

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

โครงการตั้งประดิษฐาน
กองทุนรัชดาภิเษกสมโภช

รายงาน

การประดิษฐานเครื่องปั้นสำริดด้วยไฟฟ้าสถิต

โดย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พิชญ์ ฤกษ์ผล

677.028
52
พ639 ก

ตุลาคม พ.ศ. 2545

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

โครงการสิ่งประดิษฐ์
กองทุนรัชดาภิเษกสมโภช

รายงาน

การประดิษฐ์เครื่องปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต

โดย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พิชญ์ สุภผล

ตุลาคม พ.ศ. 2545

กิตติกรรมประกาศ

ผู้ประดิษฐ์โครงการตั้งประดิษฐ์เครื่องปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตต้องขอขอบคุณ กองทุน รัชดาภิเษกสมโภช จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้การสนับสนุนเงินทุน ทำให้สามารถประดิษฐ์เครื่อง ปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี โดยสามารถนำไปใช้ในการผลิตเส้นใยที่มีขนาดเล็ก มากระดับนาโนเมตรได้ ซึ่งสามารถที่จะนำไปประยุกต์ใช้ในการผลิตวัสดุที่เป็นประโยชน์เพื่อใช้งาน วิจัยทางวิชาการและในอุตสาหกรรมต่างๆ ต่อไป

ผู้ประดิษฐ์ต้องขอขอบคุณวิทยาลัยปิโตรเลียมและปิโตรเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้การ สนับสนุนโครงการนี้ ทั้งทางด้านสถานที่ที่ทำการตั้งประดิษฐ์ เครื่องมือต่างๆ ที่ใช้ในโครงการ รวมทั้งเจ้าหน้าที่ของวิทยาลัยฯ ทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือโครงการนี้

นอกจากนี้ผู้ประดิษฐ์ต้องขอขอบคุณ บริษัท เอเซียไฟเบอร์ จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์เม็ด โพลอน 6 เพื่อใช้ในการทดสอบเครื่องปั่นเส้นใย รวมทั้งใช้ในการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการปั่น เส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตนี้



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ชื่อโครงการ การประดิษฐ์เครื่องปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตย์
 ชื่อผู้ดำเนินการ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พิชญ์ สุขผล
 เดือนและปีที่ทำเสร็จ ตุลาคม พ.ศ. 2545

บทคัดย่อ

เครื่องปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตสามารถผลิตเส้นใยที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กมากระดับนาโนเมตรได้ ผลึกภัณฑ์ที่ผลิตได้มีลักษณะเป็นแผ่นผ้าที่ไม่ได้ทอ มีอัตราส่วนของพื้นที่ผิวต่อปริมาตรของเส้นใยสูง มีรูพรุนขนาดเล็กมาก จึงสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้อย่างมากมาย เช่น ควบคุมการปลดปล่อยยา วัสดุตกแต่งแผล ทำแผ่นเชื่อมกันเพื่อใช้ในการกรองในอุตสาหกรรมต่างๆ เป็นต้น การทำงานของเครื่องปั่นเส้นใยนี้ประกอบไปด้วย เครื่องจ่ายไฟฟ้าแรงสูงที่สามารถปรับค่าปริมาณศักย์ไฟฟ้าได้ตั้งแต่ 0 ถึง 30 กิโลโวลต์ จะจ่ายศักย์ไฟฟ้าให้แก่สารละลายพอลิเมอร์โดยในโครงการนี้ใช้สารละลายไนลอน 6 ในกรดฟอร์มิกเข้มข้น 85% ซึ่งบรรจุอยู่ในหลอดฉีดยานิคแก้ว โดยมีเข็มฉีดยาทำหน้าที่เป็นอิเล็กโทรด และควบคุมการไหลของสารละลายพอลิเมอร์โดยใช้ตัวปรับควบคุมการไหลของก๊าซไนโตรเจน เมื่อศักย์ไฟฟ้ากำลังสูงที่ให้กับสารละลายไนลอน 6 สามารถเกิดแรงทางไฟฟ้าสูงกว่าแรงตึงผิวของสารละลายไนลอน 6 จะทำให้หยดของสารละลายที่บริเวณปลายเข็มฉีดยาเกิดการยืดตัวออก มีลักษณะรูปร่างเป็นรูปทรงกรวยและเกิดเป็นเส้นใยที่พุ่งออกจากปลายของทรงกรวยนั้น หลังจากนั้นจะแตกออกเป็นเส้นฝอย ได้เส้นใยไนลอน 6 ที่มีขนาดเล็กในช่วงประมาณ 60 ถึง 230 นาโนเมตรบนแผ่นอลูมิเนียมที่รองรับเส้นใย ซึ่งขนาดของเส้นใยที่ปั่นได้จะเพิ่มขึ้นตามความหนืดของสารละลายที่เพิ่มขึ้น

สถาบันวิทยบริการ
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Project Title Electrospinning Machine
Name of the Investigator Assist. Pitt Supaphol, Ph.D.
Year October 2002

Abstract

Electrospinning machine can produce fibers with diameter in the nanometer range. The non-woven fabrics were formed and possess high surface-to-volume ratio. The electrospun fibers can be used in several applications such as for drug delivery system, wound dressing material, filter membrane for industries. The principle of this machine is the applied electric field from high voltage power supply which can adjust the amount of voltage from 0 to 30 kV are applied to polymer solution which served by nylon 6 solution in formic acid 85% contained in glass syringe through the needle which serve as electrode. Whenever the applied electrical force overcome the surface tension of solutions, the shape of the solution will change to cone shape or Taylor cone, and the jet will eject. And the splaying phenomenon will occur. The as-received fibers are in the range of 60 to 230 nanometer. The average diameter of the electrospun fibers are increased with increasing the viscosity of the solution.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ii
บทคัดย่อภาษาไทย	iii
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	iv
สารบัญ	v
รายการตารางประกอบ	vi
รายการภาพประกอบ	vii
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 แนวความคิดของการประดิษฐ์	4
บทที่ 3 วิธีการประดิษฐ์ การทดสอบ การใช้งาน	8
3.1 วิธีการประดิษฐ์	8
3.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการประดิษฐ์	8
3.1.2 การต่อชุดอุปกรณ์เครื่องปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต	12
3.2 การทดสอบ	13
3.3 การใช้งาน	14
3.3.1 การเตรียมสารละลาย	14
3.3.2 การปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต	14
3.3.3 การศึกษาลักษณะและขนาดของเส้นใย	14
บทที่ 4 การอภิปรายผล	16
4.1 สมบัติของสารละลายไนลอน 6	16
4.2 การศึกษาลักษณะเส้นใยไนลอน 6 ที่ได้จากเครื่องปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต	18
4.3 การศึกษาขนาดของเส้นใยไนลอน 6 ที่ได้จากเครื่องปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต	22
บทที่ 5 ข้อสรุป	25
บทที่ 6 ข้อเสนอแนะ	27
เอกสารอ้างอิง	28
ภาคผนวก	29

รายการตารางประกอบ

ตารางที่	หน้า
4.1 ค่าความหนืดและแรงดึงผิวของสารละลายไนลอน 6 ที่ความเข้มข้นในช่วงตั้งแต่ 10 ถึง 46 % โดยน้ำหนัก	16
4.1 ค่าความหนืดและแรงดึงผิวของสารละลายไนลอน 6 ที่ความเข้มข้นในช่วงตั้งแต่ 10 ถึง 46 % โดยน้ำหนัก (ต่อ)	17
4.2 ผลของค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยไนลอน 6 ที่ได้จากการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต ที่ความเข้มข้นในช่วงตั้งแต่ 30 ถึง 46 % โดยน้ำหนัก	23

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการภาพประกอบ

ภาพที่	หน้า
2.1	5
3.1	9
3.2	10
3.3	11
3.4	12
3.5	12
3.6	13
3.7	15
4.1	17
4.2	18
4.2	19
4.2	20
4.2	21
4.3	23
4.4	24



บทที่ 1

บทนำ

เส้นใยได้เข้ามามีบทบาทต่อชีวิตความเป็นอยู่ของมนุษย์อย่างต่อเนื่องเป็นเวลานาน สามารถนำมาถักทอเป็นเครื่องนุ่งห่มเพื่อให้ความอบอุ่นแก่ร่างกาย และผลิตเป็นผลิตภัณฑ์อื่นๆ ที่ใช้ในชีวิตประจำวัน เช่น ผ้าปูที่นอน ปลอกหมอน ผ้าห่ม ผ้า màn ถุงเท้า เป็นต้น นอกจากนั้นยังนำไปใช้ในงานอุตสาหกรรม งานทางการแพทย์ และโครงการบินอวกาศอีกด้วย ตัวอย่างเช่น ทำสายพาน ทำเข็มขัดนิรภัยในรถยนต์ ทำชุดนักบินอวกาศ เป็นต้น ในสมัยก่อนนั้น มนุษย์ได้ใช้ผลิตภัณฑ์เส้นใยธรรมชาติจากพืชและสัตว์ ได้แก่ ขนสัตว์ ฝ้าย ลินิน ไหม มาใช้ทำเป็นเครื่องนุ่งห่มและผลิตภัณฑ์อื่นๆ⁽¹⁾ แต่เนื่องจากเส้นใยธรรมชาติมีสมบัติที่ไม่หลากหลาย ไม่สามารถตอบสนองต่อการนำเส้นใยไปใช้ประโยชน์ตามที่มนุษย์ต้องการได้ ทำให้เส้นใยสังเคราะห์ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อตอบสนองต่อความต้องการดังกล่าว โดยการพัฒนาเส้นใยสังเคราะห์นี้เริ่มตั้งแต่การพัฒนาเส้นใยไนลอนโดย W.H. Carothers ในปี พ.ศ. 2482 และหลังจากนั้นมาเส้นใยสังเคราะห์ประเภทอื่นๆ ได้ถูกคิดค้นและพัฒนาอย่างต่อเนื่อง เช่น เส้นใยพอลิเอสเตอร์ เส้นใยพอลิโพรพิลีน เป็นต้น แต่เนื่องจากนักวิจัย ยังมีความต้องการที่จะผลิตเส้นใยให้มีสมบัติเฉพาะ สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานให้ได้ดียิ่งขึ้น การวิจัยและพัฒนาเส้นใยที่มีสมบัติพิเศษ (High performance fibers) จึงเกิดขึ้น เส้นใยประเภทเหล่านี้ ตัวอย่างเช่น เส้นใยที่มีความแข็งแรงสูง เส้นใยที่ทนต่อการเผาไหม้ เส้นใยที่ทนต่อการกัดกร่อนของสารเคมี เป็นต้น นอกจากการวิจัยและพัฒนาเส้นใยดังกล่าว การผลิตเส้นใยที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางขนาดเล็กมาก (Ultra-fine fibers) ด้วยเทคนิคต่างๆ ก็เป็นอีกเทคโนโลยีหนึ่งที่นักวิจัยได้คิดค้นและพัฒนาขึ้น⁽²⁾

การผลิตเส้นใยที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางขนาดเล็กมากนี้ จะทำให้ได้เส้นใยที่มีความยืดหยุ่น มีพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้น และทำให้ผลิตเส้นด้ายที่มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นด้วยเนื่องจากมีปริมาณของเส้นใยภายในเส้นด้ายเพิ่มขึ้น ดังนั้นจะทำให้ผ้าที่ผลิตได้มีความอ่อนนุ่ม มีความคงรูปดี มีความเงางาม และมีความแข็งแรงสูง การผลิตเส้นใยประเภทนี้สามารถผลิตได้โดยตรงจากกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยวิธีทั่วไป ได้แก่ กระบวนการปั่นเส้นใยจากพอลิเมอร์หลอมเหลว (Melt-spinning) และกระบวนการปั่นเส้นใยจากสารละลายพอลิเมอร์ (Solution-spinning) โดยอาจลดปริมาณของของเหลวที่ออกมาจากหัวฉีด (Spinneret) หรืออาจเพิ่มอัตราเร็วในการดึงยึด (Draw ratio) นอกจากนั้นการผลิตเส้นใยที่ประกอบไปด้วยพอลิเมอร์สองชนิดขึ้นไปภายในเส้นใยเส้นเดียวโดยวิธีการรีด (Extrusion) หลังจากนั้นจึงแยกเอาพอลิเมอร์ที่ต้องการผลิตเป็นเส้นใยออก ก็เป็นอีกวิธีหนึ่งที่สามารถผลิตเส้นใยขนาดเล็กตามที่ต้องการได้ สำหรับวิธีการนี้ เส้นใยที่ประกอบไปด้วยพอลิเมอร์หลายชนิดนี้สามารถผลิตให้มีลักษณะการจัดเรียงตัวของพอลิเมอร์ภายในเส้นใยได้หลายรูปแบบ ได้แก่ Island-in-a-sea type, Separation type และ Multi-layer type สำหรับรูปแบบประเภท

Island-in-a-sea สามารถแยกพอลิเมอร์ที่ต้องการผลิตเส้นใยได้โดยละลายพอลิเมอร์ส่วนที่ไม่ต้องการออกด้วยตัวทำละลาย ส่วนประเภท Separation และ Multi-layer สามารถแยกพอลิเมอร์ที่ต้องการผลิตเป็นเส้นใยออกด้วยวิธีการเชิงกล หรือทางเคมี⁽³⁾

จากวิธีการผลิตเส้นใยที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางขนาดเล็กมาก ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น เป็นวิธีที่ค่อนข้างยุ่งยาก และมีราคาแพง ต้องใช้เครื่องมือในการผลิตที่มีราคาสูง และอีกทั้งนักวิจัยยังมีความต้องการที่จะผลิตเส้นใยให้มีขนาดเล็กมากขึ้นไปอีก จึงทำให้การปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต (Electrospinning หรือ Electrostatic spinning) ถูกพัฒนาขึ้นมา ทั้งนี้เนื่องจากกระบวนการนี้สามารถผลิตเส้นใยที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางขนาดเล็กถึงระดับนาโนเมตรหรือที่เรียกว่านาโนไฟเบอร์(Nanofibers) ซึ่งวิธีการอื่นๆ ยังไม่สามารถผลิตได้ เทคนิคการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตนี้พัฒนามานานแล้ว โดยเริ่มตั้งแต่ปี พ.ศ. 2477 ซึ่งเป็นเวลากว่า 60 ปีมาแล้ว โดย A. Formhals ได้ประดิษฐ์อุปกรณ์เพื่อใช้ในการปั่นเส้นใยเซลลูโลสอะซิเตต (Cellulose acetate) โดยใช้กระแสไฟฟ้าสถิต และได้จดลิขสิทธิ์ไว้ ต่อจากนั้นมาก็มีการจดลิขสิทธิ์สำหรับกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตอีกประมาณ 50 ฉบับทั้งในเรื่องอุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิต และการประยุกต์ใช้งานของเส้นใยที่ผลิตได้ด้วยกระบวนการนี้⁽⁴⁾ แต่กระบวนการผลิตเส้นใยด้วยเทคนิคนี้ยังไม่มีการผลิตในเชิงพาณิชย์ ทำให้หลายปีที่ผ่านมา นักวิจัยในต่างประเทศทั้งจากภาครัฐ และภาคเอกชน พยายามที่จะศึกษาค้นคว้าวิจัยเทคนิคการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตด้วยกันมาก ทั้งในเรื่องการพัฒนาเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิต กลไกการเกิดเส้นใย การปั่นเส้นใยจากพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ และการศึกษาผลของปัจจัยต่างๆ ของกระบวนการที่มีผลต่อโครงสร้างและสมบัติของเส้นใย

กระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตนี้เป็นกระบวนการที่ไม่ยุ่งยากซับซ้อน และมีราคาถูก เนื่องจากใช้อุปกรณ์ในการผลิตจำนวนน้อย อีกทั้งปริมาณของพอลิเมอร์ที่นำมาปั่นเส้นใยก็ใช้ในปริมาณที่น้อยอีกด้วย นอกจากนี้ยังใช้ระยะเวลาในการผลิตสั้นเพราะความเร็วในการปั่นเป็นเส้นใยสูง ผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้จะมีลักษณะเป็นแผ่นผ้าที่ไม่ได้ทอ(Non-woven web) ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้โดยตรง ส่วนสมบัติของนาโนไฟเบอร์ที่ปั่นได้จากกระบวนการนี้จะมีอัตราส่วนของความยาวต่อเส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นใยสูง มีอัตราส่วนของพื้นที่ผิวต่อปริมาตรของเส้นใยสูง และแผ่นผ้าที่ได้มีลักษณะเหมือนเป็นแผ่นเยื่อ (Membrane) ที่มีรูพรุนขนาดเล็กระดับไมโครเมตร (Microporous) มีความเป็นรูพรุนสูง (High porosity) และมีน้ำหนักเบา⁽⁵⁾ จากข้อคิดดังกล่าวนาโนไฟเบอร์จึงสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้อย่างมากมาย ได้แก่ ใช้เป็นวัสดุอุปกรณ์ทางการแพทย์ (เช่น วัสดุตกแต่งแผล วัสดุควบคุมการปลดปล่อยยา เป็นต้น) ใช้เป็นวัสดุทางการแพทย์โดยควบคุมการปลดปล่อยยาฆ่าแมลงให้แก่พืช สามารถนำมาผลิตเป็นเสื้อผ้าที่ป้องกันสารเคมีหรือจุลินทรีย์ได้ (เช่น ชุดที่ใช้ในห้องผ่าตัด ชุดทหารที่ต้องการป้องกันสารเคมี เป็นต้น) ใช้เป็นเส้นใย

เสริมกำลัง (Reinforcing fibers) ในวัสดุคอมโพสิตทำให้ได้วัสดุที่มีน้ำหนักเบาและมีความแข็งแรงสูง และผลิตภัณฑ์อื่นๆ อีกมากมาย⁽⁶⁾

จากที่กล่าวมาแล้วทั้งหมด ทั้งข้อดีของกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสติดเอง อีกทั้งสมบัติที่ดี และการนำไปใช้ประโยชน์นานัปการของนาโนไฟเบอร์ ทำให้โครงการนี้จึงเกิดขึ้นเพื่อที่จะผลิตเครื่องมือที่ใช้ในการปั่นเส้นใยที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็ก รวมทั้งศึกษาปัจจัยของกระบวนการ ได้แก่ ความเข้มข้นของสารละลายพอลิเมอร์ ที่มีผลต่อรูปร่างและโครงสร้างของเส้นใย สำหรับเครื่องมือและกระบวนการผลิตของเทคนิคนี้ยังไม่มีการศึกษากันภายในประเทศ โครงการนี้จึงคาดว่าจะจะเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี รวมทั้งอุตสาหกรรมสิ่งทอไทย

สำหรับวัตถุประสงค์ของโครงการตั้งประคิษฐ์เครื่องปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสติดนี้มีดังนี้

1. เพื่อออกแบบและประดิษฐ์เครื่องมือที่ใช้ในการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสติด
2. เพื่อทดสอบเครื่องปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสติดในช่วงของศักย์ไฟฟ้าตั้งแต่ 5 ถึง 25 kV โดยการผลิตเส้นใยจากสารละลายพอลิเมอร์บางชนิด เช่น ไนลอน เป็นต้น
3. เพื่อศึกษารูปร่าง โครงสร้าง และขนาดของเส้นใย ที่ผลิตได้จากกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสติด

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

แนวความคิดของการประดิษฐ์

การผลิตเส้นใยด้วยวิธีการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต เป็นกระบวนการผลิตเส้นใยให้มีเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กมากระดับนาโนเมตร พอลิเมอร์ที่ใช้ในการผลิตสามารถใช้ได้ทั้งพอลิเมอร์หลอมเหลว (Polymer melts) หรือสารละลายพอลิเมอร์ (Polymer solutions) ก็ได้ โดยพอลิเมอร์ที่เป็นของเหลว (Polymer fluid) เหล่านี้ จะถูกบรรจุอยู่ในภาชนะที่มีลักษณะเป็นหลอดคาปิลลารี ซึ่งอาจมีหลายลักษณะด้วยกัน เช่น เข็มฉีด ยา ปิเปต เป็นต้น โดยบริเวณปลายหลอดด้านในควรมีเส้นผ่านศูนย์กลางที่เล็กขนาดประมาณ 1 มิลลิเมตร หรืออาจเล็กกว่าก็ได้ ในกระบวนการผลิตอาจมีระบบควบคุมการไหลเพื่อที่จะควบคุมอัตราการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลวออกจากปลายหลอดคาปิลลารีให้คงที่ ในส่วนของไฟฟ้ากำลังสูง (High voltage) จะถูกส่งมาจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าแรงสูง (High voltage power supply) ที่สามารถปรับค่าได้ในช่วงประมาณ 5 ถึง 25 กิโลโวลต์ และเป็นไฟฟ้ากระแสตรง ทั้งนี้เนื่องจากกระบวนการนี้ต้องการควบคุมการเกิดเส้นใยและต้องการให้เส้นใยที่ได้มีเส้นผ่านศูนย์กลางที่คงที่ นอกจากนี้กระแสไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงนี้ควรมีค่าต่ำอยู่ในระดับไมโครแอมป์ เพื่อที่จะป้องกันอันตรายที่อาจเกิดขึ้นได้ ไฟฟ้ากำลังสูงนี้จะถูกส่งมายังพอลิเมอร์ที่เป็นของเหลวโดยผ่านอิเล็กโทรด (Electrode) ซึ่งทำด้วยวัสดุที่เป็นโลหะ เช่น ทองแดง หรือเหล็กไร้สนิม (Stainless steel) เป็นต้น อิเล็กโทรดนี้จะจุ่มอยู่ในพอลิเมอร์เหลว โดยสนามไฟฟ้าจะเกิดขึ้นระหว่างปลายของหลอดคาปิลลารี และแผ่นโลหะที่เป็นตัวรองรับเส้นใย (Grounded collector) ซึ่งมีได้หลายลักษณะ เช่น เป็นแผ่นอลูมิเนียม เป็นลูกกลิ้งที่หมุนได้และห่อหุ้มด้วยแผ่นอลูมิเนียม เป็นตะแกรงโลหะ เป็นอ่างน้ำ เป็นต้น

เมื่อใดก็ตามที่ไฟฟ้ากำลังสูงที่ป้อนให้กับพอลิเมอร์หลอมเหลวหรือสารละลายพอลิเมอร์สามารถทำให้เกิดแรงทางไฟฟ้า (Electrical force) สูงกว่าแรงตึงผิว (Surface tension) ของพอลิเมอร์ที่เป็นของเหลว จะทำให้หยดของพอลิเมอร์ที่บริเวณปลายหลอดคาปิลลารีเกิดการยืดตัวออก มีลักษณะรูปร่างเป็นรูปทรงกรวย (Cone shape) หรือที่เรียกว่า Taylor cone และจะเกิดเป็นเส้นที่พุ่ง (Jet) ออกจากปลายของกรวยของเหลวนั้น หลังจากนั้นจะแตกออกเป็นเส้นฝอย (Splaying) ได้เป็นนาโนไฟเบอร์ ฉีดลงสู่แผ่นโลหะรองรับ โดยตัวทำละลายจะระเหยออกไปหมด ในกรณีที่ตัวทำละลายพอลิเมอร์เป็นตัวทำละลายชนิดที่ไม่สามารถระเหยได้ (Non-volatile solvent) จะใช้น้ำหรือสารละลายเคมีชนิดอื่นเป็นตัวรองรับเส้นใย เพื่อเป็นการแยกเอาตัวทำละลายออกจากเส้นใย⁽⁷⁾

จากที่กล่าวมาแล้วข้างต้น สามารถแบ่งช่วงของการเกิดนาโนไฟเบอร์ตั้งแต่ปลายหลอดคาปิลลารีจนกระทั่งถึงแผ่นรองรับเส้นใย ได้เป็น 4 ช่วงด้วยกัน คือ ช่วงฐาน (Base region) ช่วงเกิดเส้นพุ่ง (Jet region) ช่วงพ่นเป็นฝอย (Splaying) และ ช่วงรองรับ (Collection region)⁽⁸⁾

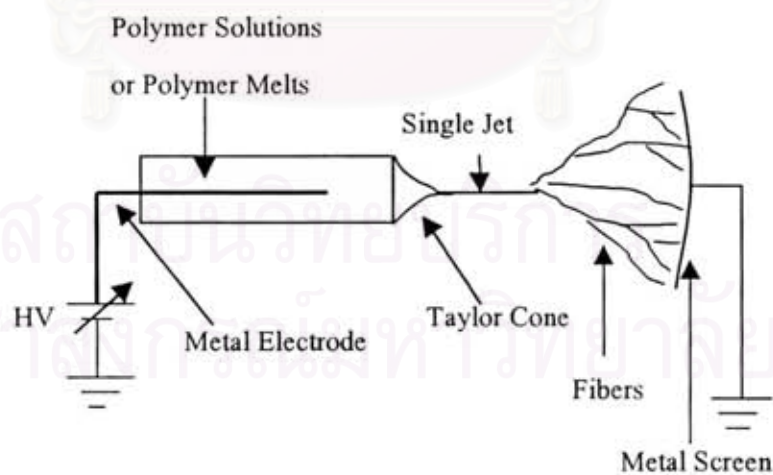
ช่วงฐาน (Base region) เป็นช่วงเริ่มต้นเมื่อพอลิเมอร์เหลวที่ออกจากปลายหลอดคาปิลลารี มีรูปร่างเป็นทรงกรวย โดยความเร็วของของเหลวที่ถูกดึงยึดออกจะเพิ่มไปตามแนวแกนของเส้นพุ่ง

ช่วงเกิดเส้นพุ่ง (Jet region) เป็นช่วงที่เส้นพุ่งถูกดึงออกจากปลายทรงกรวยไปยังแผ่นรองรับ โดยถูกแรงทางไฟฟ้าดึงยึดต่อไปอีก ทำให้เส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นพุ่งลดลงไปตามความยาวของเส้นพุ่งนั้น แต่ยังคงรักษาปริมาณของพอลิเมอร์ที่หลอมเหลวให้คงที่ตลอดช่วง

ช่วงพ่นเป็นฝอย (Splaying region) ช่วงนี้เกิดขึ้นเนื่องมาจากการที่เส้นพุ่งถูกดึงด้วยแรงทางไฟฟ้า และเกิดการระเหยของตัวทำละลาย เป็นสาเหตุให้เส้นพุ่งมีเส้นผ่าศูนย์กลางที่เล็กลง แรงทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากประจุไฟฟ้าตามแนวรัศมีภายในเส้นพุ่งจึงมากกว่าแรงยึดเหนี่ยว (Cohesive forces) ภายในเส้นพุ่ง ทำให้เส้นพุ่งแตกออกเป็นเส้นเล็กๆ หลายเส้น

ช่วงรองรับ (Collection region) เป็นบริเวณที่เส้นพุ่งที่แตกออกเป็นฝอยนั้นหยุดการเคลื่อนที่ ทำให้ได้เส้นใยซึ่งตัวทำละลายได้ระเหยไปหมดแล้ว สะสมอยู่บนแผ่นโลหะรองรับ

หลักการของกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตแสดงดังในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 หลักการของกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต⁽⁶⁾

ในงานวิจัยที่ผ่านมา มีพอลิเมอร์หลายชนิดที่ถูกนำมาผลิตด้วยกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต Srinivasan⁽⁹⁾ ได้ผลิตนาโนไฟเบอร์ของพอลิพาราฟีนิลลีนเทรฟทาเอไมด์ (Poly(p-phenylene terephthalamide) (PPTA)) และพอลิอะนิลีน (Polyaniline (PA)) โดยวิธีการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตนี้ พอลิเมอร์ทั้งสองชนิดเป็นพอลิเมอร์นำไฟฟ้า (Electrically conducting polymers) สารละลายพอลิเมอร์สามารถเตรียมได้โดยใช้กรดซัลฟูริก (Sulfuric acid) เป็นตัวทำละลายและบรรจุอยู่ในหลอดคาปิลลารีซึ่งมีปั๊มสุญญากาศเป็นตัวควบคุมการไหลของสารละลาย เมื่อป้อนไฟฟ้าแรงสูงในช่วง 12 ถึง 18 กิโลโวลต์แก่สารละลาย ทำให้เกิดแรงทางไฟฟ้า (Electrical forces) และเมื่อแรงนี้มีมากกว่าแรงตึงผิว (Surface tension) ของสารละลายพอลิเมอร์ จะทำให้เกิดเส้นใยได้ โดยตัวทำละลายจะถูกกำจัดออกภายในอ่างน้ำ (Water bath) เส้นใยที่ได้มีขนาดอยู่ในช่วง 40 ถึงประมาณ 300 นาโนเมตร และนำมาศึกษารูปร่างและโครงสร้างของเส้นใยด้วยเครื่องทรานสมิชชันอิเล็กตรอนไมโครสโคป (Transmission electron microscope) และเครื่องอิเล็กตรอนดิฟแฟร็กโทรมิเตอร์ (Electron diffractometer) ซึ่งพบว่ามีผลึกอยู่ในโครงสร้าง และผลจากอิเล็กตรอนดิฟแฟร็กชัน (Electron diffraction) ยังพบว่าเหมือนกับเส้นใยที่ผลิตในทางการค้า

Kim และ Reneker⁽¹⁰⁾ ได้ผลิตนาโนไฟเบอร์ของพอลิเบนซิมิดาโซล (Polybenzimidazole [Poly(2,2'-(m-phenylene)-5,5'-bibenzimidazole)](PBI)) โดยวิธีการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต ได้ผลิตกัณฑ์มีลักษณะเป็นผ้าที่ไม่ได้ทอ (Non-woven fabrics) เส้นใยที่ได้มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 300 นาโนเมตร ในกระบวนการผลิตจะละลายพอลิเบนซิมิดาโซล ด้วยเอ็นเอ็นไดเมทิลอะซิตาไมด์ (N,N-dimethylacetamide) และบรรจุในปิเปต สนามไฟฟ้าเกิดขึ้นเมื่อศักย์ไฟฟ้าแรงสูงในช่วง 10 ถึง 25 กิโลโวลต์ ถูกป้อนผ่านอิเล็กโทรดโลหะ (Metal Electrode) ที่จุ่มอยู่ในสารละลายพอลิเมอร์ และเส้นใยจะถูกฉีดพุ่งออกเมื่อแรงทางไฟฟ้ามีค่ามากกว่าแรงตึงผิวของสารละลาย หลังจากนั้นสารละลายจะระเหยออกไปหมด ทำให้ได้เส้นใยที่แห้งและแข็งตัว (Solidified) ตกลงบนแผ่นอลูมิเนียมที่หุ้มบนลูกกลิ้ง อัตราการปั่นเส้นใยสามารถปรับได้จากความแรงของสนามไฟฟ้าและอัตราการไหลของสารละลายพอลิเมอร์ ขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นใยวัดได้จากเครื่องอะตอมมิกฟอร์สไมโครสโคป (Atomic force microscope) และเครื่องทรานสมิชชันอิเล็กตรอนไมโครสโคป (Transmission electron microscope)

Fang และ Reneker⁽¹¹⁾ ได้ใช้เทคนิคการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตนี้ในการผลิตเส้นใยดีเอ็นเอ (DNA) ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ทางชีวภาพ ได้เส้นใยที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเล็กมากอยู่ในช่วงประมาณ 50 ถึง 80 นาโนเมตร และจากการศึกษาขนาดและรูปร่างของเส้นใยด้วยเครื่องออปติคอลไมโครสโคป (Optical microscope), กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope) และเครื่องทรานสมิชชันอิเล็กตรอนไมโครสโคป (Transmission electron microscope) ยังพบว่าเกิดเม็ดบีด (Bead) บนเส้นใยอีกด้วย

นอกจากพอลิเมอร์ดังที่กล่าวมาแล้วสามารถนำมาผลิตเป็นเส้นใยที่มีขนาดเล็กด้วยวิธีการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต ยังมีพอลิเมอร์อีกหลายชนิดที่ได้ผลิตเป็นเส้นใยด้วยเทคนิคนี้ ตัวอย่างเช่น พอลิเอทิลีนออกไซด์ (Poly(ethylene oxide)) พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Poly(vinyl alcohol) เซลลูโลสอะซิเตต (Cellulose acetate) พอลิแลคติกแอซิด (Poly(lactic acid) พอลิอะคริโลไนไทรล์ (Poly(acrylonitrile)) เป็นต้น^(5,12)

การศึกษามลของปัจจัยต่างๆ ที่มีต่อกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตยังเป็นอีกแนวทางหนึ่งที่ได้มีการทำวิจัย ทั้งนี้เนื่องจากปัจจัยเหล่านี้สามารถควบคุมกระบวนการผลิตเพื่อให้ได้เส้นใยที่มีขนาดและรูปร่างตามที่ต้องการได้ ดังเช่น Deitzel และคณะ⁽¹³⁾ ได้ทำการวิจัยศึกษาผลของปัจจัยของกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตที่มีต่อโครงสร้างของนาโนไฟเบอร์ โดยใช้พอลิเอทิลีนออกไซด์ (Poly(ethylene oxide) (PEO)) น้ำหนักโมเลกุล 400,000 กรัม/โมล ละลายในน้ำเป็นสารละลายพอลิเมอร์ที่นำมาศึกษา ความเข้มข้นของสารละลายพอลิเมอร์ที่ศึกษาอยู่ในช่วง 4 ถึง 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และปริมาณของศักย์ไฟฟ้าอยู่ในช่วง 5.5 ถึง 15.0 กิโลโวลต์ จากการวิจัยพบว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยเพิ่มขึ้นเมื่อสารละลายพอลิเมอร์มีความเข้มข้นสูงขึ้น และศักย์ไฟฟ้ามีค่าต่ำ โดยหากศักย์ไฟฟ้ามีค่าต่ำก็จะก่อให้เกิดเม็ดบิด (Bead) ขึ้นบนเส้นใยเพิ่มขึ้นด้วย

Baumgarten⁽¹⁴⁾ ได้ผลิตเส้นใยพอลิอะคริโลไนไทรล์ (Polyacrylonitrile) ด้วยเทคนิคนี้ โดยใช้ไดเมทิลฟอร์มามิด (Dimethyl formamide) เป็นตัวทำละลายพอลิเมอร์ และได้ศึกษามลของปัจจัยต่างๆ ที่มีต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง และความยาวของเส้นพุ่ง (jet) โดยปัจจัยเหล่านี้ได้แก่ ความเข้มข้นของสารละลายพอลิเมอร์ การเปลี่ยนแปลงสภาพบรรยากาศขณะทำการปั่นเส้นใย อัตราการไหลของสารละลายพอลิเมอร์ และปริมาณของศักย์ไฟฟ้า จากการวิจัยนี้พบว่าการเกิดเส้นใยที่มีขนาดเล็กมากจะพบที่สารละลายที่มีความเข้มข้น 7.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก หรือมีความหนืดของสารละลาย 1.7 พอยซ์ (poise) จนกระทั่งถึงความเข้มข้น 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก หรือมีความหนืดของสารละลาย 215 พอยซ์ และพบว่าที่ความเข้มข้นของสารละลาย 17.5 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งเป็นความเข้มข้นของสารละลายที่มีความหนืดสูงจึงทำให้ตัวทำละลายระเหยออกจากเส้นใยไม่สมบูรณ์จึงทำให้เส้นใยเกิดติดกันขณะทำการปั่นเส้นใย ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยที่ผลิตได้เพิ่มขึ้นเมื่อความหนืดของสารละลายพอลิเมอร์สูงขึ้น

บทที่ 3

วิธีการประดิษฐ์ การทดสอบ การใช้งาน

3.1 วิธีการประดิษฐ์

3.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการประดิษฐ์

เครื่องป้อนเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตย์สามารถจัดแบ่งอุปกรณ์ที่ใช้ในการประดิษฐ์ออกเป็น 5 ส่วนด้วยกัน ได้แก่

1. อุปกรณ์จ่ายไฟฟ้าแรงสูง ที่สามารถปรับขนาดของไฟฟ้าได้ตั้งแต่ 0 ถึง 30 กิโลโวลต์
2. อุปกรณ์ที่บรรจุสารละลายพอลิเมอร์
3. อิเล็กโทรด เป็นอุปกรณ์ส่งผ่านไฟฟ้าไปยังสารละลายพอลิเมอร์
4. อุปกรณ์ควบคุมการไหลของสารละลายพอลิเมอร์
5. อุปกรณ์รองรับเส้นใยที่ปั่นได้

การออกแบบ และการจัดเตรียมอุปกรณ์ทั้ง 5 ส่วนนี้ มีรายละเอียด ดังนี้

3.1.1.1 อุปกรณ์จ่ายไฟฟ้าแรงสูง

โดยทั่วไปศักย์ไฟฟ้าที่จ่ายให้กับสารละลายพอลิเมอร์สำหรับการป้อนเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตย์นี้จะมีค่าอยู่ในช่วงตั้งแต่ 5 ถึง 30 กิโลโวลต์ ดังนั้นเครื่องจ่ายไฟฟ้าแรงสูง (High voltage power supply) สามารถปรับค่าได้ตั้งแต่ 0 ถึง 30 กิโลโวลต์ และมีศักย์ไฟฟ้าออกเป็นศักย์ไฟฟ้าตรง (DC) และเนื่องจากเครื่องจ่ายไฟฟ้าแรงสูงขนาด 30 กิโลโวลต์และเป็นศักย์ไฟฟ้าตรงนี้ ไม่มีผลิตในประเทศไทย ทางผู้ประดิษฐ์จึงสั่งซื้อจากบริษัท GAMMA HIGH VOLTAGE RESEARCH ซึ่งเป็นบริษัทออกแบบและผลิตเครื่องจ่ายไฟฟ้าแรงสูงโดยเฉพาะ โดยรายละเอียดของสถานที่ตั้งบริษัท และของเครื่องจ่ายไฟฟ้าแรงสูงนี้มีดังนี้

สถานที่ตั้งบริษัท : 1096 NORTH U.S. HIGHWAY #1, ORMOND BEACH, FLORIDA 32174,
USA

รุ่นของเครื่อง : Gamma model D-ES30PN/M692

คุณลักษณะของเครื่อง :

Input Voltage : 90-240 VAC ; 50-60 Hz

Output Voltage : ศักย์ไฟฟ้าออกสามารถจ่ายไฟได้ทั้งชนิดบวก (Positive Supply) หรือ ชนิดลบ (Negative Supply) โดยสามารถปรับค่าได้ตั้งแต่ 0 ถึง 30 กิโลโวลต์ หรือ 0 ถึง -30 กิโลโวลต์

Output Current : 200 ไมโครแอมป์ ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำ เหมาะสมกับการนำมาใช้งานเนื่องจากจะไม่เป็นอันตรายต่อผู้ใช้งาน

ขนาดของเครื่อง : สูง 5 นิ้ว, กว้าง 8 นิ้ว, ยาว 10 นิ้ว
ลักษณะของเครื่องจ่ายไฟฟ้าแรงสูงนี้แสดงดังในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 เครื่องจ่ายไฟฟ้าแรงสูง (High voltage power supply)

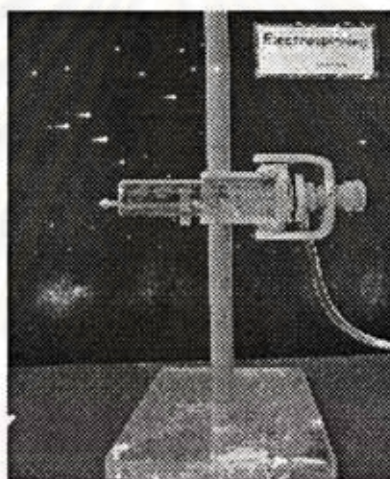
3.1.1.2 อุปกรณ์บรรจุสารละลายพอลิเมอร์

หลอดฉีดยาชนิดแก้ว (glass syringe) ขนาด 50 มิลลิลิตร นำมาใช้เป็นหลอดคาบิลลารีซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ใช้บรรจุสารละลายพอลิเมอร์ ปริมาณสารละลายพอลิเมอร์ที่ให้อยู่ในช่วงประมาณ 10-50 มิลลิลิตร ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณของเส้นใยที่ต้องการได้รับ นอกจากหลอดฉีดยาชนิดแก้วแล้ว ปีเปตเป็นอุปกรณ์อีกชนิดหนึ่งที่สามารถนำมาใช้บรรจุสารละลายพอลิเมอร์ได้ โดยในช่วงแรกของการประดิษฐ์ ปีเปตขนาด 1 มิลลิลิตรได้นำมาใช้เป็นหลอดคาบิลลารีและจุ่มเส้นลวดทองแดงซึ่งทำหน้าที่เป็นอิเล็กโทรดลงในสารละลายพอลิเมอร์ แต่อาจเนื่องจากปลายหลอดปีเปตมีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดกว้าง เมื่อนำไปทดสอบการปั่นเส้นใยจึงทำให้มีหยดของสารละลายพอลิเมอร์ปนกับเส้นใยจำนวนมาก ดังนั้นทางผู้ประดิษฐ์จึงใช้หลอดฉีดยาชนิดแก้วเป็นอุปกรณ์ที่ใช้บรรจุสารละลายพอลิเมอร์แทน

ในชุดอุปกรณ์นี้ได้จัดทำอุปกรณ์สำหรับวางหลอดฉีดยาซึ่งทำจากพลาสติก โดยสามารถปรับการวางหลอดฉีดยาจากแนวตั้งเป็นแนวนอนได้ และสามารถปรับระดับความสูงของหลอดฉีดยาจากฐานล่างได้ เพื่อจะได้นำไปศึกษาผลของขนาดเส้นใยที่มีต่อระยะทางระหว่างปลายเข็มฉีดยากับแผ่นรองรับเส้นใย โดยอุปกรณ์สำหรับวางหลอดฉีดยานี้จำเป็นต้องทำด้วยวัสดุที่เป็นพลาสติก เพื่อป้องกันการนำไฟฟ้า

3.1.1.3 อิเล็กโทรด

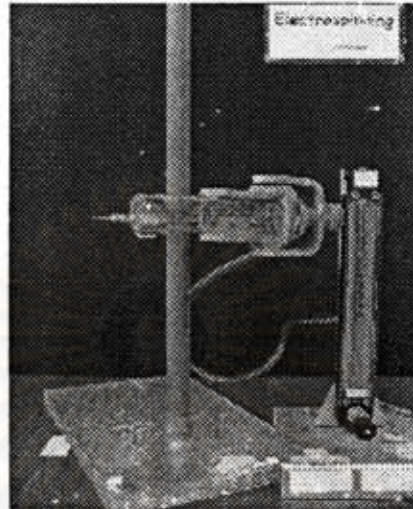
ทำหน้าที่เป็นตัวส่งผ่านศักย์ไฟฟ้าไปยังสารละลายพอลิเมอร์ ดังนั้นวัสดุที่ใช้ควรเป็นโลหะ และเนื่องจากในการประดิษฐ์นี้ใช้หลอดฉีดยาเป็นอุปกรณ์บรรจุสารละลายพอลิเมอร์ จึงได้ใช้เข็มฉีดยาทำหน้าที่เป็นอิเล็กโทรดโดยไม่จำเป็นต้องใช้ลวดโลหะจุ่มลงในสารละลาย เข็มฉีดยาที่ใช้เป็นเบอร์ 26 ซึ่งเป็นเบอร์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ปลายเข็มเล็ก 0.47 มิลลิเมตร และตัดปลายเข็มให้เป็นระนาบแบนเพื่อให้หยดของสารละลายพอลิเมอร์ที่ออกจากปลายเข็มมีลักษณะเป็นทรงกลม และเมื่อใช้งานจะต่อสายไฟฟ้าจากเครื่องจ่ายไฟฟ้าแรงสูงมายังเข็มฉีดยานี้ ลักษณะของอุปกรณ์บรรจุสารละลายพอลิเมอร์และอิเล็กโทรดแสดงดังในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 หลอดฉีดยาชนิดแก้วและเข็มฉีดยาที่ทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์บรรจุสารละลายพอลิเมอร์และอิเล็กโทรด ตามลำดับ

3.1.1.4 อุปกรณ์ควบคุมการไหลของสารละลายพอลิเมอร์

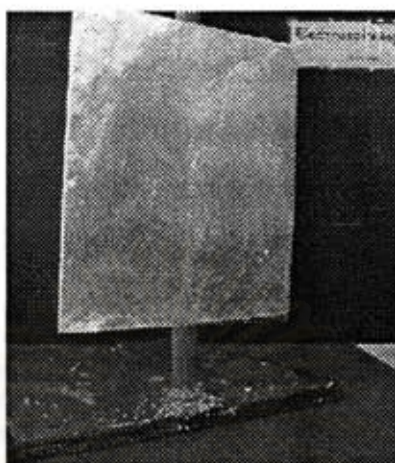
การควบคุมการไหลของสารละลายพอลิเมอร์ ใช้วิธีการอัดก๊าซในโตรเจนลงไปหลอดฉีดยาที่บรรจุสารละลายพอลิเมอร์ ซึ่งจะทำให้เกิดแรงดันที่จะขับเคลื่อนสารละลายให้ออกจากปลายเข็มฉีดยาได้ โดยในช่วงแรกของการประดิษฐ์ได้ควบคุมการไหลของสารละลายพอลิเมอร์ด้วยการควบคุมปริมาณการไหลของก๊าซในโตรเจนที่ออกมาจากถังก๊าซโดยตรง และเพื่อให้ปริมาณการไหลของก๊าซที่ปล่อยออกจากถังให้มีปริมาณที่คงที่ ในช่วงหลังของการประดิษฐ์จึงได้ใช้ตัวปรับควบคุมการไหลของก๊าซ (Flow meter) ซึ่งแสดงดังในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 อุปกรณ์ชุดควบคุมการไหลของสารละลายพอลิเมอร์

3.1.1.5 อุปกรณ์รองรับเส้นใย

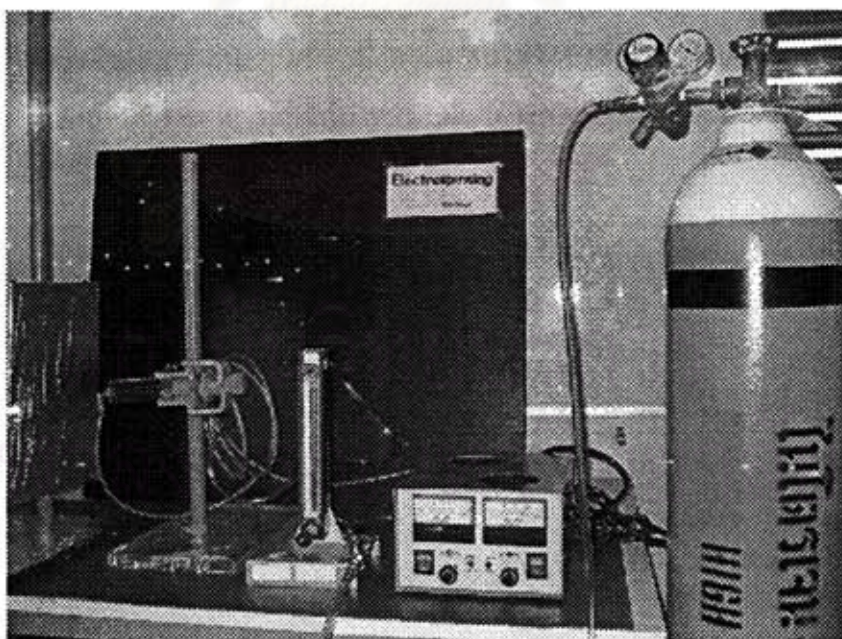
เนื่องจากเครื่องปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตที่ได้ประดิษฐ์ขึ้นนี้ ได้จัดตั้งเครื่องในลักษณะแนวนอน เพื่อป้องกันการหยดของสารละลายพอลิเมอร์อันเนื่องมาจากแรงโน้มถ่วงของโลก ชุดอุปกรณ์รองรับเส้นใยจึงจัดทำในแนวตั้ง เพื่อรองรับเส้นใยที่ปั่นออกมาในแนวนอน โดยแผ่นรองรับเส้นใยนี้ใช้แผ่นอลูมิเนียม ต่อกับสายดินจากเครื่องจ่ายไฟฟ้าแรงสูง ลักษณะของชุดอุปกรณ์รองรับเส้นใยนี้แสดงดังในรูปที่ 3.4 นอกจากนี้แผ่นอลูมิเนียมสามารถนำมาใช้เป็นอุปกรณ์รองรับเส้นใยแล้ว วัสดุที่เป็นโลหะชนิดอื่นๆ ก็ได้นำมาทำเป็นอุปกรณ์รองรับเส้นใย เช่น แผ่นทองแดง ตะแกรงอลูมิเนียม ตะแกรงเหล็กที่มีความถี่ของช่องตะแกรงขนาดต่างๆ เป็นต้น ซึ่งจากการทดสอบ วัสดุเหล่านี้สามารถทำหน้าที่รองรับเส้นใยได้ดี แต่เพื่อความสะดวกในการนำชิ้นงานไปศึกษาค้นคว้าด้วยเครื่องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope) แผ่นอลูมิเนียมจึงถูกเลือกให้นำมาใช้เป็นอุปกรณ์รองรับเส้นใย โดยหลังจากการปั่นเส้นใยแล้ว สามารถตัดแผ่นอลูมิเนียมที่มีเส้นใยอยู่ไปติดบนแท่นวางชิ้นตัวอย่าง (Stub) ของเครื่องอิเล็กตรอนแบบส่องกราดได้ทันที และนอกจากนี้แผ่นอลูมิเนียมมีราคาถูกกว่าวัสดุชนิดอื่นมาก จึงได้นำมาใช้เป็นอุปกรณ์รองรับเส้นใย



รูปที่ 3.4 ชุดอุปกรณ์รองรับเส้นใยที่ผลิตได้จากเครื่องปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต

3.1.2 การต่อชุดอุปกรณ์เครื่องปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต

ลักษณะของอุปกรณ์ทั้ง 5 ชุดดังที่กล่าวมาแล้ว และการต่ออุปกรณ์ทั้งหมดเข้าด้วยกัน เพื่อให้ได้เป็นเครื่องปั่นเส้นใยด้วยกระแสไฟฟ้าสถิตนี้ แสดงดังในรูปที่ 3.5

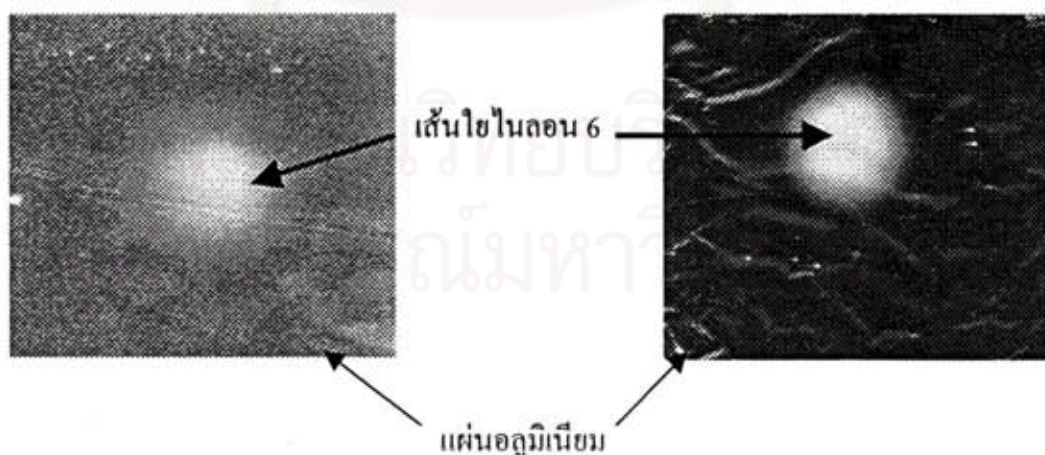


รูปที่ 3.5 การประกอบชุดอุปกรณ์การปั่นเส้นใยด้วยกระแสไฟฟ้าสถิต

3.2 การทดสอบ

เครื่องปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตนี้ได้นำมาใช้ทดสอบกับการปั่นเส้นใยไนลอน 6 ซึ่งพอลิเมอร์ชนิดนี้เป็นพอลิเมอร์ที่นิยมนำมาใช้ในการผลิตเส้นใยในทางการค้าจำนวนมาก โดยมีดไนลอน 6 ที่นำมาทดสอบนี้ได้รับความอนุเคราะห์จาก บริษัท เอเชียไฟเบอร์ จำกัด เกรด AFC-2002 มีน้ำหนักโมเลกุลโดยประมาณ 17,000 ซึ่งเกรดนี้เป็นเกรดที่ทางบริษัทใช้ในการผลิตเส้นใยไนลอนในทางการค้าทั่วไป ในช่วงการทดสอบเครื่องปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตนี้ มีดไนลอน 6 นี้ได้นำมาละลายในกรดฟอร์มิกเข้มข้น 85% โดยเตรียมสารละลายที่ความเข้มข้น 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และใช้ความร้อนรวมทั้งการกวนเล็กน้อย เพื่อช่วยในการละลาย

สารละลายไนลอน 6 ในกรดฟอร์มิกปริมาณ 10 มิลลิลิตร ได้ถูกบรรจุอยู่ในหลอดฉีดที่มีเข็มฉีดขาเป็นอิเล็กโทรด โดยต่อกับเครื่องจ่ายไฟฟ้าแรงสูง และป้อนศักย์ไฟฟ้าปริมาณ 20 กิโลโวลต์ผ่านอิเล็กโทรดนี้ ส่วนแผ่นรองรับเส้นใยที่เป็นแผ่นอลูมิเนียมได้ต่อกับสายดิน และได้ตั้งอุปกรณ์รองรับเส้นใยให้ห่างจากปลายเข็มฉีดขาเป็นระยะทาง 10 เซนติเมตร หลังจากศักย์ไฟฟ้าแรงสูงได้ถูกปล่อยผ่านอิเล็กโทรด โดยเริ่มตั้งแต่ 1 กิโลโวลต์ จนกระทั่งถึง 20 กิโลโวลต์ ตามลำดับ พบว่าหยดของสารละลายพอลิเมอร์จะเริ่มเปลี่ยนจากลักษณะเป็นทรงกลมเป็นหยดที่มีรูปร่างเป็นทรงกรวยขึ้น และเกิดการพ่นสารละลายพอลิเมอร์ออกเป็นฝอยขนาดเล็กมาก ซึ่งสามารถสังเกตด้วยตาเปล่าค่อนข้างยาก แต่สามารถสังเกตการเกิดของเส้นใยได้จากการเกิดเป็นฟิล์มสีขาวบนแผ่นอลูมิเนียมที่รองรับเส้นใย และเมื่อเวลานานขึ้นฟิล์มสีขาวที่เกิดขึ้นก็จะมีปริมาณมากขึ้น แสดงลักษณะของการเกิดเส้นใยบนแผ่นรองรับอลูมิเนียมได้ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 เส้นใยไนลอน 6 ที่ผลิตได้บนแผ่นอลูมิเนียมรองรับเส้นใย โดยใช้ระยะเวลา 30 วินาทีในการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต

3.3 การใช้งาน

สำหรับในโครงการประดิษฐ์เครื่องปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตนี้ หลังจากที่ผู้ประดิษฐ์ได้จัดเตรียมอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับเครื่อง และต่อชุดอุปกรณ์ต่างๆ เข้าด้วยกัน แล้วนำไปทดสอบกับสารละลายในลอน 6 แล้วนั้น ขั้นตอนต่อไปของโครงการนี้ ได้แก่ การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต และจากการทดสอบการปั่นเส้นใย พบว่า ปัจจัยที่สำคัญในการเกิดเส้นใยที่มีขนาดเล็กมากนี้ คือ ความเข้มข้นของสารละลายพอลิเมอร์ ดังนั้นทางคณะผู้ประดิษฐ์ได้ใช้สารละลายในลอน 6 ในกรดฟอร์มิก ตามที่ได้กล่าวมาแล้วในช่วงการทดสอบเครื่อง เป็นสารละลายพอลิเมอร์ที่ใช้ในการศึกษาปัจจัยดังกล่าว โดยมีขั้นตอนในการศึกษาปัจจัยของความเข้มข้นที่มีต่อกระบวนการปั่นเส้นใยดังนี้

3.3.1 การเตรียมสารละลาย

เตรียมสารละลายในลอน 6 ในกรดฟอร์มิกเข้มข้น 85% ที่ความเข้มข้นในช่วงตั้งแต่ 10 ถึง 46 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยใช้วิธีการกวนเล็กน้อยเพื่อช่วยในการละลาย และนำสารละลายไปทดสอบสมบัติดังนี้

ความหนืดของสารละลาย : ศึกษาโดยใช้เครื่อง Brookfield รุ่น DV-III programmable rheometer

แรงดึงผิวของสารละลาย : ศึกษาโดยใช้เครื่อง Tensiometer รุ่น K10T (KRU"SS)

3.3.2 การปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต

ในขั้นตอนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต ได้ควบคุมสภาวะต่างๆ ที่ใช้ในการปั่นเส้นใยโดยมีรายละเอียดดังนี้

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเข็มฉีดยา : 0.47 มิลลิเมตร (เบอร์ 26)

ปริมาตรของสารละลายที่บรรจุในหลอดฉีดยา : 10 มิลลิลิตร

ปริมาณของศักย์ไฟฟ้าที่ให้แก่สารละลาย : 21 กิโลโวลต์ (ประจุบวก)

ระยะทางจากปลายเข็มฉีดยาถึงแผ่นรองรับเส้นใย : 10 เซนติเมตร

ระยะเวลาในการปั่นเส้นใย : 30 วินาที

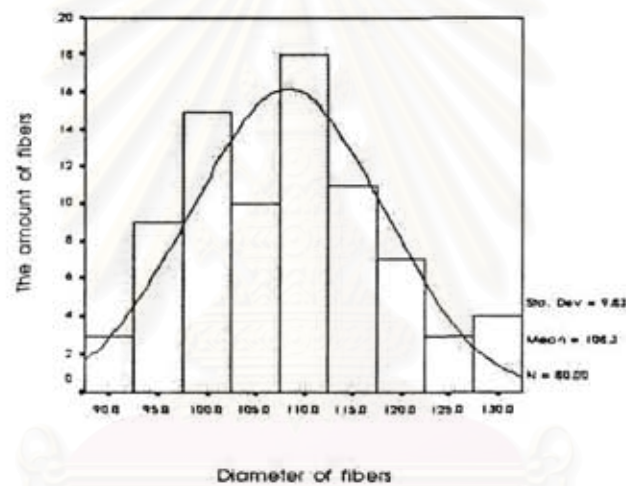
3.3.3 การศึกษาลักษณะและขนาดของเส้นใย

ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตจะนำมาศึกษาลักษณะและขนาดด้วยกล้อง

จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope) ของ JEOL รุ่น JSM 5200 การเตรียมชิ้นตัวอย่างทำได้โดยตัดแผ่นอลูมิเนียมบริเวณที่มีเส้นใยอยู่ขนาดประมาณ 5 x 5 มิลลิเมตร แล้วนำไปปิดลง

บนแท่นวางชิ้นตัวอย่าง (Stub) จากนั้นนำไปเคลือบทองด้วยเครื่อง Ion Sputtering ของ JEOL รุ่น JFC-1100E

สำหรับการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยที่ได้ ภาพถ่ายของเส้นใยจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดจำนวนหลายภาพ จะนำมาวัดขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางโดยใช้โปรแกรม SEMAFORE โดยในโปรแกรมจะให้วัดความยาวของเส้นความยาวมาตรฐานที่ปรากฏอยู่ในภาพ แล้วจึงไปวัดขนาดความกว้างของเส้นใย จะทำให้ทราบค่าขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยได้ โดยปริมาณของเส้นใยที่วัดขนาดความกว้างนี้มีจำนวน 80 เส้น หลังจากนั้นนำไปหาค่าเฉลี่ยของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยโดยใช้ฮิสโตแกรม (Histogram) ดังแสดงในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 ตัวอย่างการหาค่าเฉลี่ยของขนาดของเส้นใยไนลอน 6 โดยใช้ฮิสโตแกรม

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4 การอภิปรายผล

เครื่องปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตที่ประดิษฐ์ได้ ได้นำมาใช้ในการผลิตเส้นใยที่มีขนาดเล็กมากระดับนาโนเมตร โดยพอลิเมอร์ที่นำมาใช้ในการผลิตเส้นใยสำหรับโครงการนี้ ได้แก่ ไนลอน 6 และได้ศึกษาผลของปัจจัยที่สำคัญที่มีผลต่อกระบวนการปั่นเส้นใย ได้แก่ ความเข้มข้นของสารละลายพอลิเมอร์

4.1 สมบัติของสารละลายไนลอน 6

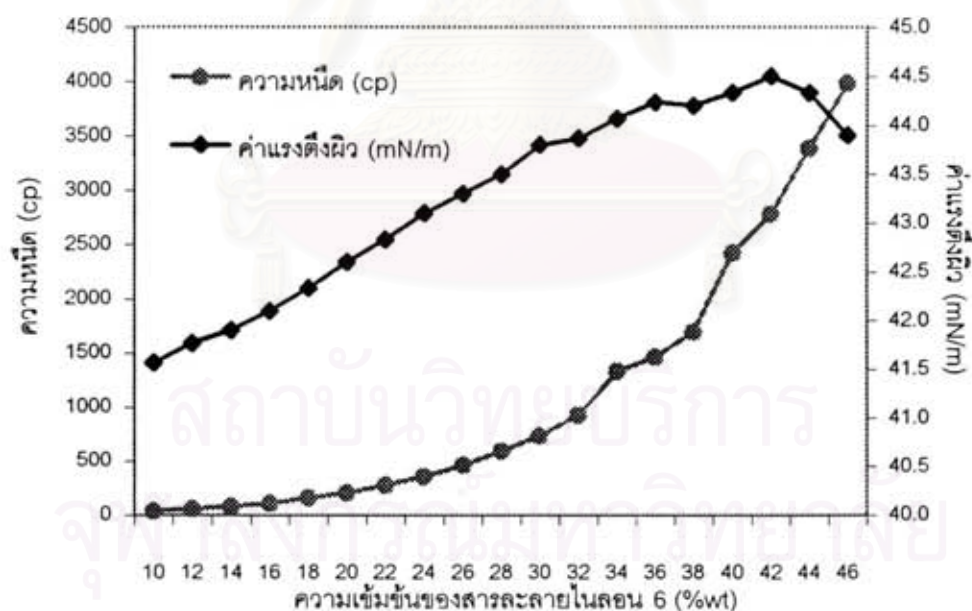
สารละลายไนลอน 6 ในกรดฟอร์มิกเข้มข้น 85 เปอร์เซ็นต์ ที่มีความเข้มข้นในช่วงตั้งแต่ 10 ถึง 46 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ได้นำมาศึกษาความหนืดและแรงตึงผิวของสารละลาย ได้ผลดังตารางที่ 4.1 และแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดและแรงตึงผิวของสารละลายกับความเข้มข้นของสารละลายไนลอน 6 ในรูปที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่าความหนืดและแรงตึงผิวของสารละลายไนลอน 6 ที่ความเข้มข้นในช่วงตั้งแต่ 10 ถึง 46 % โดยน้ำหนัก

ความเข้มข้นของสารละลายไนลอน 6 (%โดยน้ำหนัก)	ค่าความหนืดของสารละลาย (เซนติพอยส์)	ค่าแรงตึงผิวของสารละลาย (มิลลินิวตัน/ตารางเมตร)
10	39.2	41.6
12	59.2	41.8
14	82	41.9
16	113	42.1
18	157	42.3
20	209	42.6
22	277	42.8
24	358	43.1
26	463	43.3
28	592	43.5
30	738	43.8

ตารางที่ 4.1 ค่าความหนืดและแรงตึงผิวของสารละลายไพลอน 6 ที่ความเข้มข้นในช่วงตั้งแต่ 10 ถึง 46 % โดยน้ำหนัก (ต่อ)

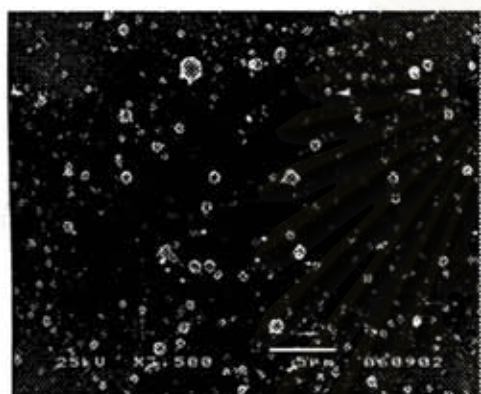
ความเข้มข้นของสารละลายไพลอน 6 (%โดยน้ำหนัก)	ค่าความหนืดของสารละลาย (เซนติพอยส์)	ค่าแรงตึงผิวของสารละลาย (มิลลินิวตัน/ตารางเมตร)
32	926	43.9
34	1332	44.1
36	1463	44.2
38	1693	44.2
40	2425	44.3
42	2782	44.5
44	3389	44.3
46	3992	43.9



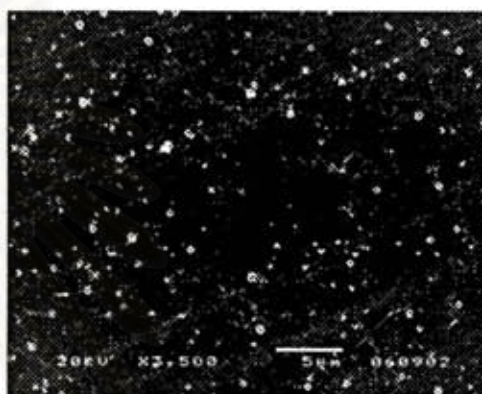
รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดและแรงตึงผิวของสารละลายไพลอน 6 กับความเข้มข้นของสารละลายไพลอน 6 ที่ความเข้มข้นในช่วงตั้งแต่ 10 ถึง 46 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

4.2 การศึกษาลักษณะเส้นใยในลอน 6 ที่ได้จากเครื่องปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต

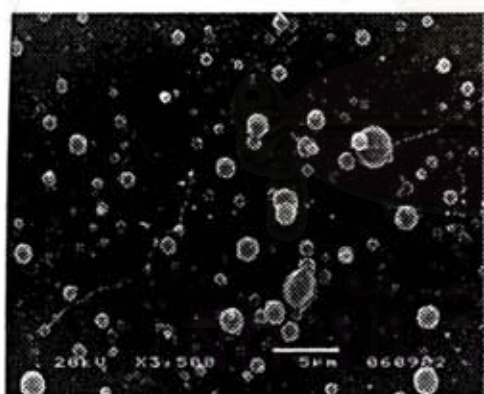
ลักษณะของการเกิดเส้นใยในลอน 6 ที่ได้จากเครื่องปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต ที่ความเข้มข้นในช่วงตั้งแต่ 10 ถึง 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แสดงดังภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดในรูปที่ 4.2 ก) ถึง ค)



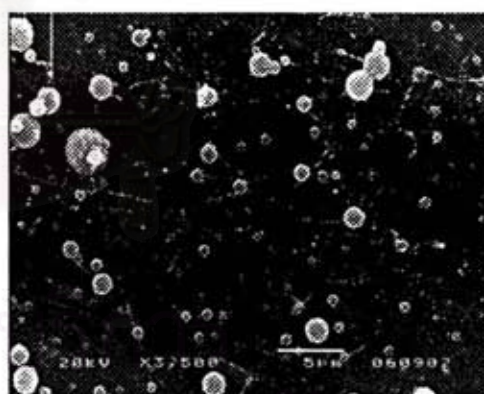
ก) 10 % โดยน้ำหนัก



ข) 12 % โดยน้ำหนัก

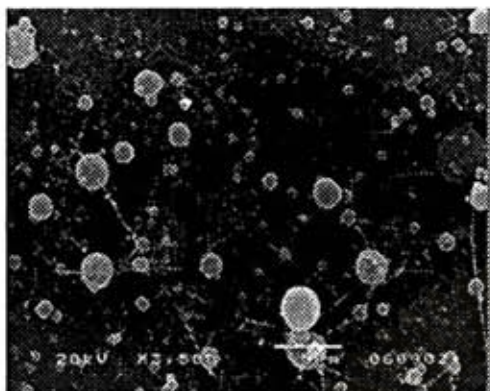


ค) 14 % โดยน้ำหนัก

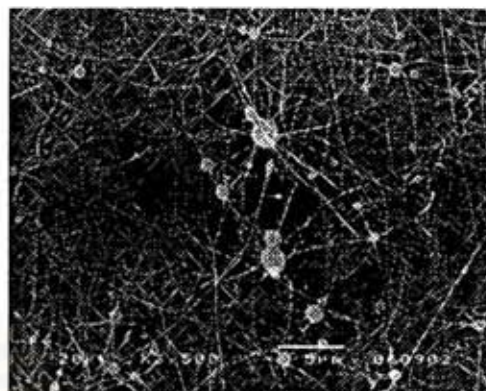


ง) 16 % โดยน้ำหนัก

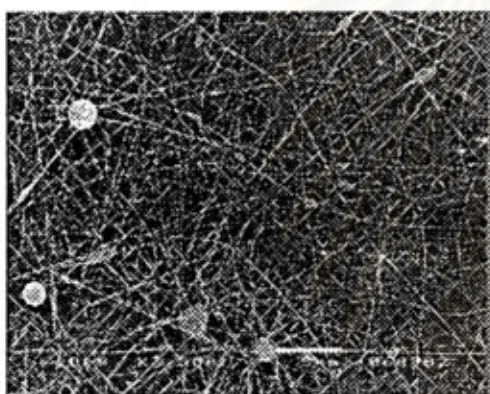
รูปที่ 4.2 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงลักษณะของการเกิดเส้นใยในลอน 6 ที่ได้จากการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต



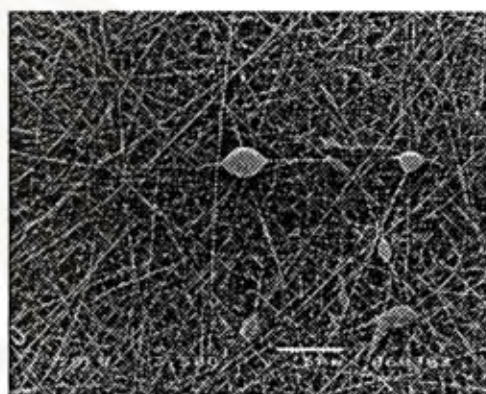
จ) 18 % โดยน้ำหนัก



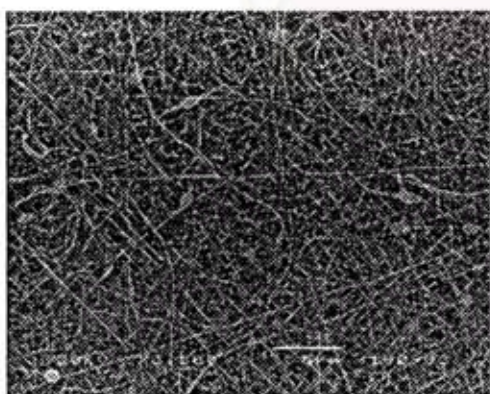
ข) 20 % โดยน้ำหนัก



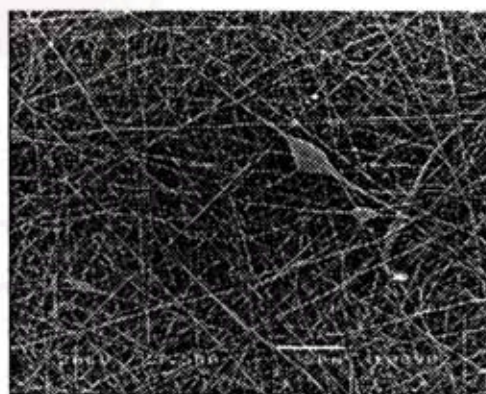
ค) 22 % โดยน้ำหนัก



ง) 24 % โดยน้ำหนัก

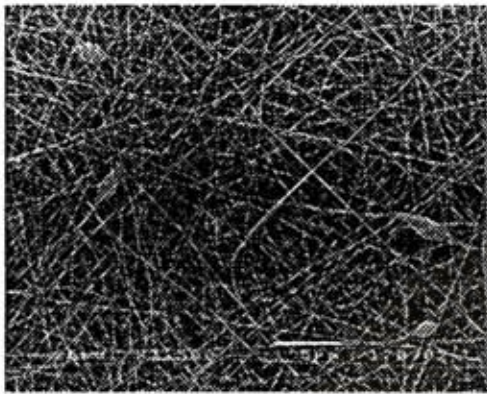


ฉ) 26 % โดยน้ำหนัก

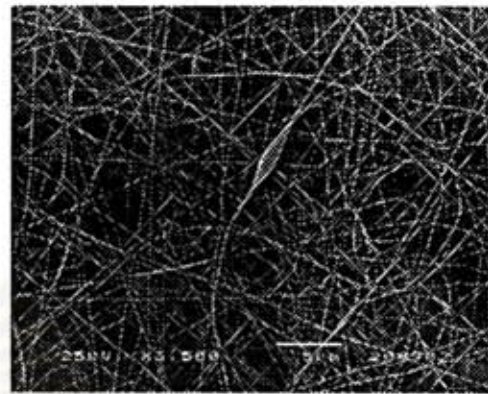


ช) 28 % โดยน้ำหนัก

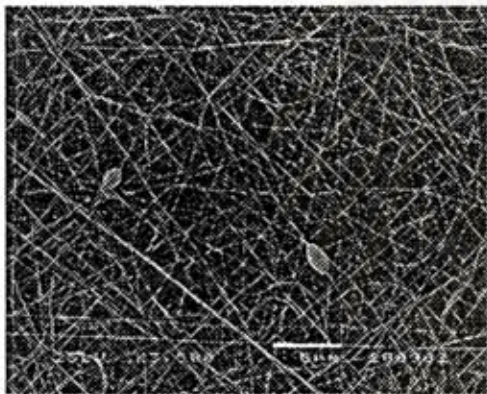
รูปที่ 4.2 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงลักษณะของการเกิดเส้นใยในลอน 6 ที่ได้จากการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต (ต่อ)



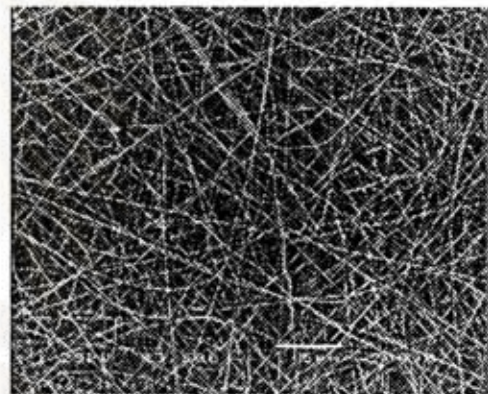
ฎ) 30 %โดยน้ำหนัก



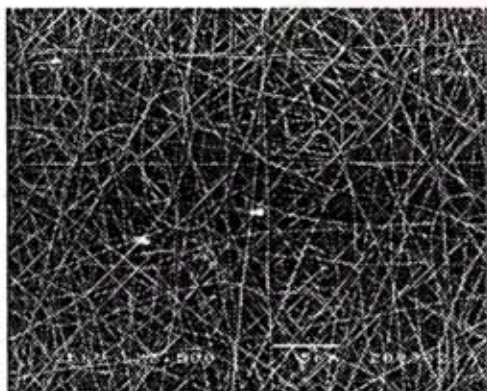
ฏ) 32 %โดยน้ำหนัก



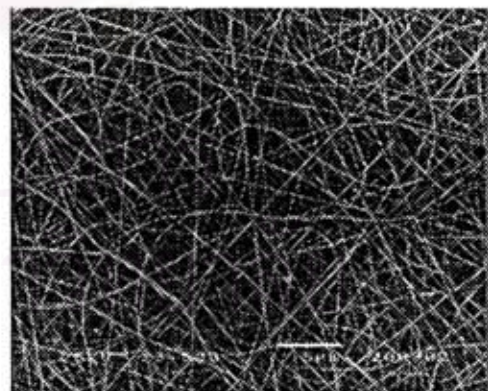
ฐ) 34 %โดยน้ำหนัก



ฑ) 36 %โดยน้ำหนัก

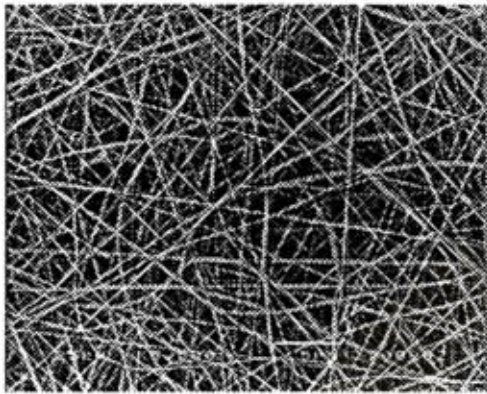


ฒ) 38 %โดยน้ำหนัก

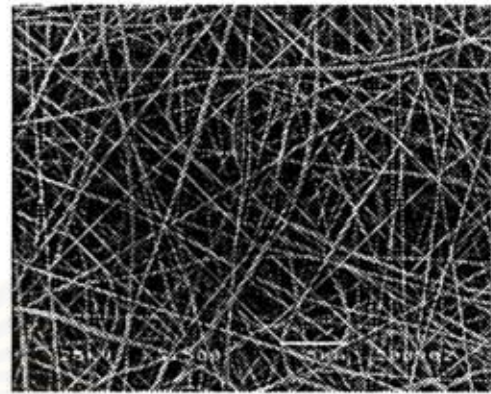


ณ) 40 %โดยน้ำหนัก

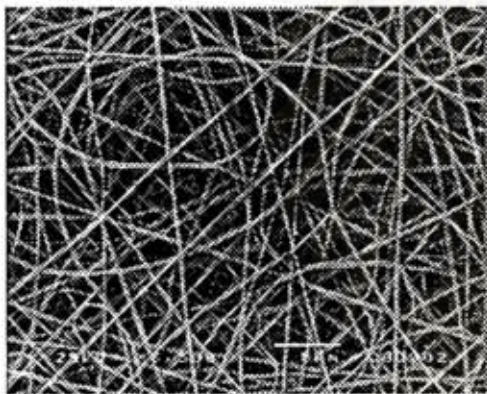
รูปที่ 4.2 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงลักษณะของการเกิดเส้นใยไนลอน 6 ที่ได้จากการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต (ต่อ)



ค) 42 % โดยน้ำหนัก



ต) 44 % โดยน้ำหนัก



ถ) 46 % โดยน้ำหนัก

รูปที่ 4.2 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงลักษณะของการเกิดเส้นใยในลอน 6 ที่ได้จากการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต (ต่อ)

จากภาพย่อยของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดในรูปที่ 4.2 เป็นลักษณะของการเกิดเส้นใยในลอน 6 ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กมาก จากเครื่องปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต โดยใช้ศักย์ไฟฟ้าประจุบวก 21 กิโลโวลต์ ป้อนให้กับสารละลายในลอน 6 ในกรดฟอร์มิกที่ความเข้มข้นต่างๆ ปรับระยะห่างระหว่างแผ่นรองรับเส้นใยกับอิเล็กโทรดเป็นระยะทาง 10 เซนติเมตร และใช้ระยะเวลาในการปั่นเส้นใยเป็นเวลา 30 วินาที โดยพบว่าที่สารละลายความเข้มข้นต่ำในช่วงตั้งแต่ 10 ถึง 18 % โดยน้ำหนัก (รูปที่ 4.2 ก.-จ.) ยังไม่เกิดเส้นใยในลอน 6 แต่เกิดการพ่นของสารละลายในลอน 6 ออกเป็นฝอย เทคนิคการเกิดหยดขนาดเล็กมากของในลอน 6 ด้วยไฟฟ้าสถิตนี้เป็นเทคนิคหนึ่งที่น่าไปประยุกต์ใช้ในการพ่นสารละลายให้เป็นฝอยขนาดเล็กในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมการพิมพ์ ใช้พ่นสารเคมีในทางการเกษตร เป็นต้น ซึ่งการ

เกิดฝอยของสารละลายนั้นจะเกิดขึ้นเมื่อสารละลายมีความหนืดต่ำมาก จึงเกิดจากการแตกตัวของเส้นที่พุ่ง (Jet) จากปลายหยดของสารละลายออกเป็นหยด (droplet) ขนาดเล็กมาก⁽¹³⁾

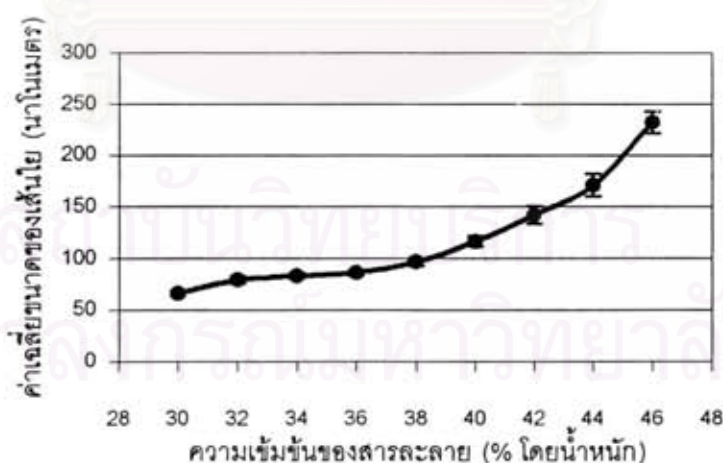
เส้นใยในลอน 6 ขนาดเล็กระดับนาโนเมตรนั้นจะเริ่มเกิดขึ้นเมื่อสารละลายมีความหนืดเพิ่มมากขึ้น โดยที่ความเข้มข้น 20 % โดยน้ำหนักเริ่มเกิดเส้นใยปริมาณมาก แต่ยังมีหยดของในลอน 6 จำนวนมากปนอยู่กับเส้นใย (รูปที่ 4.2 ฉ.) นอกจากนี้ยังพบว่าที่ความหนืดสูงขึ้นจะเกิดเม็ดบีค (Bead) บนเส้นใยในลอน 6 ที่ผลิตได้อีกด้วย ซึ่งสามารถสังเกตได้ชัดเจนที่ความเข้มข้นตั้งแต่ 22 % โดยน้ำหนักเป็นต้นไป จนถึงความเข้มข้น 36 % โดยน้ำหนัก (รูปที่ 4.2 ข. - จ.) เม็ดบีคที่เกิดขึ้นบนเส้นใยนี้จะมีปริมาณลดลงเมื่อความหนืดของสารละลายพอลิเมอร์มีค่าสูงขึ้น โดย Fong⁽¹⁵⁾ ได้ทำการศึกษาการเกิดเม็ดบีคบนเส้นใยที่เกิดขึ้นจากการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต พบว่าเมื่อความหนืดของสารละลายพอลิเมอร์เพิ่มขึ้น ระยะห่างระหว่างเม็ดบีคที่เกิดขึ้นบนเส้นใยจะลดลง และจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดบีคที่มากขึ้นด้วย และเมื่อสารละลายในลอน 6 มีความหนืดสูงมากประมาณ 1700 เซนติพอยส์ขึ้นไปหรือที่ความเข้มข้น 38 จนถึง 46% โดยน้ำหนัก (รูปที่ 4.2 ฉ.- ค.) จะไม่พบเม็ดบีคบนเส้นใย แต่เส้นใยจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มมากขึ้นตามลำดับ เส้นใยในลอน 6 ที่ได้จากการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตนี้มีพื้นที่หน้าตัดเป็นวงกลม และมีลักษณะเป็นเส้นเดี่ยวที่ไม่ได้ทอ ถ้าปั่นเส้นใยโดยใช้ระยะเวลานานมากขึ้น ความหนาของเส้นเดี่ยวจะเพิ่มขึ้น ซึ่งจะสามารถนำไปประยุกต์ใช้ต่อไปได้

4.3 การศึกษาขนาดของเส้นใยในลอน 6 ที่ได้จากเครื่องปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต

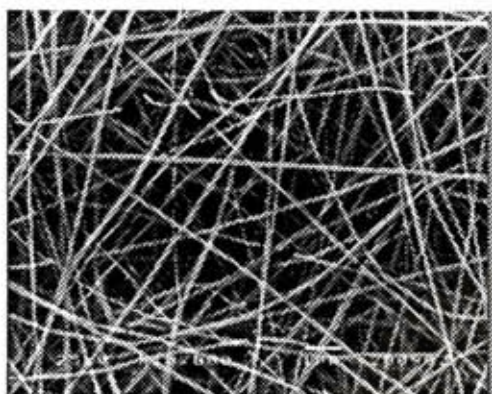
ภาพถ่ายเส้นใยในลอน 6 จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดได้นำมาใช้ในการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยในลอน 6 ที่ปั่นจากเครื่องปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต โดยจะวัดขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยที่ปั่นจากสารละลายในลอน 6 ที่ความเข้มข้นในช่วงตั้งแต่ 30 ถึง 46 % โดยน้ำหนัก ทั้งนี้เนื่องจากเส้นใยในลอน 6 ในช่วงความเข้มข้นดังกล่าว มีปริมาณเม็ดบีคน้อย และบางความเข้มข้นนั้นไม่มีเม็ดบีคเกิดขึ้นบนเส้นใยเลย จำนวนเส้นใยที่วัดขนาดนี้มีทั้งหมด 80 เส้น ได้ผลของค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานแสดงดังในตารางที่ 4.2 และรูปกราฟที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายที่ใช้ในการปั่นเส้นใยในลอน 6 กับค่าเฉลี่ยของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย โดยเส้นความผิดพลาด (Error bar) ในรูปกราฟแสดงถึงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน จากรูปกราฟนี้จะพบว่าเมื่อสารละลายในลอน 6 มีความเข้มข้นเพิ่มมากขึ้น หรืออีกนัยหนึ่งมีความหนืดสูงขึ้น เส้นใยที่ปั่นได้จะมีเส้นผ่านศูนย์กลางที่ใหญ่ขึ้นด้วย ภาพที่ 4.4 แสดงภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดกำลังขยายสูง 10,000 เท่า ซึ่งจะเห็นถึงขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยที่เพิ่มมากขึ้นเมื่อความหนืดของสารละลายเพิ่มมากขึ้น

ตารางที่ 4.2 ผลของค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยในลอน 6 ที่ได้จากการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต ที่ความเข้มข้นในช่วงตั้งแต่ 30 ถึง 46 % โดยน้ำหนัก

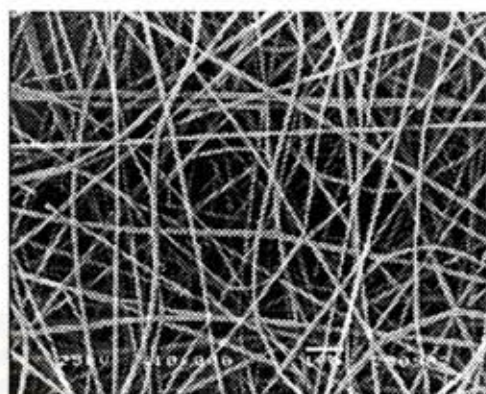
ความเข้มข้นของสารละลายในลอน 6 (% โดยน้ำหนัก)	ค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยในลอน 6 (นาโนเมตร)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย (นาโนเมตร)
30	66.0	4.35
32	79.0	6.92
34	83.1	5.24
36	86.0	5.51
38	96.3	7.14
40	116.1	10.14
42	141.9	16.73
44	170.7	21.86
46	231.9	21.53



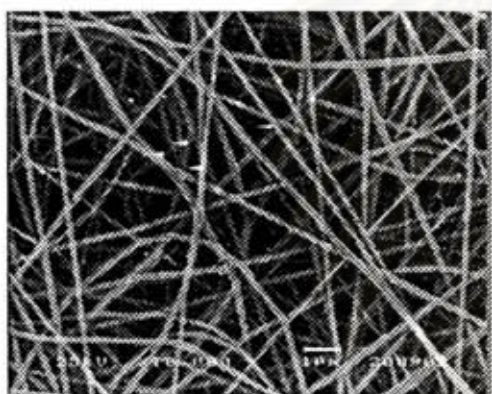
รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยในลอน 6 ที่ได้จากการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตกับความเข้มข้นของสารละลายในลอน 6



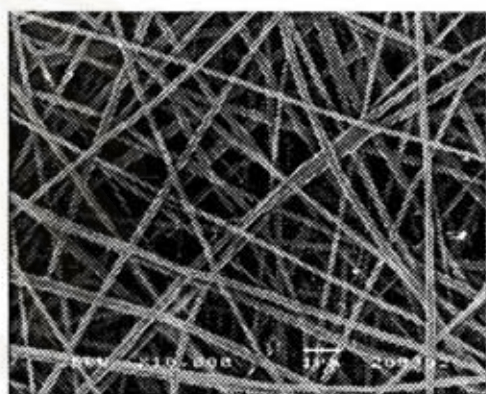
ก) 36 % โดชน้ำหนัก



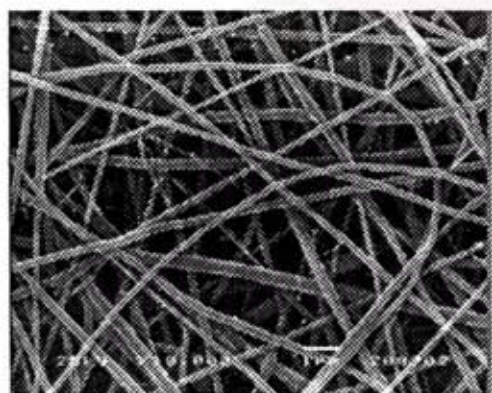
ข) 38 % โดชน้ำหนัก



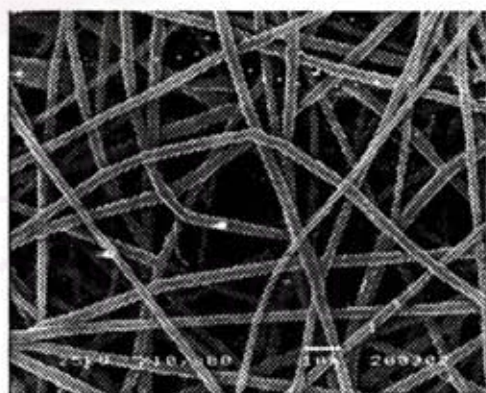
ค) 40 % โดชน้ำหนัก



ง) 42 % โดชน้ำหนัก



จ) 44 % โดชน้ำหนัก



ฉ) 46 % โดชน้ำหนัก

รูปที่ 4.4 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 10,000 เท่า ของเส้นใยไนลอน 6 ที่ได้จากการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต ที่ความเข้มข้นของสารละลายในช่วง 36 ถึง 46 % โดชน้ำหนัก

บทที่ 5

ข้อสรุป

กระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต (Electrospinning หรือ Electrostatic spinning) เป็นกระบวนการที่สามารถผลิตเส้นใยที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กมากระดับนาโนเมตรได้ กระบวนการนี้เป็นกระบวนการผลิตเส้นใยที่ไม่ยุ่งยากซับซ้อน ใช้พอลิเมอร์ปริมาณน้อย และใช้ระยะเวลาในการผลิตสั้น เพราะความเร็วในการปั่นเป็นเส้นใยสูง ผลึกภัณฑ์ที่ผลิตได้มีลักษณะเป็นแผ่นผ้าที่ไม่ได้ทอ (Non-woven web) ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้โดยตรง โดยมีอัตราส่วนของพื้นที่ผิวต่อปริมาตรของเส้นใยสูง และแผ่นผ้าที่ผลิตได้มีลักษณะเป็นแผ่นเชื่อมกัน (Membrane) ที่มีรูพรุนขนาดเล็กมาก มีความเป็นรูพรุนสูง มีน้ำหนักเบา จึงสามารถนำผลึกภัณฑ์ที่ได้ไปใช้ประโยชน์ได้อย่างมากมาย เช่น วัสดุควบคุมการปลดปล่อยยา วัสดุตกแต่งแผล วัสดุควบคุมการปลดปล่อยยามาแมลง เป็นต้น

สำหรับอุปกรณ์การปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตที่ประดิษฐ์ในโครงการนี้ ประกอบด้วยอุปกรณ์และหลักการของการปั่นเส้นใยดังต่อไปนี้ สารละลายพอลิเมอร์ซึ่งในโครงการนี้ได้แก่ สารละลายไนลอน 6 ในกรดฟอร์มิกเข้มข้น 85% จะถูกบรรจุอยู่ในหลอดฉีดยาชนิดแก้วขนาด 50 มิลลิเมตร โดยมีเข็มฉีดยาหลักเบอร์ 26 หรือมีเส้นผ่านศูนย์กลางปลายเข็ม 0.47 มิลลิเมตร ทำหน้าที่เป็นอิเล็กโทรด และมีการควบคุมการไหลของสารละลายพอลิเมอร์ด้วยการควบคุมการไหลของก๊าซไนโตรเจนที่ปล่อยผ่านเข้าไปภายในหลอดฉีดยาแก้ว โดยใช้ตัวปรับควบคุมการไหลของก๊าซ (Flow meter) จากนั้นศักย์ไฟฟ้ากำลังสูงในช่วง 5 ถึง 30 กิโลโวลต์ จากเครื่องจ่ายไฟฟ้าแรงสูง (High voltage power supply) ซึ่งสามารถปรับปริมาณศักย์ไฟฟ้าได้ จะถูกป้อนให้กับสารละลายไนลอน 6 โดยผ่านไปยังอิเล็กโทรด ส่วนทางด้านตรงข้ามกับปลายเข็มฉีดยาจะมีแผ่นอลูมิเนียมซึ่งเป็นแผ่นโลหะชนิดหนึ่งทำหน้าที่เป็นแผ่นรองรับเส้นใยที่จะผลิตได้ โดยแผ่นอลูมิเนียมนี้สามารถปรับเลื่อนไปมาได้เพื่อเป็นการปรับระยะทางระหว่างปลายอิเล็กโทรดกับแผ่นรองรับเส้นใย และแผ่นอลูมิเนียมนี้จะต่อกับสายดิน เมื่อใดก็ตามที่ไฟฟ้ากำลังสูงที่ป้อนให้กับสารละลายไนลอน 6 สามารถทำให้เกิดแรงทางไฟฟ้า (Electrical force) สูงกว่าแรงตึงผิว (Surface tension) ของสารละลายไนลอน 6 จะทำให้หยดของสารละลายที่บริเวณปลายเข็มฉีดยาเกิดการยืดตัวออก มีลักษณะรูปร่างเป็นรูปทรงกรวย (Cone shape) หรือที่เรียกว่า Taylor cone และจะเกิดเป็นเส้นพุ่ง (Jet) ออกจากปลายของสารละลายทรงกรวยนั้น หลังจากนั้นจะแตกออกเป็นเส้นฝอย (Splaying) ได้เป็นเส้นใยไนลอน 6 ขนาดเล็กบนแผ่นรองรับเส้นใย

สารละลายไนลอน 6 ในกรดฟอร์มิกที่ความเข้มข้นตั้งแต่ 10 ถึง 46 % โดยน้ำหนักได้นำมาปั่นเป็นเส้นใยด้วยกระบวนการนี้ เพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลาย หรืออีกนัยหนึ่งเป็นการศึกษาผลของความหนืดของสารละลายที่มีต่อการเกิดเป็นเส้นใย และขนาดของเส้นใยที่ได้ โดยควบคุมปริมาณศักย์ไฟฟ้า

ที่ป้อนให้กับสารละลายไนลอน 6 และระยะทางระหว่างปลายเข็มฉีดยากับแผ่นอลูมิเนียมรองรับเส้นใยเป็น 21 กิโลโวลต์ และ 10 เซนติเมตรตามลำดับ จากการศึกษาพบว่าที่ความเข้มข้นต่ำกว่า 20 % โดยน้ำหนัก ยังไม่เกิดเส้นใยไนลอน 6 แต่เกิดเป็นหยดขนาดเล็กจำนวนมากบนแผ่นรองรับเส้นใยแทน ที่ความเข้มข้น 20 % โดยน้ำหนัก เป็นต้นไปจะเกิดเส้นใยไนลอน 6 ขนาดเล็กและมีเม็ดบีด (Bead) ปรากฏอยู่บนเส้นใยจำนวนมาก และเม็ดบีดนี้จะลดปริมาณลงเมื่อความหนืดเพิ่มมากขึ้น จนกระทั่งที่ความเข้มข้นประมาณ 38 % โดยน้ำหนักจะไม่พบเม็ดบีดเหล่านี้ และจากการวัดขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยไนลอน 6 พบว่าเมื่อสารละลายมีความเข้มข้นสูงขึ้นหรือความหนืดเพิ่มมากขึ้น ขนาดของเส้นใยจะเพิ่มมากขึ้นด้วย โดยขนาดของเส้นใยที่เกิดจากสารละลายไนลอน 6 ความเข้มข้นตั้งแต่ 30 ถึง 46 % โดยน้ำหนัก จะเพิ่มขึ้นจาก 66 จนถึง 239 นาโนเมตร ตามลำดับ



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 6

ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากในโครงการสังเคราะห์เครื่องปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตย์นี้ เป็นโครงการที่เริ่มทดลอง จึงยังมีข้อเสนอแนะที่จะนำไปใช้ในการปรับปรุงอุปกรณ์ในส่วนต่างๆ เพื่อพัฒนาคุณภาพของกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตย์ให้ดียิ่งขึ้น ดังมีรายละเอียดดังนี้

1. อุปกรณ์บรรจุพอลิเมอร์หรือหลอดคาปิลลารี

การปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตย์นี้ สามารถใช้ได้กับทั้งพอลิเมอร์หลอมเหลว (Polymer melts) และสารละลายพอลิเมอร์ (Polymer solutions) ดังนั้นเพื่อให้การวิจัยเป็นไปอย่างกว้างขวาง สามารถปั่นเส้นใยจากพอลิเมอร์ทุกชนิดได้ จึงควรประดิษฐ์ชุดอุปกรณ์ให้ความร้อนกับพอลิเมอร์ เพื่อให้พอลิเมอร์หลอมเหลว ตัวอย่างพอลิเมอร์ที่ควรศึกษาประเภทนี้ เช่น พอลิเอทิลีน พอลิโพรพิลีน เป็นต้น

2. อุปกรณ์ควบคุมการไหลของสารละลายพอลิเมอร์

เพื่อให้การควบคุมการไหลของสารละลายที่ออกมาจากปลายเข็มฉีดยาถูกต้องแม่นยำยิ่งขึ้น อาจใช้ปั๊มสำหรับหลอดฉีดยา (Syringe pump) เป็นอุปกรณ์ควบคุมการไหล แต่ในโครงการนี้ยังไม่ได้จัดซื้อเพราะเนื่องจากปั๊มชนิดนี้มีราคาสูงมาก และยังเป็นโครงการที่อยู่ในขั้นทดลอง สามารถประยุกต์ใช้อุปกรณ์ชนิดอื่นเป็นตัวควบคุมการไหลของสารละลายพอลิเมอร์ได้

3. อุปกรณ์รองรับเส้นใย

อุปกรณ์รองรับเส้นใยที่เคลื่อนที่หมุนไปมาได้แบบลูกกลิ้ง (Roller) อาจนำมาใช้ในการจับเก็บเส้นใยที่ผลิตได้ เพื่อรองรับปริมาณเส้นใยได้มากขึ้น และยังสามารถทำให้เส้นใยเกิดการจัดเรียงตัวได้มากขึ้นด้วย

นอกจากนี้ควรจัดทำชุดควบคุมอุณหภูมิเพื่อให้ความร้อนกับระบบ ที่จะช่วยทำให้เกิดการระเหยของสารละลายได้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เอกสารอ้างอิง

1. B.P. Corbman, *Textiles: Fiber to Fabric*, 6th ed., McGraw-Hill: New York, 1983.
2. H. Fong, *PhD Dissertation*, The University of Akron, 1999.
3. T. Nakajima, K. Kajiwara, and J.E. McIntyre, *Advanced Fiber Spinning Technology*, Woodhead Publishing: London, 1994.
4. I. Chun, *PhD Dissertation*, The University of Akron, 1995.
5. H.S. Gibson, *I.F.J.*, October, 48-50 (1998).
6. J. Doshi, and D.H. Reneker, *J. Electrostatics*, 35, 151-160 (1995).
7. S.B. Warner, A. Buer, M. Grimler, S.C. Ugbolue, G.C. Rutledge, and M.Y. Shin, *National Textile Center Annual Report*, M98-D01, 1999.
8. D.H. Reneker, and I. Chun, *Nanotechnology*, 7, 216-223 (1996).
9. G. Srinivasan, *PhD Dissertation*, The University of Akron, 1994.
10. J. Kim, and D.H. Reneker, *Polym. Eng. Sci.*, 39, 849-854 (1999).
11. X. Fang and D.H. Reneker, *J. Macromol. Sci.-Phys., B*, 36(2), 169-173 (1997).
12. A. Buer, S.C. Ugbolue, and S.B. Warner, *Textile Res. J.*, 71(4), 323-328 (2001).
13. J.M. Deitzel, J. Kleinmeyer, D.Harris, and N.C. Beck Tan, *Polymer*, 42, 261-272 (2001).
14. P.K. Baumgarten, *Journal of Colloid and Interface Science*, 36(1), 71-79 (1971).
15. H. Fong, I. Chun, and D.H. Reneker, *Polymer*, 40, 4585-4592 (1999).

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

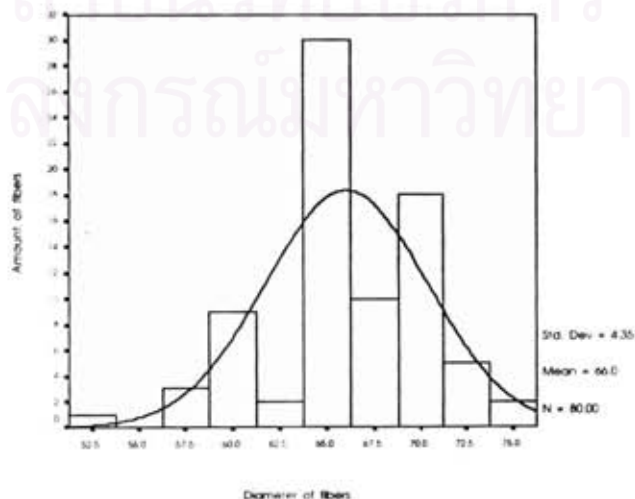
ภาคผนวก

การหาขนาดของเส้นใยโดยเฉลี่ย

การวัดขนาดของเส้นใยที่ปั่นได้จากสารละลายไนลอน 6 ที่ความเข้มข้นตั้งแต่ 30 ถึง 46 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยแต่ละความเข้มข้นจะวัดขนาดของเส้นใยจำนวน 80 เส้นแล้วหาค่าเฉลี่ยโดยใช้สูตรกรม

ขนาดของเส้นใยจากสารละลายไนลอน 6 ความเข้มข้น 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

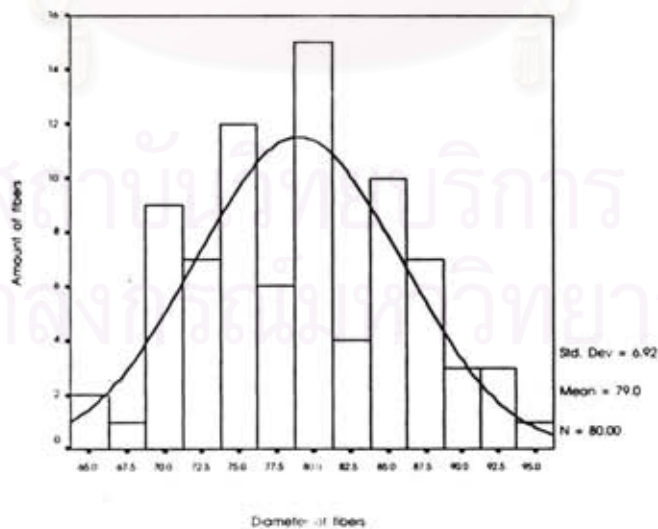
ขนาดของเส้นใย (นาโนเมตร)			
70	64	68	59
75	64	70	65
64	52	61	70
71	64	76	65
68	64	68	69
68	65	65	65
70	64	60	64
68	68	73	69
65	70	70	61
71	66	60	65
68	69	65	69
62	70	68	72
71	58	58	69
71	65	66	65
73	64	70	61
65	68	65	58
60	65	65	72
62	64	72	61
64	64	67	66
64	69	59	65





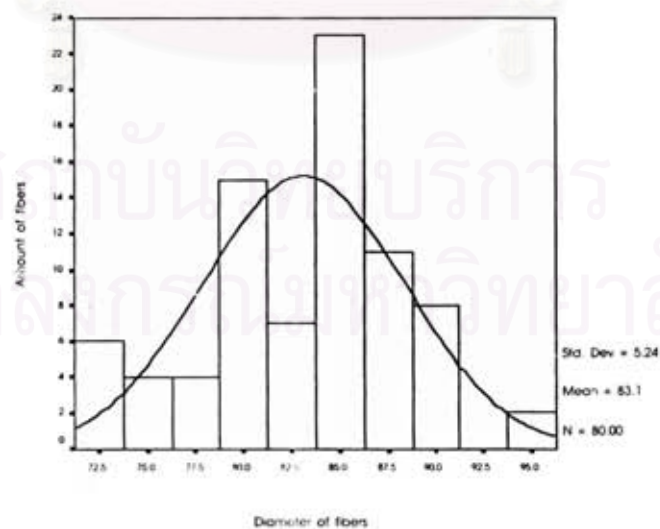
ขนาดของเส้นใยจากสารละลายในลอน 6 ความเข้มข้น 32 เปอร์เซ็นต์

ขนาดเส้นใย (นาโนเมตร)			
89	70	85	86
79	71	74	77
75	89	85	94
77	66	82	93
72	87	87	71
75	73	87	77
74	73	83	84
68	80	87	86
69	91	79	86
69	76	74	86
65	92	84	82
75	70	79	87
69	80	78	79
73	79	79	80
74	76	87	82
77	73	73	81
74	72	76	86
75	79	78	79
70	88	84	79
69	79	81	92



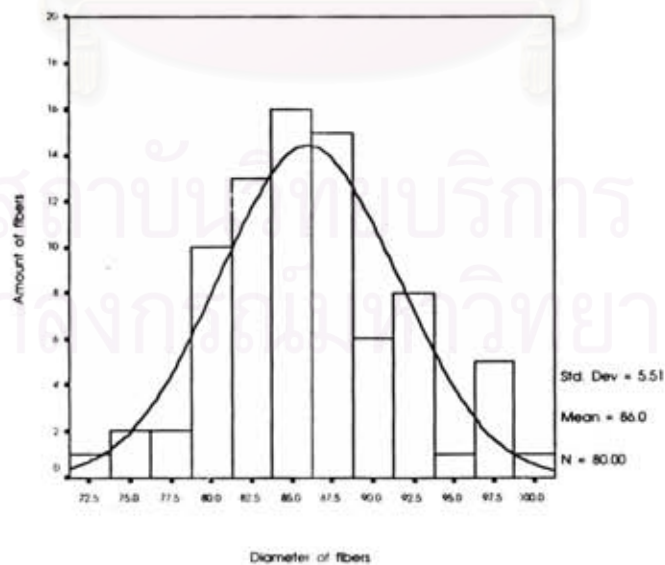
ขนาดของเส้นใยจากสารละลายไพลอน6 ความเข้มข้น 34 เปอร์เซ็นต์

ขนาดของเส้นใย (นาโนเมตร)			
85	85	85	91
83	83	85	88
79	84	79	89
88	80	82	84
85	85	88	79
80	88	86	77
88	85	89	72
88	89	89	86
82	88	72	73
80	79	95	89
79	80	86	82
72	76	87	89
85	73	85	80
89	86	78	95
73	86	75	85
88	83	81	85
81	85	83	81
75	87	84	88
78	79	86	86
75	84	80	77



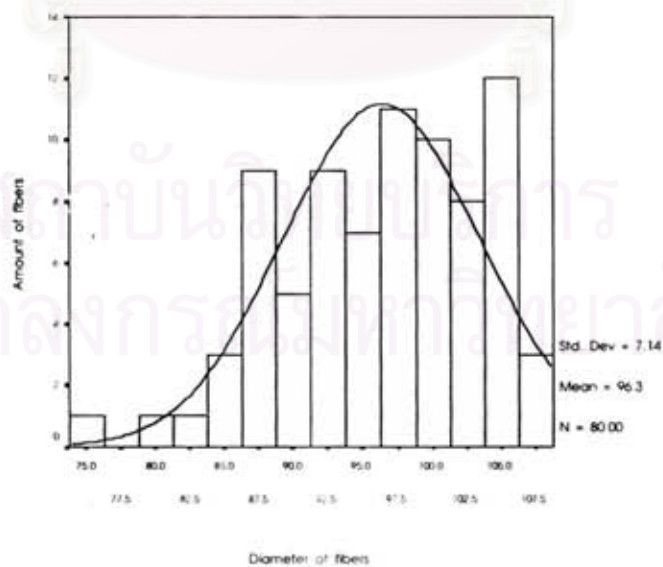
ขนาดของเส้นใยจากสารละลายในลอน6 ความเข้มข้น 36 เปอร์เซ็นต์

ขนาดของเส้นใย (นาโนเมตร)			
79	85	92	78
99	83	87	79
85	87	79	87
73	87	87	80
93	91	97	82
84	85	83	89
91	92	92	79
87	90	76	88
87	87	83	85
78	87	89	85
83	98	83	81
87	81	82	86
85	85	80	98
82	88	92	75
93	80	97	88
97	85	85	85
85	83	94	85
83	85	83	79
85	90	88	87
83	92	92	83



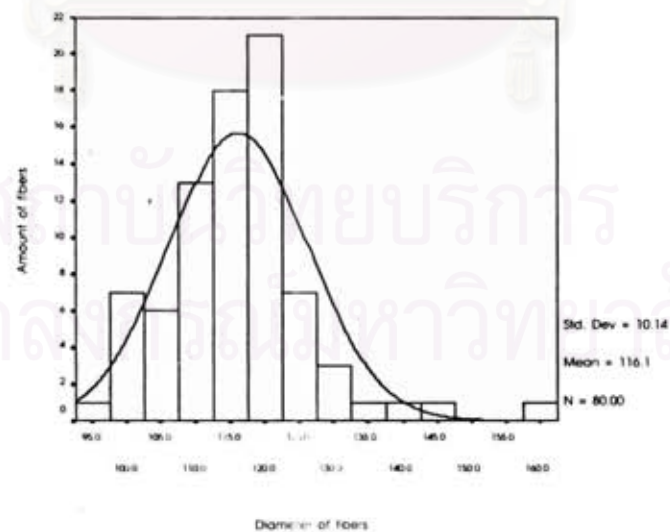
ขนาดของเส้นใยจากสารละลายใยลอน6 ความเข้มข้น 38 เปอร์เซ็นต์

ขนาดของเส้นใย (นาโนเมตร)			
98	98	92	105
99	105	96	97
99	98	107	92
87	103	103	108
88	107	84	97
88	105	96	103
76	87	90	98
87	91	105	106
90	93	101	86
87	101	88	105
93	97	103	100
85	101	96	104
104	105	94	92
101	106	88	102
92	101	104	82
81	96	94	94
99	99	97	98
105	103	103	102
88	90	93	97
93	90	97	92



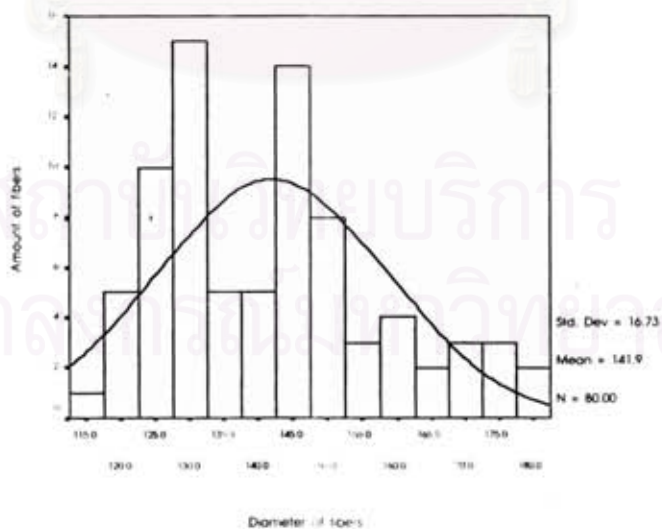
ขนาดของเส้นใยจากสารละลายในลอน6 ความเข้มข้น 40 เปอร์เซ็นต์

ขนาดของเส้นใย (นาโนเมตร)			
113	117	111	105
124	117	121	102
126	121	110	114
114	120	119	134
120	123	122	120
116	122	127	118
109	101	122	124
118	119	129	111
113	121	120	106
111	101	122	113
113	101	124	108
106	139	110	116
116	107	100	120
102	159	121	118
108	144	119	111
109	107	128	131
97	98	108	114
118	115	113	122
114	117	110	113
117	123	111	106



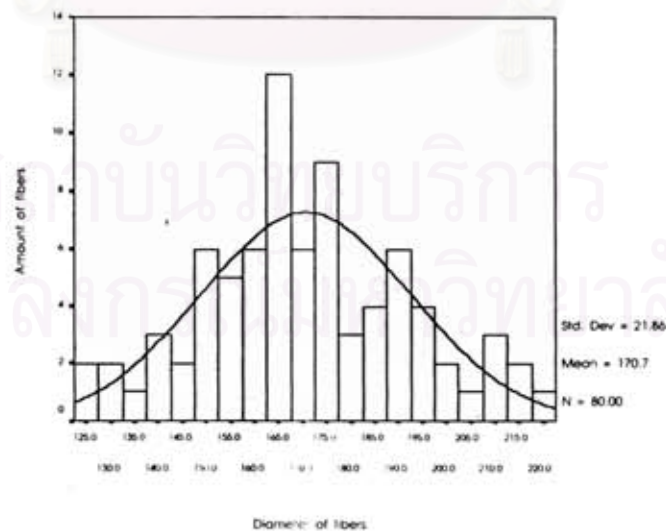
ขนาดของเส้นใยจากสารละลายในลอน6 ความเข้มข้น 42 เปอร์เซ็นต์

ขนาดของเส้นใย (นาโนเมตร)			
151	137	140	121
152	136	139	124
146	130	167	128
161	147	144	119
134	172	182	120
160	147	125	123
182	143	175	116
124	123	166	130
152	171	130	132
158	130	152	130
125	129	156	143
131	128	171	147
118	139	131	129
128	134	120	142
144	134	146	130
143	157	175	160
123	150	151	151
157	143	146	138
144	152	143	130
123	175	124	123



ขนาดของเส้นใยจากสารละลายในลอน 6 ความเข้มข้น 44 เปอร์เซ็นต์

ขนาดของเส้นใย (นาโนเมตร)			
216	175	197	177
211	164	145	194
176	219	188	185
164	160	208	165
176	166	176	164
190	164	197	136
191	131	170	127
201	158	186	155
164	148	186	163
173	189	193	199
176	191	184	151
148	170	171	150
160	161	169	182
217	170	155	142
178	148	158	156
167	164	154	166
182	124	174	155
152	129	168	141
192	138	147	162
209	205	176	164



ขนาดของเส้นใยจากสารละลายไนลอน6 ความเข้มข้น 46 เปอร์เซ็นต์

ขนาดของเส้นใย (นาโนเมตร)			
284	207	236	262
242	256	218	252
270	259	218	257
213	230	220	229
221	221	224	207
247	222	209	223
244	202	226	213
205	224	209	241
218	216	202	218
218	257	273	246
204	252	213	233
246	209	247	220
205	205	267	229
209	203	216	240
254	212	259	214
223	277	236	243
273	216	240	214
196	254	268	242
247	248	224	206
246	242	228	252

