



การขึ้นรูปเส้นใยไฟโบรอินและเส้นใยไฟโบรอินที่เติมสารเรืองแสง

โดยเทคนิคการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต

Fabrication of Silk Fibroin and Fluorescent Silk Fibroin Nanofibers
via Electrospinning

พิมพ์ตะวัน แสงจันทร์ทิพย์

ชุตินันท์ พงษ์ศิริ

เอื้อกานต์ บุญคช

โครงการทางวัสดุศาสตร์ เป็นส่วนหนึ่งของหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวัสดุศาสตร์

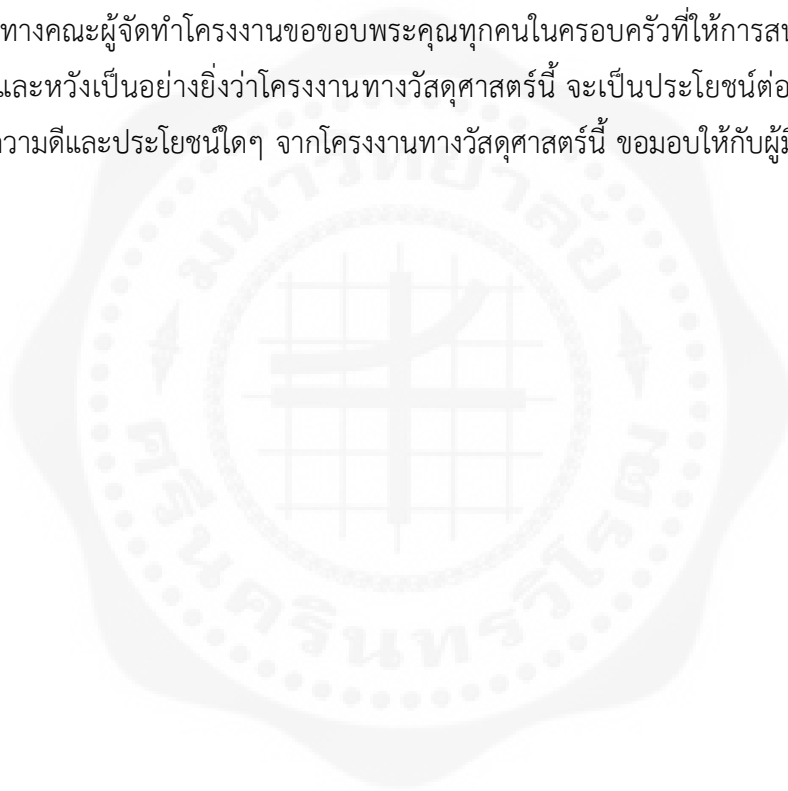
ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

ปีการศึกษา 2564

กิตติกรรมประกาศ

โครงการทางวิทยาศาสตร์นี้ สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความช่วยเหลือจากผู้มีพระคุณหลายท่าน คณะผู้จัดทำโครงการขอขอบพระคุณ อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปณิธาน วนากมล และ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุพิชฌา สุพรรณสมบุรณ์ ที่ได้กรุณาเสียสละเวลาอันมีค่าเพื่อให้คำปรึกษา คำแนะนำ ตรวจสอบแก้ไขความเรียบร้อย ตลอดจนการชี้แนะในการหาคำตอบในปัญหาต่างๆ ระหว่างจัดทำโครงการนี้ ด้วยความเอาใจใส่อย่างยิ่ง และขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. อมรรัตน์ พรหมบุญ ที่ให้ความอนุเคราะห์ รังไหม เครื่องมือ อุปกรณ์ และคำแนะนำในการทำการวิจัย

ท้ายที่สุดนี้ ทางคณะผู้จัดทำโครงการขอขอบพระคุณทุกคนในครอบครัวที่ให้การสนับสนุนให้กำลังใจในการศึกษาตลอดมา และหวังเป็นอย่างยิ่งว่าโครงการทางวิทยาศาสตร์นี้ จะเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่สนใจนำไปศึกษา ไม่มากก็น้อยต่อไป ความดีและประโยชน์ใดๆ จากโครงการทางวิทยาศาสตร์นี้ ขอมอบให้กับผู้มีพระคุณทุกท่านที่ได้กล่าวมาทั้งหมด



บทคัดย่อ

ไฟโบรอินเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติจากรังไหมที่ใช้กันอย่างแพร่หลายและเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ การปรับปรุงไฟโบรอินให้มีการเรืองแสงได้รับความสนใจในด้านวิศวกรรมเนื้อเยื่อในช่วงเวลาที่ผ่านมา เนื่องจากมีความเข้ากันได้กับร่างกาย มีความสามารถในการสลายตัวทางชีวภาพ และง่ายต่อการตรวจสอบโดยไม่ต้องทำลายตัวอย่าง งานวิจัยนี้ได้ทำการขึ้นรูปเส้นใยไฟโบรอินและเส้นใยไฟโบรอินที่เติมสารเรืองแสงจากกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตซึ่งเป็นกระบวนการที่ไม่ซับซ้อน สามารถผลิตเส้นใยที่มีขนาดต่ำกว่าไมโครเมตรและยาวต่อเนื่องโดยใช้ศักย์ไฟฟ้า โดยนำรังไหมบ้านมาสกัดเพื่อให้ได้ไฟโบรอินโดยใช้สารละลายแคลเซียมคลอไรด์จากนั้นทำให้เป็นผงแล้วนำมาละลายในกรดฟอร์มิกความเข้มข้นร้อยละ 98 จนได้ความเข้มข้นของไฟโบรอินร้อยละ 10 12 และ 14 wt% สำหรับสารละลายไฟโบรอินเรืองแสงเตรียมโดยใช้สารเรืองแสงฟลูออเรสซินโซเดียมที่มีความเข้มข้นแตกต่างกัน สารละลายขึ้นรูปเป็นเส้นใยด้วยการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตโดยใช้ศักย์ไฟฟ้าที่ 20 kV การวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานของเส้นใยไฟโบรอินและเส้นใยไฟโบรอินที่เติมสารเรืองแสงโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงลักษณะเส้นใยที่ยาวต่อเนื่องขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยโดยเฉลี่ยอยู่ในระดับต่ำกว่าไมโครเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของไฟโบรอิน การตรวจวิเคราะห์สมบัติทางแสงของเส้นใยไฟโบรอินที่เติมสารเรืองแสงด้วยเครื่องวัดการเรืองแสงสเปกโตรฟลูออโรมิเตอร์ แสดงค่าความเข้มการเรืองแสงสูงขึ้นเมื่อลดความเข้มข้นของสารเรืองแสง และการตรวจวิเคราะห์เอกลักษณ์เฉพาะด้วยเทคนิคสเปกโตรสโกปีของเส้นใยไฟโบรอินและเส้นใยไฟโบรอินที่เติมสารเรืองแสงด้วยเครื่องวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางโครงสร้างเคมีของสารโดยใช้ฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี แสดงหมู่ฟังก์ชันที่สอดคล้องกับโครงสร้างทางเคมีของไฟโบรอิน ทำให้สามารถยืนยันได้ว่าเส้นใยที่ได้เป็นเส้นใยไฟโบรอิน และสารเรืองแสงที่เติมไม่ส่งผลกระทบต่อโครงสร้างทางเคมีของไฟโบรอิน

คำสำคัญ: ไหม, ไฟโบรอิน, กระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต, สารเรืองแสง

Abstract

Fibroin, derived from cocoon, is a natural polymer used widely and increasingly in various fields. In recent years, the development of fluorescent fibroin has gained attention in the field of tissue engineering, because of its biocompatibility, oxygen/water vapor permeability, adaptive biodegradability, and ability to be tested non-invasively. In this work, silk fibroin and fluorescent silk fibroin fibers were fabricated via electrospinning, a simple process through which continuous submicron fibers can be produced. Degummed fibroin was extracted by dissolving in a calcium chloride solution. The fibroin powder was dissolved in 98% formic acid to form 10, 12 and 14 wt.% solutions. Fluorescent fibroin solutions were achieved with addition of fluoresceine sodium (FS) as fluorescent dye. The fluorescent solutions were prepared at 10 wt% fibroin with varying FS concentration at 0.1, 0.3 and 0.5 wt% and at varying 0.5 wt% FS with fibroin concentration at 10, 12, 14 wt%. The fibroin solutions were fabricated into fibers via electrospinning. The applied voltage at 20 kV. The surface morphology of silk fibroin fibers and fluorescent fibroin fibers, observed by scanning electron microscope (SEM), showed long continuous fibers. The average fiber diameter, in sub-micron range, was found to increase with fibroin concentration. The fluorescence intensity observed by fluorescence spectrophotometer was found to increase with decreasing fluorescent dye concentration. The functional groups and chemical structure of silk fibroin fibers analyzed by infrared spectroscopy (IR) were not affected by the addition of fluorescent dye.

Keywords: Silk, fibroin, Electrospinning, Fluorescent dye

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
สารบัญ	ค
สารบัญรูปภาพ	ช
สารบัญตาราง	ญ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย/ปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	3
1.3 ประโยชน์ที่ได้รับ	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	
2.1 ไหม (Silk)	4
2.1.1 ลักษณะทั่วไปของไหม	4
2.1.2 โครงสร้างและองค์ประกอบของไหม	5
2.1.3 โครงสร้างและองค์ประกอบของไฟโบรอิน	6
2.1.4 สมบัติของไหม	7
2.1.5 การประยุกต์ใช้ไฟโบรอิน	8
2.1.6 การเตรียมตัวอย่างสารละลายไฟโบรอิน	9

สารบัญ (ต่อ)

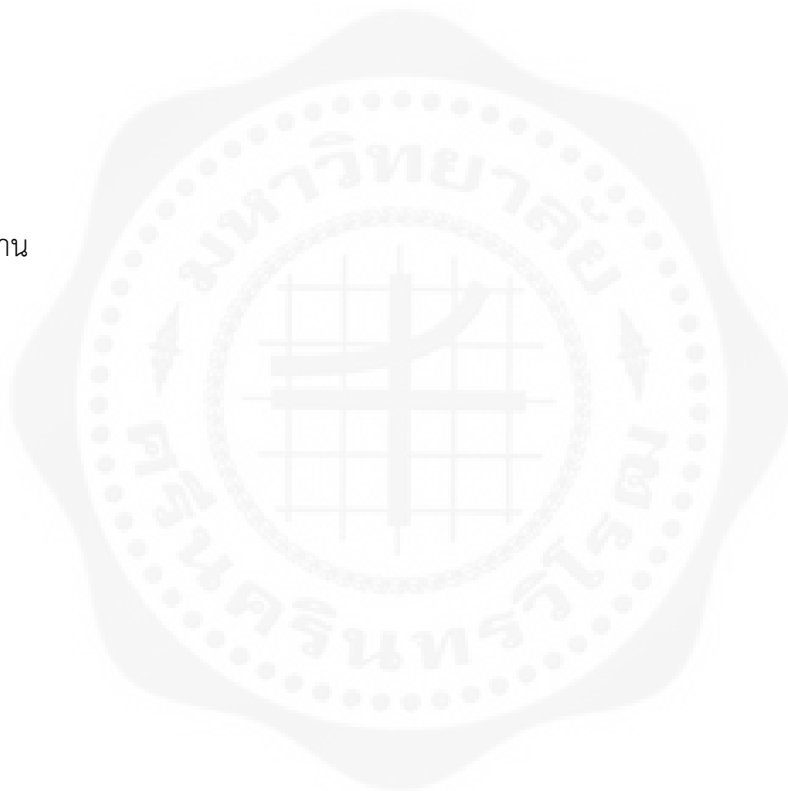
	หน้า
2.2 เทคนิคการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต (Electrospinning)	10
2.2.1 หลักการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต	10
2.2.2 การประยุกต์ใช้เทคนิคการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตเพื่อใช้ทางการแพทย์	11
2.3 สารเรืองแสง	12
2.3.1 ลักษณะทั่วไปของสารเรืองแสง	12
2.3.2 กลไกการเปล่งแสง	13
2.3.3 สารเรืองแสง Fluorescein Sodium (FS)	13
2.4 การประยุกต์ใช้สารเรืองแสงทางการแพทย์ในโครงร่างเลี้ยงเซลล์	14
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการปั่นเส้นใยไฟโบรอินและเส้นใยไฟโบรอินเรืองแสง	15
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	
3.1 วัสดุและสารเคมี	16
3.1.1 สำหรับการสกัดไฟโบรอิน	16
3.1.2 สำหรับการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต	16
3.2 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	16
3.2.1 ขั้นตอนการสกัดไฟโบรอินจากรังไหม	17
3.2.2 การเตรียมเป็นสารละลายไฟโบรอินสำหรับการขึ้นรูปโดย เทคนิคการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต	18
3.2.3 การขึ้นรูปเส้นใยด้วยเทคนิคการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต	18

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2.4 การวิเคราะห์ผลเส้นใยไฟโบรอินและเส้นใยไฟโบรอิน ที่เติมสารเรืองแสง Fluorescein Sodium	19
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล	
4.1 การสกัดไฟโบรอิน	20
4.2 ลักษณะสัณฐานของเส้นใยไฟโบรอินและเส้นใยไฟโบรอินที่เติม สารเรืองแสงจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	21
4.2.1 ลักษณะสัณฐานของเส้นใยไฟโบรอิน	21
4.2.2 ลักษณะสัณฐานของเส้นใยไฟโบรอินที่เติมสารเรืองแสง Fluorescein Sodium	22
4.2.3 สรุปผลจากภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	25
4.3 การศึกษาและตรวจวิเคราะห์เอกลักษณ์เฉพาะของเส้นใยไฟโบรอินและ เส้นใยไฟโบรอินที่เติมสารเรืองแสงด้วยเครื่องอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี	27
4.3.1 การศึกษาและตรวจวิเคราะห์เอกลักษณ์เฉพาะด้วยเทคนิคสเปกโตรสโกปี ของเส้นใยไฟโบรอิน	27
4.3.2 การศึกษาและตรวจวิเคราะห์เอกลักษณ์เฉพาะ ด้วยเทคนิคสเปกโตรสโกปี เส้นใยไฟโบรอินที่เติมสารเรืองแสง Fluorescein Sodium	28
4.4 การศึกษาและตรวจวิเคราะห์สมบัติทางแสงของเส้นใยไฟโบรอินที่เติมสารเรืองแสง Fluorescein Sodium ด้วย Fluorescence Spectrophotometer	29

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	32
5.1 สรุปผลการวิจัย	32
5.2 ข้อเสนอแนะ	32
เอกสารอ้างอิง	33
ภาคผนวก ก	37
ภาคผนวก ข	40
ประวัติย่อผู้ทำโครงการ	44



สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 วงจรชีวิตของหนอนไหม	4
รูปที่ 2.2 โครงสร้างปฐมภูมิของไฟโบรอิน	6
รูปที่ 2.3 โครงสร้างของเส้นใยไฟโบรอิน	6
รูปที่ 2.4 การประยุกต์ใช้ไฟโบรอิน	8
รูปที่ 2.5 โครงร่างเลี้ยงเซลล์ไฟโบรอิน (Fibroin Scaffold)	8
รูปที่ 2.6 กระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต	10
รูปที่ 2.7 สารประกอบเฮทเทอโรไซคลิกที่ไม่ให้การเรืองแสง	12
รูปที่ 2.8 สารประกอบเฮทเทอโรไซคลิกที่ให้การเรืองแสง	12
รูปที่ 2.9 โครงสร้างทางเคมีของ Fluorescein Sodium	13
รูปที่ 3.1 ภาพรวมขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	17
รูปที่ 3.2 การขึ้นรูปเส้นใยด้วยเทคนิคการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต	19
รูปที่ 4.1 ภาพ SEM ลักษณะสัณฐานของเส้นใยไฟโบรอินที่มีความเข้มข้น 10 wt%	21
รูปที่ 4.2 ภาพ SEM ลักษณะสัณฐานของเส้นใยไฟโบรอินที่มีความเข้มข้น 12 wt%	21
รูปที่ 4.3 ภาพ SEM ลักษณะสัณฐานของเส้นใยไฟโบรอินที่มีความเข้มข้น 14 wt%	22
รูปที่ 4.4 ภาพ SEM ลักษณะสัณฐานของเส้นใยไฟโบรอินที่มีความเข้มข้น 10 wt% ที่เติม Fluorescein Sodium 0.1 wt%	23
รูปที่ 4.5 ภาพ SEM ลักษณะสัณฐานของเส้นใยไฟโบรอินที่มีความเข้มข้น 10 wt% ที่เติม Fluorescein Sodium 0.3 wt%	23

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.6 ภาพ SEM ลักษณะสัณฐานของเส้นใยไฟโบรอินที่มีความเข้มข้น 10 wt% ที่เติม Fluorescein Sodium 0.5 wt%	24
รูปที่ 4.7 ภาพ SEM ลักษณะสัณฐานของเส้นใยไฟโบรอินที่มีความเข้มข้น 12 wt% ที่เติม Fluorescein Sodium 0.5 wt%	24
รูปที่ 4.8 ภาพ SEM ลักษณะสัณฐานของเส้นใยไฟโบรอินที่มีความเข้มข้น 14 wt% ที่เติม Fluorescein Sodium 0.5 wt%	25
รูปที่ 4.9 แสดงขนาดของเส้นใยไฟโบรอินและเส้นใยไฟโบรอินที่เติมสารเรืองแสง Fluorescein Sodium	26
รูปที่ 4.10 รูปแบบอินฟราเรดสเปกตรัมของเส้นใยไฟโบรอินและเส้นใยไฟโบรอิน ที่เติมสารเรืองแสง Fluorescein Sodium	27
รูปที่ 4.11 Liaoliao Pang และคณะ แสดงรูปแบบอินฟราเรดสเปกตรัมของเส้นใยไฟโบรอิน และเส้นใยไฟโบรอินที่เติมสารเรือง Fluorescein Sodium	29
รูปที่ 4.12 แสดงค่าความเข้มของการเรืองแสงของเส้นใยไฟโบรอินที่ เติมสารเรืองแสง Fluorescein Sodium	30
รูปที่ 4.13 Liaoliao Pang และคณะ แสดงค่าความเข้มของการเรืองแสง ของเส้นใยไฟโบรอินที่เติมสารเรืองแสง Fluorescein Sodium	31
รูปที่ ก-1 แสดงผล % เซรีซินเทียบกับเวลา	37

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ ข-1 ปรากฏการณ์ Tyndall Effect ของ CQDs	41
รูปที่ ข-2 ภาพ TEM แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาของอนุภาค CQDs	41
รูปที่ ข-3 สเปกตรัมแสดงค่าการดูดกลืนของ CQDs และ น้ำส้มเขียวหวาน	42
รูปที่ ข-4 ค่า Energy gap ของ CQDs	42
รูปที่ ข-5 แสดงค่าความเข้มของการเรืองแสงของเส้นใยไฟเบอร์อินที่เติมสารเรืองแสง CQDs	43
รูปที่ ข-6 แสดงค่าความเข้มของการเรืองแสงของเส้นใยไฟเบอร์อินที่เติม CQDs เทียบกับสารเรืองแสง Fluorescein Sodium	43

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 กรดอะมิโนที่เป็นองค์ประกอบของเซรีซินและไฟโบรอิน	5
ตารางที่ 3.1 แสดงเงื่อนไขความเข้มข้นของสารเรืองแสงในสารละลายไฟโบรอินที่ใช้ในการทดลอง	18
ตารางที่ 4.1 ปริมาณมวลของไฟโบรอิน	20
ตารางที่ 4.2 สรุปรูปขนาดเส้นใยและลูกปัดในเงื่อนไขต่างๆ	26
ตารางที่ 4.3 แสดงช่วงของการดูดกลืน รูปแบบการสั่น และพันธะของไฟโบรอิน	28
ตารางที่ 4.4 แสดงสัดส่วนไฟโบรอินต่อสารเรืองแสงที่มีลำดับความเข้มข้นการเรืองแสงจากมากไปน้อย	30
ตารางที่ ก-1 ตารางแสดงปริมาณมวลของไฟโบรอินที่ได้จากการละลายรังไหมด้วยสารละลาย Ajisawa ในสัดส่วน 1:12 และ 1:20	38
ตารางที่ ก-2 ตารางแสดงปริมาณมวลของไฟโบรอินที่ Dialysis ด้วย น้ำ DI และ Urea	39

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

ไหมเป็นวัสดุที่เกี่ยวข้องกับชีวิตมนุษย์มายาวนาน ไหมจัดเป็นโปรตีนเส้นใยธรรมชาติที่มีสมบัติดี ภายในเส้นไหมประกอบด้วยโปรตีนหลัก 2 ชนิด คือ เซรีซิน (Sericin : SS) มีลักษณะเป็นกาวที่ประกอบด้วยกรดอะมิโนที่มีขั้วในปริมาณสูงจึงละลายได้ในตัวทำละลายมีขั้ว เช่น น้ำร้อน กรด เบส หรือเอนไซม์ย่อยโปรตีน และไฟโบรอิน (Fibroin : SF) เป็นส่วนของเส้นใยที่สนใจในงานวิจัยนี้ ไฟโบรอินเป็นโปรตีนที่ละลายได้ยากในตัวทำละลายที่มีขั้ว แต่สามารถละลายได้ในสารละลายเกลือ กรด หรือเบสเข้มข้นเนื่องจากประกอบด้วยกรดอะมิโนที่ไม่มีขั้วหรือมีขั้วต่ำ โครงสร้างของไฟโบรอินมีการจัดเรียงตัวแบบ β -pleated sheet สายโซ่โปรตีนเชื่อมกันแบบ Anti-parallel ด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่คาร์บอกซิลกับหมู่อะมิโน โดยการจัดเรียงตัวแบบ β -pleated sheet นี้มีลักษณะเป็นโครงร่างผลึกส่งผลให้ไฟโบรอินมีสมบัติเชิงกลที่มีความแข็งแรงสูง [1]

นอกจากนี้ไฟโบรอินยังมีสมบัติที่ดีอื่นๆคือ มีความเข้ากันได้ทางชีวภาพ ไม่ก่อให้เกิดการต่อต้านจากระบบภูมิคุ้มกันของร่างกายมนุษย์และสามารถสลายตัวได้ทางชีวภาพ ไฟโบรอินสามารถขึ้นรูปได้หลายรูปแบบ เช่น เส้นใย (Fiber) พิล์ม (Film) ไฮโดรเจล (Hydrogel) หรือ ฟองน้ำ (Sponge) เป็นต้น ซึ่งสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้อย่างหลากหลายเพื่อพัฒนาเป็นวัสดุอุปกรณ์ทางการแพทย์ เช่น Electronic skin Wireless therapy Drug delivery หรือ โครงร่างเลี้ยงเซลล์ (Scaffold) โดยโครงร่างเลี้ยงเซลล์ไฟโบรอิน (Fibroin scaffold) มีสมบัติเชิงกลที่มีความคงตัว และมีพื้นผิวที่เหมาะสมสำหรับให้เซลล์มายึดเกาะ และเจริญเติบโต เพื่อสร้างและฟื้นฟูกระดูกอ่อน เอ็น เนื้อเยื่อของกระดูกและกล้ามเนื้อ [2] โดยต้องมีการประเมินความสามารถในการสลายตัวทางชีวภาพของโครงร่างเลี้ยงเซลล์ โดยทั่วไปแล้วใช้วิธี Invasive ทำให้ต้องมีการทำลายโครงร่างเลี้ยงเซลล์ ดังนั้นจึงมีความยุ่งยากในการตรวจการเสื่อมสภาพของโครงร่างเลี้ยงเซลล์ [3]

ไฟโบรอินได้ถูกรวบรวมเข้ากับวัสดุต่างๆ หรือได้รับการดัดแปลงทางเคมีเพื่อให้มีสมบัติที่หลากหลายและเหมาะสมสำหรับการใช้งาน เช่น การนำสารเรืองแสงรวมเข้ากับไฟโบรอิน ทำให้ไฟโบรอินมีสมบัติเรืองแสงซึ่งสามารถนำไปใช้ด้านสิ่งทอหรือด้านการแพทย์ จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่าทำให้ไฟโบรอินเรืองแสงสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การเลี้ยงหนอนไหมด้วยอาหารที่ผสมสารเรืองแสง หรือการใช้สารเรืองแสงผสมโดยตรงกับสารละลายไฟโบรอิน สำหรับสารเรืองแสงที่นิยมใช้กับไฟโบรอิน คือ Fluorescein Sodium

Rhodamine B Acridine Orange หรือ Quantum dot ซึ่งสามารถขึ้นรูปไฟโบรอินเรืองแสงได้หลายลักษณะ เช่น การเทขึ้นรูป (Casting) หรือการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต (Electrospinning)

Natalia และคณะ ได้ผลิตไฟโบรอินให้มีการเรืองแสงเป็นโครงร่างเลี้ยงเซลล์โดยการเลี้ยงหนอนไหมด้วยอาหารที่ผสมสีย้อมเรืองแสง สารเรืองแสงช่วยในการตรวจสอบการเจริญเติบโตของเซลล์และการสลายตัวทางชีวภาพเมื่อเวลาผ่านไป เป็นการตรวจสอบแบบไม่สร้างความเสียหายหรือการทำลายตัวอย่าง (Non-invasive methods) [4] Ping Liu และคณะ ได้ทำการเลี้ยงหนอนไหมด้วยอาหารที่มีสารเรืองแสงแกรฟีนควอนตัมดอท (GQDs) และทำการเทขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มของไฟโบรอินที่เรืองแสง โดยสามารถใช้งานได้กว้างขวาง เช่น Biosensor Drug delivery และ Tissue engineering [5] Liaoliao Pang และคณะ ทำการนำสารละลายไฟโบรอินผสมกับสีย้อมเรืองแสง Fluorescein Sodium Rhodamine B และ Acridine Orange ผลการเรืองแสงของเส้นใยไฟโบรอินจะเปลี่ยนไป เมื่อทำการเปลี่ยนความเข้มข้นของสีย้อม และได้ทำการขึ้นรูปเส้นใยไฟโบรอินเรืองแสงด้วยวิธีการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต (Electrospinning) เพื่อสร้างเป็นวัสดุสิ่งทอ [6]

การขึ้นรูปเส้นใยแบบเรืองแสงด้วยกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตได้รับความสนใจในช่วงที่ผ่านมา เพราะเป็นกระบวนการที่ไม่ซับซ้อน สามารถผลิตเส้นใยที่มีขนาดเล็กและยาวต่อเนื่องโดยใช้ศักย์ไฟฟ้า แผ่นเส้นใยที่ได้จะมีสมบัติเฉพาะที่โดดเด่น คือ พื้นที่ผิวต่อมวลหรือพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูง มีความเป็นรูพรุน และมีสมบัติเชิงกลสูง [7] ในแง่การใช้สารเรืองแสง มีรายงานหลายฉบับเกี่ยวกับการใช้งานด้านชีวการแพทย์และเทคโนโลยีชีวภาพโดยใช้ไหมไฟโบรอินที่เรืองแสง และสำหรับสารเรืองแสงที่นิยมใช้ทางการแพทย์คือ Fluorescein Sodium (FS) ซึ่งเป็นสารอินทรีย์สังเคราะห์หลักลักษณะเป็นผงละเอียดมีสีส้มหรือสีแดง เมื่อสัมผัสกับแสงที่มีความยาวคลื่น 465–490 nm (สีน้ำเงิน) สารประกอบจะปล่อยแสงที่มีความยาวคลื่น 520–530 nm (สีเขียว–เหลือง) สารเรืองแสง Fluorescein Sodium เมื่อละลายในน้ำหรือแอลกอฮอล์จะได้สีเขียวเหลืองเรืองแสง และถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายโดยเฉพาะในด้านการแพทย์ เช่น ใช้เพื่อตรวจสอบความพอดีของคอนแทคเลนส์หรือตรวจสอบความผิดปกติของผิวลูกตาได้ [8] Fluorescein Sodium ถูกนำไปใช้ทางการแพทย์เป็นเวลานานเพื่อวัตถุประสงค์ในการวินิจฉัย ซึ่งเป็นที่ยอมรับว่าปลอดภัยอย่างกว้างขวาง [9]

ในงานวิจัยนี้จึงมีจุดมุ่งหมายที่จะผลิตเส้นใยไฟโบรอินและเส้นใยไฟโบรอินเรืองแสงจากสารเรืองแสง Fluorescein Sodium ด้วยเทคนิคการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต โดยศึกษาเงื่อนไขต่างๆในการสกัดไฟโบรอินจากรังไหม การขึ้นรูปเส้นใย วิเคราะห์ลักษณะสัณฐาน และสมบัติการเรืองแสงของเส้นใยที่ได้

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาและทำการสกัดไฟโบรอินจากรังไหม
- 2) เพื่อศึกษาและทำการขึ้นรูปเส้นใยไฟโบรอินโดยเทคนิคการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต
- 3) เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการขึ้นรูปเส้นใยไฟโบรอินที่เติมสารเรืองแสง โดยเทคนิคการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต
- 4) เพื่อวิเคราะห์ลักษณะพื้นฐานของเส้นใยไฟโบรอินและเส้นใยไฟโบรอินที่เติมสารเรืองแสงจากการขึ้นรูปโดยเทคนิคการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต
- 5) เพื่อศึกษาสารเรืองแสงที่มีผลต่อการเรืองแสงของไฟโบรอิน

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) ศึกษาเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการสกัดไฟโบรอินจากรังไหม
- 2) หาสภาวะเงื่อนไขที่เหมาะสมในการขึ้นรูปเส้นใยไฟโบรอินและเส้นใยไฟโบรอินที่เติมสารเรืองแสงโดยเทคนิคการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต
- 3) วิเคราะห์ลักษณะพื้นฐาน สมบัติทางแสงและพันธะเคมีของเส้นใยไฟโบรอินด้วย Scanning Electron Microscope (SEM) Fluorescence Spectrophotometer และ Fourier-Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) ตามลำดับ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) สามารถสกัดไฟโบรอินจากรังไหมได้เป็นสารละลายไฟโบรอิน
- 2) สารเรืองแสงสามารถละลายเข้ากันได้ดีกับสารละลายไฟโบรอิน
- 3) สามารถขึ้นรูปเส้นใยไฟโบรอินและเส้นใยไฟโบรอินที่เติมสารเรืองแสงโดยการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตได้เส้นใยไฟโบรอินและเส้นใยไฟโบรอินเรืองแสง
- 4) ได้ความรู้เกี่ยวกับการผลิตเส้นใยไฟโบรอินที่เติมสารเรืองแสงที่จะเป็นประโยชน์แก่ผู้ที่สนใจและอาจสามารถนำไปใช้ประโยชน์ทางด้านการแพทย์ได้ในอนาคต

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ไหม (Silk)

2.1.1 ลักษณะทั่วไปของไหม

เส้นไหมเป็นโปรตีนชนิดเส้นใยและส่วนมากผลิตจากแมลงใน Order Lepidopteran วงศ์ Bombycidae หรือไหมบ้าน (Mulberry silk) และ Saturniidae หรือไหมป่า (Non-mulberry หรือ Wild silk) ไหมบ้านจะกิน ใบหม่อนเป็นอาหาร ส่วนไหมป่าจะกินใบพืชชนิดอื่น เช่น ใบละหุ่ง หรือใบมันสำปะหลัง วงจรชีวิตของไหม ประกอบด้วย 4 ระยะ คือ ระยะไข่ ระยะตัวหนอน ระยะดักแด้ และ ระยะผีเสื้อ แสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 วงจรชีวิตของหนอนไหม [10]

2.1.2 โครงสร้างและองค์ประกอบของไหม

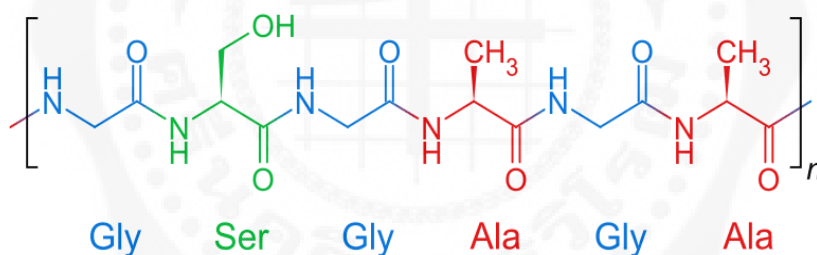
ไหมประกอบด้วยโปรตีนหลัก 2 ชนิด คือ ไฟโบรอิน (Fibroin) และเซรีซิน (Sericin) ไฟโบรอินประกอบด้วยกรดอะมิโนที่สำคัญคือ ไกลซีน (ร้อยละ43) อะลานีน (ร้อยละ30) และเซอรีน (ร้อยละ12) สายโพลิโกเพปไทด์มอนอเมอร์มีลำดับกรดอะมิโน (ไกลซีน-อะลานีน-ไกลซีน-อะลานีน-ไกลซีน-เซอรีน/ไทโรซีน) $_n$ ซึ่งเป็นกรดอะมิโนขนาดเล็กที่ไม่มีขั้ว สำหรับปริมาณกรดอะมิโนชนิดต่างๆที่พบในไฟโบรอิน ทำให้ไฟโบรอินละลายได้ยากในตัวทำละลายที่มีขั้ว ส่วนเซรีซินประกอบด้วยกรดอะมิโนที่มีขั้วในอัตราที่สูง นอกจากไกลซีน อะลานีน และเซอรีนแล้ว เซรีซินยังประกอบด้วยกรดกลูตามิก ทรีโอนีนและไทโรซีน แสดงดังตารางที่ 2.1 [1]

ตารางที่ 2.1 กรดอะมิโนที่เป็นองค์ประกอบของเซรีซินและไฟโบรอิน (กรดอะมิโนเป็นกรัมในโปรตีน 100 กรัม)

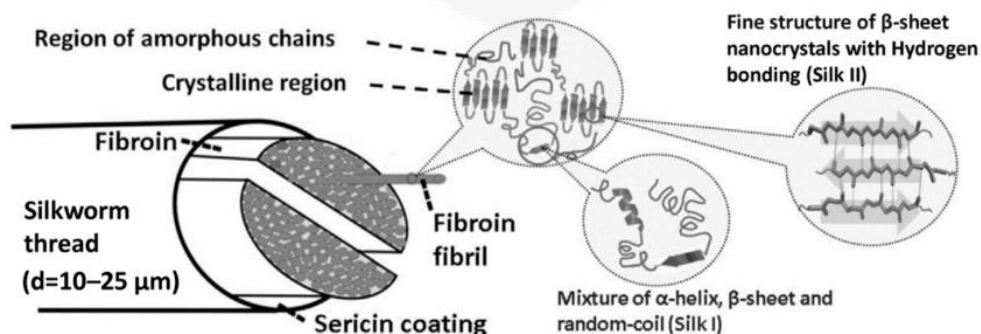
กรดอะมิโน		เซรีซินทั้งหมด	ไฟโบรอิน
Non-polar Amino acid	Glycine	8.66	41.25
	Alanine	3.51	28.87
	Valine	3.41	2.63
	Leucine	1.02	0.32
	Isoleucine	0.77	0.44
	Proline	0.66	-
	Phenylalanine	0.50	0.58
Acid amino acid	Aspartic acid	17.03	0.76
	Glutamic acid	7.46	0.69
Basic amino acid	Arginine	6.07	0.86
	Histidine	1.88	-
	Lysine	4.95	0.17
Oxy amino acid	Serine	27.32	13.22
	Threonine	7.48	0.81
	Tyrosine	4.43	10.96
Sulfur-complex Amine acid	Methionine	-	-
	Cystine	0.20	-

2.1.3 โครงสร้างและองค์ประกอบของไฟโบรอิน

ไฟโบรอินเป็นสารประกอบโปรตีนประเภทเส้นใย (Fibrous protein) ที่ถูกสร้างมาจากต่อมบริเวณส่วนหลัง (Posterior silk gland) ของหนอนไหม (*Bombyx mori*) มีโครงสร้างปฐมภูมิที่ประกอบด้วยกรดอะมิโน 6 หน่วย เรียงลำดับเป็นหน่วยซ้ำ ดังนี้ (Gly - Ser - Gly - Ala - Gly - Ala)_n [11] แสดงดังรูปที่ 2.2 โครงสร้างทุติยภูมิของไฟโบรอินประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก คือ ส่วนที่มีการจัดเรียงตัวเป็นผลึก และส่วนที่มีการจัดเรียงตัวแบบอสัณฐาน นอกจากนี้ส่วนที่มีโครงสร้างการจัดเรียงตัวเป็นผลึกยังสามารถแบ่งย่อยออกเป็น 3 แบบ ได้แก่ silk I silk II และ silk III โดย silk I มีโครงสร้างก่อนเปลี่ยนแปลงไปเป็นผลึกเส้นใย (Pre-spun pseudo crystalline) ที่เรียกว่าโครงสร้างแบบเกลียวคู่หรือโครงสร้างแบบเกลียว α -helix สามารถละลายน้ำได้ (Water soluble) เป็นโครงสร้างที่ไม่เสถียรสามารถเปลี่ยนโครงสร้างเป็น silk II ได้ และ silk II มีรูปแบบโครงสร้างเป็นเส้นใยไหมและถือเป็นโครงสร้างหลักของไฟโบรอิน ซึ่งประกอบด้วยโครงสร้างการจัดเรียงตัวแบบ β -pleated sheet สายโซ่โปรตีนเชื่อมกันแบบไม่ขนาน (Anti-parallel) ด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่คาร์บอกซิลกับหมู่อะมิโนโดยระหว่าง β -pleated sheet แต่ละแผ่นซ้อนทับกันด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ส่งผลให้ไฟโบรอินมีสมบัติเชิงกลที่มีความแข็งแรงสูงและไม่สามารถละลายน้ำได้โดยตรง [12] แสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.2 โครงสร้างปฐมภูมิของไฟโบรอิน [13]



รูปที่ 2.3 โครงสร้างของเส้นใยไฟโบรอิน [14]

silk I เป็นโครงสร้างธรรมชาติดั้งเดิมของโปรตีนไฟโบรอินขณะที่ยังอยู่ในต่อมส่วนหลังของหนอนไหมซึ่งเป็นโครงสร้างที่ไม่เสถียร สามารถละลายได้ในน้ำ โครงสร้างที่ไม่เสถียรของ silk I นี้จะเปลี่ยนไปอยู่ในรูป silk II ระหว่างกระบวนการชักใยและการสร้างรังไหม โดยที่สาร intermediate ระหว่าง silk I และ silk II มีลักษณะเป็น Liquid crystalline phase จะถูกพ่นออกมาระหว่างชักใยและช่วยในการเรียงตัวของโมเลกุลโปรตีนให้เป็นระเบียบและได้ผลผลิตสุดท้ายเป็นเส้นใย [1] นอกจากนี้ silk I ยังสามารถเปลี่ยนโครงสร้างเป็น silk II ได้เมื่อได้รับความร้อน (Heating) การปั่นกว (Spinning) การให้แรงทางไฟฟ้า (Electric field) หรือการเติมด้วยสารละลายที่มีขี้ผึ้ง เช่น เมทานอล หรือ อะซิโตน [11]

ไฟโบรอินเป็นเส้นใยที่มีโครงสร้างประกอบด้วยโปรตีน 3 หน่วยย่อย ได้แก่

1. สายโซ่โปรตีนน้ำหนักโมเลกุลสูง (Heavy chain) ประมาณ 350 kDa ประกอบด้วยกรดอะมิโนที่สำคัญ 2 ชนิด คือ ไกลซีน (Gly) และอะลานีน (Ala)
2. สายโซ่โปรตีนน้ำหนักโมเลกุลต่ำ (Light chain) ประมาณ 25 kDa ประกอบด้วยกรดอะมิโนหลายชนิด เช่น ลิวซีน (Leu) ไอโซลิวซีน (Ile) และ วาลีน (Val) เป็นต้น
3. ไกลโคโปรตีน P25 (Glycoprotein P25) มีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 30 kDa ประกอบด้วยพอลิเปปไทด์ และโอลิโกแซ็กคาไรด์ (Oligosaccharide) ซึ่งประกอบด้วยน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว 2 - 10 โมเลกุล โดยส่วนใหญ่จะเป็นน้ำตาลแมนโนส (Mannose)

สายโซ่โปรตีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงแสดงการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ ซึ่งประกอบด้วยกรดอะมิโนที่ไม่ชอบน้ำ สำหรับสายโซ่โปรตีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ มีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 25 kDa โครงสร้างของสายโซ่ประกอบด้วยกรดอะมิโนที่แสดงประจุ ซึ่งสายโซ่โปรตีนในส่วนนี้เชื่อมต่อกับสายโซ่โปรตีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงด้วยพันธะไดซัลไฟด์ (Disulfide bond) และส่วนสำคัญที่ทำให้สายโซ่เชื่อมต่อกันโดยสมบูรณ์คือ ไกลโคโรโปรตีน P25 มีน้ำหนักโมเลกุล 30 kDa ทำหน้าที่เชื่อมสายโซ่ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงและโมเลกุลต่ำเข้าด้วยกันโดยเชื่อมกันตรงบริเวณที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic interaction) ซึ่งอัตราส่วนระหว่างสายโซ่ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง น้ำหนักโมเลกุลต่ำ และไกลโคโรโปรตีน P25 มีค่าประมาณ 6 : 6 : 1 โดยโมล [11]

2.1.4 สมบัติของไหม

2.1.4.1 ความแข็งแรง/ความยืดหยุ่น

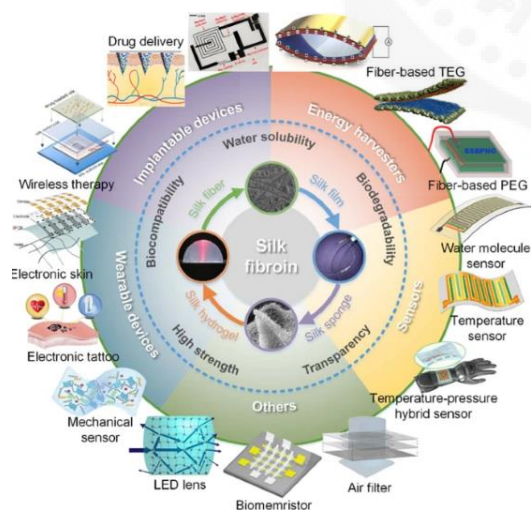
ไหมมีความแข็งแรงสูง จากรายงานพบว่าเส้นไหมมีความแข็งแรงตั้งแต่ 4.8 GPa ขึ้นไป ความแข็งแรงของเส้นไหมขณะเปียกจะลดลงร้อยละ 15-20 เมื่อเทียบกับเส้นไหมแห้ง และเส้นไหมสามารถยืดหยุ่นได้ดีโดยสามารถยืดได้ถึงร้อยละ 20 ของความยาวเดิม [1]

2.1.4.2 การสลายตัวทางชีวภาพ

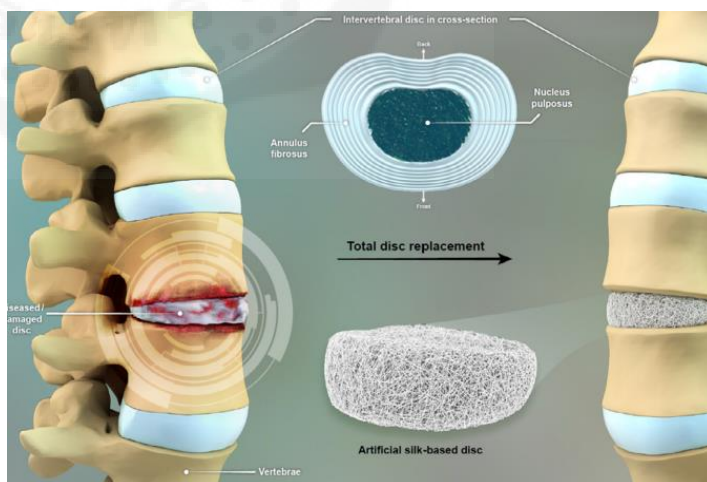
สมบัติในการสลายตัวทางชีวภาพของไหมถือว่ามีความสำคัญต่อการนำไปใช้งานโดยเฉพาะในทางการแพทย์ เส้นไหมจะสูญเสียความแข็งแรงภายในระยะเวลา 1 ปี และเมื่อเวลาผ่านไป 2 ปี เอนไซม์ไทโรซิเนส (Tyrosinase) ภายในร่างกายจะสามารถย่อยไหมตามกลไกการกำจัดสิ่งแปลกปลอมที่เข้าสู่ร่างกาย จึงถือว่าไหมเป็นวัสดุที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ แต่ในทางตรงกันข้ามเส้นไหมที่อยู่บริเวณเปลือกนอกกรังไหมจะมีความคงทนเป็นเวลานานเนื่องจากว่าหนอนไหมจะสร้างสารที่ยับยั้งเอนไซม์โปรตีเอส (Protease) ภายในต่อมไหมและหลั่งออกมาเก็บไว้ที่บริเวณเปลือกนอกกรังไหมเพื่อป้องกันไม่ให้เส้นไหมถูกทำลายด้วยเอนไซม์ดังกล่าว [1]

2.1.5 การประยุกต์ใช้ไฟโบรอิน

ไฟโบรอินสามารถขึ้นรูปได้หลายรูปแบบไม่ว่าจะเป็นเส้นใย (Fiber) พิล์ม (Film) ไฮโดรเจล (Hydrogel) หรือ ฟองน้ำ (Sponge) ซึ่งนำมาใช้ประโยชน์ได้อย่างหลากหลายเพื่อพัฒนาวัสดุอุปกรณ์ทางการแพทย์ เช่น Electronic skin Wireless therapy Drug delivery หรือ โครงร่างเลี้ยงเซลล์ (Scaffold) แสดงดังรูปที่ 2.4 โดยโครงร่างเลี้ยงเซลล์ไฟโบรอิน (Fibroin scaffold) มีสมบัติทางกลที่มีความคงตัว มีพื้นผิวที่เหมาะสมสำหรับให้เซลล์มายึดเกาะและเจริญเติบโต เพื่อสร้างและฟื้นฟูกระดูกอ่อน เอ็น เนื้อเยื่อของกระดูกและกล้ามเนื้อ แสดงดังรูปที่ 2.5 [2] โดยต้องมีการประเมินความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพของโครงร่างเลี้ยงเซลล์โดยทั่วไปแล้วใช้วิธี Invasive ทำให้ต้องมีการทำลายโครงร่างเลี้ยงเซลล์จำนวนมาก ดังนั้นจึงมีความยุ่งยากในการตรวจการเสื่อมสภาพของโครงร่างเลี้ยงเซลล์ [3]



รูปที่ 2.4 การประยุกต์ใช้ไฟโบรอิน [15]



รูปที่ 2.5 โครงร่างเลี้ยงเซลล์ไฟโบรอิน (Fibroin Scaffold) [2]

2.1.6 การเตรียมตัวอย่างสารละลายไฟโบรอิน

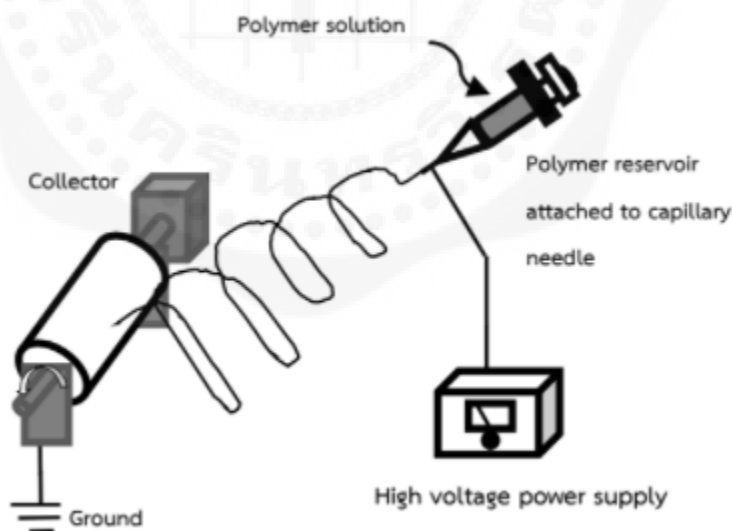
สารละลายไฟโบรอินสามารถเตรียมได้หลายวิธี โดยที่ไฟโบรอินเป็นโปรตีนที่มีลักษณะเป็นผลึกไม่ละลายน้ำ แต่สามารถละลายได้ในสารละลายเกลือ กรด หรือเบสเข้มข้นเนื่องจากประกอบด้วยกรดอะมิโนที่ไม่มีขั้วหรือมีขั้วต่ำ มีแรงดึงดูดสูง จับกับไขมันได้ดี และไฟโบรอินเป็นโปรตีนที่เข้ากับร่างกายของมนุษย์ได้ดี ดังนั้นไฟโบรอินจึงถูกนำมาใช้เป็นวัสดุทางการแพทย์ที่ต้องสัมผัสกับอวัยวะของมนุษย์ จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่ามีวิธีการคิดค้นวิธีการละลายไฟโบรอินแบบต่าง ๆ [16] ยกตัวอย่างเช่น

- 1) การละลายไฟโบรอินโดยใช้สารละลาย Ajisawa's reagent $\text{CaCl}_2 : \text{H}_2\text{O} : \text{Ethanol}$ (1 : 8 : 2) นำสารละลาย Ajisawa's reagent ผสมกับเส้นไหมที่ผ่านการลอกกาไหมออกแล้ว ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 75 °C พร้อมกับคนให้เข้ากันจนละลาย จากนั้น Dialysis โดยใช้ Cellulose tube ด้วยน้ำที่ปราศจากไอออนหรือน้ำกลั่น และตรวจสอบเกลือออก Cellulose tube ที่ผ่านการ Dialysis ด้วยสารละลาย AgNO_3 จนไม่พบตะกอน จะได้สารละลายไฟโบรอินบริสุทธิ์ [17]
- 2) การละลายไฟโบรอินโดยใช้สารละลาย $\text{CaCl}_2 : \text{H}_2\text{O} : \text{Ethanol}$ (1 : 8 : 2) ทำการละลายเส้นไหมที่ผ่านการลอกกาไหมแล้ว ที่อุณหภูมิ 60 °C นาน 30 นาที จากนั้นกรองแล้วทำ Dialysis กับน้ำที่ปราศจากไอออน โดยผ่าน Membrane เป็นเวลา 3 วัน จะได้สารละลายไฟโบรอิน จากนั้นนำสารละลายที่ได้มาทำแห้งด้วยวิธี Freeze dry จะได้ผงไฟโบรอินที่มีมวลโมเลกุล 5,000 – 30,000 g/mol [18]
- 3) การละลายไฟโบรอินโดยใช้สารละลาย CaCl_2 ผสม Ethanol 20% (v/v) ทำการละลายเส้นไหมที่ผ่านการลอกกาไหมแล้ว โดยให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 100 °C นาน 1-5 ชั่วโมง จากนั้น Dialysis โดยใช้ Cellulose tube ด้วยน้ำกลั่น หรือน้ำที่ปราศจากไอออน 4 °C เป็นเวลา 2 วัน จากนั้นนำสารละลายที่ผ่านการ Dialyzed ไป Centrifuged ที่ 8000 rpm นาน 15 นาที จะได้สารละลายใสของไฟโบรอินอยู่ส่วนบน [19]
- 4) การละลายไฟโบรอินโดยใช้สารละลาย LiBr ความเข้มข้น 9 M ทำการละลายเส้นไหมที่ผ่านการลอกกาไหมแล้ว ที่อุณหภูมิ 40 °C จากนั้น Dialysis ด้วยน้ำกลั่นที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 4 วัน จะได้สารละลายไฟโบรอินใส [20]

2.2 เทคนิคการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต (Electrospinning)

2.2.1 หลักการการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต

กระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต คือ กระบวนการผลิตเส้นใยโดยอาศัยการให้ศักย์ไฟฟ้ากำลังสูงทำให้เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างเข็มโลหะที่ต่อกับหลอดบรรจุสารละลายพอลิเมอร์และวัสดุรองรับเส้นใย เมื่อศักย์ไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นสารละลายพอลิเมอร์ที่ปลายเข็มโลหะจะเริ่มเปลี่ยนรูปร่างจากทรงกลมเป็นรูปโคน หรือเรียกว่า Taylor Cone และเมื่อแรงทางไฟฟ้ามีค่ามากกว่าแรงตึงผิวของสารละลายพอลิเมอร์ สารละลายจะพุ่งออกจากปลายโคนเป็นลำเคลื่อนที่ไปยังวัสดุรองรับ ระหว่างการเคลื่อนที่ของเส้นใยจะเกิดการแกว่งและการยืดตัวของเส้นใย และเกิดการระเหยของตัวทำละลาย สุดท้ายเกิดการซ้อนทับของเส้นใยที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็กบนวัสดุรองรับ ได้แผ่นเส้นใยแบบไม่ถักทอ สำหรับอุปกรณ์พื้นฐานที่ใช้ในกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตแสดงดังรูปที่ 2.6 ประกอบด้วย หลอดบรรจุสารละลายพอลิเมอร์ที่ติดเข็มโลหะ (Polymer reservoir attached to capillary needle) แหล่งกำเนิดศักย์ไฟฟ้ากำลังสูง (High voltage power supply) และวัสดุรองรับเส้นใย (Collector) แม้ว่ากระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตจะไม่ซับซ้อนมาก แต่ยังคงมีตัวแปรอื่นที่มีอิทธิพลต่อลักษณะของเส้นใย เช่น ศักย์ไฟฟ้า อัตราการไหลของสารละลายพอลิเมอร์ ระยะห่างระหว่างหลอดบรรจุสารละลายพอลิเมอร์กับวัสดุรองรับ ความเข้มข้นของสารละลายพอลิเมอร์ การระเหยของตัวทำละลาย และการนำไฟฟ้าของสารละลายพอลิเมอร์ เป็นต้น [21]



รูปที่ 2.6 กระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต [21]

2.2.2 การประยุกต์ใช้เทคนิคการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตเพื่อใช้ทางการแพทย์ (วิศวกรรมเนื้อเยื่อ)

วิศวกรรมเนื้อเยื่อ เป็นกระบวนการสร้างเนื้อเยื่อเพื่อทดแทน ซ่อมแซมเนื้อเยื่อหรืออวัยวะที่เกิดจากการสูญเสียและบาดเจ็บ เพื่อปรับปรุงการทำงานของเนื้อเยื่อหรืออวัยวะซึ่งไม่สามารถสร้างขึ้นเอง หรืองอกใหม่ได้ในมนุษย์ กระบวนการนี้ต้องใช้การพัฒนาความรู้ด้านต่าง ๆ ได้แก่ วิศวกรรมวัสดุ ชีววิทยาของเซลล์ และวิศวกรรมชีวเคมี เพื่อใช้ในการพัฒนาวัสดุที่เข้ากันได้กับร่างกาย ทำหน้าที่เป็นโครงร่างเลี้ยงเซลล์ เพื่อให้เซลล์ยึดเกาะ แบ่งตัว เจริญเติบโต พัฒนาเป็นเนื้อเยื่อใหม่และสามารถทำงานได้ตามที่ต้องการอย่างสมบูรณ์ โดยโครงร่างเลี้ยงเซลล์ที่ดีควรมีลักษณะดังนี้ คือ มีความเข้ากันได้กับเนื้อเยื่อของร่างกาย ไม่เกิดการต่อต้านโดยภูมิคุ้มกันของร่างกาย มีพื้นผิวที่เหมาะสมสำหรับให้เซลล์ยึดเกาะ เจริญเติบโตและเปลี่ยนแปลงเพื่อทำหน้าที่ต่างๆ ตามร่างกายหรืออวัยวะที่ได้รับการปลูกฝัง มีความพรุนสูง มีการเชื่อมต่อของรูพรุนภายในโครงร่างเลี้ยงเซลล์ รูพรุนมีขนาดเหมาะสมสำหรับให้เซลล์และสารอาหารต่างๆ เกิดการแลกเปลี่ยนและเคลื่อนที่ผ่านเข้าออกได้ง่าย ทำให้เกิดสภาวะแวดล้อมที่เหมาะสมภายในโครงร่างเลี้ยงเซลล์ นอกจากนี้โครงร่างเลี้ยงเซลล์ควรสามารถควบคุมการสลายตัวทางชีวภาพ และมีสมบัติเชิงกลที่เหมาะสม เพื่อให้โครงร่างเลี้ยงเซลล์สามารถคงรูปและมีความแข็งแรงอยู่ได้ในระหว่างการเจริญเติบโตและการพัฒนาของเซลล์เป็นเนื้อเยื่อใหม่ได้อย่างสมบูรณ์ [21]

จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการศึกษากระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตสำหรับผลิตโครงร่างเลี้ยงเซลล์ใช้ในวิศวกรรมเนื้อเยื่อ ตัวอย่างเช่น

Yoshimoto และคณะ ทำการศึกษาศักยภาพของแผ่นเส้นใยพอลิคาโพรแล็กโตน (Polycaprolactone) ที่ขึ้นรูปโดยการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต สำหรับประยุกต์ใช้ในวิศวกรรมเนื้อเยื่อกระดูก จากการทดลองพบว่าเมื่อเลี้ยงเซลล์เป็นระยะเวลา 4 สัปดาห์ พื้นผิวของวัสดุถูกครอบคลุมด้วย Mesenchymal stem cell นอกจากนี้ยังพบว่าเกิดการสะสมแร่ธาตุของกระดูก (Mineralization) และเกิดคอลลาเจน ชนิดที่ 1 (Collagen type I) ที่พื้นผิวของวัสดุ แสดงว่าวัสดุนี้เหมาะสมสำหรับใช้เป็นวัสดุในวิศวกรรมเนื้อเยื่อกระดูก

Bhattarai และคณะ ได้ขึ้นรูปแผ่นเส้นใยอีเล็กโตรสปิน Poly (p-dioxanone-co-L-lactide)-block-poly (ethylene glycol) (PPDO/PLLA-b-PEG) copolymer โดยศึกษาการเจริญเติบโตของเซลล์และศึกษาลักษณะสัณฐานของวัสดุ จากการทดลอง พบว่าวัสดุนี้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 380 nm มีขนาดรูพรุน 8 μm นอกจากนี้วัสดุยังช่วยให้เซลล์สามารถยึดเกาะและเจริญเติบโต ทำให้มีประสิทธิภาพสามารถนำไปใช้ในงานวิศวกรรมเนื้อเยื่อผิวหนัง อีกทั้งยังได้นำแผ่นเส้นใยอีเล็กโตรสปินไหมไฟโบรอินที่มีการเติม Bone morphogenetic protein-2 (BMP-2) และอนุภาคนาโน Hydroxyapatite (nHAp) ขึ้นรูปด้วยกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต จากนั้นวัสดุโครงร่างเลี้ยงเซลล์นี้ได้ถูกนำไปศึกษาการสร้างเนื้อเยื่อกระดูกจาก Mesenchymal stem cell จากผลการศึกษาพบว่าการรวมตัวกันของ BMP-2 และ nHAp ในแผ่นเส้นใย

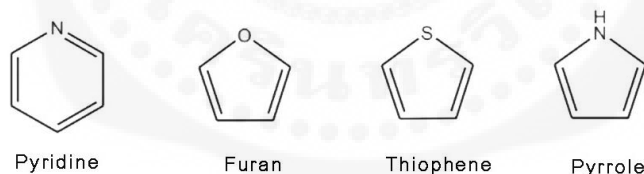
อิเล็กโตรสปีนไหมไฟโบรอินสามารถสร้างเซลล์เนื้อเยื่อกระดูกได้และมีประสิทธิภาพนำไปใช้ในงานวิศวกรรมเนื้อเยื่อกระดูก

Kumbar และคณะ ได้ทำการศึกษาผลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยอิเล็กโตรสปีน Poly (lactic-co-glycolic acid) (PLGA) ต่อการสร้างเนื้อเยื่อผิวหนังใหม่ จากผลการทดลองพบว่าเส้นใยอิเล็กโตรสปีนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางในช่วง 350-1100 nm เซลล์สามารถเจริญเติบโตได้ดี เหมาะสำหรับใช้เป็นวัสดุโครงร่างเลี้ยงเซลล์สำหรับวิศวกรรมเนื้อเยื่อผิวหนัง [21]

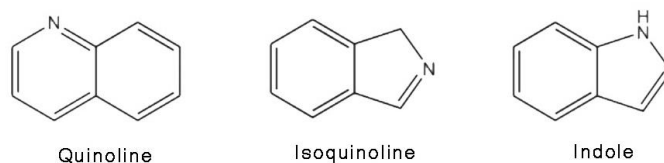
2.3 สารเรืองแสง

2.3.1 ลักษณะทั่วไปของสารเรืองแสง

สารเรืองแสงเป็นกลุ่มสารอินทรีย์ประเภทหนึ่ง โครงสร้างส่วนใหญ่มีลักษณะเป็นวงอะโรมาติก เป็นสารประกอบพวกอะลิฟาติกและอะลิไซคลิกคาร์บอนิลบางชนิด โดยเฉพาะเมื่อมีพันธะคู่แบบคอนจูเกต (Conjugated double-bonds) จะสามารถให้การเรืองแสงได้ ส่วนสารประกอบเฮเทอโรไซคลิก (Heterocyclic compounds) อย่างง่ายจะไม่ให้การเรืองแสง เช่น ไพริดีน (Pyridine) ฟูแรน (Furan) ไทโอฟิน (Thiophene) และไพโรล (Pyrrole) แสดงดังรูปที่ 2.7 และหากเฮเทอโรไซคลิกอยู่ติดกับวงอะโรมาติก (Fused-ring structures) จะสามารถให้การเรืองแสงได้ เช่น ควิโนลีน (Quinoline) ไอโซควิโนลีน (Isoquinoline) และอินโดล (Indole) แสดงดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.7 สารประกอบเฮเทอโรไซคลิกที่ไม่ให้การเรืองแสง [22]



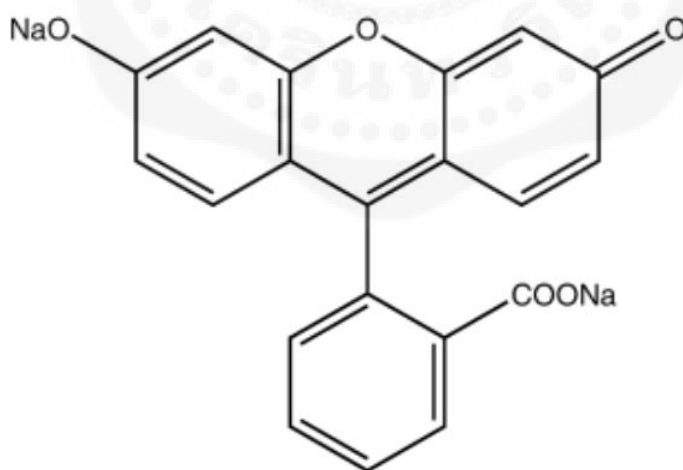
รูปที่ 2.8 สารประกอบเฮเทอโรไซคลิกที่ให้การเรืองแสง [22]

2.3.2 กลไกการเปล่งแสง

กลไกการเปล่งแสง (Luminescence) มีหลายชนิด ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับแหล่งของพลังงานที่ทำให้โมเลกุลไปอยู่ในสถานะกระตุ้น (Excited state) ซึ่งถ้าอะตอมหรือโมเลกุลถูกกระตุ้นโดยการดูดกลืนรังสีแม่เหล็กไฟฟ้า เรียกว่า Photoluminescence โดยเมื่อโมเลกุลดูดกลืนรังสีแม่เหล็กไฟฟ้า อิเล็กตรอนในโมเลกุลจะเปลี่ยนจากสถานะพื้น (Ground state) ไปยังสถานะกระตุ้น ซึ่งสถานะนี้โมเลกุลจะมีความเครียดสูงจึงปลดปล่อยพลังงานออกมาเพื่อกลับสู่สถานะพื้นทำให้เกิดการเรืองแสงขึ้น โดยถ้าในกระบวนการคายพลังงานนี้ใช้เวลา 10-15 วินาที หรือน้อยกว่านั้น เรียกว่า การวาวแสง หรือ Fluorescence แต่ถ้าใช้เวลาในการเกิดมากเป็นนาทีหรือชั่วโมง เรียกว่า การเรืองแสงหรือ Phosphorescence นอกจากนี้ถ้าโมเลกุลใช้แหล่งพลังงานที่ได้จากปฏิกิริยาเคมี เรียกว่า การเรืองแสงทางเคมี (Chemiluminescence) ถ้าโมเลกุลได้รับพลังงานจากอนุภาคที่มีพลังงานสูง เรียกว่า การเรืองแสงด้วยรังสี (Radioluminescence) และการเรืองแสงทางชีวภาพ (Bioluminescence) ซึ่งเป็นการเรืองแสงที่เกิดขึ้นในสิ่งมีชีวิตโดยเป็นผลมาจากปฏิกิริยาชีวเคมีภายในเซลล์ของสิ่งมีชีวิต [22]

2.3.3 สารเรืองแสง Fluorescein Sodium (FS)

Fluorescein Sodium (FS) สูตรทางเคมี คือ $C_{20}H_{10}Na_2O_5$ น้ำหนักโมเลกุล 376.3 แสดงดังรูปที่ 2.9 มีลักษณะเป็นผงละเอียดสีส้มแดง สามารถละลายในน้ำและแอลกอฮอล์ได้ เมื่อสัมผัสกับแสงที่มีความยาวคลื่น 465–490 nm (สีน้ำเงิน) สารประกอบจะปล่อยแสงที่มีความยาวคลื่น 520–530 nm (สีเขียว-เหลือง) Fluorescein Sodium ถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลาย และสามารถเรืองแสงได้สูงสุดในช่วง pH 8-9



รูปที่ 2.9 โครงสร้างทางเคมีของ Fluorescein Sodium [23]

Fluorescein Sodium บริสุทธิ์ถือว่าไม่เป็นพิษ ผลข้างเคียงที่เป็นพิษมักเกิดจากสิ่งสกปรก ระดับความเป็นพิษต่อร่างกายของมนุษย์ สามารถคำนวณบนพื้นฐานของการทดลองกับหนูตัวออกมาเป็นค่า LD50 ซึ่งจะคิดจากปริมาณของสารเคมีเป็นมิลลิกรัม (mg) ต่อน้ำหนักตัวหนูเป็นกิโลกรัม (kg) ในการใช้จักษุวิทยาในมนุษย์ ปริมาณปกติคือประมาณ 15 mg/kg สำหรับการตรวจจอประสาทตา สูงสุด 30 mg/kg สำหรับการตรวจส่วนหน้าของดวงตา ไม่มีหลักฐานการก่อมะเร็งหรือผลที่เป็นอันตรายอื่นๆ ในหนูที่ได้รับสารละลาย 1% เป็นเวลาหลายสัปดาห์ Lipson และ Yannuzzi รายงานว่าในการใช้ Fluorescein Sodium ทางคลินิก โดยการฉีด Fluorescein Sodium ทางหลอดเลือดดำเกือบ 30 ปี ได้พิสูจน์แล้วว่าเป็นกระบวนการที่ค่อนข้างปลอดภัย แม้ว่าจะมีรายงานผลข้างเคียงแต่ภาวะแทรกซ้อนที่ร้ายแรงหรือเป็นอันตรายถึงชีวิตนั้นหายากมาก อาการข้างเคียงของ Fluorescein Sodium ที่ไม่รุนแรง ได้แก่ อาการคลื่นไส้ (2.24–20%) อาเจียน (0–7%) และอาการผิดปกติทางหลอดเลือด (น้อยกว่า 3%) และการฉีดยาเข้าเส้นเลือดจะพบอาการจาม คัน มีผื่นขึ้นตามผิวหนัง เป็นลมหมดสติ เป็นไข้ (Pyrexia) ลิ่มเลือดอุดตัน เนื้อตายเฉพาะที่ และเส้นประสาทอัมพาต (0-1%) [23]

2.4 การประยุกต์ใช้สารเรืองแสงทางการแพทย์ในโครงร่างเลี้ยงเซลล์

การประยุกต์ใช้สารเรืองแสงทางการแพทย์มักใช้ในโครงร่างเลี้ยงเซลล์ โดยที่โครงร่างเลี้ยงเซลล์ควรมีสสมบัติทางกลที่เพียงพอในระหว่างกระบวนการเจริญเติบโตและการเปลี่ยนแปลงของเซลล์ในหลอดทดลองหรือในร่างกาย เมื่อมีการปลูกถ่ายโครงสร้างเลี้ยงเซลล์ อัตราการหลั่ง ECM ของเซลล์และอัตราการเสื่อมสภาพของโครงร่างเลี้ยงเซลล์จะต้องสมดุลกันเพื่อช่วยรักษาความแข็งแรงเชิงกลของโครงร่างเลี้ยงเซลล์ให้เหมาะสม ซึ่งความสามารถในการสลายทางชีวภาพมีความสำคัญต่อการออกแบบและการผลิตโครงร่างเลี้ยงเซลล์ สำหรับวิศวกรรมเนื้อเยื่อขึ้นอยู่กับสมบัติทางเคมีและทางกายภาพ เช่น องค์ประกอบ โครงสร้าง น้ำหนักโมเลกุล ความหนาแน่น การสลายตัว และความพรุนของโครงร่างเลี้ยงเซลล์ ความสามารถในการสลายทางชีวภาพของโครงร่างเลี้ยงเซลล์จะแตกต่างกันไปตามชนิดของเซลล์ที่เพาะ จำนวน และการกระจาย แม้ว่าความสามารถในการสลายตัวทางชีวภาพเป็นสิ่งสำคัญสำหรับโครงร่างเลี้ยงเซลล์ แต่ไม่มีวิธีการที่ง่ายและแม่นยำในการตรวจสอบการสลายตัวทางชีวภาพ

ในปัจจุบัน การกระจายน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ การวิเคราะห์ขนาดอนุภาค การติดตามการสูญเสีย น้ำหนัก สมบัติทางความร้อนและลักษณะสัญญาณสามารถวิเคราะห์โดย FT-IR spectrum เพื่อประเมินความสามารถในการสลายตัวทางชีวภาพของโครงร่างเลี้ยงเซลล์ โดยทั่วไปใช้วิธีที่ต้องมีการทำลายโครงร่างเลี้ยงเซลล์ ดังนั้นจึงมีความยุ่งยากในการตรวจครั้งต่อไปและการตรวจสอบการเสื่อมสภาพของโครงร่างเลี้ยงเซลล์อย่างแม่นยำ เนื่องจากมีการเตรียมและวิเคราะห์ตัวอย่างที่แตกต่างกันในเวลาที่แตกต่างกันและความหลากหลายของสัตว์ทดลองยังเป็นตัวแปรที่ต้องพิจารณาในการวิเคราะห์ในร่างกาย ดังนั้นจึงมีความจำเป็นสำหรับวิธีการตรวจสอบแบบที่ไม่สร้างความเสียหายหรือการทำลายตัวอย่าง วิธีการถ่ายภาพแบบไม่ทำลาย

ตัวอย่างทำให้ใช้ตัวอย่างในการทดสอบจำนวนน้อยลง โดยมีการสร้างภาพ การตรวจสอบข้อมูลเซลล์และโมเลกุลแบบเรียลไทม์จากสัตว์ที่มีชีวิต เช่น การถ่ายภาพด้วยคลื่นสนามแม่เหล็ก (MRI) การตรวจเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ (CT) และการถ่ายภาพอัลตราซาวด์ (UI) นอกจากนี้มีรายงานการศึกษาการเสื่อมสภาพของโครงสร้างเลี้ยงเซลล์ตามธรรมชาติโดยใช้การถ่ายภาพเรืองแสงที่ใช้เวลาไม่นาน สามารถวิเคราะห์ได้ถึงความยาวคลื่นต่างๆ โดยใช้สารเรืองแสงที่เหมาะสม อีกทั้งยังสามารถตรวจสอบโครงสร้างเลี้ยงเซลล์ได้แบบเรียลไทม์ [3]

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการปั่นเส้นใยไฟโบรอินและเส้นใยไฟโบรอินเรืองแสง

ในปี ค.ศ. 2018 Bingcheng Yi และคณะ [24] ได้ทำการศึกษาการขึ้นรูปเส้นใยไฟโบรอินผสมโพลี(เอทิลีนออกไซด์) (PEO) เนื่องจาก PEO มีน้ำหนักโมเลกุลสูงซึ่งทำหน้าที่เป็นส่วนผสมในการสร้างเส้นใยเพื่อเพิ่มการควบคุมความเสถียรในการฉีดสารละลายไปยังฉากรับในระหว่างการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต โดยขึ้นรูปด้วยวิธี Jet Electrospinning (SJES) ทำให้เส้นใยที่ได้มีสมบัติเชิงกลที่ดีเหมาะสมสำหรับสร้างเนื้อเยื่อรับน้ำหนักแบบแอนไอโซทรอปิก เช่น เอ็น และหลอดเลือด

ในปี ค.ศ. 2019 Liaoliao Pang และคณะ [6] ได้ทำการศึกษาการขึ้นรูปเส้นใยไฟโบรอินเรืองแสงด้วยวิธีการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต (Electrospinning) เพื่อสร้างเป็นวัสดุสิ่งทอ โดยนำสารละลายไฟโบรอินผสมกับสีย้อมเรืองแสง Fluorescein Sodium Rhodamine B และ Acridine Orange แสดงพื้นผิวเรียบและมีเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 873 ± 135 nm 835 ± 195 nm และ 925 ± 205 nm ตามลำดับ ผลการเรืองแสงของเส้นใยไฟโบรอินจะเปลี่ยนไป เมื่อทำการเปลี่ยนความเข้มข้นของสีย้อม โดยความเข้มข้นของสีย้อมเรืองแสงไม่ส่งผลกระทบต่อโครงสร้างทางเคมีของเส้นใยไฟโบรอิน

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 วัสดุและสารเคมี

3.1.1 สำหรับการสกัดไฟโบรอิน

- 1) รังไหม
- 2) Na_2CO_3
- 3) Ajisawa's reagent ($\text{CaCl}_2 : \text{H}_2\text{O} : \text{Ethanal} = 1 : 8 : 2$ ในอัตราส่วน molar)
- 4) น้ำ DI
- 5) สารเรืองแสง Fluorescein Sodium (FS)

3.1.2 สำหรับการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต

- 1) High Voltage Power Supply
- 2) Formic 98%
- 3) กระบอกฉีดสารละลาย
- 4) เข็มโลหะเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 0.5 - 0.9 mm
- 5) ฉากรับเส้นใย

3.2 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยเริ่มจากสกัดไฟโบรอินจากรังไหม จากนั้นเตรียมสารละลายไฟโบรอิน และสารละลายไฟโบรอินที่เติมสารเรืองแสงโดยขึ้นรูปเส้นใยด้วยเทคนิคการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต ทำการวิเคราะห์เส้นใยด้วย Scanning Electron Microscope (SEM) Fluorescence Spectrophotometer และ Fourier-Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) ภาพรวมขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย แสดงดังรูปที่ 3.1

- 5) นำสารละลายไฟโบรอินที่ได้ไป centrifuge ที่ 4 °C ที่ความเร็ว 9,000 rpm เป็นเวลา 30 นาที อีกครั้ง เพื่อแยกเอาตะกอนหรือสิ่งเจือปนออก จะได้สารละลายไฟโบรอินที่ใส
- 6) นำสารละลายไฟโบรอินที่ได้ไปอบให้แห้งที่ 40 °C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง เมื่อแห้งแล้วจะได้ลักษณะเป็นฟิล์มแล้วนำไปบดให้ละเอียด เพื่อเตรียมไปใช้งานในขั้นต่อไป

3.2.2 การเตรียมสารละลายไฟโบรอินสำหรับการขึ้นรูปโดยเทคนิคการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต

- 1) ตวงผงไฟโบรอินลงในขวด Vial
- 2) หยดสารละลายกรดฟอร์มิก 98% ลงในผงไฟโบรอิน
- 3) ผสมสารละลายกรดฟอร์มิกและผงไฟโบรอินให้ละลายเป็นเนื้อเดียวกันโดยการกวนด้วยแท่งแม่เหล็กบน stirrer ความเร็วรอบน้อยที่อุณหภูมิห้อง
- 4) เมื่อผงไฟโบรอินละลายแล้วเก็บไว้ที่ 4 °C เพื่อนำไปขึ้นรูปในขั้นตอนต่อไป

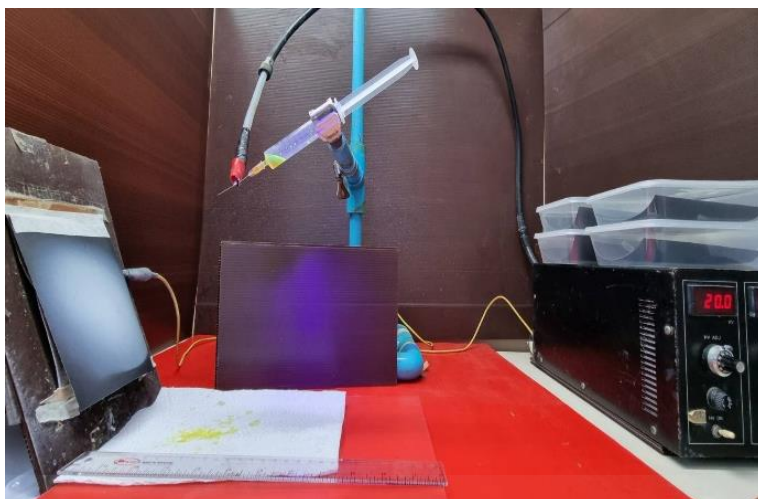
จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการเติม Fluorescein Sodium 0.5 - 2 wt% ลงในสารละลายไฟโบรอิน 10 wt% [5] งานวิจัยนี้จึงเลือกเงื่อนไขที่แตกต่างทั้งความเข้มข้นของสารเรืองแสงและความเข้มข้นของสารละลายไฟโบรอิน โดยนำไฟโบรอินที่บดละเอียดแล้วมาละลายด้วยสารละลายกรดฟอร์มิก 98% ที่ความเข้มข้น 10 12 และ 14 wt% และสำหรับการเตรียมสารละลายไฟโบรอินเรืองแสง ทำได้โดยการเติมสารเรืองแสง Fluorescein sodium ลงในสารละลายไฟโบรอินที่ความเข้มข้น 0.1 0.3 และ 0.5 wt% โดยมีเงื่อนไขแสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แสดงเงื่อนไขความเข้มข้นของสารเรืองแสงในสารละลายไฟโบรอินที่ใช้ในการทดลอง

สาร	ความเข้มข้น				
SF (wt%)	10 (0.2711g)	10 (0.2711g)	10 (0.2711g)	12 (0.3327g)	14 (0.3972g)
FS (wt%)	0.1 (0.0027g)	0.3 (0.0068g)	0.5 (0.0114g)	0.5 (0.0116g)	0.5 (0.0119g)

3.2.3 การขึ้นรูปเส้นใยด้วยเทคนิคการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต

นำสารละลายไฟโบรอิน และสารละลายไฟโบรอินที่เติมสารเรืองแสง Fluorescein sodium ในความเข้มข้นที่แตกต่างบรรจุในกระบอกฉีดสารละลาย ที่ใช้เข็มขนาด 0.5 - 0.9 mm และใช้ศักย์ไฟฟ้าที่ 20 kV และระยะห่างระหว่างปลายเข็มและฉากรับคือ 15 cm แสดงดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 การขึ้นรูปเส้นใยด้วยเทคนิคการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต

3.2.4 การวิเคราะห์ผลเส้นใยไฟโบรอินและเส้นใยไฟโบรอินที่เติมสารเรืองแสง Fluorescein Sodium

3.2.4.1 การวิเคราะห์ลักษณะสัญญาณของเส้นใย

วิเคราะห์ลักษณะสัญญาณของเส้นใยไฟโบรอิน และเส้นใยไฟโบรอินที่เติมสารเรืองแสง Fluorescein Sodium ด้วย Scanning Electron Microscope (SEM) ตัวอย่างทั้งหมดถูกเคลือบด้วยทองคำก่อนการถ่ายภาพ และหาเส้นผ่านศูนย์กลางโดยเฉลี่ยของเส้นใยที่ได้มาจากการภาพ SEM โดยใช้ image J analysis software ในการวิเคราะห์

3.2.4.2 การวิเคราะห์สมบัติทางแสงของเส้นใยไฟโบรอินที่เติมสารเรืองแสง Fluorescein Sodium

วิเคราะห์สมบัติทางแสงของเส้นใยไฟโบรอินที่เติมสารเรืองแสง Fluorescein Sodium ด้วย Fluorescence Spectrophotometer โดยใช้แสงความยาวคลื่น 430 nm ในการกระตุ้น

3.2.4.3 การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของเส้นใย

วิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของเส้นใยไฟโบรอิน และเส้นใยไฟโบรอินที่เติมสารเรืองแสง Fluorescein Sodium โดยเครื่อง Fourier-Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)

บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการสกัดไฟโบรอินจากรังไหม จากนั้นทำการขึ้นรูปเส้นใยไฟโบรอินและเส้นใยไฟโบรอินที่เติมสารเรืองแสงด้วยกระบวนการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตและวิเคราะห์ศึกษาผลของเงื่อนไขในการสกัดไฟโบรอินจากรังไหมและเงื่อนไขในกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต แสดงผลการทดลองเป็นลำดับ ดังนี้

4.1 การสกัดไฟโบรอิน

การสกัดไฟโบรอินจากรังไหมในงานวิจัยนี้ได้ทำการละลายไฟโบรอินด้วยสารละลาย Ajisawa ในอัตราส่วน 1:20 อัตราส่วนมวลไฟโบรอินในสารละลายหาโดยนำสารละลายไฟโบรอินปริมาตร 2 ml ได้ปริมาณมวลของไฟโบรอินโดยเฉลี่ยคือ 2.09 %W/V แสดงดังตารางที่ 4.1

ปริมาณมวลไฟโบรอินต่อปริมาตรสารละลาย คือ $\frac{m}{v} \times 100$

m คือ มวลไฟโบรอินหลังจากอบแห้งสารละลาย และ v คือ ปริมาตรสารละลายไฟโบรอินเริ่มต้น (2ml)

ตารางที่ 4.1 ปริมาณมวลของไฟโบรอิน

ครั้งที่	มวลไฟโบรอินหลังจากอบแห้งสารละลาย (g)	ปริมาณมวลของไฟโบรอินที่ได้จากสารละลายปริมาตร 2 ml (%W/V)
1	0.0379	1.90
	0.0461	2.31
2	0.0483	2.42
	0.0377	1.89
	0.0417	2.09
3	0.0337	1.69
	0.0408	2.04
	0.0481	2.41
สัดส่วนไฟโบรอินที่สกัดได้โดยเฉลี่ย		2.09

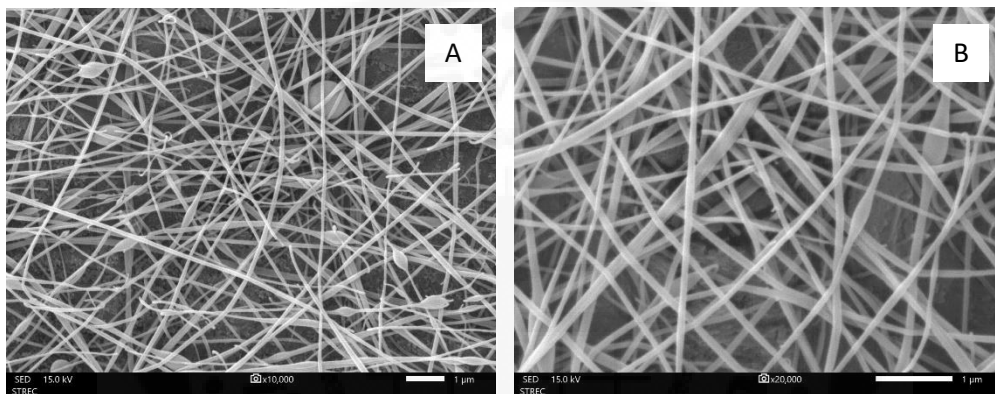
4.2 ลักษณะสัณฐานของเส้นใยไฟโบรอินและเส้นใยไฟโบรอินที่เติมสารเรืองแสงจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

4.2.1 ลักษณะสัณฐานของเส้นใยไฟโบรอิน

ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงลักษณะสัณฐานของเส้นใยไฟโบรอินที่มีความเข้มข้นแตกต่างกันคือ 10 12 และ 14 wt% มีเงื่อนไขในการขึ้นรูปเส้นใยด้วยเทคนิคการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต คือ ระยะห่างระหว่างเข็มและฉากรับ 15 cm และ ความต่างศักย์ไฟฟ้า 20 kV

4.2.1.1 ลักษณะสัณฐานของเส้นใยไฟโบรอินที่มีความเข้มข้น 10 wt% แสดงดังรูปที่ 4.1

เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 86.89 ± 21.84 nm มีการกระจายตัวของขนาดเส้นใยอย่างสม่ำเสมอมีลักษณะเป็นเส้นใยยาวต่อเนื่อง ผิวเส้นใยเรียบ และมีลูกปัดกระจายอยู่เล็กน้อยโดยลูกปัดมีค่าเฉลี่ย 188.26 ± 92.24 nm

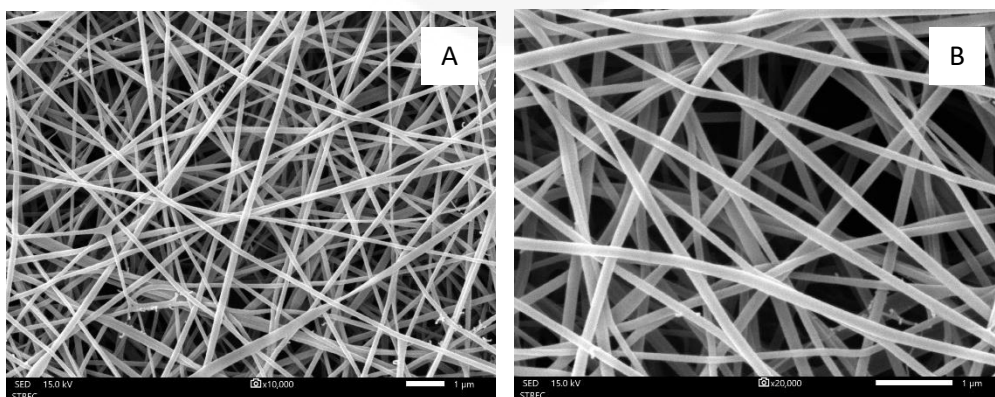


รูปที่ 4.1 ภาพ SEM ลักษณะสัณฐานของเส้นใยไฟโบรอินที่มีความเข้มข้น 10 wt%

A : กำลังขยาย 10,000X B : กำลังขยาย 20,000X

4.2.1.2 ลักษณะสัณฐานของเส้นใยไฟโบรอินที่มีความเข้มข้น 12 wt% แสดงดังรูปที่ 4.2

เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 128.14 ± 29.17 nm มีการกระจายตัวของขนาดเส้นใยอย่างสม่ำเสมอมีลักษณะเป็นเส้นใยยาวต่อเนื่อง ผิวเส้นใยเรียบ

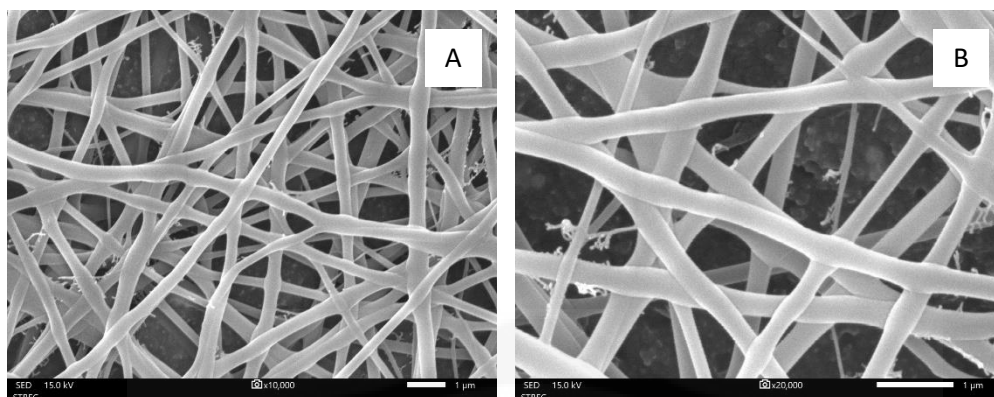


รูปที่ 4.2 ภาพ SEM ลักษณะสัณฐานของเส้นใยไฟโบรอินที่มีความเข้มข้น 12 wt%

A : กำลังขยาย 10,000X B : กำลังขยาย 20,000X

4.2.1.3 ลักษณะสัณฐานของเส้นใยไฟโบรอินที่มีความเข้มข้น 14 wt% แสดงดังรูปที่ 4.3

เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 286.54 ± 82.92 nm มีการกระจายตัวของขนาดเส้นใยอย่างสม่ำเสมอ มีลักษณะเป็นเส้นใยยาวต่อเนื่อง ผิวเส้นใยเรียบ เส้นใยเชื่อมติดกันเล็กน้อย และมีเยื่อติดกับเส้นใย



รูปที่ 4.3 ภาพ SEM ลักษณะสัณฐานของเส้นใยไฟโบรอินที่มีความเข้มข้น 14 wt%

A : กำลังขยาย 10,000X B : กำลังขยาย 20,000X

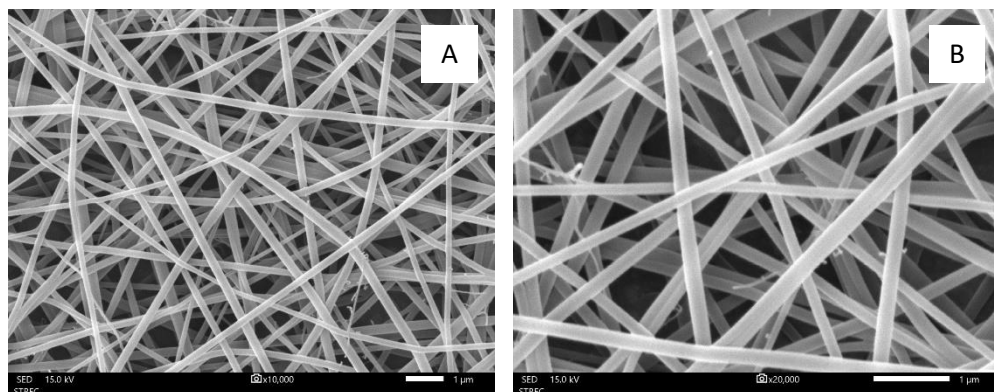
ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงลักษณะสัณฐานของเส้นใยไฟโบรอินที่มีความเข้มข้นแตกต่างกันคือ 10 12 และ 14 wt% แสดงให้เห็นว่าเส้นใยไฟโบรอินที่มีความเข้มข้น 10 wt% มีขนาดเล็กและเกิดลูกปัดมากกว่าที่ความเข้มข้น 12 และ 14 wt% เมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้น เส้นใยมีแนวโน้มที่จะมีขนาดใหญ่ขึ้น

4.2.2 ลักษณะสัณฐานของเส้นใยไฟโบรอินที่เติมสารเรืองแสง Fluorescein Sodium

ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงลักษณะสัณฐานของเส้นใยไฟโบรอินที่เติมสารเรืองแสง Fluorescein Sodium มีความเข้มข้นแตกต่างกัน มีเงื่อนไขในการขึ้นรูปเส้นใยด้วยเทคนิคการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต คือ ระยะห่างระหว่างเข็มและฉากรับ 15 cm และ ความต่างศักย์ไฟฟ้า 20 kV เงื่อนไขความเข้มข้นของสารเรืองแสง ในสารละลายไฟโบรอินที่ทดลอง แสดงดังตารางที่ 3.1

4.2.2.1 ลักษณะสัณฐานของเส้นใยไฟโบรอินที่มีความเข้มข้น 10 wt% ที่เติม Fluorescein Sodium 0.1 wt% แสดงดังรูปที่ 4.4

เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 174.67 ± 38.79 nm มีการกระจายตัวของขนาดเส้นใยอย่างสม่ำเสมอ มีลักษณะเป็นเส้นใยยาวต่อเนื่อง ผิวเส้นใยเรียบ และมีเยื่อติดกับเส้นใย

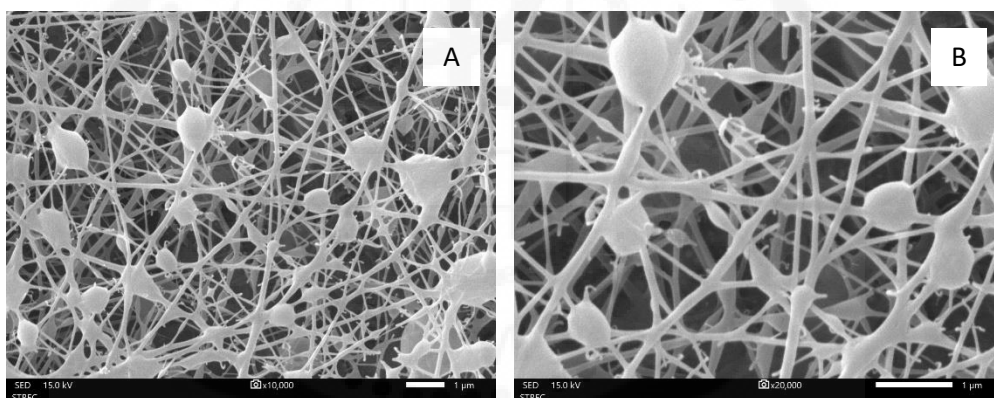


รูปที่ 4.4 ภาพ SEM ลักษณะสัณฐานของเส้นใยโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ที่มีความเข้มข้น 10 wt% ที่เติม Fluorescein Sodium 0.1 wt%

A : กำลังขยาย 10,000X B : กำลังขยาย 20,000X

4.2.2.2 ลักษณะสัณฐานของเส้นใยโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ที่มีความเข้มข้น 10 wt% ที่เติม Fluorescein Sodium 0.3 wt% แสดงดังรูปที่ 4.5

เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 84.66 ± 32.41 nm มีลูกปัดกระจายตัวอยู่จำนวน โดยลูกปัดมีค่าเฉลี่ย 310.77 ± 229.53 nm เส้นใยเชื่อมติดกัน และมีเยื่อติดกับเส้นใย

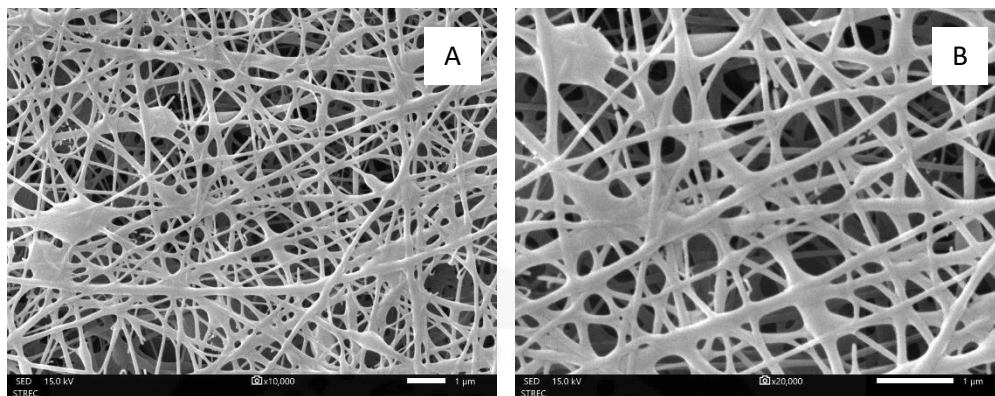


รูปที่ 4.5 ภาพ SEM ลักษณะสัณฐานของเส้นใยโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ที่มีความเข้มข้น 10 wt% ที่เติม Fluorescein Sodium 0.3 wt%

A : กำลังขยาย 10,000X B : กำลังขยาย 20,000X

4.2.2.3 ลักษณะสัณฐานของเส้นใยไฟโบรอินที่มีความเข้มข้น 10 wt% ที่เติม Fluorescein Sodium 0.5 wt% แสดงดังรูปที่ 4.6

เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 103.34 ± 40.16 nm มีลูกปัดกระจายตัวอยู่จำนวน โดยลูกปัดมีค่าเฉลี่ย 351.29 ± 177.43 nm เส้นใยเชื่อมติดกัน และมีเยื่อติดกับเส้นใย

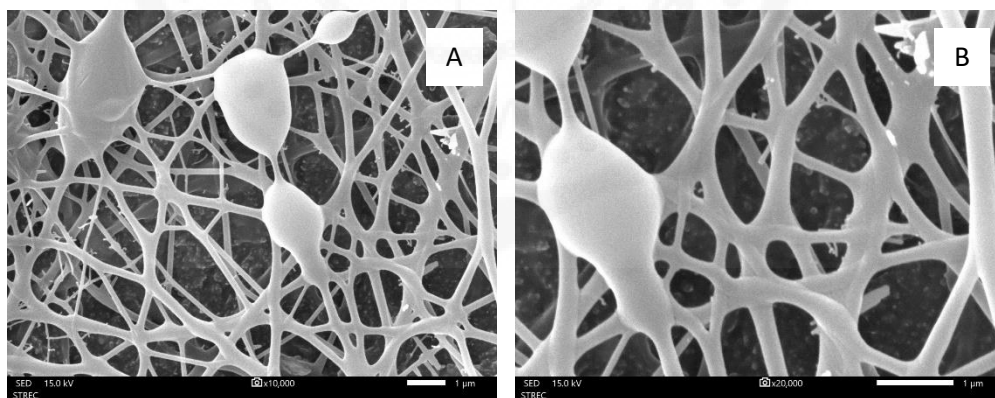


รูปที่ 4.6 ภาพ SEM ลักษณะสัณฐานของเส้นใยไฟโบรอินที่มีความเข้มข้น 10 wt% ที่เติม Fluorescein Sodium 0.5 wt%

A : กำลังขยาย 10,000X B : กำลังขยาย 20,000X

4.2.2.4 ลักษณะสัณฐานของเส้นใยไฟโบรอินที่มีความเข้มข้น 12 wt% ที่เติม Fluorescein Sodium 0.5 wt% แสดงดังรูปที่ 4.7

เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 203.34 ± 62.88 nm มีลูกปัดกระจายตัวอยู่เล็กน้อย โดยลูกปัดมีค่าเฉลี่ย 1107.48 ± 388.53 nm เส้นใยเชื่อมติดกัน และมีเยื่อติดกับเส้นใย

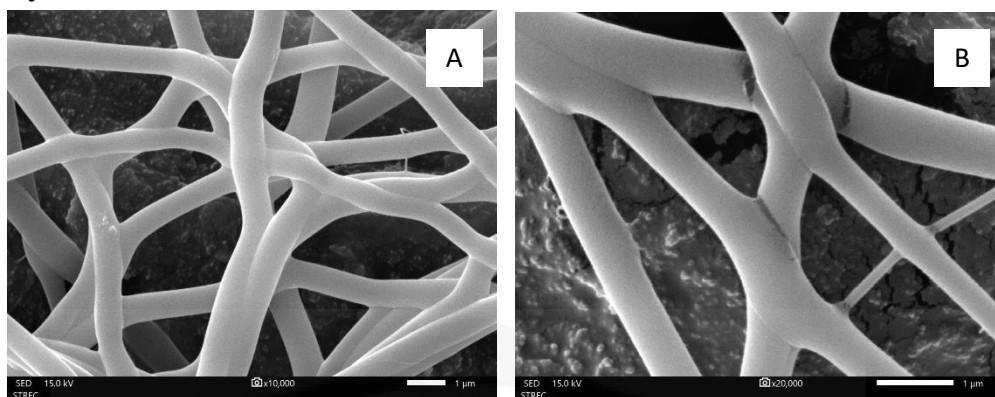


รูปที่ 4.7 ภาพ SEM ลักษณะสัณฐานของเส้นใยไฟโบรอินที่มีความเข้มข้น 12 wt% ที่เติม Fluorescein Sodium 0.5 wt%

A : กำลังขยาย 10,000X B : กำลังขยาย 20,000X

4.2.2.5 ลักษณะสัณฐานของเส้นใยไฟโบรอินที่มีความเข้มข้น 14 wt% ที่เติม Fluorescein Sodium 0.5 wt% แสดงดังรูปที่ 4.8

เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 556.28 ± 175.79 nm และมีเส้นใยเชื่อมติดกัน



รูปที่ 4.8 ภาพ SEM ลักษณะสัณฐานของเส้นใยไฟโบรอินที่มีความเข้มข้น 14 wt% ที่เติม Fluorescein Sodium 0.5 wt%
A : กำลังขยาย 10,000X B : กำลังขยาย 20,000X

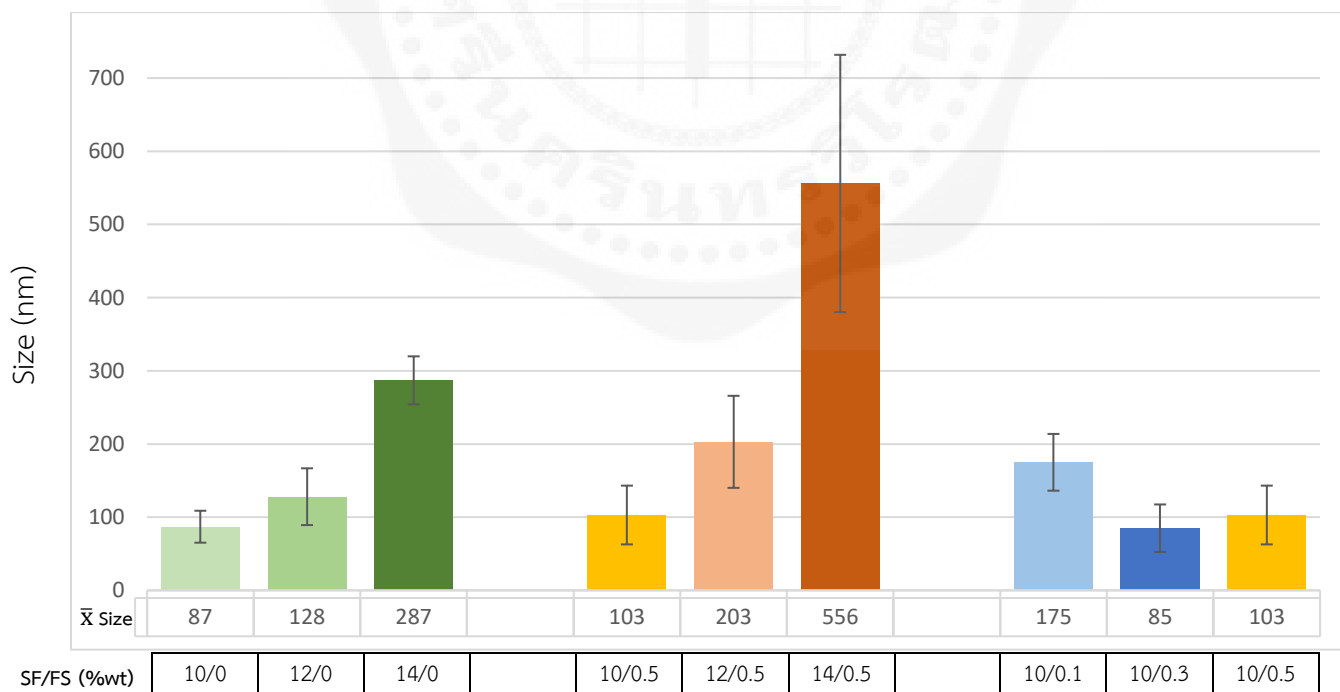
ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงลักษณะสัณฐานของเส้นใยไฟโบรอินที่มีการเติมสารเรืองแสง Fluorescein Sodium ที่มีความเข้มข้นแตกต่างกัน แสดงดังตารางที่ 3.1 แสดงให้เห็นว่าเส้นใยไฟโบรอินที่ความเข้มข้น 10 wt% ที่เติม Fluorescein Sodium 0.3 และ 0.5 wt% มีเส้นใยขนาดใหญ่ เส้นใยเชื่อมติดกัน และเกิดลูกปัดกระจายตัวมากกว่าที่เติม Fluorescein Sodium 0.1 wt% สำหรับเส้นใยไฟโบรอินที่ความเข้มข้น Fluorescein Sodium 0.5 wt% เท่ากัน ที่ไฟโบรอิน 12 และ 14 wt% มีเส้นใยขนาดใหญ่กว่าที่ 10 wt% โดยที่เส้นใยไฟโบรอินที่ความเข้มข้น 14 wt% ไม่เกิดลูกปัดในขณะที่ไฟโบรอินความเข้มข้น 12 wt% ยังเกิดลูกปัดขึ้นเล็กน้อย

4.2.3 สรุปผลจากภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

เส้นใยไฟโบรอินไม่เติมสารเรืองแสงที่ความเข้มข้น 10 12 และ 14 wt% จะมีขนาดเล็กมากกว่าเส้นใยที่มีการเติมสารเรืองแสง Fluorescein Sodium ที่มีความเข้มข้น 0.5 wt% และเส้นใยไฟโบรอินที่ความเข้มข้น 10 wt% เท่ากัน ที่เติมสารเรืองแสง Fluorescein Sodium ที่ความเข้มข้นต่างกันคือ 0.1 0.3 และ 0.5 wt% พบว่าเส้นใย ที่เติมสารเรืองแสง Fluorescein Sodium 0.1 wt% มีขนาดเส้นใยที่ใหญ่กว่า แสดงดังตารางที่ 4.2 และ แสดงดังรูปที่ 4.9 ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าความเข้มข้นของสารละลายไฟโบรอินที่มากส่งผลให้ขนาดของเส้นใยมีขนาดใหญ่ตาม โดยเส้นใยที่เติมสารเรืองแสงจะมีเส้นใยที่เชื่อมติดกันเป็นจำนวนมาก และลูกปัดที่เกิดขึ้นเกิดได้จากหลายปัจจัย เช่น ความเข้มข้นของสารละลายที่ส่งผลต่อความหนืด สารละลายไม่เป็นเนื้อเดียวกัน และอัตราการไหลของสารละลายที่ไม่คงที่ที่ทำให้หยดของสารละลายพุ่งไปที่ฉากรับซึ่งเป็นปัจจัยเชิงกระบวนการในการขึ้นรูปการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต

ตารางที่ 4.2 สรุปขนาดเส้นใยและลูกปัดในเงื่อนไขต่างๆ

เงื่อนไข	ขนาดของเส้นใย (nm)	ขนาดของลูกปัด (nm)
SF10 wt%	87 ± 22	188 ± 92
SF10 wt% - FS0.1 wt%	175 ± 39	-
SF10 wt% - FS0.3 wt%	85 ± 32	311 ± 230
SF10 wt% - FS0.5 wt%	103 ± 40	351 ± 177
SF12 wt%	128 ± 29	-
SF12 wt% - FS0.5 wt%	203 ± 63	1107 ± 389
SF14 wt%	287 ± 83	-
SF14 wt% - FS0.5 wt%	556 ± 176	-

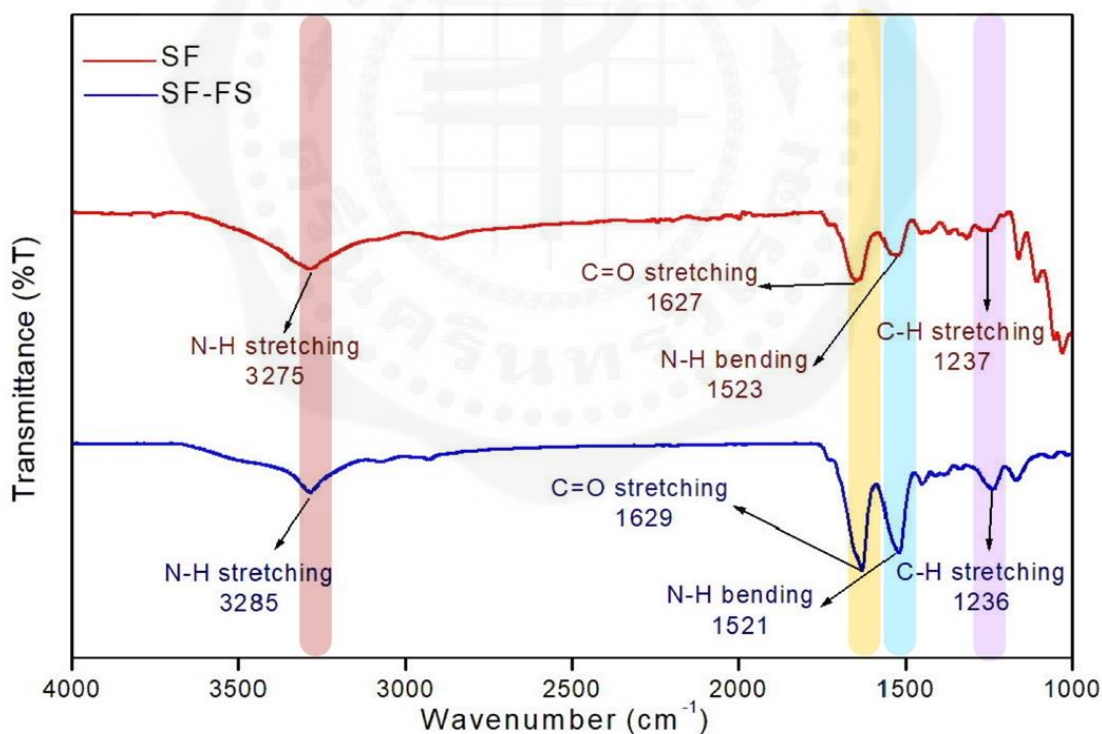


รูปที่ 4.9 แสดงขนาดของเส้นใยไฟโบรอินและเส้นใยไฟโบรอินที่เติมสารเรืองแสง Fluorescein Sodium

4.3 การศึกษาและตรวจวิเคราะห์เอกลักษณ์เฉพาะโดยเทคนิคสเปกโตรสโกปีของเส้นใยไฟโบรอินและเส้นใยไฟโบรอินที่เติมสารเรืองแสงด้วยเครื่องอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (Fourier Transform Infrared Spectrometer; FTIR)

4.3.1 การศึกษาและตรวจวิเคราะห์เอกลักษณ์เฉพาะโดยเทคนิคสเปกโตรสโกปีของเส้นใยไฟโบรอิน

จากการนำสารละลายไฟโบรอินที่ผ่านการขึ้นรูปโดยเทคนิคการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตมาตรวจสอบและวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชัน โดยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี ในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ $4000-700\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งแสดงให้เห็นแสดงดังรูปที่ 4.10 พบว่า มีพีคที่เลขคลื่น 3275 cm^{-1} ตรงกับ mode การสั่น N-H stretching (Amide A) พีคที่เลขคลื่น 1627 cm^{-1} ตรงกับ mode การสั่น C=O stretching (Amide I) พีคที่เลขคลื่น 1523 cm^{-1} ตรงกับ mode การสั่น N-H bending (Amide II) และพีคที่เลขคลื่น 1237 cm^{-1} ตรงกับ mode การสั่น C-H stretching (Amide III) โดยจากพีคทั้งหมดที่กล่าวมา สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.3 หมู่ฟังก์ชันที่พบนี้แสดงหมู่ฟังก์ชันที่สอดคล้องกับโครงสร้างทางเคมีของไฟโบรอินทำให้สามารถยืนยันได้ว่าเส้นใยที่ได้เป็นเส้นใยไฟโบรอิน



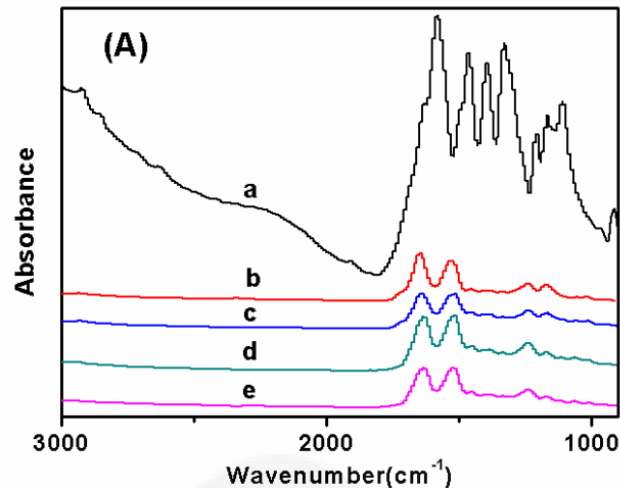
รูปที่ 4.10 รูปแบบอินฟราเรดสเปกตรัมของเส้นใยไฟโบรอินและเส้นใยไฟโบรอินที่เติมสารเรืองแสง Fluorescein Sodium

ตารางที่ 4.3 แสดงช่วงของการดูดกลืน รูปแบบการสั่น และพันธะของไฟโบรอิน

ช่วงการดูดกลืน (cm^{-1})	รูปแบบการสั่นของพันธะ	หมู่ฟังก์ชัน/พันธะ
3275	Stretching	N-H Group (Amide A)
1627	Stretching	C=O Group (Amide I)
1523	Bending	N-H Group (Amide II)
1237	Stretching	C-H Group (Amide III)

4.3.2 การศึกษาและตรวจวิเคราะห์เอกลักษณ์เฉพาะโดยเทคนิคสเปกโตรสโกปีเส้นใยไฟโบรอินที่เติมสารเรืองแสง Fluorescein Sodium

จากการตรวจสอบและวิเคราะห์เอกลักษณ์ของเส้นใยไฟโบรอินที่เติมสารเรืองแสง Fluorescein Sodium พบพีกเลขคลื่น 3285 cm^{-1} 1629 cm^{-1} 1521 cm^{-1} 1236 cm^{-1} ซึ่งเป็นพีกลักษณะเฉพาะของเส้นใยไฟโบรอิน แสดงดังรูปที่ 4.10 เนื่องจากการเติมสารเรืองแสงในปริมาณที่น้อยเมื่อเทียบกับปริมาณของไฟโบรอินทำให้ลักษณะของพีกที่เกิดขึ้นคล้ายกับกรณีที่ไม่เติมสารเรืองแสง ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Liaoliao Pang และคณะ [6] ได้ทำการขึ้นรูปเส้นใยไฟโบรอินเรืองแสงเพื่อสร้างวัสดุสิ่งทอ โดยการนำสารละลายไฟโบรอินผสมกับสีย้อมเรืองแสง 3 ชนิด คือ Fluorescein Sodium Rhodamine B และ Acridine Orange โดยความเข้มข้นของ Fluorescein Sodium ที่ 0.5 - 2.0 wt% พีกลักษณะเฉพาะของไฟโบรอินเรืองแสงไม่มีการเปลี่ยนแปลง แสดงดังรูปที่ 4.11 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้นของ Fluorescein Sodium ไม่มีผลกระทบต่อโครงสร้างทางเคมีของไฟโบรอิน จึงสามารถยืนยันได้ว่าการเติมสารเรืองแสงไม่ส่งผลกระทบต่อโครงสร้างทางเคมีของเส้นใยไฟโบรอิน



รูปที่ 4.11 Liaoliao Pang และคณะ แสดงรูปแบบอินฟราเรดสเปกตรัมของเส้นใยไฟโบรอินและเส้นใยไฟโบรอินที่เติมสารเรือง Fluorescein Sodium a : Fluorescein sodium b : เส้นใยไฟโบรอิน และ SF-FS (wt%) c : 6.0 - 1.0 d : 8.0 - 1.0 e : 10.0 - 1.0 [6]

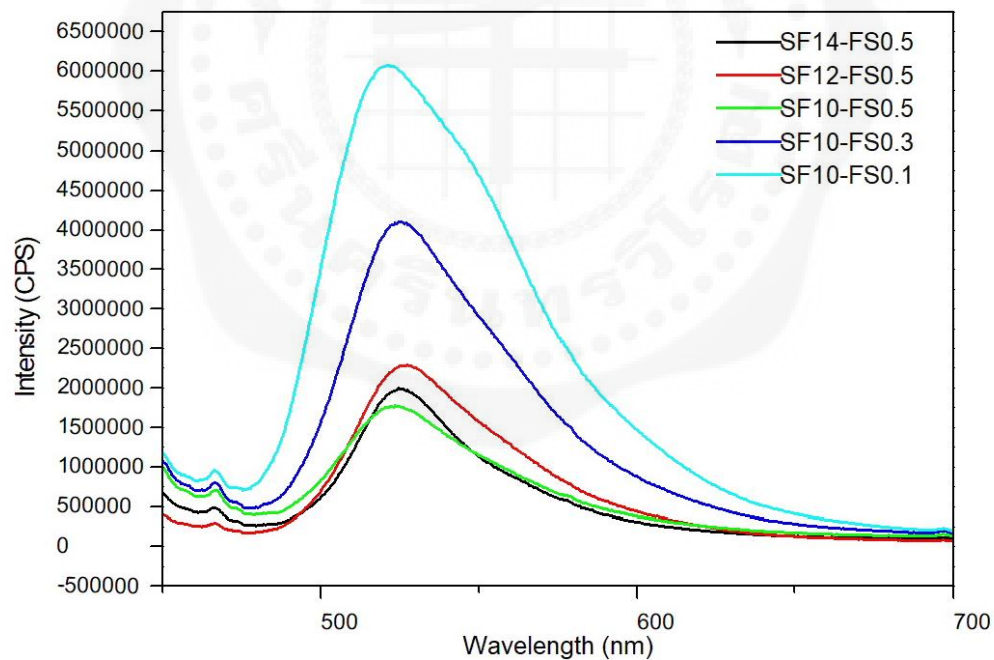
4.4 การศึกษาและตรวจวิเคราะห์สมบัติทางแสงของเส้นใยไฟโบรอินที่เติมสารเรืองแสง Fluorescein Sodium โดย Fluorescence Spectrophotometer

ผลการเรืองแสงของเส้นใยไฟโบรอินที่เติมสารเรืองแสง Fluorescein Sodium ที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน โดยใช้เครื่องวัดแสงฟลูออเรสเซนซ์ โดย excitation spectrum ที่ 430 nm และ emission spectra ในช่วง 450-700 nm แสดงดังรูปที่ 4.12 การเรืองแสงของเส้นใยไฟโบรอินที่เติมสารเรืองแสงทั้งหมด แสดงค่า fluorescence emission ในช่วง 520-526 nm (สีเขียว) ซึ่งไฟโบรอิน 10 wt% ที่เติม Fluorescein Sodium 0.1 wt% มีค่าความเข้มการเรืองแสงสูงสุด และไฟโบรอิน 10 wt% ที่เติม Fluorescein Sodium 0.5 wt% มีค่าความเข้มการเรืองแสงต่ำสุด โดยไฟโบรอิน 12 wt% ที่เติม Fluorescein Sodium 0.5 wt% มีค่าความเข้มการเรืองแสงสูงกว่าไฟโบรอิน 10 และ 14 wt% ที่เติม Fluorescein Sodium 0.5 wt% ตามลำดับ ตารางที่ 4.4 แสดงสัดส่วนไฟโบรอินต่อสารเรืองแสงโดยมีลำดับของสัดส่วนนี้สอดคล้องกับความเข้มของการเรืองแสงยกเว้นไฟโบรอิน 14 wt% และ 12 wt% ที่เติม Fluorescein Sodium 0.5 wt% ทั้งนี้อาจเกิดจากสารละลายไฟโบรอิน 14 wt% มีเข้มข้นสูงส่งผลให้ความหนืดสูงและอาจทำให้สารเรืองแสงยังกระจายตัวไม่ทั่ว และความเข้มข้นสูงทำให้เกิด self-quenching ส่งผลให้ค่าความเข้มการเรืองแสงน้อยกว่าความเป็นจริง [25] นอกจากนี้ความเข้มของการเรืองแสงจะมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารเรืองแสง เกิดจากโมเลกุลของสารเรืองแสงก่อตัวเป็นก้อนหรือซ้อนกันโดยผลลัพธ์เป็นไปตาม Fluorescence Quenching Theory ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Liaoliao Pang และคณะ [6] ทำการขึ้นรูปเส้นใยไฟโบรอินเรืองแสงเพื่อสร้างวัสดุสิ่งทอโดยการนำสารละลายไฟโบรอินผสมกับสีย้อมเรืองแสง 3 ชนิด คือ Fluorescein Sodium Rhodamine B และ

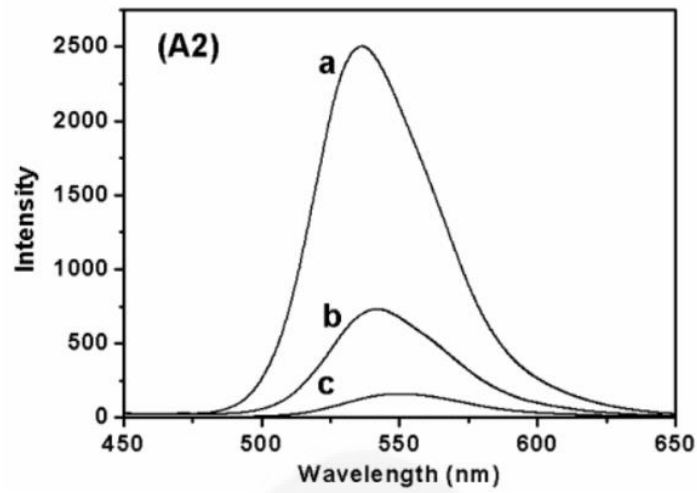
Acridine Orange ใช้ความเข้มข้นของ Fluorescein Sodium ที่ 0.5 - 2.0 wt% ผลการเรืองแสงของเส้นใยไฟเบอร์อินที่เติมสารเรืองแสงที่มีความเข้มข้นของ Fluorescein Sodium ต่างกัน แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของ Fluorescein Sodium มีผลต่อการเรืองแสงของเส้นใยไฟเบอร์อินที่เติมสารเรืองแสง แสดงดังรูปที่ 4.13 ซึ่งมีแนวโน้มคล้ายกับงานวิจัยฉบับนี้

ตารางที่ 4.4 แสดงสัดส่วนไฟเบอร์อินต่อสารเรืองแสงที่มีลำดับความเข้มข้นการเรืองแสงจากมากไปน้อย

ลำดับความเข้มข้นการเรืองแสง	เงื่อนไข	สัดส่วนมวลของสารเรืองแสง Fluorescein Sodium ที่อยู่ในเส้นใย
1	SF 10 wt% - FS 0.1 wt%	0.009959
2	SF 10 wt% - FS 0.3 wt%	0.025830
3	SF 12 wt% - FS 0.5 wt%	0.348662
4	SF 14 wt% - FS 0.5 wt%	0.299597
5	SF 10 wt% - FS 0.5 wt%	0.420509



รูปที่ 4.12 แสดงค่าความเข้มของการเรืองแสงของเส้นใยไฟเบอร์อินที่เติมสารเรืองแสง Fluorescein Sodium



รูปที่ 4.13 Liaoliao Pang และคณะ แสดงค่าความเข้มของการเรืองแสงของเส้นใยโพลีเอไมด์ที่เติมสารเรืองแสง Fluorescein Sodium a : 0.5 , b 1.0 , และ c 2.0 wt% [6]

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากงานวิจัยการขึ้นรูปเส้นใยไฟโบรอินและเส้นใยไฟโบรอินที่เติมสารเรืองแสงโดยเทคนิคการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต สามารถสกัดไฟโบรอินในอัตราส่วนที่เหมาะสมจากรังไหมด้วยสารละลาย Ajisawa ในอัตราส่วนไหมต่อสารละลายคือ 1:20 สามารถเตรียมสารละลายไฟโบรอิน และสารละลายไฟโบรอินผสมสารเรืองแสง Fluorescein Sodium และขึ้นรูปเป็นเส้นใยด้วยวิธีการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตโดยใช้ความต่างศักย์ 20 kV เส้นใยไฟโบรอินที่ไม่เติมสารเรืองแสงมีขนาดเส้นใยเพิ่มขึ้นแปรผันตามความเข้มข้นของไฟโบรอินในสารละลาย โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 87 ± 22 128 ± 29 และ 287 ± 83 nm สำหรับความเข้มข้นไฟโบรอิน 10 12 และ 14 wt% ตามลำดับ การเติมสารเรืองแสง Fluorescein Sodium ส่งผลต่อลักษณะของเส้นใยไฟโบรอินโดยมีลูกปัดเกิดขึ้น และเส้นใยเชื่อมติดกันในบางเงื่อนไข โดยความเข้มข้นของการเรืองแสงเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารเรืองแสงลดลง โดยเรืองแสงสูงสุดเมื่อเติมสารเรืองแสง Fluorescein Sodium 0.1 wt% ลงในสารละลายไฟโบรอิน 10 wt% ในขณะเดียวกันความเข้มข้นของสารเรืองแสงจะไม่ส่งผลกระทบต่อโครงสร้างทางเคมีของไฟโบรอิน ซึ่งเส้นใยเรืองแสงเหล่านี้อาจนำไปพัฒนาและนำไปใช้ประโยชน์ในด้านการแพทย์ได้ในอนาคต

5.2 ข้อเสนอแนะ

การพัฒนางานวิจัยเพื่อนำไปประยุกต์ใช้เป็นวัสดุทางการแพทย์ สามารถใช้สารละลายไฟโบรอินผสมกับ poly(ethylene oxide) (SF/PEO) โดยการ sonicated ด้วยเครื่องอัลตราโซนิกก่อนขึ้นรูปโดยเทคนิคการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตเพื่อเพิ่มความหนืดของสารละลาย SF/PEO และปรับปรุงสมบัติเชิงกลของเส้นใยอิเล็กทรอนิกส์ให้ดีขึ้นในสภาพแห้งและเปียก [25] โดยกระบวนการนี้หลีกเลี่ยงการใช้ตัวทำละลายที่เป็นพิษซึ่งเป็นผลดีกับการประยุกต์ใช้เป็นวัสดุทางการแพทย์ และควรประเมินความเข้ากันได้ทางชีวภาพของวัสดุทางการแพทย์ด้วย ISO 10993 เป็นการประเมินและการทดสอบตามมาตรฐาน ประกอบด้วยการทดสอบความเป็นพิษต่อเซลล์ ความเป็นพิษกึ่งเรื้อรัง ความเป็นพิษทางพันธุกรรม การปลูกถ่าย ความเข้ากันได้กับเลือด และระยะเวลาที่วัสดุทางการแพทย์สัมผัสกับร่างกาย [26]

Materials Science, 27(2), 1-14.

al (2012). Functional silk colored and luminescent. **Advanced**

l. (2020). Self-healable flexible luminescent films based on s

n dots. **OSA Contium**, 3(4), 1021-1030.

(2019). Fabrication of Silk Fibroin Fluorescent Nanofibers via

86.

& Tsukada, M. (2014). 5 - Electrospun silk sericin nanofibers

C. Kundu (Ed.), **Silk Biomaterials for Tissue Engineering and**

5.

- [1] หยาดพิรุณ บุญสด; และ ประสงค์ สีหนาม. (2011). ไหม: องค์ประกอบและโครงสร้าง คุณสมบัติและการประยุกต์ใช้. **ThaiScience**, 31(4), 437-441.
- [2] Farokhi Mehdi.; et al (2019). Silk fibroin scaffolds for common cartilage injuries: Possibilities for future clinical applications. **European Polymer Journal**, 115, 251-267.
- [3] Kim, Hyeon Joo.; et al (2015). In vivo degradation profile of porcine cartilage-derived extracellular matrix powder scaffolds using a non-invasive fluorescence imaging method. **Journal of Biomaterials Science**, 27(2), 1-14.
- [4] C, Natalia.; et al (2012). Functional silk colored and luminescent. **Advanced Materials**. 24(11), 1388-1397.
- [5] LIU, PING.; et al. (2020). Self-healable flexible luminescent films based on silk fibroin and graphene quantum dots. **OSA Continuum**, 3(4), 1021-1030.
- [6] L, Pang.; et al. (2019). Fabrication of Silk Fibroin Fluorescent Nanofibers via Electrospinning. **Polymers**, 11(6), 986.
- [7] Khan, M. M. R.; & Tsukada, M. (2014). 5 - Electrospun silk sericin nanofibers for biomedical applications. In S. C. Kundu (Ed.), **Silk Biomaterials for Tissue Engineering and Regenerative Medicine**, 125-156.
- [8] WookKim, Dong.; et al. (2015). Novel fabrication of fluorescent silk utilized in biotechnological and medical application. **Biomaterials**, 70, 48-56.
- [9] จุฑามาศ ยี่มนุ่น. (2016). การตรวจคราบโลหิตของมนุษย์ด้วยวิธีฟิโนฟธาไลน์ ลูมินอล และฟลูออเรสเซินบนพื้นรองเท้าชนิดต่างๆ (ปริญญาานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยศิลปากร, นครปฐม).
- [10] ศูนย์หมอนไหมเฉลิมพระเกียรติกาญจนาบุรี. วงจรชีวิตของตัวไหม. สืบค้นจาก <https://qsds.go.th/newqssckri/%E0%B8%A7%E0%B8%87%E0%B8%88%E0%B8%A3%E0%B8%>

- [11] มาโนชญ์ สุธีรวัฒนานนท์. (2548) คุณสมบัติทางเคมีกายภาพของผงไฟโบรอินและซีรีซิน ที่ผลิตได้จากรังไหมและน้ำต้มรังไหม. สำนักวิชาเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี:นครราชสีมา. สืบค้นจาก https://doi.nrct.go.th/ListDoi/listDetail?Resolve_DOI=10.14457/SUT.res.2005.3
- [12] จุฬาวិทยานุกรม. (2561). ไหมไทย : การประยุกต์ใช้เป็นชีววัสดุเพื่อการแพทย์. สืบค้นจาก <http://www.chulapedia.chula.ac.th/index.php?title>
- [13] Safwan, Mohammad Ali. (2013). Non-Thrombogenic Silk Fibroin/N,N'-Methylene-DI-Acrylamide Blended Scaffolds. **applied sciences**, 1-86
- [14] Y, Qi.; et al. (2017). A Review of Structure Construction of Silk Fibroin Biomaterials from Single Structures to Multi-Level Structures. **Int J Mol Sci**, 18(3), 237.
- [15] Wen, Dan-Liang.; et al. (2021). Recent progress in silk fibroin-based flexible electronics. **Microsyst Nanoeng**, 7, 35.
- [16] มาโนชญ์ สุธีรวัฒนานนท์. (2549). การพัฒนากรรมวิธีการผลิตฟิล์มจากไฟโบรอินเพื่อใช้เป็นเวชภัณฑ์ทางการแพทย์. สำนักวิชาเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี:นครราชสีมา. สืบค้นจาก https://doi.nrct.go.th/ListDoi/listDetail?Resolve_DOI=10.14457/SUT.res.2011.53
- [17] Yamada, Hiromi.; et al. (2001). Preparation of undegraded native molecular fibroin solution from silkworm cocoons. **Materials Science and Engineering**. 14(1-2), 41-46.
- [18] H, Lin.; et al. (2008). Structure and Properties of Silk Fibroin Modified Cotton. **Fibers and Polymers**. 9,113-120.
- [19] MIYAGUCHI, Yuji; & HU, Jianen. (2004). Physicochemical Properties of Silk Fibroin after Solubilization Using Calcium Chloride with or without Ethanol. **Food Science and Technology Research**, 11(1), 37-42.
- [20] Kino, Rikako.; et al. (2007). Preparation and Characterization of Multilayered Hydroxyapatite/Silk Fibroin Film. **Journal of Bioscience and Bioengineering**, 103(6), 514-520.

- [21] อรพรรณ สุวรรณทอง. (2558). กระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตสำหรับประยุกต์ใช้ทางการแพทย์. *วารสารวิทยาศาสตร์ มข*, 43(4), 564-578.
- [22] ขวัญชนก จันทลักขณา. (2557). การสังเคราะห์และพัฒนาสีย้อมฟลูออเรสเซนต์ชนิดใหม่เพื่อใช้สำหรับเป็นเซ็นเซอร์ตรวจหาไอออนโลหะ (ปริญญาานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, ปทุมธานี).
- [23] O goshi, Ken-ichiro; & Serup, Jrgen. (2006). Review Safety of sodium fluorescein for in vivo study of skin. *Skin Research and Technology*, 12, 155–61.
- [24] Yi, Bingcheng.; et al. (2018). Fabrication of high-performance silk fibroin fibers via stable jet electrospinning for potential use in anisotropic tissue regeneration. *Journal of materials chemistry. B*, 6 (23), 3934-3945.
- [25] ชูชาติ อารีจิตรานุสรณ์. (2544). *เครื่องมือวิทยาศาสตร์*(พิมพ์ครั้งที่3). ขอนแก่น: โรงพิมพ์คลังนานาวิทยา.
- [26] Serodio, Ricardo.; et al. (2019). Ultrasound sonication prior to electrospinning tailors silk fibroin/PEO membranes for periodontal regeneration. *Materials Science and Engineering: C*, 9, 969-981.
- [27] TUV SUD. (2022). ISO 10993 การประเมินทางชีวภาพและการทดสอบความเข้ากันได้ทางชีวภาพของเครื่องมือแพทย์. สืบค้นจาก https://www.tuvsud.com/th-th/about-us?intlnk_group=navigation&intlnk_target=about&intlnk_origin=mainnavi-tools

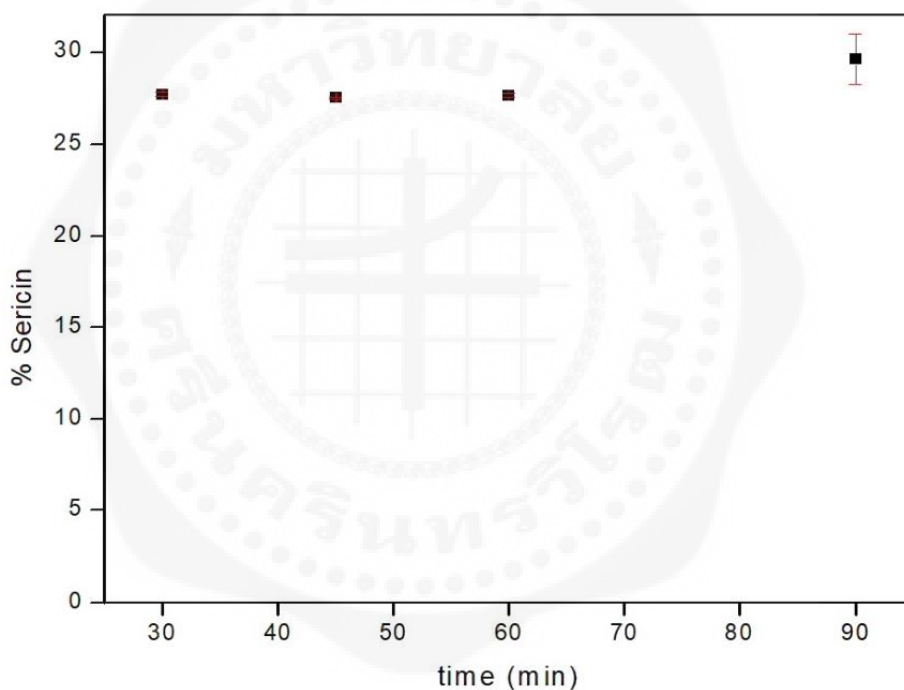


ภาคผนวก ก

การทดลองการสกัดสารละลายไฟโบรอิน

ทดลองการลอกกาไหม

ทดลองการลอกกาไหม โดยมีเงื่อนไขเป็นเวลาในการลอกกาไหมที่ 30 45 60 และ 90 นาที โดยลอกกาไหม 1 g ด้วย Na_2CO_3 เพื่อศึกษาผลของเวลาในการลอกกาต่อประสิทธิภาพในการลอกกา ซึ่งผลจะแสดงในรูป % เซริซินที่ถูกลอกออก แสดงดังรูปที่ ก-1 หา % เซริซินโดยใช้สูตรการคำนวณ $\frac{W_b - W_a}{W_b} \times 100$ W_b คือ น้ำหนักของรังไหมก่อนลอกกา และ W_a คือ น้ำหนักของรังไหมหลังลอกกา



รูปที่ ก-1 แสดงผล % เซริซินเทียบกับเวลา

จากรูปที่ ก-1 แสดงให้เห็นว่าเวลาในการลอกกาไหมแทบไม่มีผลต่อ % เซริซินที่ได้ ดังนั้นเวลาที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการลอกกา คือ 30 45 และ 60 นาที แต่ที่ 90 นาที % เซริซินที่ได้ค่อนข้างที่จะสูงเพราะใช้เวลาในการลอกกามากเกินไปทำให้น้ำหนักที่หายไปอาจเป็นไฟโบรอินบางส่วน

ทดลองละลายรังไหมด้วยสารละลาย Ajisawa ในสัดส่วนที่ต่างกัน

ทดลองละลายรังไหมและปริมาณตัวทำละลาย Ajisawa ที่สัดส่วนแตกต่างกัน เป็น 1:12 และ 1:20 โดยที่ 1:12 ใช้เวลาในการละลายไฟโบรอินมากกว่า 1:20 อย่างเห็นได้ชัด แสดงดังตารางที่ ก-1 เนื่องจากปริมาณของสารละลาย Ajisawa ที่น้อยกว่าอาจทำให้สารละลายกระจายตัวไม่ถึงเส้นใยไฟโบรอินจึงทำให้ใช้เวลาในการละลายมากกว่า โดยปริมาณมวลของไฟโบรอินหาได้จากการอบสารละลายไฟโบรอินปริมาตร 2 ml ที่ 105 °C เป็นเวลา 90 นาที

ตารางที่ ก-1 ตารางแสดงปริมาณมวลของไฟโบรอินที่ได้จากการละลายรังไหมด้วยสารละลาย Ajisawa ในสัดส่วน 1:12 และ 1:20

การทดลอง	สัดส่วน SF : Ajisawa	ปริมาณมวลของไฟโบรอินที่ได้จาก สารละลายปริมาตร 2 ml (%W/V)	เวลา (ชั่วโมง)
1	1:12	2.52 %	7
2	1:20	2.58 %	2
3	1:20	1.89 %	2
4	1:20	2.31 %	2

ทดลองการทำ Dialysis

การ Dialysis ด้วยน้ำ DI เปรียบเทียบกับ Urea

ทำการ Dialysis ด้วยน้ำ DI กับ Urea เพื่อเปรียบเทียบผลของปริมาณมวลไฟโบรอินที่ได้ โดยการ Dialysis ด้วย Urea ได้ผลลัพธ์ปริมาณของมวลไฟโบรอินมากกว่าการ Dialysis ด้วยน้ำ DI อย่างเห็นได้ชัด แสดงดังตารางที่ ก-2 แต่เป็นกระบวนการที่ซับซ้อนเนื่องจากในการทำ Dialysis ต้องมีการลดปริมาณความเข้มข้นของ Urea จาก 4M เป็น 2M และ 1M ตามลำดับ ในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้น้ำ DI ในการทำ Dialysis เนื่องจากเป็นกระบวนการที่มีความซับซ้อนน้อยกว่า

ตารางที่ ก-2 ตารางแสดงปริมาณมวลของไฟโบรอินที่ Dialysis ด้วย น้ำ DI และ Urea

Dialysis โดย	สัดส่วน SF : Ajisawa	มวลไฟโบรอินหลังจาก อบแห้งสารละลาย (g)	ปริมาณมวลของไฟโบรอินที่ได้จาก สารละลายปริมาตร 2 ml (%W/V)
Urea	1:10	0.089	4.45 %
Urea	1:20	0.1216	6.07 %
DI	1:20	0.0517	2.59 %

ภาคผนวก ข

Carbon Quantum Dots (CQDs)

การสังเคราะห์สารเรืองแสง CQDs จากน้ำส้มเขียวหวานโดยใช้กระบวนการ Hydrothermal เพื่อสังเกตแนวโน้มของการเรืองแสงหากเติมลงในสารละลายไฟโบรอิน

วัสดุและอุปกรณ์

- 1) น้ำส้มเขียวหวาน 36 ml
- 2) น้ำ DI 24 ml
- 3) Autoclave

วิธีการดำเนินการทดลอง สังเคราะห์ CQDs

- 1) นำน้ำส้มและน้ำ DI ผสมเข้าด้วยกันในอัตราส่วน 60:40 โดยการกวนด้วยแท่งแม่เหล็กบน stirrer
- 2) นำสารละลายที่ได้เทลงใน Autoclave หมุนปิดให้สนิทและนำเข้าตู้อบที่ 170 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง
- 3) นำ Autoclave ออกจากตู้อบ ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องและกรองเฉพาะส่วนสีส้มที่ใส
- 4) นำไป centrifuge ที่ความเร็ว 9000 rpm เป็นเวลา 15 นาที และนำสารละลายเก็บไว้ในขวด vial ที่ 4 °C

การเตรียมสารละลายไฟโบรอินเรืองแสง CQDs สำหรับการขึ้นรูปโดยเทคนิคการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต

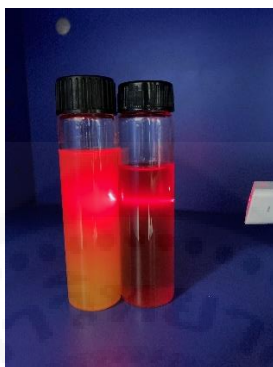
นำไฟโบรอินที่บดละเอียดละลายโดยใช้สารละลายกรดฟอร์มิก 98% ปริมาตร 2ml ที่ความเข้มข้น 12 wt% และทำการเติม CQDs 1%v/v

การขึ้นรูปเส้นใยโดยเทคนิคการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต

นำสารละลายไฟโบรอินที่เติมสารเรืองแสง CQDs บรรจุในกระบอกฉีดสารละลาย ที่ใช้เข็มขนาด 0.5 - 0.9 mm ใช้ศักย์ไฟฟ้าที่ 20 kV และระยะห่างระหว่างปลายเข็มและฉากรับคือ 15 cm

การทดสอบ CQDs ด้วย ปรากฏการณ์ Tyndall Effect

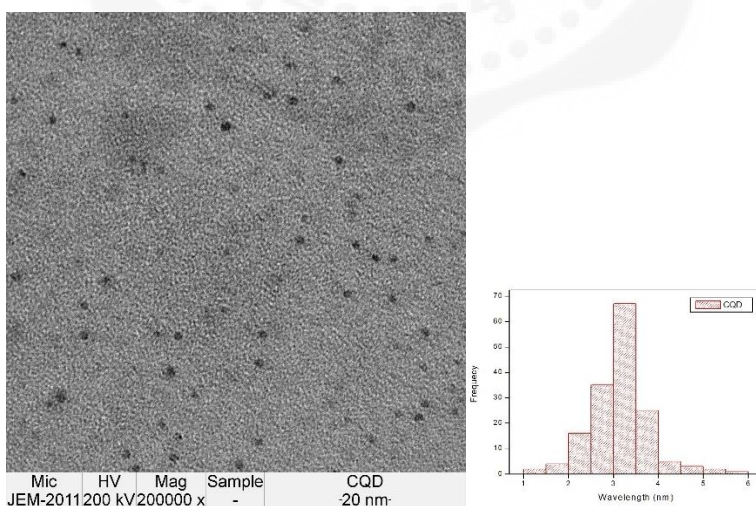
ทดสอบ CQDs เบื้องต้นด้วยลำแสง laser วัดปรากฏการณ์ Tyndall Effect ของนาโนคอลลอยด์ เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดจากการกระเจิงของแสง เมื่อลำแสงส่องผ่านคอลลอยด์จะเห็นลำแสงเป็นเส้นผ่านคอลลอยด์ โดยหลังจากการสังเคราะห์ CQDs โดยกระบวนการ Hydrothermal พบว่า CQDs ที่สังเคราะห์ได้เกิด ปรากฏการณ์ Tyndall Effect แสดงดังรูปที่ ข-1



รูปที่ ข-1 ปรากฏการณ์ Tyndall Effect ของ CQDs

การวิเคราะห์ลักษณะพื้นฐานของ CQDs โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM)

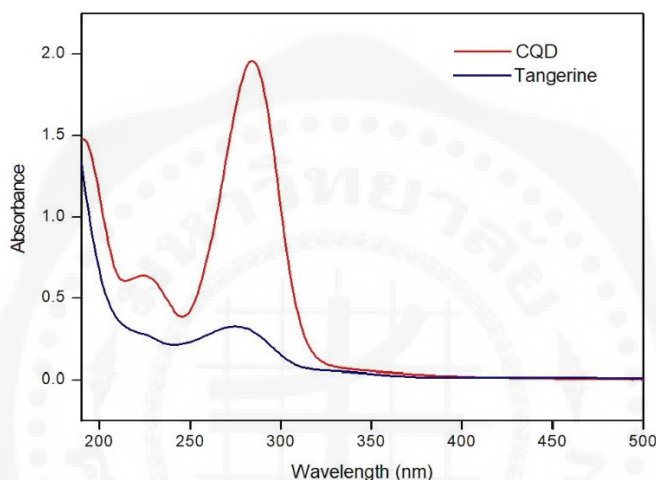
ลักษณะพื้นฐานของอนุภาค CQDs ที่ใช้กระบวนการ Hydrothermal ในการสังเคราะห์จะเห็นได้ว่า อนุภาคของ CQDs มีรูปร่างเป็นทรงกลม มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยอยู่ที่ 3.15 ± 0.65 nm ซึ่งอนุภาค ส่วนใหญ่มีขนาดใกล้เคียงกัน แสดงถึงการกระจายตัวของขนาดอนุภาคเป็นแบบแคบ แสดงดังรูปที่ ข-2



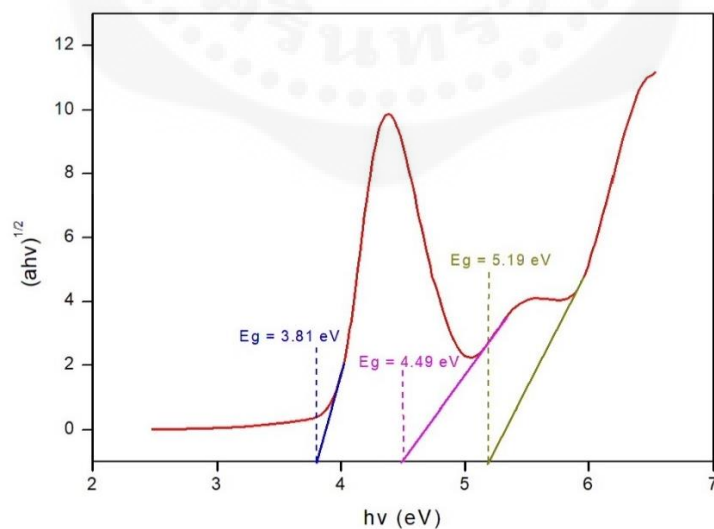
รูปที่ ข-2 ภาพ TEM แสดงลักษณะพื้นฐานวิทยาของอนุภาค CQDs

การวิเคราะห์สมบัติทางแสงของ CQDs โดย UV-VIS Spectrophotometer

สเปกตรัมแสดงค่าการดูดกลืนที่ 200-500 nm จะสังเกตเห็นพีคการดูดกลืนที่ 280 nm สำหรับ CQDs และ พีคการดูดกลืนที่ 276 nm สำหรับน้ำส้มเขียวหวานโดยแสดงค่า Absorbance ที่ต่ำว่า CQDs แสดงดังรูปที่ ข-3 และนำผลที่ได้จาก UV-Visible มาเปลี่ยนเป็นค่า Energy gap จากรูปบอกได้ว่า CQDs ที่สังเคราะห์ได้มีค่า Energy gap 3.81 eV 4.49 eV และ 5.19 eV ซึ่งเป็นผลจาก Quantum Confinement Effect แสดงดังรูปที่ ข-4 โดยในการศึกษาก่อนหน้านี้พบค่า Energy gap อยู่ในช่วง 1.8 eV - 5 eV ซึ่งผลมีความสอดคล้องกันและการที่มี Energy gap เกิดขึ้น 3 ค่า เกิดจาก Quantities of Energy



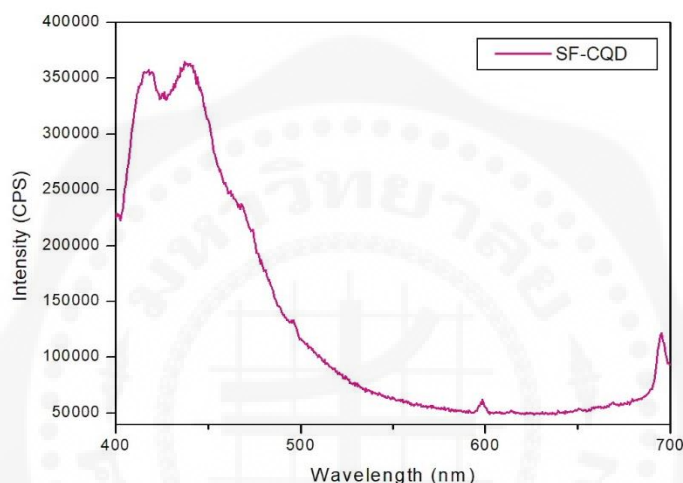
รูปที่ ข-3 สเปกตรัมแสดงค่าการดูดกลืนของ CQDs และ น้ำส้มเขียวหวาน



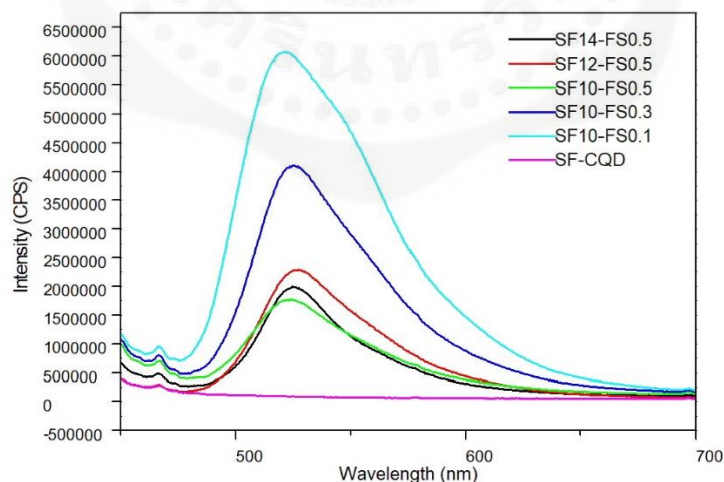
รูปที่ ข-4 ค่า Energy gap ของ CQDs

การศึกษาและตรวจวิเคราะห์สมบัติทางแสงของเส้นใยไฟโบรอินที่เติม CQDs เทียบกับเส้นใยไฟโบรอินที่เติมสารเรืองแสง Fluorescein Sodium โดย Fluorescence Spectrophotometer

ผลการเรืองแสงของเส้นใยไฟโบรอินที่เติม CQDs ที่ความเข้มข้น 1 %v/v โดยใช้เครื่องวัดแสงฟลูออเรสเซนซ์โดย excitation spectrum ที่ 370 nm และ emission spectra ในช่วง 450-700 nm การเรืองแสงของเส้นใยไฟโบรอินที่เติม CQDs แสดงค่า fluorescence emission ที่ 438 nm แสดงดังรูปที่ ข-5 ซึ่งผลการเรืองแสงของ CQDs แสดงความเข้มการเรืองแสงที่ต่ำกว่าสารเรืองแสง Fluorescein Sodium แสดงดังรูปที่ ข-6 แต่อย่างไรก็ตามผลการเรืองแสงของเส้นใยไฟโบรอินที่เติม CQDs สามารถเรืองแสงได้จริง



รูปที่ ข-5 แสดงค่าความเข้มของการเรืองแสงของเส้นใยไฟโบรอินที่เติมสารเรืองแสง CQDs



รูปที่ ข-6 แสดงค่าความเข้มของการเรืองแสงของเส้นใยไฟโบรอินที่เติม CQDs

เทียบกับสารเรืองแสง Fluorescein Sodium

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล	นางสาวพิมพ์ตะวัน แสงจันทร์ทิพย์
วัน เดือน ปี เกิด	15 กุมภาพันธ์ 2543
สถานที่เกิด	ราชบุรี
วุฒิการศึกษา	มัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนราชโบริกานุเคราะห์ จังหวัดราชบุรี พ.ศ.2560 วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวัสดุศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ พ.ศ.2564
ชื่อ-สกุล	นางสาวชุติมณฑน์ พงษ์ศิริ
วัน เดือน ปี เกิด	14 กรกฎาคม 2543
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
วุฒิการศึกษา	มัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนหอวัง กรุงเทพมหานคร พ.ศ.2560 วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวัสดุศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ พ.ศ.2564
ชื่อ-สกุล	นางสาวเอื้อกานต์ บุญคช
วัน เดือน ปี เกิด	26 กรกฎาคม 2543
สถานที่เกิด	กำแพงเพชร
วุฒิการศึกษา	มัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนวชิรปราการวิทยาคม จังหวัดกำแพงเพชร พ.ศ.2560 วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวัสดุศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ พ.ศ.2564