

การป้อนเส้นใยโคพอลิเมอร์แบบสามช่วงประเภทสไตรีน-ไอโซพรีน-สไตรีน ด้วยไฟฟ้าสถิตและการ
ประยุกต์ใช้เส้นใยในวัสดุเชิงประกอบที่มีพอลิสไตรีนเป็นวัสดุเนื้อหลัก

ปริญญาานิพนธ์

ของ

ศุภวัณณ์ โตเกียรติวงศ์ชัย

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์

ตุลาคม 2553

การป้อนเส้นใยโคพอลิเมอร์แบบสามช่วงประเภทสไตรีน-ไอโซพรีน-สไตรีน ด้วยไฟฟ้าสถิตและการ
ประยุกต์ใช้เส้นใยในวัสดุเชิงประกอบที่มีพอลิสไตรีนเป็นวัสดุเนื้อหลัก

ปริญญาานิพนธ์

ของ

ศุภวัชย์ โตเกียรติวงศ์ชัย

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์

ตุลาคม 2553

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

การป้อนเส้นใยโคพอลิเมอร์แบบสามช่วงประเภทสไตรีน-ไอโซพรีน-สไตรีน ด้วยไฟฟ้าสถิตและการ
ประยุกต์ใช้เส้นใยในวัสดุเชิงประกอบที่มีพอลิสไตรีนเป็นวัสดุเนื้อหลัก

บทคัดย่อ

ของ

ศุภวัณณ์ โตเกียรติวงศ์ชัย

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์

ตุลาคม 2553

ศุภวัณษ์ โตเกียรติวงศ์ชัย. (2553). การปั่นเส้นใยโคพอลิเมอร์แบบสามช่วงประเภทสไตรีน-ไอโซพรีน-สไตรีนด้วยไฟฟ้าสถิตและการประยุกต์ใช้เส้นใยในวัสดุเชิงประกอบที่มีพอลิสไตรีนเป็นวัสดุเนื้อหลัก. ปริญญาานิพนธ์ วท.ม. (ฟิสิกส์). กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. คณะกรรมการควบคุม: อาจารย์ ดร.ปณิธาน วนากมล, อาจารย์ ดร. อาริยา เขี่ยมบุญ.

ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเส้นใยโคพอลิเมอร์แบบสามช่วงประเภทสไตรีน-ไอโซพรีน-สไตรีนที่ได้จากกระบวนการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตและประยุกต์ใช้เส้นใยในวัสดุเชิงประกอบที่มีพอลิสไตรีนเป็นวัสดุเนื้อหลัก สารละลายโคพอลิเมอร์แบบสามช่วงถูกเตรียมในตัวทำละลายผสมระหว่างเตตระไฮโดรฟอรันและไดเมทิลฟอร์มาไมด์ในอัตราส่วน 75:25 ที่ความเข้มข้น 10 12 14 16 18 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ในการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตคือ 10 12 14 16 18 และ 20 กิโลโวลต์ จากการวิเคราะห์ลักษณะของเส้นใยด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าขนาดของเส้นใยโคพอลิเมอร์แบบสามช่วงมีขนาดตั้งแต่ 0.6 ถึง 9 ไมโครเมตร โดยลักษณะของเส้นใยที่ได้มีลักษณะเป็นลูกบิดและมีการเปลี่ยนแปลงจนกระทั่งถึงฐานที่ได้มีลักษณะเป็นเส้นใยที่เรียบสม่ำเสมอและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยจะมีขนาดเล็กลงเมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้น ในประยุกต์ใช้เส้นใยในวัสดุเชิงประกอบที่มีพอลิสไตรีนเป็นวัสดุเนื้อหลัก ได้เลือกปั่นเส้นใยโคพอลิเมอร์แบบสามช่วงที่มีความเข้มข้น 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ลงบนแผ่นฟิล์มพอลิสไตรีนที่ใช้เป็นตัวรองรับเส้นใย แล้วนำแผ่นฟิล์มนี้มาตัด ซ้อนทับกัน และนำไปอบอ่อน (Anneal) ด้วยเครื่องอัดร้อน (Compression molding machine) จากนั้นทำการทดสอบสมบัติเชิงกลด้วยเครื่องทดสอบแรงดึงเพื่อเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลที่ได้กับแผ่นฟิล์มที่เป็นพอลิสไตรีนล้วนที่ไม่มีเส้นใยผสมอยู่ ผลการทดสอบพบว่าแผ่นฟิล์มพอลิสไตรีนที่ผลิตเป็นวัสดุเชิงประกอบมีความเหนียวและมีความสามารถของวัสดุที่จะดูดซับพลังงานไว้ได้โดยไม่เกิดการแตกหักมากกว่าแผ่นฟิล์มพอลิสไตรีนที่ไม่มีเส้นใยผสมอยู่

ELECTROSPINNING OF STYRENE-ISOPRENE-STYRENE TRIBLOCK COPOLYMERS AND
APPLICATION OF THE ELECTROSPUN FIBERS IN POLYSTYRENE-MATRIX

AN ABSTRACT

BY

SUPAWAN TOKEATTIWONGCHAI

Presented in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Master of Science Degree in Physics
at Srinakharinwirot University

October 2010

Supawan Tokeattiwongchai. (2010). *Electrospinning of Styrene-Isoprene-Styrene Triblock Copolymers and Application of The Electrospun Fibers in Polystyrene-Matrix Composite*. Master thesis, M.S. (Physics). Bangkok: Graduate School, Srinakharinwirot University. Advisor Committee: Dr. Panitan Wanakamol , Dr. Areeya Aeimbhu.

This research explored poly (styrene-isoprene-styrene) block copolymer fibers fabricated via the electrospinning process. We aimed to study the influences of solution concentration and electrical potential on the fiber diameter and morphology. The block copolymer solution was prepared in a mixed solvent of tetrahydrofuran and dimethylformamide with the mixing ratio of 75:25. The solution concentration varied from 10, 12, 14, 16, 18 to 20 wt% and the electrical potential applied in the electrospinning process ranged from 10, 12, 14, 16, 18 to 20 kV. The fiber analyses using a scanning electron microscope show that the fiber diameter varies from 0.6 to 9 microns. The morphology of fiber change from discrete droplets to a smooth fiber and fiber diameter decrease with increasing of solution concentration. In applying fibers in polystyrene-matrix composite, the fibers were spun from 20 wt% block copolymer solution on to polystyrene film, which was used as a collector. Then, the film was cut, superimposed and annealed with a compression molding machine. Mechanical properties tests were performed using a universal tensile testing machine in order to compare the composite and a neat polystyrene sample. The result show that the polystyrene-matrix composite has toughness and has better capability of absorbing energy before failure than the neat polystyrene film has.

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัย

จาก

คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

ปริญญานิพนธ์

เรื่อง

การปั่นเส้นใยโคพอลิเมอร์แบบสามช่วงประเภทสไตรีน-ไอโซพรีน-สไตรีน ด้วยไฟฟ้าสถิต
และการประยุกต์ใช้เส้นใยในวัสดุเชิงประกอบที่มีพอลิสไตรีนเป็นวัสดุเนื้อหลัก

ของ

ศุภวัชย์ โตเกียรติวงศ์ชัย

ได้รับอนุมัติจากบัณฑิตวิทยาลัยให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาฟิสิกส์

ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

..... คณะบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร. สมชาย สันติวัฒนกุล)

วันที่..... เดือน พ.ศ. 2553

คณะกรรมการควบคุมปริญญานิพนธ์

คณะกรรมการสอบปากเปล่า

..... ประธาน

..... ประธาน

(อาจารย์ ดร. ปณิธาน วนากมล)

(อาจารย์ ดร. อนุศิษฐ์ ทองนำ)

..... กรรมการ

..... กรรมการ

(อาจารย์ ดร. อารีญา เอี่ยมบุญ)

(อาจารย์ ดร. ปณิธาน วนากมล)

..... กรรมการ

(อาจารย์ ดร. อารีญา เอี่ยมบุญ)

..... กรรมการ

(ศาสตราจารย์ ดร. พิชญ์ ศุภผล)

ประกาศคุณูปการ

ปริญญาโทสำเร็จได้ด้วยดีเป็นเพราะผู้วิจัยได้รับความกรุณาอย่างยิ่งจาก อาจารย์ ดร. ปณิธาน วนากมล ประธานกรรมการควบคุมปริญญาโท อาจารย์ ดร. อาริยา เขี่ยมบุญ กรรมการควบคุมปริญญาโท ท่านทั้งสองได้เสียสละเวลาอันมีค่าเพื่อให้คำปรึกษาแนะนำในการ จัดทำวิทยานิพนธ์ทุกขั้นตอน อีกทั้งทำให้ผู้วิจัยได้รับประสบการณ์ในการทำงานวิจัยและรู้ถึงคุณค่าของ งานวิจัยมากขึ้น และท่านทั้งสองยังเป็นแบบฉบับของอาจารย์ที่ทุ่มเทให้กับศิษย์และงานด้านวิชาการ อย่างไม่เหน็ดเหนื่อย ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ สุจินดา จิตต์ใจฉ่ำ ที่ให้ความอนุเคราะห์เกี่ยวกับเครื่องมือที่ใช้ ในงานวิจัย รวมทั้งให้คำแนะนำและความช่วยเหลือในระหว่างทำงานวิจัย จนทำให้การทำงานวิจัย ลุล่วงได้ด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ ดร. อนุศิษฐ์ ทองนำ และ ศาสตราจารย์ ดร. พิชญ์ ศุภผล ที่ ให้ความอนุเคราะห์ในการเป็นคณะกรรมการสอบปากเปล่าปริญญาโท รวมทั้งให้คำแนะนำเพื่อ แก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ทำให้ปริญญาโทฉบับนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ภาควิชาฟิสิกส์ทุกท่านที่ให้ความรู้แก่ผู้วิจัยในการศึกษาตาม หลักสูตรฟิสิกส์ ซึ่งทำให้ผู้วิจัยรู้ว่าการศึกษาในระดับปริญญาโทของผู้วิจัยนั้นมีได้สิ้นสุดลงเพียงการ ทำปริญญาโทฉบับนี้ให้สำเร็จลงได้ หากผู้วิจัยได้ซึมซับเอากระบวนการเรียนรู้ที่ถูกจุดประกายขึ้น ในระยะเวลา 4 ปีที่ผ่านมา ให้กลายเป็นการเรียนรู้ที่ต้องสืบเนื่องต่อไปอย่างไม่สิ้นสุด และจะต้อง นำเอาความรู้นั้นไปยังประโยชน์ให้แก่ผู้อื่นต่อไปอีกด้วยจึงจะสมตามเจตนารมณ์ของฟิสิกส์อย่าง สมบูรณ์

ท้ายสุดผู้วิจัยขอขอบพระคุณ พ่อ แม่ น้องชาย และเพื่อนๆทุกคนที่ให้ทั้งกำลังกายและ กำลังใจที่ดีเยี่ยมตลอดระยะเวลาที่ศึกษาและทำงานวิจัย

ศุภวัตร ไตเกียรติวงศ์ชัย

สารบัญ

บทที่	หน้า
1 บทนำ	1
ภูมิหลัง.....	1
ความมุ่งหมายของงานวิจัย.....	3
ความสำคัญของงานวิจัย.....	3
ขอบเขตของงานวิจัย	4
2 เทคนิคและเอกสารที่เกี่ยวข้อง	5
เทคนิคการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต (Electrospinning)	5
พอลิเมอร์และโคพอลิเมอร์แบบช่วง (Polymers and Block Copolymers)	9
โคพอลิเมอร์แบบสามช่วงประเภทสไตรีน-ไอโซพรีน-สไตรีน (Styrene - Isoprene - Styrene Triblock Copolymers)	14
การปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตโคพอลิเมอร์แบบช่วงของ สไตรีนและอีลาสโตเมอร์.....	18
สมบัติเชิงกลของพอลิสไตรีนและพอลิสไตรีนชนิดทนแรงกระแทกสูง	20
เทคนิคการตรวจสอบวิเคราะห์เส้นใยด้วยกล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy)	23
เทคนิคการทดสอบแรงดึงด้วยเครื่องทดสอบเนกประสงค์ (Universal Tensile Testing Machine)	26
3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	30
วัสดุที่ใช้ในการวิจัย	30
อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์โคพอลิเมอร์แบบสามช่วง	30
สถานที่ในการวิจัย	31
ขั้นตอนการวิจัย	31
ขั้นตอนการเตรียมสารละลายพอลิเมอร์.....	31

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
3 (ต่อ)	
ขั้นตอนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต	32
ขั้นตอนการวิเคราะห์เส้นใยโคพอลิเมอร์แบบสามช่วง	33
ขั้นตอนการทำวัสดุเชิงประกอบจากเส้นใย.....	33
ขั้นตอนการวิเคราะห์วัสดุเชิงประกอบจากเส้นใย.....	35
4 ผลการวิจัย	36
การปั่นเส้นใยเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตและการวิเคราะห์	
เส้นใยโคพอลิเมอร์แบบสามช่วง.....	36
สมบัติเชิงกลและการวิเคราะห์วัสดุเชิงประกอบจากเส้นใย.....	48
5 สรุปและอภิปราย.....	55
บรรณานุกรม	57
ภาคผนวก.....	61
ประวัติย่อผู้วิจัย.....	147

บัญชีตาราง

ตาราง	หน้า
1 สมบัติเชิงกลของพอลิस्टาไทรินและพอลิस्टาไทรินชนิดทนกระแทกสูง.....	23
2 ปริมาณสารละลายพอลิเมอร์โดยใช้เตตระไฮโดรฟอรัน เป็นตัวทำละลาย	31
3 ปริมาณสารละลายพอลิเมอร์โดยใช้เตตระไฮโดรฟอรันและ ไดเมทิลฟอร์มาไมด์ในอัตราส่วน 75:25 เป็นตัวทำละลาย	32
4 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยของสารละลาย 10 ถึง 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ 10 ถึง 20 กิโลโวลต์ โดยให้เส้นผ่านศูนย์กลางเส้นใยมีหน่วยไมโครเมตร	45
5 ภาพเปรียบเทียบผลวิเคราะห์จาก SEM สำหรับสารละลาย 10 ถึง 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ความต่างศักย์ ไฟฟ้าที่ 12 16 และ 20 กิโลโวลต์ แท่งสเกลได้ภาพยาว 60 ไมโครเมตร	47
6 ข้อมูลของแผ่นฟิล์มพอลิस्टาไทรินที่มีเส้นใย	49
7 ข้อมูลของแผ่นฟิล์มพอลิस्टาไทริน	50
8 สมบัติเชิงกลของแผ่นฟิล์มพอลิस्टาไทรินที่มีเส้นใย.....	53
9 สมบัติเชิงกลของแผ่นฟิล์มพอลิस्टาไทริน	54
10 การเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของแผ่นฟิล์มพอลิस्टาไทรินที่มีเส้นใย กับพอลิस्टาไทรินทนแรงกระแทกสูง	54
11 ผลการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยและการคำนวณหาค่าเฉลี่ยของ เส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยที่ความเข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 10 กิโลโวลต์.....	75
12 ผลการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยและการคำนวณหาค่าเฉลี่ยของ เส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยที่ความเข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 12 กิโลโวลต์.....	77

บัญชีตาราง (ต่อ)

ตาราง	หน้า
45 ผลการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยและการคำนวณหาค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยที่ความเข้มข้น 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 18 กิโลโวลต์.....	143
46 ผลการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยและการคำนวณหาค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยที่ความเข้มข้น 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 20 กิโลโวลต์	145

บัญชีภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
1 อุปกรณ์ของเทคนิคอิเล็กโตรสปินนิง	7
2 ลักษณะโครงสร้างโดเมนของโมเลกุลของบล็อกโคพอลิเมอร์	14
3 การเชื่อมกันของสไตรีนและไอโซพรีนในบล็อกโคพอลิเมอร์	15
4 โครงสร้างของพอลิสไตรีน	16
5 โครงสร้างของยางธรรมชาติ	17
6 กราฟความเค้น (σ) - ความเครียดของพอลิสไตรีน (ϵ)	21
7 ลักษณะการเกิดเครซของพอลิเมอร์	22
8 ส่วนประกอบต่างๆของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบกวาด	24
9 ภาพเครื่องทดสอบแรงดึง	27
10 เส้นโค้งความเค้น-ความเครียด (Stress-Strain Curve)	28
11 การเตรียมแผ่นฟิล์มก่อนนำไปอบอ่อน	35
12 ผลของ SEM ที่ความเข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ศักย์ไฟฟ้า 10 ถึง 20 กิโลโวลต์	38
13 ผลของ SEM ที่ความเข้มข้น 12 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ศักย์ไฟฟ้า 10 ถึง 20 กิโลโวลต์	39
14 ผลของ SEM ที่ความเข้มข้น 14 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ศักย์ไฟฟ้า 10 ถึง 20 กิโลโวลต์	40
15 ผลของ SEM ที่ความเข้มข้น 16 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ศักย์ไฟฟ้า 10 ถึง 20 กิโลโวลต์	41
16 ผลของ SEM ที่ความเข้มข้น 18 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ศักย์ไฟฟ้า 10 ถึง 20 กิโลโวลต์	42
17 ผลของ SEM ที่ความเข้มข้น 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ศักย์ไฟฟ้า 10 ถึง 20 กิโลโวลต์	43
18 ไดอะแกรมของการหาเส้นผ่านศูนย์กลางของพอลิเมอร์ ที่มีลักษณะเป็นลูกปัดทรงกลม	44

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
19 โดอะแกรมของการหาเส้นผ่านศูนย์กลางของพอลิเมอร์ ที่มีลักษณะเป็นลูกบิดทรงรี.....	44
20 โดอะแกรมของการหาเส้นผ่านศูนย์กลางของพอลิเมอร์ ที่มีลักษณะเป็นลูกบิดทรงกระบอก.....	45
21 กราฟระหว่างค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นใยที่ผลิตจากสารละลาย ที่ความเข้มข้นของสารตั้งต้นมีค่า 16 18 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้าต่างๆ	48
22 กราฟระหว่างความเค้นและความเครียดที่ได้จากการวิเคราะห์ คุณสมบัติเชิงกลของแผ่นฟิล์มพอลิสไตรีนที่มีเส้นใย.....	50
23 กราฟระหว่างความเค้นและความเครียดที่ได้จากการวิเคราะห์ คุณสมบัติเชิงกลของแผ่นฟิล์มพอลิสไตรีน	51
24 การเคลื่อนที่ของประจุ q_0 จากจุด a ไปยังจุด b ในสนามไฟฟ้าที่สม่ำเสมอ E	67
25 แรงลัพท์ที่กระทำกับวัตถุทรงกลมตันที่เคลื่อนที่ในของเหลว.....	70
26 รูปกรอปรูปตัวยู	73

บทที่ 1

บทนำ

ภูมิหลัง

เส้นใยนาโนหรือนาโนไฟเบอร์ (Nanofibers) เป็นเส้นใยสังเคราะห์ที่กำลังได้รับความสนใจอย่างยิ่งในปัจจุบันเนื่องจากเป็นเส้นใยที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กอยู่ในระดับนาโนเมตร (10^{-9} เมตร) มีอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวต่อปริมาตร (พื้นที่ผิวจำเพาะ) มากกว่า 1000 เท่าเมื่อเทียบกับเส้นใยในระดับไมโครเมตร (10^{-6} เมตร) ด้วยคุณสมบัตินี้เองทำให้มีผู้สนใจศึกษาและค้นคว้าวิธีการผลิตเส้นใยขนาดนาโนเมตรเพื่อนำไปประยุกต์ใช้กับงานที่ต้องการพื้นที่ผิวสัมผัสสูง (Huang; et al. 2003: 2223)

จากรายงานการวิจัยด้านนาโนเทคโนโลยีต่างๆ พบว่าเส้นใยนาโนเป็นเส้นใยสังเคราะห์ที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในชีวิตประจำวันได้หลากหลาย เช่น การนำเส้นใยนาโนมาใช้เป็นโครงสร้างของไส้กรองในเครื่องกรอง เนื่องจากประสิทธิภาพในการกรองนั้นขึ้นอยู่กับความละเอียดของเส้นใยที่นำมาทำเป็นไส้กรอง ถ้าเส้นใยมีความละเอียดมากจะทำให้ประสิทธิภาพของการกรองเพิ่มมากขึ้น เพราะสามารถจับอนุภาคที่มีขนาดเล็กได้ดีกว่าเส้นใยขนาดใหญ่ ในทางการแพทย์มีการนำเส้นใยมาใช้ทำอวัยวะเทียมและแผ่นเนื้อเยื่อเทียมเนื่องจากเนื้อเยื่อและอวัยวะของมนุษย์ เช่น กระดูก ฟันและผิวหนังมีโครงสร้างในระดับเดียวกัน นอกจากนี้ยังมีการนำเส้นใยมาทำอุปกรณ์ทำแผลและรักษา รอยไหม้ของแผลได้โดยการฉีดเส้นใยนาโนบนส่วนของผิวหนังที่ได้รับบาดเจ็บโดยตรง แผ่นเนื้อเยื่อที่ทำจากเส้นใยนั้นมีประสิทธิภาพในการดูดซึมของเหลว เช่น น้ำเหลืองและเลือดได้ดีและสามารถป้องกันแบคทีเรียได้จึงทำให้แผลหายเร็วขึ้น ในทางการแพทย์มีการนำเส้นใยนาโนจากการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตมาผลิตเป็นชุดป้องกันอาวุธทางเคมีหรืออาวุธทางชีวภาพ เนื่องจากเส้นใยขนาดเล็กที่วางตัวเป็นชั้นๆ นี้มีความพรุนสูงและมีรูพรุนขนาดเล็ก มันจึงสามารถต้านทานต่อการทะลุผ่านของตัว ทำละลายทางเคมีอันตรายที่อยู่ในรูปของละอองของเหลวได้ดี ขณะเดียวกันก็สามารถระบายอากาศได้และชุดป้องกันเหล่านี้ยังมีน้ำหนักเบาอีกด้วย ในปัจจุบันมีงานวิจัยที่กำลังพัฒนาและผลิตเส้นใยนาโนให้มีสมบัติที่ดีขึ้น เพื่อนำไปเพิ่มขีดความสามารถของอุปกรณ์ต่างๆ เช่น เครื่องตรวจจับการเคลื่อนไหวของร่างกาย การตรวจวัดอุณหภูมิและจังหวะการเต้นของหัวใจ (Huang; et al. 2003: 2239-2242)

สำหรับวิธีการผลิตเส้นใยนาโนจากพอลิเมอร์ในปัจจุบันมีอยู่หลายวิธี เช่น การดึงยึด (Drawing) การสังเคราะห์แบบเทมเพลต (Template synthesis) การแยกเฟส (Phase separation) และการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต (Electrospinning) ซึ่งวิธีสุดท้ายนี้เป็นวิธีการผลิตเส้นใยนาโนที่ได้รับความนิยมสนใจเป็นอย่างมาก (Huang; et al. 2003: 2233-2236)

การปั่นแบบไฟฟ้าสถิตหรืออิเล็กโตรสปินนิงเป็นเทคนิคหนึ่งในการผลิตเส้นใยพอลิเมอร์ระดับนาโนเมตร ซึ่งสามารถผลิตเส้นใยได้ตั้งแต่ขนาดเล็กกว่า 100 นาโนเมตร ไปจนถึงขนาดหลายไมโครเมตร เทคนิคนี้ต่างจากการผลิตเส้นใยในอุตสาหกรรมสิ่งทอโดยทั่วไปเนื่องจากเป็นเทคนิคที่พัฒนามาเพื่อผลิตเส้นใยแบบเส้นต่อเส้น ในปัจจุบันมีนักวิจัยสนใจศึกษาโครงสร้างและสัณฐานของเส้นใยพอลิเมอร์ธรรมชาติและพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่ได้จากเทคนิคนี้ (Rutledge; & Fridrikh. 2007: 1)

พอลิเมอร์ที่ใช้ในการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตโดยมากอยู่ในรูปโฮโมพอลิเมอร์ (Homopolymers) ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยมอนอเมอร์ (Monomer) ชนิดเดียวเรียงต่อกัน ส่วนการนำโคพอลิเมอร์แบบช่วง (Block copolymers) มาปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตยังมีไม่มากนักโดยเฉพาะการศึกษาวิจัยในการปั่นเส้นใยที่มีผลต่อลักษณะของเส้นใยและโครงสร้างไมโครโดเมน (Microdomain) โครงสร้างไมโครโดเมนที่กล่าวมานี้เป็นลักษณะเฉพาะของโคพอลิเมอร์แบบช่วงซึ่งเกิดจากการที่สายโซ่โมเลกุลประกอบด้วยมอนอเมอร์มากกว่าหนึ่งชนิดมาต่อกันเป็นช่วงๆ ชนิดของมอนอเมอร์ที่แตกต่างกันทำให้เกิดการแยกเฟสในระดับจุลภาค (Microphase separation) ซึ่งเป็นโครงสร้างขนาดต่ำกว่าระดับไมโครเมตรหรือที่เรียกว่าไมโครโดเมน โครงสร้างไมโครโดเมนนี้มีรูปร่างที่แน่นอน เช่น ทรงกลม ทรงกระบอกและแบบชั้น ทั้งนี้ขึ้นกับสัดส่วนของพอลิเมอร์แต่ละชนิดที่มาประกอบกัน การปั่นโคพอลิเมอร์แบบช่วงให้เป็นเส้นใยขนาดเล็กที่มีขนาดใกล้เคียงกับขนาดของโครงสร้างไมโครโดเมนอาจส่งผลต่อลักษณะไมโครโดเมนที่ได้ ในปี ค.ศ. 1999 ฟงและรีเนเกอร์ (Fong; & Reneker. 1999: 3488-3493) ศึกษาเส้นใยนาโนของโคพอลิเมอร์แบบสามช่วงประเภท สไตรีน-บิวทาไดอีน-สไตรีน (Styrene-butadiene-styrene triblock copolymers) จากการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต ผลการศึกษาพบว่าโครงสร้างที่ผลิตได้เป็นโดเมนแบบทรงกลม (Spherical domain) โดเมนแบบทรงกระบอก (Cylindrical domain) และโดเมนแบบชั้น (Lamella domain) เมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้นตามลำดับ ในปี ค.ศ. 2006 แคลราและคนอื่นๆ (Kalra; et al. 2006: 5453-5357) ศึกษาโครงสร้างไมโครโดเมนในเส้นใยของโคพอลิเมอร์แบบสองช่วงประเภท สไตรีน-ไอโซพรีน (Styrene-isoprene diblock copolymers) โดยโคพอลิเมอร์ที่มีสัดส่วนระหว่างสไตรีนและไอโซพรีนต่างกันสองแบบ รวมทั้งใช้สารละลายที่มีความเข้มข้นต่างกันทำให้ได้โครงสร้างโดเมนที่ต่างกันโดยมีพอลิสไตรีนเป็นเฟสต่อเนื่อง

ที่ผ่านมากการศึกษากการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตของโคพอลิเมอร์แบบช่วงและผลของปัจจัยต่างๆ ต่อลักษณะไมโครโดเมนภายในเส้นใยยังมีน้อยมาก งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายที่จะผลิตเส้นใยของโคพอลิเมอร์แบบสามช่วงประเภทสไตรีน-ไอโซพรีน-สไตรีนโดยการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตและศึกษาผลของปัจจัยต่างๆต่อลักษณะเส้นใย

นอกจากนี้การนำเส้นใยโคพอลิเมอร์ที่ได้ไปผสมเข้ากับวัสดุที่เป็นเนื้อหลักหรือเมทริกซ์ (Matrix) เพื่อผลิตเป็นวัสดุเชิงประกอบหรือคอมโพสิต (Composite) เป็นอีกประเด็นหนึ่งที่น่าสนใจศึกษา โดยทั่วไปการผสมอนุภาคยาง เช่น ไอโซพรีน ในเทอร์โมพลาสติกหรือพลาสติกที่เราใช้ในชีวิตประจำวันจะทำให้เทอร์โมพลาสติกมีความแกร่ง (Toughness) มากขึ้น งานวิจัยนี้จึงจะทำการประยุกต์ใช้เส้นใยโดยผสมเส้นใยซึ่งมีส่วนประกอบของพอลิไอโซพรีนซึ่งเป็นยางเข้ากับเทอร์โมพลาสติก คือ พอลิสไตรีน เนื่องจากเส้นใยมีส่วนที่เป็นพอลิสไตรีนอยู่ด้วย การผสมเส้นใยในวัสดุเนื้อหลักที่เป็นพอลิสไตรีนเช่นกันจึงน่าจะเข้ากันได้ดี การใช้เส้นใยจากการปั่นไฟฟ้าสถิตซึ่งมีส่วนผสมของยางพอลิไอโซพรีนนี้มีความแตกต่างจากการใช้ออนุภาคยางที่ทำแต่ดั้งเดิมเนื่องจากรูปทรงของเส้นใยที่ได้จากการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตมีรูปทรงเป็นทรงกระบอกและขนาดของเส้นใยนี้มีขนาดเล็กกว่าอนุภาคยางที่มีการใช้กัน

ความมุ่งหมายของงานวิจัย

ในงานวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยได้ตั้งความมุ่งหมายไว้ดังนี้

1. เพื่อศึกษากการผลิตเส้นใยโคพอลิเมอร์แบบช่วงด้วยการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต
2. เพื่อศึกษาผลของปัจจัยต่างๆที่มีต่อขนาดและสัณฐานของเส้นใย
3. เพื่อผลิตวัสดุเชิงประกอบที่มีเส้นใยโคพอลิเมอร์แบบช่วงผสมในพอลิสไตรีนซึ่งเป็นวัสดุเนื้อหลักและเพื่อศึกษาสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบที่เกิดจากการนำเส้นใยมาประยุกต์ใช้

ความสำคัญของการวิจัย

1. ทำให้ได้เส้นใยของโคพอลิเมอร์แบบสามช่วงประเภทสไตรีน-ไอโซพรีน-สไตรีนจากการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต
2. ทำให้ทราบถึงผลของปัจจัยที่มีต่อขนาดและสัณฐานของเส้นโคใยพอลิเมอร์แบบสามช่วงประเภท สไตรีน-ไอโซพรีน-สไตรีน ปัจจัยที่ต้องการศึกษา ได้แก่ ความเข้มข้นของสารละลายและค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า

3. ทำให้ทราบถึงสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบที่ผลิตขึ้นโดยนำเส้นใยโคพอลิเมอร์แบบสามช่วงประเภทสไตรีน-ไอโซพรีน-สไตรีน ที่ได้จากการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตมาผสมลงในวัสดุเนื้อหลัก ทำให้ได้วัสดุเชิงประกอบแบบใหม่ที่ไม่เคยมีการผลิตมาก่อน

ขอบเขตของการวิจัย

ในงานวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยได้ตั้งขอบเขตของงานวิจัยไว้ดังนี้

1. ใช้เทคนิคการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตผลิตเส้นใยจากสารละลายโคพอลิเมอร์แบบสามช่วงประเภทสไตรีน-ไอโซพรีน-สไตรีน โดยเปลี่ยนแปลงค่าของความเข้มข้นของสารละลายและค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า

2. นำเส้นใยที่ปั่นได้ไปตรวจวิเคราะห์ลักษณะของเส้นใยด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy; SEM) ณ ศูนย์โลหะและเทคโนโลยีแห่งชาติ (MTEC) และนำผลที่ได้มาวิเคราะห์ผลของปัจจัยที่ศึกษาต่อขนาดและสัณฐานของเส้นใย

3. นำเส้นใยโคพอลิเมอร์แบบสามช่วงประเภทสไตรีน-ไอโซพรีน-สไตรีนที่ได้จากการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตมาผลิตวัสดุเชิงประกอบโดยใช้พอลิสไตรีนเป็นวัสดุเนื้อหลัก และนำไปทดสอบสมบัติเชิงกลด้วยเครื่องทดสอบแบบดึงเพื่อหาค่ามอดูลัส ความต้านทานแรงดึงสูงสุดและความเครียดที่จุดขาด จากนั้นเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลที่ได้กับวัสดุที่เป็นพอลิสไตรีนล้วนไม่มีเส้นใยผสมอยู่

บทที่ 2

ทฤษฎีและเอกสารที่เกี่ยวข้อง

ในการวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยได้ศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องและได้นำเสนอตามหัวข้อต่อไปนี้

1. การปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต (Electrospinning)
2. พอลิเมอร์และโคพอลิเมอร์แบบช่วง (Polymers and Block Copolymers)
3. โคพอลิเมอร์แบบสามช่วงประเภทสไตรีน - ไอโซพรีน - สไตรีน

(Styrene - Isoprene - Styrene Triblock Copolymers)

4. การปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตของโคพอลิเมอร์แบบช่วงของสไตรีนและอีลาสโตเมอร์
5. สมบัติเชิงกลของพอลิสไตรีนและพอลิสไตรีนทนแรงกระแทกสูง
6. เทคนิคการตรวจสอบวิเคราะห์เส้นใยด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

(Scanning Electron Microscopy; SEM)

7. เทคนิคการทดสอบแรงดึงด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal Tensile

Testing Machine)

การปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต (Electrospinning)

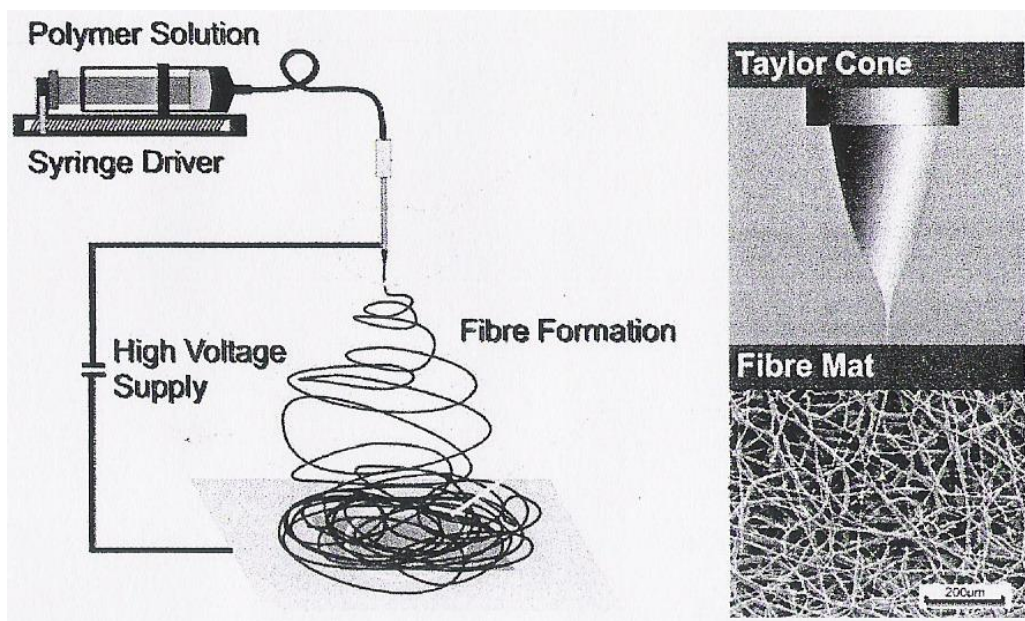
การปั่นแบบไฟฟ้าสถิตหรืออิเล็กโตรสปินนิง เป็นเทคนิคหนึ่งในการผลิตเส้นใยระดับนาโน-เมตรที่พัฒนามาเพื่อผลิตเส้นใยนาโนแบบเส้นต่อเส้น เทคนิคการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตเป็นการใช้ความต่างศักย์สูงต่อเข้ากับปลายเข็มฉีดยาที่บรรจุสารละลายพอลิเมอร์ ถ้าความต่างศักย์ไฟฟ้ามีค่าสูงถึงจุดที่แรงทางไฟฟ้ามีค่ามากกว่าแรงตึงผิวของสารละลายพอลิเมอร์จะทำให้สารละลายพอลิเมอร์พุ่งลงสู่แผ่นรองที่ทำด้วยโลหะทำให้ได้เส้นใยที่มีขนาดเล็กและบาง ภาพประกอบ 1 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในเทคนิคการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต เทคนิคการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตมีอุปกรณ์หลักเพียง 3 อย่าง ได้แก่ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าความต่างศักย์สูง (High-voltage power supply) หลอดรูเล็กที่ทำจากเข็มฉีดยา (Syringe) และแผ่นรองโลหะ (Collector) ซึ่งทำหน้าที่เป็นที่รองรับเส้นใย (Rutledge; & Fridrikh. 2007: 1)

หลักการพื้นฐาน

ในการผลิตเส้นใยพอลิเมอร์ขนาดเล็กโดยเทคนิคการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต โดยปกติจะต่อขั้วประจุไฟฟ้าขั้วบวกเข้ากับปลายเข็มที่บรรจุสารละลายพอลิเมอร์และต่อขั้วประจุไฟฟ้าขั้วลบเข้ากับแผ่นรองรับ เมื่อยังไม่ให้ไฟฟ้าความต่างศักย์สูงแก่ระบบ สารละลายพอลิเมอร์ซึ่งมีลักษณะเป็นของเหลวหนืดจะรวมตัวกันเป็นหยดรูปร่างครึ่งทรงกลมที่บริเวณปลายเข็มโลหะอันเป็นผลเนื่องมาจากแรงตึงผิว (Surface tension) แรงระหว่างพันธะภายในสารละลายพอลิเมอร์รวมทั้งแรงตึงผิวทำให้สารละลายพอลิเมอร์ไม่ไหลลงตามแรงโน้มถ่วงของโลก แต่เมื่อให้ไฟฟ้าความต่างศักย์สูงแก่สารละลายพอลิเมอร์ส่วนปลายของเข็มโลหะถูกเหนี่ยวนำให้มีประจุเป็นบวกและแผ่นรองรับมีประจุเป็นลบ ประจุบวกบริเวณปลายของเข็มโลหะดึงประจุลบภายในสารละลายพอลิเมอร์เข้าใกล้บริเวณเข็มโลหะทำให้หยดสารละลายพอลิเมอร์ที่ปลายเข็มจึงมีประจุเป็นบวกเฉพาะที่ผิว ประจุบวกที่ผิวของหยดสารละลายพอลิเมอร์ออกแรงผลักทางไฟฟ้าสถิต (Electrostatic repulsion) ในทิศตรงข้ามกับแรงตึงผิว ดังนั้นถ้าความต่างศักย์ไฟฟ้ามีค่ามากพอที่จะทำให้เกิดแรงผลักทางไฟฟ้าสถิตมากกว่าแรงตึงผิว จะส่งผลให้รูปร่างครึ่งทรงกลมของสารละลายพอลิเมอร์ที่อยู่ปลายเข็มยืดออกเป็นรูปร่างทรงกรวยที่เรียกว่า กรวยของเทเลอร์ (Taylor cone) และเมื่อเพิ่มความแรงของสนามไฟฟ้าที่ให้แก่ระบบมากขึ้นจนกระทั่งถึงค่าวิกฤตค่าหนึ่งจะเกิดแรงขับเคลื่อนให้สารละลายพอลิเมอร์พุ่งออกมาเป็นลำ (Solution jet) ลำของสารละลายพอลิเมอร์ที่พุ่งออกมามีประจุเป็นบวกจึงพุ่งเข้าหาแผ่นรองรับซึ่งเป็นประจุลบ อย่างไรก็ตามประจุภายในลำสารละลายพอลิเมอร์จะผลักรันทำให้เกิดการระเบิดตัวตามแนวขวางทำให้เกิดการบิดโค้งของลำสารละลายพอลิเมอร์ ความไม่เสถียรทำให้ลำของสารละลายพอลิเมอร์ยืดออกในลักษณะที่ซับซ้อน การยืดตัวออกของลำสารละลายนี้นำมาซึ่งเส้นใยที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่เล็กลง ขณะเดียวกันตัวทำละลายจะระเหยไปทำให้เหลือไว้เพียงแต่เส้นใยพอลิเมอร์ที่ต้องการกองรวมกันอย่างไม่เป็นระเบียบบนแผ่นรองรับ โดยมีลักษณะเป็นแบบเส้นใยที่ไม่ได้ถักทอซ้อนทับกัน (Non-woven) (Rutledge; & Fridrikh, 2007: 2)

เส้นใยที่ได้จากการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตมีการกองรวมกันอย่างไม่เป็นระเบียบบนแผ่นรองรับ เส้นใยจะมีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางและสัดส่วนของเส้นใยที่แตกต่างกัน บางครั้งเส้นใยที่ได้มีรูปร่างคล้ายลูกบิด ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ได้แก่ ตัวแปรของระบบ สมบัติของสารละลาย และสภาวะแวดล้อม ตัวแปรของระบบเป็นปัจจัยที่เราสามารถควบคุมได้ เช่น ความต่างศักย์ไฟฟ้า ระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับวัสดุรองรับ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวเข็ม แรงดันภายในหลอดบรรจุสารละลายพอลิเมอร์ ความหนืดของสารละลายพอลิเมอร์เป็นสมบัติของสารละลายที่ส่งผลกระทบต่อขนาดและรูปร่างของเส้นใย ความหนืดมีค่าเกี่ยวข้องกับความสัมพันธ์ คือ เมื่อสารละลายมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้นความหนืดก็จะเพิ่มขึ้นด้วย ทำให้เส้นใยที่ได้จะมีลักษณะเป็นปมลดลงและได้เส้นใยที่มี

ความสม่ำเสมอมากขึ้น สภาวะแวดล้อมเป็นค่าเฉพาะในบริเวณโดยรอบที่ทำการผลิตเส้นใย เช่น อุณหภูมิ ความชื้นและความเร็วลม (Huang; et al. 2003: 2231)



ภาพประกอบ 1 แสดงอุปกรณ์ของเทคนิคการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต

ที่มา: G. E. Wnek ; et al. (2008). Processing of Polymer Nanofibers Through Electrospinning as Drug Delivery Systems. *Material Chemistry and Physics*. (Online).

สำหรับปัจจัยที่สอดคล้องกับงานวิจัยครั้งนี้ ได้แก่ ความเข้มข้นของสารละลายพอลิเมอร์และค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า ได้มีผู้ทำการวิจัยมาแล้วทั้งในเชิงทฤษฎีและการทดลอง โดยใช้พอลิเมอร์ที่ต่างกันรวมทั้งกำหนดค่าของปัจจัยที่ศึกษาแตกต่างกัน

ในปี ค.ศ. 1995 โดชิและรีเนเกอร์(Doshi; & Reneker. 1995: 151-160) เสนอผลงานวิจัยเกี่ยวกับเส้นใยที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดต่ำกว่าระดับไมโครเมตรที่เตรียมจากการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต ซึ่งไม่สามารถเตรียมเส้นใยแบบนี้ได้จากเทคนิคอื่นได้ในขณะนั้น ทั้งสองทำการศึกษาเทคนิคการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตเพื่ออธิบายถึงพารามิเตอร์ที่มีผลต่อกระบวนการและลักษณะพื้นฐานของเส้นใย ในการวิจัยครั้งนี้ใช้พอลิเอธิลีนออกไซด์ (Polyethylene oxide ; PEO) ที่มีความเข้มข้นอยู่ในช่วง 1 ถึง 7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ใช้ศักย์ไฟฟ้ามีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 12 กิโลโวลต์และใช้กล่องจุลทรรศน์แบบส่อง-

กราด (Scanning Electron Microscopy; SEM) วิเคราะห์เส้นผ่านศูนย์กลางและสัดส่วน ของเส้นใย การวิจัยพบว่าปัจจัยที่มีผลต่อเทคนิคปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต ได้แก่ สมบัติของสารละลาย (ความหนืด ความนำไฟฟ้า และแรงตึงผิว) ศักย์ไฟฟ้าบริเวณปลายเข็ม ระยะห่างระหว่างปลายเข็มและตัวรองรับเส้นใยและสภาพแวดล้อม (อุณหภูมิและความชื้นในห้องทำการวิจัย)

ในปี ค.ศ.1999 รีเนเกอร์และคนอื่นๆ (Reneker; & et al. 1999: 4585-4592) ศึกษาลักษณะของปมที่เกิดขึ้นบนเส้นใยนาโนโดยใช้พอลิเอทิลีนออกไซด์ (Polyethylene oxide; PEO) ที่มีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย 9×10^5 กรัมต่อโมล สารละลายจะถูกเตรียมที่อุณหภูมิห้อง สารละลาย PEO บรรจุในเข็มฉีดยาที่รูเปิดมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.3 มิลลิเมตร หลอดฉีดยาเชื่อมอยู่กับเครื่องกำเนิดศักย์ไฟฟ้าแรงสูง ซึ่งค่าที่ใช้ในการวิจัยมีค่าอยู่ในช่วง 0 ถึง 18 กิโลโวลต์และใช้แผ่นอลูมิเนียมพอยล์เป็นตัวรองรับเส้นใยโดยวางห่างจากปลายรูเปิดของเข็มฉีดยาเป็นระยะ 21.5 เซนติเมตร เส้นใยที่ได้นำไปวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด พบว่าเมื่อสารละลายมีความหนืดเพิ่มขึ้นระยะทางระหว่างปมบนเส้นใยมีค่าเพิ่มขึ้นนั่นคือมีจำนวนปมน้อยลง นอกจากนี้รูปร่างของปมค่อยๆเปลี่ยนจากทรงกลมเป็นทรงกรวย เมื่อพิจารณาว่าค่าศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ถ้าค่าศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจำนวนปมจะเพิ่มมากขึ้น

ในปี ค.ศ. 2005 วูและคนอื่นๆ (Wu; & et al. 2005: 1292-1297) ทำการศึกษาผลของตัวทำละลายที่ส่งผลต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยเอทิลเซลลูโลส (Ethyl cellulose; EC) โดยใช้เตตระไฮโดรฟอรัณผสมกับไดเมทิลอะซิตาไมด์ในอัตราส่วน 100 : 0 80 : 20 และ 20 : 80 เป็นตัวทำละลาย ให้สารละลายมีค่าความเข้มข้น 13 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและใช้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 20 กิโลโวลต์ ผลการศึกษาพบว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยมีค่าลดลงเมื่ออัตราส่วนของไดเมทิลอะซิตาไมด์เพิ่มขึ้น

ในปี ค.ศ. 2005 จีรดิษฐ์ จารุสุวรรณภูมิและคนอื่นๆ (Jarusuwannapoom; & et al. 2005: 409-421) ศึกษาตัวทำละลายที่มีผลต่อความสามารถในการปั่นเส้นใยของสารละลายพอลิสไตรีน (Polystyrene) และลักษณะสัดส่วนของเส้นใยที่ได้จากการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต พบว่าเมื่อใช้ตัวทำละลายต่างชนิดกันส่งผลให้ความสามารถในการปั่นเส้นใยและลักษณะสัดส่วนของเส้นใยต่างกันด้วย

ปี ค.ศ. 2005 ชางและคนอื่นๆ (Zhang; & et al. 2005: 423-432) ศึกษาลักษณะสัดส่วนของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Poly(vinyl alcohol; PVA) พบว่าเมื่อความเข้มข้นของสารละลายพอลิเมอร์มีค่ามากขึ้นลักษณะสัดส่วนของเส้นใยมีการเปลี่ยนแปลงจากเส้นใยที่มีลักษณะปมบนเส้นใยไปเป็นเส้นใยที่มีความสม่ำเสมอ

นอกจากการศึกษาขนาดและสัณฐานของเส้นใยแล้ว ยังมีนักวิจัยที่พยายามจะศึกษาการควบคุมการเรียงตัวของเส้นใยให้เป็นเดี่ยวแฉกกัน อย่างไรก็ตามถึงงานวิจัยในส่วนนี้ยังไม่ประสบความสำเร็จเนื่องจากวิธีการเคลื่อนที่ของลำพอลิเมอร์ซึ่งเป็น 3 มิติ มีความซับซ้อนมากเกิดจากความไม่เสถียรและเกิดการบิดงอ (Bending instability) ในปัจจุบันมีความพยายามที่จะทำให้อัตราการเรียงตัวของเส้นใยนาโนเมตรเรียงตัวไปในแนวเดียวกัน เช่น การใช้แผ่นรองที่สามารถหมุนด้วยความเร็วสูง การเสริมข้อไฟฟ้าสนามไฟฟ้าและการใช้วงล้อขอบบาง เป็นต้น วิธีเหล่านี้สามารถทำให้อัตราการเรียงตัวของเส้นใยนาโนเมตรเรียงตัวไปในแนวเดียวกันได้ในระดับหนึ่งเท่านั้น (Huang; et al. 2003: 2232)

จวบจนถึงปัจจุบันได้มีการนำพอลิเมอร์มากกว่า 50 ชนิดมาขึ้นรูปเป็นเส้นใยนาโนจากการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต เส้นใยที่ผลิตได้มีเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 10 นาโนเมตร ถึงหลายไมโครเมตร โดยทั่วไปจุดมุ่งหมายหลักของการผลิตเส้นใยนาโนโดยเทคนิคนี้คือ

1. สามารถควบคุมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยให้มีขนาดสม่ำเสมอและเล็กกว่าระดับไมโครเมตร

2. สามารถผลิตเส้นใยที่มีผิวเรียบ

3. สามารถผลิตเส้นใยที่มีการเรียงตัวไปในแนวเดียวกันได้

อย่างไรก็ตามจากผลการวิจัยที่ผ่านมาพบว่าไม่ใช่เรื่องง่ายที่จะได้เส้นใยตามจุดมุ่งหมายทั้ง 3 ประการข้างต้น (Huang; et al. 2003: 2230)

พอลิเมอร์และโคพอลิเมอร์แบบช่วง (Polymers and Block Copolymers)

พอลิเมอร์มีรากศัพท์มาจากภาษากรีก สามารถแยกศัพท์ได้เป็น 2 คำ คำแรก คือ คำว่า พอลิ มีความหมายว่าจำนวนมากและคำว่า เมอร์ มีความหมายว่า หน่วย ความหมายทั่วไปของพอลิเมอร์จึงหมายถึง โมเลกุลที่ประกอบด้วยหน่วยซ้ำ (Repeating units) หรือมอนอเมอร์จำนวนมากเชื่อมต่อกันเป็นโครงสร้างที่มีลักษณะคล้ายสายโซ่ยาวด้วยพันธะโควาเลนต์ (Covalent bond) (Fried. 2007: 3)

ตัวอย่างของพอลิเมอร์ที่มีความสัมพันธ์กับชีวิตประจำวัน ได้แก่ โปรตีน (Protein) เซลลูโลส (Cellulose) และไหม (Silk) ซึ่งล้วนเป็นพอลิเมอร์ที่พบได้ในธรรมชาติ ในขณะที่พอลิเมอร์ชนิดอื่นทั้ง พอลิสไตรีน (Polystyrene) พอลิเอทิลีน (Polyethylene) พอลิเอสเตอร์ (Polyester) และไนลอน (Nylon) เป็นพอลิเมอร์ที่ถูกสร้างขึ้นมาด้วยวิธีการสังเคราะห์ ซึ่งมีลักษณะเป็นเส้นใยที่สามารถใช้แทนเส้นใยในธรรมชาติได้ ในบางกรณีพอลิเมอร์ที่มีในธรรมชาติก็สามารถนำมาทำการสังเคราะห์ใหม่ เช่น ยาง ซึ่งรูปแบบที่ถูกสังเคราะห์รู้จักกันในชื่อของพอลิไอโซพรีน (Polyisoprene) (Fried. 2007: 5)

การผลิตพอลิเมอร์มีขึ้นครั้งแรกในปี ค.ศ.1830 โดยชาลส์ กู๊ดเยียร์ (Charles Goodyear) ได้พัฒนากระบวนการวัลคาไนเซชัน (Vulcanization) เพื่อทำการเปลี่ยนแปลงในธรรมชาติให้เป็น

อิลาสโตเมอร์สำหรับนำไปใช้ทำยางรถยนต์ สำหรับการสังเคราะห์เทอร์โมพลาสติกครั้งแรกมีขึ้นในปี ค.ศ.1847 คริสเตียน เอฟ โชว์เบน (Christian F. Schönbein) ได้ทำการเร่งเซลลูโลสด้วยกรดไนตริก เพื่อผลิตเซลลูโลสไนเตรท เทอร์โมพลาสติกที่ได้นี้เรียกว่า เซลลูลอยด์ (Celluloid) ในปี ค.ศ.1930 ทีมผู้วิจัยของดูปองต์ (Dupont) ในอเมริกาได้ผลิตพอลิเมอร์ชนิดใหม่ขึ้นรวมถึงการสังเคราะห์ยางและวัสดุที่น่าสนใจ เช่น ไนลอน (Nylon) และเทฟลอน (Teflon) และในปี ค.ศ.1938 ดาวส์ (Dow) ได้ผลิตพอลิสไตรีนในระดับการค้าขึ้น การผลิตพอลิเอธิลีนความหนาแน่นต่ำเป็นครั้งแรกโดยนักวิทยาศาสตร์ในประเทศอังกฤษมีขึ้นในปี ค.ศ.1939 การพัฒนาวัสดุพอลิเมอร์ใหม่โดยเฉพาะอย่างยิ่งจากการสังเคราะห์เป็นวัสดุที่ต้องการในระหว่างสงครามโลกครั้งที่ 2 เนื่องจากในขณะนั้นวัสดุจากธรรมชาติมีอย่างจำกัด ในช่วงระหว่างปี ค.ศ.1960-1970 การพัฒนาคุณภาพของโรงงานผลิตพอลิเมอร์พลาสติกเพิ่มสูงขึ้นเป็นผลให้วัสดุที่ใช้มีความสมบูรณ์มากขึ้น ในปัจจุบันวัสดุพอลิเมอร์ถูกใช้ในชีวิตประจำวันอย่างหลากหลายและยังคงมีการพัฒนารวมทั้งสร้างให้เป็นอุตสาหกรรมขนาดใหญ่อีกด้วย (Fried. 2007: 1)

การจำแนกพอลิเมอร์มีลักษณะสองประการที่นิยมใช้ ได้แก่ การจำแนกตามสมบัติเมื่อมีการให้ความร้อนและการจำแนกตามชนิดของหน่วยซ้ำ สำหรับการจำแนกพอลิเมอร์ตามสมบัติเมื่อมีการให้ความร้อนสามารถแบ่งพอลิเมอร์ออกเป็น 3 ชนิดใหญ่ๆ คือ เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastics) อิลาสโตเมอร์ (Elastomers) และเทอร์โมเซต (Thermosets)

เทอร์โมพลาสติก คือ พอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างโมเลกุลแบบ 2 มิติ มีลักษณะคล้ายสายโซ่พอลิเมอร์ประเภทนี้อ่อนตัวเมื่อได้รับความร้อนเหนืออุณหภูมิสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature; T_g) และหลอมเหลวเมื่ออุณหภูมิสูงถึงอุณหภูมิหลอมเหลว (Melting temperature; T_m) เทอร์โมพลาสติกจึงสามารถไหลตัวได้เมื่อมีการให้ความร้อนกับพอลิเมอร์เพียงพอ นอกจากนี้พอลิเมอร์ที่เป็นเทอร์โมพลาสติกยังสามารถแข็งตัวกลับมาเป็นของแข็งหรือมีลักษณะคล้ายคลึงกับยางเมื่อเย็นลง ความสามารถในการหลอมนี้ทำให้เทอร์โมพลาสติกสามารถขึ้นรูปด้วยแม่แบบได้หลายครั้ง เทอร์โมพลาสติกยังสามารถขึ้นรูปโดยอาศัยการอ่อนตัวที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดหลอมเหลว เช่น กระบวนการเป่าในแม่แบบกระบวนการเทอร์โมฟอर्मมิง (สุญญากาศและมีการให้ความดัน) ดังนั้นพอลิเมอร์ประเภทนี้จึงสามารถหลอมกลับมาใช้งานใหม่ (Recycle) ตัวอย่างเช่น กลุ่มของพอลิโอฟีน (ได้แก่ พอลิเอธิลีนและพอลิฟลอปิเลน) พอลิสไตรีนและพอลิไวนิลคลอไรด์ (ปีนสุดา ปีติรักษสกุล. 2546: 45)

อิลาสโตเมอร์ คือ พอลิเมอร์อีกประเภทหนึ่งซึ่งมีความสามารถยืดตัวได้สูงถึง 600-700 เปอร์เซ็นต์และสามารถหดตัวกลับคืนได้ นอกจากนี้มีการเพิ่มขึ้นของมอดูลัส (Modulus) เมื่อมีอุณหภูมิสูงขึ้นซึ่งเป็นสมบัติตรงข้ามกับพอลิเมอร์ชนิดอื่นๆ ตัวอย่างของอิลาสโตเมอร์ ได้แก่ ยาง

ธรรมชาติและยางสังเคราะห์ โดยพื้นฐานยางเป็นพอลิเมอร์ที่มีสายโซ่โมเลกุลยาวโดยเชื่อมกันด้วยพันธะโควาเลนต์เช่นเดียวกับเทอร์โมพลาสติกและเสียรูปอย่างถาวรได้เมื่อถูกแรงดึง แต่การวัลคาไนเซชันหรือการทำให้ยางสุก (Curing) ทำให้ยางมีรูปทรงที่แน่นอนและสามารถกลับคืนรูปได้ (Reversible) รวมทั้งทำให้ยางมีสมบัติเชิงกลดีขึ้น การวัลคาไนเซชันเป็นการทำให้สายโซ่โมเลกุลของยางเกิดการเชื่อมโยงกันเป็นโครงสร้างโมเลกุลแบบตาข่าย (3 มิติ) ซึ่งทำได้โดยการเติมสารเคมีจำพวกซัลเฟอร์หรือเปอร์ออกไซด์ลงในยาง จากนั้นผ่านกระบวนการให้ความร้อนและความดัน สารเคมีดังกล่าวหรือที่เรียกว่า สารวัลคาไนซ์ (Vulcanization agents) จะเป็นตัวเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่โมเลกุลทำให้สายโซ่เชื่อมติดกันอย่างถาวรและช่วยป้องกันการลื่นไหล (Slippage) ของโมเลกุลภายใต้การให้แรงดึง ดังนั้นเมื่อมีการใส่ความเค้นให้กับตัวอย่างยางซึ่งมีโครงสร้างแบบร่างแห (Network) ขึ้นตัวอย่างจะสามารถรักษาสภาพภาวะสมดุลของการดึงไว้ได้ ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญมากเนื่องจากทำให้ยางมีคุณค่าและมีประโยชน์ในการใช้งานสูงขึ้น (ปีนสุดา ปีติรักษ์สกุล. 2546: 56)

เทอร์โมเซต คือ พอลิเมอร์อีกประเภทหนึ่งที่จำแนกโดยสมบัติเมื่อมีการให้ความร้อน เมื่อผ่านกระบวนการขึ้นรูปแล้วเทอร์โมเซตจะไม่สามารถหลอมตัวกลับเป็นครั้งที่สอง ในการผลิตจะมีการให้ความร้อนทำให้พอลิเมอร์ชนิดนี้เกิดปฏิกิริยาการสุก (Curing reaction) การเติมสารเร่งปฏิกิริยา (Catalysts) ภายใต้ความดันและอุณหภูมิจะทำให้เกิดความเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่โมเลกุลด้วยพันธะโควาเลนต์เกิดเป็นร่างแหที่แข็งแรงกลายเป็นโครงสร้าง 3 มิติหรือมีโครงสร้างโมเลกุลแบบตาข่าย (Network of molecules) เช่นเดียวกับอิลาสโตเมอร์แต่หนาแน่นกว่ามาก โครงสร้างดังกล่าวทำให้เทอร์โมเซตมีความคงทนต่อการหลอมตัวอีกครั้ง ตัวอย่างของเทอร์โมเซต ได้แก่ อีพอกซี (Epoxy) ฟีนอลฟอมาดีไฮด์ เรซิน (Phenolformaldehyde resin) และพอลิเอสเตอร์ (Polyesters) ซึ่งจะใช้ผสมรวมกับวัสดุในอุตสาหกรรมของการผลิตแก้วเพื่อเพิ่มความแข็งแรงและทนทานที่ถูกเรียกว่า ไฟเบอร์-กลาส (Fiber glass) (ปีนสุดา ปีติรักษ์สกุล. 2546: 47)

ในการจำแนกพอลิเมอร์อีกแบบ คือ การจำแนกตามชนิดของหน่วยซ้ำที่สามารถแบ่งพอลิเมอร์ได้เป็น 2 ประเภท คือ โฮโมพอลิเมอร์ (Homopolymers) และโคพอลิเมอร์ (Copolymers)

โฮโมพอลิเมอร์ คือ พอลิเมอร์ที่อยู่ในสายโซ่โมเลกุลประกอบด้วยหน่วยซ้ำ (Repeating units) ของพอลิเมอร์เพียงชนิดเดียวเรียงต่อกัน โครงสร้างทางเคมีของพอลิเมอร์ของโฮโมพอลิเมอร์โดยทั่วไปเขียนโดยให้หน่วยซ้ำอยู่ภายในวงเล็บใหญ่ ถ้าให้ A แทนมอนอเมอร์หรือหน่วยซ้ำสัญลักษณ์ทางเคมีของโฮโมพอลิเมอร์เขียนแทนด้วย $-A-A-A-$ หรือ $-[A]-$ เมื่อ n คือจำนวนของหน่วยซ้ำที่ต่อกันเป็นสายโซ่โมเลกุล ตัวอย่างของโฮโมพอลิเมอร์ ได้แก่ พอลิสไตรีน พอลิไวนิล-คลอไรด์ พอลิไอโซพรีน เป็นต้น (ปีนสุดา ปีติรักษ์สกุล. 2546: 235)

โคพอลิเมอร์ คือ พอลิเมอร์ที่มีสายโซ่โมเลกุลประกอบด้วยหน่วยซ้ำตั้งแต่สองชนิดขึ้นไปเรียงต่อกัน สามารถแบ่งประเภทของโคพอลิเมอร์ออกเป็น 4 ประเภท ได้แก่ โคพอลิเมอร์แบบสุ่ม (Random copolymers) โคพอลิเมอร์แบบสลับ (Alternating copolymers) โคพอลิเมอร์แบบกราฟท์ (Graft copolymers) และโคพอลิเมอร์แบบช่วง (Block copolymers)

โคพอลิเมอร์แบบสุ่ม คือ โคพอลิเมอร์ที่มีสายโซ่โมเลกุลประกอบด้วยหน่วยซ้ำตั้งแต่สองชนิดขึ้นไปและหน่วยซ้ำมีการจัดเรียงลำดับอย่างไม่มีระเบียบ โคพอลิเมอร์ชนิดนี้มักเกิดจากปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันแบบเพิ่มเข้า (Addition polymerization) ระหว่างสารผสมของไวนิลมอนอเมอร์ (Vinyl monomer) สองชนิด ถ้า A และ B แทนหน่วยซ้ำของพอลิเมอร์แต่ละชนิดสามารถเขียนโครงสร้างของโคพอลิเมอร์แบบสุ่มได้เป็น AABAAABBABAAB และเรียกชื่อโคพอลิเมอร์นี้ว่า poly (A-co-B) เมื่อหน่วยซ้ำแรก (A) คือ หน่วยซ้ำซึ่งมีปริมาณสูงกว่าหน่วยซ้ำของอีกชนิดหนึ่ง ตัวอย่าง เช่น การสังเคราะห์โคพอลิเมอร์ยางแบบสุ่ม 75 เปอร์เซ็นต์ จากบิวทอะไดอีน และ 25 เปอร์เซ็นต์จากสไตรีน โคพอลิเมอร์ดังกล่าวมีชื่อว่า poly (butadiene-co-styrene)

โคพอลิเมอร์แบบสลับ คือ โคพอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยจำนวนหน่วยซ้ำสองชนิดในปริมาณที่เท่ากันและมีกระจายตัวของหน่วยซ้ำอย่างเป็นระเบียบ โดยถ้า A และ B แทนหน่วยซ้ำของพอลิเมอร์แต่ละชนิด สามารถเขียนโครงสร้างของโคพอลิเมอร์แบบสลับได้เป็น ABABABABA หรือ -(ABAB)-

โคพอลิเมอร์แบบกราฟท์ คือ โคพอลิเมอร์ซึ่งมีมอนอเมอร์ชนิดเดียวกันต่อเรียงกันเป็นสายโซ่ยาวซึ่งเป็นสายโซ่หลักและมีมอนอเมอร์อีกชนิดหนึ่งเป็นกิ่งก้านสาขาบนสายโซ่หลัก โครงสร้างของพอลิเมอร์เขียนชื่อเป็น poly (A-graft-B) ซึ่งหน่วยซ้ำแรกหมายถึงสายโซ่หลัก

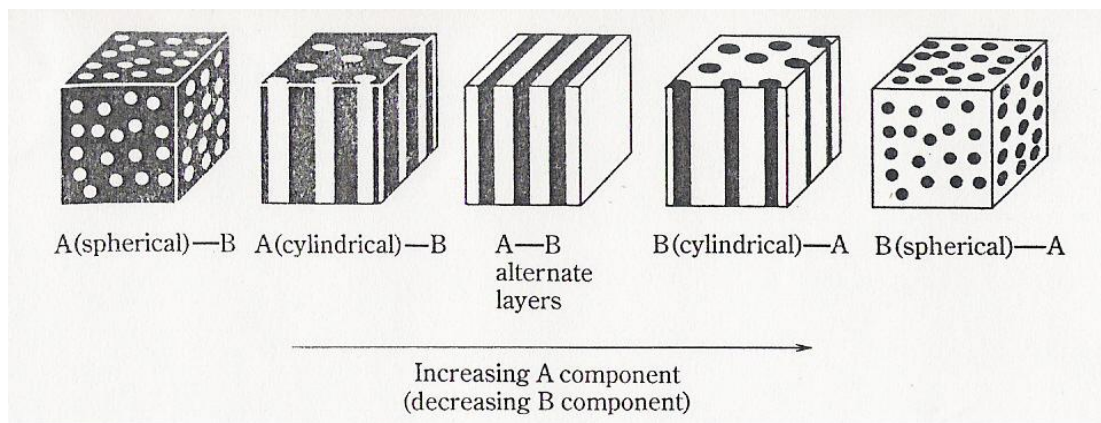
โคพอลิเมอร์แบบช่วง คือ โคพอลิเมอร์ที่เกิดจากการเชื่อมต่อกันระหว่างโพลิเมอร์ตั้งแต่สองชนิดขึ้นไป โดยมีการเรียงต่อกันเป็นสายโซ่ยาวเป็นช่วงๆ ถ้า {A} แทนโมเลกุลของพอลิเมอร์ชนิดหนึ่ง {B} แทนโมเลกุลของพอลิเมอร์ชนิดที่สอง และ n, m หรือ p คือจำนวนของหน่วยซ้ำที่ต่อกันเป็นสายโซ่โมเลกุล โคพอลิเมอร์แบบสองช่วง (Di-block) สามารถเขียนแทนด้วย $\{A_n\}\{B_m\}$ แบบสามช่วง (Tri-block) โครงสร้างเขียนแทนด้วย $\{A_n\}\{B_m\}\{C_p\}$ และแบบสามช่วงแซนวิช (Tri-block or sandwich block) โครงสร้างเขียนแทนด้วย $\{A_n\}\{B_m\}\{A_p\}$

ในงานวิจัยนี้สนใจศึกษาโคพอลิเมอร์เพียงประเภทเดียว คือ โคพอลิเมอร์แบบช่วง ซึ่งมีการเรียงลำดับกันเป็นเส้นตรงต่อกันยาวเป็นช่วงๆทำให้มีโครงสร้างโมเลกุลเป็นแบบเชิงเส้น (Linear structure) ถ้าให้ A แทนหน่วยซ้ำของพอลิเมอร์ชนิดที่หนึ่งและ B แทนหน่วยซ้ำของพอลิเมอร์ชนิดที่สอง สามารถเขียนโครงสร้างของโคพอลิเมอร์แบบสองช่วงได้เป็น



โดยทั่วไปพอลิเมอร์แต่ละชนิดไม่สามารถผสมรวมกันได้ การเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ต่างชนิดสามารถพิจารณาได้จากพารามิเตอร์อันตรกิริยา (Interaction parameter; χ) เมื่อนำพอลิเมอร์ต่างชนิดมาต่อกันเชิงเคมีเป็นโคพอลิเมอร์แบบช่วง พอลิเมอร์แต่ละช่วงซึ่งหลีกเลี่ยงการผสมกันจะพยายามแยกออกจากกัน เกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่า การแยกเฟสระดับจุลภาค (Microscopic phase separation) ภายในแต่ละเฟสซึ่งประกอบด้วยสายโซ่พอลิเมอร์ชนิดเดียวจะครอบคลุมบริเวณเล็กๆที่เรียกว่า โดเมน (Domain) ทั้งนี้ขนาดของโดเมนขึ้นอยู่กับความยาวของสายโซ่พอลิเมอร์ อย่างไรก็ตามสำหรับพอลิเมอร์ทั่วไปซึ่งมีน้ำหนักโมเลกุลในช่วงต่ำกว่าหนึ่งล้านกรัมต่อโมลจะมีโดเมนขนาดระดับต่ำกว่า 1 ไมโครเมตร โครงสร้างจากการแยกเฟสนี้จึงเรียกกันว่า โครงสร้างไมโครโดเมน (Microdomain structure) (Doi. 1997: 40)

โครงสร้างไมโครโดเมนนอกจากจะมีขนาดต่างกันแล้วยังมีรูปร่างที่ต่างกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสัดส่วนของพอลิเมอร์แต่ละช่วงในสายโซ่ ถ้ากำหนดให้ A แทนหน่วยซ้ำของพอลิเมอร์ชนิดที่หนึ่งและ B แทนหน่วยซ้ำของพอลิเมอร์ชนิดที่สองเชื่อมติดกันเป็นโคพอลิเมอร์แบบช่วง รูปร่างของไมโครโดเมนซึ่งขึ้นอยู่กับอัตราส่วนเชิงปริมาตรของแต่ละช่วง (Volume fraction) สามารถอธิบายได้จากจำนวนหน่วยซ้ำในสายโซ่ A (แทนด้วยสัญลักษณ์ N_A) ต่อจำนวนหน่วยซ้ำในสายโซ่ B (แทนด้วยสัญลักษณ์ N_B) สำหรับโคพอลิเมอร์แบบช่วงชนิด A-B ถ้า N_A มีค่าน้อยกว่า N_B สายโซ่ A จะประกอบตัวเป็นโดเมนเป็นแบบทรงกลมเรียงตัวอยู่ในโดเมน B ซึ่งเป็นเฟสต่อเนื่อง ถ้า N_A มีค่าเพิ่มขึ้นโครงสร้างโดเมนของสายโซ่ A จะเปลี่ยนไปเป็นแบบทรงกระบอกและเรียงตัวอยู่ในโดเมนของ B ซึ่งเป็นเฟสต่อเนื่อง ถ้า N_A มีค่าเท่ากับ N_B จะทำให้โครงสร้างโดเมนเปลี่ยนไปเป็นแบบชั้น ซึ่งมีลักษณะเป็นชั้นของโดเมน A และโดเมน B สลับกันไป ถ้า N_A มีค่ามากกว่า N_B สายโซ่ B จะมีโดเมนแบบทรงกระบอกหรือแบบทรงกลม และสายโซ่ A จะเป็นเฟสต่อเนื่องแทนสายโซ่ B ดังแสดงในภาพประกอบ 3 การแยกเฟสในระดับจุลภาคที่เกิดขึ้นนั้นเป็นพื้นฐานที่สำคัญในการควบคุมโครงสร้างระดับนาโนให้ได้ตามเป้าหมายและมีความหลากหลายในการนำไปประยุกต์ใช้ (Doi. 1997: 41)



ภาพประกอบ 2 แสดงลักษณะโครงสร้างโดเมนของโมเลกุลของโคพอลิเมอร์แบบช่วง

ที่มา: M. Doi (1997). *Introduction to Polymer Physics*. Translated by Howard See.

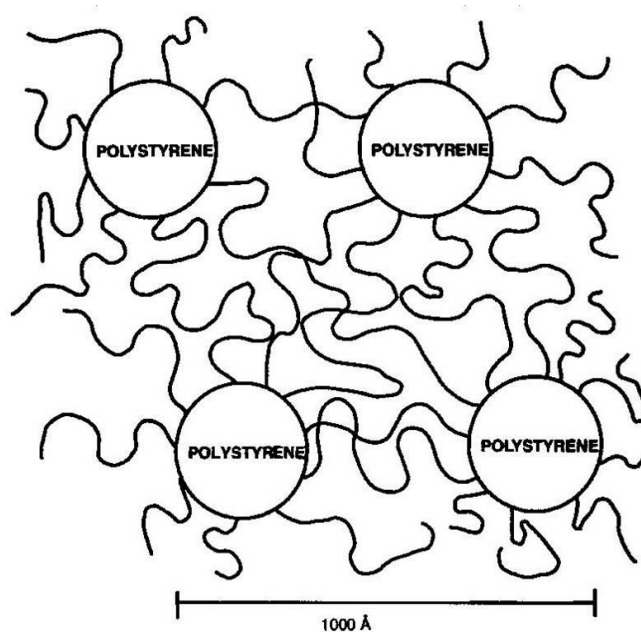
p. 41.

โคพอลิเมอร์แบบสามช่วงประเภทสไตรีน-ไอโซพรีน-สไตรีน (Styrene-Isoprene-Styrene Triblock Copolymers)

โคพอลิเมอร์แบบสามช่วงประเภทสไตรีน-ไอโซพรีน-สไตรีน เรียกกันว่า เทอร์โมพลาสติก-อีลาสโตเมอร์ (Thermoplastics elastomers) ประเภทหนึ่ง พอลิเมอร์นี้ได้จากการรวมกันของเทอร์โมพลาสติกในที่นี้คือ พอลิสไตรีน และอีลาสโตเมอร์ในที่นี้คือ พอลิไอโซพรีน ทำให้ได้พอลิเมอร์ที่มีคุณสมบัติผสมผสาน สำหรับที่อุณหภูมิห้องซึ่งสูงกว่าอุณหภูมิสถานะคล้ายแก้วของพอลิไอโซพรีนแต่ต่ำกว่าอุณหภูมิสถานะคล้ายแก้วของพอลิสไตรีน พอลิสไตรีนจะแข็งเกร็ง (Rigid) และพอลิไอโซพรีนจะมีความยืดหยุ่น (Elasticity) เหมือนยางทั่วไป ในกรณีที่สัดส่วนของพอลิสไตรีนน้อยกว่าพอลิไอโซพรีน พอลิไอโซพรีนจะเป็นวัสดุเนื้อหลักและพอลิสไตรีนจะเป็นโดเมนทรงกลมหรือทรงกระบอก ซึ่งความแข็งเกร็งของพอลิสไตรีนทำให้มันเป็นเหมือนตัวเชื่อมข้าม (Crosslink) ระหว่างสายโซ่พอลิไอโซพรีน การใช้พอลิสไตรีนเป็นตัวเชื่อมข้ามเชิงกายภาพสำหรับพอลิไอโซพรีนแทนการเชื่อมข้ามเชิงเคมีที่นิยมทำกันเป็นสิ่งที่มีความประโยชน์ในเชิงอุตสาหกรรมเพราะทำให้ยางนำมาหมุนเวียนใช้ใหม่ได้ สำหรับยางที่มีโครงสร้างตายแบบถาวรจากการเชื่อมข้ามเชิงเคมี เมื่อให้ความร้อนเข้าไปจะเสื่อมสภาพแต่ยางจากการเชื่อมข้ามเชิงกายภาพเช่นในโคพอลิเมอร์แบบสามช่วงประเภทสไตรีน-ไอโซพรีน-สไตรีน เมื่อให้ความร้อนเข้าไปพอลิสไตรีนจะหลอมเหลวทำให้สูญเสียสภาพการเป็นตัวเชื่อมข้ามและทำให้ยางพอลิไอโซพรีนนำมาขึ้นรูปใหม่ได้ ภาพประกอบ 3 แสดงการเชื่อมกันของพอลิสไตรีนและ

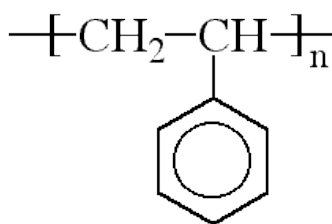
พอลิไอโซพรีนในโคพอลิเมอร์แบบสามช่วง พอลิเมอร์ที่เป็นองค์ประกอบของโคพอลิเมอร์แบบสามช่วง ประเภทสไตรีน-ไอโซพรีน-สไตรีนที่จะศึกษา คือ พอลิสไตรีน (Polystyrene; PS) และพอลิไอโซพรีน (Polyisoprene; PI) มีสมบัติและลักษณะดังต่อไปนี้

พอลิสไตรีนรู้จักกันในชื่อของไวนิล เบนซีน (Vinyl benzene) มีโครงสร้างดังภาพประกอบ 4 ดังที่กล่าวมาแล้วพอลิสไตรีนเป็นพอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมพลาสติก มีค่าความหนาแน่น 1050 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (kg/m^3) อุณหภูมิสถานะคล้ายแก้วและอุณหภูมิหลอมเหลวมีค่าเท่ากับ 95 องศาเซลเซียส และ 240 องศาเซลเซียส ตามลำดับ



ภาพประกอบ 3 แสดงการเชื่อมกันของสไตรีนและไอโซพรีนในโคพอลิเมอร์แบบสามช่วง

ที่มา: A.Tolstov.; et al. (2004). Thermoplastic Elastomers from Rubber and Recycled Polyethylene: Chemical Reactions at Interphases for Property Enhancement. *Polymer International*. 53: 1700.



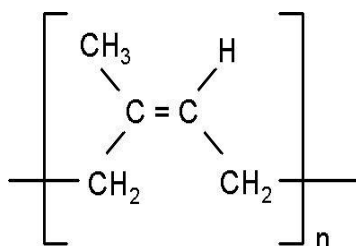
ภาพประกอบ 4 แสดงโครงสร้างของพอลิสไตรีน

ที่มา: ปิ่นสุภา ปีติรักษ์สกุล. (2545). *พอลิเมอร์เบื้องต้น* 1. หน้า 235.

พอลิสไตรีนเป็นที่รู้จักมานานกว่า 150 ปี แต่ยังไม่มีการผลิตในเชิงการค้าจนกระทั่งปี ค.ศ.1930 พอลิสไตรีนซึ่งผลิตขึ้นในเชิงการค้าเป็นพอลิเมอร์อสัณฐาน (Amorphous) พอลิสไตรีนผลิตได้หลายวิธีทั้งจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันทั้งแบบบัลค์ (Bulk polymerization) ปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบอิมัลชัน (Emulsion polymerization) และปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบแขวนลอย (Suspension polymerization) ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมมากที่สุด พอลิสไตรีนที่ผลิตได้ในเชิงการค้าจะมีการจัดเรียงตัวของหมู่อะโรเมติกภายในโครงสร้างเป็นแบบไม่เป็นระเบียบหรือเป็นแบบอะแทกติก (Atactic) มีคุณสมบัติแข็งเปราะคล้ายแก้ว มีค่าดัชนีหักเหแสงสูง มีค่าความต้านทานต่อแรงดึงอยู่ระหว่างพอลิเอทิลีนและพอลิฟลูออรีนซึ่งเป็นพอลิเมอร์ประเภทเดียวกันกับพอลิสไตรีน ถึงแม้ว่าพอลิสไตรีนจะมีความแข็งแรงสูงกว่าพอลิเอทิลีนถึงสองเท่าแต่พอลิสไตรีนจะค่อนข้างเปราะ โดยธรรมชาติพอลิสไตรีนจะโปร่งใสและสามารถเติมสีเพื่อทำให้ทึบแสงหรือโปร่งแสง จึงพบว่าพอลิสไตรีนถูกนำไปใช้งานทางด้านการตกแต่งในรูปของแผ่นพลาสติกใส พอลิสไตรีนมีความสามารถในการยอมให้แสงผ่านเท่ากับอะคริลิก อย่างไรก็ตามพอลิสไตรีนจะมีความว่องไวต่อแสงอัลตราไวโอเล็ตจึงไม่นิยมใช้พอลิสไตรีนกับงานกลางแจ้ง พอลิสไตรีนมีความต้านทานต่อน้ำมันแร่ ด่าง และน้ำ แต่สามารถละลายได้ในตัวทำละลายจำพวกไฮโดรคาร์บอน ดังนั้นจึงสามารถทำการเชื่อมพอลิสไตรีนโดยอาศัยตัวทำละลายได้ โดยทั่วไปจะพบพอลิสไตรีนเป็นชิ้นส่วนอุปกรณ์สมัยใหม่ ของเล่นเด็ก ก่อผนังหรืออุปกรณ์ภายในบ้าน สามารถใช้สำหรับเฟอร์นิเจอร์ และเป็นภาชนะถ้วยชาม ซึ่งมีความใสหรือบางครั้งอาจมีการเติมแต่งสีให้มีความสวยงาม มีความแข็งแรงและราคาถูก แต่มีความต้านทานต่อแรงกระแทกและความต้านทานต่อความร้อนค่อนข้างต่ำ อย่างไรก็ตามเนื่องจากพอลิสไตรีนเป็นเทอร์โมพลาสติกซึ่งมีสมบัติทางไฟฟ้าดี จึงถูกนำไปใช้งานด้านการไฟฟ้า เช่น นำไปใช้ในรูปแบบของคอยล์ เครื่องแปลงสัญญาณความถี่ (Frequency transformers) ตู้โทรทัศน์ (Television cabinets) โทรทัศน์ ไซมูแลเตอร์ และอุปกรณ์ตกแต่งภายในยานยนต์ พอลิสไตรีนสามารถขึ้นรูปด้วยแม่แบบได้ง่ายมีการหดตัวใน

แม่แบบต่ำ จึงสามารถขึ้นรูปโดยใช้กระบวนการฉีดเข้าแม่แบบ กระบวนการอัดรีดและกระบวนการเป่าในแม่แบบ นอกจากนี้ยังสามารถผ่านกระบวนการแปรรูปในขั้นทุติยภูมิได้ เช่น กระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิง การเชื่อมด้วยความถี่โซนิก (Sonic welding) การกดประทับด้วยความร้อน (Heat stamping) เป็นต้น (ปิ่นสุภา ปีติรักษ์สกุล. 2546 : 235)

สำหรับพอลิไอโซพรีนเป็นที่รู้จักกันในรูปของยาง (Rubber) หรือยางธรรมชาติ (Natural rubber) มีโครงสร้างดังภาพประกอบ 5 ก่อนการวัลคาไนเซชันพอลิไอโซพรีนเป็นพอลิเมอร์แบบสายโซ่ยาวซึ่งประกอบด้วยไอโซพรีน (C_5H_8) หลายหน่วยซ้ำๆกัน โดยที่ n มีค่าตั้งแต่ 15,000 - 20,000 และมีน้ำหนักโมเลกุล 100,000 ถึง 1,000,000 กรัมต่อโมล โดยมากมีการวัลคาไนเซชันทำให้สายโซ่โมเลกุลของยางเกิดการเชื่อมโยงกันเป็นโครงสร้างโมเลกุลแบบตาข่าย 3 มิติ พอลิไอโซพรีนจึงจัดเป็นพอลิเมอร์ประเภทอีลาสโตเมอร์



ภาพประกอบ 5 แสดงโครงสร้างของยางธรรมชาติ

ที่มา: ปิ่นสุภา ปีติรักษ์สกุล. (2545). *พอลิเมอร์เบื้องต้น* 2. หน้า 220.

พอลิไอโซพรีนเป็นพอลิเมอร์ที่ได้จากธรรมชาติซึ่งได้จากต้นไม้มือชื่อว่ายางพารามีชื่อเรียกทางพฤกษศาสตร์ว่า *Hevea brasiliensis* ซึ่งเดิมมีอยู่เฉพาะในทวีปอเมริกาเท่านั้นต่อมาได้นำมาปลูกในทวีปเอเชียและแอฟริกา ยางสามารถเจริญเติบโตได้ดีทางภาคใต้และภาคตะวันออกของประเทศไทย เนื่องจากส่วนประกอบของยางธรรมชาติเป็นไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีขั้ว ดังนั้นยางจึงละลายได้ดีในตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว เช่น เบนซีน เฮกเซน เป็นต้น โดยทั่วไปยางธรรมชาติมีโครงสร้างการจัดเรียงตัวของโมเลกุลแบบอสัณฐาน แต่ในบางสภาวะโมเลกุลของยางสามารถจัดเรียงตัวค่อนข้างเป็นระเบียบที่อุณหภูมิต่ำหรือเมื่อถูกยืดมันจะสามารถเกิดผลึก (Crystallize) ได้ การเกิดผลึกเนื่องจากอุณหภูมิต่ำ (Low temperature crystallization) จะทำให้ยางแข็งมากขึ้นแต่ถ้าอุณหภูมิสูงขึ้นยางก็จะ

อ่อนลงและกลับสู่สภาพเดิม การเกิดผลึกเนื่องจากการยืดตัว (Strain induced crystallization) ทำให้ยางมีสมบัติเชิงกลดี นั่นคือ ยางจะมีความทนทานต่อแรงดึง (Tensile strength) ความทนทานต่อการฉีกขาด (Tear resistance) และความทนทานต่อการขัดสี (Abrasion resistance) สูง (ปิ่นสุดา ปีติรักษ์สกุล. 2546: 236)

ยางธรรมชาติถูกนำไปใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ยางต่างๆ มากมาย เนื่องจากยางธรรมชาติมีสมบัติดีเยี่ยมในด้านการทนต่อแรงดึงแม้ไม่ได้เติมสารเสริมแรง (Reinforce materials) และมีความยืดหยุ่นสูงมากจึงเหมาะที่จะใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์บางชนิด เช่น ถุงมือยาง ถุงยางอนามัย ยางรัดของ เป็นต้น นอกจากนี้ยางธรรมชาติยังมีสมบัติเชิงพลวัต (Dynamic properties) ที่ดี มีความยืดหยุ่นสูง ในขณะที่มีความร้อนภายใน (Heat build-up) ที่เกิดขณะใช้งานต่ำและมีสมบัติการเหนียวติดกัน (Tack) ที่ดี จึงเหมาะสำหรับการผลิตยางรถบรรทุก ยางล้อเครื่องบินหรือใช้ผสมกับยางสังเคราะห์ในการผลิตยางรถยนต์ เป็นต้น ยิ่งไปกว่านั้นยางธรรมชาติมีความต้านทานต่อการฉีกขาด (Tear resistance) สูงทั้งที่อุณหภูมิต่ำและอุณหภูมิสูง จึงเหมาะสำหรับการผลิตยางกระเป๋าน้ำร้อน เพราะในการแกะชิ้นงานออกจากเบ้าในระหว่างกระบวนการผลิตจะต้องดึงชิ้นงานออกจากเบ้าพิมพ์ในขณะที่ร้อนยางที่ใช้จึงต้องมีค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดขณะร้อนสูง แม้ว่ายางธรรมชาติจะมีสมบัติที่ดีเหมาะสำหรับการผลิตผลิตภัณฑ์ยางต่างๆ มากมายแต่ยางธรรมชาติก็มีข้อเสียหลัก คือ การเสื่อมสภาพเร็วภายใต้แสงแดด ออกซิเจน โอโซน และความร้อน เนื่องจากโมเลกุลของยางธรรมชาติมีพันธะคู่ (Double bond) อยู่มาก ทำให้ยางไวต่อการทำปฏิกิริยากับออกซิเจนและโอโซนโดยมีแสงแดดและความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนั้นในระหว่างการผลิตผลิตภัณฑ์จึงต้องมีการเติมสารเคมีบางชนิด (สารในกลุ่มของ antidegradants) เพื่อยืดอายุการใช้งาน นอกจากนี้ยางธรรมชาติยังมีประสิทธิภาพการทนต่อสารละลายไม่มีขี้ผึ้ง น้ำมันและสารเคมีต่ำ จึงไม่สามารถใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ต้องสัมผัสกับสารต่างๆ ดังกล่าว (ปิ่นสุดา ปีติรักษ์สกุล. 2546: 238)

การปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตโคพอลิเมอร์แบบช่วงของสไตรีนและอิลาสโตเมอร์

ดังที่กล่าวในบทนำการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตใช้กันอย่างแพร่หลายกับไฮโมพอลิเมอร์ แต่สำหรับโคพอลิเมอร์แบบช่วงโดยเฉพาะโคพอลิเมอร์แบบสามช่วงประเภทสไตรีน-ไอโซพรีน-สไตรีน มีอยู่ไม่มากนัก การศึกษาทางวิจัยที่เกี่ยวข้องจึงอาจศึกษาจากระบบใกล้เคียง คือ โคพอลิเมอร์แบบช่วงระหว่างพอลิสไตรีนกับพอลิไอโซพรีน (Styrene-isoprene diblock copolymers) หรือโคพอลิเมอร์แบบช่วงระหว่างพอลิสไตรีนกับพอลิบิวทาไดอีน (Styrene-butadiene-styrene triblock copolymers) เนื่องจากพอลิบิวทาไดอีนเป็นอิลาสโตเมอร์แบบหนึ่งคล้ายกับพอลิไอโซพรีน

ในปี ค.ศ. 1999 ฟงและรีเนเกอร์ (Fong; & Reneker. 1999: 3488-3493) ศึกษาเส้นใยของ โพลีเอทิลีนแบบสามช่วงประเภทสไตรีน-บิวทาไดอีน-สไตรีน ซึ่งมีพอลิสไตรีน 31 เปอร์เซ็นต์โดย น้ำหนักและเป็นโพลีเอทิลีนแบบช่วงที่เรียงตัวแบบเชิงเส้น ตัวทำละลายที่ใช้ประกอบด้วยเตตระ- ไฮโดรฟอรัน (THF) 75 เปอร์เซ็นต์ และไดเมทิลฟอร์มาไมด์ (DMF) 25 เปอร์เซ็นต์ สารละลายใช้ ปริมาณของพอลีเอทิลีน 14 เปอร์เซ็นต์ ตัวรองรับเส้นใยกำหนดความอยู่ห่างจากปลายเข็มของกระบอก ฉีดเย็บเป็นระยะ 30 เซนติเมตร และใช้เครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission electron microscopy; TEM) วิเคราะห์ลักษณะของเส้นใยนาโนโพลีเอทิลีนแบบสามช่วง พบว่า เส้นใยนาโนที่ได้มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 100 นาโนเมตร ซึ่งมีค่าเล็กกว่า เส้นใยของผ้าทั่วไป 10 ถึง 100 เท่ามีความยืดหยุ่นและเรืองแสง นอกจากนี้ยังพบอีกว่าเกิดการแยกเฟสในระดับจุลภาคใน เส้นใยที่ได้จากการปั่นโดยพื้นฐานของการแยกเฟสในระดับจุลภาคไม่ค่อยสม่ำเสมอ โครงสร้างที่ได้ เป็นแบบทรงกลมและเมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้นโครงสร้างจะเปลี่ยนแปลงไปอาจเป็นแบบทรงกระบอก หรือแบบชั้น ซึ่งในการวิจัยครั้งนี้ไม่สามารถแยกแยะโครงสร้างทั้งสองออกจากกันได้แน่ชัด

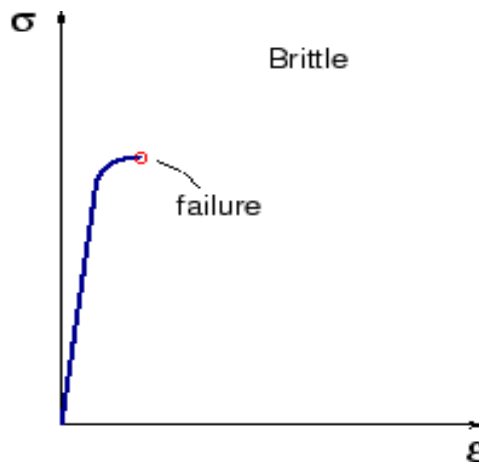
ในปี ค.ศ. 2005 วราพรและคนอื่นๆ (Varaporn; & et al. 2005: 1073-1080) ทำการศึกษาโพลีเอทิลีนที่มีเมทาคริลेट (Methacrylate) เป็นส่วนประกอบหลัก โดยใช้เอทานอลเป็นตัวทำละลาย ให้ความเข้มข้นของสารละลายมีค่า 10 ถึง 35 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้าในช่วง 7.5 ถึง 22.5 กิโลโวลต์ พบว่าเมื่อความเข้มข้นของสารละลายพอลีเอทิลีนมีค่าต่ำ (ได้แก่ความเข้มข้น 10 และ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) ลักษณะพื้นฐานของเส้นใยมีลักษณะเป็นลูกบิด เมื่อความเข้มข้น ของสารละลายพอลีเอทิลีนมีค่า 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักลักษณะพื้นฐานของเส้นใยมีลักษณะเป็นปม บนเส้นใยและเมื่อความเข้มข้นของสารละลายพอลีเอทิลีนมีค่าสูง (ได้แก่ความเข้มข้น 25 และ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) ลักษณะพื้นฐานของเส้นใยมีลักษณะเป็นเส้นใยที่มีความสม่ำเสมอ

ในปี ค.ศ. 2006 แคลราและคนอื่นๆ (Kalra; et al. 2006: 5453-5357) ศึกษาโครงสร้างของ เส้นใยโพลีเอทิลีนแบบช่วงประเภทสไตรีน-ไอโซพรีนโดยใช้สารละลายสองแบบ แบบที่หนึ่งใช้ พอลิ สไตรีนและพอลิไอโซพรีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 32×10^5 และ 13×10^5 กรัมต่อโมล ตามลำดับ นั้นคือมีไอโซพรีน 29 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ส่วนแบบที่สองใช้พอลิสไตรีนและพอลิไอโซ-พรีนที่มี น้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 74×10^5 และ 68×10^5 กรัมต่อโมลตามลำดับ นั้นคือมีไอโซพรีน 53 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ทั้งสองแบบใช้เตตระไฮโดรฟอรันเป็นตัวทำละลาย สารละลายแบบที่หนึ่งจะ ถูกเตรียมให้มีความเข้มข้นอยู่ในช่วง 30 ถึง 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และแบบที่สองจะถูกเตรียมให้มีความเข้มข้นอยู่ในช่วง 15 ถึง 25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ทั้งสองแบบใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้ามีค่า เท่ากับ 20 กิโลโวลต์และกำหนดระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับตัวรองรับเส้นใยเท่ากับ 10 เซนติเมตร การวิเคราะห์ลักษณะของเส้นใยด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและกล้องจุลทรรศน์

อิเล็กทรอนิกส์แบบส่องผ่าน พบว่าเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเส้นใยมีค่า 200 นาโนเมตรถึง 5 ไมโครเมตร สำหรับสารละลายแบบที่หนึ่งและสารละลายแบบที่สองพอลิไอโซพรีนจะมีโครงสร้างโดเมนเป็นแบบทรงกระบอกและแบบชั้นตามลำดับ โดยเรียงตัวอยู่ในพอลิสไตรีนซึ่งอยู่ในรูปแบบของเฟสต่อเนื่อง

สมบัติเชิงกลของพอลิสไตรีนและพอลิสไตรีนชนิดทนแรงกระแทกสูง

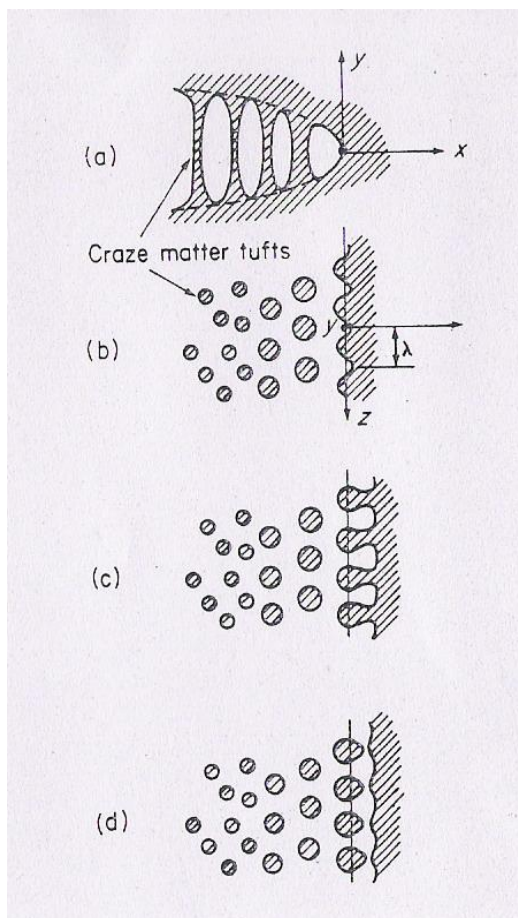
ดังที่กล่าวมาแล้วว่าพอลิสไตรีนเป็นพอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมพลาสติกซึ่งมีลักษณะแข็งเกร็งเมื่อใช้งานที่อุณหภูมิห้อง กล่าวคือ พอลิสไตรีนจะมีลักษณะเปราะ (Brittle) และมีการเสียรูปคล้ายวัสดุประเภทแก้วหรือเซรามิกซ์ ลักษณะเส้นโค้งระหว่างความเค้นและความเครียดของพอลิสไตรีนมีลักษณะดังภาพประกอบ 6 ที่ผ่านมามีการปรับปรุงพอลิสไตรีนเพื่อให้พอลิสไตรีนมีความเหนียวและความทนการกระแทกได้ดีขึ้น ตัวอย่างหนึ่งคือ พอลิสไตรีนทนการกระแทกสูง (High impact polystyrene) หรือ HIPS ในวัสดุนี้จะมีการผสมอนุภาคยางลงไปโนพอลิสไตรีน อนุภาคยางส่วนใหญ่ที่ใช้เป็นเม็ดทรงกลมมีขนาดอยู่ในช่วง 500 นาโนเมตร ถึง 10 ไมโครเมตร อนุภาคยางจะช่วยทำหน้าที่ให้เกิดเครซ (Craze) ได้ง่ายขึ้น เครซเป็นลักษณะโครงสร้างเฉพาะที่เกิดขึ้นระหว่างการเสียรูปของพอลิเมอร์ เครซเป็นช่องอากาศขนาดเล็กที่เกิดขึ้นเมื่อพอลิเมอร์ถูกดึงยืดออกดังภาพประกอบ 7 การเกิดเครซทำให้มีพื้นผิวใหม่ภายในวัสดุจำนวนมากโดยทั่วไปการเกิดพื้นผิวใหม่ภายในเนื้อวัสดุต้องอาศัยพลังงานพื้นผิว (Surface energy) การเกิดเครซจึงดูดกลืนพลังงานอย่างมากและทำให้พอลิเมอร์เหนียวขึ้น นอกจากนี้การเกิดเครซยังทำให้การเสียรูปของพอลิเมอร์เปลี่ยนจากแบบเปราะเป็นแบบยืดได้ (Ductile) การผสมอนุภาคยางซึ่งส่งเสริมการเกิดเครซจึงเป็นกลวิธีในการทำให้พอลิสไตรีนเหนียวขึ้นและมีสภาพดึงยืดได้ (Ductility) มากขึ้น (Ward; & Hadley. 2002: 246)



ภาพประกอบ 6 แสดงกราฟความเค้น (σ) - ความเครียดของพอลิสไตรีน (ϵ)

ที่มา: I. M. Ward; & D. W. Hadley. (2002). *An Introduction to the Mechanical Properties of Solid Polymers*. p. 246.

จากงานวิจัยเกี่ยวกับสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกแบบเหนียว ดังเช่น พอลิสไตรีนทนแรงกระแทกสูงนี้มีการศึกษาสมบัติต่างๆ ได้แก่ ค่ามอดูลัส (Modulus) ความต้านทานแรงดึงสูงสุด (Ultimate tensile strength) ความเครียดที่จุดขาด (Strain at break) และความแกร่ง (Toughness) เป็นต้น (Gong; et al. 2004: 1141; Govaert; et al. 2003: 457; Jérôme; et al. 1999: 2511; Mousavi; & Ramazani. 2005: 89)



ภาพประกอบ 7 แสดงลักษณะการเกิดครีซของพอลิเมอร์เมื่อ (a) เกิดแรงดึงยึดในแนวแกน y
 (b) ภาพตัดขวางของครีซ (c) และ (d) ลักษณะของครีซในช่วงเวลาที่ต่างกัน

ที่มา: I. M. Ward; & D. W. Hadley. (2002). *An Introduction to the Mechanical Properties of Solid Polymers*. p. 266.

สำหรับสมบัติเชิงกลของพอลิสไตรีนและพอลิสไตรีนทนแรงกระแทกสูงเป็นดังแสดงในตาราง 1 ทั้งนี้ค่าที่ได้ขึ้นอยู่กับตัวแปรในการทดสอบ เช่น อัตราการเพิ่มความเครียด ในส่วนของพอลิสไตรีนทนแรงกระแทกสูงค่าของสมบัติเหล่านี้แปรผันตามลักษณะและปริมาณของอนุภาคยางที่ใส่ในพอลิสไตรีน บักแนลและคนอื่นๆ (Bucknall; et al. 1986: 307-313) ได้ทำการศึกษาและพบว่ามอดูลัสของยังและความเค้นที่จุดครากลดลง เมื่อสัดส่วนโดยปริมาตรของอนุภาคยางเพิ่มขึ้น สำหรับสัดส่วนโดยปริมาตรยางที่เท่ากันมอดูลัสของยังและความเค้นที่จุดครากจะลดลง เมื่อขนาดของอนุภาคใหญ่

ขึ้น ในทางตรงกันข้ามความเหนียวจะเพิ่มขึ้นกับทั้งสัดส่วนของยางและขนาดของอนุภาคยาง (Dowling. 1999: 119)

ตาราง 1 แสดงสมบัติเชิงกลของพอลิस्टไทรีนและพอลิस्टไทรีนชนิดทนกระแทกสูง

ชนิดพอลิเมอร์	มอดูลัส เมกกะปาสคัล (MPa)	ความต้านทานแรง ดึงสูงสุด เมกกะปาสคัล (MPa)	ความเครียดที่จุด ขาด เปอร์เซ็นต์ (%)
พอลิस्टไทรีน	2300-3300	36-52	1.2-2.5
พอลิस्टไทรีนชนิดทนแรงกระแทกสูง	1100-2600	13-43	20-65

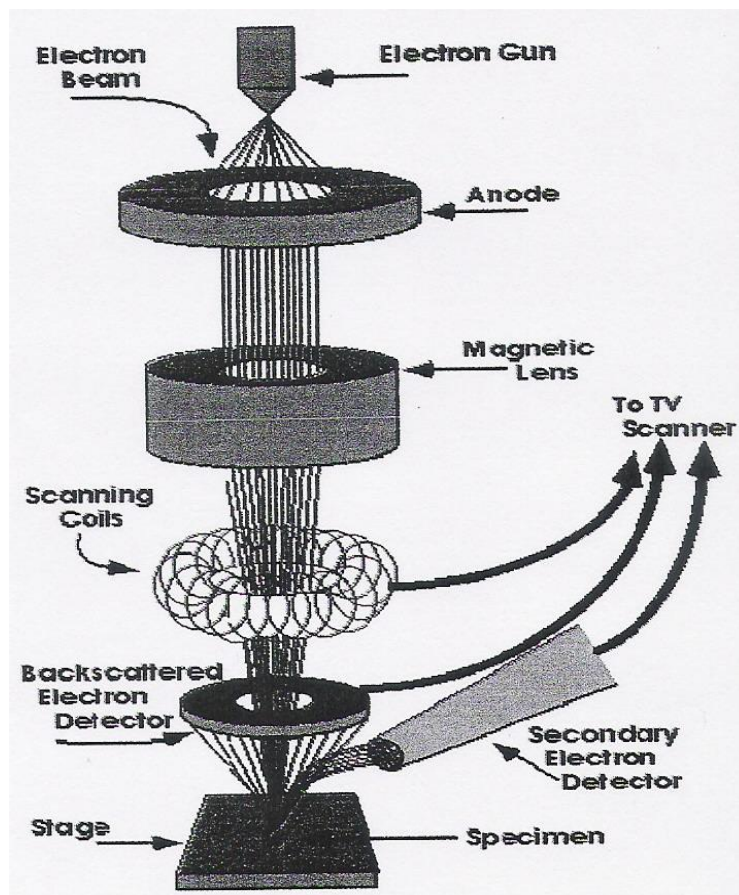
ที่มา: N. E. Dowling (1999). *Mechanical Behavior of Material: Engineering Methods for Deformation Fracture and Fatigue*. p.121.

สำหรับงานวิจัยนี้การปรับเปลี่ยนพอลิस्टไทรีนทำโดยการผสมเส้นใยที่ได้จากการปั่นด้วยไฟฟ้า-สถิตเข้าไป เส้นใยนี้เป็นโคพอลิเมอร์แบบช่วงของพอลิस्टไทรีนและพอลิไอโซพรีนโดยมีส่วนของพอลิ-ไอโซพรีนซึ่งเป็นวัสดุประเภทยางอยู่ 70 เปอร์เซ็นต์ เส้นใยซึ่งมีส่วนที่เป็นยางปริมาณมากนี้จะทำหน้าที่คล้ายกับอนุภาคยางในพอลิस्टไทรีนทนแรงกระแทกสูงที่กล่าวมาแล้วข้างต้น หากแต่ในกรณีนี้ยางอยู่ในรูปเส้นทรงกระบอกแทนที่จะเป็นทรงกลม นอกจากนี้ส่วนที่เป็นพอลิस्टไทรีนของโคพอลิเมอร์แบบช่วงในเส้นใยยังคงคาดว่าจะทำให้เส้นใยเข้ากับวัสดุเนื้อหลักซึ่งเป็นพอลิस्टไทรีนเช่นเดียวกันได้เป็นอย่างดี

เทคนิคการตรวจสอบวิเคราะห์เส้นใยด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy; SEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy) หรือ SEM เป็นเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์ลักษณะชิ้นงานในหลายสาขา เช่น วัสดุศาสตร์ ไมโครอิเล็กทรอนิกส์ ธรณีวิทยา ชีววิทยา และการแพทย์ เนื่องจากสาขาวิชาต่างๆจำเป็นต้องทำงานเกี่ยวกับวัสดุและชิ้นส่วนประกอบที่มีขนาดเล็กมากซึ่งไม่สามารถวิเคราะห์ได้จากเครื่องมือธรรมดาทั่วไป SEM มีจุดเด่น

ที่สำคัญ 3 ประการ ได้แก่ สามารถให้ภาพที่มีความชัดลึกสูง (High depth of field) สามารถให้กำลังแยกแยะเชิงระยะสูง (High spatial resolution) และสามารถใช้ร่วมกับเทคนิคอื่น เช่น Energy Dispersive Spectrometry (EDS) และ Wavelength Dispersive Spectrometry (WDS) เพื่อให้ข้อมูลเชิงเคมี



ภาพประกอบ 8 แสดงส่วนประกอบต่างๆของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ที่มา: บัญชา ธนบุญสมบัติ. (2540). จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบกวาด:ประตูสู่โลกระดับจุลภาค. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ. (ออนไลน์).

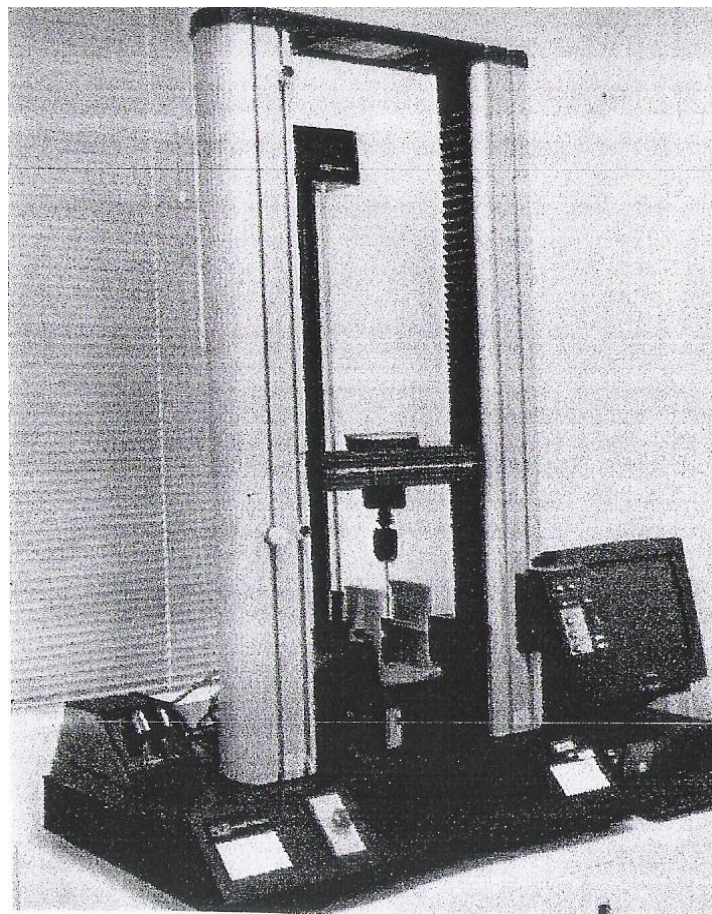
หลักการการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ส่วนประกอบและลักษณะการทำงานโดยสังเขปของเครื่อง SEM แสดงไว้ดังภาพประกอบ 8 สิ่งสำคัญอันดับแรกของเครื่อง SEM คือ อิเล็กตรอนต้องเป็นลำอิเล็กตรอนที่มีพลังงานเดียว (ความยาวคลื่นเดียว) ในส่วนบนสุดจะเป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน (Electron source) หรือ ปืนอิเล็กตรอน (Electron gun) โดยมีขดลวดทั้งสแตนด์รูปร่างเป็นแหล่งกำเนิดสำหรับการใช้ SEM กับพอลิเมอร์นั้น มีขีดจำกัดเนื่องจากความร้อนของลำอิเล็กตรอนอาจทำลายผิวหน้าของชิ้นงานได้ นอกจากนี้ยังมีความจำเป็นต้องเคลือบชิ้นงานพอลิเมอร์ซึ่งไม่นำไฟฟ้าด้วยตัวนำไฟฟ้า เช่น คาร์บอน หรือทองคำ อิเล็กตรอนจากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งให้เคลื่อนที่ลงมาตามคอลัมน์ด้วยความต่างศักย์ในช่วง 1 ถึง 30 กิโลโวลต์ (บางเครื่องอาจสูงถึง 50 กิโลโวลต์) ชิ้นงานหรืออานอนถูกยึดไว้กับอะไรที่มีศักย์ไฟฟ้าที่เป็นศูนย์ลำอิเล็กตรอนผ่านช่องในอานอนและถูกโฟกัสลงบนชิ้นงาน โดยทิศทางเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจะควบคุมโดยเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic lens) จำนวน 2 ชุดหรือมากกว่าและปริมาณของอิเล็กตรอนจะควบคุมโดยช่องเปิดที่มีขนาดต่างๆกันตามลักษณะการใช้งาน เลนส์คอนเดนเซอร์อันแรก (First condenser lens) อาจนับได้ว่าเป็นองค์ประกอบที่มีความสำคัญสูงสุดต่อการควบคุมทัศนศาสตร์ของอิเล็กตรอน (Electron optics) เนื่องจากเป็นเลนส์ที่ทำหน้าที่บีบลำอิเล็กตรอนที่ส่งลงมาจากแหล่งกำเนิดให้มีพื้นที่หน้าตัดเล็กลง (Demagnification) ส่วนเลนส์วัตถุ (Objective lens) ซึ่งเป็นเลนส์อันสุดท้ายนั้นทำหน้าที่โฟกัสลำอิเล็กตรอนให้ไปตกกระทบกับผิวของวัตถุเป้าหมาย โดยมีขดลวดกวาดภาพ (Scan coil) ทำหน้าที่กวาดลำอิเล็กตรอนบนผิววัตถุในกรอบสี่เหลี่ยม เมื่อลำอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งใหม่คุณลักษณะของสัญญาณที่ถูกวัดโดยเครื่องรับสัญญาณต่างๆเปลี่ยนแปลงไปและแสดงผลออกมาในรูปของความมืดสว่างของภาพซึ่งสอดคล้องกับลักษณะพื้นผิว กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดสามารถตรวจสอบตัวอย่างขนาดประมาณ 10 มิลลิเมตร ในการเตรียมชิ้นงานตัวอย่างจะติดอยู่บนสตัป (Stub) ซึ่งเคลื่อนที่ขึ้นลงบนแท่นวางชิ้นงานคล้ายกับการทำงานของแม่แรงยกของรถยนต์ ตัวอย่างพอลิเมอร์ที่เป็นฉนวนไฟฟ้าจะถูกเหนี่ยวนำทำให้สามารถนำไฟฟ้าได้ด้วยวิธีการระเหย (Evaporation) โลหะใส่ชิ้นตัวอย่างหรือการฉาบด้วยโลหะ (Sputtering) เช่น ทองคำ ทองคำผสมพาลาเดียม อลูมิเนียมหรือคาร์บอน เป็นต้น ในการระเหยใช้หลักการให้ความร้อนกับโลหะภายใต้สุญญากาศ มักใช้ทั้งสแตนด์เป็นขดลวดให้ความร้อนซึ่งสามารถต้านทานต่อความร้อนสูงที่ศักย์ไฟฟ้าต่ำ โดยทั่วไปขดลวดโลหะเมื่อได้รับความร้อนจะเกิดการหลอมเหลวและค่อยๆระเหยกลายเป็นไอ ผิวหน้าของโลหะหลอมเหลวจะสัมผัสกับไส้หลอดทั้งสแตนด์ด้วยแรงตึงผิวตลอดเวลา จากนั้นอะตอมของก๊าซโลหะแต่ละอะตอมเกิดการควบแน่นบนผิวชิ้นตัวอย่างภายในช่องสุญญากาศ (ปีนสุภา ปีติรักษ์สกุล. 2545: 220)

อย่างไรก็ตามควรระลึกเสมอว่า การเคลือบผิวชิ้นตัวอย่างนี้เพื่อให้ชิ้นงานนำไฟฟ้าได้ ดังนั้นในการเคลือบผิวควรครอบคลุมพื้นที่ทั้งหมดที่ต้องการตรวจสอบและการเคลือบต้องต่อเนื่องติดต่อกันเป็นเนื้อเดียวกันตลอดตั้งแต่ด้านข้างของชิ้นงานจนกระทั่งถึงตัวสตั๊ป เพื่อทำให้เกิดสภาพการนำไฟฟ้าบนพื้นที่ทั้งหมดที่สัมผัสล้าอิเล็กตรอนตลอดจนแทนวางชิ้นตัวอย่างซึ่งมีศักย์ไฟฟ้าเป็นศูนย์ บ่อยครั้งอาจมีการทาสีซึ่งมีส่วนผสมของเงินหรือกราไฟท์บนผิวของชิ้นตัวอย่างก่อนการทาสารเหนียวคล้ายกาวเพื่อทำให้เกิดสภาพการนำไฟฟ้าถึงกันได้ด้วย

เทคนิคการทดสอบแรงดึงด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal tensile testing machine; UTM)

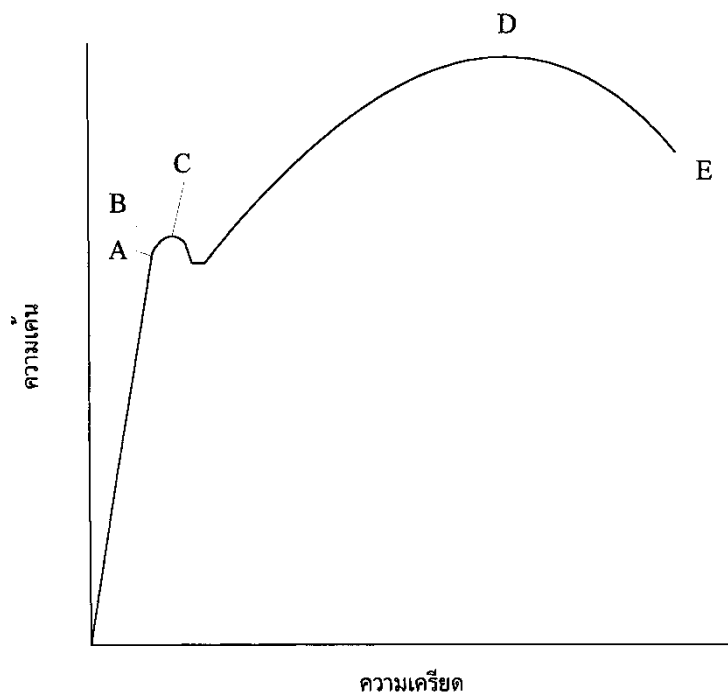
เครื่องมือที่ใช้วัดความเค้นและความเครียดที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย คือ เครื่องทดสอบวัสดุอเนกประสงค์ (Universal tensile testing machine) แสดงดังภาพประกอบ 9 เครื่องมือดังกล่าวนี้ประกอบด้วย อุปกรณ์ที่ใช้ในการจับชิ้นงานหรือหัวจับ (Grips or jaws) สองตัว หัวจับตัวหนึ่งอยู่หนึ่งติดกับแท่นเครื่อง ส่วนหัวจับอีกตัวหนึ่งสามารถเคลื่อนที่ได้และจะยึดติดกับตัววัดแรงหรือโหลดเซลล์ (Load cell) ในการทดสอบนั้นจะต้องนำชิ้นตัวอย่างที่เตรียมใส่ระหว่างตัวหัวจับทั้งสองข้าง ส่วนปลายของชิ้นตัวอย่างแต่ละข้างจะถูกหนีบแน่นด้วยหัวจับทั้งสอง เมื่อหัวจับที่เคลื่อนที่ได้เคลื่อนตัวออกห่างจากหัวจับที่อยู่กับที่ชิ้นตัวอย่างจะถูกดึงยืดออก ระดับการยืดตัวของชิ้นตัวอย่างซึ่งเท่ากับระยะที่หัวจับเคลื่อนที่ไปนั้นจะถูกบันทึกในคอมพิวเตอร์ ระยะยืดนี้สามารถนำมาคำนวณหาความเครียดของชิ้นตัวอย่างได้หากทราบความยาวเบื้องต้น ในขณะเดียวกันเมื่อชิ้นตัวอย่างยืดตัวออกพันธะภายในวัสดุออกแรงต้านซึ่งแรงต้านการยืดตัวของชิ้นตัวอย่างจะสมดุลกับแรงของหัวจับและโหลดเซลล์ ทำให้สามารถวัดแรงต้านภายในชิ้นตัวอย่างได้โดยอ่านค่าแรงของโหลดเซลล์ ค่าของแรงจะถูกบันทึกในคอมพิวเตอร์และสามารถนำมาคำนวณหาความเค้นได้เมื่อทราบพื้นที่หน้าตัดของชิ้นตัวอย่าง เครื่องทดสอบแรงดึงสามารถตั้งคำสั่งต่างๆไว้ล่วงหน้า เช่น สามารถกำหนดให้ดึงชิ้นตัวอย่างที่อัตราเร็วในการดึงตามต้องการ สามารถกำหนดระยะยืดที่จะสิ้นสุดการทดสอบ กระทั่งสามารถสั่งให้ตัววัดแรงเคลื่อนที่กลับสู่ตำแหน่งเริ่มต้นอย่างอัตโนมัติเมื่อถึงระยะยืดที่กำหนด ในการทดสอบแรงดึงชิ้นงานถูกเตรียมโดยยึดปลายแต่ละข้างของชิ้นงานไว้ด้วยหัวหนีบ เมื่อหัวหนีบทั้งสองนี้เคลื่อนที่ออกจากกันชิ้นงานก็จะยืดออก ชิ้นงานที่มีลักษณะเป็นแท่งสี่เหลี่ยมผืนผ้าอาจไม่เหมาะสมสำหรับใช้ทดสอบเนื่องจากมักปรากฏการแตกหักขึ้นในบริเวณใดบริเวณหนึ่งภายนอกช่วงความยาวของชิ้นงานนั้นดังเช่นในบริเวณที่ถูกหนีบ ดังนั้นจึงนิยมเตรียมชิ้นงานในรูปร่างคล้ายดรัมเบลล์ (Drumbell) คือ ปลายทั้งสองด้านจะมีขนาดโตกว่าบริเวณส่วนกลางของชิ้นงาน ทั้งนี้เพื่อให้การดึงเป็นไปอย่างสมบูรณ์แบบและขาดบริเวณตรงกลาง (ปิ่นสุภา ปิติรักษ์สกุล, 2545: 249)



ภาพประกอบ 9 แสดงภาพเครื่องทดสอบอเนกประสงค์

ที่มา: ปิ่นสุภา ปิติรักษ์สกุล. (2545). การวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของพอลิเมอร์. หน้า 250.

สำหรับวัสดุทั่วไปเส้นโค้งระหว่างความเค้น-ความเครียดมีลักษณะดังภาพประกอบ 10 เมื่อเริ่มดึงขึ้นทดสอบขึ้นทดสอบจะค่อยๆยืดออก ในช่วงแรกจากจุดเริ่มต้นจนถึงจุดหนึ่ง (จุด A) ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดจะเป็นสัดส่วนคงที่ ทำให้ได้กราฟที่เป็นเส้นตรงตามกฎของฮุก (Hook's law) ซึ่งกล่าวว่าความเค้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเครียด ค่าคงที่ในการแปรผันตรงระหว่างความเค้นและความเครียดคือค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น (Elastic modulus) ซึ่งเป็นปริมาณที่บอกความแข็งแรงดึงของวัสดุ จุด A นี้ เรียกว่าพิสัยสัดส่วน (Proportional Limit) และภายใต้พิสัยสัดส่วนนี้ วัสดุจะแสดงพฤติกรรมการคืนรูปแบบยืดหยุ่น (Elastic) นั่นคือเมื่อปล่อยแรงกระทำขึ้นทดสอบจะกลับไปมีขนาดเท่าเดิม



ภาพประกอบ 10 เส้นโค้งความเค้น-ความเครียด (Stress-Strain Curve)

ที่มา: ปิ่นสุภา ปิติรักษ์สกุล. (2545). การวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของพอลิเมอร์. หน้า 246.

เมื่อเราเพิ่มแรงกระทำต่อไปจนเกินพิกัดสัดส่วน เส้นกราฟจะค่อย ๆ โค้งออกจากเส้นตรง วัสดุหลายชนิดจะยังคงแสดงพฤติกรรมการคืนรูปได้อีกเล็กน้อยจนถึงจุด ๆ หนึ่ง (จุด B) ซึ่งเรียกว่า พิกัดยืดหยุ่น (Elastic limit) จุดนี้เป็นจุดกำหนดความเค้นสูงสุดที่จะไม่ทำให้เกิดการแปรรูปถาวร (Permanent Deformation or Offset) เมื่อผ่านจุดนี้ไปแล้ววัสดุจะมีการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวรหรือแบบพลาสติก (Plastic Deformation) ลักษณะการเริ่มต้นการเปลี่ยนรูปร่างถาวรมีความแตกต่างกันตาม ชนิดของวัสดุ จุด C เป็นจุดที่เกิดการเปลี่ยนรูปร่างแบบพลาสติกเรียกว่าจุดคราก (Yield Point) และค่าของความเค้นที่จุดนี้ เรียกว่า ความเค้นจุดคราก (Yield Stress) หรือ ความแข็งแรง ณ จุดคราก (Yield Strength) ความแข็งแรง ณ จุดครากนี้มีประโยชน์กับวิศวกรรมมากเพราะเป็นจุดแบ่งระหว่างพฤติกรรม การคืนรูปกับพฤติกรรม การเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวร ในกรณีของโลหะจะเป็นค่าความแข็งแรงสูงสุดที่เรา จะใช้ประโยชน์จากวัสดุได้โดยไม่เกิดความเสียหาย หลังจากจุดครากแล้ววัสดุจะเปลี่ยนรูปร่างถาวร

โดยความเค้นจะเพิ่มอย่างช้าๆที่จนถึงจุด D ค่าความเค้นที่จุดนี้ เรียกว่า ความต้านทานแรงดึงสูงสุด (Ultimate Strength) ซึ่งเป็นค่าความเค้นสูงสุดที่วัสดุจะทนได้ เนื่องจากวัสดุหลายชนิดสามารถเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกได้มาก ค่าความเค้นสูงสุดนี้สามารถนำมาใช้แทนความเค้น ณ จุดครากในการพิจารณาการใช้งานของวัสดุได้ นอกจากนี้ค่านี้ยังใช้เป็นดัชนีเปรียบเทียบคุณสมบัติของวัสดุได้ด้วย ทั้งนี้คำว่าความแข็งแรง (Strength) ของวัสดุหรือกำลังวัสดุนั้นโดยทั่วไปจะหมายถึงค่าความเค้นสูงสุดที่วัสดุทนได้นั่นเอง ที่จุดสุดท้าย (จุด E) ของกราฟเป็นจุดที่วัสดุเกิดการแตกหรือขาดออกจากกัน (Fracture) ความเค้น ณ จุดแตกหักนี้ เรียกว่า ความเค้นประลัย (Rupture Strength) สำหรับโลหะบางชนิด เช่น เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำหรือโลหะเหนียว ค่าความเค้นประลัยนี้จะต่ำกว่าความเค้นสูงสุด เพราะเมื่อเลยจุด D ไป พื้นที่ภาคตัดขวางของชิ้นตัวอย่างลดลง ทำให้พื้นที่ที่จะต้านทานแรงดึงลดลงด้วย (ปิ่นสุภา ปิติรักษ์สกุล. 2545: 246)

นอกจากค่ามอดูลัสและความแข็งแรงของวัสดุแล้ว สมบัติเชิงกลอีกประการที่สามารถคำนวณได้จากกราฟระหว่างความเค้น-ความเครียด คือ ความแกร่ง (Toughness) ความแกร่งนี้ สอดคล้องกับปริมาณพลังงานที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงรูปร่างวัสดุ ซึ่งคำนวณได้จากพื้นที่ใต้กราฟระหว่างความเค้นและความเครียด

บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

ในการวิจัยนี้มีการเตรียมเส้นใยโคพอลิเมอร์แบบสามช่วงประเภทสไตรีน-ไอโซพรีน-สไตรีน โดยการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตและมีการนำเส้นใยไปประยุกต์ใช้โดยผสมในพอลิสไตรีน รายละเอียดเกี่ยวกับการดำเนินงานวิจัย แบ่งออกตามหัวข้อดังต่อไปนี้

วัสดุที่ใช้ในการวิจัย

1. โคพอลิเมอร์แบบสามช่วงประเภทสไตรีน-ไอโซพรีน-สไตรีน (Styrene - Isoprene - Styrene Triblock Copolymers) ภายใต้ชื่อทางการค้า SIS ผลิตโดยบริษัท Dextor polymer
2. ตัวทำละลายเตตระไฮโดรฟอรัน (Tetrahydrofuran; THF) จากบริษัท Merck KgaA
3. ตัวทำละลายไดเมทิลฟอร์มมาไมด์ (Dimethylformamide; DMF)

จากบริษัท Merck KgaA

4. เครื่องกำเนิดไฟฟ้าศักย์สูง (High-voltage power supply) ยี่ห้อ Goldtool รุ่น HY3003
5. แผ่นอะลูมิเนียมฟอยล์ขนาด 8 x10 เซนติเมตร
6. กระจกฉีดยาพร้อมหัวเข็มเบอร์ 22 (เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 0.7x1.25 มิลลิเมตร)
7. แผ่นฟิล์มพอลิสไตรีน
8. เครื่องอัดรีดร้อน (Compression Molding Machine)

อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์โคพอลิเมอร์แบบสามช่วง

1. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy ; SEM) รุ่น JSM 5410 (JEOL)
2. เครื่องทดสอบแรงดึง (Universal Testing Tensile Machine) ชนิด static โมเดล 55R4502

สถานที่ในการวิจัย

1. ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
2. ภาควิชาคหกรรมศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
3. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC)

ขั้นตอนการวิจัย

ขั้นตอนการเตรียมสารละลายพอลิเมอร์

1. ใส่โคพอลิเมอร์แบบสามช่วงประเภทสไตรีน-ไอโซพรีน-สไตรีนในขวดแก้วสะอาดที่เตรียมไว้จำนวน 7 ขวด แล้วนำไปชั่งให้ได้มวลพอลิเมอร์ตามต้องการดังตาราง 2
2. เติมตัวทำละลายเตตระไฮโดรฟอรัลซึ่งเป็นตัวทำละลายลงในขวดที่บรรจุโคพอลิเมอร์แบบสามช่วงไว้ในปริมาณ ดังตาราง 2 ปิดฝาให้แน่นตั้งทิ้งไว้ให้พ่นแสงเป็นเวลาประมาณ 1 ถึง 2 วัน จะได้สารละลายโคพอลิเมอร์แบบสามช่วงประเภทสไตรีน-ไอโซพรีน-สไตรีนที่มีความเข้มข้นตามต้องการ

ตาราง 2 แสดงปริมาณสารละลายพอลิเมอร์โดยใช้เตตระไฮโดรฟอรัลเป็นตัวทำละลาย

ความเข้มข้นของสารละลาย โคพอลิเมอร์แบบสามช่วงประเภท สไตรีน-ไอโซพรีน-สไตรีน เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (wt%)	ปริมาณโคพอลิเมอร์แบบสามช่วง ประเภทสไตรีน-ไอโซพรีน-สไตรีน กรัม (g)	ปริมาณเตตระ- ไฮโดรฟอรัล กรัม (g)
10	2.0	18.0
12	2.4	17.6
14	2.8	17.2
16	3.2	16.8
18	3.6	16.4
20	4.0	16.0

3. ทำการเตรียมสารซ้ำข้อ 1 ถึง 2 โดยเปลี่ยนตัวทำละลายความเป็นตัวทำละลายเตตระไฮโดรฟอรัลและตัวทำละลายไดเมทิลฟอรัลมาไม่ตีในอัตราส่วน 75:25 ดังตาราง 3

ตาราง 3 แสดงปริมาณสารละลายพอลิเมอร์โดยใช้เตตระไฮโดรฟอรันและไดเมทิลฟอร์มาไมด์ในอัตราส่วน 75:25 เป็นตัวทำละลาย

ความเข้มข้นของสารละลายโคพอลิเมอร์แบบสามช่วงประเภทสไตรีน-ไอโซพรีน-สไตรีนเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (wt%)	ปริมาณโคพอลิเมอร์แบบสามช่วงประเภทสไตรีน-ไอโซพรีน-สไตรีน กรัม (g)	ปริมาณเตตระไฮโดรฟอรัน กรัม (g)	ปริมาณไดเมทิลฟอร์มาไมด์ กรัม (g)
10	2.0	13.5	4.5
12	2.4	13.2	4.4
14	2.8	12.9	4.3
16	3.2	12.6	4.2
18	3.6	12.3	4.1
20	4.0	12.0	4.0

ขั้นตอนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต

กระบวนการปั่นเส้นใยเป็นไปตามขั้นตอนต่อไปนี้

1. พันแผ่นอะลูมิเนียมฟอยล์บนแกนของตัวรับเส้นใย
2. เทสารละลายโคพอลิเมอร์แบบสามช่วงประเภทสไตรีน-ไอโซพรีน-สไตรีนที่ใช้เตตระไฮโดรฟอรันเป็นตัวทำละลายมีความเข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่เตรียมไว้ลงในกระบอکیدยาในปริมาตร 5 มิลลิลิตร แล้วนำกระบอکیدยาไปประกอบเข้ากับชุดอุปกรณ์การปั่นในส่วนที่เป็นขาตั้ง
3. ให้ระยะห่างระหว่างปลายกระบอکیدยาที่บรรจุสารละลายโคพอลิเมอร์แบบสามช่วงประเภทสไตรีน-ไอโซพรีน-สไตรีนกับอุปกรณ์รองรับเส้นใยคงที่เท่ากับ 30 เซนติเมตรและให้เข็มชิดยาเอียงทำมุม 45 องศากับแนวตั้ง
4. ต่อศักย์ไฟฟ้าขั้วบวกเข้าที่ปลายเข็มและต่อขั้วลบเข้าที่อุปกรณ์รองรับเส้นใย
5. เปิดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ปรับความต่างศักย์ไฟฟ้าให้มีค่า 10 กิโลโวลต์ ทำการปั่นสะสมเส้นใยเป็นเวลา 10 นาที แล้วปิดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (ก่อนปิดสวิตช์ต้องลดความต่างศักย์ไฟฟ้าลงมาให้มีค่าประมาณ 5 กิโลโวลต์) แล้วแกะแผ่นอะลูมิเนียมฟอยล์ออกจากแกนรองรับเส้นใย ผึ่งเส้นใยให้แห้งสนิท (ทิ้งไว้ประมาณ 1 วัน) จะได้เส้นใยนาโนของโคพอลิเมอร์แบบสามช่วงประเภทสไตรีน-

ไอโซพรีน-สไตรีนที่มีความเข้มข้นของสารละลายเท่ากับ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้เท่ากับ 10 กิโลโวลต์ เก็บไว้เป็นตัวอย่างที่ 1

6. ทำการวิจัยซ้ำข้อ 1 ถึง 5 โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลายเท่าเดิม แต่เปลี่ยนความต่างศักย์ไฟฟ้าเป็น 12 14 16 18 และ 20 กิโลโวลต์ ตามลำดับ

7. ทำการวิจัยซ้ำข้อ 1 ถึง 6 โดยเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายของสารละลายเป็น 12 14 16 18 20 และ 22 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตามลำดับ

8. ทำการวิจัยซ้ำข้อ 1 ถึง 7 โดยเปลี่ยนสารละลายพอลิเมอร์เป็นสารละลายโคพอลิเมอร์แบบสามช่วงประเภทสไตรีน-ไอโซพรีน-สไตรีน โดยใช้เตตระไฮโดรฟอรันและไดเมทิลฟอร์มาไมด์ในอัตราส่วน 75:25 เป็นตัวทำละลาย

9. จากการวิจัยจะได้ตัวอย่างเส้นใยทั้งหมด 84 ตัวอย่าง

ขั้นตอนการวิเคราะห์เส้นใยโคพอลิเมอร์แบบสามช่วง

ทำการวิเคราะห์เส้นใยด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ณ ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ

ขั้นตอนการทำวัสดุเชิงประกอบจากเส้นใย

1. ทำแผ่นฟิล์มพอลิสไตรีน โดยใส่พอลิสไตรีนในขวดแก้วสะอาดที่เตรียมไว้ แล้วนำไปชั่งให้ได้มวลพอลิเมอร์ โดยใช้เตตระไฮโดรฟอรันเป็นตัวทำละลาย กำหนดให้ความเข้มข้นของสารละลายพอลิสไตรีน 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ใช้ฝาปิดให้แน่นเก็บให้แห้งเป็นเวลา 4 ถึง 5 วัน จะได้สารละลายพอลิสไตรีนที่มีความเข้มข้นตามต้องการ

2. นำสารละลายพอลิสไตรีนเทลงในแม่พิมพ์ในปริมาณ 100 มิลลิลิตร ใช้กระดาษฟอยล์ปิดก่อนเก็บให้แห้งเป็นเวลา 2 ถึง 3 วัน

3. นำแผ่นฟิล์มพอลิสไตรีนออกจากแม่พิมพ์ แบ่งฟิล์มที่ได้เป็นสองส่วน ส่วนหนึ่งนำไปทำเป็นวัสดุเชิงประกอบโดยการผสมเส้นใยโคพอลิเมอร์ที่ได้จากการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต อีกส่วนหนึ่งเก็บไว้เป็นตัวอย่างสำหรับการทดสอบเปรียบเทียบ

4. พันแผ่นฟิล์มพอลิสไตรีนแทนแผ่นอะลูมิเนียมฟอยล์บนแกนของตัวรับเส้นใย

5. จากขั้นตอนการวิเคราะห์เส้นใยโคพอลิเมอร์แบบสามช่วง เลือกสารละลายโคพอลิเมอร์แบบสามช่วงประเภทสไตรีน-ไอโซพรีน-สไตรีนและค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ทำให้ได้เส้นใยมีลักษณะสม่ำเสมอและมีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็ก คือ ใช้สารละลายที่มีความเข้มข้น 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ 16 กิโลโวลต์

6. เทสสารละลายโคพอลิเมอร์แบบสามช่วงประเภทสไตรีน-ไอโซพรีน-สไตรีนที่เลือกไว้ลงในกระบอกฉีดยาในปริมาตร 5 มิลลิลิตร แล้วนำกระบอกฉีดยาไปประกอบเข้ากับชุดอุปกรณ์การปั่นในส่วนที่เป็นชาต้ง

7. ให้ระยะห่างระหว่างปลายกระบอกฉีดยาที่บรรจุสายละลายโคพอลิเมอร์แบบสามช่วงประเภทสไตรีน-ไอโซพรีน-สไตรีนกับอุปกรณ์รองรับเส้นใยคงที่เท่ากับ 30 เซนติเมตรและให้เข็มฉีดยาเอียงทำมุม 45 องศากับแนวตั้ง

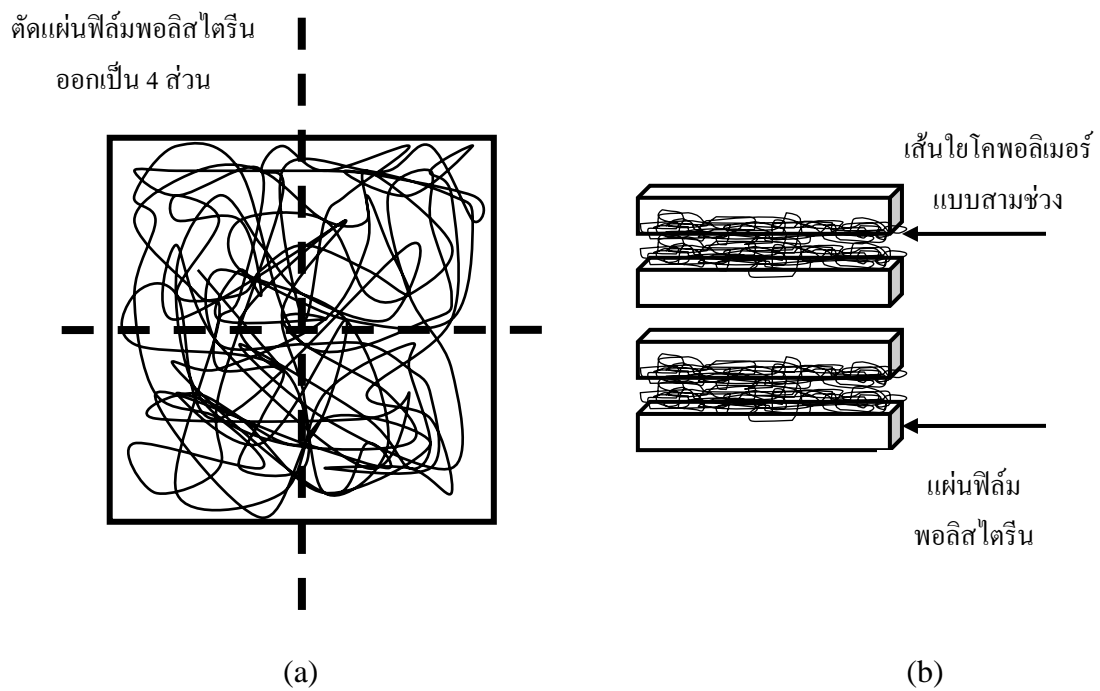
8. ต่อดักย์ไฟฟ้าชั่วคราวเข้าที่ปลายเข็มและต่อขั้วลบเข้าที่อุปกรณ์รองรับเส้นใย

9. เปิดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ปรับความต่างศักย์ไฟฟ้าให้เท่ากับค่าที่เลือกไว้ตามข้อ 2 ทำการปั่นผสมเส้นใยเป็นเวลา 10 นาที แล้วปิดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (ก่อนปิดสวิตช์ต้องลดความต่างศักย์ไฟฟ้าลงมาให้มีค่าประมาณ 5 กิโลโวลต์) แล้วแกะแผ่นฟิล์มพอลิสไตรีนออกจากแกนรองรับเส้นใย ผึ่งเส้นใยให้แห้งสนิท (ทิ้งไว้ประมาณ 1 วัน)

10. นำตัวอย่างแผ่นพอลิสไตรีนที่มีเส้นใยกระจายอยู่แต่ละแผ่นมาตัดและซ้อนทับกัน โดยนำด้านที่ทำการปั่นเส้นใยมาซ้อนทับเข้าหากันดังภาพประกอบ 11 จากนั้นนำไปอบอ่อน (Anneal) ด้วยเครื่องอัดร้อน เพื่อให้ได้ตัวอย่างวัสดุเชิงประกอบที่มีเส้นใยโคพอลิเมอร์แบบสามช่วงประเภทสไตรีน-ไอโซพรีน-สไตรีน ปนอยู่เป็นชั้นๆ ที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส โดยทำการเปิดเครื่องก่อนทำการอบอ่อนเป็นเวลา 3 นาที ใช้เวลาในการกดชิ้นงาน 2.5 นาที และทำการหล่อเครื่องอบอ่อนด้วยน้ำเย็นเป็นเวลา 4.5 นาที

11. นำตัวอย่างแผ่นฟิล์มพอลิสไตรีนในข้อ 2 ที่ไม่ได้ผสมเส้นใยมาซ้อนทับกันและอบอ่อน (anneal) ด้วยเครื่องอัดร้อน ที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส โดยทำการเปิดเครื่องก่อนทำการอบอ่อนเป็นเวลา 3 นาที ใช้เวลาในการกดชิ้นงาน 2.5 นาที และทำการหล่อเครื่องอบอ่อนด้วยน้ำเย็นเป็นเวลา 4.5 นาที เช่นเดียวกับตัวอย่างในข้อ 10.

12. จากการวิจัยจะได้ตัวอย่างทั้งหมด 2 ตัวอย่าง



ภาพประกอบ 11 การเตรียมแผ่นฟิล์มก่อนนำไปอบอ่อน (a) แสดงลักษณะการตัดแผ่นฟิล์มและ (b) แสดงการการซ้อนทับของแผ่นฟิล์มที่มีเส้นไฮผสมอยู่เพื่อทำการอบอ่อนให้ได้วัสดุเชิงประกอบ

ขั้นตอนการวิเคราะห์วัสดุเชิงประกอบจากเส้นใย

วิเคราะห์สมบัติเชิงกลของทั้ง 3 ตัวอย่างโดยใช้เครื่องทดสอบแรงดึง ณ ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ

บทที่ 4

ผลการวิจัย

ในการวิจัยนี้ทำการเตรียมเส้นใยโคพอลิเมอร์แบบสามช่วงประเภทสไตรีน-ไอโซพรีน-สไตรีน โดยการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตและมีการนำเส้นใยไปประยุกต์ใช้โดยผสมในพอลิสไตรีน ผลการวิจัยแบ่งออกตามหัวข้อดังต่อไปนี้

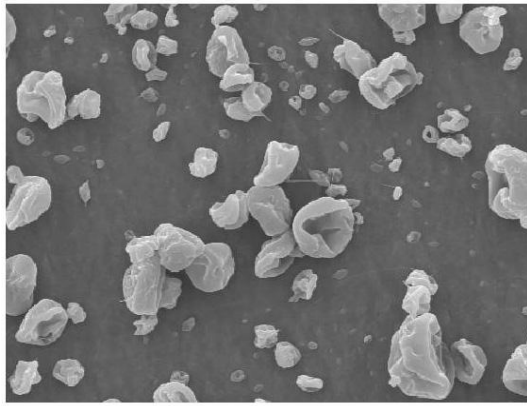
การปั่นเส้นใยเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตและการวิเคราะห์เส้นใยโคพอลิเมอร์แบบสามช่วงประเภทสไตรีน-ไอโซพรีน-สไตรีน

ในการวิจัยการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตได้มีการเตรียมสารละลายพอลิเมอร์ 2 แบบคือ สารละลายพอลิเมอร์ที่ใช้เตตระไฮโดรฟอรันเป็นตัวทำละลายและสารละลายพอลิเมอร์เป็นสารละลายพอลิเมอร์โดยใช้เตตระไฮโดรฟอรันและไดเมทิลฟอร์มาไมด์ในอัตราส่วน 75:25 เป็นตัวทำละลาย กำหนดให้สารละลายมีความเข้มข้น 10 12 14 16 18 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้า 10 12 14 16 18 และ 20 กิโลโวลต์ ผลจากการวิเคราะห์เส้นใยด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด สารละลายพอลิเมอร์ที่ใช้เตตระไฮโดรฟอรันเป็นตัวทำละลายไม่สามารถปั่นเป็นเส้นใยออกมาได้ มีเพียงสารละลายพอลิเมอร์ที่ใช้เตตระไฮโดรฟอรันและไดเมทิลฟอร์มาไมด์ในอัตราส่วน 75:25 เป็นตัวทำละลายเท่านั้นที่สามารถทำการปั่นเป็นเส้นใยได้

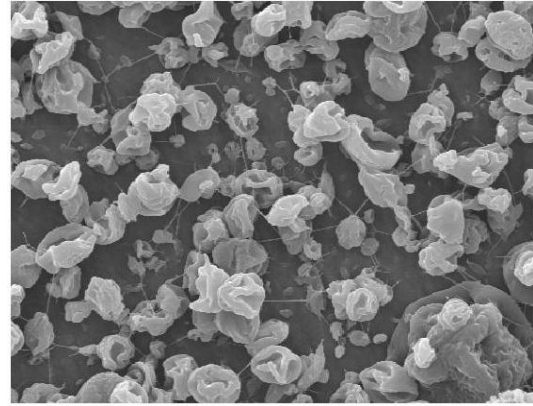
จากการวิเคราะห์เส้นใยด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าสารละลายพอลิเมอร์ที่ใช้เตตระไฮโดรฟอรันและไดเมทิลฟอร์มาไมด์ในอัตราส่วน 75:25 เป็นตัวทำละลาย มีขนาดและสัดส่วนของเส้นใยเปลี่ยนแปลงไปสำหรับความเข้มข้นสารละลายตั้งต้นและความต่างศักย์ไฟฟ้าที่แตกต่างกัน ภาพประกอบ 12 ถึง 17 แสดงภาพตัวอย่างจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงลักษณะของเส้นใยสำหรับความเข้มข้นสารละลาย 10 12 14 16 18 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และความต่างศักย์ไฟฟ้า 10 12 14 16 และ 20 กิโลโวลต์ ภาพประกอบ 12 แสดงภาพของสารละลายมีความเข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ผลจากการปั่นไม่ได้ออกมาเป็นเส้นใยแต่มีลักษณะเป็นลูกบิด มีผิวขรุขระ เมื่อเพิ่มความต่างศักย์ที่ใช้ในการปั่นพบว่าขนาดลูกบิดพอลิเมอร์ที่ได้มีขนาดเล็กลง ภาพประกอบ 13 แสดงภาพของสารละลายมีความเข้มข้น 12 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ผลจากการปั่นออกมาเป็นเส้นใยเพียงเล็กน้อยแต่ส่วนใหญ่พอลิเมอร์มีลักษณะเป็นลูกบิด มีผิวเรียบ ขนาดลูกบิดที่ได้มีขนาดใกล้เคียงกัน เมื่อเพิ่มความต่างศักย์

ที่ใช้ในการปั่นพบว่าลูกบิดพอลิเมอร์ที่ได้มีขนาดเล็กลง ภาพประกอบ 14 แสดงภาพของสารละลายมีความเข้มข้น 14 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ผลจากการปั่นออกมาเป็นเส้นใยที่มีลักษณะเป็นปมมีรูปร่างเป็นทรงกลมและทรงรีปะปนกันผสมอยู่ในเส้นใย เมื่อเพิ่มความต่างศักย์ที่ใช้ในการปั่นพบว่าผลจากการปั่นมีการเปลี่ยนแปลงชัดเจน ปมมีขนาดเล็กลงและปริมาณเส้นใยที่ได้เพิ่มมากขึ้น ภาพประกอบ 15 แสดงภาพของสารละลายมีความเข้มข้น 16 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ผลจากการปั่นไม่มีพอลิเมอร์ที่มีลักษณะเป็นลูกบิดเหลืออยู่แต่ได้เป็นเส้นใยที่มีปมลักษณะเรียวยาวอยู่เป็นช่วงๆบนเส้นใย เมื่อเพิ่มความต่างศักย์ที่ใช้ในการปั่นไม่ได้ส่งผลต่อเส้นใยมากนักเส้นใยที่ได้มีขนาดใกล้เคียงกัน ภาพประกอบ 16 แสดงภาพของสารละลายมีความเข้มข้น 18 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ผลจากการปั่นได้เส้นใยที่มีลักษณะเป็นเส้นเรียวยาวสม่ำเสมอเพียงบางเส้นที่มีปมลักษณะเรียวยาวอยู่เป็นช่วงๆบนเส้นใย เมื่อเพิ่มความต่างศักย์ที่ใช้ในการปั่นเส้นใยที่ได้มีความสม่ำเสมอมากขึ้นมีเส้นใยที่มีปมลักษณะเรียวยาวกระจายตัวอยู่เป็นช่วงๆบนเส้นใยน้อยลง ภาพประกอบ 17 แสดงภาพของสารละลายมีความเข้มข้น 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ผลจากการปั่นได้เส้นใยที่มีลักษณะเป็นเส้นเรียวยาวสม่ำเสมอไม่มีเส้นใยที่มีปมเรียวยาวกระจายตัวอยู่เป็นช่วงๆบนเส้นใยอีกและสามารถปั่นเส้นใยได้มาก เมื่อเพิ่มความต่างศักย์ที่ใช้ในการปั่นเส้นใยที่ได้มีความสม่ำเสมอมากขึ้นและเส้นใยมีขนาดลดลง

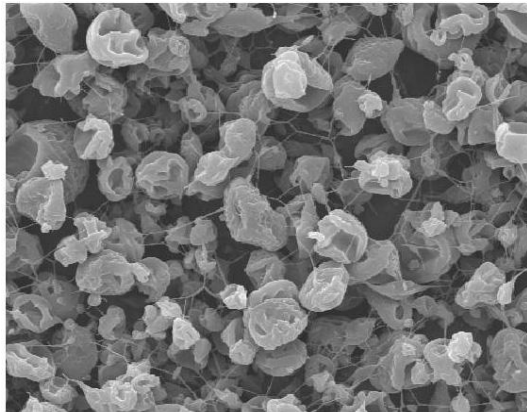
ในการคำนวณเส้นผ่านศูนย์กลางของพอลิเมอร์ที่มีลักษณะเป็นลูกบิด คำนวณเส้นผ่านศูนย์กลางโดยทำการวัดตามแกนแนวนอนและแนวตั้งของลูกบิด ภาพประกอบ 18 แสดงไดอะแกรมของการหาเส้นผ่านศูนย์กลางของพอลิเมอร์ที่มีลักษณะเป็นลูกบิดทรงกลม โดยเส้นที่บแทนลักษณะการหาค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของแนวนอน (d_1) และเส้นประแทนลักษณะการหาค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของแนวตั้ง (d_2) ซึ่งแกนทั้งสองแนวตั้งฉากกัน แล้วนำทั้งสองค่ามาหาค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลาง ภาพประกอบ 19 แสดงไดอะแกรมของการหาเส้นผ่านศูนย์กลางของพอลิเมอร์ที่มีลักษณะเป็นลูกบิดทรงรี โดยเส้นที่บแทนลักษณะการหาค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของแนวนอน (d_1) คือ แนวตามยาวของลูกบิดและเส้นประแทนลักษณะการหาค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของแนวตั้ง (d_2) คือ แนวที่ตั้งฉากกับแนวตามยาวของลูกบิด แล้วนำทั้งสองค่ามาหาค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลาง การคำนวณเส้นผ่านศูนย์กลางของพอลิเมอร์ที่มีลักษณะเป็นเส้นเรียวยาว ภาพประกอบ 20 แสดงไดอะแกรมของการหาเส้นผ่านศูนย์กลางของพอลิเมอร์ที่มีลักษณะเป็นเส้นเรียวยาว โดยเส้นที่บแทนลักษณะการหาค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย ตาราง 4 สรุปผลการคำนวณค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย โดยตารางส่วนที่แรเงาพื้นเทาแสดงค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของพอลิเมอร์ที่มีลักษณะเป็นลูกบิด ในส่วนที่เหลือแสดงค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของพอลิเมอร์ที่มีลักษณะเป็นเส้นใย (รายละเอียดการคำนวณแสดงในภาคผนวก)



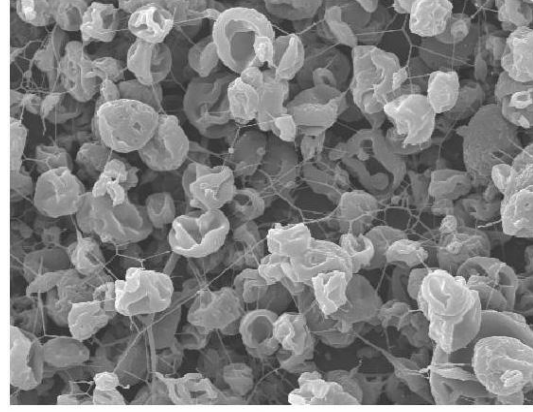
(1)



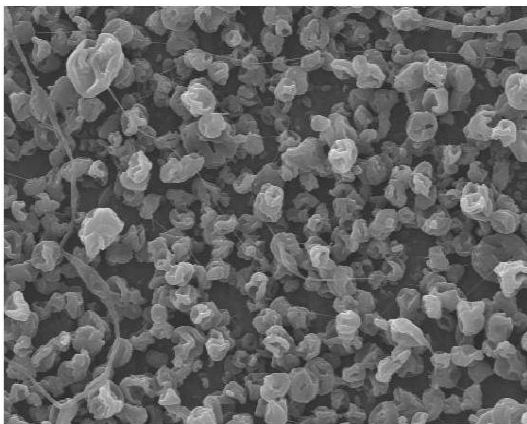
(2)



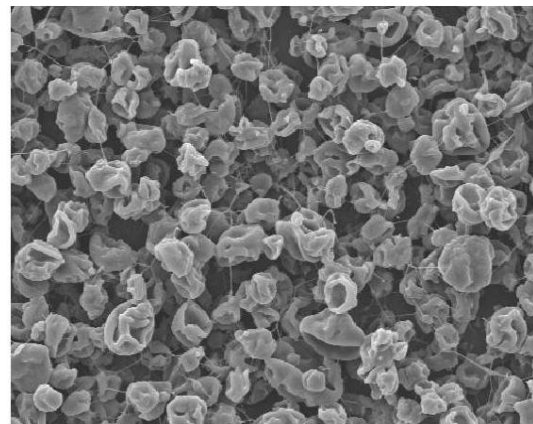
(3)



(4)

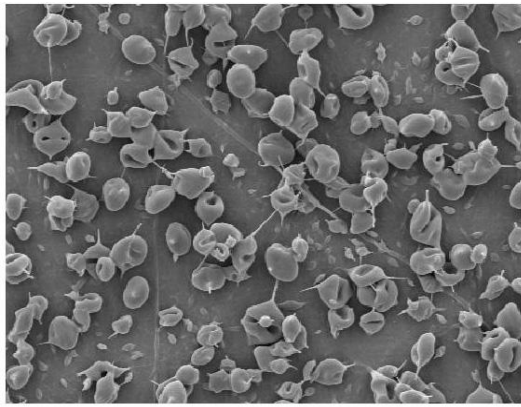


(5)

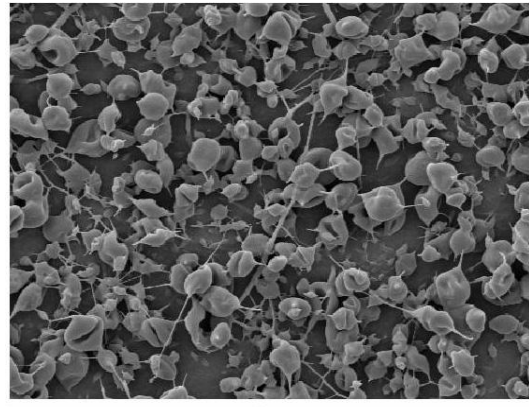


(6)

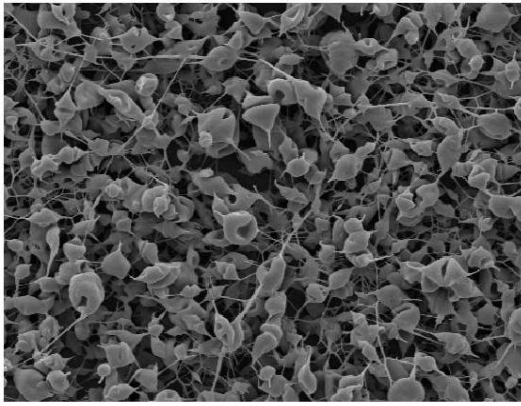
ภาพประกอบ 12 แสดงผลของ SEM ที่ความเข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ศักย์ไฟฟ้า 10 ถึง 20 กิโลโวลต์ แต่งสเกลได้ภาพยาว 60 ไมโครเมตร



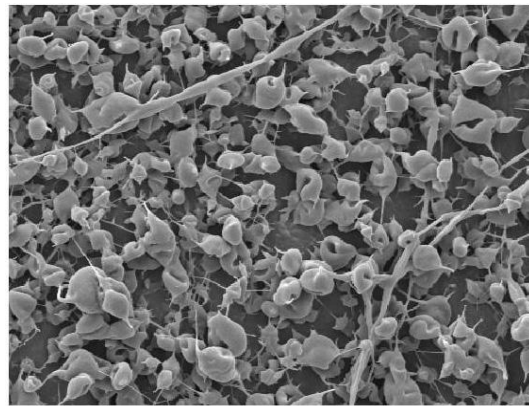
(1)



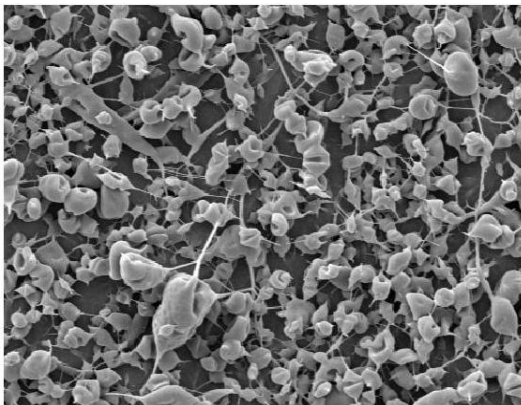
(2)



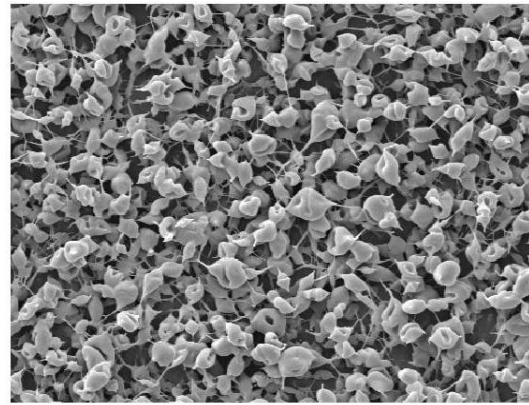
(3)



(4)

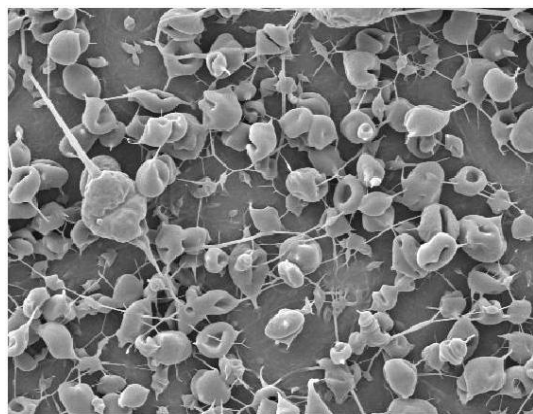


(5)

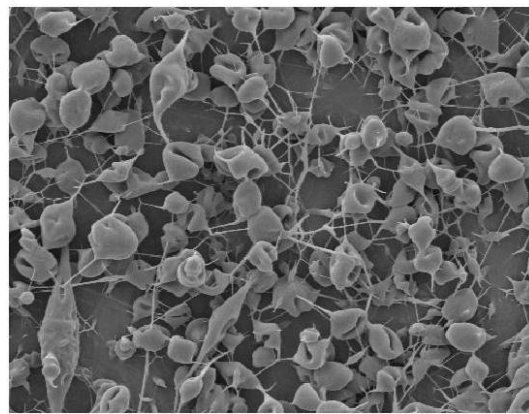


(6)

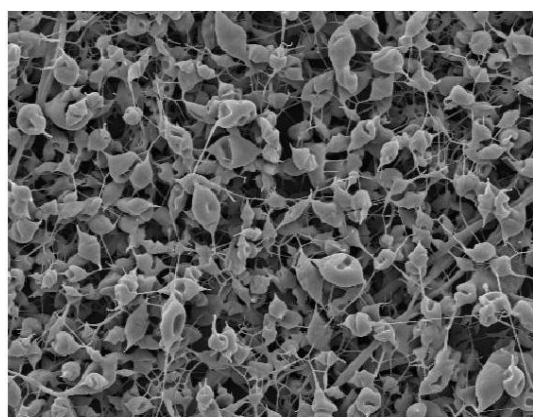
ภาพประกอบ 13 แสดงผลของ SEM ที่ความเข้มชั้น 12 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ศักย์ไฟฟ้า 10 ถึง 20 กิโลโวลต์ แต่งสเกลได้ภาพยาว 60 ไมโครเมตร



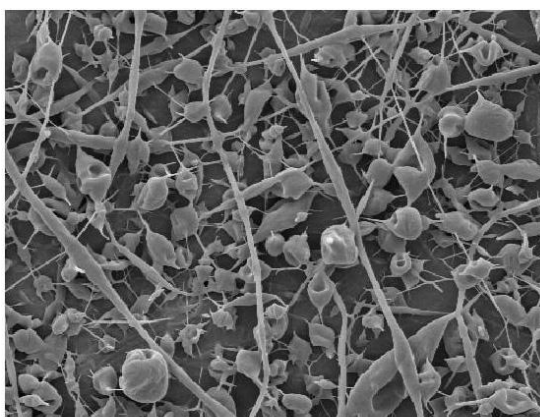
(1)



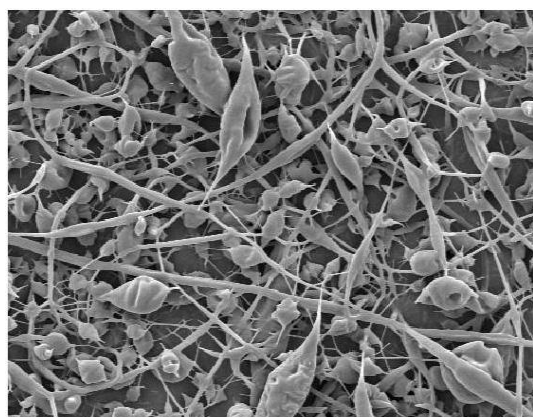
(2)



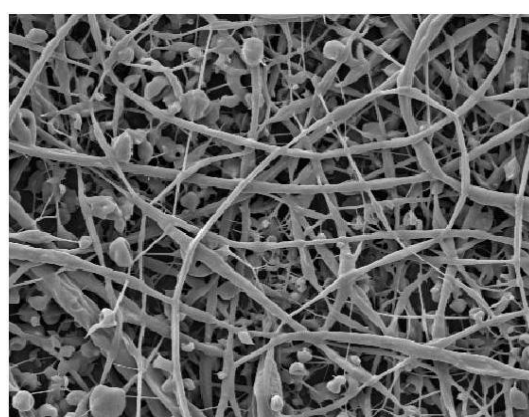
(3)



(4)

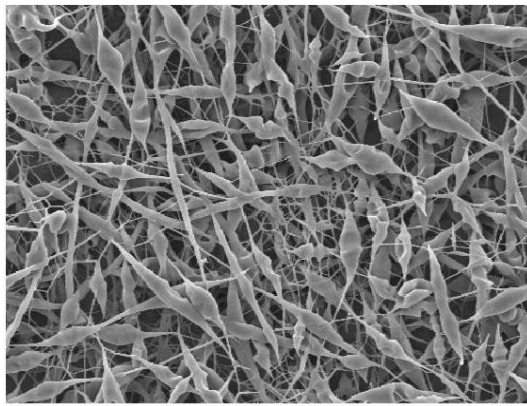


(4)

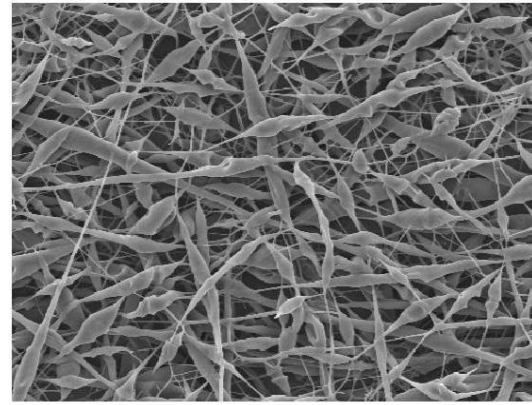


(6)

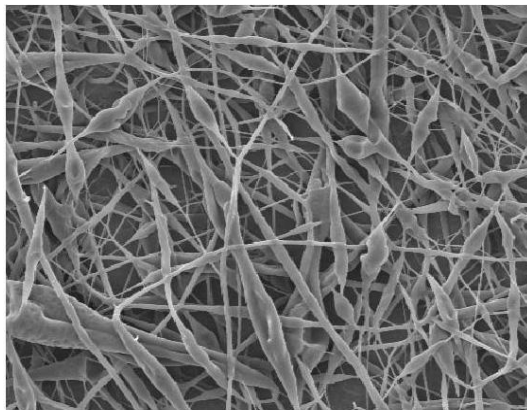
ภาพประกอบ 14 แสดงผลของ SEM ที่ความเข้มข้น 14 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ศักย์ไฟฟ้า 10 ถึง 20 กิโลโวลต์ แต่งสเกลได้ภาพยาว 60 ไมโครเมตร



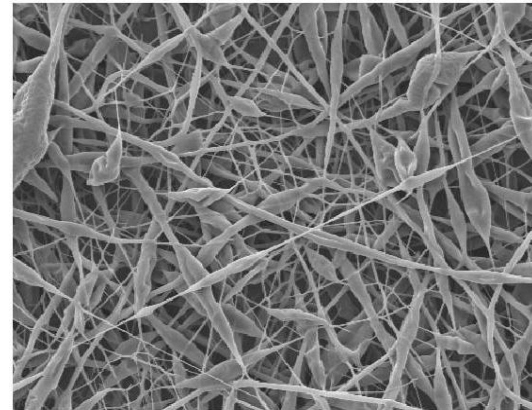
(1)



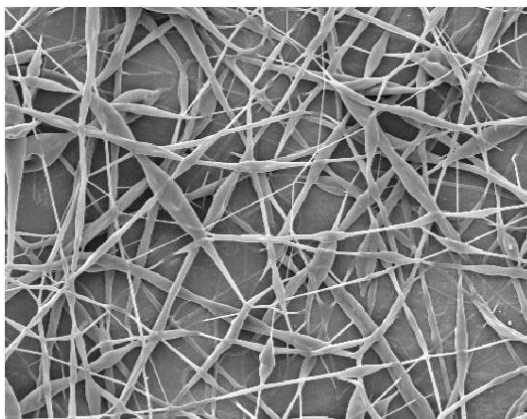
(2)



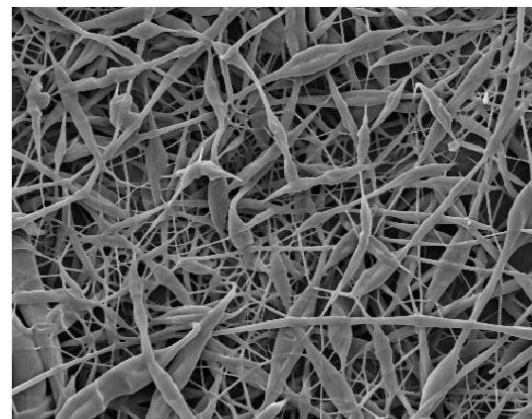
(3)



(4)

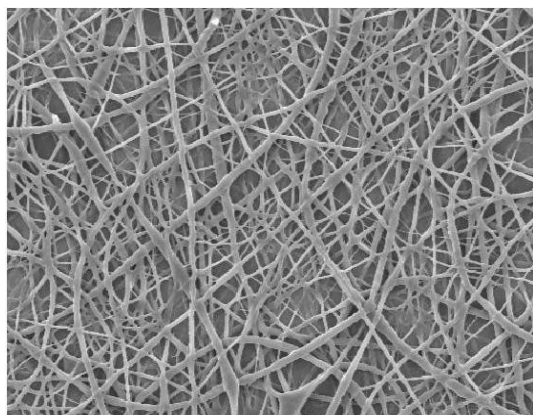


(5)

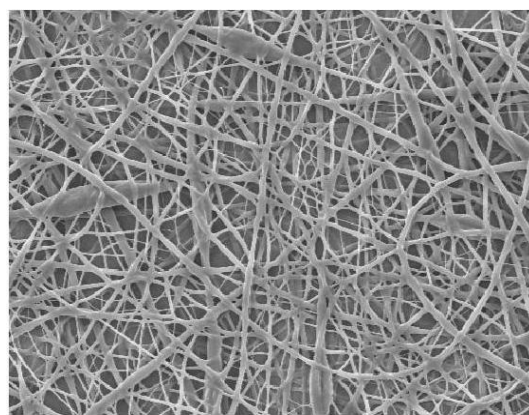


(6)

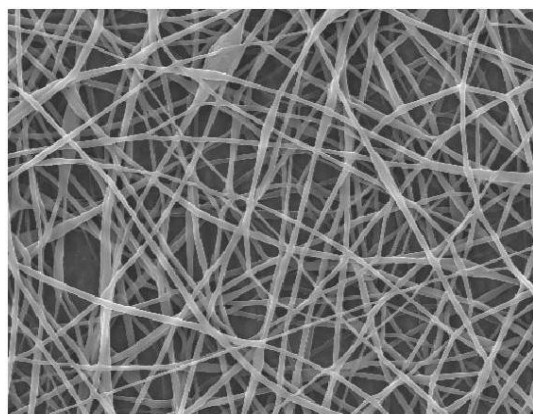
ภาพประกอบ 15 แสดงผลของ SEM ที่ความเข้มข้น 16 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ศักย์ไฟฟ้า 10 ถึง 20 กิโลโวลต์ แต่งสเกลได้ภาพยาว 60 ไมโครเมตร



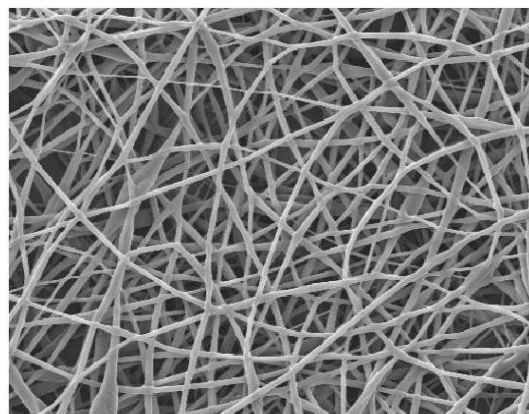
(1)



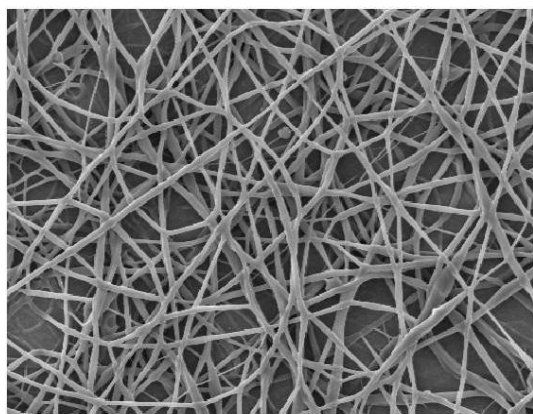
(2)



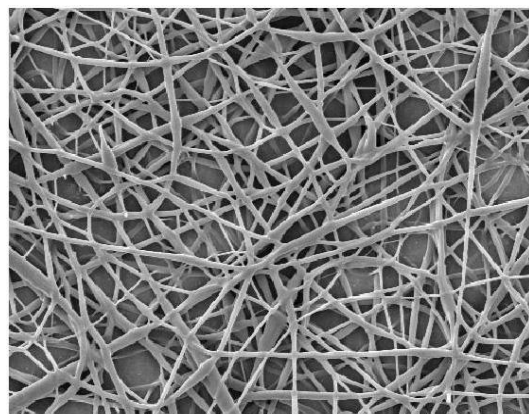
(3)



(4)

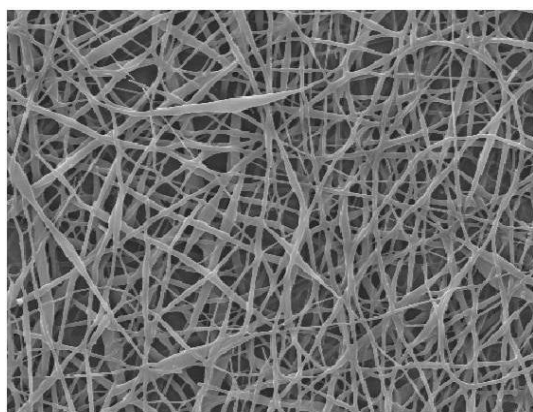


(5)

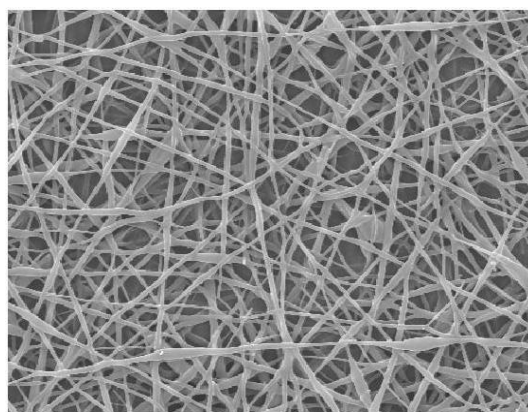


(6)

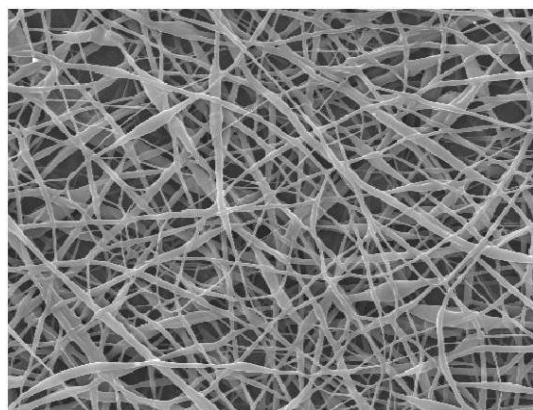
ภาพประกอบ 16 แสดงผลของ SEM ที่ความเข้มข้น 18 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ศักย์ไฟฟ้า 10 ถึง 20 กิโลโวลต์ แต่งสเกลได้ภาพยาว 60 ไมโครเมตร



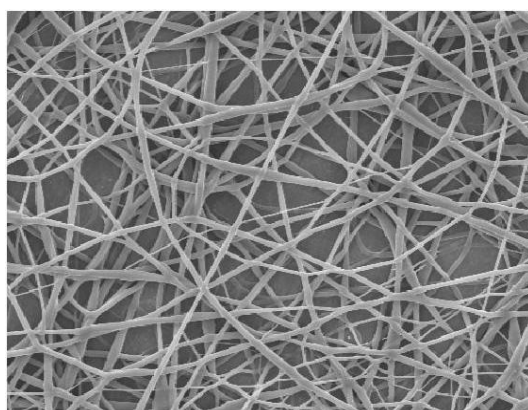
(1)



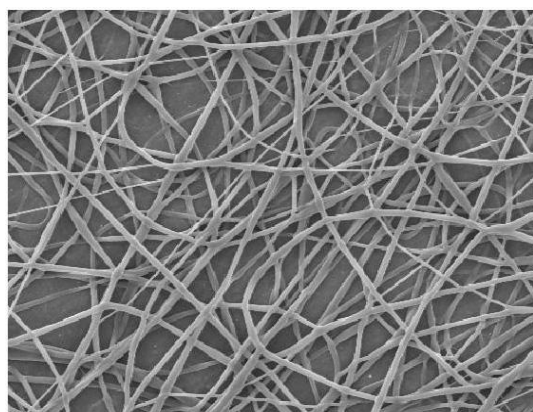
(2)



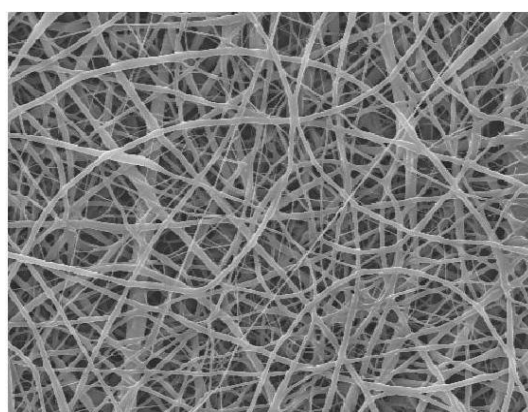
(3)



(4)

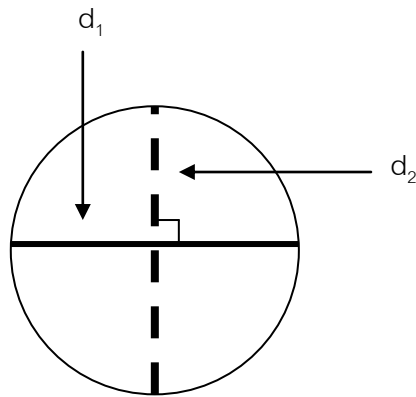


(5)

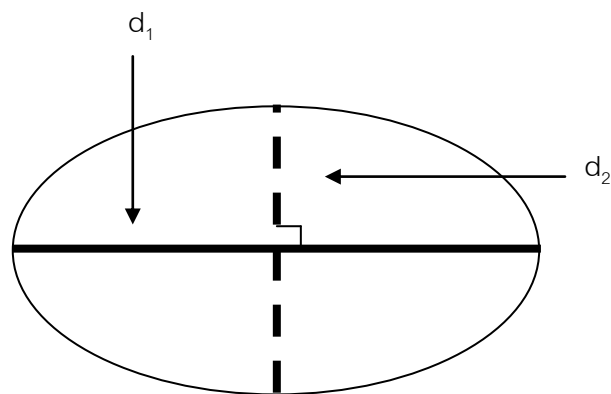


(6)

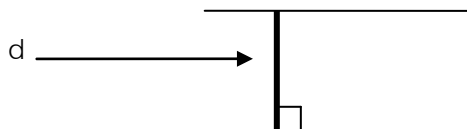
ภาพประกอบ 17 แสดงผลของ SEM ที่ความเข้มขึ้น 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ศักย์ไฟฟ้า 10 ถึง 20 กิโลโวลต์ แต่งสเกลได้ภาพยาว 60 ไมโครเมตร



ภาพประกอบ 18 แสดงไดอะแกรมของการหาเส้นผ่านศูนย์กลางของพอลิเมอร์ที่มีลักษณะเป็นลูกปัดทรงกลม (เส้นที่บิแทนเส้นผ่านศูนย์กลางของแกนอน (d_1) และเส้นประแทนเส้นผ่านศูนย์กลางของแนวตั้ง (d_2))



ภาพประกอบ 19 แสดงไดอะแกรมของการหาเส้นผ่านศูนย์กลางของพอลิเมอร์ที่มีลักษณะเป็นลูกปัดทรงรี (เส้นที่บิแทนเส้นผ่านศูนย์กลางของแกนอน (d_1) และเส้นประแทนเส้นผ่านศูนย์กลางของแนวตั้ง (d_2))



ภาพประกอบ 20 แสดงไดอะแกรมของการหาเส้นผ่านศูนย์กลางของพอลิเมอร์ที่มีลักษณะเป็นเส้นเรียวยาว (เส้นที่บแทนเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย (d))

ตาราง 4 แสดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยของสารละลาย 10 ถึง 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ 10 ถึง 20 กิโลโวลต์ โดยให้เส้นผ่านศูนย์กลางเส้นใยมีหน่วยไมโครเมตร

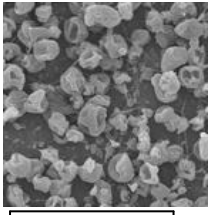
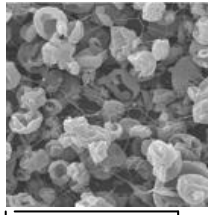
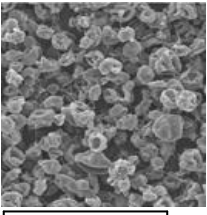
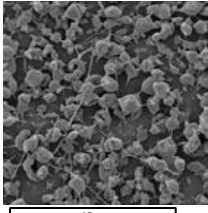
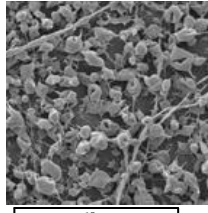
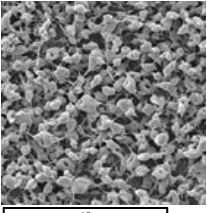
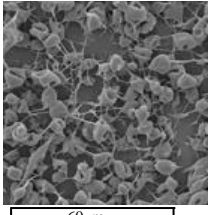
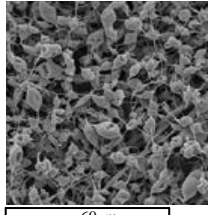
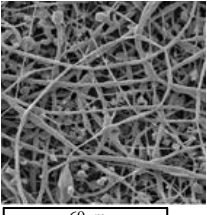
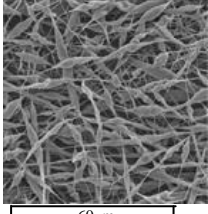
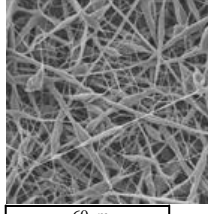
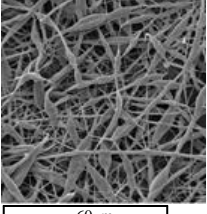
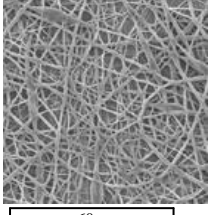
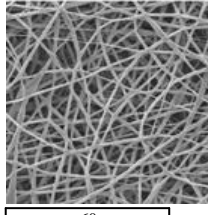
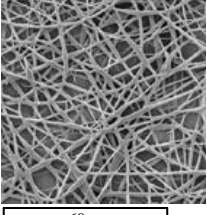
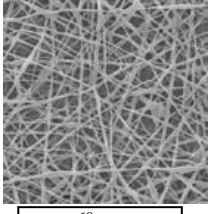
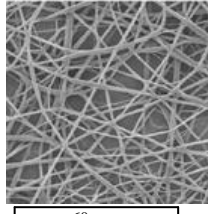
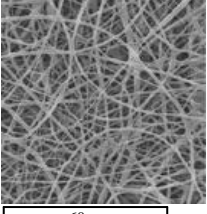
ความเข้มข้นของ สารตั้งต้น	ความต่างศักย์ไฟฟ้า					
	กิโลโวลต์(kV)					
เปอร์เซ็นต์โดย น้ำหนัก (wt%)	10	12	14	16	18	20
10	9.97 ± 3.81	9.87 ± 2.89	9.94 ± 3.46	9.83 ± 2.64	7.60 ± 3.07	6.60 ± 3.21
12	6.73 ± 2.21	6.71 ± 2.04	6.20 ± 1.56	5.99 ± 1.02	5.91 ± 1.01	5.25 ± 0.79
14	7.97 ± 2.12	7.43 ± 1.84	6.35 ± 2.31	6.33 ± 1.86	1.83 ± 0.57	1.77 ± 0.45
16	1.80 ± 0.49	1.71 ± 0.36	1.51 ± 0.35	1.45 ± 0.44	1.34 ± 0.35	1.32 ± 0.42
18	1.18 ± 0.25	1.11 ± 0.26	1.07 ± 0.19	0.99 ± 0.21	0.96 ± 0.21	0.91 ± 0.19
20	0.89 ± 0.16	0.88 ± 0.18	0.83 ± 0.11	0.76 ± 0.13	0.72 ± 0.13	0.66 ± 0.09

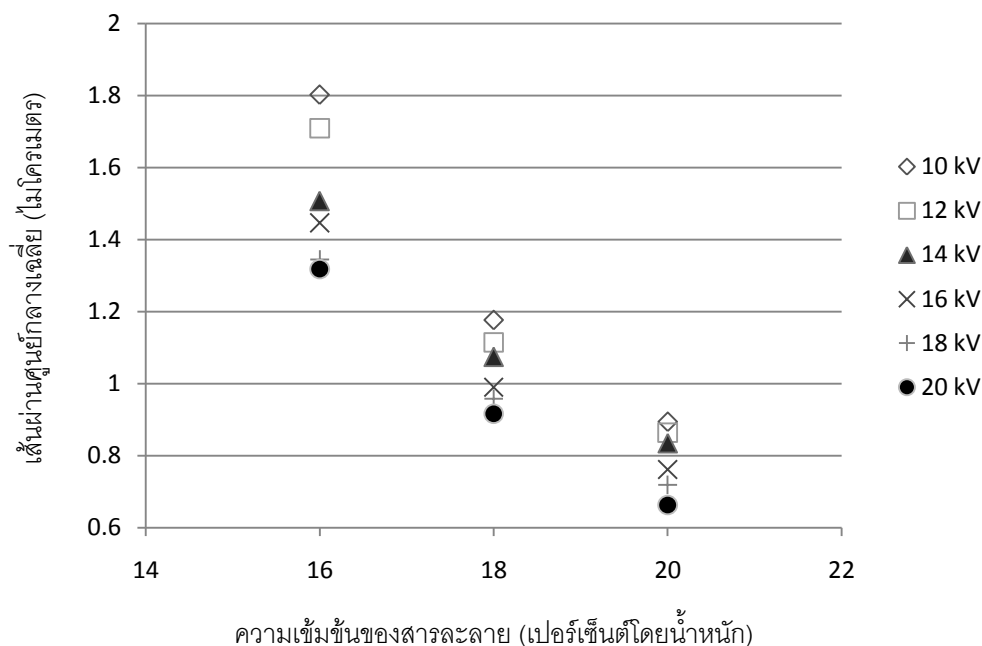
ตาราง 5 แสดงผลวิเคราะห์เส้นใยจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เพื่อแสดงภาพรวมในการเปลี่ยนแปลงลักษณะสัญญาณของเส้นใย เมื่อเปลี่ยนความเข้มข้นของสารตั้งต้นและค่าความต่างศักย์ที่ใช้ ผลของความเข้มข้นของสารละลายเมื่อพิจารณาความเข้มข้นของสารละลายพบว่าที่ความเข้มข้นของสารละลายต่ำได้แก่ที่ 10 และ 12 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สัญญาณของเส้นใยที่ได้จากการปั่นไม่มีลักษณะเป็นเส้นแต่มีลักษณะเป็นลูกบิดทรงกลม เมื่อความเข้มข้นของสารละลาย

เพิ่มขึ้นเป็น 14 เเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สันฐานโดยมากยังมีลักษณะเป็นลูกบิดทรงกลมและลูกบิดทรงรี แต่เริ่มมีส่วนที่เป็นเส้นใยปรากฏปะปนอยู่ ที่ความเข้มข้น 16 เเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ลักษณะลูกบิดทรงกลมไม่เหลืออยู่สันฐานที่ได้จึงมีลักษณะยึดออกเป็นเส้นใยทั้งหมด อย่างไรก็ตามแต่ละเส้นยังมีส่วนที่เป็นปมลักษณะเรียวยาวเป็นช่วงๆบนเส้นใย กระทั่งที่ความเข้มข้นสารละลาย 18 และ 20 เเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สันฐานที่ได้จึงมีลักษณะเป็นเส้นใยที่เรียบและมีขนาดสม่ำเสมอ การเปลี่ยนแปลงจากสันฐานแบบลูกบิดทรงกลมไปสู่ลักษณะสันฐานของเส้นใยที่สม่ำเสมอนี้ เกิดเนื่องมาจากเมื่อความเข้มข้นสารละลายเพิ่มขึ้นความพันเกี่ยว (Entanglement) ของสายโซ่โมเลกุลในสารละลายเพิ่มขึ้น สำหรับสารละลายที่เจือจางโซ่โมเลกุลพอลิเมอร์มีความพันเกี่ยวน้อย เมื่อบั่นออกมาโดยที่ตัวทำละลายระเหยไปอย่างรวดเร็วพอลิเมอร์ที่ได้จึงแยกเป็นส่วนๆ ในลักษณะลูกบิดทรงกลม แต่ถ้าสารละลายมีความเข้มข้นมากโซ่โมเลกุลจะมีความพันเกี่ยวสูง เมื่อถูกสกัดออกมาจากปลายเข็มในกระบวนการปั่น ความพันเกี่ยวสูงนี้ทำให้เส้นใยที่ได้มีความต่อเนื่องเป็นเส้นมากขึ้น สำหรับเส้นใยที่ลักษณะเป็นเส้นต่อเนื่องและไม่เป็นลูกบิด นั่นคือที่ความเข้มข้น 16 18 และ 20 เเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยมีค่าลดลงเมื่อค่าความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้น ความเข้มข้นสารละลายสูงและความพันเกี่ยวของสายโซ่ที่มากขึ้นทำให้การยึดตัวของเส้นใยระหว่างการปั่นดีขึ้นเส้นใยที่ได้จึงมีขนาดเล็กลง

เมื่อพิจารณาผลความต่างศักย์ไฟฟ้า พบว่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่สูงขึ้นมีผลให้เส้นใยยึดตัวออกมากขึ้นเช่นกัน ที่เห็นชัดเจนคือที่สารละลายพอลิเมอร์ที่มีความเข้มข้น 14 เเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ดังภาพประกอบ 14 เมื่อความต่างศักย์ไฟฟ้าต่ำ (ได้แก่ 10 12 และ 14 กิโลโวลต์) สันฐานปรากฏในลักษณะลูกบิดทรงกลม แต่เมื่อค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้น (ได้แก่ 16 และ 20 กิโลโวลต์) ลักษณะสันฐานที่ได้เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงจากทรงกลมไปเป็นลูกบิดทรงรีและเริ่มมีเส้นใยปะปนอยู่ด้วย ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อความต่างศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นส่งผลให้แรงทางไฟฟ้าสถิตเพิ่มขึ้น ทำให้เส้นใยเหวี่ยงออกมาแรงและมีการยึดตัวเป็นเส้นมากขึ้น นอกจากนี้ที่ความเข้มข้นสารละลาย 16 18 และ 20 เเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งให้เส้นใยต่อเนื่องที่ไม่เป็นปมหรือลูกบิด พบว่าเส้นใยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลดลงเมื่อความต่างศักย์เพิ่มมากขึ้น ดังข้อมูลในตาราง 4 และกราฟในภาพประกอบ 21 ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงช่วยให้การยึดตัวของเส้นใยดีขึ้นคล้ายกับความพันเกี่ยวของโมเลกุลพอลิเมอร์ที่มีความเข้มข้นสารละลายสูง กระนั้นผลของความต่างศักย์ที่มีต่อลักษณะเส้นใยไม่เด่นชัดเท่ากับผลของความเข้มข้นสารละลาย

ตาราง 5 แสดงภาพเปรียบเทียบผลวิเคราะห์จาก SEM สำหรับสารละลาย 10 ถึง 20 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ 12 16 และ 20 กิโลโวลต์ แห่งสเกลได้ภาพยาว 60 ไมโครเมตร

ความเข้มข้นของ สารละลาย เปอร์เซ็นต์โดย น้ำหนัก (wt%)	ความต่างศักย์ไฟฟ้า กิโลโวลต์ (kV)		
	12	16	20
10			
12			
14			
16			
18			
20			



ภาพประกอบ 21 แสดงกราฟระหว่างค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นใยที่ผลิตจากสารละลายที่ความเข้มข้นของสารตั้งต้นมีค่า 16 18 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้าต่างๆ คือ 10 12 14 16 18 และ 20 กิโลโวลต์

สมบัติเชิงกลและการวิเคราะห์วัสดุเชิงประกอบจากเส้นใย

โดยทั่วไปวัสดุเชิงประกอบหรือคอมโพสิต (Composite) เป็นวัสดุที่มีการนำตัวเติม (Filler) ไปผสมเข้ากับวัสดุที่เป็นเนื้อหลักหรือเมทริกซ์ (Matrix) เพื่อพัฒนาสมบัติของวัสดุ งานวิจัยนี้ได้ทำการผลิตวัสดุเชิงประกอบโดยประยุกต์ใช้เส้นใยโคพอลิเมอร์แบบสามช่วงซึ่งมีส่วนประกอบของพอลิไอโซพรีนที่มีคุณสมบัติเป็นยางผสมเข้ากับวัสดุเนื้อหลักประเภทพอลิสไตรีน เส้นใยที่ใช้เป็นโคพอลิเมอร์แบบสามช่วงของพอลิสไตรีนและพอลิไอโซพรีนโดยมีส่วนของพอลิไอโซพรีนซึ่งเป็นวัสดุประเภทยางอยู่ 70 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเส้นใยมีส่วนที่เป็นยางปริมาณมากนี้จะทำหน้าที่คล้ายกับอนุภาคยางในพอลิสไตรีนทนแรงกระแทกสูง (HIPS) แต่แตกต่างจากการใช้อนุภาคยางที่ใช้ทั่วไปเนื่องจากรูปทรงของเส้นใยที่ได้จากการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตมีรูปทรงเป็นทรงกระบอกและขนาดของเส้นใยนี้มีขนาดเล็กกว่าอนุภาคยางที่มีการใช้กัน และเนื่องจากเส้นใยที่เป็นโคพอลิเมอร์ที่มีพอลิสไตรีนอยู่ด้วย การผสมเส้นใยในวัสดุเนื้อหลักที่เป็นพอลิสไตรีนเช่นกันจึงน่าจะทำให้วัสดุเนื้อหลักและเส้นใยเข้ากันได้ดี

ในการผลิตวัสดุเชิงประกอบนี้ได้เลือกปั่นเส้นใยโคพอลิเมอร์แบบสามช่วงที่มีความเข้มข้นของสารละลาย 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ลงบนแผ่นฟิล์มพอลิสไตรีนที่ใช้เป็นตัวรองรับเส้นใย นำแผ่นฟิล์มพอลิสไตรีนที่มีเส้นใยกระจายอยู่แต่ละแผ่นมาตัดและซ้อนทับกัน แล้วนำไปอบอ่อน (Anneal) ด้วยเครื่องอัดร้อน (Compression molding machine) ที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส เพื่อให้ได้วัสดุเชิงประกอบ ตาราง 6 และตาราง 7 แสดงข้อมูลของแผ่นฟิล์มพอลิสไตรีนที่มีเส้นใยและแผ่นฟิล์มพอลิสไตรีนที่ทำการวัดก่อนนำไปทดสอบสมบัติเชิงกลด้วยเครื่องทดสอบแรงดึงเพื่อเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลที่ได้กับแผ่นฟิล์มที่เป็นพอลิสไตรีนล้วนที่ไม่มีเส้นใยผสมอยู่

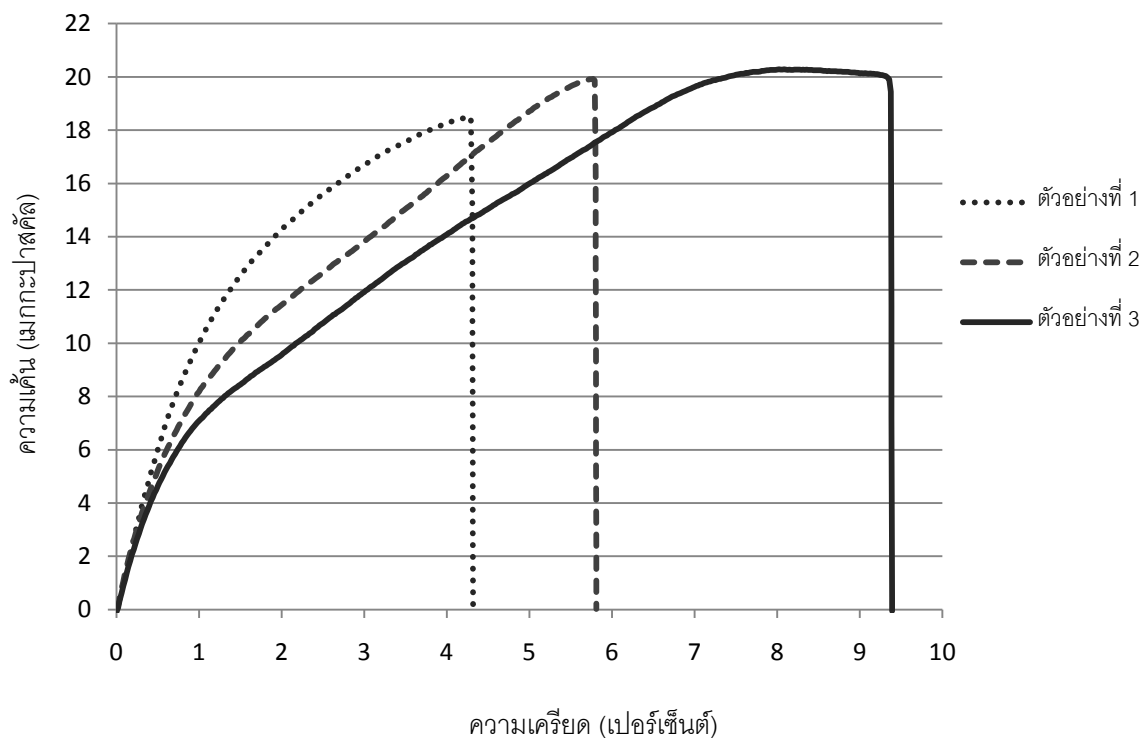
ในการทดสอบเรานำตัวอย่างที่จะทดสอบมาตั้งอย่างช้าๆ ได้กราฟระหว่างความเค้นและความเครียดเป็นดังภาพประกอบ 22 และภาพประกอบ 23 สำหรับแผ่นฟิล์มพอลิสไตรีนที่มีเส้นใยและแผ่นฟิล์มพอลิสไตรีน

ตาราง 6 แสดงข้อมูลของแผ่นฟิล์มพอลิสไตรีนที่มีเส้นใย

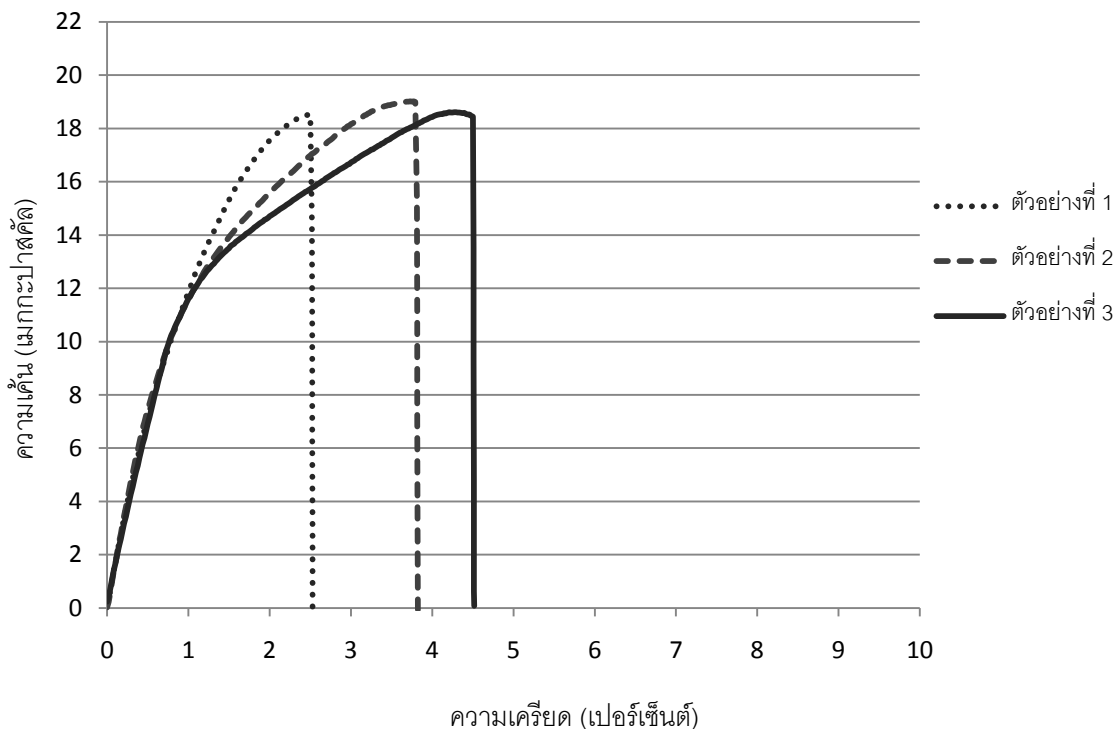
ตัวอย่างแผ่นฟิล์ม	ความหนาของ แผ่นฟิล์ม มิลลิเมตร (mm)	ความกว้างของ แผ่นฟิล์ม มิลลิเมตร (mm)	ความยาวของ แผ่นฟิล์ม มิลลิเมตร (mm)	พื้นที่หน้าตัด ตารางเซนติเมตร (cm ²)
1	0.71	11.23	40	0.079
2	0.69	11.16	40	0.077
3	0.63	11.03	40	0.069

ตาราง 7 แสดงข้อมูลของแผ่นฟิล์มพอลิไสตรีน

ตัวอย่างแผ่นฟิล์ม	ความหนา ของแผ่นฟิล์ม มิลลิเมตร (mm)	ความกว้าง ของแผ่นฟิล์ม มิลลิเมตร (mm)	ความยาวของ แผ่นฟิล์ม มิลลิเมตร (mm)	พื้นที่หน้าตัด ตารางเซนติเมตร (cm ²)
1	0.64	11.06	40	0.070
2	0.61	10.83	40	0.066
3	0.57	10.54	40	0.060



ภาพประกอบ 22 แสดงกราฟระหว่างความเค้นและความเครียดที่ได้จากการวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงกลของแผ่นฟิล์มพอลิไสตรีนที่มีเส้นใย



ภาพประกอบ 23 แสดงกราฟระหว่างความเค้นและความเครียดที่ได้จากการวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงกลของแผ่นฟิล์มพอลิโอสไตรีน

จากตาราง 6 แผ่นฟิล์มตัวอย่างที่ 1 และตาราง 7 แผ่นฟิล์มตัวอย่างที่ 3 มีค่าความหนา ความกว้างและพื้นที่หน้าตัดใกล้เคียงกัน เมื่อเปรียบเทียบกราฟที่ได้จากการทดสอบพบว่า ตัวอย่างที่ 1 ซึ่งเป็นแผ่นฟิล์มพอลิโอสไตรีนที่มีเส้นใยมีความเค้นและความเครียดที่จุดแตกหักเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน แสดงให้เห็นว่าการผสมเส้นใยทำให้วัสดุมีความเหนียวและแกร่งขึ้น นั่นคือสามารถดึงยืดได้มากกว่าจนฉีกขาด

หากพิจารณากราฟระหว่างความเค้นและความเครียดในการทดสอบแรงดึง พื้นที่ใต้กราฟระหว่างความเค้นและความเครียดนั้นสามารถใช้คำนวณหาความแกร่ง (Toughness) ของวัสดุ ซึ่งสัมพันธ์กับพลังงานที่วัสดุดูดซับเพื่อใช้ในการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างระหว่างถูกดึงจนกระทั่งแตกหักได้ จากสมการงานที่ทำให้วัสดุเสียรูปจากระยะยืด x ถึง x' เมื่อ x คือ ระยะยืด และ P คือ แรงดึง

$$u = \int_x^x P dx \quad (1)$$

สามารถหางานต่อหน่วยปริมาตรในการดึงวัสดุจากระยะยืด x ถึง x' ซึ่งเทียบเท่าการดึงวัสดุด้วยความเครียด 0 ถึง ϵ' ได้เป็น

$$u = \frac{U}{A \cdot L_i} = \int_x^x \frac{P}{A} d\left(\frac{x}{L_i}\right) = \int_0^{\epsilon'} \sigma d\epsilon \quad (2)$$

ซึ่งงานต่อหน่วยปริมาตร ก็คือ พื้นที่ใต้กราฟระหว่างความเค้นและความเครียดนั่นเอง ถ้าพื้นที่ใต้กราฟมากแสดงว่าต้องใช้พลังงานในการทำให้วัสดุเปลี่ยนแปลงรูปร่างจนแตกหักและความแกร่งของวัสดุชนิดนั้นก็จะมีค่ามาก จากภาพประกอบ 21 และภาพประกอบ 22 แผ่นฟิล์มพอลิสไตรีนที่มีเส้นใยมีพื้นที่ใต้กราฟเพิ่มมากขึ้นจากแผ่นฟิล์มพอลิสไตรีนทั่วไป นั้นแสดงให้เห็นว่าแผ่นฟิล์มพอลิสไตรีนที่ผลิตเป็นวัสดุเชิงประกอบมีความเหนียวและความสามารถของวัสดุที่จะดูดซับพลังงานไว้ได้โดยไม่เกิดการแตกหักมากกว่าแผ่นฟิล์มพอลิสไตรีนทั่วไป

จากตาราง 8 และตาราง 9 สรุปสมบัติเชิงกลของแผ่นฟิล์มพอลิสไตรีนที่มีเส้นใยและแผ่นฟิล์มพอลิสไตรีน พบว่าแผ่นฟิล์มพอลิสไตรีนที่มีเส้นใยมีค่าเฉลี่ยของมอดูลัสน้อยกว่าแผ่นฟิล์มพอลิสไตรีนแต่มีค่าเฉลี่ยของความต้านทานแรงดึงสูงสุดและความเครียดที่จุดขาดมากกว่าแผ่นฟิล์มพอลิสไตรีน การที่แผ่นฟิล์มพอลิสไตรีนที่มีเส้นใยผสมอยู่มีค่าเฉลี่ยมอดูลัสน้อยกว่าเนื่องจากการผสมเส้นใยที่มีส่วนประกอบของพอลิไอโซพรีนเข้าไปในแผ่นฟิล์ม พอลิไอโซพรีนนี้มีสมบัติเป็นยางซึ่งมีค่ามอดูลัสต่ำกว่าพอลิสไตรีนซึ่งเป็นเทอร์โมพลาสติก การผสมเส้นใยจึงทำให้วัสดุที่ได้มีค่ามอดูลัสต่ำกว่าแผ่นฟิล์มพอลิสไตรีนทั่วไป นอกจากนี้การผสมเส้นใยที่มีส่วนของยางพอลิไอโซพรีนยังทำให้แผ่นฟิล์มที่ผสมเส้นใยมีความเครียดที่จุดขาดสูง โดยทั่วไปยางมีสมบัติการยืดตัวที่ดีอยู่แล้วแต่ในที่นี้ก็ยังช่วยยับยั้งการขาดโดยการป้องกันการเกิดรอยแยก (Crack) ในพอลิสไตรีนไม่ให้แล่นผ่านตลอดชิ้นงานได้สะดวกและอนุภาคยางที่กระจายตัวในรูปของเส้นใยนี้สามารถทำให้เกิดเครซค์ได้ดังในพอลิสไตรีนชนิดทนแรงกระแทกสูง (HIPS) ทั่วไป จึงทำให้แผ่นฟิล์มที่มีเส้นใยผสมอยู่มีค่าความเครียดที่จุดขาดมากกว่าแผ่นฟิล์มพอลิสไตรีนที่ไม่มีเส้นใยผสมอยู่ ดังนั้นแม้ว่าค่าของความต้านทานแรงดึงสูงสุดไม่ต่างกันมากแต่การที่ความเครียดที่จุดขาดต่างกัน ทำให้พื้นที่ใต้กราฟหรือความแกร่งของพอลิสไตรีนแบบมีเส้นใยมีค่าสูงกว่าอย่างชัดเจน

ตารางที่ 10 แสดงการเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของแผ่นฟิล์มพอลิโอสไตรีนที่มีเส้นใยกับพอลิโอสไตรีนชนิดทนแรงกระแทกสูง เมื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติเชิงกลของแผ่นฟิล์มพอลิโอสไตรีนที่มีเส้นใยผสมอยู่ที่ได้จากงานวิจัยกับพอลิโอสไตรีนชนิดทนแรงกระแทกสูง (Dowling. 1999: 119) พบว่าค่ามอดุลัสและค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดของแผ่นฟิล์มทั้งสองแบบมีค่าอยู่ช่วงเดียวกัน แต่ค่าของความเครียดที่จุดขาดของแผ่นฟิล์มพอลิโอสไตรีนที่มีเส้นใยผสมอยู่ที่ได้จากงานวิจัยมีค่าน้อยกว่าพอลิโอสไตรีนชนิดทนแรงกระแทกสูงทั่วไป ปัจจัยที่ทำให้ความเครียดที่จุดขาดต่างกัน ได้แก่ รูปปร่างขนาด และปริมาณของเส้นใยที่ใช้ในการผลิตวัสดุเชิงประกอบ เนื่องจากรูปปร่างของเส้นใยในงานวิจัยนี้มีรูปปร่างเป็นเส้นทรงกระบอกอาจไม่เอื้ออำนวยต่อการเกิดเครขได้ดีเท่าอนุภาคยางที่ผสมอยู่ในพอลิโอสไตรีนชนิดทนแรงกระแทกสูงซึ่งมีรูปปร่างเป็นทรงกลมและขนาดของเส้นใยในงานวิจัยมีขนาดเล็กกว่าอนุภาคยางและอาจมีปริมาณของเส้นใยน้อยกว่าปริมาณของอนุภาคยาง ดังเช่นที่บั๊กแนลและคนอื่นๆ (Bucknall; et al. 1986: 307-313) ได้ทำการศึกษาพอลิโอสไตรีนทนแรงกระแทกสูงพบว่าความเหนียวจะเพิ่มขึ้น เมื่อสัดส่วนปริมาณของยางและขนาดของอนุภาคยางเพิ่มขึ้น (Dowling. 1999: 119) ทำให้ค่าความเครียดที่จุดขาดของพอลิโอสไตรีนทั้งสองแบบมีค่าแตกต่างกัน

ตาราง 8 แสดงสมบัติเชิงกลของแผ่นฟิล์มพอลิโอสไตรีนที่มีเส้นใย

ตัวอย่าง แผ่นฟิล์ม	มอดุลัส เมกกะปาสคัล (MPa)	ความต้านทานแรงดึง สูงสุด เมกกะปาสคัล (MPa)	ความเครียดที่ จุดขาด เปอร์เซ็นต์ (%)
1	1303.40	18.50	4.32
2	1173.28	19.92	5.81
3	973.67	20.28	9.39
เฉลี่ย	1150.12	19.57	6.51

ตาราง 9 แสดงสมบัติเชิงกลของแผ่นฟิล์มพอลิไทรีน

ตัวอย่างแผ่นฟิล์ม	มอดุลัส เมกกะปาสคัล (MPa)	ความต้านทาน แรงดึงสูงสุด เมกกะปาสคัล (MPa)	ความเครียดที่ จุดขาด เปอร์เซ็นต์ (%)
1	1590.23	18.52	2.53
2	1663.38	19.02	3.82
3	1424.06	18.61	4.51
เฉลี่ย	1559.22	18.72	3.62

ตาราง 10 แสดงการเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของแผ่นฟิล์มพอลิไทรีนที่มีเส้นใยกับพอลิไทรีน
ทนแรงกระแทกสูง

ชนิดพอลิเมอร์	มอดุลัส เมกกะปาสคัล (MPa)	ความต้านทาน แรงดึงสูงสุด เมกกะปาสคัล (MPa)	ความเครียดที่ จุดขาด เปอร์เซ็นต์ (%)
แผ่นฟิล์มพอลิ- ไทรีนที่มีเส้นใย	1150.12	19.57	6.51
พอลิไทรีน ทนแรงกระแทกสูง	1100-2600	13-43	20-65

บทที่ 5

สรุปและอภิปรายผล

ในการวิจัยครั้งนี้ได้ทำการศึกษาความเข้มข้นและความต่างศักย์ไฟฟ้าที่มีผลต่อขนาดและสัญญาณของเส้นใยโคพอลิเมอร์แบบสามช่วงประเภท สไตรีน-ไอโซพรีน-สไตรีน พบว่าเส้นใยที่ได้มีการเปลี่ยนแปลงจากสัญญาณแบบลูกบิดทรงกลมไปสู่ลักษณะเส้นใยที่สม่ำเสมอ เมื่อพิจารณาผลของความเข้มข้นของสารละลาย พบว่าการเปลี่ยนแปลงสัญญาณของเส้นใยเกิดเนื่องมาจากเมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้นความสัมพันธ์ (Entanglement) ของสายโซ่โมเลกุลในสารตั้งต้นเพิ่มขึ้น สารละลายที่เจือจางโซ่โมเลกุลพอลิเมอร์มีความพันเกี่ยวน้อย เมื่อปั่นออกมาโดยที่ตัวทำละลายระเหยไปอย่างรวดเร็วพอลิเมอร์ที่ได้จึงแยกเป็นส่วนๆในลักษณะลูกบิดทรงกลม สารละลายที่มีความเข้มข้นมากโซ่โมเลกุลจะมีความพันเกี่ยวสูงเมื่อถูกสกัดออกมาจากปลายเข็มในกระบวนการปั่น ความพันเกี่ยวสูงนี้ทำให้เส้นใยที่ได้มีความต่อเนื่องเป็นเส้นมากขึ้น สำหรับเส้นใยที่ลักษณะเป็นเส้นต่อเนื่องและไม่เป็นลูกบิด นั่นคือที่ความเข้มข้น 16 18 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และทำการคำนวณค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย พบว่าเส้นใยมีค่าเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.6 ถึง 9 ไมโครเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยมีค่าลดลงเมื่อค่าความเข้มข้นของสารตั้งต้นเพิ่มขึ้นเนื่องจากความเข้มข้นของสารละลายสูงและความพันเกี่ยวของสายโซ่ที่มากขึ้นทำให้การยึดตัวของเส้นใยระหว่างการปั่นดีขึ้นเส้นใยที่ได้จึงมีขนาดเล็กลง เมื่อพิจารณาผลของความต่างศักย์ไฟฟ้าพบว่าเมื่อค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงจะช่วยให้การยึดตัวของเส้นใยดีขึ้นคล้ายกับความพันเกี่ยวของโมเลกุลพอลิเมอร์ที่ความเข้มข้นของสารละลาย กระนั้นผลของความต่างศักย์ที่มีต่อลักษณะเส้นใยไม่เด่นชัดเท่ากับผลของความเข้มข้นสารละลาย ปัจจัยที่ส่งผลมากต่อเส้นใยโคพอลิเมอร์แบบสามช่วงประเภท สไตรีน-ไอโซพรีน-สไตรีน จากงานวิจัยนี้ คือ ความเข้มข้นของสารละลายพอลิเมอร์ อย่างไรก็ตามแม้ว่าผลการวิจัยจะมีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงไปตามปัจจัยที่ทำการศึกษแต่ด้วยข้อจำกัดหลายข้อ ดังเช่น เครื่องกำเนิดศักย์ไฟฟ้าที่ใช้สามารถให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าได้สูงสุดเพียง 20 กิโลโวลต์ อีกทั้งความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ต่ำเกินไปนั้นไม่สามารถทำให้การปั่นเส้นใยได้ ทำให้ขอบเขตการวิจัยจำกัด

ในการประยุกต์ใช้เส้นใยโคพอลิเมอร์แบบสามช่วงประเภท สไตรีน-ไอโซพรีน-สไตรีน เพื่อผลิตวัสดุเชิงประกอบที่มีพอลิสไตรีนเป็นวัสดุเนื้อหลัก ทำโดยการปั่นเส้นใยโคพอลิเมอร์บนแผ่นพอลิสไตรีนแล้วนำมาซ้อนทับและนำไปอบอ่อน เส้นใยโคพอลิเมอร์ปั่นจากสารละลายที่ความเข้มข้นมีค่า 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้า 16 กิโลโวลต์ เนื่องจากได้เส้นใยที่มีความสม่ำเสมอขนาดเล็ก จากการทดสอบสมบัติเชิงกลด้วยเครื่องทดสอบแรงดึงเพื่อเปรียบเทียบกับสมบัติ

เชิงกลที่ได้กับแผ่นฟิล์มพอลิไอสไตรีนทั่วไปที่ไม่มีเส้นใยผสมอยู่ พบว่าการผสมเส้นใยลงไปใแผ่นฟิล์มพอลิไอสไตรีนทำให้วัสดุที่ได้มีค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดและความเครียดที่จุดขาดที่สูงขึ้นสะท้อนให้เห็นว่าแผ่นฟิล์มที่มีเส้นใยผสมอยู่มีความเหนียวและแตกหักยากกว่าแผ่นฟิล์มพอลิไอสไตรีนเดิมทั่วไป และในการเปรียบเทียบกับพอลิไอสไตรีนทนแรงกระแทกสูงทั่วไป พบว่าการผสมอนุภาคยางในพอลิไอสไตรีนชนิดทนแรงกระแทกสูงทั่วไปมีประสิทธิภาพในการสร้างความเหนียวหรือความแกร่งมากกว่าการผสมเส้นใยที่มีรูปทรงเป็นเส้นยาวในแผ่นฟิล์มพอลิไอสไตรีน อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาวัสดุเชิงประกอบจากการปั่นเส้นใยที่มีเงื่อนไขเริ่มต้นเพียงเงื่อนไขเดียวซึ่งไม่ครอบคลุมในทุกกรณี หากทำการปรับเปลี่ยนการปั่นเส้นใยให้ได้ขนาด รูปร่าง ปริมาณและการเรียงตัวของเส้นใยที่เปลี่ยนไป อาจทำให้สามารถพัฒนาสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบที่ต่างออกไปจากผลของงานวิจัยครั้งนี้ได้ความเหนียวและแข็งแรงยิ่งขึ้น

บรรณานุกรม

บรรณานุกรม

- บัญชา ธนบุญสมบัติ. (2540, กรกฎาคม-กันยายน). *จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบกวาด: ประตูสู่โลก
ระดับจุลภาค. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ. สืบค้นเมื่อ 20 มิถุนายน 2552,*
จาก <http://www.mtec.ac.th>.
- ปิ่นสุภา ปิติรักษ์สกุล. (2545). *การวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของพอลิเมอร์. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ:
สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยรามคำแหง.*
- (2546). *พอลิเมอร์เบื้องต้น 1. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัย
รามคำแหง.*
- (2546). *พอลิเมอร์เบื้องต้น 2. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัย
รามคำแหง.*
- ปิยะรัตน์ พรหมณี. (2545). *ฟิสิกส์มหาลัย ไฟฟ้า-แม่เหล็ก. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์
ไทยเส็ง.*
- วัลย์พร หงส์โรจนวิวัฒน์. (2547, มกราคม-มีนาคม). *พอลิเมอร์นาโนไฟเบอร์โดยเทคนิคอิเล็กโตร-
สปินนิง. คัลเลอร์เวย์. 9(50): 17-20.*
- วิมลรัตน์ ศรีจรัสสิน. (2544, พฤษภาคม-กรกฎาคม). *การผลิตพอลิเมอร์นาโนไฟเบอร์ด้วยกระบวนการ
การอิเล็กโตรสปินนิงและการศึกษาสมบัติที่ผิวของเส้นใย. คัลเลอร์เวย์. 7(52): 43-46.*
- อาริต ธรรมโน; และ ธีรัช ทองจิตติ. (2541, กรกฎาคม-กันยายน). *การตรวจสอบการผลิตแผงวงจร
รวม ตอนที่ 1. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ. สืบค้นเมื่อ 20 มิถุนายน 255, จาก
<http://mtec.ac.th>.*
- Adhikari, R.; & Michler, G. H. (2004, September 27). Influence of Molecular Architecture on
Morphology and Micromechanical Behavior of Styrene/Butadiene Block
Copolymer Systems. *Progress in Polymer Science. 29(9): 949-956.*
- Bucknall, C. B.; et al. (1986, January). Rubber Toughening of Plastics Part 10 Effects of
Rubber Particle Volume Fraction of the Kinetics of Yielding in HIPS. *Journal of
Material Science. 21(1): 307-313.*
- Demir, M. M.; & et al. (2002, May 8). Electrospinning of Polyurethane Fibers. *Polymer. 43
(11): 3303-3309.*
- Doi, M. (1997). *Introduction to Polymer Physics. 2nd ed. New York: Oxford Science
Publications.*

- Doshi, J.; & Reneker, D. H. (1995, August). Electrospinning Process and Applications of Electrospun Fibers. *Journal of Electrostatics*. 35(3): 151-160.
- Dowling, N. E. (1999). *Mechanical Behavior of Material : Engineering Methods for Deformation Fracture and Fatigue*. 2nd ed. New Jersey: Prentice-Hall.
- Feng, J.J. (2003, December 10). Stretching of A Straight Electrically Charged Viscoelastic Jet. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanical*. 116(1): 55-70.
- Fong, H.; & Reneker, D. H. (1999, August 4). Elastomeric Nanofibers of Styrene-Butadiene-Styrene Triblock Copolymer. *Journal of Polymer Science*. 37: 3488-3493.
- Fong, H.; Reneker, D.H.; & Chun, I. (1999, October 22). Beaded Nanofibers Formed During Electrospinning. *Polymer*. 40: 4585-4592.
- Fried, J. R. (2007). *Polymer Science and Technology*. 2nd ed. New Jersey: Prentice-Hall.
- Gong, X. H.; et al. (2004). Improved Mechanical Properties of HIPS/Hydroxyapatite Composites by Surface Modification of Hydroxyapatite Via *In-Situ* Polymerization of Styrene. *Journal of Material Science: Material in Medicine*. 15: 1141-1146.
- Govaert, L. E.; et al. (2003). Prediction of Brittle-to-Ductile Transitions in Polystyrene. *Polymer*. 44: 457-465.
- Huang, Z. M.; et al. (2003, November 8). A Review on Polymer Nanofibers by Electrospinning and Their Applications in Nanocomposites. *Composite Science & Technology*. 63(15): 2223-2253.
- Jarusuwannapoom, T.; et al. (2004, December 18). Effect of Solvents on Electrospinnability of Polystyrene and Morphological Appearance of Resulting Electrospun Polystyrene Fibers. *European Polymer Journal*. 41(3): 409-421.
- Jérôme, R.; et al. (1999, June 2). Composition Effect on the Core-Shell Morphology and Mechanical Properties of Ternary Polystyrene / Styrene-Butadiene Rubber / Polyethylene. *Polymer*. 40: 2511-2520.
- Kalra, V.; et al. (2006, June 7). Self - Assembled Structure in Electrospun Poly (styrene-block-isoprene) Fibers. *Macromolecules*. 39: 5453-5457.

- Kenawy, E. R.; et al. (2008, July 11). Processing of Polymer Nanofibers Through Electrospinning as Drug Delivery Systems. *Material Chemistry and Physics*. Retrieved August 18, 2008, from <http://www.elsevier.com/locate/matchemphys>.
- Larrondo, L.; & Manley, St. John. (1981). Electrostatic Fiber Spinning From Polymer Melts. *Polymer Science*. 19: 909-920.
- Mousavi, S. A.; & Ramazani, A. (2005). Investigation of Vacuum Annealing Effects on Physical-Mechanical Properties of Thermoplastic Parts. *Materials and Design*. 26: 89-93.
- Pornsopone, V., Supaphol, P., Rangkupan, R., and Tantayanon, S. (2005). Electrospinning of Methacrylate - Based Copolymers : Effect of Solution Concentration and Applied Electrical Potential on Morphological Appearance of As-Spun. *Polymer Engineering and Science*., 1073-1080.
- Rutledge, G. C.; & Fridrikh , S. V. (2007, August 22). Formation of Fiber by Electrospinning. *Advanced Drug Delivery Review*. 59: 1384-1391.
- Shin, Y. M.; et al. (2001, December 25). Experimental Characterization of Electrospinning :The Electrically Forced Jet and Instabilities. *Polymer*. 42(25): 9955-9967.
- Shin, Y. M.; et al. (2001, February 19). Electrospinning A Whipping Fluid Jet Generates Submicron Polymer Fibers. *Applied Physics Letters*. 78(8): 1149-1151.
- Thompson, C. J.; et al. (2007, November 2). Effects of Parameters on Nanofiber Diameter Determined From Electrospinning Model. *Polymer*. 48(23): 6913-6922.
- Tolstov, A.; et al. (2004, July 30). Thermoplastic Elastomers from Rubber and Recycled Polyethylene: Chemical Reactions at Interphases for Property Enhancement. *Polymer International*. 53: 1668-1702.
- Ward, I. M.; & Hadley, D. W. (1993). *An Introduction to the Mechanical Properties of Solid Polymers*. New York: John Wiley & Sons.
- Wu, X., Wang, L., Yu, H. and Huang, Y. (2005). Effect of Solvent on Morphology of Electrospinning Ethyl Cellulose Fibers. *Polymer Science*. 97, 1292-1297.
- Zhang C., Yuan, X., Wu, L., Han, Y. and Sheng, J. (2005). Study on Morphology of Electrospun Poly(vinyl alcohol) Mats, *European Polymer Journal*. 41, 423-432.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
สนามไฟฟ้า

สนามไฟฟ้า

กฎของคูลอมบ์ กล่าวว่า ขนาดของแรงไฟฟ้าระหว่างจุดสองจุดประจุ (Point charge) แปรผันตรงกับผลคูณของค่าประจุทั้งสอง และแปรผกผันกับกำลังสองของระยะทางระหว่างประจุนั้น ซึ่งสามารถเขียนขนาดของแรง F ระหว่างสองจุดประจุ คือ q_1 และ q_2 ที่อยู่ห่างกันเป็นระยะ r ได้เป็น

$$F = \frac{kq_1q_2}{r^2} \quad (\text{ก.1})$$

เมื่อ k เป็นค่าคงที่สัดส่วน (Proportionality constant) ในระบบเอสไอมักเขียนค่า k เป็น $\frac{1}{4\pi\epsilon_0}$ เมื่อ ϵ_0 เป็นค่าคงที่ เรียกว่า Permittivity constant ซึ่งจะเขียนกฎของคูลอมบ์ได้เป็น

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1q_2}{r^2} \quad (\text{ก.2})$$

$$\text{ซึ่งค่า } \epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{ C}^2 / \text{Nm}^2$$

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} 9.0 \times 10^9 \text{ Nm}^2 / \text{C}^2 \quad (\text{ก.3})$$

เนื่องจากแรงเป็นปริมาณเวกเตอร์ ในการใช้กฎของคูลอมบ์จึงต้องพิจารณาทิศทางของแรงด้วย ถ้า q_1 และ q_2 เป็นประจุชนิดเดียวกันจะเกิดแรงผลักซึ่งกันและกัน ทิศทางของแรงแต่ละประจุนั้นออกจากกัน ถ้า q_1 และ q_2 เป็นประจุต่างชนิดกันจะเกิดแรงดึงดูดซึ่งกันและกัน ทิศทางของแรงแต่ละประจุนั้นจะชี้เข้าหากัน

สนามไฟฟ้า (Electric field) หมายถึง บริเวณโดยรอบประจุไฟฟ้า ซึ่งประจุไฟฟ้าสามารถส่งอำนาจไปถึงหรือบริเวณที่เมื่อนำประจุไฟฟ้าเข้าไปวางแล้ว จะเกิดแรงกระทำบนประจุไฟฟ้านั้นตามจุดต่างๆในบริเวณสนามไฟฟ้าย่อมมีความเข้มของสนามไฟฟ้าแตกต่างกัน จุดที่อยู่ใกล้ประจุไฟฟ้าจะมี

ความเข้มของสนามไฟฟ้าสูงกว่าจุดที่อยู่ห่างออกไป นอกจากนั้น ณ จุดต่างๆในบริเวณสนามไฟฟ้าย่อมจะมีความต่างศักย์ไฟฟ้าที่มีค่าต่างๆกันด้วย ซึ่งเป็นศักย์ไฟฟ้าชนิดเดียวกับศักย์ไฟฟ้าอันเกิดจากประจุไฟฟ้าที่เป็นเจ้าของสนามไฟฟ้า จุดที่อยู่ใกล้ประจุไฟฟ้าจะมีศักย์สูงกว่าจุดที่อยู่ไกลออกไป นิยามได้ว่า สนามไฟฟ้าเป็นแรงต่อประจุ 1 คูลอมป์ มีหน่วยเป็นนิวตันต่อคูลอมป์ (N/C) ในระบบเอสไอ

สนามไฟฟ้า = แรง / ประจุ

$$E = \frac{F}{q} \quad (\text{ก.4})$$

$$E = k \frac{q}{r^2} \hat{e}_E \quad (\text{ก.5})$$

ภาคผนวก ข
ศักย์ไฟฟ้าและความต่างศักย์ไฟฟ้า

ศักย์ไฟฟ้าและความต่างศักย์ไฟฟ้า

เมื่อประจุ q_0 วางอยู่ในสนามไฟฟ้า E ประจุจะถูกแรงกระทำจากสนามไฟฟ้าด้วยขนาดของแรง $F = q_0 E$ ทำให้ประจุเคลื่อนที่จากระยะห่างอนันต์มายังจุด P ทำให้เกิดงานและมีพลังงานศักย์ไฟฟ้าเกิดขึ้น พลังงานศักย์ต่อหนึ่งหน่วยประจุที่วางไว้ ณ จุดใดๆ คือ ศักย์ไฟฟ้า (Electric potential) เขียนสมการได้เป็น

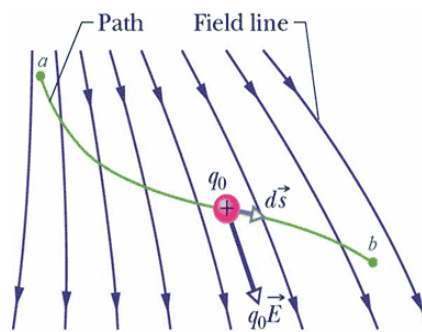
$$V_P = \frac{E_P}{q} \quad (ข.1)$$

เราสามารถหาศักย์ไฟฟ้าจากสนามไฟฟ้าที่จุด P ใดๆ ได้จาก

$$V_P = - \int_{\infty}^P \vec{E} \cdot \partial \vec{s} \quad (ข.2)$$

ศักย์ไฟฟ้าเป็นปริมาณสเกลาร์ มีหน่วยเป็น จูลต่อคูลอมบ์ (J/K) หรือเรียกว่า โวลต์ (Volt)

ความต่างศักย์ (Potential difference) ของศักย์ไฟฟ้าระหว่างจุดสองจุดมีค่าเท่ากับ การเปลี่ยนแปลงพลังงานเมื่อประจุไฟฟ้าบวกหนึ่งหน่วยเคลื่อนที่จากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งในสนามไฟฟ้า หน่วยของความต่างศักย์ไฟฟ้า คือ โวลต์ (Volt) พลังงานไฟฟ้าจะเปลี่ยนไป 1 จูล เมื่อประจุไฟฟ้า 1 คูลอมบ์ เคลื่อนที่ระหว่างจุดสองจุดที่มีความต่างศักย์ 1 โวลต์ ซึ่งส่วนใหญ่มีการกำหนดจุดอ้างอิงจุดหนึ่งให้มีศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ 0 (ทำการต่อลงดิน)



ภาพประกอบ 24 แสดงการเคลื่อนที่ของประจุ q_0 จากจุด a ไปยังจุด b ในสนามไฟฟ้าที่สม่ำเสมอ E

ที่มา: ปิยะรัตน์ พรหมณี. (2545). ฟิสิกส์มหาลัย ไฟฟ้า-แม่เหล็ก. หน้า. 50.

งานทั้งหมดหรือพลังงานศักย์ที่ต้องใช้ในการเคลื่อนที่ประจุ จาก a ไปยัง b สามารถเขียนได้
เป็น

$$W = -q_0 \int_a^b \vec{E} \cdot d\vec{s} \quad (1.3)$$

ความต่างศักย์ระหว่างจุด a กับ b เขียนสมการได้เป็น

$$V_{ab} = V_b - V_a = \frac{W}{q_0} = - \int_a^b \vec{E} \cdot d\vec{s} \quad (1.4)$$

ถ้า V_{ab} เป็นลบจะเกิดการสูญเสียพลังงานศักย์ที่เคลื่อนที่ประจุ จาก a ไปยัง b แสดงว่าสนามไฟฟ้าเป็นตัวกระทำงาน ถ้า เป็นบวก (ทิศทางที่ประจุเคลื่อนที่สวนกับทิศทางของสนามไฟฟ้า) คือ เมื่อมีพลังงานศักย์ในการเคลื่อนที่เพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าแรงภายนอกเป็นตัวกระทำงาน

ภาคผนวก ค

ความหนีด

ความหนืด

ความหนืด (Viscosity) คือ ความสามารถในการต้านทานการไหลของของไหลเมื่อมีแรงมากระทำ (ของไหล คือ สสารที่สามารถไหลได้ เช่น ก๊าซ และของเหลว) ของไหลที่มีความหนืดสูงจะมีค่าความต้านทานต่อการไหลสูง ของไหลที่มีความหนืดต่ำจะมีค่าความต้านทานต่อการไหลต่ำ ของไหลธรรมดาสามารถที่จะแสดงค่าความหนืดสัมบูรณ์ได้แต่ในขณะที่ของไหลที่มีส่วนผสมของสสารหลายตัวจะมีลักษณะการไหลที่ซับซ้อนและไม่สามารถแสดงค่าความหนืดค่าเดียวได้

การวัดความหนืดสามารถทำได้โดยการวัดแรงต้านทานการไหลภายในของของไหล เมื่อมีแรงมากระทำ (F) ในแนวขนานกับพื้นผิว เรียกแรงต้านที่เกิดขึ้นนี้ว่า แรงเฉือน (Shear force) เมื่อพิจารณาถึงก้อนของไหลซึ่งประกอบด้วยแผ่นโมเลกุลที่ขนานกัน ชั้นที่อยู่ล่างสุดของของไหลจะถูกยึดไว้ถ้าแผ่นด้านบนของของไหลได้รับแรงกระทำให้เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ แผ่นด้านล่างถัดลงไปจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเป็นสัดส่วนโดยตรงกับระยะทางจากแผ่นของไหลชั้นล่างสุดที่ไม่เคลื่อนที่ ความแตกต่างของความเร็ว (∂v) ระหว่างของไหลสองแผ่นกับระยะทางที่เปลี่ยนไป (∂x) ก็คือ อัตราเฉือน (Shear rate) ที่อยู่ในเทอมของ velocity gradient ($\partial v / \partial x$, s) ค่าแรงต่อหน่วยพื้นที่ที่ทำให้เกิดการไหล เรียกว่า แรงเฉือนต่อหน่วยพื้นที่ (Shear stress, F') ถ้าของไหลมีความหนืดสูงขึ้นก็ต้องใช้แรงเฉือนที่สูงขึ้นเพื่อให้ได้อัตราเฉือนเท่าเดิม ดังนั้นอัตราเฉือนจึงเป็นสัดส่วนโดยตรงกับแรงเฉือนสามารถเขียนสมการได้เป็น

$$\frac{F}{A} = \eta \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right) \quad (\text{ค.1})$$

η คือ สัมประสิทธิ์ของความหนืด (Coefficient of viscosity) สัมประสิทธิ์ความหนืดสามารถเขียนเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ได้เป็น

$$\eta = \frac{F'}{S} \quad (\text{ค.2})$$

เมื่อ F' คือ แรงเฉือนต่อหน่วยพื้นที่ มีหน่วยเป็น dynes / cm² หรือ ปาสคัล (Pascal, Pa)

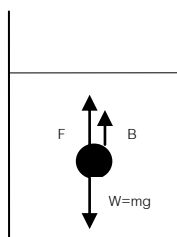
S คือ อัตราเฉือน มีหน่วยเป็น sec⁻¹

กฎของสโตกส์ (Stokes's law) กล่าวว่า เมื่อปล่อยวัตถุทรงกลมตันให้เคลื่อนที่ในของไหล ความหนืดของของไหล จะทำให้เกิดแรงต้านการเคลื่อนที่ของวัตถุ เรียกว่า แรงหนืด (Viscous force) เมื่อทรงกลมรัศมี r เคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็ว v ผ่านของไหลที่มีสัมประสิทธิ์ความหนืด η จะมีแรงหนืดต้านการเคลื่อนที่ จะสามารถเขียนสมการของแรงหนืดได้เป็น

$$F = 6\pi\eta rv \quad (\text{ค.3})$$

หน่วยของความหนืด คือ $\text{dyne}\cdot\text{sec}/\text{cm}^2$ หรือ $\text{gram}/\text{cm}^1\cdot\text{sec}^1$ เรียกเป็น poise

โดยที่ 1 poise คือ แรงที่ใช้ทำให้ของเหลวที่มีพื้นที่หน้าตัด 1 cm^2 หนา 1 cm เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 1 cm/s ซึ่งมีค่าเท่ากับ $1\text{ dyne}\cdot\text{sec}/\text{cm}^2$ หรือ 10^{-1}



รูปประกอบ 25 แสดงแรงลัพธ์ที่กระทำกับวัตถุทรงกลมตันที่เคลื่อนที่ในของเหลว

เนื่องจากแรงหนืดเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเร็วของวัตถุทรงกลม ดังนั้นตอนเริ่มต้นแรงหนืดเป็นศูนย์ วัตถุทรงกลมจะเคลื่อนที่ด้วยความเร่งแต่ในขณะเดียวกันแรงหนืดจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามอัตราเร็วด้วย ทำให้แรงลัพธ์ที่กระทำต่อลูกกลมจะมีค่าลดลงเรื่อยๆจนกระทั่งเป็นศูนย์ ทรงกลมจะเคลื่อนที่ลงด้วยอัตราเร็วคงที่ตลอด เรียกว่า อัตราเร็วสุดท้าย (Terminal velocity, v_T) และสามารถหา η ที่อัตราเร็วสุดท้ายได้จากสมการ

$$\text{แรงต้านการเคลื่อนที่ของวัตถุ} \quad F = 6\pi\eta rv \quad (\text{ค.4})$$

$$\text{แรงลอยตัวของวัตถุ} \quad B = \frac{4}{3}\pi r^3 \sigma g \quad (\text{ค.5})$$

$$\text{น้ำหนักของวัตถุทรงกลม} \quad W = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho g \quad (\text{ค.6})$$

ที่ภาวะสมดุล $W = F + B$ (ค.7)

ดังนั้น $6\pi\eta rv = -\frac{4}{3}\pi r^3 (\rho - \sigma) g$ (ค.8)

$$\eta = \frac{2r^2 g}{9v_T} (\rho - \sigma) \quad (\text{ค.9})$$

เมื่อ σ คือ ความหนาแน่นของของเหลว

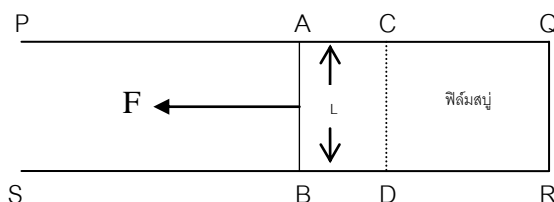
ρ คือ ความหนาแน่นของลูกทรงกลม

g คือ ค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก ซึ่งมีค่าเท่ากับ 9.81 m/s^2

ภาคผนวก ง
ความต้งฉิว

ความตึงผิว

ความตึงผิว (Coefficient of surface tension, γ) คือ ความพยายามในการยืดผิวของเหลวเท่ากับอัตราส่วนระหว่างแรงที่กระทำไปตามผิวต่อความยาวของผิวที่ถูกแรงกระทำ ความยาวนี้ต้องตั้งฉากกับแรงด้วย



ภาพประกอบ 26 แสดงรูปกรอบรูปตัวยู

ในรูป PQRS เป็นโครงลวดที่มีลวด AB ปิดอยู่อีกด้านหนึ่ง ในตอนแรกเส้นลวด AB หลังจากรวบรวมน้ำลงในน้ำสบู่และดึงลวด AB ไปทางซ้ายด้วยแรง F ก็จะทำให้เกิดฟิล์มสบู่อยู่บริเวณ AQRB และให้ L เป็นความยาวของเส้นลวดที่เลื่อนเข้าออก เพราะฉะนั้นจึงได้สมการความตึงผิว (γ) เป็น

$$\gamma = \frac{F}{L} \quad (\text{ง.1})$$

หน่วยของความตึงผิว คือ นิวตันต่อเมตร (N/m)

ผลคูณระหว่างความตึงผิว (γ) กับพื้นที่ผิวที่เปลี่ยนแปลง (ΔS) จะได้ งานตึงผิว (Surface tension work, W) เขียนสมการได้เป็น

$$W = \gamma \cdot \Delta S \quad (\text{ง.2})$$

หน่วยของงาน คือ จูล (Joule)

ภาคผนวก จ

ตารางแสดงผลการวัดค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยจากภาพที่ได้จาก
กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

**ตารางแสดงผลการวัดค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยจากภาพที่ได้จาก
กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด**

สำหรับเส้นใยแต่ละความเข้มข้นมีการคำนวณขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางจากจำนวนจุดภาพ (Pixel) แล้วเปลี่ยนไปเป็นหน่วยไมโครเมตร (μm) โดยการเทียบมาตรฐาน (382 จุด มีค่าเท่ากับ 60 ไมโครเมตร)

ตาราง 11 แสดงผลการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยและการคำนวณหาค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยที่ความเข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 10 กิโลโวลต์

เส้นใย	x_1	y_1	x_2	y_2	x_3	y_3	x_4	y_4	$d_1(\text{pixel})$	$d_2(\text{pixel})$	$d(\text{pixel})$	$d_1(\mu\text{m})$	$d_2(\mu\text{m})$	$d(\mu\text{m})$
1	190	141	202	198	143	180	256	163	58.24946	114.2716	86.26053	9.1491304	17.94842	13.548775
2	95	156	93	196	73	177	114	182	40.04997	41.30375	40.67686	6.290571	6.4875004	6.3890357
3	267	129	267	169	248	148	297	146	40	49.0408	44.5204	6.2827225	7.7027434	6.9927329
4	295	186	297	221	323	202	272	206	35.0571	51.15662	43.10686	5.5063502	8.0350716	6.7707109
5	355	170	354	196	336	184	372	177	26.01922	36.67424	31.34673	4.0867891	5.7603521	4.9235706
6	333	227	381	226	354	197	360	258	48.01042	61.29437	54.65239	7.540903	9.6273882	8.5841456
7	142	239	159	264	162	238	135	283	30.23243	52.47857	41.3555	4.7485497	8.2427069	6.4956283
8	494	276	468	308	459	274	497	311	41.23106	53.03772	47.13439	6.4760821	8.3305323	7.4033072
9	385	295	385	322	366	303	403	316	27	39.21734	33.10867	4.2408377	6.1597921	5.2003149
10	363	272	364	292	337	285	388	276	20.02498	51.78803	35.90651	3.1452855	8.1342455	5.6397655
11	82	346	107	370	152	340	76	375	34.65545	83.67198	59.16371	5.4432639	13.142196	9.2927298
12	174	342	175	371	157	353	193	353	29.01724	36	32.50862	4.5576811	5.6544503	5.1060657
13	326	327	319	403	267	360	374	359	76.32169	107.0047	91.66318	11.9877	16.807017	14.397358
14	195	441	276	418	229	381	257	475	84.20214	98.0816	91.14187	13.225467	15.405487	14.315477
15	333	443	327	473	317	449	343	464	30.59412	30.01666	30.30539	4.8053587	4.714659	4.7600088
16	452	440	454	485	421	465	489	466	45.04442	68.00735	56.52589	7.0750402	10.681783	8.8784117
17	497	491	510	533	534	499	469	524	43.9659	69.64194	56.80392	6.9056381	10.938525	8.9220815
18	375	516	346	540	355	515	371	555	37.64306	43.08132	40.36219	5.9125226	6.7666992	6.3396109
19	194	522	155	548	153	512	196	560	46.87217	64.44377	55.65797	7.3621204	10.122059	8.7420896
20	234	561	233	600	212	580	255	574	39.01282	43.41659	41.2147	6.1276678	6.8193592	6.4735135
21	289	646	260	671	268	633	295	682	38.28838	55.9464	47.11739	6.0138816	8.7873931	7.4006374
22	422	598	376	630	379	588	415	648	56.0357	69.97142	63.00356	8.8014193	10.990276	9.8958476
23	505	424	460	458	456	406	501	475	56.40035	82.37718	69.38877	8.8586944	12.938824	10.898759
24	346	473	326	535	303	476	363	517	65.14599	72.67049	68.90824	10.232354	11.414213	10.823284
25	479	341	504	395	521	346	457	401	59.5063	84.38602	71.94616	9.3465396	13.254348	11.300444

ตาราง11 (ต่อ)

เส้นใย	x_1	y_1	x_2	y_2	x_3	y_3	x_4	y_4	$d_1(\text{pixel})$	$d_2(\text{pixel})$	$d(\text{pixel})$	$d_1(\mu\text{m})$	$d_2(\mu\text{m})$	$d(\mu\text{m})$
26	481	260	440	280	453	247	466	289	45.61798	43.9659	44.79194	7.1651276	6.9056381	7.0353828
27	647	225	677	273	802	226	627	274	56.60389	181.4635	119.0337	8.8906628	28.50212	18.696391
28	118	588	148	643	89	638	166	599	62.64982	86.31338	74.4816	9.8402859	13.557076	11.698681
29	358	672	380	703	383	678	350	704	38.01316	42.0119	40.01253	5.9706527	6.5987282	6.2846905
30	428	575	452	601	457	569	427	613	35.38361	53.25411	44.31886	5.5576354	8.3645196	6.9610775
31	570	662	667	665	631	616	616	719	97.04638	104.0865	100.5664	15.242887	16.348665	15.795776
32	737	684	795	672	755	616	780	732	59.22837	118.6634	88.94588	9.3028856	18.638229	13.970557
33	527	614	496	638	495	600	544	648	39.20459	68.593	53.8988	6.1577893	10.77377	8.4657796
34	637	573	660	600	671	566	632	618	35.4683	65	50.23415	5.5709365	10.209424	7.8901803
35	612	499	655	553	663	499	599	553	69.02898	83.73769	76.38333	10.842248	13.152516	11.997382
36	707	556	742	531	716	522	732	572	43.01163	52.49762	47.75462	6.7557528	8.2456993	7.5007261
37	838	529	828	567	806	540	861	560	39.29377	58.5235	48.90863	6.1717956	9.1921727	7.6819842
38	643	418	611	477	596	429	657	469	67.1193	72.94518	70.03224	10.542298	11.457359	10.999828
39	702	456	665	496	666	452	714	503	54.48853	70.03571	62.26212	8.558408	11.000373	9.7793903
40	829	387	747	450	757	378	820	463	103.407	105.8017	104.6043	16.241931	16.618068	16.43
41	831	348	866	365	861	336	835	377	38.91015	48.54894	43.72955	6.1115423	7.6254886	6.8685155
42	516	383	581	397	552	332	525	438	66.4906	109.3846	87.93762	10.44355	17.180834	13.812192
43	628	280	583	333	581	282	636	328	69.52697	71.70077	70.61387	10.920467	11.261901	11.091184
44	494	276	466	307	460	274	497	313	41.7732	53.75872	47.76596	6.5612352	8.443778	7.5025066
45	746	237	709	279	693	210	781	283	55.97321	114.3372	85.15521	8.7916033	17.958726	13.375165
46	860	204	811	241	816	201	856	245	61.40033	59.46427	60.4323	9.6440302	9.3399385	9.4919843
47	585	168	520	255	526	218	644	251	108.6002	122.5275	115.5639	17.057621	19.245165	18.151393
48	724	137	786	205	674	177	757	186	92.02174	83.48653	87.75413	14.453676	13.113067	13.783371
49	519	452	603	488	595	428	527	503	91.38928	101.2373	96.31331	14.354337	15.901154	15.127745
50	753	651	662	688	693	602	741	731	98.23441	137.6408	117.9376	15.429489	21.61898	18.524234
										Average d	63.4642		Average d	9.968208
										STD	24.2553		STD	3.809727

ตาราง 12 แสดงผลการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยและการคำนวณหาค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยที่ความเข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 12 กิโลโวลต์

เส้นใย	x_1	y_1	x_2	y_2	x_3	y_3	x_4	y_4	$d_1(\text{pixel})$	$d_2(\text{pixel})$	$d(\text{pixel})$	$d_1(\mu\text{m})$	$d_2(\mu\text{m})$	$d(\mu\text{m})$
1	115	229	191	201	137	161	163	267	80.99383	109.1421	95.06797	12.721543	17.14274	14.932142
2	250	225	296	184	257	176	289	235	61.6198	67.1193	64.36955	9.6785029	10.542298	10.1104
3	584	140	384	190	361	164	409	164	206.1553	48	127.0776	32.380411	7.539267	19.959839
4	373	198	330	256	321	203	398	243	72.20111	86.76981	79.48546	11.340488	13.628766	12.484627
5	392	242	392	303	357	273	432	269	61	75.10659	68.0533	9.5811518	11.796847	10.688999
6	356	285	355	339	319	308	391	312	54.00926	72.11103	63.06014	8.4831296	11.326339	9.9047343
7	278	251	283	303	252	281	317	267	52.23983	66.4906	59.36522	8.2052091	10.44355	9.3243795
8	290	319	292	389	253	361	330	363	70.02857	77.02597	73.52727	10.999251	12.09832	11.548785
9	218	368	219	430	194	403	249	403	62.00806	55	58.50403	9.7394865	8.6387435	9.189115
10	157	379	156	422	186	390	129	412	43.01163	61.09828	52.05495	6.7557528	9.5965887	8.1761708
11	127	328	82	402	74	324	139	396	86.60831	97	91.80416	13.6034	15.235602	14.419501
12	294	391	319	441	342	405	277	444	55.9017	75.80237	65.85204	8.7803716	11.906132	10.343252
13	278	445	298	481	313	457	261	472	41.18252	54.12024	47.65138	6.4684587	8.5005607	7.4845097
14	502	340	446	391	452	337	496	402	75.74299	78.49204	77.11751	11.896804	12.328592	12.112698
15	450	477	411	508	411	463	445	521	49.81967	67.23095	58.52531	7.8250798	10.559834	9.1924571
16	480	508	473	542	451	517	502	531	34.71311	52.88667	43.79989	5.4523209	8.306807	6.879564
17	194	494	192	544	166	516	221	519	50.03998	55.08176	52.56087	7.8596834	8.6515849	8.2556341
18	88	627	148	651	140	602	105	669	64.62198	75.591	70.10649	10.150049	11.872933	11.011491
19	193	676	232	709	232	668	200	721	51.08816	61.91123	56.49969	8.0243182	9.7242765	8.8742973
20	330	590	279	643	341	644	289	594	73.5527	72.13876	72.84573	11.55278	11.330695	11.441737
21	328	691	285	721	283	671	326	733	52.43091	75.45197	63.94144	8.235221	11.851095	10.043158
22	391	646	367	683	365	641	395	690	44.10215	57.45433	50.77824	6.9270399	9.0242403	7.9756401
23	420	606	445	619	440	597	424	625	28.17801	32.24903	30.21352	4.4258648	5.0652928	4.7455788
24	521	611	530	664	484	627	560	621	53.75872	76.23647	64.9976	8.443778	11.974315	10.209047
25	583	677	538	699	548	654	573	728	50.08992	78.1089	64.09941	7.8675266	12.268413	10.06797
26	646	605	578	636	604	581	628	661	74.73286	83.52245	79.12765	11.738145	13.11871	12.428427
27	726	621	674	648	685	605	713	668	58.59181	68.942	63.76691	9.2029018	10.828587	10.015744
28	832	607	785	639	794	598	827	654	56.85948	65	60.92974	8.9308077	10.209424	9.5701159
29	806	596	805	628	787	613	822	608	32.01562	35.35534	33.68548	5.0286316	5.5531946	5.2909131
30	478	509	470	540	450	517	503	534	32.01562	55.65968	43.83765	5.0286316	8.7423581	6.8854949
31	733	574	703	581	712	560	724	593	30.80584	35.1141	32.95997	4.8386142	5.5153036	5.1769589
32	713	548	716	615	669	587	754	582	67.06713	85.14693	76.10703	10.534104	13.373864	11.953984
33	701	551	663	558	677	535	692	574	38.63936	41.78516	40.21226	6.0690091	6.5631149	6.316062
34	481	510	470	540	451	516	504	533	31.95309	55.65968	43.80639	5.01881	8.7423581	6.8805841
35	678	463	677	496	661	478	693	480	33.01515	32.06244	32.53879	5.1856253	5.0359852	5.1108053

ตาราง 12 (ต่อ)

เส้นใย	x_1	y_1	x_2	y_2	x_3	y_3	x_4	y_4	$d_1(\text{pixel})$	$d_2(\text{pixel})$	$d(\text{pixel})$	$d_1(\mu\text{m})$	$d_2(\mu\text{m})$	$d(\mu\text{m})$
36	781	358	738	388	740	344	781	397	52.43091	67.00746	59.71918	8.235221	10.524732	9.3799766
37	823	318	825	385	783	351	861	354	67.02984	78.05767	72.54376	10.528248	12.260367	11.394307
38	813	305	867	288	825	263	854	327	56.61272	70.26379	63.43825	8.8920502	11.036197	9.9641237
39	751	272	787	320	738	334	807	268	60	95.48298	77.74149	9.4240838	14.997327	12.210705
40	522	267	537	323	492	310	571	292	57.97413	81.02469	69.49941	9.1058846	12.726391	10.916138
41	612	227	580	291	551	244	633	280	71.55418	89.55445	80.55431	11.238876	14.066144	12.65251
42	666	212	678	261	647	249	700	225	50.44799	58.18075	54.31437	7.9237685	9.1383381	8.5310533
43	823	181	820	242	774	215	857	214	61.07373	83.00602	72.03987	9.5927318	13.037595	11.315164
44	739	180	692	205	701	188	731	215	53.23533	40.36087	46.7981	8.3615696	6.339404	7.3504868
45	495	181	457	247	448	191	516	235	76.15773	80.99383	78.57578	11.961947	12.721543	12.341745
46	731	443	754	480	771	445	718	482	43.56604	64.63745	54.10175	6.8428338	10.152479	8.4976565
47	835	471	848	508	823	495	861	484	39.21734	39.56008	39.38871	6.1597921	6.2136253	6.1867087
48	447	392	498	345	449	338	495	404	69.35416	80.44874	74.90145	10.893324	12.635928	11.764626
49	616	335	610	373	591	346	642	366	38.47077	54.78138	46.62608	6.042529	8.6044058	7.3234674
50	781	358	738	388	740	344	781	397	52.43091	67.00746	59.71918	8.235221	10.524732	9.3799766
										Average	62.82975		Average	9.8685469
										STD	18.37317		STD	2.8858377

ตาราง 13 แสดงผลการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยและการคำนวณหาค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยที่ความเข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 14 กิโลโวลต์

เส้นใย	x_1	y_1	x_2	y_2	x_3	y_3	x_4	y_4	$d_1(\text{pixel})$	$d_2(\text{pixel})$	$d(\text{pixel})$	$d_1(\mu\text{m})$	$d_2(\mu\text{m})$	$d(\mu\text{m})$
1	171	134	119	174	174	201	111	116	65.60488	105.8017	85.70329	10.304431	16.618068	13.46125
2	278	169	202	200	227	140	266	219	82.07923	88.10221	85.09072	12.892026	13.838044	13.365035
3	354	182	329	201	330	179	351	259	31.40064	82.71034	57.05549	4.9320372	12.991153	8.9615949
4	159	205	183	266	211	215	115	251	65.55151	102.528	84.03978	10.296048	16.103881	13.199965
5	372	274	353	303	346	274	379	299	34.66987	41.40048	38.03518	5.4455296	6.5026937	5.9741116
6	103	307	170	346	197	329	175	410	77.52419	83.9345	80.72934	12.176574	13.183429	12.680002
7	158	391	113	451	98	399	163	453	75	84.50444	79.75222	11.780105	13.272948	12.526527
8	150	366	148	391	128	373	164	379	25.07987	36.49658	30.78822	3.939247	5.7324464	4.8358467
9	178	336	238	330	204	293	211	360	60.29925	67.36468	63.83197	9.471087	10.58084	10.025963
10	215	387	271	391	252	358	233	420	56.14268	64.84597	60.49432	8.8182213	10.185231	9.5017262
11	310	348	316	420	275	389	355	373	72.24957	81.58431	76.91694	11.3481	12.81429	12.081195
12	344	348	376	346	357	319	361	377	32.06244	58.13777	45.1001	5.0359852	9.1315865	7.0837859
13	386	351	399	396	366	389	430	358	46.84015	71.11259	58.97637	7.3570922	11.169516	9.2633042
14	401	315	449	352	457	308	414	356	60.60528	64.44377	62.52453	9.519154	10.122059	9.8206064
15	91	412	165	434	158	391	114	448	77.20104	72.00694	74.60399	12.125817	11.309991	11.717904
16	478	424	419	470	425	389	496	399	74.8131	71.70077	73.25693	11.750749	11.261901	11.506325
17	368	449	382	485	397	461	359	485	38.62642	44.94441	41.78541	6.0669763	7.0593314	6.5631539
18	172	475	178	514	149	503	198	493	39.45884	50.01	44.73442	6.1977235	7.8549737	7.0263486
19	186	476	235	464	190	441	213	498	50.44799	61.46544	55.95672	7.9237685	9.6542572	8.7890129
20	366	449	382	484	397	460	358	484	38.48376	45.79301	42.13839	6.0445701	7.1926198	6.6185949
21	230	494	224	562	181	531	270	537	68.26419	89.20202	78.73311	10.722125	14.010788	12.366456
22	440	550	413	579	409	554	443	580	39.62323	42.80187	41.21255	6.2235433	6.7228067	6.473175
23	476	567	503	634	536	590	449	615	72.23573	90.52072	81.37822	11.345925	14.217913	12.781919
24	439	549	412	577	410	553	442	580	38.8973	41.86884	40.38307	6.1095237	6.576258	6.3428909
25	229	495	221	561	182	530	267	530	66.48308	85	75.74154	10.442369	13.350785	11.896577
26	122	562	101	611	88	568	157	602	53.31041	76.92204	65.11623	8.3733631	12.081996	10.227679
27	226	592	256	615	251	580	224	624	37.80212	51.62364	44.71288	5.9375052	8.1084248	7.022965
28	118	627	100	685	76	636	147	681	60.72891	84.0595	72.3942	9.5385716	13.203063	11.370817
29	161	685	142	718	128	691	184	710	38.07887	59.13544	48.60715	5.9809736	9.2882887	7.6346311
30	274	706	235	719	238	689	266	731	41.10961	50.47772	45.79366	6.4570067	7.9284374	7.1927221
31	285	678	286	708	266	691	310	691	30.01666	44	37.00833	4.714659	6.9109948	5.8128269
32	362	611	331	631	335	596	360	635	36.89173	46.32494	41.60834	5.7945131	7.2761685	6.5353408
33	457	541	421	661	426	635	452	663	125.2837	38.20995	81.74681	19.678065	6.0015623	12.839813
34	671	616	674	706	621	659	730	653	90.04999	109.165	99.6075	14.143977	17.146337	15.645157
35	758	632	786	643	789	617	761	659	30.08322	50.47772	40.28047	4.7251128	7.9284374	6.3267751

ตาราง 13 (ต่อ)

เส้นใย	x_1	y_1	x_2	y_2	x_3	y_3	x_4	y_4	$d_1(\text{pixel})$	$d_2(\text{pixel})$	$d(\text{pixel})$	$d_1(\mu\text{m})$	$d_2(\mu\text{m})$	$d(\mu\text{m})$
36	550	522	585	577	594	519	530	679	65.19202	172.3253	118.7586	10.239585	27.066797	18.653191
37	678	540	678	569	628	549	722	550	29	94.00532	61.50266	4.5549738	14.765233	9.6601036
38	549	496	624	462	571	442	610	513	82.34683	81.00617	81.6765	12.934057	12.723483	12.82877
39	728	424	728	475	686	441	771	445	51	85.09407	68.04703	8.0104712	13.36556	10.688016
40	667	354	651	412	620	376	699	399	60.16644	82.28001	71.22322	9.4502255	12.923562	11.186894
41	793	436	797	495	760	459	829	466	59.13544	69.35416	64.2448	9.2882887	10.893324	10.090806
42	829	466	860	477	851	455	844	491	32.89377	36.67424	34.78401	5.1665605	5.7603521	5.4634563
43	755	251	790	289	803	256	748	288	51.66237	63.63175	57.64706	8.1145077	9.9945162	9.0545119
44	812	248	847	266	844	245	817	289	39.35734	51.62364	45.49049	6.1817807	8.1084248	7.1451028
45	489	266	527	216	490	216	533	264	62.80127	64.44377	63.62252	9.8640744	10.122059	9.9930666
46	523	200	523	288	405	279	577	254	88	173.8074	130.9037	13.82199	27.299586	20.560788
47	630	181	646	241	686	192	592	228	62.0967	100.6578	81.37727	9.7534082	15.810131	12.78177
48	489	438	556	467	543	412	516	503	73.00685	94.92102	83.96393	11.467044	14.909061	13.188053
49	584	694	580	724	560	720	609	710	30.26549	50.01	40.13775	4.7537422	7.8549737	6.3043579
50	730	169	746	191	750	172	732	187	27.20294	23.43075	25.31685	4.2727132	3.6802224	3.9764678
										Average	63.29069		Average	9.940947
										STD	22.03952		STD	3.461705

ตาราง 14 แสดงผลการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยและการคำนวณหาค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยที่ความเข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 16 กิโลโวลต์

เส้นใย	x_1	y_1	x_2	y_2	x_3	y_3	x_4	y_4	$d_1(\text{pixel})$	$d_2(\text{pixel})$	$d(\text{pixel})$	$d_1(\mu\text{m})$	$d_2(\mu\text{m})$	$d(\mu\text{m})$
1	201	134	225	191	239	144	185	193	61.84658	72.91776	67.38217	9.7141232	11.453052	10.583587
2	290	135	291	193	255	171	324	159	58.00862	70.03571	64.02216	9.1113016	11.000373	10.055837
3	471	162	391	205	407	144	456	231	90.82401	99.84989	95.33695	14.265551	15.683228	14.97439
4	476	198	450	210	450	183	477	226	28.63564	50.77401	39.70483	4.4977448	7.9749753	6.23636
5	229	216	217	249	200	225	249	248	35.1141	54.12947	44.62179	5.5153036	8.5020117	7.0086577
6	249	278	250	359	210	316	300	302	81.00617	91.08238	86.04428	12.723483	14.306133	13.514808
7	147	382	147	455	113	419	189	420	73	76.00658	74.50329	11.465969	11.938206	11.702087
8	286	453	326	439	295	421	310	465	42.37924	46.48656	44.4329	6.6564252	7.3015535	6.9789893
9	381	381	381	441	341	413	418	414	60	77.00649	68.50325	9.4240838	12.095261	10.759672
10	443	411	424	458	408	421	462	450	50.69517	61.29437	55.99477	7.9625917	9.6273882	8.79499
11	353	447	375	512	320	496	409	461	68.62215	95.63472	82.12844	10.778349	15.02116	12.899755
12	325	438	285	451	297	419	310	465	42.05948	47.80167	44.93058	6.6062013	7.5081163	7.0571588
13	216	510	168	522	180	486	207	538	49.47727	58.59181	54.03454	7.7712986	9.2029018	8.4871002
14	279	534	280	598	235	577	324	563	64.00781	90.09439	77.0511	10.053583	14.150952	12.102268
15	183	583	196	633	164	619	219	597	51.66237	59.23681	55.44959	8.1145077	9.3042114	8.7093596
16	155	635	155	680	124	656	195	660	45	71.11259	58.05629	7.0680628	11.169516	9.1187895
17	221	686	220	714	202	699	240	702	28.01785	38.11824	33.06804	4.4007097	5.9871577	5.1939337
18	384	566	392	621	346	608	431	577	55.57877	90.47652	73.02764	8.7296502	14.210971	11.470311
19	425	623	490	630	458	593	459	664	65.37584	71.00704	68.19144	10.268456	11.152939	10.710697
20	444	688	410	705	409	677	439	714	38.01316	47.63402	42.82359	5.9706527	7.4817835	6.7262181
21	831	634	832	722	782	675	882	671	88.00568	100.08	94.04282	13.822882	15.719367	14.771124
22	806	595	806	525	721	673	882	663	70	161.3103	115.6551	10.994764	25.33669	18.165727
23	480	192	515	235	512	181	478	237	55.44367	65.51336	60.47851	8.7084291	10.290056	9.4992426
24	700	129	736	178	752	139	669	177	60.80296	91.28527	76.04411	9.5502032	14.338	11.944102
25	871	141	836	155	833	129	868	167	37.69615	51.66237	44.67926	5.9208618	8.1145077	7.0176847
26	829	215	881	216	863	170	861	252	52.00961	82.02439	67.017	8.1690494	12.883412	10.52623
27	585	163	568	177	562	144	601	201	22.02272	69.06519	45.54395	3.4590653	10.847935	7.1535002
28	672	233	599	251	604	200	645	251	75.18643	65.43699	70.31171	11.809388	10.278062	11.043725
29	719	287	667	321	670	275	720	331	62.1289	75.0733	68.6011	9.7584657	11.791617	10.775042
30	714	267	761	266	737	237	737	297	47.01064	60	53.50532	7.3838697	9.4240838	8.4039767
31	855	267	862	291	835	288	873	275	25	40.16217	32.58109	3.9267016	6.3081944	5.117448
32	763	252	779	302	798	264	739	300	52.49762	69.11584	60.80673	8.2456993	10.855892	9.5507956
33	533	262	553	327	589	286	495	289	68.00735	94.04786	81.02761	10.681783	14.771915	12.726849
34	859	352	768	351	823	287	801	307	91.00549	29.73214	60.36882	14.294057	4.6699692	9.482013
35	602	396	660	358	608	327	658	300	69.33974	56.82429	63.08202	10.891059	8.9252812	9.9081702

ตาราง 14 (ต่อ)

เส้นใย	x_1	y_1	x_2	y_2	x_3	y_3	x_4	y_4	$d_1(\text{pixel})$	$d_2(\text{pixel})$	$d(\text{pixel})$	$d_1(\mu\text{m})$	$d_2(\mu\text{m})$	$d(\mu\text{m})$
36	595	418	613	481	567	468	637	437	65.52099	76.55717	71.03908	10.291255	12.024686	11.15797
37	685	489	680	531	650	511	715	510	42.29657	65.00769	53.65213	6.6434406	10.210632	8.4270364
38	496	469	499	514	469	491	534	486	45.09989	65.19202	55.14596	7.0837522	10.239585	8.6616686
39	717	584	756	551	711	543	764	598	51.08816	76.38063	63.73439	8.0243182	11.996957	10.010638
40	500	468	503	514	468	494	535	486	46.09772	67.47592	56.78682	7.2404799	10.598312	8.9193961
41	543	577	588	562	555	538	576	594	47.43416	59.80803	53.6211	7.4503924	9.3939308	8.4221616
42	667	578	666	619	637	602	691	600	41.01219	54.03702	47.52461	6.4417058	8.4874907	7.4645982
43	750	153	754	194	723	183	780	159	41.19466	61.84658	51.52062	6.4703654	9.7141232	8.0922443
44	466	511	388	542	406	575	448	566	83.9345	42.95346	63.44398	13.183429	6.7466173	9.9650232
45	778	487	777	572	726	528	794	529	85.00588	68.00735	76.50662	13.351709	10.681783	12.016746
46	582	435	573	434	619	476	540	456	9.055385	81.49233	45.27386	1.4223118	12.799843	7.1110772
47	571	154	508	207	497	150	567	230	82.32861	106.3015	94.31503	12.931195	16.696564	14.81388
48	144	497	116	550	178	502	180	549	59.94164	47.04253	53.49209	9.414917	7.3888797	8.4018983
49	723	404	737	456	703	440	771	424	53.85165	69.857	61.85432	8.458374	10.972303	9.7153386
50	742	384	751	430	716	418	781	402	46.87217	66.94027	56.90622	7.3621204	10.514179	8.9381496
										Average	62.82975		Average	9.8685469
										STD	18.37317		STD	2.8858377

ตาราง 15 แสดงผลการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยและการคำนวณหาค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยที่ความเข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 18 กิโลโวลต์

เส้นใย	x_1	y_1	x_2	y_2	x_3	y_3	x_4	y_4	$d_1(\text{pixel})$	$d_2(\text{pixel})$	$d(\text{pixel})$	$d_1(\mu\text{m})$	$d_2(\mu\text{m})$	$d(\mu\text{m})$
1	114	152	98	183	91	153	113	180	34.88553	34.82815	34.85684	5.4794022	5.47039	5.4748961
2	511	157	491	168	496	149	509	171	22.82542	25.55386	24.18964	3.5851452	4.013696	3.7994206
3	418	167	431	185	434	166	417	184	22.2036	24.75884	23.48122	3.487477	3.8888225	3.6881497
4	170	208	250	221	214	179	198	262	81.04937	84.5281	82.78873	12.730267	13.276665	13.003466
5	377	192	365	219	350	198	391	213	29.54657	43.65776	36.60217	4.640823	6.8572398	5.7490314
6	391	233	415	213	394	211	411	243	31.241	36.23534	33.73817	4.9069631	5.691415	5.299189
7	453	198	552	219	438	311	465	213	101.2028	101.6514	101.4271	15.895723	15.966183	15.930953
8	489	171	500	202	471	183	501	268	32.89377	90.13878	61.51628	5.1665605	14.157924	9.6622422
9	113	277	147	269	124	246	151	299	34.9285	59.48109	47.20479	5.4861516	9.3425795	7.4143655
10	194	261	217	287	222	267	193	289	34.71311	36.40055	35.55683	5.4523209	5.7173638	5.5848424
11	278	277	253	299	264	279	366	316	33.30165	108.5035	70.90255	5.2306259	17.042428	11.136527
12	356	278	391	254	356	251	392	283	42.43819	48.16638	45.30228	6.6656843	7.5653997	7.115542
13	377	312	409	287	383	286	407	315	40.60788	37.64306	39.12547	6.3782012	5.9125226	6.1453619
14	489	301	511	368	500	284	600	312	70.5195	103.846	87.18277	11.076361	16.310896	13.693629
15	182	351	188	376	162	376	209	353	25.70992	52.3259	39.01791	4.0382074	8.218728	6.1284677
16	264	367	301	358	279	340	349	386	38.07887	83.76157	60.92022	5.9809736	13.156267	9.5686203
17	343	354	352	382	313	377	389	349	29.41088	80.99383	55.20235	4.6195103	12.721543	8.6705269
18	469	318	447	338	447	315	468	341	29.73214	33.42155	31.57684	4.6699692	5.2494581	4.9597137
19	120	379	124	401	106	399	139	377	22.36068	39.66106	31.01087	3.5121487	6.2294865	4.8708176
20	105	421	87	429	91	411	103	440	19.69772	31.38471	25.54121	3.093882	4.9295355	4.0117088
21	435	375	452	397	460	375	429	395	27.80288	36.89173	32.34731	4.3669441	5.7945131	5.0807286
22	502	396	478	413	481	391	497	416	29.41088	29.68164	29.54626	4.6195103	4.6620383	4.6407743
23	199	436	240	470	246	430	199	478	53.2635	67.17887	60.22118	8.3659941	10.551654	9.4588242
24	363	422	339	448	329	426	365	445	35.38361	40.70626	38.04494	5.5576354	6.3936542	5.9756448
25	406	432	418	458	397	451	429	434	28.63564	36.23534	32.43549	4.4977448	5.691415	5.0945799
26	133	470	143	512	116	502	160	479	43.17407	49.64877	46.41142	6.781267	7.7982356	7.2897513
27	339	506	350	534	323	528	364	506	30.08322	46.52956	38.30639	4.7251128	7.3083079	6.0167103
28	102	544	82	579	74	550	111	581	40.31129	48.27007	44.29068	6.331616	7.5816869	6.9566515
29	451	529	475	540	472	517	454	551	26.40076	38.47077	32.43576	4.1467158	6.042529	5.0946224
30	197	594	205	637	182	625	223	610	43.73786	43.65776	43.69781	6.8698202	6.8572398	6.86353
31	236	628	268	639	260	613	244	652	33.83785	42.15448	37.99616	5.3148453	6.6211222	5.9679838
32	477	666	500	697	509	662	472	699	38.60052	52.3259	45.46321	6.0629086	8.218728	7.1408183
33	198	694	255	713	234	670	215	728	60.08328	61.03278	60.55803	9.4371637	9.5863002	9.511732
34	537	653	525	702	514	660	552	697	50.44799	53.03772	51.74286	7.9237685	8.3305323	8.1271504
35	535	612	558	632	553	605	531	637	30.4795	38.83298	34.65624	4.7873562	6.0994203	5.4433882

ตาราง 15 (ต่อ)

เส้นใย	x_1	y_1	x_2	y_2	x_3	y_3	x_4	y_4	$d_1(\text{pixel})$	$d_2(\text{pixel})$	$d(\text{pixel})$	$d_1(\mu\text{m})$	$d_2(\mu\text{m})$	$d(\mu\text{m})$
36	516	660	545	700	556	666	512	697	49.40648	53.82379	51.61513	7.7601797	8.4539979	8.1070888
37	825	577	843	614	851	581	816	608	41.14608	44.20407	42.67508	6.4627353	6.943048	6.7028916
38	598	604	664	570	582	589	620	498	74.24284	98.61541	86.42913	11.66118	15.489332	13.575256
39	770	584	812	683	790	558	888	606	107.5407	109.1238	108.3322	16.891208	17.139861	17.015535
40	572	481	548	506	545	480	569	503	34.65545	33.24154	33.94849	5.4432639	5.2211843	5.3322241
41	647	430	669	456	677	429	634	460	34.05877	53.00943	43.5341	5.3495455	8.326089	6.8378172
42	749	422	718	454	709	423	755	455	44.55334	56.0357	50.29452	6.9979066	8.8014193	7.899663
43	577	335	612	354	606	321	584	364	39.82462	48.30114	44.06288	6.2551752	7.5865663	6.9208707
44	704	283	724	322	737	289	695	317	43.82921	50.47772	47.15347	6.8841697	7.9284374	7.4063035
45	726	248	753	280	754	252	723	280	41.86884	41.7732	41.82102	6.576258	6.5612352	6.5687466
46	834	298	854	326	856	299	836	321	34.4093	29.73214	32.07072	5.4046023	4.6699692	5.0372858
47	720	233	754	214	728	204	746	245	38.94868	44.77723	41.86296	6.1175944	7.0330722	6.5753333
48	696	130	785	162	772	138	715	152	94.57801	58.69412	76.63607	14.855185	9.2189721	12.037078
49	808	185	703	205	784	180	809	213	106.8878	41.40048	74.14414	16.788658	6.5026937	11.645676
50	781	358	738	388	740	344	781	397	52.43091	67.00746	59.71918	8.235221	10.524732	9.3799766
										Average	48.39751		Average	7.601703
										STD	19.54321		STD	3.069615

ตาราง 16 แสดงผลการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยและการคำนวณหาค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยที่ความเข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 20 กิโลโวลต์

เส้นใย	x_1	y_1	x_2	y_2	x_3	y_3	x_4	y_4	$d_1(\text{pixel})$	$d_2(\text{pixel})$	$d(\text{pixel})$	$d_1(\mu\text{m})$	$d_2(\mu\text{m})$	$d(\mu\text{m})$
1	97	205	108	234	80	235	130	229	31.01612	50.35871	40.68742	4.8716426	7.9097455	6.3906941
2	229	215	260	226	250	197	240	243	32.89377	47.07441	39.98409	5.1665605	7.3938863	6.2802234
3	280	194	299	163	275	169	305	198	36.35932	41.72529	39.04231	5.7108876	6.5537108	6.1322992
4	443	200	429	233	417	209	454	229	35.8469	42.05948	38.95319	5.6304026	6.6062013	6.118302
5	492	224	466	264	456	225	498	262	47.70744	55.97321	51.84032	7.4933155	8.7916033	8.1424594
6	100	290	99	323	73	310	117	307	33.01515	44.10215	38.55865	5.1856253	6.9270399	6.0563326
7	111	334	114	371	96	357	134	376	37.12142	42.48529	39.80336	5.8305899	6.6730824	6.2518362
8	359	338	345	368	334	344	366	371	33.10589	41.86884	37.48737	5.1998781	6.576258	5.8880681
9	460	370	459	403	440	383	475	413	33.01515	46.09772	39.55644	5.1856253	7.2404799	6.2130526
10	341	372	341	408	322	390	367	388	36	45.04442	40.52221	5.6544503	7.0750402	6.3647452
11	301	388	272	400	277	374	315	410	31.38471	52.34501	41.86486	4.9295355	8.2217292	6.5756324
12	243	353	218	379	188	371	243	391	36.06938	58.5235	47.29644	5.6653473	9.1921727	7.42876
13	108	335	116	370	96	360	134	392	35.90265	49.67897	42.79081	5.6391591	7.8029795	6.7210693
14	337	419	374	442	376	409	341	454	43.56604	57.00877	50.28741	6.8428338	8.9542573	7.8985455
15	113	465	112	424	143	456	154	496	41.01219	41.48494	41.24857	6.4417058	6.5159587	6.4788322
16	232	467	220	510	200	459	236	499	44.64303	53.8145	49.22876	7.011994	8.4525387	7.7322663
17	346	478	315	502	303	498	345	514	39.20459	44.94441	42.0745	6.1577893	7.0593314	6.6085603
18	427	444	431	466	391	484	412	432	22.36068	56.0803	39.22049	3.5121487	8.808424	6.1602863
19	480	530	442	544	451	515	468	556	40.49691	44.38468	42.4408	6.3607717	6.971416	6.6660939
20	321	595	363	589	347	568	349	622	42.42641	54.03702	48.23172	6.6638335	8.4874907	7.5756621
21	233	565	253	535	282	552	232	529	36.05551	55.03635	45.54593	5.6631695	8.6444531	7.1538113
22	138	680	117	711	114	681	148	705	37.44329	41.6173	39.5303	5.8811451	6.5367493	6.2089472
23	169	687	178	716	153	714	194	688	30.36445	48.54894	39.4567	4.7692858	7.6254886	6.1973872
24	290	678	265	703	259	672	294	706	35.35534	48.79549	42.07542	5.5531946	7.6642133	6.608704
25	404	668	438	685	429	657	412	697	38.01316	43.46263	40.73789	5.9706527	6.8265907	6.3986217
26	469	594	445	633	418	598	458	626	45.79301	48.82622	47.30962	7.1926198	7.6690402	7.43083
27	546	653	535	682	524	658	557	679	31.01612	39.11521	35.06567	4.8716426	6.143751	5.5076968
28	724	685	714	717	708	693	742	712	33.52611	38.94868	36.2374	5.265881	6.1175944	5.6917377
29	814	577	834	608	855	563	821	597	36.89173	48.08326	42.4875	5.7945131	7.5523447	6.6734289
30	735	487	711	524	803	462	753	490	44.10215	57.3062	50.70417	6.9270399	9.0009731	7.9640065
31	627	437	636	462	655	443	613	456	26.57066	43.9659	35.26828	4.1734022	6.9056381	5.5395201
32	657	463	668	501	631	499	654	464	39.56008	41.88078	40.72043	6.2136253	6.5781335	6.3958794
33	628	389	606	422	599	386	638	416	39.66106	49.20366	44.43236	6.2294865	7.7283233	6.9789049
34	559	389	589	399	585	373	568	418	31.62278	48.10405	39.86342	4.9669283	7.5556106	6.2612694
35	687	345	717	344	711	315	709	371	30.01666	56.0357	43.02618	4.714659	8.8014193	6.7580391

ตาราง 16 (ต่อ)

เส้นใย	x_1	y_1	x_2	y_2	x_3	y_3	x_4	y_4	$d_1(\text{pixel})$	$d_2(\text{pixel})$	$d(\text{pixel})$	$d_1(\mu\text{m})$	$d_2(\mu\text{m})$	$d(\mu\text{m})$
36	661	249	692	274	692	246	655	285	39.82462	53.75872	46.79167	6.2551752	8.443778	7.3494766
37	495	227	466	244	457	225	503	256	33.61547	55.47071	44.54309	5.2799172	8.7126774	6.9962973
38	541	232	555	262	532	259	569	244	33.10589	39.92493	36.51541	5.1998781	6.2709313	5.7354047
39	658	205	661	242	636	229	682	222	37.12142	46.52956	41.82549	5.8305899	7.3083079	6.5694489
40	735	153	701	132	709	150	732	186	39.96248	42.72002	41.34125	6.2768297	6.7099506	6.4933901
41	644	133	649	158	616	167	669	150	25.4951	55.65968	40.57739	4.0044656	8.7423581	6.3734119
42	529	183	561	184	544	169	546	202	32.01562	33.06055	32.53809	5.0286316	5.1927566	5.1106941
43	843	249	863	277	876	243	830	283	34.4093	60.959	47.68415	5.4046023	9.5747125	7.4896574
44	749	360	746	391	719	371	772	376	31.14482	53.23533	42.19007	4.891857	8.3615696	6.6267133
45	760	599	732	610	739	590	758	640	30.08322	53.48832	41.78577	4.7251128	8.4013063	6.5632095
46	776	384	789	422	752	421	809	410	40.16217	58.0517	49.10694	6.3081944	9.1180682	7.7131313
47	801	186	823	213	795	216	829	187	34.82815	44.68781	39.75798	5.47039	7.0190271	6.2447085
48	737	155	701	180	711	149	732	186	43.82921	42.54409	43.18665	6.8841697	6.6823186	6.7832441
49	475	459	478	493	463	470	489	513	34.1321	50.24938	42.19074	5.3610623	7.8925725	6.6268174
50	793	258	763	235	738	278	739	238	37.80212	40.0125	38.90731	5.9375052	6.2846856	6.1110954
										Average	62.82975		Average	9.8685469
										STD	18.37317		STD	2.8858377

ตาราง 17 แสดงผลการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยและการคำนวณหาค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยที่ความเข้มข้น 12 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 10 กิโลโวลต์

เส้นใย	x_1	y_1	x_2	y_2	x_3	y_3	x_4	y_4	$d_1(\text{pixel})$	$d_2(\text{pixel})$	$d(\text{pixel})$	$d_1(\mu\text{m})$	$d_2(\mu\text{m})$	$d(\mu\text{m})$
1	140	142	140	195	118	172	168	163	53	50.80354	51.90177	8.3246073	7.9796141	8.1521107
2	218	157	231	157	231	142	230	169	13	27.01851	20.00926	2.0418848	4.2437454	3.1428151
3	251	152	265	152	259	142	260	158	14	16.03122	15.01561	2.1989529	2.5179926	2.3584727
4	289	179	270	216	257	186	305	208	41.59327	52.80152	47.19739	6.5329741	8.2934317	7.4132029
5	327	209	366	228	360	194	341	237	43.38202	47.01064	45.19633	6.8139305	7.3838697	7.0989001
6	385	187	430	186	412	151	412	209	45.01111	58	51.50555	7.0698078	9.1099476	8.0898777
7	451	192	538	225	420	205	479	206	93.04837	59.00847	76.02842	14.614928	9.2683467	11.941637
8	462	242	417	249	435	218	445	271	45.54119	53.93515	49.73817	7.1530665	8.4714889	7.8122777
9	233	267	248	276	243	260	236	281	17.49286	22.13594	19.8144	2.747569	3.4768498	3.1122094
10	266	302	236	323	231	294	269	330	36.61967	52.34501	44.48234	5.7517801	8.2217292	6.9867547
11	310	324	342	360	306	363	351	323	48.16638	60.20797	54.18718	7.5653997	9.4567497	8.5110747
12	393	347	260	375	256	347	295	372	135.9154	46.32494	91.12018	21.347971	7.2761685	14.31207
13	384	336	368	360	358	337	392	359	28.84441	40.49691	34.67066	4.5305356	6.3607717	5.4456537
14	371	439	413	440	394	414	389	465	42.0119	51.24451	46.62821	6.5987282	8.0488762	7.3238022
15	301	406	323	438	297	445	334	409	38.83298	51.62364	45.22831	6.0994203	8.1084248	7.1039225
16	227	415	266	416	250	393	241	442	39.01282	49.81967	44.41625	6.1276678	7.8250798	6.9763738
17	171	367	203	382	196	355	177	396	35.34119	45.18849	40.26484	5.5509729	7.0976692	6.3243211
18	73	438	98	438	87	417	85	457	25	40.04997	32.52498	3.9267016	6.290571	5.1086363
19	89	474	114	474	100	461	100	488	25	27	26	3.9267016	4.2408377	4.0837696
20	215	529	242	529	228	514	228	550	27	36	31.5	4.2408377	5.6544503	4.947644
21	325	492	362	479	335	461	348	509	39.21734	49.72927	44.47331	6.1597921	7.8108796	6.9853359
22	366	498	400	484	382	471	387	510	36.76955	39.31921	38.04438	5.7753224	6.1757916	5.975557
23	573	668	581	706	552	698	603	683	38.83298	53.16014	45.99656	6.0994203	8.3497595	7.2245899
24	627	613	663	613	645	597	643	630	36	33.06055	34.53028	5.6544503	5.1927566	5.4236034
25	634	525	630	559	609	535	665	544	34.23449	56.7186	45.47654	5.3771443	8.9086812	7.1429128
26	838	656	879	665	870	640	846	686	41.97618	51.88449	46.93034	6.5931179	8.1493959	7.3712569
27	803	505	821	514	819	496	802	521	20.12461	30.23243	25.17852	3.1609338	4.7485497	3.9547417
28	721	579	718	610	697	596	740	596	31.14482	43	37.07241	4.891857	6.7539267	5.8228919
29	260	560	294	576	283	543	267	592	37.57659	51.5461	44.56134	5.902082	8.0962454	6.9991637
30	155	604	174	652	141	643	187	622	51.62364	50.56679	51.09521	8.1084248	7.9424274	8.0254261
31	325	593	334	618	314	615	349	597	26.57066	39.35734	32.964	4.1734022	6.1817807	5.1775915
32	389	618	389	648	371	637	411	630	30	40.60788	35.30394	4.7120419	6.3782012	5.5451215
33	355	678	357	707	339	695	374	695	29.06888	35	32.03444	4.5657933	5.4973822	5.0315877
34	426	704	455	705	436	683	439	719	29.01724	36.12478	32.57101	4.5576811	5.6740498	5.1158654
35	477	602	478	619	469	612	489	612	17.02939	20	18.51469	2.6747727	3.1413613	2.908067

ตาราง 17 (ต่อ)

เส้นใย	x_1	y_1	x_2	y_2	x_3	y_3	x_4	y_4	$d_1(\text{pixel})$	$d_2(\text{pixel})$	$d(\text{pixel})$	$d_1(\mu\text{m})$	$d_2(\mu\text{m})$	$d(\mu\text{m})$
36	445	604	504	631	489	578	455	647	64.88451	76.92204	70.90328	10.191285	12.081996	11.13664
37	532	166	544	201	515	192	565	171	37	54.23099	45.61549	5.8115183	8.5179561	7.1647372
38	530	238	562	227	538	201	561	257	33.83785	60.53924	47.18855	5.3148453	9.5087817	7.4118135
39	768	223	811	214	779	193	791	243	43.93177	51.41984	47.6758	6.9002773	8.0764147	7.488346
40	818	269	855	255	825	236	843	286	39.56008	53.14132	46.3507	6.2136253	8.3468043	7.2802148
41	811	315	857	290	826	286	842	317	52.35456	34.88553	43.62004	8.2232294	5.4794022	6.8513158
42	852	332	879	320	859	303	871	344	29.54657	42.72002	36.1333	4.640823	6.7099506	5.6753868
43	712	295	713	329	686	315	742	311	34.0147	56.14268	45.07869	5.3426235	8.8182213	7.0804224
44	642	265	670	265	654	238	656	284	28	46.04346	37.02173	4.3979058	7.2319567	5.8149312
45	615	241	626	270	599	262	638	252	31.01612	40.26164	35.63888	4.8716426	6.3238185	5.5977306
46	568	280	592	288	582	265	572	301	25.29822	37.36308	31.33065	3.9735426	5.8685471	4.9210449
47	483	295	522	296	508	266	558	313	39.01282	68.62215	53.81749	6.1276678	10.778349	8.4530083
48	541	371	594	371	570	343	598	400	53	63.50591	58.25295	8.3246073	9.9747495	9.1496784
49	487	423	528	426	509	406	587	445	41.10961	87.20665	64.15813	6.4570067	13.69738	10.077193
50	520	499	544	564	531	483	532	509	69.28925	26.01922	47.65424	10.883128	4.0867891	7.4849586
										Average	42.85234		Average	6.7307332
										STD	14.07024		STD	2.209985

ตาราง 18 แสดงผลการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยและการคำนวณหาค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยที่ความเข้มข้น 12 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 12 กิโลโวลต์

เส้นใย	x_1	y_1	x_2	y_2	x_3	y_3	x_4	y_4	$d_1(\text{pixel})$	$d_2(\text{pixel})$	$d(\text{pixel})$	$d_1(\mu\text{m})$	$d_2(\mu\text{m})$	$d(\mu\text{m})$
1	109	163	119	187	98	181	134	169	26	37.94733	31.97367	4.0837696	5.9603139	5.0220418
2	313	156	340	154	328	144	328	166	27.07397	22	24.53699	4.2524565	3.4554974	3.8539769
3	336	177	362	196	372	153	328	209	32.20248	71.21798	51.71023	5.0579818	11.186069	8.1220256
4	423	216	407	233	398	215	424	231	23.34524	30.52868	26.93696	3.6667908	4.7950798	4.2309353
5	152	179	151	224	117	196	180	203	45.01111	63.3877	54.1994	7.0698078	9.9561826	8.5129952
6	166	242	133	269	132	238	164	267	42.63801	43.18565	42.91183	6.6970698	6.7830857	6.7400778
7	199	252	220	269	185	261	215	300	27.01851	49.20366	38.11109	4.2437454	7.7283233	5.9860343
8	250	238	300	277	224	260	275	259	63.41136	51.0098	57.21058	9.9598988	8.0120109	8.9859549
9	307	268	289	306	270	281	316	293	42.04759	47.53946	44.79352	6.6043338	7.4669305	7.0356322
10	358	344	387	378	353	380	395	342	44.68781	56.63921	50.66351	7.0190271	8.8962108	7.957619
11	299	340	292	370	272	349	316	361	30.80584	45.60702	38.20643	4.8386142	7.1634058	6.00101
12	301	385	327	381	316	410	316	361	26.30589	49	37.65295	4.1318156	7.6963351	5.9140754
13	293	385	283	414	268	393	309	411	30.67572	44.77723	37.72647	4.8181764	7.0330722	5.9256243
14	336	412	356	436	365	411	332	440	31.241	43.93177	37.58638	4.9069631	6.9002773	5.9036202
15	299	433	289	457	264	429	323	453	26	63.69458	44.84729	4.0837696	10.004385	7.0440773
16	296	482	304	501	274	495	330	480	20.61553	57.97413	39.29483	3.2380411	9.1058846	6.1719629
17	433	509	427	548	409	531	453	526	39.45884	44.28318	41.87101	6.1977235	6.9554732	6.5765983
18	349	548	383	563	377	529	351	578	37.16181	55.47071	46.31626	5.8369332	8.7126774	7.2748053
19	397	563	450	607	366	588	430	591	68.88396	64.07027	66.47712	10.81947	10.063394	10.441432
20	387	635	415	700	407	619	398	657	70.77429	39.05125	54.91277	11.11638	6.1337039	8.6250422
21	327	618	286	643	288	614	313	656	48.02083	48.8774	48.44911	7.5425386	7.6770782	7.6098084
22	323	676	301	702	294	671	329	703	34.05877	47.42362	40.7412	5.3495455	7.4487366	6.399141
23	213	681	236	667	214	662	234	694	26.92582	37.73592	32.33087	4.229187	5.9271086	5.0781478
24	165	653	216	614	173	610	213	657	64.2028	61.7171	62.95995	10.08421	9.6937848	9.8889974
25	351	546	380	567	378	531	350	577	35.80503	53.85165	44.82834	5.6238263	8.458374	7.0411002
26	272	584	264	598	260	584	275	598	16.12452	20.51828	18.3214	2.5326464	3.2227672	2.8777068
27	236	519	249	536	252	517	234	539	21.40093	28.42534	24.91314	3.3614033	4.4647132	3.9130583
28	203	495	215	506	217	486	200	511	16.27882	30.23243	23.25563	2.5568828	4.7485497	3.6527162
29	578	708	612	706	595	686	595	723	34.05877	37	35.52939	5.3495455	5.8115183	5.5805319
30	593	597	650	628	573	610	612	616	64.88451	39.45884	52.17168	10.191285	6.1977235	8.1945041
31	840	607	900	634	816	621	863	617	65.79514	47.16991	56.48252	10.334315	7.4088857	8.8716002
32	780	616	810	650	795	596	799	633	45.34314	37.21559	41.27936	7.1219586	5.8453803	6.4836694
33	461	649	474	655	472	642	463	676	14.31782	35.17101	24.74442	2.2488724	5.5242425	3.8865575
34	487	142	504	190	467	176	525	157	50.92151	61.03278	55.97714	7.9981427	9.5863002	8.7922214
35	488	349	512	348	501	334	498	366	24.02082	32.14032	28.08057	3.7729043	5.0482174	4.4105609

ตาราง 18 (ต่อ)

เส้นใย	x_1	y_1	x_2	y_2	x_3	y_3	x_4	y_4	$d_1(\text{pixel})$	$d_2(\text{pixel})$	$d(\text{pixel})$	$d_1(\mu\text{m})$	$d_2(\mu\text{m})$	$d(\mu\text{m})$
36	469	350	487	370	488	349	466	366	26.90725	27.80288	27.35506	4.2262693	4.3669441	4.2966067
37	528	376	534	411	507	402	553	384	35.51056	49.39636	42.45346	5.5775752	7.75859	6.6680826
38	659	412	642	460	619	423	681	442	50.92151	64.84597	57.88374	7.9981427	10.185231	9.0916869
39	823	551	853	554	840	527	832	576	30.14963	49.64877	39.8992	4.7355435	7.7982356	6.2668895
40	676	522	701	538	701	510	674	546	29.68164	45	37.34082	4.6620383	7.0680628	5.8650506
41	836	354	801	375	802	354	833	378	40.81666	39.20459	40.01063	6.4109942	6.1577893	6.2843917
42	846	285	822	310	813	283	848	310	34.65545	44.20407	39.42976	5.4432639	6.943048	6.193156
43	603	150	650	181	578	167	629	170	56.30275	51.08816	53.69546	8.8433644	8.0243182	8.4338413
44	593	186	587	215	574	200	611	203	29.61419	37.12142	33.3678	4.6514428	5.8305899	5.2410163
45	831	100	850	173	792	162	868	141	75.43209	78.84795	77.14002	11.847972	12.384496	12.116234
46	772	155	787	160	786	147	774	170	15.81139	25.94224	20.87682	2.4834641	4.0746979	3.279081
47	641	236	660	256	628	248	655	300	27.58623	58.59181	43.08902	4.3329155	9.2029018	6.7679086
48	592	187	589	214	574	200	612	240	27.16616	55.17246	41.16931	4.2669354	8.6658309	6.4663832
49	567	192	545	250	547	177	568	211	62.03225	39.96248	50.99737	9.7432853	6.2768297	8.0100575
50	570	691	650	625	557	660	589	685	103.7111	40.60788	72.15951	16.289707	6.3782012	11.333954
										Average	42.69744		Average	6.706404
										STD	12.99226		STD	2.0406699

ตาราง 19 แสดงผลการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยและการคำนวณหาค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยที่ความเข้มข้น 12 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 14 กิโลโวลต์

เส้นใย	x_1	y_1	x_2	y_2	x_3	y_3	x_4	y_4	$d_1(\text{pixel})$	$d_2(\text{pixel})$	$d(\text{pixel})$	$d_1(\mu\text{m})$	$d_2(\mu\text{m})$	$d(\mu\text{m})$
1	145	177	144	216	112	192	175	200	39.01282	63.50591	51.25936	6.1276678	9.9747495	8.0512087
2	278	167	274	204	252	179	305	184	37.21559	53.23533	45.22546	5.8453803	8.3615696	7.103475
3	436	170	436	198	419	191	456	184	28	37.65634	32.82817	4.3979058	5.9146085	5.1562571
4	408	195	408	233	379	219	433	208	38	55.10898	46.55449	5.9685864	8.6558612	7.3122238
5	329	197	339	230	290	232	274	186	34.48188	48.70318	41.59253	5.416002	7.6497146	6.5328583
6	283	242	303	266	281	267	309	241	31.241	38.20995	34.72547	4.9069631	6.0015623	5.4542627
7	152	290	182	295	173	262	162	319	30.41381	58.0517	44.23276	4.7770386	9.1180682	6.9475534
8	342	286	360	280	341	272	357	300	18.97367	32.24903	25.61135	2.980157	5.0652928	4.0227249
9	377	344	392	330	374	328	394	344	20.51828	25.6125	23.06539	3.2227672	4.0229053	3.6228362
10	374	328	424	295	371	299	422	339	59.90826	64.81512	62.36169	9.4096748	10.180386	9.7950302
11	227	361	234	339	205	341	257	356	23.08679	54.12024	38.60351	3.6261978	8.5005607	6.0633793
12	98	362	121	371	119	350	101	379	24.69818	34.1321	29.41514	3.879295	5.3610623	4.6201786
13	178	350	175	373	154	363	197	358	23.19483	43.28972	33.24227	3.6431665	6.7994327	5.2212996
14	380	417	400	391	358	385	427	418	32.80244	76.48529	54.64387	5.1522155	12.013397	8.5828061
15	446	446	426	495	412	454	464	478	52.92447	57.27128	55.09788	8.3127447	8.9954897	8.6541172
16	241	424	241	405	229	415	251	445	19	37.20215	28.10108	2.9842932	5.8432697	4.4137815
17	133	442	135	469	111	458	158	457	27.07397	47.01064	37.0423	4.2524565	7.3838697	5.8181631
18	190	463	198	481	172	480	214	461	19.69772	46.09772	32.89772	3.093882	7.2404799	5.167181
19	165	503	200	506	185	486	177	524	35.12834	38.83298	36.98066	5.5175397	6.0994203	5.80848
20	224	528	268	531	250	507	245	545	44.10215	38.32754	41.21484	6.9270399	6.0200318	6.4735359
21	173	569	202	571	207	539	197	602	29.06888	63.78871	46.4288	4.5657933	10.01917	7.2924815
22	164	503	199	506	186	485	177	522	35.12834	38.07887	36.6036	5.5175397	5.9809736	5.7492567
23	607	482	628	504	597	507	636	478	30.41381	48.60041	39.50711	4.7770386	7.6335725	6.2053056
24	759	516	750	559	713	533	786	543	43.93177	73.68175	58.80676	6.9002773	11.573049	9.2366634
25	809	502	810	533	791	517	827	521	31.01612	36.22154	33.61883	4.8716426	5.6892472	5.2804449
26	680	493	685	504	672	509	697	490	12.08305	31.40064	21.74184	1.8978606	4.9320372	3.4149489
27	464	578	450	603	442	504	474	576	28.6531	78.79086	53.72198	4.5004865	12.375528	8.4380073
28	479	585	507	590	504	568	483	603	28.44293	40.81666	34.62979	4.4674752	6.4109942	5.4392347
29	129	694	106	730	90	689	148	726	42.72002	68.7968	55.75841	6.7099506	10.80578	8.7578655
30	156	662	154	687	137	672	170	673	25.07987	33.01515	29.04751	3.939247	5.1856253	4.5624362
31	94	532	109	546	113	528	91	548	20.51828	29.73214	25.12521	3.2227672	4.6699692	3.9463682
32	251	711	255	733	230	729	275	717	22.36068	46.57252	34.4666	3.5121487	7.3150561	5.4136024
33	252	648	240	685	228	654	273	674	38.8973	49.24429	44.07079	6.1095237	7.7347051	6.9221144
34	230	679	224	697	219	684	237	734	18.97367	53.14132	36.05749	2.980157	8.3468043	5.6634807
35	155	663	155	688	138	674	170	675	25	32.01562	28.50781	3.9267016	5.0286316	4.4776666

ตาราง 19 (ต่อ)

เส้นใย	x_1	y_1	x_2	y_2	x_3	y_3	x_4	y_4	$d_1(\text{pixel})$	$d_2(\text{pixel})$	$d(\text{pixel})$	$d_1(\mu\text{m})$	$d_2(\mu\text{m})$	$d(\mu\text{m})$
36	303	661	323	650	302	638	321	669	22.82542	36.35932	29.59237	3.5851452	5.7108876	4.6480164
37	374	609	362	626	349	606	385	632	20.80865	44.40721	32.60793	3.2683747	6.9749539	5.1216643
38	402	636	424	622	402	602	423	655	26.07681	57.00877	41.54279	4.095834	8.9542573	6.5250456
39	474	683	509	701	467	701	491	686	39.35734	28.30194	33.82964	6.1817807	4.4453314	5.3135561
40	778	635	763	662	740	636	792	662	30.88689	58.13777	44.51233	4.851344	9.1315865	6.9914653
41	826	129	832	173	802	162	855	148	44.40721	54.81788	49.61254	6.9749539	8.6101383	7.7925461
42	753	170	767	199	736	198	787	168	32.20248	59.16925	45.68587	5.0579818	9.2935993	7.1757906
43	635	183	635	207	612	194	656	198	24	44.18144	34.09072	3.7696335	6.9394938	5.3545637
44	562	205	586	224	588	172	594	246	30.61046	74.24284	52.42665	4.807925	11.66118	8.2345524
45	754	230	748	253	733	237	773	246	23.76973	41	32.38486	3.7334652	6.4397906	5.0866279
46	846	231	867	264	860	215	858	248	39.11521	33.06055	36.08788	6.143751	5.1927566	5.6682538
47	793	221	810	220	854	209	804	230	17.02939	54.23099	35.63019	2.6747727	8.5179561	5.5963644
48	758	306	751	327	733	306	771	321	22.13594	40.8534	31.49467	3.4768498	6.4167638	4.9468068
49	835	297	821	332	804	304	854	323	37.69615	53.48832	45.59224	5.9208618	8.4013063	7.161084
50	464	533	504	548	499	514	465	574	42.72002	68.96376	55.84189	6.7099506	10.832004	8.7709773
										Average	39.47442		Average	6.2001709
										STD	9.956421		STD	1.5638358

ตาราง 20 แสดงผลการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยและการคำนวณหาค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยที่ความเข้มข้น 12 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 16 กิโลโวลต์

เส้นใย	x_1	y_1	x_2	y_2	x_3	y_3	x_4	y_4	$d_1(\text{pixel})$	$d_2(\text{pixel})$	$d(\text{pixel})$	$d_1(\mu\text{m})$	$d_2(\mu\text{m})$	$d(\mu\text{m})$
1	114	176	107	205	88	184	130	197	29.83287	43.9659	36.89938	4.6857908	6.9056381	5.7957144
2	181	145	201	137	182	129	203	159	21.54066	36.61967	29.08016	3.3833496	5.7517801	4.5675649
3	465	152	441	172	435	151	472	182	31.241	48.27007	39.75554	4.9069631	7.5816869	6.244325
4	165	192	187	206	194	185	169	216	26.07681	39.82462	32.95071	4.095834	6.2551752	5.1755046
5	335	165	311	192	309	170	329	190	36.12478	28.28427	32.20453	5.6740498	4.4425557	5.0583027
6	413	212	381	186	406	188	388	211	41.23106	29.20616	35.21861	6.4760821	4.5873556	5.5317188
7	375	231	345	215	350	245	366	208	34	40.31129	37.15564	5.3403141	6.331616	5.8359651
8	250	255	276	244	255	230	273	270	28.23119	43.86342	36.04731	4.4342181	6.8895431	5.6618806
9	230	232	208	263	201	237	235	260	38.01316	41.04875	39.53095	5.9706527	6.4474479	6.2090503
10	112	289	142	273	112	250	137	289	34	46.32494	40.16247	5.3403141	7.2761685	6.3082413
11	103	315	132	319	120	298	116	333	29.27456	35.22783	32.2512	4.5980988	5.533167	5.0656329
12	234	262	236	229	184	289	243	288	33.06055	59.00847	46.03451	5.1927566	9.2683467	7.2305517
13	391	254	394	282	375	277	414	266	28.16026	40.5216	34.34093	4.4230768	6.3646491	5.3938629
14	174	376	193	373	248	358	186	387	19.23538	68.44706	43.84122	3.0212645	10.750847	6.8860558
15	325	327	358	351	357	314	326	363	40.80441	57.98276	49.39358	6.4090699	9.1072392	7.7581545
16	416	351	415	377	436	363	394	367	26.01922	42.19005	34.10463	4.0867891	6.6267088	5.3567489
17	366	402	401	391	375	370	390	422	36.68787	54.12024	45.40405	5.7624931	8.5005607	7.1315269
18	335	383	364	382	347	359	355	405	29.01724	46.69047	37.85385	4.5576811	7.3335817	5.9456314
19	264	386	276	386	274	371	334	398	12	65.79514	38.89757	1.8848168	10.334315	6.1095657
20	433	418	430	439	415	424	450	430	21.2132	35.51056	28.36188	3.3319168	5.5775752	4.454746
21	402	477	431	469	414	451	421	492	30.08322	41.59327	35.83824	4.7251128	6.5329741	5.6290435
22	392	478	390	507	365	491	414	500	29.06888	49.81967	39.44428	4.5657933	7.8250798	6.1954365
23	325	415	344	424	339	409	329	428	21.0238	21.47091	21.24735	3.3021669	3.3723943	3.3372806
24	310	538	338	552	336	516	326	575	31.30495	59.84146	45.5732	4.9170081	9.3991818	7.1580949
25	103	525	129	522	114	504	116	543	26.1725	39.05125	32.61188	4.1108646	6.1337039	5.1222843
26	171	695	190	720	200	693	164	725	31.40064	48.16638	39.78351	4.9320372	7.5653997	6.2487185
27	254	672	239	712	230	687	259	702	42.72002	32.64966	37.68484	6.7099506	5.1282181	5.9190844
28	381	692	400	723	366	656	408	695	36.35932	57.31492	46.83712	5.7108876	9.0023434	7.3566155
29	803	670	827	649	796	631	837	683	31.89044	66.21933	49.05488	5.0089692	10.400942	7.7049558
30	713	599	713	635	691	617	737	630	36	47.80167	41.90084	5.6544503	7.5081163	6.5812833
31	767	146	758	196	741	163	762	175	50.80354	24.18677	37.49516	7.9796141	3.7989696	5.8892919
32	799	212	800	251	770	230	733	229	39.01282	37.01351	38.01316	6.1276678	5.8136405	5.9706541
33	754	316	785	294	769	262	810	295	38.01316	52.63079	45.32197	5.9706527	8.2666161	7.1186344
34	660	261	687	286	685	262	655	290	36.79674	41.03657	38.91665	5.7795925	6.4455344	6.1125635
35	733	378	756	383	752	363	737	395	23.5372	35.34119	29.4392	3.6969431	5.5509729	4.623958

ตาราง 20 (ต่อ)

เส้นใย	x_1	y_1	x_2	y_2	x_3	y_3	x_4	y_4	$d_1(\text{pixel})$	$d_2(\text{pixel})$	$d(\text{pixel})$	$d_1(\mu\text{m})$	$d_2(\mu\text{m})$	$d(\mu\text{m})$
36	605	538	633	544	627	517	613	566	28.63564	50.96077	39.79821	4.4977448	8.0043093	6.2510271
37	516	413	552	390	520	378	547	424	42.72002	53.33854	48.02928	6.7099506	8.3777814	7.543866
38	471	381	482	359	461	363	491	375	24.59675	32.31099	28.45387	3.8633635	5.0750244	4.469194
39	533	343	531	368	520	355	548	356	25.07987	28.01785	26.54886	3.939247	4.4007097	4.1699783
40	628	391	670	391	649	366	650	421	42	55.00909	48.50455	6.5968586	8.6401712	7.6185149
41	521	324	547	294	498	284	463	324	39.69887	53.15073	46.4248	6.2354241	8.3482821	7.2918531
42	458	242	490	256	452	281	492	240	34.9285	57.28001	46.10426	5.4861516	8.9968608	7.2415062
43	660	261	686	287	685	263	657	289	36.76955	38.20995	37.48975	5.7753224	6.0015623	5.8884423
44	682	320	667	336	661	319	686	367	21.93171	54.12024	38.02597	3.4447715	8.5005607	5.9726661
45	591	419	610	398	581	393	613	425	28.3196	45.25483	36.78722	4.4481054	7.1080891	5.7780973
46	430	439	433	418	412	425	449	431	21.2132	37.48333	29.34827	3.3319168	5.887434	4.6096754
47	551	529	542	566	521	546	573	556	38.07887	52.95281	45.51584	5.9809736	8.3171952	7.1490844
48	492	521	523	522	513	498	509	539	31.01612	41.19466	36.10539	4.8716426	6.4703654	5.671004
49	602	537	633	545	627	520	612	565	32.01562	47.43416	39.72489	5.0286316	7.4503924	6.239512
50	636	310	654	310	646	297	687	322	18	48.02083	33.01041	2.8272251	7.5425386	5.1848818
										Average	38.17045		Average	5.9953589
										STD	6.480128		STD	1.0178212

ตาราง 21 แสดงผลการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยและการคำนวณหาค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยที่ความเข้มข้น 12 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 18 กิโลโวลต์

เส้นใย	x_1	y_1	x_2	y_2	x_3	y_3	x_4	y_4	$d_1(\text{pixel})$	$d_2(\text{pixel})$	$d(\text{pixel})$	$d_1(\mu\text{m})$	$d_2(\mu\text{m})$	$d(\mu\text{m})$
1	92	146	83	169	80	158	102	198	24.69818	45.65085	35.17451	3.879295	7.1702904	5.5247927
2	147	149	175	163	174	133	153	185	31.30495	56.0803	43.69263	4.9170081	8.808424	6.8627161
3	277	149	254	159	249	153	283	188	25.07987	48.79549	36.93768	3.939247	7.6642133	5.8017302
4	376	157	349	181	332	137	377	166	36.12478	53.53504	44.82991	5.6740498	8.4086443	7.041347
5	406	143	385	161	385	136	410	164	27.65863	37.53665	32.59764	4.344288	5.8958087	5.1200483
6	426	237	453	237	433	211	442	253	27	42.95346	34.97673	4.2408377	6.7466173	5.4937275
7	452	249	426	275	415	240	460	266	36.76955	51.97115	44.37035	5.7753224	8.1630072	6.9691648
8	447	273	433	284	431	265	448	293	17.80449	32.75668	25.28059	2.7965174	5.1450281	3.9707727
9	293	216	262	231	263	204	287	241	34.43835	44.10215	39.27025	5.409165	6.9270399	6.1681025
10	327	272	334	303	350	287	319	293	31.7805	31.57531	31.6779	4.9917011	4.9594723	4.9755867
11	300	275	300	310	283	294	318	294	35	35	35	5.4973822	5.4973822	5.4973822
12	210	206	238	219	234	194	212	234	30.8707	45.65085	38.26077	4.8488007	7.1702904	6.0095456
13	173	196	175	228	138	214	199	206	32.06244	61.52235	46.7924	5.0359852	9.6631969	7.3495911
14	138	185	144	205	125	205	164	193	20.88061	40.80441	30.84251	3.2796774	6.4090699	4.8443737
15	166	225	154	250	140	225	188	250	27.73085	54.12024	40.92554	4.3556308	8.5005607	6.4280957
16	253	261	273	261	261	233	266	281	20	48.25971	34.12986	3.1413613	7.5800598	5.3607105
17	186	295	211	261	337	235	309	260	42.2019	37.53665	39.86927	6.62857	5.8958087	6.2621894
18	95	285	102	298	88	300	111	285	14.76482	27.45906	21.11194	2.3190822	4.3129414	3.3160118
19	132	282	145	303	148	280	127	303	24.69818	31.14482	27.9215	3.879295	4.891857	4.385576
20	173	313	196	329	197	306	173	337	28.01785	39.20459	33.61122	4.4007097	6.1577893	5.2792495
21	228	291	228	310	215	301	239	334	19	40.80441	29.90221	2.9842932	6.4090699	4.6966815
22	229	342	253	352	246	329	232	363	26	36.76955	31.38478	4.0837696	5.7753224	4.929546
23	151	388	150	429	128	404	176	408	41.01219	48.16638	44.58929	6.4417058	7.5653997	7.0035527
24	194	408	191	449	167	431	216	431	41.10961	49	45.0548	6.4570067	7.6963351	7.0766709
25	249	385	245	410	217	387	276	409	25.31798	62.96825	44.14311	3.9766457	9.8903004	6.9334731
26	199	365	218	408	177	399	148	370	47.01064	41.01219	44.01142	7.3838697	6.4417058	6.9127877
27	109	438	130	438	121	423	121	454	21	31	26	3.2984293	4.8691099	4.0837696
28	404	431	404	466	375	450	432	452	35	57.03508	46.01754	5.4973822	8.958389	7.2278856
29	456	328	454	369	434	349	475	351	41.04875	41.04875	41.04875	6.4474479	6.4474479	6.4474479
30	103	500	102	540	88	521	124	522	40.0125	36.01389	38.01319	6.2846856	5.6566313	5.9706584
31	117	547	150	539	127	520	139	565	33.95585	46.57252	40.26419	5.3333802	7.3150561	6.3242182
32	104	602	91	616	86	601	108	617	19.10497	27.20294	23.15396	3.0007811	4.2727132	3.6367472
33	176	582	173	612	159	599	192	599	30.14963	33	31.57481	4.7355435	5.1832461	4.9593948
34	317	585	332	610	370	544	313	560	29.15476	59.20304	44.1789	4.5792816	9.2989069	6.9390942
35	293	515	274	563	253	519	289	525	51.62364	36.49658	44.06011	8.1084248	5.7324464	6.9204356

ตาราง 21 (ต่อ)

เส้นใย	x_1	y_1	x_2	y_2	x_3	y_3	x_4	y_4	$d_1(\text{pixel})$	$d_2(\text{pixel})$	$d(\text{pixel})$	$d_1(\mu\text{m})$	$d_2(\mu\text{m})$	$d(\mu\text{m})$
36	88	520	122	519	102	500	102	540	34.0147	40	37.00735	5.3426235	6.2827225	5.812673
37	187	701	215	733	219	700	183	734	42.52058	49.51767	46.01913	6.6786256	7.7776451	7.2281354
38	237	682	227	710	215	687	252	697	29.73214	38.32754	34.02984	4.6699692	6.0200318	5.3450005
39	232	625	218	644	205	618	244	645	23.60085	47.43416	35.51751	3.7069394	7.4503924	5.5786659
40	180	621	192	648	166	641	210	631	29.54657	45.12206	37.33432	4.640823	7.087234	5.8640285
41	113	665	135	687	143	660	104	697	31.1127	53.75872	42.43571	4.8868113	8.443778	6.6652947
42	757	247	805	229	768	240	794	267	51.26402	37.48333	44.37368	8.0519407	5.887434	6.9696873
43	739	167	772	175	757	151	749	188	33.95585	37.85499	35.90542	5.3333802	5.9458094	5.6395948
44	536	366	577	367	559	342	558	391	41.01219	49.0102	45.0112	6.4417058	7.6979376	7.0698217
45	720	267	720	303	699	286	743	286	36	44	40	5.6544503	6.9109948	6.2827225
46	598	710	629	703	605	681	618	729	31.7805	49.72927	40.75488	4.9917011	7.8108796	6.4012904
47	849	717	880	707	857	689	877	727	32.57299	42.94182	37.75741	5.1161772	6.7447887	5.9304829
48	827	614	866	601	851	576	865	532	41.10961	46.17359	43.6416	6.4570067	7.2523956	6.8547012
49	644	557	670	565	658	539	650	578	27.20294	39.81206	33.5075	4.2727132	6.2532029	5.2629581
50	643	644	674	656	669	617	653	655	33.24154	41.23106	37.2363	5.2211843	6.4760821	5.8486332
										Average	37.62404		Average	5.9095354
										STD	6.445199		STD	1.0123349

ตาราง 22 แสดงผลการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยและการคำนวณหาค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยที่ความเข้มข้น 12 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 20 กิโลโวลต์

เส้นใย	x_1	y_1	x_2	y_2	x_3	y_3	x_4	y_4	d_1 (pixel)	d_2 (pixel)	d (pixel)	d_1 (μm)	d_2 (μm)	d (μm)
1	75	179	100	179	89	156	89	193	25	37	31	3.9267016	5.8115183	4.8691099
2	139	179	139	204	122	192	154	190	25	32.06244	28.53122	3.9267016	5.0359852	4.4813434
3	225	151	245	171	223	175	253	151	28.28427	38.41875	33.35151	4.4425557	6.0343579	5.2384568
4	363	151	383	139	358	129	385	157	23.32381	38.8973	31.11055	3.6634253	6.1095237	4.8864745
5	218	176	231	205	202	200	240	179	31.7805	43.41659	37.59854	4.9917011	6.8193592	5.9055301
6	285	190	311	201	315	162	283	126	28.23119	48.16638	38.19878	4.4342181	7.5653997	5.9998089
7	361	169	361	192	343	183	382	178	23	39.31921	31.1596	3.6125654	6.1757916	4.8941785
8	415	217	398	229	399	212	418	246	20.80865	38.94868	29.87867	3.2683747	6.1175944	4.6929845
9	113	248	140	235	118	219	136	215	29.96665	18.43909	24.20287	4.7068034	2.896192	3.8014977
10	203	229	230	221	211	214	221	242	28.16026	29.73214	28.9462	4.4230768	4.6699692	4.546523
11	420	275	450	300	450	270	426	303	39.05125	40.80441	39.92783	6.1337039	6.4090699	6.2713869
12	124	337	142	360	160	334	130	361	29.20616	40.36087	34.78352	4.5873556	6.339404	5.4633798
13	319	329	350	320	331	308	339	338	32.28002	31.04835	31.66419	5.070161	4.8767041	4.9734325
14	247	386	247	418	230	404	261	403	32	31.01612	31.50806	5.026178	4.8716426	4.9489103
15	358	411	377	412	364	392	369	430	19.0263	38.32754	28.67692	2.9884237	6.0200318	4.5042278
16	439	423	450	451	429	444	460	429	30.08322	34.43835	32.26078	4.7251128	5.409165	5.0671389
17	204	453	192	479	175	458	132	475	28.63564	46.23851	37.43708	4.4977448	7.2625935	5.8801692
18	265	458	250	479	243	453	270	483	25.80698	40.36087	33.08392	4.0534517	6.339404	5.1964278
19	347	452	365	495	377	452	349	477	46.61545	37.53665	42.07605	7.3217981	5.8958087	6.6088034
20	410	515	410	560	379	530	404	537	45	25.96151	35.48075	7.0680628	4.0777241	5.5728935
21	283	540	307	555	306	531	279	545	28.30194	30.41381	29.35788	4.4453314	4.7770386	4.611185
22	233	563	268	576	261	552	239	594	37.33631	47.41308	42.37469	5.8643418	7.4470804	6.6557111
23	187	650	233	675	221	631	195	639	52.35456	27.20294	39.77875	8.2232294	4.2727132	6.2479713
24	196	689	221	708	229	673	190	656	31.40064	42.54409	36.97237	4.9320372	6.6823186	5.8071779
25	292	661	328	661	309	643	309	682	36	39	37.5	5.6544503	6.1256545	5.8900524
26	367	657	387	678	357	684	388	659	29	39.82462	34.41231	4.5549738	6.2551752	5.4050745
27	411	643	431	627	408	615	439	655	25.6125	50.60632	38.10941	4.0229053	7.9486372	5.9857713
28	469	647	469	679	447	662	491	662	32	44	38	5.026178	6.9109948	5.9685864
29	498	658	522	695	492	695	514	668	44.10215	34.82815	39.46515	6.9270399	5.47039	6.1987149
30	477	593	475	633	447	614	443	614	40.04997	4	22.02498	6.290571	0.6282723	3.4594216
31	486	554	506	548	488	531	504	567	20.88061	39.39543	30.13802	3.2796774	6.1877641	4.7337208
32	578	622	590	645	565	637	603	623	25.94224	40.49691	33.21958	4.0746979	6.3607717	5.2177348
33	743	622	746	654	721	641	733	636	32.14032	13	22.57016	5.0482174	2.0418848	3.5450511
34	649	611	689	611	665	578	677	546	40	34.17601	37.08801	6.2827225	5.3679605	5.8253415
35	698	578	699	600	680	592	719	592	22.02272	39	30.51136	3.4590653	6.1256545	4.7923599

ตาราง 22 (ต่อ)

เส้นใย	x_1	y_1	x_2	y_2	x_3	y_3	x_4	y_4	$d_1(\text{pixel})$	$d_2(\text{pixel})$	$d(\text{pixel})$	$d_1(\mu\text{m})$	$d_2(\mu\text{m})$	$d(\mu\text{m})$
36	739	527	761	554	732	550	767	526	34.82815	42.43819	38.63317	5.47039	6.6656843	6.0680372
37	581	468	581	511	559	491	587	488	43	28.16026	35.58013	6.7539267	4.4230768	5.5885018
38	532	409	534	457	499	442	478	433	48.04165	22.84732	35.44448	7.5458087	3.5885842	5.5671964
39	846	404	849	439	826	421	869	419	35.12834	43.04649	39.08741	5.5175397	6.7612282	6.139384
40	641	382	673	381	652	352	673	367	32.01562	25.80698	28.9113	5.0286316	4.0534517	4.5410416
41	541	293	578	319	572	274	558	238	45.22168	38.62642	41.92405	7.1028811	6.0669763	6.5849287
42	665	280	670	307	651	296	687	286	27.45906	37.36308	32.41107	4.3129414	5.8685471	5.0907443
43	489	297	490	315	464	305	520	300	18.02776	56.22277	37.12526	2.8315848	8.8308018	5.8311933
44	644	266	644	285	633	274	660	275	19	27.01851	23.00926	2.9842932	4.2437454	3.6140193
45	515	145	515	166	496	157	535	161	21	39.20459	30.1023	3.2984293	6.1577893	4.7281093
46	599	228	588	245	573	226	608	249	20.24846	41.88078	31.06462	3.1803859	6.5781335	4.8792597
47	714	317	713	340	693	327	734	330	23.02173	41.10961	32.06567	3.6159784	6.4570067	5.0364925
48	763	326	780	337	788	307	759	332	20.24846	38.28838	29.26842	3.1803859	6.0138816	4.5971337
49	800	330	827	318	808	308	820	336	29.54657	30.46309	30.00483	4.640823	4.7847789	4.712801
50	823	389	844	373	820	354	846	324	26.40076	39.69887	33.04981	4.1467158	6.2354241	5.19107
										Average	33.40163		Average	5.2463293
										STD	5.003361		STD	0.7858683

ตาราง 23 แสดงผลการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยและการคำนวณหาค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยที่ความเข้มข้น 14 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 10 กิโลโวลต์

เส้นใย	x_1	y_1	x_2	y_2	x_3	y_3	x_4	y_4	$d_1(\text{pixel})$	$d_2(\text{pixel})$	$d(\text{pixel})$	$d_1(\mu\text{m})$	$d_2(\mu\text{m})$	$d(\mu\text{m})$
1	101	562	127	577	132	549	105	592	30.01666	50.77401	40.39534	4.714659	7.9749753	6.3448171
2	138	645	163	607	123	603	173	648	45.48626	67.26812	56.37719	7.144439	10.565673	8.8550562
3	260	693	275	725	245	724	289	704	35.34119	48.33218	41.83669	5.5509729	7.5914425	6.5712077
4	382	603	405	647	363	636	421	612	49.64877	62.76942	56.20909	7.7982356	9.8590711	8.8286533
5	371	681	408	720	373	718	405	681	53.75872	48.9183	51.33851	8.443778	7.6835025	8.0636403
6	487	586	504	618	469	618	527	588	36.23534	65.29931	50.76733	5.691415	10.256436	7.9739256
7	657	689	701	669	665	655	690	710	48.33218	60.41523	54.37371	7.5914425	9.4893031	8.5403728
8	388	552	394	589	446	580	473	564	37.48333	31.38471	34.43402	5.887434	4.9295355	5.4084848
9	412	524	474	516	442	456	453	477	62.514	23.70654	43.11027	9.8189526	3.7235402	6.7712464
10	377	506	411	506	390	488	390	526	34	38	36	5.3403141	5.9685864	5.6544503
11	490	494	555	494	525	470	525	525	65	55	60	10.209424	8.6387435	9.4240838
12	497	538	521	516	489	512	525	544	32.55764	48.16638	40.36201	5.1137656	7.5653997	6.3395827
13	645	550	661	579	631	577	672	549	33.12099	49.64877	41.38488	5.2022498	7.7982356	6.5002427
14	742	626	768	659	736	656	775	628	42.0119	48.01042	45.01116	6.5987282	7.540903	7.0698156
15	785	611	825	656	780	651	834	608	60.20797	69.02898	64.61848	9.4567497	10.842248	10.149499
16	831	394	781	455	766	403	832	456	78.87332	84.64632	81.75982	12.388479	13.295234	12.841856
17	719	435	745	471	704	472	761	433	44.40721	69.06519	56.7362	6.9749539	10.847935	8.9114445
18	662	477	709	445	670	426	709	488	56.85948	73.24616	65.05282	8.9308077	11.504633	10.21772
19	781	322	778	365	756	346	808	348	43.10452	52.03845	47.57149	6.7703441	8.1735781	7.4719611
20	600	333	588	394	574	366	618	369	62.16912	44.10215	53.13564	9.7647839	6.9270399	8.3459119
21	478	382	463	418	448	385	494	417	39	56.0357	47.51785	6.1256545	8.8014193	7.4635369
22	533	324	532	374	500	350	565	350	50.01	65	57.505	7.8549737	10.209424	9.0321989
23	700	234	720	276	685	263	752	245	46.51881	69.37579	57.9473	7.3066199	10.896721	9.1016703
24	611	268	634	268	623	258	623	283	23	25	24	3.6125654	3.9267016	3.7696335
25	610	237	610	288	585	269	638	269	51	53	52	8.0104712	8.3246073	8.1675393
26	824	276	825	326	804	302	855	302	50.01	51	50.505	7.8549737	8.0104712	7.9327224
27	593	285	636	285	615	251	615	305	43	54	48.5	6.7539267	8.4816754	7.617801
28	671	268	684	273	684	257	675	276	13.92839	21.0238	17.47609	2.187705	3.3021669	2.7449359
29	634	216	633	254	608	236	661	236	38.01316	53	45.50658	5.9706527	8.3246073	7.14763
30	752	204	790	229	759	239	788	194	45.48626	53.53504	49.51065	7.144439	8.4086443	7.7765416
31	741	483	741	538	706	511	767	513	55	61.03278	58.01639	8.6387435	9.5863002	9.1125218
32	748	548	767	582	738	578	776	558	38.94868	42.94182	40.94525	6.1175944	6.7447887	6.4311915
33	813	504	813	550	780	528	841	529	46	61.0082	53.5041	7.2251309	9.5824392	8.403785
34	815	292	854	301	829	325	841	274	40.02499	52.39275	46.20887	6.286648	8.2292274	7.2579377
35	817	181	836	212	803	210	852	188	36.35932	53.7122	45.03576	5.7108876	8.4364706	7.0736791

ตาราง 23 (ต่อ)

เส้นใย	x_1	y_1	x_2	y_2	x_3	y_3	x_4	y_4	$d_1(\text{pixel})$	$d_2(\text{pixel})$	$d(\text{pixel})$	$d_1(\mu\text{m})$	$d_2(\mu\text{m})$	$d(\mu\text{m})$
36	143	207	182	168	144	172	178	208	55.15433	49.51767	52.336	8.6629836	7.7776451	8.2203143
37	169	255	202	222	162	215	214	263	46.66905	70.76722	58.71814	7.3302169	11.115271	9.2227438
38	233	282	197	311	194	262	233	311	46.2277	62.62587	54.42679	7.2608949	9.8365246	8.5487097
39	79	376	106	412	73	410	119	373	45	59.03389	52.01694	7.0680628	9.2723385	8.1702007
40	302	286	302	251	260	261	339	270	35	79.51101	57.2555	5.4973822	12.48864	8.9930109
41	311	193	372	214	358	180	323	233	64.51356	63.51378	64.01367	10.133021	9.9759861	10.054503
42	378	215	409	215	393	195	393	233	31	38	34.5	4.8691099	5.9685864	5.4188482
43	374	265	424	304	416	247	373	306	63.41136	73.00685	68.2091	9.9598988	11.467044	10.713472
44	292	293	310	335	275	330	325	298	45.69464	59.36329	52.52896	7.1771684	9.3240767	8.2506225
45	443	323	485	333	450	361	477	301	43.17407	65.79514	54.4846	6.781267	10.334315	8.5577908
46	281	362	310	404	275	405	319	367	51.0392	58.13777	54.58848	8.0166284	9.1315865	8.5741074
47	81	372	106	417	74	409	115	370	51.47815	56.58622	54.03218	8.0855734	8.8878876	8.4867305
48	195	456	274	404	210	382	271	472	94.57801	108.7244	101.6512	14.855185	17.077134	15.96616
49	375	506	412	506	390	488	390	524	37	36	36.5	5.8115183	5.6544503	5.7329843
50	149	527	139	549	160	548	129	553	24.16609	31.40064	27.78336	3.7957212	4.9320372	4.3638792
										Average	50.75397		Average	1.9718274
										STD	13.50468		STD	2.1211544

ตาราง 24 แสดงผลการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยและการคำนวณหาค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยที่ความเข้มข้น 14 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 12 กิโลโวลต์

เส้นใย	x_1	y_1	x_2	y_2	x_3	y_3	x_4	y_4	$d_1(\text{pixel})$	$d_2(\text{pixel})$	$d(\text{pixel})$	$d_1(\mu\text{m})$	$d_2(\mu\text{m})$	$d(\mu\text{m})$
1	123	438	172	463	167	415	126	488	55.00909	83.72574	69.36742	8.6401712	13.15064	10.895406
2	208	448	262	495	249	454	203	501	71.58911	65.76473	68.67692	11.244362	10.329539	10.786951
3	88	479	114	479	99	459	99	494	26	35	30.5	4.0837696	5.4973822	4.7905759
4	82	510	145	510	121	488	121	538	63	50	56.5	9.895288	7.8534031	8.8743455
5	120	625	178	625	0	0	0	0	58	0	29	9.1099476	0	4.5549738
6	287	604	287	644	259	623	313	623	40	54	47	6.2827225	8.4816754	7.382199
7	379	588	406	605	0	0	0	0	31.90611	0	15.95306	5.0114312	0	2.5057156
8	424	665	408	695	381	661	449	698	34	77.41447	55.70723	5.3403141	12.159341	8.7498274
9	332	693	353	712	331	720	359	684	28.3196	45.60702	36.96331	4.4481054	7.1634058	5.8057556
10	351	633	314	651	319	621	344	662	41.14608	48.02083	44.58346	6.4627353	7.5425386	7.0026369
11	262	568	292	583	260	599	294	555	33.54102	55.60576	44.57339	5.268223	8.7338882	7.0010556
12	263	509	277	551	248	535	291	522	44.27189	44.92215	44.59702	6.9536996	7.0558358	7.0047677
13	564	180	538	206	534	170	574	204	36.76955	52.49762	44.63359	5.7753224	8.2456993	7.0105109
14	724	138	746	166	717	166	752	139	35.60899	44.20407	39.90653	5.5930347	6.943048	6.2680413
15	815	226	815	276	774	236	847	264	50	78.18568	64.09284	7.8534031	12.280473	10.066938
16	535	305	547	334	514	329	568	311	31.38471	56.921	44.15285	4.9295355	8.9404709	6.9350032
17	601	319	637	319	624	298	613	340	36	43.41659	39.70829	5.6544503	6.8193592	6.2369047
18	666	316	666	335	652	324	675	324	19	23	21	2.9842932	3.6125654	3.2984293
19	735	296	757	349	712	332	773	316	57.38467	63.06346	60.22406	9.0132985	9.9052555	9.459277
20	812	349	819	389	793	380	844	368	40.60788	52.39275	46.50031	6.3782012	8.2292274	7.3037143
21	585	399	611	437	574	434	619	398	46.04346	57.62812	51.83579	7.2319567	9.0515369	8.1417468
22	661	385	694	372	662	349	693	407	35.4683	65.76473	50.61651	5.5709365	10.329539	7.9502378
23	723	401	744	384	710	370	752	413	27.01851	60.10824	43.56337	4.2437454	9.4410841	6.8424148
24	842	439	879	439	867	419	858	458	37	40.02499	38.5125	5.8115183	6.286648	6.0490832
25	672	464	712	464	694	442	694	492	40	50	45	6.2827225	7.8534031	7.0680628
26	862	543	840	570	830	541	872	575	34.82815	54.03702	44.43259	5.47039	8.4874907	6.9789404
27	554	510	600	518	577	478	577	548	46.69047	70	58.34524	7.3335817	10.994764	9.164173
28	730	564	767	593	724	590	770	557	47.01064	56.61272	51.81168	7.3838697	8.8920502	8.1379599
29	758	602	758	646	730	620	787	620	44	57	50.5	6.9109948	8.9528796	7.9319372
30	758	670	791	670	771	652	778	691	33	39.62323	36.31161	5.1832461	6.2235433	5.7033947
31	839	669	855	688	866	660	826	697	24.83948	54.48853	39.66401	3.9014897	8.558408	6.2299489
32	513	631	537	669	498	656	553	627	44.94441	62.17717	53.56079	7.0593314	9.7660471	8.4126892
33	620	643	649	614	615	606	659	649	41.01219	61.52235	51.26727	6.4417058	9.6631969	8.0524513
34	862	542	836	568	830	540	872	575	36.76955	54.67175	45.72065	5.7753224	8.5871855	7.181254
35	514	693	533	733	501	721	548	701	44.28318	51.07837	47.68078	6.9554732	8.0227808	7.489127

ตาราง 24 (ต่อ)

เส้นใย	x_1	y_1	x_2	y_2	x_3	y_3	x_4	y_4	$d_1(\text{pixel})$	$d_2(\text{pixel})$	$d(\text{pixel})$	$d_1(\mu\text{m})$	$d_2(\mu\text{m})$	$d(\mu\text{m})$
36	132	172	132	213	107	194	164	194	41	57	49	6.4397906	8.9528796	7.6963351
37	241	170	241	218	226	194	267	194	48	41	44.5	7.539267	6.4397906	6.9895288
38	411	200	394	241	382	213	428	231	44.38468	49.39636	46.89052	6.971416	7.75859	7.365003
39	287	227	341	247	329	190	292	290	57.58472	106.6255	82.10512	9.0447204	16.747463	12.896092
40	186	213	207	255	169	245	224	223	46.95743	59.23681	53.09712	7.3755122	9.3042114	8.3398618
41	229	245	258	245	241	222	241	262	29	40	34.5	4.5549738	6.2827225	5.4188482
42	133	174	133	210	106	194	164	194	36	58	47	5.6544503	9.1099476	7.382199
43	426	242	444	266	420	270	455	236	30	48.79549	39.39775	4.7120419	7.6642133	6.1881276
44	150	276	197	276	172	253	172	310	47	57	52	7.382199	8.9528796	8.1675393
45	74	283	124	304	109	264	83	319	54.23099	60.83584	57.53342	8.5179561	9.5553683	9.0366622
46	221	283	230	316	194	312	254	292	34.20526	63.24555	48.72541	5.3725544	9.9338565	7.6532054
47	309	337	357	375	359	335	312	386	61.22091	69.35416	65.28754	9.61585	10.893324	10.254587
48	142	385	186	385	163	355	163	411	44	56	50	6.9109948	8.7958115	7.8534031
49	410	417	450	417	432	386	432	443	40	57	48.5	6.2827225	8.9528796	7.617801
50	322	405	322	437	305	425	342	425	32	37	34.5	5.026178	5.8115183	5.4188482
										Average	47.31		Average	7.4308898
										STD	11.7208		STD	1.8409635

ตาราง 25 แสดงผลการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยและการคำนวณหาค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยที่ความเข้มข้น 14 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 14 กิโลโวลต์

เส้นใย	x_1	y_1	x_2	y_2	x_3	y_3	x_4	y_4	$d_1(\text{pixel})$	$d_2(\text{pixel})$	$d(\text{pixel})$	$d_1(\mu\text{m})$	$d_2(\mu\text{m})$	$d(\mu\text{m})$
1	255	339	278	344	273	305	260	371	23.5372	67.26812	45.40266	3.6969431	10.565673	7.1313082
2	249	298	262	277	238	273	286	311	24.69818	61.22091	42.95954	3.879295	9.61585	6.7475725
3	435	496	442	533	416	523	467	512	37.65634	52.17279	44.91457	5.9146085	8.194679	7.0546438
4	397	576	390	598	378	578	409	599	23.08679	37.44329	30.26504	3.6261978	5.8811451	4.7536715
5	321	222	366	222	346	203	346	239	45	36	40.5	7.0680628	5.6544503	6.3612565
6	481	463	462	490	460	469	482	485	33.01515	27.20294	30.10904	5.1856253	4.2727132	4.7291693
7	505	272	551	257	513	313	547	316	48.38388	34.1321	41.25799	7.5995626	5.3610623	6.4803124
8	495	363	496	407	461	394	528	385	44.01136	67.60178	55.80657	6.9127794	10.61808	8.7654296
9	473	416	498	453	541	472	537	492	44.65423	20.39608	32.52515	7.013753	3.2035725	5.1086627
10	521	542	560	541	539	514	538	571	39.01282	57.00877	48.01079	6.1276678	8.9542573	7.5409625
11	528	625	549	599	522	595	558	623	33.42155	45.60702	39.51428	5.2494581	7.1634058	6.206432
12	549	677	546	690	528	679	563	686	13.34166	35.69314	24.5174	2.0955493	5.6062518	3.8509006
13	540	462	590	502	582	453	545	504	64.03124	63.00794	63.51959	10.057263	9.8965345	9.9768988
14	666	363	708	368	682	313	670	412	42.29657	99.72462	71.0106	6.6434406	15.663553	11.153497
15	667	421	666	469	633	443	704	443	48.01042	71	59.50521	7.540903	11.151832	9.3463677
16	615	654	662	606	577	738	587	725	67.17887	16.40122	41.79004	10.551654	2.5761078	6.563881
17	818	630	801	668	790	641	827	655	41.62932	39.56008	40.5947	6.5386361	6.2136253	6.3761307
18	823	691	818	728	788	706	850	715	37.33631	62.64982	49.99306	5.8643418	9.8402859	7.8523139
19	840	351	840	381	799	361	871	371	30	72.69113	51.34556	4.7120419	11.417455	8.0647482
20	779	382	799	359	769	353	806	393	30.4795	54.48853	42.48402	4.7873562	8.558408	6.6728821
21	841	310	823	325	825	309	847	326	23.43075	27.80288	25.61681	3.6802224	4.3669441	4.0235832
22	785	178	780	213	755	191	809	196	35.35534	54.23099	44.79316	5.5531946	8.5179561	7.0355754
23	620	352	629	393	604	377	647	362	41.97618	45.54119	43.75869	6.5931179	7.1530665	6.8730922
24	643	497	673	511	665	488	644	524	33.10589	41.67733	37.39161	5.1998781	6.5461778	5.873028
25	856	155	867	155	861	140	860	176	11	36.01389	23.50694	1.7277487	5.6566313	3.69219
26	675	645	651	655	681	654	765	734	26	116	71	4.0837696	18.219895	11.151832
27	712	133	725	147	731	131	707	146	19.10497	28.30194	23.70346	3.0007811	4.4453314	3.7230563
28	834	281	828	276	839	263	826	293	7.81025	32.69557	20.25291	1.2267408	5.1354291	3.181085
29	714	291	754	364	733	272	733	318	83.24062	46	64.62031	13.074442	7.2251309	10.149787
30	520	541	560	541	540	513	540	570	40	57	48.5	6.2827225	8.9528796	7.617801
31	279	217	289	243	0	0	0	0	27.85678	0	13.92839	4.3754099	0	2.187705
32	505	271	552	257	511	204	548	217	49.0408	39.21734	44.12907	7.7027434	6.1597921	6.9312677
33	584	281	591	304	579	294	608	286	24.04163	30.08322	27.06242	3.7761723	4.7251128	4.2506426
34	829	643	825	657	808	641	843	659	14.56022	39.35734	26.95878	2.2869455	6.1817807	4.2343631
35	506	431	514	442	520	431	501	443	13.60147	22.47221	18.03684	2.1363566	3.5296657	2.8330112

ตาราง 25 (ต่อ)

เส้นใย	x_1	y_1	x_2	y_2	x_3	y_3	x_4	y_4	$d_1(\text{pixel})$	$d_2(\text{pixel})$	$d(\text{pixel})$	$d_1(\mu\text{m})$	$d_2(\mu\text{m})$	$d(\mu\text{m})$
36	150	207	160	207	150	179	121	136	10	51.86521	30.9326	1.5706806	8.1463681	4.8585243
37	185	197	199	182	175	178	203	203	20.51828	37.53665	29.02747	3.2227672	5.8958087	4.559288
38	265	275	256	299	240	271	283	306	25.63201	55.44367	40.53784	4.0259704	8.7084291	6.3671997
39	179	383	227	363	181	329	215	310	52	38.94868	45.47434	8.1675393	6.1175944	7.1425668
40	140	395	152	381	126	371	162	405	18.43909	49.51767	33.97838	2.896192	7.7776451	5.3369185
41	128	543	128	519	116	529	144	537	24	29.12044	26.56022	3.7696335	4.573891	4.1717623
42	110	598	103	633	86	609	131	623	35.69314	47.12749	41.41031	5.6062518	7.402223	6.5042374
43	114	696	114	713	95	703	138	710	17	43.56604	30.28302	2.6701571	6.8428338	4.7564954
44	254	700	307	643	255	636	307	702	77.83315	84.02381	80.92848	12.225103	13.197456	12.71128
45	204	687	238	668	214	661	231	697	38.94868	39.81206	39.38037	6.1175944	6.2532029	6.1853986
46	294	495	318	474	283	455	323	508	31.89044	66.4003	49.14537	5.0089692	10.429367	7.719168
47	319	432	357	454	351	423	328	463	43.909	46.14109	45.02504	6.8967011	7.2472913	7.0719962
48	326	392	357	384	335	361	349	412	32.01562	52.88667	42.45115	5.0286316	8.306807	6.6677193
49	280	390	311	408	308	378	272	421	35.8469	56.0803	45.9636	5.6304026	8.808424	7.2194133
50	234	331	253	335	0	0	0	0	19.41649	0	9.708244	3.0497101	0	1.5248551
										Average	40.40183		Average	6.3458377
										STD	14.71913		STD	2.3119054

ตาราง 26 แสดงผลการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยและการคำนวณหาค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยที่ความเข้มข้น 14 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 16 กิโลโวลต์

เส้นใย	x_1	y_1	x_2	y_2	x_3	y_3	x_4	y_4	$d_1(\text{pixel})$	$d_2(\text{pixel})$	$d(\text{pixel})$	$d_1(\mu\text{m})$	$d_2(\mu\text{m})$	$d(\mu\text{m})$
1	535	210	519	237	512	209	549	235	31.38471	45.22168	38.30319	4.9295355	7.1028811	6.0162083
2	649	207	670	220	647	232	671	196	24.69818	43.26662	33.9824	3.879295	6.7958035	5.3375492
3	835	155	851	170	827	174	860	151	21.93171	40.22437	31.07804	3.4447715	6.317964	4.8813678
4	839	368	822	395	815	374	845	393	31.90611	35.51056	33.70834	5.0114312	5.5775752	5.2945032
5	835	554	868	555	850	529	853	577	33.01515	48.09366	40.5544	5.1856253	7.5539778	6.3698016
6	274	577	273	604	257	588	296	593	27.01851	39.31921	33.16886	4.2437454	6.1757916	5.2097685
7	101	514	125	515	114	496	112	531	24.02082	35.0571	29.53896	3.7729043	5.5063502	4.6396273
8	608	585	646	587	629	563	626	605	38.0526	42.10701	40.0798	5.9768474	6.6136659	6.2952567
9	837	367	822	395	814	374	846	393	31.76476	37.21559	34.49017	4.9892294	5.8453803	5.4173049
10	422	189	420	237	381	210	455	216	48.04165	74.24284	61.14225	7.5458087	11.66118	9.6034942
11	266	241	293	255	287	225	271	269	30.41381	46.8188	38.61631	4.7770386	7.3537382	6.0653884
12	508	295	519	311	495	320	536	284	19.41649	54.56189	36.98919	3.0497101	8.5699306	5.8098204
13	577	409	597	367	541	373	620	405	46.51881	85.23497	65.87689	7.3066199	13.387692	10.347156
14	522	409	552	396	525	362	554	438	32.69557	81.34494	57.02025	5.1354291	12.776693	8.956061
15	534	485	571	479	546	451	556	506	37.48333	55.9017	46.69251	5.887434	8.7803716	7.3339028
16	720	543	743	565	706	574	759	524	31.82766	72.86288	52.34527	4.999109	11.444432	8.2217706
17	834	554	867	555	849	529	853	577	33.01515	48.16638	40.59076	5.1856253	7.5653997	6.3755125
18	805	348	805	376	776	361	822	361	28	46	37	4.3979058	7.2251309	5.8115183
19	563	510	563	530	545	521	580	520	20	35.01428	27.50714	3.1413613	5.4996256	4.3204934
20	216	306	213	334	196	314	237	326	28.16026	42.72002	35.44014	4.4230768	6.7099506	5.5665137
21	181	363	214	351	179	321	216	386	35.1141	74.79305	54.95357	5.5153036	11.747599	8.6314514
22	184	382	177	405	161	394	196	394	24.04163	35	29.52082	3.7761723	5.4973822	4.6367773
23	88	315	103	347	75	336	125	316	35.34119	53.85165	44.59642	5.5509729	8.458374	7.0046735
24	186	151	189	161	192	133	165	175	10.44031	49.92995	30.18513	1.6398387	7.8424007	4.7411197
25	214	127	201	146	194	129	219	145	23.02173	29.68164	26.35169	3.6159784	4.6620383	4.1390084
26	340	401	340	435	304	420	369	415	34	65.19202	49.59601	5.3403141	10.239585	7.7899495
27	382	498	412	496	392	481	395	509	30.06659	28.16026	29.11342	4.7225015	4.4230768	4.5727891
28	209	542	210	566	191	556	228	557	24.02082	37.01351	30.51717	3.7729043	5.8136405	4.7932724
29	160	480	160	514	144	498	185	501	34	41.10961	37.5548	5.3403141	6.4570067	5.8986604
30	255	469	286	476	287	431	253	509	31.7805	85.08819	58.43434	4.9917011	13.364637	9.1781691
31	309	466	345	466	330	435	317	504	36	70.21396	53.10698	5.6544503	11.02837	8.3414104
32	363	578	388	578	378	560	372	597	25	37.48333	31.24166	3.9267016	5.887434	4.9070678
33	597	163	607	150	590	147	613	165	16.40122	29.20616	22.80369	2.5761078	4.5873556	3.5817317
34	614	541	614	563	599	553	636	548	22	37.33631	29.66815	3.4554974	5.8643418	4.6599196
35	253	536	253	547	240	540	267	541	11	27.01851	19.00926	1.7277487	4.2437454	2.985747

ตาราง 26 (ต่อ)

เส้นใย	x_1	y_1	x_2	y_2	x_3	y_3	x_4	y_4	$d_1(\text{pixel})$	$d_2(\text{pixel})$	$d(\text{pixel})$	$d_1(\mu\text{m})$	$d_2(\mu\text{m})$	$d(\mu\text{m})$
36	158	674	182	655	182	674	158	656	30.61046	30	30.30523	4.807925	4.7120419	4.7599834
37	307	473	344	473	318	511	332	432	37	80.23092	58.61546	5.8115183	12.601715	9.2066165
38	582	413	599	368	542	374	621	406	48.10405	85.23497	66.66951	7.5556106	13.387692	10.471651
39	524	412	554	402	556	440	525	360	31.62278	85.79627	58.70952	4.9669283	13.475854	9.2213911
40	475	448	502	444	491	460	484	425	27.29469	35.69314	31.49391	4.2871238	5.6062518	4.9466878
41	275	577	271	604	255	588	295	592	27.29469	40.1995	33.7471	4.2871238	6.314058	5.3005909
42	142	495	183	500	159	480	158	514	41.30375	34.0147	37.65923	6.4875004	5.3426235	5.915062
43	264	244	294	256	270	269	288	225	32.31099	47.53946	39.92522	5.0750244	7.4669305	6.2709774
44	251	160	279	160	265	146	265	172	28	26	27	4.3979058	4.0837696	4.2408377
45	200	186	223	207	200	208	226	182	31.14482	36.76955	33.95719	4.891857	5.7753224	5.3335897
46	98	182	124	149	94	147	127	182	42.0119	48.10405	45.05798	6.5987282	7.5556106	7.0771694
47	267	282	265	305	240	292	293	292	23.08679	53	38.0434	3.6261978	8.3246073	5.9754026
48	182	366	214	350	182	329	215	381	35.77709	61.58734	48.68221	5.6194378	9.6734036	7.6464207
49	339	401	343	434	305	420	367	417	33.24154	62.07254	47.65704	5.2211843	9.7496133	7.4853988
50	358	300	398	290	364	263	389	334	41.23106	75.27284	58.25195	6.4760821	11.822959	9.1495204
										Average	40.33106		Average	6.3347213
										STD	11.81158		STD	1.8552214

ตาราง 27 แสดงผลการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยและการคำนวณหาค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยที่ความเข้มข้น 14 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 18 กิโลโวลต์

เส้นใย	x_1	y_1	x_2	y_2	d (pixel)	d (μm)
1	418	494	420	502	8.246211251	1.295216427
2	594	550	584	546	10.77032961	1.691674809
3	714	240	718	229	11.70469991	1.838434541
4	420	460	422	453	7.280109889	1.143472757
5	610	443	604	437	8.485281374	1.332766708
6	155	421	164	432	14.2126704	2.232356608
7	617	488	625	504	17.88854382	2.809718925
8	749	484	758	479	10.29563014	1.617114682
9	831	465	836	460	7.071067812	1.110638923
10	686	412	690	421	9.848857802	1.546941016
11	622	259	632	269	14.14213562	2.221277847
12	385	589	378	581	10.63014581	1.66965641
13	266	201	270	194	8.062257748	1.266323207
14	322	389	316	404	16.15549442	2.537512213
15	198	578	193	584	7.810249676	1.226740787
16	151	649	145	657	10	1.570680628
17	136	670	130	681	12.52996409	1.968057186
18	408	589	404	595	7.211102551	1.132633909
19	764	618	754	602	18.86796226	2.963554282
20	144	227	132	221	13.41640786	2.107289193
21	596	280	588	269	13.60147051	2.136356624
22	755	189	758	200	11.40175425	1.790851453
23	896	447	903	452	8.602325267	1.351150566
24	626	374	635	375	9.055385138	1.422311802
25	357	580	360	575	5.830951895	0.915856319
26	834	324	838	315	9.848857802	1.546941016
27	876	301	883	296	8.602325267	1.351150566
28	256	296	254	305	9.219544457	1.448095988
29	208	385	206	398	13.15294644	2.065907817
30	144	505	141	520	15.29705854	2.402679352
31	733	605	739	593	13.41640786	2.107289193
32	276	643	271	633	11.18033989	1.756074328
33	850	497	853	508	11.40175425	1.790851453
34	890	569	894	577	8.94427191	1.404859462
35	897	583	899	598	15.13274595	2.376871092

ตาราง 27 (ต่อ)

เส้นใย	x_1	y_1	x_2	y_2	d (pixel)	d (μm)
36	579	363	588	344	21.02379604	3.302166918
37	400	379	392	374	9.433981132	1.481777141
38	125	173	119	169	7.211102551	1.132633909
39	397	198	386	198	11	1.727748691
40	612	237	623	246	14.2126704	2.232356608
41	380	686	371	679	11.40175425	1.790851453
42	853	439	860	433	9.219544457	1.448095988
43	402	195	396	215	20.88061302	3.279677437
44	621	232	631	240	12.80624847	2.01145264
45	380	672	388	683	13.60147051	2.136356624
46	125	313	117	320	10.63014581	1.66965641
47	328	692	332	677	15.5241747	2.438352047
48	594	572	578	564	17.88854382	2.809718925
49	378	380	381	388	8.544003745	1.341990117
50	398	437	406	443	10	1.570680628
				Average	11.6539062	1.8304565
				STD	3.61494489	0.56779239

ตาราง 28 แสดงผลการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยและการคำนวณหาค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยที่ความเข้มข้น 14 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 20 กิโลโวลต์

เส้นใย	x_1	y_1	x_2	y_2	d (pixel)	d (μm)
1	87	728	94	717	13.03840481	2.047916986
2	167	669	175	662	10.63014581	1.66965641
3	127	171	134	181	12.20655562	1.917260044
4	417	390	425	396	10	1.570680628
5	822	696	828	705	10.81665383	1.698950863
6	573	206	581	212	10	1.570680628
7	547	536	554	531	8.602325267	1.351150566
8	671	708	675	699	9.848857802	1.546941016
9	782	254	794	263	15	2.356020942
10	416	306	412	302	5.656854249	0.888511139
11	393	372	390	384	12.36931688	1.94282464
12	306	637	301	643	7.810249676	1.226740787
13	603	509	608	522	13.92838828	2.187704965
14	658	656	652	662	8.485281374	1.332766708
15	425	650	424	646	4.123105626	0.647608213
16	511	595	518	586	11.40175425	1.790851453
17	668	199	660	190	12.04159458	1.891349934
18	184	428	190	426	6.32455532	0.993385652
19	762	286	770	285	8.062257748	1.266323207
20	339	497	350	499	11.18033989	1.756074328
21	730	577	740	581	10.77032961	1.691674809
22	344	324	349	332	9.433981132	1.481777141
23	856	440	867	440	11	1.727748691
24	572	642	580	632	12.80624847	2.01145264
25	630	582	641	570	16.2788206	2.556882816
26	72	429	85	420	15.8113883	2.483464131
27	664	178	654	185	12.20655562	1.917260044
28	418	493	407	483	14.86606875	2.33498462
29	441	379	436	366	13.92838828	2.187704965
30	287	143	282	135	9.433981132	1.481777141
31	564	288	559	276	13	2.041884817
32	750	280	756	289	10.81665383	1.698950863
33	240	371	249	367	9.848857802	1.546941016
34	239	543	246	550	9.899494937	1.554894493
35	542	276	535	272	8.062257748	1.266323207

ตาราง 28 (ต่อ)

เส้นใย	x_1	y_1	x_2	y_2	d (pixel)	d (μm)
36	335	708	345	706	10.19803903	1.601786235
37	702	333	714	323	15.62049935	2.453481574
38	751	553	740	549	11.70469991	1.838434541
39	75	589	70	601	13	2.041884817
40	829	369	833	363	7.211102551	1.132633909
41	406	670	392	666	14.56021978	2.286945515
42	733	335	739	344	10.81665383	1.698950863
43	763	388	770	402	15.65247584	2.458504059
44	471	380	471	393	13	2.041884817
45	470	467	472	473	6.32455532	0.993385652
46	468	600	480	608	14.4222051	2.265267817
47	431	438	445	446	16.1245155	2.532646413
48	856	440	867	432	13.60147051	2.136356624
49	665	192	670	203	12.08304597	1.897860624
50	415	505	419	515	10.77032961	1.691674809
				Average	11.2955896	1.77417638
				STD	2.88374329	0.4529439

ตาราง 29 แสดงผลการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยและการคำนวณหาค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยที่ความเข้มข้น 16 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 10 กิโลโวลต์

เส้นใย	x_1	y_1	x_2	y_2	d (pixel)	d (μm)
1	697	352	707	346	11.66190379	1.831712637
2	731	334	741	345	14.86606875	2.33498462
3	779	306	789	301	11.18033989	1.756074328
4	864	259	875	253	12.52996409	1.968057186
5	111	159	113	169	10.19803903	1.601786235
6	366	352	371	362	11.18033989	1.756074328
7	399	377	404	384	8.602325267	1.351150566
8	546	487	549	498	11.40175425	1.790851453
9	477	435	487	433	10.19803903	1.601786235
10	463	424	473	431	12.20655562	1.917260044
11	715	614	719	622	8.94427191	1.404859462
12	735	629	743	649	21.54065923	3.383349617
13	806	682	810	693	11.70469991	1.838434541
14	651	462	649	472	10.19803903	1.601786235
15	771	466	775	478	12.64911064	1.986771305
16	546	366	554	342	25.29822128	3.97354261
17	151	592	157	585	9.219544457	1.448095988
18	326	467	337	458	14.2126704	2.232356608
19	511	366	518	365	7.071067812	1.110638923
20	592	352	600	350	8.246211251	1.295216427
21	149	665	160	660	12.08304597	1.897860624
22	671	495	680	493	9.219544457	1.448095988
23	99	190	105	203	14.31782106	2.248872418
24	173	226	180	233	9.899494937	1.554894493
25	406	339	417	343	11.70469991	1.838434541
26	493	180	502	174	10.81665383	1.698950863
27	176	512	179	504	8.544003745	1.341990117
28	239	346	245	339	9.219544457	1.448095988
29	316	145	319	136	9.486832981	1.490078479
30	494	556	493	546	10.04987562	1.578514495
31	473	289	473	278	11	1.727748691
32	466	186	465	174	12.04159458	1.891349934
33	686	710	682	717	8.062257748	1.266323207
34	670	654	665	647	8.602325267	1.351150566
35	624	487	621	497	10.44030651	1.639838719

ตาราง 29 (ต่อ)

เส้นใย	x_1	y_1	x_2	y_2	d (pixel)	d (μm)
36	114	191	118	202	11.70469991	1.838434541
37	190	260	195	271	12.08304597	1.897860624
38	193	204	199	214	11.66190379	1.831712637
39	266	366	271	375	10.29563014	1.617114682
40	399	572	407	579	10.63014581	1.66965641
41	516	644	523	654	12.20655562	1.917260044
42	594	668	605	670	11.18033989	1.756074328
43	460	570	463	586	16.2788206	2.556882816
44	544	571	551	580	11.40175425	1.790851453
45	841	573	853	569	12.64911064	1.986771305
46	119	676	128	671	10.29563014	1.617114682
47	165	650	172	645	8.602325267	1.351150566
48	366	538	375	528	13.45362405	2.113134667
49	433	500	444	494	12.52996409	1.968057186
50	567	425	576	420	10.29563014	1.617114682
				Average	11.4773401	1.80272356
				STD	3.0988252	0.48672647

ตาราง 30 แสดงผลการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยและการคำนวณหาค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยที่ความเข้มข้น 16 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 12 กิโลโวลต์

เส้นใย	x_1	y_1	x_2	y_2	d (pixel)	d (μm)
1	476	605	486	610	11.18033989	1.756074328
2	84	428	74	430	10.19803903	1.601786235
3	198	475	210	479	12.64911064	1.986771305
4	332	529	344	532	12.36931688	1.94282464
5	396	555	403	560	8.602325267	1.351150566
6	172	378	182	370	12.80624847	2.01145264
7	253	312	262	308	9.848857802	1.546941016
8	306	267	315	264	9.486832981	1.490078479
9	879	132	887	126	10	1.570680628
10	122	156	132	159	10.44030651	1.639838719
11	162	185	167	196	12.08304597	1.897860624
12	253	253	260	264	13.03840481	2.047916986
13	422	380	425	403	23.19482701	3.643166546
14	466	397	461	392	7.071067812	1.110638923
15	525	457	534	466	12.72792206	1.999150062
16	570	491	579	498	11.40175425	1.790851453
17	701	589	711	596	12.20655562	1.917260044
18	469	244	478	251	11.40175425	1.790851453
19	564	320	572	331	13.60147051	2.136356624
20	762	477	772	482	11.18033989	1.756074328
21	889	579	896	587	10.63014581	1.66965641
22	782	259	791	265	10.81665383	1.698950863
23	131	450	140	455	10.29563014	1.617114682
24	656	686	666	689	10.44030651	1.639838719
25	507	699	514	693	9.219544457	1.448095988
26	579	641	587	634	10.63014581	1.66965641
27	737	513	742	503	11.18033989	1.756074328
28	744	651	752	655	8.94427191	1.404859462
29	886	543	892	538	7.810249676	1.226740787
30	580	210	586	214	7.211102551	1.132633909
31	596	221	599	230	9.486832981	1.490078479
32	691	295	698	300	8.602325267	1.351150566
33	713	313	721	311	8.246211251	1.295216427
34	844	414	846	404	10.19803903	1.601786235
35	867	432	862	424	9.433981132	1.481777141

ตาราง 30 (ต่อ)

เส้นใย	x_1	y_1	x_2	y_2	d (pixel)	d (μm)
36	336	538	343	530	10.63014581	1.66965641
37	545	383	553	377	10	1.570680628
38	677	283	686	277	10.81665383	1.698950863
39	241	245	248	253	10.63014581	1.66965641
40	347	323	358	329	12.52996409	1.968057186
41	428	384	436	390	10	1.570680628
42	464	411	475	415	11.70469991	1.838434541
43	550	475	558	482	10.63014581	1.66965641
44	606	517	615	524	11.40175425	1.790851453
45	416	201	424	208	10.63014581	1.66965641
46	491	262	500	269	11.40175425	1.790851453
47	656	394	665	400	10.81665383	1.698950863
48	776	489	783	500	13.03840481	2.047916986
49	758	241	767	245	9.848857802	1.546941016
50	850	310	859	317	11.40175425	1.790851453
				Average	10.8823076	1.70926298
				STD	2.31573615	0.36372819

ตาราง 31 แสดงผลการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยและการคำนวณหาค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยที่ความเข้มข้น 16 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 14 กิโลโวลต์

เส้นใย	x_1	y_1	x_2	y_2	d (pixel)	d (μm)
1	755	531	762	525	9.219544457	1.448095988
2	384	662	378	657	7.810249676	1.226740787
3	344	629	335	624	10.29563014	1.617114682
4	682	149	677	159	11.18033989	1.756074328
5	562	504	559	511	7.615773106	1.196194729
6	488	724	486	731	7.280109889	1.143472757
7	316	300	319	308	8.544003745	1.341990117
8	402	533	406	542	9.848857802	1.546941016
9	440	634	443	644	10.44030651	1.639838719
10	397	360	398	351	9.055385138	1.422311802
11	596	439	599	448	9.486832981	1.490078479
12	625	515	628	522	7.615773106	1.196194729
13	645	567	649	575	8.94427191	1.404859462
14	690	683	697	693	12.20655562	1.917260044
15	215	187	211	196	9.848857802	1.546941016
16	185	242	180	249	8.602325267	1.351150566
17	828	325	832	332	8.062257748	1.266323207
18	879	403	884	415	13	2.041884817
19	764	688	768	680	8.94427191	1.404859462
20	869	478	874	469	10.29563014	1.617114682
21	444	417	453	421	9.848857802	1.546941016
22	585	485	591	489	7.211102551	1.132633909
23	879	626	890	631	12.08304597	1.897860624
24	92	597	101	591	10.81665383	1.698950863
25	857	237	868	231	12.52996409	1.968057186
26	112	279	110	287	8.246211251	1.295216427
27	149	305	155	309	7.211102551	1.132633909
28	728	715	730	722	7.280109889	1.143472757
29	717	708	715	703	5.385164807	0.845837404
30	197	735	201	725	10.77032961	1.691674809
31	381	476	385	470	7.211102551	1.132633909
32	96	293	99	300	7.615773106	1.196194729
33	146	456	149	472	16.2788206	2.556882816
34	208	658	210	672	14.14213562	2.221277847
35	487	711	490	722	11.40175425	1.790851453

ตาราง 31 (ต่อ)

เส้นใย	x_1	y_1	x_2	y_2	d (pixel)	d (μm)
36	105	143	113	151	11.3137085	1.777022277
37	147	175	153	182	9.219544457	1.448095988
38	218	228	224	233	7.810249676	1.226740787
39	259	259	266	264	8.602325267	1.351150566
40	732	613	736	620	8.062257748	1.266323207
41	767	640	773	644	7.211102551	1.132633909
42	358	521	367	515	10.81665383	1.698950863
43	463	443	472	430	15.8113883	2.483464131
44	623	324	629	318	8.485281374	1.332766708
45	760	220	768	215	9.433981132	1.481777141
46	856	148	864	146	8.246211251	1.295216427
47	878	132	887	135	9.486832981	1.490078479
48	530	169	538	177	11.3137085	1.777022277
49	563	195	569	200	7.810249676	1.226740787
50	733	335	740	342	9.899494937	1.554894493
				Average	9.5970419	1.5073888
				STD	2.22159774	0.34894205

ตาราง 32 แสดงผลการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยและการคำนวณหาค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยที่ความเข้มข้น 16 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 16 กิโลโวลต์

เส้นใย	x_1	y_1	x_2	y_2	d (pixel)	d (μm)
1	164	471	173	475	9.848857802	1.546941016
2	739	526	745	520	8.485281374	1.332766708
3	805	473	810	467	7.810249676	1.226740787
4	863	428	869	422	8.485281374	1.332766708
5	264	350	270	366	17.08800749	2.683980234
6	588	179	597	175	9.848857802	1.546941016
7	675	134	682	130	8.062257748	1.266323207
8	173	348	178	356	9.433981132	1.481777141
9	335	427	342	430	7.615773106	1.196194729
10	520	517	528	521	8.94427191	1.404859462
11	650	580	656	584	7.211102551	1.132633909
12	630	389	637	386	7.615773106	1.196194729
13	691	357	700	353	9.848857802	1.546941016
14	774	385	779	392	8.602325267	1.351150566
15	854	424	863	427	9.486832981	1.490078479
16	126	500	135	523	24.69817807	3.879294985
17	197	469	205	465	8.94427191	1.404859462
18	217	460	224	454	9.219544457	1.448095988
19	328	409	333	402	8.602325267	1.351150566
20	492	335	498	331	7.211102551	1.132633909
21	597	288	604	285	7.615773106	1.196194729
22	648	265	655	262	7.615773106	1.196194729
23	133	376	140	372	8.062257748	1.266323207
24	191	351	200	347	9.848857802	1.546941016
25	837	488	846	492	9.848857802	1.546941016
26	860	506	866	510	7.211102551	1.132633909
27	557	694	565	689	9.433981132	1.481777141
28	599	676	607	671	9.433981132	1.481777141
29	640	656	649	653	9.486832981	1.490078479
30	731	615	740	611	9.848857802	1.546941016
31	880	547	886	542	7.810249676	1.226740787
32	464	730	459	734	6.403124237	1.00572632
33	361	668	356	664	6.403124237	1.00572632
34	186	563	184	555	8.246211251	1.295216427
35	130	530	137	527	7.615773106	1.196194729

ตาราง 32 (ต่อ)

เส้นใย	x_1	y_1	x_2	y_2	d (pixel)	d (μm)
36	474	421	477	429	8.544003745	1.341990117
37	166	189	159	185	8.062257748	1.266323207
38	86	130	92	135	7.810249676	1.226740787
39	145	684	148	674	10.44030651	1.639838719
40	193	648	202	643	10.29563014	1.617114682
41	238	613	239	604	9.055385138	1.422311802
42	272	588	278	583	7.810249676	1.226740787
43	580	358	585	351	8.602325267	1.351150566
44	851	154	858	148	9.219544457	1.448095988
45	82	464	89	452	13.89244399	2.182059265
46	210	355	217	350	8.602325267	1.351150566
47	425	172	432	166	9.219544457	1.448095988
48	462	140	470	133	10.63014581	1.66965641
49	511	143	514	151	8.544003745	1.341990117
50	855	414	861	419	7.810249676	1.226740787
				Average	9.2097311	1.44655463
				STD	2.8213567	0.44314503

ตาราง 33 แสดงผลการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยและการคำนวณหาค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยที่ความเข้มข้น 16 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 18 กิโลโวลต์

เส้นใย	x_1	y_1	x_2	y_2	d (pixel)	d (μm)
1	352	526	354	518	8.246211251	1.295216427
2	405	369	408	368	3.16227766	0.496692826
3	446	253	448	244	9.219544457	1.448095988
4	477	161	480	154	7.615773106	1.196194729
5	506	155	513	165	12.20655562	1.917260044
6	590	370	600	376	11.66190379	1.831712637
7	259	170	263	179	9.848857802	1.546941016
8	873	264	883	260	10.77032961	1.691674809
9	190	304	197	305	7.071067812	1.110638923
10	248	330	256	333	8.544003745	1.341990117
11	362	377	370	381	8.94427191	1.404859462
12	563	464	574	468	11.70469991	1.838434541
13	687	517	689	525	8.246211251	1.295216427
14	355	408	359	415	8.062257748	1.266323207
15	380	468	384	477	9.848857802	1.546941016
16	485	725	490	725	5	0.785340314
17	665	215	662	222	7.615773106	1.196194729
18	629	318	626	326	8.544003745	1.341990117
19	579	454	576	463	9.486832981	1.490078479
20	555	521	551	529	8.94427191	1.404859462
21	440	384	440	391	7	1.09947644
22	484	447	488	456	9.848857802	1.546941016
23	575	573	581	580	9.219544457	1.448095988
24	602	609	608	618	10.81665383	1.698950863
25	299	685	302	682	4.242640687	0.666383354
26	512	376	517	382	7.810249676	1.226740787
27	568	294	572	302	8.94427191	1.404859462
28	635	196	640	191	7.071067812	1.110638923
29	443	389	442	395	6.08276253	0.955407727
30	587	573	598	565	13.60147051	2.136356624
31	294	679	298	672	8.062257748	1.266323207
32	590	300	594	295	6.403124237	1.00572632
33	659	212	665	205	9.219544457	1.448095988
34	611	319	614	310	9.486832981	1.490078479
35	466	422	475	433	14.2126704	2.232356608

ตาราง 33 (ต่อ)

เส้นใย	x_1	y_1	x_2	y_2	d (pixel)	d (μm)
36	184	202	191	208	9.219544457	1.448095988
37	210	222	215	232	11.18033989	1.756074328
38	223	231	230	238	9.899494937	1.554894493
39	276	271	282	272	6.08276253	0.955407727
40	575	495	580	499	6.403124237	1.00572632
41	619	528	625	533	7.810249676	1.226740787
42	812	672	820	679	10.63014581	1.66965641
43	838	692	842	683	9.848857802	1.546941016
44	77	733	85	729	8.94427191	1.404859462
45	100	715	104	722	8.062257748	1.266323207
46	225	621	232	616	8.602325267	1.351150566
47	302	565	303	560	5.099019514	0.800893117
48	648	305	654	301	7.211102551	1.132633909
49	287	713	289	706	7.280109889	1.143472757
50	319	617	324	616	5.099019514	0.800893117
				Average	8.5627656	1.344937
				STD	2.2312817	0.3504631

ตาราง 34 แสดงผลการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยและการคำนวณหาค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยที่ความเข้มข้น 16 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 20 กิโลโวลต์

เส้นใย	x_1	y_1	x_2	y_2	d (pixel)	d (μm)
1	628	600	635	595	8.602325267	1.351150566
2	723	530	729	526	7.211102551	1.132633909
3	286	141	292	141	6	0.942408377
4	348	235	357	239	9.848857802	1.546941016
5	576	588	581	596	9.433981132	1.481777141
6	444	475	439	482	8.602325267	1.351150566
7	406	528	399	534	9.219544457	1.448095988
8	343	618	339	618	4	0.628272251
9	277	712	269	718	10	1.570680628
10	105	262	110	263	5.099019514	0.800893117
11	284	339	292	343	8.94427191	1.404859462
12	425	400	430	405	7.071067812	1.110638923
13	470	419	477	422	7.615773106	1.196194729
14	125	569	135	567	10.19803903	1.601786235
15	200	538	208	535	8.544003745	1.341990117
16	528	410	534	406	7.211102551	1.132633909
17	865	277	872	275	7.280109889	1.143472757
18	349	636	356	632	8.062257748	1.266323207
19	96	291	102	295	7.211102551	1.132633909
20	225	382	232	383	7.071067812	1.110638923
21	337	461	344	466	8.602325267	1.351150566
22	402	508	407	520	13	2.041884817
23	432	529	437	533	6.403124237	1.00572632
24	476	560	485	564	9.848857802	1.546941016
25	555	616	560	622	7.810249676	1.226740787
26	108	251	114	253	6.32455532	0.993385652
27	617	472	624	475	7.615773106	1.196194729
28	99	577	107	574	8.544003745	1.341990117
29	529	415	536	411	8.062257748	1.266323207
30	869	288	873	296	8.94427191	1.404859462
31	521	242	525	244	4.472135955	0.702429731
32	663	581	666	588	7.615773106	1.196194729
33	348	444	352	435	9.848857802	1.546941016
34	350	417	349	418	1.414213562	0.222127785

ตาราง 34 (ต่อ)

เส้นใย	x_1	y_1	x_2	y_2	d (pixel)	d (μm)
35	247	160	254	165	8.602325267	1.351150566
37	313	300	320	305	8.602325267	1.351150566
38	371	343	378	350	9.899494937	1.554894493
39	790	659	796	663	7.211102551	1.132633909
40	524	399	530	392	9.219544457	1.448095988
41	127	438	133	435	6.708203932	1.053644597
42	361	233	340	227	21.84032967	3.430418272
43	399	199	405	190	10.81665383	1.698950863
44	422	179	430	175	8.94427191	1.404859462
45	714	337	719	329	9.433981132	1.481777141
46	750	367	759	370	9.486832981	1.490078479
47	836	436	841	441	7.071067812	1.110638923
48	153	431	156	423	8.544003745	1.341990117
49	312	578	318	584	8.485281374	1.332766708
50	478	732	485	738	9.219544457	1.448095988
				Average	8.3933235	1.3183231
				STD	2.6977166	0.4237251

ตาราง 35 แสดงผลการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยและการคำนวณหาค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยที่ความเข้มข้น 18 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 10 กิโลโวลต์

เส้นใย	x_1	y_1	x_2	y_2	d (pixel)	d (μm)
1	201	641	209	634	10.63014581	1.66965641
2	462	446	465	438	8.544003745	1.341990117
3	587	353	592	348	7.071067812	1.110638923
4	821	177	829	173	8.94427191	1.404859462
5	318	612	312	606	8.485281374	1.332766708
6	163	490	158	485	7.071067812	1.110638923
7	595	645	600	639	7.810249676	1.226740787
8	839	443	845	437	8.485281374	1.332766708
9	137	531	142	523	9.433981132	1.481777141
10	408	324	413	320	6.403124237	1.00572632
11	513	244	518	238	7.810249676	1.226740787
12	253	705	260	699	9.219544457	1.448095988
13	267	696	270	693	4.242640687	0.666383354
14	291	680	300	676	9.848857802	1.546941016
15	353	640	357	644	5.656854249	0.888511139
16	451	578	456	575	5.830951895	0.915856319
17	517	534	520	525	9.486832981	1.490078479
18	250	479	241	475	9.848857802	1.546941016
19	494	356	501	360	8.062257748	1.266323207
20	694	488	702	491	8.544003745	1.341990117
21	802	561	810	565	8.94427191	1.404859462
22	680	259	684	261	4.472135955	0.702429731
23	438	261	440	253	8.246211251	1.295216427
24	452	218	459	213	8.602325267	1.351150566
25	465	181	469	176	6.403124237	1.00572632
26	401	515	397	513	4.472135955	0.702429731
27	389	473	388	468	5.099019514	0.800893117
28	375	425	380	422	5.830951895	0.915856319
29	483	703	490	698	8.602325267	1.351150566
30	129	453	134	456	5.830951895	0.915856319
31	419	507	425	508	6.08276253	0.955407727
32	330	547	335	544	5.830951895	0.915856319
33	763	454	770	452	7.280109889	1.143472757
34	105	271	99	270	6.08276253	0.955407727
35	340	597	336	592	6.403124237	1.00572632

ตาราง 35 (ต่อ)

เส้นใย	x_1	y_1	x_2	y_2	d (pixel)	d (μm)
36	304	558	298	555	6.708203932	1.053644597
37	582	616	590	612	8.94427191	1.404859462
38	872	315	878	310	7.810249676	1.226740787
39	214	547	210	553	7.211102551	1.132633909
40	499	375	496	380	5.830951895	0.915856319
41	258	684	254	692	8.94427191	1.404859462
42	574	603	581	600	7.615773106	1.196194729
43	353	530	349	524	7.211102551	1.132633909
44	271	407	267	400	8.062257748	1.266323207
45	213	318	207	312	8.485281374	1.332766708
46	864	682	860	689	8.062257748	1.266323207
47	111	458	115	448	10.77032961	1.691674809
48	295	353	300	351	5.385164807	0.845837404
49	356	515	362	518	6.708203932	1.053644597
50	564	570	566	563	7.280109889	1.143472757
				Average	7.49284446	1.176888656
				STD	1.602702424	0.25173365

ตาราง 36 แสดงผลการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยและการคำนวณหาค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยที่ความเข้มข้น 18 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 12 กิโลโวลต์

เส้นใย	x_1	y_1	x_2	y_2	d (pixel)	d (μm)
1	108	709	114	704	7.810249676	1.226740787
2	456	449	462	444	7.810249676	1.226740787
3	791	199	798	193	9.219544457	1.448095988
4	860	148	866	143	7.810249676	1.226740787
5	885	732	876	725	11.40175425	1.790851453
6	800	668	797	669	3.16227766	0.496692826
7	581	502	577	493	9.848857802	1.546941016
8	453	406	448	401	7.071067812	1.110638923
9	382	206	377	217	12.08304597	1.897860624
10	290	282	285	289	8.602325267	1.351150566
11	514	646	519	644	5.385164807	0.845837404
12	526	174	530	179	6.403124237	1.00572632
13	614	195	608	200	7.810249676	1.226740787
14	528	259	524	261	4.472135955	0.702429731
15	588	480	594	476	7.211102551	1.132633909
16	453	549	447	545	7.211102551	1.132633909
17	92	292	88	285	8.062257748	1.266323207
18	655	492	660	495	5.830951895	0.915856319
19	679	507	687	511	8.94427191	1.404859462
20	318	595	324	594	6.08276253	0.955407727
21	487	143	491	140	5	0.785340314
22	637	534	639	541	7.280109889	1.143472757
23	466	702	463	695	7.615773106	1.196194729
24	385	461	383	454	7.280109889	1.143472757
25	360	386	358	378	8.246211251	1.295216427
26	336	311	333	304	7.615773106	1.196194729
27	300	202	296	196	7.211102551	1.132633909
28	233	402	239	399	6.708203932	1.053644597
29	865	259	871	258	6.08276253	0.955407727
30	114	443	120	449	8.485281374	1.332766708
31	496	519	500	523	5.656854249	0.888511139
32	677	556	682	559	5.830951895	0.915856319
33	455	447	461	448	6.08276253	0.955407727
34	650	500	656	502	6.32455532	0.993385652
35	677	507	683	510	6.708203932	1.053644597

ตาราง 36 (ต่อ)

เส้นใย	x_1	y_1	x_2	y_2	d (pixel)	d (μm)
36	840	553	845	554	5.099019514	0.800893117
37	248	583	253	581	5.385164807	0.845837404
38	463	524	467	522	4.472135955	0.702429731
39	594	488	601	486	7.280109889	1.143472757
40	446	705	442	699	7.211102551	1.132633909
41	350	386	344	380	8.485281374	1.332766708
42	328	312	333	306	7.810249676	1.226740787
43	295	204	292	198	6.708203932	1.053644597
44	490	678	498	675	8.544003745	1.341990117
45	315	592	320	588	6.403124237	1.00572632
46	482	141	484	148	7.280109889	1.143472757
47	563	351	568	356	7.071067812	1.110638923
48	603	456	608	457	5.099019514	0.800893117
49	298	402	294	408	7.211102551	1.132633909
50	159	609	154	613	6.403124237	1.00572632
				Average	7.096484427	1.114631062
				STD	1.635046269	0.25681355

ตาราง 37 แสดงผลการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยและการคำนวณหาค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยที่ความเข้มข้น 18 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 14 กิโลโวลต์

เส้นใย	x_1	y_1	x_2	y_2	d (pixel)	d (μm)
1	276	274	280	280	7.211102551	1.132633909
2	327	549	332	545	6.403124237	1.00572632
3	714	257	719	263	7.810249676	1.226740787
4	520	123	526	127	7.211102551	1.132633909
5	749	306	751	314	8.246211251	1.295216427
6	816	358	819	364	6.708203932	1.053644597
7	449	681	445	678	5	0.785340314
8	578	673	573	670	5.830951895	0.915856319
9	834	476	836	472	4.472135955	0.702429731
10	507	278	505	285	7.280109889	1.143472757
11	222	498	218	505	8.062257748	1.266323207
12	191	521	188	527	6.708203932	1.053644597
13	321	679	324	675	5	0.785340314
14	703	702	710	697	8.602325267	1.351150566
15	663	694	657	689	7.810249676	1.226740787
16	327	439	321	435	7.211102551	1.132633909
17	748	432	755	437	8.602325267	1.351150566
18	801	226	803	233	7.280109889	1.143472757
19	517	124	520	130	6.708203932	1.053644597
20	539	188	546	191	7.615773106	1.196194729
21	596	360	600	366	7.211102551	1.132633909
22	614	413	617	421	8.544003745	1.341990117
23	670	579	669	585	6.08276253	0.955407727
24	334	192	337	195	4.242640687	0.666383354
25	369	287	372	293	6.708203932	1.053644597
26	480	589	484	593	5.656854249	0.888511139
27	519	332	523	330	4.472135955	0.702429731
28	815	575	820	578	5.830951895	0.915856319
29	417	307	425	310	8.544003745	1.341990117
30	818	407	822	410	5	0.785340314
31	463	669	459	665	5.656854249	0.888511139
32	194	378	189	372	7.810249676	1.226740787
33	574	664	569	660	6.403124237	1.00572632
34	688	548	693	542	7.810249676	1.226740787
35	489	128	493	134	7.211102551	1.132633909

ตาราง 37 (ต่อ)

เส้นใย	x_1	y_1	x_2	y_2	d (pixel)	d (μm)
36	642	286	648	289	6.708203932	1.053644597
37	670	316	676	322	8.485281374	1.332766708
38	752	401	760	403	8.246211251	1.295216427
39	239	173	232	177	8.062257748	1.266323207
40	130	359	125	364	7.071067812	1.110638923
41	435	196	431	202	7.211102551	1.132633909
42	212	531	216	526	6.403124237	1.00572632
43	218	636	214	633	5	0.785340314
44	98	444	91	440	8.062257748	1.266323207
45	482	732	477	729	5.830951895	0.915856319
46	283	434	277	437	6.708203932	1.053644597
47	134	213	132	209	4.472135955	0.702429731
48	301	195	306	199	6.403124237	1.00572632
49	469	423	476	428	8.602325267	1.351150566
50	464	142	469	148	7.810249676	1.226740787
				Average	6.840689612	1.074453866
				STD	1.255585736	0.197212419

ตาราง 38 แสดงผลการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยและการคำนวณหาค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยที่ความเข้มข้น 18 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 16 กิโลโวลต์

เส้นใย	x_1	y_1	x_2	y_2	d (pixel)	d (μm)
1	187	205	190	209	5	0.785340314
2	342	537	345	531	6.708203932	1.053644597
3	608	337	612	332	6.403124237	1.00572632
4	126	411	130	410	4.123105626	0.647608213
5	445	151	450	147	6.403124237	1.00572632
6	475	127	478	124	4.242640687	0.666383354
7	502	133	506	140	8.062257748	1.266323207
8	351	639	347	635	5.656854249	0.888511139
9	192	656	186	651	7.810249676	1.226740787
10	133	596	136	595	3.16227766	0.496692826
11	370	490	374	493	5	0.785340314
12	436	242	443	245	7.615773106	1.196194729
13	457	257	460	260	4.242640687	0.666383354
14	285	428	288	421	7.615773106	1.196194729
15	520	236	528	233	8.544003745	1.341990117
16	392	618	400	616	8.246211251	1.295216427
17	528	522	535	518	8.062257748	1.266323207
18	551	290	555	294	5.656854249	0.888511139
19	608	430	610	434	4.472135955	0.702429731
20	441	670	435	666	7.211102551	1.132633909
21	396	542	390	539	6.708203932	1.053644597
22	297	263	296	259	4.123105626	0.647608213
23	560	487	566	485	6.32455532	0.993385652
24	589	405	591	398	7.280109889	1.143472757
25	686	128	687	124	4.123105626	0.647608213
26	443	343	449	343	6	0.942408377
27	852	253	858	248	7.810249676	1.226740787
28	818	601	820	608	7.280109889	1.143472757
29	560	382	564	387	6.403124237	1.00572632
30	771	479	778	475	8.062257748	1.266323207
31	876	457	880	462	6.403124237	1.00572632
32	371	613	367	619	7.211102551	1.132633909
33	453	161	458	158	5.830951895	0.915856319
34	479	132	483	130	4.472135955	0.702429731
35	498	137	502	140	5	0.785340314

ตาราง 38 (ต่อ)

เส้นใย	x_1	y_1	x_2	y_2	d (pixel)	d (μm)
36	855	507	858	514	7.615773106	1.196194729
37	470	161	463	165	8.062257748	1.266323207
38	444	198	439	202	6.403124237	1.00572632
39	308	605	306	610	5.385164807	0.845837404
40	283	633	280	636	4.242640687	0.666383354
41	850	180	855	174	7.810249676	1.226740787
42	791	566	796	562	6.403124237	1.00572632
43	653	667	649	660	8.062257748	1.266323207
44	584	570	580	564	7.211102551	1.132633909
45	316	194	310	190	7.211102551	1.132633909
46	896	564	890	560	7.211102551	1.132633909
47	655	130	660	132	5.385164807	0.845837404
48	520	657	524	661	5.656854249	0.888511139
49	452	218	455	223	5.830951895	0.915856319
50	437	669	432	671	5.385164807	0.845837404
				Average	6.302935254	0.98998983
				STD	1.397157167	0.21944877

ตาราง 39 แสดงผลการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยและการคำนวณหาค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยที่ความเข้มข้น 18 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 18 กิโลโวลต์

เส้นใย	x_1	y_1	x_2	y_2	d (pixel)	d (μm)
1	304	563	306	559	4.472135955	0.702429731
2	343	533	346	531	3.605551275	0.566316954
3	152	178	156	181	5	0.785340314
4	221	230	226	234	6.403124237	1.00572632
5	387	202	382	205	5.830951895	0.915856319
6	696	299	700	303	5.656854249	0.888511139
7	417	703	423	708	7.810249676	1.226740787
8	814	474	819	470	6.403124237	1.00572632
9	875	428	872	421	7.615773106	1.196194729
10	100	312	93	317	8.602325267	1.351150566
11	473	607	479	601	8.485281374	1.332766708
12	679	689	682	686	4.242640687	0.666383354
13	394	380	390	385	6.403124237	1.00572632
14	664	711	668	715	5.656854249	0.888511139
15	414	552	412	548	4.472135955	0.702429731
16	384	451	380	448	5	0.785340314
17	657	120	656	125	5.099019514	0.800893117
18	524	583	520	589	7.211102551	1.132633909
19	330	386	333	383	4.242640687	0.666383354
20	396	370	404	369	8.062257748	1.266323207
21	167	554	173	552	6.32455532	0.993385652
22	254	540	260	537	6.708203932	1.053644597
23	460	591	462	586	5.385164807	0.845837404
24	812	355	817	362	8.602325267	1.351150566
25	223	514	219	512	4.472135955	0.702429731
26	574	285	575	290	5.099019514	0.800893117
27	355	688	355	685	3	0.471204188
28	473	630	470	624	6.708203932	1.053644597
29	872	435	877	430	7.071067812	1.110638923
30	345	422	344	430	8.062257748	1.266323207
31	190	338	196	341	6.708203932	1.053644597
32	254	361	260	362	6.08276253	0.955407727
33	641	497	645	502	6.403124237	1.00572632
34	245	615	241	611	5.656854249	0.888511139
35	139	425	136	422	4.242640687	0.666383354

ตาราง 39 (ต่อ)

เส้นใย	x_1	y_1	x_2	y_2	d (pixel)	d (μm)
36	715	689	717	685	4.472135955	0.702429731
37	780	543	785	540	5.830951895	0.915856319
38	113	573	112	569	4.123105626	0.647608213
39	746	603	745	596	7.071067812	1.110638923
40	358	193	355	198	5.830951895	0.915856319
41	249	252	252	258	6.708203932	1.053644597
42	176	373	171	379	7.810249676	1.226740787
43	153	415	146	418	7.615773106	1.196194729
44	757	380	762	385	7.071067812	1.110638923
45	875	564	880	560	6.403124237	1.00572632
46	493	640	493	647	7	1.09947644
47	345	458	351	458	6	0.942408377
48	599	462	603	466	5.656854249	0.888511139
49	284	687	288	681	7.211102551	1.132633909
50	337	543	339	538	5.385164807	0.845837404
				Average	6.099828408	0.958088232
				STD	1.367290408	0.214757656

ตาราง 40 แสดงผลการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยและการคำนวณหาค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยที่ความเข้มข้น 18 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 20 กิโลโวลต์

เส้นใย	x_1	y_1	x_2	y_2	d (pixel)	d (μ m)
1	696	564	699	562	3.605551275	0.566316954
2	669	433	673	429	5.656854249	0.888511139
3	146	623	139	620	7.615773106	1.196194729
4	117	290	111	286	7.211102551	1.132633909
5	310	161	314	163	4.472135955	0.702429731
6	461	191	468	193	7.280109889	1.143472757
7	417	312	416	318	6.08276253	0.955407727
8	381	413	378	419	6.708203932	1.053644597
9	493	150	496	157	7.615773106	1.196194729
10	553	310	554	315	5.099019514	0.800893117
11	347	390	344	385	5.830951895	0.915856319
12	184	470	188	471	4.123105626	0.647608213
13	559	536	564	538	5.385164807	0.845837404
14	876	591	881	592	5.099019514	0.800893117
15	213	169	210	173	5	0.785340314
16	488	125	484	129	5.656854249	0.888511139
17	145	634	141	635	4.123105626	0.647608213
18	453	724	456	721	4.242640687	0.666383354
19	677	418	679	414	4.472135955	0.702429731
20	697	713	700	709	5	0.785340314
21	705	167	704	172	5.099019514	0.800893117
22	802	305	804	309	4.472135955	0.702429731
23	171	501	177	503	6.32455532	0.993385652
24	473	224	467	219	7.810249676	1.226740787
25	325	145	319	142	6.708203932	1.053644597
26	345	494	349	490	5.656854249	0.888511139
27	485	439	490	435	6.403124237	1.00572632
28	535	420	540	416	6.403124237	1.00572632
29	583	401	586	397	5	0.785340314
30	234	340	239	342	5.385164807	0.845837404
31	260	140	264	140	4	0.628272251
32	219	231	217	235	4.472135955	0.702429731
33	183	330	178	334	6.403124237	1.00572632
34	127	451	120	455	8.062257748	1.266323207
35	686	707	688	702	5.385164807	0.845837404

ตาราง 40 (ต่อ)

เส้นใย	x_1	y_1	x_2	y_2	d (pixel)	d (μm)
36	749	573	754	568	7.071067812	1.110638923
37	798	468	803	465	5.830951895	0.915856319
38	329	671	324	675	6.403124237	1.00572632
39	146	580	139	577	7.615773106	1.196194729
40	202	584	198	580	5.656854249	0.888511139
41	185	545	182	540	5.830951895	0.915856319
42	116	380	114	376	4.472135955	0.702429731
43	698	715	701	709	6.708203932	1.053644597
44	728	658	736	662	8.94427191	1.404859462
45	768	582	774	578	7.211102551	1.132633909
46	466	358	470	362	5.656854249	0.888511139
47	456	414	460	415	4.123105626	0.647608213
48	462	603	465	610	7.615773106	1.196194729
49	461	640	465	645	6.403124237	1.00572632
50	461	673	464	676	4.242640687	0.666383354
				Average	5.833026292	0.91618214
				STD	1.568055026	0.199170947

ตาราง 41 แสดงผลการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยและการคำนวณหาค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยที่ความเข้มข้น 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 10 กิโลโวลต์

เส้นใย	x_1	y_1	x_2	y_2	d (pixel)	d (μm)
1	428	476	433	475	5.099019514	0.800893117
2	406	494	410	490	5.656854249	0.888511139
3	733	248	738	245	5.830951895	0.915856319
4	784	210	787	204	6.708203932	1.053644597
5	699	497	703	492	6.403124237	1.00572632
6	853	373	858	370	5.830951895	0.915856319
7	289	456	292	455	3.16227766	0.496692826
8	670	169	675	165	6.403124237	1.00572632
9	797	338	800	332	6.708203932	1.053644597
10	788	571	793	569	5.385164807	0.845837404
11	867	356	870	351	5.830951895	0.915856319
12	590	411	594	414	5	0.785340314
13	631	507	635	512	6.403124237	1.00572632
14	698	666	702	668	4.472135955	0.702429731
15	509	640	513	639	4.123105626	0.647608213
16	711	382	715	379	5	0.785340314
17	642	301	647	298	5.830951895	0.915856319
18	698	276	702	272	5.656854249	0.888511139
19	812	247	808	245	4.472135955	0.702429731
20	444	505	450	508	6.708203932	1.053644597
21	871	396	871	398	2	0.314136126
22	346	605	350	610	6.403124237	1.00572632
23	802	351	808	348	6.708203932	1.053644597
24	836	311	843	308	7.615773106	1.196194729
25	885	253	889	249	5.656854249	0.888511139
26	254	407	250	410	5	0.785340314
27	238	207	233	210	5.830951895	0.915856319
28	177	309	172	313	6.403124237	1.00572632
29	155	344	150	342	5.385164807	0.845837404
30	444	196	440	200	5.656854249	0.888511139
31	282	434	276	434	6	0.942408377
32	222	522	217	525	5.830951895	0.915856319
33	402	562	407	559	5.830951895	0.915856319
34	435	516	434	510	6.08276253	0.955407727
35	603	287	609	285	6.32455532	0.993385652

ตาราง 41 (ต่อ)

เส้นใย	x_1	y_1	x_2	y_2	d (pixel)	d (μm)
36	681	180	685	175	6.403124237	1.00572632
37	529	654	533	650	5.656854249	0.888511139
38	658	464	662	463	4.123105626	0.647608213
39	794	262	799	259	5.830951895	0.915856319
40	747	602	752	598	6.403124237	1.00572632
41	810	513	816	510	6.708203932	1.053644597
42	859	661	857	664	3.605551275	0.566316954
43	171	511	166	508	5.830951895	0.915856319
44	739	383	743	379	5.656854249	0.888511139
45	828	586	832	591	6.403124237	1.00572632
46	888	721	890	726	5.385164807	0.845837404
47	608	707	611	713	6.708203932	1.053644597
48	327	167	329	173	6.32455532	0.993385652
49	441	222	446	225	5.830951895	0.915856319
50	602	297	606	302	6.403124237	1.00572632
				Average	5.69376917	0.894309294
				STD	1.010665378	0.158741431

ตาราง 42 แสดงผลการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยและการคำนวณหาค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยที่ความเข้มข้น 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 12 กิโลโวลต์

เส้นใย	x_1	y_1	x_2	y_2	d (pixel)	d (μm)
1	82	128	85	135	7.615773106	1.196194729
2	408	374	412	380	7.211102551	1.132633909
3	499	440	504	445	7.071067812	1.110638923
4	652	555	655	561	6.708203932	1.053644597
5	497	418	501	414	5.656854249	0.888511139
6	746	231	749	226	5.830951895	0.915856319
7	78	462	82	460	4.472135955	0.702429731
8	215	351	220	349	5.385164807	0.845837404
9	771	334	773	341	7.280109889	1.143472757
10	860	437	865	435	5.385164807	0.845837404
11	159	238	156	240	3.605551275	0.566316954
12	440	312	434	317	7.810249676	1.226740787
13	288	435	286	442	7.280109889	1.143472757
14	219	734	220	728	6.08276253	0.955407727
15	389	620	383	616	7.211102551	1.132633909
16	651	444	655	442	4.472135955	0.702429731
17	743	383	748	379	6.403124237	1.00572632
18	702	714	707	711	5.830951895	0.915856319
19	835	598	840	600	5.385164807	0.845837404
20	863	290	864	295	5.099019514	0.800893117
21	500	291	504	293	4.472135955	0.702429731
22	591	357	590	360	3.16227766	0.496692826
23	814	522	811	527	5.830951895	0.915856319
24	231	422	237	424	6.32455532	0.993385652
25	605	655	610	659	6.403124237	1.00572632
26	279	682	277	678	4.472135955	0.702429731
27	242	647	240	642	5.385164807	0.845837404
28	457	683	454	680	4.242640687	0.666383354
29	420	570	418	565	5.385164807	0.845837404
30	400	509	401	504	5.099019514	0.800893117
31	373	425	368	422	5.830951895	0.915856319
32	327	287	325	288	2.236067977	0.351214866
33	311	238	308	235	4.242640687	0.666383354
34	485	707	489	705	4.472135955	0.702429731
35	511	643	515	640	5	0.785340314

ตาราง 42 (ต่อ)

เส้นใย	x_1	y_1	x_2	y_2	d (pixel)	d (μm)
36	249	710	243	710	6	0.942408377
37	470	131	474	135	5.656854249	0.888511139
38	528	258	530	264	6.32455532	0.993385652
39	726	697	731	696	5.099019514	0.800893117
40	346	383	353	381	7.280109889	1.143472757
41	397	372	401	367	6.403124237	1.00572632
42	722	295	727	293	5.385164807	0.845837404
43	634	551	640	553	6.32455532	0.993385652
44	97	269	103	270	6.08276253	0.955407727
45	682	390	687	393	5.830951895	0.915856319
46	178	602	182	597	6.403124237	1.00572632
47	756	465	758	461	4.472135955	0.702429731
48	345	591	340	590	5.099019514	0.800893117
49	268	507	264	503	5.656854249	0.888511139
50	219	454	215	457	5	0.785340314
				Average	5.627478008	0.883897069
				STD	1.156830323	0.181701098

ตาราง 43 แสดงผลการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยและการคำนวณหาค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยที่ความเข้มข้น 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 14 กิโลโวลต์

เส้นใย	x_1	y_1	x_2	y_2	d (pixel)	d (μm)
1	114	151	117	156	5.830951895	0.915856319
2	330	311	333	315	5	0.785340314
3	588	508	590	513	5.385164807	0.845837404
4	655	558	658	563	5.830951895	0.915856319
5	721	609	725	610	4.123105626	0.647608213
6	807	674	813	676	6.32455532	0.993385652
7	841	698	845	700	4.472135955	0.702429731
8	156	674	160	670	5.656854249	0.888511139
9	175	659	179	655	5.656854249	0.888511139
10	339	538	345	536	6.32455532	0.993385652
11	217	361	220	358	4.242640687	0.666383354
12	327	268	325	264	4.472135955	0.702429731
13	498	127	503	130	5.830951895	0.915856319
14	528	150	532	153	5	0.785340314
15	561	175	564	180	5.830951895	0.915856319
16	757	330	759	335	5.385164807	0.845837404
17	839	394	844	397	5.830951895	0.915856319
18	419	689	422	690	3.16227766	0.496692826
19	859	485	864	482	5.830951895	0.915856319
20	139	598	140	594	4.123105626	0.647608213
21	304	474	307	470	5	0.785340314
22	317	465	314	462	4.242640687	0.666383354
23	251	748	252	742	6.08276253	0.955407727
24	700	428	703	425	4.242640687	0.666383354
25	883	296	885	291	5.385164807	0.845837404
26	725	709	729	705	5.656854249	0.888511139
27	424	182	430	184	6.32455532	0.993385652
28	646	250	650	254	5.656854249	0.888511139
29	392	254	395	257	4.242640687	0.666383354
30	489	323	493	325	4.472135955	0.702429731
31	566	376	570	380	5.656854249	0.888511139
32	603	404	608	407	5.830951895	0.915856319
33	665	448	670	450	5.385164807	0.845837404
34	906	619	910	620	4.123105626	0.647608213
35	297	423	300	428	5.830951895	0.915856319

ตาราง 43 (ต่อ)

เส้นใย	x_1	y_1	x_2	y_2	d (pixel)	d (μm)
36	331	447	335	443	5.656854249	0.888511139
37	184	607	189	610	5.830951895	0.915856319
38	304	704	303	710	6.08276253	0.955407727
39	511	705	514	700	5.830951895	0.915856319
40	532	651	536	647	5.656854249	0.888511139
41	598	483	601	479	5	0.785340314
42	638	380	642	376	5.656854249	0.888511139
43	660	322	664	318	5.656854249	0.888511139
44	95	289	100	292	5.830951895	0.915856319
45	723	152	727	149	5	0.785340314
46	321	179	326	180	5.099019514	0.800893117
47	333	550	337	554	5.656854249	0.888511139
48	391	394	396	392	5.385164807	0.845837404
49	515	528	519	531	5	0.785340314
50	862	617	865	622	5.830951895	0.915856319
				Average	5.312451299	0.834416434
				STD	0.712756359	0.111951261

ตาราง 44 แสดงผลการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยและการคำนวณหาค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยที่ความเข้มข้น 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 16 กิโลโวลต์

เส้นใย	x_1	y_1	x_2	y_2	d (pixel)	d (μm)
1	164	190	168	192	4.472135955	0.702429731
2	282	279	285	282	4.242640687	0.666383354
3	327	311	330	315	5	0.785340314
4	521	459	524	462	4.242640687	0.666383354
5	96	719	100	715	5.656854249	0.888511139
6	366	519	369	516	4.242640687	0.666383354
7	437	466	440	462	5	0.785340314
8	565	371	570	369	5.385164807	0.845837404
9	644	312	649	309	5.830951895	0.915856319
10	695	275	699	279	5.656854249	0.888511139
11	143	396	148	394	5.385164807	0.845837404
12	318	265	320	261	4.472135955	0.702429731
13	200	442	195	445	5.830951895	0.915856319
14	147	400	145	396	4.472135955	0.702429731
15	332	202	333	207	5.099019514	0.800893117
16	434	273	438	277	5.656854249	0.888511139
17	547	350	550	353	4.242640687	0.666383354
18	582	374	585	378	5	0.785340314
19	648	419	652	423	5.656854249	0.888511139
20	228	378	230	383	5.385164807	0.845837404
21	563	634	567	636	4.472135955	0.702429731
22	638	691	640	695	4.472135955	0.702429731
23	94	581	97	579	3.605551275	0.566316954
24	296	606	292	610	5.656854249	0.888511139
25	323	534	325	530	4.472135955	0.702429731
26	269	469	271	472	3.605551275	0.566316954
27	681	582	686	585	5.830951895	0.915856319
28	341	380	343	384	4.472135955	0.702429731
29	498	302	499	299	3.16227766	0.496692826
30	248	459	252	463	5.656854249	0.888511139
31	469	512	472	513	3.16227766	0.496692826
32	415	302	419	305	5	0.785340314
33	760	401	765	404	5.830951895	0.915856319
34	746	378	749	374	5	0.785340314
35	177	439	180	441	3.605551275	0.566316954

ตาราง 44 (ต่อ)

เส้นใย	x_1	y_1	x_2	y_2	d (pixel)	d (μm)
36	330	288	333	285	4.242640687	0.666383354
37	232	486	237	483	5.830951895	0.915856319
38	767	297	770	295	3.605551275	0.566316954
39	465	688	470	691	5.830951895	0.915856319
40	593	630	595	634	4.472135955	0.702429731
41	647	698	652	699	5.099019514	0.800893117
42	536	268	541	270	5.385164807	0.845837404
43	620	386	625	385	5.099019514	0.800893117
44	653	433	658	435	5.385164807	0.845837404
45	233	473	231	477	4.472135955	0.702429731
46	335	184	337	189	5.385164807	0.845837404
47	855	316	850	320	6.403124237	1.00572632
48	508	468	512	470	4.472135955	0.702429731
49	661	528	664	526	3.605551275	0.566316954
50	211	207	208	210	4.242640687	0.666383354
				Average	4.849350477	0.761678085
				STD	0.797828654	0.125313401

ตาราง 45 แสดงผลการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยและการคำนวณหาค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยที่ความเข้มข้น 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 18 กิโลโวลต์

เส้นใย	x_1	y_1	x_2	y_2	d (pixel)	d (μm)
1	146	174	149	176	3.605551275	0.566316954
2	265	263	269	265	4.472135955	0.702429731
3	869	718	870	722	4.123105626	0.647608213
4	495	420	500	418	5.385164807	0.845837404
5	157	379	158	375	4.123105626	0.647608213
6	636	244	640	247	5	0.785340314
7	122	340	125	342	3.605551275	0.566316954
8	498	608	500	613	5.385164807	0.845837404
9	599	519	600	515	4.123105626	0.647608213
10	752	377	752	373	4	0.628272251
11	857	279	855	275	4.472135955	0.702429731
12	258	479	261	476	4.242640687	0.666383354
13	294	449	295	446	3.16227766	0.496692826
14	349	409	348	405	4.123105626	0.647608213
15	381	381	384	378	4.242640687	0.666383354
16	669	396	673	394	4.472135955	0.702429731
17	798	306	802	304	4.472135955	0.702429731
18	808	632	813	629	5.830951895	0.915856319
19	755	517	760	520	5.830951895	0.915856319
20	649	604	652	602	3.605551275	0.566316954
21	79	475	82	476	3.16227766	0.496692826
22	237	618	241	622	5.656854249	0.888511139
23	588	423	591	425	3.605551275	0.566316954
24	671	637	676	640	5.830951895	0.915856319
25	306	288	310	289	4.123105626	0.647608213
26	334	362	338	364	4.472135955	0.702429731
27	364	438	366	442	4.472135955	0.702429731
28	428	602	430	607	5.385164807	0.845837404
29	116	465	120	468	5	0.785340314
30	277	350	283	352	6.32455532	0.993385652
31	460	264	464	260	5.656854249	0.888511139
32	847	419	843	417	4.472135955	0.702429731
33	243	476	240	473	4.242640687	0.666383354
34	561	631	565	629	4.472135955	0.702429731
35	693	376	695	380	4.472135955	0.702429731

ตาราง 45 (ต่อ)

เส้นใย	x_1	y_1	x_2	y_2	d (pixel)	d (μm)
36	152	292	156	288	5.656854249	0.888511139
37	159	543	163	542	4.123105626	0.647608213
38	435	464	440	463	5.099019514	0.800893117
39	664	192	666	196	4.472135955	0.702429731
40	562	606	567	604	5.385164807	0.845837404
41	820	230	821	227	3.16227766	0.496692826
42	846	195	850	194	4.123105626	0.647608213
43	755	724	758	722	3.605551275	0.566316954
44	123	400	125	395	5.385164807	0.845837404
45	115	378	120	380	5.385164807	0.845837404
46	238	532	242	533	4.123105626	0.647608213
47	326	644	330	648	5.656854249	0.888511139
48	496	413	494	410	3.605551275	0.566316954
49	397	277	395	272	5.385164807	0.845837404
50	769	567	773	568	4.123105626	0.647608213
				Average	4.578347481	0.71911217
				STD	0.807322575	0.126804593

ตาราง 46 แสดงผลการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยและการคำนวณหาค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยที่ความเข้มข้น 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 20 กิโลโวลต์

เส้นใย	x_1	y_1	x_2	y_2	d (pixel)	d (μm)
1	215	632	217	636	4.472135955	0.702429731
2	306	563	309	566	4.242640687	0.666383354
3	463	446	464	442	4.123105626	0.647608213
4	594	348	596	352	4.472135955	0.702429731
5	672	289	674	293	4.472135955	0.702429731
6	750	232	749	237	5.099019514	0.800893117
7	874	139	874	143	4	0.628272251
8	448	693	452	691	4.472135955	0.702429731
9	398	650	396	653	3.605551275	0.566316954
10	360	618	364	616	4.472135955	0.702429731
11	573	671	577	669	4.472135955	0.702429731
12	94	419	90	418	4.123105626	0.647608213
13	593	205	596	209	5	0.785340314
14	647	249	644	252	4.242640687	0.666383354
15	701	297	703	302	5.385164807	0.845837404
16	571	671	573	667	4.472135955	0.702429731
17	808	485	811	483	3.605551275	0.566316954
18	307	300	309	304	4.472135955	0.702429731
19	366	442	369	440	3.605551275	0.566316954
20	721	167	725	165	4.472135955	0.702429731
21	578	354	583	356	5.385164807	0.845837404
22	609	431	613	430	4.123105626	0.647608213
23	624	469	620	467	4.472135955	0.702429731
24	380	399	383	401	3.605551275	0.566316954
25	405	329	407	325	4.472135955	0.702429731
26	578	351	581	354	4.242640687	0.666383354
27	607	428	610	432	5	0.785340314
28	695	663	698	665	3.605551275	0.566316954
29	185	391	189	390	4.123105626	0.647608213
30	453	249	456	247	3.605551275	0.566316954
31	501	224	504	223	3.16227766	0.496692826
32	414	540	416	544	4.472135955	0.702429731
33	873	442	875	445	3.605551275	0.566316954
34	378	689	380	684	5.385164807	0.845837404
35	828	472	830	469	3.605551275	0.566316954

ตาราง 46 (ต่อ)

เส้นใย	x_1	y_1	x_2	y_2	d (pixel)	d (μm)
36	252	138	255	140	3.605551275	0.566316954
37	540	351	541	355	4.123105626	0.647608213
38	818	557	820	560	3.605551275	0.566316954
39	878	600	880	604	4.472135955	0.702429731
40	491	547	490	550	3.16227766	0.496692826
41	413	460	412	464	4.123105626	0.647608213
42	551	395	554	393	3.605551275	0.566316954
43	855	250	859	252	4.472135955	0.702429731
44	405	392	408	396	5	0.785340314
45	487	426	490	423	4.242640687	0.666383354
46	816	565	818	568	3.605551275	0.566316954
47	882	593	883	598	5.099019514	0.800893117
48	253	135	255	138	3.605551275	0.566316954
49	498	443	500	447	4.472135955	0.702429731
50	680	671	683	673	3.605551275	0.566316954
				Average	4.218940849	0.662660866
				STD	0.571908827	0.089828612

ประวัติย่อผู้วิจัย

ประวัติย่อผู้วิจัย

ชื่อ ชื่อสกุล	นางสาว ศุภวัลย์ โตเกียรติวงศ์ชัย
วันเดือนปีเกิด	25 ตุลาคม 2527
สถานที่เกิด	เขต ป้อมปราบศัตรูพ่าย กรุงเทพมหานคร
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	169/69 ถ.แยกสวนสยาม แขวงคั่นนายาว เขตคั่นนายาว กรุงเทพมหานคร 10230

ประวัติการศึกษา

พ.ศ. 2545	มัธยมศึกษาตอนปลาย จาก โรงเรียนสตรีวิทยา 2
พ.ศ. 2549	วท.บ. (สาขาฟิสิกส์) จาก มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
พ.ศ. 2553	วท.ม. (สาขาฟิสิกส์) จาก มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ