



รายงานการวิจัย

โครงการวิจัย เรื่อง การศึกษาสมบัติของผ้าไม่ถักทอจากพอลิยูรีเทนผสมผงไหมชิริซิน

Study on the properties of polyurethane nonwoven mixed with silk sericin powder

คณะผู้วิจัย

นางสาวปิยะพร คามภิรภาพันธ์

นางสาวพรเพ็ญ ศิริดำรง

โครงการวิจัยทุนสนับสนุนงานวิจัยของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

งบประมาณแผ่นดิน ปี พ.ศ. 2555

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ เงินงบประมาณแผ่นดิน ปี พ.ศ. 2555 จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยี
ราชมงคลกรุงเทพ ที่ให้การสนับสนุนเงินทุนในการทำวิจัย ทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ปิยะพร คามภิรภาพันธ์

พรเพ็ญ ศิริดำรง



บทคัดย่อ (ภาษาไทย)

การศึกษานี้เป็นการเตรียมเส้นใยพอลิยูรีเทนและพอลิยูรีเทนผสมชิริชินโดยใช้กระบวนการอิเล็กโตรสปินนิงที่อุณหภูมิห้อง การศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายพอลิยูรีเทน พบว่า ความเข้มข้นของสารละลายมีผลต่อขนาดของเส้นใยอย่างมาก การเติมชิริชินลงในสารละลายพอลิยูรีเทนทำให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นใยเล็กลง ผลของชิริชินต่อการหายของแผลในหนูถูกศึกษา ผลการทดลองพบว่าแผ่นปิดแผลพอลิยูรีเทนผสมชิริชินมีปฏิกิริยาการอักเสบน้อยกว่าและขนาดของแผลเล็กลงได้มากกว่าแผลที่ใช้แผ่นปิดแผลควบคุมในช่วงตลอดเวลาการทดสอบ



บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)

In this study, polyurethane and polyurethane mixed with sericin electrospun nanofibers were prepared via electrospinning process at room temperature. The effect of solution concentration on morphology of electrospun nanofibers was investigated. It was observed that the fiber diameter was strongly affected by the polymer concentration. By adding sericin powder into polyurethane solution, the fiber diameters were decreased. The effects of sericin on wound healing in rats were studied. The results found that polyurethane mixed with sericin electrospun mats had much smaller inflammatory reactions and wound-size reduction was much greater than in control throughout the inspection period.



สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อ (ภาษาไทย)	ข
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญภาพ	ซ
คำย่อที่ใช้ในการวิจัย	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญที่มาของปัญหาที่ทำการศึกษาค้นคว้า	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	1
1.3 ขอบเขตการวิจัย	1
1.4 ประโยชน์ที่ได้คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 การปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตหรืออิเล็กทรอนิกส์ปั่นนิ่ง	3
2.1.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับอิเล็กทรอนิกส์ปั่นนิ่ง	3
2.1.2 ทฤษฎีและกระบวนการผลิต	4
2.1.3 พารามิเตอร์	5
2.1.3.1 ตัวแปรด้านสารละลาย	5
2.1.3.2 ภาวะในการปั่นเส้นใย	9
2.1.3.3 ด้านสภาพแวดล้อม	10
2.1.4 พอลิเมอร์สำหรับอิเล็กทรอนิกส์ปั่นนิ่ง	11
2.2 พอลิยูรีเทน	12
2.3 ไหม	14
2.4 บาดแผล	15
2.4.1 ประเภทของบาดแผล	15
2.4.1.1 ตามความสะอาดของแผล	16
2.4.1.2 ตามลักษณะการนิกขาดของผิวหนัง	16
2.4.1.3 ตามระยะเวลาที่เกิดแผล	17

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4.2 การหายของแผล	17
2.4.2.1 การหายของแผลแบบปฐมภูมิ	17
2.4.2.2 การหายของแผลแบบทุติยภูมิ	17
2.4.2.3 การหายของแผลแบบตติยภูมิ	18
2.4.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการหายของแผล	19
2.4.3.1 ปัจจัยภายใน	20
2.4.3.2 ปัจจัยภายนอก	20
2.4.4 การทำแผล	20
2.4.4.1 วัตถุประสงค์ของการทำแผล	20
2.4.4.2 ชนิดของการทำแผล	21
2.4.4.3 การทำแผลในอุดมคติ	21
2.5 การเลือกวัสดุปิดแผล	21
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	23
3.1 วัสดุและสารเคมี	23
3.2 อุปกรณ์การทดลอง	23
3.3 การเตรียมการทดลอง	24
3.3.1 การเตรียมสารละลายพอลิยูรีเทน	24
3.3.2 ระบบเครื่อง	24
3.4 วิธีการทดลอง	24
3.4.1 การปั่นเส้นใยพอลิยูรีเทน	24
3.4.2 การปั่นเส้นใยพอลิยูรีเทนผสมชิริชิน	24
3.5 การทดสอบและวิเคราะห์ตัวอย่าง	25
3.5.1 สันฐานวิทยาของเส้นใยและขนาดของเส้นใย	25
3.5.2 การกระจายตัวของชิริชินในเส้นใย	26
3.5.3 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน	26
3.5.4 ประสิทธิภาพของแผ่นปิดแผลต่อการหายของแผล	26
บทที่ 4 ผลการทดลองและการอภิปรายผล	29
4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นและความหนืดของสารละลายพอลิยูรีเทน	29

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2 ผลของความเข้มข้นและอัตราการไหลของสารละลายพอลิยูรีเทนต่อ สัณฐานวิทยาของเส้นใย	31
4.3 ผลของศักย์ไฟฟ้าต่อสัณฐานวิทยาของเส้นใย	37
4.4 ผลของระยะทางจากหัวเข็มถึงวัสดุรองรับเส้นใยต่อสัณฐานวิทยาของเส้นใย	39
4.5 ผลของปริมาณชิริชินต่อสัณฐานวิทยาของเส้นใย	41
4.6 การตรวจสอบแผ่นอิเล็กโตรสปีนพอลิยูรีเทนผสมชิริชิน	51
4.6.1 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของแผ่นอิเล็กโตรสปีน	51
4.6.2 การกระจายตัวของชิริชินในเส้นใย	52
4.7 ประสิทธิภาพของแผ่นปิดแผลต่อการหายของแผล	54
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	59
บรรณานุกรม	60
ภาคผนวก	63



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า	
2.1	สรุปชนิดของพอลิเมอร์และตัวทำละลายที่ใช้สำหรับผลิตเส้นใยขนาดนาโนเมตรโดยกระบวนการอิเล็กโตรสปินนิง	11
2.2	สรุปพอลิเมอร์ที่ใช้สำหรับผลิตเส้นใยโดยกระบวนการอิเล็กโตรสปินนิงในรูปหลอดมเหลว	12
2.3	สมบัติของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนอีลาสโตเมอร์	14
3.1	ปริมาณสาร	25
4.1	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นและความหนืดของสารละลายพอลิเมอร์	29
4.2	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกึ่งกลางของเส้นใยเมื่อปรับเปลี่ยนความเข้มข้นและอัตราการไหลของสารละลายพอลิยูรีเทน	36
4.3	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกึ่งกลางของเส้นใยเมื่อใช้ศักย์ไฟฟ้าต่างกัน	38
4.4	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกึ่งกลางของแผ่นเส้นใยและเส้นใยเมื่อใช้ระยะทางจากหัวเข็มถึงวัสดุรองรับเส้นใยต่างกัน	40
4.5	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกึ่งกลางของเส้นใยเมื่อใช้ปริมาณชีรีซินต่างกัน	50
4.6	การหายของแผล	57

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	การติดตั้งเครื่องอิเล็กทรอนิกส์สปริง	5
2.2	ลักษณะของเส้นใยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่น้ำหนักโมเลกุลต่างกัน	6
2.3	ลักษณะของเส้นใยพอลิแลคติกโกลิโกลิโคลิกแอซิด (PLGA) ที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน	7
2.4	พันธะยูริเทน	13
2.5	โครงสร้างพอลิยูริเทน	13
2.6	ไหม	15
2.7	บาดแผลเปิดลักษณะต่าง ๆ	16
2.8	การหายของแผลแบบปฐมภูมิ	17
2.9	การหายของแผลแบบทุติยภูมิ	17
2.10	การหายของแผลแบบตติยภูมิ	18
2.11	กระบวนการหายของแผลในแต่ละระยะ	19
3.1	ลักษณะแผ่นกริด	26
4.1	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นและความหนืดของสารละลายพอลิยูริเทน	30
4.2	สัณฐานวิทยาของเส้นใยพอลิยูริเทนความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรเมื่อใช้อัตราการไหลต่างกัน	31
4.3	สัณฐานวิทยาของเส้นใยพอลิยูริเทนความเข้มข้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรเมื่อใช้อัตราการไหลต่างกัน	32
4.4	สัณฐานวิทยาของเส้นใยพอลิยูริเทนความเข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรเมื่อใช้อัตราการไหลต่างกัน	33
4.5	สัณฐานวิทยาของเส้นใยพอลิยูริเทนความเข้มข้นร้อยละ 4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรเมื่อใช้อัตราการไหลต่างกัน	34
4.6	สัณฐานวิทยาของเส้นใยพอลิยูริเทนความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรเมื่อใช้อัตราการไหลต่างกัน	35
4.7	สัณฐานวิทยาของเส้นใยพอลิยูริเทนความเข้มข้นร้อยละ 6 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรเมื่อใช้อัตราการไหลต่างกัน	36
4.8	สัณฐานวิทยาของเส้นใยพอลิยูริเทนเมื่อใช้ศักย์ไฟฟ้าต่าง gyo	38

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.9	ลักษณะการเคลื่อนตัวของสารละลายในกระบวนการอิเล็กโตรสปีนนิ่ง
4.10	ลักษณะการเคลื่อนตัวของสารละลายในกระบวนการอิเล็กโตรสปีนนิ่ง
4.11	ลักษณะการเคลื่อนตัวของสารละลายในกระบวนการอิเล็กโตรสปีนนิ่ง
4.12	ลักษณะการเคลื่อนตัวของสารละลายในกระบวนการอิเล็กโตรสปีนนิ่ง
4.13	ลักษณะการเคลื่อนตัวของสารละลายในกระบวนการอิเล็กโตรสปีนนิ่ง
4.14	ลักษณะการเคลื่อนตัวของสารละลายในกระบวนการอิเล็กโตรสปีนนิ่ง
4.15	ลักษณะการเคลื่อนตัวของสารละลายในกระบวนการอิเล็กโตรสปีนนิ่ง
4.16	ลักษณะการเคลื่อนตัวของสารละลายในกระบวนการอิเล็กโตรสปีนนิ่ง
4.17	ลักษณะการเคลื่อนตัวของสารละลายในกระบวนการอิเล็กโตรสปีนนิ่ง
4.18	ลักษณะการเคลื่อนตัวของสารละลายในกระบวนการอิเล็กโตรสปีนนิ่ง
4.19	FTIR สเปกตรัมของเส้นใยพอลิยูรีเทน ซิริซินและพอลิยูรีเทนผสมซิริซิน
4.20	ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านของเส้นใยพอลิยูรีเทนและพอลิยูรีเทนผสมซิริซิน
4.21	การหายของแผลที่ปิดทับด้วยแผ่นปิดแผล ณ เวลา 2 วัน
4.22	การหายของแผลที่ปิดทับด้วยแผ่นปิดแผล (ผ้าก๊อซ) ณ เวลา 7 วัน
4.23	การหายของแผลที่ปิดทับด้วยแผ่นปิดแผล ณ เวลา 7 วัน
4.24	การหายของแผลที่ปิดทับด้วยแผ่นปิดแผล (ผ้าก๊อซ) ณ เวลา 14 วัน
4.25	การหายของแผลที่ปิดทับด้วยแผ่นปิดแผล ณ เวลา 14 วัน
4.26	การหายของแผล

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
ก-1	อีสโตรแกรมของเส้นใยพอลิยูรีเทนที่ความเข้มข้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ศักย์ไฟฟ้า 15 กิโลโวลต์ ระยะห่างจากหัวเข็มถึงวัสดุรองรับเส้นใย คือ 20 เซนติเมตร 65
ก-2	อีสโตรแกรมของเส้นใยพอลิยูรีเทนที่ความเข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ศักย์ไฟฟ้า 15 กิโลโวลต์ ระยะห่างจากหัวเข็มถึงวัสดุรองรับเส้นใย คือ 20 เซนติเมตร 66
ก-3	อีสโตรแกรมของเส้นใยพอลิยูรีเทนที่ความเข้มข้นร้อยละ 4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ศักย์ไฟฟ้า 15 กิโลโวลต์ ระยะห่างจากหัวเข็มถึงวัสดุรองรับเส้นใย คือ 20 เซนติเมตร 67
ก-4	อีสโตรแกรมของเส้นใยพอลิยูรีเทนที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ศักย์ไฟฟ้า 15 กิโลโวลต์ ระยะห่างจากหัวเข็มถึงวัสดุรองรับเส้นใย คือ 20 เซนติเมตร 68
ก-5	อีสโตรแกรมของเส้นใยพอลิยูรีเทนที่ความเข้มข้นร้อยละ 6 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ศักย์ไฟฟ้า 15 กิโลโวลต์ ระยะห่างจากหัวเข็มถึงวัสดุรองรับเส้นใย คือ 20 เซนติเมตร 69
ข-1	อีสโตรแกรมของเส้นใยพอลิยูรีเทนเมื่อระยะห่างจากหัวเข็มถึงวัสดุรองรับต่างกัน 71
ค-1	อีสโตรแกรมของเส้นใยพอลิยูรีเทน 73
ค-2	อีสโตรแกรมของเส้นใยพอลิยูรีเทนผสมชิริชินปริมาณ 0.03 กรัม 74
ค-3	อีสโตรแกรมของเส้นใยพอลิยูรีเทนผสมชิริชินปริมาณ 0.07 กรัม 75
ค-4	อีสโตรแกรมของเส้นใยพอลิยูรีเทนผสมชิริชินปริมาณ 0.11 กรัม 76
ค-5	อีสโตรแกรมของเส้นใยพอลิยูรีเทนผสมชิริชินปริมาณ 0.15 กรัม 77
ค-6	อีสโตรแกรมของเส้นใยพอลิยูรีเทนผสมชิริชินปริมาณ 0.19 กรัม 78
ค-7	อีสโตรแกรมของเส้นใยพอลิยูรีเทนผสมชิริชินปริมาณ 0.23 กรัม 79
ค-8	อีสโตรแกรมของเส้นใยพอลิยูรีเทนผสมชิริชินปริมาณ 0.27 กรัม 80

คำย่อที่ใช้ในการวิจัย

PEO	พอลิเอทิลีนออกไซด์
PLGA	พอลิแลคติกโคโกลิโคติกแอซิด
DMF	ไดเมทิลฟอร์มาไมด์
THF	เตตระไฮโดรฟูแรน
PVA	พอลิไวนิลแอลกอฮอล์
PU	พอลิยูรีเทน
PVC	พอลิไวนิลคลอไรด์
PCL	พอลิคาร์โปแลคโตน
PS	พอลิสไตรีน
SBS	สไตรีนบิวตะไดอินสไตรีน
PE	พอลิเอทิลีน
PP	พอลิโพรพิลีน
PA-12	ไนลอน 12
PET	พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต
PEN	พอลิเอทิลีนแนฟทาเลต

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการศึกษาค้นคว้า

ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม ที่มีวัสดุเหลือใช้จากการเกษตรเป็นจำนวนมาก ทั้งนี้รวมถึงวัสดุเหลือใช้จากไหมด้วย กล่าวคือ หลังจากนำไหมไปใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอแล้ว ประเทศไทยยังมีเศษไหมเหลือทิ้งไม่ต่ำกว่า 2 แสนกิโลกรัมต่อปี (กลุ่มงานประชาสัมพันธ์ สำนักงานปลัดกระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. ม.ป.ป.: ออนไลน์) เส้นไหมมีส่วนประกอบที่เป็นประโยชน์ต่อร่างกายจำนวนมาก เนื่องจากมีกรดอะมิโนอยู่มากถึง 16-18 ชนิด ดังนั้น กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี โดยสถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) จึงเริ่มศึกษาวิจัย และปรับปรุงสมบัติของผงไหม โดยใช้เทคโนโลยีนิวเคลียร์ จนได้ผงไหมชิริชินที่มีคุณภาพสูงและมีสมบัติที่น่าสนใจ เช่น มีสารต้านอนุมูลอิสระช่วยรักษาแผลให้หายเร็วขึ้น สามารถกำจัดเชื้อจุลินทรีย์บางชนิดที่เป็นสาเหตุของโรคผิวหนัง ทั้งยังช่วยรักษาปริมาณน้ำในผิวหนัง กำจัดสิ่งสกปรกในเซลล์และอีคอาซูเซลล์ได้อีกด้วย นอกจากนี้ผงไหมยังมีสารช่วยป้องกันผิวแห้งและลดแอลกอฮอล์ในตับ (Zhang, 2002: 91) จากสมบัติเหล่านี้ ผู้วิจัยจึงมีความคิดที่จะนำผงไหมชิริชินไปผสมกับพอลิยูรีเทนซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่เข้ากับร่างกายและเลือดได้ดี แล้วปั่นเป็นเส้นใยขนาดนาโนเมตรด้วยกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต เพื่อศึกษาสมบัติทางกายภาพ ทางแสง และทางชีวภาพ เพื่อเป็นการเพิ่มมูลค่าสินค้าอีกทางหนึ่งด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1) เพื่อผลิตผ้าไม่ถักทอจากพอลิยูรีเทนที่ผสมผงไหมโดยกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต
- 2) เพื่อศึกษาสมบัติทางกายภาพ เชิงแสง และทางชีวภาพของผ้าไม่ถักทอ

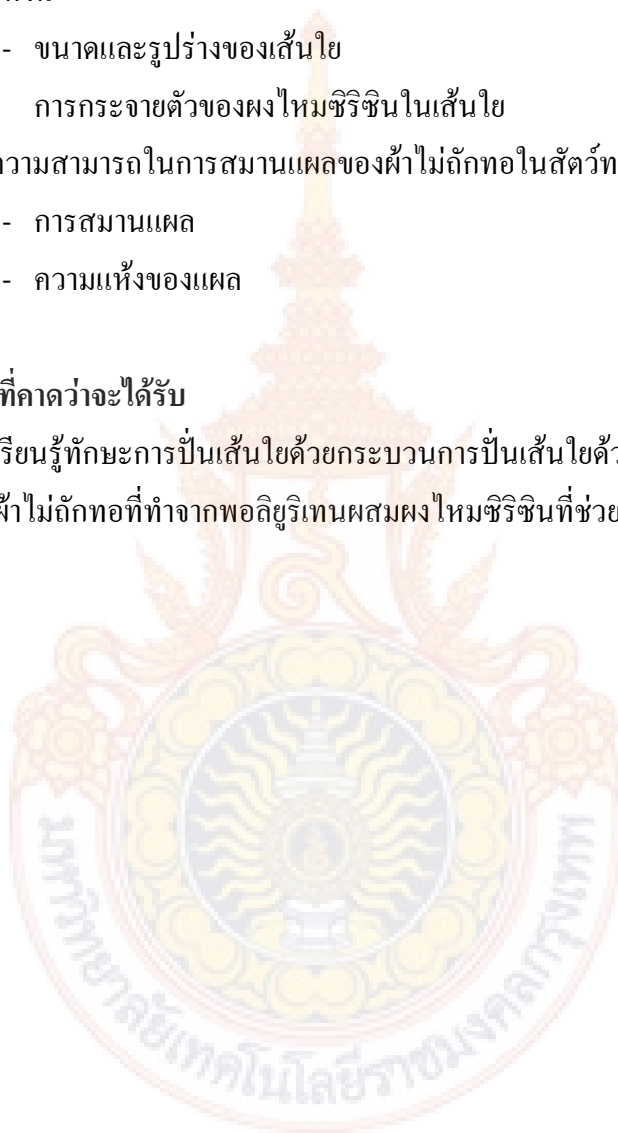
1.3 ขอบเขตการวิจัย

- 1) ศึกษาภาวะที่เหมาะสมของการผลิตผ้าไม่ถักทอจากพอลิยูรีเทน โดยกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต ดังนี้
 - ความเข้มข้นของสารละลายพอลิเมอร์

- อัตราการไหลของสารละลายพอลิเมอร์
 - ศักย์ไฟฟ้า
 - ระยะห่างระหว่างหัวเข็มและวัสดุรองรับเส้นใย
- 2) ศึกษาปริมาณผงไหมซิริชินต่อสมบัติทางกายภาพและเชิงแสงของผ้าไม่ถักทอ โดยศึกษาสมบัติ ดังนี้
- ขนาดและรูปร่างของเส้นใย
 - การกระจายตัวของผงไหมซิริชินในเส้นใย
- 3) ศึกษาความสามารถในการสमानแผลของผ้าไม่ถักทอในสัตว์ทดลอง โดยประเมินผลจาก
- การสमानแผล
 - ความแห้งของแผล

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้เรียนรู้ทักษะการปั่นเส้นใยด้วยกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต
2. ได้ผ้าไม่ถักทอที่ทำจากพอลิยูรีเทนผสมผงไหมซิริชินที่ช่วยสमानแผลได้เร็วขึ้น



บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต หรือ อิเล็กโตรสปินนิง

การปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตเป็นเทคนิคที่ง่ายในการผลิตเส้นใยขนาดนาโนเมตร เส้นใยเหล่านี้สามารถใช้งานได้หลากหลาย เช่น แผ่นกรอง ตัวเสริมแรงในวัสดุคอมโพสิต และงานทางการแพทย์ หลักการของการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต หรืออิเล็กโตรสปินนิง (Electrospinning) คล้ายกับอิเล็กโตรสเปรย์ (Electrospraying) ต่างกันเพียงความเข้มข้นของพอลิเมอร์ที่ใช้ คือ ในกรณีของอิเล็กโตรสปินนิง พอลิเมอร์จะมีความหนืดสูงพอที่จะถูกยืดดึงเป็นเส้นใยได้ แต่ในกรณีอิเล็กโตรสเปรย์ พอลิเมอร์มีความหนืดไม่พอในการยืดดึงเป็นเส้นใย ผลที่ได้คือสารละลายพอลิเมอร์กลายเป็นหยด กระบวนการเหล่านี้เป็นที่รู้จักมาประมาณ 370 ปีมาแล้วโดยนายวิลเลียม กิลเบิร์ต (William Gilbert) เขาพบว่าหยดของน้ำบนพื้นผิวที่แห้งสามารถถูกยืดดึงได้ เมื่อมีประจุทางไฟฟ้าด้านบนของหยดน้ำในระนาบที่เหมาะสม ในปี 1960 เทเลอร์ (Taylor) ศึกษาการเสีรูปร่างของหยดน้ำเมื่ออยู่ในสนามไฟฟ้า พบว่ามุมระหว่างของเหลวสองชนิดที่เหมาะสม คือ 49.3 องศา

2.1.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับอิเล็กโตรสปินนิง

ในช่วงต้นของทศวรรษที่ 1990 มีนักวิจัยหลายกลุ่มสนใจในด้านอิเล็กโตรสปินนิง โดยการสาธิตการทำเส้นใยเป็นเส้นใยจากพอลิเมอร์หลากหลาย ในปี 1934 Formhals (1934: Patent; 1939: Patent) ประดิษฐ์อุปกรณ์อิเล็กโตรสแตติก (Electrostatic) สำหรับการผลิตเส้นใยจากพอลิเมอร์ อิเล็กโตรดของขั้วลบบรรจุอยู่ในสารละลายพอลิเมอร์ ขณะที่ขั้วบวกจะติดกับฐานรองรับเส้นใย จากนั้นให้สนามไฟฟ้าไปที่สารละลายพอลิเมอร์ เพื่อให้สารละลายถูกยืดดึงเป็นเส้นใยและตกมาที่ฐานรองรับเส้นใย

ในปี 1939 Gladding (1939: Patent) ปรับปรุงอุปกรณ์การปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต เพื่อให้การผลิตเส้นใยมีความเสถียรมากขึ้น และใช้สายพานที่วิ่งต่อเนื่องเป็นอุปกรณ์สำหรับรองรับเส้นใย

โดยทั่วไปกระบวนการอิเล็กโตรสปินนิงเป็นกระบวนการที่มีกำลังการผลิตต่ำ Martin et al. (1978: Patent; 1977: Patent) ประดิษฐ์หัวเข็มสำหรับฉีดเส้นใยแบบหลายหัว ในปี 1977 ซึ่งทำให้สามารถผลิตผ้าปิดแผลที่มีหลายองค์ประกอบได้ในชั้นเดียว ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความ

เป็นรูปทรงและยืดหยุ่นเพื่อให้เกิดการแลกเปลี่ยนออกซิเจนและไอน้ำระหว่างบรรยากาศและพื้นผิวของแผล

หลังจากนั้นประมาณ 15 ปี กระบวนการอิเล็กโตรสปินนิงก็ได้รับความสนใจอีกครั้งโดย Reneker และคณะ ซึ่งในปี 1995 Doshi et al. (1995: 151) ศึกษาผลของตัวแปรด้านกระบวนการผลิตต่อลักษณะของเส้นใยพอลิเอทิลีนออกไซด์ (PEO) หลังจากนั้นมีการศึกษาการผลิตเส้นใยโดยกระบวนการอิเล็กโตรสปินนิงโดยใช้พอลิเมอร์หลากหลายชนิด

2.1.2 ทฤษฎีและกระบวนการผลิต

อิเล็กโตรสปินนิงเป็นกระบวนการที่ใช้เพื่อผลิตเส้นใยขนาดนาโนเมตรถึงขนาดไมโครเมตรโดยใช้แรงจากไฟฟ้าสถิต โดยทั่วไป คำจำกัดความของเส้นใยขนาดนาโนเมตร คือ มีขนาดตั้งแต่ 0.4 นาโนเมตร จนถึง 5 ไมโครเมตร อย่างไรก็ตาม ในกรณีที่เป็นเอกสารที่เกี่ยวข้องกับด้านวิทยาศาสตร์เส้นใยและสิ่งทอ คำจำกัดความของเส้นใยขนาดนาโนเมตรจะมีขนาดของเส้นใยในช่วง 100-500 นาโนเมตร (Frenot, 2003: 64; Subbiah, 2005: 557)

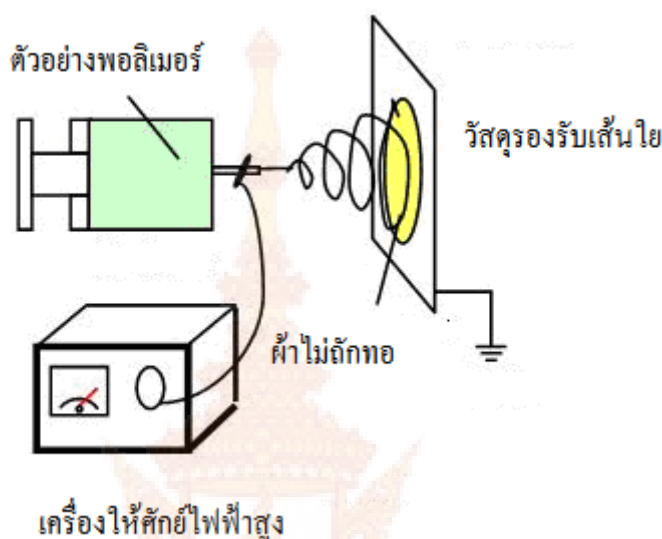
ส่วนประกอบของเครื่องอิเล็กโตรสปินนิงมี 3 ส่วนหลัก ๆ คือ เครื่องให้ศักย์สูง (High voltage power supply) อุปกรณ์ใส่พอลิเมอร์เหลว (Capillary connected to a syringe) และฐานรองรับเส้นใย (Collector) (ภาพที่ 2.1)

จากงานวิจัยที่ผ่านมา นิยมใช้เข็มฉีดยาที่ต่อกับหัวเข็ม เนื่องจากอุปกรณ์นี้ต้องถูกนำไปติดกับเครื่องควบคุมการไหลของสาร (Syringe pump) ซึ่งสามารถควบคุมอัตราการไหลของสารให้คงที่ได้ แต่ในปัจจุบัน มีนักวิจัยบางกลุ่ม (Hansen, 2005: 427) ใช้หัวแทงหน้าเค้กโลหะที่มีขนาดของรูประมาณ 1-1.5 มิลลิเมตร แล้วใช้แรงโน้มถ่วงของโลกในการดันพอลิเมอร์เหลวผ่านรูเปิดออกมาแทนการใช้เครื่องควบคุมการไหลของสาร

ฐานรองรับเส้นใย ใช้เป็นแผ่นโลหะ และเมื่อต้องการเพิ่มกำลังการผลิต จะใช้ลูกกลิ้งโลหะ หรือสายพานโลหะ เพื่อให้มีพื้นที่มากขึ้นในการรองรับเส้นใย

ศักย์ที่ใช้ในการปั่นเส้นใยอยู่ในช่วง 5-30 กิโลโวลต์ ขึ้นกับชนิดของพอลิเมอร์ ความเข้มข้นของสารละลายพอลิเมอร์ ความหนืดของพอลิเมอร์เหลว และภาวะในการปั่นเส้นใยในระหว่างกระบวนการปั่นเส้นใย เมื่อยังไม่ให้ศักย์ไฟฟ้ากำลังสูงแก่ระบบ สารละลายจำนวนหนึ่งจะรวมตัวกันเป็นหยดรูปทรงทรงกลมที่บริเวณปลายเข็มโลหะอันเป็นผลเนื่องมาจากแรงตึงผิว (Surface tension) แต่เมื่อให้ความต่างศักย์กำลังสูงแก่ระบบ จะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าครอบคลุมส่วนปลายของเข็มโลหะและมีประจุเกิดขึ้นที่ผิวของสารละลายเกิดแรงผลักทางไฟฟ้าสถิต (Electrostatic repulsion) ขึ้นในทิศตรงกันข้ามกับแรงตึงผิว ดังนั้น ถ้าสนามไฟฟ้ามีค่ามากพอที่จะทำให้เกิดแรงผลักมากกว่าแรงตึงผิว จะส่งผลให้รูปทรงทรงกลมของสารละลายที่อยู่ปลายเข็มยืดออกเป็น

รูปร่างทรงกรวยที่เรียกว่า “กรวยของเทเลอร์” (Taylor cone) และเมื่อสนามไฟฟ้าที่ให้แก่ระบบมีค่ามากขึ้นจนกระทั่งถึงค่าวิกฤตค่าหนึ่งจะเกิดแรงขับเคลื่อนให้สารละลายพุ่งออกมาเป็นลำ (Solution jet) ต่อมาลำของสารละลายนี้จะยืดออกจนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กลงถึงระดับนาโนเมตร แล้วตกลงบนวัสดุรองรับในลักษณะที่ไม่เกิดการฉีกทอ



ภาพที่ 2.1 การติดตั้งเครื่องอิเล็กทรอนิกส์พ่นน้ำ

ที่มา: Koyama Laboratory. 2007: online

2.1.3 พารามิเตอร์

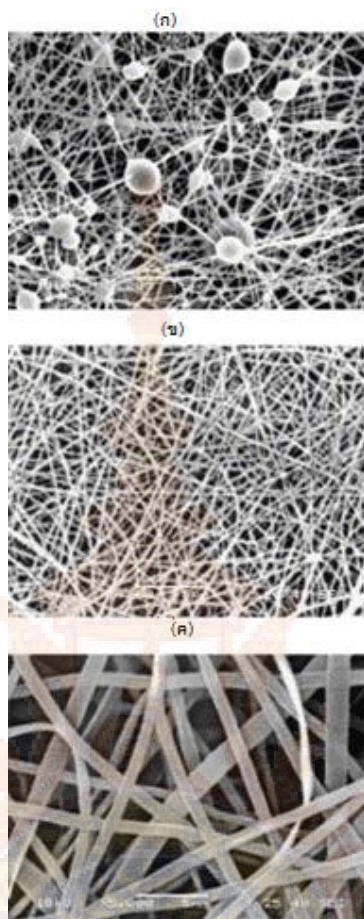
ตัวแปรของการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตสามารถแบ่งออกเป็น 3 ชนิด คือ สารละลายพอลิเมอร์ ภาวะในการปั่นเส้นใย และสภาพแวดล้อม (Frenot. 2003: 64; Subbiah. 2005: 557; Haghi. 2007: 1830) โดยตัวแปรของสารละลายพอลิเมอร์ ได้แก่ น้ำหนักโมเลกุล ความเข้มข้นของพอลิเมอร์ แรงตึงผิว สภาพการนำไฟฟ้าของสารละลายพอลิเมอร์ ส่วนตัวแปรสำหรับภาวะในการปั่นเส้นใย ได้แก่ ศักย์ไฟฟ้าที่ให้ อัตราการไหลของพอลิเมอร์ อุณหภูมิ ผลของวัสดุรองรับที่ใช้ ขนาดของหัวเข็ม และระยะห่างระหว่างปลายเข็มและวัสดุรองรับ สุดท้ายคือ ตัวแปรด้านสภาพแวดล้อม ได้แก่ ความชื้นสัมพัทธ์ ชนิดของบรรยากาศที่ใช้ และความดัน

2.1.3.1 ตัวแปรด้านสารละลาย

น้ำหนักโมเลกุลและความเข้มข้นของพอลิเมอร์

น้ำหนักโมเลกุลบ่งบอกถึงความยาวของสายโซ่พอลิเมอร์ ซึ่งสัมพันธ์กับความหนืดของสารละลายพอลิเมอร์ด้วย ณ ความเข้มข้นเดียวกัน ถ้าน้ำหนักโมเลกุลยิ่งสูง สายโซ่

พอลิเมอร์ที่ยาว ทำให้ความหนืดของสารละลายพอลิเมอร์สูงกว่าพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำกว่า ส่งผลให้พบเส้นใยที่มีขนาดใหญ่กว่า ดังภาพที่ 2.2

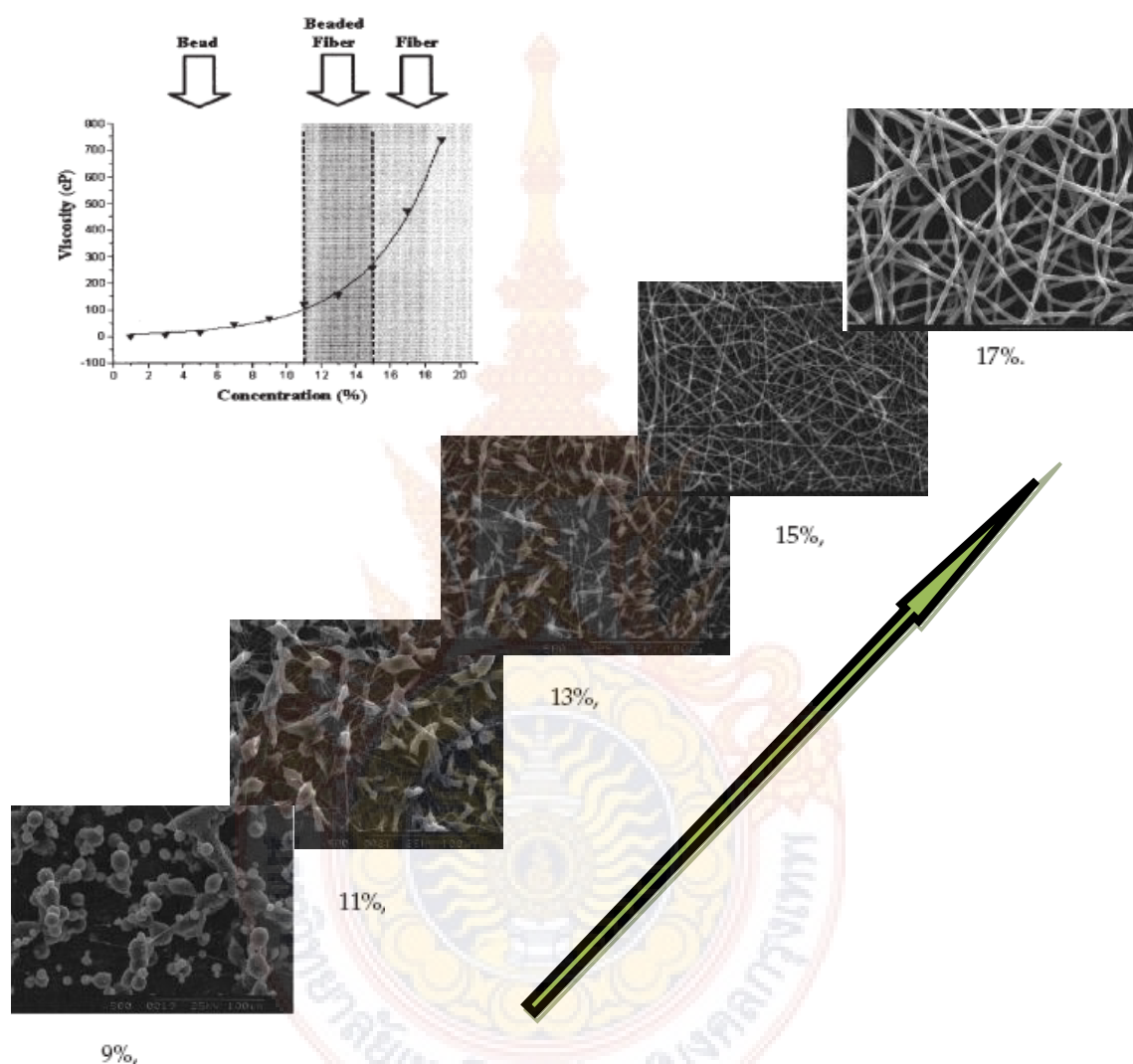


ภาพที่ 2.2 ลักษณะของเส้นใยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่น้ำหนักโมเลกุลต่างกัน เมื่อใช้ความเข้มข้นของสารละลายร้อยละ 25 โดยมวล (ก) 9,000-10,000 กรัมต่อโมล (ข) 13,000-23,000 กรัมต่อโมล (ค) 31,000-50,000 กรัมต่อโมล

ที่มา: Koski, 2004: 493

ในกรณีของความเข้มข้นของสารละลายพอลิเมอร์นั้นจะสัมพันธ์กับความหนืดของสารละลายพอลิเมอร์เช่นเดียวกัน ถ้าสารละลายพอลิเมอร์มีความเข้มข้นสูงมากพอ สารละลายจะถูกดึงยืดจากปลายเข็มกลายเป็นเส้นใยได้ เนื่องจากมีการพันกันของสายโซ่โมเลกุลสูง ในขณะที่สารละลายพอลิเมอร์ที่มีความเข้มข้นต่ำ มีการพันกันของสายโซ่น้อย เมื่อมีการยืดดึงที่ปลายเข็มสารละลายไม่สามารถที่จะถูกยืดดึงเป็นเส้นใยได้ แต่จะพบในลักษณะเป็น หยด (Doshi, 1995: 151) และเมื่อความเข้มข้นของสารละลายพอลิเมอร์สูงขึ้น ความหนืดของสารละลายพอลิ

เมื่อความเข้มข้นของเส้นใยจะใหญ่ขึ้น ดังภาพที่ 2.3 และผลอีกอย่างหนึ่งคือ เมื่อความเข้มข้นสูงขึ้น พื้นที่ของเส้นใยที่ตกบนวัสดุรองรับจะมีขนาดเล็กลง



ภาพที่ 2.3 ลักษณะของเส้นใยพอลิแลคติกโคไกลิโคลิกแอซิด (PLGA) ที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน

ที่มา: You, 2006: 1214

แรงดึงผิว

แรงดึงผิว คือ แรงที่เกิดขึ้นบริเวณที่ผิวของของไหลสัมผัสกับของไหลอื่น หรือกับผิวของแข็ง โดยมีพลังงานเพียงพอต่อการยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล สำหรับกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต สารละลายจะรวมตัวเป็นลักษณะครึ่งวงกลมที่ปลายเข็ม เมื่อยังไม่มีแรงดึงผิวสูงต่อสารละลาย ทั้งนี้เนื่องจากแรงดึงผิว แต่เมื่อให้ความต่างศักย์สูงจะเกิดสนามไฟฟ้าครอบคลุมปลายเข็มและมีประจุเกิดขึ้นที่ผิวของสารละลาย จึงเกิดแรงทางไฟฟ้าสถิตขึ้นในทิศทางตรงข้ามกับแรงดึงผิว และเมื่อสนามไฟฟ้ามีค่ามากพอที่ชนะแรงดึงผิวได้ ส่งผลให้เกิดเป็นเส้นใย ถ้าสารละลายมีแรงดึงผิวสูง อาจทำให้เส้นใยที่ได้มีหยด (Bead) เป็นองค์ประกอบด้วย ดังนั้นถ้าต้องการลดแรงดึงผิวของสารละลายลงมีวิธีการทำ คือ ใช้ตัวทำละลายที่มีแรงดึงผิวต่ำ (Akatsu, 1999: Patent) และใช้สารลดแรงดึงผิว (Salager, 2005: 3) Fong et al. (1999: 4585) พบว่า เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของเอทานอลและน้ำจะเปลี่ยนสัมประสิทธิ์แรงดึงผิวของสารละลาย PEO โดยที่ความเข้มข้นของ PEO เท่ากัน แรงดึงผิวของสารละลายลดลงจาก 75.8 mN/m เป็น 50.5 mN/m เมื่อเปลี่ยนอัตราส่วนของเอทานอลและน้ำจาก 97: 0 เป็น 57: 40

สภาพการนำไฟฟ้าของสารละลาย (Solution conductivity)

เมื่อสภาพการนำไฟฟ้าของสารละลายสูง ทำให้ประจุที่ส่งมาที่สารละลายสูงขึ้น ตัวอย่างการทำให้สภาพการนำไฟฟ้าของสารละลายสูงขึ้น เช่น การเติมไอออน (เกลือ) ลงไปในสารละลาย ทำให้ประจุเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เส้นใยยึดตัวมากขึ้น ขนาดของเส้นใยเล็กลง และไม่มีหยด Zong et al. (2002: 4403) พบว่าเมื่อเติมเกลือความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนักลงไปในสารละลายพอลิแลกติกแอซิด เส้นใยที่ได้จะมีขนาด 200-1000 นาโนเมตร และไม่มีหยด นอกจากนี้ Fong et al. (1999: 4585) ยังพบว่า เมื่อเติมโซเดียมคลอไรด์ลงไปในสารละลายสำหรับการปั่นเส้นใย เส้นใยจะมีหยดน้อยลง

ค่าไดอิเล็กทริกของตัวทำละลาย (Dielectric effect of solvent)

ค่าไดอิเล็กทริกของตัวทำละลาย คือ ตัวทำละลายที่มีค่าการนำไฟฟ้าต่ำ โดยทั่วไป สารละลายที่มีค่าไดอิเล็กทริกสูงจะลดการเกิดหยดและลดขนาดของเส้นใยได้ ดังนั้นถ้าเติมตัวทำละลายที่มีค่าไดอิเล็กทริกสูงลงไปในสารละลาย ความสามารถในการปั่นเส้นใยควรจะดีขึ้น อย่างไรก็ตามในบางครั้งความสามารถในการปั่นเส้นใยอาจไม่เพิ่มขึ้น เนื่องจากปฏิสัมพันธ์ระหว่างพอลิเมอร์และตัวทำละลายไม่ดี

2.1.3.2 ภาวะในการปั่นเส้นใย

ศักย์ไฟฟ้าที่ให้

ศักย์ไฟฟ้าที่ให้ไปมีผลต่อความเสถียรของลำพอลิเมอร์ที่พุ่งออกมาและสถานะวิทยาของเส้นใย โดยส่วนใหญ่ศักย์ไฟฟ้าที่สูง จะก่อให้เกิดการยึดดึงเส้นใยที่ดีขึ้น ทำให้เส้นใยมีขนาดเล็กลง และช่วยให้ตัวทำละลายระเหยเร็วขึ้น ทำให้เส้นใยแห้งเร็ว จากงานวิจัยของ Megelski et al. (2002: 8456) พบว่า ขนาดของเส้นใยพอลิสไตรีนขึ้นกับ ศักย์ที่ใช้ คือ เส้นใยมีขนาดลดลงจาก 20 ไมโครเมตร เป็น 10 ไมโครเมตร เมื่อเพิ่มศักย์จาก 5 กิโลโวลต์ เป็น 12 กิโลโวลต์ โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงขนาดของรูพรุนบริเวณผิวเส้นใยที่ชัดเจน

อัตราการไหล

อัตราการไหลพิจารณาจากปริมาณของสารละลายที่ผ่านจากปลายเข็มไปทั่วตัวรองรับ เมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้น ปริมาณของสารละลายที่ออกมาเพิ่มขึ้น ทำให้เส้นใยมีขนาดใหญ่ขึ้น ผลอีกอย่างหนึ่งของอัตราการไหลที่เพิ่มขึ้น คือ ปริมาณของสารละลายที่ถูกดึงผ่านหัวเข็มเพิ่มขึ้น จึงลดเวลาการระเหยของตัวทำละลาย ทำให้เส้นใยที่ได้มีลักษณะเป็นการผสมของเส้นใยและหยดพอลิเมอร์ ยิ่งไปกว่านั้นตัวทำละลายที่ระเหยไม่หมดอาจทำให้เส้นใยติดกันเป็นแพเมื่อตกลงสู่ตัวรองรับ

อุณหภูมิของสารละลาย

อุณหภูมิที่สูงขึ้นของสารละลายจะทำให้ความหนืดของสารละลายพอลิเมอร์ลดลงและเพิ่มอัตราการระเหยของสารละลาย ซึ่งทั้งความหนืดและอัตราการระเหยส่งผลกระทบต่อสถานะวิทยาของเส้นใยดังที่กล่าวไปแล้วในตอนต้น Kataphinan (2006: Dissertation) พบว่าเมื่อปั่นเส้นใยพอลิคาร์โปแลคโตน (PCL) ความเข้มข้นร้อยละ 20 ในแอซิโตน ที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส เส้นใยที่ได้จะติดกันและมีลักษณะเป็นหยดผสมในขณะที่เมื่อใช้อุณหภูมิสูงขึ้น คือ 23 องศาเซลเซียส ที่ภาวะเดียวกัน พบว่าเส้นใยแห้งตัวดีและไม่พบหยดของพอลิเมอร์

ผลของตัวรองรับ

ตัวรองรับเส้นใยต้องทำจากวัสดุที่นำไฟฟ้าได้ ถ้าใช้ตัวรองรับที่ไม่นำไฟฟ้า ประจุจากกระบวนการอิเล็กโตรสปินนิงจะสะสมอย่างรวดเร็วบนตัวรองรับ ทำให้เส้นใยที่จะตกลงตัวรองรับน้อยลง และความหนาแน่นในการอัดตัวของเส้นใยน้อยลง เนื่องจากแรงดันของประจุบนตัวรองรับ

ขนาดของหัวเข็ม

หัวเข็มเป็นทางให้สารละลายพอลิเมอร์ผ่านออก และมีความสัมพันธ์กับอัตราการไหล โดยถ้าขนาดของหัวเข็มใหญ่ อัตราการไหลจะสูง ส่งผลให้เส้นใยมีขนาดใหญ่ นอกจากนี้ ขนาดของหัวเข็มที่มีขนาดเล็กสามารถลดการอุดตันของสารละลายพอลิเมอร์ในระหว่างการปั่นเส้นใยได้ เนื่องจากการลดการสัมผัสของสารละลายกับภาวะภายนอก อย่างไรก็ตาม ช่องว่างภายในหัวเข็มต้องมีขนาดใหญ่พอที่จะให้สารละลายพอลิเมอร์ผ่านออกมาได้

ระยะทางระหว่างหัวเข็มและวัสดุรองรับ

เมื่อระยะห่างระหว่างหัวเข็มและวัสดุรองรับลดลง ลำของพอลิเมอร์ที่พุ่งออกมาจะมีระยะในการเดินทางสั้นลงก่อนที่จะตกลงบนวัสดุรองรับ นอกจากนี้ความแรงของสนามไฟฟ้าจะสูงขึ้น จึงเร่งให้ลำของพอลิเมอร์ที่พุ่งออกมาตกไปสู่วัสดุรองรับได้เร็วขึ้น ทำให้ตัวทำละลายไม่มีเวลามากพอที่จะระเหยออกไปจากเส้นใย ส่งผลให้เส้นใยติดกันเป็นแพ

2.1.3.3 ด้านสภาพแวดล้อม

ความชื้น

ในกรณีที่ความชื้นในระบบสูงจะส่งผลต่ออัตราการระเหยของตัวทำละลายในเส้นใย ถ้าความชื้นในระบบสูงมากจะเกิดปรากฏการณ์คล้ายกับการควบแน่นเป็นหยดน้ำบนผิวของเส้นใย ทำให้เกิดรูพรุนบนเส้นใยในปริมาณมากขึ้น

ชนิดของบรรยากาศ

ส่วนประกอบของอากาศมีผลต่อกระบวนการอิเล็กโตรสปินนิง แก๊สที่แตกต่างกันมีพฤติกรรมที่แตกต่างกันภายใต้สนามไฟฟ้ากำลังสูง

ความดัน

โดยทั่วไป การลดลงของความดันรอบ ๆ ลำของพอลิเมอร์ที่พุ่งออกมาไม่ได้ช่วยปรับปรุงกระบวนการอิเล็กโตรสปินนิง และเมื่อความดันต่ำกว่าความดันบรรยากาศ จะทำให้จุดเริ่มต้นของลำพอลิเมอร์ที่พุ่งออกมาไม่เสถียร

2.1.4 พอลิเมอร์สำหรับอิเล็กทรอนิกส์

ในปัจจุบันนี้ มีการใช้พอลิเมอร์ที่แตกต่างกันมากกว่า 20 ชนิด สำหรับการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต ซึ่งข้อดีข้อหนึ่งของกระบวนการนี้ คือ สามารถใช้กับพอลิเมอร์ในลักษณะที่เป็นสารละลายและสารหลอมเหลวได้ ดังตารางที่ 2.1-2.2

ตารางที่ 2.1 สรุปรูปแบบของพอลิเมอร์และตัวทำละลายที่ใช้สำหรับผลิตเส้นใยขนาดนาโนเมตร โดยกระบวนการอิเล็กทรอนิกส์ (MacDiarmid, 2001: 27)

ตัวอย่าง	พอลิเมอร์	ตัวทำละลาย
1	เซลลูโลสแอซีเตต	แอซีโตน
2	พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA)	น้ำ
3	ไนลอน 6	กรดฟอร์มิก
4	พอลิยูรีเทน (PU)	ไดเมทิลฟอร์มาไมด์ (DMF) เททระไฮโดรฟูแรน (THF)
5	พอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC)	ไดเมทิลฟอร์มาไมด์ (DMF) เททระไฮโดรฟูแรน (THF)
6	พอลิคาร์โปแลคโตน (PCL)	แอซีโตน
7	พอลิสไตรีน (PS)	เททระไฮโดรฟูแรน (THF)
8	สไตรีนบิวตะไดอินสไตรีน (SBS)	75% THF 25% DMF
9	พอลิเอทิลีนออกไซด์ (PEO)	น้ำ
10	ไหม	กรดฟอร์มิก

ตารางที่ 2.2 สรุปพอลิเมอร์ที่ใช้สำหรับผลิตเส้นใยโดยกระบวนการอิเล็กโตรสปินนิงในรูปแบบหลอดลมเหลว (MacDiarmid, 2001: 27)

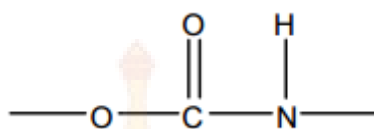
ตัวอย่าง	พอลิเมอร์	รายละเอียด	อุณหภูมิที่ใช้ (°C)
1	พอลิเอทิลีน (PE)	HDPE, MW = 1.35×10^5	200-220
2	พอลิโพรพิลีน (PP)	Isotactic-PP, MI = 0.5	220-240
3	ไนลอน 12 (PA-12)	MW = 3.5×10^4	220
4	พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET)	MW = 4.6×10^4	270
5	พอลิเอทิลีนแนฟทาเลต (PEN)	MW = 4.8×10^4	290
6	ของผสมของ PET-PEN	75/25, 25/75 (wt %)	290

2.2 พอลิยูรีเทน

ในปัจจุบันนี้ มีการใช้พอลิยูรีเทนอย่างกว้างขวางมากขึ้น เช่น หลอดเลือดเทียม ผ้าปิดแผล ลีนหัวใจเทียม และไหมเย็บแผล (Gunatillake et al. 2003: 545; Lee et al. 2001: 4; Cho et al. 2002: 861; Ozkaynak et al. 2005: 177; Jeong et al. 2007: 3991) โดยเฉพาะอย่างยิ่งงานที่เกี่ยวข้องกับการสัมผัสเลือด เนื่องจากมีความยืดหยุ่นสูง ความเข้ากันกับร่างกายและเลือดได้ดี และสามารถควบคุมการสลายตัวได้ (Gunatillake et al. 2003: 545) สำหรับการใช้พอลิยูรีเทนเป็นผ้าปิดแผลนั้นเป็นที่นิยมนอย่างมาก เนื่องจาก ต้องการการเปลี่ยนผ้าปิดแผลต่ำ (Brown and Zitelli, 1995: 1081) และมีสมบัติการให้ออกซิเจนผ่านได้ดี (Ozkaynak et al. 2005: 177; Khil et al. 2003: 275; Choi et al. 2004: 249)

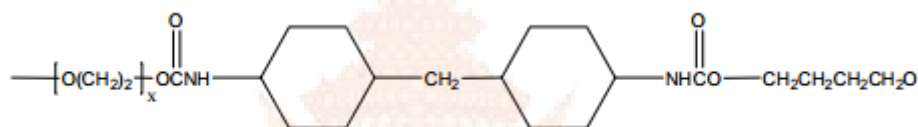
พอลิยูรีเทนเตรียมได้จากปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันแบบขั้นของไดไอโซไซยานาตและไดออล (Ozkaynak et al. 2005: 177) ซึ่งประกอบด้วยส่วนที่นุ่มและส่วนที่แข็งโดยเชื่อมกันด้วยพันธะยูรีเทน ดังภาพที่ 2.4 โดยส่วนที่แข็งแสดงความแข็งและความแข็งแรง ในขณะที่ ส่วนที่นุ่มแสดงถึงความยืดหยุ่นและสมบัติความเป็นพลาสติก ปริมาณของส่วนที่แข็งและส่วนที่นุ่มที่ต่างกัน ทำให้พอลิยูรีเทนมีลักษณะเฉพาะตัว เหมาะกับการใช้งานที่แตกต่างกัน กรณีของพอลิยูรีเทนที่มีส่วนที่นุ่มร้อยละ 60-85 สามารถเรียกเป็นเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ (Thermoplastic

elastomer) (Pinchuk. 1994: 225) ซึ่งมีข้อดี คือ สามารถรีไซเคิลได้เหมือนพลาสติก และมีความยืดหยุ่นได้เหมือนยาง (Zapletalova et al. 2006: 62) และข้อดีของการใช้เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนอีลาสโตเมอร์สำหรับการแพทย์ คือ มีการยึดตัว ณ จุดขาดสูง (Puskas and Chen. 2004: 1141)



ภาพที่ 2.4 พันธะยูรีเทน

ในงานวิจัยนี้ ใช้พอลิยูรีเทน (Tecophilic®) ซึ่งมีโครงสร้างและสมบัติดังภาพที่ 2.5 และตารางที่ 2.3



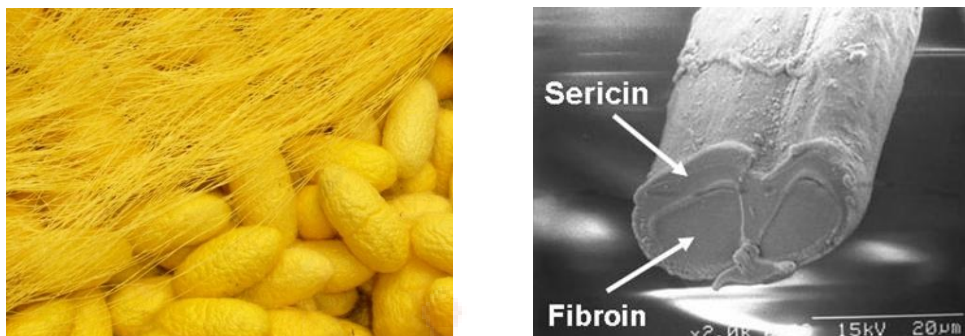
ภาพที่ 2.5 โครงสร้างพอลิยูรีเทน (Tecophilic®)

ตารางที่ 2.3 สมบัติของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนอีลาสโตเมอร์ (Lubrizol. n.d.: online)

	Tecoflex®	Tecothane®	Carbonate®	Tecophilic®	Tecoplast®
Based	Polyether	Polyether	Polycarbonate	Polyether	Polyether
Aliphatic or Aromatic	Aliphatic	Aromatic	Aliphatic	Aliphatic	Aromatic
Durometer range	72A-83D	75A-77D	73A-75A	83A-72D	82D-84D
Radiopacifiers	Barium sulfate Bismuth salts Tungsten	Barium sulfate Tungsten	Barium sulfate Tungsten	Barium sulfate Bismuth salts Tungsten	N/A
Custom colors	Yes	Yes	Yes	Limited	Yes
Solution grades	Yes	No	No	Yes	No
Extrusion and/or injection molding	Both	Both	Both	Both	Injection molding
Melt processing (°C)	150-190	200-220	190-220	145-190	215-230
Temperature range (F)	305-370	390-430	370-430	290-370	420-445
Relative degree of biostability	Good	Better	Best	Not determined	Not determined

2.3 ไหม

ไหมเป็นเส้นใยโปรตีนชนิดหนึ่ง ประกอบด้วยโปรตีน 2 ชนิด คือ ไฟโบรอินและซีรีซิน โดยซีรีซินทำหน้าที่หุ้มไผโบรอินซึ่งเป็นเส้นใยเอาไว้ ดังภาพที่ 2.6



ภาพที่ 2.6 ไหม

ที่มา: Hiroshima University. n.d.: online

นอกจากนี้ ไหมดิบยังมีสิ่งเจือปนชนิดอื่น ๆ รวมอยู่ด้วย ได้แก่ จี๊ซิ่ง ไขมันและน้ำมัน สีธรรมชาติ สารอนินทรีย์ เศษรัง ในปริมาณที่มากน้อยแตกต่างกันตามชนิด สายพันธุ์และวิธีการเลี้ยงหนอนไหม

ไหมดิบที่มีโปรตีนซีรีซินจะมีสัมผัสที่แข็งกระด้างและไม่มีความมันเงา ทำให้ไม่เหมาะต่อการนำไปใช้งาน จึงจำเป็นต้องกำจัดซีรีซินรวมทั้งสิ่งสกปรกอื่น ๆ ออก กระบวนการกำจัดโปรตีนซีรีซินออกจากไหมดิบ เรียกว่า การลอกกว (Degumming) ซึ่งอาจลอกกวออกทั้งหมดหรือลอกออกเพียงบางส่วนก็ได้ ขึ้นกับความต้องการในการใช้งาน

ผงไหมสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ ผงไหมจากกวไหม (ซีรีซิน) ซึ่งมีสีเหลือง นิยมนำไปใส่ในเครื่องสำอางและผงไหมจากเส้นใยด้านใน (ไฟโบรอิน) ซึ่งมีสีขาว นิยมใส่ในอาหารและเครื่องดื่ม เพราะ ไม่ทำให้กลิ่นและสีเปลี่ยนไป

ผงไหมของไทยมีจำนวนกรดอะมิโนถึง 18 ชนิด มีสมบัติการดูดความชื้นและเก็บน้ำได้ดี สมบัติฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดโรคผิวหนังได้ และด้านการอักเสบได้ จึงเหมาะแก่การทำเครื่องสำอาง

2.4 บาดแผล

บาดแผล หมายถึง รอยฉีกขาดของผิวหนังหรือเนื้อเยื่อ รวมทั้งส่วนที่ลึกกว่าผิวหนังถูกทำลาย ทำให้ผิวหนังแยกจากกันและทำให้เนื้อเยื่อได้รับอันตราย (บาดแผล. ม.ป.ป.: ออนไลน์)

2.4.1 ประเภทของบาดแผล

เนื่องจากแผลเกิดได้จากหลายสาเหตุและมีลักษณะแตกต่างกัน จึงจำแนกบาดแผลออกเป็นประเภทต่าง ๆ ได้หลายวิธี ได้แก่ แบ่งตามความสะอาดของแผล แบ่งตามลักษณะการฉีกขาดของผิวหนัง และแบ่งตามระยะเวลาที่เกิดแผล ซึ่งรายละเอียดของแผลแต่ละประเภทมีดังนี้

2.4.1.1 ตามความสะอาดของแผล ได้แก่

แผลสะอาด (Clean wound) หมายถึง แผลที่ไม่มีการติดเชื้อหรือแผลที่เคຍปนเปื้อนเชื้อแล้วแต่ได้รับการดูแลจนแผลสะอาดไม่ติดเชื้อ เช่น แผลผ่าตัด แผลเจาะหลัง

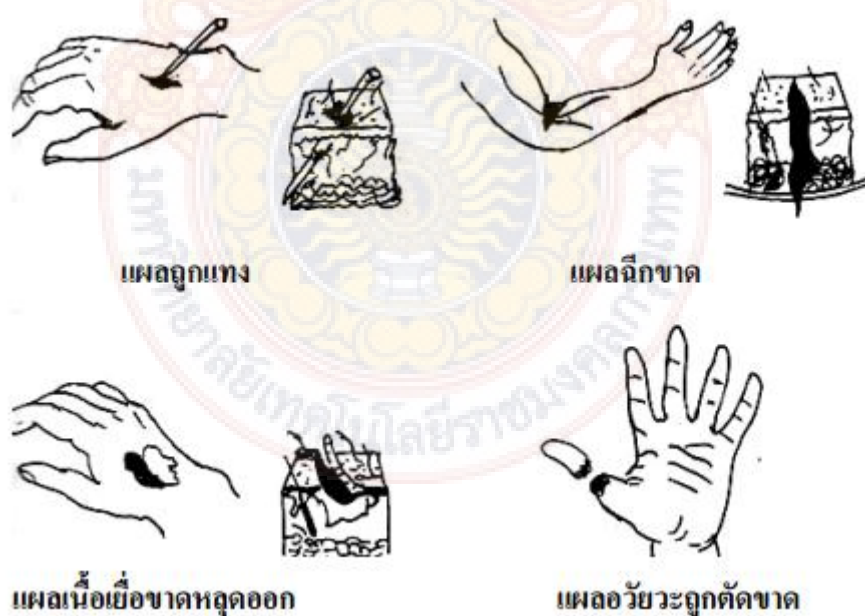
แผลปนเปื้อน (Contaminated wound) หมายถึง แผลเปิดที่เริ่มมีการอักเสบปวด บวม แดง อาจมีสิ่งขับหลั่งเป็นน้ำเลือดหรือน้ำเกลือ มีโอกาสติดเชื้อสูง เช่น แผลถลอก แผลไฟไหม้ หรือแผลผ่าตัดที่มีการอักเสบ

แผลติดเชื้อ (Infected wound) หมายถึง แผลที่มีการอักเสบลุกลามเป็นบริเวณกว้าง อาจมีสิ่งขับหลั่งเป็นหนอง ขี้เลือดขี้หนองหรือเนื้อเยื่อตาย ส่วนใหญ่เป็นแผลจากอุบัติเหตุ

2.4.1.2 ตามลักษณะการนึกขาดของผิวหนัง

แผลปิด (Closed wound) หมายถึง บาดแผลที่ผิวหนังไม่ฉีกขาดออกจากกัน แต่เนื้อเยื่อที่อยู่ใต้ผิวหนังได้รับบาดเจ็บ มักเกิดจากการกระแทกหรือถูกดิ่งรั้งอย่างแรง เช่น แผลฟกช้ำ แผลไหม้พอง

แผลเปิด (Opened wound) หมายถึง แผลที่ผิวหนังบางส่วนฉีกขาด เช่น แผลถลอก แผลฉีกขาด แผลถูกตัด แผลทะลุทะลวง (ภาพที่ 2.7)



ภาพที่ 2.7 บาดแผลเปิดลักษณะต่าง ๆ

ที่มา: วิจิตรา กุสุมภ์. 2546: 3

2.4.1.3 ตามระยะเวลาที่เกิดแผล

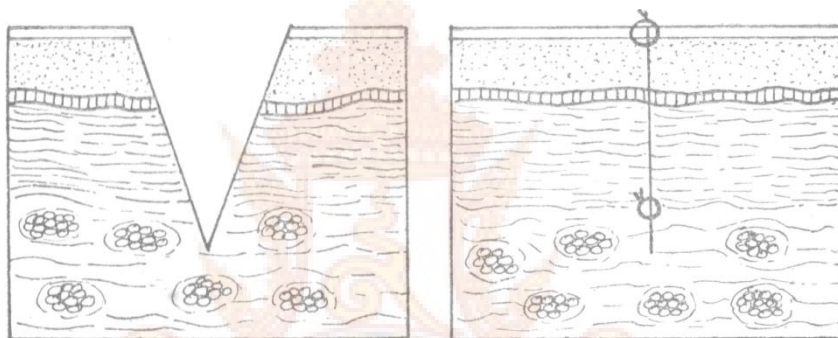
แผลสด หมายถึง แผลที่เกิดขึ้นใหม่

แผลเรื้อรัง (Chronic wound) หมายถึง แผลที่มีการติดเชื้อและทำลายเนื้อเยื่อ มีการตายของเนื้อเยื่อ แผลจะหายช้าและการดูแลรักษาอย่างยากซับซ้อน เช่น แผลกดทับ แผลเนื้อเน่า

2.4.2 การหายของแผล

การหายของบาดแผล แบ่งได้ดังนี้ (กระบวนการหายของแผล. ม.ป.ป.: ออนไลน์)

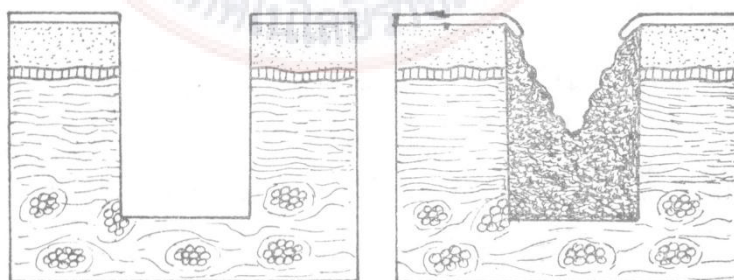
2.4.2.1 การหายของแผลแบบปฐมภูมิ (Primary intention healing) การหายของแผลที่มีการสูญเสียเนื้อเยื่อน้อยและผิวหนังอยู่ในสภาพดี ขอบแผลจะถูกดึงเข้าหากันและใช้การเย็บหรือการใช้คลิป (ภาพที่ 2.8)



ภาพที่ 2.8 การหายของแผลแบบปฐมภูมิ

ที่มา: กระบวนการหายของแผล. ม.ป.ป.: ออนไลน์

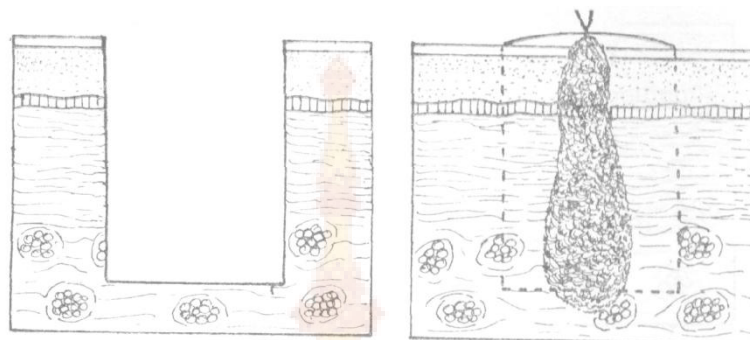
2.4.2.2 การหายของแผลแบบทุติยภูมิ (Secondary intention healing) บาดแผลชนิดนี้มีขนาดใหญ่ มีการสูญเสียเนื้อเยื่อจำนวนมาก ขอบแผลกว้างและไม่สามารถดึงขอบแผลให้มาชิดกันได้ บาดแผลชนิดนี้ควรรักษาแบบบาดแผลเปิดและปล่อยให้หายเองโดยเนื้อเยื่อเกี่ยวพันจะถูกสร้างเข้ามาเติมในส่วนที่ขาดไป เช่น แผลกดทับ (ภาพที่ 2.9)



ภาพที่ 2.9 การหายของแผลแบบทุติยภูมิ

ที่มา: กระบวนการหายของแผล. ม.ป.ป.: ออนไลน์

2.4.2.3 การหายของแผลแบบตติยภูมิ (Tertiary intention healing) คล้ายกับการหายของบาดแผลแบบทุติยภูมิ คือ ปล่อยให้ร่างกายสร้างเนื้อเยื่อเกี่ยวพันขึ้นมาทดแทนพอควร จนแผลตื้นขึ้นและไม่มีการติดเชื้อ จึงปิดบาดแผลโดยการเย็บหรือการปลูกถ่ายผิวหนัง (ภาพที่ 2.10)



ภาพที่ 2.10 การหายของแผลแบบตติยภูมิ
ที่มา: กระบวนการหายของแผล. ม.ป.ป.: ออนไลน์

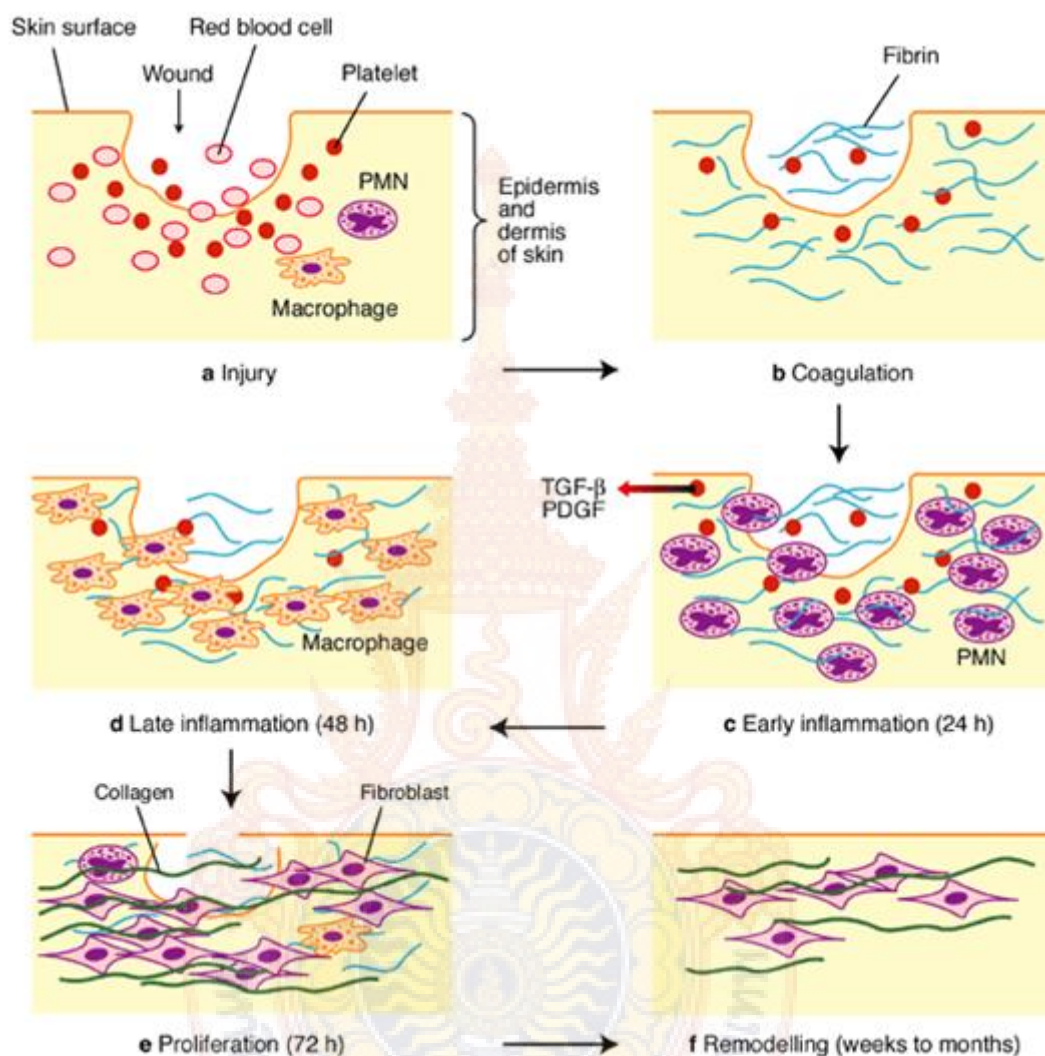
เมื่อเกิดบาดแผลขึ้น โดยธรรมชาติร่างกายจะมีกลไกในการปรับเพื่อรักษาสมดุล ทำให้เกิดการหายของแผลในช่วงระยะเวลาหนึ่ง กระบวนการหายของแผลแบ่งออกเป็น 3 ระยะ คือ ระยะที่มีการอักเสบ ระยะงอกขยายและระยะปรับตัว (ภาพที่ 2.11) ดังนี้

ระยะที่มีการอักเสบ (Inflammatory phase) เมื่อเนื้อเยื่อถูกทำลายหรือได้รับบาดเจ็บ หลอดเลือดบริเวณนั้นจะหดตัวใช้เวลาประมาณ 3-5 วินาที หลังจากนั้นหลอดเลือดจะขยายตัวจากฤทธิ์ของฮิสตามีน แบรคคิไคนินและโพรสตาแกลนดินที่หลั่งมาจากเซลล์ เลือดจึงไหลสู่บริเวณที่อักเสบเร็วขึ้นและมากขึ้นทำให้เลือดไหลกลับไม่ทันเกิดภาวะเลือดคั่ง ความดันในหลอดเลือดสูงขึ้นเกิดการซึมผ่านของของเหลวออกนอกหลอดเลือด เลือดจึงข้นขึ้น เม็ดเลือดแดงจับเป็นกลุ่ม เม็ดเลือดขาวถูกผลักไปชิดผนังหลอดเลือดแล้วจึงเคลื่อนแบบอะมีบาผ่านผนังหลอดเลือด และเคลื่อนที่ต่อไปยังศูนย์กลางของการอักเสบและทำลายสิ่งแปลกปลอม หากสิ่งแปลกปลอมถูกทำลายไป การอักเสบก็จะสิ้นสุดลง แต่หากสิ่งแปลกปลอมมีความรุนแรงเกินกว่านิวโทรฟิลจะทำลายได้ มาโครฟาส (Macrophage) จะเพิ่มจำนวนมากขึ้น

ระยะงอกขยาย (Proliferative phase) ระยะนี้เริ่มตั้งแต่วันที่ 5-20 ภายหลังการเกิดบาดแผล เป็นระยะที่มีการสร้างคอลลาเจนโดยไฟโบรบลาสต์ ร่วมกับการเกิด Wound contraction และ Epithelization

ระยะปรับตัว (Remodeling phase) เป็นระยะภายหลังวันที่ 20 และอาจมีการเปลี่ยนแปลงไปนานถึง 1.5 ปี ในช่วงนี้มีการปรับเรียงตัวของคอลลาเจนเป็นลักษณะกลุ่ม

นอกจากนี้ยังเกิดการเชื่อมขวาง (Crosslinking) ของคอลลาเจน ทำให้สภาพคอลลาเจนเปลี่ยนแปลงไป



ภาพที่ 2.11 กระบวนการหายของแผลในแต่ละระยะ

ที่มา: Wound healing: In depth. 2010: online

2.4.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการหายของแผล

การหายของแผลแม้จะเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ แต่ก็มีปัจจัยหลายประการที่ช่วยส่งเสริมการหายของแผล และลดโอกาสที่จะเกิดภาวะแทรกซ้อน ซึ่งสามารถจำแนกได้เป็นปัจจัยภายในและภายนอก ดังนี้

2.4.3.1 ปัจจัยภายใน

การκάซาบของเนื้อเยื่อ (Tissue perfusion) การที่เนื้อเยื่อได้รับเลือดไปเลี้ยงอย่างเพียงพอเป็นสิ่งสำคัญในการนำสารอาหารไปเลี้ยงเนื้อเยื่อเพื่อซ่อมแซมส่วนที่ถูกทำลาย

การได้รับออกซิเจนของเนื้อเยื่อ (Oxygenation) แผลจะหายได้ดีต้องมีออกซิเจนไปเลี้ยงอย่างเพียงพอ ซึ่งออกซิเจนจำเป็นต่อกระบวนการหายของแผล เช่น การสร้างคอลลาเจน การทำลายเชื้อแบคทีเรียและสร้างภูมิคุ้มกัน และการสร้างเยื่อพัง

อุณหภูมิของแผล เมื่ออุณหภูมิของแผลสูงขึ้น การขาดออกซิเจนจะเพิ่มมากขึ้น การหายของแผลจึงเกิดช้า

ภาวะขาดสารอาหาร ภาวะโภชนาการเป็นปัจจัยสำคัญในการส่งเสริมการหายของแผล เช่น โปรตีน ช่วยสร้างเนื้อเยื่อใหม่ วิตามินซี ช่วยในการสร้างคอลลาเจน

อายุ วัยสูงอายุจะมีการซ่อมแซมแผลได้ช้ากว่าวัยหนุ่มสาว

ภาวะของโรค ภาวะการเจ็บป่วยเป็ยปัจจัยที่ขัดขวางการหายของแผล เช่น แผลของผู้ป่วยเบาหวานจะหายช้ากว่าปกติ

ภาวะเครียดของบาดแผล (Wound stress) ภาวะเครียดของร่างกายทุกชนิด เช่น อาเจียน แน่นท้อง จะขัดขวางการสมานของเนื้อเยื่อชั้นต่าง ๆ

2.4.3.2 ปัจจัยภายนอก

ยา ยาที่ผู้ป่วยได้รับอาจมีอิทธิพลต่อการหายของแผล เช่น ยาที่รบกวนการสังเคราะห์โปรตีน วิตามินต่าง ๆ

รังสีรักษา การใช้รังสีในการรักษาอาจก่อให้เกิดพังผืดและเกิดรอยแผลเป็น ทำให้รบกวนต่อการหายของแผล

การสูบบุหรี่ จะทำให้การทำหน้าที่ของฮีโมโกลบินลดลง รบกวนต่อการปล่อยออกซิเจนเข้าเนื้อเยื่อ ส่งผลให้เนื้อเยื่อขาดออกซิเจนได้

2.4.4 การทำแผล

2.4.4.1 วัตถุประสงค์ของการทำแผล

- 1) เพื่อให้ภาวะที่เหมาะสมแก่การงอกของเนื้อเยื่อ
- 2) ดูดซึมสิ่งขับหลั่ง เช่น เลือด น้ำเหลืองหนอง
- 3) จำกัดการเคลื่อนไหวของแผลให้อยู่นิ่ง
- 4) ให้ความชุ่มชื้นกับพื้นผิวของแผลอยู่เสมอ
- 5) ป้องกันไม่ให้ผ้าปิดแผลติดและดึงรั้งเนื้อเยื่อที่งอกใหม่
- 6) ป้องกันแผลหรือเนื้อเยื่อที่เกิดใหม่จากสิ่งกระทบกระเทือน

- 7) ป้องกันแผลปนเปื้อนเชื้อโรคจากอุจจาระ ปัสสาวะ สิ่งสกปรกอื่น ๆ
- 8) เป็นการห้ามเลือด

2.4.4.2 ชนิดของการทำแผล

การทำแผลแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ การทำแผลแบบแห้งและการทำแผลแบบเปียก ดังนี้ (บาดแผล. ม.ป.ป.: ออนไลน์)

- 1) การทำแผลแบบแห้ง (Dry dressing) หมายถึง การทำแผลที่ไม่ต้องใช้ความชุ่มชื้นในการหายของแผล ใช้สำหรับทำแผลสะอาด แผลปิด แผลที่ไม่มีการ อักเสบเป็นแผลเล็ก ๆ ที่ไม่มีสิ่งขับหลั่งมาก
- 2) การทำแผลแบบเปียก (Wet dressing) หมายถึง การทำแผลที่ต้องใช้ความชุ่มชื้นในการหายของแผล ใช้สำหรับทำแผลที่มีลักษณะเป็นแผลเปิด แผลอักเสบติดเชื้อ แผลที่มีสิ่งขับหลั่งมาก ซึ่งการปิดแผลชั้นแรกจะใช้วัสดุที่มีความชื้น เช่น ก๊อชชุบน้ำเกลือ (0.9% normal saline) ปิดไว้แล้วปิดด้วยก๊อชแห้งอีกครั้ง

2.4.4.3 การทำแผลในอุดมคติ

- 1) ทำให้ง่าย (Easy to apply)
- 2) เหมาะกับอวัยวะที่บาดเจ็บ (Able to conform to body contour)
- 3) มั่นคง (Durable) แต่ยืดหยุ่นได้ (Flexible)
- 4) เหมาะสมกับราคา (Cost effective)
- 5) สามารถซึมซับสิ่งคัดหลั่งได้ดี (Able to absorb or contain exudate)
- 6) ไม่ทำอันตรายต่อเนื้อเยื่อที่งอกขึ้นใหม่
- 7) ไม่ดูน่าเกลียดก่อให้เกิดความมั่นใจเมื่อต้องปรากฏต่อสายตาผู้อื่น (Acceptable in appearance)

2.5 การเลือกวัสดุปิดแผล (การทำแผล. ม.ป.ป.: ออนไลน์)

วัสดุปิดแผลมีหลากหลายชนิด เช่น ผ้าก๊อช วาสลินก๊อช ฟิล์มใสและไฮโดรเจล ซึ่งการเลือกใช้วัสดุปิดแผลชนิดใดต้องคำนึงถึงความเหมาะสมของวัสดุกับชนิดของแผล

ผ้าก๊อช (Gauze dressing) เหมาะกับปิดแผลขนาดเล็กและมีสิ่งขับหลั่งเล็กน้อย

ผ้าก๊อชหุ้มสำลี (Top dressing) เหมาะสำหรับปิดแผลที่มีสิ่งขับหลั่งจำนวนมาก

ว้ายก๊อช (Y-gauze) เป็นผ้าก๊อชที่ตัดตรงกลางเป็นรูปตัว Y ใช้ปิดแผลที่มีการใส่ท่อเพื่อระบายสิ่งขับหลั่ง

วาสลินก๊อช (Vaseline gauze) เป็นก๊อชชุบวาสลิน สำหรับปิดแผลเพื่อไม่ให้อากาศเข้าสู่แผล นอกจากนี้ยังมีตัวยา Antiseptic ซึ่งมีฤทธิ์ในการฆ่าเชื้อโรค จึงช่วยป้องกันการติดเชื้อ

ฟิล์มใส (Transparent film) ลักษณะเป็นแผ่นใสทำจากพอลิยูรีเทนเคลือบด้วยกาวสังเคราะห์ สามารถป้องกันน้ำและแบคทีเรียได้ ใช้สำหรับปิดแผลขนาดเล็ก แผลที่ไถลหาย (Healing wound) หรือปิดบริเวณที่แห้งให้น้ำเกลือ

ไฮโดรเจล (Hydrogel) และไฮโดรคอลลอยด์ (Hydrocolloid) ช่วยให้แผลมีความชุ่มชื้น (Moist wound environment) ช่วยในการเจริญเติบโตของเนื้อเยื่อ ใช้ได้ทั้งแผลลึกและแผลตื้น



บทที่ 3

วิธีดำเนินการทดลอง

3.1 วัสดุและสารเคมี

- 1) พอลิยูรีเทน (Tecophilic®, SP-80A-150) (Lubrizol Advanced Materials Asia Pacific Limited, Hongkong)
- 2) ชิริจีน (บริษัท แก้วหลวง จำกัด ประเทศไทย)
- 3) เอทานอล (Sigma-Aldrich, USA)

3.2 อุปกรณ์การทดลอง

- 1) อุปกรณ์เครื่องแก้ว เช่น บีกเกอร์ แท่งแก้วคน ขวดใส่สารเคมี กระจกสไลด์
- 2) เครื่องชั่งไฟฟ้าทศนิยม 4 ตำแหน่ง
- 3) หลอดฉีดยา และเข็ม (บริษัทนิโปร (ประเทศไทย) จำกัด ประเทศไทย)
- 4) เครื่องให้ศักย์ไฟฟ้าสูง (Spellman High Voltage Electronics Corporation, USA)
- 5) เครื่องควบคุมการให้สารละลายทางกระบอกฉีดยา (Syringe pump) (บริษัทแนชั่นแนล ไคเร็ค เน็ตเวิร์ค จำกัด ประเทศไทย)
- 6) เครื่องล้างอัลตราโซนิก (Ultrasonic cleaner)
- 7) อะลูมิเนียมฟอยล์
- 8) แผ่นโลหะรองรับเส้นใย
- 9) เครื่องวัดความหนืดยี่ห้อ Brookfield รุ่น RV-7 (Brookfield Engineering Laboratories, Inc)
- 10) Autoclave รุ่น SS-320 (Tomy limited, Japan)
- 11) บัตตาเลียนไฟฟ้า (Wahi Clipper Corp., USA)
- 12) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด รุ่น JSM-6400 (Joel Ltd., Japan)
- 13) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน รุ่น JEM-2100 (Joel Ltd., Japan)

3.3 การเตรียมการทดลอง

3.3.1 การเตรียมสารละลายพอลิยูรีเทน

เตรียมสารละลายพอลิยูรีเทนที่ความเข้มข้นร้อยละ 1-6 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรโดยการละลายพอลิยูรีเทนในเอทานอลที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส นานประมาณ 45 นาทีหรือจนกว่าพอลิยูรีเทนจะละลายหมด แล้วจึงนำสารละลายที่ได้ไปปั่นเป็นเส้นใยด้วยกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต

3.3.2 ระบบเครื่อง

เครื่องอิเล็กทรอนิกส์ป็นิ่ง ดังภาพที่ 2.1 ในบทที่ 2 ประกอบด้วย

- 1) เครื่องให้ศักย์ไฟฟ้าสูง สามารถให้ศักย์ไฟฟ้าได้ในช่วง 0-40 กิโลโวลต์
- 2) เข็มฉีดยาพลาสติกขนาด 5 มิลลิเมตร ใช้ใส่สารละลายสำหรับการปั่นเส้นใย
- 3) เข็มเบอร์ 21 ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก คือ 0.82 มิลลิเมตร และเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน คือ 0.51 มิลลิเมตร ตัดปลายเข็มให้เรียบและมีความยาวประมาณ 2 เซนติเมตร
- 4) แผ่นเหล็กที่หุ้มด้วยอะลูมิเนียมฟอยด์ เป็นวัสดุรองรับเส้นใย

3.4 วิธีการทดลอง

3.4.1 การปั่นเส้นใยพอลิยูรีเทน

นำสารละลายพอลิยูรีเทนความเข้มข้นร้อยละ 1-6 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรที่ละลายเป็นเนื้อเดียวกันอย่างสมบูรณ์แล้ว มาวัดความหนืดของสารละลายด้วยเครื่องวัดความหนืดหยู Brookfield รุ่น RV-7 (Brookfield Engineering Laboratories, Inc) จากนั้นนำสารละลายใส่ในหลอดฉีดยาพลาสติกที่ต่อกับเข็มซึ่งตัดปลายเข็มแล้ว ต่อหัวบวกเข้ากับปลายเข็ม และต่อหัวลบเข้ากับวัสดุรองรับเส้นใย กำหนดระยะห่างระหว่างหัวเข็มกับวัสดุรองรับ (10-30 เซนติเมตร) และศักย์ไฟฟ้าสูง (10-25 กิโลโวลต์) ปั่นเส้นใยลงบนวัสดุรองรับที่หุ้มด้วยอะลูมิเนียมฟอยด์ ศึกษาพื้นฐานวิทยาของเส้นใยโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และเลือกภาวะที่เหมาะสมของการปั่นเส้นใยพอลิยูรีเทน

3.4.2 การปั่นเส้นใยพอลิยูรีเทนผสมชิริชิน

นำสารละลายพอลิยูรีเทนความเข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ผสมกับชิริชิน โดยใช้ปริมาณสารดังตารางที่ 3.1 จากนั้นนำสารที่ผสมแล้วเข้าเครื่อง Ultrasonic cleaner นาน 15 นาที เพื่อช่วยการกระจายตัวของชิริชินในสารละลายพอลิยูรีเทน และนำสารที่เตรียมได้ไปปั่นเป็นเส้นใยด้วยกระบวนการอิเล็กทรอนิกส์ป็นิ่ง และตรวจสอบพื้นฐานวิทยาของเส้นใยโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน

ตารางที่ 3.1 ปริมาณสาร

สารละลายพอลิยูรีเทนความเข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร (กรัม)	ปริมาณซีริซิน (กรัม)
5	0
5	0.03
5	0.07
5	0.11
5	0.15
5	0.19
5	0.23
5	0.27

3.5 การทดสอบและวิเคราะห์ตัวอย่าง

3.5.1 สัณฐานวิทยาของเส้นใยและขนาดของเส้นใย

ศึกษาสัณฐานวิทยาและขนาดของเส้นใยที่ปั่นได้ โดยใช้การถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) รุ่น JSM-6400 ผลิตโดยบริษัท Joel Ltd. ที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย การเตรียมตัวอย่างเพื่อศึกษาสัณฐานวิทยาของเส้นใยที่ปั่นได้ มีขั้นตอนดังนี้ ตัดแผ่นอะลูมิเนียมฟอยด์ที่มีตัวอย่างเส้นใยติดอยู่ขนาด 0.7 เซนติเมตร $\times$ 0.7 เซนติเมตร ติดลงบนเทปกาวยางสองหน้าเพื่อยึดตัวอย่างกับแท่นรองรับซึ่งทำจากอะลูมิเนียม (Aluminium stub) จากนั้นเคลือบทองลงบนผิวของเส้นใยเพื่อให้มีสมบัติการนำไฟฟ้า แล้วนำไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดกำลังขยาย 1,000 เท่า

เมื่อได้ภาพถ่ายจากเครื่อง SEM แล้ว นำภาพที่ได้มาทำการวิเคราะห์หาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย โดยใช้โปรแกรม Image J โดยในโปรแกรมจะให้วัดความยาวของเส้นมาตรฐานที่ปรากฏอยู่ในภาพ เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับความกว้างของเส้นใย ทำให้ทราบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยได้ ปริมาณของเส้นใยที่วัดนี้มีจำนวน 70 เส้น หลังจากนั้นนำไปหาค่าเฉลี่ยของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

3.5.2 การกระจายตัวของซิริชินในเส้นใย

ศึกษาการกระจายตัวของซิริชินในเส้นใยโดยใช้การถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission electron microscope, TEM) รุ่น JEM-2100 ผลิตโดยบริษัท Joel Ltd. ที่ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ การเตรียมตัวอย่างเพื่อศึกษาการกระจายตัวของซิริชินในเส้นใยที่ปั่นได้ ทำได้โดยการปั่นเส้นใยลงบนแผ่นกริด (ภาพที่ 3.1) จากนั้นนำแผ่นกริดที่มีตัวอย่างเส้นใยไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน



ภาพที่ 3.1 ลักษณะแผ่นกริด

3.5.3 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน

วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของตัวอย่างแผ่นเส้นใยอิเล็กโตรสปินและใช้ยืนยันแผ่นเส้นใยอิเล็กโตรสปินที่เตรียมได้โดยใช้เครื่องฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Spectrum One, Perkin Elmer, USA) ในช่วงความยาวคลื่น 4000 ถึง 400 cm^{-1} ที่อุณหภูมิห้องโดยมี Resolution 4 cm^{-1} และ 32 scans

3.5.4 ประสิทธิภาพของแผ่นปิดแผลต่อการหายของแผล

การศึกษาประสิทธิภาพของแผ่นปิดแผลต่อการหายของแผลทดสอบตามแบบ Bae และคณะ (Bae, 2012: 457)

1) การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

- แผ่นปิดแผลพอลิยูรีเทน (สารละลายความเข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร อัตราการไหล 5 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง ระยะทางจากหัวเข็มถึงวัสดุรองรับเส้นใย 20 เซนติเมตร ศักย์ไฟฟ้า 15 กิโลโวลต์)

- แผ่นปิดแผลพอลิยูรีเทนผสมซีรีซิน (สารละลายความเข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรต่อปริมาณซีรีซินในอัตราส่วน 5 กรัม ต่อ 0.19 กรัม อัตราการไหล 6.2 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง ระยะทางจากหัวเข็มถึงวัสดุรองรับเส้นใย 20 เซนติเมตร ศักย์ไฟฟ้า 15 กิโลโวลต์)

แผ่นปิดแผลมีความหนาประมาณ 1.5 มิลลิเมตร และผ่านการฆ่าเชื้อด้วยรังสีแกมมาในปริมาณไม่น้อยกว่า 15 กิโลเกรย์

2) สัตว์ทดลอง

หนูแรท สายพันธุ์ Wistar เพศเมีย อายุ 9-10 สัปดาห์ น้ำหนัก 250-300 กรัม ตั้งจากศูนย์สัตว์ทดลองแห่งชาติ ศาเลา มหาวิทยาลัยมหิดล ทำการเลี้ยงดูภายใต้อุณหภูมิ 24 ± 2 องศาเซลเซียส มีอาหารและน้ำดื่มให้กินตลอดเวลา

3) วิธีการทดสอบ

ศึกษาขนาดการหายของแผลที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงเวลา โดยแบ่งเป็น 4 ชุดการทดลอง ชุดละ 10 ตัว ตามช่วงเวลาการศึกษา แต่ละชุดประกอบด้วยตัวอย่างทดลอง 3 กลุ่ม คือ กลุ่ม Sham (การปิดแผลด้วยผ้าก๊อซ) กลุ่ม Non-sericin (การปิดแผลด้วยแผ่นปิดแผลจากพอลิยูรีเทนไม่ผสมซีรีซิน) และกลุ่ม Sericin (การปิดแผลด้วยแผ่นปิดแผลจากพอลิยูรีเทนผสมซีรีซิน)

ชุดที่ 1	ศึกษาการหายของแผล ณ วันที่ 3
ชุดที่ 2	ศึกษาการหายของแผล ณ วันที่ 7
ชุดที่ 3	ศึกษาการหายของแผล ณ วันที่ 14
ชุดที่ 4	ศึกษาการหายของแผล ณ วันที่ 21

นำหนูแรทเพศเมีย อายุ 9-10 สัปดาห์ที่ได้รับการเลี้ยงดูเพื่อปรับสภาพเป็นเวลาไม่น้อยกว่า 1 สัปดาห์ มาอดอาหารก่อนการทดลองเป็นเวลา 16 ชั่วโมง เตรียมการผ่าตัดโดยโกนขนออกจากผิวหนังบริเวณหลังทั้งซ้ายและขวา และฟอกล้างผิวหนังด้วยน้ำยาฆ่าเชื้อ (เบตาดีน สครับ) จากนั้นสลบสัตว์ทดลองด้วย Pentobarbital sodium ขนาด 25 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดยการฉีดเข้าช่องท้อง ส่วนการผ่าตัดขึ้นผิวหนังออกใช้วิธีการ Aseptic technique โดยกรีดผิวหนังให้มีขนาดกว้าง 1.5 เซนติเมตร ยาว 1.5 เซนติเมตร บริเวณหลังของหนูแรททั้งฝั่งซ้ายและขวาลึกตลอดชั้นของผิวหนัง จากนั้นทำความสะอาดแผลที่เกิดขึ้นแล้วจึงปิดทับด้วยแผ่นปิดแผลที่เตรียมไว้ เปลี่ยนผ้าปิดแผลทุก ๆ 2 วัน โดยแต่ละกลุ่มจะประกอบด้วยแผลที่ไม่ได้รับตัวอย่างทดสอบ (กลุ่ม Sham, การปิดแผลด้วยผ้าก๊อซ) แผลที่ได้รับการปิดด้วยแผ่นปิดแผลจากพอลิยูรีเทนไม่ผสมซีรีซินและแผลที่ได้รับการปิดด้วยแผ่นปิดแผลพอลิยูรีเทนผสมซีรีซิน

4) การวัดผลและการประเมินผล

ติดตามการหายของแผลในสัตว์ทดลองโดยดูจากขนาดของแผลที่เปลี่ยนแปลง
ทำการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยขนาดของแผลภายในแต่ละช่วงเวลา โดยเปรียบเทียบกับแผล Sham ด้วย
สถิติแบบ oneway-ANOVA



บทที่ 4

ผลการทดลองและการอภิปรายผล

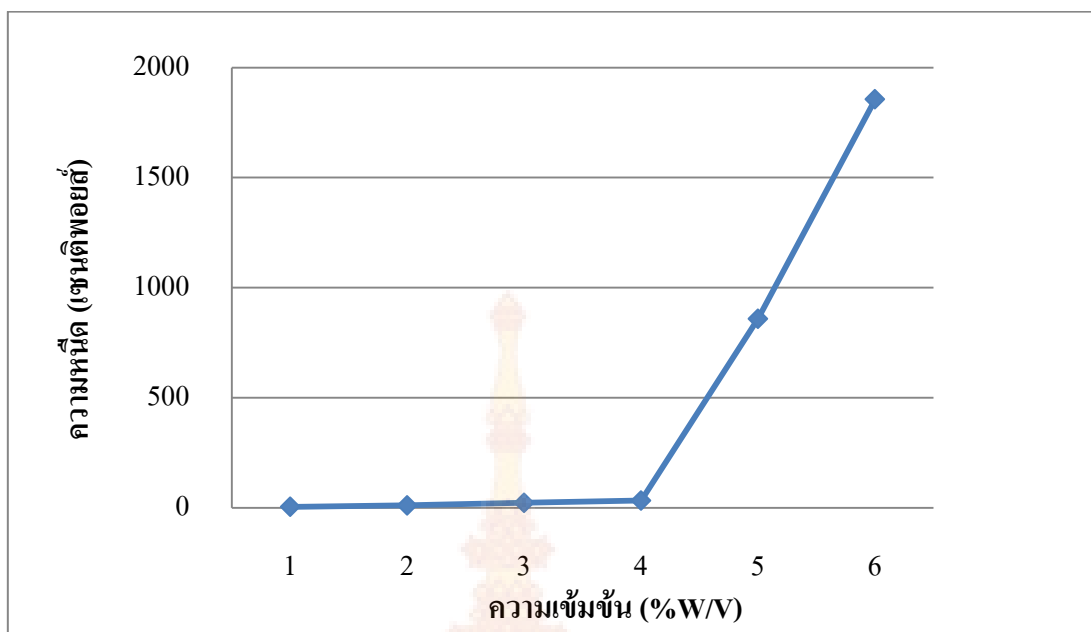
การควบคุมสัณฐานวิทยาและขนาดของเส้นใยที่ปั่นได้จากกระบวนการอิเล็กโตรสปินนิงที่ดี ทำให้สามารถนำเส้นใยเหล่านี้ไปประยุกต์ใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงศึกษาผลของปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อสัณฐานวิทยาและขนาดของเส้นใยพอลิยูรีเทนโดยปัจจัยที่ทำการศึกษาได้แก่ ความเข้มข้นของสารละลาย อัตราการไหลของสารละลาย ปริมาณศักย์ไฟฟ้าที่ให้แก่สารละลายและระยะทางจากหัวเข็มถึงวัสดุรองรับเส้นใย โดยมีรายละเอียด ดังนี้

4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นและความหนืดของสารละลายพอลิเมอร์

ความเข้มข้นของสารละลายพอลิเมอร์เป็นหนึ่งในตัวแปรที่สำคัญในกระบวนการอิเล็กโตรสปินนิง เนื่องจากความเข้มข้นของสารละลายมีความสัมพันธ์กับความหนืดของพอลิเมอร์ ดังนั้นจึงนำสารละลายพอลิยูรีเทนความเข้มข้นตั้งแต่ร้อยละ 1 ถึงร้อยละ 6 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรมาทดสอบหาความหนืดโดยใช้เครื่อง Brookfield viscometer รุ่น RV-7 ผลการทดลองแสดงในตารางที่ 4.1 และภาพที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นและความหนืดของสารละลายพอลิยูรีเทน

ความเข้มข้นของสารละลายพอลิยูรีเทน (% W/V)	ความหนืด (เซนติพอยส์)
1	4.2
2	10.3
3	22.1
4	32.4
5	858.3
6	1,856



ภาพที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นและความหนืดของสารละลายพอลิยูรีเทน

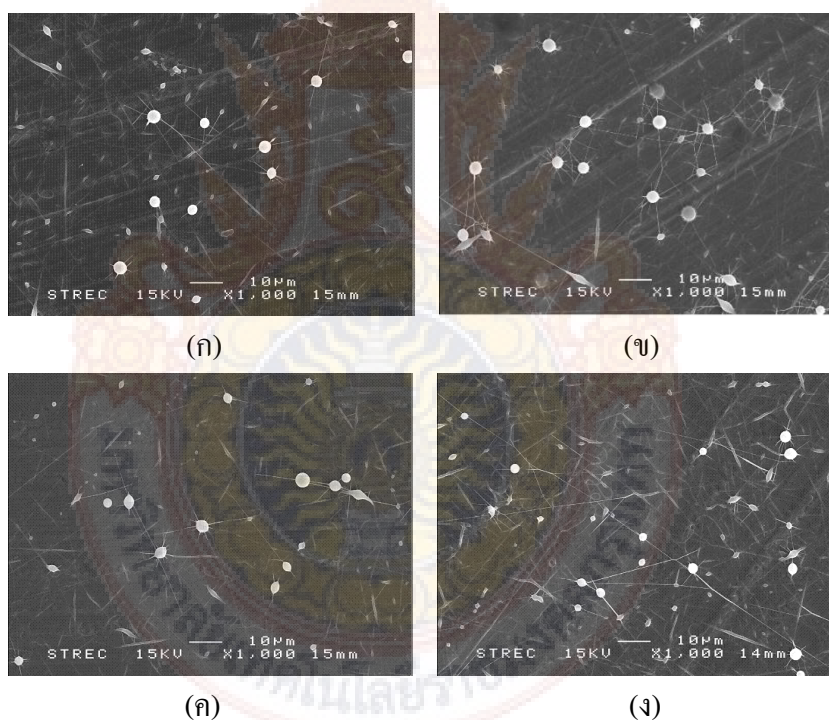
ตัวแปรสองชนิดที่มีผลต่อความหนืดของสารละลายพอลิเมอร์ ได้แก่ ชนิดของตัวทำละลาย และความเข้มข้นของสารละลาย (Liu et al. 2008: 632) สำหรับงานวิจัยนี้ ใช้ตัวทำละลายชนิดเดียวกันในแต่ละชนิดพอลิเมอร์ กล่าวคือ ใช้เอทานอลเป็นตัวทำละลาย ดังนั้นความหนืดของสารละลายพอลิยูรีเทนจึงขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารละลายเท่านั้น

จากผลการทดลอง (ตารางที่ 4.1 และ ภาพที่ 4.1) พบว่า ค่าความหนืดของสารละลายพอลิยูรีเทนมีค่าอยู่ในช่วง 4.2 ถึง 1,856 เซนติพอยส์ที่ความเข้มข้นตั้งแต่ร้อยละ 1 ถึงร้อยละ 6 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ค่าความหนืดของสารละลายพอลิยูรีเทนสูงขึ้น เมื่อความเข้มข้นของสารละลายสูงขึ้น

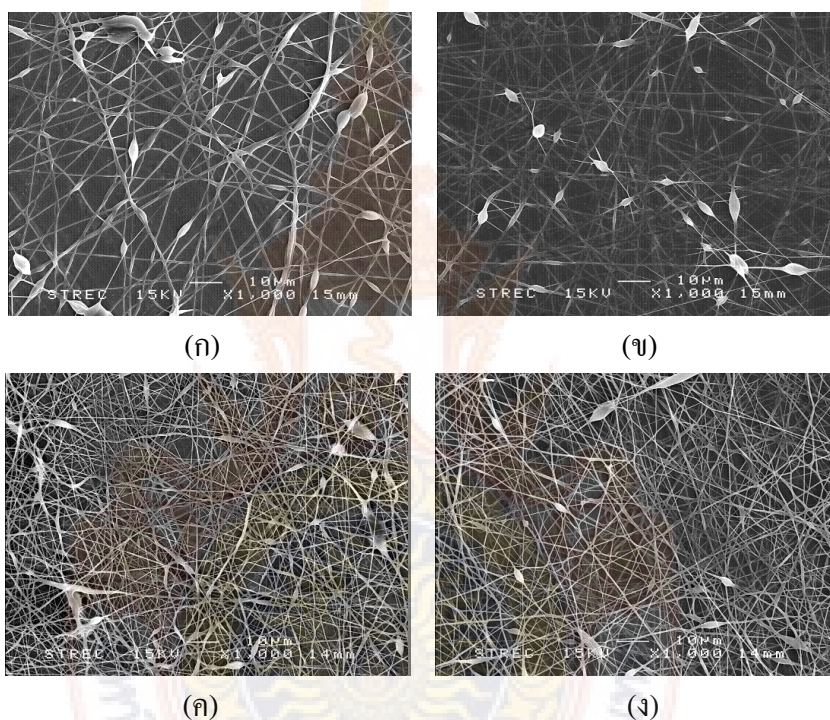
ค่าความหนืดของสารละลายพอลิเมอร์มีผลโดยตรงต่อสัญญาณวิทยาของเส้นใยที่ปั่นได้ จากกระบวนการอิเล็กโตรสปินนิง ถ้านำสารละลายพอลิเมอร์ที่มีค่าความหนืดต่ำมาก ไปปั่นเป็นเส้นใยด้วยกระบวนการอิเล็กโตรสปินนิง จะทำให้ลำของสารละลายพอลิเมอร์ที่ไหลออกมาแตกเป็นหยดของสารละลายเล็ก ๆ แทนที่จะได้เป็นเส้นใย ส่วนในกรณีที่ความหนืดของสารละลายสูงขึ้น สายโซ่โมเลกุลในสารละลายสามารถพันกันได้มากขึ้น จึงป้องกันการแตกตัวของลำพอลิเมอร์เป็นหยด ทำให้พบเส้นใยแทนที่จะพบหยดของสารละลาย ซึ่งสามารถใช้ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดในการสนับสนุนข้อมูลข้างต้นได้

4.2 ผลของความเข้มข้นและอัตราการไหลของสารละลายพอลิยูรีเทนต่อสัณฐานวิทยาของเส้นใย

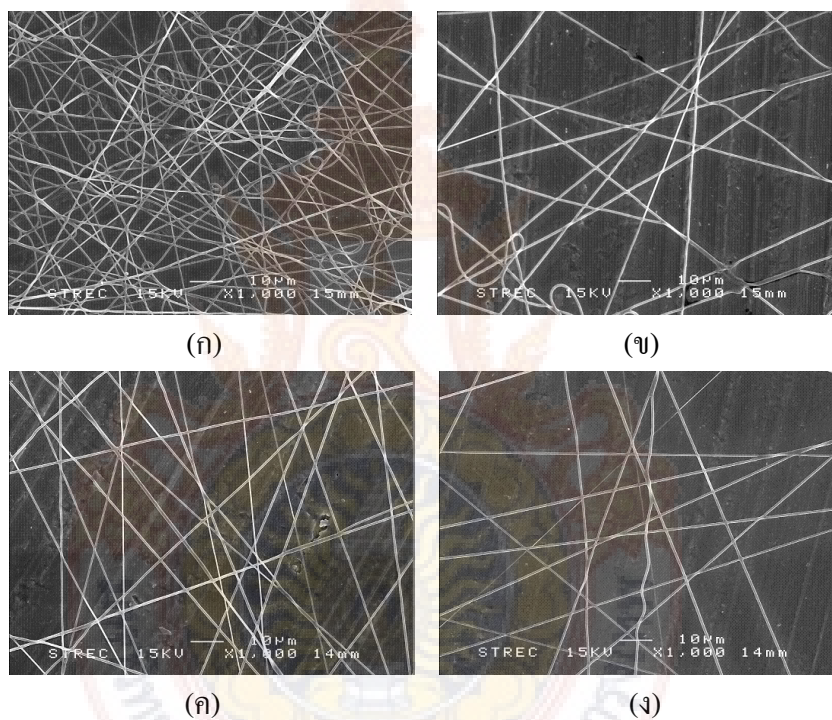
นำเส้นใยพอลิยูรีเทนที่ได้จากกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตที่ใช้ความเข้มข้นและอัตราการไหลของสารละลายแตกต่างกัน ไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเพื่อศึกษาสัณฐานวิทยาของเส้นใย โดยเส้นใยที่ปั่นได้เหล่านี้ถูกปั่นโดยใช้ศักย์ไฟฟ้าที่ 15 กิโลโวลต์และระยะทางจากหัวเข็มและวัสดุรองรับเส้นใย คือ 20 เซนติเมตร ผลการทดลองแสดงในภาพที่ 4.2-4.7 จากนั้นนำภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเฉพาะที่ความเข้มข้นร้อยละ 2 ถึงร้อยละ 6 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ไปวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยโดยเฉลี่ย (ไม่รวมหยดของสารละลายบนเส้นใย) ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานและกราฟฮิสโตแกรม ซึ่งผลการทดลองแสดงในตารางที่ 4.2 และภาคผนวก ก ตามลำดับ



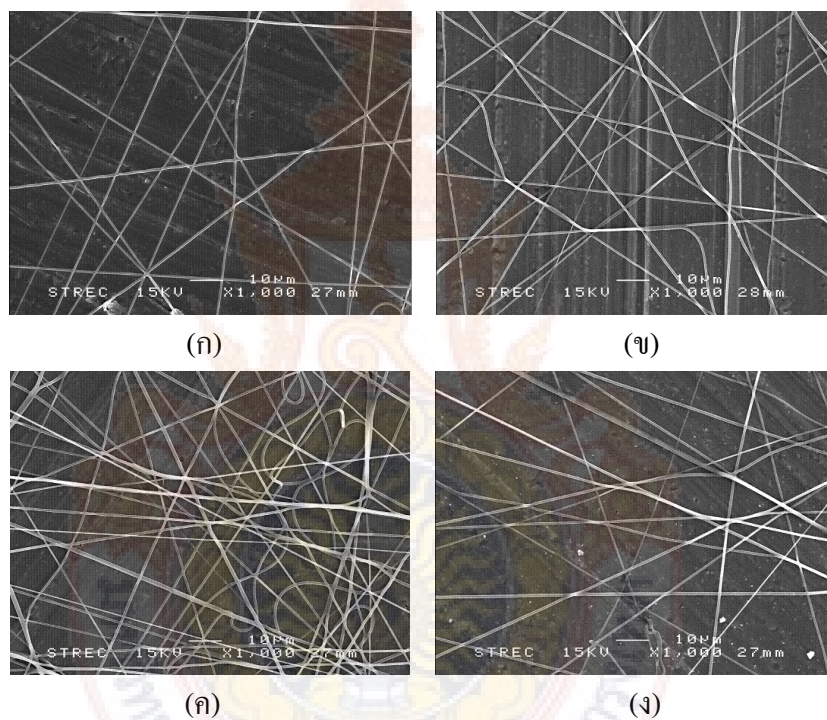
ภาพที่ 4.2 สัณฐานวิทยาของเส้นใยพอลิยูรีเทนความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรเมื่อใช้อัตราการไหลต่างกัน (ก) 1 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง (ข) 3 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง (ค) 5 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง (ง) 7 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง



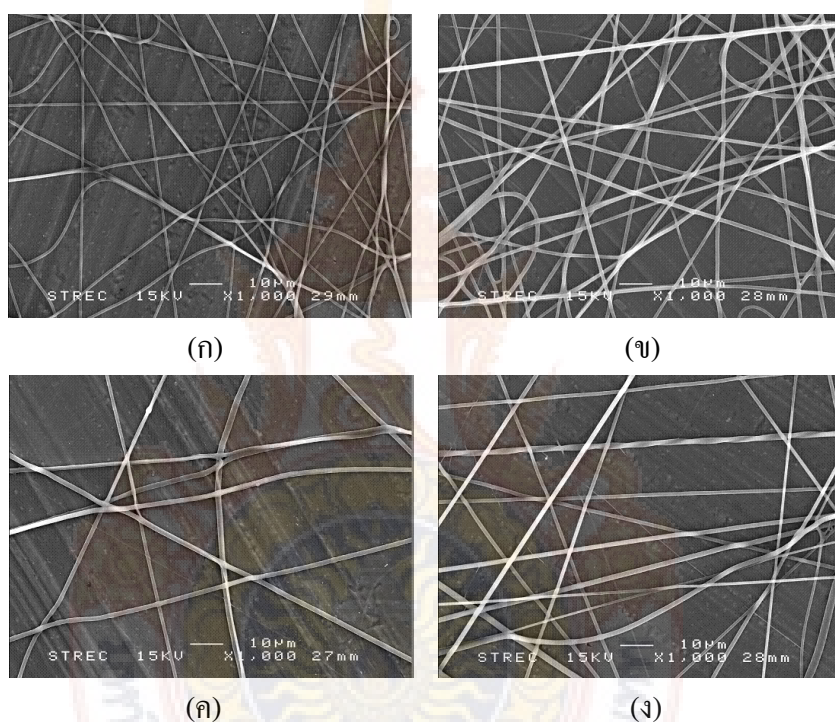
ภาพที่ 4.3 สัณฐานวิทยาของเส้นใยพอลิยูรีเทนความเข้มข้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรเมื่อใช้อัตราการไหลต่างกัน (ก) 1 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง (ข) 3 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง (ค) 5 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง (ง) 7 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง



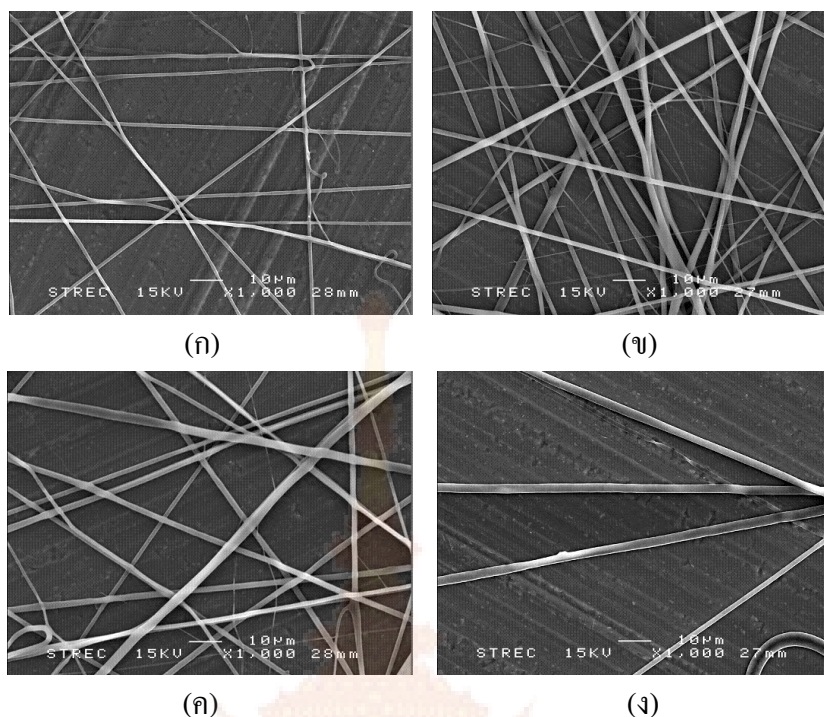
ภาพที่ 4.4 สัณฐานวิทยาของเส้นใยพอลิยูรีเทนความเข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรเมื่อใช้อัตราการไหลต่างกัน (ก) 1 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง (ข) 3 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง (ค) 5 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง (ง) 7 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง



ภาพที่ 4.5 สัณฐานวิทยาของเส้นใยพอลิยูรีเทนความเข้มข้นร้อยละ 4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรเมื่อใช้อัตราการไหลต่างกัน (ก) 1 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง (ข) 3 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง (ค) 5 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง (ง) 7 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง



ภาพที่ 4.6 สัณฐานวิทยาของเส้นใยพอลิยูรีเทนความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรเมื่อใช้อัตราการไหลต่างกัน (ก) 1 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง (ข) 3 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง (ค) 5 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง (ง) 7 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง



ภาพที่ 4.7 สัณฐานวิทยาของเส้นใยพอลิยูรีเทนความเข้มข้นร้อยละ 6 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรเมื่อใช้อัตราการไหลต่างกัน (ก) 1 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง (ข) 3 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง (ค) 5 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง (ง) 7 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง

ตารางที่ 4.2 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยเมื่อปรับเปลี่ยนความเข้มข้นและอัตราการไหลของสารละลายพอลิยูรีเทน

ความเข้มข้นของ สารละลายพอลิยูรีเทน (%W/V)	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย (ไมโครเมตร)			
	อัตราการไหล (มิลลิลิตรต่อชั่วโมง)			
	1	3	5	7
2	0.47 ± 0.12	0.36 ± 0.08	0.30 ± 0.07	0.32 ± 0.09
3	0.53 ± 0.11	0.67 ± 0.15	0.74 ± 0.13	1.04 ± 0.17
4	1.08 ± 0.20	1.55 ± 0.29	1.84 ± 0.37	1.88 ± 0.32
5	1.81 ± 0.16	2.31 ± 0.24	2.80 ± 0.35	2.88 ± 0.75
6	1.93 ± 0.11	3.22 ± 0.69	3.70 ± 0.99	5.02 ± 1.44

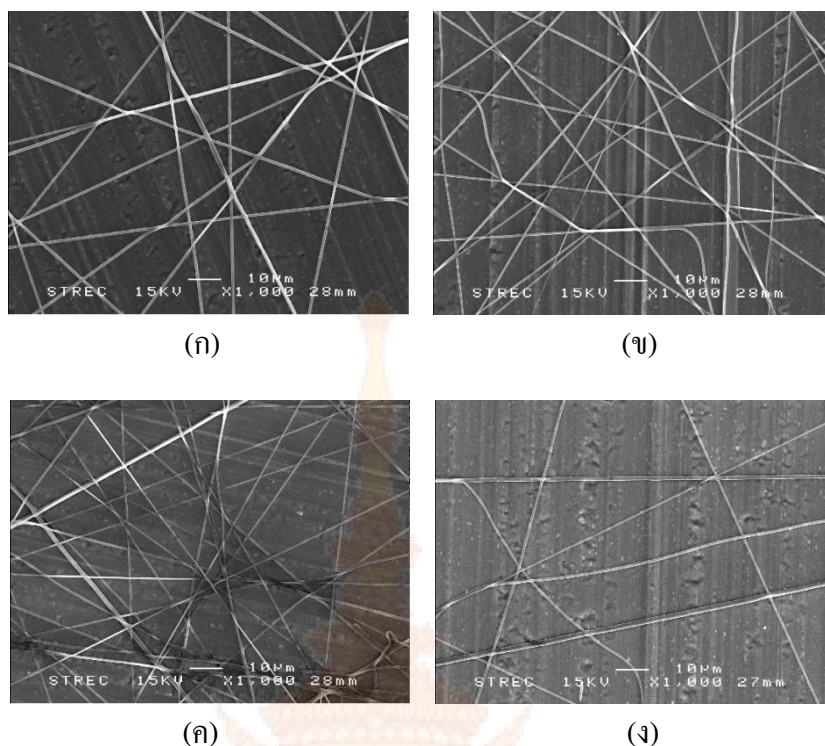
เมื่อใช้สารละลายพอลิยูรีเทนความเข้มข้นร้อยละ 1-2 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรในการปั่นเส้นใย พบว่าเส้นใยมีขนาดเล็กผสมกับหยดของสารละลาย (ภาพที่ 4.2-4.3) ทั้งนี้เนื่องจากสารละลาย พอลิยูรีเทนมีความเข้มข้นต่ำ ปริมาณของสายโซ่พอลิเมอร์ที่พันกัน (Chain entanglement) มีน้อย แรงที่ทำให้สายพอลิเมอร์คงรูปอยู่ได้จึงมีไม่มากพอ สายพอลิเมอร์จึงเกิดการแตกตัวจากปลายหยดของสารละลายเป็นสายขนาดเล็ก จากนั้นแรงตึงผิวของสารละลายที่อยู่ล้อมรอบจะทำให้เกิดเป็นหยดขนาดเล็ก

เมื่อความเข้มข้นของสารละลายพอลิยูรีเทนสูงขึ้น (ตั้งแต่ความเข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร) จะไม่พบหยดของสารละลายบนเส้นใย และพบว่าเมื่อความเข้มข้นสูงขึ้น เส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยจะมีขนาดใหญ่ขึ้น (ภาพที่ 4.4-4.7) เนื่องจากเมื่อความเข้มข้นของสารละลายสูงขึ้น ปริมาณของสายโซ่พอลิเมอร์ในสารละลายมีมากขึ้น สายโซ่จึงมีโอกาสพันกันสูงขึ้น ดังนั้นสายพอลิเมอร์จึงมีแรงต้านต่อแรงทางประจุที่เข้ามากระทำมากขึ้น ทำให้สายพอลิเมอร์เกิดการยืดตัวได้ยากขึ้น เส้นใยที่ได้จึงมีเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยขนาดใหญ่ ซึ่งปรากฏการณ์เหล่านี้สามารถรับรู้ภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) มาสนับสนุนได้

ในกรณีที่ศึกษาผลของอัตราการไหลต่อสัณฐานวิทยาและขนาดของเส้นใย พบว่า ที่ความเข้มข้นเดียวกัน เมื่ออัตราการไหลของสารละลายพอลิยูรีเทนสูงขึ้น ขนาดหยดหรือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยที่ได้มีขนาดใหญ่ขึ้น เนื่องจากอัตราการไหลแสดงถึงปริมาณของสารละลายที่ไหลออกจากหัวเข็มสู่ตัวสุรรองรับเส้นใย อัตราการไหลของสารละลายยิ่งสูงแสดงว่ามีปริมาณของสารละลายไหลออกจากหัวเข็มมาก ทำให้พบหยดของสารละลายที่มีขนาดใหญ่ขึ้น เมื่อความเข้มข้นของสารละลายต่ำ แต่เมื่อความเข้มข้นของสารละลายมีค่ามากพอที่จะปั่นเป็นเส้นใย การใช้อัตราการไหลของสารละลายที่สูงกว่า จะได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยที่มีขนาดใหญ่กว่าการใช้อัตราการไหลที่ต่ำกว่า

4.3 ผลของศักย์ไฟฟ้าต่อสัณฐานวิทยาของเส้นใย

ศึกษาผลของศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ในปั่นเส้นใยพอลิยูรีเทน โดยใช้สารละลายพอลิยูรีเทนความเข้มข้นร้อยละ 4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ระยะทางระหว่างหัวเข็มและตัวสุรรองรับเส้นใย คือ 20 เซนติเมตร อัตราการไหลของสารละลาย 3 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง และปรับเปลี่ยนศักย์ไฟฟ้าตั้งแต่ 10 ถึง 25 กิโลโวลต์ จากนั้นนำเส้นใยที่ปั่นได้ไปตรวจสอบสัณฐานวิทยาของเส้นใยโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ผลการทดลองแสดงในภาพที่ 4.8 จากนั้นนำเส้นใยที่ปั่นได้ไปวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยโดยเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ซึ่งผลการทดลองแสดงในตารางที่ 4.3



ภาพที่ 4.8 สัณฐานวิทยาของเส้นใยพอลิยูรีเทนเมื่อใช้ศักย์ไฟฟ้าต่างกัน (ก) 10 กิโลโวลต์ (ข) 15 กิโลโวลต์ (ค) 20 กิโลโวลต์ (ง) 25 กิโลโวลต์

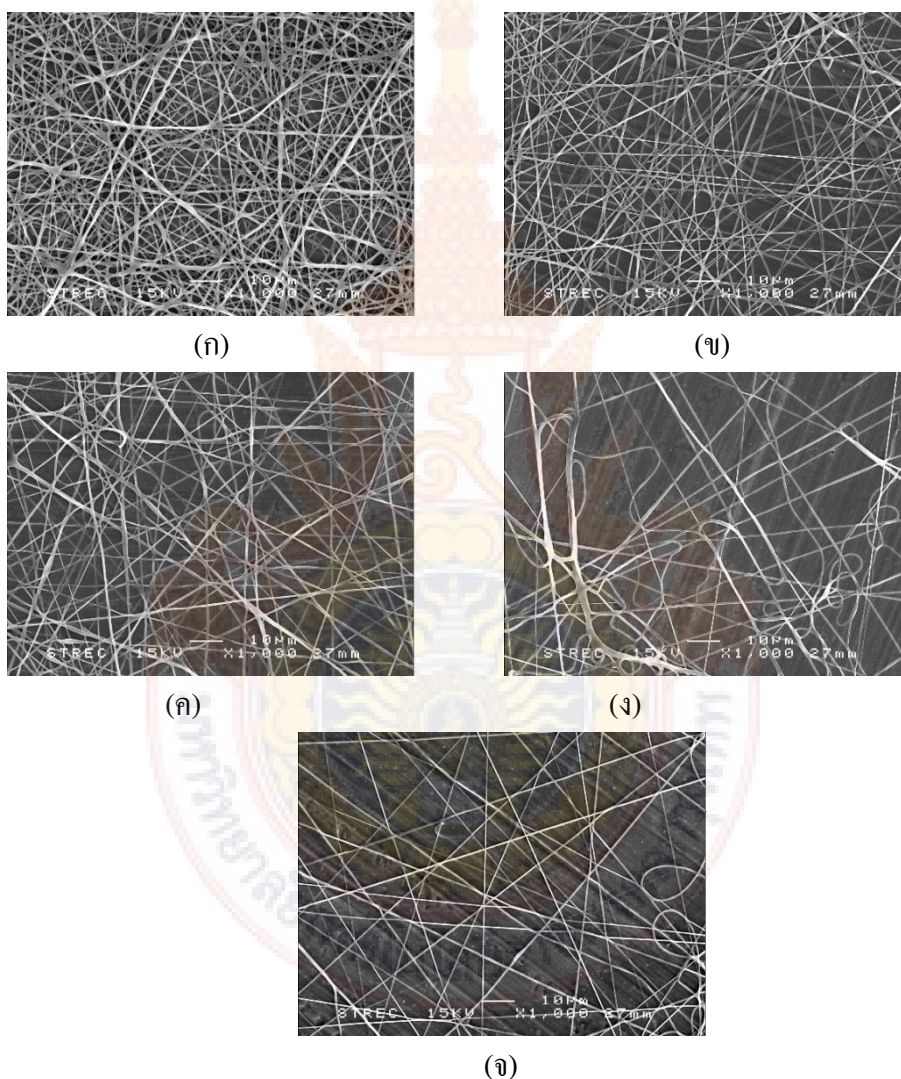
ตารางที่ 4.3 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยเมื่อใช้ศักย์ไฟฟ้าต่างกัน

ศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ (กิโลโวลต์)	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยโดยเฉลี่ย (ไมโครเมตร)
10	1.01 ± 0.11
15	0.77 ± 0.07
20	0.77 ± 0.21
25	0.76 ± 0.11

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มศักย์ไฟฟ้าที่ให้แก่อารละลายพอลิยูรีเทน (ภาพที่ 4.8 และตารางที่ 4.3) ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มศักย์ไฟฟ้าแก่อารละลายเป็นการเพิ่มแรงผลักของแรงทางประจุไฟฟ้าทำให้ลำของพอลิเมอร์เกิดการยืดตัวได้มาก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยจึงเล็กลง

4.4 ผลของระยะทางจากหัวเข็มถึงวัสดุรองรับเส้นใยต่อสัณฐานวิทยาของเส้นใย

นำสารละลายพอลิยูรีเทนความเข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรมาปั่นเป็นเส้นใย โดยควบคุมตัวแปรบางอย่างให้คงที่ ได้แก่ อัตราการไหลที่ 5 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง ศักย์ไฟฟ้าที่ 15 กิโลโวลต์ เวลาในการปั่นเส้นใย 1 นาที และปรับระยะทางจากหัวเข็มถึงวัสดุรองรับเส้นใยตั้งแต่ 10 ถึง 30 เซนติเมตร สัณฐานวิทยาและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยแสดงในภาพที่ 4.9 และ ภาพผนวก ข และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแผ่นเส้นใยที่ตกบนวัสดุรองรับแสดงในตารางที่ 4.4



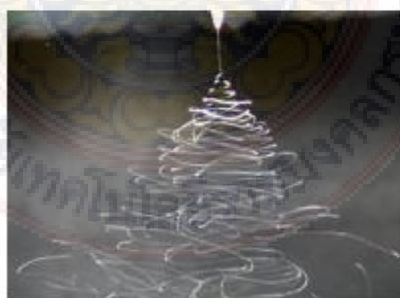
ภาพที่ 4.9 สัณฐานวิทยาของเส้นใยพอลิยูรีเทนเมื่อใช้ระยะทางจากหัวเข็มถึงวัสดุรองรับเส้นใยต่างกัน (ก) 10 เซนติเมตร (ข) 15 เซนติเมตร (ค) 20 เซนติเมตร (ง) 25 เซนติเมตร (จ) 30 เซนติเมตร

ตารางที่ 4.4 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแผ่นเส้นใยและเส้นใยเมื่อใช้ระยะทางจากหัวเข็มถึงวัสดุรองรับเส้นใยต่างกัน

ระยะทางจากหัวเข็มถึงวัสดุรองรับเส้นใย (เซนติเมตร)	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแผ่นเส้นใยบนวัสดุรองรับ (เซนติเมตร)	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยโดยเฉลี่ย (ไมโครเมตร)
10	4	0.69 ± 0.18
15	6	0.63 ± 0.18
20	9	0.63 ± 0.15
25	12	0.60 ± 0.24
30	16	0.57 ± 0.10

จากผลการทดลองในภาพที่ 4.9 และตารางที่ 4.4 พบว่าเส้นใยที่ได้แห้งตัวดี ไม่มีเส้นใยรวมติดกันเป็นแพ ในทุกระยะทางจากปลายเข็มถึงวัสดุรองรับเส้นใย เมื่อระยะทางจากปลายเข็มถึงวัสดุรองรับเส้นใยเพิ่มขึ้น มีผลทำให้ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยมีขนาดเล็กลง

ในระยะเวลาการปั่นเส้นใยเท่ากัน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแผ่นเส้นใยที่ตกบนวัสดุรองรับเส้นใยมีขนาดใหญ่ขึ้นและความหนาแน่นของเส้นใยในพื้นที่เท่ากันมีน้อย เมื่อใช้ระยะทางจากปลายเข็มถึงวัสดุรองรับเส้นใยเพิ่มขึ้น (ตารางที่ 4.4) ทั้งนี้เนื่องจากการปั่นเส้นใยด้วยกระบวนการอิเล็กทรอนิกส์สปินนิ่ง ถ้าพอลิเมอร์ที่ออกมาจากปลายเข็มจะเคลื่อนตัวเป็นรูปทรงกรวย ดังภาพที่ 4.10

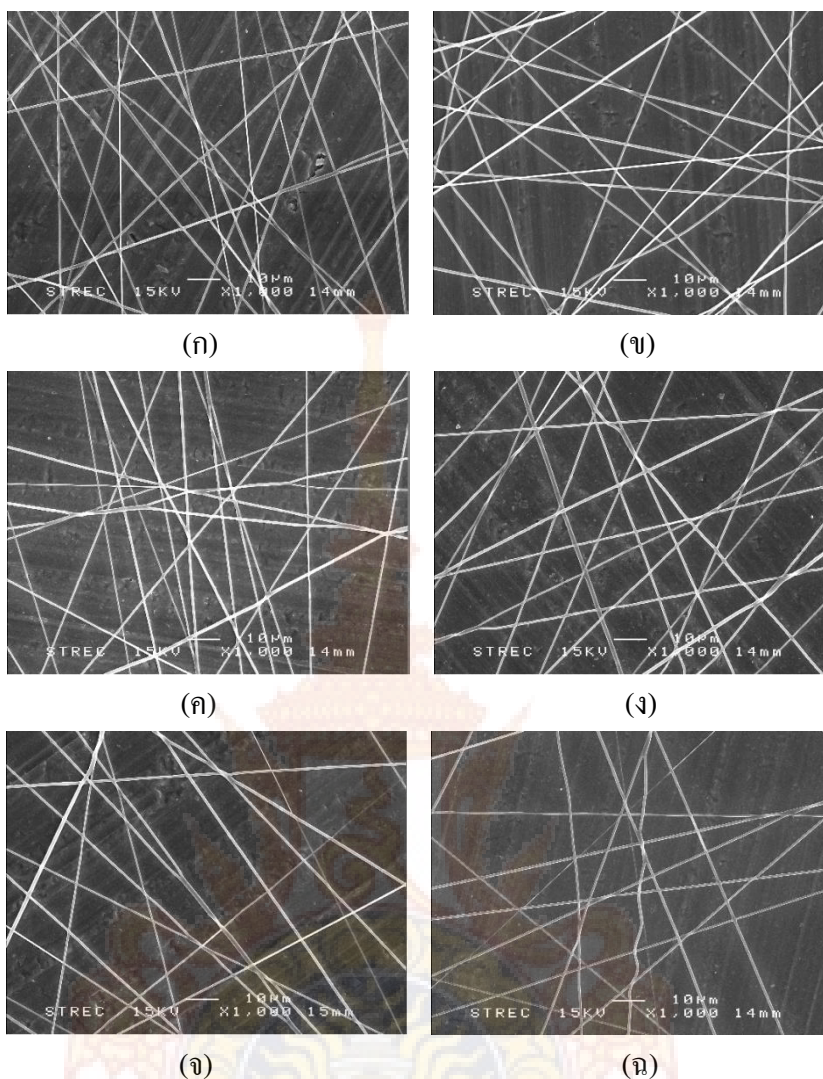


ภาพที่ 4.10 ลักษณะการเคลื่อนตัวของสารละลายในกระบวนการอิเล็กทรอนิกส์สปินนิ่ง
ที่มา: MemPro Ceramics Corporation, 2010: online

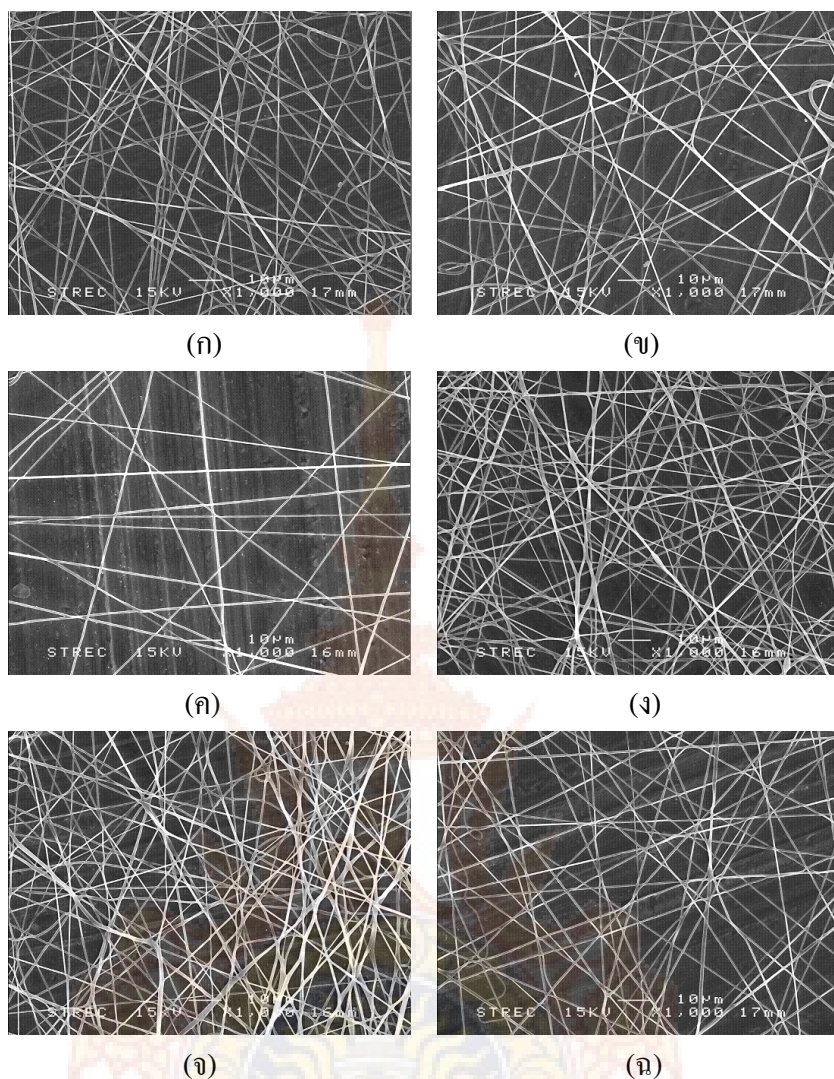
4.5 ผลของปริมาณซิริชินต่อสัณฐานวิทยาของเส้นใย

เนื่องจากความเข้มข้นของสารละลายพอลิยูรีเทนที่ร้อยละ 3 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรเป็นความเข้มข้นน้อยที่สุดที่ทำให้เส้นใยไม่มีหยดของสารละลายผสมในเส้นใย ดังนั้นจึงเลือกความเข้มข้นนี้ปริมาณ 5 กรัมในการปั่นเส้นใยพอลิยูรีเทนผสมซิริชินตั้งแต่ 0 ถึง 0.27 กรัม ใช้อัตราการไหลตั้งแต่ 5.0-7.0 มิลลิตรต่อชั่วโมง ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อปั่นเส้นใยพอลิยูรีเทนล้วน ในช่วงอัตราการไหลนี้ เส้นใยที่ได้เป็นเส้นตรงและปริมาณเส้นใยมีมากกว่าการใช้อัตราการไหลต่ำ เมื่อระยะเวลาการปั่นเส้นใยเท่ากัน นอกจากนี้ภาวะอื่นที่ใช้ในการปั่นเส้นใยพอลิยูรีเทนผสมซิริชิน คือ ระยะทางระหว่างหัวเข็มถึงวัสดุรองรับ 20 เซนติเมตรและศักย์ไฟฟ้าที่ 15 กิโลโวลต์ จากนั้นตรวจสอบสัณฐานวิทยาของเส้นใยที่ปั่นได้โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด จากนั้นตรวจสอบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกลางของเส้นใย ผลการทดลองแสดงในภาพที่ 4.11-4.18 ตารางที่ 4.5 และภาคผนวก ก ตามลำดับ

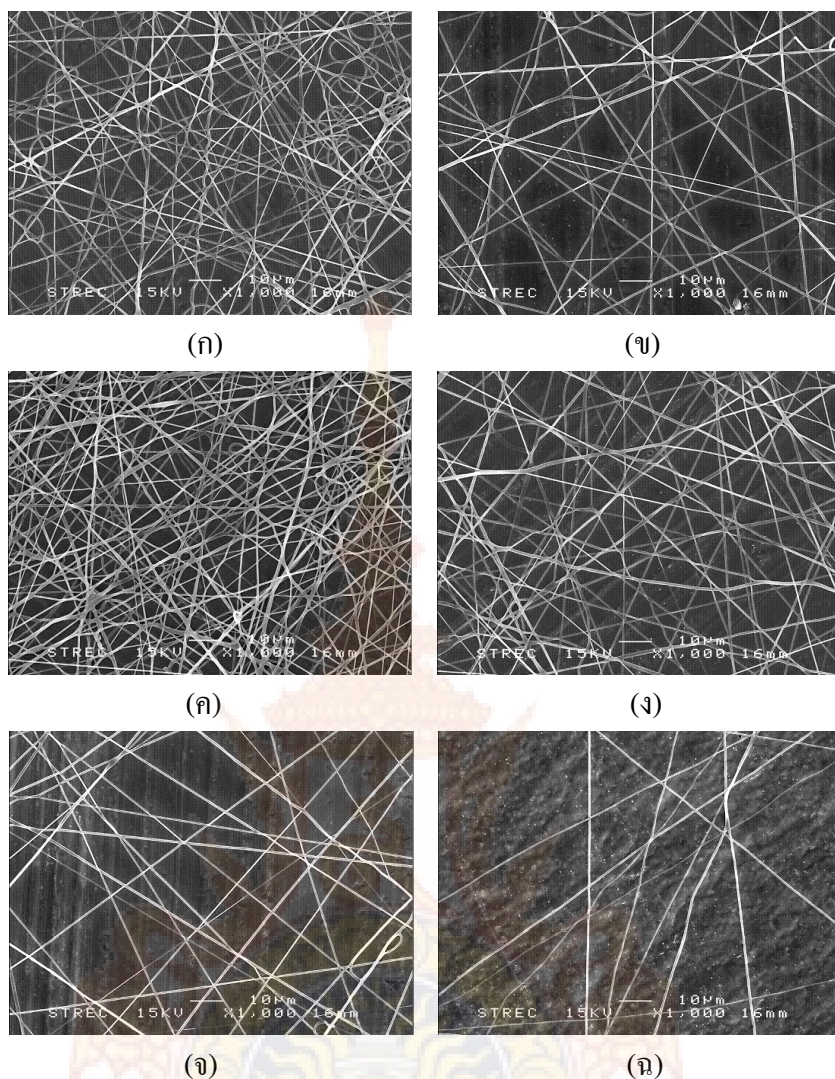




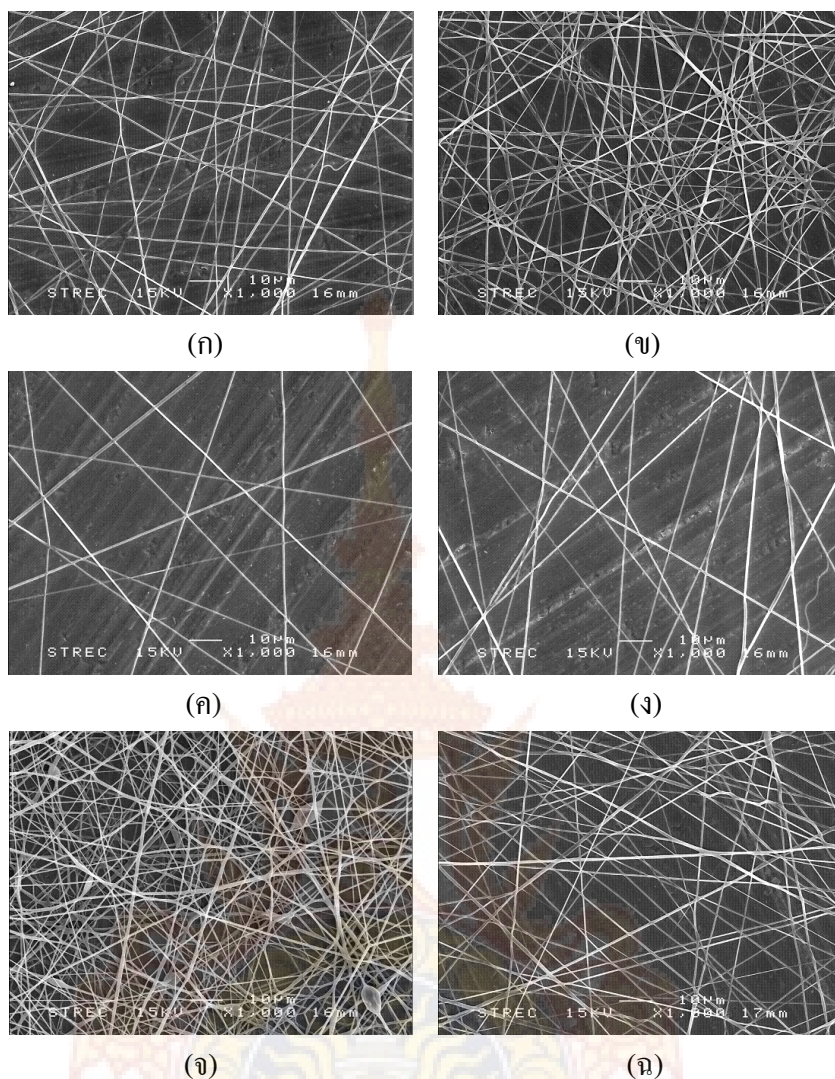
ภาพที่ 4.11 สัณฐานวิทยาของเส้นใยพอลิยูรีเทนเมื่อใช้อัตราการไหลต่างกัน (ก) 5.0 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง (ข) 5.4 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง (ค) 5.8 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง (ง) 6.2 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง (จ) 6.6 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง (ฉ) 7.0 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง



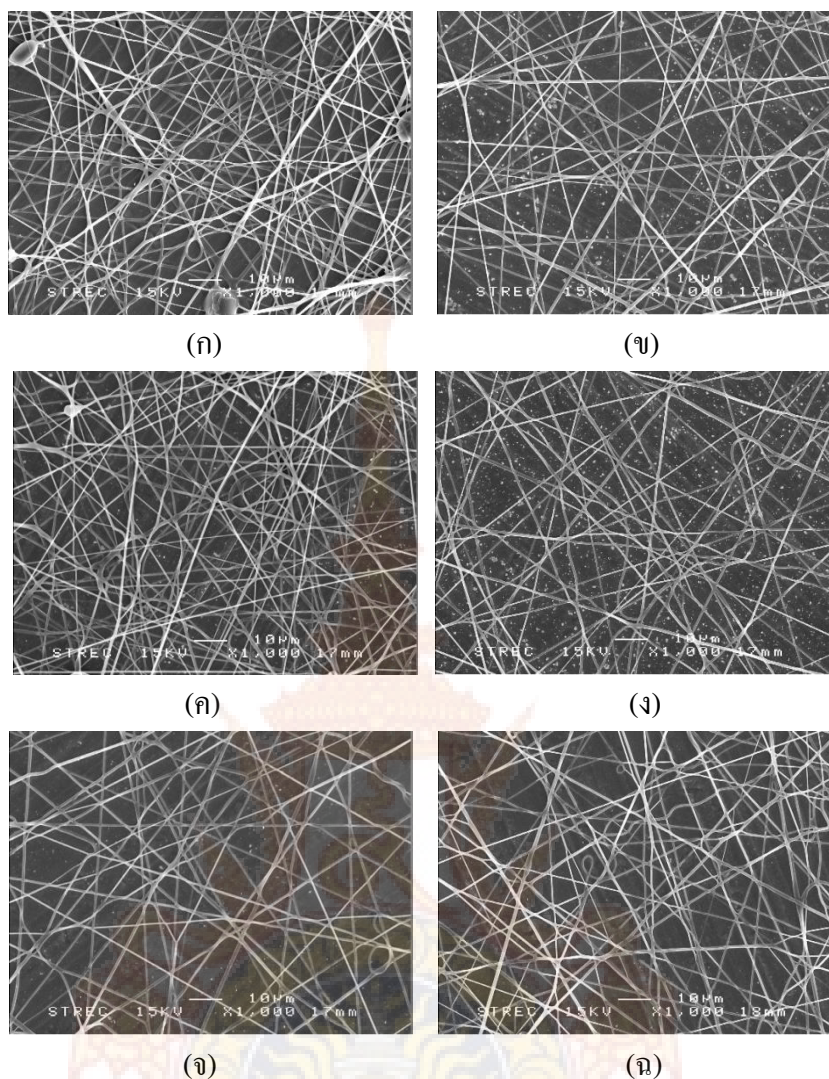
ภาพที่ 4.12 สัณฐานวิทยาของเส้นใยพอลิยูรีเทนผสมชิริซิน 0.03 กรัม เมื่อใช้อัตราการไหลต่างกัน (ก) 5.0 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง (ข) 5.4 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง (ค) 5.8 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง (ง) 6.2 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง (จ) 6.6 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง (ฉ) 7.0 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง



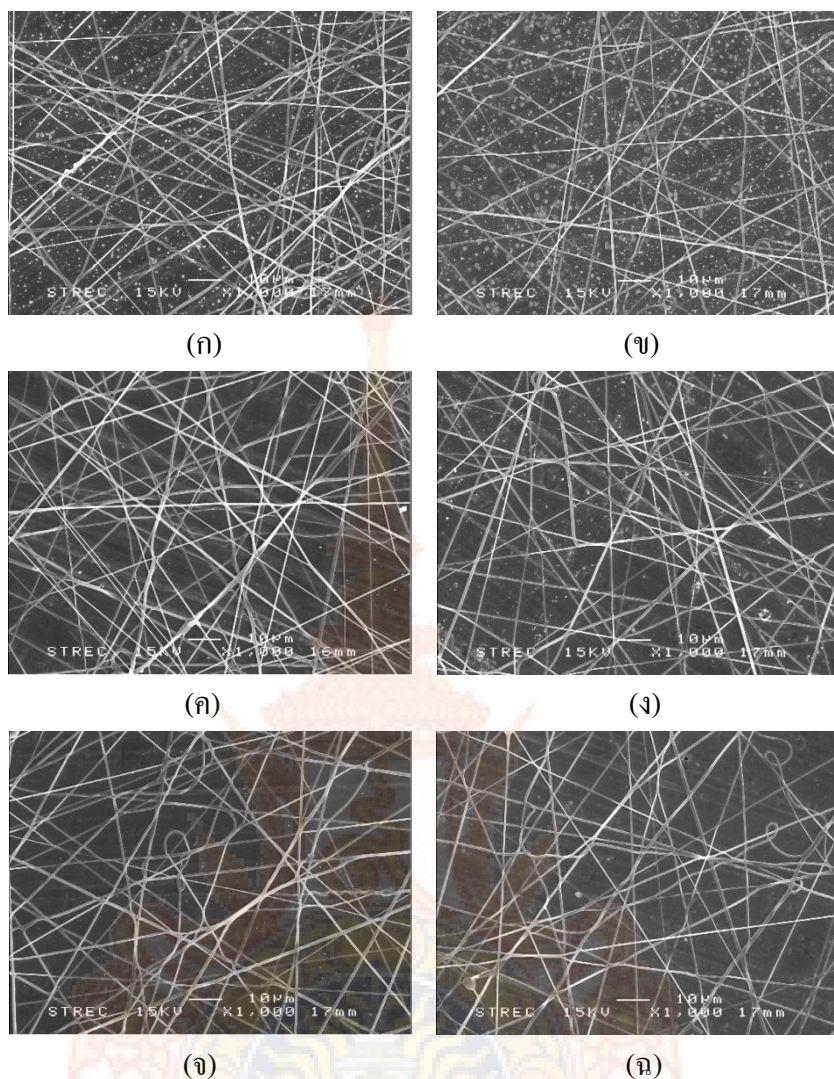
ภาพที่ 4.13 สัณฐานวิทยาของเส้นใยพอลิยูรีเทนผสมชิริซิน 0.07 กรัม เมื่อใช้อัตราการไหลต่างกัน
 (ก) 5.0 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง (ข) 5.4 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง (ค) 5.8 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง (ง) 6.2 มิลลิลิตร
 ต่อชั่วโมง (จ) 6.6 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง (ฉ) 7.0 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง



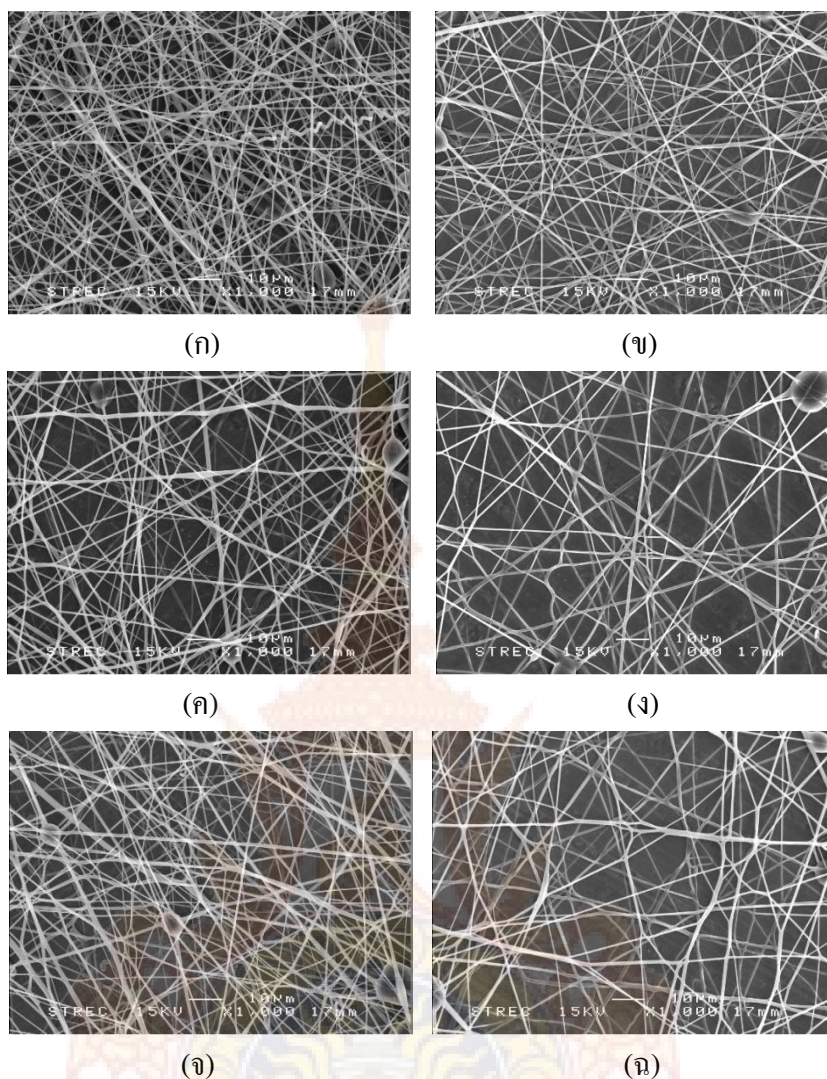
ภาพที่ 4.14 สัณฐานวิทยาของเส้นใยพอลิยูรีเทนผสมชิริซิน 0.11 กรัม เมื่อใช้อัตราการไหลต่างกัน
 (ก) 5.0 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง (ข) 5.4 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง (ค) 5.8 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง (ง) 6.2 มิลลิลิตร
 ต่อชั่วโมง (จ) 6.6 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง (ฉ) 7.0 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง



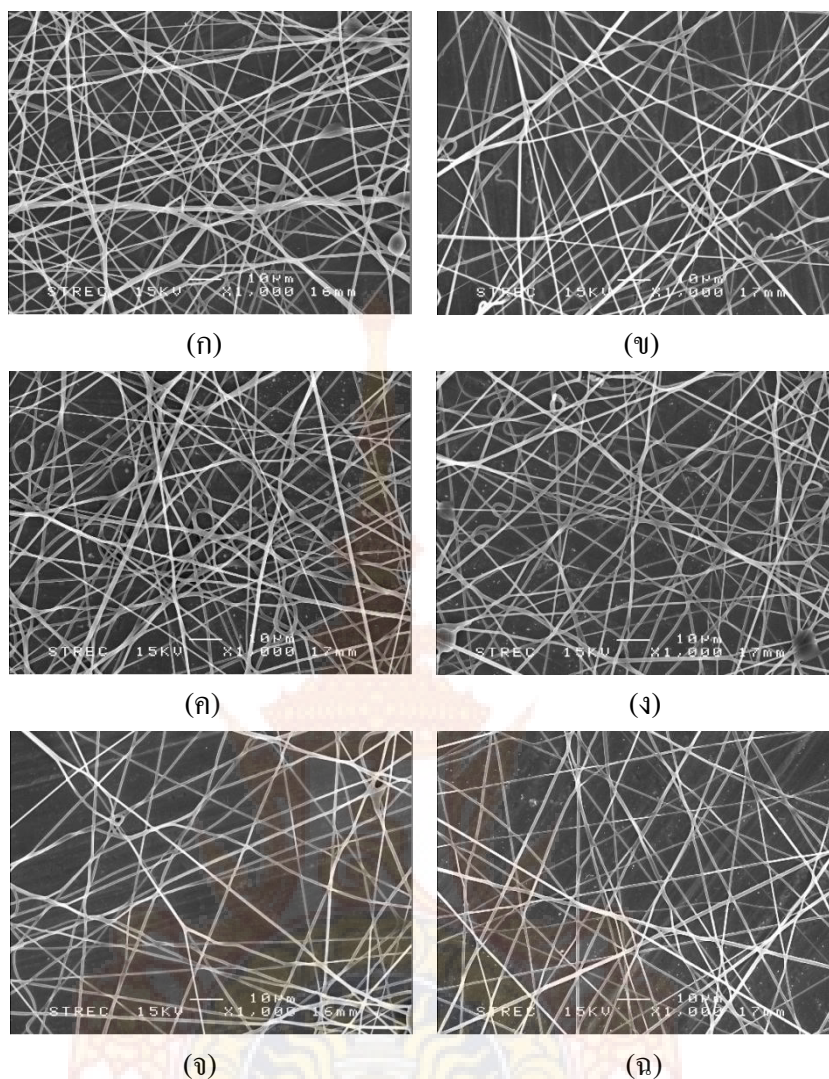
ภาพที่ 4.15 สัณฐานวิทยาของเส้นใยพอลิยูรีเทนผสมชิริซิน 0.15 กรัม เมื่อใช้อัตราการไหลต่างกัน (ก) 5.0 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง (ข) 5.4 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง (ค) 5.8 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง (ง) 6.2 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง (จ) 6.6 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง (ฉ) 7.0 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง



ภาพที่ 4.16 สัณฐานวิทยาของเส้นใยพอลิยูรีเทนผสมชิริซิน 0.19 กรัม เมื่อใช้อัตราการไหลต่างกัน (ก) 5.0 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง (ข) 5.4 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง (ค) 5.8 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง (ง) 6.2 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง (จ) 6.6 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง (ฉ) 7.0 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง



ภาพที่ 4.17 สัณฐานวิทยาของเส้นใยพอลิยูรีเทนผสมชิริซิน 0.23 กรัม เมื่อใช้อัตราการไหลต่างกัน (ก) 5.0 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง (ข) 5.4 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง (ค) 5.8 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง (ง) 6.2 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง (จ) 6.6 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง (ฉ) 7.0 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง



ภาพที่ 4.18 สัณฐานวิทยาของเส้นใยพอลิยูรีเทนผสมชิริซิน 0.27 กรัม เมื่อใช้อัตราการไหลต่างกัน (ก) 5.0 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง (ข) 5.4 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง (ค) 5.8 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง (ง) 6.2 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง (จ) 6.6 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง (ฉ) 7.0 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง

ตารางที่ 4.5 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยเมื่อใช้ปริมาณซีรีซินต่างกัน เมื่อใช้สารละลายพอลิยูรีเทนความเข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ปริมาณ 5 กรัม

ปริมาณซีรีซิน (กรัม)	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย (ไมโครเมตร)					
	อัตราการไหล (มิลลิลิตรต่อชั่วโมง)					
	5.0	5.4	5.8	6.2	6.6	7.0
0	0.74 ± 0.13	0.75 ± 0.14	0.87 ± 0.12	0.79 ± 0.22	0.91 ± 0.16	1.04 ± 0.17
0.03	0.61 ± 0.11	0.62 ± 0.11	0.60 ± 0.11	0.59 ± 0.13	0.64 ± 0.14	0.70 ± 0.12
0.07	0.71 ± 0.18	0.77 ± 0.18	0.72 ± 0.17	0.69 ± 0.18	0.82 ± 0.21	0.68 ± 0.14
0.11	0.67 ± 0.16	0.53 ± 0.15	0.73 ± 0.13	0.57 ± 0.12	0.54 ± 0.18	0.53 ± 0.17
0.15	0.57 ± 0.16	0.58 ± 0.13	0.51 ± 0.13	0.56 ± 0.13	0.70 ± 0.14	0.65 ± 0.17
0.19	0.54 ± 0.15	0.52 ± 0.14	0.54 ± 0.16	0.55 ± 0.15	0.64 ± 0.17	0.61 ± 0.16
0.23	0.62 ± 0.17	0.54 ± 0.18	0.61 ± 0.23	0.66 ± 0.16	0.61 ± 0.24	0.69 ± 0.22
0.27	0.70 ± 0.19	0.74 ± 0.18	0.73 ± 0.21	0.70 ± 0.18	0.76 ± 0.15	0.74 ± 0.22

จากผลการทดลองในภาพที่ 4.11-4.18 และตารางที่ 4.5 พบว่า โดยรวมแล้วขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อใช้อัตราการไหลของสารละลายมากขึ้น เนื่องจากอัตราการไหลของสารละลาย คือ ปริมาณของสารละลายที่ไหลออกจากหัวเข็มสู่ตัวสุรรองรับเส้นใย เมื่อใช้อัตราการไหลสูงขึ้น แสดงว่าปริมาณสารละลายที่ออกจากหัวเข็มมีปริมาณมากขึ้น จึงส่งผลให้เส้นใยที่ปั่นได้มีขนาดใหญ่ขึ้น และเมื่อเติมซีรีซินลงไปในสารละลายพอลิยูรีเทนเพื่อปั่นเป็นเส้นใยพบว่า ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยมีแนวโน้มลดลง เมื่อเทียบกับสารละลายพอลิยูรีเทนที่ไม่มีซีรีซิน ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากซีรีซินประกอบด้วยกรดอะมิโนถึง 18 ชนิด ซึ่งส่วนใหญ่มีหมู่มีขั้ว เช่น หมู่ไฮดรอกซิล คาร์บอนิล และหมู่อะมิโน และประมาณหนึ่งในสามของกรดอะมิโนเหล่านี้คือ ซีรีน (Serine) (Zhang et al 2012: 337-347) ดังนั้นเมื่ออนุภาคซีรีซินกระจายตัวในสารละลายพอลิยูรีเทนจึงทำให้สายเจตมีค่าการนำไฟฟ้าที่ดีขึ้น ส่งผลให้เส้นใยมีขนาดเล็กลง

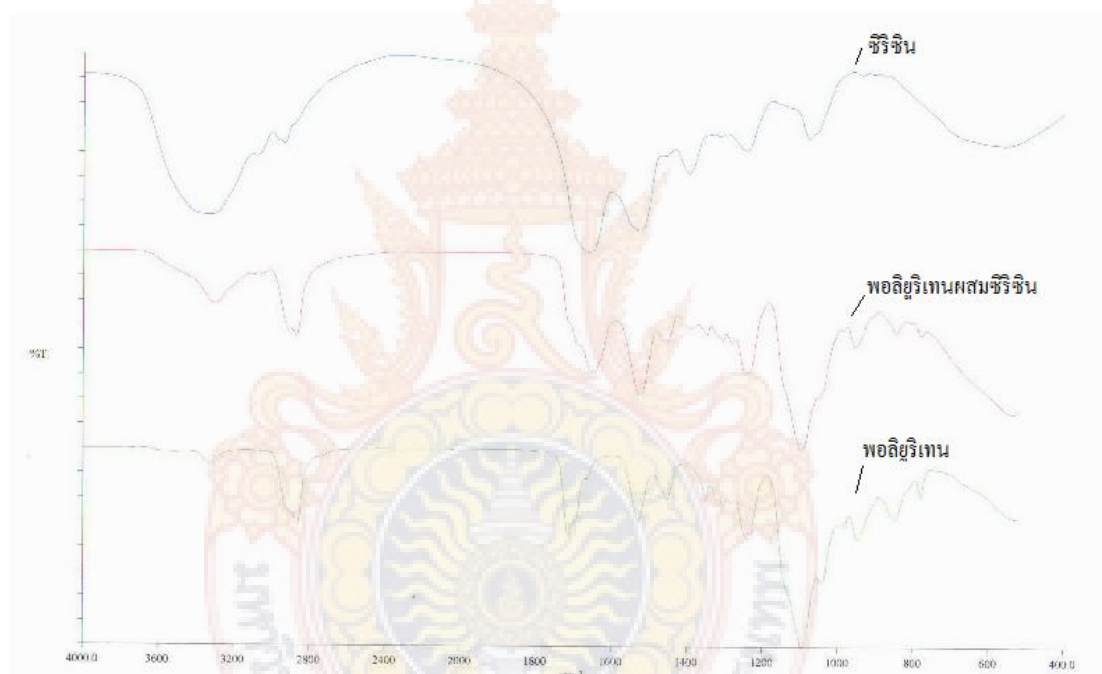
นอกจากนี้การเติมซีรีซินลงไปในสารละลายพอลิยูรีเทนมากขึ้น ขนาดของเส้นใยที่ปั่นได้ยังมีขนาดเล็กลง (ปริมาณซีรีซินตั้งแต่ 0.03 ถึง 0.19 กรัมในสารละลายพอลิยูรีเทน 5 กรัม) อย่างไรก็ตามเมื่อใช้ปริมาณซีรีซินมากกว่า 0.19 กรัม เส้นใยที่ปั่นได้มีขนาดใหญ่ขึ้นเล็กน้อย (ตารางที่ 4.5) และเส้นใยที่ปั่นได้มีหยดของสารละลายร่วมด้วย (ภาพที่ 4.17-4.18)

4.6 การตรวจสอบแผ่นอิเล็กโตรสปีนพอลิยูรีเทนผสมชิริชิน

วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของแผ่นอิเล็กโตรสปีนโดยใช้เครื่องฟูรีเออร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (FTIR) และการกระจายตัวของชิริชินในเส้นใยโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission electron microscope, TEM) เพื่อเป็นการยืนยันว่ามีชิริชินอยู่ในเส้นใยที่ปั่นได้จริง

4.6.1 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของแผ่นอิเล็กโตรสปีน

นำแผ่นอิเล็กโตรสปีนที่ปั่นได้มาวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันโดยใช้เครื่องฟูรีเออร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (FTIR) ผลการทดลองแสดงในภาพที่ 4.19



ภาพที่ 4.19 FTIR สเปกตรัมของเส้นใยพอลิยูรีเทน ชิริชิน และพอลิยูรีเทนผสมชิริชิน

ชิริชินประกอบด้วยโครงสร้างแบบเกลียวที่ไม่มีระเบียบ (Random coil) และโครงสร้างแผ่นบีตา (β -sheets) ซึ่งแต่ละโครงสร้างแสดงถึงส่วนที่เป็นอสัณฐาน (Amorphous) และส่วนที่เป็นผลึก (Crystalline) ตามลำดับ (Teramoto 2006: 6-8) โดยลักษณะโครงสร้างแบบเกลียวที่ไม่มีระเบียบ (Random coil) แสดงพีกที่ตำแหน่งเลขคลื่น (Wave number) เท่ากับ 1658 cm^{-1} ใน amide I 1540 cm^{-1} ใน amide II และ 1240 cm^{-1} ใน amide III ส่วนโครงสร้างแบบบีตา แสดงพีกที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1627 cm^{-1} 1522 cm^{-1} และ 1234 cm^{-1} ใน amide I amide II และ amide III ตามลำดับ (Um et al. 2003: 203-213; Dash et al. 2009: 321) จากผลของ FTIR (ภาพที่ 4.19) พบว่าสเปกตรัมของชิริชิน

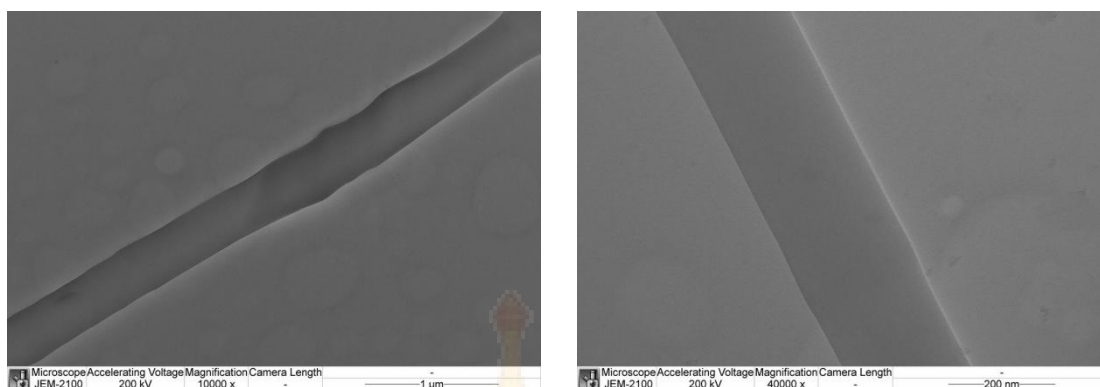
ในการทดลองนี้ มีพีกหลัก คือ amide I (1658 cm^{-1}) amide II (1530 cm^{-1}) และ amide III (1240 cm^{-1}) แสดงว่าซิริชินที่นำมาใช้นี้มีโครงสร้างแบบเกลียวที่ไม่มีระเบียบซึ่งเป็นโครงสร้างแบบอสัณฐานที่มีสมบัติการละลายน้ำที่ดีกว่าโครงสร้างแผ่นบิดา

FTIR สเปกตรัมของพอลิยูรีเทน แสดงพีกที่ตำแหน่งเลขคลื่น 3324 cm^{-1} (NH stretching) 2947 และ 2861 cm^{-1} (CH symmetric และ asymmetric stretching vibration ของหมู่ CH_2) ตำแหน่งเลขคลื่น 1714 และ 1664 cm^{-1} ที่แสดงถึงพันธะคาร์บอนิล (C=O bond) ตำแหน่งเลขคลื่น 1527 cm^{-1} (NH deformations) ตำแหน่งเลขคลื่น 1450 cm^{-1} (CH_2 bending vibration) และตำแหน่งเลขคลื่น 1348 cm^{-1} (CH_2 bending vibration) ซึ่งตำแหน่งพีกที่เลขคลื่น 3324 1714 และ 1450 cm^{-1} แสดงถึงพันธะยูรีเทน (NHCOO) (Zia et al. 2008: 149-158)

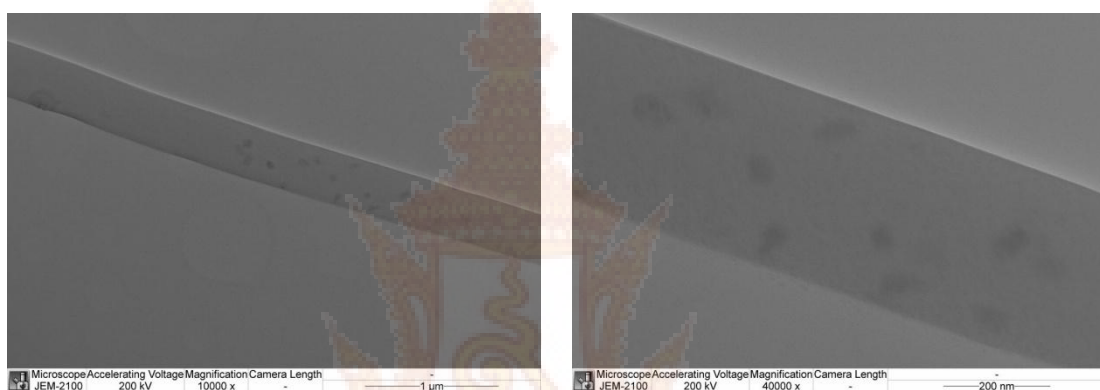
FTIR สเปกตรัมของพอลิยูรีเทนผสมซิริชินแสดงตำแหน่งเลขคลื่นที่ตำแหน่งเดียวกับสเปกตรัมจากพอลิยูรีเทน คือ ที่ตำแหน่งเลขคลื่น 2911 และ 2869 cm^{-1} (CH symmetric และ asymmetric stretching vibration ของหมู่ CH_2) ตำแหน่งเลขคลื่น 1527 cm^{-1} (NH deformations) และสเปกตรัมที่ตำแหน่งเลขคลื่นที่ 1392 cm^{-1} แสดงถึงกรดคาร์บอกซิลิก (Carboxylic acid) (Benning et al. 2003: online) ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันของซิริชินเท่านั้น นอกจากนี้พีกที่ตำแหน่งช่วงคลื่น $3000\text{-}3700\text{ cm}^{-1}$ แสดงถึง NH และ OH stretching absorption พีกจากสเปกตรัมของพอลิยูรีเทนที่ตำแหน่งเลขคลื่น 3324 cm^{-1} มีลักษณะแหลมเล็กซึ่งแสดงถึง NH stretching ส่วนพีกจากสเปกตรัมของซิริชินมีลักษณะกว้างซึ่งแสดงถึง OH stretching ส่วนพีกจากสเปกตรัมของพอลิยูรีเทนผสมซิริชินแสดงพีกมีลักษณะแหลมเล็กที่ตำแหน่ง 3300 cm^{-1} (NH stretching) ซึ่งแสดงถึงพอลิยูรีเทน และมีลักษณะพีกฐานกว้าง (OH stretching) ซึ่งแสดงถึงซิริชิน ดังนั้นผลการทดลองนี้จึงเป็นการยืนยันว่ามีซิริชินอยู่ในเส้นใยพอลิยูรีเทนที่ปั่นจากกระบวนการอิเล็กโตรสปินนิง

4.6.2 การกระจายตัวของซิริชินในเส้นใย

ตรวจสอบการกระจายตัวของผงไหมซิริชินในเส้นใยพอลิยูรีเทนที่ปั่นได้ โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน ผลการทดลองแสดงในภาพที่ 4.20



(ก)



(ข)



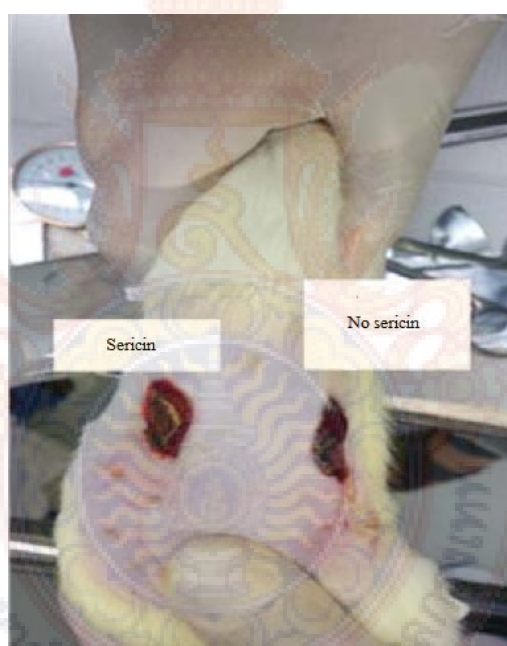
(ค)

ภาพที่ 4.20 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านของเส้นใยพอลิยูรีเทนและพอลิยูรีเทนผสมซีรีซินที่กำลังขยาย 10,000 และ 40,000 เท่า (ก) เส้นใยพอลิยูรีเทน (ข) เส้นใยพอลิยูรีเทนผสมซีรีซิน 0.11 กรัม (ค) เส้นใยพอลิยูรีเทนผสมซีรีซิน 0.23 กรัม

จากผลการทดลองในภาพที่ 4.20 พบว่า อนุภาคของซีรีซินกระจายตัวในเส้นใยพอลิยูรีเทนอย่างสม่ำเสมอ และเมื่อผสมซีรีซินในสารละลายพอลิยูรีเทนมากขึ้น ปริมาณของซีรีซินที่พบในเส้นใยก็มากขึ้นด้วย

4.7 ประสิทธิภาพของแผ่นปิดแผลต่อการหายของแผล

ตัดชิ้นเนื้อในสัตว์ทดลองขนาดกว้าง 1.5 เซนติเมตร ยาว 1.5 เซนติเมตร คิดเป็นพื้นที่ 2.25 ตารางเซนติเมตร และทดสอบประสิทธิภาพของแผ่นปิดแผลต่อการหายของแผล โดยแผ่นปิดแผลที่ใช้ในการทดสอบแบ่งเป็น 3 กลุ่ม คือ กลุ่มแผลที่ถูกปิดด้วยผ้าก๊อซ (Sham) กลุ่มแผลที่ถูกปิดด้วยแผ่นปิดแผลพอลิยูรีเทนที่ไม่ผสมซีรีซิน (No sericin) และกลุ่มแผลที่ถูกปิดด้วยแผ่นปิดแผลพอลิยูรีเทนผสมซีรีซิน (Sericin) ผลการทดลองแสดงในภาพที่ 4.21-4.26 และตารางที่ 4.6



ภาพที่ 4.21 การหายของแผลที่ปิดด้วยแผ่นปิดแผล (ซ้าย) แผ่นปิดแผลพอลิยูรีเทนผสมซีรีซิน (ขวา) แผ่นปิดแผลพอลิยูรีเทนที่ไม่ผสมซีรีซิน ณ เวลา 2 วัน



ภาพที่ 4.22 การหายของแผลที่ปิดด้วยแผ่นปิดแผล (ผ้าก๊อซ) ณ เวลา 7 วัน



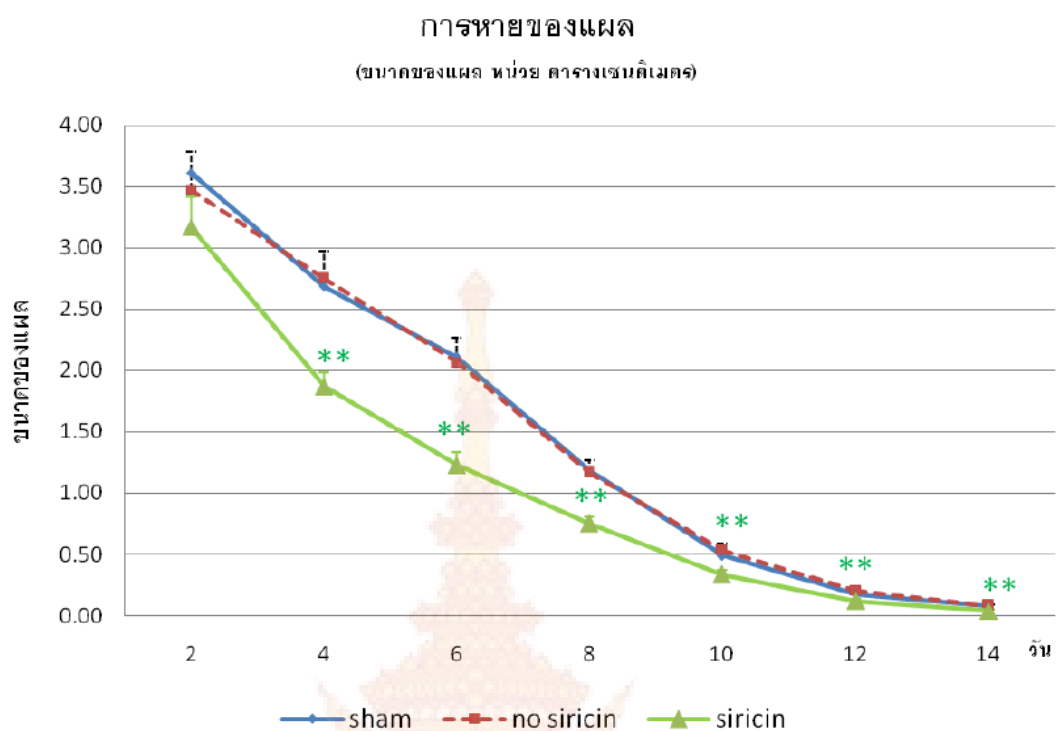
ภาพที่ 4.23 การหายของแผลที่ปิดด้วยแผ่นปิดแผล (แผลด้านซ้ายของลำตัว) แผลที่ปิดทับด้วยแผ่นปิดแผลพอลิยูรีเทนผสมชิริชิน (แผลด้านขวาของลำตัว) แผลที่ปิดทับด้วยแผ่นปิดแผลพอลิยูรีเทนไม่ผสมชิริชิน ณ เวลา 7 วัน



ภาพที่ 4.24 การหายของแผลที่ปิดด้วยแผ่นปิดแผล (ผ้าก๊อซ) ณ เวลา 14 วัน



ภาพที่ 4.25 การหายของแผลที่ปิดด้วยแผ่นปิดแผล (แผลด้านซ้ายของลำตัว) แผลที่ปิดทับด้วยแผ่นปิดแผลพอลิยูรีเทนผสมชิริชิน (แผลด้านขวาของลำตัว) แผลที่ปิดทับด้วยแผ่นปิดแผลพอลิยูรีเทนไม่ผสมชิริชิน ณ เวลา 14 วัน



เครื่องหมาย ** แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญระหว่างกลุ่ม Sericin เทียบกับกลุ่ม Sham ที่ระดับความเชื่อมั่น $p \leq 0.01$

ภาพที่ 4.26 การหายของแผล

ตารางที่ 4.6 การหายของแผล

จำนวน (วัน)	ขนาดของแผล (ตารางเซนติเมตร)		
	Sham (n=8)	No sericin (n=14)	Sericin (n=14)
2	3.61 ± 0.552	3.47 ± 0.317	3.17 ± 0.251
4	2.69 ± 0.274	2.75 ± 0.227	1.87 ± 0.116
6	2.11 ± 0.270	2.07 ± 0.194	1.23 ± 0.109
8	1.18 ± 0.103	1.17 ± 0.098	0.75 ± 0.056
10	0.49 ± 0.097	0.53 ± 0.059	0.34 ± 0.038
12	0.18 ± 0.032	0.21 ± 0.018	0.12 ± 0.014
14	0.08 ± 0.009	0.08 ± 0.007	0.04 ± 0.007

จากผลการทดลองในภาพที่ 4.21-4.26 และตารางที่ 4.6 พบว่า ในระยะแรกขนาดของแผลจะกว้างขึ้น กล่าวคือ ภายหลังการตัดชั้นเนื้อที่ผิวหนังเป็นเวลา 2 วัน หนูทุกกลุ่มมีขนาดของแผลมากกว่า 2.25 ตารางเซนติเมตร ทั้งนี้เนื่องจากกระบวนการอักเสบของแผล ทำให้เกิดการคั่งรัง้ แผลจึงมีขนาดใหญ่ขึ้น โดยกลุ่มแผลที่ถูกปิดด้วยผ้าก๊อช (Sham) มีขนาดของแผลใหญ่ที่สุด คือ มีขนาด 3.61 ± 0.552 ตารางเซนติเมตร และกลุ่มแผลที่ถูกปิดด้วยแผ่นปิดแผลพอลิยูรีเทนผสมซีรีซิน (Sericin) มีขนาดของแผลเล็กที่สุด คือขนาด 3.17 ± 0.251 ตารางเซนติเมตร อย่างไรก็ตามขนาดของแผลแต่ละกลุ่มในระยะเวลา 2 วันหลังการตัดชั้นเนื้อ ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ

ในระยะตั้งแต่ 4-8 วัน ขนาดของแผลในกลุ่มที่ถูกปิดด้วยแผ่นปิดแผลพอลิยูรีเทนผสมซีรีซินจะลดขนาดลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งมีความแตกต่างจากแผลที่ถูกปิดด้วยผ้าก๊อช อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ขณะที่กลุ่มแผลที่ถูกปิดด้วยแผ่นปิดแผลจากพอลิยูรีเทนไม่ผสมซีรีซินยังคงมีขนาดของแผลใกล้เคียงกับขนาดของแผลที่ถูกปิดด้วยผ้าก๊อช

ขนาดแผลในกลุ่มแผลที่ถูกปิดด้วยผ้าก๊อชและแผลที่ถูกปิดด้วยแผ่นปิดแผลจากพอลิยูรีเทนผสมซีรีซินมีความแตกต่างกันอย่างมากในระยะแรกของ Proliferation phase และความแตกต่างจะค่อย ๆ ลดลงภายหลังการตัดชั้นเนื้อวันที่ 8 ซึ่งเป็นระยะท้ายของ Proliferation phase แสดงให้เห็นว่า ซีรีซินช่วยให้การหายของแผลเร็วขึ้นอันเป็นผลมาจากระยะ Inflammatory phase กับระยะต้นของ Proliferation phase ซึ่งอาจเกี่ยวเนื่องกับการออกฤทธิ์เพื่อควบคุมการติดเชื้อหรือลดการอักเสบของแผล ภายหลัง 14 วันหลังจากการตัดชั้นเนื้อของทุกกลุ่ม แผลปิดสนิทเหลือเป็นเพียงรอยเล็ก ๆ เท่านั้น

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสมบัติของผ้าไม้อัดทอจากพอลิยูรีเทนผสมชิริชิน ซึ่งสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

- 1) ความเข้มข้นของสารละลาย ศักย์ไฟฟ้า อัตราการไหลและระยะห่างจากหัวเข็มถึงวัสดุรองรับเส้นใยมีผลต่อต้นทุนวิทยาและขนาดของเส้นใยที่ปั่นได้
- 2) ความเข้มข้นของสารละลายพอลิยูรีเทนต่ำที่สุดที่สามารถปั่นเป็นเส้นใยได้โดยไม่มีหยดของสารละลายผสมคือที่ความเข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร
- 3) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกลางของเส้นใยพอลิยูรีเทนผสมชิริชินมีแนวโน้มลดลง เมื่อเทียบกับสารละลายพอลิยูรีเทนที่ไม่ผสมชิริชิน
- 4) วัสดุพอลิยูรีเทนที่ใช้ทำแผ่นปิดแผ่นนั้นไม่ได้มีผลต่อการการหายของแผล แต่การผสมชิริชินลงในวัสดุปิดแผลช่วยให้การหายของแผลเร็วขึ้น โดยมีผลตั้งแต่ระยะแรกของกระบวนการหายของแผล



บรรณานุกรม

การจัดเสวนา คุณกัน...ฉันทวิทย์ กลุ่มงานประชาสัมพันธ์ สำนักงานปลัดกระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ม.ป.ป. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: <http://www.most.go.th/scitalk> (วันที่สืบค้น 7 กันยายน 2553)

การทำแผล ม.ป.ป. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก:

<http://student.mahidol.ac.th/~u4809033/instrument.html> (วันที่สืบค้น 23 ตุลาคม 2555)

กระบวนการหายของแผล ม.ป.ป. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก:

<http://www.healthcarethai.com/%E0%B8%81%E0%B8%A3%E0%B8%B0%E0%B8%9A%E0%B8%A7%E0%B8%99%E0%B8%81%E0%B8%B2%E0%B8%A3%E0%B8%AB%E0%B8%B2%E0%B8%A2%E0%B8%82%E0%B8%AD%E0%B8%87%E0%B9%81%E0%B8%9C%E0%B8%A5wound-healing-process/> (วันที่สืบค้น 20 ตุลาคม 2555)

บาดแผล ม.ป.ป. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: <http://science.srru.ac.th/org/sci->

[elearning/courseonline/4072303/pdf_9.pdf](http://science.srru.ac.th/org/sci-elearning/courseonline/4072303/pdf_9.pdf) (วันที่สืบค้น 20 ตุลาคม 2555)

วิจิตร กุศลภักดิ์ 2546. การพยาบาลผู้ป่วยที่มีบาดแผล. พิมพ์ครั้งที่ 3 กรุงเทพฯ โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Akatsu, Hiroyuki., Hoyer, Ronald., and Ramachandran, Ravikumar. 1999. "Method to Minimize Watermarks on Silicon Substrates" US Patent No 5,932,493. August, 3.

Benning, L.G.; Phoenix, V.R.; Yee, N.; and Tobin, M.J. 2003. [Online]. Available:

http://homepages.see.leeds.ac.uk/~earlgb/Publications/Cyano_IR1.pdf (Retrieved May 30, 2013).

Brown, C.D.; Zitelli, J.A. *Otolaryngol. Clin. North Am.* **1995**, 28(5), 1081-1091.

Cho, Y.S.; Lee, J.W.; Lee, J.S.; Lee, J.H.; Yoon, T.R.; Kuroyanagi, Y.; Park, M.H.; Pyun, D.G.; Kim, H.J. *J. Mater. Sci.-Mater. Med.* **2002**, 13, 861-865.

Choi, J.S.; Lee, S.W.; Jong, L.; Bae, S.; Min, B.C.; Youk, J.H.; and Park, W.H. *Int. J. Biol. Macromol.* **2004**, 34, 249-256.

Dash, B.C.; Mandal, B.B.; and Kundu, S.C. *J. Biotechnol.* **2009**, 144, 321-329.

Doshi, J. and Reneker, D.H. *J. Electrostat.* **1995**, 35, 151-160.

Fong, H.; Chun, I.; and Reneker, D.H. *Polymer.* **1999**, 40, 4585-4592.

- Formhals, Anton. 1934. "Process and apparatus for preparing artificial threads" US Patent No. 1,975,504. October, 2.
- Formhals, Anton. 1939. "Method and apparatus for spinning" US Patent No. 2,160,962. June, 6.
- Frenot, A. and Chronakis, I.S., *Curr. Opin. Colloid In.* **2003**, 8(1), 64-75.
- Gladding, Ernest K. 1939. "Apparatus for the Production of Filaments, Threads, and the Like" US patent No. 2,168,027. December, 7.
- Gunatillake, P.A.; Martin, D.J.; Meijs, G.F.; McCarthy, S.J.; and Adhikari, R. *Aust. J. Chem.* **2003**, 56, 545-557.
- Haghi, A. K. and Akbari, M., *Phys. Status Solidi. A.* **2007**, 204(6), 1830-1834.
- Hansen, L.M.; Smith, D.J.; Reneker, D.H.; and Kataphinan, W. *J. Appl. Polym. Sci.* **2005**, 95(2), 427-434.
- Hiroshima University. n.d. [Online]. Available: http://www.hiroshima-u.ac.jp/en/top/research_HU/researchnow/no18/ (Retrieved May 12, 2012).
- Jeong, E.H.; Yang, J.; Youk, J.H. *Mater. Lett.* **2007**, 61, 3991-3994.
- Kataphinan, W. Ph.D. Dissertation, University of Akron, Akron, OH, 2006.
- Khil, M.S.; Cha, D.I.; Kim, H.Y.; Kim I.S. *J. Biomed. Mater. Res. Part B: Appl. Biomater.* **2003**, 67, 275-279.
- Koshi, A.; Yim, K.; and Shivkumar, S. *Mater. Lett.* **2004**, 58(3-4), 493-497.
- Koyama Laboratory. 2007. "Electrospinning" [online] Available: http://ckpmac7.yz.yamagata-u.ac.jp/E-Page/Project/research/spinning/espining_E.htm (Retrieved March 10, 2011)
- Kuroyanagy, Y. *Trends Biomater. Artif. Organs.* **2001**, 15(1), 4-6.
- Lee, J.S.; Cho, Y.S.; Lee, J.W.; Kim, H.J.; Pyun, D.G.; Park, M.H.; Yoon, T.R.; Lee, H.J.; Ozkaynak, M.U.; Atalay-Oral, C.; Tantekin-Ersolmaz, B.; and Guner, F.S. *Macromol. Symp.* **2005**, 228, 177-184.
- Liu, Y.; He, J.-H.; Yu, J.-Y.; and Zeng H.-M. *Polymer International.* **2008**, 57, 4, 632-636.
- Lubrizol n.d. [Online]. Available: <http://www.lubrizol.com/Medical/Products/default.html> (Retrieved October 20, 2012).
- MacDiarmid, A. G.; Jones, W.E. Jr.; Norris, Gao, J.; Johnson, A.T. Jr.; Pinto, N.J.; Hone, J.; Han, B.; Ko, F.K.; Okuzaki, H.; and Llanguno, M. *Synthetic Met.* **2001**, 119, 27-30.

- Martin, Graham Ernest., Cock, Ian Derek., and Fildes, Francis James Thomas. 1977. "Fibrillar Lining for Prosthetic Device" US Patent No. 4,044,404. August, 30.
- Martin, Graham E., Cockshott, Ian D., and Mcaloon, Kevin T. 1978. "Porous Fluoropolymeric Fibrous Sheet and Method of Manufacture" US Patent No. 4,127,706. November, 28.
- Megelski, S.; Stephens, J.S.; Chase, D.B.; and Robolt, J.F. *Macromolecules*. **2002**, 35, 8456-8466.
- MemPro Ceramics Corporation 2010. "nCATfiber technology" [online] Available: <http://www.ceramicnanofibers.com/technology.html> (Retrieved June 20, 2011)
- Pinchuk, L. *J. Biomater. Sci., Polym. Ed.* **1994**, 6(3), 225-267.
- Puskas, J.; and Chen, Y. *Biomacromolecules*. **2004**, 5(4), 1141-1154.
- Salager, J.L.; Anton, R.E.; Sabatini, D.A.; Harwell, J.H.; Acosta, E.J.; and Tolosa, L.I. *J. Surfactants and Deterg.* **2007**, 8(1), 3-21.
- Subbiah, T.; Bhat, G.S.; Tock, R.W.; Parameswaran, S.; and Ramkumar, S.S. *J. Appl. Polym. Sci.* **2005**, 96(2), 557-569.
- Teramoto, H.; Kakazu, A.; and Asakura, T. *Macromolecules*. **2006**, 39, 6-8.
- Um, I.C.; Kweon, H.Y.; Kwang, G.L.; and Park, Y.H. *Int J. Biol. Macromol.* **2003**, 33, 203-213.
- Wound healing: In depth. 2010. [Online]. Available: http://www.pilonidal.org/aftercare/wound_healing_indepth.php (Retrieved October 30, 2012).
- You, Y.; Lee, S.J.; Min, B.M.; and Park, W.H. *J. Appl. Polym. Sci.* **2006**, 99(3), 1214-1221.
- Zapletalova, T.; Michielsen, S.; Pourdeyhimi, B. *J. Eng. Fibers Fabr.* **2006**, 1(1), 62-72.
- Zhang, Y.Q. *Biotechnol. Adv.* **2002**, 20, 91-100.
- Zhang, X.; Khan, M.R.; Yamamoto, T.; Tsukada, M.; and Morikawa, H. *Int. J. Biol. Macromol.* **2012**, 50, 337-347.
- Zia, K.M.; Barikani, M.; Zuber, M.; Bhatti, I.A.; and Sheikh, M.A. *Carbohydr. Polym.* **2008**, 74(2), 149-158.
- Zong, X.; Kim, K.; Fang, D.; Ran, S.; Hsiao, B.; and Chu, B. *Polymer*. **2002**, 43, 4403-4412.

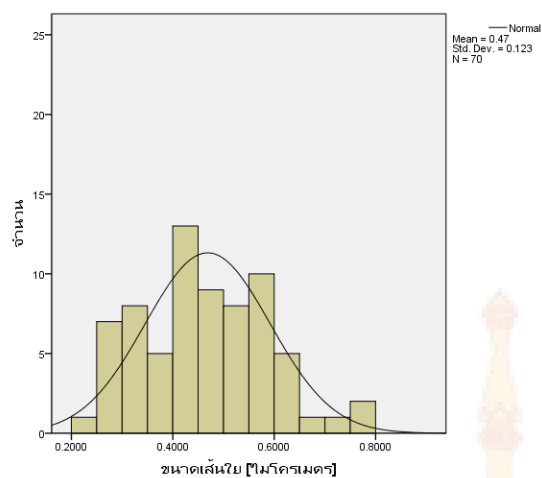
ภาคผนวก



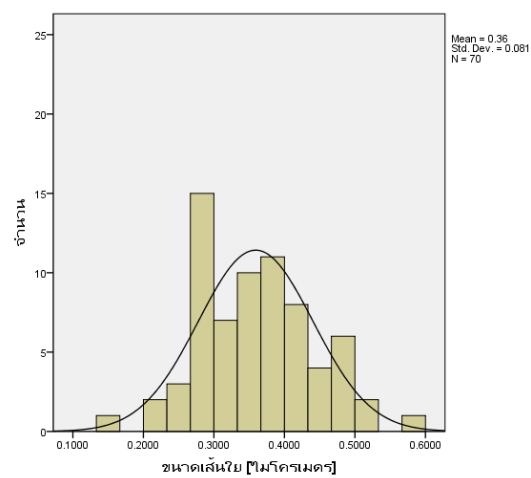
ภาคผนวก ก

อีสโตรแกรมของเส้นใยพอลิยูรีเทนที่ความเข้มข้นต่างกัน

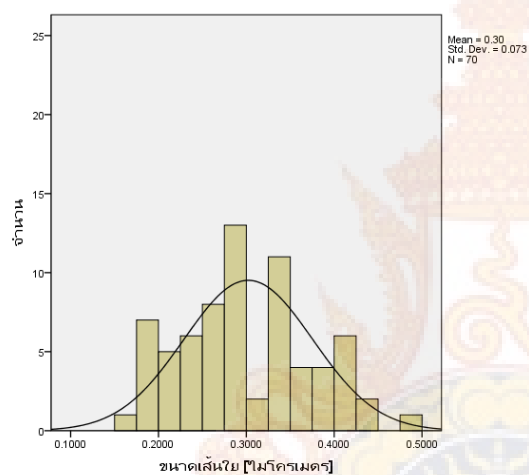




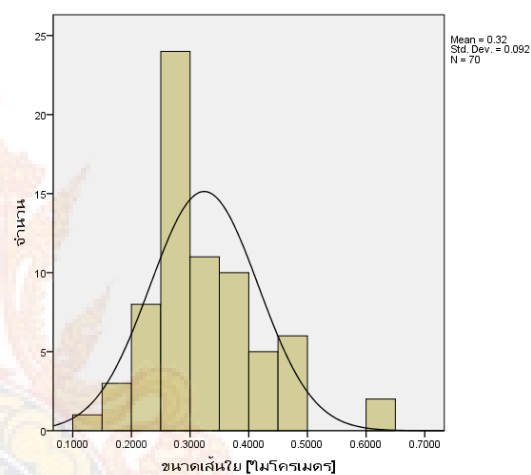
อัตราการไหลที่ 1 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง



อัตราการไหลที่ 3 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง

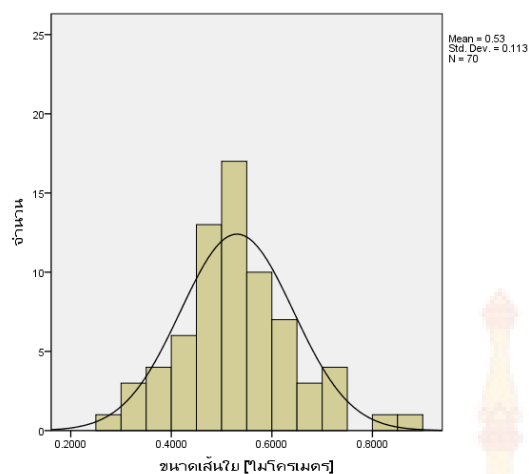


อัตราการไหลที่ 5 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง

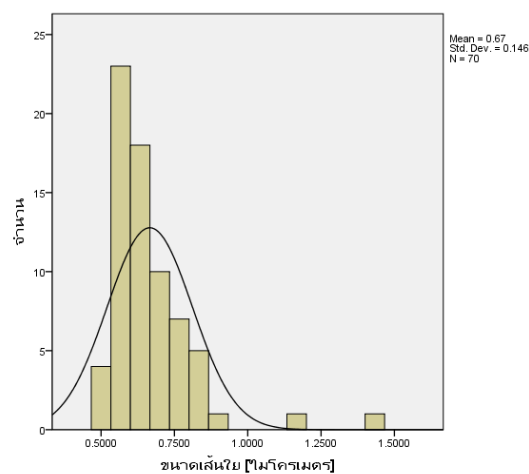


อัตราการไหลที่ 7 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง

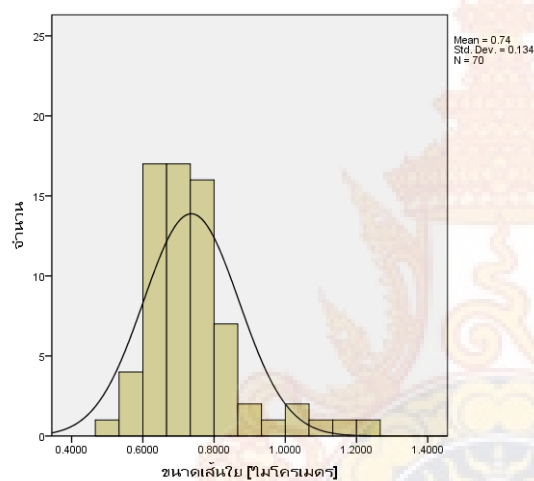
ภาพที่ ก-1 สีสโตรแกรมของเส้นใยพอลิยูรีเทนที่ความเข้มข้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร
ศักย์ไฟฟ้า 15 กิโลโวลต์ ระยะห่างจากหัวเข็มถึงวัสดุรองรับเส้นใย คือ 20 เซนติเมตร



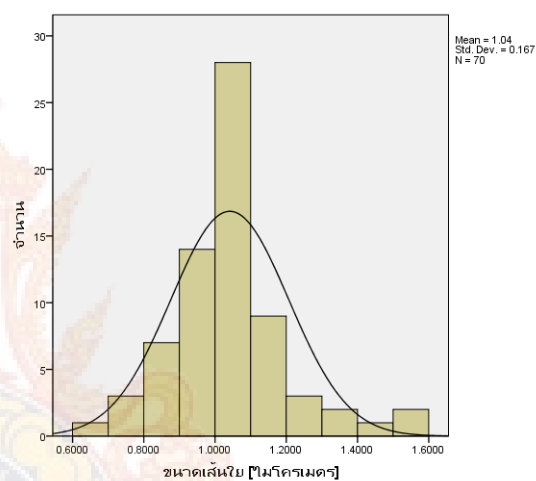
อัตราการไหลที่ 1 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง



อัตราการไหลที่ 3 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง

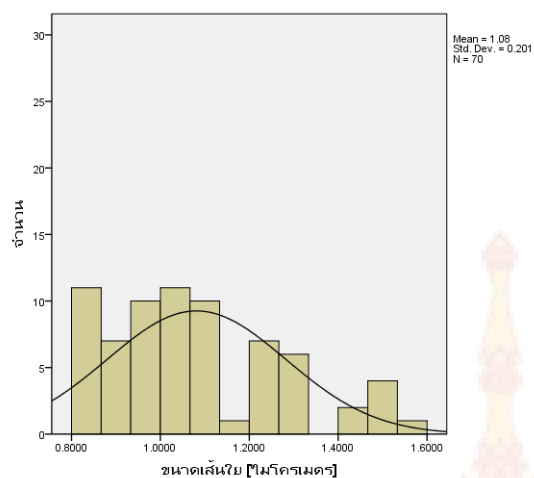


อัตราการไหลที่ 5 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง

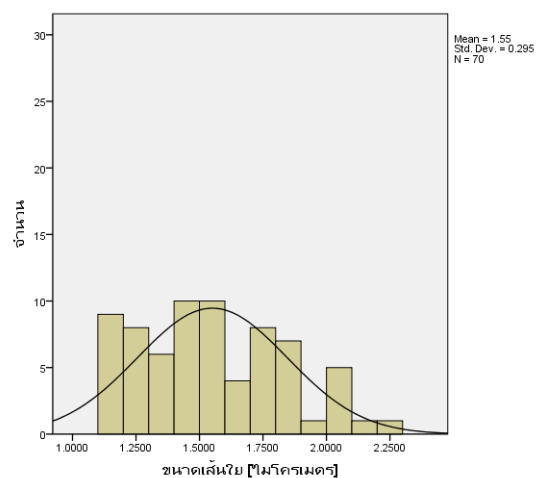


อัตราการไหลที่ 7 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง

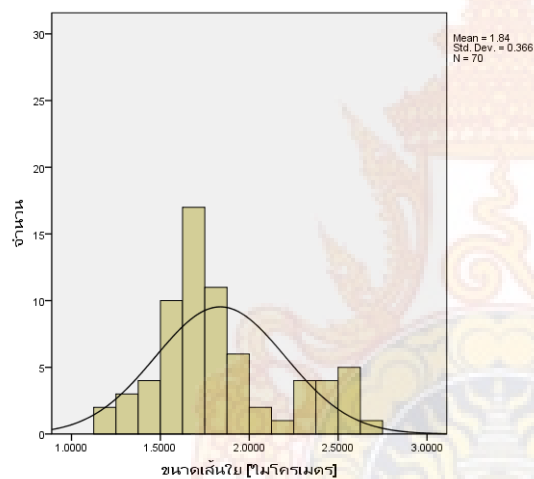
ภาพที่ ก-2 ฮิสโตแกรมของเส้นใยพอลิยูรีเทนที่ความเข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร
ศักย์ไฟฟ้า 15 กิโลโวลต์ ระยะห่างจากหัวเข็มถึงวัสดุรองรับเส้นใย คือ 20 เซนติเมตร



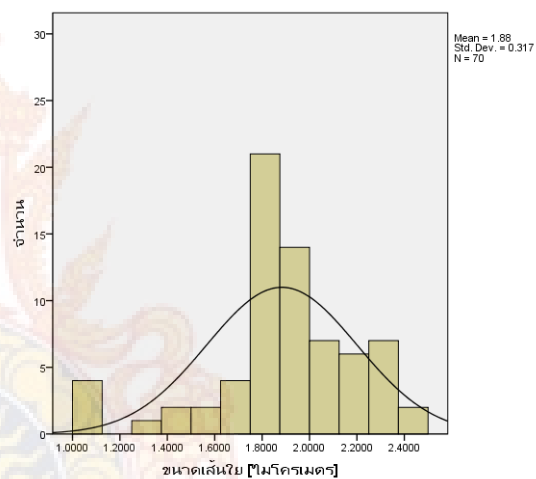
อัตราการไหลที่ 1 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง



อัตราการไหลที่ 3 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง

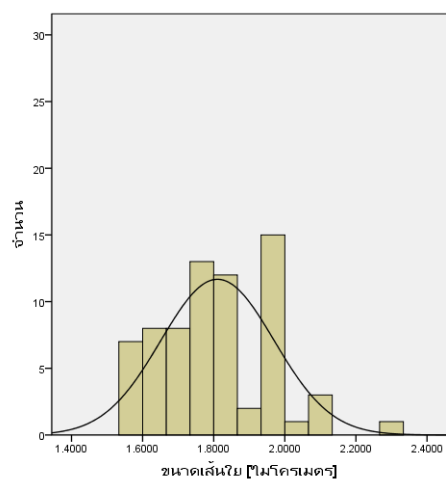


อัตราการไหลที่ 5 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง

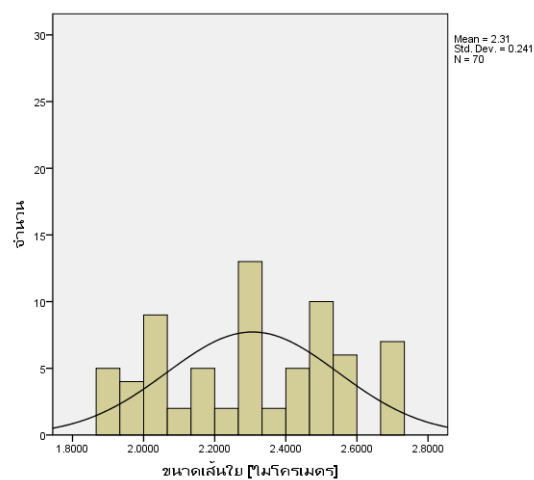


อัตราการไหลที่ 7 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง

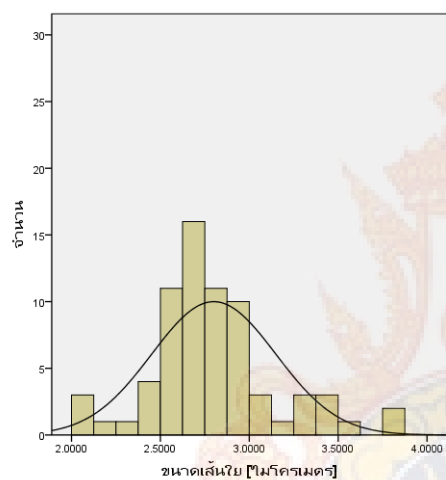
ภาพที่ ก-3 สีสโตรแกรมของเส้นใยพอลิยูรีเทนที่ความเข้มข้นร้อยละ 4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร
ศักย์ไฟฟ้า 15 กิโลโวลต์ ระยะห่างจากหัวเข็มถึงวัสดุรองรับเส้นใย คือ 20 เซนติเมตร



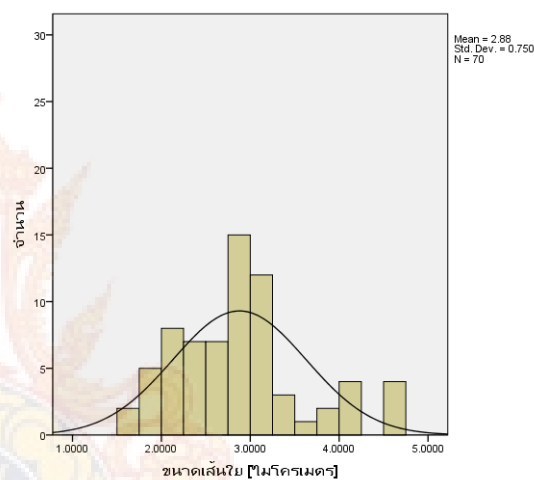
อัตราการไหลที่ 1 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง



อัตราการไหลที่ 3 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง

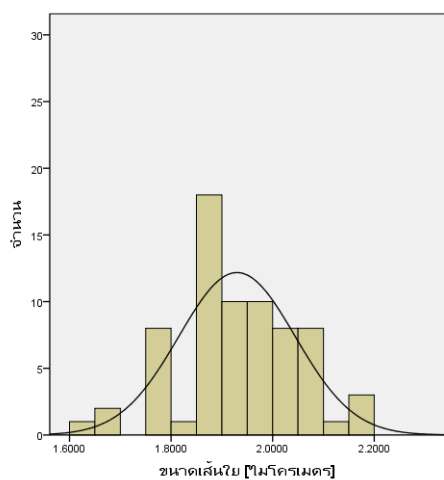


อัตราการไหลที่ 5 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง

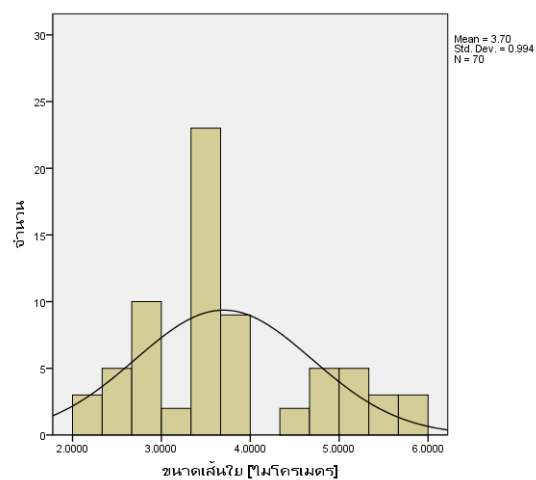


อัตราการไหลที่ 7 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง

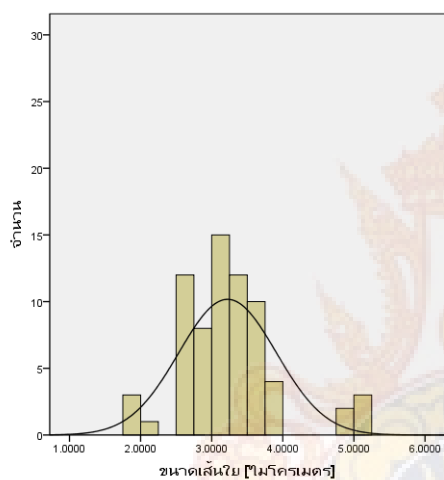
ภาพที่ ก-4 ฮิสโตแกรมของเส้นใยพอลิยูรีเทนที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร
ศักย์ไฟฟ้า 15 กิโลโวลต์ ระยะห่างจากหัวเข็มถึงวัสดุรองรับเส้นใย คือ 20 เซนติเมตร



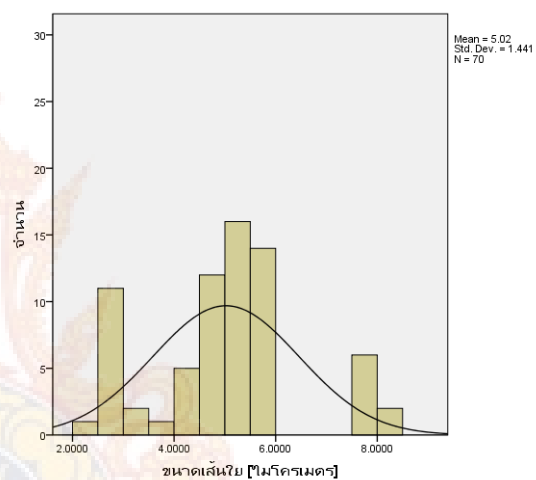
อัตราการไหลที่ 1 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง



อัตราการไหลที่ 3 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง



อัตราการไหลที่ 5 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง

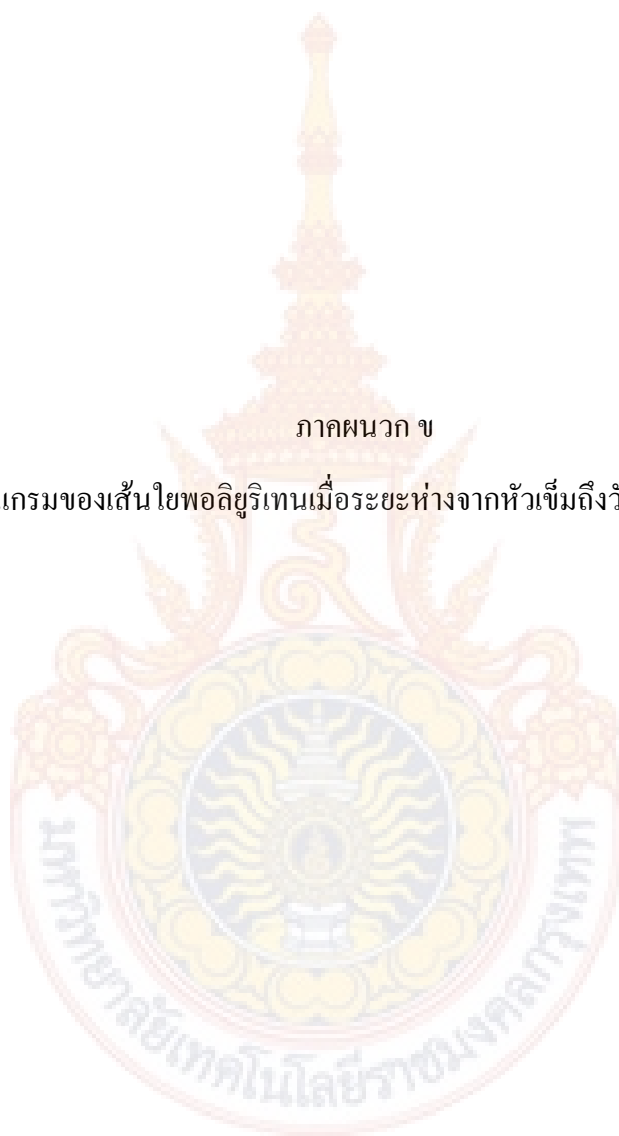


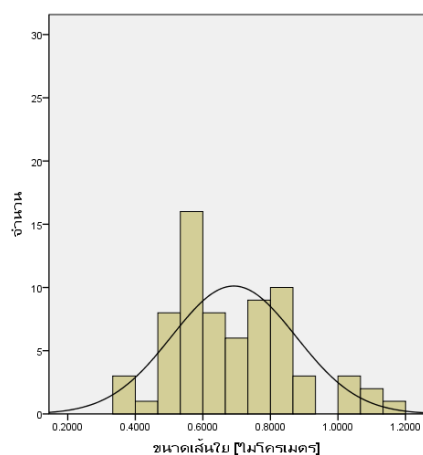
อัตราการไหลที่ 7 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง

ภาพที่ ก-5 ฮิสโตแกรมของเส้นใยพอลิยูรีเทนที่ความเข้มข้นร้อยละ 6 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร
ศักย์ไฟฟ้า 15 กิโลโวลต์ ระยะห่างจากหัวเข็มถึงวัสดุรองรับเส้นใย คือ 20 เซนติเมตร

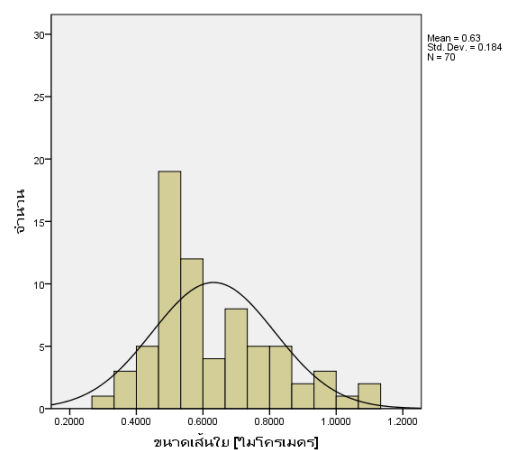
ภาคผนวก ข

อีสโตรแกรมของเส้นใยพอลิยูรีเทนเมื่อระยะห่างจากหัวเข็มถึงวัสดุรองรับต่างกัน

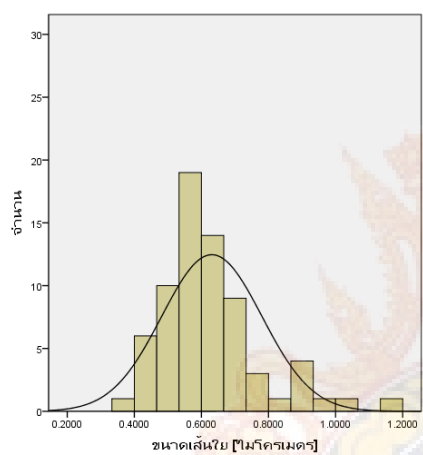




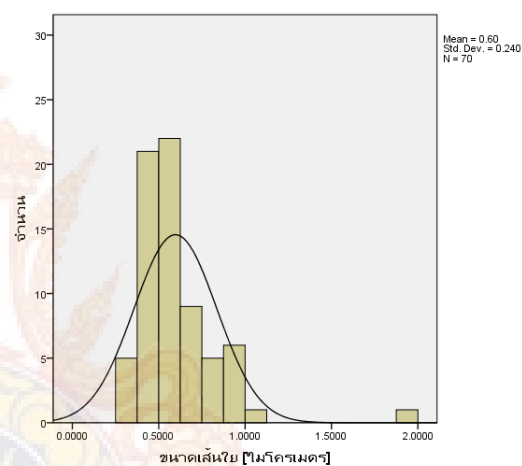
10 เซนติเมตร



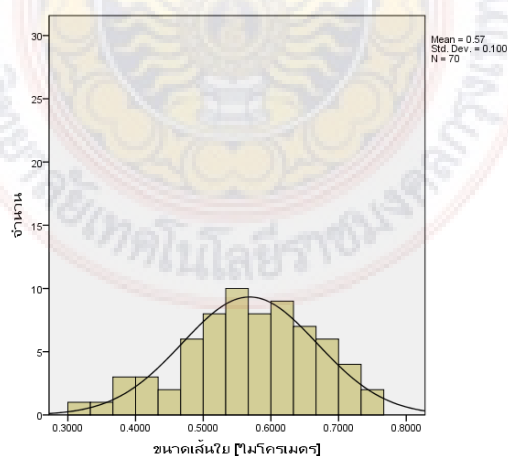
15 เซนติเมตร



20 เซนติเมตร



25 เซนติเมตร

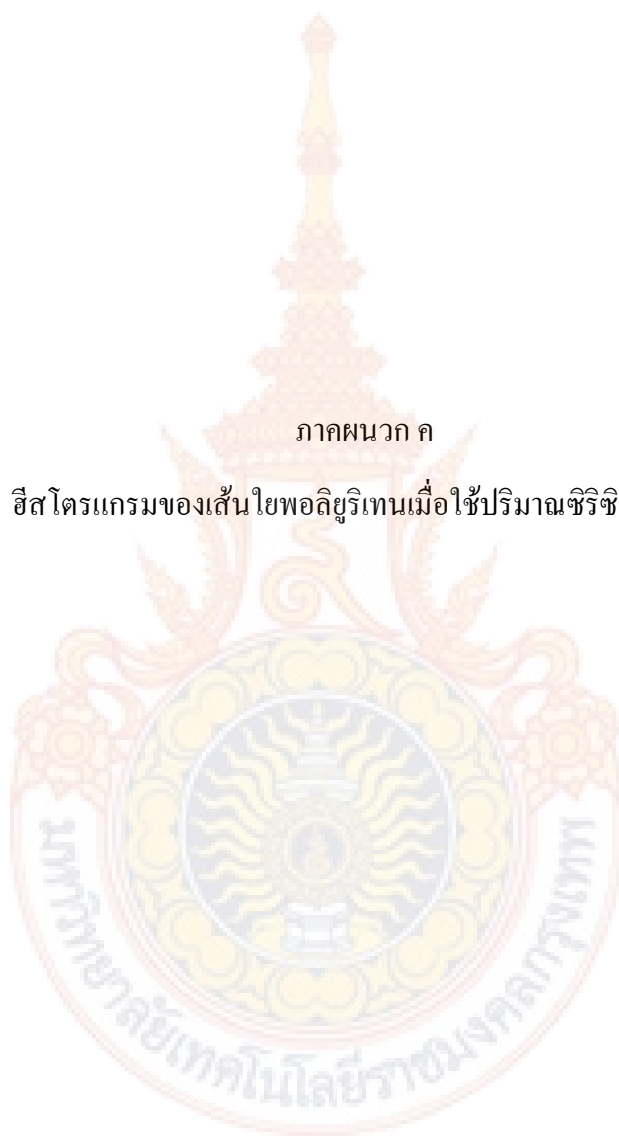


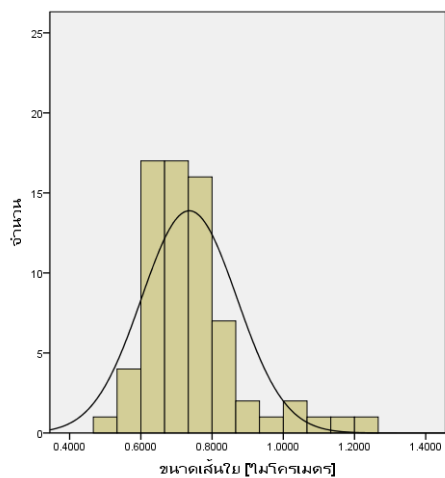
30 เซนติเมตร

ภาพที่ ข-1 ฮิสโตแกรมของเส้นใยพอลิยูรีเทนเมื่อระยะห่างจากหัวเข็มถึงวัสดุรองรับต่างกัน

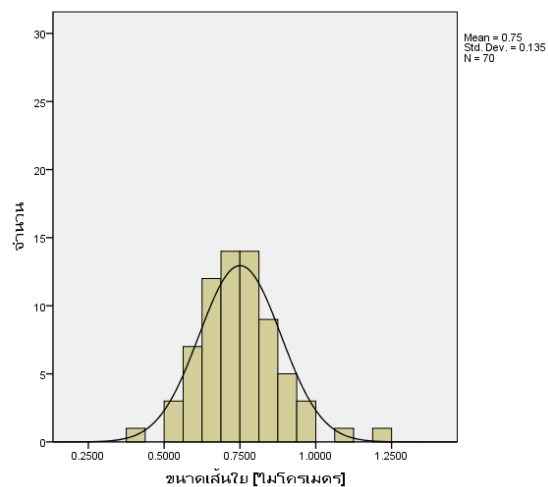
ภาคผนวก ค

สีสโตรแกรมของเส้นใยพอลิยูรีเทนเมื่อใช้ปริมาณซีรีซินต่างกัน

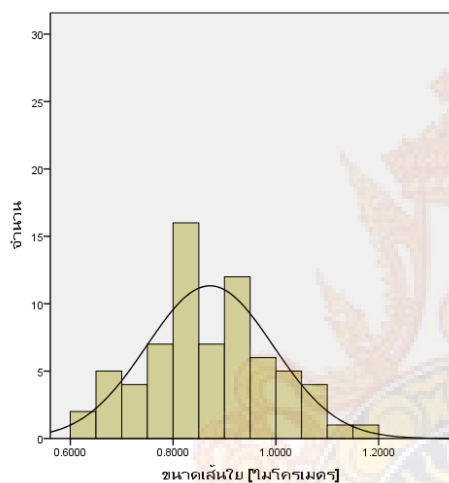




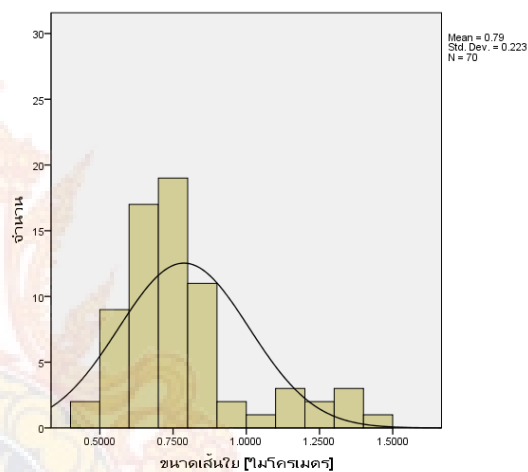
อัตราการไหลที่ 5.0 มิลลิตรต่อชั่วโมง



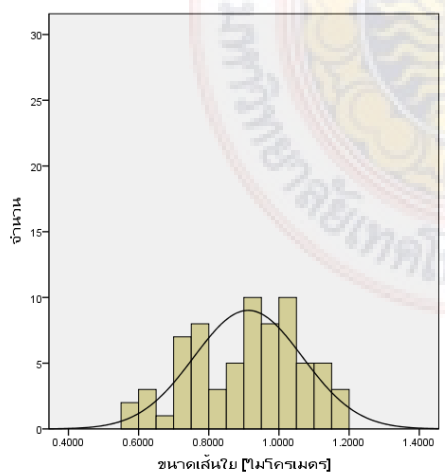
อัตราการไหลที่ 5.4 มิลลิตรต่อชั่วโมง



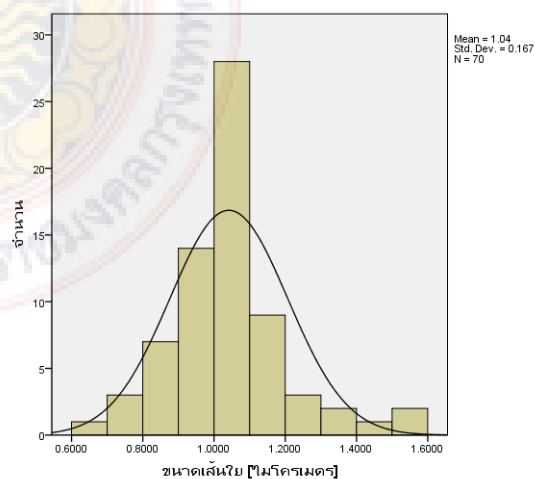
อัตราการไหลที่ 5.8 มิลลิตรต่อชั่วโมง



อัตราการไหลที่ 6.2 มิลลิตรต่อชั่วโมง

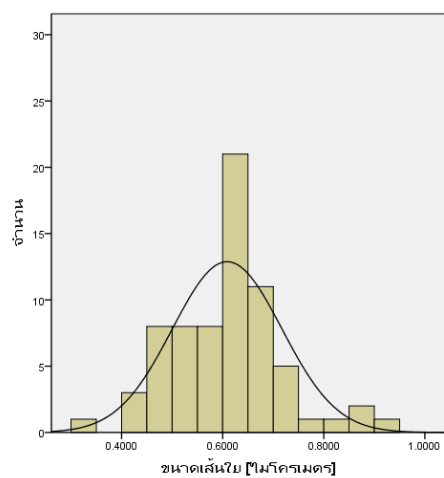


อัตราการไหลที่ 6.6 มิลลิตรต่อชั่วโมง

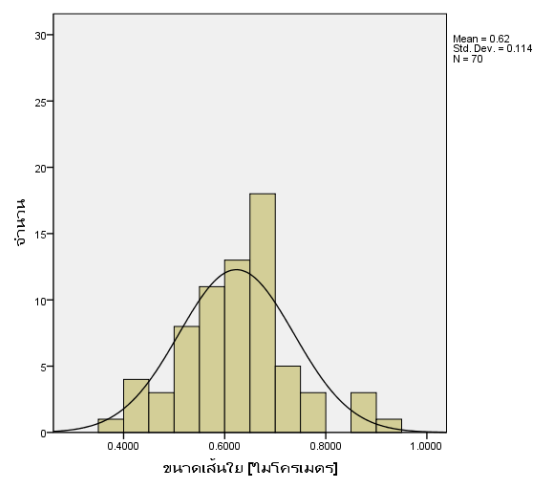


อัตราการไหลที่ 7.0 มิลลิตรต่อชั่วโมง

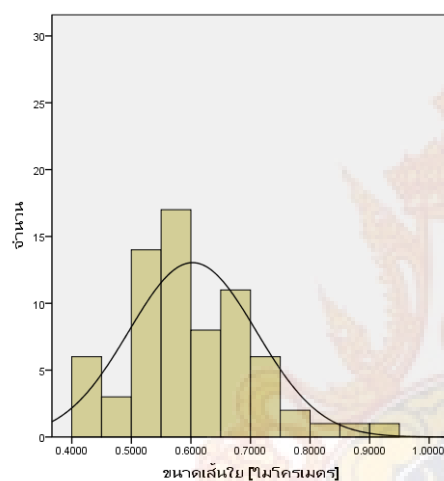
ภาพที่ ค-1 ฮิสโตแกรมของเส้นใยพอลิยูรีเทน



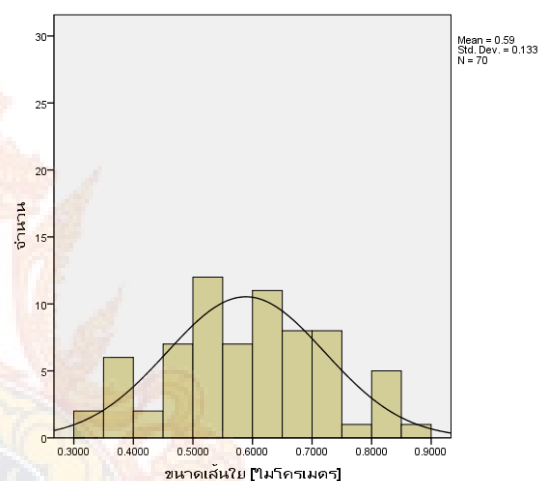
อัตราการไหลที่ 5.0 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง



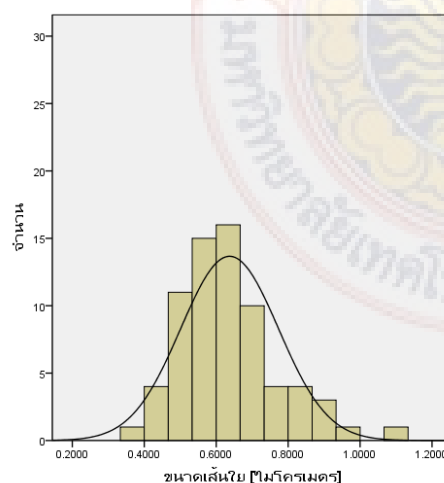
อัตราการไหลที่ 5.4 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง



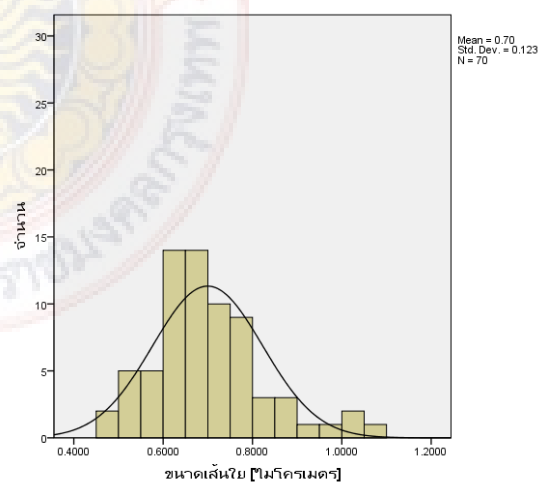
อัตราการไหลที่ 5.6 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง



อัตราการไหลที่ 6.2 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง

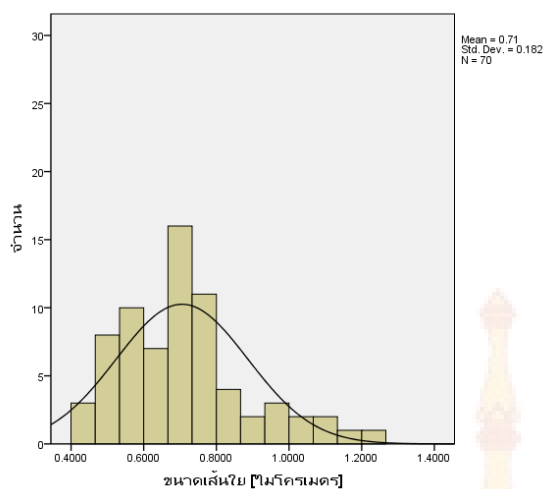


อัตราการไหลที่ 6.6 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง

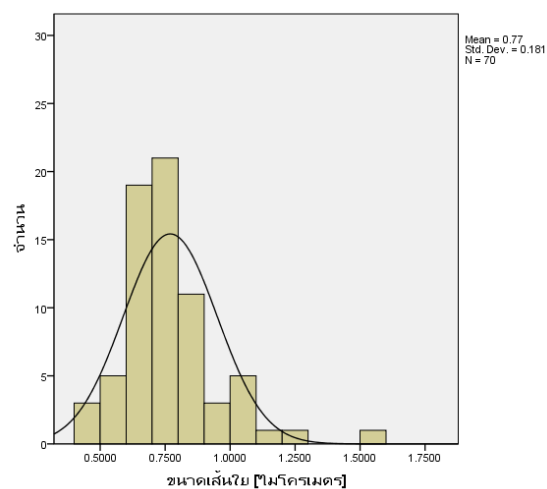


อัตราการไหลที่ 7.0 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง

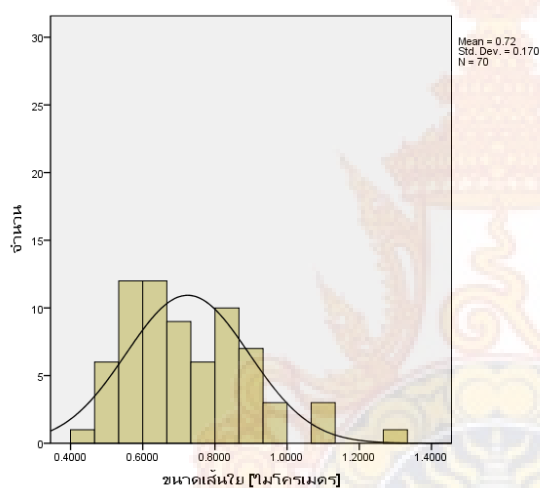
ภาพที่ ค-2 ฮิสโตแกรมของเส้นใยพอลิยูรีเทนผสมซีจีนปริมาณ 0.03 กรัม



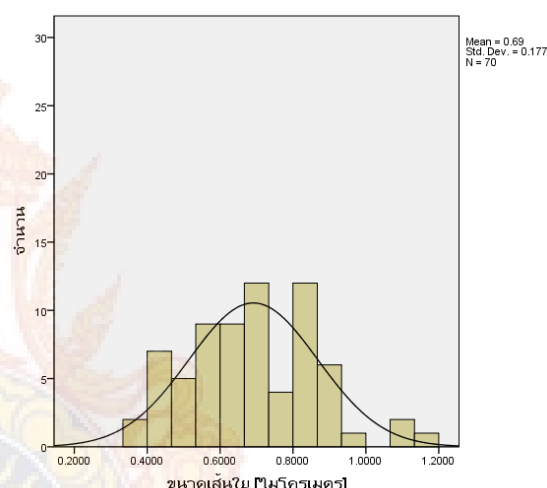
อัตราการใช้ 5.0 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง



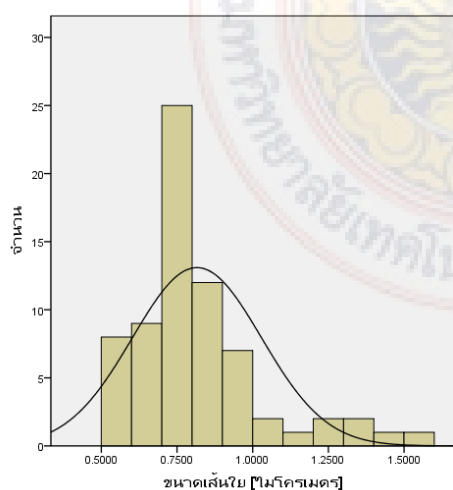
อัตราการใช้ 5.4 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง



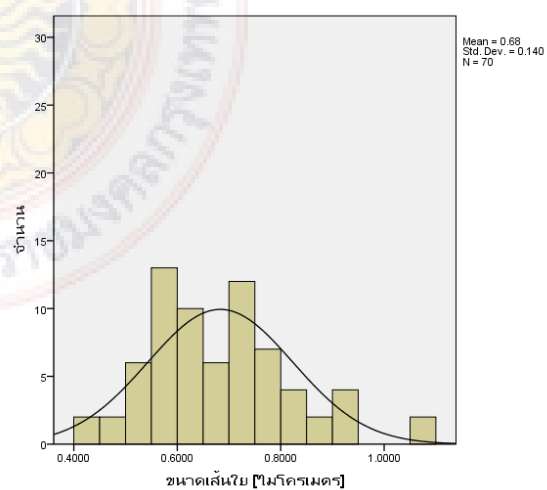
อัตราการใช้ 5.8 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง



อัตราการใช้ 6.2 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง

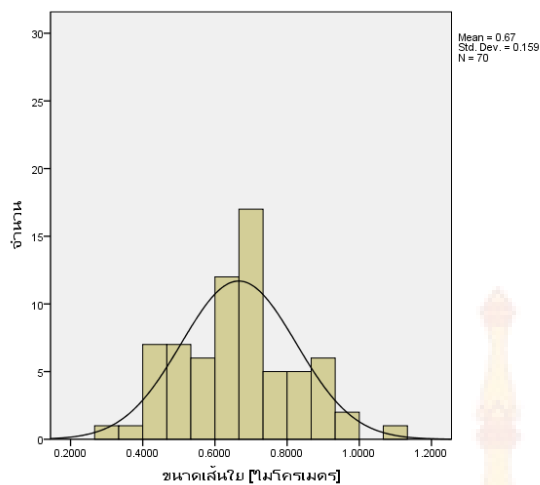


อัตราการใช้ 6.6 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง

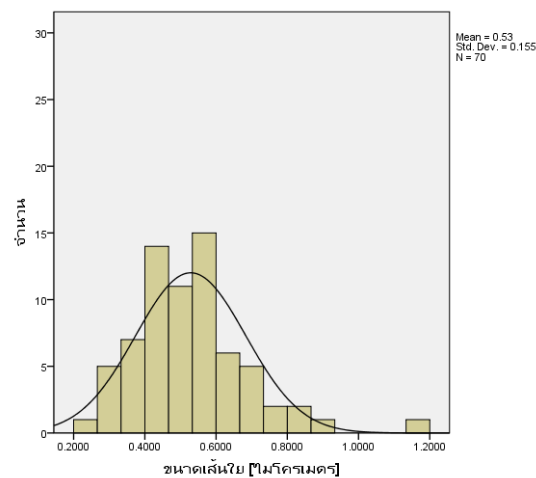


อัตราการใช้ 7.0 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง

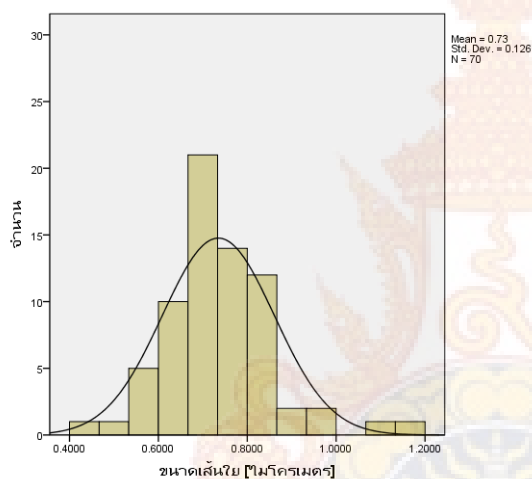
ภาพที่ ค-3 ฮิสโตแกรมของเส้นใยพอลิยูรีเทนผสมซีซีซีปริมาณ 0.07 กรัม



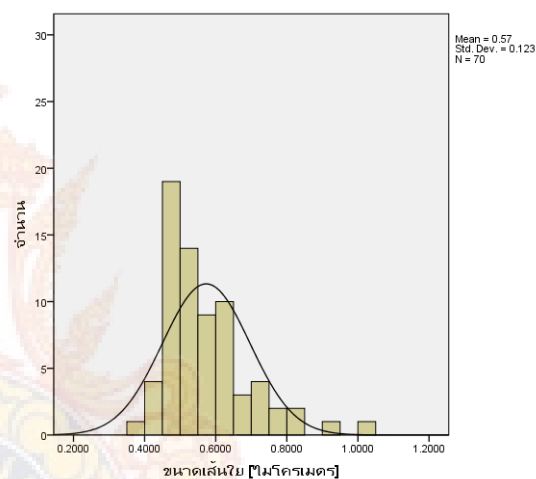
อัตราการไหลที่ 5.0 มิลลิตรต่อชั่วโมง



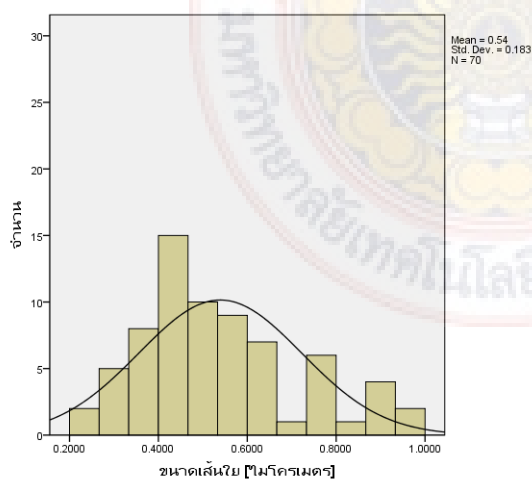
อัตราการไหลที่ 5.4 มิลลิตรต่อชั่วโมง



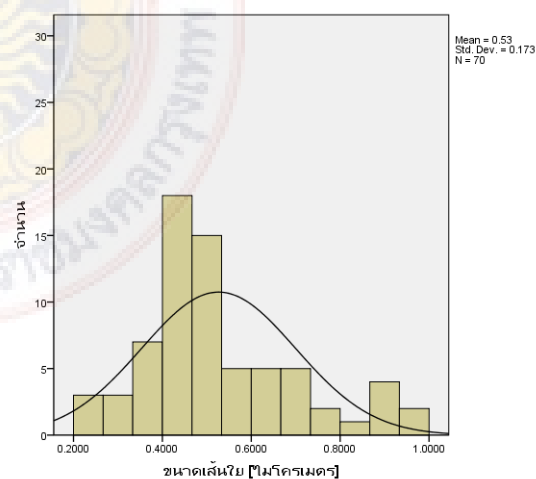
อัตราการไหลที่ 5.8 มิลลิตรต่อชั่วโมง



อัตราการไหลที่ 6.2 มิลลิตรต่อชั่วโมง

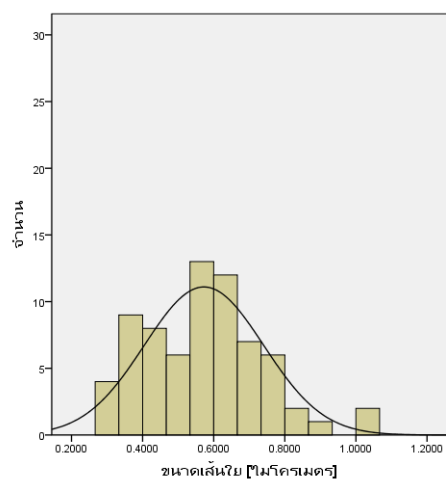


อัตราการไหลที่ 6.6 มิลลิตรต่อชั่วโมง

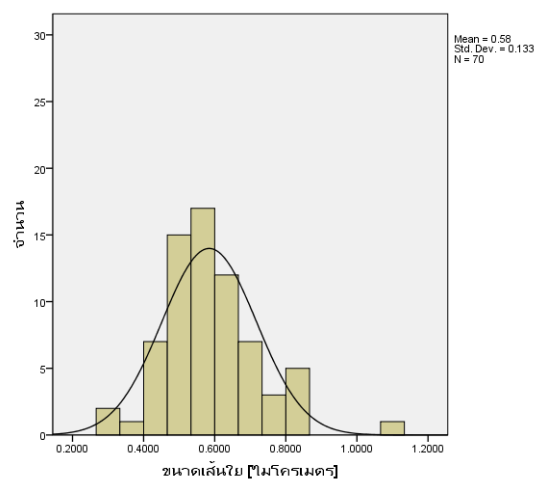


อัตราการไหลที่ 7.0 มิลลิตรต่อชั่วโมง

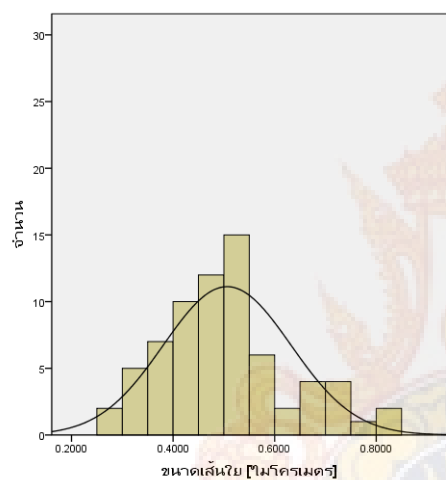
ภาพที่ ค-4 ฮิสโตแกรมของเส้นใยพอลิยูรีเทนผสมซีรีซินปริมาณ 0.11 กรัม



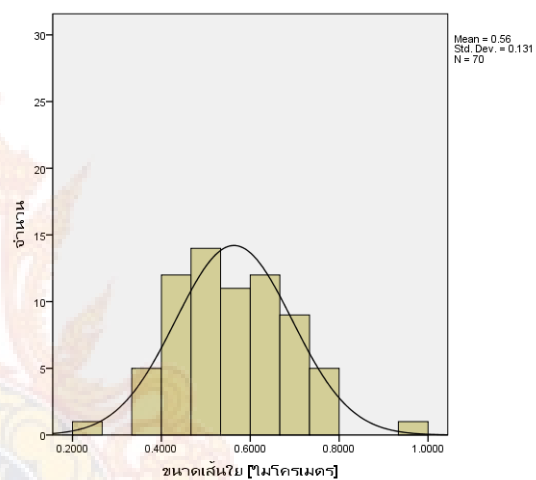
อัตราการไหลที่ 5.0 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง



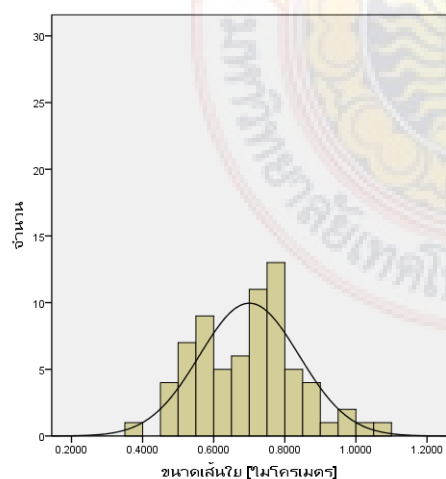
อัตราการไหลที่ 5.4 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง



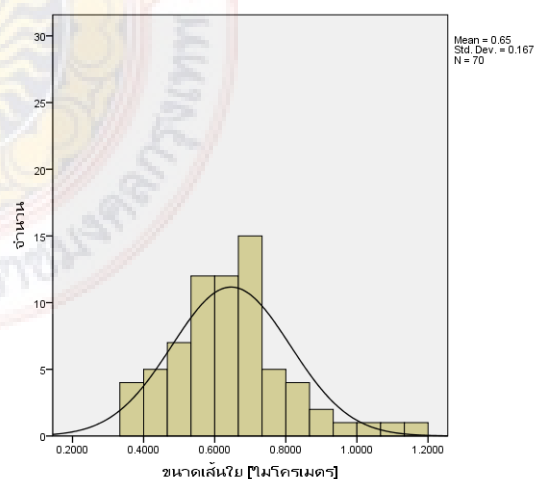
อัตราการไหลที่ 5.8 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง



อัตราการไหลที่ 6.2 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง

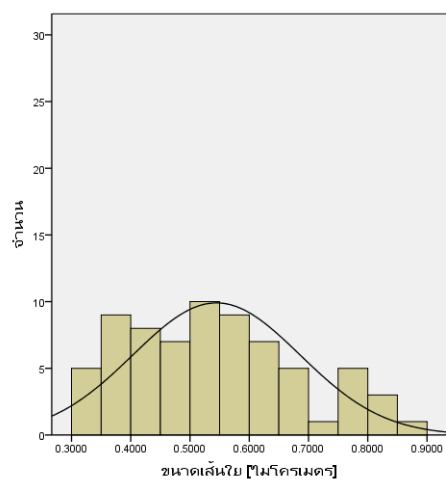


อัตราการไหลที่ 6.6 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง

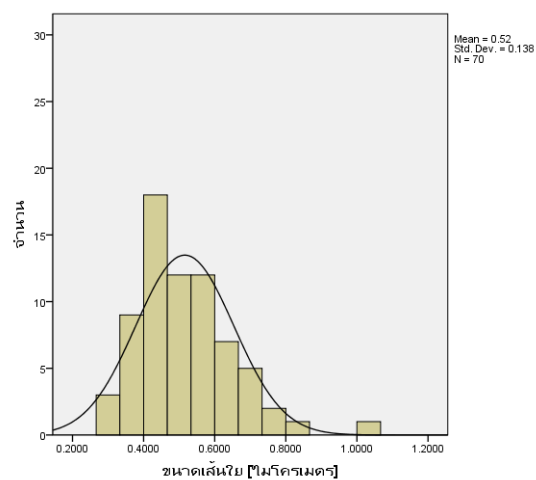


อัตราการไหลที่ 7.0 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง

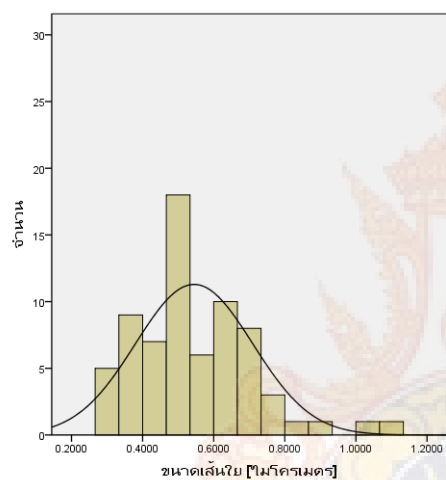
ภาพที่ ค-5 ฮิสโตแกรมของเส้นใยพอลิยูรีเทนผสมซีรีซินปริมาณ 0.15 กรัม



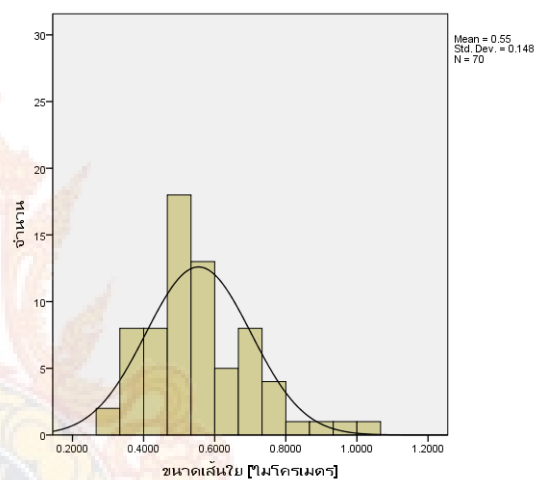
อัตราการไหลที่ 5.0 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง



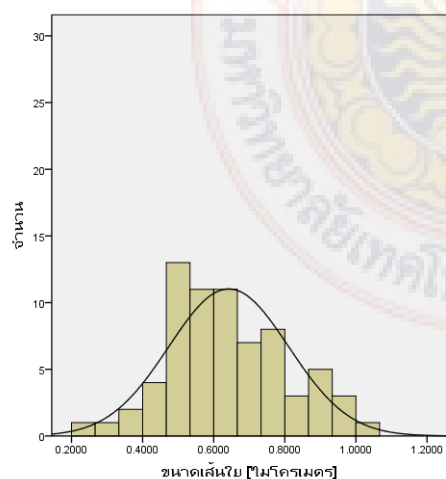
อัตราการไหลที่ 5.4 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง



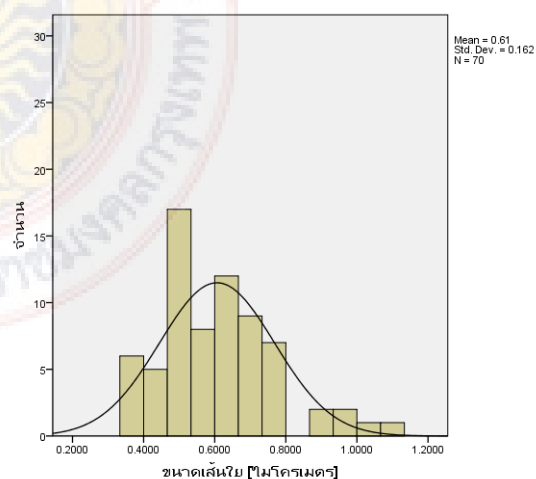
อัตราการไหลที่ 5.8 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง



อัตราการไหลที่ 6.2 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง

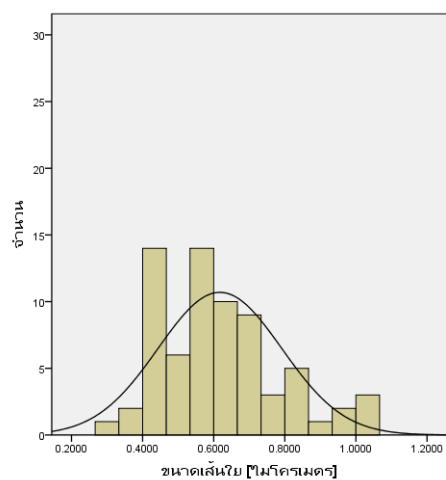


อัตราการไหลที่ 6.6 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง

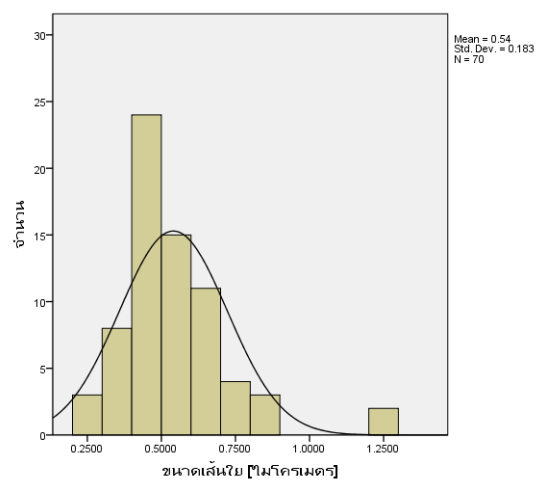


อัตราการไหลที่ 7.0 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง

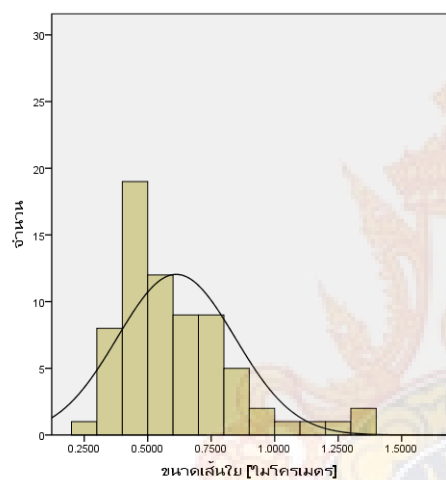
ภาพที่ ค-6 ฮิสโตแกรมของเส้นใยพอลิยูรีเทนผสมซีรีซินปริมาณ 0.19 กรัม



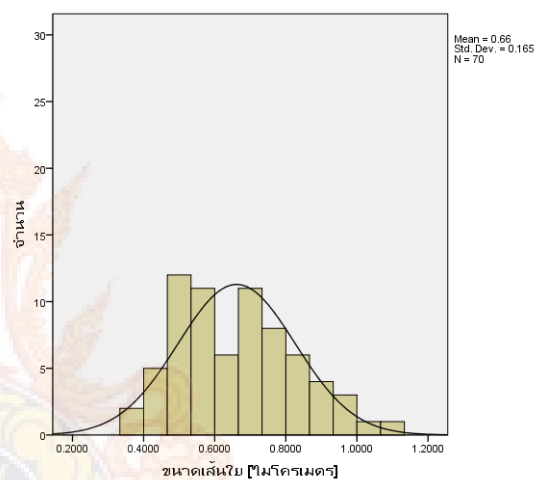
อัตราการไหลที่ 5.0 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง



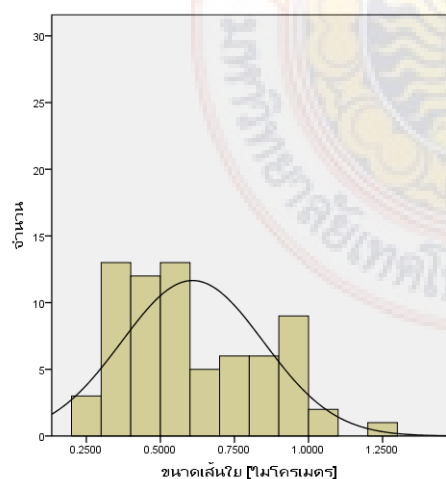
อัตราการไหลที่ 5.4 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง



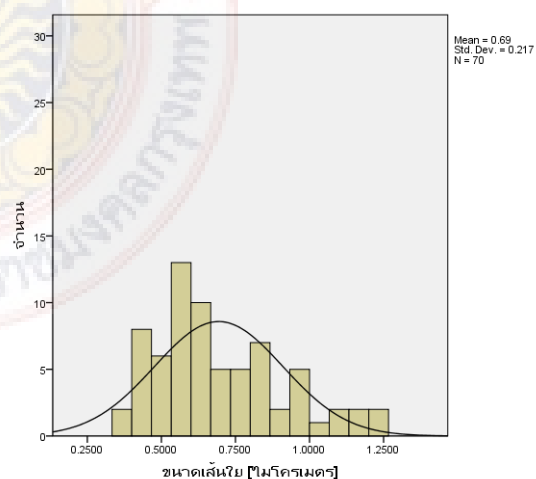
อัตราการไหลที่ 5.8 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง



อัตราการไหลที่ 6.2 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง

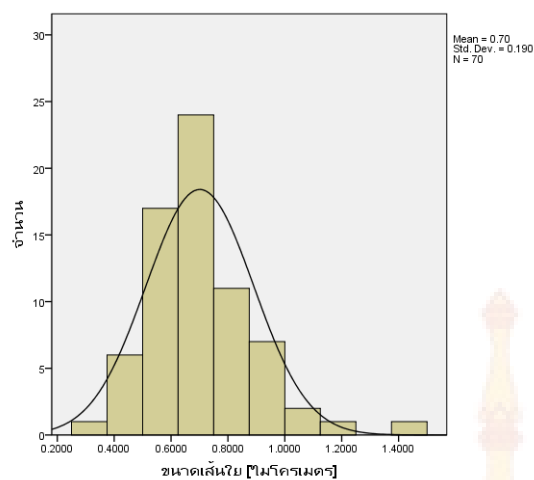


อัตราการไหลที่ 6.6 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง

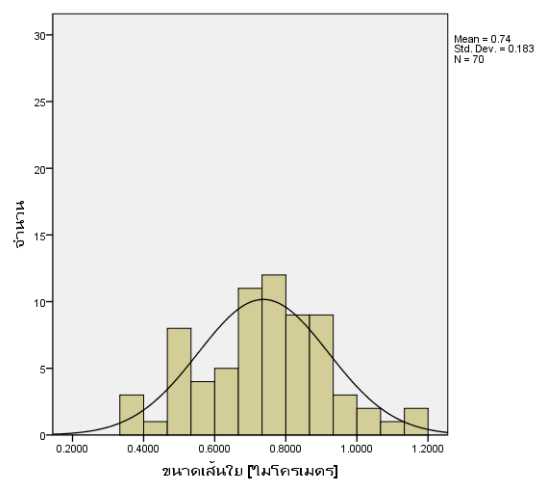


อัตราการไหลที่ 7.0 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง

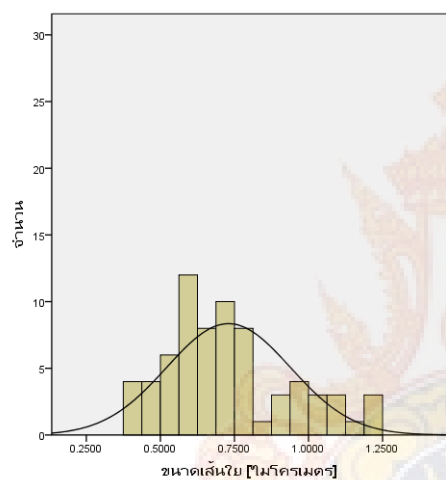
ภาพที่ ค-7 ฮิสโตแกรมของเส้นใยพอลิยูรีเทนผสมซีรีซินปริมาณ 0.23 กรัม



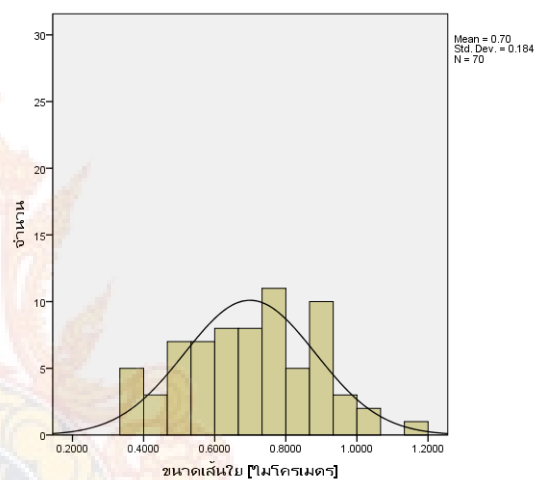
อัตราการไหลที่ 5.0 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง



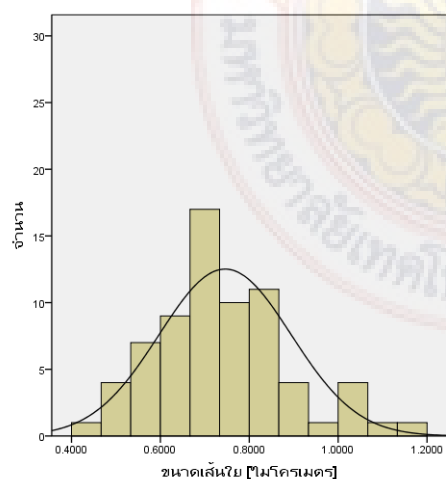
อัตราการไหลที่ 5.4 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง



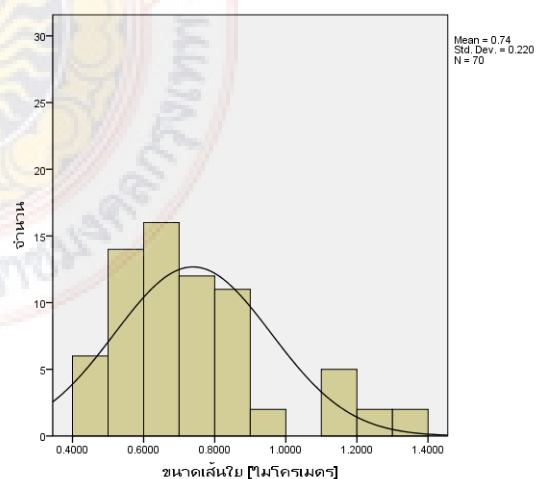
อัตราการไหลที่ 5.8 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง



อัตราการไหลที่ 6.2 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง



อัตราการไหลที่ 6.6 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง



อัตราการไหลที่ 7.0 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง

ภาพที่ ค-8 ฮิสโตแกรมของเส้นใยพอลิยูรีเทนผสมซีรีซินปริมาณ 0.27 กรัม