สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การสังเคราะห์วัสดุประกอบร่วมระหว่างเนื้อเยื่อโครงสร้างโปรตีนไฟโบรอินกับไฮดรอกซีแอปาไทต์

นางสาว นุชนาถ จำรัส
นางสาว รสสุคนธ์ ผ่องสวัสดิ์

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....107794
วัน,เดือน,ปี.....14 พ.ค. 2553
b.....1221237A
i.....

โครงงานนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาเคมีอุตสาหกรรม
ภาควิชาเคมี
คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The Synthesis of Composite of Silk Fibroin with Hydroxyapatite

Miss Nuchanat Jamrat

Miss Rossukon Phongsawat

A Special Project Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement for the

Degree of Bachelor of Science

Department of Chemistry

Faculty of Science

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

2006

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงงานพิเศษเรื่อง	การสังเคราะห์วัสดุประกอบร่วมระหว่างเนื้อเยื่อโครงสร้างโปรตีนไฟโบรอินกับไฮดรอกซีแอปาไทต์
นักศึกษา	นางสาวนุชนาถ จำรัส นางสาวรสสุคนธ์ ผ่องสวัสดิ์
ภาควิชา	เคมี
สาขาวิชา	เคมีอุตสาหกรรม
ปีการศึกษา	2549
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร. มาลินี ชัยศุภกิจสินธ์

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง อนุมัติให้โครงงานพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการตรวจสอบ		ลายมือชื่อ
ประธานกรรมการ	ผศ.ดร.จุฑารัตน์ ปรัชญาวรากร	.....
กรรมการ	รศ.ดร. กันยา ตันติวิสุทธิกุล	.....
กรรมการ	รศ.ดร. มาลินี ชัยศุภกิจสินธ์	.....

.....

(ผศ.ดร. ประยงค์ ดวงดี)

หัวหน้าภาควิชา

ลิขสิทธิ์ของภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงงานพิเศษ	การสังเคราะห์วัสดุประกอบร่วมระหว่างเนื้อเยื่อโครงสร้างโปรตีนไฟโบรอินกับไฮดรอกซีแอปาไทต์
นักศึกษา	นางสาว นุชนาถ จำรัส นางสาว รสสุคนธ์ ผ่องสวัสดิ์
ภาควิชา	เคมี คณะวิทยาศาสตร์
ปีการศึกษา	2549
สาขาวิชา	เคมีอุตสาหกรรม
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร.มาลินี ชัยศุภกิจสินธ์

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการสังเคราะห์วัสดุประกอบร่วมระหว่างเนื้อเยื่อโครงสร้างโปรตีนไฟโบรอินจากไหมไทยนางน้อยกับไฮดรอกซีแอปาไทต์ (HAp) แบ่งการเตรียมเป็น 3 ขั้นตอน ขั้นตอนแรกเป็นการเตรียมผงไหมไฟโบรอินจากรังไหมไทยนางน้อยได้ผลิตภัณฑ์เป็นผงสีขาวอมเหลือง ขั้นที่สองเป็นการเตรียมเนื้อเยื่อโครงสร้างโปรตีนไฟโบรอินโดยละลายใน 1,1,1,3,3,3,-เฮกซะฟลูออโรโพพานอลและใช้เกลือโซเดียมคลอไรด์เป็นสารทำให้เกิดรูพรุน ขั้นที่สามเป็นการเตรียมวัสดุประกอบร่วมระหว่างเนื้อเยื่อโครงสร้างไฟโบรอินกับ HAp โดยแช่เนื้อเยื่อโครงสร้างในสารละลาย HAp ความเข้มข้น 0.5 และ 1.0% w/v ที่ pH 10 เป็นเวลา 4 , 8 , 12 และ 16 วัน ที่อุณหภูมิห้อง

ผลการตรวจวิเคราะห์จากเทคนิค FTIR และ TGA แสดงให้เห็นว่าผงไหมไฟโบรอินจากขั้นตอนแรกและเนื้อเยื่อโครงสร้างโปรตีนไฟโบรอินจากขั้นที่ 2 มีโครงสร้างและอุณหภูมิการสลายตัวคล้ายกันแสดงให้เห็นว่าขั้นตอนการเตรียมไม่ส่งผลกระทบต่อโครงสร้างของไฟโบรอินจากไหมและเนื้อเยื่อโครงสร้างที่แช่ในสารละลาย HAp ความเข้มข้น 1.0% w/v เป็นเวลา 16 วัน นั้นมีความแข็งแรงกดอัดสูงและความสามารถในการดูดน้ำต่ำ ลักษณะโครงสร้างทางจุลภาพจากเทคนิค SEM แสดงให้เห็นว่ามีอนุภาคสีขาวมาเกาะบนเนื้อเยื่อโครงสร้าง และเมื่อวิเคราะห์อนุภาคสีขาวด้วยเทคนิค FTIR และ TGA สเปคตรัมที่ได้และอุณหภูมิการสลายตัวคล้ายกับสารประกอบแคลเซียมไฮดรอกซีแอปาไทต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Special Project Title	The Synthesis of Composite of Silk Fibroin with Hydroxyapatite
Student	Miss Nuchanat Jamrat
	Miss Rossukon Phongsawat
Department of	Chemistry Faculty of Science
Major	Industrail Chemistry
Year	2006
Special Project Advisor	Assoc.Prof.Dr.Malinee Chaisupakitsin

ABSTRACT

This research study on synthesis of composite between scaffold made from thai silk fibroin,NangNoi , and hydroxyapatite. Preparation devided into 3 steps. First , preparation fibroin powder from cucoon of NangNoi , and obtained yellowish powder. Second , preparation of scaffold by dissolution with 1,1,1,3,3,3-hexafluoropropanol and used sodium chloride salt as porogen. Thrid , preparation of composites between fibroin scaffold and hydroxyapatite by soaking the scaffold in hydroxyapatite solution concentration 0.5 and 1.0 % w/v at pH 10 for 4 , 8 , 12 and 16 days under room temperature.

The results from FTIR and TGA technique indicated that fibroin powder from first step and fibroin scaffold have similar structure and decomposition temperature. This means that preparation process did not affect on the structure of silk fibroin. The experimental results of soaking fibroin scaffold in 1.0% w/v of hydroxyapatite solution for 16 days provided the high compressive strength of scaffold-HAp and low water absorption. SEM micrographs showed white particles deposited on surface of scaffold. After analysis these white particles by using FTIR and TGA , they were found that the spectrum and the decomposition temperature of white particles was similar to calcium hydroxyapatite

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร. มาลินี ชัยศุภกิจสินธ์ อาจารย์ที่ปรึกษาที่กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ อบรมให้รู้จักการทำงานอย่างมีระเบียบรอบคอบ และความช่วยเหลือในการดำเนินงานโครงงานพิเศษนี้มาตลอด

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร. จุฑารัตน์ ศิริชัยสิทธิ์ และ รศ.ดร. กันยา ตันติวิสุทธิกุล อาจารย์คณะกรรมการตรวจสอบโครงงานพิเศษที่ให้ความอนุเคราะห์การตรวจทาน และแก้ไขโครงงานพิเศษฉบับนี้ให้ถูกต้องสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่ภาควิชาเคมี และเจ้าหน้าที่ของศูนย์เครื่องมือฯ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือเพื่อปฏิบัติงานจนโครงงานพิเศษนี้เสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา และเพื่อนๆ ที่ให้ความช่วยเหลือทางด้านแรงงานความคิดและเป็นกำลังใจให้เสมอมา

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง สถาบันที่ให้การศึกษาตลอดระยะเวลา 4 ปีจนสำเร็จการศึกษา

นางสาว นุชนาถ จำรัส

นางสาว รสสุคนธ์ ผ่องสวัสดิ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญรูป	ฉ
สารบัญตาราง	ซ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ฌ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญที่มาของโครงงาน	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตการศึกษาโครงงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	
2.1 ไหม	4
2.2 สีของรังไหม	5
2.3 โครงสร้างของโปรตีน	10
2.4 สมบัติบางประการและปฏิกิริยาของโปรตีน	12
2.4.1 สมบัติบางประการทางกายภาพ	12
2.4.2 สมบัติทางเคมี	13
2.4.3 ปัจจัยที่ทำให้โปรตีนแปลงสภาพ	13
2.5 ไหมไฟโบรอิน	14
2.5.1 สมบัติของสันใยไหมไฟโบรอิน	20
2.5.2 การปรับปรุงเส้นใยไหมด้วยวิธีการทางเคมี	24
2.5.3 การนำไปใช้ประโยชน์ในด้านอื่นๆ	26
2.6 เนื่อเยื่อวิศวกรรม	29
2.6.1 วัสดุสำหรับทำ Scaffold	30
2.6.2 การสังเคราะห์เนื้อเยื่อวิศวกรรม	31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน้า

2.6.3 สมบัติที่จำเป็นที่สุดของ Scaffold 33
2.7 โพโรเจน 34
2.7.1 การเลือกและการเติมโพโรเจน 34
2.8 สารประกอบไฮดรอกซีแอปาไทต์ 35
2.8.1 โครงสร้างผลึกไฮดรอกซีแอปาไทต์ 35
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 36
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน
3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน 40
3.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง 41
3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง 41
3.4 วิธีการทดลอง 43
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล
4.1 การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ของผงไหมไฟโบรอิน 45
4.2 การเตรียมเนื้อเยื่อโครงสร้างโปรตีนไฟโบรอิน 46
4.3 การเตรียมวัสดุประกอบร่วมของเนื้อเยื่อโครงสร้างโปรตีน ไฟโบรอินกับไฮดรอกซีแอปาไทต์ 47
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ
5.1 การสังเคราะห์เนื้อเยื่อโครงสร้างโปรตีนไฟโบรอิน 57
5.2 การเตรียมสารละลายไฮดรอกซีแอปาไทต์ 57
5.3 การเตรียมวัสดุประกอบร่วมของเนื้อเยื่อโครงสร้างโปรตีน ไฟโบรอินกับไฮดรอกซีแอปาไทต์ 57
5.4 ข้อเสนอแนะ 57
เอกสารอ้างอิง 59
ภาคผนวก ก การคำนวณ 62
ภาคผนวก ข อินฟราเรดสเปคตรา 67
ภาคผนวก ค ลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคจากเครื่อง SEM 70
ภาคผนวก ง เทอร์โมแกรมจากเครื่อง TGA 73
ภาคผนวก จ สมบัติเชิงกลโดยวัดความสามารถในการรับแรงกด 75
ภาคผนวก ฉ แพทเทิร์นการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์จากเครื่อง XRD 77

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

		หน้า
รูปที่ 2.1	สีของรังไหมจากพันธุ์ไหมต่างๆ	6
รูปที่ 2.2	โครงสร้าง α -เฮลิคส์	11
รูปที่ 2.3	โครงสร้าง β -ชีทของพอลิเพปไทด์	12
รูปที่ 2.4	โครงสร้างสามมิติของไหม	15
รูปที่ 2.5	(ก) ลักษณะโครงสร้างแบบเบต้า (β - plated sheet) (ข) ลักษณะโครงสร้างแผ่นจีบแบบแอนติพาราเลล (Antiparallel pleated sheet structure) (ค) พาราเลล (Parallel pleated sheet structure)	16
รูปที่ 2.6	(ก) แสดงภาคตัดขวางของเส้นไหมจากรังไหม Bombyx mori (ข) ใยไฟโบรอิน	21
รูปที่ 2.7	โครงสร้างของเส้นใยไหม	21
รูปที่ 2.8	SEMของเส้นไหมไหมเลี้ยง (*Bombyx mori*) ไหมดิบที่ ไม่มีการลอกกาวไหม (เซริซิน) ออก	22
รูปที่ 2.9	SEM แสดงเส้นไหมที่มีการลอกกาวไหม (เซริซิน)ออก โดยสกัดเป็นเวลา 60 นาที	22
รูปที่ 2.10	องค์ประกอบของกระดูกในร่างกาย	35
รูปที่ 2.11	โครงผลึกของไฮดรอกซีแอปาไทต์	36
รูปที่ 4.1	อินฟราเรดสเปคตรัมของผงไหมไฟโบรอิน	45
รูปที่ 4.2	TGA เทอร์โมแกรมของผงไหมไฟโบรอิน	46
รูปที่ 4.3	อินฟราเรดสเปคตรัมของเนื้อเยื่อโครงสร้างโปรตีนไฟโบรอิน	47
รูปที่ 4.4	TGA เทอร์โมแกรมของเนื้อเยื่อโครงสร้างโปรตีนไฟโบรอิน	47
รูปที่ 4.5	กราฟแสดงน้ำหนักของเนื้อเยื่อโครงสร้างโปรตีนไฟโบรอินหลังแช่ สารละลาย HAp ที่ความเข้มข้น 0.5% w/v	48
รูปที่ 4.6	กราฟแสดงน้ำหนักของเนื้อเยื่อโครงสร้างโปรตีนไฟโบรอินหลังแช่ สารละลาย HAp ที่ความเข้มข้น 1.0% w/v	48
รูปที่ 4.7	ลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคที่พื้นผิวของวัสดุประกอบร่วมระหว่างเนื้อเยื่อ โครงสร้างโปรตีนไฟโบรอินกับไฮดรอกซีแอปาไทต์ความเข้มข้น 0.5% w/v ที่กำลังขยาย 50 เท่า	49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน้า

รูปที่ 4.8 ลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคที่พื้นผิวของวัสดุประกอบร่วมระหว่างเนื้อเยื่อโครงสร้างโปรตีนไฟโบรอินกับไฮดรอกซีแอปาไทต์ ความเข้มข้น 1.0% w/v ที่กำลังขยาย 50 เท่า 50

รูปที่ 4.9 อินฟาเรดสเปกตรัมโดย a. ผงไหมไฟโบรอิน b. เนื้อเยื่อโครงสร้างโปรตีนไฟโบรอินก่อนแช่สารละลาย HAp c. เนื้อเยื่อโครงสร้างโปรตีนไฟโบรอินหลังแช่สารละลายHAp ความเข้มข้น 0.5% w/v เป็นเวลา 16 วัน และ d. เนื้อเยื่อโครงสร้างหลังแช่สารละลาย HAp ความเข้มข้น 1.0% w/vเป็นเวลา 16 วัน 51

รูปที่ 4.10 อินฟาเรดสเปกตรัมโดย a. เนื้อเยื่อโครงสร้างก่อนแช่สารละลาย HAp b. เนื้อเยื่อโครงสร้างโปรตีนไฟโบรอินหลังแช่สารละลาย HAp ความเข้มข้น 1.0% w/v เป็นเวลา 16 วัน c. ผงไฮดรอกซีแอปาไทต์ d. ผงแคลเซียมไฮดรอกไซด์ 52

รูปที่ 4.11 TGA เทอร์โมแกรมของเนื้อเยื่อโครงสร้างโปรตีนไฟโบรอินหลังแช่สารละลาย HAp ความเข้มข้น 0.5 % w/v เป็นเวลา 16 วัน 53

รูปที่ 4.12 TGA เทอร์โมแกรมของเนื้อเยื่อโครงสร้างโปรตีนไฟโบรอินหลังแช่สารละลาย HAp ความเข้มข้น 1.0 % w/v เป็นเวลา 16 วัน 53

รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสามารถในการรับแรงกดของเนื้อเยื่อโครงสร้างโปรตีนไฟโบรอินโดย a. ก่อนแช่สารละลาย HAp b. หลังแช่สารละลาย HAp ที่ความเข้มข้น 1.0 % w/v เป็นเวลา 16 วัน 54

รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสามารถในการดูดน้ำของวัสดุประกอบก่อนและหลังแช่สารละลาย HAp ที่ความเข้มข้น 1.0%w/v เป็นเวลา 16 วัน 54

รูปที่ 4.15 แพทเทิร์นการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของเนื้อเยื่อโครงสร้างโปรตีนไฟโบรอินก่อนแช่สารละลาย HAp 55

รูปที่ 4.16 แพทเทิร์นการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของเนื้อเยื่อโครงสร้างโปรตีนไฟโบรอินหลังแช่สารละลาย HAp ความเข้มข้น 0.5 % w/v เป็นเวลา 16 วัน 56

รูปที่ 4.17 แพทเทิร์นการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของเนื้อเยื่อโครงสร้างโปรตีนไฟโบรอินหลังแช่สารละลาย HAp ความเข้มข้น 1.0 % w/vเป็นเวลา 16 วัน 56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

		หน้า
ตารางที่ 2.1	แสดงชื่อของกรดแอลฟาอะมิโนที่พบมากในธรรมชาติ มี 20 ชนิด	10
ตารางที่ 2.2	สูตรโครงสร้างของกรดอะมิโนที่พบในไหม	15
ตารางที่ 2.3	คุณสมบัติและหน้าที่สำคัญของกรดอะมิโนในผงไหมที่มีต่อร่างกาย	17
ตารางที่ 2.4	กรดอะมิโนในไฟโบรอินและเซริซินของไหมไทยนางน้อย	20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

HAp	Hydroxyapatile
FTIR	Fourior Transform Infrared Spectrophotometer
Scaffold	เนื้อเยื่อวิศวกรรม
SEM	Scanning Electron Microscope
nm	นาโนเมตร
TGA	Thermogravimetric Analyzer
XRD	X-ray diffractometer
T_d	อุณหภูมิสลายตัว
w/v	น้ำหนักต่อปริมาตร
%	เปอร์เซนต์
ν	เลขคลื่น
μm	ไมโครเมตร
^0C	องศาเซลเซียส
^0F	องศาฟาเรนไฮต์
1°	primary
2°	secondary
3°	tertiary

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงงานวิจัย

หนอนไหม(Silkworm) มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า Bombyx mori อยู่ในวงศ์ Bombycidae หนอนไหมเป็นแมลงที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบสมบูรณ์ (Completely metamorphosis insect) ผลิตเส้นไหม ซึ่งเป็นเส้นใยธรรมชาติ จัดเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติชนิดหนึ่งมีโครงสร้างที่เรียกว่าโปรตีน สามารถแยกกรดอะมิโนออกจากโปรตีนได้โดยการไฮโดรไลส์ด้วยกรด กรดอะมิโนที่พบในโปรตีนมีทั้งหมด 20 ชนิด โปรตีนเส้นใยมีองค์ประกอบหลักทางเคมี คือ โปรตีนที่เรียกว่าไฟโบรอิน (Fibroin) เป็นเส้นใยที่ไม่ละลายน้ำ (ประมาณ 78% ของน้ำหนักไหมดิบ) และอีกชนิดหนึ่งคือโปรตีนที่เรียกว่าเซริซิน (Sericin) ซึ่งเป็นกาวไหมที่ทำให้เส้นใย 2 เส้นติดกัน สามารถละลายน้ำได้ ไหมสามารถนำไปใช้งานอยู่ในรูปของเส้นใยสิ่งทอและการเป็นวัสดุทางการแพทย์ เนื่องจากเหนียวและทนต่อการเข้าทำลายของเชื้อจุลินทรีย์ทั้งยังเข้ากับเนื้อเยื่อมนุษย์ได้ดี

เนื้อเยื่อวิศวกรรม ถูกจำกัดความว่าเป็นศาสตร์ 2 ศาสตร์ที่ใช้ประโยชน์ตามหลักของวิศวกรรมและวิทยาศาสตร์ชีวภาพ เกี่ยวกับการพัฒนาของชีววิทยาเพื่อแทนที่ ซ่อมแซม รักษาหรือปรับปรุงเนื้อเยื่อ ในการออกแบบเนื้อเยื่อวิศวกรรมนั้นวัสดุและเทคนิคการผลิตจะเป็นสิ่งสำคัญ จุดมุ่งหมายของการสร้างเนื้อเยื่อใหม่ Scaffold ให้เหมาะกับความต้องการเฉพาะอย่างรูพรุนที่มากและขนาดรูที่เพียงพอจึงเป็นที่ต้องการจากงานวิจัย เพื่อสะดวกในการเพาะเซลล์และแพร่ผ่านตลอด ทำให้โครงสร้างสมบูรณ์ของทั้งเซลล์และสารอาหาร การเสื่อมสภาพทางชีวภาพเป็นส่วนสำคัญของ Scaffold ที่ต้องการ เพื่อดูดซับเนื้อเยื่อแวดล้อมภายนอกที่จำเป็นจากการผ่าตัดเอาออกไป อัตราของการเสื่อมสภาพที่เกิดขึ้นเท่ากันกับอัตราการเกิดเนื้อเยื่อใหม่ นั้นคือ ขณะเซลล์เกิดขึ้นมีโครงสร้างเมตริกซ์ธรรมชาติรอบๆเซลล์ Scaffold สามารถให้โครงสร้างที่สมบูรณ์ภายในร่างกาย และในที่สุดก็จะแตกออกจากเนื้อเยื่อใหม่ ซึ่งเนื้อเยื่อใหม่นี้จะต้องรับน้ำหนักต่อไป

ในงานวิจัยนี้เป็นการนำรังไหมไทยนางน้อย สีเหลือง จากจังหวัดขอนแก่นที่ตัดรังเพื่อเอาหนอนไหมออกไปและไม่สามารถนำไปใช้ในการทอผ้าได้แล้ว มาทดลองผลิตเป็นวัสดุทางการแพทย์โดยใช้โปรตีนไฟโบรอินเตรียมเนื้อเยื่อโครงสร้าง (Scaffold) ลักษณะคล้ายฟองน้ำที่มีความสามารถในการดูดซับน้ำและสารละลายบางชนิดได้เป็นอย่างดี จากนั้น ทำการศึกษาสมบัติทางกายภาพ สมบัติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เชิงกล และสัณฐานวิทยา ของขนาดรูพรุนและชนิดของไพโรเจน ซึ่งได้แก่เกลือชนิดต่างๆ ในการทำให้เกิดรูของเนื้อเยื่อโครงสร้างและหาสภาวะที่เนื้อเยื่อโครงสร้างคล้ายฟองน้ำของโปรตีนจากไหมไทยเกิดการเกาะตัวของแคลเซียม

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อหาสภาวะสำหรับการเตรียมวัสดุประกอบร่วมของเนื้อเยื่อโครงสร้างโปรตีนไฟโบรอินกับไฮดรอกซีแอปาไทต์
2. เพื่อศึกษาเปรียบเทียบสมบัติเชิงกล การดูดน้ำ และสัณฐานวิทยา ของวัสดุประกอบร่วมของเนื้อเยื่อโครงสร้างโปรตีนไฟโบรอินก่อนและหลังการเกาะตัวของไฮดรอกซีแอปาไทต์
3. เพื่อหาวิธีนำโปรตีนไหมมาใช้ทำวัสดุชีวภาพเพื่อใช้ประโยชน์ทางการแพทย์เป็นการเพิ่มมูลค่าให้ไหมไทย

1.3 ขอบเขตโครงงานวิจัย

1. ศึกษาการเตรียมผงไหมไฟโบรอินจากไหมไทยนางน้อย
2. ศึกษาสภาวะการเตรียมเนื้อเยื่อโครงสร้างโปรตีนไฟโบรอินของไหมไทยนางน้อย
3. ศึกษาชนิดของโพโรเจนที่มีผลต่อโครงสร้างเนื้อเยื่อที่เตรียมจากโปรตีนไฟโบรอิน
4. ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมที่แคลเซียมจะเกาะติดเนื้อเยื่อโครงสร้างโปรตีนไฟโบรอิน
5. ศึกษาสมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล และสัณฐานวิทยาของเนื้อเยื่อโครงสร้างโปรตีนไฟโบรอินทั้งก่อนและหลังการเกาะติดของแคลเซียม

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบถึงสภาวะในการเตรียมเนื้อเยื่อโครงสร้างโปรตีนไฟโบรอินของไหมไทยนางน้อย
2. ทราบว่าโพโรเจนชนิดใดให้โครงสร้างเนื้อเยื่อที่มีสมบัติที่ดีและแคลเซียมเกาะติดได้ง่าย
3. เป็นการนำโปรตีนจากรังไหมไทยมาใช้ให้เกิดประโยชน์อย่างคุ้มค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ค้นคว้าและศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง
2. วางแผนการดำเนินงานทดลอง
3. เตรียมผงไหมไฟโบรอินจากรังไหมไทยนางน้อย
4. เตรียมเนื้อเยื่อโครงสร้างจากผงไหมโปรตีนไฟโบรอิน
5. เตรียมวัสดุประกอบร่วมของเนื้อเยื่อโครงสร้างโปรตีนไฟโบรอินกับไฮดรอกซีแอปาไทต์
6. ตรวจวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่ได้ด้วยเครื่องมือวิเคราะห์ต่างๆ
7. วิเคราะห์ผลจากการศึกษาทดลองและสรุปผลการทดลอง
8. เขียนรายงานและเสนอผลงานวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ไหม (Silks) [1-3]

หนอนไหม (Silkworm) มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า ***Bombyx mori*** อยู่ในวงศ์ Bombycidae หนอนไหมเป็นแมลงที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบสมบูรณ์ (Completely metamorphosis insect) แบ่งออกเป็น 4 ระยะ ได้แก่ ไข่ ตัวหนอน ดักแด้ และผีเสื้อ มีเพียงระยะตัวหนอนเท่านั้นที่กินอาหาร ซึ่งจะนำสารชนิดต่าง ๆ จากใบหม่อนไปสร้างความเจริญเติบโต โดยผ่านการย่อยและดูดซึมเป็นปริมาณ 1 ใน 3 ของสารอาหารทั้งหมด ครึ่งหนึ่งของโปรตีนที่ดูดซึมจากใบหม่อนจะถูกนำไปใช้ผลิตเส้นไหม เมื่อถึงวัย 5 วันแรกต่อมไหม (Silk gland) จะหนักเพียง 6.36% ของน้ำหนักตัวไหม เมื่อไหมสุกก่อนเข้าทำรัง ต่อมไหมจะหนักถึง 41.97% จะเห็นว่าปลายวัยที่ 5 สารอาหาร โดยเฉพาะโปรตีนเกือบทั้งหมดถูกเปลี่ยนไปเป็นสารที่ใช้ชักใยทำรังหรือเส้นไหมนั่นเอง และเป็นเส้นใยที่มีคุณค่ามหาศาล หาที่เปรียบมิได้ ไหมเป็น "ราชินีแห่งเส้นใย" ที่ได้มาจากโปรตีนที่หนอนไหมขับออกมาเพื่อป้องกันตัวเองขณะเป็นดักแด้ เส้นใยที่ได้มีความยาวต่อเนื่อง (Filaments) เส้นใยไหมเป็นเส้นใยธรรมชาติที่ได้จากโปรตีนเช่นเดียวกับเส้นใยขนสัตว์ เส้นไหมเกิดจากการพ่นออกของตัวหนอนไหม การสังเคราะห์โปรตีนในเส้นไหมทำได้ในเซลล์ของต่อมไหมที่อยู่ในตัวหนอนไหม สารไหมเหลว (Liquid silk) สามารถขับออกมาจากต่อมไหมส่วนท้าย (Posterior silk gland) หลังจากนั้นจะส่งสารไหมเหลวไปที่ต่อมไหมส่วนกลาง (Middle silk gland) ในระหว่างที่อยู่ในต่อมไหมส่วนกลาง สารไหมเหลวจะมีการเปลี่ยนรูปกลายเป็นเจลาติน (Gelatin) ที่มีความแข็งแรงขึ้น ในต่อมไหมส่วนกลางยังมีต่อมที่สามารถสร้างโปรตีนอีกชนิดหนึ่งที่มีสมบัติเป็นกาวในการเคลือบเจลาตินที่ได้ เรียกโปรตีนชนิดนี้ว่า เซริซิน (Sericin) หลังจากนั้นเจลาตินจะมีความเหนียวและแข็งขึ้นโดยอาศัยการส่ายหัวไปมาของตัวหนอนไหม อาการเคลื่อนไหวจะเกิดขึ้นที่บริเวณต่อมไหมส่วนหน้า เรียกเจลาตินที่มีความเหนียวข้นนี้ว่า ไฟโบรอิน (Fibroin) หลังจากที่มีการรวมกันของไฟโบรอิน 2 เส้นและมีการเชื่อมติดกันด้วยกาวไหมเซริซิน จะมีการผ่านรูขนาดเล็ก(Orifice of spinneret) ออกมาจากตัวของหนอนไหม และได้เป็นเส้นใยที่ใช้ในการทำเครื่องนุ่งห่มหรือสิ่งทอต่าง ๆ สามารถจำแนกไหมออกเป็นสองประเภทดังนี้คือ

2.1.1 ไหมเลี้ยง (Mulberry silk) เป็นหนอนไหมที่มนุษย์เพาะเลี้ยงโดยให้อาหาร คือ ใบหม่อน (Mulberry leaves) สดๆ ซึ่งไหมชนิดนี้มีสีค่อนข้างขาวและหลังการลอกกาวจะมีความมันเงาเพิ่มขึ้น

2.1.2 ไหมป่า (Wild silk) เป็นไหมที่มนุษย์ไม่ได้เพาะเลี้ยงโดยปกติไหมทาซาร์ (Tussah silk) มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แหล่งกำเนิดอยู่ที่จีนและอินเดียเลี้ยงด้วยใบโอ๊คซึ่งไหมป่าจะให้เส้นใยที่มีสีน้ำตาล หยาบและไม่สม่ำเสมอเมื่อเทียบกับเส้นใยจากไหมเลี้ยง

ไหมไทยถือว่าเป็นไหมเลี้ยงซึ่งเป็นตัวอ่อนของผีเสื้อกลางคืนชนิดหนึ่งเป็นแมลงในอันดับเลพิดอปเทอรา มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Bombyx mori* มีชื่อสามัญว่า silkworm วงศ์ Bombicidae เป็นพันธุ์ไหมที่มีคุณภาพดีที่สุดนิยมเลี้ยงกันมากในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย ปัจจุบันการเลี้ยงไหมและการผลิตไหมได้รับการส่งเสริมให้ทำเป็นระบบอุตสาหกรรมแบบ Sericulture ซึ่งเป็นระบบที่ได้รับการพัฒนามาจากประเทศญี่ปุ่นแต่มีลักษณะที่แตกต่างกัน เนื่องจากเส้นใยมีสีเหลืองและค่อนข้างหยาบ ไหมไทยมีส่วนประกอบที่เป็นกาวไหมปริมาณมากถึง38 % มากกว่าไหมเลี้ยงชนิดอื่นๆ ซึ่งปกติมีกาวไหมเพียง 20-25 % เท่านั้นทำให้เส้นใยไหมไทยมีลักษณะเฉพาะตัวเมื่อทอผ้าไหมจัดเป็นเส้นใยที่หรูหรา สวยงาม มีเอกลักษณ์เป็นของตัวเอง ซึ่งเส้นใยอื่นไม่สามารถเทียบได้มีสมบัติดีเหมาะแก่การทำเป็นเสื้อผ้า เพราะให้ความสบายความสวยงามดูมีค่าและมีความทนทานแข็งแรงที่สุดในบรรดาเส้นใยธรรมชาติทั้งหมด

พันธุ์ไหมในประเทศไทยมีจำนวนประมาณ 28 พันธุ์[4-5] โดยมีทั้งพันธุ์แท้ของไทยและพันธุ์ผสมที่ได้จากพัฒนา ในที่นี้จะยกตัวอย่างพันธุ์ไหมที่ใช้มากและสำคัญ ดังนี้

1.นางลาย เป็นพันธุ์ไหมแท้พื้นเมือง รังไหมมีสีเหลืองเข้ม ลักษณะมีหัวท้ายค่อนข้างแหลม ขนาด 1.43 × 2.90 cm จำนวนรังไหม 1300-1400 รังต่อรังไหม 1 กิโลกรัม น้ำหนักรังสด 1 รัง 0.68-1.64 กรัม น้ำหนักเปลือกรัง 1 รัง 0.08-0.24 กรัม ความยาวเส้นใยประมาณ 311 เมตรต่อรัง ความสามารถในการสาวออกสูง เส้นใยมีความเหนียวสูงและเป็นมันเงา

2.ไทยลูกผสมอุบลราชธานี 60-35 (ดอกบัว) เป็นไหมไทยลูกผสม รังไหมมีสีเหลือง ลักษณะมีหัวท้ายค่อนข้างกลม ขนาด 1.5 × 3.25 cm น้ำหนักรังสด 1 รัง 1.4 กรัม น้ำหนักเปลือกรัง 1 รัง 0.225 กรัม ความยาวเส้นใยประมาณ 519 เมตรต่อรัง และมีการรับรองพันธุ์จากกรมวิชาการเกษตร เมื่อเดือนสิงหาคม พ.ศ. 2535

3.จุลไทย เบอร์ 1 เป็นไหมลูกผสมคู่ รังไหมมีสีขาวนุ่นอมเทา ลักษณะมียาวรี มีรอยย่นค่อนข้างละเอียด ขนาด 2.3 × 3.6 cm น้ำหนักรังสด 1 รัง 1.75 กรัม น้ำหนักเปลือกรัง 1 รัง 0.393 กรัม ความยาวเส้นใยประมาณ 887 เมตรต่อรัง และมีการรับรองพันธุ์จากกรมวิชาการเกษตร เมื่อเดือนมีนาคม พ.ศ. 2546

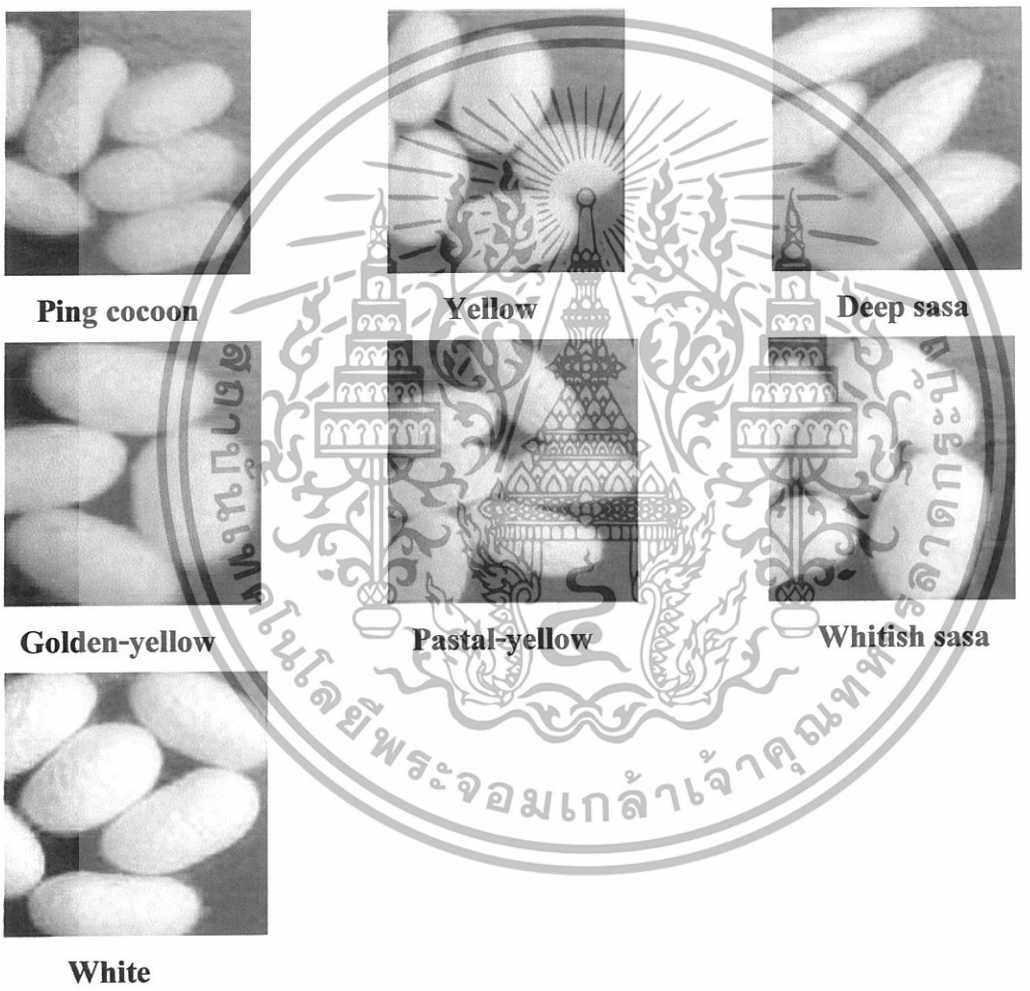
2.2 สีของรังไหม [6-7]

ความหลากหลายของรังไหมและเป็นรังไหมที่มีสีสว่าง เช่น สีเหลือง สีชมพู สีเหลืองทอง flesh sasa (yellowish green) ซึ่งได้มาจากแคโรทีนอยด์ (carotenoids) ขณะที่สีเขียวและ sasa ได้มาจาก flavonoids โดยที่สีของไหมได้จากการที่หนอนไหมดูดกลืนสีของใบหม่อนแล้วส่งผ่านต่อจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

midgut ไปยังต่อมของไหม โดยผ่าน hemolymph โดยที่แคโรทีนอยด์จะไม่ถูกสังเคราะห์ในตัวหนอนไหม ดังนั้นเนื้อเยื่อ midgut และ เนื้อเยื่อตรงกลางของต่อมไหมเป็นเนื้อเยื่อที่สำคัญมากๆ สำหรับการส่งผ่านสีจากหลอดการย่อยอาหารไปสะสมในชั้นเซริซินของรังไหม

ความหลากหลายของสีรังไหมเป็นผลมาจากสัดส่วนของลูเตอิน (lutein), บีตา-แคโรทีน (β-carotene), แกมมา-แคโรทีน (α-carotene) และ xanthophylls โดยที่ลูเตอินเป็นส่วนสำคัญมากของสีรังไหมสีเหลือง ขณะที่สีเหลืองเทียนของรังไหมจะมีลูเตอิน มากกว่า 80% โดยที่สีเหลืองทองของรังไหมจะมีลูเตอิน 60% ดังตัวอย่างสีของรังไหมจากพันธุ์ต่างๆ



รูปที่ 2.1 สีของรังไหมจากพันธุ์ไหมต่างๆ[7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แคโรทีนอยด์ (Carotenoids)[7]

แคโรทีนอยด์เป็นกลุ่มของรงควัตถุที่พบในพืช ให้สีเหลือง ส้ม และส้มแดง มีสมบัติที่ไม่ละลายน้ำ แต่ละลายได้ดีในน้ำมันและตัวทำละลายอินทรีย์

ชนิดของแคโรทีนอยด์

แคโรทีนอยด์สีส้ม	แอลฟา-, บีตา- และแกรมมา-แคโรทีน
แคโรทีนอยด์สีแดง	ไลโคพรีน และ astaxanthin
แคโรทีนอยด์สีเหลือง	ลูเตเอิน และ zeaxanthin

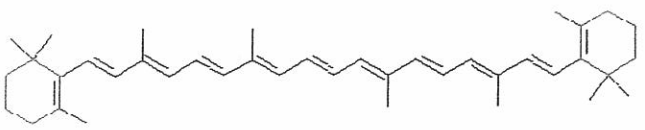
แคโรทีนอยด์ แบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่ม คือ

1. กลุ่มที่เป็นไฮโดรคาร์บอน คือ แคโรทีนซึ่งเป็นแคโรทีนอยด์กลุ่มที่มีโครงสร้างหลักประกอบด้วยหน่วยไอโซพรีนเป็นไดอีน (diene) มีคาร์บอนในโมเลกุล40 อะตอม มีสูตรโมเลกุล $C_{40}H_{56}$ แบ่งออกได้เป็นกลุ่มย่อยคือ

1.1 ไลโคพรีน (Lycopene) โมเลกุลไลโคพรีนเป็นโครงสร้างพื้นฐานของแคโรทีนอยด์ ถูกปรับจากอะตอมคาร์บอน 40 ซึ่งถูกจัดเรียงในโครงสร้างยาวสลับระหว่างพันธะคู่-พันธะเดี่ยว แคโรทีนอยด์จัดรูปเป็น chromophore ซึ่งเป็นส่วนของโมเลกุลที่ดูดซับและให้ความยาวคลื่นแสง chromophore จะไม่ให้แคโรทีนอยด์ที่เป็นสีอย่างเดียวแต่กระจายความเป็นสมบัติแอนติออกซิเดนท์ (antioxidant) โมเลกุลของไลโคพรีนจะสมมาตรซึ่งเป็นลักษณะของแคโรทีนอยด์ทั่วไป

ไลโคพรีน (Lycopene)

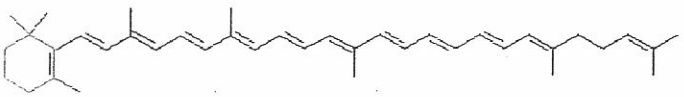
1.2 บีตา-แคโรทีน (β-carotene) คือไฮโดรคาร์บอนที่มีวงแหวนอยู่ในโมเลกุลที่ปลายทั้งสองด้าน ซึ่งวงแหวนทั้งสองจะชี้เฉพาะ เป็นแคโรทีนทั่วไปและเป็นเครื่องหมายแสดงวิตามินเอ



บีตา-แคโรทีน (β-carotene)

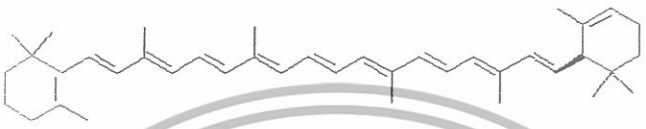
1.3 แกมมา-แคโรทีน (γ-carotene) คือไฮโดรคาร์บอนที่มีวงแหวนอยู่ในโมเลกุลปลายด้านหนึ่ง แกมมา-แคโรทีนเป็นเครื่องหมายแสดงวิตามินเอเหมือนกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



แกมมา-แคโรทีน (γ-carotene)

1.4 แอลฟา-แคโรทีน (α-carotene) คือไฮโดรคาร์บอนที่มีวงแหวนอยู่ที่ปลายทั้งสอง ส่วนที่ปลายซ้ายของโมเลกุลเป็นวงแหวนที่เหมือนกันและทางขวาจะเป็นประเภทที่แตกต่าง ซึ่งจะเป็นโมเลกุลที่ไม่สมมาตร จะมีวิตามินเอประมาณ 50-55% ของบีตา-แคโรทีน



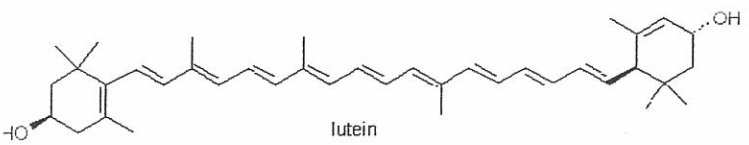
แอลฟา-แคโรทีน (α-carotene)

1.5 เดลต้า-แคโรทีน เป็นเครื่องแสดงของแอลฟา-แคโรทีน ซึ่งมีวงแหวนที่ปลายทางขวาประเภทเดียวกับแอลฟา-แคโรทีน แต่ปลายซ้ายจะไม่มี

เดลต้า-แคโรทีน

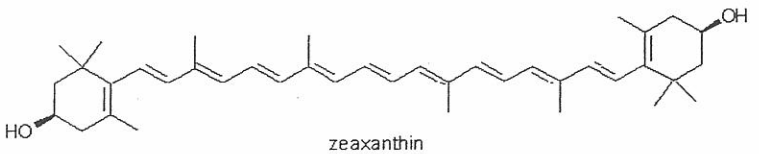
2. กลุ่มที่มีออกซิเจนในโมเลกุล เป็นกลุ่มของอนุพันธ์ไฮโดรคาร์บอนที่มีหมู่ไฮโดรอกซิล เมทอกซิล คาร์บอนซิล คีโตน หรืออีพอกซี (Epoxy) แคโรทีนอยด์กลุ่มที่พบในพืชและมักจะอยู่รวมกับแคโรทีน นอกจากนี้ ยังอาจอยู่ในรูปอนุพันธ์เอสเทอร์กับกรดไขมันก็ได้ สารกลุ่มนี้จะเป็นรงควัตถุหลัก

2.1 แซนโทฟิลล์ (Xanthophylls) ที่เรียกว่า ลูเตอิน (Lutein) ใช้ป้องกันการเกิดจุดด่างดำ ต้อกระจก และ มะเร็งลำไส้ใหญ่ ซึ่งมีหมู่ –OH 2 หมู่บนวง



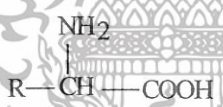
2.2 ซีแซนติน (Zeaxanthin) เป็นสเตอริโอไอโซเมอร์ (stereoisomer) ของลูเตอิน จะเกิดไปทางเดียวกับลูเตอินในเรตินาของตา เพื่อป้องกันการทำลายจากแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



zeaxanthin

เส้นใยไหมมีปริมาณของซัลเฟอร์จำนวนเล็กน้อยมาก เป็นสารชีวโมเลกุลที่มีมวลโมเลกุลสูง โปรตีนทุกชนิดประกอบด้วยธาตุคาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) ไนโตรเจน (N) ออกซิเจน (O) และกำมะถัน (S) แต่โปรตีนบางชนิดมีธาตุฟอสฟอรัส (P) เหล็ก (Fe) สังกะสี (Zn) และทองแดง (Cu) เพิ่มเข้ามา เส้นไหมเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติชนิดหนึ่งที่เรียกว่าโปรตีน (Protein) สามารถถูกแยกออกจากโปรตีนได้โดยการไฮโดรไลส์ด้วยกรด กรดอะมิโนที่พบในโปรตีนมีทั้งหมด 20 ชนิด ดังตารางที่ 2.1 โดยแต่ละชนิดมีโครงสร้างต่างกันที่หมู่ R กรดอะมิโนเหล่านี้ต่อกันเป็นสายโซ่ยาว เรียกว่า โซ่พอลิเพปไทด์ ต่อกันอยู่ในลักษณะเป็นพอลิเมอร์ที่ไม่มีการแตกกิ่ง พันธะโควาเลนต์ที่เชื่อมอยู่ระหว่างกรดอะมิโนมีชื่อว่า พันธะเพปไทด์ ซึ่งพันธะนี้ เป็นพันธะเอไมด์ที่เกิดการสูญเสียน้ำจากหมู่คาร์บอกซิลิกของกรดอะมิโนตัวหนึ่งกับหมู่แอลฟาอะมิโนของกรดอะมิโนที่อยู่ถัดไป โมเลกุลของโปรตีนอาจประกอบด้วยโซ่พอลิเพปไทด์เพียงโซ่เดียวหรือมากกว่าก็ได้ โดยมีความยาวที่แตกต่างกันออกไป โดยมีกรดอะมิโนตั้งแต่ประมาณ 40 ถึงมากกว่า 4,000 หน่วย ซึ่งโปรตีนแต่ละชนิดมีส่วนประกอบทางเคมี มวลโมเลกุล และการเรียงลำดับของกรดอะมิโนที่จำเพาะโดย กรดอะมิโนมีสูตรโมเลกุลทั่วไป คือ



ภายในโมเลกุลของกรดแอลฟาอะมิโน จะมีหมู่อะมิโนต่ออยู่ที่ตำแหน่งแอลฟาคาร์บอนของกรดคาร์บอกซิลิก (กรดอะมิโนทุกตัวมีแอลฟาคาร์บอน ยกเว้นไกลซีน) แต่เนื่องจากเอมีนเป็นเบสและคาร์บอกซิลิกเป็นกรดจึงเกิดการส่งผ่านโปรตอนจากกรดให้เบส ซึ่งสูตรโมเลกุลของกรดอะมิโนจึงเขียนอยู่ในรูปที่แตกตัวเป็นไอออน หรือรูปที่มีประจุสองขั้วได้ ดังนี้

โครงสร้างที่เป็นประจุของกรดแอลฟาอะมิโน

เส้นไหมเป็นเส้นใยที่เป็นสารประกอบประเภทพอลิเอไมด์ (Polyamide) เกิดจากการมีหน่วยของโมเลกุลขนาดเล็กที่เรียกว่า กรดอะมิโน (Amino acid) มาต่อกันเป็นสารที่มีโมเลกุลใหญ่ด้วยพันธะเปปไทด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 แสดงชื่อของกรดแอลฟาอะมิโนที่พบมากในธรรมชาติ มี 20 ชนิด [8]

กรดแอลฟาอะมิโน	ชื่อย่อ
ไกลซีน (Glycine)	Gly
อะลานีน(Alanine)	Ala
วาลีน (Valine)	Val
ลิวซีน (Leucine)	Leu
ไอโซลิวซีน (Isoleucine)	Ile
เซรีน (Serine)	Ser
ธรีโอนีน (Threonine)	Thr
กรดแอสพาร์ติก (Aspartic acid)	Asp
แอสพาราจีน (Asparagine)	Asn
ซีลเตอีน (Cysteine)	Cys
เมธีโอนีน (Methionine)	Met
กรดกลูตามิก (Glutamic acid)	Glu
กลูตามีน (Glutamine)	Gln
ไลซีน (Lysine)	Lys
อาร์จินีน (Arginine)	Arg
ฮีสติดีน (Histidine)	His
ฟีนีลอะลานีน (Phenylalanine)	Phe
ไทโรซีน (Tyrosine)	Tyr
ทริพโตเฟน (Tryptophan)	Try
โพรลีน (Proline)	Pro

2.3 โครงสร้างของโปรตีน [1-3,9]

จำแนกโครงสร้างของโปรตีนได้เป็น 4 แบบ คือ

1. โครงสร้างปฐมภูมิ (Primary structure)

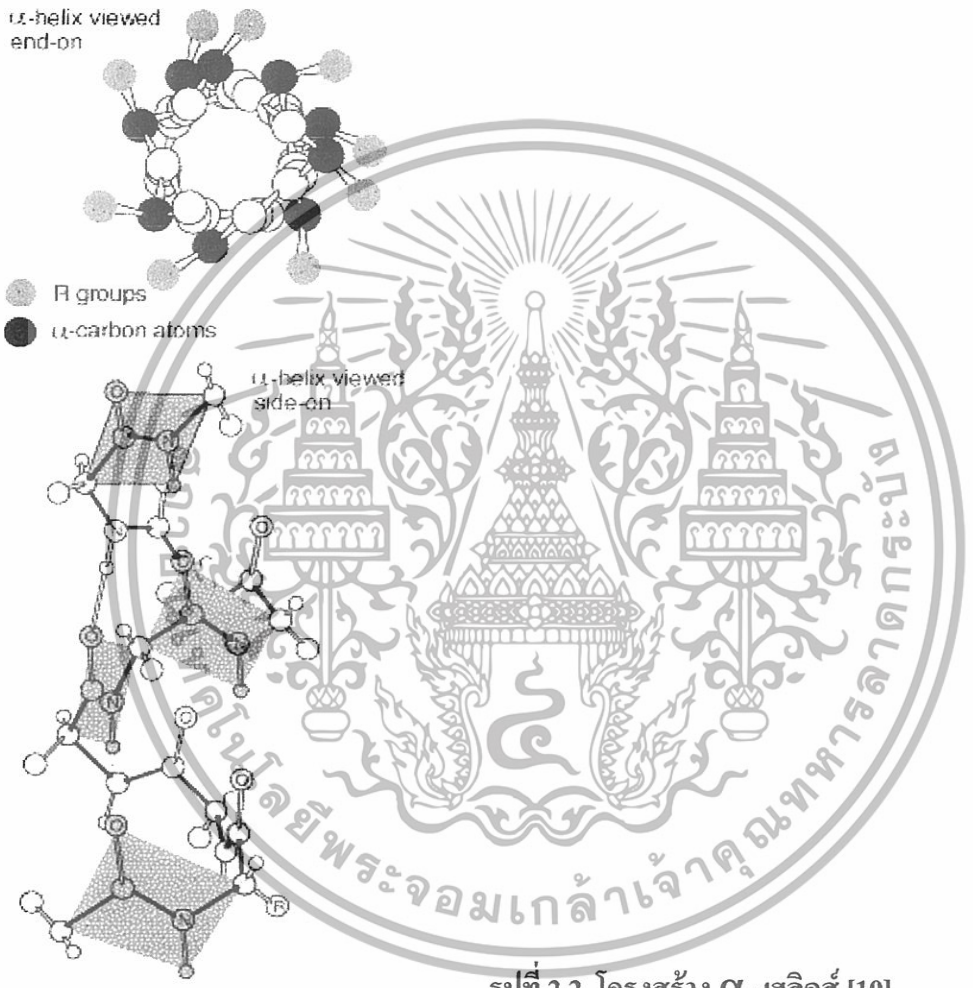
โครงสร้างแบบนี้เป็นโครงสร้างแบบพื้นฐานที่สุด หมายถึง โครงสร้างของโมเลกุลเส้นยาวที่ต่อกันด้วยพันธะเพปไทด์ และรวมถึงพันธะไดซัลไฟด์

2. โครงสร้างทุติยภูมิ (Secondary structure)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยทั่วไปโมเลกุลที่เป็นเส้นยาว จะไม่คงอยู่ในสภาพที่เป็นเส้นยาว แต่จะจับกันด้วยพันธะไฮโดรเจน เกิดเป็นโครงสร้างทุติยภูมิ 2 แบบ คือ แอลฟา - เฮลิกซ์และเบตา - พลีทเทดชีท

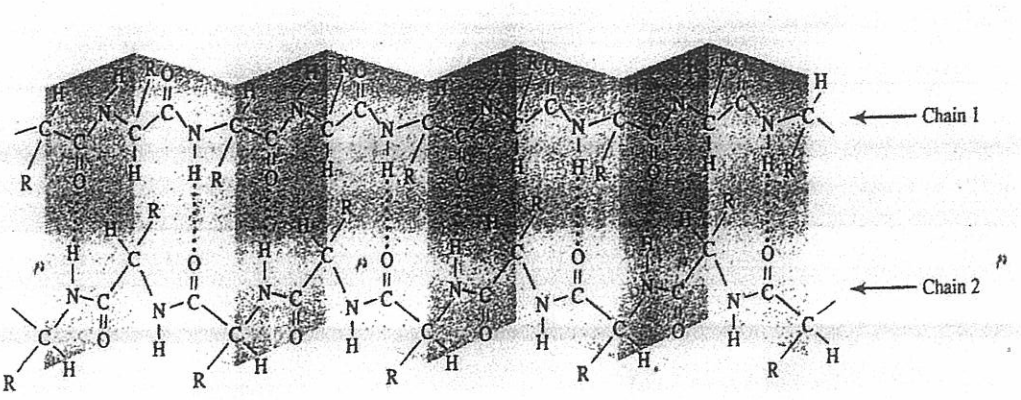
2.1 α -เฮลิคส์ (α - helix) สายโซ่ยาวจะขดตัวโดยมีหมู่อะตอมโซ่ข้างชี้ออกด้านนอก แรงพันธะไฮโดรเจนระหว่าง O ของหมู่คาร์บอนิล และ H ของ – NH – จะยึดโมเลกุลไว้ มีจำนวนกรดอะมิโน 3.6 ตัว ในแต่ละรอบของเฮลิกซ์ ตัวอย่างโปรตีนที่มีโครงสร้างแบบนี้คือ myosin โปรตีนของกล้ามเนื้อ α-keratin ในผม ขนสัตว์ เล็บ (รูปที่ 2.2)



รูปที่ 2.2 โครงสร้าง α -เฮลิคส์ [10]

2.2 β -พลีทเทดชีท (β - pleated sheet) โมเลกุลจะมาเรียงตัวในลักษณะเป็นแผ่นขนานกัน แรงพันธะไฮโดรเจนระหว่างแผ่นโมเลกุลที่ขนานกัน เป็นแรงยึดโมเลกุลไว้ด้วยกัน หมู่ R จะชี้ขึ้นด้านบนและด้านล่างของแผ่นที่ขนานกัน พบโครงสร้างชนิดนี้ในไฟโบรอิน (รูปที่ 2.3)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 โครงสร้าง β -ชีทของพอลิเพปไทด์[3]

2.3 β-เบนด์ โครงรูป (Conformation) แบบ β-เบนด์จะพบบริเวณจุดหักมุมเพื่อกลับทิศทางของสาย∝-เฮลิคส์ หรือ β-ชีท ซึ่งลักษณะทั่วไปจะเป็นลูกสูบ (Loop) โดยจะเกิดจากการที่หมู่คาร์บอนิลเกิดพันธะไฮโดรเจนกับหมู่ถัดไป 3 ยูนิต

3. โครงสร้างตติยภูมิ (Tertiary structure)

หมายถึง โครงสร้างที่มีโซ่พอลิเพปไทด์มาขดม้วนแน่นในลักษณะกลมของโปรตีนก้อนกลมโดยพันธะที่เข้ามาเกี่ยวข้องทำให้โครงสร้างนี้เสถียรอยู่ได้ คือ พันธะไดซัลไฟด์ ซึ่งเป็นพันธะโควาเลนต์ และพันธะอ่อน เช่น พันธะไฮโดรเจน พันธะไฮโดรโฟบิก หรือพันธะนอนโพลาร์ และแรงวาลเดอร์วาลส์ นอกจากนี้ยังมีลักษณะเฉพาะที่สำคัญประการหนึ่งคือ การม้วนพับเข้าหากันจะให้ส่วนมีขั้วที่ชอบน้ำเรียกว่า ไฮโดรฟิลิก (Hydroplilic) อยู่ด้านนอก เพราะในสภาวะแวดล้อมทั้งหมดมักเป็นน้ำ ส่วนที่ไม่มีขั้วเรียกว่า ไฮโดรโฟบิก (Hydrophobic) ซึ่งอยู่ด้านใน ตัวอย่างเช่น ไมโอโกลบิน (Myoglobin) ซึ่งเป็นโปรตีนที่มีฮีม (Heme) เป็นองค์ประกอบ

4. โครงสร้างจตุรภูมิ (Quaternary structure)

หมายถึง โครงสร้างที่ประกอบด้วยโซ่พอลิเพปไทด์มากกว่าหนึ่งโซ่อยู่รวมกันด้วยพันธะไฮโดรเจน ซึ่งแต่ละโซ่พอลิเพปไทด์ หรือหน่วยย่อย หรือโปรโตเมอร์ (Protomer) อาจเหมือนกันหรือต่างกันได้ โดยโปรตีนที่มีโครงสร้างลักษณะนี้เรียกว่า โอลิโกเมอร์โปรตีน ตัวอย่างเช่น ฮีโมโกลบิน ประกอบด้วย โซ่แอลฟา 2 โซ่ และโซ่เบต้า 2โซ่

2.4 สมบัติบางประการและปฏิกิริยาของโปรตีน

2.4.1สมบัติบางประการทางกายภาพ

1.การละลาย-ไม่ละลาย แต่บางชนิดละลายน้ำได้เล็กน้อยในสภาพคอลลอยด์

2.ขนาดโมเลกุล มีมวลโมเลกุลขนาดใหญ่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

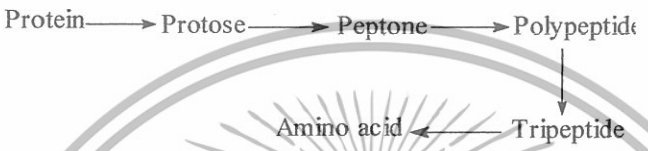
3.สถานะเป็นของแข็ง

4.การเผาไหม้ เผาแล้วจะเกิดกลิ่น

2.4.2 สมบัติทางเคมี

โปรตีนสามารถเกิดปฏิกิริยาเคมีได้หลายปฏิกิริยา

1.ปฏิกิริยาไฮโดรลิซิส (Hydrolysis reaction) โปรตีนสามารถเกิดปฏิกิริยาไฮโดรลิซิลกับน้ำโดยมีสาระลายกรด-เบส หรือเอนไซม์บางชนิดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โปรตีนจะถูกไฮโดรไลส์จากโมเลกุลใหญ่ค่อย ๆ กลายเป็นโมเลกุลที่มีขนาดเล็กลงเรื่อย ๆ และถ้าการเกิดไฮโดรลิซิสเป็นไปอย่างสมบูรณ์ในที่สุดจะได้กรดอะมิโน เขียนสมการเกิดไฮโดรลิซิส ได้ดังนี้



2.ปฏิกิริยาการทดสอบโปรตีน (Biuret reaction) เป็นปฏิกิริยาเฉพาะสำหรับทดสอบโปรตีน และผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการไฮโดรไลส์โปรตีนที่ยังมีพันธะเพปไทด์อยู่เช่น Protose, Peptone, Polypeptide และ Tripeptide โดยนำมาทำปฏิกิริยากับสารละลาย $CuSO_4$ ในเบส NaOH ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาให้สีต่าง ๆ กัน ตั้งแต่สีน้ำเงิน หรือม่วงจนถึงชมพู ซึ่งสีเหล่านี้เป็นสีของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไอออนของทองแดงกับสารที่มีพันธะเพปไทด์ตั้งแต่ 2 พันธะขึ้นไป เรียกปฏิกิริยาการทดสอบโปรตีนดังกล่าวนี้ว่า Biuret reaction ถ้าเป็นโปรตีนจะได้สารประกอบสีน้ำเงินอมม่วง ถ้าเป็นผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการไฮโดรไลส์โปรตีนจะให้สีต่าง ๆ กัน ตั้งแต่สีม่วงจนถึงสีชมพู ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับขนาดของโมเลกุล สำหรับกรดอะมิโนจะไม่เกิดปฏิกิริยาเฉพาะที่จะให้ผลกับสารที่มีพันธะเพปไทด์ตั้งแต่ 2 พันธะขึ้นไป

3.การแปลงสภาพของโปรตีน (Denature of protein) การที่โปรตีนประกอบด้วยกรดอะมิโนจำนวนมากยึดติดกันด้วยพันธะเพปไทด์ ซึ่งภายในโมเลกุลอาจเกิดพันธะไฮโดรเจนซึ่งกันและกัน ทำให้โมเลกุลมีลักษณะเป็นเกลียวเป็นแผ่นมีการขดม้วนตัวด้วยแรงวาลเดอร์วาลล์ พันธะไฮโดรเจนทำให้เกิดโครงสร้างสามมิติแบบต่าง ๆ โครงสร้างเหล่านี้อาจจะเปลี่ยนแปลงได้ เพราะแรงดังกล่าวถูกทำลาย เช่น เกิดการคลายเกลียวของโปรตีนก้อนกลม เป็นสายโปรตีนที่ไร้ระเบียบ และเกิดการสูญเสียสมรรถนะทางชีวภาพ โปรตีนจะเกิดการแข็งตัวและไม่ละลายน้ำ

2.4.3 ปัจจัยที่ทำให้โปรตีนแปลงสภาพ

1.ความร้อน การให้ความร้อนเป็นการทำให้โปรตีนแปลงสภาพไป เกิดการแข็งตัว เช่น การต้มไข่ขาว การทำลายแบคทีเรียในอาหารด้วยความร้อนที่ 50 $^{\circ}C$ ทำให้โปรตีนแปลงสภาพได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.ความเป็นกรดและเบส เมื่อค่าพีเอชของโปรตีนเปลี่ยนไป เนื่องจากได้รับหรือเสียโปรตอน (H^+) ซึ่งทำให้โปรตีนเกิดประจุขึ้น และสามารถจับกับไอออนอื่นได้ ไอออนที่มาจากกรดหรือเบสกระเด็นเข้าตาจะทำให้เกิดการแปลงสภาพของโปรตีนในดวงตา ถ้าได้รับกรดหรือเบสปริมาณมากอาจทำให้ตาบอด

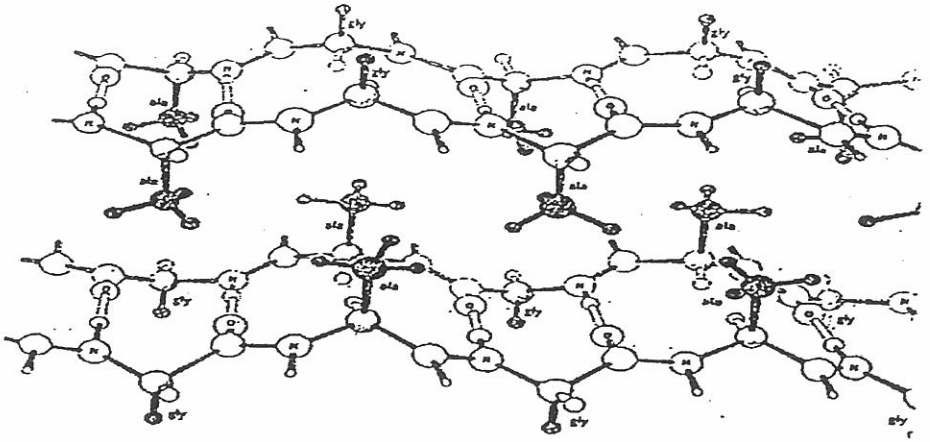
3.ตัวทำละลายอินทรีย์ที่มีพันธะไฮโดรเจน เช่น แอลกอฮอล์ จะเกิดพันธะไฮโดรเจนกับโปรตีน โปรตีนเกิดการแข็งตัว และละลายน้ำได้น้อยลง หลักการนี้นำไปใช้ในชีวิตประจำวัน เช่น การฆ่าเชื้อโรคพวกแบคทีเรียด้วยแอลกอฮอล์ โปรตีนในแบคทีเรียจะเกิดพันธะไฮโดรเจนกับแอลกอฮอล์ ทำให้โปรตีนในแบคทีเรียแปลงสภาพ แบคทีเรียจะตาย โดยมากจะใช้แอลกอฮอล์ที่มีความเข้มข้นประมาณร้อยละ 70

4.ไอออนของโลหะหนัก เช่น Pb^{2+} Hg^{2+} และ Ag^{+} ไอออนเหล่านี้จะไปจับกับกรดอะมิโนตรงด้านที่เป็นกรด เกิดเป็นเกลือคาร์บอนซิเลตได้ ซึ่งทำให้โปรตีนละลายน้ำได้น้อยลง และเกิดการแปลงสภาพไป การแปลงสภาพของโปรตีนเป็นวิธีนำไปใช้ประโยชน์ในทางการแพทย์ ในการล้างท้องผู้ป่วยรับประทานพิษ ซึ่งส่วนใหญ่จะมีไอออนของโลหะหนัก แพทย์จะให้คนไข้รับประทานไข่ขาวดิบ ไอออนของโลหะหนักจะเกิดการรวมตัวกับไข่ขาวดิบ เกิดการแปลงสภาพแล้วทำให้เกิดการอาเจียนออกมาก่อนที่ไอออนของโลหะหนักจะเข้าไปสู่เซลล์ของร่างกายไปทำการแปลงสภาพโปรตีนซึ่งจะเป็นอันตรายต่อร่างกาย ในสภาพความเข้มข้นของเกลือบางชนิด เช่น $(NH_4)_2$ SO_4 ความเข้มข้นสูงจะทำให้โปรตีนเกิดการละลายได้น้อยลง เพราะไอออนของเกลือดึงโมเลกุลของน้ำออกจากโปรตีนที่ละลายไม่ได้จึงเกิดการตกตะกอน มิใช่เกิดการแปลงสภาพ

2.5 ไหมไฟโบรอิน (Silk Fibroin) [1-3,8-10]

โปรตีนเส้นใยมีองค์ประกอบหลักทางเคมี คือ โปรตีนที่เรียกว่าไฟโบรอิน (Fibroin) เป็นโปรตีนที่ไม่ละลายน้ำ (ประมาณ 78% ของน้ำหนักไหมดิบ) ประกอบด้วยกรดอะมิโนประมาณ 15 ชนิด กรดอะมิโนหลักๆ ที่พบในเส้นใยได้แก่ ไกลซีน (Glycine, 40%) อะลานีน (Alanine, 29%) และเซรีน (Serine, 12%) แต่ละชนิดมีโครงสร้างต่างกันที่หมู่ R (โซ่ข้าง) ดังแสดงในตารางที่ 2.2 กรดอะมิโนเหล่านี้ต่อกันเป็นสายยาวที่เรียกว่า โซ่พอลิเพปไทด์เป็นเส้นยาวขนานกับแกนในลักษณะเป็นเส้นใยหรือเป็นแผ่น มีความแข็ง เหนียวและอาจยืดหยุ่นได้ดังแสดงในรูปที่ 2.4 และมีโครงสร้างปฐมภูมิที่ซ้ำกัน คือ $(Gly\text{-}Ala\text{-}Gly\text{-}Ala\text{-}Gly\text{-}Ser)_n$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 โครงสร้างสามมิติของไหม [12]

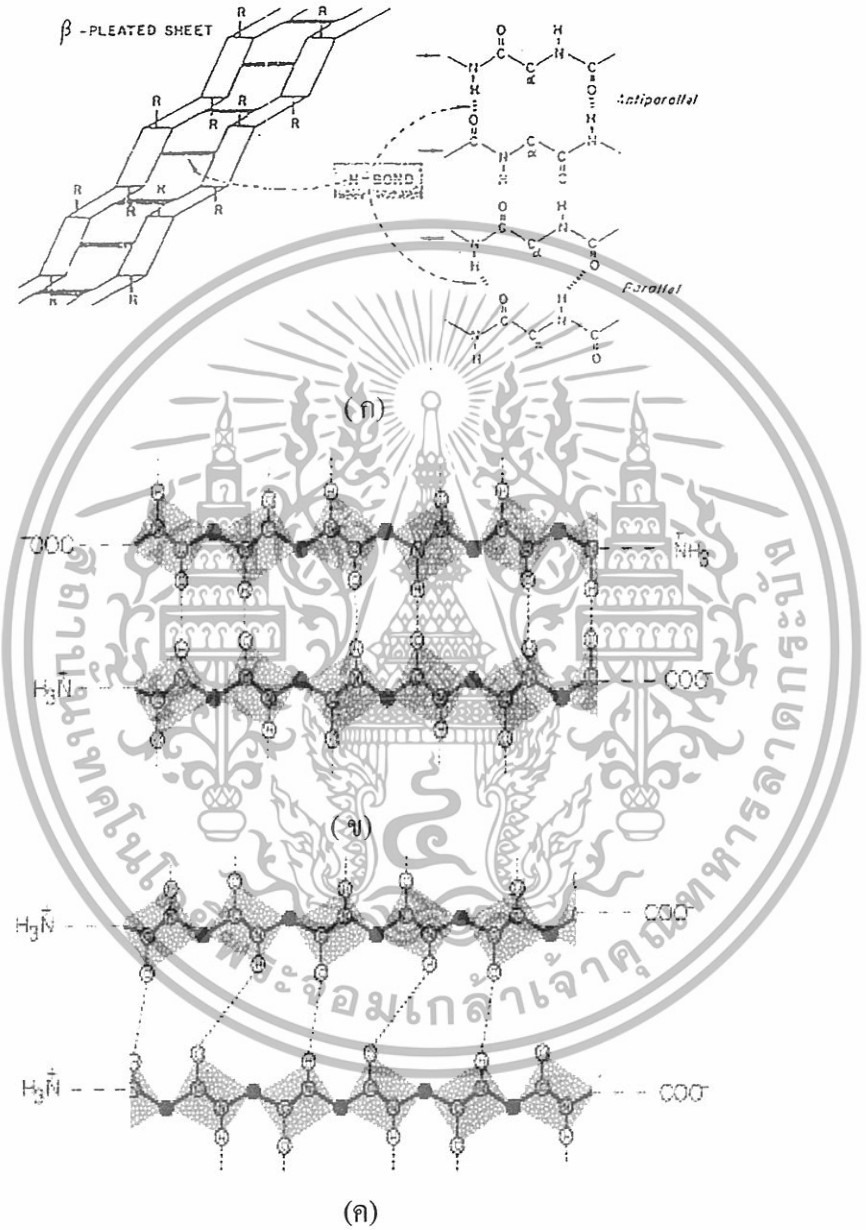
ตารางที่ 2.2 สูตรโครงสร้างของกรดอะมิโนที่พบในไหม [3]

	R (โซ่ข้าง)	ชื่อ	สัญลักษณ์
กรดอะมิโนที่เป็นกลาง	—H	ไกลซีน (Glycine)	Gly, G
	$-CH_3$	อะลานีน (Alanine)	Ala, A
กรดอะมิโนที่โซ่ข้างมีหมู่ OH	$-CH_2OH$	เซรีน (Serine)	Ser, S
	$-CH_2-C_6H_4-OH$	ไทโรซีน (Tyrosine)	Tyr, Y
กรดอะมิโนที่เป็นกรด	$-CH_2CH_2COOH$	กรดกลูตามิก (Glutamic acid)	Glu, Q
กรดอะมิโนที่เป็นเบส	$-(CH_2)_4NH_2$	ไลซีน (Lysine)	Lys, K

โปรตีนทั้งหลายในธรรมชาติประกอบด้วยสายพอลิเพปไทด์ที่มีโครงสร้างทุติยภูมิ โดยปกติในไฟโบรอินของไหมมักพบโครงสร้างชนิดแผ่นจีบนี้ ซึ่ง β-พลีทเทดชีทมีด้วยกัน 2 โครงสร้าง (รูปที่ 2.5 (ก)) คือ β-พลีทเทดชีทที่สายเพปไทด์ทั้งสองมีทิศทางจากปลายฝั่ง N ไปยัง C ที่อยู่ตรงข้าม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กัน เรียกว่า แอนติพาราเลล β-พลีทเทดชีท (Antiparallel pleated sheet structure) (รูปที่ 2.5 (ข)) และ β-พลีทเทดชีทที่สายเพปไทด์ทั้งสองมีทิศทางจากปลายฝั่ง N ไปยัง C เหมือนกัน เรียกว่า พาราเลล β-ชีท (Parallel pleated sheet structure) (รูปที่ 2.5 (ค)) ไฟโบรอินของไหมส่วนใหญ่เป็นโครงสร้างแผ่นจีบแบบแอนติพาราเลล



รูปที่ 2.5 (ก) ลักษณะโครงสร้างแบบเบต้า (β - plated sheet) (ข) ลักษณะโครงสร้างแผ่นจีบแบบแอนติพาราเลล (Antiparallel pleated sheet structure) และ (ค) พาราเลล (Parallel pleated sheet structure) [10,14]

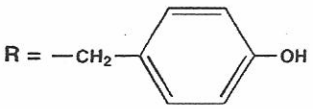
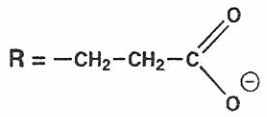
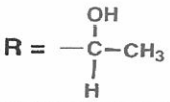
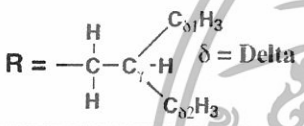
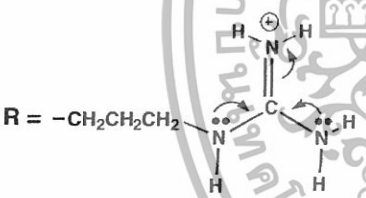
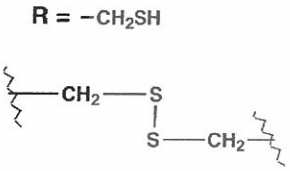
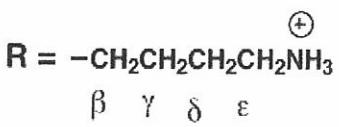
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณน้ำหนักโมเลกุลของไฟโบรอินทำได้ยาก ทั้งนี้เนื่องจากไฟโบรอินไม่ละลายในสารละลายทั่วไปแต่ละลายในสารละลายบางชนิดเท่านั้น เช่น Cupric–ethylenediamine หรือในสารละลายเข้มข้น Lithium iodide หรือ Thiocyanate จากการใช้สารละลายเหล่านี้ร่วมกับการใช้หลักการของการตกตะกอนใน Ultracentrifuge สามารถคำนวณน้ำหนักได้ประมาณ 84,000 กรัม/โมล แต่ถ้าคำนวณจากการอาศัยการวัดสมบัติทางความหนืดจะได้น้ำหนักโมเลกุลประมาณ 50,000 กรัม/โมลหรือมีผู้ใช้การคำนวณโดยอาศัยการวิเคราะห์จาก Terminal amino acid พบว่าน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วงระหว่าง 80,000 – 100,000 กรัม/โมล

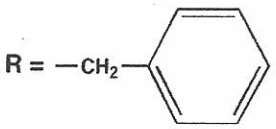
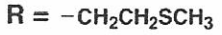
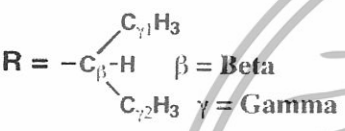
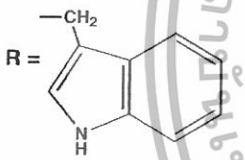
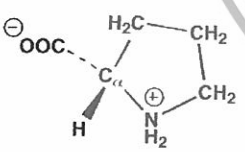
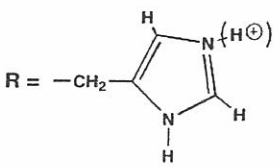
ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติและหน้าที่สำคัญของกรดอะมิโนในผงไหมที่มีต่อร่างกาย [8]

ชนิดกรดอะมิโนในผงไหม	หน้าที่และคุณสมบัติ
Glycine[#] **R = H**	- ควบคุมระดับคลอเรสเตอรอล - ป้องกันและรักษาความดันโลหิตสูง - ช่วยเสริมสร้างการทำงานของตับ
Alanine[#] **R = $-CH_3$**	- เป็นแหล่งพลังงานสำคัญต่อเนื้อเยื่อกล้ามเนื้อ สมอง และระบบประสาทส่วนกลาง - ผลิต antibodies ที่ช่วยให้ระบบภูมิคุ้มกันดีขึ้น - ช่วยในระบบการทำงานของน้ำตาลและกรดอินทรีย์ digest alcohol (สลายแอลกอฮอล์)
Serine[#] **R = $-CH_2OH$**	- เป็นแหล่งในการสะสมน้ำตาลกลูโคสในตับ และกล้ามเนื้อ จึงช่วยส่งเสริมระบบการทำงานของอินซูลิน (Insulin) เป็นการลดน้ำตาลในเลือดซึ่งช่วยในการเผาผลาญไขมันที่สะสมในร่างกาย - ช่วยให้ระบบภูมิคุ้มกันแข็งแรงขึ้น - ช่วยสังเคราะห์กรดไขมันล้อมรอบ Never fibers
Aspatic acid* R = $-CH_2-C(=O)-O^{\ominus}$	- ช่วยขับไล่อาการเจ็บ และสารพิษแอมโมเนียออกจากร่างกาย - ช่วยเพิ่มความต้านทานต่อการเหนื่อยอ่อน - ช่วยระบบกล้ามเนื้อ และการเคลื่อนไหว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
107794

Tyrosine 	- ช่วยในการส่งผ่านเส้นประสาทไปยังสมองอีกทั้งมีผลดีต่อระบบประสาท - ช่วยความจำ - กระตุ้นการเต้นของหัวใจ
Glutamic acid 	- ช่วยลดแอมโมเนียในเลือดซึ่งมีส่วนสันพันธ์กับโปรตีนในสมอง และระบบการทำงานของน้ำตาล - ช่วยควบคุมโรคสุรา (Alccoholism) - รักษาปริมาณน้ำของผิวหนัง และป้องกันผิวแห้ง
Threonine* 	- ป้องกันการเกิดไขมันในตับ - ช่วยย่อยและช่วยระบบการทำงานของร่างกาย
Isoleusine*	- กระตุ้นการทำงานของสมองส่วนบน
Leusine* 	- ลดน้ำตาลในเลือด - ช่วยให้แผลหายเร็วขึ้น
Arginine 	- เสริมสร้างภูมิคุ้มกันต่อเชื้อแบคทีเรีย ไวรัส และเซลล์เนื้องอก - ช่วยให้แผลหายเร็วขึ้น - ช่วยเสริมสร้างตับ
Cystine 	- ทำหน้าที่เป็นสารต้านอนุมูลอิสระ (Anitoxdant) และเพิ่มความแข็งแกร่งให้ร่างการต่อต้านรังสี และมลพิษ - ช่วยในการสังเคราะห์โปรตีน - มีความจำเป็นต่อการสร้างผิวหนัง ซึ่งจะช่วยให้แผลไฟไหม้ และแผลผ่าตัดหายเร็วขึ้น - ส่วนของผมและผิวหนังจะประกอบด้วย Cyatine 10-14%
Lysine* 	- ต่อต้านเริม งูสวัด โดยจะช่วยให้เกิดความสมดุลของธาตุอาหาร และการไปลดการเจริญของไวรัส - การขาด Lysind มีผลทำให้เหนื่อยง่าย ยับยั้งการเติบโต ผมร่วง โรคโลหิตจาง และเกิดปัญหาต่อระบบสืบพันธุ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Phenylanine* 	- มีผลต่อระบบเส้นประสาท
Methionine* 	- เป็นแหล่งที่ให้สารกำมะถันซึ่งป้องกันการเกิดโรคเกี่ยวกับผม ผิวหนังและเล็บ - ช่วยลดระดับคลอเรสเตอรอล โดยการผลิตเลซิตินในตับ - ลดไขมันตับ และป้องกันไต - ป้องกันผมร่วงและส่งเสริมการเจริญของเส้นผม
Valine* 	- ช่วยให้จิตใจกระปี้กระเปร่า ประสานการทำงานของกล้ามเนื้อ
Trptophan* 	- สนับสนุนการผลิตเม็ดเลือดแดง - ป้องกันและช่วยลดอันตรายที่จะเกิดกับเส้นโลหิตแดง และการชักกระตุกของหัวใจ - ทำงานร่วมกับ Lysine ในการลดคลอเรสเตอรอล
Proline 	- รักษาความดันโลหิต - มีความสำคัญอย่างมากต่อการทำงานของข้อ และเอ็น - ช่วยบำรุงรักษากล้ามเนื้อหัวใจ
Histidin 	- พบมากในเม็ดเลือดแดง ใช้ในการรักษารูมาตอยโรคข้ออักเสบ อาการผื่นคัน โรคผื่นคัน แผลพุพอง และโรคโลหิตจาง - ถ้าขาด จะมีผลต่อการได้ยินเสียงลดลง - ส่งเสริมการผลิตเซลล์เม็ดเลือด ช่วยขยายหลอดเลือด

หมายเหตุ *กรดอะมิโนที่มีความจำเป็น (Essential amino acid)

#กรดอะมิโนในไหมที่พบมาก และมีความสำคัญต่อร่างกายมากที่สุด (3 ชนิด)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับกรดอะมิโนที่อยู่ในไหมไทยนางน้อยแสดงในตารางที่ 2.4 ดังนี้

ตารางที่ 2.4 กรดอะมิโนในไฟโบรอินและเซริซินของไหมไทยนางน้อย [15]

กรดอะมิโน	ไฟโบรอิน g/kg	เซริซิน g/kg
Cysteic acid	1.03	7.76
Asp	7.32	102.76
Met	0.37	1.28
Thr	3.47	47.84
Ser	29.89	141.48
Glu	5.16	36.09
Gly	65.95	51.65
Ala	56.42	22.42
Val	6.26	18.66
Ile	1.68	5.01
Leu	1.58	8.81
Tyr	19.40	19.45
Phe	2.71	3.93
Lys	1.58	21.29
His	0.86	10.76
Arg	2..29	26.23
Pro	0.00	4.75

2.5.1 สมบัติของเส้นใยไหมไฟโบรอิน (Properties of Silks Fibroin) [1-3,9]

สมบัติของเส้นใยจะส่งผลโดยตรงต่อสมบัติการใช้งานเฉพาะด้านของผลิตภัณฑ์ดังนั้นต้องเข้าใจและเลือกใช้เส้นใยให้เหมาะสมกับงาน โดยทั่วไปสมบัติของเส้นใยจะถูกกำหนดจากปัจจัยต่างๆ ซึ่งสามารถแบ่งการศึกษาเส้นใยออกได้เป็นสองส่วนคือสมบัติกายภาพและสมบัติทางเคมี

2.5.1.1 สมบัติทางกายภาพของไหมไฟโบรอิน

1. ลักษณะที่มองเห็นจากกล้องจุลทรรศน์และรูปร่าง

ไหมเป็นเส้นใยยาวต่อเนื่องตลอดเส้นมีความยาวประมาณ 900–1700 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 9 – 11 ไมครอน สีของเส้นใยไหมดิบจะมีสีเหลืองถึงสีครีมเส้นใยไหมที่นำใช้ทอผ้านั้นเกิดจากการพ่นของเหลวที่มีความหนืดจากต่อมขนาดใหญ่สองต่อมภายในตัวหนอนไหมที่โตเต็มวัย โดยส่วนที่เป็นของเหลวหนืด คือ ไฟโบรอินจะถูกเคลือบด้วยโปรตีนอีก

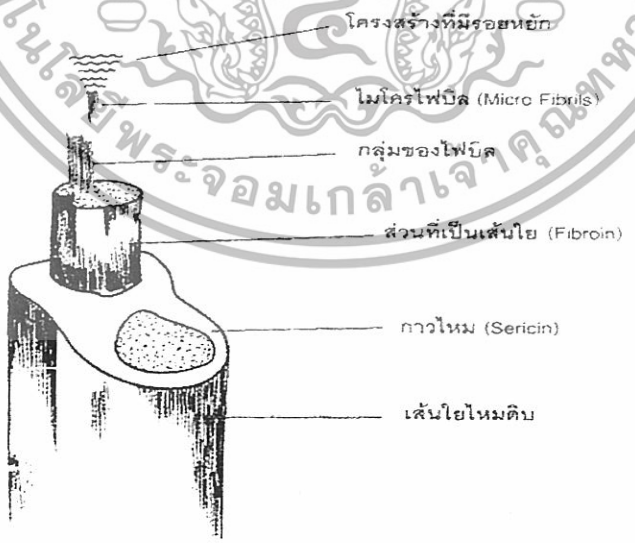
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชนิดหนึ่งที่เรียกว่าเซริซินซึ่งเป็นกาวไหมที่ทำให้เส้นใย 2 เส้นติดกันเมื่อโปรตีนทั้งสองชนิดสัมผัสกับอากาศจะเกิดการแข็งตัวทำให้เส้นใยยึดติดกันกลายเป็นเส้นใยยาวต่อเนื่อง และเมื่อดูด้วยกล้องจุลทรรศน์จะเห็นรอยแตกตามความยาวของเส้นใยด้านตัดขวางจะมีลักษณะรีส่วนนอกของเส้นใยเป็นกาวไหมที่หุ้มโปรตีนไฟโบรอินคล้ายรูปสามเหลี่ยมเรียงคู่กันดังแสดงให้เห็นในภาพตัดขวางและภาพตัดตามยาวของเส้นใยทั้งสองชนิด (รูปที่ 2.6 (ก) และรูปที่ 2.6 (ข)) และสำหรับเส้นใยไหมป่าจะมีขนาดไม่สม่ำเสมอตลอดความยาวทำให้ดูคล้ายลินินและเส้นใยจะมีความหยาบกระด้าง ไม่เรียบ ค่อนข้างจะไม่มันเงาเมื่อเทียบกับเส้นใยไหมบอมบิกซ์โมริ

(ก) (ข)

รูปที่ 2.6 (ก) แสดงภาคตัดขวงของเส้นไหมจากรังไหม Bombyx mori F; ใยไฟโบรอิน (Fibroin), S; กาวเซริซิน (Sericin) (ข) ใยไฟโบรอิน[16]

ซึ่งหลังจากการลอกกาวไหมแล้วเส้นใยยาวที่เป็นลักษณะสามเหลี่ยมปลายมนทั้งสองเส้นจะแยกตัวออกมาทำให้เส้นใยมีรูปร่างต่างจากเส้นใยไหมดิบ คือมีความละเอียดกว่าและเส้นใยมีความมันเงาสูงกว่า โดยรายละเอียดของโครงสร้างของเส้นใยดังแสดงในรูปที่ 2.7

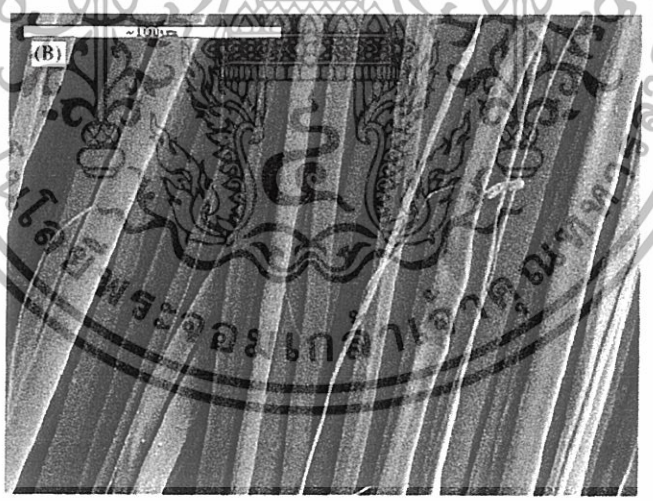


รูปที่ 2.7 โครงสร้างของเส้นใยไหม [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการศึกษาโครงสร้างพื้นผิวของเส้นใยไหมด้วยกล้องจุลทรรศน์พบว่าชั้นนอกสุดของเส้นใยมีปริมาณกาวไหมมากที่สุด ทำให้พื้นผิวของเส้นใยมีลักษณะเป็นคลื่นปกคลุมตามความยาวของเส้นใยดังแสดงในรูปที่ 2.8 และสำหรับไหมที่ลอกกาวแล้วจะมีพื้นผิวค่อนข้างเรียบสม่ำเสมอมากกว่าเส้นใยไหมดิบ รูปที่ 2.9 ที่ผ่านการลอกกาวไฟบริลเหล่านี้เกิดการพันเกลียวกันเรียงตัวกันมีลักษณะคล้ายโครงร่างตาข่ายทำให้เห็นเป็นเหมือนท่อไปตามแนวยาวของเส้นใยแสดงให้เห็นถึงระบบธรรมชาติที่มีความละเอียดสูงซึ่งไม่พบในเส้นใยชนิดอื่นทำให้เส้นใยมีความเงางามและสีสรรสวยงาม

รูปที่ 2.8 SEMของเส้นไหมไหมเลี้ยง (*Bombyx mori*) ไหมดิบที่ไม่มีการลอกกาวไหม (เซริซิน) ออก[17]



รูปที่ 2.9 SEM แสดงเส้นไหมที่มีการลอกกาวไหม (เซริซิน)ออก โดยสกัดเป็นเวลา 60 นาที [17]

2. ความแข็งแรง ไหมมีความแข็งแรงสูงที่สุดในบรรดาเส้นใยธรรมชาติทั้งหมดด้วยที่ผิวของไหมเรียบมันจึงช่วยลดปัญหาที่เกิดจากการขัดถู สามารถออกแบบผ้าไหมให้มีโครงสร้างเบา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บางและคงทนเนื่องจากความละเอียดของเส้นใย ไหมมีค่าความทนแรงดึง ณ จุดขาดอยู่ที่ 3.5 – 5.0 gram/denier ในขณะแห้งและจะลดลงเล็กน้อยเมื่อเปียก (ประมาณ 15 – 25%)

3. ความยืดหยุ่น ไหมเป็นเส้นใยที่มีความยืดหยุ่นดีเปลี่ยนแปลงได้บ้างตามชนิดของพันธุ์ และยืดได้ถึง 20% ของความยาวเดิม ไหมมีความยืดหยุ่นไม่ดีเมื่อเปรียบเทียบกับขนสัตว์เนื่องจากโครงสร้างโมเลกุลของไหมไม่มีพันธะมาจับเชื่อมด้านข้างเป็นโครงข่าย ดังนั้นเมื่อถูกยืดจึงไม่สามารถหดกลับคืนสภาพเดิมได้

4. การคืนตัวจากแรงอัด ไหมทนต่อการยืดหดได้ดี เมื่อทำการซักผ้าจะหดแต่เมื่อดึงและรีดก็จะกลับรูปเดิม ไม่เกิดการยับย่นได้ง่าย

5. การดูดซับความชื้น ไหมสามารถดูดซับความชื้นได้ดีในภาวะมาตรฐานสามารถดูดซับความชื้นได้ถึง 11% ทำให้รับสีย้อมและสีพิมพ์ได้ดีและเมื่อนำมาใช้สวมใส่จะรู้สึกสบายไม่ระคายเคืองผิว เนื่องจากผ้าไหมเป็นตัวนำความร้อนไม่ดีจึงรักษาความอบอุ่นได้นานเหมาะในการนำไปทำเป็นผ้าพันคอ ชุดสูท เป็นต้น

6. ความร้อน ไหมสามารถทนความร้อนได้ประมาณ 340° F (170° C) ในช่วงสั้นๆ หลังจากนั้นจะเกิดการสลายตัวแต่ดีกว่าขนสัตว์ เมื่อโดนรังสีอัลตราไวโอเลตนานๆ จะมีค่าความแข็งแรงและการยืดตัวลดลง

7. ความถ่วงจำเพาะ ไหมมีค่าความถ่วงจำเพาะระหว่าง1.32 – 1.33 แต่มีการทิ้งตัวดีแต่เมื่อเพิ่มน้ำหนักไหมจะมีค่าประมาณ 1.60

2.5.1.2 สมบัติทางเคมีของไหมไฟโบรอิน

เนื่องจากการใช้งานของผ้าไหมมีโอกาสที่จะสัมผัสกับสารเคมี อุณหภูมิ แสงแดดและสภาวะแวดล้อมต่างๆ เป็นต้น ซึ่งเป็นสาเหตุของการเสื่อมสภาพหรือสมบัติของไหมเปลี่ยนแปลงไปดังนั้นจึงมีการศึกษาสมบัติทางเคมีเพื่อการนำไปใช้งานได้อย่างเหมาะสม ดังนี้

1. กรดและด่าง สามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของพอลิเพปไทด์ในเส้นใย ค่าความเป็นกรดเป็นด่างระหว่าง 4-8 จะทำให้เส้นใยเสียหายน้อยมาก

กรดจะทำให้พันธะเพปไทด์ขาดออกจากกัน กรดซัลฟุริกและกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นจะละลายเส้นใยได้ กรดไนตริกทำให้เส้นใยเหลือง ในขณะที่กรดเจือจางจะไม่ทำลายเส้นใย

ด่างจะตัดปลายของพันธะเพปไทด์ออกก่อน โดยด่างโซดาไฟเข้มข้นจะละลายเส้นใยทันที ส่วนด่างอ่อน เช่น สบู่ บอเร็กซ์ หรือแอมโมเนีย จะละลายแค่กาวไหมแต่ถ้าต้มที่เดือดนานๆ อาจละลายเส้นใยได้

2. สารออกซิไดส์และสารรีดิวซ์ เส้นใยไม่ทนทานต่อสารออกซิไดส์ดังนั้นเวลาฟอกเส้นใยจะต้องระวังการใช้ไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ที่ใช้สำหรับฟอกไหม การฟอกนี้ ไม่ทำลายพันธะของเพปไทด์ (Peptide) แต่ในบางครั้งก็ตัดส่วนของโซ่โมเลกุลของพอลิเพปไทด์ ทำให้เส้นไหมมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเหนียวและความยืดต่ำลงเล็กน้อย แต่เส้นใยจะทนทานต่อสารรีดิวซ์ ได้ดี เช่น โซเดียมไฮโดรซัลไฟท์

3. ไหมถูกทำลายด้วยสารที่มีส่วนผสมของเกลือคลอไรด์ผสมอยู่ ได้แก่ เหงื่อ น้ำยาดับกลิ่นและน้ำเกลือทั่วไป โดยเฉพาะอย่างยิ่งเหงื่อจะทำให้ผ้าไหมติดคราบ ดังนั้นการใช้ผลิตภัณฑ์ไหมที่ต้องสัมผัสผิวภายหลังการใช้งานทุกครั้งจะต้องทำความสะอาด

4. สารละลายอินทรีย์ ส่วนใหญ่ผลิตภัณฑ์ไหมมักใช้การซักแห้งอยู่เสมอเนื่องมาจากโครงสร้างของเส้นด้ายไหมหรือสีที่ใช้ย้อมทำให้ไหมสามารถทนสารละลายอินทรีย์ทุกชนิด

5. สารซักฟอก ไหมทนต่อสารซักฟอกคล้ายขนสัตว์แต่ถูกทำลายได้ด้วยสารซักฟอกประเภท ออกซิไดส์ เช่น พวกที่มีโซเดียมไฮโปคลอไรท์ผสมอยู่เพราะทำให้ความแข็งแรงของเส้นใยลดลงควรใช้สารซักฟอกประเภทไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์หรือโซเดียมเปอร์บอเรตจะไม่เกิดผลเสียต่อไหม

6. แสงแดดและความร้อน แสงแดดและความร้อนสูงเป็นเวลานานๆ จะทำให้ความแข็งแรงของเส้นใยลดลงและเปลี่ยนเป็นสีเหลืองเนื่องจากทำให้โปรตีนเกิดการสลายตัวได้เร็วขึ้น

7. การย้อมสี ไหมมีความสามารถในการรับสีย้อมได้ดีมากสามารถย้อมได้ด้วยสีที่เป็นแอซิด สีเบสิก หรือ สีวัต สีมอร์แดนท์ เมื่อเปรียบเทียบกับขนสัตว์จะได้สีที่เข้มกว่าและย้อมได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่าด้วย

2.5.1.3 สมบัติทางชีวภาพ

1. รา และแมลง ไหมไม่เกิดราได้ง่ายยกเว้นถูกทิ้งไว้ในสภาวะที่ค่อนข้างชื้นเป็นเวลานาน แมลงไม่กัดกินหากไม่มีสิ่งสกปรกติดอยู่ที่ผ้า

2.5.1.4 สมบัติในการติดไฟ ไหมเมื่อติดไฟจะลุกไหม้ช้าๆ เมื่อนำออกจากแหล่งให้ความร้อนเปลวไฟจะดับเอง

2.5.1.5 สมบัติในการเป็นตัวนำไฟฟ้าและความร้อน เป็นตัวนำไฟฟ้าและความร้อนที่ไม่ดี

มีการใช้งานของไหมกันอย่างกว้างขวางด้วยไหมมีสมบัติเด่นหลายประการ นอกจากการใช้งานผ้าไหมเป็นไหม 100 % แล้วยังมีการนำไหมไปผสมกับเส้นใยชนิดอื่นได้ด้วย เช่น ไหมผสมฝ้าย ไหมผสมลินินหรือไหมผสมขนสัตว์ เป็นต้น

2.5.2 การปรับปรุงเส้นใยไหมด้วยวิธีการทางเคมี (Chemical Treatment of Silks) [13,14,18,19]

ไหมดิบที่ได้จากรังไหมในแต่ละรังมีความแข็งกระด้างและให้สัมผัสที่ไม่ดีเนื่องจากเส้นใยไหมดิบมีองค์ประกอบของกาวไหมและสารอื่น ๆ เคลือบอยู่ดังนั้นก่อนนำไหมไปใช้งานจึงจำเป็นต้องมีการปรับปรุงสมบัติของเส้นใยก่อนนำไปทำเป็นผลิตภัณฑ์นั้นจะต้องผ่านกระบวนการลอกกาวไหมและการตกแต่งสำเร็จ เช่น การตกแต่งเพื่อเพิ่มสมบัติทางความร้อน การตกแต่งเพื่อเพิ่มคุณสมบัติการใช้งาน เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.2.1 การลอกกาว (Degumming)

การลอกกาว หมายถึง การลอกเซริซินออก 100% แต่บางครั้งมีการลอกกาวเพียง 30%, 50%, 70% ทั้งนี้ ขึ้นกับชนิดของผลิตภัณฑ์ เส้นใยไหมเมื่อสาวออกจากรังเป็นเส้นใยกระด้างแข็ง เพราะมีกาวหุ้ม ฟอกออกได้ด้วยสบู่จะได้ใยที่นุ่มเป็นมันทำให้น้ำหนักไหมลดไปประมาณ 25 % เส้นไหมมีสีขาวขุ่นและเพื่อเพิ่มความสามารถในการย้อมสีเส้นใยจะต้องมีการฟอกขาวเพื่อกำจัดสีธรรมชาติออกไปด้วย

การลอกกาวออกจากเส้นใยไหมดิบเป็นการลอกกาวเพื่อกำจัดสิ่งสกปรกออกจากเส้นใย เพื่อให้เส้นใยมีความมันเงามากขึ้นมีวิธีใช้อยู่ทั่วไปดังนี้

1. การลอกกาวด้วยโซดา (Degumming)

สารละลายโซดาที่ใช้ในการลอกกาวเส้นใยที่นิยมใช้ คือ โซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3)และโซเดียมไบคาร์บอเนต ($NaHCO_3$) ที่อุณหภูมิ 90° C เป็นเวลา 2-9 ชั่วโมงจากนั้นล้างด้วยน้ำอุ่น 40-50 °C และน้ำที่อุณหภูมิห้องหลาย ๆ ครั้งวิธีนี้สามารถลอกกาวได้สม่ำเสมอแต่ข้อเสียของวิธีนี้คือสารเคมีที่ใช้มีความเป็นด่างสูงทำให้เส้นใยมีสมบัติเชิงกลลดลง

2. การลอกกาวด้วยสบู่

การลอกกาวไหมด้วยสบู่เริ่มจากแช่เส้นใยไหมดิบที่อุณหภูมิ 40° C 30 นาทีแล้วเติมสบู่ 15-20% โดยน้ำหนักของเส้น (30-50 เท่าของน้ำหนักไหมดิบ) และต้มต่อเป็นเวลา 1-2 ชั่วโมงทำให้ได้เส้นไหมที่เงางามและเรียบสวย ข้อเสียของวิธีการนี้ คือ ถ้าใช้น้ำกระด้างจะทำให้เกิดไดลสบู่ที่เกิดจากแคตไอออนในน้ำเช่น แคลเซียม แมกนีเซียมและเหล็กทำให้เส้นใยที่ได้มีการลอกกาวที่ไม่สม่ำเสมอและมีสีหมองคล้ำ

3. การลอกกาวด้วยเอมไซม์

เอมไซม์ที่ใช้ในการลอกกาวได้ คือ เอมไซม์โปรตีเอส (Protease enzyme) ชนิดด่างที่มีค่า pH 9.0 – 10.5 ที่อุณหภูมิ 40 – 65° C เป็นเวลา 1- 2 ชั่งโมงแล้วล้างน้ำอุ่น 40 – 50° C และน้ำที่อุณหภูมิห้องหลายครั้ง ๆ เอมไซม์สามารถลอกกาวได้อย่างสม่ำเสมอ แต่ข้อเสีย คือเอมไซม์ที่ใช้มีราคาแพงและมีกลิ่นรุนแรง

4. การลอกกาวด้วยกรด

การนำเส้นใยไปต้มในสารละลายที่เป็นกรดแต่วิธีนี้ไม่เป็นที่นิยมใช้เนื่องจากปัญหาในการควบคุมคุณภาพของไหมที่ลอกกาว

5. การลอกกาวด้วยไทรเอทิลอะมีน

เส้นใยที่ผ่านการลอกกาวด้วยวิธีนี้จะมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับเส้นใยที่ผ่านการลอกกาวด้วยสบู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. การลอกกาวด้วยสบู่ – โซดา

การลอกกาวด้วยสบู่ผสมโซดาจะใช้สบู่ 8 – 15 % o.w.f และโซเดียมคาร์บอเนต 5 – 8 % o.w.f ใช้อัตราส่วนของวัสดุต่อของเหลวเป็น 1:5 ที่อุณหภูมิ 90° C ใช้เวลา 2 – 3 ชั่งโมงหลังจากนั้นนำเส้นใยมาล้างด้วยสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตหรือโซเดียมไบคาร์บอเนตที่เป็นด่างอ่อนกว่าที่อุณหภูมิ 40 – 50 ° C ตามด้วนน้ำที่อุณหภูมิห้องหลาย ๆ ครั้งวิธีนี้จัดว่าเป็นวิธีทีมีประสิทธิภาพมากวิธีหนึ่งทำให้ได้เส้นใยที่ขาวและมีความสม่ำเสมอในการลอกกาวมากขึ้นและช่วยลดข้อเสียในการลอกกาวด้วยสบู่จากการใช้สารลดแรงตึงผิวและสารลดความกระด้าง

2.5.3 การนำไปใช้ประโยชน์ด้านอื่น ๆ [20]

รังไหมและเส้นไหมสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้มากมายหลายอย่าง เช่นเดียวกับหนอนไหมและดักแด้ได้แก่

1. สิ่งทอ ไหมเป็นสิ่งทอที่ล้ำค่ามากกว่าสิ่งทออื่น ๆ จนได้รับสมญานามว่า " ราชินีแห่งเส้นใย " แม้ไหมจะมีข้อเสียคือ ยืดหยุ่นได้น้อย ยับง่ายซักยาก แต่ข้อเสียเหล่านี้ก็ได้กำจัดหรือทำให้ลดน้อยลงไปโดยการใช้สารเคมีหลายชนิดในกระบวนการผลิตเพื่อทำให้ผ้าไหมซักง่ายขึ้น ลดการยับและลดการทำให้ผ้าเหลืองลงได้ ยังมีการพัฒนาเส้นไหมดิบให้มีความยืดหยุ่นมากขึ้นโดยการตีเกลียวเส้นไหม ในทิศทางกลับกันและถี่ขึ้น ใช้เส้นใยที่มีขนาดใหญ่เส้นใยชนิดนี้จะมีคุณสมบัติทางเคมีและฟิสิกส์ดี กำจัดข้อเสียต่าง ๆ ออกได้ด้วยความเป็นเส้นใยที่ได้จากสัตว์ ไหมจึงได้เปรียบเหนือกว่าฝ้าย ไหมมีคุณสมบัติที่ดีเยี่ยมในการระบายอากาศ ดูดซับความร้อน ทำให้ร่างกายสบายมีการดูดซับน้ำและระบายความชื้นได้ดีสามารถดูดซับน้ำได้มากกว่าฝ้าย 1.5 เท่า แต่ระบายความชื้นได้เร็วกว่า 50% และดูดซับความร้อนไว้ที่เนื้อผ้าได้ สูงกว่า 13-21% ปกติอุณหภูมิของร่างกายบริเวณเต้านม และต้นขาประมาณ 33.3-34.2 องศาเซลเซียส การสวมใส่ชุดผ้าไหมจะทำให้อุณหภูมิของร่างกายบริเวณดังกล่าวลดลงเหลือ 31-33 องศาเซลเซียส ดังนั้นจึงทำให้ผู้สวมใส่รู้สึกอบอุ่นในฤดูหนาวแต่จะเย็นสบายในฤดูร้อนไม่เหนียวเหนอะหนะเวลาสวมใส่ผ้าไหม ด้วยเหตุผลดังกล่าวประเทศญี่ปุ่นที่มีอากาศร้อนและอากาศหนาวในช่วง 1 ปี จึงพัฒนาชุดชั้นในที่ทำด้วยเส้นใยไหมดึงดูดความสนใจได้มากกว่าเส้นใยสังเคราะห์อื่น ๆ นอกจากจะใช้ผ้าไหมเป็นเครื่องนุ่งห่มแล้ว ยังเป็นผ้าม่าน ผ้าหุ้มชุดเฟอร์นิเจอร์ ฯลฯ ในอดีตถุงน่องสตรี ทำจากไหมเพียงอย่างเดียว ภายหลังใยสังเคราะห์ไนล่อนเข้ามาทดแทนไหมได้เกือบสมบูรณ์ เนื่องจากมีความเหนียวและทนทานยืดหยุ่นดีและราคาถูก แต่ไหมยังดีกว่าไนล่อนอยู่มากในด้านการสัมผัสการดูดซับความร้อนและระบายอากาศ จึงได้มีการพัฒนาเส้นไหมผสม (Hybrid silk) เพื่อรวมคุณสมบัติที่ดีของเส้นใยทั้ง 2 ชนิดไว้ด้วยกัน

2. เครื่องสำอาง "silk fibroin" เป็นเลิศแห่งมอยซ์เจอไรเซอร์ ที่สามารถให้ความชุ่มชื้นสูงถึง 300 เท่าของน้ำหนัก เป็นโปรตีนสกัดจากไหมที่ผสานเป็นเหนึ่งเดียวกับผิวหนัง ด้วยกระบวนการทางชีวเคมีดุจเดียวกับธรรมชาติผิว นับเป็นสรรพคุณของไหม ที่บริษัทเครื่องสำอาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แห่งหนึ่งที่ผลิตครีมบำรุงความชื้นผิวจากโปรตีนไหมกล่าวถึง ไหมนอกจากจะครองความเป็นเลิศในเรื่องของเส้นใยแล้วยังเป็นวัสดุที่มีคุณค่าเมื่อนำเทคโนโลยีสมัยใหม่เข้ามาพัฒนา เนื่องจากเส้นใยไหม ส่วนใหญ่ (90%) เป็นโปรตีนที่มีความใกล้เคียงกับโปรตีนที่พบในร่างกายมนุษย์ซึ่งยากยิ่งที่สารสังเคราะห์อื่นใดจะทำได้เสมอเหมือน โปรตีนจากเส้นไหมประกอบด้วยไฟโบรอิน และ เซริซิน แต่เซริซิน จะถูกความร้อนชะล้างออกไปเมื่อต้มรังในการสาวไหมเพราะเป็นกาวเหนียว มีเพียงไฟโบรอินที่ใช้ทำเป็นเส้นใย ดังนั้น งานวิจัยจึงมุ่งเน้นไปที่การใช้ประโยชน์จากไฟโบรอิน เมื่อ 60 ปีก่อน บริษัทเครื่องสำอางแห่งหนึ่งในประเทศญี่ปุ่น ได้นำไฟโบรอินมาหลอมให้อยู่ในรูปของสารละลายก่อนที่จะทำเป็นผงและครีมซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์เครื่องสำอางอันดับแรกที่ทำจากไหมโดยใช้เป็นเครื่องแต่งหน้าให้กับผู้แสดงละครคาบูกิ ที่จำเป็นต้องพอกหน้าด้วยเครื่องสำอางอย่างมาก ทำให้ผู้แสดงรู้สึกสบายผิวมากขึ้น นอกจากนั้นเมื่อต้องแสดงกลางแจ้งก็สามารถป้องกันอันตรายจากแสงอุลตราไวโอเลท (UV light) และที่สำคัญเครื่องสำอางชนิดนี้เข้ากับผิวหน้าได้ดีกว่าชนิดอื่น ต่อมาบริษัทได้ผลิตโปรตีนไหมที่ทำจากเซริซิน เพื่อใช้ในวงการเสริมสวยโดยมีสรรพคุณในการป้องกันเส้นผมเสีย ในขณะตกแต่งหรือเปลี่ยนทรงผม ปัจจุบันครีมรองพื้น ครีมแต่งหน้า และครีมทำความสะอาด จะมีโปรตีนจากไหมเป็นส่วนผสม ญี่ปุ่นประเทศเดียว มีการใช้ไหมทำเครื่องสำอางถึงปีละ 5-6 ตัน และเป็นที่น่ายินดีที่มีบริษัทของไทยได้ผลิตเครื่องสำอาง สบู่เหลว แชมพูและน้ำยาซักผ้าไหม ที่มีโปรตีนจากเส้นใยไหมเป็นส่วนผสมออกจำหน่ายแล้ว

3. การแพทย์ เป็นที่ทราบกันดีว่าไหมใช้เป็นเส้นด้ายในการเย็บแผลผ่าตัด นอกจากเหนียวและทนต่อการเข้าทำลายของเชื้อจุลินทรีย์แล้ว ยังเข้ากับเนื้อเยื่อมนุษย์ได้ดี คุณสมบัติของไหมเหล่านี้จึงเป็นประโยชน์ต่อวงการแพทย์อย่างมากในการที่จะหลอมเส้นไหมแล้วทำให้เป็นแผ่นผิวหนังเทียมหรือเป็นหลอดต่อเส้นเลือดเทียม คอนแท็กเลนซ์ แม้ว่าอุปกรณ์เหล่านี้จะทำได้ด้วยพลาสติก แต่ก็ถูกต่อต้านจากร่างกายสูง ได้มีความพยายามที่จะผลิตสารดูดซับ (Absorbant polymers) และสารช่วยย่อย ที่จะใช้ทางการแพทย์และการอาหารจากสารละลายไฟโบรอิน เมื่อเร็ว ๆ นี้ พบว่ากรดอมิโนที่พบในไฟโบรอินคือ Glycine จะช่วยให้คอเลสเตอรอล และระดับน้ำตาลในเลือดต่ำ และ อะลานีน (Alanine) จะช่วยตับทำงาน เช่น ช่วยให้อาการเมาค้างกลับสู่ภาวะปกติได้เร็วขึ้นขณะเดียวกัน Serine จะกระตุ้นทำงานของสมองในผู้สูงอายุ ไฟโบรอินจากไหมยังมีศักยภาพในการพัฒนาเป็น biosensors เพื่อตรวจจับ แอนติ้บอดี้ (Antibodies) ซึ่งใช้ในการวินิจฉัยโรคมะเร็งและโรคเอดส์ได้ ไหมได้ถูกนำมาใช้ประโยชน์มากขึ้นเรื่อย ๆ จนได้รับการขนานนามอีกอย่างหนึ่งว่า "เส้นใยสุขภาพ (Health fiber)"

4. สารป้องกันกำจัดแมลง ในสหรัฐอเมริกาได้มีการสกัดสารจากเชื้อ *Bacillus thuringiensis* ที่แยกได้จากหนอนไหม นำไปใช้เป็นสารกำจัดแมลง (Microbial insecticide) เชื้อรา (Filamentous fungi) ซึ่งไม่เป็นอันตรายต่อหนอนไหม พบว่าสามารถทำลายด้วงหนวดยาว จึงมีการผลิตเชื้อราชนิดนี้จากหนอนไหม เพื่อใช้กำจัดด้วงเจาะลำต้น นอกจากนี้ยังมีการใช้ฮอร์โมนบาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชนิดจากหนอนไหมควบคุมการเจริญเติบโตของแมลง ใช้หนอนไหมเป็นอาหารของจุลินทรีย์หลาย ๆ ชนิดที่สามารถใช้กำจัดแมลงได้การปลูกเชื้อไวรัสที่เจือจางในหนอนไหมสามารถใช้เป็นวัคซีนป้องกันโรคของสัตว์ได้ ตลอดจนมีการศึกษาการเลี้ยงเชื้อไวรัส และจุลินทรีย์ ที่สามารถนำมาผลิตเป็นยารักษาโรคและสารที่มีประโยชน์ต่าง ๆ ใช้หนอนไหมเป็นอาหารของไส้เดือนฝอยในการขยายพันธุ์เพื่อใช้กำกัดแมลงศัตรูพืชบางชนิด

5. สบู่และเทียนไข ไขจากดักแด้ไหมสามารถนำมาผลิตเป็นสบู่และเทียนไขที่มีคุณภาพสูง ญี่ปุ่นและอิตาลีเป็นประเทศที่ผลิตสบู่และเทียนไขคุณภาพสูงจากไขดักแด้ไหมมากเป็นอันดับ 1 และ 2 ไขมันที่สกัดได้เมื่อนำไปผ่านกระบวนการเพิ่มไฮโดรเจน (Hydrogenation) จะได้ไขสีขาว (White oil) คือ stearic acid $(CH_3)(CH_2)_{16}COOH$ ซึ่งเป็นวัตถุดิบที่ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตสบู่และเทียนไขคุณภาพสูงและมีการนำไปทำผงซักฟอก ไฟโบรอินจากไหม ใช้เป็นส่วนผสมในการผลิตผงซักฟอก ที่มีประสิทธิภาพสูง เนื่องจากสามารถเคลื่อนย้ายสิ่งสกปรกได้ดี เพราะมีส่วนช่วยกระตุ้นปฏิกิริยาทางเคมี

6. ดอกไม้ รังไหมที่ผ่ารังเอาดักแด้ออกแล้ว สามารถนำมาประดิษฐ์เป็นดอกไม้ได้หลากชนิด เช่น ดอกทิวลิป ดอกบัว ดอกเฟื่องฟ้า ดอกทานตะวัน ดอกเยอเบร่า ดอกกุหลาบ หรือประดิษฐ์เป็นรูปสัตว์ต่าง ๆ เช่น นก หนู ฯลฯ ใช้ประดับในอาคาร ในรถยนต์ นอกจากจะสวยงามแล้วยังสะดุดตาแก่ผู้พบเห็นทั่วไปอีกด้วย

7. อาหารมนุษย์ มนุษย์รู้จักบริโภคดักแด้จากหนอนไหมมาตั้งแต่เมื่อไร ไม่ปรากฏ แต่ชาวไทยที่เคยเลี้ยงไหม หรือสาวไหม ถ้วนแล้วแต่รู้จักการบริโภคดักแด้ที่อยู่ในรังไหมเป็นอย่างดี เมื่อต้มรังไหมและสาวไหมจนหมดเส้นใย ก็มักจะลอกเปลือกรังชั้นในนำดักแด้ที่สุกแล้วมาบริโภคหรือนำไปคั่วก็อร่อยไปอีกแบบหนึ่งหรือนำไปปรุงอาหารชนิดอื่นก็ได้ เช่น ทอดกับไข่ผัดใบกระเพรา ตลาดในภาคอีสานจะมีดักแด้ไหมขายตามฤดูกาลเลี้ยงราคากิโลกรัมละ 40-80 บาท ชาวญี่ปุ่นก็บริโภคดักแด้ไหมที่ปรุงแล้วเช่นเดียวกับชาวจีน เกาหลี อินเดีย และพม่า แถมยังมีจำหน่วยในซูเปอร์มาเก็ตบางแห่งอีกด้วย มีบริษัทอุตสาหกรรมการเกษตรของไทยได้ส่งออกผลิตภัณฑ์ "ดักแด้กระป๋อง" ไปจำหน่ายยังประเทศเกาหลี เนื่องจากมีความต้องการสูง เพราะดักแด้ไหมมีโปรตีนและเกลือแร่หลายชนิด มีคุณค่าทางอาหารสูงกว่าปลาและสัตว์ต่าง ๆ ยังอุดมไปด้วยวิตามินบี 1 และ บี 2 ดักแด้แห้งจะมีโปรตีนสูงถึง 48.98%

8. อาหารสัตว์ ดักแด้ไหมสดหรือดักแด้ไหมแห้ง สามารถนำไปเลี้ยงปลาและสัตว์อื่นได้อีกหลายชนิดเช่น สัตว์ปีก และปศุสัตว์ กำลังมีการมองหาแหล่งโปรตีนใหม่ ๆ ทดแทนการใช้ปลาป่นที่นับวันจะหายากและมีราคาแพงขึ้นทุกขณะ ดักแด้ไหมป่นเป็นทางเลือกหนึ่งของการนำไปใช้ทดแทนปลาป่น ดักแด้ไหมที่สกัดไขมันแล้วจะเป็นแหล่งโปรตีนที่มีคุณภาพสูง กากดักแด้ไหม (Cake) ที่เหลือจากการนำไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมการทำสบู่และเทียนไขแล้ว สามารถนำไปเป็นอาหารของปลาและสัตว์ปีกได้ มูลไหมจะมีไนโตรเจนเหลืออยู่ประมาณ 3.06% สามารถ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่นำไปเป็นอาหารเสริมของปลาร่วมกับเศษใบหม่อนที่เหลือจากการเลี้ยงไหมได้ ปัจจุบันยังไม่มีข้อมูลมากนัก คาดว่าจะได้รับข่าวดีในการใช้ดักแด้ไหมไปเลี้ยงสัตว์ในเร็ววันนี้

9. ทดแทนนุ่น ปุยไหมชั้นนอกไม่สามารถจะนำไปสาวเป็นเส้นได้ เดิมจะมีการลอกปุยไหมชั้นนอกทิ้งไปก่อนนำรังไปต้มเพื่อสาวเป็นเส้นไหมต่อไป หรือรังเสียที่ไม่สามารถเข้าเครื่องสาวได้ จะนำไปต้มแล้วดึงเส้นใยไหมออกมาเป็นแผ่น โดยสถาบันวิจัยหม่อนไหมเซนเจียง (Zhenjiang Dongfang Silkworm Egg Development Company of Sericultural Research Institute of the Chinese Academy of Agricultural Sciences) ได้คิดค้นการใช้ประโยชน์จากปุยไหมด้วยการผลิต " floss silk – waddes quilt" ผลิตภัณฑ์เหล่านี้บริษัทเอกชนในประเทศไทยก็มีการผลิตออกจำหน่ายแล้ว รวมทั้งเครื่องนอนต่าง ๆ เช่น ผ้าห่ม หมอนข้าง และหมอน เป็นต้น นับว่าเศษวัสดุเหลือใช้จากรังไหมได้ถูกพัฒนานำมาใช้ประโยชน์อีกอย่างหนึ่ง

นอกจากนั้น นักวิทยาศาสตร์ยังคงศึกษาต่อไปในการใช้ประโยชน์จากวัสดุเหลือใช้ คือเส้นไหมที่นำไปใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอไม่ได้แล้วไปบดเป็นผงไหม เพื่อใช้ในอุตสาหกรรมและผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ดังนี้ คือ

วัสดุที่ให้ความรู้สึกที่ดีในการสัมผัส โดยการใช้ผงไหมผสมสีแล้วฉีดพ่นบนวัสดุ เพื่อให้เกิดความนุ่มมือและดูดซับความชื้น ไม่เหนียวเหนอะหนะ เช่น ปากกา

ฟิล์ม เคลือบรักษาความสดในอุตสาหกรรมประมง โดยทำการเปรียบเทียบกับสารต่าง ๆ เช่น สารโพลีเมอร์ ฟ้าย ป้าน ปอ กระดาษเคลือบไข (Oil paper) และสารละลายเกลือ 1% พบว่าการเคลือบด้วยฟิล์มไหมรักษาความสดของกุ้งสดได้นานถึง 9 วัน ดีกว่าวัสดุอื่น และดีกว่าน้ำแข็งที่รักษาความสดไว้ได้เพียง 7 วัน

- ถ้าไม่ทำเป็นผง ก็จะนำไปฟอกให้เกิดความอ่อนนุ่ม เพื่อนำไปทำเป็นสำลี ผ้าเช็ดเลนส์และกระจก แผ่นทำความสะอาดผิวหน้า เช่นการชำระล้างเครื่องสำอาง เหล่านี้เป็นต้น

2.6 เนื้อเยื่อวิศวกรรม (Tissue Engineering) [19,21,22]

เนื้อเยื่อวิศวกรรม ถูกจำกัดความว่าเป็นศาสตร์ 2 ศาสตร์ที่ใช้ประโยชน์ตามหลักของวิศวกรรมและวิทยาศาสตร์ชีวภาพ เกี่ยวกับการพัฒนาของชีววิทยาเพื่อแทนที่ ซ่อมแซม รักษาหรือปรับปรุงเนื้อเยื่อ ในการออกแบบเนื้อเยื่อวิศวกรรมนั้นวัสดุและเทคนิคการผลิตจะเป็นสิ่งสำคัญ ซึ่งจะต้องเข้าใจหน้าที่ 3 ข้อในเนื้อเยื่อวิศวกรรม ดังนี้

- ใช้แยกเซลล์หรือแทนที่เซลล์ตามความต้องการ
- การส่งผ่านของเนื้อเยื่อ เพื่อการเติบโตไปยังตำแหน่งที่ต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- การเติบโตเซลล์ใน scaffold 3 มิติ

2 ข้อจำกัดที่สำคัญ ในการแยกเซลล์หรือเหนี่ยวนำเนื้อเยื่อ ได้แก่ขนาดอนุภาคและรูปร่าง ดังนั้น พื้นฐานความต้องการที่ยอมรับกันอย่างกว้างๆสำหรับการออกแบบพอลิเมอร์ scaffold คือ

- Scaffold จะมีความรูพรุนสูงและขนาดรูที่เหมาะสม
- ต้องการพื้นที่ผิวสูง
- สามารถเสื่อมสลายทางชีวภาพและอัตราการเสื่อมสภาพที่เหมาะสมเท่ากับอัตราการเกิดเนื้อเยื่อใหม่
- Scaffold ต้องมีสมบัติเชิงกลที่สมบูรณ์เพื่อคงสภาพของโครงสร้างเนื้อเยื่อ
- Scaffold ต้องไม่เป็นพิษต่อเซลล์ (คือ สามารถเข้ากันได้)
- Scaffold ต้องเกิดแรงกระทำภายในกับเซลล์ได้ รวมถึงต้องเพิ่มการติดกันของเซลล์ การเติบโต การเป็นก้อนและหน้าที่ที่แตกต่าง

จุดมุ่งหมายของการสร้างเนื้อเยื่อใหม่ Scaffold ให้เหมาะกับความต้องการเฉพาะอย่าง รูพรุนที่มากและขนาดรูที่เพียงพอจึงเป็นที่ต้องการจากงานวิจัย เพื่อสะดวกในการเพาะเซลล์และแพร่ผ่านตลอด ทำให้โครงสร้างสมบูรณ์ของทั้งเซลล์และสารอาหาร การเสื่อมสภาพทางชีวภาพเป็นส่วนสำคัญของ Scaffold ที่ต้องการ เพื่อดูดซับเนื้อเยื่อแวดล้อมภายนอกที่จำเป็นจากการผ่าตัดเอาออกไป อัตราของการเสื่อมสภาพที่เกิดขึ้นเท่ากันกับอัตราการเกิดเนื้อเยื่อใหม่ นั่นคือ ขณะเซลล์เกิดขึ้นมีโครงสร้างเมตริกซ์ธรรมชาติรอบๆ เซลล์ Scaffold สามารถให้โครงสร้างที่สมบูรณ์ภายในร่างกาย และในที่สุดก็จะสลายออกจากเนื้อเยื่อใหม่ เนื้อเยื่อใหม่นี้ จะต้องรับน้ำหนักต่อไป

2.6.1 วัสดุสำหรับทำ Scaffold [21]

พอลิเมอร์เป็นวัสดุแรกสำหรับ Scaffold ตัวอย่างเช่น Poly(glycolic acid)(PGA), poly(lactic acid)(PLA), และโคพอลิเมอร์ poly(lactic acid-co-glycolic acid)(PLGA) เป็นตระกูลของ linear aliphatic polyesters ซึ่งจะใช้ส่วนใหญ่ในเนื้อเยื่อวิศวกรรม พอลิเมอร์จะเสื่อมสลายผ่านการไฮโดรลิซิสของพันธะเอสเทอร์ PGA เป็นพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งที่นิยมใช้เป็น Scaffold เพราะมีธรรมชาติที่ชอบน้ำ PGA เสื่อมสลายเร็วในสารละลายน้ำหรือในสิ่งมีชีวิต แต่สูญเสียสมบัติเชิงกลภายใน 2 ถึง 4 สัปดาห์ ใช้ผลิตเป็นเส้นใยที่ไม่นำมาถักทอเป็นผืน ซึ่งเป็น Scaffold แบบหนึ่งที่ใช้สำหรับเนื้อเยื่อวิศวกรรม PLA เป็น Scaffold ที่ใช้กันทั่วไป มีหมู่เมทิลในหน่วย PLA (เปรียบเทียบกับ PGA) ซึ่งไม่ชอบน้ำ จึงลดโมเลกุลที่เข้าใกล้กับน้ำ นำไปสู่อัตราการไฮโดรลิซิสที่ช้า ใช้เวลาหลายเดือนหรือเป็นปี มีการทดลองปลูกฝัง Scaffold PLA ในสิ่งมีชีวิต เพื่อศึกษาอัตราการเสื่อมสลายระหว่าง PGA และ PLA เพื่อใช้เป็นอัตราส่วนของแลกติกและกรดไกลโคลิกในการสังเคราะห์ PLGA พวก linear aliphatic polyester เช่น poly(Ɛ-caprolactone) (PCL) และ poly(hydroxyl butyrate)(PHB) ซึ่งใช้ในเนื้อเยื่อวิศวกรรม PCL จะมีอัตราการเสื่อมสลายที่ช้ากว่า PLA, PGA และ PLGA อัตราการเสื่อมสลายที่ช้าทำให้ PCL เป็นที่น่าสนใจน้อยสำหรับการใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประโยชน์ในเนื้อเยื่อวิศวกรรม แต่เหมาะสำหรับในเรื่องการปลูกฝังและสามารถควบคุมการปลดปล่อยที่ต้องการการเสื่อมสลายช้า ในปัจจุบันโคพอลิเมอร์ของ PCL จะวิเคราะห์เพื่อปรับปรุงสมบัติการเสื่อมสลาย ส่วน PHB ทำมาจากการหมักสิ่งมีชีวิตขนาดเล็ก PHB และโคพอลิเมอร์ PHB จะเสื่อมสลายได้ช้ามากๆเพราะตามธรรมชาติจะไม่ชอบน้ำ จึงมีความสนใจน้อยเมื่อเทียบกับ PGA, PLA และ PLGA การสังเคราะห์พอลิเมอร์ที่สามารถเสื่อมสลายทางชีวภาพอื่นๆคือ poly(propylene fumarate)(PPF) จะเสื่อมสลายผ่านการไฮโดรลิซิสของพันธะเอสเทอร์ คล้ายกับไกลโคไลด์และแลกไลด์ แม้กระนั้นก็ตาม การใช้ประโยชน์สำหรับเนื้อเยื่อวิศวกรรม จะมีความต้องการคล้ายๆกัน คือ ความสามารถที่เข้ากันได้ทางชีวภาพและความสามารถในการเสื่อมสลายทางชีวภาพ ในเมตริกซ์และ Scaffold เนื้อเยื่อวิศวกรรม

พอลิเมอร์ธรรมชาติ เช่น โปรตีนและพอลิแซคคาไรด์เป็นประโยชน์ใช้สำหรับเนื้อเยื่อวิศวกรรม คอลลาเจนเป็นเส้นใยโปรตีนและองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นเซลล์ธรรมชาติ ซึ่งใช้สำหรับการเกิดเนื้อเยื่อใหม่ สำหรับซ่อมแซมเนื้อเยื่ออ่อน การจัดการหนึ่งของคอลลาเจนเป็นองค์ประกอบเซลล์ธรรมชาติที่มีสมบัติทางชีววิทยาซึ่งเป็นที่ปรารถนาสำหรับการใช้ประโยชน์ของเนื้อเยื่อวิศวกรรม โคพอลิเมอร์ collagen-glycosaminoglycan (GAG) ถูกนำมาสร้าง Scaffold สำหรับเนื้อเยื่อวิศวกรรม โดยการเปลี่ยนลักษณะคอลลาเจน (เจลลาติน)เพื่อผลิตวัสดุรูพรุนสำหรับซ่อมแซมเนื้อเยื่อ ในด้านอื่นที่เกี่ยวข้องกับคอลลาเจน อาจจะมีการส่งต่อของโรค การต่อต้านเชื้อโรค การจัดการและสมบัติเชิงกลที่ไม่ดี และการควบคุมการเสื่อมสลายทางชีวภาพได้น้อย ส่วนกลุ่มอื่นๆของเส้นใยโปรตีนธรรมชาติ คือไหม ซึ่งใช้ในกระบวนการสิ่งทอมา 20 ปี และใช้ในการเย็บแผลมา 10 ปี เพราะว่ามีสมบัติเชิงกลดึงยืดที่ดี ถึงแม้ว่าไหมเป็นลักษณะของวัสดุที่ไม่เสื่อมสลาย แต่สามารถเสื่อมสลายในกลไกของเอนไซม์ได้ อย่างไรก็ตามอัตราการเสื่อมสลายจะช้ามากๆ ซึ่งอาจจะเกี่ยวเนื่องกับการเป็นพิษต่อเซลล์ จึงได้มีการปรับแปลี่ยนทางเคมีของวัสดุไหมเพื่อเพิ่มความสามารถที่เข้ากันได้ และชนิดของไหมอื่นๆ เช่น ใยแมงมุมและไหมพันธุวิศวกรรม ส่วนพอลิแซคคาไรด์เป็นประเภทของพอลิเมอร์ธรรมชาติ ตัวอย่าง เช่น alginate, chitosan และ hyaluronate จะใช้เป็น Scaffold รูพรุนเนื้อเยื่อวิศวกรรม solid-state ดังนั้น โมเลกุลธรรมชาติขนาดใหญ่ที่บริสุทธิ์จะสกัดมาจาก เนื้อเยื่อสัตว์หรือเนื้อเยื่อพืช

2.6.2 การสังเคราะห์เนื้อเยื่อวิศวกรรม [19]

มีวิธีการหลายแบบสำหรับการเตรียมโครงสร้างรูพรุนเพื่อใช้เป็นเนื้อเยื่อวิศวกรรม (Scaffold) เทคนิคแต่แบบจะมีประโยชน์และข้อเสีย ดังนี้

1. Textile Technology : เทคนิคนี้จะใช้สำหรับการเตรียม เส้นใยที่ไม่ทอของพอลิเมอร์ ตัวอย่างเช่น โครงสร้างของพอลิไกลโคไลด์ (Polyglycolide) ใช้ประโยชน์เป็นเนื้อเยื่อวิศวกรรม โครงสร้างเส้นใยเป็นประโยชน์ต่อการเกิดเซลล์ที่แตกต่างกัน ข้อเสีย คือยากที่จะได้รูพรุนจำนวนมากและขนาดรูเท่าๆกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. Solvent Casting and Particulate Leaching (SCPL) : วิธีการนี้ โครงสร้างรูพรุนจะมีขนาดรูเท่าๆกัน แต่ความหนาถูกจำกัด พอลิเมอร์เริ่มต้นจะละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ (เช่น กรดพอลิแลคติก ละลายใน ไดคลอโรมีเทน (Dichloromethane)) สารละลายก็จะถูกเทไปในโมลจนเต็ม พร้อมกับอนุภาคโพโรเจน (Porogen) โพโรเจนเป็นเกลืออนินทรีย์ เช่น โซเดียมคลอไรด์ (Sodium chloride) ผลึกของ saccharose เจลลาติน (Gelatin) หรือพาราฟีน (Paraffin) ขนาดของอนุภาคโพรอเจนจะมีผลต่อรู Scaffold ขณะที่อัตราของพอลิเมอร์กับโพโรเจนสัมพันธ์กันโดยตรงต่อจำนวนของรูพรุนในโครงสร้าง จากนั้นปล่อยให้ตัวทำละลายอินทรีย์ระเหย นำพอลิเมอร์จุ่มลงในอ่างของของเหลวสำหรับละลายโพรอเจน ในกรณีของโซเดียมคลอไรด์จะใช้น้ำ saccharose และเจลลาตินจะใช้น้ำ ตัวทำละลายอะลิฟาติก เช่น เฮกเซน (Hexane) ใช้สำหรับพาราฟีน โพโรเจนละลายอย่างสมบูรณ์โครงสร้างรูพรุนก็เกิดขึ้น มีความหนาเล็กน้อย ข้อเสียของ SCPL คือใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ซึ่งต้องเอาออกอย่างสมบูรณ์ เพื่อหลีกเลี่ยงความเสียหายต่อเซลล์บน Scaffold

3. Gas Foaming : เป็นการเอาชนะในการใช้ตัวทำละลายอินทรีย์และโพโรเจนของแข็ง เทคนิคนี้จะใช้ก๊าซเป็นโพโรเจนพัฒนารูปร่างโครงสร้าง พอลิเมอร์จะถูกเตรียมโดยการอัดโมลโดยใช้โมลร้อน ภาชนะจะถูกวางในอ่างขนาดใหญ่ที่เปิด ให้ความดัน CO_2 สูง ความดันภายในอ่างขนาดใหญ่จะเป็นสภาวะของชั้นบรรยากาศ ขณะนี้รูพรุนก็จะเกิดขึ้นโดยโมเลกุลคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปล่อยไว้ในพอลิเมอร์ เป็นผลให้โครงสร้างคล้ายฟองน้ำ ปัญหาส่วนใหญ่ของเทคนิคนี้ได้แก่ใช้ความร้อนมากเกินไปขณะการอัดโมล (ข้อห้าม ในการรวมกัน อุณหภูมิวัสดุอาจเกิดการเปลี่ยนแปลงภายในเมตริกซ์พอลิเมอร์) และโดยข้อเท็จจริงนั้นรูจะไม่เชื่อมกัน

4. Emulsification/Freeze-drying : เทคนิคนี้ไม่ต้องการใช้โพรอเจนของแข็งเหมือน SCPL พอลิเมอร์สังเคราะห์ละลายในตัวทำละลายที่เหมาะสม (เช่น กรดพอลิแลกติก ละลายในไดคลอโรมีเทน) เติมน้ำลงในสารละลายพอลิเมอร์ ของเหลวทั้งสองจะผสมกันได้เป็นอิมัลชัน ก่อนที่สองเฟสจะแยกกัน อิมัลชันจะเทไปในโมลและแช่แข็งเร็วโดยการจุ่มไปในไนโตรเจนเหลว อิมัลชันแช่แข็งต่อมาก็ไป Freeze-drying เพื่อเอาน้ำและตัวทำละลายออก โครงสร้างก็จะเป็นรู การ Emulsification และ Freeze-drying เตรียมได้เร็วเมื่อเทียบกับ SCPL ซึ่งจะไม่ต้องการเวลาการชะล้าง ไม่ต้องการใช้ตัวทำละลาย นอกจากนั้นขนาดรูจะเล็กและรูพรุนจะเท่าๆกัน Freeze-drying โดยตัวมันเองใช้เทคนิคทั่วไปสำหรับการเกิด Scaffold จะใช้เตรียมฟองน้ำคอลลาเจน คอลลาเจนจะละลายในอะซิติก สารละลายของกรดอะซิติกหรือ กรดไฮโดรคลอริก ถูกเทภายในโมล แช่แข็งกับไนโตรเจนเหลว เป็น Lyophilize

5. Liquid-Liquid Phase Separation : คล้ายกับเทคนิคที่ 4 กระบวนการนี้ต้องใช้ตัวทำละลายที่มีจุดหลอมเหลวต่ำเพื่อง่ายต่อการทำให้บริสุทธิ์ เช่น ไดออกเซน (Dioxane) ใช้ละลายกรดพอลิแลกติก เติมปริมาณน้ำเล็กน้อยก็จะแยกเฟสกัน ตามด้วยให้ความเย็นที่ต่ำกว่าจุดหลอมเหลว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของตัวทำละลาย จาก Vacuum-drying เพื่อดึงตัวทำละลายออก ก็จะได้รูพรุนของ Scaffold มีข้อเสียเหมือน วิธี Emulsification/Freeze-drying

2.6.3 สมบัติที่จำเป็นที่สุดของ Scaffold [22]

- ความสามารถเข้ากันได้ทางชีวภาพ Scaffold จะต้องรวมเป็นเนื้อเดียวกับเนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิต

- รูพรุนของ Scaffold จะต้องมีรูเปิดซึ่งทำให้การเชื่อมต่อภายในโครงสร้างรูพรุน อัตราพื้นผิวต่อพื้นที่ปริมาตรจะกว้าง เซลล์จะเจริญภายใน และเซลล์จะแพร่ตลอดโครงสร้างรู ทำให้ง่ายต่อการมีหลอดเลือดใหม่ของโครงสร้างเนื้อเยื่อรอบๆ Scaffold จะแสดงพฤติกรรม microporosity ที่เพียงพอ รูพรุนและการติดกันนั้นเป็นสิ่งสำคัญสำหรับการแพร่ของสารอาหารและก๊าซ เพื่อเอาของเสียจากการเผาผลาญออกจากเซลล์ ที่เติบโตภายใน Scaffold เป็นลักษณะเฉพาะที่สำคัญในเนื้อเยื่อวิศวกรรมกระดูก เพราะเนื่องจากลักษณะการเผาผลาญกระดูก ปริมาณการส่งผ่านของเสียจะมีอัตราสูงเกิดขึ้นภายใต้สภาวะการทดลองการปลูกฝังเนื้อเยื่อ อย่างไรก็ตาม ระดับของรูพรุนจะมีอิทธิพลต่อสมบัติอื่นๆของ Scaffold นั่นคือ ความเสถียรทางเชิงกล ดังนั้นค่าจะเท่ากันกับความต้องการเชิงกลของเนื้อเยื่อวิศวกรรม เพื่อใช้ในการแทนที่

- ขนาดรูพรุน เป็นประเด็นสำคัญมากๆเพราะถ้ารูที่ใช้ขนาดเล็ก รูจะถูกปิดกั้นโดยเซลล์ที่เกิดขึ้น ซึ่งจะป้องกันเซลล์แทรกซึมเข้าไป ป้องกันการเกิดเมตริกซ์เซลล์พิเศษและป้องกันการเกิดหลอดเลือดใหม่ภายในพื้นที่ของ Scaffold โดยที่ขนาดรูภายในเป็น 200-900 μm ซึ่งแล้วแต่แนวคิดที่แตกต่าง ที่เป็นที่ต้องการของผู้ทดลอง เชื่อว่ากระดูดที่สร้างขึ้นมาใหม่ จะได้มาโดยเมตริกซ์ชั่วคราว 3D ซึ่งรูขนาดใหญ่โครงสร้างจะติดกัน ที่อัตราพื้นผิว/ปริมาตรสูง ง่ายต่อเซลล์เนื้อเยื่อและเส้นเลือดเจริญภายใน อย่างไรก็ตาม จะไม่มีผลต่อสมบัติเชิงกล

- สมบัติของพื้นผิว ทั้งทางเคมีและลักษณะรูปร่างสามารถควบคุม และส่งผลกระทบต่อการติดกันของเซลล์ และการเติบโตของเซลล์

1. สมบัติทางเคมี จะสัมพันธ์กับความสามารถการติดกันของเซลล์กับวัสดุนั้นคือปฏิกิริยาภายในโปรตีนกับวัสดุ

2. สมบัติของลักษณะรูปร่าง เป็นส่วนที่น่าสนใจเมื่อหัวข้อ คือการสื่อนำกระดูก (Osteoconduction) การสื่อนำกระดูกจะกระทำโดยย้ายที่เซลล์เนื้อเยื่อกระดูกไปยังผิวของเส้นใย scaffold ซึ่งจะเกิดขึ้นหลังจากการปลูกฝังวัสดุ การย้ายก้อนเซลล์เนื้อเยื่อกระดูกจะเอาออกจากเส้นใยเมตริกซ์ชั่วคราว ดังนั้น เส้นใยเมตริกซ์เป็นสิ่งสำคัญมากสุดที่ได้มาจาก Scaffold หรืออีกในหนึ่งเมื่อเซลล์เนื้อเยื่อกระดูกเริ่มจะเป็นก้อนบนเส้นใยแยกออกจาก Scaffold ขณะที่บาดแผลหดตัว พื้นผิวที่หยาบมากๆสามารถกักเส้นใยเมตริกซ์ได้มากกว่าพื้นผิวเรียบ และจากนี้ไปการย้ายที่ของเซลล์เนื้อเยื่อกระดูกไปยังผิวของวัสดุจะง่ายขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 โพโรเจน (Porogen)[23]

รูพรุนตัวของไฮโดรเจลถูกเตรียมโดยใช้ เกลือ น้ำตาลหรือผลึกน้ำแข็ง

2.7.1 การเลือกและการเติมโพโรเจน

รูพรุนของวัสดุไฮโดรเจลจะส่งผลเนื่องจากการแขวนลอยที่อิ่มตัวยิ่งยวดของโพโรเจนในสารละลายมอนอเมอร์ โพโรเจนจะต้องไม่ละลายในสารละลายมอนอเมอร์ แต่จะละลายในสารละลายการชะล้างที่ใช้ โดยที่โซเดียมคลอไรด์ชอบใช้เป็นโพโรเจน ส่วนโพแทสเซียมคลอไรด์ น้ำแข็ง น้ำตาลและโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต ก็จะถูกนำมาใช้ ซึ่งจะควบคุมขนาดอนุภาคโพโรเจนที่น้อยกว่า 25 ไมครอน ซึ่งควรเลือกให้น้อยกว่า 10 ไมครอน ขนาดเล็กๆจะช่วยการแขวนลอยของโพโรเจนในตัวทำละลาย ความเข้มข้นของโพโรเจนอยู่ในช่วงจาก 5% w/w – 50% w/w โดยการเลือก 10% w/w – 20% w/w ในสารละลายของมอนอเมอร์

ตัวอย่างโพโรเจนที่ใช้ [24]

1. โซเดียมคลอไรด์ (Sodium chloride)

- สูตรโมเลกุล	NaCl
- คุณสมบัติทางกายภาพและเคมี	เป็นผลึกของแข็ง สีขาว ไม่มีกลิ่น
น้ำหนักโมเลกุล	58.44
จุดเดือด	1465 °C
จุดหลอมเหลว/จุดเยือกแข็ง	~800 °C
ความถ่วงจำเพาะ(น้ำ=1)	2.16
ความสามารถในการละลายน้ำ	37 กรัม/100 มล.
ความเป็นกรด-ด่าง (pH)	5-8
- ความคงตัวและการเกิดปฏิกิริยา	
ความคงตัว	สารนี้มีความเสถียร
สารที่เข้ากันไม่ได้	ทำปฏิกิริยากับโบรมีนไตรฟลูออไรด์ (BF_3), โบรอนไตรออกไซด์และแคลเซียมออกไซด์ (B_2O_3+CaO) และกรดซัลฟูริก โซเดียม สังกะสี
สารอันตรายจากการสลายตัว	ฟูม/ก๊าซพิษของคลอไรด์ (Cl^-) เกิดเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 1600 °C

เมื่อสัมผัสกับความร้อนสูง จะทำให้เกิดไอระเหยที่ฤทธิ์ระคายเคืองขึ้น

- อันตรายต่อสุขภาพอนามัย

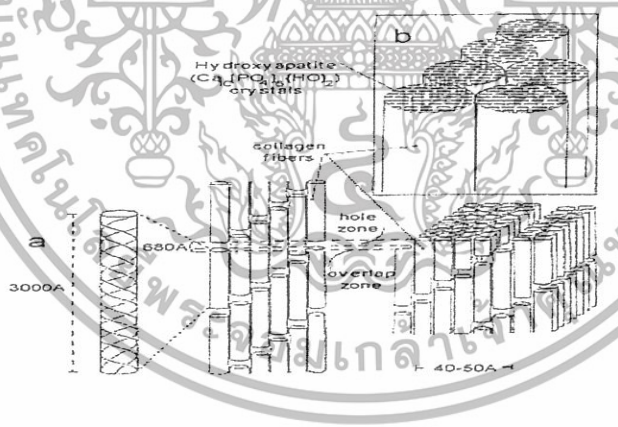
สัมผัสทางหายใจ	การหายใจเข้าไปจะทำให้เกิดการระคายเคืองจมูก คอ และ ปอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัมผัสทางผิวหนัง	การสัมผัสถูกผิวหนังทำให้ระคายเคือง การสัมผัสเป็นเวลานานจะทำให้ปวดแสบปวดร้อนและแผลไหม้
กินหรือกลืนเข้าไป	การกลืนกินเข้าไปทำให้ระคายเคืองกระเพาะอาหารและลำไส้ ทำให้คลื่นไส้และอาเจียน
สัมผัสถูกตา	การสัมผัสถูกตา ทำให้เกิดการระคายเคือง ต่อตา ตาแดง เจ็บตา
การก่อมะเร็ง	สารนี้ถูกรายงานว่าเป็นสารไม่ก่อให้เกิดมะเร็งโดย NTP, IARC, OSHA
ความผิดปกติ อื่น ๆ	การสัมผัสกับสารเป็นระยะเวลานานหรือการสัมผัสสารซ้ำ จะทำให้เกิดแผลพุพอง

2.8 สารประกอบไฮดรอกซีแอปาไทต์ [25]

องค์ประกอบหลักของร่างกายมนุษย์ ประกอบด้วย 3 ส่วน คือ น้ำ คอลลาเจน และไฮดรอกซีแอปาไทต์ โดยไฮดรอกซีแอปาไทต์เป็นแร่ธาตุหลักในกระดูกและฟัน ซึ่งมีอยู่ประมาณ 5 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักร่างกาย ดังรูป2.10

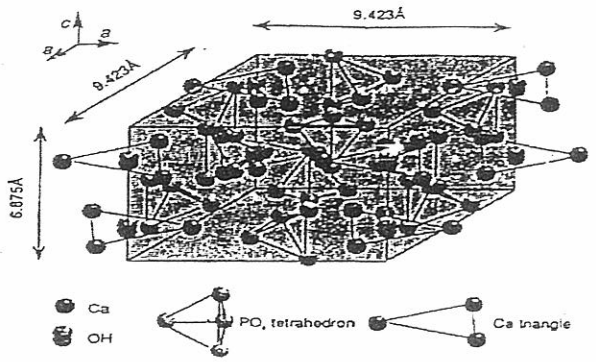


รูปที่ 2.10 องค์ประกอบของกระดูกในร่างกาย[25]

2.8.1 โครงสร้างผลึกไฮดรอกซีแอปาไทต์

สารประกอบไฮดรอกซีแอปาไทต์ เป็นสารประกอบจำพวกแคลเซียมฟอสเฟต ที่มีสูตรเคมี คือ $Ca_{10}(PO_4)(OH)_2$ มีอัตราส่วนโดยโมลของ Ca:P เป็น 1.67 รูปผลึกเป็นเฮกซะโกนอล ขนาดยูนิตเซลล์ a= 9.423 และ c=6.875 อังสตรอม ดังรูป2.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11 โครงผลึกของไฮดรอกซีแอปาไทต์[25]

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Esmaiel Jabbari[26] ได้ศึกษาการเตรียม Scaffold ที่เป็นนาโนคอมโพสิตระหว่าง hydrogel/apatite เพื่อการงอกของกระดูก โดยอนุภาคนาโนของ hydroxyapatite (HA)จะถูกนำมาต่อกิ่งบน hydrophilic unsaturated poly(ethylene glycol)oligomer ก่อนเพื่อเพิ่มเสถียรภาพในการแขวนลอยในสารละลายไฮโดรเจล การต่อกิ่งจะมี 2 ขั้นตอน ในขั้นแรก poly(ethylene glycol)methacrylate (PEGMA) จะถูกควบแน่นกับ 3-isocyanatopropyltrimethoxysilane (iCPTMS) เพื่อให้เกิด PEGMA-PTMS urethane โดยมี unsaturated methylacrylate และ trimethoxysilane เป็นหมู่ปลาย และในขั้นที่ 2 หมู่ปลายของ urethane ที่เป็น trimethoxysilane จะถูกทำปฏิกิริยาด้วยหมู่ฟอสเฟต และ คาร์บอเนต ที่ผิวของ HA เพื่อสร้าง HA ที่มีกิ่ง PEGMA oligomers (gHA)

Hydrogel/apatite porous scaffold เตรียมได้จาก PLEOF ซึ่งใช้เป็น degradable macromer ส่วนสารที่ทำให้เกิดการเชื่อมโยง ได้แก่ methylenebisacrylamide (MBIS) และมี NaCl เป็นสารที่ทำให้เกิดรู (porogen) นำ gHA โดยน้ำหนักเท่ากับ ไฮโดรเจลใส่ลงในส่วนผสมพอลิเมอร์ แล้วย้ายไปใส่ในแม่แบบเทฟลอน แล้วนำไปใส่เตาอบ เพื่อให้เกิดการเชื่อมโยง ส่วนสารที่ทำให้เกิดรูนั้นจะเอาออกโดยนำ Scaffold ไปแช่ในน้ำกลั่นเป็นเวลา 2 วัน ซึ่งต้องเปลี่ยนน้ำทุกๆ 8 ชั่วโมงแล้วนำไปทำให้แห้งในสุญญากาศเป็นเวลา 12 ชั่วโมงก่อนนำไปใช้งาน Scaffold จะถูกฆ่าเชื้อด้วยเมทานอล แล้วล้างด้วย PBS แล้วนำไปทดสอบการยึดติดกับเซลล์ (neonatal heart fibroblast cells) เพาะไว้เป็นเวลา 48 ชั่วโมง เซลล์ที่ติดกับ Scaffold แล้วจะล้างด้วย PBS แล้วทำให้สามารถซึมน้ำได้โดยแช่ใน PBS กับ 0.1%triton x-100และ 0.1M glycine จากนั้นย้อมสีนิวเคลียสของเซลล์ด้วย 4',6-Diamidino-2-phenylindole หรือ SYTOX Green แล้วสลับด้วย Texas Red-X Phalloidin เนื่องจาก PLEOF hydrogel นั้นเฉื่อยทำให้เซลล์ไม่ติดกับผิวของแบบจำลอง แต่เมื่อนำ Scaffold ไปtreated ด้วย คอลลาเจน จะทำให้เซลล์ติดที่ผิวของ Scaffold ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Yoshiyuki Yokogawa และ Fukue Nagata [27] ได้ทำการสังเคราะห์วัสดุที่เป็นคอมโพสิตระหว่าง ไฮดรอกซีแอปาไทต์ และพอลิเมอร์ โดยวิธี hydrothermal โดยเตรียม apatite precursor slurry จาก 0.06 โมล $CaCO_3$ และ 0.09 โมล $CaHPO_4 \cdot 2H_2O$ แล้วปั่นกวนใน pot mill โดยมีน้ำ 200 มล. แล้วใส่เส้นใยพอลิเมอร์ลงไปใน apatite precursor slurry โดยเส้นใยพอลิเมอร์ที่นำมาใช้ มี 3 ชนิด ได้แก่ aromatic polyamide , phenolic resin และ polyvinyl alcohol ปรับพีเอชให้เป็น 10 ด้วยแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ และเป็น 4 ด้วยกรดอะซิติก แล้วนำสารละลายไปใส่ใน autoclave ที่อุณหภูมิ 160-200 °C เป็นเวลา 5 ชั่วโมง แล้วศึกษาการเกิดผลึกแอปาไทต์บนเส้นใยพอลิเมอร์ พบว่า ที่ pH 10 อนุภาคแอปาไทต์ที่มาเกาะบนเส้นใยจะมีรูปร่างเป็นทรงกลมคล้ายกลีบดอกไม้ และพบว่าอนุภาคแอปาไทต์จะเกาะที่ phenolic resin และ polyvinyl alcohol มากกว่าที่ aromatic polyamide ที่อุณหภูมิ 180°C pH 10 ยังพบอีกว่า polyvinyl alcohol ดูเหมือนจะยืดและโค้งงอไปจากเดิม แต่ phenolic resin และ aromatic polyamide ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงใดๆ ส่วนที่pH6.5 ผลิตภัณฑ์ที่ได้เหมือนที่pH 10 คืออนุภาคแอปาไทต์ที่มาเกาะมีรูปร่างเป็นทรงกลมคล้ายกลีบดอกไม้ และจะมีมากที่ polyvinyl alcohol และที่พีเอชนี้ยังพบอีกว่า เส้นใย polyvinyl alcohol บางส่วนหลอมติดกัน ในขณะที่ phenolic resin และ aromitic polyamide ไม่มีการเปลี่ยนแปลงใดๆ ส่วนที่pH 4 พบว่าผลึกของแอปาไทต์มีรูปร่างเหมือนท่อนไม้ (rod-like crystals) กว้างประมาณ 2-3 ไมโครเมตร ยาว20-50 ไมโครเมตรและแต่ละผลึกจะยาวไปในทิศทางเดียวกัน และจากการศึกษาด้วย TEM พบว่าผลึกคล้ายท่อนไม้นั้นประกอบด้วยผลึกเล็กๆจำนวนมากและที่พีเอชนี้เส้นใย polyvinyl alcohol นั้นถูกทำลายค่อนข้างมาก แต่ phenolic resin กับ aromatic polyamide นั้นไม่มีการเปลี่ยนแปลงใดๆ

Tamada Yusashi [28] ได้คิดค้นวิธีการเตรียมโครงสร้างรูพรุนจากไฟโบรอินจากไหม โดยในกระบวนการจะมีการแช่แข็งและการละลายสารละลายไฟโบรอินในตัวทำละลายอินทรีย์ โดยในกระบวนการจะไม่มีการทำ freeze-drying ไม่มีการใช้สารเชื่อมโยงและไม่มีการใช้วัสดุพอลิเมอร์อื่นๆ พบว่า ความเข้มข้นของตัวทำละลาย ความเข้มข้นของไฟโบรอิน อุณหภูมิแช่แข็ง และเวลาแช่แข็ง จะมีผลต่อการเกิดฟองน้ำโครงสร้างของรูพรุน และสมบัติเชิงกลของฟองน้ำ จาก XRD และ FTIR แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างผลึกของไหม I และ II จะยังคงอยู่ในฟองน้ำ และโครงสร้างทุติยภูมิของไฟโบรอิน จะเปลี่ยนไปเป็น ß-sheet ส่วนค่าความแข็งแรงดึง จะลดลงเล็กน้อย ฟองน้ำไฟโบรอินจะผ่านการฆ่าเชื้อใน autoclave ในเวลา 3 สัปดาห์จะพบว่า เซลล์ MC3T3 ที่เพาะบนฟองน้ำนี้สามารถจะเพิ่มจำนวนได้ ดังนั้นฟองน้ำนี้สามารถใช้เป็นเนื้อเยื่อวิศวกรรม เพราะเนื่องจากเป็นการโครงสร้างจากโปรตีนไหมบริสุทธิ์ อีกทั้งโครงสร้างรูพรุนและสมบัติเชิงกลก็เหมาะเป็นที่ให้เซลล์เจริญเติบโต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Guang Chen และคณะ[29] ได้ทำการปรับปรุง poly(ε-caprolactone) scaffold (PCL) ด้วยไฟโบรอินจากไหม (SF) โดยจาก SEM แสดงให้เห็นว่าความเข้มข้นของสารละลายไฟโบรอิน จะมีผลต่อสัณฐานวิทยาของ PCL-SF hybrid scaffold ที่ได้ ส่วน ATR-FTIR ได้แสดงให้เห็นว่ามี SF อยู่ที่ผิวของ Scaffold และมีการเปลี่ยนแปลงคอนฟอร์เมชัน อีกทั้ง wettability ของ hybrid scaffold นั้นดีขึ้นมาก เมื่อนำเซลล์เนื้อเยื่อในร่างกายมนุษย์มาเพาะบน hybrid scaffold พบว่าจากเซลล์เพียงไม่กี่เซลล์ที่นำไปเพาะ เมื่อเวลาผ่านไป 7 วันมีเซลล์เกิดขึ้นเป็นจำนวนมาก การศึกษาครั้งนี้แสดงให้เห็นว่าการปรับปรุงพื้นผิว Scaffold ด้วยไฟโบรอินจากไหมเป็นการทำให้ PCL เข้ากับร่างกายได้ดีขึ้น จึงทำให้สามารถนำไปใช้เป็นเนื้อเยื่อวิศวกรรมได้จริงๆ

Kong X.D. และคณะ[30] ทำการตกผลึก hydroxyapatite (HA) บน silk fibroin โดยใช้แคลเซียมฟอสเฟตตกตะกอนในสารละลายของ silk fibroin ที่ pH 8 และอุณหภูมิห้อง จากผลการทดลองพบว่าผลึก HA เกิดเป็นสารประกอบกับ fibroin โดยแรงกระทำระหว่าง HA กับ silk fibroin ค่อนข้างแข็งแรงซึ่งจะทำให้พีคของเอไมด์นั้นshift ไปจากตำแหน่ง 1517-1539 cm^{-1} และจาก TEM แสดงให้เห็นอีกว่าผลึก HA รูปร่างเหมือนท่อนไม้ (rod-like) เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2-3 nm

Li Wang และคณะ[31] ได้ทำการสังเคราะห์วัสดุประกอบระหว่างhydroxyapatite(HA) กับ silk fibroin (SF)โดยวิธีการตกตะกอนร่วม ซึ่งทำการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของ HA ต่อ SF พบว่าที่ปริมาณ SF มากกว่า40 % โดยน้ำหนักขึ้นไป การกระจายตัวของขนาดอนุภาคของผลึก HA จะแคบลง วัสดุประกอบที่สังเคราะห์ได้นั้นรูพรุนจะเป็นรูเปิดประมาณ 62-74% และประมาณ 70% ของรูที่เชื่อมต่อกันมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 40-115 μm แต่ที่ปริมาณของ SF เท่ากับ 30% โดยน้ำหนัก พบว่าผลึก HA มีขนาดใกล้เคียงกันและกระจายตัวของผลึกออกเป็นสามมิติ

Tsutomo และคณะ [32]ทำการสังเคราะห์วัสดุประกอบร่วมระหว่าง แอปาไทต์ และเส้นใยไหม โดยใช้วิธีการแช่สลับ (alternate soaking process) โดยแช่เส้นใยไหมในสารละลายของแคลเซียม และฟอสเฟต สลับกันทุกชั่วโมง พบว่า ผลึกแอปาไทต์จะเกาะหลังจากแช่มากกว่า 21 ครั้งขึ้นไปโดยได้ความหนามากกว่า 20 μm และยังพบอีกว่าการเกาะของผลึกแอปาไทต์จะเติบโตออกทางแกน c

MC Chang และคณะ[33] ไดทำการสังเคราะห์วัสดุประกอบร่วมของ gelatin (GEL) กับ Hydroxyapatite (HAp) โดยทำการตกตะกอนผลึก HApในสารละลายของ GEL ที่ pH 8 และอุณหภูมิ 38°c พบว่าในการวิเคราะห์ด้วย FT-IR พันธะเคมีระหว่างแคลเซียมไอออนของ HApกับคาร์บอกซิลไอออนของ GEL เหนี่ยวนำให้เกิดการ shift ของพีคจาก 1339 cm^{-1} และที่ความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เข้มข้นของ GEL มากจะมีหมู่ที่ว่องไวมากกว่า เช่น หมู่คาร์บอกซิล เมื่อหมู่ว่องไวมากก็เหนี่ยวนำแคลเซียมไอออนได้มาก การเกาะของ HAp ก็มากแต่อย่างไรก็ตามการที่ HAp มาเกาะมากก็ทำให้ความเข้มข้นของแคลเซียมลดลงจึงทำให้การเติบโตของผลึกเกิดได้น้อยตามไปด้วย

Rikako Kino และ คณะ [34]ได้ทำการเตรียมฟิล์มไฟโบรอินจากไหม แล้วแช่ในแคลเซียมคลอไรด์ ที่ความเข้มข้นต่างๆกัน แล้วทรีทด้วย MeOH แล้วแช่ในของไหลเทียมจากร่างกาย (1.5 SBF) พบว่าผลึก HAp ไม่เกาะบนฟิล์มที่มีความเข้มข้นของแคลเซียมคลอไรด์น้อยกว่า 3 % โดยน้ำหนัก แต่ที่ปริมาณแคลเซียมคลอไรด์มากกว่า 5 %โดยน้ำหนัก ผลึก HAp จะเกาะบนฟิล์มหลังจากแช่เป็นเวลา 6 ชั่วโมง

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
การวิจัยและการดำเนินงาน

1.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน

ตอนที่ 1. การเตรียมผงไหมไฟโบรอินจากรังไหมไทยนางน้อย

1. การล้างกาวเซริซินออกด้วยน้ำร้อน
2. การทำดีกัมหรือการล้างกาวเซริซินที่เหลือและไขมัน
3. การทำไดอะไลซิสในถุงเซลโลเฟนเพื่อกำจัด $CaCl_2.2H_2O$ ออก
4. ตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ของสารประกอบที่เตรียมได้ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปคโตสโคปี (FTIR) และเครื่องวิเคราะห์ทางความร้อน (TGA)

ตอนที่ 2. การเตรียมเนื้อเยื่อโครงสร้างโปรตีนไฟโบรอิน

1. การเตรียมเนื้อเยื่อโครงสร้างโปรตีนไฟโบรอินโดยใช้เกลือโซเดียมคลอไรด์
2. ตรวจวิเคราะห์เนื้อเยื่อโครงสร้างโปรตีนไฟโบรอินที่เตรียมได้ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปคโตสโคปี (FTIR) , เครื่องวิเคราะห์ทางความร้อน (TGA) , กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด(SEM) , ทดสอบแรงกดด้วยเครื่องทดสอบสมบัติเชิงกล (Universal testing machine) และทดสอบการดูดน้ำ

ตอนที่ 3. การเตรียมวัสดุประกอบร่วมของเนื้อเยื่อโครงสร้างโปรตีนไฟโบรอินกับไฮดรอกซีแอปาไทต์

1. การเตรียมสารสะลายไฮดรอกซีแอปาไทต์ที่ความเข้มข้นต่างๆ
2. การเตรียมวัสดุประกอบร่วมของเนื้อเยื่อโครงสร้างโปรตีนไฟโบรอินกับไฮดรอกซีแอปาไทต์ในสารละลายไฮดรอกซีแอปาไทต์ที่ความเข้มข้นต่างๆในระยะเวลาที่แตกต่างกัน
3. ตรวจวิเคราะห์วัสดุประกอบร่วมของเนื้อเยื่อโครงสร้างโปรตีนไฟโบรอินกับไฮดรอกซีแอปาไทต์ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปคโตสโคปี (FTIR) , เครื่องวิเคราะห์ทางความร้อน (TGA) , กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด(SEM) , ทดสอบแรงกดด้วยเครื่องทดสอบสมบัติเชิงกล (Universal testing machine) และทดสอบการดูดน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 วัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. รังไหมไทยนางน้อย
2. สบู่
3. น้ำกลั่น
4. โซเดียมคาร์บอเนต (Sodium carbonate (Na_2CO_3)) ของบริษัท APS Finechem
5. แคลเซียมคลอไรด์-2-ไฮเดรต (Calcium chloride 2-hydrate ($CaCl_2 \cdot 2H_2O$))
6. 1,1,1,3,3,3-เฮกซะฟลูออโร-2-โพรพานอล (1,1,1,3,3,3-Hexafluoro-2-propanol (HFIP)) ($C_3H_2F_6O$)ของบริษัท Fluka puriss >99.0% bp. 57-60 °C
7. โซเดียมคลอไรด์ (SodiumChloride (NaCl)) ของบริษัท CARLOERBA
8. เอทานอล (Ethanol (C_2H_5OH))
9. ไฮดรอกซีแอปาไทต์ (Hydroxyapatite ($Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$)) ของบริษัท Fluka
10. กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric (HCl))
11. แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (Ammonium Hydroxide (NH_4OH))
12. กรดอะซิติก (Acetic acid (CH_3COOH))

3.3 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

<u>อุปกรณ์</u>

1. บีกเกอร์
2. กระบวกตวง
3. แท่งแก้วคน
4. ปากคีบ
5. จานเพาะเชื้อ
6. ขวดและถาดพอลิพอพิลีน
7. แผ่นอะลูมิเนียมฟลอยด์
8. กระดาษกรองเบอร์ 1
9. กระบอกน้ำกลั่น
10. ช้อนตักสาร
11. กรรไกร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

12. ถาดอะลูมิเนียม
13. พาราฟิล์ม
14. กระดาษวัด pH
15. ตะแกรงวัดการบวมตัว
16. Regenerated cellulose SnakeSkinTH Pleated Dialysis Tubing ของบริษัท Pierce MWCO 3,500
17. ขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร
18. แท่งแม่เหล็ก (Magnetic bar)

<u>เครื่องมือ</u>

1. เครื่องชั่งน้ำหนัก 4 ตำแหน่ง ของบริษัท Scientific promotion ยี่ห้อ Sartorius
2. เครื่องทำความเย็น ที่ -81 องศาเซลเซียส ของบริษัท GES รุ่น PLC-1055
3. ตู้อบ
4. เครื่องให้ความร้อนชนิดแผ่น (Hot plate)
5. ตู้เย็นธรรมดา
6. หม้อนึ่งอัดไอ (Auto clave) รุ่น Hirayama Model HA-300MII
7. เครื่อง Freeze dryer
8. เครื่องทดสอบสมบัติเชิงกล LLOYD (Universal testing machine) รุ่น LR 5K; LLOYD
9. เครื่องเทอร์มัลกราวิมิเตอร์ (TGA): รุ่น Pyris 1 TGA Perkin Elmer
10. เครื่องฟูเรียนทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตสโกปี (Fourier Transform spectroscopy, FTIR): รุ่นFTIR Spectrum GX Perkin Elmer
11. กล้องจุลทรรศน์อิเลกตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM): LOE รุ่น 1455UP
12. เครื่องวัดความเป็นกรดด่าง (pH-meter)
13. เครื่องปั่นกวนแม่เหล็ก (Magnetic stirrer)
14. เครื่องวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD) บริษัท BRUKER รุ่น D8 Advance

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 วิธีการทดลอง

<u>ตอนที่ 1.</u> การเตรียมผงไหมไทยไฟโบรอินจากรังไหมไทยนางน้อย

1.1 การล้างกาวเซริซินออกด้วยน้ำ

นำรังไหมจำนวน 30 กรัม มาทำการตัดให้เป็นชิ้น รังไหมที่นำมาตัดต้องเลือกส่วนที่สกปรกออกก่อนล้างด้วยน้ำประปาประมาณ 3 – 4 ครั้ง

นำไหมที่ล้างแล้วใส่ขวดพลาสติก PP พร้อมใส่น้ำกลั่นปริมาตร 300 มิลลิลิตร โดยไม่ต้องปิดฝาให้สนิท แล้วนำเข้าเครื่อง Autoclave ที่อุหณภูมิ 121 °C เป็นเวลา 60 นาที

เมื่อนำไหมออกมาแช่ส่วนที่เป็นน้ำ (โปรตีนเซริซิน) ออกแช่เก็บไว้ในตู้เย็น ส่วนเส้นไหมนำไปผึ่งให้แห้ง

1.2 การทำดีกัม

- นำไหมที่ผ่านการล้างกาวออกแล้ว นำมาทำการฉีกเป็นฝอย
- ต้มน้ำกลั่นปริมาตรปริมาณ 1000 มิลลิลิตร ที่มีสบู่จำนวน 2.25 กรัม และโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) จำนวน 1.59 กรัม นำไหมที่ฉีกเป็นฝอยใส่ลงไปจำนวน 20 กรัม พร้อมทั้งคนและให้ความร้อนประมาณ 1 ชั่วโมง

เมื่อครบกำหนดเวลาเทน้ำสบู่ทิ้งแล้วล้างไหมด้วยน้ำกลั่นที่อุ่นและเย็นสลับกันประมาณ 3 -4 ครั้ง แล้วทำการวัด pH น้ำที่ล้างจนเป็นกลางแล้วนำไหมไปผึ่งที่อุณหภูมิห้องจนแห้งสนิท

1.3 การทำไดอะไลซิสในถุงเซลโลเฟน

- นำไหมจากข้อ 1.2 มาทำการตัดเป็นชิ้นชั่งประมาณ 10 กรัม มาละลายด้วยสารละลายผสมระหว่างแคลเซียมคลอไรด์ น้ำ และเอทิลแอลกอฮอล์ (73 ml : 47 ml : 54 ml)[4] นำมาปริมาตร 100 มิลลิลิตรให้ความร้อนต่ำกว่า 100 °c จนได้สารละลายที่ข้นเหนียวไม่เหลือเส้นไหมแล้ว
- จากนั้นเทสารไหมไฟโบรอินที่ละลายแล้วลงใน Cellulose membrane tube ถุงละ 2-3 ml นำไปทำไดอะไซซิสด้วยน้ำสะอาด 3 วัน โดยเปลี่ยนน้ำทุกวันโดยเฉพาะครึ่งวันแรกเปลี่ยนน้ำทุกชั่วโมง
- พอครบกำหนดเทสารละลายจากถุงเซลโลเฟนทุกถุงรวมกันจดปริมาตรรวม นำทั้งหมดไปกรองเก็บ ส่วนน้ำใส่จานเพาะเชื้อแล้วนำไปแช่แข็ง จากนั้นนำไปเข้าเครื่อง Freeze – dryer จะได้ผงไหมไฟโบรอินสีเหลืองอ่อน

1.4 ตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ของผงไหมไฟโบรอินที่เตรียมได้ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปคโตสโคปี (FTIR) และด้วยเครื่องวิเคราะห์ทางความร้อน (TGA)

<u>ตอนที่ 2.</u> การเตรียมเนื้อเยื่อโครงสร้างโปรตีนไฟโบรอิน (scaffold)

1. ชั่งผงไหมไฟโบรอินประมาณ 0.34 กรัม นำมาละลายใน 1,1,1,3,3,3-เฮกซะฟลูออโร-2-โพรพานอล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริมาตร 2 มิลลิลิตร ปิดฝาให้แน่นรอจนไหมละลายเป็นเนื้อเดียวกันจนหมด

2. จากนั้นเติมเกลือซึ่งจะใช้เป็นตัวที่ทำให้เกิดรูพรุนโดยในการทดลองนี้จะใช้เกลือโซเดียมคลอไรด์ โดยใช้ปริมาณเกลือ 10 เท่าของน้ำหนักผงไหมที่ชั่งมาข้างต้น เติมลงไปกระจายให้ทั่วปิดฝาภาชนะให้แน่นรอจนผงไหมละลายหมดจากนั้นเปิดฝาแล้วรอให้แอลกอฮอล์ระเหยไป
3. นำก้อนไฟโบรอินที่ได้แช่น้ำเพื่อละลายเกลือจนหมดแล้วผึ่งให้แห้งจะได้เนื้อเยื่อโครงสร้างโปรตีนไฟโบรอินซึ่งมีลักษณะคล้ายฟองน้ำ มีรูปร่างทรงกลม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.0 เซนติเมตรและหนา 0.4 เซนติเมตร
4. ตรวจวิเคราะห์เนื้อเยื่อโครงสร้างโปรตีนไฟโบรอินที่เตรียมได้ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปคโตสโคปี (FTIR) , เครื่องวิเคราะห์ทางความร้อน (TGA) และด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)
5. ทดสอบแรงกดเนื้อเยื่อโครงสร้างโปรตีนไฟโบรอินด้วยเครื่องทดสอบสมบัติเชิงกล (Universal testing machine) และทดสอบการดูดน้ำ

<u>ตอนที่ 3.</u> การเตรียมวัสดุประกอบร่วมของเนื้อเยื่อโครงสร้างโปรตีนไฟโบรอินกับไฮดรอกซีแอปาไทต์

1. เตรียมสารละลายไฮดรอกซีแอปาไทต์ ที่มีความเข้มข้น 0.5 % w/v โดยชั่งไฮดรอกซีแอปาไทต์ 0.5 กรัม ละลายน้ำ 100 กรัม แล้วทำให้เป็นสารละลายด้วยกรดอะซิติกเข้มข้นพร้อมทั้งปั่นกวน ทำวิธีเดียวกันนี้อีก 2 ความเข้มข้น คือ 1.0 และ 3.0 % w/v
2. นำเนื้อเยื่อโครงสร้างโปรตีนไฟโบรอินที่ได้จากตอนที่ 2. จำนวน 4 ชิ้นโดยตัดในแต่ละชิ้นมีขนาด 1 ใน 4 ของชิ้นงานที่เตรียมได้จากตอนที่ 2 มาแช่ในสารละลายที่เตรียมได้จากข้อ 1. โดยทำการแช่ในลักษณะแขวนลอยในสารละลาย จากนั้นทำการปรับ pH ของสารละลายให้มี pH เท่ากับ 10 ด้วยสารละลายบัฟเฟอร์ pH 10 พร้อมทั้งปั่นกวน
3. หลังจากสารละลายมี pH เท่ากับ 10 จะเกิดการตกตะกอนกลับมาของไฮดรอกซีแอปาไทต์ หยุดการปั่นกวน ปิดภาชนะด้วยอลูมิเนียมฟลอยด์ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง
4. ทำการแช่ตัวอย่างเป็นเวลา 4 , 8 , 12 และ 16 วันตามลำดับ ทำเช่นเดียวกันนี้ทั้ง 3 ความเข้มข้น
5. ทำการวิเคราะห์โครงสร้างวัสดุประกอบร่วมของเนื้อเยื่อโครงสร้างโปรตีนไฟโบรอินกับไฮดรอกซีแอปาไทต์ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปคโตสโคปี (FTIR) , เครื่องวิเคราะห์ทางความร้อน (TGA) และด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)
6. ทดสอบแรงกดด้วยเครื่องทดสอบสมบัติเชิงกล (Universal testing machine) และทดสอบการดูดน้ำ

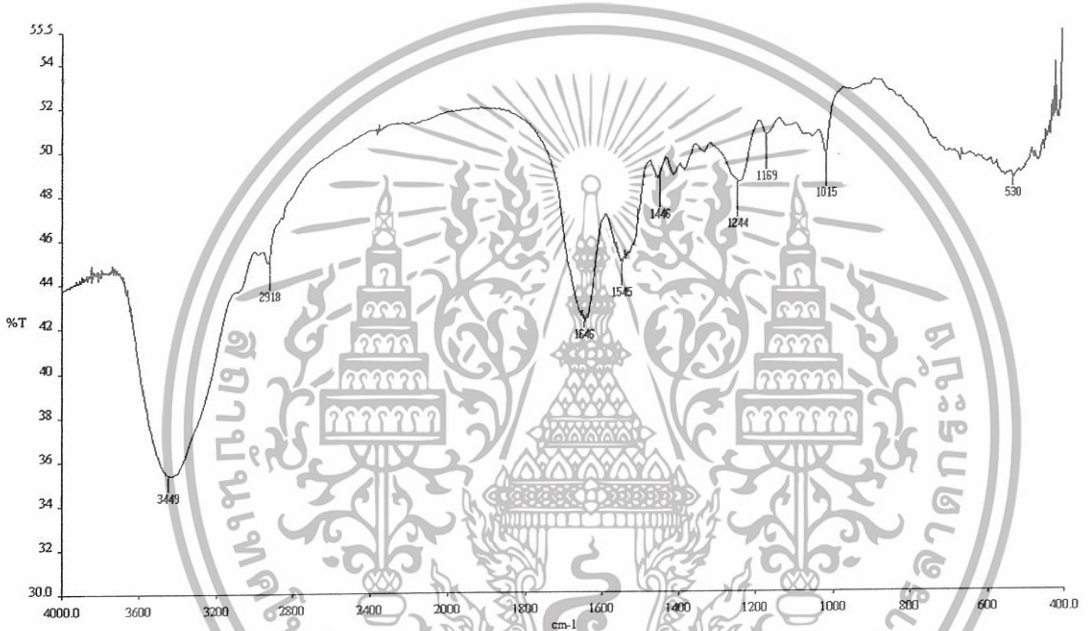
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและการอภิปรายผล

4.1 การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ของผงไหมไฟโบรอิน

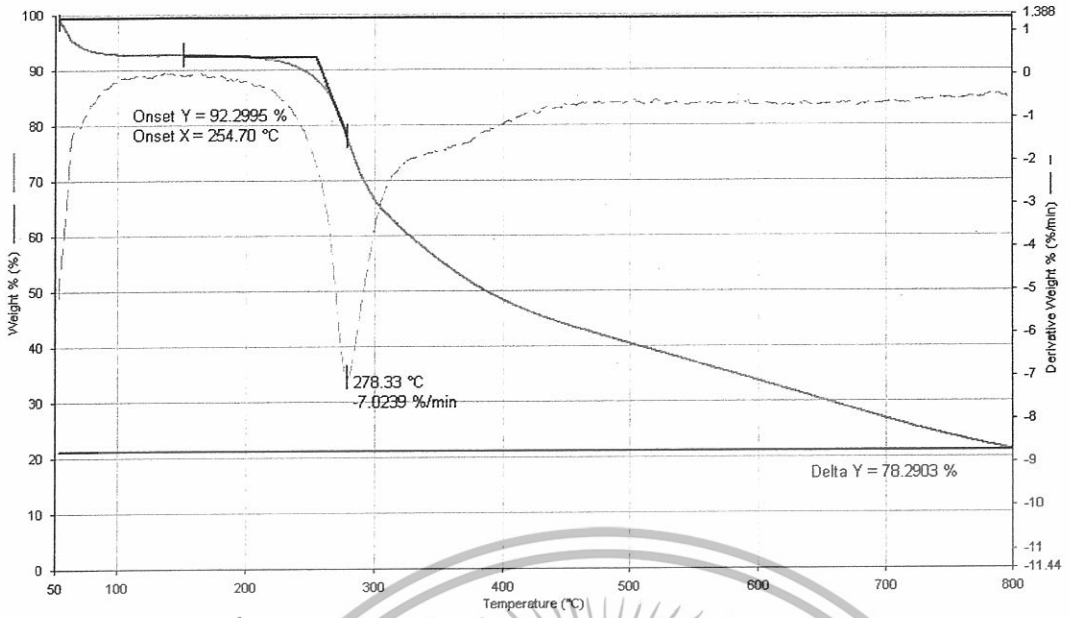
จากการเตรียมผงไหมไฟโบรอินจากรังไหมไทยนางน้อยได้ผลิตภัณฑ์เป็นผงละเอียด สีขาวเหลือง นำผลิตภัณฑ์ที่ได้มาตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FTIR และ TGA ได้ผลแสดงดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 อินฟราเรดสเปคตรัมของผงไหมไฟโบรอิน

จากรูปพบพีคที่เลขคลื่น 3449 cm^{-1} ซึ่งเป็นพีคของ N-H Stretching ของ amide , เลขคลื่น 2918 cm^{-1} เป็นพีคของ C-H Stretching และเลขคลื่น 1646 , 1545 และ 1446 cm^{-1} ซึ่งเป็นพีคของ C=O ของ 1° 2° และ 3° amide ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าผงไหมไฟโบรอินเป็นสารประเภทโปรตีน โดยมีกรดอะมิโนเป็นองค์ประกอบหลัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

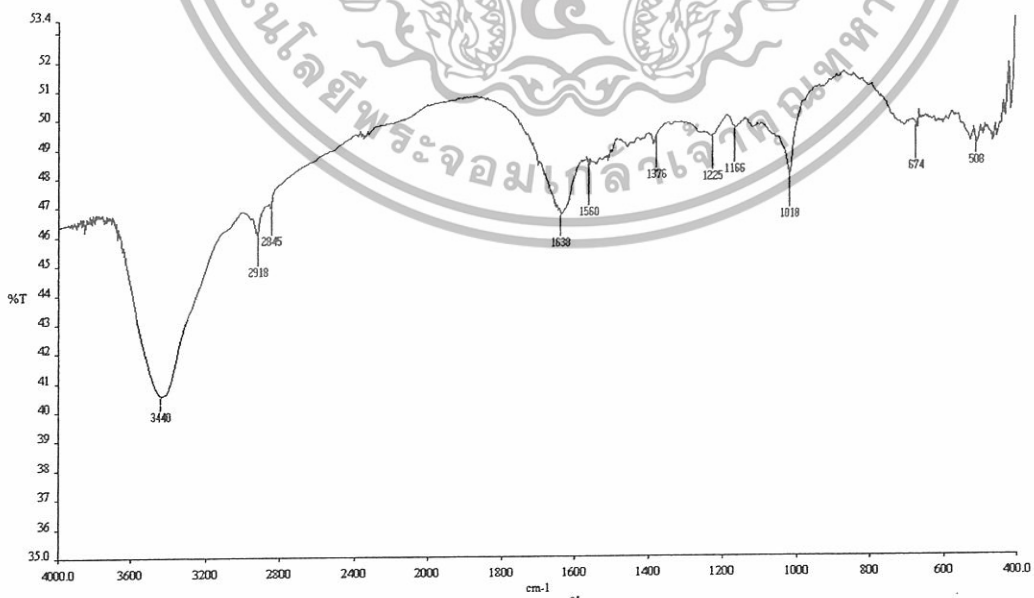


รูปที่ 4.2 TGA เทอร์โมแกรมของผงไหมไฟโบรอิน

จากรูปพบพีคการสลายตัวเพียงหนึ่งขั้นตอนซึ่งสลายตัวที่อุณหภูมิ 278.33° C

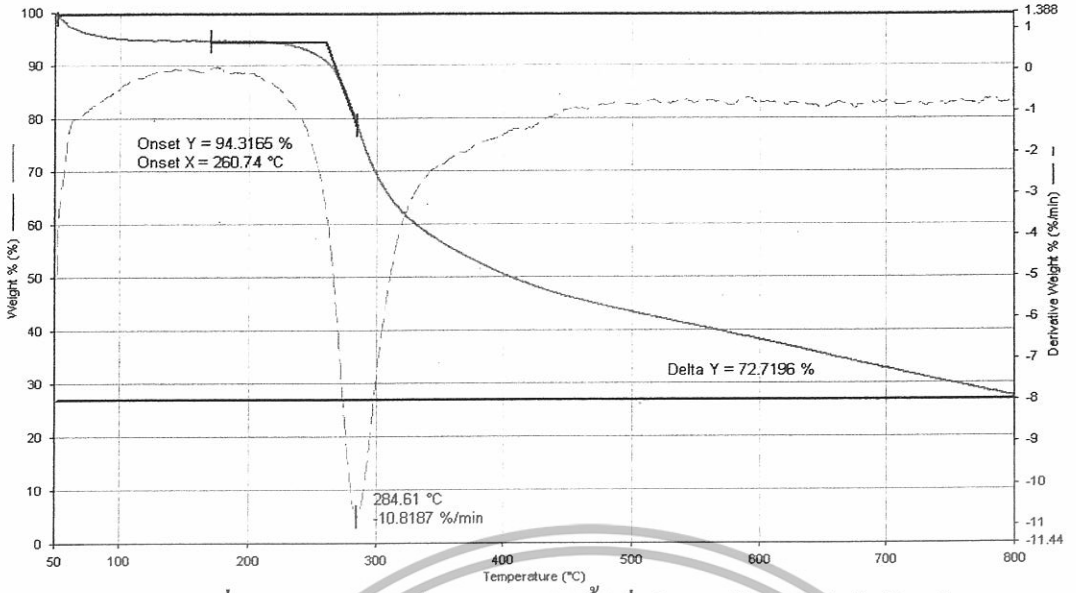
4.2 การเตรียมเนื้อเยื่อโครงสร้างโปรตีนไฟโบรอิน

การเตรียมเนื้อเยื่อโครงสร้างโปรตีนไฟโบรอินในงานวิจัยนี้ ใช้วิธี salt-leaching โดยใช้เกลือโซเดียมคลอไรด์ในการทำให้เกิดรูพรุน ได้ผลิตภัณฑ์เป็นของแข็งสีขาวเหลือง เมื่อนำเนื้อเยื่อโครงสร้างโปรตีนไฟโบรอินที่เตรียมได้มาตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FTIR รูปที่ 4.3 และ TGA รูปที่ 4.4



รูปที่ 4.3 อินฟราเรดสเปคตรัมของเนื้อเยื่อโครงสร้างโปรตีนไฟโบรอิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



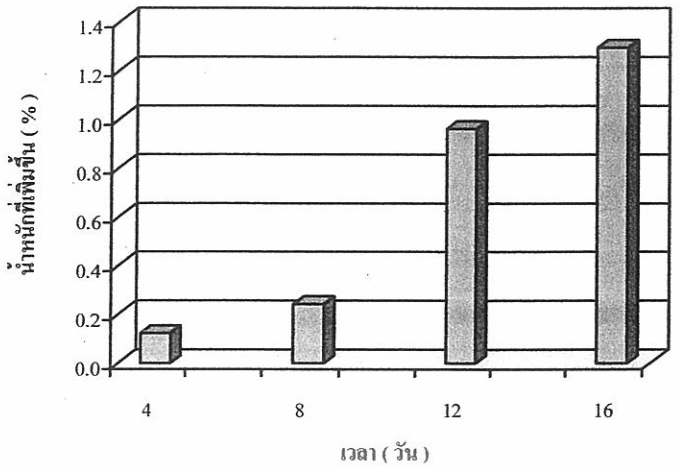
รูปที่ 4.4 TGA เทอร์โมแกรมของเนื้อเยื่อโครงสร้างโปรตีนไฟโบรอิน

พบว่าตำแหน่งของพีคที่แสดงหมู่ฟังก์ชันอยู่ในช่วงเดียวกันกับผงไหมไฟโบรอินซึ่งแสดงให้เห็นว่าขั้นตอนการเตรียมจากผงไหมเป็นเนื้อเยื่อโครงสร้างไม่ส่งผลกระทบต่อโครงสร้างไหมไฟโบรอินซึ่งยังคงเป็นสารประกอบประเภทโปรตีนมีกรดอะมิโนเป็นองค์ประกอบหลักเช่นเดียวกัน

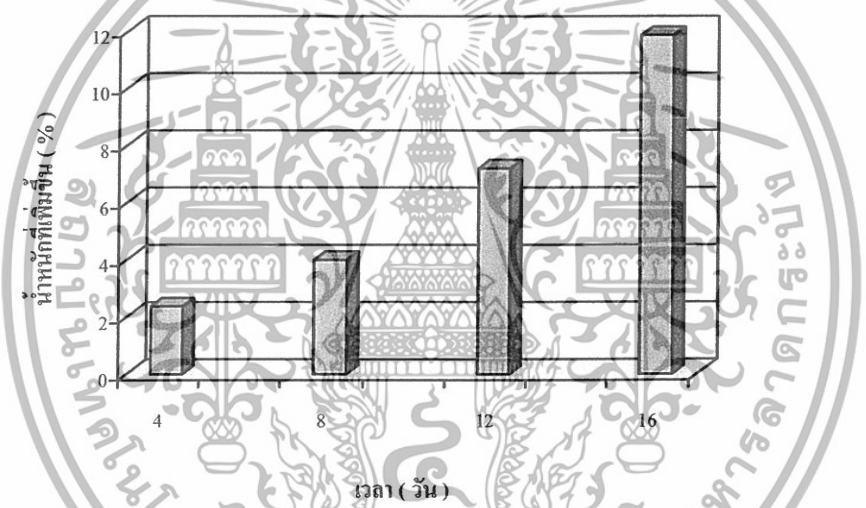
4.3 การเตรียมวัสดุประกอบร่วมของเนื้อเยื่อโครงสร้างโปรตีนไฟโบรอินกับไฮดรอกซีแอปาไทต์

ในการเตรียมวัสดุประกอบร่วมของเนื้อเยื่อโครงสร้างโปรตีนไฟโบรอินโดยแช่ในสารละลายไฮดรอกซีแอปาไทต์ที่ความเข้มข้น 0.5 , 1.0 และ 3.0% w/v ซึ่งจากการทดลองไม่สามารถเตรียมสารละลายไฮดรอกซีแอปาไทต์ที่ความเข้มข้น 3.0 % ได้เนื่องจากไม่สามารถเตรียมให้อยู่ในรูปสารละลายได้ จึงทำการทดลองเพียง 2 ความเข้มข้นคือ 0.5 และ 1.0% w/v และแช่เป็นระยะเวลา 4,8,12 และ 16วัน น้ำหนักของชิ้นงานที่เพิ่มขึ้นแสดงได้ดังรูปที่ 4.5 และ 4.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงน้ำหนักของเนื้อเยื่อโครงสร้างโปรตีนไฟโบรอินหลังแช่สารละลายไฮดรอกซีแอปาไทต์ที่ความเข้มข้น 0.5% w/v



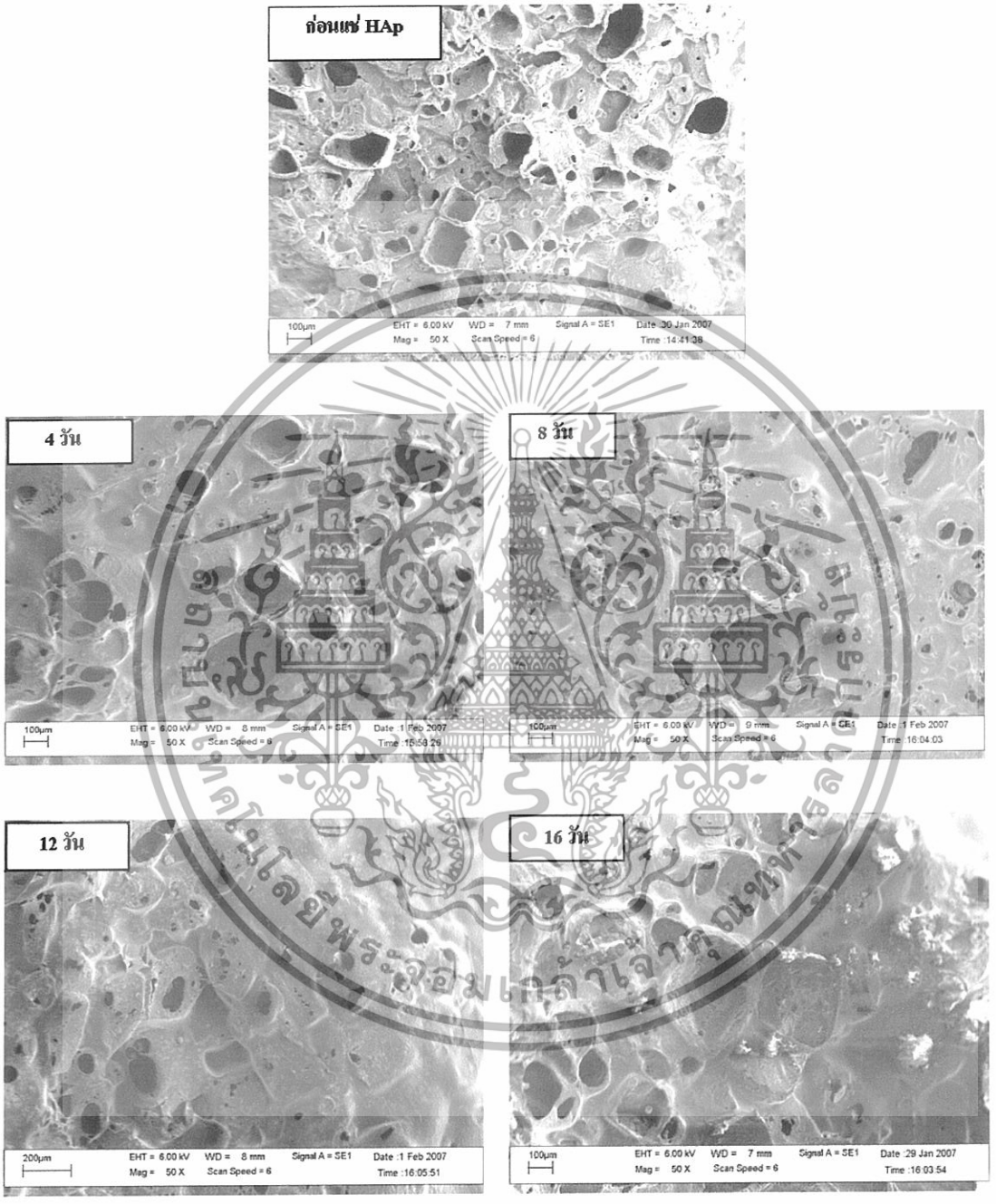
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงน้ำหนักของเนื้อเยื่อโครงสร้างโปรตีนไฟโบรอินหลังแช่สารละลายไฮดรอกซีแอปาไทต์ที่ความเข้มข้น 1.0% w/v

* ตัวอย่างการคำนวณแสดงในภาคผนวก ก

จากกราฟแสดงให้เห็นว่าหลังการแช่ในสารละลายไฮดรอกซีแอปาไทต์ พบว่าน้ำหนักของเนื้อเยื่อโครงสร้างโปรตีนไฟโบรอินเพิ่มขึ้นเนื่องจากมีการเกาะติดของสารประกอบเกิดขึ้นบนเนื้อเยื่อโครงสร้างและเมื่อแช่ที่ความเข้มข้นมากขึ้นและเวลานานขึ้นพบว่าน้ำหนักก็เพิ่มมากขึ้นตามลำดับ ซึ่งแสดงได้ว่ามีการเกาะติดของสารประกอบมากขึ้น

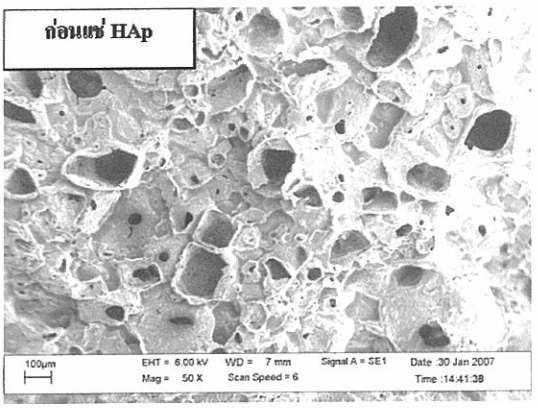
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

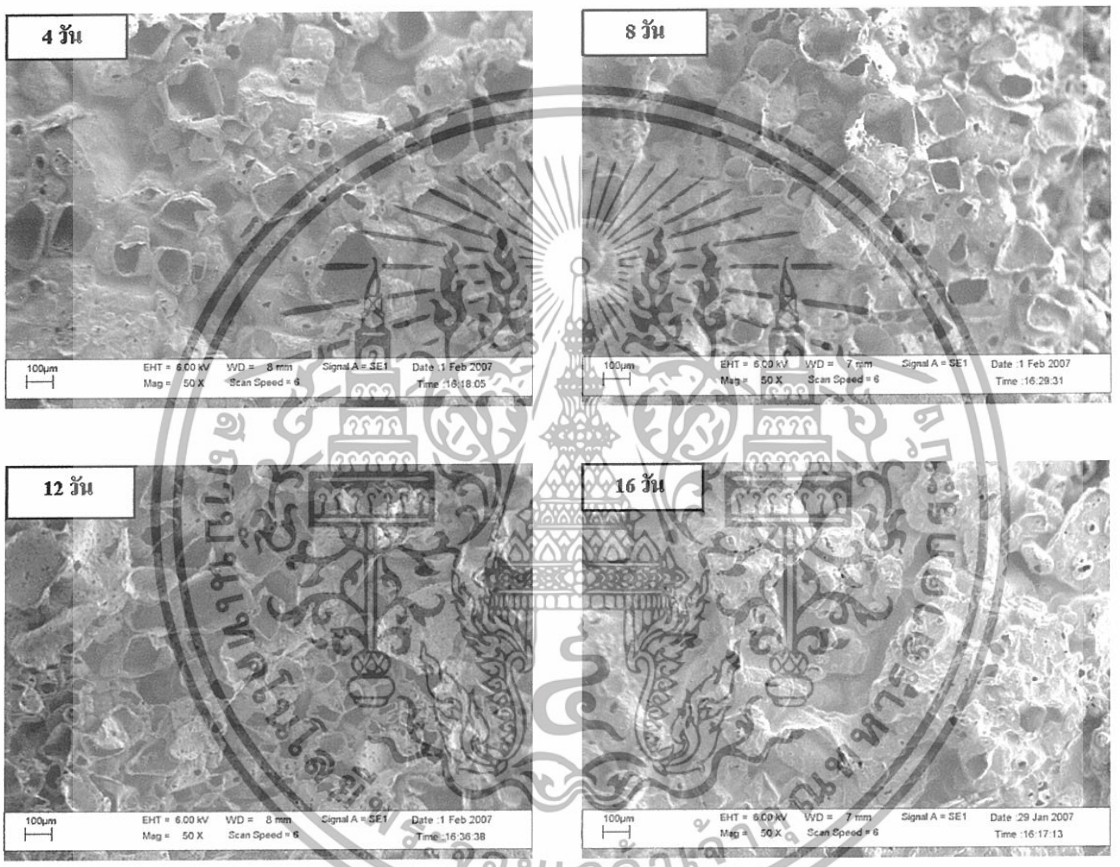
เมื่อนำวัสดุประกอบที่แช่ในสารละลายไฮดรอกซีแอปาไทต์เป็นเวลา 4 ,8 ,12 และ16 วันมาตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM แสดงได้ดังรูปที่ 4.7 และ 4.8 พบว่าที่พื้นผิวด้านหน้าของเนื้อเยื่อโครงสร้างโปรตีนไฟโบรอินมีการเปลี่ยนแปลงดังรูป



รูปที่ 4.7 ลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคที่พื้นผิวของวัสดุประกอบร่วมระหว่างเนื้อเยื่อโครงสร้างโปรตีนไฟโบรอินกับไฮดรอกซีแอปาไทต์ความเข้มข้น 0.5% w/v ที่กำลังขยาย 50 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



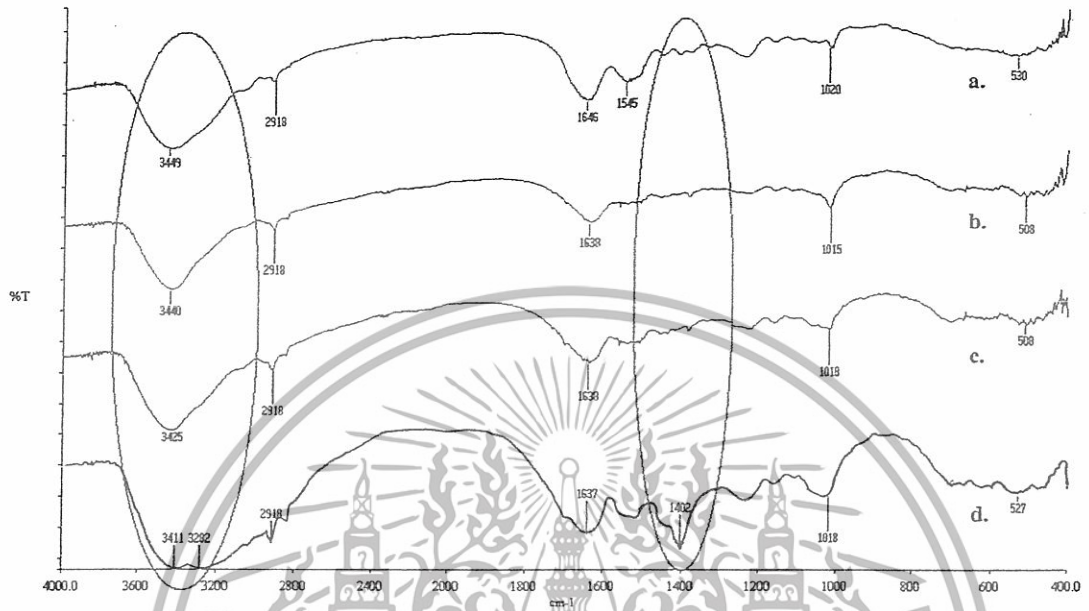


รูปที่ 4.8 ลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคที่พื้นผิวของวัสดุประกอบร่วมระหว่างเนื้อเยื่อโครงสร้างโปรตีนไฟโบรอินกับไฮดรอกซีแอปาไทต์ความเข้มข้น 1.0% w/v ที่กำลังขยาย 50 เท่า

จากรูปพบว่าลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคที่พื้นผิวของวัสดุประกอบหลังการแช่สารละลาย HAp มีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นเมื่อเทียบกับวัสดุประกอบก่อนการแช่สารละลาย HAp โดยจะสังเกตเห็นว่ามีการพอกของสารประกอบเกิดขึ้นที่ผิวเนื้อเยื่อโครงสร้าง และที่ความเข้มข้นของไฮดรอกซีแอปาไทต์ 1.0% w/v พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงที่พื้นผิวมากกว่าที่ความเข้มข้น 0.5% w/v เมื่อเวลาในการแช่เท่ากัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

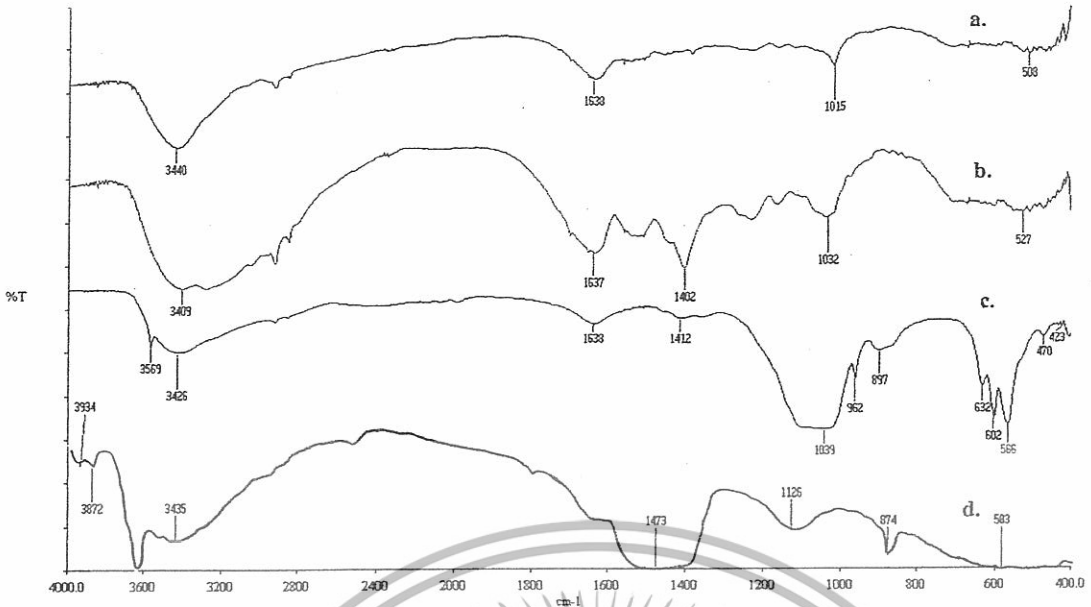
หลังจากนั้นนำวัสดุประกอบที่สังเคราะห์ได้ 16 วันทั้ง 2 ความเข้มข้นมาตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FTIR และเปรียบเทียบกับผงไหมไฟโบรอินและเนื้อเยื่อโครงสร้างโปรตีนไฟโบรอินก่อนแช่สารละลายไฮดรอกซีแอปาไทต์พบว่าพีคมีการเปลี่ยนแปลง ดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 อินฟาเรดสเปกตรัมโดย **a.** ผงไหมไฟโบรอิน **b.** เนื้อเยื่อโครงสร้างโปรตีนไฟโบรอินก่อนแช่สารละลาย HAp **c.** เนื้อเยื่อโครงสร้างโปรตีนไฟโบรอินหลังแช่สารละลาย HAp ความเข้มข้น 0.5% w/v เป็นเวลา 16 วัน และ **d.** เนื้อเยื่อโครงสร้างหลังแช่สารละลาย HAp ความเข้มข้น 1.0% w/v เป็นเวลา 16 วัน

พบว่ามีพีคเพิ่มขึ้นที่ ν 3282 cm^{-1} (O-H Stretching) และ 1402 cm^{-1} จากตำแหน่งที่เกิดพีคนั้นระบุได้ว่าสารประกอบที่มาเกาะเนื้อเยื่อโครงสร้างโปรตีนไฟโบรอินน่าจะเป็นสารประเภทแคลเซียมไฮดรอกซีแอปาไทต์ดังรูปที่ 4.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

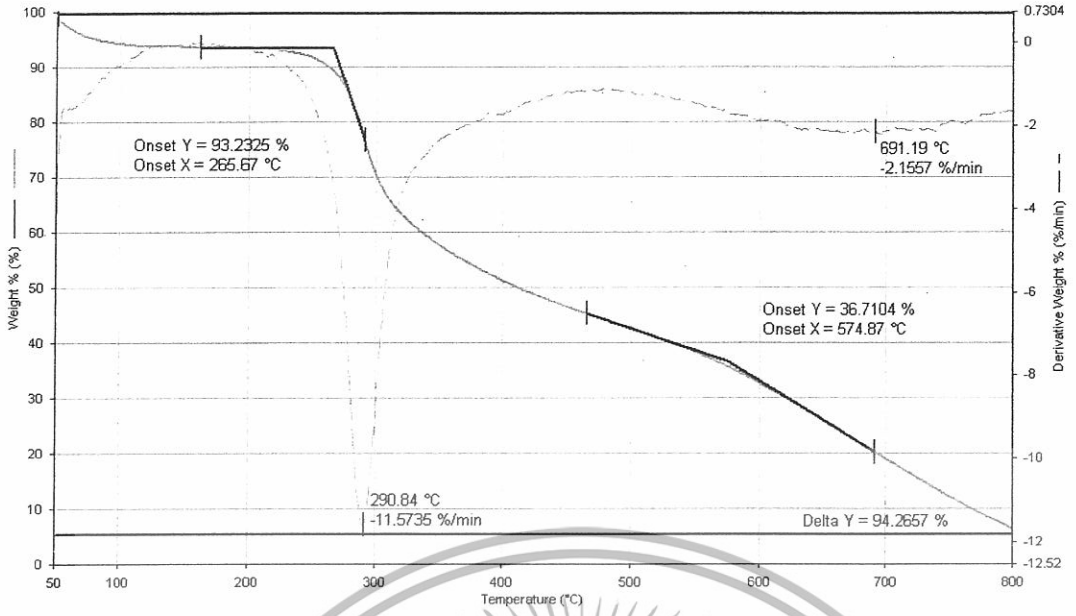


รูปที่ 4.10 อินฟาเรดสเปกตรัมโดย **a.** เนื้อเยื่อโครงสร้างก่อนแช่สารละลาย HAp **b.** เนื้อเยื่อโครงสร้างโปรตีนไฟโบรอินหลังแช่สารละลาย HAp ความเข้มข้น 1.0% w/v เป็นเวลา 16 วัน **c.** ผงไฮดรอกซีแอปาไทต์ **d.** ผงแคลเซียมไฮดรอกไซด์

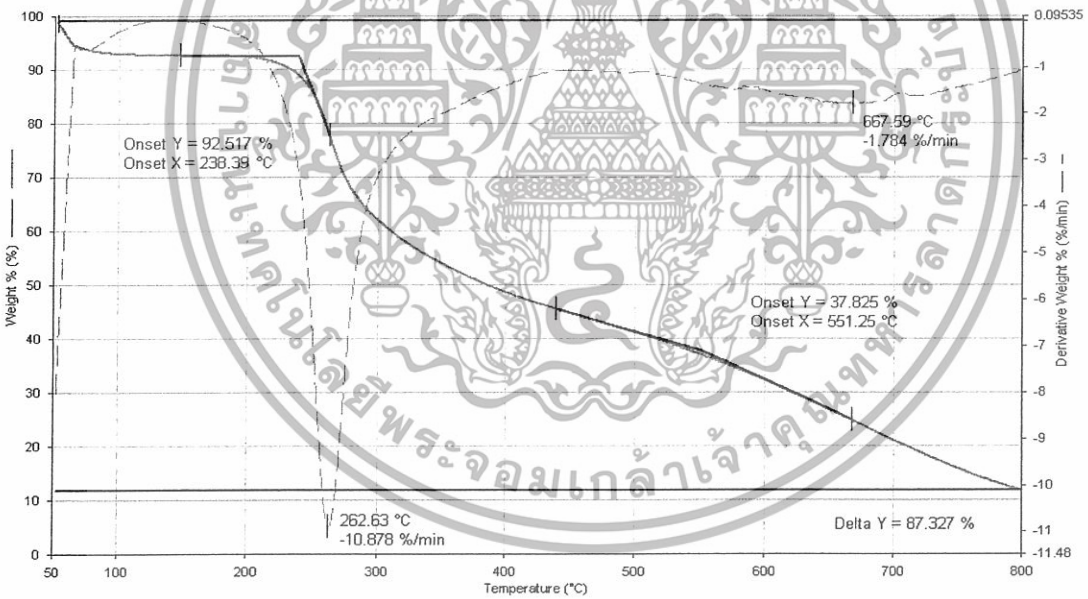
จากรูปพบว่าพีคที่บ่งบอกถึงหมู่ฟอสเฟตนั้นไม่ชัดเจนอาจเนื่องจากรูพรุนของเนื้อเยื่อโครงสร้างนั้นเล็กเกินไปและฟอสเฟตแอนไอออนนั้นมีขนาดใหญ่ทำให้ฟอสเฟสแอนไอออนไม่เข้าไปอยู่ในรูพรุนและแรงกระทำระหว่างแคลเซียมและฟอสเฟตไม่มากพอ ดังนั้นฟอสเฟตแอนไอออนอาจหลุดออกไปตอนล้างด้วยน้ำกลั่น

เมื่อนำวัสดุประกอบที่สังเคราะห์ได้มาตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิค TGA พบว่ามีการสลายตัวของสารเพิ่มขึ้นเป็นสองขั้นตอนเมื่อเปรียบเทียบกับเนื้อเยื่อโครงสร้างโปรตีนไฟโบรอินก่อนแช่สารละลาย HAp โดยมีอุณหภูมิการสลายตัวที่ 691.19 ^{0}C ของความเข้มข้น 0.5% w/v และอุณหภูมิการสลายตัวที่ 667.59 ^{0}C ของความเข้มข้น 1.0% w/v ดังรูปที่ 4.11 และ 4.12 ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิการสลายตัวของหมู่ไฮดรอกซิล(dehydroxylation) ซึ่งเป็นลักษณะการสลายตัวของสารประกอบไฮดรอกซีแอปาไทต์ [รูปในภาคผนวก ง-1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



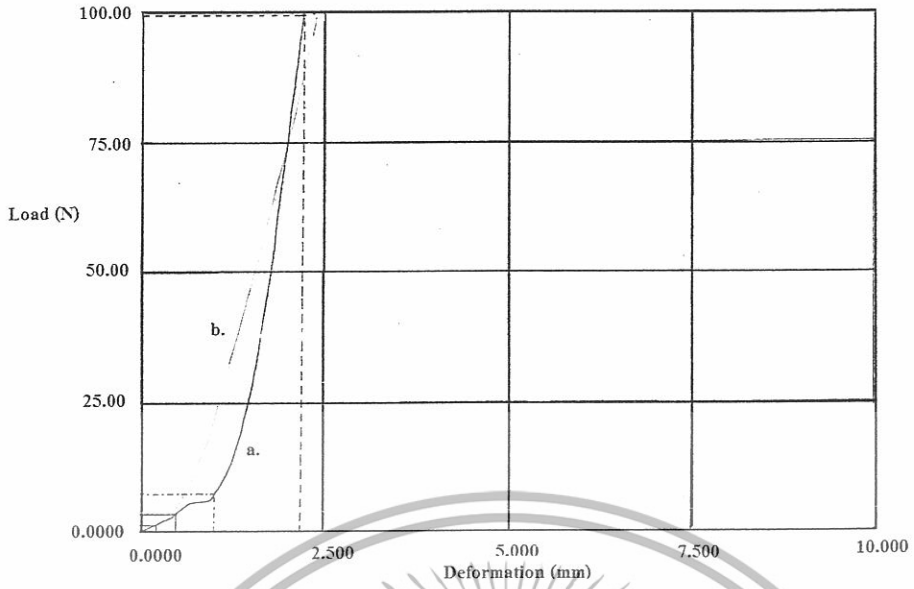
รูปที่ 4.11 TGA เทอร์โมแกรมของเนื้อเยื่อโครงสร้างโปรตีนไฟโบรอินหลังแช่สารละลายไฮดรอกซีแอปาไทต์ความเข้มข้น 0.5 % w/v เป็นเวลา 16 วัน



รูปที่ 4.12 TGA เทอร์โมแกรมของเนื้อเยื่อโครงสร้างโปรตีนไฟโบรอินหลังแช่สารละลายไฮดรอกซีแอปาไทต์ความเข้มข้น 1.0 % w/v เป็นเวลา 16 วัน

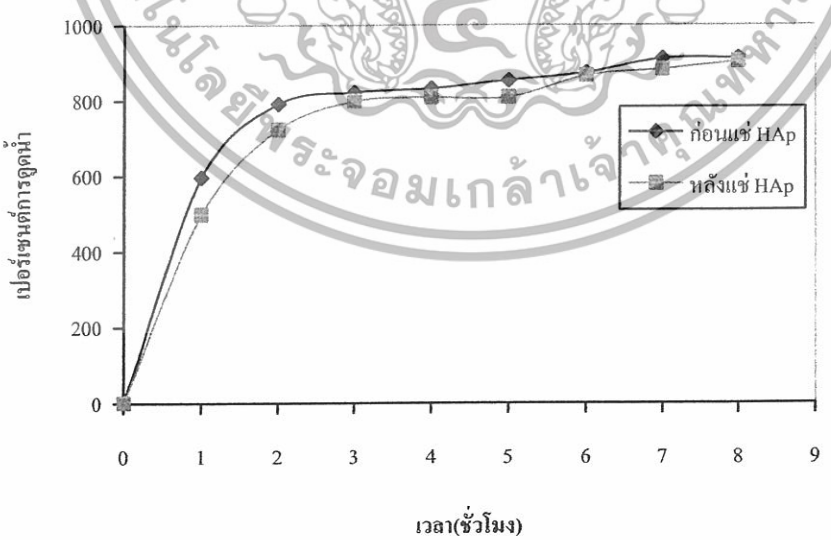
เมื่อนำวัสดุประกอบเนื้อเยื่อโครงสร้างโปรตีนไฟโบรอินก่อนและหลังแช่สารละลายไฮดรอกซีแอปาไทต์ความเข้มข้น 1% w/v เป็นเวลา 16 วันมาทดสอบสมบัติเชิงกลโดยวัดความสามารถในการรับแรงกดอัดได้ผลการทดลองแสดงได้ดังรูป 4.13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสามารถในการรับแรงกดของเนื้อเยื่อโครงสร้างโปรตีนไฟโบรอินโดย **a.** ก่อนแช่สารละลาย HAp **b.** หลังแช่สารละลาย HAp ที่ความเข้มข้น 1.0 % w/v เป็นเวลา 16 วัน

จากกราฟพบว่าวัสดุประกอบหลังการแช่มีความชันของเส้นกราฟมากกว่าซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นเนื่องจากสารประกอบที่มาเคลือบเนื้อเยื่อโครงสร้างคือไฮดรอกซีแอปาไทต์ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของกระดูก ดังนั้นจึงทำให้เนื้อเยื่อโครงสร้างมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น และเมื่อนำมาทดสอบสมบัติทางกายภาพโดยวัดความสามารถในการดูดน้ำ แสดงได้ดังรูปที่ 4.14

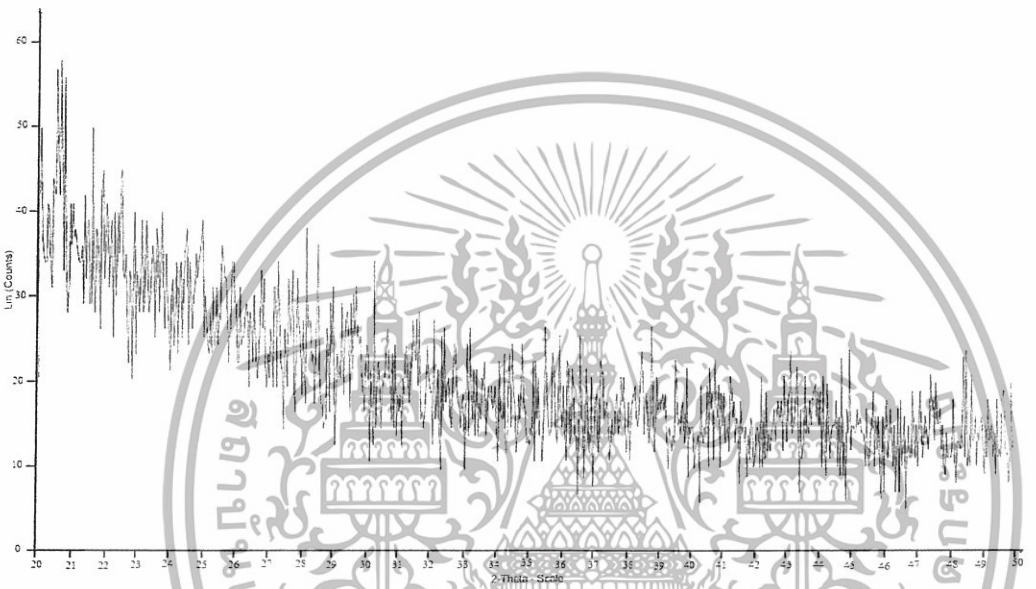


รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสามารถในการดูดน้ำของวัสดุประกอบก่อนและหลังแช่สารละลาย HAp ที่ความเข้มข้น 1.0%w/v เป็นเวลา 16 วัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

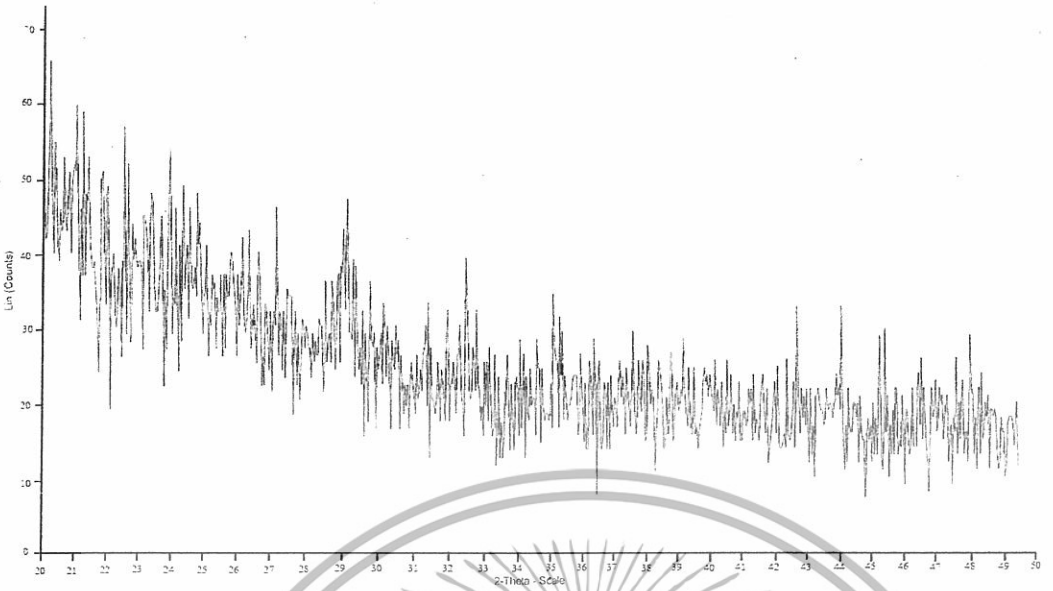
จากกราฟพบว่าวัสดุประกอบหลังแช่สารละลาย HAp มีเปอร์เซนต์การดูดน้ำลดลงแสดงว่ามีการเกาะของสารประกอบเกิดขึ้นบนเนื้อเยื่อโครงสร้างแต่ลดลงไม่มากอาจเนื่องมาจากสารประกอบ ที่มาเกาะมีในปริมาณน้อย

เมื่อนำวัสดุประกอบที่สังเคราะห์ได้จากการทดลองมาตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD พบว่าลักษณะพีคได้ไม่ชัดเจนอาจเนื่องมาจากมีสารประกอบไฮดรอกซีแอปาไทต์ที่มาเกาะนั้นมีปริมาณน้อยมากจึงไม่สามารถตรวจวัดได้ ดังรูป 4.15-4.17

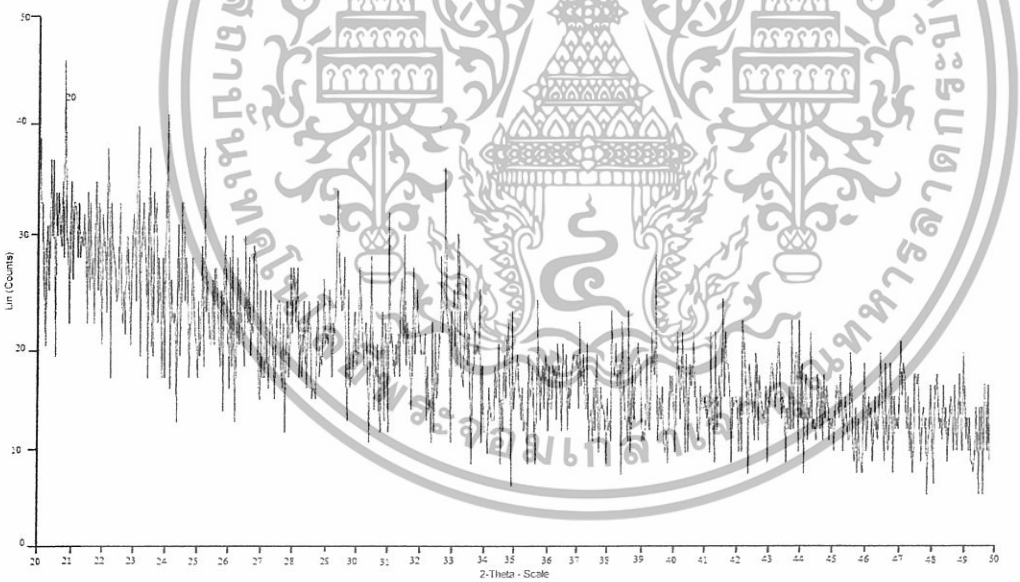


รูปที่ 4.15 แพทเทิร์นการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของเนื้อเยื่อโครงสร้างโปรตีนไฟโบรอินก่อนแช่สารละลายไฮดรอกซีแอปาไทต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 แพทเทิร์นการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของเนื้อเยื่อโครงสร้างโปรตีนไฟโบรอินหลังแช่สารละลายไฮดรอกซีแอปาไทต์ความเข้มข้น 0.5 % w/v เป็นเวลา 16 วัน



รูปที่ 4.17 แพทเทิร์นการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของเนื้อเยื่อโครงสร้างโปรตีนไฟโบรอินหลังแช่สารละลายไฮดรอกซีแอปาไทต์ความเข้มข้น 1.0 % w/v เป็นเวลา 16 วัน

ถ้าเป็นสารประกอบไฮดรอกซีแอปาไทต์ควรมีลักษณะแพทเทิร์นการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ [รูปในภาคผนวก ฉ-1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 การสังเคราะห์เนื้อเยื่อโครงสร้างจากโปรตีนไหมไฟโบรอิน

เนื้อเยื่อโครงสร้างโปรตีนไฟโบรอินที่สังเคราะห์ด้วยวิธี salt-leaching โดยใช้เกลือโซเดียมคลอไรด์เป็นสารทำให้เกิดรูพรุน พบว่า ปริมาณเกลือที่ใช้น้อยเกินไปและไม่มีการคัดขนาด จึงทำให้เนื้อเยื่อโครงสร้างที่สังเคราะห์ได้มีรูพรุนน้อย เป็นรูปิดและขนาดรูไม่สม่ำเสมอ

5.2 การเตรียมสารละลายไฮดรอกซีแอปาไทต์

ไม่สามารถเตรียมสารละลายไฮดรอกซีแอปาไทต์ที่ความเข้มข้น 3.0 % w/v ได้เนื่องจากไม่สามารถเตรียมให้อยู่ในรูปสารละลายได้

5.3 การสังเคราะห์วัสดุประกอบร่วมระหว่างเนื้อเยื่อโครงสร้างโปรตีนไฟโบรอินกับไฮดรอกซีแอปาไทต์

วัสดุประกอบร่วมที่สังเคราะห์ได้เป็นของแข็งสีขาวอมเหลือง เมื่อตรวจวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ด้วยเทคนิค SEM พบว่า มีสารประกอบมาเคลือบบริเวณพื้นผิวหน้าของเนื้อเยื่อโครงสร้างมากกว่าภายในรูพรุนและพบว่าวัสดุประกอบที่แช่ในสารละลายไฮดรอกซีแอปาไทต์ความเข้มข้น 1.0 % w/v เป็นเวลา 16 วัน มีการเกาะติดของสารประกอบบนเนื้อเยื่อมากที่สุด เมื่อตรวจสอบด้วยเทคนิค FTIR และ TGA พบว่าสเปคตรัมและช่วงอุณหภูมิการสลายตัวคล้ายกับสารประกอบไฮดรอกซีแอปาไทต์ แต่เมื่อตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD ไม่ปรากฏพีคของ HAp อาจเนื่องจากสารประกอบที่มาเคลือบนั้นมีปริมาณน้อยมาก และวัสดุประกอบที่สังเคราะห์ได้มีความแข็งแรงกดอัดสูงและความสามารถในการดูดน้ำต่ำ

5.4 ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาการเตรียมเนื้อเยื่อโครงสร้างโปรตีนไฟโบรอินโดยใช้ปริมาณเกลือและผงไหมที่เหมาะสมและมีการคัดขนาดของเกลือเพื่อให้เกิดรูพรุนเป็นรูเปิดต่อเนื่องและมีขนาดสม่ำเสมอ
2. ศึกษาการเตรียมสารละลายไฮดรอกซีแอปาไทต์ให้มีสภาวะและความเข้มข้นที่เหมาะสม
3. เพิ่มระยะเวลาในการแช่เนื้อเยื่อโครงสร้างโปรตีนไฟโบรอินในสารละลายไฮดรอกซีแอปาไทต์เพื่อให้เกิดการเกาะติดมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ควรหาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมวัสดุประกอบร่วมเพื่อให้เกิดการเกาะติดของไฮดรอกซีแอปาไทต์มากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[1]วีระศักดิ์ อุดมกิจเดชา **วิทยาศาสตร์เส้นใย** พิมพ์ครั้งที่ 2 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ2543.

[2]อภิชาต สนธิสมบัติ **กระบวนการเคมีสิ่งทอ** พิมพ์ครั้งที่1 คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล กรุงเทพฯ 2543.

[3]มณฑา จันทร์เกตุเลี้ยด **วิทยาศาสตร์สิ่งทอเบื้องต้น** พิมพ์ครั้งที่ 1 สมาคมเศรษฐศาสตร์แห่งประเทศไทย ในพระบรมราชินูปถัมภ์ กรุงเทพฯ 2541.

[4]ภาณุพงศ์ ภูทะวัง. 2547.**การศึกษาผลของเซริซินชนิดต่างๆที่มีต่อสมบัติของฟิล์มไฮโดรเจลพอลิไวนิลแอลกอฮอล์** โครงการพิเศษวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรม ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

[5]จรรยา ปั้นเหน่งเพชร, วิทยวัฒน์ กุญชร ณ อยุธยา, ประเวศ แสงเพชร, สมชาย กันหลง, วิโรจน์ แก้วเรือง, โกวิทย์ พงษ์แสวง และ ทิพรรณี เสนะวงศ์. 2546. **การคุ้มครองไหมไทย** หน้า 21-36. กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์

[6]www.herbalchem.net/carotenoids_Intermediate.htm

[7]Tabunoki H., Higurashi S., Ninagi O. 2004. A carotenoid-binding protein (CBP) plays a crucial role in cocoon pigmentation of silkworm (*Bombyx mori*) larvae. **FEBS Letters**.567:175-178

[8]นวลจันทร์ โชคทวีทรัพย์, นิภาพรรณ โสตถิยานนท์ และศิริเนตร ประดับวงศ์. 2545. **การเตรียมฟิล์มไฮโดรเจลจาก PVA/Sericin โดยวิธีการฉายรังสี และการปรับสภาพทางความร้อน** โครงการพิเศษวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรม ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

[9]ชนิตา พงษ์ลิมานนท์ **เคมีอินทรีย์เบื้องต้น** พิมพ์ครั้งที่ 4 ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ กรุงเทพฯ 2542.

[10]www.schoolscience.co.uk/content/5/chemistry/proteins/Protch3pg3.html

[11]อัจฉราพร ไศละสูต **ความรู้เรื่องผ้า** พิมพ์ครั้งที่ 10 สร้างสรรค์-วิชาการ กรุงเทพฯ 2539

[12]โสภณ เริงสำราญ อมร เพชรสม ศุภศร พัฒนอักษรและสุรชัย พคภคกุล **อินทรีย์เคมี II** พิมพ์ครั้งที่ 3 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ 2545.

[13] ลลิดา บุญโฉม **สมบัติทางกายภาพและการย้อมติดสีของเส้นใยไหมที่ทำการต่อกิ่งกับไวนิลมอนอเมอร์** วิทยานิพนธ์ปริญญาโท คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2546.

[14]ชัยวัฒน์ เจนวาณิชย์ **เคมีพอลิเมอร์พื้นฐาน** พิมพ์ครั้งที่ 1 คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ โอเดียนสโตร์ กรุงเทพฯ 2527.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[15]มาลินี ชัยศุภกิจสินธิ์ , กันยา ตันติวิทธิกุล. พ.ศ. 2548. รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์ เรื่อง โปรตีนเซริซินจากไหมไทย

[16]มินะกาวะ โมโตอิ. 2530.**วิทยาการไหม เล่ม 1** แปลและเรียบเรียงโดย เออีอีชิ คาวาอิ และ เข็มชัย เหมะจันทร. คณะกรรมการส่งเสริมสินค้าไหมไทย กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม

[17]G.H. Altman., F. Diaz., C. Jakuba., T. Calabro., R.L. Horan., J. Chen., H. Lu., J. Richmond. And D.L. Kaplan 2003. Silk-based biomaterials. **Biomaterial**. 24 : 401-416

[18]T. Arai., H. Ishikawa., G. Freddi., S. Winkler and M. Tsukada 2001. Chemical Modification of *Bombyx Mori* Silk Using Isocyanates. *Journal of Applied Polymer Science*. **79:** 1756 – 1763.

[19]http://en.wikipedia.org/wiki/Tissue_engineering

[20]www.moac.go.th

[21]Antonio J.S., Olga P.C. and Rui L.R. 2004. Bone Tissue Engineering state of the art and future trends. **Macromolecular Bioscience**.4:743-765

[22]www.materialstoday.com/pdfs_7_5/ma.pdf

[23]Gregory M. and Michael J. 2001. Hydrogels that undergo volumetric expansion in response to changes in their environment and their methods of manufacture and use. **Pharm/Biotech Resources.** 804935.

[24]http://msds.pcd.go.th

[25]นางสาว มธุรส สินธุระหัส , นางสาว วิมล จารุอารยนันท์ , 2545 **การสังเคราะห์วัสดุประกอบร่วมไฮดรอกซีแอปาไทต์กับพอลิเอทิลีนเทเรพทาเรต** โครงการพิเศษวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรม ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

[26]Esmaiel Jabbari.2005.Aqueous Based Hydrogel/Apatite Nanocomposite Scaffolds for Guided Bone Regeneration.Department of Chemical Eng.South Carolina University

[27]Yoshiyuki Yokogawa and Fukue Nagata.Hydrothermal Synthesis of Hydroxyapatite-Polymer Composite Materials:373-376

[28]Yasushi Tamada .2005. New Process to Form a Silk Fibroin Porous 3-D Structure.**Biomacromolecules.**6:3100-3106

[29]Guang Chen,Ping Zhou,Na Mei,Xin Chen,ZhengZhong Shao,Luanfeng Pan and Chungen Wu 2004.Silk fibroin modified porous poly(ε-caprolactone) scaffold for human fibroblast culture in vitro.*Journal of materials science.Material in medical*:671-677

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[30]Kong X.D. , Cui F.Z. , Wang X.M. ,Zhang M. and Zhang W. 2004.Silk fibroin regulated mineralization of hydroxyapatite nanocrystals.*Journal of crystal growth*:197-202

[31]Li Wang , Nemoto Rei and Senna Mamoru 2004.Change in microstructure and physico-chemical properties of hydroxyapatite-silk fibroin nanocomposite with varying silk fibroin content.*Journal of the European Ceramic Society* :2707-2715

[32]Tsutomo Furuzono , Tetsushi Taguchi , Akio Kishida ,Mitsuru Akashi and Yasushi Tamada 2000.Preparation and characterization of apatite deposited on silk fabric using an alternate soaking process.*J Biomed Mater Res* :344-352

[33]MC chang ,CC Ko , WH Douglas 2005.Preparation of hydroxyapatite-gelatin nanocomposite.Chemistry Letters vol.34 No.8 p.1110

[34]Rikako Kino , Toshiyuki Ikoma , Akira Monkawa ,Shunji Yunoki , Masanobu Munekata , Junzo Tanaka and Tetsuo Asakura 2006.Deposition of bone-like apatite on modified silk fibroin films from simulated body fluid.*J Apply polym Sci.*

[35]U.Vigayalakshmi and S.Rajeswari 2006. Preparation and Characterization of Microcrystalline Hydroxyapatite Using Sol Gel Method.Trend Biomater.Artif.Organs , Vol 19(2) : 57-62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก
การคำนวณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณแปอร์เซนต์น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นของเนื้อเยื่อโครงสร้างโปรตีนไฟโบรอินหลังแช่สารละลายไฮดรอกซีแอปาไทต์

จะได้ว่า เปอร์เซนต์น้ำหนักที่เพิ่มขึ้น $= \frac{W_2 - W_1}{W_1} \times 100$

หมายเหตุ W_1 = น้ำหนักเนื้อเยื่อโครงสร้างโปรตีนไฟโบรอินก่อนแช่สารละลาย HAp

W_2 = น้ำหนักเนื้อเยื่อโครงสร้างโปรตีนไฟโบรอินหลังแช่สารละลาย HAp

ตัวอย่างการคำนวณ

สำหรับการแช่ในสารละลายไฮดรอกซีแอปาไทต์ความเข้มข้น 0.5% w/v เป็นเวลา 4 วัน

โดย $W_1 = 0.0812$ กรัม

$W_2 = 0.0813$ กรัม

จะได้ เปอร์เซนต์น้ำหนักที่เพิ่มขึ้น $= \frac{0.0813 - 0.0812}{0.0812} \times 100$

$= 0.1232$ %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-1 แสดงการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของเนื้อเยื่อโครงสร้างโปรตีนไฟโบรอินหลังแช่สารละลายไฮดรอกซีแอปาไทต์ที่ความเข้มข้น 0.5 % w/v

จำนวนวัน	น้ำหนักก่อนแช่	น้ำหนักหลังแช่	น้ำหนักที่เพิ่มขึ้น (%)
4	0.0812	0.0813	0.1232
8	0.0825	0.0827	0.2424
12	0.0832	0.0840	0.9615
16	0.0772	0.0782	1.2953

ตารางที่ ก-2 แสดงการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของเนื้อเยื่อโครงสร้างโปรตีนไฟโบรอินหลังแช่สารละลายไฮดรอกซีแอปาไทต์ที่ความเข้มข้น 1.0 % w/v

จำนวนวัน	น้ำหนักก่อนแช่	น้ำหนักหลังแช่	น้ำหนักที่เพิ่มขึ้น (%)
4	0.0718	0.0735	2.3677
8	0.0802	0.0834	3.9900
12	0.0932	0.0999	7.1888
16	0.0886	0.0991	11.8510

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณเปอร์เซนต์การดูดน้ำ

จะได้ว่า เปอร์เซนต์การดูดน้ำ $= \frac{W_2 - W_1}{W_1} \times 100$

หมายเหตุ W_1 = น้ำหนักเนื้อเยื่อโครงสร้างโปรตีนไฟโบรอินก่อนแช่น้ำ

W_2 = น้ำหนักเนื้อเยื่อโครงสร้างโปรตีนไฟโบรอินหลังแช่น้ำ

ตัวอย่างการคำนวณ

สำหรับวัสดุประกอบที่ได้จากการแช่ในสารละลายไฮดรอกซีแอปาไทต์ความเข้มข้น 1.0 % w/v เป็นเวลา 16 วัน ที่เวลา 1 ชั่วโมง

โดย $W_1 = 0.0974$ กรัม

$W_2 = 0.5824$ กรัม

จะได้ เปอร์เซนต์การดูดน้ำ $= \frac{0.5824 - 0.0974}{0.0974} \times 100$

$= 497.9466$ %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-3 แสดงเปอร์เซนต์การดูดน้ำของเนื้อเยื่อโครงสร้างโปรตีนไฟโบรอิน

เวลา (ชั่วโมง)	ก่อนแช่สารละลายไฮดรอกซีแอปาไทต์			หลังแช่สารละลายไฮดรอกซีแอปาไทต์ที่ความเข้มข้น 1% w/v		
	นน.แห้ง	นน.เปียก	%การดูดน้ำ	นน.แห้ง	นน.เปียก	%การดูดน้ำ
1	0.0870	0.6064	597.0115	0.0974	0.5824	497.9466
2	0.0870	0.7752	791.0345	0.0974	0.8016	722.9980
3	0.0870	0.8013	821.0345	0.0974	0.8737	797.0226
4	0.0870	0.8099	830.9195	0.0974	0.8834	806.9815
5	0.0870	0.8291	852.9885	0.0974	0.8843	807.9055
6	0.0870	0.8465	872.9885	0.0974	0.9399	864.9897
7	0.0870	0.8787	910.0000	0.0974	0.9555	881.0062
8	0.0870	0.8804	911.9540	0.0974	0.9769	902.9774

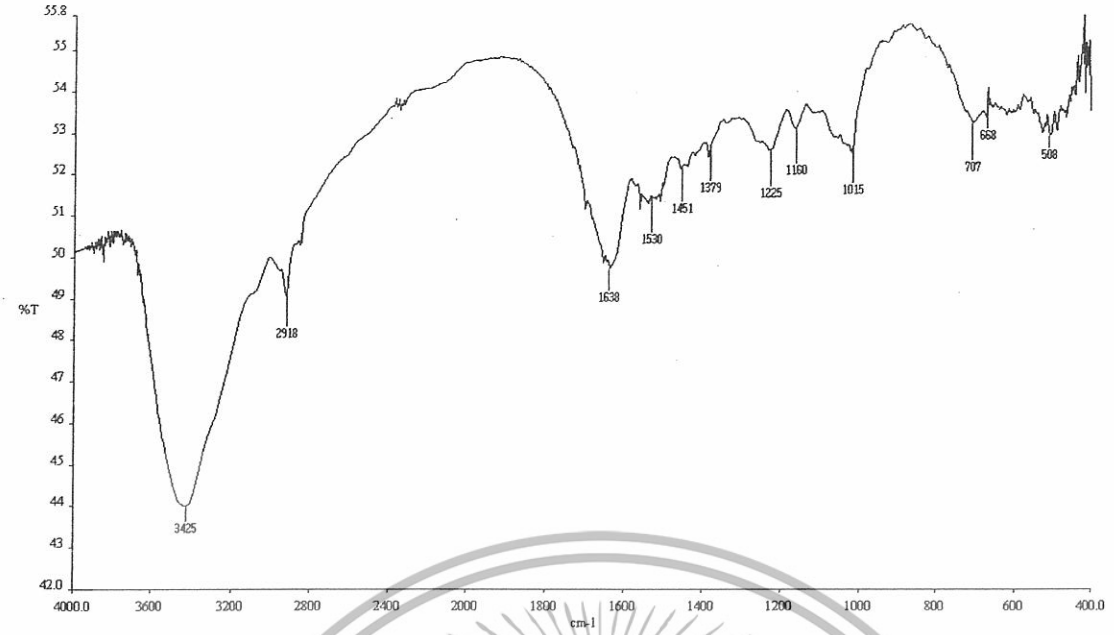
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

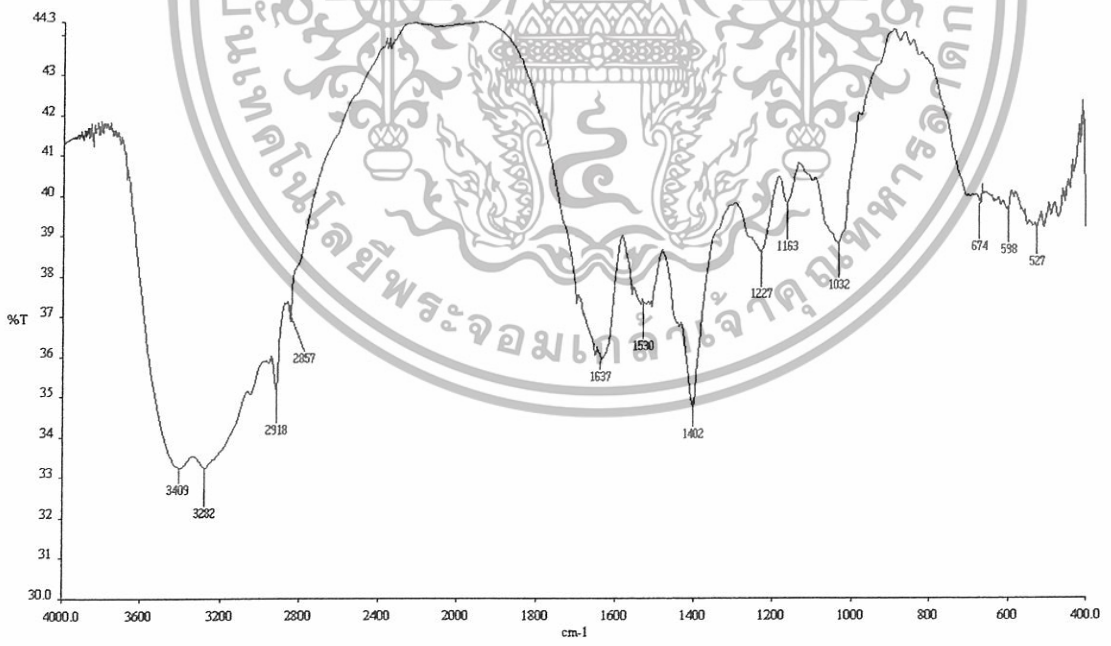
ภาคผนวก ข

อินฟราเรดสเปคตรา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

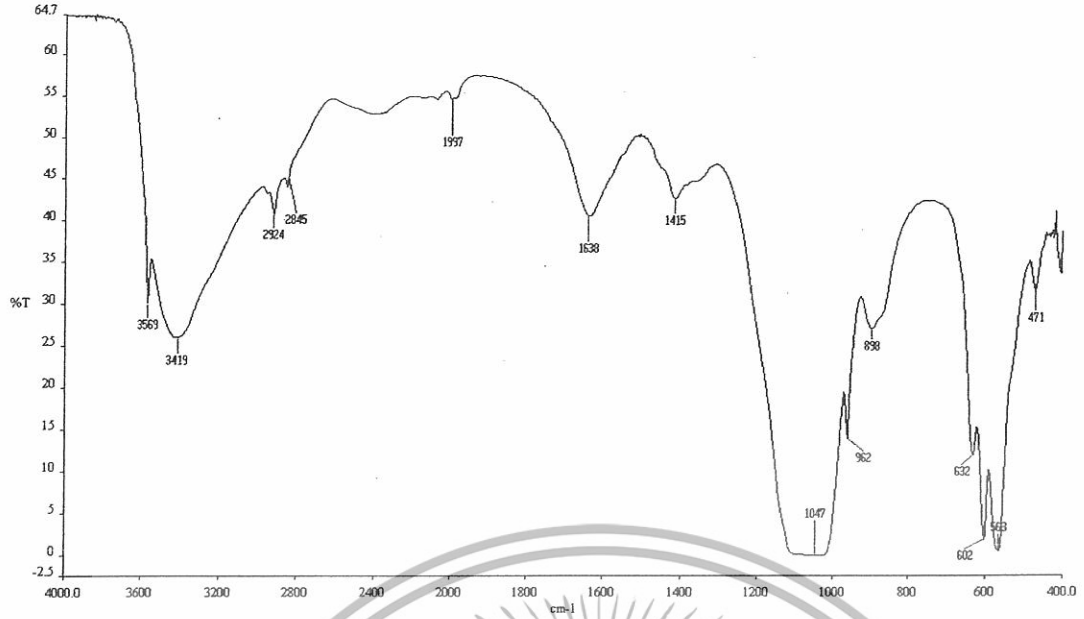


รูปที่ ข-1 อินฟราเรดสเปคตรัมของเนื้อเยื่อโครงสร้างโปรตีนไฟโบรอินหลังแช่สารละลายไฮดรอกซีแอปาไทต์ความเข้มข้น 0.5 % w/v เป็นเวลา 16 วัน

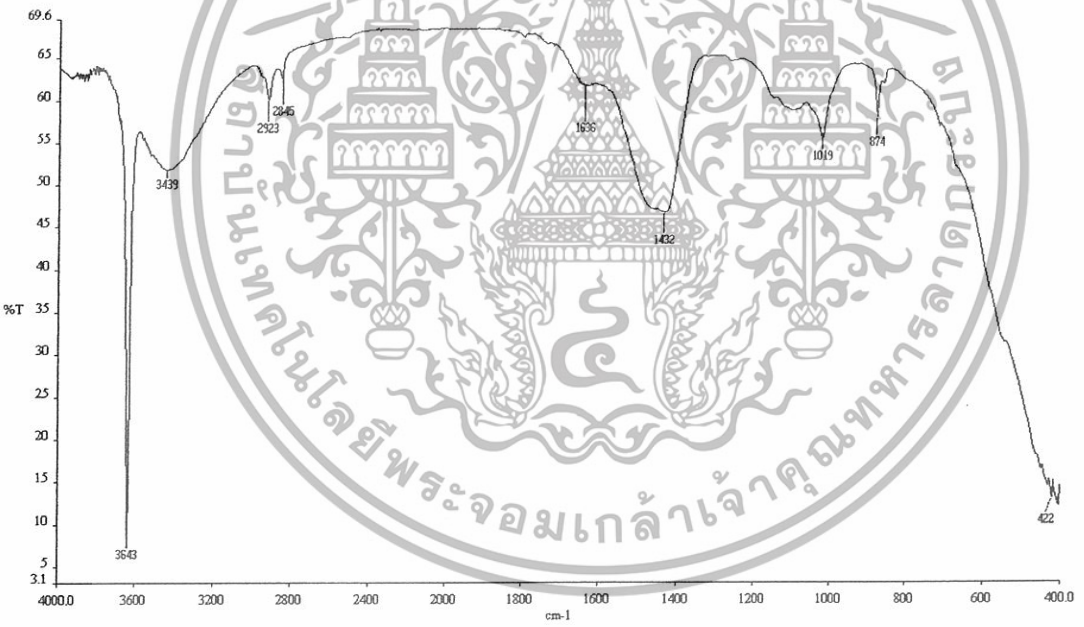


รูปที่ ข-2 อินฟราเรดสเปคตรัมของเนื้อเยื่อโครงสร้างโปรตีนไฟโบรอินหลังแช่สารละลายไฮดรอกซีแอปาไทต์ความเข้มข้น 1.0 % w/v เป็นเวลา 16 วัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข-3 อินฟราเรดสเปคตรัมของไฮดรอกซีแอปาไทต์

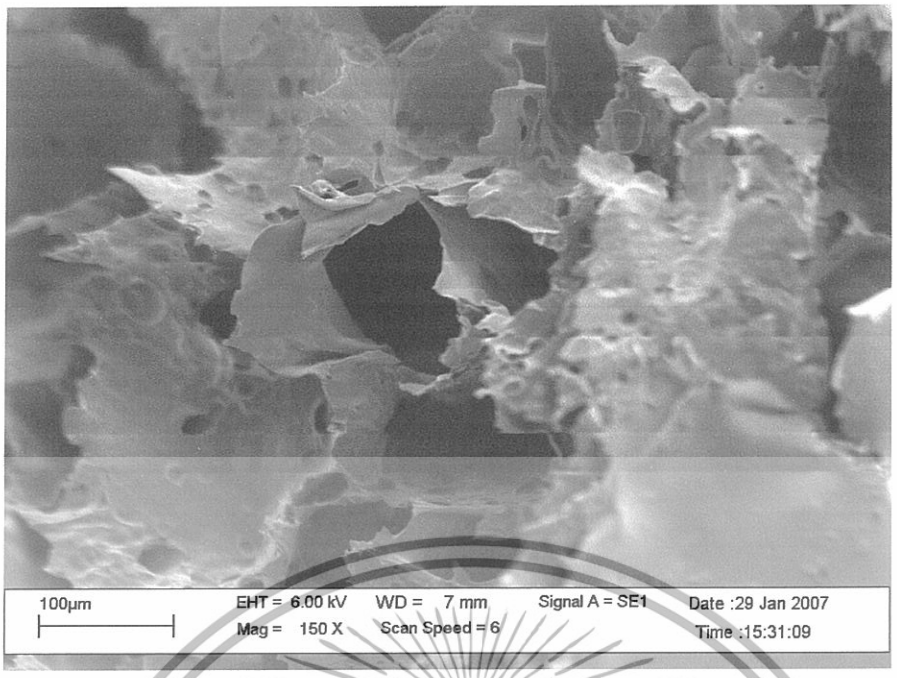


รูปที่ ข-4 อินฟาเรดสเปคตรัมของแคลเซียมไฮดรอกไซด์

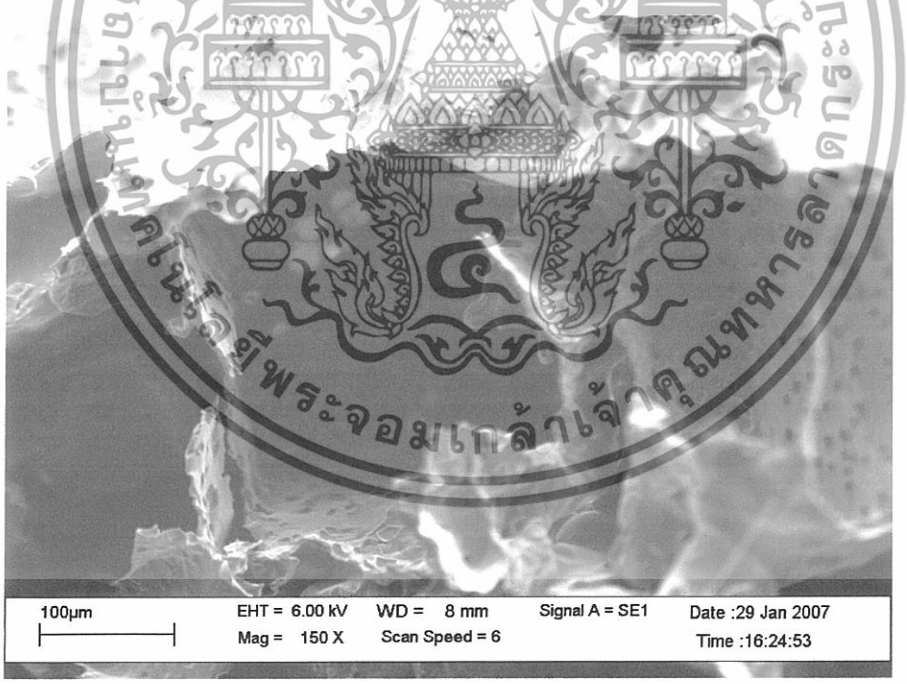
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค
ลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคจากเครื่อง SEM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

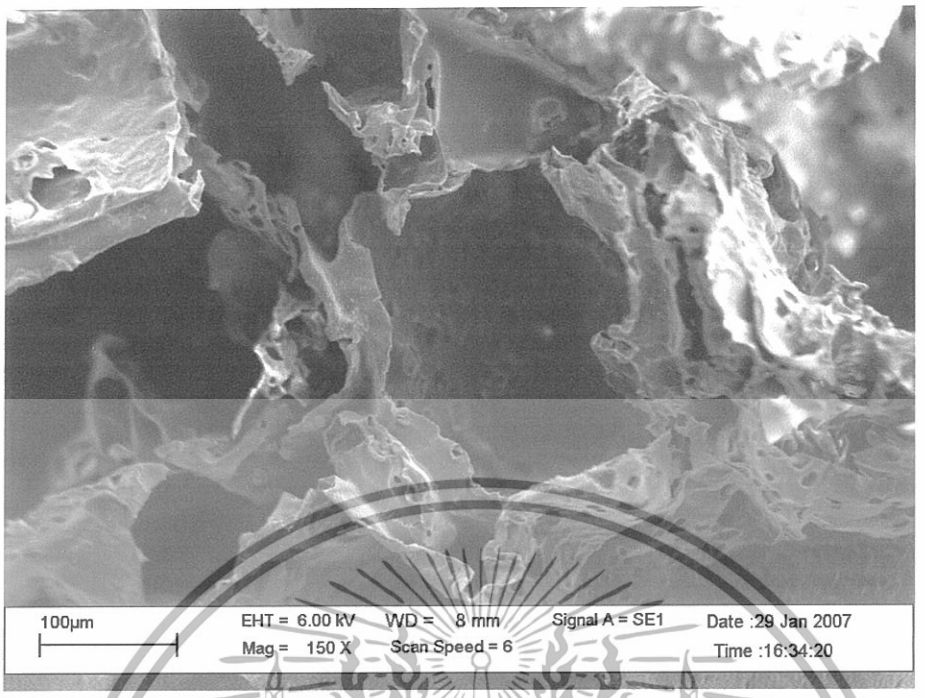


รูปที่ ค-1 ลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคที่พื้นผิวด้านข้างของวัสดุประกอบร่วมระหว่างเนื้อเยื่อโครงสร้างโปรตีนไฟโบรอินก่อนแช่สารละลาย HAp ที่กำลังขยาย 150 เท่า



รูปที่ ค-2 ลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคที่พื้นผิวด้านข้างของวัสดุประกอบร่วมระหว่างเนื้อเยื่อโครงสร้างโปรตีนไฟโบรอินหลังแช่สารละลาย HAp ความเข้มข้น 0.5% w/v เป็นเวลา 16 วัน ที่กำลังขยาย 150 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

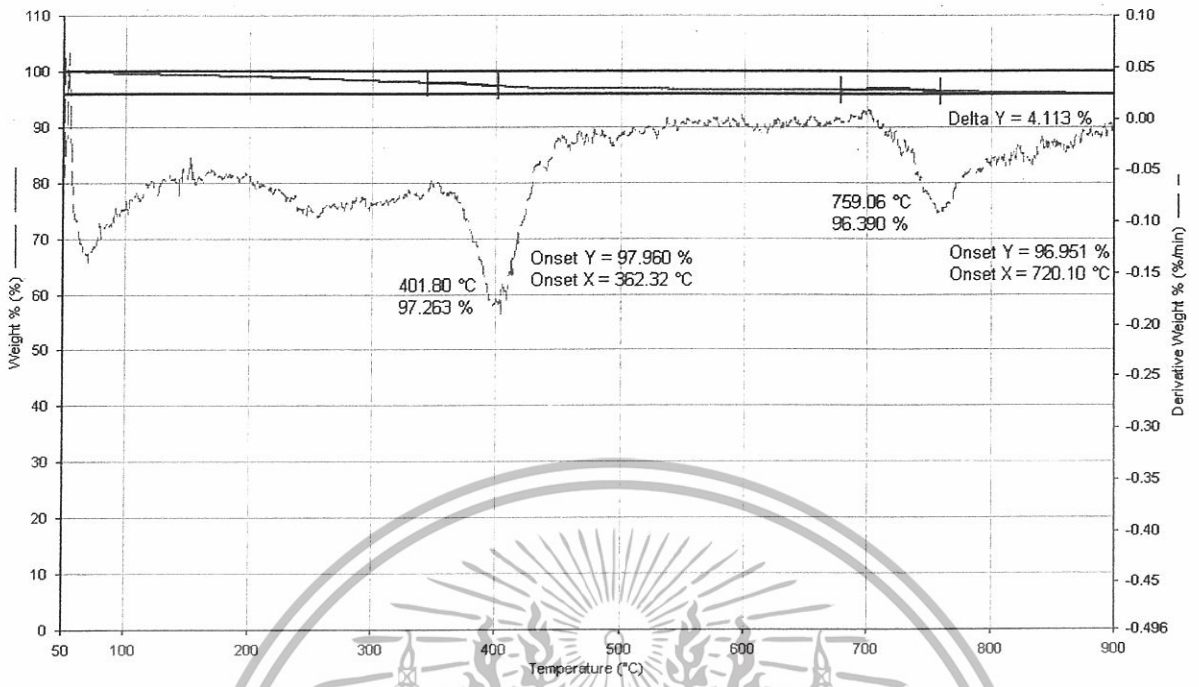


รูปที่ ค-3 ลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคที่พื้นผิวด้านข้างของวัสดุประกอบร่วมระหว่างเนื้อเยื่อโครงสร้างโปรตีนไฟโบรอินหลังแช่สารละลาย HAp ความเข้มข้น 1.0 % w/v เป็นเวลา 16 วัน ที่กำลังขยาย 150 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง
เทอร์โมแกรมจากเครื่อง TGA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

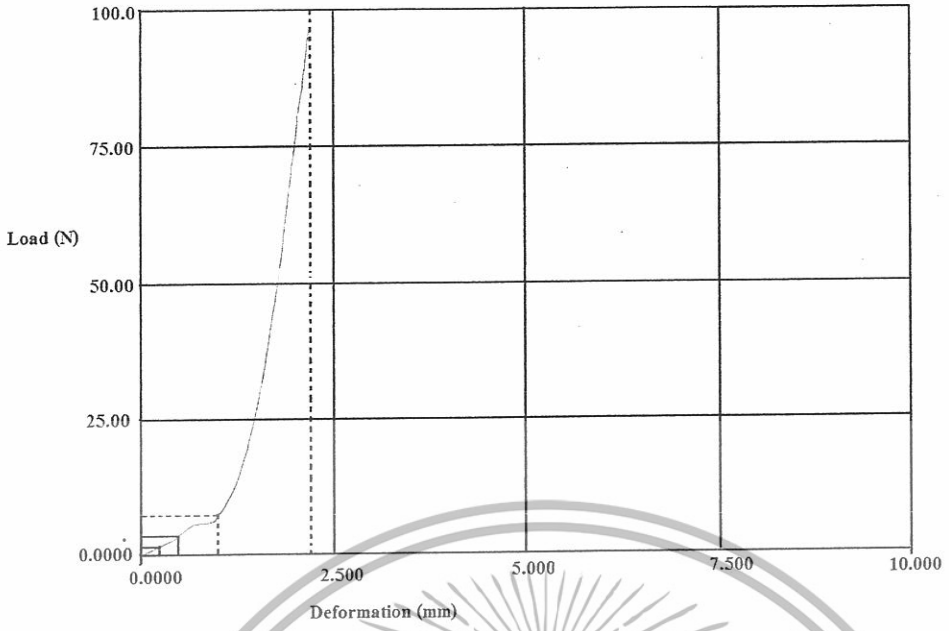


รูปที่ ง-1 TGA เทอร์โมแกรมของ ไฮดรอกซีแอปาไทต์

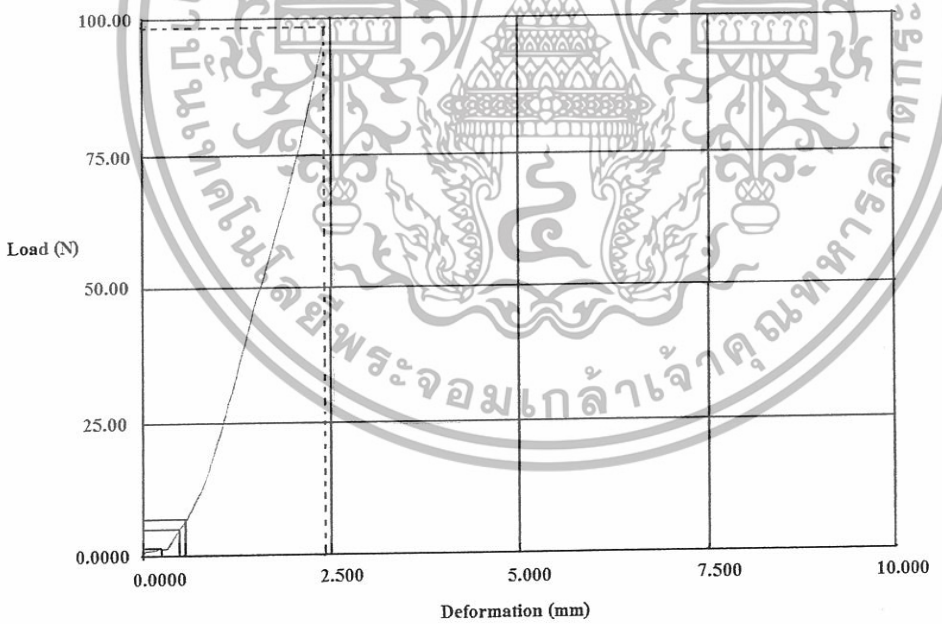
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ
สมบัติเชิงกลโดยวัดความสามารถในการรับแรงกด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ จ-1 กราฟแสดงการรับแรงกดของเนื้อเยื่อโครงสร้างโปรตีนไฟโบรอินก่อนแช่สารละลาย HAp

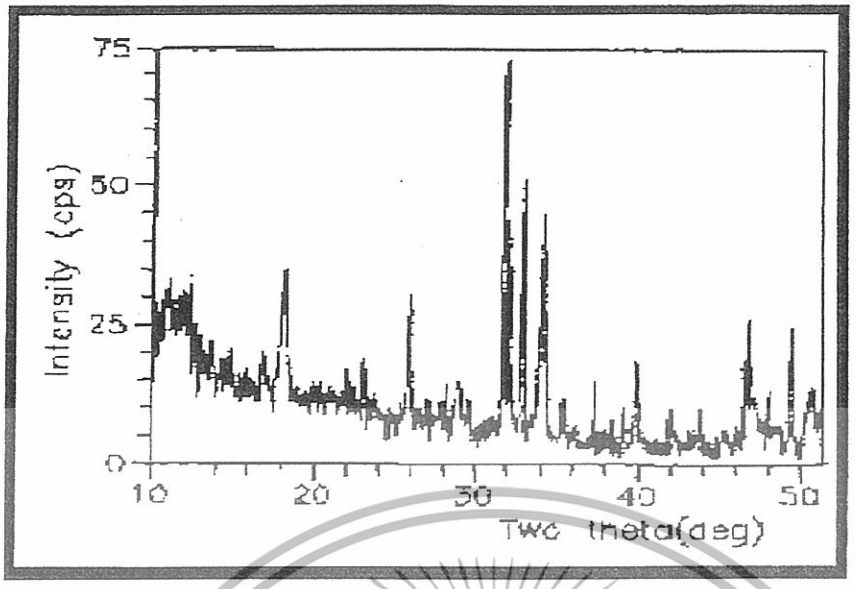


รูปที่ จ-2 กราฟแสดงการรับแรงกดของเนื้อเยื่อโครงสร้างโปรตีนไฟโบรอินหลังแช่สารละลาย HAp ความเข้มข้น 1.0 % w/v เป็นเวลา 16 วัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ฉ
แพทเทิร์นการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์จากเครื่อง XRD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ฉ-1 แพทเทิร์นการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของไฮดรอกซีแอปาไทต์ [35]

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้