



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การเตรียมและศึกษาสมบัติแผ่นเส้นใยโกรงร่างขนาดนาโนจากสารละลายน้ำ
ด้วยวิธีอเล็กโตรสปินนิ่งเพื่อการประยุกต์ใช้ในชีววิทยาทางการแพทย์

Preparation and properties of non-woven mats nanofibers from silk solution
with electrospinning method for biomedical applications

คณบุญ
ผู้วิจัย

นายสาียนต์ แสงสุวรรณ

สังกัด

คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

โครงการวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ประจำปีงบประมาณ 2552-2553
(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย ม.อ.บ. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สามารถเสร็จสมบูรณ์ได้เนื่องจากได้รับความช่วยเหลือจากนักศึกษาปริญญาโท นางสาวคัทลียา ครองยุทธ และนักศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาเคมี ของคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่ได้ร่วมกันช่วยทำงานเป็นอย่างดีอันเป็นส่วนหนึ่งของโครงการพิเศษ (special project) ในหลักสูตรสาขาเคมีซึ่งประกอบด้วย นายไชยา พรอมโส นางสาวพรทิพย์ โพธิสาชา นางสาวกรองกาญจน์ แก้วนิมิตร และ นางสาวสุจิตรา วงศ์แก้ว

ขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์และเจ้าหน้าที่/อาจารย์ประจำภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัย อุบลราชธานี สำหรับความอนุเคราะห์/สนับสนุนอุปกรณ์ เครื่องมือและสารเคมีต่างๆ ในการทำการทดลอง

ขอขอบคุณ พศ.ดร.อรัญญา พิมพ์มงคล ที่กรุณให้คำแนะนำและอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่อง Scanning Electron Microscope เพื่อศึกษาลักษณะทางสัญญาณวิทยาของเส้นใย

ขอขอบคุณ บุคลากร ภาควิชาพิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ ที่อำนวยความสะดวกในการใช้เครื่อง X-Ray Diffraction (XRD) เพื่อใช้ศึกษาโครงสร้างผลึกของเส้นใย

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณแหล่งทุนที่สนับสนุนให้งานวิจัยนี้เกิดขึ้น คือ สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) และมหาวิทยาลัยอุบลราชธานีที่ได้ให้ทุนสนับสนุนงานวิจัยในครั้งนี้

ผู้จัด

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สามารถเสร็จสมบูรณ์ได้เนื่องจากได้รับความช่วยเหลือจากนักศึกษาปริญญาโท นางสาวคัทลียา ครองยุทธ และนักศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาเคมี ของคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่ได้ร่วมกันช่วยทำงานเป็นอย่างดีอันเป็นส่วนหนึ่งของโครงการพิเศษ (special project) ในหลักสูตรสาขาเคมีซึ่งประกอบด้วย นายไชยา พรอมโส นางสาวพรทิพย์ โพธิสาชา นางสาวกรองกาญจน์ แก้วนิมิตร และ นางสาวสุจิตรา วงศ์แก้ว

ขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์และเจ้าหน้าที่/อาจารย์ประจำภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัย อุบลราชธานี สำหรับความอนุเคราะห์/สนับสนุนอุปกรณ์ เครื่องมือและสารเคมีต่างๆ ในการทำการทดลอง

ขอขอบคุณ พศ.ดร.อรัญญา พิมพ์มงคล ที่กรุณาให้คำแนะนำและอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่อง Scanning Electron Microscope เพื่อศึกษาลักษณะทางสัญญาณวิทยาของเส้นใย

ขอขอบคุณ บุคลากร ภาควิชาพิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ ที่อำนวยความสะดวกในการใช้เครื่อง X-Ray Diffraction (XRD) เพื่อใช้ศึกษาโครงสร้างผลึกของเส้นใย

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณแหล่งทุนที่สนับสนุนให้งานวิจัยนี้เกิดขึ้น คือ สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) และมหาวิทยาลัยอุบลราชธานีที่ได้ให้ทุนสนับสนุนงานวิจัยในครั้งนี้

ผู้จัด

สารบัญ

	หน้า
บทสรุปผู้บริหาร.....	iii
บทคัดย่อภาษาไทย.....	viii
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ix
กิตติกรรมประกาศ	x
บทที่	
1. บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย)	1
1.2 วัตถุประสงค์หลักของโครงการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย	3
2. ทฤษฎีและแนวคิด	3
2.1 กระบวนการอิเล็กทรอนิกส์	3
2.1.1 การขึ้นรูปเส้นໃยในระดับไมโครเมตร	3
2.1.2 วิธีการขึ้นรูปเส้นไายนานาไป	3
2.1.3 การขึ้นรูปเส้นไายนานาไปด้วยวิธีอิเล็กทรอนิกส์	4
2.2 ปัจจัยที่ผลต่อการขึ้นรูปเส้นไายนานาไปด้วยเทคนิคอิเล็กทรอนิกส์	7
2.3 เทคนิคในการพิสูจน์เอกสารของเส้นไายนานาไป	10
2.4 ใหม่และสมบัติของใหม่	10
2.4.1 เส้นไยธรรมชาติ	11
2.4.2 ประเภทของใหม่	12
2.4.3 ส่วนประกอบของเส้นใหม่	13
2.4.4 สมบัติทางเคมีของใหม่	15
2.4.5 องค์ประกอบทางโครงสร้างของใหม่	17
2.3 การทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศ (information) ที่เกี่ยวข้อง	18
3. การทดลอง	20
3.1 เครื่องมือ	20
3.2 สารเคมี	20
3.3 วัตถุดิบที่ใช้ในการทดลอง	21
3.4 การสร้างเครื่องมืออิเล็กทรอนิกส์อย่างง่ายเพื่อใช้ผลิตเส้นไายนานาไป	21
3.5 การเตรียมสารละลายใหม่เพื่อใช้สำหรับเตรียมเส้นไายนานาไป	21
3.6 การขึ้นรูปเส้นไายนานาไปด้วยเทคนิคอิเล็กทรอนิกส์	22
3.7 การพิสูจน์เอกสารของเส้นไยใหม่และเส้นไายนานาไปที่เตรียมได้	22
4. ผลการทดลองและวิจารณ์	23
4.1 การสร้างเครื่องมืออิเล็กทรอนิกส์อย่างง่าย	23
4.2 การทดสอบระบบเครื่องมือที่สร้างขึ้น	27
4.3 ระบบตัวทำละลายที่เหมาะสมสมสำหรับการเตรียมผงใหม่	31
4.4 การหาสภาวะที่เหมาะสมของตัวแปรการขึ้นรูปเส้นไยใหม่	34
4.4.1 ผลกระทบของความเข้มข้นสารละลายใหม่ต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นไย	34

สารบัญ (ต่อ)	หน้า
4.4.2 ผลกระทบของศักย์ไฟฟ้าที่ให้ต่อสัมฐานวิทยาและขนาดเส้นผ่าն ศูนย์กลางของเส้นใย	40
4.4.3 ผลกระทบของระยะห่างจากปลายเข็มถึงแผ่นรองรับ (TCD) ต่อสัมฐานวิทยาและเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นใยนาโนใหม่	43
4.5 การขึ้นรูปเส้นใยผสมระหว่างใหม่ (SF) กับ PVP ด้วยเทคนิคอิเล็กโทรสปินนิ่ง	47
4.6 การวิเคราะห์สมบัติต่างๆของเส้นใย	53
4.6.1 การศึกษาโครงสร้างทางเคมีของเส้นใยใหม่ด้วยเทคนิค FTIR	53
4.6.2 การศึกษาโครงสร้างผลึกของเส้นใยใหม่ด้วยเทคนิค X-ray diffractions	54
4.6.3 การศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC	54
4.6.4 การศึกษาสมบัติความเสถียรทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA	57
4.7 การวิเคราะห์สมบัติของเส้นใยผสม SF/PVP	58
5. สรุปผลการทดลอง	61
เอกสารอ้างอิง	63
ภาคผนวก	66

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

เส้นใยพอลิเมอร์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ระดับมิลลิเมตรลงไปถึงระดับนาโนเมตรมีประโยชน์อย่างมากในด้าน เช่น เป็นเส้นใยเสริมแรงในคอมโพสิตเส้นใย เป็นขั้นพื้นผิวป้องกันการเปียกน้ำในสื่อผ้า เป็นตัวรองเมมเบรนที่มีประสิทธิภาพสูงและใช้ในวิศวกรรมเนื้อเยื่อ เช่น สร้างแผ่นโครงร่างเนื้อเยื่อสำหรับให้เซลล์เจริญเติบโต การปลูกถ่ายเส้นเลือด การตอกแต่งบาดแผลและระบบการนำส่งยาเป็นต้น เนื่องจากเส้นใยนาโนมีอัตราส่วนระหว่างปริมาณพื้นผิวต่อปริมาตรสูงจึงทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของเซลล์และการเพิ่มจำนวนอย่างรวดเร็วในกระบวนการการเกิดเนื้อเยื่อ การสร้างแผ่นรองกระเบื้องเนื้อเยื่อ การทำไฮโลเวนแคลสติ้ง การกรองอนุภาค การแยกเฟส การทำให้แห้งโดยวิธีอบเย็นแบบอัมลัชั่น การทำก้ามไฟฟ์มิ่งและเทคนิคการพิมพ์แบบ 3 มิติ อย่างไรก็ตามพบว่าเทคนิคօลีก็อตโรคสปินนิ่งเป็นวิธีการร่ายๆและไม่ซับซ้อนจึงได้เปรียบและที่ดึงดูดใจอย่างมากสำหรับใช้สร้างแผ่นเส้นใยสำหรับสร้างเนื้อเยื่อ เนื่องจากโครงสร้างที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็กที่ได้จากการวิธีอิเล็กโทรสปินนิ่งทำให้มีอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูงและมีสัมผัสรุนวิทยาลักษณะกับเนื้อเยื่อธรรมชาติ นอกจากนี้แล้วยังพบว่าประจุไฟฟ้าสถิตย์ของเส้นใยที่เตรียมด้วยเทคนิคօลีก็อตโรคสปินนิ่งมีประโยชน์ในการเปลี่ยนตัวรองเมมเบรนสามาตรช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการกรองให้ดีมากขึ้น^[1-4]

ในปัจจุบัน วัสดุชีวภาพทางพอลิเมอร์ที่เข้ากันได้สัมภาระอย่างสลายได้ทางชีวภาพกำลังได้รับความสนใจในการนำมาขึ้นรูปเป็นแผ่นเส้นใยสำหรับการสร้างเนื้อเยื่อ วัสดุเหล่านี้ประกอบด้วย คอลลาเจน พอลิแล็คไทล์โคลาเจน โพลิแล็คติกເອົຈີດ พอลิไกลโคລິກເອົຈີດ และพอลิຄາປຣແລັກໂທນ อย่างไรก็ตาม วัสดุเหล่านี้มักมีสมบัติเชิงกลไม่ดีเพียงพอและมักหนึ่งนานาให้เกิดการอักเสบขึ้นภายในเนื้อเยื่อ ดังนั้นด้วยคุณสมบัติเชิงกลที่ดีของเส้นใยไหม (อันเนื่องมาจากโครงสร้างเป็ดต้าชีห์) ทำให้เส้นใยจากไหมมีศักยภาพเป็นตัวแข่งขันที่มีสมบัติเฉพาะตัวสำหรับใช้เป็นวัสดุในการผลิตเป็นแผ่นเส้นใยสำหรับการสร้างเนื้อเยื่อจึงทำให้เกิดความสนใจครั้งใหม่ขึ้นในหมู่นักวิจัยในการใช้ประโยชน์จากเส้นใยไหมเพื่อประโยชน์ต่อในทางชีววิทยาทางการแพทย์เนื่องด้วยสมบัติเชิงกลที่เหมาะสมและการย่อยสลายได้ดี ไหมเลี้ยงได้รับความสนใจมายาวนานกว่า 5000 ปี ไม่ใช่เฉพาะเรื่องสมบัติทางเส้นใยในเรื่องของเนื้อผ้า ความคงทน และการย้อมสีเท่านั้น แต่ยังถูกนำไปใช้ในพวงเครื่องสำอางที่เป็นครีม โลชั่น เครื่องแต่งหน้า แป้ง สบู่อ่อนน้อม และทางด้านยาอักด้วย และไหมที่ได้จากตัวหนอนไหมยังมีการใช้อ讶งกว้างขวางในทางการค้า เช่น เป็นไหมเย็บแผลที่ย่อยสลายได้เองในช่วงหลายทศวรรษที่ผ่านมา^[5-11]

การทำอิเล็กโทรสปินนิ่งจากไหมและจากไขแมงมุมได้ถูกรายงานครั้งแรกโดย Zarkoob และคณะ^[12-14] โดยละลายน 0.23 – 1.2 wt% ใน hexafluoro-2-propanol (HFIP) และสามารถผลิตเส้นใยพอลิเมอร์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วง 6.5 – 200 nm ซึ่งมีระดับของความเป็นผลึกเทียบเท่ากับเส้นใยธรรมชาติของพวกไหมเอง ต่อมาก Jin และคณะ^[2] และ Ohgo และคณะ^[10] ได้ประยุกต์ใช้เทคนิคօลีก็อตโรคสปินนิ่งเพื่อเตรียมแผ่นเส้นใยไหมนาโนสำหรับสร้างเนื้อเยื่อที่มีรูพรุนสูงมากๆ นั่นคือมีเส้นผ่านศูนย์กลางระดับนาโน โดยในตอนเริ่มต้นของการทำวิจัยด้านอิเล็กโทรสปินนิ่งนั้นประสบปัญหาหลักด้าน เช่น การเลือกตัวทำละลายที่เหมาะสม^[15] และการควบคุมการเปลี่ยนรูปแบบการจัดเรียงตัวของไฟฟ์บอร์อินในระหว่างการทำอิเล็กโทรสปินนิ่ง โดยตัวทำละลายที่ใช้ในการละลายไหมจะต้องไม่ไปปรบกวนการเข้ากันได้เมื่อนำไปใช้ในเซลล์ไม่ว่าจะอยู่ในรูปแบบ *in vitro* หรือ *in vivo* ก็ตาม การคงรูปของโครงสร้างอันดับสอง (เบ็ดต้าชีห์) ของไหมในเส้นใยที่ผลิตโดยวิธีอิเล็กโทรสปินนิ่งเป็นสิ่งที่จำเป็นเพื่อทำให้ได้สมบัติเชิงกลที่เหมาะสม Jin ได้ผลิตเส้นใยจากของผสมระหว่าง poly(ethylene oxide) (PEO) และไหมด้วยเทคนิคօลีก็อตโรคสปินนิ่งโดยใช้สารละลายน HFIP พบร้าได้เส้นใยที่มีขนาดเท่ากัน (800 ± 100 nm) แต่เนื่องจากใช้ PEO จึงอาจมีผลกระทบต่อสมบัติเชิงกลและการเข้ากันได้กับเนื้อเยื่อ ต่อมาก Jin และคณะ^[16] ได้ตัวทำละลาย hexafluoroacetone-hydrate (HFA) สำหรับการเตรียมไหมแบบบริโภคบินเนทพบร้าเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเส้นใยที่เตรียมได้โดยใช้ตัวทำละลายนี้เท่ากับ 300 nm ซึ่ง HFA-hydrate อาจช่วยทำให้เกิดความเข้ากันได้มากขึ้นและมีการใช้เมทานอลในการชะล้าง

HFA ออกไปซึ่งนำไปสู่การทำให้เส้นใยเกิดการหดตัวเกิดขึ้นและมีผลต่อสมบัติเชิงกลของเส้นใยด้วย นอกจากนี้ในปัจจุบันแม้จะมีการทำวิจัยการผลิตเส้นใยนาโนจากใหม่เพิ่มมากขึ้นก็ตาม แต่ปัญหาเรื่องการหาตัวทำละลายที่ดี การหัวริการ/เทคนิคเพื่อให้ได้เส้นใยที่ความเสมอภาคกัน ยังเป็นโจทย์วิจัยที่นักวิจัยยังคงต้องทำวิจัยทั้งในเชิงลึกและเชิงกว้างกันอย่างต่อเนื่อง นอกจากนี้แล้วมีหลายงานวิจัยที่ได้รายงานว่าตัวแปรที่มีอิทธิพลอย่างมากต่อขนาดและลักษณะของเส้นใยที่เตรียมได้ คือ ตัวแปรของการขึ้นรูป (processing parameters) ซึ่งประกอบไปด้วย ความเข้มข้นของสารละลาย ความหนืดของสารละลาย สนามไฟฟ้า ชนิดของตัวทำละลาย ระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับแผ่นโลหะ รองรับ อัตราการไหลของสารละลาย^[4] และมุมระหว่างปลายเข็มกับแผ่นโลหะรองรับ^[17] ตลอดจนยังพบว่ามีงานวิจัยจำนวนค่อนข้างน้อยที่รายงานความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรของการขึ้นรูปกับสมบัติของเส้นใยนาโนโดยเฉพาะอย่างยิ่ง ในตัวอย่างเส้นใยนาโนของใหม่

ดังนั้นโครงการวิจัยนี้จึงสนใจสร้างเครื่องมืออิเล็กทรอนิกส์เพื่อประเมินค่าตัวแปรที่สามารถผลิตเส้นใยนาโนจากห้องพอลิเมอร์ทั่วไปและพอลิเมอร์ธรรมชาติได้และต้องการศึกษาวิธีการเตรียมแผ่นเส้นใยโครงร่างขนาดนาโนจากสารละลายโดยปรติจากใหม่ด้วยเทคนิคอิเล็กทรอนิกส์เพื่อประเมินค่าตัวแปรในขบวนการทำอิเล็กทรอนิกส์จากสารละลายใหม่เพื่อสร้างแผ่นเส้นใยโครงร่างสำหรับสร้างเนื้อเยื่อเพื่อประยุกต์ใช้ในทางชีวิทยาการแพทย์ โดยมีวัตถุประสงค์ให้ได้รับเส้นใยในระดับนาโนที่มีขนาดเดียวกันกับตัวอิเล็กทรอนิกส์เพื่อใช้ในการแพทย์ และทำวิเคราะห์ข้อมูลของตัวแปรทางการขึ้นรูปต่อเส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นใย และสมบัติอื่นๆ ของเส้นใย เช่น สมบัติเชิงกล สมบัติสัญฐานวิทยา สมบัติการจัดเรียงตัวระดับโมเลกุล สมบัติทางความร้อน เป็นต้น แล้วหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรของการขึ้นรูปกับสมบัติของแผ่นเส้นใยที่เตรียมได้จากสารละลายใหม่ และจะใช้เป็นฐานข้อมูลเพื่อการวิจัยขั้นสูงต่อไปสำหรับการประยุกต์ใช้ในทางการแพทย์ต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์หลักของโครงการวิจัย

1. เพื่อสร้างเครื่องมืออิเล็กทรอนิกส์เพื่อใช้สำหรับการผลิตเส้นใยนาโน
2. เพื่อศึกษาการขึ้นรูปแผ่นเส้นใยโครงร่างระดับนาโนจากสารละลายใหม่ด้วยวิธีการอิเล็กทรอนิกส์เพื่อใช้สำหรับการประยุกต์ใช้ในชีวิทยาทางการแพทย์
3. เพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่าง ๆ ในการขึ้นรูปต่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นใยใหม่ สัญฐานวิทยา สมบัติเชิงกล สมบัติการจัดเรียงตัวในระดับโมเลกุล สมบัติทางความร้อน และสมบัติการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักเนื่องจากความร้อนของแผ่นเส้นใยใหม่ระดับนาโนที่เตรียมได้
4. เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมแผ่นเส้นใยใหม่ระดับนาโนให้มีเส้นผ่าศูนย์กลางที่มีความเสมอภาคกัน
5. เพื่อศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรของการขึ้นรูปกับสมบัติของเส้นใยใหม่นาโนที่เตรียมได้ (processing/property relationships)

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

1. สร้างเครื่องมืออิเล็กทรอนิกส์เพื่อใช้สำหรับทำการผลิตเส้นใยนาโน จำนวน 1 ชุด
2. ศึกษาการขึ้นรูปเส้นใยโครงร่างระดับนาโนจากสารละลายใหม่ด้วยเทคนิคอิเล็กทรอนิกส์เพื่อใช้สำหรับการประยุกต์ใช้ในชีวิทยาทางการแพทย์ (biomedical)
3. ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่าง ๆ ในการขึ้นรูปต่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นใยใหม่ สัญฐานวิทยา สมบัติเชิงกล สมบัติการจัดเรียงตัวในระดับโมเลกุล สมบัติทางความร้อน และสมบัติการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักเนื่องจากความร้อนของแผ่นเส้นใยใหม่ระดับนาโนที่เตรียมได้
4. ค้นหาสภาวะที่เหมาะสมในการขึ้นรูปแผ่นเส้นใยใหม่ระดับนาโนให้มีเส้นผ่าศูนย์กลางที่มีความเสมอภาคกัน
5. ค้นหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรของการขึ้นรูปกับสมบัติของเส้นใยใหม่นาโนที่เตรียมได้

บทที่ 2 ทฤษฎีและแนวคิด

2.1 กระบวนการอิเล็กโทรสปินนิ่ง (Electrospinning Process)

ก่อนที่จะกล่าวถึงกระบวนการอิเล็กโทรสปินนิ่ง ขอแนะนำวิธารขั้นรูปเส้นในระดับไมโครเมตรและการขั้นรูปเส้นในระดับนาโนเมตร ดังนี้

2.1.1 การขั้นรูปเส้นในระดับไมโครเมตร (Fabrication of microfibers)

โดยปกติการผลิตเส้นใยสังเคราะห์สามารถเตรียมได้ 3 วิธีการง่ายๆ ที่แตกต่างกัน คือ การปั๊มเส้นใยแบบแห้ง (dry spinning)^[18,19] การปั๊มเส้นใยแบบเปียก (wet spinning)^[20-23] และการปั๊มเส้นใยหลอมเหลว (melt spinning)^[24-26] ซึ่งต้องให้ความร้อนแก่พอลิเมอร์จนหลอมเหลวและมีความหนืดที่เหมาะสมสำหรับการอีกซ์ทรูชัน ผ่าน spinnerette ส่วนกระบวนการปั๊มเส้นใยแบบสารละลายต้องใช้ตัวทำละลายอ่อนทรีย์ในการละลายพอลิเมอร์เส้น ไปให้เป็นของเหลวก่อนที่จะทำการอีกซ์ทรูดผ่าน spinnerette ตัวอย่างพอลิเมอร์เส้นใยที่นิยมนำมาปั๊มเส้นใย หลอมเหลวประกอบด้วย HDPE, polyesters, nylon และ polyolefins เป็นต้น ส่วนตัวอย่างพอลิเมอร์ที่นิยมปั๊มเส้นใยโดยวิธีตัวทำละลายแห้ง เช่น cellulose acetate, cellulose triacetate, acrylic, vinylon และ spandex ในขณะที่เส้นใยที่ปั๊มโดยวิธีเปียกประกอบด้วย acrylic และ monoacrylic

ส่วนใหญ่กระบวนการเหล่านี้ขึ้นอยู่กับความดันที่ต้องใช้ในการขับดันพอลิเมอร์ของเหลวหนึ德 และเส้นใยที่ผลิตได้มีเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วง 2 - 500 ไมโครเมตร และด้วยกระแสไฟปัจจุบันของโลกวิทยาศาสตร์ที่กำลังมุ่งไปสู่สัดส่วนที่เล็กกว่า (นาโนเทคโนโลยี) จึงทำให้นักวิจัยได้คิดวิธีการ/เทคนิคที่จะลดขนาดของวัสดุลงและพยายามค้นหาสมบัติของวัสดุเหล่านี้ในระดับนาโนสเกล การลดระดับขนาดของวัสดุลงไปอยู่ในระดับนาโนจะทำให้สามารถควบคุมสมบัติพื้นฐานของวัสดุโดยไม่ต้องทำการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนทางเคมีของพวกรัตน์ การใช้ประโยชน์ของเทคโนโลยีใหม่เพื่อผลิตเส้นใยนาโน จึงถือเป็นการเปิดโอกาสให้มีการพัฒนาผลิตภัณฑ์ชนิดใหม่ขึ้นพร้อมๆ กันนำไปประยุกต์ใช้ในหลายๆ ด้าน เส้นใยนาโนเป็นวัสดุนาโนที่เป็นของแข็งและมีลักษณะเป็นเส้นตรง โดยถูกจำแนกจากค่า aspect ratio (ค่าความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง) ที่มากกว่า 1000:1 โดยที่อ้างถึงสถาบันวิทยาศาสตร์แห่งชาติ (NSF) ของประเทศสหรัฐฯ ได้ให้ความหมายว่ากับวัสดุขนาดนาโนว่าเป็นวัตถุที่มีอย่างน้อย 1 มิติ (one dimension) ที่มีขนาดน้อยกว่าหรือเท่ากับ 100 นาโนเมตร^[27] ดังนั้นเส้นใยนาโนจึงเป็นเส้นใยที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่าหรือเท่ากับ 100 นาโนเมตร วัสดุในรูปของเส้นใยจึงมีความสำคัญอย่างมากทั้งในทางทฤษฎีและทางปฏิบัติ การมีคุณสมบัติที่ร่วมกันหลายอย่างของเส้นใยนาโน เช่น การมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง ความคงดอง การนำความร้อนและการนำไฟฟ้า และความแข็งแรงสูง ทำให้เส้นใยนาโนเป็นรูปแบบที่เหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้ในด้านต่างๆ ตั้งแต่เป็นเครื่องนุ่มน้ำไปจนถึงเป็นตัวเสริมแรงของยานอวกาศ เป็นต้น นอกจากนี้ยังสามารถใช้งานด้านพิลเตอร์ ด้านคอมพิวเตอร์ ด้านการสร้าง ด้านการดูแลสุขภาพ ด้านการกักเก็บพลังงาน และด้านเครื่องสำอาง เป็นต้น

2.1.2 วิธีการขั้นรูปเส้นใยนาโน (Methods of fabricating nanofibers)

เทคโนโลยีที่ใช้สำหรับการขั้นรูปเส้นใยนาโนมีอยู่หลายเทคนิค ได้แก่ เทคนิคแม่พิมพ์ (template method)^[28-30] เทคนิคการรวมตัวกัน (self assembly)^[31,32] เทคนิค vapor growth^[33] เทคนิคการแยกเฟส^[34,35] เทคนิคการดึง (drawing)^[36] เทคนิคการเป่าสารหลอมเหลว (melt blowing)^[37,38] เทคนิค multi-component fiber splitting, เทคนิคการปั๊ม (spinning) และเทคนิคอิเล็กโทรสปินนิ่ง (electrospinning) ลักษณะวิธีการขั้นรูปเส้นใยแบบดึงจะคล้ายๆ กับวิธีการผลิตเส้นใยแบบปั๊มที่ใช้ในอุตสาหกรรมเส้นใยซึ่งสามารถผลิตเส้นใยเดี่ยวนาโนที่มีความยาวมากๆ ได้ อย่างไรก็ตามข้อเสียของเทคนิคนี้ คือ วัสดุที่มีความเป็นวิสโคэลاستิกเท่านั้นจึงจะสามารถนำมาปั๊มเป็นเส้นใยนาโนได้ ส่วนเทคนิคแม่พิมพ์จะใช้เมมเบรนที่รูพรุนระดับนาโนเป็นแม่แบบในการผลิตเส้นใยนาโน โดยอาจจะอยู่ในรูปของของเส้นใย (fibril) และ รูปท่อ (hollow) เทคนิคนี้สามารถเตรียมเส้นใยและท่อที่มีขนาดนาโนได้

สำหรับวัสดุพ梧พอลิเมอร์นำไฟฟ้า โลหะ เมมค่อนดักเตอร์ และ คาร์บอน แต่ข้อเสียของวิธีนี้ คือ ไม่สามารถผลิตเส้นในรูปแบบเดี่ยวได้ ส่วนเทคนิค self-assembly จะใช้สมบัติเฉพาะตัวของวัสดุดังต้นเพื่อจัดการตัวมันเองให้อยู่ในรูปแบบและหน้าที่ตามที่เราต้องการ อย่างไรก็ตามเทคนิคนี้ใช้เวลานานในการเตรียมเส้นใยพอลิเมอร์ในรูปแบบต่อเนื่อง เทคนิคการแยกเฟลเป็นกระบวนการที่ทำลายขั้นตอนที่เกี่ยวกับการแยกตัว การเกิดเจลและการสกัดโดยใช้ตัวทำละลายที่แตกต่างกัน การทำให้เข็งตัวและทำให้แห้ง โดยจะได้วัสดุที่มีรูพรุนระดับนาโน อย่างไรก็ตามเทคนิคนี้ใช้เวลา ยาวนานเข่นกันในการส่งผ่านพอลิเมอร์ในรูปของแข็งไปสู่รูปของโฟมที่มีรูพรุนระดับนาโน เส้นใยที่เข็งรูปด้วยเทคนิค melt-blowing จะให้เส้นใยที่มีลักษณะผสมโดยมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางอยู่ทึ้งในระดับชั้นใบไมโครเมตรและระดับไมโครเมตร ซึ่งจะใช้สำหรับพอลิเมอร์ที่เป็นพลาสติกแต่เส้นใยที่ได้สมบัติเชิงกลไม่ดีนัก เนื่องจากมีการจัดเรียงตัวระดับโมเลกุลที่ไม่เป็นระเบียบในขณะที่เกิดการเข็งรูป อีกทั้งใช้พอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำน้ำหนักของโมเลกุลที่ไม่เข็งตัวได้ เช่น ไนโตรเจนไนท์ ออกไซด์ ไฮโดรเจน ไฮดรอกซิล และ อะมอนิอา ซึ่งจะเข้ามาช่วยให้โมเลกุลต่ำน้ำหนักเข็งตัวได้โดยไม่ต้องใช้ความร้อนสูง แต่ในทางกลับกัน โมเลกุลต่ำน้ำหนักของพอลิเมอร์ที่เข็งตัวได้จะต้องมีส่วนประกอบที่ต้องการตัวอย่างเช่น อะมอนิอา ไฮดรอกซิล และ ไฮดรอกซิล ซึ่งจะเข้ามาช่วยให้โมเลกุลต่ำน้ำหนักเข็งตัวได้โดยไม่ต้องใช้ความร้อนสูง แต่ในทางกลับกัน โมเลกุลต่ำน้ำหนักของพอลิเมอร์ที่เข็งตัวได้จะต้องมีส่วนประกอบที่ต้องการตัวอย่างเช่น อะมอนิอา ไฮดรอกซิล และ ไฮดรอกซิล

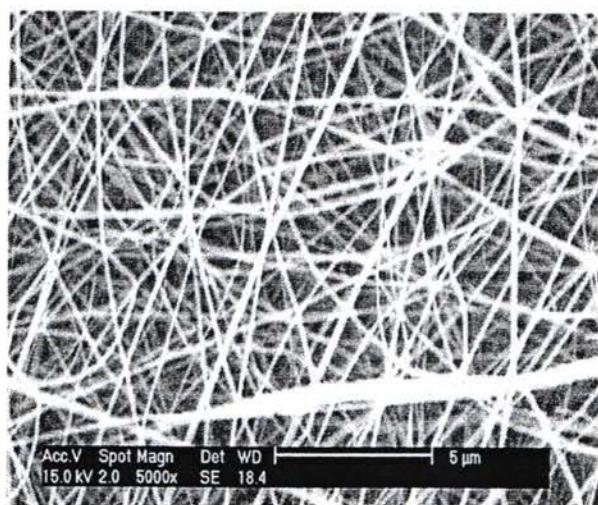
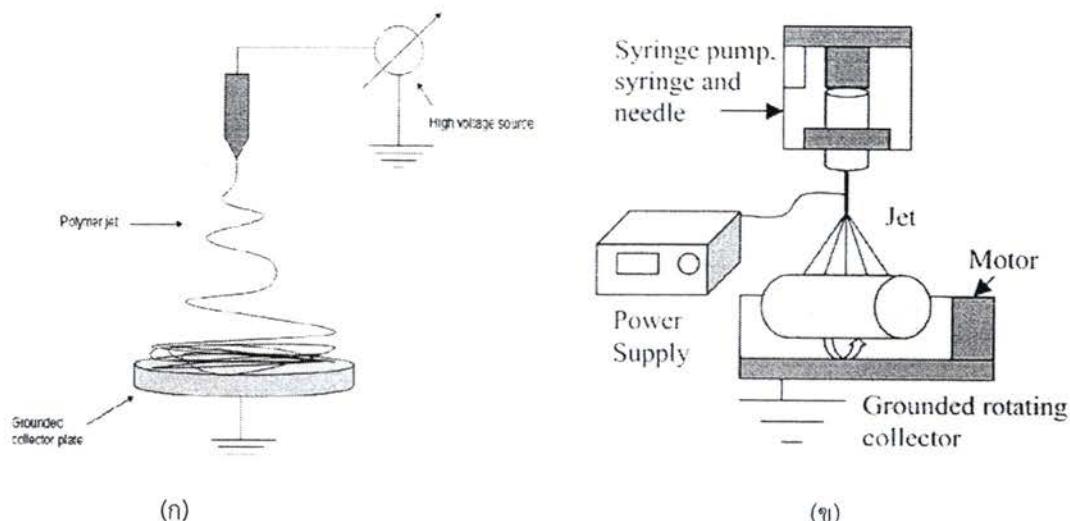
จากที่กล่าวมาแล้ว จะเห็นว่าเทคนิคเล็กๆน้อยนี้มันจะเป็นวิธีการเดียวที่จะสามารถพัฒนาไปสู่การผลิตในเชิงปริมาณมากๆในระดับอุตสาหกรรมได้ สำหรับการผลิตเส้นใยนาโนแบบต่อเนื่องจากพอลิเมอร์ต่างๆ

2.1.3 การขึ้นรูปเส้นไนโานด้วยวิธีอเล็กโทรสปินนิ่ง (Electrospinning of nanofibers)

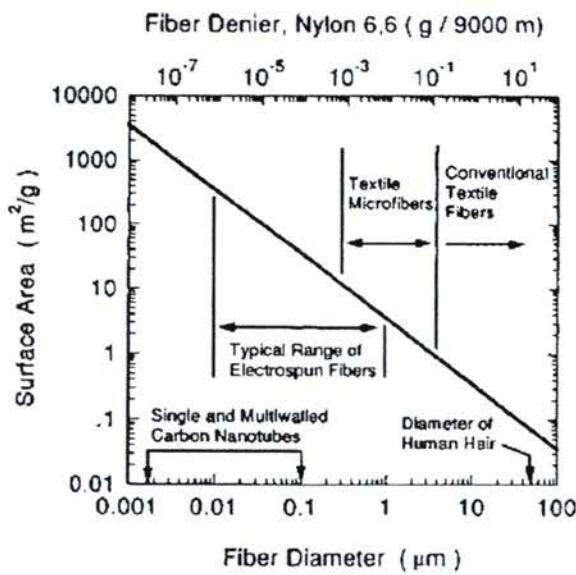
เทคนิคօเล็กตอร์สปีนนิ่งเป็นรุ้งจัมมาตั้งแต่ทศวรรษที่ 1930 เป็นเทคนิคที่ง่ายและมีประสิทธิภาพในการผลิตเส้นใยที่มีขนาดระดับนาโนในปัจจุบันไม่ในครอเมต์ การใช้อลีกตอร์สปีนนิ่งในการสร้างแผ่นเส้นใยโครงร่างที่ไม่ได้เกิดจากการห่อ (nonwoven) ถูกรายงานครั้งแรกในสิทธิบัตรโดย Formhals A^[39] ในปี ค.ศ. 1934 เทคนิคนี้เกี่ยวข้องกับการสร้างสนามไฟฟ้าที่มีความเข้มสูงระหว่างสารละลายพอลิเมอร์ที่อยู่ในภาชนะกักเก็บเช่น glass syringe ที่ต่ออยู่กับปลายเข็มฉีดยา กับภาชนะรองรับที่เป็นโลหะดังรูปที่ 1 โดยเมื่อให้ศักย์ไฟฟ้าเข้าไปจนถึงค่าวิกฤตค่าหนึ่ง ประจุจะสามารถอาซานะแรงตึงผิวของหยดพอลิเมอร์ที่อยู่บนปลายเข็มได้จะเกิดลำกระแสงของเหลวของสารละลาย (jet) เกิดขึ้น โดยขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของลำกระแสงประจุดังกล่าวจะลดลงภายใต้แรง electro-hydrodynamic และภายใต้สภาวะการทดลองที่แน่นอนหนึ่ง ลำกระแสงของเหลวนี้จะเกิดการขาดของสายไฟได้ความไม่เสถียรของสนามไฟฟ้าในขณะที่วิ่งตรงไปยังภาชนะรองรับโลหะซึ่งทำให้เกิดการยึดออกของเส้น^[2] กระบวนการยึดออกของเส้นในนี้จะเกี่ยวกับการระเหยออกของตัวทำละลาย ซึ่งนำไปสู่การลดลงของเส้นผ่านศูนย์กลางของลำกระแสงของเหลว โดยเส้นที่แห้งแล้วจะผังตัวแบบสี่เหลี่ยมหรือจัมมาตั้งแต่ทศวรรษที่ 1930 เป็นเทคนิคของการร่วมรับ.

นอกจากนี้ ยังพบว่ามีความก้าวหน้าด้านงานวิจัยอื่นอย่างมากในช่วงสิบปีที่ผ่านมาและเทคโนโลยีนี้ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในด้านต่างๆกันอย่างกว้างขวาง โดยงานวิจัยส่วนใหญ่ในปัจจุบันได้มุ่งเน้นไปที่การพยาบาลทำความเข้าใจในเชิงลึกถึงการเปลี่ยนแปลงลักษณะพื้นฐานหลักของกระบวนการเพื่อทำให้สามารถควบคุมสัมผัสรูปแบบของเส้นใยระดับนาโน โครงสร้าง หน้าที่ของพื้นผิว และกลยุทธ์ในการรวมกันของเส้นใยหรือการหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการทำอิเล็กโทรสปินนิ่งของพอลิเมอร์แบบต่างๆและพอลิเมอร์ทางชีวภาพแบบต่างๆ เส้นใยนาโนที่ขึ้นรูปโดยเทคนิคօลิกอิเล็กโทรสปินนิ่งสามารถจัดเรียงเพื่อสร้างโครงสร้างระดับนาโนที่มีหน้าที่เฉพาะเจาะจงได้ เช่น นาโนทิวบ์ และ นาโนไวร์^[40-41] เป็นต้น นอกจากนี้สมบัติด้านความแข็งแรง น้ำหนัก ความเป็นรูพรุน หน้าที่ของพื้นผิว (surface functionality) ยังขึ้นอยู่กับชนิดของพอลิเมอร์ที่นำมาใช้ เทคนิคการสปินนิ่งเส้นใยยังสามารถผสมพอลิเมอร์ เส้นใย และอนุภาคอื่นๆเข้าไปเพื่อสร้างเป็นชั้นที่มีความบางมากๆได้ อนุภาคที่ไม่คล้ายจำวนะเล็กน้อยสามารถเติมเข้าไปในสารละลายพอลิเมอร์และถูกฝังอยู่ในเส้นใยนาโนที่แห้งแล้วด้วย ด้วยที่สามารถละลายได้หรือสารแบคทีเรียก์สามารถเติมเข้าไปได้และทำการขึ้นรูปด้วยเทคนิคօลิกอิเล็กโทรสปินนิ่งให้เป็นแผ่นเส้นใยโครงร่างสำหรับการสร้างเนื้อเยื่อ หรือรักษาบาดแผลได้^[42] การ pragmatique ของเส้นใยนาโนทำให้สามารถเชื่อมระหว่างโลกของนาโนสเกลกับโลกของแมคโครสเกลได้เนื่องจากเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยอยู่ในระดับที่ช่วงนาโนเมตรและมีความยาวในระดับเหลาเมตร

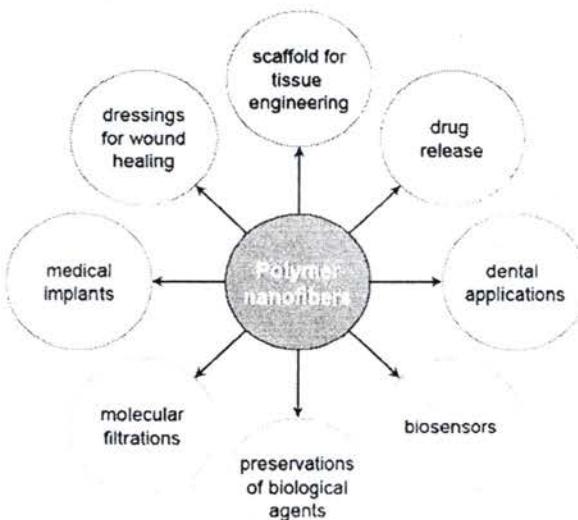
จึงทำให้เส้นไนโานีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงมากเมื่อเทียบเส้นไนรัมบ์ไมโคร เมตร ดังแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางกับปริมาตรพื้นผิวตามรูปที่ 2



รูปที่ 1 (ก) แผนภาพอย่างง่ายของการติดตั้งเครื่องมืออิเล็กโทรสปินนิ่ง โดยเส้นไนโอลิเมอร์ที่เตรียมได้สามารถนำไปปรับปรุงต่อเพื่อให้เหมาะสมกับการประยุกต์ใช้ในด้านต่างๆ และ (ข) ตัวรองรับเส้นใยที่สามารถหมุนได้ซึ่งจะช่วยให้เส้นใยที่เตรียมเกิดการจัดเรียงตัวที่ดีขึ้น (ค) ภาพตัวอย่างเส้นไนโานีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงที่เตรียมด้วยเทคนิคอิเล็กโทรสปินนิ่ง



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ผิว กับ เส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยในลอน^[43]



รูปที่ 3 การประยุกต์ใช้เส้นใยนาโนสำหรับทางชีวิทยาการแพทย์และเทคโนโลยีชีวภาพ^[43]

ดังนั้นความสำคัญของงานวิจัยในปัจจุบันเกี่ยวกับเส้นใยนาโนจึงเป็นการใช้คุณสมบัติดังกล่าวและมุ่งเป้าไปที่การหาสภาวะที่เหมาะสมในการขึ้นรูปพอลิเมอร์แบบอิเล็ก tro สเป็นนิ่งสำหรับพอลิเมอร์แบบต่างๆ รวมถึงพอลิเมอร์ทางชีวภาพด้วยเพื่อการนำไปใช้ประโยชน์ในท้ายที่สุด เช่น การสร้างเมมเบรนที่มีหน้าที่หลักอย่าง สร้างแผ่นเส้นใยโครงร่างสำหรับการสร้างเนื้อเยื่อสำหรับวิศวกรรมเนื้อเยื่อ การตอกแต่งบาดแผล การนำส่งยา การสร้างอวัยวะเทียม การปลูกถ่ายเส้นเลือดเป็นต้น การสร้างสื่อป้องกันกระสุน ตัวรองสำหรับอนุภัคกระดับต่ำกว่าไมโครเมตรในอุตสาหกรรมการแยก การเสริมแรงในคอมโพสิต และเป็นโครงสร้างในเครื่องมืออิเล็กโทรนิคระดับนาโน^[44] การประยุกต์ใช้เส้นใยนาโนสำหรับทางชีวิทยาการแพทย์และเทคโนโลยีชีวภาพนั้นอาจจะสรุปเป็นแผนผังอย่างง่ายได้ดัง

แสดงในรูปที่ 3 ความสนใจในกระบวนการอิเล็กโทรสปินนิ่งได้เพิ่มขึ้นอย่างมากในช่วงไม่ท้าปีที่ผ่านมา^[44,45] รายงานส่วนใหญ่ระบุว่าความต้านทานของระบบตัวทำละลายพอลิเมอร์ที่จะทำให้ผลิตเส้นໄไปได้ แต่พบว่ามีรายงานน้อยมากที่รายงานเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรของการขึ้นรูปกับสมบัติของเส้นใยนาโนที่เตรียมได้ไม่ว่าจะเป็นทางตรงหรือทางอ้อมก็ตาม โดยตัวแปรของการขึ้นรูปเส้นใยนาโนจะพิจารณาถึงศักยภาพที่ให้เข้าไป (applied voltage) อัตราการไหลของสารละลายพอลิเมอร์ (solution flow rate) ความเข้มข้นของพอลิเมอร์ (polymer concentration) น้ำหนักโมเลกุล ระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับแผ่นรองรับเส้นใย^[46] และยังพบว่าความหนืดของสารละลายพอลิเมอร์ มีอิทธิพลต่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นใย ลักษณะของหยดของเหลวเริ่มนั่นและวิธีของลำกระแสงของเหลวด้วย (มุ่งระหว่างปลายเข็มกับภาชนะรองรับ) ซึ่งพบว่าการเพิ่มความหนืดของสารละลายจะเกี่ยวข้องกับการเพิ่มน้ำดของเส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นใย^[47]

Baumgarten^[48] ได้รายงานความสัมพันธ์ระหว่างสภาวะบรรยายกาศในขณะทำการสปินนิ่งกับปรากฏการณ์การเกิดลำกระแสงของเหลว (jet-splaying phenomena) ผลของการกระจายออกได้รายงานโดย Reneker et al.^[44, 47] สำหรับตัวแปรของการขึ้นรูปอื่นๆ (processing variables) เช่น acceleration voltage, electrospinning current และระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับภาชนะรองรับยังไม่ได้รับการศึกษามากนัก แต่ได้มีการนำไปใช้เมื่อยกับสัณฐานวิทยาของเส้นใยและโครงสร้างที่ไม่สมบูรณ์^[49] จากงานวิจัยพื้นหลังสำหรับทั้งกระบวนการอิเล็กโทรสเปรย์และอิเล็กโทรสปินนิ่งบ่งชี้ว่าสัณฐานวิทยาทางโครงสร้างของผลิตภัณฑ์สุดท้ายจะเป็นอนุภาคหรือเส้นใยซึ่งหากผลกระทบร่วมกันของตัวแปรของสารละลายและแรงไฟฟ้าสถิตย์ซึ่งตัวแปรเหล่านี้ คือ ความหนืด ความตึงผิว ความเข้มข้น และสมบัติโดยอิเล็กทริกของสารละลาย และตัวแปรทางการขึ้นรูป เช่น อัตราการไหล และการอัตราเร่งการให้สูบความต่างศักย์^[47, 49]

2.2 ปัจจัยที่ผลต่อการขึ้นรูปเส้นใยนาโนด้วยเทคนิคอเล็กโทรสปินนิ่ง (Factors Affecting the Process of Electrospinning Nanofibers)

จากที่กล่าวมาข้างต้น เส้นใยนาโนนั้นมีตัวแปรต่างๆเข้ามาเกี่ยวข้องด้วยค่อนข้างมากและแต่ละตัวแปรก็มีอิทธิพลต่อสัณฐานวิทยาของเส้นใยนาโนที่เตรียมได้ตลอดจนสมบูรณ์ ของเส้นโดยด้วย ต่อไปนี้จะกล่าวถึงปัจจัยต่างๆ โดยสรุปที่มีผลกระทำต่อการผลิตเส้นใยนาโนด้วยเทคนิคอิเล็กโทรสปินนิ่ง โดยมีตัวแปรหลักใหญ่ที่จะต้องพิจารณา แบ่งออกเป็น 2 แหล่งใหญ่ๆ ดังต่อไปนี้

(ก) ตัวแปรทางระบบ เช่น น้ำหนักโมเลกุล น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย และโครงสร้างของพอลิเมอร์ สมบัติของสารละลายพอลิเมอร์ เช่น ความหนืด การนำไปฟื้นฟู และ แรงตึงผ้า

(ข) ตัวแปรของ การเขียนรูป เช่น ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ อัตราการไหลของสารละลายน้ำ ระยะห่างระหว่างปลายเข็ม กับภาชนะรองรับ อุณหภูมิ ความชื้น และกระแสลมในห้องทดลอง เป็นต้น และสุดท้าย คือ การเคลื่อนที่ของภาชนะ รองรับ ตัวอย่างเช่น สารละลายจะต้องมีความเข้มข้นสูงพอที่จะทำให้พอลิเมอร์เกิดการเกี้ยวพันกันได้ แต่ต้องไม่สูงมากจนไม่สามารถเกิดเคลื่อนที่ได้จากสนามไฟฟ้า สารละลายต้องมีแรงดึงดูดต่ำมากและมีความหนาแน่นประจุสูงพอ และความหนืดสูงพอที่จะป้องกันกระแสของเหลวจากการตกของหยดก่อนที่ตัวทำละลายจะระเหยไป การเปลี่ยนแปลงทางสัณฐานวิทยาสามารถเกิดขึ้นได้ภายใต้การลดระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับภาชนะรองรับ การเพิ่มหรือลดสนามไฟฟ้าทำให้ลดความหนาแน่นของการเกิดเป็นเม็ดๆ ของพอลิเมอร์ โดยไม่คำนึงถึงความเข้มข้นของสารละลายพอลิเมอร์ สำหรับผลกระทบของตัวแปรของการเขียนรูปและตัวแปรของสารละลายที่มีต่อเส้นใยที่ผลิตด้วย เทคนิคอิเล็กโทรสปินนิ่ง ที่ได้ทำการค้นหาจากงานวิจัยของกลุ่มวิจัยต่างๆ สามารถสรุปได้ตามตารางที่ 1 และ 2 ตามลำดับ และตารางที่ 3 แสดงชนิดของพอลิเมอร์ต่างๆ ที่ได้รับการศึกษานำมาผลิตเป็นสันในนานาด้วยเทคนิคอิเล็กโทรสปินนิ่ง ซึ่งจะเห็นว่าส่วนใหญ่แล้วจะเป็นพอลิเมอร์สังเคราะห์มากกว่าที่จะเป็นพอลิเมอร์ที่ได้จากการหมาดต่อย่างเช่นไหม นอกจากนี้ยังสังเกตเห็นได้ว่าขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยที่เตรียมได้จะไม่คงที่ โดยมีขนาดตั้งแต่ระดับนาโนเมตรไปจนถึงระดับไมโครเมตร และตัวทำละลายที่ใช้สำหรับพอลิเมอร์แต่ละชนิดก็แตกต่างกันไปด้วย เป็นต้น [50]

ตารางที่ 1 ตัวแปรของกระบวนการขึ้นรูปด้วยเทคนิคอิเล็กโทรสปินนิ่ง (Electrospinning process parameters)^[50]

Needle to collector distance	Exponentially inverse to the volume charge density (Theron et al., 2004) Inversely proportional to bead formation density (Fong et al., 1999; Gupta & Wilkes, 2003) Inverse to the electric field strength (Fong et al., 1999; Theron et al., 2004)
Flow rate	Directly proportional to the electric current (Theron et al., 2004) Directly proportional to the fiber diameter (Sawicka et al., 2005) Inversely related to surface charge density (Theron et al., 2004)
Voltage	Inversely related to volume charge density (Theron et al., 2004) Inversely proportional to surface charge density (Theron et al., 2004) Direct effect on bead formation (Deitzel et al., 2001) AC potential improved fiber uniformity (Kessick et al., 2004) Inversely related to fiber diameter (Gupta & Wilkes, 2003)

ตารางที่ 2 ตัวแปรของสารละลายน้ำสำหรับการขึ้นรูปด้วยอิเล็กโทรสปินนิ่ง^[50]

Concentration of polymer	Directly proportional to the fiber diameter (Gupta & Wilkes, 2003) Power law relation to the fiber diameter (Deitzel et al., 2001) Cube of polymer concentration proportional to diameter (Demir et al., 2002) Parabolic – upper and lower limit relation to diameter (Hsu & Shivkumar, 2004)
Ionic strength	Directly proportional to charge density (Zong et al., 2002) Inversely proportional to bead density (Zong et al., 2002)
Solvent	Effects volume charge density (Theron et al., 2004) Directly related to the evaporation and solidification rate (Theron et al., 2004)
Temperature	Inversely proportional to viscosity (Demir et al., 2002) Uniform fibers with less beading (Demir et al., 2002)
Viscosity	Parabolic relation to diameter, and spinning ability (Hsu & Shivkumar, 2004)

ตารางที่ 3 ตัวอย่างของพอลิเมอร์ที่ได้รับการนำมาผลิตเป็นเส้นใยนาโนด้วยเทคนิคอิเล็กโทรสปินนิ่ง

Polymers	Solvents	Fiber diameter	Year
Polyacrylonitrile (PAN)	Dimethyl formamide (DMF)	0.05-1.1 μm	1971
PEO (polyethylene oxide)		0.05- 2 μm	1981
PEO	Water	0.05- 5 μm	1995
Poly(ethylene teraphthalate) PET	Trifluoroacetic acid + Dichlorometh	0.3 - 2 μm	1996
PLLA (poly-L-lactide acid)	Dichloromethane	100 nm- 5 μm	2001
Polycarbonate	Dichloromethane	101 nm- 5 μm	2001
Polyvinlycarbazole	Dichloromethane	102 nm- 5 μm	2001
PLGA (poly(D,L-lactide-co-glycolide); 85:15	Tetrahydrofuran (THF) + DMF; 1:1	500-800 nm	2002
Fibrinogen (human and bovine)	Hexafluoro-2-propanol (HFIP)	80-700 nm	2002
PAN	DMF	~ 100 nm	2002
Polyamide-6	Formic acid	> 50 nm	2003
Polylactide (PLA)	Dichloromethane	> 50 nm	2003
Poly(ethylene-co-vinyl acetate) PEVA + Bovi	Dichloromethane	5 - 20 μm	2003
Polycaprolactone (PCL)	Chloroform + Methanol (3:1)	0.3 -5 μm	2003
PEO	Methanol	0.08 - 1 μm	2003
Vanadium sol + Poly(vinylacetate)	Ethanol	0.5 -1.5 μm	2003
Poly(vinly alcohol) PVA + casein	Water + triethanolamine	100 - 500 nm	2003
fibroin silk fibers	formic acid	< 100 nm	2003
natural silks of Bombyx mori and Nephila clavipes	hexafluoro-2-propanol	6.5-200 nm	2004
silk fibroin (SF)	9.3 M LiBr aqueous solution	700 nm	2005
Bombyx mori silk fibers	formic acid	8-379 nm	2005
Bombyx mori silk fibers	water	500 nm-10 μm	2006

2.3 เทคนิคในการพิสูจน์เอกลักษณ์ของเส้นไหมนาโน (Characterization techniques for nanofibers)

นักวิทยาศาสตร์ได้ทำงานเกี่ยวกับวัสดุในระดับนาโนมากกว่าร้อยปีแล้วแต่ยังขาดความสามารถในการวิเคราะห์เพื่อให้เข้าใจศักยภาพของมันอย่างเต็มที่ แต่ในช่วงสองสามทศวรรษที่ผ่านมาได้มีการเปลี่ยนแปลงอย่างสิ้นเชิง คือ มีเครื่องมือที่สามารถศึกษาลงลึกในระดับไมโครเมตร ทำให้สามารถหาอะตอมแต่ละชนิดได้ โดยทั่วไปสมบัติโครงสร้าง สัณฐานวิทยา การจัดเรียงของกลุ่มเส้นไหมนาโนและความเป็นรูพรุน และสมบัติเหนียวซึ้งของแผ่นเส้นไหมนาโนโครงร่าง (nanofiber mats) สามารถวิเคราะห์ด้วยเทคนิคและเครื่องมือดังเดิมได้ แต่เทคนิคใหม่บางอย่างจำเป็นต้องมีสำหรับทดสอบสมบัติเชิงกลของเส้นไหมนาโนเดียว (เส้นเดียว) แม้ว่าการวัดสมบัติเชิงกลของแผ่นเส้นไหมนาโนโครงร่าง เช่น เท斛ใช้สูงสุด strength และ elongation จะยกเนื่องจากขนาดเส้นไหมมีน้ำหนัก แต่สมบัติเหล่านี้เป็นสิ่งจำเป็นดังนั้นการปรับแก้ของเครื่องมือปัจจุบันและเทคนิคจึงจำเป็นเพื่อให้เข้าใจวัสดุนาโนได้ดีมากขึ้น เทคนิคที่ใช้ในการพิสูจน์เอกลักษณ์สมบัติของเส้นไหมนาโนสามารถแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มใหญ่ๆ คือ

- 1) ทางกายภาพ (physical)
- 2) องค์ประกอบหรือสมบัติทางเคมี (compositional or chemical) และ
- 3) สมบัติเชิงกล (mechanical)

1. Physical characterization

สมบัติทางกายภาพอันประกอบด้วยลักษณะพื้นผิว, สัณฐานวิทยาและโครงสร้างของวัสดุ การวิเคราะห์ทางพื้นผิวประกอบด้วยเทคนิคมาตรฐาน เช่น x-ray photoelectron spectroscopy (XPS), secondary-ion mass spectrometry (SIMS), scanning tunneling microscopy (STM), scanning electron microscopy (SEM), high-resolution transmission electron microscopy (HRTEM) และ low energy electron diffraction (LEED) สัณฐานวิทยาของแผ่นเส้นไหมนาโนโครงร่างสามารถหาโดยใช้เทคนิค SEM, HRTEM และ atomic force microscopy (AFM) ส่วนโครงสร้างของเส้นไหมนาโนสามารถวิเคราะห์ด้วยเทคนิค wide x-ray diffraction and scattering (WAXD) และ small angle x-ray scattering (SAXS) ซึ่งจะทำให้สามารถหาความเป็นผลลัพธ์ของวัสดุได้ สมบัติทางการภาพอื่นๆ เช่น อุณหภูมิ glass transition, อุณหภูมิหลอมเหลว และอุณหภูมิการตกผลึกสามารถหาได้จากทั้งเทคนิค differential scanning calorimetry (DSC) และ thermo gravimetric analysis (TGA)

2. Chemical or compositional characterization

สมบัติทางเคมีและองค์ประกอบของเส้นไหมนาโนสามารถวิเคราะห์ได้หลากหลายเทคนิค เช่น Raman spectroscopy, Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) และ nuclear magnetic resonance (NMR) โดยจะไม่ขอกล่าวในรายละเอียดของเทคนิคในที่นี้

3. Mechanical characterization

สมบัติเชิงกลของเส้นไหมนาโนสามารถหาได้โดยใช้เครื่องมือหลายตัว เช่น AFM, Kawabata micro-tensile testers (KES) และ dynamic mechanical analyzer (DMA) นอกจากเทคนิค AFM แล้ว เส้นไหมนาโนสามารถทำการแยกหรือรวมกันสำหรับการทดสอบเชิงกลได้ โดยแต่ละเทคนิคการทดสอบต้องการการรวมของเส้นใยเหล่านี้ไม่ว่าจะเป็นในรูปของโครงร่างแบบสุ่ม (random mat) หรือ เส้นใยที่มีการจัดเรียงตัว (aligned yarn)

2.4 ไหมและสมบัติของไหม (Bombyx mori Silk and Its Properties)

ไหมเป็นเส้นเยื่อร่มชาติที่ถูกนำมาใช้ประโยชน์ในการผลิตเครื่องนุ่งห่มเป็นเวลานานกว่า 5 พันปีมาแล้ว นับตั้งแต่สมัยจีนโบราณ และมีกระบวนการผลิตเครื่องนุ่งห่มจากเส้นไหมไทร์ได้รับการพัฒนาเรื่อยมา โดยธรรมชาติแล้ว เส้นไหมจะมีความแข็งแรงค่อนข้างมาก มีความยืดหยุ่น/เห็นยาสูง แต่มีความอ่อนนุ่ม จึงมีการนำไปใช้ใน

อุตสาหกรรมเส้นใยและสิ่งทอ สำหรับผลิตเป็นเครื่องนุ่งห่มอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน นอกจากนี้แล้วยังได้มีการนำไปเส้นใยไหมไปประยุกต์ใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ เพื่อเพิ่มมูลค่าของสินค้า เช่น ประดิษฐ์เป็นเสื้อกระถักกระสนุน เนื่องจากคุณสมบัติทางกายภาพของมันที่มีทั้งความเนียน滑และความยืดหยุ่นสูง จึงทำให้มันสามารถรองรับแรงกระแทกและดูดซับแรงได้เป็นอย่างดี ยังสามารถใช้งานได้คล่องตัวสูงด้วย เพราะว่ามันน้ำหนักเบาเมื่อเทียบกับเสื้อกระถักกระสนุนที่ทำจากวัสดุที่เป็นโลหะ การแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์เครื่องสำอางแต่งหน้า/ดูแลผิว เช่นพู ครีม อาบน้ำ สบู่ โลชั่นต่างๆโดยทำการย่อยเส้นไหมให้เป็นพอลิเมอร์ขนาดเล็ก อาจจะเล็กจนถึงอยู่ในรูปของกรดอะมิโน จากนั้นจึงนำมาผสมเป็นผลิตภัณฑ์เครื่องสำอางต่อไป ซึ่งนับว่าเป็นผลิตภัณฑ์ที่น่าสนใจมาก ที่จะสามารถเพิ่ม มูลค่าของผลิตภัณฑ์ในประเทศไทยให้สูงขึ้นได้อีก ยังมีการนำไปใช้ประโยชน์ในการแพทย์อย่างมากอีกด้วย เช่น การประยุกต์แผ่นเส้นใยสำหรับสร้างเนื้อเยื่อวิศวกรรม (tissue-engineered scaffolds), การตกแต่งบาดแผล, ใหมเย็น แพล, ระบบบำบัดสิ่งสาร เนื่องจากมันพื้นที่ผิวจำเพาะสูง รวมทั้งมีความแข็งแรง และทนต่อความร้อนและการนำไปฟื้นฟูได้ดี นอกจากนี้ยังสามารถใช้ผลิตเป็นไฮดรเจล (hydrogel) การผลิตเป็นเยื่อเลือกผ่าน ใช้สำหรับผลิตอุปกรณ์ตรวจวัดสารทางชีวโมโนเลกุล (biological sensor) และใช้ในงานทางด้านพอลิเมอร์ผสม พอลิเมอร์คอมโพสิต เป็นต้น^[51-53]

สำหรับในประเทศไทยจะเน้นการใช้ประโยชน์จากไหมในเรื่องอุตสาหกรรมเครื่องนุ่มห่มเป็นหลัก เพราะนอกจากจะนำเงินเข้าประเทศปีละหลายร้อยล้านบาทแล้วยังสร้างงานและสร้างรายได้อีกด้วย ให้แก่กลุ่มเกษตรกรตามชนบทอีกเป็นจำนวนมาก จึงทำให้มีหน่วยงานต่างๆส่งเสริมและให้ความรู้แก่เกษตรกร นับตั้งแต่โครงการปลูกหม่อน เลี้ยงไหม ศุนย์หม่อนใหม่เฉลิมพระเกียรติ โครงการหอผ้าไหมในพระราชดำริของสมเด็จพระบรมราชินีนาถ หรือแม้จะ เป็นกรมส่งเสริมการเกษตร หรือหน่วยงานเอกชนก็เข้ามาลงทุนตรงส่วนนี้มาก และยังปัจจุบัน มีการส่งเสริมโครงการหนึ่งตำบลหนึ่งผลิตภัณฑ์ (OTOP) ก็ยังสร้างงานและรายได้แก่กลุ่มเกษตรกรมากยิ่งขึ้น แต่ในเรื่องการประยุกต์ใช้ไหม สำหรับทางด้านชีววิทยาทางการแพทย์ยังมีการทำงานวิจัยทางด้านนี้อยู่มาก ดังนั้นในโครงการวิจัยนี้จึงมีความสนใจ ที่เพิ่มมูลค่าสินค้าไหม และรังไหมที่เหลือทั้งจากเกษตรกรให้มีประโยชน์มากขึ้นโดยการใช้เทคโนโลยีเล็กโตรสปินนิ่ง เข้ามาช่วยในการสร้างเส้นใยนาโนจากสารละลายไหม เพื่อการประยุกต์ใช้ในทางชีววิทยาทางการแพทย์ต่อไป

2.4.1 เส้นใยธรรมชาติ

เส้นใยธรรมชาติที่ใช้กันอยู่มีหลายชนิด^[54] และสามารถแบ่งย่อยออกตามองค์ประกอบหลักทางเคมีซึ่ง กำหนดโดยแหล่งกำเนิดของเส้นใยนั้นๆ ดังแสดงในตารางที่ 4 โดยเส้นใยที่มีความสำคัญและใช้งานสูงได้แก่ เส้นใยพืชและเส้นใยสัตว์

ตารางที่ 4 การแบ่งชนิดของเส้นใยธรรมชาติ

เส้นใยธรรมชาติ			
เซลลูโลส (เส้นใยพืช)	โปรตีน (เส้นใยสัตว์)	แร่	ยาง
ฝ้าย (cotton)	ขนสัตว์ (wool)	แร่ asbestos	ยาง (rubber)
ลินิน (linin)	ไหม (silk)		
ปอ (Jute)	ผม (hair)		
รามี (ramie)			
ป่าน (hemp)			
บุน (kapok)			

a) เส้นใยพืช

เส้นใยพืชมีองค์ประกอบโครงสร้างทางเคมีหลัก คือ เซลลูโลส เส้นใยเหล่านี้ได้จากส่วนต่างๆ ของพืช เช่น เส้นใยที่ได้จากเมล็ด ลำต้น ใบ หรือ ผล เป็นต้น ซึ่งสมบัติโดยทั่วไปของเส้นใยพืชมีความคล้ายคลึงกันดังสรุปใน

ตารางที่ 5 นอกจากสมบัติดังกล่าวแล้ว ยังมีสมบัติทางเคมีที่คล้ายคลึงกัน เช่น ทนต่อกรดอ่อนหรือกรดอินทรีย์ แต่ไม่ทนต่อกรดแกร๊ สามารถทนต่อต่างได้ ทนต่อสารละลายอินทรีย์ สามารถซักแห้งได้ นอกจากนั้นยังทนต่อสารซักฟอกข้อเด่นอีกประการหนึ่งของเส้นใยพืช คือ ความสามารถในการรับสียอมได้หลายชนิดทั้งสีรีวแอคทีฟ (Reactive dye) สีเวต (Vat dye) และสีไดเรกท์ (Direct dye) เป็นต้น

b) เส้นใยสัตว์

เส้นใยสัตว์นับเป็นเส้นใยธรรมชาติที่มีบุษยรูจักษณะและใช้มาเป็นเวลานาน จัดเป็นเส้นใยสัตว์และมีสมบัติที่คล้ายกันหลายประการ เพราะมีโครงสร้างทางเคมีเหมือนกัน คือ เป็นพ梧โปรตีน ความสำคัญของสมบัติดังกล่าว คือ มีความสามารถในการดูดซึมความชื้นได้ดี มีความคืนตัวดี อีกทั้งเป็นอนุนวยร้อนป้องกันสภาพอากาศที่หนาวเย็นได้ดี ขณะเดียวกันสมบัติที่เป็นจุดอ่อนก็มีคล้ายคลึงกันด้วย เช่น ความแข็งแรงลดลงมากในขณะเปียก มีการหดตัวอย่างรุนแรงเกิดขึ้นเมื่อยื่นสภาวะร้อนชื้นและมีแรงกระทำจากภายนอกเข้าเสริม ในประเทศไทยผลิตภัณฑ์ที่ทำมาจากขนสัตว์มีน้อยมาก ลินค้าไทยอันเป็นเอกลักษณ์ที่โดดเด่นเป็นเรื่องของใหม่ ซึ่งถูกจัดอยู่ในกลุ่มเดียวกับเส้นใยสัตว์ ด้วยเหตุผล คือ เป็นเส้นใยที่มีองค์ประกอบทางเคมีคล้ายกันคือ โปรตีน แต่การต่อเรียงกันเป็นสายโซ่ยาวของโมเลกุลโปรตีนมีลักษณะเหมือนเดียว ในขณะที่ขนสัตว์ไม่มีโมเลกุลมีการพับตัวกันทำให้การยืดและการคืนตัวลับของขนสัตว์ต่ำกว่าใหม่ ในขณะที่ใหม่มีความเรียบลื่น สวยงามมั่นคงจากนั้นใหม่ยังนับเป็นเส้นใยธรรมชาติที่เป็นชนิดเส้นใยยาวชนิดเดียวเท่านั้น เป็นเส้นใยที่มีความเป็นผลึกสูง มีความแข็งแรง อีกทั้งเป็นเส้นใยละเอียด ดูดซึมความชื้นได้ดี สามารถยอมหรือพิมพ์ด้วยสีหลายชนิด โดยเฉพาะอย่างยิ่งสีที่มีความสดใสมากๆ จึงนับว่าเป็นเส้นใยเศรษฐกิจชนิดหนึ่งที่มีความสำคัญเชื่อมโยงกับภาคเกษตรกรรมอย่างใกล้ชิด

เส้นใยสัตว์หรือเส้นใยโปรตีนทั้งขนสัตว์และใหม่มีความแตกต่างในด้านต่างๆ ตามที่ได้กล่าวกันมาบ้างแล้ว เพื่อให้เห็นความขัดเจนสามารถสรุปเป็นตารางเบรียบเทียบได้ ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ความแตกต่างระหว่างใหม่และขนสัตว์

ใหม่	ขนสัตว์	ความสำคัญต่อผู้ใช้
ประกอบด้วย C H O N	ประกอบด้วย C H O S	ขนสัตว์จะถูกทำลายได้ด้วยแมลง
ไม่เลกุลเหยียดยาว	ไม่เลกุลมีการพับตัว	ขนสัตว์จะมีการยืดตัวและการคืนตัวจากแรงยืดต่ำกว่า
มีความเป็นผลึกสูง	มีปริมาณอัณฑูรูปมากกว่า	ใหม่มีความแข็งแรง แต่ขนสัตว์จะดูดซึมน้ำได้ดีกว่า
เส้นไนโอลีเยกันตลอด	เส้นใยประกอบด้วยหลาลส่วน โดยส่วนนอกสุดเป็นเกล็ด	ขนสัตว์มีการหดตัวสูง
ผิวเรียบ	เส้นใยหยิกอ และมีผิวเป็นเกล็ดคล้ายเกล็ดปลา	ขนสัตว์ให้ความอบอุ่นกว่า คืนตัวกลับได้มากกว่า ส่วนใหม่จะมีความเรียบมันมากกว่า
ปกติเป็นเส้นใยยาว	มีแต่เส้นใยสั้นเท่านั้น	ขนสัตว์จะฟู แต่ใหม่จะเรียบ

2.4.2 ประเภทของใหม่^[51.55]

โดยทั่วไปสามารถจำแนกได้เป็นสองประเภท คือ

- ใหม่เลี้ยง (Mulberry Silk หรือ *Bombyx mori* silk)

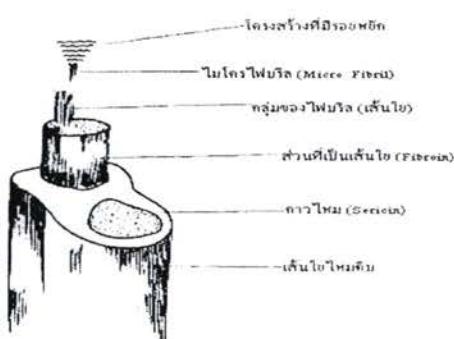
เป็นหนอนไหมที่มีบุญย์ทำการเพาะเลี้ยงขึ้นโดยใช้ใบหม่อน (Mulberry Leaves) สดฯ เป็นอาหาร ซึ่งไหมชนิดนี้จะมีสีค่อนข้างขาวและหลังการลอกการแล้วจะมีความมันเงางามขึ้น

2. ไหมป่า (Wild silk)

เป็นไหมที่มีบุญย์ไม่ได้เพาะเลี้ยงและการทำเป็นเส้นใยจะนำไปสาวเป็นเส้นไหมโดยตรงไม่ได้ การทำเป็นเส้นต้องทำแบบเส้นไหมป่าน (spun silk) ซึ่งไหมป่าจะแยกได้เป็น 2 พาก คือ ไหมที่ใช้ใบอ้อคเป็นอาหาร เรียกตัวไหมนี้ว่า "Tussah Silk" โดยปกติไหมท้าชาร์จะเป็นกลุ่มตัวแทนที่มีจำนวนมากสำหรับไหมชนิดนี้และมีแหล่งกำเนิดอยู่ที่จีนและอินเดีย กับอ้อพากหนึ่งใช้ใบละหุ่งเป็นอาหารเรียกว่า "Iri silk" ซึ่งไหมป่าทั้งสองแบบจะให้เส้นใยที่มีสีน้ำตาล มีความหมายและไม่สมำเสมอเมื่อเทียบกับเส้นใยจากไหมเลี้ยง สำหรับไหมไทยถือว่าเป็นไหมเลี้ยง แต่มีลักษณะที่ต่างจากไหมของภูมิภาคอื่นๆเนื่องจากเส้นใยค่อนข้างหยาบ นอกจากนี้ ยังพบว่าไหมไทยมีส่วนประกอบที่เป็นการไหมปริมาณมากถึง 38% ขณะที่ไหมเลี้ยงชนิดอื่นๆ ปกติมีการไหมเพียง 20-25% เท่านั้น ซึ่งทำให้เส้นไหมไทยมีลักษณะเฉพาะตัวเมื่อห่อเป็นผ้า

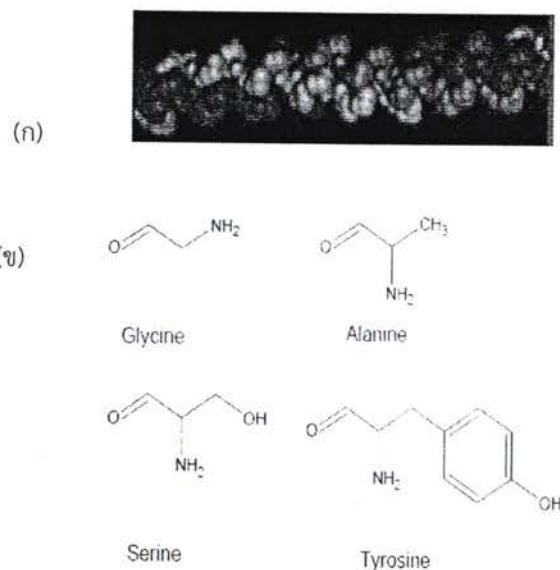
2.4.3 ส่วนประกอบของเส้นไหม^[51]

เส้นไหมที่ได้จากไหมเลี้ยงประกอบด้วย protein fibroin, sericin, fats, wax, sand pigments รวมทั้งแร่บางชนิด แต่โดยหลักๆ แล้วเส้นไหม จะประกอบด้วย 2 ส่วนที่สำคัญคือ Fibroin protein และ Sericin ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 4 ส่วนประกอบภายในเส้นไหม

Fibroin protein เป็นเส้นใยซึ่งเป็นสารโปรตีนชนิดหนึ่ง ซึ่งประกอบด้วยกรดอะมิโนชนิดต่างๆกันจำนวนมาก มากน้อยรวมเป็นสายพอลิเมอร์ที่มีลักษณะเป็นเกลียวดังแสดงในรูปที่ 5(ก) โครงสร้างของ fibroin มีทั้งส่วนที่เป็นอัลฟะไฮดรอกไซด์และส่วนฟลีก เนื่องจากส่วนที่เป็น fibrous protein ก็คือ fibroin ซึ่งเป็นส่วนที่ควรศึกษาถึงลักษณะ โครงสร้างภายในเส้นไหมเพื่อจะได้รู้ถึงปฏิกิริยาของไหมต่อขบวนการต่างๆ โดย fibroin ประกอบด้วยกรดอะมิโนที่สำคัญ 4 ตัวด้วยกันดังแสดงในรูปที่ 5 (ข)



รูปที่ 5 (ก) สายโพลีเมอร์ของไหมที่มีลักษณะเป็นเกลียวและ (ข) โครงสร้างของกรดอะมิโน 4 ตัวหลัก

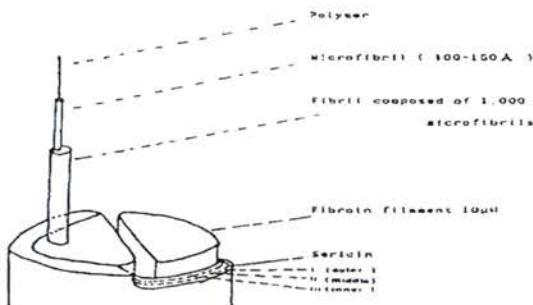
เมื่อทำการศึกษาโดยใช้ enzyme - chymotrypsin ที่อุณหภูมิ 40°C , pH 7.8 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง พบร่วงจะได้ ตะกอนของ chymotrypsin และเมื่อนำเอาระกะนันมาศึกษาพบว่าประกอบไปด้วย Polypeptide bond ซึ่งมีการ เรียงตัวดังนี้คือ Gly.Ala.Gly.Ala.Gly.(Ser.Gly.Ala.Gly.Ala.Gly.)₈ Ser.Gly.Ala.Gly.Tyr. ซึ่งปริมาณของกรดอะมิโน ชนิดต่างๆใน Fibroin และ Sericin แสดงดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 Amino acid composition of Fibroin and Sericin (Kirimura, 1972)

% Amino acids	Fibroin	Sericin	% Amino acids	Fibroin	Sericin
Glycine	42.8	8.8	Tyrosine	11.8	4.9
Alanine	32.4	4.0	Serine	14.7	30.1
Leucine	0.7	0.9	Threonine	1.2	8.5
Isoleucine	0.9	0.6	Phenylalanine	1.2	0.6
Valine	3.0	3.1	Glutamic acid	1.7	10.1
Arginine	0.9	4.2	Proline	0.6	0.5
Histidine	0.3	1.4	Methionine	0.2	0.1
Lysine	0.5	5.5	Tryptophan	0.5	0.5
Aspartic acid	1.9	16.8	Cystine	0.1	0.3

เซริซิน (Sericin) เป็นสารที่มีสี แข็งและไม่มียืดหยุ่นตัว ทำหน้าที่เชื่อมเส้นใยยาวทั้งสองเส้น เพื่อป้องกัน อันตรายให้กับเส้นใย (Fibroin) เป็นส่วนที่ปิดบังความมันเงาของไฟเบอร์อิน Sericin ถือว่าเป็นส่วนที่ไม่เป็นระเบียบ และสามารถละลายได้ในน้ำสบู่ร้อน Sericin เป็นสารโปรตีนที่ซับซ้อนประกอบด้วยสามส่วนที่ขัดเจน โดย sericin ส่วนที่สามเป็น interior layer ที่ต่ออยู่กับ fibroin core โดยตรง sericin ส่วนที่หนึ่งเป็น outer layer ที่สามารถ ละลายได้มากที่สุดเมื่อเทียบกับส่วนประกอบทั้งสาม ในขณะที่ sericin ส่วนที่สามละลายได้ยาก เมื่อพิจารณา

ภาพตัดขวางของเส้นไหมจะพบว่าเส้นเดียว (brin) จะมีลักษณะเป็นรูปแท่งสามเหลี่ยมที่มีรูมุ่มเท่ากันทั้งสามมุม ดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 Texture of the silk gland

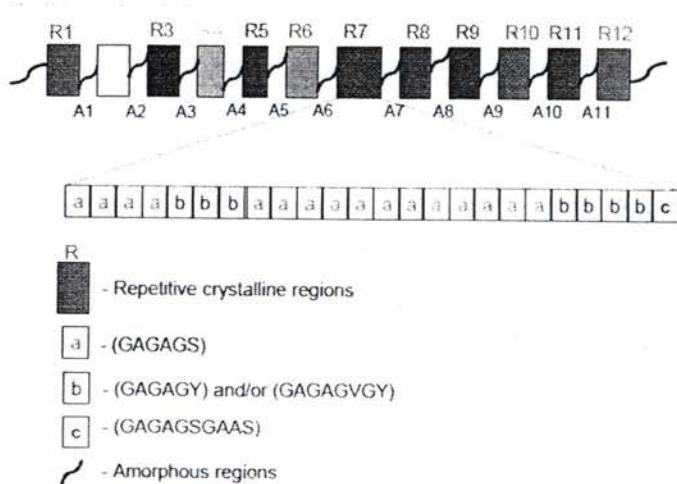
2.4.4 สมบัติทางเคมีของไหม (Chemical properties of silk)

สมบัติเฉพาะเจาะจงของโปรตีนไหมเกิดจากองค์ประกอบของกรดอะมิโนของมันที่ส่งผลต่อการจัดเรียงโครงสร้างที่เฉพาะตัวของเส้นไหม โดยที่แกนกลางของโปรตีนไหมจะประกอบไปด้วยสายโซ่ของกรดอะมิโน ซึ่งกรดแต่ละตัวจะถูกสร้างมาจากการต่อตัวกันของ 4 หมู่พื้นฐาน โดย 3 หมู่แรกซึ่งประกอบด้วย กลุ่มอะมีน ($-NH_2$) กลุ่มคาร์บอชิล ($-COOH$) และกลุ่มไฮโดรเจน ($-H$) ซึ่งจะปรากฏอยู่ในกรดอะมิโนทุกตัวและต่ออยู่กับ α -carbon สำหรับกลุ่มที่ 4 ของกรดอะมิโนแต่ละชนิด คือ หมู่ “R” หรือเรียกว่า สายโซ่กิ่ง (side chain) ซึ่งจะแตกต่างในกรดอะมิโนแต่ละตัว

ความหลากหลายของโปรตีนไหมมาจาก ขนาด รูปร่าง ประจุ ความสามารถในการมีพันธะไฮโดรเจน และความว่องไวที่แตกต่างกันของแต่ละสายโซ่กิ่ง นอกจากนี้อันตราริยาระหว่าง R-groups ด้วยกันเองจะได้รับผลกระทบจากการหมุนรอบ α -carbon ของกรดอะมิโน ซึ่งคุณสมบัตินี้ทำให้มีเล็กน้อยในการลดดึงดูดระหว่างหน่วยที่มีน้ำหนักเบา (~25 kDa) และน้ำหนักสูง (~350 kDa) ปนกัน สำหรับสายไฟโบรอินที่มีน้ำหนักมากจะประกอบไปด้วยส่วนที่เหมือนกัน (repetitive regions) อยู่ 12 แห่ง ซึ่งเรียกว่า ส่วนผลึก และประกอบด้วยส่วนที่ไม่เหมือนกัน (non repetitive) อีก 11 แห่งซึ่งอยู่ระหว่างส่วนที่เหมือนกันเรียกว่า ส่วนอัลฟ์ฟารอน องค์ประกอบของกรดอะมิโน 5263 ในไฟโบรอินจะประกอบด้วย (in mol %) 45.9% glycine (G), 30.3% alanine (A), 12.1% serine (S), 5.3% tyrosine (Y), 1.8% valine (V) และ 4.7% กรดอะมิโนอื่นๆ^[56] องค์ประกอบด่างๆของไฟโบรอินสำหรับไหมเดี้ยงแสดงดังตารางที่ 7 และโครงสร้างขั้นต้น (primary structure) ของไหมไฟโบรอินแสดงดังรูปที่ 7 โดยส่วนผลึกจะทำหน้าที่เป็นโครงสร้างอันดับสอง (secondary structure) หรือเรียกว่า anti-parallel β -pleated sheets ของโปรตีน^[57] โดยส่วนผลึกจะทำหน้าที่ให้ความแข็งแรงแก่เส้นไหม ในขณะที่ส่วนที่เป็นอัลฟารอนจะเป็นส่วนที่ทำให้ส่วนผลึกสามารถเกิดการจัดเรียงตัวได้ภายใต้การดึง นั่นคือ ทำหน้าที่ในส่วนของความยืดหยุ่นและโค้งงอนน์เอง และยังช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับเส้นไหมอีกด้วย

ตารางที่ 7 สัดส่วนองค์ประกอบของไฟเบอร์อินสำหรับไหมเลี้ยง^[58]

Amino acid	Symbol	Charge	Hydrophobicity/ hydrophilicity	Amount (g/100g fibroin)
Alanine	Ala	neutral	Hydrophobic	32.4
Glycine	Gly	neutral	hydrophilic	42.8
Tyrosine	Tyr	neutral	hydrophilic	11.8
Serine	Ser	neutral	hydrophilic	14.7
Aspartate	Asp	-	hydrophilic	1.73
Arginine	Arg	+	hydrophilic	0.90
Histidine	His	+	hydrophilic	0.32
Glutamate	Glu	-	hydrophilic	1.74
Lysine	Lys	+	hydrophilic	0.45
Valine	Val	neutral	Hydrophobic	3.03
Leucine	Leu	neutral	Hydrophobic	0.68
Isoleucine	Ile	neutral	Hydrophobic	0.87
Phenylalanine	Phe	neutral	Hydrophobic	1.15
Proline	Pro	neutral	Hydrophobic	0.63
Threonine	Thr	neutral	hydrophilic	1.51
Methionine	Met	neutral	Hydrophobic	0.10
Cysteine	Cys	neutral	Hydrophobic	0.03
Tryptophan	Trp	neutral	hydrophilic	0.36



รูปที่ 7 แผนภาพแสดงโครงสร้างขั้นต้น (primary structure) ของไหมเลี้ยง^[59]

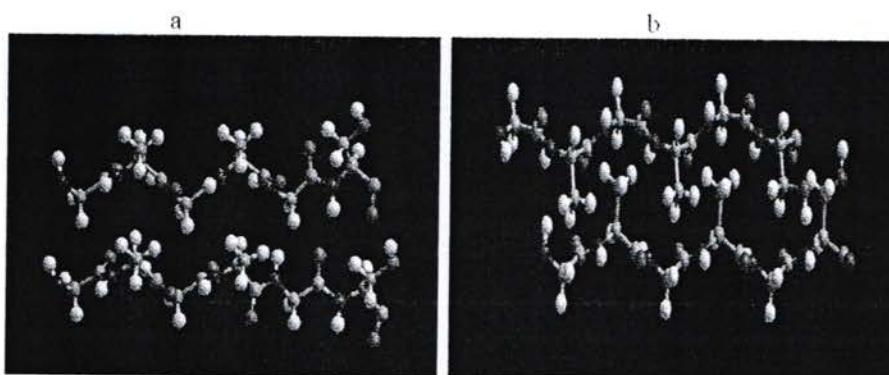
2.4.5 องค์ประกอบทางโครงสร้างของไหม (Structural composition of silks)

โครงสร้างโมเลกุลและผลึกของไหมไฟบรอินได้รับความสนใจศึกษาวิจัยอย่างมากตลอดศตวรรษที่ผ่านมา ซึ่งพบร่องรอยของไหมไฟบรอินจะเป็นการจัดเรียงตัวปกติของแผ่นชีท anti-parallel อย่างไรก็ตามเนื่องจากโนเมเดลโครงสร้างผลึกนี้ขึ้นกับการประมาณค่าหนึ่งทำให้นักวิจัยหลายกลุ่มไม่เชื่อถือโนเมเดลนี้^[60-62] และได้พยายามหาโนเมเดลอธิบายไหมโดยให้มี cell dimensions ที่อ้างอิงจากโนเมเดลของ polypeptides อย่างเช่น poly(L-Ala-Gly) และ Gly-Ala-Gly-Ala-Gly-Ser โดยในโนเมเดลใหม่นี้มี 3 conformations ของไหมที่ถูกวิเคราะห์โดยเทคนิค x-ray และ electron diffraction, NMR และ IR spectroscopy คือ โครงสร้างแบบสุ่ม (random structure, มีความเข้มข้นของไฟบรอินต่ำ), α -structure (silk I, type II β -turn, ความเข้มข้นสูงเกิดในกรณีมี physical shear), และ β -structure (silk II, antiparallel β -pleated sheet, เกิดจาก physical shear หรือการแข็งตัวทำลาย เช่น เมทานอล)^[63] โดย conformations เหล่านี้สามารถเปลี่ยนไปมาหากันได้ขึ้นอยู่กับภาวะการของรั้นรูป เช่น อุณหภูมิ, แรงและลักษณะการดึง, pH, และการแข็งตัวทำลาย เป็นต้น

โครงสร้างแบบสุ่มหรือสายไหมมีความเป็นระเบียบน้อย มีลักษณะเป็นกาวยอลิเมอร์ที่ไม่สามารถปั๊บหรือดึงยืดได้^[64] อย่างไรก็ตาม โครงสร้างนี้สามารถเปลี่ยนไปเป็นโครงสร้างแบบ α - และ β -sheet ได้โดยผ่านการดึงเชิงกลและการปรับปรุงในตัวทำลายอินทรีย์ภายใต้สภาวะของปฏิกิริยาต่างๆ สำหรับโครงสร้างแบบ β -sheet พันธะไฮโดรเจนสามารถเกิดขึ้นได้ระหว่างสายไหมเปลี่ยนไปที่อยู่ติดกัน^[65] สายไหมเปลี่ยนไปที่อาจจะจัดเรียงตัวแบบเคียงข้างกันหรือจัดแบบ antiparallel direction ได้ใน 4 configurations ที่เป็นไปได้ ดังนี้

- 1). polar-antiparallel sheet ซึ่งเสนอโดย Marsh *et al.*^[66]
- 2). polar-parallel sheet (methyl groups of alanine residues grouped on just one side)
- 3). antipolar-antiparallel sheet (methyl groups pointed alternately to opposite sides of the sheet)
- 4). antipolar-parallel model

รูปที่ 8 แสดงแผนภาพของ 2 configurations ที่เป็นไปได้สำหรับ β -sheet (parallel and anti-parallel) โดยทั้งทิศทางของสายไหมที่อยู่ติดกันและความเป็นขั้วของโมเลกุลที่จัดเรียงตัว จะเป็นตัวบ่งชี้ว่าชีทโปรดีนจะวางซ้อนทับกันเป็นผลึกในสามมิติอย่างไร โดย β -sheet จะจัดกันแน่นได้ที่สุดโดยมีระยะห่างระหว่างแผ่นชีทประมาณ 3.5 Å สำหรับ glycine-glycine interactions และ 5.7 Å สำหรับ alanine-alanine interactions [67] ถ้าแผ่นบีต้าชีทขนาดกันและไปในทิศทางเดียวกัน พันธะไฮโดรเจนระหว่างแผ่นชีทจะเกิดการบิดเบี้ยวไปห่างกัน 5.27 Å เพราะฉะนั้นพวกมันจะไม่ค่อยเสียรูปมากนัก ดังนั้นในแผนแบบตัวชีทซึ่งขนาดกันที่มีพื้นที่เปลี่ยนไปที่น้อย 5 หน่วยจะพบน้อยมาก โดยโครงสร้าง β -sheet จะมีโครงสร้างเป็นแบบ polar-antiparallel และจากการที่ Warwicker^[67] ได้



รูปที่ 8 2 configurations ที่เป็นไปได้ของ β -sheet configurations (a) parallel และ (b) anti-parallel

จัดแบ่งโครงสร้าง β -sheet ของไหมออกเป็น 5 กลุ่มตามความยาวของ c-axis ในแต่ละยูนิตเซลล์ พบร่องรอยของยูนิตเซลล์ของไหมไฟเบอร์อินเป็น a (9.3 Å), b (9.44 Å) และ c (6.95 Å) อย่างไรก็ตาม ในงานวิจัยปัจจุบันได้แสดงว่า โครงสร้าง β -sheet ประกอบด้วยชิ้นโครงสร้าง antipolar-antiparallel สองอันที่จัดเรียงตัวแตกต่างกันตาม crystal sites^[68] ส่วนโครงสร้าง α -structure (silk I, type II β -turn) ยังคงไม่ได้ข้อมูลที่ชัดเจนมากนัก แม้จะมีการศึกษามาอย่างยาวนานก็ตาม ทั้งนี้ เพราะว่ามันสามารถเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของ silk II ได้^[69-71] โดยโปรตีนไหมเลี้ยง *B. mori* silk fibroin สามารถอยู่ได้ในสองโครงสร้างที่ต่างกัน คือ ในรูปแบบของแข็ง silk I (ก่อนการสาวไyi) และ silk II (หลังการสาวไyi) สำหรับโครงสร้างที่สาม (silk III) มีโครงสร้างผลลัพธ์เป็น threefold helical crystal structure ซึ่งได้รับการค้นพบโดย Valluzzi et al. (1999) ในตัวอย่างฟิล์มที่เตรียมจากสารละลายไฟเบอร์อินโดยใช้เทคนิค Langmuir Blodgett^[72] ฟิล์มที่เตรียมได้มีลักษณะเป็นผลลัพธ์ที่จัดเรียงตัวในทิศทางเดียว และมีแกนเกลียวจัดเรียงตั้งฉากกับแผ่นฟิล์มหรือแกนเกลียวของตัวอยู่ในแผ่นฟิล์มในตำแหน่ง air-water interface โดยทั้ง ความเป็นผลลัพธ์และระดับของการจัดเรียงตัว (crystallinity และ degree of orientation) ของผลลัพธ์ใหม่ในรูปของเส้นใย ฟิล์ม และสารละลาย ได้รับการศึกษาไว้วางใจในช่วงหลายปีที่ผ่านมา เพราะว่าเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อสมบัติเชิงกลของตัวเส้นไหมเอง^[73-77]

2.3 การบทหน่วยรวม/สารสนเทศ (information) ที่เกี่ยวข้อง

ในปี 2001 Koombhongse et al.^[78] ได้ทำการศึกษาการติดตั้งเครื่องมืออิเล็กโทรสปินนิ่งแบบดั้งเดิม ดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งพบว่าข้อได้เปรียบของวิธีการติดตั้งในแนวตั้งนี้คือ จะมีแรงโน้มถ่วงของโลกช่วยในการเกิดการหดของสารละลายลงไปบนแผ่นรองรับ แต่บางกลุ่มวิจัย เช่น Buer et al.^[79] และ MacDiarmid et al.^[80] ได้ติดตั้งเครื่องมือโดยมีการทำมุกันระหว่างปลายเข็มกับแผ่นรองรับ แต่เว็บนี้ต้องใช้โซลูชันปั๊มช่วยเพื่อให้การหดเป็นไปตามต้องการและในปัจจุบันนี้ยังไม่มีการเปรียบผลที่ได้อย่างเป็นระบบระหว่างการติดตั้งเครื่องมือแบบแนวตั้งหรือแนวนอน และข้าไฟฟ้าศักย์สูงสามารถจุ่มลงไปในสารละลายหรือหนีนไว้ที่ปลายเข็มก็ได้

Rangpuwan and Reneker (2001)^[81] ได้พัฒนาวิธีอิเล็กโทรสปินนิ่งจากพอลิเมอร์หลอมเหลวในสภาวะสูญญากาศ ซึ่งข้อดีคือจะได้สำนวนไฟฟ้าที่มีความเข้มสูงแม้ในระยะห่างมากๆ และยังสามารถทำได้ในอุณหภูมิที่สูงกว่าในกรณีที่เป็นบรรยากาศปกติ Gupta and Wilkes (2003)^[82] และ Ding's group (2004)^[83] ได้ทำการเสนอเครื่องมืออิเล็กโทรสปินนิ่งชนิดที่มีหัวฉีดหลายหัว โดยกลุ่มของ Ding ยังได้ออกแบบหัวฉีดแบบเคลื่อนที่ได้ซึ่งสามารถทำเป็นแผ่นแมมเบรนที่มีความหนาใกล้เคียงกันได้

ในปี 2003 Li et al.^[84] ได้เตรียมเส้นใยที่มีการจัดเรียงในทิศเดียวกัน ซึ่งสามารถทำได้โดยอาศัยการใช้แผ่นรองรับที่ประกอบด้วยแผ่นนำไฟฟ้าสองชั้นที่อยู่ระหว่างกลางของปลายเข็มและแผ่นรองรับโดยให้ทั้งสองแผ่นนี้หันกันในระดับหลายร้อยไมโครเมตรไปถึงหลายเซนติเมตร เส้นใยนาโนที่มีประจุจะถูกขับดันโดยอันตรกิริยาของไฟฟ้าสถิตย์ ทำให้เส้นใยที่ได้มีการยืดออกและแผ่กระจายไปในทิศทางเดียวกัน และ Dersch et al.^[85] ได้แสดงการจัดเรียงตัวของเส้นใยนาโนพอลิเอโอมีดบันเฟรมโลหะที่ได้เป็นตัวรองรับซึ่งการจัดเรียงตัวดังกล่าวเชื่อว่าเกิดมาจากลักษณะของพอลิเมอร์เกิดการกระโดดข้ามไปมาระหว่างแต่ละด้านของเฟรมโลหะ เนื่องมาจากผลของประจุไฟฟ้าสถิตย์นั้นเอง ในปี 2004 Sundaray et al.^[86] พบร่องรอยเส้นใยอสปัน (as spun) สามารถจัดเรียงตัวได้เมื่อใช้แท่งจนวนทรงกระบอกเป็นตัวรองรับที่หมุนด้วยอัตราเร็วประมาณ 2000 rpm

ในปี 2004 Theron et al.^[46] ได้รายงานเกี่ยวกับผลกระทบของการเปลี่ยนตัวแปรของวิธีการทำอิเล็กโทรสปินนิ่งของสารละลายของ polyethylene oxide (PEO), polyacrylic acid (PAA), polyvinyl alcohol (PVA), polyurethane (PU) และ polycaprolactone (PCL) ซึ่งพบว่าความหนาแน่นปริมาตรประจุเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราการหดของสารละลาย แต่ความหนาแน่นประจุบนผิวลดลงเมื่อเพิ่มอัตราการหดและกระแสไฟฟ้า โดยกระแสไฟฟ้าในสำหรับสารละลายเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราการหดของสารละลาย PEO, PVA, PAA (2.5×10^5) และ PU แต่ลดลงในตัวอย่าง PCL อัตราการหดของสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงของ PAA ไม่มีผลกระทบต่อกระแสไฟฟ้า เมื่อเพิ่มอัตราการหดจะมีประจุของสารละลายเริ่มมากที่ปลายเข็มทำให้จำกัดเวลาของสารละลายในการอยู่ในสำหรับ

ทำให้ค่าความหนาแน่นของกระเพาะมีการลดลงแบบເອກໂປນເຂົ້າລື
เพิ่ມขึ้นซึ่งหมายถึงการลดลงของความเข้มสนาໄຟຟ້ານັ້ນເວງ

Deitzel et al. 2001^[49] ໄດ້ຄັນຫາກາຮົດປົມໃນເສັນໄຟແພບວ່າສັກຍີໄຟຟ້າໃນກາຮົດປົມນິ່ງສ່ວນທີ່ກຳໄຊ
ຂະໜາດທີ່ຄວາມເຂັ້ມຂັ້ນຂອງພອລິມେອົຣີມີຜົດຕ່າງໆເສັນຜ່ານຄູນຢ຺ກລາງຂອງເສັນໄຟ ໂດຍຈະເພີ່ມຂັ້ນເມື່ອເພີ່ມຄວາມເຂັ້ມຂັ້ນ ຊຶ່ງ
ເປັນໄປຕາມກູງ power law ທີ່ຄວາມເຂັ້ມຂັ້ນສູງຈະພົບກາຮົດຕ່າງໆແບບສອງໂທນີ້

Gupta & Wilkes, 2003^[82] ໄດ້ທຳການສຶກຫາພົບຂອງຄວາມເຂັ້ມຂັ້ນ ຮະຍະທ່າງຮະຫວ່າງປາຍເຂັ້ມກັບແຜ່ນຮັບ
ສັກຍີໄຟຟ້າທີ່ປາຍເຂັ້ມ ອັດຕາກາໄທລ ພົບວ່າເສັນໄຟໄດ້ປົມຂັ້ນແລ້ວມີເສັນຜ່ານຄູນຢ຺ກລາງເພີ່ມຂັ້ນເມື່ອດະຫວ່າງທ່າງລົງແລ້ວ
ຄວາມເຂັ້ມຂັ້ນສູງກີ່ໄຟເສັນຜ່ານຄູນຢ຺ກລາງເຊື່ອເພີ່ມຂັ້ນ ແລ້ວກາຮົດປົມສັກຍີໄຟຟ້າທີ່ໄຟເສັນຜ່ານຄູນຢ຺ກລາງລົດລົງ ເມື່ອຄວາມ
ເຂັ້ມຂັ້ນສູງທີ່ມີກາງຈະໄຟເສັນໄຟເນື່ອຈາກມີຄວາມໜີດສູງມາກແລ້ວຄວາມໜີດໄຟເພີ່ມພວ ຕາມລຳດັບ

Zong et al. 2002^[87] ພົບວ່າກາຮົດປົມກີ່ລົງໄຟ 1wt% ລົງໃນກາຮົດປົມພອລິມେອົຣີທີ່ຍ່ອຍສລາຍໄດ້ທາງຮຽມຫາດ
ກີ່ລົງ poly(D,L-lactic acid) ສຳເນົາໄຟເສັນໄຟທີ່ມີປົມ (bead-free) ຊຶ່ງກາຮົດປົມເກີ່ລົງໄປທຳໄຟຟ້າຂອງລຳກະຮະແສ
ຂອງສາຮະລາຍເພີ່ມຂັ້ນ

Kessick et al., 2004^[88] ໄດ້ສຶກຫາເປົ້າວ່າພົບປົມເສັນໄຟໄດ້ກຳໄຊສ່ວນນິ່ງຈາກກາຮົດປົມທີ່ດັ່ງກັນ
ຄືບແບບສັກຍີກະແສຕຽງແລ້ວສັກຍີກະແສສັບ ພົບວ່າສັກຍີແບບກະແສສັບຈະເພີ່ມ surface coverage ບັນແຜ່ນຮັບ
ອ່າຍມື້ສຳຄັນ ແລ້ວຈະລຸດຈຳນວນເສັນໄຟທີ່ເກີດກາຮົດປົມ whapping ກັນເມື່ອໃຊ້ສັກຍີກະແສຕຽງ

ປັຈຈຸບັນເສັນໃນຍາໂນແລະນາໂນຄອມພອສີທັງໄຟໄດ້ພັນນາໄປດີຮັດວຽກແລ້ວຍ່ອງຮ່ວ່າງກາຮົດປົມແລ້ວຍ່ອງຮ່ວ່າງກາຮົດປົມ
ພັນນາແຕ່ກົມສັກຍີກາພາສູງທີ່ຈະນຳໄປເປົດໃນເງິນທາງກາຮົດປົມ ກາຮົດປົມໄປປະຍຸກຕີໃໝ່ງນັດຕ້ານຕ່າງໆ
ສາມາດແປ່ງອອກເປັນ 4 ຕ້ານໃໝ່ງຕ້ານນີ້ ຄືບໍ່ຕ້ານຊີວິທາກາຮົດປົມ (biomedical applications), ຕ້ານກາຮົດປົມ
ສັກເຮະກ໌ semiconductor nanowire, ຕ້ານວັດສຸດໍາຮັບ structural composite, ແລ້ວກາຮົດປົມ (filtration)

Fertala et al. 2001^[89] ໄດ້ທຳການເຕີມເສັນໄຟພອລິມେອົຣີທີ່ຍ່ອຍສລາຍໄດ້ຕາມຮຽມຫາດໂດຍກຳໄຊຈົດລົງໄປ
ໂດຍຕຽບນິວໜັງທີ່ເກີດບາດແພດເພື່ອສ້າງເປັນແຜ່ນເສັນໄຟໂຄຮັງຮັງ (fibrous mat) ສຳເນົາໄຟຟ້າຫຍ່າຍເຮັດວຽກຂັ້ນ

Huang et al. 2000^[41] ແລ້ວ Athreya & Martin, 2003^[94] ໄດ້ໃຊ້ nanoscale fibrous scaffolds ເປັນ
ແບບທີ່ເໝາະສົມເພື່ອທຳໄຟຟ້າເຊື່ອເສັນໄຟ ເຊື່ອເສັນໄຟທີ່ແລ້ວເຈົ້າເຈົ້າໃຫຍ່ ນອກຈາກນີ້ເສັນໃນຍາໂນຈາກພອລິມେອົຣີທີ່ມີຄວາມເຫຼົາ
ກັນໄດ້ຍັງສາມາດຝຶກຕົວເປັນແຜ່ນຮູ້ພຸດຍບາງໆເພື່ອກາຮົດປົມສຳຫຼັບການນູ່ຍື້ໄດ້

Wnek et al. 2003^[51] ໄດ້ທຳການນຳເວົາວັດສຸດໍາຄົມພອສີເຕີມເຂົ້າໄປໃນແຜ່ນເສັນໄຟໂຄຮັງຮັງສໍາຫຼັບສ້າງເນື້ອເຍື່ອ
ຊື່ເພີ່ມໜັ້ນທີ່ມີນັດຕ້ານຕ່າງໆທີ່ຕ້ອງກາຮົດປົມ ໂດຍພົບວ່າ electrospinning fibrinogen ສາມາດເປັນຄູ່ແໜ່ງສຳຄັນສໍາຫຼັບກາຮົດປົມ
ສ້າງແຜ່ນໂຄຮັງຮັງສໍາຫຼັບວິທະຍານນີ້ເຍື່ອ ກາຮົດປົມທີ່ແຕ່ງແລ້ວ homeostatic ຮູ່ພົດລົດວັນທີ່ອື່ນໆ

Chen C. et al. 2006^[90] ໄດ້ທຳການເຕີມແຜ່ນເສັນໄຟໄໝຈາກສາຮະລາຍໄໝມີຂໍ້ວ່າທີ່ຄວາມເຂັ້ມຂັ້ນສູງໂດຍໄມ້ມີ
ກາຮົດປົມທີ່ມີກະແສຕຽງ ແລ້ວທຳກາຮົດປົມທີ່ມີກະແສຕຽງ ເຊື່ອເສັນໄຟທີ່ໄດ້ຕ້າຍເຖິງເຄື່ອງການ
DSC ແລ້ວ tensile testing ຊຶ່ງພົບວ່າ as-spun fiber ທີ່ໄດ້ມີໂຄຮັງຮັງເປັນ random coil conformation ແລ້ວ
ໜັງຈາກທຳກາຮົດປົມທີ່ມີກະແສຕຽງ ເຊື່ອເສັນໄຟທີ່ໄດ້ຕ້າຍເຖິງເຄື່ອງການ ເພີ່ມຄວາມເຂັ້ມຂັ້ນແຮງສູງຂັ້ນຍ່າງ
ນຳກັນ ຊຶ່ງນຳຈະເໝາະສົມສໍາຫຼັບການນຳເປັນໃນວິທະຍານນີ້ເຍື່ອ

บทที่ 3 การทดลอง

3.1 เครื่องมือ

ตารางที่ 3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

เครื่องมือ	ยี่ห้อ/รุ่น
FTIR Spectrometer	Perkin Elmer/FTIR 2000
Scanning Electron Microscope (SEM)	JEOL/JSM 5410 LV
X-Ray Diffraction (XRD)	Philips/X'Pert-MDP
Differential Scanning Calorimeter (DSC)	Mettler toledo/Star ^e SW8.01
Thermalgravimetric Analysis (TGA)	Rigaku/ThermoPlus
Programable syringe pump	Harvard Apparatus/
High voltage power supply	Gamma High Voltage/ES30P-5W
Brookfield viscometer	Brookfield / DV-II+
Freez dryer	Science Engineer International co. Ltd/ Flexi-Dry MP
Conductimeter	Eutech Instruments/Cyber scan 300
Isotemp vacuum oven	Jenway /1000
Cellulose tubular membrane	Membrane Filtration Products, Inc/Cellu-Sep T1

3.2 สารเคมี

ตารางที่ 2 สารเคมีและวัสดุที่ใช้ในการทดลอง

สารเคมี	บริษัท
Ethanol	Carlo Erba
Lithium bromide	ACROS organics
Sodium hydrogen carbonate, 99.5%	Carlo Erba
Hexafluoroacetone	Aldrich
Sodium Hydrogen Phosphate	AJAX chemical
Disodium Hydrogen Phosphate	Carlo Erba
Sodium Chloride	Merck
Hydrochloric	Analar
Acetic acid	Analar
Formic acid 99%	Carlo Erba
Ethanol 99.8%, Analytical grade	Carlo Erba
Isopropyl alcohol, 99.8%, Analytical grd.	Carlo Erba
CaCl ₂ (92%)	Carlo Erba
Polyethylene oxide (PEO), M _w =200,000	ACROS organics
Polyvinyl pyrrolidone (PVP) M _w =1,300,000	Aldrich

3.3 วัสดุดิบที่ใช้ในการทดลอง

เส้นไหมเลี้ยงดิบ สีเหลือง จากศูนย์ศิลปปาชีพในสมเด็จพระนางเจ้าฯ บ้านยางชุมน้อย อ. เชื่องใน จ. อุบลราชธานี

3.4 การสร้างเครื่องมืออิเล็กโทรสปินนิ่งอย่างง่ายเพื่อใช้ผลิตเส้นใยนาโน

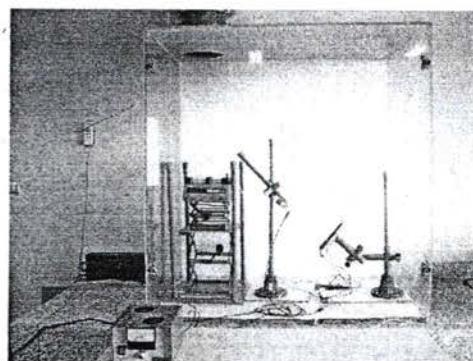
1. โดยทำการติดตั้งเครื่อง power supply source ที่สามารถให้ด้วยไฟฟ้าได้สูงถึง 30 KV และสามารถปรับแต่งค่าความต่างศักย์ได้ เข้ากับชุดชาตั้งสำหรับยีด glass syringe

2. ทำการเตรียมแผ่นรองรับเส้นใยที่เป็นโลหะ โดยคาดว่าจะเตรียมแผ่นรองรับเป็น 2 แบบ คือแบบที่อยู่นิ่งกับที่ และแบบที่สามารถเคลื่อนที่ได้

3. เตรียมการจัดวาง glass syringe ว่าจะวางตัวในแนวตั้ง แนวอน หรือทำมุกกับแผ่นรองรับ 45 องศา โดยในการศึกษาครั้งนี้ จะทำการศึกษาในทั้งสามแบบนี้เพื่อหาว่าแบบใดเหมาะสมสำหรับชุดเครื่องมือที่ติดตั้งขึ้น

4. เตรียมชุด programmable syringe pump ให้สามารถปรับอัตราการไหลด้วยการสั่งงานด้วยการปรับมือและผ่านโปรแกรมคอมพิวเตอร์ได้ (ถ้าสามารถเขียนโปรแกรมเสร็จทัน)

5. ทำการต่อชุดสายไฟฟ้าต่างๆเข้ากับชุดอุปกรณ์ทั้งหมด เพื่อทดสอบว่าสามารถทำงานได้หรือไม่ หากไม่ได้จะทำการแก้ไขให้สามารถใช้งานได้ต่อไป โดยภาพลักษณะการติดตั้งเครื่องมือเมื่อแล้วเสร็จ น่าจะมีหน้าตาเป็นดังรูปที่ 3.1 โดยในการทดสอบเราจะนำสารละลายพอลิเมอร์มาทดลองขึ้นรูป ดูก่อน เมื่อระบบเสถียรแล้วจึงจะนำไปใช้กับตัวอย่างที่เป็นสารละลายใหม่ต่อไป



รูปที่ 3.1 ภาพแสดงชุดเครื่องมืออิเล็กโทรสปินนิ่งที่คาดว่าจะเป็น

3.5 การเตรียมสารละลายใหม่เพื่อใช้สำหรับเตรียมเส้นใยนาโน

1. ทำการลอกการไหม (degummed process) เพื่อทำการกำจัดเชริชิน (การไหม)ออกไปก่อน โดยตัวอย่างใหม่ที่จะนำมาใช้ในการทดลองครั้งนี้ จะมีอยู่ 2 แบบ คือ จากรังไหมโดยตรง และจากเส้นไหมดิบ

2. โดยสารละลายที่ใช้ในการลอกการ ก็จะใช้ NaHCO_3 ที่ความเข้มข้น 50 wt% โดยนำไปให้กับสารละลายดังกล่าว หลังจากนั้นก็นำไปหมุนเพื่อการต้มไปล้างน้ำ 4-5 ครั้งเพื่อทำให้เส้นไหมที่ได้มีความเป็นกลางและสะอาดเพื่อเตรียมพร้อมสำหรับการทำเป็นสารละลายใหม่ต่อไป

3. นำไปหมุนตัวจากข้อ 2 ไปละลายในระบบตัวทำละลาย $\text{CaCl}_2/\text{H}_2\text{O}/\text{EtOH}$ (1:8:2), 9.3 LiBr, และ 50wt% CaCl_2 จากนั้นกรองเอาสารละลายที่ได้ใส่ถุง Cellulose tubular membrane แล้วนำไปทำการ dialysis ในน้ำเป็นเวลา 3 วัน โดยทำการเปลี่ยนน้ำใหม่ทุกวัน เพื่อหาระบบทัวทำละลายที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมผงไหมที่เหมาะสมในการเป็นสารละลายที่เหมาะสมสำหรับการอัดด้วยอิเล็กโทรสปินนิ่ง

4. จานั้นกรองเอาสารที่ได้จากการทำ dialysis ไปทิ้งให้แห้งด้วยเครื่อง freeze die ซึ่งจะทำให้ได้ผงใหม่สำหรับเตรียมเป็นสารละลายน้ำหรืออีด์ต่อไป

3.6 การขึ้นรูปเส้นใยในด้วยเทคนิคอิเล็กโทรสปินนิ่ง

ทำการละลายผงใหม่ที่ความเข้มข้นต่างๆ 6-20 % (w/v) ด้วยตัวทำละลายกรด Formic 99% เป็นเวลานาน 1 ชั่วโมง แล้วนำสารละลายใหม่ที่เตรียมได้ มาบรรจุลงสายยางที่ต่อ กับ glass syringe เพื่อนำไปเตรียมอีด์ด้วยเครื่องอิเล็กโทรสปินนิ่ง โดยในการศึกษาครั้งนี้ จะประตัวแปรของ

1. ความเข้มข้นของสารละลายใหม่
2. ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้
3. ระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับแผ่นภาชนะรองรับ
4. ระบบการฉีด (แนวตั้ง แนวเฉียง และแนวนอน)

นอกจากนี้ยังได้ทำการศึกษาการเตรียมเส้นใยพสมระหว่างใหม่ (SF) กับ PVP ด้วย โดยเลือกเอา สภาวะที่เหมาะสมจากระบบที่ได้จากการขึ้นรูปเส้นใยใหม่มาปรับใช้ โดยจะทำการแปรอัตราส่วนผสมจาก 8:2, 6:4, 5:5, 4:6 และ 8:2 อัตราส่วนโดยน้ำหนัก เพื่อหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสม

3.7 การพิสูจน์เอกลักษณ์ของแผ่นเส้นใยใหม่และเส้นใยพสมที่เตรียมได้

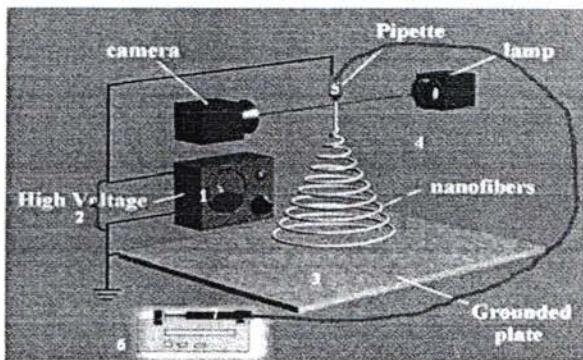
1. ทำการศึกษาสมบัติทางสัณฐานวิทยาของเส้นใยที่เตรียมได้ ด้วยเทคนิค SEM เพื่อหาขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางและการกระจายตัวของเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย
2. หาโครงสร้างทางเคมีและโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิค FTIR และ เทคนิค WAXD ตามลำดับ
3. ทำการศึกษาสมบัติทางความร้อนและความเสถียรต่อความร้อนด้วยเทคนิค DSC และ TG-DTA ตามลำดับ

บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์

4.1 การสร้างเครื่องมืออิเล็กโทรสปินนิ่งอย่างง่าย

4.1.1 การออกแบบและสร้างประกอบอุปกรณ์ระบบอิเล็กโทรสปินนิ่ง

ได้ทำการออกแบบสร้างขาตั้งยึดสำหรับอุปกรณ์ที่จะใช้ในการประกอบ โดยวัสดุอุปกรณ์ที่เลือกใช้ในการประกอบเป็นชุด อุปกรณ์สำหรับระบบอิเล็กโทรสปินนิ่ง คือ วัสดุที่สามารถหาซื้อได้ง่าย ราคาไม่แพง ส่วนประกอบต่างๆของระบบอิเล็กโทรสปินนิ่งพื้นฐานแสดงดังรูปที่ 4.1



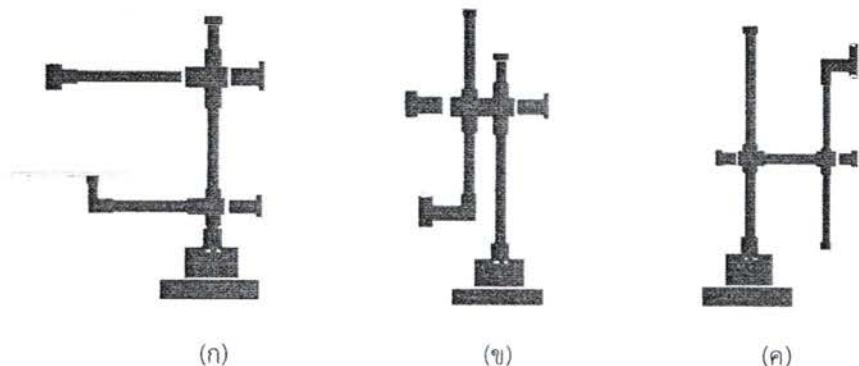
ภาพที่ 4.1 อุปกรณ์.....เตรียมเส้นใยโพลิเมอร์โดยเทคนิคการป่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต^[41] ประกอบด้วย ส่วนประกอบต่างๆของระบบอิเล็กโทรสปินนิ่งพื้นฐาน มีดังนี้

- 1. เครื่องจ่ายไฟฟ้าศักย์สูง
- 2. ขั้วต่อไฟฟ้าบวกและลบ
- 3. วัสดุรองรับเส้นใย
- 4. ขาตั้งยึดสำหรับอุปกรณ์
- 5. Glass syringe
- 6. อุปกรณ์ควบคุมอัตราการไหลของสารละลาย และ
- 7. กระบวนการฉีดยาพลาสติกพร้อมสายยางเชื่อมต่อปั๊ม

4.1.2 การออกแบบสร้างอุปกรณ์ขาตั้งสำหรับการฉีดในระบบแนวตั้ง แนวเฉียงและแนวนอน

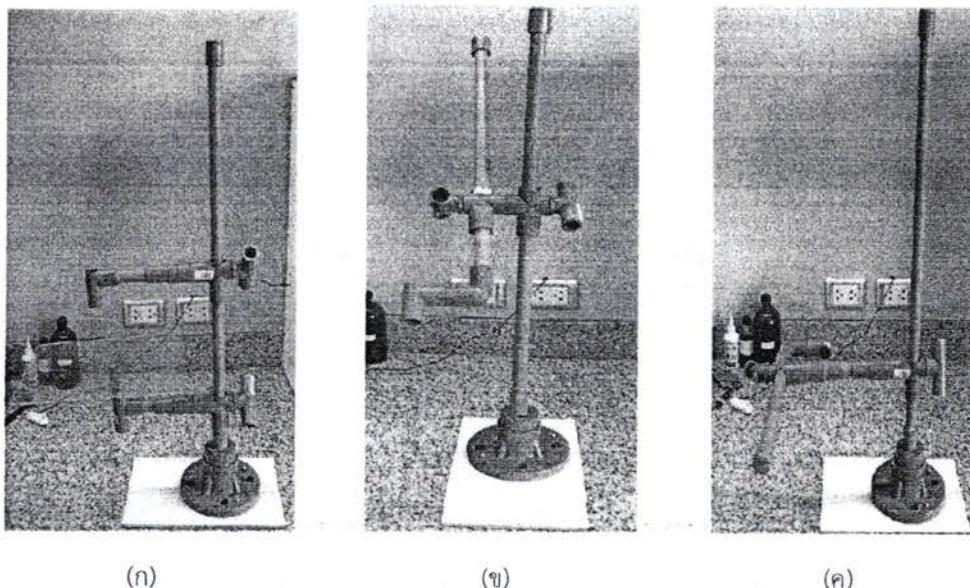
ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาระบบการฉีดสารละลายเป็นสามแนว คือ แนวตั้ง แนวเฉียง และ แนวนอน ดัง แสดงดังรูปที่ 4.2 โดยอุปกรณ์ขาตั้งนี้ต้องสามารถปรับเปลี่ยนแนวการฉีดเป็นได้ทั้งสามแบบจากการปรับเปลี่ยน วิธีการประกอบเท่านั้น สำหรับอุปกรณ์ที่ใช้ในสร้างอุปกรณ์ขาตั้ง ประกอบด้วย

- 1. หัวอุด PVC หนา 13.5 ไม่มีเกลียว 1/2" 3 ตัว
- 2. ข้อต่อ 4 ทาง PVC 3/4" 2 ตัว
- 3. ห่อสันหน้าจาน PVC 1 ตัว
- 4. คลิปอ้าท์ PVC 1 ตัว
- 5. สามทางเกลียววนอกทองเหลือง PVC 1/2" (สีเทา) 2 ตัว
- 6. ข้อต่อเกลียวใน PVC หนา 13.5 1/2"
- 7. ข้อง PVC 90 องศา หนา 13.5 1/2" 1 ตัว
- 8. สามทาง PVC หนา 13.5 1/2" 1 ตัว
- 9. ห่อ PVC ขนาด 4 และ 6 หุน
- 10. ข้อต่อตรง PVC หนา 13.5 1/2"
- 11. แผ่นอะคริลิกขนาด 8x12 เซนติเมตร
- 12. แผ่นเม็ดขนาด 30 x 20 เซนติเมตร
- 13. น็อต



ภาพที่ 4.2 ภาพจำลองอุปกรณ์ที่ใช้สร้างขาตั้งสำหรับยด glass syringe ในระบบ (ก) แนวตั้ง (ข) แนวเฉียง และ (ค) แนวอน

สำหรับภาพอุปกรณ์ที่ประกอบสำเร็จแล้วในการจัดวางแนวการฉีดทั้งสามแบบแสดงดังรูปที่ 4.3



ภาพที่ 4.3 ภาพจริงของอุปกรณ์ขดลวดสำหรับยืด glass syringe ในระบบ (ก) แนวตั้ง (ข) แนวเฉียง และ (ค) แนวนอน

4.1.3 การออกแบบสร้างอุปกรณ์รองรับเส้นใย

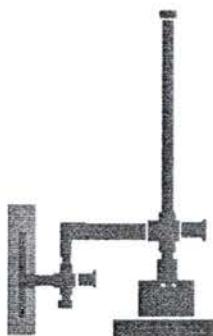
ในการออกแบบอุปกรณ์รองรับเส้นใย (collector screen) ได้ทำการออกแบบให้มีลักษณะดังรูปที่ 4.4 โดยอุปกรณ์ข้าดังเตรียมจากห่อ PVC เช่นกัน และใช้แผ่นรองรับเป็นแผ่นโลหะทองแดงขนาด $15 \times 15 \text{ cm}^2$ นอกจานี้แล้วแผ่นรองรับเส้นใยนี้ต้องสามารถปรับเปลี่ยนมุมเพื่อรองรับเส้นใยที่อีดมาจากกระบวนการฉีดหัวในแนวตั้ง แนวอนวนและแนวเฉียงได้ อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมแผ่นรองรับพร้อมข้าดังประกอบด้วย

- | | |
|---|--|
| 1. หัวอุด PVC หนา 13.5 ไม่มีเกลียว 1/2" 3 ตัว | 2. ข้อต่อ 4 ทาง PVC 3/4" 2 ตัว |
| 3. คลีนเอ้าท์ PVC 1 ตัว | 4. สามทางเกลียวแนกทองเหลือง PVC 1/2" 2 ตัว |
| 5. ข้อต่อเกลียวใน PVC หนา 13.5 1/2" 2 ตัว | 6. ข้องอ PVC 90 องศา หนา 13.5 1/2" 1 ตัว |

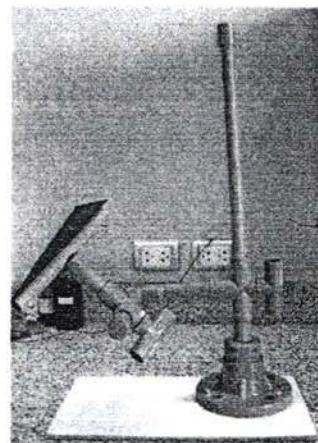
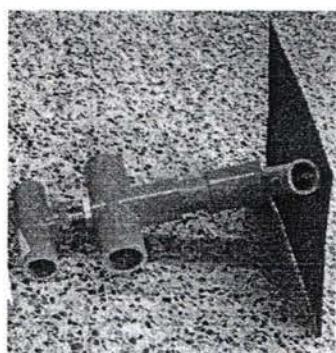
7. ท่อ PVC ขนาด 4 และ 6 หุน
9. นื้อต

8. ห่อสันหน้าจาน PVC 1 ตัว

และภาพอุปกรณ์จริงของแผ่นรองรับเส้นใยแสดงดังรูปที่ 4.5



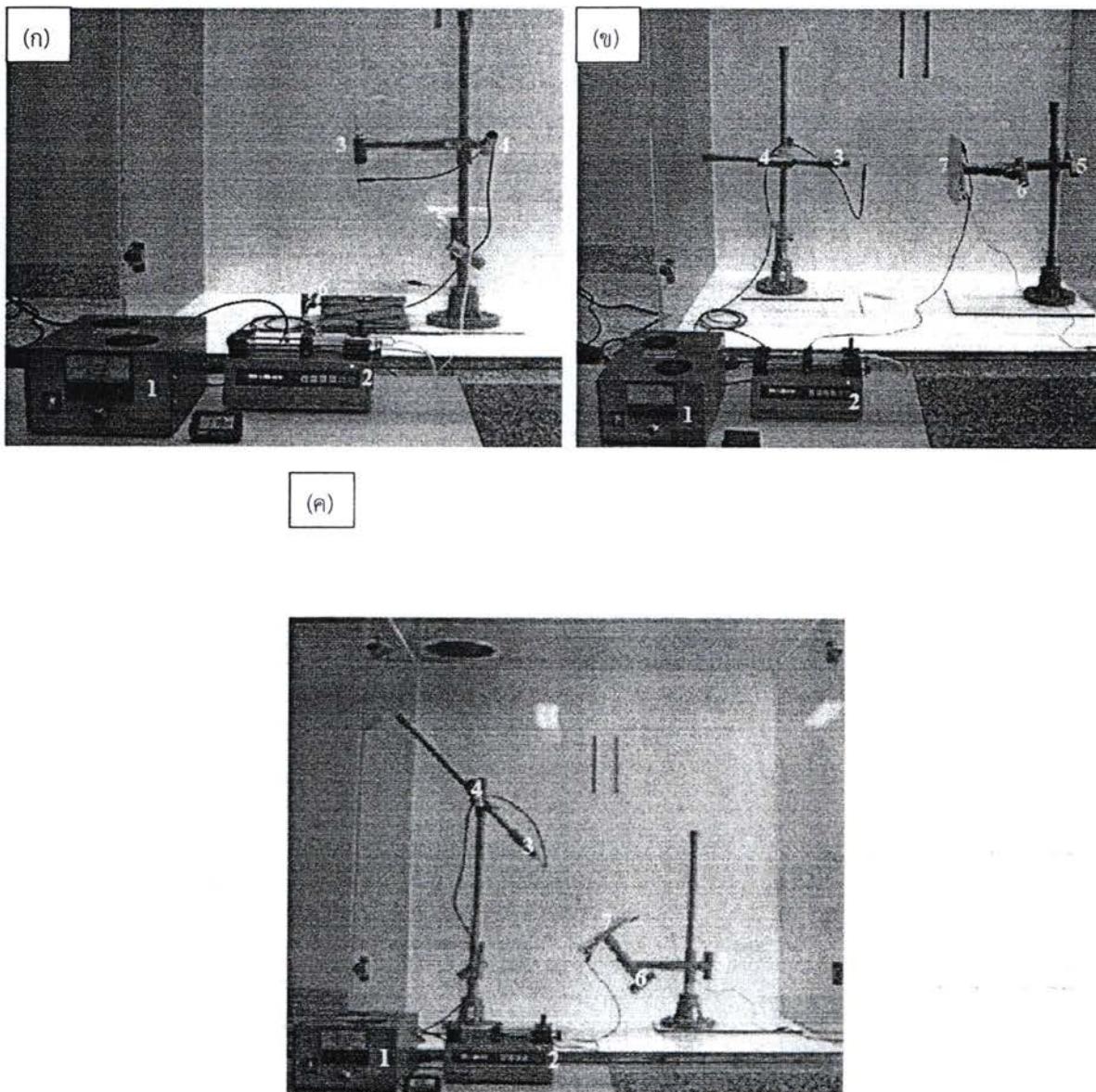
ภาพที่ 4.4 ภาพจำลองอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมเป็นวัสดุรองรับเส้นใยที่สามารถปรับมุมได้



ภาพที่ 4.5 ภาพจริงของวัสดุรองรับเส้นใยที่สามารถปรับมุมได้

4.1.4 ชุดเครื่องมืออิเล็กโทรสปินนิ่งที่ประกอบแล้วเสร็จ

ในการศึกษานี้ประสบความสำเร็จในการประกอบชุดเครื่องมืออิเล็กโทรสปินนิ่งขึ้นมาทั้งหมด 3 ระบบ ซึ่งแบ่งตามรูปแบบของการฉีด ดังนี้ ระบบอิเล็กโทรสปินนิ่งแนวตั้ง ระบบอิเล็กโทรสปินนิ่งแนวอน และ ระบบอิเล็กโทรสปินนิ่งแนวตั้ง ดังแสดงในรูปที่ 4.6ก - 4.6ค ตามลำดับ



รูปที่ 4.6 เครื่องมืออิเล็กโทรสปินนิ่งระบบการฉีดแบบ (ก) แนวตั้ง (ข) แนวนอน และ (ค) แนวเฉียง ที่เสร็จสมบูรณ์

จากรูปที่ 4.7 จะเห็นว่าองค์ประกอบหลักๆของเครื่องอิเล็กโทรสปินนิ่งจะประกอบด้วย 3 ส่วนคือ หมายเลข 1 เครื่องจ่ายศักย์ไฟฟ้ากำลังสูงเพื่อทำให้หยดสารละลายสามารถอาซานะแรงตึงผิวได้ หมายเลข 2 เครื่องจ่ายแรงดันสารละลายพอลิเมอร์ หรือ Syringe pump ทำให้ควบคุมการไหลของสารละลายให้เป็นตามที่เราต้องการ และหมายเลข 6 (ในรูป 4.6ก) และ หมายเลข 7 (ในรูป 4.6-ค) เป็นแผ่นรองรับเส้นใยหรือ collecting screen โดยเราได้ออกแบบให้มีช่องว่างๆต่อเนื่องกันไม่ติดกันโดยตรงกับกระบอกฉีดยาทั้งนี้เพื่อป้องกันไม่ให้กระแทกไฟกระเด็นจากปลายเข็ม (หมายเลข 3) หมายเครื่อง syringe pump อันจะทำให้เครื่องมือเสียหาย แต่ได้ทำการต่อเป็นสายยางทึบระบุ

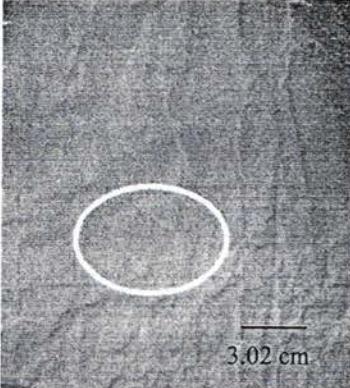
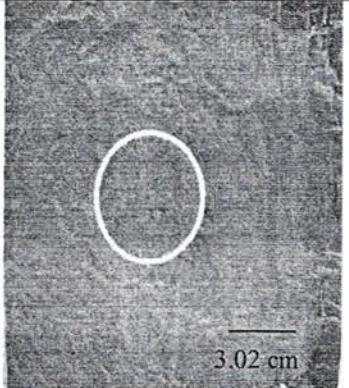
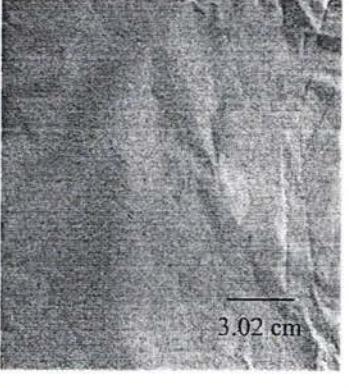
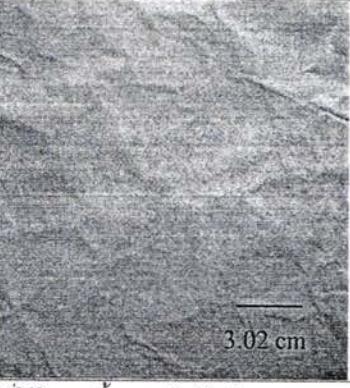
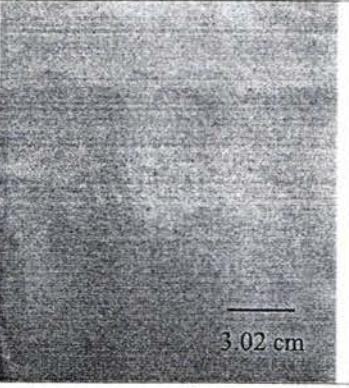
สารละลายพอลิเมอร์แทนและต่อป้ายเข้มฉีดยา กับป้ายสายยาง อีกทีหนึ่ง ซึ่งการอุดแบบนี้พบว่าได้ผลดีเป็นที่น่าพอใจของเรามากอย่างมาก

4.2 การทดสอบระบบเครื่องมือที่สร้างขึ้น

เพื่อทดสอบระบบอิเล็กโตรสปินนิ่งทั้งสามระบบที่ประกอบขึ้นมาว่าจะสามารถใช้งานได้ดีแค่ไหนและแบบใดที่จะเหมาะสมนำไปประยุกต์ใช้ในการเตรียมเส้นใยนาโนของใหม่ต่อไป จึงได้ทำการทดลองกับระบบสารละลายพอลิเมอร์ก่อน เพราะเตรียมได้ง่ายและรู้ว่าหนักไม่เลกกลุ่มที่แน่นอนและควบคุมคุณสมบัติได้ง่ายกว่าสารละลายใหม่ ดังนั้นจึงได้ทดสอบขั้นรูปเส้นใยพอลิเอทธิลีนออกไซด์ (Poly(ethylene oxide), PEO) โดยได้เตรียมสารละลาย PEO ที่ความเข้มข้น 6, 10 และ 14 % wt/v โดยใช้อิโฟรพานอลและน้ำดีไอ เป็นตัวทำละลายในอัตราส่วน 7:3 ตามลำดับ และให้ศักยภาพไฟฟ้าที่ 20 kV ระยะห่างระหว่างป้ายเข้มกับวัสดุรองรับ 20 cm และควบคุมอัตราการไหลของสารละลายเป็น 1 mL/h โดยกำหนดเวลาในการเก็บเส้นใยในแต่ละระบบเท่ากัน 1 ชั่วโมง ลักษณะทางกายภาพของเส้นใย PEO ที่เตรียมได้แสดงในตารางที่ 4.1

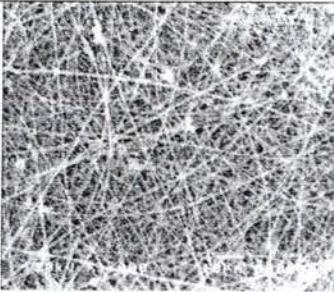
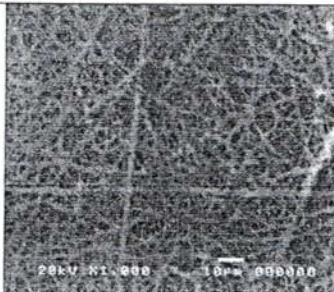
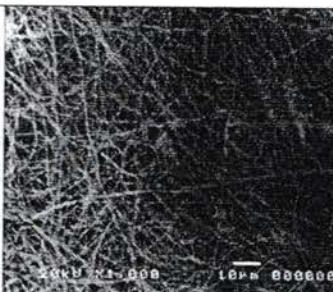
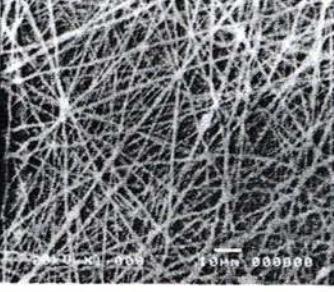
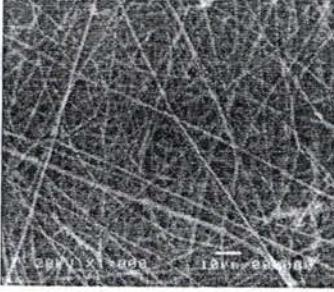
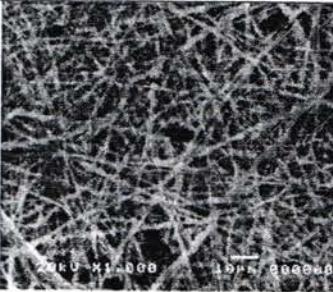
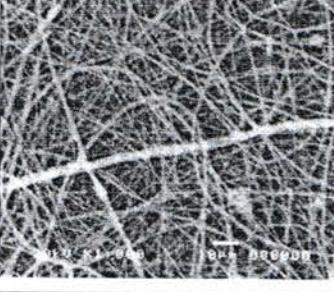
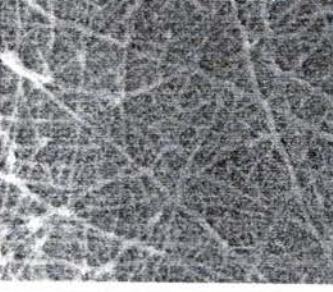
ตารางที่ 4.1 แสดงลักษณะของแผ่นเส้นใย PEO บนวัสดุรองรับสำหรับการขึ้นรูปเส้นใยด้วยระบบการฉีดทั้ง 3 แบบที่ความเข้มข้นต่างๆ พบร่วมกันในแผ่นรองรับเส้นใยที่ขึ้นรูปจากสารละลาย PEO ความเข้มข้น 6 wt% ในทั้ง 3 แนวการฉีดนั้นมีปริมาณหยดสารละลายที่หลุดออกจากการป้ายเข้มฉีดขึ้นปริมาณมากเมื่อเปรียบเทียบสารละลาย ความเข้มข้นอื่นๆ เนื่องจากสารละลายมีความเข้มข้นต่ำสุดจึงมีการเก็บไว้พันของสายโซ่พอลิเมอร์น้อยและทำให้มีแรง ผิวของสารละลายสูง เมื่อทำการขึ้นรูป/ฉีดออกมานะเส้นใยที่ได้จึงมีเกิดการขาดและไม่ต่อเนื่องจึงทำให้มีหยดสารละลาย เกิดขึ้นมาก และเมื่อเปรียบเทียบปริมาณหยดสารละลายที่เกิดขึ้นในทั้งสามระบบพบว่า ระบบการฉีดแนวอน < แนว เฉียง < แนวตั้ง ตามลำดับ แต่หากเทียบปริมาณเส้นใยที่เกิดขึ้นบนแผ่นวัสดุรองรับพบว่า ระบบการฉีดแนวอน < แนวเฉียง < แนวตั้ง ตามลำดับ และเมื่อนำตัวอย่างเส้นใยที่เตรียมได้ไปทำศึกษาสัมฐานวิทยาด้วยเทคนิค SEM พบรักษณะทางกายภาพดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.1 ภาพถ่ายแผ่นเส้นใย PEO ที่เกิดขึ้นบนวัสดุรองรับในการทำอิเล็กโทรสปินนิ่งในแต่ละระบบที่ความเข้มข้น 6, 10 และ 14 wt% โดยใช้อิโซโพร์พานอลและน้ำ DI เป็นตัวทำละลายในอัตราส่วน 7:3

ระบบ ความเข้มข้น	แนวเฉียง	แนวอน	แนวตั้ง
6 %wt PEO			
10%wt PEO			
14%wt PEO			

Note: สภาวะที่ใช้ในการขึ้นรูป: ดักจับไฟฟ้า = 20 kV, ระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับวัสดุรองรับ = 20 cm และอัตราการให้ = 1 mL/h และเวลาในการเก็บเส้นใย = 1 ชั่วโมง

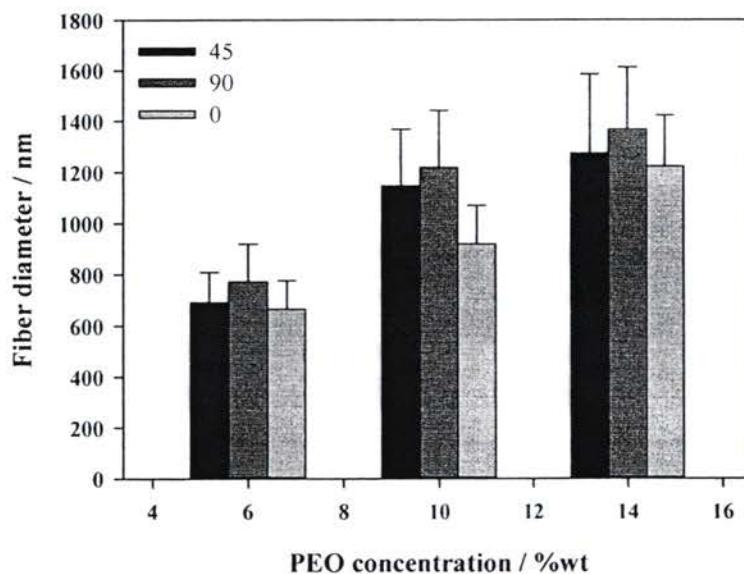
ตารางที่ 4.2 ภาพถ่าย SEM ของแผ่นเส้นใย PEO ที่เกิดขึ้นบนวัสดุรองรับในการทำอิเล็กโทรสปินนิ่งแต่ละระบบที่ความเข้มข้น 6, 10 และ 14 wt% โดยใช้อิโโซไฟฟานอลและน้ำ DI เป็นตัวทำละลายในอัตราส่วน 7:3

ระบบ ความ เข้มข้น	แนวเฉียง	แนวอน	แนวตั้ง
6 wt%			
10 wt%			
14 wt%			

Note: สภาวะที่ใช้ในการขึ้นรูป: ศักยไฟฟ้า = 20 kV, ระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับวัสดุรองรับ = 20 cm และอัตราการให้ = 1 mL/h และเวลาในการเก็บเส้นใย = 1 ชั่วโมง

จากตารางที่ 4.2 จะเห็นว่าทุกๆระบบการฉีดสามารถให้เส้นใย PEO ได้คล้ายๆกัน จะมีแต่ความหนาแน่นและความหนาของเส้นใยที่ไม่เท่ากัน โดยพบว่าระบบการฉีดแนวตั้ง (หรือมุม 90°) จะมีความหนามากที่สุด รองลงมาเป็นแนวเฉียง (หรือมุม 45°) และระบบการฉีดแนวอน (หรือมุม 0°) มีความหนาของแผ่นเส้นใยน้อยที่สุด เนื่องจากเส้นใยบางส่วนไม่สามารถวิ่งไปถึงแผ่นรองรับได้ทั้งหมด นอกจากนี้แล้วเมื่อเพิ่มความเข้มข้นขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางจะมีขนาดเพิ่มขึ้นและเส้นใยจะมีพิษรุกรานมากขึ้นโดยเฉพาะที่ความเข้มข้น 14 wt% (ดูรูปที่ 4.7 ประกอบ) ทั้งนี้เนื่องมาจากความหนืดที่เพิ่มมากขึ้นทำให้เส้นใยเกิดการยืดตัว (stretching) ได้ไม่ดีนัก เพราะมีการเกี่ยวพันของสายโซ่มากเกินไปความแรงของสนามไฟฟ้าจึงไม่แรงเพียงพอที่จะทำให้เกิดการยืดตัวของสายโซ่พอลิเมอร์ และเมื่อเส้นใย

แข็งตัวขณะเดินทางจากปลายเข็มฉีดยา มาถึงแผ่นรองรับจึงทำให้เกิดลักษณะผิวขรุขระและมีลักษณะเป็นเม็ดปูมขึ้นได้ในเส้นใย (bead fibers)



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นใย PEO กับ ความเข้มข้นของสารละลาย PEO

ตั้งนั้นจากข้อมูลส่วนที่ 1 ทำให้สามารถสรุปได้ว่า

1. สามารถสร้างเครื่องมืออิเล็กโทรสปินนิ่งอย่างง่ายได้สำเร็จ จำนวน 1 ชุด
2. เครื่องมือที่สร้างขึ้นสามารถนำไปใช้กับการหั่นรูปเส้นใยจากสารละลายพอลิเมอร์ได้
3. ระบบการฉีดที่เหมาะสมที่จะนำไปใช้กับการหั่นรูปเส้นใยในไนโตรเจน หรือ ระบบการฉีดแนวเฉียง (หรือ นูน 45°) เนื่องจากให้ปริมาณของเส้นใยได้ดีและมีเม็ดบีด/หยดของพอลิเมอร์ที่หลุดไปติดกับแผ่นรองรับเส้นใยน้อยกว่าแบบแนวตั้ง

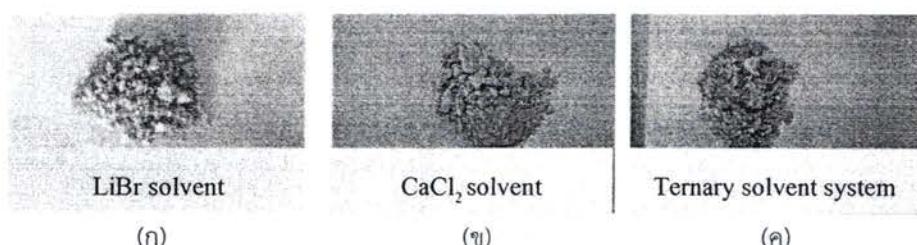
ส่วนที่ 2

การประยุกต์ใช้งานเครื่องอิเล็กโทรสปินนิ่งอย่างง่าย

สำหรับขั้นรูปเส้นไนนานาจากสารละลายใหม่

4.3 ระบบตัวทำละลายที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมผงไหม (silk sponge)

เพื่อให้ได้สารละลายพอลิเมอร์ที่เหมาะสมสำหรับใช้ในกระบวนการขั้นรูปเส้นไนนานาด้วยเทคนิคอิเล็กโทรสปินนิ่ง ระบบตัวทำละลายที่เหมาะสมเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญอย่างมากที่ต้องได้รับการปรับปรุงให้เหมาะสม ดังนี้ใน การศึกษานี้ จึงได้ศึกษาระบบทัวทำละลายที่เหมาะสมสำหรับเตรียมผงไหมที่พร้อมที่จะใช้เป็นสารละลายไหมต่อไป โดยได้ทำการศึกษาระบบทัวทำละลายทั้งหมด 3 ระบบ ประกอบด้วย สารละลายโซเดียมคลอไรด์ (50wt% NaCl) สารละลายระบบสามตัวทำละลาย (ternary solvent, $\text{CaCl}_2/\text{H}_2\text{O}/\text{EtOH}$ (1:8:2 mole ratio)) และสารละลายลิเทียมໂบร์มีด (9.3M LiBr) โดยหลังจากนำไหมไปผ่านการกำจัดกาเวชีนแล้วจะได้เส้นไหมที่นุ่มและลื่นนิ่มวาว ไม่ หยาบกระด้าง เราเรียกว่าไหมในขั้นนี้ว่า degummed silk หรือเรียกว่าไหมไฟเบอร์อิน silk fibroin (SF) และนำมาตัด เป็นขั้นเล็กๆแล้วละลายในตัวทำละลายทั้ง 3 ระบบ จากนั้นทำการโดยใช้สีและทำให้แห้งด้วยวิธีไลโอฟิลลิซซ์จะได้ผง ไหมมีลักษณะสีเหลืองเข้มจนถึงเหลืองอ่อน เรียกว่า silk fibroin sponge ดังแสดงในรูปที่ 4.8

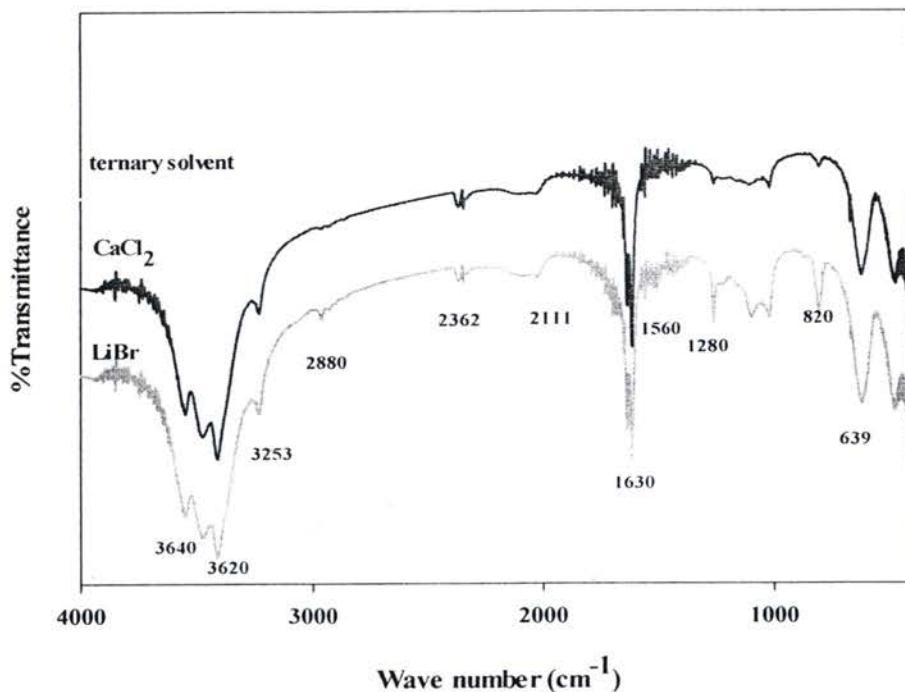


รูปที่ 4.8 ภาพถ่ายของผงไหม (silk fibroin sponge) ที่ได้จากระบบทัวทำละลาย (g) LiBr solution, (h) CaCl_2 solution และ (k) ternary solvent ($\text{CaCl}_2/\text{H}_2\text{O}/\text{EtOH}$; 1:8:2 อัตราส่วนโมล)

จากรูปที่ 4.8 พบว่าผงไหมที่ได้รับจากระบบทัวทำละลาย 9.3 M LiBr จะค่อนข้างแข็งแต่ประแทรก่าย ขณะที่ผงไหมที่ได้รับจากอีกสองระบบที่เหลือพบว่าเป็นผงฟุ่นและมีสีเหลืองจากกว่าผงไหมที่ได้รับจากระบบที่ลิเทียม ໂบร์มีด จากนั้นได้ทำผงไหมทั้งสามไปเตรียมเป็นสารละลายไหม (spinning solution) ด้วยตัวทำละลายกรดฟอร์มิก 99% สำหรับเป็นเส้นใยด้วยเครื่องอิเล็กโทรสปินนิ่ง จากการทดลองพบว่าผงไหมที่เตรียมจากตัวทำละลายลิเทียมໂบร์ มีดจะค่อนข้างเหนียวติดกันและมีความหนืดระดับหนึ่ง ขณะที่สารละลายที่ได้จากอีกสองระบบ พบว่าสารละลายไม่ เหนียวติดกันและดูเหมือนจะมีความหนืดน้อยกว่า จากข้อมูลนี้บ่งชี้ว่าหน้าหักโนเลกุลของผงไหมที่ได้จากระบบทัวทำ ละลายทั้งสามมีค่าต่างกัน โดยน้ำหนักโนเลกุลที่ได้จากระบบที่ลิเทียมໂบร์มีดน่าจะมีค่าสูงกว่าที่ได้จากอีกสองระบบ

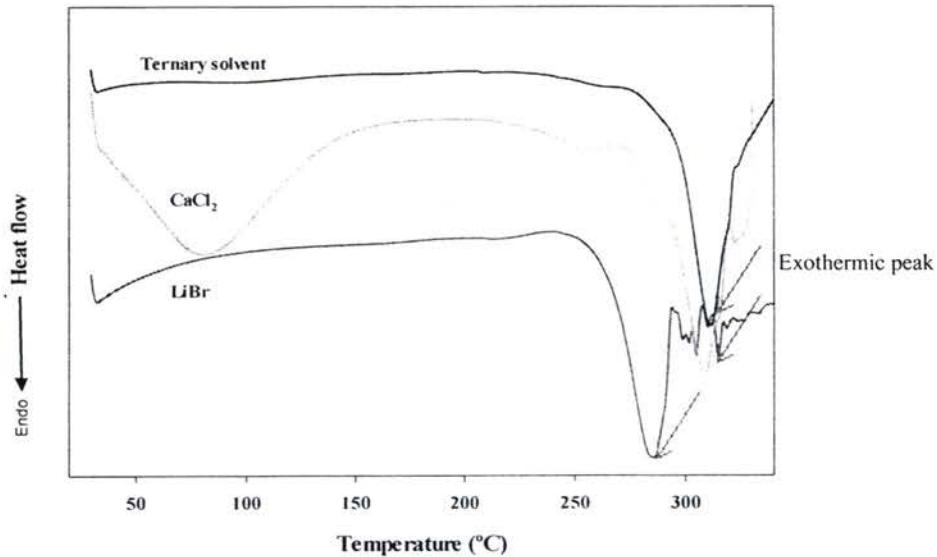
และเมื่อนำสารละลายไหมดังกล่าวไปทดสอบขั้นรูปเป็นเส้นไนนานา พบว่ามีเพียงสารละลายไหมที่เตรียม จากรูปใหม่ระบบลิเทียมໂบร์มีดเท่านั้นที่ได้เส้นไนนานาที่ดีและมีความเรียบสม่ำเสมอ ทั้งนี้อาจเนื่องจากผงไหมที่ได้จาก ระบบลิเทียมໂบร์มีดมีน้ำหนักโนเลกุลที่เหมาะสมกับขนาดของการเกิดการเกี่ยวพันกันของสายโซ่พอลิเมอร์ (chain entanglements) ในขณะที่อีกสองสารละลายที่เหลือพบว่ามีความหนืดที่ต่ำกว่าเนื่องจากมีการเกี่ยวพันกันของสารโซ่ น้อยกว่า (น้ำหนักโนเลกุลต่ำกว่า) ดังนั้นจึงได้มีตกลงของพอลิเมอร์แทนที่จะได้เส้นไนนานา และการที่มี ความหนืดต่ำยังเห็นได้ชัดเจนให้เกิดเส้นใยที่มีเม็ดปม (beaded fibers) แทนที่จะได้เส้นใยที่เรียบและสม่ำเสมอ ดังนั้น จากผลการทดลองนี้เราจึงได้เลือกใช้ระบบที่ลิเทียมໂบร์มีดในการเตรียมผงไหมเพื่อเตรียมเป็นสารละลายไหมต่อไป

นอกจากนี้ยังได้วิเคราะห์ทางมุฟงก์ขั้นทางเคมี สมบัติทางความร้อน และสมบัติทางโครงสร้างของผงใหม่ที่สามระบบที่เตรียมได้โดยใช้ เทคนิค FTIR, DSC, และ XRD, ตามลำดับ รูปที่ 4.9 แสดงสเปกตร้า FTIR ของผงใหม่ที่ได้จากทั้งสามระบบ (LiBr , CaCl_2 , and ternary solvent systems) และจากสเปกตร้าที่ได้พบว่ามีความคล้ายคลึง โดยจะมีพิคการดูดกลืนหลักอยู่ที่ $3500 - 3250 \text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเป็นส่วนของ O-H stretching, $3200 - 2800 \text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเป็นส่วนของ C-H₂ stretching, และ $1675 - 1650 \text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเป็นส่วน C=O stretching, ตามลำดับ และพบโครงสร้าง amide I, amide II และ amide III bands อยู่ที่ 1630 , 1560 และ 1280 cm^{-1} , ตามลำดับ ผลการศึกษานี้ยืนยันว่า เราประสบผลสำเร็จในการเตรียมผงใหม่



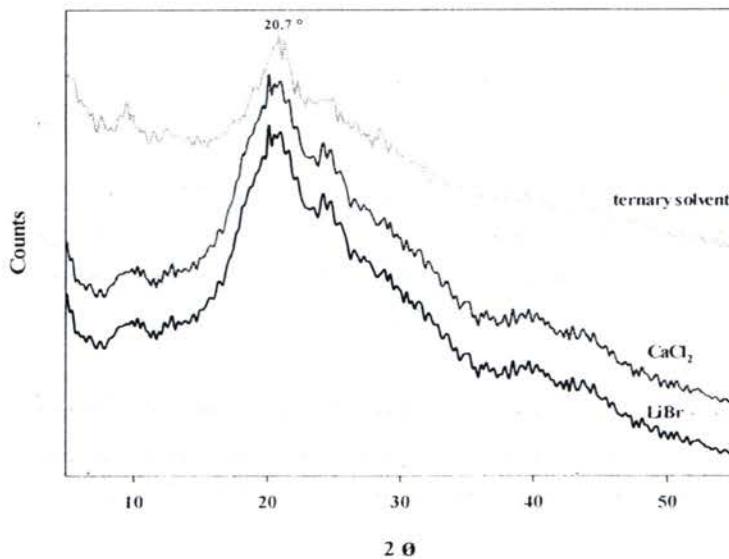
รูปที่ 4.8 FTIR สเปกตร้าของผงใหม่ที่เตรียมได้จากการบดตัวทำละลาย LiBr , CaCl_2 , และ ternary solvent

รูปที่ 4.9 แสดง DSC thermograms ของผงใหม่ที่เตรียมได้จากการบดตัวทำละลาย LiBr , CaCl_2 , และ ternary solvent จากรูปจะเห็นว่า DSC thermogram ของผงใหม่ที่เตรียมได้จากการบดตัวทำละลาย LiBr แสดงพีคการดูดกลืนที่ $285 \text{ }^\circ\text{C}$ ซึ่งบอกร่องรอยการสลายตัวทางความร้อนของโมเลกุลของใหม่ในส่วนที่เป็นระเบียบ อย่างไรก็ตาม DSC thermogram ของผงใหม่ที่เตรียมจาก CaCl_2 พบร่องรอยการดูดกลืนที่ $285 \text{ }^\circ\text{C}$ แต่ไม่ชัดเจน แสดงพีคการดูดกลืนที่ $285 \text{ }^\circ\text{C}$ ซึ่งเกี่ยวข้องกับการสลายตัวของโมเลกุลใหม่ในส่วนที่เป็นระเบียบ และสุดท้าย DSC thermogram ของผงใหม่ที่ได้จากการบดตัวทำละลาย LiBr แสดงพีคการดูดกลืนที่ $285 \text{ }^\circ\text{C}$ ซึ่งบอกร่องรอยการสลายตัวของโมเลกุลใหม่ในส่วนที่เป็นระเบียบ นอกจากนี้เมื่อมองคุณภาพของใหม่ในแต่ละเทอร์โมแกรมพบว่าจะมีพีคการคายความร้อนที่เกิดขึ้นก่อนพีคของการสลายตัวเนื่องจากความร้อน ซึ่งพีคการคายความร้อนนี้เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ของ random coil ซึ่งเป็นตัวบินยันว่าผงใหม่ประกอบด้วย random coil และการจัดเรียงตัวเป็นแบบแอลfa (α -helix conformation>)



รูปที่ 4.9 DSC thermograms ของผงไหมที่ได้จากการบดตัวทำละลาย LiBr, CaCl₂ และ Ternary solvent

สำหรับการศึกษาโครงสร้างผลึกของผงไหมที่เตรียมได้โดยเทคนิค X-Ray diffraction (XRD) ได้ผลดังรูปที่ 4.10 จากรูปจะเห็นว่า XRD patterns ของผงไหมที่ได้จากการบดตัวทำละลายมีความคล้ายคลึงกัน โดยแสดงเพียงหนึ่งพีกกว้าง (broad peak) ที่ $2\theta = 20.7^\circ$ ในทุก XRD patterns ซึ่งพีคนี้บ่งบอกถึงว่าผงไหมไฟเบอร์อินบริสุทธิ์ประกอบด้วย random coil และมีการจัดเรียงตัวแบบ α -helix conformations ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่ได้ FTIR และจากลักษณะรูปร่างของ XRD patterns แสดงให้เห็นว่าผงไหมที่เตรียมได้ออยู่ในสถานะอสัมธฐาน (amorphous)



รูปที่ 4.10 XRD patterns ของผงไหมที่ได้จากการบดตัวทำละลาย LiBr, CaCl₂ และ Ternary solvent

4.4 การทดสอบความเข้มข้นสารละลายใหม่ต่อเส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นใย

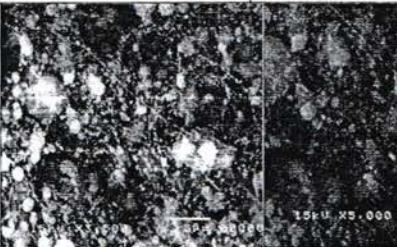
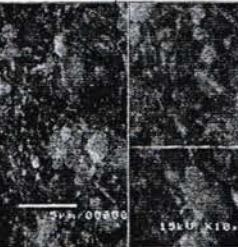
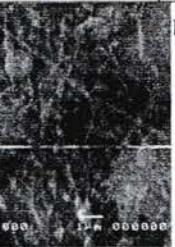
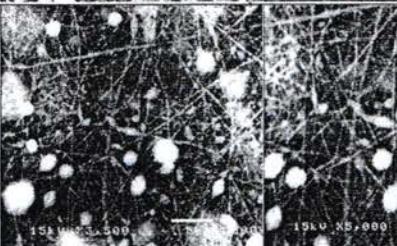
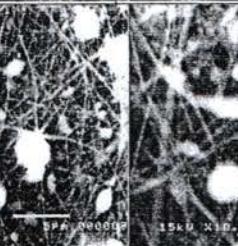
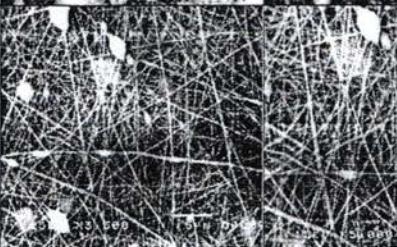
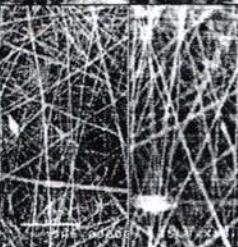
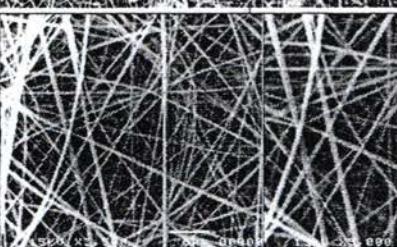
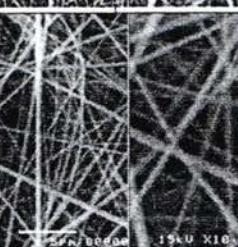
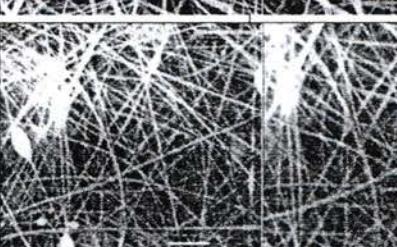
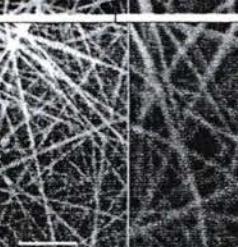
4.4.1 ผลกระทบของความเข้มข้นสารละลายใหม่ต่อเส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นใย

หลังจากที่ได้สภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมใหม่แล้ว ขั้นตอนต่อไป คือการทดสอบความเข้มข้นในการขึ้นรูปเส้นใยนาโนจากสารละลายใหม่ ดังนั้นเป้าหมายของส่วนนี้ คือ การศึกษาตัวแปรของการขึ้นรูป (ความเข้มข้นของสารละลายพอลิเมอร์) เพื่อที่จะได้เส้นใยใหม่ที่มีความสม่ำเสมอด้วยเทคนิคอิเล็ก trodespinning และเพื่อวิเคราะห์อิทธิพลของความเข้มข้นของพอลิเมอร์ต่อขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นใย ใน การศึกษานี้ผงใหม่ไฟฟ์โบรอน (SF sponge) ละลายในกรดฟอร์มิก 99% เพื่อเตรียมเป็นสารละลายสำหรับปั๊นในช่วงความเข้มข้น 6-20 % (wt/v) โดยกำหนดให้สภาวะการขึ้นรูปด้วยเทคนิคอิเล็ก trodespinning เป็นดังนี้ ศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ 15 kV และความเข้มข้นของสารละลายใหม่เป็น 6, 8, 10, 12, 14, 15, 16, 18 และ 20 % (wt/v) และกำหนดให้ระยะห่างระหว่างปลายเข็มและแผ่นรองรับ (TCD) เป็น 15 เซนติเมตร (cm) และอัตราการไหลเป็น 1 mL/h

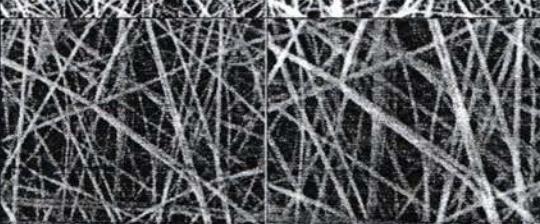
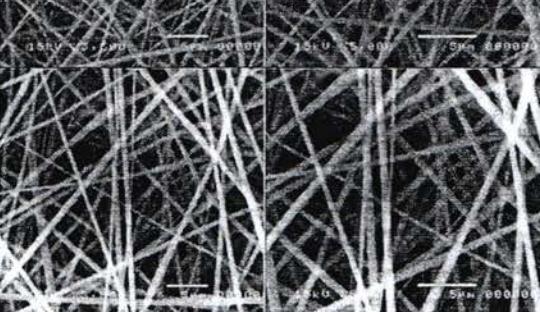
ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเส้นใยนาโนใหม่ที่ปั๊นได้ถูกวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM ที่กำลังขยาย 3500x, 5000x และ 10000x แสดงในรูปที่ 4.11 จากรูปที่ 4.11 จะเห็นว่ามีเส้นใยนาโนใหม่เกิดขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม พบว่ามีหยด (droplets) และเส้นใยที่มีเม็ดปม (beaded along fibers) ที่ตัวอย่างเส้นใหม่ที่เตรียมจากสารละลายใหม่ความเข้มข้น 6% เนตุผลที่เป็นเช่นนี้เพราะว่าความเข้มข้นนี้มีการเพิ่มพันกันของสายโซ่น้อยและไม่เพียงพอที่จะป้องกันการเกิดการแตกหักของลำกระแทก (jet) ที่ขับด้วยแรงทางไฟฟ้าและดังนั้นจึงเป็นหยดขั้นแทนที่จะเป็นเส้นใย ตารางที่ 4.3 แสดงภาพรวมของอิทธิพลของความเข้มข้นต่อสัณฐานวิทยาของเส้นใย ที่ความเข้มข้น 8% ก็ยังพบเส้นใยและมีหยดพอลิเมอร์บนแผ่นเส้นใยด้วยและเส้นผ่าศูนย์กลางไม่สม่ำเสมอ ที่ความเข้มข้น 10% ก็พบหยดแทนที่จะได้เส้นใย ด้วย และพบว่าเส้นใยต่อเนื่องจะเกิดขึ้นเมื่อสารละลายใหม่มีความเข้มข้นมากกว่า 12% ทั้งนี้เนื่องจากมีปริมาณการเกี่ยวพันกันของสายโซ่ที่เพียงพอซึ่งป้องกันการแตกหักของลำกระแทกที่ขับด้วยแรงเคลื่อนทางไฟฟ้าได้และทำให้แรงนี้ ทำให้เกิดการยืดออกของลำกระแทกเพื่อเกิดเป็นเส้นใย ที่ความเข้มข้น 14% พบว่าเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยของเส้นใยมีขนาดเล็กกว่าที่ความเข้มข้นอื่นๆแต่ก็ยังมีหยดพอลิเมอร์ติดมาด้วยเล็กน้อย ที่ความเข้มข้น 15% พบว่าได้เส้นใยที่เรียบ และสม่ำเสมอ กัน (uniform) และมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 300 นาโนเมตร (nm) ที่ความเข้มข้น 16% เส้นใยที่ได้มีความสม่ำเสมอ กันแต่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางขนาดใหญ่ขึ้นและใหญ่กว่าเส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นใยที่ความเข้มข้น 14% และสุดท้ายที่ความเข้มข้น 20% พบว่าเกิดเส้นใยติดเขินกันแต่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางใหญ่ มากกว่าเส้นใยที่ความเข้มข้นต่ำกว่า ซึ่งผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Sukigura และคณะ^[91] และจาก การวิเคราะห์เส้นใยโดยโปรแกรมวัดขนาดเส้นใยจะเห็นได้ว่าขนาดของเส้นใยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นเพิ่มมากขึ้นทั้งนี้เนื่องจากเมื่อความเข้มข้นมากขึ้นแสดงว่าสารละลายก็จะมีความหนืดมากขึ้นดังนั้นจึงมีความต้านทานต่อการยืดตัวออกของเส้นใยมากขึ้นจึงทำให้มีเส้นผ่าศูนย์กลางเพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า ความเข้มข้นที่เหมาะสมจะให้ได้เส้นใยนาโนใหม่ที่มีความสม่ำเสมอ เส้นเรียบและมีเส้นผ่าศูนย์กลางขนาดเล็ก คือ ความเข้มข้น 15%

กราฟการกระจายตัวของเส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นใยด้วยตัวความเข้มข้น 8, 10, 12, 14, 15, 16, 18 และ 20% แสดงในคอลัมน์ด้านขวาเมื่อของรูปที่ 4.12 จากรูปจะเห็นว่าเส้นใยนาโนใหม่ที่เตรียมได้มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางตั้งแต่ 100 – 800 nm และในแต่ละความเข้มข้น ก็พบเส้นใยบางส่วนที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางต่ำกว่า 100 nm อีกด้วย

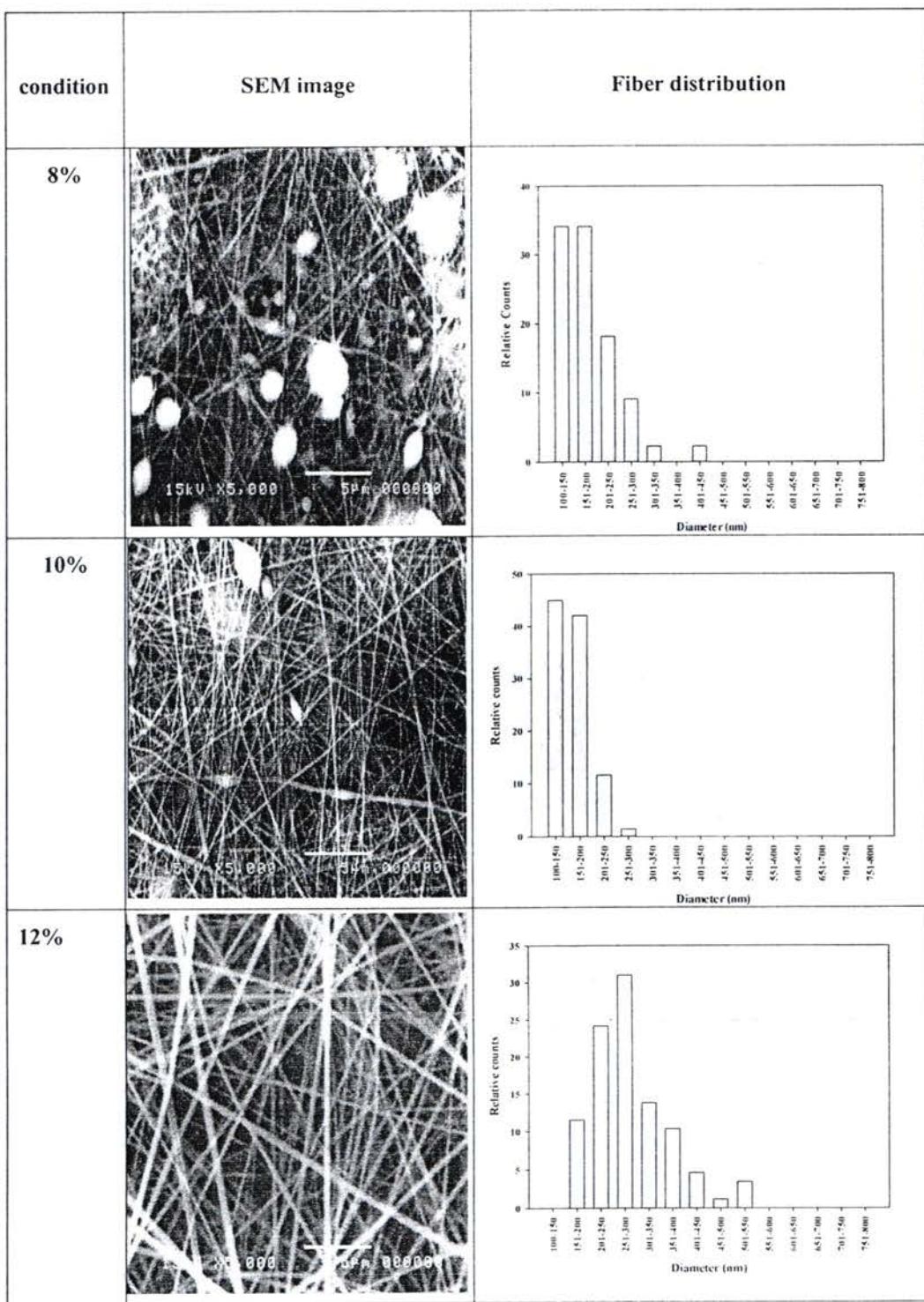
รูปที่ 4.13 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นใยกับความเข้มข้นของสารละลายใหม่ จากรูปจะเห็นว่า เมื่อความเข้มข้นของสารละลายใหม่เพิ่มสูงขึ้น ขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยของเส้นใยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น สาเหตุเนื่องมาจากมีการเพิ่มพันกันของสายโซ่ที่เพียงพอในสารละลายพอลิเมอร์ทำให้ป้องกันการเกิดการแตกหัก/ฉีกขาดออกจากกันของลำกระแทกที่ถูกขับเคลื่อนด้วยแรงทางไฟฟ้า จึงทำให้เกิดการยืดออกของเส้นใย

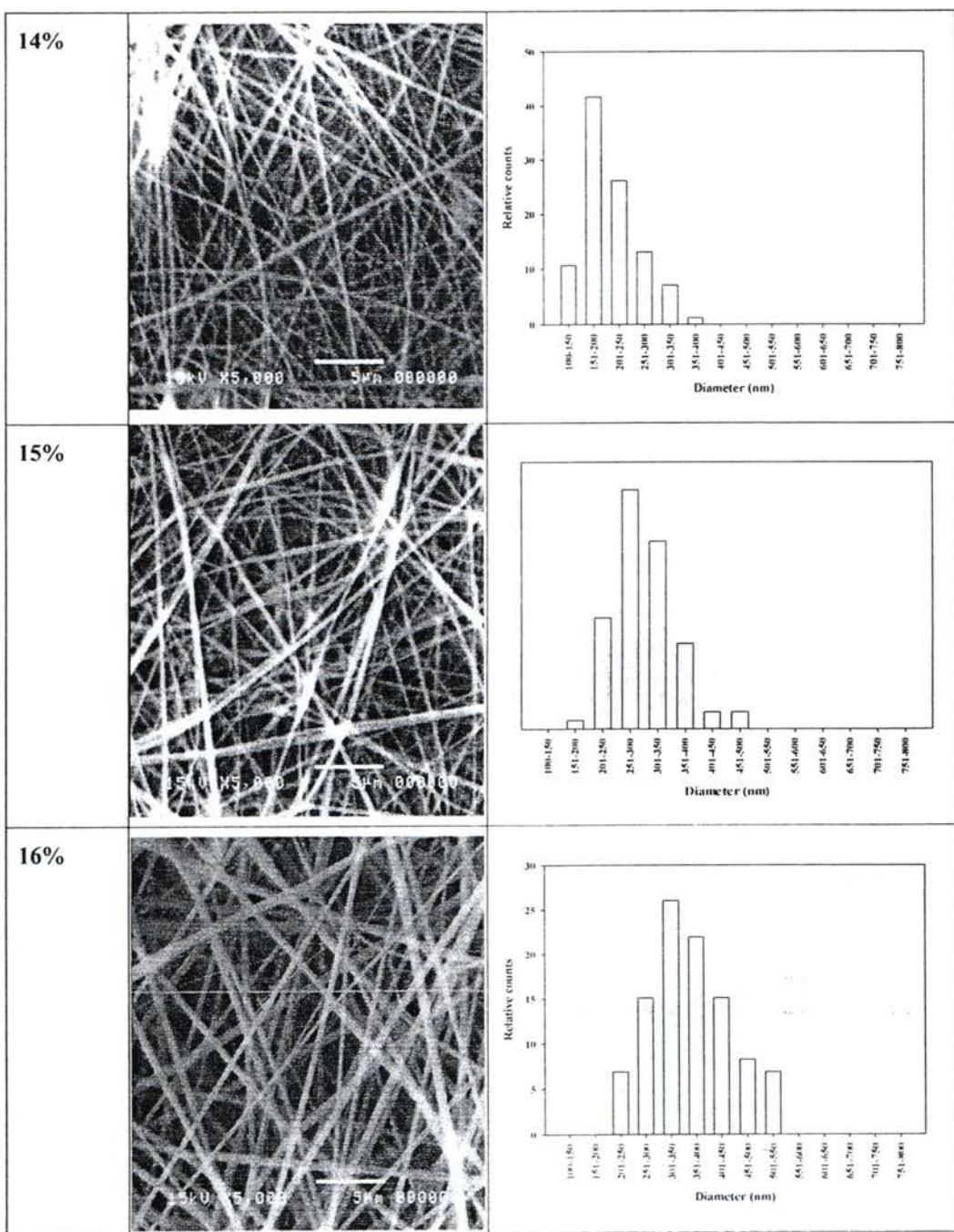
Condi-tion	Magnification			Fiber Diameter (nm)
	3500x	5000x	10000x	
6%				No
8%				AV: 186 STD: 63 Max: 431 Min: 109
10%				AV: 157 STD: 35 Max: 252 Min: 69
12%				AV: 287 STD: 79 Max: 541 Min: 158
14%				AV: 206 STD: 56 Max: 357 Min: 91

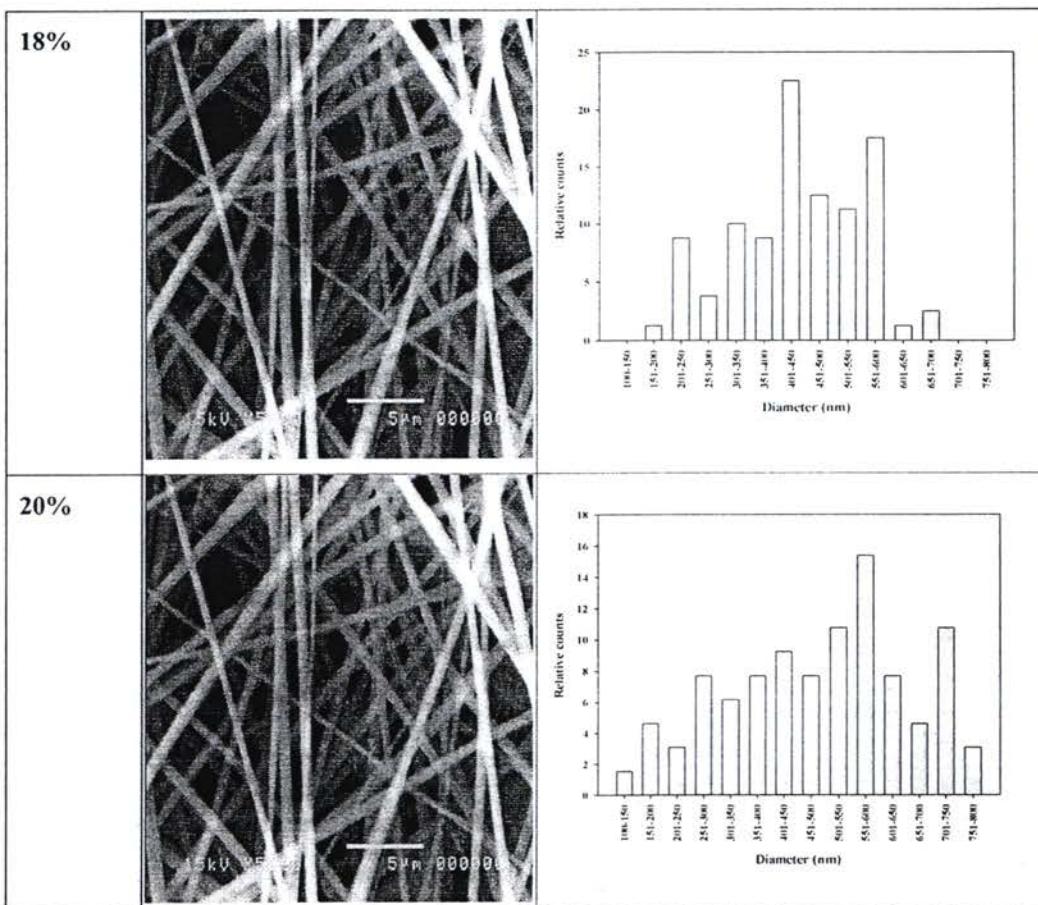
รูปที่ 4.11 สัมฐานวิทยาของเล็นไยที่ความเข้มข้นต่างๆ (6-20%) ซึ่งถ่ายรูปด้วยสนาณไฟฟ้า 15 kV และระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับแผ่นรองรับเท่ากับ 15 cm อัตราการไหลเท่ากับ 1 mL/h

Condition	Magnification			Fiber Diameter (nm)
	3500x	5000x	10000x	
15%				AV : 302 STD : 53 Max : 460 Min : 197
16%				AV: 412 STD: 78 Max: 592 Min: 264
18wt%				AV: 443 STD: 122 Max: 799 Min: 156
20%				AV: 495 STD: 177 Max: 859 Min: 134

รูปที่ 4.11 สัณฐานวิทยาของเส้นใยที่ความเข้มข้นต่างๆ (6-20%) ซึ่งขึ้นรูปด้วยสนามไฟฟ้า 15 kV และระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับแผ่นรองรับเท่ากับ 15 เซ็นติเมตร อัตราการไหลเท่ากับ 1 mL/h (ต่อ)



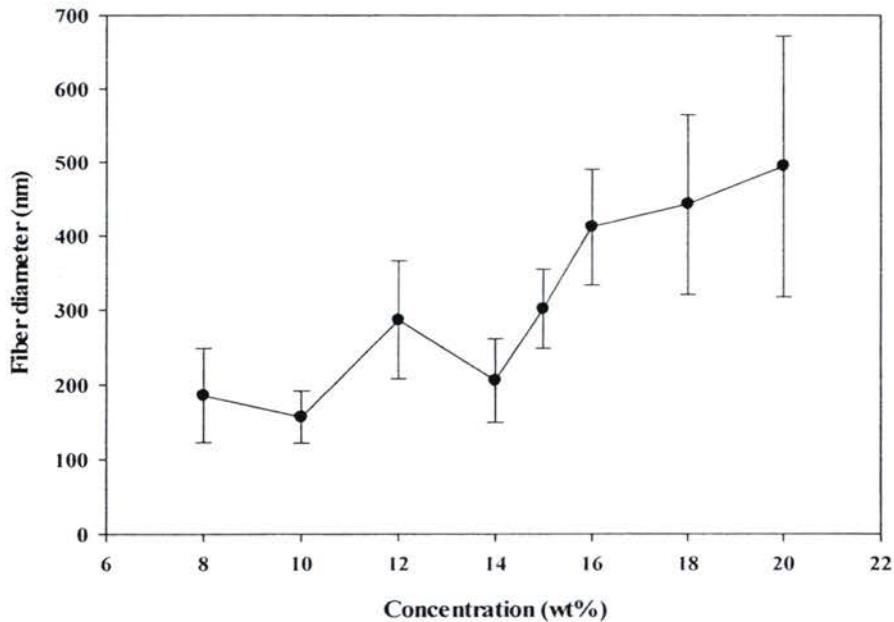




รูปที่ 4.12 การกระจายตัวของเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยไหมซึ่งทำการขึ้นรูปที่สนามไฟฟ้า 15 KV และที่ความเข้มข้นของสาระลายไหม 6, 8, 10, 12, 14, 15, 16, 18 และ 20% โดยจำกัดระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับแผ่นรองเป็น 15 cm และอัตราการไหลเป็น 1 mL/h

ตารางที่ 4.3 ตารางสรุปผลของความเข้มข้นไหมต่อสัณฐานวิทยาของการเกิดเส้นใยไหม

ความเข้มข้นไหม (%w/v)	สัณฐานวิทยา
6	ไม่มีเส้นใย มีแต่หยดของพอลิเมอร์
8	มีเส้นใยบางแต่มีหยดพอลิเมอร์ค่อนข้างเยอะ
10	เริ่มมีเส้นใยเกิดได้ดีมากขึ้นและมีเม็ดปมเยอะ
12	เส้นใยเกิดได้ดี มีขนาดเล็ก แต่ไม่สม่ำเสมอ กัน
14	เส้นใยเกิดได้ดี มีขนาดเล็ก แต่ไม่สม่ำเสมอ กัน มีเม็ดปม
15	เส้นใยเกิดได้ดี มีขนาดเล็ก สม่ำเสมอ กัน ดี มีเม็ดปมน้อย
16	เส้นใยเกิดได้ดี มีขนาดใหญ่ ไม่สม่ำเสมอ กัน
18	เส้นใยเกิดได้ดี มีขนาดใหญ่มากขึ้น ไม่สม่ำเสมอ กัน
20	เส้นใยเกิดได้ดี มีขนาดใหญ่มากขึ้น ไม่สม่ำเสมอ กัน



รูปที่ 4.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นใยไนโอมกับความเข้มข้นของไนโอมในช่วง 8-20 % (wt/v)

4.4.2 ผลกระทบของศักย์ไฟฟ้าที่ได้ต่อสัณฐานวิทยาและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย

เพื่อศึกษาผลกระทบของศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ต่อสัณฐานวิทยาและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยไนโอม ได้จำกัดความเข้มข้นของสารละลายไนโอมที่ 15% (ตามสรุปในหัวข้อ 4.4.1) พร้อมกับทำการกำหนดให้ระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับแผ่นรองรับเป็น 15 cm และให้อัตราการไหลของสารละลายเป็น 1 mL/h โดยทำการแปรผันค่าศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ในการปั่นเส้นใยเป็น 10, 15, 20, และ 25 kV

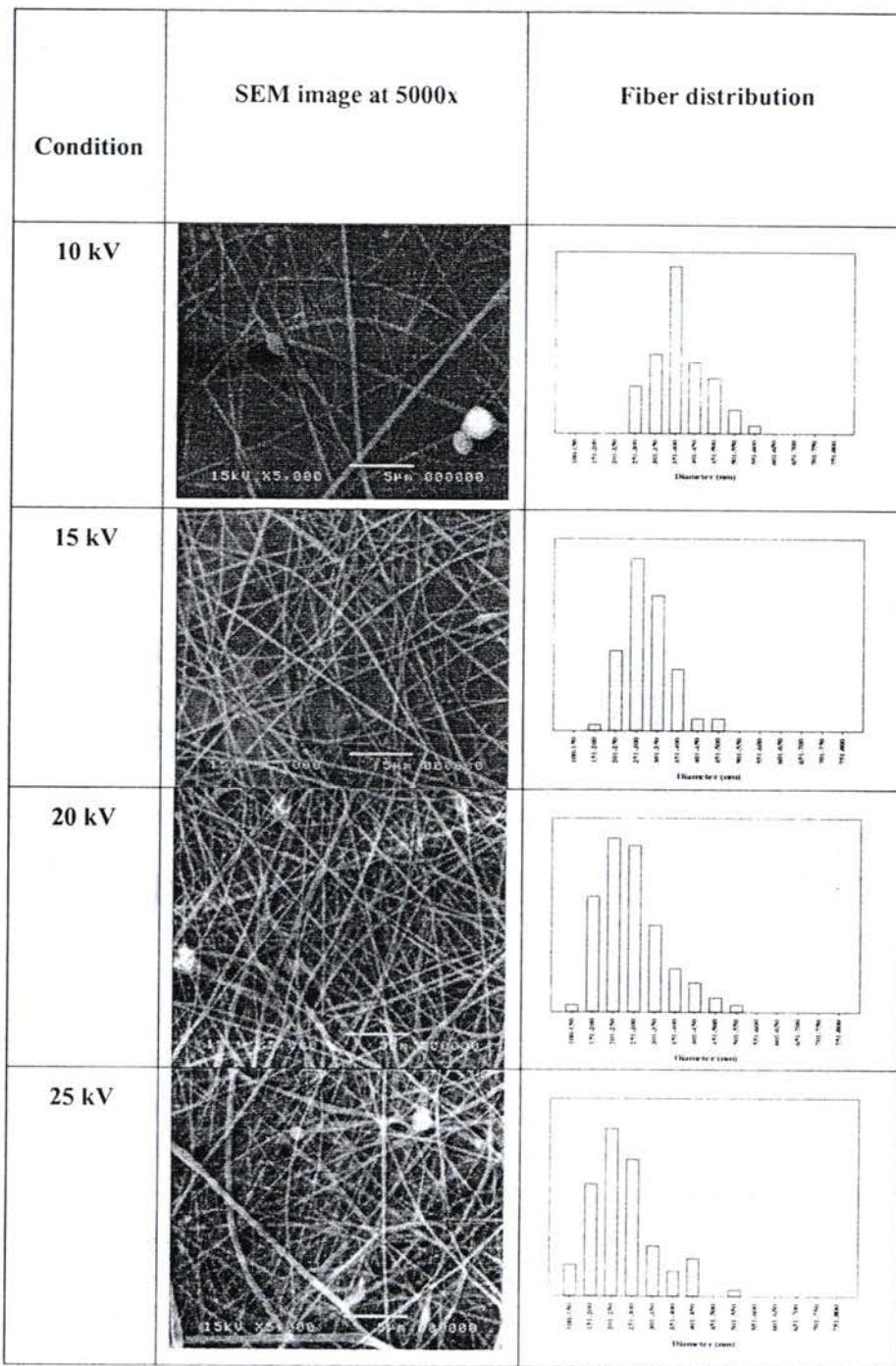
รูปที่ 4.14 แสดงภาพสัณฐานวิทยาของเส้นไนโอมที่กำลังขยายต่างๆ (3500-10000x) ซึ่งขึ้นรูปด้วยการใช้ศักย์ไฟฟ้าที่ 10, 15, 20 และ 25 kV โดยกำหนดให้ระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับแผ่นรองรับเป็น 15 cm และให้อัตราการไหลของสารละลายเป็น 1 mL/h จากรูปจะเห็นว่ามีเส้นใยเกิดขึ้นในทุกความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้แต่จำนวนเม็ดปม จำนวนหยดพอลิเมอร์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและปริมาณเส้นใยจะแตกต่างกัน และในคลุมด้านขวามีอย่างได้แสดงเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเส้นใยและค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานรวมถึงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ใหญ่และเล็กที่สุดไว้ด้วย

ที่ความต่างศักย์ 10 kV ได้เส้นใยที่มีเม็ดปมและมีปริมาณเส้นใยน้อย แต่จะได้หยดของพอลิเมอร์เป็นส่วนใหญ่เนื่องจากกำลังศักย์ไฟฟ้ายังไม่เพียงพอที่จะทำให้เกิดการยึดออกของลำกระแสงได้ เมื่อเพิ่มกำลังศักย์ไฟฟ้าสูงขึ้นเป็น 15 – 25 kV พบว่าได้เส้นใยที่มีเม็ดปม (bead-fibers) ลดลงและเส้นใยที่ได้ก็มีความสม่ำเสมอ กันดีและมีปริมาณเส้นใย/ความหนาแน่นเพิ่มมากขึ้นเมื่อศักย์ไฟฟ้าสูงมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม พบว่าเราไม่สามารถกำหนดให้มีเม็ดปมหมวดไปได้ในทุกศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ และยังพบว่าเม็ดปมมากขึ้นหากว่าใช้กำลังศักย์ไฟฟ้าเกินค่าวิกฤติไป เช่นที่ 20-25 kV ทั้งนี้เนื่องจากศักย์ไฟฟ้าที่ใช้และสนามไฟฟ้าที่ได้มีผลต่อการยึดตัวและความเร่งของลำกระแสง (jet) ดังนั้นจึงมีอิทธิพลต่อสัณฐานวิทยาของเส้นใยที่ได้ เส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นไนโอมที่เตรียมได้ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าจาก 10, 15, 20 และ 25 kV มีค่าเท่ากับ 386 nm, 302 nm, 412 nm และ 273 nm ตามลำดับ

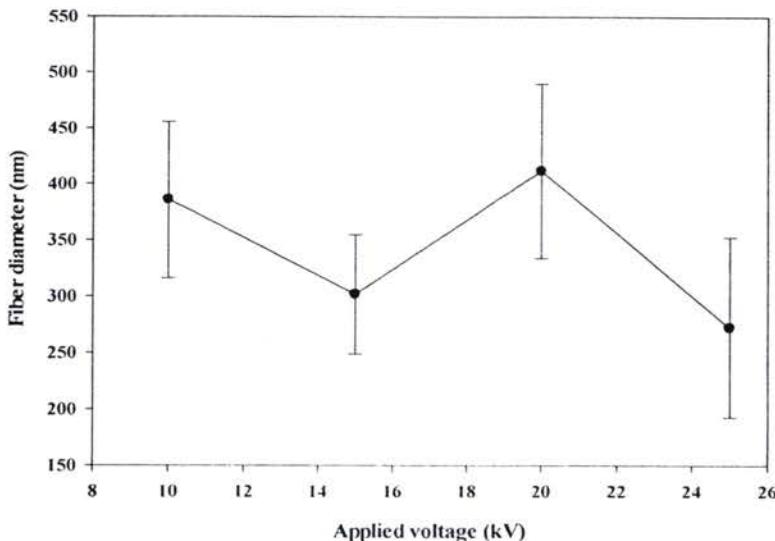
Condition	Magnification			Fiber Diameter (nm)
	3500x	5000x	10000x	
10 kV.				AV: 386 STD: 70 Max: 568 Min: 282
15 kV.				AV: 302 STD: 53 Max: 460 Min: 197
20 kV.				AV: 412 STD: 78 Max: 592 Min: 264
25 kV.				AV: 273 STD: 80 Max: 507 Min: 122

รูปที่ 4.14 สัณฐานวิทยาของเส้นไนนานใหม่ที่กำลังขยายต่างๆ (3500-10000x) ซึ่งขึ้นรูปด้วยการใช้ศักย์ไฟฟ้าที่ 10, 15, 20 และ 25 kV โดยกำหนดให้ระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับแผ่นรองรับเป็น 15 cm และให้อัตราการไหลของสารละลายเป็น 1 mL/h

รูปที่ 4.15 แสดงกราฟการกระจายตัวของเส้นไนนานใหม่ที่เตรียมได้จากศักย์ไฟฟ้าที่แตกต่างกัน จะเห็นว่าที่ศักย์ไฟฟ้าต่ำๆและศักย์ไฟฟ้าสูงๆ มีผลทำให้เกิดการกระจายของขนาดเส้นใยที่กว้าง นั้นหมายความว่าได้เส้นใยที่มีขนาดแตกต่างกันมาก/มีความไม่สม่ำเสมอ กันซึ่งเป็นสิ่งที่ไม่ดีต่อการ ดังนั้นจากรูปกราฟการกระจายตัว ศักย์ไฟฟ้าที่ให้การกระจายตัวของขนาดเส้นใยแคบที่สุด คือ ที่ศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ 15 kV และลักษณะเส้นใยที่ได้ยังมีความเรียบและมีเม็ดปมเกิดขึ้นน้อยที่สุดด้วย ดังนั้นจากข้อมูลนี้พожสรุปได้ว่า ศักย์ไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับใช้ขึ้นรูปเส้นไนนานใหม่ คือ ศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ 15 kV



รูปที่ 4.15 การกระจายตัวของเส้นผ่าնิยงค์ทางของเส้นใยที่ศักยไฟฟ้า 10, 15, 20 และ 25 kV เส้นใยขึ้นรูปด้วยการใช้ศักยไฟฟ้าที่ 10, 15, 20 และ 20 kV โดยกำหนดให้ระยะห่างระหว่างปลาຍเข้มกับแผ่นรองรับเป็น 15 cm และให้อัตราการไหลของสารละลายเป็น 1 mL/h



รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยของเส้นใยกับศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ในการขึ้นรูปเท่ากับ 10, 15, 20 และ 25 kV

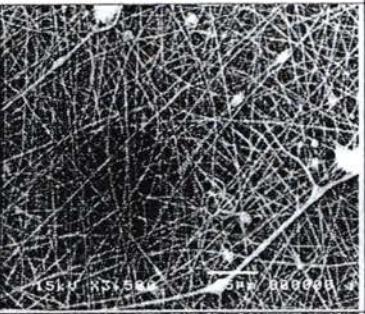
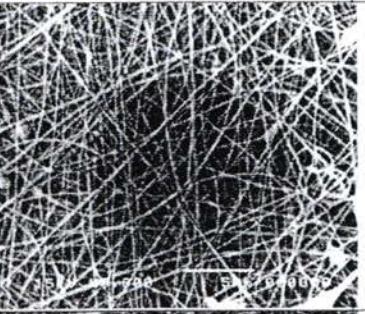
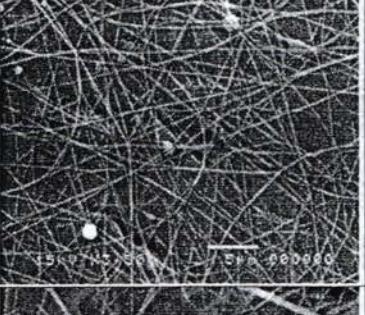
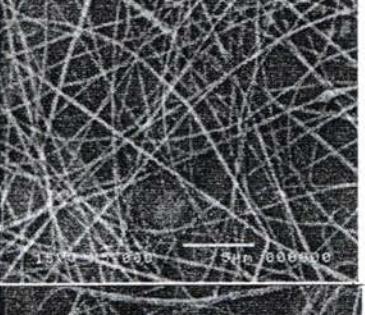
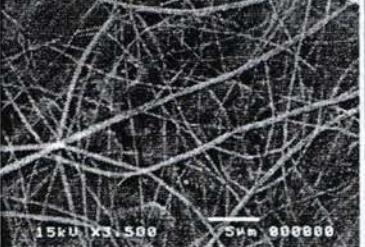
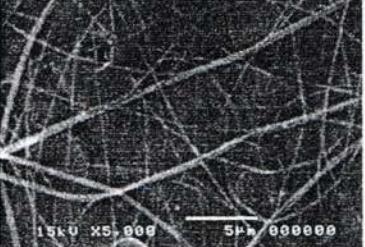
รูปที่ 4.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นใยกับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ในการขึ้นรูป จากรูปจะเห็นว่าเส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นใยมีแนวโน้มลดลงเมื่อศักย์ไฟฟ้าที่ใช้มากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากมีการยืดตัวออกของลำกระแสงได้มากเพรำมีแรงคูลอมบ์บิ่กมากขึ้นภายในลำกระแสงรวมถึงสนามไฟฟ้าที่เพิ่มมากขึ้นจึงไปทำให้เกิดการลดลงของขนาดเส้นใยใหม่ที่ได้^[28] และนอกจากนั้นยังช่วยทำให้เกิดการระเหยตัวที่เร็วขึ้นของตัวทำละลายทำให้ได้เสียไหที่แห้งมากขึ้นด้วย^[92] ถึงแม้ว่าเส้นใยที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเล็กที่สุดสามารถขึ้นรูปได้โดยใช้ศักย์ไฟฟ้าที่ 25 kV แต่จากรูปที่ 4.15 พบว่าการกระจายตัวของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางมีความกว้างมากกว่าที่ใช้ศักย์ไฟฟ้า 15 kV ดังนั้นจึงสามารถกล่าวได้ว่าศักย์ไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับใช้ขึ้นรูปเสียไหนาในใหม่ให้มีความสม่ำเสมอและเส้นเรียบคือ 15 kV ซึ่งจะใช้สำหรับการปรับปรุงตัวแปรของ การขึ้นรูปด้วยอุปกรณ์อื่นๆ ต่อไป

4.4.3 ผลกระทบของระยะห่างจากปลายเข็มถึงแผ่นรองรับ (TCD) ต่อสัณฐานวิทยาและเส้นผ่าศูนย์กลางเส้นไหนาในใหม

ในหัวข้อนี้จะทำการอิพลของระยะห่างระหว่างปลายเข็มถึงแผ่นรองรับเส้นใย (target to collector distance, TCD) เพื่อหาระยะห่างที่เหมาะสมในการขึ้นรูปเส้นไหนาในจากสารละลายใหม่ โดยได้กำหนดให้ความเข็มของสารละลายใหม่คงที่เท่ากับ 15 wt% (จาก 4.4.1) และศักย์ไฟฟ้าที่ใช้คงที่ เท่ากับ 15 kV (จาก 4.4.2) อัตราการไหลกับ 1 mL/h และได้ทำการปรับน้ำหนักระหว่างปลายเข็มถึงแผ่นรองรับเป็น 10, 15, และ 20 cm ตามลำดับ

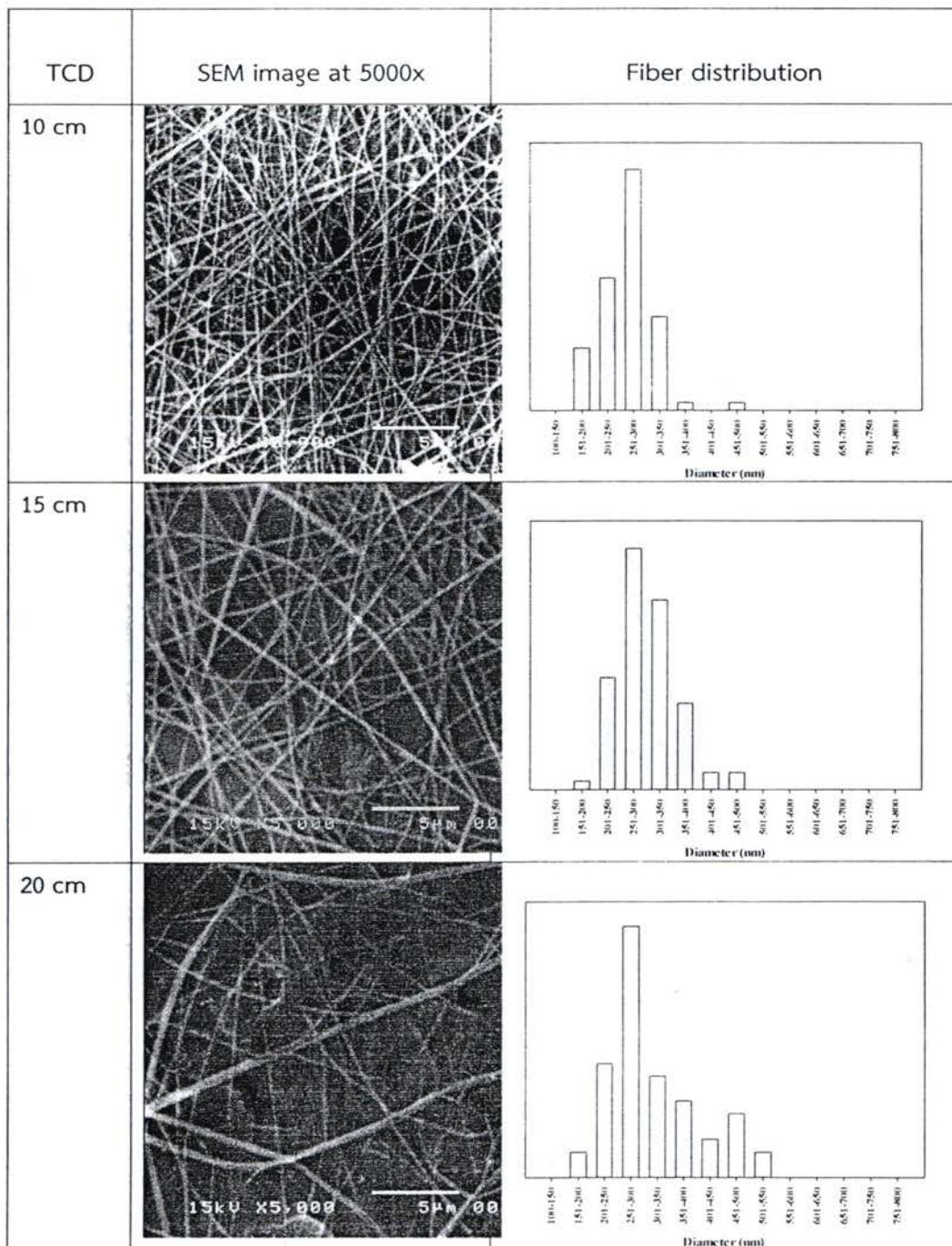
รูปที่ 4.17 แสดงภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 3500x และ 5000x ของเส้นไหนาในของใหม่ที่ปั้นขึ้นรูปด้วยระยะห่างจากปลายเข็มถึงแผ่นรองรับระยะ 10, 15 และ 20 cm เมื่อกำหนดให้ความเข็มข้นของสารละลายใหม่และศักย์ไฟฟ้าที่ใช้คงที่ จำกัดที่ 4.17 จะเห็นว่าเส้นใยต่อเนื่องเกิดขึ้นในทุกๆ ระยะห่างที่ทำการทดสอบ แต่ที่ระยะห่างเท่ากับ 10 cm พบว่าได้เส้นใยที่มีเม็ดปมเกิดขึ้นจำนวนมากและจำนวนเส้นไหนาในที่มีความหนาแน่นสูงกว่าระยะอื่นๆ การเกิดเม็ดปมจำนวนมากจากการเพิ่มขึ้นของสนามไฟฟ้าระหว่างปลายเข็มและแผ่นรองรับ (ระยะทางข้าไปลักษณะไฟฟ้าจะสูงขึ้น) และถ้าหากสนามไฟฟ้ามากเกินไปก็จะทำให้ลำกระแสงเกิดการรวมกันกลายเป็นเม็ดปมเกิดขึ้น^[93] เมื่อเพิ่มระยะห่างเพิ่มขึ้นจาก 10 เป็น 15 และ 20 cm พบว่ามีเม็ดปมลดลงแต่ความหนาแน่นของเส้นใยก็ลดลงไป

ด้วย และยังสังเกตเห็นหยดพอลิเมอร์ติดไปด้วยในปริมาณหนึ่ง นอกจากนี้ยังสังเกตเห็นเส้นใยที่มีขนาดไม่สม่ำเสมอ กันที่ระยะห่าง 20 cm

TCD	Magnification		Fiber Diameter (nm)
	3500x	5000x	
10 cm			AV: 269 STD: 65 Max: 615 Min: 167
15 cm			AV: 302 STD: 53 Max: 460 Min: 197
20 cm			AV: 319 STD: 85 Max: 505 Min: 189

รูปที่ 4.17 สัญญาณวิทยาของเส้นใยนาโนใหม่ที่ขึ้นรูปด้วยความเข้มข้น 15% ใช้ศักยไฟฟ้าเป็น 15 KV โดยมีการแปรงระยะห่างระหว่างปลายเข็มแผ่นรองรับเป็น 10 15 และ 20 cm

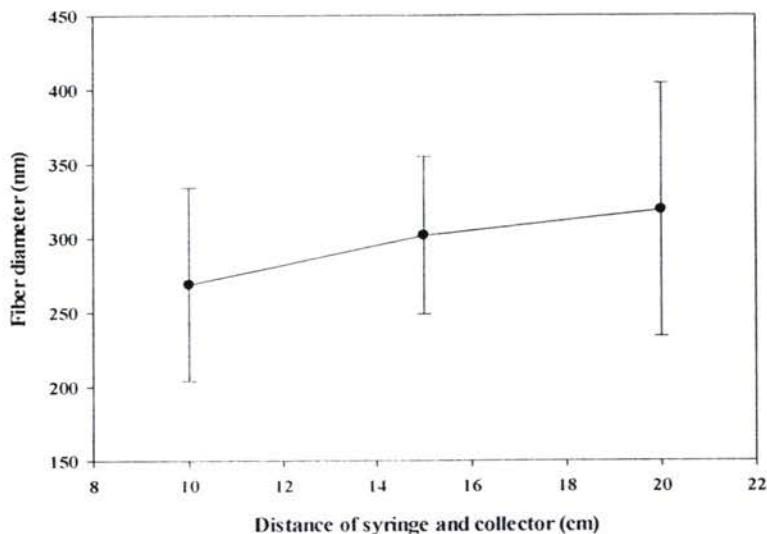
รูปที่ 4.18 แสดงกราฟการกระจายตัวของเส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นใยใหม่ที่ระยะห่างระหว่างปลายเข็มถึงแผ่นรองรับเป็น 10, 15 และ 20 cm จากรูปจะเห็นว่าการกระจายตัวของเส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นใยใหม่จะมีแนวโน้มกว้างมากขึ้นเมื่อเพิ่มระยะห่างมากขึ้น อย่างไรก็ตาม การกระจายตัวของเส้นใยที่ระยะห่าง 10 และ 15 cm พบร่วมกันค่อนข้างมีรูปร่างคล้ายคลึงกัน เมื่อระยะห่างมากเกินไป จะไม่มีเส้นใยไปทางเดียวได้เนื่องแรงทางไฟฟ้ากระโดดข้ามไปไม่ถึงแผ่นรองรับ นอกจากนี้แล้วยังพบว่าที่ระยะห่าง 10 cm ถึงแม้จะมีการกระจายตัวค่อนข้างแคบแต่จะมีปริมาณเม็ดปมเกิดขึ้นค่อนข้างมาก ดังนั้นระยะห่างจากปลายเข็มถึงแผ่นรองรับที่เหมาะสมสำหรับปั๊มเส้นใยใหม่น่าจะเท่ากับ 15 cm เนื่องจากให้เส้นใยที่มีการกระจายตัวแคบและมีเม็ดปมปริมาณน้อยพร้อมทั้งได้ความหนาแน่นของเส้นใยที่พอเหมาะ



รูปที่ 4.18 กราฟการกระจายตัวของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นใบนาในใหมที่ขึ้นรูปด้วยความเข้มข้น 15% ใช้สักกี้ไฟฟ้าเป็น 15 kV โดยมีการแปรผันระยะห่างระหว่างปลายเข็มถึงแผ่นรองรับเป็น 10 15 และ 20 cm

รูปที่ 4.19 แสดงความล้มพังระหว่างเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยกับระยะห่างระหว่างปลายเข็มถึงแผ่นรองรับเส้นใยที่ระยะ 10, 15 และ 20 cm จากรูปจะเห็นว่าเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยของเส้นใยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อระยะห่างเพิ่มมากขึ้นซึ่งพบว่าเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยของเส้นใยเป็น 269 nm, 302 nm และ 319 nm เมื่อระยะห่าง

เป็น 10, 15 และ 20 cm ตามลำดับ การเพิ่มขึ้นเล็กน้อยของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยเมื่อระยะห่างระหว่างปลายเข็มถึงแผ่นรองรับมากขึ้น เนื่องมาจาก การลดลงของความแรงของสนามไฟฟ้าทำให้เส้นใยยืดออกลดลง ดังนั้นดูเหมือนว่าจะต้องมีความแรงของสนามไฟฟ้าที่เหมาะสมที่ยังทำให้ลักษณะเส้นผ่านศูนย์กลางคงที่โดยไม่ต้องทำให้เส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยในนั้นลดลง หากไม่แล้วก็จะได้เส้นผ่านศูนย์กลางที่เพิ่มมากขึ้นแทน



รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยกับระยะทางระหว่างปลายเข็มถึงแผ่นรองรับที่ระยะทาง 10, 15 และ 20 cm

ดังนั้น จากข้อมูล 4.4.1 - 4.4.3 ทำให้สามารถสรุปได้ว่า กระบวนการขึ้นรูปที่เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูปเส้นใยนาโนจากสารละลายใหม่ เป็นดังนี้

ความเข้มข้นของสารละลายใหม่ เท่ากับ 15 % w/v

ศักยไฟฟ้าที่ใช้ เท่ากับ 15 kV

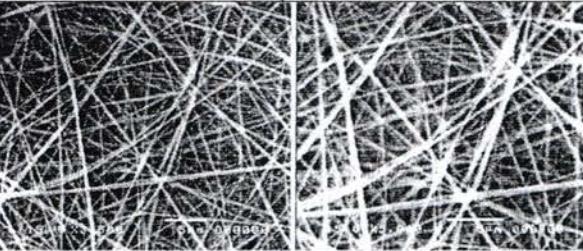
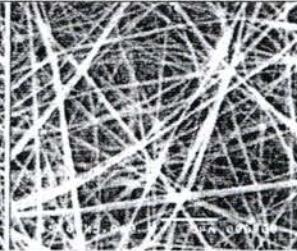
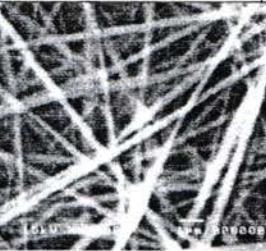
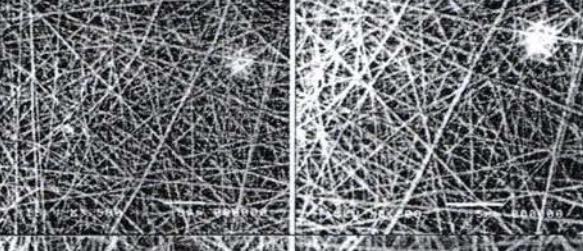
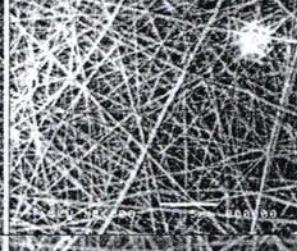
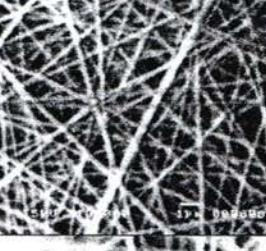
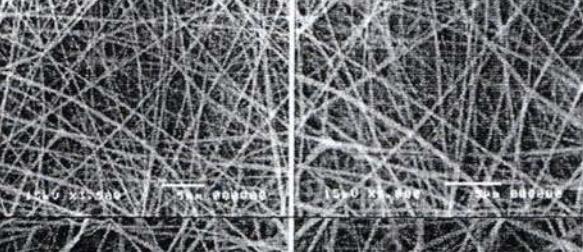
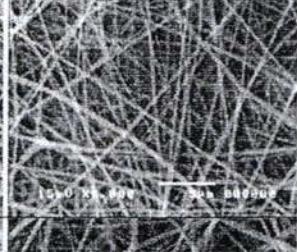
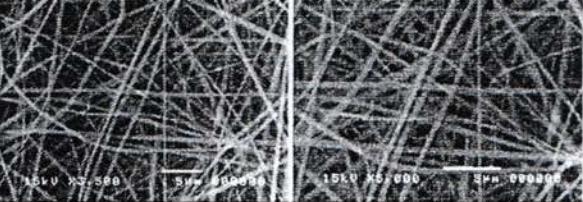
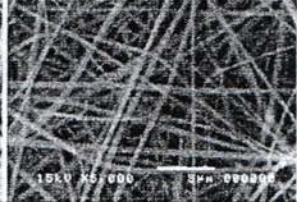
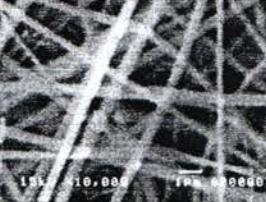
ระยะห่างระหว่างปลายเข็มถึงแผ่นรองรับ เท่ากับ 15 cm

4.5 การขึ้นรูปเส้นใยพสมระหว่างไหม (SF) กับ PVP ด้วยเทคนิคอิเล็กตรอสปินนิ่ง

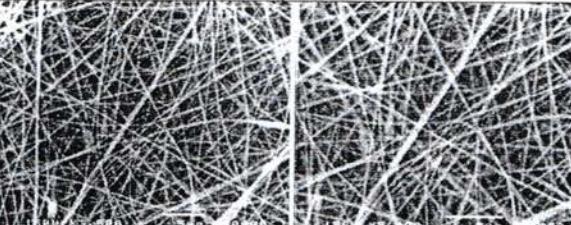
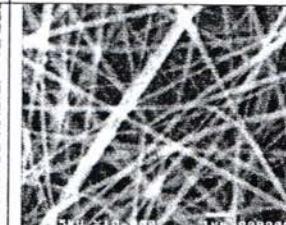
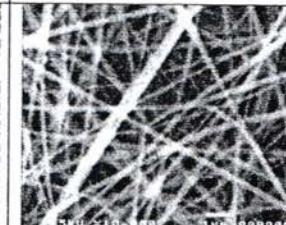
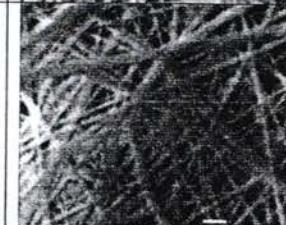
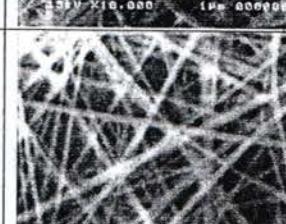
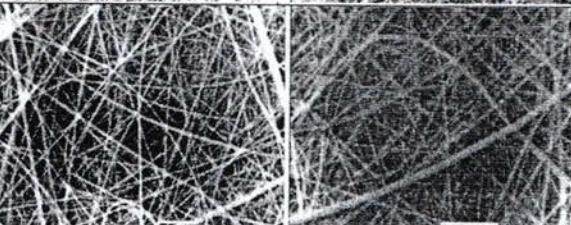
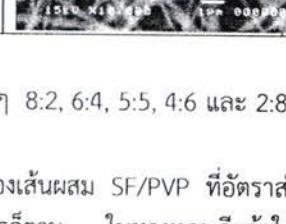
ในหัวข้อนี้ต้องการศึกษาการเตรียมเส้นใยพสมระหว่างไหมไฟบรอิน (Silk fibroin, SF) กับพอลิไวนิลไฟโรเรโนน (Poly(vinyl pyrrolidone), PVP). ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่พบว่าขึ้นรูปเป็นเส้นใยได้ง่าย และเข้ากันได้กับสิ่งมีชีวิต ดังนั้นจึงได้มีความคิดที่ประดิษฐ์เส้นใยพสมระหว่างสารสองชนิดนี้โดยอาศัยสมบัติที่ขึ้นรูปเป็นเส้นใยที่ดี มีสมบัติที่ดี หลายด้านและไม่เป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิต^[94] หากจะนำไปประยุกต์ใช้ในด้านการแพทเทอร์ไบซ์จะขยายการประยุกต์ใช้งานของเส้นใยไหมให้กว้างมากยิ่งขึ้น โดยได้ใช้สภาวะการขึ้นรูปเส้นใยของไหมที่ได้จากหัวข้อที่ 4.4 มาประยุกต์ใช้ โดยจะทำการศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่าง SF กับ PVP ที่ทำให้ขึ้นรูปเส้นใยได้ดีที่สุดและศึกษาสมบัติทางสัณฐานวิทยา สมบัติทางโครงสร้างและสมบัติทางความร้อน

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้สนใจเตรียมสารละลายพอลิเมอร์ผสม SF/PVP ที่ความเข้มข้นคงที่ 15 % w/v และทำการแปรผันอัตราส่วนผสมเป็น 8/2, 6/4, 5/5, 4/6 และ 2/8 โดยนำหนัก พร้อมกับใช้สภาวะในการขึ้นรูปในแต่ สัดส่วนเป็นดังนี้ ศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ 15 kV, ระยะห่างจากปลายเข็มถึงแผ่นรองรับเป็น 15 cm และอัตราการไหลของสารละลายเท่ากับ 1 mL/h ทำการฉีดในแนวเฉียงมุม 45° นอกจากนี้ในเบื้องต้นพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของ PVP สารละลายผสมจะไหลได้ด้วยขึ้นซึ่งบ่งชี้ว่าความหนืดของสารละลายผสมลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณ PVP สังเกตได้จากการหยดของสารละลายที่ปลายเข็ม และการฉีดของกระแสงสารละลายจากปลายเข็มก็พบว่ามีความเรียบและง่ายมากขึ้น ดังนั้นตัวพอลิเมอร์ PVP เองก็สามารถใช้เป็นสารช่วยในการขึ้นรูปได้ (processing aid)

รูปที่ 4.20 แสดงภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 3500x, 5000x และ 10000x ของเส้นใยพสม SF/PVP ระดับนาโนที่ 5 อัตราส่วน; 8:2, 6:4, 5:5, 4:6 และ 2:8. ตามลำดับ จากรูปจะเห็นว่าทุกๆ อัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสม SF/PVP สามารถให้เส้นใยต่อเนื่องที่เรียบและค่อนข้างสม่ำเสมอไร้เม็ดปมในเส้นใย เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของ 15%SF และ 15%PVP บริสุทธิ์เท่ากับ 302 และ 227 nm, ตามลำดับ สำหรับเส้นใยพสมมีเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยที่ อัตราส่วน 8:2, 6:4, 5:5, 4:6 และ 2:8 เท่ากับ 291, 384, 236, 262 และ 264 nm ตามลำดับ

Condition	Magnification			Fiber diameter (nm)
	3500x	5000x	10000x	
15%SF				AV : 302 STD : 523 Max : 460 Min : 197
15%PVP				AV : 227 STD : 51 Max : 432 Min : 132
SF:PVP 8:2				AV : 291 STD : 78 Max : 529 Min : 143
SF:PVP 6:4				AV : 370 STD : 79 Max : 531 Min : 226

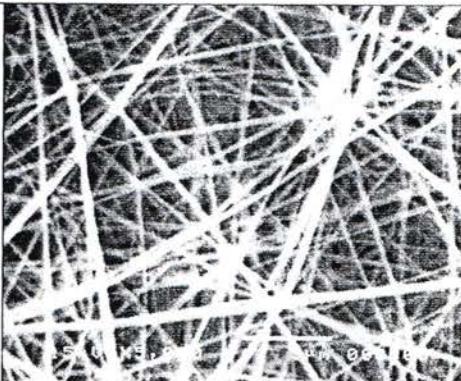
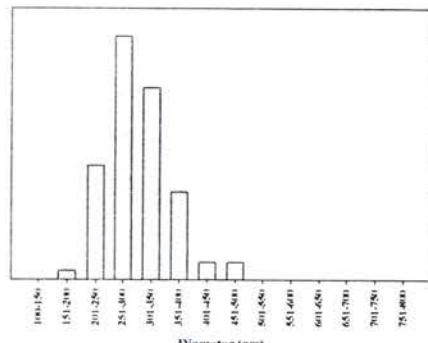
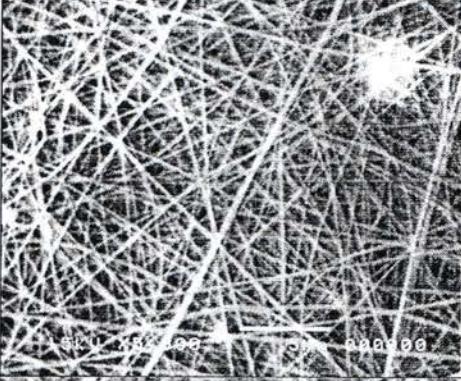
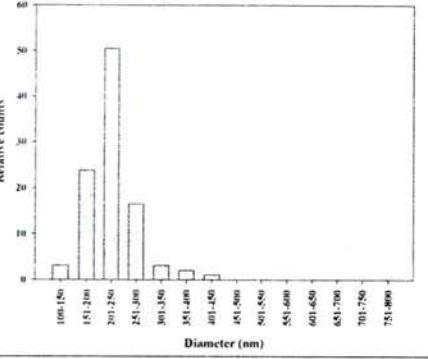
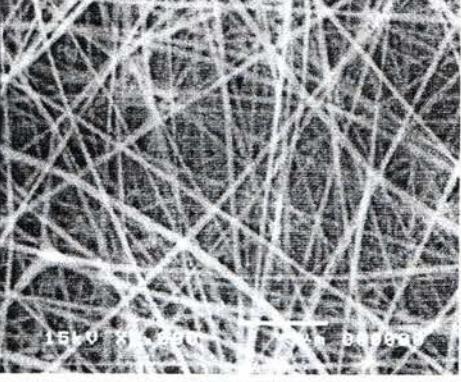
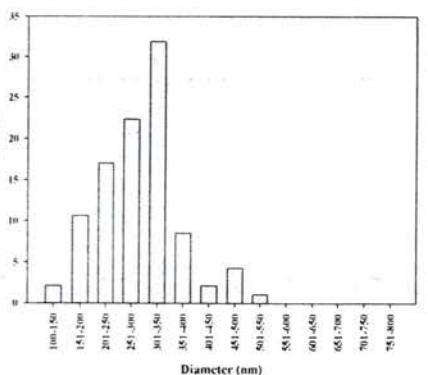
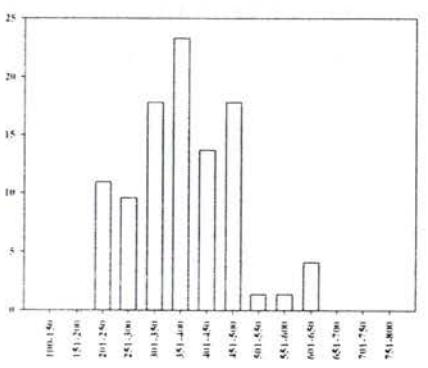
รูปที่ 4.20 ภาพถ่าย SEM ของเส้นใยผสม 15% SF/PVP ที่อัตราส่วนต่างๆ 8:2, 6:4, 5:5, 4:6 และ 2:8

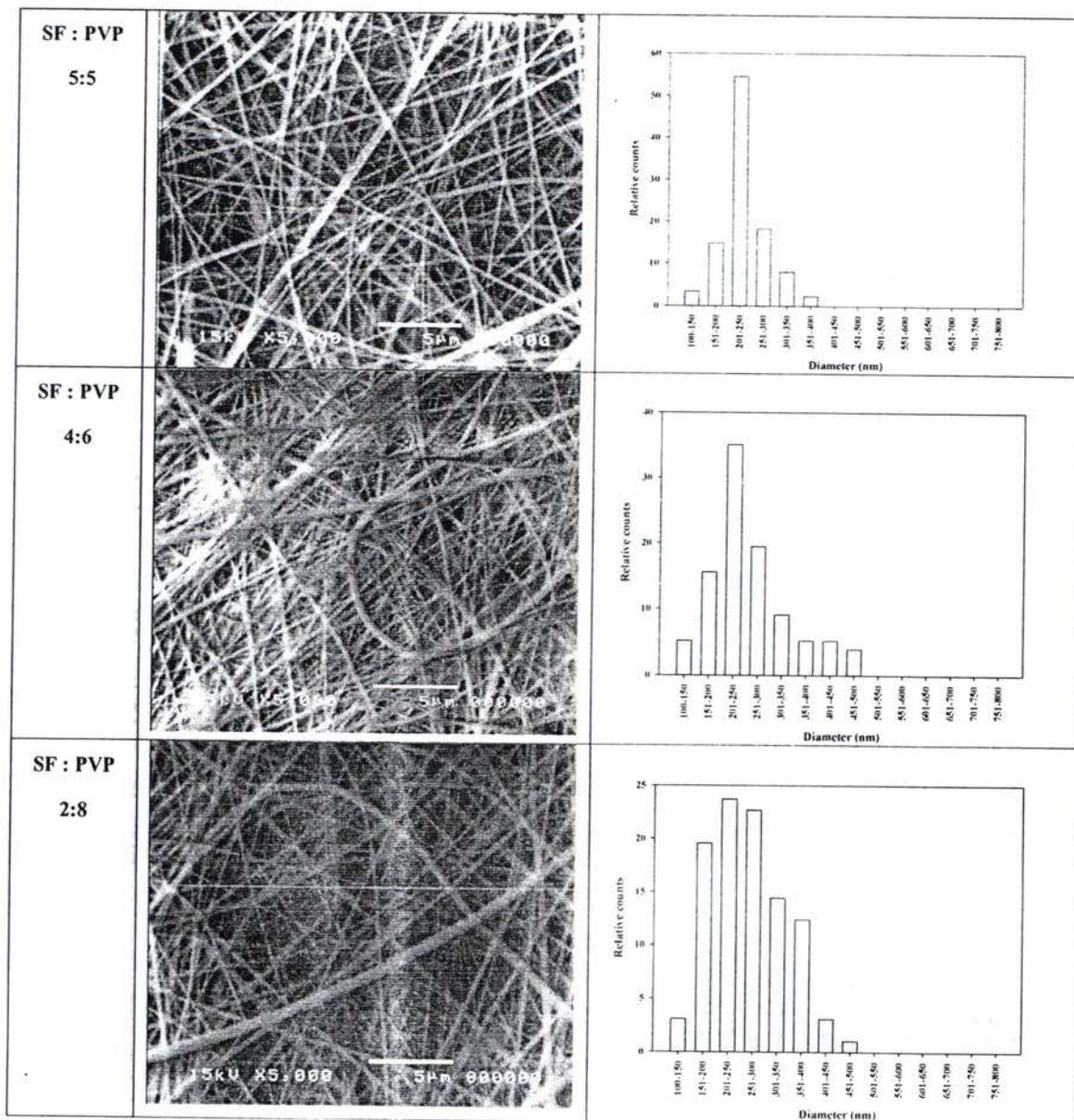
Condi tion	Magnification			Fiber diameter (nm)
	3500x	5000x	10000x	
SF:PVP 5:5				AV : 236 STD : 46 Max : 361 Min : 127
SF:PVP 4:6				AV : 262 STD : 86 Max : 551 Min : 115
SF:PVP 2:8				AV : 264 STD : 73 Max : 455 Min : 135

รูปที่ 4.20 ภาพถ่าย SEM ของเส้นใยผสม 15% SF/PVP ที่อัตราส่วนต่างๆ 8:2, 6:4, 5:5, 4:6 และ 2:8 (ต่อ)

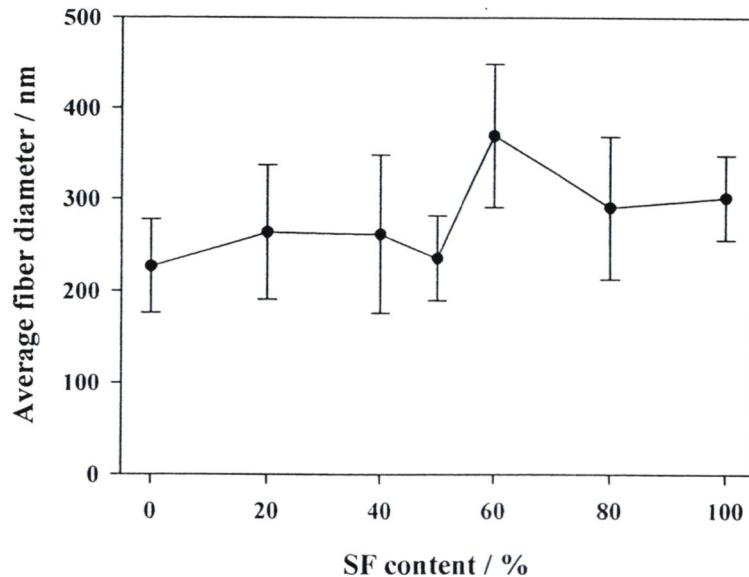
รูปที่ 4.21 แสดงการกระจายตัวของเส้นผ่าศูนย์กลางเส้นใยของเส้นผสม SF/PVP ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ จากรูปจะพบว่าเส้นกราฟการกระจายตัวไม่มีแนวโน้มที่แน่นอน อย่างไรก็ตาม ในทางทฤษฎีแล้วในการนำไปใช้ประโยชน์ด้านต่างๆ ต้องการเส้นใยที่มีความสม่ำเสมอ กันนั่นคือ ต้องการการกระจายตัวที่แคบ และก็โชคดีที่พบว่า การกระจายตัวของเส้นใยผสม SF/PVP ที่อัตราส่วน 5:5 ให้การกระจายตัวที่แคบที่สุด ขณะที่อัตราส่วนอื่นๆ พบว่า มีการกระจายที่กว้างมากกว่า

นอกจากนี้ ยังพบว่า เส้นใยผสม SF/PVP อัตราส่วน 5:5 ให้เส้นใยที่เรียบและสม่ำเสมอ กันดีมาก และให้เส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยต่ำที่สุดเพียงแค่ 236 nm เท่านั้น ซึ่งจะทำให้มีพื้นผิวด้วยริมा�ตรที่สูง ดังนั้นจากข้อมูลการกระจายตัวของเส้นผ่าศูนย์กลางเส้นใยจึงทำให้เลือกอัตราส่วนการผสมที่เหมาะสมสำหรับคุณสมบัติ SF กับ PVP คือ 5:5 โดยน้ำหนัก

condition	magnification	Fiber distribution
15%SF		
15%PVP		
SF : PVP 8:2		
SF : PVP 6:4		



รูปที่ 4.21 กราฟการกระจายตัวของเส้นผ่าনิยกลางเส้นใยพสม SF/PVP ที่อัตราส่วนต่างๆ (15% SF/PVP, ศักยไฟฟ้า 15 KV, ระยะห่างปลายเข็มถึงแผ่นรองรับ 15 cm และ อัตราการไหล 1 mL/h)



รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่าんศูนย์กลางเฉลี่ยของเส้นใยผสม SF/PVP กับปริมาณของ SF

รูปที่ 4.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่าんศูนย์กลางเฉลี่ยของเส้นใยผสม SF/PVP กับปริมาณของ SF จากรูปจะเห็นว่าเส้นผ่าんศูนย์กลางเฉลี่ยของเส้นใยผสมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณของไฟเบอร์เพิ่มขึ้น หรือกล่าวว่า ก็ นัยหนึ่งคือ เส้นผ่าんศูนย์กลางของเส้นใยเมื่อขนาดลดลงเมื่อเติม PVP มากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการเติม PVP ช่วยทำให้สายไฟเบอร์เคลื่อนที่และยืดออกตามแรงทางไฟฟ้าได้มากขึ้นจึงส่งผลให้เส้นผ่าんศูนย์กลางของเส้นใยลดลงนั่นเอง^[11]

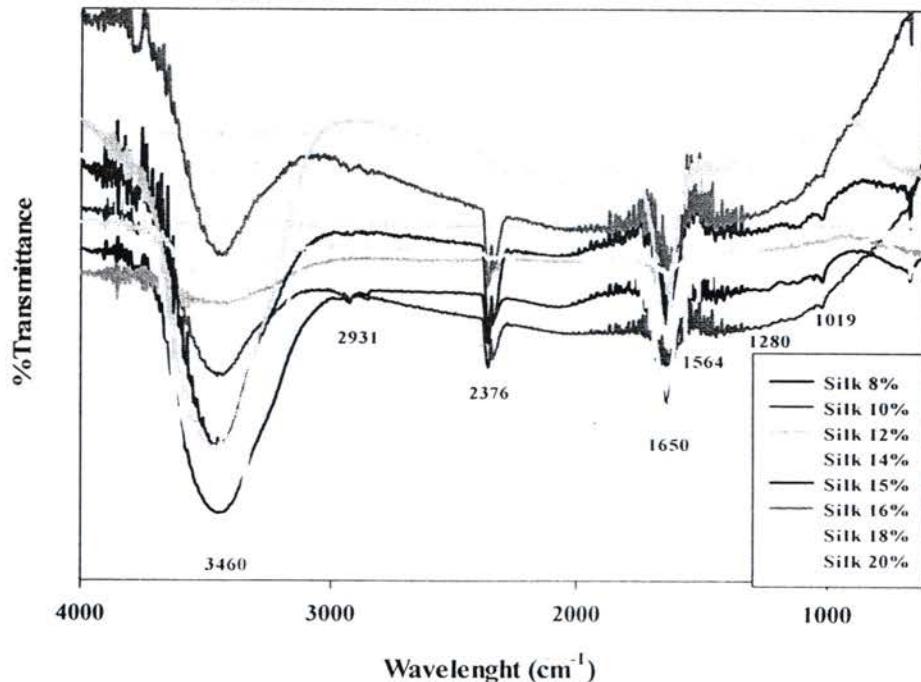
ส่วนที่ 3

การวิเคราะห์สมบัติของเส้นใยนาโนไนมและเส้นใยพอลิเมอร์ SF/PVP

4.6 การวิเคราะห์สมบัติต่างๆของเส้นใย

4.6.1 การศึกษาโครงสร้างทางเคมีของเส้นใยไนมด้วยเทคนิค FTIR

เป็นที่ทราบกันดีว่า โครงสร้างอันดับสองของ *Bombyx mori* silk fibroin (SF) นั้นประกอบด้วยการจัดเรียงตัวหลักๆอยู่ 2 แบบคือ โครงสร้างแบบสุ่มหรือ random coils (silk I) และโครงสร้างเบต้า-ชีท (β -sheet (silk II))^[95] ในงานวิจัยนี้จะไม่ได้แยกความแตกต่างระหว่าง random coils กับโครงสร้าง silk I เนื่องจากมีโครงสร้างคล้ายๆกัน โดยเทคนิค FTIR จะถูกใช้ในการติดตามการเปลี่ยนโครงสร้างของไนมระหว่างขั้นตอนการขึ้นรูปในขั้นต่างๆ ซึ่งโดยทั่วไปแล้ว random coils จะปรากฏแบบน์การคุดกลืนที่มีความเข้มสูงที่เลขคลื่น 1665 (amide I), 1540 (amide II), และ 1235 cm^{-1} (amide III) และสำหรับ β -sheets จะแสดงแบบน์การคุดกลืนที่เลขคลื่น 1628 (amide I), 1533 (amide II) และ 1265 cm^{-1} (amide III)^[96] นอกจากนี้ Hino และคณะ^[93] ยังได้รายงานช่วงของเลขคลื่นต่างๆสำหรับโครงสร้างอันดับสองของโปรตีนไว้เพิ่มเติมดังนี้ แบบน์ amide I อยู่ในช่วง $1700\text{-}1600\text{ cm}^{-1}$ แบบน์ amide II อยู่ในช่วง $1600\text{-}1500\text{ cm}^{-1}$ และ แบบน์ amide III อยู่ในช่วง $1300\text{-}1200\text{ cm}^{-1}$



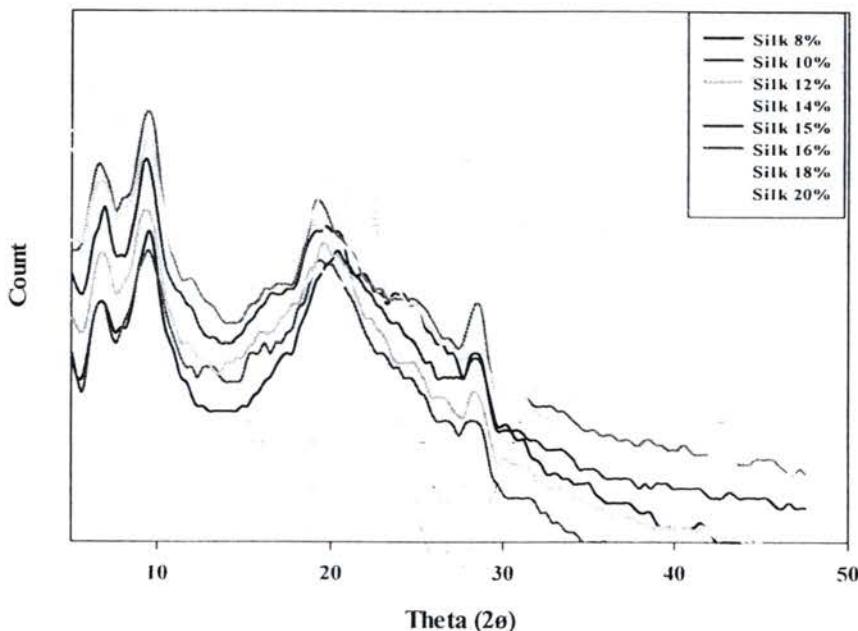
รูปที่ 4.23 FTIR spectra ของเส้นใยนาโนไนมที่ความเข้มข้นต่างๆ

รูปที่ 4.23 แสดง FTIR spectra ของเส้นใยนาโนไนมที่ได้จากการฉีดหัวหอยที่ความเข้มข้นต่างๆ จากรูปพบว่า FTIR spectra ของเส้นใยไนมที่ความเข้มข้นต่างๆ มีลักษณะคล้ายคลึงกันและไม่ได้แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งจากข้อมูลส่วนนี้ซึ่งให้เห็นว่าเส้นใยไนมที่ได้จากการใช้สารละลายความเข้มข้นที่แตกต่างกันไม่มีผลต่อโครงสร้างทางเคมี ของเส้นใยไนมที่ได้อย่างไรก็ตาม พบร่วมความแตกต่างในเรื่องความเข้มพีค (intensity) เมื่อความเข้มข้นเปลี่ยนซึ่งสิ่ง

แสดงถึงการเปลี่ยนในส่วนของโครงสร้างอันดับสองหรือความเข้มข้น และพบแบบต่อการคุณภาพลักษณะที่เลขคู่คี่ ประมาณ 3460 cm^{-1} ซึ่งเป็นการสั่นของ N-H stretching และพีกเล็กๆที่เลขคู่คี่ 1019 cm^{-1} ซึ่งเป็นการสั่นของหมู่ C-O stretching และยังพบพีกการสั่นที่เลขคู่คี่ 1650 cm^{-1} ซึ่งเป็น amide I (C=O stretching) และพบพีกของ amide II (-NH₂ stretching) ที่เลขคู่คี่ $1564, 1544, 1520$ และ 1507 cm^{-1} ขณะที่พีกของ amide III พบรูปพีกเล็กๆที่เลขคู่คี่ 1280 cm^{-1} ซึ่งบ่งบอกถึงโครงสร้างของเบต้าชีท (β -sheet structure)

4.6.2 การศึกษาโครงสร้างผลึกของเส้นไนโตรเจนด้วยเทคนิค X-ray diffractions

ในการศึกษานี้ได้ใช้เทคนิค X-ray diffractions (XRD) ในการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของไฟเบอร์อิน (SF) รูปที่ 4.24 แสดง XRD patterns ของเส้นไนโตรเจนในที่ปั่นได้จากการเพิ่มความเข้มข้นต่างๆ จากรูปจะเห็นว่าเส้นไนโตรเจนที่ได้แสดง XRD patterns ที่คล้ายคลึงกันโดยปรากฏพีกกว้างที่ $2\theta = 21^\circ$ ซึ่งบ่งบอกว่าเส้นไนโตรเจนที่ได้มีโครงสร้างเป็นอิสระฐาน หรือมีโครงสร้างส่วนใหญ่เป็น random coils นั้นเอง นอกจากนี้ยังพบพีกขนาดเล็กที่ $2\theta = 28^\circ$ ซึ่งบ่งบอกว่ามีโครงสร้างของเบต้าชีทปอนอยู่ในโครงสร้างด้วยเล็กน้อย จากข้อมูลนี้ให้เห็นว่าเส้นไนโตรเจนที่ได้ประกอบด้วยของผสมระหว่างผลึก silk I (random coil) และผลึก Silk II (b-sheet) นั้นคือไม่มีเส้นไนโตรเจนที่มีเพียงแค่ผลึกหนึ่ง^[92]



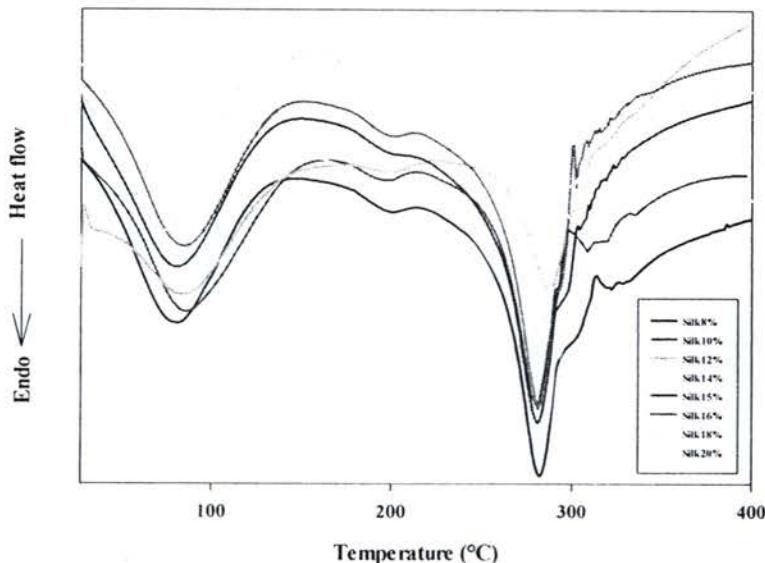
รูปที่ 4.24 XRD patterns ของเส้นไนโตรเจนที่ความเข้มข้นต่างๆ

4.6.3 การศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาสมบัติทางความร้อนของแผ่นเส้นไนโตรเจนด้วยเทคนิค DSC ซึ่งได้ผลตั้งแสดงในรูปที่ 4.25 โดยทำการวิเคราะห์จากอุณหภูมิห้องถึงอุณหภูมิ 400°C อัตราการให้ความร้อนเป็น $10^\circ\text{C}/\text{min}$ ภายใต้บรรยากาศในโดเรเจน ซึ่งจาก DSC curves ของเส้นไนโตรเจนที่ทุกความเข้มข้นจะเห็นว่ามีลักษณะคล้ายคลึงกัน โดยจะมี 3 endothermic peaks คือที่ประมาณ $77-83, 198-203$ และ $290-295^\circ\text{C}$ ซึ่งสอดคล้องกับพลังงานที่ใช้ในการถลอกตัวของความเข้มข้น และพีกของการถลอกตัวของไนโตรเจน ตามลำดับ และจากข้อมูลที่ได้จะเห็นว่าไม่มีความแตกต่าง

อย่างมีนัยสำคัญในตัวอย่างใหม่ที่ทุกความเข้มข้น แสดงให้เห็นว่าใหม่ที่ได้จากแต่ละความเข้มข้นมีสมบัติทางความร้อนไม่แตกต่างกัน

สำหรับข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 4.4



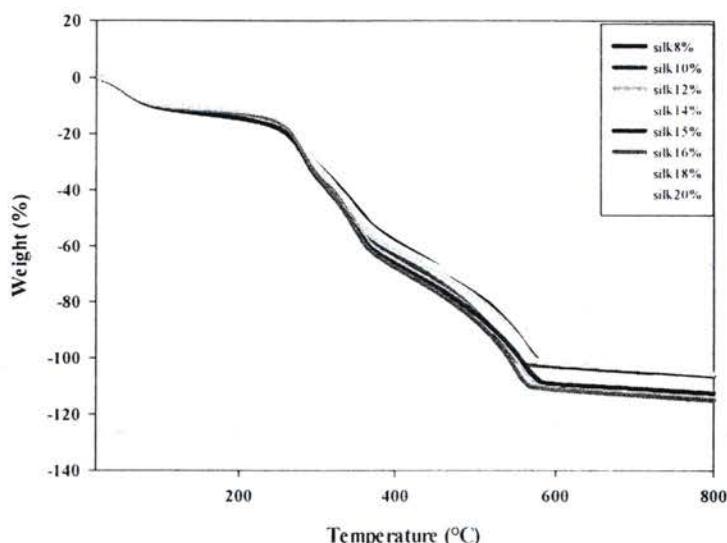
รูปที่ 4.25 DSC thermograms ของเส้นใยใหม่ที่ได้จากความเข้มข้นต่างๆ

ตารางที่ 4.4 ค่าพารามิเตอร์ทางความร้อนของเส้นใยใหม่ที่ความเข้มข้นต่างๆ

Concentration/%wt	#Peak	Integral/mJ	T _{onset} /°C	T _{peak} /°C	T _{endset} /°C
8	2	-0.20	198.74	199.45	200.47
	3	-371.45	277.89	289.21	298.81
10	1	-1197.14	26.51	85.34	142.25
	2	-32.59	176.51	194.74	209.04
	3	-563.98	261.11	280.60	296.28
12	1	-208.15	50.85	83.58	114.59
	2	0.60	215.42	216.29	217.48
	3	-315.46	265.70	287.38	302.56
14	3	-103.19	269.92	286.90	298.69
16	2	-15.80	178.60	197.87	213.41
	3	-269.97	265.31	283.05	295.24
18	1	-575.19	37.01	74.55	112.56
	2	-15.14	181.72	196.10	209.05
	3	-296.85	266.32	282.19	296.89
20	1	-160.87	47.87	103.45	135.40
	2	-24.39	170.23	194.78	211.08
	3	-497.25	281.36	284.70	296.02

4.6.4 การศึกษาสมบัติความเสถียรทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA

ในการศึกษานี้ได้ทำการศึกษาสมบัติความเสถียรต่อความร้อนของตัวอย่างเส้นใยไหมที่เตรียมได้ที่ความเข้มข้นต่างๆ โดยทำการวิเคราะห์ตั้งแต่อุณหภูมิห้องไปจนถึงอุณหภูมิ 800°C อัตราการให้ความร้อนเป็น $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ภายใต้บรรยากาศในโตรเจน รูปที่ 4.26 แสดง TG curves ของเส้นใยที่ความเข้มข้นต่างๆ ซึ่งจากรูปจะเห็นว่าจะมีการสลายตัวหลายขั้นตอนและจะสลายตัวจนหมดเมื่ออุณหภูมิประมาณ 600°C นอกจากนี้แล้วก็พบว่า TG curves ของเส้นใยในทุกๆ ความเข้มข้นที่ศึกษามีลักษณะคล้ายคลึงกันซึ่งแสดงว่าความเข้มข้นไม่มีผลต่อความเสถียรทางความร้อนของเส้นใยที่ปั้นได้ โดยในน้ำหนักที่หายไปในช่วงอุณหภูมิห้องถึง 100°C เป็นการสลายตัวของความชื้น หลังจากนั้นจะมีการสลายตัวสายโซ่เปปไทด์ที่อยู่สายโซ่โมเลกุลของไฟเบอร์อินเริมตันที่อุณหภูมิประมาณ $252-257^{\circ}\text{C}$ ซึ่งถือว่าเป็นอุณหภูมิการสลายตัวที่สูง สำหรับข้อมูลต่างๆ ของการสลายตัวทางความร้อนแสดงในตารางที่ 4.5

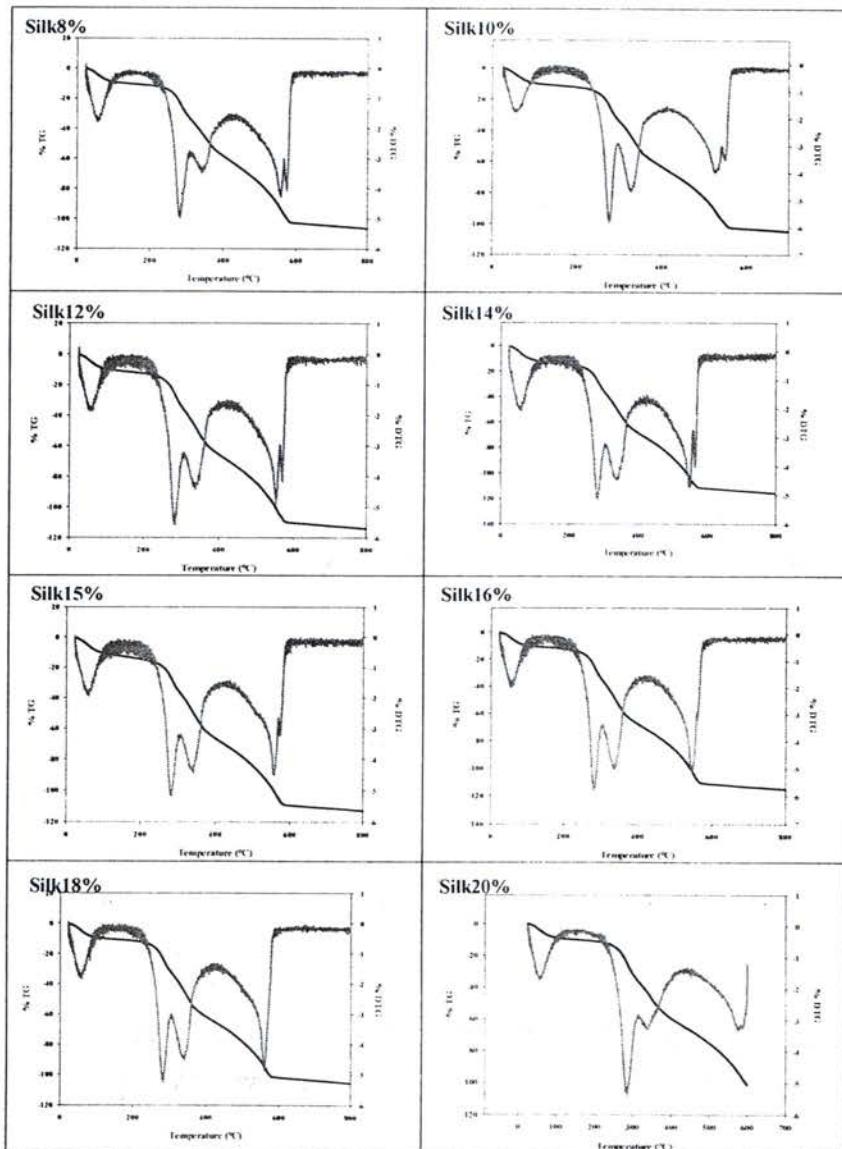


รูปที่ 4.25 TG curves ของเส้นใยไหมที่ความเข้มข้นต่างๆ

ตารางที่ 4.5 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ได้จาก TG และ DTG curves

Concentration (%wt/v)	T _{ds} /°C	T _{d10} /°C	T _{onset} /°C	T _{max1} , T _{max2} , T _{max3} , T _{max4} , T _{max5}
8	59.3	125.3	252.6	56.1, 282.9, 346.1, 558.2, 575.2
10	60.1	104.9	252.7	56.9, 278.8, 330.0, 525.9, 549.8
12	57.8	100.9	253.6	54.0, 282.4, 338.7, 553.0, 571.0
14	54.6	83.1	256.3	54.9, 282.5, 338.3, 547.9, 566.0
15	56.2	89.5	253.1	56.3, 281.3, 340.8, 558.0, 574.3
16	57.6	99.5	253.9	53.3, 280.5, 338.3, 546.9, 560.7
18	59.0	118.1	254.8	55.2, 282.5, 340.3, 559.6
20	62.8	142.5	257.2	57.0, 286.9, 340.7, 582.7

เพื่อให้เห็นถึงกลไกการสลายตัวทางความร้อนเป็นกี่ขั้นตอน เราสามารถดูข้อมูลเพิ่มเติมได้จากข้อมูล DTG ดังแสดงในรูปที่ 4.26 ซึ่งจากรูปก็จะเห็นว่ากลไกในการสลายตัวของเส้นใยไหมนาโนมีลักษณะคล้ายคลึงกัน นั่นคือ ประกอบด้วยอย่างน้อย 4 ขั้นตอน (multi-step decomposition) โดยมีอุณหภูมิที่มีอัตราการสลายตัวเร็วที่สุดในแต่ละขั้น (T_{max}) ประมาณ 55, 282, 340, และ 555 °C ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.5

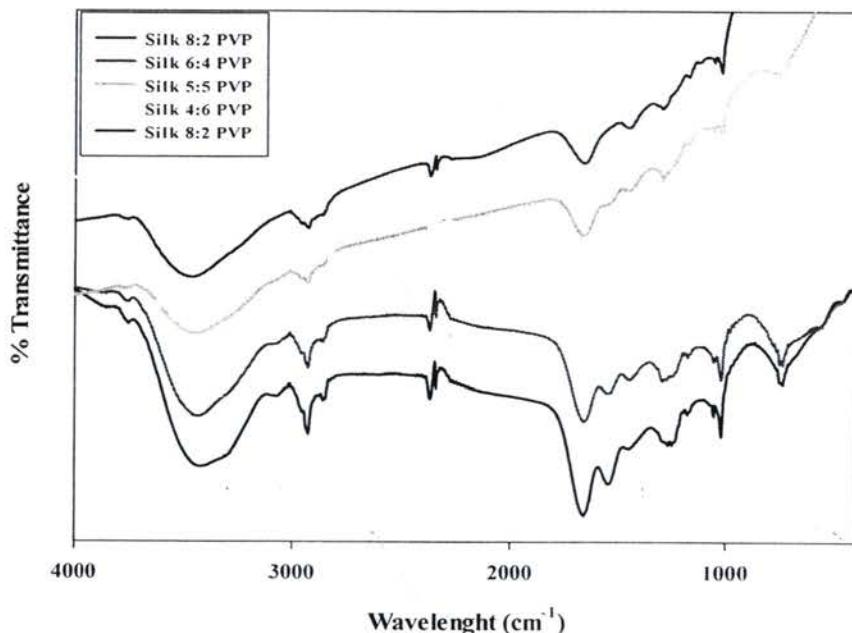


รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่าง %TG กับ DTG Curves ของเส้นใยไหมที่ความเข้มข้นต่างๆ

4.7 การวิเคราะห์สมบัติของเส้นใยผสม SF/PVP

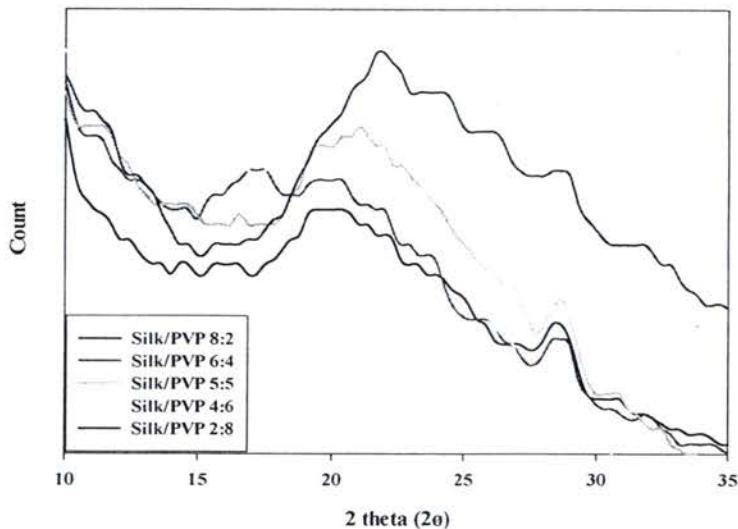
ในส่วนของเส้นใยผสมระหว่างไหมไฟบรอิน (SF) กับ polyvinyl pyrrolidone (PVP) หรือ เส้นใยผสม SF/PVP ที่ได้มีการศึกษาสมบัติทางโครงสร้างเคมี โครงสร้างผลึก สมบัติทางความร้อนและสมบัติความเสถียรต่อความร้อนด้วยเช่นกัน ดังแสดงต่อไปนี้

รูปที่ 4.27 แสดง FTIR ของเส้นใยผสม SF/PVP ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ จากรูปจะเห็นว่าแต่ละอัตราส่วนผสมจะมี FTIR spectra ที่คล้ายคลึงกันแต่จะแตกต่างกันเฉพาะส่วนที่เป็นความเข้มของพีค โดยก็จะพบพีคที่แสดงเอกลักษณ์ของไหมและของ PVP ในทุกสเปกตร้า ซึ่งในส่วนพีคเอกลักษณ์ของ silk fibroin จะพบพีคการสั่นของหมู่ฟังก์ชันที่เป็นเอกลักษณ์ของไหม 3 พีคสำคัญได้แก่ ที่เลขคลื่น $\sim 1630\text{ cm}^{-1}$, $\sim 1520\text{ cm}^{-1}$ และ $\sim 1240\text{ cm}^{-1}$ เป็นพีคที่แสดงเอกลักษณ์ของ amide I, amide II และ amide III ตามลำดับ และในส่วนพีคเอกลักษณ์ของ PVP จะพบพีคเอกลักษณ์ที่สำคัญ 3 พีค คือ ที่ $\sim 2995\text{ cm}^{-1}$ เป็นพีคการสั่นของหมู่ C-H stretching ที่ $\sim 1655\text{ cm}^{-1}$ เป็นพีคการสั่นของหมู่ C=O stretching และที่ $\sim 1290\text{ cm}^{-1}$ เป็นพีคการสั่นของหมู่ C-N stretching ซึ่งสอดคล้องกับโครงสร้างของ PVP จากข้อมูลนี้ยืนยันได้ว่าเส้นใยผสมที่บันไดเป็นสันใยผสมของ SF และ PVP



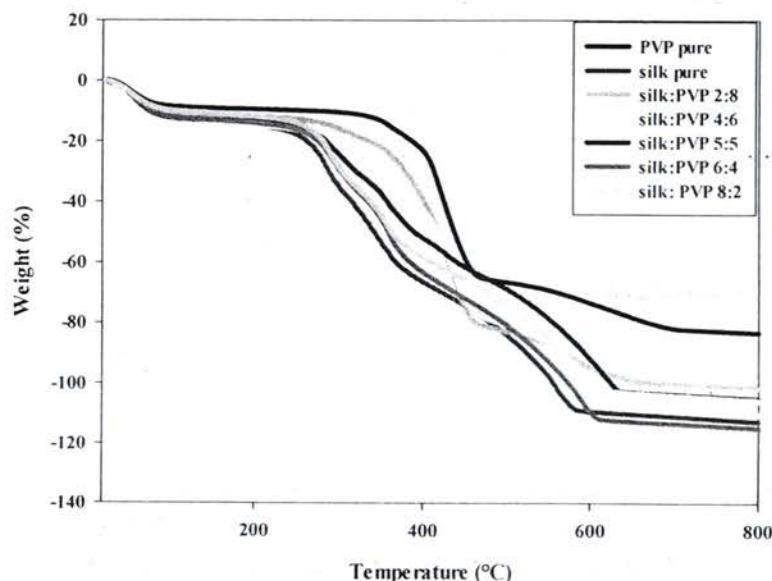
รูปที่ 4.27 FTIR ของเส้นใยผสม SF/PVP ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ (8:2, 6:4, 5:5, 4:6, 2:8 โดยน้ำหนัก)

รูปที่ 4.28 แสดง XRD patterns ของเส้นใยผสม SF/PVP ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ จากรูปจะเห็นว่า XRD patterns ของเส้นใยผสมมีพีคกว้างหนึ่งพีคที่ $2\theta = 21-23^\circ$ (random coil) และมีพีคเล็กที่ $2\theta = 27-28^\circ$ (silk I structure) ซึ่งจากลักษณะของ XRD patterns ที่ได้จะเห็นว่ามีลักษณะคล้ายคลึงกันในทุกอัตราส่วน และบ่งชี้ว่าเส้นใยผสมที่ได้มีโครงสร้างผลึกเป็นอันฐานเป็นส่วนใหญ่



รูปที่ 4.28 XRD patterns ของเส้นใยผสม SF/PVP ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ

รูปที่ 4.29 แสดง TG thermograms ของเส้นใยผสมที่อัตราส่วนต่างๆ จากรูปจะเห็นว่า TG thermograms มีลักษณะคล้ายคลึงกันและกลไกการสลายตัวเป็นแบบหลายขั้นตอน (multi-step decomposition) (ประมาณ 4 ขั้นตอน) และยังพบการเติม PVP เข้าไปในพอลิเมอร์ผสมทำให้เส้นใยผสมมีความเสถียรต่อความร้อนที่สูงขึ้นกว่าเส้นใยไหมที่ไม่เติม PVP เพราะฉะนั้นการเติม PVP นอกจากจะช่วยทำให้ขั้นรูปได้ง่ายแล้วยังช่วยเพิ่มสมบัติความเสถียรต่อความร้อนให้สูงขึ้นด้วย



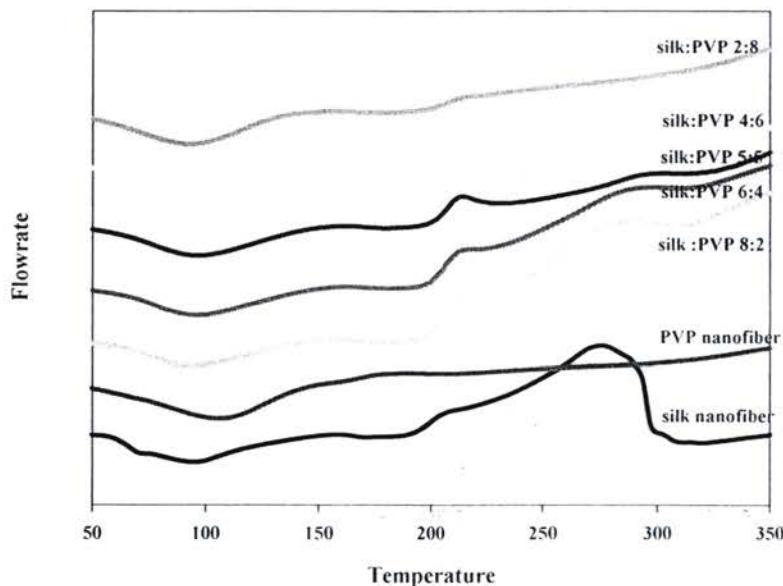
รูปที่ 4.29 TG thermograms ของเส้นใยผสมที่อัตราส่วนต่างๆ

สำหรับข้อมูลต่างๆ ที่ได้จาก TG thermograms แสดงดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ได้จาก TG thermograms ของเส้นใยผสานอัตราส่วนต่างๆ

Concentration (wt)	T _{d5} /°C	T _{d10} /°C	T _{onset} /°C	T _{max1} , T _{max2} , T _{max3} , T _{max4} , T _{max5}
2:8	56.9	92.5	330.0	54.3, 305.0, 424.1, 438.8, 582.2, 640.5
4:6	51.6	71.3	266.7	52.7, 297.2, 435.1, 605.7
5:5	54.5	75.1	258.5	56.4, 293.2, 364.2, 426.0, 615.8
6:4	55.1	77.5	268.4	56.9, 289.8, 354.6, 587.5
8:2	56.7	103.5	261.9	53.3, 287.9, 352.9, 588.2

รูปที่ 4.30 แสดง DSC thermograms ของเส้นใยผสานที่อัตราส่วนต่างๆ จากรูปพบว่า DSC curves ของทุกอัตราส่วนผสมมีลักษณะคล้ายคลึงกัน โดยในช่วงอุณหภูมิประมาณ 85-100 °C เป็นส่วนของความชื้นที่มีในตัวอย่างและเกิดการสลายตัวในช่วงอุณหภูมิ 275-300 °C ซึ่งจากข้อมูลนี้ช่วยยืนยันกับข้อมูล XRD ว่าเส้นใยผสานที่เตรียมได้มีโครงสร้างเป็นอ่อน懦นเป็นหลัก



รูปที่ 4.30 DSC thermograms ของเส้นใยผสานที่อัตราส่วนต่างๆ

บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยมีจุดประสงค์เพื่อสร้างเครื่องมืออิเล็กโทรสปินนิ่งอย่างง่ายเพื่อใช้ในการสร้างเส้นในนาโน และประยุกต์ใช้เครื่องมือที่ประกอบสร้างขึ้นนี้ทำการเตรียมและศึกษาเส้นในของไหม และเส้นใยผสมของไหมผสม SF/PVP พร้อมทั้งศึกษาสมบัติต่างๆ ของเส้นไหมที่เตรียมได้ จากผลการทดลองทั้งหมดสามารถสรุปได้ดังนี้

1. ประสบความสำเร็จในการสร้างเครื่องมืออิเล็กโทรสปินนิ่งอย่างง่ายสำหรับสร้างเส้นในนาโนได้จำนวน 1 ชุด พร้อมทั้งได้ออกแบบติดตั้งระบบการฉีดเป็น 3 ระบบคือ ระบบการฉีดในแนวอน แนวตั้ง และแนวเฉียงมุม 45 องศา (มุ่งระหว่างปลายเข็มกับแผ่นรองรับ)
2. เมื่อทำการทดสอบเครื่องมืออิเล็กโทรสปินนิ่งที่สร้างขึ้นโดยทดสอบการป่นเส้นไหมของ PEO พบร้า เครื่องมือที่สร้างขึ้นสามารถป่นเส้นໄไปได้จริง และพบว่าระบบการฉีดในแนวตั้งสามารถให้ความหนาของแผ่นเส้นໄได้มากที่สุดที่ระยะเวลาในการป่นเท่ากัน ส่วนระบบการฉีดในแนวอนพบร้าให้ความหนาของแผ่นเส้นในน้อยที่สุด แต่อย่างไรก็ตามพบว่าระบบการฉีดที่เหมาะสมที่จะนำไปประยุกต์ใช้สำหรับฉีดเส้นไหมในนาโน คือ ระบบการฉีดแนวเฉียงมุม 45 องศา เนื่องจากได้ความหนาของแผ่นค่อนข้างมาก และมีปริมาณหยดของพอลิเมอร์ที่หลุดออกมากจากปลายเข็มบนแผ่นเส้นในน้อยกว่าในกรณีการฉีดแนวตั้ง และยังให้การกระจายของเส้นໄที่สม่ำเสมออีกด้วย
3. สำหรับการศึกษาการขึ้นรูปเส้นในนาโนของไหม ในการศึกษาได้เริ่มต้นด้วยการศึกษาระบบทองตัวทำละลายที่เหมาะสมสำหรับการละลายเส้นไหมในไฟฟ์ไบรอินเพื่อเตรียมเป็นผงไหม (silk sponge) สำหรับนำไปเป็นสารละลายสำหรับฉีดในระบบอิเล็กโทรสปินนิ่ง โดยได้ทำการศึกษาระบบทองตัวทำละลาย 3 ระบบ คือ ระบบ $50\% \text{CaCl}_2$, 9.3 M LiBr และ ระบบ ternary solvent ($\text{CaCl}_2/\text{EtOH}/\text{H}_2\text{O}$ 1:2:8) และจากการศึกษาพบว่า ระบบตัวทำละลาย 9.3 M LiBr เหมาะสมสำหรับเป็นตัวทำละลายเส้นไหม เป็นผงไหม (silk sponge)
4. หลังจากได้ตัวอย่างผงไหมที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมเป็นสารละลายสำหรับฉีดในระบบอิเล็กโทรสปินนิ่งแล้ว ได้ทำการศึกษาภาวะที่เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูปเส้นໄไหมให้มีความเรียบและสม่ำเสมอ กันมากที่สุด โดยได้ทำการศึกษาตัวแปรความเข้มข้นของสารละลายไหม ศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ในการขึ้นรูปและระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดกับแผ่นรองรับ ซึ่งจากการทดลองพบว่า ภาวะที่เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูปเส้นในนาโนใหม่ให้มีความสม่ำเสมอและมีความเรียบ คือ ความเข้มข้นของสารละลายไหม เท่ากับ 15 % w/v
ศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ เท่ากับ 15 kV
ระยะห่างระหว่างปลายเข็มถึงแผ่นรองรับ เท่ากับ 15 cm

5. ในการศึกษานี้ยังได้ทำการศึกษาแนวทางการใช้งานของไหมให้กับวัสดุอิ่มขึ้น โดยเราพบว่าการขึ้นรูปตัวยเส้นไหมเดียวานั่นทำได้ค่อนข้างยาก จึงได้คิดเตรียมเป็นเส้นใยผสมระหว่างไหมไฟฟ์ไบรอิน (SF) กับ PVP ทั้งนี้เนื่องจาก PVP นั้นมีสมบัติในการฉีดเป็นเส้นໄได้ดีและยังช่วยเพิ่มความยืดหยุ่นให้กับสารโพลิเมอร์ด้วย โดยจากการทดลองพบว่าการเติม PVP ช่วยทำให้การฉีดขึ้นรูปเส้นໄไหมทำได้ง่ายมากขึ้นและยังช่วยลดขนาดของเส้นໄให้มีขนาดเล็กลงด้วยพร้อมกับทั้งได้เส้นໄที่มีความสม่ำเสมอ กันตี และอัตราส่วนที่เหมาะสมในการเตรียมเส้นใยผสมให้มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยเท่ากับ 236 nm ซึ่งเหมาะสมสำหรับนำไปประยุกต์ใช้งานต่อทางด้านการแพทย์ชีวภาพ
6. จากการวิเคราะห์สมบัติโครงสร้างเคมีของเส้นໄที่เตรียมได้ด้วยเทคนิค FTIR พบร้า FTIR spectra ของเส้นໄไหมที่ความความเข้มข้นต่างๆ มีลักษณะคล้ายคลึงกันและไม่ได้แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งจากข้อมูลส่วนนี้ชี้ให้เห็นว่าเส้นໄไหมที่ได้มีโครงสร้างทางเคมีคล้ายคลึงกันโดยพบร้า การคุณภาพที่

เลขคลื่นประมาณ 3460 cm^{-1} ซึ่งเป็นการสั่นของ N-H stretching และพีคเล็กๆที่เลขคลื่น 1019 cm^{-1} ซึ่งเป็นการสั่นของหมู่ C-O stretching และยังพบพีคการสั่นที่เลขคลื่น 1650 cm^{-1} ซึ่งเป็น amide I (C=O stretching) และพบพีคของ amide II ($-\text{NH}_2$ stretching) ที่เลขคลื่น $1564, 1544, 1520$ และ 1507 cm^{-1} ขณะที่พีคของ amide III พบรูปพีคเล็กๆที่เลขคลื่น 1280 cm^{-1} ซึ่งบ่งบอกถึงโครงสร้างของเบต้าชีท (β – sheet structure) ในส่วนของโครงสร้างทางเคมีของเส้นใยผสม SF/PVP กับเกล็กซ์นิคเฉพาะตัวของทั้งส่วนของ SF และ PVP ซึ่งยืนยันว่าสามารถสร้างเส้นใยผสมได้

7. จากการศึกษาสมบัติทางโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิค XRD เส้นใยไหมที่ได้และเส้นใยไหมผสม (SF/PVP) พบรูปเส้นใยไหมที่เตรียมได้มัลกษณะผลึกเป็นอสังฐานเป็นส่วนใหญ่และมีส่วนน้อยที่เป็นโครงสร้างผลึกของเบต้าชีทผสมอยู่ โดยปรากฏพีคกว้างที่ $2\theta = 21^\circ$ (random coil) และพีคขนาดเล็กที่ $2\theta = 28^\circ$ (silk II, β -sheet)
8. จากการศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC พบรูปเส้นใยไหมที่เตรียมได้ในแต่ละความเข้มข้นมีพฤติกรรมทางความร้อนใกล้เคียงกัน ความเข้มข้นของไหมไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อพฤติกรรมทางความร้อนของเส้นใยไหมที่เตรียมได้ ในส่วนของเส้นใยผสมก็ได้ผลคล้ายๆกัน
9. จากการศึกษาสมบัติความเสถียรต่อความร้อนด้วยเทคนิค TGA พบรูปเส้นใยไหมมีความเสถียรต่อความร้อนสูงโดยจะเริ่มเกิดการเสียสภาพของพอลิเมอร์ที่อุณหภูมิประมาณ $252-257^\circ\text{C}$ แต่ในของเส้นใยผสม SF/PVP พบรูปการเติม PVP สามารถเพิ่มความเสถียรต่อความร้อนของเส้นใยไหมได้

เอกสารอ้างอิง

1. Bognitzki M, Czado W. *Adv Mater* 2001;13(1):70–2.
2. Jin HJ, Fridrikh SV, Rutledge GC, Kaplan DL. *Biomacromolecules* 2002;3:1233–9.
3. Cai Q, Yang J, Bei J, Wang S. *Biomaterials* 2002;23:4483–92.
4. Shin YM, Hohman MM. *Polymer* 2001;42:9955–67.
5. Wnek GE, Carr ME, Simpson DG, Bowlin GL. *Nano Lett* 2003;3(2):213–6.
6. Altman GH, Diaz F, Jakuba C, Calabro T, Horan RL, Chen J, Lu H, Richmond J, Kaplan DL. *Biomaterials* 2003;24:401–16.
7. Benito B. *Trends Biotechnol* 2002;20(5):189.
8. Service RF. *Science* 2002;295(5554):419–20.
9. Lazaris A, Arcidiacono S, Huang Y, Zhou JF, Duguay F, Chretien N, Welsh EA, Soares JW, Karatzas CN. *Science* 2002;295(5554):472–6.
10. Ohgo K, Zhao C, Kobayashi M, Asakura T. *Polymer* 2003;44:841–6.
11. Brooks G. *Drug Cosmet Ind* 1989;145(4):32–6.
12. Zarkoob S, Reneker DH, Eby RK, Hudson SD, Ertley D, Adams WW. *Polym Preprints* 2003;39(2):244–5.
13. Zarkoob S. PhD Dissertation, University of Akron; 1998.
14. Zarkoob S, Reneker DH, Ertley D, Eby RK, Hudson SD. U.S. Patent 6,110,590: August 29,2000.
15. Cappello J, McGrath KP. In: Kaplan D, Wade Adams W, Farmer B, Viney C, editors. *Silk polymers, materials science and biotechnology*. 1994. Chapter 26.
16. Supaphol P.; <http://pioneer.chula.ac.th/~spitt/pitt.htm>, 2550
17. Maensiri S.; http://ora.kku.ac.th/res_kku/Expertise/ExpertiseView.asp?QID=4620, 2550
18. Gogolewski, S.; Pennings, A. J. *Polymer* 1985, 26, 1394-1400.
19. Leenslag, J. W.; Pennings, A. J. *Polymer* 1987, 28, 1695-1702.
20. Lock, R. L. US patent 5,252,285, 1993.
21. O'Brien, J. P.; Fahnestock, S. R.; Termonia, Y.; Gardner, K. H. *Adv. Mater.* 1998, 10, 1185-1195.
22. Liivak, O.; Blye, A.; Shah, N.; Jelinski, L. W. *Macromolecules* 1998, 31, 2947-2951.
23. Cappello, J.; McGrath, K. P. In *Silk Polymers*; Kaplan, D., Adams, W. W., Farmer, B. and Viney, C., Eds.; *Materials Science and Biotechnology*; American Chemical Society: D.C, 1994.
24. Eling, B.; Gogolewski, S.; Pennings, A. J. *Polymer* 1982, 23, 1587-1593.
25. Yamane, H.; Terao, K.; Hiki, S.; Kimura, Y. *Polymer* 2001, 42, 3241-3248.
26. Wu, G.; Li, H.; Wu, Y.; Cuculo, J. A. *Polymer* 2002, 43, 4915-4922.
27. Rocco, M. C.; William, R. S.; Alivisatos, P. 1999.
28. Allcock, H.; Lampe, F. In *Contemporary Polymer Chemistry*; Prentice Hall: Engelwood Cliffs, N.J, 1990.
29. Martin, C. R. *Chem. Mater.* 1996, 8, 1739-1746.
30. Feng, L.; Li, S.; Li, H.; Zhai, J.; Song, Y.; Jiang, L. *Angew Chem Int Ed* 2002, 41, 1221-1223.

31. Liu, G. J.; Ding, J. F.; Qiao, L. J.; Guo, A.; Dymov, B. P.; Gleeson, J. T. *Chem-A European J.* 1999, 5, 2740-2749.
32. Whitesides, G. M.; Grzybowski, B. *Science* 2002, 295, 2418-2421.
33. Fan, Y. Y.; Cheng, H. M.; Wei, Y. L.; Su, G.; Shen, Z. H. *Carbon* 2000, 38, 789.
34. Hongu, T.; Phillips, G. O., Eds.; In *New Fibers*; Woodhead Publishing Limited: Cambridge, England, 1997.
35. Ma, P. X.; Zhang, R. J. *Biomed. Mat. Res.* 1999, 46, 60-72.
36. Ondarcuhu, T.; Joachim, C. *Europhys. Lett.* 1998, 42, 215-220.
37. Fabbricante, A.; Ward, G.; Fabbricante, T. U.S Patent 6,114,017, 2000.
38. Torobin, L.; Findlow, R. U.S Patent 6,183,670, 2001.
- [39] Formhals A. U.S. Patent, 1,975,504; 1934.
40. Dzenis, Y. Spinning continuous fibers for nanotechnology. *Science*, 2004, 304, 1917-1919.
41. Huang, Z. M., Zhang, Y. Z., Kotaki, M., and Ramakrishna, S. *Compos. Sci. Technol.*, 2003, 63, 2223-2253.
42. Frenot, A. and Chronakis, I. S. Polymer nanofibers assembled by electrospinning. *Curr. Opin. Colloid Interface Sci.*, 2003, 8, 64-75.
43. Zhang Y., Lim C. T., Rammakrishna S., and Huang Z-M. *J Mat Sci: Mat Med* 16 (2005) 933- 946.
44. Reneker, D. H. and Chun, I. *Nanotechnology*, 1996, 7, 216-223.45.
45. Xu, C. Y., Inai, R., Kotaki, M., and Ramakrishna, S. Aligned biodegradable nanofibrous structure: a potential scaffold for blood vessel engineering. *Biomaterials*, 2004, 25, 877-886.
46. Theron, S. A., Zussman, E., and Yarin, A. L. Experimental investigation of the governing parameters in the electrospinning of polymer solutions. *Polymer*, 2004, 45, 2017-2030.
47. Reneker, D. H., Yarin, A. L., Fong, H., and Koombhongse, S. Bending instability of electrically charged liquid jets of polymer solutions in electrospinning. *J. Appl. Phys.*, 2000, 87, 4531-4547.
48. Baumgarten, P. K. *J. Colloid Interface Sci.*, 1971, 36, 71-79.
49. Deitzel, J. M., Kleinmeyer, D., Harris, D., and Beck Tan, N. C. The effect of processing variables on the morphology of electrospun nanofibers and textiles. *Polymer*, 2001, 42, 261-272.
50. Sawicka K.M., and Gouma P. Electrospun composite nanofibers for functional applications. *Journal of Nanoparticle Research* (2006) 8:769-781.
51. <http://www.Athaisilk.netfirms.com>.
52. Colour way. ปีที่ 2 (ฉบับที่ 12); มีนาคม – เมษายน 2540.
53. <http://www.Daae.go.th/Plat/mhon.htm>.
54. Colour way. Vol 32, มกราคม – กุมภาพันธ์ 2544.
55. ดร.ประดุจ สวนพุด. “พลาสม่าเทคโนโลยี เทคโนโลยีเพื่อพัฒนาผ้าไทย และสิ่งทอไทยสู่ระดับโลก” Colour way. ปีที่ 10 (ฉบับที่ 55) : หน้า 37-40 ; พฤศจิกายน- ธันวาคม 2547.
56. Yang, Y.; Shao, Z.; Chen, X.; Zhou, P. *Biomacromolecules* 2004, 5, 773-779.
57. Pauling, L.; Corey, R. B. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 1953, 39, 253-256.
58. Tanaka, T.; Magoshi, J.; Magoshi, Y.; Inoue, S.; Kobayashi, M.; Tsuda, H.; Becker, M. A.; Nakamura, S. *J. Therm. Anal. Cal* 2002, 70, 825-832.
59. Asakura, T; Seguno, R; Yao, J; Takashima, H; Kishore, R. *Biochemistry* 2002, 41, 4415-4424.
60. Lotz, B.; Keith, H. D. *J. Mol. Biol.* 1971, 61, 201-15.

61. Lotz, B.; Colonna Cesari, F. *Biochimie* 1979, 61, 205-14.
62. Canetti, M.; Seves, A.; Secundo, F.; Vecchio, G. *Biopolymers* 1989, 28, 1613-24.
63. Jin, H. J.; Kaplan, D. L. *Nature* 2003, 424, 1057-61.
64. Craig, C. L. *Annu. Rev. Entomol.* 1997, 42, 231-267.
65. Nelson, D. L.; Cox, M. M. In *The Three Dimensional Structure of Proteins*; Ryan, M., Strange, L. and Neal, V., Eds.; *Lehninger Principles of Biochemistry*; Worth Publishers: New York, 2000; Vol. 3, 159-170.
66. Marsh, R. E.; Corey, R. B.; Pauling, L. *Biochim. Biophys. Acta*. 1955, 16, 1-34.
67. Warwicker, J. O. *J. Mol. Biol.* 1960, 2, 350-362.
68. Takahashi, Y.; Gehoh, M.; Yuzuriha, K. *International Journal of Biological Macromolecules* 1999, 24, 127-138.
69. Asakura, T.; Kuzuhara, A.; Tabeta, R.; Saito, H. *Macromolecules* 1985, 18, 1841-1845.
70. Fossey, S. A.; Nemethy, G.; Gibson, K. D.; Scheraga, H. A. *Biopolymers* 1991, 31, 1529.
71. Asakura, T. *Makromol. Chem.*, *Rapid Commun.* 1986, 7, 755.
72. Valluzzi, R.; Gido, S. P.; Muller, W.; Kaplan, D. L. *Int. J. Biol. Macromol.* 1999, 24, 237-42.
73. Iizuka, E. *Biorheology* 1965, 3, 1-8.
74. Freddi, G.; Pessina, G.; Tsukada, M. *Int. J. Biol. Macromol.* 1999, 24, 251-63.
75. Valluzzi, R.; He, S. J.; Gido, S. P.; Kaplan, D. *Int. J. Biol. Macromol.* 1999, 24, 227-36.
76. Um, I. C.; Kweon, H. Y.; Park, Y. H.; Hudson, S. *Int. J. Biol. Macromol.* 2001, 29, 91-7.
77. Ha, S. W.; Park, Y. H.; Hudson, S. M. *Biomacromolecules* 2003, 4, 488-96.
78. Koombhongse S., W. Liu & DH. Reneker, 2001. *J. Polym. Sci. Polym. Phys. Ed.* 39, 2598.
79. Buer A., S.C. Ugbolue & S.B. Warner, 2001. *Textile Res J.* 71,323.
80. MacDiarmid A.G., W.E. Jones & I.D. Noris, 2001. *Synth. Met.* 119, 27.
81. Rangpukan R. & D.H. Reneker, 2001. *J. Textile App. Technol. Manage.* 2001, Vol.1 Special issue: The Fiber Society Spring 2001 Conference, Raleigh, NC.
82. Gupta P. & G.L. Wilkes, 2003. *Polymer* 44, 6353.
83. Ding B., E. Kimura, T. Sato, S. Fujita & S. Shiratori, 2004. *Polymer* 45, 1895.
84. Li D., Y. Wang & Y. Xia, 2003. *Nano. Lett.* 3, 1167.
85. Dersch R., T. Liu, A.K. Schape & A. Greiner, 2003. *J. Polym. Sci. B* 41, 545.
86. Sundaray B., V. Subramanian & T.S. Natarajan, 2004. *Appl. Phys. Lett.* 84, 1222.
87. Zong X., K. Kim, D. Fang, S. Ran, B.S. Hsiao & B. Chu, 2002. *Polymer* 43, 4403.
88. Kessick R., J. Fenn & G. Tepper, 2004. *Polymer* 45, 2981.
89. Fertala A., W.B. Han & F.K. Ko, 2001. *J. Biomed. Mater. Res.* 57, 48.
90. Chen C., Chuanbau C., Xilan M., Yin T., Hesun Z. *Polymer* 2006;47:6322-9327.
91. Sukigara S. et al. *Polymer* 2003; 44:5821-5727.
92. Ayutsdea J., Gandhi M.,Sukigara S., Micklus M. Chend H., Ko F. *Polymer* 2006; 46:1625-1634.
93. Ramakrishna S. et al., An introduction to Electrospinning and nanofibers, Worls Scientific Pub. Co.Pte. Ltd. 2005.
94. Folttmann H., Quadir A. Drug delivery technology 2008; June: 8, No. 6
95. Chen X., Shao Z., Marinkovic N.S., Miller L.M., Zhou P. *Biophys Chem* 2001;89(1) :25-34.
96. Um I.C., Kweon H.Y., Lee K.G., Park Y.H. *Int Biol Macromol* 2003; 33: 203-13.

ภาคผนวก

1. การนำผลงานไปเผยแพร่

- แบบ Poster ในงานประชุมวิชาการนานาชาติ PURE AND APPLIED CHEMISTRY INTERNATIONAL CONFERENCE 2012 (PACCON 2012), เรื่อง FABRICATION OF SILK (SF) / POLYVINYL PYRROLIDONE (PVP) BLENDS NANOFIBERS BY ELECTROSPINNING TECHNIQUE
- Proceeding in PACCON 2012 เรื่อง FABRICATION OF SILK (SF) / POLYVINYL PYRROLIDONE (PVP) BLENDS NANOFIBERS BY ELECTROSPINNING TECHNIQUE, 1794-1796.
- Effects of Processing Parameters on Morphology and Properties of Electrospun Thai-Silk Nanofiber Mats (in Preparation)

2. การผลิตนักศึกษาจากโครงการวิจัยนี้

1. นักศึกษาระดับปริญญาตรี จำนวน 4 คน (ประกอบด้วยนายไชยา พรโมสิ นางสาวพรทิพย์ โพธิสาха นางสาวกรองกาญจน์ แก้วนิมิต และ นางสาวสุจิตรา วงศ์แก้ว)
2. ระดับนักศึกษาระดับปริญญาโท จำนวน 1 คน (ประกอบด้วย นางสาวคฑาลียา ครองยุทธ)