงดึงความต้านแรงฉีก และความแข็งแรงสูงขึ้นเมื่อปริมาณสารตัวเติมเพิ่มขึ้น และเมื่อทดสอบสมบัติเชิงกลหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อน พบว่าสมบัติเชิงกลลดลง ในขณะที่วัสดุคอมพอสิตสามารถนำไฟฟ้าได้เมื่อผสมคาร์บอนแบล็กในสัดส่วนวิกฤติที่ 40phr โดยค่าการนำไฟฟ้าเท่ากับ $2.3 \times 10^{-6} \text{ S/cm}$

ผงกราไฟต์ที่ได้จากอุตสาหกรรมหลอมโลหะสามารถนำมาใช้เป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติได้ โดยผงกราไฟต์ช่วยให้ผลิตภัณฑ์ยางมีสมบัติเชิงกลเช่น ค่ามอดูลัสและความแข็งแรงเพิ่มขึ้น แม้ว่าค่ามอดูลัสจะต่ำกว่าประมาณ 2-3 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับค่ามอดูลัสของผลิตภัณฑ์ยางที่ผสมกับคาร์บอนแบล็กเกรดนำไฟฟ้า หรือ N339แต่ข้อดีของการใช้ผงกราไฟต์คือระยะยืด ณ จุดขาดจะไม่มีเปลี่ยนแปลง เมื่อปริมาณการใช้ผงกราไฟต์เพิ่มขึ้น ในขณะที่การใช้คาร์บอนแบล็กทั้ง 2 เกรดให้ระยะยืด ณ จุดขาดลดลง เมื่อปริมาณสารตัวเติมเพิ่มขึ้น การใช้คาร์บอนแบล็กเกรด N339 ให้ค่าความต้านแรงดึงสูงที่สุด และค่าความต้านทานแรงดึงเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณสารตัวเติมเพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่าความต้านทานแรงดึงของผลิตภัณฑ์ที่ผสมผงกราไฟต์มีค่าใกล้เคียงกับการใช้คาร์บอนแบล็กเกรดนำไฟฟ้าการนำไฟฟ้าของวัสดุคอมพอสิตที่ผสมกับคาร์บอนแบล็กเกรดนำไฟฟ้ามีค่าสูงที่สุด ($2.7 \times 10^{-4} \text{ S/cm}$) ที่สัดส่วนวิกฤติที่ต่ำที่สุด (10 phr) เมื่อเทียบกับวัสดุคอมพอสิตที่ผสมกับคาร์บอนแบล็กเกรด N339($2.3 \times 10^{-6} \text{ S/cm}$ ที่ 40 phr) และผงกราไฟต์($7.1 \times 10^{-9} \text{ S/cm}$ ที่ 60 phr)ตามลำดับพบว่าการใช้ผงกราไฟต์เป็นสารตัวเติมให้สมบัติเชิงกลและการนำไฟฟ้าที่ดีกว่า เมื่อเทียบกับคาร์บอนแบล็กทั้ง 2 เกรด เนื่องจากผง

ราไฟต์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีพื้นที่ผิวจำเพาะต่ำกว่าคาร์บอนแบล็กทั้ง 2 ชนิด และมีอนุภาคเป็นผลึกขนาดใหญ่ จำเป็นต้องมีการดัดแปรพื้นผิวของผงกราไฟต์ เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวจำเพาะของผงกราไฟต์ให้มีสมบัติใกล้เคียงกับคาร์บอนแบล็กทั้ง 2 ชนิดได้ ก็สามารถนำผงกราไฟต์มาทดแทนการใช้คาร์บอนแบล็กเพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลและการนำไฟฟ้าได้ ทั้งนี้การลดปริมาณการใช้คาร์บอนแบล็ก เป็นการลดการใช้ก๊าซธรรมชาติหรือน้ำมันปิโตรเลียมลง เนื่องจากเป็นสารตั้งต้นในการผลิตที่นับวันจะมีปริมาณลดน้อยลง นอกจากนี้การใช้ผงกราไฟต์ยังเป็นการนำวัสดุเหลือใช้มาก่อให้เกิดประโยชน์อีกด้วย

ข้อเสนอแนะ

1. ผงกราไฟต์เป็นสารตัวเติมที่เพิ่มสมบัติเชิงกลเช่น เช่น โมดูลัสและความแข็งแรงได้เพียงเล็กน้อย โดยไม่ส่งผลต่อค่าระยะยืด ณ จุดขาดถ้าต้องการเพิ่มสมบัติเชิงกลให้สูงขึ้นอาจจะต้องผสมกับสารตัวเติมที่ทำหน้าที่เสริมแรงชนิดอื่นๆ ร่วมด้วย
2. เนื่องจากค่าการนำไฟฟ้าของสารตัวเติมผงกราไฟต์ค่อนข้างต่ำ และต้องใช้ในปริมาณสูงเพื่อให้การนำไฟฟ้าดีขึ้น ดังนั้นควรจะมีการดัดแปรพื้นผิว หรือผสมกับสารตัวเติมชนิดนำไฟฟ้าอื่นเข้ารวม เช่น ผงโลหะ, ท่อนาโนคาร์บอน เป็นต้น
3. ผงกราไฟต์มีขนาดอนุภาคที่เล็กลง พื้นที่ผิวเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ค่าการนำไฟฟ้าของวัสดุดีขึ้นได้

เอกสารอ้างอิง

- [1] พงษ์ธร แซ่ฮุย. ยางนำไฟฟ้า. *วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี*, 2551, 2, 12-17.
- [2] Sengupta, R., Bhattacharya, M., Bandyopadhyay, S. and Bhowmick, A. K. A review on the mechanical and electrical properties of graphite and modified graphite reinforced polymer composites. *Prog. Polym. Sci.*, 2011, 5 (36), 638-670.
- [3] Krutmeijer, E. The Nobel Prize in Chemistry, 2000: Conductive polymers [Online]. Available from: http://nobelprize.org/nobel_prizes/chemistry/laureates/2000/adv.html [2011, Jan].
- [4] พงษ์ธร แซ่ฮุย. สารเคมียาง. *ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, ปทุมธานี*, 2548, 70-86.
- [5] EnvironmentCanada. Carbon Black [online]. Available from: <http://www.ec.gc.ca/esees/default.asp?Lang=En&n=2CF34283-1> [2011, Jan].
- [6] สุรวุฒิ ช่วงโชติและพิชญ์ สุกผล. พอลิเมอร์นำไฟฟ้า. *วารสารพลาสติก*, 2548, 2, 24-32.
- [7] Hussain, M., Choa, Y. H. and Niihara, K. Fabrication process and electrical behavior of novel pressure-sensitive composites. *Compos. Part A-Appl. S.*, 2001, 12 (32), 1689-1696.
- [8] Sau, K. P., Chaki, T. K. and Khastgir, D. Conductive rubber composites from different blends of ethylene-propylene-diene rubber and nitrile rubber. *J. Mater. Sci.*, 1997, 32, 5717-5724.
- [9] Uraldey, J. L., Ruizy, I., Santosy, I., Zubillagay, A., Bringasy, P. G., Okarizz, A. and Guraya, T. Automatic Morphological Categorisation of Carbon Black Nano-aggregates. *Lect. Notes. Comput. Sc.*, 2010, 6262, 185-193.
- [10] Evonik industries. Properties of Carbon Black Pigments [online]. Available from: <http://carbon-blackpigments.evonik.com/product/carbon-black-pigments/en/about/properties/pages/default.aspx> [2011, Jan].
- [11] Leblanc, J. L. Rubber-filler interactions and rheological properties in filled compounds. *Prog. Polym. Sci.*, 2002, 27, 627-687.
- [12] Azura, A. R., Ghazali, S. and Mariatti M. Effects of the filler loading and aging time on the mechanical and electrical conductivity properties of carbon black filled natural rubber. *J. Appl. Polym. Sci.*, 2008, 110, 747-752.
- [13] Job, A. E., Oliveira, F. A., Alves, N., Giacometti, J. A. and Mattoso, L. H. C. Conductive composites of natural rubber and carbon black for pressure sensors. *Synthetic. Met.*, 2003, 135-136, 99-100.
- [14] Oliveira, F. A., Alves, N., Giacometti, J. A., Constantino, C. J. L., Mattoso, L. H. C., Balan, A. M. O. A. and Job, A. E. Study of the thermomechanical and electrical properties of conducting composites containing natural rubber and carbon black. *J. Appl. Polym. Sci.*, 2007, 106, 1001-1006.
- [15] Sau, K. P., Chaki T. K. and Khastgir, D. Carbon fibre filled conductive composites based on nitrile rubber (NBR), ethylene propylenediene rubber (EPDM) and their blend. *Polymer*, 1998, 39 (25), 6461-6471.
- [16] Yigit, S., Hacaloglu, J., Akbulut, U. and Toppare, L. Conducting polymer composites of polythiopene with natural and synthetic rubbers. *Synthetic. Met.*, 1996, 79, 11-16.
- [17] Li, Z., Zhang, J. and Chen, S. Effect of carbon blacks with various structures on electrical properties of filled ethylene-propylene-diene rubber. *J. Electrostat.*, 2009, 67, 73-75.
- [18] Blow, C. M. and Hepburn, C. Rubber Technology and Manufacture. Second edition, Butterworth Scientific for the Plastics and Rubber Institute, London, 1982, 400.

ภาคผนวก ก

การคำนวณการวิเคราะห์หึ่งค์ประกอบแบบประมาณ โดยวิธี proximate analysis

1. ความชื้น (moisture)

ชั่งสารตัวเดิม	1.0071	กรัม
น้ำหนักถ้วยกระเบื้องเปล่าก่อนอบ	41.3580	กรัม
น้ำหนักถ้วยกระเบื้องและสารตัวเดิมหลังอบ	42.3642	กรัม
น้ำหนักสารตัวเดิมหลังอบ	1.0062	กรัม

จากสมการที่ (2.1)

$$\text{ร้อยละความชื้น} = \frac{\text{น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ} - \text{น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ}}{\text{น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ}} \times 100$$

$$\text{ร้อยละความชื้น} = \frac{1.0071 - 1.0062}{1.0071} \times 100$$

$$\text{ร้อยละความชื้น} = 0.0894$$

ดังนั้นสารตัวเดิมมีองค์ประกอบความชื้นอยู่ 0.0894% โดยน้ำหนัก

2. สายที่ระเหยได้ (volatile matter)

ชั่งสารตัวเดิม	1.0011	กรัม
น้ำหนักถ้วยเปล่าก่อนอบ	24.0115	กรัม
น้ำหนักถ้วยและสารตัวเดิมหลังอบ	25.0009	กรัม
น้ำหนักสารตัวเดิมหลังอบ	0.9894	กรัม

จากสมการที่ (2.2)

$$\text{ร้อยละสายที่ระเหยได้} = \left[\frac{\text{น้ำหนักตัวอย่างก่อนเผา} - \text{น้ำหนักตัวอย่างหลังเผา}}{\text{น้ำหนักตัวอย่างก่อนเผา}} \times 100 \right] - \text{ร้อยละความชื้น}$$

$$\text{ร้อยละสายที่ระเหยได้} = \left[\frac{1.0011 - 0.9894}{1.0011} \times 100 \right] - 0.0894$$

$$\text{ร้อยละสายที่ระเหยได้} = 0.9111$$

ดังนั้นสารตัวเดิมมีองค์ประกอบสายที่ระเหยได้อยู่ 0.9111 % โดยน้ำหนัก

3. เถ้า (ash)

ชั่งสารตัวเดิม	1.0065	กรัม
น้ำหนักถ้วยเปล่าก่อนอบ	24.1559	กรัม
น้ำหนักถ้วยและสารตัวเดิมหลังอบ	23.1702	กรัม
น้ำหนักสารตัวเดิมหลังอบ	0.0143	กรัม

จากสมการที่ (2.3)

$$\text{ร้อยละเถ้า} = \frac{\text{น้ำหนักตัวอย่างหลังเผา}}{\text{น้ำหนักตัวอย่างก่อนเผา}} \times 100$$

$$\text{ร้อยละเถ้า} = \frac{0.0143}{1.0065} \times 100$$

$$\text{ร้อยละเถ้า} = 1.4208$$

ดังนั้นสารตัวเดิมมีองค์ประกอบเถ้าอยู่ 1.4208 % โดยน้ำหนัก

4. คาร์บอนคงตัว (fixed carbon)

จากข้อมูลข้างต้น

- ร้อยละความชื้น	0.0894
- ร้อยละสารที่ระเหยได้	0.9111
- ร้อยละเถ้า	1.4208

จากสมการที่ (2.4)

$$\text{ร้อยละคาร์บอนคงตัว} = 100 - (\text{ร้อยละความชื้น} + \text{ร้อยละเถ้า} + \text{ร้อยละสารที่ระเหยได้})$$

$$\text{ร้อยละคาร์บอนคงตัว} = 100 - (0.0894 + 0.9111 + 1.4208)$$

$$\text{ร้อยละคาร์บอนคงตัว} = 97.4894$$

ดังนั้นสารตัวเดิมมีองค์ประกอบคาร์บอนคงตัวอยู่ 97.4894 % โดยน้ำหนัก

ภาคผนวก ข

ผลการวิเคราะห์ค่าการนำไฟฟ้า

ตาราง ข.1ผลค่าการนำไฟฟ้าของคอมพอลิเตียกธรรมชาติผสมร่วมผงกราไฟต์

Sample code	L (cm)	A (cm ²)	resistance (ohm)	conductivity (S/cm)	I (mA)	V (V)
NR-0	0.1915	2.84	9,981,060.00	7.0673E-09	0.0111	108.60
					0.0203	200.70
					0.0404	404.00
					0.0604	600.00
G-5	0.1912	2.84	9,981,834.33	7.0668E-09	0.0112	108.50
					0.0204	201.20
					0.0405	401.00
					0.0605	601.00
G-10	0.1820	2.84	9,965,818.66	7.0782E-09	0.0112	108.50
					0.0204	201.20
					0.0405	401.00
					0.0605	601.00
G-15	0.1810	2.84	9,952,461.69	7.0877E-09	0.0111	108.50
					0.0205	201.80
					0.0415	411.00
					0.0615	610.00
G-20	0.1754	2.84	9,951,539.23	7.0883E-09	0.0112	108.50
					0.0208	206.50
					0.0406	402.00
					0.0603	598.00
G-30	0.2251	2.84	9,931,277.46	7.1028E-09	0.0112	108.90
					0.0230	227.40
					0.0413	409.00
					0.0609	606.00

ตาราง ข.1 ผลค่าการนำไฟฟ้าของคอมพอสิตยางธรรมชาติผสมร่วมผงกราฟไฟต์ (ต่อ)

Sample code	L (cm)	A (cm ²)	resistance (ohm)	conductivity (S/cm)	I (mA)	V (V)
G-40	0.2180	2.84	9,922,901.40	7.1088E-09	0.0112	108.60
					0.0306	303.10
					0.0425	422.00
					0.0613	608.00
G-60	0.1437	2.84	9,901,498.03	7.1241E-09	0.0112	108.90
					0.0203	200.20
					0.0412	408.00
					0.0609	604.00
G-80	0.1473	2.84	2,282,633.96	2.2765E-08	0.0150	97.00
					0.0850	140.00
					0.7600	200.00
G-100	0.2000	2.84	25,875.10	2.7262E-06	0.7110	61.00
					1.4770	85.00
					2.7650	114.00
					8.3000	177.00

ตาราง ข.2 ผลค่าการนำไฟฟ้าของคอมพอสิตยางธรรมชาติผสมร่วมคาร์บอนแบล็กเกรดการนำไฟฟ้า (Printex XE 2B)

Sample code	L (cm)	A (cm ²)	resistance (ohm)	conductivity (S/cm)	I (mA)	V (V)
NR-0	0.1915	2.84	9,981,060.00	7.0673E-09	0.0111	108.60
					0.0203	200.70
					0.0404	404.00
					0.0604	600.00
CB-5	0.2217	2.84	9,975,933.47	7.8370E-09	1.12E-02	1.09E+02
					2.04E-02	2.01E+02
					4.66E-02	4.62E+02
					5.29E-02	5.25E+02
CB-10	0.2402	2.84	309.33	2.7388E-04	9.97E-02	3.80E-02
					1.65E+00	5.50E-01
					2.81E+00	8.55E-01
					4.10E+00	1.17E+00
CB-15	0.2048	2.84	74.63	9.6772E-04	3.07E+00	6.60E-02
					6.20E+01	6.20E-01
					1.25E+01	1.02E+00
					1.96E+01	1.33E+00
CB-20	0.2612	2.84	43.74	2.1000E-03	4.00E+00	5.60E-01
					1.24E+01	1.00E+00
					2.44E+01	1.22E+00
					3.45E+01	1.50E+00
CB-25	0.2442	2.84	27.72	3.1230E-03	5.80E+00	3.00E-01
					1.36E+01	5.50E-01
					1.85E+01	6.50E-01
					2.75E+01	8.38E-01
					4.48E+01	1.00E+00

ตาราง ข.3 ผลค่าการนำไฟฟ้าของคอมพอสิตยางธรรมชาติผสมร่วมคาร์บอนแบล็กเกรด N339

Sample code	L (cm)	A (cm ²)	resistance (ohm)	conductivity (S/cm)	I (mA)	V (V)
NR-0	0.1915	2.84	9,981,060.00	7.0673E-09	0.0111	108.60
					0.0203	200.70
					0.0404	404.00
					0.0604	600.00
NCB-5	0.2258	2.84	9,953,852.31	7.0867E-09	0.0112	108.90
					0.0202	200.10
					0.0403	400.00
					0.0605	600.00
NCB-10	0.2223	2.84	9,950,723.76	7.0889E-09	0.0112	108.90
					0.0204	201.90
					0.0407	403.00
					0.0605	600.00
NCB-15	0.2336	2.84	9,919,666.25	7.1111E-09	0.0112	108.70
					0.0203	200.70
					0.0405	400.00
					0.0603	600.00
NCB-20	0.2333	2.84	9,915,426.95	7.1141E-09	0.0112	108.70
					0.0203	200.40
					0.0405	401.00
					0.0605	601.00
NCB-30	0.2301	2.84	9,934,716.46	7.1003E-09	0.0112	108.60
					0.0203	200.10
					0.0405	401.00
					0.0603	601.00
NCB-40	0.2217	2.84	30,624.04	2.3034E-06	0.0130	1.00
					0.1050	5.00
					0.2500	10.00
					0.6350	20.21

ตาราง ข.3 ผลค่าการนำไฟฟ้าของคอมพอสิตยางธรรมชาติผสมร่วมคาร์บอนแบล็กเกรด N339 (ต่อ)

Sample code	L (cm)	A (cm ²)	resistance (ohm)	conductivity (S/cm)	I (mA)	V (V)
NCB-50	0.2217	2.84	215.14	3.2788E-04	1.7700	1.00
					8.5000	3.00
					18.0000	5.24
					41.5000	10.03
					57.6000	13.18
NCB-60	0.2217	2.84	83.55	8.4428E-04	10.3000	2.20
					34.0000	5.28
					90.0000	10.15
					138.0000	13.00
NCB-80	0.2217	2.84	47.37	1.4891E-03	18.0000	1.10
					51.0000	2.30
					128.0000	5.10
					214.0000	10.10
					318.0000	15.10

ตัวอย่างการคำนวณค่าการนำไฟฟ้าของคอมพอสิตยางธรรมชาติผสมร่วมผงกราไฟต์ ณ สัดส่วนวิกฤติที่ 60 phr

จากข้อมูล เส้นผ่านศูนย์กลางชั้นตัวอย่าง 1.9 cm

พื้นที่หน้าตัด 2.84 cm^2

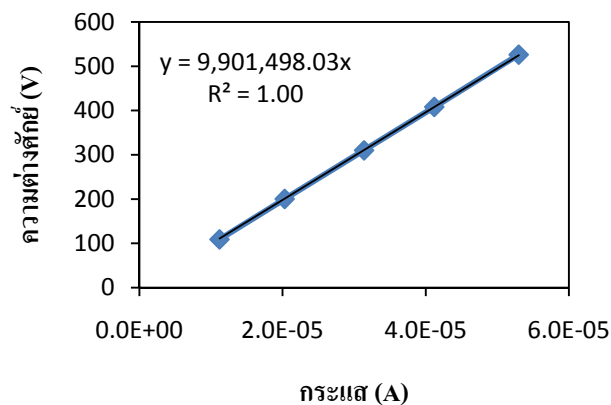
ความหนา 0.143 cm

จากข้อมูลดังรูปที่ ข.1 วัสดุคอมพอสิตยางธรรมชาติมีความต้านทานไฟฟ้า 9,901,498.03 Ω นำข้อมูลดังกล่าวไปคำนวณดังสมการที่ (2.8)

$$\text{การนำไฟฟ้าเชิงปริมาตร (S/cm)} = \frac{\text{ความหนา(เซนติเมตร)}}{\text{ความต้านทาน(โอห์ม)} \times \text{พื้นที่หน้าตัด (ตารางเซนติเมตร)}}$$

$$\text{การนำไฟฟ้าเชิงปริมาตร (S/cm)} = \frac{0.143}{9,901,498.03 \times 2.84}$$

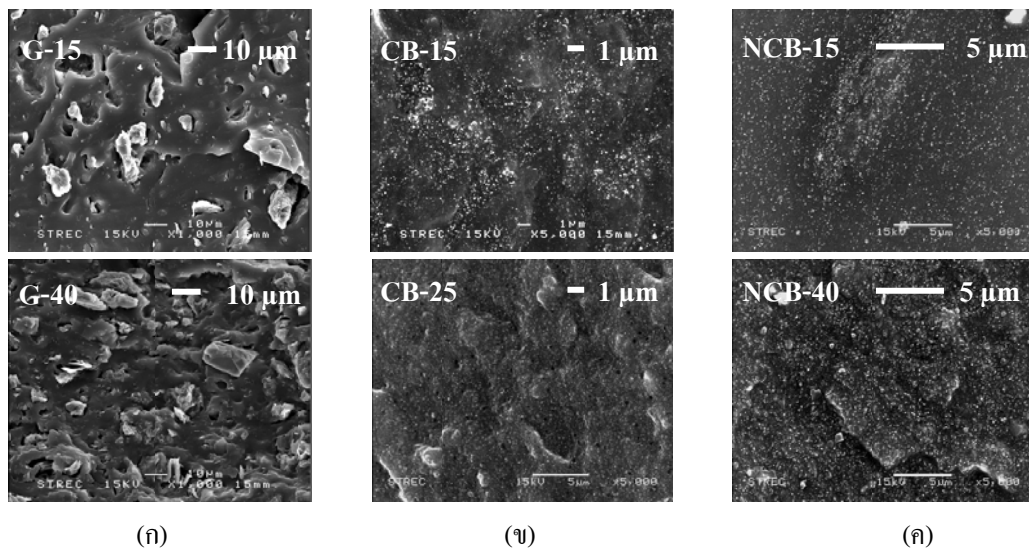
$$\text{การนำไฟฟ้าเชิงปริมาตร (S/cm)} = 7.1241 \times 10^{-9} \text{ S/cm}$$



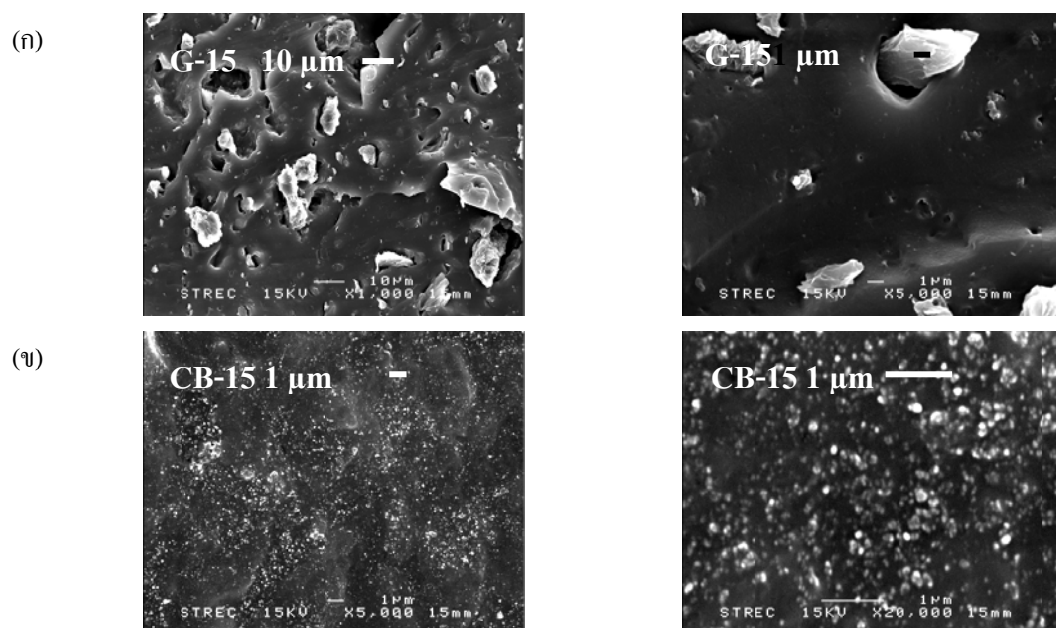
รูปที่ ข.1กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสและความต่างศักย์ของคอมพอสิตยางธรรมชาติผสมร่วมผงกราไฟต์ที่สัดส่วนวิกฤติ60 phr

ภาคผนวก ค

ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของคอมพอลิเตียกธรรมชาติผสมกับสารตัวเติม



รูปที่ ค.1 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของคอมพอลิเตียกธรรมชาติผสมกับ(ก) พงกราไฟต์ที่กำลังขยาย 1000 เท่า (ข) คาร์บอนแบล็กเกรดการนำไฟฟ้า (Printex XE 2B) ที่กำลังขยาย 5000 เท่า และ (ค) คาร์บอนแบล็กเกรด N339 ที่กำลังขยาย 5000 เท่าด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



รูปที่ ค.2 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของคอมพอลิเตียกธรรมชาติผสมกับ(ก) พงกราไฟต์ที่กำลังขยาย 1,000 และ 5,000 เท่าตามลำดับ (ข) คาร์บอนแบล็กเกรดการนำไฟฟ้า (Printex XE 2B) ที่กำลังขยาย 5,000 และ 20,000 เท่าตามลำดับ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ภาคผนวก ง

ตัวอย่างการคำนวณต้นทุนวัสดุคอมพอสิตยางธรรมชาติผสมร่วมผงกราฟต์ ณ จุดตัดส่วนวิกฤติที่ 60 phr (G-60)

1. การคำนวณค่าสารเคมี

ยางธรรมชาติราคา	102 บาท/กิโลกรัม	ใช้ 0.10 กิโลกรัม	เป็นเงินเท่ากับ $102 \times 0.10 = 10.2$ บาท
ผงกราฟต์ราคา	2 บาท/กิโลกรัม	ใช้ 0.06 กิโลกรัม	เป็นเงินเท่ากับ $2 \times 0.06 = 0.12$ บาท
น้ำมันแฉะฟทานิกราคา	70 บาท/กิโลกรัม	ใช้ 0.006 กิโลกรัม	เป็นเงินเท่ากับ $70 \times 0.006 = 0.42$ บาท
แอทพิซิงค์ออกไซด์ราคา	88 บาท/กิโลกรัม	ใช้ 0.004 กิโลกรัม	เป็นเงินเท่ากับ $88 \times 0.004 = 0.352$ บาท
กรดสเตียริกราคา	58 บาท/กิโลกรัม	ใช้ 0.002 กิโลกรัม	เป็นเงินเท่ากับ $58 \times 0.002 = 0.116$ บาท
CBS ราคา	164 บาท/กิโลกรัม	ใช้ 0.001 กิโลกรัม	เป็นเงินเท่ากับ $164 \times 0.001 = 0.164$ บาท
กำมะถันราคา	26 บาท/กิโลกรัม	ใช้ 0.0025 กิโลกรัม	เป็นเงินเท่ากับ $26 \times 0.0025 = 0.065$ บาท
รวมเป็นเงินค่าสารเคมีเท่ากับ 11.437 บาท			

2. การคำนวณค่าบริการและค่าไฟฟ้า

two-roll mill ค่าบริการราคา	100 บาท/batch	ใช้ 1 batch	เป็นเงินเท่ากับ $100 \times 1 = 100$ บาท
compression molding ค่าบริการราคา	100 บาท/batch	ใช้ 1 batch	เป็นเงินเท่ากับ $100 \times 1 = 100$ บาท
รวมเป็นเงินค่าบริการเท่ากับ 200 บาท			

ดังนั้นวัสดุคอมพอสิตยางธรรมชาติผสมร่วมผงกราฟต์(G-60)มีต้นทุนการผลิตเท่ากับ $11.473 + 200 = 211.473$ บาท

ภาคผนวก จ

รายละเอียด (specification) ของสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

1. ยางธรรมชาติ (natural rubber, NR) เกรด STR-5L



๒๐๓๐๗

บริษัท พี เอ รับเบอร์ จำกัด

๑๑ หมู่ ๑๑ พหลโยธินราช อ.ปรางค์ อ.ชุมพร 86210 Tel.081-3967636 Fax. 077-651270

ใบรับรองผลการทดสอบ

Ref...207.../...2553

P-10-10-11

ฉบับที่ 1.0

วันที่ออกขาย 26 พฤษภาคม 2554

เลขที่ Order 1101D-044 Plan No. CP-SSL-PD 071 จำนวน : 450 กิโลกรัม (15,000 kgs.)

LOT NO./วันผลิต	A0300	P4	18/05/2554	ก้อนที่	(1,801-1,830)
A0301	P1,P3,P4,P5	18/05/2554	ก้อนที่	(1,831-1,950)	
A0302	P1,P2,P3,P4,P5	18/05/2554	ก้อนที่	(1,951-2,100)	
A0303	P1,P2,P5	18/05/2554	ก้อนที่	(2,101-2,190)	
A0304	P1,P2	18/05/2554	ก้อนที่	(2,191-2,250)	

ปลายทาง บริษัท แพนอินโนเวชั่น จำกัด

Property	STR 5L Limit	Test results of Lot No.				
		A0300	A0301	A0302	A0303	A0304
Dirt	0.04 max	0.005	0.006	0.004	0.004	0.004
Ash	0.40 max	0.14	0.16	0.19	0.19	0.21
Volatile matter	0.80 max	0.26	0.24	0.24	0.27	0.27
Nitrogen	0.60 max	0.36	0.37	0.39	0.38	0.38
Colour	6.0 max	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5
Initial Wallace Plasticity (Po)	35.0 min	40.2	39.7	40.6	41.2	40.1
range		39-42	38-42	40-42	40-43	38-43
Plasticity Retention Index (PRI)	60.0 min	87.9	87.1	85.2	89.0	87.1
Mooney viscosity ML (1' + 4') 100° C	-	63.2	62.5	62.4	61.9	63.5

27/5/2011

ลงชื่อ.....หัวหน้าแผนกคุณภาพ

(นางสาวอุรวิรัตน์ เต็มดี)

01/03/2011

2. คาร์บอนแบล็กเกรดการนำไฟฟ้า(Printex XE 2B)

Specification
PRINTEX XE 2 B

Degussa AG
FP-FA-A12
Karin Lippke-Lohmer

Spec. Info: 1957/1
Material number, Block: 25,1570:0000,00
Valid for all forms of packaging
Standard

page 1 of 1
date of print: 13.08.2003
valid from: 01.09.2000

Product specification

Properties and Test Methods	Units	Target Values (Spec. Limits)
713/2037 Iodine adsorption 713/2006 following ASTM D 1510	mg/g	1125,0 (1025,0 - 1225,0)
713/2008 DBP Absorption 713/2012 following ASTM D 2840 following DIN 5361	ml/100 g	420,0 (380,0 - 460,0)
713/2009 Sieve residue 45 µm Mocker 713/2003 following ISO 787-13	ppm	< = 500
713/2039 Ash content 650°C 713/2031 following DIN 5366 A	%	< = 2,0
713/2011 Sulfur content 713/2012 following DIN 5324	%	< = 0,8
713/2013 Volatiles at 105°C 713/2004 following ISO 787-2	%	< = 1,0
713/2042 pH value 713/2005 following ISO 787-9		7,8 (6,3 - 9,3)

3. คาร์บอนแบล็กเกรด N339 (carbon black N339)



Analytical Data of Sample

Date : 9/12/2011
 Consignee : To whom it may concern
 Grade : N-339

Test	Unit	Method	Typical Values	Results
Iodine Adsorption Number	mg/g	<u>ASTM</u> D1510	90	88
DBP Absorption Number	ml/100g	D2414	120	120
Sieve Residue:				
: Screen Size 500 μ m (No.35)	%	D1514	0.001 max	0.0000
: Screen Size 45 μ m (No.325)	%	D1514	0.1 max	0.0039
Heating Loss	%	D1509	2.5 max	0.38

for Niyakorn Y.

Head of Laboratory

4. น้ำมันแนฟเทนิค (naphthenic oil)

JIS-DIN

บริษัท จิส ดิน จำกัด

471 ซ.เทียนทะเล 26 แยก 6-1 ถนนบางขุนเทียน-ชายทะเล แขวงท่าข้าม เขตบางขุนเทียน กรุงเทพฯ 10150

ผู้ผลิต/ตัวแทนจำหน่ายผลิตภัณฑ์หล่อลื่น เคมี สารละลาย ตลับลูกปืนทุกชนิด โทรศัพท์ (02) 453-6141-2 / โทรสาร (02) 453-6143

CERTIFICATE OF ANALYSIS

PRODUCT NAME : **Rub 641**

REPORT DATE : **30.05.54**

COA. NO. : **6300554**

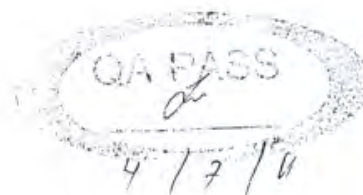
SAMPLE DATE : **30.05.54**

Property	Method	Unit	Specification	Result
Colour	ASTM D 1500	-	Max. 3.0	2.70
Viscosity, Kinematic @ 40°C	ASTM D 445	cSt.	15.00-30.00	19.70
@ 100°C	ASTM D 445	cSt.	2.85-4.00	3.80
Flash Point, PMcc	ASTM D 93	@ °C	Min. 130	169
Neutralization Number	ASTM D 974	mg KOH/g	Max. 0.10.	<0.05
Pour Point	ASTM D 97	@ °C	Max. -29	-27
Polycyclic Aromatic Content	IP 346	% m/m	-	10
Aniline Point	ASTM D 611	@ °C	-	74
Carbon Atom Analysis	EXON	% wt.	-	
c-aromatic			-	10
c-naphthanic			-	36
c-paraffinic			-	53
Water Content	ASTM D 95-83(90)	% vol.	Max. 0.05	<=0.05
Appearance	Visual	-	B&C	B&C

Remark : RoHS Free Product

Approved By 

Approved Date 30/05/54



5. แอกร์ฟซิงก์ออกไซด์ (active zinc oxide, ZnO)



鉅安工業股份有限公司

HSIEN ANG INDUSTRIAL CO., LTD

NO.15, YI-GONG 2ND ROAD YI-CHU IND.ZONE
YI-CHU HSIANG, CHIA-YI HSIEN TAIWAN
嘉義縣義竹鄉義竹工業區義工二路15號

TEL: (05) 3426831 (5line)

FAX: (05) 3427392

http://www.hsienang.com.tw

E-mail: hsien_ang@msa.hinet.net

分析. 試驗結果報告 ANALYSIS AND TEST RESULTS

MATERIAL NAME 品名	ZINC OXIDE ACTIVE 氧化鋅	DATE 日期	01/04/2011		
EXPORT NO 貨物編號	QA 23974561	LOT NO 批號	103140026, 103150027, 103160028, 103160029, 103170030, 103180031, 103260039, 103280040		
CUSTOMER 客戶	裕豐源	QUANTITY 數量	20000KG.		
CONTROL ITEMS 檢測項目	SPECIFICATION 規格值	MEASUREMENT 檢測值	JUDGMENT (判定)		
			PASS	FAIL	
氧化鋅(ZnO)	%	99-99.8	96.5	✓	
鋅(Zn)	%	74.67-78.69	77.48	✓	
鉛(Pb)	ppm	5 max	0.3	✓	
鎘(Cd)	ppm	5 max	0.8	✓	
銅(Cu)	ppm	15 max	3.7	✓	
錳(Mn)	ppm	10 max	1.5	✓	
鈣(Ca)	ppm	5 max	0.2	✓	
六價鉻(Cr ⁶⁺)	ppm	0.1 max	0	✓	
汞(Hg)	ppm	0.1 max	0	✓	
水份(H ₂ O)	%	1 max	0.4	✓	
篩網(Average particle) 325mesh		99.99%pass	99.99%pass	✓	
審核	化驗				

25/5/11

(No. Syarikat 185866-M)
(A Subsidiary of Kuala Lumpur - Kepong Bhd)
Lot 1245, Kundang Industrial Estate, 48020 Rawang, Selangor Darul Ehsan, Malaysia
Tel: 603-60344800 (Hunting Line) Fax: 603-60341270, 60342340
Email: www.zikolee.com.my

CUSTOMER :	CHEMMIN CORPORATION LTD.	DATE :	09TH JUNE 2011
PRODUCT :	RUBBER GRADE STEARIC ACID B1810 FLAKE	L/C NO :	ML11012908
OUR SALES CONTRACT NO. :	PO 33460	LOT NUMBER :	260581-810POLIK
MANUFACTURING DATE (MFG) :	26-05-2011	LAB-REPORT NO.	QA-PO 33460-0005A
EXPIRY DATE (EXP) :	25-05-2012		
QUANTITY OF THE MATERIAL OF EACH LOT NUMBER : 1320 BAGS			

TEST	ACTUAL TEST RESULTS	SPECIFICATION
Acid Value, mg KOH/g	208	195 MIN
Saponification Value, mg KOH/g	210	196 MIN
Iodine Value, g Iodine /100g	4.3	8 MAX
Colour, Lovibond 54.1	3.5Y 0.6R	20 BY 2 OR MAX
Titre, °C	61.2	62 MIN

PALM OIL CO. SDN. BHD.

62105-02

$$\hat{A}_{\text{eff}} = \hat{A}_0 + \frac{\beta}{2} \left(\hat{C}^\dagger \hat{C} - \hat{C} \hat{C}^\dagger \right)$$

© 1999 by John Wiley & Sons, Inc.

08/07/2011

7. กำมะถัน (sulfur)



บริษัท สยามเคมี จำกัด (มหาชน)

26/38-37 ชั้น 11 อาคารอรรถาณัติ ถนนพหลโยธิน แขวงจตุจักร 10330
โทร. 0-2801128-9, 0-22543890-8, 0-22513022-4, 0-22520658-8 โทรสาร 0-22543899
โทรสาร 186 ถนนสุขุมวิท อ.พรหมบุรีจ.สิงห์ ๑ อ.สมุทรปราการ 10290 โทร. 0-28157030-40 (ติดต่อในมือ) โทรสาร : 0-2815-6999

THE SIAM CHEMICALS PUBLIC CO.,LTD.

26/38-37 11th Fl. Otrakarn Bldg., Chulalongkorn Rd., Pomprab, Bangkok 10330
Tel. 0-22501128-9, 0-22543890-8, 0-22513022-4, 0-22520658-8 Fax: 0-22543899
Fax : 186 Sukawadi Rd., Amphur Pramong, Samutprakarn 10290 Tel. 0-28157030-40 (AUTO) Fax : 0-2815-6999

CERTIFICATE OF ANALYSIS

DESCRIPTION : SULPHUR POWDER
CUSTOMER'S NAME : บริษัท สโว อินดัสทรี จำกัด
CERTIFICATE NO. : 066 / กษ
ISSUE DATE : 15 / 6 / 2554

TEST METHOD	INSPECTION ITEMS	SPECIFICATION	TEST RESULTS
TIS 692-2530	PURITY (%)	99.50 % (MIN)	99.50
TIS 692-2530	ASH (%)	0.15 % (MAX)	0.014
TIS 692-2530	CARBON (%)	0.05 % (MAX)	0.012
TIS 692-2530	MOISTURE (%)	0.15 % (MAX)	0.014
TIS 692-2530	ACIDITY (%)	0.05 % (MAX)	0.012

REMARK : LDT NO. 060 / กษ

% FINENESS THROUGH 325 Mesh = 99.50

15/06/11

AUTHORIZED BY 
CHIEF OF QUALITY CONTROL DIVISION



8. ไซโคลเฮกซิลเบนโซไทอะซัลไฟน์ (n-cyclohexyl-2-benzothiazyl sulfenamide, CBS)

MONFLEX®

MONFLEX PTE. LTD.
(Reg. No.: 200812970W)

9H, Yuan Ching Rd. #12-82, Singapore 618650.
Email: monflex@singnet.com.sg; MONFLEX@ymail.com

Certificate of Analysis

Date: January 10, 2011

ATTN:

Customer Order No : RT10-071
Order Quantity : 4,000 kg

Trade Name : MONFLEX CBS
Product Form : Granule
Chemical Name : N-Cyclohexyl-2-benzothiazole sulfenamide
CAS # : 95-33-0

Lot Number : 11010601
Lot Quantity : 4,000 kg
Manufactured by : Northeast Auxiliary Chemical Industry Co., Ltd
Date of Manufacture : January 06, 2011
Date of Analysis : January 07, 2011

Property	Unit	Specification	Result
Appearance		Light yellow or greyish white granule	
Melting Point, Initial	°C	98.00 (min)	98.50
Melting Point, End	°C		102.00
Purity	%	95.00 (min)	96.12
Heat Loss	%	0.30 (max)	0.12
Ash content	%	0.30 (max)	0.08
Hardness	N	0.6-2.0	1.09

Approved by

6/5/11
-9 ต.อ. 2554
Huan Kim Huan
Quality Control & Technical Manager
9/13

Production of conducting natural rubber composite by graphite waste from metals smelting industry

Amornthep Klayhan¹, Sarut Thongprecha¹
and Sirilux Poompradub^{1,2}

¹ Department of Chemical Technology, Faculty of Science, Chulalongkorn University;

² Center of Excellence on Petrochemical and Materials Technology, Chulalongkorn University;
Tel: 0-2218-7518, e-mail: sirilux.p@chula.ac.th

The effect of graphite content on electrical conductivity and mechanical properties of natural rubber composite material was investigated. Carbon black was used as a reference. Characterizations of graphite were verified by proximate analysis, CHN analysis, thermogravimetric analysis, X-ray diffraction and X-ray fluorescence, respectively. Cure characteristic of rubber compounding by using sulfur system for vulcanization in various filler loadings (5-40 part per hundred rubbers: phr) were performed by a moving die rheometer. The mechanical properties and thermal properties of composite materials were examined in terms of tensile strength, tear strength and hardness, respectively. The electrical properties were also tested by four point probe and the morphology of composites was illustrated by using scanning electrons microscopy.

Keywords: Carbon black, conducting polymer, graphite, natural rubber

Study the application of chitosan membrane in DMFC

Phansa Tungwattanapipat¹, Danupol Ngamsittisak¹
and Khantong Soontarapa¹

¹ Fuel Research Center, Department of Chemical Technology, Faculty of Science, Chulalongkorn University;
Tel: 0-2218-7678, e-mail: khantong@sc.chula.ac.th

This research aimed to develop a direct methanol fuel cell (DMFC) as an alternative electricity generating device. The DMFC in this study used the acid treated commercial chitosan membranes. The

palladium (Pd) catalyst was loaded on the membrane by electroless plating technique. The plated membrane was sandwiched between two carbon papers for hot pressing to prepare as a membrane electrode assembly (MEA). The DMFC demonstration unit was designed and fabricated for testing the membrane performance. The EDX result showed the existence of Pd catalyst on the membrane. The membrane proton conductivity was measured to find the optimum plating condition. It was found that the proton conductivity at optimum condition of 303 K was 0.0198 S/cm. The optimum condition for hot pressing was at 35 kg/cm² and 333 K. The open circuit volt of 41 mV was obtained from the 1 M direct methanol single cell.

Keywords: Chitosan membrane, Pd, electroless plating, DMFC

Morphological, thermal, and mechanical properties of polylactic acid blend with natural rubber and polymethyl methacrylate

Wuthiphong Dechatiwong¹
and Sirilux Poompradub^{2,3}

¹ Program in Petrochemistry and Polymer Science, Faculty of Science, Chulalongkorn University;

² Department of Chemical Technology, Faculty of Science, Chulalongkorn University;

³ Center of Excellence on Petrochemical and Materials Technology, Chulalongkorn University;
Tel. 0-2218-7523-5, e-mail: sirilux_p@chula.ac.th

The polylactic acid (PLA)/natural rubber (NR) composites blend together with polymethyl methacrylate (PMMA) were prepared in an internal mixer. Two kinds of NR were used, i. e., NR latex and solid NR. Due to the poor compatibility between PLA and NR, PMMA was used as a compatibilizer in this study. The PMMA and NR contents were varied. The morphological studies of composite materials were investigated by scanning electron microscope. Thermal and mechanical properties of composite materials were also investigated by thermogravimetric analysis and universal tensile testing, respectively.

Keywords: Polylactic acid, natural rubber, polymethyl methacrylate

สรุปข้อคิดเห็นของผู้ทรงคุณวุฒิต่อโครงการ

“การผลิตยางธรรมชาตินำไฟฟ้าจากผงกราไฟต์ที่เหลือจากอุตสาหกรรมหลอมโลหะ” สัญญาเลขที่ RDG 5450058

ข้อคิดเห็น/ข้อเสนอแนะของผู้ทรงคุณวุฒิ	ชี้แจงโดยนักวิจัย
ความเห็นด้านการพิมพ์ (Editor) 1. แก้ไขการใช้คำ ควรใช้ให้สม่ำเสมอ เช่น Carbon black ควรเรียกให้เหมือนกันทุกแห่ง 2. ใช้คำว่า “เถา” แทนคำว่า ขี้เถา 3. ให้ตรวจสอบการพิมพ์เกี่ยวกับเอกสารอ้างอิง - หน้า 14 อ้างอิงถึงรายการที่ 19 แต่ในเอกสารอ้างอิงมีเพียง 17 รายการ - หน้า 8 อ้างอิงหมายเลขเอกสารอ้างอิง ที่ตรวจสอบแล้วไม่ตรงกับในเอกสารอ้างอิง หน้า 37 - ในเอกสารอ้างอิง Text ที่อ้าง (เช่น No. 17) ไม่ได้ระบุหน้าไว้ 4. ในภาคผนวก ข บางตารางใช้ทศนิยม 2 ตำแหน่ง บางตารางใช้ 4 ตำแหน่ง (ค่า Conductivity) 5. แก้ไขเพิ่มเติมตามรายการที่แนบ	1. ได้แก้ไขตามคำแนะนำของผู้ทรงคุณวุฒิเรียบร้อยแล้ว 2. ได้แก้ไขตามคำแนะนำของผู้ทรงคุณวุฒิเรียบร้อยแล้ว 3. ได้แก้ไขตามคำแนะนำของผู้ทรงคุณวุฒิเรียบร้อยแล้ว 4. ได้แก้ไขตามคำแนะนำของผู้ทรงคุณวุฒิเรียบร้อยแล้ว 5. ได้แก้ไขตามคำแนะนำของผู้ทรงคุณวุฒิเรียบร้อยแล้ว
ความเห็นด้านวิชาการ 1. การวิจารณ์ผลการทดลอง ควรจะเป็นการวิจารณ์ว่า ผลที่ได้สูงหรือต่ำ เพราะอะไรดีหรือไม่อย่างไร ไม่ใช่บอกแค่สูงหรือต่ำ ถือว่าไม่ใช่วิธีการวิจารณ์ผล 2. การสรุปผลการทดลอง ควรบอกว่า สารตัวเดิมที่นำมาทดสอบให้ผลอย่างไร เมื่อเทียบกับ 3 ตัว ซึ่ง ในงานวิจัยบอกเพียงว่า ผลกราไฟต์ให้ผลการทดสอบค่าความต้านแรงดึงและสมบัติเชิงกลอื่น ๆ ดีน้อยกว่า ควรจะบอกว่าผลิตภัณฑ์ที่ดีควรมีค่าเท่าใด ผงกราไฟต์มีค่าดีน้อยกว่ามากน้อยอย่างไร เมื่ออ่านแล้วไม่รู้ว่า จะนำไปใช้งานได้ในระดับไหน	1. ได้แก้ไขตามคำแนะนำของผู้ทรงคุณวุฒิเรียบร้อยแล้ว โดยเฉพาะในหัวข้อ 4.1 2. ได้แก้ไขตามคำแนะนำของผู้ทรงคุณวุฒิเรียบร้อยแล้วในส่วนสรุปผลการทดลอง บทที่ 5 หน้า 35 แต่อย่างไรก็ตามผู้วิจัยไม่สามารถระบุเป็นตัวเลขที่แน่ชัดว่าค่าที่ดีควรมีค่าเป็นเช่นไร ขึ้นอยู่กับชนิดและลักษณะการนำไปใช้งานของผลิตภัณฑ์ จากข้อมูลที่ได้จากงานวิจัยนี้สามารถนำยางธรรมชาติผสมกับผงกราไฟต์ไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ประเภทแหวนรองรับน้ำหนัก หรือตัวรับรู้ (sensor) ได้

ข้อคิดเห็น/ข้อเสนอแนะของผู้ทรงคุณวุฒิ	ชี้แจงโดยนักวิจัย
และการทดสอบทำเอง หรือส่งหน่วยงานอื่น ผลการทดสอบเชื่อถือได้หรือไม่ (ได้รับการรับรอง ISO17025 หรือไม่) ผู้วิจัยสรุปว่า ผงกราไฟต์สามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกลได้นั้น เทียบจากอะไร และในรูป 3.6(หน้า 23) ค่า Tensile Strength ของตัวอย่าง ผงกราไฟต์ เป็น สารตัวเดิมนั้นมีแค่ 40 phrแล้วที่ใส่ 60 phrค่าเป็นอย่างไร	การทดสอบสมบัติเชิงกลทั้งหมดส่งทดสอบที่ศูนย์วิจัยและพัฒนาอุตสาหกรรมยางไทย โดยการทดสอบเป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนด ดังแสดงในหัวข้อ 2.2.3.2 ส่วนสมบัติการนำไฟฟ้าส่งทดสอบที่กรมวิทยาศาสตร์บริการตามมาตรฐาน ASTMD618-05 ProceA แต่ไม่สามารถวัดค่าการนำไฟฟ้าของยางธรรมชาติที่ผสมกับผงกราไฟต์และผงเขม่าแกรดการนำไฟฟ้าได้ เนื่องจากเครื่องวิเคราะห์มี detection limit ในการวัดค่าต้านทานการนำไฟฟ้า (resistivity) โดยผลิตภัณฑ์ที่ผู้วิจัยเตรียมได้นั้นมีค่าต้านทานการนำไฟฟ้าที่อยู่นอกช่วงของการวิเคราะห์ได้ จึงต้องทำการออกแบบวิธีการทดสอบเอง ดังแสดงในหัวข้อ 2.2.3.5 ผงกราไฟต์สามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกลได้นั้น เทียบกับยาง STR 5L vulcanizate โดยไม่เติมสารตัวเติมเมื่อพิจารณาจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด ดังรูปที่ 3.5 จะเป็นได้ว่าการเติมผงกราไฟต์ช่วยให้ค่ามอดูลัสเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณสารตัวเติมเพิ่มขึ้น ผู้วิจัยไม่ได้ศึกษาสมบัติเชิงกลของตัวอย่างผงกราไฟต์ในปริมาณ 60 phrเนื่องจากผลการศึกษาสมบัติเชิงกลในรูปที่ 3.6 พบว่าค่าTensile strength มีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากในทุกสัดส่วนของการเติมผงกราไฟต์(5-40 phr) เมื่อเทียบกับยาง STR 5L vulcanizate เพราะฉะนั้นการเติมผงกราไฟต์ในปริมาณที่สูงขึ้น จะส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่ามอดูลัส แต่อาจจะไม่มีผลต่อค่า Tensile strengthสิ่งสำคัญที่ผู้วิจัยสนใจคือการศึกษาสมบัติการนำไฟฟ้า เพื่อที่จะคำนวณหาปริมาณผงกราไฟต์ที่ต่ำที่สุดที่สามารถให้ค่าการนำไฟฟ้าได้ หรือสัดส่วนวิกฤตนั่นเอง

ข้อคิดเห็น/ข้อเสนอแนะของผู้ทรงคุณวุฒิ	ชี้แจงโดยนักวิจัย
3. หน้า 14 นักวิจัยควรระบุลงไปให้ชัดว่าใช้ยาง STR 5L และมีคำถามว่าทำไมจึงใช้เกรดนี้ เนื่องจากเป็นเกรดที่เน้นความสำคัญเรื่องสี ที่นอกเหนือสีดำ 4. หน้า ง. บทคัดย่อ ตรวจสอบความชัดเจน/ถูกต้อง การสรุปเกี่ยวกับสมบัติการนำไฟฟ้า อนึ่ง เกี่ยวกับสมบัติการนำไฟฟ้า ซึ่งเป็น key ของงานนี้ นักวิจัยควรให้ข้อสรุปที่เข้าใจได้ง่าย คือ ควรจะตั้ง “benchmark” ว่า conductivity ที่ระดับใดที่ต้องการเปรียบเทียบ หรือ “ค่าเป้าหมาย” และในค่าเป้าหมายนั้น มีการใช้ filler ปริมาณต่างกันอย่างไร? ซึ่งควรนำปริมาณ filler ระดับที่ให้ค่า conductivity ที่ใกล้เคียงกัน ไปคำนวณต้นทุน	3. ได้แก้ไขตามคำแนะนำของผู้ทรงคุณวุฒิเรียบร้อยแล้ว ส่วนการเลือกใช้ยาง STR 5L เนื่องจากเป็นยางที่มีสิ่งเจือปนหรือ impurity ก่อนข้างต่ำ โดยผู้วิจัยคาดหวัง impurity ที่มีอยู่ในยางปริมาณต่ำจะไม่ส่งผลกระทบต่อการศึกษาสมบัติการนำไฟฟ้าของสารตัวเดิมทั้ง 3 ชนิดที่ใช้ในงานวิจัย 4. ได้ตรวจสอบความชัดเจน/ถูกต้องในส่วนของบทคัดย่อ หน้า ง และการสรุปเกี่ยวกับสมบัติการนำไฟฟ้าแล้ว โดยปกติสารที่เป็นวัสดุกึ่งตัวนำ (semiconductor) ที่นิยมใช้ในทางการค้าจะมีค่าการนำไฟฟ้าในช่วง 10^6-10^8 S/cm จากข้อมูลในงานวิจัยนี้พบว่าค่าการนำไฟฟ้าของยางธรรมชาติผสมกับผงกราฟิต์ยังคงมีค่าต่ำกว่าค่ามาตรฐานมาก เมื่อเทียบกับการผสมคาร์บอนแบล็กทั้ง 2 ชนิดที่ให้ค่าการนำไฟฟ้าอยู่ในช่วงวัสดุกึ่งตัวนำ ทั้งนี้ผู้วิจัยได้ให้เหตุผลประกอบการอธิบายแล้วในหัวข้อ 4.5 และด้วยเหตุผลที่กล่าวมาว่าสมบัติของพื้นผิวและการที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะที่ต่างกันของสารตัวเดิมทั้ง 3 ชนิด ทำให้ไม่สามารถใส่สารตัวเดิมในปริมาณที่เท่ากันได้ (เพื่อให้สมบัติการนำไฟฟ้าที่ใกล้เคียงกัน) ค่าเป้าหมายที่ผู้วิจัยตั้งไว้คือที่ตำแหน่งจุดวิกฤติ ซึ่งเป็นจุดที่ผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติสามารถนำไฟฟ้าได้ โดยต้นทุนส่วนใหญ่เกิดจากต้นทุนราคาของสารตัวเดิมนั่นเอง ถ้าสารตัวเดิมมีการดัดแปร (modify) โครงสร้างทางเคมีเพื่อเพิ่มสมบัติทางไฟฟ้ามากเท่าไร ต้นทุนราคาของสารตัวเดิมก็จะยิ่งสูงมากขึ้นเท่านั้น