

การปรับปรุงสมบัติการนำไฟฟ้าของยางธรรมชาติโดยใช้คาร์บอนแบล็ก

IMPROVEMENT OF ELECTRICAL CONDUCTIVITY
OF NATURAL RUBBER USING CARBON BLACK

วิชรพันธ์ มณีรัตน์
WATCHARAPAN MANEEERAT

วิทยานิพนธ์ที่เป็นต้นฉบับหนึ่งของภาควิชาเคมีตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2549

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การปรับปรุงสมบัติการนำไฟฟ้าของยางธรรมชาติโดยใช้คาร์บอนแบล็ก

IMPROVEMENT OF ELECTRICAL CONDUCTIVITY
OF NATURAL RUBBER USING CARBON BLACK



วัชรพันธุ์ มณีรัตน์

WATCHARAPAN MANEERAT

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 69084
วัน,เดือน,ปี...= 7... ๑๗... 2550

b.....
i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2549

**IMPROVEMENT OF ELECTRICAL CONDUCTIVITY
OF NATURAL RUBBER USING CARBON BLACK**

WATCHARAPAN MANEERAT

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN CHEMICAL ENGINEERING
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

2006

COPYRIGHT 2006

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การปรับปรุงสมบัติการนำไฟฟ้าของยางธรรมชาติโดยใช้คาร์บอนแบล็ก
นักศึกษา	นายวัชรพันธุ์ มณีรัตน์
รหัสนักศึกษา	44611703
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
พ.ศ.	2549
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	ดร.อภิวัฒน์ นัมคณิศรณ
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ร่วม	ดร.สุรัตน์ อารีรัตน์

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการปรับปรุงสมบัติการนำไฟฟ้าของยางธรรมชาติโดยการเติมคาร์บอนแบล็ก โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มการนำไฟฟ้าของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติกับคาร์บอนแบล็กให้อยู่ในระดับที่สามารถใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมเช่น ใช้เป็นเซ็นเซอร์ที่บอกถึงการเสื่อมสภาพของอุปกรณ์ จากการศึกษาพบว่าปัจจัยที่มีผลต่อการนำไฟฟ้าของยางธรรมชาติที่ผสมคาร์บอนแบล็ก ได้แก่ ขนาดอนุภาค โครงสร้าง และปริมาณคาร์บอนแบล็ก ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานทดสอบเริ่มจากการผสมน้ำยางธรรมชาติ กับคาร์บอนแบล็ก แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1-2 ชั่วโมง หลังจากนั้น ตัดชิ้นงานให้มีขนาด 10×10 ตารางเซนติเมตร เพื่อนำไปวัดค่าสภาพการนำไฟฟ้า ปริมาณคาร์บอนแบล็กที่ผสมในยางธรรมชาติอยู่ระหว่าง 5-25 phr โดยผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าสภาพการนำไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณคาร์บอนแบล็ก โดยมีค่าการนำไฟฟ้าสูงสุดอยู่ในช่วง $10^{-2} \Omega^{-1}$ ที่ปริมาณคาร์บอนแบล็ก 25 phr และไม่เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเพิ่มปริมาณคาร์บอนแบล็กเกินกว่า 25 phr คาร์บอนแบล็กโครงสร้างสูง จะมีประสิทธิภาพในการเพิ่มการนำไฟฟ้าสูงกว่าคาร์บอนแบล็กที่มีโครงสร้างต่ำและคาร์บอนแบล็กที่มีขนาดอนุภาคเล็ก จะเพิ่มการนำไฟฟ้าได้ดีกว่าอนุภาคขนาดใหญ่ ภายใต้สภาวะที่ชิ้นงานถูกดึงยืดสมบัติในการนำไฟฟ้าจะลดลงตามระยะการดึงยืด ขนาดของแรงต่อพื้นที่หน้าตัดที่ใช้ในการดึงชิ้นงานให้ยืด 100 เปอร์เซ็นต์ จะเพิ่มขึ้นตามปริมาณคาร์บอนแบล็กที่ผสม ที่ปริมาณคาร์บอนแบล็กในยางตั้งแต่ 10 phr ขึ้นไป ระยะการยืดตัวสูงสุดและความต้านทานการดึงที่จุดขาดของวัสดุเชิงประกอบจะสูงกว่ายางธรรมชาติที่ไม่ผสมคาร์บอนแบล็ก โดยปริมาณคาร์บอนแบล็กที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 15-30 phr เมื่อวัดค่าการนำไฟฟ้าของวัสดุเชิงประกอบในช่วงอุณหภูมิ 30-80 องศาเซลเซียส พบว่าค่าการนำไฟฟ้าของชิ้นงานขณะถูกดึงยืดออกที่ระยะ 10-100 เปอร์เซ็นต์ จะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น โดยมีค่าสูงสุดอยู่ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และมีแนวโน้ม

ลดลงหลังจากนั้น ผลของอุณหภูมิที่มีต่อการนำไฟฟ้าของวัสดุเชิงประกอบจะเห็นได้ชัดเจนในกรณีที่ชิ้นงานอยู่ในสภาพที่ปราศจากความเค้น แต่เมื่อชิ้นงานอยู่ภายใต้ความเค้น อุณหภูมิจะมีผลต่อการนำไฟฟ้าน้อยลง

Thesis Title Improvement of Electrical Conductivity of Natural Rubber Using Carbon Black
Student Mr. Watcharapan Maneerat
Student ID. 44611703
Degree Masster of Engineering
Program Chemical Engineering
Year 2549
Thesis Advisor Dr. Apinan Namkanisorn
Thesis CoadvisorDr. Surat Areerat

ABSTRACT

This research involves the improvement of the electrical conductivity of natural rubber by addition of carbon black to make natural rubber-carbon black composite. The primary objective is to enhance the electrical conductivity of such composite to the level that is useful for industrial applications such as strain-sensitive and temperature-sensitive sensors. In the material preparation steps, concentrated latex was mixed with carbon black followed by heat curing in an oven at 150°C for 1-2 hrs. After the specimen was cooled overnight, the cured rubber composite was cut into a small piece of 10 cm × 10 cm followed by surface resistivity measurement. Our experimental results have shown that the diameter of carbon black particle, structure and content of carbon black added into the composite play significant roles on the electrical conductivity of the resulting rubber-carbon black composite. By varying the content of carbon black from 5-25 phr, the conductivity was improved from $10^{-14} \Omega^{-1}$ in a virgin state to about $10^{-2} \Omega^{-1}$. Further addition of carbon black beyond 25 phr yielded no significant improvement of the electrical conductivity and segregation of the composite became more visible. High structure carbon black was found to be more effective in promoting the electrical conductivity of the composite compared to low structure carbon black. In addition, composite made with smaller particle size carbon black had higher electrical conductivity than that made with larger particle size. When the composite was strained at various % elongation, the electrical conductivity inversely varied with increasing % elongation. The stress required to obtain 100% elongation was found to increase with increasing content of carbon black. Percent elongation at break and tensile strength of the composite were observed to increase when at least 10 phr of carbon black content was used. However, the optimum mechanical properties of the composite were obtained when the content of

carbon black was in the range from 15-30 phr. When varying the test temperatures from 30-80°C, the electrical conductivity of the composite as measured at 10-100% elongation increased with temperature, reaching the highest value at 60°C and decreasing afterward. However, when the composite was strained, the effect of temperature became less significant.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จด้วยความกรุณาจาก ดร. อภินันท์ นัมคณิศรณ และ ดร. สุรัตน์ อารีรัตน์ อาจารย์ที่ปรึกษา และอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่สนับสนุนเมตตาในการให้ความอนุเคราะห์ และให้คำปรึกษาที่เป็นประโยชน์กับงานวิทยานิพนธ์ และกับตัวข้าพเจ้าผู้ทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย ภายใต้โครงการทุนวิจัยมหัศจรรย์ สกว. สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ปี 2548 ที่สนับสนุนเงินทุนวิจัยมหัศจรรย์ เพื่อใช้จ่ายในโครงการวิจัยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบคุณ บริษัท ไทยโตโก คาร์บอนโปรดักท์ จำกัด ที่ให้การอนุเคราะห์คาร์บอนแบล็ก ชนิดต่างๆ มาใช้ในงานวิจัยตลอดจนวิทยานิพนธ์สำเร็จลุล่วง

ขอขอบคุณ รศ. ดร. อัญชลีพร วาริตสวัสดิ์ หล่อทองคำ ที่ให้การอนุเคราะห์ตลอดจนให้คำปรึกษากับข้าพเจ้าผู้ทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จในการศึกษาปริญญาโท

ขอขอบคุณ อาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเคมีทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทวิชากับข้าพเจ้าจนสำเร็จการศึกษา

สุดท้ายสำหรับทุกๆ สิ่งที่ข้าพเจ้าได้กระทำให้สำเร็จการศึกษาในครั้งนี้ข้าพเจ้าผู้ทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ขอแสดงความดีนี้กลับคืนให้กับทุกสรรพสิ่งที่ให้การสนับสนุนช่วยเหลือข้าพเจ้าให้สำเร็จลุล่วงเหมือนที่ข้าพเจ้าได้รับมา โดยสิ่งนี้ขอยกให้บิดามารดา ญาติพี่น้องของข้าพเจ้าเป็นพิเศษ หากมีข้อผิดพลาดประการใดอันเกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ข้าพเจ้าขออภัยและน้อมรับแต่เพียงผู้เดียว

วัชรพันธุ์ มณีรัตน์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	III
กิตติกรรมประกาศ	V
สารบัญ	VI
สารบัญตาราง	X
สารบัญรูป	XI
ศัพท์เทคนิค	XIII
รายการสัญลักษณ์	XVI
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญในการศึกษา	1
1.2 วัตถุประสงค์ในการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตในการวิจัย	2
1.4 ขั้นตอนการศึกษา	2
1.5 สมมติฐานของการศึกษา	3
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
1.7 องค์ประกอบงานวิทยานิพนธ์	4
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 ขงธรรมชาติ	5
2.1.1 องค์ประกอบทางเคมีของขงธรรมชาติ	6
2.1.2 นำขงธรรมชาติ	6
2.1.3 การนำขงธรรมชาติไปใช้ผลิตผลิตภัณฑ์ขง	7
2.1.4 สมบัติของขงธรรมชาติ	7
2.2 สารเคมีที่ใช้ในอุตสาหกรรมขง	9
2.2.1 สารทำให้ขงคงรูป หรือสารวัลคาไนซ์	10
2.2.2 สารเร่งปฏิกิริยาการคงรูป	13
2.2.3 สารกระตุ้นปฏิกิริยาการคงรูป	16
2.2.4 สารตัวเติม	17

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.2.5 สารช่วยในการแปรรูป	19
2.2.6 การต้านทานยางเสื่อมสภาพ	20
2.2.7 ประโยชน์ในการผสมยางกับสารเคมี	21
2.3 คาร์บอนแบล็ก	22
2.3.1 คาร์บอนแบล็กแบ่งตามชนิด	22
2.3.2 การแบ่งเกรดและการเรียกชื่อคาร์บอนแบล็ก	24
2.3.3 รูปร่างและโครงสร้างของคาร์บอนแบล็ก	25
2.3.4 ปัจจัยของคาร์บอนแบล็กที่มีผลต่อสมบัติการเสริมแรง	27
2.3.5 ปฏิกิริยาการการันต์ตัวของยางเมื่อได้รับแรง	34
2.4 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการนำไฟฟ้า	36
2.4.1 ปัจจัยที่มีผลต่อค่าความต้านทานของฉนวนไฟฟ้า	38
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	41
บทที่ 3 ขั้นตอนการศึกษา	45
3.1 วัสดุและสารเคมี	45
3.1.1 ยางธรรมชาติ	45
3.1.2 สารเคมีขึ้นรูปยาง	45
3.1.3 คาร์บอนแบล็ก	45
3.1.4 การเตรียมสารละลายคาร์บอนแบล็ก	46
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้วิจัย	47
3.3 การเตรียมชิ้นงานวิจัย	47
3.4 การวัดสภาพการนำไฟฟ้า	48
3.4.1 การวัดค่าสภาพการนำไฟฟ้า	48
3.4.2 การวัดสภาพการนำไฟฟ้าขณะดึงยืด	49
3.4.3 การวัดสภาพการนำไฟฟ้าสัมพันธ์กับอุณหภูมิ	49
3.5 การวัดสมบัติเชิงกล	50

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ข้อมูล	51
4.1 สันฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติและคาร์บอนแบล็ก	51
4.1.1 สันฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติและคาร์บอนแบล็ก แสดงตามปริมาณของคาร์บอนแบล็กที่เติมลงในยางธรรมชาติ	51
4.1.2 ผลของสันฐานวิทยาของคาร์บอนแบล็ก โครงสร้างสูงและต่ำ	52
4.2 ปัจจัยทางกายภาพของคาร์บอนแบล็กต่อสภาพการนำไฟฟ้า	54
4.2.1 ปริมาณของคาร์บอนแบล็กที่มีต่อสภาพการนำไฟฟ้าของวัสดุเชิงประกอบ	54
4.2.2 ผลของขนาดอนุภาคคาร์บอนแบล็กที่มีต่อสภาพการนำไฟฟ้า	55
4.2.3 ผลของโครงสร้างคาร์บอนแบล็กที่มีต่อสภาพการนำไฟฟ้า	55
4.3 ปัจจัยเชิงกลที่มีต่อสภาพการนำไฟฟ้าของยางธรรมชาติ	57
4.3.1 ผลของการดึงยึดต่อสภาพการนำไฟฟ้าสัมพันธ์ตามปริมาณคาร์บอนแบล็ก	57
4.3.2 ผลของการดึงยึดต่อสภาพการนำไฟฟ้าสัมพันธ์ตามโครงสร้างคาร์บอนแบล็ก	59
4.4 ปัจจัยเชิงกลที่เป็นผลมาจากการใส่คาร์บอนแบล็ก	60
4.4.1 แรงดึงยึดสูงสุดที่จุดขาด	60
4.4.2 ร้อยละการดึงยึดที่จุดขาด	62
4.4.3 ความต้านทานแรงดึง ที่ร้อยละการดึงยึด 100	64
4.5 ผลของอุณหภูมิต่อการตอบสนองการนำไฟฟ้า	65
4.5.1 การตอบสนองต่ออุณหภูมิของสภาพการนำไฟฟ้าตามโครงสร้างคาร์บอนแบล็ก	65
4.5.2 การตอบสนองต่ออุณหภูมิของสภาพการนำไฟฟ้าตามปริมาณคาร์บอนแบล็ก	66
4.5.3 การตอบสนองต่ออุณหภูมิของสภาพการนำไฟฟ้าตามระยะการดึงยึด	68
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	71
5.1 สรุปผลการทดลอง	71
5.1.1 ลักษณะทางสันฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ กับคาร์บอนแบล็ก	71
5.1.2 ผลของปัจจัยทางกายภาพของคาร์บอนแบล็กที่มีต่อสมบัตินำไฟฟ้าของ วัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ	71
5.1.3 ผลจากสมบัติเชิงกลที่มีต่อสมบัตินำไฟฟ้าของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ	72

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.1.4 ผลของปัจจัยเชิงกลที่เป็นผลมาจากการผสมคาร์บอนแบล็ก	72
5.1.5 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อสมบัติการนำไฟฟ้าของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ	73
5.2 ข้อเสนอแนะ	73
เอกสารอ้างอิง	75
ภาคผนวก	78
ภาคผนวก ก ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์	79
ภาคผนวก ข ข้อมูลดิบของงานวิจัยและวิธีการวัดค่าการนำไฟฟ้า	86
ข.1 ข้อมูลดิบของงานวิจัย	86
ข.2 วิธีการวัดค่าการนำไฟฟ้า	93
ภาคผนวก ค รูปข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย	97
ประวัติผู้เขียน	104

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 สมบัติทางกายภาพของยางเมื่อปริมาณการเชื่อม โยงมากขึ้น	11
2.2 ลักษณะของยางเมื่อใส่กำมะถันในปริมาณที่ไม่เท่ากัน	12
2.3 การเปรียบเทียบลักษณะของคาร์บอนแบล็กชนิดต่างๆ	24
2.4 การจำแนกเกรดคาร์บอนแบล็กตามมาตรฐาน ASTM (D1765)	25
3.1 สมบัติทางกายภาพของคาร์บอนแบล็กที่ใช้ในการวิจัย	46
3.2 อัตราส่วนผสมสารเสริมที่ใช้ในการขึ้นรูปยางธรรมชาติชนิดแผ่น	48
ข.1 ประเภทของวัสดุแบ่งตามสภาพการนำไฟฟ้า	86
ข.2 การนำไฟฟ้าของคาร์บอนแบล็กผง	87
ข.3 การนำไฟฟ้าของสารเคมีที่ใช้ขึ้นรูปยาง	87
ข.4 สมบัติการนำไฟฟ้าของธรรมชาติที่ใส่คาร์บอนแบล็ก	88
ข.5 สมบัติการนำไฟฟ้าของธรรมชาติที่ใส่คาร์บอนแบล็กขณะดึงยืด	89
ข.6 สมบัติการนำไฟฟ้าของธรรมชาติที่ใส่คาร์บอนแบล็กที่อุณหภูมิต่างๆ	92
ข.7 สมบัติการนำไฟฟ้าของธรรมชาติที่ใส่คาร์บอนแบล็กขณะดึงยืดที่อุณหภูมิต่างๆ	92

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.6 ความสัมพันธ์โครงสร้างคาร์บอนแบล็กที่มีต่อสภาพการนำไฟฟ้าของ N326 กับ N330 ที่มีขนาดอนุภาคเท่ากันคือ 28 นาโนเมตร แต่มีโครงสร้างต่างกัน	57
4.7 ผลของการดัดยัดที่มีต่อสภาพการนำไฟฟ้า โดยแสดงความสัมพันธ์เปรียบเทียบระหว่างคาร์บอนแบล็ก N234 กับคาร์บอนแบล็ก N326 ตามปริมาณคาร์บอนแบล็ก	58
4.8 ความสัมพันธ์ของสภาพการนำไฟฟ้าที่มีต่อการดัดยัด โดยเปรียบเทียบตามโครงสร้างที่ปริมาณคาร์บอนแบล็กเท่ากันคือ 15 PHR	59
4.9 ความสัมพันธ์ของปริมาณคาร์บอนแบล็กในยางกับแรงสูงสุดที่จุดขาด	60
4.10 ความสัมพันธ์ของปริมาณคาร์บอนแบล็กในยางกับร้อยละการยืดตัวที่จุดขาด	63
4.11 ความต้านทานแรงดึง ที่ร้อยละการดัดยัด 100	64
4.12 ผลของอุณหภูมิต่อสภาพการนำไฟฟ้า เปรียบเทียบตามโครงสร้างของคาร์บอนแบล็กที่ปริมาณคาร์บอนแบล็ก 15 phr	66
4.13 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิที่มีสภาพการนำไฟฟ้า โดยแสดงความสัมพันธ์เปรียบเทียบตามปริมาณคาร์บอนแบล็ก	67
4.14 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิที่มีสภาพการนำไฟฟ้า โดยแสดงความสัมพันธ์เปรียบเทียบที่คาร์บอนแบล็ก 5 phr	68
4.15 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อสภาพการนำไฟฟ้าของที่ระยะการดัดยัดต่างๆ	69
4.16 กราฟ 3 มิติ แสดงผลอุณหภูมิที่มีต่อสภาพการนำไฟฟ้าของที่ระยะการดัดยัดของคาร์บอนแบล็ก 234 ปริมาณ 15 phr	70
ค.1 แนวคิดในการทำเส้นเซอร์จากยาง	97
ค.2 แนวทางประยุกต์ทางธรรมชาติเพื่อใช้เป็นเส้นเซอร์	98
ค.3 ชนิดโครงสร้างคาร์บอนแบล็ก	99
ค.4 การก่อโมเลกุลคาร์บอนแบล็กเป็นโครงสร้างที่ซับซ้อน	100
ค.5 ความสามารถในการนำไฟฟ้าของคาร์บอนแบล็ก	101
ค.6 รูปแสดงแต่ละวัสดุเชิงประกอบที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง	103
ค.7 รูปแสดงโครงสร้างการรวมตัวกันของคาร์บอนแบล็ก	103

ศัพท์เทคนิค

การกระจายตัว	Dispersion
กล้องจุลทรรศน์	Optical Microscope (OM)
กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	Scanning electron Microscope (SEM)
กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน	Transmission Electron Microscope (TEM)
การกระดอน	Resilience
การขึ้นรูป	Processing
การเชื่อมโยง	Vulcanization
การดูดกลืนแสง	Optic Absorbance
การดูดซับก๊าซไนโตรเจน	BET N ₂ Absorption
การแตกตัวเนื่องจากความร้อน	Thermal Cracking
พันธะเคมี	Chemical Bonding
การยึดเกาะทางกายภาพ	Physical Adsorption
ตัวนำไฟฟ้า	Conductor
สัณฐานวิทยา	Morphology
การเสริมแรง	Reinforcement
การหดตัว	Shrinkage
การหักงอที่อุณหภูมิต่ำ	Low Temperature Flexibility
เกิดการขาด	Break up
เกิดการคงรูปก่อนกำหนด	Scorch
การแทรกตัว	Penetration
เกิดการดูดซับทางเคมีหรือเคมีซอร์พชัน	Chemisorptions
การประสานเชิงกล	Mechanical Interlocking
การผสม	Compounding
ขนาดอนุภาค	Particle size
แขวนลอยหรือกระจาย	Disperse
ความเกะกะ	Bulkiness
ความชื้น	Humidity
ความต้านทานต่อการสึกหรอ	Abrasion Resistance

ศัพท์เทคนิค (ต่อ)

ความต้านทานไฟฟ้าเชิงปริมาตร	Volume Resistance
ความต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิว	Surface Resistance
ความทนทานต่อการฉีกขาด	Tear Strength
ความทนทานต่อของเหลวและสารเคมี	Liquid and Chemical Resistance
ความต้านทานต่อแรงดึง	Tensile Strength
ฉนวนไฟฟ้า	Insulation
ความยืดหยุ่น	Elasticity
ความสามารถในการนำไฟฟ้า	Electrical Conductivity
ความสามารถในการเสริมแรง	Reinforcement
คาร์บอนแบล็ก	Carbon Black
คาร์บอนแบล็กชนิดแกรไฟต์	Graphitized Carbon Blacks
คาร์บอนแบล็กชนิดเทอร์มอล	Thermal Blacks
คาร์บอนแบล็กจากการแตกตัว	Cracking Blacks
คาร์บอนแบล็กชนิดเฟอร์เนส	Furnace Blacks
คาร์บอนแบล็กโครงสร้างต่ำ	Low structure
คาร์บอนแบล็กโครงสร้างสูง	High Structure
ค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาด	% Elongation at break
ค่าศักย์ไฟฟ้า	Voltage
โครงสร้างปฐมภูมิ	Primary Structure
ช่องว่าง	Voids
ตัวทำละลาย	Solvent
ตัวเร่งทุติยภูมิ	Secondary Accelerator
ตัวเร่งปฐมภูมิ	Primary Accelerator
น้ำยางข้น	Concentrated Latex
โนดูล	Nodules
ปรากฏการณ์การนิ่มตัวของยางเมื่อได้รับแรง	Stress Softening Effect
ยางบาวด์	Bound rubber

ศัพท์เทคนิค (ต่อ)

ยางออกคลู๊ด	Occluded Rubber
ร้อยละ โดยน้ำหนักยาง	Part per Hundred
สมบัติเชิงพลวัต	Dynamic Properties
สารช่วยในการแปรรูป	Plasticizer
สารตัวเติมชนิดเสริมแรง	Reinforcing Fillers
สารตัวเติมที่มีลักษณะเป็นเม็ด	Particulated Filler
สารตัวเติมที่มีลักษณะเป็นเส้นใย	Fibrous Filler
สารตัวเติมพวกเสริมความแข็งแรง	Reinforcing Filler
สารต้านทานยางเสื่อมสภาพ	Protective Agent
สารทำให้ยางคงรูป หรือสารวัลคาไนซ์	Vulcanizing Agent
สารที่ชอบน้ำ	Hydrophilic
สารที่ไม่ชอบน้ำ	Hydrophobic
สารป้องกันการเสื่อมสภาพ	Anti Degradants
สารเร่งปฏิกิริยาการคงรูป	Accelerator
การเสื่อมสภาพเนื่องจากการหักงอไปมา	Flex Cracking
การเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน	Heat Aging
การเสื่อมสภาพเนื่องจากตั้งทิ้งไว้นาน	Self Aging
การเสื่อมสภาพเนื่องจากแสง	Light Aging
อนุภาค โครงสร้างกลุ่มก้อนขนาดใหญ่	Agglomerates
อันตรกิริยา	Interactions
อุณหภูมิ	Temperature
อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว	Glass Transition Temperature

รายการสัญลักษณ์

σ	สภาพการนำไฟฟ้า
μ	ขนาดอนุภาคไมครอนหรือเท่ากับ 10^6
Ω	หน่วยความต้านทาน (โอห์ม)
Δi	สภาพการนำไฟฟ้าของที่ระยะการดึงยึด
$^{\circ}\text{C}$	องศาเซลเซียส
A	ค่าคงที่ของกระแสที่ 1 หน่วยเวลา
A	พื้นที่หน้าตัด (ซม. ²)
D	ความกว้างขั้วไฟฟ้า (ซม.)
I	กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์, A)
$I(t)$	ค่ากระแสไหลบนขึ้นทดสอบเทียบกับเวลา
L	ความหนา (ซม.)
M	ค่า Activation Constant
M	ค่าคงที่ที่มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1
pH	หน่วยความเป็นกรด - ด่าง
R	ความต้านทาน
$R(t)$	ความต้านทานที่ขึ้นกับอุณหภูมิ
B	ค่าคงที่ Proportion Constant
T	ค่าอุณหภูมิ (K)
V	ความต่างศักย์ไฟฟ้า (โวลต์, V)

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญในการศึกษา

ยางธรรมชาติและผลิตภัณฑ์จากยางพาราเป็นสินค้าส่งออกหลักของประเทศที่ทำรายได้เข้าประเทศปีละกว่าแสนล้านบาท โดยมีเกษตรกรจำนวนมากถึง 6 ล้านคนที่ได้รับผลกระทบในยามที่ราคาของยางพาราตกต่ำ รัฐบาลจึงให้ความสำคัญในการสร้างความเข้มแข็งกับอุตสาหกรรมยางพาราในประเทศ โดยเฉพาะในด้านการวิจัยเพื่อสร้างองค์ความรู้ที่นำไปสู่การพัฒนาตลอดจนการสร้างนวัตกรรมที่เกี่ยวข้องกับอุตสาหกรรมยางพารา อันจะทำให้ประเทศไทยเป็นศูนย์กลางความรู้ด้านยางธรรมชาติในอนาคต

แนวทางหนึ่งที่จะช่วยเพิ่มมูลค่าของยางธรรมชาติ คือการส่งเสริมให้มีการใช้ยางธรรมชาติร่วมกับวัสดุอื่นๆ มากขึ้นในภาคอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมรถยนต์ ก่อสร้าง งานทั่วไป ฯลฯ หากเราสามารถนำยางธรรมชาติไปใช้แทนหรือใช้ร่วมกับวัสดุบางประเภทจะเป็นการเปิดโอกาสให้มีการพัฒนาผลิตภัณฑ์จากยางธรรมชาติใหม่ๆ ในภาคอุตสาหกรรมเหล่านี้ ซึ่งจะทำให้เกิดการเพิ่มมูลค่าของยางธรรมชาติภายในประเทศ ปัญหาอย่างหนึ่งที่เป็นอุปสรรคคือยางธรรมชาติมีการนำไฟฟ้าต่ำ การประยุกต์ใช้ยางธรรมชาติเพื่อเป็นวัสดุนำไฟฟ้าจำเป็นต้องผสมวัสดุนำไฟฟ้าอื่นๆ เช่น ผงโลหะ วัสดุเชิงประกอบคาร์บอน

การเพิ่มสมบัติการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์ มีผู้ศึกษาจำนวนมาก [1-12] ในหลายปีที่ผ่านมา โดยมีการประยุกต์ใช้ในงานที่หลากหลาย เช่น Pressure sensitive sensors, Temperature sensors และ Dynamic sensors เป็นต้น วิธีหนึ่งที่นิยมใช้เพิ่มสมบัติทางไฟฟ้าของพอลิเมอร์ คือ การใส่อนุภาคของวัสดุที่สามารถนำไฟฟ้าได้ดี เช่น คาร์บอนแบล็ก หรืออนุภาคโลหะ [2] แต่ทั้งนี้สมบัติในการนำไฟฟ้าของวัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์ ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ อันได้แก่ ขนาด โครงสร้าง ปริมาณ และชนิดของวัสดุนำไฟฟ้าที่ใช้ผสมกับพอลิเมอร์

วิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการศึกษาการเพิ่มสมบัติในการนำไฟฟ้าของวัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์จากยางธรรมชาติ และคาร์บอนแบล็ก โดยศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการนำไฟฟ้าเปรียบเทียบกับยางธรรมชาติบริสุทธิ์ที่มีสภาพการนำไฟฟ้าประมาณ $10^{-14} \Omega^{-1}$ ซึ่งจัดอยู่ในช่วงวัสดุที่เป็นฉนวนไฟฟ้า ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาได้แก่ ปริมาณคาร์บอนแบล็ก ขนาดอนุภาค และลักษณะ โครงสร้าง คาร์บอนแบล็ก นอกจากนี้ได้ทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบเมื่อเติมคาร์บอนแบล็กและการเปลี่ยนแปลงสมบัติการนำไฟฟ้าขณะที่มีการดึงยืดชิ้นงาน นอกจากนี้ยังได้ทำการศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อการนำไฟฟ้าโดยวัดการนำไฟฟ้าของวัสดุเชิงประกอบที่อุณหภูมิระหว่าง 30 – 70 องศาเซลเซียส

1.2 วัตถุประสงค์ในการวิจัย

- 1.2.1 พัฒนาสมบัตินำไฟฟ้าของยางธรรมชาติโดยใช้คาร์บอนแบล็ก
- 1.2.2 ศึกษาผลจากปัจจัยพื้นฐาน ได้แก่ ชนิด ขนาดอนุภาค และปริมาณคาร์บอนแบล็กที่มีต่อสภาพการนำไฟฟ้า
- 1.2.3 ศึกษาผลของสมบัติเชิงกลต่อสภาพการนำไฟฟ้า
- 1.2.4 ศึกษาผลของการใช้คาร์บอนแบล็กที่มีต่อสมบัติเชิงกล เช่น ความต้านทานแรงดึง และ ค่าการยืดตัวสูงสุด
- 1.2.5 ศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อการนำไฟฟ้า

1.3 ขอบเขตในการวิจัย

การศึกษานี้มุ่งเน้นการปรับปรุงสมบัตินำไฟฟ้าของยางธรรมชาติที่ขึ้นรูปจากน้ำยางพารา และมีการเติมคาร์บอนแบล็กในขณะขึ้นรูป ขอบเขตของการศึกษามีดังต่อไปนี้

- 1.3.1 ศึกษาสภาพการนำไฟฟ้าของยางธรรมชาติอันเป็นผลจากปัจจัยทางกายภาพของคาร์บอนแบล็ก ซึ่งประกอบด้วย ปริมาณ ขนาดอนุภาค และลักษณะ โครงสร้างคาร์บอนแบล็ก
- 1.3.2 ศึกษาผลของคาร์บอนแบล็กที่มีต่อสมบัติเชิงกล ได้แก่ ความสามารถในการต้านทานการยืด และค่าการยืดตัวสูงสุดที่จุดขาด และหาความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติเชิงกล ได้แก่ ระยะการดึงยืด ที่มีต่อสภาพการนำไฟฟ้า
- 1.3.3 ศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อการนำไฟฟ้าในวัสดุเชิงประกอบ ได้แก่ ปริมาณ ขนาดอนุภาค และลักษณะ โครงสร้างคาร์บอนแบล็ก นอกจากนี้ยังได้ศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อการนำไฟฟ้าที่ระยะยืดต่างๆ กัน

1.4 ขั้นตอนการศึกษา

ลำดับขั้นตอนการศึกษามีดังนี้

ขั้นที่ 1 ศึกษาความเป็นไปได้ในการเพิ่มสมบัตินำไฟฟ้าของยางธรรมชาติโดยศึกษาการเพิ่มสมบัตินำไฟฟ้า จากหนังสือ และจากบทความงานวิจัยของผู้ดำเนินการวิจัยมาแล้ว ในการศึกษาพบแนวทางที่น่าสนใจหลายวิธี เช่น การทำให้โมเลกุลพอลิเมอร์มีสมบัตินำไฟฟ้า การเพิ่มสมบัตินำไฟฟ้าด้วยการใส่วัสดุที่มีสมบัตินำไฟฟ้าต่างๆ ซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกที่จะเพิ่มสมบัตินำไฟฟ้าด้วยการเติมคาร์บอนแบล็ก เนื่องจากคาร์บอนแบล็กเป็นสารเดิมแต่งที่นิยมใช้กับยางธรรมชาติเพื่อเพิ่มสมบัติในการเสริมแรงของชิ้นงาน อีกทั้งคาร์บอนแบล็กยังมีคุณสมบัตินำไฟฟ้า

ขั้นที่ 2 เมื่อได้แนวทางในการเพิ่มสมบัตินำไฟฟ้าแล้ว จึงวางขอบเขตในงานวิจัยเพื่อกำหนดกรอบระเบียบวิธีในการวิจัย โดยการวางขอบเขตงานวิจัยในการเพิ่มสมบัตินำไฟฟ้าจากการผสม

คาร์บอนแบล็กในยางธรรมชาติ คือศึกษาปัจจัยทางกายภาพของคาร์บอนแบล็กต่อสมบัติการนำไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นของยางธรรมชาติ ปัจจัยเชิงกลที่เป็นผลมาจากการผสมยางธรรมชาติกับคาร์บอนแบล็กตลอดจนสมบัติในการนำไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงจากสมบัติเชิงกลที่กระทำกับชิ้นงาน ได้แก่ การดึงยืด และผลของอุณหภูมิที่มีต่อสมบัตินำไฟฟ้าของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติกับคาร์บอนแบล็ก

ขั้นที่ 3 หลังจากวางขอบเขตงานวิจัย จึงได้ทำการศึกษาวิธีการเตรียมชิ้นงานตลอดจนวิธีการวัดค่าการนำไฟฟ้าของชิ้นงานขณะที่มีการเปลี่ยนแปลงขนาด เช่น ในขณะที่ชิ้นงานถูกดึงให้ยืดออกด้วยแรงดึงโดยทั่วไปในวิธีการวัดค่าการนำไฟฟ้าของวัสดุ จะทำการวัดค่าการนำไฟฟ้าในขณะที่ชิ้นงานไม่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (ขนาดคงที่) และกำหนดช่วงค่าของการวัด (เพื่อเลือกความต่างศักย์และมิเตอร์วัดให้เหมาะสมกับชนิดของวัสดุ ได้แก่ วัสดุฉนวนไฟฟ้า วัสดุกึ่งตัวนำและวัสดุนำไฟฟ้า) ซึ่งในกรณีที่ทำการวัดค่าการนำไฟฟ้าของวัสดุในขณะที่เปลี่ยนแปลงขนาด จำเป็นต้องประยุกต์ประดิษฐ์เครื่องมือเพื่อใช้วัด ทั้งนี้เพื่อให้เป็นไปตามวัตถุประสงค์ในการวิจัย และสามารถวัดค่าได้ช่วงกว้างเหมาะสมกับช่วงการนำไฟฟ้าของวัสดุ

ขั้นที่ 4 ทำการทดลองเพื่อเก็บข้อมูล และนำข้อมูลที่ได้ไปวิเคราะห์ผล โดยผลจากงานวิจัยแบ่งออกเป็นหลายส่วนดังนี้ การศึกษาสัณฐานวิทยาของยางธรรมชาติที่ผสมคาร์บอนแบล็ก การศึกษาปัจจัยทางกายภาพของคาร์บอนแบล็กอันส่งผลต่อการนำไฟฟ้าของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ การศึกษาสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบอันเป็นผลมาจากการผสมกับคาร์บอนแบล็กตลอดจนศึกษาสมบัติในการนำไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงเนื่องมาจากการให้แรงเชิงกล ได้แก่ การดึงยืด และศึกษาอิทธิพลจากอุณหภูมิที่ส่งผลต่อการนำไฟฟ้า

ขั้นที่ 5 สรุปผลที่ได้จากงานวิจัย และเสนอแนะแนวทางอื่นๆ เพื่อใช้ประกอบในการทำงานวิจัยระดับสูงต่อไป

1.5 สมมติฐานของการศึกษา

ยางธรรมชาติมีสมบัติทางไฟฟ้าที่เป็นฉนวนไฟฟ้า ซึ่งค่าการนำไฟฟ้าคือ 10^{-14} - $10^{-16} \Omega^{-1}$ ในการเพิ่มสมบัติในการนำไฟฟ้ามีหลายวิธีเช่น การผสมกับวัสดุที่สามารถนำไฟฟ้า การปรับปรุงสมบัติทางเคมีของยางธรรมชาติ แต่ทั้งนี้ในงานวิจัยนี้ ศึกษาการเพิ่มสมบัติในการนำไฟฟ้าของยางธรรมชาติโดยใช้ นำยางธรรมชาติผสมคาร์บอนแบล็ก เพียงอย่างเดียว เนื่องจากในการใช้คาร์บอนแบล็กเป็นที่นิยมใช้กับยางธรรมชาติ โดยใช้เพื่อเพิ่มสมบัติเชิงกล อีกทั้งวัสดุสามารถหาได้ง่ายในประเทศ และเป็นการเพิ่มมูลค่าผลิตภัณฑ์ภายในประเทศ

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.6.1 เกิดองค์ความรู้พื้นฐานในการเพิ่มสภาพการนำไฟฟ้าของยางธรรมชาติ
- 1.6.2 สามารถเป็นแนวทางพัฒนาสมบัตินำไฟฟ้า นำไปประยุกต์ใช้กับพอลิเมอร์ชนิดอื่นรวมถึงนำวัสดุอื่นมาประยุกต์ใช้ในการเพิ่มสมบัตินำไฟฟ้า
- 1.6.3 สามารถนำความรู้ที่ได้ไปใช้เพื่อสร้างผลิตภัณฑ์ที่ก่อให้เกิดมูลค่าเพิ่มของยางธรรมชาติ ซึ่งเป็นพืชเศรษฐกิจหลักของประเทศ
- 1.6.4 เกิดการเชื่อมโยงกับงานวิจัยอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องกับยางพารา เพื่อก่อให้เกิดการบูรณาการในการใช้ประโยชน์จากผลิตภัณฑ์จากยางพารา ในด้านอื่นๆ เช่นการพัฒนาการยึดติดของยางพาราที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติในการนำไฟฟ้า กับวัสดุจำพวก โลหะ และพลาสติก เพื่อใช้ในการตรวจสอบการเสื่อมสภาพ ข้อต่อของวัสดุอุปกรณ์ ต่างๆ ที่มีการเปลี่ยนรูปร่าง

1.7 องค์ประกอบงานวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้มีองค์ความรู้ประกอบการนำเสนอคือ

ส่วนที่ 1 ประกอบด้วยการนำเสนอถึงปัญหาและความสำคัญในการทำวิทยานิพนธ์ วัตถุประสงค์ การวางขอบเขตในการทำวิทยานิพนธ์ ขั้นตอนการศึกษา และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์ ซึ่งรวมอยู่ในบทที่ 1

ส่วนที่ 2 ประกอบด้วยการแสดงทฤษฎีที่ใช้งานวิจัย หลักการอันเป็นองค์ความรู้ในงานวิจัยและเกี่ยวข้อง ได้แก่ ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับยางธรรมชาติ ประเภทสารเคมีพื้นฐานที่ใช้ในงานวิจัย ความรู้เกี่ยวกับวัสดุเชิงประกอบ ได้แก่ คาร์บอนแบล็ก และทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ในการวัดสภาพความต้านทาน และสภาพการนำไฟฟ้า นอกจากนี้ยังแสดงงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยสรุปงานวิจัยของผู้ที่ทำงานวิจัยที่ใกล้เคียง หรือเกี่ยวข้อง โดยสังเขป ทั้งหมดกล่าวรวมอยู่ในบทที่ 2

ส่วนที่ 3 แสดงถึงวิธีดำเนินงานวิจัย ซึ่งประกอบไปด้วย สารเคมี และอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย ขั้นตอนและระเบียบวิธีที่ใช้วิจัย ขั้นตอนและวิธีการวัดผลและแปลผลวิจัย อยู่ในบทที่ 3

ส่วนที่ 4 ประกอบด้วยผลการวิจัย และการวิเคราะห์ ข้อมูลซึ่งประกอบด้วย ค่าการนำไฟฟ้าของสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย การแสดงผลของสัมฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสม คาร์บอนแบล็ก กราฟแสดงความสัมพันธ์ค่าการนำไฟฟ้ากับปัจจัยต่างๆ ได้แก่ ปัจจัยกายภาพ ปัจจัยเชิงกล และอุณหภูมิ แสดงในบทที่ 4

ส่วนที่ 5 ส่วนสุดท้ายในการเสนอองค์ความรู้ โดยสรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ กับผู้ที่สนใจในงานวิจัยนี้ หรือในงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อเป็นแนวทางในการประยุกต์ เพื่อพัฒนางานวิจัยในระดับต่อไป แสดงในบทที่ 5

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ยางธรรมชาติ (Natural Rubber, NR)

ยางธรรมชาติที่นำมาใช้ในทางการค้า ได้จากต้นยางพารา ซึ่งมีชื่อทางพฤกษศาสตร์ว่า *Hevea Brasiliensis* ซึ่งแต่เดิมมีอยู่เฉพาะในทวีปอเมริกาใต้เท่านั้น แต่หลังจากนั้น ได้มีผู้นำมาปลูกในทวีปเอเชียและแอฟริกา พืชชนิดนี้นิยมปลูกกันมากในประเทศที่มีอากาศร้อนชื้น เช่น ภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ซึ่งมีอากาศที่เหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตของต้นยางพารา มากกว่า 90% ของยางธรรมชาติที่ได้มาจากภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ที่เหลือได้มาจากทวีปแอฟริกากลาง สำหรับประเทศไทยสามารถปลูกยางพาราได้งอกงามดีทางภาคใต้และภาคตะวันออก

เมื่อต้นยางโตเต็มที่แล้วชาวสวนจะเก็บน้ำยางโดยการกรีดลำต้น ให้น้ำยางไหลซึมออกมา น้ำยางที่ได้มีลักษณะเป็นของเหลวสีขาวขุ่นข้นคล้ายน้ำมัน มีกลิ่นหอมเล็กน้อย ประกอบด้วยอนุภาคยางเล็กๆ แขนงลอยอยู่ในน้ำ ในลักษณะของอิมัลชัน (Emulsion) มีเนื้อของแข็ง 30-40 % ขึ้นกับพันธุ์ของต้นยาง อายุของต้นยาง และฤดูกาล น้ำยางที่ได้มีความหนาแน่นประมาณ 0.98 กรัมต่อลูกบาศก์มิลลิเมตร มี pH ประมาณ 6.8 [13]

น้ำยางเมื่อวางทิ้งไว้จะเกิดการบวมตัว จึงทำการแปรรูปให้เป็นยางดิบในลักษณะต่างๆกัน คือ อยู่ในรูปของน้ำยางข้น หรือยางดิบชนิดแห้งต่างๆ ได้แก่ ยางแผ่นรมควัน (Ribbed Smoked Sheet, RSS) ยางแผ่นผึ่งแห้ง (Air-dried Sheet, ADS) ยางเครพขาว (Crepes) หรือยางแท่ง (Block Rubber) เป็นต้น เพื่อใช้เป็นวัตถุดิบป้อนโรงงานผลิตผลิตภัณฑ์ยางประเภทต่างๆ เช่น ยางรถยนต์ ยางล้อเครื่องบิน ยางรัดของ ท่อยาง ที่นอนฟองน้ำ และรองเท้ายาง เป็นต้น ทั้งนี้เนื่องจากยางมีสมบัติพิเศษแตกต่างจากวัสดุอื่นๆ คือ มีความยืดหยุ่นดี นอกจากนี้ยังมีเนื้อที่บีบอัดกลับคืนน้ำและอากาศไม่ให้ออกได้ง่าย อีกทั้งไม่ยอมให้กระแสไฟไหลผ่าน ดังนั้นยางจึงเป็นวัสดุที่มีประโยชน์และคุณค่ามาก

ยางธรรมชาติเป็นยางที่เหมาะสมสำหรับใช้ผลิตวัสดุสำเร็จรูปทั่วไปที่ไม่ต้องการสมบัติพิเศษ เช่น การทนต่อน้ำมัน หรือทนต่อความร้อนที่อุณหภูมิสูงๆ ถึงแม้ว่าในปัจจุบันจะมีการผลิตยางสังเคราะห์ขึ้นหลายชนิด แต่ปริมาณการใช้ยางธรรมชาติเพื่อผลิตวัสดุสำเร็จรูปยางก็ยังคงสูงอยู่ เนื่องจากยางธรรมชาติมีสมบัติที่ดีหลายประการ คือ มีความสามารถในการกระดอน (Resilience) สูง มีสมบัติเหนียวติดกันเอง (Tackiness) ดีมาก มีความต้านทานต่อการสึกหรอ (Abrasion Resistance) ดีมาก แต่ด้อยกว่ายาง SBR เล็กน้อย การเกิดความร้อนสะสมต่ำ และมีความต้านทานต่อการซึมผ่านของก๊าซไม่ดี

2.1.1 องค์ประกอบทางเคมีของยางธรรมชาติ

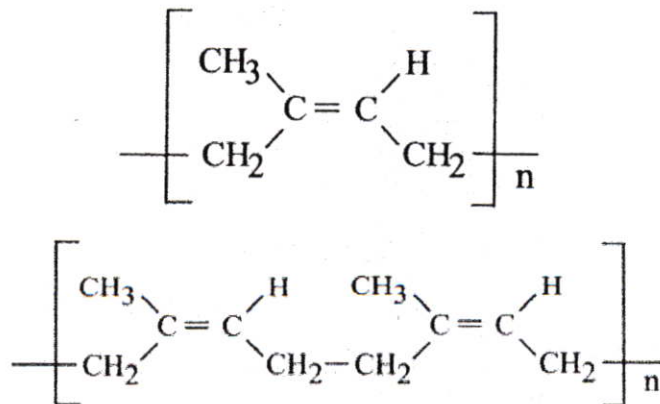
ยางธรรมชาติมีชื่อทางเคมีว่า พอลิไอโซพรีน (Polyisoprene, $-(C_5H_8)_n-$) ซึ่งได้จากหน่วยของไอโซพรีนต่อกันแบบหัวต่อหาง (head to tail)

ยางเฮเวีย (Hevea Rubber) มีโครงสร้างเป็น cis 1,4 Polyisoprene ส่วนยางกัตตาเปอร์ชา (gutta-percha) และยางบาลาตา (balata) มีโครงสร้างเป็น trans 1,4 Polyisoprene ซึ่งต้นกัตตามีอยู่ในประเทศมาเลเซีย ส่วนบาลาตามีอยู่บริเวณชายฝั่งตะวันออกเฉียงเหนือของทวีปอเมริกาใต้ และในประเทศอินโดนีเซีย ซึ่งไม่ค่อยมีความสำคัญทางการค้ามากนัก มีการใช้งานน้อย แต่เดิมใช้ทำฉนวน หุ้มสายเคเบิลใต้น้ำ ปัจจุบันใช้ทำที่หุ้มลูกกอล์ฟและกาวพิเศษบางชนิดเท่านั้น ทั้งนี้เพราะน้ำยางเกิดการแข็งตัวได้เร็วมากในอากาศ

2.1.2 น้ำยางธรรมชาติ (Natural Rubber Latex) [13]

น้ำยางที่ได้จากต้นยางมีสีขาวขุ่นคล้ายน้ำนม มีกลิ่นหอมเล็กน้อย ความหนาแน่นประมาณ 0.975 - 0.980 กรัมต่อลูกบาศก์มิลลิเมตร มีค่า pH 6.5 - 7 น้ำยางจะมีอนุภาคขนาดต่างๆ กันแขวนลอยหรือกระจาย (Disperse) อยู่ในตัวกลางที่เป็นของเหลว โดยอนุภาคเหล่านี้จะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่า 5 ไมครอน และมีประจุเป็นลบ ซึ่งผลักกันตลอดเวลา สูตรโครงสร้างโมเลกุลยางธรรมชาติแสดงในรูปที่ 2.1

น้ำยางมีลักษณะพิเศษที่เรียกว่า “คอลลอยด์” (Colloid) ชนิดที่มีน้ำเป็นตัวทำละลาย (Hydrosol) แต่มีลักษณะพิเศษ คือ น้ำยางมีลักษณะระหว่างสารที่ชอบน้ำ (Hydrophilic) และสารที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) แต่ลักษณะที่ไม่ชอบน้ำจะเด่นชัดกว่า นอกจากนี้ น้ำยางยังประกอบไปด้วยส่วนที่ไม่ใช่ยาง ได้แก่ สารพวกโปรตีนและกรดอะมิโน ไขมัน คาร์โบไฮเดรต และอนุผลของโลหะ เป็นต้น



รูปที่ 2.1 รูปโครงสร้างโมเลกุล ยางธรรมชาติ

2.1.3 การนำยางธรรมชาติไปใช้ผลิตผลิตภัณฑ์ยาง

- ข้อดี**
1. เนื้อยางจะให้สมบัติเชิงกลสูง เนื่องจากเมื่อยืดออก โมเลกุลจะเรียงตัวเป็นระเบียบ
 2. มีความต้านทานแรงดึงสูง (มากกว่า 20 MPa)
 3. สามารถยืดตัวก่อนขาดได้มาก (500 -1000%)
 4. ทนทานต่อการฉีกขาดและสึกหรอได้ดี แต่น้อยกว่ายางสังเคราะห์
 5. การคืนตัวและการกระดอนดี
 6. สามารถใช้งานที่อุณหภูมิต่ำได้ดี
 7. สามารถยึดติดกับเส้นใยและโลหะได้ดี
- ข้อเสีย**
1. ความต้านทานการบ่มและความร้อนไม่ดี
 2. ไม่ทนทานต่อพวกน้ำมันปิโตรเลียม เช่น น้ำมันเครื่อง น้ำมันเบนซิน เป็นต้น
 3. มีอุณหภูมิการใช้งานระหว่าง -40 ถึง 70 องศาเซลเซียส

ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่ทำจากยางธรรมชาติ ได้แก่ ยางล้อรถยนต์ ยางเครื่องบิน ยางรองคอกสะพาน ยางรองรับแรงสะเทือน หรือแผ่นดินไหว ยางชิ้นส่วนรถยนต์ และเฟอร์นิเจอร์ พื้นรองเท้า กาวยาง ยางเส้นรัดของ เป็นต้น

2.1.4 สมบัติของยางธรรมชาติ

คุณสมบัติของยาง

ความยืดหยุ่น (Elasticity)

สมบัติความยืดหยุ่นเป็นลักษณะเด่นอีกประการหนึ่งของยางธรรมชาติกล่าวคือยางธรรมชาติที่คงรูปแล้วจะมีความยืดหยุ่นสูง เมื่อแรงภายนอกที่มากระทำกับยางหมดไป ยางจะกลับคืนสู่รูปร่างและขนาดเดิม (หรือใกล้เคียง) ได้อย่างรวดเร็ว

ความเหนียวติดกัน (Tack)

ยางธรรมชาติ(ในสภาพที่ยังไม่คงรูป) มีสมบัติดีในด้านความเหนียวติดกันซึ่งเป็นสมบัติสำคัญของการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ต้องการอาศัยการประกอบชิ้นส่วนต่างๆ เข้าด้วยกัน เช่น ยางล้อรถยนต์ เป็นต้น

ความต้านทานแรงดึง (Tensile Strength)

เนื่องจากโมเลกุลของยางธรรมชาติมีความเป็นระเบียบสูงจึงทำให้ยางธรรมชาติสามารถคดงอได้ง่ายเมื่อถูกยืดซึ่งผลึกที่เกิดขึ้นจะช่วยเสริมความแข็งแรงให้กับยาง ดังนั้น ยางธรรมชาติจึงมีค่าความต้านทานแรงดึง โดยที่ไม่ต้องใช้สารตัวเติมเสริมแรงเข้าช่วย (~ 20 MPa หรือสูงกว่านั้น) การเติมสารตัวเติมเสริมแรงลงไปก็จะช่วยทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงขึ้น ซึ่งสมบัตินี้จะแตกต่างจากยางสังเคราะห์ส่วนใหญ่ที่มีค่าความต้านทานแรงดึงต่ำ จึงไม่สามารถนำไปใช้งานในทางวิศวกรรมได้นอกจากจะมีการเติมสารตัวเติมเสริมแรงเข้าช่วยเท่านั้น

ความต้านทานแรงฉีก (Tear Strength)

เนื่องจากยางธรรมชาติสามารถแตกหักได้เมื่อถูกยืด ดังนั้น ยางธรรมชาติจึงมีความต้านทานแรงฉีกสูงมากทั้งๆที่อุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิสูง การเติมสารตัวเติมเสริมแรงลงไปก็จะช่วยทำให้ค่าความทนทานต่อการฉีกขาดของยางสูงขึ้นด้วย

สมบัติเชิงพลวัต (Dynamic Properties)

ยางธรรมชาติมีสมบัติเชิงพลวัตที่ดี ยางมีการสูญเสียพลังงานในรูปของความร้อนต่ำในระหว่างใช้งาน นอกจากนี้ ยางธรรมชาติยังมีความต้านทานต่อการล้าตัว ที่สูงมากอีกด้วย

ความต้านทานต่อการสึกหรอ (Abrasion Resistance)

ยางธรรมชาติมีค่าความต้านทานต่อการขัดถูสูง แต่ยังคงน้อยกว่ายาง SBR เล็กน้อย อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบกับยางสังเคราะห์ชนิดอื่นๆ พบว่า ยางธรรมชาติมีค่าความต้านทานต่อการขัดถูอยู่ในกลุ่มที่สูงมาก

ความเป็นฉนวนไฟฟ้า (Insulation)

ยางธรรมชาติมีความเป็นฉนวนไฟฟ้าสูงมาก โดยมีค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ (Specific Resistivity) สูงถึง 10^{15} หรือ $10^{16} \Omega \cdot \text{cm}$

ความทนทานต่อของเหลวและสารเคมี (Liquid and Chemical Resistance)

เนื่องจากองค์ประกอบของยางธรรมชาติเป็นสารไฮโดรคาร์บอนชนิดไม่มีขั้ว ดังนั้น ยางดิบจึงละลายได้ดีในตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว เช่น เบนซีน เฮกเซน และ โทลูอีน เป็นต้น ความสามารถในการละลายนี้จะลดลงถ้าเกิดการคงรูปเนื่องจากการเชื่อมโยงทางเคมีของโมเลกุลนั้นเกิดเป็นโครงสร้างตาข่าย 3 มิติ กระบวนการละลายของยางจึงเกิดขึ้นยาก ยางคงรูปจึงเพียงแต่เกิดการบวมตัวในตัวทำละลายเหล่านี้เท่านั้น อย่างไรก็ตาม การบวมตัวของยางดังกล่าวจะทำให้สมบัติเชิงกลของยางด้อยลง ด้วยเหตุนี้ ยางธรรมชาติจึงไม่ทนต่อน้ำมันปิโตรเลียมหรือตัวทำละลายที่ไม่มีขั้วต่างๆ ยางจะทนทานต่อของเหลวที่มีขั้ว เช่น อะซิโตน หรือ อีทิลแอลกอฮอล์ นอกจากนี้ยางธรรมชาติยังทนต่อการกรดและค้างเงาได้ดี แต่ไม่ทนต่อการกรดในตริกและกรดกำมะถันเข้มข้น

สมบัติการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน โอโซน และแสงแดด (Aging Properties)

เนื่องจากโมเลกุลของยางธรรมชาติมีพันธะคู่อยู่มาก ทำให้ยางว่องไวต่อการทำปฏิกิริยากับออกซิเจน (ปฏิกิริยาออกซิเดชัน) โดยมีแสงแดดหรือความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนั้น ยางธรรมชาติจึงถูกออกซิไดซ์ได้ง่าย นอกจากนี้ ยางธรรมชาติยังไม่ทนต่อโอโซนเพราะเมื่อถูกยืดและได้รับโอโซนนานๆ จะเกิดการขยายขนาดเล็กน้อยมาก ที่บริเวณพื้นผิวในทิศตั้งฉากกับทิศทางการยืดตัวของยาง ด้วยเหตุนี้ ในระหว่างการผลิตผลิตภัณฑ์จึงต้องมีการเติมสารเคมีบางชนิดได้แก่ สารป้องกันการเสื่อมสภาพ (Anti - Degradants) และ ขี้ (wax) ลงไปเพื่อยืดอายุการใช้งานของยางธรรมชาติ

การหักงอที่อุณหภูมิต่ำ (Low Temperature Flexibility)

ยางธรรมชาติยังคงรักษาสมบัติความยืดหยุ่นหรือความสามารถในการหักงอได้แม้ในอุณหภูมิต่ำมาก ๆ ซึ่งยางที่มีคุณสมบัติที่ดีกว่ายางธรรมชาติมีเพียง 2 ชนิด คือ ยางบิวตาไดอีน (BR) และยางซิลิโคน (Silicone)

ค่าการคืนตัว (Compression Set)

ยางธรรมชาติมีค่าการคืนตัวค่อนข้างต่ำทั้งในอุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิสูงปานกลาง อย่างไรก็ตามค่าการคืนตัวที่อุณหภูมิต่ำของยางธรรมชาติจะมีค่าสูงขึ้นเนื่องจากยางอาจเกิดการตกผลึกทำให้ความยืดหยุ่นของยางเริ่มสูญเสียไป ในขณะที่ค่าการคืนตัวที่อุณหภูมิสูงของยางธรรมชาติจะมีค่าต่ำลงเนื่องจากยางธรรมชาติไม่ทนความร้อน ยางจึงเกิดการเสื่อมสภาพ ซึ่งจะส่งผลทำให้สมบัติค่าการคืนตัวด้อยลง

การกระด้างกระดอน (Rebound Resilience)

ยางธรรมชาติมีสมบัติการกระด้างกระดอนสูง (สูงกว่ายางชนิดอื่นๆ ทั้งหมด ยกเว้น BR) และในระหว่างการเปลี่ยนแปลงของรูปร่าง ยางจะสูญเสียพลังงานในรูปของความร้อนน้อย อีกทั้งยางธรรมชาติมีความร้อนสะสมต่ำเมื่อถูกใช้งานในเชิงพลวัต ยางชนิดนี้จึงเหมาะที่จะใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ยางที่มีขนาดใหญ่ เช่น ยางรถบรรทุกหรือยางล้อเครื่องบิน เพราะหากใช้ยางที่มีความร้อนสะสมสูง ก็อาจทำให้ยางเกิดการระเบิดได้ง่าย

อุณหภูมิของการทำงาน (Service Temperature)

ยางธรรมชาติสามารถใช้งานได้ดีที่อุณหภูมิตั้งแต่ -55°C จนถึง 70°C อย่างไรก็ตาม หากเก็บยางไว้ที่อุณหภูมิต่ำนานๆ ยางอาจเกิดการตกผลึกซึ่งจะทำให้ยางแข็งขึ้นและสูญเสียความยืดหยุ่นไป แต่เมื่ออุณหภูมิการใช้งานสูงเกินไป สมบัติเชิงกลต่างๆ ก็จะด้อยลงเนื่องจากความร้อนจะทำให้ยางเกิดการเสื่อมสภาพ ในบางกรณีที่มีการออกสูตรผสมเคมียางได้อย่างเหมาะสม (มีการเติมสารป้องกันการเสื่อมสภาพลง) ยางธรรมชาติอาจสามารถนำไปใช้งานได้อย่างต่อเนื่องที่อุณหภูมิสูงถึง 90°C หรืออาจสูงถึง 100°C (ในกรณีที่ยางได้รับอุณหภูมิสูงเป็นช่วงๆ เท่านั้น)

2.2 สารเคมีที่ใช้ในอุตสาหกรรมยาง

สารเติมแต่งสำหรับยางพาราเป็นสารเคมีที่ผสมลงไปในยาง เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ยางที่มีสมบัติตามต้องการ ยางที่ผสมสารเคมีแล้วนี้ ยังไม่สามารถนำไปใช้งานได้เลย จนกว่าสารเคมีจะเข้าไปทำปฏิกิริยากับยาง ซึ่งอาจเร่งปฏิกิริยาให้เกิดขึ้นได้ด้วยความร้อน ยางที่ยังไม่เกิดปฏิกิริยากับสารเคมีเรียกว่า ยางไม่คงรูป (Green Compound หรือ Uncured Compound) ส่วนยางที่สารเคมีเข้าทำปฏิกิริยากับยางแล้วเรียกว่า ยางคงรูป (Vulcanized Rubber หรือ Cured Rubber)

2.2.1 สารทำให้ยางคงรูป หรือสารวัลคาไนซ์ (Vulcanizing Agent)

สารทำให้ยางคงรูปหรือสารวัลคาไนซ์ เป็นสารที่ทำให้เกิดการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลของยาง (Crosslink) เพื่อปรับปรุงสมบัติของผลิตภัณฑ์ยางให้ดีขึ้น ปฏิกริยาที่เกิดขึ้น เรียกว่าการคงรูปหรือการวัลคาไนซ์ (Vulcanization หรือ Cure)

การทำให้ยางคงรูปเป็นกระบวนการเปลี่ยนแปลงของยางที่อยู่ในสภาพที่ไม่คงตัวให้เป็นอย่างที่รักษารูปทรงได้ในลักษณะยืดหยุ่น หรือแข็งกระด้าง โดยใช้สารที่ทำให้ยางคงรูป (Vulcanizing agent) ซึ่งเป็นสารที่ทำให้เกิดการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุล บริเวณตำแหน่งพันธะคู่หรือตำแหน่งอื่นที่ว่องไวต่อปฏิกริยา

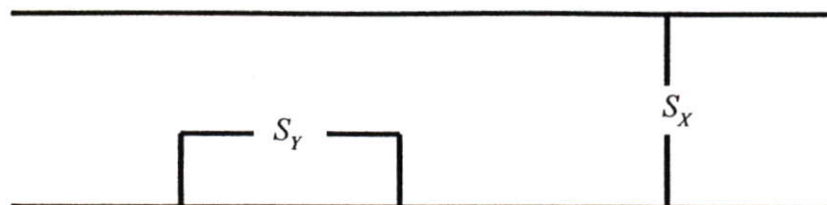
สารที่ทำให้ยางคงรูปมี 3 ประเภท คือ กำมะถันและธาตุที่คล้ายกำมะถัน สารที่ให้กำมะถัน และสารอื่นๆที่ไม่ใช่กำมะถัน แต่สารที่ทำให้ยางคงรูปที่สำคัญสำหรับยางธรรมชาติ คือ กำมะถัน ส่วนยางสังเคราะห์อื่นๆ จะใช้สารที่ทำให้ยางคงรูปแตกต่างกันไป ขึ้นกับชนิดของยาง การทำให้ยางคงรูปจะทำให้ยางมีสมบัติที่เปลี่ยนแปลงไป คือ

1. ยางเปลี่ยนโครงสร้างจากเส้นตรงเป็นร่างแหหรือเป็นแบบ 3 มิติ โดยการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุล ทำให้ยางเปลี่ยนจากวัสดุพลาสติกไปเป็นวัสดุอีลาสติกสูงขึ้น
2. สมบัติทางกายภาพ เช่น ความต้านทานแรงดึง ความต้านทานต่อการสึกหรอ และความต้านทานต่อการฉีกขาดจะเพิ่มขึ้น
3. เปลี่ยนสภาพของยางจากการละลายในสารละลาย เป็นยางที่ไม่ละลายในสารละลาย และไม่พองตัว
4. มีความทนทานต่อความร้อน แสง เพิ่มขึ้น ทำให้สามารถใช้งานได้ในช่วงอุณหภูมิที่กว้างมากขึ้น

กำมะถันเป็นสารที่ทำให้ยางคงรูปที่นิยมใช้มากที่สุด ประมาณ 90% และนิยมใช้กับยางที่ไม่อิมตัว ซึ่งมีพันธะคู่อยู่ในโมเลกุล ได้แก่ ยางธรรมชาติ, ยาง SBR และยาง NBR เป็นต้น

เมื่อใส่กำมะถันเข้าไปในยางแล้วให้ความร้อน จะเกิดการคงรูปขึ้น โดยกำมะถันเป็นตัวเชื่อมระหว่างโมเลกุลของยาง ทำให้ยางมีสมบัติดีขึ้น คือ เมื่อร้อนไม่เยิ้มเหนียว เมื่อเย็นไม่แข็ง ไม่มีกลิ่น ไม่ละลายในตัวทำละลาย เป็นต้น โดยกำมะถันจะเชื่อมต่อกับ โมเลกุลของยางดังรูปที่ 2.2

โดยทั่วไปถ้าการคงรูปเกิดในระบบที่มีสารตัวเร่งที่มีประสิทธิภาพดี จำนวนอนุภาคกำมะถันควรมีค่าประมาณ 1 หรือ 2 และไม่มีโครงสร้างที่เป็นวง (Cyclic) หรือมีน้อยมาก แต่ถ้าเป็นระบบที่ไม่มีประสิทธิภาพจำนวนอนุภาคกำมะถันอาจมีค่า สูงถึง 8 และมีโครงสร้างที่เป็นวงเกิดขึ้นมาก ปริมาณกำมะถันที่รวมอยู่ในโครงสร้างร่างแหนี้ เรียกว่า สัมประสิทธิ์ของการคงรูป (Coefficient of Vulcanization) ซึ่งเป็นส่วนของกำมะถันที่เข้าร่วมตัวกับยาง 100 ส่วน



รูปที่ 2.2 การเชื่อมโยงโมเมนต์ของขางด้วยกำมะถัน

S_x เป็นการเชื่อมโยงระหว่างสองโมเมนต์

S_y เป็นการเชื่อมโยงภายในโมเมนต์เดียวกัน [13]

ปริมาณของกำมะถันที่ใช้ทั่วไปอยู่ในช่วง 1-3 phr โดยปริมาณกำมะถัน 2.5 phr จะทำให้ยางมีค่าความต้านทานแรงดึงสูงที่สุด นอกจากนี้ถ้าต้องการยางที่มี มอดูลัสต่ำ เช่น ลูกโป่งจะใช้กำมะถันน้อยลง หรือถ้าต้องการยางที่มีมอดูลัสสูง จะใช้กำมะถันมากขึ้น

ถ้าต้องการให้ยางคงสภาพความยืดหยุ่นได้ดี ปริมาณกำมะถันในยางไม่ควรเกิน 5 phr (ตารางที่ 2.2)

ตารางที่ 2.1 สมบัติทางกายภาพของยางเมื่อปริมาณการเชื่อมโยงมากขึ้น [13]

สมบัติ	การเปลี่ยนแปลง เมื่อเพิ่มปริมาณการเชื่อมโยง
สมบัติที่ขึ้นกับปริมาณการเชื่อมโยงเท่านั้น ความเหนียว(มอดูลัส) ความแข็งแรง	เพิ่มขึ้น เพิ่มขึ้น
สมบัติที่บางส่วนขึ้นกับปริมาณการเชื่อมโยง การยืดออกจนขาด การกระดอน การบวมเนื่องจากสารละลาย ความต้านทานต่อการสึกหรอ ความต้านทานแรงดึงและความต้านทานต่อการฉีกขาด	ลดลง เพิ่มขึ้น ลดลง เพิ่มขึ้น เพิ่มขึ้น,แล้วลดลง

ตารางที่ 2.2 ลักษณะของยางเมื่อใส่กำมะถันในปริมาณที่ไม่เท่ากัน [13]

ปริมาณกำมะถัน(phr)	ลักษณะของยาง
0-5	ยางมีสภาพยืดหยุ่น
5-15	ยางมีลักษณะยืดได้เล็กน้อย คล้ายหนัง
>15	ทำให้ยางมีความแข็งมากเรียกว่า Ebonite

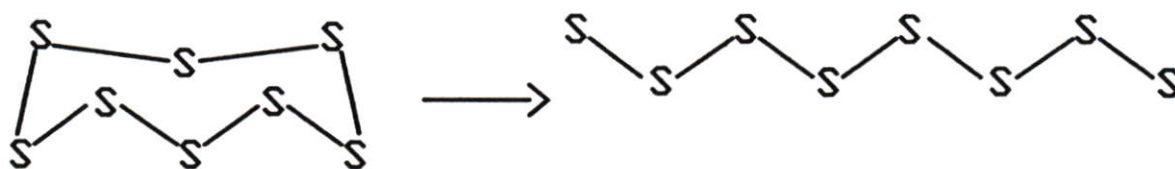
กำมะถันโดยทั่วไปมี 3 อันตรูป คือ

ก. α -sulfur หรือ rhombic sulfur

ข. β -sulfur หรือ monoclinic sulfur : ที่ 96 องศาเซลเซียส α -Sulfur จะเปลี่ยนรูปไปเป็น β -sulfur

ค. γ -sulfur หรือ Slastic sulfur : เป็นกำมะถันอสัณฐานซึ่งไม่ละลายในยาง ทำได้โดยการนำกำมะถันมาทำให้ร้อนจนเหลว แล้วเทลงในน้ำเย็นทันที

แต่กำมะถันที่ใช้ในการคงรูปยาง จะใช้กำมะถันชนิด Rhombic ซึ่งมีโครงสร้างดังรูปที่ 2.3 คือมีโครงสร้างเป็นวง ประกอบด้วยกำมะถัน 8 อะตอม S_8 มีลักษณะเป็นวงสี่เหลี่ยม และหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 112 องศาเซลเซียส จุดเดือดที่ 444 องศาเซลเซียส ถ้าให้ความร้อนแก่กำมะถัน โครงสร้างที่เป็นวงจะแตกออกเป็นสาย นั่นคือ กำมะถันกำลังหลอมเหลว



รูปที่ 2.3 โครงสร้างกำมะถัน Rhombic [13]

กำมะถันที่ใช้ในยางต้องเป็นกำมะถันที่มีขนาดอนุภาคเล็ก ซึ่งขนาดอนุภาคยิ่งเล็กจะยิ่งทำให้กำมะถันกระจายในยางได้อย่างทั่วถึง สำหรับการละลายของกำมะถันในยางจะขึ้นกับชนิดของยาง ซึ่งกำมะถันจะละลายในยางได้ประมาณ 0.8 ส่วนต่อยาง 100 ส่วน และเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นกำมะถันจะละลายได้มากขึ้น แต่มีข้อเสียคือ เมื่อตั้งทิ้งไว้กำมะถันที่เป็นส่วนเกิน จะตกผลึกออกมาที่ผิวยาง เรียกว่า เกิดการบลูม (Blooming) การที่กำมะถันเกิดการแยกตัวมาอยู่ที่ผิวยางที่ยังไม่คงรูป ทางแก้ไขคือ

1) ผสมกำมะถันเข้าไปในยางที่อุณหภูมิต่ำที่สุดเท่าที่จะทำได้

2) อาจใช้กำมะถันชนิดที่ไม่ละลายแทนกำมะถันธรรมดา ซึ่งเป็นแบบชนิดละลาย แต่กำมะถันไม่ละลายจะไม่คงตัว คือ เมื่อตั้งทิ้งไว้นานๆ จะค่อยๆ เปลี่ยนเป็นกำมะถันชนิดละลายอย่างช้าๆ ที่อุณหภูมิห้อง และที่อุณหภูมิสูงจะเปลี่ยนเป็นกำมะถันที่ละลายได้ภายในเวลา 10-20 นาที ซึ่งการเก็บรักษากำมะถันชนิดไม่ละลายต้องเก็บไว้ในที่อุณหภูมิต่ำ เพื่อป้องกันไม่ให้กำมะถันไม่ละลายเปลี่ยนรูป

3) อาจใช้กำมะถันชนิดไม่ละลายปนกับชนิดละลาย เช่น การใช้กำมะถันชนิดไม่ละลายประมาณ 70 % ของปริมาณทั้งหมด จะลดการตกผลึกของกำมะถันที่ผิวยางได้

การใส่กำมะถันลงในยางจะใส่หลังสุดในจำนวนสารเคมีทั้งหมด เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการคงรูปก่อนกำหนด (Scorch) ส่วนยางบางชนิดเช่น ยางไนไตรล์ (ยาง NBR) กำมะถันจะกระจายในยางได้ไม่ดี จำเป็นต้องใส่กำมะถันเข้าไปตั้งแต่เริ่มต้น เพื่อช่วยเพิ่มเวลาในการกระจายตัว หรืออาจใช้กำมะถันพิเศษ คือ MC-sulfur แทนกำมะถันธรรมดา

ข้อดีของกำมะถัน

1. กำมะถันมีราคาค่อนข้างถูก ทำให้ต้นทุนต่ำ
2. กระจายตัวในยางได้ง่าย
3. ไม่เป็นอันตรายต่อสุขภาพ
4. มีผลโดยตรงต่อสารเร่งปฏิกิริยาการคงรูป จึงเป็นตัวควบคุมอัตราการเกิดการคงรูป

ข้อเสียของกำมะถัน

1. มีแนวโน้มทำให้เกิดการแยกตัวของกำมะถันมาอยู่ที่ผิวยาง
2. มีการติดสีของซัลไฟด์
3. เมื่อนำยางที่ผสมกำมะถันไปอบ จะมีความต้านทานต่อความร้อนไม่ดี
4. มีข้อจำกัดในการใช้ คือ ใช้ได้เฉพาะกับยางที่ไม่อิมตัว

นอกจากกำมะถันแล้วยังมีธาตุอื่นๆที่คล้ายกำมะถัน ทำหน้าที่เป็นสารทำให้ยางคงรูป ได้แก่ ซีลีเนียม (Selenium) และเทลลูเรียม (Tellurium) มักใช้แทนกำมะถันเมื่อต้องการสมบัติในด้านความต้านทานความร้อน แต่ปฏิกิริยาที่สารทั้งสองทำกับยางไม่ดีเท่ากับกำมะถัน และยังเป็นพิษอีกด้วย โดยทั่วไปนิยมใช้สารสองตัวนี้เป็นสารทำให้ยางคงรูปเสริมร่วมกับกำมะถัน ซึ่งทำให้ปริมาณกำมะถันที่ใช้ลดลง ผลลัพท์ที่ได้มีความต้านทานต่อความร้อนและไอน้ำ อีกทั้งยังมีโมดูลัสสูงขึ้นด้วย

2.2.2 สารเร่งปฏิกิริยาการคงรูป (Accelerator)

ก่อนที่จะมีการค้นพบสารเร่งปฏิกิริยาการคงรูปของยางนั้น ชาลส์ กู๊ดเยียร์ ได้ค้นพบวิธีการคงรูปยางธรรมชาติ โดยใช้กำมะถันเพียงอย่างเดียว ซึ่งต้องใช้กำมะถันในปริมาณมาก และการคงรูปต้องใช้เวลาที่อุณหภูมิสูง ผลลัพท์ที่ได้มีสีคล้ำ และเมื่อทิ้งไว้จะเกิดการซึมของกำมะถัน

ออกมาที่ผิวต่อมาได้มีการค้นพบสารเร่งปฏิกิริยาการคงรูป และนำมาใช้ร่วมกับกำมะถันในการคงรูปยาง ซึ่งสารเร่งนี้จะช่วยลดเวลา ลดอุณหภูมิ และลดปริมาณกำมะถันที่ใช้ในการคงรูปลง นอกจากนี้ยังช่วยปรับปรุงสมบัติของผลิตภัณฑ์อีกด้วย

สารเร่งปฏิกิริยาการคงรูปสามารถแบ่งได้เป็น 3 ระบบ คือ

- 1) ระบบการใช้สารเร่งปฏิกิริยาสารคงรูปเพียงชนิดเดียว (Primary Accelerator) ให้พอเพียงที่จะคงรูปยางได้ตามเวลาที่ต้องการ
- 2) ระบบการใช้สารเร่งปฏิกิริยาการคงรูปตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป ประกอบด้วย
 - สารชนิดที่ใช้ในปริมาณมาก เรียกว่า ตัวเร่งปฐมภูมิ (Primary Accelerator)
 - สารชนิดที่ใช้ในปริมาณน้อย เรียกว่า ตัวเร่งทุติยภูมิ (Secondary Accelerator)
- 3) ระบบการใช้สารเร่งที่มีปฏิกิริยาช้า (Delayed Action Accelerator) จะไม่เกิดปฏิกิริยาก่อนการคงรูป ซึ่งเป็นการป้องกันปัญหาการเกิดการคงรูปก่อนกำหนด

สมบัติของสารเร่งปฏิกิริยาการคงรูป

1. สามารถทำให้ยางคงรูปได้เร็ว
2. มีความว่องไวในการเร่งให้เกิดการเชื่อมโยงของโมเลกุลยางสูง
3. ละลายได้ดีในยาง
4. มีความปลอดภัยในขบวนการผลิต
5. สามารถเก็บรักษาได้นานโดยไม่เสื่อมสภาพ
6. ใช้งานได้ในช่วงอุณหภูมิกว้าง
7. เข้ากันได้ดีกับสารเคมีอื่นๆที่ใส่เข้าไปในยาง
8. ไม่เป็นอันตรายต่อผู้ใช้
9. สมบัติต่างๆของยางไม่ลดลงเมื่อใช้เวลาในการคงรูปนาน
10. ไม่ทำให้เกิดผลเสียต่อสมบัติอื่น

ประเภทของสารเร่งปฏิกิริยาการคงรูป

สามารถจัดตามความเร็วในการเร่งให้ยางเกิดการคงรูป แบ่งได้เป็น 4 ประเภท คือ

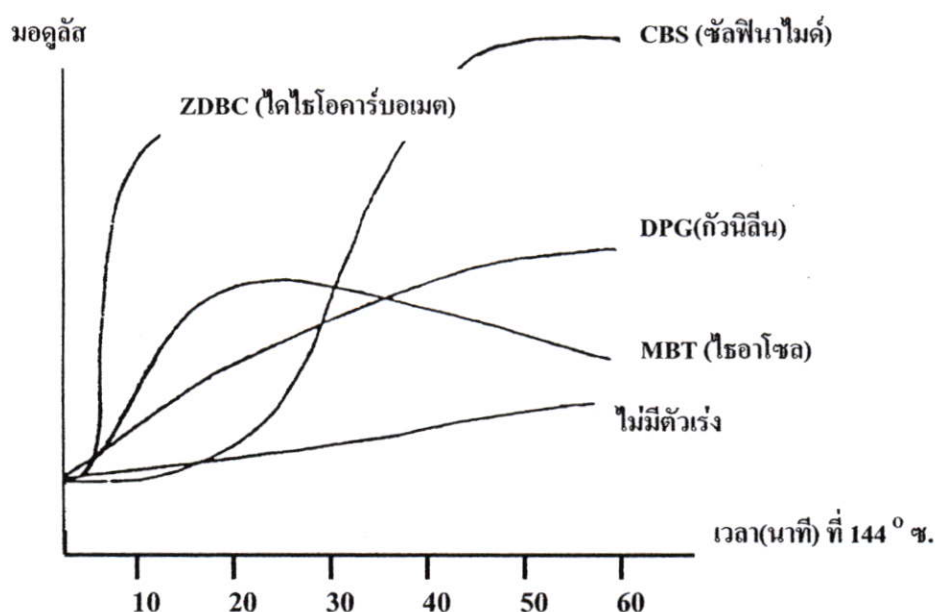
1. สารเร่งที่มีปฏิกิริยาช้า (Slow Accelerators) ได้แก่ Aniline เมื่อทำการคงรูปยางธรรมชาติ ใช้เวลา 90-120 นาที
2. สารเร่งที่มีปฏิกิริยาเร็วปานกลาง (Moderately Fast Accelerators) ได้แก่ Diphenyl Guanidine, Hexamethylene Tetramene ใช้เวลาในการคงรูป 60 นาที
3. สารเร่งที่มีปฏิกิริยาเร็ว (Fast Accelerators) ได้แก่ Mercaptobentothiazole, Benzothiazyl Disulfide ใช้เวลาในการคงรูปประมาณ 30 นาที
4. สารเร่งที่มีความเร็วมาก (Ultra Accelerators) ได้แก่ Thiurams, Dithiocarbamates, Xanthates ใช้เวลาในการคงรูปน้อยกว่า 30 นาที

เมื่อมีการใช้ยางสังเคราะห์มากขึ้น สารเร่งที่มีการคงรูปที่จัดว่าเร็วหรือเร็วมากในยางธรรมชาติ อาจกลายเป็นสารเร่งที่ช้าสำหรับยางสังเคราะห์ จึงมีการจัดประเภทของสารเร่งปฏิกิริยาการคงรูป โดยพิจารณาตามลักษณะโครงสร้างทางเคมีของสารเร่งนั้นๆ สามารถแบ่งได้เป็น 7 ประเภท คือ

1. กัวนิติน (Guanidines)
2. อัลดีไฮด์-อะมีน (Aldehyde-Amine)
3. ซัลฟีนามาได์ (Sulphenamide)
4. ไทอาโซล (Thiazole)
5. ไทยูเรม (Thiurams)
6. ไดไทโอคาร์บอเมต (Dithiocarbamates)
7. แซนเทต (Xanthates)

สามารถเรียงลำดับตามความว่องไวจากเร็วไปช้าได้ดังนี้

$$1 > 2 > 3 > 4 > 5 > 6 > 7$$



รูปที่ 2.4 อิทธิพลของสารเร่งต่างๆที่ใช้ในการคงรูปยาง [13]

จากรูปที่ 2.4 จะเห็นได้ว่า

กลุ่มไดไทโอคาร์บอเมต เป็นสารเร่งที่เกิดการคงรูปก่อนกำหนด และเกิดการคงรูปได้เร็วที่สุด

กลุ่มกัวนิติน เกิดการคงรูปก่อนกำหนดเร็วมาก แต่เกิดการคงรูปช้า

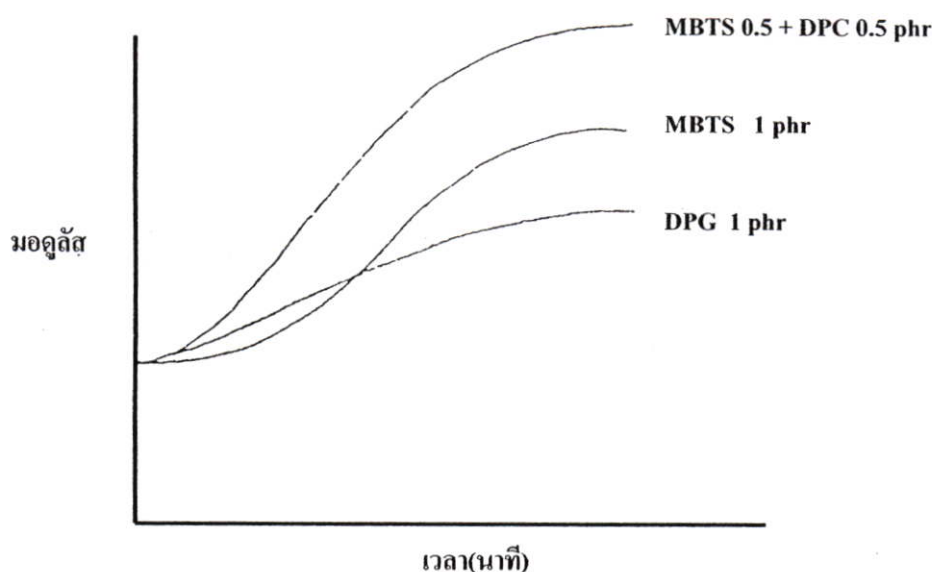
กลุ่มไทอาโซล เกิดการคงรูปก่อนกำหนดช้ากว่ากลุ่มกัวนิติน แต่เกิดการคงรูปได้เร็วกว่า

กลุ่มซัลฟีนามาई เกิดการคงรูปก่อนกำหนดช้าที่สุด และเมื่อถึงเวลาคงรูป มอคูลัสจะสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว นิยมใช้มากในอุตสาหกรรมยางรถยนต์

การกระตุ้นการทำงานของสารเร่งด้วยสารเร่งมี 2 ประเภท คือ

1. การกระตุ้นสารเร่งที่คงรูปช้า โดยการใช้สารเร่งที่คงรูปได้เร็วกว่า เช่น การกระตุ้นสารพวกไทอาโซล และซัลฟีนามาई ด้วยไซยูแรม และไดโซโอคาร์บาเมต การกระตุ้นเช่นนี้การคงรูปจะเร็วที่สุดอย่างมากก็เท่ากับไซยูแรม หรือไดโซโอคาร์บาเมตเท่านั้น

2. การกระตุ้นโดยใช้สารเร่งที่คงรูปช้ากว่า เช่น ไซยูแรมหรือไดโซโอคาร์บาเมต กระตุ้นโดยใช้กำนิติน ซึ่งสารเร่งรวมนี้จะเร็วสารเร่งเดิมทั้งสอง การกระตุ้นแบบนี้ เรียกว่า Synergism ซึ่งเป็นการเสริมซึ่งกันและกัน ตัวอย่างเช่น กลุ่มไทอาโซลกับกำนิติน MBTS กับ DPG และ TMTD กับ MBT (ซึ่งจะทำให้มอคูลัสสูงกว่าการใช้สารเร่งเดี่ยวๆ) จากรูปที่ 2.5 จะเห็นว่า การใช้ DPG ผสมกับ MBTS จะทำให้มอคูลัสของยาง และอัตราการคงรูปดีกว่า MBTS หรือ DPG เพียงอย่างเดียว



รูปที่ 2.5 การกระตุ้นการทำงานของสารเร่งด้วยสารเร่งที่คงรูปช้ากว่า [13]

2.2.3 สารกระตุ้นปฏิกิริยาการคงรูป (Activator)

เป็นสารที่เสริมตัวเร่ง โดยจะช่วยเร่งอัตราการคงรูปของยางให้เร็วขึ้น โดยทำให้สารเร่งปฏิกิริยาการคงรูปมีความว่องไวต่อปฏิกิริยา เพื่อจะได้เกิดประสิทธิภาพมากขึ้น ซึ่งสารกระตุ้นนี้จะเข้าไปทำปฏิกิริยากับสารเร่งปฏิกิริยาการคงรูปเกิดเป็นสารเชิงซ้อนที่มีประสิทธิภาพในการเร่งให้กำมะถันเกิดความว่องไวต่อปฏิกิริยาเชื่อมโยงโมเลกุล สารกระตุ้นมีสมบัติที่สำคัญ คือ เมื่อใส่เข้าไปในยางในปริมาณที่เล็กน้อย จะทำให้ยางมีมอคูลัสสูงขึ้น ช่วยไม่ให้สารประกอบยางติดกับลูกกลิ้งที่ใช้ใน

การบดผสมยาง ช่วยกระจายตัวของสารเคมีในเนื้อยาง และในบางครั้งอาจไม่มีปฏิกิริยาการคงรูป เกิดขึ้นถ้าไม่มีสารกระตุ้น

ชนิดของสารกระตุ้นปฏิกิริยาการคงรูป

2.2.3.1 พวกอนินทรีย์ ส่วนใหญ่เป็นพวกโลหะออกไซด์ ได้แก่

- ซิงค์ออกไซด์ (Zinc Oxide, ZnO)
- แคดเมียมออกไซด์ (Cadmium Oxide, CdO)
- แคลเซียมออกไซด์ (Calcium Oxide, CaO)
- แมกนีเซียมออกไซด์ (Magnesium Oxide, MgO)

ลำดับความว่องไวในการช่วยให้เกิดปฏิกิริยา



ซิงค์ออกไซด์เป็นสารที่นิยมใช้กันโดยทั่วไป แต่เป็นสารที่มีราคาค่อนข้างแพง โดยมากมักใช้ซิงค์ออกไซด์ประมาณ 3 - 5 phr ถ้าซิงค์ออกไซด์มีขนาดอนุภาคเล็ก สามารถลดปริมาณการใช้เหลือเพียง 1 phr ได้ ซึ่งจะทำให้ยางที่มีมอดูลัสสูง และยางมีลักษณะโปร่งใส

ซิงค์ออกไซด์สามารถจัดเกรดได้ตามความบริสุทธิ์ เนื่องจากปกติซิงค์ออกไซด์จะมีตะกั่วเจือปนอยู่ ซึ่งเป็นสาเหตุให้ยางมีสีคล้ำ จึงแบ่งซิงค์ออกไซด์ได้เป็น 2 ชนิด คือ White Seal และ Red Seal โดย White Seal มีตะกั่วอยู่ในปริมาณน้อย มักใช้ยางสีขาวย หรือสีสดใส ส่วน Red Seal จะมีตะกั่วอยู่ในปริมาณมากและนิยมใช้ในยางสีดำ

นอกจากนี้ซิงค์ออกไซด์บางชนิดที่มีอนุภาคเล็ก และอยู่ปนกับออกไซด์ของโลหะอื่น เรียกว่า Active Zinc Oxide สามารถใช้ในยางได้ โดยใส่ในปริมาณน้อย จะทำให้ยางใส มีสมบัติทางกายภาพดีขึ้น ได้แก่ มอดูลัส ความต้านทานต่อการฉีกขาด ความต้านทานต่อการสึกหรอ เป็นต้น

2.2.3.2 พวกอินทรีย์ ที่สำคัญ คือกรดไขมัน ได้แก่ กรดสเตียริก (Stearic Acid) กรดลอริก (Lauric Acid) กรดปาล์มมิติก (Palmitic Acid) เป็นต้น กรดไขมันเป็นสารที่จำเป็นในการใช้เป็นสารเสริมตัวเร่งปฏิกิริยาบางตัว โดยเฉพาะพวกไทอาโซล

โดยทั่วไปกรดไขมันที่มีความเป็นกรดสูง มีโมเลกุลยาวจะเป็นกรดไขมันที่มีประสิทธิภาพสูง สำหรับพวกที่มีจุดหลอมเหลวตัวต่ำ จะทำให้ยางอ่อนตัว และพวกที่มีความอิมตัวต่ำ จะทำให้สมบัติของยางหลังการบ่มเร่งดีขึ้น เช่น สมบัติการต้านทานต่อรอยแตกเนื่องจากการหักงอ เป็นต้น

กรดไขมันที่นิยมใช้เป็นสารกระตุ้นปฏิกิริยาการคงรูปมากที่สุด คือ กรดสเตียริก ปริมาณที่ใช้ในยางขึ้นกับชนิดของยาง โดยทั่วไปการผสมสารเคมีกับยางธรรมชาติจะใส่กรดสเตียริก 1 - 3 phr

2.2.4 สารตัวเติม

สารตัวเติม หมายถึง สารอื่นๆที่ไม่ใช่ยางที่ใส่ลงไปในยาง เพื่อลดต้นทุนในการผลิต หรือปรับปรุงสมบัติของยางให้ดีขึ้น เช่น คาร์บอนแบล็ก แคลเซียมคาร์บอเนต และซิลิกา เป็นต้น

สารตัวเติมที่ใส่ลงไปในช่วง เพื่อวัตถุประสงค์ต่างๆดังนี้

- เพื่อลดต้นทุน
- เพื่อเปลี่ยนแปลงสมบัติของยาง
- เพื่อช่วยในขบวนการผลิต
- ลดการพองตัวของยางในน้ำมัน
- เพื่ออายุการใช้งานของยาง

การแบ่งชนิดของสารตัวเติม

สามารถแบ่งชนิดของสารตัวเติมตามการผลิตและลักษณะคือ

การแบ่งชนิดของสารตัวเติมตามการผลิต แบ่งได้เป็น 5 ชนิด

1. สารตัวเติมที่มีตามธรรมชาติ หรือจากผลพลอยได้จากธรรมชาติ แล้วนำมาบดให้ละเอียด

- แคลเซียมคาร์บอเนตจากหินปูน เปลือกหอย และชอล์ก
- แคลเซียมและแมกนีเซียมซิลิเกตจากแป้งทัลคัม
- ซิลิกาอสัณฐาน (Amorphous Silica)

2. สารตัวเติมตามธรรมชาติที่ร่อนแยกความละเอียด เช่น คาโอลิน

3. สารตัวเติมที่ได้จากวิธีการตกตะกอน เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต ไฮดรตซิลิกา โซเดียม
อลูมิเนียมซิลิเกต อลูมิเนียมซิลิเกต แคลเซียมซิลิเกต และไฮดรตอลูมิเนียมออกไซด์

4. สารตัวเติมในรูปของเขม่า หรือผงฝุ่น เช่นคาร์บอนแบล็ก ซิงค์ออกไซด์ และแมกนีเซียม
ออกไซด์

5. สารตัวเติมประเภทที่มีการทำปฏิกิริยาที่ผิว (Surface Modified Products) เป็นผลิตภัณฑ์ที่นำสารตัวเติมมาทำการปรับปรุงสภาพผิว เพื่อให้สารตัวเติมนั้นเกาะติดแน่นกับยาง ซึ่งทำให้ยางมีสมบัติทางกายภาพดีขึ้น เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต แป้งทัลคัม และซิลิกาที่ทำปฏิกิริยาที่ผิวหรือฉาบผิว

การแบ่งชนิดของสารตัวเติมตามลักษณะ แบ่งได้เป็น 3 ชนิด คือ

1. สารตัวเติมที่มีลักษณะเป็นเม็ด (Particulated Filler) ได้แก่ แคลเซียมคาร์บอเนตคาร์บอน-
แบล็ก

2. สารตัวเติมที่มีลักษณะเป็นเส้นใย (Fibrous Filler) ได้แก่ เอสเบสทอส ผงเยื่อไม้

3. สารตัวเติมที่มีลักษณะเป็นเรซิน (Resinous Filler) ได้แก่ ฟีนอริกเรซิน เป็นต้น

สารตัวเติมที่มีลักษณะเป็นเม็ด

ก. สารตัวเติมพวกเสริมความแข็งแรง (Reinforcing Filler) เป็นสารตัวเติมที่ช่วยให้ยางมีสมบัติทางกายภาพดีขึ้น คือ มีความต้านทานแรงดึง ความต้านทานต่อการสึกหรอ และความต้านทานต่อการฉีกขาดสูง เป็นต้น แต่ถ้าเพิ่มปริมาณของสารตัวเติมมากขึ้นจะทำให้ยางมีความ

ด้านทานต่อการกระดอนลดลง สารตัวเติมประเภทนี้ส่วนใหญ่จะมีอนุภาคขนาดเล็กประมาณ 180 - 600 Å เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากเขม่า เช่น คาร์บอนแบล็ก และ ซิลิกา เป็นต้น

ข. สารตัวเติมพวกกึ่งความแข็งแรง (Semi-Reinforcing Filler) เป็นสารตัวเติมที่ช่วยเสริมความแข็งแรงของยางได้บ้าง สารตัวเติมเหล่านี้มีขนาดอนุภาคปานกลาง เช่น อลูมิเนียมซิลิกเกต แคลเซียมซิลิกเกต และคาโอลิน เป็นต้น

ค. สารตัวเติมพวกช่วยลดต้นทุนการผลิต (Diluent Filler) สารตัวเติมประเภทนี้ไม่เสริมประสิทธิภาพความแข็งแรงให้กับยาง มีราคาถูก มีอนุภาคขนาดใหญ่ตั้งแต่ 10,000 Å ขึ้นไป เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต แป้งทัลคัม แบเรียมซัลเฟต เป็นต้น สารตัวเติมประเภทนี้จะทำให้สมบัติทางกายภาพบางอย่างลดลง เช่น ความต้านทานแรงดึง ความต้านทานต่อการฉีกขาด และความต้านทานต่อการสึกหรอ แต่ปรับปรุงสมบัติบางอย่างให้ดีขึ้น เช่น ทำให้ความแข็งของมอดูลัสดีขึ้น ทำให้กระบวนการแปรรูปง่าย ลดการบวมของยาง และช่วยลดต้นทุนการผลิตเพราะมีราคาถูก

2.2.5 สารช่วยในการแปรรูป (Plasticizer)

เป็นสารที่ใส่เข้าไปในยางเพื่อเพิ่มความยืดหยุ่น และเพิ่มความสามารถในการใช้งาน ซึ่งสารช่วยในการแปรรูปจะทำให้ความแข็งของยางลดลง และช่วยให้แปรรูปได้ง่ายขึ้น

ในบางครั้งสารช่วยในการแปรรูปจะมีชื่อเรียกต่างๆ กัน ขึ้นกับหน้าที่และปริมาณการใช้ คือ

1. Processing acid คือ สารพลาสติกไซเซอร์ ที่ใช้ในปริมาณไม่เกิน 5 phr เพื่อช่วยในการแปรรูปยาง และช่วยให้การผสมสารเคมีเข้าไปในยางได้ง่ายขึ้น
 2. Softener คือ สารพลาสติกไซเซอร์ที่ใช้ในปริมาณ 5 - 15 phr ใส่เพื่อทำให้ยางนิ่มลงทั้งในขณะยังไม่คงรูปและคงรูปแล้ว
 3. Extender คือ สารพลาสติกไซเซอร์ที่ใช้ในปริมาณมากกว่า 15 phr ใส่เพื่อลดต้นทุนหน้าที่ของพลาสติกไซเซอร์
 1. ช่วยในการแปรรูปยางคือ ช่วยให้ยางทั้งที่คงรูปแล้วและยางที่ยังไม่คงรูปนิ่มลง ทำให้แปรรูปยางได้ง่ายขึ้น
 2. เพื่อปรับปรุงสมบัติของยาง คือ มีความแข็งแรงลดลง มอดูลัสลดลง แรงยึดออกจกขนาดของยางสูงขึ้น มีความยืดหยุ่นสูงขึ้น
 3. ลดต้นทุน คือ การเติมพลาสติกไซเซอร์เข้าไปจะช่วยทำให้สามารถใส่สารตัวเติมได้มากขึ้น
 4. เพื่อการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำ คือ ทำให้ยางยังคงมีความยืดหยุ่นที่อุณหภูมิต่ำ
 5. เพื่อลดพลังงานในการแปรรูปยาง เนื่องจากพลาสติกไซเซอร์ทำให้ยางนิ่มลง
- พลาสติกไซเซอร์ แบ่งเป็น 2 ประเภท คือ

ก. สารช่วยทำให้ยางนิ่มโดยทางเคมี (Chemical Plasticizer) เป็นพลาสติกไซเซอร์ที่เมื่อใส่เข้าไปในปริมาณเล็กน้อย จะทำให้ยางนิ่มและลดเวลาของการบดขย้างลง มักใช้กับยางธรรมชาติและยาง

สังเคราะห์ที่มีความหนืดสูง ซึ่งมีโมเลกุลใหญ่และแปรรูปได้ยาก โดยใช้ประมาณ 2 phr ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาเคมีกับยาง

ข. สารช่วยทำให้ยางนิ่มโดยทางกายภาพ (Physical Plasticizer) เป็นพลาสติกไซเซอร์ที่ใส่เข้าไปแล้ว ทำหน้าที่เป็นตัวหล่อลื่นระหว่างโมเลกุลของยาง ทำให้โมเลกุลยางเคลื่อนไหวได้ง่าย ยางจะนิ่มลง แปรรูปได้ง่ายขึ้น เป็นสารที่ไม่ทำปฏิกิริยากับยางและสามารถผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกับยางและสารอื่นๆ ได้ ตัวอย่างเช่น น้ำมันปิโตรเลียม เป็นต้น

2.2.6 การต้านทานยางเสื่อมสภาพ (Protective Agent)

เนื่องจากโมเลกุลของยางธรรมชาติจะมีพันธะคู่อยู่ด้วย จึงทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ทำจากยางธรรมชาติเกิดการเสื่อมสภาพได้ โดยสาเหตุของการเสื่อมสภาพนี้เนื่องจากปฏิกิริยาของออกซิเจนและโอโซน ซึ่งการเสื่อมสภาพของยางจะเกิดช้ามากถ้าไม่มีสารเร่ง แต่ในธรรมชาติ เช่น แสง ความร้อน ความไม่บริสุทธิ์ของโลหะ ส่วนเป็นตัวเร่งตามธรรมชาติที่ทำให้ยางเสื่อมสภาพเร็วขึ้น

นอกจากนี้การอบยาง (Aging) จะทำให้ผิวหน้าของผลิตภัณฑ์เกิดการเปลี่ยนแปลง หรืออาจจะเกิดการเปลี่ยนแปลงในทุกส่วนของผลิตภัณฑ์ เช่น เกิดรอยแตกที่ผิว ผิวแข็ง และสูญเสียความแข็งแรงซึ่งการเสื่อมสภาพของยางสามารถแบ่งออกได้เป็น 6 แบบ คือ

1. การเสื่อมสภาพเนื่องจากตั้งทิ้งไว้นาน (Self Aging)
2. การเสื่อมสภาพเนื่องจากการกระตุ้นของโลหะที่เป็นตัวเร่ง (Metallic Poisoning)
3. การเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน (Heat Aging)
4. การเสื่อมสภาพเนื่องจากแสง (Light Aging)
5. การเสื่อมสภาพเนื่องจากการหักงอไปมา (Flex Cracking)
6. เกิดรอยแตกเนื่องจากบรรยากาศ (Atmospheric Cracking)

ดังนั้นเพื่อเป็นการป้องกันยางเสื่อมสภาพและเพิ่มความทนทานของยางให้ดีขึ้น ในการผลิตผลิตภัณฑ์ยางจึงจำเป็นต้องมีการป้องกันยางเสื่อมสภาพ โดยใช้สารแอนติออกซิแดนท์ (Antioxidant) หรือสารแอนตี้โอโซนแนนท์ (Antiozonent) ซึ่งจะช่วยยืดอายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์ให้นานขึ้น

2.2.6.1 แอนติออกซิแดนท์ เป็นสารป้องกันการเสื่อมสภาพของยางที่เนื่องมาจากการที่ออกซิเจนเข้าทำปฏิกิริยากับยาง โดยเรียกปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้ว่า “ปฏิกิริยาออกซิเดชัน” โดยสารแอนติออกซิแดนท์สามารถแบ่งได้เป็น 2 พวกใหญ่ๆ คือ

ก. สารแอนติออกซิแดนท์ชนิดตกสี (Staining Antioxidant) เป็นสารป้องกันการเกิดออกซิเดชันที่เป็นสารประกอบอะมีน (Amine) หรืออนุพันธ์ของอะมีน ใช้กับยางที่มีสีดำ เป็นสารที่มีประสิทธิภาพสูงแต่เมื่อใช้จะทำให้ผลิตภัณฑ์ตกสี ได้แก่ Para-phenylene diamine (PPD) เป็นต้น

ข. สารแอนติออกซิแดนซ์ชนิดไม่ตกสี (Non-Staining Antioxidant) เป็นสารแอนติออกซิแดนซ์ที่เป็นสารประกอบฟีนอล (Phenol) หรืออนุพันธ์ของฟีนอล ใช้กับยางที่มีสีทั่วไป ซึ่งจะไม่เกิดการตกสี หรือตกสีเล็กน้อย ได้แก่ Phenolic sulfide เป็นต้น

2.2.6.2 แอนตี้โอโซนแนนท์ โดยปกติโอโซนมีอยู่ในปริมาณน้อยประมาณ 1-10 ส่วนต่อร้อยล้านส่วน (pphm) ในบรรยากาศ แต่มีผลต่อยาง โดยทำให้ยางเกิดรอยแตก สามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ

ก. Para-Phenylene Diamine (PPD) ซึ่งเป็นทั้งแอนติออกซิแดนซ์และแอนตี้โอโซนแนนท์ แต่มีข้อเสีย คือเกิดการตกสี เหมาะสำหรับผลิตภัณฑ์ที่มีสีคล้ำ

ข. ขี้ผึ้งพาราฟิน (Paraffin Wax) เป็นสารขี้ผึ้งที่เติมลงไปในยางจะเกิดการซึมออกมาที่ผิวยาง กลายเป็นแผ่นฟิล์มบางๆ ทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้โอโซนกระทบกับผิวของยาง ทำให้ยางมีความทนทานต่อโอโซน ขี้ผึ้งพาราฟินที่ใช้ในการป้องกันไม่ให้โอโซนทำปฏิกิริยากับยาง ควรมีสมบัติดังนี้ ต้องซึมออกมาที่ผิวของยางได้เร็ว ต้องเกาะยึดแน่นกับผิวยาง และต้องมีปริมาณมากพอที่จะทำให้ผิวของยางมีขี้ผึ้งอยู่ตลอดเวลา

2.2.7 ประโยชน์ในการผสมยางกับสารเคมี

1. เพื่อแก้ไขข้อเสียของยาง

ก. ยางมีสมบัติเป็นทั้งพลาสติกและอีลาสติก สมบัติเป็นพลาสติก คือ สมบัติของสารที่เมื่อใช้น้ำหนักกดลงไป จะแบนและไหลได้ ส่วนสมบัติเป็นอีลาสติก คือ สมบัติของสารที่เมื่อมีแรงกระทำต่อมัน เช่น ยืดออก เมื่อเอาแรงออกจะกลับคืนรูปเดิม ยางเมื่อกดก็จะแบนลง แต่เมื่อคลายแรงจะกลับคืนรูปแต่ไม่เท่าของเดิม หรือเมื่อดึงออกจะยืด แต่เมื่อปล่อยกลับจะคืนกลับแต่ไม่เท่าเดิม การที่ยางมีสมบัติเป็นพลาสติกนี้ทำให้ไม่สามารถนำงานไปใช้ได้โดยตรง

ข. ยางเป็นเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) คือ ที่อุณหภูมิต่ำ ยางจะแข็งกระด้าง แตกหักได้ง่าย แต่ที่อุณหภูมิที่สูงขึ้นยางจะอ่อนนุ่มไหลแปรรูปไป การมีสมบัติเป็นเทอร์โมพลาสติก ทำให้นำยางไปใช้งานได้ในช่วงอุณหภูมิที่จำกัด

ค. ยางมีความแข็งแรงต่ำ ความต้านทานแรงดึงต่ำ และความต้านทานต่อการสึกหรอต่ำ

ง. ยางสามารถละลายได้ง่ายในตัวทำละลายหลายชนิด ยางมีสารประกอบที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ มีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย 30,000 - 300,000 โมเลกุลเหล่านี้เมื่ออยู่รวมกันจะยึดกันด้วยแรงอ่อนๆ ได้แก่ แรงแวนเดอร์วาลส์ หรือพันธะไฮโดรเจน โมเลกุลจึงแยกจากกันได้ง่าย โดยใช้ตัวทำละลายที่มีขั้วหรือมีประสิทธิภาพของการละลายใกล้เคียงกับยาง ดังนั้นยางจึงสามารถละลายได้ง่ายในตัวทำละลายต่างๆ

2. เพื่อเป็นตัวช่วยในกระบวนการแปรรูปยาง

ปกติในยางดิบที่ยังไม่ได้ผสมกับสารเคมีอื่น จะมีสมบัติเหนียว ซึ่งเกี่ยวกับความยืดหยุ่นของส่วนประกอบที่อยู่ในยางดิบ และทำให้ลำบากในการนำไปเข้ากระบวนการต่างๆ เช่น การรีดยาง

ให้เป็นแผ่นเรียบจากเครื่องรีดเรียบ หรือการทำท่อยางหรือเส้นยางจากเครื่องอัดผ่านหัวไต เป็นต้น กระบวนการเหล่านี้แสดงให้เห็นถึงความผิดปกติ หรือความสม่ำเสมอของยาง เมื่อผ่านเครื่องรีดเรียบ และความผิดปกติในการพองตัวของยางเมื่อผ่านเครื่องอัดผ่านหัวไต แต่หลังจากที่ได้เติมสารเคมีบางชนิด เช่น สารตัวเติม สารทำให้ยางอ่อนตัว จะทำให้ผลผลิตที่ได้จากเครื่องรีดเรียบมีผิวเรียบ และสามารถลดปัญหาเกี่ยวกับความไม่สม่ำเสมอของแผ่นยางหรือการพองตัวของท่อยางได้

3. ทำให้ยางมีขอบเขตการใช้งานมากขึ้น

จากความเหมาะสมในการเลือกสารเคมีผสมในยาง ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติของผลิตภัณฑ์ยางอย่างมาก และผลิตภัณฑ์ที่ได้เหล่านี้จะเปลี่ยนจากอ่อน ไปจนถึงผลิตภัณฑ์ที่มีความสามารถในการทนความร้อน เช่น ขวดใส่น้ำร้อน และผลิตภัณฑ์ที่มีความแข็งมากที่สุด เช่น เปลือกหม้อเบตเตอร์รี่ ต้องการสมบัติของผลิตภัณฑ์ยางอย่างไร ก็สามารถเลือกชนิดและปริมาณของสารเคมีได้ตามวัตถุประสงค์

4. เพื่อเป็นการลดต้นทุนการผลิต

การนำยางมาทำเป็นผลิตภัณฑ์ ถ้าใช้แต่เนื้อยางล้วนๆ จะทำให้ต้นทุนการผลิตสูง ถ้าสามารถผสมสารอื่นที่มีราคาถูกลงไป จะทำให้ลดต้นทุนการผลิตลง

2.3 คาร์บอนแบล็ก

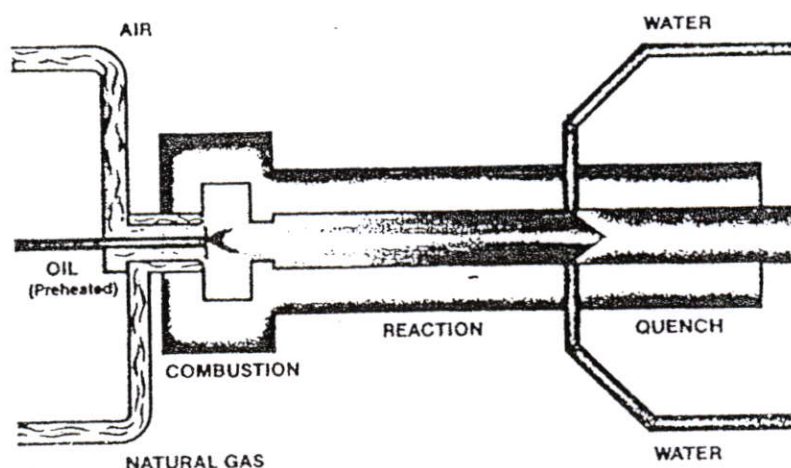
คาร์บอนแบล็ก ได้จากขบวนการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ หรือการแตกตัวเนื่องจากความร้อน (Thermal Cracking) ของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน เช่น น้ำมันเชื้อเพลิง ก๊าซธรรมชาติ ฯลฯ คาร์บอนแบล็กจัดเป็นสารตัวเติมที่สำคัญที่สุด และมีปริมาณการใช้มากที่สุดในอุตสาหกรรมยาง เนื่องจากคาร์บอนแบล็กมีราคาถูก สามารถใส่คาร์บอนแบล็กในยางได้ในปริมาณมาก (มากกว่า 50 phr) และที่สำคัญที่สุด คือ คาร์บอนแบล็กสามารถช่วยเสริมแรงให้กับยางอย่างมาก อาจทำให้ความแข็งแรง ของยางเพิ่มมากกว่า 10 เท่า นอกจากนี้ยังช่วยเพิ่มความสามารถในการขึ้นรูป (Processability) ของยางให้ง่ายขึ้นด้วย เช่น ลดความยืดหยุ่นของของไหล ลดการหดตัว และการบิดเบี้ยว ของผลิตภัณฑ์ยางหลังจากขึ้นรูป เป็นต้น การใช้คาร์บอนแบล็กมีข้อเสีย คือ ผลิตภัณฑ์ยางที่ใส่สารตัวเติมคาร์บอนแบล็กมีสีดำ เช่น ยางรถยนต์ สายพาน ฯลฯ

2.3.1 คาร์บอนแบล็กแบ่งตามชนิด คือ

1. คาร์บอนแบล็กชนิดเฟอร์เนส (Furnace Blacks)

คาร์บอนแบล็กชนิดเฟอร์เนส เป็นชนิดที่นิยมใช้แพร่หลายทั่วไป และมีปริมาณการใช้งานมากที่สุด คาร์บอนแบล็กชนิดนี้ผลิตได้จากปฏิกิริยาการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ของสารไฮโดรคาร์บอน ขบวนการผลิตคาร์บอนแบล็กสามารถแสดงได้ดังรูป เชื้อเพลิงคือก๊าซหรือน้ำมัน

เชื้อเพลิง เผาไหม้ภายใต้บรรยากาศที่มีออกซิเจนที่มากเกินไป (Excess Air) เกิดเป็นอากาศร้อน หมุนวนภายในเตาเผาบริเวณเผาไหม้ น้ำมันวัตถุดิบ นิยมใช้เป็นน้ำมันหนักที่เหลือจากขบวนการกลั่นน้ำมัน (Refinery Heavy Oil) ที่มีสารอะโรมาติก (Aromatic) ปริมาณมาก จะถูกฉีดเข้าไปเกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ กลายเป็นกากคาร์บอน ลักษณะเป็นก้อนคาร์บอนแบล็กปริมาณมาก ซึ่งจะถูกทำให้เย็นอย่างรวดเร็ว (Quench) ด้วยน้ำ คาร์บอนแบล็กชนิดเฟอร์เนสจะมีโครงสร้างเป็นก้อนกลมติดกันเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่ที่เรียกว่า “แอ็กกรีเกต” (Aggregates) มีโครงสร้างสูง ขนาดเล็ก (ประมาณ 10 – 100 nm) มีปริมาณออกซิเจนต่ำ (มักจะน้อยกว่า 1%) เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันบนพื้นผิวเกิดเป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่มีหมู่ฟังก์ชันอะตอมออกซิเจนบางประเภท หรือออกซีไฮโดรคาร์บอน (Oxyhydrocarbons) ปริมาณเล็กน้อย พื้นผิวของคาร์บอนแบล็กเป็นกลางหรือเป็นด่างเล็กน้อย (pH ประมาณ 8)



รูปที่ 2.6 แผนภาพแสดงการผลิตคาร์บอนแบล็กชนิดเฟอร์เนส [14]

2. คาร์บอนแบล็กชนิดเทอร์มอล (Thermal Blacks)

คาร์บอนแบล็กชนิดนี้เกิดจากขบวนการแตกตัว (Cracking) ของน้ำมันหรือก๊าซธรรมชาติ ภายใต้บรรยากาศที่ปราศจากออกซิเจนที่บริเวณผิวร้อนภายในเตาเผาอุณหภูมิสูง ได้เป็นคาร์บอนแบล็กที่ไม่ถูกออกซิไดซ์ คาร์บอนแบล็กชนิดนี้จะมีขนาดใหญ่ (ประมาณ 100 – 500 nm) ลักษณะเป็นก้อนกลม โครงสร้างน้อย และมีพื้นที่ผิวน้อย

3. คาร์บอนแบล็กชนิดชันแนล

ขบวนการผลิตคาร์บอนแบล็กชนิดนี้ค่อนข้างเก่า ล้าสมัย จึงไม่เป็นที่นิยมใช้ เกิดจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ ของก๊าซธรรมชาติ ที่เตาเผา (Burner) ทำให้เกิดเขม่าเกาะสะสมที่ผิวภายในท่อเหล็ก (Channel Iron) เส้นที่ต่อยาวไปมาเป็นอนุกรม ทำให้ได้คาร์บอนแบล็กชนิดชันแนล มีพื้นที่ผิวที่

ถูกออกซิไดซ์ มีความเป็นกรด (pH ต่ำ) ขนาดเล็กมาก (ประมาณ 1 – 3 nm) การใช้คาร์บอนแบล็กชนิดนี้จะมีผล “หน่วง” ปฏิกริยาการเชื่อมโยงของยางเนื่องจากมีความเป็นกรด

ตารางที่ 2.3 การเปรียบเทียบลักษณะของคาร์บอนแบล็กชนิดต่างๆ [13]

ลักษณะ	Furnace	Thermal	Channel
ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (Average Particle Size) (nm)	10 – 100	100 – 500	1 – 3
พื้นที่ผิว (Surface area (N ₂)) (m ² /g)	27 – 145	7 – 11	100 – 1125
การดูดซับน้ำมัน (Oil absorption) (ml/g)	0.67 – 1.55	0.32 – 0.47	1.0 – 6.0
ปริมาณสารระเหยได้ (Volatile matter) (%)	0.3 – 2.8	0.1 – 1.0	3.5 – 16.0
ปริมาณเถ้า (Ash) (%)	0.1 – 1.0	0.2 – 0.5	0 – 0.1
ปริมาณกำมะถัน (Sulfur) (%)	0.5 – 1.5	10 ppm	0 – 0.1
ความเป็นกรด – ค่า (pH)	5.0 – 9.5	7 - 9	3 - 6

2.3.2 การแบ่งเกรดและการเรียกชื่อคาร์บอนแบล็ก

ในอดีตได้มีการแบ่งเกรดและเรียกชื่อคาร์บอนแบล็กต่างๆ มากมาย โดยมากจะเรียกตามชนิดและความสามารถในการปรับปรุงสมบัติของยาง เช่น

Furnace black แบ่งตามขนาดอนุภาค ได้ดังนี้

- SAF (Super Abrasion Furnace Black) มีขนาดอนุภาค 200 A°
- ISAF (Intermediate Super Abrasion Furnace Black) มีขนาดอนุภาค 240A°
- HAF (High Abrasion Furnace) มีขนาดอนุภาค 300 A°
- FEF (Fast Extension Furnace Black) มีขนาดอนุภาค 400 A°
- GPF (General Purpose Furnace black) มีขนาดอนุภาค 600 A°
- SRF (Semi-Reinforcing Furnace Black) มีขนาดอนุภาค 700 A°
- SCF (Super Conductive Furnace Black) มีขนาดอนุภาค 200 A°
- CF (Conductive Furnace Black) มีขนาดอนุภาค 240 A°

ปัจจุบันมาตรฐาน ASTM D1765 ได้แบ่งเกรดคาร์บอนแบล็กตามขนาดอนุภาคเฉลี่ย (Average Particle Size) และระดับการออกซิเดชันบนพื้นผิว (Degree of Surface Oxidation) ซึ่งจะมีผลโดยตรงต่อความรวดเร็วในการเชื่อมโยงยาง โดยใช้อักษร “N” หรือ “S” แล้วตามด้วยตัวเลขสามหลัก (เช่น N110 N660 S330 เป็นต้น) หลักการเรียกชื่อมีดังนี้

- อักษรนำ “N” มาจาก “Normal – Curing” เกิดการเชื่อมโยงปกติ ใช้คาร์บอนแบล็กชนิดเฟอร์เนส (Furnace Blacks) และคาร์บอนแบล็กชนิดเทอร์มอล (Thermal Blacks)

- อักษรนำ “S” มาจาก “Slow – Curing” เกิดการเชื่อมโยงซ้ำ ใช้เรียกคาร์บอนแบล็กชนิดชั้นแนล (Channel Blacks) และคาร์บอนแบล็กชนิดเฟอร์เนสที่ถูกออกซิไดซ์ (Oxidized Furnace Blacks)

- ตัวเลขหลักแรก แสดงถึง “ขนาดอนุภาคเฉลี่ย” ตัวเลขน้อยใช้แทนอนุภาคขนาดเล็ก ตัวเลขมากใช้แทนอนุภาคขนาดใหญ่ แสดงรายละเอียดดังตาราง

- ตัวเลขหลักที่ 2 และ 3 แสดงถึง “โครงสร้าง” ตัวเลขน้อยใช้แทนคาร์บอนแบล็กที่มีโครงสร้างต่ำ ตัวเลขมากใช้แทนคาร์บอนแบล็กที่มีโครงสร้างสูง การใช้ตัวเลขไม่มีหลักการที่แน่นอน

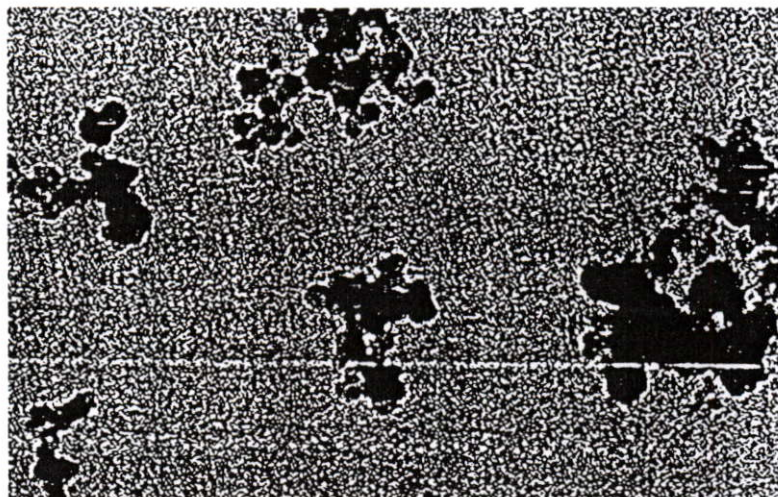
ตารางที่ 2.4 การจำแนกเกรดคาร์บอนแบล็กตามมาตรฐาน ASTM (D1765)

Range of ASTM Numbers	Average Particle Diameter (nm)	Old Classification
900 – 999	201 – 500	MT
800 – 899	101 – 200	FT
700 – 799	61 – 100	SRF
600 – 699	49 – 60	FPF , HMF
500 – 599	40 – 48	FEF
400 – 499	31 – 39	FF
300 – 399	26 – 30	HAF , EPC
200 – 299	20 – 25	ISAF
100 – 199	11 – 19	SAF
000 - 099	1 - 10	-

2.3.3 รูปร่างและโครงสร้างของคาร์บอนแบล็ก

รูปที่ 2.7 และ 2.8 แสดงสัณฐานวิทยาของคาร์บอนแบล็กที่ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscope, TEM) ที่กำลังขยายต่ำและกำลังขยายสูงตามลำดับ จะเห็นได้ว่าคาร์บอนแบล็กมีลักษณะเป็นกลุ่มก้อนกลมติดกันอย่างไม่เป็นระเบียบ มีรูปร่างคล้ายพวงองุ่น กลุ่มก้อนของอนุภาคที่ติดกันนี้เรียกว่า “แอ็กกรีเกต” (Aggregate) เกิดจากการหลอมติด ของอนุภาคเล็กๆที่เรียกว่า “โนดูล” ซึ่งเป็นหน่วยที่เล็กที่สุดของคาร์บอนแบล็ก แต่ละโนดูลเกิดจากการเรียงตัวหลายๆชั้นของแผ่นแกรไฟต์ (Graphitic Layer Planes) เป็นผลึกเรียงเป็นวงขยายออกตามแนวรัศมี โครงสร้างผลึกของคาร์บอนแบล็ก จะไม่เป็นระเบียบเหมือน

แกรไฟต์ เช่นมีระยะห่างระหว่างชั้นมากกว่า (ประมาณ 3.5\AA) มีอะตอมที่หายไป อาจมีหมู่ฟังก์ชันหรืออะตอมของธาตุอื่นด้วยเช่น ออกซิเจน รูปวาดแสดงโครงสร้างของคาร์บอนแบล็กแสดงได้ดังรูปที่ 2.9

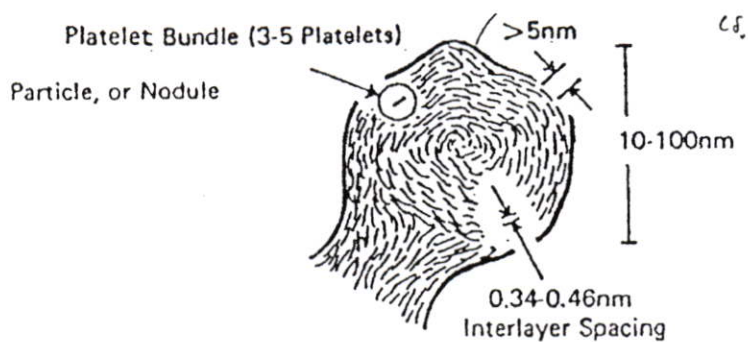


รูปที่ 2.7 TEM Micrograph กำลังขยายต่ำแสดงรูปร่าง [14]

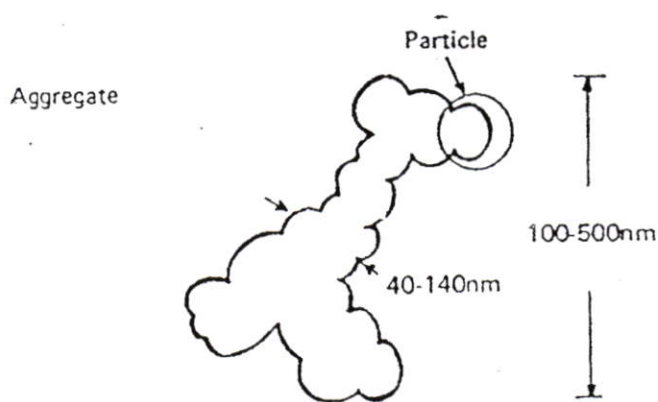


รูปที่ 2.8 TEM Micrograph กำลังขยายสูงแสดงรูปร่างของคาร์บอนแบล็ก

(แท่งแสดงขนาด = 10 nm) [14]



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.9 (ก) ภาพวาดแสดงลักษณะของอนุภาคหรือโนดูลของคาร์บอนแบล็ก และ (ข) แอ็กกรีเกต ที่เกิดจากโนดูล หลอมติดกัน(Fused Nodules) [14]

2.3.4 ปัจจัยของคาร์บอนแบล็กที่มีผลต่อสมบัติการเสริมแรง

ในการเติมสารตัวเติมเช่นเขม่าเพื่อเพิ่มเนื้อและเสริมแรงให้กับยาง มีหลายปัจจัยที่ต้องพิจารณา เนื่องจากจะมีผลอย่างมากต่อสมบัติของยาง ปัจจัยที่สำคัญได้แก่

1. ขนาด หรือ พื้นที่ผิว
2. โครงสร้าง
3. เคมีของพื้นผิว เช่นหมู่ฟังก์ชัน บนพื้นผิว ความเป็นกรดค่า (pH) ฯลฯ

2.3.4.1 ขนาดของอนุภาคคาร์บอนแบล็ก

ขนาดอนุภาค ของคาร์บอนแบล็กจะแปรผกผันกับ พื้นที่ผิว กล่าวคือสารตัวเติมของแข็งที่มีขนาดเล็กจะมีพื้นที่ผิวมาก สารตัวเติมขนาดใหญ่จะมีพื้นที่ผิวน้อย เป็นที่ทราบกันดีว่า สารตัวเติมที่ทำหน้าที่เป็นสารตัวเติมชนิดเสริมแรง จะต้องมึขนาดอนุภาคเล็ก ประมาณเล็กกว่า 1 ไมครอน

(μm) สารตัวเติมยังมีขนาดเล็กประสิทธิภาพการเสริมแรงยิ่งสูงขึ้น จะทำให้ยางมีความแข็งแรงสูงขึ้น ความทนทานต่อการสึกหรอสูงขึ้น อย่างไรก็ตาม การบดคาร์บอนแบล็กให้เข้ากันจะทำได้ดียิ่งขึ้น

เทคนิคการหาขนาดอนุภาคหรือพื้นที่ผิวของคาร์บอนแบล็ก

1. การศึกษาสัณฐานวิทยา (Morphology)

การศึกษาสัณฐานวิทยา ของคาร์บอนแบล็กแล้วทำการวัดโดยตรงจากภาพถ่าย หรือใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์วิเคราะห์ภาพ สามารถวัดขนาดอนุภาคคาร์บอนแบล็กได้โดยตรงเช่น กล้องจุลทรรศน์ (Optical Microscope, OM) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron Microscope, SEM) ฯลฯ

2. การดูดซับก๊าซไนโตรเจน (BET N_2 Absorption)

เป็นเทคนิคการหาพื้นที่ผิว ทำได้โดยการวัดปริมาณของก๊าซไนโตรเจนที่อุณหภูมิคงที่ ที่ดูดซับที่ผิวของอนุภาคคาร์บอนแบล็ก ซึ่งจะดูดซับเพียงหนึ่งชั้น (Monolayer) บนพื้นผิวเรียกเทคนิคนี้ว่าการดูดซับก๊าซไนโตรเจน หรือ BET ค่ารายงานเป็นพื้นที่ผิวต่อน้ำหนักคาร์บอนแบล็ก (เช่น m^2/g)

3. การดูดซับไอโอดีน (Iodine Absorption)

ทำได้โดยนำไอโอดีนที่ละลายในโพแตสเซียมไอโอดีน (KI) ผสมเพื่อให้ดูดซับกับคาร์บอนแบล็กที่ทราบน้ำหนักแน่นอน จากนั้นทำการกรองแล้วไตเตรตหาปริมาณไอโอดีนที่เหลือ ปริมาณไอโอดีนที่ดูดซับจะสัมพันธ์กับพื้นที่ผิวของคาร์บอนแบล็ก คาร์บอนแบล็กขนาดเล็ก พื้นที่ผิวมาก จะดูดซับไอโอดีนได้มาก

4. การหาค่าบดบังแสง (Tinting Strength)

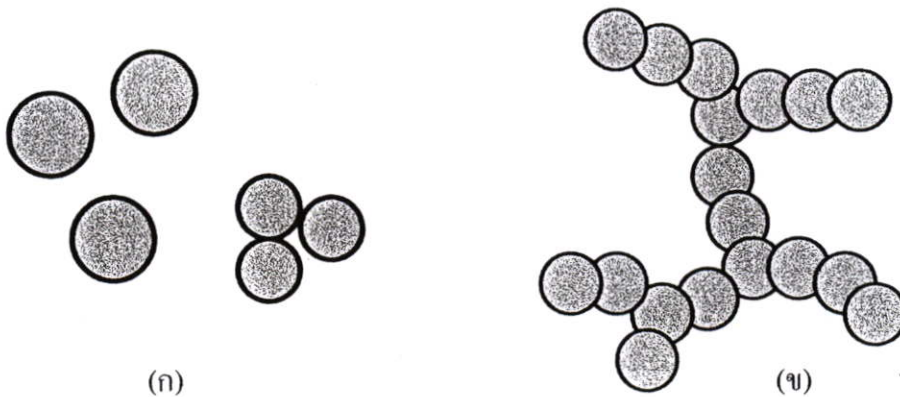
เทคนิคนี้เป็นการวัดสมบัติทางแสงคือ Tinting Strength ซึ่งความสามารถของวัตถุในการบดบังแสง เตรียมตัวอย่างโดยผสมคาร์บอนแบล็ก 0.1 กรัม เข้ากับซิงค์ออกไซด์ (ZnO) 3.75 กรัม โดยใช้น้ำมัน เช่น น้ำมันถั่วเหลือง ทำให้ได้ของเหนียวข้น (Paste) สีเทา เพื่อทำการวัดการดูดกลืนแสง (Optic absorbance) คาร์บอนแบล็กที่มีขนาดเล็กจะจัดเรียงตัวอนุภาคกันแน่น มีความสามารถในการบดบังแสง หรือ Tinting strength สูง ทำให้เห็นตัวอย่างมีสีดำนอกกว่าคาร์บอนแบล็กที่มีขนาดใหญ่ นอกจากนี้คาร์บอนแบล็กที่มีโครงสร้างน้อย (กลม หรือกึ่งก้านน้อย) จะจัดเรียงอนุภาคใกล้ชิดกันมากกว่าทำให้มี Tinting strength สูงกว่าหรือบดบังแสงได้มากกว่า มีสีดำนอกกว่า

2.3.4.2 โครงสร้างของคาร์บอนแบล็ก

โครงสร้าง ของคาร์บอนแบล็ก คือความไม่เป็นระเบียบ หรือความเกะกะ (Bulkiness) ของแอ็กกรีเกต (Aggregates) หรือกลุ่มก้อนที่ติดกันของโนดูล ดังรูปที่ 2.10 อาจกล่าวได้ว่า

- คาร์บอนแบล็กที่มีโครงสร้างต่ำ หมายถึง คาร์บอนแบล็กที่โนดูลเกาะกันอย่างเป็นระเบียบรูปร่างค่อนข้างกลม ไม่มีกึ่งก้านมาก (รูปที่ 2.10 (ก))

- คาร์บอนแบล็กที่มีโครงสร้างสูง หมายถึง คาร์บอนแบล็กที่มีจำนวนโนดคู่ต่อหนึ่งแอ็กกรีเกตมาก เกาะติดกันเป็นรูปร่างไม่เป็นระเบียบ เป็นกิ่งก้านสาขามาก เกะกะมาก จะมีความหนาแน่นต่ำ สามารถดูดซับสารเคมีต่างจำพวกน้ำมัน ได้มาก เช่น สารหล่อลื่น (รูปที่ 2.10 (ข))



รูปที่ 2.10 (ก) คาร์บอนแบล็กโครงสร้างต่ำ (Low Structure) (ข) คาร์บอนแบล็กโครงสร้างมาก (High Structure)

โครงสร้างของคาร์บอนแบล็กอาจแบ่งได้เป็น 2 ระดับ คือ

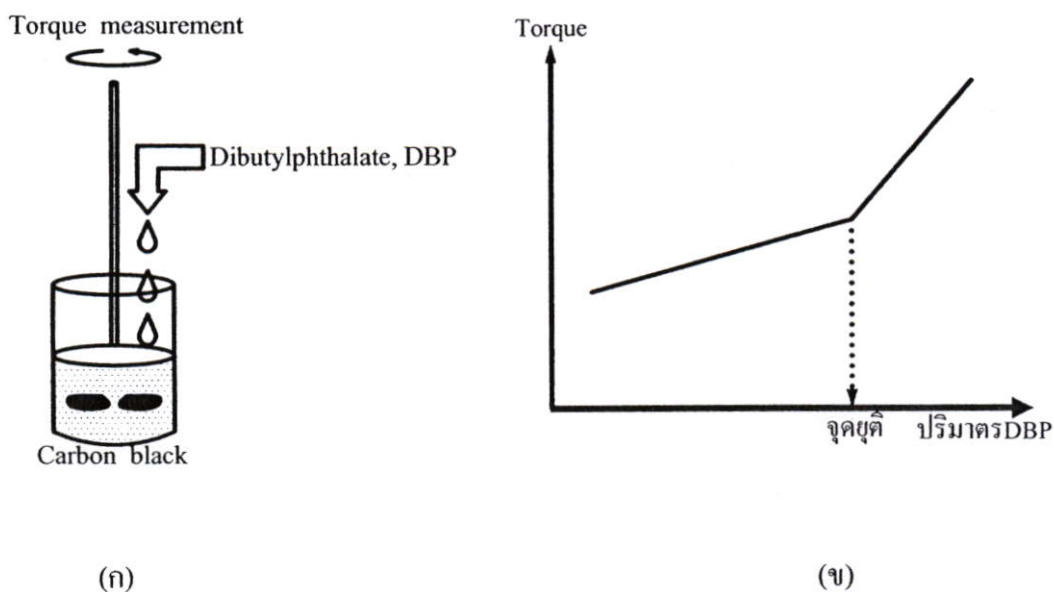
1. โครงสร้างปฐมภูมิ (Primary Structure) เป็นโครงสร้างพื้นฐานมีขนาดเล็ก เกิดจากโนดคู่เกาะติดกันเป็น “แอ็กกรีเกต” (Aggregates)

2. โครงสร้างทุติยภูมิ (Secondary Structure) เป็นโครงสร้างขนาดใหญ่เกิดจากโครงสร้างปฐมภูมิ เกิดเนื่องจากการผลิตคาร์บอนแบล็กหรือในระหว่างการเก็บก่อนใช้งาน แอ็กกรีเกตคาร์บอนแบล็กมักจับตัวเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่ด้วยแรงทุติยภูมิ เช่น แรงแวนเดอร์วาลส์ (Vander Waals forces) เรียกว่า “แอ็กโกลเมอเรต” (Agglomerates) เป็นโครงสร้างที่ไม่เสถียร ในการผสมที่ดีเมื่อทำการผสมคาร์บอนแบล็กกับยางโดยใช้แรงเฉือนจากเครื่องผสมจะทำให้แอ็กโกลเมอเรตแตกออกเป็นแอ็กกรีเกตขนาดเล็กจำนวนมากกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในยาง

เทคนิคการหาโครงสร้างของคาร์บอนแบล็ก

โครงสร้างของคาร์บอนแบล็กสามารถหาได้โดยเทคนิค “เวฮิเคิลดีมานด์” (Vehicle Demand) หรือเทคนิคการดูดซับ DBP (DBP absorption test) ตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM D2414 ทำได้โดยการเติมของเหลวหนืดปานกลางเช่น “ไดบิวทิลพทาเลต” (Dibutylththalate, DBP) ให้เป็นพาหะ (Vehicle) ในการผสมกับคาร์บอนแบล็กด้วยเครื่องผสมระบบปิดเช่น เครื่องผสมภายใน จากการวัดแรงบิดหรือทอร์ก (Torque) ของใบพัดปั่นกวนในการผสมคาร์บอนแบล็กแห้งที่ทราบน้ำหนักแน่นอนเข้ากับของเหลวหนืดไดบิวทิลพทาเลต (DBP) เมื่อใส่ DBP ในผงคาร์บอนแบล็ก ของเหลว

หนืด DBP นี้จะเข้าแทรกตัวในช่องว่าง (Void Volume) หรือช่องระหว่างโครงสร้างเกาะของอนุภาคคาร์บอนแบล็กเมื่อเพิ่มปริมาณ DBP จนถึงจุดหนึ่งที่ของเหลวเติมเต็มโครงสร้างของคาร์บอนแบล็ก และมี DBP ออกมาบริเวณนอกอนุภาคคาร์บอนแบล็ก เป็นผลให้ค่าแรงบิดเพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใด คล้ายจุดยุติ (End point) ของการไตเตรต (Titration) ดังรูปที่ 2.11 ค่าโครงสร้างของคาร์บอนแบล็กสามารถรายงานในรูปแบบ “ปริมาณ DBP ต่อน้ำหนักคาร์บอนแบล็ก” เช่น ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อ 100 กรัมของคาร์บอนแบล็ก ($\text{cm}^3 / 100 \text{ g}$) เป็นต้น



รูปที่ 2.11 (ก) ภาพวาดแสดงการหาโครงสร้างของคาร์บอนแบล็กด้วยวิธี Vehicle demand
(ข) ตัวอย่างกราฟแสดงจุดยุติการหาโครงสร้าง [14]

2.3.4.3 อันตรกิริยาระหว่างคาร์บอนแบล็กและยาง (Black – Rubber Interactions)

อันตรกิริยา (Interactions) ระหว่างคาร์บอนแบล็กและยางมีความสำคัญ เนื่องจากจะมีผลโดยตรงต่อความสามารถในการเสริมแรง (Reinforcement) ของคาร์บอนแบล็กในยาง กล่าวคือ ถ้าคาร์บอนแบล็กมีอันตรกิริยากับยางมากจะทำให้ยางผสมคาร์บอนแบล็กมีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้นกว่ายางผสมคาร์บอนแบล็กที่มีอันตรกิริยาระหว่างกันน้อย อันตรกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างคาร์บอนแบล็กและยางเกิดในหลายลักษณะ ได้แก่

1. การยึดเกาะทางกายภาพ (Physical Adsorption) เนื่องจากคาร์บอนแบล็กโดยเฉพาะชนิดที่มีโครงสร้างสูง จะมีความซับซ้อนเป็นกิ่งก้านและมีช่องว่างระหว่างอนุภาคคาร์บอนแบล็ก ทำให้สาย

โซ่โมเลกุลยางสามารถแทรกตัวระหว่างโครงสร้างและเกิดการยึดติดที่ติดกับคาร์บอนแบล็ก เช่น การกลืนยึดติดเชิงกล (Mechanical Interlocking)

2. การยึดเกาะด้วยพันธะเคมี (Chemical Bonding) ที่บริเวณพื้นผิวของคาร์บอนแบล็กมีหมู่ฟังก์ชัน เช่น ที่บริเวณริมแผ่นแกรไฟต์ (Graphite Basal Planes) โดยเฉพาะในคาร์บอนแบล็กบางชนิด เช่น คาร์บอนแบล็กชนิดเฟอร์เนส (Furnace Blacks) และชั้นแนล (Channel blacks) มีหมู่ฟังก์ชันที่มีอะตอมของออกซิเจน เช่น หมู่คาร์บอกซิล (Carboxyl) ฟีนอล (Phenol) ควิโนน (Quinone) และ แลคโตน (Lactone) หมู่ฟังก์ชันเหล่านี้อาจเกิดปฏิกิริยาต่อกิ่ง (Grafting) ทำให้เกิดพันธะเคมีเชื่อมต่อระหว่างคาร์บอนแบล็กกับสายโซ่โมเลกุลของยาง อาจเกิดปฏิกิริยาในระหว่างการผสม (Compounding) การขึ้นรูป (Processing) หรือระหว่างการเชื่อมโยง (Vulcanization) เนื่องจากในการผสมที่เกิดแรงเฉือนสูง (High Shear Stress) อาจเกิดการขาดของสายโซ่โมเลกุลของยางเกิดอนุมูลอิสระเกิดปฏิกิริยาต่อกิ่ง ทำให้เกิดพันธะเคมีเชื่อมต่อระหว่างสายโซ่โมเลกุลของยางกับหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวคาร์บอนแบล็ก

2.3.4.4 ยางบาวด์ (Bound Rubber)

ยางบาวด์ คือยางส่วนที่ติดอยู่กับโครงสร้างของคาร์บอนแบล็ก เมื่อทำการสกัดยางผสมคาร์บอนแบล็กด้วยตัวทำละลายที่ดี

การเกิดยางบาวด์ เป็นหลักฐานที่เด่นชัดว่า ยางเกิดอันตรกิริยากับคาร์บอนแบล็ก เช่น เกิดการยึดเกาะทางกายภาพ (Physical adsorption) เกิดพันธะเคมี (Chemical Bonding) เกิดการยึดเกาะทางเคมีหรือเคมีซอร์พชัน (Chemisorption) ฯลฯ ทำให้ยางเกิดการยึดเกาะที่ติดบนพื้นผิวหรือภายในช่องว่างของโครงสร้างคาร์บอนแบล็ก ไม่ถูกทำละลายที่ดีสกัดออก

ปริมาณยางบาวด์ในยางผสมคาร์บอนแบล็กจะสัมพันธ์กับลักษณะของคาร์บอนแบล็ก กล่าวคือ คาร์บอนแบล็กที่มีโครงสร้างสูง และมีขนาดเล็กหรือพื้นที่ผิวสูง (Large Surface Area) จะเกิดยางบาวด์ปริมาณมาก ส่งผลให้เกิดการเสริมแรง ของคาร์บอนแบล็กมากขึ้น

การทดลองที่สามารถใช้พิสูจน์สมบัติของยางบาวด์คือ การทำคาร์บอนแบล็กให้เป็น “คาร์บอนแบล็กชนิดแกรไฟต์” (Graphitized Carbon Blacks) โดยการทำให้เป็นแกรไฟต์หรือแกรไฟไทเซชัน (Graphitization) เป็นการให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงประมาณ 2,700 °C ในสภาวะก๊าซเฉื่อย (Inert atmosphere) ความร้อนสูงจะทำให้โครงสร้างผลึกของเขม่าเกิดการจัดเรียงอย่างเป็นระเบียบคล้ายโครงสร้างผลึกแกรไฟต์ นอกจากนี้ยังทำให้หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวคาร์บอนแบล็กกลายเป็นก๊าซ เช่น คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) หลุดออกไป การทำเช่นนี้จะทำให้อันตรกิริยาระหว่างยางและคาร์บอนแบล็กลดลง เมื่อผสมยางกับคาร์บอนแบล็กชนิดแกรไฟต์จะทำให้เกิดยางบาวด์ปริมาณน้อย จะเห็นได้ว่าเมื่อทำคาร์บอนแบล็กให้เป็นแกรไฟต์มากขึ้น มีปริมาณยางบาวด์ติดบนผิวคาร์บอนแบล็กน้อยลง จะทำให้สมบัติการเสริมแรงของคาร์บอนแบล็กลดลง ยางมีความต้านทานแรงดึง (Tensile Strength) และมอดูลัส ลดลง ส่วนค่าเปอร์เซ็นต์การยึด ณ จุดขาด

(% Elongation at break) เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่ายางผสมคาร์บอนแบล็กชนิดแกรไฟต์มีสมบัติความต้านทานการขัดถูเสียดสี (Abrasion Resistance) ลดลงเทียบกับยางผสมคาร์บอนแบล็กธรรมดา ดังนั้นจึงอาจสรุปได้ว่า ยางบวดยืดหรืออันตรกิริยาระหว่างยางกับคาร์บอนแบล็กที่ดีจะช่วยเพิ่มสมบัติเสริมแรงของคาร์บอนแบล็กให้กับยาง

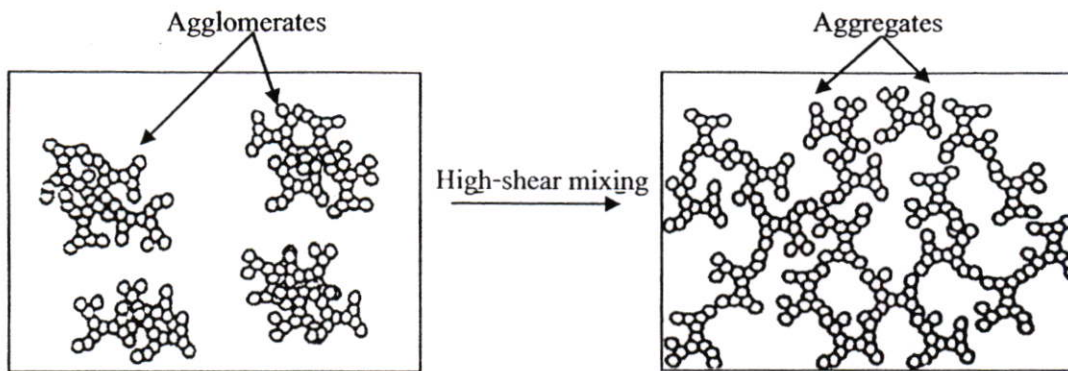
2.3.4.5 การเปลี่ยนแปลงของคาร์บอนแบล็กเมื่อผสมกับยาง

เมื่อผสมคาร์บอนแบล็กกับยางด้วยเครื่องผสมใดๆ ก็ตาม เริ่มแรกของการผสมจะเกิดการแทรก (Penetration) ของสายโซ่โพลิเมอร์ในช่องว่าง ระหว่างอนุภาค โครงสร้างกลุ่มก้อนขนาดใหญ่ หรือแอ็กโกลเมอเรต (Agglomerates) ของคาร์บอนแบล็ก ในขั้นนี้ถ้ายังมีอันตรกิริยามากกับคาร์บอนแบล็ก หรือเกิดเป็นยางบวดยืด (Bound Rubber) ปริมาณมาก จะทำให้คาร์บอนแบล็กเกิดการกระจายตัว (Dispersion) ในยางได้ยาก เนื่องจากยางบวดยืดจะยึดแอ็กกรีเกต ของคาร์บอนแบล็กเข้าไว้ด้วยกัน ด้วยเหตุผลนี้จึงเป็นสาเหตุให้คาร์บอนแบล็กที่มีโครงสร้างต่ำ อัดตัวกันแน่น หรือคาร์บอนแบล็กขนาดเล็กที่มีพื้นที่ผิวมาก เกิดการผสมยาก กระจายตัวในยางได้ยาก

การผสมที่ดีจะทำให้เกิดการแตกออกของกลุ่มก้อนคาร์บอนแบล็กในขณะที่ทำการผสมยางกับคาร์บอนแบล็กด้วยแรงเฉือนสูง กลายเป็นคาร์บอนแบล็กแอ็กกรีเกตที่เป็น โครงสร้างแบบปฐมภูมิ (Primary Aggregates) กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในยาง ความยากง่ายหรือปริมาณในการทำให้กลุ่มก้อนคาร์บอนแบล็กแตกออกจากกันและกระจายในยาง จะขึ้นหลายปัจจัยเช่น

- ยางมีความหนืด (Viscosity) สูง มากพอที่จะทำให้เกิดแรงเฉือนสูง
- แรงยึดเหนี่ยวในกลุ่มก้อนแอ็กโกลเมอเรตต่ำ
- เครื่องผสมทำให้เกิดแรงเฉือนขณะผสมสูง

การผสมที่ดีทำให้คาร์บอนแบล็กกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ จากการศึกษพบว่า โครงสร้างของคาร์บอนแบล็กมีแนวโน้มที่จะเกิดการต่อกันของอนุภาคคาร์บอนแบล็ก เกิดเป็น โครงสร้างคล้ายร่างแห (Network) ภายในยางดังรูปที่ 2.12 หลักฐานของการเกิดโครงสร้างคล้ายร่างแหของอนุภาคคาร์บอนแบล็กได้แก่ ความสามารถในการนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity) ของยางผสมคาร์บอนแบล็กสูงขึ้นเมื่อคาร์บอนแบล็กกระจายตัวได้ดีในยาง เมื่อทำการดึงยืดเพียงเล็กน้อย พบว่าทำให้ความสามารถในการนำไฟฟ้าของยางผสมคาร์บอนแบล็กลดลงอย่างรวดเร็ว ทั้งนี้คาดว่าเนื่องมาจากการดึงยืดจะทำลายความต่อเนื่องของ โครงสร้างร่างแหของคาร์บอนแบล็ก นอกจากนี้ยังพบว่า อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass Transition Temperature, Tg) ของยางผสมคาร์บอนแบล็กมีค่าเพิ่มขึ้น 2-3 °C ทั้งนี้เนื่องจากความสามารถในการเคลื่อนที่ของสายโซ่โพลิเมอร์ลดลง โดยเฉพาะยางบริเวณใกล้อนุภาคคาร์บอนแบล็ก

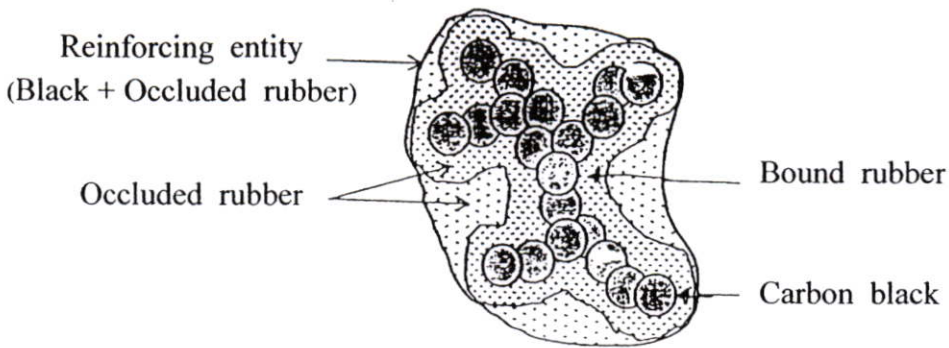


รูปที่ 2.12 ภาพวาดแสดงการเปลี่ยนโครงสร้างของคาร์บอนแบล็กจากโครงสร้างทุติยภูมิแอ็กโกลเมอเรต (Agglomerates) เมื่อเริ่มผสม หลังจากได้รับแรงเฉือนสูงขณะผสมกลายเป็นโครงสร้างปฐมภูมิ แอ็กกรีเกต (Aggregates) ต่อเนื่องคล้ายร่างแห [14]

2.3.4.6 ยางออกคลู๊ด (Occluded Rubber)

ยางออกคลู๊ด คือยางส่วนที่แทรกตัวอยู่ในช่องว่าง (Voids) ในโครงสร้างแอ็กกรีเกตของคาร์บอนแบล็กดังรูปที่ 2.13 จะเห็นได้ว่ายางออกคลู๊ดมีความหมายกว้างและครอบคลุมส่วนของยางบาวด์ (Bound Rubber) กล่าวคือยางออกคลู๊ดมีความหมายรวมยางที่อยู่ภายในช่องว่างของคาร์บอนแบล็กที่ไม่เกิดอันตรกิริยาใดๆ รวมทั้งยางที่เกิดอันตรกิริยาเช่นพันธะเคมี การยึดเกาะเชิงกล ฯลฯ (ยางบาวด์) ข้อดีของยางออกคลู๊ดคือยางออกคลู๊ดที่แทรกอยู่ในช่องว่างของเขม่าจะทำให้ปริมาตรของส่วนเสริมแรง (Reinforcing entity) เพิ่มขึ้น คล้ายกับทำการเติมคาร์บอนแบล็กในยางมากขึ้น หรือเพิ่มอัตราส่วน โดยปริมาตรของคาร์บอนแบล็กในยาง (Effective Volume Fraction of Carbon Black) ทำให้ยางผสมคาร์บอนแบล็กมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น

ปริมาณยางออกคลู๊ดจะสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาตรช่องว่างในคาร์บอนแบล็ก ดังนั้นคาร์บอนแบล็กที่มีโครงสร้างสูง จะเกิดยางออกคลู๊ดมาก



รูปที่ 2.13 ภาพวาดแสดงโครงสร้างของคาร์บอนแบล็ก Bound Rubber และ Occluded Rubber รวมเป็น ส่วนเสริมแรง (Reinforcing Entity) [14]

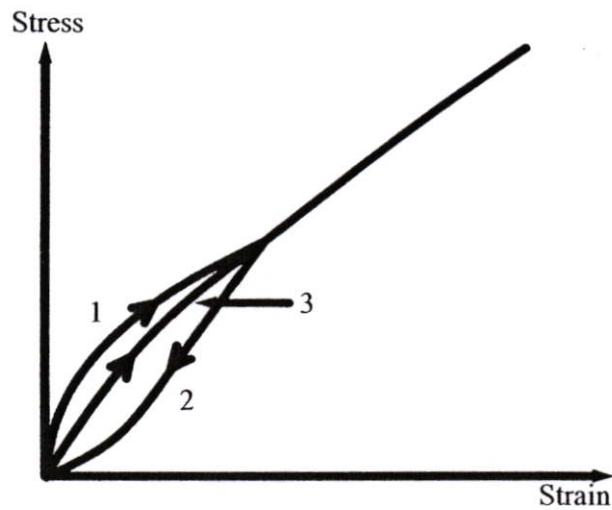
2.3.5 ปฏิกิริยาการน้มนิ่มตัวของยางเมื่อได้รับแรง (Stress Softening Effect)

การน้มนิ่มตัวของยางเมื่อได้รับแรง (Stress Softening) หรือ “ปรากฏการณ์มัลลิน” (Mullins effect) คือการที่ยางผสมคาร์บอนแบล็กได้รับแรงซ้ำๆ กัน แล้วทำให้ยางน้มนิ่มขึ้นหรือมีมอดุลัสลดลง พิจารณารูปที่ 2.14 เมื่อให้แรงดึงยางผสมคาร์บอนแบล็กครั้งแรก (เส้นที่ 1) ที่เปอร์เซ็นต์การดึงยืดไม่สูงมากจนขาด แล้วปล่อยแรง (เส้นที่ 2) จากนั้นจึงให้แรงดึงใหม่ (เส้นที่ 2) พบว่าความชันของการดึงครั้งที่สอง (เส้นที่ 2) หรือค่ามอดุลัสของวัสดุมีค่าน้อยกว่าการดึงครั้งแรก (เส้นที่ 1) หรืออาจกล่าวได้ว่าวัสดุน้มนิ่มขึ้นเมื่อให้แรงดึงซ้ำๆ ที่เป็นเช่นนี้อาจเกิดจากสาเหตุหลายประการเช่น

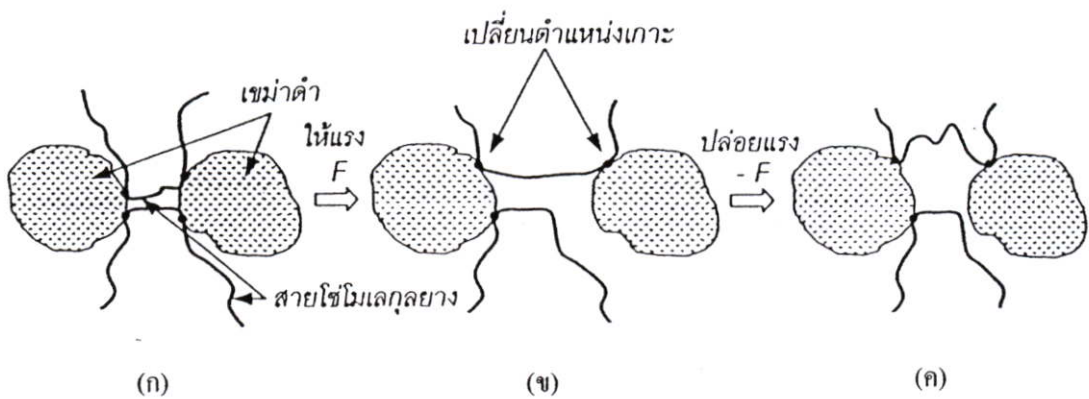
- เมื่อให้แรงดึงครั้งแรก อาจทำให้เกิดการขาด (Break up) หรือการเลื่อนหลุด (Slippage) เปลี่ยนตำแหน่งยึดติดของสายโซ่โมเลกุลของยางบนพื้นผิวของอนุภาคคาร์บอนแบล็ก แสดงดังรูปที่ 2.15 ทำให้ความสามารถในการรับแรงของสายโซ่หรือความแข็งของวัสดุโดยรวมลดลงเมื่อทำการดึงครั้งต่อมา

- อาจเกิดการแตกออกของแอ็กโกลเมอเรต (Agglomerates) หรือกลุ่มก้อนขนาดใหญ่ของคาร์บอนแบล็กกลายเป็นแอ็กกรีเกต (Aggregates) ขนาดเล็กเมื่อได้รับแรง

- เกิดการคืนตัวไม่สมบูรณ์ของยืดหยุ่น (Incomplete Elastic Recovery) ของสายโซ่โมเลกุลยางเมื่อปล่อยแรง ซึ่งเป็นสมบัติปกติของวัสดุพอลิเมอร์ซึ่งสมบัติไหลยืดหยุ่นหรือสมบัติวิสโคอีลาสติก (Viscoelastic Properties)



รูปที่ 2.14 กราฟความเค้น-ความเครียด แสดงปรากฏการณ์การนํ้าตัวของยางเมื่อได้รับแรงดึงครั้งแรก (เส้นที่ 1) ปลดปล่อยแรง (เส้นที่ 2) และให้แรงดึงใหม่ (เส้นที่ 3) สังเกตว่าความชัน (มอดูลัส) ของเส้นที่ 3 น้อยกว่าเส้นที่ 1 [14]



รูปที่ 2.15 ภาพวาดแสดงสาเหตุของการนํ้าตัวของยางเมื่อได้รับแรง (ก) ก่อนดึง (ข) ขณะดึงยึด (ค) หลังปล่อยแรงดึง สังเกตสายโซ่ ที่หย่อนไม่รับแรงดึง สังเกตสายโซ่โมเลกุลยาว เลื่อนเปลี่ยนตำแหน่งยึดเกาะ ได้สายโซ่ที่หย่อนไม่รับแรง และบางโมเลกุลหลุดออกจากการยึดเกาะบนพื้นผิวคาร์บอนแบล็ค [14]

2.4 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการนำไฟฟ้า

วัสดุฉนวนไฟฟ้าซึ่งจะทำหน้าที่ป้องกันกระแสไฟฟ้า ไม่ให้ไหลผ่านจากตัวนำหนึ่งไปยังอีกตัวนำหนึ่ง ฉนวนไฟฟ้าที่ใช้กันอยู่ทั่วไปในปัจจุบันส่วนใหญ่จะผลิตมาจาก วัสดุพอลิเมอร์ เนื่องจากวัสดุพอลิเมอร์มีคุณสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดี และนอกจากนี้ยังมีคุณสมบัติอื่นอีกที่เหมาะสม เช่นการขึ้นรูปง่าย ทนต่อการกัดกร่อนสูง และมีน้ำหนักเบา ฉนวนพอลิเมอร์ทั่วไปมีคุณสมบัติการนำไฟฟ้าต่ำและมีความยืดหยุ่นสูงเหมาะสำหรับทำวัสดุหุ้มสายไฟ อย่างไรก็ตามไม่ใช่พอลิเมอร์ทุกชนิดที่จะใช้เป็นฉนวนไฟฟ้าได้อย่างสมบูรณ์ สำหรับอุปกรณ์จ่ายกระแสไฟฟ้าทั่วไป การไหลของกระแสไฟฟ้าผ่านฉนวนเพียงเล็กน้อย สามารถยอมรับได้ แต่ในเครื่องมือวัดทางอิเล็กทรอนิกส์บางอย่าง ที่ต้องการความเที่ยงตรงมากๆ การไหลของกระแสไฟฟ้าเพียงน้อยนิด ผ่านฉนวนที่มีคุณภาพต่ำ ก็อาจจะทำให้เครื่องวัดนั้นเสีย หรือลดความแม่นยำลงได้ ดังนั้นการทดสอบเพื่อให้ทราบว่า วัสดุพอลิเมอร์ตัวไหนมีค่าความต้านทานไฟฟ้า (Resistivity) หรือ มีคุณสมบัติเป็นฉนวนที่ดี มาก/น้อย แตกต่างกันอย่างไร จึงมีความจำเป็น เพื่อที่เราจะได้เลือกใช้วัสดุให้เหมาะสมกับงาน

สภาพการนำไฟฟ้าเชิงปริมาตร

สภาพการนำไฟฟ้าของชิ้นงาน เป็นไปตามสมการ

$$\sigma = \frac{L I}{AV} \quad (2.1)$$

σ หมายถึง สภาพการนำไฟฟ้า ($\Omega \cdot \text{cm}$)⁻¹, V หมายถึง ความต่างศักย์ไฟฟ้า (โวลต์, V), I หมายถึง กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์, A), L หมายถึง ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า (ซม.) และ A หมายถึง พื้นที่หน้าตัดขั้วไฟฟ้า (ซม.²)

สภาพการนำไฟฟ้าเชิงพื้นผิว

สภาพการนำไฟฟ้าของชิ้นงาน เป็นไปตามสมการ

$$\sigma = \frac{L I}{DV} \quad (2.2)$$

σ หมายถึง สภาพการนำไฟฟ้า (Ω)⁻¹, V หมายถึง ความต่างศักย์ไฟฟ้า (โวลต์, V), I หมายถึง กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์, A), L หมายถึง ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า (ซม.) และ D หมายถึง ความยาวขั้วไฟฟ้า (ซม.)

โดยสมการการนำไฟฟ้า (σ) มีความสัมพันธ์กับความต้านทาน R

$$\sigma = \frac{1}{R} \quad (2.3)$$

โดยทั่วไปสภาพความต้านทานไฟฟ้าแบ่งเป็น 4 ประเภท คือ

1. ความต้านทานไฟฟ้าเชิงปริมาตร (Volume Resistance) คือ อัตราส่วนระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้า (Voltage) ระหว่าง 2 ขั้วไฟฟ้า ที่อยู่บนพื้นผิวตรงกันข้ามกัน ของชิ้นทดสอบกับกระแสไฟฟ้า (Current) ที่วัดได้ระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสอง ในเวลาที่จำเพาะค่าหนึ่งโดยไม่รวมค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าบนผิวของชิ้นทดสอบ และไม่นำค่าของผลอันเนื่องมาจาก Polarization Effect ที่อาจเกิดขึ้นได้ที่ขั้วไฟฟ้ามาคิดคำนวณ

2. สภาพความต้านทานไฟฟ้าเชิงปริมาตร (Volume Resistivity) คือ ค่าที่คำนวณจากอัตราส่วนของ ค่าการเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้าเกรเดียน (Voltage Gradient) (ซึ่งคำนวณจากค่าศักย์ไฟฟ้าที่ใช้วัดหารด้วยค่าความหนาของชิ้นทดสอบ) กับ ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า (Current Density) ที่ใช้ อย่างไรก็ตามค่าการเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้าเกรเดียนจริง (True Voltage Gradient) นั้นต่างจากค่าที่ใช้วัด เนื่องจากมีผลของการสัมผัสกัน ระหว่างขั้วไฟฟ้า กับชิ้นทดสอบมาเกี่ยวข้องด้วย

3. ความต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิว (Surface Resistance) คือ อัตราส่วนโดยตรงระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ในการวัด ของขั้วไฟฟ้า 2 ขั้ว บนผิวของชิ้นทดสอบ กับค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้ระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้ง 2 นั้น หลังจากเวลาที่ใช้วัดค่าหนึ่ง โดยไม่สนใจผลของการเกิด Polarisation ที่ขั้วไฟฟ้า

4. สภาพความต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิว (Surface Resistivity) คือ ค่า Surface Resistance ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ หรือ เป็นอัตราส่วนระหว่างค่า Voltage Gradient และค่ากระแส ต่อหนึ่งหน่วยความกว้างของทางกระแส (Current Path)

ทั้งค่า สภาพความต้านทานไฟฟ้าเชิงปริมาตร (Volume Resistivity) และสภาพความต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิว (Surface Resistivity) อาจจะขึ้นอย่างมากกับ ปัจจัยของระยะเวลาของศักย์ไฟฟ้าที่ใช้วัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศและที่สำคัญความชื้นที่อยู่ในชิ้นทดสอบ นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับรูปทรงทางเรขาคณิตของขั้วไฟฟ้าที่ใช้ และ ระดับความแรงของศักย์ไฟฟ้าที่ใช้วัดด้วย

หน่วยการวัดค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้า

ในระบบหน่วยพื้นฐานของ SI ค่า สภาพความต้านทานไฟฟ้าเชิงปริมาตร จะมีค่าเป็น Ohm-Meter ($\Omega \cdot m$) ซึ่งเป็นการถอดหน่วยสมการมาจาก $\Omega m^2/m$ โดยทั่วไปมักจะใช้หน่วยเป็น $\Omega \cdot cm$ มากกว่า โดยที่วัสดุฉนวนโดยทั่วไปจะมีค่า สภาพความต้านทานไฟฟ้าเชิงปริมาตร โดยประมาณเป็น $10^{18} \Omega \cdot cm$ ซึ่งจะจัดอยู่ในกลุ่มพลาสติกประเภทไม่มีขั้ว (Non-polar Plastic) ตัวอย่างเช่น PTFE, PE, PS และอื่นๆ ซึ่งในการวัดทดสอบค่า สภาพความต้านทานไฟฟ้าเชิงปริมาตร ในตัวอย่างพลาสติกพวกนี้ค่อนข้างยาก เนื่องจากมีค่า สภาพความต้านทานไฟฟ้าเชิงปริมาตรที่สูงมากๆ

สำหรับหน่วย SI ของ สภาพความต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิว จะมีหน่วยเป็น Ω เนื่องจากการถอดแก้สมการหน่วยมาจาก $\Omega m/m$ ซึ่งในบางครั้งอาจจะหมายความถึงค่า “ Ω per square”

เนื่องจากมีความแตกต่างกันของค่าความต้านทานที่วัดในแต่ละครั้ง ในสภาวะการทดสอบที่แตกต่างกัน ความไม่สม่ำเสมอของรูปทรงของชิ้นทดสอบ ถึงแม้ว่าจะตัดมาจากแผ่นตัวอย่างเดียวกันก็ตาม ดังนั้นค่าที่วัดได้จากชิ้นทดสอบแต่ละชิ้นยากที่จะทำให้ค่าใกล้เคียงกันในระดับน้อยกว่า 10% โดยส่วนมาก จะได้ค่าที่แตกต่างกันค่อนข้างมาก ทำให้มีผู้ทดสอบบางรายมักจะอ้างอิงค่า สภาพความต้านทาน ในรูปของค่า Logarithm ซึ่งเหมาะสำหรับการนำเสนอผลการทดสอบ ในรูปของ ตาราง หรือ รูปกราฟ อย่างไรก็ตามในอุตสาหกรรม ในการพิจารณาว่าวัสดุสองชนิดจะมีค่า สภาพความต้านทานต่างกัน (ในการใช้เป็นฉนวนไฟฟ้า) หรือไม่ อย่างไร ก็ต่อเมื่อมีค่า สภาพความต้านทาน ที่วัดได้ต่างกันอย่างน้อยครึ่งหนึ่ง (50%)

2.4.1 ปัจจัยที่มีผลต่อค่าความต้านทานของฉนวนไฟฟ้า

2.4.1.1 ความแตกต่างของวัสดุ (Inherent Variation in Materials)

ในการวัดค่าความต้านทานของวัสดุต่างๆ กันที่สภาวะเดียวกัน มักจะพบว่า มีค่าความแปรผันของค่าที่วัดได้มากกว่า 10 % อันเนื่องมาจาก ความไม่สม่ำเสมอของชิ้นทดสอบเอง วิธีการที่จะทำให้ค่าการผันแปรของค่าที่วัดได้ลดลงอาจจะกระทำได้โดยพยายามเตรียมชิ้นทดสอบให้มีความสม่ำเสมอกันมากที่สุด ไม่ว่าจะเป็นขนาด ความหนา วิธีการปรับสภาพชิ้นทดสอบ เป็นต้น

2.4.1.2 อุณหภูมิ

ค่าความต้านทานของฉนวนไฟฟ้า จะเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิ โดยที่ความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าอุณหภูมิกับ ค่าความต้านทาน เป็นไปตามสมการที่ 2.4 ซึ่งได้มาจากสมการของ Arrhenius [15]

$$R(t) = Be^{m/T} \quad (2.4)$$

เมื่อ R คือ ค่าความต้านทานของวัสดุฉนวนไฟฟ้า หรือของระบบ, B คือ ค่าคงที่ Proportion Constant, m คือ ค่า Activation Constant และ T คือ ค่าอุณหภูมิ (K)

ค่าของ m เป็นค่าเฉพาะ สำหรับวัสดุแต่ละชนิด หาได้ความชันของกราฟเส้นตรง ที่ได้จากพล็อตระหว่าง ค่า Natural Logarithm ของค่าความต้านทานกับ ส่วนกลับของค่าอุณหภูมิสมบูรณ์ ดังสมการ 2.5 [15]

$$\ln R = \ln B = m \frac{l}{T} \quad (2.5)$$

การเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานกับค่าอุณหภูมิจาก T_1 ถึง T_2 สามารถคำนวณได้โดยอาศัยผลต่างของสมการที่ 2.6 ได้ดังนี้ [15]

$$\ln \left[\frac{R_2}{R_1} \right] = m \left[\frac{l}{T_2} - \frac{l}{T_1} \right] = m \left[\frac{\Delta T}{T_1 T_2} \right] \quad (2.6)$$

ซึ่งสมการ 2.6 จะใช้ได้ในช่วงอุณหภูมิที่วัสดุตัวอย่าง ยังไม่เกิดการเปลี่ยนสถานะ (Transition)

2.4.1.3 อุณหภูมิ และความชื้น (Temperature and Humidity)

สำหรับวัสดุฉนวนที่เป็นของแข็งไดอิเล็กตริก (Dielectric Materials) ค่าความต้านทานจะลดลง เมื่ออุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ (Relative Humidity) เพิ่มขึ้น 5 - 7 โดยเฉพาะค่าความต้านทานไฟฟ้าเชิงปริมาตร จะร่วงไวต่อการเปลี่ยนแปลง ของอุณหภูมิมาก ส่วนค่าความต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิว จะร่วงไวต่อการเปลี่ยนแปลง ค่าความชื้นสัมพัทธ์ โดยการเปลี่ยนแปลง ทั้ง 2 กรณีจะเป็นการเปลี่ยนแปลงแบบ Exponential สำหรับวัสดุบางประเภท ถ้ามีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจาก 25 องศาเซลเซียส ไปเป็น 100 องศาเซลเซียส (ในช่วงอุณหภูมิดังกล่าว มีการเปลี่ยนแปลงค่าความชื้นสัมพัทธ์ด้วย) ค่าความต้านทานอาจเปลี่ยนแปลงไปโดยแฟกเตอร์ 100,000 เท่า โดยปกติถ้ามีการเปลี่ยนแปลงเฉพาะอุณหภูมิ จะทำค่าตัวเลขแฟกเตอร์น้อยกว่านี้ แต่ถ้ามีการเปลี่ยนแปลงค่าความชื้นสัมพัทธ์เปลี่ยนจาก 25 % ไปเป็น 90 % ค่าความต้านทานจะเพิ่มขึ้นด้วยแฟกเตอร์ของ 1,000,000 หรือมากกว่า โดยทั่วไปการเปลี่ยนแปลงค่าความชื้นสัมพัทธ์ จะมีผลเฉพาะที่ผิวของชิ้นทดสอบเท่านั้น (ผลต่อค่าความต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิว) เนื่องจาก

กระบวนการที่ความชื้นจะถูกดูดซึมเข้าไปในเนื้อในของฉนวนนั้น เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นได้ช้ามาก จึงทำให้มีผลต่อค่า ความต้านทานไฟฟ้าเชิงปริมาตรค่อนข้างน้อย

2.4.1.4 เวลาในการให้กระแส (Time of Electrification)

การวัดค่าความต้านทานของวัสดุที่เป็น Dielectric มีพื้นฐานไม่ต่างไปจาก การวัดค่าความต้านทานตัวนำไฟฟ้า(Conductor) ยกเว้น จะต้องมีการเพิ่มตัวแปรเสริม (Parameter) บางตัวลงไป เช่น ระยะเวลาที่ให้กระแสไหลลงชั้นทดสอบ (Time of Electrification) หรือค่าความต่างศักย์เกรเดียน (Voltage Gradient) เป็นต้น สำหรับการวัดค่าความต้านทานของวัสดุตัวอย่างที่เป็น Dielectric จะต้องมีการต่อชั้นทดสอบ (หรือ Unknown Resistance) เข้ากับตัวต้านทานมาตรฐาน เป็นลักษณะอนุกรม โดยที่ตัวต้านทานมาตรฐานที่ต่อเข้าควรมีค่าความต้านทานต่ำเพื่อจะให้ค่าศักย์ไฟฟ้าตกคร่อมชั้นทดสอบ มีค่ามากพอ เมื่อใช้ค่าศักย์ไฟฟ้าที่แตกต่างกัน สำหรับการวัดชั้นทดสอบ จะพบว่าค่ากระแสไฟฟ้าที่ผ่านชั้นทดสอบอาจจะมีค่าน้อยกว่า ค่าที่สังเกตได้ในนาทีแรก ไป 0.01% เหตุผลการลดลงของค่ากระแสไฟฟ้าสำหรับวัสดุที่เป็น Dielectric เนื่องมาจาก การดูดซับประจุของวัสดุ(เกิด Polarization ระหว่างระนาบ การเปลี่ยนแปลงปริมาตร และอื่นๆ) และการเคลื่อนที่แบบกวาดกวาดของไอออน (Sweep of Mobile Ions) เข้าหาขั้วไฟฟ้า โดยที่ความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสที่ไหลบนชั้นทดสอบ กับเวลา เป็นดังนี้ [15]

$$I(t) = At^m \quad (2.7)$$

เมื่อ A คือ ค่าคงที่ของกระแสที่ 1 หน่วยเวลา และ m คือ ค่าคงที่ที่มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1

เวลาที่ทำให้ค่ากระแสลดลงไป 1% อาจจะใช้เวลาเพียงไม่กี่วินาที จนถึงเป็นชั่วโมง ขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของวัสดุทดสอบ ดังนั้น เพื่อให้ผลการทดสอบ สามารถเปรียบเทียบกันได้ จึงต้องมีการระบุระยะเวลาสำหรับการให้กระแสไฟฟ้า (Time of Electrification) สำหรับการวัดค่าความต้านทาน โดยปกติจะใช้ระยะเวลาในการวัดเท่ากับ 1 นาที

2.4.1.5 ขนาดความต่างศักย์ (Magnitude of Voltage)

ทั้งค่า ความต้านทานไฟฟ้าเชิงปริมาตร และ ความต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิว ของชั้นทดสอบ อาจจะมีค่าความไวต่อค่าต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้วัด Voltage Gradient มีค่าเท่ากันตลอด สำหรับการวัดค่าความต้านทาน ที่ต้องการผลการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบ ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ควรอยู่ในช่วงไม่เกิน 5% ของค่าที่กำหนด โดยปกติศักย์ไฟฟ้าที่ใช้วัดจะเป็น 100, 250, 500, 1,000, 2,500, 5,000, 10,000 และ 15,000 V แต่ที่นิยมใช้มากที่สุดจะเป็น 100 และ 500 V สำหรับค่าศักย์ไฟฟ้าที่สูงกว่านี้จะใช้ศึกษาคุณค่าลักษณะ Voltage-Resistance หรือ Voltage-Conductance ของวัสดุ หรือ ใช้ในกรณีที่ต้องการเพิ่มค่าความไวในการวัด สำหรับชั้นทดสอบที่มีความชื้นอยู่สูง การ

ใช้ศักย์ไฟฟ้าที่สูงในการวัด จะทำให้เกิดการสลายตัวของโครงสร้างของตัวอย่างทดสอบด้วยไฟฟ้า (Electrolysis) ได้ หรือการเคลื่อนย้ายของหมู่ไอออน (Ions Migration) ซึ่งจะทำให้ค่าความต้านทานที่วัดได้ต่ำกว่าที่เป็นจริง

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

M.H. Ali และ A. Abo-Hashem [11] ศึกษาผลการเข้ากันของวัสดุเชิงประกอบได้แก่คาร์บอนแบล็กชนิด HAF ที่มีต่อสมบัตินำไฟฟ้าของพอลิเมอร์คือ พอลิคลอโรพรีน ค่าปริมาณของคาร์บอนแบล็ก และอุณหภูมิจะส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์นำไฟฟ้า โดยเป็นไปตามสมการ $\sigma = \sigma_0(P-P_c)^\beta$ ซึ่งค่า P_c จะบอกการเข้ากันได้ของสารกับพอลิเมอร์ P คือปริมาณคาร์บอนแบล็ก β คือค่า EXPONENT โดยจากการคำนวณได้ค่า filling factor ที่หาได้คือ 0.70 โดย $\beta \approx Z+1$ ค่า occupation number 8.2

M.H. Ali และ A. Abo-Hashem [12] ศึกษาผลการเข้ากันของวัสดุเชิงประกอบได้แก่คาร์บอนแบล็กชนิด FEF ที่มีต่อสมบัตินำไฟฟ้าของพอลิเมอร์คือ พอลิคลอโรพรีน โดยวัสดุเชิงประกอบที่ใส่อันได้แก่คาร์บอนแบล็ก และอุณหภูมิจะมีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์นำไฟฟ้า การเพิ่มปริมาณคาร์บอนแบล็กจะสามารถเข้ากันได้กับพอลิเมอร์ที่ปริมาณใกล้เคียง 20 โดยน้ำหนักยาง (PHR) ค่า filling factor ที่หาได้คือ 0.82 ที่ ค่า occupation number 8.2 และค่า β มีค่าคือ 6.8 นอกจากนี้ค่าสัมประสิทธิ์ในการนำไฟฟ้ายังขึ้นอยู่กับ ความสามารถในการเข้ากันได้ของวัสดุเชิงประกอบกับพอลิเมอร์

K.P. SAU และคณะ [10] ศึกษาผลจากปัจจัยที่ต่างกัน ได้แก่ความเค้น และความเครียด ที่มี ความสัมพันธ์ต่อสมบัติในการนำไฟฟ้าของยาง NBR และ EPDM วัสดุเชิงประกอบที่ผสมได้แก่ Acetylene black พบว่าค่าการนำไฟฟ้าขึ้นอยู่กับอัตราส่วนการผสมกันระหว่าง NBR และ EPDM นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับค่าระยะในยึดตัวของการวัดระยะการยืดตัวสูงสุดที่จุดขาด (Elongation at break) ของวัสดุเชิงประกอบค่าการนำไฟฟ้านี้มีค่าในทำนองเดียวกันกับทุกสภาวะปริมาณคาร์บอนแบล็ก

J.N. Aneli และคณะ [3] ได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงลักษณะ โครงสร้างภายในของวัสดุเชิงประกอบอันเกิดมาจากการเปลี่ยนแปลงแรงเชิงกล (การดึงยืด , การกด เป็นต้น) ซึ่งส่งผลต่อ สภาพการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์ โดยในการศึกษาใช้ ยาง Polydimethylvinil methylsiloxan (SCTV) จากการศึกษาพบว่า ความเค้น จะทำให้วัสดุเชิงประกอบ เปลี่ยนรูปร่าง เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงเชิงกล ซึ่งเป็นผลมาจากการเข้ากันของวัสดุเชิงประกอบและตัวพอลิเมอร์เมตริก จึงทำให้มีสภาพการนำไฟฟ้าเปลี่ยนแปลง

L. Flandin และคณะ [4] ได้ศึกษาผลของความเครียดที่มีต่อการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์ Ethylene-Octene Elastomer ที่ผสมวัสดุเชิงประกอบคาร์บอนได้แก่ เส้นใยคาร์บอน คาร์บอนแบล็ก โครงสร้างต่ำ และคาร์บอนแบล็ก โครงสร้างสูงพบว่าสมบัติในการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์เป็นตาม

ปริมาณของวัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์ เมื่อให้แรงกระทำกับขึ้นทดสอบในที่นี้คือการต้านทานการคืบ พบว่าที่การยืดตัวไม่เกิน ร้อยละ 30 ของความยาวเดิมของชิ้นงานวิจัย พอลิเมอร์ที่ผสมวัสดุเชิงประกอบ เส้นใยคาร์บอน จะมีค่าการนำไฟฟ้าดีที่สุด และคาร์บอนแบล็กที่มีโครงสร้างต่ำจะมีค่าการนำไฟฟ้าน้อยที่สุดและเมื่อมีการยืดตัวมากกว่าร้อยละ 30 การนำไฟฟ้ายังให้แนวโน้มในทางเดิมคือวัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์จากเส้นใยคาร์บอนมีค่าการนำไฟฟ้าดีที่สุดและคาร์บอนแบล็กโครงสร้างต่ำนำไฟฟ้าน้อยที่สุดแต่นอกจากนี้พบว่าวัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์จากเส้นใยคาร์บอนจะเริ่มมีการแตกร้าวไม่สามารถหาคัดกลับได้เหมือนเดิม ในกรณีของพอลิเมอร์ที่ผสมคาร์บอนแบล็กโครงสร้างสูงการหาคัดกลับทำได้ช้ากว่าพอลิเมอร์ที่ผสมคาร์บอนแบล็กโครงสร้างต่ำ ทั้งนี้เนื่องมาจากการกระจายตัวของวัสดุเชิงประกอบในพอลิเมอร์ไม่เหมือนกัน

V.I. Roldughin และ V.V. Vysotskii [7] ศึกษาสมบัติในการเข้ากันระหว่างพอลิเมอร์กับผงโลหะโดยมุ่งศึกษาผลจากโครงสร้างและกลไกที่ทำให้นำไฟฟ้า ในการวิจัยแสดงให้เห็นถึงสมบัติในการนำไฟฟ้านั้นขึ้นกับการเข้ากันระหว่างผงโลหะและเนื้อพอลิเมอร์ อีกทั้งยังขึ้นกับการจับตัวกันระหว่างอนุภาคโลหะเองโดยในกรณีที่ผงโลหะที่จับรวมตัวกันในเนื้อพอลิเมอร์ซึ่งจะส่งผลต่อการส่งผ่านพลังงานในระหว่างชั้นผิวของโลหะทำให้มีความสามารถในการนำไฟฟ้าที่ดีขึ้นแต่ทำให้การเข้ากันของผงโลหะกับพอลิเมอร์ลดลง

Xiang-Wu Zhang และคณะ [8] ศึกษาผลจากเวลาที่มีต่อสมบัติในการนำไฟฟ้าที่มีการเปลี่ยนแปลงความเค้น โดยใช้วัสดุเชิงประกอบจากผงโลหะ คือ ดีบุก-พลวง ทองแดง และผงอลูมิเนียม โดยศึกษาเปรียบเทียบทั้งชนิดและปริมาณของวัสดุเชิงประกอบที่ใช้กับพอลิเมอร์พอลิไธรีน และพอลิเอทิลีน พบว่าค่าความต้านทานขึ้นอยู่กับปริมาณของวัสดุเชิงประกอบ ชนิด และค่าความเค้นที่กระทำกับชิ้นงานวิจัย และขนาดอนุภาคของวัสดุประกอบอันได้แก่ ผงโลหะเมื่อให้แรงกระทำกับชิ้นงานวิจัยพบว่าค่าพลังงานภายในจะเปลี่ยนแปลง ส่งผลต่อสมบัติในการนำไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงด้วย

L. Flandin และคณะ [5] ได้ศึกษาต่อในงานวิจัยเกี่ยวกับการประยุกต์สมบัติในการนำไฟฟ้า โดยได้ศึกษาสมบัติในการนำไฟฟ้าของวัสดุเชิงประกอบที่มีขนาดอนุภาคระดับ นาโนในการประยุกต์เป็นเซ็นเซอร์โดยใช้โปรแกรมในการวิเคราะห์พบว่าค่าความต้านทานและค่าความจุไฟฟ้าจะเป็นอนุพันธ์โดยตรงกับค่าตำแหน่งของอนุภาคของวัสดุเชิงประกอบ โดยจะขึ้นกับค่าการกระจายตัวของอนุภาคในการคำนวณให้ทราบค่าการนำไฟฟ้าเป็นไปตามการเข้ากันและปริมาณของเนื้อวัสดุเชิงประกอบกับพอลิเมอร์

Maris Knite และคณะ [6] ได้ศึกษาความสัมพันธ์ของสมบัติในการนำไฟฟ้าและสมบัติในการประยุกต์ตัวคล้ายขงที่ใช้วัสดุเชิงประกอบคือคาร์บอนแบล็ก ขนาดอนุภาคระดับ นาโน โดยศึกษาลักษณะพื้นผิวของวัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์พบว่าคาร์บอนแบล็กที่ใช้ในการวิจัยเป็นชนิดที่มีความสามารถนำไฟฟ้าได้สูงและมีขนาดอนุภาคอยู่ที่ 30 nm จากภาพถ่าย AFM พบว่าที่ความเข้มข้น

ของคาร์บอนสูงขึ้น จะพบตำแหน่งที่บอกถึงปริมาณสารคาร์บอนแบล็กในเนื้อพอลิไอโซพรีนมากขึ้น ซึ่งส่งผลต่อสมบัติในการนำไฟฟ้าที่สูงขึ้นตามปริมาณอนุภาคคาร์บอนแบล็ก

M. Knite และคณะ [2] ได้ทำการศึกษาสมบัติการนำไฟฟ้าของ พอลิไอโซพรีน (Polyisoprene) ที่ใส่คาร์บอนแบล็ก เพื่อประโยชน์ในการประยุกต์ใช้กับชิ้นส่วนรถยนต์ ในการศึกษาสมบัติในการนำไฟฟ้า ของยางจะขึ้นกับการดึงยืดและแรงกดที่กระทำกับยาง โดยสภาพความต้านทานจะมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อมีการดึงยืดมากกว่าร้อยละ 40 และการเปลี่ยนแปลงขึ้นกับอุณหภูมิอย่างมาก แต่จะขึ้นกับการดึงยืดและการกดที่สภาวะอุณหภูมิในช่วง $20 - 70^{\circ}\text{C}$ ซึ่งสามารถอธิบายโดยสมการได้ดี ในส่วนของ การดึงยืดและการกดซึ่งทำให้เกิดแรงกระทำระหว่างอะตอม ต่อผลต้านกันระหว่างคาร์บอนแบล็กและพอลิเมอร์เมตริกจะส่งผลต่อสภาพการนำไฟฟ้าที่วัดแตกต่างกัน ทั้งนี้เนื่องมาจากการยึดติดกันของ คาร์บอน อะตอม ในระดับนาโน กับ พอลิเมอร์เมตริก จะให้ผลไม่แตกต่างกันกับ การยึดติดกันของโมเลกุลพอลิเมอร์เมตริกเองกระแสไฟฟ้าจึงส่งผ่านวัสดุเชิงประกอบได้ดี

A.E. Job และคณะ [9] ศึกษาสมบัติในการนำไฟฟ้าของวัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์ระหว่างคาร์บอนแบล็ก กับยางธรรมชาติโดยศึกษาปริมาณคาร์บอนแบล็กและผลของความดันที่มีต่อสมบัติในการนำไฟฟ้าของวัสดุเชิงประกอบ ในการศึกษาของ Job บอกถึงความสัมพันธ์ของสมบัติเชิงกลกับค่าการนำไฟฟ้าของยางธรรมชาติที่ผสมกับคาร์บอนแบล็ก โดยมีแนวทางในการประยุกต์ เป็น pressure sensors ได้ ค่าที่วัดได้จากการวิจัย อยู่ในช่วง 10^{-11} ถึง 10^{-2} S.cm⁻¹ แปรผันตามปริมาณคาร์บอนแบล็กที่ใส่มาขึ้นจาก 5 ถึง 20 phr

M. Knite และคณะ [13] ได้ทำการศึกษาผลของการใส่ พลาติไซเซอร์ เพื่อลดความเครียดที่มีต่อสมบัติความต้านทานไฟฟ้าโดยใช้คาร์บอนแบล็กขนาดอนุภาคระดับนาโน กับพอลิไอโซพรีน พบว่าที่ปริมาณ คาร์บอนแบล็ก ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักยาง (phr) ทดสอบการนำไฟฟ้าโดยการดึงยืดขึ้นทดสอบร้อยละ 40 ของความยาวเดิมจะทำให้ค่าการต้านทานไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไป 4 อันดับโดยมีค่าเพิ่มขึ้น และเมื่อผสมพลาติไซเซอร์ในชิ้นงานจะส่งผลให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไปโดยมีค่าลดลงอันเกิดจากทำให้มีการเข้ากันของคาร์บอนแบล็กกับเนื้อยางได้ดีขึ้น โมเลกุลของคาร์บอนแบล็กมีการตอบสนองต่อกระแสไฟฟ้าที่ส่งผ่านได้มากขึ้น

Tzong-Ming Wu และคณะ [14] ศึกษาพฤติกรรมในการนำไฟฟ้าของ Poly(ϵ -caprolactone)/poly(vinyl butyral)/montmorillonite ที่ผสมกับคาร์บอนแบล็กขนาดอนุภาคระดับ นาโนและสมบัติในการเกิดผลึกของพอลิเมอร์ พบว่าค่าปริมาณของ PVB และมวลโมเลกุลของ PVB จะมีผลต่อสมบัติความเป็นผลึกและสมบัติ Thermoelectric น้อย การเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิ (PTC) จะแสดงถึงค่าสัณฐานของวัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์ที่เปลี่ยนแปลงไป ค่า G และ Avrami exponent n สามารถหาได้จาก POM และ DSC ที่ isothermal crystallized ที่อุณหภูมิ 41°C

Tzong-Ming Wu และ Jen-Chih Cheng [15] ศึกษาสมบัติพื้นฐานและสมบัติในการนำไฟฟ้าของ Poly(ϵ -caprolactone) / poly(vinyl butyral) / montmorillonite ที่ผสมวัสดุเชิงประกอบคาร์บอนแบล็กขนาดอนุภาคระดับนาโนพบว่าปริมาณ คาร์บอนแบล็กที่ผสมในวัสดุเชิงประกอบจะมีผลต่อสมบัตินำไฟฟ้าโดยแปรผันตรงกับค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิซึ่งหาได้จากค่าสูงสุดของความต้านทานจากกราฟความต้านทานไฟฟ้ากับอุณหภูมิ ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิจะเปลี่ยนแปลงตามพอลิเมอร์ที่ค่าพื้นฐานวิทยาที่แตกต่างกัน

บทที่ 3

ขั้นตอนการศึกษา

3.1 วัสดุและสารเคมี

3.1.1 ยางธรรมชาติ

นำยางธรรมชาติที่ใช้ในการวิจัยนี้ได้มาจากสถาบันวิจัยยางแห่งประเทศไทย โดยมีปริมาณเนื้อยางธรรมชาติประมาณ ร้อยละ 60 โดยน้ำหนักและมีสารเพิ่มความเสถียรคือ แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (NH_4OH)

3.1.2 สารเคมีขึ้นรูปยาง

3.1.2.1 กรดสเตียริก (Stearic acid)

3.1.2.2 กำมะถัน (Sulfur)

3.1.2.3 ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide, ZnO)

3.1.2.4 Wingstay L

3.1.2.5 ZDEC (Zinc-diethyldithiocarbamate, $\text{C}_{10}\text{H}_{20}\text{H}_2\text{S}_4\text{Zn}$)

3.1.3 คาร์บอนแบล็ก

คาร์บอนแบล็กที่ใช้ในการวิจัยนี้ ผลิตโดยไทยโดไกคาร์บอน โปรดักท์ จำกัด คาร์บอนแบล็กซึ่งใช้ในงานวิจัยมีทั้งหมด 6 ชนิด มีขนาดอนุภาคระหว่าง 18-43 นาโนเมตร และโครงสร้าง 72-125 มม./100 ก. ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 : สมบัติทางกายภาพของคาร์บอนแบล็กที่ใช้ในการวิจัย [16]

ชนิดของคาร์บอนแบล็ก	ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (nm)	ปริมาณการดูดซับของ DBP (ml/100g)	ความหนาแน่น (kg/m ³)	คุณสมบัติ
N220	22	114	345	ขึ้นรูปได้ง่าย เป็นสารเสริมแรงที่ดี และต้านทานการเสียดสีได้ดี
N234	18	125	320	ต้านทานการเสียดสี และมี ความต้านแรงดึงสูง
N326	28	72	465	โครงสร้างต่ำและ โมดูลัสต่ำ มี ความต้านแรงดึงสูง และระยะยึดตัวดี
N330	28	102	375	ต้านทานการเสียดสีสูง ต้านทานแรงดึงยึดสูง ค่า โมดูลัสปานกลาง และระยะยึดตัว ณ จุดขาด ปานกลาง
N339	24	120	345	ต้านทานการล้าสูง มีโครงสร้างสูง ทำให้มีการกระจายตัวดี
N550	43	121	360	มีสมบัติทางพลวัตที่ดี หดตัว ในขณะที่อัดรีดในแม่พิมพ์ต่ำ และมีผิวสัมผัสเรียบ

3.1.4 การเตรียมสารละลายคาร์บอนแบล็ก

คาร์บอนแบล็กที่ใช้ในการวิจัยเนื่องจากมีลักษณะเป็นผงอนุภาคจึงต้องทำให้อยู่ในรูปในสารละลายเพื่อง่ายต่อการผสมกับน้ำยางธรรมชาติ โดยคาร์บอนแบล็กจะทำการผสมกับสารเพิ่มการกระจายตัว โดยมีน้ำเป็นตัวทำละลายใน Ball mill เป็นเวลา 36 ชั่วโมง จะได้สารละลายคาร์บอนแบล็กพร้อมผสมกับน้ำยางธรรมชาติ

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้วิจัย

- 3.2.1 ตู้อบสารเคมี
- 3.2.2 เครื่องมือวัดสมบัตินำไฟฟ้า
- 3.2.3 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)
- 3.2.4 เครื่องบดขนาดบอลมิล (Ball mill)
- 3.2.5 เครื่องชั่งน้ำหนักอิเล็กทรอนิกส์
- 3.2.6 เครื่องทดสอบความแข็งแรงดึง (Tensile Testing Machine) ยี่ห้อ Lloyd ให้กำลังสูงสุด (Load cell) 3 กิโลนิวตัน
- 3.2.7 อุปกรณ์วัดความหนา
- 3.2.8 เวอร์เนีย (Vernia Caliper)
- 3.2.9 บีกเกอร์ (Beaker)
- 3.2.10 แท่งกวนสารเคมีแม่เหล็กไฟฟ้า (Magnetic Starrier)
- 3.2.11 เตาให้ความร้อนและเครื่องกวนระบบแม่เหล็กไฟฟ้า (Hot Plate)
- 3.2.12 แม่แบบพิมพ์ขึ้นรูปยาง ขนาด กว้าง × ยาว × สูง เท่ากับ 12 × 12 × 3 ลูกบาศก์เซนติเมตร และ 30 × 30 × 3 ลูกบาศก์เซนติเมตร

3.3 การเตรียมชิ้นงานวิจัย

ผสมน้ำยางธรรมชาติกับคาร์บอนแบล็กที่ทำให้อยู่ในรูปสารละลาย ตามอัตราส่วนปริมาณคาร์บอนแบล็กคือ 5 - 25 phr จากนั้นผสมกับสารเติมแต่งและสารเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยงตามตารางที่ 3.2 ก่อนนำไปใส่แบบพิมพ์ และอบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส 1 - 2 ชั่วโมง เพื่อกระตุ้นการเชื่อมโยงและระเหยสารที่ไม่ต้องการ จะได้ยางธรรมชาติที่มีขนาดเฉลี่ย 8 มม. เก็บชิ้นงานที่อุณหภูมิห้องเพื่อให้ชิ้นงานคงรูป ก่อนทำการวัดค่าสภาพการนำไฟฟ้า

ตารางที่ 3.2 :อัตราส่วนผสมสารเคมีที่ใช้ในการขึ้นรูปยางธรรมชาติชนิดแผ่น

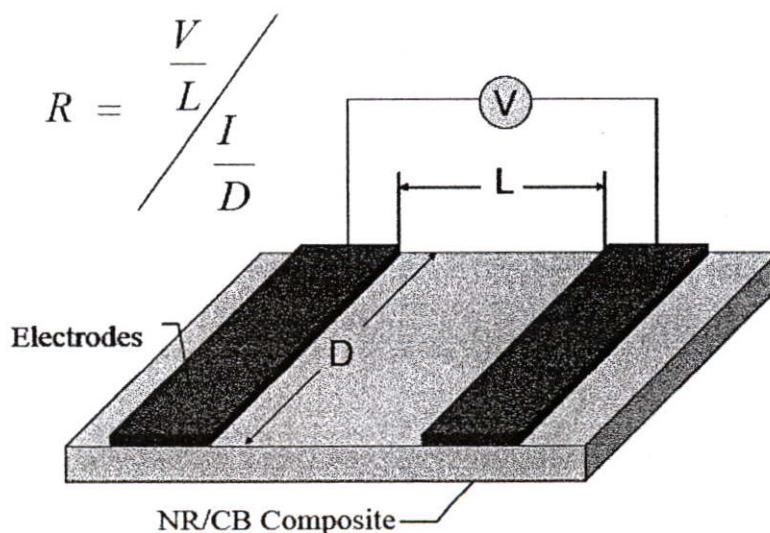
สารเคมีขึ้นรูปยาง	อัตราส่วนผสม (phr)
1. กรดสเตียริก (Stearic acid)	1.250
2. กำมะถัน (Sulfur)	3.125
3.ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide, ZnO)	1.875
4. Wingstay L	1.250
5. ZDEC (Zinc-diethyldithiocarbamate, $C_{10}H_{20}H_2S_4Zn$)	1.875

* สูตรอัตราส่วนสารเคมีที่ใช้ในการขึ้นรูปยางได้จากสถาบันวิจัยยางแห่งประเทศไทย

3.4 การวัดสภาพการนำไฟฟ้า

3.4.1 การวัดค่าสภาพการนำไฟฟ้า

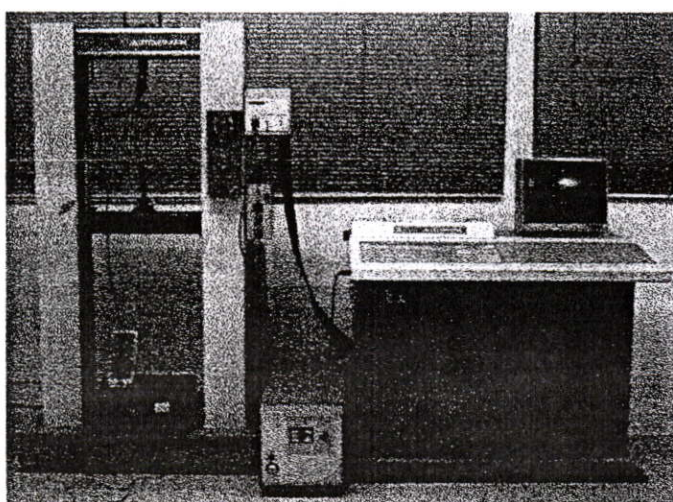
ขึ้นงานก่อนทำการวัดสภาพการนำไฟฟ้า ทำการตัดที่ขนาด 10×10 ตารางเซนติเมตร จากนั้นทำการวัดสภาพการนำไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ 100 500 และ 1,000 โวลต์ (จากรูปที่ 3.1) ค่าที่ได้จากการวัด คือ ค่ากระแสไฟฟ้า สามารถเปลี่ยนให้อยู่ในรูปค่าสภาพการนำไฟฟ้า



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนทดสอบเพื่อวัดค่าสภาพการนำไฟฟ้า

3.4.2 การวัดสภาพการนำไฟฟ้าขณะดึงยัด

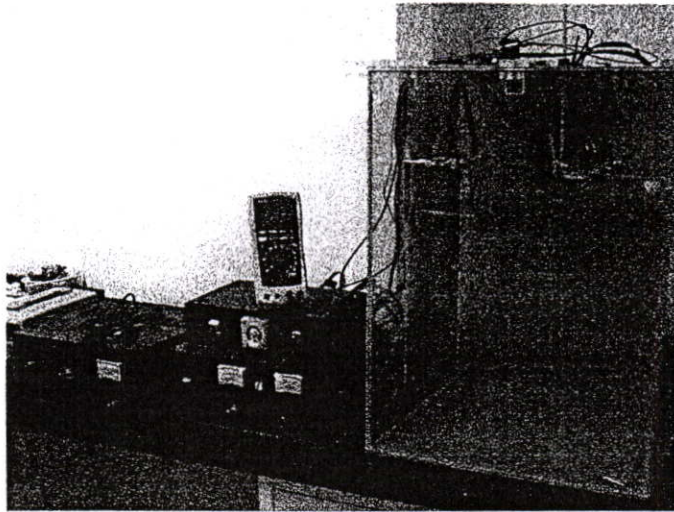
ชิ้นงานที่ใช้วัดความสัมพันธ์สภาพการนำไฟฟ้าตามระยะการดึงยัดเป็นไปตามมาตรฐาน ชิ้นงานที่ใช้ทดสอบสมบัติเชิงกลของยาง ASTM D3183 ที่มีช่วงแกนวัดระยะยัด (Gauge length) และเป็นแกนวัดความสัมพันธ์กับสภาพการนำไฟฟ้าตามระยะยัดตัว 25 ± 0.25 มิลลิเมตร โดยมี ระยะยัดที่ใช้ทดสอบวัดสภาพการนำไฟฟ้าตั้งแต่ 10 – 100 เปอร์เซ็นต์ระยะดึงยัดเทียบกับขณะไม่ ยัดตัว ค่าที่ได้จะแสดงความสัมพันธ์สภาพการนำไฟฟ้าขณะดึงยัด โดยเปรียบเทียบกับสภาพการนำ ไฟฟ้าขณะ ไม่ยัดตัว เครื่องมือที่ใช้ทดสอบแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 การวัดสภาพการนำไฟฟ้าขณะดึงยัด

3.4.3 การวัดสภาพการนำไฟฟ้าสัมพันธ์กับอุณหภูมิ

การศึกษาความสัมพันธ์ของสภาพการนำไฟฟ้ากับอุณหภูมิ เครื่องมือที่ใช้ทดสอบแสดงดังรูปที่ 3.3 อุณหภูมิที่ใช้ทดสอบอยู่ระหว่าง 30 – 80 องศาเซลเซียส โดยได้ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิ ส่งผลต่อสภาพการนำไฟฟ้าแสดงตามปริมาณ และชนิดคาร์บอนแบล็ก นอกจากนี้ยังได้ศึกษา อิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่อสภาพการนำไฟฟ้าตามระยะการดึงยัดระหว่าง 10 -100 เปอร์เซ็นต์ระยะ ดึงยัดเทียบกับขณะไม่ยัดตัว



รูปที่ 3.3 เครื่องวัดสภาพการนำไฟฟ้าสัมพันธ์กับอุณหภูมิ

3.5 การวัดสมบัติเชิงกล

สมบัติเชิงกลที่วัดในงานวิจัยนี้ได้แก่ค่าการยืดตัวสูงสุดที่จุดขาด (Elongation at break) และค่าความต้านทานแรงดึง (Tensile strength) เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D412-87 และชิ้นงานที่ใช้ทดสอบเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D3183 โดยชิ้นงานที่ใช้ทดสอบมีความหนา 2.0 ± 0.2 มิลลิเมตร ความกว้างช่วงคอคอด 7.0 ± 0.7 มิลลิเมตร และมีช่วงแกนวัดระยะยืด (Gauge length) 25 ± 0.25 มิลลิเมตร อัตราเร็วในการดึงชิ้นงาน 500 ± 50 มิลลิเมตรต่อนาที โดยเครื่องให้กำลังดึงสูงสุด (Load Cell) 3 กิโลนิวตัน การวัดค่าต้านทานแรงดึงวัดที่ ร้อยละ 100 ของร้อยละการยืดตัว และวัดร้อยละการยืดตัวสูงสุด

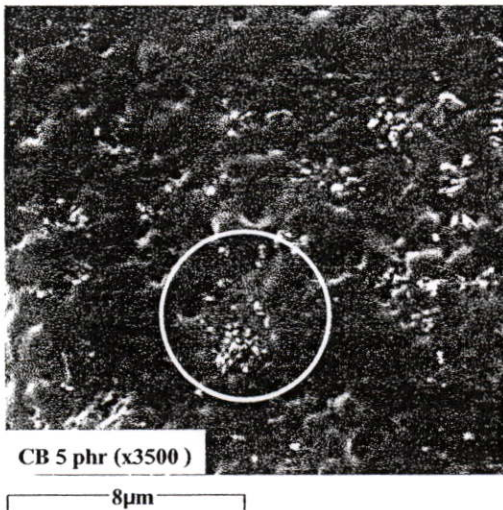
บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูล

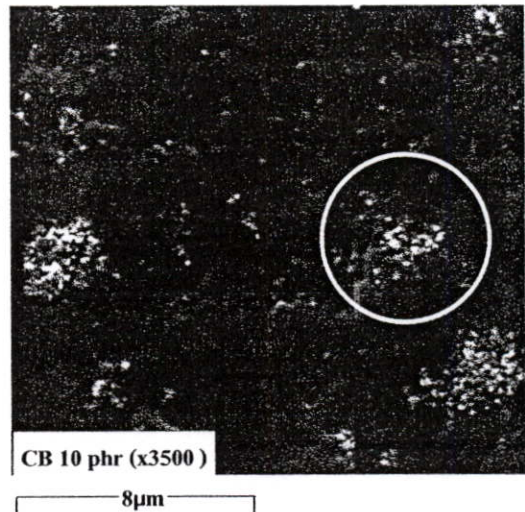
4.1 สัณฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติและคาร์บอนแบล็ก

4.1.1 สัณฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติและคาร์บอนแบล็กแสดงตามปริมาณของคาร์บอนแบล็กที่เติมลงในยางธรรมชาติ

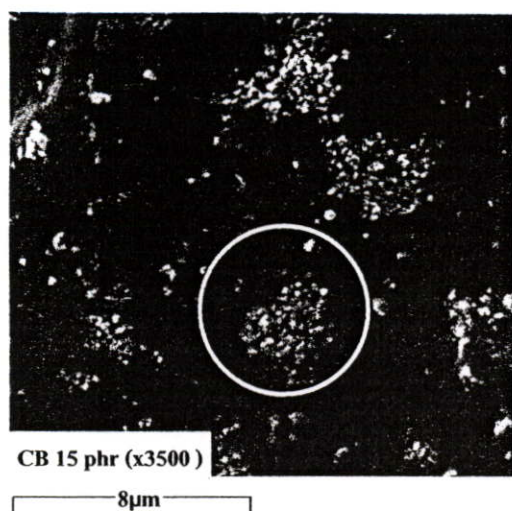
รูปที่ 4.1 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และคาร์บอนแบล็ก ซึ่งขนาดอนุภาคของคาร์บอนแบล็กที่ทดสอบคือ 43 nm จากรูปที่ 4.1 (ก) - (จ) แสดงให้เห็นว่า ปริมาณคาร์บอนแบล็กที่เพิ่มขึ้นจะมีการกระจายตัวในเนื้อยางธรรมชาติมากขึ้น นอกจากนี้ ที่ ปริมาณคาร์บอนแบล็กมากขึ้นจะมีการเกาะกลุ่มกันระหว่างอนุภาคคาร์บอนแบล็กมากขึ้น อันเนื่องมาจากปริมาณคาร์บอนแบล็กที่เพิ่มมากขึ้นซึ่งส่งผลให้มีอนุภาคคาร์บอนแบล็กในเนื้อยางมาก จึงทำให้มีการกระจายตัวในเนื้อยางธรรมชาติมากขึ้น อีกทั้งยังเป็นการให้อนุภาคคาร์บอนแบล็ก เกาะกลุ่มกันเป็นร่างแหออกจากศูนย์กลาง โมเลกุลทำให้มีลักษณะเป็นกลุ่มก้อนมากกว่าที่ปริมาณ คาร์บอนแบล็กน้อย



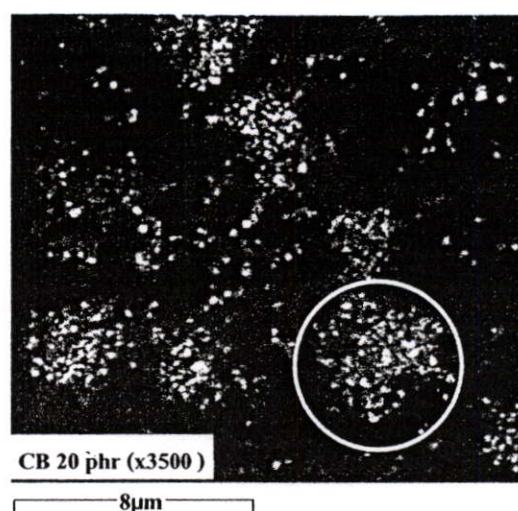
(ก)



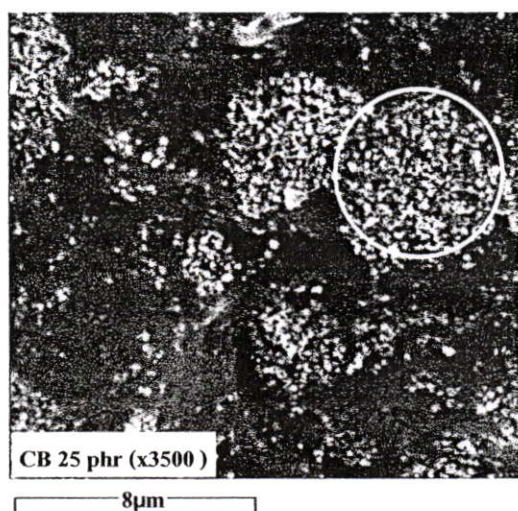
(จ)



(ค)



(ง)



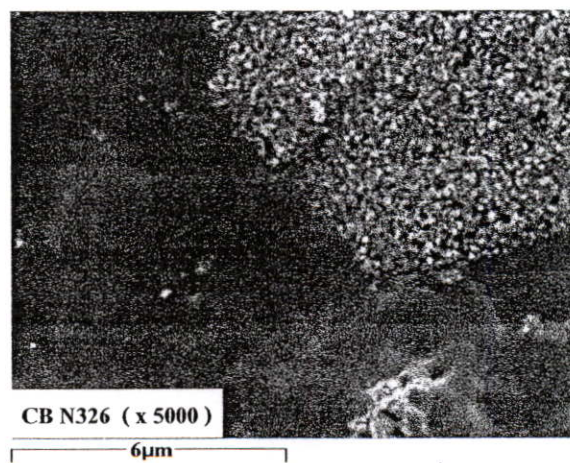
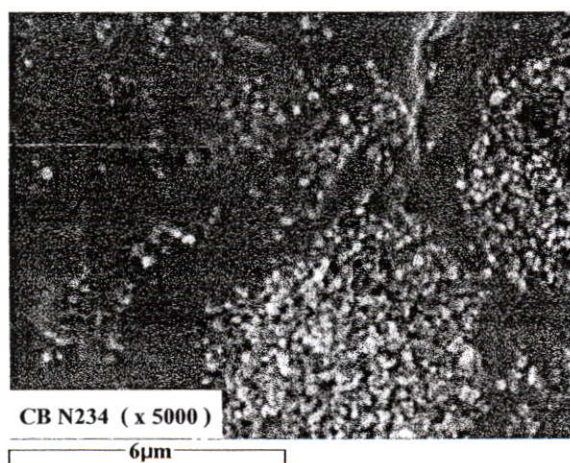
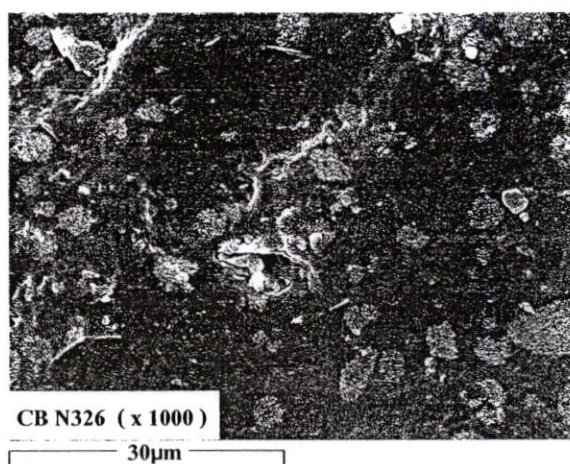
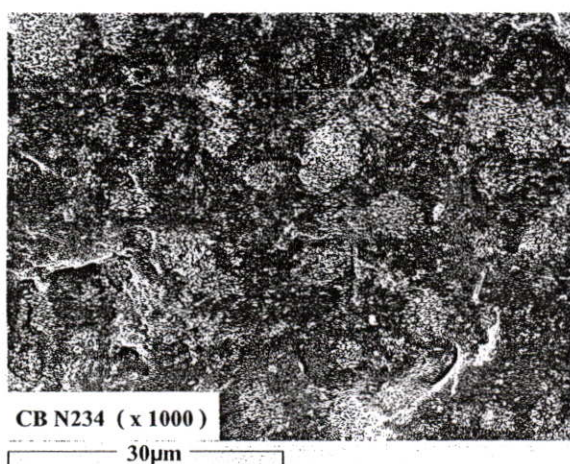
(จ)

รูปที่ 4.1 สัณฐานวิทยาของคาร์บอนแบล็ก (N550) จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่กำลังขยาย 3,500 เท่า เพื่อเปรียบเทียบผลของปริมาณคาร์บอนแบล็กที่เติมลงไปในช่วง 5 – 25 phr

4.1.2 ผลของสัณฐานวิทยาของคาร์บอนแบล็กโครงสร้างสูงและต่ำ

รูปที่ 4.2 สัณฐานวิทยาของยางธรรมชาติที่ผสมคาร์บอนแบล็ก เปรียบเทียบระหว่าง คาร์บอนแบล็กโครงสร้างสูง และโครงสร้างต่ำ ได้แก่ คาร์บอนแบล็ก N234 ซึ่งมีขนาดอนุภาค 18 nm

และ N326 มีขนาดอนุภาค 28 nm จากรูปแสดงให้เห็นว่ามีการกระจายตัวของอนุภาคคาร์บอนแบล็กในเนื้อยางของคาร์บอนแบล็กโครงสร้างสูงมากกว่าคาร์บอนแบล็กโครงสร้างต่ำ นอกจากนี้ยังแสดงถึง ลักษณะที่เป็นกลุ่มก้อนของคาร์บอนแบล็กโครงสร้างสูงจะมีอนุภาคที่เกาะตัวเป็นกิ่งก้านสาขาขาว และซับซ้อน ออกจากโมเลกุลอนุภาคแกนกลางมากกว่า คาร์บอนแบล็กโครงสร้างต่ำ อันเนื่องมาจากคาร์บอนแบล็กโครงสร้างสูงจะมีลักษณะการจัดเรียงอนุภาคที่มีลักษณะกระจายตัวเป็นร่างแหที่ซับซ้อนออกจากแกนกลางมากกว่าคาร์บอนแบล็กโครงสร้างต่ำที่มีการการจัดเรียงอนุภาคที่เกาะกลุ่มกันอยู่แกนกลาง โมเลกุลทำให้สามารถเห็นการกระจายตัวของคาร์บอนแบล็กโครงสร้างสูงมากกว่าคาร์บอนแบล็กโครงสร้างต่ำ



(ก) โครงสร้างสูง

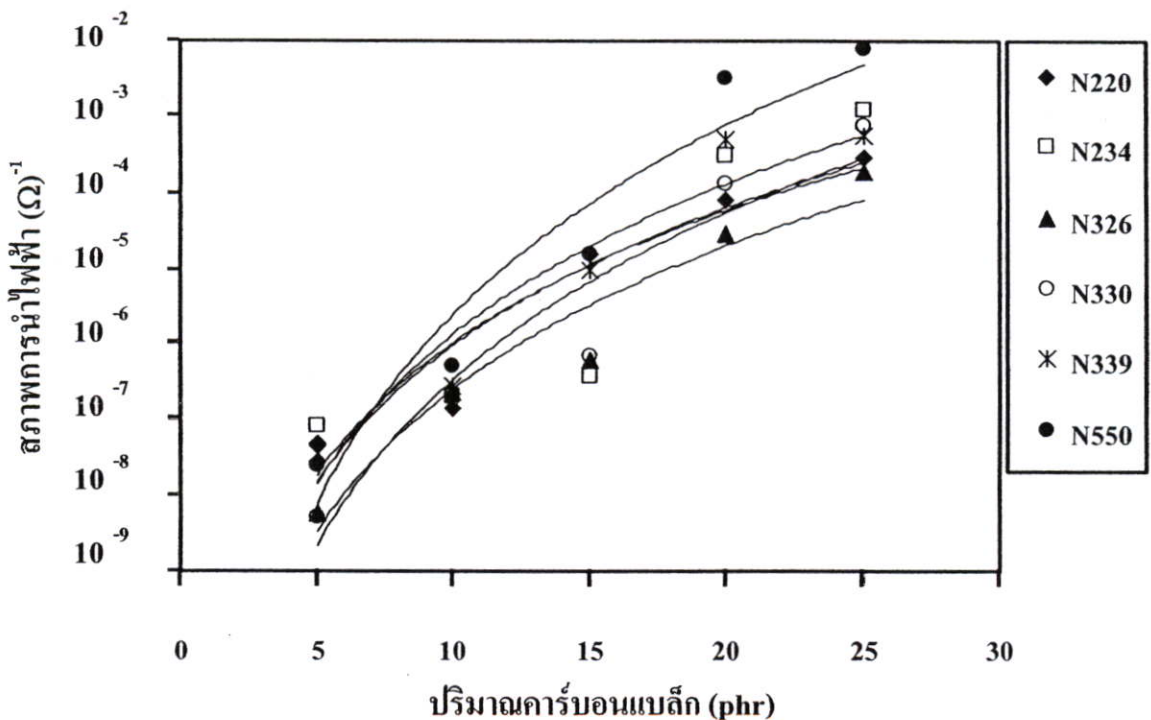
(ข) โครงสร้างต่ำ

รูปที่ 4.2 สัมฐานวิทยาเปรียบเทียบคาร์บอนแบล็ก N234 ที่มีโครงสร้างสูงและ N326 ที่มีโครงสร้างต่ำ จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่ 25 phr

4.2 ปัจจัยทางกายภาพของคาร์บอนแบล็กต่อสภาพการนำไฟฟ้า

4.2.1 ปริมาณของคาร์บอนแบล็กที่มีต่อสภาพการนำไฟฟ้าของวัสดุเชิงประกอบ

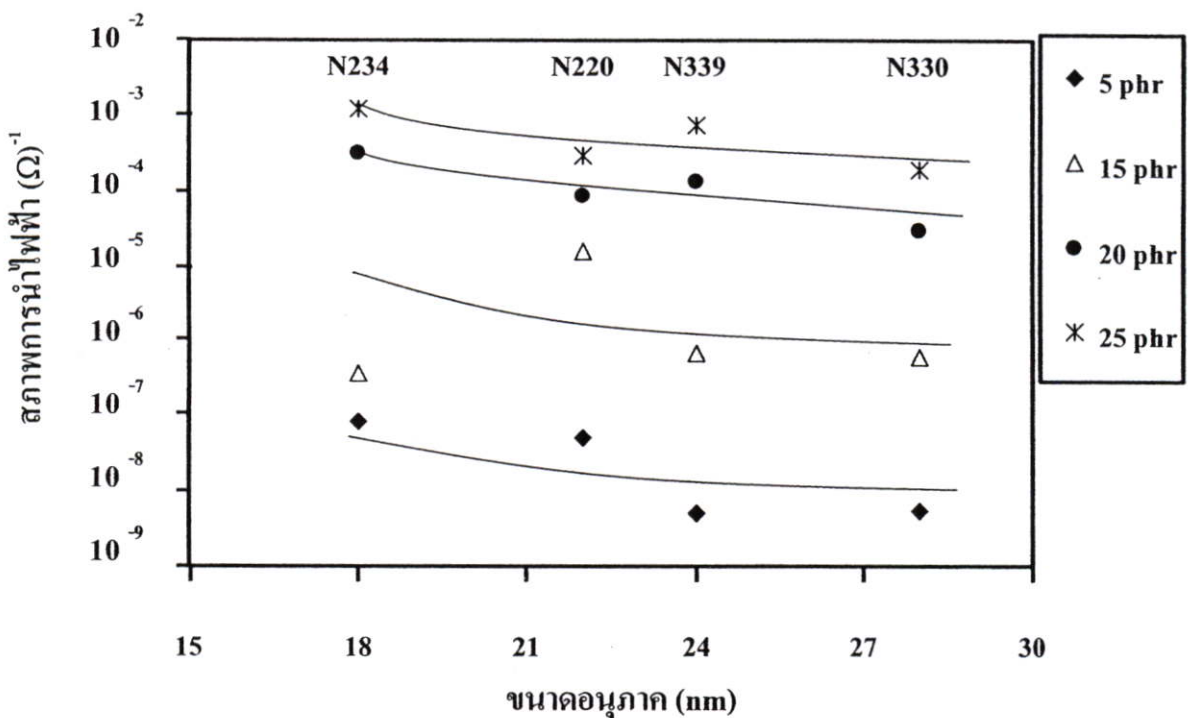
ในการเติมวัสดุที่สามารถนำไฟฟ้าลงในพอลิเมอร์ที่ไม่นำไฟฟ้าจะสามารถเพิ่มสมบัติในการนำไฟฟ้าได้โดยสมบัติในการนำไฟฟ้าจะขึ้นกับปริมาณวัสดุนำไฟฟ้าที่เพิ่มลงในพอลิเมอร์แต่เมื่อเพิ่มปริมาณวัสดุนำไฟฟ้ามากขึ้น สมบัติในการนำไฟฟ้าจะเข้าใกล้ค่าหนึ่งซึ่งจะใกล้เคียงกับค่าการนำไฟฟ้าของวัสดุนำไฟฟ้าที่เติมลงไป [10] โดยจากรูปที่ 4.3 แสดงค่าสภาพการนำไฟฟ้าตามอัตราส่วนปริมาณ คาร์บอนแบล็ก ได้แก่ 5 - 25 phr พบว่าที่ปริมาณคาร์บอนแบล็กน้อย 5 phr ค่าสภาพการนำไฟฟ้าของวัสดุเชิงประกอบจะเพิ่มขึ้นอยู่ที่ประมาณ $10^{-9} \Omega^{-1}$ เมื่อเปรียบเทียบกับยางธรรมชาติบริสุทธิ์ ที่มีสภาพการนำไฟฟ้าอยู่ในระดับ $10^{-14} \Omega^{-1}$ พบว่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น 10^6 เท่า และเมื่อเพิ่มปริมาณคาร์บอนแบล็กมากขึ้น จนถึง 25 phr ค่าสภาพการนำไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นอยู่ที่ประมาณ $10^{-3} \Omega^{-1}$ คาร์บอนแบล็กทุกประเภทแสดงแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของค่าสภาพการนำไฟฟ้าตามปริมาณคาร์บอนแบล็กในลักษณะเดียวกัน แต่อย่างไรก็ตามเมื่อปริมาณคาร์บอนแบล็กสูงกว่า 25 phr ค่าสภาพการนำไฟฟ้านี้จะมีแนวโน้มเข้าใกล้ค่าหนึ่ง



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ของค่าสภาพการนำไฟฟ้ากับปริมาณคาร์บอนแบล็กที่ผสม

4.2.2 ผลของขนาดอนุภาคคาร์บอนแบล็กที่มีต่อสภาพการนำไฟฟ้า

จากรูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ของค่าสภาพการนำไฟฟ้ากับขนาดอนุภาคคาร์บอนแบล็ก ได้แก่ N234 ที่มีขนาดอนุภาค 18 nm ไปจนถึง N330 ที่มีขนาดอนุภาค 28 nm ที่ปริมาณคาร์บอนแบล็ก 5-25 phr พบความสัมพันธ์คือ แนวโน้มของขนาดอนุภาคคาร์บอนแบล็กที่เพิ่มขึ้น จะส่งผลต่อแนวโน้มสภาพการนำไฟฟ้าที่มีค่าลดลง ทั้งนี้เนื่องจากอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ขึ้นจะส่งผลต่อการเข้าเป็นเนื้อเดียวกันระหว่างอนุภาคคาร์บอนแบล็กกับเนื้อยาง โดยทำให้เข้ากันได้ลดลง อย่างไรก็ตามในกรณี N550 ที่ขนาดอนุภาค 43 nm มีค่าไม่สอดคล้องกับแนวโน้ม ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากปัจจัยอื่นที่สำคัญคือ โดยอนุภาคมีขนาดใหญ่กว่ามาก จะสามารถส่งผ่านกระแสไฟฟ้าไปยังอนุภาคข้างเคียงได้ปริมาณมากกว่า โดยเทียบแต่ละอนุภาคกับคาร์บอนแบล็กที่ขนาดอนุภาคเล็ก ทำให้มีค่าสภาพการนำไฟฟ้าสูง ซึ่งในส่วนการศึกษาโครงสร้างจะได้แสดงผลต่อไป

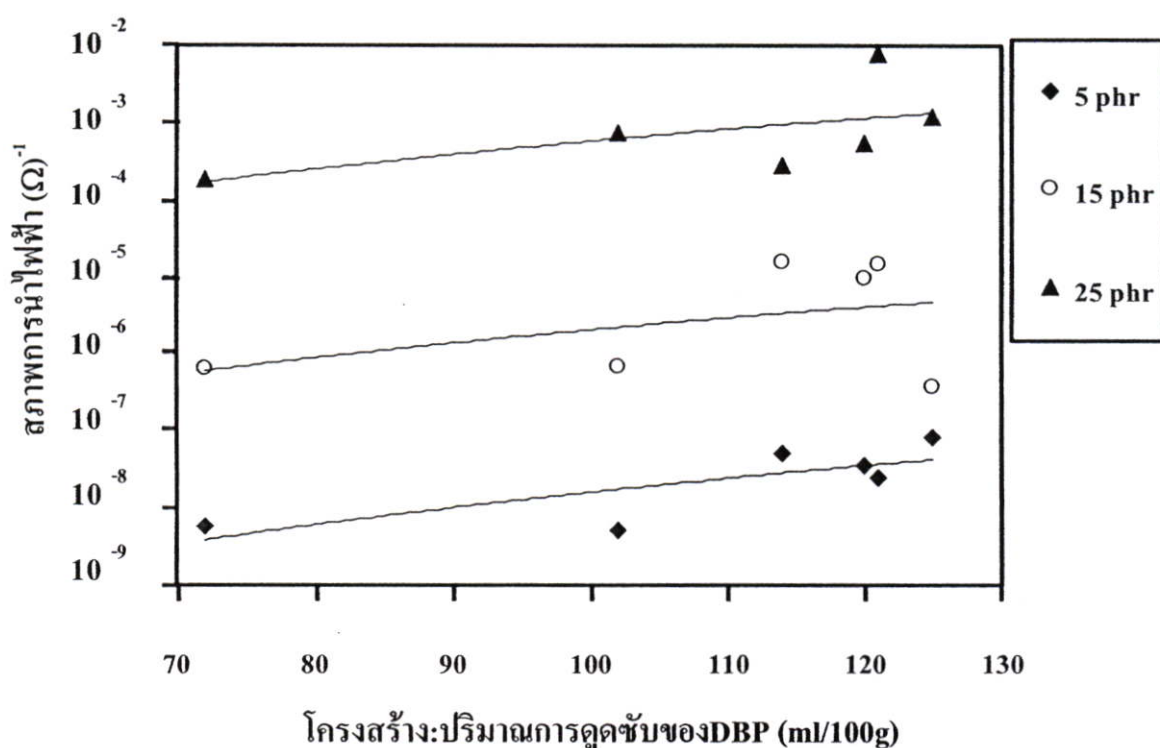


รูปที่ 4.4 ผลของขนาดอนุภาคที่มีต่อสภาพการนำไฟฟ้าของวัสดุเชิงประกอบ

4.2.3 ผลของโครงสร้างคาร์บอนแบล็กที่มีต่อสภาพการนำไฟฟ้า

รูปที่ 4.5 แสดงผลของลักษณะโครงสร้างที่มีต่อสภาพการนำไฟฟ้าของวัสดุเชิงประกอบบางธรรมชาติที่สามารถจำแนกลักษณะโครงสร้างได้จากความสามารถในการดูดซับสาร DBP ซึ่งจะดูดซับที่พื้นผิวสัมผัสของคาร์บอนแบล็ก โดยคาร์บอนแบล็กที่ลักษณะโครงสร้างสูงกว่าจะสามารถดูดซับสาร DBP ได้มากกว่าคาร์บอนแบล็กโครงสร้างต่ำแต่ทั้งนี้ยังขึ้นกับขนาดอนุภาคด้วย โดยได้

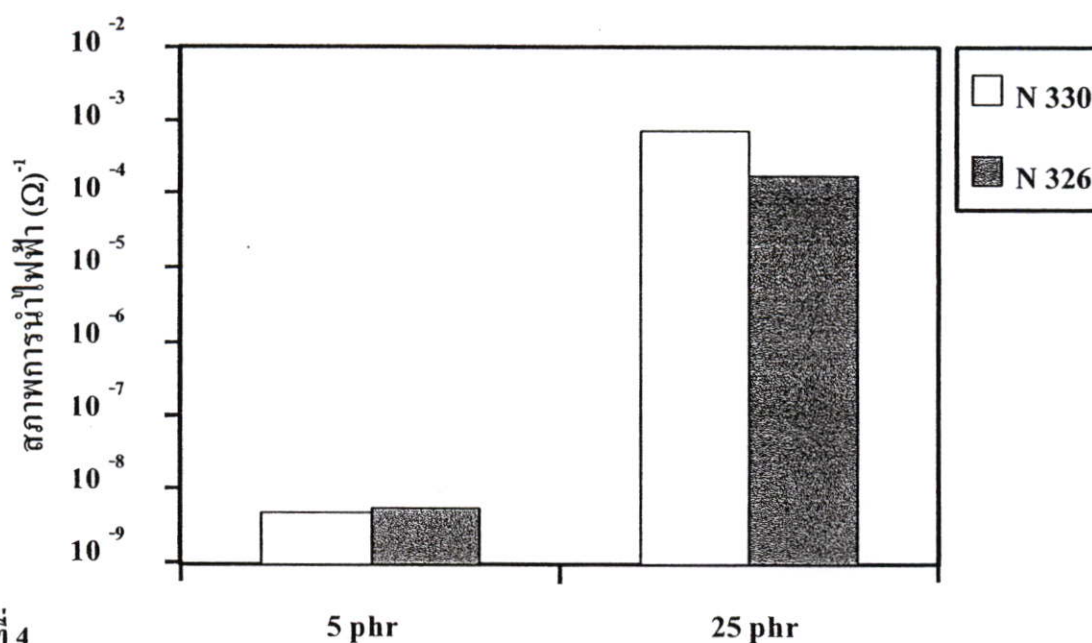
ทำการศึกษาเกี่ยวกับคาร์บอนแบล็กที่มีโครงสร้างต่ำคือ N326 ที่มีการดูดซับ DBP 72 ml/100g ไปจนถึง N234 ที่มีโครงสร้างสูงที่มีการดูดซับสาร DBP 125 ml/100g ในช่วงปริมาณคาร์บอนแบล็ก 5 – 25 phr พบว่าแนวโน้มค่าสภาพการนำไฟฟ้าจะสูงขึ้นตามลักษณะโครงสร้างของคาร์บอนแบล็กที่มีสูงขึ้น โดยโครงสร้างคาร์บอนแบล็กที่มีค่าสูงจะมีลักษณะโครงสร้างที่เป็นกิ่งก้านสาขาและซับซ้อนตลอดจนมีการเชื่อมต่อกันระหว่างอนุภาคคาร์บอนแบล็กที่ยาวกว่าคาร์บอนแบล็กที่มีโครงสร้างต่ำ ทำให้คาร์บอนแบล็กที่มีโครงสร้างสูงกว่ามีการกระจายตัวในเนื้อยางได้มากกว่า คาร์บอนแบล็กโครงสร้างต่ำ คาร์บอนแบล็กโครงสร้างสูงกระแสไฟฟ้าจึงสามารถส่งผ่านไปได้สะดวก ทำให้มีสภาพการนำไฟฟ้าสูงกว่า



รูปที่ 4.5 ผลของโครงสร้างคาร์บอนแบล็กที่แสดงได้จากการดูดซับปริมาณสาร DBP ที่มีต่อสภาพการนำไฟฟ้าของวัสดุเชิงประกอบ

รูปที่ 4.6 แสดงผลของโครงสร้างที่มีต่อสภาพการนำไฟฟ้าโดยเปรียบเทียบกันระหว่างอนุภาคคาร์บอนแบล็กที่มีขนาดอนุภาคเท่ากันแต่โครงสร้างแตกต่างกัน โดยคาร์บอนแบล็ก ที่นำมาเปรียบเทียบคือ N326 และ N330 ที่มีขนาดอนุภาค 28 nm มีโครงสร้างต่างกันคือ N326 ที่มีการดูดซับ DBP 72 ml/100g มีโครงสร้างที่ต่ำกว่า N330 ที่มีการดูดซับ DBP 102 ml/100g ที่มีลักษณะโครงสร้างที่สูงกว่า พบว่าที่ปริมาณคาร์บอนแบล็กต่ำ คือ 5 phr ค่าสภาพการนำไฟฟ้าของทั้งสอง

ชนิดมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งผลของลักษณะโครงสร้างคาร์บอนแบล็กไม่ส่งผลต่อสภาพการนำไฟฟ้า ในช่วงปริมาณคาร์บอนแบล็กน้อย แต่เมื่อเพิ่มปริมาณคาร์บอนแบล็กสูงขึ้นเป็น 25 phr ค่าสภาพการนำไฟฟ้าที่วัดได้จากคาร์บอนแบล็ก N330 ที่มีโครงสร้างสูงกว่า จะมีค่าสภาพการนำไฟฟ้าสูงชันกว่าคาร์บอนแบล็ก N326 ที่มีโครงสร้างต่ำกว่า โดยมีค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 74 แสดงให้เห็นถึงลักษณะโครงสร้างของคาร์บอนแบล็กจะส่งผลต่อสมบัติในการนำไฟฟ้าที่แตกต่างกันเมื่อปริมาณคาร์บอนแบล็กที่ผสมมีปริมาณมากขึ้น



รูปที่ 4

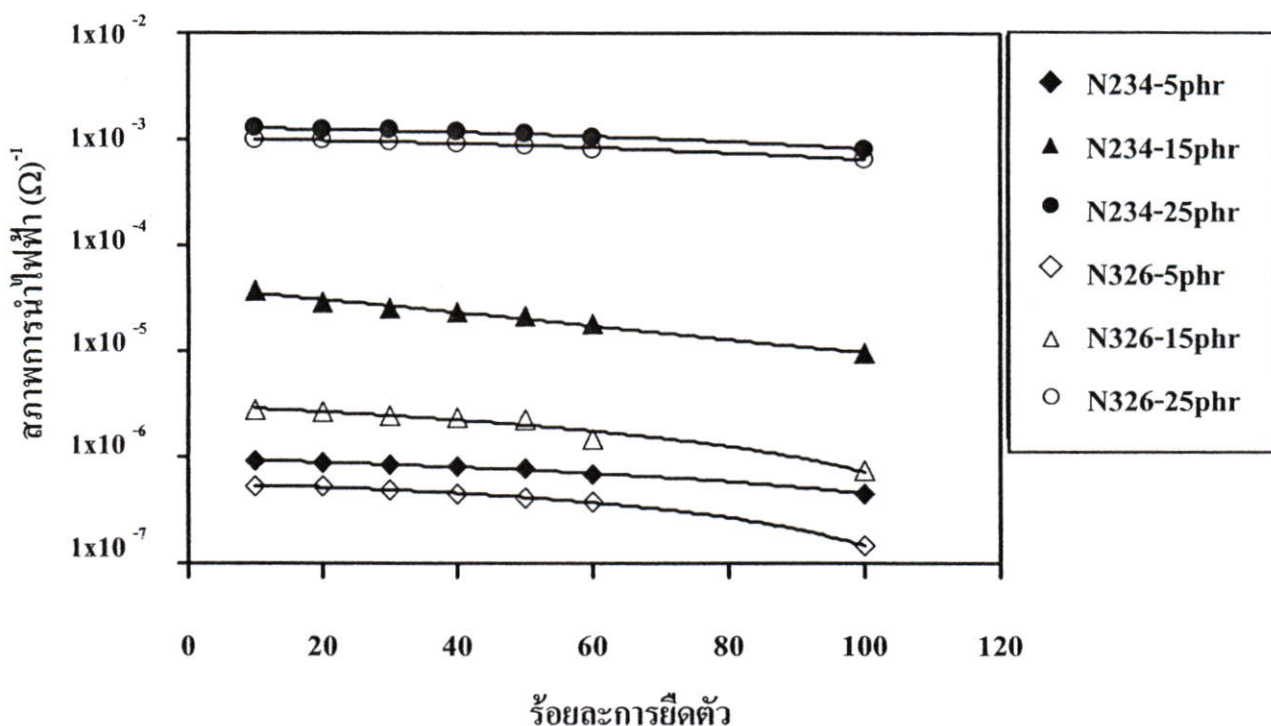
ขนาดอนุภาคเท่ากันคือ 28 นาโนเมตร แต่มีโครงสร้างต่างกัน

4.3 ปัจจัยเชิงกลที่มีต่อสภาพการนำไฟฟ้าของยางธรรมชาติ

4.3.1 ผลของการดึงยึดต่อสภาพการนำไฟฟ้าสัมพันธ์ตามปริมาณคาร์บอนแบล็ก

รูปที่ 4.7 แสดงสภาพการนำไฟฟ้าที่เป็นผลมาจากการดึงยึด โดยเปรียบเทียบตามปริมาณคาร์บอนแบล็กของคาร์บอนแบล็ก N234 ที่มีโครงสร้างสูง กับคาร์บอนแบล็ก N326 ที่มีโครงสร้างต่ำ จากรูปแสดงให้เห็นว่าสภาพการนำไฟฟ้าจะมีค่าลดลงเมื่อระยะการดึงยึดของยางที่ผสมคาร์บอนแบล็กเพิ่มขึ้น โดยมีความสอดคล้องกับทุกค่าปริมาณคาร์บอนแบล็ก ทั้งนี้เนื่องมาจากเมื่อระยะการดึงยึดเพิ่มขึ้นจะทำให้อนุภาคคาร์บอนแบล็กในเนื้อยางห่างจากกัน ทำให้กระแสไฟฟ้าผ่านคาร์บอนแบล็กในเนื้อยางได้ยากขึ้น สภาพการนำไฟฟ้าจึงลดลง ทั้งคาร์บอนแบล็กโครงสร้างสูง (N234) และคาร์บอนแบล็กโครงสร้างต่ำ (N326) จะมีสภาพการนำไฟฟ้าลดลงในแนวโน้มเดียวกัน แต่ในคาร์บอนแบล็ก N326 ที่มีโครงสร้างต่ำที่ปริมาณน้อย (5-15 phr) เมื่อเพิ่มระยะการดึงยึดมากขึ้นจะแสดงผลการลดลงของสภาพการนำไฟฟ้าได้รวดเร็วกว่าคาร์บอนแบล็ก N234 ที่มีโครงสร้างสูง

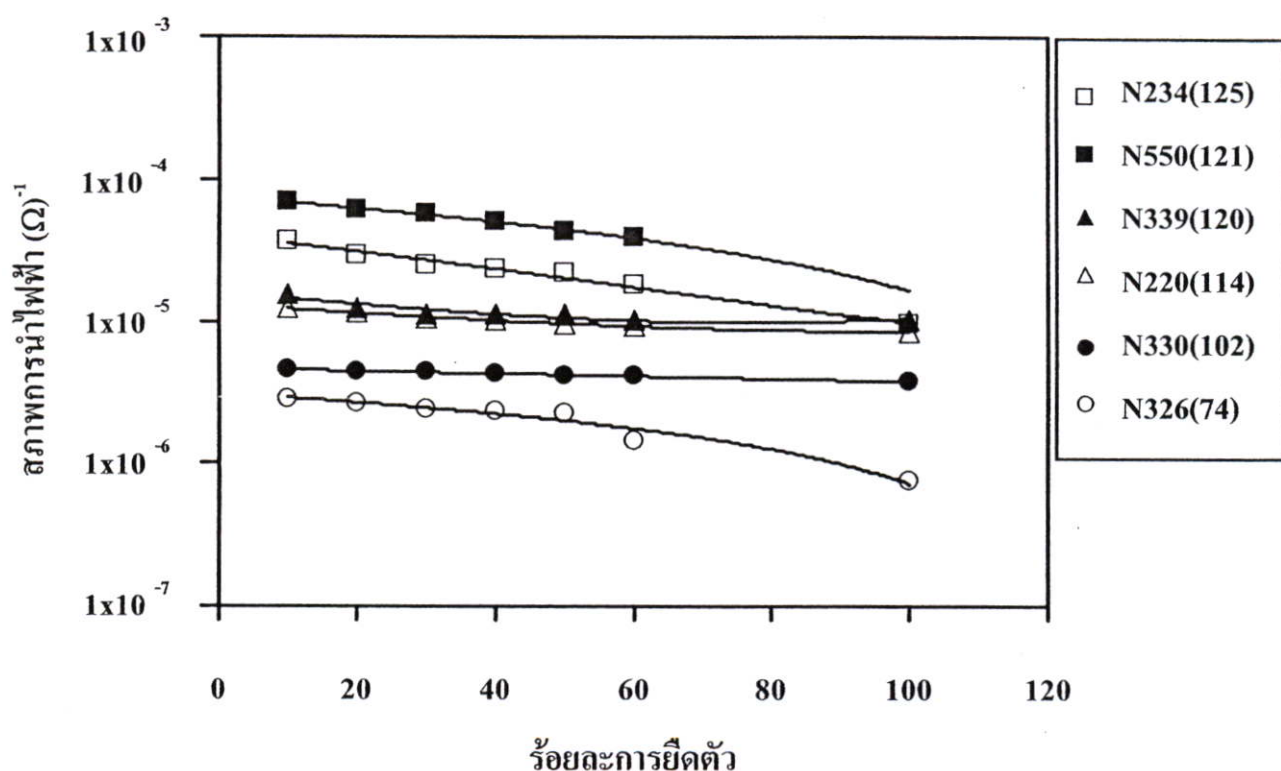
อาจเนื่องมาจาก คาร์บอนแบล็กโครงสร้างต่ำมีการเชื่อมต่อกันระหว่างอนุภาคคาร์บอนแบล็กที่สั้นกว่าคาร์บอนแบล็กที่มีโครงสร้างสูง ทำให้คาร์บอนแบล็กที่มีโครงสร้างต่ำมีการกระจายตัวแต่มีความต่อเนื่องของแต่ละอนุภาคที่ก่อตัวยึดติดกัน ในเนื้อหาน้อยกว่าคาร์บอนแบล็กโครงสร้างสูง เมื่อเกิดการคั่งยัดที่มากขึ้น จะทำให้เกิดระยะห่างระหว่างอนุภาคคาร์บอนแบล็กมากกว่าคาร์บอนแบล็กโครงสร้างสูงซึ่งแต่ละอนุภาคยึดตัวกันเป็นร่างแหเสริมแรง จึงมีกระแสไฟฟ้าลดลงอย่างรวดเร็วกว่าคาร์บอนแบล็กโครงสร้างสูงที่มีการกระจายตัวยึดติดกันสูง แต่ในกรณีที่มีปริมาณคาร์บอนแบล็กในเนื้อของวัสดุเชิงประกอบสูงเช่นที่ 25 phr มีการกระจายตัวของอนุภาคคาร์บอนแบล็กในเนื้ออย่างมาก ความต่อเนื่องอนุภาคคาร์บอนแบล็กในเนื้ออยู่ชิดกันซึ่งพบได้ทั้งกรณีของคาร์บอนแบล็กโครงสร้างสูงและคาร์บอนแบล็กโครงสร้างต่ำ เมื่อวัสดุเชิงประกอบนี้ถูกคั่งยัดการนำไฟฟ้าจะลดลงน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับระยะการคั่งยัดเดียวกันในกรณีที่มีคาร์บอนแบล็กปริมาณน้อยกว่า



รูปที่ 4.7 ผลของการคั่งยัดที่มีต่อสภาพการนำไฟฟ้า โดยแสดงความสัมพันธ์เปรียบเทียบระหว่างคาร์บอนแบล็ก N234 กับคาร์บอนแบล็ก N326 ตามปริมาณคาร์บอนแบล็ก

4.3.2 ผลของการดึงยึดต่อสภาพการนำไฟฟ้าสัมพันธ์ตามโครงสร้างคาร์บอนแบล็ก

รูปที่ 4.8 สภาพการนำไฟฟ้าที่เป็นผลมาจากการดึงยึด แสดงความสัมพันธ์เปรียบเทียบตามโครงสร้างเรียงตามลำดับจากสูงไปต่ำคือ N234 มีโครงสร้างสูงจากการดูดซับสาร DBP 125 ml/100g จนถึง N326 โครงสร้างต่ำที่ดูดซับ DBP 74 ml/100g ที่ปริมาณคาร์บอนแบล็ก 15 phr พบว่าสภาพการนำไฟฟ้าจะมีค่าลดลงเมื่อมีการดึงยึดเพิ่มขึ้น โดยเกิดกับคาร์บอนแบล็กทุกลักษณะ โครงสร้างเหมือนกัน ระยะการดึงยึดที่เพิ่มขึ้นจะทำให้คาร์บอนแบล็กทั้ง โครงสร้างสูงและต่ำ มีระยะห่างระหว่างอนุภาคคาร์บอนแบล็กเพิ่มขึ้นทำให้กระแสไฟฟ้าผ่านอนุภาคได้น้อยลง การนำไฟฟ้าจึงลดลง โครงสร้างคาร์บอนแบล็กที่มีค่าต่ำจะมีลักษณะ โครงสร้างที่เป็นกิ่งก้านสาขาและซับซ้อนน้อย ตลอดจนมีการเชื่อมต่อกันระหว่างอนุภาคคาร์บอนแบล็กที่น้อยกว่าคาร์บอนแบล็กที่มีโครงสร้างสูง ทำให้คาร์บอนแบล็กที่มีโครงสร้างต่ำมีการกระจายตัวที่มีความต่อเนื่องของแต่ละอนุภาคที่ก่อตัวยึดติดกัน ในเนื้อยาน้อยกว่าคาร์บอนแบล็ก โครงสร้างสูง การเกาะกลุ่มตรงแกนกลางมากเมื่อมีการดึงยึดทำให้สภาพการนำไฟฟ้าลดลงเร็วกว่าคาร์บอนแบล็ก โครงสร้างสูงที่มีกิ่งก้านสาขาเชื่อมต่อกันมากกว่าซึ่งช่วยในการเสริมแรง

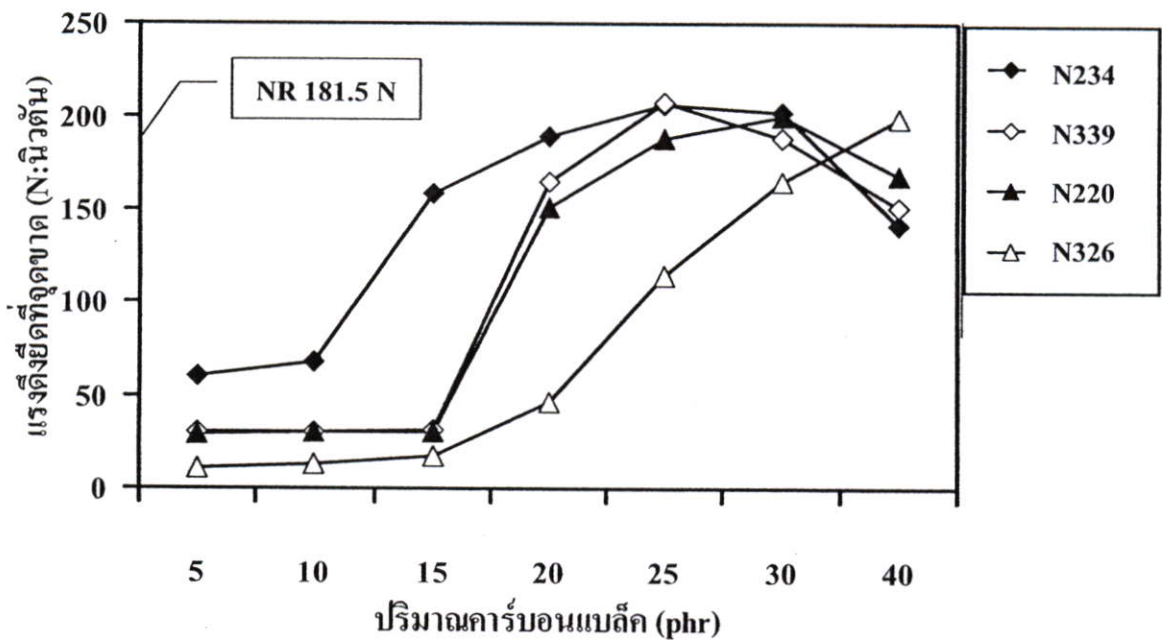


รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ของสภาพการนำไฟฟ้าที่มีต่อการดึงยึด โดยเปรียบเทียบตามโครงสร้างที่ปริมาณคาร์บอนแบล็กเท่ากันคือ 15 phr

4.4 ปัจจัยเชิงกลที่เป็นผลมาจากการใส่คาร์บอนแบล็ก

4.4.1 แรงดึงยึดสูงสุดที่จุดขาด

รูปที่ 4.9 แรงดึงยึดที่จุดขาดเปรียบเทียบตามลักษณะ โครงสร้างที่แสดงจากการดูดซับสาร DBP ของคาร์บอนแบล็กที่ผสม ได้แก่ N234 ที่มีลักษณะ โครงสร้างสูง ไปจนถึง N326 ที่มีลักษณะ โครงสร้างต่ำ พบว่าแนวโน้มค่าแรงดึงยึดที่จุดขาดมีค่าสูงขึ้นตามปริมาณคาร์บอนที่มากขึ้นจนถึง 25 phr ซึ่งเป็นกับคาร์บอนแบล็กทุกชนิด และเมื่อปริมาณคาร์บอนแบล็กมากกว่า 25 phr คาร์บอนแบล็ก N234 และ N339 ซึ่งจัดเป็นคาร์บอนแบล็ก โครงสร้างสูงจะมีแนวโน้มแรงดึงที่จุดขาดลดลง ในกรณีคาร์บอนแบล็ก N220 ที่จัดเป็นคาร์บอนแบล็ก โครงสร้างปานกลาง จะมีแนวโน้มแรงดึงที่จุดขาดสูงขึ้นจนถึงปริมาณ 30 phr จากนั้นจะมีค่าลดลง และที่คาร์บอนแบล็ก N326 ที่ปริมาณมากกว่า 25 phr จะมีแนวโน้มแรงดึงที่จุดขาดสูงขึ้นจนถึงปริมาณ 40 phr ซึ่งค่าแรงดึงนี้จะมีแนวโน้มเข้าใกล้ค่าหนึ่ง



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ของปริมาณคาร์บอนแบล็กในยางกับแรงสูงสุดที่จุดขาด

เมื่อเปรียบเทียบกับค่าแรงดึงที่จุดขาดของยางธรรมชาติที่ไม่ผสมคาร์บอนแบล็ก พบว่าคาร์บอนแบล็กที่ผสมในยางธรรมชาติตั้งแต่ 5 - 15 phr ทุกชนิดจะมีค่าแรงดึงที่จุดขาดน้อยกว่ายางธรรมชาติที่ไม่ผสมคาร์บอนแบล็ก ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากในการดึงยึดยางธรรมชาติที่ผสมคาร์บอนแบล็กในปริมาณต่ำ คาร์บอนแบล็กที่ทำหน้าที่เสริมแรงให้กับยางธรรมชาติแต่เนื่องจากมีปริมาณไม่มากพอที่จะเสริมแรงให้กับยางซึ่งในการเสริมแรงของคาร์บอนแบล็ก คาร์บอนแบล็กจะมีลักษณะการ

เรียงตัวระหว่างอนุภาคเป็นกลุ่มก้อนและแตกแขนงเป็นร่างแหเพื่อถ่ายเทแรงได้มีประสิทธิภาพ แต่ในกรณีที่ปริมาณคาร์บอนแบล็กต่ำ ทำให้อนุภาคคาร์บอนไม่มากพอที่จะสามารถเรียงตัวเป็นร่างแหได้ อีกทั้งอาจมีลักษณะของการเกิดยางบาวด์ (Bound Rubber) ซึ่งทำให้สมบัติในการเสริมแรงของคาร์บอนแบล็กลดลง โดยคาร์บอนแบล็กที่ทำหน้าที่ในการเสริมแรงจะมีลักษณะการเรียงตัวเป็นร่างแหโดยเกาะกับยางบาวด์ที่เกิดจากคาร์บอนแบล็กที่ทำปฏิกิริยากับยางธรรมชาติ ซึ่งที่ปริมาณคาร์บอนแบล็กต่ำ ทำให้มีปริมาณคาร์บอนไม่มากพอที่จะยึดเกาะกับยางบาวด์เพื่อเสริมแรงและที่คาร์บอนแบล็กต่ำ อาจเกิดยางบาวด์มากจึงมีคาร์บอนแบล็กอิสระไม่มากพอที่จะเรียงตัวเป็นกลุ่มก้อนและร่างแหเพื่อเสริมแรง ประกอบกับในการดึงยืดยางเมื่อระยะเวลาการยืดเพิ่มขึ้น จะทำให้ยางเสียสภาพในการยึดเกาะกับวัสดุเสริมแรง ทำให้แรงในการดึงยืดที่จุดขาดของยางที่ผสมคาร์บอนแบล็กปริมาณน้อยมีค่าน้อยกว่ายางธรรมชาติที่ไม่ผสมคาร์บอนแบล็ก เมื่อคาร์บอนแบล็กเพิ่มขึ้นเป็น 30 phr คาร์บอนแบล็ก N234 N339 และคาร์บอนแบล็ก N220 ที่เป็นคาร์บอนแบล็กโครงสร้างสูงและปานกลางที่จำแนกได้จากการดูดซับสาร DBP ซึ่งได้ที่กล่าวมาแล้วข้างต้นตามลำดับ จะมีค่าการดึงยืดที่จุดขาดสูงกว่าค่าเมื่อเปรียบเทียบกับค่าของยางธรรมชาติที่ไม่ผสมคาร์บอนแบล็ก ทั้งนี้เนื่องจากคาร์บอนแบล็กที่มีปริมาณสูงขึ้นเพียงพอจะสามารถเกาะกลุ่มกันและเรียงตัวเป็นร่างแหได้ และเนื่องจากคาร์บอนแบล็ก N234 N339 และ คาร์บอนแบล็ก N220 มีโครงสร้างที่สูงและปานกลางตามลำดับ ซึ่งมีลักษณะโครงสร้างของแต่ละอนุภาคในโมเลกุลเป็นร่างแหและกระจายตัวสูงและปานกลางตามลำดับ เมื่อคาร์บอนบอมีปริมาณมากพอทำให้ง่ายต่อการเกาะตัวเป็นกลุ่มก้อนและยึดเกาะกันเป็นร่างแหโดยมียางบาวด์เป็นแกน ซึ่งตรงข้ามกับคาร์บอนแบล็กโครงสร้างต่ำ (N326) ที่มีโครงสร้างของแต่ละอนุภาคในโมเลกุลเป็นกลุ่มก้อนไม่ได้เป็นร่างแหกระจายตัว ดังนั้นที่ปริมาณคาร์บอนแบล็กเท่ากันเมื่อเทียบกับคาร์บอนแบล็กโครงสร้างสูงจึงมีการเรียงตัวเป็นกลุ่มก้อนร่างแหน้อยกว่าคาร์บอนแบล็กโครงสร้างสูง คาร์บอนแบล็กโครงสร้างต่ำจึงสามารถเสริมแรงได้ต่ำกว่าค่าแรงดึงที่จุดขาดจึงน้อยกว่า และเมื่อที่คาร์บอนแบล็กมากขึ้นจนถึง 40 phr จะเห็นว่าที่คาร์บอนแบล็กโครงสร้างสูง(N234 และN339) และคาร์บอนแบล็กโครงสร้างปานกลาง (N220) จะมีค่าแรงดึงที่จุดขาดลดลงอันเนื่องมาจากมีปริมาณคาร์บอนแบล็กมากเกินไป มีการเรียงตัวเป็นกลุ่มก้อนของคาร์บอนแบล็กมากขึ้นทำให้มียางล้อมรอบคาร์บอนแบล็กน้อยลง ความสามารถในการเสริมแรงจึงลดลงเนื่องมาจากในการเสริมแรง ยางทำหน้าที่ในการรับแรงและกระจายแรงมายังอนุภาคคาร์บอนแบล็ก แต่เมื่อคาร์บอนมีปริมาณมากเกินไปทำให้มีคาร์บอนแบล็กบางส่วนเกาะตัวเป็นกลุ่มใหญ่ ซึ่งคาร์บอนแบล็กระหว่าง อนุภาคยึดติดกันด้วยแรงทางกายภาพเมื่อเกาะตัวเป็นกลุ่มใหญ่โดยไม่มียางธรรมชาติล้อมรอบ ทำให้ความแข็งแรงลดลง ทำให้สมบัติในการกระจายแรงลดลงอันเนื่องมาจากการเกาะกลุ่มเป็นกลุ่มใหญ่ แรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคคาร์บอนแบล็กที่มีค่าน้อยกว่าแรงระหว่างพันธะของอะตอมยางธรรมชาติกับยางธรรมชาติและพันธะของอนุภาคของคาร์บอนแบล็กกับยางธรรมชาติของยางบาวด์ ทำให้สมบัติในการเสริมแรงลดลง ซึ่งต่างกับคาร์บอนแบล็กโครงสร้างต่ำ

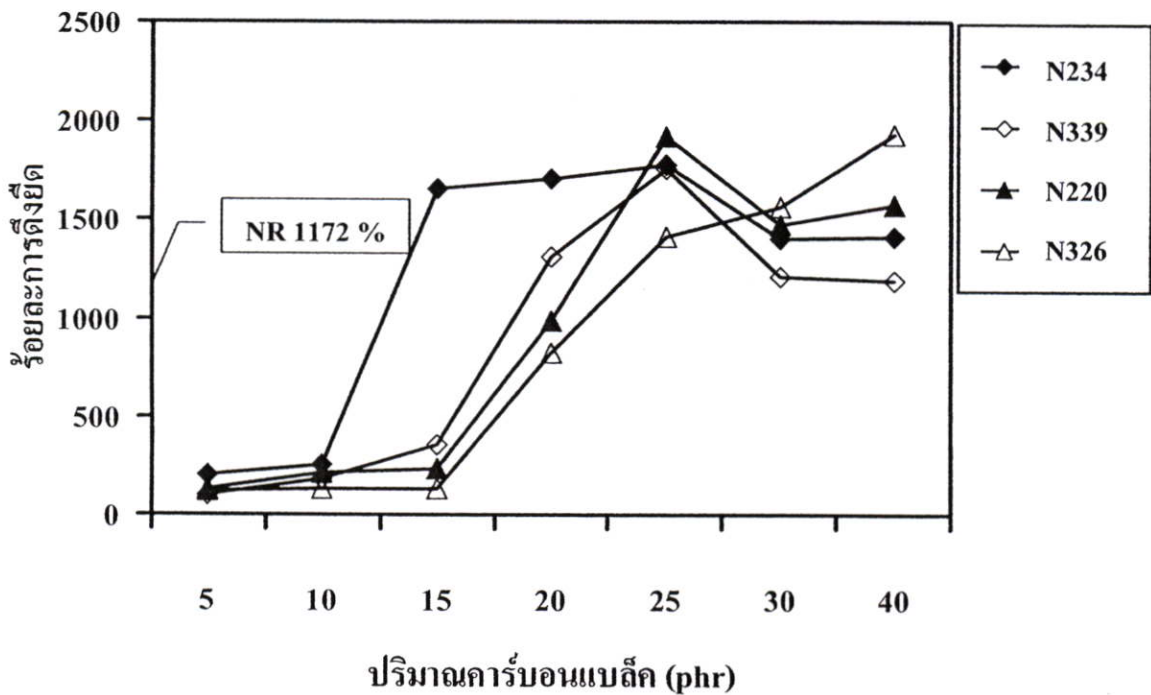
(N326) ที่ปริมาณคาร์บอนแบล็กเดียวกัน โดยคาร์บอนแบล็กมีการกระจายมากขึ้นแต่ยังไม่ได้เกาะตัวเป็นกลุ่มก้อนมากจนลดสมบัติการเสริมแรง แต่เริ่มมีแนวโน้มการเกาะตัวเป็นกลุ่มก้อนมากขึ้น โดยแสดงได้จากค่าแรงดึงยึดที่จุดขาดเริ่มมีแนวโน้มเข้าใกล้ค่าหนึ่ง

4.4.2 ร้อยละการดึงยึดที่จุดขาด

รูปที่ 4.10 แสดงร้อยละการดึงยึดที่จุดขาดเปรียบเทียบตามลักษณะ โครงสร้างของคาร์บอนแบล็กที่ผสม เรียงจากสูง ได้แก่ N234 ไปจนถึงค่าต่ำ คือ N326 แสดงให้เห็นถึงแนวโน้มร้อยละการดึงยึดที่จุดขาดสูงขึ้นจนถึงช่วงปริมาณคาร์บอนแบล็ก 25 phr ซึ่งเป็นกับทุกอนุภาคคาร์บอนแบล็ก และเมื่อปริมาณคาร์บอนแบล็กสูงกว่า 25 phr คาร์บอนแบล็ก ชนิด N234 N339 และ N220 ซึ่งมีลักษณะโครงสร้างสูงและปานกลางตามลำดับ จะมีแนวโน้มร้อยละการดึงยึดที่จุดขาดลดลง ในขณะที่ N326 มีแนวโน้มร้อยละการดึงยึดที่จุดขาดสูงขึ้นต่อไป

เมื่อเปรียบเทียบกับค่าร้อยละการดึงยึดที่จุดขาดของยางธรรมชาติที่ไม่ผสมคาร์บอนแบล็ก พบว่า คาร์บอนแบล็กที่ปริมาณน้อยตั้งแต่ 5-10 phr จะมีค่าร้อยละการดึงยึดที่จุดขาดน้อยกว่ายางธรรมชาติที่ผสมคาร์บอนแบล็กทั้งนี้อาจเนื่องมาจาก ที่ปริมาณคาร์บอนแบล็กน้อย ทำให้อนุภาคคาร์บอนไม่มากพอที่จะสามารถเรียงตัวเป็นร่างแหที่ทำให้มีสมบัติในการเสริมแรงได้ อีกทั้งอาจเกิดยางบาดฉีกซึ่งเมื่อคาร์บอนแบล็กต่ำ คาร์บอนแบล็กที่ไม่ได้สร้างพันธะกับยางธรรมชาติอาจมีไม่มากพอที่จะเกาะเรียงตัวเป็นร่างแหเพื่อเสริมแรง อีกทั้งยางธรรมชาติซึ่งปกติจะเกิดพันธะกันระหว่างโมเลกุลยางธรรมชาติเอง ซึ่งเมื่อมีการผสมคาร์บอนแบล็กในยางธรรมชาติทำให้ส่วนหนึ่งของยางธรรมชาติเกิดพันธะกับคาร์บอนแบล็กเป็นยางบาด ทำให้จำนวน โมเลกุลของยางธรรมชาติ โมโนเมอร์ที่สร้างพันธะเกิดเป็นพอลิเมอร์มีจำนวนน้อยลง ทำให้ความแข็งแรง โมเลกุลพอลิเมอร์ยางธรรมชาติน้อยกว่า เมื่อเทียบกับยางธรรมชาติไม่ใส่คาร์บอนแบล็ก อีกทั้งคาร์บอนแบล็กที่ปริมาณน้อย ไม่สามารถช่วยในการเสริมแรง ทำให้ร้อยละการดึงยึดที่ช่วงปริมาณคาร์บอนแบล็กน้อยๆ มีค่าต่ำ เมื่อปริมาณคาร์บอนแบล็กเพิ่มเป็น 20 phr ค่าร้อยละการดึงยึดของคาร์บอนแบล็ก N234 และ N339 ซึ่งมีลักษณะโครงสร้างสูงจะมีค่าร้อยละการดึงยึดสูงกว่ายางธรรมชาติที่ไม่ผสมคาร์บอนแบล็ก ทั้งนี้เนื่องมาจาก คาร์บอนแบล็ก โครงสร้างมีลักษณะการเรียงตัวระหว่างอนุภาคเป็นร่างแหซับซ้อน เมื่อมีปริมาณคาร์บอนในเนื้อยางมากขึ้นทำให้อนุภาคคาร์บอนแบล็กมีการเกาะเรียงตัวกันเป็นร่างแหต่อจากแกนยางบาดซึ่งช่วยในการเสริมแรงมากขึ้น ทำให้เมื่อมีการดึงยึดมากขึ้นคาร์บอนแบล็กที่ช่วยในการเสริมแรงทำใหยางสามารถยืดไปได้มากกว่ายางที่ไม่ได้ใส่สารเสริมแรง และตรงข้ามกับคาร์บอนแบล็ก โครงสร้างต่ำกว่า (N220 และ N326) ซึ่งการเรียงตัวเป็นร่างแหยังไม่มากพอที่จะเสริมแรงทำให้สามารถยืดไปได้ไม่มากเท่าคาร์บอนแบล็ก โครงสร้างสูง เมื่อปริมาณคาร์บอนแบล็กเพิ่มขึ้นมากกว่า 20 phr คาร์บอนแบล็ก ชนิด N234 N339 และ N220 จะมีแนวโน้มร้อยละการดึงยึดที่จุดขาดลดลง ทั้งนี้เนื่องมาจากปริมาณคาร์บอนแบล็กที่เพิ่มขึ้น จนมี

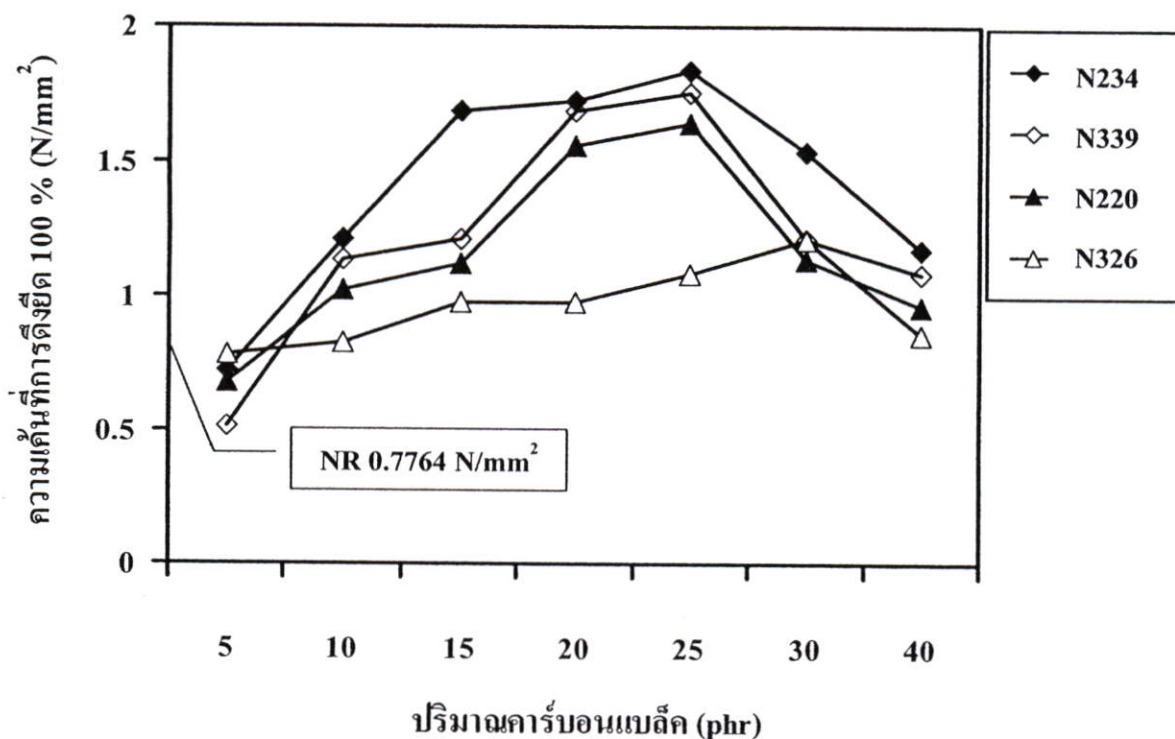
ค่ามากพอที่จะทำให้คาร์บอนบอนที่มีการเรียงตัวเป็นกลุ่มก้อนใหญ่มากขึ้นทำให้ความสามารถในการเสริมแรงลดลงอันเนื่องมาจาก การเกาะกลุ่มเป็นกลุ่มใหญ่ แรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคคาร์บอนแบล็กที่มีค่าน้อยกว่าแรงระหว่างพันธะของอะตอมยางธรรมชาติกับยางธรรมชาติ ทำให้เมื่อมีการดึงยืดมากขึ้นการขาดจะเกิดขึ้นในส่วนระหว่างอนุภาคคาร์บอนแบล็ก ที่เป็นกลุ่มก้อนใหญ่ที่มีแรงยึดเหนี่ยวน้อยกว่าแรงระหว่างโมเลกุลของยางธรรมชาติเองและยางธรรมชาติกับอนุภาคคาร์บอนแบล็ก ซึ่งในส่วนของคาร์บอนแบล็ก N326 ที่มีโครงสร้างค้ำ แนวโน้มร้อยละการดึงยืดที่จุดขาดยังมีแนวโน้มสูงขึ้นได้ อาจเนื่องจากการเกาะกลุ่มเป็นกลุ่มใหญ่ของอนุภาคคาร์บอนแบล็กยังมีน้อยทำให้ยังสามารถเสริมแรงให้มีการยึดตัวที่จุดขาดสูงขึ้นได้อีก แต่เมื่อคาร์บอนแบล็กมีปริมาณมากเกินไปจะแสดงแนวโน้มลดลงเหมือนกับคาร์บอนแบล็กชนิดอื่น



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ของปริมาณคาร์บอนแบล็กในยางกับร้อยละการยืดตัวที่จุดขาด

4.4.3 ความต้านทานแรงดึง (Tensile Stress) ที่ร้อยละของการดึงยืด 100 (Modulus 100)

ความต้านทานแรงดึง ที่ร้อยละของการดึงยืด 100 แสดงในรูปที่ 4.11 พบว่าค่าแรงต่อพื้นที่หน้าตัดที่ร้อยละของการดึงยืด 100 มีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อปริมาณคาร์บอนแบล็กมากขึ้น จนถึงปริมาณคาร์บอนแบล็ก 30 phr และเมื่อปริมาณคาร์บอนแบล็กมากกว่า 30 phr ค่าแรงต่อพื้นที่หน้าตัดจะมีแนวโน้มลดลง แนวโน้มนี้สังเกตได้ในทุกชนิดของคาร์บอนแบล็ก



รูปที่ 4.11 ความต้านทานแรงดึง ที่ร้อยละการดึงยืด 100

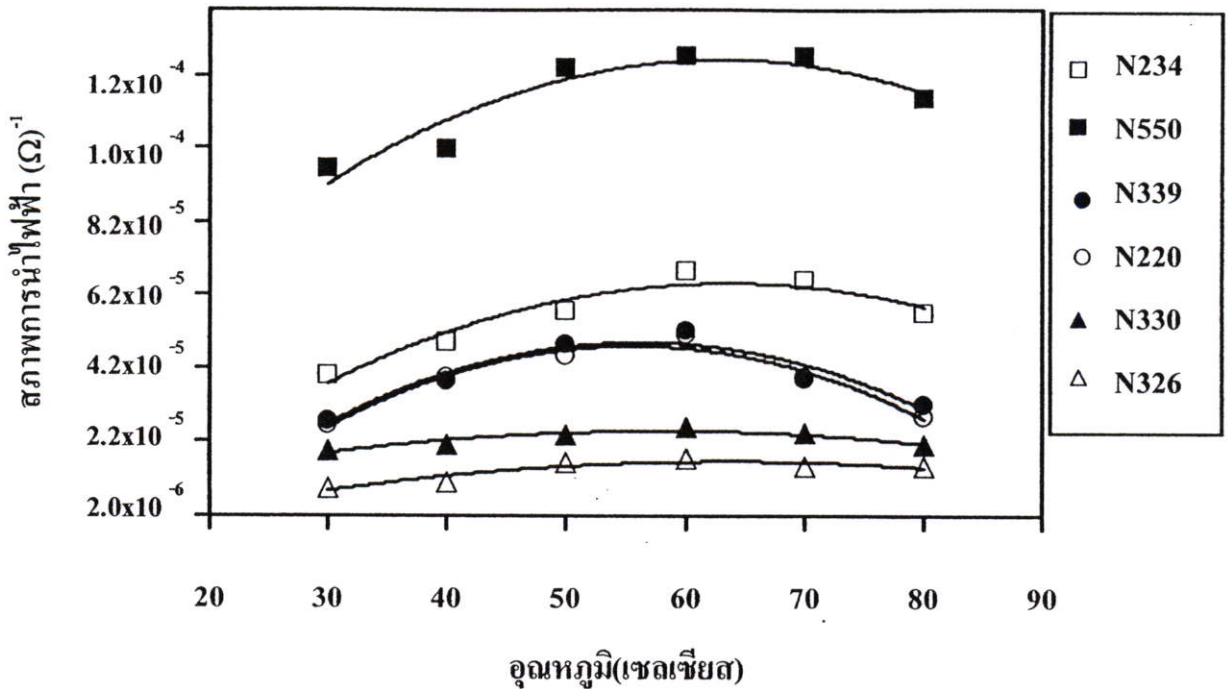
เมื่อเปรียบเทียบกับความต้านทานแรงดึงที่ร้อยละการดึงยืด 100 ของยางธรรมชาติพบว่าที่ปริมาณคาร์บอนแบล็ก 5 phr จะมีค่าความต้านทานแรงดึงน้อยกว่าค่าของยางธรรมชาติ อาจเนื่องมาจากเมื่อใช้ปริมาณคาร์บอนแบล็กต่ำ การก่อตัวเป็นกลุ่มก้อนและสร้างโครงสร้างร่างแหเพื่อเสริมแรงนั้นมีน้อยอีกทั้ง ที่ปริมาณคาร์บอนแบล็กต่ำ คาร์บอนแบล็กส่วนหนึ่งจะเกิดการสร้างพันธะกับยางธรรมชาติเกิดเป็นยางขาวด์ ทำให้เหลือยางอิสระที่จะก่อตัวเป็นโครงสร้างเพื่อเสริมแรงไม่มากพอทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงที่ร้อยละดึงยืด 100 มีค่าน้อยกว่าเมื่อเทียบกับค่าความต้านทานแรงดึงของยางที่ไม่ผสมคาร์บอนแบล็ก เมื่อปริมาณคาร์บอนแบล็กมากขึ้นจนถึง 30 phr ทำให้มีการจับตัวเป็นกลุ่มก้อนมากขึ้นมีการเรียงตัวเป็นร่างแหซับซ้อนมากขึ้นในเนื้อยาง ทำให้คาร์บอนแบล็กทำหน้าที่เสริมแรงได้มากขึ้นเมื่อมีการดึงยืดที่ยังไม่ให้เกิดการเสียหายการยึดเกาะกันระหว่างยางกับอนุภาคคาร์บอนแบล็ก คาร์บอนแบล็กจะมีประสิทธิภาพในการเสริมแรง

มากขึ้นซึ่งคาร์บอนแบล็กที่มีโครงสร้างสูงกว่าจะสามารถเสริมแรงได้มากกว่าคาร์บอนแบล็ก โครงสร้างต่ำกว่า และเมื่อคาร์บอนแบล็กมากกว่า 30 phr แนวโน้มค่าความต้านทานแรงดึงของรีออล การดึงยืดที่ 100 มีค่าลดลงอันเนื่องมาจากในปริมาณคาร์บอนแบล็กที่เพิ่มขึ้นทำให้เกิดกลุ่มของ คาร์บอนแบล็กที่ใหญ่ขึ้น โมเลกุลของอนุภาคคาร์บอนแบล็กรวมตัวกันมากขึ้นทำให้แรงยึดเหนี่ยว ของระหว่างอนุภาคคาร์บอนแบล็กที่มีค่าน้อยกว่าแรงยึดเหนี่ยวของยางธรรมชาติกับยางธรรมชาติ และยางธรรมชาติกับอนุภาคคาร์บอน เมื่อมีการดึงยืดมากขึ้นทำให้กลุ่มอนุภาคคาร์บอนแบล็กขนาดใหญ่ อันเกิดจากปริมาณคาร์บอนแบล็กสูง จะเสียสภาพการเสริมแรงมากกว่ากลุ่มอนุภาคคาร์บอน แบล็กกลุ่มเล็กๆ และเป็นร่างแห

4.5 ผลของอุณหภูมิต่อการตอบสนองต่อการนำไฟฟ้า

4.5.1 การตอบสนองต่ออุณหภูมิของสภาพการนำไฟฟ้าตามโครงสร้างคาร์บอนแบล็ก

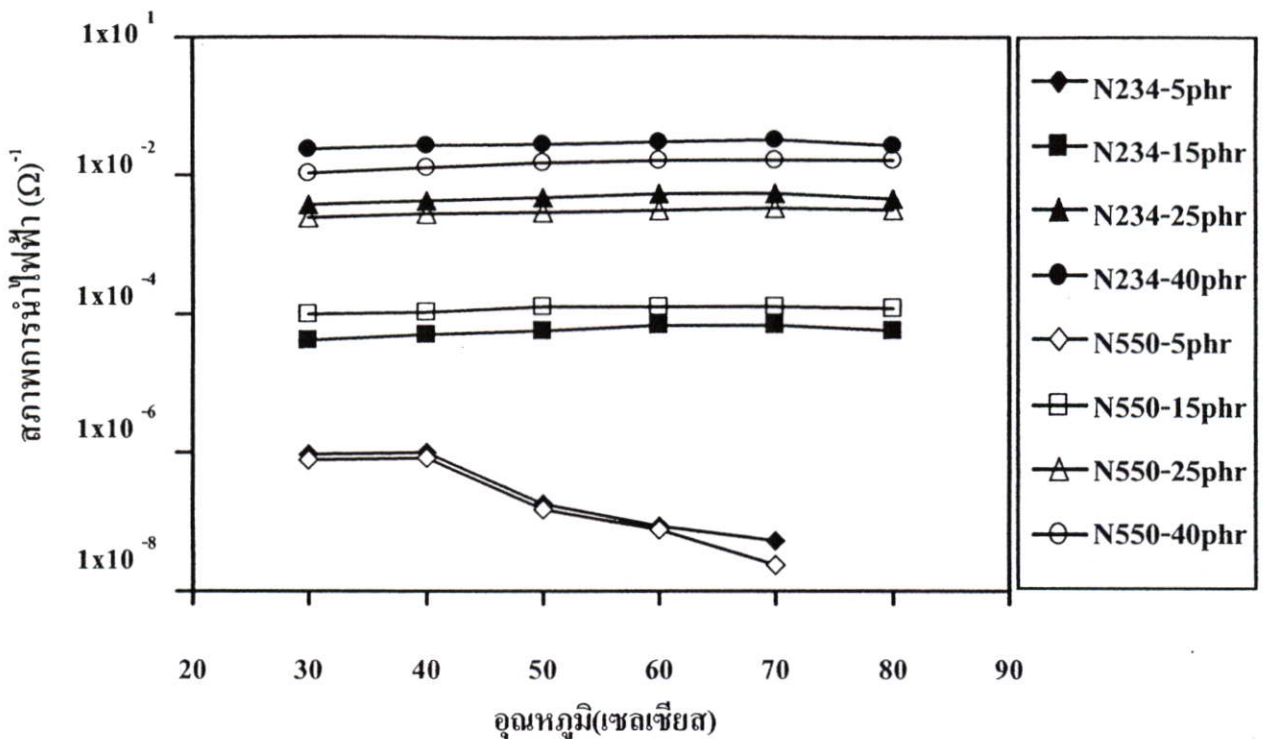
รูปที่ 4.12 แสดงการตอบสนองต่ออุณหภูมิของสภาพการนำไฟฟ้า โดยแสดงความสัมพันธ์ เปรียบเทียบตามโครงสร้างที่วัดได้จากการดูดซับ DBP ซึ่งมีค่าตั้งแต่ 74-125 ml/100g ที่ปริมาณ คาร์บอนแบล็ก 15 phr พบว่าอุณหภูมิจะส่งผลต่อสภาพการนำไฟฟ้าในลักษณะเป็นช่วงคือ ในช่วง อุณหภูมิ 30-60 องศาเซลเซียส สภาพการนำไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้น และอุณหภูมิ 70-80 องศาเซลเซียส สภาพการนำไฟฟ้ามีค่าลดลง แนวโน้มนี้เกิดขึ้นกับคาร์บอนแบล็กทุกลักษณะ โครงสร้าง ทั้งนี้อาจ เนื่องมาจากที่อุณหภูมิ 30-60 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิไม่สูงมากนัก เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นทำ ให้อิเล็กทรอนิกส์เคลื่อนที่ได้เร็วขึ้นจากการเพิ่มของอุณหภูมิทำให้พลังงานการกระตุ้นสูงขึ้น อีกทั้งการขยายตัวของเนื้อยางไม่สูงมากนักอันเนื่องจากอุณหภูมิไม่สูงมาก และจากคาร์บอนแบล็กที่ ช่วยเสริมแรงด้านการขยายตัว แต่เมื่ออุณหภูมิมากกว่า 60 องศาเซลเซียส พบว่าสภาพการนำไฟฟ้า ลดลง อันเนื่องมาจากอุณหภูมิสูงขึ้นทำให้การขยายตัวของยางมากขึ้นทำให้ระยะห่างระหว่าง อนุภาคคาร์บอนแบล็กมากขึ้นทำให้การนำไฟฟ้าลดลงเพราะกระแสไฟฟ้าผ่านได้ยากขึ้น นอกจากนี้ ยังพบว่าที่คาร์บอนแบล็ก โครงสร้างสูงที่มีลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคมากกว่าอัน เนื่องมาจากความเป็นกิ่งก้านและความซับซ้อนของอนุภาคคาร์บอนแบล็ก มีแนวโน้มการ เปลี่ยนแปลงสภาพการนำไฟฟ้าสูงกว่าที่คาร์บอนแบล็ก โครงสร้างต่ำในช่วงอุณหภูมิ 30-60 องศา เซลเซียส อันเนื่องมาจากความสามารถในการเสริมแรงสูงกว่า



รูปที่ 4.12 ผลของอุณหภูมิต่อสภาพการนำไฟฟ้า เปรียบเทียบตามโครงสร้างของคาร์บอนแบล็ก ที่ปริมาณคาร์บอนแบล็ก 15 phr

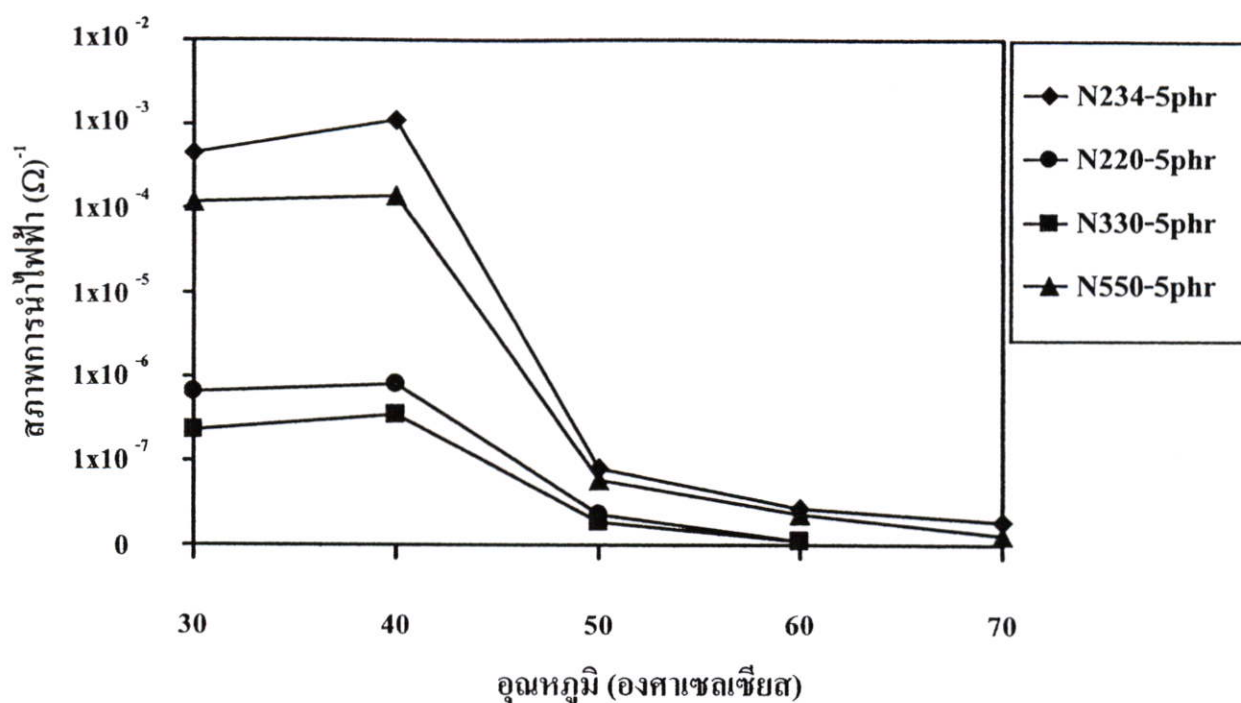
4.5.2 การตอบสนองต่ออุณหภูมิของสภาพการนำไฟฟ้าตามปริมาณคาร์บอนแบล็ก

รูปที่ 4.13 แสดงการตอบสนองต่ออุณหภูมิของสภาพการนำไฟฟ้า เปรียบเทียบตามปริมาณคาร์บอนแบล็ก ที่เติมลงในวัสดุเชิงประกอบ โดยเลือกพิจารณาเฉพาะคาร์บอนแบล็ก, N234 และ N550 เนื่องจาก N234 แทนคาร์บอนแบล็กที่มีโครงสร้างสูง และ N550 ที่มีโครงสร้างต่ำพบว่า อุณหภูมิส่งผลต่อสภาพการนำไฟฟ้าในลักษณะเป็นช่วงตามปริมาณคาร์บอนแบล็กคือ ที่คาร์บอนแบล็กตั้งแต่ 15 phr อุณหภูมิส่งผลต่อสภาพการนำไฟฟ้าเป็นไปตามรูป 4.13 คือการนำไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นในช่วงอุณหภูมิ 30-60 องศาเซลเซียส และมีแนวโน้มลดลงที่อุณหภูมิมากกว่า 70 องศาเซลเซียส ในขณะที่เมื่อใช้คาร์บอนแบล็ก 5 phr อุณหภูมิส่งผลต่อสภาพการนำไฟฟ้าในลักษณะเป็นช่วงคือที่อุณหภูมิ 30-40 องศาเซลเซียส การนำไฟฟ้าจะสูงขึ้นเล็กน้อย และนั่นคือการลดลงของการนำไฟฟ้าจะเกิดเร็วขึ้น ที่อุณหภูมิมากกว่า 40 องศาเซลเซียสสภาพการนำไฟฟ้าจะมีค่าลดลงซึ่งจะกล่าวต่อไป โดยจากรูปจะพบว่าที่คาร์บอนแบล็กตั้งแต่ 15 phr ขึ้นไปอุณหภูมิที่มีผลต่อสภาพการนำไฟฟ้าของยางที่ผสมคาร์บอนแบล็ก แต่เมื่อเทียบกับการเปลี่ยนขนาดตามระยะยืดแล้วสภาพการนำไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ทั้งนี้เนื่องมาจากแรงเชิงกลที่กระทำต่อชิ้นงานที่ทำให้เกิดการยืดตัวมีผลต่อการขยายตัวอย่างมากกว่าอุณหภูมิ ทำให้เกิดระยะห่างระหว่างอนุภาคคาร์บอนแบล็กมากกว่า การนำไฟฟ้าจึงลดลงมากกว่า การนำไฟฟ้าจึงขึ้นกับอุณหภูมิน้อยกว่าแรงเชิงกล



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิที่มีสภาพการนำไฟฟ้า โดยแสดงความสัมพันธ์เปรียบเทียบตามปริมาณคาร์บอนแบล็ก

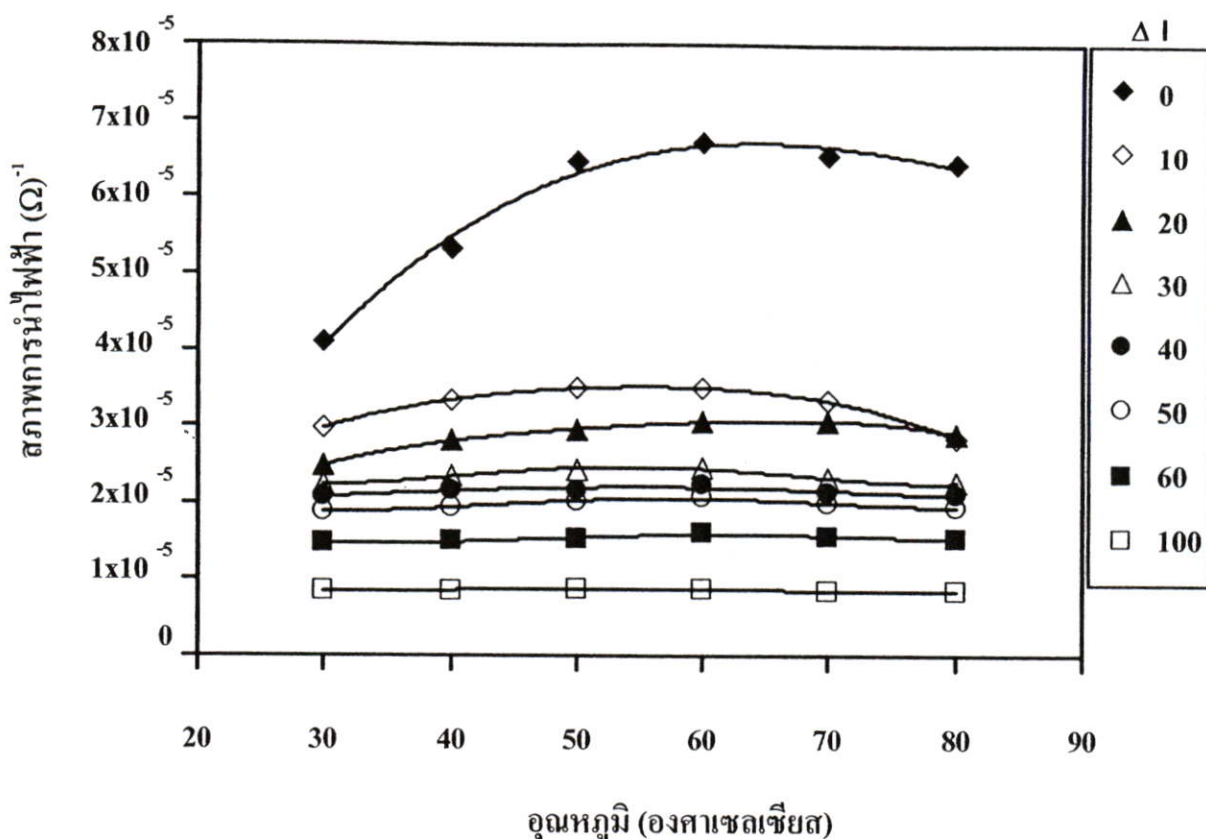
เนื่องจากการพิจารณาผลของคาร์บอนแบล็กที่ 5 phr ในรูปที่ 4.13 พบว่าอุณหภูมิมิมีผลต่อการปรับปรุงของสภาพการนำไฟฟ้า ดังนั้น จึงได้พิจารณาชนิดของคาร์บอนแบล็กเพื่อให้ครอบคลุมทั้งขนาดอนุภาคและโครงสร้าง โดยพิจารณา N220 N234 N330 และ N550 เป็นตัวแบบของตัวอย่างทั้งหมด ซึ่งสามารถแสดงผลของการทดลองได้ใน รูปที่ 4.14 แสดงการตอบสนองต่ออุณหภูมิของสภาพการนำไฟฟ้า เปรียบเทียบที่ ปริมาณคาร์บอนแบล็ก 5 phr จากรูป อุณหภูมิส่งผลต่อสภาพการนำไฟฟ้าในลักษณะเป็นช่วงคือ ที่อุณหภูมิ 30-40 องศาเซลเซียส สภาพการนำไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย และที่อุณหภูมิมากกว่า 40 องศาเซลเซียส สภาพการนำไฟฟ้าจะมีค่าลดลงจนเข้าใกล้ค่าหนึ่ง ทั้งนี้เนื่องมาจากในช่วงอุณหภูมิ 30-40 องศาเซลเซียสการนำไฟฟ้าเป็นไปตามรูปที่ 4.14 คือการขยายตัวมีค่าน้อยกว่าพลาตโง่จากรูปร่างของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ และเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 40 องศาเซลเซียส สภาพการนำไฟฟ้าลดลงอันเนื่องมาจากอุณหภูมิจะส่งผลต่อการขยายตัวของยางธรรมชาติมากขึ้น ทำให้ระยะห่างระหว่างอนุภาคคาร์บอนแบล็กในยางที่ขยายตัวมีมากขึ้น การนำไฟฟ้าจึงลดลง แต่จะเข้าใกล้ค่าหนึ่งเนื่องมาจากอิทธิพลการขยายตัวของยางธรรมชาติจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นมีค่าไม่มากจากการต้านทานการดึงของยางเองเมื่อเทียบกับการขยายตัวจากแรงเชิงกลเกิดการยืดตัว



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิที่มีสภาพการนำไฟฟ้า โดยแสดงความสัมพันธ์เปรียบเทียบที่คาร์บอนแบล็ก 5 phr

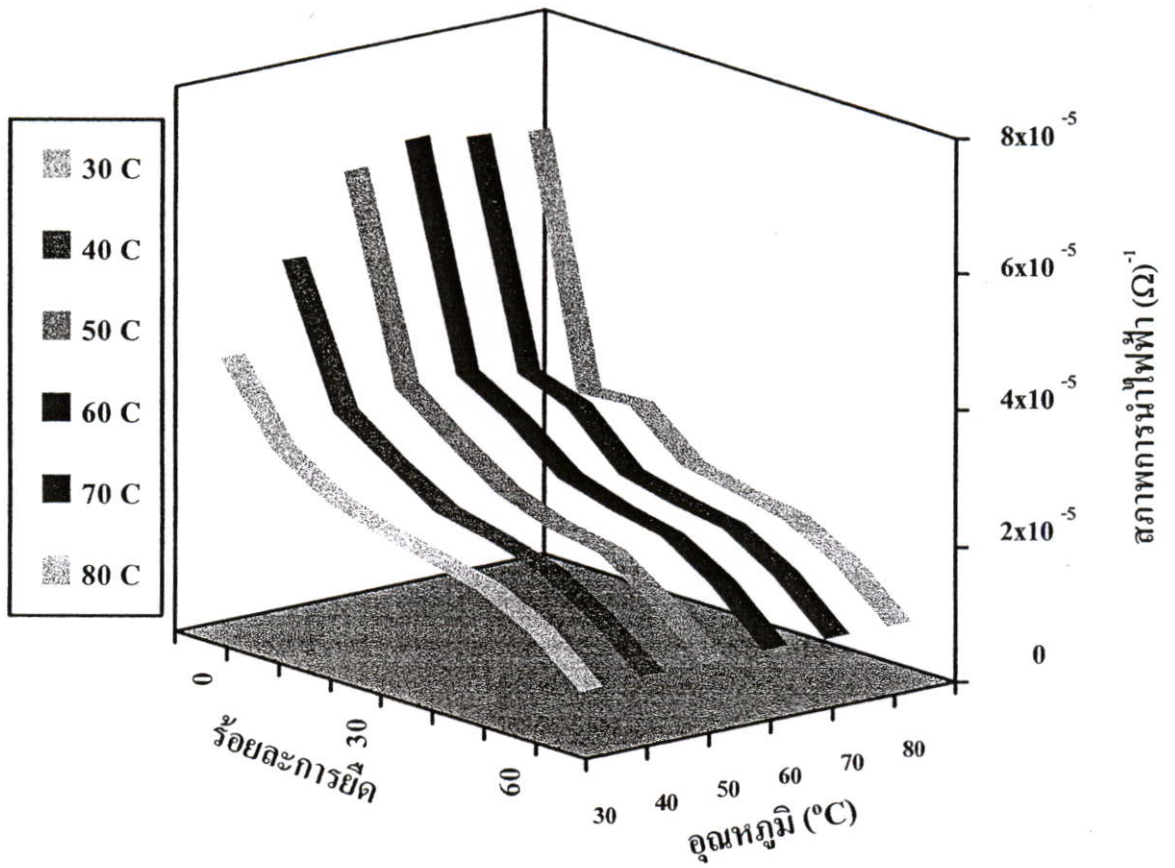
4.5.3 การตอบสนองต่ออุณหภูมิของสภาพการนำไฟฟ้าตามระยะการดิ่งยัด

รูปที่ 4.15 แสดงผลของอุณหภูมิต่อสภาพการนำไฟฟ้าของที่ระยะการดิ่งยัด (ΔI) ต่างๆ ในกรณีของคาร์บอนแบล็ก N234 ปริมาณ 15 phr พบว่าเมื่อระยะการยัดเพิ่มขึ้นอุณหภูมิจะส่งผลต่อสภาพการนำไฟฟ้าลดลงเมื่อเทียบกับขางที่ไม่มีการดิ่งยัด ทั้งนี้เนื่องมาจากในการเพิ่มระยะการยัดโดยแรงเชิงกลจะทำให้อนุภาคเคลื่อนตัวห่างจากกันมากขึ้น โดยในแต่ละระยะการดิ่งยัดจะทำให้การนำไฟฟ้าลดลงและเมื่อศึกษาความสัมพันธ์ของอุณหภูมิที่มีต่อแต่ละระยะการดิ่งยัดพบว่า เมื่อเพิ่มระยะการดิ่งยัดมากขึ้นนอกจากระยะห่างระหว่างอนุภาคมากขึ้นแล้วยังเกิดความเครียดมากขึ้นในแต่ละชั้นงานตามระยะการดิ่งยัดที่มากขึ้น อุณหภูมิที่สูงขึ้นที่ส่งผลต่อการขยายตัวจึงมีผลน้อยกว่าการยัดตัวจากแรงเชิงกล จึงทำให้เมื่อระยะการยัดตัวมากขึ้นอุณหภูมิจะส่งผลต่อสภาพการนำไฟฟ้าน้อยลง



รูปที่ 4.15 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อสภาพการนำไฟฟ้าของที่ระยะการคิ่งยัดต่างๆในกรณี ของคาร์บอนแบล็ก N234 ปริมาณ 15 phr

รูปที่ 4.16 แสดงการตอบสนองต่ออุณหภูมิของสภาพการนำไฟฟ้าของที่ระยะการคิ่งยัด ของคาร์บอนแบล็ก N234 ปริมาณ 15 phr แสดงในลักษณะสามมิติ จากรูปพบว่าที่ระยะการคิ่งยัดต่ำๆ อุณหภูมิจะส่งผลต่อสภาพต่อสภาพการนำไฟฟ้าได้สูงกว่าที่สภาพการคิ่งยัดสูงๆ ซึ่งเป็นไปตามรูปที่ 4.15 โดยในช่วงการคิ่งยัดต่ำ อุณหภูมิที่สูงกว่า 40 องศาเซลเซียส จะมีการเปลี่ยนแปลงสภาพการนำไฟฟ้ามากกว่าในช่วงการคิ่งยัดสูง แสดงได้จากค่าความชันของกราฟแต่ละอุณหภูมิ เมื่อการคิ่งยัดสูงขึ้นความชันที่แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงการนำไฟฟ้ามีค่าลดลงในทุกอุณหภูมิซึ่งแสดงว่าผลของอุณหภูมิจะส่งผลต่อสภาพการนำไฟฟ้าลดลงเมื่อมีการคิ่งยัดเพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 4.16 กราฟ 3 มิติ แสดงผลของอุณหภูมิที่มีต่อสภาพการนำไฟฟ้าของที่ระยะการคั่งยัด ของคาร์บอนแบล็ก N234 ปริมาณ 15 phr

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

การเพิ่มสมบัติในการนำไฟฟ้าของยางธรรมชาติโดยการผสมกับคาร์บอนแบล็กที่มีลักษณะต่างกัันพบว่า การผสมคาร์บอนแบล็กลงในยางนอกจากเพิ่มสมบัติเชิงกลของยาง ยังสามารถเพิ่มสมบัติในการนำไฟฟ้า ยางธรรมชาติที่ไม่ใส่คาร์บอนแบล็ก มีค่าการนำไฟฟ้าโดยประมาณ คือ $10^{-14} \Omega^{-1}$ ซึ่งการนำไฟฟ้าอยู่ในช่วงที่เป็นฉนวนไฟฟ้า เมื่อผสมคาร์บอนแบล็กลงในยางที่ปริมาณ 5 phr จนถึง 25 phr การนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นในระดับ 10^{-8} - $10^{-2} \Omega^{-1}$ โดยประมาณซึ่งการนำไฟฟ้าอยู่ในช่วงวัสดุกึ่งตัวนำไฟฟ้าจนถึงวัสดุนำไฟฟ้า เมื่อเพิ่มปริมาณคาร์บอนแบล็กลงในยางมากกว่า 25 phr ไม่ทำให้การนำไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงมากนัก ซึ่งช่วงการนำไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นจากการผสมคาร์บอนแบล็กลงในยางธรรมชาติ สามารถนำมาใช้ประโยชน์ในการผลิตอุปกรณ์จำพวกเซ็นเซอร์ได้ ซึ่งปัจจัยที่ส่งผลต่อการนำไฟฟ้าของวัสดุเชิงประกอบได้แก่ ปัจจัยทางกายภาพของคาร์บอนแบล็กที่ผสม สมบัติเชิงกลที่กระทำกับวัสดุเชิงประกอบและอุณหภูมิ

5.1.1 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติกับคาร์บอนแบล็ก

ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติกับคาร์บอนแบล็กแสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวของคาร์บอนแบล็กในเนื้อยาง โดยพบว่าเมื่อปริมาณคาร์บอนแบล็กที่ผสมในเนื้อยางเพิ่มขึ้นจะทำให้สัดส่วนของคาร์บอนแบล็กในเนื้อยางเพิ่มขึ้น การเกาะกลุ่มกันของอนุภาคคาร์บอนแบล็กเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับระหว่างสัณฐานวิทยาของคาร์บอนแบล็ก โครงสร้างสูงและสัณฐานวิทยาของคาร์บอนแบล็ก โครงสร้างต่ำพบว่าคาร์บอนแบล็ก โครงสร้างสูงจะมีลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคคาร์บอนแบล็กในเนื้อยางธรรมชาติมากกว่าและลักษณะการจัดเรียงตัวของอนุภาคคาร์บอนแบล็กในเนื้อยางต่อเนื่องกันออกจากแกนกลางของกลุ่มอนุภาคคาร์บอนแบล็กมากกว่าคาร์บอนแบล็ก โครงสร้างต่ำ

5.1.2 ผลของปัจจัยทางกายภาพของคาร์บอนแบล็กที่มีต่อสมบัตินำไฟฟ้าของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ

ปัจจัยที่ส่งผลต่อสมบัตินำไฟฟ้าของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่ผสมคาร์บอนแบล็กได้แก่ ปริมาณคาร์บอนแบล็ก ขนาดอนุภาคคาร์บอนแบล็ก และลักษณะ โครงสร้างคาร์บอนแบล็ก จากผลการศึกษาพบว่า สภาพการนำไฟฟ้าของเชิงประกอบยางธรรมชาติจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณ

คาร์บอนแบล็กที่ผสม แต่แนวโน้มค่าการนำไฟฟ้าจะมีค่าเข้าใกล้ค่าหนึ่งเมื่อปริมาณคาร์บอนแบล็กที่ผสมเพิ่มขึ้น ขนาดอนุภาคคาร์บอนแบล็กส่งผลต่อสมบัตินำไฟฟ้าของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติคือเมื่อขนาดอนุภาคคาร์บอนแบล็กที่ผสมกับยางธรรมชาติมีขนาดใหญ่ขึ้น จะส่งผลให้แนวโน้มสมบัติในการนำไฟฟ้าของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติมีค่าลดลง และโครงสร้างคาร์บอนแบล็กส่งผลต่อสมบัติการนำไฟฟ้าคือ เมื่อผสมคาร์บอนแบล็กโครงสร้างต่างๆ กับยางธรรมชาติ ค่าการนำไฟฟ้าของวัสดุเชิงประกอบจะมีแนวโน้มค่ามากขึ้นตามลักษณะโครงสร้างคาร์บอนแบล็กที่มีค่าสูงขึ้น โดยลักษณะโครงสร้างคาร์บอนแบล็กวัดได้จากร้อยละการดูดซับ DBP ลักษณะคาร์บอนแบล็กที่มีโครงสร้างสูงกว่าจะสามารถดูดซับ DBP ได้มากกว่าคาร์บอนแบล็กที่มีค่าต่ำ

5.1.3 ผลจากสมบัติเชิงกลที่มีต่อสมบัตินำไฟฟ้าของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ

สมบัติเชิงกลได้แก่การดึงยืด ส่งผลต่อวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่ผสมกับคาร์บอนแบล็ก โดยลักษณะการดึงยืดที่เพิ่มขึ้นจะทำให้สมบัติในการนำไฟฟ้าลดลงซึ่งเกิดขึ้นกับคาร์บอนแบล็กทุกชนิดและทุกความเข้มข้น ที่ปริมาณคาร์บอนแบล็กที่ต่ำจะพบว่าการนำไฟฟ้ามีการลดลงมากกว่าที่ปริมาณคาร์บอนแบล็กสูง

5.1.4 ผลของปัจจัยเชิงกลที่เป็นผลมาจากการผสมคาร์บอนแบล็ก

การผสมคาร์บอนแบล็กลงในยางธรรมชาติ เพื่อทำเป็นวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติกับคาร์บอนแบล็กจะสามารถเพิ่มสมบัติเชิงกลของยางได้ดีขึ้น โดยเมื่อผสมคาร์บอนแบล็กในเนื้อยางในปริมาณสูงขึ้นสมบัติเชิงกลคือความต้านทานการดึงที่จุดขาด ร้อยละการยืดตัวที่จุดขาด และความต้านทานการดึงที่ร้อยละการยืดตัว 100 มีแนวโน้มค่าเพิ่มขึ้นจนถึงช่วงหนึ่งแล้วลดลง คาร์บอนแบล็กที่มีโครงสร้างของคาร์บอนแบล็กสูงกว่าจะสามารถเพิ่มสมบัติเชิงกลได้ดีกว่าคาร์บอนแบล็กโครงสร้างต่ำกว่า เมื่อเปรียบเทียบสมบัติทั้งสามกับยางธรรมชาติพบว่า การเพิ่มสมบัติความต้านทานแรงดึงที่จุดขาดดีกว่ายางธรรมชาติสามารถใช้กับคาร์บอนแบล็กบางชนิดตั้งแต่ช่วงปริมาณ 20 ถึง 30 ร้อยละปริมาณ โดยน้ำหนักในยาง การเพิ่มปริมาณคาร์บอนแบล็กสูงไปกว่านี้จะทำให้สมบัติของวัสดุลดลง การเพิ่มสมบัติการยืดตัวสูงสุดที่จุดขาดดีกว่ายางธรรมชาติสามารถผสมคาร์บอนแบล็กบางชนิดกับยางตั้งแต่ 15 ถึง 25 ร้อยละปริมาณ โดยน้ำหนักในยาง การเพิ่มปริมาณคาร์บอนแบล็กสูงมากกว่านี้จะทำให้สมบัติการยืดตัวสูงสุดที่จุดขาดโดยมากลดลง และการเพิ่มสมบัติการต้านทานการดึงที่ร้อยละการดึงยืด 100 ให้ดีกว่ายางธรรมชาติ สามารถใช้กับปริมาณคาร์บอนแบล็กทุกชนิดที่มากกว่า 10 ร้อยละปริมาณ โดยน้ำหนักในยางแต่ปริมาณคาร์บอนแบล็กที่มากกว่า 25 ร้อยละ โดยน้ำหนักในยาง ทำให้สมบัติการต้านทานการดึงที่ร้อยละการดึงยืดลดลง

5.1.5 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อสมบัติการนำไฟฟ้าของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ

การนำไฟฟ้าที่เป็นผลมาจากการเปลี่ยนของอุณหภูมิของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติกับคาร์บอนแบล็ก โดยได้ศึกษาอุณหภูมิที่ส่งผลต่อการนำไฟฟ้าตามปัจจัยได้แก่ปริมาณคาร์บอนแบล็ก ชนิดลักษณะ โครงสร้างคาร์บอนแบล็ก และที่ร้อยละการคั่งยัดต่างๆ พบว่าที่ปริมาณคาร์บอนแบล็กต่ำ ผลของอุณหภูมิจะส่งผลต่อสภาพการนำไฟฟ้าได้มากกว่าที่ปริมาณที่คาร์บอนสูง โดยที่ปริมาณคาร์บอนแบล็กต่ำ การเปลี่ยนแปลงในช่วงอุณหภูมิไม่มาก จะทำให้สภาพการนำไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไป คาร์บอนแบล็กทุกชนิดและลักษณะ โครงสร้างคาร์บอนแบล็กจะส่งผลในแนวโน้มนเดียวกันเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ และการคั่งยัดที่สูงขึ้นอุณหภูมิจะทำให้ต่อสมบัติการนำไฟฟ้าลดลง โดยที่ระยะการคั่งยัดสูงขึ้นการนำไฟฟ้าของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติกับคาร์บอนแบล็กจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไม่มากเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิสูงขึ้น สรุปโดยรวมที่ช่วงอุณหภูมิไม่สูงมาก สภาพการนำไฟฟ้าของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติกับคาร์บอนแบล็กมีค่าการเปลี่ยนแปลงไม่มาก

ยางธรรมชาติมีสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้าโดยมีการนำไฟฟ้าอยู่ในช่วง $10^{-14} \Omega^{-1}$ สามารถเพิ่มสมบัตินำไฟฟ้าด้วยการผสมคาร์บอนแบล็กลงในเนื้อยางธรรมชาติ สมบัติในการนำไฟฟ้าของวัสดุเชิงประกอบที่เพิ่มขึ้นจากการผสมกับคาร์บอนแบล็ก สามารถเพิ่มการนำไฟฟ้าให้อยู่ในช่วงวัสดุกึ่งตัวนำไปจนถึงวัสดุนำไฟฟ้า ประกอบกับสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติกับคาร์บอนแบล็กที่ได้ที่มีการยืดหยุ่นตัวสูงขึ้น ความต้านทานการคั่งและการฉีกขาดสูงขึ้น จึงอาจใช้เป็นแนวทางเพื่อผลิตวัสดุเชิงประกอบจากยางธรรมชาติผสมกับคาร์บอนแบล็กเป็นเซ็นเซอร์ในอุตสาหกรรมชิ้นส่วนรับแรงกระแทกสูงเพื่อตรวจสอบการเสื่อมสภาพ ไปจนถึงใช้เป็นวัสดุตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงระยะของชิ้นงานเช่น บานพับประตู

5.2 ข้อเสนอแนะ

การเพิ่มสมบัติในการนำไฟฟ้าของยางธรรมชาติโดยการผสมกับคาร์บอนแบล็กจะสามารถเพิ่มการนำไฟฟ้าได้ในช่วงหนึ่ง แต่จากการประยุกต์การเพิ่มสมบัติในการนำไฟฟ้าของยางธรรมชาติ โดยการเติมวัสดุนำไฟฟ้าอื่นๆที่มีค่าการนำไฟฟ้าสูงกว่าคาร์บอนแบล็ก ลงในยางธรรมชาติอาจเป็นแนวทาง เพิ่มสมบัติในการนำไฟฟ้าได้สูงกว่าคาร์บอนแบล็กแต่อาจทำให้สมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติลดลง จึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจที่จะศึกษาการเพิ่มสมบัติการนำไฟฟ้าของยางธรรมชาติโดยการผสมคาร์บอนแบล็กร่วมกับวัสดุนำไฟฟ้าชนิดอื่นเพื่อเพิ่มสมบัติในการนำไฟฟ้าให้สูงขึ้นและสามารถคงสมบัติเชิงกลที่ดีของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติเพื่อการใช้งานที่หลากหลายเพิ่มขึ้น

แนวทางหนึ่งหลังจากประยุกต์สมบัติในการนำไฟฟ้าของยางธรรมชาติจากการผสมคาร์บอนแบล็กคือการปรับปรุงสมบัติการยึดติดกับชิ้นงาน เช่น แผ่นโลหะ วัสดุพลาสติก อื่นๆ เป็นต้น เพื่อ

ส่งเสริมและศึกษาความเป็นไปได้ในการนำวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติกับคาร์บอนแบล็กไปใช้เป็นเส้นเชอร์มากขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] Knite M., Teteris V., Kiploka A. and Kaupuzs J. “Polyisoprene-carbon black nanocomposites as tensile strain and pressure sensor materials” **Sensors and Actuators A**, vol. 110, 2004. pp. 142 – 149.
- [2] Aneli J.N., Zaikov G.E. “Effects of Mechanical Deformations on the Structurization and electric conductivity of electric conducting polymer composites” **J. Applied Polymer Science**, vol. 74, 1999. pp. 601 – 621.
- [3] Flandin L., Chang A., Nazarenko S., Hiltner A. and Baer E. “Effect of strain on the properties of an ethylene octane elastomer with conductive carbon fillers” **J. Applied Polymer Science**, vol. 76, 2000. pp. 894-905.
- [4] Flandin L., Brechet Y. and Cavaille J.-Y. “Electrically conductive polymer nanocomposites as deformation sensors” **Composites Science and Technology**, vol. 61, 2001. pp. 895 – 901.
- [5] Knite M., Teteris V., Polyakov B. and Erts D. “Electric and elastic properties of conductive polymeric nanocomposites on macro- and nanoscales” **Materials Science & Engineering C**, vol. 19, 2002. pp. 15-19.
- [6] Zhang X.W., Pan Y., Zheng Q. and Yi X-S. “Time dependence of piezoresistance for the conductor filled polymer composites” **J. Polymer Science:Part B**, vol. 38, 2000. pp. 2739–2749.
- [7] Knite M., Teteris V. and Kiploka A. “The effect of plasticizing agent on strain-induced change of electric resistivity of carbon-polyisoprene nano-composites” **Materials Science & Engineering C**, vol. 23, 2003. pp. 787–790.
- [8] Wu T-M. and Cheng J-C. “Morphology and electrical properties of carbon-black-filled poly(ϵ -caprolactone)/poly(vinyl butyral)” **J. Applied Polymer Science**, vol. 88, 2003. pp. 1022–1031.
- [9] 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 Metals**, vol. 135-136, 2003. pp. 99–100.

เอกสารอ้างอิง(ต่อ)

- [10] Sau K.P., Chaki T.K. and.Khastgir D. “The change in conductivity of a rubber-carbon black composite subjected to different modes of pre-strain” **Composites Part A**, vol. 29A, 1998. pp. 363–37
- [11] Ali M.H.and Hashem A.Abo. “Percolation concept and the electrical conductivity of carbon black-polymer composites 2: *Non-crystallisable chloroprene rubber mixed with HAF carbon black*” **J. Materials Processing Technology**, vol. 68, 1997. pp. 163–167.
- [12] Ail M.H.and Hashem A. Abo. “Percolation concept and the electrical conductivity of carbon black-polymer composites 3: *Crystallisable chloroprene rubber mixed with FEF carbon black*” **J. Materials Processing Technology**, vol. 68, 1997. pp. 168–171.
- [13] ศุภรัตน์ นवलสุวรรณ. “ยางธรรมชาติเสริมแรงด้วยซิติกาจากเกลือบ.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัย ภาควิทยาศาสตร์ บัณฑิตศึกษา, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2538.
- [14] อธิพิล แจ่มชัด. “คู่มือประกอบการสอน เทคโนโลยียาง.” กรุงเทพมหานคร : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2545.
- [15] อุทัย มีคำ. “คู่มือประกอบการสอน Polymer Testing Laboratory” กรุงเทพมหานคร : มปป. มปป.
- [16] Product Information, Thai Tokai Carbon Product Company Limited, 2005.
- [17] Polydynamax. “Structure of Composite.” [Online]. Available : <http://www.polymerdynamix.com/www>. 2004.
- [18] TREK, INC. “Surface and Volume Properties.” [Online].Available : [www. Trekinc.com](http://www.Trekinc.com). 2003.
- [19] Cabot. “Surface and Volume Resistivity Test.” [Online]. Available : www.Cabat.com. 2003.
- [20] ASTM. “Standard Test Methods for Rubber Properties inTension.”**Annual Book of ASTM Standard**, vol. 09.01, D412 – 87, 1992. pp. 100-111.
- [21] วรากรณ์ ขจรไชยกุล. “เทคโนโลยียาง.” กรุงเทพมหานคร : สถาบันวิจัยยาง กรมส่งเสริมการเกษตร. 2534.
- [22] อรุษา สรวารี. “สารเติมแต่งพอลิเมอร์.” พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร : โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2546.
- [23] กัญจนา ตระกูล. “เทคโนโลยีพอลิเมอร์.” พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร : ห้างหุ้นส่วนจำกัด เอ็กซ์เพรสมีเดีย. 2533.

เอกสารอ้างอิง(ต่อ)

- [24] พรพรรณ นิธิอุทัย. “สารเคมีสำหรับยาง.” สงขลา : มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. มปป.
- [25] McGill, W.j. and Shelver, S.R., “The Effect of Carbon Black on Tetramethylthiuram Disulfide Accelerator Sulfur Vulcanization of Polyisoprene.” **J. Applied Polymer Science**, vol. 58, 1995. pp. 1433-1400.
- [26] Medalia, A.I. “Effect of Carbon Black on Dynamic Properties of Rubber Vulcanizates” **Rubber Chemistry and Technology**, vol. 51, 1982. pp. 437-518.
- [27] อธิพิล แจ้งชัด. “คู่มือประกอบการสอน พอลิเมอร์ผสมและคอมโพสิต.” กรุงเทพมหานคร : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2544.
- [28] N.C. Das., D. Khastgir., T.K. Chaki. and A. Chakraborty. “Electromagnetic Interference Shielding Effectiveness of Carbon black and Carbon Fibre filled EVA and NR Based Composites” **Composites Part A**, vol. 31, 2000. pp. 1069–1081.
- [29] L. Flandin., A. Hiltner. and E. Bear. “Enterrelationships between Electrical and Mechanical Properties of a Carbon Black – Filled Ethylene – Octene Elastomer” **Polymer**, vol. 42, 2001. pp. 827–838.
- [30] V.V. Vysotsky. And V.I. Rodlughin. “Aggregate Structure and Percolation Perperties of Metal – Filled Polymer Films” **Colloids and Surfaces A**, vol. 160, 1999. pp. 171–180.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์

Enhancement of Electrical Conductivity of Natural Rubber by Addition of Carbon Black

Watcharapan Manecrat, Surat Areerat and Apinan Namkanisorn*

Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering,

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand

Corresponding Author E-mail: knapinan@kmitl.ac.th

Abstract

Thailand ranks as a world leader in the production of natural rubber. Most natural rubber produced is used as raw materials in various industries, including automobile, construction, agriculture, etc. One limitation that prevents larger usage of natural rubber in an automobile industry is poor electrical conductivity of natural rubber. Its electrical conductivity is typically in the orders of 10^{-14} ($\Omega/\text{sq.}$)⁻¹, which can be classified as insulator material. To make natural rubber suitable for practical applications such as electrical sensors, much higher electrical conductivity is required. This research aims to improve the electrical conductivity of natural rubber by addition of carbon black to make natural rubber-carbon black composite. Our experimental results have shown that the diameter of carbon black particle, structure and the content of carbon black play significant roles on the improvement of the conductivity of the rubber composite. In the material preparation steps, natural rubber latex was mixed with carbon black followed by heat curing in an oven at 150 °C for 1-2 hrs. After the specimen was cooled overnight, the cured rubber composite was cut into a small piece of 10 cm × 10 cm followed by surface resistivity measurement. By varying the content of carbon black from 5 – 25 phr, the conductivity was improved to about 10^{-2} ($\Omega/\text{sq.}$)⁻¹. Further addition of carbon black beyond 25 phr yielded no significant improvement of the electrical conductivity and segregation of the composite became more visible. High structure carbon black was found to be more effective in promoting the electrical conductivity of the composite compared to low structure carbon black.

Keywords

Natural Rubber; Carbon Black; Conducting Composite; Electrical Conductivity; Surface Resistivity

Introduction

Electrical conductive polymer composites have gained immense interests [2-13] in recent years due to a large variety of practical applications such as pressure, temperature and deformation-sensitive sensors. A simple model of electrical conductive polymer composite comprises of a matrix of insulating polymer filled with conductive particles such as carbon black or metal particle additives [2]. The electrical conductivity of polymeric composites depends on several factors including the type of the fillers, size, structure and content to which the filler is added to the matrix.

In this paper, composites of natural rubber (NR) and carbon black (CB) were prepared and their electrical properties were studied. The aim of this work is to improve the electrical conductivity of virgin rubber to a level suitable for practical uses. The electrical conductivity of virgin rubber is typically in the orders of 10^{-14} ($\Omega/\text{sq.}$)⁻¹, which can be classified as insulator material. To make natural rubber suitable for practical applications such as electrical sensors, much higher electrical conductivity is required and, thus, our goal is to increase the electrical conductivity to the orders of 10^{-4} - 10^{-2} ($\Omega/\text{sq.}$)⁻¹. The properties of carbon black investigated in this work include the content to which it is added to the composite, particle diameter and structure. The electrical behaviour of the composite is studied by measuring surface resistivities of the composite prepared from various conditions.

Subsequently, the values of surface resistivity were converted to electrical conductivity (σ) in a unit of $(\Omega/\text{sq.})^{-1}$ using the following equation

$$\sigma = \frac{1}{R} = \frac{L}{D} \cdot \frac{I}{V} \quad (1)$$

where R is surface resistivity $(\Omega/\text{sq.})^{-1}$, V is the applied voltage (V), I is the electrical current (A), L is the separation distance between the two electrodes (cm) and D is the sample width (cm).

Materials and Methods

Natural Rubber

The natural latex rubber was obtained from Rubber Research Institute of Thailand. The rubber latex containing approximately 60%wt of solid rubber is stabilized with 0.6 wt% of ammonium hydroxide (NH_4OH).

Carbon Black (CB)

Five different types of carbon black (Oil Furnace Black type) from Thai Tokai Carbon Product Company Limited were used as received (see Table 1 for description). The particle size and the complex structure as measured from DBP absorption was between 18-43 nm and 72-125 ml/100g, respectively.

Table 1- Physical Properties of Carbon Black Used in This Study [1].

Classification of CB	Average Particle Size (nm)	DBP Absorption (ml/100g)	Density (kg/m^3)	Features
N220	22	114	345	Good processability. Strong reinforcement and high abrasion resistance.
N234	18	125	320	High abrasion resistance, high tensile strength.
N326	28	72	465	Low modulus, high tensile strength and elongation. Good abrasion resistance with low structure.
N330	28	102	375	High abrasion resistance, high tensile strength, proper modulus and sufficient elongation.
N339	24	120	345	High abrasion resistance. Good dispersion and processability with high structure.
N550	43	121	121	Excellent dynamic properties. Low shrinkage at extrusion molding and smoothest surface.

Composite Preparation

A dispersed solution of carbon black was prepared by mixing carbon black and dispersion agents in a ball mill for about 36 hrs. The dispersed carbon black solution was then mixed with latex rubber and various additives which include stearic acid, sulphur, ZDEC, wingstay-L, ZnO and TiO₂. Composite of NR/CB was prepared by casting into a rectangular aluminium mold and heated cured at 150 °C for 1-2 hours to evaporate the volatile components. The composite of thickness in the order of 8 mm was obtained with NR/CB contents ranging from 100/0, 95/5, 90/10, 85/15, 80/20 and 75/25 phr. The composite was kept in ambient air for 3 days before measuring surface resistivity.

Resistivity Measurement

The NR/CB composite was cut into a square piece of 10 cm × 10 cm. Then the test piece was mounted on a sample holder and various voltages (100, 500 and 1000 Volts) were applied to the specimen depending on the resistance of the specimen (Figure 1). The value of electrical current across the specimen was recorded and was subsequently converted to the surface resistivity.

Results and Discussion

Effect of CB Content on Surface Resistivity of Composite

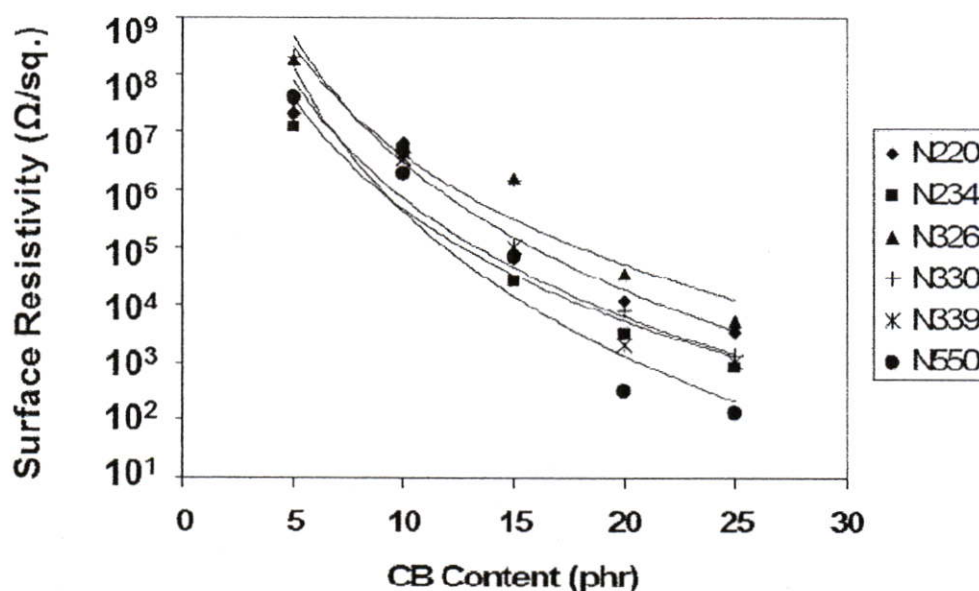


Figure 2: Effect of CB Content on Surface Resistivity of Composite. Strong dependence of surface resistivity on the content of CB added to the composite is observed. Surface resistivity of a virgin rubber is in the orders of 14 Ω/sq.

Figure 2 shows the effect of CB content on the surface resistivity of the composite. The surface resistivity of a virgin rubber was as high as 10¹⁴ Ω/sq. Addition of 5 wt% CB in the composite reduces the surface resistivity roughly by six orders of magnitude to 10⁸ Ω/sq. This trend is observed for all types of CB used in this study. An increase of CB content in the composite further reduces surface resistivity down to 10⁴ to 10² Ω/sq., depending on the type of CB used. For the content of CB above 25 wt% the composite cracked as a result of segregation of CB from the matrix of NR, thus we were unable to obtain the surface resistivity measurement. However, a nearly constant value of the electrical conductivity when the content of CB is above 20 wt% has been reported by Job *et. al.* [10].

Effect of Particle Diameter on Surface Resistivity of Composite

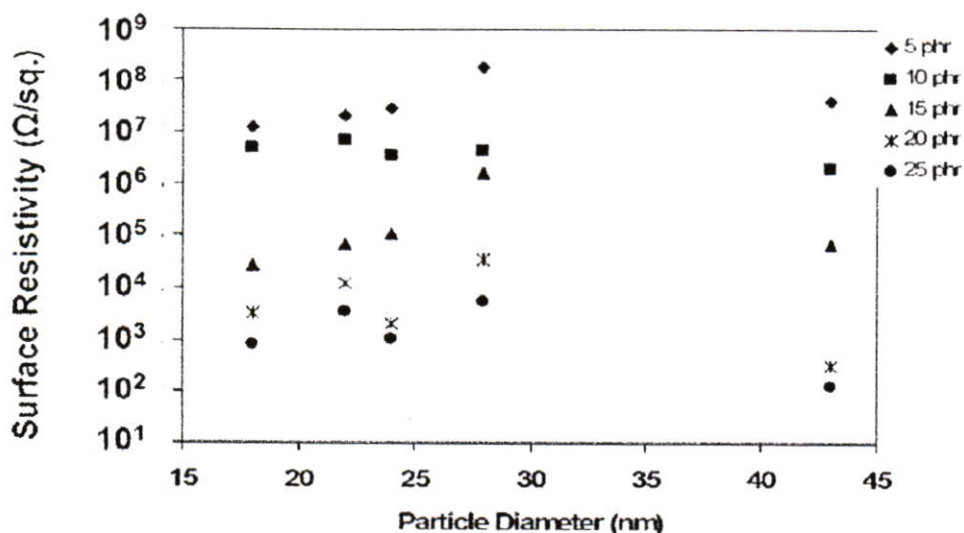


Figure 3- Effect of Particle Diameter on Surface Resistivity of Composite.

Figure 3 shows the dependence of surface resistivity on the particle diameter for composites made with NR/CB contents of 95/5, 90/10, 85/15, 80/20 and 75/25 phr. An increase in particle diameter from 18 to 28 nm results in increasing surface resistivities since the homogeneity of the composite decreases with increasing particle diameter. As a result, poorer electrical conductivity is obtained at higher CB diameter. However, a slight increase of the electrical conductivity is observed at the particle diameter of 43 nm. This may be attributed to the effect of high structure of CB that promotes the electrical conductivity. This type of CB has the highest structure compared to other types of CB used in this study.

Effect of CB Structure on Surface Resistivity of Composite

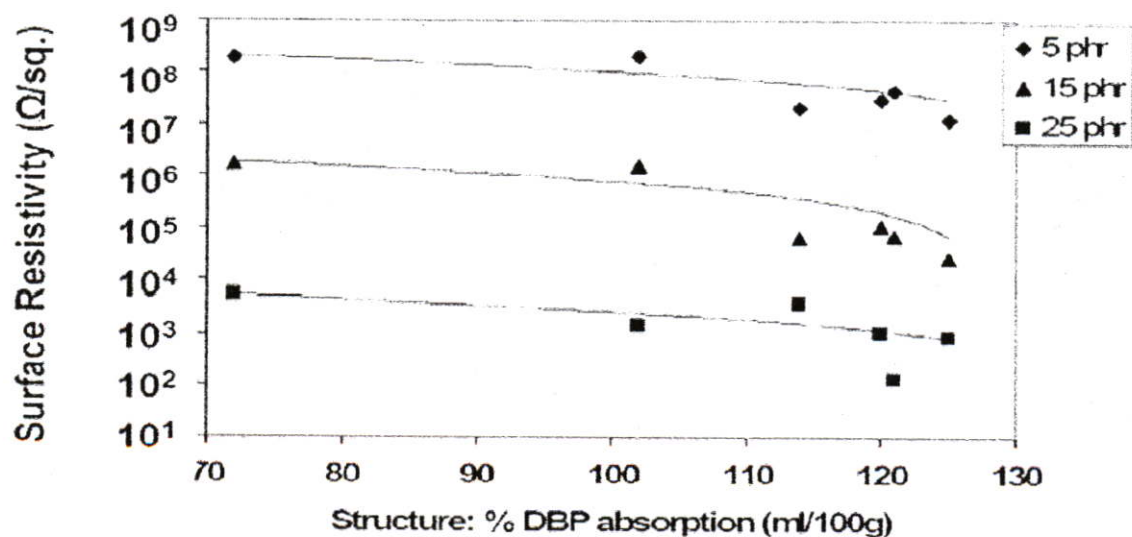


Figure 4- Effect of CB Structure on Surface Resistivity of Composite.

Figure 4 shows the effect of carbon black structure on surface resistivity of composite. A comparison of surface resistivity of composites with varying CB contents from 95/5, 85/15 and 75/25 phr shows a reduction of surface resistivity as the carbon black structure becomes more complex. This is because high structure carbon black is highly branched and highly interconnected so that they form a network of particles, which can facilitate the movement of electrons across the matrix of the composite. As a result superior electrical conductivity can be achieved.

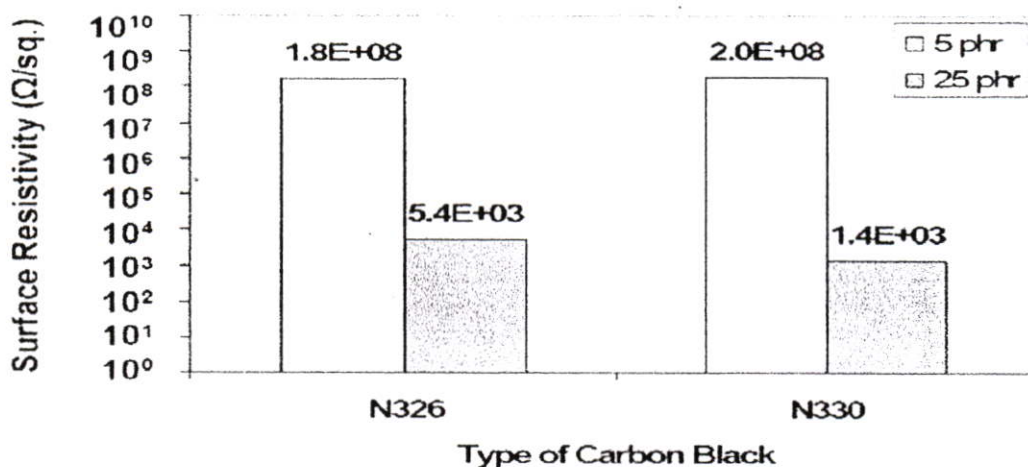


Figure 5- Effect of CB Content versus Structure. N326 and N330 are carbon black of equal particle diameter of 28 nm, but different structure and density.

Figure 5 shows a comparison of surface resistivity between two types of carbon black, namely N326 and N330 which have equal particle diameter of 28 nm, but different structure and density. N326 is a low structure carbon black with density of 465 kg/m^3 , whereas N330 has medium structure with lower density of 375 kg/m^3 . For low content CB composite (5 phr), the values of surface resistivity both for N326 and N330 composites are almost unchanged. The effect of structure is not so obvious here since the surface resistivity has been compensated by higher density of carbon black. On the other hand, at high content CB composite (25 phr), the difference in surface resistivity is more pronounced as indicated by about 74% reduction in surface resistivity.

Conclusion

Surface resistivity of NR/CB composite can be significantly reduced by addition of carbon black particles. It was found that composites having large content of CB possess high electrical conductivity suitable for applications such as sensors. The particle diameter has an inverse effect on the electrical conductivity, whereas the conductivity improves with increasing complexity of the carbon black structure. It is worthwhile to further investigate the effects of variation in specimen's length (i.e., during tensile test) on electrical conductivity so that one can establish the relationship that would be useful for practical applications.

Acknowledgements

The authors are thankful to Thailand Research Fund (TRF) for the financial support and Thai Tokai Carbon Product Company Limited for their generous supply of carbon black used in this study.

References

1. Product Information, Thai Tokai Carbon Product Company Limited, 2005.
2. Knite M., Teteris V., Kiploka A. and Kaupuzs J. *Polyisoprene-carbon black nanocomposites as tensile strain and pressure sensor materials*. **J. Elsevier**. 2004; 110: 142 – 142.
3. Aneli J.N., Zaikov G.E. *Effects of Mechanical Deformations on the Structurization and electric conductivity of electric conducting polymer composites*. **J. Applied Polymer Science**. 1999; 74: 601 – 621.
4. Flandin L., Chang A., Nazarenko S., Hiltner A. and Baer E. *Electrically conductive polymer nanocomposites as deformation sensors*. **J. Applied Polymer Science**. 2000; 76: 894-905.
5. Flandin L., Brechet Y. and Cavaille J.-Y. *Electrically conductive polymer nanocomposites as deformation sensors*. **J. Elsevier Science**. 2001; 61: 895 – 901.
6. Knite M., Teteris V., Polyakov B. and Ertz D. *Electric and elastic properties of conductive polymeric nanocomposites on macro- and nanoscales*. **J. Elsevier Science**. 2002; 19: 15-19.
7. Zhang X.W., Pan Y., Zheng Q. and Yi X-S. *Time dependence of piezoresistance for the conductor filled polymer composites*. **J. Polymer Science**. 2000; 38: 2739–2749.
8. Knite M., Teteris V. and Kiploka A. *The effect of plasticizing agent on strain-induced change of electric resistivity of carbon-polyisoprene nano-composites*. **J. Elsevier Science**. 2003; 23: 787–790.
9. Wu T-M. and Cheng J-C. *Morphology and electrical properties of carbon-black-filled poly(ϵ -caprolactone)/poly(vinyl butyral)*. **J. Applied Polymer Science**. 2003; 88: 1022–1031.
10. 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*. **J. Elsevier Science** 2003; 135-136: 99–100.
11. Sau K.P., Chaki T.K. and Khastgir D. *The change in conductivity of a rubber-carbon black composite subjected to different modes of pre-strain*. **J. Elsevier Science**. 1998; 29A: 363–370.
12. Ali M.H. and Hashem A. Abo. *Percolation concept and the electrical conductivity of carbon black-polymer composites 2: Non-crystallisable chloroprene rubber mixed with HAF carbon black*. **J. Elsevier Science**. 1997; 68: 163–167.
13. Ali M.H. and Hashem A. Abo. *Percolation concept and the electrical conductivity of carbon black-polymer composites 3: Crystallisable chloroprene rubber mixed with FEF carbon black*. **J. Elsevier Science**. 1997; 68: 168–171.

ภาคผนวก ข

ข้อมูลดิบของงานวิจัย และวิธีการวัดค่าการนำไฟฟ้า

ข.1 ข้อมูลดิบของงานวิจัย

การจำแนกวัสดุตามสภาพการนำไฟฟ้า แสดงในตารางที่ ข.1 โดยยางธรรมชาติมีสภาพการนำไฟฟ้า 10^{-14} - $10^{-16} \Omega^{-1}$ โดยประมาณ ซึ่งมีสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้าในการประยุกต์ทำยางธรรมชาติให้สามารถใช้เป็นเซ็นเซอร์ได้ต้องมีค่าสมบัติการนำไฟฟ้าตั้งแต่วัสดุกึ่งตัวนำขึ้นไปจนถึงวัสดุนำไฟฟ้า

ตารางที่ ข.1 ประเภทของวัสดุแบ่งตามสภาพการนำไฟฟ้า

ประเภทวัสดุ	สภาพการนำไฟฟ้าเชิงพื้นที่ (Ω) ⁻¹	สภาพการนำไฟฟ้าเชิงปริมาตร (Ω -cm) ⁻¹
วัสดุนำไฟฟ้า	$> 1 \times 10^{-5}$	$> 1 \times 10^{-4}$
วัสดุกึ่งตัวนำ	$1 \times 10^{-12} - 1 \times 10^{-5}$	$1 \times 10^{-11} - 1 \times 10^{-4}$
วัสดุฉนวนไฟฟ้า	$\leq 1 \times 10^{-12}$	$\leq 1 \times 10^{-11}$

ยางธรรมชาติมีสภาพการนำไฟฟ้า 10^{-14} - $10^{-16} \Omega^{-1}$

ค่าการนำไฟฟ้าของคาร์บอนแบล็ก และสารเคมีที่ใช้ในการขึ้นรูปยางแสดงในตารางที่ ข.2 และ ข.3 เมื่อขึ้นรูปยางธรรมชาติที่ผสมกับสารเคมีที่ใช้การขึ้นรูปมีค่าการนำไฟฟ้า $1.306 \times 10^{-14} \Omega^{-1}$ มีสมบัติในการนำไฟฟ้าคือเป็นฉนวนไฟฟ้าซึ่งเป็นสมบัติโดยปกติของยางธรรมชาติ (มีค่าการนำไฟฟ้า $10^{-14} - 10^{-16} \Omega^{-1}$ แสดงให้เห็นถึงสารเคมีที่ใช้ในการขึ้นรูปยางไม่ส่งผลต่อสมบัติในการนำไฟฟ้าของยางธรรมชาติที่ผ่านการขึ้นรูป โดยค่าการนำไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นเมื่อเริ่มผสมคาร์บอนแบล็กที่ 5 phr (ค่าการนำไฟฟ้า $10^{-8} \Omega^{-1}$ โดยประมาณ) และเมื่อเพิ่มปริมาณคาร์บอนแบล็กขึ้น สภาพการนำไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณคาร์บอนแบล็กที่ผสม คาร์บอนแบล็กจึงเป็นปัจจัยหลักในการเพิ่มสมบัตินำไฟฟ้าของยางธรรมชาติในการวิจัยนี้

ตารางที่ ข.2 การนำไฟฟ้าของคาร์บอนแบล็กผง (Ω^{-1})

ชนิดของคาร์บอนแบล็ก	ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (nm)	ปริมาณการดูดซับของ DBP (ml/100g)	ความต้านทาน (Ω)	การนำไฟฟ้า (Ω^{-1})
N220	22	114	18	0.056
N234	18	125	14	0.071
N326	28	72	34	0.029
N330	28	102	24	0.042
N339	24	120	38	0.026
N550	43	121	22	0.045

ตารางที่ ข.3 การนำไฟฟ้าของสารเคมีที่ใช้ขึ้นรูปยาง

ชนิดสารเคมี	ความต้านทาน (Ω)	การนำไฟฟ้า(Ω^{-1})
Steric acid	1.53×10^6	6.518×10^{-7}
Sulfer	203.46×10^3	4.914×10^{-6}
Z D E C	212.85×10^3	4.698×10^{-6}
Z n O	102.84×10^3	9.723×10^{-6}
Wingstay-L	132.12×10^3	7.568×10^{-6}
TiO ₂	17.24×10^3	5.800×10^{-5}

*** สภาพการนำไฟฟ้าของ NR $1.306 \times 10^{-14} \Omega^{-1}$

สมบัติในการนำไฟฟ้าของยางธรรมชาติที่ผสมคาร์บอนแบล็ก (ตารางที่ ข. 4) พบว่าเมื่อเริ่มผสมคาร์บอนแบล็กลงในยางธรรมชาติที่ 5 phr จะเพิ่มสมบัตินำไฟฟ้าจาก $10^{-14} \Omega^{-1}$ โดยประมาณของยางธรรมชาติ เป็น $10^{-8} \Omega^{-1}$ โดยประมาณหลังจากใส่คาร์บอนแบล็ก 5 phr และเมื่อเพิ่มปริมาณคาร์บอนแบล็กลงในยางเพิ่มขึ้น สมบัติในการนำไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นแต่จะเข้าใกล้ค่าหนึ่งโดยที่คาร์บอนแบล็ก 25 phr ค่าการนำไฟฟ้าโดยประมาณคือ $10^{-3} \Omega^{-1}$ การเพิ่มปริมาณคาร์บอนแบล็กลงในยางธรรมชาติต่อจากนี้ ค่าสภาพการนำไฟฟ้า จะเปลี่ยนแปลงไม่มาก

ตารางที่ ข.4 สมบัติการนำไฟฟ้าของยางธรรมชาติที่ใส่คาร์บอนแบล็ก

N220		N234		N326	
Conc.	Conductivity (Ω^{-1})	Conc.	Conductivity (Ω^{-1})	Conc.	Conductivity (Ω^{-1})
5	4.912×10^{-8}	5	8.425×10^{-8}	5	5.631×10^{-9}
10	1.456×10^{-7}	10	2.035×10^{-7}	10	2.281×10^{-7}
15	1.528×10^{-5}	15	3.807×10^{-7}	15	6.201×10^{-7}
20	8.063×10^{-5}	20	3.036×10^{-4}	20	2.840×10^{-5}
25	2.846×10^{-4}	25	1.180×10^{-3}	25	1.866×10^{-4}

ตารางที่ ข.4 (ต่อ) สมบัติการนำไฟฟ้าของยางธรรมชาติที่ใส่คาร์บอนแบล็ก

N330		N339		N550	
Conc.	Conductivity (Ω^{-1})	Conc.	Conductivity (Ω^{-1})	Conc.	Conductivity (Ω^{-1})
5	5.074×10^{-9}	5	3.519×10^{-8}	5	2.461×10^{-8}
10	2.185×10^{-7}	10	2.858×10^{-7}	10	5.234×10^{-7}
15	6.767×10^{-7}	15	9.634×10^{-6}	15	1.491×10^{-5}
20	1.293×10^{-4}	20	4.818×10^{-4}	20	3.113×10^{-3}
25	7.364×10^{-4}	25	5.382×10^{-4}	25	7.691×10^{-3}

ตารางที่ ข.5 สมบัติการนำไฟฟ้าของธรรมชาติที่ใส่คาร์บอนแบล็กขณะดึงยืด

Conc.	Conductivity (Ω^{-1}) (N234)						
	% Δ I = 10	% Δ I = 20	% Δ I = 30	% Δ I = 40	% Δ I = 50	% Δ I = 60	% Δ I = 100
5 phr	9.231×10^{-7}	8.860×10^{-7}	8.560×10^{-7}	8.118×10^{-7}	7.594×10^{-7}	6.793×10^{-7}	4.512×10^{-7}
10 phr	1.839×10^{-6}	1.808×10^{-6}	1.778×10^{-6}	1.648×10^{-6}	1.522×10^{-6}	1.267×10^{-6}	6.497×10^{-7}
15 phr	3.719×10^{-5}	2.946×10^{-5}	2.522×10^{-5}	2.312×10^{-5}	2.170×10^{-5}	1.803×10^{-5}	9.395×10^{-6}
20 phr	2.251×10^{-4}	2.234×10^{-4}	2.159×10^{-4}	2.281×10^{-4}	2.242×10^{-4}	2.337×10^{-4}	2.041×10^{-4}
25 phr	1.280×10^{-3}	1.237×10^{-3}	1.214×10^{-3}	1.184×10^{-3}	1.148×10^{-3}	1.057×10^{-3}	8.164×10^{-4}
30 phr	1.625×10^{-3}	1.589×10^{-3}	1.535×10^{-3}	1.498×10^{-3}	1.470×10^{-3}	1.418×10^{-3}	1.212×10^{-3}
40 phr	2.257×10^{-3}	2.076×10^{-3}	2.117×10^{-3}	2.062×10^{-3}	2.044×10^{-3}	1.942×10^{-3}	1.700×10^{-3}

ตารางที่ ข.5 สมบัติการนำไฟฟ้าของธรรมชาติที่ใส่คาร์บอนแบล็กขณะดึงยืด

Conc.	Conductivity (Ω^{-1}) (N220)						
	% Δ I = 10	% Δ I = 20	% Δ I = 30	% Δ I = 40	% Δ I = 50	% Δ I = 60	% Δ I = 100
5 phr	3.977×10^{-7}	4.081×10^{-7}	3.989×10^{-7}	3.844×10^{-7}	3.596×10^{-7}	3.392×10^{-7}	2.559×10^{-7}
10 phr	6.361×10^{-7}	6.205×10^{-7}	5.713×10^{-7}	5.417×10^{-7}	5.111×10^{-7}	4.742×10^{-7}	3.735×10^{-7}
15 phr	1.220×10^{-5}	1.152×10^{-5}	1.046×10^{-5}	1.013×10^{-5}	9.569×10^{-6}	9.304×10^{-6}	8.354×10^{-6}
20 phr	3.041×10^{-4}	2.609×10^{-4}	2.425×10^{-4}	2.139×10^{-4}	2.246×10^{-4}	2.028×10^{-4}	-
25 phr	5.220×10^{-5}	5.832×10^{-5}	5.906×10^{-5}	5.713×10^{-5}	6.051×10^{-5}	6.175×10^{-5}	6.119×10^{-5}
30 phr	4.657×10^{-4}	4.166×10^{-4}	4.475×10^{-4}	4.763×10^{-4}	4.644×10^{-4}	4.284×10^{-4}	3.870×10^{-4}
40 phr	3.547×10^{-3}	3.600×10^{-3}	3.573×10^{-3}	3.536×10^{-3}	3.465×10^{-3}	3.439×10^{-3}	3.009×10^{-3}

*** ตำแหน่งที่ไม่มีข้อมูล คือ ตำแหน่งที่วัสดุเชิงประกอบขณะยืดขาด

ตารางที่ ข.5 สมบัติการนำไฟฟ้าของธรรมชาติที่ใส่คาร์บอนแบล็กขณะดั่งยัด

Conc.	Conductivity (Ω) ⁻¹ (N339)						
	% Δ l = 10	% Δ l = 20	% Δ l = 30	% Δ l = 40	% Δ l = 50	% Δ l = 60	% Δ l = 100
5 phr	2.711×10^{-7}	2.456×10^{-7}	2.196×10^{-7}	2.030×10^{-7}	1.839×10^{-7}	1.673×10^{-7}	1.011×10^{-7}
10 phr	1.487×10^{-6}	1.201×10^{-6}	1.106×10^{-6}	1.081×10^{-6}	9.531×10^{-7}	8.535×10^{-7}	6.790×10^{-7}
15 phr	1.525×10^{-5}	1.248×10^{-5}	1.126×10^{-5}	1.117×10^{-5}	1.110×10^{-5}	1.032×10^{-5}	1.023×10^{-5}
20 phr	2.928×10^{-4}	2.835×10^{-4}	2.679×10^{-4}	2.439×10^{-4}	2.107×10^{-4}	2.055×10^{-4}	-
25 phr	4.416×10^{-5}	3.863×10^{-5}	3.826×10^{-5}	3.766×10^{-5}	3.644×10^{-5}	3.423×10^{-5}	2.835×10^{-5}
30 phr	5.139×10^{-4}	4.813×10^{-4}	4.803×10^{-4}	4.766×10^{-4}	4.929×10^{-4}	4.811×10^{-4}	4.352×10^{-4}
40 phr	2.106×10^{-3}	2.101×10^{-3}	2.135×10^{-3}	2.143×10^{-3}	2.060×10^{-3}	2.030×10^{-3}	1.737×10^{-3}

*** ตำแหน่งที่ไม่มีข้อมูล คือ ตำแหน่งที่วัสดุเชิงประกอบขณะยัดขาด

ตารางที่ ข.5 สมบัติการนำไฟฟ้าของธรรมชาติที่ใส่คาร์บอนแบล็กขณะดั่งยัด

Conc.	Conductivity (Ω) ⁻¹ (N326)						
	% Δ l = 10	% Δ l = 20	% Δ l = 30	% Δ l = 40	% Δ l = 50	% Δ l = 60	% Δ l = 100
5 phr	2.698×10^{-7}	2.677×10^{-7}	2.582×10^{-7}	2.471×10^{-7}	2.356×10^{-7}	2.201×10^{-7}	1.467×10^{-7}
10 phr	2.526×10^{-7}	2.463×10^{-7}	2.438×10^{-7}	2.424×10^{-7}	2.323×10^{-7}	2.272×10^{-7}	1.581×10^{-7}
15 phr	2.840×10^{-6}	2.679×10^{-6}	2.416×10^{-6}	2.314×10^{-6}	2.234×10^{-6}	1.453×10^{-6}	7.547×10^{-7}
20 phr	1.307×10^{-5}	1.046×10^{-5}	9.397×10^{-6}	8.868×10^{-6}	9.196×10^{-6}	8.990×10^{-6}	7.793×10^{-6}
25 phr	4.066×10^{-5}	4.274×10^{-5}	4.199×10^{-5}	3.983×10^{-5}	4.123×10^{-5}	3.857×10^{-5}	3.591×10^{-5}
30 phr	7.369×10^{-5}	7.081×10^{-5}	6.951×10^{-5}	6.933×10^{-5}	6.701×10^{-5}	6.499×10^{-5}	5.571×10^{-5}
40 phr	1.714×10^{-4}	1.604×10^{-4}	1.248×10^{-4}	1.222×10^{-4}	1.198×10^{-4}	1.182×10^{-4}	8.267×10^{-4}

ตารางที่ ข.5 สมบัติการนำไฟฟ้าของธรรมชาติที่ใส่คาร์บอนแบล็กขณะดั่งยัด

Conc.	Conductivity (Ω) ⁻¹ (N330)						
	% Δ l = 10	% Δ l = 20	% Δ l = 30	% Δ l = 40	% Δ l = 50	% Δ l = 60	% Δ l = 100
5 phr	1.289×10^{-6}	1.028×10^{-6}	9.234×10^{-7}	1.621×10^{-7}	1.385×10^{-7}	1.164×10^{-7}	-
10 phr	1.242×10^{-6}	1.204×10^{-6}	1.128×10^{-6}	1.044×10^{-6}	8.893×10^{-7}	7.472×10^{-7}	6.044×10^{-7}
15 phr	4.562×10^{-6}	4.422×10^{-6}	4.343×10^{-6}	4.248×10^{-6}	4.197×10^{-6}	4.110×10^{-6}	3.711×10^{-6}
20 phr	7.234×10^{-6}	6.664×10^{-6}	6.331×10^{-6}	6.075×10^{-6}	5.904×10^{-6}	5.792×10^{-7}	3.159×10^{-6}
25 phr	2.727×10^{-5}	3.764×10^{-5}	4.361×10^{-5}	4.426×10^{-5}	4.486×10^{-5}	4.411×10^{-5}	-
30 phr	2.748×10^{-4}	2.554×10^{-4}	2.417×10^{-4}	2.510×10^{-4}	2.320×10^{-4}	2.215×10^{-4}	1.442×10^{-4}
40 phr	1.552×10^{-3}	1.633×10^{-3}	1.653×10^{-3}	1.749×10^{-3}	1.745×10^{-3}	1.736×10^{-3}	1.548×10^{-3}

*** ตำแหน่งที่ไม่มีข้อมูล คือ ตำแหน่งที่วัสดุเชิงประกอบขณะยัดขาด

ตารางที่ ข.5 สมบัติการนำไฟฟ้าของธรรมชาติที่ใส่คาร์บอนแบล็กขณะดั่งยัด

Conc.	Conductivity (Ω) ⁻¹ (N550)						
	% Δ l = 10	% Δ l = 20	% Δ l = 30	% Δ l = 40	% Δ l = 50	% Δ l = 60	% Δ l = 100
5 phr	8.987×10^{-7}	6.164×10^{-7}	5.441×10^{-7}	4.013×10^{-7}	1.474×10^{-7}	8.829×10^{-8}	5.550×10^{-8}
10 phr	1.723×10^{-6}	1.646×10^{-6}	1.544×10^{-6}	1.345×10^{-6}	1.050×10^{-6}	8.430×10^{-7}	2.887×10^{-7}
15 phr	6.929×10^{-5}	6.126×10^{-5}	5.787×10^{-5}	5.017×10^{-5}	4.342×10^{-5}	3.879×10^{-5}	-
20 phr	1.348×10^{-4}	1.280×10^{-4}	1.167×10^{-4}	1.220×10^{-4}	1.146×10^{-4}	1.092×10^{-4}	4.963×10^{-5}
25 phr	5.493×10^{-5}	5.056×10^{-5}	4.680×10^{-5}	4.222×10^{-5}	4.029×10^{-5}	3.680×10^{-5}	4.258×10^{-5}
30 phr	2.342×10^{-4}	2.503×10^{-4}	2.670×10^{-4}	2.705×10^{-4}	2.819×10^{-4}	2.734×10^{-4}	2.219×10^{-4}
40 phr	6.579×10^{-4}	6.308×10^{-4}	6.790×10^{-4}	7.361×10^{-4}	7.719×10^{-4}	7.964×10^{-4}	8.248×10^{-4}

*** ตำแหน่งที่ไม่มีข้อมูล คือ ตำแหน่งที่วัสดุเชิงประกอบขณะยัดขาด

ตารางที่ ข.6 สมบัติการนำไฟฟ้าของธรรมชาติที่ใส่คาร์บอนแบล็กที่อุณหภูมิต่างๆ

ชนิด	Conc.	Conductivity (Ω) ⁻¹					
		30 °c	40 °c	50 °c	60 °c	70 °c	80 °c
N234	5phr	9.330×10^{-7}	1.011×10^{-7}	1.808×10^{-7}	8.744×10^{-8}	5.390×10^{-8}	-
	15phr	3.986×10^{-5}	4.900×10^{-5}	5.729×10^{-5}	6.886×10^{-5}	6.619×10^{-5}	5.673×10^{-5}
	25phr	3.748×10^{-3}	4.110×10^{-3}	4.659×10^{-3}	5.296×10^{-3}	5.436×10^{-3}	4.410×10^{-3}
	40phr	2.375×10^{-2}	2.660×10^{-2}	2.780×10^{-2}	2.926×10^{-2}	3.118×10^{-2}	2.717×10^{-2}
N220	5phr	3.644×10^{-7}	3.797×10^{-7}	7.152×10^{-8}	7.198×10^{-9}	-	-
	15phr	2.633×10^{-5}	3.914×10^{-5}	4.523×10^{-5}	5.077×10^{-5}	3.866×10^{-5}	2.871×10^{-5}
N339	15phr	2.774×10^{-5}	3.813×10^{-5}	4.838×10^{-5}	5.183×10^{-5}	3.924×10^{-5}	3.190×10^{-5}
N326	15phr	9.425×10^{-6}	1.094×10^{-5}	1.633×10^{-5}	1.745×10^{-5}	1.551×10^{-5}	1.510×10^{-5}
N330	5phr	2.709×10^{-7}	3.084×10^{-7}	5.363×10^{-8}	7.160×10^{-9}	-	-
	15phr	1.960×10^{-5}	2.144×10^{-5}	2.385×10^{-5}	2.597×10^{-5}	2.420×10^{-5}	2.093×10^{-5}
N550	5phr	8.162×10^{-7}	8.300×10^{-7}	1.525×10^{-7}	7.436×10^{-8}	2.299×10^{-8}	-
	15phr	9.606×10^{-5}	1.018×10^{-4}	1.238×10^{-4}	1.272×10^{-4}	1.270×10^{-4}	1.154×10^{-4}
	25phr	2.340×10^{-3}	2.638×10^{-3}	2.960×10^{-3}	3.075×10^{-3}	3.200×10^{-3}	3.038×10^{-3}
	40phr	1.069×10^{-2}	1.258×10^{-2}	1.509×10^{-2}	1.571×10^{-2}	1.610×10^{-2}	1.588×10^{-2}

*** ตำแหน่งที่ไม่มีข้อมูล คือ ไม่สามารถวัดค่าสภาพการนำไฟฟ้าได้

ตารางที่ ข.7 สมบัติการนำไฟฟ้าของธรรมชาติที่ใส่คาร์บอนแบล็กขณะดึงยืดที่อุณหภูมิต่างๆ

ชนิด	ระยะ (%Δl)	Conductivity (Ω) ⁻¹					
		30 °c	40 °c	50 °c	60 °c	70 °c	80 °c
N234-15%	0	4.093×10^{-5}	5.319×10^{-5}	6.457×10^{-5}	6.715×10^{-5}	6.552×10^{-5}	6.442×10^{-5}
	10	2.965×10^{-5}	3.334×10^{-5}	3.487×10^{-5}	3.498×10^{-5}	3.320×10^{-5}	2.840×10^{-5}
	20	2.484×10^{-5}	2.804×10^{-5}	2.946×10^{-5}	3.065×10^{-5}	3.055×10^{-5}	2.903×10^{-5}
	30	2.235×10^{-5}	2.343×10^{-5}	2.441×10^{-5}	2.459×10^{-5}	2.312×10^{-5}	2.256×10^{-5}
	40	2.068×10^{-5}	2.165×10^{-5}	2.163×10^{-5}	2.227×10^{-5}	2.138×10^{-5}	2.090×10^{-5}
	50	1.883×10^{-5}	1.943×10^{-5}	2.011×10^{-5}	2.065×10^{-5}	1.989×10^{-5}	1.947×10^{-5}
	60	1.479×10^{-5}	1.492×10^{-5}	1.526×10^{-5}	1.601×10^{-5}	1.555×10^{-5}	1.529×10^{-5}
	100	8.434×10^{-6}	8.592×10^{-6}	8.721×10^{-6}	8.687×10^{-6}	8.549×10^{-6}	8.472×10^{-6}



Surface Resistivity and Surface Resistance Measurements Using a Concentric Ring Probe Technique

William A. Maryniak, Toshio Uehara, Maciej A. Noras

Abstract The relationship between surface resistivity and surface resistance is established and explained.

1 Introduction

Concepts of surface resistance and surface resistivity can be sometimes confusing. Definitions of both terms can be found in many books and standards [1–4]. Surface resistance, R_s , is defined in all of the aforementioned literature sources as the ratio of a DC voltage U to the current, I_s flowing between two electrodes of specified configuration that are in contact with the same side of a material under test (Figure 1).

$$R_s = \frac{U}{I_s} \quad (1)$$

Surface resistivity ρ_s , on the other hand, is determined by the ratio of DC voltage U drop per unit length L to the surface current I_s per unit width D .

$$\rho_s = \frac{U}{L} \frac{L}{D} \quad (2)$$

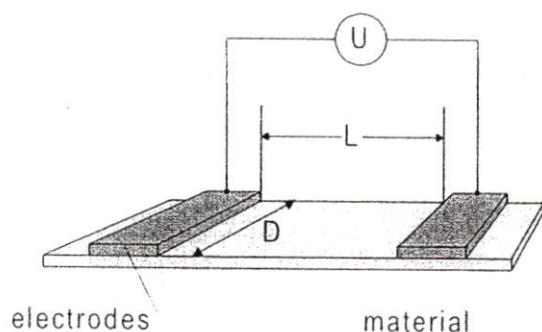


Figure 1: Basic setup for surface resistance and surface resistivity measurement.

Surface resistivity is a property of a material. Theoretically it should remain constant regardless of

the method and configuration of the electrodes used for the surface resistivity measurement. A result of the surface resistance measurement depends on both the material and the geometry of the electrodes used in the measurement. The physical unit of surface resistivity is Ohm (Ω). The legitimate unit of the surface resistance is also Ohm. Because of that surface resistivity and the surface resistance are often mixed up. In order to differentiate between the two, surface resistivity is often expressed also in Ohm/square ($\Omega/\text{sq.}$) which is not a valid unit from the dimensional analysis point of view.

2 Surface resistivity and surface resistance

2.1 Current density and surface current density

It is possible to establish a relationship between the surface resistance and surface resistivity for any electrode configuration. An idea of the current density is very helpful in understanding of that relationship. Consider two samples of a material as shown in Figure 2. With a constant voltage U and both samples made of the same material the amount of current flowing through the material will be different. The thicker bar (sample #1) conducts "more easily" than the thin bar (sample #2). One may use a water pipe analogy - given a constant water pressure, there will be more water per unit time coming through the pipe with a larger diameter. The flow density, be it water or electric current, is the amount of flow passing through a unit area of the pipe or the sample of the material. The surface area is perpendicular to the direction of the flowing current (or water).





Surface Resistivity and Surface Resistance Measurements Using a Concentric Ring Probe Technique

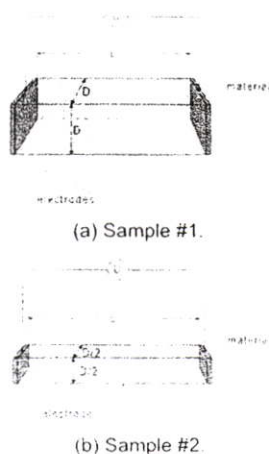


Figure 2: Current density.

When the voltage U is kept constant, the current density for the thin and the thick bar is the same. The electric current density is often expressed by:

$$J = \frac{I}{S}$$

where I is the current and S is the surface area, and is measured in $[A/m^2]$. Surface current density is the next concept helpful in understanding the relationship between the surface resistance and surface resistivity. Consider Figure 1, where both electrodes are on the same side of the material. It is assumed that electric current flows on the surface of the material only. In reality, this is not exactly true. There is always a portion of that current flowing through the bulk of the material. However, in order to make it possible to compare surface properties of various materials, it had been presumed that the surface current flows through infinitesimally thin surface layer. This layer is so thin, that the thickness of it can be neglected. Surface current density J_s is therefore defined as:

$$J_s = \frac{I}{D}$$

where D is a width of the electrode.

2.2 Concentric ring electrodes configuration

The relationship between surface resistivity and the surface resistance for a concentric ring probe geometry can be found by defining a surface current density in the area between rings. Knowing the surface current density, it is possible to find an electric field intensity between the electrode rings (Figure 3).

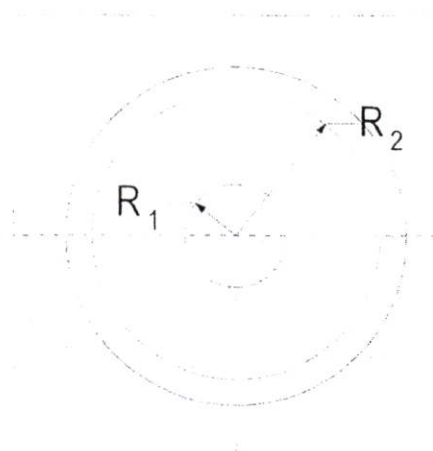


Figure 3: Surface resistance and surface resistivity measurement configuration for concentric ring electrodes.

Define:

- R_1 outer radius of the center electrode,
- R_2 inner radius of the outer ring electrode,

as it is shown in Figure 3 (see also Figure 5). The surface current density J_s for a concentric rings configuration is determined as:

$$J_s = \frac{I_s}{2\pi r} \quad (3)$$





Surface Resistivity and Surface Resistance Measurements Using a Concentric Ring Probe Technique

where the radius r varies from R_1 to R_2 . It is important to remember that when testing the surface resistivity (or resistance) of any material, it is assumed that all the currents flow between electrodes along the surface and do not penetrate into the bulk of the material. In order to ensure that the surface currents are measured properly, some more advanced techniques for surface resistivity measurements have been developed [1,2,4]. The Ohm's law describes relationship between a current density J and an electric field intensity E . It is also valid for the surface currents:

$$J_s = \frac{E}{\rho_s} \quad (4)$$

Therefore, it is possible to find electric field between the concentric rings by solving the following dependency (using equation 3 and 4):

$$E = \frac{\rho_s I_s}{2\pi r} \quad (5)$$

The voltage between electrodes can be found by integrating the electric field E from R_1 to R_2 :

$$\begin{aligned} U_{R_1, R_2} &= \int_{R_1}^{R_2} E dr = \\ &= \int_{R_1}^{R_2} \frac{\rho_s I_s}{2\pi r} dr \\ &= \frac{\rho_s I_s}{2\pi} \int_{R_1}^{R_2} \frac{1}{r} dr \\ &= \frac{\rho_s I_s}{2\pi} \ln \left(\frac{R_2}{R_1} \right) \end{aligned} \quad (6)$$

Substituting $R_s = \frac{U}{I_s}$:

$$R_s = \frac{\rho_s}{2\pi} \ln \left(\frac{R_2}{R_1} \right) \quad (7)$$

After rearrangements, the surface resistivity is related to the surface resistance by a constant that depends on the geometry of the electrodes only:

$$\rho_s = R_s \frac{2\pi}{\ln \left(\frac{R_2}{R_1} \right)} = R_s \cdot k \quad (8)$$

Where k is frequently called a geometry coefficient.

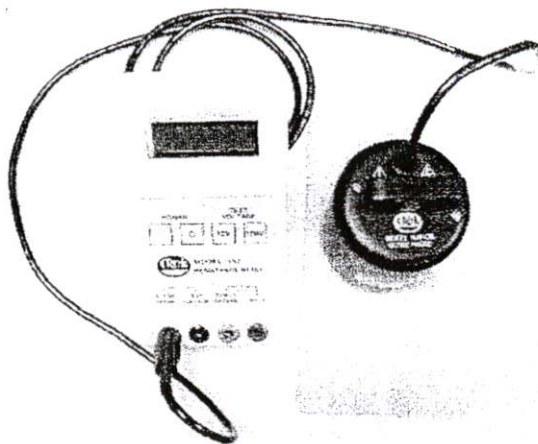


Figure 4: Surface resistivity measurement setup.

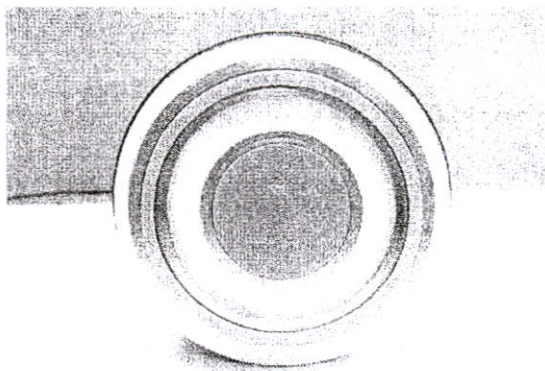


Figure 5: Concentric ring probe.

Figure 4 presents a typical surface resistivity measurement setup using a resistivity meter and a concentric ring probe (Figure 5). The resistivity meter is capable of measuring surface resistivities directly, utilizing various configuration of



Surface Resistivity and Surface Resistance Measurements Using a Concentric Ring Probe Technique

electrodes. Meter provides a constant voltage U and measures the current I flowing between electrodes. Resistance R_s is then easily calculated and the value of resistivity is equal to the value of resistance multiplied by the geometry coefficient. Usually electrodes are especially constructed to simplify calculations of surface resistivity and the geometry coefficient is equal to a simple integer. Most of industrial standards use this simplified approach [1, 2, 4].

Example 1: Consider the following measurement configuration:

$$R_1 = 15.3 \text{ [mm]},$$

$$R_2 = 28.6 \text{ [mm]},$$

$$U = 10 \text{ [V]}.$$

The current measured during the test was equal to $I_s = 1 \cdot 10^{-6} \text{ [A]}$. The surface resistivity of the material under test can be calculated from the equation 8:

$$\begin{aligned} \rho_s &= R_s \frac{2\pi}{\ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)} = \\ &= \frac{U}{I_s} \frac{2\pi}{\ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)} = \\ &= \frac{10 \text{ [V]}}{10^{-6} \text{ [A]}} \frac{2\pi}{\ln\left(\frac{28.6 \text{ [mm]}}{15.3 \text{ [mm]}}\right)} = \\ &= 10^7 \text{ [\Omega]} \cdot \frac{2\pi}{\ln(1.869)} = \\ &= 10^7 \text{ [\Omega]} \cdot 10 = \\ &= 10^8 \text{ [\Omega]} \end{aligned}$$

3 Additional remarks

While conducting the surface resistivity and the surface resistance tests, it is important to consider

some additional components affecting the test results. The electric resistivity of any dielectric material depends on many environmental factors. It can change with humidity, temperature, etc. For this reason it is recommended to condition the test sample before the measurement. Another important aspect is to ensure a proper contact between electrodes and the tested material. Electrode systems can be made of various materials and may come in various shapes and configurations. The way of electrode contacts the material under test has a very significant influence on the result of a measurement. The DC voltage level used for testing is also an important issue. Usually resistivity of the material depends on the value of the applied voltage and the time span during which the sample was energized. All these contributing factors and criteria are described in appropriate guides and standards [1–4].

References

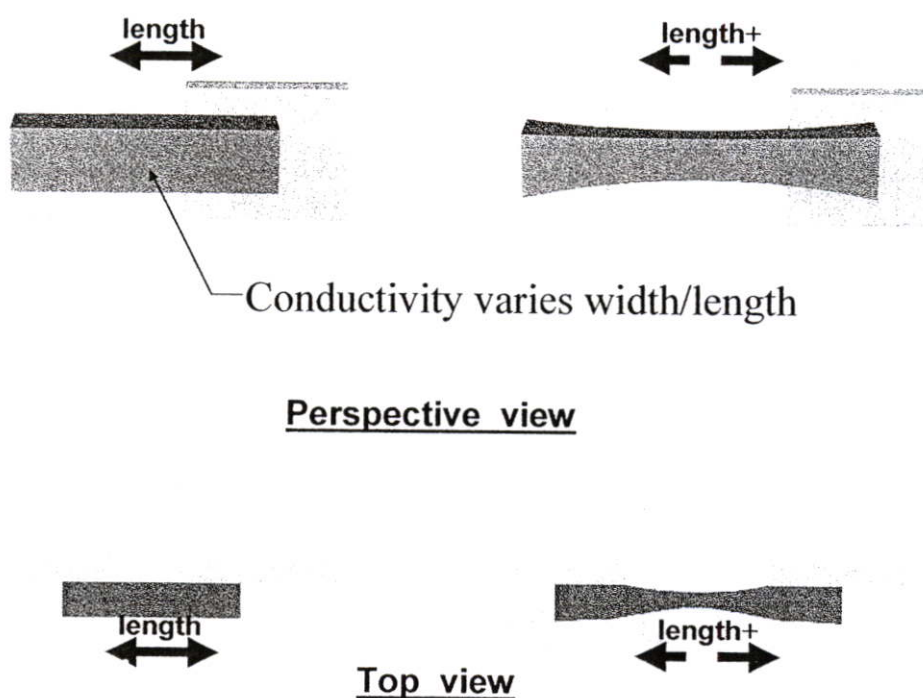
- [1] ASTM Standard D 257-99. Standard test methods for D-C resistance or conductance of insulating materials, 1999.
- [2] ESD STM 11.11-2001 Standard. Surface resistance measurement of static dissipative planar materials, 2001.
- [3] Michael B. Heaney. *The Measurement, Instrumentation and Sensors Handbook*, chapter Electrical Conductivity and Resistivity. CRC Press, 1999.
- [4] IEC 61340-5-1 Standard. Electrostatics - part 5-1: Protection of electronic devices from electrostatic phenomena - general requirements, 1998.



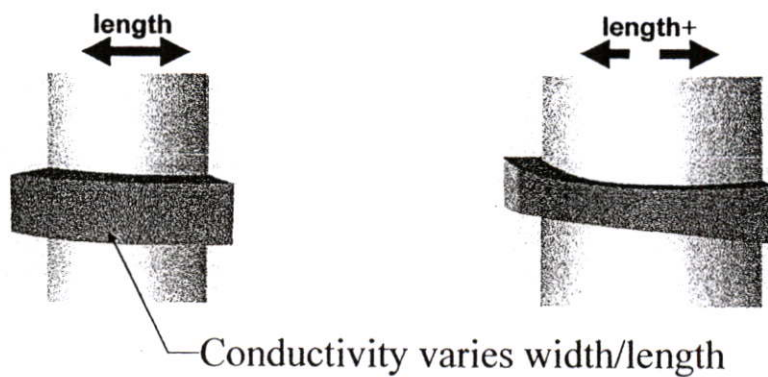
ภาคผนวก ก

รูปข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

การแสดงผลการในการประยุกต์วัสดุเชิงประกอบจากยางธรรมชาติกับคาร์บอนแบล็กเพื่อใช้เป็นเซ็นเซอร์ แสดงในรูป ก.1 และ ก.2 โดยหลักการคือ การนำไฟฟ้าของวัสดุซึ่งเกิดจากระยะห่างระหว่างอนุภาคคาร์บอนแบล็กที่เป็นตัวกลางในการส่งผ่านกระแสไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงทำให้กระแสไฟฟ้าเปลี่ยนไป โดยหลักการนี้สามารถใช้ทำเป็นเซ็นเซอร์ ในการตรวจสอบการเสื่อมสภาพของชิ้นงาน ทั้งที่ทำจากยางธรรมชาติ และชิ้นงานอื่นที่ติดกับวัสดุประกอบจากยางธรรมชาติกับคาร์บอนแบล็ก เช่น ตามข้อต่อ วัสดุกันสะเทือน บานพับปิดเปิด เป็นต้น นอกจากนี้ยังสามารถประยุกต์ใช้ในส่วนที่เข้าถึง หรือวัดได้ยาก เช่น ข้อต่อเป็นรูปโค้ง ข้อต่อเครื่องจักรที่มีแผ่นปกคลุมเพื่อความสวยงาม เป็นต้น



รูปที่ ก.1 แนวคิดในการทำเซ็นเซอร์จากยาง

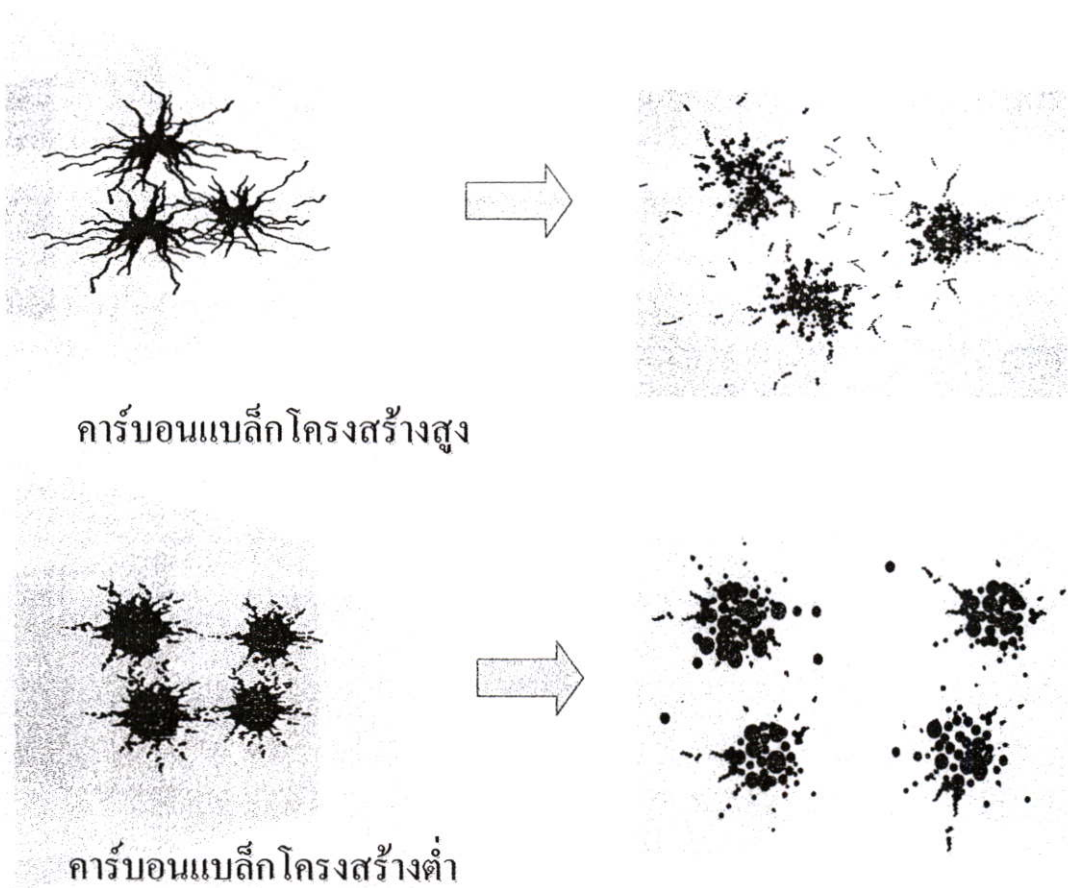


Perspective view



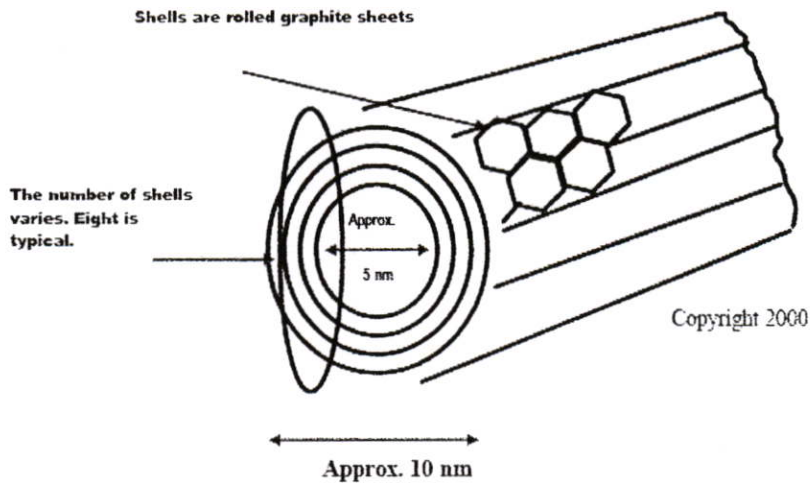
รูปที่ ก.2 แนวทางประยุกต์อย่างธรรมชาติเพื่อใช้เป็นเซ็นเซอร์

รูปที่ ๓.๓ แสดงการเปรียบเทียบคาร์บอนแบล็กโครงสร้างสูงกับคาร์บอนแบล็กโครงสร้างต่ำ โดยคาร์บอนแบล็กโครงสร้างสูงมีลักษณะการเกาะตัวของอนุภาคคาร์บอนแบล็กเป็นกิ่งก้านและซับซ้อนมากกว่า คาร์บอนแบล็กโครงสร้างต่ำ นอกจากนี้ คาร์บอนแบล็กโครงสร้างสูงยังมีการกระจายตัวออกจากศูนย์กลางการก่ออนุภาคมากกว่าคาร์บอนแบล็กโครงสร้างต่ำ



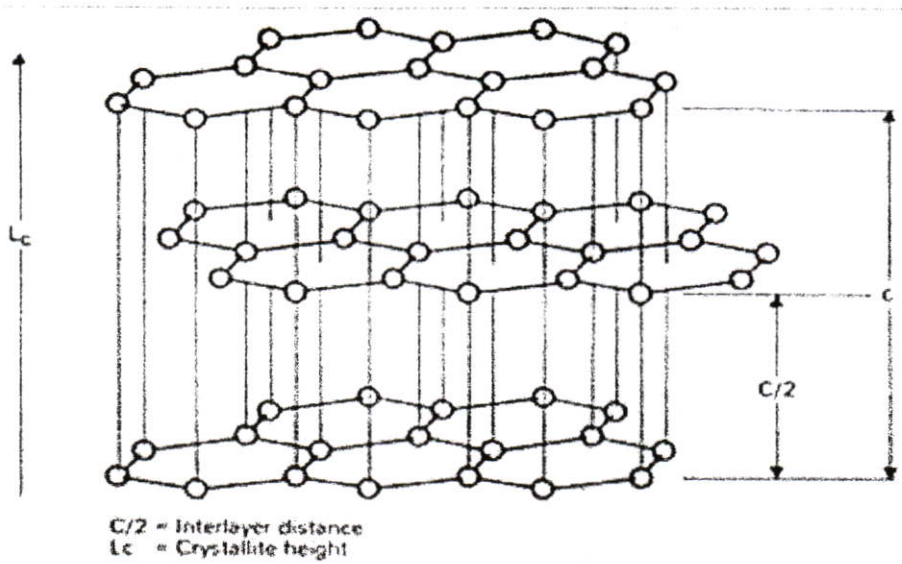
รูปที่ ๓.๓ ชนิดโครงสร้างคาร์บอนแบล็ก

การก่อดัวของอนุภาคคาร์บอนแบล็กเป็นโมเลกุลที่ใหญ่ขึ้น แสดงได้จากรูป ค. 4 ซึ่งลักษณะการก่อดัวของแต่ละอนุภาคคาร์บอนแบล็กในโมเลกุลคาร์บอน จะเป็นในลักษณะ 3 มิติ โดยลักษณะของโมเลกุลอนุภาคคาร์บอนแบล็กที่ใหญ่ขึ้น จะมีการก่อดัวเป็นลักษณะร่างแหมากขึ้น ทำให้นอกจากการเสริมแรงที่เพิ่มขึ้นจากลักษณะก่อดัวเป็นร่างแห ยังเป็นการเพิ่มสมบัตินำไฟฟ้ามากขึ้น จากการส่งผ่านอิเล็กตรอนไฟฟ้าผ่านโครงสร้างร่างแหของโมเลกุลคาร์บอนแบล็ก

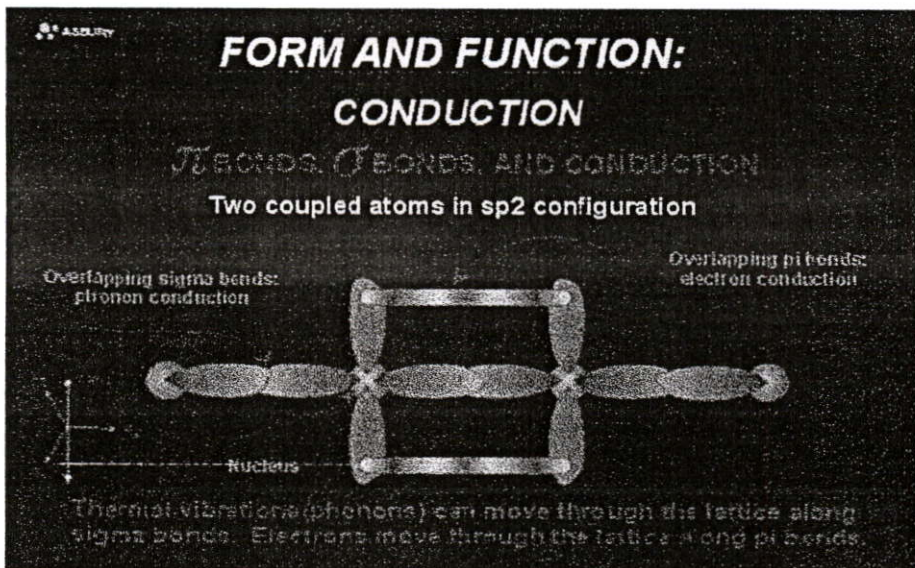


รูปที่ ค.4 การก่อดัวโมเลกุลคาร์บอนแบล็กเป็นโครงสร้างที่ซับซ้อน [16]

สมบัติในการนำไฟฟ้าของคาร์บอนแบล็กแสดงในรูป ค. 5 เนื่องจากการจัดเรียงตัวของแต่ละอนุภาคคาร์บอนแบล็กในโมเลกุลเป็นแบบ sp^3 ทำให้ในแต่ละอนุภาคคาร์บอนมีอิเล็กตรอนที่ไม่สร้างพันธะเหลือ ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการส่งผ่านอิเล็กตรอน (กระแสไฟฟ้า) ไปยังตำแหน่งต่างๆ ในโมเลกุล ทำให้คาร์บอนแบล็กมีสมบัตินำไฟฟ้า นอกจากนี้โครงสร้างอนุภาคคาร์บอนแบล็ก ยังมีลักษณะคล้ายกราฟต์ซึ่งมีสมบัติในการนำไฟฟ้าได้ดี



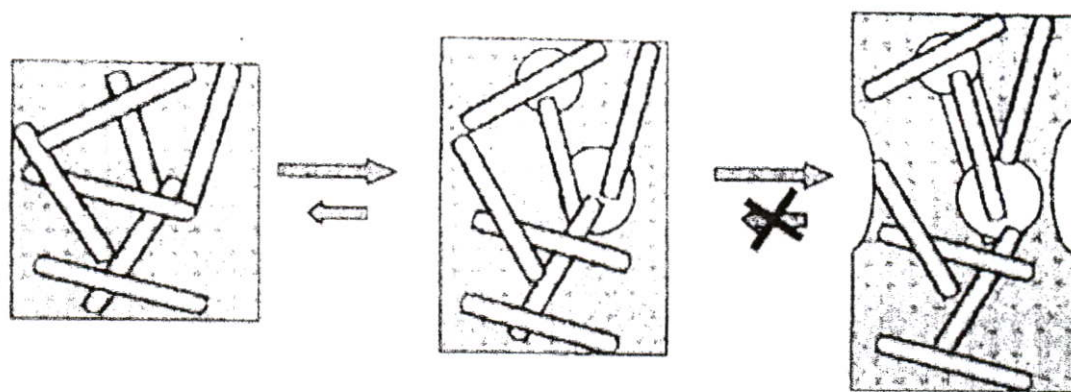
(ก)



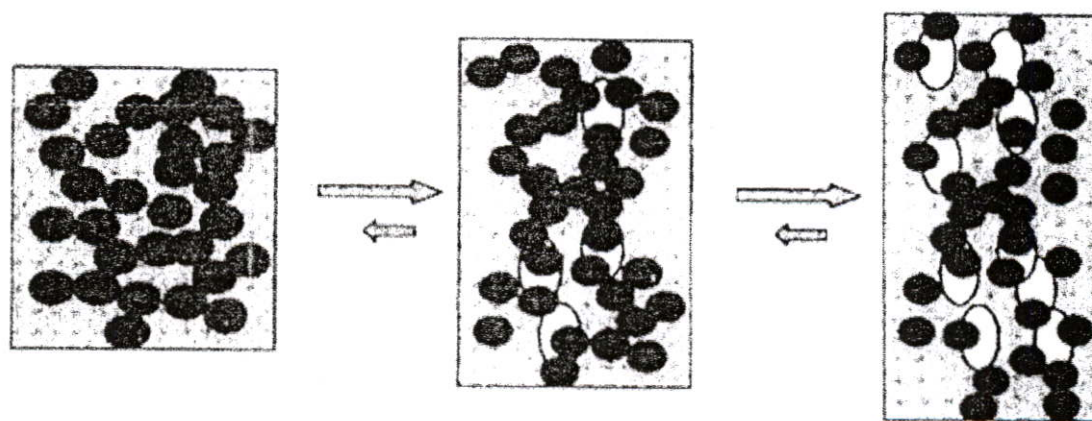
(ข)

รูปที่ ค.5 ความสามารถในการนำไฟฟ้าของคาร์บอนแบล็กเกิดจาก π -bond ของ คาร์บอน
 แบล็กในโมเลกุล ซึ่งเกิดขึ้นระหว่างระนาบของแต่ละโมเลกุล (ก-ข) [16]

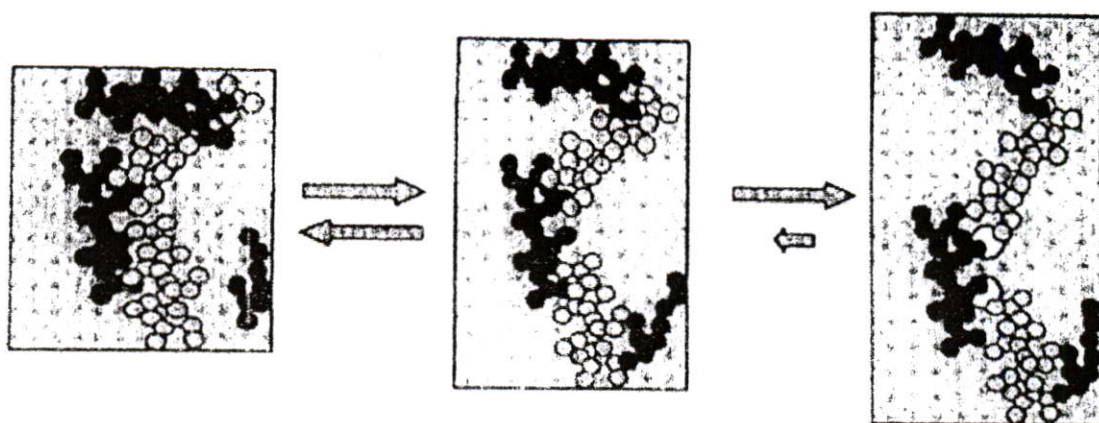
ลักษณะในการนำไฟฟ้าของแต่ละวัสดุเชิงประกอบแสดงในรูป ค. 6 การนำไฟฟ้าที่ต่างกันของแต่ละวัสดุ เกิดจากรูปร่างของวัสดุ ปริมาณวัสดุ และขนาดวัสดุนำไฟฟ้าที่ผสม โดยวัสดุที่มีโครงสร้างต่อเนื่องกันมากจะทำให้มีค่าการนำไฟฟ้าสูงกว่าวัสดุโครงสร้างไม่ต่อเนื่อง ปริมาณวัสดุที่เพิ่มขึ้น จะทำให้สมบัติในการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจากความต่อเนื่องของอนุภาคที่ก่อตัวใกล้กันมากขึ้นจากปริมาณวัสดุที่เพิ่มขึ้น และขนาดอนุภาคที่เล็กทำให้มีการเข้ากันในเนื้อวัสดุเชิงประกอบมาก การนำไฟฟ้าจึงสูง นอกจากนี้รูปร่างวัสดุที่ผสมจะส่งผลต่อ การนำไฟฟ้า คือวัสดุที่มีลักษณะเป็นเส้นใย มีการนำไฟฟ้าดีกว่าวัสดุที่เป็นอนุภาค อีกทั้งสามารถรับแรงได้สูงกว่าวัสดุที่เป็นอนุภาคที่ระดับการยึดตัวหนึ่ง เมื่อการยึดตัวเพิ่มขึ้นจากนี้ วัสดุเชิงประกอบจากเส้นใยจะเสถียรสภาพได้ง่ายกว่าวัสดุเชิงประกอบที่เป็นอนุภาค



(ก)



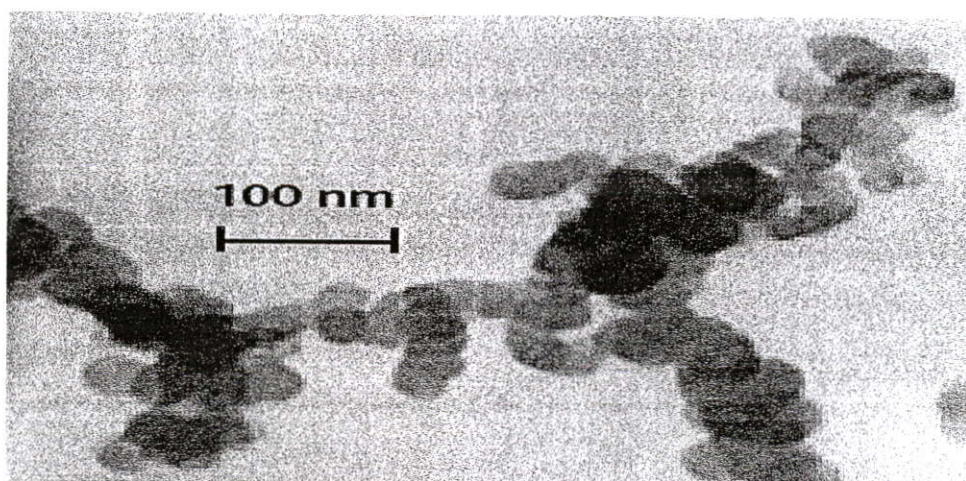
(ข)



(ก)

รูปที่ ๖.๖ รูปแสดงแต่ละวัสดุเชิงประกอบที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง

รูป ค. ๗ แสดงการจัดเรียงตัวของอนุภาคคาร์บอนแบล็กเป็น โมเลกุลที่มีโครงสร้างซับซ้อนมากขึ้น โดยคาร์บอนแบล็กที่มีโครงสร้างสูงจะมีการก่อตัวของแต่ละอนุภาคคาร์บอนเป็น โมเลกุลที่มีกิ่งก้าน และ โครงสร้างที่ซับซ้อนกว่าคาร์บอนแบล็กที่มีโครงสร้างต่ำ



TEM picture of ENSACO™ Carbon Black showing the high level of aggregation. By courtesy of University of Louvain (Louvain-La-Neuve)

รูปที่ ๖.๗ รูปแสดงโครงสร้างการรวมตัวกันของคาร์บอนแบล็ก [17]

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล

วัชรพันธุ์ มณีรัตน์

ที่อยู่

289/1 หมู่ 9 แขวงลำปลาทิว เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ
10520

ประวัติการศึกษา

ปี 2535 จบการศึกษามัธยมปลาย จากโรงเรียนพรตพิทย
พยัคฆ์ แผนก วิทยาศาสตร์-คณิต

ปี 2539 จบการศึกษาจากมหาวิทยาลัย ศรีนครินทร
วิโรฒประสานมิตร

ความชำนาญเฉพาะด้าน

- 1). Polymer
- 2). Organic Chemistry
- 3). Organic Polymer