

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 ยางธรรมชาติ	5
2.1.1 องค์ประกอบทางเคมีของยางธรรมชาติ	6
2.1.2 น้ำยางธรรมชาติ	6
2.1.3 การนำยางธรรมชาติไปใช้ผลิตผลิตภัณฑ์ยาง	7
2.1.4 สมบัติของยางธรรมชาติ	7
2.2 สารเคมีที่ใช้ในอุตสาหกรรมยาง	9
2.2.1 สารทำให้ยางคงรูป 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 ปรากฏการณ์การนํ้าของยางเมื่อได้รับแรง	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 ผลของสันฐานวิทยาของคาร์บอนแบล็กโครงสร้างสูงและต่ำ	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 แรงดึงยึดสูงสุดที่จุลขาด	60
4.4.2 ร้อยละการดึงยึดที่จุลขาด	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 สมบัติทางกายภาพของยางเมื่อปริมาณการเชื่อมโยงมากขึ้น	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

รูปที่	หน้า
2.1 รูปโครงสร้างโมเลกุล ขงธรรมชาติ	6
2.2 การเชื่อมโยงโมเลกุลของขงด้วยกัมมันต์	11
2.3 โครงสร้างกัมมันต์Rhombic	12
2.4 อิทธิพลของสารเร่งต่างๆที่ใช้ในการขงรูปขง	15
2.5 การกระตุ้นการทำงานของสารเร่งด้วยสารเร่งที่ขงรูปขงกว่า	16
2.6 แผนภาพแสดงการผลิตคาร์บอนแบล็กชนิดเฟอร์เนส	23
2.7 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านกำลังขยายต่ำแสดงรูปร่างของคาร์บอนแบล็ก	26
2.8 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านกำลังขยายสูงแสดงรูปร่างของคาร์บอนแบล็ก	26
2.9 ภาพวาดแสดงลักษณะของอนุภาคหรือโนดูลของคาร์บอนแบล็กและแอ็กกรีเกต ที่เกิดจากโนดูลหลอมติดกัน	27
2.10 คาร์บอนแบล็กโครงสร้างต่ำและคาร์บอนแบล็กโครงสร้างมาก	29
2.11 ภาพวาดแสดงการหาโครงสร้างของคาร์บอนแบล็ก และกราฟแสดงจุดยุติการหาโครงสร้าง	30
2.12 ภาพวาดแสดงการเปลี่ยนโครงสร้างของคาร์บอนแบล็กหลังจากได้รับแรงเหวี่ยง	33
2.13 ภาพวาดแสดงโครงสร้างของคาร์บอนแบล็ก ขงยาว และ ขงออกคลู๊ด	34
2.14 กราฟความเค้น-ความเครียด แสดงปรากฏการณ์การนํ้าตัวของขง	35
2.15 ภาพวาดแสดงสาเหตุของการนํ้าตัวของขงเมื่อได้รับแรง	35
3.1 ชิ้นงานทดสอบเพื่อวัดค่าสภาพการนำไฟฟ้า	48
3.2 การวัดสภาพการนำไฟฟ้าขณะยืด	49
3.3 เครื่องวัดสภาพการนำไฟฟ้าสัมพันธ์กับอุณหภูมิ	50
4.1 สันฐานวิทยาของคาร์บอนแบล็ก (N550) จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่กำลังขยาย 3,500 เท่า เพื่อเปรียบเทียบผลของปริมาณคาร์บอนแบล็กที่เติมลงไปในช่วง 5 – 25 phr	52
4.2 สันฐานวิทยาเปรียบเทียบคาร์บอนแบล็ก N234 ที่มีโครงสร้างสูงและ N326 ที่มีโครงสร้างต่ำ จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่ 25 PHR	53
4.3 ความสัมพันธ์ของค่าสภาพการนำไฟฟ้ากับปริมาณคาร์บอนแบล็กที่ผสม	54
4.4 ผลของขนาดอนุภาคที่มีต่อสภาพการนำไฟฟ้าของวัสดุขงประกอบ	55
4.5 ผลของโครงสร้างคาร์บอนแบล็กที่แสดงได้จากการดูชั้นปริมาณสาร DBP ที่มี ต่อสภาพการ นำไฟฟ้าของวัสดุขงประกอบ	56

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
เกิดการดูดซับทางเคมีหรือเคมีชอบขั้ว	Chemisorptions
การประสานเชิงกล	Mechanical Interlocking
การผสม	Compounding
ขนาดอนุภาค	Particle size
แขวนลอยหรือกระจาย	Disperse
ความเกาะกะ	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
ปรากฏการณ์การนูนตัวของยางเมื่อได้รับแรง	Stress Softening Effect
ยางบาวด์	Bound rubber

ศัพท์เทคนิค (ต่อ)

ยางออกคลู้ด	Occluded Rubber
ร้อยละโดยน้ำหนักยาง	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)