



การเตรียมและวิเคราะห์เส้นใยจากยางธรรมชาติผสมอะครีโลไนไตรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีน
ที่ถูกปั่นโดยใช้ไฟฟ้า

โดย

นายสรารุช ศิธรกุล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์

ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2552

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

การเตรียมและวิเคราะห์เส้นใยจากยางธรรมชาติผสมอะครีโลไนไตรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีน
ที่ถักปั่นโดยใช้ไฟฟ้า

โดย
นายสรารัฐ ศิธรกุล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์
ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร
ปีการศึกษา 2552
ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

**PREPARATION AND CHARACTERIZATION OF ELECTROSPUN NATURAL RUBBER/
ACRYLONITRILE BUTADIENE STYRENE NONWOVEN MATS**

By

Sarawuth Sithornkul

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree

MASTER OF ENGINEERING

Department of Materials Science and Engineering

Graduate School

SILPAKORN UNIVERSITY

2009

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร อนุมัติให้วิทยานิพนธ์เรื่อง “ การเตรียมและวิเคราะห์เส้นใยจากยางธรรมชาติผสมอะครีโลไนไตรล์ - บิวทาไดอิน - สไตรีนที่ถูกปั่นโดยใช้ไฟฟ้า ” เสนอโดย นายสรารุช ศิธรกุล เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริชัย ชินะตั้งกูร)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
วันที่.....เดือน..... พ.ศ.....

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
อาจารย์ ดร.พูนทรัพย์ ศรีภพนาถกุล

คณะกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฉัฐกาญจน์ หงส์ศรีพันธ์)
...../...../.....

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.วีรชัย พุทธวงศ์)
...../...../.....

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จันทร์ฉาย ทองปิ่น)
...../...../.....

..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร.พูนทรัพย์ ศรีภพนาถกุล)
...../...../.....

50402239 : สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์

คำสำคัญ : การปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้า/ยางธรรมชาติ

สราวุธ ศิธรกุล : การเตรียมและวิเคราะห์เส้นใยจากยางธรรมชาติผสมอะครีโลไนไตรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีน ที่ถูกปั่นโดยใช้ไฟฟ้า. อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ : อ.ดร.พูนทรัพย์ ศรีภพนาถกุล. 94 หน้า.

การใช้เทคโนโลยีสมัยใหม่ได้แก่กระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าประกอบกับการเลือกใช้วัสดุยางธรรมชาติผสมกับเอปียีสถูกนำมาใช้เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของการเตรียมเส้นใยจากยางธรรมชาติที่ถูกปั่นโดยใช้ไฟฟ้า โดยกระบวนการนี้จะสามารถผลิตเส้นใยที่มีขนาดเล็ก ทำให้มีอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูง และมีขนาดรูพรุนเล็ก ส่งผลทำให้มีน้ำหนักเบา และอากาศสามารถถ่ายเทได้สะดวก ยางธรรมชาติผสมกับเอปียีสเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจแทน flexible plastics ซึ่งมีคุณสมบัติด้านการทนต่อแรงดึงยึดติผสมกับความยืดหยุ่นทางออสติก ดังนั้น โครงการวิจัยนี้ได้นำยางธรรมชาติผสมกับเอปียีสมาศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของยางธรรมชาติและเอปียีส

ในงานวิจัยนี้ ยางธรรมชาติถูกคอมปาวด์กับสารเติมแต่งและสารคงรูปภายในเครื่อง torque rheometer โดยเตรียมสารละลายยางธรรมชาติและเอปียีสในตัวทำละลายเตตระไฮโดรฟูแลนที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ได้แก่ 5 10 และ 15 % โดยน้ำหนัก ทำการศึกษาอัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติคอมพาวด์และเอปียีส ได้แก่ 80/20 70/30 60/40 และ 50/50 นอกจากนี้ทำการศึกษาสภาวะที่ใช้สำหรับเตรียมเส้นใยจากกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าต่อลักษณะของแผ่นเส้นใยยางธรรมชาติผสมเอปียีส ได้แก่ ความต่างศักย์ไฟฟ้า อัตราการไหล ระยะห่างระหว่างหัวฉีดกับแผ่นรองรับ จากผลการวิจัย พบว่า ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยยางธรรมชาติผสมเอปียีสลดลง เมื่อ ลดปริมาณเอปียีส หรือ ลดอัตราการฉีดสารละลาย หรือ ลดปริมาณความเข้มข้นของยางธรรมชาติผสมเอปียีสในตัวทำละลาย หรือ เพิ่มระยะห่างปลายหัวฉีดถึงตัวรองรับ สำหรับสมบัติเชิงกลของแผ่นเส้นใยยางธรรมชาติผสมเอปียีสซึ่งทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง พบว่า เมื่อปริมาณเอปียีสเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความทนต่อแรงดึงเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย แต่ส่งผลให้ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาดลดลงอย่างมาก ส่วนผลของการแพร่ผ่านไอน้ำบนแผ่นเส้นใยยางธรรมชาติ นั้น พบว่า เมื่อปริมาณเอปียีสเพิ่มขึ้นนั้น แผ่นเส้นใยจะมีความเป็นรูพรุนมากขึ้น จึงทำให้ปริมาณไอน้ำสามารถแพร่ผ่านบนแผ่นเส้นใยยางธรรมชาติผสมเอปียีสมากขึ้น

ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร ปีการศึกษา 2552

ลายมือชื่อนักศึกษา.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

50402239 : MAJOR : POLYMER SCIENCE AND ENGINEERING

KEY WORDS : ELECTROSPUN/ NATURAL RUBBER

SARAWUTH SITHORNKUL : PREPARATION AND CHARACTERIZATION OF ELECTROSPUN NATURAL RUBBER/ ACRYLONITRILE BUTADIENE STYRENE NONWOVEN MATS. THESIS ADVISOR : POONSUB THREEPOPATKUL, Ph.D. 94pp.

Combination between a new technology as electrospinning and using natural rubber (NR) and acrylonitril butadiene styrene (ABS) blend is used to study the feasibility on preparation of electrospun natural rubber nonwoven mats. The effect of flow rate of solution, tip to collector distance, and voltage on the morphology, mechanical properties and moisture vapor permeability of electrospun natural rubber nonwoven membranes will be investigated. Electrospinning technique is providing a fibrous membrane with high porosity, high surface area and small fiber diameter. These properties are directly related to the barrier properties of the product, including water vapor transmission and light weight. Natural rubber and ABS blends have been introduced as an alternative to flexible plastics. They are flexible and high tensile strength.

In this research, the NR was compounded in a torque rheometer, with stearic acid, wingstay-L, dibenzothiazole disulfide (MBTS), tetramethylthiuram disulfide (TMTD) and sulfur respectively. The compounded NR was blended with ABS by dissolution them in tetrahydrofuran (THF), concentration of solution included 5, 10, and 15 w/w%. The composition weight ratios of NR/ABS were 80/20, 70/30, 60/40 and 50/50. The effects of electrospun process parameters on the morphology such as voltage (14, 15 and 16 kV), flow rate (10, 20 and 30 ml/h), and tip to collector distance (15, 20 and 25 cm) were studied. The morphology of electrospun fibers were characterized by scanning electron microscope (SEM). SEM images showed that NR/ABS membranes had higher porosity with increasing ABS contents. Fiber diameter of electrospun NR/ABS decreased with decreasing ABS contents, flow rate, and solution concentration but increasing tip to collector distance. Mechanical properties of electrospun NR/ABS non-woven mats were evaluated by universal testing machine and permeability of electrospun NR/ABS membranes was observed by water vapour permeability. The results of mechanical properties showed that for electrospun NR/ABS fiber mats, the elongation at break obviously decreased and the tensile strength slightly increased with increasing ABS loading. For permeability, increasing ABS content increased permeability of electrospun NR/ABS non-woven mats due to higher porosity.

Department of Materials Science and Engineering Graduate School, Silpakorn University Academic Year 2009

Student's signature

Thesis Advisors' signature

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยและวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี โดยได้รับความรู้ คำแนะนำและการชี้แนะต่างๆ เพื่อเป็นแนวทางในการดำเนินงานวิจัยจากอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ อาจารย์ ดร.พูนทรัพย์ ตรีภพนาถกุล ที่ทำให้สามารถดำเนินงานวิจัยได้อย่างราบรื่น และรวมไปถึงขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่ได้เคยสั่งสอนข้าพเจ้ามาตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน

ขอขอบคุณภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร สำหรับสถานที่ทำวิจัยและเครื่องมือทดสอบ และศูนย์ความเป็นเลิศแห่งชาติด้านปิโตรเลียม ปิโตรเคมีและวัสดุขั้นสูงสำหรับทุนการศึกษาและเงินทุนสนับสนุนในการทำวิจัย

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่วิทยาศาสตร์ คุณพินิจ เจียนระลึก ที่คอยอำนวยความสะดวกในการจัดหาอุปกรณ์และสารเคมีต่างๆ และ คุณไพโรจน์ ตั้งสุขวิช ในการบำรุงรักษาเครื่องมือต่างๆ รวมไปถึงเจ้าหน้าที่สำนักงานภาควิชา (พี่กอล์ฟ, พี่เก้, พี่จิบ, พี่เจียบ, พี่เจตต์, พี่ปา และคุณลูกกวาง) ที่อำนวยความสะดวกทางการเงินและเอกสารต่างๆ

ขอบคุณพี่วรเทพ สีสัตย์ช่อ และเพื่อนๆปริญญาโททุกคน ที่ให้ความช่วยเหลือคำปรึกษา ตลอดจนมิตรภาพและความสนุกสนานที่ดีเสมอมา

สุดท้ายนี้งานวิจัยนี้จะเกิดขึ้นไม่ได้เลย ถ้าขาดบุคคลสองท่านนี้ ขอกราบขอบพระคุณคุณพ่อ คุณแม่ และครอบครัวสำหรับกำลังใจ คำแนะนำและความช่วยเหลือต่างๆ เสมอมา

ด้วยความกรุณาของทุกท่านที่กล่าวมาข้างต้น จึงทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ผู้วิจัยจึงขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญภาพ	ฐ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
วัตถุประสงค์และขอบเขตของการวิจัย.....	2
แนวคิดของงานวิจัย.....	2
ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
2 เอกสารที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย	4
ยางธรรมชาติ.....	4
ชนิดและความเป็นมาของยางธรรมชาติ.....	4
สมบัติทั่วไปของยางธรรมชาติ.....	5
การผสมเคมียาง.....	7
การผลิต และ การใช้ยางของโลก	8
อะครีโลไนไตร-บิวตะไดอิน-สไตรีนโคพอลิเมอร์	11
ความเป็นมาของอะครีโลไนไตร-บิวตะไดอิน-สไตรีนโคพอลิเมอร์.....	11
สมบัติโดยทั่วไปของพลาสติกเอบีเอส	13
การปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้า (Electrospinning).....	16
ความเป็นมาของการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้า.....	16
พารามิเตอร์ของสารละลายพอลิเมอร์ (Polymer Solution Parameters)	17
น้ำหนักโมเลกุลและความหนืดของสารละลาย (Molecular Weight and Solution Viscosity)	17
แรงตึงผิว (Surface Tension)	19
การนำไฟฟ้าของสารละลาย (Solution conductivity).....	20

บทที่	หน้า
ผลของความเป็นไออิเล็กทริกของตัวทำละลาย (Dielectric Effect of Solvent)	22
สถานะที่ใช้ในกระบวนการปั่นเส้นใย (Processing Conditions)	23
ความต่างศักย์ไฟฟ้า (Voltage).....	24
อัตราการไหล (Feedrate)	26
อุณหภูมิ (Temperature)	27
ผลของตัวรองรับ (Effect of Collector)	28
เส้นผ่านศูนย์กลางรูออกของปิเปต/เข็ม (Diameter of Pipette Orifice / Needle)	30
ระยะห่างระหว่างปลายเข็มและตัวรองรับ (Distance between Tip and Collector)	30
พารามิเตอร์จากสถานะแวดล้อม (Ambient Parameters)	32
ความชื้น (Humidity)	32
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	33
3 วิธีดำเนินการวิจัย	36
สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	36
อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	36
วิธีการทดลอง.....	37
การเตรียมยางธรรมชาติคอมปาวด์	37
การทดสอบสมบัติการคงรูปของยางคอมพาวด์	38
การเตรียมสารละลายสำหรับการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้า	38
การติดตั้งอุปกรณ์สำหรับปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้า	39
การปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้า.....	39
การวิเคราะห์สมบัติของสารละลาย	40
การวัดความหนืดของสารละลาย	40
การวัดค่าการนำไฟฟ้าของสารละลาย	41
การทดสอบและตรวจสอบสมบัติของเส้นใย NR/ABS ที่ปั่นด้วยไฟฟ้า	41
การหาค่าความความถ่วงจำเพาะของเส้นใย	41

บทที่	หน้า
การทดสอบแรงดึงของเส้นใย	42
การทดสอบการแพร่ผ่านของไอน้ำ.....	42
การศึกษาสัณฐานวิทยาของเส้นใย	43
4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	44
การวิเคราะห์สมบัติของของสารละลาย.....	44
ความหนืดของสารละลาย	44
ค่าการนำไฟฟ้าของสารละลาย.....	45
การศึกษาสัณฐานวิทยาของเส้นใยของยางธรรมชาติที่ผสมเอบีเอส.....	46
การศึกษาสภาวะที่ใช้ในการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้า.....	46
ความเข้มข้นของสารละลาย	46
ระยะทางจากปลายเข็มถึงตัวรองรับ	50
อัตราการไหลของสารละลาย.....	53
ความต่างศักย์ไฟฟ้า.....	55
การศึกษาสภาวะที่ใช้ในการบ่มยางธรรมชาติ.....	57
อิทธิพลของเอบีเอสที่มีผลต่อสัณฐานวิทยาของเส้นใยทั้งก่อนการบ่ม และหลังการบ่ม.....	58
การศึกษาสมบัติการแพร่ผ่านของไอน้ำของเส้นใย NR/ABS.....	62
การทดสอบค่าความหนาแน่นของเส้นใย NR/ABS	63
การศึกษาสมบัติเชิงกลของเส้นใยที่ถูกปั่นด้วยไฟฟ้าของ NR/ABS.....	64
สมบัติความทนทานต่อแรงดึง.....	64
มอดุลัสแรงดึง	65
ความทนต่อแรงดึงสูงสุด.....	65
เปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด	66
5 สรุปผลการทดลอง	68
บรรณานุกรม.....	70
ภาคผนวก	72

บทที่	หน้า
ภาคผนวก ก ข้อมูลค่าความหนืดของสารละลาย NR/ABS	73
ภาคผนวก ข ข้อมูลสมบัติเชิงกลของวัสดุ	74
ภาคผนวก ค ข้อมูลการทดสอบการแพร่ผ่านของไอน้ำ.....	78
ภาคผนวก ง การนำเสนอผลงานในการประชุมวิชาการ	79
ประวัติผู้วิจัย	95

สารบัญญัตินี้

ตารางที่		หน้า
1	ปริมาณการผลิตยางทั้งหมดของโลก.....	10
2	การใช้ยางทั้งหมดของโลก.....	10
3	สมบัติโดยทั่วไปของพลาสติกเอบีเอส.....	14
4	สมบัติของเรซินเมทริกซ์ในพลาสติกเอบีเอส.....	15
5	ค่าการนำไฟฟ้าของตัวทำละลาย.....	21
6	ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของตัวทำละลาย.....	23
7	แสดงอัตราส่วนของสารเติมแต่งที่ใช้ในยางธรรมชาติ.....	38
8	แสดงสถานะที่ใช้ในการเตรียมเส้นใย.....	39
9	แสดงค่าการนำไฟฟ้าของสารละลาย.....	46
10	แสดงค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นใย เมื่อทำการปรับเปลี่ยนความเข้มข้น ของสารละลาย.....	50
11	แสดงค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นใย เมื่อทำการปรับเปลี่ยนระยะทาง ระหว่างปลายเข็มถึงตัวรองรับ.....	53
12	แสดงค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นใย เมื่อทำการปรับเปลี่ยนอัตราการ ไหลของสารละลาย.....	55
13	แสดงค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นใย เมื่อทำการปรับเปลี่ยนความต่าง ศักย์ไฟฟ้า.....	56
14	แสดงสถานะที่ใช้ในการบ่มยางด้วยเครื่อง MDR.....	57
15	แสดงค่าความหนาแน่นของเส้นใย NR/ABS หลังทำการบ่ม.....	63
16	แสดงค่าความหนืดของสารละลาย NR/ABS.....	73
17	แสดงข้อมูลสมบัติเชิงกลของเส้นใยที่ถูกปั่นด้วยไฟฟ้าที่ยังไม่ได้ถูก Normalize ด้วยความหนาแน่นของ NR/ABS:50/50 ที่ความเข้มข้นสารละลาย 15 wt%, ระยะทางระหว่างปลายเข็มถึงตัวรองรับ 20 cm, อัตราการไหล 30 ml/h และความต่างศักย์ไฟฟ้า 15 kV.....	74
18	แสดงข้อมูลสมบัติเชิงกลของเส้นใยที่ถูกปั่นด้วยไฟฟ้าที่ยังไม่ได้ถูก Normalize ด้วยความหนาแน่นของ NR/ABS:60/40 ที่ความเข้มข้นสารละลาย 15 wt%, ระยะทางระหว่างปลายเข็มถึงตัวรองรับ 20 cm, อัตราการไหล 30	

ตารางที่		หน้า
	ml/h และความต่างศักย์ไฟฟ้า 15 kV.....	75
19	แสดงข้อมูลสมบัติเชิงกลของเส้นใยที่ถูกปั่นด้วยไฟฟ้าที่ยังไม่ได้ถูก Normalize ด้วยความหนาแน่นของ NR/ABS:70/30 ที่ความเข้มข้นสารละลาย 15 wt%, ระยะทางระหว่างปลายเข็มถึงตัวรองรับ 20 cm, อัตราการไหล 30 ml/h และความต่างศักย์ไฟฟ้า 15 kV.....	76
20	แสดงข้อมูลสมบัติเชิงกลของเส้นใยที่ถูกปั่นด้วยไฟฟ้าที่ยังไม่ได้ถูก Normalize ด้วยความหนาแน่นของ NR/ABS:80/20 ที่ความเข้มข้นสารละลาย 15 wt%, ระยะทางระหว่างปลายเข็มถึงตัวรองรับ 20 cm, อัตราการไหล 30 ml/h และความต่างศักย์ไฟฟ้า 15 kV.....	77
21	แสดงข้อมูลดิบการทดสอบการแพร่ผ่านของไอน้ำของเส้นใยที่ปั่นด้วยไฟฟ้าของ NR/ABS ที่ความเข้มข้นสารละลาย 15 wt%, ระยะทางระหว่างปลายเข็มถึงตัวรองรับ 20 cm, อัตราการไหล 30 ml/h และความต่างศักย์ไฟฟ้า 15 kV.....	78

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	สูตรโครงสร้างทางธรรมชาติ.....	5
2	แสดงกระบวนการผลิตของ BASF	12
3	แสดงขั้นตอนการผลิตอัลฟาเมทิลสไตรีน (α -methylstyrene)	12
4	เส้นใยพอลิคาโพรแลคโตน (Polycaprolactone) ที่ถูกปั่นด้วยไฟฟ้า [A] เกิดลูกปัดที่ความเข้มข้น 0.1 g/ml และ [B] เส้นใยที่ปราศจากลูกปัดที่ความเข้มข้น 0.12 g/ml.	18
5	[A] ที่ความหนืดสูง, โมเลกุลของตัวทำละลายจะกระจายอยู่บนการพันกันของโมเลกุลพอลิเมอร์ [B] ที่ความหนืดต่ำ, โมเลกุลของตัวทำละลายมีแนวโน้มที่จะเกาะกลุ่มกันเองภายใต้การกระทำของแรงตึงผิว.....	20
6	เส้นใยพอลิคาโพรแลคโตน [A] ลูกปัดจากกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้า ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 6 kV และ [B] เส้นใยที่ปราศจากลูกปัด ที่ 22kV	25
7	เส้นใยพอลิคาโพรแลคโตน ที่มีการเพิ่มขนาดของลูกปัด เมื่อทำการเพิ่มอัตราการไหล [A] 0.5 ml/hr และ [B] 2 ml/hr.....	27
8	การเกิดแอ่ง ของเส้นใยพอลิคาโพรแลคโตนที่ถูกปั่นด้วยไฟฟ้า ที่อัตราการไหล 8 mL/hr.....	29
9	คอลลาเจน (Collagen) ที่ถูกเก็บบน Braided Teflon sheet.	30
10	Nylon 6,6 (a) ระยะห่าง 2 cm และ (b) ระยะห่าง 0.5 cm.....	31
11	แสดงเครื่อง Brabender	37
12	แสดงการติดตั้งอุปกรณ์สำหรับเส้นใยด้วยไฟฟ้า	38
13	แสดงเครื่องวัดความหนืดของสารละลาย Brookfield Viscometer รุ่น	40
14	แสดงเครื่องชั่งทดสอบค่าความหนาแน่น.....	41
15	แสดงเครื่องทดสอบแรงตึงเอนกประสงค์.....	42
16	แสดงความหนืดของสารละลาย NR/ABS ที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน	44
17	แสดงเส้นใย NR/ABS (50/50) ที่ยังไม่ผ่านการบ่มโดยทำการปรับระดับของความเข้มข้นของสารละลาย ดังนี้ 5, 10, 15 wt% ที่ระยะทางระหว่างปลายเข็มถึงตัวรองรับ 15 cm อัตราการไหล 30 ml/h และความต่างศักย์ไฟฟ้า 15 kV	47

ภาพที่		หน้า
18	แสดงเส้นใย NR/ABS (70/30) ที่ยังไม่ผ่านการบ่ม โดยทำการปรับระดับของความเข้มข้นของสารละลาย ดังนี้ 5, 10 wt% ที่ระยะทางระหว่างปลายเข็มถึงตัวรองรับ 15 cm อัตราการไหล 30 ml/h และความต่างศักย์ไฟฟ้า 15 kV	48
19	แสดงเส้นใย NR/ABS (80/20) ที่ยังไม่ผ่านการบ่ม โดยทำการปรับระดับของความเข้มข้นของสารละลาย ดังนี้ 5, 10 wt% ที่ระยะทางระหว่างปลายเข็มถึงตัวรองรับ 15 cm อัตราการไหล 30 ml/h และความต่างศักย์ไฟฟ้า 15 kV	48
20	แสดงเส้นใย NR/ABS (50/50) ที่ยังไม่ผ่านการบ่ม โดยทำการปรับระดับของระยะทางจากปลายเข็มถึงตัวรองรับ ดังนี้ 15, 20 และ 25 cm ที่ความเข้มข้นของสารละลาย 15 %wt อัตราการไหล 30 ml/h และความต่างศักย์ไฟฟ้า 15 kV.....	51
21	แสดงเส้นใย NR/ABS (60/40) ที่ยังไม่ผ่านการบ่ม โดยทำการปรับระดับของระยะทางจากปลายเข็มถึงตัวรองรับ ดังนี้ 15 และ 20 cm ที่ความเข้มข้นของสารละลาย 15 wt% อัตราการไหล 30 ml/h และความต่างศักย์ไฟฟ้า 15 kV	52
22	แสดงเส้นใย NR/ABS (70/30) ที่ยังไม่ผ่านการบ่ม โดยทำการปรับระดับของระยะทางจากปลายเข็มถึงตัวรองรับ ดังนี้ 20 และ 25 cm ที่ความเข้มข้นของสารละลาย 15 wt% อัตราการไหล 30 ml/h และความต่างศักย์ไฟฟ้า 15 kV	52
23	แสดงเส้นใย NR/ABS (80/20) ที่ยังไม่ผ่านการบ่ม โดยทำการปรับระดับของระยะทางจากปลายเข็มถึงตัวรองรับ ดังนี้ 20 และ 25 cm ที่ความเข้มข้นของสารละลาย 15 %wt อัตราการไหล 30 ml/h และความต่างศักย์ไฟฟ้า 15 kV	53
24	แสดงเส้นใย NR/ABS (50/50) ที่ยังไม่ผ่านการบ่ม โดยทำการปรับระดับของอัตราการไหลของสารละลาย ในช่วง 10, 20 และ 30 ml/h ที่ความเข้มข้นของสารละลาย 15 %wt ระยะทางระหว่างปลายเข็มถึงตัวรองรับ 20 cm และความต่างศักย์ไฟฟ้า 15 kV.....	54
25	แสดงเส้นใย NR/ABS 50/50 ที่ยังไม่ผ่านการบ่ม โดยทำการปรับระดับของความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ 14, 15 และ 16 kV ที่ความเข้มข้นของสารละลาย 15 wt% ระยะทางระหว่างปลายเข็มถึงตัวรองรับ 20 cm และอัตราการไหล 30 ml/h	56

ภาพที่		หน้า
26	แสดงภาพเส้นใยยางธรรมชาติที่เตรียมได้จากการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้า ที่ผ่าน การบ่มที่อุณหภูมิ 200 °C	58
27	แสดงเส้นใย NR/ABS ทั้งก่อนและหลังการบ่มและใช้สภาวะในการขึ้นรูป ดังนี้ ความเข้มข้น 15 wt% ระยะทางระหว่างปลายเข็มถึงตัวรองรับ 20 cm อัตราการไหล 30ml/h และความต่างศักย์ไฟฟ้า 15 kV	60
28	แสดงเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเส้นใย NR/ABS ก่อนการบ่มและใช้สภาวะ ในการขึ้นรูป ดังนี้ ความเข้มข้น 15 wt% ระยะทางระหว่างปลายเข็มถึง ตัวรองรับ 20 cm อัตราการไหล 30ml/h และความต่างศักย์ไฟฟ้า 15 kV ..	61
29	แสดงเส้นใยยางธรรมชาติยังไม่ผ่านการบ่ม (ภาพซ้าย) และผ่านการบ่ม (ภาพขวา) ใช้สภาวะในการขึ้นรูป ดังนี้ ความเข้มข้น 15 wt% ระยะทางระหว่างปลาย เข็มถึงตัวรองรับ 20 cm อัตราการไหล 30ml/h และความต่างศักย์ไฟฟ้า 15 kV	62
30	แสดงผลการทดสอบ static moisture permeation ของ Electrospun NR/ABS ที่อัตราส่วน 50/50, 60/40, 70/30 และ 80/20 ที่ความเข้มข้น 15 wt% ระยะทางระหว่างปลายเข็มถึงตัวรองรับ 20 cm อัตราการไหล 30 ml/h และความต่างศักย์ไฟฟ้า 15 kV	62
31	แสดง stress – strain curves ของเส้นใย NR/ABS ที่อัตราส่วน 50/50, 60/40, 70/30 และ 80/20 ที่ความเข้มข้นสารละลาย 15 wt% ระยะทางระหว่าง ปลายเข็มถึงตัวรองรับ 20 cm อัตราการไหล 30 ml/h และความต่างศักย์ ไฟฟ้า 15 kV	64
32	แสดงค่ามอดูลัสของเส้นใย NR/ABS ที่อัตราส่วน 50/50, 60/40, 70/30 และ 80/20 ที่ความเข้มข้นสารละลาย 15 wt% ระยะทางระหว่างปลายเข็มถึงตัว รองรับ 20 cm อัตราการไหล 30 ml/h และความต่างศักย์ไฟฟ้า 15 kV	65
33	แสดงค่าความทนต่อแรงดึงสูงสุดของเส้นใย NR/ABS ที่อัตราส่วน 50/50, 60/40, 70/30 และ 80/20 ที่ความเข้มข้นสารละลาย 15 wt% ระยะทาง ระหว่างปลายเข็มถึงตัวรองรับ 20 cm อัตราการไหล 30 ml/h และความ ต่างศักย์ไฟฟ้า 15 kV	66
34	แสดงค่า elongation at break ของเส้นใย NR/ABS ที่อัตราส่วน 50/50, 60/40,	

ภาพที่		หน้า
	70/30 และ 80/20 ที่ความเข้มข้นสารละลาย 15 wt% ระยะทางระหว่าง ปลายเข็มถึงตัวรองรับ 20 cm อัตราการไหล 30 ml/h และความต่างศักย์ ไฟฟ้า 15 kV	66
35	แสดง stress-strain ของเส้นใยที่ถูกปั่นด้วยไฟฟ้าของ NR/ABS:50/50 ที่ความ เข้มข้นสารละลาย 15 wt%, ระยะทางระหว่างปลายเข็มถึงตัวรองรับ 20 cm, อัตราการไหล 30 ml/h และความต่างศักย์ไฟฟ้า 15 kV	74
36	แสดง stress-strain ของเส้นใยที่ถูกปั่นด้วยไฟฟ้าของ NR/ABS:60/40 ที่ความ เข้มข้นสารละลาย 15 wt%, ระยะทางระหว่างปลายเข็มถึงตัวรองรับ 20 cm, อัตราการไหล 30 ml/h และความต่างศักย์ไฟฟ้า 15 kV	75
37	แสดง stress-strain ของเส้นใยที่ถูกปั่นด้วยไฟฟ้าของ NR/ABS:70/30 ที่ความ เข้มข้นสารละลาย 15 wt%, ระยะทางระหว่างปลายเข็มถึงตัวรองรับ 20 cm, อัตราการไหล 30 ml/h และความต่างศักย์ไฟฟ้า 15 kV	76
38	แสดง stress-strain ของเส้นใยที่ถูกปั่นด้วยไฟฟ้าของ NR/ABS:80/20 ที่ความ เข้มข้นสารละลาย 15 wt%, ระยะทางระหว่างปลายเข็มถึงตัวรองรับ 20 cm, อัตราการไหล 30 ml/h และความต่างศักย์ไฟฟ้า 15 kV	77

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันประเทศไทยมีการปลูกยางพารากันอย่างแพร่และส่งออกอย่างมาก ซึ่งยางพาราหรือเรียกในอีกชื่อหนึ่งว่า ยางธรรมชาติ มีสมบัติเด่นคือ มีความยืดหยุ่น และสามารถกลับคืนสู่สภาพเดิมได้เมื่อมีแรงมากระทำ แต่มีข้อเสียคือ ไม่คงรูป จึงมีการปรับปรุงให้มีสมบัติที่ดีขึ้นได้ด้วยการทำให้ยางคงรูป (Vulcanizing) ซึ่งส่งผลให้สมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติที่ผ่านการวัลคาไนท์แล้วดีขึ้น รวมทั้งการทนทานต่อตัวทำลาย และมีเสถียรภาพต่อความร้อน แต่มีข้อเสียคือขาดความแข็งแรง (Modulus) ได้มีความพยายามที่จะเตรียมเส้นใยจากวัสดุประเภทยาง ด้วยเทคนิคการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าซึ่งได้มีการใช้สารตัวเติม (Filler) หรือระบบของการคงรูปยางแบบต่างๆ [1-3] เพื่อให้สามารถที่จะปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าจากยางเหล่านี้แล้วยังคงสมบัติที่ได้จากเทคนิคการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้า แต่วัสดุยางที่เตรียมได้นั้นก็ยังคงขาดความแข็งแรงในเรื่องของความแข็งแรง (Strength) เนื่องมาจากการที่ใช้วัสดุที่มีมอดูลัสที่ต่ำเกินไป หรือการใช้ระบบของการคงรูปยางนั้นไม่ได้ส่งผลให้ยางนั้นมีสมบัติทางด้านความแข็งแรงที่สูงขึ้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะศึกษาการใช้วัสดุที่มีมอดูลัสที่สูงเติมลงในยางธรรมชาติ ซึ่งจะช่วยให้เส้นใยยางธรรมชาตินั้นมีความแข็งแรงที่เพิ่มขึ้น อีกทั้งยังมุ่งหวังว่าจะช่วยให้ยางธรรมชาติที่เตรียมด้วยเทคนิคการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าจะยังคงสมบัติเช่นเดิมอยู่ จากเทคนิคการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้า สมบัติของผลิตภัณฑ์ที่ได้ นั้นจะมีข้อดีคือ ได้เส้นใยที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ ไมครอนจนถึงในระดับนาโนเมตร ลักษณะของเส้นใยที่ได้มีลักษณะเป็นแบบไม่ถักทอ (Nonwoven) มีพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูง รวมทั้งความเป็นรูพรุน ซึ่งสามารถที่จะนำมาใช้เป็นตัวกรอง, เยื่อเลือกผ่าน, งานทางด้านการแพทย์ (Tissue engineering) หรือวัสดุเสริมองค์ประกอบ (Composite) ซึ่งผู้วิจัยคาดว่าเส้นใยที่เตรียมได้นั้นจะมีความยืดหยุ่นและแข็งแรง แต่ยังคงที่จะมีความเป็นรูพรุนอยู่ เพื่อให้สามารถที่จะมีการระบายอากาศที่ดี

ซึ่งเอบีเอส เป็นวัสดุประเภท เทอร์โมพลาสติก ที่เกิดจากมอนอเมอร์ 3 ชนิดด้วยกันคือ อะคริโลไนไตรล์ (Acrylonitrile), บิวทาไดอีน (Butadiene) และสไตรีน (Styrene) ทำให้สามารถที่จะควบคุมคุณสมบัติของเอบีเอสได้ ซึ่งสมบัติโดยทั่วไปของเอบีเอส นั้นก็ขึ้นอยู่กับปริมาณของแต่ละส่วนของอะคริโลไนไตรล์, บิวทาไดอีน และสไตรีน โดยอะคริโลไนไตรล์มีผลต่อสมบัติการทน

ความร้อนและสารเคมี บิวตะไดอินมีผลต่อสมบัติความทนทานต่อแรงกระแทก (Impact strength) และสไตรีนมีผลทำให้พลาสติกมีพื้นผิวเป็นมันเงา ตัดแต่งวัสดุได้ง่าย สามารถขึ้นรูปได้ง่าย และช่วยลดต้นทุน เนื่องจากเอบีเอสเป็นพลาสติกที่ได้จากการนำโมโนเมอร์ 3 ชนิดมาผลิต ดังนั้นผู้ผลิตเอบีเอส จึงสามารถปรับเปลี่ยนสัดส่วนของโมโนเมอร์ทั้งสามชนิดเพื่อให้ได้สมบัติอย่างที่ต้องการ ดังนั้นในงานวิจัยนี้ต้องการที่จะศึกษาวิธีการเตรียมเส้นใยจากยางธรรมชาติผสมเอบีเอส โดยใช้กระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้า (Electrospinning) และสมบัติต่างๆ ได้แก่ สมบัติทางสัณฐานวิทยา สมบัติเชิงกล และสมบัติการแพร่ผ่านของไอน้ำ ของเส้นใยที่เตรียมได้

1.2 วัตถุประสงค์และขอบเขตของการวิจัย

1.2.1 ศึกษาถึงปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อความสามารถในการขึ้นรูปเส้นใยของยางธรรมชาติที่ผสมเอบีเอสในกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้า เช่น ความหนืดของสารละลาย อัตราการไหล ความต่างศักย์ของกระแสไฟฟ้า และ ระยะห่างระหว่างหัวฉีดกับแผ่นรองรับ

1.2.2 ศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนระหว่างเอบีเอสกับยางธรรมชาติ ที่จะนำไปใช้ขึ้นรูปเส้นใยด้วยกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้า โดยใช้ยางธรรมชาติเป็นสัดส่วนหลัก ที่ส่งผลกระทบต่อสัณฐานวิทยา สมบัติเชิงกล และสมบัติการแพร่ผ่านของไอน้ำ

1.3 แนวคิดของงานวิจัย

งานวิจัยนี้ต้องการเตรียมเส้นใยจากยางธรรมชาติด้วยการปั่นด้วยไฟฟ้า โดยเส้นใยของยางธรรมชาติที่ถูกปั่นด้วยไฟฟ้า จะยังสามารถรักษาลักษณะของเส้นใย และความมีรูพรุนเอาไว้ได้ หลังทำการบ่ม โดยจะทำการเปรียบเทียบผลของปริมาณระหว่างยางธรรมชาติกับเอบีเอส ต่อสมบัติเชิงกล, สมบัติการแพร่ผ่านของไอน้ำ และสมบัติทางสัณฐานวิทยา โดยใช้ยางธรรมชาติเป็นสัดส่วนหลัก ซึ่งมุ่งหวังว่าเอบีเอส จะสามารถเพิ่มความแข็งแรงให้กับยางธรรมชาติ และช่วยรักษารูพรุนของเส้นใยยางธรรมชาติกับเอบีเอสที่ถูกปั่นด้วยไฟฟ้าหลังจากการบ่มเอาไว้ได้

โดยงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 4 ส่วน ดังนี้

ส่วนที่ 1 : หาสภาวะในการบ่มของยางธรรมชาติคอมปาวด์ สำหรับนำไปใช้กับเส้นใยที่ผลิตได้จากกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้า

ส่วนที่ 2 : หาสถานะที่เหมาะสมในการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้า ดังนี้ ความหนืดของสารละลาย, อัตราการไหลของสารละลาย, ความต่างศักย์ไฟฟ้า, ระยะห่างระหว่างหัวฉีดกับแผ่นรองรับ

ส่วนที่ 3 : ศึกษาอิทธิพลของเอบีเอสที่มีต่ออย่างธรรมชาติในการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้า

ส่วนที่ 4 : ทดสอบสมบัติเชิงกล, สมบัติการแพร่ผ่านของไอน้ำ และสมบัติทางสัญญาณวิทยาของเส้นใยที่ปั่นได้ด้วยไฟฟ้า

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 สามารถเตรียมเส้นใยจากการปั่นด้วยไฟฟ้าของยางธรรมชาติที่ผสมกับเอบีเอสได้

1.4.2 ทราบถึงอิทธิพลของเอบีเอสที่มีผลต่อสมบัติเชิงกล, สมบัติการแพร่ผ่านของไอน้ำ และสัญญาณวิทยาของเส้นใยที่เตรียมได้

1.4.3 เป็นแนวทางในการนำยางธรรมชาติไปใช้ประโยชน์ทางการแพทย์ และส่งเสริมการใช้ยางธรรมชาติในประเทศไทย

บทที่ 2

เอกสารที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

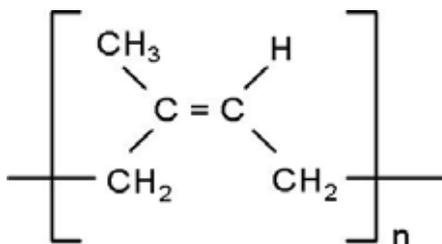
2.1 ยางธรรมชาติ

2.1.1 ชนิดและความเป็นมาของยางธรรมชาติ[4]

ยางธรรมชาติส่วนมากเป็นยางที่ได้มาจากต้นยาง *Hevea Brazilliensis* ซึ่งมีต้นกำเนิดจากกลุ่มแม่น้ำ อเมซอนในทวีปอเมริกาใต้ น้ำยางสดที่กรีดยได้จากต้นยางมีลักษณะสีขาวขุ่นและมีเนื้อยางแห้ง (dry rubber) ประมาณ 30 % แขนงลอยอยู่ในน้ำ ถ้านำน้ำยางที่ได้นี้ไปผ่านกระบวนการปั่นเหวี่ยง (centrifuge) จนกระทั่งได้น้ำยางที่มีปริมาณยางแห้งเพิ่มขึ้นเป็น 60 % เรียกว่า น้ำยางข้น (concentrated latex) การเติมสารแอมโมเนียลงไปจะช่วยรักษาสภาพของน้ำยางข้นให้เก็บไว้ได้นาน น้ำยางข้นส่วนหนึ่งจะถูกส่งออกสู่ตลาดต่างประเทศ ส่วนที่เหลือจะถูกนำไปใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมถุงมือยางและถุงยางอนามัย เป็นต้น แต่เมื่อนำน้ำยางสดที่กรีดยได้จากต้นยางมาเติมกรดเพื่อให้อนุภาคน้ำยางจับตัวกันเป็น ของแข็งแยกตัวจากน้ำ จากนั้นก็รีดยางให้เป็นแผ่นด้วยเครื่องรีด (two-roll mill) และนำไปตากแดดเพื่อไล่ความชื้นก่อนจะนำไปอบรมควันที่อุณหภูมิประมาณ 60-70 °C เป็นเวลา 3 วัน เราก็จะได้ยางแผ่นรมควัน

นอกจากยางแผ่นรมควันแล้ว อุตสาหกรรมส่วนใหญ่เริ่มเปลี่ยนมาใช้ยางแท่งหรือยางก้อนเป็นวัตถุดิบ ทั้งนี้เนื่องจากยางแท่งเป็นยางมีคุณภาพที่สม่ำเสมอกว่ายางแผ่นรมควัน ผ่านการทดสอบและจัดชั้นเพื่อรับรองคุณภาพตามหลักวิชาการ วัตถุดิบของการผลิตยางแท่ง ได้แก่ น้ำยางหรือยางแผ่นขึ้นอยู่กับเกรดของยางแท่งที่ต้องการผลิต เช่น ถ้าต้องการผลิตยางแท่งเกรด STR5L ซึ่งมีสีจางมาก จำเป็นต้องใช้น้ำยางเป็นวัตถุดิบ หรือถ้าต้องการผลิตยางแท่งเกรด STR20 ซึ่งเป็นเกรดที่มีสีเจือปนสูงและมีสีเข้ม ก็อาจใช้ยางแผ่นหรือขี้ยางเป็นวัตถุดิบ เป็นต้น ส่วนกระบวนการผลิตยางแท่งค่อนข้างจะยุ่งยากต้องอาศัยเครื่องจักรที่มีราคาแพงและต้องมีการควบคุมคุณภาพอย่างสม่ำเสมอ ดังนั้นราคายางแท่งจึงสูงกว่ายางแผ่นรมควัน

ยางธรรมชาติมีชื่อทางเคมีคือ ซิส-1,4-พอลิไอโซพรีน (cis-1,4-polyisoprene) กล่าวคือในโมเลกุลยาง 1 โมเลกุลจะประกอบด้วยหน่วยของไอโซพรีน (C_5H_8) มาต่อกันเป็นสายยาว (แบบเส้นตรง) โดยทั่วไปยางธรรมชาติมีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยอยู่ในช่วง 200,000 ถึง 400,000 และมีการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลที่กว้างมาก ยางธรรมชาติมีความหนาแน่นเท่ากับ 0.93g/cm^3 ที่อุณหภูมิ 20 °C และมีอุณหภูมิของการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (glass transition temperature, Tg) ประมาณ -72 °C



ภาพที่ 1 สูตรโครงสร้างยางธรรมชาติ

จากภาพที่ 1 จะเห็นว่าใน 1 หน่วยของไอโซพรีนจะมีพันธะคู่และมีหมู่อัลฟาเมทิลีน (α -methylene) ที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาการคงรูปด้วยกำมะถันอยู่ ดังนั้น พันธะคู่ที่มีอยู่ในโมเลกุลของยางจึงเป็นสิ่งที่จำเป็นสำหรับการคงรูปด้วยกำมะถัน อย่างไรก็ตาม พันธะคู่เหล่านี้ยังสามารถทำปฏิกิริยากับสารอื่นๆ ได้อีก เช่น ออกซิเจน หรือโอโซน ทำให้ยางเกิดการเสื่อมสภาพหรืออาจทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจน คลอรีน ไฮโดรเจนคลอไรด์ เป็นต้น ซึ่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาระหว่างยาง (ที่ตำแหน่งพันธะคู่) กับสารเคมีต่างๆ เหล่านี้จะสูงขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

2.1.2 สมบัติทั่วไปของยางธรรมชาติ

ความยืดหยุ่น (elasticity) สมบัติความยืดหยุ่นเป็นลักษณะเด่นอีกประการหนึ่งของยางธรรมชาติกล่าวคือยางธรรมชาติที่คงรูปแล้วจะมีความยืดหยุ่นสูง เมื่อแรงภายนอกที่มากระทำกับยางหมดไป ยางจะกลับคืนสู่รูปร่างและขนาดเดิม (หรือใกล้เคียง) ได้อย่างรวดเร็ว

ความเหนียวติดกัน (tack) ยางธรรมชาติ (ในสภาพที่ยังไม่คงรูป) มีสมบัติดีเยี่ยมในด้านความเหนียวติดกันซึ่งเป็นสมบัติสำคัญของการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ต้องอาศัยการประกอบชิ้นส่วนต่างๆ เข้าด้วยกัน เช่น ยางล้อรถยนต์ เป็นต้น

ความทนทานต่อแรงดึง (tensile strength) เนื่องจากโมเลกุลของยางธรรมชาติมีความเป็นระเบียบสูงจึงทำให้ยางธรรมชาติสามารถตกผลึกได้ง่ายเมื่อถูกยืด ซึ่งผลึกที่เกิดขึ้นจะช่วยเสริมความแข็งแรงให้กับยาง ดังนั้น ยางธรรมชาติจึงมีค่าความทนทานต่อแรงดึงสูงมาก โดยที่ไม่ต้องใช้สารตัวเติมเสริมแรงเข้าช่วย (~20 MPa หรือสูงกว่านั้น) การเติมสารตัวเติมเสริมแรงลงไปก็จะช่วยทำให้ค่าความทนทานต่อแรงดึงสูงขึ้น ซึ่งสมบัตินี้จะแตกต่างจากยางสังเคราะห์ส่วนใหญ่ที่มักมีค่าความทนทานต่อแรงดึงต่ำ จึงไม่สามารถนำไปใช้งานในทางวิศวกรรมได้นอกจากจะมีการเติมสารตัวเติมเสริมแรงเข้าช่วยเท่านั้น

ความทนทานต่อการฉีกขาด (tear strength) เนื่องจากยางธรรมชาติสามารถตกผลึกได้เมื่อถูกยืด ดังนั้น ยางธรรมชาติจึงมีความทนทานต่อการฉีกขาดสูงมากทั้งที่อุณหภูมิห้องและที่

อุณหภูมิสูง การเติมสารตัวเติมเสริมแรงลงไปก็จะช่วยทำให้ค่าความทนทานต่อการขีดขาดของยางสูงขึ้น

สมบัติเชิงพลวัต (dynamic properties) ยางธรรมชาติมีสมบัติเชิงพลวัตที่ดี ยางมีการสูญเสียพลังงานในรูปของความร้อนต่ำในระหว่างการใช้งาน นอกจากนี้ ยางธรรมชาติยังมีความต้านทานต่อการล้าตัว (fatigue resistance) ที่สูงมากอีกด้วย

ความต้านทานต่อการขัดถู (abrasion resistance) ยางธรรมชาติมีค่าความต้านทานต่อการขัดถูสูง แต่ยังคงดีกว่ายาง SBR เล็กน้อย อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบกับยางสังเคราะห์ชนิดอื่นๆ พบว่ายางธรรมชาติมีค่าความต้านทานต่อการขัดถูอยู่ในกลุ่มที่สูงมาก

ความเป็นฉนวนไฟฟ้า (insulation) ยางธรรมชาติมีความเป็นฉนวนไฟฟ้าสูงมาก โดยมีค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ (specific resistivity) สูงถึง 10^{15} หรือ 10^{16} ohm.cm

ความทนทานต่อของเหลวและสารเคมี (liquid and chemical resistance) เนื่องจากองค์ประกอบของยางธรรมชาติเป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีขั้ว ดังนั้น ยางดิบจึงละลายได้ดีในตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว เช่น เบนซีน เฮกเซน และโทลูอีน เป็นต้น ความสามารถในการละลายนี้จะลดลงถ้าเกิดการคงรูปเนื่องจากการเชื่อมโยงทางเคมีของโมเลกุลเกิดเป็นโครงสร้างตาข่าย 3 มิติในยางคงรูปจะไปขัดขวางกระบวนการละลายของยาง ยางคงรูปจึงเพียงแต่เกิดการบวมตัวในตัวทำละลายเหล่านี้เท่านั้น อย่างไรก็ตาม การบวมตัวของยางดังกล่าวจะทำให้สมบัติเชิงกลของยางด้อยลง ด้วยเหตุนี้ ยางธรรมชาติจึงไม่ทนต่อน้ำมันปิโตรเลียมหรือตัวทำละลายที่ไม่มีขั้วต่างๆ แต่ยางจะทนทานต่อของเหลวที่มีขั้ว เช่น อะซิโตน หรืออัลกอฮอล์ นอกจากนี้ ยางธรรมชาติยังทนต่อกรดและด่างเจือจางได้ดี แต่ไม่ทนต่อกรดในตริกและกรดกำมะถันเข้มข้น

การเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน โอโซน และแสงแดด (aging properties) เนื่องจากโมเลกุลของยางธรรมชาติมีพันธะคู่อยู่มาก ทำให้ยางว่องไวต่อการทำปฏิกิริยากับออกซิเจน (เรียกปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นว่าปฏิกิริยาออกซิเดชัน) โดยมีแสงแดดหรือความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนั้น ยางธรรมชาติจึงถูกออกซิไดส์ได้ง่าย นอกจากนี้ ยางธรรมชาติยังไม่ทนต่อโอโซน เพราะเมื่อยางถูกยึดและได้รับโอโซนนานๆ จะเกิดรอยแตกขนาดเล็กจำนวนมากที่บริเวณพื้นผิวในทิศตั้งฉากกับทิศทางการยึดตัวของยาง ด้วยเหตุนี้ ในระหว่างการผลิตผลิตภัณฑ์จึงต้องมีการเติมสารเคมีบางชนิด (สารป้องกันการเสื่อมสภาพ (anti-degradants) และไข (wax)) ลงไปเพื่อยืดอายุการใช้งานของยางธรรมชาติ

การหักงอที่อุณหภูมิต่ำ (low temperature flexibility) ยางธรรมชาติยังคงรักษาสสมบัติความยืดหยุ่นหรือความสามารถในการหักงอได้แม้ที่อุณหภูมิต่ำมากๆ ซึ่งยางที่มีสมบัตินี้ดีกว่ายางธรรมชาติมีเพียง 2 ชนิดคือ ยางบิวตาไดอีน (BR) และยางซิลิโคน (Q)

Compression set ยางธรรมชาติมีค่า compression set ค่อนข้างต่ำทั้งที่อุณหภูมิห้อง และที่อุณหภูมิสูงปานกลาง อย่างไรก็ตามค่า compression set ที่อุณหภูมิต่ำของยางธรรมชาติจะสูงขึ้นเนื่องจากยางอาจเกิดการตกผลึกทำให้ความยืดหยุ่นของยางเริ่มสูญเสียไป ในขณะที่ค่า compression set ที่อุณหภูมิสูงของยางธรรมชาติจะมีค่าสูงขึ้นเนื่องจากยางธรรมชาติไม่ทนต่อความร้อน ยางจึงเกิดการเสื่อมสภาพ ซึ่งจะส่งผลทำให้สมบัติ compression set ค่อยลง

การกระด้างกระดอน (rebound resilience) ยางธรรมชาติมีสมบัติการกระด้างกระดอนสูง (สูงกว่ายางชนิดอื่นๆ ทั้งหมด ยกเว้นยาง BR) และในระหว่างการเปลี่ยนแปลงรูปร่างยางจะสูญเสียพลังงานในรูปของความร้อนน้อย (มี hysteresis ต่ำ) ยางธรรมชาติจึงมีความร้อนสะสมต่ำเมื่อถูกใช้งานในเชิงพลวัตยางชนิดนี้จึงเหมาะที่จะใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ยางที่มีขนาดใหญ่ เช่น ยางรถบรรทุกหรือยางล้อเครื่องบิน เพราะหากใช้ยางที่มีความร้อนสะสมสูงก็อาจทำให้ยางเกิดการระเบิดได้ง่าย

อุณหภูมิของการทำงาน (service temperature) ยางธรรมชาติสามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิตั้งแต่ -55°C จนถึง 70°C อย่างไรก็ตาม หากเก็บยางไว้ที่อุณหภูมิต่ำนานๆ ยางอาจเกิดการตกผลึกซึ่งจะทำให้ยางแข็งขึ้นและสูญเสียความยืดหยุ่นไป แต่เมื่ออุณหภูมิการใช้งานสูงเกินไป สมบัติเชิงกลต่างๆ ก็จะค่อยลงเนื่องจากความร้อนจะทำให้ยางเกิดการเสื่อมสภาพ ในบางกรณีที่มีการออกสูตรผสมเคมีอย่างไรก็เหมาะสม (มีการเติมสารป้องกันการเสื่อมสภาพลง) ยางธรรมชาติอาจสามารถนำไปใช้งานได้อย่างต่อเนื่องที่อุณหภูมิสูงถึง 90°C หรืออาจสูงถึง 100°C (ในกรณีที่ยางได้รับอุณหภูมิสูงเป็นช่วงๆ เท่านั้น)

2.1.3 การผสมเคมียาง

ยางดิบตามลำพังจะมีขีดจำกัดในการทำงานเนื่องจากมีสมบัติเชิงกลต่ำและมีลักษณะทางกายภาพที่ไม่เสถียร โดยสมบัติต่างๆ จะแปรผันตามการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอย่างมาก กล่าวคือ ยางจะอ่อนตัวและเหนียวเมื่อร้อน แต่จะแข็งเปราะที่อุณหภูมิต่ำ ด้วยเหตุนี้ การใช้ประโยชน์จากยางจำเป็นต้องมีการผสมยางกับสารเคมีต่างๆ เช่น กำมะถัน ผงเขม่าดำ สารตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นต้น หลังจากการผสมเคมียาง ยางผสมที่ได้หรือที่เรียกกันโดยทั่วไปว่ายางคอมปาวด์ (rubber compound) จะถูกนำไปขึ้นรูปในแม่พิมพ์ภายใต้ความร้อนและความดัน กระบวนการนี้เรียกว่ากระบวนการคงรูปยางหรือในทางเทคนิคจะเรียกว่ากระบวนการวัลคาไนเซชัน (vulcanization) ยางที่ผ่านกระบวนการดังกล่าวแล้วจะเรียกว่า “ยางสุกหรือยางคงรูป (vulcanizate)” ซึ่งสมบัติของยางคงรูปที่ได้นี้จะเสถียร ไม่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิมากนักและมีสมบัติเชิงกลดีขึ้น

แม้ว่ายางธรรมชาติสามารถคงรูปได้ด้วยเพอร์ออกไซด์หรือการใช้รังสีที่มีพลังงานสูง แต่ระบบการคงรูปด้วยกำมะถันก็ยังคงเป็นระบบที่ใช้กันมากที่สุดในอุตสาหกรรมยาง เมื่อเปรียบเทียบกับยางสังเคราะห์ ยางธรรมชาติต้องการปริมาณกำมะถันมากกว่าแต่ต้องการปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาน้อยกว่า เพราะในยางธรรมชาติมีสารประกอบอินทรีย์บางตัวที่สามารถเร่งปฏิกิริยา คงรูปได้

ยางธรรมชาติเป็นของแข็งที่มีความเหนียวและความหนืดสูงมาก การผสมสารเคมีให้เข้ากับยางจึงเป็นไปได้ยาก ด้วยเหตุนี้ ก่อนการผสมจึงต้องทำการบดยางหรือลดความหนืดของยาง โดยการจัดโมเลกุลยาง (ลดน้ำหนักโมเลกุล) ด้วยกระบวนการเชิงกล นั่นคืออาศัยแรงเฉือนในเครื่องรีดแบบ 2 ลูกกลิ้ง (two-roll mill) หรือในเครื่องผสมระบบปิด (internal mixer) ขั้นตอนการบดยางเพื่อลดความหนืดของยางก่อนการผสมเคมีนี้เรียกว่า “มาสติกเคชัน (mastication)” ปฏิกิริยาบดยางที่อุณหภูมิต่ำจะให้ประสิทธิภาพการบดที่ดีเพราะยางจะมีความหนืดสูงส่งผลทำให้เกิดแรงเฉือนสูง โมเลกุลยางก็จะเกิดการฉีกขาดได้ดี แต่ที่อุณหภูมิสูง ยางจะมีความหนืดลดลงซึ่งจะส่งผลทำให้แรงเฉือนที่เกิดขึ้นในระหว่างการผสมลดลงด้วย ประสิทธิภาพในการบดยางอันเนื่องจากแรงเชิงกลจึงลดลง แต่ในบางครั้งก็สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการบดยางที่อุณหภูมิสูงได้เช่นกัน โดยการเติมสารเปปไทเซอร์ (peptizer) ลงไปเล็กน้อย เพราะสารเคมีดังกล่าวจะช่วยทำให้โมเลกุลยางที่ถูกต้องขาดไปแล้วไม่สามารถกลับเข้าไปทำปฏิกิริยารวมตัวกันใหม่

เนื่องจากการบดยางที่มากเกินไปจะทำให้ยางอ่อนเกินไป ซึ่งจะส่งผลทำให้ยางไม่สามารถรับสารตัวเติมได้ในปริมาณมาก ยางคงรูปที่ได้จึงมีความยืดหยุ่น สมบัติเชิงกล และสมบัติเชิงพลวัตที่ไม่ดี ดังนั้นการบดยางจึงควรทำเท่าที่จำเป็น (ใช้เวลาให้สั้นที่สุดเท่าที่จะทำได้) เพราะนอกจากจะทำให้ยางคงรูปที่ได้มีสมบัติที่ดีแล้ว ยังช่วยลดต้นทุนในการผลิตอีกด้วย

2.1.4 การผลิต และการใช้ยางของโลก[4-5]

ในอดีต ยางธรรมชาติจัดเป็นยางเอนกประสงค์ที่สามารถนำไปใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆ ได้มากมายเนื่องจากยางธรรมชาติมีสมบัติทั้งเชิงกลและเชิงพลวัตที่ดี อย่างไรก็ตาม ยางธรรมชาติก็มีข้อด้อยหลักคือไม่ทนต่อความร้อน สภาพอากาศ น้ำมัน และสารเคมีอื่นๆ ด้วยเหตุนี้ ยางสังเคราะห์ชนิดต่างๆ จึงเริ่มเข้ามามีบทบาทสำคัญแทนที่ยางธรรมชาติ อย่างไรก็ตาม ผลิตภัณฑ์ยางบางประเภทยังคงจำเป็นต้องใช้ยางธรรมชาติเป็นวัตถุดิบในกระบวนการผลิตเนื่องจาก

1. ยางธรรมชาติมีสมบัติดีเยี่ยมในด้านความทนทานต่อแรงดึงแม้ไม่ได้เติมสารตัวเติมเสริมแรงและมีความยืดหยุ่นสูงมาก จึงเหมาะที่จะใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์บางชนิด เช่น ถุงมือยาง ถุงยางอนามัย ลูกโป่ง และยางรัดของ เป็นต้น

2. ยางธรรมชาติมีสมบัติทั้งเชิงกลและเชิงพลวัตที่ดี มีความยืดหยุ่นสูง ในขณะที่มีความร้อนสะสมที่เกิดขึ้นต่ำและมีสมบัติความเหนียวติดกันที่ดี จึงเหมาะที่จะนำไปใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์หลากหลายชนิด เช่น ยางล้อรถบรรทุก ยางล้อรถยก ยางล้อเครื่องบิน ฝ้ายาง ยางกันกระแทกท่าเรือ หรือใช้ผสมกับยางสังเคราะห์ในการผลิตยางล้อรถยนต์ เป็นต้น

3. ยางธรรมชาติมีความทนทานต่อการฉีกขาดสูงทั้งที่อุณหภูมิต่ำและอุณหภูมิสูง จึงเหมาะสำหรับการผลิตยางกระเป๋าน้ำร้อน เนื่องจากในการแกะชิ้นงานออกจากเบ้าพิมพ์ในระหว่างกระบวนการผลิตจะต้องดึงชิ้นงานออกจากเบ้าพิมพ์ในขณะที่ร้อน ยางที่ใช้จึงต้องมีค่าความทนทานต่อการฉีกขาดขณะร้อนสูง

ปี 2549 ปริมาณการผลิตยางทั้งหมดของโลกมีทั้งสิ้น 21.703 ล้านตัน แบ่งเป็นยางสังเคราะห์ 12.515 ล้านตัน และยางธรรมชาติ 9.188 ล้านตัน (ตารางที่ 1) ระหว่างปี 2545-2549 ปริมาณการผลิตยาง ทั้งหมดของโลกได้เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยที่อัตราการขยายตัวของการผลิตยางธรรมชาติสูงกว่าการผลิตยางสังเคราะห์ อย่างไรก็ตามสัดส่วนของยางที่ผลิตได้ทั้งหมดของโลกส่วนใหญ่ร้อยละ 60 เป็นยางสังเคราะห์ ที่เหลือร้อยละ 40 เป็นยางธรรมชาติ สำหรับการใช้อย่างของโลกพบว่าปี 2549 การใช้อย่างของโลกมีทั้งสิ้น 21.573 ล้านตัน แบ่งเป็นยางสังเคราะห์ 12.617 ล้านตัน และยางธรรมชาติ 8.956 ล้านตัน การใช้อย่างของโลกมีการใช้อย่างสังเคราะห์มากกว่ายางธรรมชาติในสัดส่วนประมาณร้อยละ 60:40 (ตารางที่ 2) สัดส่วนการใช้อย่างสังเคราะห์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากผู้ใช้อย่างส่วนใหญ่สามารถผลิตและส่งออกได้ จึงเอื้ออำนวยต่อการบริหารจัดการในเรื่องของสต็อกและวัตถุดิบ ประกอบกับราคายางสังเคราะห์ค่อนข้างมีเสถียรภาพมากกว่ายางธรรมชาติ สำหรับแนวโน้มการผลิตและการใช้อย่างของโลกเป็นไปในทิศทางที่เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับการเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจและการเพิ่มขึ้นของประชากรโลก

ตารางที่ 1 ปริมาณการผลิตยางทั้งหมดของโลก [5]

ปี	การผลิตยางของโลก					
	ยางธรรมชาติ		ยางสังเคราะห์		รวม	
	ปริมาณ	ร้อยละ	ปริมาณ	ร้อยละ	ปริมาณ	ร้อยละ
2545	7,302	40.16	10,882	59.84	18,184	100.00
2546	7,975	41.18	11,390	58.82	19,365	100.00
2547	8,654	41.92	11,989	58.08	20,943	100.00
2548	8,777	42.09	12,078	57.91	20,855	100.00
2549	9,188	42.34	12,515	57.66	21,703	100.00

ที่มา : IRSG (2007)

ตารางที่ 2 การใช้ยางทั้งหมดของโลก [5]

ปี	การใช้ยางของโลก					
	ยางธรรมชาติ		ยางสังเคราะห์		รวม	
	ปริมาณ	ร้อยละ	ปริมาณ	ร้อยละ	ปริมาณ	ร้อยละ
2545	7,628	41.56	10,724	58.44	18,352	100.0
2546	8,033	41.33	11,404	58.67	19,437	100.0
2547	8,581	41.91	11,894	58.09	20,475	100.0
2548	8,994	42.82	12,010	57.18	21,004	100.0
2549	8,956	41.51	12,617	58.49	21,573	100.0

ที่มา : IRSG (2007)

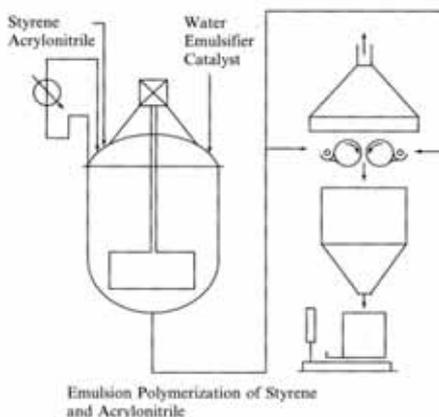
ยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์มีความจำเป็นที่ต้องใช้ร่วมกันในผลิตภัณฑ์หลายชนิดเพื่อประโยชน์ในด้านคุณภาพของสินค้า และในหลายกรณีสามารถใช้ทดแทนกันได้ สภาพการแข่งขันในการผลิตยางสังเคราะห์และยางธรรมชาตินั้นแตกต่างกันที่การผลิตยางสังเคราะห์เป็นการผลิตจากโรงงานอุตสาหกรรมที่ต้องใช้เงินลงทุนสูง ควบคุมปริมาณการผลิตได้ ส่วนการผลิตยางธรรมชาติเป็นการผลิตในเชิงเกษตรกรรม เกื้อกูลทางด้านสภาพแวดล้อมและให้ผลพลอยได้ทางด้านไม้ใช้สอยหรือมวลชีวภาพที่เป็นประโยชน์แก่มวลมนุษย์ ขณะที่การผลิตยางสังเคราะห์ก่อให้เกิดผลเสียต่อบรรยากาศและสภาพแวดล้อม โดยทั่วไปการใช้ยางสังเคราะห์ในแต่ละปี มี

ปริมาณที่ใกล้เคียงกับปริมาณการผลิตและส่วนใหญ่เป็นการใช้ในประเทศผู้ผลิตเพื่อป้อนโรงงานอุตสาหกรรมของตนเอง และเป็นหลักประกันมิให้เกิดการขาดแคลนยางขึ้นได้ เช่น สหรัฐอเมริกา ญี่ปุ่น รัสเซียและเกาหลีใต้ นอกจากการผลิตเพื่อใช้ในประเทศแล้วยังส่งออกไปประเทศอื่น ๆ ที่ไม่มีการผลิตอีกด้วย ยางสังเคราะห์มีแผนการผลิตที่แน่นอน มีการทำสัญญาซื้อขายล่วงหน้า จึงทำให้การผลิตและการใช้ยางสังเคราะห์มีความสมดุลมากกว่ายางธรรมชาติ ดังนั้น จึงไม่เกิดความผันผวนของราคาซึ่งต่างจากยางธรรมชาติ

2.1 อะคริโลไนไตร-บิวตะไดอิน-สไตรีนโคพอลิเมอร์

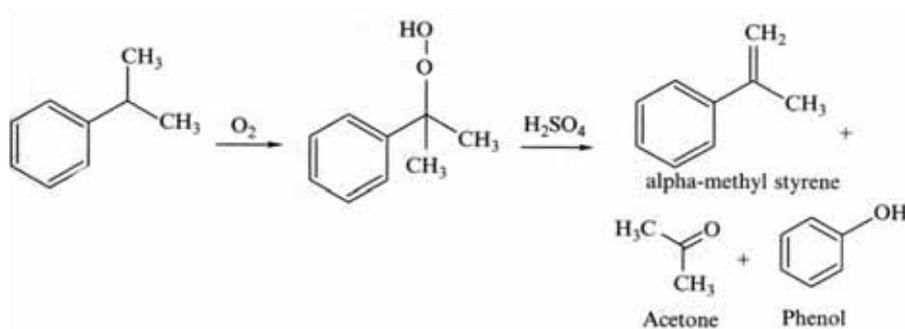
2.1.1 ความเป็นมาของอะคริโลไนไตร-บิวตะไดอิน-สไตรีนโคพอลิเมอร์ [6-8]

ปี ค.ศ. 1940 อะคริโลไนไตร-บิวตะไดอิน-สไตรีนโคพอลิเมอร์ หรือ พลาสติกเอบีเอส (acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer ,ABS) เริ่มรู้จักกันในช่วงสงครามโลกครั้งที่ 2 ประมาณกลางปี โดยเริ่มแรกของการผลิตพลาสติกเอบีเอสนั้น ทำได้โดยการผสมระหว่างสไตรีน-อะคริโลไนไตรโคพอลิเมอร์ (SAN) กับบิวตะไดอิน-สไตรีนโคพอลิเมอร์ (SBR) หรือบิวตะไดอิน-อะคริโลไนไตรโคพอลิเมอร์ (NBR) แต่วัสดุดังกล่าวก็ยังมีปัญหาอยู่ เช่น ไม่มีความคงทนของสี ราคาสูง ขึ้นรูปยาก ผลิตภัณฑ์ที่ได้ไม่มีความสวยงาม พื้นผิวที่ไม่มีความเงา หรือพื้นผิวด้าน และโดยเฉพาะอย่างยิ่ง ทนต่อแรงกระแทกได้ไม่ดีที่อุณหภูมิต่ำแต่ปัญหาดังกล่าวก็สามารถแก้ไขได้ โดยในปี 1948 ทีมนักวิจัยจากบริษัท Marbon (บริษัทในเครือ Marsene Corp. ซึ่งภายหลังเปลี่ยนชื่อเป็น Borg Warner) พบว่าพอลิบิวตะไดอินมีอุณหภูมิทรานซิชันต่ำกว่าในกรณีที่เป็นโคพอลิเมอร์ จึงคิดที่จะนำพอลิบิวตะไดอินมาผสมกับ SAN โดยตรงเพื่อผลิตวัสดุเอบีเอสแต่ก็ยังมีปัญหาเรื่องความเข้ากันได้ของเฟสทั้งสอง ซึ่งปัญหาดังกล่าวก็สามารถแก้ไขได้โดยการใช้กระบวนการ Emulsion polymerization เพื่อสังเคราะห์อนุภาคพอลิบิวตะไดอินขึ้นมาก่อนจากนั้นกราฟท์ SAN ลงไปโดยใช้กระบวนการผลิตของ BASF ดังแสดงในภาพที่ 1 จนกระทั่งในปี 1959 Borg Warner ได้ทำการจดสิทธิบัตรสำหรับกระบวนการผลิตเอบีเอสด้วยวิธีดังกล่าวและใช้ผลิตเอบีเอสออกสู่ตลาดโดยใช้ชื่อทางการค้าว่า CyclolacTM



ภาพที่ 2 แสดงกระบวนการผลิตของ BASF

การวิจัยและพัฒนาวัสดุเอปียีสเป็นไปอย่างต่อเนื่อง Borg Warner ใช้เงินลงทุนมหาศาลสำหรับงานวิจัยกว่า 10,000 ชั่ง เพื่อหาสัดส่วนมอนอเมอร์ที่เหมาะสมในการผลิตเอปียีสในด้านการพาณิชย์ ต่อมา มีการผลิตพลาสติกเอปียีสชนิดทนความร้อนสูงขึ้น โดยใช้อัลฟาเมทิลสไตรีน (α -methylstyrene) แทนสไตรีนทั้งในส่วนเมทริกซ์และส่วนกราฟท์ ซึ่งทำให้วัสดุเอปียีสมีอุณหภูมิในการเสีรูป (Heat deflection temperature) สูงขึ้น โดยในปี 1958 เอปียีสเกรดทนความร้อนเป็นที่นิยมมากในอุตสาหกรรมยานยนต์ แต่ข้อเสียของเอปียีสเกรดนี้คือความหนืดที่เพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากหมู่เมทิลที่เพิ่มเข้าไปจะขัดขวางการไหลของพลาสติกหลอมเหลวทำให้มีข้อจำกัดในการขึ้นรูปสำหรับเอปียีสเกรดดังกล่าว



ภาพที่ 3 แสดงขั้นตอนการผลิตอัลฟาเมทิลสไตรีน (α -methylstyrene)

ต่อมาได้เกิดแนวคิดที่ผลิตวัสดุเอปียีสที่มีความใสขึ้น ซึ่งเอปียีสชนิดที่มีอยู่นั้นมีลักษณะขุ่นเนื่องจากการกระเจิงแสงของเฟสยาง จึงมีการทดลองลดขนาดของอนุภาคบิวตะไดอิน พบว่าสามารถผลิตเอปียีสที่มีความใสได้แต่กลับทำให้ความทนต่อแรงกระแทกลดลง ต่อมา มีการ

ทดลองเติมมอนอเมอร์อีกชนิดลงไปซึ่งก็คือ เมทิลเมทาคริเลต (Methyl methacrylate; MMA) เพื่อลดความแตกต่างครรชนที่หักเหแสงขององค์ประกอบต่างๆ จนประสบความสำเร็จในการผลิตเอปียเอสชนิดใสและออกสู่ตลาดด้วยชื่อทางการค้า Cyclolac™ CIT

2.1.2 สมบัติโดยทั่วไปของพลาสติกเอปียเอส

เนื่องจากพลาสติกเอปียเอสเป็นพลาสติกที่ประกอบด้วยมอนอเมอร์ 3 ชนิด จึงทำให้สมบัติในด้านต่างๆ ของพลาสติกเอปียเอสเป็นไปตามสมบัติของมอนอเมอร์นั้นๆ ดังนี้

1. พอลิอะคริโลไนไตร เป็นพอลิเมอร์ชนิดอสัณฐาน (Amorphous) ช่วยเสริมความแข็งแรง (Strength) ความแข็ง (Rigid) ทนต่อความร้อน สารเคมี และเป็นตัวทำละลายได้ดี

2. พอลิบิวตะไดอิน เป็นวัสดุที่เป็นยาง มีอุณหภูมิอ่อนตัว (T_g) ต่ำ (ต่ำกว่า -76°F หรือ -60°C) และมีพันธะคู่ที่ทำให้เกิดการเชื่อมโยง (Cross-linking) เป็นเทอร์โมเซทพลาสติกซึ่งเป็นที่นิยมทั้งในบริษัทที่ผลิตโฮโมพอลิเมอร์ (Homopolymer) และโคพอลิเมอร์ (Copolymer) เช่น ยางเอสบีอาร์ (SBR) และ เอ็นบีอาร์ (NBR) เป็นต้น เนื่องจากยางบิวตะไดอินช่วยทำให้อุณหภูมิอ่อนตัวของวัสดุลดลงจึงทำให้วัสดุดังกล่าว ทนต่อแรงกระแทกได้ดี เพื่อความเหนียว และสามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิต่ำ

3. พอลิสไตรีน เป็นพอลิเมอร์ชนิดอสัณฐาน มีความแข็งสูง (Rigid materials) ความหนืดต่ำ (low viscosity) จึงสามารถไหลได้ง่าย (Flowability) ทำให้ง่ายต่อการขึ้นรูปในกระบวนการผลิต และมีความมันวาวแต่มีข้อด้อย คือ มีความเปราะ (Brittleness)

จากสมบัติดังกล่าวของมอนอเมอร์ทั้งสามชนิด ทำให้พลาสติกเอปียเอสมีสมบัติที่ดีหลายอย่างด้วยกัน แสดงดังตารางที่ 1 โดยสมบัติต่างๆ ของพลาสติกเอปียเอส ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบน้ำหนักโมเลกุล และลักษณะทางสัณฐานวิทยา (morphology) ของพอลิเมอร์ต่างๆ ดังกล่าว และจากสมบัติที่ดีหลายอย่างนี้จึงทำให้พลาสติกเอปียเอสได้รับความนิยมในการใช้งานอย่างมาก แต่เนื่องจากการะบวนการผลิตเม็ดพลาสติกเอปียเอสที่ค่อนข้างซับซ้อนจึงมีข้อจำกัดในเรื่องของราคา และสำหรับกระบวนการขึ้นรูปพลาสติกเอปียเอสนั้นใช้อุณหภูมิในการผลิตช่วง 220-260 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ยังต้องระวังในเรื่องของความชื้นระหว่างกระบวนการขึ้นรูปเป็นพิเศษด้วย

ตารางที่ 3 สมบัติโดยทั่วไปของพลาสติกเอบีเอส

Properties	Units	Injection-molding grades		Extrusion grades
		High impact	Medium impact	
Izod impact (3.2 mm.thick specimen)	J/m	320-500	160-320	80-640
Hardness	R	85-106	102-115	75-115
Tensile yield strength	MPa	18-41	35-50	30-44
Elongation at break	%	5-75	5-60	20-100
Tensile modulus	GPa	1.02.4	2.1-2.8	0.9-2.9
Specific gravity	-	1.01-1.05	1.03-1.06	1.02-1.08

สมบัติของพลาสติกเอบีเอสโดยทั่วไปขึ้นอยู่กับเฟสหลัก ซึ่งเป็นส่วนสำคัญในการกำหนดความสามารถในการผลิต (Processibility) และการทนความร้อนของพลาสติกเอบีเอสคอมปาวด์ (Compound) โดยความสามารถในการผลิตจะขึ้นอยู่กับน้ำหนักโมเลกุล และสัดส่วนทางเคมีของพลาสติกเอบีเอสคอมปาวด์ เช่น หน่วยของมอนอเมอร์ การจัดเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลพอลิเมอร์ และอุณหภูมิคล้ายแก้วของเฟสหลักในพลาสติกเอบีเอส แสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 4 สมบัติของเรซินเมทริกซ์ในพลาสติกเอบีเอส

Matrix component	Chemical constructure	T _g (°C)	Concentration in the ABS blend (wt%)	Heat resistance Vicat B 120 (°C)	Other properties
SAN	Random copolymer S:AN 80:20-65:35	115	95-50	104	Increase in thermal-stability at high acrylonitrile contents
AMS-AN copolymer	Random copolymer AMS:AN 70:30	128	95-50	117	Depolymerization begins at 280°C
AMS-AN Sequence polymer	AMS:AN 70:30 high proportion of AMS pairs	140	95-50	~130	Toughness lower than with random copolymers
Styrene-AN-NPMI terpolymer	Random terpolymer S:AN:NPMI 67:28:5	140	95-80	~130	High reactivity of the anhydride ring, Heat resistance limited

AN = acrylonitrile; AMS = α -methylstyrene; MA = maleicanhydride; S = styrene;

NPMI = *N*-phenylmaleimide

พลาสติกเอบีเอสที่ผลิตจากโคพอลิเมอร์ของเอลฟาเมทิลสไตรีน-อะคริโลไนไตร (α-methylstyrene-acrylonitrile) มีสมบัติที่คล้ายคลึงกับสไตรีน-อะคริโลไนไตรโคพอลิเมอร์ คือ เป็นพอลิเมอร์ที่มีอุณหภูมิคล้ายแก้วสูง และมีพฤติกรรมทางเคมีคล้ายกับสไตรีน-อะคริโลไนไตรโคพอลิเมอร์ คือ สามารถทำให้เกิดพลาสติกเอบีเอสที่ทนต่อความร้อนสูงได้ ซึ่งความสามารถในการทนต่อความร้อนของพลาสติกเอบีเอสยังขึ้นกับปริมาณของเอลฟาเมทิลสไตรีนอีกด้วย และโคพอลิเมอร์แบบพิเศษนี้มีสัดส่วนของเอลฟาเมทิลสไตรีนสูงขึ้น สามารถทำได้โดยการผลิตด้วยวิธีอิมัลชันพอลิเมอร์ไรเซชัน ได้ผลิตภัณฑ์พลาสติกเอบีเอสที่มีความต้านทานต่อความร้อนสูงถึง 130 องศาเซลเซียส (Vicat B temperature)

สมบัติของพลาสติกเอปียีสนอกจากขึ้นอยู่กับส่วนที่เป็นเมทริกซ์แล้ว ยังขึ้นอยู่กับส่วนที่เป็นยางอีกด้วย นั่นคือ เมื่อเพิ่มสัดส่วนของเฟสที่เป็นยาง อุณหภูมิห้อง ความเหนียวของพลาสติกเอปียีสสูงขึ้น และทำให้ความต้านแรงกระแทก (Izod impact strength) สูงขึ้นด้วย แสดงดังภาพที่ 8 แต่ความแข็งแรง (Tensile strength) และค่ามอดูลัสความต้านแรงดึง (Tensile modulus) ลดลงตามสัดส่วนของเฟสยางที่เพิ่มขึ้น

2.3 การปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้า (Electrospinning)[9-10]

2.3.1 ความเป็นมาของการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้า

เป็นที่รู้จักกันดีว่าการใช้ประจุไฟฟ้าเพื่อที่จะทำให้ของเหลวแตกออกเป็นอนุภาคขนาดเล็กนั้น ได้มีการศึกษามากกว่า 100 ปี อีกทั้งยังเป็นเทคนิคที่มีราคาถูก และได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นวัสดุในระดับนาโน ซึ่งเป็นส่วนสำคัญที่ขาดไม่ได้ทางเศรษฐศาสตร์และวิทยาศาสตร์ ในการที่จะพัฒนาประเทศ

ในกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้า (Electrospinning) นั้นจะเริ่มจากการให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่สูงแก่พอลิเมอร์เหลว ซึ่งจะก่อให้เกิดการสะสมประจุภายในของไหลนั้น เมื่อประจุไฟฟ้าที่สะสมนั้นมากพอ ของไหลนั้นจะพุ่งจากหยดของของไหลที่ปลายเข็มของหลอดฉีดยา เป็นผลให้เกิดลักษณะที่เรียกว่า Taylor cone ซึ่งจะมีทิศทางพุ่งไปยังข้างหน้าสู่บริเวณที่มีศักย์ไฟฟ้าต่ำกว่า โดยทั่วไปแล้วส่วนที่ใช้ในการเก็บเส้นใยนั้นจะทำการต่อสายดินไว้ โดยอิทธิพลที่มีผลต่อสัญญาณวิทยาของเส้นใยที่ได้นั้นมีอยู่หลายพารามิเตอร์ด้วยกัน ไม่ว่าจะเป็นการเกิดลูกปัด (Bead) หรือลักษณะของรูพรุนที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของเส้นใย ซึ่งเทคนิคการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้า นั้นเป็นที่รู้จักกันดีว่าสามารถที่จะใช้วัสดุได้ทั้งพอลิเมอร์หลอมเหลว และสารละลายพอลิเมอร์ แต่ที่เป็นที่นิยมและใช้กันอย่างแพร่หลายก็คือสารละลายพอลิเมอร์ เนื่องจากผลของพารามิเตอร์ในกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้า ที่มีต่อสารละลายพอลิเมอร์นั้นให้ผลที่น่าสนใจและสามารถปรับแต่งได้ ซึ่งพารามิเตอร์ที่มีผลต่อเส้นใยเหล่านี้ ได้แก่ คุณสมบัติของสารละลายพอลิเมอร์ (Polymer solution parameters), สภาพที่ใช้ในการผลิต (Processing condition) รวมไปถึงการใช้ความต่างศักย์ (Applied voltage), อุณหภูมิ (Temperature) และผลของตัวรองรับ (Effect of collector) และสภาพแวดล้อมโดยรอบ (Ambient conditions) ซึ่งความเข้าใจในพารามิเตอร์เหล่านี้ จะทำให้สามารถที่จะกำหนดผลของโครงสร้างของเส้นใย การจัดเรียงตัวได้ ด้วยการปรับพารามิเตอร์เหล่านี้

2.3.2 พารามิเตอร์ของสารละลายพอลิเมอร์ (Polymer Solution Parameters)

สมบัติของสารละลายพอลิเมอร์นั้นเป็นมีอิทธิพลอย่างมากต่อกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าต่อสัณฐานวิทยาของเส้นใย โดยแรงตึงผิว (Surface tension) นั้นเป็นส่วนหนึ่งที่มีหน้าที่สำคัญในการเกิดลักษณะที่เรียกว่า ลูกบิดที่เกิดขึ้น ความหนืดของสารละลายและสมบัติทางไฟฟ้าจะเป็นตัวกำหนดให้สารละลายนั้นถูกยัดออก โดยผลลัพท์ที่ได้นั้นจะส่งผลกระทบต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยที่ถูกปั่นด้วยไฟฟ้า (Electrospun fibers)

2.3.2.1 น้ำหนักโมเลกุลและความหนืดของสารละลาย (Molecular Weight and Solution Viscosity)

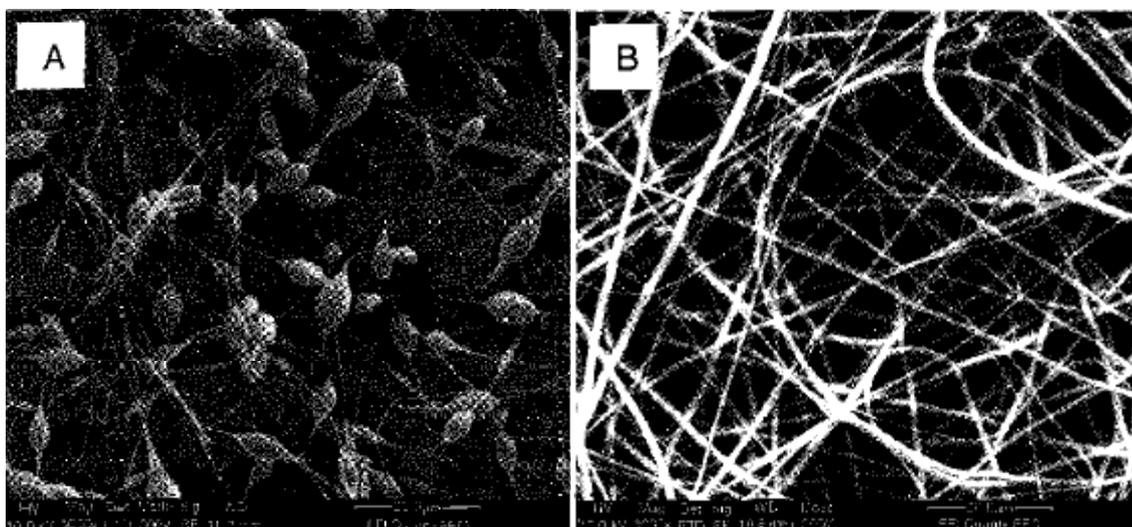
จากที่ได้กล่าวไว้ก่อนหน้านี้แล้วนั้น หนึ่งในปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความหนืดของสารละลายก็คือน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ โดยทั่วไปแล้วเมื่อพอลิเมอร์มีน้ำหนักโมเลกุลที่มากและถูกละลายในตัวทำละลาย จะมีค่าความหนืดที่สูงกว่าพอลิเมอร์ชนิดเดียวกันที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำกว่า ซึ่งเป็นหนึ่งในสภาวะสำหรับการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้า ที่จะใช้ในการเกิดเป็นเส้นใยก็คือสารละลายนั้นจะต้องมีน้ำหนักโมเลกุลและความหนืดที่พอเพียง ในระหว่างที่สาย jet กำลังพุ่งออกมาจากปลายเข็ม นั้น สารละลายพอลิเมอร์จะถูกดึงไปข้างหน้าไปยังตัวรองรับ ในระหว่างที่มีการดึงยัดนั้นสารละลายพอลิเมอร์จะเกิดการพันกันของโมเลกุลสายโซ่พอลิเมอร์ จะพยายามรักษาให้เป็นสายของสารละลายที่ต่อเนื่อง ซึ่งมันจะขัดขวางการเคลื่อนที่ของกระแสไฟฟ้าบนสาย jet ซึ่งอาจจะทำให้เกิดการขาดของสาย jet ได้ จากผลดังกล่าวสารละลายพอลิเมอร์ที่เป็นแบบโมเลกุลเดี่ยวจึงไม่สามารถที่จะเกิดเป็นเส้นใยได้ เมื่อใช้กระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้า

น้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์นั้นแสดงให้เห็นถึงความยาวของสายโซ่พอลิเมอร์ ซึ่งมันจะส่งผลต่อความหนืดของสารละลาย โดยที่ความยาวของสายโซ่พอลิเมอร์จะเป็นตัวกำหนดปริมาณในการพันกันของสายโซ่พอลิเมอร์ในตัวทำละลาย นอกจากนี้การเพิ่มขึ้นของค่าความหนืดของสารละลาย ก็สามารถเพิ่มขึ้นได้ด้วยการเพิ่มความเข้มข้นของพอลิเมอร์ เช่นเดียวกันการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักโมเลกุล และการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้น เป็นผลให้สายโซ่พอลิเมอร์มีการพันกันที่ดีขึ้นในสารละลาย ซึ่งมันจะช่วยรักษาความต่อเนื่องของ jet ที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้า

การพันกันของสายโซ่พอลิเมอร์นั้นพบว่ามีส่วนสำคัญที่ส่งผลในเรื่องของ การขาดของสาย jet แล้วเกิดเป็นหยดของสารละลาย (Droplet) ขนาดเล็ก หรือได้เส้นใยที่มีลูกบิดปนอยู่ด้วย แม้ว่าจำนวนที่น้อยที่สุดที่สายโซ่พอลิเมอร์เกิดการพันกันนั้น ค่าความหนืดสำหรับการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้า ที่มากเกินไปก็จะทำให้การอัดให้สารละลายในหลอดฉีดออกมาจากปลายเข็มได้

ยากขึ้นเช่นกัน ยิ่งไปกว่านั้น เมื่อความหนืดของสารละลายนั้นสูงมาก ก็อาจจะเกิดการแห้งที่บริเวณปลายเข็มก่อนที่กระบวนการ Electrospinning จะถูกเริ่มขึ้นได้

หลายๆ การทดลองนั้นแสดงให้เห็นว่าสารละลายพอลิเมอร์แต่ละชนิดนั้นจะมีค่าความหนืดต่ำสุดที่จะทำให้ได้เส้นใยที่ไม่เกิดลูกปัดแตกต่างกัน ซึ่งโดยปกติที่ความหนืดต่ำๆ ก็จะสามารถพบลูกปัด ได้ทั่วไปในเส้นใยที่เกาะอยู่บนแผ่นตัวรองรับ แต่เมื่อความหนืดเพิ่มขึ้น ลักษณะของลูกปัดจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆ จากทรงกลม (Spherical) เป็นทรงกระบอก (Spindle like) จนกระทั่งได้เส้นใยที่เรียบ (Smooth) แสดงดังภาพที่ 4 ที่ความหนืดต่ำๆ นั้นจะมีปริมาณของโมเลกุลตัวทำละลายสูง และมีการพันกันของสายโซ่ที่น้อย นั้นหมายถึงแรงดึงผิวจะเป็นอิทธิพลหลักต่อสาย jet ซึ่งเป็นสาเหตุของการเกิดลูกปัดในเส้นใย เมื่อความหนืดเพิ่มขึ้นนั้นหมายความว่า มีปริมาณของการพันกันของสายโซ่พอลิเมอร์ในสารละลายนั้นสูงไปด้วย ซึ่งจะช่วยให้ประจวบสาย jet สามารถที่จะดึงสารละลายนั้นได้อย่างเต็มที่ พร้อมกับกับการกระจายตัวของโมเลกุลตัวทำละลายในสายโซ่พอลิเมอร์ ซึ่งการเพิ่มขึ้นของค่าความหนืดนั้น จะเป็นผลทำให้เส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยนั้นเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งอาจจะเกิดมาจากการที่สารละลายต้านทานต่อการดึงโดยประจุที่อยู่บนสาย jet



ภาพที่ 4 เส้นใยพอลิคาโพรแลคโตน (Polycaprolactone) ที่ถูกปั่นด้วยไฟฟ้า [A] เกิดลูกปัดที่ความเข้มข้น 0.1 g/ml และ [B] เส้นใยที่ปราศจากลูกปัดที่ความเข้มข้น 0.12 g/ml.

แรงกระทำ (Interaction) ระหว่างสารละลายและประจวบสาย jet นั้นจะเป็นตัวควบคุมการกระจายตัวของเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยที่ได้ ในระหว่างกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้า อาจจะมีการเกิด jet อันที่สองเกิดขึ้นจากสาย jet หลัก ซึ่งมันจะเสถียรเพียงพอที่จะทำให้ได้

เส้นใยที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็ก ที่ความหนืดนั้นๆ ซึ่งสามารถอธิบายความแตกต่างของเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยที่พบได้ในบางกรณี อย่างไรก็ตาม เมื่อความหนืดนั้นสูงมากพอ มันอาจจะลดการเกิดสาย jet อีกเส้นจากการแตกออกจากสาย jet หลัก ซึ่งอาจจะมีส่วนทำให้มีการเพิ่มขึ้นของเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย

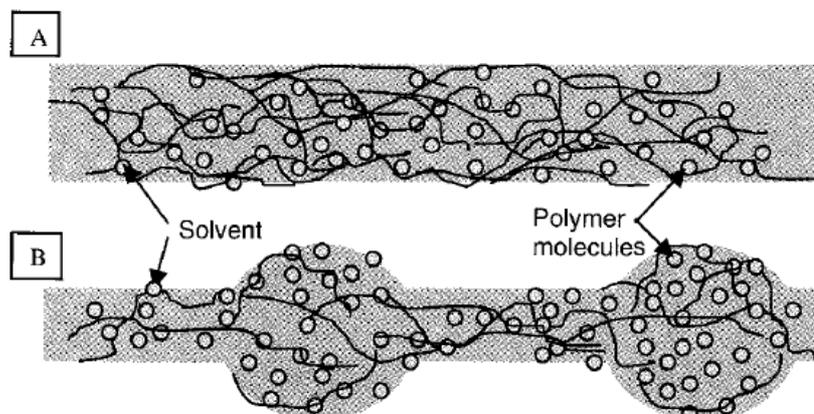
ผลกระทบอื่นๆ ของการที่มีความเข้มข้นสูงเกินไปนั้นจะเห็นได้จากการที่มีบริเวณที่ลงไปเกาะอยู่บนตัวรองรับมีพื้นที่น้อย ซึ่งมันเกิดจากการที่ความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้น ก็จะทำให้ความหนืดของสารละลายนั้นมีความแข็งแรงพอที่จะลดการเกิดความไม่เสถียรในระยะทางจากปลายเข็มด้วย เป็นผลให้ส่วนของสาย jet นั้นลดลง และความไม่เสถียรมีบริเวณที่ลดลง แต่นั่นก็หมายถึงส่วนของสาย jet นั้นมีการดึงยึดที่ลดลงด้วย จึงทำให้ได้เส้นใยที่มีขนาดใหญ่

แม้ว่าความหนืดจะมีหน้าที่สำคัญต่อรูปแบบของเส้นใย แต่มันก็ไม่ได้เป็นตัวกำหนดว่าจะต้องใช้ความเข้มข้นเท่าไรในการที่จะเกิดเป็นเส้นใยระหว่างกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้า

ตัวอย่างเช่นใน พอลิเอทิลีนออกไซด์ (Polyethylene oxide) จะได้เส้นใยที่เรีบนั้นความหนืดจะต้องเพิ่มขึ้นเป็น 3.5 เท่า จากการที่น้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์นั้นเพิ่มขึ้นจาก 8K เป็น 8M ดังนั้นในกรณีนี้จะเห็นได้ว่าความเข้มข้นนั้นมีผลต่อความเรียบของเส้นใย

2.3.2.2 แรงตึงผิว (Surface Tension)

ในตอนเริ่มต้นของกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้า นั้นจะต้องมีการสะสมของประจุบนสารละลายเพื่อให้มีค่ามากกว่าแรงตึงผิว อย่างไรก็ตาม การเกิดการเคลื่อนที่ของสาย jet ไปยังตัวรองรับ ผลของแรงตึงผิวอาจเป็นสาเหตุของการเกิดลูกปัดที่พบได้ในเส้นใย ในแรงตึงผิวเมื่อมีการลดลงของพื้นที่ผิวต่อหนึ่งหน่วยมวลของของไหล (Surface area per unit mass of a fluid) ในกรณีนี้คือเมื่อมีความเข้มข้นสูงๆ โมเลกุลของตัวทำละลายที่เป็นอิสระมีแนวโน้มที่จะทำให้โมเลกุลของตัวทำละลายรวมกลุ่มกันเป็นทรงกลม เนื่องจากแรงตึงผิว และในกรณีของความหนืดสูงๆ นั้นหมายถึงการมีแรงกระทำที่ตีระหว่างตัวทำละลายและโมเลกุลพอลิเมอร์ ดังนั้นเมื่อสารละลายถูกดึงภายใต้อิทธิพลของประจุ โมเลกุลของตัวทำละลายจะกระจายตัวอยู่บน โมเลกุลของพอลิเมอร์ที่พันกัน ดังนั้น โมเลกุลของตัวทำละลายจะมาเกาะรวมกลุ่มกันภายใต้อิทธิพลของแรงตึงผิว ในรูปที่ 5



ภาพที่ 5 [A] ที่ความหนืดสูง, โมเลกุลของตัวทำละลายจะกระจายอยู่บนการพันกันของโมเลกุลพอลิเมอร์ [B] ที่ความหนืดต่ำ, โมเลกุลของตัวทำละลายมีแนวโน้มที่จะเกาะกลุ่มกันเองภายใต้การกระทำของแรงตึงผิว

ยกตัวอย่างเช่นตัวทำละลาย อย่างเอทานอล (Ethanol) มีแรงตึงผิวที่ต่ำ ดังนั้นมันจึงทำให้ได้รูปแบบของเส้นใยที่เรียบ นอกจากนี้การลดแรงตึงผิวสามารถทำได้โดยการเติมสารลดแรงตึงผิว (Surfactant) ลงในสารละลาย อีกทั้งการใช้สารลดแรงตึงผิว พบว่าจะทำให้ได้เส้นใยที่เป็นรูปแบบเดียวกันมากขึ้น แม้ว่าสารลดแรงตึงผิวแบบ ผงจะไม่ละลาย แต่ก็จะถูกกระจายตัวอยู่ในสารละลาย ซึ่งจะทำให้ได้เส้นใยที่มีลักษณะที่ดียิ่งขึ้น

2.3.2.3 การนำไฟฟ้าของสารละลาย (Solution conductivity)

กระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้านั้นเกี่ยวข้องกับการดึงยึดของสารละลาย ที่ได้แรงผลักจากประจุบนพื้นผิว ดังนั้นถ้าการนำไฟฟ้าของสารละลายเพิ่มขึ้น ก็จะทำให้สามารถที่จะสะสมประจุได้มากยิ่งขึ้นด้วย ซึ่งสามารถทำได้ค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายนั้นเพิ่มขึ้นได้ด้วยการเติมไอออน (Ions) นอกจากนี้โดยส่วนมากทั้งยาและโปรตีน เมื่อถูกละลายในน้ำจะอยู่ในรูปของไอออน เช่นเดียวกันการเกิดลูปปิด นั้นเกิดจากการที่สารละลายนั้นไม่ได้ถูกดึงอย่างเต็มที่ เพราะฉะนั้นการเติมปริมาณของเกลือ (Salt) หรือพอลิอิเล็กโทรไลต์ (Polyelectrolyte) ลงไปในสารละลาย ก็จะทำให้สามารถที่จะเพิ่มการนำประจุได้ ซึ่งจะช่วยให้สารละลายนั้นถูกดึงได้มากยิ่งขึ้น ซึ่งทำให้เส้นใยที่มีความเรียบมากขึ้น รวมไปถึงทำให้เส้นใยที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางที่มีขนาดเล็กลงด้วย อย่างไรก็ตามข้อจำกัดในการลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยก็คือ เมื่อสารละลายถูกดึงด้วยประจุก็จะมีแรงต้านที่มาจาก Viscoelastic force

การเติมไอออนนั้นแสดงให้เห็นแล้วว่าสามารถเพิ่มค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายได้ ซึ่งจะทำให้ความต่างศักย์วิกฤต (Critical voltage) สำหรับกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้านั้นลดลงไปด้วย นอกจากนี้ผลของการเพิ่มขึ้นของประจุจะทำให้ความไม่เสถียรเพิ่มขึ้นด้วย ทำให้บริเวณของเส้นใยที่ตกลงบนตัวรองรับมีพื้นที่เพิ่มมากขึ้น

แม้ว่าตัวทำละลายอินทรีย์ จะเป็นที่ยูกันดีว่าไม่นำไฟฟ้า แต่ก็ยังมีบางตัวที่ยังมีระดับของการนำไฟฟ้าอยู่ ซึ่งการเตรียมสารละลายโดยใช้ตัวทำละลายที่นำไฟฟ้าได้ดังนั้นจะทำให้ได้เส้นใยที่ปราศจากลูกบิด แต่ถ้าสารละลายนั้นมีค่าการนำไฟฟ้าเป็นศูนย์ก็จะมีเส้นใยเกิดขึ้น ตารางที่ 5 แสดงค่าการนำไฟฟ้าของตัวทำละลายทั่วไปที่ใช้ในกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้า

ขนาดของไอออน อาจจะมีอิทธิพลต่อสัญญาณวิทยาของเส้นใยที่ถูกปั่นด้วยไฟฟ้าจากสารละลายที่ถูกทำละลายด้วยโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) นั้นพบว่าให้เส้นผ่านศูนย์กลางที่เล็กมากกว่าสารละลายที่ละลายด้วยโปแตสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (KH_2PO_4) เช่นเดียวกันโซเดียมไอออน (Sodium ions) และคลอไรด์ไอออน (Chloride ions) นั้นมีรัศมีของอะตอม (Atomic radius) ที่เล็กมากกว่าโปแตสเซียมไอออน (Potassium ions) และฟอสเฟตไอออน (Phosphate ions) จึงทำให้มันสามารถเคลื่อนที่ได้ดีกว่าได้สภาวะที่มีสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Electrostatic fields) จากภายนอกซึ่งทำให้มีแรงดึงยึดที่เพิ่มขึ้นบนสาย jet จากการที่มีไอออน ขนาดเล็กจำนวนมาก จึงได้เส้นใยที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกลงไปด้วย

ตารางที่ 5 ค่าการนำไฟฟ้าของตัวทำละลาย

Solvent	Conductivity (ms/m)
1,2-Dichloroethane	0.034
Acetone	0.0202
Butanol	0.0036
Dichloromethane/Dimethylformamide (40/60)	0.505
Dichloromethane/Dimethylformamide (75/25)	0.273
Dimethylformamide	1.090
Distilled Water	0.447
Ethanol	0.0554
Ethanol (95%)	0.0624
Ethanol/Water (40/60)	0.150

Solvent	Conductivity (ms/m)
Methanol	0.1207
Propanol	0.0385

เราสามารถเพิ่มค่าการนำไฟฟ้าได้พร้อมๆ กับการลดลงของแรงตึงผิวโดยการใช้สารลดแรงตึงผิวที่เป็นไอออนิก (Ionic surfactant) เช่น Triethyl benzyl ammonium chloride ซึ่งทำให้เส้นผ่านศูนย์กลางเส้นใยนั้นลดลง นอกจากนี้การเพิ่มขึ้นของค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายโดยการเปลี่ยนค่า pH ของสารละลาย เช่น การปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าของเซลลูโลสอะซิเตท (Cellulose acetate, CA) ในสภาวะเบส จะมีเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยที่เล็กกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับในสภาวะที่เป็นกลาง ซึ่งการที่เซลลูโลสอะซิเตท อยู่ในสภาวะที่เป็นกรดจึงทำให้สามารถเกิดการดีอะเซทิลเลชัน (Deacetylation) ได้ ทำให้ OH^- ions ได้รับอิทธิพลนี้ภายใต้สภาวะนี้ และทำให้สารละลายถูกดึงได้เพิ่มมากยิ่งขึ้น

อย่างไรก็ตาม, แรงกระทำระหว่างสารตั้งต้นที่ถูกเติมลงไปนั้น จะไปช่วยเพิ่มค่าการนำไฟฟ้าของสารละลาย ซึ่งเมื่อเซลลูโลสอะซิเตท ถูกละลายสภาวะที่เป็นกรดเส้นใยที่ถูกปั่นด้วยไฟฟ้า จะมีเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยค่อยๆ เพิ่มขึ้น แม้ว่าค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายจะเพิ่มขึ้นก็ตาม ในกรณีเดียวกัน การเติมเกลือไอออนิก (Ionic salt) อาจเป็นสาเหตุที่ทำให้มีการเพิ่มขึ้นของความหนืดในสารละลาย ดังนั้นแม้ว่าค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายจะเพิ่มขึ้น แต่ถ้า Viscoelastic force นั้นแข็งแกร่งกว่าแรงคูลอมบ์ (Columbic force) ก็จะทำให้เส้นใยที่ได้นั้นมีเส้นผ่านศูนย์กลางที่ใหญ่แทน

2.3.2.4 ผลของความเป็นไดอิเล็กตริกของตัวทำละลาย (Dielectric Effect of Solvent)

ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric constant) นั้นมีอิทธิพลที่สำคัญต่อกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าโดยทั่วไปแล้ว สารละลายที่มีสมบัติไดอิเล็กตริกที่ดีนั้น จะช่วยลดการเกิดลูกบิดและได้เส้นใยที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางลดลง เช่น ตัวทำละลาย N,N-Dimethylformamide (DMF) ซึ่งอาจจะเติมลงในสารละลายเพื่อเพิ่มสมบัติไดอิเล็กตริก เพื่อทำให้สัณฐานวิทยา (Morphology) ของเส้นใยดีขึ้น ซึ่งความไม่เสถียรของสาย jet ก็จะเพิ่มขึ้นด้วยเมื่อค่าคงที่ไดอิเล็กตริกนั้นสูง ซึ่งสามารถสังเกตเห็นได้ด้วยการที่เส้นใยนั้นมีบริเวณที่เกาะอยู่บนตัวรองรับมีพื้นที่เพิ่มมากขึ้น และได้เส้นใยที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางลดลง เนื่องมาจากมีสาย jet ที่เพิ่มมากขึ้น สำหรับค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของตัวทำละลายทั่วไปที่ใช้ในกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าแสดงดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของตัวทำละลาย

Solvent	Dielectric constant
2-Propanol	18.3
Acetic acid	6.15
Acetone	20.7
Acetonitrile	35.92-37.06
Chloroform	4.8
Dichloromethane	8.93
Dimethylformamide	36.71
Ethyl acetate	6.0
Ethanol	24.55
m-Cresol	11.8
Tetrahydrofuran	7.47

อย่างไรก็ตาม, ถ้าตัวทำละลายนั้นมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่สูงมาก การเติมลงไปในการละลายจะช่วยเพิ่มความสามารถในการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้า (Electrospinnability) ของสารละลาย โดยแรงกระทำระหว่างของผสมเช่น ค่าการละลายของพอลิเมอร์ รวมไปถึงมันจะส่งผลกระทบต่อสัญญาณวิทยของเส้นใย เมื่อเติม DMF ลงในสารละลายพอลิสไตรีน (Polystyrene, PS) ก็จะมีลูกบิด เกิดขึ้น แม้ว่าความสามารถในการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้น เนื่องมาจากค่าคงที่ไดอิเล็กตริกจะเพิ่มขึ้นจากการเติม DMF นี้ อาจเป็นผลจากการแยกกันของโมเลกุลพอลิสไตรีน ที่มีแรงกระทำที่ไม่ดีระหว่างพอลิสไตรีน และ โมเลกุลของตัวทำละลาย

2.3.3 สภาพที่ใช้ในกระบวนการปั่นเส้นใย (Processing Conditions)

พารามิเตอร์อื่นๆ ที่สำคัญที่ส่งผลต่อกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้า ก็คือปัจจัยภายนอกที่จะส่งผลต่อสาย jet ซึ่งรวมไปถึงการใช้ความต่างศักย์ (Voltage supplied), อัตราการไหล (Feedrate), อุณหภูมิของสารละลาย (Temperature of the solution), ชนิดของตัวรองรับ (Type of collector), เส้นผ่านศูนย์กลางของเข็ม (Diameter of needle) และระยะทางระหว่างปลายเข็มกับตัวรองรับ (Distance between the needle tip and collector) ซึ่งพารามิเตอร์เหล่านี้จะมีอิทธิพลต่อ

สัณฐานวิทยาของเส้นใย แม้ว่าพารามิเตอร์เหล่านี้จะมีความสำคัญน้อยกว่าพารามิเตอร์ของสารละลาย

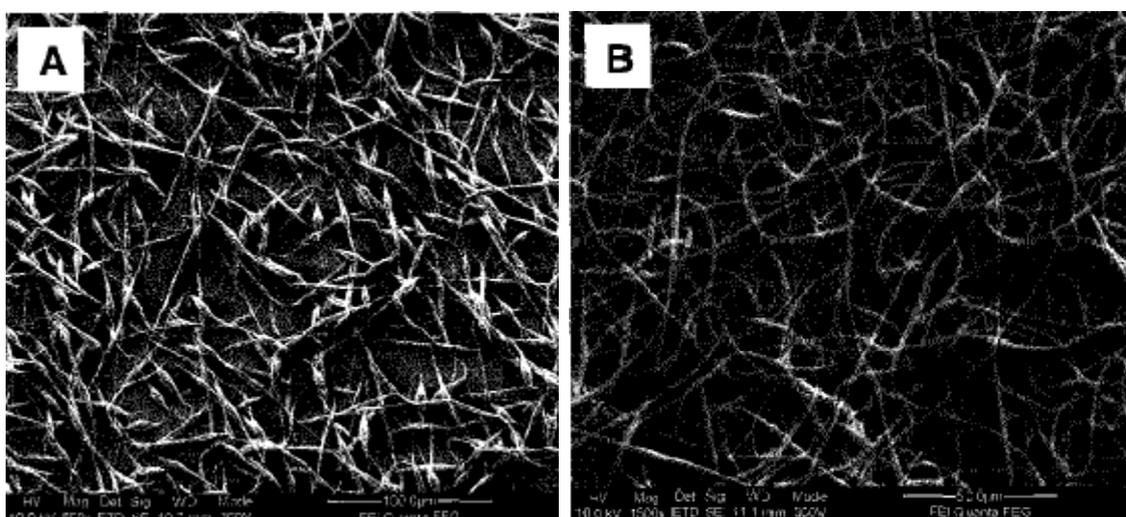
2.3.3.1 ความต่างศักย์ไฟฟ้า (Voltage)

ในกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้านั้นเป็นการใช้ประโยชน์จากการความต่างศักย์ที่สูงแก่สารละลาย ซึ่งมันจะก่อให้เกิดประจุบนสารละลาย และเกิดสนามไฟฟ้าภายนอก ซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นของกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้า เมื่อแรงของไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic force) ในสารละลายนั้นมากกว่าแรงตึงผิวของสารละลายนั้น โดยทั่วไปแล้วทั้งประจุบวก และ ประจุลบ ที่มากกว่า 6kV จะสามารถทำให้หยดของสารละลายที่ปลายเข็ม เปลี่ยนรูปเป็น Taylor Cone ขณะที่กำลังจะเกิดเป็นสาย jet ซึ่งก็ขึ้นอยู่กับอัตราการไหลของสารละลาย ซึ่งอาจจะต้องใช้ความต่างศักย์ที่สูง เพื่อให้ Taylor Cone นั้นเสถียร โดยแรงผลักรวม (Columbic repulsive force) ในสาย jet จะไปถึง Viscoelastic solution แต่ถ้าการให้ความต่างศักย์นั้นสูงมากเกินไป จำนวนของประจุที่สูงนั้นจะเป็นเหตุให้สาย jet นั้นเคลื่อนที่เร็ว และมีปริมาณของสารละลายที่จะถูกดึงจากปลายเข็มลดลงที่เพิ่มขึ้น เป็นผลทำให้ได้ Taylor Cone ที่มีขนาดเล็กและไม่เสถียร เมื่อสารละลายถูกดึงไปยังตัวรองรับอย่างรวดเร็วมากกว่าอัตราการไหลที่ให้นั้น จะทำให้ Taylor Cone เกิดการย้อนกลับไปที่ยังตัว

ทั้งการให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าและการเกิดสนามไฟฟ้านั้น มีอิทธิพลต่อการดึงยึดและความเร็วของสาย jet ซึ่งจะส่งผลต่อสัณฐานวิทยาของเส้นใย ในหลายๆ กรณีการใช้ความต่างศักย์ที่สูงนั้น จะทำให้เกิดการดึงยึดที่ดีขึ้นของสารละลาย เนื่องจากแรงผลักรวมในสาย jet ที่ดีขึ้น เช่นเดียวกับการที่มีสนามไฟฟ้าที่แข็งแรง ซึ่งผลเหล่านี้จึงทำให้เส้นผ่านศูนย์กลางนั้นลดลง และรวมไปถึงการระเหยของตัวทำละลายที่รวดเร็วด้วย เมื่อมีการใช้สารละลายที่มีความหนืดต่ำๆ นั้น ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่สูง จะทำให้เกิดสาย jet รอง (Secondary jets) ในระหว่างกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้า ซึ่งนี่เป็นผลที่ทำให้เส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยลดลง ส่วนปัจจัยที่เหลือนั้นจะมีอิทธิพลต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยในเรื่องของระยะเวลาที่ลอยตัวอยู่ (Flight time) ของสาย jet ซึ่งการที่มีเวลาลอยตัวที่มากจะทำให้เส้นใยนั้นถูกดึงและยึดก่อนที่จะเกาะลงบนตัวรองรับ ดังนั้นการใช้ความต่างศักย์ที่ต่ำ ก็จะลดความเร็วของสาย jet และทำให้มีสนามไฟฟ้าที่อ่อนแอ ซึ่งจะช่วยให้เพิ่มระยะเวลาที่ลอยตัวอยู่แก่สาย jet ทำให้ได้เส้นใยที่ดี ซึ่งในกรณีนี้จะทำให้ความต่างศักย์ที่เข้าใกล้ค่าความต่างศักย์วิกฤตของกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าจะทำให้ได้เส้นใยที่ดี

ที่ความต่างศักย์สูงๆ พบว่าจะมีแนวโน้มที่จะทำให้เกิดลูกบิด โดยได้มีการรายงานว่ารูปร่างของลูกบิดเปลี่ยนจากทรงกระบอกไปสู่ทรงกลม เมื่อทำการเพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้า ซึ่งมันจะเพิ่มให้มีการดึงยึดมากยิ่งขึ้นเมื่อใช้ความต่างศักย์ที่สูง และควรที่จะมีการเกิด

ลูกปัดที่ลดลง ซึ่งได้มีการรายงานไว้ในบางกรณี แสดงดังภาพที่ 6 โดยการเพิ่มขึ้นของปริมาณลูกปัด นั้นมากจากการที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ก็จะไปเพิ่มความไม่เสถียรของสาย jet เช่นเดียวกับการที่ Taylor Cone นั้นมีการเคลื่อนที่ย้อนกลับไปทางด้านหลังของหลอดฉีดยา ซึ่งเหตุการณ์นี้ได้มีการศึกษาว่าการเพิ่มขึ้นของความต่างศักย์ไฟฟ้านั้นจะทำให้มีการเพิ่มขึ้นของปริมาณลูกปัด ซึ่งที่ความต่างศักย์สูงๆ นั้นจะทำให้ลูกปัด เกิดการมารวมตัวกันจึงได้เส้นใยที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางที่ใหญ่ขึ้น



ภาพที่ 6 เส้นใยพอลิเอปไซโคลแลคโตน [A] ลูกปัดจากกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้า ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 6 kV และ [B] เส้นใยที่ปราศจากลูกปัด ที่ 22kV

ผลของการใช้ความต่างศักย์ที่มากไปนั้น ไม่เพียงแต่จะปรากฏที่ลักษณะทางกายภาพของเส้นใยเท่านั้น แต่มันจะมีผลต่อความเป็นผลึกของเส้นใยพอลิเมอร์ ซึ่งสนามไฟฟ้าสถิตย์จะเป็นสาเหตุที่ทำให้โมเลกุลของพอลิเมอร์นั้นมีการจัดเรียงตัวที่เพิ่มมากขึ้น ระหว่างกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้า ดังนั้นจึงมีแนวโน้มของการเกิดผลึกที่ดีขึ้นในเส้นใย ซึ่งมันจะทำให้ระยะเวลาลอยตัวของสาย jet นั้นลดลง เนื่องจากการจัดเรียงตัวของโมเลกุลพอลิเมอร์จะใช้ต้องใช้เวลา ซึ่งการที่ระยะเวลาในการลอยตัวที่ลดลง นั้นหมายถึงเส้นใยจะมีการเกาะก่อนที่โมเลกุลของพอลิเมอร์จะมีเวลาพอที่จะจัดเรียงตัวใหม่อีกครั้ง ดังนั้น ถ้ามันมีระยะเวลาในการลอยตัวที่เพียงพอ ความเป็นผลึกของเส้นใยก็จะเพิ่มมากขึ้นเมื่อมีการใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่สูงขึ้น

กระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้า นั้นเกิดจากการสะสมประจุบนสาย jet ซึ่งประจุเหล่านี้จะได้รับอิทธิพลจากสนามแม่ไฟฟ้าสถิตย์จากภายนอกซึ่งมันจะส่งผลกระทบต่อเส้นทางของ

สาย jet จึงไม่แปลกที่ได้มีหลายความพยายามที่จะเปลี่ยนแปลงรูปแบบของสนามไฟฟ้าสถิตย์ระหว่างแหล่งกำเนิดของสาย jet กับที่ตัวรองรับ

นี่สามารถที่จะทำให้สำเร็จได้ด้วยการใช้ขั้วไฟฟ้า (Electrodes) เสริม หรือการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการจัดเรียงหรือเปลี่ยนแปลงรูปร่างของตัวรองรับ การจัดเรียงที่เป็นรูปแบบเดียวหรือคู่ในแนวเดียวกัน ของเส้นใยนาโน นั้นสามารถที่จะทำได้โดยการใช้สนามไฟฟ้า

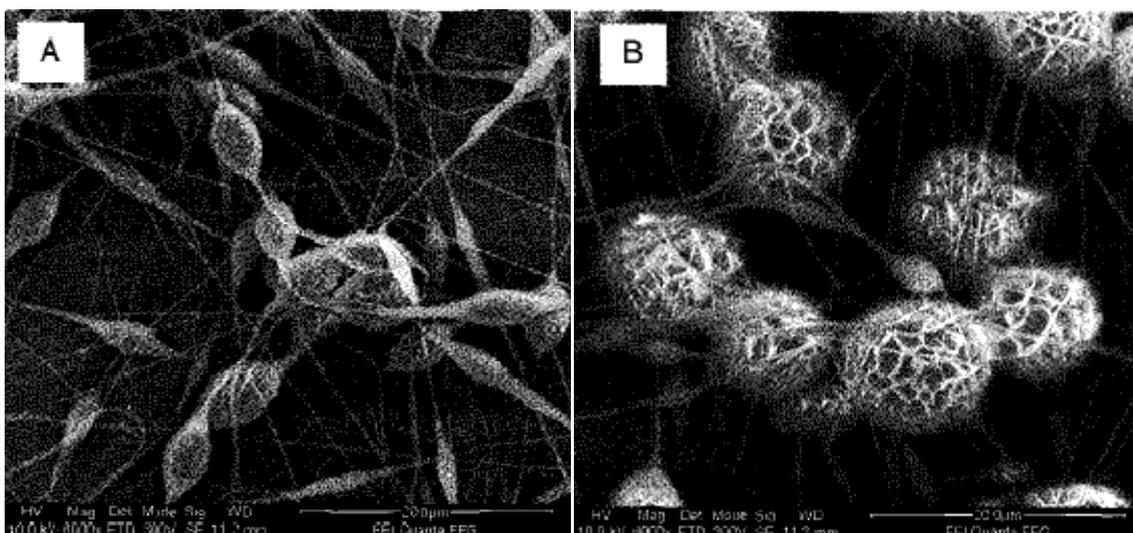
การใช้แหล่งกำเนิดความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เป็นไฟฟ้ากระแสตรง (DC voltage supply) นั้นเป็นที่นิยมใช้ในกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้า แต่มันก็สามารถที่จะใช้ไฟฟ้ากระแสสลับได้เช่นเดียวกันในกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้า ในตอนที่จะเริ่มเกิดสาย jet นั้น การดึงยืด และความไม่เสถียรของสาย jet นั้น เกิดจากประจุที่อยู่ภายในสารละลาย ซึ่งจะถูกสะสมอย่างรวดเร็วและทำให้สาย jet นั้นพุ่งออกไป ในขณะที่สาย jet เคลื่อนที่ไปยังตัวรองรับนั้น ปกติแล้วแต่ละส่วนของสาย jet จะมีประจุบวกหรือลบอยู่บนนั้น ซึ่งเป็นเหตุที่ทำให้เกิดความไม่เสถียรขึ้น จากแรงผลักรวมในสาย jet โดยปกติแล้วไม่ว่าจะเป็นความต่างศักย์ที่เป็นบวก หรือลบนั้นจะเป็นตัวลด แรงผลักรวม ดังนั้นจึงทำให้มีความไม่เสถียรนั้นลดลงด้วย ซึ่งการที่มีการดึงยืดที่ไม่เสถียรนั้น การดึงยืดที่ลดลงของสาย jet นั้น เป็นผลทำให้ได้เส้นใยที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดใหญ่ มากกว่าเส้นใยที่เกิดจากแหล่งกำเนิดที่เป็นแบบกระแสสลับนั้น มีความต่างศักย์เดียวกัน ประโยชน์อื่นๆ นอกจากนี้ การใช้แหล่งกำเนิดที่เป็นแบบกระแสสลับนั้น มีแนวโน้มที่จะมีการสะสมของประจุชนิดเดียวกันบนเส้นใยหลังเกาะบนตัวรองรับน้อย ดังนั้น ความหนาของเส้นใยที่ถูกปั่นด้วยไฟฟ้า จึงสามารถที่จะเก็บบนตัวรองรับที่เป็นฉนวนได้

2.3.3.2 อัตราการไหล (Feedrate)

อัตราการไหลนั้นเป็นตัวกำหนดปริมาณของสารละลายเพื่อใช้ในกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้า ดังนั้นการให้ความต่างศักย์ จึงต้องสอดคล้องต่ออัตราการไหล เพื่อให้ Taylor Cone นั้นเสถียร เมื่ออัตราการไหลนั้นเพิ่มขึ้น ก็จะมีความสัมพันธ์กับเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยที่เพิ่มขึ้น หรือขนาดของลูกบิด ด้วยแสดงดังรูปที่ 7 ซึ่งนี้แสดงให้เห็นว่าการมีปริมาตรที่เพิ่มขึ้นของสารละลายจะทำให้ถูกดึงออกไปจากปลายเข็ม

อย่างไรก็ตาม, การเพิ่มขึ้นของเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยจะมีข้อจำกัดจากการที่ต้องมีอัตราการไหลที่สูงขึ้น ที่อัตราการไหลเดียวกันสารละลายก็จะถูกนำไปเท่าๆ กันตลอดสาย jet ซึ่งจะต้องสอดคล้องต่อประจุที่เพิ่มขึ้น เมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงมีการดึงยืดของสารละลายเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งมันจะตรงกันข้ามกับการเพิ่มขึ้นของเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยจากการที่มีปริมาตรเพิ่มขึ้น

เนื่องจากว่าการที่มีปริมาตรเพิ่มขึ้นสารละลายที่ถูกดึงจากปลายเข็ม หรือสาย jet นั้นจะต้องใช้เวลานานในการที่จะทำให้แห้ง ทำให้ตัวทำละลายเกิดการเกาะอยู่บนเส้นใย เนื่องจากการที่มีเวลาในการระเหยไม่เพียงพอ เช่นเดียวกับระยะเวลาในการลอยตัว ตัวทำละลายที่เหลืออยู่นั้นจึงเป็นสาเหตุที่ทำให้เส้นใยเกิดการหลอมรวมกัน และเชื่อมโยงกันบริเวณที่สัมผัสกัน ที่อัตราการไหลต่ำๆ นั้นจะทำให้ตัวทำละลายนั้นมีเวลามาพอที่จะทำให้เกิดการระเหย



รูปที่ 7 เส้นใยพอลิคาโพรแลคโตน ที่มีการเพิ่มขนาดของลูกปิด เมื่อทำการเพิ่มอัตราการไหล [A] 0.5 ml/hr และ [B] 2 ml/hr

2.3.3.3 อุณหภูมิ (Temperature)

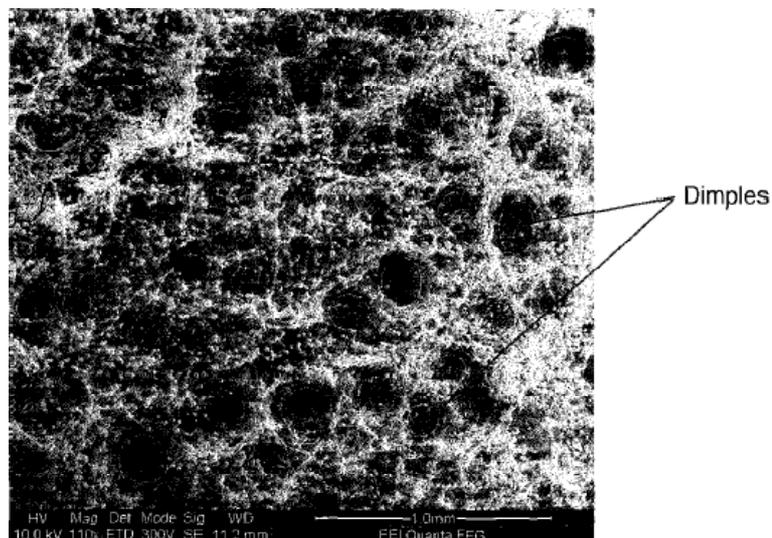
อุณหภูมิของสารละลายนั้นจะมีผลต่อทั้งการเพิ่มขึ้นของอัตราการระเหยของสารละลาย และลดความหนืดของสารละลายพอลิเมอร์ เมื่อพอลิยูรีเทน (Polyurethane) ถูกนำมาปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าที่อุณหภูมิสูง เส้นใยที่เตรียมได้นั้นจะมีเส้นผ่านศูนย์กลางที่ใกล้เคียงกันมากขึ้น นี้ อาจเกิดมาจากการที่มีความหนืดที่ต่ำลงของสารละลาย และการละลายที่ดีขึ้นของพอลิเมอร์ในตัวทำละลาย ซึ่งทำให้สารละลายนั้นถูกดึงยึดได้มากขึ้น การที่มีความหนืดต่ำนั้น ก็จะทำให้แรงकुกลมบ์ นั้นมีแรงที่ใช้ในการดึงยึดที่ดีขึ้น บนสารละลาย ดังนั้นจึงเป็นผลทำให้ได้เส้นใยที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็ก การที่น้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นก็ทำให้โมเลกุลของพอลิเมอร์มีการเคลื่อนไหวที่เพิ่มขึ้นด้วย จึงเป็นเหตุที่ทำให้แรงकुกลมบ์ นั้นมีการดึงยึดสารละลายที่เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม, การเติมสารที่เป็นชีวภาพ เช่น เอนไซม์และโปรตีน ลงในสารละลาย เมื่อมีการใช้อุณหภูมิที่สูง จะทำให้สารเหล่านี้เกิดการสูญเสียหน้าที่ไป

2.3.3.4 ผลของตัวรองรับ (Effect of Collector)

ในระหว่างที่จะเริ่มกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้า นั้นจะมีการเกิดสนามไฟฟ้า ระหว่างแหล่งกำเนิดและตัวรองรับ ดังนั้นในการติดตั้งชุดปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้า ตัวรองรับจะถูกทำมาจากวัสดุที่นำไฟฟ้า เช่น อลูมิเนียมฟอยล์ (Aluminum foil) และทำการต่อสายดิน แต่ในกรณีที่ตัวรองรับนั้นเป็นวัสดุที่ไม่นำไฟฟ้า ประจุที่อยู่บนสาย jet จะเกิดการสะสมบนตัวรองรับ ซึ่งทำให้เก็บเส้นใยได้เพียงเล็กน้อย ซึ่งเส้นใยที่เก็บบนตัวรองรับที่ไม่นำไฟฟ้านั้น โดยปกติแล้วจะมีความหนาแน่นของการแพ็คตัวของเส้นใยที่น้อย เมื่อเปรียบเทียบกับตัวรองรับที่มีพื้นผิวที่นำไฟฟ้า เนื่องมาจาก Repulsive force ของประจุที่สะสมไว้บนตัวรองรับ สำหรับในกรณีที่ตัวรองรับนำไฟฟ้านั้น ประจุที่อยู่บนเส้นใยจะค่อยๆ ลดลง และสามารถที่จะทำให้เก็บเส้นใยได้มาก ซึ่งผลที่ได้นั้นจะทำให้เส้นใยนั้นมีการแพ็คตัวที่หนาแน่น

สำหรับตัวรองรับที่ไม่นำไฟฟ้า ประจุที่สะสมจะส่งผลต่อรูปแบบการวางตัวของเส้นใย เนื่องมาจากแรงผลักรวมของประจุชนิดเดียวกัน เมื่อความหนาแน่นของประจุเพียงพอบนเส้นใยก็จะทำให้เกิดเป็นรูปแบบดังกล่าว ซึ่งเกิดจากแรงผลักรวมจากเส้นใย ทำให้ได้ลักษณะที่เป็นแบบรังผึ้ง อย่างไรก็ตาม, ตัวรองรับที่นำไฟฟ้านั้น เมื่อมีการสะสมของเส้นใยที่สูง ก็จะทำให้เส้นใยนั้นมีความหนาที่เพียงพอ ซึ่งจะทำให้มีการสะสมของประจุที่สูงจากประจุที่เหลืออยู่บนเส้นใย เนื่องจากปอลิเมอร์ที่เกิดเป็นเส้นใยนั้น โดยปกติแล้วจะไม่นำไฟฟ้าซึ่งทำให้ได้รูปแบบของเส้นใยที่เป็นแอม่งดังภาพที่ 8

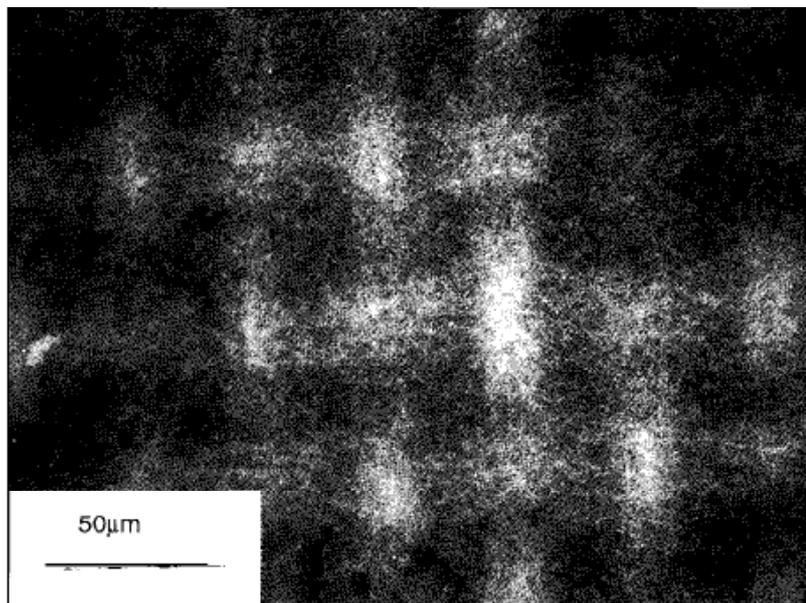
รูพรุนที่อยู่บนตัวรองรับนั้นจะส่งผลต่อการเกาะของเส้นใย จากการทดลองพบว่า เมื่อใช้ตัวรองรับที่มีรูพรุน เช่นกระดาษ และตะแกรงเหล็ก นั้นจะเห็นได้ว่าเส้นใยที่อยู่บนตัวรองรับนั้นมีการความหนาแน่นในการแพ็คตัวที่ต่ำ และมีพื้นผิวที่เรียบน้อยกว่าการใช้ฟอยล์โลหะ (Metal foil) เนื่องมาจากการกระจายตัว และอัตราในการระเหยของตัวทำละลายที่เหลือนบนเส้นใยบนตัวรองรับ ซึ่งตัวรองรับที่มีรูพรุน จะมีการระเหยของตัวทำละลายที่เหลือนบนเส้นใยที่รวดเร็ว เนื่องจากพื้นที่ผิวที่สูง ในขณะที่พื้นผิวที่เรียบนั้นจะเป็นสาเหตุที่ทำให้มีการสะสมของตัวทำละลายรอบเส้นใย เนื่องมาจากมีอัตราการระเหยที่ต่ำ เนื่องจากการดูดและการกระจายตัวของตัวทำละลายที่เหลือนบนเส้นใย ทำให้เส้นใยถูกดึงเข้ามาด้วยกันและแพ็คตัวกันหนา เช่นเดียวกันกับเส้นใยจะแห้งได้เร็วบนตัวรองรับที่มีรูพรุน เนื่องมาจากประจุที่เหลืออยู่บนเส้นใยนั้นจะเป็นตัวไล่ออกไปจากเส้นใย อย่างไรก็ตาม บนพื้นผิวที่เรียบ ตัวทำละลายที่เหลือนบนนั้นจะเป็นตัวที่ส่งเสริมให้ประจุที่เหลืออยู่บนนั้นถูกสะสมอยู่บนตัวรองรับ



ภาพที่ 8 การเกิดแอ่ง ของเส้นใยพอลิอะซิโตนที่ถูกปั่นด้วยไฟฟ้า ที่อัตราการไหล 8 mL/hr

รูปแบบของเส้นใยสามารถปรับแต่งได้จากการใช้ลักษณะของตัวรองรับ ดังภาพที่ 9 ซึ่งเส้นใยที่เกาะบน braided Teflon sheet ก็จะมีรูปแบบที่เหมือนกับรูปแบบบนพื้นผิวของ Teflon sheet

การใช้ตัวรองรับที่อยู่กับที่หรือมีการเคลื่อนที่นั้นจะส่งผลต่อกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้า ซึ่งการใช้ตัวรองรับที่มีการหมุนนั้นจะทำให้เส้นใยที่เก็บได้มีการจัดเรียงตัว อีกทั้งยังพบว่ามันจะทำไคเส้นใยที่ได้นั้นแห้งด้วย ซึ่งมันจะเป็นประโยชน์ต่อตัวทำละลาย เช่น Dimethylformamide (DMF) ซึ่งมันก็ความเหมาะสมต่อกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้า แต่มีจุดเดือดที่สูง นั้นทำให้เส้นใยที่เก็บได้นั้นเปียก การใช้ตัวรองรับที่หมุนได้นั้นจะช่วยให้ตัวทำละลายมีเวลามากพอที่จะเกิดการระเหย และยังช่วยเพิ่มอัตราการระเหยของตัวทำละลายบนเส้นใยด้วย ซึ่งจะทำให้ลักษณะของเส้นใยที่ได้นี้แตกต่างอย่างชัดเจน



ภาพที่ 9 คอลลาเจน (Collagen) ที่ถูกเก็บบน Braided Teflon sheet.

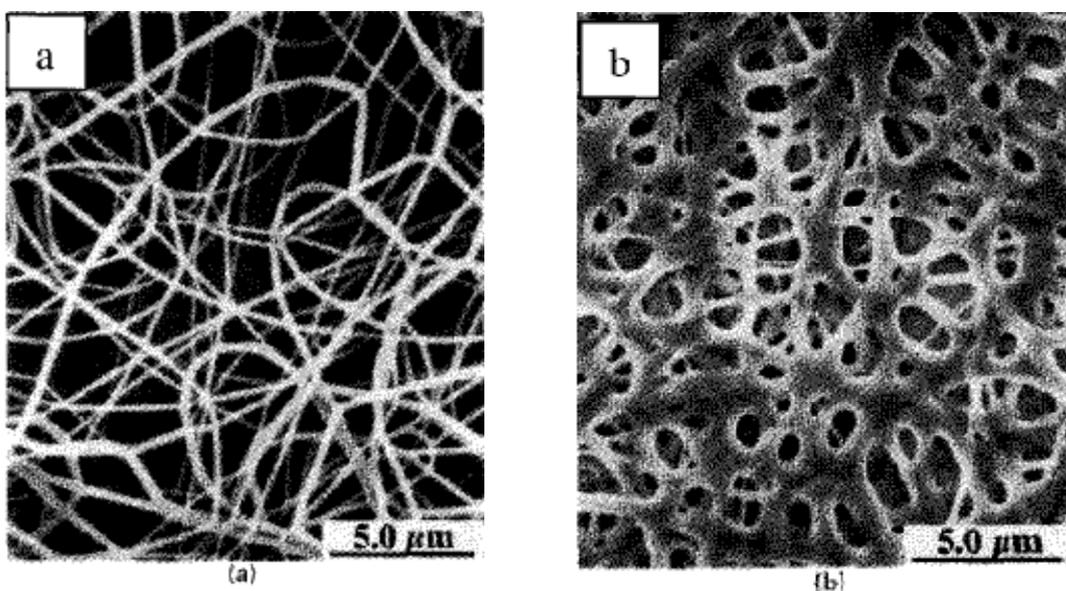
2.3.3.5 เส้นผ่านศูนย์กลางรูออกของปิเปต/เข็ม (Diameter of Pipette Orifice / Needle)

เส้นผ่านศูนย์กลางภายในเข็มฉีดยาหรือปิเปตนั้นจะมีผลโดยตรงต่อกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้า ซึ่งเส้นผ่านศูนย์กลางภายในที่น้อยนั้นจะช่วยลดการอุดตัน จึงทำให้ลดการเกิดลูกปัด ในเส้นใยที่ถูกปั่นด้วยไฟฟ้า เนื่องจากมีปริมาณของสารละลายที่สัมผัสกับอากาศในระหว่างกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าที่น้อย อีกทั้งยังช่วยให้ได้เส้นใยที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางที่ลดลง และเมื่อขนาดของหยดสารละลายที่ปลายเข็มนั้นลดลง จากการที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของเข็มที่ลดลงนั้น แรงตึงผิวของหยดสารละลายนั้นจะเพิ่มขึ้น ทำให้ต้องใช้ความต่างศักย์ที่สูงขึ้น เพื่อให้แรงคูลอมบ์นั้นเอาชนะได้ ดังนั้น ความเร็วของสาย jet จะลดลง และทำให้มีเวลามากขึ้นในการที่จะดึงยึดก่อนที่จะถูกเก็บลงบนตัวรองรับ อย่างไรก็ตาม, เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของเข็มที่เล็กมากๆ นั้น ก็อาจจะไม่สามารถที่จะทำการผลักออกสารละลายให้ออกมาที่ปลายเข็มได้

2.3.3.6 ระยะห่างระหว่างปลายเข็มและตัวรองรับ (Distance between Tip and Collector)

ในหลายๆ กรณีระยะเวลาในการลอยตัวและสนามไฟฟ้า นั้นจะมีผลต่อกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าและเส้นใยที่ได้ ซึ่งการปรับเปลี่ยนระยะทางระหว่างปลายเข็มถึงตัวรองรับ นั้นจะมีอิทธิพลโดยตรงต่อทั้งระยะเวลาในการลอยตัวและสนามไฟฟ้า ซึ่งในการเกิดเส้นใย

นั้น สาย jet จะต้องใช้เวลาพอที่จะทำให้ตัวทำละลายนั้นเกิดการระเหย และเมื่อระยะทางระหว่างปลายเข็มถึงตัวรองรับลดลงนั้น สาย jet ก็จะมีระยะทางจากปลายเข็มถึงตัวรองรับที่สั้น ยิ่งไปกว่านั้น, ก็จะทำให้สนามไฟฟ้านั้นสูงขึ้นด้วย ทำให้สาย jet นั้นมีการเคลื่อนที่ๆ รวดเร็วขึ้นไปยังตัวรองรับ เป็นผลให้ตัวทำละลายไม่มีเวลาพอที่จะเกิดการระเหย ทำให้เส้นใยเกิดการเชื่อมติดกันบริเวณที่สัมผัสกัน ทั้งภายในและภายนอกของเส้นใย แสดงดังภาพที่ 10 ซึ่งการเชื่อมต่อกันของเส้นใยนี้จะทำให้ scaffold นั้นมีความแข็งแรงมากยิ่งขึ้น



ภาพที่ 10 Nylon 6,6 (a) ระยะห่าง 2 cm และ (b) ระยะห่าง 0.5 cm

อีกทั้งยังขึ้นอยู่กับสมบัติของสารละลายด้วย ซึ่งจากผลของการปรับเปลี่ยนระยะทาง นั้นอาจจะมีหรือไม่มีผลต่อสัญญาณวิทยาของเส้นใย ในบางกรณี การเปลี่ยนระยะทางนั้น ไม่ส่งผลต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย แต่อย่างไรก็ตาม ก็จะมีผลต่อการเกิดลูปปิด ได้ถ้ามีระยะทางที่ต่ำเกินไป ซึ่งการเกิดลูปปิดนั้นเกิดจากการที่มีสนามไฟฟ้า ที่สูงระหว่างปลายเข็มถึงตัวรองรับ เช่นเดียวกัน การลดระยะทาง ก็จะมีผลเช่นเดียวกันกับการเพิ่มความต่างศักย์ และเป็นสาเหตุที่ทำให้มีสนามไฟฟ้าที่สูงขึ้น จากที่กล่าวมาแล้วนั้น ถ้าสนามไฟฟ้านั้นสูงมาก ก็จะเพิ่มความไม่เสถียรของสาย jet ซึ่งจะส่งผลเสริมให้มีการเกิดลูปปิด อย่างไรก็ตาม, ถ้าระยะทางนั้นมีความเหมาะสมต่อสนามไฟฟ้าก็จะพบลูปปิดได้น้อย เนื่องจากมีแรงดึงในสาย jet พอเพียง ในสถานะอื่นๆ การเพิ่มขึ้นของระยะทางจะทำให้ค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยลดลง เมื่อระยะทางนั้นยาวขึ้น นั้นหมายความว่า มันก็จะมีระยะเวลาลอยตัวที่นานขึ้น สำหรับสารละลาย เพื่อให้มีการดึงก่อนที่จะเกาะลงบนตัวรองรับ อย่างไรก็ตาม, ในกรณีที่ระยะทางไกลมาก นั้น เส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย

ก็จะเพิ่มขึ้น เนื่องจากสนามไฟฟ้าสถิตย์ที่ลดลง ทำให้มีการดึงเส้นใยที่น้อย เมื่อระยะทางนั้นไกลมากเกินไป ก็จะไม่มีเส้นใยมาเกาะติดอยู่ที่ตัวรองรับ เพราะฉะนั้น ระยะทางจึงต้องน้อยกว่า ความแข็งแรงของ สนามไฟฟ้าสถิตย์ ไม่เช่นนั้นแล้วความสามารถในการดึงสารละลายจะลดลง ทำให้ได้เส้นใยที่มีขนาดใหญ่ขึ้น

2.3.4 พารามิเตอร์จากสถานะแวดล้อม (Ambient Parameters)

ผลกระทบต่อบริเวณที่อยู่รอบๆ สาย jet นั้นมีการศึกษาที่น้อยมาก แรงกระทำใดๆ ระหว่างบริเวณรอบๆ และสารละลายพอลิเมอร์นั้น อาจจะมีผลต่อสัณฐานวิทยาของเส้นใย ยกตัวอย่างเช่น ถ้ามีความชื้นสูง ก็จะทำให้ได้เส้นใยที่มีพื้นผิวมีรูพรุน ดังนั้นกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้า นั้นสามารถที่จะได้รับอิทธิพลจากสนามไฟฟ้าภายนอก, ประจุต่างๆ ในสภาพแวดล้อม ซึ่งจะส่งผลต่อกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้า

2.3.4.1 ความชื้น (Humidity)

ความชื้นจากสภาพแวดล้อมสำหรับกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้า นั้นมีอิทธิพลต่อสารละลายพอลิเมอร์ในระหว่างกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้า ที่ความชื้นสูงๆ ก็จะทำให้มีน้ำมากล้นตัวอยู่บนพื้นผิวของเส้นใย เมื่อทำปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้า ภายใต้สภาวะบรรยากาศปกติ ซึ่งจะมีอิทธิพลต่อสัณฐานวิทยาของเส้นใย โดยเฉพาะอย่างยิ่งพอลิเมอร์ที่ละลายในตัวทำละลายที่ระเหยได้ง่าย ในการทดลองที่ใช้ Polysulfone (PES) ที่ละลายใน Tetrahydrofuran (THF) แสดงให้เห็นว่าที่ความชื้นต่ำกว่า 50% พื้นผิวของเส้นใยจะเรียบ แต่เมื่อความชื้นนั้นเพิ่มขึ้น จะมีรูพรุนเกิดขึ้นที่พื้นผิวของเส้นใย ซึ่งขนาดของรูพรุนนี้จะเพิ่มขึ้น เมื่อความชื้นเพิ่มขึ้น จนรูพรุนเหล่านี้มารวมตัวกันจนมีขนาดใหญ่ และมีรูปร่างที่ไม่เป็นแบบเดียวกัน แสดงดังรูปที่ 3.8 และความลึกของรูพรุนนี้จะเพิ่มขึ้นเมื่อความชื้นเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน ซึ่งทำการวัดโดยการ ใช้ Atomic force microscopy อย่างไรก็ตาม, ความลึกของรูพรุนนี้ก็เพิ่มขึ้นตามปริมาณของความชื้น จนถึงจุดอิ่มตัว

ในการศึกษา Thin films นั้น ที่พื้นผิวจะมีลักษณะของรูพรุนอยู่เพื่อการระบายอากาศ ซึ่งรวมไปถึงการเกิดขึ้นของรูพรุนเช่นนี้ในการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้า เช่นเดียวกับ ไอ้ที่กลั่นตัวบนพื้นผิวของสาย jet ระหว่างที่กำลังเย็นตัว จากการระเหยที่รวดเร็วของตัวทำละลายที่ระเหยได้ง่าย จึงทำให้เกิดรูพรุน จากทั้งน้ำและตัวทำละลายที่เกิดการระเหย แม้ว่ารูพรุนที่เกิดบน thin film นั้นจะใช้เพื่อการระบายจะเป็นรูปแบบเดียวกันนั้น รูพรุนที่เห็นในเส้นใยที่ถูกปั่นด้วยไฟฟ้า จะไม่เป็นแบบนี้ เนื่องจาก ในกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้า สาย jet มีสถานะที่มีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา เมื่อเปรียบเทียบกับสถานะที่คงที่บน Thin film

ความชื้นในสภาพแวดล้อมนั้น เกิดขึ้นจากอัตราการระเหยของตัวทำละลายในสารละลาย ซึ่งที่ความชื้นต่ำมากๆ นั้น ตัวทำละลายที่ระเหยได้ง่ายจะสามารถแห้งได้อย่างรวดเร็ว การระเหยของตัวทำละลายจะเร็วเร็วกว่าการขจัดตัวทำละลายออกจากปลายเข็ม ดังนั้น กระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้า จึงใช้เวลาไม่ถึงนาทีก่อนที่ปลายเข็มจะเกิดการอุดตัน

ผลของความชื้นต่อ ประจุไฟฟ้าสถิต บนพื้นผิวที่ไม่นำไฟฟ้า นั้น ได้มีการศึกษากันอย่างกว้างขวาง โดยได้มีการศึกษาการขนส่งอนุภาคของแก้ว ในท่อทองแดงที่ต่อสายดิน พบว่า ถ้ามีความชื้นสัมพัทธ์ที่สูงมาก (>76%) จะทำให้มีจำนวนของประจุบนพื้นผิวของอนุภาคเพิ่มขึ้น

นอกจากนี้ความชื้นที่สูงจะช่วยลดประจุบนเส้นใยที่ถูกปั่นด้วยไฟฟ้า อย่างไรก็ตาม, ได้มีการทดสอบหลายครั้งเกี่ยวกับผลของความชื้นที่มี การคลายของประจุในระหว่าง กระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้า และการสะสมของประจุที่เหลืออยู่บนเส้นใยที่ตัวรองรับ

2.3.4.2 ชนิดของสภาพแวดล้อม (Type of Atmosphere)

ส่วนประกอบของอากาศในสภาพแวดล้อมของการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้า จะมีผลต่อกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้า ก๊าซต่างชนิดกัน ก็จะมีพฤติกรรมที่แตกต่างกัน ภายใต้สนามไฟฟ้าที่สูง ตัวอย่างเช่น Helium จะแตกตัวที่สนามไฟฟ้า สูงๆ ดังนั้นจึงทำให้ไม่สามารถทำการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าได้ อย่างไรก็ตาม, ก๊าซที่จะแตกต่างที่ความต่างศักย์สูงๆ ที่มีการใช้ได้แก่ Freon®-12 จะทำให้ได้เส้นใยที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเป็น 2 เท่า ของเส้นใยที่ถูกปั่นด้วยไฟฟ้า ในอากาศ ที่สภาวะเดียวกัน

2.3.4.4 ความดัน (Pressure)

ภายใต้สภาวะปิด ได้มีการศึกษาผลของความดันต่อสาย jet โดยปกติแล้ว ถ้าลดความดันลงก็ไม่ทำให้กระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้านั้นดีขึ้น แต่เมื่อความดันนั้นต่ำกว่าความดันบรรยากาศ จะมีแนวโน้มที่สารละลายจะไหลออกมาจากเข็มฉีดยา ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้สาย jet นั้นไม่เสถียร เช่นเดียวกัน ถ้าความดันต่ำลง สารละลายจะเกิดฟองอย่างรวดเร็วที่ปลายเข็ม และที่ความดันต่ำๆ ก็จะทำให้ไม่สามารถที่จะทำการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าได้ เนื่องมาจากมีการคลายประจุโดยตรงจาก ประจุไฟฟ้า

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

S.-S. Choi และคณะ[1] ได้ทำการศึกษากการเตรียมเส้นใยด้วยไฟฟ้าของ Polybutadiene (BR) ที่ถูกทำให้เกิดการเชื่อมโดยด้วยวิธี UV irradiation เนื่องจากเส้นใย BR นั้นไม่สามารถที่จะ

รักษาลักษณะของเส้นใยเอาไว้ได้ เนื่องจากค่า T_g ที่ต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง ซึ่งในการทดลองนี้ได้ใช้ความเข้มข้นของสารละลายที่ 8 wt% และใช้สารที่ทำให้เกิดการเชื่อมโยง (Crosslinker) ที่ 0.5, 1.0, 2.0 และ 3.0 % ของ BR จากการศึกษาพบว่า การใช้ปริมาณสารที่ทำให้เกิดการเชื่อมโยงสูงสุด จะทำให้ค่าความหนาแน่นของการเชื่อมโยง (Crosslink density) เพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากค่า T_g ที่เพิ่มขึ้นจาก -84.35 เป็น -80.07 °C อีกทั้งในสมบัติเชิงกลยังให้ค่ามอดูลัสและค่าความทนต่อแรงดึงสูงสุด มากกว่าการใช้สารที่ทำให้เกิดการเชื่อมโยงต่ำที่สุทธประมาณ 2 เท่า เนื่องมาจากการเชื่อมโยงนั้นเกิดขึ้นทั้งภายในเส้นใย และระหว่างเส้นใยด้วยตัวเอง

Threepopnatkul. P. และคณะ[2] ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของชนิดเขม่าดำที่เติมลงใน Butyl Rubber (BR) ซึ่งจะถูกนำมาปั่นเป็นเส้นใยด้วยไฟฟ้า โดยจะใช้ปริมาณของเขม่าดำที่ 25, 30 และ 40 phr และทำการผสมด้วยเครื่อง Torque rheometer จากการศึกษาพบว่า เส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยจะเพิ่มขึ้น เมื่อขนาดของอนุภาคเขม่าดำนั้นมีขนาดที่เพิ่มขึ้น ซึ่งในส่วนของโครงสร้างเขม่าดำที่มีขนาดใหญ่ และขนาดของอนุภาคเล็ก จะทำให้ได้เส้นใยที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางที่ลดลง จากค่าการนำไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น รวมไปถึงความแข็งแรง ณ จุดขาด, เปอร์เซ็นต์การยืดตัว และ 300% มอดูลัส พบว่าการลดลงของขนาดอนุภาคเขม่าดำจะทำให้มีคุณสมบัติที่ดีขึ้น

H. Ismail และคณะ[11] ได้ทำการศึกษาสมบัติเชิงกลของวัสดุเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ระหว่าง polypropylene/natural rubber (PP/NR) และ polypropylene/recycle rubber (PP/RR) จากการศึกษาพบว่า ทั้ง PP/NR และ PP/RR นั้นให้ค่าความทนต่อแรงดึง และยังมีมอดูลัส ที่ลดลงเมื่อปริมาณของยางนั้นเพิ่มขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบในอัตราส่วนเดียวกัน PP/RR นั้นให้ค่าความทนต่อแรงดึง และยังมีมอดูลัสที่สูงกว่า แต่กลับให้ค่าการยืดตัว ณ จุดขาดต่ำกว่า PP/NR เนื่องมาจาก RR นั้นเป็นยางที่ถูกเชื่อมโยงมาแล้ว จึงขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่พอลิเมอร์

Dong Yang Wu และคณะ[12] ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของยางที่ใช้แล้ว (Ground rubber; GR) ต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิต ABS กับยางที่ผ่านการปรับปรุงผิวโดยการทำคลอรีเนชัน (chlorination) ด้วยสารละลายกรดโซเดียมไฮเปอร์คลอไรด์ แล้วทำการกราฟที่ผิวหน้า 2 แนวทางคือ การทำกราฟที่ผิวหน้า chlorinated GR ด้วย amine-terminated butadiene acrylonitrile (ATBN) หรือ triethanolamine zirconium chelate (TEAZ) และ การทำ In-situ compatibilization ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น $AlCl_3$, $FeCl_3$, $ZnCl_2$ โดยยังมีส่วนประกอบ คือ 30% ยางธรรมชาติ (NR) และ 70% ยางสไตรีน-บิวตะไดอีน (SBR) จากการศึกษาพบว่า สำหรับยางที่ไม่ได้ทำการปรับปรุงผิว เมื่อปริมาณยางที่ผสมกับ ABS เพิ่มขึ้น ทำให้ค่ามอดูลัส และค่าความแข็งแรงของวัสดุคอมโพสิตลดลง แต่ขนาดของยางมีผลต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิตไม่มากนัก สำหรับยางที่ผ่านการปรับปรุงผิวแล้ว พบว่า ยางที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วยวิธี In-situ compatibilization ด้วยตัวเร่ง

ปฏิกิริยา ทำให้ค่ามอดุลัส ค่าความแข็งแรง และค่าความเหนียวของวัสดุคอมโพสิตมากกว่า เป็นผล
เนื่องมาจากกลไกการยึดเกาะที่แข็งแรงกว่าของพันธะไฮโดรเจน

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

- 3.1.1 ยางธรรมชาติแท่ง (Natural rubber) เกรด STR5L บริษัท สักดารุ่งเรืองกิจ จำกัด
- 3.1.2 Poly(acrylonitrile-butadiene-styrene) เกรด SP200 บริษัท IRPC .,Co.LTD
- 3.1.3 เตตระไฮโดรฟูเรนต์ (Tetrahydrofuran) เกรด commercial บริษัท RCL Labscan
- 3.1.4 ZnO ได้ความอนุเคราะห์จากบริษัท KIJ PAIBOON Chemical Ltd., Part.
- 3.1.5 Steric acid ได้ความอนุเคราะห์จากบริษัท KIJ PAIBOON Chemical Ltd., Part.
- 3.1.6 Wingstay-L ได้ความอนุเคราะห์จากบริษัท KIJ PAIBOON Chemical Ltd., Part.
- 3.1.7 Tetramethylthiuram disulfide (TMTD) ได้ความอนุเคราะห์จากบริษัท KIJ PAIBOON Chemical Ltd., Part.
- 3.1.8 Dibenzothiazole disulfide (MBTS) ได้ความอนุเคราะห์จากบริษัท KIJ PAIBOON Chemical Ltd., Part.
- 3.1.9 Sulfur ได้ความอนุเคราะห์จากบริษัท KIJ PAIBOON Chemical Ltd., Part.
- 3.1.10 CaCl₂ จากบริษัท Ajax Finechem Pty.,Ltd เกรด analytical
- 3.1.11 NH₄Cl จากบริษัท Carlo Erba เกรด analytical

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

- 3.2.1 เครื่องกำเนิดความต่างศักย์ไฟฟ้าแรงสูง (High Voltage) บริษัท Gamma high voltage research
- 3.2.2 เครื่องควบคุมอัตราการไหล (Syringe pump) บริษัท KD scientific รุ่น single pump
- 3.2.3 ตู้อบแบบสุญญากาศ บริษัท EYELA vacuum oven รุ่น VOS-301SD
- 3.2.4 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนไมโครสโคปแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy) รุ่น CAMSCAN mx200
- 3.2.6 เครื่องวัดความหนืดสารละลาย (Brook filed viscometer) บริษัท Brookfiled viscometer รุ่น DV-E viscometer
- 3.2.7 มอเตอร์ บริษัท Hascon electric motor รุ่น MS632-4

3.2.8 อินเวอร์เตอร์ บริษัท Frenic-mini

3.2.9 เครื่องทดสอบเอนกประสงค์ (Universal testing machine) บริษัท Instron รุ่น 5565

3.2.10 เครื่องวัดความชื้น รุ่น Hygrometer testo 608-11

3.2.11 เครื่องชั่งละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง บริษัท Mettler Toledo รุ่น AB204-S/FACT

3.2.12 เครื่องผสมภายใน (Internal mixer) บริษัท BRABENDER รุ่น 30/50 EHT

3.2.13 เครื่องทดสอบเอกลักษณ์การคงรูปยาง Moving Die Rheometer (MDR) บริษัท Gotech รุ่น GT-M2000

3.2.14 เครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้าของสารละลาย บริษัท Mettler Toledo รุ่น Seven Multi S47

3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 การเตรียมยางธรรมชาติคอมปาวด์



ภาพที่ 11 แสดงเครื่อง Brabender

นำแท่งยางธรรมชาติ (Natural rubber STR5L) มาตัดเป็นชิ้นเล็กๆ ให้มีขนาดที่จะเข้าห้องผสมของเครื่อง Brabender ได้ โดยสภาวะที่ใช้ในการผสมระหว่างยางธรรมชาติและสารเติมแต่งอื่นๆ คือ อุณหภูมิที่ใช้ระหว่างผสมคือ $40\text{ }^{\circ}\text{C}$, ความเร็วรอบของสกรู 60 รอบ/นาที ซึ่งในการเตรียมคอมปาวด์ยางธรรมชาตินั้นจะต้องมีการใส่สารเติมแต่งตามลำดับ เพื่อให้สารเติมแต่งที่เติมลงไปมีการกระจายตัวที่ดี และมีประสิทธิภาพ ซึ่งสารเติมแต่งและปริมาณที่ใช้แสดงดังตารางที่ 7 ขั้นตอนในการผสม คือ ทำการใส่แท่งยางธรรมชาติที่ตัดแล้ว ลงในห้องผสมของเครื่อง Brabender เพื่อทำการลดน้ำหนักโมเลกุลยาง (mastication) เป็นเวลา 15 นาที หลังจากนั้นจึงใส่สารเติมแต่งลง

ไปตามลำดับ ดังนี้ ZnO, Steric acid, Wingstay-L, MBTS, TMTD, SULFUR ตามลำดับ จนครบ เวลาผสมทั้งหมดคือ 30 นาที จากนั้นจึงเก็บลงถุงพลาสติก เพื่อนำไปผสมกับเอบีเอสต่อไป

ตารางที่ 7 แสดงอัตราส่วนของสารเติมแต่งที่ใช้ในยางธรรมชาติ [13]

Materials	phr*
Natural rubber (STR-5L)	100.0
ZnO	5.0
Steric acid	2.0
Wingstay-L	1.0
MBTS	1.0
TMTD	0.1
Sulfur	2.75

* phr = part per hundred rubber

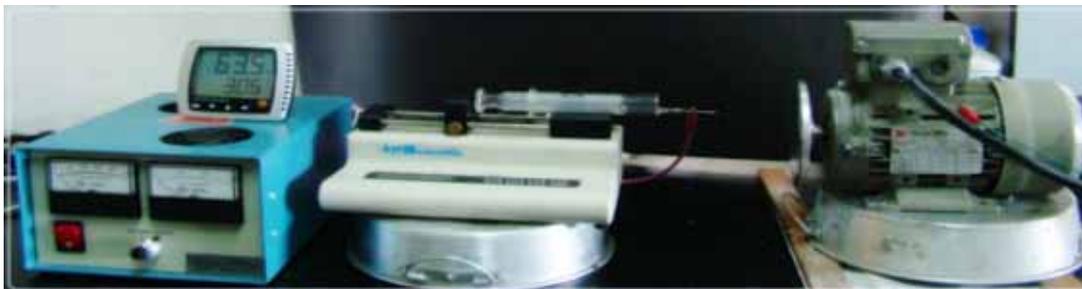
3.3.2 การทดสอบสมบัติการคงรูปของยางคอมพาวด์

นำยางคอมพาวด์ที่ได้จากการผสม ไปหาคุณลักษณะของการคงรูปของยางคอมพาวด์ เครื่อง Moving Die Rheometer (MDR) ที่อุณหภูมิ 180 - 200 °C เพื่อตรวจสอบค่าแรงบิดสูงสุดและต่ำสุด (torque maximum and torque minimum) เวลาในการเกิดสกอร์ช (scorch time, t_{s2}) และเวลาในการคงรูป (cure time, t_{c90})

3.3.3 การเตรียมสารละลายสำหรับการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้า

นำยางธรรมชาติคอมพาวด์มาผสมกับ ABS โดยการนำมาละลายในตัวทำละลาย THF และใช้ความเข้มข้นอยู่ในช่วง 5 – 20 wt% ซึ่งอัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติคอมพาวด์และเอบีเอส นั้น มีดังนี้ 80/20, 70/30, 60/40 และ 50/50 (wt %/wt %) จากนั้นทิ้งไว้ประมาณ 12 ชม. จนละลายเป็นสารละลายเนื้อเดียวกัน

3.3.4 การติดตั้งอุปกรณ์สำหรับปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้า



ภาพที่ 12 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์สำหรับปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้า

ในการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้านั้น มีอุปกรณ์ที่จำเป็นหลักๆ อยู่ 3 ส่วนด้วยกันคือ เครื่องกำเนิดความต่างศักย์ไฟฟ้า ซึ่งในการทดลองนี้จะเป็นแบบประจุบวก, เครื่องควบคุมอัตราการไหล และชุดรองรับเส้นใย ซึ่งการจัดวางชุดปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้านั้นสามารถกระทำได้หลายแบบ โดยในการทดลองนี้จะติดตั้งชุดปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าในแนวนอน เพื่อลดปัจจัยของแรงดึงดูดของโลก ที่กระทำต่อเส้นใยขณะที่พุ่งจากปลายเข็มฉีดยา ไปยังตัวรองรับ และชุดรองรับเส้นใยที่ใช้ในการทดลองนี้ จะเป็นแบบแผ่นโลหะกลม ที่สามารถหมุนและควบคุมความเร็วรอบได้ เพื่อช่วยให้เกิดการกระจายตัวที่เท่ากันของเส้นใยที่เก็บได้บนตัวรองรับ และยังช่วยเพิ่มการระเหยของตัวทำละลาย ในระหว่างที่ทำการเก็บเส้นใยบนตัวรองรับด้วย รวมทั้งในการทดลองนี้ยังมีการใช้สปอตไลท์ร่วมด้วย เพื่อให้ความร้อนแก่เส้นใยระหว่างที่พุ่งจากปลายเข็มฉีดยา ไปยังตัวรองรับ ซึ่งจะช่วยให้มีการระเหยของตัวทำละลายได้ดียิ่งขึ้นอีกด้วย

3.3.5 การปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้า

นำสารละลายที่เตรียมได้มาบรรจุลงใน syringe ขนาด 20 มิลลิลิตร และใช้เข็มแบบพลาสติก เบอร์ 19 แล้วทำการติดตั้งบนเครื่องควบคุมอัตราการไหล (syringe pump) อัตราการไหลของของสารละลายจะมีความสัมพันธ์ต่อระยะห่างระหว่างตัวรองรับ ดังนั้นจึงต้องปรับให้มีความเหมาะสม เนื่องจากถ้าหาระยะห่างระหว่างปลายเข็มและตัวรองรับไม่เหมาะสมแล้ว จะทำให้ตัวทำละลายไม่เกิดการระเหย และไม่สามารถที่จะทำการเก็บเส้นใยได้ และให้ศักย์ไฟฟ้าที่บริเวณปลายเข็ม ซึ่งการเลือกศักย์ไฟฟ้าที่จะให้ นั้นจะเลือกจากลักษณะของ jet ที่ได้มีความเสถียร คือไม่มีลักษณะพ่นเป็นหยด หรือมีการแกว่ง หลังจากที่ทำกรเปิดเครื่องควบคุมอัตราการไหล และตัวรองรับ (collector) เรียบร้อยแล้ว โดยสภาวะที่ใช้ในการเตรียมเส้นใยแสดงดังตารางที่ 8

ตารางที่ 8 แสดงสภาวะที่ใช้ในการเตรียมเส้นใย

Solution concentration (wt%)	Flow rates (ml/h)	Voltage (kV)	Tip-to-Collector distance (cm)
5 -20	10-30	14-16	15-25

หลังจากทำการเตรียมเส้นใยตามสภาวะที่กำหนดเรียบร้อยแล้ว จะนำมาทิ้งที่อุณหภูมิห้อง เพื่อให้ตัวทำละลายระเหยเป็นเวลา 1 ชม. เส้นใยที่ได้จะถูกเก็บออกเป็นสองส่วนด้วยกัน ซึ่งเส้นใยอีกส่วนหนึ่งจะถูกนำไป บ่มใน vacuum oven ที่อุณหภูมิ 190 °C เป็นเวลาสองนาทีก

3.4 การวิเคราะห์สมบัติของสารละลาย

3.4.1 การวัดความหนืดของสารละลาย



ภาพที่ 13 แสดงเครื่องวัดความหนืดของสารละลาย Brookfield Viscometer รุ่น

นำสารละลายที่เตรียมได้เทใส่ภาชนะที่มีความกว้าง ห่างจากระยะห่างระหว่างแกนทดสอบประมาณ 1.5 cm และต้องจุ่มมิดในสารละลายที่จะทำการวัด ซึ่งเครื่องทดสอบจะมีหัวทดสอบประกอบกันด้วยหลายหัวทดสอบ แสดงดังภาพที่ 13 และสามารถกำหนดความเร็วรอบของการทดสอบได้ เมื่อทำการทดสอบเครื่องจะแสดงค่าอยู่ 4 อย่างด้วยกันคือ shear rate, shear stress, torque และ viscosity ซึ่งค่าความหนืดที่วัดจะมีความเหมาะสมและเที่ยงตรง นั้นสามารถดูได้จากค่า

torque ซึ่งค่าที่สามารถยอมรับได้คือ ค่า torque มากกว่า 90% ขึ้นไป จะมีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด แต่หากไม่สามารถที่จะปรับให้มีค่า torque ที่มากกว่า 90% ได้ ค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดจะอยู่ที่ 10%

3.4.2 การวัดค่าการนำไฟฟ้าของสารละลาย

ทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้าของสารละลาย บริษัท Mettler Toledo รุ่น Seven Multi S47 ซึ่งตัวอย่างจะถูกเตรียมตามหัวข้อที่ 3.3.3

3.5 การทดสอบและตรวจสอบสมบัติของเส้นใย NR/ABS ที่ปั่นด้วยไฟฟ้า

3.5.1 การหาค่าความถ่วงจำเพาะของเส้นใย



ภาพที่ 14 แสดงเครื่องชั่งทดสอบค่าความถ่วงจำเพาะ

การวัดความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) ของเส้นใยจะทำตาม ASTM D792 ซึ่งลักษณะของเครื่องชั่งที่ใช้ในการหาความถ่วงจำเพาะนั้น จะมีส่วนที่เป็นขวดวัดเพิ่มขึ้นมา ดังภาพที่ 14 โดยตัวอย่างแผ่นเส้นใยที่จะนำมาทำการทดสอบนั้นจะถูกนำมาชั่งในขวดวัดชุดบนก่อน ซึ่งจะเป็น้ำหนักในอากาศ หลังจากนั้นจึงนำตัวอย่างไปชั่งในขวดวัดชุดด้านล่าง ซึ่งจะถูกร่วมอยู่ในน้ำภายในบีกเกอร์ แต่เนื่องจากตัวอย่างแผ่นเส้นใยที่เตรียมนั้น มีความเป็นรูพรุนสูง จึงทำให้มีอากาศอยู่ภายใน จึงจำเป็นต้องทำการขจัดอากาศนั้นออกจากแผ่นเส้นใย ด้วยการใช้ตุ๋บสูญญากาศ ดูดอากาศที่อยู่ภายในเส้นใยออกก่อน แล้วจึงทำการชั่งต่อไป ซึ่งค่าความถ่วงจำเพาะที่ได้จะถูกคำนวณตามสมการ ดังนี้

$$\text{Specific gravity} = \frac{a}{[(a+w)-b]} \quad (\text{สมการที่ 3.1})$$

a = น้ำหนักของตัวอย่างในอากาศ

b = น้ำหนักของตัวอย่างในน้ำ ถ้าใช้ในการถ่วงตัวอย่างให้จม

W = น้ำหนักของตัวอย่างทั้งหมดในน้ำ

3.5.2 การทดสอบแรงดึงของเส้นใย



ภาพที่ 15 แสดงเครื่องทดสอบแรงดึงเอนกประสงค์

การทดสอบแรงดึงของเส้นใยจะกระทำตาม ASTM D412 โดยใช้เครื่องทดสอบเอนกประสงค์ (universal testing machine) ยี่ห้อ Instron รุ่น 5565 ขนาดของ Loadcell 500 N Cross head speed 10 mm/min ตัวอย่างจะถูกตัดออกมาโดยมีขนาด 10 x 50 (mm x mm) และทำการวัดความหนาด้วยไมโครมิเตอร์ ซึ่งความหนาของตัวอย่างจะถูกควบคุมโดยใช้ปริมาณของสารละลายประมาณ 5 ml ในการปั่นเส้นใย

3.5.3 การทดสอบการแพร่ผ่านของไอน้ำ (Water vapour permeation, WVP)

สามารถทำการทดสอบได้ด้วยการใช้สารละลายเกลืออิ่มตัวที่ความค่า RH แตกต่างกัน สองชนิดคือ CaCl_2 (32 %RH) และ NH_4Cl (80 %RH) โดยนำสารละลายเกลืออิ่มตัวอิ่มตัวที่มี RH สูงกว่าบรรจุลงในหลอดทดลอง คือ NH_4Cl และนำสารละลายเกลือที่มี RH ต่ำกว่าบรรจุลงในบีกเกอร์ คือ CaCl_2 นำสารละลายเกลือที่บรรจุอยู่ในบีกเกอร์ ใส่ลงใน Desiccators ไว้จนกระทั่ง

บรรยากาศภายใน Desiccators มี RH เท่ากับสารละลายเกลืออิ่มตัวของ CaCl_2 หลังจากนั้นทำการบรรจุสารละลายเกลืออิ่มตัวของ NH_4Cl ลงในหลอด vial ขนาด 4 drums แล้วทำการชั่งน้ำหนัก และจดบันทึก จากนั้นนำเส้นใยที่เตรียมได้มาปิดไว้บนหลอดทดลอง และนำไปวางไว้ใน Desiccators ที่ไว้จนครบ 24 ชม. แล้วทำการวัดน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงอีกครั้ง จึงนำมาคำนวณอัตราการแพร่ผ่านของอากาศตามสมการ[14] ดังนี้

$$\text{WVP} = \frac{24M}{At} \quad (\text{g/m}^2/\text{day}) \quad (\text{สมการที่ 3.2})$$

M = น้ำหนักที่หายไป (g)

t = ระยะเวลาที่ใช้ทดสอบ (h)

A = พื้นที่ภายในของภาชนะ (m^2)

$$A = \frac{\pi d^2 \times 10^{-6}}{4} \quad (\text{สมการที่ 3.3})$$

d = เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของภาชนะ (mm)

3.5.4 การศึกษาสัณฐานวิทยาของเส้นใย

จะทำการศึกษาโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน สองประเภทด้วยกันคือ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน โดยจะขอกล่าวถึง กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเป็นลำดับแรก เมื่อทำการเตรียมเส้นใยจากการปั่นด้วยไฟฟ้าเรียบร้อยแล้ว เส้นใยจะถูกเก็บลงบนแผ่นอะลูมิเนียมเพลตที่ติดตั้งไว้ที่ตัวรองรับ จึงตัดออกเป็นชิ้นเล็กๆ แล้วนำ Coat ทอง ด้วยเครื่อง Sputtering เป็นเวลา 120 วินาที หลังจากนั้นจึงนำไปติดบน stub เพื่อทำการทดสอบ และใช้พลังงานที่ 15 keV. ที่กำลังขยาย 50, 200 และ 1000 เท่า

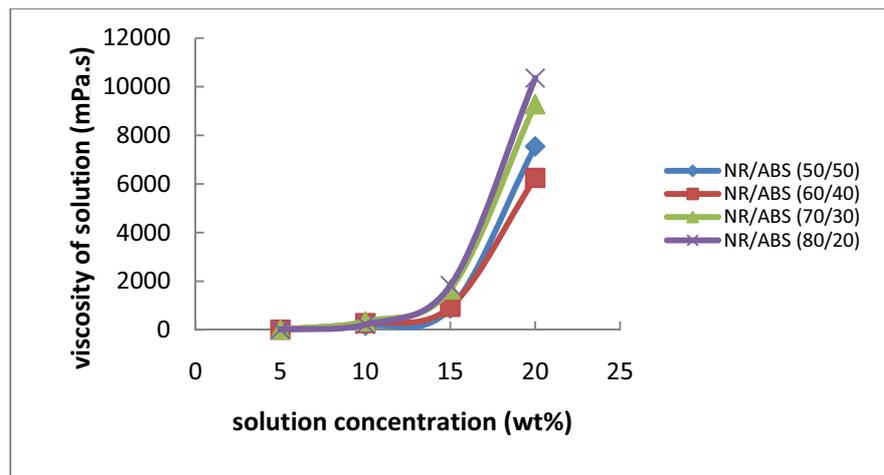
บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ต้องการศึกษาการเตรียมเส้นใยด้วยวิธีการปั่นด้วยไฟฟ้าของยางธรรมชาติที่ผสมกับเอบีเอส ในอัตราส่วนแตกต่างกัน โดยใช้ยางธรรมชาติเป็นสัดส่วนหลัก ซึ่งจะทำให้การศึกษาอิทธิพลของปัจจัยต่างๆ ในกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้า และอิทธิพลของปริมาณเอบีเอสที่ส่งผลต่อลักษณะทางกายภาพของเส้นใยที่เตรียมได้ รวมทั้งสมบัติเชิงกล และสมบัติการแพร่ผ่านของไอน้ำ โดยผลการทดลองเป็นดังนี้

4.1 การวิเคราะห์สมบัติของของสารละลาย

4.1.1 ความหนืดของสารละลาย



ภาพที่ 16 แสดงความหนืดของสารละลาย NR/ABS ที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน

ความหนืดของสารละลายที่ใช้ในการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้า นั้นมีความสำคัญต่อสถานะที่จะใช้ในการขึ้นรูปเส้นใย ซึ่งส่งผลไปยังลักษณะของเส้นใยที่ได้ด้วย โดยทั่วไปแล้วค่าความหนืดของสารละลายนั้นสามารถทำให้เพิ่มขึ้นได้ด้วยการเพิ่มน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ หรือการใช้ความเข้มข้นที่สูงขึ้น ซึ่งการที่น้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์หรือความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ได้เส้นใยที่มีความยาวต่อเนื่อง จากการที่สายโซ่พอลิเมอร์มีปริมาณของการพันกันที่มากขึ้น และได้เส้นใยที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางที่เพิ่มมากขึ้นด้วย แต่การที่มีความหนืดที่สูงมากเกินไปนั้นก็ไม่ส่งผลดีต่อกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้า เนื่องจากจะทำให้สารละลายเกิดการแข็งที่บริเวณปลายเข็ม

และไม่สามารถดัดสารละลายให้ไหลออกจากปลายเข็มได้ เพราะความเข้มข้นที่สูงขึ้นจะทำให้มีปริมาณของตัวทำละลายอยู่น้อย ซึ่งในการทดลองนี้สารละลายที่ใช้สำหรับการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้า NR/ABS นั้นจะปรับเปลี่ยนความเข้มข้นตั้งแต่ 5 wt% ถึง 20 wt% และปรับเปลี่ยนอัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติ และเอปียเอสให้แตกต่างกัน ในแต่ละความเข้มข้น จากภาพที่ 16 จะเห็นได้ว่าที่ทุกๆ อัตราส่วนของ NR/ABS นั้น เมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้น จาก 5 wt% จนถึง 20 wt% นั้น ค่าความหนืดของสารละลายที่ได้เพิ่มขึ้นสูงขึ้น โดยที่อัตราส่วน NR/ABS (80/20) นั้นให้ค่าความหนืดสูงสุด คือจาก 18 เป็น 10354 mPa.s และเมื่อพิจารณาความเข้มข้น ในช่วง 5 – 15 wt% นั้นจะเห็นได้ว่าอยู่ในระดับใกล้เคียงกัน แต่เมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้นเป็น 20 wt% ค่าความหนืดของสารละลายที่ได้แตกต่าง จากความเข้มข้นอื่นๆ (5 – 15 wt%) อย่างชัดเจน และเมื่อพิจารณาที่ความเข้มข้นเดียวกัน ที่แต่ละอัตราส่วนระหว่าง NR/ABS พบว่า เมื่อปริมาณของยางธรรมชาติเพิ่มสูงขึ้นจาก 50 % เป็น 80 % จะทำให้ความหนืดของสารละลายที่ได้เพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากยางธรรมชาตินั้นมีน้ำหนักโมเลกุลที่สูงประมาณ 400,000 [5] อีกทั้งการเพิ่มขึ้นของปริมาณยางธรรมชาติจึงทำให้มีการเกี่ยวพันกันของสายโซ่พอลิเมอร์ที่เพิ่มมากขึ้น จึงทำให้ความหนืดของสารละลายเพิ่มขึ้น

4.1.2 ค่าการนำไฟฟ้าของสารละลาย

จากตารางที่ 9 แสดงค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายที่ใช้ในการทดลอง โดยกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้านั้นเกี่ยวข้องกับ การดึงยึดของสารละลายที่ได้แรงผลักจากประจุบนพื้นผิวดังนั้นถ้าการนำไฟฟ้าของสารละลายเพิ่มขึ้น ทำให้สามารถสะสมประจุได้มากยิ่งขึ้นด้วย จากผลการทดลองพบว่าค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายเอปียเอสมีค่าน้อยกว่าค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายจากยางธรรมชาติคอมปาวด์ ซึ่งพอลิเมอร์โดยทั่วไปแล้วนั้นมีสมบัติความเป็นฉนวน แต่การเติมสารเติมแต่งลงในยางธรรมชาติ จึงเป็นผลให้มีค่าการนำไฟฟ้าที่สูงกว่าเอปีย เอส อีกทั้งค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายยางธรรมชาติที่ผสมเอปียเอสอยู่ในค่าที่ใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่าค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายที่เพิ่มขึ้นนั้น มาจากยางธรรมชาติคอมปาวด์

ตารางที่ 9 แสดงค่าการนำไฟฟ้าของสารละลาย

NR/ABS Ratios (%wt)	Conductivity of solution ($\mu\text{S/cm}$)	Temperature ($^{\circ}\text{C}$)
0/100	0.015	26.3
50/50	0.038	28.7
60/40	0.035	28.7
70/30	0.037	30.1
80/20	0.037	28.1
100/0	0.043	27.8

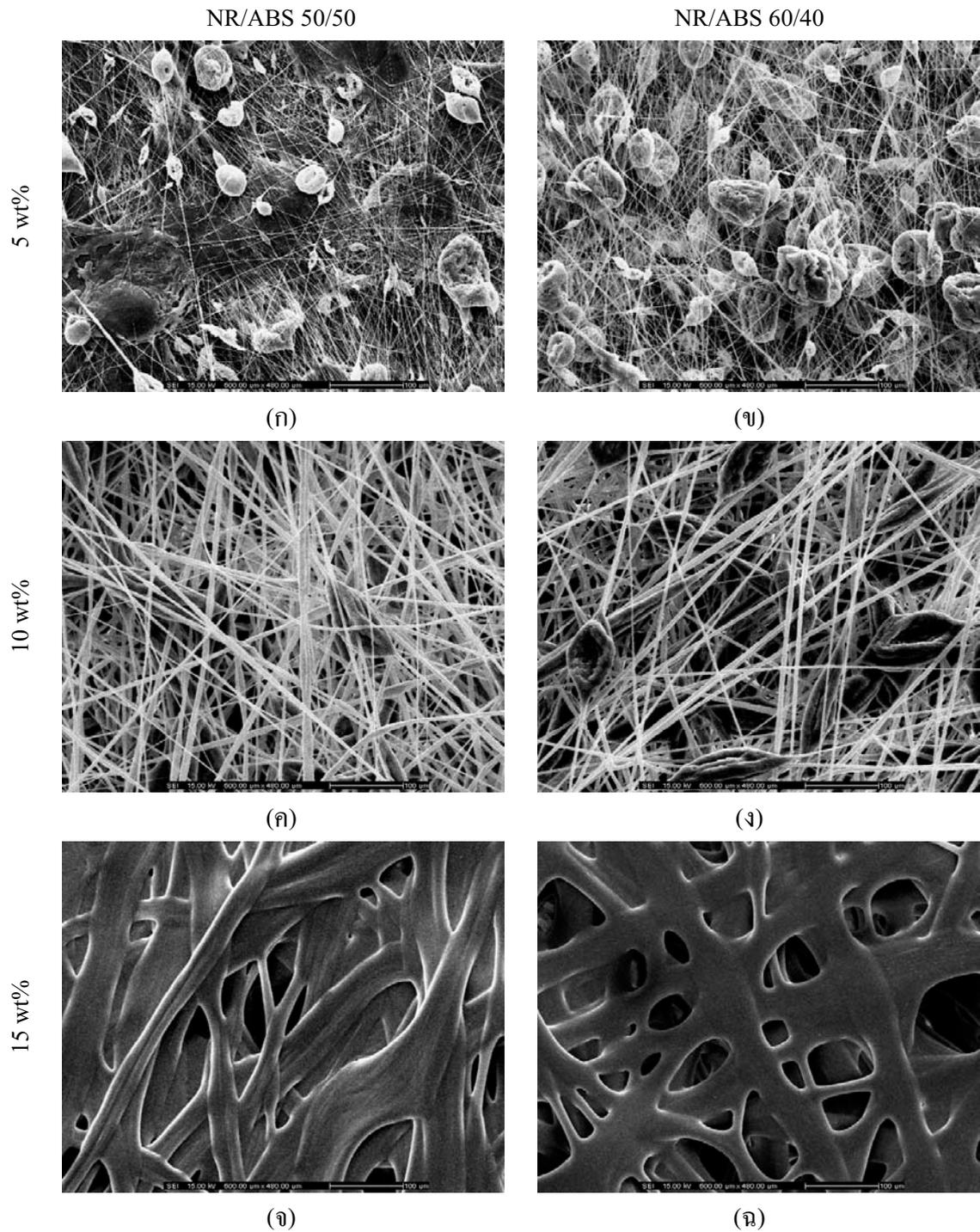
4.2 การศึกษาสัณฐานวิทยาของเส้นใยของยางธรรมชาติที่ผสมเอบีเอส

4.2.1 การศึกษาสภาวะที่ใช้ในการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้า

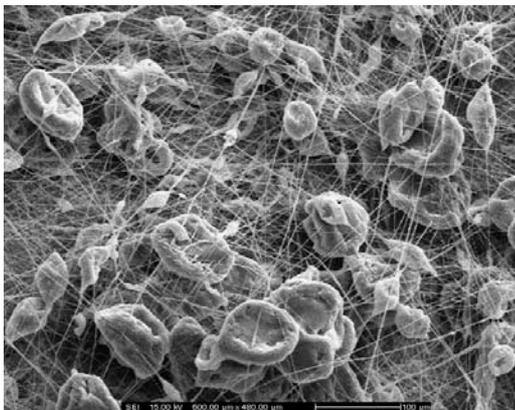
ในกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้านั้น มีปัจจัยหลายอย่างที่มีผลกระทบต่อลักษณะของเส้นใย, การจัดเรียงตัว และเส้นผ่านศูนย์กลาง โดยในงานวิจัยนี้ต้องการศึกษาปัจจัย 4 อย่างที่สำคัญที่ส่งผลต่อกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้า 4 ปัจจัยหลัก ด้วยกัน คือ ความเข้มข้นของสารละลาย, ระยะห่างระหว่างปลายเข็มถึงตัวรองรับ, อัตราการไหล และความต่างศักย์ไฟฟ้า โดยความต่างศักย์ไฟฟ้าที่จะกำหนดให้แก่สารละลาย NR/ABS นั้นจะกระทำที่ 15 kV เนื่องจากลักษณะของสาย jet ของสารละลายที่พุ่งจากปลายเข็มไปยังตัวรองรับนั้นให้ความเสถียรที่สุด

4.2.1.1 ความเข้มข้นของสารละลาย

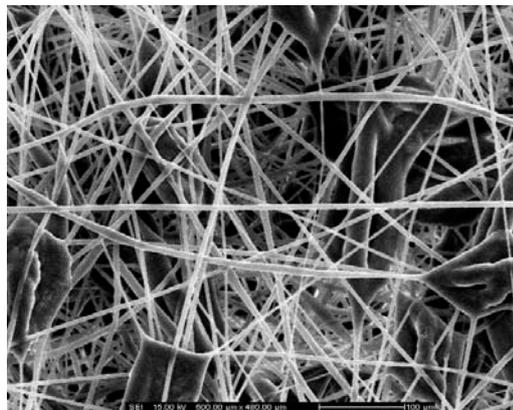
จากที่ได้กล่าวไว้ก่อนหน้านี้ในหัวข้อความหนืดของสารละลายนั้นมีความสัมพันธ์โดยตรงต่อความเข้มข้นของสารละลาย แสดงดังภาพที่ 4.1 โดยจะเห็นได้ว่าเมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มสูงขึ้น ก็จะทำให้ค่าความหนืดที่ได้สูงขึ้นด้วย ซึ่งในกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้านั้น การที่จะทำให้ได้เส้นใยที่มีความต่อเนื่อง, smooth, ไม่เกิดลูกปัดและได้เส้นใยมีลักษณะเป็นทรงกระบอกนั้น ค่าความหนืดของสารละลายที่ใช้ปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้านั้นจะต้องมีความเหมาะสม[15,16] ซึ่งค่าความหนืดที่สามารถเตรียมเป็นเส้นใยที่ปราศจากลูกปัดได้ในวัสดุแต่ละชนิด นั้นไม่เท่ากัน ซึ่งอาจจะทำให้ได้เส้นใยที่มีลักษณะแตกต่างกันไปได้ ที่ความหนืดเท่ากันจึงทำให้การศึกษาลักษณะของเส้นใยที่เตรียมได้ในแต่ละวัสดุนั้นมีความสำคัญ



ภาพที่ 17 แสดงเส้นใย NR/ABS (50/50) และ NR/ABS (60/40) ที่ยังไม่ผ่านการบ่ม โดยทำการปรับระดับของความเข้มข้นของสารละลาย ดังนี้ 5, 10, 15 wt% ที่ระยะทางระหว่างปลายเข็มถึงตัวรองรับ 15 cm อัตราการไหล 30 ml/h และความต่างศักย์ไฟฟ้า 15 kV

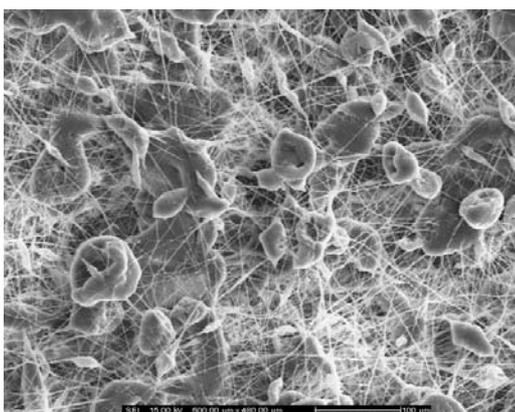


(ก) 5 %

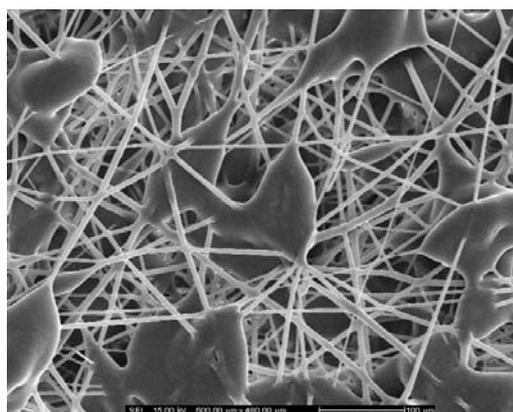


(ข) 10 %

ภาพที่ 18 แสดงเส้นใย NR/ABS (70/30) ที่ยังไม่ผ่านการบ่ม โดยทำการปรับระดับของความเข้มข้นของสารละลาย ดังนี้ 5, 10 wt% ที่ระยะทางระหว่างปลายเข็มถึงตัวรองรับ 15 cm อัตราการไหล 30 ml/h และความต่างศักย์ไฟฟ้า 15 kV



(ก) 5 %



(ข) 10 %

ภาพที่ 19 แสดงเส้นใย NR/ABS (80/20) ที่ยังไม่ผ่านการบ่ม โดยทำการปรับระดับของความเข้มข้นของสารละลาย ดังนี้ 5, 10 wt% ที่ระยะทางระหว่างปลายเข็มถึงตัวรองรับ 15 cm อัตราการไหล 30 ml/h และความต่างศักย์ไฟฟ้า 15 kV

ซึ่งจากภาพที่ 17 ที่อัตราส่วน 50/50 นั้น จะเห็นได้ว่า ที่ความเข้มข้น 5 % wt นั้น เส้นใยที่ได้มีลักษณะที่เกิดเป็นลูกปัด และมีการหลอมรวมกันของเส้นใย ก็เนื่องมาจากปริมาณของพอลิเมอร์ที่ละลายอยู่ในสารละลายที่มีอยู่น้อย นั้นหมายความว่า มีปริมาณของตัวทำละลายที่มากกว่า รวมทั้งทำให้มีการพันกันของสายโซ่พอลิเมอร์ที่ต่ำ ทำให้ค่าแรงดึงผิวของตัวทำละลายนั้น กลายมาเป็นอิทธิพลหลัก[17] จึงเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดลูกปัดตามเส้นใย ซึ่งเมื่อทำการเพิ่มความเข้มข้นไปที่ 10 wt% นั้นก็เป็นผลให้เส้นใยที่ได้มีความต่อเนื่อง และเป็นรูปแบบเดียวกันมากขึ้น

รวมทั้งค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย คือ 5.78 ± 3.35 (μm) และที่ความเข้มข้น 15 wt% จะเห็นได้ว่า เส้นใยที่ได้นั้นมีลักษณะที่เป็นแบบ flat dog bone และมีการหลอมรวมกัน ซึ่งเกิดจากการที่ตัวทำละลายนั้นไม่สามารถที่จะระเหยได้ทันในขณะที่สาย jet พุ่งออกจากปลายเข็มฉีดยาไปยังตัวรองรับ [18,19] จึงทำให้เส้นใยที่เตรียมได้นั้นการไหลรวมกันเกิดขึ้น และทำให้ค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยอยู่ที่ 22.96 ± 9.63 (μm) และที่ความหนืดที่มากกว่า 15 wt% นั้นจึงทำให้ไม่สามารถที่จะเตรียมขึ้นมาได้ เนื่องจากเมื่อปริมาณของพอลิเมอร์ที่ละลายอยู่ภายในสารละลายนั้นเพิ่มสูงขึ้น จะทำให้แรงตึงผิวของสารละลายนั้นเพิ่มสูงขึ้นด้วย จึงทำให้ต้องใช้ประจุที่เพิ่มมากขึ้นในการดึงเส้นใย เพื่อที่จะเอาชนะแรงตึงผิวที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้การเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของสารละลายนอกจากจะทำให้ลักษณะของเส้นใยที่ได้มีการเปลี่ยนแปลงแล้ว ยังส่งผลให้เส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยที่ได้นั้นเพิ่มสูงขึ้นด้วย แสดงดังตารางที่ 10 ซึ่งก็เกิดจากการที่ความหนืดของสารละลายที่เพิ่มขึ้นนั้น ด้านทานต่อแรงดึงของประจุที่อยู่บนสาย jet และที่อัตราส่วน 60/40 (ภาพที่ 17) จะเห็นได้ว่าที่ความเข้มข้น 10 wt% นั้นมีอัตราการเกิดลูกบิดที่เพิ่มสูงขึ้น เนื่องมาจากค่าความหนืดของสารละลายที่เพิ่มสูงขึ้น จากการเพิ่มปริมาณของยางธรรมชาติ เพราะยางธรรมชาตินี้มีน้ำหนักโมเลกุลที่สูง จึงเป็นเหตุให้ค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยเพิ่มขึ้นอีกด้วย และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นไปที่ 15 wt% เส้นใยที่เตรียมได้นั้นมีลักษณะที่เป็นแบบ flat dog bone เพิ่มมากยิ่งขึ้น และมีปริมาณของรูพรุนที่ลดลง โดยจะเห็นได้ว่าเมื่อปริมาณของยางธรรมชาติเพิ่มสูงขึ้น นั้นจะทำให้ค่าความหนืดที่ได้เพิ่มสูงขึ้นด้วย จึงทำให้เมื่อทำการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายที่ใช้ในการปั่นเส้นใยที่อัตราส่วนอื่นๆ นั้น จึงทำให้มีอัตราการเกิดลูกบิดที่เพิ่มสูงขึ้น โดยจะเห็นได้ว่าที่อัตราส่วน 70/30 (ภาพที่ 18) และ 80/20 (ภาพที่ 19) นั้นไม่สามารถที่จะทำการเตรียมเส้นใยที่ความเข้มข้น 15 wt% ได้ เนื่องจากในกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้านั้น หลังจากที่ทำกรให้ความต่างศักย์แล้วสาย jet ที่พุ่งไปยังตัวรองรับสามารถที่แบ่งออกได้เป็น 2 ส่วนด้วยกัน คือ ส่วนที่เสถียร ซึ่งมีการดึงยึดเพียงเล็กน้อย และส่วนที่ไม่เสถียร จะมีลักษณะของการสะบัดเป็นวงกลมอย่างรวดเร็ว ในส่วนนี้นั้นเองจะมีการดึงยึดสารละลายพอลิเมอร์ให้มีเส้นผ่านศูนย์กลางที่ลดลงอย่างมาก ซึ่งการเพิ่มความหนืดของสารละลาย นั้นจะส่งผลให้ ระยะของสาย jet ในส่วนที่เสถียรนั้นต้องใช้ระยะที่เพิ่มมากขึ้นด้วย เพราะสารละลายพอลิเมอร์นั้นมีแรงต้านทานต่อประจุที่สูงขึ้น

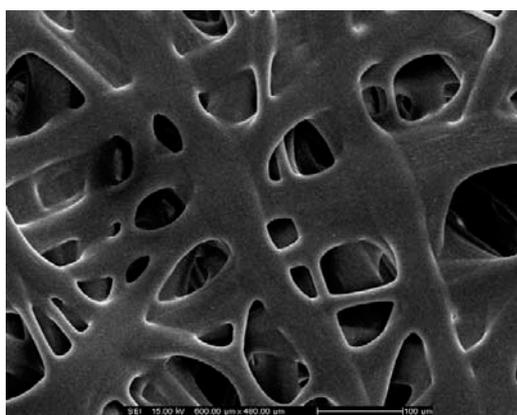
ตารางที่ 10 แสดงค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นใย เมื่อทำการปรับเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลาย

ความเข้มข้นของสารละลาย(wt%)	ค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นใย (μm)			
	50/50	60/40	70/30	80/20
5	- (ลูกปัด)	- (ลูกปัด)	- (ลูกปัด)	- (ลูกปัด)
10	5.78 ± 3.35	6.12 ± 1.61	5.28 ± 1.10	4.4 ± 2.0
15	22.96 ± 9.63	22.63 ± 7.16	-	-

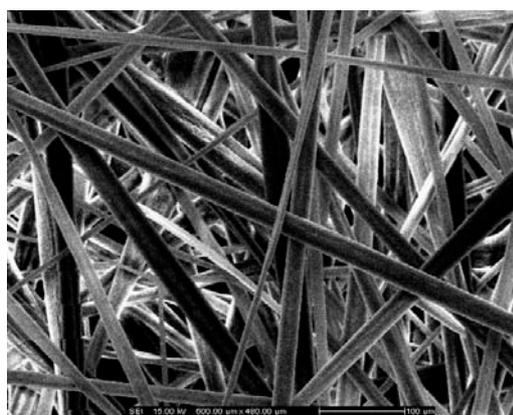
4.2.1.2 ระยะทางจากปลายเข็มถึงตัวรองรับ

ในการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้า นั้น ระยะทางระหว่างปลายเข็มถึงตัวรองรับจะช่วยในการระเหยของตัวทำละลาย เนื่องจากสาย jet ที่พุ่งจากปลายเข็มไปยังตัวรองรับมีเวลามากขึ้นแล้ว ยังช่วยให้เส้นใยที่เตรียมได้มีเส้นผ่านศูนย์กลางที่ลดลงจากการถูกดึงยึดที่เพิ่มมากขึ้นด้วย ซึ่งจากภาพที่ 20 ที่อัตราส่วน 50/50 นั้นจะเห็นได้ว่า ที่ระยะทางระหว่างปลายเข็มถึงตัวรองรับ 15 cm นั้นเส้นใยที่เตรียมได้นั้นเกิดการหลอมรวมกัน และเส้นใยที่ได้มีเส้นผ่านศูนย์กลางที่มีขนาดใหญ่ เมื่อทำการเพิ่มระยะทางระหว่างปลายเข็มถึงตัวรองรับไปที่ 20 cm จะเห็นได้ว่าเส้นใยที่เตรียมได้นั้นมีเส้นผ่านศูนย์กลางที่ลดลง แสดงดังตารางที่ 11 และเมื่อเพิ่มระยะทางระหว่างปลายเข็มถึงตัวรองรับไปที่ 25 cm นั้น เส้นใยที่เตรียมได้นั้นกลับมาพบลักษณะของลูกปัด ขึ้นอีกครั้ง ทั้งนี้ก็เนื่องมาจากระยะทางระหว่างปลายเข็มถึงตัวรองรับที่เพิ่มมากขึ้น จะส่งผลให้สนามไฟฟ้าสถิตย์ระหว่างปลายเข็มถึงตัวรองรับนั้นลดลง ทำให้สารละลายนั้นกลับมามีแรงต้านทานต่อสนามไฟฟ้าสถิตย์ที่มากขึ้น เป็นเหตุให้เกิดเป็นลักษณะดังกล่าว ในอัตราส่วน 60/40 จากภาพที่ 21 จะเห็นได้ว่าที่ระยะทางระหว่างปลายเข็มถึงตัวรองรับ 15 cm เส้นใยจะมีลักษณะของการเชื่อมติดกันในบริเวณที่สัมผัสกัน ทั้งนี้เกิดจากการที่ระยะทางระหว่างปลายเข็มถึงตัวรองรับนั้นน้อยเกินไป เป็นผลให้มีสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนั้นสูง ทำให้สาย jet นั้นมีการเคลื่อนที่ๆ รวดเร็วไปยังตัวรองรับ เป็นผลให้ตัวทำละลายไม่มีเวลามากพอที่จะเกิดการระเหย จึงทำให้เส้นใยเกิดการเชื่อมติดกัน และเมื่อทำการปรับระยะทางระหว่างปลายเข็มถึงตัวรองรับไปที่ 20 cm จึงทำให้ได้เส้นใยที่ smooth และไม่เกิดการเชื่อมติดกัน ซึ่งในอัตราส่วน 70/30 นั้นมีความหนืดที่สูงกว่าในอัตราส่วน 60/40 จึงทำให้ไม่สามารถที่จะเตรียมเส้นใยที่ระยะทางระหว่างปลายเข็มถึงตัวรองรับที่ 15 cm ได้เนื่องจากต้องสาย jet จะต้องมียะเพียงพอที่จะเกิดความไม่เสถียรเกิดขึ้น ซึ่งในส่วนจะช่วยให้มีการระเหยของตัวทำละลายที่มากพอ โดยระยะทางระหว่างปลายเข็มถึงตัวรองรับที่ทำให้ได้เส้นใย smooth ในอัตราส่วน 70/30 แสดงดังภาพที่ 22 และในอัตราส่วนที่ 80/20 ดังภาพที่ 23 จะเห็นได้ว่าเส้นใยนั้นมียะที่

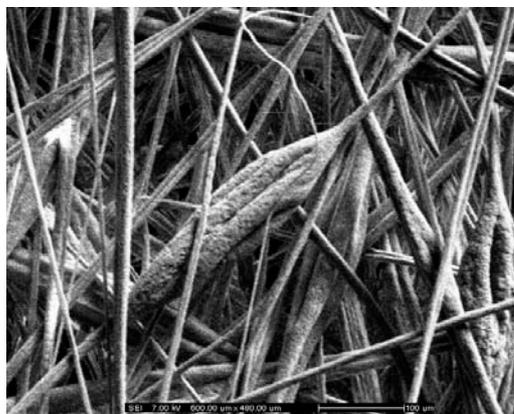
เกิดการเชื่อมติดกันบริเวณที่สัมผัสกันสูง นั้นเกิดจากการที่ในอัตราส่วนนี้มีปริมาณของยางธรรมชาติมาก เพราะยางธรรมชาตินั้นมีค่า Tg ที่ต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง สายโซ่โมเลกุลจึงสามารถที่จะเคลื่อนไหวได้ง่ายจึงเกิดการเชื่อมติดกัน ดังนั้นการเพิ่มระยะทางระหว่างปลายเข็มถึงตัวรองรับ นอกจากจะช่วยลดขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยที่เตรียมได้แล้ว ยังช่วยให้มีเวลามากพอที่ตัวทำละลายจะเกิดการระเหยเพิ่มมากขึ้นอีกด้วย



(ก) 15 cm

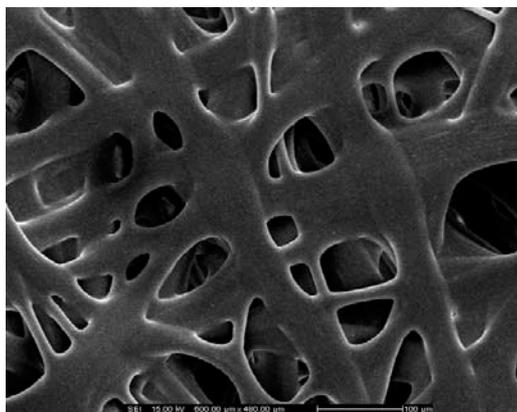


(ข) 20 cm

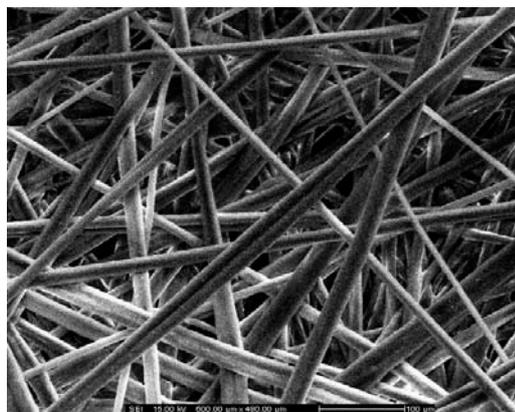


(ค) 25 cm

ภาพที่ 20 แสดงเส้นใย NR/ABS (50/50) ที่ยังไม่ผ่านการบ่ม โดยทำการปรับระดับของระยะทางจากปลายเข็มถึงตัวรองรับ ดังนี้ 15, 20 และ 25 cm ที่ความเข้มข้นของสารละลาย 15 %wt อัตราการไหล 30 ml/h และความต่างศักย์ไฟฟ้า 15 kV

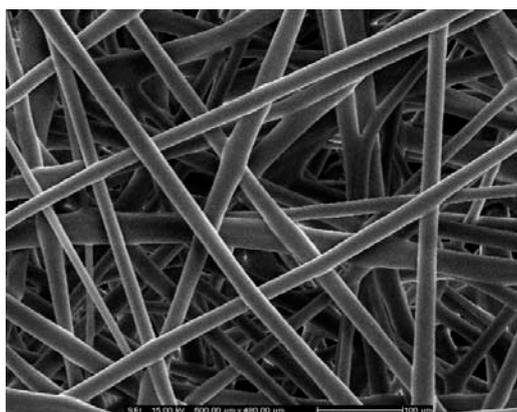


(ก) 15 cm

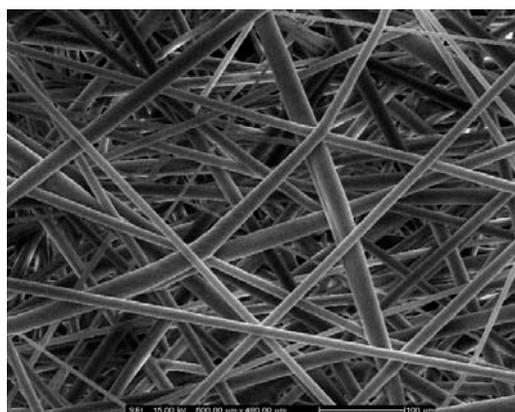


(ข) 20 cm

ภาพที่ 21 แสดงเส้นใย NR/ABS (60/40) ที่ยังไม่ผ่านการบ่ม โดยทำการปรับระดับของระยะทางจากปลายเข็มถึงตัวรองรับ ดังนี้ 15 และ 20 cm ที่ความเข้มข้นของสารละลาย 15 wt% อัตราการไหล 30 ml/h และความต่างศักย์ไฟฟ้า 15 kV

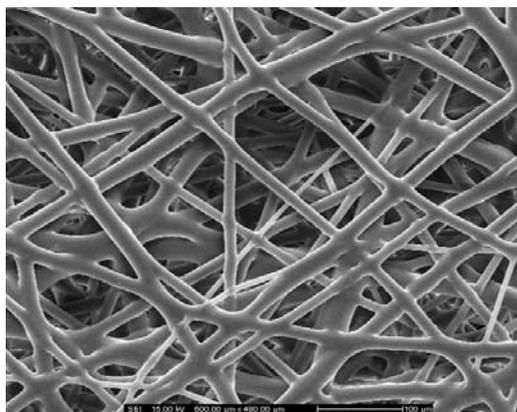


(ก) 20 cm

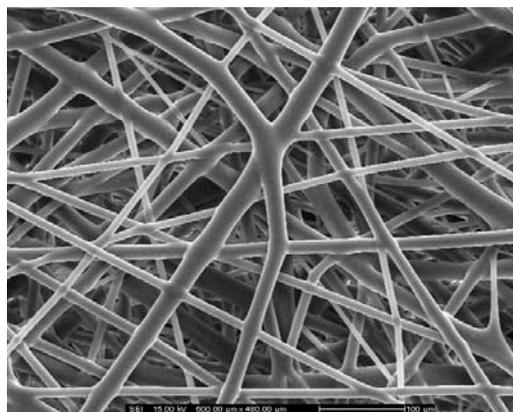


(ข) 25 cm

ภาพที่ 22 แสดงเส้นใย NR/ABS (70/30) ที่ยังไม่ผ่านการบ่ม โดยทำการปรับระดับของระยะทางจากปลายเข็มถึงตัวรองรับ ดังนี้ 20 และ 25 cm ที่ความเข้มข้นของสารละลาย 15 wt% อัตราการไหล 30 ml/h และความต่างศักย์ไฟฟ้า 15 kV



(ก) 20 cm



(ข) 25 cm

ภาพที่ 23 แสดงเส้นใย NR/ABS (80/20) ที่ยังไม่ผ่านการบ่ม โดยทำการปรับระดับของระยะทางจากปลายเข็มถึงตัวรองรับ ดังนี้ 20 และ 25 cm ที่ความเข้มข้นของสารละลาย 15 %wt อัตราการไหล 30 ml/h และความต่างศักย์ไฟฟ้า 15 kV

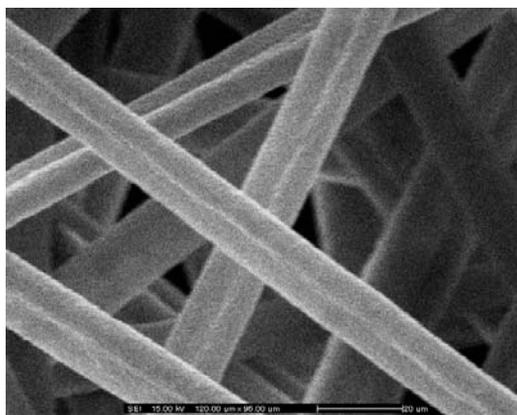
ตารางที่ 11 แสดงค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นใย เมื่อทำการปรับเปลี่ยนระยะทางระหว่างปลายเข็มถึงตัวรองรับ

ระยะทางระหว่าง ปลายเข็มถึงตัว รองรับ (cm)	ค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นใย (μm)			
	50/50	60/40	70/30	80/20
15	22.96 ± 9.63	22.63 ± 7.16	-	-
20	20.90 ± 7.71	17.81 ± 6.93	21.07 ± 5.10	14.41 ± 5.19
25	15.40 ± 8.99 (ลูกปัด)	-	15.01 ± 5.62	12.68 ± 6.05

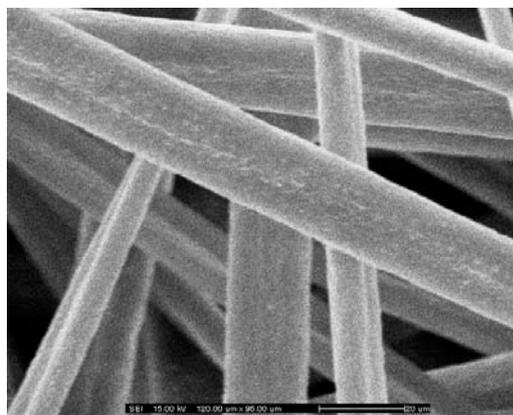
4.2.1.3 อัตราการไหลของสารละลาย

จากสองสถานะที่ได้ศึกษาไปก่อนหน้านี้ จึงเลือกสถานะที่ใช้ในการเตรียมเส้นใย คือ ความเข้มข้นของสารละลาย 15 wt% และระยะทางจากปลายเข็มถึงตัวรองรับ 20 cm เนื่องจากเป็นสถานะที่สามารถเตรียมเส้นใยได้ดีที่สุด จากภาพที่ 24 จะเห็นได้ว่าเมื่ออัตราการไหลของสารละลายลดลงนั้นจะทำให้เส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยลดลงด้วย (ตารางที่ 12) ทั้งนี้ก็เนื่องมาจากการที่ประจุไฟฟ้าที่สะสมอยู่บนพื้นผิวของ สารละลายพอลิเมอร์นั้นมีปริมาณเท่าเดิม แต่ปริมาณของของ สารละลายลดลง ประจุไฟฟ้าจึงมีอยู่มาก จึงทำให้สามารถดึงให้เส้นใยที่ได้มีขนาดลดลงด้วย ซึ่งส่งผลให้ปริมาณของรูพรุนที่ได้นั้นเพิ่มสูงขึ้น อีกทั้งขนาดของรูพรุนก็มีขนาดลดลงด้วย โดยการที่

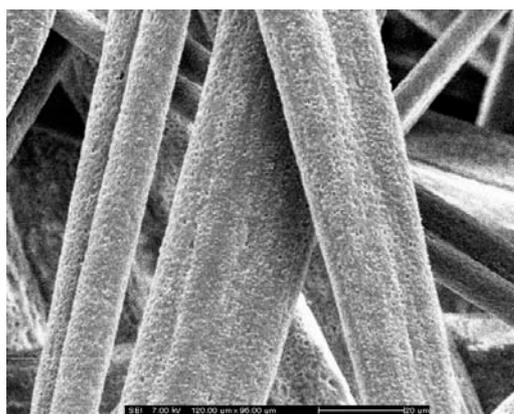
ปริมาณของรูปทรงเพิ่มสูงขึ้นและรูปทรงมีขนาดเล็กนั้น จึงอาจกล่าวได้ว่าพื้นที่ผิวของแผ่นเส้นใยที่เตรียมได้นั้น เพิ่มขึ้น



(ก) 10 ml/h



(ข) 20 ml/h



(ค) 30 ml/h

ภาพที่ 24 แสดงเส้นใย NR/ABS (50/50) ที่ยังไม่ผ่านการบ่ม โดยทำการปรับระดับของอัตราการไหลของสารละลาย ในช่วง 10, 20 และ 30 ml/h ที่ความเข้มข้นของสารละลาย 15 %wt ระยะทางระหว่างปลายเข็มถึงตัวรองรับ 20 cm และความต่างศักย์ไฟฟ้า 15 kV

จากภาพนั้นเห็นได้ว่าลักษณะของเส้นใยมีสองลักษณะอยู่ด้วยกัน คือ แบบ flat dog bone และ circular ทั้งนี้ลักษณะของเส้นใยที่เกิดขึ้นเป็นแบบ flat dog bone นั้นเกิดจากการที่ตัวทำละลายไม่สามารถที่จะระเหยได้ทัน เพราะอัตราการไหลที่เพิ่มขึ้นจะทำให้มีปริมาตรของสารละลายที่เพิ่มขึ้นจึงทำให้ตัวทำละลายนั้นยังคงเหลืออยู่ภายในเส้นใย เป็นผลให้เกิดการหลอมเหลวเส้นใยขึ้นอีกครั้งเกิดเป็นเส้นใยที่มีลักษณะเป็นแบบ flat dog bone เกิดขึ้น ซึ่งอัตราการไหลในช่วงตั้งแต่ 10 ml/h ลงไปนั้น ความสามารถในการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้านั้น กระทำได้ยาก เนื่องจากสาย jet ที่พุ่งไปยังตัวรองรับนั้นไม่เสถียร ก็เนื่องมาจากที่แต่ละอัตราการไหล นั้นปริมาณของความต่างศักย์ที่

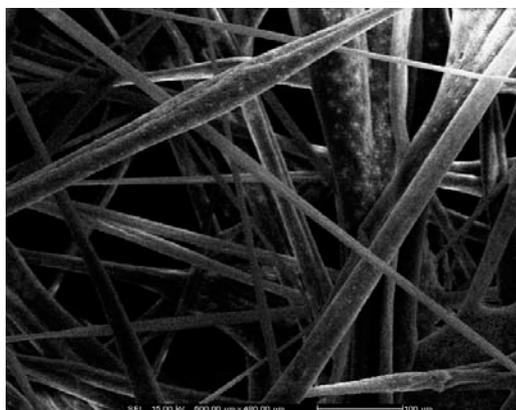
ให้มันไม่เท่ากัน ถ้ามีอัตราการไหลน้อยความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ให้นั้นก็จะไม่มาก ซึ่งเมื่อทำการลดอัตราการไหลลงต่ำกว่า 10 ml/h สาย jet ที่ได้มันมีความไม่เสถียรที่เพิ่มขึ้นก็เนื่องมาจากการที่สาย jet นั้นมีการเคลื่อนที่ๆ เร็วมากยิ่งขึ้นจากประจุไฟฟ้าที่ถูกสะสมอยู่บนสาย jet ที่มาก ทำให้สารละลายถูกดึงไปยังตัวรองรับมากกว่าอัตราการไหลที่ให้อาจจะทำให้ Taylor cone นั้นเกิดการย้อนกลับไปที่เข็มฉีดยา

ตารางที่ 12 แสดงค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นใย เมื่อทำการปรับเปลี่ยนอัตราการไหลของสารละลาย

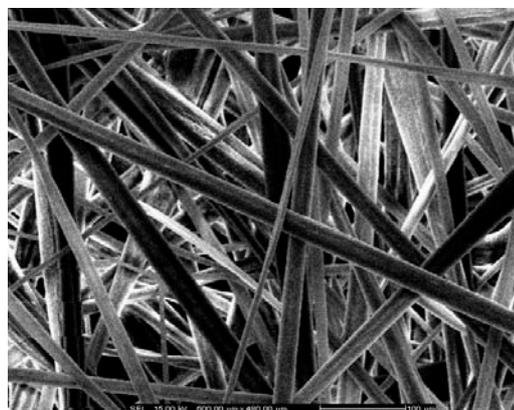
NR/ABS	อัตราการไหลของสารละลาย (ml/h)	ค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นใย (μm)
50/50	10	15.42 ± 2.65
	20	17.85 ± 4.25
	30	19.63 ± 6.51

4.2.1.4 ความต่างศักย์ไฟฟ้า

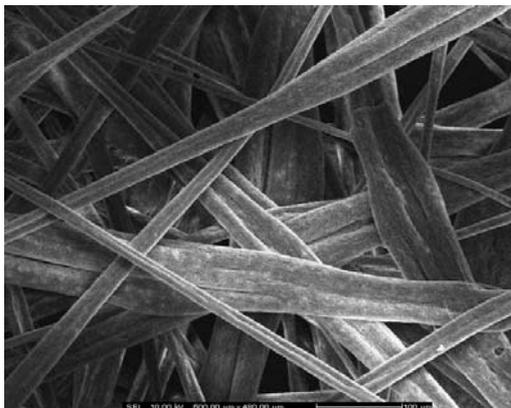
ในการเลือกความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ให้แก่สารละลายพอลิเมอร์ จะมีค่าเท่าไรหรือนั้น ก็ขึ้นกับความสามารถในการนำไฟฟ้าของตัวพอลิเมอร์และตัวทำละลายที่ใช้ โดยทั่วไปแล้วสารละลายพอลิเมอร์เมื่อได้รับความต่างศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้น จะก่อให้เกิดการพุ่งของสาย jet ที่เร็วเพิ่มขึ้นในกรณีพอลิเมอร์นั้นมีการนำไฟฟ้าที่ดี [17] ซึ่งจะทำให้มีปริมาณของสารละลายพอลิเมอร์ที่ถูกดึงออกจากปลายเข็มที่มากขึ้นด้วย จึงเป็นสาเหตุที่ทำให้เส้นใยที่เตรียมได้นั้นมีขนาดเล็ก



(ก) 14 kV



(ข) 15 kV



(ค) 16 kV

ภาพที่ 25 แสดงเส้นใย NR/ABS 50/50 ที่ยังไม่ผ่านการบ่ม โดยทำการปรับระดับของความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ 14, 15 และ 16 kV ที่ความเข้มข้นของสารละลาย 15 wt% ระยะทางระหว่างปลายเข็มถึงตัวรองรับ 20 cm และอัตราการไหล 30 ml/h

จากภาพที่ 25 แสดงให้เห็นว่า เมื่อทำการเพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้าให้แก่สารละลายพอลิเมอร์นั้น เส้นใยที่ได้เตรียมได้นั้นมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่เพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้าจะทำให้ได้เส้นใยที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางที่ลดลง และมีความ smooth ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากมีแรงดึงดูดไฟฟ้าที่เพิ่มสูงขึ้น แต่เมื่อความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ให้นั้นสูงเกินกว่าค่าที่เหมาะสม ทำให้มีแนวโน้มที่จะเกิดลูกปัดมากขึ้น[21] ซึ่งเป็นผลให้ลูกปัดนั้นมีการเกิดที่หนาแน่นมากขึ้น จึงรวมกันเป็นเส้นใยที่มีความต่อเนื่องได้เส้นใยที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางที่เพิ่มขึ้น จากภาพ SEM พบว่าเส้นใยที่ความต่างศักย์ 16 kV นั้นมีขนาดของเส้นใยที่มีขนาดใหญ่ขึ้น แสดงดังตารางที่ 13 ซึ่งเป็นผลดังที่ได้กล่าวไว้

ตารางที่ 13 แสดงค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นใย เมื่อทำการปรับเปลี่ยนความต่างศักย์ไฟฟ้า

NR/ABS	ความต่างศักย์ไฟฟ้า (kV)	ค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นใย (μm)
50/50	14	20.83 ± 10.96
	15	19.63 ± 6.51
	16	32.58 ± 18.79

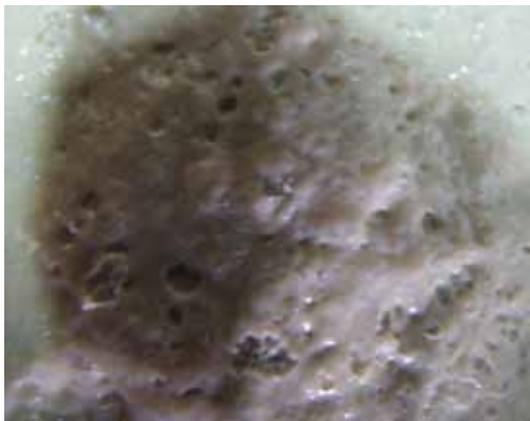
4.2.2 การศึกษาสถานะที่ใช้ในบ่มยางธรรมชาติ

จากสถานะที่ใช้ในการศึกษาการบ่มยางธรรมชาติด้วยเครื่อง MDR แสดงดังตารางที่ 14 ซึ่งทำการทดสอบโดยใช้ยางธรรมชาติที่ผ่านการคอมปาวด์ ซึ่งได้ข้อมูลออกมาเป็นค่า scorch time และ cure time ซึ่งค่า scorch time เป็นค่าที่บอกถึงช่วงเวลาที่ยางจะยังไม่เกิดการเชื่อมโยง และเป็นเวลาที่ยางจะยังสามารถเกิดการไหลได้ และเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้ทราบว่าเป็นเวลาเท่าใดก่อนที่ยางคอมปาวด์จะเกิดการเชื่อมโยกัน (crosslink) และในส่วนของ cure time เป็นค่าที่ใช้บอกเวลาในการเชื่อมโยงของยางซึ่งเกิดขึ้นต่อจาก scorch time ประกอบกับโดยทั่วไปแล้วค่า cure time ที่ใช้ในการบ่มยางนั้นจะใช้ที่ cure time 90% หรือ tc90 เนื่องจากความร้อนที่ยังคงตกค้างอยู่ภายในชิ้นงาน และแม้พิมพ์จะส่งผลให้ยางเกิดการเชื่อมโยงต่อไปได้ แต่ถ้าหากใช้เวลาในการบ่มยาง นานกว่า tc90 ขึ้นไปก็อาจจะทำให้ยางที่ผ่านการเชื่อมโยงที่ได้นั้นมีสมบัติที่แย่ง[20]

ตารางที่ 14 แสดงสถานะที่ใช้ในการบ่มยางด้วยเครื่อง MDR

Temperature (°C)	ts2 (m:s)	tc90 (m:s)	Tmax (dN-m)	Tmin (dN-m)	M90 (dN-m)	DT(MH-ML) (dN-m)
180	1:00	1:35	24.703	2.824	22.515	21.879
190	0:31	1:12	25.683	2.628	23.378	23.055
200	0:24	0:56	32.401	2.883	29.449	29.518

โดยจะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้ค่า scorch time และ cure time นั้นมีเวลาที่ลดลง ซึ่งได้นำเวลาดังกล่าวมาใช้ในการบ่มเส้นใย NR/ABS ที่เตรียมได้จากกระบวนการปั่นด้วยไฟฟ้า ผลที่ได้คือเวลาที่ใช้ในการบ่มเส้นใย NR/ABS ที่เตรียมได้จากการปั่นด้วยไฟฟ้านั้น จะกระทำที่ 190 °C เป็นเวลา 2 นาที มีความเหมาะสม เนื่องจากการใช้อุณหภูมิที่ 180 °C จะทำให้เส้นใย NR/ABS ที่เตรียมได้เกิดการหลอมรวมกัน เนื่องจากจะต้องใช้เวลานานในการบ่มเส้นใย NR/ABS เพื่อให้เกิดการเชื่อมโยงกันอย่างสมบูรณ์ และเมื่อใช้อุณหภูมิที่ 200 °C พบว่าเส้นใย NR/ABS ที่เตรียมได้นั้นเกิดการเดือด และหลอมรวมกัน แสดงดังภาพที่ 26 ก่อนเวลาของ tc90 ที่ 200 °C จึงทำให้การบ่มเส้นใย NR/ABS ที่ถูกปั่นด้วยไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 190 °C เป็นเวลา 2 นาที นั้นมีความเหมาะสมที่สุด



ภาพที่ 26 แสดงภาพเส้นใยยางธรรมชาติที่เตรียมได้จากการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้า ที่ผ่านการบ่มที่อุณหภูมิ 200 °C

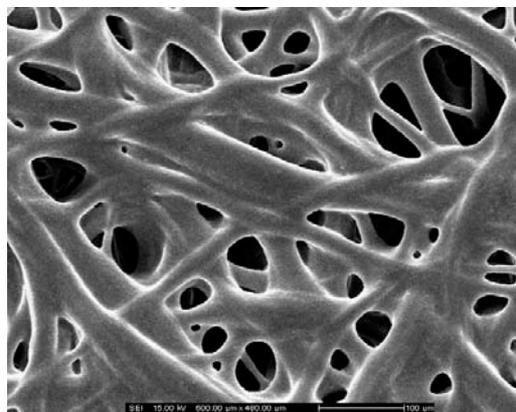
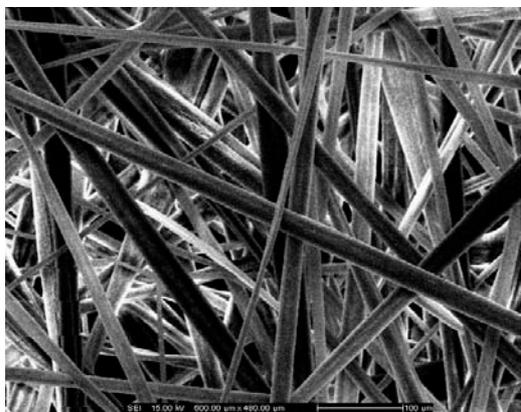
4.2.3 อิทธิพลของเอบีเอสที่มีผลต่อลักษณะของเส้นใยทั้งก่อนการบ่มและหลังการบ่ม

จากภาพที่ 31 แสดงลักษณะของเส้นใย NR/ABS ที่ยังไม่ผ่านการบ่ม จะเห็นได้ว่าในอัตราส่วนที่มีปริมาณของเอบีเอสที่ปริมาณมากกว่า 30% ลักษณะของเส้นใยที่ได้จะเป็นแบบ flat dog bone ซึ่งเกิดจากการระเหยของตัวทำละลายที่อยู่ภายในเส้นใย ในขณะที่ทำการปั่นเส้นใย ที่เป็นเช่นนี้ น่าจะเกิดจากการที่ตัวทำละลายนั้นกระจายอยู่ทั้งในส่วนของยางธรรมชาติและเอบีเอส ในสารละลาย ซึ่งอัตราในการระเหยของตัวทำละลายในแต่ละส่วนนั้นไม่เท่ากัน เนื่องจากเป็นสารละลายที่ประกอบไปด้วยพอลิเมอร์ 2 ชนิด ซึ่งถูกละลายรวมกันอยู่ภายในสารละลาย จึงส่งผลให้เกิดเป็นลักษณะของเส้นใยดังกล่าว เมื่อปริมาณของเอบีเอสลดลงด้วย แสดงดังภาพที่ 27

ก่อนการบ่ม

หลังการบ่ม

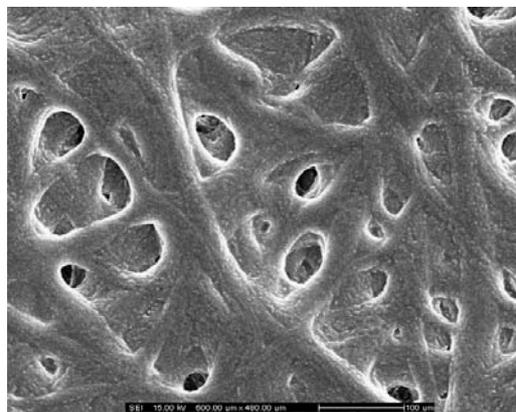
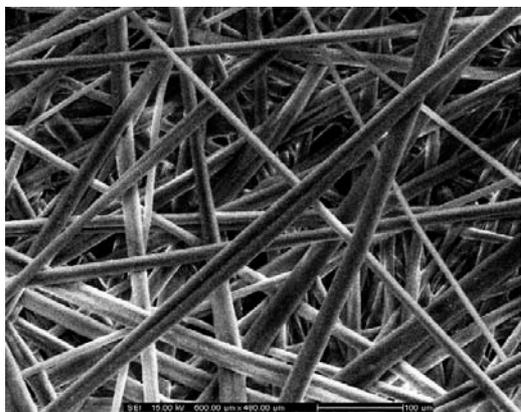
50/50



(ก)

(ข)

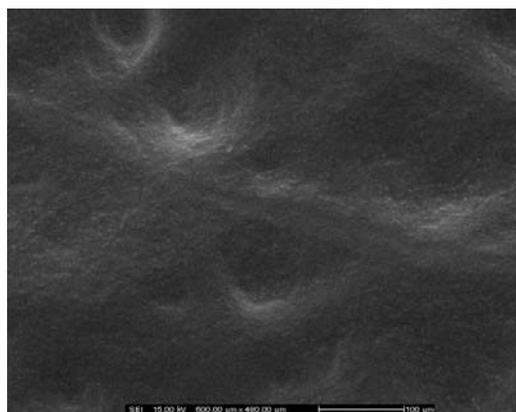
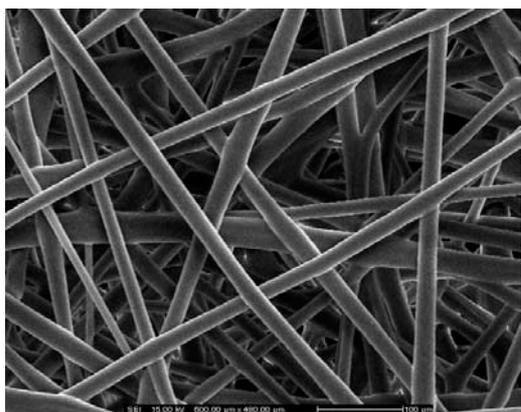
60/40



(ค)

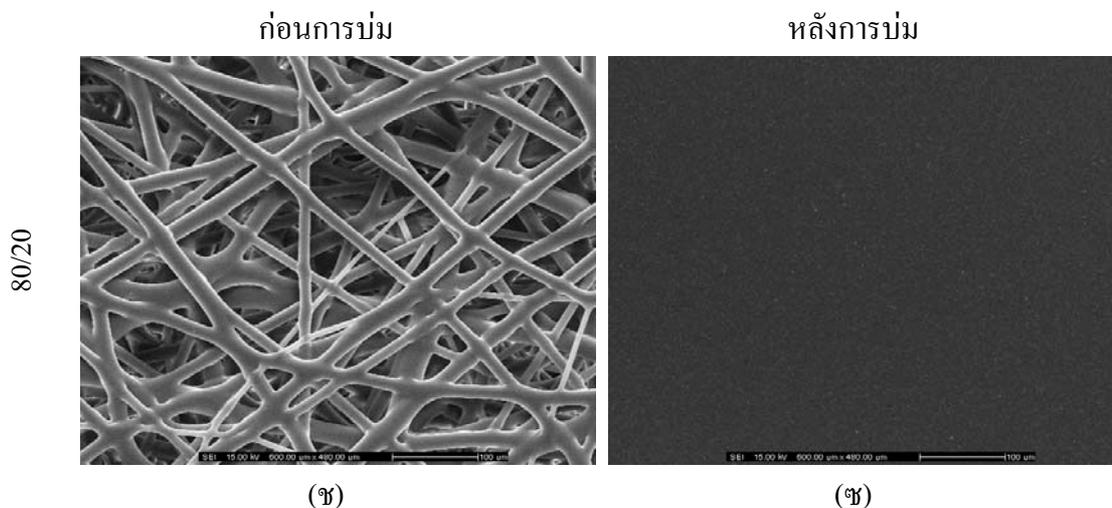
(ง)

70/30



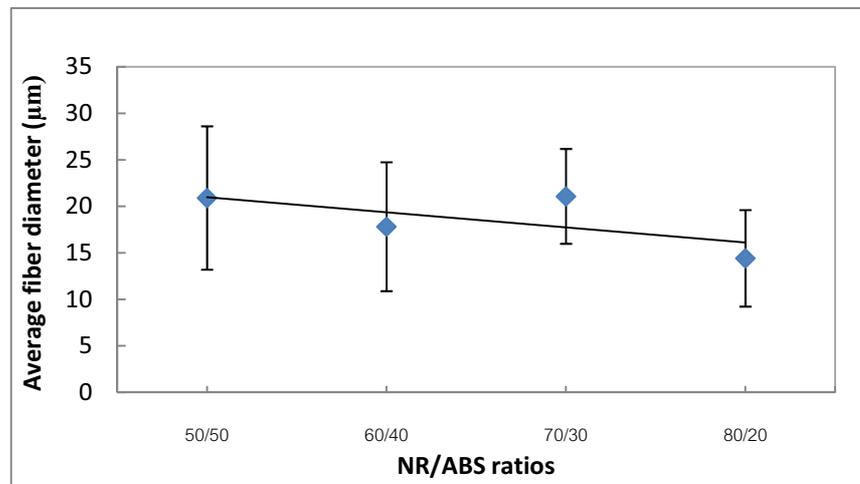
(จ)

(ฉ)



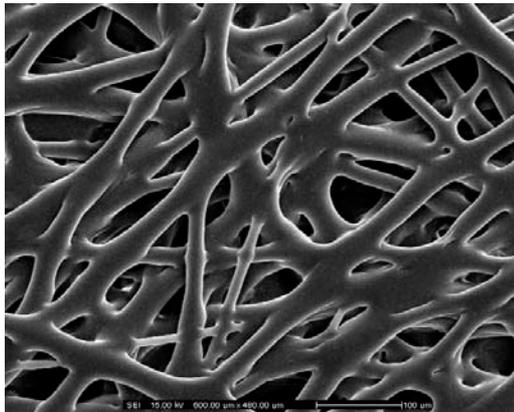
ภาพที่ 27 แสดงเส้นใย NR/ABS ทั้งก่อนและหลังการบ่มและใช้สภาวะในการขึ้นรูป ดังนี้ ความเข้มข้น 15 wt% ระยะทางระหว่างปลายเข็มถึงตัวรองรับ 20 cm อัตราการไหล 30ml/h และความต่างศักย์ไฟฟ้า 15 kV

และจากการที่ยางธรรมชาติมีค่า T_g ที่ต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง แสดงดังภาพที่ 29 จะเห็นว่าเส้นใยที่ยังไม่ผ่านการบ่มของยางธรรมชาติเพียงอย่างเดียว นั้น จะปรากฏลักษณะของการเชื่อมติดกันของเส้นใยในบริเวณของเส้นใยที่สัมผัสต่อกัน อีกทั้งอุณหภูมิที่ใช้ในการบ่ม เส้นใยนั้น จะต้องกระทำที่อุณหภูมิที่สูง คือ $190\text{ }^{\circ}\text{C}$ จึงทำให้เมื่อปริมาณของยางธรรมชาติ เพิ่มสูงขึ้นจึงเกิดการหลอมรวมกัน รวมถึงเส้นใยที่ยังไม่ผ่านการบ่มนั้นมีเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยที่ต่ำที่สุด เมื่อปริมาณของยางธรรมชาติสูงสุดคือ 80% ซึ่งอัตราส่วนของยางธรรมชาติต่อเอบีเอสที่ให้ปริมาณของรูพรุนสูงสุดนั้นคืออัตราส่วนที่มีปริมาณของยางธรรมชาติต่อเอบีเอสที่ 50/50 เห็นได้ว่าการเพิ่มขึ้นของปริมาณเอบีเอสนั้นช่วยขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่ของยางธรรมชาติ จึงทำให้เมื่อทำการเตรียมเป็นเส้นใย แล้วยังคงสามารถรักษารูพรุนเอาไว้ได้

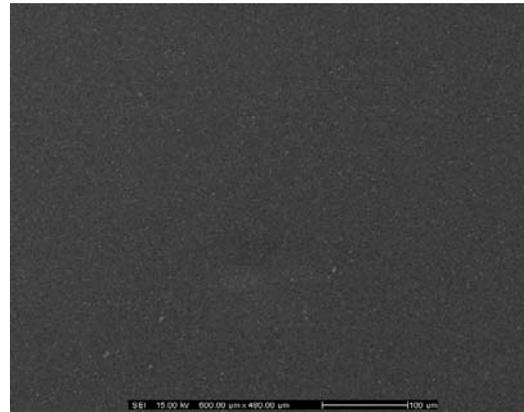


ภาพที่ 28 แสดงเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเส้นใย NR/ABS ก่อนการบ่มและใช้สภาวะในการขึ้นรูป ดังนี้ ความเข้มข้น 15 wt% ระยะทางระหว่างปลายเข็มถึงตัวรองรับ 20 cm อัตราการไหล 30ml/h และความต่างศักย์ไฟฟ้า 15 kV

ในส่วนของเส้นใยที่ผ่านการบ่ม กลับพบไปในทิศทางที่ตรงกันข้ามกับเส้นใยที่ยังไม่ผ่านการบ่ม คือ ลักษณะความเป็นรูพรุน และเส้นใยนั้นมีการเปลี่ยนแปลงไปซึ่งในการเตรียมเส้นใยด้วยเทคนิคการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้านั้น เป็นเทคนิคที่ทำให้มีปริมาณของรูพรุนและพื้นที่ผิวสูง จากข้อมูลในหัวข้อที่ 4.2 นั้นแสดงให้เห็นว่าถ้าเส้นใยที่เตรียมได้ก่อนผ่านการบ่มนั้นมีเส้นผ่านศูนย์กลางที่มีขนาดใหญ่ (ภาพที่ 28) จะทำให้ได้แผ่นเส้นใยนั้นจะมีพื้นที่ผิวน้อย เป็นผลให้เมื่อทำการบ่มเส้นใยนั้นสามารถรักษาลักษณะของเส้นใยไว้ได้ รวมถึงรูพรุน ก็จะยังคงอยู่มากกว่าเส้นใยที่ก่อนการบ่มนั้นมีเส้นผ่านศูนย์กลางที่มีขนาดเล็กกว่า เพราะจะมีพื้นที่ผิวที่สูง จึงมีบริเวณที่สัมผัสระหว่างเส้นใยด้วยกันที่สูง จึงทำให้เส้นใยเมื่อทำการบ่มเกิดการเชื่อมติดกัน ซึ่งจากสภาวะที่เห็นนี้ จะเห็นได้ว่าที่อัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติต่อเอบีเอสที่อัตราส่วน 50/50 มีปริมาณของรูพรุนและคงลักษณะของเส้นใยไว้ได้มากที่สุดจากภาพจะเห็นได้ว่า เมื่ออัตราส่วนของเอบีเอสลดลง จะทำให้ลักษณะของเส้นใย และความเป็นรูพรุนของ แผ่นเส้นใยนั้นมีการลดลงด้วย



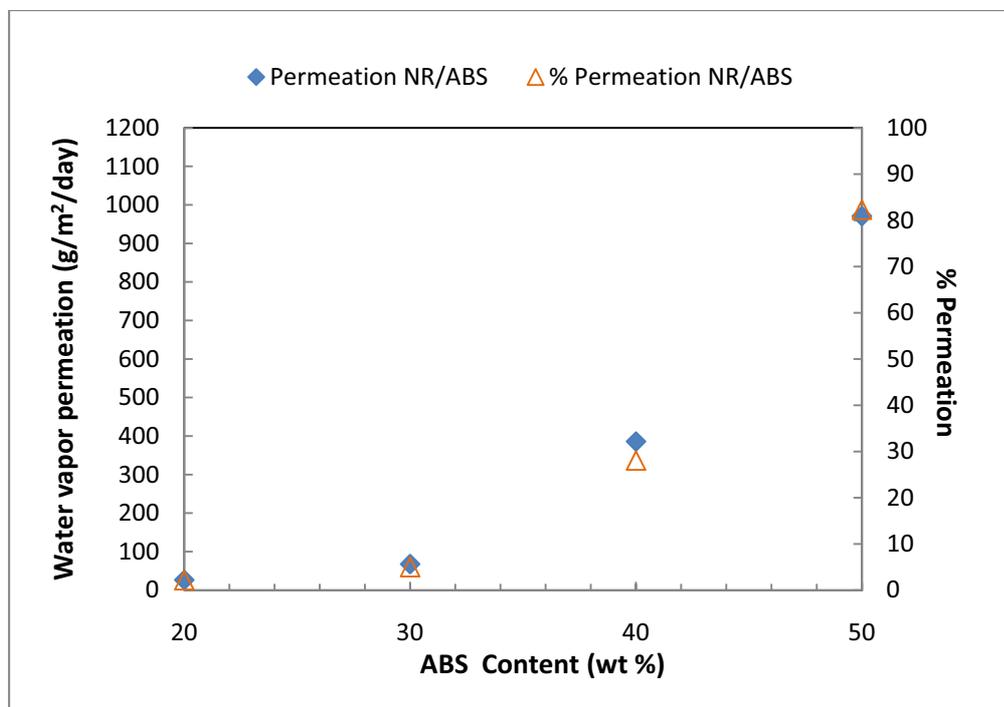
(ก)



(ข)

ภาพที่ 29 แสดงเส้นใยธรรมชาติที่ยังไม่ผ่านการบ่ม (ภาพซ้าย) และผ่านการบ่ม (ภาพขวา) ใช้สถานะในการขึ้นรูป ดังนี้ ความเข้มข้น 15 wt% ระยะทางระหว่างปลายเข็มถึงตัวรองรับ 20 cm อัตราการไหล 30ml/h และความต่างศักย์ไฟฟ้า 15 kV

4.3 การศึกษาสมบัติการแพร่ผ่านของไอน้ำของเส้นใย NR/ABS



รูปที่ 30 แสดงผลการทดสอบ static moisture permeation ของ Electrospun NR/ABS ที่อัตราส่วน 50/50, 60/40, 70/30 และ 80/20 ที่ความเข้มข้น 15 wt% ระยะทางระหว่างปลายเข็มถึงตัวรองรับ 20 cm อัตราการไหล 30 ml/h และความต่างศักย์ไฟฟ้า 15 kV

การแพร่ผ่านของไอน้ำนั้นเป็นส่วนสำคัญที่จะช่วยให้ผู้ที่มีการใช้งานแผ่นเส้นใย ทางด้านเครื่องนึ่งห่ม มีความสะดวกสบาย ซึ่งการเตรียมเส้นใย ด้วยเทคนิคการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้า นอกจากที่จะให้พื้นที่ผิวสูงแล้วก็ยังให้ปริมาณของรูพรุนที่สูงขึ้นไปด้วย ซึ่งทำให้เมื่อผู้สวมใส่มีเหงื่อออก ก็สามารถที่จะระบายออกไปได้ดี อีกทั้งยังป้องกันน้ำผ่านเข้ามาด้วย

จากสถานะที่ได้ศึกษาในส่วนแรก จึงนำเส้นใยที่เตรียมได้มาทำการบ่มและทดสอบการแพร่ผ่านของไอน้ำ จากรูปที่ 30 จะเห็นได้ว่าที่ปริมาณของเอบีเอสสูงที่สุดอัตราการแพร่ผ่านของไอน้ำจะสูงขึ้นด้วยจาก 2.12 % เป็น 82.29 % ซึ่งสอดคล้องกับผลทางด้านสัณฐานวิทยา และความหนาแน่น ซึ่งสามารถเห็นได้ว่าที่อัตราส่วนเอบีเอสสูงที่สุด สามารถที่จะรักษารูพรุนไว้ได้มากที่สุด หลังการบ่ม เมื่อเทียบกับอัตราส่วนอื่นๆ ที่เป็นเช่นนี้ก็เนื่องมาจากตัวเอบีเอสเองนั้นไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่ของยางธรรมชาติที่อุณหภูมิต่ำ ซึ่งจะประพฤติตัวเป็น rubbery ดังนั้นจึงทำให้เส้นใย NR/ABS สามารถที่จะยังคงรักษารูพรุนไว้ได้

4.4 การทดสอบค่าความหนาแน่นของเส้นใย NR/ABS

ตารางที่ 15 แสดงค่าความหนาแน่นของเส้นใย NR/ABS หลังทำการบ่ม

NR/ABS	50/50	60/40	70/30	80/20
Density of NR/ABS (g/cc)	0.67	0.69	0.74	0.81

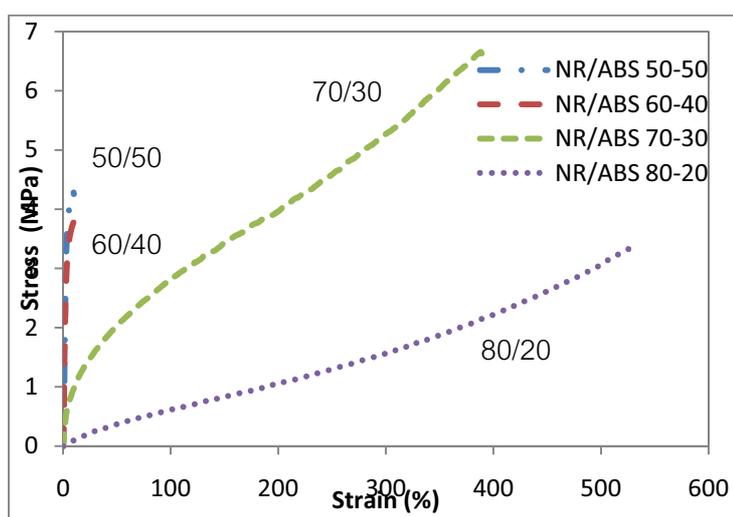
ค่าความถ่วงจำเพาะของเส้นใยนั้นแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณของรูพรุนบนแผ่นเส้นใยด้วย หากแผ่นเส้นใยนั้นมีปริมาณของรูพรุนที่น้อย ค่าความถ่วงจำเพาะของแผ่นเส้นใยก็จะมีค่าสูง และในทางกลับกันหากแผ่นเส้นใยมีปริมาณของรูพรุนมาก ค่าความถ่วงจำเพาะก็จะมีค่าน้อย เนื่องจากแผ่นเส้นใยนั้นมีน้ำหนักลดลง แต่ยังคงมีปริมาตรเท่าเดิม ซึ่งจากผลการทดลอง ดังตารางที่ 4.6 พบว่าที่อัตราส่วนของปริมาณเอบีเอสสูงที่สุด จะให้ค่าความถ่วงจำเพาะต่ำสุด โดยค่าความถ่วงจำเพาะเพิ่มจาก 0.67 เป็น 0.81 เมื่อปริมาณของเอบีเอสเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลของภาพ SEM ในก่อนหน้านี้ และค่าความถ่วงจำเพาะของเส้นใยจะใช้ในการนำมา Normalize ค่าที่ได้จากการทดสอบสมบัติความทนต่อแรงดึง คือ ค่ามอดุลัส, ค่าความแข็งแรง และค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว

4.5 การศึกษาสมบัติเชิงกลของเส้นใยที่ถูกปั่นด้วยไฟฟ้าของ NR/ABS

การศึกษาสมบัติเชิงกลของวัสดุเส้นใย NR/ABS นั้นคือ สมบัติแรงดึง (Tensile properties) ซึ่งในการทดสอบสมบัติแรงดึงนั้น เส้นใยที่เตรียมได้ในแต่ละอัตราส่วนนั้นมีปริมาณของรูพรุน และขนาดของเส้นใยที่แตกต่างกัน เพื่อให้ผลการทดลองสามารถที่จะนำมาเปรียบเทียบกันได้นั้น จึงต้องมีการนำค่าความถ่วงจำเพาะของเส้นใยของแต่ละอัตราส่วนมา Normalize ซึ่งจากการศึกษาในสภาวะก่อนนี้พบว่า ความเข้มข้น 15 wt% ระยะทางจากปลายเข็มถึงตัวรองรับ 20 cm อัตราการไหล 30 ml/h และความต่างศักย์ไฟฟ้า 15 kV นั้นให้ขนาดของเส้นใย, ปริมาณของรูพรุน รวมทั้งความสามารถในการขึ้นรูปที่ดีที่สุด

4.5.1 สมบัติความทนทานต่อแรงดึง

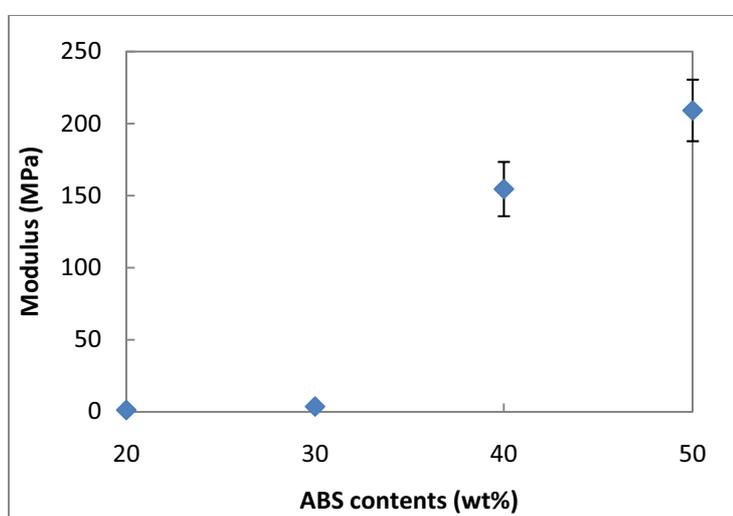
จากรูปที่ 31 แสดงกราฟ stress – strain ของเส้นใย NR/ABS แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มขึ้นของปริมาณเอบีเอสนั้นทำให้เส้นใย NR/ABS นั้นแสดงพฤติกรรมไปในทางวัสดุที่มีความแข็งแรงที่สูง ในอัตราส่วน NR/ABS 50/50 เป็น 80/20, ตามลำดับ อาจกล่าวได้ดังนี้ว่าเมื่อปริมาณของเอบีเอสลดลงจาก 50 wt% เป็น 20 wt% จะทำให้มีค่า strain ที่เพิ่มขึ้น แต่มี stress ที่ลดลง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการลดลงของปริมาณเอบีเอสจะทำให้วัสดุที่มีความนิ่มที่เพิ่มขึ้น จากกราฟพบว่าที่อัตราส่วนของยางธรรมชาติต่อเอบีเอสที่ 70/30 นั้นให้ค่า stress สูงที่สุด



รูปที่ 31 แสดง stress – strain curves ของเส้นใย NR/ABS ที่อัตราส่วน 50/50, 60/40, 70/30 และ 80/20 ที่ความเข้มข้นสารละลาย 15 wt% ระยะทางระหว่างปลายเข็มถึงตัวรองรับ 20 cm อัตราการไหล 30 ml/h และความต่างศักย์ไฟฟ้า 15 kV

4.5.2 มอดุลัสแรงดึง

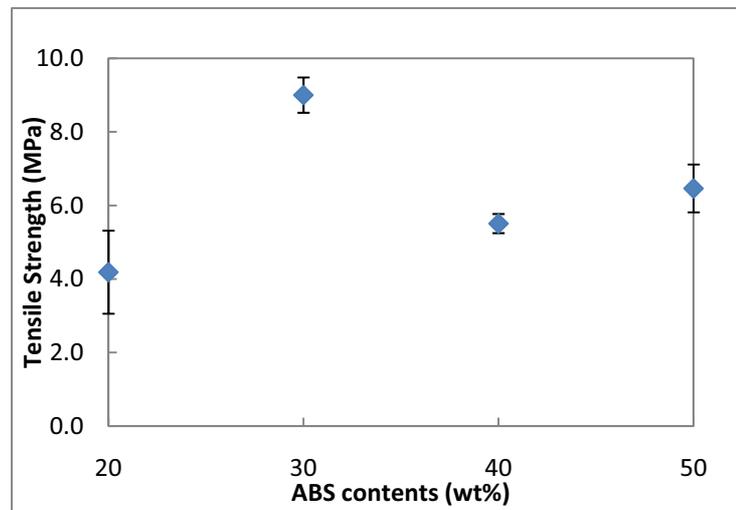
ค่ามอดุลัสแรงดึงของเส้นใย NR/ABS แสดงดังภาพที่ 32 ซึ่งจากภาพ นั้นเห็นได้ว่าค่ามอดุลัสของเส้นใย NR/ABS เป็นไปในทิศทางเดียวกันกับค่าความทนต่อแรงดึงสูงสุดด้วยเหตุผลเดียวกันนั่นคือความแข็งของเนื้อวัสดุซึ่งเป็นผลมาจากเอบีเอส เนื่องจากเอบีเอสนั้นเป็นวัสดุที่มีความแข็งที่สูงกว่า การที่เอสบีเอสมีปริมาณลดต่ำลง จึงทำให้มีมอดุลัสต่ำ และเมื่อพิจารณาในพอลิเมอร์ผสม ระหว่างยางธรรมชาติ และเอบีเอส นั้น พบว่าที่อัตราส่วนเอบีเอสสูงที่สุด ให้ค่ามอดุลัสสูงที่สุด เมื่อเปรียบมอดุลัสที่อัตราส่วนอื่นๆ



รูปที่ 32 แสดงค่ามอดุลัสของเส้นใย NR/ABS ที่อัตราส่วน 50/50, 60/40, 70/30 และ 80/20 ที่ความเข้มข้นสารละลาย 15 wt% ระยะทางระหว่างปลายเข็มถึงตัวรองรับ 20 cm อัตราการไหล 30 ml/h และความต่างศักย์ไฟฟ้า 15 kV

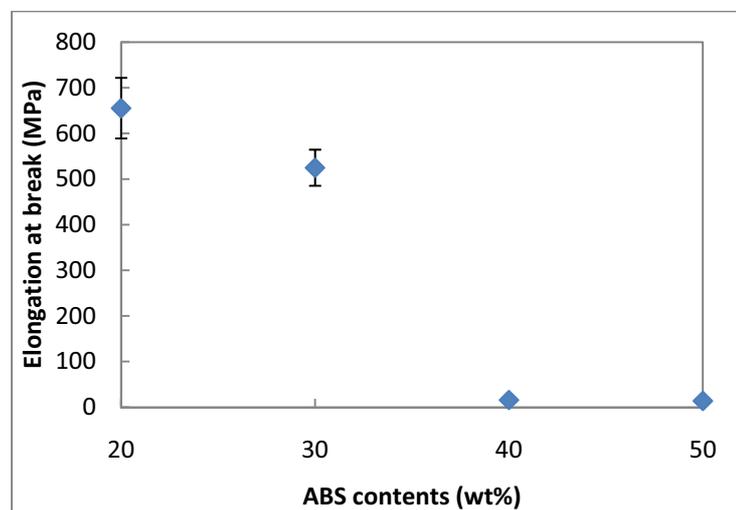
4.5.3 ความทนต่อแรงดึงสูงสุด

ภาพที่ 33 แสดงค่าความทนต่อแรงดึงสูงสุดของเส้นใย NR/ABS จะเห็นได้ว่าค่าความทนต่อแรงดึงสูงสุด ของอัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติและเอบีเอสนั้นมีการเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณของเอบีเอสเพิ่มขึ้น โดยทั่วไปแล้วยางธรรมชาติเพียงอย่างเดียว นั้นให้สมบัติการทนต่อแรงดึงที่ดี ซึ่งในอัตราส่วนยางธรรมชาติที่ 80% เห็นได้ว่ามีค่าความทนต่อแรงดึงต่ำที่สุด ทั้งนี้เกิดจากการแยกวัฏภาคระหว่างยางธรรมชาติและเอบีเอส



รูปที่ 33 แสดงค่าความทนต่อแรงดึงสูงสุดของเส้นใย NR/ABS ที่อัตราส่วน 50/50, 60/40, 70/30 และ 80/20 ที่ความเข้มข้นสารละลาย 15 wt% ระยะทางระหว่างปลายเข็มถึงตัวรองรับ 20 cm อัตราการไหล 30 ml/h และความต่างศักย์ไฟฟ้า 15 kV

4.5.4 เปอร์เซนต์การยืดตัว ณ จุดขาด



รูปที่ 34 แสดงค่า elongation at break ของเส้นใย NR/ABS ที่อัตราส่วน 50/50, 60/40, 70/30 และ 80/20 ที่ความเข้มข้นสารละลาย 15 wt% ระยะทางระหว่างปลายเข็มถึงตัวรองรับ 20 cm อัตราการไหล 30 ml/h และความต่างศักย์ไฟฟ้า 15 kV

สำหรับค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด ของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและเอปียีสนั้น แสดงดังภาพที่ 34 โดยค่าดังกล่าวขึ้นอยู่กับปริมาณของยางธรรมชาติ นั่นคือ ที่อัตราส่วนที่มีปริมาณของยางธรรมชาติสูงที่สุดจะทำให้วัสดุผสมนั้นมีความเหนียวและยืดตัวออกได้มากเมื่อได้รับแรงดึง จากภาพจะสังเกตเห็นได้ว่าค่าการยืดตัวของของเส้นใย NR/ABS นั้น มีอยู่ 2 ช่วงด้วยกันคือ เมื่อปริมาณของเอปียีสในช่วง 20 – 30 wt % มีค่าการยืดตัวที่สูง(>500% elongation) แต่เมื่อปริมาณของเอปียีสอยู่ในช่วงที่ 40 – 50 wt% ค่าการยืดตัวจะต่ำ (<100% elongation) โดยการลดลงของค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาดนั้น เนื่องมาจากเอปียีส นั้นมีความแข็งแรงที่สูงกว่ายางธรรมชาติ อีกทั้งโมเลกุลของยางธรรมชาตินั้นอยู่ในลักษณะที่เป็น อัจฉนวน เมื่อได้รับแรงมากกระทำจึงสามารถเคลื่อนตัว และจัดเรียงตัวให้เป็นระเบียบได้ จึงทำให้ที่อัตราส่วนที่มีปริมาณของยางธรรมชาติสูงๆ จึงมีการยืดตัวที่สูงกว่า

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

อิทธิพลของปัจจัยที่ส่งผลต่อการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้า

จากการศึกษาพบว่า

- ความเข้มข้นของสารละลาย พบว่าการเพิ่มความหนืดของสารละลายจะทำให้ได้เส้นใยที่มีความต่อเนื่อง, ปราศจากลูกปัดมากยิ่งขึ้น และมีเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นใยที่เพิ่มขึ้นด้วย
- ระยะทางระหว่างปลายเข็มถึงตัวรองรับ ที่เพิ่มขึ้นจะช่วยให้เส้นใยที่ได้มีเส้นผ่านศูนย์กลางที่ลดลง และเพิ่มการระเหยของตัวทำละลาย
- อัตราการไหลของสารละลาย เมื่อเพิ่มขึ้นจะทำให้เส้นใยนั้นมีเส้นผ่านศูนย์กลางที่เพิ่มขึ้น
- ความต่างศักย์ไฟฟ้า ที่เพิ่มขึ้นในการเตรียมเส้นใยจากยางธรรมชาติที่ผสมเอบีเอสนั้น จะทำให้ได้เส้นใยที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางที่เพิ่มขึ้น

อิทธิพลของเอบีเอสที่ส่งผลต่อคุณสมบัติต่างๆ ของเส้นใยยางธรรมชาติผสมเอบีเอส

สมบัติพื้นฐานวิทยาของเส้นใยยางธรรมชาติผสมเอบีเอส

เอบีเอสเป็นส่วนสำคัญที่ช่วยขัดขวางการเคลื่อนที่ของยางธรรมชาติ ซึ่งทำให้การลดลงของปริมาณเอบีเอส เป็นส่วนให้เส้นใยก่อนการบ่มที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางที่ลดลง แต่การเพิ่มขึ้นของปริมาณเอบีเอสจะช่วยป้องกันการเชื่อมติดกันของเส้นใย และสามารถรักษารูพรุนเอาไว้ได้เมื่อทำการบ่ม

สมบัติเชิงกลของเส้นใยยางธรรมชาติผสมเอบีเอส

จากยางธรรมชาติซึ่งเป็นวัสดุที่มีมอดุลัสต่ำ การเติมเอบีเอส นั้นเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้ยางธรรมชาตินั้นมีสมบัติเชิงกลที่ดีทั้งความแข็งแรง และมอดุลัส โดยการเพิ่มขึ้นของปริมาณเอบีเอสจะให้ค่ามอดุลัส และค่าความทนต่อแรงดึงสูงสุดที่เพิ่มขึ้น แต่การเพิ่มปริมาณของยางธรรมชาตินั้นทำให้เปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาดนั้นเพิ่มสูงขึ้น

สมบัติการแพร่ผ่านของไอน้ำของเส้นใยธรรมชาติผสมเอบีเอส

จากการศึกษาพบว่าเอบีเอสนั้นเป็นส่วนสำคัญที่ช่วยให้เส้นใยนั้นสามารถรักษารูปร่างเอาไว้ได้ เนื่องจากเอบีเอสนั้นไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของโมเลกุลยางธรรมชาติ เป็นผลให้มีอัตราการแพร่ผ่านของไอน้ำที่เพิ่มสูงขึ้น เมื่อปริมาณของเอบีเอสเพิ่มขึ้น

บรรณานุกรม

1. Choi, S. S.; Hong, J. P.; Seo, Y. S.; Chung, S. M.; Nah, C., "Fabrication and characterization of electrospun polybutadiene fibers crosslinked by UV irradiation." *Journal of Applied Polymer Science* **101**(4), 2006, 2333-2337.
2. Threepopnatkul, P., Murphy, D., Zukas, W., and Mead, J., "Fiber Structure and Mechanical Properties of Electrospun Butyl Rubber with Different Type of Carbon Black", *Rubber Chemistry and Technology Journal*, May, 80(2), 2007, pp. 231-250.
3. Hao, X. and X. Zhang (2007). "Syndiotactic 1,2-polybutadiene fibers produced by electrospinning." *Materials Letters* **61**(6): 1319-1322.
4. สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร, "การผลิต และการใช้ยางของโลก" [Online]. Accessed 10 February 2010. Available from <http://www.rubberthai.com/information/Wichakan50/01.pdf>
5. พงษ์ธร แซ่ฮุย, "ยาง: ชนิด สมบัติ และการใช้งาน", 2547, ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ
6. Rubin, I.I., "Handbook of Plastic Materials and Technology" Vol. John Wiley & Sons 1990, New York.
7. Salamone, J.C., "Polymer Materials Encyclopedia" 1996, New York: CRC Press.
8. Scheirs, J. and Priddy, D., "Modern styrenic polymers" 2003, West Sussex: John Wiley & Sons Ltd 757
9. Seeram Ramakrishna, Kazutoshi Fujihara, Wee-Eong Teo, Teik-Cheng Lim and Zuwei Ma, "An Introduction to Electrospinning and Nanofibers " 2005, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd
10. Ji-Huan He, Yong Liu, Lu-Feng Mo, Yu-Qin Wan and Lan Xu, "Electrospun Nanofibres and Their Applications" 2008, Lightning Source Inc.
11. Ismail, H. and Suryadiansyah, "Thermoplastic elastomers based on polypropylene/natural rubber and polypropylene/recycle rubber blends". *Polymer Testing*, 2002. **21**(4): p. 389-395.
12. Wu, D.Y., S. Bateman, and M. Partlett, "Ground rubber/acrylonitrile-butadiene-styrene composites". *Composites Science and Technology*, 2007. **67**(9): p. 1909-1919.
13. Annicelli R, "The Vanderbilt Rubber Handbook". 13th ed., R.F. Ohm, R.T. Vanderbilt Company, Inc., Norwalk, CT, Ch 4 (1990).

14. Brown, P.J. and Stevens, K., *"Nanofibers and nanotechnology in textiles"*, TJ International Limited, Padstow
15. Tungprapa, S.; Jangchud, I.; Ngamdee, P.; Rutnakornpituk M. and Supaphol, P., *"Ultrafine electrospun poly(ethylene glycol)-polydimethylsiloxane-poly(ethylene glycol) triblock copolymer/poly(ethylene oxide) blend fibers"*. Materials Letters, 2006. **60**(24): p. 2920-2924.
16. Zheng-Ming Huang, Y. Z. Zhang, S. Ramakrishna and C. T. Lim., *"Electrospinning and mechanical characterization of gelatin nanofibers "*. Polymer. 2004. 45: p. 5361-5368.
17. Gu, S.-Y.; Wang, Z.-M.; Ren, J.; Zhang, C.-Y., *"Electrospinning of gelatin and gelatin/poly(l-lactide) blend and its characteristics for wound dressing"*. Materials Science and Engineering: C, 2009. **29**(6): p. 1822-1828.
18. Rockwood, D. N.; Chase, D. B.; Akins Jr, R. E.; Rabolt, J. F., *"Characterization of electrospun poly(N-isopropyl acrylamide) fibers"*. Polymer, 2008. **49**(18): p. 4025-4032.
19. Behler, K., M. Havel, and Y. Gogotsi, *"New solvent for polyamides and its application to the electrospinning of polyamides 11 and 12"*. Polymer, 2007. **48**(22): p. 6617-6621.
20. Lo'pez-Manchado, M. A.; Arroyo, M.; Herrero, B.; Biagiotti, J., *"Vulcanization Kinetics of Natural Rubber–Organoclay Nanocomposites"*. Journal of Applied Polymer Science, 2003. 89
21. Deitzel, J.M., Kleinmeyer, J., Harris, D., Beck Tan, N. C., *The effect of processing variables on the morphology of electrospun nanofibers and textiles*. Polymer, 2001. **42**(1): p. 261-272.

ภาคผนวก

ก. ข้อมูลค่าความหนืดของสารละลาย NR/ABS

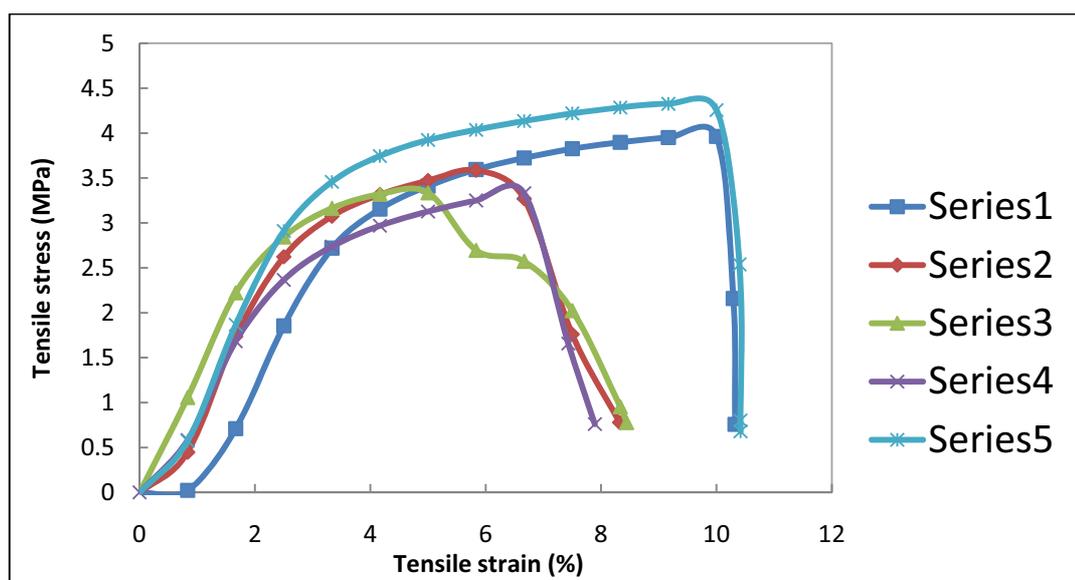
ตารางที่ 16 แสดงค่าความหนืดของสารละลาย NR/ABS

ความเข้มข้นของ สารละลาย (wt%)	ค่าความหนืด (mPa.s)			
	50/50	60/40	70/30	80/20
5	9	9	15	18
10	174	276	348	222
15	882	951	1662	1830
20	7546	6251	9286	10354

ข. ข้อมูลสมบัติเชิงกลของวัสดุ NR/ABS

ตารางที่ 17 แสดงข้อมูลสมบัติเชิงกลของเส้นใยที่ถูกปั่นด้วยไฟฟ้าที่ยังไม่ได้ถูก Normalize ด้วยความหนาแน่นของ NR/ABS:50/50 ที่ความเข้มข้นสารละลาย 15 wt%, ระยะทางระหว่างปลายเข็มถึงตัวรองรับ 20 cm, อัตราการไหล 30 ml/h และความต่างศักย์ไฟฟ้า 15 kV

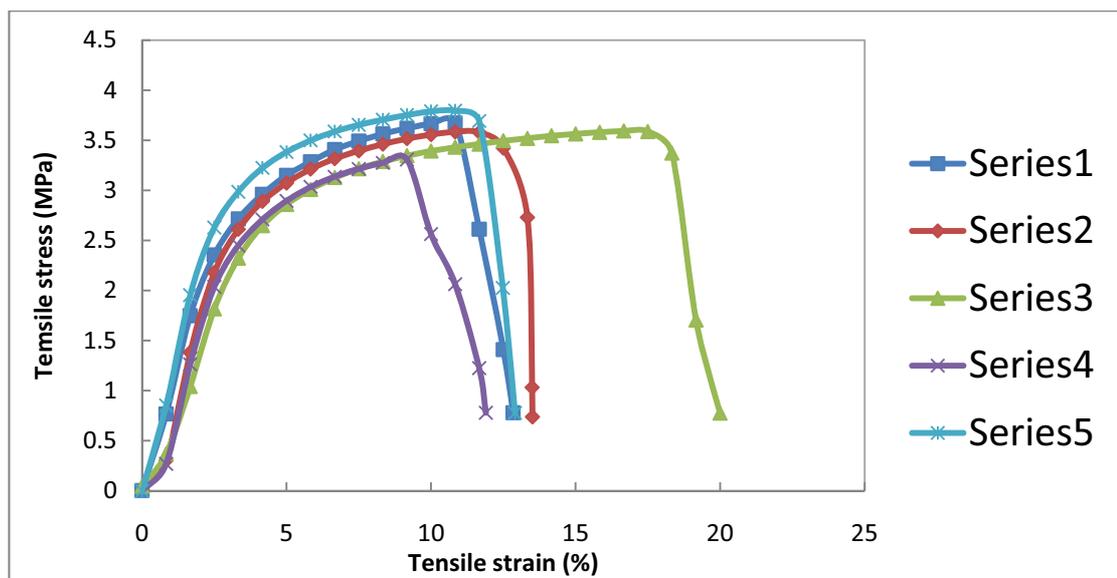
NR/ABS	Tensile strength (MPa)	Modulus (MPa)	% Strain at Break
50/50	3.96318	12.053983	10.29
	3.58583	154.54817	8.32
	3.33486	-	8.44
	3.33090	131.85243	7.89
	4.32597	140.11158	10.40



ภาพที่ 35 แสดง stress-strain ของเส้นใยที่ถูกปั่นด้วยไฟฟ้าของ NR/ABS:50/50 ที่ความเข้มข้นสารละลาย 15 wt%, ระยะทางระหว่างปลายเข็มถึงตัวรองรับ 20 cm, อัตราการไหล 30 ml/h และความต่างศักย์ไฟฟ้า 15 kV

ตารางที่ 18 แสดงข้อมูลสมบัติเชิงกลของเส้นใยที่ถูกปั่นด้วยไฟฟ้าที่ยังไม่ได้ถูก Normalize ด้วยความหนาแน่นของ NR/ABS:60/40 ที่ความเข้มข้นสารละลาย 15 wt%, ระยะทางระหว่างปลายเข็มถึงตัวรองรับ 20 cm, อัตราการไหล 30 ml/h และความต่างศักย์ไฟฟ้า 15 kV

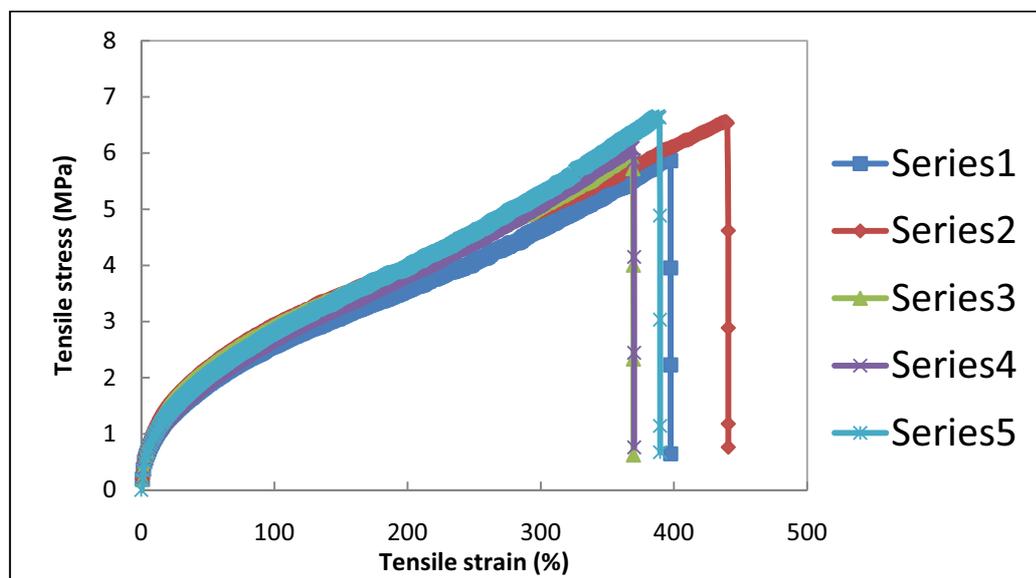
NR/ABS	Tensile strength (MPa)	Modulus (MPa)	% Strain at Break
60/40	3.67404	95.31729	12.84
	3.58540	112.67662	13.49
	3.59295	79.66870	25.31
	3.30814	106.05289	11.90
	3.79632	106.62672	12.90



ภาพที่ 36 แสดง stress-strain ของเส้นใยที่ถูกปั่นด้วยไฟฟ้าของ NR/ABS:60/40 ที่ความเข้มข้นสารละลาย 15 wt%, ระยะทางระหว่างปลายเข็มถึงตัวรองรับ 20 cm, อัตราการไหล 30 ml/h และความต่างศักย์ไฟฟ้า 15 kV

ตารางที่ 19 แสดงข้อมูลสมบัติเชิงกลของเส้นใยที่ถูกปั่นด้วยไฟฟ้าที่ยังไม่ได้ถูก Normalize ด้วยความหนาแน่นของ NR/ABS:70/30 ที่ความเข้มข้นสารละลาย 15 wt%, ระยะทางระหว่างปลายเข็มถึงตัวรองรับ 20 cm, อัตราการไหล 30 ml/h และความต่างศักย์ไฟฟ้า 15 kV

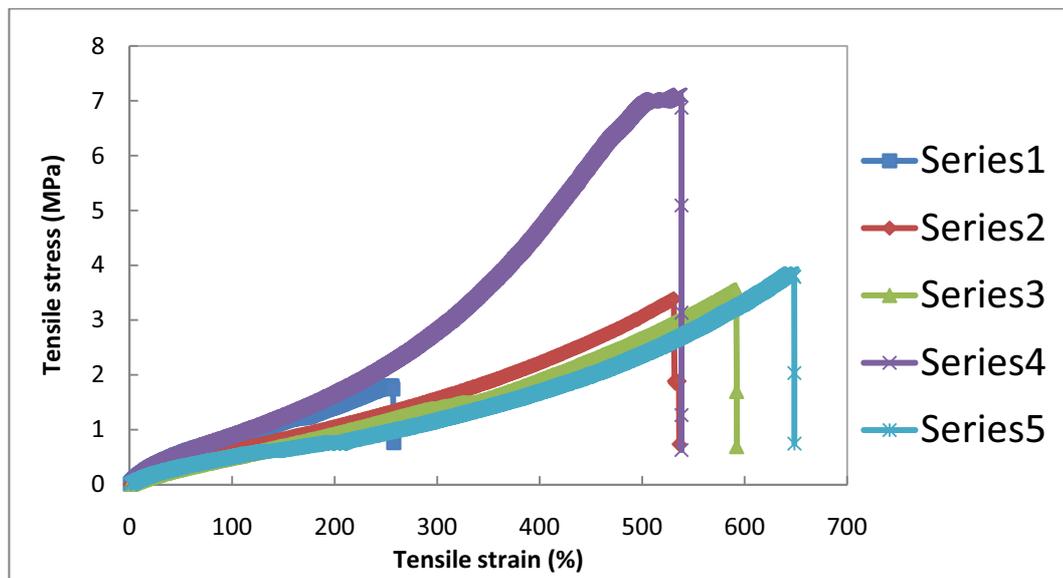
NR/ABS	Tensile strength (MPa)	Modulus (MPa)	% Strain at Break
70/30	5.90850	2.39595	397.50
	6.56257	2.60098	440.78
	5.94563	2.85582	369.55
	6.09770	2.55480	370.10
	6.65695	2.65695	389.57



ภาพที่ 37 แสดง stress-strain ของเส้นใยที่ถูกปั่นด้วยไฟฟ้าของ NR/ABS:70/30 ที่ความเข้มข้นสารละลาย 15 wt%, ระยะทางระหว่างปลายเข็มถึงตัวรองรับ 20 cm, อัตราการไหล 30 ml/h และความต่างศักย์ไฟฟ้า 15 kV

ตารางที่ 20 แสดงข้อมูลสมบัติเชิงกลของเส้นใยที่ถูกปั่นด้วยไฟฟ้าที่ยังไม่ได้ถูก Normalize ด้วยความหนาแน่นของ NR/ABS:80/20 ที่ความเข้มข้นสารละลาย 15 wt%, ระยะทางระหว่างปลายเข็มถึงตัวรองรับ 20 cm, อัตราการไหล 30 ml/h และความต่างศักย์ไฟฟ้า 15 kV

NR/ABS	Tensile strength (MPa)	Modulus (MPa)	% Strain at Break
80/20	1.80389	1.08715	257.68
	3.39005	0.94728	536.21
	3.55051	0.97108	592.17
	7.11440	2.29821	538.33
	3.85698	1.08614	648.51



ภาพที่ 38 แสดง stress-strain ของเส้นใยที่ถูกปั่นด้วยไฟฟ้าของ NR/ABS:80/20 ที่ความเข้มข้นสารละลาย 15 wt%, ระยะทางระหว่างปลายเข็มถึงตัวรองรับ 20 cm, อัตราการไหล 30 ml/h และความต่างศักย์ไฟฟ้า 15 kV

ค. ข้อมูลการทดสอบการแพร่ผ่านของไอน้ำ

ตารางที่ 21 แสดงข้อมูลดิบการทดสอบการแพร่ผ่านของไอน้ำของเส้นใยที่ปั่นด้วยไฟฟ้าของ NR/ABS ที่ความเข้มข้นสารละลาย 15 wt%, ระยะทางระหว่างปลายเข็มถึงตัวรองรับ 20 cm, อัตราการไหล 30 ml/h และความต่างศักย์ไฟฟ้า 15 kV

NR/ABS ratios		น้ำหนักของสารละลาย เกลือเริ่มต้น (g)	น้ำหนักของสารละลาย เกลือที่ 24 ชม. (g)	ผลต่างของน้ำหนัก สารละลายเกลือ (g)
50/50	ปิดด้วยแผ่น เส้นใย	23.0108	22.9089	0.1019
		22.9280	22.8185	0.1095
		23.2104	23.1086	0.1018
	ไม่ปิดด้วย แผ่นเส้นใย	22.7189	22.5948	0.1241
		22.8124	22.6889	0.1235
		22.9257	22.7927	0.1330
60/40	ปิดด้วยแผ่น เส้นใย	23.0013	22.9462	0.0551
		23.0668	23.0302	0.0366
		23.3697	23.3369	0.0328
	ไม่ปิดด้วย แผ่นเส้นใย	22.7778	22.6237	0.1541
		22.8120	22.6683	0.1437
		22.9697	22.8232	0.1465
70/30	ปิดด้วยแผ่น เส้นใย	23.0444	23.0358	0.0086
		23.0087	23.0020	0.0067
		23.3804	23.3738	0.0066
	ไม่ปิดด้วย แผ่นเส้นใย	22.8720	22.7289	0.1431
		22.8815	22.7334	0.1481
		22.9463	22.7959	0.1504
80/20	ปิดด้วยแผ่น เส้นใย	23.0348	23.0320	0.0028
		23.0364	23.0332	0.0032
		23.2857	23.2831	0.0026
	ไม่ปิดด้วย แผ่นเส้นใย	22.8553	22.7223	0.1330
		22.8799	22.7444	0.1355
		22.9601	22.8231	0.1370

ง. การนำเสนอผลงานในการประชุมวิชาการ

ผลงานการนำเสนอรูปแบบ Oral Presentation ในการประชุมวิชาการ The 2nd International Conference on Multi-functional Materials and Structures ณ มณฑล ชิงเต่า (Qingdao) ประเทศสาธารณรัฐประชาชนจีน ในระหว่างวันที่ 9-12 ตุลาคม 2552.

Morphology of Electrospun Natural Rubber with Acrylonitrile-Butadiene-Styrene

S. Sithornkul^{1,2,a} and P. Threepopnatkul^{1,2,b}

¹Department of Material Science and Engineering, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Silpakorn University, Nakorn Pathom, 73000, Thailand

²Center of Excellence for Petroleum, Petrochemicals, and Advance Materials, Chulalongkorn University, Bangkok, 10330, Thailand

^asarawuth_st@hotmail.com, ^bpoonsubt@yahoo.com

Keywords: Electrospinning, Natural rubber, ABS, Morphological property

Abstract. This research was aimed to study the electrospinning of natural rubber (NR)-acrylonitrile butadiene styrene (ABS) blend. The NR used in this research was compounded in a torque rheometer, with stearic acid, wingstay-L, dibenzothiazole disulfide (MBTS), tetramethylthiuram disulfide (TMTD) and sulfur, respectively. The compounded NR was blended with ABS by dissolving them in tetrahydrofuran (THF), concentration of solution included 5, 10, and 15 w/w%. The ratio of NR/ABS was varied by varying the content of ABS of 20, 30, 40 and 50 wt%. Then NR/ABS electrospun membrane was built up by electrospinning technique with high voltage 15 kV, flow rate 30 ml/h, collector distance 15, 20 and 25 cm and collected the electrospun fiber on rotating circular at 1000 rpm. The morphology of electrospun fibers were characterized by scanning electron microscope (SEM). SEM images showed that NR/ABS membranes had higher porosity with decreasing ABS contents. Decreasing ABS contents, decreasing solution concentration and increasing collector distance decreased fiber diameter of electrospun NR/ABS.

1. Introduction

In recent years, the electrospinning technique has been interested for preparing nonwoven nanofibers because of high surface area and very small pore size. Moreover, electrospinning process is capable of making fiber diameters to vary approximately from 10 nanometers to more than 1 micrometer by electrical force supplied from high voltage power. When the electrospinning jet left the needle tip during electrospinning, the polymer solution is stretched as it travels to the collector. These high surface area and small pore size characters enable the electrospun fibers to possess many potential applications such as optical materials, sensor materials, tissue scaffolds, drug delivery systems, in filtration systems and protective clothing[1].

A wide variety of polymers including polyvinyl alcohol[2], Gelatin[3], butyl rubber[4] and syndiotactic 1,2 polybutadiene[5] have been used for producing electrospun nanofibers. So far, there is no study on the electrospun natural rubber, thus draw our interests onto this research. Natural rubber (NR) is one of its kinds of polymer which has very high molecular weight and the prominent properties such as elasticity, flexibility, toughness, abrasion resistance with the sacrifice of breathability. Therefore, natural rubber membranes produced by electrospinning technique could provide a combination of stretchable and breathable materials. Acrylonitrile butadiene styrene (ABS) copolymer is a rubber-toughened thermoplastic. The manufacturing process for ABS resin begins with particles of crosslinked rubber being grafted into an elastomer phase and subsequently embedded into a continuous resin matrix. This crosslinked rubber phase provides ABS with many excellent properties including impact strength, toughness, hardness, and bondability. Natural rubber and ABS blends have been introduced as an alternative to study the properties of electrospun nonwoven mats. They could provide a combination of tough but yet stretchable and breathable materials.

In this work, the effect of ABS contents was investigated on the morphology of electrospun NR. In addition, the influences of electrospun parameters such as polymer solution concentration and distances between tip to collector were also studied on the morphology of electrospinning NR/ABS.

2. Experimental

2.1 Materials

Natural rubber (grade STR-5L) used in this research was purchased from Sakdaroongreungkij Co., Thailand. The additives of rubber compounds such as ZnO, stearic acid, wingstay-L, dibenzothiazole disulfide (MBTS), tetramethylthiuram disulfide (TMTD) and sulfur were obtained from KIJ PAIBOON Chemical Limited Partnership, Thailand. Commercial grade tetrahydrofuran (THF) was purchased from RCL Labscan. ABS (grade SP200) was obtained by IRPC Co. Ltd.

2.2 Compounding and solution preparation

The mixing of the compound formulation as given in Table 1 was carried out in torque rheometer (Barbender). Natural rubber was added and mixed at 60 rpm for 15 minutes; all other ingredients were added and mixed for another 12 minutes. Sulfur was added last and the rubber stock mixed for 5 more minutes.

The rubber compound was blend with ABS by dissolving in THF. The ratios of NR/ABS were made by varying the ABS content of 20, 30, 40 and 50 wt%. The concentration of NR/ABS solution in THF used in this experiment was 5, 10, and 15 w/w%.

2.3 Electrospinning process

A schematic of the electrospinning system used in this research is shown in Fig. 1. The electrospinning solution was placed in 20-ml syringe with a metal needle. A high DC power supply (Gamma High Voltage Research, Inc.) was used to provide a high voltage of 15 kV to charge the polymer solution contained in the syringe. A syringe pump (KD scientific) was used to control polymer solution flow rate of 30 ml/hr. A rotating circular aluminum plate was used as collector. The tip-to-collector distance was 15, 20, and 25 cm. The electrospun NR/ABS were dried at room temperature for 1 hr to remove any residual solvent.

2.4 Characterization

The viscosity of NR/ABS solution was determined by a rheometer (Brookfield Co., USA). The uncured electrospun NR/ABS were characterized by scanning electron microscope (SEM, camscan mx200). All specimens were coated with gold prior to SEM. The fiber diameter was measured on the SEM images.

Table 1: Compounding Formulation

Materials	phr*
Natural rubber (STR-5L)	100.0
ZnO	5.0
Steric acid	2.0
Wingstay I.	1.0
MBTS	1.0
TMTD	0.1
Sulfur	2.75

*phr = part per hundred rubber

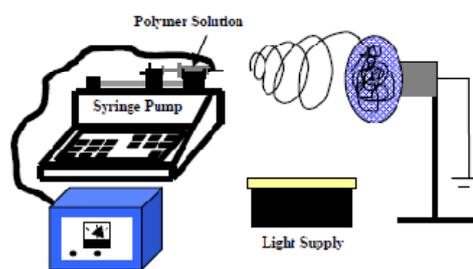


Fig. 1 Diagram of the electrospinning process.

3. Results and Discussion

3.1 Effect of ABS contents on morphology of electrospun natural rubber fibers

Fig. 2(a) depicts SEM image of electrospun NR showing a significant fibrous merge. Electrospun NR fibers could fuse together due to its rubbery like condition at room temperature.

Electrospun butyl rubber studied by Threepopnatkul [4] showed an obvious merging of nonwoven fibers. Because carbon black aligned along the electrospun fibers, thus, it could control morphology of electrospun butyl rubber. Therefore, ABS was employed in this research in order that the fibrous merging would be subsided to get as more uniform fiber as possible. The morphology of electrospun could be purposively controlled by varying ABS contents.

Fig. 2(b-e) shows the morphology of uncured electrospun nonwoven NR/ABS fibers as a function of ABS content. They showed significant effects of ABS at all different ratios that enable the smooth appearances of the fibers. Electrospun NR/ABS fibers exhibit diameters ranging from 14 – 21 micron as shown in Table 2. As seen in Fig. 2(b) at the lowest amount of ABS, the merged fibers could be seen with the smallest fiber diameter. Whereas they possess the highest pore size compared with neat counterpart. At higher ABS contents as seen in Fig. 2(e-e), electrospun mats illustrated no traces of merged fibers. Larger diameter of electrospun NR/ABS fibers was observed as a function of ABS content.

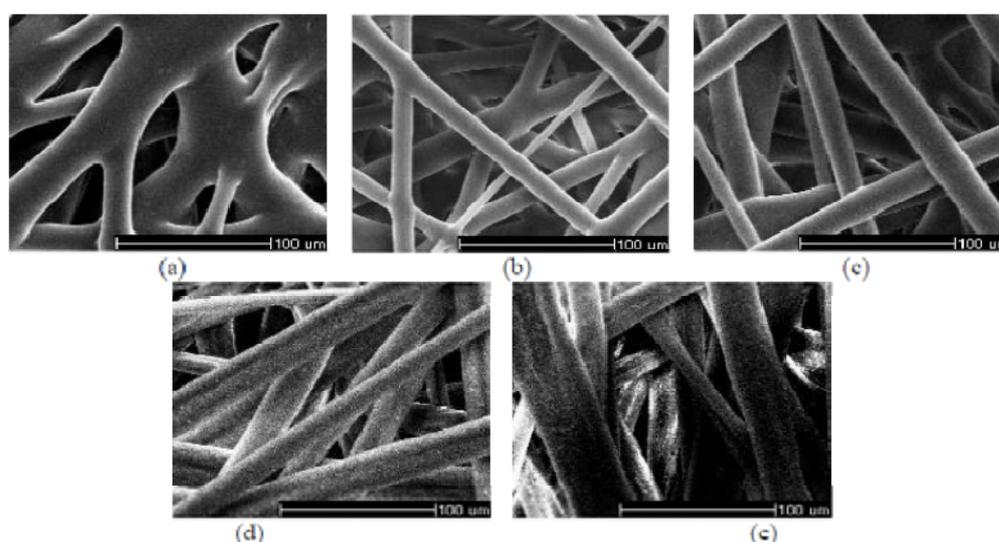


Fig. 2. SEM images of (a) electrospun NR fibers and electrospun NR/ABS fibers with difference ABS contents of (b) 20 % (c) 30% (d) 40% and (e) 50% by weight. The solution concentration and tip-to-collector distance were 15 wt% and 20 cm, respectively.

3.2 Effect of solution concentration and tip-to-collector distance on electrospun NR/ABS fibers

Not only the effect of ABS contents on electrospun fiber morphology but also the other parameters affect the electrospinning preparation which led to the outcome of porosity and diameter differences. These include the solution concentration, distance between the needle tip and collector, flow rate of solution and voltage supplied. This work focuses on only the effect of solution concentration and distance between tip to collector on electrospun fiber morphology by using NR/ABS ratio of 50:50, flow rate of 30 ml/hr and high voltage of 15 kV.

The concentration of solution plays an important role in determining the fiber formability[6]. Adequate viscosity is one of the necessary conditions for electrospinning to form the fiber. At low viscosity of 5wt% NR/ABS solution concentration, the undesired beads regularly incurred. With the increment of the viscosity, there is a gradual change of the beads shaping from spindles-like to smooth fiber. As seen in Table 2, the diameter of electrospun NR/ABS fibers was decreased with the reduction of the polymer solution concentration. Whilst the increase of the distance between tip to collector was in effect, the fiber diameter of electrospun NR/ABS would frequently show

somewhat smaller. This could be explained by the fact that there was enough time for the solvent to evaporate upon the arrival at the collector.

Table 2 Properties and conditions of NR/ABS solutions and the resulting electrospun nonwoven NR/ABS mats.

NR/ABS	Solution concentration (%w/w)	Tip-to-collector distance (cm)	Viscosity (mPas)	Average of Fiber diameter (μm)
50/50	5	15	-	- (Beads)
	10	15	174 ± 17	5.78 ± 3.35
	15	15	882 ± 70	22.95 ± 9.63
50/50	15	20	882 ± 70	20.90 ± 7.71
	15	25	882 ± 70	15.40 ± 8.99
60/40	15	20	951 ± 76	17.81 ± 6.91
70/30	15	20	1662 ± 50	21.07 ± 5.10
80/20	15	20	1830 ± 55	14.40 ± 5.13

4. Conclusions

In this study, the electrospun nonwoven NR/ABS mats were successfully prepared by electrospinning technique. The fiber diameters become smaller and higher porosity with decreasing ABS contents. However, the solution concentration is much more influential effect than the one of the ABS contents. ABS itself is efficiently capable of controlling the morphology of electrospun membranes namely uniformity, diameter size and its porosity. Hence, one could properly choose the right choice of the fine fillers or the suitable polymers or the appropriate additives in order to obtain somewhat more uniform fibers and avoid the merging phenomena of the electrospun nonwoven mats.

5. Acknowledgements

The authors would like to thank Department of Materials Science and Engineering, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Silpakom University, Thailand for materials. Some of the authors gratefully acknowledge the financial support # F-31-102-16-01 of NSTDA (National Science and Technology Development Agency, TH). Also the authors would like to thank Center of Excellence for Petroleum, Petrochemical, and Advance Materials, Chulalongkorn University for financial support. The authors wish to thank Dr. Chanin Kulsetthanchalee (Suan Dusit Rajabhat University, TH) for his comments and suggestions during preparation of this article.

6. References

- [1] Z.M. Huang, Y.Z. Zhang, M. Kotaki, and S. Ramakrishna: *Compos. Sci. Technol.* Vol. 63 (2003), p. 2223
- [2] E. Yang, X. Qin, and S. Wang: *Mat. Let.* Vol. 62 (2008), p. 3555
- [3] Y.Z. Zhang, J. Venugopal, Z.M. Huang, C.T. Lim, and S. Ramakrishna: *Polym.* Vol. 47 (2006), p. 2911
- [4] P. Threepopnatkul, D. Murphy, W. Zukas, and J. Mead: *Rubb. Chem. Tech.* Vol. 80 (2007), p. 231
- [5] X. Hao, and X. Zhang: *Mat. Let.* Vol. 61 (2007), p. 1319
- [6] H. Zhang, H. Nie, S. Li, C.J.B. White, and L. Zhu: *Mat. Let.* Vol. 63 (2009), p. 1199

ผลงานการนำเสนอรูปแบบ Poster Presentation ในการประชุมวิชาการ 7th Eco-Energy and Materials Science and Engineering Symposium ณ โรงแรมสอติเคย์ อินน์ จังหวัดเชียงใหม่ ประเทศไทย ในระหว่างวันที่ 19-22 พฤศจิกายน พ.ศ. 2552



Ultrafine Electrospun Natural Rubber with Acrylonitrile-Butadiene-Styrene Blended Fibers

S. Sithornkul^{1,2}, P. Threepopnatkul^{1,2}, C. Kulsethanchalee³ and C. Thongpin¹

¹Department of Materials Science and Engineering, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Silpakorn University, Nakhon Pathom 73000 Thailand

²Center of Excellence for Petroleum, Petrochemicals, and Advanced Materials, Chulalongkorn University, Bangkok 10330, Thailand

³Faculty of Science and Technology, Suan Dusit Rajabhat University, Bangkok 10300, Thailand

* corresponding author, Tel. +66 3421 9363, E-mail: poomsutba@yahoo.com

Abstract— In the present contribution, successful preparation of ultrafine fibers of natural rubber (NR) with acrylonitrile-butadiene-styrene (ABS) blend via electrospinning process was reported. The natural rubber was compounded with other additives and sulfur for vulcanization. The NR/ABS was blended by dissolution with tetrahydrofuran (THF). The total concentration of the solution was 15 wt%. The composition weight ratios between the NR and ABS were 80:20, 70:30, 60:40, and 50:50. Scanning electron microscope (SEM) was employed to investigate the morphology of the electrospun NR/ABS membrane after cured. The effects of electrospinning process parameters on the morphology such as voltage (14, 15 and 16 kV) and flow rate (10, 20 and 30 ml/h) were studied. The average size of the electrospun fibers were also studied and found that the shape of the electrospun fibers showed a closed relation to the voltage. Whereas increasing the flow rate would enlarge the diameter of electrospun NR/ABS.

INTRODUCTION

In these recent years, many techniques to produce nonwoven mat have been in great interest such as skiving, template synthesis, self assembly and electrospinning technique. However, the electrospinning can convert the polymer to nonwoven mat using polymer solution or polymer melt. By applying voltage to polymer solution and then it would charge the polymer into Taylor cone and traveling to collector. There are a number of advantages of such nonwoven fibers such as high surface area to volume ratio, high aspect ratio and high porosity with minute pore size. Undoubtedly, it would be suitable to use in application of biomaterial, ultrafiltration, protective clothing, support catalyst and also reinforcement in composite materials.

In electrospinning technique, the characteristics such as fiber diameter, porosity as well as morphology were influenced by various parameters such as solution concentration, applied voltage, tip-to-collector distance and flow rate. In the previous work[1], we studied two parameters of uncured electrospun NR/ABS on electrospinning such as solution concentration and the tip to collector distance. In term of solution concentration, we found that the fiber diameter was directly proportional to the solution concentration. And for the effect of tip-to collector distance, the diameter of fiber tended to decrease with increasing the tip-to-collector distance due to allocated time for solvent to be evaporated and stretchability upon the arrival to the collector.

In this present work, we would study some other parameters such as applied voltage and flow rate which affect on electrospinning process and the morphology of electrospun NR/ABS after cured.

EXPERIMENTAL PROCEDURE

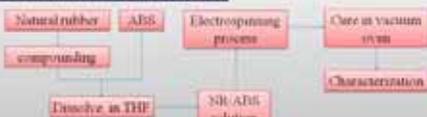


Figure 1. Flow chart of the experimental

Table 1. Compounding Formulation

Materials	phr*
Natural rubber (STR-5L)	100.0
ZnO	5.0
Stearic acid	2.0
Wingstay L	1.0
MDFTS	1.0
TMFD	0.1
Sulfur	2.75

*phr = part per hundred Rubber

RESULTS AND DISCUSSION

Table 2. Search Time (ts) and Cure Time (tc90) of NR Compounds at Different Temperatures

temperature (°C)	ts (m.s)	tc90 (m.s)
180	1.00	1.35
190	0.31	1.12
200	0.24	0.56

ACKNOWLEDGMENT

The authors gratefully acknowledge the financial support # F-31-102-16-01 of NSTDA (National Science and Technology Development Agency, TH). The authors also would like to thank Center of Excellence for Petroleum, Petrochemical, and Advanced Materials, Chulalongkorn University for financial support.

REFERENCE

- [1] Sithornkul S. and Threepopnatkul P. (2019) Morphology of Electrospun Natural Rubber with Acrylonitrile-Butadiene-Styrene. *Advanced Materials Research* 79-82 1583-6.

Effect of ABS Contents on Morphology of Electrospun NR/ABS after Cured.

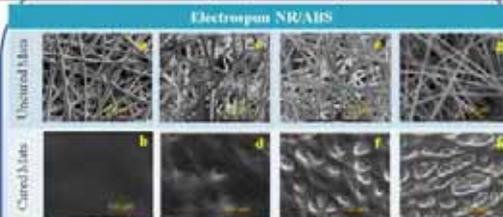


Figure 2. SEM micrographs of uncured electrospun NR/ABS (a) 20 (c) 30 (e) 40 and (g) 50% by wt of ABS content and cured electrospun NR/ABS (b) 20 (d) 30 (f) 40 and (h) 50% by wt of ABS. Flow rate and voltage are 10 ml/h and 15 kV, respectively.

Effect of Applied Voltages on Uncured Electrospun NR/ABS



Figure 3. SEM micrographs of uncured electrospun NR/ABS (50:50) with different applied voltage of (a) and (b) 14kV (c) and (d) 15kV (e) and (f) 16kV. Flow rate is 30 ml/h.

Table 3. Fiber Diameter of Uncured Electrospun NR/ABS (50:50) at Different Flow Rate of 10 ml/h, 20 ml/h and 30 ml/h. Applied Voltage is 15 kV.

Flow rate (ml/h)	average of Fiber diameter (µm)
10	15.42 ± 2.65
20	17.85 ± 4.25
30	19.62 ± 6.21

Table 4. Fiber Diameter of Uncured Electrospun NR/ABS (50:50) at Different Applied Voltage of 14-16 kV. Flow Rate is 30 ml/h.

Voltage (kV)	average of Fiber diameter (µm)
14	20.85 ± 10.96
15	19.63 ± 6.21
16	32.58 ± 18.79

CONCLUSIONS

The electrospun NR/ABS were produced by electrospinning. Experimental results demonstrated that morphology of uncured electrospun NR/ABS was changed after curing. It was found that cured electrospun NR/ABS at the ratio of 50:50 could produce the best electrospun fiber mat with high porosity. The factors affecting the properties of spun fiber can be as follow.

- The high voltage used to apply in the electrospinning process would introduce the thicker ribbon fiber shape.
- High flow rate applied to polymer solution would lead to larger diameter of the electrospun fiber.

Ultrafine Electrospun Natural Rubber with Acrylonitrile-Butadiene-Styrene Blended Fibers

S. Sithornkul^{1,2}, P. Threepopnatkul^{1,2*}, C. Kulsetthanchalee³ and C. Thongpin¹

¹Department of Materials Science and Engineering, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Silpakorn University, Nakhon Pathom 73000 Thailand

²Center of Excellence for Petroleum, Petrochemicals, and Advanced Materials, Chulalongkorn University, Bangkok 10330, Thailand

³ Faculty of Science and Technology, Suan Dusit Rajabhat University, Bangkok 10300, Thailand.

* corresponding author, Tel: +66 3421 9363, E-mail: poonsubt@yahoo.com

Abstract— In the present contribution, successful preparation of ultrafine fibers of natural rubber (NR) with acrylonitrile-butadiene-styrene (ABS) blend via electrospinning process was reported. The natural rubber was compounded with other additives and sulfur for vulcanization. The NR/ABS was blended by dissolution with tetrahydrofuran (THF). The total concentration of the solution was 15 wt%. The composition weight ratios between the NR and ABS were 80/20, 70/30, 60/40, and 50/50. Scanning electron microscope (SEM) was employed to investigate the morphology of the electrospun NR/ABS membrane after cured. The effects of electrospun process parameters on the morphology such as voltage (14, 15 and 16 kV) and flow rate (10, 20 and 30 ml/h) were studied. The average size of the electrospun fibers were also studied and found that the shape of the electrospun fibers showed a closed relation to the voltage. Whereas increasing the flow rate would enlarge the diameter of electrospun NR/ABS.

Keywords— ABS, Electrospinning parameter, Natural rubber, Nonwoven Mats

1. INTRODUCTION

In these recent years, many techniques to produce nonwoven mat have been in great interest such as drawing, template synthesis, self assembly and electrospinning technique. However, the electrospinning can convert the polymer to nonwoven mat using polymer solution or polymer melt. By applying voltage to polymer solution and then it would charge the polymer into Taylor cone and traveling to collector. There are a number of advantages of as such nonwoven fibers such as high surface area to volume ratio, high aspect ratio and high porosity with minute pore size. Undoubtedly, it would be suitable to use in application of biomaterial, ultrafiltration, protective clothing, support catalyst and also reinforcement in composite materials.

Natural rubber (*Hevea brasiliensis*) is from para-tree and can be found in many parts of Thailand. It provides

good mechanical properties, especially, tensile strength. When electrospun nonwoven mat was made from natural rubber, it showed the merged fiber because the electrospun natural rubber could fuse together because of its rubbery like condition at room temperature. Many researchers have found and attempted to solve these related problems in a variety of polymers, for example, using UV as crosslinking agent for Polybutadiene nonwoven mats [1], filling with carbon black as the filler in Polybutyl rubber nonwoven mats[2], employing syndiotactic Polybutadiene[3] as in the thermoplastic elastomeric electrospun fibers.

However, no research on electrospun fibers from polymer blend with NR had been found. And this would be a good chance to extensively investigate the fused problems of the nonwoven electrospun fiber using polymer blend with NR along with some other characteristics of the electrospun fibers. In this study, natural rubber was blended with acrylonitrile-butadiene-styrene (ABS). Typically, the proportion of each component for ABS can be varied to improve its properties, for example, impact strength, toughness, chemical resistance and heat resistance in order to meet each specific application.

In electrospinning technique, the characteristics such as fiber diameter, porosity as well as morphology were influenced by various parameters such as solution concentration, applied voltage, tip-to-collector distance and flow rate. In the previous work[4], we studied two parameters of uncured electrospun NR/ABS on electrospinning such as solution concentration and the tip-to-collector distance. In term of solution concentration, we found that the fiber diameter was directly proportional

S. Sithornkul is with the Department of Materials Science and Engineering, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Silpakorn University, Nakhon Pathom 73000, Thailand. E-mail: oak47@hotmail.com

P. Threepopnatkul is with the Department of Materials Science and Engineering, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Silpakorn University, Nakhon Pathom 73000, Thailand. E-mail: poonsubt@yahoo.com

C. Kulsetthanchalee is with the School of Event and Exhibition Design, Faculty of Science and Technology, Suan Dusit Rajabhat University, Bangkok 10300, Thailand. E-mail: chanink@gmail.com

C. Thongpin is with the Department of Materials Science and Engineering, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Silpakorn University, Nakhon Pathom 73000, Thailand. E-mail: chanchai@su.ac.th

to the solution concentration. And for the effect of tip-to-collector distance, the diameter of fiber tended to decrease with increasing the tip-to-collector distance due to allocated time for solvent to be evaporated and stretchability upon the arrival to the collector.

In this present work, we would study some other parameters such as applied voltage and flow rate which affect on electrospinning process and the morphology of electrospun NR/ABS after cured.

2. EXPERIMENTAL PROCEDURE

2.1 Materials

Natural rubber (STR-5L) used in this research was purchased from Sakdaroongreungkij Company Limited. The additives of rubber compounds such as ZnO, stearic acid, wingstay-L, dibenzothiazole disulfide (MBTS), tetramethylthiuram disulfide (TMTD) and sulfur were obtained from Kij Paiboon Chemical Limited Partnership. Commercial grade tetrahydrofuran (THF) was purchased from RCL Labscan. ABS (SP200) was obtained by IRPC Public Company Limited.

2.2 Compounding and Solution Preparation

The mixing of the compound formulation as given in Table 1 was carried out in torque rheometer (Brabender). Natural rubber was added and mixed at 60 rpm for 15 minutes. All other ingredients were added and mixed for another 12 minutes. Sulfur was added last and the rubber stock mixed for 5 more minutes.

Table 1. Compounding Formulation

Materials	phr ^a
Natural rubber (STR-5L)	100.0
ZnO	5.0
Steric acid	2.0
Wingstay L	1.0
MBTS	1.0
TMTD	0.1
Sulfur	2.75

^a phr = part per hundred rubber

The rubber compound was blended with ABS by dissolving in THF. The ratios of NR/ABS were made by varying the ABS content of 20, 30, 40 and 50 wt%. The concentration of NR/ABS solution in tetrahydrofuran used in this experiment was 15 w/w%.

2.3 Electrospinning Process

A schematic of the electrospinning system used in this research is shown in Fig. 1. The electrospinning solution was placed in 20-ml syringe with a metal needle. A high DC power supply (Gamma High Voltage Research Inc.) was used to provide a high voltage of 14, 15 and 16 kV to charge the polymer solution contained in the syringe. A syringe pump (KD scientific) was used to control polymer solution flow rate of 10, 20 and 30 ml/hr. A rotating circular aluminum plate was used as collector. The tip-to-collector distance was 20 cm. The electrospun NR/ABS were dried at room temperature for 1 hr to remove any residual solvent and cure in vacuum oven for 2 min at 190 °C.

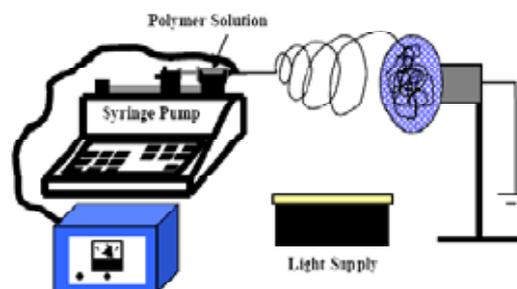


Figure 1. Diagram of the electrospinning process

2.4 Characterization

The uncured electrospun NR/ABS and cured electrospun NR/ABS were characterized by scanning electron microscope (SEM, eamscan mx200). All specimens were coated with gold prior to SEM. The fiber diameter and average fiber distribution were measured on the SEM images. The cure characteristic of rubber compound was observed by Moving Die Rheometer (MDR, Model GT-M2000, GOTECH Testing Machine, Ind, Taiwan)

Table 2. Average Fiber Diameter of Uncured Electrospun NR/ABS at All Different Ratios of ABS. Applied Voltage is 15 wt %.

Content of ABS	average of Fiber diameter (μm)
20	13.70 \pm 2.74
30	16.11 \pm 3.14
40	12.57 \pm 2.26
50	15.42 \pm 2.65

Table 3. Scorch Time (ts2) and Cure Time (tc90) of NR Compounds at Different Temperatures.

temperature ($^{\circ}\text{C}$)	ts2 (m:s)	tc90 (m:s)
180	1:00	1:35
190	0:31	1:12
200	0:24	0:56

3. RESULT AND DISCUSSION

3.1 Effect of ABS Content on Morphology of Electrospun NR/ABS after Cured.

Our previous reports on uncured electrospinning NR/ABS showed that the polymer could be spun from NR/ABS and possess uniform fiber and porosity at all different ratios of ABS [4]. This work will focus the effect of ABS content on morphology of electrospun NR/ABS after cured. Fig. 2 shows SEM images of uncured and cured electrospun NR/ABS for four different ratios of ABS (20, 30, 40 and 50 wt %). At the ABS content of 20 wt% of uncured electrospun NR/ABS, it shows the diameter of uncured electrospun fiber was slightly increased from 13.70 \pm 2.74 μm to 15.42 \pm 2.65 μm when the content of ABS was raised from 20 wt% to 50 wt% as shown in Table 2. And the porosity of uncured electrospun NR/ABS at the low ABS content of 20 wt%

possessed the largest pore size compared with other ABS content in the range of 20 wt% to 50 wt%. As seen in Fig 2, the fiber of uncured electrospun NR/ABS has two shape patterns such as cylindrical fiber shape (Fig. 2a, 2c) and ribbon fiber shape (Fig. 2e, 2g). The ribbon fiber shape of uncured electrospun fiber can be explained by the evaporation of the solvent during the fibers travelling to the collector in the electrospinning process [5, 6]. This could be explained that when the solvent rapidly evaporated, the solid skins were formed, which caused the solvent entrapment inside the fiber. The slow evaporation would lead the structure to collapse and formed the ribbon.

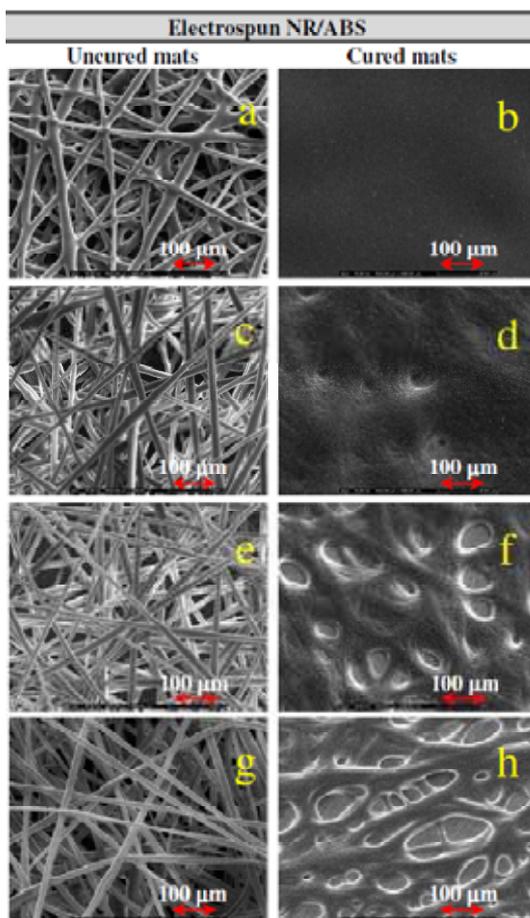


Figure 2. SEM micrographs of uncured electrospun NR/ABS (a) 20 (c) 30 (e) 40 and (g) 50% by wt of ABS content and cured electrospun NR/ABS (b) 20 (d) 30 (f) 40 and (h) 50 % by wt of ABS. Flow rate and voltage are 10 ml/h and 15kV, respectively.

Scorch time and cure time for NR compounds at different temperatures are shown in Table 3. This could help select the optimum temperature for curing the uncure electrospun NR/ABS. It was found that cure time would decrease with the temperature was raised from 180 °C to 200 °C. The selected temperature for curing electrospun NR/ABS was at 190 °C. Because heat transfer via air medium inside vacuum oven when placing the uncure electrospun NR/ABS samples into it would have slower

heating effect than the heat transfer via heat conduction in typical polymer processes. Also when considering the typical curing curve of the rubber depicting the modulus versus curing time, it could be predicted that the overcure might take place if it was at 200 °C or higher temperature.

Fig. 2b, 2d, 2f and 2h show the morphology of cured electrospun NR/ABS. It showed that the appearance of smooth fiber in uncured electrospun NR/ABS (Fig. 2a, 2c, 2e and 2g) had changed to the merge fiber condition after being cured. The result in Fig. 2b, 2d, 2f and 2h shows that the porosity of cured electrospun NR/ABS was increased with the ABS content scaled up from 20 wt% to 50 wt%. Fig. 2h shows the cured electrospun NR/ABS (50/50 wt%), it possesses the largest pore size and maintains the porosity compared with other ABS contents on cured electrospun fiber. The cured electrospun NR/ABS fibers were fused or bonded together at their contacted sites. The evidence was clear when the cured electrospun NR/ABS lost their initial cylindrical fiber shape and ribbon fiber shape used to be seen in uncured electrospun NR/ABS (Fig 2a, 2c, 2e and 2g). Choi SS, et al.[1] had studied polybutadiene fiber crosslinked by UV Irradiation. The problem was the swollen fiber and fused together due to its low glass transition temperature (T_g). They had attempted with success to maintain circular cross section of fiber via in situ UV curing at room temperature.

Table 4. Fiber Diameter of Uncured Electrospun NR/ABS (50/50 wt%) at Different Flow Rate of 10 ml/h, 20 ml/h and 30 ml/h. Applied Voltage is 15 kV.

Flow rate (ml/h)	average of Fiber diameter (μm)
10	15.42 ± 2.65
20	17.85 ± 4.25
30	19.63 ± 6.51

3.2 Effect of Flow Rates on Uncured Electrospun NR/ABS

In general, the productivity can be increased by increasing the solution concentration or the flow rate. Table 4 shows the flow rate dependence on the uncured electrospun NR/ABS. At a lower flow rate of 10 ml/h, it shows a reduction in the fiber diameter of uncured electrospun NR/ABS to be at 15.42 ± 2.65 from at 19.63 ± 6.51 with the flow rate at 30ml/h. It would take a longer period of time for the fiber jet stream to dry due to the larger amount of solution drawn from the needle tip. And the solvent might not have enough time to evaporate from the deposited fibers at a given flight time. Additionally, the residual solvent might have caused the fibers to fuse together when forming webs at the contact points. Therefore, a lower flow rate is more desirable because of the ample evaporation time for the solvent.

3.3 Effect of Applied Voltages on Uncured Electrospun NR/ABS

The applied voltage is one of the important parameters for charging the jet of solution, electrospinning to form Taylor cone and traveling to the collector. From the result in Table 5, it shows the average fiber diameter of uncured electrospun NR/ABS (50/50

wt%) increased from $20.83 \pm 10.96 \mu\text{m}$ to $32.58 \pm 18.79 \mu\text{m}$ when the applied voltage was increased from 14 kV to 16 kV.

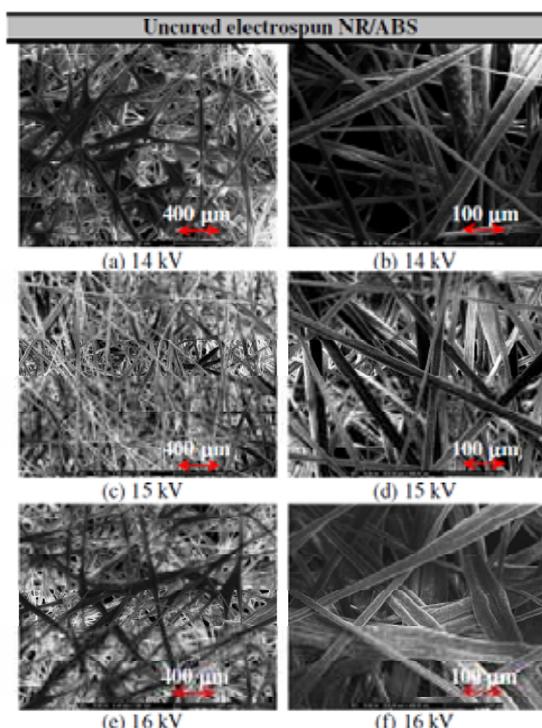


Figure 3. SEM micrographs of uncured electrospun NR/ABS (50/50 wt%) with different applied voltage of (a) and (b) 14kV (c) and (d) 15kV (e) and (f) 16kV. Flow rate is 30 ml/h.

The positive charges at the tip of the needle can be formed and accumulated with the applied voltage to the polymer solution. The higher the voltage applied, the more the positive charges can be formed. Once the positive charges formed excessively, the polymer solution would be driven to the grounded collector with Taylor cone shape at the needle tip. The higher voltage applied, the thinner the fiber obtained.

Table 5. Fiber Diameter of Uncured Electrospun NR/ABS (50/50 wt %) at Different Applied Voltage of 14-16 kV. Flow Rate is 30 ml/h.

Voltage (kV)	average of Fiber diameter (μm)
14	20.83 ± 10.96
15	19.63 ± 6.51
16	32.58 ± 18.79

However, It was found from the result, in this research, indicated in Table 5 that the effect of applied voltage on diameter was in opposite way with Bechley V, et al.[7] and Gu SY, et al.[8]. It was understood that this was responsible by the ribbon shape of obtained

electrospun fiber as illustrated in Fig. 3e and 3f. The ribbon shaped fiber would be caused by solvent evaporation within the electrospun fibers.

4. CONCLUSION

The electrospun NR/ABS were produced by electrospinning. Experimental results demonstrated that morphology of uncured electrospun NR/ABS was changed after curing. It was found that cured electrospun NR/ABS at the ratio of 50/50 could produce the best electrospun fiber mat with high porosity. The factors affecting the properties of spun fiber can be as follow:

- The high voltage used to apply in the electrospinning process would introduce the thicker ribbon fiber shape.
- High flow rate applied to polymer solution would lead to larger diameter of the electrospun fiber.

ACKNOWLEDGMENT

The authors gratefully acknowledge the financial support # F-31-102-16-01 of NSTDA (National Science and Technology Development Agency, TH). The authors also would like to thank Center of Excellence for Petroleum, Petrochemical, and Advanced Materials, Chulalongkorn University for financial support.

REFERENCES

- [1] Choi SS., Hong JP., Seo YS., Chung SM., Nah C. (2006). Fabrication and Characterization of Electrospun Polybutadiene Fibers Crosslinked by UV Irradiation. *Journal of Applied Polymer Science* 101:2333-7.
- [2] Threepopnatkul P., Murphy D., Zukas W., and Mead J. (2007). Fiber Structure and Mechanical Properties of Electrospun Butyl Rubber with Different Type of Carbon Black. *Rubber Chemistry and Technology Journal* 80(2):231-50.
- [3] Hao X, Zhang X. (2007). Syndiotactic 1,2-polybutadiene fibers produced by electrospinning. *Materials Letters* 61(6):1319-22.
- [4] Sithornkul S. and Threepopnatkul P. (2009). Morphology of Electrospun Natural Rubber with Acrylonitrile-Butadiene-Styrene. *Advanced Materials Research* 79-82:1583-6.
- [5] Behler K., Havel M., Gogotsi Y. (2007). New solvent for polyamides and its application to the electrospinning of polyamides 11 and 12. *Polymer* 48:6617-21.
- [6] Rockwood DN., Chase DB., Jr. REA., Rabolt JF. (2008). Characterization of electrospun poly(N-isopropyl acrylamide) fibers. *Polymer* 49:4025-32.
- [7] Bechley V. and Wen X. (2009). Effect of electrospinning parameters on the nanofiber diameter and length. *Materials Science and Engineering C* 29:663-8.
- [8] Gu SY., Wang ZM., Ren J., Zhang CY. (2009). Electrospinning of gelatin and gelatin/poly(L-lactide) blend and its characteristics for wound dressing. *Materials Science and Engineering C* 29:1822-8.

ผลงานการนำเสนอรูปแบบ Oral Presentation ในการประชุมวิชาการ International Conference on Functionalized and Sensing Materials ณ ศูนย์วิจัยจุฬาภรณ์ จังหวัดกรุงเทพมหานคร ประเทศไทย ในระหว่างวันที่ 7-9 ธันวาคม พ.ศ. 2552

Control of Mechanical Properties and Permeability of Electrospun Natural Rubber with Different Composite Systems

S. Sithornkul^{1,2} P. Threepopnatkul^{1,2*}

¹Department of Materials Science and Engineering, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Silpakorn University, Nahkon Pathom, 73000 Thailand

²Center of Excellence for Petroleum, Petrochemicals, and Advance Materials, Chulalongkorn University, Bangkok, 10330, Thailand

*E-mail: poonsubt@yahoo.com, Tel: +66 3 4219363

Keywords: Electrospinning, Natural rubber, Mechanical property, Permeability

Abstract. The electrospun natural rubber (NR) with two different components namely: acrylonitrile butadiene styrene (ABS) and carbon black (CB) have been extensively studied. The main objective was to investigate the mechanical properties and permeability dependency of NR/ABS and NR/CB as well as its contents. NR/CB was compounded by torque rheometer (Brabender) while ABS was dissolved with NR using tetrahydrofuran (THF) as its solvent. Sulfur was used as the vulcanizing agent in both systems. Mechanical properties were evaluated by universal testing machine and permeability was observed by water vapour permeability. The optimum conditions for electrospun NR/ABS and NR/CB non-woven mats were as follows: flow rate 30 ml/h, voltage 15 kV, collector distance 20 cm and collected on rotating circular plate at 1000 rpm. The results of mechanical properties showed that for electrospun NR/CB fiber membranes, the higher the CB loading it had, the lower its tensile strength and elongation it would be. Whilst electrospun NR/ABS fiber mats, the elongation behavior was affected by the ABS loading but not the tensile strength. For permeability, NR/CB was shown to possess relatively higher permeability than the NR/ABS non-woven mats.

Introduction

Natural rubber (*Hevea brasiliensis*) provides a wide range of possibilities in many applications due to specific viscoelastic properties and crosslinking capabilities. The vulcanizing agents used are, for example, sulfur and peroxide. One of its good properties is tensile strength and can be modified by fillers, additives or polymers such as fly ash, organo clay[1], carbon black[2], zeolite, fume silica, polyethylene, polypropylene[3], styrene butadiene rubber[4] to improve properties, for instances, toughness, impact properties, heat resistance and chemical resistance.

ABS is a copolymer derived from acrylonitrile, butadiene and styrene. The advantages of ABS combine the strength and rigidity of acrylonitrile and styrene monomers with the toughness of the butadiene rubber. The proportion of each component for ABS can be varied to improve its property for each specific application. The most important properties of ABS are strength and toughness. Carbon black is known as reinforcing filler for rubber industry to improve its properties. Its properties can be controlled by vary carbon black loading and particle size.

The fabrications of non-woven mats can be made from several processes such as melt spraying, sol-gel and electrospinning. However, the electrospinning can produce fiber diameter into submicron with high surface area to volume ratio and porosity. A typical electrospinning process, fibers are drawn from a solution or melt through a blunt needle by electrostatic forces. Typically, the splints used in medicinal areas are relatively stiff with low breathability. Our study will purposely make these splints to feasibly become more flexible and breathable to some extents. And it would be less possible if the natural rubber. ABS and carbon black are not the materials used for our study. Therefore, this study will focus onto mechanical and water vapor permeability properties by a comparison investigation of the two composition systems i.e., Natural Rubber with ABS and Natural Rubber with carbon black for electrospun nonwoven membranes.

Experimental

Materials

Natural rubber (STR-5L) used in this research was purchased from Sakdaroongreungkij Co.Ltd. The additives of rubber compounds such as ZnO, stearic acid, wingstay-L, dibenzothiazoledisulfide (MBTS), tetramethylthiuram disulfide (TMTD) and sulfur were obtained from Kij Paiboon Chemical Limited Partnership. Commercial grade tetrahydrofuran (THF) was purchased from RCL Labscan. ABS (SP200) was obtained by IRPC PLC. Carbon black (N550) was obtained from Thai Carbon Black PLC.

Compounding and solution preparation

The mixing of the compound formulation as given in Table 1 was carried out in torque rheometer (Brabender). Natural rubber was added and mixed at 60 rpm for 15 minutes and then carbon black was added for 5 minutes. All other ingredients were added and mixed for another 12 minutes. Sulfur was added last and the rubber stock mixed for 5 more minutes.

The rubber compound was blended with ABS by dissolving in THF. The ratios of NR/ABS were made by varying the ABS content of 20, 30, 40 and 50 wt%. The concentration of NR/ABS solution in tetrahydrofuran used in this experiment was 15 w/w%.

Electrospinning process

The electrospinning solution was placed in 20-ml syringe with a metal needle. A high DC power supply (Gamma High Voltage Research Inc.) was used to provide a high voltage of 15 kV to charge the polymer solution contained in the syringe. A syringe pump (KD Scientific) was used to control polymer solution flow rate of 30 ml/hr. A rotating circular aluminum plate was used as collector. The tip-to-collector distance was 20 cm. The electrospun NR/ABS and NR/CB were dried at room temperature for 1 hr to remove any residual solvent and cure in oven at 2 min at 190 °C.

Table 1: Compounding Formulation

Materials	phr*
Natural rubber (STR-5L)	100.0
ZnO	5.0
Steric acid	2.0
Wingstay L	1.0
MBTS	1.0
TMTD	0.1
Sulfur	2.75

*phr = part per hundred rubber

2.4 Testing

The mechanical behavior of the cured electrospun NR fiber mats was examined with universal testing machine (Instron) with a crosshead speed of 10 mm/min and load cell 500 N. All specimens were 10 mm. x 50 mm. The permeability was measured by water vapor permeability. Density was investigated according to ASTM D792.

Results and Discussion

Effect of Composition on Mechanical Properties of Electrospun NR/ABS and NR/CB

Stress-strain behavior of electrospun NR/ABS and NR/CB fiber mats is shown in Figure 1. The resulting tensile strength, ultimate elongation and modulus from each composite are normalized by density as shown in Figure 2 and 3.

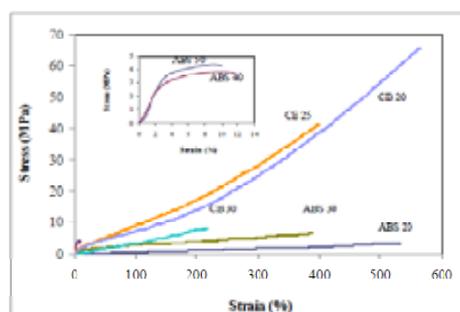


Fig 1: Stress-strain curves of electrospun NR/ABS and NR/CB fiber mats. The inset shows stress-strain curves of electrospun NR/ABS 40 wt% and 50 wt%.

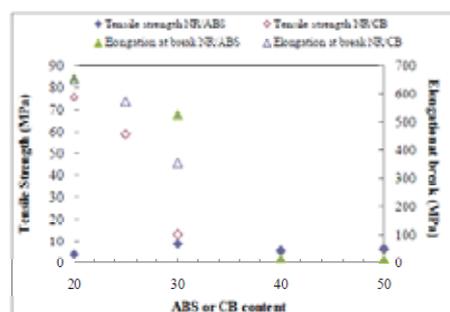


Fig 2: Effect of ABS and CB content on tensile strength and ultimate elongation of electrospun NR/ABS and NR/CB fiber mats.

As demonstrated in Figure 1, the mechanical behavior with NR composition can be categorized into two systems. Firstly, electrospun fibers of NR/ABS blends show a relatively low elongation behavior with the increase of ABS. In other words, the lower of elastic region would affect in low elongation at break. However, ABS content has little effect on tensile strength of electrospun NR/ABS content.

Typically, carbon black is the primary reinforcing filler for rubber industry. For this study, the electrospun fibers of the NR/CB system showed somewhat significant finding as shown also in Figure 2. It demonstrates an increment tendency of the tensile strength and elongation behavior once the CB is added into the system at a lower content. The presence of more CB content would induce a relatively higher conductivity to the electrospun fibers, then would reduce the fibrous diameter (from $6.56 \pm 1.61 \mu\text{m}$ at CB 20 wt% to $4.26 \pm 1.58 \mu\text{m}$ at CB 30 wt%) and thus would enhance the amount of porosity. This could be seen from Table 2 that electrospun NR/CB fiber mats at a lesser density was appeared at a higher amount of CB in the electrospun NR fiber membranes. Therefore, one could witness a higher tensile strength and elongation at break of electrospun NR/CB fiber mats at a lower presence of the CB in the system. In other words, the amount of CB in electrospun NR/CB fiber mats would significantly determine its tensile strength and elongation behavior.

Effect of ABS content on Young's modulus of electrospun NR/ABS fiber mats is shown as in Figure 3. It is found that modulus increased with increasing ABS content. This can be explained that the load transfer to stiffer ABS component fiber from low modulus elastomeric NR fibers.

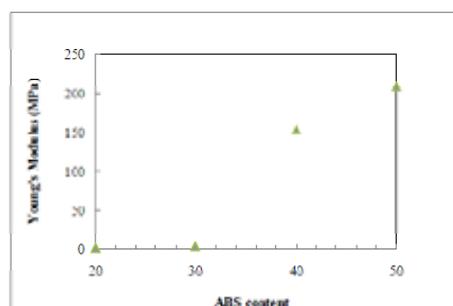


Fig 3: Effect of ABS content on Young's modulus of electrospun NR/ABS fiber mats.

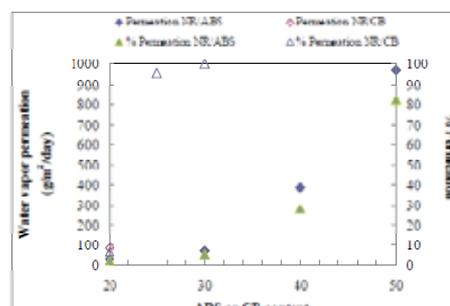


Fig 4: Effect of ABS and CB content on water vapor permeation of electrospun NR fiber membranes.

Effect of Composition on Permeability of Electrospun NR/ABS and NR/CB

Permeability of moisture is important to keep comfortable in clothing applications. Figure 4 compares the water vapor permeation of electrospun NR/ABS and NR/CB membranes as the function composition loading. The permeability of water vapor through NR/ABS fibrous mats is less than that of NR/CB fibrous mats when considering at the same amount of the filled component. CB possesses the porosity which greatly impact on not only the density of the fiber mats but also affect on the amount of the water vapor travelling through the system.

The porosity depends on fiber diameter and pore size [5]. As our previous morphology study [6], fiber diameter of electrospun NR/ABS was reduced from $20.90 \pm 7.71 \mu\text{m}$ to $14.40 \pm 5.13 \mu\text{m}$ with decreasing ABS content. At the room temperature, the molecular chains of NR have high mobility, thus enabling the chains to disentangle or slip past each other easily. Addition of ABS resulted in the restriction of the mentioned rubbery chain mobility, and thus it would keep those pores of electrospun NR/ABS fibers to remain active which enabling the water vapor to permeate.

Table 2: Density of Electrospun NR/ABS and NR/CB membranes

ABS or CB content (%wt)	20	25	30	40	50
Density of NR/ABS (g/cc)	0.81	-	0.74	0.69	0.67
Density of NR/CB (g/cc)	0.87	0.70	0.61	-	-

Conclusions

In this research, a comparison study of the mechanical and the permeability property of electrospun NR/ABS and NR/CB membrane was carried out. It was found that higher content of both ABS and CB could intensify the permeability. Mechanical properties of NR/ABS and NR/CB were investigated and found that for electrospun NR/CB fiber membranes, the higher the CB loading it had, the lower its tensile strength and elongation it would be. Whilst electrospun NR/ABS fiber mats, the elongation behavior would be the only one which was affected by the ABS loading.

Acknowledgements

The authors gratefully acknowledge the financial support # F-31-102-16-01 of NSTDA (National Science and Technology Development Agency) as well as the Center of Excellence for Petroleum, Petrochemical, and Advance Materials, Chulalongkorn University for financial support. The authors wish to thank Dr. Chanin Kulsethanchalee (Suan Dusit Rajabhat University) for his comments and suggestions during preparation of this article.

References

1. J. Carretero-González, J.I. Valentin, M. Arroyo, K. Saalwächter, M.A. Lopez-Manchado, *European Polymer Journal*, (2008) 44(11): p. 3493–3500.
2. J.H. Kim, and H.Y. Jeong, *International Journal of Fatigue*, 2005. 27(3): p. 263-272.
3. H. Ismail, and Suryadiansyah, *Polymer Testing*, (2001) 21: p. 389-395.
4. S. Goyanes, C.C. Lopez, G.H. Rubiolo, F. Quasso, and A.J. Marzocca, *European Polymer Journal*, (2008) 44(5): p. 1525-1534.
5. Y. J. Ryu, H.Y. Kim, K.H. Lee, H.C. Park and D.R. Lee, *European Polymer Journal*, (2003) 39: p. 1883-1889.
6. S. Sithornkul, and P. Threepopnatkul, *Advanced Material Research*, (2009) 79-82: p. 1583-1586.

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล นายสรารุช ศิธรกุล
ที่อยู่ 161/23 ถ.บางกรวย ต.บางกรวย อ.บางกรวย จ.นนทบุรี 11130

ประวัติการศึกษา

พ.ศ. 2549 สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมพลาสติก
คณะวิศวกรรมวัสดุและโลหการ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
พ.ศ. 2550 ศึกษาต่อระดับปริญญาโท
สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ผลงานวิจัย

- (1) S. Sithornkul and P. Threepopnatkul, “Morphology of Electrospun Natural Rubber with Acrylonitrile-Butadiene-Styrene”, Paper Presented at The 2nd International Conference on Multi-functional Materials and Structures, Qingdao, China 9-12 October 2009.
- (2) S. Sithornkul, P. Threepopnatkul, C. Kulsetthanchalee and C. Thongpin, “Ultrafine Electrospun Natural Rubber with Acrylonitrile-Butadiene-Styrene Blended Fibers”, Paper Presented at 7th Eco-Energy and Materials Science and Engineering Symposium, Chiang Mai, Thailand, 17-20 November 2009.
- (3) S. Sithornkul and P. Threepopnatkul, “Control of Mechanical Properties and Permeability of Electrospun Natural Rubber with Different Composite Systems”, Paper Presented at International Conference on Functionalized and Sensing Materials 2009, Chulabhorn Research Institute, Bangkok, Thailand, 7-9 December 2009.