

สมบัติทางกายภาพและเชิงกลของเนื้อเยื่อโครงสร้างจาก
คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสและเซรีซิน

Physical and Mechanical Properties of
Carboxymethylcellulose(CMC)/Sericin Scaffolds



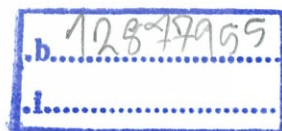
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2558

สมบัติทางกายภาพและเชิงกลของเนื้อเยื่อโครงสร้างจาก
คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสและเซรีซิน

Physical and Mechanical Properties of
Carboxymethylcellulose(CMC)/Sericin Scaffolds



เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 148996
วัน,เดือน,ปี.....1.8.S.A. 2560



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2558

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF
CARBOXYMETHYLCELULOSE(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
ACADEMIC YEAR 2015

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	สมบัติทางกายภาพและเชิงกลของเนื้อเยื่อโครงสร้างจากคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสและเซรีซิน		
ชื่อนักศึกษา	นางสาวเกษณีย์	วงศ์ศา เทวัญ	รหัสนักศึกษา 55050582
	นางสาวแกมกานต์	นายะวร	รหัสนักศึกษา 55050585
	นางสาวศุภมาส	มนต์ประสิทธิ์	รหัสนักศึกษา 55050822
ปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)		
ภาควิชา	เคมี		
คณะ	วิทยาศาสตร์		
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)		
ปีการศึกษา	2558		
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร.มาลินี ชัยศุกกิจสินธ์		

บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้ได้ทำการศึกษาการเตรียมเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลจากโปรตีนเซรีซินที่ได้จากรังไหมผสมร่วมกับคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ในอัตราส่วนต่างๆ ได้แก่ 100:0, 80:20, 50:50, 20:80 และ 0:100 โดยทำการขึ้นรูปด้วยวิธีทำแห้งแบบเยือกแข็ง ซึ่งชิ้นงานที่ได้มีลักษณะเป็นรูพรุนคล้ายฟองน้ำ เมื่อนำไปทดสอบสมบัติต่างๆ ได้แก่ สมบัติทางสัมพัทธ์วิทยา การบวมน้ำ จำนวนรูพรุน สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และหาชนิดของหมู่ฟังก์ชัน พบว่าอัตราส่วน 20:80 เป็นอัตราส่วนที่ดีที่สุดเนื่องจากมีสมบัติเชิงกลในการรับแรงกดอัดได้ดีที่สุด ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนแสดงให้เห็นว่าเซรีซินและคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสสามารถผสมเข้ากันได้ดี แต่ชิ้นงานที่ได้ยังคงมีความเปราะ รับแรงกดอัดได้น้อย จึงนำมาปรับปรุงความแข็งแรงของชิ้นงานด้วยการผสมแคลเซียมไฮดรอกซีอะปาไทต์ โดยเปรียบเทียบที่ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกซีอะปาไทต์ 0.2 และ 0.4 %w/v พบว่าเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลจากเซรีซินและคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสในอัตราส่วน 20:80 ที่ปรับปรุงด้วยแคลเซียมไฮดรอกซีอะปาไทต์ 0.4 %w/v สามารถรับแรงกดอัดได้สูงขึ้น การละลายน้ำลดลง สมบัติการบวมน้ำและบวมตัวในบัฟเฟอร์ PBS ดีขึ้น เหมาะแก่การนำไปประยุกต์ใช้ทำเป็นกระดูกเทียมหรือวัสดุทางการแพทย์ได้

คำสำคัญ : คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส แคลเซียมไฮดรอกซีอะปาไทต์ เซรีซิน เนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจล

Title	Physical and Mechanical Properties of Carboxymethylcellulose (CMC)/Sericin Scaffolds		
Students	Miss Katsanee Wongkachatawan	Student ID	55050582
	Miss Kamkan Nayaworn	Student ID	55050585
	Miss Supphamat Monprasit	Student ID	55050822
Degree	Bachelor of Science (B.Sc. Industrial Chemistry)		
Department	Chemistry		
Faculty	Science		
University	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)		
Academic Year	2015		
Advisor	Asst.Prof.Dr.Malinee Chaisupakitsin		

Abstract

This special project focus on preparation of hydrogel scaffold from protein sericin extracted from Thai silk cocoon and mixed with carboxymethylcellulose. Five different ratios of sericin/CMC matrices of ratios 100:0, 80:20, 50:50, 20:80 and 0:100 respectively, were forming by freeze-drying technique. This sample is like a porous sponge. Then morphology, swelling, porosity, mechanical, thermal properties and functional groups were investigated. The ratio of 20:80 (sericin:CMC) is the optimum ratio due to the highest compressive stress. Moreover, thermal properties showed that sericin and carboxymethylcellulose are well compatible from the part but is still brittle. Therefore, the strength of sample was improved by mixing calcium hydroxyapatite to hydrogel. It is revealed that the mechanical properties of hydrogel scaffold at ratio of 20:80 (sericin:CMC) mixed with 0.4 %w/v of calcium hydroxyapatite provides better compressive stress, low water solubility, higher percent of swelling in both water and in PBS buffer. This hydrogel scaffold is suited to application as artificial bone materials.

Keywords : CMC, Calciumhydroxyapatite, Sericin, Scaffold, Hydrogel

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากความกรุณาและความร่วมมือของทุกๆท่าน ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.มาลินี ชัยศุกกิจสินธ์ ที่คอยให้คำปรึกษาดูแลอย่างใกล้ชิดและให้ความช่วยเหลือแนะนำที่ดีในการปรับปรุงข้อบกพร่องในการทำโครงการพิเศษและขอขอบคุณกรรมการสอบโครงการพิเศษ คือ รศ.ดร.สมศักดิ์ วรมงคลชัย และ รศ.ดร.จุฑารัตน์ ปรัชญาวรากร ที่ให้ข้อคิดเห็นและคำแนะนำช่วยเหลือในการทำโครงการพิเศษให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการเคมี และเจ้าหน้าที่ห้องธุรการ สาขาวิชาเคมี ที่ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวก ในการทำโครงการพิเศษให้สำเร็จไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่อาคารฝึกงานทางอุตสาหกรรมเคมีและพอลิเมอร์ที่อำนวยความสะดวกและให้ความช่วยเหลือ รวมทั้งให้คำแนะนำการใช้เครื่องมือ

ผู้จัดทำโครงการขอขอบคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้



เกษณีย์ วงศ์ชาเทวีญ
แกมกานต์ นายะวาร
ศุภมาส มนต์ประสิทธิ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น 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.....	2
1.3 ขอบเขต.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 ใหม่.....	3
2.1.1 ใหม่ไฟเบอร์อิน.....	9
2.1.2 เซริซิน.....	10
2.2 คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส.....	11
2.2.1 สมบัติทางเคมีและสูตรโครงสร้าง.....	11
2.2.2 การผลิตอนุพันธ์ของเซลลูโลส.....	12
2.2.3 สมบัติหลักของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส.....	12
2.2.4 สมบัติทางกายภาพของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส.....	13
2.2.5 สมบัติการละลายของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส.....	13
2.2.6 การนำไปใช้ประโยชน์.....	13
2.3 ไฮโดรเจล.....	15
2.3.1 ประเภทของไฮโดรเจล.....	15
2.3.2 พันธะทางเคมีของไฮโดรเจล.....	17
2.3.3 พันธะเชื่อมโยงของไฮโดรเจล.....	17
2.3.4 การเตรียมไฮโดรเจล.....	17
2.3.5 สมบัติของไฮโดรเจลและการนำไปใช้งาน.....	18
2.4 ไฮดรอกซีอะปาไทต์.....	18
2.4.1 โครงสร้างไฮดรอกซีอะปาไทต์.....	18
2.4.2 องค์ประกอบของไฮดรอกซีอะปาไทต์.....	19
2.5 กระบวนการทำแห้งแบบแช่แข็ง.....	20
2.5.1 โครงสร้างไฮดรอกซีอะปาไทต์.....	20
2.5.2 เครื่องมือและระบบที่ใช้ในกระบวนการทำแห้งแบบแช่แข็ง.....	21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	22
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	25
3.1 สารเคมี อุปกรณ์ และเครื่องมือที่ใช้.....	25
3.2 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	26
3.2.1 การสกัดเซรีซินจากรังไหม.....	26
3.2.2 เตรียมสารละลายCMC เข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร.....	26
3.2.3 เตรียมการขึ้นรูปชิ้นงาน.....	27
3.2.4 ปรับปรุงชิ้นงานด้วยการเติมแคลเซียมไฮดรอกไซด์อะปาไทต์.....	27
3.3 การทดสอบสมบัติต่าง ๆ.....	28
3.3.1 สมบัติทางกายภาพ.....	28
3.3.2 สมบัติเชิงกล.....	29
3.3.3 สมบัติทางความร้อน.....	29
3.3.4 การตรวจสอบหาหมู่ฟังก์ชันของสาร.....	30
3.3.5 การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์.....	30
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล.....	31
4.1 ศึกษาอัตราส่วนระหว่างสารละลายเซรีซินและสารละลายคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ที่มีผลต่อสมบัติต่าง ๆ ของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจล.....	31
4.1.1 สมบัติทางกายภาพ.....	31
4.1.2 สมบัติเชิงกล.....	33
4.1.3 สมบัติทางความร้อน.....	35
4.1.4 การตรวจสอบหาหมู่ฟังก์ชันของสาร.....	35
4.1.5 การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์.....	37
4.1.6 การทดสอบสมบัติทางความร้อน (TGA).....	38
4.1.7 การทดสอบหาหมู่ฟังก์ชัน (FT-IR).....	40
4.2 ศึกษาผลของแคลเซียมไฮดรอกไซด์อะปาไทต์ที่มีต่อสมบัติของ เนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจล.....	42
4.2.1 ลักษณะทางกายภาพของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลที่มีการเติมแคลเซียม ไฮดรอกไซด์อะปาไทต์.....	42
4.2.2 สมบัติทางสัณฐานวิทยาของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลที่มีการเติมแคลเซียม ไฮดรอกไซด์อะปาไทต์.....	43
4.2.3 ลักษณะการบวมตัวในน้ำของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลที่มีการเติมแคลเซียม ไฮดรอกไซด์อะปาไทต์.....	44
4.2.4 ลักษณะการบวมตัวในบัฟเฟอร์ของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลที่มีการเติม แคลเซียมไฮดรอกไซด์อะปาไทต์.....	45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2.5 จำนวนรูพรุนของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลที่มีการเติมแคลเซียมไฮดรอกซีอะปาไทต์.....	46
4.2.6 การทดสอบสมบัติเชิงกลของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลที่มีการเติมแคลเซียมไฮดรอกซีอะปาไทต์.....	47
4.2.7 การทดสอบสมบัติทางความร้อนของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลที่มีการเติมแคลเซียมไฮดรอกซีอะปาไทต์ (TGA).....	48
4.2.8 การทดสอบหาหมู่ฟังก์ชันของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลที่มีการเติมแคลเซียมไฮดรอกซีอะปาไทต์ (FT-IR).....	50
4.2.9 การทดสอบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลที่มีและไม่มี การเติมแคลเซียมไฮดรอกซีอะปาไทต์.....	52
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	55
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	55
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	56
เอกสารอ้างอิง.....	57
ภาคผนวก.....	61
ภาคผนวก ก การบวมตัว (swelling).....	62
ภาคผนวก ข สัมมนาวิทยา.....	69
ภาคผนวก ค สมบัติทางความร้อน (TGA).....	76
ภาคผนวก ง การทดสอบหาหมู่ฟังก์ชัน.....	80
ภาคผนวก จ การทดสอบสมบัติเชิงกล.....	84
ภาคผนวก ฉ ขนาดรูพรุนของชั้นงานสูตรต่าง ๆ.....	86
ภาคผนวก ช จำนวนรูพรุนของชั้นงานในสูตรต่าง ๆ.....	90
ภาคผนวก ซ ความสามารถในการคืนรูปร่าง.....	91
ภาคผนวก ฌ แบบจำลองการเกิดพันธะเชื่อมโยง.....	92
ภาคผนวก ฎ การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์.....	93

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 องค์ประกอบที่สำคัญของเส้นใยไหม.....	4
2.2 สมบัติและหน้าที่สำคัญของกรดอะมิโนในไหมที่มีต่อร่างกาย.....	6
2.3 ลักษณะโดยทั่วไปของเซรีซิน.....	10
2.4 ตัวอย่างการใช้ CMC ในอุตสาหกรรมประเภทต่าง ๆ.....	14
2.5 คุณสมบัติที่เหมาะสมต่อการทำวัสดุทดแทนกระดูก.....	20
3.1 อัตราส่วนผสมของสารละลายเซรีซินที่มีความเข้มข้น 2 %w/v และสารละลายคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่มีความเข้มข้น 5 %w/v.....	27
3.2 อัตราส่วนผสมของสารละลายเซรีซินที่มีความเข้มข้น 2 %w/v สารละลายคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่มีความเข้มข้น 5 %w/v และแคลเซียมไฮดรอกซีอะปาไทต์.....	28
4.1 ลักษณะทางกายภาพของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลสูตรต่าง ๆ.....	31
4.2 ขนาดของรูพรุนของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลสูตรต่าง ๆ.....	34
4.3 จำนวนรูพรุนของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลสูตรต่าง ๆ.....	35
4.4 อุณหภูมิการสลายตัวของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลสูตรต่าง ๆ.....	40
4.5 ลักษณะทางกายภาพของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลที่มีการเติมแคลเซียมไฮดรอกซีอะปาไทต์.....	42
4.6 ขนาดรูพรุนของเนื้อเยื่อโครงสร้างที่มีการเติมแคลเซียมไฮดรอกซีอะปาไทต์.....	44
4.7 จำนวนรูพรุนของเนื้อเยื่อโครงสร้างที่มีการเติมแคลเซียมไฮดรอกซีอะปาไทต์.....	44
4.8 การเปรียบเทียบ IR spectrum ของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลที่มีและไม่มีการเติมแคลเซียมไฮดรอกซีอะปาไทต์.....	51

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 โครงสร้างของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส.....	11
2.2 โครงสร้างแลตทิซของผลึกอะปาไทต์อย่างง่าย.....	18
2.3 โครงสร้างของไฮดรอกซีอะปาไทต์.....	19
4.1 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาในแนวภาคตัดขวางสูตรต่าง ๆ	33
4.2 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์การบวมน้ำของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลสูตรต่าง ๆ.....	35
4.3 โครงสร้างของกรดอะมิโนเซอร์ริน	36
4.4 กราฟแสดงค่าความเค้นแรงกดสูงสุดของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลในสูตร ๆ	37
4.5 กราฟแสดงค่า Young's Modulus ของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลในสูตร ๆ.....	38
4.6 เทอร์โมแกรมจากการวิเคราะห์ TGA ของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลในสูตรต่าง ๆ.....	39
4.7 IR Spectrum ของเนื้อเยื่อโครงสร้างในสูตรต่าง ๆ.....	40
4.8 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาในแนวภาคตัดขวาง สูตร HA-1.....	43
4.9 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาในแนวภาคตัดขวาง สูตร HA-2.....	43
4.10 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์การบวมน้ำของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลที่มีการเติมแคลเซียมไฮดรอกซีอะปาไทต์ 0.2 %w/v และ 0.4 %w/v และไม่ได้เติมแคลเซียมไฮดรอกซีอะปาไทต์	45
4.11 โครงสร้างในการเกิด ionic electrostatic ระหว่างแคลเซียมไอออนจากแคลเซียมไฮดรอกซีอะปาไทต์	46
4.12 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์การบวมตัวในบัฟเฟอร์ของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลที่มีการเติมแคลเซียมไฮดรอกซีอะปาไทต์ 0.2 %w/v และ 0.4 %w/v และไม่ได้เติมแคลเซียมไฮดรอกซีอะปาไทต์	46
4.13 ค่าความเค้นแรงกดที่ 50% ของความหนาของชิ้นงานที่ไม่มีการเติมแคลเซียมอะปาไทต์ (สูตร 20:80) และมีการเติมแคลเซียมไฮดรอกซีอะปาไทต์ 0.2 %w/v และ 0.4 %w/v.....	47
4.14 ค่าความแข็งยืดหยุ่น (compressive modulus) ที่ 50% ของความหนาของชิ้นงานที่ไม่มีการเติมไฮดรอกซีอะปาไทต์ (สูตร 20:80) และมีการเติมแคลเซียมไฮดรอกซีอะปาไทต์ 0.2 %w/v (สูตร HA-1) และ 0.4 %w/v (สูตร HA-2).....	48
4.15 เทอร์โมแกรมจากการวิเคราะห์ TGA ของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจล สูตร HA-1 และ สูตร HA-2.....	49
4.16 IR spectrum ของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลสูตร HA-1, HA-2 และสูตรที่ไม่มีการเติมแคลเซียมไฮดรอกซีอะปาไทต์.....	50
4.17 การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของโปรตีนเซรีซิน.....	52
4.18 การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของCMC.....	52
4.19 การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของแคลเซียมไฮดรอกซีอะปาไทต์	53
4.20 การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของเนื้อเยื่อโครงสร้างที่ได้จากการผสมระหว่างโปรตีนเซรีซิน 80% และ CMC 20% (สูตร 20:80).....	53

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่

หน้า

- 4.21 การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของเนื้อเยื่อโครงสร้างที่ได้จากการผสมระหว่างโปรตีนเซรีซิน 80% และ CMC 20% ที่มีการเติมแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ 0.4 %w/v (สูตร HA-2)..... 54



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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
100 : 0	อัตราส่วนระหว่างสารละลายเซริซิน 100% และ CMC 0%
80 : 20	อัตราส่วนระหว่างสารละลายเซริซิน 80% และ CMC 20%
50 : 50	อัตราส่วนระหว่างสารละลายเซริซิน 50% และ CMC 50%
20 : 80	อัตราส่วนระหว่างสารละลายเซริซิน 20% และ CMC 80%
0 : 100	อัตราส่วนระหว่างสารละลายเซริซิน 0% และ CMC 100%
HA-1	เนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลที่มีการเติมแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ 0.2 %w/v
HA-2	เนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลที่มีการเติมแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ 0.4 %w/v

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ไหม (silk)^[1] เป็นวัสดุที่ได้จากธรรมชาติมีการผลิตและใช้งานในประเทศไทย องค์ประกอบหลักของไหมคือโปรตีน 2 ชนิด ได้แก่ ไพบোরิน คิดเป็นส่วนประกอบประมาณ 62.5–67 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักและเซรีซิน ประมาณ 22–25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของโปรตีนไหมทั้งหมด โดยในทางอุตสาหกรรม ไพบোরิน^[2] มักถูกนำไปใช้ประโยชน์ยกตัวอย่างเช่นในอุตสาหกรรมสิ่งทอซึ่งเป็นอุตสาหกรรมที่มีกระบวนการฟอกไหม (degumming) คือกระบวนการสกัดไพบোরินไปใช้งาน ทำให้มีปริมาณเซรีซินเป็นของเสียที่เหลือจากอุตสาหกรรมนี้เป็นจำนวนมาก นอกจากนี้ไหมยังถูกนำไปใช้งานในอุตสาหกรรมอื่น ๆ^[3] เช่น อุตสาหกรรมอาหาร อุตสาหกรรมยา หรือเป็นส่วนประกอบในเครื่องสำอาง โดยจะมีส่วนของเซรีซินซึ่งเป็นส่วนที่เหลือทิ้งจากการสกัดไพบোরินไปใช้งาน

โปรตีนเซรีซิน (sericin)^[4] จากไหมเป็นพอลิเมอร์ทางธรรมชาติประเภทโปรตีนที่สามารถละลายน้ำได้ ประกอบไปด้วยกรดอะมิโนหลายชนิด เช่น ซีรีน (serine) ซึ่งเป็นกรดอะมิโนที่พบมากที่สุด โดยกรดอะมิโนแต่ละชนิดจะเชื่อมต่อกันด้วยพันธะเปปไทด์ นอกจากนี้จะเป็นโปรตีนทางธรรมชาติ^[5] แล้วยังมีคุณสมบัติที่เหมาะสมแก่การนำมาใช้ประโยชน์ได้แก่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ไม่มีความเป็นพิษ ต้านทานต่อการเกิดออกซิเดชัน (oxidation resistance) ต่อด้านและยับยั้งการทำงานของจุลินทรีย์ ทนทานต่อรังสี UV และมีความสามารถในการดูดซับความชื้น

คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (carboxymethylcellulose ; CMC)^{[6],[7]} เป็นอนุพันธ์ของเซลลูโลสประเภทหนึ่งที่เกิดจากการแทนที่โครงสร้างของเซลลูโลสด้วยหมู่เมทิลและหมู่คาร์บอกซีเมทิล มีลักษณะเป็นของแข็งสีขาว ไม่มีกลิ่น ไม่มีรส และไม่เป็นอันตราย มีสมบัติเป็นสารเพิ่มความข้นหนืด เป็นสารคงสภาพ สามารถละลายน้ำได้ ถูกนำมาใช้ประโยชน์หลากหลายในอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมยา อุตสาหกรรมเครื่องสำอาง อุตสาหกรรมอาหาร อุตสาหกรรมผงซักฟอก อุตสาหกรรมกาว เป็นต้น CMC เป็นสารที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมต่าง ๆ^[11] เนื่องจากละลายน้ำได้ มีความเป็นกลางคือไม่เป็นกรดต่าง ไม่เป็นอันตรายต่อผู้ใช้ ถูกย่อยสลายได้ด้วยจุลินทรีย์จึงไม่สะสมในแหล่งน้ำ ทำให้มีค่า BOD ต่ำ จึงไม่ก่อให้เกิดปัญหาน้ำเน่าเสียไม่เป็นอันตรายต่อสัตว์น้ำและพืชน้ำ และมีการรายงานพบว่า CMC มีอิทธิพลต่อสมบัติเชิงกลเมื่อมีการใช้ CMC ร่วมกับพอลิเมอร์ทางธรรมชาติอื่น ๆ

สารตัวอย่างที่ได้จากการผสมระหว่างคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสกับเซรีซินและใช้เทคนิคการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (freeze-drying) คือเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจล (hydrogel scaffold) สามารถสังเคราะห์หรือเตรียมได้จากวัสดุที่ได้จากธรรมชาติ ซึ่งเป็นพอลิเมอร์จำเพาะชนิดหนึ่งที่มีโครงสร้างร่างแหสามมิติ มีรูพรุนมาก มีความสามารถในการดูดซับน้ำ และสารละลายบางชนิดได้เป็นอย่างดี โดยที่โครงสร้างของไฮโดรเจลยังมีความแข็งแรงไม่เกิดการละลาย หมู่ฟังก์ชันในไฮโดรเจลที่มีสมบัติความชอบน้ำ เช่น หมู่ไฮดรอกซิล หมู่คาร์บอกซิล และยังสามารถเข้ากันได้ดีกับสารชีวภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในร่างกายมนุษย์ ไม่เป็นพิษต่อเซลล์ จึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในทางการแพทย์ได้^[1] ก่อนหน้านี้มีงานวิจัยศึกษาวัสดุปิดแผล^[8] ที่ทำจาก CMC และเซรีซินพบว่าช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการรักษาแผลได้ดีขึ้น ดังนั้นเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจล^{[9],[10]} ที่ประกอบด้วย CMC และเซรีซินจะเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติที่ดี เนื่องจาก CMC มีความสามารถในการบวมน้ำที่ดีเยี่ยมและมีค่า compressive modulus ที่สูง ส่วนเซรีซินมีความสามารถในการเหนียวนำไปให้เซลล์มายึดเกาะและกระตุ้นการเจริญเติบโตของเนื้อเยื่อใหม่ ช่วยรักษาความชื้น ดูดซับน้ำเหลืองจากแผลในขณะที่แผลเกิดการอักเสบ ทำให้การรักษาแผลมีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อเตรียมเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลจากสารละลายผสมระหว่างคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสและเซรีซินจากรังไหม

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) เตรียมสารละลายเซรีซินจากรังไหมสายพันธ์ุหางน้อยที่มีความเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร
- 2) เตรียมสารละลายคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย 90,000 และมี DS = 0.7 ที่ความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร
- 3) เตรียมเตรียมของผสมระหว่างสารละลายเซรีซินกับสารละลายคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่อัตราส่วน 100 ต่อ 0, 80 ต่อ 20, 50 ต่อ 50, 20 ต่อ 80 และ 0 ต่อ 100
- 4) แช่แข็งที่อุณหภูมิ -2 องศาเซลเซียส
- 5) ขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเทคนิค freeze-drying
- 6) สมบัติที่ทำการทดสอบคือทดสอบสมบัติทางกายภาพได้แก่การบวมน้ำ ความเป็นรูพรุนและดูพื้นผิวชิ้นงานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค Thermogravimetric Analysis (TGA) ทดสอบหาหมู่ฟังก์ชันก็ด้วยเทคนิค Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR) และทดสอบสมบัติเชิงกลด้วยการทดสอบค่าความแข็งแรงกดอัด
- 7) ปรับปรุงความแข็งของชิ้นงานสูตรที่ดีที่สุดด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.2 %w/v และ 0.4 %w/v
- 8) สรุปผล

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) เป็นการนำโปรตีนเซรีซินที่ได้จากรังไหมมาใช้ให้เกิดประโยชน์
- 2) ทราบถึงกระบวนการเตรียมเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลจากโปรตีนเซรีซินและคาร์บอกซีเมทิล-เซลลูโลส
- 3) ทราบถึงสมบัติต่าง ๆ ของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลซึ่งเป็นวัสดุที่อาจนำไปประยุกต์ใช้เป็นวัสดุทางการแพทย์ได้
- 4) เพื่อเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุทางการแพทย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

วิศวกรรมเนื้อเยื่อ (Tissue Engineering)^[11] เป็นกระบวนการสร้างเนื้อเยื่อ (regeneration of functional tissues) เพื่อทดแทน ซ่อมแซม หรือปรับปรุงการทำงานของเนื้อเยื่อหรืออวัยวะที่สูญเสียหรือบาดเจ็บ ซึ่งปกติจะไม่มีการงอกใหม่เองในมนุษย์ ได้แก่ ผิวหนังแท้ เส้นประสาท กระดูก กระดูกอ่อน กล้ามเนื้อหัวใจ เป็นต้น กระบวนการสร้างเนื้อเยื่อต้องใช้การพัฒนาความรู้ต่าง ๆ สามด้านหลัก ได้แก่ วิศวกรรมของวัสดุ ชีววิทยาของเซลล์ และวิศวกรรมชีวเคมี ทำเป็นโครงสร้างสำหรับส่งเสริมการเจริญของเนื้อเยื่อ เรียกว่า เนื้อเยื่อโครงสร้าง (scaffold)^[10] 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 ซึ่งนำจะนำสารชนิดต่าง ๆ จากใบหม่อนไปสร้างความเจริญเติบโต โดยผ่านการย่อยและการดูดซึมเป็นปริมาณ 1 ใน 3 ของสารอาหารทั้งหมด ครึ่งหนึ่งของโปรตีนที่ดูดซึมจากใบหม่อนจะถูกนำไปใช้ผลิตเส้นไหม เมื่อถึงวัย 5 วันแรกต่อมไหม (silk gland) จะหนักเพียง 6.36 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักตัวไหม เมื่อไหมสุกก่อนเข้าทำรัง ต่อมาไหมจะหนักถึง 41.97 เปอร์เซ็นต์ จะเห็นว่าปลายวัยที่ 5 สารอาหารโดยเฉพาะโปรตีนเกือบทั้งหมดถูกเปลี่ยนไปเป็นสารที่ใช้ชักใยทำรังหรือเส้นไหมนั่นเอง เส้นใยที่ออกมามีคุณสมบัติหลากหลายที่เปรียบมิได้ ไหมเป็น “ราชินีแห่งเส้นใย” ที่ได้มาจากโปรตีนที่หนอนไหมขับออกมาเพื่อป้องกันตัวเองขณะเป็นดักแด้ เส้นใยที่ได้มีความยาวต่อเนื่อง (filaments) เส้นใยไหมเป็นเส้นใยธรรมชาติที่ได้จากโปรตีนเช่นเดียวกับเส้นใยขนสัตว์ เส้นไหมเกิดจากการพันออกมาจากตัวหนอนไหม การสังเคราะห์โปรตีนในเส้นไหมทำได้ในเซลล์ของต่อมไหมที่อยู่ในตัวหนอนไหม สารไหมเหลว (liquid silk) สามารถขับออกมาจากต่อมไหมส่วนท้าย (posterior silk gland) หลังจากนั้นจะส่งสารไหมเหลวไปที่ต่อมไหมส่วนกลาง (middle silk gland) ในระหว่างที่อยู่ในต่อมไหมส่วนกลาง สารไหมเหลวจะมีการเปลี่ยนแปลงกลายเป็นเจลาติน (gelatin) ที่มีความแข็งแรงขึ้น ในต่อมไหมส่วนกลางยังมีต่อมที่สามารถสร้างโปรตีนอีกชนิดหนึ่งที่มีสมบัติเป็นกาวในการเคลือบเจลาตินเรียกโปรตีนชนิดนี้ว่า เซริซิน (sericin) หลังจากนั้นเจลาตินจะมีความเหนียวและแข็งแรงขึ้นโดยอาศัยการสลายหัวไปมาของตัวหนอนไหม อาการเคลื่อนไหวจะเกิดขึ้นที่บริเวณต่อมไหมส่วนหน้า เรียกเจลาตินที่มีความเหนียวขั้นนี้ว่า ไฟโบรอิน (fibroin) หลังจากที่มีการรวมกันของไฟโบรอิน 2 เส้น และมีการเชื่อมติดกันด้วยกาวไหมเซริซิน จะมีการผ่านรูขนาดเล็ก (orifice of spinneret) ออกมาจากตัวของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หนอนไหม และได้เป็นเส้นใยที่ใช้ในการทำเครื่องนุ่งห่มหรือสิ่งทอต่างๆ สามารถจำแนกไหมออกเป็น 2 ประเภท ดังนี้คือ

1. ไหมเลี้ยง (Mulberry silk)

เป็นหนอนไหมที่มนุษย์เพาะเลี้ยงโดยให้อาหาร คือ ใบหม่อน (Mulberry leaves) สด ๆ ซึ่งไหมชนิดนี้มีสีค่อนข้างขาวและหลังการลอกกาวจะมีความมันเงาเพิ่มขึ้น

2. ไหมป่า (Wild silk)

เป็นไหมที่มนุษย์ไม่ได้เพาะเลี้ยงโดยปกติ ไหมทาชาร์ (Tussah silk) มีแหล่งกำเนิดอยู่ที่จีนและอินเดีย เลี้ยงด้วยใบไถ้ ซึ่งไหมป่าจะให้เส้นใยที่มีสีน้ำตาล หยาดและไม่สม่ำเสมอเมื่อเทียบกับเส้นใยจากไหมเลี้ยง

ไหมไทยถือว่าเป็นไหมเลี้ยงซึ่งเป็นตัวอ่อนของผีเสื้อกลางคืนชนิดหนึ่งเป็นแมลงในอันดับเลพิโดปเทอร่า มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Bombyx mori* และมีชื่อสามัญว่า silkworm อยู่ในวงศ์ Bombycidae เป็นพันธุ์ที่มีคุณภาพดีที่สุดในย้อมเลี้ยงกันมากในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย ปัจจุบันการเลี้ยงไหมและการผลิตไหมได้รับการส่งเสริมให้ทำเป็นระบบอุตสาหกรรมแบบ sericulture ซึ่งเป็นระบบที่ได้รับการพัฒนาจากประเทศญี่ปุ่นแต่มีลักษณะที่แตกต่างกันเนื่องจากเส้นใยมีสีเหลืองและค่อนข้างหยาด ไหมไทยมีส่วนประกอบที่เป็นกาวไหมปริมาณมากถึง 38 เปอร์เซ็นต์ มากกว่าไหมเลี้ยงชนิดอื่น ๆ ซึ่งปกติมีกาวไหมเพียง 20-25 เปอร์เซ็นต์เท่านั้น ทำให้เส้นใยไหมไทยมีลักษณะเฉพาะตัวเมื่อทอผ้าไหมจัดเป็นเส้นใยที่ทรุทร่า สวยงาม มีเอกลักษณ์เป็นของตัวเอง ซึ่งเส้นใยอื่นไม่สามารถเทียบได้ มีสมบัติเฉพาะที่เหมาะสมแก่การทำเป็นเสื้อผ้า เพราะให้ความสบาย ความสวยงาม คุ้มค่าและมีความทนทานที่แข็งแกร่งที่สุดในบรรดาเส้นใยธรรมชาติทั้งหมด

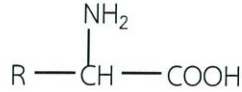
ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบที่สำคัญของเส้นใยไหม^[1]

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) สามารถถูกแยกออกจากโปรตีนได้โดยการไฮโดรไลส์ด้วยกรด กรดอะมิโนที่พบในโปรตีนมีทั้งหมด 20 ชนิด ดังตารางที่ 2.2 โดยแต่ละชนิดมีโครงสร้างที่ต่างกันที่หมู่ R กรดอะมิโนต่อไปนี้ต่อกันเป็นสายโซ่ยาว เรียกว่า โซ่พอลิ-เพปไทด์ ต่อกันอยู่ในลักษณะเป็นพอลิเมอร์ที่ไม่มีการแตกกิ่ง พันธะโควาเลนต์ที่เชื่อมอยู่ระหว่างกรดอะมิโนมีชื่อว่า พันธะเพปไทด์ซึ่งพันธะนี้เป็นพันธะเอไมด์ที่เกิดการสูญเสียน้ำจากหมู่คาร์บอกซิลิกของกรดอะมิโนตัวหนึ่งกับหมู่แอลฟาอะมิโนของกรดอะมิโนที่อยู่ถัดไป โมเลกุลของโปรตีนอาจ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประกอบด้วยโพลิเพปไทด์เพียงโซ่เดียวหรือมากกว่าก็ได้ โดยมีความยาวที่แตกต่างกันออกไป โดยมีกรดอะมิโนตั้งแต่ประมาณ 40 ถึงมากกว่า 4,000 หน่วย ซึ่งโปรตีนแต่ละชนิดมีส่วนประกอบทางเคมีมวลโมเลกุล และการเรียงลำดับของกรดอะมิโนที่จำเพาะ โดยกรดอะมิโนมีสูตรโมเลกุลทั่วไป คือ



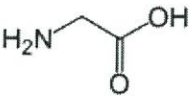
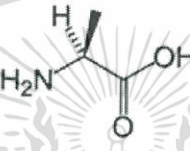
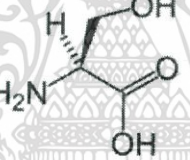
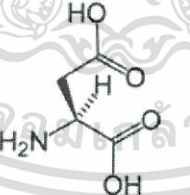
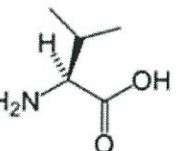
ภายในโมเลกุลของกรดแอลฟาอะมิโน จะมีหมู่อะมิโนต่ออยู่ที่ตำแหน่งแอลฟาคาร์บอนของกรดคาร์บอกซิลิก (กรดอะมิโนทุกตัวมีแอลฟาคาร์บอน ยกเว้นไกลซีน) แต่เนื่องจากเอมีนเป็นเบสและคาร์บอกซิลิกเป็นกรดจึงเกิดการส่งผ่านโปรตอนจากกรดให้เบส ซึ่งสูตรโมเลกุลของกรดอะมิโนจึงเขียนอยู่ในรูปที่แตกตัวเป็นไอออน หรือรูปที่มีประจุสองขั้วได้ ดังนี้



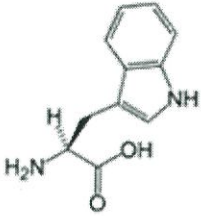
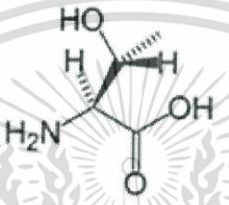
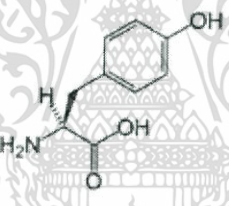
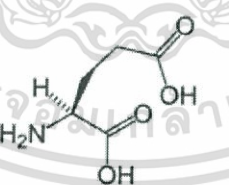
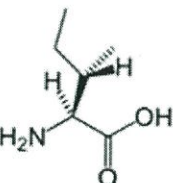
เส้นไหมเป็นเส้นใยที่เป็นสารประกอบประเภทพอลิเอไมด์ (polyamide) เกิดจากการมีหน่วยของโมเลกุลขนาดเล็กที่เรียกว่า กรดอะมิโน (amino acid) มาต่อกันเป็นสารที่มีโมเลกุลใหญ่ด้วยพันธะเพปไทด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

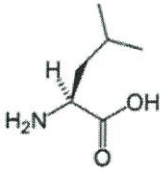
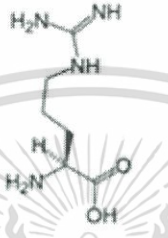
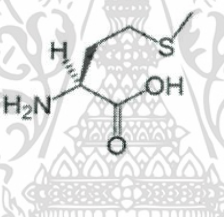
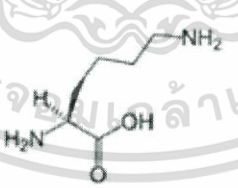
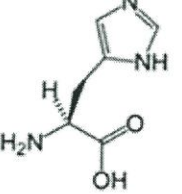
ตารางที่ 2.2 สมบัติและหน้าที่สำคัญของกรดอะมิโนในนมที่มีต่อร่างกาย^[1]

ชนิดของกรดอะมิโนในนม	โครงสร้าง	หน้าที่และสมบัติ
Glycine (Gly,G)		<ul style="list-style-type: none"> - ควบคุมระดับคลอเรสเตอรอล - ป้องกันและรักษาความดันโลหิตสูง - ช่วยเสริมสร้างการทำงานของตับ
Alanine (Ala,A)		<ul style="list-style-type: none"> - เป็นแหล่งพลังงานสำคัญต่อเนื้อเยื่อกล้ามเนื้อ สมอง และระบบ - ผลิต Antibodies ที่ช่วยให้ระบบภูมิคุ้มกันดีขึ้น
Serine (Ser,S)		<ul style="list-style-type: none"> - เป็นแหล่งในการสะสมน้ำตาลกลูโคสในตับ และกล้ามเนื้อ จึงช่วยส่งเสริมระบบการทำงานของอินซูลิน (Insulin) เป็นการลดน้ำตาลในเลือดซึ่งช่วยในการเผาผลาญไขมันที่สะสมในร่างกาย
Aspartic acid (Asp,D)		<ul style="list-style-type: none"> - ช่วยขับไล่อาการเจ็บ และสารพิษแอมโมเนียออกจากร่างกาย - ช่วยเพิ่มความต้านทานต่อการเหนื่อยอ่อน
Valine (Val,V)		<ul style="list-style-type: none"> - ช่วยให้จิตใจกระปรี้กระเปร่า - ประสานการทำงานของกล้ามเนื้อ

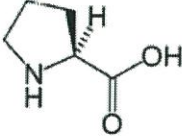
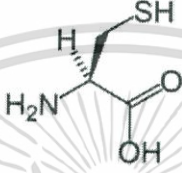
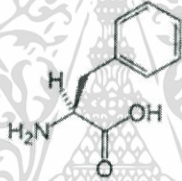
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชนิดของกรดอะมิโนใน นม	โครงสร้าง	หน้าที่และสมบัติ
Tryptophan (Trp,W)		<ul style="list-style-type: none"> - สนับสนุนการผลิตเม็ดเลือดแดง - ป้องกันและช่วยลดอันตรายที่จะเกิดกับเส้นโลหิตแดงและการชักกระตุกของหัวใจ
Threonine (Thr,T)		<ul style="list-style-type: none"> - ป้องกันการเกิดไขมันในตับ - ช่วยย่อยและช่วยระบบการทำงานของร่างกาย
Tyrosine (Tyr,Y)		<ul style="list-style-type: none"> - ช่วยในการส่งผ่านเส้นประสาทไปยังสมอง อีกทั้งมีผลต่อระบบประสาท - ช่วยความจำ - กระตุ้นการเต้นของหัวใจ
Glutamic acid (Glu,E)		<ul style="list-style-type: none"> - ช่วยลดแอมโมเนียในเลือดซึ่งมีส่วนสัมพันธ์กับโปรตีนในสมองและระบบการทำงานของน้ำตาล - ช่วยควบคุมโรคสุรา (Alcoholism)
Isolesine (Ile,I)		<ul style="list-style-type: none"> - กระตุ้นการทำงานของสมองส่วนบน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชนิดของกรดอะมิโนใน ใหม่	โครงสร้าง	หน้าที่และสมบัติ
Leusin (Leu,L)		<ul style="list-style-type: none"> - ลดน้ำตาลในเลือด - ช่วยให้แผลหายเร็วขึ้น
Arginine (Arg,R)		<ul style="list-style-type: none"> - เสริมสร้างภูมิคุ้มกันต่อเชื้อแบคทีเรีย ไวรัสและเซลล์เนื้องอก - ช่วยให้แผลหายเร็วขึ้น - ช่วยเสริมสร้างตับ
Methionine (Met,M)		<ul style="list-style-type: none"> - เป็นแหล่งที่ให้สารกำมะถันซึ่งป้องกันการเกิดโรคเกี่ยวกับผม ผิวหนังและเล็บ - ช่วยลดระดับคอเลสเตอรอลโดยการผลิตเลซิทินในตับ
Lysine (Lys,K)		<ul style="list-style-type: none"> - ต่อด้านเริ่ม งูสวัดโดยจะช่วยให้เกิดความสมดุลของธาตุอาหารและการไปลดการเจริญเติบโตของไวรัส - การขาด Lysine มีผลทำให้เหนื่อยง่าย ยับยั้งการเติบโต ผมร่วง โรคโลหิตจางและเกิดปัญหาต่อระบบสืบพันธุ์
Histidine (His,H)		<ul style="list-style-type: none"> - พบมากในเม็ดเลือดแดง ใช้ในการรักษารูมาตอย โรคข้ออักเสบ อากาศผื่นคัน โรคผื่นคัน แผลพุพองและโรคโลหิตจาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชนิดของกรดอะมิโนในไหม	โครงสร้าง	หน้าที่และสมบัติ
Proline (Pro,P)		<ul style="list-style-type: none"> - รักษาความดันโลหิต - มีความสำคัญอย่างมากต่อการทำงานของข้อและเอ็น - ช่วยบำรุงรักษากล้ามเนื้อหัวใจ
Cystine (Cys,C)		<ul style="list-style-type: none"> - ทำหน้าที่เป็นสารต้านอนุมูลอิสระ (antioxidant) และเพิ่มความแข็งแรงให้ร่างกาย ต่อต้านรังสีและมลพิษ - ช่วยในการสังเคราะห์โปรตีน
Phenylalanine (Phe,F)		<ul style="list-style-type: none"> - มีผลต่อระบบเส้นประสาท

2.1.1 ไหมไฟโบรอิน (Silk Fibroin)^[1]

โปรตีนเส้นไหมมีองค์ประกอบหลักทางเคมี คือ โปรตีนที่เรียกว่า ไฟโบรอิน (fibroin) เป็นโปรตีนที่ไม่ละลายน้ำ (ประมาณ 78 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักไหมดิบ) ประกอบด้วยกรดอะมิโนประมาณ 15 ชนิด กรดอะมิโนหลัก ๆ ที่พบในเส้นไหม ได้แก่ โกลซีน (Glycine, 40 เปอร์เซ็นต์) อะลานีน (Alanine, 29 เปอร์เซ็นต์) และเซรีน (Serine, 12 เปอร์เซ็นต์) กรดอะมิโนเหล่านี้ต่อกันเป็นสายยาวที่เรียกว่า โพลีเพปไทด์ เป็นสายยาวขนานกับแกนในลักษณะเป็นเส้นใยหรือเป็นแผ่น มีความแข็งแรงเหนียวและอาจยืดหยุ่นได้

การคำนวณน้ำหนักโมเลกุลของไฟโบรอินทำได้ยาก เนื่องจากไฟโบรอินไม่ละลายในสารละลายทั่วไป แต่ละลายในสารละลายบางชนิดเท่านั้น เช่น Cupric-ethylenediamine หรือในสารละลายเข้มข้น Lithium iodide หรือ Thiocyanate จากการใช้สารละลายเหล่านี้ร่วมกับการใช้หลักการของการตกตะกอนใน Ultracentrifuge สามารถคำนวณน้ำหนักได้ประมาณ 84,000 กรัม/โมล แต่ถ้าคำนวณจากการอาศัยการวัดสมบัติทางความหนืดจะได้น้ำหนักโมเลกุลประมาณ 50,000 กรัม/โมล หรือมีผู้ใช้การคำนวณโดยอาศัยการวิเคราะห์จาก terminal amino acid พบว่าน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วงระหว่าง 80,000-100,000 กรัม/โมล

2.1.2 เซรีซิน (Sericin)^[4]

เป็นโปรตีนไหมที่มีความสามารถในการละลายได้ในน้ำ และสามารถแยกเซรีซินออกจากรังไหมได้โดยผ่านกระบวนการสาวไหมในน้ำร้อน โดยปกติเซรีซินเป็นสิ่งที่เหลือจากการสาวไหมและไม่มีการนำไปใช้ประโยชน์ ซึ่งปริมาณการทิ้งของเซรีซินในกระบวนการสาวไหมมีปริมาณราว 50,000 ตันต่อรังไหมที่ใช้ในการสาวไหม 1,000,000 ตัน จะเห็นได้ว่าน้ำที่เหลือจากการสาวไหมที่มีเซรีซินละลายอยู่ในปริมาณมาก ดังนั้นถ้าสามารถนำน้ำที่เหลือนี้หรือนำเซรีซินที่มีในน้ำเหลือทิ้งนี้มาใช้ประโยชน์ก็จะทำให้เกิดผลดีในทางเศรษฐกิจ ในปัจจุบันได้มีการค้นคว้าวิจัยการนำเซรีซินไปใช้ประโยชน์อย่างมากมาย เพราะเซรีซินเป็นสารที่ได้จากธรรมชาติ ไม่มีพิษ ไม่ก่อให้เกิดผลข้างเคียงเมื่อนำมาใช้ จึงสามารถนำมาใช้ได้อย่างกว้างขวาง

2.1.2.1 องค์ประกอบทางเคมีของเซรีซิน

เซรีซินเป็นกาไหมที่เป็นสารประกอบโปรตีนที่มีซั้วมากหรือมีองค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญที่สร้างแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลได้สูง ได้แก่ กลุ่มของเคมีจำพวกกลุ่มไฮดรอกซิล (-OH group) กลุ่มคาร์บอนิล (-COOH group) และกลุ่มอะมิโน (-NH group) ซึ่งสามารถสร้างพันธะไฮโดรเจนได้เป็นอย่างดี น้ำหนักโมเลกุลของเซรีซินมีค่าระหว่าง 10-300 กิโลดัลตัน เซรีซินประกอบไปด้วยกรดอะมิโน 18 ชนิด ที่สำคัญได้แก่ Serine (hydroxyamino acid) มีอยู่ประมาณ 31-33.4 เปอร์เซ็นต์ Glycine มีอยู่ประมาณ 13.9-19.1 เปอร์เซ็นต์ และ Aspratic acid มีอยู่ประมาณ 14.5-17.8 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ยังมีกรดอะมิโนอื่นที่สำคัญรองลงมา เช่น Threonine, Lysine, Glutamic acid, Alanine และ Valine เป็นต้น

ตารางที่ 2.3 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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2.2 ลักษณะและโครงสร้างของเซรีซิน

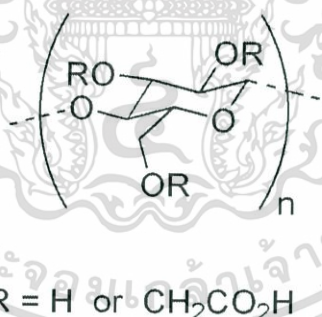
เซรีซินเป็นโปรตีนที่มีความสามารถในการละลายต่างเจือจางที่ร้อนได้ดี เพราะมีกรดอะมิโนที่มีสมบัติ hydrophilic สูง นอกจากนี้ยังสามารถเกิดไฮโดรไลซิส (hydrolysis) เมื่อสัมผัสกับกรดหรือด่าง เซรีซินสามารถย่อยสลายได้โดยเอนไซม์โปรติเอส (protease) กระบวนการผลิตเส้นใยไหมมีผลต่อขนาดของโมเลกุลเซรีซิน เนื่องจากเซรีซินมีความไวต่อสภาวะกรด-ด่าง (pH) อุณหภูมิ และเวลาที่ใช้ในกระบวนการสาวไหม (processing time) ในสภาวะที่มีความร้อนสูงราว 150 องศาเซลเซียส สามารถทำให้เกิดการเปลี่ยนสีไปเป็นสีออกน้ำตาล (browning) ได้ และเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นก็จะนำไปสู่การเสื่อมสภาพเนื่องจากการเกิดการขาดของสายโซ่ทำให้โครงสร้างของเซรีซินมีขนาดสั้นลง

2.2 คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (Carboxymethylcellulose)^[1]

2.2.1 สมบัติทางเคมีและสูตรโครงสร้าง

อนุพันธ์ของเซลลูโลสที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรม คือ โซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส หมายถึงเซลลูโลสที่ผ่านกระบวนการทางเคมี ซึ่งสามารถกระจายตัวได้ในน้ำเป็นคอลลอยด์ แต่ไม่ละลายในตัวทำละลายอื่น เช่น เอทานอล อีเทอร์ เป็นต้น

สารโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (Sodium carboxymethyl cellulose) หรือที่รู้จักกันในอีกหลายๆชื่อคือ NaCMC, Sodium CMC, CMC, CM cellulose, Cellulose gum, Carboxymethylcellulose หรือ Sodium cellulose glycolate เป็นแอนไอออนิกเซลลูโลสอีเทอร์ที่ละลายน้ำ มีสูตรโครงสร้างดังรูป



รูปที่ 2.1 แสดงโครงสร้างของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส^[12]

ค่าที่แสดงจำนวนกลุ่ม CH₂COONa ที่แทนที่ไฮโดรเจนต่อ 1 หน่วยนี้เรียกว่า องศาการแทนที่ (degree of substitution) ดังนั้นมีค่าสูงสุดได้เท่ากับ 3 CMC แบ่งออกเป็นเกรดต่าง ๆ ตามการนำไปใช้ประโยชน์ ซึ่งการแบ่งเกรดของ CMC ขึ้นอยู่กับค่าองศาการแทนที่ ความสม่ำเสมอของหมู่แทนที่ องศาการเกิดพอลิเมอร์ และองศาความบริสุทธิ์

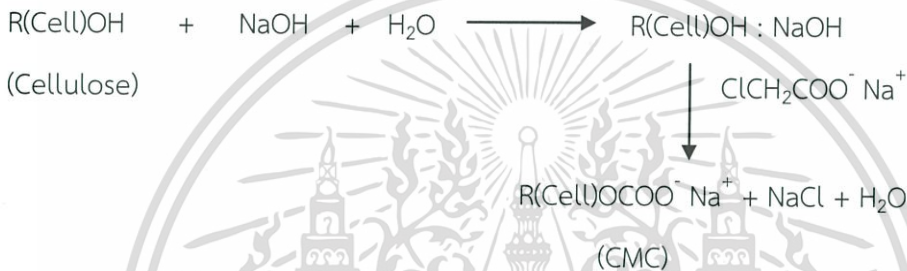
CMC เป็นสารที่ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ไม่เป็นอันตราย จึงนิยมใช้ในอุตสาหกรรมอาหารและยา สมบัติอื่น ๆ มีดังนี้ ดูดความชื้นคงตัวในช่วงความเป็นกรด-ด่าง 2-10 น้ำหนักโมเลกุลประมาณ 2,100 – 500,000 เมื่อละลายน้ำจะได้สารแขวนลอย มีลักษณะข้นเหลว ไม่สามารถละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ แต่สามารถละลายในตัวทำละลายผสมระหว่างน้ำกับตัวทำละลายอินทรีย์ที่ละลายน้ำ เช่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอทานอล หรือ อะซีโตน ความเป็นกรด-ด่าง ประมาณ 6.5–8.0 เมื่อนำ CMC 1 ส่วนละลายน้ำ 100 ส่วน จะได้สารละลายที่มีความหนืด 5-6,000 เซ็นติพอยส์ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับค่า average chain length of macromolecule (n) อุณหภูมิ ความเป็นกรด-ด่าง สมบัติในการละลายขึ้นอยู่กับองค์ประกอบแทนที่ กล่าวคือ CMC ที่มีองค์ประกอบแทนที่ต่ำกว่า 0.1 จะไม่ละลายน้ำและไม่ละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ ถ้าค่านี้สูงกว่า 0.2 จะละลายน้ำแต่ยังคงไม่ละลายในตัวทำละลายอินทรีย์

2.2.2 การผลิตอนุพันธ์ของเซลลูโลส (CMC)

การผลิต CMC ในอุตสาหกรรมอาศัยปฏิกิริยา etherification ระหว่างเซลลูโลสในสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์กับโซเดียมคลอโรอะซิเตต จากนั้นทำให้เป็นกลางด้วยกรด โดยมีโซเดียมคลอไรด์ และโซเดียมไกลโคเลต เป็นผลจากปฏิกิริยาข้างเคียงต้องใช้เมทานอลหรืออะซีโตนสกัดแยกเกลือ โซเดียมทั้งสองชนิดนี้เพื่อให้ได้ CMC ที่มีความบริสุทธิ์สูง ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นดังนี้



และมีปฏิกิริยาข้างเคียงดังนี้



2.2.3 สมบัติหลักของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส

1. เป็นสารละลายที่เพิ่มความหนืด และช่วยในการยึดเกาะ
2. ละลายได้ทั้งในน้ำเย็นและน้ำร้อน ไม่ละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ น้ำมัน และไขมัน สามารถละลายในสารละลายผสมระหว่างน้ำกับตัวทำละลายอินทรีย์ที่ละลายน้ำ เช่น เอทานอล หรือ อะซีโตน ได้ สารละลายที่มีความหนืด
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 และเครื่องดื่มแคลอรีต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.4 สมบัติทางกายภาพของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส

1. ความบริสุทธิ์ของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)	72-99.5	เปอร์เซ็นต์
2. ความชื้น (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)	7-8	เปอร์เซ็นต์
3. อุณหภูมิที่ทำให้เปลี่ยนเป็นสีน้ำตาล (brown temperature)	180-225	องศาเซลเซียส
4. อุณหภูมิที่ทำให้เป็นถ่าน (charring temperature)	210-250	องศาเซลเซียส
5. ความหนาแน่น (bulk density, กรัมต่อมิลลิลิตร)	0.65-0.75	
6. BOD (biological oxygen demand, กรัมต่อมิลลิลิตร)	10,000-18,000	

2.2.5 สมบัติการละลายของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส

การประยุกต์ใช้ CMC ส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปการละลายในน้ำ ดังนั้นขั้นตอนการละลายน้ำจึงถือว่าสำคัญที่สุด เนื่องจาก CMC มีแนวโน้มจะจับตัวเป็นก้อนที่เรียกว่า lump ในบางครั้งอาจละลาย CMC โดยใช้ตัวทำละลายอื่นๆ เช่น เอทานอล แล้วเติมน้ำภายหลังเพื่อหลีกเลี่ยงการเกิด lump สำหรับส่วนผสมอื่น ๆ ที่ต้องการผสมกับ CMC ให้ผสมกันขณะแห้งก่อนแล้วจึงละลายน้ำ ในการผสมแบบแห้งควรใช้ CMC น้อยกว่า 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และการพ่นไอน้ำลงในภาชนะขณะละลายจะช่วยให้ CMC ละลายได้ดีขึ้น

2.2.6 การนำไปใช้ประโยชน์

CMC เป็นสารที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เนื่องจากละลายน้ำได้มีความเป็นกลางคือไม่เป็นกรดต่าง ไม่เป็นอันตรายต่อผู้ใช้ ถูกย่อยสลายได้ด้วยจุลินทรีย์จึงไม่สะสมในแหล่งน้ำมีค่า BOD ต่ำ จึงไม่ก่อให้เกิดปัญหาน้ำเน่าเสีย ไม่เป็นอันตรายต่อสัตว์น้ำและพืชน้ำ

CMC ที่ผลิตจำหน่ายมีมากมายหลายชนิดคุณภาพ เช่น สำหรับอาหาร ยา เครื่องสำอาง อุตสาหกรรม ดังนั้นจึงเลือกใช้ให้เหมาะสมกับผลิตภัณฑ์ เช่น CMC ที่ใช้ผสมในอาหารต้องมีความบริสุทธิ์ไม่น้อยกว่า 99.5 เปอร์เซ็นต์ และมีตะกั่ว สารหนูในปริมาณต่ำมาก ความหนืดเป็นสมบัติสำคัญอีกประการหนึ่งที่ผู้ใช้นักคำนึงถึง ดังนั้น CMC ที่จำหน่ายมีความหนืดในช่วงต่าง ๆ กันคือ 10-6,000 กรัม เซนติพอยส์ (ในสารละลาย 1 เปอร์เซ็นต์)

ตารางที่ 2.4 ตัวอย่างการใช้ CMC ในอุตสาหกรรมประเภทต่าง ๆ ^[1]

ประเภทของอุตสาหกรรม	ประโยชน์
อุตสาหกรรมอาหาร	<ul style="list-style-type: none"> - ใช้เป็นสารป้องกันการตกผลึกในไอศกรีม น้ำเชื่อม น้ำตาลไอซิ่งส์ อาหารพวกที่ฉาบน้ำตาล - ใช้เป็นสารป้องกันการคอลลอยดีในมายองเนส - ใช้เป็นสารช่วยในการแขวนลอยในผลิตภัณฑ์อาหารจำพวกนม น้ำผลไม้ - ใช้เป็นสารทำให้ข้นในน้ำสลัด เครื่องดื่ม อาหารสัตว์ - ใช้ทำให้เป็นวุ้นในเยลลีขนมหวาน - ใช้เป็นสารทำให้ข้นฟูในไอศกรีม วิกปิ้งครีม
อุตสาหกรรมยา	<ul style="list-style-type: none"> - ใช้เคลือบเม็ดยาเพื่อให้คงตัว ใช้เป็นสารควบคุมการออกฤทธิ์ของยา เนื่องจาก CMC ไม่ละลายในสภาวะที่เป็นกรด เช่น ในกระเพาะอาหารแต่ละลายในสภาวะที่เป็นด่าง เช่น ในลำไส้ - ใช้เป็นสารทำให้คงตัวสำหรับยาที่มีส่วนผสมในลักษณะแขวนลอย
อุตสาหกรรมเครื่องสำอาง	<ul style="list-style-type: none"> - ใช้เป็นสารทำให้ข้น สารคงตัว สารช่วยการแขวนลอย สารก่อฟิล์มใน ผลิตภัณฑ์จำพวกครีม โลชั่น แชมพู เยลจัดแต่งทรงผม ยาสีฟัน
อุตสาหกรรมผงซักฟอก	<ul style="list-style-type: none"> - ใช้ผสมในผงซักฟอกเพื่อป้องกันไม่ให้สิ่งสกปรกที่หลุดจากผ้ากลับมาติดบนเนื้อผ้า
อุตสาหกรรมกาว	<ul style="list-style-type: none"> - ใช้เป็นสารทำให้ข้นในกาวสูตรน้ำ
อุตสาหกรรมสีและวาร์นิช	<ul style="list-style-type: none"> - ใช้เป็นสารทำให้ข้นและสารช่วยการแขวนลอยของผงสี - ใช้เป็นสารก่อฟิล์มในวาร์นิช
อุตสาหกรรมโพลีเมอร์	<ul style="list-style-type: none"> - ใช้เป็นสารป้องกันการคอลลอยด์ และสารช่วยทำให้สารเกิดการแขวนลอย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประเภทของอุตสาหกรรม	ประโยชน์
อุตสาหกรรมกระดาษ	- ใช้เป็นสารเคลือบกระดาษเพื่อให้เกิดการพิมพ์หมึกดีขึ้นไม่ดูดซึมน้ำมัน
อุตสาหกรรมน้ำมัน	- ใช้เป็นส่วนผสมในดินที่ใช้สำหรับหล่อลื่นหัวขุดเจาะน้ำมันเนื่องจาก CMC อุ่นน้ำได้ในปริมาณสูง ทำให้การแขวนลอยของดินคงตัว
อุตสาหกรรมเซรามิก	- ใช้เป็นสารช่วยการยึดหยุ่นในการทำผลิตภัณฑ์พอร์ซเลนที่ใช้ในงาน ทางไฟฟ้า
อุตสาหกรรมฆ่าแมลง	- ใช้เป็นสารช่วยการแขวนลอยในยาฆ่าแมลงสูตรน้ำ

2.3 ไฮโดรเจล (Hydrogel)^[4]

ไฮโดรเจลสามารถสังเคราะห์หรือเตรียมได้จากทางธรรมชาติ เช่น เจลาติน (gelatin) วุ้น (agar) โปรตีนที่ชอบน้ำ (hydrophilic protein) และเตรียมได้จากพอลิเมอร์สังเคราะห์ เช่น พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Poly (vinyl alcohol)) พอลิอะคริลิกแอซิด (Poly (acrylic acid)) พอลิอะคริลาไมด์ (Polyacrylamide)

2.3.1 ประเภทของไฮโดรเจล^[1] สามารถแบ่งออกเป็นหลายชนิดขึ้นอยู่กับเกณฑ์ที่ใช้ดังต่อไปนี้

2.3.1.1 แบ่งตามลักษณะการสังเคราะห์ (Fabrication of hydrogels)

ไฮโดรเจลแบ่งตามลักษณะการสังเคราะห์ได้เป็น 4 แบบ คือ

1. ไฮโดรเจลแบบแผ่นฟิล์ม (cast film) ไฮโดรเจลแบบนี้มักนำไปใช้เคลือบผิววัสดุต่าง ๆ โดยมีการเชื่อมต่อระหว่างสายโซ่ด้วยพันธะไฮโดรโฟบิก (hydrophobic bond) เพื่อป้องกันไม่ให้พอลิเมอร์ละลายในตัวกลางที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบ หรือในบางกรณีหลังจากเคลือบลงบนผิววัสดุ แล้วอาจจะทำการเชื่อมต่อระหว่างโมเลกุลด้วยพันธะโควาเลนต์ (covalently crosslinked) โครงสร้างของไฮโดรเจลชนิดนี้ประกอบด้วยทั้งส่วนที่ชอบน้ำและส่วนที่ไม่ชอบน้ำ ตัวอย่างไฮโดรเจลชนิดนี้ ได้แก่ พอลิ (2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาครีเลต) (Poly (2-hydroxyethylmethacrylate) ; PHEMA) ไฮโดรไลซ์พอลิอะคริโลไนไตรล์ (hydrolyzed Polyacrylonitrile) และพอลิ (เมทิลเมทาครีเลต-โค-เอ็น-ไวนิล-2-ไพโรลิโดน) (Poly (methyl methacrylate-co-N-vinyl-2-pyrrolidone)) เป็นต้น

2. ไฮโดรเจลแบบโครงร่างตาข่าย (crosslinked network) ไฮโดรเจลแบบนี้เตรียมโดยฉีดสารผสมของมอนอเมอร์ (monomer) ตัวริเริ่ม (initiator) และตัวเชื่อมต่อ (crosslinking agent) หรือในบางกรณีอาจจะผสม ตัวทำละลายลงไปด้วยเข้าไปในแม่พิมพ์ จากนั้นทำให้เกิดพอลิเมอร์เชนในแม่พิมพ์นั้น ตัวอย่างเช่น พอลิ (2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาครีเลต) พอลิ (2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาครีเลต-โค-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอ็น-ไวนิล-2-ไพโรลิโดน) พอลิอะครีลาไมด์ (Polyacrylamide) และพอลิ (ไวนิลแอลกอฮอล์) (Poly (vinyl alcohol)) เป็นต้น

3. ไฮโดรเจลแบบกราฟท์บนพื้นผิว (surface grafted polymer) ไฮโดรเจลแบบนี้เตรียมโดยการนำพอลิเมอร์ที่ชอบน้ำไปทำให้เกิดพันธะกับพอลิเมอร์อื่นที่ไม่ละลายน้ำ ไฮโดรเจลที่ได้ไม่ละลายน้ำ วิธีการนี้สามารถใช้ปรับปรุงสมบัติเชิงกลของไฮโดรเจลให้ดีขึ้นได้ โดยนำไฮโดรเจลไปทำให้เกิดพันธะกับพอลิเมอร์ ที่มีคุณสมบัติเชิงกลที่ดี เช่น กราฟท์โคพอลิเมอร์ของซัลโฟนิลยูเรียพอลิเมอร์กับพอลิ (เอ็น-ไวนิล-2-ไพโรลิโดน) (Sulfonylurea polymer and poly (N-vinyl-2-pyrrolidone) graft copolymer) และกราฟท์โคพอลิเมอร์ของเจลาติน (gelatin) พอลิ (2-ไฮดรอกซีเอธิลเมธาครีเลต) และพอลิ (บิวทิลอะครีเลต) (Poly (butyl acrylate)) เป็นต้น

4. ไฮโดรเจลแบบอินเตอร์เพเนตริงพอลิเมอร์เน็ตเวิร์ก (interpenetrating polymer network ; IPN) ไฮโดรเจลชนิดนี้เป็นการแทรกพอลิเมอร์สองชนิดที่มีโครงสร้างเป็นแบบโครงร่างตาข่ายเข้าด้วยกัน โดยโครงร่างทั้งสองไม่สามารถแยกออกจากกันได้และมีความแข็งแรงมาก วิธีนี้เป็น การปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลของไฮโดรเจลให้ดีขึ้นได้อีกวิธีหนึ่ง ตัวอย่างเช่น พอลิ (ไวนิลแอลกอฮอล์)/พอลิ (อะครีลิกเอซิด) อินเตอร์เพเนตริงพอลิเมอร์เน็ตเวิร์ก (Poly (vinyl alcohol)/Poly (acrylic acid) ; IPN) เป็นต้น

2.3.1.2 แบ่งตามขนาดของรูพรุน

ไฮโดรเจลสามารถแบ่งตามขนาดของรูพรุน ได้เป็น 2 ชนิด คือ

1. ไฮโดรเจลที่มีรูพรุนขนาดเล็ก (microporous hydrogel) เป็นไฮโดรเจลที่สังเคราะห์ในตัวทำละลายที่ดี โดยมอนอเมอร์ตัวเชื่อมต่อนและพอลิเมอร์สามารถละลายในตัวทำละลายได้ เจลที่ได้มีลักษณะใส ไฮโดรเจลชนิดนี้อาจเรียกว่า ไฮโดรเจลแบบเนื้อเดียว (homogeneous hydrogel) รูพรุนมีขนาดเล็ก เช่น พอลิ (2-ไฮดรอกซีเอธิลเมธาครีเลต) ที่เตรียมโดยมีอัตราส่วน PHEMA ต่อ H₂O เท่ากับ 2 ต่อ 1 และพอลิ (เอ็น-ไวนิล-2-ไพโรลิโดน) ที่เตรียมใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย เป็นต้น

2. ไฮโดรเจลที่มีรูพรุนขนาดใหญ่ (macroporous hydrogel) ในขั้นตอนการสังเคราะห์ไฮโดรเจลชนิดนี้ พอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นไม่ละลายน้ำในตัวทำละลายที่ใช้สำหรับพอลิเมอร์ไรเซชันและตกตะกอนออกมา ไฮโดรเจลที่ได้มีรูพรุนขนาดใหญ่ มีสีขาวขุ่น หรือเรียกได้ว่าเป็นไฮโดรเจลแบบเนื้อผสม (Heterogeneous hydrogel) ตัวอย่างเช่น พอลิ (2-ไฮดรอกซีเอธิลเมธาครีเลต) ที่เตรียมโดยมีอัตราส่วน PHEMA ต่อ H₂O เท่ากับ 1.25 ต่อ 1 และพอลิ (เมธิลเมธาครีเลต-โค-เอ็น-ไวนิล-2-ไพโรลิโดน) ที่เตรียมโดยใช้เฮกเซนเป็นตัวทำละลาย เป็นต้น

2.3.1.3 แบ่งตามชนิดการเชื่อมโยงของโครงสร้าง

ไฮโดรเจลแบ่งตามการเชื่อมโยงภายในโครงสร้างของพอลิเมอร์ได้เป็น 2 ชนิด คือ

1. ไฮโดรเจลทางเคมี (chemical hydrogels) มีการเชื่อมต่อนระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ด้วยพันธะโควาเลนต์ ซึ่งเป็นการเชื่อมโยงที่แข็งแรงมาก ในหนึ่งโมเลกุลของมอนอเมอร์แบบนี้มักจะมีหมู่ฟังก์ชันหลายตำแหน่ง (multifunctional molecule) ที่สามารถเกิดการเชื่อมต่อได้ ไฮโดรเจลที่ได้จะเกิดขบวนการไม่ย้อนกลับทางความร้อน (heat-irreversible) คือไม่สามารถทำให้หลอมได้อีก หากมีการให้ความร้อนจนถึงจุดที่พันธะแตกออกจะเกิดการสลายตัว สมบัติจะเปลี่ยนไปจากเดิม ไฮโดรเจลชนิดนี้อาจเรียกอีกอย่างว่า ไฮโดรเจลชนิดเทอร์โมเซต เนื่องจากไฮโดรเจลประเภทนี้มีความคงทน ไม่หลอมเหลวและไม่ละลายในตัวทำละลาย ทำให้มีข้อจำกัดในการขึ้นรูป เช่น พอลิ (ไดเมธาครีลาไมด์-โค-เอธิลีนไดเมธาครีเลต) (Poly (dimethacrylamide-co-ethylene

dimethacrylate)) และพอลิ (2-ไฮดรอกซีเอซิลเมธาครีเลต) ที่มีการเชื่อมต่อระหว่างโมเลกุลด้วยเอธิลีนไกลคอลไดเมธาครีเลต เป็นต้น

2. ไฮโดรเจลทางกายภาพ (physical hydrogel) การเชื่อมต่อระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์เกิดจากแรงแวนเดอร์วาลส์ พันธะไฮโดรเจน แรงระหว่างประจุ หรืออันตรกิริยาไฮโดรโฟบิก (hydrophobic interaction) ซึ่งมีความแข็งแรงน้อยกว่าพันธะโควาเลนต์ ไฮโดรเจลประเภทนี้มีการผันกลับทางความร้อนได้ (heat-reversible) หรือเรียกว่า ไฮโดรเจลชนิดเทอร์โมพลาสติก สามารถหลอมตัวเมื่อให้ความร้อนและแข็งตัวเมื่อทำให้เย็นตัวลง โดยที่การให้ความร้อนไม่มีผลกระทบต่อสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของไฮโดรเจล นอกจากนี้ยังสามารถละลายได้ในตัวทำละลายบางชนิด ทำให้สามารถขึ้นรูปได้ง่ายและสามารถผสมสารอื่นลงในไฮโดรเจลได้ เช่น สารเติมแต่ง สารต้านทานจุลินทรีย์ และยา เป็นต้น ตัวอย่างของไฮโดรเจลประเภทนี้ ได้แก่ พอลิ (อะครีลาไมด์-โค-เมธิล-เมธาครีเลต-โค-ไวนิลเอมีน) (Poly (acrylamide-co-methyl methacrylate-co-vinyl amine)) และพอลิ (เมธิลเมธาครีเลต-โค-เอิน-ไวนิล-2-ไพโรลิโดน)

2.3.2 พันธะทางเคมีของไฮโดรเจล^[4] สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ

ก. พันธะภายในโมเลกุลของพอลิเมอร์ (intramolecular interaction) เนื่องจากการเชื่อมต่อกันของมอนอเมอร์ที่มีองค์ประกอบหลักเป็นคาร์บอน (C) จึงทำให้มีพันธะโควาเลนต์ เพื่อยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของคาร์บอน

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

2.3.3 พันธะเชื่อมโยงของไฮโดรเจล มี 2 ลักษณะ คือ

ก. พันธะเชื่อมโยงทางกายภาพ (physical crosslinked) โดยจะมีการทำให้เกิดเป็นโครงร่างแหสามมิติด้วยพันธะไฮโดรเจนหรือแรงทางไฟฟ้าสถิตย์ โดยจะมีการอยู่รวมกันเป็นกลุ่มคล้ายปมของเชือก ไฮโดรเจลชนิดนี้สามารถเตรียมได้จากเทคนิคที่เรียกว่า freezing and thawing สมบัติของไฮโดรเจลที่เตรียมได้จะมีการหลอมเหลวที่อุณหภูมิไม่สูงประมาณ 55 องศาเซลเซียส และเรียกไฮโดรเจลที่มีพันธะเชื่อมโยงในลักษณะนี้ว่า physical hydrogel หรือ pseudogel

ข. พันธะเชื่อมโยงทางเคมี (chemical crosslinked) โดยจะมีการให้เกิดพันธะเชื่อมโยงที่เป็นพันธะโควาเลนต์ หรือเป็นพันธะเคมีอื่น ๆ โดยมีการใช้สารเชื่อมโยงเป็นสารเคมี เช่น สารประกอบพวกแอลดีไฮด์ และมีการใช้แสงหรือความร้อนในการเชื่อมโยง เช่น รังสีเอกซ์ รังสีแกมมา ซึ่งการเชื่อมโยงโดยวิธีนี้จะได้พันธะเชื่อมโยงเป็นพันธะโควาเลนต์ชนิดคาร์บอน-คาร์บอน (C-C bond) ที่มีความแข็งแรงสูง

2.3.4 การเตรียมไฮโดรเจล

ไฮโดรเจลสามารถเตรียมได้จากสารละลายพอลิเมอร์ที่มีสมบัติการดูดน้ำ หรือสามารถละลายในน้ำได้ เกล่งในแม่พิมพ์ โดยส่วนมากจะใช้เทคนิคการเทหล่อ (casting process) ในการเตรียม จากนั้นทำการเชื่อมโยงไฮโดรเจล โดยถ้าใช้เทคนิคการฉายรังสีจะต้องทำการฉายรังสีเสียก่อนจึงค่อยนำไปอบให้แห้ง ส่วนถ้าใช้สารเคมีในการเชื่อมโยงจะต้องนำสารละลายในแม่พิมพ์ไปอบให้แห้งเสียก่อนจึงค่อยทำการเชื่อมโยง

2.3.5 สมบัติของไฮโดรเจลและการนำไปใช้งาน

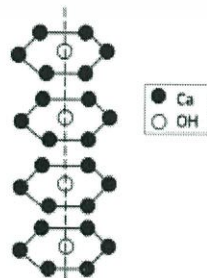
ไฮโดรเจลมีความสามารถในการดูดซับน้ำหรือสารละลายบางชนิด เช่น สารละลายอิเล็กโทรไลต์ และสารละลายทางชีวภาพได้มากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ โดยเมื่อหลังจากดูดซับจะมีสมบัติเชิงกลที่ดี ไม่เกิดการละลายและสลายตัว และไม่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างซึ่งสมบัตินี้จะมีความคล้ายคลึงกันในอวัยวะบางอย่างของร่างกายมนุษย์ เช่น เส้นเอ็น กล้ามเนื้อ ลำไส้เล็ก เซลล์ห่อหุ้มอวัยวะภายใน เป็นต้น และจากสมบัติการเข้ากันได้ดีกับสารทางชีวภาพ เช่น เลือด น้ำเหลือง เนื้อเยื่อ เซลล์ผิวหนัง จึงสามารถนำมาใช้ทำเลนส์สัมผัส ใช้ในการเคลือบอวัยวะเทียมเมื่อนำไปใช้ในในร่างกายมนุษย์ สามารถใช้เป็นวัสดุปิดแผลที่รักษาหน้าแผลให้มีความเรียบ และไม่ทำลายเซลล์ผิวใหม่เมื่อมีการลอกออก และสามารถใช้งานด้านต่าง ๆ ที่ไฮโดรเจลมีความเหมาะสมและมีสมบัติที่ครอบคลุมการใช้งาน

2.4 ไฮดรอกซีอะพาไทต์ (Hydroxyapatite ; HAp)

สารไฮดรอกซีอะพาไทต์^[13] จัดเป็น bioactive material ซึ่งมีการผลิตออกมาจำหน่ายในตลาดโลกสูงถึงปีละ 24 ล้านล้านดอลลาร์ ประมาณ 55 เปอร์เซ็นต์ของมูลค่านี้เป็นการนำไปใช้ด้านฟันและกระดูก เช่น ทำฟันเทียม ในแต่ละปีประเทศไทยต้องนำเข้าไฮดรอกซีอะพาไทต์ซึ่งมีราคาค่อนข้างสูง เนื่องจากไฮดรอกซีอะพาไทต์เป็นสารประกอบอนินทรีย์ที่เป็นองค์ประกอบของกระดูก และสามารถเกิดพันธะเคมีกับกระดูกได้ ด้วยเหตุนี้จึงได้มีการศึกษาการใช้ไฮดรอกซีอะพาไทต์และเกลือแคลเซียมฟอสเฟตในทางการแพทย์อย่างกว้างขวาง เช่น การใช้เป็นวัสดุด้านทันตกรรมและการใช้แทนกระดูก โดยถ้ามีการพัฒนาการผลิตไฮดรอกซีอะพาไทต์จากวัสดุธรรมชาติที่เหลือได้ก็จะสามารถพัฒนาให้เกิดประโยชน์ที่ยั่งยืนต่อไป

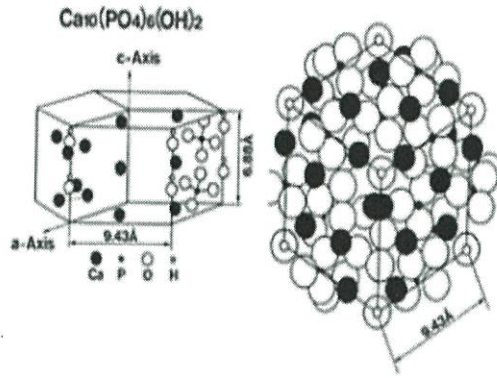
2.4.1 โครงสร้างไฮดรอกซีอะพาไทต์

ไฮดรอกซีอะพาไทต์มีสูตรโมเลกุลเป็น $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ ประกอบด้วย Ca^{2+} , PO_4^{3-} และ OH^- มีอัตราส่วนต่อโมลของ Ca:P เท่ากับ 1.67 โครงสร้างแลตทิซของผลึกอะพาไทต์ แสดงดังรูปที่ 2.2 และ 2.3 โดยมี Ca^{2+} บรรจุอยู่ในผลึกรูปร่างแท่ง และมี OH^- ล้อมรอบอยู่ด้านข้าง โครงสร้างของแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์แสดงตำแหน่งที่แน่นอนในผลึก ซึ่งถูกกำหนดจากแร่ธาตุแต่ละธาตุโดย Beever และ Malntype ซึ่งต่อมาภายหลังได้มีการกำหนดตำแหน่งของอะตอมขึ้นมาใหม่จากการสังเคราะห์วัสดุไฮดรอกซีอะพาไทต์ โดยโครงสร้างแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์จะมีโครงสร้างแบบเฮกซะโกนอลมีกลุ่มปริภูมิ (space group) $P6_3/m$ มีค่า $a = b = 9.43$ และ $c = 6.88$ angstrom และมุม $\alpha = \beta = 90^\circ$, $\gamma = 120^\circ$



รูปที่ 2.2 โครงสร้างแลตทิซของผลึกอะพาไทต์อย่างง่าย^[14]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 โครงสร้างของไฮดรอกซีอะพาไทต์^[14]

2.4.2 องค์ประกอบของไฮดรอกซีอะพาไทต์

ไฮดรอกซีอะพาไทต์บริสุทธิ์มีองค์ประกอบทางทฤษฎีคือ มี Ca อยู่ 39.68 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และ P 18.45 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และมีอัตราส่วนระหว่าง Ca/P คือ 2.151 โดยน้ำหนัก หรือ 1.67 โดยโมลโดยเชิงพาณิชย์อัตราส่วนโดยโมลระหว่าง Ca/P ของวัสดุไฮดรอกซีอะพาไทต์จะอยู่ในช่วง 1.57-1.70^[15] และคุณสมบัติด้านต่าง ๆ ของไฮดรอกซีอะพาไทต์สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.5 ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่เหมาะสมต่อการทำวัสดุทดแทนกระดูก การใช้ประโยชน์ในทางการแพทย์ โดยทั่วไปลักษณะการนำวัสดุทางการแพทย์ไปใช้งานนั้นจะมีอยู่ 2 ลักษณะคือ

1) วัสดุการแพทย์ที่ใส่เข้าไปในร่างกายจะทำหน้าที่ทดแทนอวัยวะนั้น ๆ โดยไม่จำเป็นต้องมีส่วนเกี่ยวข้องกับระบบเนื้อเยื่อส่วนอื่น ๆ ของร่างกาย

2) วัสดุการแพทย์ที่ใส่เข้าไปในร่างกายจะต้องมีส่วนร่วมหรือมีหน้าที่สัมพันธ์กับอวัยวะที่อยู่ในร่างกายแต่ต้องไม่เป็นพิษต่อเนื้อเยื่อในร่างกาย ซึ่งคุณสมบัติเฉพาะของสารไฮดรอกซีอะพาไทต์นี้สามารถนำไปใช้ในร่างกายเพื่อทำให้เกิดการสร้างพันธะระหว่างวัสดุหรืออุปกรณ์การแพทย์กับเซลล์กระดูกคนไข้ได้ดี สารไฮดรอกซีอะพาไทต์แบบผงสามารถใช้เคลือบลงบนข้อสะโพกเทียมในส่วนที่เป็นแกนโลหะเพื่อให้โลหะทนทานต่อการกัดกร่อนจากของเหลวภายในร่างกายที่โดยปกติจะมีสภาพเป็นกรดอ่อน ๆ อยู่แล้วและหากเกิดการเจ็บป่วยสภาพภายในร่างกายก็จะมีความเป็นกรดยิ่งขึ้น ดังนั้นการใช้สารไฮดรอกซีอะพาไทต์เคลือบบนผิวข้อสะโพกเทียมจะทำให้อุปกรณ์มีความทนทานมากยิ่งขึ้นและยังช่วยสร้างพันธะระหว่างข้อสะโพกเทียมกับกระดูกของผู้ป่วยด้วย

ตารางที่ 2.5 คุณสมบัติที่เหมาะสมต่อการทำวัสดุทดแทนกระดูก^[16]

คุณสมบัติ	ข้อมูลจากการทดลอง
สูตรเคมี	$\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$
อัตราส่วนระหว่าง Ca/P	1.67
โครงสร้างผลึก	เฮกซะโกนอล
กลุ่มปริภูมิ(Space group)	$P6_3/m$
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
ความแกร่งต้านทานการแตกหัก ($\text{MPa m}^{1/2}$)	0.7-1.2
ค่าความแข็ง Hardness (HV)	600
อุณหภูมิของการสลายตัว ($^{\circ}\text{C}$)	>1000
จุดหลอมเหลว ($^{\circ}\text{C}$)	1614
ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก	7.40-10.47
สัมประสิทธิ์การนำความร้อน (W/cm K)	0.013
ความเข้ากันกับเนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิต (biocompatibility)	สูง
ความเข้ากันกับสิ่งมีชีวิต (bioactivity)	สูง
การย่อยสลายทางชีวภาพ (biodegradation)	ต่ำ
ความเข้ากันได้ของเซลล์	สูง
การสร้างกระดูกขึ้นใหม่	-
การสร้างกระดูกแทนที่กระดูกปลูก	สูง

2.5 กระบวนการทำแห้งแบบแช่แข็ง (Freeze-Drying)^[17]

2.5.1 หลักการและขั้นตอนการทำแห้งแบบแช่แข็ง

freeze drying คือกระบวนการที่ให้สารที่เปียกแห้งได้โดยทำให้สารนั้นเย็นจนแข็งตัว และระเหิดเอาน้ำแข็งออกไป การทำให้แห้งแบบ freeze-drying นี้รู้จักกันมานานแล้ว แต่เพราะต้องเสียค่าใช้จ่ายสูงเนื่องจากเครื่องมือราคาแพง เมื่อต้องใช้ระบบทำความเย็นจัดและเครื่องปั๊มที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุดในการดูแลให้เป็นสุญญากาศ และการใช้ที่ต้องใช้เทคนิคเฉพาะ รวมทั้งการดูแลรักษา จึงไม่ค่อยเป็นที่นิยมใช้ในระบบผลิตทั่ว ๆ ไป นอกจากผลิตภัณฑ์บางอย่าง เช่น biological substances หรือผลิตภัณฑ์ยาบางชนิด ซึ่งผลิตภัณฑ์ประเภทนี้ไม่สามารถทนต่อความร้อนสูงที่ใช้กัน ในวิธีทำแห้งแบบทั่วๆไปได้ ผลิตภัณฑ์ที่ได้โดยวิธีนี้นั้นมีคุณสมบัติของสารที่มีการเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุด สามารถคงตัวอยู่ได้นาน ณ อุณหภูมิห้อง และข้อดีที่สำคัญคือสามารถนำกลับมาละลายน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(reconstitute) ได้ง่ายมาก ถ้าจะอธิบายให้ละเอียดมากขึ้น freeze drying ก็คือ การรักษาสภาพของสารที่เปียกหรือสารละลายในน้ำโดยผลิตภัณฑ์จะถูกทำให้เย็นจนแข็ง และอยู่ในบรรยากาศที่มีความชื้นต่ำ เกิดสภาวะน้ำแข็งระเหิด คือการเปลี่ยนจากสภาวะของแข็งเป็นสภาวะก๊าซ โดยไม่มีการละลายและหลีกเลี่ยงการเปลี่ยนแปลงทางเคมีกายภาพ และเอนไซม์ มักจะรวมกับการแห้งโดยวิธีอื่นมีการทำให้มีความชื้นต่ำ และการดูดบรรยากาศให้เป็นสุญญากาศ

Freeze – Drying แบ่งเป็น 3 ขบวนการ คือ

1. Pre-freezing เป็นการลดอุณหภูมิของสารเพื่อทำให้เกิดก้อนผลึกของน้ำก่อนทำ primary drying จะทำให้สารแข็งตัวใน freeze-dryer (internal freezing) หรืออาจให้แข็งตัวในภาชนะเฉพาะ (external freezing) ซึ่งความหนาของสารที่เหมาะสมเพื่อให้ freezing time และ drying cycle สั้น คือประมาณ 10 มิลลิเมตร หรือไม่ควรเกิน 15 มิลลิเมตร การละลายที่เป็นน้ำ freezing point คือ 0 องศาเซลเซียส อาจจะมีปัญหาถ้าการละลายนั้น มีส่วนประกอบที่เป็นน้ำตาลหรือเกลือ sodium chloride อุณหภูมิของ freezing point จะต้องต่ำลงไปอีกจาก 0 องศาเซลเซียส การที่ต้องทำให้วัตถุแข็งตัวก็เพื่อที่จะยึดทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิด และปริมาณของแต่ละ component ในส่วนผสมของผลิตภัณฑ์นั้น แต่โดยทั่ว ๆ ไป การลดอุณหภูมิที่ 40 องศาเซลเซียส ผลิตภัณฑ์แทบทุกชนิดจะแข็งตัวอย่างสมบูรณ์ภายใน 2-3 ชั่วโมง

2. Primary drying เป็นสภาวะระเหิด หรือการ 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 ขณะที่อุณหภูมิไปถึงขีด ถึงแม้กระบวนการ primary drying จะเสร็จสมบูรณ์แล้ว ก็มักจะให้เวลาของ drying ต่อไปอีก 30 นาที หรือ 1 ชั่วโมง เพื่อให้แน่ใจว่าไม่มีน้ำหลงเหลืออยู่ สิ่งที่แสดงว่า primary drying ยังไม่เสร็จคือ
- ภาชนะบรรจุเมื่อนำออกจากตู้แล้ว สัมผัสดูรู้สึก “เย็น”
- สารที่แห้งจะหดตัวหรือละลายเป็นน้ำ

3. Secondary drying เป็นขบวนการดูดความชื้นที่หลงเหลือจาก Primary drying เพื่อลดปริมาณ ความชื้นจาก Primary freeze-drying เพื่อเพิ่มความคงตัวของสารที่มักจะมี ความชื้นจาก Primary freeze-drying หลงเหลือ

2.5.2 เครื่องมือและระบบที่ใช้ในขบวนการ Freeze-Drying

2.5.2.1 Low temperature condenser

condenser จะทำหน้าที่ดักจับไอน้ำในระบบไอน้ำที่อยู่เหนือผิวผลิตภัณฑ์ น้ำแข็งจะเคลื่อนตัวไปสู่พื้นที่ความดันต่ำ (low pressure area) คือบริเวณรอบ ๆ ผิว condenser (อุณหภูมิต่ำกว่า) ส่วนใหญ่จะอยู่ในช่วง -40 องศาเซลเซียส ถึง -60 องศาเซลเซียส แล้วแต่ชนิดของเครื่องมือที่ใช้ ซึ่งอุณหภูมิช่วงนี้จะมีประสิทธิภาพเพียงพอในการทำ freeze-drying ซึ่งเครื่องมือที่ให้ condenser temperature ต่ำกว่า ย่อมมีประสิทธิภาพมากกว่า ทั้งนี้เพราะว่าเมื่ออุณหภูมิต่ำลง vapor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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) เป็นสิ่งที่จำเป็นจะทำให้เกิดการระเหิดของแข็งในผลิตภัณฑ์และเป็นการกำจัดอากาศหรือ non-condensable gas ออกไปลดแรงเสียดทานในระบบ ช่วยให้การเคลื่อนที่ของไอน้ำเกิดได้ดี และยังเป็นการป้องกันการเกิด oxidation ระหว่างกระบวนการและช่วงการเก็บรักษาด้วย โดยปกติ high vacuum ประมาณ 5-50 มิลลิทอร์ (0.005-0.05 มิลลิเมตรปรอท) จะมีประสิทธิภาพสูงสุด แต่ในเครื่องมือ freeze dryer ทั่ว ๆ ไป สามารถลดความดันได้ประมาณ 100-120 มิลลิทอร์หรือต่ำกว่า ซึ่งนับว่าเพียงพอ (1 มิลลิทอร์ หรือ ไมครอน = 10^{-3} ทอร์ = 10^{-3} มิลลิเมตรปรอท)

2.5.2.3 Controlled heat to product

การให้ความร้อนกับผลิตภัณฑ์ก็เพื่อที่จะช่วยให้การระเหิดเกิดได้อย่างสม่ำเสมอ แต่การเพิ่มอุณหภูมิต้องควบคุมให้เพียงพอที่จะผลักดันให้ไอน้ำถูกกำจัดออกไปได้โดยที่ไม่เกิดการหลอมละลายกลับ (melt back) ของน้ำแข็งในผลิตภัณฑ์ ซึ่งในทางปฏิบัติโดยทั่วไปเราจะควบคุมอุณหภูมิของน้ำแข็งในผลิตภัณฑ์ขณะทำ freeze-drying ให้ต่ำกว่าจุดที่ผลิตภัณฑ์จะเกิดการหลอมละลายกลับเล็กน้อย หลังจากน้ำแข็งในผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่ถูกกำจัดออกไปเกือบหมดแล้ว จึงค่อยเริ่มเพิ่มความร้อนให้ผลิตภัณฑ์ คือปรับอุณหภูมิให้ค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจนถึง 20 องศาเซลเซียส หรือ 30 องศาเซลเซียส แล้วแต่ผลิตภัณฑ์แต่ละตัว

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.6.1 Yu-Qing Zhang (2002) ได้มีการนำเอาซิลิโคนโปรตีนชนิดที่ละลายน้ำได้เรียกว่า เซริซิน มาประยุกต์ใช้เป็นวัสดุทางชีวภาพ (biomaterials) โดยมีสมบัติต้านการเกิดออกซิเดชัน (oxidation) ต้านทานและยับยั้งแบคทีเรียบางชนิด (antibacterial) ทนต่อรังสีอัลตราไวโอเล็ต (UV) และยังสามารถดูดความชื้นได้ดี (moisturizer) นอกจากนั้นเซริซินสามารถเกิดการเชื่อม เกิดพอลิเมอร์รวมและเกิดการผสมกับวัสดุอื่นได้^[18]

2.6.2 สาระ สาโรวาท และรัตนวรรณ มกรพันธุ์ (2546) ได้มีการศึกษาว่าเส้นไหมดิบประกอบไปด้วยโปรตีน 2 ชนิดคือ เซริซินและไฟโบรอิน โดยไฟโบรอินคือโปรตีนส่วนที่เป็นเส้นใย ติดกันด้วยเซริซินที่เป็นกาวไหมเซริซินได้มาจากกระบวนการล้างไหมก่อนฟอกย้อม สามารถละลายได้ดีในน้ำอุ่นจึงสามารถแยกออกได้ง่าย จากการทดสอบด้วยการกระเจิงรังสีเอ็กซ์พบว่าโครงสร้างอสังฐานต่างจากเส้นไหมดิบ โครงสร้างทางเคมีของเซริซินประกอบไปด้วยกลุ่มของไฮดรอกซิลที่ทราบจาก broad band ของการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดในช่วง 3200-3600 หนึ่งต่อเซนติเมตร คุณสมบัติสำคัญของเซริซิน คือกลุ่มของไฮดรอกซิลที่ชอบน้ำจึงทำให้เซริซินสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในทางอุตสาหกรรมหลายอย่าง เช่น เครื่องสำอาง อาหาร และวัสดุทางการแพทย์ เป็นต้น^[19]

2.6.3 Tipawan Sirtienthong and Pornanong Aramwit (2015) ได้มีการศึกษาเกี่ยวกับ น้ำหนักโมเลกุลของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่ส่งผลต่อสมบัติต่าง ๆ ของไฮโดรเจลโดยทำการผสมกับ โปรตีนเซรีซิน พบว่าน้ำหนักโมเลกุลของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสไม่ส่งผลต่อขนาดของรูพรุนของ ไฮโดรเจลที่ได้ แต่น้ำหนักโมเลกุลที่เพิ่มขึ้นของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสส่งผลให้สมบัติการบวม น้ำ สูงขึ้นและมีสมบัติการย่อยสลายทางชีวภาพลดลง^[7]

2.6.4 Padamwar M N and Pawar A P (2004) ได้มีการศึกษาเกี่ยวกับสมบัติต่าง ๆ ของ โปรตีน เซรีซินจากไหม พบว่าเซรีซินสามารถเกิดเป็นเจลได้เองเมื่อให้ความร้อนแล้วปล่อยให้เย็นที่ อุณหภูมิห้อง เซรีซินมีค่าไอโซอิเล็กทริก ที่ไอโซเท่ากับ 4.0 เมื่อทำการสกัดเซรีซินด้วยน้ำร้อนพบว่า จะได้น้ำหนักโมเลกุลประมาณ 24000 และน้ำหนักโมเลกุลของเซรีซินขึ้นกับเทคนิคการสกัด^[3]

2.6.5 Jiang Liuyun, Li Yubao and Xiong Chengdong (2009) ได้ศึกษาสมบัติทางเคมี กายภาพและสมบัติทางชีวภาพ ของวัสดุเชิงประกอบเนื้อเยื่อโครงสร้างที่ได้จากสารผสมระหว่างนา โนไฮดรอกซีอะปาไทต์ ไคโตซาน และคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส โดยวิธีทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง พบว่า มีการเชื่อมโยงแบบใช้ประจุระหว่างไคโตซานและคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส โดยมีนาโนไฮดรอกซีอะ- ปาไทต์เป็นสารเชื่อมโยง ทำให้วัสดุที่ได้มีโครงสร้างที่แข็งแรงขึ้นสามารถรับแรงกดอัดได้ดีและไม่มี ความเป็นพิษต่อร่างกาย จึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นกระดูกเทียมซึ่งเป็นวัสดุทางการแพทย์ได้^[20]

2.6.6 Rajput S.K. and Mukesh Kumar (2015) ได้ศึกษาเกี่ยวกับการใช้งานเซรีซินซึ่ง พบว่าเซรีซินถูกใช้งานอย่างหลากหลายได้แก่ ด้านทางการแพทย์เช่น วัสดุปิดแผล, คอนแทคเลนส์ ด้านอาหารเช่น ผลิตภัณฑ์อาหารเสริม เป็นส่วนประกอบในเครื่องสำอาง และสามารถใช้เป็นสาร ต่อต้านและยับยั้งแบคทีเรีย^[5]

2.6.7 Sayeda M. และคณะ (2013) ศึกษาการเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างคาร์บอกซีเมทิล เซลลูโลส (CMC) และโซเดียมอะซิเนต (SA) โดยเปรียบเทียบผลปริมาณการฉายรังสีแกมมาที่สมบัติ ทางกายภาพของพอลิเมอร์ผสม CMC ต่อ SA ได้แก่ ปริมาณค่าสัดส่วนเจล (เปอร์เซ็นต์) และการบวม ตัว (เปอร์เซ็นต์) พบว่าปริมาณค่าสัดส่วนเจลจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณการฉายรังสีและการบวมตัว ของพอลิเมอร์ผสมจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณโซเดียมอะซิเนต สมบัติเชิงกลและเสถียรภาพทางความ ร้อนจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสและเพิ่มปริมาณการฉายรังสี^[21]

2.6.8 ทศยาญจน์ จันทร์ส่องแสง (2555) ศึกษาการเตรียมไฮโดรเจลจากคาร์บอกซีเมทิล เซลลูโลสและไฟโบรอินจากไหมไทย โดยใช้เอ็น,เอ็น-เมทิลีนบิสอะคริลาไมด์เป็นสารก่อก้อนเชื่อมโยง และใช้แอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟตเป็นสารริเริ่มปฏิกิริยา พบว่าภายใต้สภาวะการทดลองเดียวกันฟิล์ม ผสมที่มีคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสน้ำหนักโมเลกุลสูงดูดซับน้ำได้ดีกว่าฟิล์มผสมคาร์บอกซีเมทิล เซลลูโลสที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำเพราะมีหมู่คาร์บอกซีเลตจำนวนมากขึ้น สารก่อก้อนเชื่อมโยงและ สารริเริ่มปฏิกิริยาที่เพิ่มขึ้นช่วยปรับปรุงความเสถียรของฟิล์ม แสดงว่าจำนวนพันธะเชื่อมโยงมากและ ความยาวของพอลิเมอร์เชื่อมขวางมีผลต่อรูปร่างที่เสถียรของฟิล์มหลังแช่น้ำ แต่การดูดซับน้ำที่สมดุล ลดลง เนื่องจากพันธะเชื่อมโยงมากและลดขนาดช่องว่างที่จับโมเลกุลน้ำ อิทธิพลความเป็นกรด-ด่าง ของสารละลาย พบว่า ฟิล์มดูดซับน้ำที่สมดุลได้สูงกว่า pH 7 และการดูดซับน้ำที่สมดุลต่ำสุดที่ pH 14 ฟิล์มไฮโดรเจลแสดงสมบัติเป็น pH-sensitive hydrogel และการผสมไฟโบรอินในฟิล์มช่วยให้สมบัติ เชิงกล เช่น ค่าความทนแรงดึง การดึงยืด ณ จุดขาดสูงขึ้น แต่โมดูลัสของฟิล์มลดลง^[1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.9 Kunya, Jintana and Tamikazu (2002-2003) ได้ศึกษาถึงปริมาณซิลค์โปรตีนที่น้อยที่สุดที่ยังสามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย โดยแบคทีเรียที่ใช้ในการศึกษามี 3 ชนิด ได้แก่ *Escherichia*, *Bacillus subtilis* และ *Staphylococcus aureus* จากการศึกษาพบว่าปริมาณซิลค์โปรตีนที่น้อยที่สุดในการยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียคือ 5 เปอร์เซ็นต์ ที่ละลายในน้ำกลั่น และในทุกๆ ความเข้มข้นที่อยู่ในช่วงของการศึกษา (5-15 เปอร์เซ็นต์) ไม่สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของ *Bacillus subtilis* ได้^[22]

2.6.10 Kim SH และคณะ (2550) ได้ทำการศึกษา Method for preparing porous polymer scaffold for tissue engineering using gel spinning molding technique วิธีการผลิตดังกล่าวแม้ว่าเจ้าของสิทธิบัตรจะอ้างว่า spinning molding technique จะทำให้ได้โครงที่มีรูพรุนขนาดเท่ากัน รูพรุนสามารถเชื่อมต่อกันได้ดีและมีประสิทธิภาพมากกว่าโครงที่สร้างขึ้นด้วยวิธีอื่น แต่การผลิตโครงที่ใช้ในงานวิจัยนี้ทำได้โดยกระบวนการ freeze-drying ซึ่งก็มีการยอมรับว่าสามารถทำให้เกิดรูพรุนที่มีประสิทธิภาพดีเช่นเดียวกัน^[23]

2.6.11 Tipawan Siritienthong, Juthamas Ratanavaraporn and Pornanong Aramwit. (2012) จากที่มีการรายงานถึงประโยชน์ของเซรีซินในสมบัติทางชีววิทยาที่การใช้เป็นแผ่นปิดแผลก่อนหน้านี ในงานวิจัยนี้จึงทำการสร้างและเปรียบเทียบสมบัติของ 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-precipitated sericin/PVA scaffolds เซลล์เพิ่มจำนวนอย่างรวดเร็ว มีการลดลงของขนาดบาดแผลอย่างมีนัยสำคัญ มีการสร้างคอลลาเจนเพิ่มขึ้น และมีการงอกของเยื่อผิวหนัง ทำให้การรักษาแผลเร็วขึ้น จึงสามารถสรุปได้ว่า EtOH-precipitated sericin/PVA scaffolds มีประสิทธิภาพในการรักษาแผลได้ดีกว่า EtOH-precipitated/PVA scaffolds ที่ไม่มีเซรีซิน^[24]

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. ริงไทม์ไทยสีเหลืองพันธุ์นางน้อย จากศูนย์วิจัยหม่อนไหม จังหวัดขอนแก่น
3. แคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ (Calcium hydroxyapatite) ของบริษัท Fluka
4. กรดอะซิติก (Acetic acid)
5. Ethyl alcohol Absolute ของบริษัท ITALMAR CO.,LTD
6. Phosphate buffered saline ของบริษัท Fluka
7. น้ำกลั่น

อุปกรณ์

1. บีกเกอร์
ขนาด 1000 มิลลิลิตร
ขนาด 600 มิลลิลิตร
ขนาด 100 มิลลิลิตร
ขนาด 50 มิลลิลิตร
2. กระจกตวง
ขนาด 1000 มิลลิลิตร
ขนาด 10 มิลลิลิตร
3. แท่งแก้วคน
4. ปากคีบ (Forceps)
5. แผ่นอลูมิเนียมฟลอยด์
6. กระจกนาฬิกา
7. ปีเปต
ขนาด 5 มิลลิลิตร
8. จุกยาง
9. ซ้อนตักสาร
10. กระจกบอกล้าง
11. กรรไกร
12. ชุดกรองสุญญากาศ (Suction)
13. กระจกกรอง เบอร์ 2
14. ขวดวัดปริมาตร
ขนาด 100 มิลลิลิตร
15. Spatula
16. เทอร์โมมิเตอร์
17. ตะแกรงลวด ขนาด 250 mesh

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

18. petri dish

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 5K
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

3.2 วิธีการดำเนินงาน

ตอนที่ 1

3.2.1 การสกัดเซรีซินจากรังไหม

1. นำรังไหมสายพันธุ์นางน้อยมาล้างทำความสะอาด ตัดเป็นชิ้นเล็ก ๆ และอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
2. เตรียมสารละลายเซรีซินเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร โดยนำรังไหมที่เตรียมไว้ชั่งน้ำหนัก 10 กรัม ต้มในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง
3. นำสารละลายที่ได้มากรองแบบลดความดัน
4. เทสารละลายลงในขวดวัดปริมาตร และปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้เป็น 100 มิลลิลิตร

3.2.2 เตรียมสารละลายCMC เข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร

1. ตวงน้ำกลั่นปริมาตร 100 มิลลิลิตร และให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส
2. ชั่งคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส 5 กรัม เติลงในน้ำกลั่นที่ให้ความร้อน ใช้แท่งแก้วคนจนสารละลายรวมเป็นเนื้อเดียวกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.3 เตรียมการขึ้นรูปชิ้นงาน

1. ผสมสารละลายคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสและสารละลายเซรีซินตามอัตราส่วนต่าง ๆ ดังตารางที่ 3.1
2. นำสารในข้อ 1. มาทำการปั่นกวนด้วยเครื่อง overhead stirrer ที่ความเร็วรอบ 600 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที
3. ตวงสารละลายผสมเทของลงในแม่พิมพ์ โดยใช้ petri dish เป็นแม่พิมพ์
4. นำไปแช่แข็งที่อุณหภูมิ -2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
5. นำชิ้นงานที่แช่แข็งเข้าเครื่อง freeze dryer เพื่อขึ้นรูปชิ้นงานให้มีลักษณะเป็นรูพรุน
6. นำชิ้นงานที่ได้ไปทดสอบสมบัติต่าง ๆ

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

สูตรที่	สูตร	เซรีซิน (%)	CMC (%)
1	100 : 0	100	0
2	80 : 20	80	20
3	50 : 50	50	50
4	20 : 80	20	80
5	0 : 100	0	100

ตอนที่ 2

3.2.4 ปรับปรุงชิ้นงานที่มีอัตราส่วนที่ดีที่สุดโดยเพิ่มความแข็งแรงของชิ้นงานด้วยการเติมแคลเซียมไฮดรอกซีอะปาไทต์

1. สกัดเซรีซินจากรังไหม และเตรียมสารละลาย CMC เข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ผสมกันในอัตราส่วนที่ดีที่สุดที่เลือก จากนั้นทำการปั่นกวนด้วยเครื่อง overhead stirrer ที่ความเร็วรอบ 600 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที
2. เตรียมสารละลายแคลเซียมไฮดรอกซีอะปาไทต์ความเข้มข้น 0.2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตรและ 0.4 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร โดยละลายด้วยกรดอะซิติก
3. เทสารละลายแคลเซียมไฮดรอกซีอะปาไทต์ที่เตรียมได้ลงในสารละลายผสมดังตารางที่ 3.2 จากนั้นทำการปั่นกวนด้วยเครื่อง overhead stirrer ต่อเป็นเวลา 60 นาที
4. นำของผสมที่ได้เทลง petri dish
5. นำไปแช่แข็งที่อุณหภูมิ -2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
6. นำชิ้นงานที่ผ่านการแช่แข็งเข้าเครื่อง freeze dryer เพื่อขึ้นรูปชิ้นงานให้มีลักษณะเป็นรูพรุน
7. นำชิ้นงานที่ได้ไปทดสอบสมบัติต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 แสดงอัตราส่วนผสมระหว่างสารละลายเซริซินที่มีความเข้มข้น 2 %w/v สารละลาย CMC ที่มีความเข้มข้น 5 %w/v และแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์

สูตรที่	ชื่อสูตร	เซริซิน (%)	CMC (%)	HAp (%w/v)
6	HA-1	20	80	0.2
7	HA-2	20	80	0.4

3.3 การทดสอบสมบัติต่าง ๆ

3.3.1 สมบัติทางกายภาพ

1. การบวมน้ำ (Swelling)^[4]

วิธีการทดสอบ

- 1) ตัดตัวอย่างชิ้นงานให้มีขนาด 2x2 cm
- 2) ชั่งน้ำหนักตะแกรงลวดขนาด 250 mesh
- 3) ห่อตัวอย่างชิ้นงานด้วยตะแกรงลวดและนำไปแช่น้ำหนัก
- 4) แช่ตัวอย่างชิ้นงานลงในน้ำกลั่นเป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยนำชิ้นงานขึ้นมาซับน้ำที่เกาะอยู่ในตะแกรงลวดและชั่งน้ำหนักทุก ๆ 10 นาที
- 5) บันทึกผลน้ำหนักที่ได้ และคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การบวมน้ำ

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

2. จำนวนรูพรุน (Porosity)^[20]

วิธีการทดสอบ

- 1) นำชิ้นงานตัดเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า วัดปริมาตรของชิ้นงานเป็น V (กxขxล) และนำไปแช่น้ำหนัก บันทึกเป็น W₁
- 2) ตวงปริมาณ ethyl alcohol absolute D=0.7896 ลงในบีกเกอร์ 40 mL
- 3) นำตัวอย่างชิ้นงานจุ่มลงใน ethyl alcohol absolute แช่ทิ้งไว้ 48 ชั่วโมง
- 4) นำตัวอย่างชิ้นงานมาซับด้วยกระดาษทิชชู และนำมาชั่งน้ำหนัก บันทึกเป็น W₂
- 5) นำผลการทดลองมาคำนวณหาค่าความเป็นรูพรุน ตามสูตร

$$\%Porosity = \frac{W2 - W1}{D \times V} \times 100$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM)^[25]

ใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของบริษัท CARL ZEISS CO., LTD. รุ่น EVO MA 10 ในการศึกษาสัณฐานและรายละเอียดของลักษณะและขนาดของรูพรุนของชิ้นงาน โดยทำการศึกษาชิ้นงานในแนวภาคตัดขวาง (cross section)

วิธีการทดสอบ

- 1) ทำการหักชิ้นงานในไนโตรเจนเหลว
- 2) ติดตัวอย่างชิ้นงานลงบน stub
- 3) ทำการเคลือบผิวตัวอย่างชิ้นงานด้วยทอง
- 4) นำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM

4. ขนาดรูพรุน (Pore size)

ใช้โปรแกรม ImageJ ในการวัดขนาดรูพรุน โดยวัดจากความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุน วิธีการหารูพรุนจากโปรแกรม ImageJ

- 1) เปิดโปรแกรม ImageJ จากนั้นเปิดภาพที่ต้องการวิเคราะห์โดยไปที่ file > open
- 2) set scale เพื่อเทียบอัตราส่วนของขนาดภาพ โดยใช้เครื่องมือ Magnifying glass เพื่อขยายภาพ จากนั้นใช้เครื่องมือ Straight line selection คลิกลากเส้นที่ scale ในภาพ จากนั้นไปที่ Analyze > Set scale ใส่ค่า known distance และใช้หน่วยเป็น μm จากนั้นเลือก Global แล้วคลิก OK
- 3) จากนั้นใช้เครื่องมือ Straight line selection วัดความกว้างของรูพรุนที่เราต้องการ
- 4) คลิกที่ Analyze > Measure จะปรากฏค่าความกว้างของรูพรุน
- 5) ทำตามข้อ 3, 4 เท่าจำนวนซ้ำที่ต้องการ
- 6) คลิกที่ Analyze > Summarize จะปรากฏค่าเฉลี่ย และ S.D. ขึ้นมา

3.3.2 สมบัติเชิงกล

ศึกษาถึงความสามารถในการทนทานต่อแรงกดอัดของชิ้นงานด้วยเครื่อง universal testing machine โดยอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D1621-10^[26]

วิธีการทดสอบ

- 1) ตัดตัวอย่างชิ้นงานรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส กว้าง 2 นิ้ว ยาว 2 นิ้ว และหนา 1 นิ้ว จำนวนสุตร
- 3) ทำการกดชิ้นงานโดยกำหนดระยะกดที่ 50% ของความหนาของชิ้นงาน
- 4) คำนวณหาค่าเฉลี่ยมาตรฐาน และวิเคราะห์ผลการทดสอบ

3.3.3 สมบัติทางความร้อน

ศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสาร เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ทางความร้อน (thermogravimetric analysis ; TGA)^{[27],[28],[29]}

วิธีการทดสอบ

- 1) นำสารที่จะทดสอบใส่ลงใน Pt pan ประมาณ 8-10 mg
- 2) ทำการทดสอบโดยกำหนดช่วงอุณหภูมิ 50-500 °C และใช้ heating rate 10 °C/min

3.3.4 การตรวจสอบหาหมู่ฟังก์ชันของสาร

โดยใช้เทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตเมทรี (Fourier Transform Infrared Spectrophotometry (FT-IR))^[30] ซึ่งอาศัยการสั่นของโครงสร้างหรือหมู่ฟังก์ชัน โดยใช้แหล่งกำเนิดในช่วงคลื่นแสงอินฟราเรด

วิธีการทดสอบ

- 1) บดตัวอย่างให้ละเอียด จากนั้นผสมตัวอย่างเข้ากับ KBr
- 2) ใส่สารที่บดแล้วลงในแม่พิมพ์ และนำไปอัดด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิก ที่ตั้งไว้ประมาณ 1-2 นาที
- 3) นำตัวอย่างเข้าเครื่อง FT-IR เพื่อทำการวิเคราะห์

3.3.5 การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์

ศึกษาความเป็นผลึกของเซรีซิน และ CMC เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงผลึกของของผสมจากการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟร็กโตมิเตอร์^[31] โดยใช้แหล่งกำเนิดรังสีเอ็กซ์เป็น $\text{CuK}\alpha$ ที่มุม 2θ ตั้งแต่ 5 - 40°

วิธีการทดสอบ

- 1) บดตัวอย่างให้ละเอียดเป็นผงขนาดเล็กกว่า 45 ไมครอน นำมาประมาณ 1-2 กรัม และอัดด้วยเครื่องไฮดรอลิกโดยบริเวณผิวหน้าตัวอย่างจะต้องเรียบสม่ำเสมอ
- 2) นำเข้าเครื่อง XRD เพื่อทำการวิเคราะห์

บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

งานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองเตรียมเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลจากสารละลายเซรีซินที่ได้จากรังไหมผสมกับสารละลายคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส โดยวิธี freeze-drying และเปรียบเทียบสมบัติของเนื้อเยื่อ-โครงสร้างไฮโดรเจลเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่างสารละลายเซรีซินและสารละลายคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส และเปรียบเทียบสมบัติของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลที่มีการเติมแคลเซียมไฮดรอกไซด์อะปาไทต์ ซึ่งสมบัติที่ทำการทดสอบ ได้แก่ สมบัติการดูดซับน้ำ จำนวนรูพรุน สัณฐานวิทยา สมบัติทางความร้อน สมบัติเชิงกล การตรวจสอบหาหมู่ฟังก์ชัน และการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์

4.1 ศึกษาอัตราส่วนระหว่างสารละลายเซรีซินและสารละลายคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ที่มีผลต่อสมบัติต่าง ๆ ของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจล

4.1.1 ลักษณะทางกายภาพของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลสูตรต่าง ๆ

ตารางที่ 4.1 แสดงลักษณะทางกายภาพของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลสูตรต่าง ๆ

สูตรที่	sericin : CMC (%)	ลักษณะทางกายภาพ	ลักษณะทางกายภาพของพื้นผิว
1	100 : 0	ชิ้นงานมีลักษณะเป็นของแข็งมีรูพรุน สีเหลือง นิ่ม เปราะ แตกหักง่าย	
2	80 : 20	ชิ้นงานมีลักษณะเป็นของแข็งมีรูพรุน สีเหลือง ค่อนข้างนิ่ม เปราะ แตกหักง่าย	

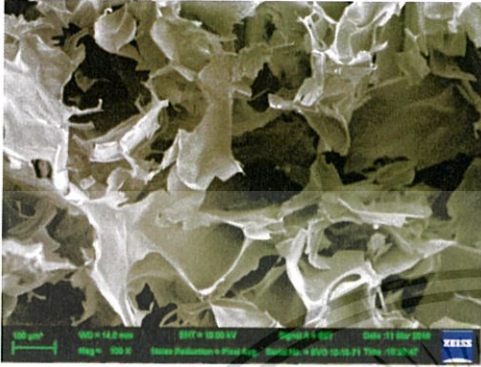
สูตรที่	sericin : CMC (%)	ลักษณะทางกายภาพ	ลักษณะทางกายภาพของพื้นผิว
3	50 : 50	ชิ้นงานมีลักษณะเป็นของแข็งมีรูพรุน สีเหลืองอ่อน ค่อนข้างนิ่ม และมีความเปราะเล็กน้อย	
4	20 : 80	ชิ้นงานมีลักษณะเป็นของแข็งมีรูพรุน สีเหลืองอ่อน ค่อนข้างแข็ง	
5	0 : 100	ชิ้นงานมีลักษณะเป็นของแข็งมีรูพรุน สีขาว ค่อนข้างแข็ง	

จากตารางที่ 4.1 พบว่าชิ้นงานที่ได้เป็นของแข็งที่มีลักษณะเป็นรูพรุนคล้ายฟองน้ำ พื้นผิวของชิ้นงานค่อนข้างเรียบ โดยสูตร 100:0 มีสีเหลืองเข้ม เนื่องจากเป็นเซริซินของไหมไทยพันธุ์นางน้อย สูตร 0:100 มีสีขาวขุ่น และอัตราส่วนผสมระหว่างเซริซิน และ CMC ได้แก่ 80:20, 50:50 และ 20:80 จะมีสีขาวเหลืองโดยจะมีสีเหลืองอ่อนลงตามอัตราส่วนของ CMC ที่เพิ่มขึ้นตามลำดับ และพบว่าชิ้นงานที่ได้จากสูตร 100:0 จะมีความนิ่ม แต่แตกหักได้ง่ายเมื่อใช้มือกดและจะมีความแข็งมากขึ้นเมื่อมีการเพิ่มอัตราส่วนของ CMC

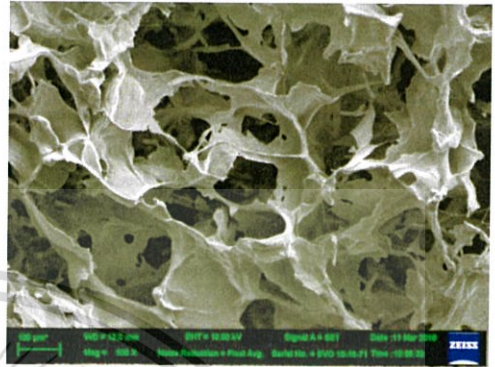
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 สมบัติทางสัณฐานวิทยาของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลสูตรต่าง ๆ

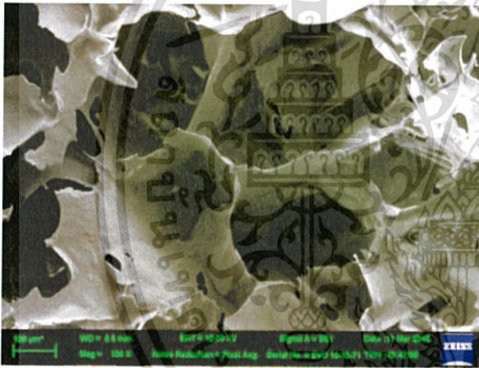
ศึกษาลักษณะและขนาดของรูพรุนของชิ้นงานสูตรต่าง ๆ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope; SEM) โดยทำการศึกษาชิ้นงานในแนวภาคตัดขวาง (cross section)



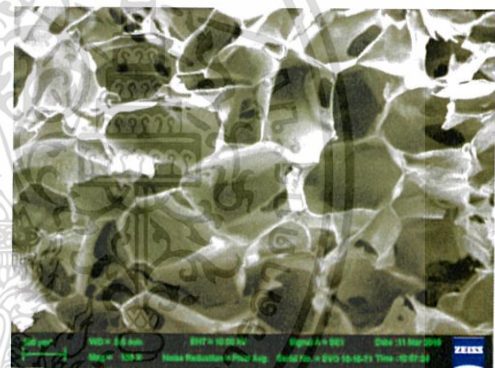
รูปที่ 4.1(ก) สูตร 100 : 0 กำลังขยาย 100X



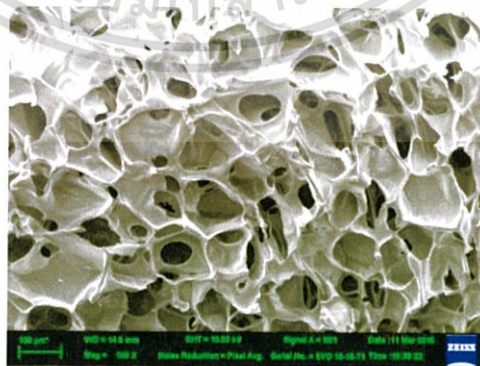
รูปที่ 4.1(ข) สูตร 80 : 20 กำลังขยาย 100X



รูปที่ 4.1(ค) สูตร 50 : 50 กำลังขยาย 100X



รูปที่ 4.1(ง) สูตร 20 : 80 กำลังขยาย 100X



รูปที่ 4.1(จ) สูตร 0 : 100 กำลังขยาย 100X

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทคนิค freeze-drying เป็นเทคนิคที่ใช้ป้อนลดความดันของภาชนะที่บรรจุสารตัวอย่างแช่แข็ง ทำให้น้ำที่ถูกแช่แข็งระเหิดออกมา ชิ้นงานที่ได้จึงมีลักษณะเป็นรูพรุน ดังนั้นขนาดของรูพรุนจึงบอกถึงขนาดของน้ำที่อยู่ภายในตัวอย่าง

จากรูปที่ 4.1(ก) ซึ่งเป็นลักษณะรูพรุนของสูตร 100:0 พบว่าลักษณะของรูพรุนที่ได้ไม่มีความสม่ำเสมอ ผนังรูพรุนไม่ต่อเนื่อง และไม่มีความเป็นระเบียบ ทำให้ชิ้นงานรับแรงกดอัดได้ไม่ดี มีความเปราะ แตกหักได้ง่าย และจากรูปที่ 4.1(จ) ซึ่งเป็นลักษณะรูพรุนของสูตร 0:100 จะพบว่ารูพรุนมีขนาดเล็ก ผนังรูพรุนมีความต่อเนื่องและดี มีการกระจายตัวของรูพรุนค่อนข้างเป็นระเบียบ อีกทั้งขนาดของรูพรุนยังมีความใกล้เคียงกัน ลักษณะของรูพรุนเช่นนี้ทำให้ชิ้นงานสูตร 0:100 มีความแข็งแรง ทนแรงกดอัดได้สูง และสามารถกลับคืนรูปร่างได้เมื่อเอาแรงกดออก ส่วนลักษณะรูพรุนของชิ้นงานที่เป็นสูตรผสมโดยเมื่อมีการเพิ่มปริมาณอัตราส่วนของ CMC ดังรูปที่ 4.1(ข) รูปที่ 4.1(ค) และรูปที่ 4.1(ง) พบว่าลักษณะของรูพรุนมีความเป็นระเบียบและมีความสม่ำเสมอมากขึ้นตามปริมาณของ CMC ที่เพิ่มขึ้นตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 4.1(ก) และเมื่อพิจารณาขนาดของรูพรุนจากตารางที่ 4.2 จะพบว่าขนาดของรูพรุนสูตร 50:50 มีขนาดใหญ่ที่สุด รองลงมาคือ สูตร 100:0, 80:20, 20:80 และสูตร 0:100 ตามลำดับ เนื่องจาก CMC มีผลทำให้โครงสร้างของชิ้นงานยึดเกาะกันได้มากขึ้น มีผลทำให้มีรูพรุนที่สม่ำเสมอและมีระเบียบมากขึ้น เมื่อมีปริมาณ CMC มาก รูพรุนจึงมีขนาดเล็กลง แต่ในสูตร 80:20 แม้จะมีปริมาณ CMC น้อย แต่รูพรุนมีขนาดเล็กกว่าสูตร 50:50 เนื่องจากโครงสร้างของรูพรุนที่ได้จากเซรีซินไม่มีความสม่ำเสมอและไม่เป็นระเบียบจึงทำให้รูพรุนมีรูปร่างและขนาดที่ไม่แน่นอนดังแสดงในตารางที่ 4.2 นั้นแสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนของของผสมที่แตกต่างกันส่งผลให้ได้ชิ้นงานที่มีลักษณะรูพรุนแตกต่างกัน ซึ่งความแตกต่างของลักษณะของรูพรุนนี้จะส่งผลต่อสมบัติในการบวมตัวของชิ้นงาน

ตารางที่ 4.2 แสดงขนาดของรูพรุนของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลสูตรต่าง ๆ

สูตรที่	sericin : CMC (%)	ความกว้างของรูพรุน (μm)
1	100 : 0	293.00 \pm 32.82
2	80 : 20	222.59 \pm 24.52
3	50 : 50	351.40 \pm 24.12
4	20 : 80	218.24 \pm 21.67
5	0 : 100	156.84 \pm 9.88

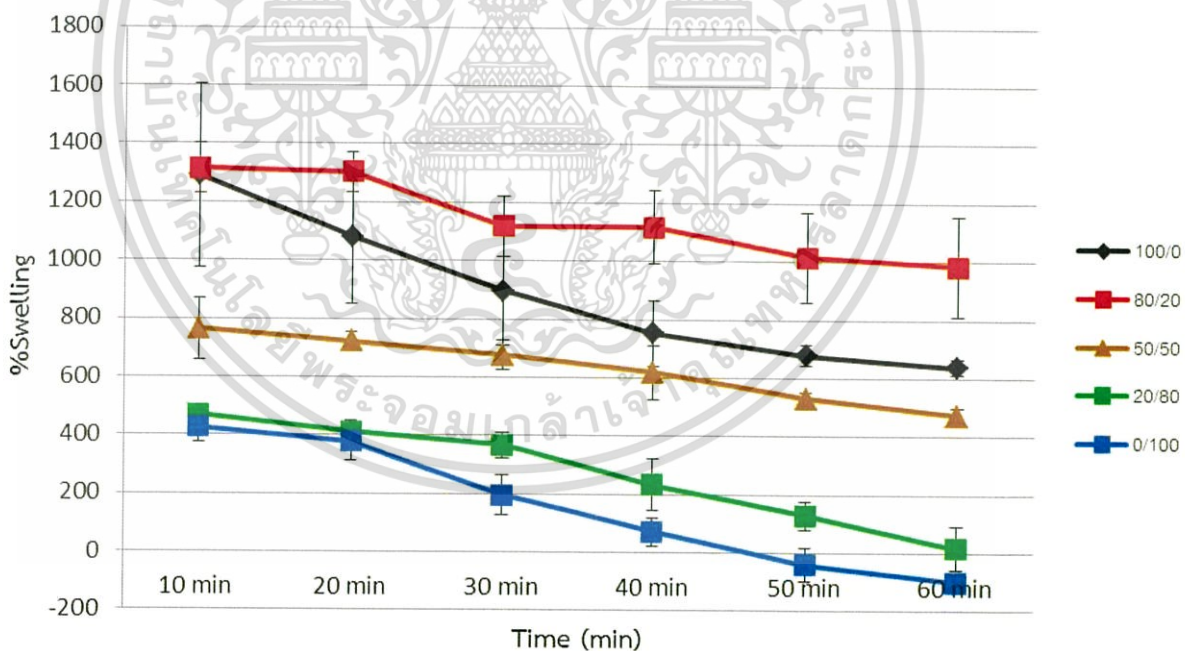
4.1.3 จำนวนรูพรุนของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจล

ตารางที่ 4.3 แสดงจำนวนรูพรุนของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลสูตรต่าง ๆ

สูตรที่	sericin : CMC (%)	จำนวนรูพรุน (%)
1	100 : 0	41.2567
2	80 : 20	50.1635
3	50 : 50	70.8044
4	20 : 80	65.1163
5	0 : 100	73.2428

จากตารางที่ 4.3 แสดงเปอร์เซ็นต์จำนวนรูพรุนที่มีอยู่ในเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลในสูตรต่าง ๆ พบว่าสูตร 0:100 มีจำนวนรูพรุนมากที่สุด ส่วนสูตร 100:0 มีจำนวนรูพรุนน้อยที่สุด และในสูตรผสมเมื่อมีอัตราส่วนของ CMC เพิ่มขึ้น ทำให้มีจำนวนรูพรุนมากตามไปด้วย ซึ่งสามารถยืนยันได้จากภาพทางสัณฐานวิทยาของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจล ดังรูปที่ 4.1

4.1.4 ลักษณะการบวมน้ำ (swelling) ของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจล

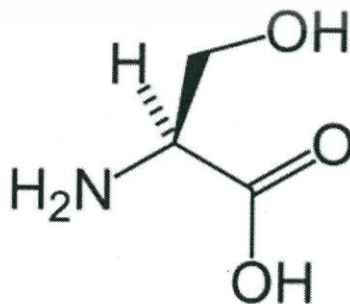


รูปที่ 4.2 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์การบวมน้ำของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลสูตรต่าง ๆ

จากรูปที่ 4.2 แสดงเปอร์เซ็นต์การบวมน้ำของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลของสูตรต่าง ๆ ในน้ำกลั่นทุก ๆ 10 นาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง พบว่าใน 10 นาทีแรก สูตร 100:0 มีเปอร์เซ็นต์การบวมน้ำสูงที่สุดประมาณ 1300% เนื่องจากเซรีซินเป็นโปรตีนใหม่ที่ละลายน้ำได้ ในโครงสร้างโมเลกุลมีกรดอะมิโนเซอร์รีน (serine) เป็นองค์ประกอบอยู่มากและยังมีหมู่ $-CONH-$ อีกด้วย การมีโครงสร้างไม่ว่าการณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังกล่าวทำให้สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับน้ำได้ดี และลักษณะของชั้นงานสูตร 100:0 มีการเสียรูปร่างอย่างรวดเร็วเมื่อแช่ในน้ำกลั่น จึงไม่เหมาะสมในการใช้เซรีซินเพียงอย่างเดียวมาขึ้นรูปชั้นงาน ส่วนสูตร 0:100 พบว่าใน 10 นาทีแรกมีเปอร์เซ็นต์การบวมน้ำประมาณ 420% ซึ่งเป็นเปอร์เซ็นต์การบวมน้ำที่ต่ำที่สุด เนื่องจากในโครงสร้างของ CMC มีหมู่ $-\text{COO}^-$ ซึ่งสามารถเกิดแรงผลัทางไฟฟ้าสถิตทำให้เกิดช่องว่างซึ่งทำให้โมเลกุลของน้ำสามารถแทรกเข้ามาในโครงสร้างของ CMC ได้และประกอบกับการเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของ CMC กับโมเลกุลของน้ำจึงทำให้ CMC มีเปอร์เซ็นต์การบวมน้ำต่ำที่สุด และการเกิดพันธะไฮโดรเจนของหมู่มีซิวซึ่งตรวจพบด้วยเทคนิค FT-IR โดยจะพบว่าเลขคลื่นของ O-H และ N-H จะเลื่อนไปที่เลขคลื่นลดลง และเมื่อเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การบวมน้ำของสูตร 0:100 และสูตร 20:80 ซึ่งมีปริมาณของเซรีซินน้อย พบว่าเซรีซินช่วยลดการละลายของ CMC ซึ่งเป็นการยืนยันว่าเซรีซินเกิดพันธะไฮโดรเจนกับ CMC ได้ และส่งผลทำให้เปอร์เซ็นต์การบวมน้ำของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลผสมเพิ่มขึ้น โดยสูตร 20:80, สูตร 50:50 และสูตร 80:20 มีเปอร์เซ็นต์การบวมน้ำใน 10 นาทีแรก เป็น 460, 760 และ 1300 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ และเมื่อเวลาผ่านไปการบวมน้ำของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลในแต่ละสูตรมีแนวโน้มลดลง โดยสูตร 0:100 จะลดลงอย่างช้า ๆ เมื่อเทียบกับสูตร 100:0 ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าในสูตรผสมเซรีซินทำให้นเนื้อเยื่อโครงสร้างละลายได้ช้าลง และ CMC ทำให้นเนื้อเยื่อโครงสร้างมีการบวมตัวต่ำ เพราะละลายน้ำได้ดี

เมื่อทำการเปรียบเทียบขนาดของรูพรุนกับเปอร์เซ็นต์การบวมน้ำพบว่าสูตร 100:0 มีขนาดของรูพรุนเท่ากับ $293.00 \pm 32.82 \mu\text{m}$ มีเปอร์เซ็นต์การบวมน้ำใน 10 นาทีแรกเท่ากับ 1300% สูตร 80:20 มีขนาดของรูพรุนเท่ากับ $222.59 \pm 24.52 \mu\text{m}$ มีเปอร์เซ็นต์การบวมน้ำใน 10 นาทีเท่ากับ 1300% สูตร 50:50 มีขนาดของรูพรุนเท่ากับ $351.40 \pm 24.12 \mu\text{m}$ มีเปอร์เซ็นต์การบวมน้ำใน 10 นาทีเท่ากับ 760% สูตร 20:80 มีขนาดของรูพรุนเท่ากับ $218.24 \pm 21.67 \mu\text{m}$ มีเปอร์เซ็นต์การบวมน้ำใน 10 นาทีเท่ากับ 460% สูตร 0:100 มีขนาดของรูพรุนเท่ากับ $156.839 \pm 9.88 \mu\text{m}$ มีเปอร์เซ็นต์การบวมน้ำใน 10 นาทีแรกเท่ากับ 420% ซึ่งจะเห็นว่า สูตร 50:50 มีขนาดของรูพรุนที่ใหญ่ที่สุดแต่มีเปอร์เซ็นต์การบวมน้ำใน 10 นาทีเท่ากับ 760% เนื่องจากมีลักษณะของรูพรุนที่เป็นระเบียบ ผนังรูพรุนมีความต่อเนื่อง จึงทำให้โมเลกุลของน้ำแทรกตัวเข้าไปในชั้นงานได้ช้า อีกทั้ง CMC ยังมีอันตรกิริยา (interaction) กับเซรีซิน ทำให้ลดการเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของ CMC กับโมเลกุลของน้ำ จึงส่งผลให้แม้ว่าจะมีขนาดรูพรุนที่ใหญ่แต่มีเปอร์เซ็นต์การบวมน้ำต่ำ ดังนั้นขนาดของรูพรุนไม่ได้ส่งผลต่อการบวมน้ำของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลผสม^{[6],[32]} ซึ่งเห็นได้ชัดเจนในสูตร 50:50



รูปที่ 4.3 แสดงโครงสร้างของกรดอะมิโนเซรีน (serine structure)^[33]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลของการบวมน้ำ สรุปได้ว่าการบวมน้ำของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลขึ้นกับอัตราส่วนระหว่าง พอลิเมอร์ผสมเพราะเป็นสิ่งกำหนดขนาดของรูพรุน อีกปัจจัยหนึ่งได้แก่แรงกระทำระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์และหมู่ฟังก์ชันที่ชอบน้ำในพอลิเมอร์

4.1.5 การทดสอบสมบัติเชิงกลของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจล

เมื่อทำการทดสอบสมบัติเชิงกลของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลด้วยเครื่อง Universal testing machine โดยใช้ load cell 5 KN และกำหนด crosshead speed 2.5 mm/min ตามมาตรฐาน ASTM 1621-10^[26] เพื่อทดสอบความสามารถในการรับแรงกดอัดและความแข็งแรงของชิ้นงาน ทำการเปรียบเทียบผลทดสอบของชิ้นงานสูตรต่าง ๆ โดยกำหนดระยะกวดที่ 50% ของความหนาของชิ้นงาน ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.4 และ รูปที่ 4.5

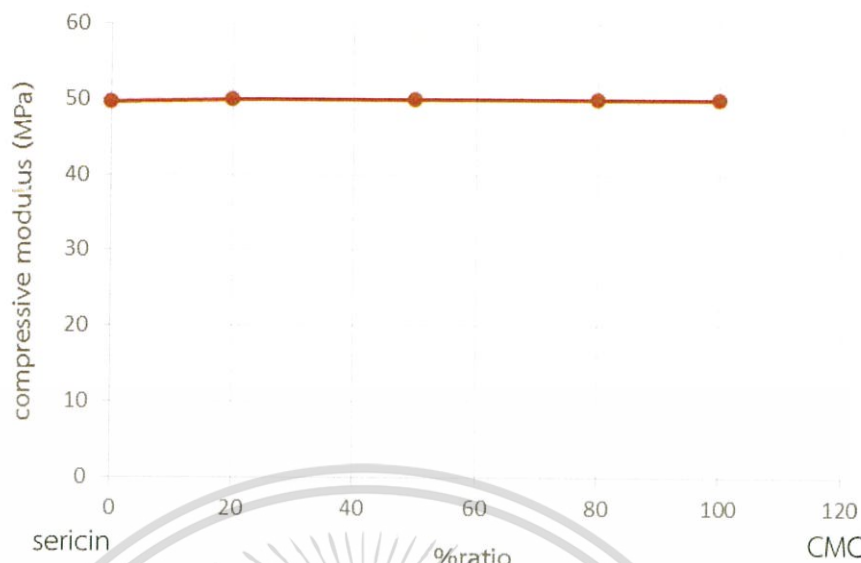
4.1.5.1 การทดสอบความเค้นแรงกดอัด (Compressive Stress)



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงค่าความเค้นแรงกดอัดสูงสุด (compressive stress) ของเนื้อเยื่อโครงสร้างในสูตรต่าง ๆ

จากรูปที่ 4.4 พบว่า 0:100 มีค่าความเค้นแรงกดสูงที่สุดที่ประมาณ 0.58 MPa และ 100:0 มีค่าความเค้นแรงกดต่ำที่สุดที่ประมาณ 0.03 MPa แสดงว่าเซรีซินมีความเปราะมากกว่า จึงรับแรงกดอัดได้น้อย ส่วน CMC มีความแข็งแรงมากกว่า จึงรับแรงกดอัดได้ดีกว่าเซรีซิน และเมื่อเปรียบเทียบค่าความเค้นแรงกดของสูตรผสมระหว่างเซรีซินกับ CMC พบว่าในอัตราส่วน 80:20, 50:50 และ 20:80 มีค่าความเค้นแรงกดเพิ่มขึ้นเล็กน้อยตามปริมาณ CMC ที่เพิ่มขึ้น ตามลำดับ แต่เนื่องจากในแต่ละสูตรมีค่าความเค้นแรงกดที่ใกล้เคียงกันแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย จึงสรุปได้ว่าอัตราส่วนที่แตกต่างกันระหว่างสารละลายเซรีซินและสารละลายคาร์-บอซีเมทิลเซลลูโลสไม่มีผลต่อค่าความเค้นแรงกดอัด

4.1.5.2 การทดสอบ compressive modulus

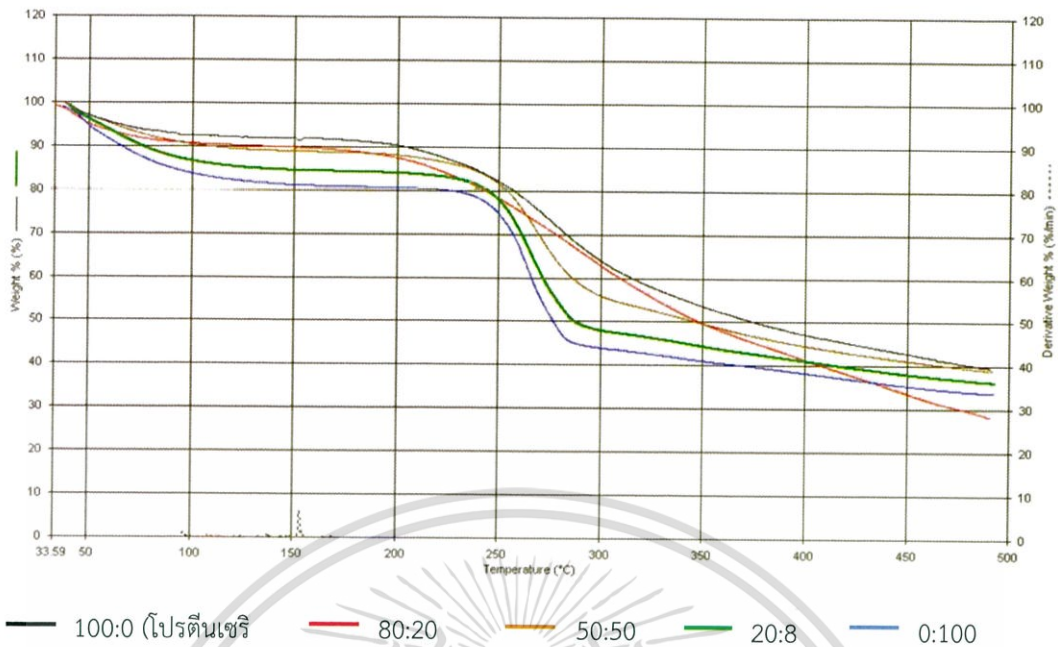


รูปที่ 4.5 แสดงกราฟแสดงค่า compressive modulus ของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลในสูตรต่าง ๆ

จากรูปที่ 4.5 แสดงค่าความแข็งยืดหยุ่น (compressive modulus) ของชิ้นงานในอัตราส่วนต่าง ๆ พบว่าในแต่ละสูตรมีค่า compressive modulus ที่ใกล้เคียงกันแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย จึงสรุปได้ว่าอัตราส่วนที่แตกต่างกันระหว่างสารละลายเซรีซินและสารละลายคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสไม่มีผลต่อค่า compressive modulus ซึ่งเป็นไปตามแนวโน้มเดียวกับ compressive stress

4.1.6 การทดสอบสมบัติทางความร้อน (TGA)

การวิเคราะห์ทางความร้อนของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลที่ได้จากโปรตีนเซรีซิน และ CMC สูตรต่างๆ โดยใช้เทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริก (thermogravimetric analysis ; TGA) ที่อัตราการให้ความร้อน 10 °C/นาที ภายใต้สภาวะไนโตรเจน ในช่วงอุณหภูมิ 50-500 °C เพื่อศึกษาเสถียรภาพทางความร้อน โดยพิจารณาอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อน และศึกษาความเข้ากันได้ของสารละลายผสมระหว่างโปรตีนเซรีซิน และ CMC โดยพิจารณาจากจำนวนขั้นในการสลายตัวของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจล ผลการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลสูตรต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 แสดงเทอร์โมแกรมจากการวิเคราะห์ TGA ของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลที่ได้จากสูตรต่าง ๆ

จากรูปที่ 4.6 พบว่า โพรตีนเซรีซินมีอุณหภูมิการสลายตัวอยู่ที่ 289 °C ซึ่งมีอุณหภูมิการสลายตัวสูงที่สุด CMC มีอุณหภูมิการสลายตัวอยู่ที่ 265 °C เป็นมีอุณหภูมิการสลายตัวต่ำที่สุด และเมื่อทำการผสมระหว่างโพรตีนเซรีซินและ CMC ตามสูตรผสมต่าง ๆ ได้แก่ 80:20 50:50 และ 20:80 จะมีอุณหภูมิการสลายตัวอยู่ที่ 278 °C, 271 °C, 268 °C ตามลำดับซึ่งเป็นอุณหภูมิการสลายตัวของสูตรผสมอยู่ในระหว่างช่วงอุณหภูมิของโพรตีนเซรีซิน และ CMC พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของ CMC จะทำให้อุณหภูมิการสลายตัวของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลลดลง และเมื่อพิจารณาขั้นตอนการสลายตัว พบว่าเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลที่ได้จากสารละลายผสมทั้ง 3 สูตร มีการสลายตัวเพียงขั้นตอนเดียว ซึ่งแสดงให้เห็นว่าโพรตีนเซรีซินและ CMC สามารถผสมเข้ากันได้ดี เนื่องจากโพรตีนเซรีซินมีหมู่ N-H, -COO- และ O-H และ CMC มีหมู่ O-H และหมู่ -COO- เป็นโมเลกุลมีขั้วสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลได้ จึงสามารถผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกันได้ดี (strong interaction and good competition)

ผลการทดลองเสถียรภาพทางความร้อนของไฮโดรเจล พบว่าการเพิ่มปริมาณ CMC ทำให้เสถียรภาพทางความร้อนของชิ้นงานลดลง

ตารางที่ 4.4 แสดงอุณหภูมิในการสลายตัวของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลสูตรต่าง ๆ

สูตรที่	sericin : CMC (%)	อุณหภูมิในการสลายตัว (°C)
1	100 : 0	288.975
2	80 : 20	278.097
3	50 : 50	271.143
4	20 : 80	267.996
5	0 : 100	264.990

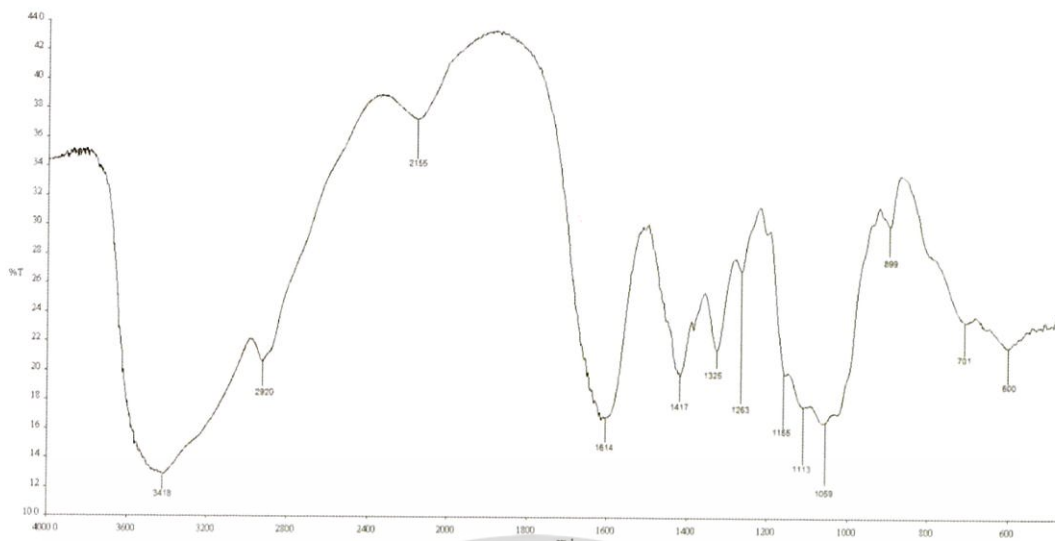
4.1.7 การทดสอบหาหมู่ฟังก์ชัน (FT-IR)

การวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR) เพื่อวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันหลักของโปรตีนเซริซิน และ CMC และทำการเปรียบเทียบกับอินฟราเรดสเปกตรัมของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลที่ได้จากการผสมระหว่างโปรตีนเซริซิน กับ CMC ในแต่ละสูตรว่ามีความแตกต่างกันอย่างไร และเพื่อตรวจสอบว่ามีการเกิดอันตรกิริยาระหว่างโปรตีนเซริซิน และ CMC หรือไม่ ซึ่งอินฟราเรดสเปกตรัมจากการวิเคราะห์ FT-IR แสดงดังรูปที่ 4.7



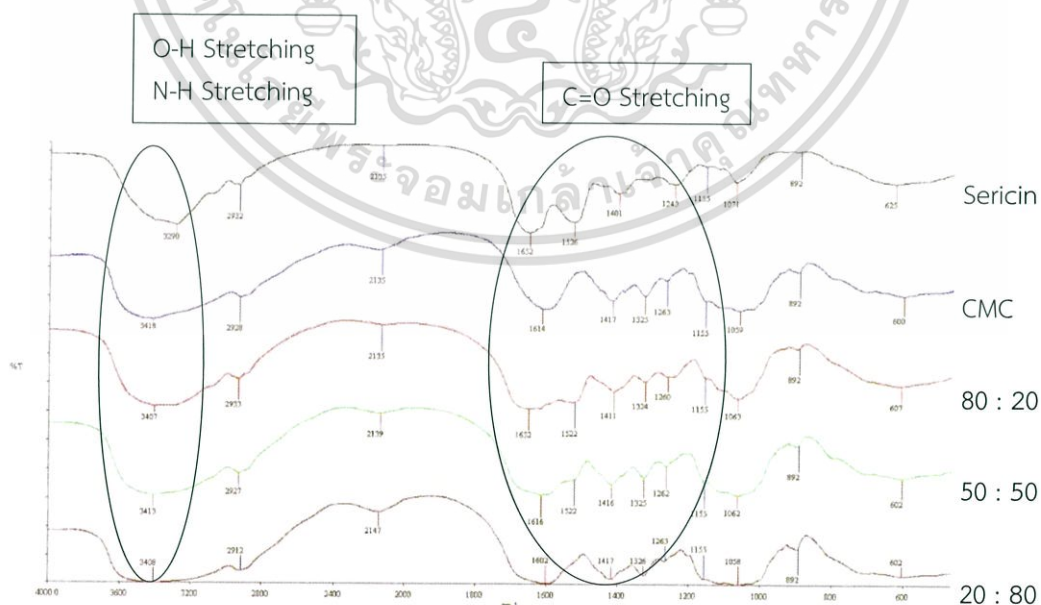
รูปที่ 4.7(ก) แสดง IR spectrum ของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลที่ได้จากโปรตีนเซริซิน (สูตร 100:0)

จากรูปที่ 4.7(ก) เมื่อพิจารณาที่เลขคลื่นในช่วง $400-4000\text{ cm}^{-1}$ พบว่าที่เลขคลื่น 3408 cm^{-1} และ 3291 cm^{-1} คือ N-H stretching ของ amine, เลขคลื่นที่ 3075 cm^{-1} คือ olefinic C-H stretching, เลขคลื่นที่ 2936 cm^{-1} คือ paraffinic C-H stretching, เลขคลื่นที่ 1652 cm^{-1} , 1526 cm^{-1} , 1401 cm^{-1} คือ C=O stretching ของ 1°, 2° และ 3° amide ตามลำดับ, เลขคลื่นที่ 1314 cm^{-1} คือ CH_3 bending, เลขคลื่นที่ 1071 cm^{-1} และ 933 cm^{-1} คือ olefinic C-H bending ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเซริซินเป็นสารประกอบประเภทโปรตีนโดยมีกรดอะมิโนเป็นองค์ประกอบหลัก



รูปที่ 4.7(ข) แสดง IR spectrum ของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลที่ได้จากสารละลายคาร์บอกซี-เมทิลเซลลูโลส (สูตร 0:100)

จากรูปที่ 4.7(ข) เมื่อพิจารณาที่เลขคลื่นในช่วง 400-4000 cm^{-1} พบว่าที่เลขคลื่น 3418 cm^{-1} คือ O-H stretching ของ carboxylic, เลขคลื่นที่ 2920 cm^{-1} คือ paraffinic C-H stretching, เลขคลื่นที่ 1614 cm^{-1} คือ C=O stretching ของ carboxylic, เลขคลื่นที่ 1417 cm^{-1} คือ CH_2, CH_3 bending, เลขคลื่นที่ 1325 cm^{-1} คือ CH_3 bending, เลขคลื่นที่ 1263 cm^{-1} คือ C-O stretching ของ carboxylic, เลขคลื่นที่ 1155 cm^{-1} , 1113 cm^{-1} และ 1059 cm^{-1} คือ C-O stretching ของ 1°, 2° และ 3° alcohol ตามลำดับ



รูปที่ 4.7(ค) แสดง IR Spectrum ของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลที่ได้จากสารละลายผสมระหว่าง โปรตีนเซรีซินและคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสในสูตรต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.7(ค) แสดง IR spectrum ของทุกสูตร พบว่าเมื่ออัตราส่วนของสารละลายคาร์บอกซี-เมทิลเซลลูโลสเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้พีคของ IR spectrum ในช่วงเลขคลื่นประมาณ $3300-3500\text{ cm}^{-1}$ มีลักษณะ broad ชัดเจนมากขึ้น เนื่องจากอิทธิพลของ O-H stretching ของ carboxylic และอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้นของสารละลายคาร์บอกซี-เมทิลเซลลูโลสส่งผลให้ C=O stretching ของ 2° และ 3° amide มีการขยับไปทางเลขคลื่นต่ำลงอย่างเห็นได้ชัดที่สูตรสารละลายผสมระหว่างโปรตีนเซรีซินกับคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส 20:80 ซึ่งมีเลขคลื่นอยู่ในช่วง $1200-1550\text{ cm}^{-1}$ สรุปได้ว่าสารละลายคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสมีอันตรกิริยากับสารละลายโปรตีนเซรีซิน

4.2 ศึกษาผลของแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่มีต่อสมบัติของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจล

เนื่องจากสูตร 20:80 มีลักษณะรูพรุนที่ค่อนข้างเป็นระเบียบ มีสมบัติในการบวมน้ำและสมบัติเชิงกลที่ดี จึงนำมาทำการปรับปรุงความแข็งแรงของชิ้นงานโดยการเติมแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ 2 สูตร ดังตารางที่ 4.5 และทำการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยวิธี freeze-drying เพื่อให้ได้ชิ้นงานที่มีลักษณะเป็นรูพรุนคล้ายฟองน้ำ และนำไปทดสอบสมบัติต่าง ๆ

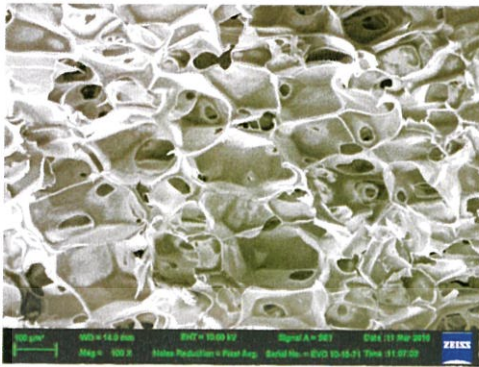
4.2.1 ลักษณะทางกายภาพของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลที่มีการเติมแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์

ตารางที่ 4.5 แสดงลักษณะทางกายภาพของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลที่มีการเติมแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์

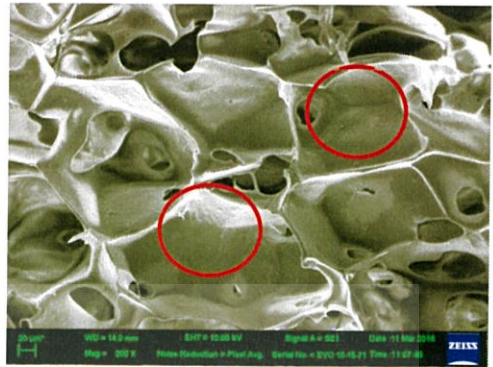
สูตรที่	ชื่อสูตร	ลักษณะทางกายภาพ	ลักษณะทางกายภาพของพื้นผิว
6	HA-1	ชิ้นงานมีลักษณะเป็นของแข็งมีรูพรุน สีเหลืองอ่อน ค่อนข้างแข็ง	
7	HA-2	ชิ้นงานมีลักษณะเป็นของแข็งมีรูพรุน สีเหลืองอ่อน ค่อนข้างแข็ง	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

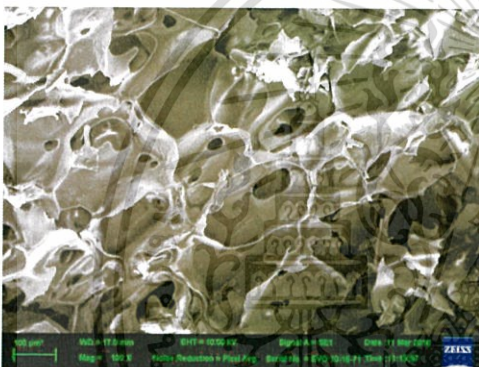
4.2.2 สมบัติทางสัณฐานวิทยาของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลที่มีการเติมแคลเซียม-ไฮดรอกซีอะพาไทต์



รูปที่ 4.8(ก) สূตร HA-1 กำลังขยาย 100X



รูปที่ 4.8(ข) สূตร HA-1 กำลังขยาย 200X



รูปที่ 4.9(ก) สূตร HA-2 กำลังขยาย 100X



รูปที่ 4.9(ข) สূตร HA-2 กำลังขยาย 200X

จากรูปที่ 4.8(ก) และ 4.8(ข) แสดงถึงลักษณะรูพรุนของชิ้นงานในแนวภาคตัดขวาง (cross section) ที่กำลังขยาย 100 เท่า และ 200 เท่าของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลที่ได้จากการผสมระหว่างโปรตีนเซรีซินและ CMC ในอัตราส่วน 20:80 โดยมีการเติมแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ 0.2 %w/v พบว่าลักษณะรูพรุนของชิ้นงานมีขนาดใกล้เคียงกัน ขอบผนังเซลล์ที่แตกหักสั้น ต่างไปจากรูปที่ 4.1(ง) แต่เมื่อพิจารณาจากกำลังขยาย 200 เท่า ดังรูปที่ 4.8(ข) พบว่าพื้นผิวภายในรูพรุนของชิ้นงานมีบริเวณที่เป็นลักษณะของเพลสที่แตกต่างกัสดังบริเวณในวงกลม ซึ่งน่าจะเกิดจากแคลเซียม-ไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่กระจายตัวอยู่ จากรูปที่ 4.9(ก) และ 4.9(ข) แสดงถึงลักษณะรูพรุนของชิ้นงานที่มีการเติมแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ 0.4 %w/v ที่กำลังขยาย 100 และ 200 เท่า ตามลำดับ พบว่าลักษณะรูพรุนคล้ายรูปที่ 4.8(ก) เมื่อพิจารณาจากกำลังขยาย 200 เท่า ดังรูปที่ 4.9(ข) พบว่าพื้นผิวภายในรูพรุนของชิ้นงานค่อนข้างมีความขรุขระ และมองเห็นอนุภาคของแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์เป็นจุดสีขาว^[34] อยู่บริเวณพื้นผิวของรูพรุนชัดเจนดังบริเวณในวงกลม

ตารางที่ 4.6 แสดงขนาดรูพรุนของชิ้นงานที่มีการเติมแคลเซียมไฮดรอกซีอะปาไทด์

สูตรที่	ชื่อสูตร	ความกว้างของรูพรุน (μm)
4	80 : 20	215.76 ± 7.92
6	HA-1	218.24 ± 21.67
7	HA-2	195.36 ± 4.48

4.2.3 จำนวนรูพรุนของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลที่มีการเติมแคลเซียมไฮดรอกซีอะปาไทด์

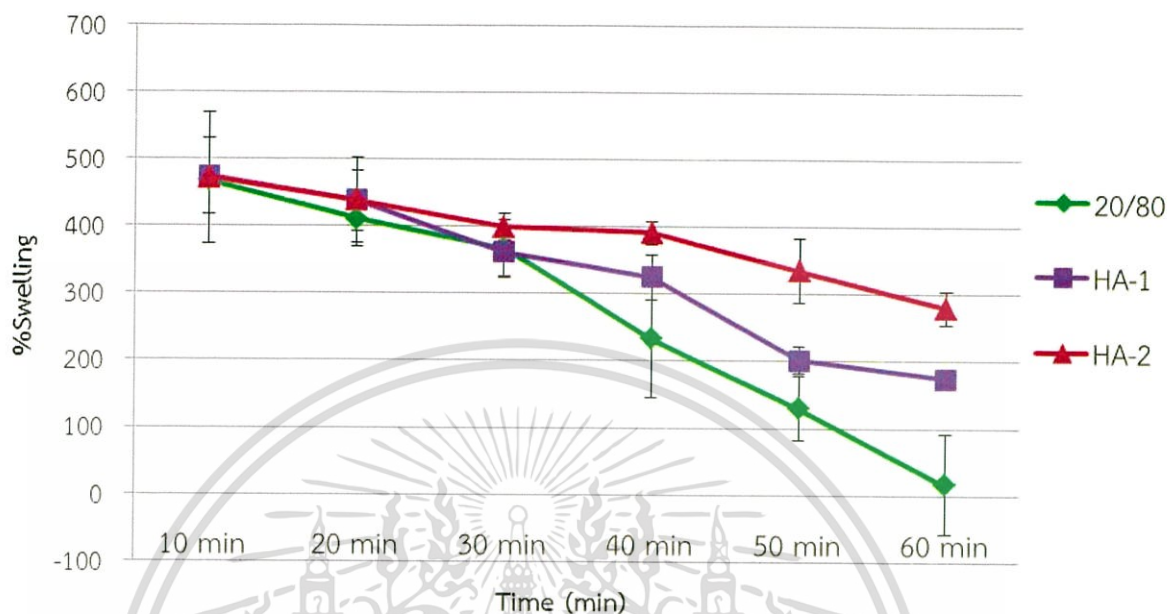
ตารางที่ 4.7 แสดงจำนวนรูพรุนของชิ้นงานอัตราส่วน 20:80 ที่มีการเติมแคลเซียมไฮดรอกซีอะปาไทด์

สูตรที่	ชื่อสูตร	จำนวนรูพรุน (%)
4	20 : 80	65.1163
6	HA-1	68.3300
7	HA-2	72.9061

จากตารางที่ 4.7 แสดงเปอร์เซ็นต์จำนวนรูพรุนของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลที่ได้จากการผสมระหว่างโปรตีนเซรีซิน และ CMC ในอัตราส่วน 20:80 โดยมีการใส่แคลเซียมไฮดรอกซีอะปาไทด์พบว่า HA-2 มีจำนวนรูพรุนมากกว่า HA-1 ซึ่งสามารถยืนยันได้จากภาพทางสัณฐานวิทยาของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจล ดังรูปที่ 4.8 และรูปที่ 4.9

เมื่อทำการเปรียบเทียบจำนวนรูพรุนของอัตราส่วน 20:80 ที่ไม่ได้มีการเติมแคลเซียมไฮดรอกซีอะปาไทด์พบว่าการมีแคลเซียมไฮดรอกซีอะปาไทด์ทำให้รูพรุนมีเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้อาจเกิดเนื่องจากแคลเซียมไอออนกับหมู่คาร์บอกซิเลต $-\text{COO}^-$ ของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเกิดอันตรกิริยากันเป็นการเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่ของ CMC สอดคล้องกับภาพทางสัณฐานวิทยาพบว่ารูพรุนมีขนาดเล็กลงและมีจำนวนรูพรุนเพิ่มมากขึ้น

4.2.4 ลักษณะการบวมน้ำ (swelling) ของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลที่มีการเติมแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์

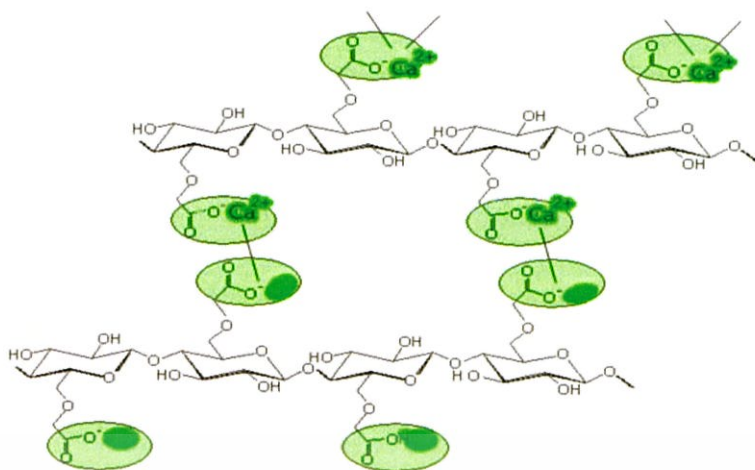


รูปที่ 4.10 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์การบวมน้ำของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลที่มีการเติมแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ 0.2 %w/v และ 0.4 %w/v และไม่ได้เติมแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์

จากรูปที่ 4.10 แสดงเปอร์เซ็นต์การบวมน้ำของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลระหว่างโปรตีนเซรีซิน และ CMC ทั้งที่ไม่มีการเติมแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ (สูตร 20:80) และมีการเติมแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ 0.2 %w/v (สูตร HA-1) และ 0.4 %w/v (สูตร HA-2) ในน้ำกลั่นทุก ๆ 10 นาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง พบว่าเมื่อมีการเติมแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ทำให้มีความสามารถในการบวมน้ำของชิ้นงานเพิ่มขึ้น แต่ชิ้นงานมีการสูญเสียรูปร่างข้างลง ซึ่งพิจารณาได้จากลักษณะความชันของเส้นกราฟที่ค่อย ๆ ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับสูตร 20:80 ที่ไม่มีการเติมแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ โดยสูตร HA-2 มีความสามารถในการบวมน้ำมากที่สุดและมีการสูญเสียรูปร่างข้างที่มากที่สุด เนื่องจากแคลเซียมไอออนจากแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ทำให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงขึ้นและมีความสามารถในการทำให้เนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลที่ได้จากโปรตีนเซรีซิน และ CMC มีสมบัติในการบวมน้ำได้มากขึ้นในขณะที่ชิ้นงานยังคงมีโครงสร้างที่แข็งแรง

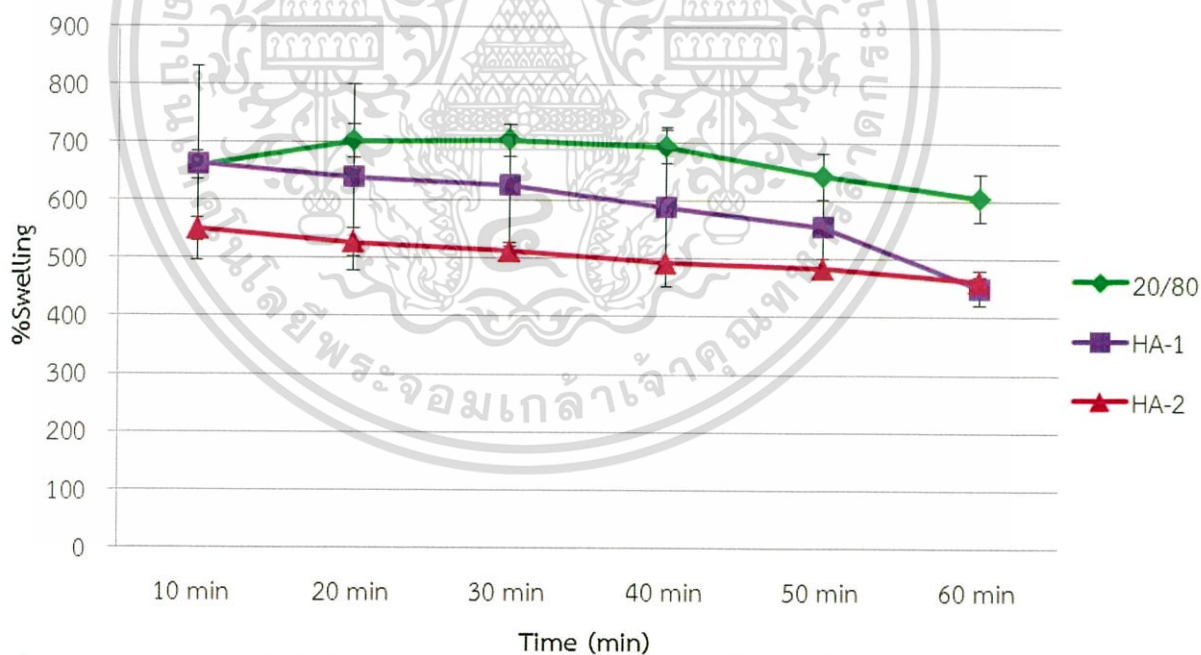
การทดลองนี้พบว่า การเพิ่มปริมาณของสารก่อพันธะเชื่อมโยง $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_2\text{OH}$ ในสารละลายกรดจะเพิ่มการบวมน้ำของเนื้อเยื่อโครงสร้างที่มี CMC อยู่ซึ่งคล้ายกับที่ A.J. Bruhi^[35] และคณะพบเมื่อทดลองผสม CMC กับแป้งและใช้ $\text{Al}(\text{SO}_4)_3 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ เป็นสารเชื่อมโยง อย่างไรก็ตามถ้าปริมาณสารก่อพันธะเชื่อมโยงมากเกินไปจนจุดเหมาะสม บริเวณที่เกิดการเชื่อมโยงก็จะมีมากเกินไปทำให้รูพรุนมีขนาดเล็กส่งผลให้การบวมน้ำลดลง

แคลเซียมไอออนจากแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์สามารถเกิด ionic electrostatic กับ COO^- ของ CMC ได้ดังรูปที่ 4.11 โดยจะขัดขวางการเคลื่อนไหวของสายโซ่โมเลกุลของ CMC เอกส (restrict mobility of chain) ส่งผลให้ชิ้นงานที่ได้แข็งแรงและมีการละลายน้ำลดลง ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 แสดงโครงสร้างในการเกิด ionic electrostatic ระหว่างแคลเซียมไอออนจากแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์กับ COO^- ของ CMC^[35]

4.2.5 ลักษณะการบวมตัว (swelling) ของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลที่มีการเติมแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ในสารละลายบัฟเฟอร์ pH 7.4



รูปที่ 4.12 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์การบวมตัวของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลที่มีการเติมแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ 0.2 %w/v และ 0.4 %w/v และไม่ได้เติมแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์

จากรูปที่ 4.12 แสดงเปอร์เซ็นต์การบวมตัวของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลระหว่างโปรตีนเซรีซิน และ CMC สูตร 20:80 ทั้งที่ไม่มีการเติมแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์และที่มีการเติมแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ 0.2 %w/v (สูตร HA-1) และ 0.4 %w/v (สูตร HA-2) ใน phosphate buffer เอกสาลีนที่มี pH = 7.4 ทุกๆ 10 นาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง พบว่าในสารละลาย phosphate buffer ไม่ว่าจะกรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

saline เนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลสูตร HA-1 และ HA-2 มีเปอร์เซ็นต์การบวมตัวที่ pH 7.4^[36] ได้มากกว่าน้ำกลั่น ดังแสดงในรูปที่ 4.10

pKa ของ CMC มีค่าประมาณ 4.6 ซึ่งหมู่คาร์บอกซิลิกจะไอออไนซ์ที่ pH > 4.6 ขณะที่ pH < 4.6 หมู่คาร์บอกซิลิกจะจับโปรตอน ดังนั้นที่ pH > 4.6 หมู่คาร์บอกซิลิกจะอยู่ในสภาพ COO⁻ ทำให้เกิดแรงผลักทางไฟฟ้าสถิต (electrostatic repulsion) ระหว่างหมู่ COO⁻ ด้วยกันทำให้การบวมตัวเพิ่มขึ้นในสูตร 20:80 ที่ไม่มีการเติมแคลเซียมไฮดรอกซีอะปาไทต์ สำหรับชิ้นงาน HA-1 และ HA-2 มีการเติมแคลเซียมไฮดรอกซีอะปาไทต์ การบวมตัวจะมีค่าน้อยกว่าชิ้นงานที่ไม่มีแคลเซียมไฮดรอกซีอะปาไทต์ ดังรูปที่ 4.10 เป็นการสนับสนุนว่าแคลเซียมไฮดรอกซีอะปาไทต์ที่เติมลงไปเกิด ionic electrostatic กับ COO⁻ ของ CMC

(หมายเหตุ : phosphate buffer saline มี pH = 7.4 ซึ่งเท่ากับเลือด)

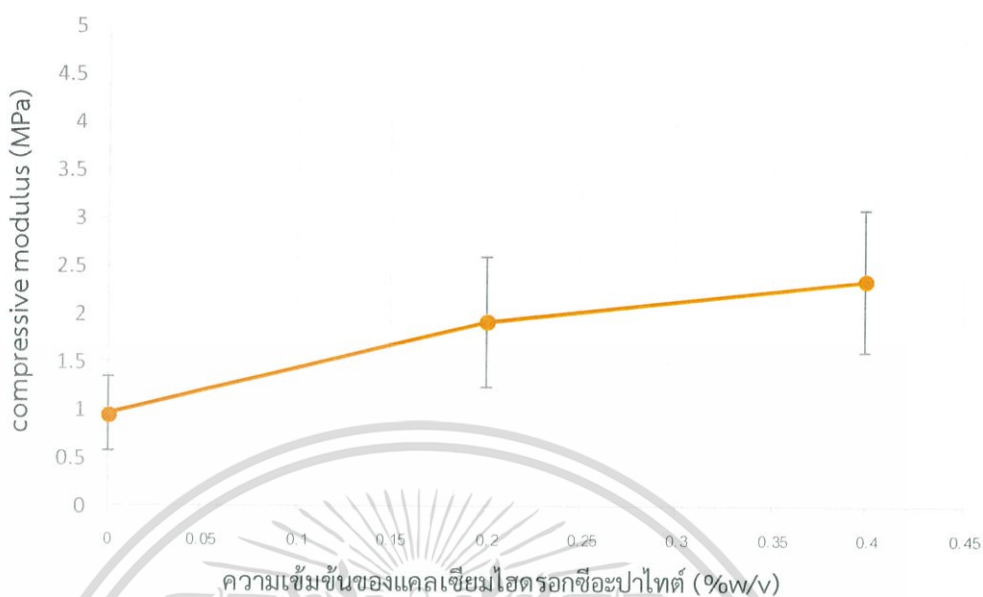
4.2.6 การทดสอบสมบัติเชิงกลของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลที่มีการเติมแคลเซียมไฮดรอกซีอะปาไทต์

4.2.6.1 การทดสอบความเค้นแรงกดอัด (Compressive stress)



รูปที่ 4.13 แสดงค่าความเค้นแรงกด (compressive stress) ที่ 50% ของความหนาของชิ้นงาน ของชิ้นงานที่ไม่มีแคลเซียมไฮดรอกซีอะปาไทต์ (สูตร 20:80) และมีการเติมแคลเซียมไฮดรอกซีอะปาไทต์ 0.2 %w/v (สูตร HA-1) และ 0.4 %w/v (สูตร HA-2)

4.2.6.2 การทดสอบค่าความแข็งยืดหยุ่น (Compressive modulus)



รูปที่ 4.14 แสดงค่าความแข็งยืดหยุ่น (compressive modulus) ที่ 50% ของความหนาของชิ้นงานที่ไม่มีการเติมไฮดรอกซีอะปาไทต์ (สูตร 20:80) และมีการเติมแคลเซียมไฮดรอกซีอะปาไทต์ 0.2 %w/v (สูตร HA-1) และ 0.4 %w/v (สูตร HA-2)

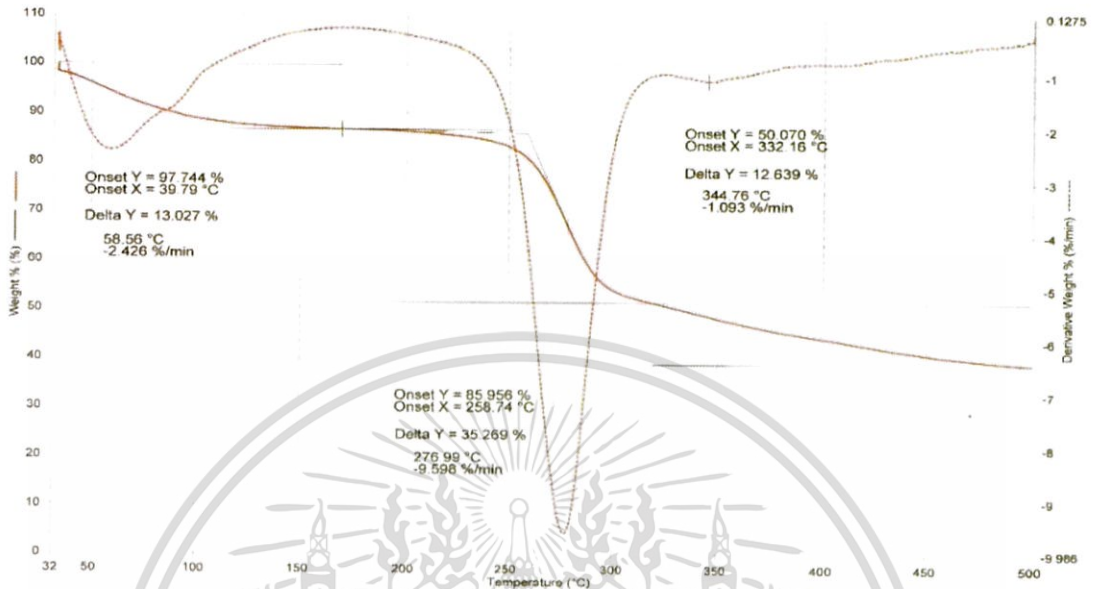
จากรูปที่ 4.13 พบว่าเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลที่ได้จากการผสมระหว่างโปรตีนเซรีซิน และ CMC ในอัตราส่วน 20:80 ที่มีการเติมแคลเซียมไฮดรอกซีอะปาไทต์ทำให้มีค่าความเค้นแรงกดสูงสุดที่ 50% ของความหนาของชิ้นงานเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงด้วยแคลเซียมไฮดรอกซีอะปาไทต์ และพบว่าสูตร 20:80 ที่ปรับปรุงด้วยแคลเซียมไฮดรอกซีอะปาไทต์ 0.4 %w/v มีค่าความเค้นแรงกดสูงที่สุด เนื่องจากแคลเซียมไอออนจากแคลเซียมไฮดรอกซีอะปาไทต์เกิด electrostatic interaction กับ COO^- เกิดการยึดสายโซ่โมเลกุลของ CMC ดังรูปที่ 4.11 จึงต้องใช้แรงในการกดมากขึ้นเพื่อให้ชิ้นงานเกิดการเสียรูป

จากรูปที่ 4.14 แสดงค่าความแข็งยืดหยุ่น (compressive modulus) ของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลที่ได้จากการผสมระหว่างโปรตีนเซรีซิน และ CMC ในอัตราส่วน 20:80 ที่มีและไม่มี การเติมแคลเซียมไฮดรอกซีอะปาไทต์ พบว่าสูตร HA-1 และ HA-2 ที่ปรับปรุงด้วยแคลเซียมไฮดรอกซีอะปาไทต์ มีค่าความแข็งยืดหยุ่นมากกว่าสูตร 20:80 ที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงด้วยแคลเซียมไฮดรอกซีอะปาไทต์ โดย HA-2 มีค่าความแข็งยืดหยุ่นสูงที่สุดเหตุผลเช่นเดียวกันกับรูปที่ 4.13 ซึ่งเป็นแนวโน้มเดียวกับ compressive stress

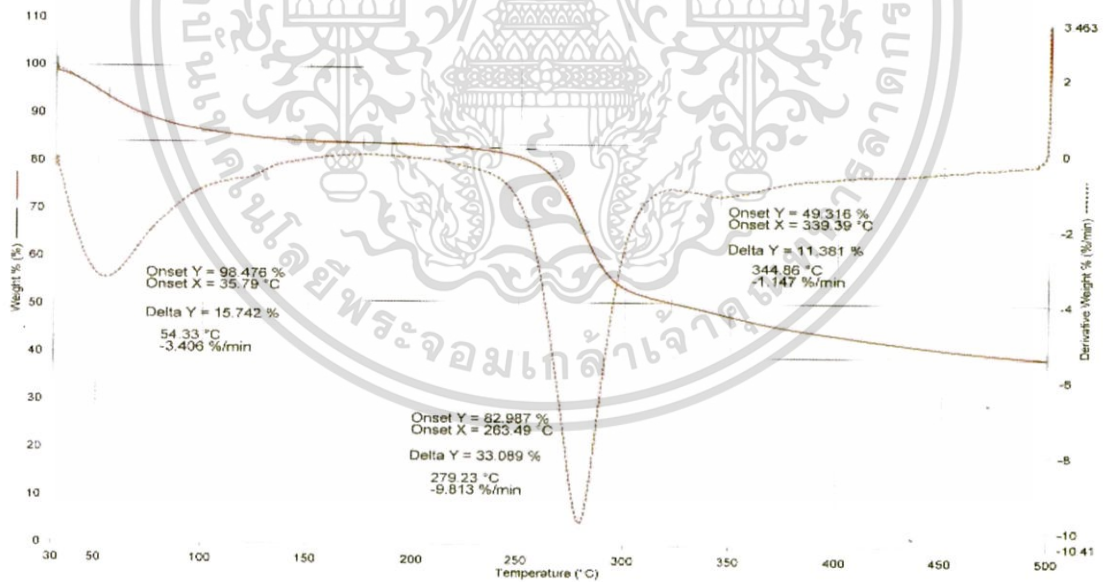
4.2.7 การทดสอบสมบัติทางความร้อน (TGA) ของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลที่มีการเติมแคลเซียมไฮดรอกซีอะปาไทต์

การวิเคราะห์ทางความร้อนโดยใช้เทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริก (thermogravimetric analysis ; TGA) เพื่อศึกษาผลของแคลเซียมไฮดรอกซีอะปาไทต์ที่มีผลต่อเสถียรภาพทางความร้อน โดยพิจารณาจากอุณหภูมิการสลายตัว และศึกษาผลของแคลเซียมไฮดรอกซีอะปาไทต์ที่มีผลต่อความเข้ากันได้ของสารละลายผสมระหว่างโปรตีนเซรีซิน และ CMC โดยพิจารณาจากจำนวนชั้นในการ

สลายตัวของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจล ผลการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลสูตรต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15(ก) แสดงเทอร์โมแกรมจากการวิเคราะห์ TGA ของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจล สูตร HA-1



รูปที่ 4.15(ข) แสดงเทอร์โมแกรมจากการวิเคราะห์ TGA ของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจล สูตร HA-2

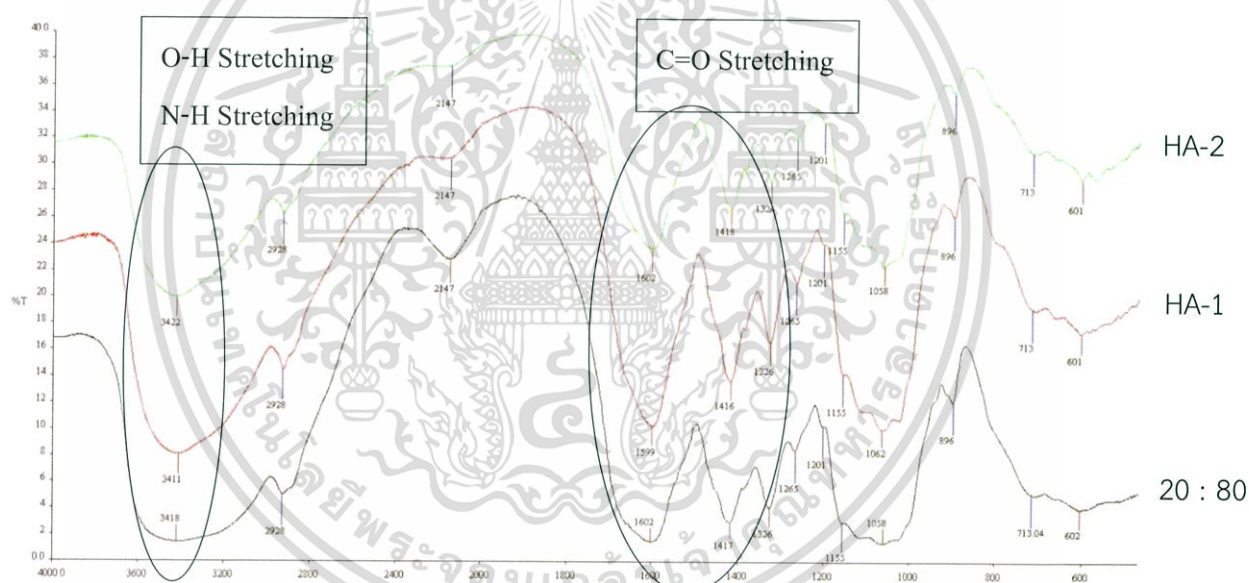
จากรูปที่ 4.15(ก) และ 4.15(ข) พบว่าสมบัติทางความร้อนของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลที่ได้จากการผสมระหว่างโปรตีนเซรีซิน 20% และ CMC 80% ที่มีการเติมแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทด์ 0.2 %w/v และ 0.4 %w/v มีอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนอยู่ที่ 277 °C และ 279 °C ตามลำดับ ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกัน และเมื่อทำการเปรียบเทียบกับเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลที่ได้จากการผสมระหว่างโปรตีนเซรีซิน 20% และ CMC 80% ที่ไม่มีการเติมแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทด์

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไทด์ พบว่าสูตรที่มีการเติมแคลเซียมไฮดรอกซีอะปาไทด์มีอุณหภูมิการสลายตัวที่สูงขึ้น ซึ่งแสดงถึงเสถียรภาพของชิ้นงานที่เพิ่มขึ้น และเป็นการยืนยันว่า CMC กับ แคลเซียมไฮดรอกซีอะปาไทด์เกิดอันตรกิริยากัน และเมื่อพิจารณาขั้นตอนการสลายตัวพบว่าการสลายตัวเพียงขั้นตอนเดียว ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแคลเซียมไฮดรอกซีอะปาไทด์ไม่มีผลต่อความเข้ากันได้ของสารละลายเซริซินและสารละลาย CMC

4.2.8 การทดสอบหาหมู่ฟังก์ชัน (FT-IR) ของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลที่มีการเติมแคลเซียมไฮดรอกซีอะปาไทด์

เนื่องจากต้องการปรับปรุงความแข็งแรงของชิ้นงานเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลสูตร 20:80 โดยการเติมแคลเซียมไฮดรอกซีอะปาไทด์ จึงทำการเปรียบเทียบ IR spectrum ของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลที่ได้จากการผสมระหว่างโปรตีนเซริซิน กับ CMC ในอัตราส่วน 20:80 ที่ไม่มีการเติมแคลเซียมไฮดรอกซีอะปาไทด์ และมีการเติมแคลเซียมไฮดรอกซีอะปาไทด์ 0.2 %w/v (สูตร HA-1) และ 0.4 %w/v (สูตร HA-2) ว่ามีการเปลี่ยนแปลงหมู่ฟังก์ชันหรือไม่ และมีความแตกต่างกันอย่างไร ซึ่งอินฟราเรดสเปกตรัมจากการวิเคราะห์ FT-IR แสดงดังรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 แสดง IR spectrum ของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลสูตร HA-1, HA-2 และสูตรที่ไม่มีการเติมแคลเซียมไฮดรอกซีอะปาไทด์

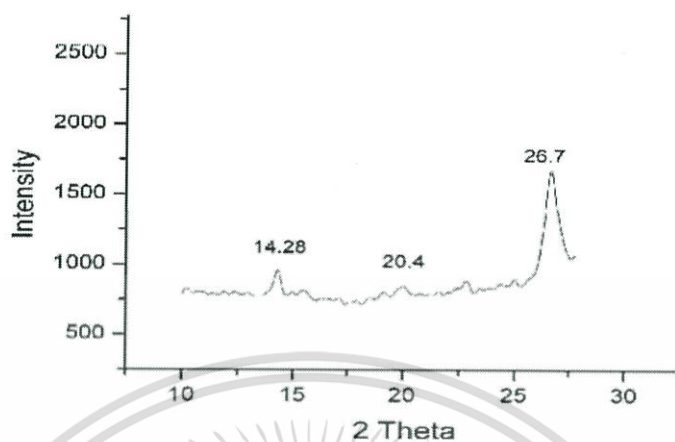
จากรูปที่ 4.16 IR spectrum ของสารละลายผสมระหว่างโปรตีนเซริซิน กับ CMC ที่อัตราส่วน 20:80 โดยมีการเติมแคลเซียมไฮดรอกซีอะปาไทด์ 0.2 %w/v, 0.4 %w/v และสูตรที่ไม่มีการเติมแคลเซียมไฮดรอกซีอะปาไทด์ตามลำดับ พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกซีอะปาไทด์ไม่ได้ส่งผลต่อ IR spectrum

ตารางที่ 4.8 แสดงการเปรียบเทียบ IR spectrum ของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลที่มีและไม่มี การเติมแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์พบว่ามี การเลื่อน (shift) ตำแหน่งเลขคลื่นของหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ ดังนี้^{[37],[38]}

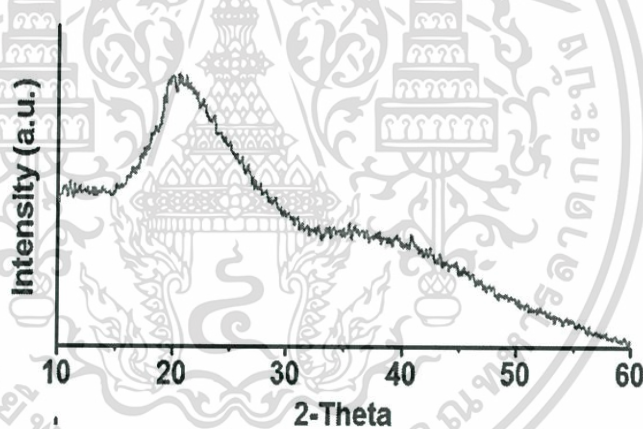
หมู่ฟังก์ชัน	สูตร 20:80	สูตร HA-1	สูตร HA-2	Standard
OH stretching	3418	3422	3411	3200-3600
C=O stretching	1° amide = 1602 2° amide = 1417 3° amide = 1326	1° amide = 1599 2° amide = 1416 3° amide = 1385	1° amide = 1602 2° amide = 1418 3° amide = 1383	1° amide = 1600-1700 2° amide = 1500-1550 3° amide = 1250-1350
NH stretching	ทับกับ OH	ทับกับ OH	ทับกับ OH	3300-3400
CH stretching	2920	2920	2920	2800-3000
C-O stretching ของ แอลกอฮอล์	1° OH = 1155 2° OH = 1113 3° OH = 1062	1° OH = 1153 2° OH = 1113 3° OH = 1062	1° OH = 1153 2° OH = 1113 3° OH = 1058	1° OH = 1050 2° OH = 1100 3° OH = 1150
C=O stretching ของคาร์บอกซิลิก	1602	1599	1602	1750
CH ₃ bending	1326	1326	1326	1450, 1375
OH bending ของ CMC	1326	1306	1306	ประมาณ 1300

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.9 การทดสอบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD) ของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลที่มีและไม่มี การเติมแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์

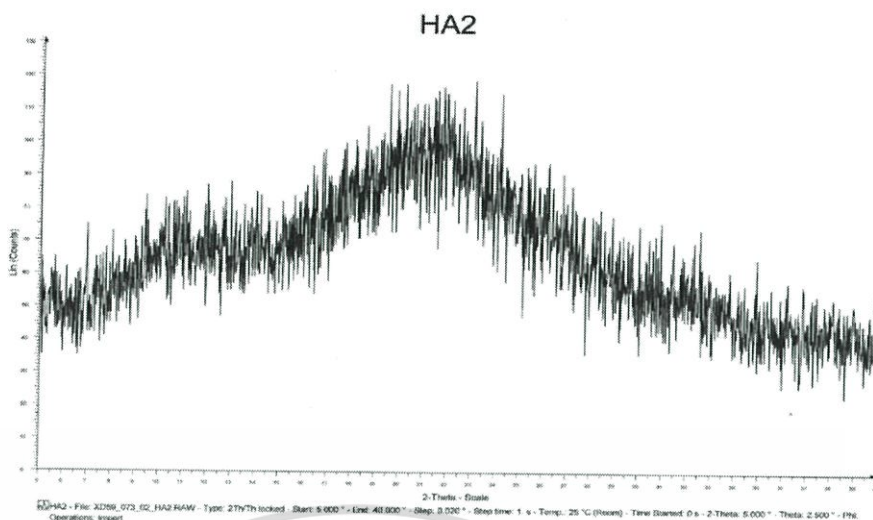


รูปที่ 4.17 แสดงการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของไพรตินเซรีซิน^[39]



รูปที่ 4.18 แสดงการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของ CMC^[40]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.21 แสดงการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของเนื้อเยื่อโครงสร้างที่ได้จากการผสมระหว่างโปรตีนเซรีซิน 80% และ CMC 20% ที่มีการเติมแคลเซียมไฮดรอกซีอะปาไทต์ 0.4 %w/v (สูตร HA-2)

จากรูปที่ 4.17 แสดงการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของโปรตีนเซรีซิน พบว่าพีกมีลักษณะแหลมซึ่งแสดงถึงควมมีผลึกของโครงสร้างโปรตีนเซรีซินและจะพบพีกที่ 2 θ ชั้นที่ตำแหน่ง 14.28, 20.4 และ 26.7

จากรูปที่ 4.18 แสดงการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของสารละลายคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (CMC) พบว่าพีกมีลักษณะกว้างคล้ายเนินเขาเนื่องจาก CMC เป็นพอลิเมอร์ที่มีความเป็นผลึกต่ำ และพบพีก 2 θ ชั้นที่ประมาณ 21 และ บริเวณช่วง 35 ถึง 45

จากรูปที่ 4.19 แสดงการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของแคลเซียมไฮดรอกซีอะปาไทต์ พบว่าพีกมีลักษณะแหลมอย่างชัดเจนเนื่องจากว่าแคลเซียมไฮดรอกซีอะปาไทต์เป็นอนุภาคของแข็งและมีผลึกสูง ทำให้พบพีกที่ 2 θ ชั้นหลายตำแหน่งตั้งแต่ 25 จนถึง 40

เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.20 ซึ่งเป็นกราฟแสดงการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของเนื้อเยื่อโครงสร้างที่ได้จากการผสมระหว่างโปรตีนเซรีซิน 80% และ CMC 20% (สูตร 80 : 20) พบว่าพีกมีลักษณะกว้างและมีลักษณะกราฟเหมือนกับกราฟที่ได้จาก CMC มาก เนื่องจากในอัตราส่วนผสมมีปริมาณของ CMC มากถึง 80% และจะพบพีกที่ 2 θ ชั้นที่ประมาณ 11 ซึ่งคาดว่าเกิดจากเกิดอัตราปฏิกิริยาระหว่าง CMC กับเซรีซินซึ่งส่งผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างผลึกของเซรีซิน ส่วนพีกที่ขึ้นที่ตำแหน่งประมาณ 21 และเนินพีกช่วง 30 ถึง 40 คือพีกที่แสดงความเป็นผลึกของ CMC ส่วนรูปที่ 4.21 ซึ่งเป็นกราฟแสดงการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของเนื้อเยื่อโครงสร้างที่ได้จากการผสมระหว่างโปรตีนเซรีซิน 80% และ CMC 20% โดยที่มีการเติมแคลเซียมไฮดรอกซีอะปาไทต์ลงไป 0.4 %w/v (สูตร HA-2) พบว่าเมื่อพิจารณาจากกราฟจะเห็นว่ากราฟมีลักษณะคล้ายกับรูปที่ 4.20 แต่จะไม่พบเนินพีกในช่วง 30 ถึง 40 เนื่องจากอิทธิพลของแคลเซียมไฮดรอกซีอะปาไทต์ที่เติมลงไปซึ่งส่งผลต่อรูปร่างผลึกของ CMC

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

ตอนที่ 1 : ศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่างสารละลายเซรีซินและสารละลาย CMC ที่มีต่อสมบัติของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจล

1. เนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลที่เตรียมได้จาก 2 %w/v ของสารละลายเซรีซิน มีสมบัติในการดูดซับน้ำได้ดี รูพรุนมีขนาดใหญ่ มีจำนวนรูพรุนน้อย (เมื่อเทียบกับชิ้นงานขนาดเท่ากัน) แต่มีสมบัติเชิงกล เช่น การทนแรงกดอัดได้ดี ทำให้ชิ้นงานแตกหักได้ง่าย

2. เนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลที่เตรียมได้จาก 5 %w/v ของสารละลาย CMC มีสมบัติในการดูดซับน้ำดีมาก ทำให้ละลายตัวอย่างรวดเร็ว รูพรุนมีขนาดเล็ก มีจำนวนรูพรุนมาก (เมื่อเทียบกับชิ้นงานขนาดเท่ากัน) และมีสมบัติเชิงกล เช่น การทนแรงกดอัดได้สูง และสามารถกลับคืนรูปร่างได้เมื่อเอาแรงกดออก

3. เนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลที่เตรียมจากสารละลายผสมระหว่างสารละลายเซรีซินเข้มข้น 2 %w/v และสารละลาย CMC เข้มข้น 5%w/v พบว่าเซรีซินจะช่วยชะลอการละลายน้ำของ CMC ให้ช้าลงและ CMCทำให้รูพรุนมีขนาดเล็กลงแสดงว่ามีการเกิดอันตรกิริยาระหว่างกัน

4. ขนาดของรูพรุนและการกระจายของรูพรุนขึ้นอยู่กับอัตราส่วนผสมของ 2 %w/v ของสารละลายเซรีซิน และ 5 %w/v ของสารละลาย CMC และขนาดรูพรุนของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลที่ได้ในทุกสูตรอยู่ในช่วง 80-300 μm ซึ่งเป็นช่วงที่สามารถนำไปใช้ในการทางการแพทย์ได้^[42]

5. อัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลที่ได้จาก 2 %w/v ของสารละลายเซรีซินและ 5 %w/v ของสารละลาย CMC คือสูตร 20:80

ตอนที่ 2 : ศึกษาผลของแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่มีต่อสมบัติของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจล

1. การเติมแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ ช่วยลดการละลายน้ำของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจล แสดงให้เห็นว่าเกิดการเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่โมเลกุลของ CMC กับแคลเซียมไอออน ส่งผลให้การละลายน้ำลดลง ทำให้การดูดซับน้ำเพิ่มขึ้น

2. แคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์มีสมบัติในการช่วยเพิ่มความแข็งให้แก่ชิ้นงาน ทำให้สมบัติเชิงกล เช่น การรับแรงกดอัดสูงขึ้น

3. แคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์มีผลทำให้ชิ้นงานที่ได้จากการผสมระหว่างสารละลายเซรีซินและสารละลาย CMC มีเสถียรภาพทางความร้อนเพิ่มขึ้น

4. สูตรที่เหมาะสมที่สุดของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลที่ได้จากการปรับปรุงด้วยการเติมแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ คือสูตร HA-2

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. สมบัติของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลที่ได้จากโรงงานพิเศษเล่มนี้เป็นสมบัติที่ได้จากสารละลายเซริซินโดยใช้ไหมไทยสายพันธุ์นางน้อยสีเหลืองเท่านั้น ซึ่งอาจให้ผลที่แตกต่างกับเซริซินที่ได้จากไหมสายพันธุ์อื่น ๆ
2. การศึกษาอัตราส่วนระหว่างสารละลายเซริซินกับสารละลาย CMC ควรเพิ่มอัตราส่วนในการศึกษา เช่น 60:40, 70:30 เป็นต้น
3. ในการเลือกอัตราส่วนที่เหมาะสมต่อการนำไปปรับปรุงควรเลือกตามลักษณะของการนำไปใช้งาน
4. ในการทดสอบหาค่า %swelling ต้องมีการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นให้คงที่ตลอดการทดสอบทุกชิ้น รวมถึงการใช้ทิชชูซับน้ำออกจากตะแกรงลวดที่ใส่ชิ้นงานก่อนนำไปชั่งน้ำหนักเพราะน้ำเพียงเล็กน้อยอาจส่งผลต่อการทดสอบที่ผิดพลาดได้
5. ขั้นตอนการตัดชิ้นงานไปใช้ทดสอบ ควรสวมถุงมือ เพราะอาจจะมีผลต่อการทดสอบต่าง ๆ เช่น FT-IR
6. การทดสอบการทนการรับแรงกดอัด อาจจะทำการเทียบกับกระดูกไก่หรือกระดูกหมูเพื่อนำมาเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ขึ้นรูปได้
7. ควรมีการนำไปทดสอบจริงทางการแพทย์ เช่น นำไปทดลองใช้กับสัตว์

เอกสารอ้างอิง

- [1] ทศยาภรณ์ จันทร์ส่องแสง. 2555. “การเตรียมไฮโดรเจลจากคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสและไฟโบรอินจากไหมไทย.” วิทยาศาสตร์บัณฑิต, 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.” วิทยาศาสตร์บัณฑิต, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [5] Rajput, S.K. and Mukesh, K.S. 2015. “Serecin-AUnique Biomaterial.” IOSR Journal of Polymer and Textile Engineering(IOSR-JPTE).
- [6] Babak, G. Hadi, A. and Ali, A.E. 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] Sunita, N. and Kundu, S.C. 2013. “Serecin-carboxymethyl cellulose porous matrices as cellular wound dressing material.” Society for Biomaterials.
- [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, M. and Prabha, D.N. 2005 “Novel Porous,Polysaccharide Scaffold for Tissue Enginnering Applications” Trends Biomater,Artif Organs.
- [11] BME5013 . 2553. วิศวกรรมชีวการแพทย์ (Biomedical Engineering). [online]. Available : www.biomedthai.blogspot.com. เข้าถึงเมื่อวันที่ 10 ก.พ. 59
- [12] Wikipedia. Carboxymethyl cellulose. [Online]. Available : https://en.wikipedia.org/wiki/Carboxymethyl_cellulose. เข้าถึงเมื่อวันที่ 13 ก.พ. 59
- [13] ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ. 2556. Hydroxyapatite. [Online]. Available : <https://www.mtec.or.th/about-us/mtec-annual-report>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 15 มี.ค. 59
- [14] Weiner, S. and Wagner, H.D. 1998. “Structure-Mechanical Function Relations.” MATERIAL BONE.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [15] สุขเกษม กังวานตระกูล. 2554. “การปรับปรุงสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบเซรามิกชีวภาพ ไฮดรอกซีแอปาทาइट-อะลูมินาด้วยอนุภาคเซอร์โคเนีย (Improvement of Mechanical Properties of Hydroxyapatite-Alumina Bioceramic Composite Materials with Zirconia Particles)”
- [16] Murugan and Ramakrishna. 2005. “Development of nanocomposites for bone Grafting.” *Composites Science and Technology*.
- [17] สุวิภา เจริญภักดี. 2556. “ผลของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่มีต่อไฮโดรเจลรูพรุนจากสารเมือกแมงลัก.” *วิทยาศาสตร์บัณฑิต, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง*.
- [18] Jiang, L. Li, Y. and Xiong, Ch. 2009. “Preparation and biological properties of a novel composite scaffold of nano-hydroxyapatite/chitosan/carboxymethyl cellulose for bone tissue engineer” *Journal of Biomedical Science*.
- [19] สารระ สาโรวาท และรัตนวรรณ มกรพันธ์. 2546. “เซรีซิน โปรตีนกาวไหม: พอลิเมอร์ชีวภาพที่ไม่ควรมองข้าม.” *วารสารวิทยาศาสตร์*.
- [20] Jiang, L. Li, Y. and Xiong, Ch. 2009. “Preparation and biological properties of a novel composite scaffold of nano-hydroxyapatite/chitosan/carboxymethyl cellulose for bone tissue engineer” *Journal of Biomedical Science*.
- [21] Sayeda, M. and et al. 2013. “Preparation and Properties of Carboxymethyl Cellulose (CMC)/Sodium alginate (SA) Blends Induced by Gamma Irradiation” *Journal of Polymers and the Environment*.
- [22] Kunya Jintana and Tamikazu. 2002-2003. “Proceedings of the Takasaki Symposium on Radiation Application of Natural Polymers in Asia” *JAERI-Conf*.
- [23] Kim, S.H. and et al. 2007 “Method for preparing porous polymer scaffold for tissue engineering using gel spinning molding technique.” *Application*.
- [24] Tipawan, S. Juthamas, R. and Pornanong, A. 2012. “Development of ethyl alcohol-precipitated silksericin/polyvinyl alcohol scaffolds for accelerated healing of full-thickness wounds.” *International Journal of Pharmaceutics*.
- [25] Toya, T. Jotaki, R. and Kato, A. 1986. “Specimen Preparations in EPMA and SEM” *JEOL Training Center EP*.
- [26] ASTM International Designation. “Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Cellular Plastics.” *ASTM 1621-10*.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [27] สิริพร กิจชัยเจริญพร และอุทัยวรรณ วัชรสินธุ์. 2014. เทคนิควิเคราะห์สมบัติทางความร้อน ของ วัสดุ (Thermal Analysis Technique, TA). [Online]. Available : <https://www.mtec.or.th/mcu/phcl/index.php/th/2014-09-04-06-23-37/14-uncategorised/38-thermal-analysis-th>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 2 ก.พ. 59
- [28] กนกวรรณ กองสำลี. 2552. “การปรับปรุงฟิล์มไฮโดรเจลจากไหมไทยนางน้อยด้วย 2 -ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลตและบิสอะคริลาไมด์เป็นสารเชื่อมโยง.” วิทยาศาสตร์บัณฑิต, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [29] บทความน่ารู้ ศูนย์เครื่องมือ มทส. 2009. สมบัติทางความร้อน. [Online]. Available : <http://cste.sut.ac.th/articles/?p=294>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 2 ก.พ. 59
- [30] ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ. การตรวจสอบหาหมู่ฟังก์ชันของสาร. 2546. [Online]. Available : <http://www.nanotec.or.th/>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 2 ก.พ. 59
- [31] กรมวิทยาศาสตร์บริการ. 2558. การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์. [Online]. Available : www.lib3.dss.go.th. เข้าถึงเมื่อวันที่ 11 พ.ค. 59
- [32] Powsjaradi, A. Ghasmzadeh, H. and Mojahedi, F. 2009. “Swelling properties of CMC-g-poly (AAM-co-AMPS) superabsorbent hydrogel.” *Journal of Applications Polymer Science*.
- [33] Dr. Eric Braverman. 2005-2015. What Everyone Needs to Know About Serine?. [Online]. Available : www.nutritional-supplements-health-guide.com. เข้าถึงเมื่อวันที่ 6 เม.ย. 59
- [34] Qian, L.G. Li, H.T. Li, P.R. and Chen, Y.C. 2012. “Preparation of Hydroxyapatite Coatings by Acid Etching-electro Deposition on Pure Titanium.” *Biomedical Engineering and Biotechnology (iCBEB 2012)*.
- [35] 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*.
- [36] Kim, S.J. Yoon, S.G. and Kim, S.I. 2005. “Synthetic and characterization of an interpenetrating polymer network composed of poly (methacrylic acid) and poly (vinyl alcohol).” *Composites Science and Technology*.
- [37] Alexander, S. Rose, A.F. Hyung, S.S and Lee, B.T. 2013. “Hydroxyapatite delivery to dentine tubules using carboxymethyl cellulose dental hydrogel for treatment of dentine hypersensitivity.” *Journal Biomedical Science and Engineering*.
- [38] กนกวรรณ กองสำลี. 2552. “การปรับปรุงฟิล์มไฮโดรเจลจากไหมไทยนางน้อยด้วย 2 -ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลตและบิสอะคริลาไมด์เป็นสารเชื่อมโยง.” วิทยาศาสตร์บัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [39] Saranga, D. Rupjyoti, B. Rajalakshmi, D. and Dipali, D. 2012, “Purification and characterization of glue like sericin protein from a wild silkworm *Antheraea assamensis* halfer.” Global journal of bio-science & biotechnology,
- [40] Molly, T.G. Ahmad, N.M. Ud, D.S. Mustri, B. and Farid, K. 2015. “Fabrication of hierarchically organized nanocomposites of Ba/alginate/ carboxymethylcellulose/graphene oxide/Au nanoparticles and their catalytic efficiency in *o*-nitroaniline reduction.” New Journal Chem.
- [41] Research Gate. XRD pattern of the synthetic hydroxyapatite powder. [Online] Available : https://www.researchgate.net/figure/8204583_fig8_Figure-1-XRD-pattern-of-the-synthetic-hydroxyapatite-powder เข้าถึงเมื่อวันที่ 10 พ.ค. 59
- [42] Karageorgiou, V. Kaplan, D. 2005. “Porosity of 3D biomaterial scaffolds and osteogenesis” Biomaterials.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




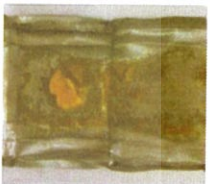






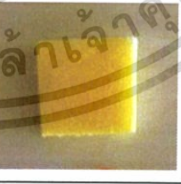


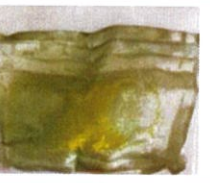
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก




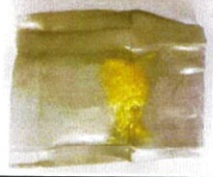
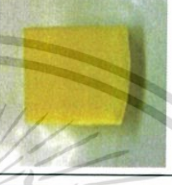
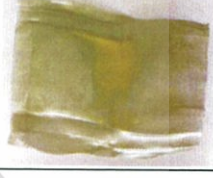






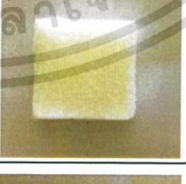

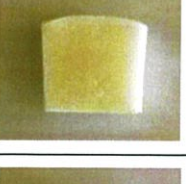

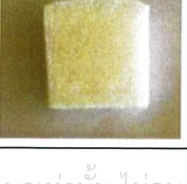

การบวมตัว (swelling)

การบวมตัวในน้ำกลั่น และการบวมตัวในสารละลาย Phosphate Buffer Saline ของ
ชิ้นงานเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจล

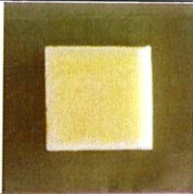

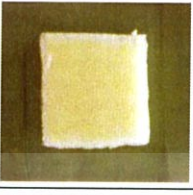




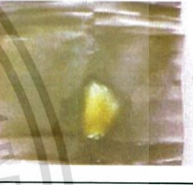




ตารางที่ ก-1 ลักษณะการบวมตัวของชิ้นงานในน้ำกลั่น

สูตรที่	Sericin : CMC (%)	ชั้นที่	ก่อนแช่	หลังแช่น้ำ 60 นาที
1	100 : 0	1		
		2		
		3		
2	80 : 20	1		
		2		
		3		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สูตรที่	Sericin : CMC (%)	ชั้นที่	ก่อนแช่	หลังแช่น้ำ 60 นาที
3	50 : 50	1		
		2		
		3		
4	20 : 80	1		
		2		
		3		
5	0 : 100	1		
		2		
		3		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สูตรที่	Sericin : CMC (%)	ชั้นที่	ก่อนแช่	หลังแช่น้ำ 60 นาที
6	HA-1	1		
		2		
		3		
7	HA-2	1		
		2		
		3		

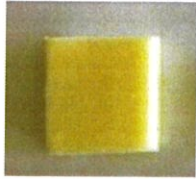
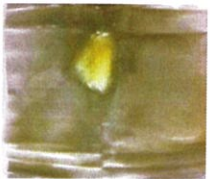
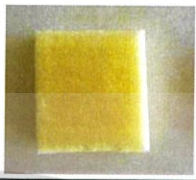
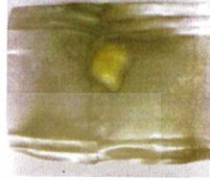








เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-2 ตารางบันทึกผลการบวมตัวของชิ้นงานในน้ำกลั่น

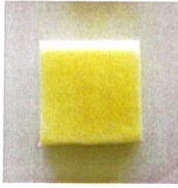
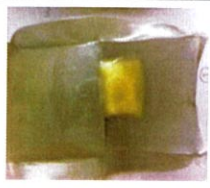




สูตร	ชั้นที่	น้ำหนัก ชิ้นงาน เริ่มต้น	น้ำหนักชิ้นงานเมื่อเวลาผ่านไป 1 ชม.					
			10 min	20 min	30 min	40 min	50 min	60 min
100:0	1	0.0719	1.0784	0.9215	0.7565	0.6931	0.5487	0.5241
	2	0.0668	1.0928	0.8961	0.6044	0.5667	0.5036	0.4796
	3	0.0655	0.6781	0.6022	0.5357	0.4866	0.5354	0.5036
80:20	1	0.0846	1.1788	1.2435	0.9767	1.0194	0.9972	0.8341
	2	0.0830	1.1481	1.1659	0.9665	0.9098	1.0182	1.0638
	3	0.0808	1.0901	1.1289	1.0815	1.0907	0.7566	0.7949
50:50	1	0.1131	1.0527	0.9679	0.9166	0.8832	0.7153	0.6403
	2	0.1358	1.2469	1.1090	1.0850	1.0345	0.8792	0.8148
	3	0.1418	1.0524	1.1284	1.0178	0.8645	0.8625	0.7837
20:80	1	0.1794	1.0202	0.7439	0.8836	0.4277	0.183	0.0623
	2	0.1945	1.1039	1.0992	0.9570	0.8041	0.4382	0.2551
	3	0.1481	0.8387	0.7563	0.6169	0.5128	0.2442	0.1949
0:100	1	0.2093	1.0978	0.9174	0.7122	0.4618	0.0001	0.0000
	2	0.1696	0.9800	0.7501	0.3684	0.2101	0.1887	0.0000
	3	0.1747	0.8323	0.9619	0.5762	0.3030	0.1226	0.0000
HA-1	1	0.1814	1.0758	0.9274	0.7638	0.7014	0.5614	0.5081
	2	0.1502	0.7658	0.7403	0.7301	0.6740	0.4755	0.3897
	3	0.1521	0.9405	0.9310	0.7258	0.6684	0.4228	0.4331
HA-2	1	0.2069	1.0057	1.0061	1.0148	1.0126	0.9442	0.8069
	2	0.1870	1.0307	1.0432	0.9078	0.8864	0.7101	0.6583
	3	0.1842	1.2486	1.0486	0.9607	0.9379	0.8619	0.7314

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-3 ลักษณะการบวมตัวของชิ้นงานในสารละลาย phosphate buffer saline

สูตรที่	Sericin : CMC (%)	ชั้นที่	ก่อนแช่	หลังแช่น้ำ 60 นาที
4	20 : 80	1		
		2		
		3		
6	HA-1	1		
		2		
		3		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สูตรที่	Sericin : CMC (%)	ชั้นที่	ก่อนแช่	หลังแช่น้ำ 60 นาที
7	20 : 80	1		
		2		
		3		

ตารางที่ ก-4 ตารางบันทึกผลการบวมตัวของชิ้นงานในสารละลาย phosphate buffer saline

สูตร	ชั้นที่	น้ำหนัก ชิ้นงาน เริ่มต้น	น้ำหนักชิ้นงานเมื่อเวลาผ่านไป 1 ชม.					
			10 min	20 min	30 min	40 min	50 min	60 min
20:80	1	0.1029	0.7525	0.792	0.8109	0.8084	0.7759	0.7161
	2	0.1036	0.8018	0.8538	0.8665	0.8547	0.8038	0.7770
	3	0.1021	0.7898	0.8294	0.8042	0.7856	0.7141	0.6842
HA-1	1	0.1756	1.461	1.3851	1.2692	1.0863	1.1334	0.967
	2	0.1424	0.8151	0.7984	0.8862	0.8556	0.8181	0.7419
	3	0.1646	1.4576	1.4299	1.3712	1.3952	1.2292	0.9541
HA-2	1	0.1906	1.26	1.2475	1.1985	1.1377	1.09	1.0835
	2	0.2013	1.2627	1.2502	1.2277	1.1931	1.1594	1.1321
	3	0.1853	1.2241	1.1225	1.1059	1.0864	1.1177	1.0275

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-5 เเปอร์เซ็นต์การบวมตัวของชิ้นงานในน้ำกลั่น

สูตร	เปอร์เซ็นต์การบวมตัวในน้ำกลั่น					
	10 min	20 min	30 min	40 min	50 min	60 min
100:0	1290.35	1080.83	896.25	751.74	678.15	638.58
80:20	1314.65	1303.28	1119.15	1117.00	1013.95	983.80
50:50	763.71	722.73	675.72	617.45	529.37	472.94
20:80	467.51	410.26	367.04	232.69	129.72	16.30
0:100	426.25	377.06	195.77	72.65	-39.50	-100
HA-1	473.75	438.74	361.44	324.95	201.35	174.77
HA-2	471.70	437.80	399.16	390.87	334.67	279.70

ตารางที่ ก-6 เเปอร์เซ็นต์การบวมตัวของชิ้นงานใน phosphate buffer saline

สูตร	เปอร์เซ็นต์การบวมตัวใน phosphate buffer saline					
	10 min	20 min	30 min	40 min	50 min	60 min
20:80	659.60	702.05	704.03	693.35	643.10	605.35
HA-1	663.31	639.39	626.05	589.03	555.58	450.44
HA-2	549.65	527.12	511.84	491.964	483.67	461.79

การคำนวณเปอร์เซ็นต์การบวมตัว (%swelling) ของชิ้นงาน

จะได้ว่า

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

ตัวอย่างการคำนวณ

สำหรับเปอร์เซ็นต์การบวมตัวของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลที่เตรียมได้จากสูตร 100:0 ที่แช่ในน้ำกลั่นเป็นเวลา 10 นาที ชั้นที่ 1

โดย น้ำหนักชิ้นงานที่บวมน้ำ = 1.0784 กรัม

น้ำหนักชิ้นงานที่แห้ง = 0.0719 กรัม

จะได้ เเปอร์เซ็นต์การบวมตัว (%swelling) = $\frac{1.0784 - 0.0719}{0.0719} \times 100$

0.0719

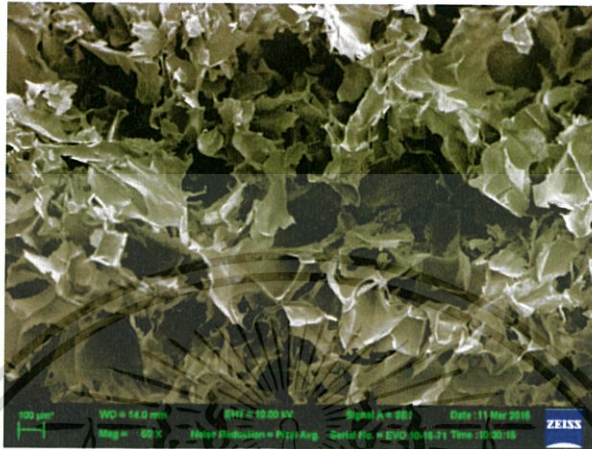
= 1399.86 %

หมายเหตุ : จากนั้นทำการคำนวณหาค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

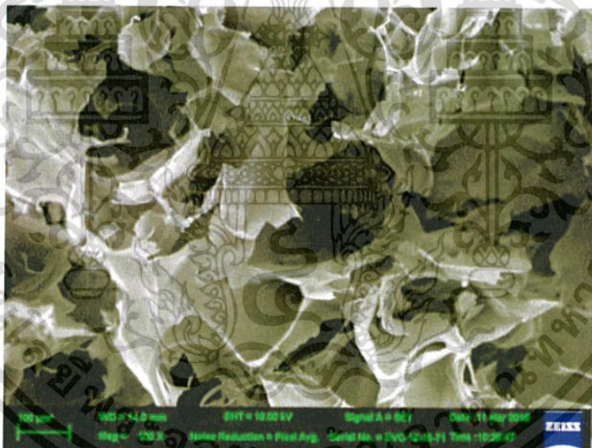
ภาคผนวก ข

สัณฐานวิทยา

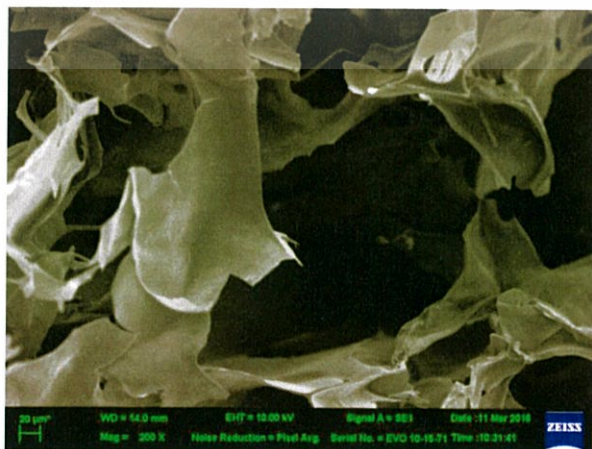
สัณฐานวิทยาของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลด้านตัดขวางจากเทคนิค SEM



รูปที่ ข-1 ภาพตัดขวางสูตร 100:0 ที่กำลังขยาย 50X

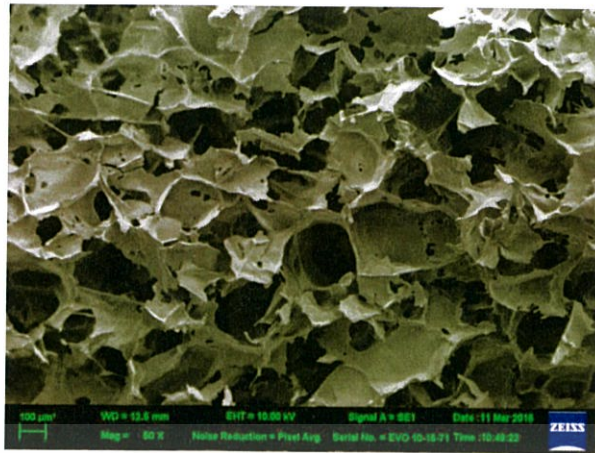


รูปที่ ข-2 ภาพตัดขวางสูตร 100:0 ที่กำลังขยาย 100X

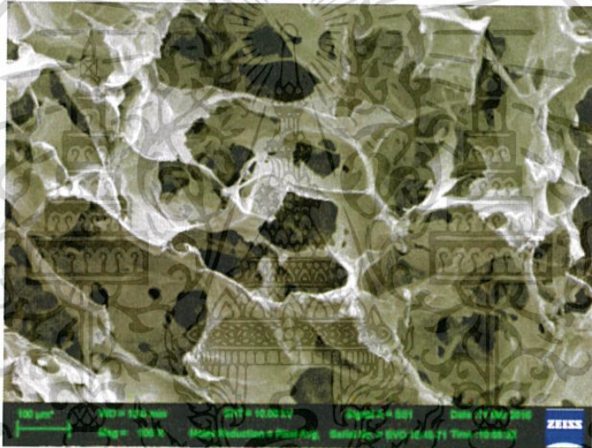


รูปที่ ข-3 ภาพตัดขวางสูตร 100:0 ที่กำลังขยาย 200X

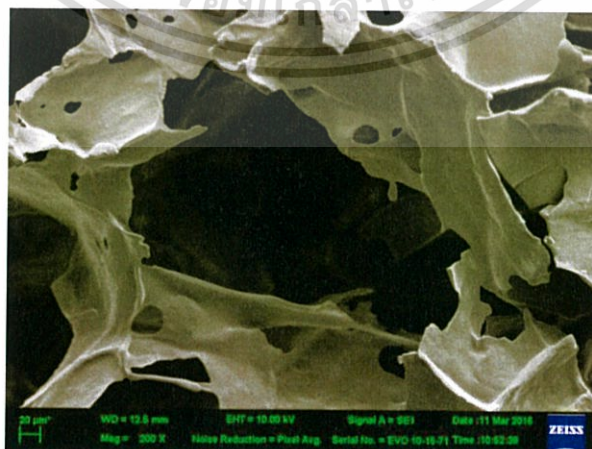
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ประโยชน์ในการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข-4 ภาพตัดขวางสูตร 80:20 ที่กำลังขยาย 50X

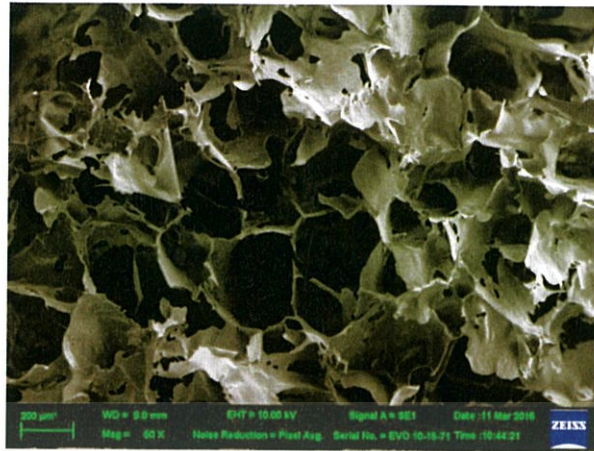


รูปที่ ข-5 ภาพตัดขวางสูตร 80:20 ที่กำลังขยาย 100X



รูปที่ ข-6 ภาพตัดขวางสูตร 80:20 ที่กำลังขยาย 200X

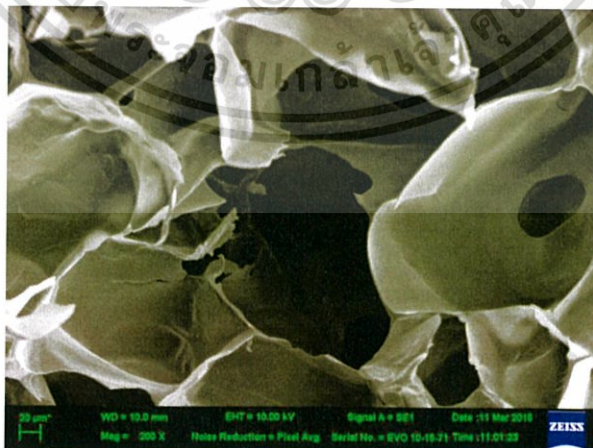
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข-7 ภาพตัดขวางสูตร 50:50 ที่กำลังขยาย 50X

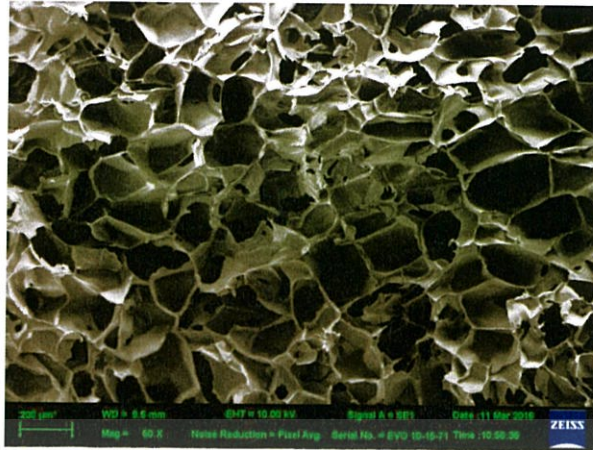


รูปที่ ข-8 ภาพตัดขวางสูตร 50:50 ที่กำลังขยาย 100X



รูปที่ ข-9 ภาพตัดขวางสูตร 50:50 ที่กำลังขยาย 200X

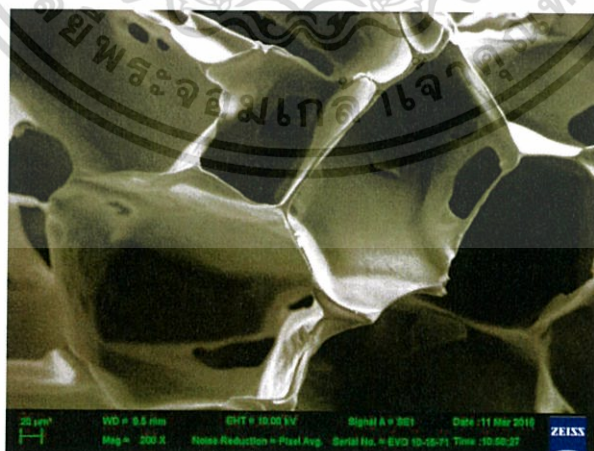
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข-10 ภาพตัดขวางสูตร 20:80 ที่กำลังขยาย 50X

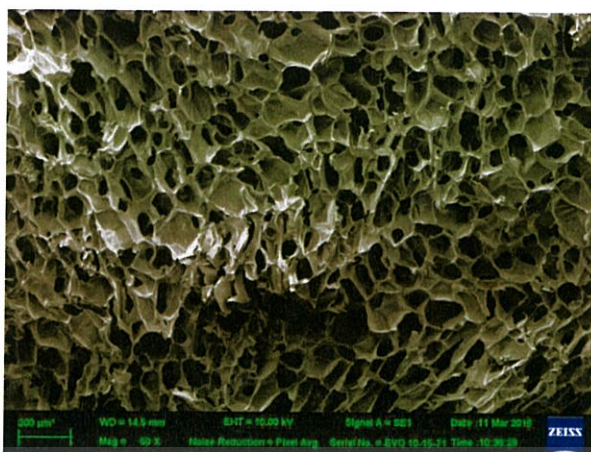


รูปที่ ข-11 ภาพตัดขวางสูตร 20:80 ที่กำลังขยาย 100X

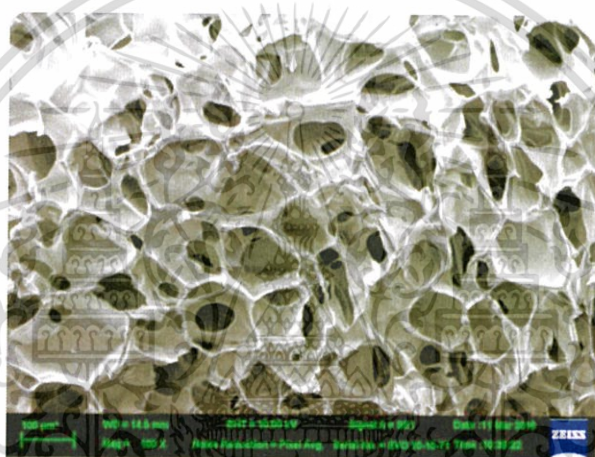


รูปที่ ข-12 ภาพตัดขวางสูตร 20:80 ที่กำลังขยาย 200X

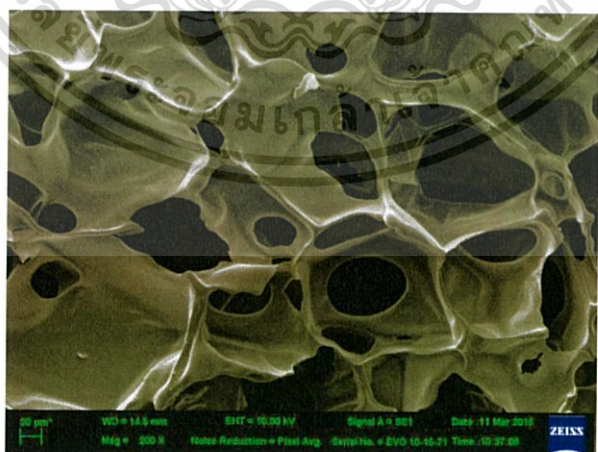
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข-13 ภาพตัดขวางสูตร 0:100 ที่กำลังขยาย 50X

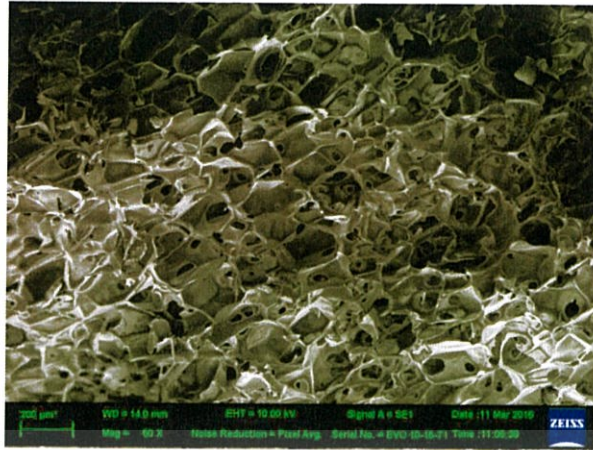


รูปที่ ข-14 ภาพตัดขวางสูตร 0:100 ที่กำลังขยาย 100X

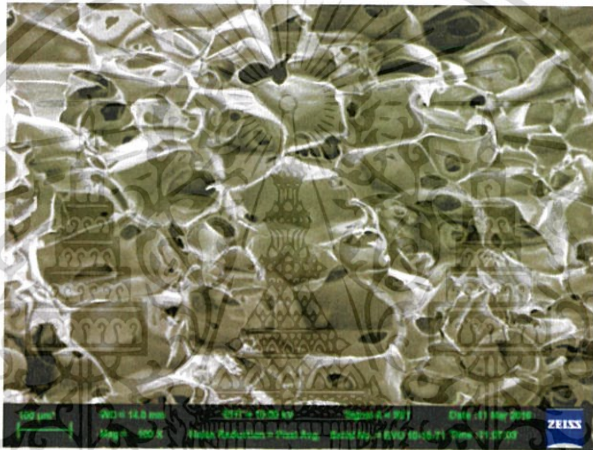


รูปที่ ข-15 ภาพตัดขวางสูตร 0:100 ที่กำลังขยาย 200X

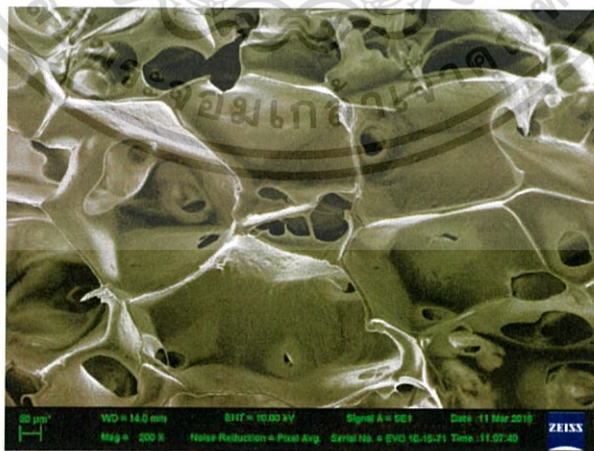
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข-16 ภาพตัดขวางสูตร HA-1 ที่กำลังขยาย 50X

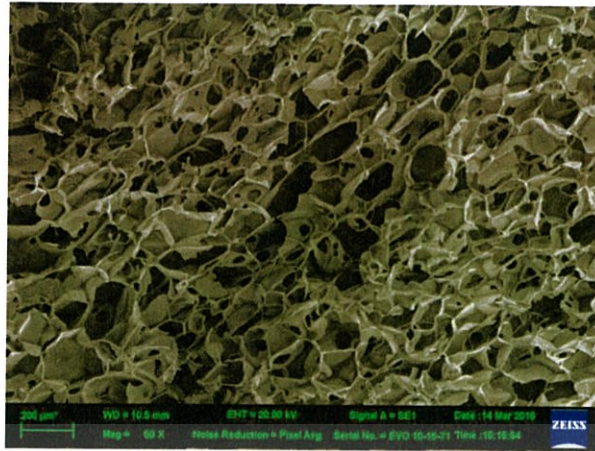


รูปที่ ข-17 ภาพตัดขวางสูตร HA-1 ที่กำลังขยาย 100X



รูปที่ ข-18 ภาพตัดขวางสูตร HA-1 ที่กำลังขยาย 200X

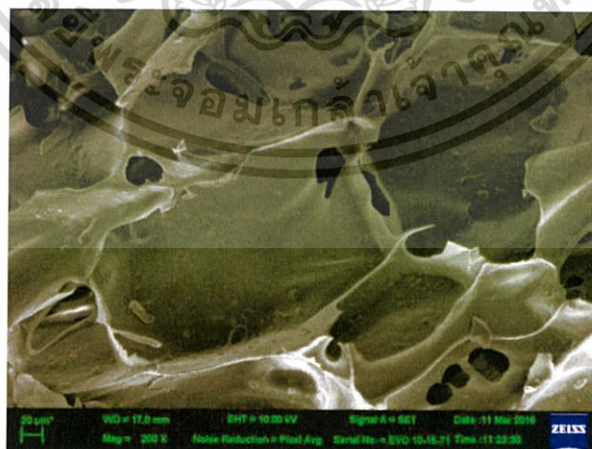
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข-19 ภาพตัดขวางสูตร HA-2 ที่กำลังขยาย 50X



รูปที่ ข-20 ภาพตัดขวางสูตร HA-2 ที่กำลังขยาย 100X

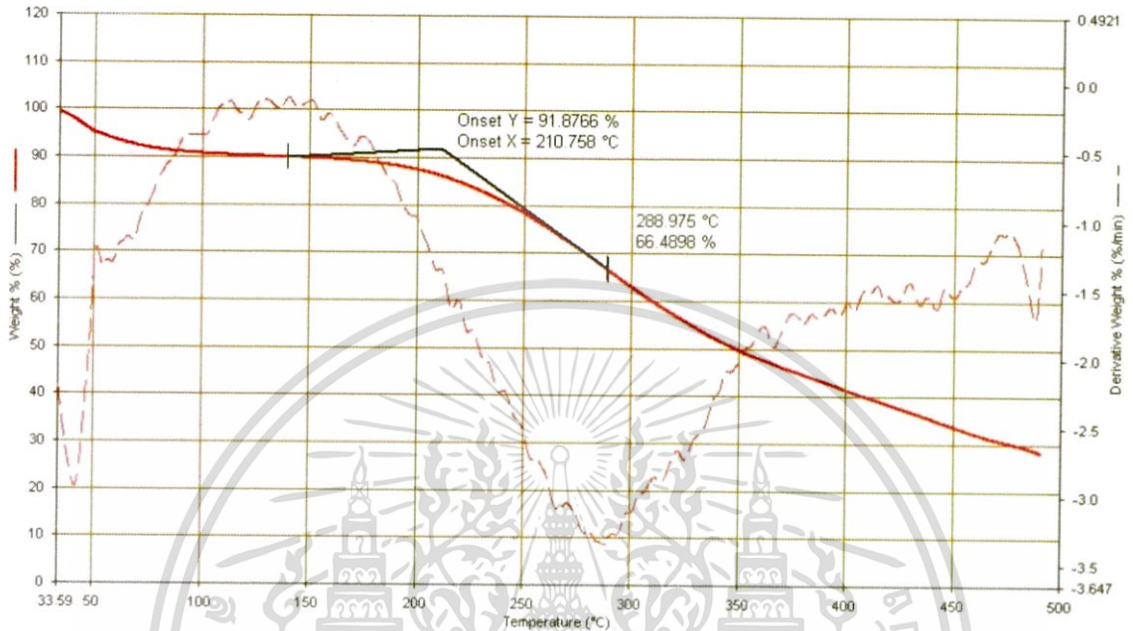


รูปที่ ข-21 ภาพตัดขวางสูตร HA-2 ที่กำลังขยาย 200X

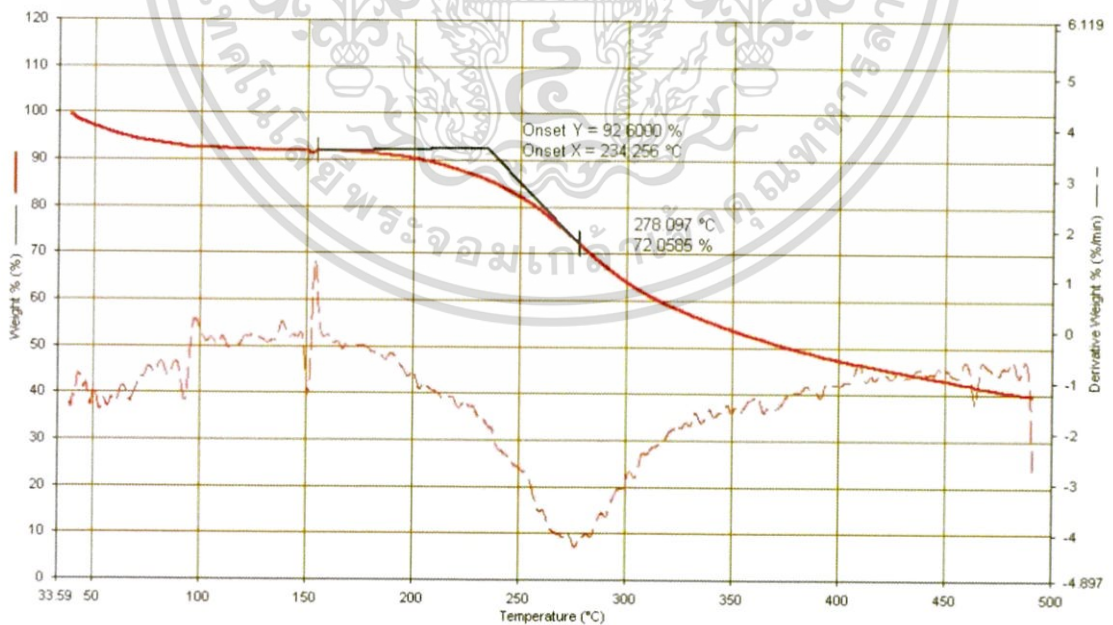
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

สมบัติทางความร้อน (TGA)

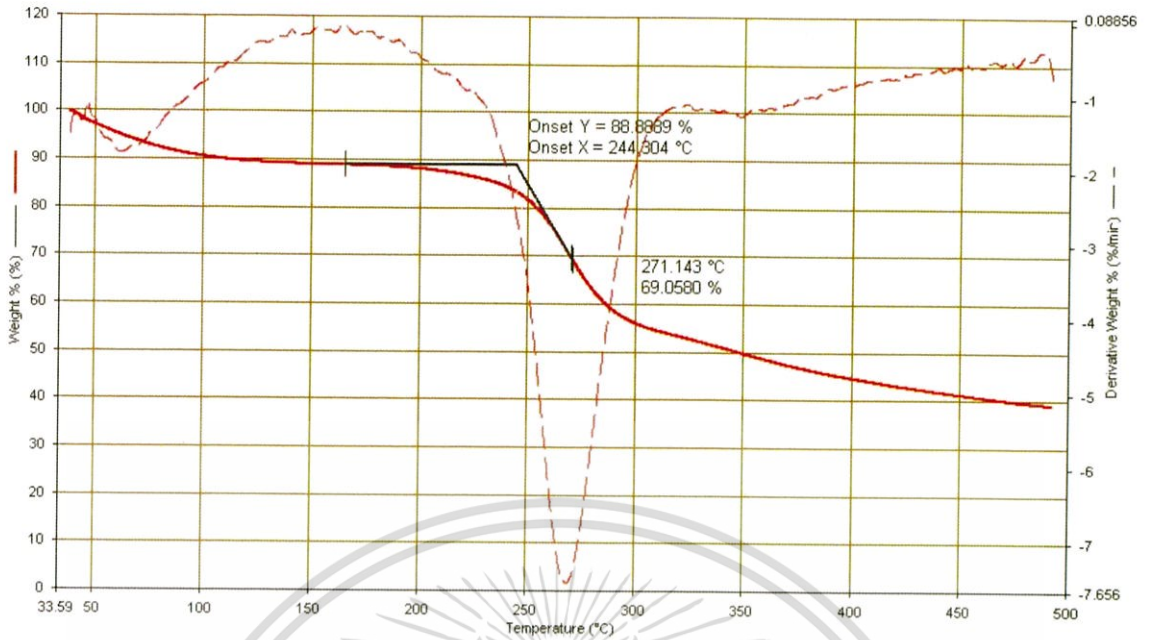


รูปที่ ค-1 เทอร์โมแกรมจากการวิเคราะห์ TGA ของเนื้อเยื่อโครงสร้างที่ได้จากสูตร 100:0

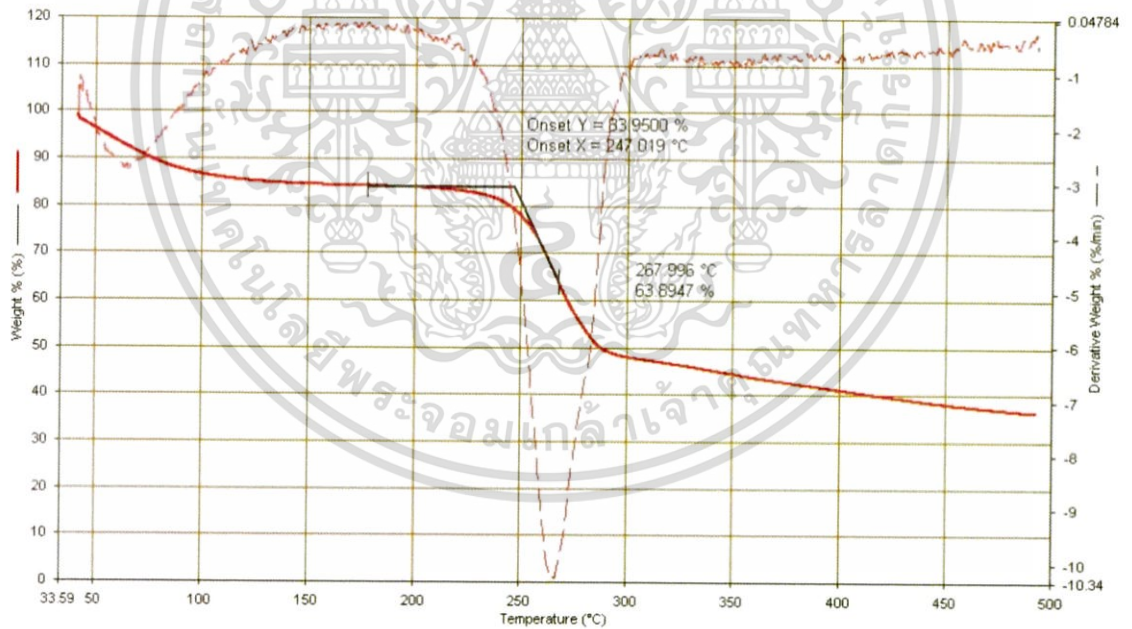


รูปที่ ค-2 เทอร์โมแกรมจากการวิเคราะห์ TGA ของเนื้อเยื่อโครงสร้างที่ได้จากสูตร 80:20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

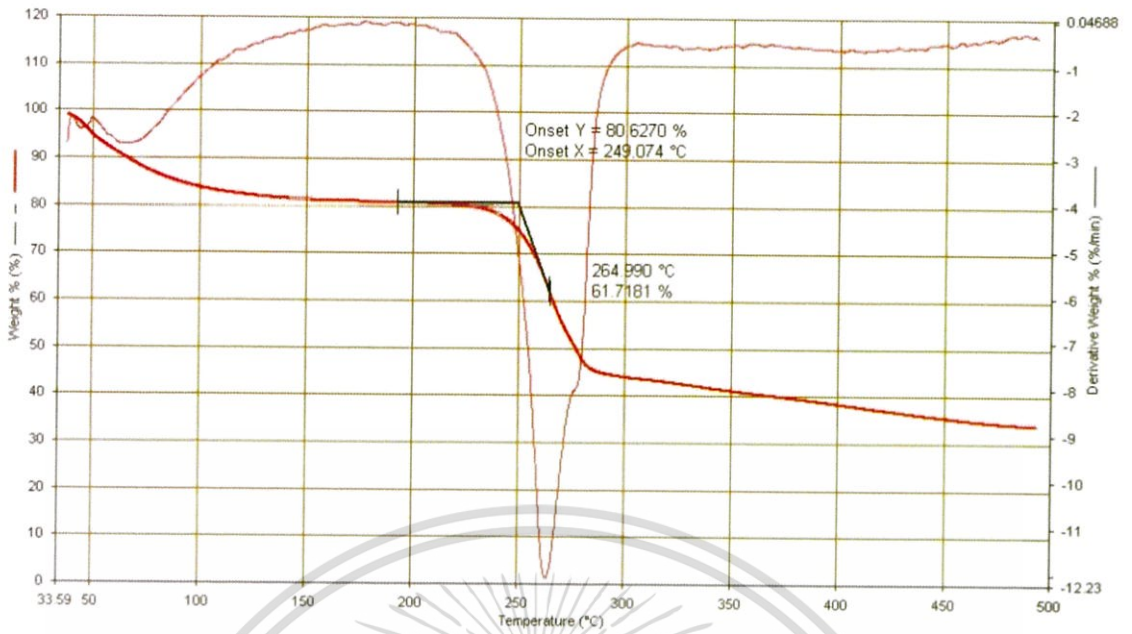


รูปที่ ค-3 เทอร์โมแกรมจากการวิเคราะห์ TGA ของเนื้อเยื่อโครงสร้างที่ได้จากสูตร 50:50

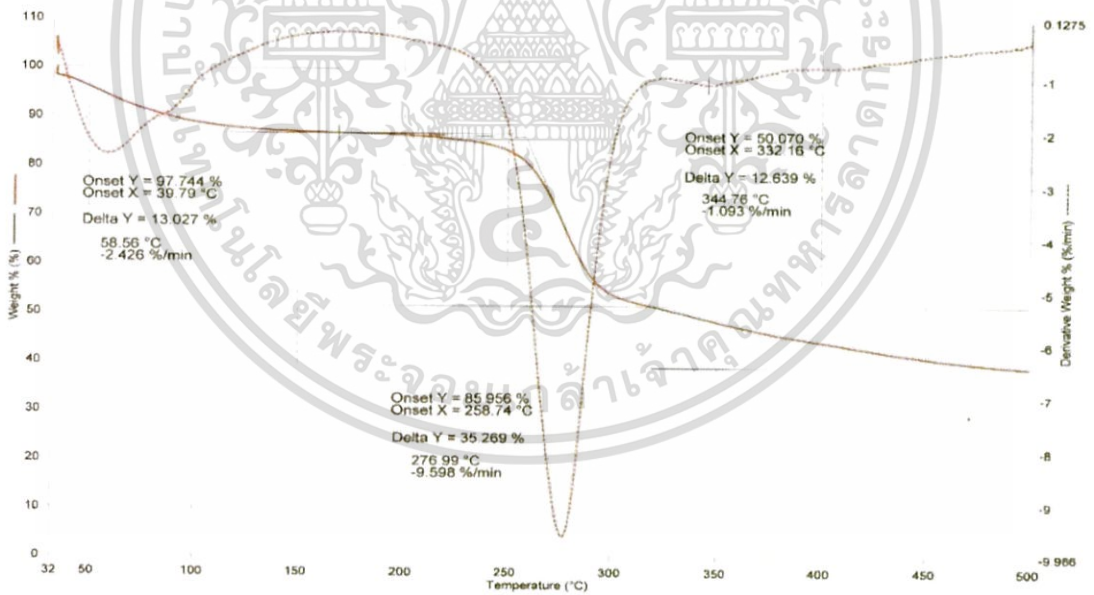


รูปที่ ค-4 เทอร์โมแกรมจากการวิเคราะห์ TGA ของเนื้อเยื่อโครงสร้างที่ได้จาก สูตร 20:80

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

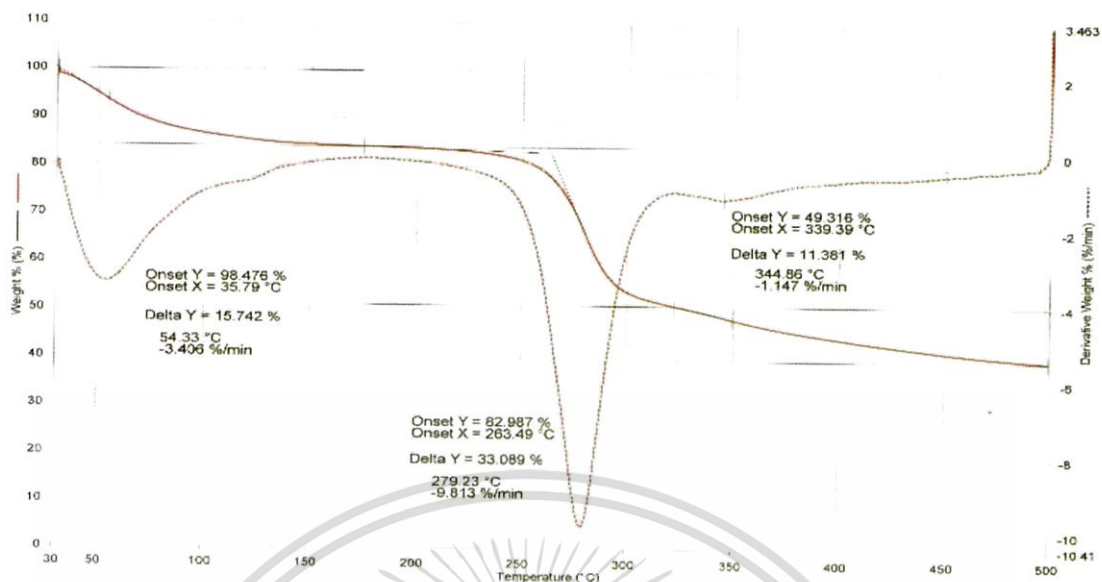


รูปที่ ค-5 เทอร์โมแกรมจากการวิเคราะห์ TGA ของเนื้อเยื่อโครงสร้างที่ได้จากสูตร 0:100



รูปที่ ค-6 เทอร์โมแกรมจากการวิเคราะห์ TGA ของเนื้อเยื่อโครงสร้างที่ได้จากสูตร HA-1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



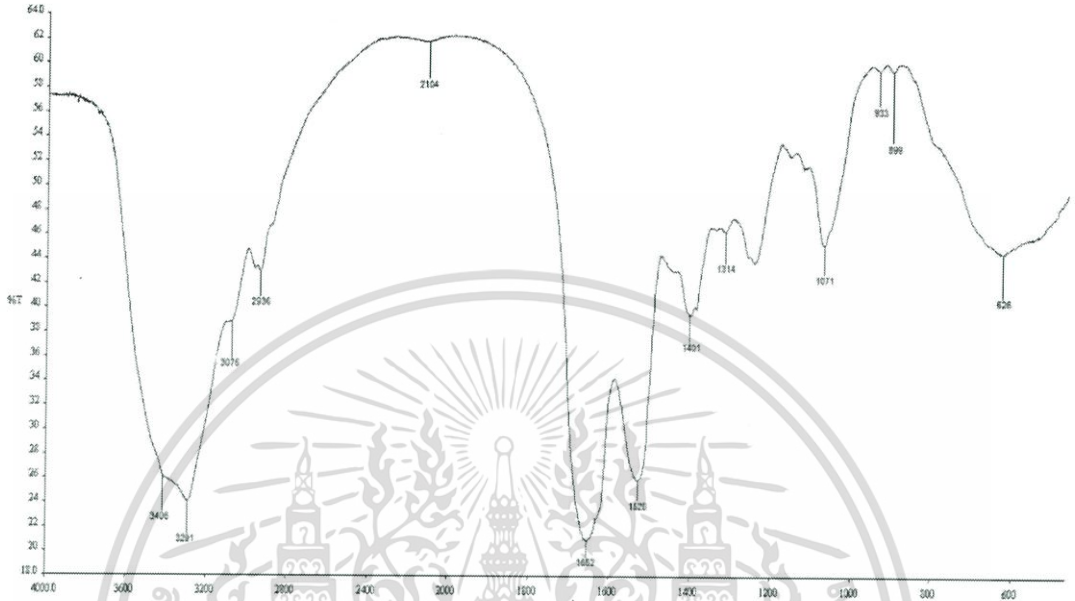
รูปที่ ค-6 เทอร์โมแกรมจากการวิเคราะห์ TGA ของเนื้อเยื่อโครงสร้างที่ได้จากสูตร HA-2



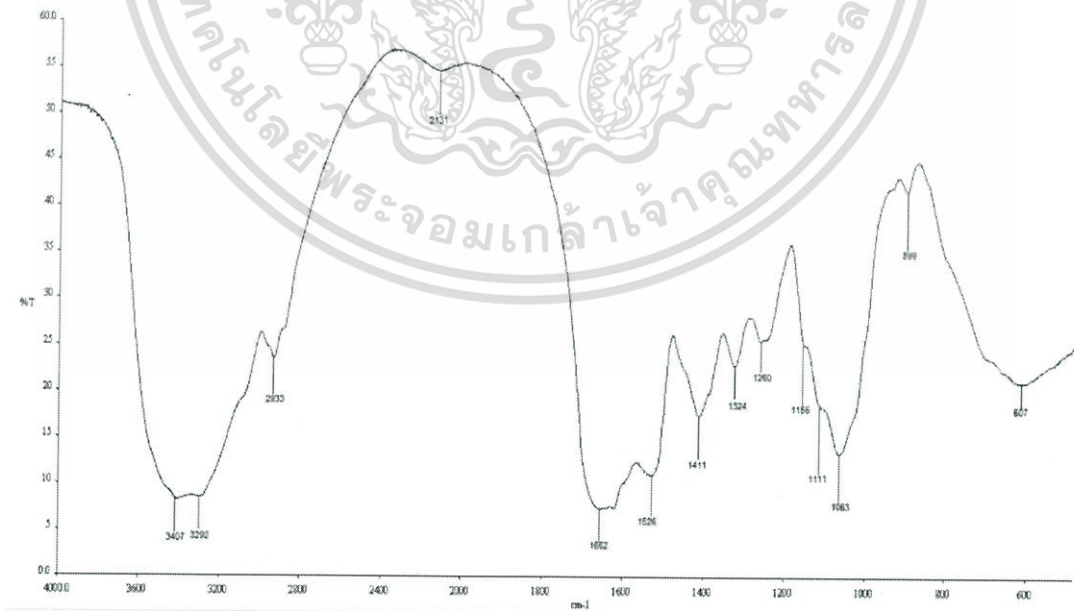
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง

การทดสอบหาหมู่ฟังก์ชัน (FT-IR)

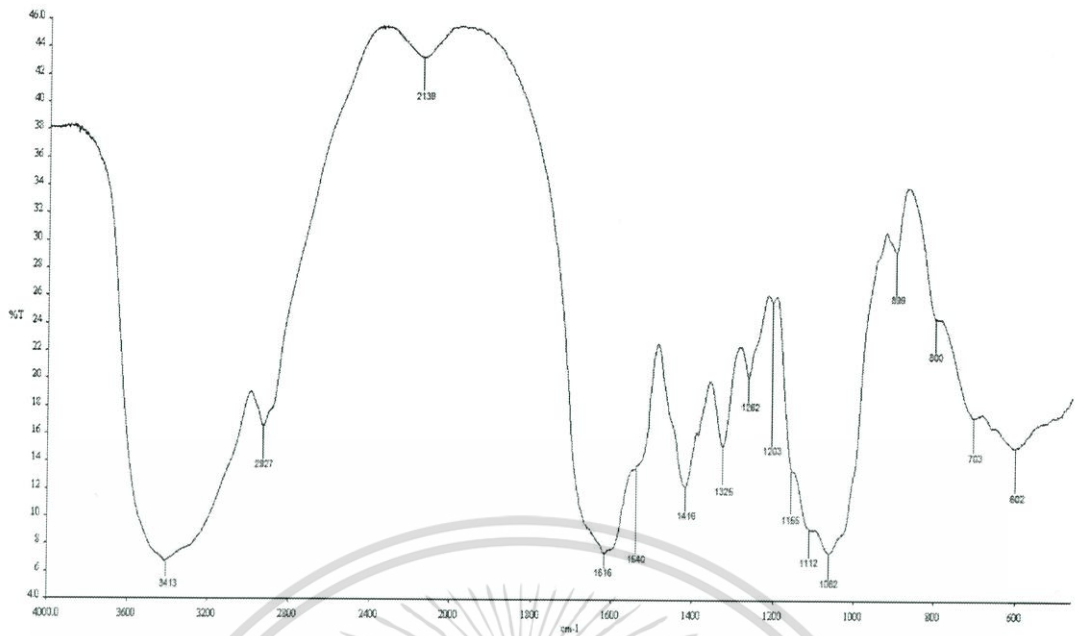


รูปที่ ง-1 แสดง IR spectrum ของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลที่ได้จากสูตร 100:0

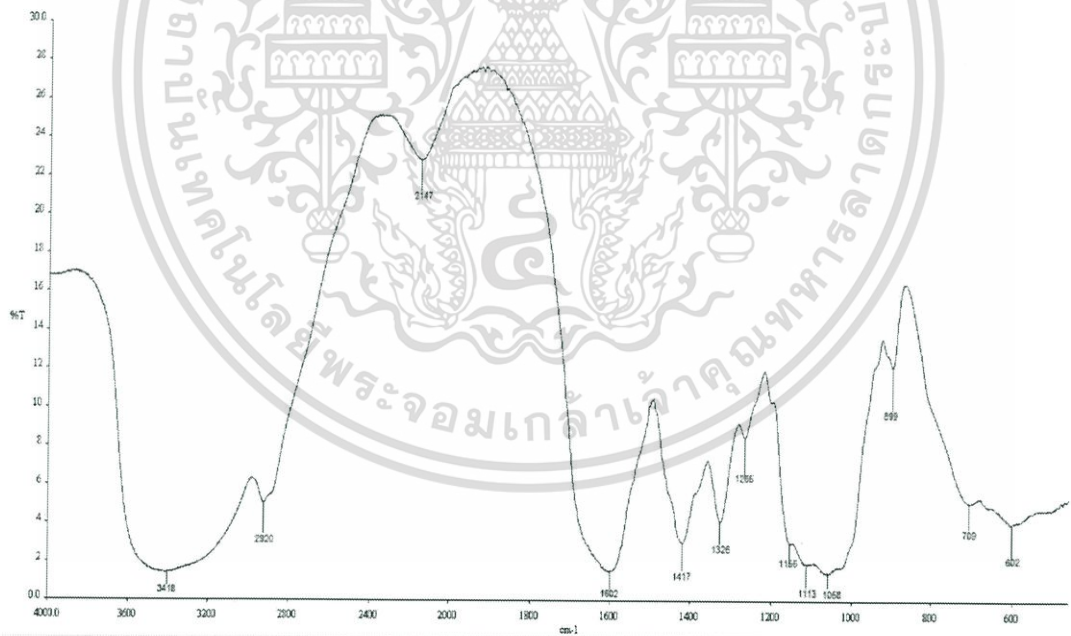


รูปที่ ง-2 แสดง IR spectrum ของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลที่ได้จากสูตร 80:20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

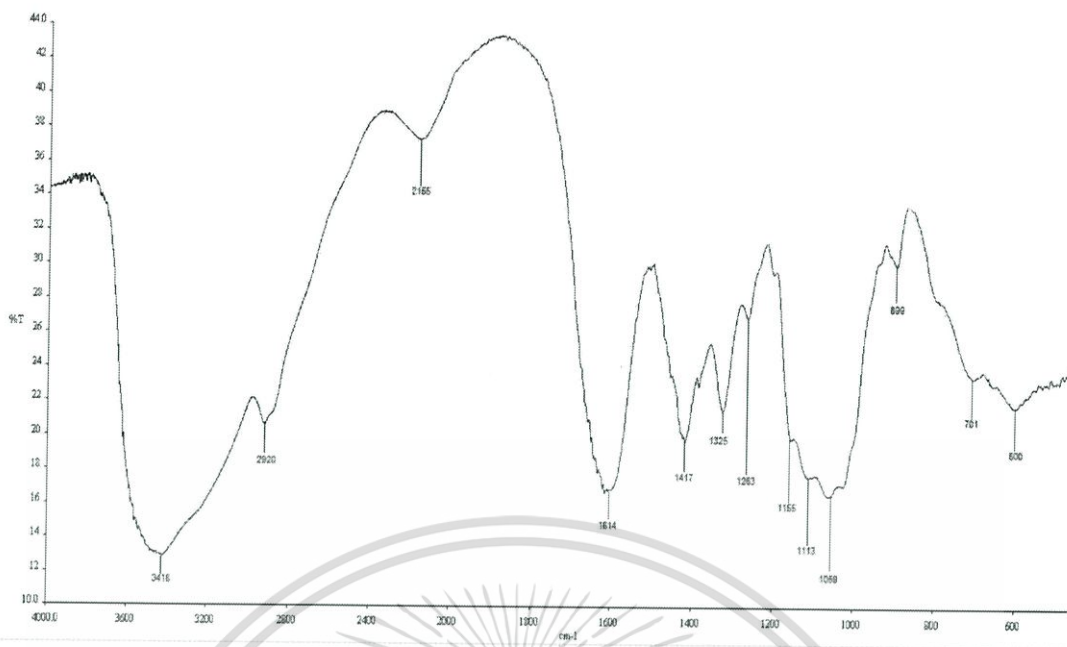


รูปที่ ง-3 แสดง IR spectrum ของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลที่ได้จากสูตร 50:50

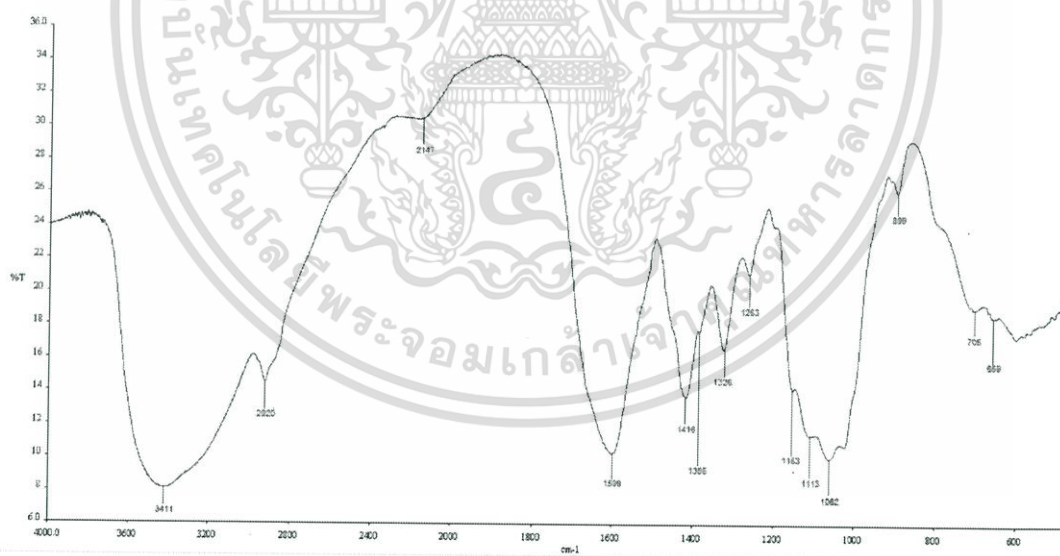


รูปที่ ง-4 แสดง IR spectrum ของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลที่ได้จากสูตร 20:80

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

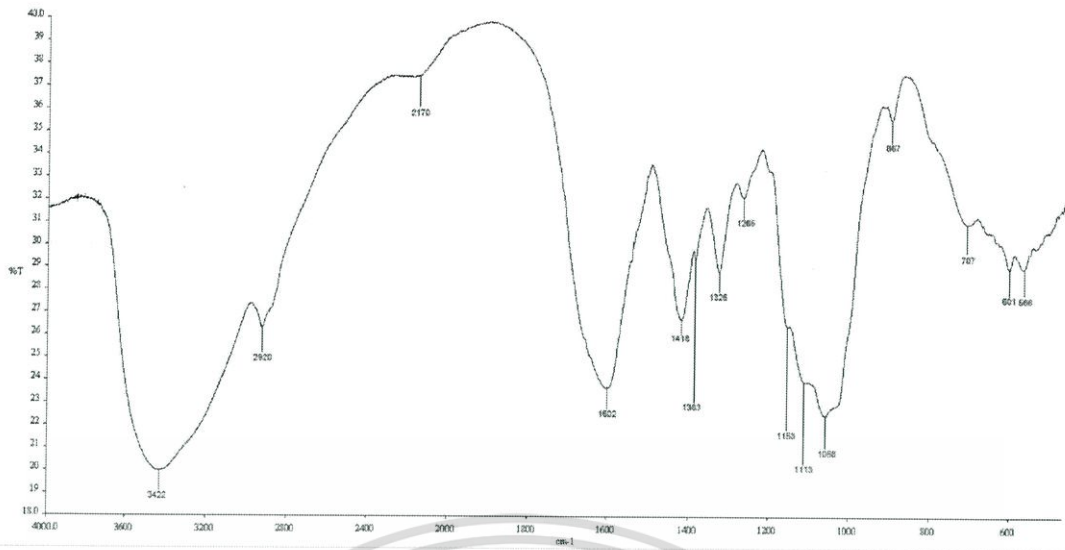


รูปที่ ง-5 แสดง IR spectrum ของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลที่ได้จากสูตร 0:100



รูปที่ ง-6 แสดง IR spectrum ของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลที่ได้จากสูตร HA-1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ง-6 แสดง IR spectrum ของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลที่ได้จากสูตร HA-2



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ

การทดสอบสมบัติเชิงกล

ตารางที่ จ-1 สมบัติเชิงกล (Compression)

สูตร	ชั้นที่	Compressive stress	Compressive modulus
100:0	1	0.029621	0.25477
	2	0.02746	0.12846
	3	0.025565	0.16839
	4	0.024553	0.20274
	5	0.026457	0.17024
Avg		0.0267312	0.18492
SD		0.00194048	0.047098434

สูตร	ชั้นที่	Compressive stress	Compressive modulus
80:20	1	0.037869	0.22202
	2	0.026242	0.13603
	3	0.049969	0.3299
	4	0.069666	0.27704
	5	0.06516	0.38595
Avg		0.0497812	0.270188
SD		0.018220473	0.096607244

สูตร	ชั้นที่	Compressive stress	Compressive modulus
50:50	1	0.14854	0.84613
	2	0.15905	0.99243
	3	0.11251	0.55756
	4	0.12964	0.65837
	5	0.077944	0.29375
Avg		0.1255368	0.669648
SD		0.032030806	0.268944388

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สูตร	ชั้นที่	Compressive stress	Compressive modulus
20:80	1	0.23376	1.138
	2	0.20988	1.5089
	3	0.17364	0.76386
	4	0.19381	0.81423
	5	0.16853	0.52249
Avg		0.195924	0.949496
SD		0.02682261	0.381954949

สูตร	ชั้นที่	Compressive stress	Compressive modulus
0:100	1	0.67839	2.8999
	2	0.72444	3.4348
	3	0.53053	2.5642
	4	0.52111	2.2456
	5	0.45016	2.1798
Avg		0.580926	2.66486
SD		0.115447994	0.517021758

สูตร	ชั้นที่	Compressive stress	Compressive modulus
HA-1	1	0.36683	2.4072
	2	0.32057	1.8945
	3	0.42715	2.7645
	4	0.27623	1.2181
	5	0.28511	1.3099
Avg		0.335178	1.91884
SD		0.062561496	0.673808807

สูตร	ชั้นที่	Compressive stress	Compressive modulus
HA-2	1	0.43475	3.5123
	2	0.3549	1.6701
	3	0.33471	2.6467
	4	0.27202	1.8071
	5	0.29456	2.1658
Avg		0.338188	2.3604
SD		0.063042077	0.746552985

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ฉ ขนาดรูปทรงของชิ้นงานสูตรต่าง ๆ

ตารางที่ ฉ-ขนาดรูปทรงของสูตร 100:0

Label	Area	Mean	Min	Max	Angle	Length
1	313.196	15.769	6.239	87.000	-32.735	278.598
2	295.657	22.010	3.613	113.668	-81.663	262.556
3	279.371	58.205	3.117	190.746	-19.497	248.263
4	335.746	11.558	3.386	49.444	-25.509	299.059
5	319.460	34.704	7.323	127.000	40.356	283.763
6	304.427	36.895	6.810	84.333	35.263	270.811
7	345.768	15.092	3.054	39.881	-60.255	307.461
8	409.752	17.393	4.185	95.835	-110.043	365.461
9	352.111	9.681	2.133	89.333	-32.157	313.887
10	337.074	19.836	5.663	43.778	-88.290	300.134
Mean	329.256	24.114	4.552	92.102	-37.453	292.999
SD	36.462	14.991	1.807	45.220	49.649	32.824
Min	279.371	9.681	2.133	39.881	-110.043	248.263
Max	409.752	58.205	7.323	190.746	40.356	365.461

ตารางที่ ฉ-2 ขนาดรูปทรงของสูตร 80:20

Label	Area	Mean	Min	Max	Angle	Length
1	259.384	49.737	16.084	164.685	-44.409	230.083
2	283.192	29.315	14.036	95.556	-15.144	251.991
3	274.421	30.973	15.206	122.152	25.159	244.357
4	285.698	74.950	7.946	253.985	-73.639	253.613
5	251.866	35.197	8.271	224.097	-20.154	224.303
6	201.000	22.882	11.527	81.793	-6.024	199.809
7	237.000	14.833	6.469	98.111	-91.214	236.060
8	200.000	28.887	16.723	148.151	9.557	198.814
9	188.000	19.800	8.000	70.920	66.038	186.824
10	201.000	29.008	18.175	138.778	11.535	200.040
Mean	238.156	33.558	12.244	139.823	-13.830	222.589
SD	37.971	17.317	4.322	60.508	46.777	24.525
Min	188.000	14.833	6.469	70.920	-91.214	186.824
Max	285.698	74.950	18.175	253.985	66.038	253.613

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ฉ-3 ขนาดรูปพรุนของสูตร 50:50

Label	Area	Mean	Min	Max	Angle	Length
1	388.363	11.117	3.439	67.000	4.640	345.902
2	428.452	24.965	10.945	80.667	-45.356	382.012
3	412.166	11.415	2.691	63.000	49.815	367.454
4	392.121	25.735	8.846	79.213	-73.371	348.925
5	350.78	5.619	1.534	47.667	70.981	312.430
6	380.000	12.388	5.632	105.444	31.301	379.363
7	363.000	40.936	13.082	142.333	-97.459	361.690
8	348.000	72.056	15.858	207.127	131.139	346.813
9	358.000	36.907	13.408	240.126	104.075	357.336
10	313.000	38.783	5.357	138.320	-61.052	312.108
Mean	373.388	27.992	8.079	117.090	11.471	351.403
SD	33.833	20.064	5.050	64.536	78.811	24.124
Min	313.000	5.619	1.534	47.667	-97.459	312.108
Max	428.452	72.056	15.858	240.126	131.139	382.012

ตารางที่ ฉ-4 ขนาดรูปพรุนของสูตร 20:80

Label	Area	Mean	Min	Max	Angle	Length
1	235.576	12.972	6.128	78.333	10.770	209.594
2	268.155	10.348	3.120	43.222	74.721	238.246
3	205.502	42.778	4.029	152.199	-37.569	183.005
4	230.564	28.933	7.036	72.188	-51.194	204.891
5	215.527	53.442	5.424	150.134	-44.526	191.027
6	234.780	22.915	11.722	52.481	-33.773	212.091
7	271.275	20.707	4.520	55.242	-51.944	245.064
8	265.192	35.591	15.946	74.895	16.345	239.178
9	245.729	25.603	13.000	42.107	-30.277	221.449
10	263.976	27.666	4.468	67.401	-22.989	237.899
Mean	243.628	28.096	7.539	78.820	-17.044	218.244
SD	23.110	13.108	4.411	40.173	39.945	21.674
Min	205.502	10.348	3.120	42.107	-51.944	183.005
Max	271.275	53.442	15.946	152.199	74.721	245.064

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ฉ-5 ขนาดรูปทรงของสูตร 0:100

Label	Area	Mean	Min	Max	Angle	Length
1	176.389	67.745	45.275	243.831	-42.194	159.265
2	160.575	30.086	8.275	165.778	-56.793	144.388
3	161.792	48.083	2.084	245.564	-101.733	145.648
4	171.524	41.170	15.029	117.259	-43.546	153.956
5	170.307	33.227	2.068	103.585	-50.247	153.456
6	194.182	50.895	8.466	165.035	-63.104	172.193
7	186.665	93.16	48.990	229.368	-52.125	165.969
8	174.137	68.979	35.362	163.444	-47.056	154.199
9	191.676	88.486	13.609	249.101	-37.020	170.431
10	167.873	47.408	4.771	184.313	-61.699	148.886
Mean	175.512	56.924	18.393	186.728	-55.552	156.839
SD	11.783	21.875	17.950	53.362	18.279	9.888
Min	160.575	30.086	2.068	103.585	-101.733	144.388
Max	194.182	93.160	48.990	249.101	-37.020	172.193

ตารางที่ ฉ-5 ขนาดรูปทรงของสูตร HA-1

Label	Area	Mean	Min	Max	Angle	Length
1	266.409	46.468	23.958	139.091	3.428	240.157
2	301.687	56.072	17.782	129.333	-3.721	272.631
3	267.625	67.800	35.068	171.111	-12.700	241.176
4	290.739	66.524	21.806	124.000	-13.861	262.153
5	240.863	48.993	24.904	96.184	-8.459	217.130
6	214.000	78.464	48.987	131.556	-26.445	212.875
7	252.000	73.284	16.138	228.845	-28.099	251.138
8	206.000	104.645	49.861	250.937	19.673	205.390
9	197.000	69.054	37.122	179.344	21.584	196.344
10	216.000	57.171	15.962	103.521	-176.805	215.002
Mean	245.232	66.848	29.159	155.392	-22.541	231.399
SD	36.466	16.848	12.877	51.682	56.737	25.666
Min	197.000	46.468	15.962	96.184	-176.805	196.344
Max	301.687	104.645	49.861	250.937	21.584	272.631

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ๕-5 ขนาดรูปทรงของสูตร HA-2

Label	Area	Mean	Min	Max	Angle	Length
1	220.539	21.861	7.004	72.222	45.000	196.301
2	254.372	44.749	6.111	125.000	-46.202	225.891
3	228.057	44.469	19.626	122.000	8.625	202.215
4	233.070	43.567	17.013	82.522	-63.712	206.920
5	236.829	39.219	9.208	154.667	-121.747	210.421
6	196.000	20.316	6.405	38.426	36.049	194.685
7	174.000	32.776	17.160	53.333	47.816	172.743
8	178.000	32.698	11.627	101.364	45.458	177.258
9	188.000	32.636	6.661	126.44	38.468	186.995
10	181.000	52.594	25.346	119.275	28.279	180.158
Mean	208.987	36.488	12.616	99.525	1.803	195.359
SD	28.846	10.368	6.763	36.839	58.703	16.604
Min	174.000	20.316	6.111	38.426	-121.747	172.743
Max	254.372	52.594	25.346	154.667	47.816	225.891

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

จำนวนรูพรุนของชิ้นงานในสูตรต่าง ๆ

ตารางที่ ข-1 ตารางบันทึกผลการทดลองหาจำนวนรูพรุน

สูตร	w ₁ (g)	w ₂ (g)	v (cm ³)	%Porosity
PS	0.1589	0.9808	2.523	41.25671
PCMC	0.1563	1.5304	2.376	73.24277
80 20	0.1367	1.0081	2.2	50.16349
50 50	0.1141	1.6795	2.8	70.80439
20 80	0.1133	1.0902	1.9	65.11625
HA1	0.1003	0.9096	1.5	68.32996
HA2	0.1637	1.5453	2.4	72.90611

การคำนวณเปอร์เซ็นต์จำนวนรูพรุนของชิ้นงาน

จะได้ว่า

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

w₁ : น้ำหนักชิ้นงานก่อนแช่ absolute ethanol (g)

w₂ : น้ำหนักชิ้นงานหลังแช่ absolute ethanol (g)

v : ปริมาตรของชิ้นงาน = กว้าง × ยาว × สูง (cm³)

D : ความหนาแน่นของ absolute ethanol = 0.7896 g/cm³

ตัวอย่างการคำนวณ

สำหรับเปอร์เซ็นต์จำนวนรูพรุนของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลที่เตรียมได้จากสูตร 100:0 โดย w₁ = 0.1589 g, w₂ = 0.9808 g, D = 0.7896 g/cm³, v = 2.523 cm³

จะได้

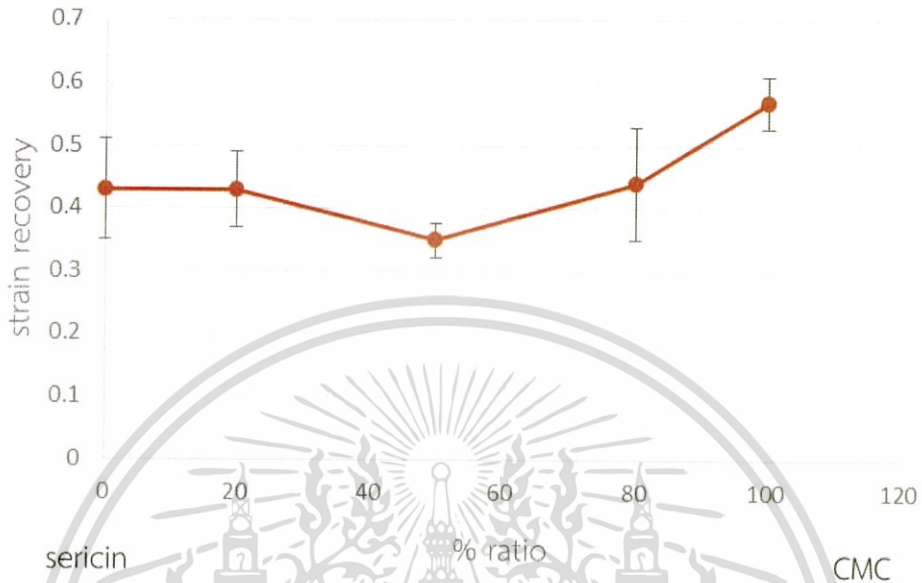
$$\%Porosity = \left(\frac{0.9808 - 0.1589}{0.7896 \times 2.523} \right) \times 100$$

$$= 41.25671 \%$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ซ

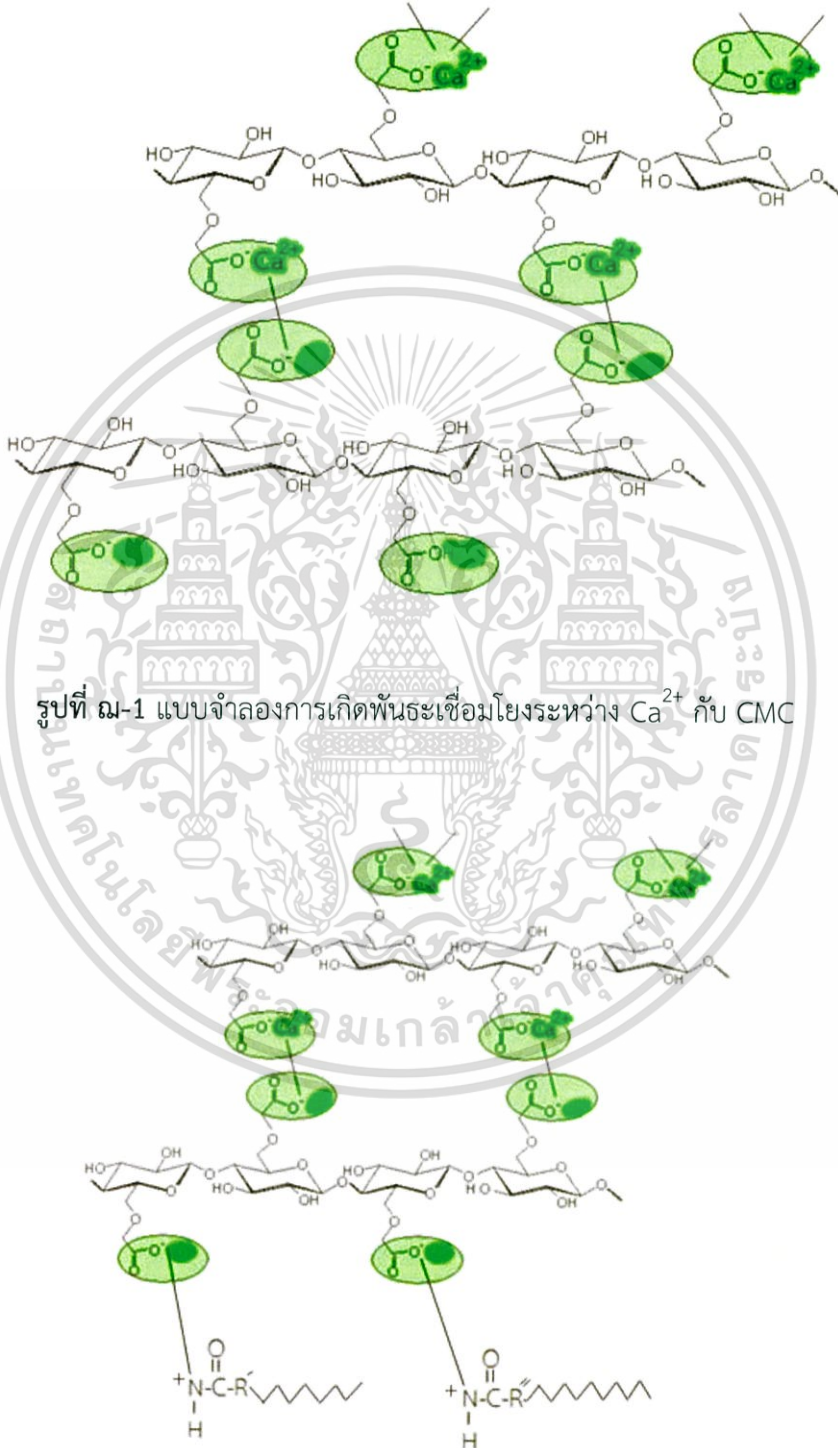
ความสามารถในการคืนรูปร่าง



รูปที่ ซ-1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง strain recovery ในสูตรต่าง ๆ

ภาคผนวก ฅ

แบบจำลองการเกิดพันธะเชื่อมโยง

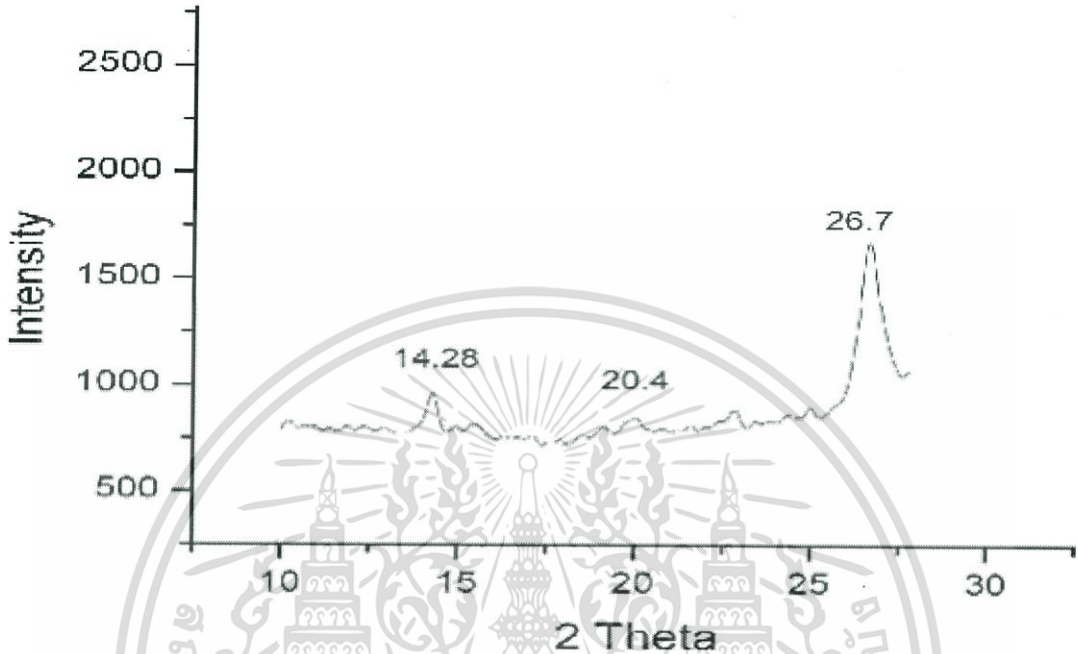


รูปที่ ฅ-1 แบบจำลองการเกิดพันธะเชื่อมโยงระหว่าง Ca^{2+} กับ CMC

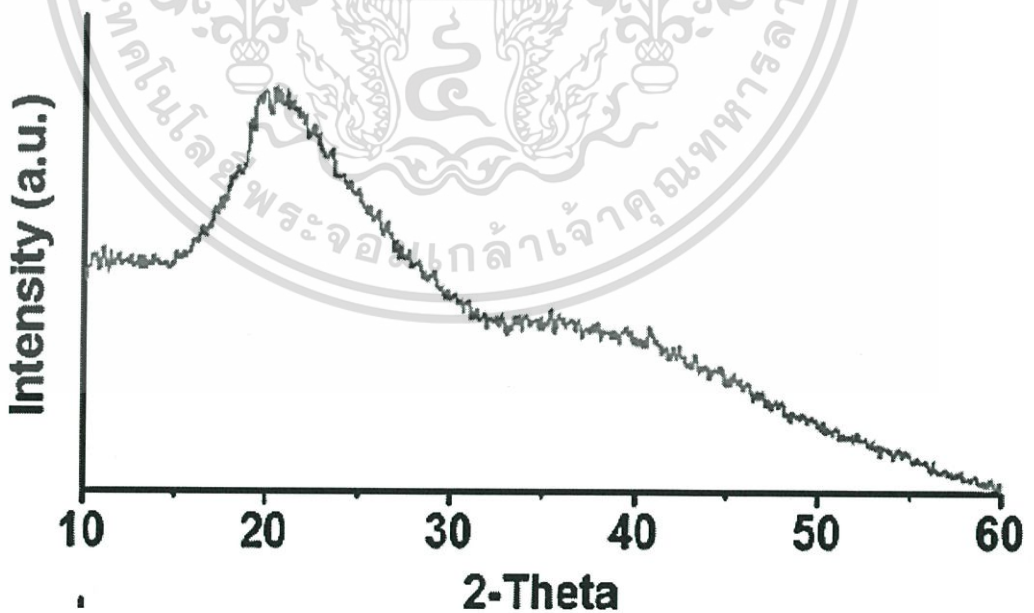
รูปที่ ฅ-2 แบบจำลองการเกิดพันธะเชื่อมโยงระหว่าง Ca^{2+} กับ CMC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ญ
การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD)

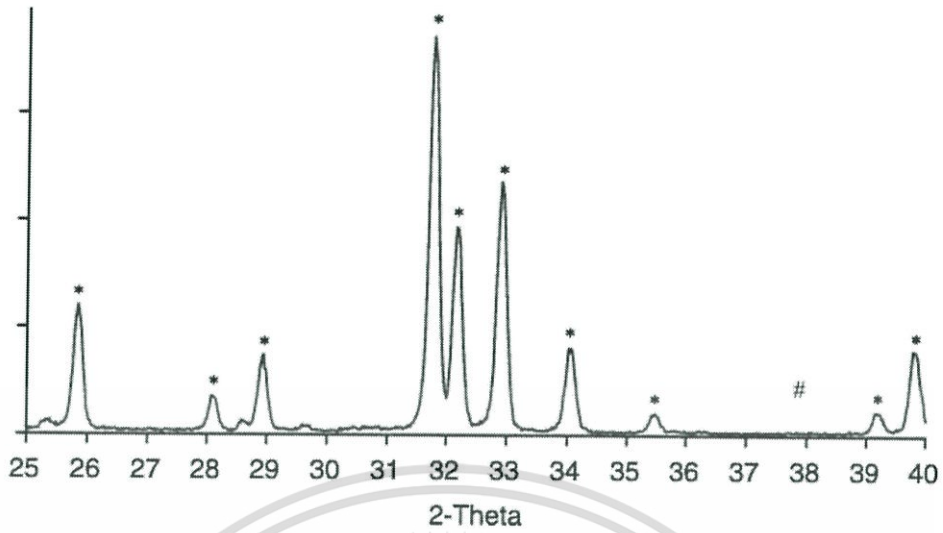


รูปที่ ญ-1 กราฟการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของโพรตีนเซรีซิน

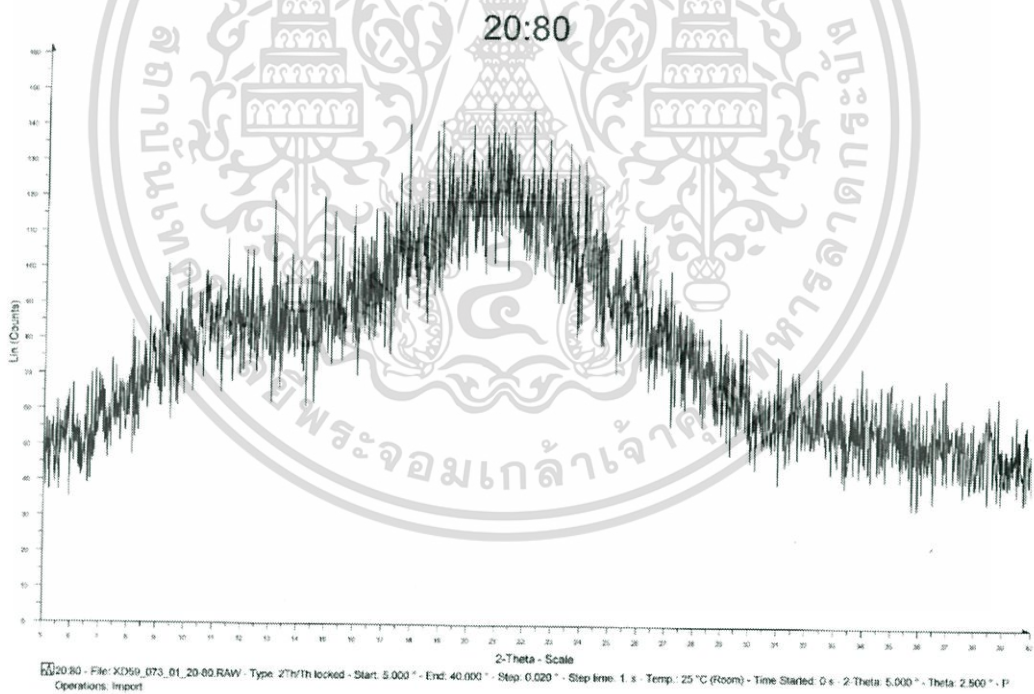


รูปที่ ญ-2 กราฟการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของเนื้อเยื่อโครงสร้างที่ได้จากคาร์บอกซีเมทิล-เซลลูโลส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

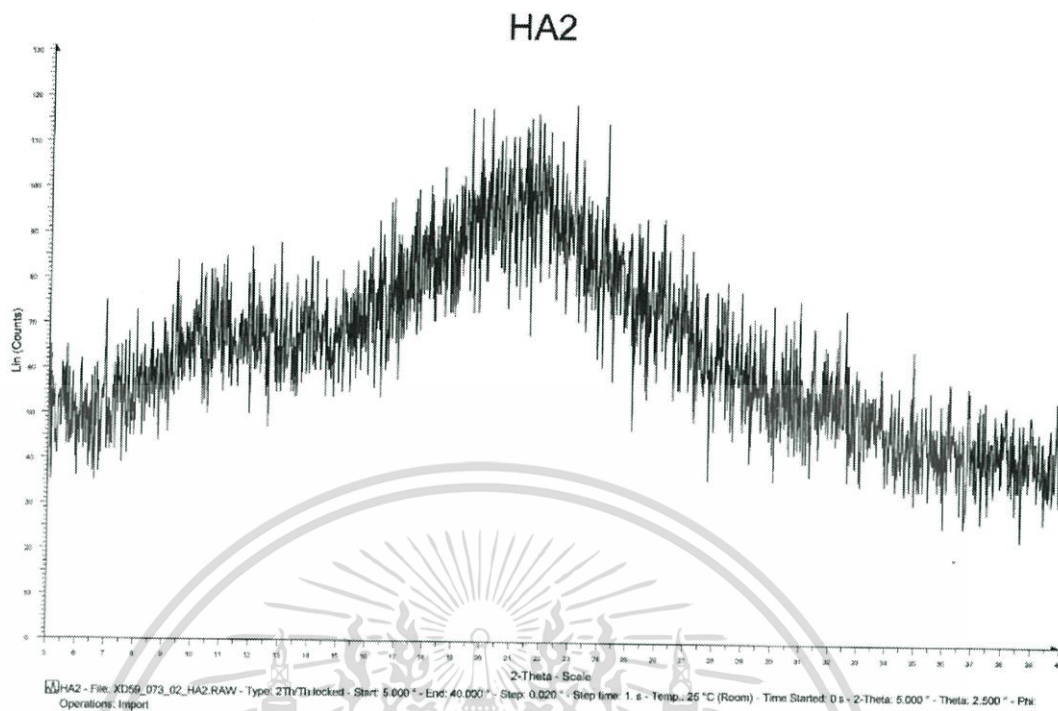


รูปที่ ๓-3 กราฟการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลที่ได้จากแคลเซียม-ไฮดรอกซีอะพาไทต์



รูปที่ ๓-4 กราฟการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลที่ได้จากสูตร 20:80

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ๕-5 กราฟการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของเนื้อเยื่อโครงสร้างไฮโดรเจลที่ได้จากสูตร HA-2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้