สารบาญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ค
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ฉ
สารบาญ	ซ
สารบาญตาราง	ฌ
สารบาญภาพ	ด
อักษรย่อและสัญลักษณ์	บ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 บทนำ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษาวิจัย	3
1.3 ประโยชน์ที่ได้รับจากการศึกษาเชิงทฤษฎีและ/หรือเชิงประยุกต์	4
บทที่ 2 วรรณกรรมปริทัศน์	5
2.1 คำจำกัดความของพอลิเมอร์ นาโนไฟเบอร์ คอมพอสิต	5
2.1.1 พอลิเมอร์ นาโนไฟเบอร์ (Polymer nanofiber)	5
2.1.2 วัสดุผสมระดับนาโนเมตร (Nanocomposite materials)	7
2.2 การผลิตเส้นใยนาโน	8
2.2.1 กระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตย์ (Electrospinning process)	9
2.2.1.1 หลักการเกิดเส้นใยอิเล็กโตรสปัน	9
2.2.1.2 ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อลักษณะและขนาดของเส้นใย	11
2.2.1.3 ประเภทของเทคนิคการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตย์	19
2.3 การปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตย์แบบสองเข็มสองทิศทาง	19
2.4 การประยุกต์ใช้เส้นใยนาโนที่เตรียมด้วยกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตย์	21

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

2.4.1 ด้านการแพทย์ 21
2.4.2 ด้านวัสดุศาสตร์ 22
2.4.3 ด้านสิ่งแวดล้อมและเทคโนโลยีชีวภาพ 23
2.4.4 ด้านวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และพลังงาน 26
2.5 พอลิเมอร์ชีวภาพ (Biopolymer) 29
2.5.1 คำจำกัดความของพอลิเมอร์ 29
2.5.2 คำจำกัดความของพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ 29
2.5.3 การแยกประเภทของพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ 30
2.5.3.1 พอลิเมอร์ตามธรรมชาติ 30
2.5.3.2 พอลิเมอร์ที่ได้จากการสังเคราะห์ 30
2.5.4 พอลิคาร์โพรแลคโทน (Polycaprolactone: PCL) 31
2.5.5 พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinyl alcohol: PVA) 32
2.6 ดอกอัญชัน (Butterfly pea) 33
2.6.1 แอนโทไซยานิน (Anthocyanin) 33
2.7 จุลชีววิทยา (Microbiology) 36
2.7.1 Escherichia coli bacteria 37
2.7.1.1 ประวัติของแบคทีเรีย E.Coli 37
2.7.1.2 ชีววิทยาและชีวเคมี (Biology and biochemistry) 37
2.7.1.3 สภาพแวดล้อมที่มีความเหมาะสมต่อการเจริญเติบโต ของแบคทีเรีย 38
2.8 เทคนิคในการวิเคราะห์ 43
2.8.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) 43
2.8.2 หลักการทำงาน (Operation) 44
2.8.3 อันตรกิริยาและผลผลิต (Interaction and product) 46
2.9 สมบัติเชิงกล (Mechanical properties) 47
2.9.1 ความเค้น (Stress) 47
2.9.2 ความเครียดและการเปลี่ยนรูป (Strain and Deformation) 48
2.9.3 การทดสอบแรงดึง (Tension Test) 49

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

2.9.4 ความคืบ (Creep) 53
2.10 การตรวจสอบเฟสองค์ประกอบทางเคมีด้วยวิธีเอ็กซเรย์ดิฟแฟรกชัน (XRD) 55
2.10.1 การทำงานของเครื่อง X-ray diffraction 56
2.11 การวิเคราะห์พันธะและหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FT-IR 57
2.11.1 แสงอินฟราเรด (Infrared radiation) 58
2.11.2 การดูดกลืนแสงอินฟราเรด 59
2.11.3 ลักษณะการสั่นของพันธะ 60
2.11.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดกลืนแสงของสาร 61
2.11.5 อินฟราเรดสเปกตรัม 62
2.11.6 การแปรผลอินฟราเรดสเปกตรัม 64
2.11.7 เครื่องมือ (Instruments) 71
2.11.7.1 ส่วนประกอบของเครื่องอินฟราเรดสเปกโทร โฟโตมิเตอร์ (Infrared spectrophotometer) 71
2.11.7.2 ชนิดของเครื่องอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ 72
2.11.8 การเตรียมตัวอย่าง 73
2.11.9 การประยุกต์ใช้ 74
2.12 สรุปสาระสำคัญจากเอกสารที่เกี่ยวข้อง 76

บทที่ 3 วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง 77
3.1 อุปกรณ์การทดลอง 77
3.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง 79
3.3 วิธีการทดลอง 79
3.3.1 การเตรียมสารละลายพอลิเมอร์ 79
3.3.1.1 การเตรียมสารละลายพอลิคาร์โพรแลคโทน 79
3.3.1.2 การเตรียมสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ 80
3.3.1.3 การเตรียมสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ผสมสารสกัดจากดอกอัญชัน 80

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

3.3.2 การผลิตเส้นใยอิเล็กโตรสปัน 82
3.3.2.1 การผลิตเส้นใยอิเล็กโตรสปันพอลิเมอร์ นาโนไฟเบอร์ 82
3.3.2.1.1 การผลิตเส้นใยอิเล็กโตรสปันพอลิคาร์โพรแลคโทน 82
3.3.2.1.2 การผลิตเส้นใยอิเล็กโตรสปันพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ 84
3.3.2.1.3 การผลิตเส้นใยอิเล็กโตรสปันพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ผสมสารสกัดจากดอกอัญชัน 85
3.3.2.2 การผลิตเส้นใยอิเล็กโตรสปัน PP และ PPB พอลิเมอร์ นาโนไฟเบอร์ คอมพอสิต 85
3.3.2.2.1 การผลิตเส้นใยอิเล็กโตรสปัน PP พอลิเมอร์ นาโนไฟเบอร์ คอมพอสิต 85
3.3.2.2.2 การผลิตเส้นใยอิเล็กโตรสปัน PPB พอลิเมอร์ นาโนไฟเบอร์ คอมพอสิต 87
3.4 วิธีการวัดและตรวจวิเคราะห์หาลักษณะเฉพาะของชิ้นงาน (Characterization and Measurement Method) 88
3.4.1 การทดสอบคุณสมบัติของสารละลายพอลิเมอร์ตั้งต้น 88
3.4.2 การศึกษาสัณฐานวิทยาของเส้นใยอิเล็กโตรสปัน 89
3.4.3 การศึกษาสมบัติเชิงกลด้วยเครื่องทดสอบแบบอเนกประสงค์ 90
3.4.4 การศึกษาเฟสองค์ประกอบของชิ้นงานด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) 92
3.4.5 การศึกษาพันธะและหมู่ฟังก์ชันทางเคมีของชิ้นงานด้วยเทคนิค FTIR 93
3.4.6 การทดสอบความสามารถในการต้านเชื้อแบคทีเรีย (Antibacterial assessment) 94
3.4.6.1 การเตรียม Nutrient agar และ Nutrient broth 94
3.4.6.2 วิธีการเกลี่ยเชื้อ (Streak plate method of isolation) 96
3.4.6.3 Starter preparation and inoculation 97
3.4.6.4 Antimicrobial Testing 97

บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง 98
4.1 ผลการศึกษาการเตรียมสารละลายพอลิเมอร์ตั้งต้น 98

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

4.1.1 สารละลายพอลิคาร์โพรแลคโทน 98
4.1.1.1 การศึกษาสภาพการนำไฟฟ้าของสารละลาย
พอลิคาร์โพรแลคโทน 99
4.1.1.2 ผลการศึกษาพันธะและหมู่ฟังก์ชันของสารละลาย
พอลิคาร์โพรแลคโทนด้วยวิธี FT-IR 100
4.1.2 สารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ พอลิไวนิลแอลกอฮอล์
ผสมสารสกัดจากดอกอัญชัน และสารสกัดจากดอกอัญชัน 101
4.1.2.1 ผลการศึกษาสภาพการนำไฟฟ้าของสารละลายพอลิไวนิล
แอลกอฮอล์ พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ผสมสารสกัดจาก
ดอกอัญชัน และสารสกัดจากดอกอัญชัน 101
4.1.2.2 ผลการศึกษาพันธะและหมู่ฟังก์ชันของสารละลาย
พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ผสมสาร
สกัดจากดอกอัญชัน ด้วยวิธี FT-IR 102
4.2 ผลการศึกษาการผลิตเส้นใยอิเล็กโตรสปันพอลิเมอร์ นาโนไฟเบอร์ 103
4.2.1 การศึกษาการผลิตเส้นใยอิเล็กโตรสปันพอลิคาร์โพรแลคโทน 103
4.2.1.1 ลักษณะทางกายภาพของเส้นใยอิเล็กโตรสปัน
พอลิคาร์โพรแลคโทน 103
4.2.1.2 ผลการศึกษาสัณฐานวิทยาของเส้นใยอิเล็กโตรสปัน
พอลิคาร์โพรแลคโทนด้วยเทคนิค SEM 104
4.2.1.3 ผลการศึกษาปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อสัณฐานวิทยาของ
เส้นใยอิเล็กโตรสปันพอลิคาร์โพรแลคโทน 107
4.2.1.3.1 ผลจากความเข้มข้นของสารละลาย
พอลิคาร์โพรแลคโทนที่มีต่อสัณฐานวิทยา 107
4.2.1.3.2 ผลจากความต่างศักย์ไฟฟ้าที่มีต่อสัณฐานวิทยา 109
4.2.1.4 ผลการศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของเส้นใยอิเล็กโตรสปัน
พอลิคาร์โพรแลคโทน 111
4.2.1.5 ผลการศึกษาเฟสองค์ประกอบทางเคมีของเส้นใย
อิเล็กโตรสปันพอลิคาร์โพรแลคโทนด้วยเทคนิค XRD 113

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

4.2.2 เส้นใยอิเล็กโตรสปันพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ และ
พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ผสมสารสกัดจากดอกอัญชัน 114
4.2.2.1 ลักษณะทางกายภาพเส้นใยอิเล็กโตรสปันพอลิไวนิล
แอลกอฮอล์ และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ผสมสารสกัด
จากดอกอัญชัน 114
4.2.2.2 ผลการศึกษาสัณฐานวิทยาของเส้นใยอิเล็กโตรสปัน
พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์
ผสมสารสกัดจากดอกอัญชัน ด้วยเทคนิค SEM 115
4.2.3 ผลการศึกษาปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อสัณฐานวิทยาของเส้นใย
อิเล็กโตรสปันพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์
ผสมสารสกัดจากดอกอัญชัน 117
4.2.3.1 ผลของความต่างศักย์ไฟฟ้าที่มีต่อสัณฐานวิทยา 117
4.2.4 ผลการศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของเส้นใยอิเล็กโตรสปัน
พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์
ผสมสารสกัดจากดอกอัญชัน 118
4.2.5 ผลการศึกษาเฟสองค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยอิเล็กโตรสปัน
พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ผสมสารสกัด
จากดอกอัญชัน ด้วยเทคนิค XRD 120
4.3 เส้นใยอิเล็กโตรสปัน PP พอลิเมอร์ นาโนไฟเบอร์ คอมพอสิต 120
4.3.1 ลักษณะทางกายภาพของเส้นใยอิเล็กโตรสปัน PP พอลิเมอร์
นาโนไฟเบอร์ คอมพอสิต 121
4.3.2 ผลการศึกษาสัณฐานวิทยาของเส้นใยอิเล็กโตรสปัน PP พอลิเมอร์
นาโนไฟเบอร์ คอมพอสิต ด้วยเทคนิค SEM 121
4.3.3 ปัจจัยที่มีผลต่อสัณฐานวิทยาของเส้นใยอิเล็กโตรสปัน PP
พอลิเมอร์ นาโนไฟเบอร์ คอมพอสิต 124
4.3.3.1 ความเข้มข้นของสารละลายพอลิเมอร์ที่มีต่อสัณฐานวิทยา 124
4.3.3.2 ผลของความต่างศักย์ไฟฟ้าที่มีต่อสัณฐานวิทยา 125
4.3.4 แสดงคุณสมบัติเชิงกลของเส้นใยอิเล็กโตรสปัน PP พอลิเมอร์
นาโนไฟเบอร์ คอมพอสิต 127

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

4.3.5 ผลการศึกษาเฟสองค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยอิเล็กโตรสปัน PP พอลิเมอร์ นาโนไฟเบอร์ คอมพอสิต ด้วยเทคนิค XRD 129
4.3.6 ผลการศึกษาพันธะและหมู่ฟังก์ชันของเส้นใยอิเล็กโตรสปัน PP พอลิเมอร์ นาโนไฟเบอร์ คอมพอสิต ด้วยวิธี FT-IR 130
4.3.7 ผลการศึกษาคุณสมบัติในการต้านเชื้อแบคทีเรียของเส้นใยอิเล็กโตรสปัน PP พอลิเมอร์ นาโนไฟเบอร์ คอมพอสิต 131
4.4 เส้นใยอิเล็กโตรสปัน PPB พอลิเมอร์ นาโนไฟเบอร์ คอมพอสิต
4.4.1 ลักษณะทางกายภาพของเส้นใยอิเล็กโตรสปัน PPB พอลิเมอร์ นาโนไฟเบอร์ คอมพอสิต 132
4.4.2 ผลการศึกษาสัณฐานวิทยาของเส้นใยอิเล็กโตรสปัน PPB พอลิเมอร์ นาโนไฟเบอร์ คอมพอสิต ด้วยเทคนิค SEM 132
4.4.3 ผลการศึกษาปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อสัณฐานวิทยาของเส้นใยอิเล็กโตรสปัน PPB พอลิเมอร์ นาโนไฟเบอร์ คอมพอสิต 135
4.4.3.1 ผลของความเข้มข้นของสารละลายที่มีผลต่อสัณฐานวิทยา 135
4.4.3.2 ผลของความต่างศักย์ไฟฟ้าที่มีผลต่อสัณฐานวิทยาของเส้นใย PPB พอลิเมอร์ นาโนไฟเบอร์ คอมพอสิต 137
4.4.4 ผลการศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของเส้นใยอิเล็กโตรสปัน PPB พอลิเมอร์ นาโนไฟเบอร์ คอมพอสิต 138
4.4.5 ผลการศึกษาเฟสองค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยอิเล็กโตรสปัน PPB พอลิเมอร์ นาโนไฟเบอร์ คอมพอสิต ด้วยเทคนิค XRD 140
4.4.6 ผลการศึกษาพันธะและหมู่ฟังก์ชันของเส้นใยอิเล็กโตรสปัน PPB พอลิเมอร์ นาโนไฟเบอร์ คอมพอสิต ด้วยวิธี FT-IR 140
4.4.7 ผลการศึกษาคุณสมบัติในการต้านเชื้อแบคทีเรียของเส้นใย PPB พอลิเมอร์ นาโนไฟเบอร์ คอมพอสิต 141

บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ
5.1 สรุปผลการทดลอง 144
5.2 ข้อเสนอแนะ 152

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

เอกสารอ้างอิง 153

ภาคผนวก 160

ภาคผนวก ก แสดงคุณสมบัติด้านต่างๆของเส้นใยอิเล็กโตรสปัน พอลิคาร์โพรแลคโทน 161

ภาคผนวก ข แสดงคุณสมบัติด้านต่างๆของเส้นใยอิเล็กโตรสปัน พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ผสม สารสกัดจากดอกอัญชัน 165

ภาคผนวก ค แสดงคุณสมบัติด้านต่างๆของเส้นใยอิเล็กโตรสปัน PP พอลิเมอร์ นาโนไฟเบอร์ คอมพอสิต 167

ภาคผนวก ง แสดงคุณสมบัติด้านต่างๆของเส้นใยอิเล็กโตรสปัน PPB พอลิเมอร์ นาโนไฟเบอร์ คอมพอสิต 171

ประวัติผู้เขียน 175

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สารบาญตาราง

ตาราง		หน้า
2.1	แสดงองค์ประกอบทางเคมีของแอนโทรไซยานิน	36
2.2	แสดงอุณหภูมิสูงสุด ต่ำสุด และอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของ Certain bacteria และ Achaea	40
2.3	แสดงค่าของรังสีแม่เหล็กไฟฟ้า แบ่งตามความถี่ (Frequency) ความยาวคลื่น (Wavelength) และผลของรังสีต่อการเปลี่ยนแปลงของโมเลกุล	59
2.4	แสดงช่วงคลื่นของอินฟราเรด	58
3.1	แสดงอุปกรณ์ และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	77
3.2	แสดงสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	79
3.3	แสดงเงื่อนไขการทดลองของสารละลายพอลิคาร์โพรแลคโทน	84
3.4	แสดงเงื่อนไขการทดลองของสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์	84
3.5	แสดงเงื่อนไขการทดลองของสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ผสมสารสกัดจากดอกอัญชัน	85
3.6	แสดงเงื่อนไขการทดลองการผลิตเส้นใยอิเล็กโตรสปัน PP พอลิเมอร์ นาโนไฟเบอร์ คอมพอสิต	86
3.7	แสดงเงื่อนไขการทดลองการผลิตเส้นใยอิเล็กโตรสปัน PPB พอลิเมอร์ นาโนไฟเบอร์ คอมพอสิต	87

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สารบาญภาพ

รูป		หน้า
2.1	แสดงภาพเส้นใยนาโนที่ได้จากเครื่อง SEM โดยกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตย์	6
2.2	แสดงเส้นใยนาโนสังเคราะห์เมื่อเทียบกับเส้นผมซึ่งเป็นเส้นใยธรรมชาติ	6
2.3	แสดงอุปกรณ์พื้นฐานสำหรับกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตย์	9
2.4	แสดงขั้นตอนการเกิดเส้นใยพอลิเมอร์โดยเทคนิคปั่นเส้นด้วยไฟฟ้าสถิตย์	11
2.5	แสดงอิทธิพลของตัวแปรต่างๆที่ส่งผลต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยนาโนที่ได้จากเทคนิคการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตย์	18
2.6	แสดงอุปกรณ์การปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตย์แบบสองเข็มสองทิศทาง	20
2.7	แสดงการเลี้ยงเซลล์บนแผ่นเส้นใยนาโน PCL (ก) ก่อนเลี้ยง และ (ข) หลังเลี้ยงเซลล์เป็นเวลา 7 วัน ซึ่งพบการการเจริญของเซลล์บนเส้นใย	22
2.8	แผ่นเส้นใยนาโนพอลิคาร์โพรแลคโทนซึ่งกลุ่มวิจัย SSMG ประดิษฐ์ขึ้นสามารถนำมาประยุกต์ใช้ทางการแพทย์ได้	22
2.9	แสดง (ก) เส้นใยนาโนคาร์บอนผ่านการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศก๊าซอาร์กอน (ข) เส้นใยนาโนเฟอโรอิเล็กตริกแบเรียมสตรอนเตรียมไททาเนต ((Ba, Sr)TiO_3, BST)	23
2.10	แสดงประสิทธิภาพของการกรองเพิ่มมากขึ้น เมื่อเส้นใยมีขนาดเล็กลง	24
2.11	แสดงระบบกรองจากเส้นใยนาโนที่มีประสิทธิภาพสูงเพื่อกรองและจับอนุภาคขนาดเล็ก	24
2.12	แสดงระบบกรองจากเส้นใยนาโนที่มีประสิทธิภาพสูงเพื่อพัฒนาใช้ทำระบบกรองน้ำหรือของเหลว	24
2.13	แสดงแผ่นเมมเบรนคัดแยกที่ทำจากเส้นใยเซลลูโลสที่มีผิวตรึงไว้กับ Cibacron blue สำหรับแยกแอลบูมิน (Albumin)	25
2.14	แสดงการเคลือบเส้นใยนาโนบนเครื่องแต่งกายทหารเพื่อป้องกันอาวุธทางชีวภาพ	26

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

2.15	แสดงอุปกรณ์ท่อนาโนของซิลิกาสำหรับตรวจวัดโมเลกุลเดี่ยว	27
2.16	แสดง (ก) แผนภาพเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมซึ่งมีเส้นใยนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) เป็นส่วนประกอบ และ (ข) ตัวอย่างเส้นใยนาโน Anatase TiO_2 ซึ่งกลุ่มวิจัย SSMG ประดิษฐ์ขึ้น	27
2.17	แสดง (ก) เส้นใยนาโน $NaCo_2O_4$ ซึ่งกลุ่มวิจัย SSMG ประดิษฐ์ขึ้น (ข) การจัดรูปแบบของเส้นใย $NaCo_2O_4$ ให้เป็นแบบเส้นเดี่ยวบน Si (100)	28
2.18	แสดงการประยุกต์ใช้เส้นใยนาโนทางด้านต่างๆ	28
2.19	แสดงโครงสร้างโมเลกุลของพอลิคาร์โพรแลคโทน	31
2.20	แสดงโครงสร้างโมเลกุลของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์	32
2.21	แสดงรูปร่างของดอกอัญชัน	33
2.22	แสดงโครงสร้างโมเลกุลของแอนโทรไซยานิน	35
2.23	แสดงสัณฐานวิทยาของเชื้อ E.Coli ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า	37
2.24	แสดงอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของเชื้อ E.Coli	39
2.25	แสดงอัตราการเจริญเติบโตต่ออุณหภูมิของสภาพแวดล้อม Prokaryotes	40
2.26	แสดงอัตราการเจริญเติบโตต่อค่า pH ของสภาพแวดล้อม Procaryotes	41
2.27	แสดง Plasmolysis ของแบคทีเรีย E.Coli	42
2.28	แสดงลักษณะและองค์ประกอบกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	43
2.29	แสดงลักษณะ electron gun ที่มีไส้หลอดเป็นทังสเตนแบบตัววี	44
2.30	แสดง electromagnetic lens และการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน	45
2.31	แสดงตัววัดของหัววัดในกล้อง SEM	46
2.32	แสดงลักษณะของแรงกระทำชนิดต่างๆ	48
2.33	แสดงวิธีการทดสอบแรงดึง	50
2.34	แสดงเส้นโค้งความเค้น-ความเครียด (Stress-Strain Curve) แบบมีจุดคราก (Yield Point)	50
2.35	แสดงเส้นโค้งความเค้น-ความเครียด แบบที่ไม่มีจุดคราก	51
2.36	แสดงการเปรียบเทียบเส้นโค้งความเค้น-ความเครียดของวัสดุเปราะและวัสดุพลาสติก	52
2.37	แสดงเส้นโค้งความคืบ	54
2.38	แสดงขั้นตอนการเกิดความคืบ	54

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

2.39	แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์	55
2.40	แสดงการทำงานของเครื่อง X-ray diffraction	56
2.41	แสดง X-ray diffraction pattern ของ Cubic SiC	57
2.42	แสดงการยืดและงอของกลุ่มอะตอมของ methyl หรือ methylene	61
2.43	แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของ ethyl ethanoate	63
2.44	แสดงอินฟาเรดสเปกตัมของ Alkane	64
2.45	แสดงอินฟาเรดสเปกตัมของ Alkene	65
2.46	แสดงอินฟาเรดสเปกตัมของ Alkyne	65
2.47	แสดงอินฟาเรดสเปกตัมของหมู่ alcohols และ phenols	66
2.48	แสดงอินฟาเรดสเปกตัมของ Ketones	67
2.49	แสดงอินฟาเรดสเปกตัมของ Aldehydes	68
2.50	แสดงอินฟาเรดสเปกตัมของ Carboxylic acid	68
2.51	แสดงอินฟาเรดสเปกตัมของ Amines	69
2.52	แสดงอินฟาเรดสเปกตัมของ Nitriles	70
2.53	แสดง IR Correlation Diagram	71
2.54	แสดง Block diagram of an infrared spectrophotometer	71
2.55	แสดง Dispersive infrared spectrophotometer	72
2.56	เปรียบเทียบอินฟราเรดสเปกตรัมของ Betamethasone และ Dexamethasone	75
3.1	แสดงขั้นตอนการเตรียมสารละลายพอลิเมอร์	81
3.2	แสดงอุปกรณ์การปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตย์	83
3.3	แสดงกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ยี่ห้อ JEOLรุ่น JSM-6335F	89
3.4	แสดงเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ยี่ห้อ Instron รุ่น 5566	90
3.5	แสดงการติดตั้งชิ้นงานตัวอย่างก่อนนำไปทดสอบด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์	91
3.6	แสดงชิ้นงานตัวอย่างเพื่อนำไปทดสอบคุณสมบัติเชิงกล	91
3.7	แสดงเครื่อง X-ray diffractometer (Rigaku Mini Flex II)	93
3.8	แสดงเครื่อง Fourier transform infrared spectrometer (Nicolet รุ่น 67 FT-IR)	94
3.9	แสดง Nutrient agar เมื่อ (ก) แสดง Nutrient agar ที่ไม่เหมาะสม และ (ข) แสดงได้ Nutrient agar ที่เหมาะสม	95
3.10	แสดง Inoculating loop	96

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

3.11	แสดง Streak plate patterns	97
4.1	แสดงค่าสภาพการนำไฟฟ้าของสารละลายพอลิคาร์โพรแลคโทน ที่ความเข้มข้น 5 7 9 และ 11 %wt	99
4.2	แสดงผลการวิเคราะห์พันธะและหมู่ฟังก์ชันของสารละลายพอลิคาร์โพรแลคโทน ที่ความเข้มข้นต่างๆ	100
4.3	แสดงค่าสภาพการนำไฟฟ้าของสารละลายชนิดต่างๆ	101
4.4	แสดงผลการวิเคราะห์พันธะและหมู่ฟังก์ชันของสารละลายพอลิไวนิล แอลกอฮอล์ และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ผสมสารสกัดจากดอกอัญชัน	102
4.5	แสดงลักษณะทางกายภาพของเส้นใยอิเล็กโตรสปันพอลิคาร์โพรแลคโทน	103
4.6	แสดงสัณฐานวิทยาของเส้นใยอิเล็กโตรสปันพอลิคาร์โพรแลคโทน ภายใต้เงื่อนไขการทดลองต่างๆ	104
4.7	แสดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยอิเล็กโตรสปันพอลิคาร์โพรแลคโทน ภายใต้เงื่อนไขต่างๆ	106
4.8	แสดงค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นของเส้นใยอิเล็กโตรสปันพอลิคาร์โพรแลคโทน ภายใต้เงื่อนไขการทดลองต่างๆ	111
4.9	แสดงค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของเส้นใยอิเล็กโตรสปันพอลิคาร์โพรแลคโทน ภายใต้เงื่อนไขการทดลองต่างๆ	112
4.10	แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของเส้นใยอิเล็กโตรสปัน พอลิคาร์โพรแลคโทน ภายใต้เงื่อนไขการทดลองต่างๆ	113
4.11	แสดงลักษณะทางกายภาพของ (ก) เส้นใยอิเล็กโตรสปันพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ และ (ข) พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ผสมสารสกัดจากดอกอัญชัน	114
4.12	แสดงสัณฐานวิทยาของเส้นใยอิเล็กโตรสปันพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ และ พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ผสมสารสกัดจากดอกอัญชัน ภายใต้เงื่อนไข การทดลองต่างๆ	115
4.13	แสดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยอิเล็กโตรสปันพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ผสมสารสกัดจากดอกอัญชัน	116

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

4.14 แสดงค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นของเส้นใยอิเล็กโตรสปันพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ และ พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ผสมสารสกัดจากดอกอัญชัน ภายใต้เงื่อนไขการทดลองต่างๆ 119
4.15 แสดงเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของเส้นใยอิเล็กโตรสปันพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ และ พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ผสมสารสกัดจากดอกอัญชัน ภายใต้เงื่อนไขการทดลองต่างๆ 119
4.16 แสดงผลการวิเคราะห์เฟสองค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยอิเล็กโตรสปันพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ผสมสารสกัดจากดอกอัญชัน 120
4.17 แสดงลักษณะทางกายภาพของเส้นใยอิเล็กโตรสปัน PP พอลิเมอร์นาโนไฟเบอร์ คอมพอสิต 121
4.18 แสดงโครงสร้างสัณฐานวิทยาของเส้นใยอิเล็กโตรสปัน PP พอลิเมอร์นาโนไฟเบอร์ คอมพอสิต 122
4.19 แสดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยอิเล็กโตรสปัน PP พอลิเมอร์นาไฟเบอร์ คอมพอสิต 124
4.20 แสดงค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นของเส้นใยอิเล็กโตรสปัน PP พอลิเมอร์นาโนไฟเบอร์ คอมพอสิต ภายใต้เงื่อนไขการทดลองต่างๆ 128
4.21 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของเส้นใยอิเล็กโตรสปัน PP พอลิเมอร์นาโนไฟเบอร์ คอมพอสิต ภายใต้เงื่อนไขการทดลองต่างๆ 128
4.22 แสดงผลการวิเคราะห์เฟสองค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยอิเล็กโตรสปัน PP พอลิเมอร์ นาโนไฟเบอร์ คอมพอสิต 129
4.23 แสดงผลการวิเคราะห์พันธะและหมู่ฟังก์ชันของเส้นใยอิเล็กโตรสปัน PP พอลิเมอร์ นาโน ไฟเบอร์ คอมพอสิต 130
4.24 แสดงผลการทดลองการต้านเชื้อแบคทีเรียของเส้นใยอิเล็กโตรสปัน PP พอลิเมอร์ นาโนไฟเบอร์ คอมพอสิต 131
4.25 แสดงลักษณะทางกายภาพของเส้นใยอิเล็กโตรสปัน PPB พอลิเมอร์นาโนไฟเบอร์ คอมพอสิต 132
4.26 แสดงสัณฐานวิทยาของเส้นใยอิเล็กโตรสปัน PPB พอลิเมอร์นาโนไฟเบอร์ คอมพอสิต ภายใต้เงื่อนไขการทดลองต่างๆ 133

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

4.27 แสดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยอิเล็กโตรสปัน PPB พอลิเมอร์ นาโนไฟเบอร์ คอมพอสิต 135
4.28 แสดงค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นของเส้นใยอิเล็กโตรสปัน PPB พอลิเมอร์ นาโนไฟเบอร์ คอมพอสิต ภายใต้เงื่อนไขการทดลองต่างๆ 139
4.29 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของเส้นใยอิเล็กโตรสปัน PPB พอลิเมอร์ นาโนไฟเบอร์ คอมพอสิต ภายใต้เงื่อนไขการทดลองต่างๆ 140
4.30 แสดงผลการวิเคราะห์เฟสองค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยอิเล็กโตรสปัน PPB พอลิเมอร์ นาโนไฟเบอร์ คอมพอสิต 141
4.31 แสดงผลการวิเคราะห์พันธะและองค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยอิเล็กโตรสปัน PPB พอลิเมอร์ นาโนไฟเบอร์ คอมพอสิต 142
4.32 แสดงผลการทดลองการต้านเชื้อแบคทีเรียของเส้นใยอิเล็กโตรสปัน PPB พอลิเมอร์ นาโนไฟเบอร์ คอมพอสิต 143

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

อักษรย่อและสัญลักษณ์

PCL	Polycaprolactone
PVA	Polyvinyl alcohol
PVAB	Polyvinyl alcohol mixed Butterfly pea solution
PP	Polycaprolactone blend polyvinyl alcohol
PPB	Polycaprolactone blend polyvinyl alcohol mixed Butterfly pea solution
SEM	Scannning Electron Microscopy
XRD	X-ray Diffraction technique
UTM	Universal Testing Machine
FT-IR	Fourier transforms infrared spectroscopy

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved