

ผลของกลีเซอรอล และเพค-10 ไคเมรีโคนต่อสมบัติของฟิล์มชีวภาพจากเปลือกทุเรียน พันธุ์หมอนทอง

สุจิตพรพรณ เข้มแก้ว

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีศึกษา

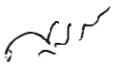
คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

กรกฎาคม 2559



ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยบูรพา

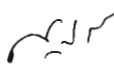
คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์และคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณา
วิทยานิพนธ์ของ สุจิตพรณ เข้มแก้ว ฉบับนี้แล้ว เห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตาม
หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีศึกษา ของมหาวิทยาลัยบูรพาได้

คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์

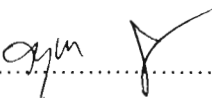

..... อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุปราณี แก้วภิรมย์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

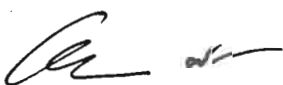
 
..... ประธาน
(ดร.ทองใส จ้างนงการ)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุปราณี แก้วภิรมย์)


..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อนุเทพ ภาสุระ)

คณะวิทยาศาสตร์อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีศึกษาของมหาวิทยาลัยบูรพา


..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เอกรัฐ ศรีสุข)

วันที่ 22 เดือน กรกฎาคม พ.ศ. 2559

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยความกรุณาจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุปราณี แก้วภิรมย์ กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาหลัก ที่กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำแนวทางที่ถูกต้อง ตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ด้วยความละเอียดถี่ถ้วนและเอาใจใส่ด้วยดีเสมอมา ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งเป็นอย่างยิ่งจึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณ ดร.ทองใส จันทนาการ อาจารย์ประจำภาควิชาวิทยาศาสตร์พื้นฐาน และ พลศึกษา คณะวิทยาศาสตร์ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา รองศาสตราจารย์ ดร.อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์ อาจารย์ประจำภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อนุเทพ ภาสุระ อาจารย์ประจำภาควิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ที่กรุณาให้ความรู้คำปรึกษา ตรวจสอบแก้ไขและวิจารณ์ผลงาน ทำให้งานวิจัยมีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

เนื่องจากงานวิจัยครั้งนี้ส่วนหนึ่งได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยของมหาวิทยาลัยบูรพา จึงขอขอบพระคุณ ณ ที่นี้ด้วย

ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อชุมพลและคุณแม่สมานจิตร เข้มแก้ว ครอบครัวเข้มแก้ว และ เพื่อนครู โรงเรียนจุฬาภรณราชวิทยาลัย เพชรบุรี และ โรงเรียนสตรีสมุทรปราการ ที่ให้กำลังใจ และ สนับสนุนผู้วิจัยเสมอมา

ขอขอบคุณ นายวีรชน ศรีหาคา ที่เอื้อเฟื้อและสละเวลา เพื่อช่วยเหลือผู้วิจัยในการทำการทดลองตลอดมา

คุณค่าและประโยชน์ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบเป็นกตัญญูกตเวทิตาแด่ บพกาธิบดี บวรพจารย์ และผู้มีพระคุณทุกท่านทั้งในอดีตและปัจจุบัน ที่ทำให้ข้าพเจ้าเป็นผู้มีการศึกษา และประสบความสำเร็จมาจนตราบเท่าทุกวันนี้

สุจิตพรณ เข้มแก้ว

55990006: สาขาวิชา: เคมีศึกษา; วท.ม. (เคมีศึกษา)

คำสำคัญ: คาร์บอกซิเมธิลเซลลูโลส, फिल्मชีวภาพ, กลีเซอรอล, เพค-10 ไดมธิโคน

ศุชัยพรรณ เข้มแก้ว : ผลของกลีเซอรอล และเพค-10 ไดมธิโคนต่อสมบัติของฟิล์มชีวภาพจากเปลือกทุเรียน พันธุ์หมอนทอง (EFFECTS OF GLYCEROL AND PEG-10 DIMETHICONE ON PROPERTIES OF BIOFILM FROM MONTHONG DURIAN RIND) คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์: สุปราณี แก้วภิรมย์, Ph.D. 107 หน้า. ปี พ.ศ. 2559.

งานวิจัยนี้ได้ทำการสังเคราะห์คาร์บอกซิเมธิลเซลลูโลส (ซีเอ็มซี) จากเซลลูโลสของเปลือกเหลือทิ้งของทุเรียน สายพันธุ์หมอนทอง ด้วยปฏิกิริยาคาร์บอกซิเมทิลชัน ยืนยันโครงสร้างทางเคมีของคาร์บอกซิเมธิลเซลลูโลสเปรียบเทียบกับโครงสร้างของเซลลูโลส ด้วยเทคนิคอินฟราเรด สเปกโทรสโคปี และศึกษาโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (WAXD) เตรียมฟิล์มคาร์บอกซิเมธิลเซลลูโลสจากเปลือกทุเรียนโดยวิธีการหล่อด้วยตัวทำละลาย (Solvent casting) ศึกษาผลของสารเติมแต่ง 2 ชนิด คือ กลีเซอรอล และ เพค-10 ไดมธิโคนที่ความเข้มข้นร้อยละ 10 20 และ 30 โดยมวล ที่มีผลต่อความแข็ง สมบัติเชิงกล อัตราการซึมผ่านของไอน้ำ และ โครงสร้างผลึกของแผ่นฟิล์มซีเอ็มซี ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า เมื่อเติมกลีเซอรอลที่ความเข้มข้นร้อยละ 30 โดยมวล ระดับค่าความแข็งของแผ่นฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนมีค่าสูงที่สุดคือระดับ 3H ค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดมีค่าสูงสุดเท่ากับร้อยละ 46 แต่ค่าแรงเค้นสูงสุด ค่ามอดูลัสของยัง และค่าแรงเค้น ณ จุดขาด มีค่าต่ำ อัตราการซึมผ่านของไอน้ำเท่ากับ 320 ± 4.90 กรัมต่อวันต่อตารางเมตร นอกจากนั้นยังพบว่า การเติมสารเติมแต่งไม่ส่งผลให้ฟิล์มมีความเป็นผลึกน้อยลงอย่างมีนัยสำคัญ

55990006: MAJOR: CHEMICAL EDUCATION; M.Sc. (CHEMICAL EDUCATION)

KEYWORDS: CARBOXYMETHYL CELLULOSE/ BIOFILM/ GLYCEROL/ PEG-10 DIMETHICONE

SUJAIPUN KHEMKAEW: EFFECTS OF GLYCEROL AND PEG-10 DIMETHICONE ON PROPERTIES OF BIOFILM FROM MONTHONG DURIAN RIND. ADVISORY COMMITTEE: SUPRANEE KAEWPIROM, Ph.D. 107 P. 2016.

In this study, carboxymethyl cellulose was prepared from cellulose extracted from Montong-durian rind by carboxymethylation. Chemical structure of the synthesized carboxymethyl cellulose and cellulose were confirmed by Fourier-transform infrared spectroscopy. Its crystal structure was also defined using wide-angle X-ray diffraction. Biofilms from such carboxymethyl cellulose, prepared by casting solvent method with various formulations, were produced using two different additives, namely glycerol and PEG-10 dimethicone. The effects of additive content (10 20 and 30%wt) on hardness, mechanical properties, water vapor transmission rate and crystal structure of those biofilms were revealed. The experimental results showed that the biofilm with 30 %wt glycerol has the highest scratch resistance at 3H and the highest elongation at break of 46 %, although stress at peak, Young's modulus and stress at break values are low. Moreover, water vapor transmission rate of such the biofilm was 320 ± 4.90 g/day.m². It was also found that the crystallinity of the biofilm did not reduced significantly by the addition of additives.

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ฉ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
ที่มาและความสำคัญ.....	1
วัตถุประสงค์ในการวิจัย.....	3
ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
นิยามศัพท์เฉพาะ/นิยามเชิงปฏิบัติการ.....	4
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
พลาสติกชีวภาพ.....	6
เซลลูลูโลส.....	8
คาร์บอนกัมมันต์เซลลูลูโลส	10
สารเติมแต่ง.....	12
เครื่องมือ.....	13
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	21
3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	25
สารเคมีและวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย.....	25

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
3 วิธีดำเนินงานวิจัย (ต่อ)	
การสกัดเซลลูโลสจากเปลือกทุเรียน.....	27
การสังเคราะห์คาร์บอกซิเมทิลเซลลูโลส (ซีเอ็มซี) จากเปลือกทุเรียน.....	27
การเตรียมฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียน.....	29
การศึกษาสมบัติของฟิล์มจากเปลือกทุเรียน.....	30
4 ผลการวิจัย.....	34
การสกัดเซลลูโลสจากเปลือกทุเรียน.....	34
การสังเคราะห์คาร์บอกซิเมทิลเซลลูโลส.....	34
การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน.....	36
ลักษณะของฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียน.....	40
การศึกษาสมบัติของฟิล์มจากเปลือกทุเรียน.....	42
โครงสร้างผลึกของฟิล์มซีเอ็มซี.....	50
อัตราการซึมผ่านของไอน้ำ.....	51
สัมฐานวิทยาของฟิล์มจากเปลือกทุเรียน.....	52
5 สรุปและอภิปรายผล.....	56
สรุปผลการทดลอง.....	56
อภิปรายผลการทดลอง.....	57
ข้อเสนอแนะ.....	63
บรรณานุกรม.....	65

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
ภาคผนวก.....	70
ภาคผนวก ก.....	71
ภาคผนวก ข.....	87
ภาคผนวก ค.....	98
ประวัติย่อของผู้วิจัย.....	107

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ปริมาณของสารเติมแต่งที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียน.....	30
4.1 ร้อยละของผลิตภัณฑ์เซลลูโลส.....	34
4.2 ร้อยละของผลิตภัณฑ์ที่ได้เทียบกับน้ำหนักของสารตั้งต้นในการสังเคราะห์ซีเอ็มซี.....	35
4.3 ลักษณะของฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนที่ใส่และไม่ใส่สารเติมแต่ง	40
4.4 ระดับค่าความแข็งของฟิล์มซีเอ็มซีที่ไม่ใส่และใส่สารเติมแต่ง.....	42
4.5 อัตราการซึมผ่านของไอน้ำของฟิล์มซีเอ็มซี.....	51
5.1 ร้อยละการยืด ณ จุดขาด ความแข็งแรงดึง และมอดูลัสของยังของฟิล์มซีเอ็มซีแต่ละชนิด.....	64
1ก ค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาด ค่าแรงเค้นสูงสุด ค่าแรงเค้น ณ จุดขาดและค่ามอดูลัสของยังของฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนที่ไม่ใส่สารเติมแต่ง.....	72
2ก ค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาด ค่าแรงเค้นสูงสุด ค่าแรงเค้น ณ จุดขาดและค่ามอดูลัสของยัง ของฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนที่ใส่กลีเซอรอลร้อยละ 10 โดยมวล.....	73
3ก ค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาด ค่าแรงเค้นสูงสุด ค่าแรงเค้น ณ จุดขาดและค่ามอดูลัสของยัง ของฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนที่ใส่กลีเซอรอลร้อยละ 20 โดยมวล.....	75
4ก ค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาด ค่าแรงเค้นสูงสุด ค่าแรงเค้น ณ จุดขาดและค่ามอดูลัสของยัง ของฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนที่ใส่กลีเซอรอลร้อยละ 30 โดยมวล.....	76

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
5ก	ค่าร้อยละการยึด ณ จุดขาด ค่าแรงเค้นสูงสุด ค่าแรงเค้น ณ จุดขาด และค่ามอดูลัสของยัง ของฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนที่ PEG-10 dimethicone ร้อยละ 10 โดยมวล.....	78
6ก	ค่าร้อยละการยึด ณ จุดขาด ค่าแรงเค้นสูงสุด ค่าแรงเค้น ณ จุดขาด และค่ามอดูลัสของยัง ของฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนที่ PEG-10 dimethicone ร้อยละ 20 โดยมวล.....	79
7ก	ค่าร้อยละการยึด ณ จุดขาด ค่าแรงเค้นสูงสุด ค่าแรงเค้น ณ จุดขาด และค่ามอดูลัสของยัง ของฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนที่ PEG-10 dimethicone ร้อยละ 30 โดยมวล.....	81
8ก	น้ำหนักของฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนที่ไม่ใส่สารเติมแต่ง ที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 75 เป็นเวลา 7 วัน.....	83
9ก	น้ำหนักของฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนที่ใส่กลีเซอรอล ร้อยละ 10 โดยมวล ที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 75 เป็นเวลา 7 วัน.....	83
10ก	น้ำหนักของฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนที่ใส่กลีเซอรอล ร้อยละ 20 โดยมวล ที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 75 เป็นเวลา 7 วัน.....	84
11ก	น้ำหนักของฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนที่ใส่กลีเซอรอล ร้อยละ 30 โดยมวล ที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 75 เป็นเวลา 7 วัน.....	84
12ก	น้ำหนักของฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนที่ใส่ PEG-10 dimethicone ร้อยละ 10 โดยมวล ที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 75 เป็นเวลา 7 วัน.....	85

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
13ก	85
น้ำหนักรของฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนที่ใส่ PEG-10 dimethicone	
ร้อยละ 20 โดยมวล ที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 75 เป็นเวลา 7 วัน	
14ก	86
น้ำหนักรของฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนที่ใส่ PEG-10 dimethicone	
ร้อยละ 30 โดยมวล ที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 75 เป็นเวลา 7 วัน	
1ข	88
สมบัติทางกายภาพของโซเดียมไฮดรอกไซด์.....	
2ข	89
สมบัติทางกายภาพของกรดอะซิติกเข้มข้น.....	
3ข	90
สมบัติทางกายภาพของไอโซโพรพานอล.....	
4ข	91
สมบัติทางกายภาพของเอทานอลบริสุทธิ์.....	
5ข	92
สมบัติทางกายภาพของเมทานอล.....	
6ข	93
สมบัติทางกายภาพของเมทานอล.....	
7ข	94
สมบัติทางกายภาพของกรดโมโนคลอโรอะซิติก.....	
8ข	95
สมบัติทางกายภาพของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์.....	
9ข	96
สมบัติทางกายภาพของกลีเซอรอล.....	
10ข	97
สมบัติทางกายภาพของ PEG-10 dimethicone	
1ค	99
ลักษณะและระดับค่าความแข็งของฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียน	
ที่ใส่และไม่ใส่สารเติมแต่ง.....	

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	โครงสร้างของเซลลูโลส.....	9
2.2	โครงสร้าง โมเลกุลของคาร์บอกซิเมทิลเซลลูโลส.....	10
2.3	โครงสร้างของกลีเซอรอล.....	12
2.4	โครงสร้างของ PEG-10 dimethicone.....	13
2.5	แผนภาพการเกิดอันตรกิริยาของสารกับการแผ่รังสีหรือแสง.....	17
2.6	การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ในผลึก.....	18
2.7	ส่วนประกอบเครื่อง Scanning electron microscope.....	20
3.1	การสกัดเซลลูโลสจากเปลือกทุเรียน.....	28
3.2	การสังเคราะห์ซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียน.....	29
3.3	เครื่องวัดความแข็งด้วยดินสอ.....	31
3.4	เครื่องทดสอบแรงดึง.....	31
3.5	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	33
4.1	อินฟราเรดสเปกตรัมของผงเซลลูโลสและซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียน.....	37
4.2	โครงสร้างของเซลลูโลสจากเปลือกทุเรียน.....	38
4.3	โครงสร้างของซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียน.....	38
4.4	ผลของชนิดและปริมาณสารเติมแต่งของฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียน ต่อค่าแรงเค้นสูงสุด.....	45
4.5	ผลของชนิดและปริมาณสารเติมแต่งของฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียน ต่อค่าแรงเค้น ณ จุดขาด.....	46
4.6	ผลของชนิดและปริมาณสารเติมแต่งของฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียน ต่อค่ามอดูลัสของยัง.....	47
4.7	ผลของชนิดและปริมาณสารเติมแต่งของฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียน ต่อค่าร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด.....	48

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.8 ผลของชนิดและปริมาณสารเติมแต่งต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะโครงสร้าง ของฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียน.....	50
4.9 ภาพถ่าย SEM บนพื้นผิวของฟิล์มซีเอ็มซีที่กำลังขยาย 500 และ 10,000 เท่า.....	53
1ค ภาพถ่าย SEM บนพื้นผิวของฟิล์มซีเอ็มซีที่กำลังขยาย 500 และ 10,000 เท่า.....	101
2ค ตัวอย่างภาพสมบัติเชิงกลของฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนที่ไม่ใส่สารเติมแต่ง จากเครื่องทดสอบแรงดึง.....	103
3ค ตัวอย่างภาพสมบัติเชิงกลของฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนที่ใส่กลีเซอรอล ร้อยละ 10 โดยมวล จากเครื่องทดสอบแรงดึง.....	103
4ค ตัวอย่างภาพสมบัติเชิงกลของฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนที่ใส่กลีเซอรอล ร้อยละ 20 โดยมวล จากเครื่องทดสอบแรงดึง.....	104
5ค ตัวอย่างภาพสมบัติเชิงกลของฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนที่ใส่กลีเซอรอล ร้อยละ 30 โดยมวล จากเครื่องทดสอบแรงดึง.....	104
6ค ตัวอย่างภาพสมบัติเชิงกลของฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนที่ใส่ PEG-10 dimethicone ร้อยละ 10 โดยมวล จากเครื่องทดสอบแรงดึง.....	105
7ค ตัวอย่างภาพสมบัติเชิงกลของฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนที่ใส่ PEG-10 dimethicone ร้อยละ 20 โดยมวล จากเครื่องทดสอบแรงดึง.....	105
8ค ตัวอย่างภาพสมบัติเชิงกลของฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนที่ใส่ PEG-10 dimethicone ร้อยละ 30 โดยมวล จากเครื่องทดสอบแรงดึง.....	106

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

พลาสติกเป็นวัสดุที่มนุษย์สังเคราะห์ขึ้นจากปิโตรเคมีหรืออนุพันธ์ของปิโตรเคมีที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ (สุวิมล กาญจนสุธา, 2551) มีคุณสมบัติที่แข็งแรง มีความยืดหยุ่นสูง ทนต่อความชื้น และสารเคมีได้ดี จึงถูกนำมาใช้เป็นผลิตภัณฑ์ เพื่ออำนวยความสะดวกในชีวิตประจำวัน โดยเฉพาะผลิตภัณฑ์ที่ใช้บรรจุอาหารและเครื่องดื่ม ซึ่งส่วนใหญ่จะมีระยะเวลาการใช้งานที่สั้น และถูกทิ้งเป็นขยะทันทีหลังการใช้งาน ทำให้ปริมาณขยะพลาสติกเพิ่มขึ้นตามจำนวนประชากรที่เพิ่มสูงขึ้นในทุก ๆ ปี ก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมที่เป็นพิษจากขยะที่เป็นภัยต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม สำหรับประเทศไทย ปริมาณขยะพลาสติกที่พบมากเป็นอันดับ 1 คือ ถุงพลาสติกชนิดซอง (ถุงร้อน) ซึ่งส่วนใหญ่ใช้บรรจุอาหาร ผลิตจากพอลิเอทิลีน และพอลิโพรพิลีน โดยขยะประเภทนี้จะเป็อนเศษอาหารทำให้ยากต่อการคัดแยก และกลับมาหมุนเวียนใช้ใหม่ ทั้งยังย่อยสลายได้ยากในสภาพธรรมชาติ ต้องนำไปกำจัดร่วมกับขยะอินทรีย์ (นิตยาพร สมภักดิ์, 2555) ด้วยเหตุนี้ จึงก่อให้เกิด การคิดค้นนวัตกรรมใหม่ ๆ เพื่อแก้ไขปัญหาสิ่งแวดล้อมไปพร้อม ๆ กับการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมอย่างยั่งยืน และนวัตกรรมที่น่าสนใจอย่างหนึ่งคือ การใช้พลาสติกชีวภาพเพื่อทดแทนหรือลดการใช้พลาสติกจากปิโตรเลียม

พลาสติกชีวภาพ (Bioplastic) หมายถึง พลาสติกที่ผลิตจากวัสดุธรรมชาติ (Bio-based) หรือ วัสดุที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradable) โดยความหมายของพลาสติกที่ผลิตจากวัสดุธรรมชาติ (Bio-based plastic) คือ พลาสติก หรือ ผลิตภัณฑ์ ที่ทั้งหมดหรือบางส่วนผลิตจากวัสดุจากธรรมชาติ ซึ่งเป็นวัสดุที่สามารถสร้างขึ้นทดแทนได้ใหม่ (Renewable raw material) เช่น อ้อย มันสำปะหลัง เส้นใยจากพืช เป็นต้น ผลิตภัณฑ์และบรรจุภัณฑ์ของพลาสติกชนิดนี้ เมื่อถูกใช้และทิ้งเป็นขยะ สามารถกำจัดได้ง่าย ไม่ก่อมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม เพราะขยะพลาสติกชีวภาพนี้จะนำไปกำจัดโดยผ่านกระบวนการหมักให้กลายเป็นปุ๋ยอินทรีย์สำหรับปลูกต้นไม้ต่อไป สำหรับความหมายของพลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradable plastic) คือ พลาสติกที่ย่อยสลายได้ เนื่องจากการทำงานของจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในธรรมชาติ เช่น แบคทีเรีย รา สาหร่าย ในสถานะและช่วงเวลาที่เหมาะสม เช่น การมีน้ำ และบางครั้งอาจต้องมียออกซิเจนเข้าร่วม (สุภณี เรียบเลิศศิริ และสุณี ภูสีม่วง, 2557)

เซลลูโลสเป็นวัสดุธรรมชาติชนิดหนึ่ง que ปัจจุบันมีการนำมาผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์ เพื่อทดแทนโฟม เช่น บรรจุภัณฑ์จากชานอ้อย เป็นต้น เซลลูโลสมีโครงสร้างเป็นเส้นตรง ประกอบด้วยโมเลกุลของกลูโคสต่อกันด้วยพันธะไกลโคซิดิกแบบเบต้า จาก 1 ไป 4 จำนวน มากกว่า 2,000 โมเลกุล (Rachtanapun & Rattanapanone, 2011) พบในผนังเซลล์ของพืช ไม่ละลาย ในน้ำ และมีความเป็นผลึกสูง ด้วยข้อจำกัดของการละลาย ทำให้เซลลูโลสมีข้อจำกัดในการขึ้นรูป เป็นผลิตภัณฑ์ นักวิทยาศาสตร์จึงมีความสนใจที่จะนำเซลลูโลสมาดัดแปร เพื่อให้สามารถละลายน้ำ ได้ อนุพันธ์ของเซลลูโลสที่สามารถละลายน้ำได้ และมีความเป็นผลึกต่ำกว่า เช่น คาร์บอกซิเมทิล เซลลูโลสหรือซีเอ็มซี จึงได้รับความสนใจนำมาทำเป็นพลาสติกชีวภาพ

คาร์บอกซิเมทิลเซลลูโลสหรือซีเอ็มซี (Carboxymethylcellulose, CMC) เป็นอนุพันธ์ของ เซลลูโลสชนิดหนึ่ง เตรียมได้จากการแทนที่ของหมู่ $-CH_2-COOH$ บนหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ของหน่วยย่อยของเซลลูโลส เกิดเป็นพันธะอีเธอร์ (Ether linkage) (รานี สุวรรณพฤษ และสุรชาติพิศ ศิริไพศาลพิพัฒน์, 2529) ซีเอ็มซีถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ อย่างแพร่หลาย เช่น อุตสาหกรรมการ ชักฟอก สิ่งทอ อาหาร ยา และเครื่องสำอางค์ การเตรียมซีเอ็มซีโดยทั่วไปจะต้องใช้เชื้อเซลลูโลสที่มี ปริมาณแอลฟาเซลลูโลส (Alpha cellulose) หรือที่เรียกกันว่า เซลลูโลสคุณภาพสูง ซึ่งอาจเตรียมได้ จากวัตถุดิบต่าง ๆ กัน และวิธีทางเคมีที่แตกต่างกัน หากนำเซลลูโลสที่มาจากไม้ยืนต้นอาจมีต้นทุน ในการผลิตสูง สำหรับในประเทศไทยมีวัสดุที่เหลือทิ้งทางการเกษตรอยู่มาก สามารถนำมาทดลอง ผลิตเซลลูโลสคุณภาพสูงได้ ไม่ว่าจะเป็น ต้นกก ช้างข้าวโพด กาบมะพร้าว ก้านกล้วย กากปาล์ม ใบกระน้ำ ใบสับประรด หย้าฉนวนจันทร์ และเปลือกทุเรียน ซึ่งถือว่าการนำเอาวัสดุเหลือทิ้งหรือผล ผลิตได้ ทางทางการเกษตรมาใช้ประโยชน์อย่างเต็มที่

เปลือกทุเรียนเป็นของเหลือทิ้งจำนวนมากและเป็นปัญหาในการกำจัดทิ้ง ในหลายพื้นที่ ที่มึ การปลูกทุเรียนเป็นพืชเศรษฐกิจ เปลือกทุเรียนมีส่วนประกอบที่เป็นเส้นใยค่อนข้างมาก โดยนอกเหนือจากส่วนที่เป็นพอลิแซคคาไรด์แล้ว ยังประกอบไปด้วยส่วนที่เป็นเชื้อเซลลูโลสสูงถึง ร้อยละ 30 จึงมีความเหมาะสมในการใช้เป็นวัตถุดิบสำคัญในการเตรียมซีเอ็มซี (ปราโมทย์ วิจารณ์กุล, จักรวัฒน์ เรืองแรงสกุล, สัจจะชาญ พัดมะลิ และประชุม คำพูน, 2554)

ดังนั้น ผู้วิจัยจึงได้สนใจนำเปลือกทุเรียนมาสังเคราะห์ให้ได้ซีเอ็มซีก่อนนำไปขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มและปรับปรุงสมบัติของฟิล์ม โดยใช้สารเติมแต่ง 2 ชนิด คือ กลีเซอรอล (Glycerol) และ เพค-10 ไดเมธิโคน (PEG-10 dimethicone) ซึ่งเป็น โคพอลิเมอร์ของพอลิเอทิลีนไกลคอล กับ พอลิไดเมทิลไซลอกเซน (Polydimethyl siloxane) ศึกษาสมบัติกายภาพและสมบัติเชิงกล ได้แก่ ค่าความแข็งด้วยเครื่องวัดความแข็งด้วยดินสอ (Pencil hardness) ค่าแรงเค้นสูงสุด (Stress at peak) ค่าแรงเค้น ณ จุดขาด (Stress at break) ค่ามอดูลัสของยัง (Young's modulus) ร้อยละการยืด ณ จุดขาด (Percent elongation at break) อัตราการซึมผ่านของไอน้ำ (Water vapor transmission rate) ศึกษาหุ้มฟังก์ชันที่เป็นองค์ประกอบของฟิล์มด้วยเครื่องอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (Infrared spectroscopy) และวิเคราะห์โครงสร้างด้วยเครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffractometer) เพื่อปรับปรุงสมบัติของฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนให้มีประสิทธิภาพที่ดียิ่งขึ้น โดยใช้วัตถุดิบที่หาง่าย มีราคาต่ำ และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

1.2 วัตถุประสงค์ในการวิจัย

- 1.2.1 สังเคราะห์ซีเอ็มซีจากเซลลูโลสที่เตรียมได้จากเปลือกทุเรียน พันธุ์หมอนทอง
- 1.2.2 เตรียมฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียน และฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนที่ได้สารเติมแต่ง และทดสอบสมบัติ เพื่อประเมินศักยภาพในการใช้งานของฟิล์มที่เตรียมได้

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.3.1 สังเคราะห์ซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียน โดยใช้ผงเซลลูโลสที่สกัดได้จากเปลือกทุเรียนพันธุ์หมอนทอง
- 1.3.2 เตรียมฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียน โดยวิธีการหล่อด้วยตัวทำละลาย (Solvent casting) ใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย และปรับปรุงสมบัติของฟิล์ม โดยเติมสารเติมแต่งเพื่อเพิ่มความยืดหยุ่น คือ กลีเซอรอล และเพิ่มความแข็งแรง คือ PEG-10 dimethicone จากนั้น ศึกษาผลของปริมาณสารเติมแต่งต่อสมบัติของฟิล์ม โดยศึกษาความเข้มข้นที่ร้อยละ 10 20 และ 30 โดยมวล

1.3.3 ศึกษาความแข็งของแผ่นฟิล์ม ด้วยเครื่องวัดความแข็งด้วยดินสอ โดยนำแผ่นฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนที่ไม่ใส่และใส่สารเติมแต่งทั้ง 2 ชนิด มาวัดค่าความแข็งที่ระดับ 6B-6H ตามวิธีมาตรฐาน D 3363

1.3.4 ศึกษาสมบัติเชิงกล ได้แก่ ค่าแรงเค้นสูงสุด ค่าแรงเค้น ณ จุดขาด ค่ามอดูลัสของยัง และร้อยละการยืด ณ จุดขาด ด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง (Tensile testing machine) โดยนำแผ่นฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนที่ไม่ใส่และใส่สารเติมแต่งทั้ง 2 ชนิด มาตัดให้ได้ขนาด $0.50 \times 5.00 \times 0.01$ ลูกบาศก์เซนติเมตร กำหนดความยาวพิคก (Gauge length) 1 เซนติเมตร อัตราเร็วในการดึง 20 มิลลิเมตรต่อนาที ส่วนวัดแรง (Load cell) 50 นิวตัน ตามวิธีมาตรฐาน ASTM D882-80a

1.3.5 ศึกษาสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ อัตราการซึมผ่านของไอน้ำ โดยนำแผ่นฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนที่ไม่ใส่และใส่สารเติมแต่งทั้ง 2 ชนิดมาทดสอบตามวิธีที่ได้ดัดแปลงจากวิธีมาตรฐาน ASTM E 96

1.3.6 ศึกษาโครงสร้างทางเคมีของผงเซลลูโลสและซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียน ด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี โดยศึกษาหมู่ฟังก์ชันในช่วงเลขคลื่น $4000-400 \text{ cm}^{-1}$ โดยเตรียมตัวอย่างผงซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนที่สังเคราะห์ได้ (2 มิลลิกรัม) ด้วยวิธีอัด KBr ก่อนนำมาวิเคราะห์

1.3.7 ศึกษาโครงสร้างผลึกของฟิล์มที่ได้จากเปลือกทุเรียนด้วยเครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ทั้งที่ไม่ใส่และใส่สารเติมแต่งทั้ง 2 ชนิด โดยศึกษาค่า 2θ ในช่วง 10-60 องศา และความเร็วในการสแกน 0.5 องศาต่อนาที

1.3.8 การศึกษาสัญญาณวิทยาของฟิล์มที่ได้จากเปลือกทุเรียนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ทั้งที่ไม่ใส่และใส่สารเติมแต่งทั้ง 2 ชนิด โดยถ่ายภาพที่พื้นผิวของฟิล์มที่กำลังขยาย 500 และ 10,000 เท่า

1.4 นิยามศัพท์เฉพาะ/นิยามเชิงปฏิบัติการ

1.4.1 CMC_d หรือ คาร์บอกซิเมทิลเซลลูโลส คือ โคพอลิเมอร์ของหน่วย 2 หน่วย ระหว่าง β -D-glucose และ β -D-glucopyranose 2-O-(Carboxymethyl)-monosodium salt โดยต่อกันด้วยพันธะไกลโคซิดิก จาก 1 ไป 4

1.4.2 ก्लीเซอรอล มีโครงสร้างโมเลกุลเป็นพอลิโออล (Polyol) เป็นสารที่เป็นของเหลวใส ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น มีรสหวานเล็กน้อย (ความหวานสัมพัทธ์ 60) ในโมเลกุลมีหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) 3 หมู่ จึงทำให้ละลายในน้ำได้ดี มีสมบัติในการดูดซับน้ำได้ดี (Hydroscopic)

1.4.3 PEG-10 dimethicone คือ โคพอลิเมอร์ของพอลิเอทิลีนไกลคอล กับ พอลิไดเมทิลไซลอกเซน (Polydimethyl siloxane) ที่ถูกดัดแปลงเพื่อให้มีความสามารถในการละลายน้ำ

1.4.4 สภาวะเหมาะสม ได้แก่ ความเข้มข้นของก्लीเซอรอล และ PEG-10 dimethicone ที่ร้อยละ 10 20 และ 30 โดยมวล

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 เป็นแนวทางในการผลิตฟิล์มชีวภาพจากเปลือกทุเรียน ที่มีสมบัติเชิงกล (ความยืดหยุ่น) ดีขึ้น

1.5.2 ทราบชนิดและปริมาณที่เหมาะสมของสารเติมแต่งในการเตรียมฟิล์มชีวภาพจากเปลือกทุเรียน

1.5.3 สร้างมูลค่าของเปลือกทุเรียนที่เป็นขยะจากการเกษตร

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 พลาสติกชีวภาพ (สุวิมล กาญจนสุธา, 2551)

ผลิตภัณฑ์ที่ทำมาจากพลาสติก สร้างความสะดวกสบายต่อการใช้งานของผู้บริโภค จึงเป็นที่นิยมนำมาเป็นวัสดุสิ่งของต่าง ๆ ในชีวิตประจำวัน เนื่องจากง่ายต่อการขึ้นรูปเป็นรูปทรงต่าง ๆ และบางชนิดสามารถหลอมและนำกลับมาใช้งานใหม่ได้ ความต้องการใช้พลาสติกของผู้บริโภคจึงเพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้การผลิตพลาสติกมีปริมาณที่เพิ่มขึ้น ซึ่งทำให้เกิดขยะจากพลาสติกในปริมาณที่มากขึ้นทุก ๆ ปี ซึ่งพลาสติกเป็นสารที่ผลิตขึ้นจากปิโตรเคมีหรืออนุพันธ์ของปิโตรเคมี จะไม่สามารถย่อยสลายได้ เพื่อเป็นการลดปัญหาที่เกิดจากขยะพลาสติกที่ไม่สามารถย่อยสลายได้เหล่านี้ จึงเกิดแนวคิดในการนำพลาสติกชีวภาพหรือพลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพมาใช้แทนพลาสติกที่ผลิตได้จากปิโตรเคมี

2.1.1 ความหมายของพลาสติกชีวภาพ (กรวิกา ข่ายทอง, 2553)

พลาสติกชีวภาพ คือ วัสดุที่มีพอลิเมอร์ชีวภาพตั้งต้น ในการอัตราส่วนต่าง ๆ และสามารถขึ้นรูปได้ด้วยความร้อนและแรงดัน

2.1.2 ประเภทของพลาสติกชีวภาพ (กรวิกา ข่ายทอง, 2553)

สามารถแบ่งตามพอลิเมอร์ชีวภาพตั้งต้น ออกเป็น 3 ประเภท คือ

1. พอลิเมอร์ที่สกัดโดยตรงจากชีวมวล เช่น พอลิเมอร์จากเซลลูโลส
2. พอลิเมอร์ที่ผลิตโดยตรงจากจุลินทรีย์ในสภาพธรรมชาติ หรือ มีการดัดแปลงพันธุกรรม เช่น พอลิไฮดรอกซีอัลคาโนเอท (Polyhydroxy alcanoates, PHAs)
3. พอลิเมอร์ที่ได้จากการรวมกันของวัสดุทั้งชีวภาพ ซึ่งผลิตจากวัสดุตั้งต้นที่ได้จากพลังงานหมุนเวียน เช่น พอลิแลคติกแอซิด (Polylactic acid) ไบโอบีโอพอลิเอทิลีน (Bio-polyethylene, BPE) เป็นต้น

พลาสติกที่ย่อยสลายได้สามารถแบ่งตามกลไกการย่อยสลาย ออกเป็น 4 ประเภท (กรมวิทยาศาสตร์บริการ, 2553) คือ

1. พลาสติกย่อยสลายทางชีวภาพ (Biodegradable plastics) เป็นพลาสติกที่ย่อยสลายได้ด้วยเอนไซม์ และแบคทีเรียในธรรมชาติ ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการย่อยสลายจะได้ น้ำมวลชีวภาพ ก๊าซมีเทน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเป็นสิ่งจำเป็นในการเจริญเติบโตและดำรงชีวิตของพืช พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่มีแนวโน้มการทำตลาดที่ดีและมีการผลิตเพื่อใช้เป็นผลิตภัณฑ์ ได้แก่ พอลิแลคติกแอซิด (Polylactic acid, PLA) และ พอลิไฮดรอกซีอัลคาโนเอท (Polyhydroxyalkanoates, PHAs) ซึ่งเป็นพลาสติกที่ได้จากธรรมชาติ ซึ่งใช้กระบวนการทางชีวเคมีในการเปลี่ยนสภาพจากแป้งที่ได้จากมันสำปะหลังและข้าวโพดให้เป็นพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

2. พลาสติกชนิดย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidative degradation plastics) หรือบางครั้งเรียกว่า พลาสติกที่สลายตัวได้โดยไม่ต้องพึ่งพาจุลินทรีย์ (Bioerodable plastics) เป็นพลาสติกที่ย่อยสลายได้ด้วยการเติมออกซิเจนลงในโมเลกุลของพอลิเมอร์ ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้เองในธรรมชาติอย่างช้า ๆ โดยมีออกซิเจน และความร้อน แสงยูวี หรือแรงทางกลเป็นปัจจัยสำคัญ เกิดเป็นสารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (Hydroperoxide, ROOH) ในพลาสติกที่ไม่มีการเติมสารเติมแต่งที่ทำหน้าที่เพิ่มความเสถียร (Stabilizing additive) ของแสงและความร้อนจะทำให้ ROOH แตกตัวกลายเป็นอนุมูลอิสระ RO และ OH ที่ไม่เสถียรและเข้าทำปฏิกิริยาต่อที่พันธะเคมีบนตำแหน่งคาร์บอนในสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้เกิดการแตกหักและสูญเสียสมบัติเชิงกลได้อย่างรวดเร็ว

3. พลาสติกย่อยสลายด้วยแสง (Photodegradable plastics) เป็นพลาสติกที่ย่อยสลายได้ด้วยแสง มักเกิดจากการเติมสารเติมแต่งที่มีความไวต่อแสงลงในพลาสติกหรือสังเคราะห์โคพอลิเมอร์ให้มีหมู่ฟังก์ชันหรือพันธะเคมีที่ไม่แข็งแรง แตกหักง่ายภายใต้รังสี (UV) เช่น หมู่คีโตน (Ketone group) อยู่ในโครงสร้าง เมื่อสารหรือหมู่ฟังก์ชันดังกล่าวสัมผัสกับรังสียูวีจะเกิดการแตกของพันธะกลายเป็นอนุมูลอิสระซึ่งไม่เสถียร จึงเข้าทำปฏิกิริยาต่ออย่างรวดเร็วที่พันธะเคมีบนตำแหน่งคาร์บอนในสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้เกิดการขาดของสายโซ่ แต่การย่อยสลายนี้จะไม่

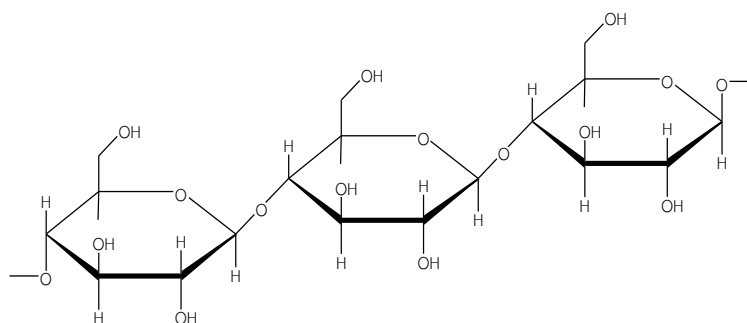
เกิดขึ้นภายในบ่อฝังกลบขยะ หรือสภาวะแวดล้อมอื่นที่มีค เนื่องจากพลาสติกจะไม่ได้สัมผัสกับ รังสียูวีโดยตรง

4. พลาสติกย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolytic degradation plastics) เป็น พลาสติกที่ย่อยสลายได้ด้วยปฏิกิริยาที่ทำให้เกิดการแตกหักของพอลิเมอร์ที่มีหมู่เอสเทอร์ หรือ เอไมด์ เช่น แป้ง พอลิเอสเทอร์ พอลิเอโนไฮโดรคาร์บอเนต พอลิคาร์บอเนต และพอลิยูรีเทน เป็นต้น แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ ประเภทที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic hydrolysis) และไม่ใช้ตัวเร่ง ปฏิกิริยา (Non-catalytic hydrolysis) โดยพลาสติกย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสประเภทที่ใช้ ตัวเร่งปฏิกิริยา แบ่งออกเป็น 2 แบบคือ แบบที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากภายนอกโมเลกุลของพอลิเมอร์ เร่งให้เกิดการย่อยสลาย (External catalytic degradation) คือ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเอนไซม์ต่างๆ (Enzyme) และ ไกลโคไฮโดรเลส (Glycohydrolase) และแบบที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากภายในโมเลกุล ของพอลิเมอร์เองในการเร่งให้เกิดการย่อยสลาย (Internal catalytic degradation) เช่น หมู่คาร์บอกซิลของหมู่เอสเทอร์ หรือเอไมด์บริเวณปลายของสายโซ่พอลิเมอร์ในการเร่งปฏิกิริยา การย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส

2.2 เซลลูโลส (จิตตรา ดอกบัว, 2552)

2.2.1 ลักษณะทั่วไปของเซลลูโลส

เซลลูโลส (Cellulose) เป็นสารประกอบพอลิแซคคาไรด์ (Polysaccharide) เป็นโครงสร้าง ในเนื้อเยื่อพืช โดยพบร่วมกับลิกนิน เพนโตแซนกัน แทนนิน ไขมัน ประกอบด้วยหน่วยซ้ำ ๆ กัน ของโมเลกุลกลูโคสต่อกันด้วยพันธะไกลโคซิดิกแบบเบต้า จาก 1 ไป 4 มีสูตรโมเลกุลทั่วไป คือ $(C_6H_{12}O_6)_n$ ดังภาพที่ 2.1 เซลลูโลสมีหมู่ไฮดรอกซิล 3 หมู่ สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนได้ แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของเซลลูโลสจึงมีมาก และโครงสร้างของเซลลูโลสยังจัดเรียงตัวอย่าง เป็นระเบียบ จึงทำให้เซลลูโลสมีความเป็นผลึกสูงมาก อุณหภูมิการหลอมตัวจึงสูงมาก มักจะเกิด การสลายตัวก่อนถึงอุณหภูมิหลอมตัว และมีความสามารถในการละลายต่ำ ในทางอุตสาหกรรมจะ หาน้ำหนักโมเลกุล โดยประมาณได้จากการวัดความหนืด



ภาพที่ 2.1 โครงสร้างของเซลลูโลส (จิตรรา ดอกบัว, 2552)

2.2.2 สมบัติทางกายภาพของเซลลูโลส

เซลลูโลสไม่ละลายน้ำ แต่จะสลายในกรดเข้มข้น เช่น กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid) กรดซัลฟิวริก (Sulfuric acid) เป็นต้น โดยเซลลูโลสจะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสอย่างรวดเร็วในสารละลายกรดที่อุณหภูมิห้อง แต่จะหยุดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่ำ เซลลูโลสบวมตัวในสารละลายเกลือเข้มข้นบางชนิด เช่น สารละลายอัลคาไลไฮดรอกไซด์ (Alkali hydroxide) บางครั้ง ทำให้เซลลูโลส มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ สามารถละลายได้ สมบัติที่สำคัญอย่างหนึ่งของเซลลูโลส โดยถ้าเราเพิ่มความเข้มข้นของเซลลูโลส ความหนืดก็จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้มีสมบัติทางกายภาพดีขึ้น เซลลูโลสส่วนใหญ่จะมีการดูดซับหรือคายไอน้ำ หรือของเหลวอื่น ๆ ในบรรยากาศรอบตัวของมัน จนกระทั่งถึงจุดสมดุล โดยสมดุลของความชื้นของเซลลูโลส จะแปรเปลี่ยนไปตามความชื้นสัมพัทธ์ของบรรยากาศนั้น ปริมาณความชื้นของเซลลูโลสมีผลต่อสมบัติทางกายภาพบางประการ เช่น ความชื้นสูงขึ้นค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) ก็จะมีค่าเพิ่มขึ้น เซลลูโลสเป็นเส้นใยเดี่ยวจะไม่มีค่าความหนาแน่นที่แน่นอน ค่าความหนาแน่นจะแปรเปลี่ยนไปตามแหล่งที่มาหรืออาจเปลี่ยนไปเนื่องจากการปรับปรุงทางเคมี

2.2.3 ประโยชน์ของเซลลูโลส

เซลลูโลส มีความสำคัญทางด้านอุตสาหกรรมมาก เช่น ใช้ทำเครื่องนุ่งห่ม ทำกระดาษ ทำพลาสติก เป็นต้น เนื่องจากเซลลูโลสทำจากวัตถุดิบที่หาได้ง่าย ทำให้ผลผลิตราคาถูกระบวนการผลิตเซลลูโลส ทำได้โดยการนำไม้ไปปอกและกลั่นด้วยไอน้ำ เพื่อกำจัดสารอินทรีย์

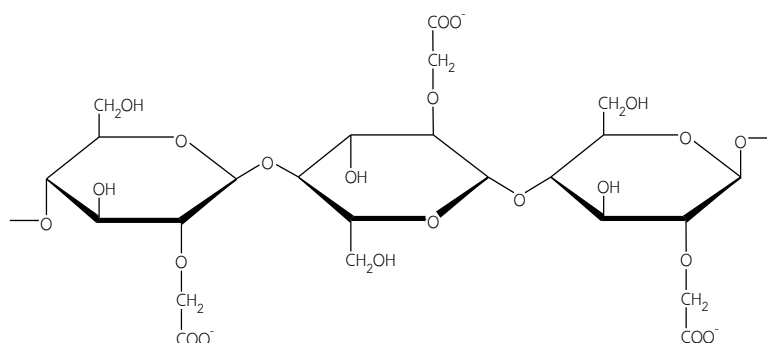
บางอย่าง ที่เหลือส่วนใหญ่เป็นลิกนิน ซึ่งสามารถกำจัดออกโดยวิธีทางเคมี ผลที่ได้เป็นเซลลูโลสบริสุทธิ์

2.3 คาร์บอกซิเมทิลเซลลูโลส (เกวดิน รัตนจรัสกุล, 2555)

คาร์บอกซิเมทิลเซลลูโลสหรือซีเอ็มซี (Carboxymethyl cellulose, CMC) หรือโซเดียมคาร์บอกซิเมทิลเซลลูโลส (Sodium carboxymethylcellulose) คือ พอลิเมอร์ที่สามารถละลายในน้ำ และในตัวทำละลายที่มีขั้วสูงได้ ความสามารถในการละลายของซีเอ็มซี ขึ้นอยู่กับความสามารถในการแทนที่หมู่ฟังก์ชัน (Degree of substitution, D.S.) ซึ่งซีเอ็มซีที่มีค่าความสามารถในการแทนที่หมู่ฟังก์ชันสูง จะทำให้เกิดการละลายน้ำได้ดี สามารถคูดน้ำและทำให้เกิดการพองตัว อัตราการซึมผ่านไอน้ำสูง และเมื่อมีความเข้มข้นของสารละลายซีเอ็มซีในน้ำเพิ่มขึ้นจะทำให้เกิดการเชื่อมขวาง (Crosslinking) ของซีเอ็มซีได้สูงขึ้น และสามารถย่อยสลายได้ในธรรมชาติ โดยปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดฟิล์มซีเอ็มซี มีดังนี้

2.3.1 โครงสร้างของพอลิเมอร์

โครงร่างตาข่ายของซีเอ็มซีประกอบด้วยเซลลูโลสเป็นสายโครงสร้างหลักของพอลิเมอร์ เกิดจากอันตรกิริยาของสายโซ่พอลิเมอร์ (Interaction) ซึ่งเป็นพันธะแบบทุติยภูมิ ดังภาพที่ 2.2 ส่งผลให้ฟิล์มมีความแข็งแรงมากและมีความยืดหยุ่นต่ำ เนื่องจากโครงร่างตาข่ายของพอลิเมอร์ มีความเป็นผลึกสูง มีการจัดเรียงตัวที่เป็นระเบียบ ดังนั้น การนำขึ้นรูปฟิล์มต้องนำพอลิเมอร์ที่มีสายโซ่ยาว เพื่อให้ฟิล์มที่ได้มีความแข็งแรงมากขึ้น จากโครงร่างตาข่ายที่ยาวขึ้น



ภาพที่ 2.2 โครงสร้างโมเลกุลของคาร์บอกซิเมทิลเซลลูโลส (พรชัย ราชชนะพันธุ์, สุพัฒน์ คำไทย, นริวิชญ์ ยาگی และรัชชิตา อุทัยศ, 2550)

2.3.2 ตัวทำละลาย

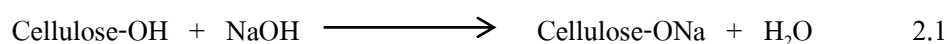
ซีเอ็มเป็นพอลิเมอร์ที่มีความเป็นประจุ จึงสามารถละลายได้ในสารละลายที่มีขั้วสูง เช่น น้ำ แอลกอฮอล์ ซึ่งกลไกการละลายของซีเอ็มซี เริ่มจากการดูดซึมน้ำเข้าไปใน โครงสร้างของสายพอลิเมอร์ ทำให้เกิดการอ้วนน้ำและพองตัว ซึ่งซีเอ็มซีเป็นสารที่มีประจุลบ จึงเกิดการผลักกันระหว่างประจุ ทำให้สายโซ่โครงร่างตาข่ายขยายตัวออกไปในตัวทำละลาย

2.3.3 การขจัดตัวทำละลาย

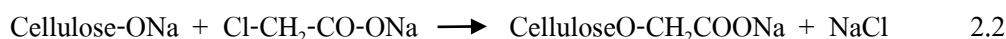
การทำให้แห้งโดยใช้ความร้อนกับสารละลายซีเอ็มซีเพื่อขจัดตัวทำละลายออก ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของโมเลกุลซีเอ็มซีในสารละลาย พันธะระหว่างสายโซ่เกิดการจับกัน ทำให้เกิดเป็นโครงร่างตาข่าย และเกิดเป็นแผ่นฟิล์ม แต่หากมีการใช้ความร้อนที่สูงเกินไป ทำให้เกิดการระเหยขึ้นอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้การจัดเรียงตัวของซีเอ็มซีหยุดลง พันธะระหว่างสายโซ่เกิดได้น้อย ทำให้โครงร่างตาข่ายของซีเอ็มซีที่เกิดขึ้นไม่มีความแข็งแรง แต่หากให้ความร้อนที่ต่ำเกินไปโมเลกุลของซีเอ็มซีตกตะกอนไม่พร้อมกัน ทำให้เกิดการแยกชั้นของโมเลกุลที่ตกตะกอนเร็วกว่า ส่งผลให้ความแข็งแรงของฟิล์มลดลงเช่นกัน

โดยซีเอ็มซีสามารถเตรียมได้ จากการกระตุ้นการทำงานของเซลล์โลสด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ในสารละลายของตัวทำละลายอินทรีย์ และกรด โมโนคลอโรอะซิติก ตามขั้นตอนดังนี้ (Rachtanapun, Luangkamin, Tanprasert, & Suriyatem, 2012)

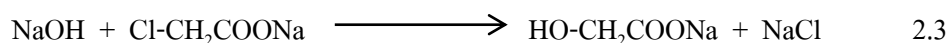
ขั้นที่ 1 กระบวนการแอลคาไลซ์เซชัน (Alkalization) คือ การทำปฏิกิริยากับด่างที่หมู่ไฮดรอกซิลของสายเซลล์โลส และจะเกิดการสลัปที่ ดังสมการที่ 2.1



ขั้นที่ 2 กระบวนการอีเธอร์ฟิเคชัน (Etherification) คือ การทำปฏิกิริยาของสายเซลล์โลสที่ถูกแทนที่ด้วยเบสตามสมการที่ 2.1 กับ โซเดียม โมโนคลอโรอะซิเตท ดังสมการที่ 2.2



โดยสมการที่ 2.2 นี้ยังเกิดปฏิกิริยาข้างเคียง เนื่องจากโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้าทำปฏิกิริยากับโซเดียม โมโนคลอโรอะซิเตท ดังสมการที่ 2.3



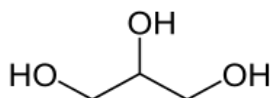
2.4 สารเติมแต่ง (Additives)

สารเติมแต่ง คือ สารที่เติมลงในพอลิเมอร์เพื่อปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ ในงานวิจัยนี้มีเพียง 2 ชนิด คือ กลีเซอรอล (Glycerol) และ พอลิอีเธอร์ซิลิโคนดัดแปลง (PEG-10 dimethicone)

2.4.1. กลีเซอรอล (ภิเชก รุ่งโรจน์ชยพร, 2557)

กลีเซอรอล หรือ กลีเซอริน (Glycerin) หรือ 1,2,3-โพรเพนไตรออล (1,2,3-Propanetriol) เป็นสารจำพวกพอลิไฮดรอลิกแอลกอฮอล์ (Polyhydric alcohol) ที่มีสูตรโมเลกุลคือ $C_3H_8O_3$ ดังภาพที่ 2.3 มีน้ำหนักโมเลกุล 92.09 กรัมต่อโมล ลักษณะเป็นของเหลวใสหนืด ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น และมีรสหวาน มีจุดหลอมเหลวที่ 17.8 องศาเซลเซียส จุดเดือดและจุดสลายตัว ที่ 290 องศาเซลเซียส กลีเซอรอลละลายได้ดีทั้งในน้ำ เมทานอล เอทานอล ไอโซเมอร์ของโพรพานอล บิวทานอล เพนทานอล รวมทั้งฟีนอล โกลคอล โพรเพนไดออกไซด์เอมีน และสารประกอบที่เป็นเฮเทอโรไซคลิก ไดเอธิลอีเธอร์ เอธิลเอสเทอร์ และไดออกเซน ไม่ละลายในตัวทำละลายจำพวกเฮโลเจน เช่น คลอโรฟอร์ม เป็นต้น ดังนั้นการที่กลีเซอรอลละลายได้ในสารหลายประเภท จึงถูกใช้เป็นตัวทำละลายที่มีประโยชน์สำหรับอุตสาหกรรมหลายชนิด เช่น อุตสาหกรรมยา อาหาร และเครื่องสำอาง เป็นต้น

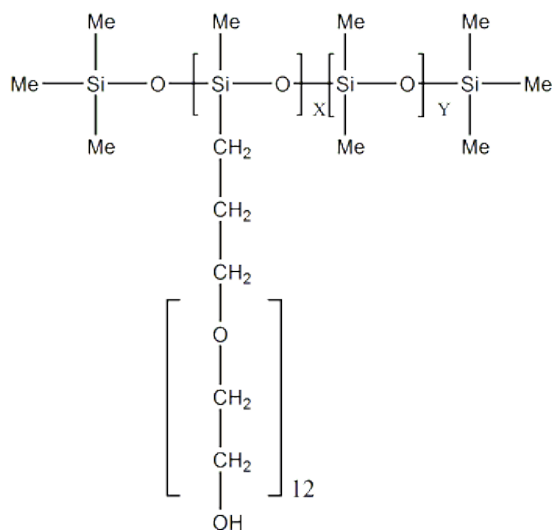
กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซออร์ที่นิยมสำหรับวัสดุพอลิเมอร์ชีวภาพ เนื่องจากกลีเซอรอลมีคุณลักษณะเด่นหลายประการ เช่น ค่าอุณหภูมิกลาสทรานสิชัน (Glass transition temperature หรือ Tg) ต่ำ น้ำหนักโมเลกุลต่ำ จุดวาบไฟสูง และละลายน้ำได้ดี และเมื่อผสมกลีเซอรอลกับน้ำ จะสามารถลดการเปราะ (Brittle) ของพลาสติกที่อุณหภูมิของจุดเดือดได้ และพลาสติกยังคงมีความยืดหยุ่นเมื่อใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซออร์ (Klanwan, 2014)



ภาพที่ 2.3 โครงสร้างของกลีเซอรอล (ภิเชก รุ่งโรจน์ชยพร, 2557)

2.4.2. พอลิเอเธอร์ซิลิโคนดัดแปลง (PEG-10 dimethicone) (Jurong xisims trade co. ltd., 2014)

พอลิเอเธอร์ซิลิโคนดัดแปลง ซึ่งเป็นโคพอลิเมอร์ของพอลิเอทิลีนไกลคอล กับ พอลิไดเมทิลไซลอกเซน (Polydimethyl siloxane) ดังภาพที่ 2.4 เป็นของเหลวใส ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น มีความหนาแน่นเท่ากับ 4.1 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ความสามารถในการละลายน้ำคือร้อยละ 0.5 ปลอดภัยและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม มีแรงตึงผิวต่ำ เหมาะสำหรับการฉีดพ่น และจุ่มเคลือบ มีสมบัติการต้านรอยขีดข่วน สำหรับตัวทำละลายที่เป็นน้ำและน้ำมัน ไม่เป็นอันตรายต่อผิวหนัง ล้างออกง่าย และเพิ่มความเงาวาว



ภาพที่ 2.4 โครงสร้างของ PEG-10 dimethicone (Jurong xisims trade co. ltd., 2014)

2.5 เครื่องมือ

2.5.1 เครื่องทดสอบความแข็ง (Hardness testing) (ณัฐสพล เกียรติพานิช, 2548)

การทดสอบความแข็ง เป็นการทดสอบที่ใช้กันอย่างแพร่หลายตามโรงงานอุตสาหกรรม ทั้งในส่วนของการควบคุมคุณภาพวัตถุดิบที่ซื้อเข้ามา การควบคุมคุณภาพของกระบวนการผลิต และนำมาใช้ในงานวิจัยและพัฒนาวัสดุชนิดต่าง ๆ

ความแข็ง (Hardness) หมายถึง ความสามารถของวัสดุในการต้านทานรอยขีดข่วน (Resistance to scratch) หรือ ความสามารถต่อการต้านทานการกดหรือเจาะทะลุโดยวัสดุอื่น (Resistance to indentation) หรือ ความสามารถของวัสดุในการต้านทานการขัดสี (Resistance to abrasion) หรือ ความสามารถของวัสดุในการต้านทานการกัดแต่งหรือการตัด (Resistance to machining) ดังนั้น การวัดความแข็งเพื่อให้ตรงตามคำจำกัดความต่าง ๆ ดังที่กล่าว เทคนิคหรือวิธีการที่ใช้ในการทดสอบจึงต้องมีความแตกต่างกันไปด้วย ซึ่งสามารถแบ่งประเภทของการทดสอบความแข็งออกได้ 3 ประเภท ดังนี้

การวัดโดยเทคนิคการกด (Indentation technique)

การวัดโดยเทคนิคการกด เป็นการวัดความสามารถของวัสดุในการต้านทานการเจาะทะลุจากแรงกดคงที่ ซึ่งส่งผ่านหัวกดลงบนเนื้อวัสดุ โดยจะมีหัวกดที่มีลักษณะแตกต่างกันไป ได้แก่ เทคนิคบริเนลล์ (Brinell hardness test) นูฟ (Knoop hardness test) วิคเกอร์ส (Vickers hardness test) ร็อกเวลล์ (Rockwell hardness test) และดูโรมิเตอร์ (Durometer)

การวัดโดยเทคนิคการกระดอนตัว (Rebound efficiency technique)

การวัดโดยเทคนิคการกระดอนตัว เป็นการวัดระดับการกระดอนตัวของหัวทดสอบมาตรฐาน ภายหลังจากปล่อยกระทบชิ้นงานทดสอบ หากวัสดุมีความแข็งแรงมาก หัวทดสอบก็จะมี การกระดอนตัวกลับมาก ตรงกันข้ามกับวัสดุที่มีความแข็งน้อย จะทำให้หัวทดสอบมีการกระดอนตัวกลับมาน้อย ได้แก่ เทคนิคแบบเชอร์โรสโคป (Scleroscope)

การวัดโดยเทคนิคการขีดหรือขูด (Scratch or plowing technique)

การวัดโดยเทคนิคการขีดหรือขูด เป็นการวัดความทนทานของวัสดุต่อการขีดด้วยวัสดุประเภทอื่น โดยมีหลักการคือ วัสดุที่มีความแข็งสูงกว่าจะสามารถขีดวัสดุที่อ่อนกว่าให้เกิดเป็นรอยได้ ได้แก่ เทคนิคแบบมอสส์ (Mohs) แบบเบียร์บัม (Bierbaum) และการวัดความแข็งด้วยดินสอ (Pencil hardness)

2.5.2 เครื่องทดสอบแรงดึง (Tensile testing) (ณัฐสพล เกียรติพานิช, 2548)

สมบัติการดึงเป็นข้อมูลที่มีประโยชน์สำหรับการออกแบบในพลาสติกวิศวกรรม ซึ่งความสามารถในการทนแรงดึงของพลาสติกนั้น เป็นคุณสมบัติเชิงกลที่บ่งบอกถึงการพัฒนาคูณสมบัติต่าง ๆ ของพลาสติก และในการทดสอบแรงดึงนั้น สามารถบอกถึงคุณสมบัติต่าง ๆ ของ

พลาสติกที่นำมาทดสอบได้อีกหลายประการ เช่น ความทนแรงดึง ร้อยละการยืด ค่ามอดูลัสของยัง เป็นต้น

2.5.2.1 สมบัติเชิงกล (Mechanical properties) (สุคนธา สุคนธ์ธารา, 2545)

สมบัติเชิงกลของวัสดุ หมายถึง สมบัติของวัสดุในการตอบสนองต่อแรงเชิงกลที่มากระทำ ไม่ว่าแรงเชิงกลนั้นจะมีลักษณะใดก็ตาม โดยทั่วไปแล้วสมบัติเชิงกลมักพิจารณาถึงเทอมต่อไปนี้

ความเค้น (Stress)

ความเค้น คือ แรงต้านภายในเนื้อวัสดุต่อแรงภายนอกที่มากระทำกับวัสดุ ซึ่งหาได้จากอัตราส่วนระหว่างแรงที่กระทำภายนอกต่อหน่วยพื้นที่ตัดขวางของวัสดุที่รับแรงนั้น

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad 2.4$$

เมื่อ σ = ความเค้น มีหน่วยเป็นปาสกาล (Pa, 1 Pa = 1 N/m²)

F = แรงภายนอกที่มากระทำ มีหน่วยเป็น นิวตัน (N)

A = พื้นที่หน้าตัดเริ่มต้นของชิ้นทดสอบ มีหน่วยเป็น ตารางเมตร (m²)

ความเครียด (Strain)

ความเครียด คือ ผลที่เกิดขึ้นหลังจากได้รับสิ่งรบกวน จะทำให้วัสดุยืดออกหรือหดเข้าตามแนวแรงที่กระทำ ซึ่งหาได้จากอัตราส่วนระหว่างความยาวของวัสดุที่เปลี่ยนแปลงไปต่อความยาวเดิมของวัสดุก่อนถูกแรงกระทำ

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad 2.5$$

เมื่อ ε = ความเครียดเชิงเส้น

ΔL = ความยาวที่เปลี่ยนไป (L-L₀)

L₀ = ความยาวเดิมของวัสดุที่สนใจ หรือ ความยาวพักตัวของวัสดุ

2.5.2.2 สมบัติทางด้านแรงดึง (Tensile properties)

การทดสอบเชิงกลที่ใช้กันอย่างกว้างขวางแบบหนึ่ง คือ การทดสอบแรงดึงเพื่อหาความเค้นแรงดึง ร้อยละการยืดตัว และค่ามอดูลัสของยัง การทดสอบนี้นับเป็นการทดสอบสมบัติเชิงกลอย่างง่ายของวัสดุที่เป็นแผ่นหรือฟิล์ม

ความทนแรงดึง

ความทนแรงดึง คือ การวัดความสามารถของวัสดุที่ต้านทานต่อการขาดภายใต้แรงดึง ความทนแรงดึงสามารถคำนวณได้จาก อัตราส่วนระหว่างแรงดึงสูงสุดต่อพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงาน

ค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาด

ค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาด คือ การยืดออกของชิ้นทดสอบที่แสดงเป็นร้อยละของความยาวเริ่มต้น ซึ่งการยืดตัวนี้เกิดขึ้นภายใต้แรงดึง ก่อนชิ้นงานจะขาด สามารถคำนวณได้ ดังนี้

$$\text{ค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาด} = \frac{L-L_0}{L_0} \times 100 \quad 2.6$$

เมื่อ ΔL = ความยาวที่เปลี่ยนไป ($L-L_0$)

L_0 = ความยาวเดิมของวัสดุที่สนใจ หรือ ความยาวพิคัดของวัสดุ

ค่ามอดูลัสของยัง

ค่ามอดูลัสของยัง เป็นอัตราส่วนของความเค้นต่อความเครียดที่เกิดขึ้นกับวัสดุ ค่ามอดูลัสของยังบ่งบอกความแข็งแกร่ง หรือความแข็งตึง (Stiffness) ของวัสดุซึ่งเป็นความสามารถในการต้านทานการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุในช่วงขีดจำกัดความยืดหยุ่น (Elastic limit) ขณะรับแรง แสดงด้วยสัญลักษณ์ E แสดงถึงความแข็งแกร่งของวัสดุ ดังสมการที่ 2.7

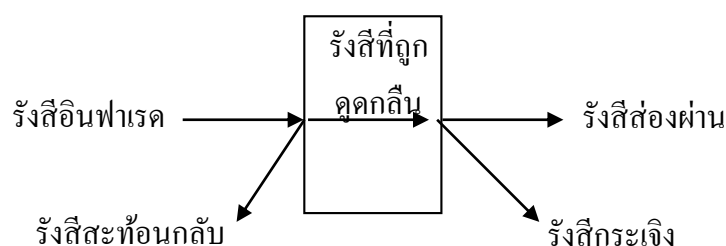
$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad 2.7$$

เมื่อ E = มอดูลัสของความยืดหยุ่น มีหน่วยเป็น N/m^2
 ϵ = ความเครียด
 σ = แรงเค้นเนื่องจากการดึงตัวอย่าง มีหน่วยเป็น N/m^2

2.5.3 การวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชัน โดยใช้เทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี

(สุภาวดี สืบสาย, 2555)

เทคนิคทางฟูรีเออร์ทรานสฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโทรสโคปี (FT-IR) เป็นเทคนิคอย่างหนึ่งที่ใช้ในการวิเคราะห์ตรวจสอบพิสูจน์และศึกษาเกี่ยวกับ โมเลกุลของสาร ซึ่งอาจอยู่ในสถานะของแข็ง ของเหลว หรือแก๊สก็ได้ โดยอาศัยหลักการของสมบัติการเกิดอันตรกิริยา (Interaction) ของสารกับพลังงานจากการแผ่รังสีอินฟราเรด ซึ่งเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าหรือเรียกว่า รังสีอินฟราเรด ดังภาพที่ 2.5 อธิบายการเกิดอันตรกิริยาของสารได้ว่า เมื่อผ่านรังสีอินฟราเรดเข้าไปในสาร จะทำให้เกิดการถ่ายเทพลังงานและพบว่าบางส่วนของรังสีถูกดูดกลืน (Absorbed) บางส่วนผ่านทะลุออกไป (Transmitted) บางส่วนเกิดการสะท้อนกลับ (Reflected) และบางส่วนอาจเกิดการกระเจิง (Scattered) อย่างไม่อย่างหนึ่งหรือเกิดหลายอย่างพร้อม ๆ กัน ซึ่งสามารถตรวจวัดได้ ความถี่ของรังสีอินฟราเรดอยู่ในช่วงระหว่างรังสีไมโครเวฟกับแสงที่ตามองเห็นได้ โดยพลังงานของรังสีอินฟราเรดจะสอดคล้องกับการสั่นของพันธะภายในโมเลกุล หากการสั่นของพันธะเกิดที่ความถี่ตรงกับความถี่ของรังสีอินฟราเรดก็จะเกิดการดูดกลืนขึ้น



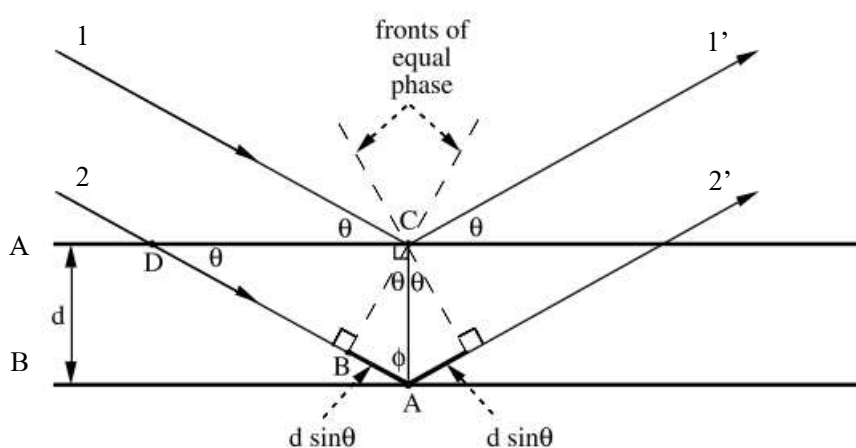
ภาพที่ 2.5 แผนภาพการเกิดอันตรกิริยาของสารกับการแผ่รังสีหรือแสง (สุภาวดี สืบสาย, 2555)

2.5.4 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึก ด้วยเครื่อง X-ray diffractometer (XRD)

(คันศนีย์ รั๊กไทยเจริญชีพ, 2558)

เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ เป็นเครื่องมือวิเคราะห์วัสดุขั้นพื้นฐาน ซึ่งเป็นการวิเคราะห์แบบไม่ทำลายตัวอย่าง (Non-destructive analysis) เพื่อศึกษาเกี่ยวกับโครงสร้างของผลึก และการจัดเรียงตัวของอะตอมใน โมเลกุลของสารประกอบต่างๆ ทั้งในเชิงคุณภาพและปริมาณ โดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนและการกระเจิงของรังสีเอ็กซ์ ซึ่งการวิเคราะห์อาศัยการเปรียบเทียบกับรูปแบบการเลี้ยวเบนกับมาตรฐาน JCPDS (Joint committee on powder diffraction standard) ของสารนั้น ดังนั้นเทคนิค XRD เป็นเทคนิคสำหรับวัดค่าความเข้มของรังสีเอ็กซ์ที่สะท้อนจากผลึก ใช้หลักการของการเลี้ยวเบนของคลื่น ซึ่งรังสีเอ็กซ์เลี้ยวเบนได้เมื่อให้ตกกระทบผลึก

จากแนวคิดของ Bragg ผลึกประกอบไปด้วยชั้น (Layer) หรือ ระนาบ (Plane) ของอะตอม ซึ่งสามารถสะท้อนคลื่นที่ตกกระทบ โดยมุมที่ตกกระทบเท่ากับ มุมสะท้อน ทั้งนี้ถ้าคลื่นที่สะท้อนออกไปจากระนาบต่าง ๆ ดังกล่าว จะมีความเข้มสูง ถ้ารังสีเอ็กซ์ 1 และ 2 ตกกระทบทำมุม θ กับระนาบของผลึก A และ B สนามไฟฟ้าของรังสีเอ็กซ์จะทำให้เกิดแรงคูลอมบ์กระทำบนอิเล็กตรอนในชั้น P และ ชั้น Q ให้สั่นด้วยความถี่เดียวกับรังสีเอ็กซ์ที่ตกกระทบ และอิเล็กตรอนที่ได้รับพลังงานนั้น จะแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นรังสีเอ็กซ์ออกไปทุกทิศทาง แต่ในทิศทาง $1'$ และ $2'$ ซึ่งเสมือนรังสีเอ็กซ์สะท้อนออกจากระนาบของผลึกจะไปแทรกสอดแบบเสริมกัน (In phase) ดังภาพที่ 2.6 (อารีรัตน์ สมหวังสกุล, 2556)



ภาพที่ 2.6 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ในผลึก (Fultz & Howe, 2013)

แม้ว่าแบบจำลองที่กล่าวมานี้จะไม่ถูกต้องในทางกายภาพ เนื่องจากแท้จริงแล้วระนาบของอะตอมไม่ได้สะท้อนคลื่น แต่วิธีคิดนี้ก็ใช้ได้ทางเรขาคณิตและทำให้เราได้สมการที่ดูง่ายและถูกต้องในการศึกษาฟลิก ดังสมการที่ 2.8 (สุรศักดิ์ กุยมาลี, 2551)

$$2d_{hkl}\sin \theta = n\lambda \quad 2.8$$

เมื่อ λ	=	ความยาวคลื่น
n	=	ลำดับของการสะท้อน
d_{hkl}	=	ระยะห่างระหว่างระนาบ(hkl)
θ	=	มุมตกกระทบและมุมสะท้อนเมื่อวัดจากแนวระนาบที่พิจารณา

การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยรังสีเอ็กซ์ ภายในเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ประกอบด้วย หลอดกำเนิดรังสีเอ็กซ์ ที่เป็นหลอดปิดและอยู่ภายใต้สถานะสุญญากาศ ซึ่งรังสีเอ็กซ์จะถูกสร้างขึ้นโดยให้กระแสไฟฟ้าแก่เส้นลวดฟิลาเมนต์ (Filament) ที่อยู่ในหลอดกำเนิดรังสีเอ็กซ์ทำให้เส้นลวดร้อนขึ้นและก่อให้เกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนออกจากเส้นลวด อิเล็กตรอนเหล่านี้จะถูกเร่งด้วยความต่างศักย์สูง และเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงจากเส้นลวดฟิลาเมนต์ที่เป็นขั้วแคโทดเข้าชนขั้วแอโนด ซึ่งโดยทั่วไปทำงานจากโลหะทองแดง อิเล็กตรอนที่พุ่งเข้าชนจะทำให้อิเล็กตรอนวงในสุด (K-shell) ของอะตอมทองแดงหลุดออกไปจึงเกิดเป็นช่องว่างขึ้น เป็นผลให้อิเล็กตรอนวงนอกที่อยู่ถัดมา (L- และ M-shell) เกิดการเปลี่ยนระดับพลังงานลงมาแทนที่ช่องว่างนั้น โดยการคายรังสีเอ็กซ์ออกมาจากหลอดเกิดแสงรังสีเอ็กซ์ไปยังสารตัวอย่าง และรังสีเอ็กซ์ที่เลี้ยวเบนออกจากสารตัวอย่างจะถูกตรวจจับด้วย อุปกรณ์ตรวจจับรังสีเอ็กซ์ (Detector)

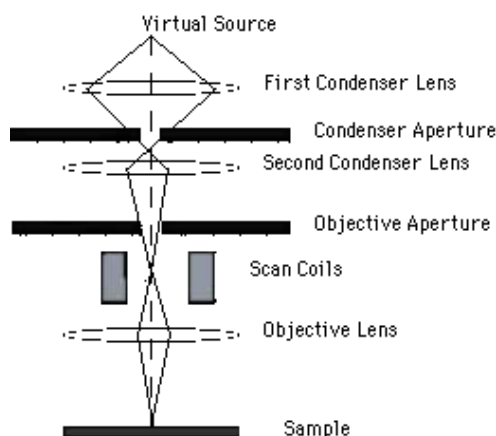
โดยลักษณะตัวอย่างที่เหมาะสมในการส่งเพื่อทดสอบสามารถทำการวิเคราะห์ตัวอย่างได้ทั้งในรูปแบบของแข็ง หรือตัวอย่างที่เป็นผง (Powder) ในกรณีที่ตัวอย่างเป็นของแข็ง ด้านที่ต้องการทดสอบผิวจะต้องเรียบ ส่วนในกรณีตัวอย่างที่เป็นผงจะต้องมีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 325 mesh หรือประมาณ 40 ไมครอน (ผงละเอียดคล้ายผงแป้ง) จึงจะให้ผลการทดสอบที่ดี โดยปริมาณที่ต้องใช้ในการทดสอบต่อครั้ง จะอยู่ประมาณ 1-2 กรัม ในกรณีที่ตัวอย่างเป็นก้อน ต้องมีขนาดกว้างยาว ไม่เกิน 10 เซนติเมตร ทั้งนี้ พื้นที่ที่จะทำการทดสอบจะเป็นเพียงบริเวณเล็ก ๆ ประมาณ 10 มิลลิเมตรเท่านั้น กรณีที่ตัวอย่างมีปริมาณน้อยมาก ๆ ก็อาจทำการทดสอบได้ โดยทางห้องปฏิบัติการจะใช้แผ่น Zero Background ในการวางตัวอย่างเพื่อทำการทดสอบ

2.5.5 การศึกษาสัณฐานวิทยา ด้วยเครื่อง Scanning electron microscope (SEM)

(นิลนิต ฝึกอบรม, 2550)

การศึกษาสัณฐานวิทยา มีวัตถุประสงค์เพื่อทำนายถึงแรงยึดเหนี่ยวของวัสดุ โดยพิจารณาจากความต่อเนื่องบริเวณผิวสัมผัสระหว่างพอลิเมอร์กับวัสดุผสม ซึ่งถ้าพอลิเมอร์และวัสดุผสมมีแรงยึดเหนี่ยวกันได้ดี บริเวณรอยต่อหรือผิวสัมผัสระหว่างพอลิเมอร์กับวัสดุผสมจะมีความต่อเนื่องกันหรืออาจแสดงให้เห็นถึงลักษณะการห่อหุ้มวัสดุผสมด้วยเนื้อของพอลิเมอร์ แต่ถ้าบริเวณผิวสัมผัสระหว่างพอลิเมอร์กับวัสดุผสมแยกกันหรือไม่มีความต่อเนื่องกันระหว่างเฟส แสดงว่าไม่มีแรงยึดเหนี่ยวกันที่ดี นอกจากนี้ยังสามารถศึกษาผิวหน้าของรอยแตกหัก (Fracture surface) โดยลักษณะของรอยแตกหักอาจสังเกตได้จากรูปแบบการแตกหักของวัสดุ เช่น ถ้ารอยแตกหักของพื้นผิวชิ้นงานมีความราบเรียบ สามารถอธิบายได้ว่าพอลิเมอร์นั้นมีการแตกหักแบบวัสดุเปราะคล้ายแก้ว แต่ถ้ารอยแตกหักของบนผิวชิ้นงานมีลักษณะเป็นคลื่นไม่เรียบ หรือ ค่อนข้างขรุขระสามารถอธิบายได้ว่าพอลิเมอร์นั้น มีการแตกหักแบบวัสดุเหนียว เนื่องจากมีการเหนียวรั้งกันระหว่างเนื้อสารกับวัสดุผสมเพื่อต้านทานการแตกหัก

ส่วนประกอบและหลักการการทำงานของ SEM แสดงในภาพที่ 2.7 ส่วนบนสุดเป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน ที่เรียกว่าปืนอิเล็กตรอน (Electron gun) อิเล็กตรอนจากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งให้เคลื่อนที่ลงมาตามคอลัมน์ซึ่งมีสภาพสุญญากาศ ด้วยความต่างศักย์เร่ง (Accelerating voltage) ในช่วง 0-30 กิโลโวลต์ (บางเครื่องอาจทำได้สูงถึง 50 กิโลโวลต์) โดยทิศทางการเคลื่อนที่จะถูกควบคุมด้วยเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic lens) 2 ชุด หรือมากกว่า และปริมาณของอิเล็กตรอนจะถูกควบคุมโดยแอฟเพอเจอร์ (Aperture) หรือช่องเปิดที่มีขนาดต่าง ๆ กัน ตามลักษณะการใช้งาน (กัลยกร เทียนชัย, 2555)



ภาพที่ 2.7 ส่วนประกอบเครื่อง Scanning electron microscope (<http://ncmn.unl.edu/cfem/microscopy/SEM.shtml>)

เลนส์แม่เหล็กไฟฟ้าชุดแรกที่เรียกว่า เลนส์คอนเดนเซอร์ (Condenser lens) นับว่าเป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญที่สุดต่อการควบคุมทัศนศาสตร์อิเล็กตรอน (Electron optics) เพราะเป็นเลนส์ที่ทำหน้าที่บีบอิเล็กตรอนที่วิ่งลงมาจากแหล่งกำเนิดให้เป็นลำที่มีขนาดพื้นที่หน้าตัดเล็กลง ส่วนเลนส์วัตถุ (Objective lens) ซึ่งเป็นเลนส์ชุดสุดท้าย จะทำหน้าที่โฟกัสลำอิเล็กตรอน (Electron beam) ให้ไปตกบนผิวของตัวอย่าง โดยมีสแกนคอยล์ (Scan coil) ทำหน้าที่กราดลำอิเล็กตรอนให้ไปบนผิวของตัวอย่างภายในกรอบพื้นที่สี่เหลี่ยมเล็ก ๆ ซึ่งพื้นที่ผิวของตัวอย่างบริเวณที่ถูกยิงด้วยลำอิเล็กตรอนนี้ จะเกิดสัญญาณ (Signal) ต่าง ๆ ขึ้นหลายชนิดในเวลาเดียวกัน และ SEM จะมีอุปกรณ์สำหรับตรวจจับสัญญาณ (Detector) ชนิดต่าง ๆ เหล่านี้แล้วส่งไปประมวลผลเป็นภาพแสดงบนจอภาพต่อไป ตัวอย่างสัญญาณที่เกิดขึ้นนั้น ได้แก่ อิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron) สัญญาณชนิดนี้จะให้ข้อมูลเกี่ยวกับลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง เป็นสัญญาณที่ถูกนำมาใช้ในการสร้างภาพมากที่สุด ภาพที่ได้จากสัญญาณชนิดนี้ เรียกว่า ภาพอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron image, SEI) และอิเล็กตรอนกระเจิงกลับ (Back scattered electron, BSE) ให้ข้อมูลเกี่ยวกับส่วนประกอบทางเคมีบนผิวของตัวอย่าง และแสดงให้เห็นลักษณะความสูงต่ำของพื้นผิว นอกเหนือจากสัญญาณเหล่านี้แล้ว ยังมีสัญญาณอีกหลายชนิดที่เกิดขึ้น เช่น รังสีเอ็กซ์ (X-ray) คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic wave) ไอออไนซ์อิเล็กตรอน (Auger electron) เป็นต้น ซึ่งสัญญาณแต่ละชนิดจะให้ข้อมูลของตัวอย่างแตกต่างกันไป

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

พรชัย ราชชนะพันธ์ุ, สุพัฒน์ คำไทย, นริวิชญ์ ยาภิ และรัฐชิตา อุทัยยศ (2550) ได้ศึกษาการสังเคราะห์คาร์บอนกัมมะขี้เหล็กเคลือบซิลิโคนจากเปลือกมะละกอ (CMCp) และนำผลของอินฟราเรดสเปกตรัมมาเปรียบเทียบกับอินฟราเรดสเปกตรัมของคาร์บอนกัมมะขี้เหล็กเคลือบซิลิโคนทางการค้า (CMCc) พบว่า พีคของอินฟราเรดสเปกตรัมของ CMCp และ CMCc มีลักษณะคล้ายกัน แต่มีพื้นที่ใต้กราฟในแต่ละพีคไม่เท่ากัน โดยพื้นที่ใต้กราฟของ CMCc มีพื้นที่ใต้กราฟมากกว่า CMCp และได้ศึกษาสมบัติเชิงกลของฟิล์มผสม CMCp และ CMCc พบว่า ฟิล์มผสมที่มีปริมาณของ CMCp มากขึ้น ส่งผลให้ค่าการต้านทานแรงดึงลดลง และไม่มีผลต่อค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาด ฟิล์มผสม CMCp และ CMCc ที่อัตราส่วนเท่ากับ 25 : 75 มีค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาดสูงสุด และฟิล์มผสม CMCp และ CMCc ที่อัตราส่วนเท่ากับ 0 : 100 มีค่าการต้านทานแรงดึงสูงสุด นำฟิล์มผสม CMCp และ CMCc ที่อัตราส่วน 25 : 75 และ 0 : 100 มาปรับปรุงด้วยกลีเซอรอล พบว่า เมื่อเติมกลีเซอรอลปริมาณ 0.1 และ 0.2 มิลลิลิตร ลงในฟิล์มผสม CMCp และ CMCc ทำให้ค่าการต้านทานแรงดึงลดลง และค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาดสูงขึ้น

กันตวัฒน์ หมาดสุเรน (2555) ได้ศึกษาฟิล์มคอมโพสิตจากไคโตซาน สังเคราะห์และพิสูจน์เอกลักษณ์ของไฮดรอกซีอะพาไทต์จากกระดูกวัว สำหรับใช้เป็นตัวเติม (Filler) ในฟิล์มคอมโพสิต พบว่า ไฮดรอกซีอะพาไทต์จากกระดูกวัวที่สังเคราะห์ ณ อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส แสดงเอกลักษณ์เฉพาะของไฮดรอกซีอะพาไทต์บริสุทธิ์ และได้ศึกษาสมบัติและอัตราส่วนของกลีเซอรอลและพอลิเอธิลีนไกลคอลที่มีน้ำหนักโมเลกุล 200 400 และ 600 พบว่า กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ที่ทำให้ฟิล์มมีความยืดหยุ่นสูงและไม่เกิดการบวมตัวมากในสารละลายที่เลียนแบบสารละลายในร่างกายมนุษย์ แต่มีสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนต่ำ ฟิล์มคอมโพสิตที่ใส่พอลิเอธิลีนไกลคอลที่มีน้ำหนักโมเลกุล 600 เป็นพลาสติกไซเซอร์ พบว่า ฟิล์มมีสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนที่ดี แต่ยืดหยุ่นน้อย รวมทั้งมีการบวมตัวค่อนข้างสูง และฟิล์มคอมโพสิตที่ใส่พอลิเอธิลีนไกลคอลที่มีน้ำหนักโมเลกุล 200 เป็นพลาสติกไซเซอร์ พบว่า มีสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อน ค่าการซึมผ่านของไอน้ำที่ดี และเกิดบวมตัวน้อย จึงใช้เป็นพลาสติกไซเซอร์ที่ดีที่สุดในงานวิจัยนี้

ณัฐธวัช จินาพันธ์, เจิมขวัญ สังข์สุวรรณ, สุทธิรา สุทศสุภา และ สุฐพัศ คำไทย (2555) ได้ศึกษาสมบัติของฟิล์มคาร์บอกซิเมทิลเซลลูโลสจากเชื้อฟางข้าว โดยใช้สารละลายคาร์บอกซิเมทิลเซลลูโลสความเข้มข้นร้อยละ 1, 2 และ 3 โดยมวล ผสมกลีเซอรอลที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.25, 0.5 และ 1.0 โดยมวล ในการขึ้นรูปฟิล์ม นำฟิล์มมาทดสอบสมบัติเชิงกลและการซึมผ่านของไอน้ำและแก๊สออกซิเจน พบว่า ปริมาณคาร์บอกซิเมทิลเซลลูโลสที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าการต้านทานแรงดึงขาดเพิ่มขึ้น แต่ค่าร้อยละการยืดตัว ค่าการซึมผ่านของไอน้ำ และค่าออกซิเจนลดลง และเมื่อปริมาณกลีเซอรอลเพิ่มขึ้น ค่าการต้านทานแรงดึงขาดลดลง แต่ค่าร้อยละการยืดตัว ค่าการซึมผ่านของไอน้ำ และค่าออกซิเจนเพิ่มขึ้น ค่าการต้านทานแรงดึงขาดของแผ่นฟิล์มจากเชื้อฟางข้าวอยู่ในช่วง 15.13-29.22 เมกะปาสคาล ค่าร้อยละการยืดตัวอยู่ในช่วง 6.29-33.53 ค่าการซึมผ่านของไอน้ำอยู่ในช่วง 1.06×10^{-4} - 1.76×10^{-4} กรัมต่อตารางเมตรมิลลิเมตรปรอทวัน และอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนอยู่ในช่วง 6.20×10^{-4} - 1.05×10^{-3} ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อตารางเมตรวันปาสคาล

Adinugraha, Marseno, and Haryadi (2005) ได้ศึกษาการสังเคราะห์และคุณลักษณะของคาร์บอกซิเมทิลเซลลูโลสจากต้นกล้วย โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 10 15 20 และ 25 โดยมวล ในการเกิดปฏิกิริยาแอลคาไลด์เซชัน พบว่า เมื่อใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 15 โดยมวล ทำปฏิกิริยากับโซเดียมโมโนคลอโรอะซิเตรต 1.2 กรัม มีค่าการแทนที่ของหมู่ฟังก์ชัน (Degree of substitution, D.S.) ค่าความหนืด

ค่าความบริสุทธิ์ และความเป็นผลึก เท่ากับ 0.75, 4033 เซนติพอยส์, 98.23 และร้อยละ 38.33 ตามลำดับ

Rachtanapun and Rattanapanone (2011) ได้ศึกษาการสังเคราะห์และลักษณะของคาร์บอกซิเมธิลเซลลูโลสจากเปลือกไมยราบยักษ์ (CMCm) โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่ความเข้มข้นร้อยละ 30, 40, 50 และ 60 โดยมวลต่อปริมาตร พบว่า การเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ทำให้ค่าการแทนที่ของหมู่ฟังก์ชัน สมบัติเชิงกล และค่าความหนืดของ CMCm เพิ่มขึ้น แต่ค่าความหนืดของ CMCm จะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น และที่ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 60 โดยมวลต่อปริมาตร สมบัติเชิงกลจะลดลง โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เข้มข้นร้อยละ 50 โดยมวลต่อปริมาตร มีสมบัติเชิงกลดีที่สุด ปริมาณความเข้มข้นเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ไม่มีผลต่อการซึมผ่านของไอน้ำของฟิล์ม CMCm และเมื่อใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ที่ทำให้ค่าร้อยละการยึดตัว ณ จุดแตกหักเพิ่มขึ้น แต่การต้านแรงดึงขาดของแผ่นฟิล์มลดลง

Rachtanapun, Luangkamin, Tanprasert, and Suriyatem (2012) ได้ศึกษาการสังเคราะห์และสมบัติของคาร์บอกซิเมธิลเซลลูโลส (CMCd) จากเปลือกทุเรียน ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 20, 30, 40, 50 และ 60 โดยมวลต่อปริมาตร พบว่า ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ร้อยละ 30 โดยมวล เป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากมีค่าการแทนที่ของหมู่ฟังก์ชัน ร้อยละผลได้ และค่าความหนืดมากที่สุด ความเป็นผลึกของเซลลูโลสมีค่าลดลงหลังการสังเคราะห์เป็น CMCd

Shekarabi, Oromiehie, Vaziri, Ardjmand, and Safekordi (2014) ได้ศึกษาผลของความเข้มข้นของกลีเซอรอลที่มีผลต่อสมบัติทางกายภาพของฟิล์มรับประทานได้ที่เตรียมจากยางพาราและคาร์บอกซิเมธิลเซลลูโลส โดยใช้ความเข้มข้นของกลีเซอรอลที่ร้อยละ 5 10 15 และ 20 โดยมวล พบว่า ค่าการซึมผ่านของไอน้ำ และค่าความต้านทานแรงดึงขาดลดลง แต่ค่าร้อยละการยึด ณ จุดขาดมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของกลีเซอรอลเพิ่มขึ้น และกลีเซอรอลที่ความเข้มข้นร้อยละ 20 โดยมวล ทำให้ฟิล์มมีประสิทธิภาพสูงที่สุดในงานวิจัยนี้

2.7 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องทั้งหมด พบว่า ผู้วิจัยได้นำวัสดุจากธรรมชาติ คือ เปลือกมะละกอ ใค้โตซาน ฟางข้าว ต้นกล้วย เปลือกไมยราบยักษ์ เปลือกทุเรียน และ ยางพารา นำมาสกัดเซลลูโลสด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และสังเคราะห์คาร์บอกซิเมทิลเซลลูโลสด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ นำคาร์บอกซิเมทิลเซลลูโลสที่สังเคราะห์ได้มาศึกษาโครงสร้างด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี และวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ บางงานวิจัยนำผงคาร์บอกซิเมทิลเซลลูโลสมาขึ้นฟิล์มชีวภาพ โดยศึกษาปริมาณของสารเติมแต่งคือ กลีเซอรอลและ โพลีเอธิลีนไกลคอล ที่เหมาะสม ศึกษาสมบัติของฟิล์มแต่ละชนิด เช่น สมบัติเชิงกล อัตราการซึมผ่านของไอน้ำ และการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน เป็นต้น

บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการสังเคราะห์ซีเอ็มซีและฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนพันธุ์หมอนทอง พร้อมทั้งปรับปรุงสมบัติของฟิล์มชีวภาพจากเปลือกทุเรียน โดยใช้สารเติมแต่ง 2 ชนิดคือ กลีเซอรอล และ PEG-10 dimethicone ที่ความเข้มข้นร้อยละ 10 20 30 โดยมวล ซึ่งจะประกอบไปด้วยขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย และวิธีการดำเนินงานวิจัย ดังนี้

3.1 สารเคมีและวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

3.1.1 สารเคมี

1. เปลือกทุเรียน พันธุ์หมอนทอง จังหวัดระยอง
2. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide) ความบริสุทธิ์ร้อยละ 98-100 AR grade บริษัท Loba chemie
3. กรดอะซิติกเข้มข้น (Glacial acetic acid) ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.8 AR grade บริษัท Scharlau chemie S.A.
4. ไอโซโพรพานอล (Isopropanol) ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.5 AR grade บริษัท QREC (ASIA) SDN BHD.
5. เอทานอลบริสุทธิ์ (Absolute ethanol) ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.9 AR grade บริษัท J.T. Baker
6. เมทานอล (Methanol) ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.8 AR grade บริษัท Ajax Finechem
7. เมทานอล (Methanol) ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.9 HPLC grade บริษัท Fisher scientific UK Limited
8. กรดโมโนคลอโรอะซิติก (Monochloroacetic acid) ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.0 AR grade บริษัท Lobachemie

9. ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide) ความบริสุทธิ์ร้อยละ 30-32 AR grade บริษัท Lobachemie
10. กลีเซอรอล (Glycerol) บริษัท Gammaco Thailand
11. โพลีเอเธอร์ซิลิโคน ดัดแปลง (PEG-10 dimethicone) บริษัท Jurong xisima trade

3.1.2 อุปกรณ์

1. ตู้อบลมร้อน (Hot air oven) รุ่น FED 115 บริษัท BINDER
2. โถดูดความชื้น (Desiccator) บริษัท S.R. LAB
3. ไฮโกรมิเตอร์ (Hygrometer) รุ่น D-011 บริษัท Daiso Thailand
4. เครื่องปั่นน้ำผลไม้ รุ่น BL-767 บริษัท Moulinex
5. เตาหตุ้มให้ความร้อน (Heating mental) รุ่น MS-E104 ขนาด 1000 มิลลิลิตร บริษัท Misung Scientific
6. เวอร์เนียคาลิเปอร์ระบบดิจิทัล (Digital Vernier caliper) ขนาด 0-150 มิลลิเมตร บริษัท ZIMM-ZEEM
7. ตะแกรงร่อนขนาด 80 mesh

3.1.3 เครื่องมือ

1. เครื่องวัดความแข็งด้วยดินสอ (Pencil hardness tester) รุ่น QHQ-A
2. เครื่องอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (Fourier transform infrared spectrophotometer, FT-IR) รุ่น System 2000 บริษัท Perkin Elmer
3. เครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction, XRD) รุ่น X'Pert-MPD บริษัท Philips
4. เครื่องทดสอบแรงดึง (Tensile testing machine) รุ่น Micro 350 บริษัท Testometric
5. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) รุ่น 1450 VP บริษัท LEO

3.2 การสกัดเซลลูโลสจากเปลือกทุเรียน (Rachtanapun et al., 2012)

นำเปลือกทุเรียนมาล้างน้ำ หั่นเปลือกทุเรียนให้ได้ขนาดประมาณ 1.0x1.5x1.0 ลูกบาศก์เซนติเมตร นำมาอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง และปั่นเปลือกทุเรียนให้ได้เป็นผงละเอียด นำผงของเปลือกทุเรียนมาต้มในเตาหลุมให้ความร้อน ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 10 โดยมวลต่อปริมาตร ในอัตราส่วนผงทุเรียนต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ คือ 1 กรัม ต่อ 20 มิลลิลิตร เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จะได้สารแขวนลอยสีดำ หลังจากนั้นกรองเอาเยื่อออกด้วยผ้าขาวบาง ทำให้เป็นกลางด้วยการล้างน้ำกลั่นหลาย ๆ รอบและทดสอบความเป็นกลางของน้ำล้างด้วย pH meter นำเยื่อที่กรองแล้วไปอบที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ปั่นเยื่อด้วยเครื่องปั่นอาหารก่อนนำเยื่อมาพอกให้ขาวด้วย ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร้อยละ 30-32 ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ปั่นเยื่อด้วยเครื่องปั่นอาหารอีกครั้ง คัดเยื่อให้มีขนาด 80 mesh (0.18 มิลลิเมตร) ด้วยตะแกรงร่อน ขั้นตอนการสกัดเซลลูโลสจากเปลือกทุเรียนแสดงในภาพที่ 3.1

3.3 การสังเคราะห์คาร์บอกซิเมทิลเซลลูโลส (ซีเอ็มซี) จากเปลือกทุเรียน (Rachtanapun et al., 2012)

นำผงเซลลูโลสที่สกัดได้จากเปลือกทุเรียน 15 กรัมละลายในโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นร้อยละ 30 โดยมวลต่อปริมาตร จำนวน 50 มิลลิลิตรผสมกับไอโซโพรพานอล 450 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 นาที จากนั้นใส่กรดโมโนคลอโรอะซิติก 18 กรัม คนโดยใช้เครื่องคนโดยใช้แท่งแม่เหล็กประมาณ 1.5 ชั่วโมง คลุมสารละลายด้วยอะลูมิเนียมฟอยล์ นำไปอบที่ 55 องศาเซลเซียส เวลา 3 ชั่วโมง หลังอบสารจะแยกออกเป็น 2 ชั้น โดยชั้นบนจะเป็นสารละลายใสให้ดูออก นำสารชั้นล่างมาล้างด้วยเมธานอลร้อยละ 70 โดยปริมาตร จำนวน 100 มิลลิลิตร ทำให้เป็นกลางโดยใช้กรดอะซิติกเข้มข้น วัดความเป็นกลางด้วยเครื่อง pH meter ล้างและกรอง 5 ครั้ง โดยใช้เมธานอลร้อยละ 70 โดยปริมาตร จำนวน 300 มิลลิลิตร จากนั้นล้างด้วยเมธานอลบริสุทธิ์และกรองออก ก่อนนำไปอบที่ 55 องศาเซลเซียส ในตู้อบลมร้อน เป็นเวลา 1 คืน (Rachtanapun et al., 2012)

ซึ่งน้ำหนักซีเอ็มซีได้จากเปลือกทุเรียนที่ได้จากการสังเคราะห์และนำมาหาค่าร้อยละผลได้ (%Yield) ของซีเอ็มซี ดังสมการที่ 3.1 (Rachtanapun et al., 2012)

$$\text{Yield of CMC}_d (\%) = \frac{\text{Weight of CMC}_d (\text{g}) \times 100}{\text{Weight of cellulose (g)}} \quad 3.1$$



1



2



3



4

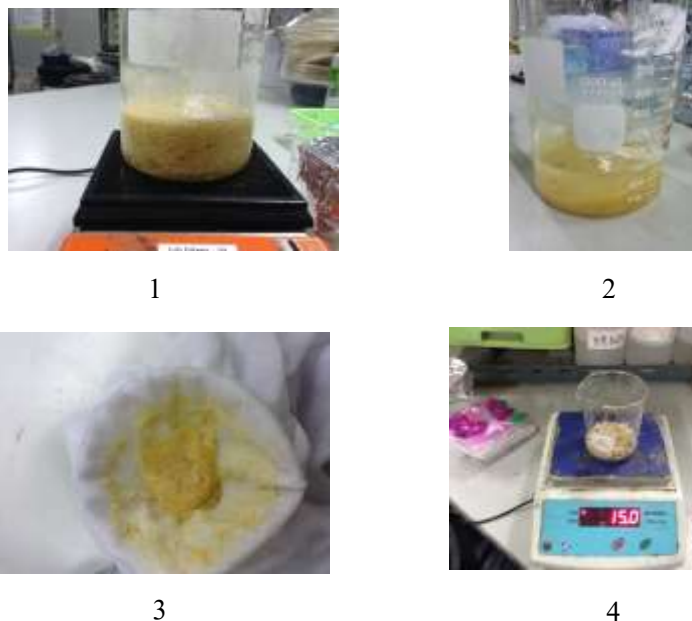


5



6

ภาพที่ 3.1 การสกัดเซลลูโลสจากเปลือกทุเรียน (1) อบเปลือกทุเรียนขนาดประมาณ 1.0x1.5x1.0 ลูกบาศก์เซนติเมตร ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง (2) บั่นเปลือกทุเรียนเป็นผงละเอียด (3) ต้มในเตาหลุมให้ความร้อนด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยมวลต่อปริมาตร เป็นเวลา 3 ชั่วโมง (4) กรองเอาเชื้อออกด้วยผ้าขาวบาง (5) ฟอกขาวเชื้อด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร้อยละ 30-32 (6) คัดเชื้อให้มีขนาด 80 mesh ด้วยตะแกรงร้อน



ภาพที่ 3.2 การสังเคราะห์ซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียน (1) ชั่งผงเซลลูโลส 15 กรัมละลายใน โซเดียมไฮดรอกไซด์ผสมกับไอโซโพรพานอล ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 นาที (2) ของผสมแยกเป็น 2 ชั้น (3) ล้างสารชั้นล่างและกรอง 5 ครั้ง โดยใช้เอทานอล และล้างผลิตภัณฑ์ด้วยเมทานอล บริสุทธิ์ กรองก่อนนำไปอบที่ 55 องศาเซลเซียส (4) ชั่งน้ำหนักซีเอ็มซีที่ได้จากการสังเคราะห์

3.4 การเตรียมฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียน (Rachtanapun et al., 2012)

นำผงซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนที่สังเคราะห์ได้ 3 กรัม ละลายในน้ำ 100 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เวลา 10 นาที คนโดยใช้แท่งแม่เหล็กตลอดเวลา ทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง แบ่งสารละลายออกมา 20 มิลลิลิตร เทลงในบีกเกอร์ที่ใส่กิลิเซอร์อลไว้ร้อยละ 10 20 30 โดยมวล และ PEG-10 dimethicone ร้อยละ 10 20 30 โดยมวล ตามสัดส่วนในตารางที่ 3.1 คนให้สารละลายเป็นเนื้อเดียวกัน แล้วเทลงในจานเพาะเชื้อ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร และนำไปอบที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียสในตู้อบสูญญากาศ เป็นเวลา 1 คืน ฟิล์มที่ได้มีความหนาประมาณ 0.11 มิลลิเมตร

ตารางที่ 3.1 ปริมาณของสารเติมแต่งที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียน

ชื่อชิ้นงาน	น้ำหนักของซีเอ็มซี (กรัม)	น้ำหนักกลีเซอรอล (กรัม)	น้ำหนัก PEG-10 dimethicone (กรัม)
CMC _d	0.60	-	-
CMC _d 10G	0.60	0.0600	-
CMC _d 20G	0.60	0.1200	-
CMC _d 30G	0.60	0.1800	-
CMC _d 10PEG	0.60	-	0.0600
CMC _d 20PEG	0.60	-	0.1200
CMC _d 30PEG	0.60	-	0.1800

3.5 การศึกษาสมบัติของฟิล์มจากเปลือกทุเรียน

3.5.1 ความแข็ง

วัดความแข็งด้วยเครื่องวัดความแข็งด้วยดินสอ ดังภาพที่ 3.3 ตามวิธีมาตรฐาน ASTM D3363 โดยวัดความแข็งแผ่นฟิล์มจากเปลือกทุเรียนที่ไม่ใส่และใส่สารเติมแต่งทั้ง 2 ชนิด ที่ระดับ 6B-6H

3.5.2 สมบัติเชิงกล (วัลลดา หวานเสนาะ, 2553)

ร้อยละการยืด ณ จุดขาด ความแข็งแรงดึง โมดูลัสของยัง ด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง โดยตัดแผ่นฟิล์มจากเปลือกทุเรียนที่ไม่ใส่และใส่สารเติมแต่งทั้ง 2 ชนิด ให้ได้ขนาด 0.50x5.00x0.01 ลูกบาศก์เซนติเมตร ก่อนนำไปทดสอบความทนต่อแรงดึงยึดโดยใช้เครื่องทดสอบแรงดึง Tensometric รุ่น Micro 350 กำหนดความยาวพิงก์ 1 เซนติเมตร อัตราเร็วในการดึง 20 มิลลิเมตรต่อนาที ส่วนวัดแรง 50 นิวตัน ดึงด้วยอัตราเร็วคงที่ ตาม ตามวิธีมาตรฐาน ASTM D882-80a



ภาพที่ 3.3 เครื่องวัดความแข็งด้วยดินสอ รุ่น QHQ-A



ภาพที่ 3.4 เครื่องทดสอบแรงดึง Tensometric รุ่น Micro 350

3.5.3 อัตราการซึมผ่านของไอน้ำ

ทำการทดลองเพื่อวัดอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ (Water vapor transmission rate, WVTR) ของฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนที่ไม่ใส่และใส่สารเติมแต่งทั้ง 2 ชนิด จากปริมาณน้ำที่ระเหยผ่านวัสดุตัวอย่างต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ โดยการตัดแปลงจากวิธีมาตรฐาน ASTM E 96 ดังนี้ ใช้ฟิล์มตัวอย่างรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด $0.50 \times 5.00 \times 0.01$ ลูกบาศก์เซนติเมตร ปิดปากกล่องพลาสติกที่มีซิติกาบบรรจุอยู่ประมาณ 4 กรัม (บันทึกทศนิยม 4 ตำแหน่ง) และปิดขอบซึ่งเป็นรอยต่อระหว่างฟิล์มกับกล่องพลาสติกให้สนิทด้วยฟิล์มพาราฟิน ชั่งน้ำหนักกล่องที่ปิดสนิทแล้วด้วยเครื่องชั่งละเอียด บันทึกเป็นน้ำหนักเริ่มต้น จากนั้นนำไปวางในโถดูดความชื้นที่บรรจุสารละลายโซเดียมคลอไรด์อิ่มตัว (มีระดับความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 75) นำออกมาชั่งน้ำหนักทุกวัน เป็นเวลา 7 วัน เพื่หาน้ำหนักที่เพิ่มขึ้น พลอตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนวันและน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นจะได้กราฟเส้นตรง จากนั้นนำความชันของกราฟเส้นตรงที่พลอตระหว่างจำนวนวันและน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นของแผ่นฟิล์มซีเอ็มซี มาคำนวณค่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ โดยอาศัยสมการ

$$\text{WVTR} = \frac{G}{tA} \quad 3.2$$

เมื่อ	WVTR = อัตราการซึมผ่านของไอน้ำ (กรัมต่อชั่วโมงตารางเมตร)
G	= น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลง
t	= เวลา (ชั่วโมง)
A	= พื้นที่ของการระเหยผ่านหรือพื้นที่ของปากถ้วย (ตารางเมตร)
G/t	= อัตราการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักหรือความชันของกราฟ (กรัมต่อชั่วโมง)

3.5.4 การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมี (วัลลดา หวานเสนาะ, 2553)

วิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันที่อยู่ในสารตัวอย่าง โดยใช้เทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี ทำการเตรียมตัวอย่าง โดยนำผงซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนที่สังเคราะห์ได้ 2-3 มิลลิกรัม มาบดรวมกับโพแทสเซียมโบรไมด์ที่อบแห้งแล้วจำนวน 0.2-0.5 กรัม ให้เข้ากัน ใส่ลงในแม่พิมพ์แล้วนำเข้า

เครื่องอัดเม็ดภายใต้ความดัน 10^4 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร นาน 5 นาที โดยศึกษาหุ้มฟังก์ชันในช่วงเลขคลื่น $4000-400\text{ cm}^{-1}$ แล้วนำเม็ดออกจากแม่พิมพ์ นำไปวิเคราะห์จะได้สเปกตรัมของสารตัวอย่าง

3.5.5 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (Rachtanapun et al., 2012)

วิเคราะห์หาโครงสร้างของผลึกและองค์ประกอบทางเคมีของสารตัวอย่าง โดยใช้หลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ที่ตกกระทบหน้าผลึกของสารตัวอย่าง ที่มีมุมต่างๆ กัน เพื่อระบุวิฤภาคองค์ประกอบของสารตัวอย่าง โดยเตรียมสารตัวอย่างที่มีความหนา 0.02 เซนติเมตร และขนาดของมุมตกกระทบที่ใช้ (2θ) ในช่วง 10-60 องศา ด้วยอัตราเร็ว 0.5 องศาต่อนาที

3.5.6 การศึกษาสัณฐานวิทยา (กัลยกร เทียนชัย, 2555)

ศึกษาสัณฐานวิทยาของฟิล์มที่ได้จากเปลือกทุเรียน ทั้งที่ไม่ใส่และใส่สารเติมแต่ง ทั้ง 2 ชนิด ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) รุ่น 1450 VP บริษัท LEO ความต่างศักย์เร่งเท่ากับ 10 กิโลโวลต์ ดังภาพที่ 3.5 ถ่ายภาพพื้นผิวของฟิล์มที่กำลังขยาย 500 และ 10,000 เท่า โดยการเตรียมตัวอย่างฟิล์มให้มีขนาดที่เหมาะสมและเคลือบด้วยทองคำ ก่อนทำการวิเคราะห์



ภาพที่ 3.5 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด รุ่น 1450 VP บริษัท LEO

บทที่ 4

ผลการวิจัย

4.1 การสกัดเซลลูโลสจากเปลือกทุเรียน

การสกัดเซลลูโลสจากเปลือกทุเรียน ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ร้อยละ 10 โดยมวลต่อปริมาตร ในอัตราส่วนผงทุเรียนต่อ โซเดียมไฮดรอกไซด์ คือ 1 กรัม ต่อ 20 มิลลิลิตร เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เมื่อคำนวณหาค่าร้อยละของผลิตภัณฑ์เซลลูโลสที่ได้ จากการหาค่าผลต่างของน้ำหนัก ก่อนและหลังการสังเคราะห์เซลลูโลสทั้งหมด 3 ครั้ง ได้ผลดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ร้อยละของผลิตภัณฑ์เซลลูโลส

ครั้งที่	น้ำหนักเปลือกทุเรียน (กรัม)	น้ำหนักเซลลูโลส (กรัม)	ร้อยละของผลิตภัณฑ์ เซลลูโลส (%)
1	85.00	17.20	20.23
2	80.00	16.00	20.00
3	80.00	15.50	19.38
		เฉลี่ย	19.87 ± 0.36

4.2 การสังเคราะห์คาร์บอกซิเมทิลเซลลูโลส (ซีเอ็มซี)

การสังเคราะห์ซีเอ็มซีจากเซลลูโลสที่สกัดจากเปลือกทุเรียน ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้นร้อยละ 30 โดยมวล เมื่อคำนวณหาค่าร้อยละของผลิตภัณฑ์ซีเอ็มซีที่ได้เทียบกับ น้ำหนักของสารตั้งต้น ได้ผลดังตารางที่ 4.2

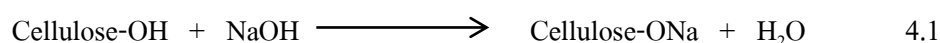
ตารางที่ 4.2 ร้อยละของผลิตภัณฑ์ที่ได้เทียบกับน้ำหนักของสารตั้งต้นในการสังเคราะห์ซีเอ็มซี

ครั้งที่	น้ำหนักเซลลูโลส (กรัม)	น้ำหนักซีเอ็มซี (กรัม)	ร้อยละของผลิตภัณฑ์ ซีเอ็มซี (%)
1	15.00	22.50	150.00
2	15.00	20.50	136.67
3	15.00	25.00	166.67
เฉลี่ย			151.11 ± 15.03

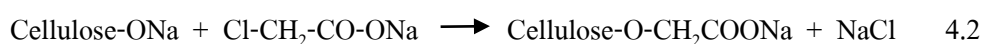
จากตารางที่ 4.2 พบว่าค่าร้อยละของผลิตภัณฑ์ซีเอ็มซีเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 151.11 ± 15.03 ซึ่งสูงกว่า 100% สอดคล้องกับผลงานวิจัยของณัฐชวีดี จินาพันธ์ และคณะ (2555) ที่รายงานค่าร้อยละของผลิตภัณฑ์ของซีเอ็มซีจากเยื่อฟางข้าว (CMC_r) มีค่าเท่ากับ 149.59 เมื่อทำปฏิกิริยากับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 30 โดยมวล และนอกจากนี้ยังสอดคล้องกับผลงานวิจัยของ Rachtanapun et al. (2012) ที่รายงานร้อยละของผลิตภัณฑ์ของซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียน (CMC_d) ว่ามีค่าประมาณ 167 เมื่อใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 30 โดยมวล ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นสามารถอธิบายได้ดังสมการที่ 4.1-4.3 (Rachtanapun et al., 2012)

โดยปฏิกิริยาแบ่งเป็น 3 ขั้นตอน ได้แก่

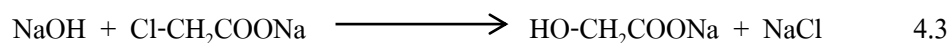
ขั้นที่ 1 กระบวนการแอลคาไลเซชัน (Alkalization) คือ การทำปฏิกิริยากับด่างที่หมู่ไฮดรอกซิลของสายเซลลูโลส และจะเกิดการสลัปที่ ดังสมการที่ 4.1



ขั้นที่ 2 กระบวนการอีเธอร์ฟิเคชัน (Etherification) คือ การทำปฏิกิริยาของสายเซลลูโลสที่ถูกแทนที่ ด้วยเบสตามสมการที่ 4.1 กับโซเดียมโมโนคลอโรอะซิเตต ดังสมการที่ 4.2



โดยสมการที่ 4.2. นี้ยังเกิดปฏิกิริยาข้างเคียง เนื่องจากโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้าทำปฏิกิริยากับโซเดียมโมโนคลอโรอะซิเตต ดังสมการที่ 4.3

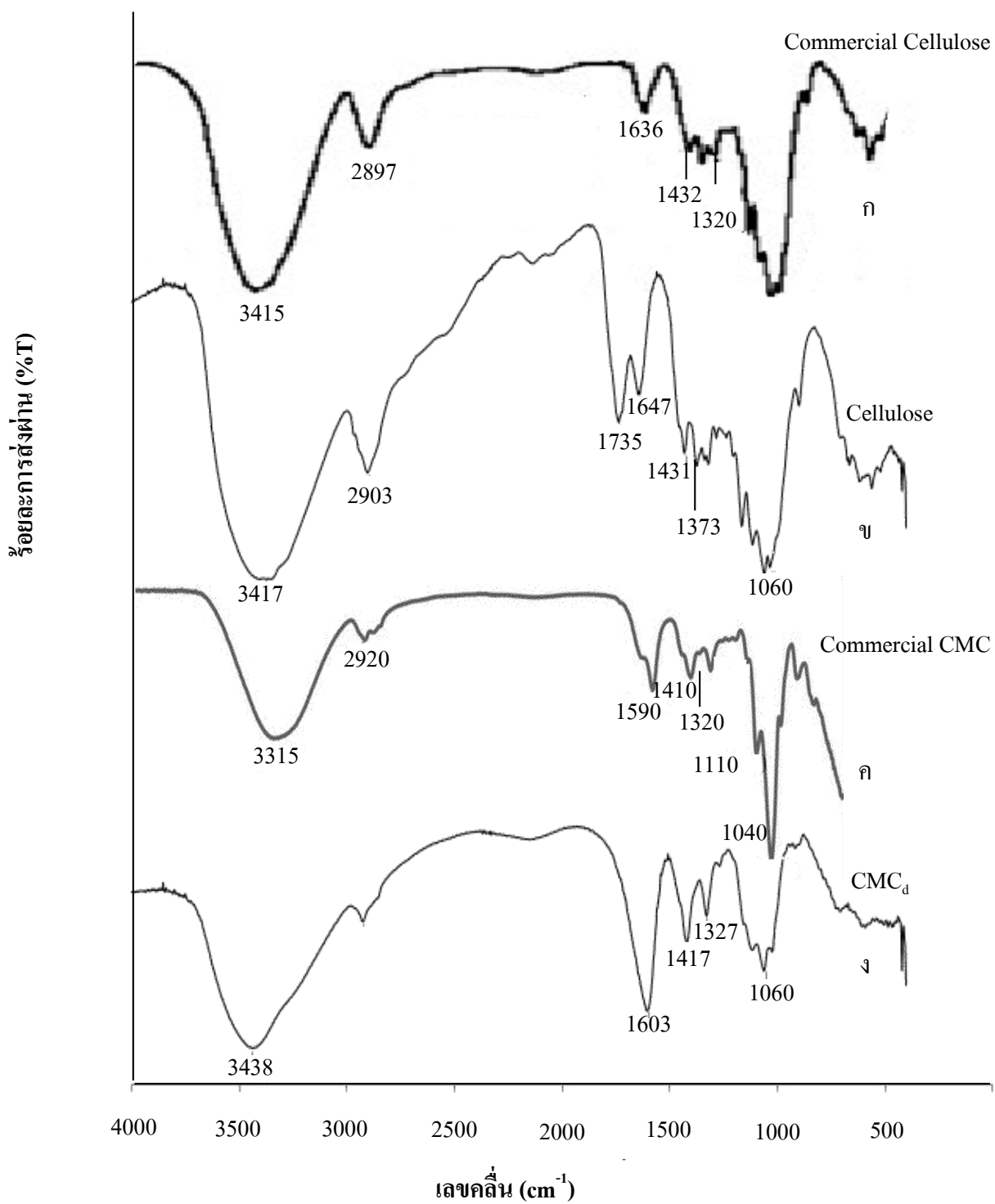


จากสมการที่ 4.2 พบว่ากระบวนการอีเธอริฟิเคชัน (Etherification) ทำให้โซเดียมโมโนคลอโรอะซิเตตเข้าแทนที่ตำแหน่งของโซเดียมไอออนจึงทำให้สายเซลลูโลสมีมวลโมเลกุลเพิ่มขึ้นหลังการสังเคราะห์ จึงทำให้ค่าร้อยละผลได้สูงขึ้นเนื่องจากค่าร้อยละผลได้คำนวณจากสมการที่ 4.4 (Rachtanapun et al., 2012) ดังนี้

$$\text{Yield of CMC}_d (\%) = \frac{\text{Weight of CMC}_d (\text{g}) \times 100}{\text{Weight of cellulose (g)}} \quad 4.4$$

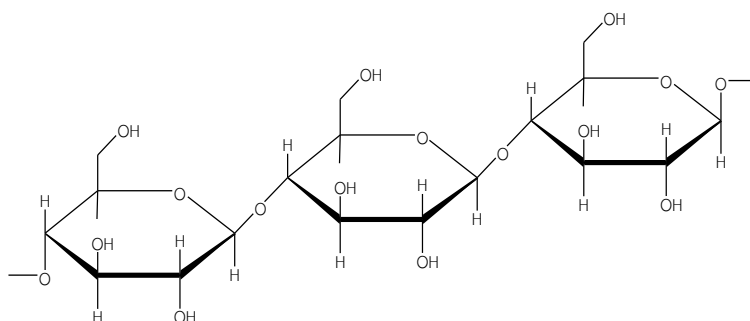
4.2 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน

การวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันที่อยู่ในสารตัวอย่าง โดยใช้เทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี ได้สเปกตรัมของร้อยละการส่งผ่านแสงของผงเซลลูโลสและซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียน ดังภาพที่ 4.1

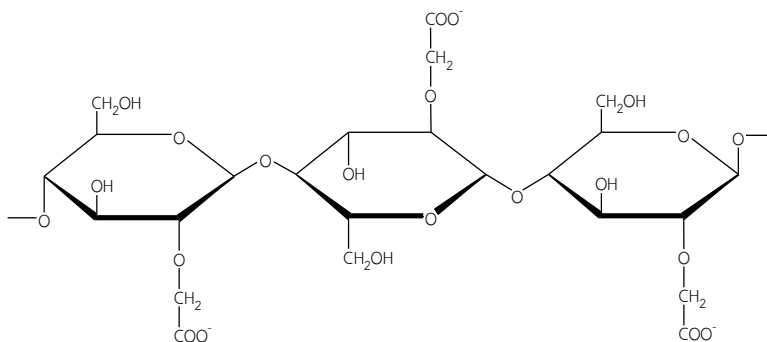


ภาพที่ 4.1 อินฟราเรดสเปกตรัมของผงเซลลูโลสและซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียน

โดยสเปกตรัมของเซลลูโลส แสดงพีกของหมู่ฟังก์ชันสำคัญ ดังนี้ ที่เลขคลื่น 3417 cm^{-1} แสดงถึงหมู่ไฮดรอกซิล (O-H stretching) ที่เลขคลื่น 2903 cm^{-1} แสดงถึงหมู่ไฮโดรคาร์บอน (C-H stretching) ที่เลขคลื่น 1735 cm^{-1} แสดงถึงหมู่คาร์บอนิล (C=O stretching) และที่เลขคลื่น 1373 และ 1060 cm^{-1} แสดงถึงหมู่อีเทอร์ (-O- stretching) (แม้น อมรสิทธิ์ และคณะ, 2554) เลขคลื่นที่ปรากฏสอดคล้องกับหมู่ฟังก์ชันที่พบในโครงสร้างของเซลลูโลสจากเปลือกทุเรียน ดังแสดงในภาพที่ 4.2 ส่วนหมู่คาร์บอกซิล พบที่ 1735 cm^{-1} นั้น อาจเนื่องมาจากผงเซลลูโลสที่สังเคราะห์ได้ ยังมีส่วนของเฮมิเซลลูโลส ลิกนิน และเพคตินเหลืออยู่ ซึ่งหมู่ฟังก์ชันหลักของเฮมิเซลลูโลส มีลักษณะคล้ายกับเซลลูโลส ส่วนหมู่ฟังก์ชันหลักของลิกนิน ได้แก่ วงแหวนเบนซีน อีเทอร์ ไฮโดรคาร์บอน และคาร์บอนิล และหมู่ฟังก์ชันหลักของเพคติน ได้แก่ หมู่ไฮโดรคาร์บอน อีเทอร์ คาร์บอกซิล และคาร์บอนิล (พรชัย ราชตะนะพันธ์ และคณะ, 2550)



ภาพที่ 4.2 โครงสร้างของเซลลูโลสจากเปลือกทุเรียน (จิตรดา ดอกบัว, 2552)



ภาพที่ 4.3 โครงสร้างของซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียน (พรชัย ราชตะนะพันธ์ และคณะ, 2550)



เมื่อนำผงซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนไปวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโคปีได้อินฟราเรดสเปกตรัมคล้ายกับอินฟราเรดสเปกตรัมของผงเซลลูโลสจากเปลือกทุเรียนคือ ที่เลขคลื่น 3438 cm^{-1} แสดงถึงหมู่ไฮดรอกซิล (O-H stretching) ที่เลขคลื่น 2931 cm^{-1} แสดงถึงหมู่ไฮโดรคาร์บอน (C-H stretching) ที่เลขคลื่น 1603 cm^{-1} แสดงถึงหมู่คาร์บอกซิล (COOH) และที่เลขคลื่นเท่ากับ 1327 และ 1060 cm^{-1} แสดงถึงหมู่อีเทอร์ (-O- stretching) นอกจากนี้ยังพบพีกที่เลขคลื่นเท่ากับ 1417 cm^{-1} แสดงถึงหมู่เมทิลีน (-CH₂ scissoring) อีกด้วย โดยโครงสร้างทางเคมีของซีเอ็มซีแสดงในภาพที่ 4.3 เมื่อพิจารณาความแตกต่างของพีกการสั่นของหมู่คาร์บอนิลของเซลลูโลสและซีเอ็มซี พบว่า พีกการสั่นของ หมู่คาร์บอกซิลในซีเอ็มซีมีการเลื่อนตำแหน่งมายังเลขคลื่นที่ต่ำลง (จาก 1735 cm^{-1} ไปที่ 1603 cm^{-1}) และพบการสั่นของหมู่เมทิลีนที่ชัดเจนขึ้น ทำให้สามารถยืนยันได้ว่ามีการแทนที่ของหมู่คาร์บอกซิเมทิลขึ้นบนสายเซลลูโลส (Rachtanapun & Rattanapanone, 2011)

จากผลการวิเคราะห์อินฟราเรดสเปกตรัมของผงซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียน และผงเซลลูโลสจากเปลือกทุเรียน พบว่าผลที่ได้สอดคล้องกับ Rachtanapun et al. (2012) ที่รายงานว่าสเปกตรัมของผงซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนที่สังเคราะห์ขึ้น โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 20 30 40 50 และ 60 โดยมวล ในกระบวนการแอลคาไลด์เซชัน พบว่ามีลักษณะของอินฟราเรดสเปกตรัมของผงซีเอ็มซีเหมือนกัน แม้ความเข้มข้นของสารละลายเบสต่างกัน และมีความแตกต่างจากสเปกตรัมของผงเซลลูโลส โดยพบพีกที่เลขคลื่น 1608 cm^{-1} ซึ่งแสดงถึงหมู่คาร์บอกซิล (COOH) พีกที่เลขคลื่น 1419 cm^{-1} แสดงถึงหมู่เมทิลีน (-CH₂ scissoring) และพีกที่เลขคลื่น 1055 cm^{-1} แสดงถึงหมู่อีเทอร์ (-O- stretching) ซึ่งพีกดังกล่าวแสดงถึงการแทนที่ของหมู่คาร์บอกซิเมทิลบนตำแหน่งของหมู่ไฮดรอกซิลในสายโซ่โมเลกุลของซีเอ็มซีที่สังเคราะห์ได้จากเปลือกทุเรียน นอกจากนี้ผลการทดลองยังสอดคล้องกับสเปกตรัมของผงซีเอ็มซีจากลำต้นของกล้วยหอมทอง ที่สังเคราะห์โดยความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 15 โดยมวล ซึ่งรายงานโดย Adinugraha et al. (2005) พบพีกที่เลขคลื่น 1620.1 cm^{-1} ซึ่งแสดงถึงหมู่คาร์บอกซิล (COOH) ที่เลขคลื่น 1423.4 cm^{-1} แสดงถึงหมู่เมทิลีน (-CH₂ scissoring) ซึ่งพีกดังกล่าวแสดงถึงการแทนที่ของหมู่คาร์บอกซิเมทิลบนตำแหน่งของหมู่ไฮดรอกซิลในสายโซ่โมเลกุลของซีเอ็มซีที่สังเคราะห์ได้จากลำต้นของกล้วยหอมทอง โดยอินฟราเรดสเปกตรัมของเซลลูโลสแสดงในภาพที่ 4.1ก และอินฟราเรดสเปกตรัมของซีเอ็มซีเกรดการค้า แสดงในภาพที่ 4.1ค (Chai & Isa, 2013)





4.3 ลักษณะของฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียน

จากการเตรียมฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียน โดยวิธีหล่อด้วยตัวทำละลาย (Solvent casting) โดยใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย และเทลงในจานเพาะเชื้อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร ปริมาตร 20 มิลลิลิตร และนำไปอบที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียสในตู้อบลมร้อนเป็นเวลา 24 ชั่วโมง พบว่า ฟิล์มที่ได้มีความหนาประมาณ 0.11 มิลลิเมตร และปรับปรุงสมบัติของฟิล์ม โดยเติมสารเติมแต่งเพื่อเพิ่มความยืดหยุ่น คือ กลีเซอรอล และ PEG-10 dimethicone จากนั้นศึกษาปริมาณสารเติมแต่งที่มีผลต่อสมบัติของฟิล์ม โดยศึกษาความเข้มข้นที่ร้อยละ 10 20 และ 30 โดยมวล ลักษณะของฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนแสดงดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ลักษณะของฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนที่ใส่และไม่ใส่สารเติมแต่ง

ชนิดของฟิล์ม	ชื่อฟิล์ม	ฟิล์มที่ได้	ลักษณะของแผ่นฟิล์มซีเอ็มซี
ไม่ใส่สารเติมแต่ง	CMC _d		เนื้อฟิล์มใสปนเหลือง นุ่ม พื้นผิวเนียน ยืดได้ดี
สารเติมแต่งเป็น กลีเซอรอล	CMC _d 10G		เนื้อฟิล์มใส นุ่ม พื้นผิว เนียน ยืดได้ดี
	CMC _d 20G		เนื้อฟิล์มใส นุ่ม พื้นผิว เนียน ยืดได้ดี

ตารางที่ 4.3 (ต่อ)

ชนิดของฟิล์ม	ชื่อฟิล์ม	ฟิล์มที่ได้	ลักษณะของแผ่นฟิล์ม ซีเอ็มซี
	CMC _d 30G		เนื้อฟิล์มใสปนเหลือง นุ่ม พื้นผิวเนียน ยืดได้ดี
	CMC _d 10PEG		เนื้อฟิล์มใสปนเหลือง พื้นผิวเนียน แข็ง คงรูปได้ดี
สารเติมแต่งเป็น	PEG-10		เนื้อฟิล์มใสปนเหลือง พื้นผิวเนียน แข็ง คงรูปได้ดี
dimethicone	CMC _d 20PEG		
	CMC _d 30PEG		เนื้อฟิล์มขุ่นปนเหลือง พื้นผิวเนียน แข็ง แตกหัก ง่าย

จากตารางที่ 4.3 สามารถสรุปได้ว่ากลีเซอรอลช่วยให้ฟิล์ม นุ่ม พื้นผิวเนียน และยืดหยุ่นได้ดีขึ้น เนื่องจากกลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซออร์ที่ลดแรงระหว่างโมเลกุลของสายโซ่ของซีเอ็มซี ซึ่งทำให้สายโซ่ของซีเอ็มซีเกิดการเคลื่อนที่ได้ดีขึ้น ส่วนสารเติมแต่ง PEG-10 dimethicone มีผลให้เนื้อฟิล์มมีลักษณะขุ่นปนเหลือง แข็งแรง คงรูปได้ดี แต่แตกหักง่าย เนื่องจาก PEG-10 dimethicone เป็นสารเติมแต่งที่มีสายโซ่โมเลกุลโครงสร้างขนาดใหญ่ ซึ่งเกิดจากสารประกอบของธาตุซิลิกอน

กับออกซิเจน จึงมีพันธะที่แข็งแรง ส่งผลให้สายโซ่โมเลกุลของซีเอ็มซีในฟิล์มเคลื่อนไหวได้ยากขึ้น ดังนั้น ฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนที่ใส่กลีเซอรอลเป็นสารเติมแต่งจึงเป็นฟิล์มที่มีลักษณะที่ดีที่สุด ในงานวิจัยนี้

4.4 การศึกษาสมบัติของฟิล์มจากเปลือกทุเรียน

4.4.1 ความแข็ง

จากการศึกษาค่าความแข็งด้วยเครื่องวัดความแข็งด้วยดินสอ ตั้งแต่ความแข็ง ระดับ 6B-6H ของแผ่นฟิล์มซีเอ็มซีที่ไม่ใส่และที่ใส่สารเติมแต่งทั้ง 2 ชนิด ได้ผลดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ระดับค่าความแข็งของฟิล์มซีเอ็มซีที่ไม่ใส่และใส่สารเติมแต่ง

ชื่อฟิล์ม	ระดับค่าความแข็ง
CMC _d	H
CMC _d 10G	2H
CMC _d 20G	3H
CMC _d 30G	3H
CMC _d 10PEG	4B
CMC _d 20PEG	5B
CMC _d 30PEG	5B

จากตารางที่ 4.4 พบว่า ค่าความแข็งของฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนที่ไม่ใส่สารเติมแต่ง คือระดับ H และเมื่อใส่กลีเซอรอล พบว่า ระดับค่าความแข็งของฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 2H เมื่อใส่กลีเซอรอลที่ความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยมวล และเมื่อใส่กลีเซอรอลที่ความเข้มข้นร้อยละ 20 และ 30 โดยมวล พบว่า ระดับค่าความแข็งมีค่าเท่ากันคือ 3H ซึ่งเป็นค่าความแข็งที่สูงที่สุดสำหรับฟิล์มที่เติมสารเติมแต่งในงานวิจัยนี้ ดังนั้น จึงสามารถสรุปจากผลการทดลองว่า ระดับค่าความแข็งของฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณของกลีเซอรอลเพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการเติมกลีเซอรอลมากถึงร้อยละ 20-30 โดยมวล ซึ่งเป็นปริมาณที่มากพอที่จะทำให้โมเลกุลของกลีเซอรอลเข้าแทรกอยู่ระหว่างโมเลกุลของซีเอ็มซีได้อย่าง

ลุ่มาเสมอ (พรชัย ราชชนะพันธุ์ และคณะ, 2550) จึงเกิดปริมาตรอิสระมากขึ้น เมื่อมีแรงกดมากระทำโมเลกุลของซีเอ็มซีจึงสามารถเคลื่อนที่เพื่อลดผลของแรงกระทำนั้นได้ เป็นผลให้ฟิล์มซีเอ็มซีมีความทนต่อการขีดข่วนได้มากขึ้น

สำหรับค่าความแข็งของฟิล์มซีเอ็มซีที่ใช้ PEG-10 dimethicone เป็นสารเติมแต่งที่ความเข้มข้นร้อยละ 10 20 และ 30 โดยมวล พบว่า ระดับค่าความแข็งของฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนมีค่าเท่ากับ 4B เมื่อใส่ PEG-10 dimethicone ที่ความเข้มข้น ร้อยละ 10 โดยมวล และเมื่อใส่ PEG-10 dimethicone ที่ความเข้มข้นร้อยละ 20 และ 30 โดยมวล พบว่า ระดับค่าความแข็งของฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนมีค่าเท่ากับ 5B เท่ากัน จึงเห็นได้ว่า ระดับค่าความแข็งของฟิล์มซีเอ็มซีที่ใช้ PEG-10 dimethicone เป็นสารเติมแต่งมีแนวโน้มลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มซีเอ็มซีที่ไม่มีสารเติมแต่งและฟิล์มซีเอ็มซีที่ใช้กลีเซอรอลเป็นสารเติมแต่ง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจาก PEG-10 dimethicone จัดเป็นโคพอลิเมอร์ที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ และเชื่อม โครงสร้างของโมเลกุลด้วยพันธะที่แข็งแรง (Si-O-Si) เมื่อเทียบกับโมเลกุลของกลีเซอรอล จึงอาจทำให้การแทรกตัวเข้าไประหว่างโมเลกุลของซีเอ็มซีทำได้ยากขึ้น จึงไม่มีผลในการเพิ่มปริมาตรอิสระให้กับ โมเลกุลของซีเอ็มซี เหมือนกับการเติมกลีเซอรอล

4.4.2 สมบัติเชิงกล

จากการศึกษาสมบัติเชิงกลของฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนที่ไม่ใส่สารเติมแต่งและฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนที่ใส่สารเติมแต่ง ได้แก่ กลีเซอรอล และ PEG-10 dimethicone ในปริมาณที่แตกต่างกันเป็นร้อยละ 10 20 และ 30 โดยมวล ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 4.4 - 4.7

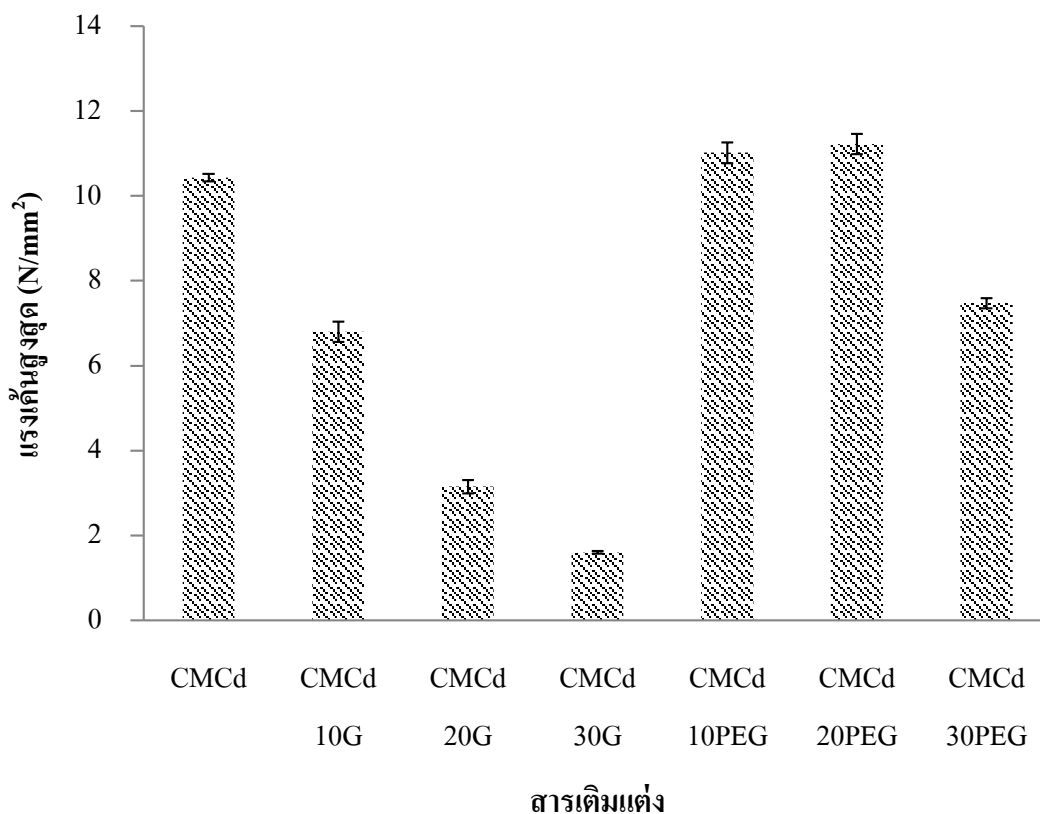
เมื่อพิจารณาผลการทดสอบค่าแรงเค้นสูงสุด (Stress at peak) ของฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนที่ไม่ใส่และที่ใส่สารเติมแต่งทั้ง 2 ชนิด ดังภาพที่ 4.4 พบว่า ค่าแรงเค้นสูงสุดของฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียน มีค่าอยู่ในช่วง 1.60 - 11.23 นิวตันต่อตารางเมตร โดยฟิล์มซีเอ็มซีที่ใส่ PEG-10 dimethicone เป็นสารเติมแต่ง มีค่าแรงเค้นสูงสุดมากกว่าฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนที่ไม่ใส่สารเติมแต่งและฟิล์มซีเอ็มซีที่ใส่กลีเซอรอลเป็นสารเติมแต่ง ซึ่งอาจเนื่องมาจาก PEG-10 dimethicone เป็นสารประกอบที่มีพันธะ Si-O-Si ซึ่งเป็นพันธะที่แข็งแรง ประกอบกับเป็นโมเลกุลที่มีโครงสร้างขนาดใหญ่ จึงส่งผลให้ค่าแรงเค้นสูงสุดเพิ่มขึ้น และเมื่อพิจารณาผลของปริมาณของ PEG-10 dimethicone ที่มีต่อฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียน พบว่า ฟิล์มซีเอ็มซีจาก

เปลือกทุเรียนที่ใส่ PEG-10 dimethicone ร้อยละ 30 โดยมวล มีค่าแรงเค้นสูงสุดลดลง เมื่อเทียบกับฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนที่ไม่ใส่สารเติมแต่ง

จากการวิเคราะห์ผลของชนิดและปริมาณสารเติมแต่งของฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนต่อค่าแรงเค้นสูงสุด ได้ผลสอดคล้องกับผลการทดลองของกันตวัฒน์ หมาดสุเรน (2555) ที่รายงานว่า ค่าความต้านทานต่อการเสีรูปและค่าความต้านทานต่อแรงดึงของฟิล์มไคโตซานและฟิล์มไคโตซานที่ใช้พลาสติกไซเซอร์ชนิดต่าง ๆ มีแนวโน้มลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มไคโตซานที่ไม่มีการใช้พลาสติกไซเซอร์ เนื่องจากการเข้าแทรกตัวของโมเลกุลของพลาสติกไซเซอร์ระหว่างสายโซ่โมเลกุลของไคโตซาน ส่งผลให้เกิดการขัดขวางของพันธะไฮโดรเจนที่ยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของไคโตซาน ทำให้สายโซ่โมเลกุลของไคโตซานสามารถเคลื่อนไหวได้มากขึ้น จึงส่งผลให้ฟิล์มไคโตซานที่ใช้พลาสติกไซเซอร์มีแนวโน้มที่จะเสีรูปได้ง่ายขึ้น เมื่อได้รับแรงดึง

เมื่อพิจารณาผลการทดสอบค่าแรงเค้น ณ จุดขาด (Stress at break) ของฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนที่ไม่ใส่และที่ใส่สารเติมแต่งทั้ง 2 ชนิด ดังภาพที่ 4.5 พบว่า ค่าแรงเค้น ณ จุดขาดของฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียน มีค่าอยู่ในช่วง 0.33 – 4.97 นิวตันต่อตารางเมตร โดยฟิล์มซีเอ็มซีที่ใส่ PEG-10 dimethicone เป็นสารเติมแต่ง ความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยมวล มีค่าแรงเค้น ณ จุดขาดมากกว่าฟิล์มซีเอ็มซีที่ใส่กลีเซอรอลเป็นสารเติมแต่ง เมื่อพิจารณาผลของปริมาณของ PEG-10 dimethicone ที่มีต่อฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียน พบว่า ฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนที่ใส่ PEG-10 dimethicone ร้อยละ 30 โดยมวล มีค่าแรงเค้น ณ จุดขาดลดลงอย่างมาก เมื่อเทียบกับฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนที่ไม่ใส่สารเติมแต่งและฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนที่ใส่ PEG-10 dimethicone เป็นสารเติมแต่ง

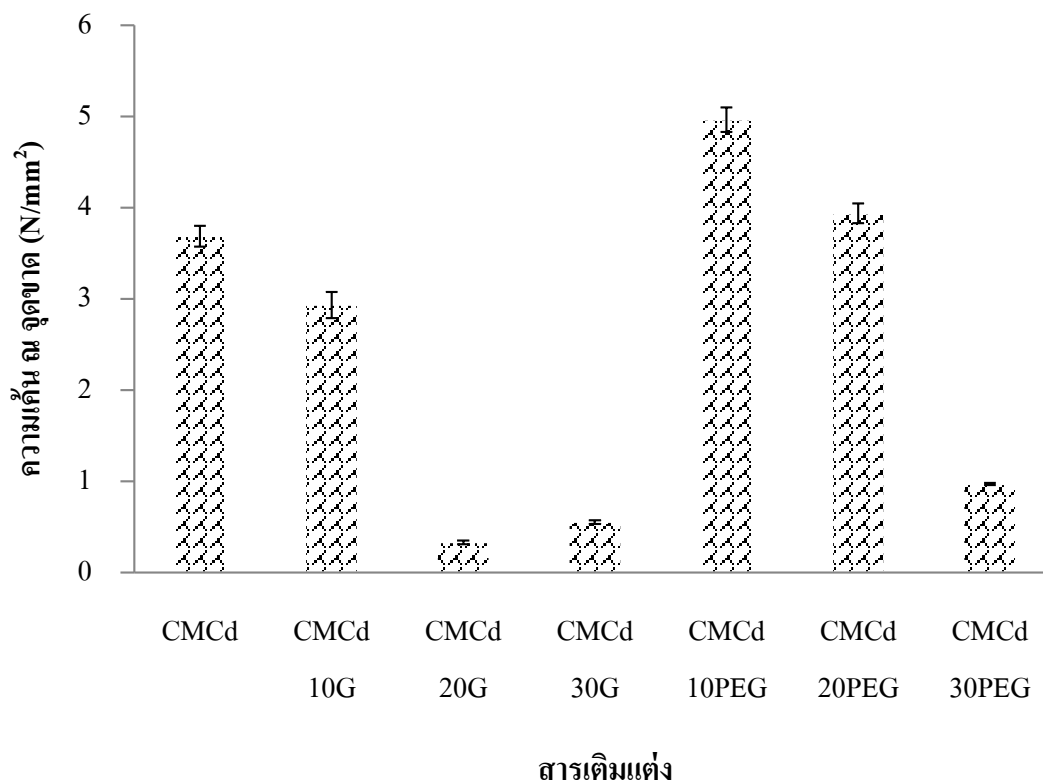
ทั้งนี้อาจเนื่องมาจาก PEG-10 dimethicone เป็นสารประกอบของธาตุซิลิกอนกับออกซิเจน (Si-O-Si) จึงมีพันธะที่แข็งแรง และ PEG-10 dimethicone เป็นสายโซ่โมเลกุลที่มีโครงสร้างขนาดใหญ่ จึงส่งผลให้ฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนที่ใส่ PEG-10 dimethicone มีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้น ซึ่งจะเห็นได้จากค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาด พบว่า การดึงยืดของฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนมีแนวโน้มลดลง เมื่อเพิ่มปริมาณของ PEG-10 dimethicone ซึ่งการแทรกตัวของโมเลกุล PEG-10 dimethicone ระหว่างสายโซ่ของซีเอ็มซีที่เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้สายโซ่โมเลกุลของซีเอ็มซีสามารถเคลื่อนที่ได้น้อยลงเมื่อได้รับแรงดึง



ภาพที่ 4.4 ผลของชนิดและปริมาณสารเติมแต่งของฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนต่อค่าแรงเค้นสูงสุด

ส่วนฟิล์มซีเอ็มซีที่ใส่กลีเซอรอลเป็นสารเติมแต่ง พบว่าค่าแรงเค้น ณ จุดขาด มีแนวโน้มลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มซีเอ็มซีที่ไม่ใส่สารเติมแต่ง นอกจากนี้ปริมาณของกลีเซอรอลที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนมีค่าแรงเค้น ณ จุดขาดลดลง

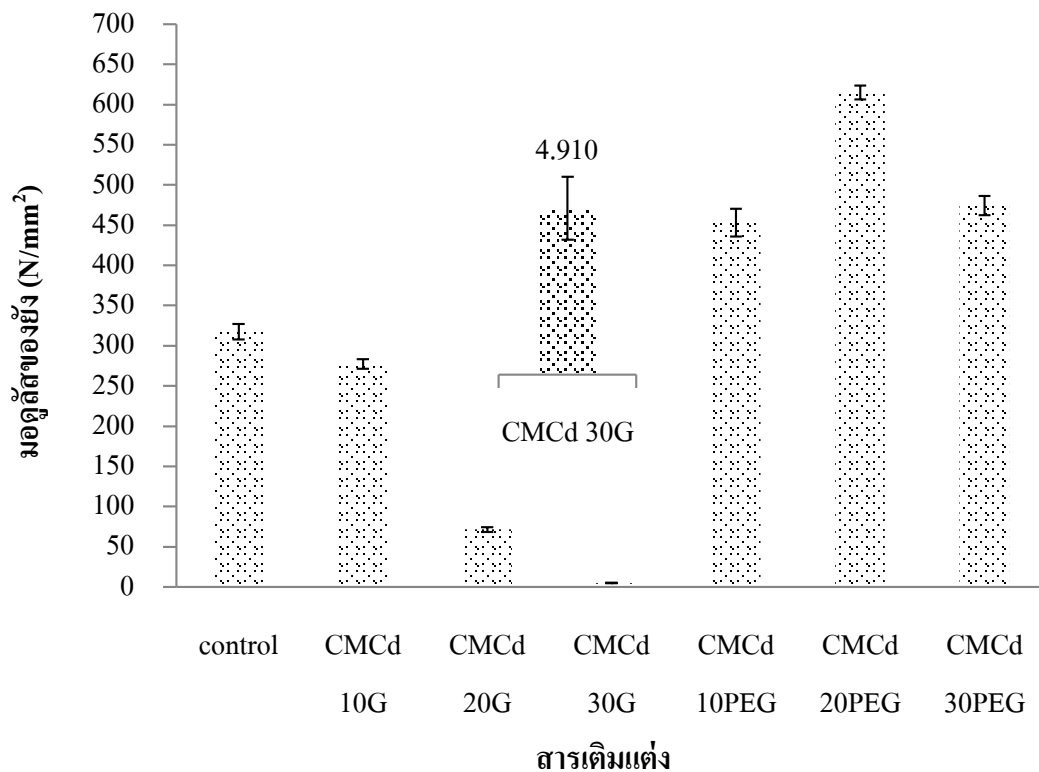
ซึ่งผลการทดลองนี้ สอดคล้องกับผลการทดลองของ Tongsin (2009) ที่รายงานว่า เมื่อเพิ่มปริมาณของกลีเซอรอลมากขึ้นพันธะที่เชื่อมต่อระหว่างสายโซ่โพลิเมอร์จะแยกออกจากกัน ซึ่งจะส่งผลให้ค่าความแข็งแรงต่อแรงฉีกขาดมีแนวโน้มที่ลดลง



ภาพที่ 4.5 ผลของชนิดและปริมาณสารเติมแต่งของฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนต่อค่าแรงเค้น ณ จุดขาด

เมื่อพิจารณาผลการทดสอบค่ามอดูลัสของยัง (Young's modulus) ของฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนที่ไม่ใส่และที่ใส่สารเติมแต่งทั้ง 2 ชนิด ดังภาพที่ 4.6 พบว่า ค่ามอดูลัสของยังของฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียน มีค่าอยู่ในช่วง 4.91 – 615.07 นิวตันต่อตารางเมตร โดยฟิล์มซีเอ็มซีที่ใส่ PEG-10 dimethicone เป็นสารเติมแต่ง มีค่ามอดูลัสของยังมากกว่าฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนที่ไม่ใส่สารเติมแต่งและฟิล์มซีเอ็มซีที่ใส่กลีเซอรอลเป็นสารเติมแต่ง

ฟิล์มซีเอ็มซีที่ใส่กลีเซอรอลเป็นสารเติมแต่ง พบว่าค่ามอดูลัสของยังมีแนวโน้มลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มซีเอ็มซีที่ไม่ใส่สารเติมแต่ง และเมื่อเพิ่มปริมาณของกลีเซอรอลมากขึ้น พบว่า ฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนมีค่ามอดูลัสของยังลดลงอย่างมาก โดยเฉพาะฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนที่ใส่กลีเซอรอลเป็นสารเติมแต่งความเข้มข้นร้อยละ 30 โดยมวล เนื่องจากกลีเซอรอลเป็นพลาสติกไฮเซอรัลที่ทำให้ฟิล์มมีความนุ่มขึ้น (Su et al., 2010) โดยกลีเซอรอลเข้าไปแทรกกระหว่างสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์ ทำให้เกิดระยะห่างระหว่างโมเลกุลมากขึ้น และเพิ่มความยืดหยุ่นของแผ่นฟิล์ม

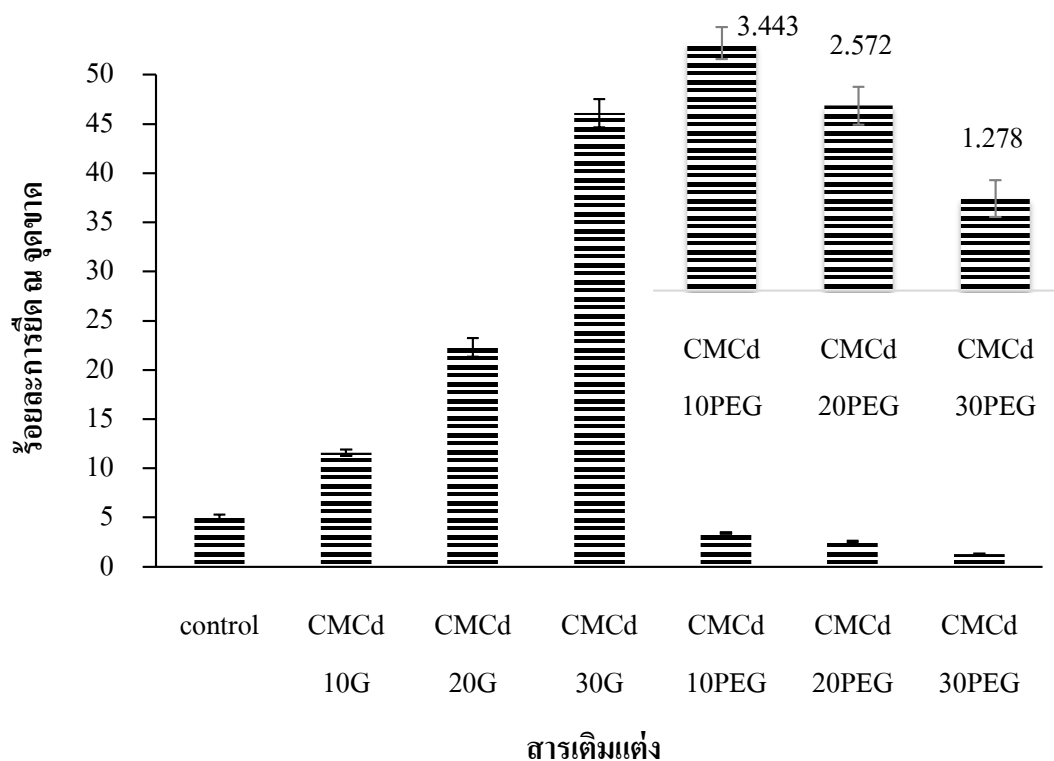


ภาพที่ 4.6 ผลของชนิดและปริมาณสารเติมแต่งของฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนต่อค่ามอดูลัสของยั้ง

ผลการทดสอบค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาด (Elongation at break) ของฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนที่ไม่ใส่และที่ใส่สารเติมแต่งทั้ง 2 ชนิด แสดงดังภาพที่ 4.7 พบว่า ค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาดของฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียน มีค่าอยู่ในช่วง 1.28 - 46.10 นิวตันต่อตารางเมตร โดยฟิล์มซีเอ็มซีที่ใส่ PEG-10 dimethicone เป็นสารเติมแต่ง มีค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาดน้อยกว่าฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนที่ไม่ใส่สารเติมแต่งและฟิล์มซีเอ็มซีที่ใส่กลีเซอรอลเป็นสารเติมแต่งอย่างมาก ซึ่งอาจเนื่องมาจาก PEG-10 dimethicone เป็นสารประกอบของธาตุซิลิกอนกับออกซิเจน จึงมีพันธะที่แข็งแรง และ PEG-10 dimethicone เป็นสายโซ่โมเลกุลที่มีโครงสร้างขนาดใหญ่ จึงส่งผลให้สายโซ่โมเลกุลของซีเอ็มซีในฟิล์มเคลื่อนไหวได้ยากขึ้นเมื่อได้รับแรงดึง (กันตัวฉนวน มาตรฐาน, 2555) และเมื่อพิจารณาผลของปริมาณของ PEG-10 dimethicone ที่มีต่อฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียน พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณ PEG-10 dimethicone ในฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียน ค่าร้อยละการ

ยึด ณ จุดขาดมีแนวโน้มลดลงอย่างมาก เมื่อเทียบกับฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนที่ไม่ใส่สารเติมแต่งและฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนที่ใส่กลีเซอรอลเป็นสารเติมแต่ง สอดคล้องกับผลของค่าแรงเค้นสูงสุดและค่ามอดูลัสของยังซึ่งเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของ PEG-10 dimethicone เพิ่มขึ้น (ภาพที่ 4.4 และ ภาพที่ 4.6)

ส่วนฟิล์มซีเอ็มซีที่ใส่กลีเซอรอลเป็นสารเติมแต่ง พบว่า ค่าร้อยละการยึด ณ จุดขาดมีแนวโน้มสูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มซีเอ็มซีที่ไม่ใส่สารเติมแต่ง และเมื่อเพิ่มปริมาณของกลีเซอรอลมากขึ้น เนื่องจากการแทรกตัวของโมเลกุลกลีเซอรอลที่เพิ่มมากขึ้น เข้าไปขัดขวางการเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของซีเอ็มซี และถึงแม้ว่าโมเลกุลของกลีเซอรอลสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับสายโซ่โมเลกุลของซีเอ็มซีได้ (กันตวัฒน์ หมาดสุเรน, 2555 และ Shekarabi et al., 2014)) แต่ก็มีจำนวนน้อยกว่าพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของซีเอ็มซีเดิม



ภาพที่ 4.7 ผลของชนิดและปริมาณสารเติมแต่งของฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนต่อค่าร้อยละการยึด ณ จุดขาด

อย่างไรก็ตามจากการพิจารณาผลการทดสอบยังพบว่า เมื่อพิจารณาค่าแรงเค้นสูงสุด แรงเค้น ณ จุดขาด และโมดูลัสของยังของฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนที่ใช้ PEG-10 dimethicone เป็นสารเติมแต่ง ซึ่งมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณสารเติมแต่งที่ความเข้มข้นร้อยละ 10 และ 20 โดยมวล แต่หากใช้ PEG -10 dimethicone ความเข้มข้นร้อยละ 30 โดยมวล กลับพบว่าค่าแรงเค้นสูงสุด แรงเค้น ณ จุดขาด และโมดูลัสของยังของฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนกลับลดลงอย่างเห็นได้ชัด ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากปริมาณของ PEG-10 dimethicone ที่ความเข้มข้นร้อยละ 30 โดยมวล เป็นปริมาณที่มากเกินไปส่งผลให้เกิดการกระจายตัวอย่างไม่สม่ำเสมอในสารละลายซีเอ็มซี จึงขาดความต่อเนื่อง และเกิดรอยแยกระหว่างวัฏภาค จึงทำให้การรับแรงและการส่งผ่านแรงทำได้ยากขึ้น (วัลลดา หวานเสนาะ, 2553)

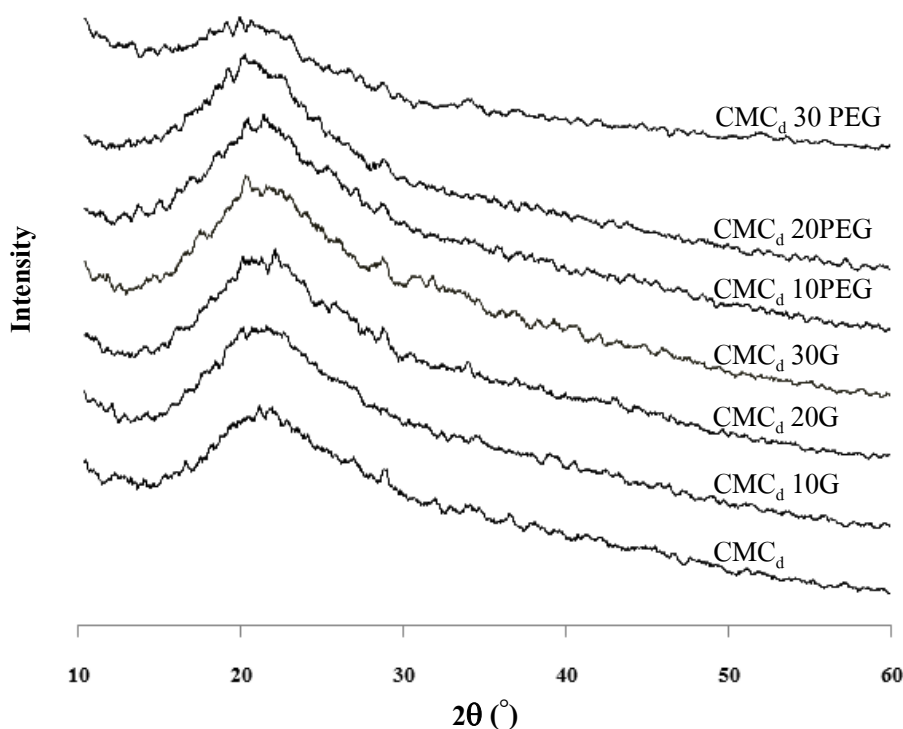
เมื่อพิจารณาผลการทดสอบสมบัติเชิงกลทั้งหมด พบว่าสารเติมแต่ง ทั้ง 2 ชนิด คือ กลีเซอรอล และ PEG-10 dimethicone ที่ใช้ปรับปรุงสมบัติของฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนในงานวิจัยนี้ทำให้ฟิล์มที่ได้มีจุดเด่นจุดด้อยแตกต่างกันออกไป โดยฟิล์มซีเอ็มซีที่ใช้กลีเซอรอลเป็นสารเติมแต่งนั้น พบว่า ฟิล์มจะมีความยืดหยุ่นสูง มีค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาดสูงที่สุด แต่ฟิล์มชนิดนี้มีค่าแรงเค้นสูงสุด แรงเค้น ณ จุดขาด และโมดูลัสของยังน้อย เมื่อเทียบกับฟิล์มซีเอ็มซีที่ไม่ใส่สารเติมแต่งและที่ใช้ PEG-10 dimethicone เป็นสารเติมแต่ง ในขณะที่ฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนที่ใช้ PEG-10 dimethicone เป็นสารเติมแต่ง มีค่าแรงเค้นสูงสุด แรงเค้น ณ จุดขาด และโมดูลัสของยังสูง แต่ก็มีค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาดน้อย เมื่อเทียบกับฟิล์มซีเอ็มซีที่ไม่ใส่สารเติมแต่งและที่ใช้กลีเซอรอลเป็นสารเติมแต่ง

เมื่อพิจารณาผลของปริมาณสารเติมแต่งที่ใช้ในฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนต่อสมบัติเชิงกลของฟิล์ม พบว่า ฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนที่ใช้กลีเซอรอลเป็นสารเติมแต่งในปริมาณที่เพิ่มขึ้น ถึงแม้จะส่งผลให้ฟิล์มสามารถดึงยึดได้มากขึ้นก็ตาม แต่ก็ทำให้ฟิล์มที่เตรียมได้มีค่าแรงเค้นสูงสุด แรงเค้น ณ จุดขาด และโมดูลัสของยังน้อยลงอย่างเห็นได้ชัด แต่สำหรับกรณีของการใช้ PEG-10 dimethicone เป็นสารเติมแต่งในปริมาณที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ฟิล์มสามารถดึงยึดได้น้อยลงอย่างมาก แต่ก็ทำให้ฟิล์มที่เตรียมได้มีค่าแรงเค้นสูงสุด แรงเค้น ณ จุดขาด และโมดูลัสของยังเพิ่มมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ยกเว้น ฟิล์มซีเอ็มซีที่ใช้ PEG-10 dimethicone ความเข้มข้นร้อยละ 30 โดยมวล เป็นสารเติมแต่ง ซึ่งมีค่าดังกล่าวลดลงอย่างมาก เนื่องจากอาจเกิดการแยกเฟสระหว่างซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียน และ PEG-10 dimethicone ดังได้กล่าวมาแล้ว

4.5 โครงสร้างผลึกของฟิล์มซีเอ็มซี

จากการศึกษาโครงสร้างของผลึกของฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนที่ไม่ใส่สารเติมแต่ง และฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนที่ใส่สารเติมแต่ง 2 ชนิด ได้แก่ กลีเซอรอล และ PEG-10 dimethicone ในปริมาณที่แตกต่างกันเป็นร้อยละ 10 20 และ 30 โดยมวล โดยใช้หลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ขนาดของมุมตกกระทบที่ใช้ (2θ) ในช่วง 10-60 องศา ด้วยอัตราเร็ว 0.5 องศาต่อนาที ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 4.8

จากผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนที่ใส่และไม่ใส่สารเติมแต่ง พบว่าไม่ปรากฏพีกเอกกลักษณะที่เด่นชัด พีกที่เกิดขึ้นจะอยู่ในช่วง 2θ เท่ากับ 19-24 องศา จึงกล่าวได้ว่าฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนเป็นฟิล์มที่มีความเป็นผลึกต่ำ และผลการทดลองนี้ สอดคล้องกับผลการทดลองของ Adinugraha et al. (2005) ที่รายงานว่า ความเป็นผลึกของคาร์บอนกัมมะถืดลดลง เมื่อเทียบกับผลึกของเซลลูโลส เนื่องจากการทำปฏิกิริยาแอลคาไลด์เซชันระหว่างเซลลูโลสกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ และโมเลกุลของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เข้าทำปฏิกิริยาได้ไปเพิ่มระยะห่างระหว่างโครงสร้างของสายโซ่เซลลูโลส ทำให้เกิดการแตกหักของพันธะไฮโดรเจนระหว่างสายโซ่เซลลูโลสเดิม



ภาพที่ 4.8 ผลของชนิดและปริมาณสารเติมแต่งต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะโครงสร้างผลึกของฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียน

และเมื่อพิจารณาความเป็นผลึกของฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนที่ใส่สารเติมแต่ง พบว่า พิกที่ เกิดขึ้นจะอยู่ในช่วง 2 θ เท่ากับ 19-24 องศา เช่นเดียวกับฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนที่ไม่ใส่สารเติมแต่ง แต่ความเข้มของพิกมีแนวโน้มลดลง เมื่อใส่สารเติมแต่ง PEG-10 dimethicone ในปริมาณที่มากขึ้นไป ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่าการใส่สารเติมแต่งทั้งกลีเซอรอล และ PEG-10 dimethicone ในปริมาณร้อยละ 10 20 และ 30 โดยมวล ไม่ส่งผลต่อความเป็นผลึกของฟิล์มซีเอ็มซี ยกเว้นฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนที่ใส่ PEG-10 dimethicone ความเข้มข้นร้อยละ 30 โดยมวล เป็นสารเติมแต่ง ซึ่งพบว่าความเป็นผลึกของฟิล์มลดลงอย่างเห็นได้ชัด ทั้งนี้อาจเนื่องมาจาก โครงสร้างของสายโซ่โมเลกุล PEG-10 dimethicone เป็นโครงสร้างขนาดใหญ่ และเชื่อมต่อกันด้วยพันธะที่แข็งแรงระหว่าง Si-O-Si ของสารเติมแต่ง PEG-10 dimethicone ในปริมาณที่มาก (ความเข้มข้นร้อยละ 30 โดยมวล) จึงทำให้เกิดระยะห่างระหว่างสายโซ่ของโมเลกุลซีเอ็มซีอย่างมาก ทำให้โอกาสในการเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างสายโซ่ของโมเลกุลซีเอ็มซีลดลง ระดับการเกิดผลึกของฟิล์มจึงต่ำลงอย่างมาก

4.6 อัตราการซึมผ่านของไอน้ำ

จากการศึกษาอัตราการซึมผ่านของไอน้ำของแผ่นฟิล์มจากเปลือกทุเรียนที่ไม่ใส่และที่ใส่สารเติมแต่งทั้ง 2 ชนิด ได้แก่ กลีเซอรอล และ PEG-10 dimethicone ในปริมาณที่แตกต่างกันร้อยละ 10 20 และ 30 โดยมวล ที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ที่ร้อยละ 75 เป็นเวลา 7 วัน แสดงดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 อัตราการซึมผ่านของไอน้ำของฟิล์มซีเอ็มซี

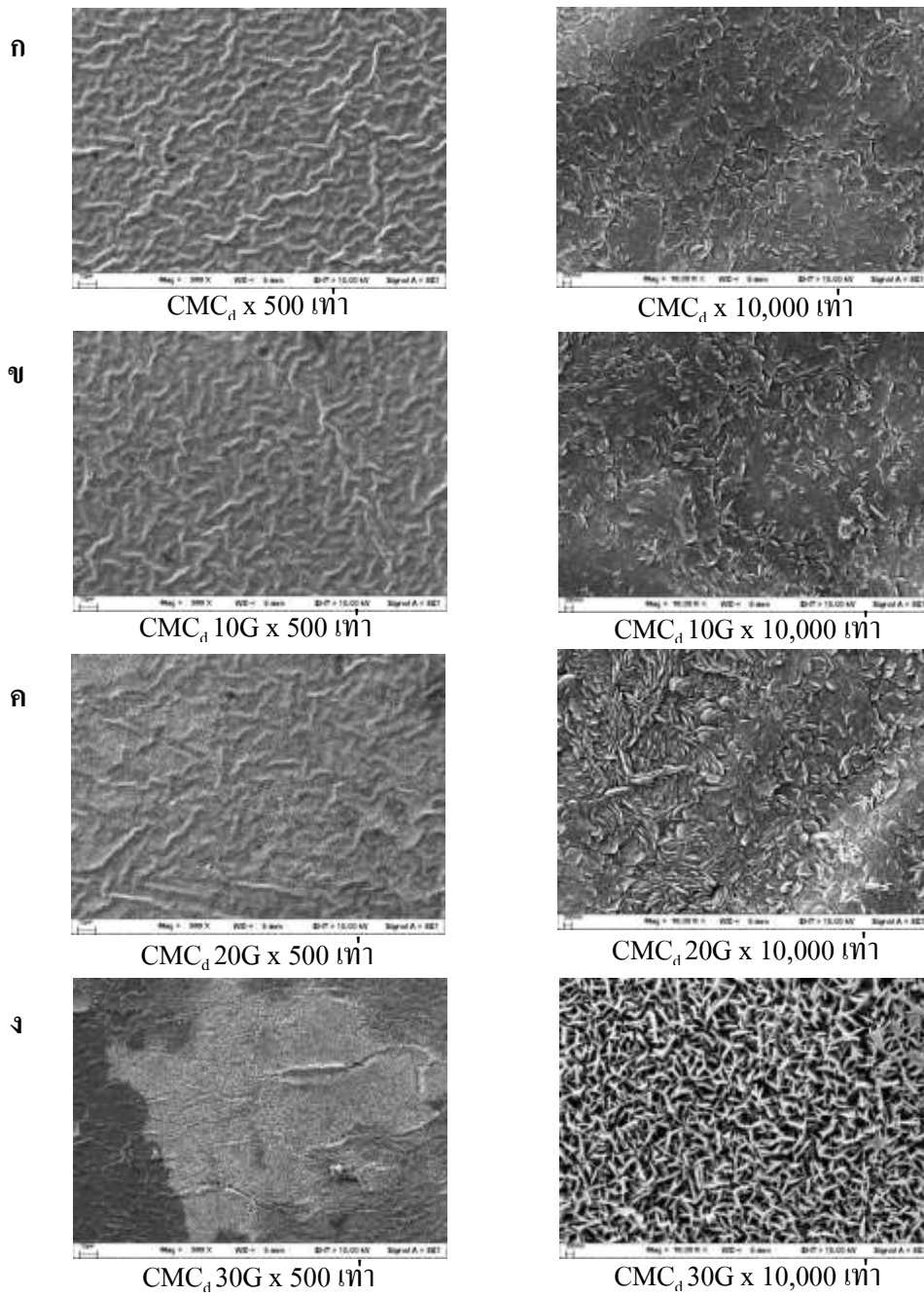
ชื่อฟิล์ม	อัตราการซึมผ่านของไอน้ำ (กรัมต่อวันต่อตารางเมตร)
CMC _d	323 ± 2.77
CMC _d 10G	328 ± 3.84
CMC _d 20G	321 ± 2.50
CMC _d 30G	320 ± 4.90
CMC _d 10PEG	303 ± 1.01
CMC _d 20PEG	318 ± 1.30
CMC _d 30PEG	323 ± 1.23

จากการศึกษาค่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำของฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนที่ใส่และไม่ใส่สารเติมแต่ง พบว่า อัตราการซึมผ่านของไอน้ำของฟิล์มซีเอ็มซีที่ไม่ใส่สารเติมแต่ง มีค่าเท่ากับ 323 ± 2.77 กรัมต่อวันต่อตารางเมตร และเมื่อเติมกลีเซอรอลความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยมวล พบว่าฟิล์มมีค่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำสูงขึ้นร้อยละ 1.5 (328 ± 3.84 กรัมต่อวันต่อตารางเมตร) ซึ่งเป็นค่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำสูงที่สุดในงานวิจัยนี้ แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของกลีเซอรอลเป็นร้อยละ 20 และ 30 โดยมวล พบว่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำลดลงเป็น 321 ± 2.50 และ 320 ± 4.90 กรัมต่อวันต่อตารางเมตร ตามลำดับ ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากการเติมกลีเซอรอลทำให้มีช่องว่างระหว่างโมเลกุลของซีเอ็มซีทำให้โมเลกุลของน้ำสามารถผ่านได้มากขึ้น แต่การเติมในปริมาณร้อยละ 20 โดยมวลหรือมากกว่า อาจทำให้โมเลกุลของกลีเซอรอลซึ่งเป็นโมเลกุลที่มีขั้วสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลของน้ำได้เป็นจำนวนมาก จึงยึดโมเลกุลของน้ำไว้และไม่ยอมให้โมเลกุลของน้ำแทรกผ่านไป (Shekarab et al., 2014)

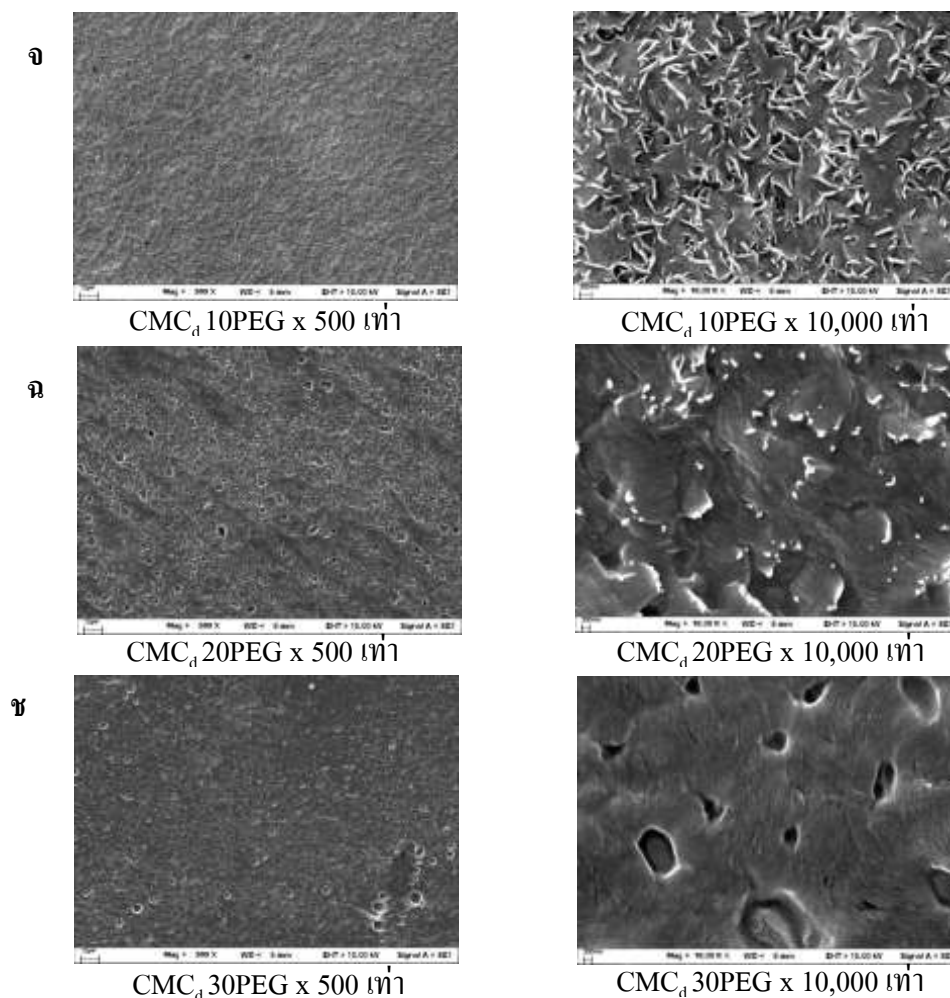
สำหรับฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนที่ใส่ PEG-10 dimethicone เป็นสารเติมแต่ง พบว่าเมื่อใส่ PEG-10 dimethicone ที่ความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยมวล ค่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำของฟิล์มลดลงถึงร้อยละ 6.2 (303 ± 1.01 กรัมต่อวันต่อตารางเมตร) เมื่อเทียบกับฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนที่ไม่ใส่สารเติมแต่ง และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ PEG-10 dimethicone เป็นร้อยละ 20 และ 30 โดยมวล พบว่า ค่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำของฟิล์มซีเอ็มซีมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น จนมีค่าใกล้เคียงกับฟิล์มซีเอ็มซีที่ไม่ใส่สารเติมแต่ง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจาก PEG-10 dimethicone มีสมบัติชอบน้ำจึงดูดซับโมเลกุลของน้ำไว้ได้ ทำให้อัตราการซึมผ่านของไอน้ำลดลง ส่วนการเติม PEG-10 dimethicone ในปริมาณที่มากขึ้น (ความเข้มข้นร้อยละ 20-30 โดยมวล) อาจทำให้เกิดการแยกเฟสระหว่าง PEG-10 dimethicone กับซีเอ็มซีมากขึ้น จนอาจส่งผลทำให้มีช่องว่างที่ไอน้ำสามารถซึมผ่านได้

4.7 ลักษณะวิทยาของฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียน

จากการศึกษาลักษณะวิทยาของฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนที่ไม่ใส่สารเติมแต่งและฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนที่ใส่สารเติมแต่ง 2 ชนิด ได้แก่ กลีเซอรอล และ PEG-10 dimethicone ในปริมาณที่แตกต่างกันเป็นร้อยละ 10 20 และ 30 โดยมวล ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 500 และ 10,000 เท่า ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 4.9



ภาพที่ 4.9 ภาพถ่าย SEM บนพื้นผิวของฟิล์มซีเอ็มซีที่กำลังขยาย 500 และ 10,000 เท่า



ภาพที่ 4.9 (ต่อ)

จากการศึกษาพื้นฐานวิทยาของฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนที่ใส่และไม่ใส่สารเติมแต่ง พบว่า ภาพถ่ายลักษณะพื้นผิวของฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนที่ไม่ใส่สารเติมแต่ง (ภาพที่ 4.9 ก) จะมีลักษณะพื้นผิวที่ยึดเกาะกันของแผ่นฟิล์มได้ดี เมื่อใส่กลีเซอรอลร้อยละ 10 โดยมวล พบว่า ลักษณะพื้นผิวของแผ่นฟิล์มซีเอ็มซีมีช่องว่างระหว่างแผ่นฟิล์มและกลีเซอรอลมากขึ้น เมื่อใส่กลีเซอรอลร้อยละ 20 และ 30 โดยมวล ทำให้ช่องว่างระหว่างแผ่นฟิล์มซีเอ็มซีและกลีเซอรอลมีมากขึ้น ตามลำดับ (ภาพที่ 4.9 ข-ง) เนื่องจากการแทรกตัวของโมเลกุลกลีเซอรอลที่เพิ่มมากขึ้น เข้าไปขัดขวางการเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของซีเอ็มซี และถึงแม้ว่าโมเลกุลของกลีเซอรอลสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับสายโซ่โมเลกุลของซีเอ็มซีได้ (กันตวัฒน์ หมาดสุเรน, 2555) แต่ก็มีจำนวนน้อยกว่าพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของซีเอ็มซีเดิม

สำหรับพื้นผิวของฟิล์มซีเอ็มซีที่ใส่ PEG-10 dimethicone พบช่องว่างขนาดใหญ่บนพื้นผิวฟิล์ม (ภาพที่ 4.9 จ-ข) ช่องว่างระหว่างฟิล์มซีเอ็มซี และ PEG-10 dimethicone มากขึ้นตามปริมาณของ PEG-10 dimethicone ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากโครงสร้างของสายโซ่โมเลกุล PEG-10 dimethicone เป็นโครงสร้างขนาดใหญ่ และเมื่อใส่ PEG-10 dimethicone ร้อยละ 30 โดยมวล (ภาพที่ 4.9 ข) พบว่า เกิดช่องว่างขนาดใหญ่ระหว่างแผ่นฟิล์มซีเอ็มซี และ PEG-10 dimethicone ซึ่งแสดงถึงการแยกเฟสภายในแผ่นฟิล์ม

บทที่ 5

สรุปและอภิปรายผล

5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ปรับปรุงและศึกษาสมบัติของฟิล์มชีวภาพจากเปลือกทุเรียน โดยใช้สารเติมแต่ง 2 ชนิดคือ กลีเซอรอล และ PEG-10 dimethicone ที่ความเข้มข้นร้อยละ 10 20 30 โดยมวล วิเคราะห์สมบัติต่าง ๆ ได้แก่ สมบัติทางกายภาพ และสมบัติเชิงกล การวิเคราะห์โครงสร้าง และการยึดยึดโครงสร้างด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี ของแผ่นฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียน สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1. สัมประสิทธิ์ซีเอ็มซีได้จากผงเซลล์จากเปลือกทุเรียน โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 30 โดยมวล มีค่าร้อยละของผลิตภัณฑ์เท่ากับ 151.11 ± 15.03 กรัม และ ยึดยึดโครงสร้างของซีเอ็มซีได้ด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี

2. ระดับค่าความแข็งของแผ่นฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนมีค่าสูงที่สุดคือระดับ 3H เมื่อเติมกลีเซอรอลที่ความเข้มข้นร้อยละ 20 และ 30 โดยมวล สำหรับฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนที่ใส่ PEG-10 dimethicone เป็นสารเติมแต่ง ที่ความเข้มข้นร้อยละ 20 และ 30 โดยมวล ระดับค่าความแข็งต่ำที่สุดคือระดับ 5B ซึ่งค่าความแข็งลดลงจากฟิล์มซีเอ็มซีที่ไม่ใส่สารเติมแต่ง

3. ค่าร้อยละการยึดตัว ณ จุดขาดของแผ่นฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนมีค่าสูงสุดเท่ากับร้อยละ 46 แต่ค่าแรงเค้นสูงสุดและค่ามอดูลัสของยังต่ำที่สุด เมื่อเติมกลีเซอรอลที่ความเข้มข้นร้อยละ 30 โดยมวล ในขณะที่ค่าแรงเค้น ณ จุดขาดของแผ่นฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนที่ใส่กลีเซอรอลความเข้มข้นร้อยละ 20 โดยมวล มีค่าต่ำที่สุด สำหรับฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนที่ใส่ PEG-10 dimethicone เป็นสารเติมแต่ง ค่าร้อยละการยึดตัว ณ จุดขาดของแผ่นฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนมีค่าต่ำสุดที่ความเข้มข้นร้อยละ 30 โดยมวล ค่าแรงเค้นสูงสุด และค่ามอดูลัสของยังสูงที่สุด ที่ความเข้มข้นร้อยละ 20 โดยมวล และเมื่อใส่ PEG-10 dimethicone ความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยมวล ค่าแรงเค้น ณ จุดขาดของฟิล์ม มีค่าสูงที่สุด

4. อัตราการซึมผ่านของไอน้ำของแผ่นฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนมีค่าสูงที่สุด เท่ากับ 328 ± 3.84 กรัมต่อวันต่อตารางเมตร เมื่อเติมกลีเซอรอลที่ปริมาณความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยมวล และฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนที่ใส่ PEG-10 dimethicone เป็นสารเติมแต่ง ค่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำต่ำที่สุด เท่ากับ 303 ± 1.01 กรัมต่อวันต่อตารางเมตร ที่ปริมาณความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยมวล

5. फिल्मซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนมีความเป็นผลึกต่ำ เมื่อเติมสารเติมแต่ง จึงไม่พบว่าการเติมสารเติมแต่งส่งผลให้ฟิล์มมีความมีผลึกน้อยลงอย่างมีนัยสำคัญ ยกเว้นฟิล์มที่เติมสารเติมแต่ง PEG-10 dimethicone ความเข้มข้นร้อยละ 30 โดยมวล มีความเป็นผลึกต่ำที่สุด

5.2 อภิปรายผลการทดลอง

5.2.1 การสังเคราะห์คาร์บอกซิเมทิลเซลลูโลส (ซีเอ็มซี)

การสังเคราะห์ซีเอ็มซีจากเซลลูโลสที่สกัดจากเปลือกทุเรียน ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 30 โดยมวล ค่าร้อยละของผลิตภัณฑ์เฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 151.11 ± 15.03 กรัม ซึ่งมีค่ามากกว่าร้อยละ 100 เนื่องจากการเกิดกระบวนการอีเทอร์ิฟิเคชัน ทำให้กรดโมโนคลอโรอะซิติก เข้าแทนที่ตำแหน่งของโซเดียมไอออนจึงทำให้สายเซลลูโลสมีมวลโมเลกุลเพิ่มขึ้นหลังการสังเคราะห์ (Rachtanapun et al., 2012)

5.2.2 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน

การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของผงซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี ได้อินฟราเรดสเปกตรัมคล้ายกับอินฟราเรดสเปกตรัมของผงเซลลูโลสจากเปลือกทุเรียน เมื่อพิจารณาความแตกต่างของพีการสันของหมู่คาร์บอนิลของเซลลูโลสและซีเอ็มซีพบว่า พีการสันของ หมู่คาร์บอกซิลในซีเอ็มซีมีการเลื่อนตำแหน่งมายังเลขคลื่นที่ต่ำลง (จาก 1735 cm^{-1} ในเซลลูโลสไปที่ 1603 cm^{-1} ในซีเอ็มซี) และพบการสันของหมู่เมทิลีนที่ชัดเจนขึ้น ทำให้สามารถยืนยันได้ว่าการแทนที่ของหมู่คาร์บอกซิเมทิลขึ้นบนสายเซลลูโลส (Rachtanapun & Rattanapanone, 2011) ดังนั้น จึงสามารถสรุปได้ว่าสามารถสังเคราะห์ซีเอ็มซีได้จากผงเซลลูโลสจากเปลือกทุเรียน โดยกระบวนการอีเทอร์ิฟิเคชันในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 30 โดยมวล

5.2.3 ลักษณะของฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียน

ฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียน เตรียมโดยวิธีหล่อจากสารละลาย โดยใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย มีความหนาประมาณ 0.11 มิลลิเมตร สามารถปรับปรุงสมบัติของฟิล์ม โดยเติมสารเติมแต่งเพื่อเพิ่มความยืดหยุ่น คือ กลีเซอรอล และ PEG-10 dimethicone พบว่า ฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนที่ไม่ใส่สารเติมแต่งเนื้อฟิล์มจะมีลักษณะใสปนเหลือง นุ่ม พื้นผิวเนียน ยืดได้ดี เมื่อใส่กลีเซอรอลความเข้มข้นร้อยละ 10 20 และ 30 โดยมวล พบว่า เนื้อฟิล์มจะมีลักษณะใสปนเหลือง นุ่ม

พื้นผิวเนียน และยึดหยุ่นได้ดี เช่นเดียวกับฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนที่ไม่ใส่สารเติมแต่ง และเมื่อใส่ PEG-10 dimethicone ความเข้มข้นร้อยละ 10 และ 20 โดยมวล พบว่า เนื้อฟิล์มใสบนเหลือง พื้นผิวเนียน แข็ง คงรูปได้ดี แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ PEG-10 dimethicone เป็นร้อยละ 30 โดยมวล พบว่า เนื้อฟิล์มขุ่นปนเหลือง พื้นผิวเนียน แข็ง และแตกหักง่าย ซึ่งอาจเนื่องมาจากปริมาณของ PEG-10 dimethicone ที่ความเข้มข้นร้อยละ 30 โดยมวล เป็นปริมาณที่มากเกินไปส่งผลให้เกิดการกระจายตัวอย่างไม่สม่ำเสมอในสารละลายซีเอ็มซีจึงขาดความต่อเนื่อง ซึ่งอาจเกิดรอยแยกระหว่างวัฏภาค (วัลลดา หวานเสนาะ, 2553)

5.2.4 การศึกษาสมบัติของฟิล์มจากเปลือกทุเรียน

ความแข็ง

วัดค่าความแข็งด้วยเครื่องวัดความแข็งด้วยดินสอ ตั้งแต่ความแข็งระดับ 6B-6H พบว่า ค่าความแข็งของฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนที่ไม่ใส่สารเติมแต่งคือระดับ H และเมื่อใส่ กลีเซอรอล พบว่า ระดับค่าความแข็งของฟิล์มเพิ่มเป็น 2H เมื่อใส่กลีเซอรอลที่ความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยมวล และเมื่อใส่กลีเซอรอลที่ความเข้มข้นร้อยละ 20 และ 30 โดยมวล พบว่า ระดับค่าความแข็งมีค่าเท่ากันคือ 3H ซึ่งเป็นค่าความแข็งที่สูงที่สุดสำหรับฟิล์มที่ใส่สารเติมแต่ง ในงานวิจัยนี้ ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่า ระดับค่าความแข็งของฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณของกลีเซอรอลเพิ่มขึ้น เนื่องมาจากการเติมกลีเซอรอลมากถึงร้อยละ 20-30 โดยมวล ซึ่งเป็นปริมาณที่มากพอที่จะทำให้โมเลกุลของกลีเซอรอลเข้าแทรกอยู่ระหว่างโมเลกุลของซีเอ็มซี ได้อย่างสม่ำเสมอ (พรชัย ราชตะนะพันธุ์ และคณะ, 2550) จึงเกิดปริมาตรอิสระมากขึ้น เมื่อมีแรงกดมากกระทำ โมเลกุลของซีเอ็มซีจึงสามารถเคลื่อนที่เพื่อลดผลของแรงกระทำนั้นได้ เป็นผลให้ฟิล์มซีเอ็มซีมีความทนต่อการขีดข่วนได้มากขึ้น สำหรับค่าความแข็งของฟิล์มซีเอ็มซีที่ใช้ PEG-10 dimethicone เป็นสารเติมแต่ง ที่ความเข้มข้นร้อยละ 10 20 และ 30 โดยมวล พบว่า ระดับค่าความแข็งของฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนมีค่าเท่ากับ 4B เมื่อใส่ PEG-10 dimethicone ที่ความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยมวล และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ PEG-10 dimethicone เป็นร้อยละ 20 และ 30 โดยมวล พบว่า ระดับค่าความแข็งของฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนมีค่าเท่ากับ 5B เท่ากัน จึงเห็นได้ว่า ระดับค่าความแข็งของฟิล์มซีเอ็มซีที่ใช้ PEG-10 dimethicone เป็นสารเติมแต่งมีแนวโน้มลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มซีเอ็มซีที่ไม่มีสารเติมแต่งและฟิล์มซีเอ็มซีที่ใช้กลีเซอรอลเป็นสารเติมแต่ง

เนื่องจาก PEG-10 dimethicone จัดเป็น โคพอลิเมอร์ที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ และเชื่อมโครงสร้างของ โมเลกุลด้วยพันธะที่แข็งแรง (Si-O-Si) เมื่อเทียบกับโมเลกุลของกลีเซอรอล จึงอาจทำให้การแทรก ตัวเข้าไประหว่างโมเลกุลของซีเอ็มซีทำได้ยากขึ้น จึงไม่มีผลในการเพิ่มปริมาตรอิสระให้กับ โมเลกุลของซีเอ็มซี ค่าความแข็งของฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนในงานวิจัยนี้เรียงลำดับจากน้อย ไปมากได้ดังนี้

$$CMC_d 30PEG \approx CMC_d 20PEG < CMC_d 10PEG < CMC_d < CMC_d 10G < CMC_d 20G \approx CMC_d 30G$$

สมบัติเชิงกล

ค่าแรงเค้นสูงสุดของฟิล์มซีเอ็มซีที่ใส่ PEG-10 dimethicone เป็นสารเติมแต่งมีค่า มากกว่าฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนที่ไม่ใส่สารเติมแต่งและฟิล์มซีเอ็มซีที่ใส่กลีเซอรอลเป็น สารเติมแต่ง เนื่องจาก PEG-10 dimethicone เป็นโมเลกุลที่มีโครงสร้างขนาดใหญ่ และประกอบด้วย ชาติซูลิกอนกับออกซิเจน จึงมีพันธะที่แข็งแรง ส่งผลให้ค่าแรงเค้นสูงสุดเพิ่มขึ้น และเมื่อพิจารณา ผลของปริมาณของ PEG-10 dimethicone ที่มีต่อฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียน พบว่า ฟิล์มซีเอ็มซี จากเปลือกทุเรียนที่ใส่ PEG-10 dimethicone ร้อยละ 30 โดยมวล มีค่าแรงเค้นสูงสุดลดลง เมื่อเทียบกับ ฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนที่ไม่ใส่สารเติมแต่ง ส่วนฟิล์มซีเอ็มซีที่ใส่กลีเซอรอลเป็นสาร เติมแต่ง พบว่า ค่าแรงเค้นสูงสุดน้อยกว่าฟิล์มซีเอ็มซีที่ไม่ใส่สารเติมแต่ง และเมื่อเพิ่มปริมาณของ กลีเซอรอลมากขึ้น พบว่า ฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนมีค่าแรงเค้นสูงสุดลดลง เนื่องจากการแทรก ตัวของโมเลกุลกลีเซอรอลที่เพิ่มมากขึ้น เข้าไปขัดขวางการเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุล ของซีเอ็มซีและถึงแม้ว่าโมเลกุลของกลีเซอรอลจะสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับสายโซ่โมเลกุล ของซีเอ็มซีได้ (กันตวัฒน์ หมายสุเรน, 2555) แต่ก็มีจำนวนน้อยกว่าพันธะไฮโดรเจนระหว่าง โมเลกุลของซีเอ็มซีเดิม ค่าแรงเค้นสูงสุดของฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนในงานวิจัยนี้เรียงลำดับ จากน้อยไปมากได้ดังนี้

$$CMC_d 30G < CMC_d 20G < CMC_d 10G < CMC_d 30PEG < CMC_d < CMC_d 10PEG < CMC_d 20PEG$$

ค่าแรงเค้น ณ จุดขาดของฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนที่ใส่ PEG-10 dimethicone เป็นสารเติมแต่ง ความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยมวล มีค่าแรงเค้น ณ จุดขาดสูงที่สุดและมากกว่าฟิล์ม ซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนที่ไม่ใส่สารเติมแต่งและฟิล์มซีเอ็มซีที่ใส่กลีเซอรอลเป็นสารเติมแต่ง เนื่องมาจาก PEG-10 dimethicone เป็น โคพอลิเมอร์ที่มีสายโซ่โมเลกุลที่มีโครงสร้างขนาดใหญ่ และ

มีพันธะ Si-O-Si ที่แข็งแรง จึงทำหน้าที่เสริมแรงได้ ส่งผลให้ฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนที่ใส่ PEG-10 dimethicone มีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มปริมาณของ PEG-10 dimethicone ค่าแรงเค้น ณ จุดขาดลดลงอย่างมาก โดยค่าแรงเค้น ณ จุดขาดของฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนในงานวิจัยนี้เรียงลำดับจากน้อยไปมากได้ดังนี้

$$CMC_d 20G < CMC_d 30G < CMC_d 30PEG < CMC_d 10G < CMC_d < CMC_d 20PEG < CMC_d 10PEG$$

ค่ามอดูลัสของยังของฟิล์มซีเอ็มซีที่ใส่กลีเซอรอลเป็นสารเติมแต่งมีแนวโน้มลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มซีเอ็มซีที่ไม่ใส่สารเติมแต่ง และเมื่อเพิ่มปริมาณของกลีเซอรอลมากขึ้นพบว่า ฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนมีค่ามอดูลัสของยังลดลงอย่างมาก โดยเฉพาะฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนที่ใส่กลีเซอรอลเป็นสารเติมแต่งความเข้มข้นร้อยละ 30 โดยมวล เนื่องจากโมเลกุลของกลีเซอรอลเข้าไปแทรกระหว่างสายโซ่โมเลกุลของซีเอ็มซี ทำให้เกิดระยะห่างระหว่างโมเลกุลมากขึ้น จึงส่งผลทำให้ความยืดหยุ่นของแผ่นฟิล์มเพิ่มขึ้น (Su et al., 2010) ค่ามอดูลัสของยังของฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนในงานวิจัยนี้เรียงลำดับจากน้อยไปมากได้ดังนี้

$$CMC_d 30G < CMC_d 20G < CMC_d 10G < CMC_d < CMC_d 10PEG < CMC_d 30PEG < CMC_d 20PEG$$

ค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาดของฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนที่ใส่ PEG-10 dimethicone เป็นสารเติมแต่ง มีค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาดน้อยที่สุด เนื่องมาจาก PEG-10 dimethicone เป็นโมเลกุลที่มีโครงสร้างขนาดใหญ่ จึงขัดขวางการเคลื่อนที่ของซีเอ็มซี ส่งผลให้สายโซ่โมเลกุลของซีเอ็มซีในฟิล์มเคลื่อนไหวได้ยากขึ้นเมื่อได้รับแรงดึง (กันตวัฒน์ หมายสุเรน, 2555) และเมื่อพิจารณาผลของปริมาณของ PEG-10 dimethicone ที่มีต่อฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณ PEG-10 dimethicone ในฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียน ค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาดมีแนวโน้มลดลงอย่างมาก เมื่อเทียบกับฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนที่ไม่ใส่สารเติมแต่ง และฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนที่ใส่กลีเซอรอลเป็นสารเติมแต่ง สำหรับฟิล์มซีเอ็มซีที่ใส่กลีเซอรอลเป็นสารเติมแต่ง พบว่า ค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาดมีแนวโน้มสูงกว่าฟิล์มซีเอ็มซีที่ไม่ใส่สารเติมแต่ง และเมื่อเพิ่มปริมาณของกลีเซอรอลมากขึ้น ฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนมีค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาดสูงขึ้น เนื่องจากการแทรกตัวของโมเลกุลกลีเซอรอลที่เพิ่มมากขึ้นเข้าไปขัดขวางการเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของซีเอ็มซี (กันตวัฒน์ หมายสุเรน, 2555) ค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาดของฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนในงานวิจัยนี้เรียงลำดับจากน้อยไปมากได้ดังนี้

$CMC_d 30PEG < CMC_d 20PEG < CMC_d 10PEG < CMC_d < CMC_d 10G < CMC_d 20G < CMC_d 30G$

5.2.5 โครงสร้างผลึกของฟิล์มซีเอ็มซี

โครงสร้างผลึกของฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนที่ใส่และไม่ใส่สารเติมแต่ง ไม่แสดงฟิสิกส์เอกลักษณ์ที่เด่นชัด ถึงแม้มีฟิสิกส์ที่เกิดขึ้นในช่วง 2θ เท่ากับ 19-24 องศา จึงกล่าวได้ว่าฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนเป็นฟิล์มที่มีความเป็นผลึกต่ำ และเมื่อพิจารณาความเป็นผลึกของฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนที่ใส่สารเติมแต่ง พบว่า ฟิสิกส์ที่เกิดขึ้นจะอยู่ในตำแหน่งเดิม แต่ความเข้มของฟิสิกส์มีแนวโน้มลดลง เมื่อใส่สารเติมแต่ง PEG-10 dimethicone ในปริมาณที่มากขึ้นไป (ความเข้มข้นร้อยละ 30 โดยมวล) ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่าการใส่สารเติมแต่งทั้งกลีเซอรอล และ PEG-10 dimethicone ไม่ส่งผลต่อความเป็นผลึกของฟิล์มซีเอ็มซี ยกเว้นฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนที่ใส่ PEG-10 dimethicone ความเข้มข้นร้อยละ 30 โดยมวล เป็นสารเติมแต่ง ซึ่งมีความเป็นผลึกลดลงอย่างเห็นได้ชัด ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากโครงสร้างของสายโซ่โมเลกุล PEG-10 dimethicone เป็นโครงสร้างขนาดใหญ่ และมีในปริมาณที่มาก (ความเข้มข้นร้อยละ 30 โดยมวล) จึงทำให้เกิดระยะห่างระหว่างสายโซ่ของโมเลกุลซีเอ็มซีถูกรบกวน ทำให้โอกาสในการเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างสายโซ่ของโมเลกุลซีเอ็มซีด้วยกันเองลดลง ระดับการเกิดผลึกของฟิล์มจึงต่ำลงอย่างมาก

5.2.6 อัตราการซึมผ่านของไอน้ำ

ค่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำของฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนที่ใส่กลีเซอรอล ร้อยละ 10 โดยมวล ส่งผลให้ฟิล์มมีค่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำสูงขึ้นร้อยละ 1.5 (328 ± 3.84 กรัมต่อวันต่อตารางเมตร) ซึ่งเป็นค่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำสูงที่สุดในงานวิจัยนี้ แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของกลีเซอรอลเป็นร้อยละ 20 และ 30 โดยมวล พบว่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำลดลงเป็น 321 ± 2.50 และ 320 ± 4.90 กรัมต่อวันต่อตารางเมตร ตามลำดับ ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากการเติมกลีเซอรอลในปริมาณน้อยทำให้มีช่องว่างระหว่างโมเลกุลของซีเอ็มซีมากขึ้น แต่การเติมในปริมาณที่มากขึ้นร้อยละ 20 โดยมวล อาจทำให้โมเลกุลของกลีเซอรอลซึ่งเป็นโมเลกุลที่มีขั้วสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลของน้ำได้เป็นจำนวนมาก จึงยึดโมเลกุลของน้ำไว้และไม่ยอมให้โมเลกุลของน้ำแทรกผ่านไป สำหรับฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนที่ใส่ PEG-10 dimethicone เป็นสารเติมแต่ง พบว่า การใส่ PEG-10 dimethicone ที่ความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยมวล ทำให้ค่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำของฟิล์มลดลงถึงร้อยละ 6.2 (303 ± 1.01 กรัมต่อวันต่อตารางเมตร)

เมื่อเทียบกับฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนที่ไม่ใส่สารเติมแต่ง และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ PEG-10 dimethicone เป็นร้อยละ 20 และ 30 โดยมวล พบว่า ค่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำของฟิล์มซีเอ็มซีมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจาก PEG-10 dimethicone จัดเป็นโคพอลิเมอร์ที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ และแทรกตัวเข้าไประหว่างโมเลกุลของซีเอ็มซีได้ยาก จึงไม่มีผลในการเพิ่มปริมาณอิสระให้กับโมเลกุลของซีเอ็มซีเหมือนกับการเติมกลีเซอรอล ประกอบกับ PEG-10 dimethicone มีสมบัติชอบน้ำจึงดูดซับโมเลกุลของน้ำไว้ได้ ทำให้อัตราการซึมผ่านของไอน้ำลดลง ส่วนการเติม PEG-10 dimethicone ในปริมาณที่มากขึ้น (ความเข้มข้นร้อยละ 20-30 โดยมวล) อาจทำให้เกิดการแยกเฟสระหว่าง PEG-10 dimethicone กับซีเอ็มซีมากขึ้น จนอาจทำให้มีช่องว่างที่ไอน้ำสามารถซึมผ่านได้ ค่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำของฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนในงานวิจัยนี้เรียงลำดับจากน้อยไปมากได้ดังนี้

$$CMC_d 10G < CMC_d \approx CMC_d 30PEG < CMC_d 20G < CMC_d 30G < CMC_d 20PEG < CMC_d 10PEG$$

5.2.7 ลักษณะวิทยาของฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียน

ภาพถ่ายลักษณะพื้นผิวของฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนที่ใส่และไม่ใส่สารเติมแต่ง กำลังขยาย 500 และ 10,000 เท่า พบว่า ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนที่ไม่ใส่สารเติมแต่งมีการยึดเกาะกันของแผ่นฟิล์มได้ดี เมื่อใส่กลีเซอรอลร้อยละ 10 โดยมวล พบว่า ลักษณะพื้นผิวของแผ่นฟิล์มซีเอ็มซีมีช่องว่างระหว่างแผ่นฟิล์มและกลีเซอรอลมากขึ้น เมื่อใส่กลีเซอรอลร้อยละ 20 และ 30 โดยมวล ทำให้ช่องว่างระหว่างแผ่นฟิล์มซีเอ็มซีและกลีเซอรอลมีมากขึ้น เนื่องจากการแทรกตัวของโมเลกุลกลีเซอรอลที่เพิ่มมากขึ้นเข้าไปขัดขวางการเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของซีเอ็มซี และถึงแม้ว่าโมเลกุลของกลีเซอรอลสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับสายโซ่โมเลกุลของซีเอ็มซีได้ (กัณฑ์วัฒน์ หมาดสุเรน, 2555) แต่ก็มีจำนวนน้อยกว่าพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของซีเอ็มซีเดิม สำหรับพื้นผิวของฟิล์มซีเอ็มซีที่ใส่ PEG-10 dimethicone พบช่องว่างขนาดใหญ่บนพื้นผิวของฟิล์มซีเอ็มซี ช่องว่างระหว่างฟิล์มซีเอ็มซี และ PEG-10 dimethicone มากขึ้น ตามปริมาณของ PEG-10 dimethicone ที่เพิ่มขึ้น เนื่องมาจากโครงสร้างของสายโซ่โมเลกุล PEG-10 dimethicone เป็นโครงสร้างขนาดใหญ่ และเมื่อใส่ PEG-10 dimethicone ร้อยละ 30 โดยมวล พบว่า เกิดช่องว่างขนาดใหญ่ระหว่างแผ่นฟิล์มซีเอ็มซี และ PEG-10 dimethicone ซึ่งแสดงถึงการแยกเฟสภายในแผ่นฟิล์ม

5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 การนำฟิล์มซีเอ็มซีไปใช้ประโยชน์

1. ฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนที่ไม่ใส่สารเติมแต่งและที่ใส่ PEG-10 dimethicone เป็นสารเติมแต่ง อาจนำไปนำไปผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์ที่ไม่เป็นภัยต่อผู้บริโภคและสิ่งแวดล้อม เนื่องจากฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนเป็นฟิล์มที่สามารถบริโภคได้ และสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

2. ฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนที่ใส่กลีเซอรอล เป็นสารเติมแต่ง สามารถนำไปผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์ที่ไม่เป็นภัยต่อผู้บริโภคและสิ่งแวดล้อมเช่นเดียวกับฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนที่ไม่ใส่สารเติมแต่งและที่ใส่ PEG-10 dimethicone เป็นสารเติมแต่ง อีกทั้งยังสามารถนำไปใช้เป็นต้นแบบของฟิล์มกันรอยจากชีวภาพได้ เนื่องจากฟิล์มมีลักษณะใส ยืดหยุ่นดี ระดับค่าความแข็งของฟิล์มสูงเท่ากับ 3H ค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาดของฟิล์มสูง และค่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำน้อยลงเมื่อปริมาณของกลีเซอรอลสูงขึ้น

5.3.2 การศึกษาต่อไป

1. ศึกษาชนิดของพลาสติกไซเซอร์ต่าง ๆ เช่น ซอร์บิทอล พอลิเอทิลีนไกลคอล เป็นต้น และปริมาณที่แตกต่างกันออกไป

2. เนื่องจากฟิล์มซีเอ็มซีที่ได้มีสีเหลืองเล็กน้อย สมควรหาวิธีในการปรับปรุงสีที่ได้ให้ไม่มีสี

3. เพิ่มการศึกษาลักษณะของฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียน เช่น การศึกษาความสามารถในการย่อยสลายโดยการฝังดิน และการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC

4. การกรองเซลล์ูโลสด้วยผ้าขาวบางมีข้อเสีย คือ ทำให้น้ำหนักของเยื่อเซลล์ูโลสหายไปส่วนหนึ่ง ดังนั้นควรใช้การกรองด้วยสุญญากาศแทน

5. ค่าสมบัติเชิงกลของฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียน พันธุ์หมอนทองในงานวิจัยนี้ยังมีความคลาดเคลื่อนสูง เนื่องจากฟิล์มมีการเยื่อออกของสารเติมแต่งคือ PEG-10 dimethicone และจะเยื่อออกจากแผ่นฟิล์มมากขึ้นเมื่อปริมาตรของ PEG-10 dimethicone มากขึ้น ดังนั้นในกระบวนการเตรียมฟิล์มจึงต้องควบคุมให้ PEG-10 dimethicone กระจายตัวในสารละลายซีเอ็มซีให้ได้ดีที่สุด เพื่อลดการแยกเฟส

ตารางที่ 5.1 ร้อยละการยึด ณ จุดขาด ความแข็งแรงดึง และมอดูลัสของยังของฟิล์มซีเอ็มซีแต่ละชนิด

ชนิดฟิล์ม	ชนิดสารเติมแต่ง	ปริมาณสารเติมแต่ง (ร้อยละ โดยมวล)	ร้อยละการยึด ณ จุดขาด (N/mm ²)	ความแข็งแรงดึง (N/mm ²)	มอดูลัสของยัง (N/mm ²)	เอกสารอ้างอิง
CMC ทางการค้า	ไม่ได้สารเติมแต่ง		3.12	42.60	-	พรชัย ราชตะนะ พันธุ์ และคณะ, 2550
CMC จากเปลือกมะละกอ	ไม่ได้สารเติมแต่ง		2.84	10.33	-	
CMC ทางการค้า	กลีเซอรอล	0.1	6.53	27.49	-	
		0.2	4.41	18.96	-	
CMC จากเชื้อฟางข้าว	กลีเซอรอล	0.25	6.29	29.22	-	ณัฐฐิทธิวี จินาพันธ์ และคณะ, 2555
		0.5	8.41	20.17	-	
		1	33.53	17.21	-	
CMC จากเปลือกทุเรียน	ไม่ได้สารเติมแต่ง		2.20	255.54	-	พรชัย ราชตะนะ พันธุ์ และคณะ, 2555
CMC จากเปลือกทุเรียน	ไม่ได้สารเติมแต่ง		5.046	10.428	317.423	งานวิจัยนี้
	กลีเซอรอล	10	11.591	6.797	277.368	
		20	22.308	3.150	71.506	
		30	46.104	1.603	4.910	
	PEG-10 dimethicone	10	3.443	11.016	453.081	
		20	2.572	11.228	615.065	
30		1.278	7.478	474.496		

บรรณานุกรม

- กรมวิทยาศาสตร์บริการ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. (2553). *พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ*. กรุงเทพฯ: สำนักหอสมุดและศูนย์สารสนเทศวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี.
- กรวิกา ข่ายทอง. (2553). *การศึกษาคุณสมบัติการใช้งานของพลาสติกชีวภาพสำหรับชิ้นส่วนยานยนต์*. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม, คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- กันตวัฒน์ หมาดสุเรน. (2555). *การเตรียมและการทดสอบของฟิล์มนาโนคอมพอสิตชีวภาพจากไคโตซานและไฮดรอกซีอะพาไทต์*. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์, คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- กัลยกร เทียนชัย. (2555). *การพัฒนาฟิล์มพลาสติกชีวภาพจากพอลิแลคติกแอซิดร่วมกับวัสดุธรรมชาติ*. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม, คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยบูรพา.
- เกวลิน รัตนจรัสกุล. (2555). *การพัฒนาฟิล์มต้านจุลินทรีย์จากคาร์บอกซิเมซิลเซลลูโลสร่วมกับน้ำมันสะระแหน่ *Mentha piperita**. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต, สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ, คณะวิทยาศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- จิตตรา ดอกบัว. (2552). *การศึกษาประสิทธิภาพเซลล์โฟสเฟตจากฟางข้าวและขานอ้อยเพื่อใช้ดูดซับตะกั่วและแคดเมียมในน้ำเสีย*. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ศึกษา, คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์.
- ณัฐพล เกียรติพานิช. (2548). *การพัฒนาเทอร์โมพลาสติกเสริมแรงที่เตรียมจากเส้นใยธรรมชาติและการศึกษาสมบัติเชิงกลและสมบัติการไหล*. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

- ณัฐชวดี จินาพันธ์, เจิมขวัญ สังข์สุวรรณ, สุทธิรา สุทธสุภา และสุฐพัศ คำไทย. (2555). คุณสมบัติของฟิล์มคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสจากเยื่อฟางข้าว. *วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร*, 43(3), 616-620.
- นิตยาพร สมภักดิ์. (2555). *การศึกษาการย่อยสลายขยะพลาสติกและ/หรือพลาสติกชีวภาพโดยกลุ่มจุลินทรีย์*. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ, คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยมหาสารคาม.
- นิลบล เพื่อกบัวขาว. (2550). *สมบัติเชิงกลและสัณฐานวิทยาของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปใหม่โดยมีแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นสารเติมแต่ง*. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวัสดุศาสตร์, คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- ปราโมทย์ วีรานุกูล, จักรวัฒน์ เรืองแรงสกุล, สัจจะชาญ พรรดมะลิ และประชุม คำพุฒ. (2554). การใช้กากมะพร้าว ต้นข้าวโพด และเปลือกทุเรียนเป็นวัสดุประกอบชีวภาพทดแทนไม้ในแผ่นใยอัดความหนาแน่นปานกลาง. ใน *การประชุมวิชาการมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 5* (หน้า 7). กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล.
- พรชัย ราชชนะพันธุ์, สุพัฒน์ คำไทย, นริวิชญ์ ยาภิ และรัฐชิตา อุทัยศ. (2550). การผลิตฟิล์มคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสจากเปลือกมะละกอและคุณสมบัติเชิงกลของฟิล์ม. ใน *การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 45* (หน้า 790-799). กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ภิเชก รุ่งโรจน์ชยพร. (2557). กลีเซอรอล: การใช้ประโยชน์เพื่อการผลิตแก๊สไฮโดรเจน. *วารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง*, 23(2), 140-159.
- แม่น อมรสิทธิ์, อมร เพชรสม, ชุติ เชี่ยววัฒนา, อติทยา ศิริภิญญานนท์, ศรีวไล โอมอภิญญาณ และอุมาพร สุขม่วง. (2554). *หลักการและเทคนิคการวิเคราะห์เชิงเครื่องมือ* (พิมพ์ครั้งที่ 2). กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์ชวนพิมพ์ 50.
- รานี สุวรรณพฤกษ์ และสุธาทิพย์ ศิริไพศาลพัฒน์. (2529). การผลิตโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสจากผักตบชวา. ใน *การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 24* (หน้า 471-478). กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

- วัลลดา หวานเสนาะ. (2553). *สมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลคอมโพสิตจากแป้งข้าวเจ้า เสริมแรงด้วยเส้นใยต่างชนิด*. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาเทคโนโลยี พอลิเมอร์, คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- ศันสนีย์ รักไทยเจริญชีพ. (2558). ประโยชน์จากเอ็กเซอร์เซิร์ฟแพรกซ์ในงานทดสอบวัตถุคืบและผลิตภัณฑ์. *วารสารกรมวิทยาศาสตร์บริการ*, 63(197), 38-40.
- ศุภณี เรียบเลิศหิรัญ และสุณี ภูสีม่วง. (2557). Benefits of Compostable Plastics. ใน *การสัมมนา "Bioplastics : The Choice of Sustainable Life"* (หน้า 3). กรุงเทพฯ: สมาคมอุตสาหกรรมพลาสติกชีวภาพไทย.
- สุคนธา สุคนธ์ธำรา. (2545). *การเตรียมและสมบัติของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังผสมเจลาติน*. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม, คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- สุภาวดี สืบสาย. (2555). *การศึกษาระดับการเกิดชีวมิคของปุ๋ยหมักด้วยการใช้หมู่ฟังก์ชันที่เป็นกรด ร่วมกับเทคนิคฟูรีเออร์ทรานสฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโทรสโคปี*. วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม, คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- สุรศักดิ์ กุญมาลี. (2551). *การหาค่าการนำความร้อนและสมบัติเชิงกลที่เหมาะสมของวัสดุผสมพอลิเอทิลีนกับผลแก่ไฟต์*. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงาน, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- สุวิมล กาญจนสุธา. (2551). *การใช้กากมันสำปะหลังและฟางข้าวเป็นวัตถุดิบในการผลิตพลาสติกชีวภาพโพลีไฮดรอกซีอัลคาโนเอตและการผลิตก๊าซไฮโดรเจนโดยวิธีชีวภาพจากกากของแข็งที่เกิดจากอุตสาหกรรมสกัดปาล์มน้ำมัน*. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม, คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- อารีรัตน์ สมหวังสกุล. (2556). *การเตรียมและศึกษาลักษณะเฉพาะของฟิล์มบางไทเทเนียมออกไซด์ในไตรด์ด้วยวิธีรีแอคทีฟแมกนีตรอนโคสปีดเตอริง*. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาฟิสิกส์, คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยบูรพา.

- Adinugraha, M. P., Marseno, D. W., & Hayadi. (2005). Synthesis and characterization of sodium carboxymethylcellulose from cavendish banana pseudo stem (*Musa cavendishii* LAMBERT). *Carbohydrate Polymers*, 62, 164-169.
- ASTM, American society of testing and materials. (1993). *Standard test methods for water vapor transmission of material. E 96*. Annual book of ASTM standards.
- ASTM, American society of testing and materials. (2000). *Standard Test Method for Film Hardness by Pencil Test. D 3363*. Annual book of ASTM standards.
- Chai, M. N., & Isa, M. I. N. (2013). The Oleic Acid Composition Effect on the Carboxymethyl Cellulose Based Biopolymer Electrolyte. *Journal of Crystallization Process and Technology*, 3, 1-4
- Fultz, B., & Howe, J.M. (2013). *Transmission Electron Microscopy and Diffractometry of Materials* (4th ed.). Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Jurong xisims trade co., ltd. (2014, 4 March). *Material safety data sheet. 91/155/EEC*
- Klanwan, Y. (2014). *Effect of plasticizer and kraft lignin addition on defatted rice bran-based bioplastic*. Master's thesis, Food Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi.
- Rachtanapun, P., & Rattanapanone, N. (2011). Synthesis and characterization of carboxymethylcellulose powder and films from mimosa pigra. *Journal of Applied Polymer Science*, 122, 3218–3226.
- Rachtanapun, P., Luangkamin S., Tanprasert K., & Suriyatem R. (2012). Carboxymethyl cellulose film from durian rind. *Journal of Food Science and Technology*, 48, 52-58.
- Shekarabi, A. S., Oromiehie, A. R., Vaziri, A., Ardjmand, M., & Safekordi, A. A. (2014). Effect of glycerol concentration on physical properties of composite edible films prepared from plums gum and carboxymethyl cellulose. *Indian Journal of Fundamental and Applied Life Sciences*, 4, 1241-1248.

- Su, J. F., Huang, Z., Yuan, X. Y., Wang, X. Y., & Li, M. (2009). Structure and properties of carboxymethyl cellulose/soy protein isolate blend edible films crosslinked by maillard reactions. *Carbohydrate Polymers*, 79, 145–153.
- Tongsin, P. (2008). *Effects of plasticizers (Glycerol and Corn oil) on morphology, thermal and mechanical properties of electrospun zein film*. Master's thesis, Food Process Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ข้อมูลการทดลอง

ตารางภาคผนวกที่ 1ก ค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาด ค่าแรงเค้นสูงสุด ค่าแรงเค้น ณ จุดขาด และค่ามอดูลัสของยัง ของฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนที่ไม่ได้
สารเติมแต่ง (CMC_d)

จำนวน ตัวอย่าง	ความหนา				ค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาด	ค่าแรงเค้นสูงสุด (นิวตันต่อตารางเมตร)	ค่าแรงเค้น ณ จุดขาด (นิวตันต่อตารางเมตร)	ค่ามอดูลัสของยัง (นิวตันต่อตารางเมตร)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย				
1	0.08	0.08	0.07	0.08	4.807	4.888	-1.038	217.082
2	0.12	0.11	0.12	0.12	1.255	4.673	3.793	341.926
3	0.12	0.12	0.12	0.12	7.060	10.827	-8.202	176.040
4	0.06	0.05	0.06	0.06	3.551	6.812	-0.140	326.443
5	0.10	0.11	0.11	0.11	6.014	10.316	3.569	415.725
6	0.09	0.10	0.10	0.10	6.380	13.022	-4.852	309.812
7	0.10	0.10	0.10	0.10	3.113	10.601	-8.106	360.316
8	0.10	0.11	0.09	0.10	5.923	10.622	-0.626	308.543
9	0.08	0.08	0.08	0.08	4.580	10.455	4.163	298.069
10	0.10	0.10	0.10	0.10	4.297	10.360	-6.34	279.053
11	0.10	0.10	0.10	0.10	5.033	12.826	-9.296	315.791
12	0.10	0.09	0.10	0.10	5.240	14.038	3.647	307.220
13	0.09	0.10	0.10	0.10	5.077	10.435	3.217	396.201

ตารางภาคผนวกที่ 1ก (ต่อ)

จำนวน ตัวอย่าง	ความหนา				ค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาด	ค่าแรงเค้นสูงสุด (นิวตันต่อตารางเมตร)	ค่าแรงเค้น ณ จุดขาด (นิวตันต่อตารางเมตร)	ค่ามอดูลัสของยัง (นิวตันต่อตารางเมตร)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย				
14	0.10	0.10	0.10	0.10	4.463	-4.229-	3.505	211.987
15	0.10	0.10	0.09	0.10	4.687	10.309	3.922	290.716
ค่าเฉลี่ย				0.10	5.046	10.428	3.688	317.423
SD				0.02	0.748	0.266	0.306	30.273

ตารางภาคผนวกที่ 2ก ค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาด ค่าแรงเค้นสูงสุด ค่าแรงเค้น ณ จุดขาด และค่ามอดูลัสของยัง ของฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนที่ใส่กลีเซอรอล
ร้อยละ 10 โดยมวล (CMC_d 10G)

จำนวน ตัวอย่าง	ความหนา				ค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาด	ค่าแรงเค้นสูงสุด (นิวตันต่อตารางเมตร)	ค่าแรงเค้น ณ จุดขาด (นิวตันต่อตารางเมตร)	ค่ามอดูลัสของยัง (นิวตันต่อตารางเมตร)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย				
1	0.08	0.08	0.07	0.08	12.720	-5.423-	-0.828-	230.033
2	0.08	0.08	0.08	0.08	19.143	-8.573-	2.822	300.712
3	0.13	0.13	0.12	0.13	20.123	7.685	2.526	277.355
4	0.08	0.07	0.08	0.08	6.517	5.623	2.880	288.470

ตารางภาคผนวกที่ 2ก (ต่อ)

จำนวน ตัวอย่าง	ความหนา				ค่าร้อยละการยึด ณ จุดขาด	ค่าแรงเค้นสูงสุด (นิวตันต่อตารางเมตร)	ค่าแรงเค้น ณ จุดขาด (นิวตันต่อตารางเมตร)	ค่ามอดูลัสของยัง (นิวตันต่อตารางเมตร)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย				
5	0.10	0.09	0.09	0.09	16.827	7.571	-2.182	263.167
6	0.08	0.08	0.07	0.08	13.070	6.497	-0.045	236.126
7	0.08	0.08	0.07	0.08	11.617	-7.812	-1.570	291.212
8	0.10	0.11	0.09	0.10	10.570	-5.128	2.429	218.555
9	0.08	0.07	0.07	0.07	10.517	6.360	-0.757	229.891
10	0.12	0.13	0.13	0.13	16.693	7.414	3.182	270.281
11	0.07	0.07	0.07	0.07	11.080	6.560	-1.686	263.321
12	0.07	0.07	0.07	0.07	14.480	7.780	-0.374	329.767
13	0.10	0.09	0.09	0.09	11.320	6.511	-1.258	293.457
14	0.05	0.06	0.06	0.06	12.453	5.973	-0.027	248.334
15	0.06	0.07	0.08	0.07	10.970	-3.823	-0.046	111.832
16	0.06	0.06	0.07	0.06	15.329	-5.017	3.457	237.866
ค่าเฉลี่ย				0.09	11.591	6.797	2.933	277.368
SD				0.02	0.944	0.761	0.380	17.360

ตารางภาคผนวกที่ 3ก ค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาด ค่าแรงเค้นสูงสุด ค่าแรงเค้น ณ จุดขาด และค่ามอดูลัสของยัง ของฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนที่ได้
กลีเซอรอล ร้อยละ 20 โดยมวล (CMC_d 20G)

จำนวน ตัวอย่าง	ความหนา				ค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาด	ค่าแรงเค้นสูงสุด (นิวตันต่อตารางเมตร)	ค่าแรงเค้น ณ จุดขาด (นิวตันต่อตารางเมตร)	ค่ามอดูลัสของยัง (นิวตันต่อตารางเมตร)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย				
1	0.10	0.10	0.12	0.11	17.103	2.936	-0.107	75.278
2	0.10	0.11	0.11	0.11	21.470	-4.195	0.365	110.234
3	0.11	0.11	0.11	0.11	18.540	2.462	0.340	71.253
4	0.10	0.09	0.11	0.10	19.917	3.029	0.409	80.205
5	0.09	0.11	0.12	0.11	23.163	3.145	-1.084	73.348
6	0.10	0.11	0.11	0.11	17.233	-4.009	-1.015	100.303
7	0.11	0.11	0.11	0.11	22.300	3.642	0.296	76.916
8	0.13	0.11	0.12	0.12	28.527	-4.669	-1.542	101.358
9	0.10	0.11	0.11	0.11	19.937	3.224	0.249	78.963
10	0.10	0.12	0.11	0.11	30.247	3.756	-0.796	75.790
11	0.11	0.12	0.12	0.12	19.260	-2.155	-0.002	49.051
12	0.12	0.11	0.09	0.11	26.453	3.627	-0.024	86.462
13	0.11	0.10	0.11	0.11	16.480	-1.882	0.424	56.933

ตารางภาคผนวกที่ 3ก (ต่อ)

จำนวน ตัวอย่าง	ความหนา				ค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาด	ค่าแรงเค้นสูงสุด (นิวตันต่อตารางเมตร)	ค่าแรงเค้น ณ จุดขาด (นิวตันต่อตารางเมตร)	ค่ามอดูลัสของยัง (นิวตันต่อตารางเมตร)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย				
14	0.10	0.10	0.11	0.10	29.307	-4.327	0.347	-99.929
15	0.12	0.09	0.11	0.11	25.583	2.245	0.289	-47.286
16	0.11	0.11	0.11	0.11	17.837	-1.071	0.313	-41.642
17	0.10	0.09	0.11	0.10	15.210	-1.800	-0.118	54.869
18	0.11	0.12	0.11	0.11	26.457	3.429	0.273	-82.630
ค่าเฉลี่ย				0.11	22.308	3.150	0.331	71.506
SD				0.01	3.007	0.503	0.057	9.258

ตารางภาคผนวกที่ 4ก ค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาด ค่าแรงเค้นสูงสุด ค่าแรงเค้น ณ จุดขาด และค่ามอดูลัสของยัง ของฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนที่ได้

กลีเซอรอล ร้อยละ 30 โดยมวล (CMC_d 30G)

จำนวน ตัวอย่าง	ความหนา				ค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาด	ค่าแรงเค้นสูงสุด (นิวตันต่อตารางเมตร)	ค่าแรงเค้น ณ จุดขาด (นิวตันต่อตารางเมตร)	ค่ามอดูลัสของยัง (นิวตันต่อตารางเมตร)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย				
1	0.08	0.08	0.07	0.08	45.213	1.702	0.487	-10.091

ตารางภาคผนวกที่ 4ก (ต่อ)

จำนวน ตัวอย่าง	ความหนา				ค่าร้อยละการยึด ณ จุดขาด	ค่าแรงเค้นสูงสุด (นิวตันต่อตารางเมตร)	ค่าแรงเค้น ณ จุดขาด (นิวตันต่อตารางเมตร)	ค่ามอดูลัสของยัง (นิวตันต่อตารางเมตร)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย				
2	0.12	0.13	0.11	0.12	40.520	1.587	-0.340	-13.099
3	0.10	0.10	0.11	0.10	36.427	-0.816	0.596	4.326
4	0.10	0.13	0.12	0.12	87.823	1.563	0.625	-8.036
5	0.09	0.09	0.10	0.09	52.513	-1.296	0.571	-3.171
6	0.10	0.11	0.09	0.10	93.600	1.528	-1.002	-3.640
7	0.09	0.12	0.11	0.11	69.940	1.722	-0.747	5.753
8	0.08	0.07	0.07	0.07	40.753	1.603	0.974	4.351
9	0.07	0.07	0.07	0.07	48.607	1.640	-1.080	4.550
10	0.10	0.09	0.10	0.10	48.797	-1.370	-0.746	4.077
11	0.13	0.11	0.12	0.12	60.747	1.430	0.603	6.329
12	0.11	0.11	0.10	0.11	45.747	1.661	0.471	4.891
13	0.12	0.11	0.09	0.11	46.683	1.592	0.528	4.510
ค่าเฉลี่ย				0.10	46.104	1.603	0.554	4.910
SD				0.02	4.065	0.086	0.055	0.925

ตารางภาคผนวกที่ 5ก ค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาด ค่าแรงเค้นสูงสุด ค่าแรงเค้น ณ จุดขาด และค่ามอดูลัสของยัง ของฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนที่ได้

PEG-10 dimethicone ร้อยละ 10 โดยมวล (CMC_d 10PEG)

จำนวน ตัวอย่าง	ความหนา				ค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาด	ค่าแรงเค้นสูงสุด (นิวตันต่อตารางเมตร)	ค่าแรงเค้น ณ จุดขาด (นิวตันต่อตารางเมตร)	ค่ามอดูลัสของยัง (นิวตันต่อตารางเมตร)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย				
1	0.05	0.06	0.06	0.06	-2.260	7.693	-3.520	739.972
2	0.06	0.06	0.06	0.06	-2.253	12.020	4.857	542.863
3	0.08	0.06	0.07	0.07	3.523	11.500	-2.503	409.301
4	0.06	0.06	0.07	0.06	3.593	10.435	4.420	402.604
5	0.07	0.07	0.06	0.07	3.517	13.527	-6.420	579.742
6	0.06	0.07	0.06	0.06	2.897	-14.763	5.020	-773.39
7	0.08	0.08	0.07	0.08	3.270	-7.150	5.025	421.989
8	0.05	0.06	0.06	0.06	3.670	-15.100	-6.080	677.862
9	0.07	0.08	0.06	0.07	-2.953	-5.715	-2.945	335.722
10	0.05	0.06	0.06	0.06	-2.017	-6.810	5.669	424.061
11	0.07	0.06	0.06	0.06	-1.763	4.620	-6.912	344.937
12	0.06	0.06	0.07	0.06	-4.353	12.178	-3.175	699.725
13	0.06	0.06	0.06	0.06	3.604	10.289	4.558	498.626

ตารางภาคผนวกที่ 5ก (ต่อ)

จำนวน ตัวอย่าง	ความหนา				ค่าร้อยละการยึด ณ จุดขาด	ค่าแรงเค้นสูงสุด (นิวตันต่อตารางเมตร)	ค่าแรงเค้น ณ จุดขาด (นิวตันต่อตารางเมตร)	ค่ามอดูลัสของยัง (นิวตันต่อตารางเมตร)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย				
14	0.05	0.06	0.06	0.06	3.547	10.414	5.126	581.854
15	0.07	0.06	0.06	0.06	3.411	11.053	5.042	503.006
ค่าเฉลี่ย				0.06	3.443	11.016	4.965	453.081
SD				0.01	0.224	0.661	0.380	48.836

ตารางภาคผนวกที่ 6 ค่าร้อยละการยึด ณ จุดขาด ค่าแรงเค้นสูงสุด ค่าแรงเค้น ณ จุดขาด และค่ามอดูลัสของยัง ของฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนที่ได้

PEG-10 dimethicone ร้อยละ 20 โดยมวล (CMC_d 20PEG)

จำนวน ตัวอย่าง	ความหนา				ค่าร้อยละการยึด ณ จุดขาด	ค่าแรงเค้นสูงสุด (นิวตันต่อตารางเมตร)	ค่าแรงเค้น ณ จุดขาด (นิวตันต่อตารางเมตร)	ค่ามอดูลัสของยัง (นิวตันต่อตารางเมตร)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย				
1	0.12	0.11	0.12	0.12	3.283	13.737	1.631	549.643
2	0.10	0.10	0.10	0.10	3.800	11.438	9.116	360.471
3	0.11	0.11	0.11	0.11	1.340	6.105	3.720	617.912
4	0.09	0.08	0.07	0.08	1.240	12.093	5.030	1210.497

ตารางภาคผนวกที่ 6ก (ต่อ)

จำนวน ตัวอย่าง	ความหนา				ค่าร้อยละการยึด ณ จุดขาด	ค่าแรงเค้นสูงสุด (นิวตันต่อตารางเมตร)	ค่าแรงเค้น ณ จุดขาด (นิวตันต่อตารางเมตร)	ค่ามอดูลัสของยัง (นิวตันต่อตารางเมตร)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย				
5	0.10	0.11	0.11	0.11	2.513	10.682	1.493	608.238
6	0.11	0.11	0.10	0.11	2.920	12.010	2.600	656.346
7	0.10	0.10	0.10	0.10	2.077	9.489	1.459	707.138
8	0.11	0.10	0.11	0.11	2.710	10.686	3.897	533.449
9	0.07	0.07	0.08	0.07	2.354	10.321	1.047	943.872
10	0.11	0.10	0.11	0.11	2.842	13.217	3.981	580.245
11	0.11	0.10	0.11	0.11	2.613	11.710	4.239	596.014
12	0.12	0.12	0.13	0.12	1.295	6.445	3.004	602.878
13	0.09	0.10	0.10	0.10	2.307	10.413	3.567	623.876
14	0.12	0.11	0.10	0.11	2.643	11.243	1.261	635.011
15	0.10	0.11	0.11	0.11	2.741	11.891	4.220	722.004
ค่าเฉลี่ย				0.11	2.572	11.228	3.937	615.065
SD				0.01	0.261	0.717	0.268	23.779

ตารางภาคผนวกที่ 7ก ค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาด ค่าแรงเค้นสูงสุด ค่าแรงเค้น ณ จุดขาด และค่ามอดูลัสของยัง ของฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนที่ได้

PEG-10 dimethicone ร้อยละ 30 โดยมวล (CMC_d 30PEG)

จำนวน ตัวอย่าง	ความหนา				ค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาด	ค่าแรงเค้นสูงสุด (นิวตันต่อตารางเมตร)	ค่าแรงเค้น ณ จุดขาด (นิวตันต่อตารางเมตร)	ค่ามอดูลัสของยัง (นิวตันต่อตารางเมตร)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย				
1	0.11	0.12	0.09	0.11	1.013	-3.166-	-0.006-	404.593
2	0.12	0.10	0.09	0.10	-3.497-	13.813-	0.913	481.674
3	0.08	0.07	0.08	0.08	1.017	-5.523-	-1.018-	618.476
4	0.10	0.11	0.10	0.10	1.663	7.633	1.018	560.216
5	0.08	0.08	0.09	0.08	1.039	7.442	0.981	636.012
6	0.09	0.12	0.11	0.11	1.007	7.599	0.992	651.064
7	0.11	0.10	0.11	0.11	1.359	7.421	1.013	499.015
8	0.12	0.11	0.12	0.12	1.763-	5.163	-2.773-	328.181
9	0.11	0.11	0.12	0.11	1.142	8.021	0.948	404.881
10	0.10	0.10	0.10	0.10	1.740-	-3.013-	0.987	503.167
11	0.10	0.11	0.10	0.10	1.153	7.112	-1.123-	549.191
12	0.08	0.09	0.08	0.08	1.397	-9.097-	1.004	520.861
13	0.09	0.10	0.10	0.10	1.433	-5.003-	0.924	465.763

ตารางภาคผนวกที่ 7ก (ต่อ)

จำนวน ตัวอย่าง	ความหนา				ค่าร้อยละการยึด ณ จุดขาด	ค่าแรงเค้นสูงสุด (นิวตันต่อตารางเมตร)	ค่าแรงเค้น ณ จุดขาด (นิวตันต่อตารางเมตร)	ค่ามอดูลัสของยัง (นิวตันต่อตารางเมตร)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย				
14	0.10	0.10	0.10	0.10	1.377	7.117	0.891	466.012
15	0.10	0.10	0.09	0.10	3.087	10.813	1.005	318.324
ค่าเฉลี่ย				0.10	1.278	7.478	0.969	474.496
SD				0.01	0.256	0.317	0.042	35.944

ตารางภาคผนวกที่ 8g น้ำหนักของฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนที่ไม่ใส่สารเติมแต่ง ที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 75 เป็นเวลา 7 วัน

ชื่อฟิล์ม	จำนวน ตัวอย่าง	น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงของฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียน ใน 7 วัน (g)							ความชื้น กราฟ	WVTR (g/day.m ²)	SD
		1	2	3	4	5	6	7			
CMC _d	1	4.1792	4.4104	4.5831	4.7098	4.8257	4.9176	4.9682	0.1294	323.50	2.77
	2	4.2992	4.5352	4.7033	4.8205	4.9401	5.0315	5.0852	0.1281	320.25	
	3	4.1716	4.4076	4.5827	4.7077	4.8262	4.9170	4.9674	0.1303	325.75	
									$\bar{\chi}$ =	323.17	

ตารางภาคผนวกที่ 9ก น้ำหนักของฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนที่ใส่กลีเซอรอลเป็นสารเติมแต่ง ที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 75 เป็นเวลา 7 วัน

ชื่อฟิล์ม	จำนวน ตัวอย่าง	น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงของฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียน ใน 7 วัน (g)							ความชื้น กราฟ	WVTR (g/day.m ²)	SD
		1	2	3	4	5	6	7			
CMC _d 10G	1	4.2067	4.4181	4.6068	4.7184	4.8507	4.9541	5.0076	0.1328	332.00	3.84
	2	4.2072	4.4239	4.6152	4.7218	4.8503	4.9471	4.9958	0.1303	325.75	
	3	4.2227	4.4123	4.5629	4.6850	4.8243	4.9392	4.9977	0.1300	325.00	
									$\bar{\chi}$ =	327.58	

ตารางภาคผนวกที่ 10g น้ำหนักของฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนที่ใส่กลีเซอรอลเป็นสารเติมแต่ง ที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 75 เป็นเวลา 7 วัน

ชื่อฟิล์ม	จำนวนตัวอย่าง	น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงของฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียน ใน 7 วัน (g)							ความชื้นกราฟ	WVTR (g/day.m ²)	SD
		1	2	3	4	5	6	7			
CMC _p 20G	1	4.2159	4.4393	4.6408	4.7519	4.8615	4.9581	5.0045	0.1294	323.50	2.50
	2	4.2524	4.4935	4.6704	4.7755	4.8889	4.9883	5.0491	0.1285	321.25	
	3	4.2534	4.4924	4.6704	4.7742	4.8835	4.9859	5.0420	0.1274	318.50	
									$\bar{\chi}$ =	321.08	

ตารางภาคผนวกที่ 11g น้ำหนักของฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนที่ใส่กลีเซอรอลเป็นสารเติมแต่ง ที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 75 เป็นเวลา 7 วัน

ชื่อฟิล์ม	จำนวนตัวอย่าง	น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงของฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียน ใน 7 วัน (g)							ความชื้นกราฟ	WVTR (g/day.m ²)	SD
		1	2	3	4	5	6	7			
CMC _p 30G	1	4.2183	4.4773	4.6657	4.7765	4.8696	4.9756	5.0301	0.1299	324.75	4.90
	2	4.2779	4.5211	4.7148	4.8179	4.9200	4.9993	5.0452	0.1283	320.75	
	3	4.2271	4.4785	4.7041	4.7791	4.8470	4.9689	5.0281	0.1260	315.00	
									$\bar{\chi}$ =	320.17	

ตารางภาคผนวกที่ 12ก น้ำหนักของฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนที่ใส่ PEG-10 dimethicone เป็นสารเติมแต่ง ที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 75 เป็นเวลา 7 วัน

ชื่อฟิล์ม	จำนวนตัวอย่าง	น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงของฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียน ใน 7 วัน (g)							ความชื้นกราฟ	WVTR (g/day.m ²)	SD
		1	2	3	4	5	6	7			
CMC _d 10PEG	1	4.2751	4.5042	4.6779	4.7835	4.9016	4.9805	5.0195	0.1218	304.50	1.01
	2	4.2802	4.5086	4.6764	4.7916	4.9008	4.9813	5.0222	0.1213	303.25	
	3	4.3446	4.5767	4.7456	4.8508	4.9587	5.0422	5.0923	0.1210	302.50	
									$\bar{\chi}$ =	303.42	

ตารางภาคผนวกที่ 13ก น้ำหนักของฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนที่ใส่ PEG-10 dimethicone เป็นสารเติมแต่ง ที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 75 เป็นเวลา 7 วัน

ชื่อฟิล์ม	จำนวนตัวอย่าง	น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงของฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียน ใน 7 วัน (g)							ความชื้นกราฟ	WVTR (g/day.m ²)	SD
		1	2	3	4	5	6	7			
CMC _d 20PEG	1	4.1991	4.4044	4.5866	4.6918	4.8156	4.9173	4.9743	0.1279	319.75	1.30
	2	4.1762	4.3777	4.5813	4.6812	4.7905	4.8954	4.9470	0.1270	317.50	
	3	4.2917	4.4832	4.6411	4.7462	4.8689	4.9827	5.0492	0.1270	317.50	
									$\bar{\chi}$ =	318.25	

ตารางภาคผนวกที่ 14ก น้ำหนักของฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนที่ใส่ PEG-10 dimethicone เป็นสารเติมแต่ง ที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 75 เป็นเวลา 7 วัน

ชื่อฟิล์ม	จำนวน ตัวอย่าง	น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงของฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียน ใน 7 วัน (g)							ความชื้น กราฟ	WVTR (g/day.m ²)	SD
		1	2	3	4	5	6	7			
CMC _d 30PEG	1	4.2629	4.3651	4.4981	4.646	4.7624	4.9261	5.0082	0.1294	323.5	1.23
	2	4.2662	4.3906	4.4953	4.6269	4.7204	4.9814	4.9963	0.1285	321.25	
	3	4.2794	4.3939	4.576	4.6572	4.7604	5.0089	5.0151	0.1293	323.25	
									$\bar{\chi}$ =	322.67	

ภาคผนวก ข

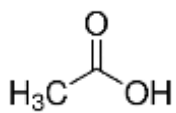
สารเคมี

ตารางภาคผนวกที่ 1ข สมบัติทางกายภาพของโซเดียมไฮดรอกไซด์*

สมบัติทางกายภาพของโซเดียมไฮดรอกไซด์	
สูตรทั่วไป	NaOH
ชื่อสารเคมี	Sodium hydroxide
มวลโมเลกุล (กรัม/โมล)	40.00
สถานะที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส	ของแข็ง
สี	ขาว
จุดเดือด (องศาเซลเซียส)	1,390
จุดหลอมเหลว (องศาเซลเซียส)	318
ความหนาแน่น (กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)	-
ความสามารถการละลาย	ละลายน้ำได้
ความบริสุทธิ์ (%)	98
บริษัทผู้ผลิต	LOBA chemie

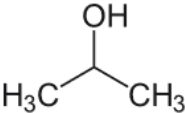
* ข้อมูลจาก Sigma-aldrich

ตารางภาคผนวกที่ 2x สมบัติทางกายภาพของกรดอะซิติกเข้มข้น*

สมบัติทางกายภาพของกรดอะซิติกเข้มข้น		
สูตรทั่วไป	CH ₃ COOH	
ชื่อสารเคมี	Glacial acetic acid	
มวลโมเลกุล (กรัม/โมล)	60.05	
สถานะที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส	ของเหลว	
สี	ไม่มีสี	
จุดเดือด (องศาเซลเซียส)	117	
จุดหลอมเหลว (องศาเซลเซียส)	17	
ความหนาแน่น (กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)	1.05	
ความสามารถการละลาย	ละลายน้ำได้	
ความบริสุทธิ์ (%)	99.8	
บริษัทผู้ผลิต	Scharlau chemie S.A.	

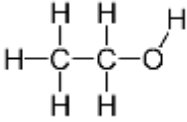
* ข้อมูลจาก Sigma-aldrich

ตารางภาคผนวกที่ 3x สมบัติทางกายภาพของไอโซโพรพานอล*

สมบัติทางกายภาพของไอโซโพรพานอล		
สูตรทั่วไป	C_3H_7OH	
ชื่อสารเคมี	2-Propanol	
มวลโมเลกุล (กรัม/โมล)	60.10	
สถานะที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส	ของเหลว	
สี	ไม่มีสี	
จุดเดือด (องศาเซลเซียส)	81-83	
จุดหลอมเหลว (องศาเซลเซียส)	-89.5	
ความหนาแน่น (กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)	0.785	
ความสามารถการละลาย	ละลายน้ำได้	
ความบริสุทธิ์ (%)	99.5	
บริษัทผู้ผลิต	QREC (ASIA) SDN BHD.	

* ข้อมูลจาก Sigma-aldrich

ตารางภาคผนวกที่ 4x สมบัติทางกายภาพของเอทานอลบริสุทธิ์*

สมบัติทางกายภาพของเอทานอลบริสุทธิ์		
สูตรทั่วไป	C_2H_5OH	
ชื่อสารเคมี	Ethanol	
มวลโมเลกุล (กรัม/โมล)	46.07	
สถานะที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส	ของเหลว	
สี	ไม่มีสี	
จุดเดือด (องศาเซลเซียส)	78.4	
จุดหลอมเหลว (องศาเซลเซียส)	-114.1	
ความหนาแน่น (กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)	0.791	
ความสามารถการละลาย	ละลายน้ำได้	
ความบริสุทธิ์ (%)	99.9	
บริษัทผู้ผลิต	J.T. Baker	

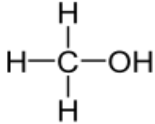
* ข้อมูลจาก Sasol.

ตารางภาคผนวกที่ 5x สมบัติทางกายภาพของเมทานอล*

สมบัติทางกายภาพของเมทานอล		
สูตรทั่วไป	CH ₃ OH	$\begin{array}{c} \text{H} \\ \\ \text{H}-\text{C}-\text{OH} \\ \\ \text{H} \end{array}$
ชื่อสารเคมี	Methanol	
มวลโมเลกุล (กรัม/โมล)	32.04	
สถานะที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส	ของเหลว	
สี	ไม่มีสี	
จุดเดือด (องศาเซลเซียส)	64.7	
จุดหลอมเหลว (องศาเซลเซียส)	-98	
ความหนาแน่น (กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)	0.791	
ความสามารถการละลาย	ละลายน้ำได้	
ความบริสุทธิ์ (%)	99.8	
บริษัทผู้ผลิต	Ajax Finechem	

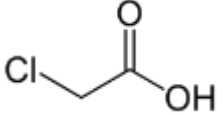
* ข้อมูลจาก Sigma-aldrich

ตารางภาคผนวกที่ 6x สมบัติทางกายภาพของเมทานอล*

สมบัติทางกายภาพของเมทานอล		
สูตรทั่วไป	CH ₃ OH	
ชื่อสารเคมี	Methanol	
มวลโมเลกุล (กรัม/โมล)	32.04	
สถานะที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส	ของเหลว	
สี	ไม่มีสี	
จุดเดือด (องศาเซลเซียส)	64.7	
จุดหลอมเหลว (องศาเซลเซียส)	-98	
ความหนาแน่น (กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)	0.791	
ความสามารถการละลาย	ละลายน้ำได้	
ความบริสุทธิ์ (%)	99.9	
บริษัทผู้ผลิต	Fisher scientific UK limited	

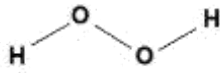
* ข้อมูลจาก Sigma-aldrich

ตารางภาคผนวกที่ 7x สมบัติทางกายภาพของกรดโมโนคลอโรอะซิติก*

สมบัติทางกายภาพของกรดโมโนคลอโรอะซิติก		
สูตรทั่วไป	ClCH_2COOH	
ชื่อสารเคมี	Monochloroacetic acid	
มวลโมเลกุล (กรัม/โมล)	94.50	
สถานะที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส	ของแข็ง	
สี	ขาว	
จุดเดือด (องศาเซลเซียส)	189	
จุดหลอมเหลว (องศาเซลเซียส)	60-63	
ความหนาแน่น (กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)	-	
ความสามารถการละลาย	ละลายน้ำได้	
ความบริสุทธิ์ (%)	99.0	
บริษัทผู้ผลิต	Lobachemie	

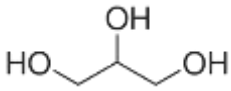
* ข้อมูลจาก Sigma-aldrich

ตารางภาคผนวกที่ 8ข สมบัติทางกายภาพของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์*

สมบัติทางกายภาพของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์		
สูตรทั่วไป	H ₂ O ₂	
ชื่อสารเคมี	Hydrogen peroxide	
มวลโมเลกุล (กรัม/โมล)	34.02	
สถานะที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส	ของเหลว	
สี	ไม่มีสี	
จุดเดือด (องศาเซลเซียส)	126	
จุดหลอมเหลว (องศาเซลเซียส)	-40	
ความหนาแน่น (กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)	1.11	
ความสามารถการละลาย	ละลายน้ำได้	
ความบริสุทธิ์ (%)	30-32	
บริษัทผู้ผลิต	Lobachemie	

* ข้อมูลจาก Sigma-aldrich

ตารางภาคผนวกที่ 9x สมบัติทางกายภาพของกลีเซอรอล*

สมบัติทางกายภาพของกลีเซอรอล		
สูตรทั่วไป	$C_3H_8O_3$	
ชื่อสารเคมี	Glycerol	
มวลโมเลกุล (กรัม/โมล)	92.09	
สถานะที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส	ของเหลว	
สี	ไม่มีสี	
จุดเดือด (องศาเซลเซียส)	182	
จุดหลอมเหลว (องศาเซลเซียส)	20	
ความหนาแน่น (กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)	1.262	
ความสามารถการละลาย (% โดยมวล)	ละลายน้ำได้	
ความบริสุทธิ์ (%)	-	
ขนาดอนุภาค	Gammaco thailand	
บริษัทผู้ผลิต	$C_3H_8O_3$	

* ข้อมูลจาก Sigma-aldrich

ตารางภาคผนวกที่ 10ข สมบัติทางกายภาพของ PEG-10 dimethicone *

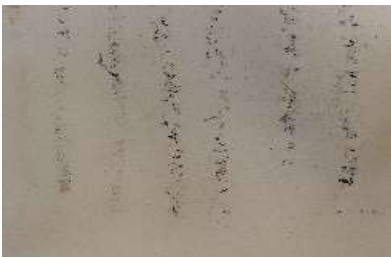



สมบัติทางกายภาพของ PEG-10 dimethicone	
สูตรทั่วไป	
ชื่อสารเคมี	PEG-10 dimethicone
มวลโมเลกุล (กรัม/โมล)	-
สถานะที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส	ของเหลว
สี	ไม่มีสี
จุดเดือด (องศาเซลเซียส)	-
จุดหลอมเหลว (องศาเซลเซียส)	-
ความหนาแน่น (กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)	4.1
ความสามารถการละลาย	ละลายน้ำได้
ความบริสุทธิ์ (%)	-
บริษัทผู้ผลิต	Jurong xisims trade co., ltd

* ข้อมูลจาก Jurong xisims trade co., ltd




ภาคผนวก ก

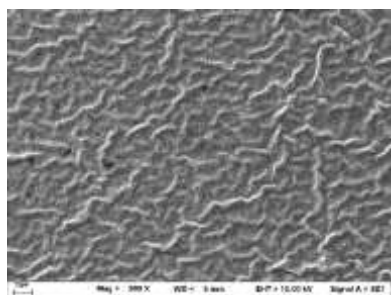
ภาพถ่ายของฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียน

ตารางภาคผนวกที่ 1ค ภาพลักษณะและระดับค่าความแข็งของฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนที่ใส่
และไม่ใส่สารเติมแต่ง

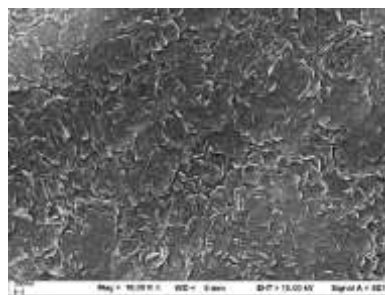
ชนิดของฟิล์ม	ชื่อฟิล์ม	ฟิล์มที่ได้	ระดับค่าความแข็ง
ไม่ใส่สารเติมแต่ง	CMC _d		H
สารเติมแต่งเป็น กลีเซอรอล	CMC _d 10G		2H
	CMC _d 20G		3H
	CMC _d 30G		3H

ตารางภาคผนวกที่ 1ค (ต่อ)

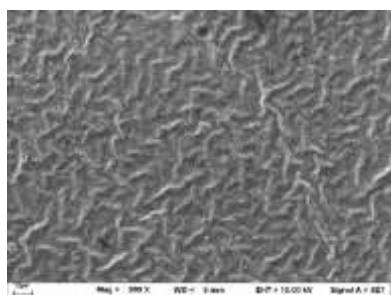
ชนิดของฟิล์ม	ชื่อฟิล์ม	ฟิล์มที่ได้	ระดับค่าความแข็ง
	CMC _d 10PEG		4B
สารเติมแต่งเป็น PEG-10 dimethicone	CMC _d 20PEG		5B
	CMC _d 30PEG		5B



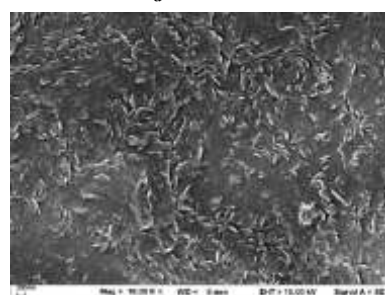
CMC_d x 500 เท่า



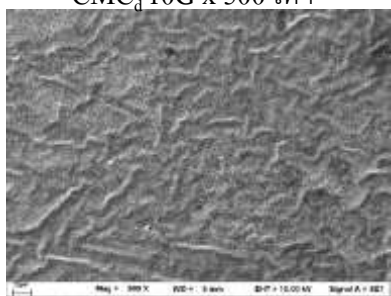
CMC_d x 10,000 เท่า



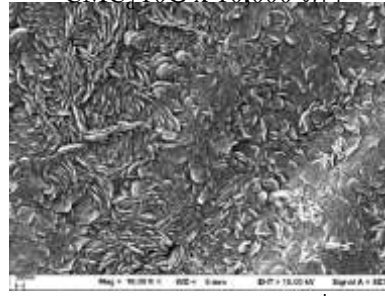
CMC_d 10G x 500 เท่า



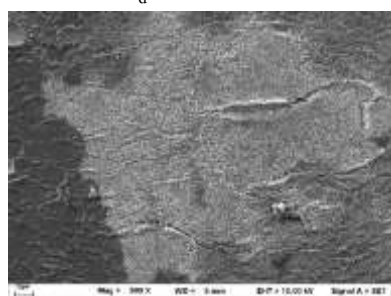
CMC_d 10G x 10,000 เท่า



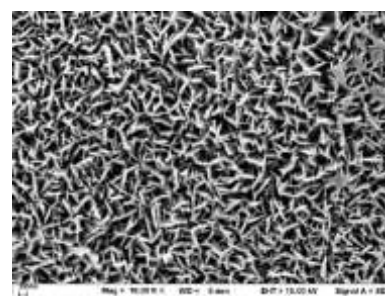
CMC_d 20G x 500 เท่า



CMC_d 20G x 10,000 เท่า

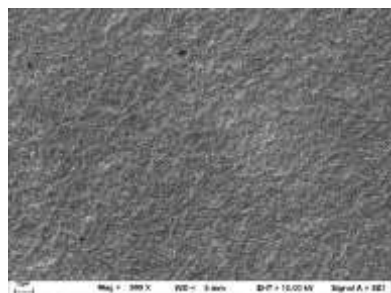


CMC_d 30G x 500 เท่า

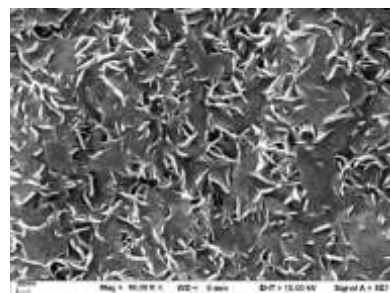


CMC_d 30G x 10,000 เท่า

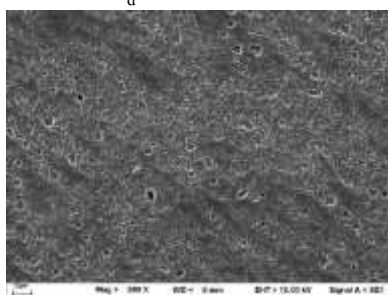
ภาพภาคผนวกที่ 1ค ภาพถ่าย SEM ของพื้นผิวฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียน กำลังขยาย 500 และ 10,000 เท่า



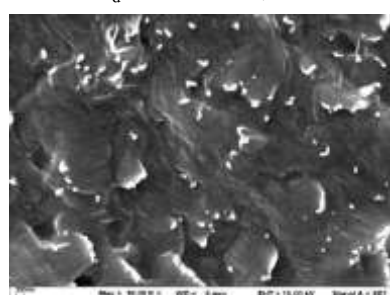
CMC_d 10PEG x 500 เท่า



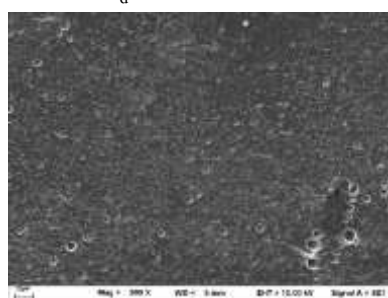
CMC_d 10PEG x 10,000 เท่า



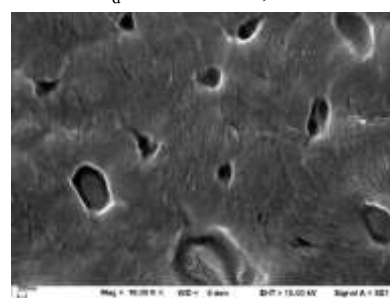
CMC_d 20PEG x 500 เท่า



CMC_d 20PEG x 10,000 เท่า

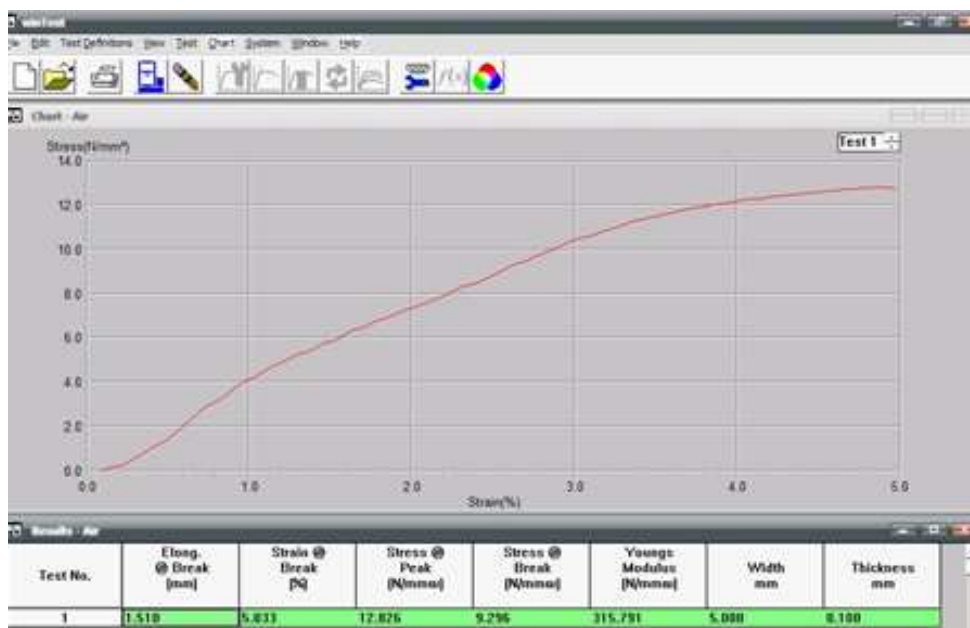


CMC_d 30PEG x 500 เท่า

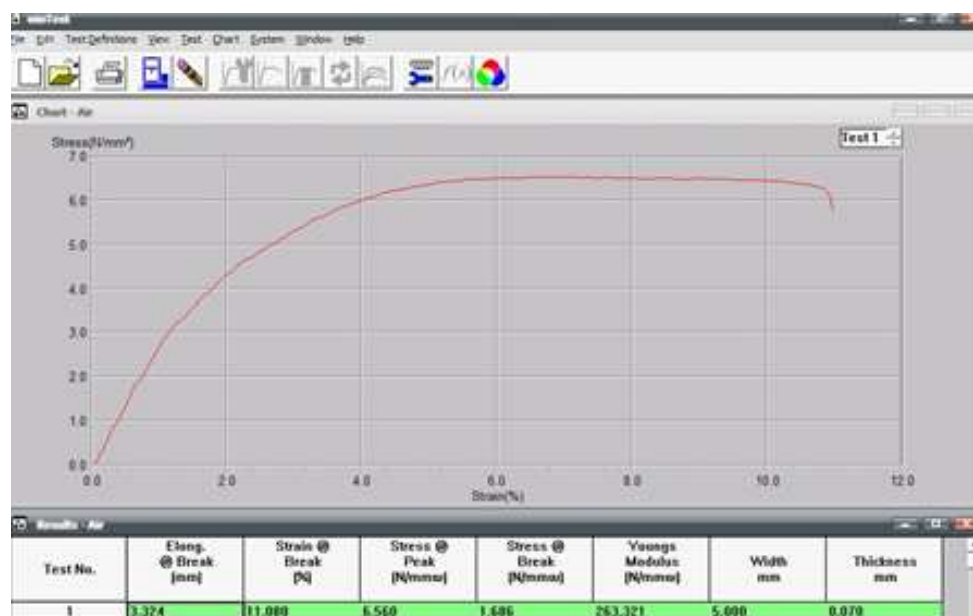


CMC_d 30PEG x 10,000 เท่า

ภาพภาคผนวกที่ 1ค (ต่อ)



ภาพภาคผนวกที่ 2ค ตัวอย่างภาพสมบัติเชิงกลของฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนที่ไม่ใส่สารเติมแต่ง (CMC₀) จากเครื่องทดสอบแรงดึง



ภาพภาคผนวกที่ 3ค ตัวอย่างภาพสมบัติเชิงกลของฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนที่ใส่กลีเซอรอลร้อยละ 10 โดยมวล (CMC₀ 10G) จากเครื่องทดสอบแรงดึง



ภาพภาคผนวกที่ 4ค ตัวอย่างภาพสมบัติเชิงกลของฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนที่ใส่กลีเซอร์อล ร้อยละ 20 โคโมวล (CMC_d20G) จากเครื่องทดสอบแรงดึง



ภาพภาคผนวกที่ 5ค ตัวอย่างภาพสมบัติเชิงกลของฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนที่ใส่กลีเซอร์อล ร้อยละ 30 โคโมวล (CMC_d30G) จากเครื่องทดสอบแรงดึง



ภาพภาคผนวกที่ 6c ตัวอย่างภาพสมบัติเชิงกลของฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนที่ได้ PEG-10 dimethicone ร้อยละ 10 โดยมวล (CMC_d 10PEG) จากเครื่องทดสอบแรงดึง



ภาพภาคผนวกที่ 7c ตัวอย่างภาพสมบัติเชิงกลของฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนที่ได้ PEG-10 dimethicone ร้อยละ 20 โดยมวล (CMC_d 20PEG) จากเครื่องทดสอบแรงดึง



ภาพภาคผนวกที่ 8ค ตัวอย่างภาพสมบัติเชิงกลของฟิล์มซีเอ็มซีจากเปลือกทุเรียนที่ได้ PEG-10 dimethicone ร้อยละ 30 โดยมวล (CMC_u 30PEG) จาก เครื่องทดสอบแรงดึง