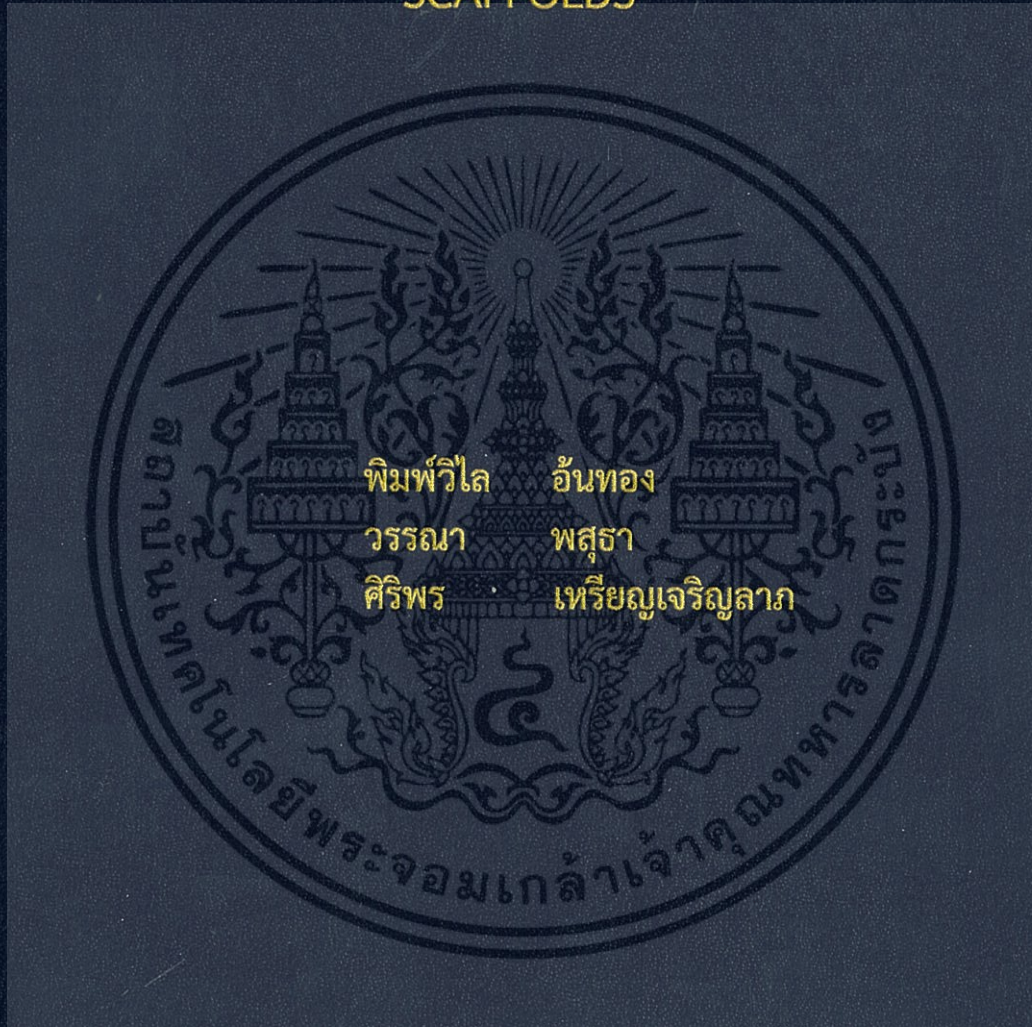


การเตรียมและทดสอบสมบัติของเนื้อเยื่อโครงสร้าง
คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสผสมเซริซิน
PREPARATION AND PROPERTIES OF
CARBOXYMETHYLCELLULOSE (CMC)/SERICIN
SCAFFOLDS



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตาม
หลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2559

การเตรียมและทดสอบสมบัติของเนื้อเยื่อโครงสร้าง
คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสผสมเซรีซิน
PREPARETION AND PROPERTIES OF
CARBOXYMETHYLCELLULOSE (CMC)/SERICIN
SCAFFOLDS



เลขหมู่.....
เลขทะเบียน... 149475
วันเดือนปี - 8 ส.ค. 2561

b. 12884959
i.

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตาม
หลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PREPARATION AND PROPERTIES OF
CARBOXYMETHYLCELLULOSE(CMC)/SERICIN
SCAFFOLDS



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENT FOR
THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE (INDUSTRIAL CHEMISTRY)
DEPARTMENT OF CHEMISTRY, FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ **ACADEMIC YEAR 2016** ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ การเตรียมและทดสอบสมบัติของเนื้อเยื่อโครงสร้างจากคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสผสมเซรีซิน
PREPARETION AND PROPERTIES OF CARBOXYMETHYLCELLULOSE(CMC)/SERICIN SCAFFOLDS

ชื่อนักศึกษา นางสาวพิมพ์วิไล อ้นทอง รหัสนักศึกษา 56050553
นางสาววรรณนา พสุธา รหัสนักศึกษา 56050588
นางสาวศิริพร เจริญเจริญลาภ รหัสนักศึกษา 56050620

ปริญญา วิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)
ภาควิชา เคมี
ปีการศึกษา 2559
อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร.มาลินี ชัยศุกกิจสินธุ์

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม) ประจำปีการศึกษา 2559

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
รศ.ดร.จุฑารัตน์ ปรัชญาวารการ ประธานกรรมการ	
รศ.ดร.สมศักดิ์ วรรณมงคลชัย กรรมการ	
รศ.ดร.มาลินี ชัยศุกกิจสินธุ์ กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การเตรียมและทดสอบสมบัติของเนื้อเยื่อโครงสร้างจากคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสผสมเซรีซิน		
ชื่อนักศึกษา	นางสาวพิมพ์วิไล	อันทอง	รหัสนักศึกษา 56050553
	นางสาววรรณ	พลธา	รหัสนักศึกษา 56050588
	นางสาวศิริพร	เหรียญเจริญลาภ	รหัสนักศึกษา 56050620
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)		
ภาควิชา	เคมี		
คณะ	วิทยาศาสตร์		
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง		
ปีการศึกษา	2559		
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร.มาลินี ชัยศุกกิจสินธ์		

บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้ได้ศึกษาการเตรียมเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลจากโปรตีนเซรีซินที่ได้จากรังไหมขาวและรังไหมเหลือง ผสมร่วมกับคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสในอัตราส่วนต่าง ๆ ได้แก่ .100:0, 50:50 และ 20:80 โดยขึ้นรูปด้วยวิธีทำแห้งแบบแช่แข็ง ซึ่งชิ้นงานที่ได้มีลักษณะเป็นรูพรุนคล้ายฟองน้ำ และทำการเปรียบเทียบลักษณะทางกายภาพ สัมฐานวิทยา ความหนาแน่น ขนาดรูพรุน ความพรุน ระหว่างไหมทั้งสองชนิด และนำไปทดสอบสมบัติต่าง ๆ ได้แก่ สมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชัน แล้วนำอัตราส่วนของโปรตีนเซรีซินต่อคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส 50:50 มาปรับปรุงโดยเติมแคลเซียมไฮดรอกไซด์อะปาไทต์ และศึกษาสมบัติต่างๆ

ผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงให้เห็นว่าโปรตีนไหมมีการจัดเรียงตัวแบบเบต้าชีท (β -sheet) คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่ผสมเข้าไปทำให้มีลักษณะเป็นรูพรุนมากขึ้น ความหนาแน่นเพิ่มขึ้น ที่อัตราส่วน 50:50 มีความพรุน 70% ซึ่งเหมาะสมที่จะนำไปใช้ทางการแพทย์ เนื้อเยื่อโครงสร้างผสมบวมน้ำลดลง เพราะขนาดรูพรุนเล็กกว่าเมื่อเทียบกับเนื้อเยื่อโครงสร้างของไหมและเสีรูปเร็วขึ้น เนื่องจากมีคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ความสามารถรับแรงกดอัดได้ดี การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนพบว่าโปรตีนเซรีซินผสมเข้ากันได้ดีกับคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเพราะมีอุณหภูมิสลายตัวที่เดียว เมื่อเติมแคลเซียมไฮดรอกไซด์อะปาไทต์ 0.5%w/v พบว่า ขนาดรูพรุนเล็กลง การบวมน้ำลดลง อุณหภูมิการสลายตัวเพิ่มขึ้นและสามารถรับแรงกดอัดได้ดีขึ้น

คำสำคัญ : เซรีซิน, คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส, แคลเซียมไฮดรอกไซด์อะปาไทต์, เนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจล

Title	PREPARATION AND PROPERTIES OF CARBOXYMETHYLCELLULOSE (CMC)/SERICIN SCAFFOLDS
Students	Miss PIMWILAI ONTHONG Student ID 56050553 Miss WANNA PHASUTHA Student ID 56050588 Miss SIRIPORN RIANJAROENLAP Student ID 56050620
Degree	Bachelor of Science (B.Sc. Industrial Chemistry)
Department	Chemistry
Faculty	Science
University	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Academic Year	2016
Advisor	Associate Professor Dr. Malinee Chaisupakitsin

Abstract

The special project focus on preparation of hydrogel scaffold from protein sericin extracted from Japan silk and Thai silk cocoons and mixed with carboxymethylcellulose (CMC). Three different ratios of sericin/CMC matrices of ratios 100:0, 50:50 and 20:80 respectively, were forming by freeze-drying technique. This sample is sponge like. The physical property, morphology, density, porosity, mechanical, thermal properties and functional groups were investigated. The ratio of 50:50 (sericin:CMC) is with and without Calcium hydroxyapatite(HAp) were studied.

The experimental result from morphology by scanning electron microscope (SEM) showed that silk protein have the β -sheet structure. The presence of CMC influenced porosity and density. The ratio of 50:50 have porosity 70% which appropriate provided enhanced for bone tissue engineering. The scaffold low swelling because pores size smaller scaffold from silk and have better deformation. The CMC can better compressive stress. Thermal properties showed that sericin and CMC are well compatible because showed only one degradation temperature. When with 0.5% w/v HAp showed that low pores size and swelling, better degradation temperature and compressive stress.

Keywords : Sericin, CMC, Hydroxyapatite, Scaffold Hydrogel

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องมาจากความกรุณาและความร่วมมือของทุกๆท่านขอขอบพระคุณ รศ.ดร.มาลินี ชัยศุกกิจสินธ์ ที่คอยให้คำปรึกษาดูแลอย่างใกล้ชิดและให้ความช่วยเหลือแนะนำที่ดีในการปรับปรุงข้อบกพร่องในการทำโครงการพิเศษ และขอขอบคุณกรรมการสอบโครงการพิเศษ คือ รศ.ดร.สมศักดิ์ วรมงคลชัย และ รศ.ดร.จุฑารัตน์ ปรีชญาวรรการ ที่ให้ข้อคิดเห็น และคำแนะนำช่วยเหลือในการทำโครงการพิเศษให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการเคมี และเจ้าหน้าที่ห้องธุรการ สาขาวิชาเคมีที่ให้ความช่วยเหลือ และอำนวยความสะดวกในการทำโครงการพิเศษให้สำเร็จไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่อาคารฝึกงานทางอุตสาหกรรมเคมีพอลิเมอร์ที่อำนวยความสะดวกและให้ความช่วยเหลือ รวมทั้งให้คำแนะนำการใช้เครื่องมือ

ผู้จัดทำโครงการขอขอบคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้

พิมพ์วิไล	อันทอง
วรรณภา	พสุธา
ศิริพร	เหรียญเจริญลาภ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	จ
สารบัญรูป.....	ฉ
คำย่อ/สัญลักษณ์.....	ช
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	3
1.3 ขอบเขต.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ไหม.....	4
2.1.1 องค์ประกอบและโครงสร้างไหม.....	5
2.1.2 คุณสมบัติของเส้นไหม.....	6
2.1.3 ไฝโบราณ.....	8
2.1.4 เซรีซิน.....	9
2.2 คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส.....	10
2.2.1 สมบัติทางเคมีและสูตรโครงสร้าง.....	10
2.2.2 การผลิตอนุพันธ์ของเซลลูโลส.....	11
2.2.3 สมบัติหลักของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส.....	11
2.2.4 สมบัติทางกายภาพของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส.....	12
2.2.5 สมบัติการละลายของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส.....	12
2.2.6 การนำไปใช้ประโยชน์.....	12
2.3 ไฮดรอกซีอะปาไทต์.....	13
2.3.1 โครงสร้างไฮดรอกซีอะปาไทต์.....	13
2.3.2 สมบัติไฮดรอกซีอะปาไทต์ทางการแพทย์.....	14
2.3.3 พฤติกรรมของไฮดรอกซีอะปาไทต์ที่อุณหภูมิสูง.....	16

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3.4 อะปาไทต์ในกระดูก และฟัน	16
2.3.5 ประโยชน์ของไฮดรอกซีอะปาไทต์	17
2.4 ไฮโดรเจล	18
2.4.1 ประเภทของไฮโดรเจล.....	18
2.4.2 พันธะทางเคมีของไฮโดรเจล.....	20
2.4.3 พันธะเชื่อมโยงของไฮโดรเจล.....	20
2.4.4 การเตรียมไฮโดรเจล.....	20
2.4.5 สมบัติของไฮโดรเจลและการนำไปใช้.....	20
2.5 กระบวนการทำแห้งแบบแช่แข็ง	21
2.5.1 หลักการและขั้นตอนการทำแห้งแบบแช่แข็ง	21
2.5.2 เครื่องมือและระบบที่ใช้ในกระบวนการทำแห้งแบบแช่แข็ง	22
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	23
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	26
3.1 สารเคมี อุปกรณ์ และเครื่องมือที่ใช้.....	26
3.2 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	28
3.2.1 การสกัดเซริซินจากรังไหม	28
3.2.2 เตรียมสารละลายคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่เข้มข้น 5 %w/v.....	28
3.2.3 เตรียมการขึ้นรูปชิ้นงาน	28
3.3 การทดสอบสมบัติต่าง ๆ.....	30
3.3.1 สมบัติทางกายภาพ.....	30
3.3.2 สมบัติเชิงกล.....	31
3.3.3 สมบัติทางความร้อน	31
3.3.4 การวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของสาร	31
3.3.5 การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์.....	32
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล	33
4.1 ศึกษาอัตราส่วนระหว่างสารละลายเซริซิน และสารละลายคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ที่มีผลต่อสมบัติต่างๆ ของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจล.....	33
4.1.1 ลักษณะทางกายภาพ.....	33
4.1.2 สมบัติทางสัณฐานวิทยา	34

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.1.3 ความหนาแน่น.....	38
4.1.4 วิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของสาร (FT-IR).....	39
4.1.5 ลักษณะการบวมน้ำ.....	43
4.1.6 การทดสอบสมบัติเชิงกล.....	44
4.1.7 วิเคราะห์สมบัติทางความร้อน (TGA).....	46
4.2 ศึกษาผลของแคลเซียมไฮดรอกซีอะปาไทต์ที่มีต่อสมบัติของ เนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจล.....	48
4.2.1 ลักษณะทางกายภาพของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลที่เติม แคลเซียมไฮดรอกซีอะปาไทต์.....	48
4.2.2 สมบัติทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนไมโครสโคป ของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลที่มีการเติมแคลเซียมไฮดรอกซีอะปาไทต์...	49
4.2.3 ความหนาแน่นของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลที่เติมแคลเซียม แคลเซียมไฮดรอกซีอะปาไทต์.....	51
4.2.4 วิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลที่เติม แคลเซียมไฮดรอกซีอะปาไทต์(FT-IR).....	52
4.2.5 ลักษณะการบวมน้ำของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลที่เติม แคลเซียมไฮดรอกซีอะปาไทต์.....	54
4.2.6 การทดสอบสมบัติเชิงกลของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลที่เติม..... แคลเซียมไฮดรอกซีอะปาไทต์.....	56
4.2.7 การทดสอบสมบัติทางความร้อนของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลที่เติม แคลเซียมไฮดรอกซีอะปาไทต์ (TGA).....	58
4.2.8 การทดสอบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลที่เติม และไม่เติมแคลเซียมไฮดรอกซีอะปาไทต์.....	60
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	63
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	63
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	64
เอกสารอ้างอิง.....	65
ภาคผนวก.....	68

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก ก สันฐานวิทยา.....	69
ภาคผนวก ข ขนาดรพูน.....	72
ภาคผนวก ค ความพูน.....	77
ภาคผนวก ง การบวมตัวในน้ำกลั่น.....	79
ภาคผนวก จ ทดสอบสมบัติเชิงกล.....	86
ภาคผนวก ฉ สมบัติทางความร้อน (TGA).....	89



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 องค์ประกอบที่สำคัญของเส้นใยไหม.....	7
2.2 แสดงลักษณะโดยทั่วไปของเซรีซิน.....	9
2.3 แสดงสมบัติทางกายภาพคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส.....	12
2.4 แสดงสมบัติผลึกไฮดรอกซีอะปาไทต์.....	13
2.5 สมบัติที่เหมาะสมต่อการทำวัสดุทดแทนกระดูก.....	15
3.1 แสดงอัตราส่วนผสมของสารละลายเซรีซินของไหมที่มีความเข้มข้น 2 %w/v และสารละลายคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่มีความเข้มข้น 5 %w/v.....	28
3.2 แสดงอัตราส่วนผสมระหว่างสารละลายเซรีซินที่มีความเข้มข้น 2 % w/v สารละลายคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่มีความเข้มข้น 5 %w/v และแคลเซียมไฮดรอกซีอะปาไทต์ 0.1 และ 0.5 %w/v.....	29
4.1 แสดงลักษณะทางกายภาพของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลสูตรต่างๆ.....	33
4.2 แสดงขนาดรูพรุนและความพรุน(%) ของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจล.....	35
4.3 แสดงขนาดรูพรุน และความพรุน(%)ของไหมทั้งสองชนิดตามสูตรต่างๆ.....	38
4.4 ความหนาแน่นของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลโปรตีนเซรีซินจากไหมขาว และไหมเหลืองกับคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสในอัตราส่วนต่างๆ.....	38
4.5 อุณหภูมิเริ่มการสลายตัวและอุณหภูมิสลายตัวของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจล จากโปรตีนเซรีซินไหมขาว และไหมเหลืองกับคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่อัตราส่วนต่างๆ.....	47
4.6 ลักษณะทางกายภาพของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลของไหมขาว และไหมเหลืองในอัตราส่วน 50:50 ที่เติมแคลเซียมไฮดรอกซีอะปาไทต์ปริมาณต่างๆ.....	48
4.7 แสดงขนาดรูพรุนของชิ้นงานที่มีการเติมแคลเซียมไฮดรอกซีอะปาไทต์.....	51
4.8 แสดงความหนาแน่นของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลของไหมขาว ไหมเหลือง และคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส อัตราส่วน 50:50 ที่เติมแคลเซียมไฮดรอกซีอะปาไทต์ปริมาณต่างๆ.....	51
4.9 อุณหภูมิเริ่มการสลายตัว และอุณหภูมิสลายตัวหมดของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจล จากโปรตีนเซรีซินไหมขาว และไหมเหลืองกับคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส อัตราส่วน 50:50 ที่มีการเติมแคลเซียมไฮดรอกซีอะปาไทต์.....	59

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ข-1 ตารางแสดงขนาดรูปพรุนของสูตร W 100:00.....	73
ข-2 ตารางแสดงขนาดรูปพรุนของสูตร W 50:50.....	73
ข-3 ตารางแสดงขนาดรูปพรุนของสูตร W 20:80.....	74
ข-4 ตารางแสดงขนาดรูปพรุนของสูตร WHAp0.1.....	74
ข-5 ตารางแสดงขนาดรูปพรุนของสูตร WHAp0.5.....	75
ข-6 ตารางแสดงขนาดรูปพรุนของสูตร YHAp0.1.....	75
ข-7 ตารางแสดงขนาดรูปพรุนของสูตร YHAp0.5.....	76
ค-1 ตารางบันทึกผลการทดลองหาความพรุน.....	78
ง-1 แสดงลักษณะการบวมตัวของชิ้นงานในน้ำกลั่น.....	80
ง-2 ตารางบันทึกผลการบวมตัวของชิ้นงานในน้ำกลั่น.....	84
จ-1 ตารางแสดงสมบัติเชิงกล (compression).....	87



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงโครงสร้างของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส.....	10
2.2 โครงสร้างผลึกของไฮดรอกซีอะปาไทต์.....	14
2.3 แสดงภาพสามมิติของผลึกไฮดรอกซีอะปาไทต์.....	14
4.1ก สันฐานวิทยาของเนื้อเยื่อโครงสร้างจากโปรตีนเซรีซินไหมขาว และคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส.....	34
4.1ข แสดงแบบจำลองการเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโปรตีนเซรีซิน.....	36
4.1ค สันฐานวิทยาของเนื้อเยื่อโครงสร้างจากโปรตีนเซรีซินไหมขาว ผสมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส.....	37
4.1ง แสดงแบบจำลองการเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโปรตีนเซรีซิน กับคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส.....	40
4.2 IR-spectrum ของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลจากโปรตีนเซรีซินจากไหมขาว สูตร W100:0.....	39
4.3 IR-spectrum ของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลจากโปรตีนเซรีซิน ของไหมเหลืองสูตร Y100:0.....	40
4.4 IR-spectrum ของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลที่ได้จากสารละลายคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส สูตร C0:100.....	41
4.5 IR-spectrum ของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลที่ได้จากสารละลายผสมระหว่าง โปรตีนเซรีซินจากไหมขาวกับคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสในสูตรต่างๆ.....	42
4.6 เปรอเซ็นต์การบวมน้ำของเนื้อเยื่อโครงสร้างจากไหมขาวสูตรต่างๆ.....	43
4.7 กราฟแสดงค่าความเค้นแรงกดอัดสูงสุด (Compressive stress) ของเนื้อเยื่อโครงสร้างในอัตราส่วนต่างๆ.....	44
4.8 กราฟแสดงค่าความแข็งยืดหยุ่น (Compressive modulus) ของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลในอัตราส่วนต่างๆ.....	45
4.9 แสดงเทอร์โมแกรมจากการวิเคราะห์ TGA ของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจล โปรตีนเซรีซินจากไหมขาวกับคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสสูตรต่าง ๆ	46
4.10 แสดงกราฟ derivitive จากการวิเคราะห์ TGA ของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลโปรตีน เซรีซินจากไหมขาวกับคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสสูตรต่าง ๆ.....	47
4.11 สันฐานวิทยาของชิ้นงานจากไหมขาวและไหมเหลืองผสมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส และแคลเซียมไฮดรอกซีอะปาไทต์.....	49
4.12 แสดงแบบจำลองการเกิดพันธะเชื่อมโยงระหว่างโปรตีนเซรีซินกับแคลเซียมไอออน และคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสกับโปรตีนเซรีซิน.....	50

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.13 IR spectrum ของแคลเซียมไฮดรอกซีอะปาไทต์.....	52
4.14 IR spectrum ของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลที่ได้จากการผสมระหว่างโปรตีน เชรีซินจากไหมขาวกับคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส และแคลเซียมไฮดรอกซีอะปาไทต์ สูตร WHAp0.1, WHAp0.5 และสูตรที่ไม่มีการเติมแคลเซียมไฮดรอกซีอะปาไทต์.....	53
4.15 IR spectrum ของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลที่ได้จากการผสมระหว่างโปรตีน เชรีซินจากไหมเหลือง กับคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส และแคลเซียมไฮดรอกซีอะปาไทต์ สูตร YHAp0.1, YHAp0.5 และสูตรที่ไม่มีการเติมแคลเซียมไฮดรอกซีอะปาไทต์.....	53
4.16 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์การบวมตัวของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลที่มีการเติมแคลเซียม ไฮดรอกซีอะปาไทต์ 0.1 และ 0.5 %w/v ของไหมขาว และสูตรที่ไม่มีการเติมแคลเซียมไฮดรอกซีอะปาไทต์ สูตร W50:50.....	54
4.17 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์การบวมตัวของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลที่เติมแคลเซียม ไฮดรอกซีอะปาไทต์ 0.1 กรัม และ 0.5 %w/v ของไหมเหลือง และสูตรที่ไม่มีการเติมแคลเซียมไฮดรอกซีอะปาไทต์ สูตร Y50:50.....	55
4.18 แสดงค่าความเค้นแรงกด (Compressive stress) ที่ 50% ของความหนาชิ้นงานที่เติมและไม่เติมแคลเซียมไฮดรอกซีอะปาไทต์ 0.1 และ 0.5 กรัม อัตราส่วนที่ 50:50 ของไหมขาวและไหมเหลือง.....	56
4.19 แสดงค่าความแข็งยืดหยุ่น (Compressive modulus) ที่ 50% ของความหนาชิ้นงาน ที่เติมและไม่เติมแคลเซียมไฮดรอกซีอะปาไทต์ 0.1 และ 0.5 กรัม อัตราส่วนที่ 50:50 ของไหมขาวและไหมเหลือง.....	57
4.20 แสดงอุณหภูมิเริ่มการสลายตัวและอุณหภูมิสลายตัวหมดของเนื้อเยื่อโครงสร้าง ไฮโดรเจลจากโปรตีนเชรีซินไหมขาว และไหมเหลืองกับคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ที่อัตราส่วนต่างๆ ที่เติมแคลเซียมไฮดรอกซีอะปาไทต์.....	58
4.21 แสดงการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของโปรตีนเชรีซิน.....	60
4.22 แสดงการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส.....	60
4.23 แสดงการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของแคลเซียมไฮดรอกซีอะปาไทต์.....	60
4.24 แสดงการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของเนื้อเยื่อโครงสร้างที่ผสมระหว่างโปรตีนเชรีซิน จากไหมขาวและคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส อัตราส่วน 50:50 และสูตรที่เติมแคลเซียมไฮดรอกซีอะปาไทต์ 0.1 และ 0.5 %w/v.....	61
4.25 แสดงการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของเนื้อเยื่อโครงสร้างที่ผสมระหว่างโปรตีนเชรีซิน จากไหมเหลือง และคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสอัตราส่วน 50:50 และสูตรที่เติมแคลเซียมไฮดรอกซีอะปาไทต์ 0.1 และ 0.5 %w/v.....	61

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ก-1 สูตร W100:0 กำลังขยาย 50X.....	70
ก-2 W100:0 ที่กำลังขยาย 200X.....	70
ก-3 สูตร W20:80 ที่กำลังขยาย 50X.....	70
ก-4 สูตร W20:80 ที่กำลังขยาย 200X.....	70
ก-5 สูตร W50:50 ที่กำลังขยาย 50X.....	70
ก-6 สูตร W50:50 ที่กำลังขยาย 200X	70
ก-7 สูตร Y50:50 ที่กำลังขยาย 50X.....	70
ก-8 สูตร Y50:50 ที่กำลังขยาย 200x.....	70
ก-9 สูตร WHAp0.1 ที่กำลังขยาย 50X.....	71
ก-10 สูตร WHAp0.5 ที่กำลังขยาย 50X.....	71
ก-11 สูตร YHAp0.1 ที่กำลังขยาย 50X.....	71
ก-12 สูตร YHAp0.1 ที่กำลังขยาย 50X.....	71
ฉ-1 แสดงเทอร์โมแกรมของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลโปรตีนเซรีซินใหม่ร่วมกับ คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่เติมแคลเซียมไฮดรอกซีอะปาไทต์ 0.1 %w/v สูตร WHAp0.1.....	90
ฉ-2 แสดงเทอร์โมแกรมของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลโปรตีนเซรีซินใหม่ร่วมกับคาร์บอกซีเมทิล เซลลูโลสที่เติมแคลเซียมไฮดรอกซีอะปาไทต์ 0.5%w/v สูตร WHAp0.5.....	90
ฉ-3 แสดงเทอร์โมแกรมของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลโปรตีนเซรีซินใหม่เหลืองกับคาร์บอก ซีเมทิลเซลลูโลสที่เติมแคลเซียมไฮดรอกซีอะปาไทต์ 0.1 %w/v สูตร YHAp0.1.....	91
ฉ-4 แสดงเทอร์โมแกรมของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลโปรตีนเซรีซินใหม่เหลืองกับ คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่เติมแคลเซียมไฮดรอกซีอะปาไทต์ 0.5 %w/v สูตร YHAp0.5.....	91

คำย่อ/สัญลักษณ์

คำย่อ/สัญลักษณ์	คำอธิบาย
°C	องศาเซลเซียส
CMC	Carboxymethylcellulose
FTIR	Fourier transform spectroscopy
HAp	Hydroxyapatite
SEM	Scanning electron microscope
TGA	Thermalgravimetric analysis
µm	micrometer
%w/v	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร
W	โปรตีนเซรีซินไหมขาว
Y	โปรตีนเซรีซินไหมเหลือง
100 : 0	อัตราส่วนระหว่างสารละลายเซรีซิน 100% และแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ 0%
50 : 50	อัตราส่วนระหว่างสารละลายเซรีซิน 50% และแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ 50%
20 : 80	อัตราส่วนระหว่างสารละลายเซรีซิน 20% และแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ 80%
0 : 100	อัตราส่วนระหว่างสารละลายเซรีซิน 0% และแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ 100%
HAp 0.1	เนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลที่มีการเติมแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ 0.1 %w/v
HAp 0.5	เนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลที่มีการเติมแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ 0.5 %w/v

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

อุตสาหกรรมไหมในปัจจุบัน ส่วนใหญ่จะมีน้ำทิ้งจากการต้มไหมและรังไหมที่เหลือทิ้งจากการใช้ในการสาวไหมในน้ำร้อนที่ค่อนข้างมาก ในงานวิจัยนี้จึงได้นำรังไหมมาใช้ในการวิจัยเพื่อเพิ่มมูลค่าของรังไหมรวมทั้งเพิ่มทางเลือกให้กับวัสดุทางการเกษตร งานวิจัยนี้ศึกษาการเตรียมไฮโดรเจลจากคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส เซรีซินจากไหมขาว และไหมเหลือง รวมทั้งนำมาผสมกับ แคลเซียมไฮดรอกซีอะซิเตตเพื่อปรับปรุงสมบัติของไฮโดรเจลให้ดีขึ้น ซึ่งอาจเป็นตัวช่วยในการทดแทนเป็นวัสดุทางการแพทย์สามารถปรับปรุงไปเป็นวัสดุทดแทนกระดูกได้ในอนาคตข้างหน้า อีกทั้งประเทศไทยกำลังประสบปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อมโดยเฉพาะเรื่องของขยะ และของเสียที่ส่งผลกระทบต่อสภาวะแวดล้อม ซึ่งส่วนใหญ่เป็นพอลิเมอร์ที่มีการผลิตขึ้นมาจากปิโตรเคมีภัณฑ์เป็นวัสดุที่ยากต่อการย่อยสลาย จึงนำไปสู่การศึกษาวิจัยเพื่อนำวัสดุทางธรรมชาติที่หาได้ง่าย และมีปริมาณมากมายให้เกิดประโยชน์สูงสุด

ไหม (Silk)^[1] เป็นวัสดุที่ได้จากหนอนไหม *Bombyx mori*. มีการผลิต และใช้งานในประเทศไทย องค์ประกอบหลักของไหม คือ โปรตีน 2 ชนิด ได้แก่ ไฟโบรอิน^[2] คิดเป็นส่วนประกอบประมาณ 62.5–67.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และเซรีซินประมาณ 22.0–25.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของโปรตีนไหมทั้งหมด โดยในทางอุตสาหกรรม โปรตีนไฟโบรอินมักถูกนำไปใช้ประโยชน์ยกตัวอย่างเช่น ในอุตสาหกรรมสิ่งทอ ซึ่งเป็นอุตสาหกรรมที่มีกระบวนการฟอกไหม (Degumming) คือ กระบวนการสกัดไฟโบรอินไปใช้งาน ทำให้มีปริมาณเซรีซินเป็นของเสียที่เหลือจากอุตสาหกรรมนี้เป็นจำนวนมาก นอกจากนี้ไหมยังถูกนำไปใช้งานในอุตสาหกรรมอื่นๆ^[3] เช่น อุตสาหกรรมอาหาร อุตสาหกรรมยา หรือเป็นส่วนประกอบในเครื่องสำอาง โดยจะมีส่วนของเซรีซินซึ่งเป็นส่วนที่เหลือทิ้งจากการสกัดไฟโบรอินไปใช้งาน ส่วนโปรตีนเซรีซิน(Sericin)^[4] จากไหมเป็นพอลิเมอร์ทางธรรมชาติประเภทโปรตีนที่สามารถละลายน้ำได้ ประกอบไปด้วยกรดอะมิโนหลายชนิด เช่น ซีรีน (Serine) ซึ่งเป็นกรดอะมิโนที่พบมากที่สุด เป็นโปรตีนทางธรรมชาติ^[5] นอกจากนำไปใช้ในอุตสาหกรรมทอผ้า อุตสาหกรรมอาหาร และยาหรือเป็นส่วนประกอบในเครื่องสำอางยังสามารถนำไปใช้ในการผลิตเป็นวัสดุทางการแพทย์ได้

คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส(Carboxymethylcellulose; CMC)^{[6],[7]} หรือโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (Sodium carboxymethylcellulose) เป็นอนุพันธ์ของเซลลูโลสประเภทหนึ่งที่เกิดจากการแทนที่โครงสร้างของเซลลูโลสด้วยหมู่เมทิล และหมู่คาร์บอกซีเมทิล มีลักษณะเป็นของแข็งสีขาว ไม่มีกลิ่น ไม่มีรส ไม่เป็นอันตรายแก่ร่างกาย และไม่ส่งผลเสียต่อสิ่งแวดล้อม มีสมบัติเป็นสารเพิ่มความข้นหนืดที่ช่วยในการยึดเกาะ และเป็นสารคงสภาพไม่เปลี่ยนแปลงสมบัติเมื่อเก็บเป็นเวลานาน ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถละลายได้ทั้งในน้ำร้อน และน้ำเย็น แต่ไม่ละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ ถูกนำมาใช้ประโยชน์หลากหลายในทางอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมยา อุตสาหกรรมเครื่องสำอาง อุตสาหกรรมอาหาร อุตสาหกรรมกาว เป็นต้น^[1]

แคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ (Calciumhydroxyapatite;HAp)^[8] เป็นสารประกอบอนินทรีย์ที่เป็นองค์ประกอบของกระดูก และสามารถเกิดพันธะกับกระดูกได้ ด้วยเหตุนี้จึงได้มีการนำมาปรับปรุงเพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในทางการแพทย์ได้ ซึ่งในงานวิจัยได้ศึกษาวัสดุเนื้อเยื่อไฮโดรเจลที่ทำจากคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสกับโปรตีนเซรีซินผสมกับแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ พบว่าช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของสมบัติเชิงกลได้ดีขึ้น ช่วยลดการละลายน้ำของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส และสามารถนำมาทดแทนกระดูกได้

สารตัวอย่างที่ได้จากการผสมระหว่างคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสกับเซรีซิน โดยใช้เทคนิคการทำแห้งแบบแช่แข็ง (Freeze-drying) คือ เนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจล (Hydrogel scaffold) สามารถสังเคราะห์หรือเตรียมได้จากวัสดุที่ได้จากธรรมชาติ ซึ่งเป็นพอลิเมอร์จำเพาะชนิดหนึ่งที่มีโครงสร้างร่างแหสามมิติ มีรูพรุนมาก มีความสามารถในการดูดซับน้ำ และสารละลายบางชนิดได้เป็นอย่างดี โดยที่โครงสร้างของไฮโดรเจลยังคงความแข็งแรง ไม่เกิดการละลายน้ำ และยังสามารถเข้ากันได้ดีกับสารชีวภาพในร่างกายมนุษย์ ไม่เป็นพิษต่อเซลล์ จึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในทางการแพทย์ได้^[1] ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาวัสดุเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจล^{[9],[10]} ที่ทำจากคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส และโปรตีนเซรีซินในการช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการรักษา และมีการปรับปรุงสมบัติการละลายน้ำ เพื่อลดการละลายน้ำให้แก่เนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลให้มีสมบัติที่ดีขึ้น เนื่องจากคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส มีความสามารถในการบวมน้ำที่ดีเยี่ยม และมีค่าความแข็งยืดหยุ่นที่สูง ส่วนโปรตีนเซรีซินมีความสามารถในการเหนียวน้ำให้เซลล์มายึดเกาะ

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อศึกษาการเตรียมเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลจากสารละลายผสมไหมเหลือง และไหมขาว กับคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส และแคลเซียมไฮดรอกซีอะปาไทต์ โดยศึกษาสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และสมบัติทางกายภาพ

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. เตรียมสารละลายเซรีซินจากรังไหมขาว และไหมเหลืองที่มีความเข้มข้น 2 %w/v
2. เตรียมสารละลายคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย 90,000 และมี DS = 0.7 ที่ความเข้มข้น 5 %w/v
3. เตรียมของผสมระหว่างสารละลายเซรีซินกับสารละลายคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่อัตราส่วน 100 ต่อ 0, 50 ต่อ 50 และ 20 ต่อ 80
4. แช่แข็งที่อุณหภูมิต่ำ -2 องศาเซลเซียส
5. ขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเทคนิคการทำแห้งแบบแช่แข็ง (Freeze drying)
6. สมบัติที่ทำการทดสอบ คือ ทดสอบสมบัติทางกายภาพได้แก่ การบวมน้ำ ความพรุน (Porosity) ความหนาแน่น และดูพื้นผิวชิ้นงานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค Thermogravimetric Analysis (TGA) ทดสอบหาหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR) และทดสอบสมบัติเชิงกลด้วยการทดสอบค่าความแข็งแรงกดอัด (Compressive modulus)
7. ปรับปรุงความแข็งของชิ้นงานสูตรที่เหมาะสมด้วยแคลเซียมไฮดรอกซีอะปาไทต์เข้มข้น 0.1 %w/v และ 0.5 %w/v และทดสอบสมบัติต่างๆ
8. สรุปผล

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบถึงสมบัติต่างๆ ของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลจากโปรตีนเซรีซิน และคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่ปรับปรุงด้วยไฮดรอกซีอะปาไทต์ ซึ่งเป็นวัสดุที่อาจนำไปประยุกต์ใช้เป็นวัสดุทางการแพทย์ได้
2. เป็นการเพิ่มทางเลือก และเพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุทางการแพทย์

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

วิศวกรรมเนื้อเยื่อ (Tissue Engineering)^[11] เป็นกระบวนการสร้างเนื้อเยื่อ เพื่อทดแทนซ่อมแซม เนื้อเยื่อที่สูญเสียที่ร่างกายไม่สามารถสร้างขึ้นมาใหม่หรืองอกขึ้นมาใหม่ได้ ยกตัวอย่างเช่น เส้นประสาท กระดูก กระดูกอ่อน กล้ามเนื้อหัวใจ เป็นต้น กระบวนการสร้างเนื้อเยื่อต้องใช้เวลาและความรู้ต่างๆ สามด้านหลัก ได้แก่ วิศวกรรมของวัสดุ ชีววิทยาของเซลล์ และวิศวกรรมชีวเคมี ทำเป็นโครงสร้างสำหรับส่งเสริมการเจริญของเนื้อเยื่อ เรียกว่า เนื้อเยื่อโครงสร้าง (Scaffold)^[9] เป็นโครงสร้างสามมิติ มีรูพรุนมาก และมีอัตราส่วนพื้นที่ต่อปริมาตรมาก พัฒนามาจากวัสดุที่ได้จากธรรมชาติ (Biomaterials) เช่น ไหม ไคติน ไคโตซาน คอลลาเจน เจลาติน เป็นต้น เพื่อให้เนื้อเยื่อโครงสร้างมีความสามารถในการเข้ากันได้กับเนื้อเยื่อในร่างกาย (Biocompatibility) ไม่เป็นพิษต่อเซลล์ จึงเหนี่ยวนำให้เซลล์มายึดเกาะและกระตุ้นการเจริญเติบโตของเนื้อเยื่อใหม่ได้

2.1 ไหม(Silks)^[1]

หนอนไหม (Silkworm) มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Bombyx mori* อยู่ในวงศ์ Bombycidae หนอนไหมเป็นแมลงที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบสมบูรณ์ (Completely metamorphosis insect) แบ่งออกเป็น 4 ระยะ ได้แก่ ไข่ ตัวหนอน ดักแด้ และผีเสื้อ มีเพียงระยะตัวหนอนเท่านั้นที่กินอาหาร ซึ่งนำจะนำสารชนิดต่างๆ จากใบหม่อนไปสร้างโครงกระดูกโดยผ่านการย่อยและการดูดซึมเป็นปริมาณ 1 ใน 3 ของสารอาหารทั้งหมด ครึ่งหนึ่งของโปรตีนที่ดูดซึมจากใบหม่อนจะถูกนำไปใช้ผลิตเส้นไหม เมื่อถึงวัย 5 วันแรกต่อมไหม (Silk gland) จะหนักเพียง 6.36 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักตัวไหม เมื่อไหมสุกก่อนเข้าทำรัง ต่อมไหมจะหนักถึง 41.97 เปอร์เซ็นต์ จะเห็นว่าปลายวัยที่ 5 สารอาหารโดยเฉพาะโปรตีนเกือบทั้งหมดถูกเปลี่ยนไปเป็นสารที่ใช้ชักใยทำรังหรือเส้นไหมนั่นเอง เส้นใยที่ออกมามีคุณสมบัติหลายอย่างที่เปรียบมิได้ ไหมเป็น “ราชินีแห่งเส้นใย” ที่ได้มาจากโปรตีนที่หนอนไหมขับออกมาเพื่อป้องกันตัวเองขณะเป็นดักแด้ เส้นใยที่ได้มีความยาวต่อเนื่อง (Filaments) เส้นใยไหมเป็นเส้นใยธรรมชาติที่ได้จากโปรตีนเช่นเดียวกับเส้นใยขนสัตว์ เส้นไหมเกิดจากการพันออกมาจาก ตัวหนอนไหม การสังเคราะห์โปรตีนในเส้นไหมทำได้ในเซลล์ของต่อมไหมที่อยู่ในตัวหนอนไหม สารไหมเหลว (Liquid silk) สามารถขับออกมาจากต่อมไหมส่วนท้าย (Posterior silk gland) หลังจากนั้นจะส่งสารไหมเหลวไปที่ต่อมไหมส่วนกลาง (Middle silk gland) ในระหว่างที่อยู่ในต่อมไหมส่วนกลาง สารไหมเหลวจะมีการเปลี่ยนรูปกลายเป็นเจลาติน (gelatin) ที่มีความแข็งแรงขึ้น ในต่อมไหมส่วนกลางยังมีต่อมที่สามารถสร้างโปรตีนอีกชนิดหนึ่งที่มีสมบัติเป็นกาวในการเคลือบเจลาตินเรียกโปรตีนชนิดนี้ว่า เซรีซิน (Sericin)

หลังจากนั้นเจลาตินจะมีความเหนียวและแข็งขึ้นโดยอาศัยการสลายหัวไปมาของตัวหนอนไหม อากาศเคลื่อนไหวจะเกิดขึ้นที่บริเวณต่อไหมส่วนหน้า เรียกเจลาตินที่มีความเหนียวขั้นนี้ว่า ไฟโบรอิน (Fibroin) หลังจากที่มีการรวมกันของไฟโบรอิน 2 เส้น และมีการเชื่อมติดกันด้วยกาวไหม เซรีซิน จะมีการผ่านรูขนาดเล็ก (Orifice of spinneret) ออกมาจากตัวของหนอนไหม และได้เป็น เส้นใยที่ใช้ในการทำเครื่องนุ่งห่มหรือสิ่งทอต่างๆ สามารถจำแนกไหมออกเป็น 2 ประเภท ดังนี้คือ

1. ไหมเลี้ยง (Mulberry silk)

เป็นหนอนไหมที่มนุษย์เพาะเลี้ยงโดยให้อาหาร คือ ใบหม่อน (Mulberry leaves) สดๆ ซึ่งไหมชนิดนี้ มีสีค่อนข้างขาว และหลังการลอกกาวจะมีความมันเงาเพิ่มขึ้น

2. ไหมป่า (Wild silk)

เป็นไหมที่มนุษย์ไม่ได้เพาะเลี้ยงโดยปกติ ไหมทาชาร์ (Tussah silk) มีแหล่งกำเนิดอยู่ที่จีน และอินเดีย เลี้ยงด้วยใบโอ๊ก ซึ่งไหมป่าจะให้เส้นใยที่มีสีน้ำตาล หยาบและไม่สม่ำเสมอเมื่อเทียบกับ เส้นใยจากไหมเลี้ยง

ไหมไทยถือว่าเป็นไหมเลี้ยงซึ่งเป็นตัวอ่อนของผีเสื้อกลางคืนชนิดหนึ่งเป็นแมลงในอันดับ เลพิโดปเทอรา มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Bombyx mori*. และมีชื่อสามัญว่า Silkworm อยู่ในวงศ์ Bombycidae เป็นพันธุ์ที่มีคุณภาพดีที่สุด นิยมเลี้ยงกันมากในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศ ไทย ปัจจุบันการเลี้ยงไหมและการผลิตไหมได้รับการส่งเสริมให้ทำเป็นระบบอุตสาหกรรมแบบ Sericulture ซึ่งเป็นระบบที่ได้รับการพัฒนาจากประเทศญี่ปุ่นแต่มีลักษณะที่แตกต่างกันเนื่องจากเส้น ใยมีสีเหลืองและค่อนข้างหยาบ ไหมไทยมีส่วนประกอบที่เป็นกาวไหมปริมาณมากถึง 38 เปอร์เซ็นต์ มากกว่าไหมเลี้ยงชนิดอื่นๆ ซึ่งปกติมีกาวไหมเพียง 20-25 เปอร์เซ็นต์เท่านั้นทำให้เส้นใยไหมไทยมี ลักษณะเฉพาะตัวเมื่อนำมาทอผ้าไหมจัดเป็นเส้นใยที่หยาบ สวยงาม มีเอกลักษณ์เป็นของตัวเอง ซึ่ง เส้นใยอื่นไม่สามารถเทียบได้ มีสมบัติเฉพาะ เหมาะแก่การทำเป็นเสื้อผ้า เพราะให้ความสบาย ความ สวยงาม และมีความทนทานที่แข็งแรงที่สุดในบรรดาเส้นใยธรรมชาติทั้งหมด

ไหมญี่ปุ่น ไหมจีนหรือไหมขาวมีลักษณะรูปร่างเป็นทรงกลม บ่อมากกว่าไหมไทยเส้นไหมมีสีขาว องค์กรประกอบเหมือนกับไหมไทยทั่วไปแตกต่างกันที่ลักษณะของสี และองค์ประกอบของกรดอะมิโน

2.1.1 องค์ประกอบและโครงสร้างไหม^[12]

เส้นไหมประกอบด้วยโปรตีนหลัก 2 ชนิด คือไฟโบรอิน (Fibroin) และเซรีซิน (Sericin) ไฟ โบรอินประกอบด้วยกรดอะมิโนที่สำคัญคือ ไกลซีน (ร้อยละ43) อะลานีน (ร้อยละ30) และเซอรีน (ร้อยละ12) สายโพลิโกเพปไทด์มอนอเมอร์ มีลำดับกรดอะมิโน (ไกลซีน-อะลานีน-ไกลซีน-อะลานีน- ไกลซีน-เซอรีน/ไทโรซีน) เป็นสัดส่วนของกรดอะมิโนที่มีขนาดเล็ก และไม่มีซัลฟิโดรเจน โครงสร้างเส้นไหม แบ่ง ได้เป็น 3 แบบ คือ แผ่นบีต้า (β -sheet) หรือ pleated sheet^[13] ซึ่งเป็นแผ่นพับซ้อนกันไปมา เกลียวอัลฟา (α -helical) จะอยู่ในส่วนที่เป็นผลึก (Crystalline) และโครงสร้างเกลียวสุ่ม (Random coil) จะอยู่ในส่วนที่เป็นอสัณฐาน โครงสร้างอสัณฐานนี้ จะเป็นส่วนที่ทำหน้าที่ด้านกายภาพโดยรวม ของเส้นไหม และโครงสร้างที่เป็นผลึก เป็นส่วนที่ทำให้เส้นไหมมีความแข็งแรง และมีความยืดหยุ่น ซึ่ง คุณสมบัติเชิงกลของไหมไฟโบรอินมีค่าสูงมากเมื่อเทียบกับวัสดุชนิดอื่นๆ

2.1.2 คุณสมบัติของเส้นไหม

ความแข็งแรง/ความยืดหยุ่น

ไหมมีความแข็งแรงสูง และสามารถยืดหยุ่นได้ดี จากรายงานพบว่า เส้นไหมมีความแข็งแรงตั้งแต่ 48 จิกะปาสคาลขึ้นไป ความแข็งแรงของเส้นไหมขณะเปียกจะลดลงร้อยละ 15-20 เมื่อเทียบกับเส้นไหมแห้งในส่วนของความยืดหยุ่นเส้นไหมสามารถยืดหยุ่นได้ตั้งแต่ร้อยละ 35 และพบว่าเส้นไหมสามารถหดกลับคืนได้ถึงร้อยละ 92

การละลาย

ไฟโบรอินไม่ละลายใน น้ำ แอลกอฮอล์ กรดหรือเบสอ่อน แต่ละลายในกรดหรือเบสแก่ หรือกรดกัดโลหะเข้มข้น เช่น กรดซัลฟูริก (Sulfuric acid) กรดฟอร์มิก (Formic acid) เฮกซะฟลูออโรไอโซโพรพานอล (Hexafluoroisopropanol) นอกจากนี้ไหมไฟโบรอินของไหมสามารถละลายในสารละลายเกลือความเข้มข้นสูง เช่น แคลเซียมไนเตรต (Calcium nitrate) ลิเทียมโบรไมด์ (Lithium bromide) ในขณะที่เซรีซินสามารถละลายได้ในน้ำร้อน สารละลายกรดหรือเบสหรือเอนไซม์ย่อยโปรตีน

ความหนาแน่น

ไหมมีความหนาแน่นสูงกว่าน้ำ เส้นไหมที่มีเซรีซินมีค่าความหนาแน่นอยู่ในช่วง 1,320-1,400 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร แต่เมื่อกำจัดเซรีซินออกความหนาแน่น จะมีค่าลดลงเล็กน้อยอยู่ในช่วง 1,300-1,380 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร การสลายตัวทางชีวภาพสมบัติในการสลายตัวของไหม ถือว่ามีความสำคัญต่อการนำไปใช้งานโดยเฉพาะในทางการแพทย์ เส้นไหมจะสูญเสียความแข็งแรงภายในระยะเวลา 1 ปี เมื่ออยู่ภายในร่างกาย และเมื่อเวลาผ่านไป 2 ปี เส้นไหมจะไม่ถูกจดจำโดยเซลล์ของร่างกาย อย่างไรก็ตาม เมื่อเวลาผ่านไป เอนไซม์ไทโรซิเนส (Tyrosinase) ภายในร่างกาย จะสามารถย่อยไหมตามกลไกการกำจัดสิ่งแปลกปลอมที่เข้าสู่ร่างกายได้ จึงถือว่าไหมเป็นวัสดุที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ แต่ในทางตรงกันข้าม เส้นไหมที่อยู่บริเวณเปลือกนอกรังไหมจะมีความคงทนเป็นเวลานาน เนื่องจากว่าหนอนไหมจะสร้างสารที่ยับยั้งเอนไซม์โปรตีเอส ภายในต่อมไหม และหลังออกมาเก็บไว้ที่บริเวณเปลือกนอกรังไหม เพื่อป้องกันไม่ให้เส้นไหมถูกทำลายด้วยเอนไซม์ดังกล่าว

การป้องกันการแพ้หรือการอักเสบ

การอักเสบของเซลล์เกิดจากการต่อต้านของระบบภูมิคุ้มกัน เมื่อมีสิ่งแปลกปลอมเข้าสู่ร่างกาย เซลล์และเนื้อเยื่อที่เกี่ยวข้องกับการอักเสบ ได้แก่ เซลล์เม็ดเลือด (เซลล์เม็ดเลือดขาว และเกล็ดเลือด) หลอดเลือด และเนื้อเยื่อเกี่ยวพัน (Connective tissue) ปัจจุบันพบว่า วัสดุทางชีวภาพสามารถป้องกันการแพ้ หรือการอักเสบของร่างกายได้

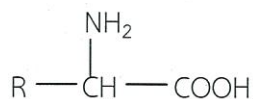
โครงยึด (Scaffold) ซึ่งเป็นส่วนผสมระหว่างไหมไฟโบรอินกับเจลลาตินที่ได้จากการเตรียมโดยใช้เทคนิคการปั่นด้วยกระแสไฟฟ้าแรงสูง (Electrospinning) ก่อนนำไปปลูกถ่ายบริเวณใต้ผิวหนังพบว่าโครงยึดที่เตรียมจากวิธีดังกล่าวสามารถเข้ากับร่างกายได้ดี และคาดว่าจะสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในงานวิศวกรรมเนื้อเยื่อ เพื่อปลูก ถ่ายเส้นเลือดได้ เมื่อศึกษาผลของแผ่นฟิล์มไหมต่อการอักเสบของเซลล์ ไฟโบรบลาสต์ทั้งในห้องปฏิบัติการ (In vitro) และร่างกายสิ่งมีชีวิต (In vivo) พบว่าแผ่นฟิล์มไหมช่วยส่งเสริมให้เซลล์มีการเกาะติด และขยายขนาดของเซลล์ได้เป็นอย่างดี โดยไม่ก่อให้เกิดการต่อต้านจากเซลล์อันเป็นสาเหตุของการอักเสบ การประยุกต์ใช้ประโยชน์จากเส้นไหมมนุษย์รู้จักใช้ประโยชน์จากไหมมาตั้งแต่อดีต สำหรับประเทศไทยถือได้ว่าไหมเกี่ยวข้องกับวิถีชีวิตผู้คนมายาวนานเช่นกัน ดังปรากฏหลักฐานจากการค้นพบมรดกโลกบ้านเชียง จังหวัดอุดรธานี ที่พบเศษเส้นไหมที่มีอายุหลายพันปีรวมอยู่ด้วย ในอดีตไหมถูกนำมาทอเป็นเครื่องนุ่งห่มหรือส่วนประกอบของอุปกรณ์ แต่ปัจจุบันมีรายงานการนำไหมไปใช้ประโยชน์มากขึ้น ได้แก่ ส่วนประกอบในเครื่องสำอาง สารเติมแต่งในอาหาร และเครื่องดื่ม วัสดุทางการแพทย์ โดยเฉพาะในวิศวกรรมเนื้อเยื่อ (Tissue engineering) การแพทย์ฟื้นฟู (Regenerative medicine) การรักษาด้วยยีนส์ (Gene therapy) การควบคุมการปลดปล่อยยา (Controlled drug delivery) และเทคโนโลยีนาโนชีวภาพ (Bionanotechnology)

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบที่สำคัญของเส้นใยไหม^[1]

องค์ประกอบที่สำคัญ	ปริมาณในเส้นใย (เปอร์เซ็นต์)
กาวไหมหรือเซรีซิน	22-25
ไหมหรือไฟโบรอิน	62.5-67
น้ำ	10-11
เกลือและอื่นๆ	1-1.5

เส้นใยไหมมีปริมาณของซัลเฟอร์จำนวนเล็กน้อย เป็นสารชีวโมเลกุลที่มีมวลโมเลกุลสูง โปรตีนทุกชนิดจะประกอบไปด้วยธาตุคาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) ไนโตรเจน (N) ออกซิเจน (O) และกำมะถัน (S) แต่โปรตีนบางชนิดมีธาตุฟอสฟอรัส (P) เหล็ก (Fe) สังกะสี (Zn) และทองแดง (Cu) เพิ่มเข้ามา เส้นไหมเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติชนิดหนึ่งที่เรียกว่าโปรตีน (Protein) สามารถถูกแยกออกจากโปรตีนได้โดยการไฮโดรไลสด้วยกรด กรดอะมิโนที่พบในโปรตีนมีทั้งหมด 20 ชนิด โดยแต่ละชนิดมีโครงสร้างที่ต่างกันที่หมู่ R กรดอะมิโนต่อกันเป็นสายโซ่ยาว เรียกว่า โซ่พอลิเพปไทด์ ต่อกันอยู่ในลักษณะเป็นพอลิเมอร์ที่ไม่มีการแตกกิ่งพันระควาแลนด์ที่เชื่อมอยู่ระหว่างกรดอะมิโน มีชื่อว่า พันธะเพปไทด์ซึ่งพันธะนี้เป็นพันธะเอไมด์ที่เกิดการสูญเสีย น้ำจากหมู่คาร์บอกซิลิกของกรดอะมิโนตัวหนึ่งกับหมู่แอลฟาอะมิโนของกรดอะมิโนที่อยู่ถัดไป โมเลกุลของโปรตีนอาจประกอบด้วยโซ่พอลิเพปไทด์เพียงโซ่เดียวหรือมากกว่าก็ได้ โดยมีความยาวที่แตกต่างกันออกไป โดยมีกรดอะมิโนตั้งแต่ประมาณ 40 ถึงมากกว่า 4,000 หน่วย ซึ่งโปรตีนแต่ละชนิดมีส่วนประกอบทางเคมี มวลโมเลกุล และการเรียงลำดับของกรดอะมิโนที่จำเพาะ โดยกรดอะมิโนมีสูตรโมเลกุลทั่วไป คือ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภายในโมเลกุลของกรดแอลฟาอะมิโน จะมีหมู่อะมิโนต่ออยู่ที่ตำแหน่งแอลฟาคาร์บอนของกรด คาร์บอกซิลิก (กรดอะมิโนทุกตัวมีแอลฟาคาร์บอน ยกเว้นไกลซีน) แต่เนื่องจากเอมีนเป็นเบส และคาร์บอกซิลิกเป็นกรดจึงเกิดการส่งผ่านโปรตอนจากกรดให้เบส ซึ่งสูตรโมเลกุลของกรดอะมิโนจึงเขียนอยู่ในรูปที่แตกตัวเป็นไอออน หรือรูปที่มีประจุสองขั้วได้ ดังนี้



เส้นไหมเป็นเส้นใยที่เป็นสารประกอบประเภทพอลิเอไมด์ (Polyamide) เกิดจากการมีหน่วยของโมเลกุลขนาดเล็กที่เรียกว่า กรดอะมิโน (Amino acid) มาต่อกันเป็นสารที่มีโมเลกุลใหญ่ด้วยพันธะเพปไทด์

2.1.3 ไฟโบรอิน (Silk Fibroin)^[1]

โปรตีนเส้นใยมีองค์ประกอบหลักทางเคมี คือ โปรตีนที่เรียกว่า ไฟโบรอิน (Fibroin) เป็นโปรตีนที่ไม่ละลายน้ำ (ประมาณ 78 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักไหมดิบ) จัดเป็นโปรตีนเส้นใยที่ประกอบด้วยกลุ่มโปรตีนสายหลัก (Heavy chain) น้ำหนักประมาณ 350 กิโลดาลตัน และโปรตีนสายรอง (Light chain) น้ำหนักประมาณ 25 กิโลดาลตัน และเชื่อมกันด้วยพันธะไดซัลไฟด์ ประกอบด้วยกรดอะมิโนประมาณ 15 ชนิด กรดอะมิโนหลักๆ ที่พบในเส้นใย ได้แก่ ไกลซีน (Glycine, 40 เปอร์เซ็นต์) อะลานีน (Alanine, 29 เปอร์เซ็นต์) และเซรีน (Serine, 12 เปอร์เซ็นต์) กรดอะมิโนเหล่านี้ต่อกันเป็นสายยาวที่เรียกว่า โซ่พอลิเพปไทด์ เป็นเส้นยาวขนานกับแกนในลักษณะเป็นเส้นใยหรือเป็นแผ่น มีความแข็ง เหนียว และอาจยืดหยุ่นได้

การคำนวณน้ำหนักโมเลกุลของไฟโบรอินทำได้ยาก เนื่องจากไฟโบรอินไม่ละลายในสารละลายทั่วไป แต่ละลายในสารละลายบางชนิดเท่านั้น 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

2.1.4 เซรีซิน (Sericin)^[4]

เป็นโปรตีนใหม่ที่มีความสามารถในการละลายได้ในน้ำ ซึ่งประกอบด้วยกรดอะมิโนที่มีขั้วในอัตราส่วนที่สูง นอกจากไกลซีน อะลานีน และเซอรีนแล้ว เซรีซินยังประกอบด้วยกรดกลูตามิก ทรีโอนีน และไทโรซีน กรดอะมิโนเหล่านี้จะก่อเป็นบริเวณอสัณฐาน (Amorphous) และสามารถแยกเซรีซินออกจากรังไหมได้โดยผ่านกระบวนการสาวไหมในน้ำร้อน โดยปกติเซรีซินเป็นสิ่งที่เหลือจากการสาวไหม และไม่มีการนำไปใช้ประโยชน์ ซึ่งปริมาณการทิ้งของเซรีซินในกระบวนการสาวไหมมีปริมาณราว 50,000 ตันต่อรังไหมที่ใช้ในการสาวไหม 1,000,000 ตัน จะเห็นได้ว่าน้ำที่เหลือจากการสาวไหมที่มีเซรีซินละลายอยู่ในปริมาณมาก ดังนั้นถ้าสามารถนำน้ำที่เหลือนี้หรือนำเซรีซินที่มีในน้ำเหลือทิ้งนี้มาใช้ประโยชน์ ก็จะทำให้เกิดผลดีในทางเศรษฐกิจ ในปัจจุบันได้มีการค้นคว้าวิจัยการนำเซรีซินไปใช้ประโยชน์อย่างมากมาย เพราะเซรีซินเป็นสารที่ได้จากธรรมชาติ ไม่มีพิษ ไม่ก่อให้เกิดผลข้างเคียงเมื่อนำมาใช้ จึงสามารถนำมาใช้ได้อย่างกว้างขวาง

องค์ประกอบทางเคมีของเซรีซิน

เซรีซินเป็นกาไหมที่เป็นสารประกอบโปรตีนที่มีขั้วมากหรือมีองค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญที่สร้างแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลได้สูง ได้แก่ กลุ่มของเคมีจำพวกกลุ่มไฮดรอกซิล (-OH group) กลุ่มคาร์บอนิล (-COOH group) และกลุ่มอะมิโน (-NH group) ซึ่งสามารถสร้างพันธะไฮโดรเจนได้เป็นอย่างดี น้ำหนักโมเลกุลของเซรีซินมีค่าระหว่าง 10-300 กิโลดัลตันเซรีซินประกอบไปด้วยกรดอะมิโน 18 ชนิด ที่สำคัญได้แก่ Serine (Hydroxyamino acid) มีอยู่ประมาณ 31-33.4 เปอร์เซ็นต์ Glycine มีอยู่ประมาณ 13.9-19.1 เปอร์เซ็นต์ และAspratic acid มีอยู่ประมาณ 14.5-17.8 เปอร์เซ็นต์นอกจากนี้ยังมีกรดอะมิโนอื่นที่รองลงมา เช่น Threonine, Lysine, Glutamic acid, Alanine และ Valine เป็นต้น

ตารางที่ 2.2 แสดงลักษณะโดยทั่วไปของเซรีซิน^[4]

คุณลักษณะและสมบัติ	ค่าที่ได้หรือสิ่งที่พบ
ลักษณะภายนอก	เป็นผงสีเหลือง
ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)	4.5-7.5
เปอร์เซ็นต์ของของแข็ง (solid content)	≥95
% ของเถ้า (ash)	≤5
ปริมาณโลหะหนัก (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	≤20
ปริมาณสารหนู As (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	≤2
ปริมาณแบคทีเรีย (จำนวนต่อกรัม)	≤500

2.1.2.2 ลักษณะและโครงสร้างของเซรีซิน

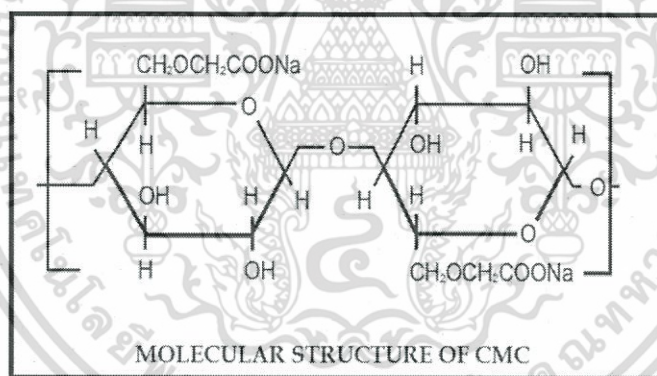
เซรีซินเป็นโปรตีนที่มีความสามารถในการละลายต่างเจือจางที่ร้อนได้ดี เพราะมีกรดอะมิโนที่มีสมบัติ ชอบน้ำ (Hydrophilic) สูง นอกจากนี้ยังสามารถเกิดไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) เมื่อสัมผัสกับกรดหรือด่าง เซรีซินสามารถย่อยสลายได้โดยเอนไซม์โปรตีเอส (Protease) กระบวนการผลิตเส้นไหมว่ากรณิใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไหมมีผลต่อขนาดของโมเลกุลเชรีซิน เนื่องจากเชรีซินมีความว่องไวต่อสภาวะกรด-ด่าง (pH) อุณหภูมิ และเวลาที่ใช้ในกระบวนการสาวไหม (Processing time) ในสภาวะที่มีความร้อนสูงราว 150 องศาเซลเซียส สามารถทำให้เกิดการเปลี่ยนสีไปเป็นสีออกน้ำตาลได้และเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นก็จะนำไปสู่การเสื่อมสภาพเนื่องจากการเกิดการขาดของสายโซ่ ที่ทำให้โครงสร้างของเชรีซินมีขนาดสั้นลง

2.2 คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (Carboxymethylcellulose)^[11]

2.2.1 สมบัติทางเคมีและสูตรโครงสร้าง

อนุพันธ์ของเซลลูโลสที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรม คือ โซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส หมายถึงเซลลูโลสที่ผ่านกระบวนการทางเคมี ซึ่งสามารถกระจายตัวได้ในน้ำเป็นคอลลอยด์ แต่ไม่ละลายในตัวทำละลายอื่น เช่น เอทานอล อีเทอร์ เป็นต้น สารโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (Sodium carboxymethyl cellulose) หรือที่รู้จักกันในอีกหลายๆ ชื่อคือ NaCMC, Sodium CMC, CMC, CM cellulose, Cellulose gum, Carboxymethylcellulose หรือ Sodium cellulose glycolate เป็นแอนไอออนิกเซลลูโลสอีเทอร์ที่ละลายน้ำ มีสูตรโครงสร้างดังรูป



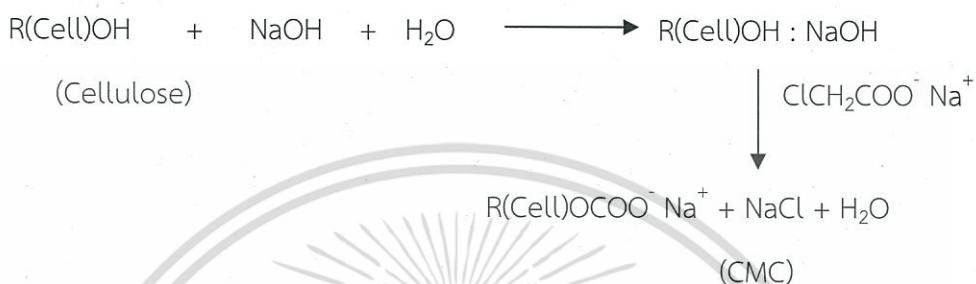
รูปที่ 2.1 แสดงโครงสร้างของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส^[14]

คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเป็นสารที่ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ไม่เป็นอันตราย จึงนิยมใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร และยา สมบัติอื่นๆ มีดังนี้ ดูดความชื้นคงตัวในช่วงความเป็นกรด-ด่าง 2-10 น้ำหนักโมเลกุลประมาณ 2,100 –500,000 เมื่อละลายน้ำจะได้สารแขวนลอย มีลักษณะข้นเหลว ไม่สามารถละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ แต่สามารถละลายในตัวทำละลายผสมระหว่างน้ำกับตัวทำละลายอินทรีย์ที่ละลายน้ำ เช่น เอทานอลหรืออะซิโตน ความเป็นกรด-ด่าง ประมาณ 6.5–8.0 เมื่อนำคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส 1 ส่วนละลายน้ำ 100 ส่วน จะได้สารละลายที่มีความหนืด 5-6,000 เซ็นติพอยส์ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับค่า Average chain length of macromolecule (n)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2 การผลิตอนุพันธ์ของเซลลูโลส (CMC)

การผลิตคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสในอุตสาหกรรมอาศัยปฏิกิริยา Etherification ระหว่างเซลลูโลสในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์กับโซเดียมคลอโรอะซิเตต จากนั้นทำให้เป็นกลางด้วยกรด โดยมีโซเดียมคลอไรด์ และโซเดียมไกลโคเลต เป็นผลจากปฏิกิริยาข้างเคียงต้องใช้เมทานอลหรืออะซิโตนสกัดแยกเกลือโซเดียมทั้งสองชนิดนี้เพื่อให้ได้คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่มีความบริสุทธิ์สูง ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นดังนี้



และมีปฏิกิริยาข้างเคียงดังนี้



2.2.3 สมบัติหลักของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส

1. เป็นสารละลายที่เพิ่มความหนืด และช่วยในการยึดเกาะ
2. ละลายได้ทั้งในน้ำเย็นและน้ำร้อน ไม่ละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ น้ำมัน และไข สามารถละลายในสารละลายผสมระหว่างน้ำกับตัวทำละลายอินทรีย์ที่ละลายน้ำ เช่น เอทานอลหรืออะซิโตนได้สารละลายที่มีความหนืด
3. ไม่มีกลิ่น ไม่มีรส ไม่มีอันตราย ไม่เป็นพิษ และไม่ระคายเคืองผิวหนัง
4. มีค่าความเป็นกรด-ด่าง ประมาณ 6.5-8.0
5. ไม่เปลี่ยนแปลงสมบัติแม้จะเก็บไว้เป็นเวลานาน
6. ทำหน้าที่เป็นสารคงสภาพ (Stabilizer) สารช่วยในการแขวนลอย (Suspending acid) สารเพิ่มความหนืด (Thickener) สารช่วยในการกระจายอนุภาค (Dispersing acid) และสารยึด(Binder)ได้
7. มีความคงทนต่อสารเคมี และเชื้อจุลินทรีย์สูงกว่าสารธรรมชาติ
8. มีความสามารถในการดูดและเก็บน้ำได้ดี
9. ความหนืดลดลงเมื่อถูกแรงเฉือน และการกวนสารละลาย
10. เป็นสารเพิ่มเนื้อสำหรับอาหาร และเครื่องสำอางค์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.4 สมบัติทางกายภาพของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส

ตารางที่ 2.3 แสดงสมบัติทางกายภาพคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส

สมบัติทางกายภาพ	ปริมาณ
ความบริสุทธิ์ของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)	72-99.5 เปอร์เซ็นต์
ความชื้น (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)	7-8 เปอร์เซ็นต์
อุณหภูมิที่ทำให้เปลี่ยนเป็นสีน้ำตาล (Brown Temperature)	180-225 องศาเซลเซียส
อุณหภูมิที่ทำให้เป็นถ่าน (Charring Temperature)	210-250 องศาเซลเซียส
ความหนาแน่น (Bulk density, กรัมต่อมิลลิลิตร)	0.65-0.75

2.2.5 สมบัติการละลายของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส

การประยุกต์ใช้คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปการละลายในน้ำ ดังนั้นขั้นตอนการละลายน้ำจึงถือว่าสำคัญที่สุด เนื่องจากคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสมีแนวโน้มจะจับตัวเป็นก้อนที่เรียกว่า Lump ในบางครั้งอาจละลายคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส โดยใช้ตัวทำละลายอื่นๆ เช่น เอทานอล แล้วเติมน้ำภายหลังเพื่อหลีกเลี่ยงการเกิด Lump สำหรับส่วนผสมอื่นๆ ที่ต้องการผสมกับคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสให้ผสมกันขณะแห้งก่อนแล้วจึงละลายน้ำ ในการผสมแบบแห้งควรใช้คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส น้อยกว่า 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และการพ่นไอน้ำลงในภาชนะขณะละลาย จะช่วยให้คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสละลายได้ดีขึ้น

2.2.6 การนำไปใช้ประโยชน์

คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเป็นสารที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมต่างๆ เนื่องจากการละลายน้ำได้ดี มีความเป็นกลาง ไม่เป็นอันตรายต่อผู้ใช้ ถูกย่อยสลายได้ด้วยจุลินทรีย์จึงไม่สะสมในแหล่งน้ำมีค่า BOD ต่ำ จึงไม่ก่อให้เกิดปัญหาน้ำเน่าเสียไม่เป็นอันตรายต่อสัตว์น้ำและพืชน้ำ

คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่ผลิตจำหน่ายมีมากมายหลายชนิดคุณภาพ เช่น สำหรับอาหาร ยา เครื่องสำอาง อุตสาหกรรม ดังนั้นจึงเลือกใช้ให้เหมาะสมกับผลิตภัณฑ์ เช่น คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่ใช้ผสมในอาหารต้องมีความบริสุทธิ์ไม่น้อยกว่า 99.5 เปอร์เซ็นต์ และมีตะกั่ว สารหนูในปริมาณต่ำมาก ความหนืดเป็นสมบัติสำคัญอีกประการหนึ่งที่ผู้ใช้มักคำนึงถึง ดังนั้นคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่จำหน่ายมีความหนืดในช่วงต่างๆ กันคือ 10-6,000 กรัมเซ็นต์พอยส์ (ในสารละลาย 1 เปอร์เซ็นต์)

2.3 ไฮดรอกซีอะพาไทต์ (Hydroxyapatite, HAp)^[15]

องค์ประกอบหลักของมนุษย์ประกอบด้วย 3 ส่วน คือ น้ำ คอลลาเจน (Collagen) และ ไฮดรอกซีอะพาไทต์ (Hydroxyapatite) โดยไฮดรอกซีอะพาไทต์เป็นแร่ธาตุที่เป็นองค์ประกอบหลักของกระดูก และฟัน ซึ่งมีอยู่ประมาณ 5% ของน้ำหนักร่างกายกระดูก และเนื้อเยื่อประกอบด้วยองค์ประกอบหลัก 2 ส่วน คือ

1. แร่ธาตุ (Mineral) เป็นสารอนินทรีย์ มีสัดส่วนประมาณ 69% ของน้ำหนักกระดูก ซึ่งประกอบไปด้วยสารไฮดรอกซีอะพาไทต์เป็นหลัก ส่วนที่เหลือจะเป็นที่นิยมนำสารตัวนี้มาใช้เป็นสารทดแทนกระดูก

2. เนื้อเยื่อ (Tissue) เนื้อเยื่อประกอบด้วยสารอินทรีย์ ซึ่งจะมีเซลล์ของสารจำพวกไขมัน และ พอลิเมอร์ธรรมชาติ เช่น พอลิแซ็กคาไรด์ (Polysaccharides) คอลลาเจน (Collagen) และพอลิฟอสเฟต (Polyphosphates) เป็นต้น

2.3.1 โครงสร้างไฮดรอกซีอะพาไทต์

สารไฮดรอกซีอะพาไทต์ เป็นสารประกอบพวกแคลเซียมฟอสเฟต (Calciumphosphate) มีสูตรเคมี คือ $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6$ มีอัตราส่วนโดยโมลของ Ca:P เป็น 1.67 คำว่า ไฮดรอกซีอะพาไทต์ มาจากคำว่า “ไฮดรอกซี (Hydroxy)” หมายถึง ไฮดรอกไซด์ไอออน (Hydroxide ion) และคำว่า “อะพาไทต์ (Apatite)” เป็นชื่อผลึกแร่ธาตุที่มีองค์ประกอบ ดังนี้ $\text{M}_{10}(\text{ZO}_4)_6\text{X}_2$

สารประกอบอะพาไทต์ (Apatite compound) จะมีส่วนประกอบแตกต่างกันออกไป ขึ้นกับไอออนที่เข้าแทนที่ในตำแหน่ง M, Z และ X ซึ่งไอออนที่เป็นไปได้ในการแทนที่ ได้แก่

(M = Ca, Sr, Ba, Cd, Pb, Mg, Na, K, H, D)

(Z = P, V, As, S, Si, Ge, Cr, B)

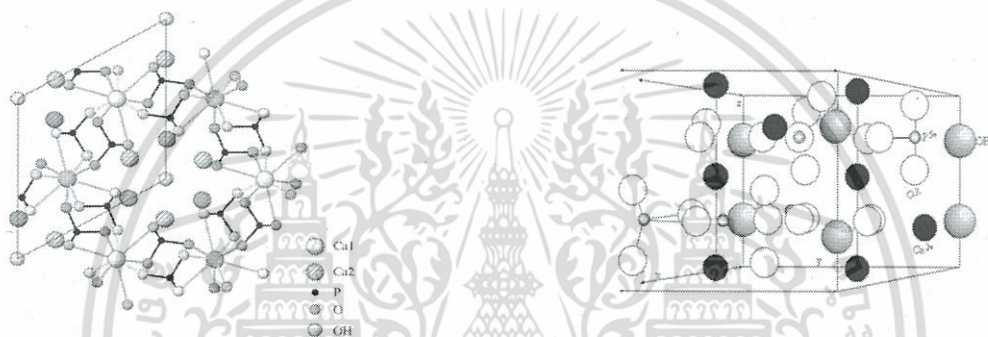
(X = OH, OD, CO_3 , O, BO_3 , F, Cl, Br, Vacancy)

ตารางที่ 2.4 แสดงสมบัติผลึกไฮดรอกซีอะพาไทต์

สูตรเคมี	$\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$
น้ำหนักโมเลกุล(Molecular weight)	M = 1004.8 g/mol
ระบบผลึก(Crystal system)	Hexagonal
ขนาดหน่วยเซลล์(Unit cell)	a = 9.423 Å, c = 6.875 Å
Chemical Unit Number	Z = 1
ความหนาแน่น (Density)	D = 3.16 g/cm ³

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารไฮดรอกซีอะปาไทต์ เป็นผลึกเฮกซะโกนอล (Hexagonal) มีน้ำหนักโมเลกุล (Molecular weight) เท่ากับ $M = 1004.8 \text{ g/mol}$ ขนาดหน่วยเซลล์ (Unit cell) $a = 9.423 \text{ \AA}$, $c = 6.875 \text{ \AA}$ โดยมีหมู่ไฮดรอกซิลอยู่บริเวณมุมที่ฐานรอมบิก (Rhombic) ของหน่วยเซลล์ มีการจัดการเรียงตัวเป็นคอลัมน์ในที่ว่าง ซึ่งมีความสูงเป็นครึ่งหนึ่งของความสูงของหน่วยเซลล์คอลัมน์ของหมู่ไฮดรอกซิลจะถูกล้อมรอบด้วยไอออนของแคลเซียม 6 ไอออน ที่จัดเรียงตัวในลักษณะสามเหลี่ยมด้านเท่า 2 รูป ตั้งฉากกับคอลัมน์ไฮดรอกซิล โดยมีหมู่ไฮดรอกซิลเป็นศูนย์กลางไอออนของแคลเซียมอีก 4 ไอออนที่เหลือจะเรียงต่อเป็นคอลัมน์ 2 คอลัมน์ระหว่างสามเหลี่ยมด้านเท่าของไอออนของแคลเซียมขนานกับคอลัมน์ของไฮดรอกซิลไอออนของแคลเซียมเหล่านี้จะถูกล้อมรอบด้วยออกซิเจนของออร์โทฟอสเฟตเตตระฮีดรอล (Orthophosphate tetrahedral)



รูปที่ 2.2 โครงสร้างผลึกของไฮดรอกซีอะปาไทต์^[16] รูปที่ 2.3 แสดงภาพสามมิติของผลึกไฮดรอกซีอะปาไทต์^[17]

2.3.2 สมบัติไฮดรอกซีอะปาไทต์ทางการแพทย์

ลักษณะการใช้ประโยชน์ไฮดรอกซีอะปาไทต์ในทางการแพทย์โดยทั่วไปลักษณะการนำวัสดุทางการแพทย์ไปใช้งานนั้นจะมีอยู่ 2 ลักษณะคือ

1) วัสดุการแพทย์ที่ใส่เข้าไปในร่างกายจะทำหน้าที่ทดแทนอวัยวะนั้นๆ โดยไม่จำเป็นต้องมีส่วนเกี่ยวข้องกับระบบเนื้อเยื่อส่วนอื่นๆ ของร่างกาย

2) วัสดุการแพทย์ที่ใส่เข้าไปในร่างกายจะต้องมีส่วนร่วมหรือมีหน้าที่สัมพันธ์กับอวัยวะที่อยู่ในร่างกายแต่ต้องไม่เป็นพิษต่อเนื้อเยื่อในร่างกายซึ่งคุณสมบัติเฉพาะของสารไฮดรอกซีอะปาไทต์นี้ สามารถนำไปใช้ในร่างกาย เพื่อทำให้เกิดการสร้างพันธะระหว่างวัสดุหรืออุปกรณ์การแพทย์กับเซลล์กระดูกคนไข้ได้ดี สารไฮดรอกซีอะปาไทต์แบบผงสามารถใช้เคลือบลงบนข้อสะโพกเทียมในส่วนที่เป็นแกนโลหะ เพื่อให้โลหะทนทานต่อการกัดกร่อนจากของเหลวภายในร่างกายที่โดยปกติจะมีสภาพเป็นกรดอ่อนๆ อยู่แล้ว และหากเกิดการเจ็บป่วยสภาพภายในร่างกายก็จะมีความเป็นกรดยิ่งขึ้น ดังนั้นการใช้สารไฮดรอกซีอะปาไทต์เคลือบบนผิวข้อสะโพกเทียม จะทำให้อุปกรณ์มีความทนทานมากยิ่งขึ้น และยังช่วยสร้างพันธะระหว่างข้อสะโพกเทียมกับกระดูกของผู้ป่วยด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไฮดรอกซีอะพาไทต์ เป็นสารที่ไม่เสถียรต่อความร้อน สลายตัวที่อุณหภูมิ 800 - 1200 °C ขึ้นอยู่กับสัดส่วนองค์ประกอบทางเคมีโดยทั่วไปไฮดรอกซีอะพาไทต์ มีความแข็งแรงเชิงกลต่ำ จึงไม่สามารถนำไปใช้งานที่ต้องรับน้ำหนักมากๆได้ ไฮดรอกซีอะพาไทต์สามารถละลายได้ในกรด แต่ไม่ละลายในสารละลายแอลคาลีน และละลายได้เพียงเล็กน้อยในน้ำ ค่าความสามารถในการละลายได้ในน้ำ (pKs) ของไฮดรอกซีอะพาไทต์ มีค่าประมาณ 120

$$pKs = -\log([Ca]_{10}[PO_4]_6[OH]_2) \approx 120$$

ความสามารถละลายได้ในน้ำของไฮดรอกซีอะพาไทต์จะเพิ่มขึ้น เมื่อเติมสารอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) ความสามารถในการละลายของไฮดรอกซีอะพาไทต์จะเกิดการเปลี่ยนแปลง เมื่ออยู่ในกรดอะมิโน โปรตีน เอนไซม์ และสารอินทรีย์อื่นๆ สมบัติของการละลายเหล่านี้มีความสัมพันธ์กับความสามารถในการเข้ากันได้ทางชีวภาพกับเนื้อเยื่อ และการเกิดปฏิกิริยาเคมีกับสารประกอบอื่นๆ อย่างไรก็ตามอัตราการละลายขึ้นอยู่กับความแตกต่างของรูปร่าง ความพรุน ขนาดผลึก ความเป็นผลึก และการเสียดรูป เนื่องจากความเครียด (Strain defects) ไฮดรอกซีอะพาไทต์จะทำปฏิกิริยากับโปรตีน ไขมัน และวัสดุที่เป็นสารอนินทรีย์ เมื่อนำไฮดรอกซีอะพาไทต์ไปเผาที่อุณหภูมิสูง จะทำให้ความสามารถในการละลายลดลง สำหรับเนื้อเยื่อใต้ผิวหนังจะมีอัตราของการละลายเป็น 0.1 มิลลิกรัมต่อปี

ตารางที่ 2.5 สมบัติที่เหมาะสมต่อการทำวัสดุทดแทนกระดูก^[18]

คุณสมบัติ	ข้อมูลจากการทดลอง
สูตรเคมี	$Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$
อัตราส่วนระหว่าง Ca/P	1.67
โครงสร้างผลึก	เฮกซะโกนอล
ขนาดของเซลล์	a = b = 9.43 และ c = 6.88
มอดูลัสของยัง (GPa)	80-110
มอดูลัสของสภาพยืดหยุ่น (GPa)	114
ความต้านแรงกด (MPa)	400-900
ความแข็งแรงดัด (MPa)	115-200
ความหนาแน่น (g/cm^3)	3.16
ความหนาแน่นสัมพัทธ์ (%)	95-99.5
ความแกร่งด้านทานการแตกหัก ($MPa m^{1/2}$)	0.7-1.2
ค่าความแข็ง Hardness (HV)	600
อุณหภูมิของการสลายตัว (°C)	>1000
จุดหลอมเหลว (°C)	1614
ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก	7.40-10.47

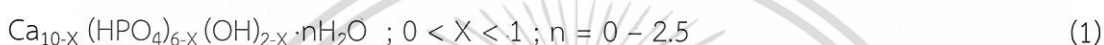
เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่ควรนำข้อมูลไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

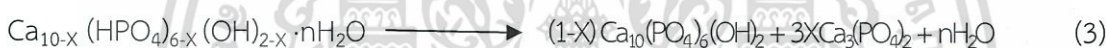
คุณสมบัติ	ข้อมูลจากการทดลอง
สัมประสิทธิ์การนำความร้อน (W/cm K)	0.013
ความเข้ากันกับเนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิต (biocompatibility)	สูง
ความเข้ากันกับสิ่งมีชีวิต (bioactivity)	สูง

2.3.3 พฤติกรรมของไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่อุณหภูมิสูง

ไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่ได้จากการสังเคราะห์จะให้รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction pattern) ที่มีพีคกว้าง เนื่องจากยังไม่มี การจัดเรียงตัวของอะตอมต่างๆ ที่สมบูรณ์ สูตรทั่วไปที่ใช้แทนไฮดรอกซีอะพาไทต์ดังกล่าว คือ



ในระหว่างที่ไฮดรอกซีอะพาไทต์ได้รับความร้อนจะมีการเปลี่ยนแปลง ดังนี้



สมการข้างต้นที่(2), (3) สามารถใช้อธิบายในกรณีที่ไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ได้ มีอัตราส่วนโดยโมลของ Ca:P เบี่ยงเบนไป 1.67 เท่านั้น ในกรณี Ca:P มีค่าเข้าใกล้ 1.67 พบว่าการเผาไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สูงกว่า 800 °C แยกตัวให้ $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ และ $\text{Ca}_2\text{P}_2\text{O}_9$

2.3.4 อะพาไทต์ในกระดูก และฟัน

อะพาไทต์ในกระดูก และฟัน อาจเรียกว่า “สารอะพาไทต์ชีวภาพ” (Biological apatite) ซึ่งมีสูตรเคมีหลากหลายแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของอะพาไทต์ และความบกพร่อง (Defects) ที่แตกต่างกัน สูตรเคมีที่เป็นไปได้ขององค์ประกอบของกระดูก เป็นดังนี้



อย่างไรก็ตามสูตรนี้ไม่เป็นที่แน่นอนสำหรับอะพาไทต์ของกระดูก เพราะในความเป็นจริง องค์ประกอบทางเคมีของอะพาไทต์ของกระดูกแตกต่างกันเล็กน้อยตามอายุ (Age) สปีชีส์ของสิ่งมีชีวิต (Species) และส่วนของอวัยวะ เป็นต้น อัตราส่วนโมลของ Ca:P ในเนื้อเยื่อแข็งประเภทกระดูก และฟัน จะเพิ่มขึ้นตามการเจริญเติบโตจนมีค่าใกล้เคียง 1.67 ผลึกอะพาไทต์ชีวภาพจะมีขนาดเล็กมาก เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยมีขนาดเล็กกว่า 0.2 ไมโครเมตร และมีรูปร่างเป็นแท่งยาวคล้ายรูปเข็มเนื่องจากผลึกอะปาไทต์มีขนาดเล็กจึงสามารถช่วยในการสร้าง และซ่อมแซมกระดูกเกิดขึ้นได้เร็ว

2.3.5 ประโยชน์ของไฮดรอกซีอะปาไทต์

คุณสมบัติเฉพาะของสารไฮดรอกซีอะปาไทต์นี้ สามารถนำไปใช้ในร่างกาย เพื่อทำให้เกิดการสร้างพันธะระหว่างวัสดุหรืออุปกรณ์การแพทย์กับเซลล์กระดูกคนไข้ได้ดี

แบบผง สำหรับใช้เพื่อเคลือบลงบนโลหะที่เป็นส่วนประกอบหลักของข้อสะโพกเทียมหรือรากฟันเทียม เพื่อให้โลหะทนทานต่อการกัดกร่อนจากของเหลวภายในร่างกาย โดยปกติจะมีสภาพเป็นกรดอ่อนๆ อยู่แล้ว และหากเกิดการเจ็บป่วย สภาพภายในร่างกายก็จะมีความเป็นกรดยิ่งขึ้น ดังนั้นการใช้สารไฮดรอกซีอะปาไทต์เคลือบบนผิวข้อสะโพกเทียม จะทำให้อุปกรณ์มีความทนทานมากยิ่งขึ้นหรือนำไปผสมกับวัสดุชนิดอื่น เช่น พอลิเมอร์ เพื่อใช้ทำกระดูกเทียม ซึ่งช่วยผู้ป่วยที่สูญเสียการได้ยินให้สามารถได้ยินเสียงดีขึ้น และการใช้สารตัวนี้สามารถทำให้เกิดการสร้างพันธะระหว่างวัสดุหรืออุปกรณ์การแพทย์กับเซลล์กระดูกคนไข้ได้ดีแบบเป็นชั้นเนื้อแน่น มีการนำไปใช้เป็นกระดูกเสริมช่องว่างทางด้านศัลยกรรมกระดูก และใบหน้า โดยรูปแบบนี้จะมีสมบัติทางเชิงกลดีกว่าแบบรูพรุน จึงสามารถรับน้ำหนักได้มากกว่า การนำไปใช้งานในต่างประเทศมักนำไปทดแทนในส่วนกระดูกสันหลังของผู้ป่วย โดยสารไฮดรอกซีอะปาไทต์ก็จะเป็นตัวเร่งให้เกิดการสร้างเนื้อเยื่อให้มาเกาะ และทำให้ระบบในร่างกายทำงานได้ดีขึ้น สารไฮดรอกซีอะปาไทต์แบบรูพรุน จากการสำรวจความต้องการจากแพทย์พบว่า สารไฮดรอกซีอะปาไทต์แบบรูพรุน เป็นที่ต้องการมากที่สุดในขณะนี้ เพื่อใช้เป็นตัวแทนกระดูกของผู้ป่วย สำหรับบริเวณต่างๆ ของร่างกายที่มีการสูญเสียกระดูกไม่ว่าจะเนื่องมาจากโรคมะเร็ง การติดเชื้อ หรืออุบัติเหตุก็ตาม โดยอาศัยความเป็นรูพรุนทำให้เซลล์ และเลือดนำพาแร่ธาตุต่างๆ เข้าไปได้อย่างทั่วถึง ช่วยทำให้เกิดการสร้างกระดูกเชื่อมต่อได้ดี

นอกจากการนำสารไฮดรอกซีอะปาไทต์ไปใช้เป็นวัสดุทางการแพทย์แล้ว ในประเทศไทยขณะนี้ได้มีการวิจัยเพื่อนำไปใช้ในระบบนำส่งยาโดยเฉพาะยาที่ใช้ในการรักษาการอักเสบ และติดเชื้อของกระดูก เช่น ที่ศูนย์เทคโนโลยีโลหะ และวัสดุแห่งชาติ (MTEC) สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ซึ่งได้ร่วมมือกับคณะแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ พัฒนาวัสดุนำส่งยาชนิดไฮดรอกซีอะปาไทต์ผสมกับยาปฏิชีวนะเข้มข้นเพื่อใช้ในการรักษาการติดเชื้อของกระดูก ข้อดีที่เหนือกว่าของวัสดุนำส่งยาข้างต้นคือ สามารถนำส่งยาปฏิชีวนะความเข้มข้นสูงเพื่อการฆ่าเชื้อแบคทีเรีย และไม่มีผลข้างเคียงต่อเนื้อเยื่อข้างเคียงเพื่อนำวัสดุดังกล่าวออก เนื่องจากวัสดุดังกล่าวจะทำหน้าที่เป็นกระดูกเทียมไปในตัว และถูกทดแทนด้วยกระดูกของผู้ป่วยจนรวมเป็นเนื้อเดียวกัน คณะแพทย์หน่วยออร์โธปิดิกส์ โรงพยาบาลพระมงกุฎเกล้า และคณะแพทยศาสตร์ร่วมกับคณะเภสัชศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ต่างก็ได้มีการศึกษาวิจัยในการใช้สารไฮดรอกซีอะปาไทต์เพื่อนำส่งยาที่กระดูกเช่นกัน จุดเด่นของการใช้ผลิตภัณฑ์นี้คือ ยาปฏิชีวนะที่พัฒนาขึ้นสามารถปลดปล่อยยาปฏิชีวนะออกมาเพื่อรักษาอาการอักเสบติดเชื้อของกระดูกได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยจะมีลักษณะการปลดปล่อยที่สูงในระยะแรก และลดลงตามระยะเวลาที่ผ่านไป ซึ่งมีข้อดีคือ จะสามารถฆ่าเชื้อแบคทีเรียให้หมดไปในช่วงแรก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 ไฮโดรเจล (Hydrogel)^[9]

ไฮโดรเจลเป็นหนึ่งในหลายๆ ชนิดของพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างเป็นโครงร่างแหสามมิติ และสามารถดูดน้ำหรือสารละลายบางชนิดได้มากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ จากคุณสมบัติเด่นของไฮโดรเจลที่สามารถดูดน้ำได้มากนี้ ทำให้ทราบว่าโครงสร้างหรือองค์ประกอบของไฮโดรเจลน่าจะมีส่วนที่ชอบน้ำ (Hydrophilic structure) และสามารถละลายได้ในน้ำ หมู่ฟังก์ชันในไฮโดรเจลที่มีสมบัติความชอบน้ำ เช่น หมู่ไฮดรอกซิล (-OH group) หมู่คาร์บอกซิล (-COOH group) หมู่เอไมด์ (-CONH₂ group) และหมู่ต่างๆ ที่เป็นอนุพันธ์ของหมู่ดังกล่าว เป็นต้น สารในกลุ่มพอลิเมอร์พวกนี้ จะเกิดการเชื่อมขวางกันด้วยพันธะเคมีหรือพันธะอื่นๆ ไฮโดรเจลที่แห้งจะเรียกว่า ซีโรเจล (Xerogel) หรือ Dry gel ซึ่งในระหว่างการระเหยน้ำออกจากไฮโดรเจลลักษณะโครงสร้างเจล (Gel structure) จะหดตัวลง หากมีน้ำออกจากไฮโดรเจลโดยที่ไม่รบกวนโครงสร้างของเจล จะได้เจลที่มีลักษณะเป็นรูพรุน (เกือบ 98% ของโครงสร้าง) ซึ่งไฮโดรเจลแห้งที่มีลักษณะดังกล่าวนี้เรียกว่า แอร์โรเจล (Aerogel) หรือสปอน (Sponge) โดยปกติไฮโดรเจลจะสามารถดูดซับน้ำได้ 10-20% ของน้ำหนักไฮโดรเจลแห้ง

ไฮโดรเจลสามารถสังเคราะห์หรือเตรียมได้จากทางธรรมชาติ เช่น เจลาติน (Gelatin) วุ้น (Agar) โปรตีนที่ชอบน้ำ (Hydrophilic protein) และเตรียมได้จากพอลิเมอร์สังเคราะห์ เช่น พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Poly(vinyl alcohol)) พอลิอะคริลิกแอซิด (Poly (acrylic acid)) พอลิอะคริลาไมด์ (Polyacrylamide)

2.4.1 ประเภทของไฮโดรเจล^[11] สามารถแบ่งออกเป็นหลายชนิดขึ้นอยู่กับเกณฑ์ที่ใช้ดังต่อไปนี้

2.4.1.1 แบ่งตามลักษณะการสังเคราะห์ (Fabrication of hydrogels)

ไฮโดรเจลแบ่งตามลักษณะการสังเคราะห์ได้เป็น 4 แบบ คือ

1. ไฮโดรเจลแบบแผ่นฟิล์ม (Cast film) ไฮโดรเจลแบบนี้มักนำไปใช้เคลือบผิววัสดุต่างๆ โดยมีการเชื่อมต่อระหว่างสายโซ่ด้วยพันธะไฮโดรโฟบิก (Hydrophobic bond) เพื่อป้องกันไม่ให้พอลิเมอร์ละลายในตัวกลางที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบหรือในบางกรณีหลังจากเคลือบลงบนผิววัสดุ แล้วอาจจะทำการเชื่อมต่อระหว่างโมเลกุลด้วยพันธะโคเวเลนต์ (Covalently crosslinked) โครงสร้างของไฮโดรเจลชนิดนี้ ประกอบด้วยทั้งส่วนที่ชอบน้ำ และส่วนที่ไม่ชอบน้ำ

2. ไฮโดรเจลแบบโครงร่างตาข่าย (Crosslinked network) ไฮโดรเจลแบบนี้เตรียมโดยฉีดสารผสมของมอนอเมอร์ (monomer) ตัวริเริ่ม (initiator) และตัวเชื่อมต่อ (crosslinking agent) หรือในบางกรณีอาจจะผสมตัวทำละลายลงไปด้วยเข้าไปในแม่พิมพ์ จากนั้นทำให้เกิดพอลิเมอร์เซชันในแม่พิมพ์นั้น

3. ไฮโดรเจลแบบกราฟท์บนพื้นผิว (Surface grafted polymer) ไฮโดรเจลแบบนี้เตรียมโดยการนำ พอลิเมอร์ที่ชอบน้ำไป ทำให้เกิดพันธะกับพอลิเมอร์อื่นที่ไม่ละลายน้ำ ไฮโดรเจลที่ได้ไม่ละลายน้ำ วิธีการนี้สามารถใช้ปรับปรุงสมบัติเชิงกลของไฮโดรเจลให้ดีขึ้นได้ โดยนำไฮโดรเจลไปทำให้เกิดพันธะกับพอลิเมอร์ที่มีคุณสมบัติเชิงกลที่ดี

4. ไฮโดรเจลแบบอินเทอร์พินเนตรตติงพอลิเมอร์เน็ตเวิร์ก (Interpenetrating polymer network ; IPN) ไฮโดรเจลชนิดนี้เป็นการแทรกพอลิเมอร์สองชนิดที่มีโครงสร้างเป็นแบบโครงร่างตาข่ายเข้าด้วยกัน โดยโครงร่างทั้งสองไม่สามารถแยกออกจากกันได้ และมีความแข็งแรงมาก วิธีนี้เป็นการปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลของไฮโดรเจลให้ดีขึ้นได้อีกวิธีหนึ่ง

2.4.1.2 แบ่งตามขนาดของรูพรุน

ไฮโดรเจลสามารถแบ่งตามขนาดของรูพรุน ได้เป็น 2 ชนิด คือ

1. ไฮโดรเจลที่มีรูพรุนขนาดเล็ก (Microporous hydrogel) เป็นไฮโดรเจลที่สังเคราะห์ในตัวทำละลายที่ดีที่สุด โดยมอนอเมอร์ตัวเชื่อมต่อ และพอลิเมอร์สามารถละลายในตัวทำละลายได้ เจลที่ได้มีลักษณะใส ไฮโดรเจลชนิดนี้อาจเรียกว่า ไฮโดรเจลแบบเนื้อเดียว (Homogeneous hydrogel) รูพรุนมีขนาดเล็ก

2. ไฮโดรเจลที่มีรูพรุนขนาดใหญ่ (Macroporous hydrogel) ในขั้นตอนการสังเคราะห์ไฮโดรเจลชนิดนี้ พอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นไม่ละลายน้ำในตัวทำละลายที่ใช้สำหรับพอลิเมอร์ไรเซชัน และตกตะกอนออกมา ไฮโดรเจลที่ได้ มีรูพรุนขนาดใหญ่ มีสีขาวขุ่น หรือเรียกได้ว่าเป็นไฮโดรเจลแบบเนื้อผสม (Heterogeneous hydrogel)

2.4.1.3 แบ่งตามชนิดการเชื่อมโยงของโครงสร้าง

ไฮโดรเจลแบ่งตามการเชื่อมโยงภายในโครงสร้างของพอลิเมอร์ได้เป็น 2 ชนิด

1. ไฮโดรเจลทางเคมี (Chemical hydrogels) มีการเชื่อมต่อระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ด้วยพันธะโควาเลนต์ ซึ่งเป็นการเชื่อมโยงที่แข็งแรงมาก ในหนึ่งโมเลกุลของมอนอเมอร์แบบนี้มักจะมีหมู่ฟังก์ชันหลายตำแหน่ง (Multifunctional molecule) ที่สามารถเกิดการเชื่อมต่อได้ ไฮโดรเจลที่ได้จะเกิดขบวนการไม่ย้อนกลับทางความร้อน (Heat-irreversible) คือ ไม่สามารถทำให้หลอมได้อีก หากมีการให้ความร้อนจนถึงจุดที่พันธะแตกออกจะเกิดการสลายตัว สมบัติจะเปลี่ยนไปจากเดิม ไฮโดรเจลชนิดนี้อาจเรียกอีกอย่างว่า ไฮโดรเจลชนิดเทอร์โมเซต เนื่องจากไฮโดรเจลประเภทนี้มีความคงทน ไม่หลอมเหลว และไม่ละลายในตัวทำละลาย ทำให้มีข้อจำกัดในการขึ้นรูป

2. ไฮโดรเจลทางกายภาพ (Physical hydrogel) การเชื่อมต่อระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์เกิดจากแรงแวนเดอร์วาลส์ พันธะไฮโดรเจน แรงระหว่างประจุหรืออันตรกิริยาไฮโดรโฟบิก (Hydrophobic interaction) ซึ่งมีความแข็งแรงน้อยกว่าพันธะโควาเลนต์ ไฮโดรเจลประเภทนี้มีการผันกลับทางความร้อนได้ (Heat-reversible) หรือเรียกว่า ไฮโดรเจลชนิดเทอร์โมพลาสติก สามารถหลอมตัวเมื่อให้ความร้อน และแข็งตัวเมื่อทำให้เย็นตัวลง โดยที่การให้ความร้อนไม่มีผลกระทบต่อสมบัติทางเคมี

2.4.2 พันธะทางเคมีของไฮโดรเจล^[9] สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ

ก. พันธะภายในโมเลกุลของพอลิเมอร์ (Intramolecular interaction) เนื่องจากการเชื่อมต่อกันของมอนอเมอร์ที่มีองค์ประกอบหลักเป็นคาร์บอน (C) จึงทำให้มีพันธะโควาเลนต์เพื่อยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของคาร์บอน

ข. พันธะระหว่างโมเลกุล (Intermolecular interaction) สามารถแบ่งออกได้หลายแบบ เช่น พันธะไฮโดรเจน ที่เกิดจากการดึงดูดอะตอมไฮโดรเจน (H) โดยอะตอมของธาตุที่มีค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตี (EN) สูง เช่น F, O, N, Cl เป็นต้น นอกจากนี้ยังแรงไดโพล-ไดโพล ที่เกิดจากการมีแรงยึดเหนี่ยวหรือมีแรงผลักรวมของโมเลกุลที่มีขั้ว และแรงแวนเดอร์วาลส์หรือแรงลอนดอนที่เกิดจากการมีแรงกระทำของโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว ซึ่งแรงนี้เป็นแรงที่อ่อนมากที่สุด

2.4.3 พันธะเชื่อมโยงของไฮโดรเจล มี 2 ลักษณะ คือ

ก. พันธะเชื่อมโยงทางกายภาพ (Physical crosslinked) โดยจะมีการทำให้เกิดเป็นโครงร่างแหสามมิติด้วยพันธะไฮโดรเจนหรือแรงทางไฟฟ้าสถิตย์ โดยจะมีการอยู่รวมกันเป็นกลุ่มคล้ายปมของเชือกไฮโดรเจลชนิดนี้สามารถเตรียมได้จากเทคนิคที่เรียกว่า Freezing and Thawing สมบัติของไฮโดรเจลที่เตรียมได้จะมีการหลอมเหลวที่อุณหภูมิไม่สูงประมาณ 55°C และเรียกไฮโดรเจลที่มีพันธะเชื่อมโยงในลักษณะนี้ว่า Physical hydrogel หรือ Pseudogel

ข. พันธะเชื่อมโยงทางเคมี (Chemical crosslinked) โดยจะมีการให้เกิดพันธะเชื่อมโยงที่เป็นพันธะโควาเลนต์หรือเป็นพันธะเคมีอื่นๆ โดยมีการใช้สารเชื่อมโยงเป็นสารเคมี เช่น สารประกอบพวกแอลดีไฮด์ และมีการใช้แสงหรือความร้อนในการเชื่อมโยง เช่น ริงส์เอ็กซ์ ริงส์แกมมา ซึ่งการเชื่อมโยงโดยวิธีนี้จะได้พันธะเชื่อมโยงเป็นพันธะโควาเลนต์ชนิดคาร์บอน-คาร์บอน (C-C bond) ที่มีความแข็งแรงสูง

2.4.4 การเตรียมไฮโดรเจล

ไฮโดรเจลสามารถเตรียมได้จากสารละลายพอลิเมอร์ที่มีสมบัติการดูดน้ำหรือสามารถละลายในน้ำได้ เเทลงในแม่พิมพ์ โดยส่วนมากจะใช้เทคนิคการเทหล่อ (Casting process) ในการเตรียม จากนั้นทำการเชื่อมโยงไฮโดรเจล โดยถ้าใช้เทคนิคการฉายรังสีจะต้องทำการฉายรังสีเสียก่อนจึงค่อยนำไปอบให้แห้ง ส่วนถ้าใช้สารเคมีในการเชื่อมโยงจะต้องนำสารละลายในแม่พิมพ์ไปอบให้แห้งเสียก่อนจึงค่อยทำการเชื่อมโยง

2.4.5 สมบัติของไฮโดรเจล และการนำไปใช้งาน

ไฮโดรเจลมีความสามารถในการดูดซับน้ำหรือสารละลายบางชนิด เช่น สารละลายอิเล็กโทรไลต์ และสารละลายทางชีวภาพได้มากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ โดยเมื่อหลังจากดูดซับจะมีสมบัติเชิงกลที่ดี ไม่เกิดการละลายหรือสลายตัว และไม่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ซึ่งสมบัตินี้จะมีความคล้ายคลึงกันในอวัยวะบางอย่างของร่างกายมนุษย์ เช่น เส้นเอ็น กล้ามเนื้อ ถ้าใส่เล็กลเซลล์ห่อหุ้มอวัยวะภายใน เป็นต้น และจากสมบัติการเข้ากันได้ดีกับสารทางชีวภาพ เช่น เลือด น้ำเหลือง เนื้อเยื่อ เซลล์ผิวหนัง จึงสามารถนำมาใช้ในการเคลือบอวัยวะเทียม สามารถใช้เป็นวัสดุปิดแผลได้

2.5 กระบวนการทำแห้งแบบแช่แข็ง (Freeze-Drying)^[19]

2.5.1 หลักการและขั้นตอนการทำแห้งแบบแช่แข็ง

การทำแห้งแบบแช่แข็ง (Freeze drying) คือ ขบวนการที่ให้สารที่เปียกแห้งได้ โดยทำให้สารนั้นเย็นจนแข็งตัว และระเหิดเอาน้ำแข็งออกไป การทำให้แห้งแบบการทำแห้งแบบแช่แข็งนี้ รู้จักกันมานานแล้ว แต่เพราะต้องเสียค่าใช้จ่ายสูง เนื่องจากเครื่องมือราคาแพง เพราะต้องใช้ระบบทำความเย็นจัด และเครื่องปั๊มที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุดในการดูดให้เป็นสุญญากาศ และการใช้ที่ต้องใช้เทคนิคเฉพาะ รวมทั้งการดูแลรักษา จึงไม่ค่อยเป็นที่นิยมใช้ในระบบผลิตทั่วไป นอกจากผลิตภัณฑ์บางอย่าง เช่น Biological substances หรือผลิตภัณฑ์ยาบางชนิด ซึ่งผลิตภัณฑ์ประเภทนี้ไม่สามารถทนต่อความร้อนสูงที่ใช้กันในวิธีทำแห้งแบบทั่วๆ ไปได้ ผลิตภัณฑ์ที่ได้โดยวิธีนี้นั้นมีคุณสมบัติของสารที่มีการเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุด สามารถคงตัวอยู่ได้นาน อนุกรมห้อง และข้อดีที่สำคัญคือสามารถนำกลับมาละลายน้ำ (Reconstitute) ได้ง่ายมาก ถ้าจะอธิบายให้ละเอียดมากขึ้น การทำแห้งแบบแช่แข็ง ก็คือ การรักษาสภาพของสารที่เปียกหรือสารละลายในน้ำโดยผลิตภัณฑ์จะถูกทำให้เย็นจนแข็ง และอยู่ในบรรยากาศที่มีความชื้นต่ำ เกิดสภาวะน้ำแข็งระเหิด ซึ่งหมายถึงการเปลี่ยนจากสภาวะของแข็งเป็นสภาวะก๊าซ โดยไม่มีการละลายและหลีกเลี่ยงการเปลี่ยนแปลงทางเคมีกายภาพ และเอนไซม์ มักจะรวมกับการแห้งโดยวิธีอื่นมีการทำให้มีความชื้นต่ำ และการดูดบรรยากาศให้เป็นสุญญากาศ

การทำแห้งแบบแช่แข็ง แบ่งเป็น 3 ขบวนการ คือ

1. Pre-freezing เป็นการลดอุณหภูมิของสาร เพื่อทำให้เกิดก้อนผลึกของน้ำก่อนทำ Primary drying จะทำให้สารแข็งตัวใน Freeze-dryer (Internal freezing) หรืออาจให้แข็งตัวในภาชนะเฉพาะ (External freezing) ซึ่งความหนาของสารที่เหมาะสมเพื่อให้ Freezing time และ Drying cycle สั้น คือประมาณ 10 มิลลิเมตรหรือไม่ควรเกิน 15 มิลลิเมตร การละลายที่เป็นน้ำ Freezing point คือ 0°C อาจจะมีปัญหาถ้าการละลายนั้นมีส่วนประกอบที่เป็นน้ำตาลหรือเกลือ Sodium chloride อุณหภูมิของ Freezing point จะต้องต่ำลงไปอีกจาก 0°C การที่ต้องทำให้วัตถุแข็งตัวก็เพื่อที่จะยึดทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิด และปริมาณของแต่ละ Component ในส่วนผสมของผลิตภัณฑ์นั้น แต่โดยทั่วไป การลดอุณหภูมิที่ 40°C ผลิตภัณฑ์แทบทุกชนิดจะแข็งตัวอย่างสมบูรณ์ภายใน 2-3 ชั่วโมง

2. Primary drying เป็นสภาวะระเหิดหรือการ freeze-drying โดยเฉพาะเพื่อดึงเอาน้ำแข็งออกจากผลิตภัณฑ์ เมื่อ Primary drying เสร็จสมบูรณ์ น้ำแข็งจะละลายไปหมด และจะมีความชื้นหลงเหลืออยู่ ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่แห้งจะดูดความชื้นนั้นไว้จึงต้องเอาความชื้นนั้นออกโดยใช้ Secondary drying สิ่งที่แสดงว่า Primary drying เสร็จสมบูรณ์คือ

- รอยต่อของน้ำแข็งและการที่แห้งหมดไป (ถ้าภาชนะเป็นแก้ว จะสังเกตเห็น)
- อุณหภูมิของการเพิ่มขึ้นไปจนถึงหรือใกล้กับสภาพแวดล้อม
- ความดันของ Drying chamber ใกล้กับ Condenser chamber
- น้ำแข็งหรือความชื้นหายไปจากภาชนะบรรจุ ขณะที่อุณหภูมิไปถึงขีดถึงแม้

กระบวนการ Primary drying จะเสร็จสมบูรณ์แล้ว ก็มักจะให้เวลาของ Drying ต่อไปอีก 30 นาที หรือ 1 ชั่วโมง เพื่อให้แน่ใจว่าไม่มีน้ำหลงเหลืออยู่ สิ่งที่แสดงว่า Primary drying ยังไม่เสร็จคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ภาชนะบรรจุเมื่อนำออกจากตู้แล้ว สัมผัสตู้รู้สึก “เย็น”
- สารที่แห้งจะหดตัวหรือละลายเป็นน้ำ

3. Secondary drying เป็นขบวนการดูดความชื้นที่หลงเหลือจาก Primary drying เพื่อลดปริมาณความชื้นจาก Primary freeze-drying เพื่อเพิ่มความคงตัวของสารที่มักจะมีมากขึ้นจาก Primary freeze-drying หลงเหลือ

2.5.2 เครื่องมือ และระบบที่ใช้ในขบวนการ Freeze-Drying

2.5.2.1 Low temperature condenser

Condenser จะทำหน้าที่ดักจับไอน้ำในระบบไอน้ำที่อยู่เหนือผิวผลิตภัณฑ์ น้ำแข็งจะเคลื่อนตัวไปสู่พื้นที่ความดันต่ำ (Low pressure area) คือ บริเวณรอบๆ ผิว Condenser (อุณหภูมิต่ำกว่า) ส่วนใหญ่จะอยู่ในช่วง -40°C ถึง -60°C แล้วแต่ชนิดของเครื่องมือที่ใช้ ซึ่งอุณหภูมิช่วงนี้จะมีประสิทธิภาพเพียงพอในการทำ Freeze-drying ซึ่งเครื่องมือที่ให้ Condenser temperature ต่ำกว่า ย่อมมีประสิทธิภาพมากกว่า ทั้งนี้ เพราะว่าเมื่ออุณหภูมิต่ำลง Vapor pressure จะลดต่ำลงไปด้วย ทำให้ความแตกต่าง Vapor pressure ของ Product ice และ Condenser ice เพิ่มขึ้น นั่นคือการเพิ่ม Rate of Sublimation

2.5.2.2 High vacuum

ปั๊มที่มีประสิทธิภาพซึ่งจะลดความดันในระบบให้เกิดสุญญากาศเพียงพอ (0.1 มิลลิเมตรปรอท) เป็นสิ่งที่จำเป็นจะทำให้เกิดการระเหิดของแข็งในผลิตภัณฑ์ และเป็นการกำจัดอากาศหรือ Non-condensable gas ออกไปลดแรงเสียดทานในระบบ ช่วยให้การเคลื่อนที่ของไอน้ำเกิดได้ดี และยังเป็นการป้องกันการเกิดออกซิเดชันระหว่างกระบวนการและช่วงการเก็บรักษาด้วย โดยปกติ High Vacuum ประมาณ 5-50 มิลลิทอร์ (0.005-0.05 มิลลิเมตรปรอท) จะมีประสิทธิภาพสูงสุด แต่ในเครื่องมือ Freeze dryer ทั่วๆ ไป สามารถลดความดันได้ประมาณ 100-120 มิลลิทอร์หรือต่ำกว่า

2.5.2.3 Controlled heat to product

การให้ความร้อนกับผลิตภัณฑ์ก็เพื่อที่จะช่วยให้การระเหิดเกิดได้อย่างสม่ำเสมอ แต่การเพิ่มอุณหภูมิต้องควบคุมให้เพียงพอที่จะผลักดันให้ไอน้ำถูกกำจัดออกไปได้โดยที่ไม่เกิดการหลอมละลายกลับ (Melt back) ของน้ำแข็งในผลิตภัณฑ์ ซึ่งในทางปฏิบัติโดยทั่วไปเราจะควบคุมอุณหภูมิของน้ำแข็งในผลิตภัณฑ์ ขณะทำ Freeze-drying ให้ต่ำกว่าจุดที่ผลิตภัณฑ์จะเกิดการหลอมละลายกลับเล็กน้อย หลังจากน้ำแข็งในผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่ถูกกำจัดออกไปเกือบหมดแล้ว จึงค่อยเริ่มเพิ่มความร้อนให้ผลิตภัณฑ์ คือปรับอุณหภูมิให้ค่อยๆ เพิ่มขึ้นจนถึง 20°C หรือ 30°C แล้วแต่ผลิตภัณฑ์แต่ละตัว

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.6.1 Rajput S.K. and Mukesh Kumar. (2015) ศึกษาองค์ประกอบของไหม ไหมประกอบไปด้วยโปรตีน 2 ชนิด คือ ไฟโบรอิน และเซรีซิน เซรีซินมีองค์ประกอบอยู่ในรังไหม 20-30% มีลักษณะเหนียวไม่ละลายน้ำ มีการย่อยสลายทางชีวภาพ ไม่เป็นพิษ ในโครงสร้างมีหมู่ฟังก์ชันที่ชอบน้ำ ได้แก่ หมู่ไฮดรอกซิล หมู่อคาร์บอนิล และหมู่อะมิโน ประกอบไปด้วยกรดอะมิโน 18 ชนิด มวลโมเลกุล จะขึ้นอยู่กับวิธีการสกัด แต่โดยส่วนใหญ่มวลโมเลกุลจะอยู่ในช่วง 24-400 กิโลดาลตัน ซึ่งจากสมบัติที่กล่าวมาข้างต้นแล้ว ทำให้โปรตีนเซรีซินจากไหมสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นวัสดุทางชีวภาพได้หลากหลาย เช่น ด้านการแพทย์ เครื่องสำอาง และตัวดูดซับสารทางชีวภาพต่างๆ^[5]

2.6.2 Jiang Liyun, Li Yubao and Xiong Chengdong. (2009) ได้ศึกษาสมบัติทางเคมีกายภาพ และสมบัติทางชีวภาพของวัสดุเชิงประกอบเนื้อเยื่อโครงสร้างที่ได้จากสารผสมระหว่างนาโนไฮดรอกซีอะปาไทต์ ไคโตซาน และคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส โดยวิธีทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง พบว่ามีการเชื่อมโยงแบบใช้ประจุระหว่างไคโตซาน และคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส โดยมีนาโนไฮดรอกซีอะปาไทต์เป็นสารเชื่อมโยง ทำให้วัสดุที่ได้มีโครงสร้างที่แข็งแรงขึ้นสามารถรับแรงกดอัดได้ดี และไม่มีความเป็นพิษต่อร่างกาย จึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นกระดูกเทียม ซึ่งเป็นวัสดุทางการแพทย์ได้^[20]

2.6.3 ทศกัญจน์ จันทร์ส่องแสง. (2555) ศึกษาการเตรียมไฮโดรเจลจากคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสและไฟโบรอินจากไหมไทย โดยใช้เอ็น, เอ็น-เมทิลีนบิสอะคริลาไมด์เป็นสารก่อก้อนเชื่อมโยง และใช้แอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟตเป็นสารริเริ่มปฏิกิริยา พบว่าภายใต้สภาวะการทดลองเดียวกันฟิล์มผสมที่มีคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสน้ำหนักโมเลกุลสูง มีการดูดซับน้ำได้ดีกว่าฟิล์มผสมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ เพราะมีหมู่คาร์บอกซีเลตจำนวนมากขึ้น สารก่อก้อนเชื่อมโยง และสารริเริ่มปฏิกิริยาที่เพิ่มขึ้นช่วยปรับปรุงความเสถียรของฟิล์ม แสดงว่าจำนวนพันธะเชื่อมโยงมากและความยาวของพอลิเมอร์เชื่อมขวางมีผลต่อรูปร่างที่เสถียรของฟิล์มหลังแช่น้ำ แต่การดูดซับน้ำที่สมดุลลดลง เนื่องจากพันธะเชื่อมโยงมาก และลดขนาดช่องว่างที่จับโมเลกุลน้ำ อิทธิพลความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย พบว่าฟิล์มดูดซับน้ำที่สมดุลได้สูงกว่า pH 7 และการดูดซับน้ำที่สมดุลต่ำสุดที่ pH 14 ฟิล์มไฮโดรเจลแสดงสมบัติเป็น pH-sensitive hydrogel และการผสมไฟโบรอินในฟิล์ม ช่วยให้สมบัติเชิงกล เช่น ค่าความทนแรงดึง การดึงยืด ณ จุดขาดสูงขึ้น แต่מודูลัสของฟิล์มลดลง^[1]

2.6.4 เกษณีย์ วงศ์ชาเทวัญ และคณะ. (2558) ศึกษาการเตรียมไฮโดรเจลจากคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส และเซรีซินจากไหมไทย พบว่าอัตราส่วน 20:80 เป็นอัตราส่วนที่ดีที่สุด เนื่องจากมีสมบัติเชิงกลในการรับแรงกดอัดได้ดีที่สุด ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อน แสดงให้เห็นว่าเซรีซินและคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสสามารถผสมเข้ากันได้ดี แต่ชิ้นงานที่ได้ยังคงมีความเปราะ รับแรงกดอัดได้น้อย จึงนำมาปรับปรุงความแข็งแรงของชิ้นงานด้วยการผสมแคลเซียมไฮดรอกซีอะปาไทต์ โดยเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า เปรียบเทียบที่ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกซีอะปาไทต์ 0.2 และ 0.4 %w/v พบว่าเนื้อเยื่อโครงสร้างไม่ต่างกันใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีเหตุผลบางประการ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไฮโดรเจลจากเซรีซินและคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสในอัตราส่วน 20:80 ที่ปรับปรุงด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ 0.4 %w/v สามารถรับแรงกดอัดได้สูงขึ้น การละลายน้ำลดลง สมบัติการบวมน้ำ และบวมตัวในบัฟเฟอร์ PBS ดีขึ้น เหมาะแก่การนำไปประยุกต์ใช้ทำเป็นกระดูกเทียมหรือวัสดุทางการแพทย์ได้^[21]

2.6.5 Zhang Yeshun, Liu Jia and Zheng Wang. (2015) ศึกษาการเตรียมโครงสร้างร่างแห อัลจินตเซรีซิน ไฮโดรเจลและเซรีซินสำหรับการขนส่งยา พบว่าเมื่อมีการผสมเซรีซินเข้าไปจะไปช่วยเพิ่มสมบัติให้โครงสร้างร่างแห IPNs (Interpenetrating polymer network) มีความแข็งแรง เสถียร เกิดการทำลายโครงสร้างร่างแหได้น้อยลง เมื่อเปรียบเทียบกับอัลจินตไฮโดรเจลเพียงอย่างเดียวไฮโดรเจลซึ่งเป็นผลดีในการขนส่งยา พร้อมทั้งส่งเสริมการเจริญเติบโตของเซลล์ มีผลระยะยาวต่อการใช้งาน และลดการโยกย้ายของเซลล์ ทำให้ใช้ในวงกว้างในพันธุวิศวกรรมเนื้อเยื่อ^[22]

2.6.6 Tipawan Siritienthong and Pornanong Aramwit. (2015) คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสมีสมบัติทนต่อการย่อยสลายทางชีวภาพ และทนต่อการย่อยสลายของเอนไซม์จึงนำมาผสมกับเซรีซินทำเป็นเนื้อเยื่อโครงสร้าง โดยมีอัตราส่วนความเข้มข้นของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส และเซรีซิน คือ 2%w/v รวมทั้งศึกษาผลของน้ำหนักโมเลกุลของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่ต่างกันที่ส่งผลต่อสมบัติต่างๆกับเนื้อเยื่อโครงสร้าง ดังนี้ น้ำหนักโมเลกุลของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสมาก (H-CMC=700,000 Da, DS=0.65-0.85), ปานกลาง(M-CMC=250,000 Da, DS=0.60-0.95), น้อย(L-CMC=90,000 Da, DS=0.65-0.90) ตามลำดับ พบว่าน้ำหนักโมเลกุลของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่มาก ไม่ส่งผลต่อการบวมตัวและโครงสร้างรูพรุนของไฮโดรเจลที่ได้ แต่ส่งผลให้สมบัติการบวมน้ำสูงขึ้น และมีอัตราการย่อยสลายทางชีวภาพลดลง รวมทั้งส่งเสริมการผลิตคอลลาเจนของเซลล์ในร่างกาย ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีข้อเสนอแนะให้ใช้คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส และเซรีซินในการเป็นวัสดุตกแต่งบาดแผลได้^[7]

2.6.7 Tipawan Siritienthong, Juthamas Ratanavaraporn and Pornanong Aramwit. (2012) จากที่มีการรายงานถึงประโยชน์ของเซรีซินในสมบัติทางชีววิทยาที่การใช้เป็นแผ่นปิดแผลก่อนหน้านี ในงานวิจัยนี้จึงทำการสร้าง และเปรียบเทียบสมบัติของ EtOH-precipitated sericin/PVA scaffolds โดยไม่มีการใส่สารเชื่อมโยง ด้วยวิธี Freeze-drying ได้เป็นโครงสร้างที่แข็งแรงกว่า มีค่าโมดูลัสของแรงบีบอัดสูงกว่า แต่มีความสามารถในการบวมน้ำต่ำกว่า non-precipitated PVA scaffolds และใช้ EtOH หลายความเข้มข้น พบว่า EtOH ที่ปริมาณ 70 เปอร์เซ็นต์ EtOH-precipitatedsericin/PVA scaffolds เซลล์เพิ่มจำนวนอย่างรวดเร็วมีการลดลงของขนาดบาดแผลอย่างมีนัยสำคัญ มีการสร้างคอลลาเจนเพิ่มขึ้น และมีการงอกของเยื่อผิวสูง ทำให้การรักษาแผลเร็วขึ้น จึงสามารถสรุปได้ว่า EtOH-precipitated sericin/PVA scaffolds มีประสิทธิภาพในการรักษาแผลได้ดีกว่า EtOH-precipitated/PVA scaffolds ที่ไม่มีเซรีซิน^[23]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.8 Sudip Mondal, Umapada Pal and Apurba Dey. (2016) ศึกษาการเตรียมเนื้อเยื่อโครงสร้างของไฮดรอกซีอะปาไทต์จากพันธูวิศวกรรมเนื้อเยื่อ โดยใช้แคลเซียมเตตระไฮเดรต $[Co(NO_3)_4 \cdot 4H_2O]$ และโคบอลต์ไนเตรตเป็นสารตั้งต้น และใช้สารละลายแอมโมเนียเป็นตัวตกตะกอน โดยใช้วิธี Solution-precipitation และทำการศึกษสมบัติเชิงกลพบว่าความสามารถของไฮดรอกซีอะปาไทต์ ช่วยพัฒนาเนื้อเยื่อโครงสร้างให้มีความแข็งแรงขึ้น และช่วยให้คุณภาพของเนื้อเยื่อมีคุณภาพที่ดีขึ้น ส่วนผลการวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันจะพบพันธูฟอสเฟต หมู่ไฮดรอกซิล ส่วนผลทางสัญญาณวิทยาพบว่าไฮดรอกซีอะปาไทต์มีอนุภาคขนาดเล็กระดับนาโน และผลการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์พบ 2-Theta ที่ 31.77° พบว่ามีความเป็นผลึกมาก^[24]

2.6.9 Fasai Wwongwanaiwat and Somchai Pattana. (2011) ศึกษาสมบัติเชิงกลที่ได้จากการเตรียมเนื้อเยื่อโครงสร้างผสมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสกับเจลลาติน พบว่าเมื่อเติมคาร์บอกซีอะปาไทต์ผสมเข้ากับเจลลาตินจะไปช่วยให้สมบัติทางกายภาพ และสมบัติเชิงกลสูงขึ้นและเมื่อใช้อัตราส่วนระหว่างเจลลาตินกับคาร์บอกซีอะปาไทต์ 80:20 จะไปทำให้ค่าการบวมน้ำ (swelling) ของชิ้นงานเพิ่มขึ้นสูงที่สุด รวมทั้งช่วยเพิ่มสมบัติความแข็งยืดหยุ่น (Compressive modulus) ให้กับชิ้นงานเมื่อเทียบกับสารละลายเจลลาตินเพียงอย่างเดียว ทางงานวิจัยจึงแนะนำให้ใช้อัตราส่วนเจลลาตินต่อคาร์บอกซีอะปาไทต์ 80:20 ในการทำพันธูวิศวกรรมเนื้อเยื่อ^[25]

2.6.10 Hyeon Joo Kim, Ung Jin Kim, Chunmei Li, Masahisa Wada, Gary G. Leisk and David L Kaplan. (2008) ศึกษาพันธูวิศวกรรมเนื้อเยื่อกระดูกที่ได้จากโปรตีนไฟโบรอินกับพอลิแอสพาทิค แอซิด และแคลเซียมไฮดรอกซีอะปาไทต์ โดยใช้เทคนิค การทำแห้งแบบแช่แข็ง (Freeze drying) พบว่าสัญญาณวิทยาที่ได้จาก SEM มีลักษณะเป็นเบต้าชีท และมีความพรุน (Porosity) สูงถึง 79% เป็นการยืนยันผลว่าเนื้อเยื่อโครงสร้างนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นวิศวกรรมเนื้อเยื่อได้^[26]

2.6.11 Jinfang Ming, Baoqi Zuo. (2014) ศึกษาการเตรียมเนื้อเยื่อโครงสร้างจากอัตราส่วนของไหมไฟโบรอิน และโซเดียมแอลจิเนต โดยกระบวนการทำแห้งแบบแช่แข็ง เมื่อทำการทดสอบสมบัติทางความร้อนพบว่าโซเดียมแอลจิเนตมีผลทำให้ทนต่ออุณหภูมิสูงขึ้น และผลทางสัญญาณวิทยาพบว่าพื้นที่ผิวมีความบาง และเรียบสม่ำเสมอเมื่อเติมโซเดียมแอลจิเนต ซึ่งทำให้มีค่าความพรุนที่มากขึ้นจึงมีผลต่อสมบัติเชิงกลทั้งค่าความเค้นแรงกด และค่าความแข็งยืดหยุ่นที่เพิ่มขึ้น^[27]

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมี อุปกรณ์ และเครื่องมือที่ใช้

สารเคมี

1. โซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (Sodium Carboxymethyl Cellulose ; CMC) ของบริษัท Acros Organics, average M.W. 90000, DS = 0.7
2. ริงไหมขาว
3. ริงไหมเหลือง
4. แคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ (Calcium hydroxyapatite) ของบริษัท Fluka
5. กรดอะซิติก (Acetic acid)
6. Ethyl alcohol Absolute ของบริษัท ITALMAR CO.,LTD
7. น้ำกลั่น

อุปกรณ์

- | | | | |
|-------------------------|------|------|-----------|
| 1. บีกเกอร์ | ขนาด | 1000 | มิลลิลิตร |
| | ขนาด | 250 | มิลลิลิตร |
| | ขนาด | 600 | มิลลิลิตร |
| | ขนาด | 50 | มิลลิลิตร |
| 2. กระจกบองตวง | ขนาด | 100 | มิลลิลิตร |
| | ขนาด | 50 | มิลลิลิตร |
| 3. ขวดปรับปริมาตร | ขนาด | 100 | มิลลิลิตร |
| 4. ปิเปต | ขนาด | 1 | มิลลิลิตร |
| 5. แผ่นอลูมิเนียมฟลอยด์ | | | |
| 6. ปากคีบ (Froceps) | | | |
| 7. จุกยาง | | | |

8. ซ้อนตักสาร
9. จากเพาะเชื้อ
10. กระบอกรน้ำกลั่น
11. กรรไกร
12. ชุดกรองสุญญากาศ (Suction)
13. กระดาษกรอง เบอร์ 2
14. แ่งแก้วคน
15. Spatula
16. เทอร์โมมิเตอร์
17. ตะแกรงลวด ขนาด 250 mesh

เครื่องมือที่ใช้

1. เครื่องชั่งน้ำหนัก 4 ตำแหน่ง ของบริษัท METTLER TOLEDO แบบ New Classic MF รุ่น ML 204/01
2. ตู้อบ SHEL LAB 1350 FX
3. เดซิเคเตอร์ (Desicator)
4. เครื่องกรองแบบลดความดัน รุ่น EYELA A-1000S
5. แท่นให้ความร้อน (Hot plate) ของบริษัท Clifton CERASTIR
6. เครื่องกวนสารชนิดใบพัดกวนสาร (overhead stirrer) ของบริษัท IKA® RW 20 digital
7. เครื่อง Freeze dryer CoolSafe™ ยี่ห้อ Scanvac ของบริษัทไซแอนติฟิค โพรโมชั่น จำกัด
8. เครื่องทดสอบสมบัติเชิงกล (Universal testing machine) ของบริษัท LLOYD INSTRUMENTS LTD. รุ่น LR 1K
9. เครื่องทดสอบสมบัติทางความร้อน (Thermogravimetric Analyzer ; TGA) ของบริษัท PerkinElmer รุ่น PYRIS 1 TGA
10. เครื่องอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (Infrared spectrophotometry ; FT-IR) ของบริษัท PerkinElmer รุ่น Spectrum GX
11. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope ; SEM) ของบริษัท CARL ZEISS CO., LTD. รุ่น EVO MA 10
12. เครื่อง X-ray Diffractometer (XRD) ยี่ห้อ Bruker AXS รุ่น D8 Advance

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 วิธีการดำเนินงาน

ตอนที่ 1 การเตรียมเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลที่ผสมระหว่างสารละลายโปรตีนเซรีซินจากไหมกับคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส

3.2.1 การสกัดเซรีซินจากรังไหม

นำรังไหมขาว และไหมเหลืองมาล้างทำความสะอาด ตัดเป็นชิ้นเล็กๆ และอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นชั่งรังไหมขาว 15* g และรังไหมเหลือง 10* g ต้มในน้ำกลั่น 100 ml ที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เมื่อได้เวลานำสารละลายที่ได้มารองแบบลดความดันโดยใช้กระดาษกรองเบอร์ 2 จากนั้นเทสารละลายลงในขวดวัดปริมาตรและปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้เป็น 100 ml จะได้สารละลายเซรีซินที่มีความเข้มข้น 2 %w/v

หมายเหตุ *ไหมขาวใช้ 15 g เนื่องจากได้ทำการทดลองแล้วพบว่าได้ความเข้มข้นของโปรตีนเซรีซินที่มีความเข้มข้น 2 %w/v

*ไหมเหลืองใช้ 10 g เนื่องจากได้ทำการทดลองแล้วพบว่าได้ความเข้มข้นของโปรตีนเซรีซินที่มีความเข้มข้น 2 %w/v

3.2.2 เตรียมสารละลายคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส เข้มข้น 5 %w/v

ตวงน้ำกลั่นปริมาตร 100 ml และให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 80 °C จากนั้นชั่งคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส 5 g เเทลงในน้ำกลั่นที่ให้ความร้อน โดยใช้แท่งแม่เหล็กในการปั่นกวนจนสารละลายรวมเป็นเนื้อเดียวกัน

3.2.3 เตรียมการขึ้นรูปชิ้นงาน

นำสารละลายเซรีซินผสมกับสารละลายคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสตามอัตราส่วนต่างๆ ดังตารางที่ 3.1 จากนั้นนำมาปั่นกวนด้วยเครื่องปั่นเชิงกล ที่ความเร็วรอบ 600 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที แล้วตวงสารละลายผสมเทลงในแม่พิมพ์ โดยใช้จานเพาะเชื้อเป็นแม่พิมพ์ แล้วนำไปแช่แข็งที่อุณหภูมิ -2 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำชิ้นงานที่แช่แข็งเข้าเครื่องกระบวนกรทำแห้งแบบแช่แข็ง เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อขึ้นรูปชิ้นงานให้มีลักษณะเป็นรูพรุน แล้วนำชิ้นงานที่ได้ไปทดสอบสมบัติต่างๆ

ตารางที่ 3.1 แสดงอัตราส่วนผสมของสารละลายเซรีซินของไหมที่มีความเข้มข้น 2 %w/v และสารละลายคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่มีความเข้มข้น 5 %w/v

สูตร	Sericin (%)	CMC (%)
W100:0	100	0
W50:50	50	50
W20:80	20	80
Y50:50	50	50

หมายเหตุ W ไหมขาว Y ไหมเหลือง

ตอนที่ 2 ศึกษาผลของแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่มีผลต่อสมบัติเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลผสมโปรตีนเซรีซินจากไหมกับคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส

นำไหมทั้งสองชนิดมาสกัดเซรีซินที่ความเข้มข้น 2 %w/v และสารละลายคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสความเข้มข้น 5 %w/v ผสมกันในอัตราส่วน 50:50* จากนั้นเตรียมสารละลายแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ 0.1 และ 0.5 %w/v โดยละลายด้วยกรดอะซิติก จากนั้นทำการผสมสารละลายทั้งสามให้เข้ากันตามอัตราส่วนดังตารางที่ 3.2 และทำการปั่นกวนด้วยเครื่องปั่นกวนแรงเชิงกลที่ความเร็วรอบ 600 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที แล้วนำของผสมที่ได้เทลงแม่พิมพ์โดยใช้งานเพาะเชื้อเป็นแม่พิมพ์ และนำไปแช่แข็งที่อุณหภูมิ -2 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำชิ้นงานที่ผ่านการแช่แข็งเข้าเครื่องกระบวนการทำแห้งแบบแช่แข็ง เพื่อขึ้นรูปชิ้นงานให้มีลักษณะเป็นรูพรุน และนำชิ้นงานที่ได้ไปทดสอบสมบัติต่างๆ

หมายเหตุ ที่เลือกอัตราส่วน 50:50 เนื่องจาก ขนาดรูพรุน และความพรุนที่อัตราส่วน W50:50 มีความพรุนไม่น้อยกว่า 70% ซึ่งเหมาะสมในการใช้งานทางด้านวิศวกรรมเนื้อเยื่อ

ตารางที่ 3.2 แสดงอัตราส่วนผสมระหว่างสารละลายเซรีซินที่มีความเข้มข้น 2 %w/v สารละลายคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่มีความเข้มข้น 5 %w/v และแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ 0.1 และ 0.5 %w/v

ชื่อสูตร	Sericin (%)	CMC (%)	HAp (%w/v)
WHAp0.1	50	50	0.1
WHAp0.5	50	50	0.5
YHAp0.1	50	50	0.1
YHAp0.5	50	50	0.5

หมายเหตุ W ไหมขาว Y ไหมเหลือง

3.3 การทดสอบสมบัติต่าง ๆ

3.3.1 สมบัติทางกายภาพ

1. การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) ใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของบริษัท CARL ZEISS CO., LTD. รุ่น EVO MA 10 ในการศึกษาสัณฐานวิทยา และรายละเอียดของลักษณะขนาดรูพรุนของชิ้นงาน โดยทำการศึกษาชิ้นงานในแนวภาคตัดขวาง (cross section) หักชิ้นงานในไนโตรเจนเหลว ขนาด 1x1 cm จากนั้นตัดตัวอย่างชิ้นงานลงบน stub แล้วเคลือบผิวตัวอย่างชิ้นงานด้วยทอง เพื่อให้ชิ้นงานนำไฟฟ้าได้ และนำไปวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด จะได้ภาพลักษณะสามมิติสีขาวดำ จากนั้นนำภาพที่ได้ไปวิเคราะห์

2. ขนาดรูพรุน (Pore size)

โดยใช้โปรแกรม ImageJ ในการวัดขนาดรูพรุน โดยนำรูปภาพที่ได้จากการวิเคราะห์สัณฐานวิทยามาวัดขนาดรูพรุนโดยวัดจากความยาวผ่านศูนย์กลางของรูพรุน วิธีการหารูพรุนเปิดโปรแกรม ImageJ จากนั้นเปิดภาพที่ต้องการวิเคราะห์โดยไปที่ file > open แล้ว set scale เพื่อเทียบอัตราส่วนของขนาดภาพ โดยใช้เครื่องมือ Magnifying glass เพื่อขยายภาพ จากนั้นใช้เครื่องมือ Straight line selection คลิกลากเส้นที่ scale ในภาพจากนั้นไปที่ Analyze > Set scale ใส่ค่า known istance และใช้หน่วยเป็น μm เลือก Global แล้วคลิก OK จากนั้นใช้เครื่องมือ Straight line selection วัดความกว้างของรูพรุนที่เราต้องการ คลิกที่ Analyze > Measure จะปรากฏค่าความกว้างของรูพรุนทำซ้ำ 10 จุด เพื่อหาค่าเฉลี่ยขนาดรูพรุนเมื่อครบ 10 จุด จากนั้นคลิกที่ Analyze > Summarize จะปรากฏค่าเฉลี่ย และ S.D. ขึ้นมา นำค่าความรูพรุนที่ได้ไปวิเคราะห์ต่อ

3. การบวมน้ำ (Swelling)^[4]

ตัดตัวอย่างชิ้นงานให้มีขนาด 2x2 cm ซึ่งน้ำหนักตะแกรงลวดขนาด 250 mesh แล้วห่อตัวอย่างชิ้นงานด้วยถุงตะแกรงลวด และนำไปซึ่งน้ำหนักแช่ตัวอย่างชิ้นงานลงในน้ำกลั่นเป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยนำชิ้นงานขึ้นมาซับน้ำที่เกาะอยู่ในถุงตะแกรงลวด และซึ่งน้ำหนักทุกๆ 10 นาที แล้วบันทึกผลน้ำหนักที่ได้ และคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การบวมน้ำ

$$\% \text{ swelling} = \left(\frac{\text{น้ำหนักชิ้นงานที่บวมน้ำ} - \text{น้ำหนักชิ้นงานที่แห้ง}}{\text{น้ำหนักชิ้นงานที่แห้ง}} \right) \times 100$$

4. ค่าความพรุน (Porosity)

นำชิ้นงานตัดเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า วัดปริมาตรของชิ้นงานเป็น V (กxยxส) และนำไปชั่งน้ำหนักบันทึกเป็น W_1 จากนั้นตวงปริมาณเอทิลแอลกอฮอล์ $D=0.7896$ ลงในปิ๊กเกอร์ 40 มิลลิลิตร นำตัวอย่างชิ้นงานจุ่มลงในเอทิลแอลกอฮอล์ แช่ทิ้งไว้ 48 ชั่วโมง แล้วนำตัวอย่างชิ้นงานมาซับด้วยกระดาษทิชชู และนำมาชั่งน้ำหนัก บันทึกเป็น W_2 นำผลการทดลองมาคำนวณหาค่าความพรุน ตามสูตร

$$\% \text{ Porosity} = \frac{\text{น้ำหนักก่อนแช่ชิ้นงาน} - \text{น้ำหนักหลังแช่ชิ้นงาน}}{\text{ความหนาแน่นเอทิลแอลกอฮอล์} \times \text{ปริมาตรของชิ้นงาน}} \times 100$$

3.3.2 สมบัติเชิงกล

ศึกษาถึงความสามารถในการทนทานต่อแรงกดอัดของชิ้นงานด้วยเครื่อง Universal testing machine โดยอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D1621-10 เตรียมตัวอย่างโดยนำตัวอย่างมาตัดชิ้นงานรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส กว้าง 2 นิ้ว ยาว 2 นิ้ว และหนา 1 นิ้ว (ตัดมา 4 ชิ้นต่อการทดสอบ 1 ครั้ง) ทำการทดสอบแรงกดอัดที่ 1 KN กดอัดชิ้นงานที่ 50% ของชิ้นงาน โดยทำการปรับค่าเครื่องก่อนจะทำการทดสอบ จากนั้นนำชิ้นงานไปทดสอบแรงกดอัด (ทำซ้ำ 3 ครั้ง) จดค่า Compressive stress และค่า Compressive modulus

3.3.3 สมบัติทางความร้อน

ศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสาร เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ทางความร้อน (Thermo gravimetric analysis ; TGA)^{[28],[29],[30]} นำชิ้นงานที่จะทดสอบใส่ลงใน Platinum pan ขนาดพอดีกับ pan ทำการทดสอบ โดยกำหนดช่วงอุณหภูมิ 50-900 °C และใช้ Heating rate 10 °C นำผลที่ได้ไปวิเคราะห์

3.3.4 การตรวจสอบหาหมู่ฟังก์ชันของสาร

ใช้เทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตเมทรี (Fourier Transform Infrared Spectrophotometry/FT-IR) ซึ่งอาศัยหลักการของ ATR เป็นเทคนิคที่สะท้อนลำแสงอินฟราเรดเข้ามาสู่ตัวอย่าง เกิดการหักเหมุมภายในระหว่างสารตัวอย่างกับผลึกที่มีค่า Reflective index สูงกว่าสารตัวอย่าง แล้วสะท้อนกลับเข้ามาในเครื่องตรวจวัดได้สัญญาณเป็น IR spectrum ทดสอบโดยตัดชิ้นงานขนาดเล็กเท่ากับหัวตรวจวัด นำไปวิเคราะห์โดยใช้เครื่องมือโดยเทคนิคATR^[31] ซึ่งเป็นวิธีที่รวดเร็วและสะดวกต่อการวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของสารตัวอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.5 การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์

ศึกษาความเป็นผลึกของโปรตีนเซรีซิน และคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงผลึกของผสมจากการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ ด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ เตรียมชิ้นงานโดยการตัด ขนาดประมาณ 2×2 นิ้ว พื้นที่ผิวต้องเรียบสม่ำเสมอ โดยใช้แหล่งกำเนิดรังสีเอ็กซ์เป็น $\text{CuK } \alpha$ ที่มุม 2θ ตั้งแต่ $5 - 40^\circ$ เนื่องจากมีค่าการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ มีมุม 2θ ไม่เกิน 40° นำไปวิเคราะห์เข้าเครื่อง XRD โดยอาศัยการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ เมื่อตกกระทบอนุภาค และเกิดการหักเหของลำรังสีสะท้อนออกมาทำมุมกับระนาบ แล้ววัดค่าความเข้มของรังสีที่สะท้อนออกมาที่มุมต่าง ๆ นำค่าที่ได้มาพลอตกราฟดูความเป็นผลึกของชิ้นงาน



บทที่ 4


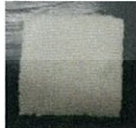
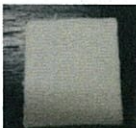

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

งานวิจัยนี้เป็นการทดลองเตรียมเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลจากสารละลายเซรีซินที่ได้จากรังไหมขาวผสมกับสารละลายคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส โดยใช้เทคนิคการทำแห้งแบบแช่แข็ง (freeze-drying) แล้วเปรียบเทียบสมบัติของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่างสารละลายเซรีซินกับสารละลายคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส และเปรียบเทียบสมบัติของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลก่อนและหลังการเติมแคลเซียมไฮดรอกไซด์อะปาไทต์ โดยวิธีการทดลองได้นำมาจากรายงานวิจัยของนางสาวเกษณีย์ และคณะ^[21] ดังนั้นเพื่อเป็นการเปรียบเทียบไหมขาวกับไหมเหลืองจึงได้นำข้อมูลและภาพประกอบบางส่วนมาใช้เปรียบเทียบเพื่อให้เห็นผลชัดเจน ซึ่งข้อมูลและภาพประกอบที่นำมาจะมีเลขเอกสารอ้างอิงกำกับ สมบัติที่ทำการทดสอบ ได้แก่ สมบัติการดูดซับน้ำ ค่าความพรุน สัณฐานวิทยา ความหนาแน่น สมบัติทางความร้อน สมบัติเชิงกล การวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชัน และการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์

4.1 การเตรียมเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลที่ผสมระหว่างสารละลายโปรตีนเซรีซินจากไหมกับคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่มีผลต่อสมบัติต่างๆ

4.1.1 ลักษณะทางกายภาพของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลจากโปรตีนเซรีซินไหมขาวสูตรต่างๆ

ตารางที่ 4.1 แสดงลักษณะทางกายภาพของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลสูตรต่างๆ

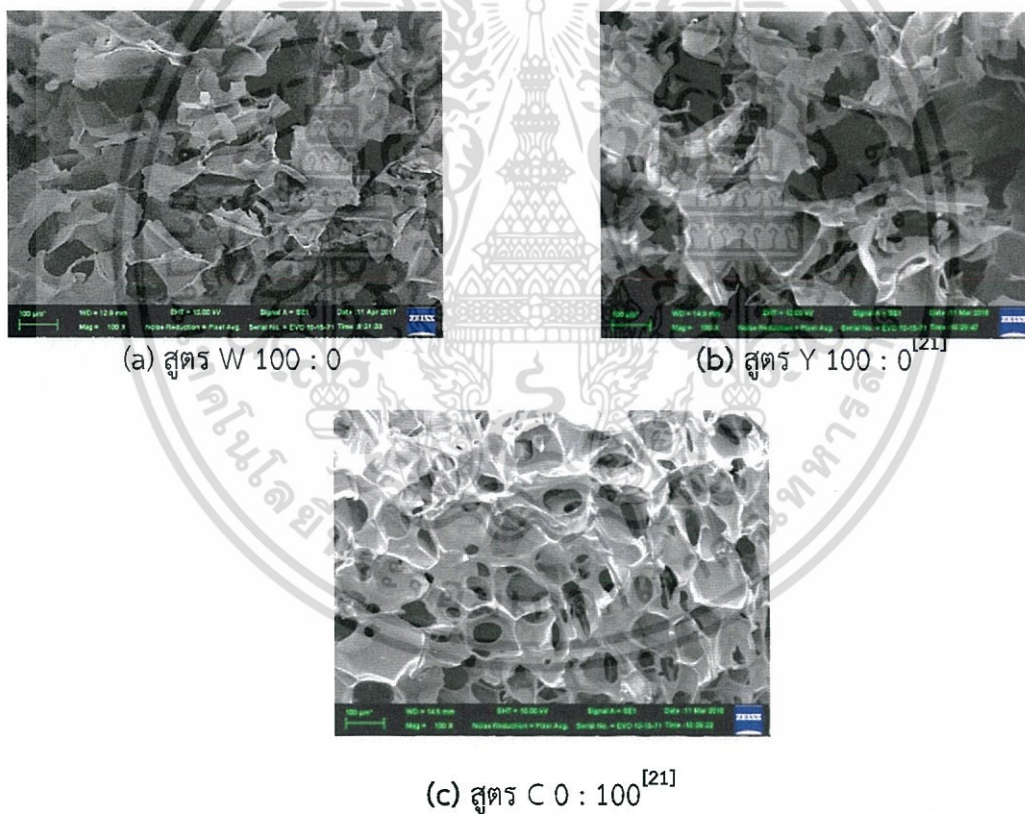
Sericin : CMC (%)	ลักษณะทางกายภาพ	ลักษณะทางกายภาพของพื้นผิว
W 100 : 0	ลักษณะชิ้นงานเป็นของแข็งมีรูพรุน สีขาว นิ่ม เปราะ และแตกหักง่าย	
W 50 : 50	ลักษณะชิ้นงานเป็นของแข็ง มีรูพรุน สีขาว ค่อนข้างนิ่ม และมีความเปราะเล็กน้อย	
W 20:80	ลักษณะชิ้นงานเป็นของแข็ง มีรูพรุน สีขาว และค่อนข้างแข็ง	
Y 50 : 50	ลักษณะชิ้นงานเป็นของแข็งมีรูพรุน สีเหลืองอ่อน ค่อนข้างนิ่ม และมีความเปราะเล็กน้อย	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.1 พบว่าชิ้นงานที่ได้เป็นของแข็งที่มีลักษณะเป็นรูพรุนคล้ายฟองน้ำ พื้นผิวของชิ้นงานค่อนข้างเรียบ โดยสูตร W100:0 มีสีขาว เนื่องจากเป็นเซรีซินของไหมขาว ซึ่งอัตราส่วนผสมระหว่างเซรีซิน และคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (W50:50, W20:80) จะมีสีขาวขึ้น ตามอัตราส่วนของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่เพิ่มขึ้น ตามลำดับและพบว่าชิ้นงานที่ได้จากสูตร W100:0 จะมีความนุ่มและแตกหักได้ง่ายเมื่อใช้มีือกด แต่จะมีความแข็งมากขึ้นเมื่อมีการเพิ่มอัตราส่วนของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ส่วนชิ้นงานที่ได้จากไหมเหลือง สูตร Y 50:50 จะมีสีเหลืองอ่อน ค่อนข้างนุ่ม และมีความเปราะเล็กน้อย

4.1.2 ผลการศึกษาสมบัติทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนไม่โครสโคปของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจล

เปรียบเทียบลักษณะและขนาดของรูพรุนของชิ้นงานที่ได้จากไหมขาว ไหมเหลือง และคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด โดยศึกษาชิ้นงานในแนวภาคตัดขวาง (Cross section)



รูปที่ 4.1ก. สัณฐานวิทยาของเนื้อเยื่อโครงสร้างจากโปรตีนเซรีซินไหมขาวสูตร W 100 : 0 (a) ไหมเหลืองสูตร Y 100 : 0 (b) และคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสสูตร 0 : 100 (c) กำลังขยาย 100X

จากรูปที่ 4.1ก. พิจารณาเปรียบเทียบโครงสร้างรูพรุนที่เกิดจากไหมขาวสูตร W100:0 (a) และไหมเหลืองสูตร Y100:0 (b) พบว่ามีลักษณะคล้ายคลึงกันคือ เซรีซินจากไหมทั้งสองเมื่อใช้เทคนิคการทำแห้งแบบแช่แข็ง (Freeze drying) โดยทำให้แห้งมีลักษณะเป็นแผ่น (Sheet) เนื่องจากโมเลกุลใหญ่เกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างสายโซ่ ไม่พบการเชื่อมต่อของรูพรุน ซึ่งทำให้เนื้อเยื่อโครงสร้างไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไฮโดรเจลที่ได้มีสมบัติแตกหักได้ (frangible) ช่องว่างที่เกิดขึ้นระหว่างแผ่นเซรีซินมีขนาดแตกต่างกัน มีการกระจายตัวแบบสุ่ม และไม่มีโครงสร้างลักษณะค้ำยัน (strut) ระหว่างแผ่นเซรีซินทั้งในไหมขาว และไหมเหลือง แผ่นเซรีซินของไหมเหลืองที่ผิวของการหักมีขนาดใหญ่กว่าที่พบในไหมขาว และมีขนาดรูพรุนกว้างกว่าที่พบในไหมขาว (ดูตารางที่ 4.2) ลักษณะเช่นนี้ทำให้สมบัติเชิงกลต่ำ

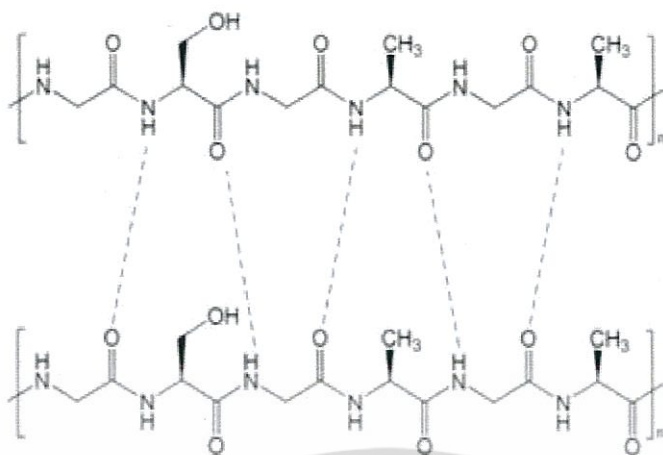
รูปที่ 4.1ก. (c) แสดงลักษณะโครงสร้างรูพรุนของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส พบว่ารูพรุนมีลักษณะคล้ายรวงผึ้ง ขนาดรูพรุนใกล้เคียงกัน ผนังรูพรุนเชื่อมต่อกันแบบ Interconnected network porous structure^[32] มีโครงสร้างค้ำยัน และมีการกระจายของรูพรุนเป็นระเบียบสม่ำเสมอ ลักษณะของรูพรุนเช่นนี้ทำให้ชิ้นงานมีความแข็งแรง ทนแรงกดอัดได้สูง และกลับคืนรูปร่างได้เมื่อเอาแรงออก

ตารางที่ 4.2 แสดงขนาดรูพรุนและความพรุน(%) ของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจล

Sericin : CMC	ขนาดรูพรุน (μm)	ความพรุน (%)
W 100:0	228.341 \pm 65.763	44.12
Y 100:0 ^[21]	239.00 \pm 32.82	41.25
C 0:100 ^[21]	156.839 \pm 9.88	76.21

ผลการวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของชิ้นงาน (a) สูตร W 100 : 0 (b) สูตร Y 100 : 0 และ (c) 0:100 ในตารางที่ 4.2 พบว่าขนาดรูพรุนจากโปรตีนเซรีซินไหมเหลืองมีขนาดใหญ่กว่าโปรตีนเซรีซินไหมขาว และคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส เนื่องจากกระบวนการทำแห้งแบบแช่แข็ง (Freeze drying) อาศัยหลักการระเหิดของโมเลกุลน้ำที่แทรกอยู่ในวัสดุ ปริมาณ และตำแหน่งที่น้ำอยู่ จึงเป็นสิ่งที่กำหนดโครงสร้างของชิ้นงาน ขนาดรูพรุนใหญ่จึงหมายถึงขนาดของน้ำขนาดใหญ่ถูกดูดซับ นั่นคือโปรตีนเซรีซินจากไหมเหลืองเกิดพันธะไฮโดรเจนกับน้ำได้ดีกว่าโปรตีนเซรีซินจากไหมขาว เมื่อขนาดรูพรุนใหญ่ส่งผลให้ความพรุนของชิ้นงานต่ำลง ขนาดรูพรุน และความพรุนของไหมไม่เหมาะสมต่อการนำไปใช้ในงานวิศวกรรมเนื้อเยื่อ แต่เมื่อพิจารณาขนาดรูพรุนของโปรตีนไหมทั้งสองชนิดเทียบกับคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส พบว่าขนาดรูพรุนของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเล็กเพียง 156.839 μm หมายถึง โมเลกุลของน้ำสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับหมู่ $-\text{COONa}$ และหมู่ $-\text{OH}$ ในโมเลกุลของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสได้อย่างทั่วถึง และการกระจายสม่ำเสมอ เมื่อนำชิ้นงานมาผ่านกระบวนการ Freeze drying จึงได้รูพรุน ดังรูปที่ 4.1ก. (c) เมื่อคำนวณความพรุนมีค่า 76% ซึ่งเหมาะสมที่จะนำไปใช้ในงานวิศวกรรมเนื้อเยื่อ^[33] จากสัณฐานวิทยาแสดงการเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโปรตีนเซรีซินดังรูปที่ 4.1ข.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

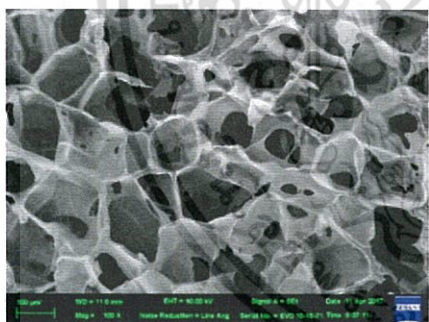


รูปที่ 4.1ข. แสดงแบบจำลองการเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโปรตีนเซรีซิน

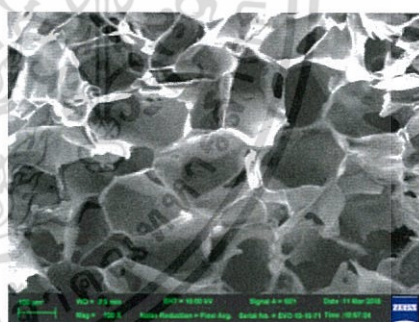
เปรียบเทียบสัณฐานวิทยาของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลผสมระหว่างโปรตีนเซรีซินจากไหมกับคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส

เซรีซินจากไหมขาว

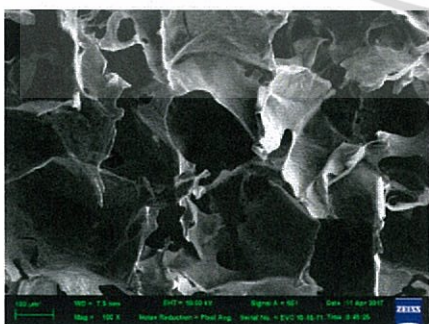
เซรีซินจากไหมเหลือง



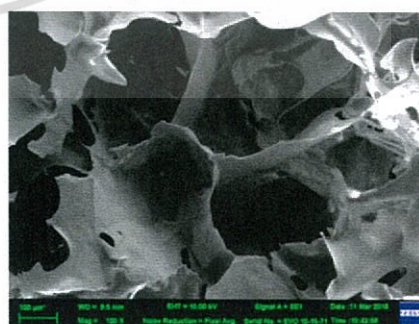
(d) สูตร W 20 : 80



(e) สูตร Y 20 : 80^[21]



(f) สูตร W 50 : 50



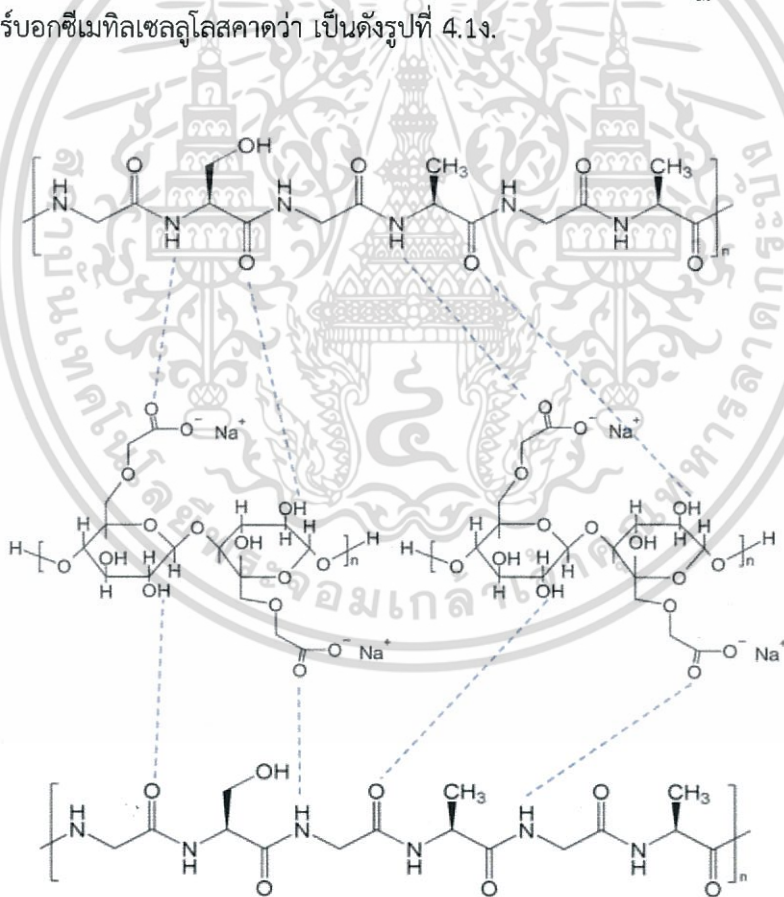
(g) สูตร Y 50 : 50^[21]

รูปที่ 4.1ค. สัณฐานวิทยาของเนื้อเยื่อโครงสร้างจากโปรตีนเซรีซินไหมขาวผสมคาร์บอกซี

เมทิลเซลลูโลส สูตร W 20 : 80 (d) สูตร W 50 : 50 (f) เนื้อเยื่อโครงสร้างจากโปรตีนเซรีซินไหม
 เอกสารเหลืองผสมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส สูตร Y 20 : 80 (e) และ สูตร Y 50 : 50 (g) กำลังขยาย 100X ในการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปรียบเทียบลักษณะ และขนาดของรูพรุนของชิ้นงานจากโปรตีนเซรีซินไหมขาว และไหมเหลืองที่ผสมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ได้ลักษณะรูพรุนดังรูปที่ 4.1ค. (d) และ (g) พบว่าการผสมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสในโปรตีนเซรีซินทั้งไหมขาว และไหมเหลืองทำให้ชิ้นงานโครงสร้างรูพรุนชัดเจนขึ้น ในสูตรที่มีอัตราส่วนของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสมาก (20:80) โครงสร้างรูพรุนของชิ้นงานไหมขาวคล้ายกับโครงสร้าง รูพรุนของชิ้นงานไหมเหลือง กล่าวคือ ขนาดรูพรุนใกล้เคียงกัน ผนังรูพรุนติดต่อกัน มีลักษณะโครงสร้างค้ำยัน ส่วนในไหมเหลืองยังปรากฏลักษณะแผ่นเบต้า (β -sheet)^[13] เป็นแผ่นรอบๆ รูพรุน และจากรูปที่ 4.1ค. (f) และ (g) อัตราส่วนที่เพิ่มโปรตีนเซรีซิน และลดคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสลง (50:50) โครงสร้างรูพรุนของชิ้นงานทั้งไหมขาว และไหมเหลือง จะเห็นเป็นแผ่นเด่นชัดเจน

ลักษณะรูพรุนมีขนาดรูพรุนใหญ่ขึ้น ซึ่งลักษณะที่ปรากฏนี้เกิดเหมือนกันทั้งไหมขาว และไหมเหลือง เพียงแต่รูพรุนที่เกิดจากโปรตีนเซรีซินของไหมเหลืองมีขนาดกว้างกว่า และเป็นแผ่นใหญ่กว่าอธิบายได้ว่า คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสลดการเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของไหมขาวได้ดีกว่าไหมเหลือง ดังนั้นแผ่นเบต้าที่เกิดขึ้นจากไหมขาวจึงน้อยกว่าไหมเหลือง ปฏิกริยาระหว่างโปรตีนเซรีซินกับคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสคาดว่า เป็นดังรูปที่ 4.1ง.



รูปที่ 4.1ง. แสดงแบบจำลองการเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโปรตีนเซรีซินกับคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส

ตารางที่ 4.3 แสดงขนาดรูพรุน และความพรุน(%) ของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลของไหมทั้งสองชนิดตามสูตรต่างๆ

Sericin : CMC	ขนาดรูพรุน (μm)	ความพรุน (%)
W20:80	163.64 \pm 25.37	68.38
Y20:80 ^[21]	218.24 \pm 21.67	65.11
W50:50	203.19 \pm 37.26	70.43
Y50:50 ^[21]	351.40 \pm 24	70.80

จากตารางที่ 4.3 เมื่อพิจารณาความพรุน(%)ของเนื้อเยื่อโครงสร้างที่ได้จากการผสมระหว่างโปรตีน เซรีซินของไหมขาว และไหมเหลืองกับคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส พบว่าที่อัตราส่วนเดียวกัน เช่น อัตราส่วน 20:80 ความพรุน(%) มีค่าใกล้เคียงกัน และที่อัตราส่วน 50:50 ให้ผลเช่นเดียวกัน ดังนั้นจึงเลือกอัตราส่วน 50:50 มาทำการศึกษาต่อโดยการเติมแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ Mingzhong และคณะ^[33] รายงานว่า เนื้อเยื่อโครงสร้างที่มีขนาดรูพรุนช่วง 80-300 μm และความพรุนไม่น้อยกว่า 70% เหมาะสมในการใช้งานด้านวิศวกรรมเนื้อเยื่อ ซึ่งในงานวิจัยนี้พบว่าที่อัตราส่วนผสม 50:50 ขึ้นงานมีขนาดรูพรุน และความพรุน(%)เหมาะสมกับการนำมาใช้งาน

4.1.3 ความหนาแน่นของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจล

เปรียบเทียบความหนาแน่นของชิ้นงานที่ได้จากอัตราส่วนไหมขาว ไหมเหลือง และคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส

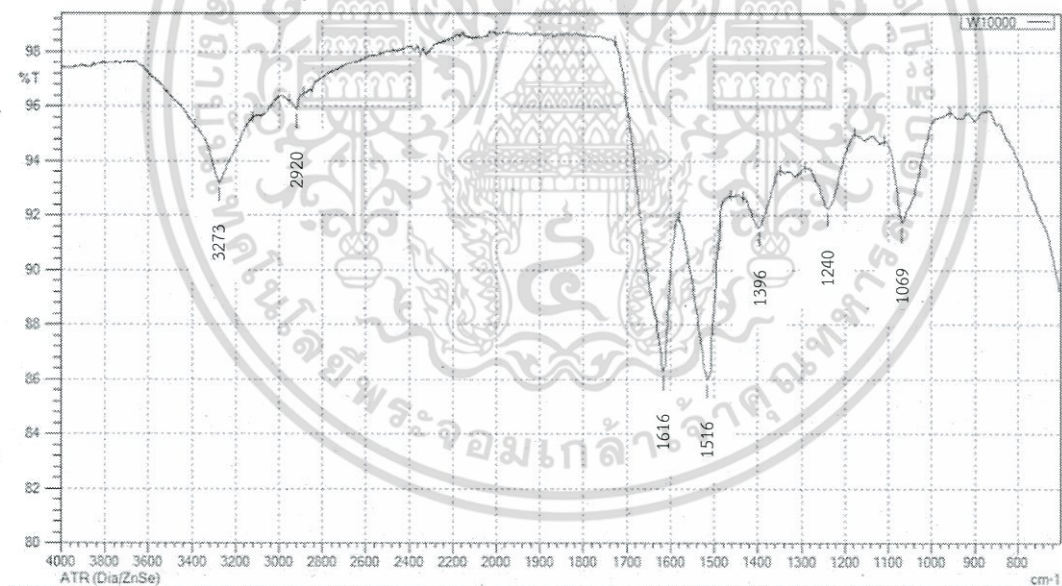
ตารางที่ 4.4 ความหนาแน่นของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลโปรตีนเซรีซินจากไหมขาว และไหมเหลืองกับคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสในอัตราส่วนต่างๆ

สูตร	น้ำหนัก (g)	ปริมาตร (กxยxส) (cm^3)	ความหนาแน่น (g/cm^3)
W100:0	0.0860	2x2x0.8	0.0269
W50:50	0.1714	2x2x0.7	0.0612
W20:80	0.1516	2x2x0.5	0.0758
Y50:50	0.1260	2x2x0.5	0.0630
C0:100	0.1588	2x2x0.5	0.0794

จากตารางที่ 4.4 เมื่อพิจารณาความหนาแน่นของชั้นงานสูตร W100:0 พบว่ามีความหนาแน่นต่ำที่สุดเนื่องจากขนาดของรูพรุนและความพรุน ดังตารางที่ 4.2 จึงทำให้ชั้นงานที่ได้มีน้ำหนักเบามาก ส่งผลต่อความหนาแน่นให้มีค่าต่ำสุด ส่วนสูตร C0:100 มีความหนาแน่นมากที่สุดเนื่องจากขนาดของรูพรุน และความพรุนของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ดังตารางที่ 4.2 ส่วนสูตรที่มีการผสมเซรีซินไหมขาว ไหมเหลืองกับคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส พบว่าสูตร W50:50 และ Y50:50 มีความหนาแน่นใกล้เคียงกัน และสูตร W20:80 มีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น ซึ่งจะเห็นได้ว่าความหนาแน่นจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส สอดคล้องกับภาพจาก SEM รูป 4.1ก. และรูป 4.1ค.

4.1.4 วิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจล

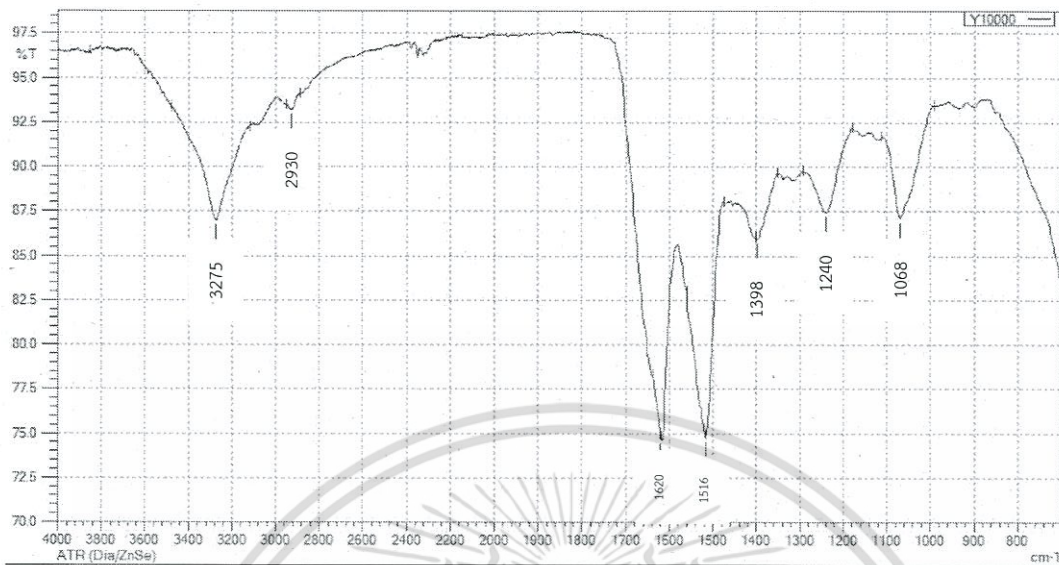
การวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR) เพื่อวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันหลักของโปรตีนเซรีซินจากไหมขาว ไหมเหลือง และคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส แล้วทำการเปรียบเทียบอินฟราเรดสเปกตรัมของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจล ที่ได้จากการผสมระหว่างโปรตีน เซรีซินกับคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสในแต่ละสูตรว่าแตกต่างกันอย่างไร และเพื่อตรวจสอบว่ามีการเกิดอันตรกิริยาระหว่างโปรตีนเซรีซินกับคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสหรือไม่ อินฟราเรดสเปกตรัมจากการวิเคราะห์ FT-IR แสดงดังรูป



รูปที่ 4.2 แสดง IR-spectrum ของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลจากโปรตีนเซรีซินจากไหมขาว สูตร W100:0

จากรูป 4.2 พิจารณาเลขคลื่นในช่วง $800-4000 \text{ cm}^{-1}$ พบว่าเลขคลื่น 3273 cm^{-1} คือ N-H stretching ของ amide, เลขคลื่นที่ 2920 cm^{-1} คือ C-H stretching, เลขคลื่นที่ 1616 cm^{-1} , 1516 cm^{-1} , 1396 cm^{-1} คือ C=O stretching ของ I, II, III ของ amide ตามลำดับ, เลขคลื่นที่ 1240 cm^{-1} , 1068 cm^{-1} คือ C-N stretching ของ amine ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเซรีซินเป็นสารประกอบประเภทโปรตีน โดยมีกรดอะมิโนเป็นองค์ประกอบหลัก

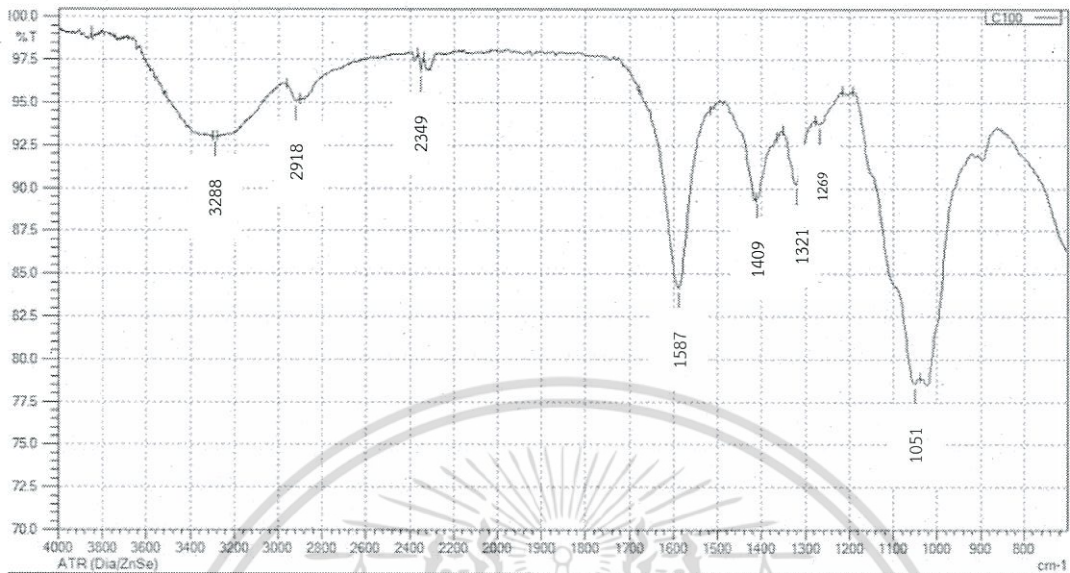
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 แสดง IR spectrum ของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลจากโปรตีนเซรีซินของไหมเหลือองสูตร Y100:0

จากรูปที่ 4.3 ที่เมื่อพิจารณาที่เลขคลื่นในช่วง $800\text{--}4000\text{ cm}^{-1}$ พบว่าที่เลขคลื่น 3275 cm^{-1} คือ N-H stretching ของ amine, เลขคลื่นที่ 2929 cm^{-1} คือ C-H stretching, เลขคลื่นที่ 1620 cm^{-1} , 1516 cm^{-1} , 1398 cm^{-1} คือ C=O stretching ของ I, II, III amide ตามลำดับ เลขคลื่นที่ 1240 cm^{-1} , 1068 cm^{-1} คือ C-N stretching ของ amine

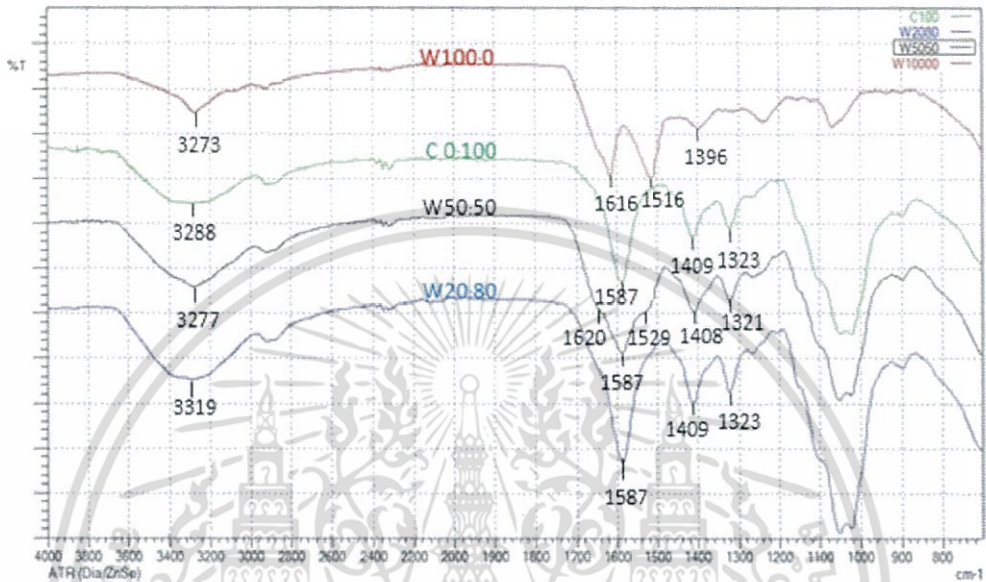
จากการเปรียบเทียบสเปกตรัม FT-IR ของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลที่ได้จากโปรตีนเซรีซินทั้งสองชนิดพบว่า IR สเปกตรัมที่พิจารณาในช่วง $800\text{--}4000\text{ cm}^{-1}$ ไม่แตกต่างกันมากนัก เนื่องจากเป็นโครงสร้างไฮโดรเจลที่ได้จากโปรตีนเซรีซินเหมือนกัน โครงสร้างที่พบเป็นสารประกอบประเภทโปรตีนโดยมีกรดอะมิโนเป็นองค์ประกอบหลักเช่นเดียวกัน



รูปที่ 4.4 แสดง IR-spectrum ของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลที่ได้จากสารละลายคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส สูตร C0:100

จากรูปที่ 4.4 พิจารณาเลขคลื่นในช่วง $800\text{--}4000\text{ cm}^{-1}$ พบว่าเลขคลื่นที่ 3288 cm^{-1} คือ O-H stretching ของ carboxylic acid, เลขคลื่นที่ 2918 cm^{-1} คือ paraffinic C-H stretching เลขคลื่นที่ 1587 cm^{-1} คือ C=O stretching ของ carboxylic, 1409 cm^{-1} คือ CH_2CH_3 bending, 1321 cm^{-1} คือ CH_3 bending, เลขคลื่นที่ 1269 cm^{-1} คือ C-O stretching ของ carboxylic, เลขคลื่นที่ 1051 cm^{-1} และ 1024 cm^{-1} คือ C-O stretching ของ alcohol.

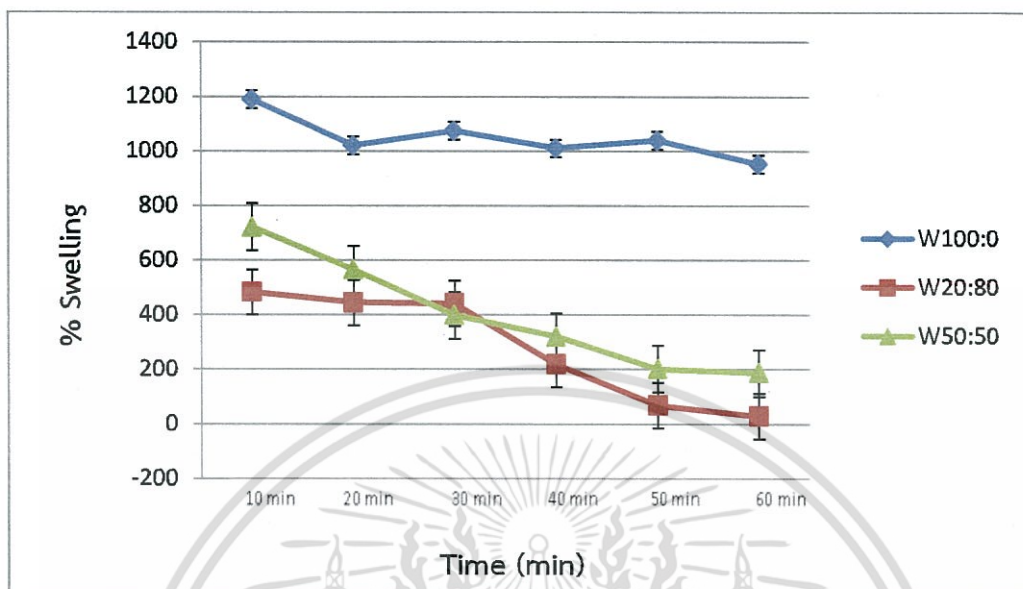
การเปรียบเทียบอินฟราเรดสเปกตรัมของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลที่ได้จากโปรตีนเซรีซิน สูตร (W100:0) กับคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส สูตร (C0:100) และจากการผสมระหว่างโปรตีนเซรีซิน กับคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส สูตร (W20:80) และ สูตร (W50:50) ตามลำดับ



รูปที่ 4.5 แสดง IR-spectrum ของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลที่ได้จากสารละลายผสมระหว่างโปรตีนเซรีซินจากไหมขาวกับคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสในสูตรต่างๆ

พิจารณาสูตร W50:50 และ W20:80 ซึ่งเป็นสูตรผสมระหว่างโปรตีนเซรีซินไหมขาวกับคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส พบว่าที่ตำแหน่ง O-H stretching และ N-H stretching เลขเคลื่อนไปอยู่ระหว่างไหม และคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส และเลขคลื่นมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส เห็นได้ชัดที่สูตร W20:80 ที่มีเลขคลื่น 3319 cm^{-1} พิกที่เลขคลื่น 1616 cm^{-1} และ 1516 cm^{-1} ของไหมขาวเกิดการเลื่อนไปที่ 1620 cm^{-1} และ 1529 cm^{-1} ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโปรตีนเซรีซินกับคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ส่วนพิกที่แสดงเอกลักษณ์ของ C=O ใน Carboxylic เลขคลื่นที่ 1587 cm^{-1} และพิกที่แสดง C-O ของ alcohol ในคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสไม่เปลี่ยนแปลง

4.1.5 ลักษณะการบวมน้ำ (Swelling) ของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจล



รูปที่ 4.6 เปอร์เซ็นต์การบวมน้ำของเนื้อเยื่อโครงสร้างจากไหมข้าวสาลีต่าง ๆ

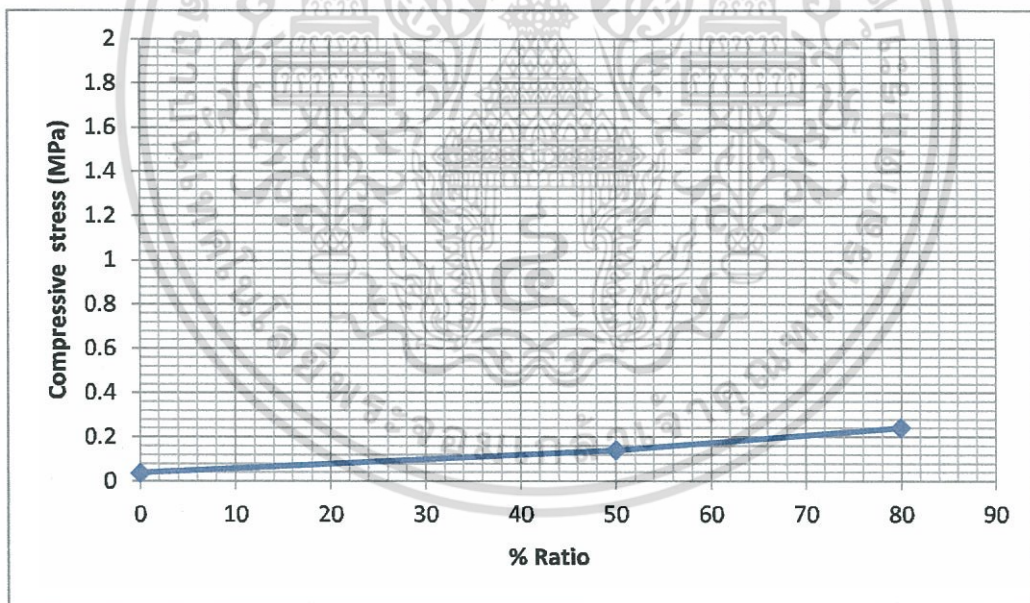
จากรูปที่ 4.6 แสดงเปอร์เซ็นต์การบวมน้ำของเนื้อเยื่อโครงสร้างจากไหมข้าวสาลีของสูตรต่างๆ ในน้ำกลั่นทุกๆ 10 นาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง พบว่าใน 10 นาทีแรก สูตร W100:0 มีเปอร์เซ็นต์การบวมน้ำสูงที่สุดประมาณ 1200 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากเซรีซินเป็นโปรตีนไหมที่มีโครงสร้างโมเลกุลมีกรดอะมิโนเซอร์รีน (Serine) เป็นองค์ประกอบอยู่มาก และยังมีหมู่ $-CONH-$ อีกด้วย การมีหมู่ฟังก์ชันดังกล่าวทำให้สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับน้ำได้ดี เนื้อเยื่อโครงสร้างของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ไม่สามารถวัดการบวมได้ เนื่องจากละลายน้ำทันที การบวมน้ำของสูตร W20:80 ซึ่งมีปริมาณของเซรีซินน้อย พบว่าเซรีซินช่วยลดการละลายของ คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ซึ่งเป็นการยืนยันว่าเซรีซินเกิดพันธะไฮโดรเจนกับคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสได้ และลดหมู่ที่ชอบน้ำลง โดยเปรียบเทียบกับสูตร W50:50 กับสูตร W20:80 มีเปอร์เซ็นต์การบวมน้ำใน 10 นาทีแรก ประมาณ 483 และ 722 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ เมื่อเวลาผ่านไปการบวมน้ำของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลในแต่ละสูตรมีแนวโน้มลดลง โดยสูตร W100:0 จะลดลงอย่างช้าๆ เมื่อเทียบกับสูตร W50:50 และสูตร W20:80 ผลการทดลองแสดงว่าการผสมเซรีซินกับคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสจะได้เนื้อเยื่อโครงสร้างผสมที่มีการบวมน้ำต่ำกว่าโปรตีนเซรีซิน เพราะคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสละลายน้ำได้ดีกว่าโปรตีนเซรีซิน เนื่องจากพบลักษณะคล้ายวนติคอยู่ที่ตะแกรงลวดที่ใช้ในการทดลอง

เมื่อทำการเปรียบเทียบขนาดของรูพรุน (ดูตารางที่ 4.3) กับเปอร์เซ็นต์การบวมน้ำ พบว่า สูตร W100:0 มีขนาดของรูพรุนเท่ากับ $228.341 \pm 65.763 \mu\text{m}$ มีเปอร์เซ็นต์การบวมน้ำใน 10 นาที แรกเท่ากับ 1200 เปอร์เซ็นต์ สูตร W50:50 มีขนาดของรูพรุนเท่ากับ $203.193 \pm 37.265 \mu\text{m}$ มีเปอร์เซ็นต์การบวมน้ำใน 10 นาทีเท่ากับ 722 เปอร์เซ็นต์ สูตร W20:80 มีขนาดของรูพรุนเท่ากับ $163.642 \pm 25.374 \mu\text{m}$ มีเปอร์เซ็นต์การบวมน้ำใน 10 นาทีเท่ากับ 483 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งจะเห็นว่า เปอร์เซ็นต์การบวมน้ำสัมพันธ์กับขนาดของรูพรุน

4.1.6 การทดสอบสมบัติเชิงกลของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจล

เมื่อทำการทดสอบสมบัติเชิงกลของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลด้วยเครื่อง Universal Testing Machine โดยใช้ Load cell 1 KN และกำหนด Crosshead speed 2.5 mm/min ตามมาตรฐาน ASTM 1621-10 เพื่อทดสอบความสามารถในการรับแรงกดอัดและความแข็งของชิ้นงาน ทำการเปรียบเทียบผลทดสอบของชิ้นงานสูตรต่างๆ โดยกำหนดระยะกดที่ 50% ของความหนาของชิ้นงาน

4.1.6.1 การทดสอบความเค้นแรงกดอัด (Compressive stress)

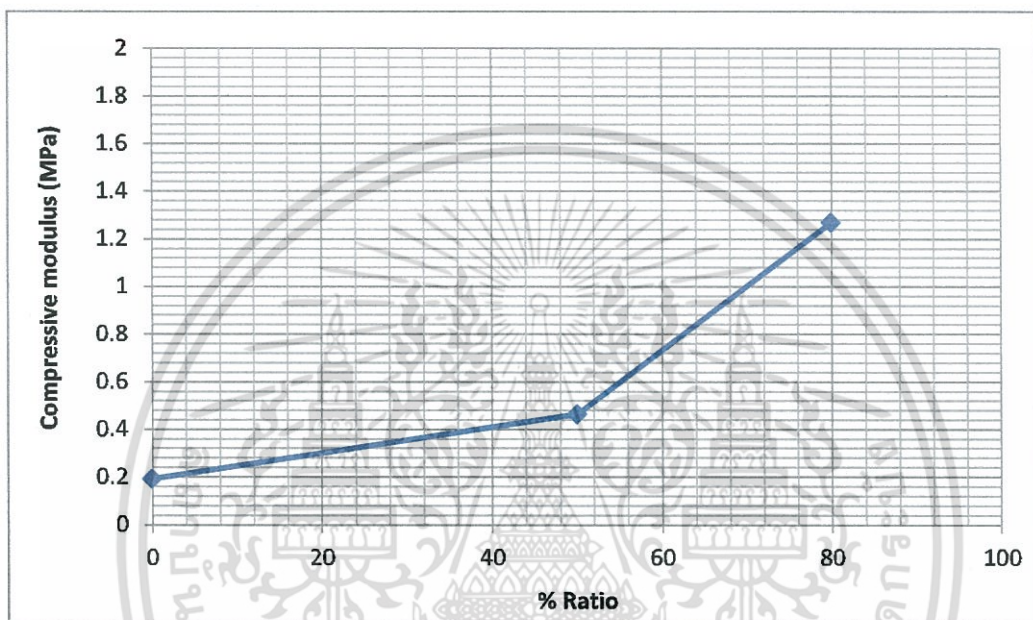


รูปที่ 4.7 กราฟแสดงค่าความเค้นแรงกดอัดสูงสุด (Compressive stress) ของเนื้อเยื่อโครงสร้างในอัตราส่วนต่างๆ

จากรูปที่ 4.7 พบว่าอัตราส่วนของโปรตีนเซรีซินต่อคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่ สูตร W100:0 มีค่าความเค้นแรงกดต่ำที่สุดที่ประมาณ 0.03 MPa แสดงว่าเซรีซินมีความเปราะมากกว่า จึงรับแรงกดอัดได้น้อย เมื่อเปรียบเทียบค่าความเค้นแรงกดอัดของสูตรผสมระหว่างเซรีซินกับคาร์บอกซีเมทิล เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เซลลูโลส พบว่าในอัตราส่วน W50:50 และ W20:80 มีค่าความเค้นแรงกดอัดเพิ่มขึ้นเล็กน้อยตามปริมาณของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่เพิ่มขึ้น แต่เนื่องจากแต่ละสูตรมีค่าความเค้นแรงกดที่ใกล้เคียงกัน จึงสรุปได้ว่าอัตราส่วนที่ต่างกันระหว่างโปรตีนเซเรซินต่อคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสไม่มีผลต่อค่าความเค้นแรงกดอัด

4.1.6.2 การทดสอบความแข็งยืดหยุ่น (Compressive modulus)

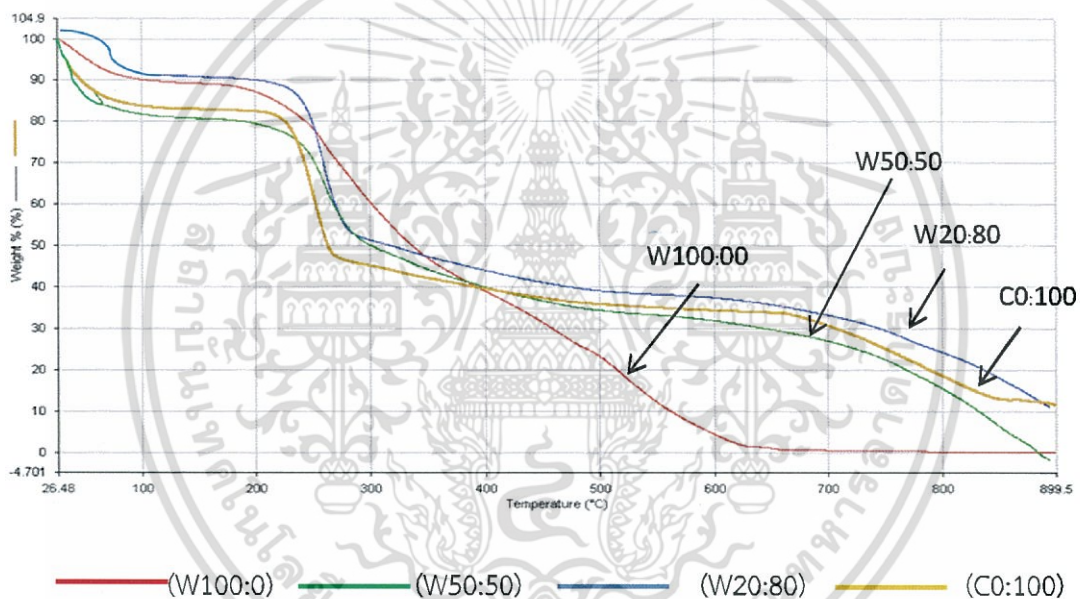


รูปที่ 4.8 กราฟแสดงค่าความแข็งยืดหยุ่น (Compressive modulus) ของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลในอัตราส่วนต่างๆ

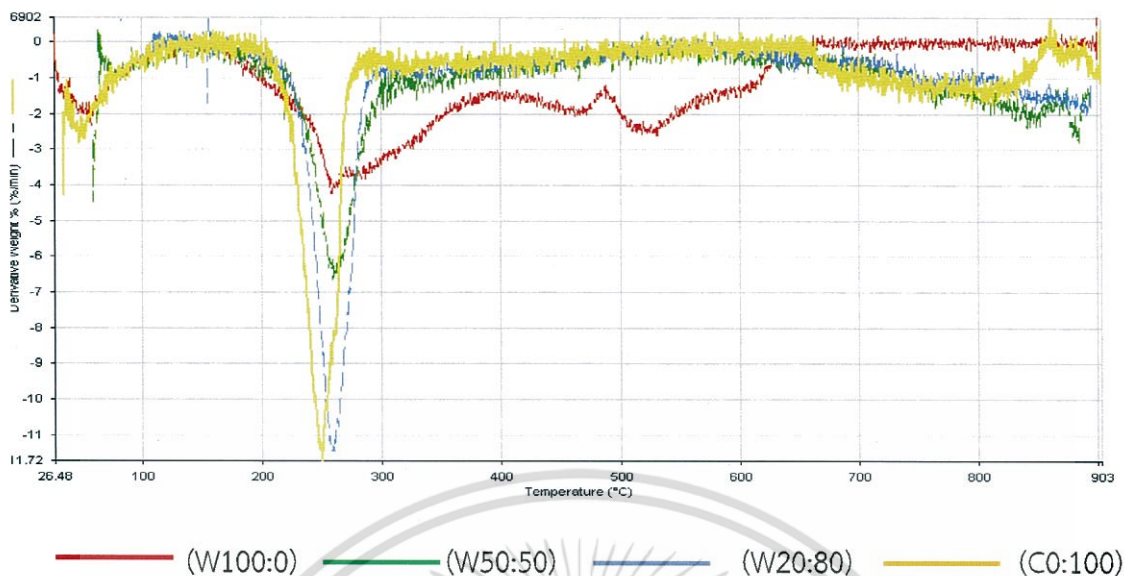
จากรูปที่ 4.8 แสดงค่าความแข็งยืดหยุ่น (Compressive modulus) ของชิ้นงานในอัตราส่วนต่างๆ พบว่าเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลที่ได้จากการผสมระหว่างโปรตีนเซเรซินกับคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส มีค่าความแข็งยืดหยุ่นเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส เนื่องจากเกิดพันธะไฮโดรเจนกับโปรตีนเซเรซิน

4.1.7 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน (TGA) ของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลที่ได้จากโปรตีนเซรีซินใหม่ร่วมกับคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่อัตราส่วนต่างๆ

การวิเคราะห์ทางความร้อนของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลที่ได้จากโปรตีนเซรีซิน และคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส สูตรต่างๆโดยใช้เทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริก ที่อัตราการให้ความร้อน 10 °C/min ภายใต้สภาวะไนโตรเจน ในช่วงอุณหภูมิ 50-900 °C เพื่อศึกษาเสถียรภาพทางความร้อน โดยพิจารณาอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อน และศึกษาความเข้ากันได้ของสารละลายผสมระหว่างโปรตีนเซรีซิน และคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสโดยพิจารณาจากจำนวนขั้นในการสลายตัวของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจล ผลการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลสูตรต่างๆ แสดงดังรูป 4.9



รูปที่ 4.9 แสดงเทอร์โมแกรมจากการวิเคราะห์ TGA ของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลโปรตีนเซรีซินจากใหม่ร่วมกับคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสสูตรต่าง ๆ



รูปที่ 4.10 แสดงกราฟ derivative จากการวิเคราะห์ TGA ของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลโปรตีนเซรีซินจากไหมขาวกับคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสสูตรต่าง ๆ

ตารางที่ 4.5 แสดงอุณหภูมิเริ่มการสลายตัวและอุณหภูมิสลายตัวของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลจากโปรตีนเซรีซินไหมขาว และไหมเหลืองกับคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่อัตราส่วนต่าง

สูตร (sericin:CMC)	อุณหภูมิเริ่มสลายตัว T_o ($^{\circ}\text{C}$)	อุณหภูมิการสลายตัวหมด T_d ($^{\circ}\text{C}$)	Mass loss (%)
W100:0	221.50	258.83	48.67
W50:50	240.58	258.09	45.44
W20:80	239.91	257.73	51.08
C0:100	233.72	248.42	42.65

จากตารางที่ 4.5 โปรตีนเซรีซินไหมขาวเริ่มสลายตัวที่อุณหภูมิ (T_o) 221°C และอุณหภูมิสลายตัวหมด (T_d) คือ 258°C เมื่อผสมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส พบว่าอุณหภูมิสลายตัวหมดเลื่อนไปที่อุณหภูมิต่ำลง ดังตารางที่ 4.5 และเมื่อพิจารณาขั้นตอนการสลายตัวหมดพบว่าการสลายตัวเพียงขั้นตอนเดียว ดังรูปที่ 4.9 และ 4.10 แสดงว่าโปรตีนเซรีซิน และคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างกันได้ดี นอกจากนี้ยังสอดคล้องกับสัณฐานวิทยาจาก SEM ที่พบว่าเนื้อเยื่อโครงสร้างที่ผสมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเข้ากันได้ดีกับโปรตีนไหมเซรีซิน เนื่องจากลักษณะแผ่นเบต้าชีทของไหมลดลง ขนาดรูพรุนลดลง และความเป็นรูพรุนมากขึ้น



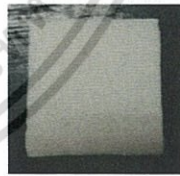

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ศึกษาผลของแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่มีต่อสมบัติของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลผสมระหว่างสารละลายโปรตีนเซรีซินกับคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส

พบว่าสูตร W50:50 และสูตร Y50:50 มีเนื้อเยื่อโครงสร้างที่มีขนาดรูพรุนอยู่ในช่วง 80-300 μm และมีความพรุนไม่น้อยกว่า 70% สอดคล้องกับการใช้งานด้านวิศวกรรมเนื้อเยื่อ^[33] (ดูตารางที่ 4.3) ดังนั้นจึงเลือกอัตราส่วน 50:50 มาศึกษาต่อโดยการเติมแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์

4.2.1 ลักษณะทางกายภาพของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลที่เติมแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์

ตารางที่ 4.6 แสดงลักษณะทางกายภาพของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลของไหมขาว และไหมเหลืองในอัตราส่วน 50:50 ที่เติมแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ปริมาณต่างๆ

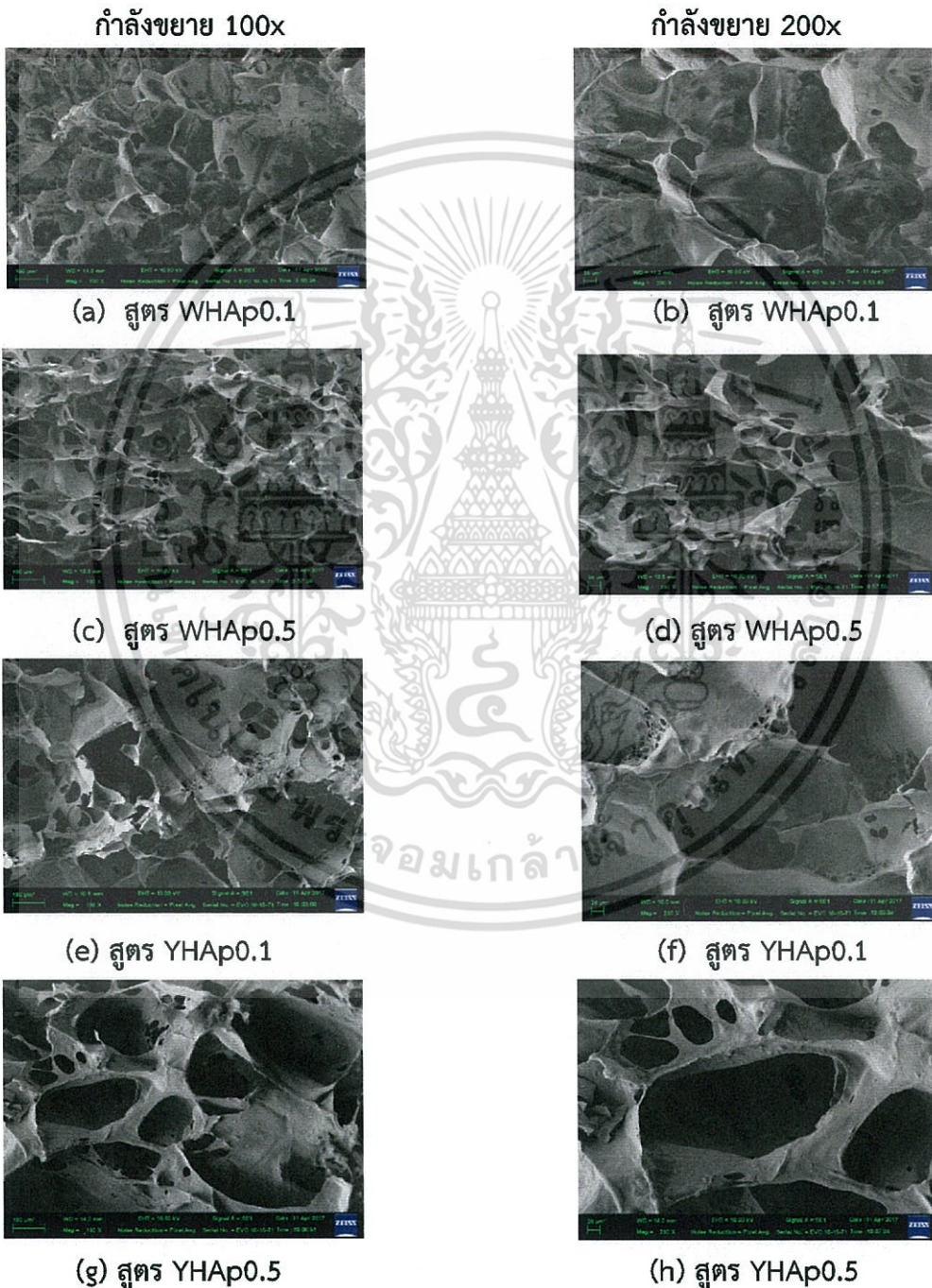
ชื่อสูตร	ลักษณะทางกายภาพ	ลักษณะทางกายภาพของพื้นผิว
WHAp0.1	ชิ้นงานมีลักษณะเป็นของแข็ง มีรูพรุน สีขาว ค่อนข้างแข็ง	
WHAp0.5	ชิ้นงานมีลักษณะเป็นของแข็ง มีรูพรุน สีขาว ค่อนข้างแข็ง	
YHAp0.1	ชิ้นงานมีลักษณะเป็นของแข็ง มีรูพรุนสีเหลืองอ่อน ค่อนข้างแข็ง	
YHAp0.5	ชิ้นงานมีลักษณะเป็นของแข็ง มีรูพรุนสีเหลืองอ่อน ค่อนข้างแข็ง	

หมายเหตุ W = ริงไหมขาว Y = ริงไหมเหลือง HAp = แคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ 0.1 และ 0.5 คือ ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์เป็น%w/v

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 สมบัติทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนไมโครสโคปของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลที่เติมแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์

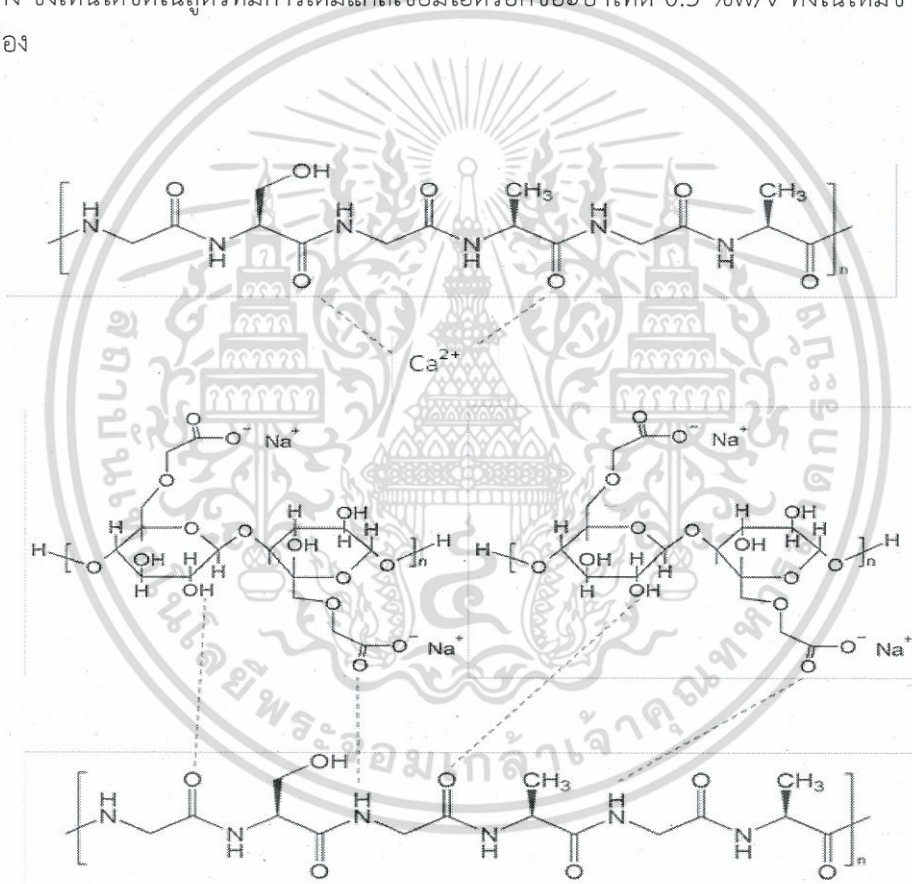
นำตัวอย่างของโปรตีนเซรีซินจากไหมขาว ไหมเหลืองผสมกับคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ที่อัตราส่วน 50:50 มาผสมกับแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ 0.1 และ 0.5 %w/v ตามลำดับ แล้วนำมาวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดได้ดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 เปรียบเทียบสัณฐานวิทยาของชิ้นงานจากไหมขาวและไหมเหลืองผสมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส และแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ ที่กำลังขยาย 100X และ 200X

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.1ค. (f) และ(g) แสดงอัตราส่วน 50:50 ของไหมขาวและไหมเหลืองที่ไม่ได้มีการเติมแคลเซียมไฮดรอกซีอะปาไทต์ ทำการเปรียบเทียบกับรูปที่ 4.11 อัตราส่วน 50:50 ของไหมขาวและไหมเหลืองที่มีการเติมแคลเซียมไฮดรอกซีอะปาไทต์ 0.1และ0.5 %w/v ที่กำลังขยาย 100 เท่า พบว่าทั้งไหมขาวและไหมเหลืองที่มีการเติมแคลเซียมไฮดรอกซีอะปาไทต์ 0.1 %w/v ลักษณะรูพรุนเป็นแผ่นบาง มีผนังบาง และขนาดรูพรุนกว้างกว่าเมื่อเทียบกับสูตรที่มีการเติมแคลเซียมไฮดรอกซีอะปาไทต์ 0.5 %w/v พบว่ามีผนังหนาขึ้น และขนาดรูพรุนแคบลงเนื่องจากปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกซีอะปาไทต์ที่มากขึ้น คาดว่าเข้าไปเกิดพันธะเชื่อมโยงระหว่างโปรตีนเซรีซินกับแคลเซียมไอออนของไหมทั้งสองชนิด ซึ่งแสดงการเกิดพันธะเชื่อมโยง ดังรูปที่ 4.12 และเมื่อทำการเพิ่มกำลังขยายเป็น 200 เท่า จะเห็นได้ว่ามีแคลเซียมไฮดรอกซีอะปาไทต์กระจายตัวอยู่บนเนื้อเยื่อโครงสร้าง ซึ่งเห็นได้ชัดในสูตรที่มีการเติมแคลเซียมไฮดรอกซีอะปาไทต์ 0.5 %w/v ทั้งในไหมขาวและไหมเหลือง



รูปที่ 4.12 แสดงแบบจำลองการเกิดพันธะเชื่อมโยงระหว่างโปรตีนเซรีซินกับแคลเซียมไอออน และคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสกับโปรตีนเซรีซิน

ตารางที่ 4.7 แสดงขนาดรูพรุนของชิ้นงานที่มีการเติมแคลเซียมไฮดรอกซีอะปาไทต์

ชื่อสูตร	ความกว้างของรูพรุน (μm)	ความพรุน (%)
W50:50	203.193 \pm 37.265	70.43
WHAp0.1	167.572 \pm 39.199	60.49
WHAp0.5	135.098 \pm 26.399	61.15
Y50:50 ^[21]	351.40 \pm 24	70.80
YHAp0.1	198.402 \pm 79.981	51.62
YHAp0.5	214.64 \pm 76.129	60.33

จากตารางเปรียบเทียบลักษณะ และขนาดของรูพรุนของชิ้นงานจากโปรตีนเซรีซินไหมขาว และไหมเหลืองที่ผสมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส และแคลเซียมไฮดรอกซีอะปาไทต์ได้ลักษณะรูพรุน ดังรูปที่ 4.10 พบว่าการผสมแคลเซียมไฮดรอกซีอะปาไทต์ความเข้มข้น 0.1 และ 0.5 %w/v ในโปรตีนเซรีซินของไหมขาว ส่งผลให้ขนาดรูพรุนแคบลงจาก 203 μm เป็น 167 μm และ 135 μm ตามลำดับ ความพรุนลดลงจาก 70% เหลือ 60% และ 61% ตามลำดับ

4.2.3 ความหนาแน่นของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลที่เติมแคลเซียมไฮดรอกซีอะปาไทต์

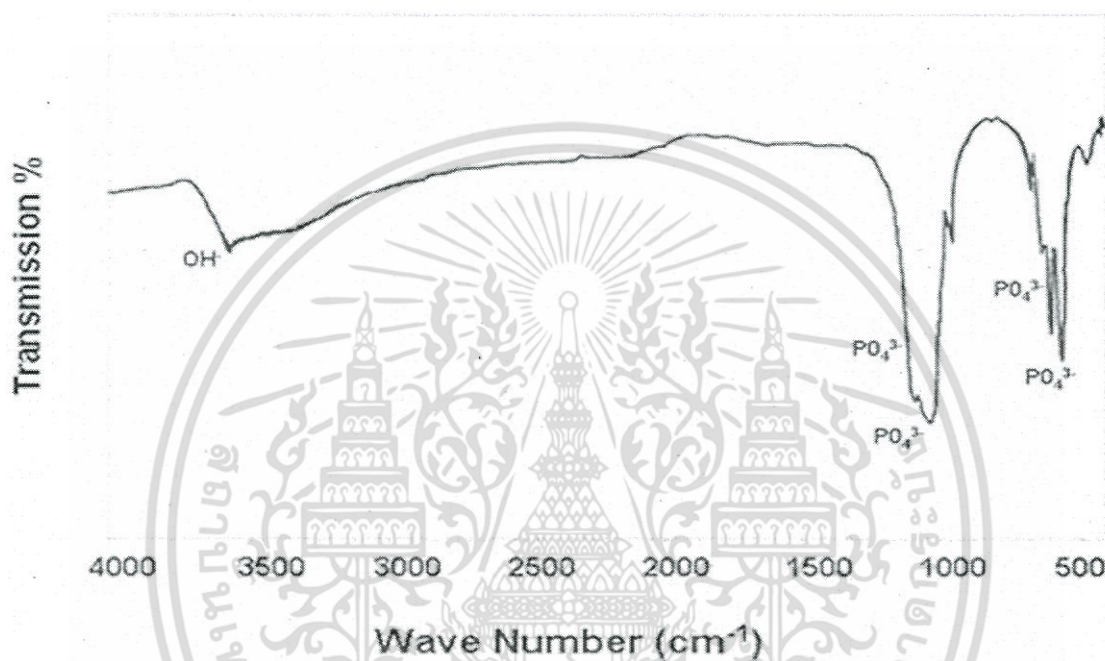
ตารางที่ 4.8 แสดงความหนาแน่นของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลของไหมขาว ไหมเหลือง และคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส อัตราส่วน 50:50 ที่เติมแคลเซียมไฮดรอกซีอะปาไทต์ปริมาณต่างๆ

สูตร	น้ำหนัก (g)	ปริมาตร (กxยxส) (cm^3)	ความหนาแน่น (g/cm^3)
WHAp0.1	0.1755	2x2x0.7	0.0633
WHAp0.5	0.1538	2x2x0.6	0.0691
YHAp0.1	0.1315	2x2x0.5	0.0657
YHAp0.5	0.1501	2x2x0.5	0.0751

จากตารางที่ 4.8 เมื่อพิจารณาความหนาแน่นของชิ้นงานสูตรที่มีการเติมแคลเซียมไฮดรอกซีอะปาไทต์ ของไหมขาว พบว่าสูตร WHAp 0.1 และสูตร WHAp0.5 มีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเติม แคลเซียมไฮดรอกซีอะปาไทต์ เมื่อเทียบกับสูตร W 50:50 (ความหนาแน่น 0.0612 g/cm^3) ซึ่งไหมเหลืองมีผลไปในทางเดียวกันกับไหมขาว จะเห็นได้ว่าความหนาแน่นเพิ่มขึ้นตามปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกซีอะปาไทต์ ขนาดรูพรุน และความพรุนของชิ้นงาน

4.2.4 วิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลที่เติมแคลเซียมไฮดรอกซีอะปาไทต์

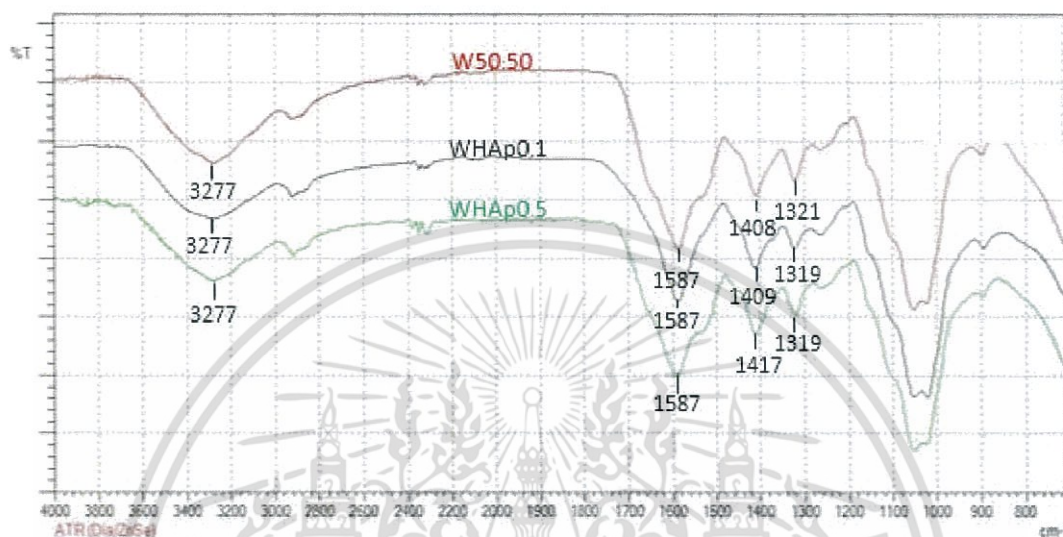
วิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของแคลเซียมไฮดรอกซีอะปาไทต์กับวิเคราะห์เนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลที่ได้จากการผสมระหว่างโปรตีนเซรีซินจากไหมขาวและไหมเหลือง กับคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส อัตราส่วน 50:50 ที่ผสมแคลเซียมไฮดรอกซีอะปาไทต์ในอัตราส่วน 0.1 และ 0.5 %w/v แล้วนำมาเปรียบเทียบ ระหว่างไหมขาวและไหมเหลืองที่มีการผสมแคลเซียมไฮดรอกซีอะปาไทต์ มีพีคที่เหมือนหรือแตกต่างกันอย่างไร



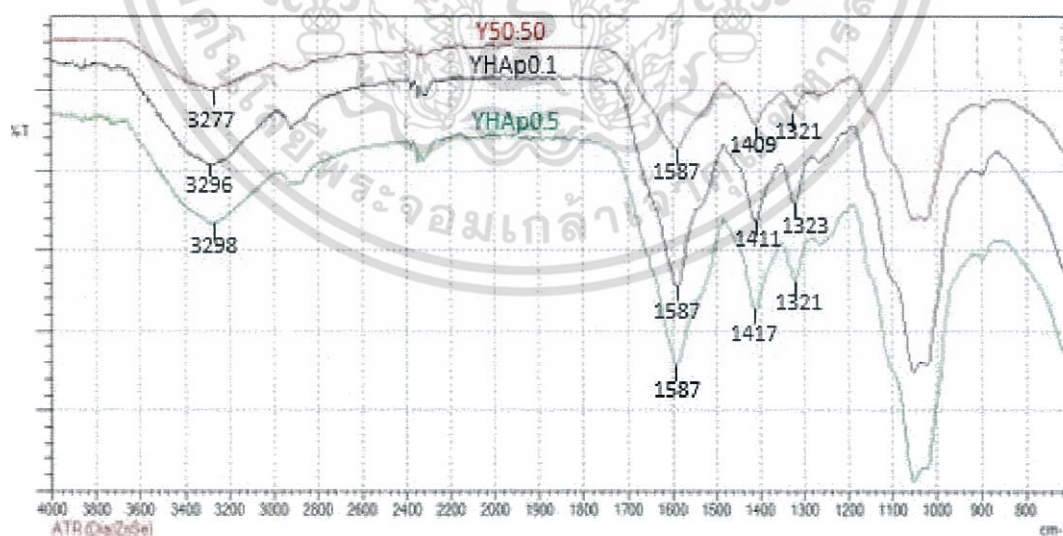
รูปที่ 4.13 แสดง IR spectrum ของแคลเซียมไฮดรอกซีอะปาไทต์^[34]

จากรูปที่ 4.13 แสดง IR spectrum ของแคลเซียมไฮดรอกซีอะปาไทต์ พบว่าเลขคลื่น 1026 cm^{-1} และ 500 cm^{-1} คืออนุมูลของ PO_4^{3-} และที่ช่วงเลขคลื่น 3000-3500 cm^{-1} คือ O-H stretching

เนื้อเยื่อโครงสร้างผสมระหว่างโปรตีนเซรีซินใหม่ขาวกับคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส และใหม่เหลือกับคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่อัตราส่วน 50:50 มีแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ 0.1 และ 0.5 %w/v แสดงดังรูปที่ 4.14 และรูปที่ 4.15 ตามลำดับ



รูปที่ 4.14 แสดง IR spectrum ของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลที่ได้จากการผสมระหว่างโปรตีนเซรีซินจากไหมขาวกับคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส และแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ สูตร WHAp0.1, WHAp0.5 และสูตรที่ไม่มีการเติมแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ สูตร W50:50

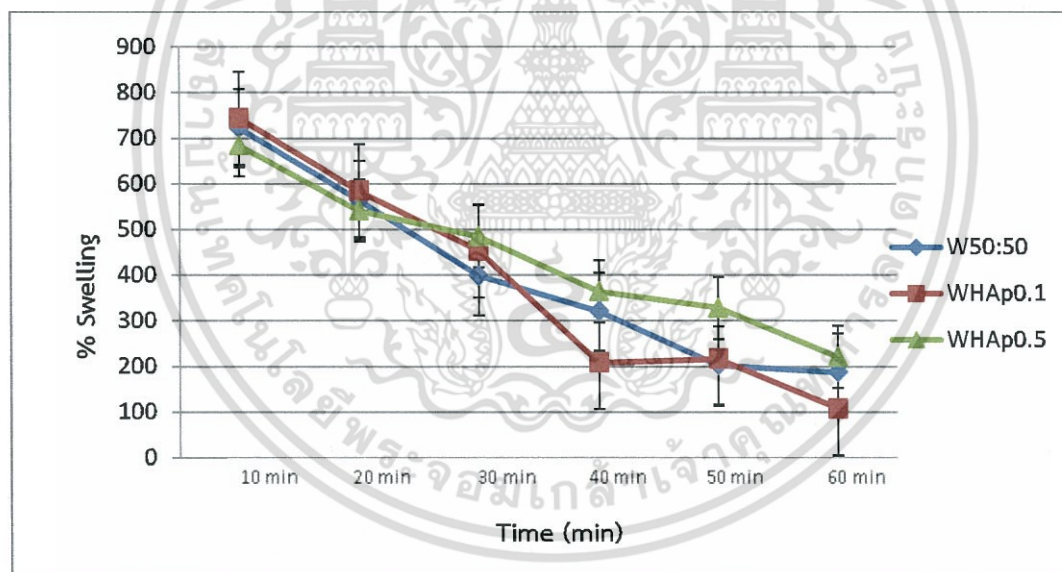


รูปที่ 4.15 แสดง IR spectrum ของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลที่ได้จากการผสมระหว่างโปรตีนเซรีซินจากไหมเหลือกับคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส และแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ สูตร YHAp0.1, YHAp0.5 และสูตรที่ไม่มีการเติมแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ สูตร Y50:50

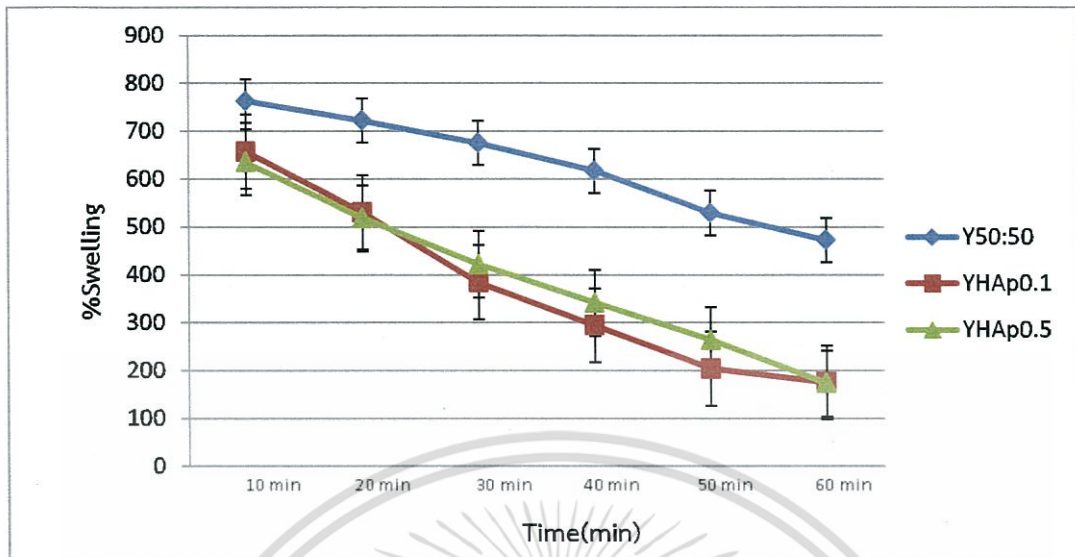
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.14 และรูปที่ 4.15 แสดง IR spectrum ของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลที่ได้จากการผสมระหว่างโปรตีนเซรีซินจากไหมขาว และไหมเหลือทิ้งกับคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส และแคลเซียมไฮดรอกซีอะปาไทต์ ในปริมาณ 0.1 และ 0.5 %w/v พบว่า แคลเซียมไฮดรอกซีอะปาไทต์ทำให้เกิดพีคที่เลขคลื่น 3277 cm^{-1} ซึ่งเป็นพีคการเกิดพันธะไฮโดรเจนของ -NH และ -OH เลื่อนไปยังเลขคลื่นที่สูงขึ้น แสดงว่าพันธะไฮโดรเจนระหว่างโปรตีนเซรีซินกับคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสลดลง นอกจากนี้พีคที่เลขคลื่น 1620 cm^{-1} และ 1540 cm^{-1} ซึ่งเป็นเอกลักษณ์ของ amide I และ amide II หายไป ส่วนพีคที่แสดงเอกลักษณ์ของ O=C-O^- ในคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสคือ 1587 cm^{-1} , 1053 cm^{-1} และ 1024 cm^{-1} เลขคลื่นไม่เปลี่ยนแปลง แสดงว่าแคลเซียมไฮดรอกซีอะปาไทต์ อาจเกิดปฏิกิริยากับ amide

4.2.5 ลักษณะการบวมน้ำ (Swelling) ของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลที่เติมแคลเซียมไฮดรอกซีอะปาไทต์



รูปที่ 4.16 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์การบวมน้ำของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลที่มีการเติมแคลเซียมไฮดรอกซีอะปาไทต์ 0.1 และ 0.5 %w/v ของไหมขาว และสูตรที่ไม่มีการเติมแคลเซียมไฮดรอกซีอะปาไทต์ สูตร W50:50

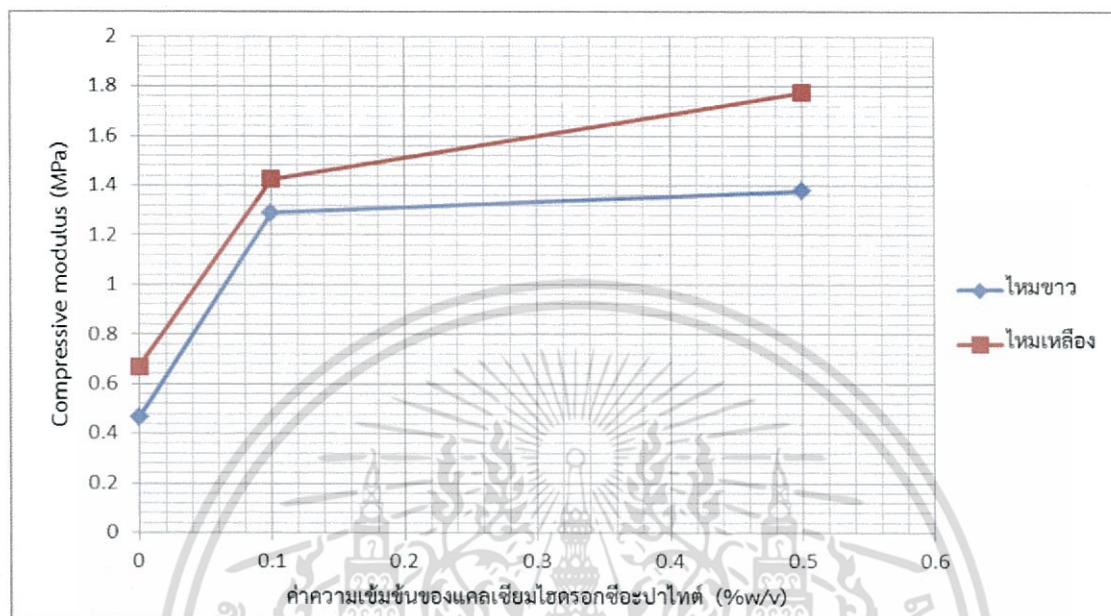


รูปที่ 4.17 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์การบวมตัวของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลที่เติมแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ 0.1 และ 0.5 %w/v ของไหมเหลือง และสูตรที่ไม่มีการเติมแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ สูตร Y50:50

จากรูปที่ 4.16 และ 4.17 แสดงเปอร์เซ็นต์การบวมตัวของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลระหว่างโปรตีนเซรีซิน และคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสในอัตราส่วน 50:50 ที่เติมแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ 0.1 และ 0.5 %w/v ในน้ำกลั่น พบว่าเมื่อมีการเติมแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ ความสามารถในการบวมตัวของเนื้อเยื่อโครงสร้างโปรตีนเซรีซินไหมขาว และคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเพิ่มขึ้น แต่เนื้อเยื่อโครงสร้างโปรตีน เซรีซินไหมเหลือง และคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส การบวมน้ำลดลง เมื่อเทียบกับเนื้อเยื่อโครงสร้างที่ไม่ได้เติมแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ แต่ชิ้นงานมีการสูญเสียรูปร่างช้าลง ซึ่งพิจารณาได้จากลักษณะความชันของเส้นกราฟที่ค่อยๆ ลดลง โดยสูตรที่เติมแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ 0.5 %w/v ของไหมขาว และไหมเหลือง มีความสามารถในการบวมน้ำมากกว่า และแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ ทำให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงขึ้น เนื่องจาก แคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ ขัดขวางการเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโปรตีนไหมเซรีซินกับคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส

4.2.6 การทดสอบสมบัติเชิงกลของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลที่เติมแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ของไหมขาว และไหมเหลือง

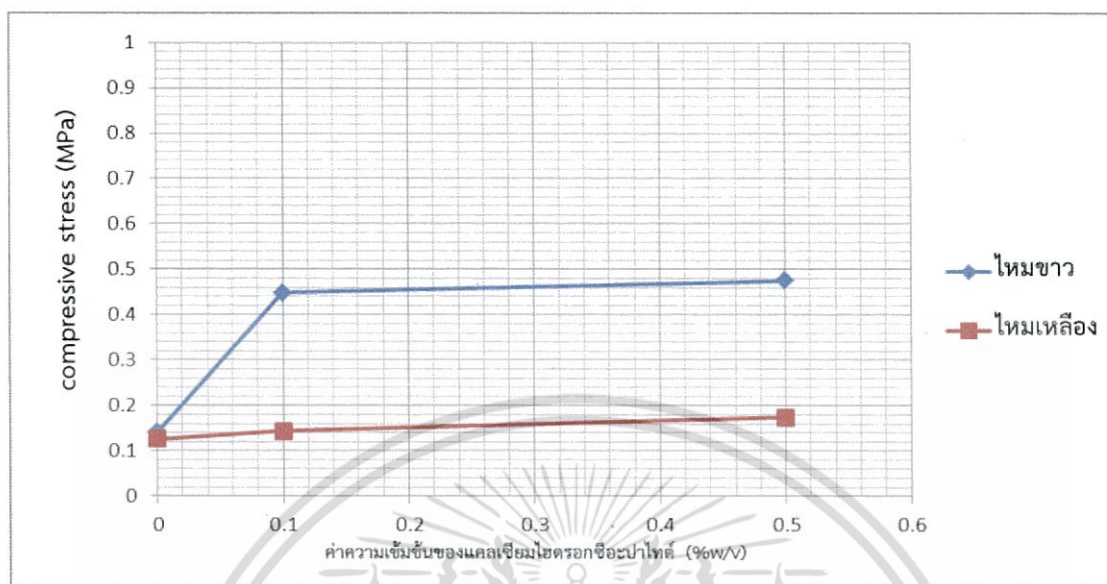
4.2.6.1 การทดสอบความเค้นแรงกดอัด (Compressive stress)



รูปที่ 4.18 แสดงค่าความเค้นแรงกด (Compressive stress) ที่ 50% ของความหนาแน่นงานที่เติมและไม่เติมแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ 0.1 และ 0.5 %w/v อัตราส่วนที่ 50:50 ของไหมขาวและไหมเหลือง

จากรูปที่ 4.18 พบว่าเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลที่ได้จากการผสมระหว่างโปรตีนเซรีซินของไหมทั้งสองชนิดกับคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสในอัตราส่วน 50:50 ที่เติมแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ทำให้มีค่าความเค้นแรงกดสูงสุดที่ 50% ของความหนาแน่นงานเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงด้วยแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ (ดูที่รูป 4.7 และ 4.8) และพบว่าอัตราส่วนที่ 50:50 ที่เติมแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ 0.5 %w/v มีค่าความเค้นแรงกดสูงสุด เนื่องจาก Ca^{2+} ของแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์เกิดแรงดึงดูดระหว่างสารที่มีขั้วต่างกัน (Electrostatic interaction) กับ COO^- ยึดกับสายโซ่โมเลกุลของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ทำให้ชิ้นงานรับแรงในการกดอัดมากขึ้น

4.2.6.2 การทดสอบความแข็งยืดหยุ่น (Compressive modulus)

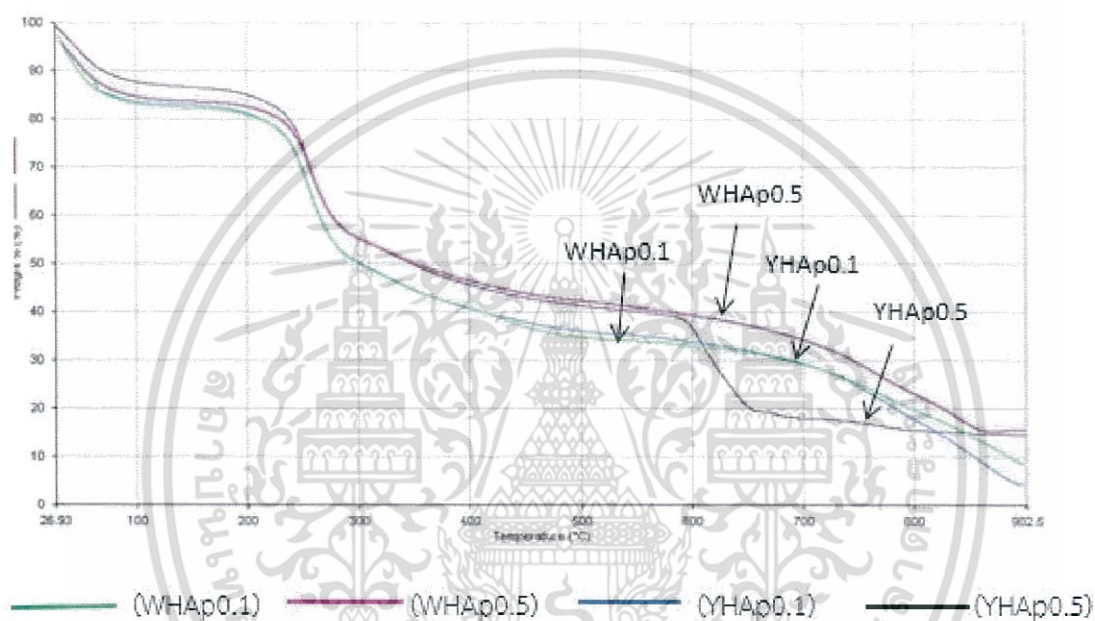


รูปที่ 4.19 แสดงค่าความแข็งยืดหยุ่น (Compressive modulus) ที่ 50% ของความหนาชิ้นงานที่เติมและไม่เติมแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ 0.1 และ 0.5 %w/v อัตราส่วนที่ 50:50 ของไหมขาวและไหมเหลือง

จากรูปที่ 4.19 แสดงค่าความแข็งยืดหยุ่น (Compressive modulus) ของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลที่ได้จากการผสมระหว่างโปรตีนเซรีซินกับคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสในอัตราส่วนที่ 50:50 ที่มีการเติม และไม่เติมแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ พบว่าอัตราส่วนที่มีการปรับปรุงด้วยแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ มีค่าความแข็งยืดหยุ่นมากกว่าอัตราส่วนที่ 50:50 ที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงด้วยแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ โดยที่ความเข้มข้น 0.5 %w/v มีค่าความแข็งยืดหยุ่นสูงที่สุด ซึ่งเป็นแนวโน้มเดียวกับค่าความเค้นแรงกด

4.2.7 การทดสอบสมบัติทางความร้อน (TGA) ของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลที่เติมแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์

การวิเคราะห์ทางความร้อนโดยใช้เทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริก เพื่อศึกษาผลของแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่มีผลต่อเสถียรภาพทางความร้อน โดยพิจารณาจากอุณหภูมิการสลายตัวหมด และศึกษาผลของแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่มีผลต่อความเข้ากันได้ของสารละลายผสมระหว่างโปรตีนเซรีซิน และคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส โดยพิจารณาจากจำนวนชั้นในการสลายตัวของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจล ผลการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลสูตรต่างๆ



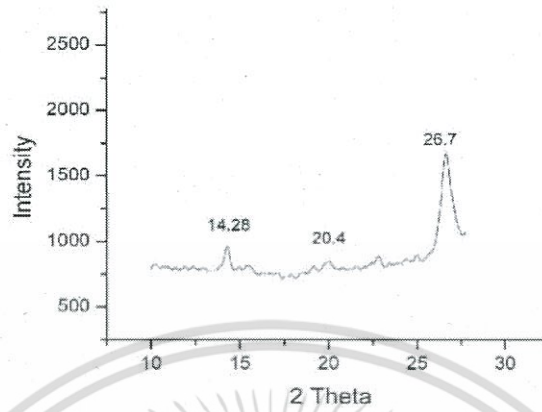
รูปที่ 4.20 แสดงอุณหภูมิเริ่มการสลายตัว และอุณหภูมิสลายตัวหมดของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลจากโปรตีนเซรีซินไหมขาว และไหมเหลืองกับคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ที่อัตราส่วนต่างๆ ที่เติมแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์

ตารางที่ 4.9 อุณหภูมิเริ่มการสลายตัว และอุณหภูมิสลายตัวหมดของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลจากโปรตีนเซรีซินไหมขาว และไหมเหลืองกับคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสอัตราส่วน 50:50 ที่มีการเติมแคลเซียมไฮดรอกไซด์อะปาไทต์

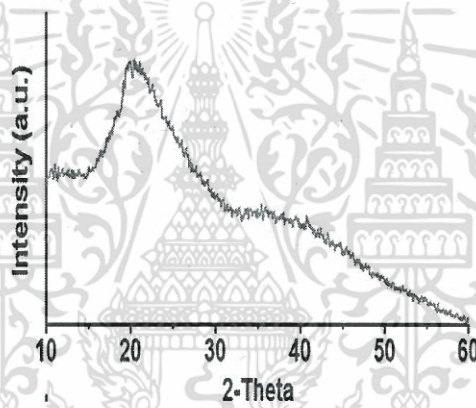
Sericin : CMC	อุณหภูมิเริ่มสลายตัว T_o ($^{\circ}\text{C}$)	อุณหภูมิการสลายตัวหมด T_d ($^{\circ}\text{C}$)	Mass loss (%)
W50:50	240.58	258.09	45.44
WHAp0.1	232.37	257.73	47.09
WHAp0.5	238.03	261.09	41.11
Y50:50	244.8	271.14	69.05
YHAp0.1	233.00	258.40	46.61
YHAp0.5	238.23	258.55	44.43

จากรูปที่ 4.20 และตารางที่ 4.9 ที่ผสมแคลเซียมไฮดรอกไซด์อะปาไทต์ในเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลผสมโปรตีนเซรีซินกับคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสสูตร W50:50 พบว่าเมื่อใส่แคลเซียมไฮดรอกไซด์อะปาไทต์ 0.1 %w/v (สูตร WHAp0.1) ทำให้อุณหภูมิเริ่มสลายตัว และอุณหภูมิสลายตัวหมดลดลง แต่ถ้าใส่ 0.5 %w/v อุณหภูมิทั้งสองนั้นจะสูงขึ้น แสดงว่าแคลเซียมไอออนลดการเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโปรตีนเซรีซินกับคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส และเกิดพันธะเชื่อมโยงระหว่างโปรตีนเซรีซินกับแคลเซียมไอออน ดังรูปที่ 4.12 การเปลี่ยนแปลงทำนองเดียวกันนี้พบในโปรตีนเซรีซินจากไหมเหลืองด้วยเช่นกัน ซึ่งสอดคล้องกับผลที่พบในการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันเมื่อเติมแคลเซียมไฮดรอกไซด์อะปาไทต์พีคของ -NH และ -OH เลื่อนไปที่เลขคลื่นสูงขึ้น

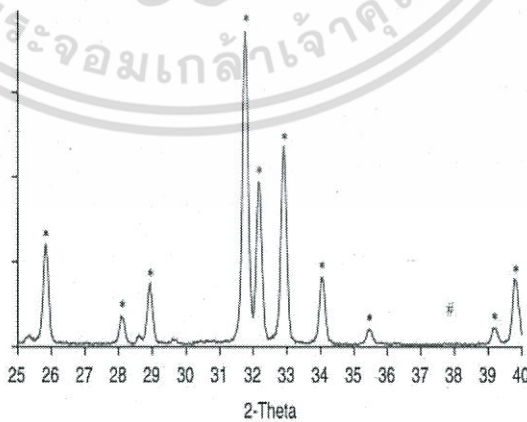
4.2.8 การทดสอบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD) ของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลที่เติมและไม่เติมแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์



รูปที่ 4.21 แสดงการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของโปรตีนเซรีซิน^[35]

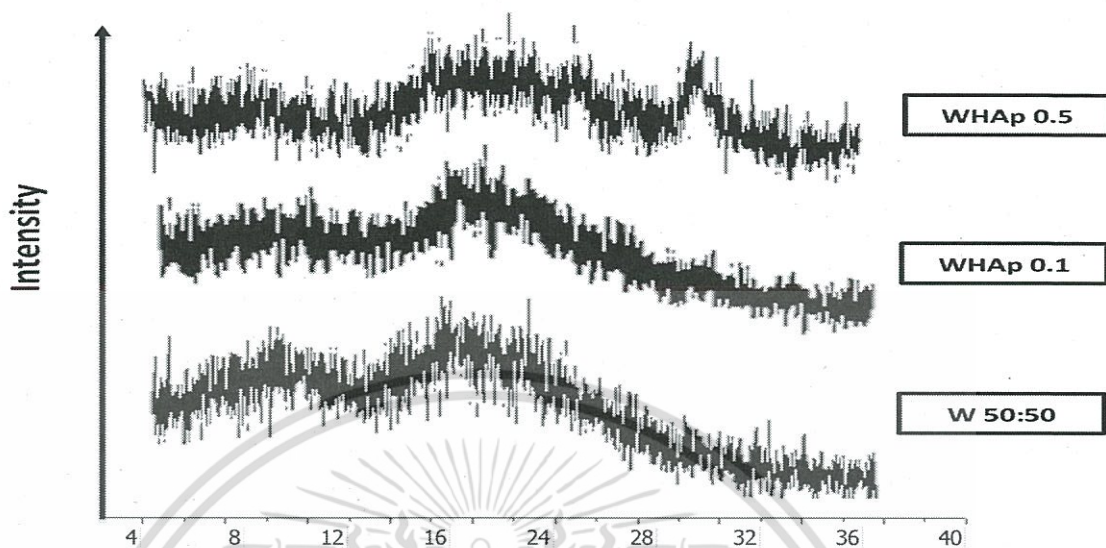


รูปที่ 4.22 แสดงการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส^[36]

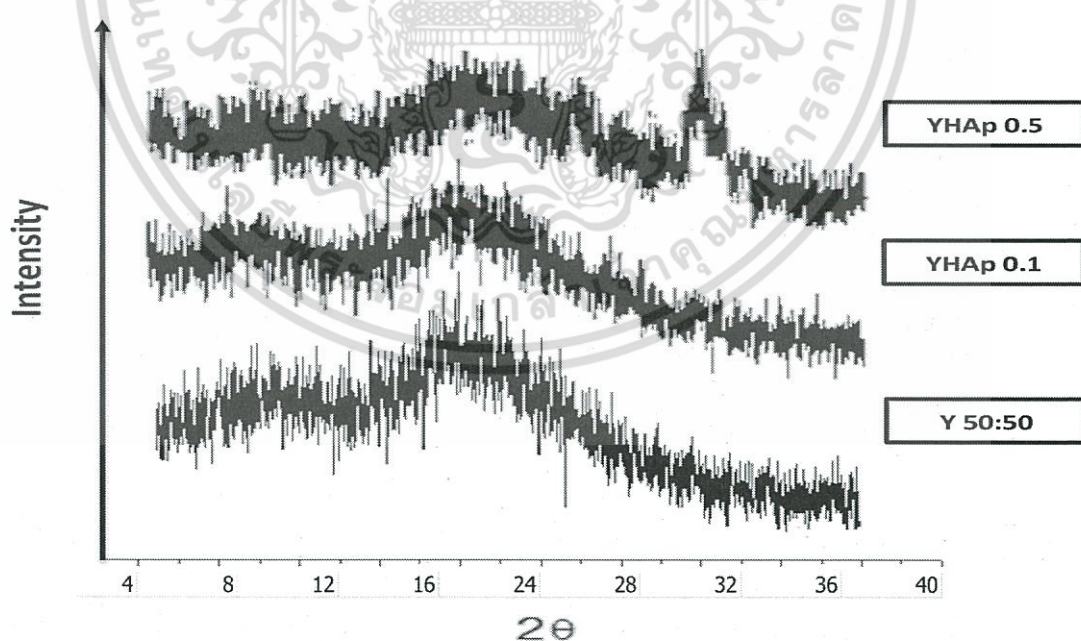


รูปที่ 4.23 แสดงการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์^[37]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.24 แสดงการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของเนื้อเยื่อโครงสร้างที่ผสมระหว่างโปรตีนเซรีซินจากไหมขาว และคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส อัตราส่วน 50:50 และสูตรที่เติมแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ 0.1 และ 0.5 %w/v



รูปที่ 4.25 แสดงการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของเนื้อเยื่อโครงสร้างที่ผสมระหว่างโปรตีนเซรีซินจากไหมเหลือง และคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส อัตราส่วน 50:50 และสูตรที่เติมแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ 0.1 และ 0.5 %w/v
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.21 แสดงการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของโปรตีนเซรีซิน พบว่าพีคมีลักษณะแหลม ซึ่งแสดงถึงโครงสร้างผลึกแบบเบต้าชีทของโปรตีนเซรีซิน และจะพบพีคที่ 2-theta ชั้นที่ตำแหน่ง 14.28, 20.4 และ 26.7

จากรูปที่ 4.22 แสดงการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของสารละลายคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส พบว่าพีคมีลักษณะกว้างคล้ายเนินเขา เนื่องจากคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเป็นพอลิเมอร์ที่มีความเป็นผลึกต่ำ และพบพีค 2-theta ชั้นที่ประมาณ 20 และบริเวณช่วง 35 ถึง 45

จากรูปที่ 4.23 แสดงการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ พบว่าพีคมีลักษณะแหลมอย่างชัดเจน เนื่องจากว่าแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์เป็นอนุภาคของแข็ง และมีผลึกสูง ทำให้พบพีคที่ 2-theta ชั้นหลายตำแหน่งตั้งแต่ 25 จนถึง 40

เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.24 และ 4.25 ซึ่งเป็นกราฟแสดงการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของเนื้อเยื่อโครงสร้างที่ได้จากการผสมระหว่างโปรตีนเซรีซินของไหมขาว และไหมเหลืองตามลำดับ ซึ่งสูตรที่มีอัตราส่วน 50:50 พบว่าพีคมีลักษณะกว้าง และกราฟเหมือนกับกราฟที่ได้จากคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสมาก เนื่องจากในอัตราส่วนผสมมีปริมาณของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส 50% และพบพีคที่ 2-theta ชั้นที่ประมาณ 11 ซึ่งคาดว่ามีการเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสกับเซรีซิน ส่งผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างผลึกของเซรีซิน ส่วนพีคที่ชั้นที่ตำแหน่งช่วง 19 ถึง 21 และเนินพีคช่วง 25 ถึง 40 คือพีคที่แสดงความเป็นผลึกของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส และพีคที่ประมาณ 26 ของโปรตีนเซรีซินไม่ปรากฏ เนื่องจากความเข้มข้นเริ่มต้นไม่เท่ากับคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสทำให้เกิดการบดบังของพีคตำแหน่งนี้ ส่วนสูตรที่เติมแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ 0.1 %w/v มีลักษณะกราฟคล้ายกับสูตรที่มีอัตราส่วน 50:50 แต่จะขึ้นพีคประมาณ 32 ซึ่งเป็นพีคที่เกิดจากผลของแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่เติมลงไป แต่มีปริมาณความเข้มข้นที่น้อย จึงปรากฏพีคไม่ชัดเจน และสูตรที่เติมแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ 0.5 %w/v มีลักษณะกราฟคล้ายกับสูตรที่มีอัตราส่วน 50:50 แต่จะไม่มีเนินพีคที่ช่วง 25 ถึง 40 เนื่องจากอิทธิพลของแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่เติมลงไป ส่งผลต่อรูปร่างผลึกของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส แต่พบพีคต่างจากเดิม คือพีคที่ชั้นตำแหน่ง 26, 28, 32, 33 และ 34 ซึ่งเป็นลักษณะการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ พบว่าพีคมีลักษณะแหลมอย่างชัดเจน เนื่องจากว่าแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์เป็นอนุภาคของแข็ง และมีผลึกสูง ทำให้พบพีค 2-theta ชั้นหลายตำแหน่งตั้งแต่ 25 จนถึง 40

จากการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลที่ได้จากการผสมระหว่างโปรตีนเซรีซินไหมขาว และไหมเหลือง พบว่าลักษณะการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลมีความคล้ายคลึงกัน ซึ่งปริมาณของเซรีซินกับคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส และแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ มีผลต่อรูปร่างโครงสร้างผลึกของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจล

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เตรียมและทดสอบสมบัติของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลโปรตีนเซรีซินผสมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส และปรับปรุงด้วยแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ โดยมีคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเป็นอนุพันธ์ของเซลลูโลสที่มีหมู่คาร์บอกซิเลต ($-\text{COO}^-$) ซึ่งเป็นหมู่ชอบน้ำอยู่ในโครงสร้าง จึงนิยมนำมาใช้เป็นวัสดุดูดซับน้ำแบบยิ่งยวด สำหรับไหมเซรีซิน (Silk sericin) จาก *Bombyx mori* เป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติที่มีโครงสร้างช่วยให้สมบัติกายภาพเข้ากันได้ดีกับวัสดุชีวภาพ มีรายงานวิจัยพบว่า เป็นวัสดุชีวภาพที่มีประโยชน์ด้านวิศวกรรมชีวการแพทย์ ดังนั้นการนำคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสมาผสมกับสารละลายโปรตีนเซรีซิน เพื่อให้ได้เนื้อเยื่อโครงสร้างที่มีความเข้ากันได้กับร่างกาย และสามารถนำไปใช้เป็นวัสดุทางชีวการแพทย์ได้ ซึ่งผลการทดลองสรุปได้ดังนี้

ตอนที่ 1 : ศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่างสารละลายเซรีซิน และสารละลายคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ที่มีผลต่อสมบัติต่างๆของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจล

เนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลที่เตรียมได้จาก 2 %w/v ของสารละลายเซรีซิน มีสมบัติในการดูดซับน้ำได้ดี รูพรุนมีขนาดใหญ่ มีความพรุนน้อย (เมื่อเทียบกับชิ้นงานขนาดเท่ากัน) แต่มีสมบัติเชิงกล เช่น การทนแรงกดอัดได้ต่ำ ทำให้ชิ้นงานแตกหักได้ง่ายแต่เนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลที่เตรียมได้จาก 5 %w/v ของสารละลายคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส มีสมบัติในการดูดซับน้ำดีมาก ทำให้ละลายน้ำอย่างรวดเร็ว รูพรุนมีขนาดเล็ก มีความพรุนมาก (เมื่อเทียบกับชิ้นงานขนาดเท่ากัน) และมีสมบัติเชิงกล เช่น การทนแรงกดอัดได้สูง และสามารถกลับคืนรูปร่างได้เมื่อเอาแรงกดออก

เนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลที่เตรียมจากสารละลายผสมระหว่าง 2 %w/v ของสารละลายเซรีซินและ 5 %w/v ของสารละลายคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส พบว่าเซรีซินจะช่วยชะลอการละลายน้ำของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสให้ช้าลง และคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสทำให้รูพรุนมีขนาดเล็กลง แสดงว่าเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างกัน

ขนาดรูพรุน และความพรุน ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนผสมของ 2 %w/v ของสารละลายเซรีซิน และ 5 %w/v ของสารละลายคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส เนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลที่ได้ในทุกสูตรมีขนาดรูพรุนอยู่ในช่วง 80-300 μm และที่อัตราส่วน W50:50 มีความพรุนไม่น้อยกว่า 70%ซึ่งเหมาะสมในการใช้งานทางด้านวิศวกรรมเนื้อเยื่อ

ตอนที่ 2 : ศึกษาผลของแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่มีต่อสมบัติของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลผสมระหว่างสารละลายเซรีซินของไหมขาว และไหมเหลืองกับคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส

การเติมแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ ช่วยลดการละลายน้ำของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลผสม ช่วยเพิ่มความแข็งแรงแก่ชิ้นงาน ทำให้สมบัติเชิงกล เช่น การรับแรงกดอัดสูงขึ้น มีเสถียรภาพ

ทางความร้อนเพิ่มขึ้น สูตรที่เหมาะสมที่สุดของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลที่ได้จากการปรับปรุงด้วยการเติมแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ คือสูตร WHAp0.5

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาการเตรียมวัสดุผสมโดยใช้สารชนิดอื่น นอกจากแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ เพื่อปรับปรุงขนาดรูพรุน เนื่องจากแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์เข้าไปทำอันตรกิริยากับเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจล ทำให้ขนาดรูพรุนเล็กลง ซึ่งไม่สามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นวัสดุทางการแพทย์ได้
2. ศึกษาการนำเนื้อเยื่อโครงสร้างไปใช้ประโยชน์ด้านอื่นๆ เช่น ใช้เป็นตัวนำส่งยา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] ททัยกาญจน์ จันท์ส่องแสง. 2555. “การเตรียมไฮโดรเจลจากคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสและไฟโบรอินจากไหมไทย”. คณะวิทยาศาสตร์. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [2] Palinee V. and Vichien K. 2008. “Serecin separation from silk degumming wastewater” Separation and Purification Technology.
- [3] Padamwar M N and Pawar A P. 2004 “Silk serecin and its applications A review” Journal of Scientific and Industrial Research.
- [4] ภาณุพงศ์ ภูทะวัง. 2547. “การศึกษาผลของเซรีซินชนิดต่างๆที่มีต่อสมบัติของฟิล์มไฮโดรเจลพอลิไวนิลแอลกอฮอล์”. คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [5] Rajput S.K. and Mukesh Kumar Singh. 2015 “Serecin-AUnique Biomaterial” IOSR Journal of Polymer and Textile Engineering(IOSR-JPTE).
- [6] Babak G. , Hadi A. , Ali A. Entezami. 2010 “Physical properties of edible modified starch/carboxymethyl cellulose films” Innovative Food Science and Emerging Technologies.
- [7] Tippawan S. and Pornanong A. 2015 “Characteristic of carboxymethyl cellulose/serecin Hydrogels and the Influence of Molecular Weight of carboxymethyl cellulose” Macromolecular Research.
- [8] ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ.(2556) Hydroxyapatite. สืบค้นเมื่อ 1 มีนาคม 2560, จาก <https://www.mtec.or.th/about-us/mtec-annual-report>.
- [9] Fasai W. and Somchai P. 2011 “Influence of Blending Carboxymethyl cellulose with Gelatin Scaffold on Mechanical Propoties” The second TSME International Conference on Mechanical Engineering.
- [10] Neethu Mohan and Prabha D. Nair. 2005 “Novel Porous,Polysaccharide Scaffold for Tissue Engineering Applications” Trends Biomater,Artif Organs.
- [11] BME5013. (3 มิถุนายน 2553). วิศวกรรมชีวการแพทย์ (Biomedical Engineering). สืบค้นเมื่อ 20 กุมภาพันธ์ 2560, จาก www.biomedthai.blogspot.com.
- [12] นิรนาม.(30 สิงหาคม 2556). ไหม องค์ประกอบและโครงสร้างคุณสมบัติและการประยุกต์ใช้. สืบค้นเมื่อ 15 ธันวาคม 2560, จาก <http://praerii.com/freetime/howto-source/>.
- [13] ผศ.ดร.พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์. Protein structure / โครงสร้างของโปรตีน. สืบค้นเมื่อ 4 กุมภาพันธ์ 2560, จาก <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/1596/protein-structure>.
- [14] Weikem. (28 January 2010). Carboxymethylcellulose. สืบค้นเมื่อ 26 กุมภาพันธ์ 2560, จาก <http://www.wei-chem.com/prolist2.asp?typeid=37>.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [15] พีรยส์ ทองแมน และคณะ. (2555). “การสังเคราะห์ไฮดรอกซีอะพาไทต์ด้วยสภาวะอุณหภูมิต่ำภายในระบบที่มีการเติมสารอินทรีย์ประจุบวก”. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรมคณะวิทยาศาสตร์. สถาบันเทคโนโลยีเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [16] Joseph M. Wallace, Ph.D. **General Introduction to Bone: Collagen and Mineral**. สืบค้นเมื่อ 15 กุมภาพันธ์ 2560, จาก <http://www.iupui.edu/~bbml/boneintro.shtml>
- [17] Lauren Welker. (30 April 2012). **the chemical structure of hydroxyapatite crystals**. สืบค้นเมื่อ 15 กุมภาพันธ์ 2560, จาก <http://boundlessthicket.blogspot.com/2012/04/pain-is-beauty.html>.
- [18] Murugan and Ramakrishna. 2005. “Development of nanocomposites for bone grafting”. *Composites Science and Technology*.
- [19] สุวิภา เจริญภักดี. 2556. “ผลของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่มีต่อไฮโดรเจลรูพรุนจากสารเมือกแมงลัก.” คณะวิทยาศาสตร์. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [20] Jiang L. Li Y. and Xiong C. 2009. “Preparation and biological properties of a novel composite scaffold of nano hydroxyapatite /chitosan carboxymethyl cellulose for bone tissue engineering”. *Journal of Biomedical Science*.
- [21] เกษณีย์ วงศ์คชาเทวัญ และคณะ. 2558. “สมบัติทางกายภาพและเชิงกลของเนื้อเยื่อโครงสร้างจากคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสและเซรีซิน” คณะวิทยาศาสตร์. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [22] Zhang Y. Liu J. Zheng W. 2015. “Design and performance of a sericin-alginate interpenetrating network hydrogel for cell and drug delivery”. *Scientific Reports*.
- [23] Tipawan S., Juthamas R. and Pornanong A. 2012. “Development of ethyl alcohol-precipitated silk sericin/polyvinyl alcohol scaffolds for accelerated healing of full-thickness wounds”. *International journal of pharmaceutics*.
- [24] Sudip M. Umapada P. Apurba D. 2016. “Natural origin hydroxyapatite scaffold as potential bone tissue engineering substitute”. *Ceramic international*.
- [25] Fasai W and Somchai P. 2011. “Influence of Blending Carboxymethylcellulose with Gelatin Scaffold on Mechanical Properties”. *The Second TSEM international Conference on Mechanical Engineering*.
- [26] Hyeon J. K. Ung J. K. Chunmei L. M. W. Gary G.L. and David L. K. 2008. “Bone Tissue Engineering with Premineralized Silk Scaffolds.”. *NIH Public Access*.
- [27] Jinfa M. Baoqi Z. 2014. “A Novel Silk Fibroin/Sodium Alginate Hybrid Scaffolds”. *Polymer Engineering and Science*.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [28] สิริพร กิจชัยเจริญพร และ อุทัยวรรณ วัชรโรสินธุ์. (2014). เทคนิควิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของ วัสดุ(Thermal Analysis Technique, TA). สืบค้นเมื่อ 20 กุมภาพันธ์ 2560, จาก <https://www.mtec.or.th/mcu/phcl/index.php/th/2014-09-04-06-23-37/14-uncategorised/38-thermal-analysis-th>.
- [29] กนกวรรณ กองสำลี. 2552. “การปรับปรุงฟิล์มไฮโดรเจลจากไหมไทยนางน้อยด้วย 2 ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลตและบิสอะคริลาไมด์เป็นสารเชื่อมโยง.” โครงการพิเศษ วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม) ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [30] บทความน่ารู้ ศูนย์เครื่องมือ มทส. (2009). สมบัติทางความร้อน. สืบค้นเมื่อ 20 กุมภาพันธ์ 2560, จาก <http://cste.sut.ac.th/articles/?p=294>.
- [31] wachiraporn T. การวัดสเปกตรัมโดยใช้เทคนิค Attenuated Total Reflectance (ATR). สืบค้นเมื่อ 20 กุมภาพันธ์ 2560, จาก <http://share.psu.ac.th/blog/aym2/22574>.
- [32] Shuqin Y. Qiang Z. Jiannan W. Yu L. Shenzhou L Mingzhong L. David L. K. 2013. “Silk fibroin/chondroitin sulfate/hyaluronic acid ternary scaffolds for dermal tissue reconstruction”. Acta Biomaterialia.
- [33] Mingzhong L. Zhengyu W. Changsheng Z. Shenzhou L. Haojing Y. Dong H. and Huilan Y. 2001. “Study on porous silk fibroin materials. II. Preparation and characteristics of spongy porous silk fibroin materials” Journal of Applied Polymer Science.
- [34] Moulay A. EL MHAMMEDI, Mina B. and Abdelilah C. 2007 “Voltammetric Detection of Diquat at the Carbon Paste Electrode Containing a $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ ” Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies.
- [35] Dr. Eric Braverman. (2005-2015). “What Everyone Needs to Know About Serine?”. สืบค้นเมื่อ 6 เมษายน 2560, จาก www.nutritional-supplements-health-guide.com.
- [36] Jian G. Q. Hai T L. Peng R. L. and Yi C. C. 2012. “Preparation of Hydroxyapatite Coatings by Acid Etching-electro Deposition on Pure Titanium”. Biomedical Engineering and Biotechnology .
- [37] Auda J. B. Sihama I. S. Fadhel A. H. and Jaleel K. A. 2014. “Proposed crosslinking model for carboxymethyl cellulose/starch superabsorbent polymer blend”. International Journal of Materials Science and Applications.

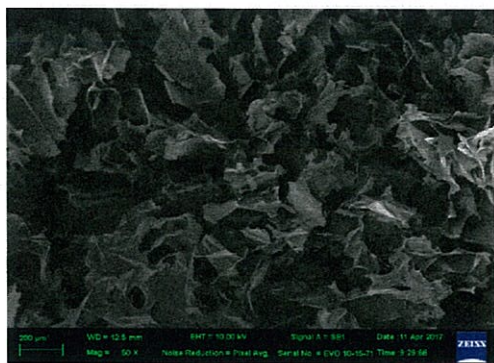


ภาคผนวก

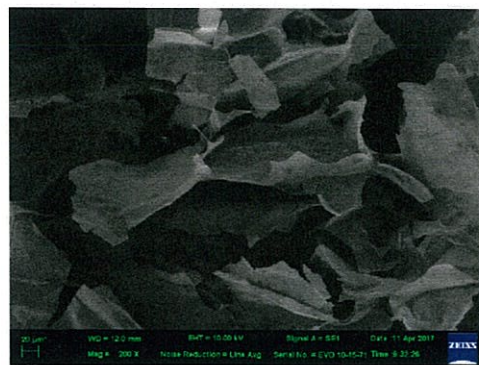
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



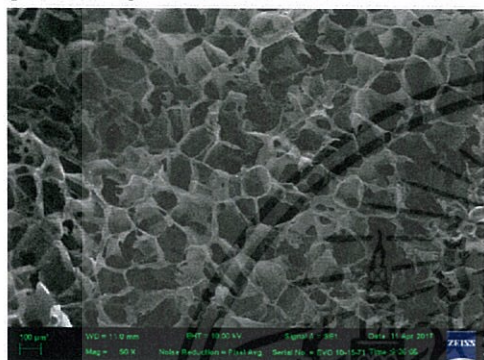
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



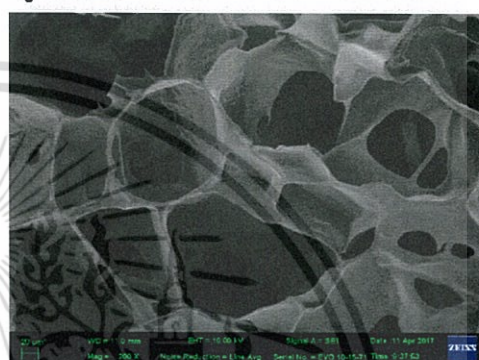
รูปที่ ก-1 สูตร W100:0 ที่กำลังขยาย 50X



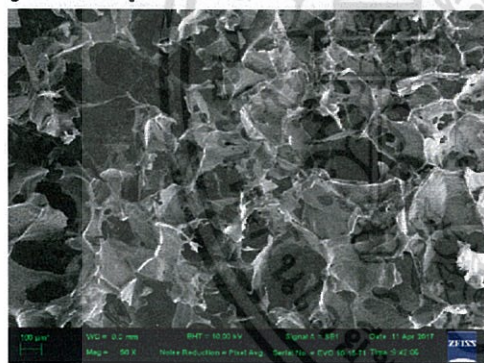
รูปที่ ก-2 W100:0 ที่กำลังขยาย 200X



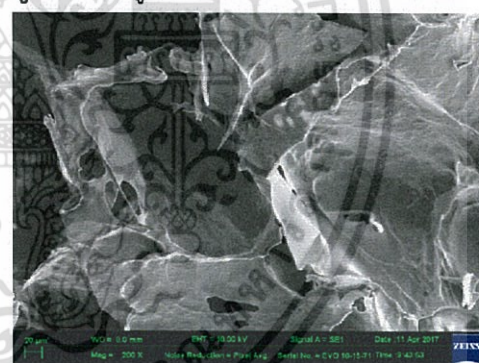
รูปที่ ก-3 สูตร W20:80 ที่กำลังขยาย 50X



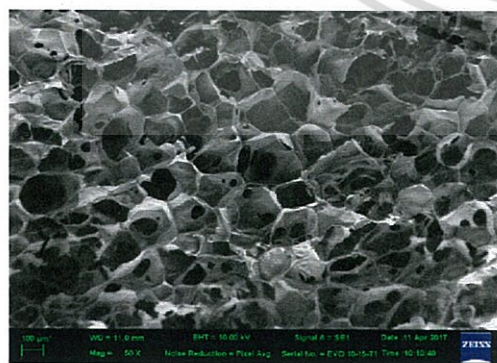
รูปที่ ก-4 สูตร W20:80 ที่กำลังขยาย 200X



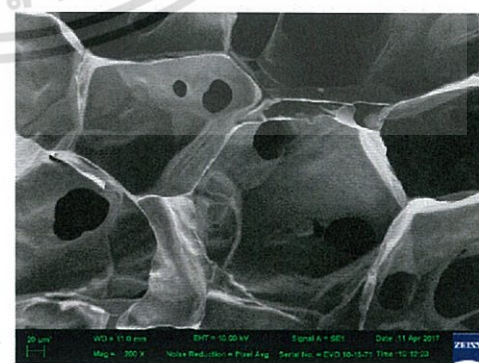
รูปที่ ก-5 สูตร W50:50 ที่กำลังขยาย 50X



รูปที่ ก-6 สูตร W50:50 ที่กำลังขยาย 200X

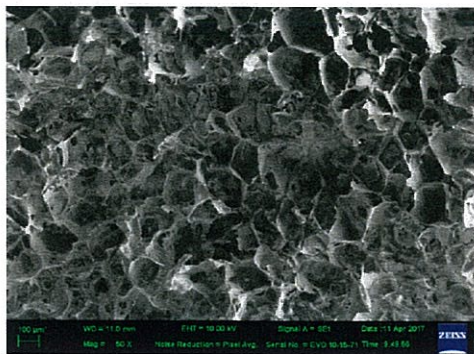


รูปที่ ก-7 สูตร Y50:50 ที่กำลังขยาย 50X

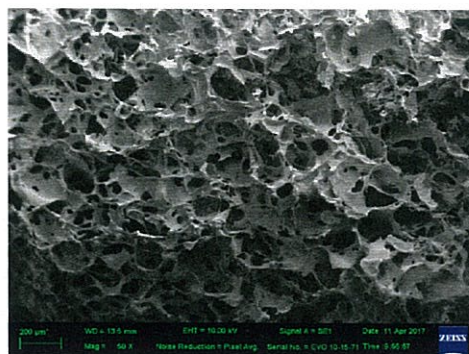


รูปที่ ก-8 สูตร Y50:50 ที่กำลังขยาย 200x

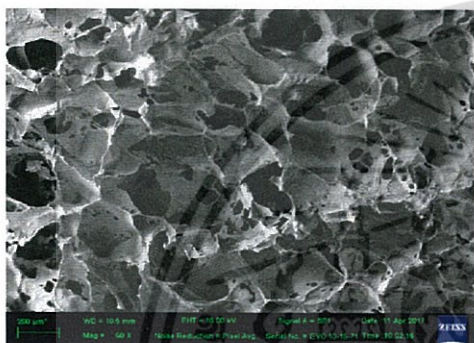
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



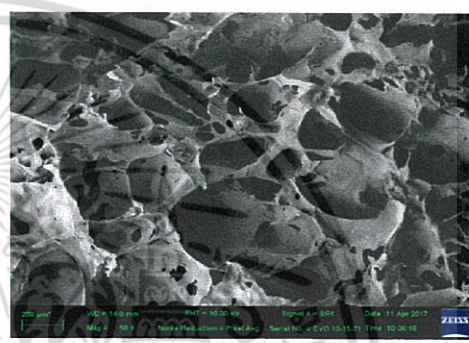
รูปที่ ก-9 สุต WHAp0.1 ที่กำลังขยาย 50X



รูปที่ ก-10 สุต WHAp0.5 ที่กำลังขยาย 50X



รูปที่ ก-11 สุต YHAp0.1 ที่กำลังขยาย 50X



รูปที่ ก-12 สุต YHAp0.1 ที่กำลังขยาย 50X

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-1 ตารางแสดงขนาดรูปทรงของสูตร W 100:00

label	Area	Mean	Min	Max	Angle	Length
1	252	23.114	14.66	42.444	12.207	250.923
2	216	29.359	18.784	68.188	-23.477	215.259
3	280	26.128	15.101	45.756	16.621	279.047
4	290	24.739	15.996	74.4	82.458	289.087
5	174	19.41	14.631	42.111	29.087	172.761
6	205	39.297	19.895	85.556	11.585	204.093
7	318	26.354	16.519	45.695	15.747	317.214
8	90	31.205	21.03	54.333	10.305	89.326
9	211	36.78	18.7	84.597	-28.763	210.058
10	257	35.003	24.26	50.381	21.343	255.646
Mean	229.3	29.139	17.958	59.346	14.711	228.341
SD	65.803	6.389	3.165	17.284	30.238	65.763
Min	90	19.41	14.631	42.111	-28.763	89.326
Max	318	39.297	24.26	85.556	82.458	317.214

ตารางที่ ข-2 ตารางแสดงขนาดรูปทรงของสูตร W 50:50

label	Area	Mean	Min	Max	Angle	Length
1	214	51.635	13.333	204.529	28.136	212.668
2	197	49.545	25.732	138.444	56.472	195.811
3	225	45.039	22	93.333	38.66	224.37
4	120	73.474	14.364	190.87	37.158	118.534
5	266	71.6	38.535	180	-8.894	265.137
6	207	65.702	27	181.82	42.049	206.241
7	195	62.565	14.107	252.053	35.744	193.903
8	185	67.154	41.415	100.092	39.925	183.606
9	210	39.418	20.66	95.672	-9.101	208.679
10	224	50.211	19.209	162.778	45.182	222.979
Mean	204.3	57.634	23.636	159.959	30.533	203.193
SD	37.083	11.893	9.82	52.63	22.052	37.265
Min	120	39.418	13.333	93.333	-9.101	118.534
Max	266	73.474	41.415	252.053	56.472	265.137

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ข-3 ตารางแสดงขนาดรูปทรงของสูตร W 20:80

label	Area	Mean	Min	Max	Angle	Length
1	140	37.347	29.901	90.778	25.463	138.955
2	167	29.132	15.333	76	3.791	166.386
3	179	31.399	23.446	90.667	-38.409	178.35
4	137	34.313	16.235	97.355	58.53	136.178
5	135	52.491	21.928	98.824	62.86	134.172
6	173	35.644	25.227	48.875	-60.751	171.919
7	208	50.874	22.007	105	-49.699	206.741
8	141	67.16	22.114	116.463	76.361	140.025
9	193	50.885	31.481	114.179	-161.092	191.64
10	173	34.298	26.783	106.222	-27.604	172.049
Mean	164.6	42.354	23.446	94.436	-11.055	163.642
SD	25.483	12.284	5.212	19.99	72.263	25.374
Min	135	29.132	15.333	48.875	-161.092	134.172
Max	208	67.16	31.481	116.463	76.361	206.741

ตารางที่ข-4 ตารางแสดงขนาดรูปทรงของสูตร WHAp0.1

label	Area	Mean	Min	Max	Angle	Length
1	191	62.929	28.787	111.515	-25.619	190.234
2	156	48.435	26.389	101.333	51.282	155.03
3	200	54.433	28.842	108.778	-79.028	198.995
4	204	42.718	20.353	74.635	-52.621	202.671
5	221	55.919	36.433	124	-78.486	220.304
6	175	45.073	28.232	73.834	64.169	173.838
7	178	65.391	34.343	94.278	-15.056	176.932
8	96	64.916	51.894	98.333	-10.359	94.81
9	140	59.007	29.755	156.667	92.454	139.462
10	124	37.546	27.698	63.781	87.207	123.449
Mean	168.5	53.637	31.273	100.715	3.394	167.572
SD	39.232	9.803	8.438	27.221	65.786	39.199
Min	96	37.546	20.353	63.781	-79.028	94.81
Max	221	65.391	51.894	156.667	92.454	220.304

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-5 ตารางแสดงขนาดรูปทรงของสูตร WHAp0.5

label	Area	Mean	Min	Max	Angle	Length
1	169	62.054	45.269	111.884	-38.234	168.048
2	109	54.127	28.143	98.333	60.584	108.076
3	104	79.145	34.302	183.878	-63.435	103.456
4	134	52.773	36.644	72.916	4.728	133.15
5	149	49.183	26.124	71.278	-25.53	148.499
6	119	38.75	21.384	96.102	93.395	118.188
7	133	48.27	30.262	144	-50.25	131.622
8	173	40.091	17.697	74	41.468	171.904
9	107	28.259	18.896	56.222	39.596	105.588
10	163	50.924	23.037	135.673	8.531	162.449
Mean	136	50.357	28.176	104.429	7.085	135.098
SD	26.357	13.825	8.682	39.942	51.571	26.399
Min	104	28.259	17.697	56.222	-63.435	103.456
Max	173	79.145	45.269	183.878	93.395	171.904

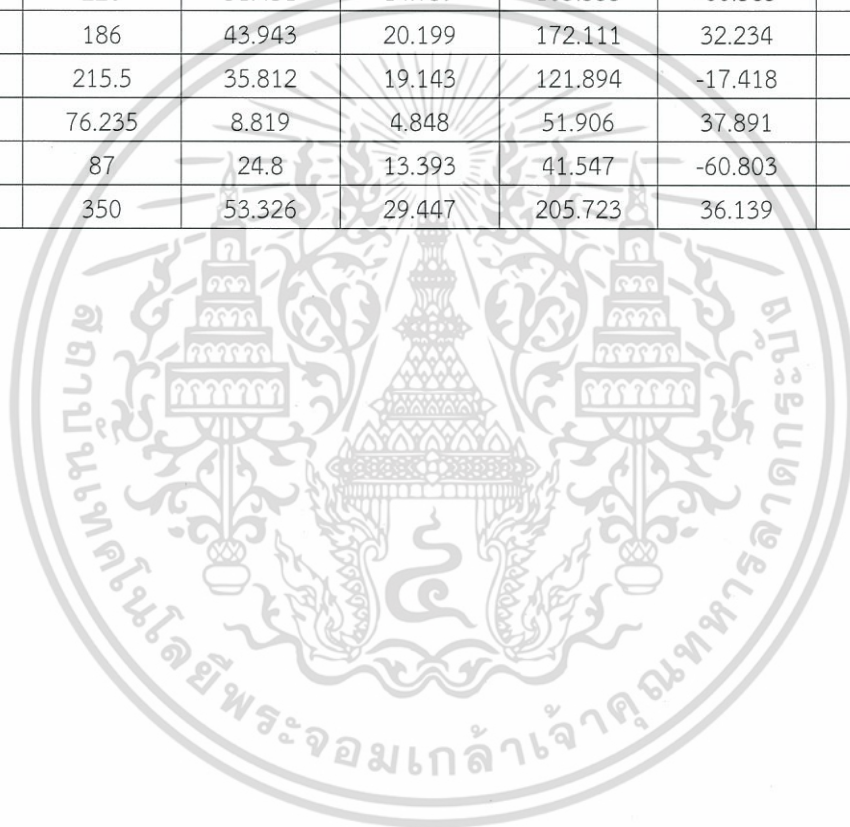
ตารางที่ ข-6 ตารางแสดงขนาดรูปทรงของสูตร YHAp0.1

label	Area	Mean	Min	Max	Angle	Length
1	233	33.477	22.226	71.309	-69.763	231.59
2	219	73.983	44.714	172.542	-50.599	217.836
3	184	52.096	22.485	119.008	-13.885	183.199
4	184	43.827	24.273	76.482	-13.581	183.199
5	313	42.845	19.094	78.246	1.102	312.058
6	154	29.111	20.824	40.667	131.82	152.971
7	76	34.857	22.8	147	24.507	74.595
8	191	71.962	44.939	93.609	14.329	189.826
9	331	50.412	20.42	193.46	-50.662	329.753
10	110	38.849	17.991	168	-104.931	108.991
Mean	199.5	47.142	25.977	116.032	-13.166	198.402
SD	79.974	15.394	10.102	51.674	64.835	79.981
Min	76	29.111	17.991	40.667	-104.931	74.595
Max	331	73.983	44.939	193.46	131.82	329.753

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 7-7 ตารางแสดงขนาดรูปทรงของสูตร YHAp0.5

label	Area	Mean	Min	Max	Angle	Length
1	247	53.326	21.806	146.919	3.489	246.477
2	87	34.27	29.447	101.778	-10.125	85.928
3	319	32.267	13.393	205.723	12.724	317.805
4	187	24.8	15.938	41.547	-24.647	186.434
5	188	45.08	20.56	177	36.139	187.48
6	215	30.558	14.248	80.667	-58.392	213.921
7	350	34.059	22.069	76.528	-44.419	348.86
8	156	28.389	19.007	113.333	-60.803	155.471
9	220	31.431	14.759	103.333	-60.385	218.88
10	186	43.943	20.199	172.111	32.234	185.147
Mean	215.5	35.812	19.143	121.894	-17.418	214.64
SD	76.235	8.819	4.848	51.906	37.891	76.129
Min	87	24.8	13.393	41.547	-60.803	85.928
Max	350	53.326	29.447	205.723	36.139	348.86



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค-1 ตารางบันทึกผลการทดลองหาความพรุน

สูตร	w ₁ (g)	w ₂ (g)	v (cm ²)	%Porosity
W100:00	0.0256	0.5553	1.4	41.2567
W50:50	0.0656	0.7551	1.3	70.4316
W20:80	0.0678	0.7132	1.2	68.3814
Y50:50 ^[21]	0.1141	1.6795	2.8	70.8043
C0:100 ^[21]	0.1563	1.0081	2.3	73.2427
WHAp0.1	0.0592	0.7514	1.4	60.4952
WHAp0.5	0.083	0.820	1.6	61.1537
YHAp0.1	0.0478	0.5529	1.2	51.6240
YHAp0.5	0.064	0.5714	1.2	60.3353

การคำนวณเปอร์เซ็นต์ความพรุนของชิ้นงาน

$$\%Porosity = \left(\frac{w_2 - w_1}{D \times v} \right) \times 100$$

w₁ : ก่อนแช่ absolute ethanol (g)

w₂ : น้ำหนักชิ้นงานน้ำหนักชิ้นงานหลังแช่ absolute ethanol (g)

v : ปริมาตรของชิ้นงาน = กว้าง × ยาว × สูง (cm²)

D : ความหนาแน่นของ absolute ethanol = 0.7896 g/cm²

ตัวอย่างการคำนวณ

สำหรับเปอร์เซ็นต์ความพรุนของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลที่เตรียมได้จากสูตร 100:0

โดย w₁ = 0.1589 g, w₂ = 0.9808 g, D = 0.7896 g/cm², v = 2.523 cm²

$$\text{จะได้ } \%Porosity = \left(\frac{0.9808 - 0.1589}{0.7896 \times 2.523} \right) \times 100$$



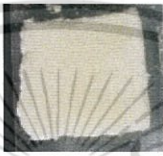









$$= 41.2567 \%$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

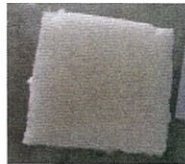




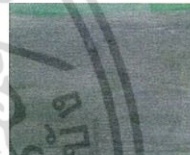


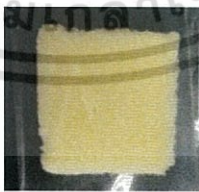

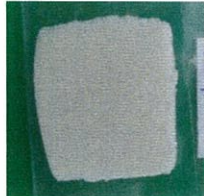



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้








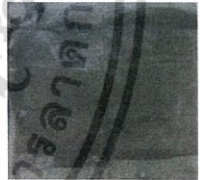




ตารางที่ ง-1 แสดงลักษณะการบวมตัวของชิ้นงานในน้ำกลั่น

ชื่อสูตร	ชั้นที่	ก่อนแช่	หลังแช่น้ำ 60 นาที
W100 : 0	1		
	2		
	3		
W50 : 50	1		
	2		
	3		

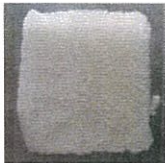
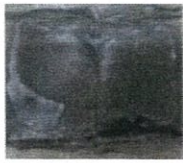




เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อสูตร	ชั้นที่	ก่อนแช่	หลังแช่น้ำ60 นาที
W20 : 80	1		
	2		
	3		
YHAp 0.1	1		
	2		
	3		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อสูตร	ชั้นที่	ก่อนแช่	หลังแช่น้ำ 60 นาที
YHAp 0.5	1		
	2		
	3		
WHAp0.1	1		
	2		
	3		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อสูตร	ชั้นที่	ก่อนแช่	หลังแช่น้ำ 60 นาที
WHAp 0.5	1		
	2		
	3		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง-2 ตารางบันทึกผลการบวมตัวของชิ้นงานในน้ำกลั่น

สูตร	ชั้นที่	น้ำหนัก ชิ้นงาน เริ่มต้น	น้ำหนักชิ้นงานเมื่อเวลาผ่านไป 1 ชม.					
			10 min	20 min	30 min	40 min	50 min	60 min
W100:0	1	0.0731	1.0177	0.7248	0.8048	0.7917	1.0113	0.9147
	2	0.0892	1.2054	1.0933	1.1941	1.0642	1.009	0.9239
	3	0.0881	0.9977	1.0092	0.9542	0.9297	0.7967	0.767
W20:80	1	0.1691	0.9528	0.8431	0.9456	0.6126	0.2887	0.2172
	2	0.1572	0.919	1.0095	0.9805	0.5593	0.3279	0.2343
	3	0.1693	1.0187	0.8418	0.754	0.4008	0.2205	0.1805
W50:50	1	0.1207	0.9112	0.8222	0.6847	0.6206	0.4603	0.4183
	2	0.1352	1.2011	0.7264	0.5059	0.3726	0.2985	0.2936
	3	0.1224	1.0092	0.9504	0.6771	0.5767	0.3734	0.3654
WHAp0.1	1	0.149	1.2231	0.8345	0.8116	0.5254	0.5883	0.3421
	2	0.1402	1.1976	1.0558	0.9246	0.4208	0.5153	0.3623
	3	0.1361	1.1672	1.0098	0.6209	0.3723	0.3022	0.1848
WHAp0.5	1	0.1534	1.2158	0.9895	1.0757	0.8304	0.8315	0.6788
	2	0.1698	1.2501	0.9542	0.8891	0.5405	0.4138	0.3479
	3	0.1419	1.1722	1.0191	0.7543	0.7561	0.7093	0.4504
YHAp0.1	1	0.1147	0.9495	0.606	0.3976	0.3151	0.1732	0.1956
	2	0.1119	0.8175	0.7155	0.5412	0.385	0.2733	0.2513
	3	0.1322	0.8122	0.6625	0.588	0.4662	0.3662	0.2268
YHAp0.5	1	0.1662	1.1794	1.0567	1.0188	0.8809	0.6485	0.4325
	2	0.1322	0.8122	0.6625	0.588	0.4662	0.3662	0.2268
	3	0.1301	1.1473	0.9343	0.6612	0.5764	0.5564	0.5038

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปอร์เซ็นต์การบวมตัวของชิ้นงาน

สูตร	เปอร์เซ็นต์การบวมตัวในน้ำกลั่น					
	10 min	20 min	30 min	40 min	50 min	60 min
W100:0	1189.7326	1020.7793	1074.24066	1010.45473	1039.6397	952.55426
W20:80	483.257133	445.993333	442.7622	218.266366	69.8523666	28.035166
W50:50	722.690633	565.980533	398.2155	320.306033	202.402666	187.4167
WHAp0.1	744.228433	585.029466	453.463866	208.769466	216.954633	107.932
WHAp0.5	684.954033	541.727333	485.475166	364.161533	328.534766	221.59923
YHAp0.1	657.624233	530.833533	384.321866	294.238066	204.7523	175.56872
YHAp0.5	635.2863667	518.3581333	422.0002333	341.9051	264.9307667	173.0091

การคำนวณเปอร์เซ็นต์การบวมตัว (%swelling) ของชิ้นงาน

จะได้ว่า

ตัวอย่างการคำนวณ

สำหรับเปอร์เซ็นต์การบวมตัวของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลที่เตรียมได้จากสูตร W 100:0 ที่แช่ในน้ำกลั่นเป็นเวลา 10 นาที ชั้นที่ 1

$$\% \text{ swelling} = \left(\frac{\text{น้ำหนักชิ้นงานที่บวมน้ำ} - \text{น้ำหนักชิ้นงานที่แห้ง}}{\text{น้ำหนักชิ้นงานที่แห้ง}} \right) \times 100$$

โดย น้ำหนักชิ้นงานที่บวมน้ำ = 1.0177 กรัม

น้ำหนักชิ้นงานที่แห้ง = 0.0731 กรัม

จะได้ เปอร์เซ็นต์การบวมตัว (% swelling) = $\left(\frac{1.0177 - 0.0731}{0.0731} \right) \times 100$
= 1292.20 %

หมายเหตุ : จากนั้นทำการคำนวณหาค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ จ-1 ตารางแสดงสมบัติเชิงกล (compression)

สูตร	ชั้นงาน	Compressive stress	Compressive modulus
W100:0	1	0.04063	0.20435
	2	0.035117	0.17789
	3	0.035427	0.19300
Avg		0.037058	0.19174
SD		0.003097	0.01327

สูตร	ชั้นงาน	Compressive stress	Compressive modulus
W50:50	1	0.14206	0.41048
	2	0.15179	0.44385
	3	0.12812	0.53755
Avg		0.140656667	0.46396
SD		0.009714053	0.053789747

สูตร	ชั้นงาน	Compressive stress	Compressive modulus
W20:80	1	0.29045	1.8799
	2	0.21092	0.89057
	3	0.22065	1.0369
Avg		0.240673333	1.269123333
SD		0.035420857	0.435996345

สูตร	ชั้นงาน	Compressive stress	Compressive modulus
Y50:50	1	0.14854	0.84613
	2	0.15905	0.99243
	3	0.11251	0.55756
Avg		0.140033333	0.798706667
SD		0.024408307	0.221279707

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สูตร	ชั้นงาน	Compressive stress	Compressive modulus
WHAp.0.1	1	0.16791	0.65321
	2	0.10078	0.25539
	3	0.17981	0.34027
Avg		0.4485	1.24887
SD		0.153494856	0.153494856

สูตร	ชั้นงาน	Compressive stress	Compressive modulus
WHAp0.5	1	0.15481	0.41615
	2	0.16245	0.48621
	3	0.15731	0.46561
Avg		0.47457	1.36797
SD		0.158221969	0.003895279

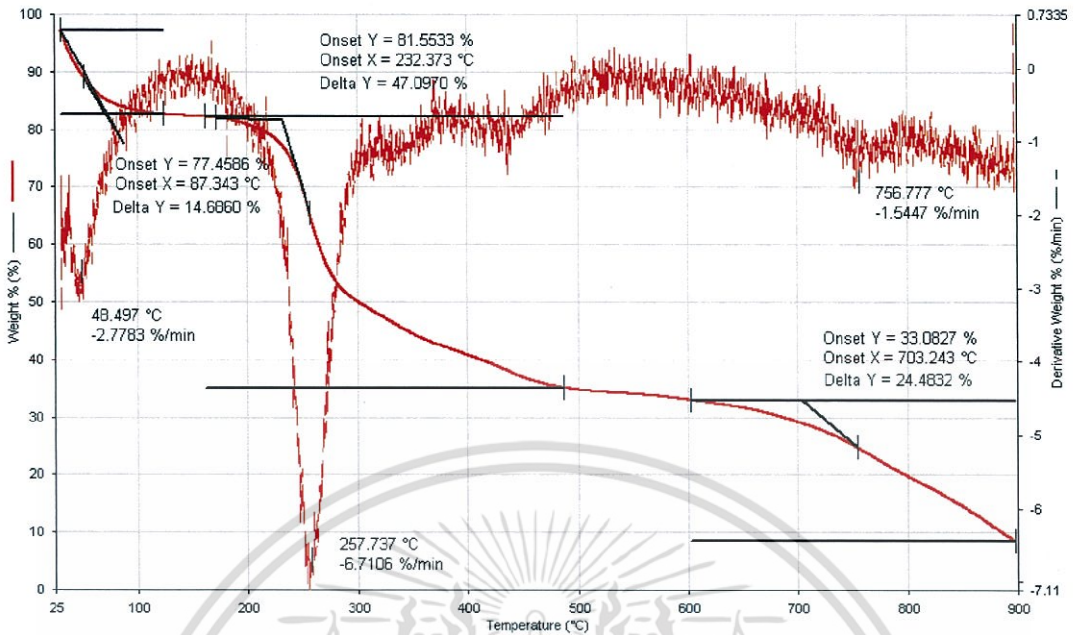
สูตร	ชั้นงาน	Compressive stress	Compressive modulus
YHAp0.1	1	0.15182	0.51958
	2	0.13385	0.47451
	3	0.14228	0.43056
Avg		0.14265	0.474883333
SD		0.008990712	0.044511174

สูตร	ชั้นงาน	Compressive stress	Compressive modulus
YHAp0.5	1	0.18751	0.6686
	2	0.18018	0.6008
	3	0.15192	0.50383
Avg		0.173203333	0.591076667
SD		0.018792749	0.082814224

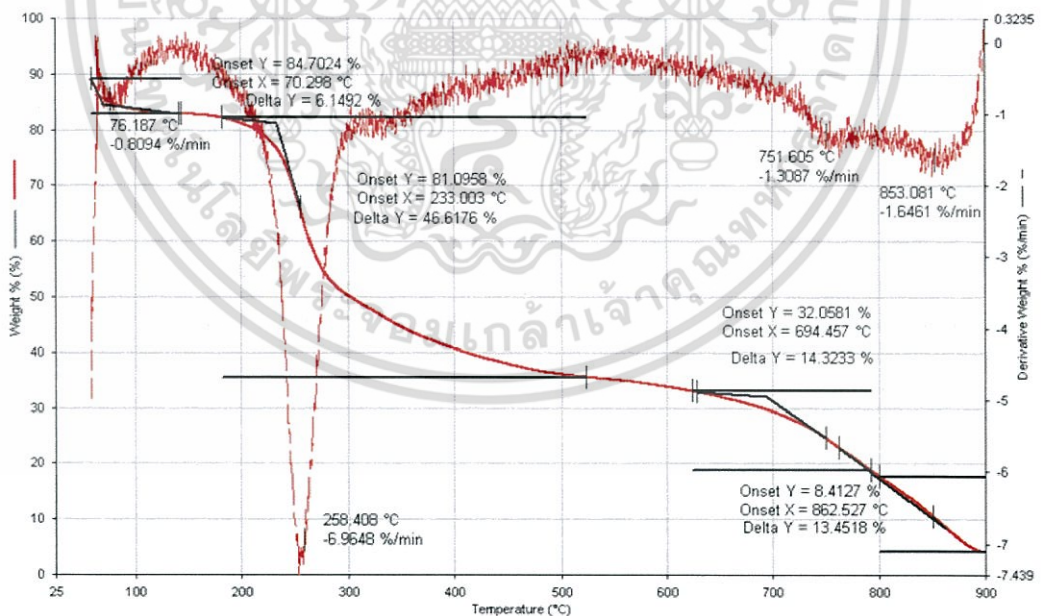
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

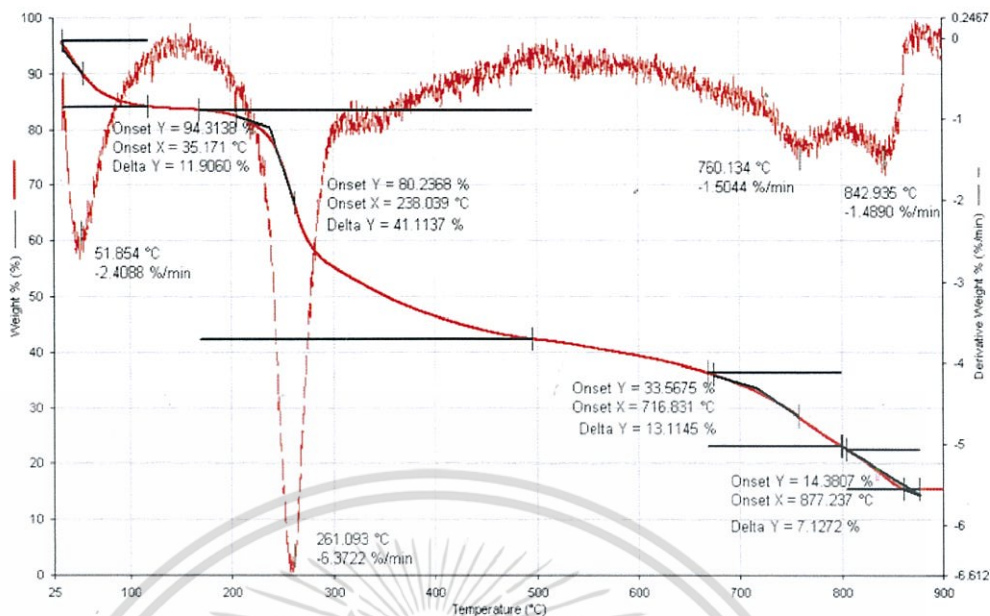


รูปที่ ฉ-1 แสดงเทอร์โมแกรมของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลโปรตีนเซรีซินใหม่ขาอยู่กับคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่เติมแคลเซียมไฮดรอกซีอะปาไทต์ 0.1 %w/v สูตร WHAp0.1

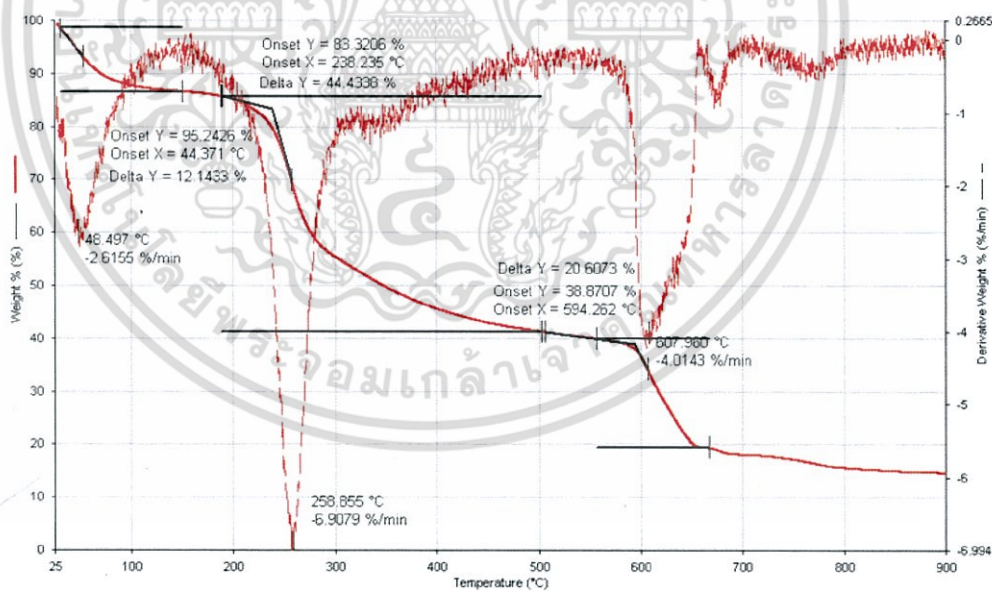


รูปที่ ฉ-2 แสดงเทอร์โมแกรมของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลโปรตีนเซรีซินใหม่ขาอยู่กับคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่เติมแคลเซียมไฮดรอกซีอะปาไทต์ 0.5%w/v สูตร WHAp0.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรนำมาใช้



รูปที่ ฉ-3 แสดงเทอร์โมแกรมของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลโปรตีนเซรีซินไหมเหลืองกับคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่เติมแคลเซียมไฮดรอกไซด์อะปาไทต์ 0.1 %w/v สูตร YHAp0.1



รูปที่ ฉ-4 แสดงเทอร์โมแกรมของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลโปรตีนเซรีซินไหมเหลืองกับคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่เติมแคลเซียมไฮดรอกไซด์อะปาไทต์ 0.5 %w/v สูตร YHAp0.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

