สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

พลาสติกย่อยสลายได้จากแป้งมันสำปะหลังผสมวุ้นแมงลัก โดยมีโลหะไอออนเป็นสารก่อพันธะเชื่อมโยง

DEGRADABLE PLASTICS FROM CASSAVA STARCH/MUCILAGE GEL OF *OCIMUM AMERICANUM* BLEND BY USING METAL ION AS CROSSLINKER

T117181

ณัฐยา บุญจินต์
พัชราภรณ์ ขำเจริญ
ยุทธศิลป์ บุญมั่น

เลขหมู่
เลขทะเบียน 117181
วัน,เดือน,ปี 19 ก.ค. 2554
b 12341823
i

โครงงานพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม
คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2553

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DEGRADABLE PLASTICS FROM CASSAVA STARCH/MUCILAGE GEL OF *OCIMUM AMERICANUM* BLEND BY USING METAL ION AS CROSSLINKER

MISS NUTHAYA BOONJIN

MISS PACHARAPORN KHAMCHAROEN

MR. YOOTHASIN BOONMUN

A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT

OF THE REQUIRMENT FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE

IN INDUSTRAIL CHEMISTRY

FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

ACADEMIC YEAR 2010

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงงานพิเศษ	พลาสติกย่อยสลายได้จากแป้งมันสำปะหลังผสมวุ้นแมงลักโดยมีโลหะไอออนเป็นสารก่อพันธะเชื่อมโยง
ชื่อนักศึกษา	นางสาวณัฐยา บุญจินต์ นางสาวพัชราภรณ์ ขำเจริญ นายยุทธศิลป์ บุญมั่น
ปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา	เคมีอุตสาหกรรม
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร.มาลินี ชัยศุภกิจสินธ์

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้โครงงานนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรม ประจำปีการศึกษา 2553

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
รศ.ดร.สมศักดิ์ วรมงคลชัย	
ดร.อำนาจ เพิ่มทรัพย์สกุล	
รศ.ดร.มาลินี ชัยศุภกิจสินธ์	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำโครงงานพิเศษนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ เนื่องจากความช่วยเหลือ ความร่วมมือ ตลอดจนคำแนะนำต่างๆที่เป็นประโยชน์แก่คณะผู้จัดทำจากบุคคลและองค์กรต่างๆ

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณ รศ.ดร.มาลินี ชัยศุภกิจสินธ์ เป็นอย่างสูงที่ได้ให้คำแนะนำ ความรู้ ความเอาใจใส่ดูแล ตลอดจนความช่วยเหลือในการดำเนินโครงงานพิเศษนี้ด้วยดีตลอดมา

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.สมศักดิ์ วรมงคลชัย และ ดร.อำนาจ เพิ่มทรัพย์สกุล กรรมการตรวจสอบโครงงานพิเศษ ที่กรุณาตรวจทานและแก้ไขโครงงานพิเศษฉบับนี้ให้ถูกต้องสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ คุณกฤษณะ เกษประดิษฐ์ และคุณสุดใจ สอนสะอาด เจ้าหน้าที่อาคารฝึกงานทางอุตสาหกรรมเคมีและพอลิเมอร์ที่อำนวยความสะดวกและให้คำปรึกษาในการใช้เครื่องมือต่างๆ รวมทั้งการแก้ปัญหาตลอดการดำเนินงาน

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณ ครอบครัว ที่ให้การสนับสนุนและเป็นกำลังใจตลอดมา ตลอดจนเพื่อนๆ เจ้าหน้าที่ภาควิชาเคมีทุกท่านที่คอยช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกให้โครงงานพิเศษนี้ดำเนินสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

นอกจากนี้ยังมีบุคคลที่มีส่วนช่วยเหลืออีกมากมายที่มิได้กล่าวถึง ณ ที่นี้ ทางคณะผู้จัดทำจึงใคร่ขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ ที่นี้ด้วย

นางสาวณัฐยา บุญจินต์

นางสาวพัชราภรณ์ ขำเจริญ

นายยุทธศิลป์ บุญมั่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	IX
สารบัญรูปภาพ	XI
บทที่ 1 บทนำ	**1-4**
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	3
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	**5-87**
2.1 ประวัติของแป้ง	5
2.2 การสังเคราะห์แป้ง	6
2.3 องค์ประกอบภายในแป้ง	9-23
2.3.1 อะมิโลส	10
2.3.2 อะมิโลเพกทิน	17
2.3.3 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของแป้งมันสำปะหลัง	22
2.3.4 ส่วนประกอบอื่นๆภายในเม็ดแป้ง	23
2.4 สมบัติของแป้ง	24-28
2.4.1 การดูดซับน้ำ การพองตัว และการละลาย	25
- สมบัติทางเคมีของคาร์โบไฮเดรต-ไฮโดรคอลลอยด์ และการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม	28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
2.5 ความหนืด	31-37
2.5.1 ปัจจัยการเกิดความหนืด	31
2.5.2 วิธีวัดความหนืด	33
2.5.3 การเกิดเจลาติไนเซชัน	34
2.5.4 การเกิดรีโทรเกรเดชัน	37
2.6 สมบัติของแป้งฟิล์ม	40-41
2.7 ลักษณะที่สำคัญทางอุตสาหกรรม	41-44
2.7.1 ปริมาณแป้ง	41
2.7.2 ปริมาณไซยาไนด์	41
2.7.3 ปริมาณเปลือก (เยื่อใย)	43
2.7.4 สารประกอบที่ทำให้เกิดสีในเนื้อแป้ง	44
2.8 คุณภาพของแป้งมันสำปะหลัง	44-46
2.9 การดัดแปรแป้ง	46-49
2.9.1 จุดประสงค์ในการดัดแปรแป้ง	46
2.9.2 การแบ่งประเภทของแป้งดัดแปร	47
2.9.3 การออกแบบปฏิกิริยาดัดแปรแป้ง	49
2.9.4 การดัดแปรทางเคมี	49
2.10 แมงลัก	51-53
2.10.1 ไฟเบอร์ที่ละลายน้ำได้	53
2.10.2 ไฟเบอร์ที่ไม่ละลายน้ำ	53
2.11 พันธะไอออนิก	54-55
2.11.1 ขนาดไอออน	55
2.12 พลาสติกไซเซอร์	55-64
2.12.1 พลาสติกไซเซชันและพลาสติกไซเซอร์	55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
2.12.2 ทฤษฎีการทำงานของพลาสติกไซเซอร์	57
2.12.3 สมบัติที่ต้องการของพลาสติกไซเซอร์	59
2.12.4 ความเข้ากันได้กับพอลิเมอร์	59
2.12.5 ผลของพลาสติกไซเซอร์ต่อสมบัติอื่นๆของพอลิเมอร์	60
2.12.5.1 สมบัติเชิงกล	60
2.12.5.2 การวิเคราะห์สมบัติทางอุณหภูมิของพอลิเมอร์	64
2.13 พลาสติกย่อยสลายได้	65-71
2.13.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับพลาสติกย่อยสลายได้	65
2.13.2 ประเภทของพลาสติกย่อยสลายได้	66
2.13.3 ผลกระทบด้านบวกกับสภาพแวดล้อม	69
2.13.4 ผลกระทบด้านลบต่อสภาพแวดล้อม	71
2.14 พลาสติกเพื่อการเกษตร	73-74
2.14.1 นิยามและความหมาย	73
2.14.2 การใช้งานพลาสติกทางการเกษตร	74
2.15 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	80-87
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	**88-96**
3.1 สารเคมี อุปกรณ์ และเครื่องมือ	88-89
3.1.1 สารเคมี	88
3.1.2 อุปกรณ์	88
3.1.3 เครื่องมือ	89
3.2 วิธีการทดลอง	90-93
3.2.1 การเตรียมสารละลาย	90
3.2.2 การเตรียมผงวุ้นแมงลัก	91

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
3.2.3 การเตรียมแผ่นฟิล์ม	92
3.2.3.1 ขั้นตอนการขึ้นรูปแผ่นฟิล์ม	93
3.3 การทดสอบสมบัติทางกายภาพของแผ่นฟิล์ม	94-95
3.3.1 ทดสอบสมบัติการดูดซับน้ำ	94
3.3.2 ทดสอบหาจุดอิ่มตัวในการดูดซับน้ำ	94
3.3.3 ทดสอบหาปริมาณน้ำที่เหลืออยู่ในแผ่นฟิล์ม	95
3.4 การทดสอบสมบัติเชิงกล	95
3.5 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน	95-96
3.6 การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมี	96
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล	**97-127**
4.1 ลักษณะทางกายภาพของแผ่นฟิล์ม	97
4.2 ผลการทดสอบการบวมน้ำ	101-108
4.3 การศึกษาสมบัติการบวมตัว	109-112
4.3.1 ฟิล์มแป้งมันสำปะหลังในสภาวะต่างๆ	109
4.3.2 ฟิล์มแมงลักในสภาวะต่างๆ	110
4.3.3 ฟิล์มแป้งผสมแมงลักในสภาวะต่างๆ	112
4.4 การศึกษาหาจุดสมดุล หรือจุดอิ่มตัวในการบวมตัว	113
4.5 การศึกษาปริมาณน้ำที่เหลืออยู่ในแผ่นฟิล์ม	114-115
4.6 การตรวจสอบหมู่ฟังก์ชัน	115-120
4.6.1 ผลการทดสอบฟิล์มแป้ง	115
4.6.2 ผลการทดสอบฟิล์มแมงลัก	116
4.6.3 ผลการทดสอบฟิล์มแป้งในสภาวะต่างๆ	117
4.6.4 ผลการทดสอบฟิล์มแมงลักที่สภาวะต่างๆ	119
4.6.5 ผลการทดสอบฟิล์มแป้งผสมแมงลัก	120

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
4.7 สมบัติเชิงกล	122-123
4.7.1 เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด และความแข็งแรงดึง	123
4.8 สมบัติทางความร้อน	124-127
4.8.1 ผลการทดสอบฟิล์มแป้ง	125
4.8.2 ผลการทดสอบฟิล์มแมงลัก	126
4.8.3 ผลการทดสอบฟิล์มแป้งผสมวุ้นแมงลัก ในอัตราส่วนต่างๆ	127
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	**128-132**
5.1 สรุปผลการดำเนินงานวิจัย	128
5.2 สันนิษฐานการเกิดพันธะเชื่อมโยง	130
5.3 ข้อเสนอแนะ	132
เอกสารอ้างอิง	**133-136**
ภาคผนวก	**137-175**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

เรื่อง		หน้า
ตารางที่ 2.1	องค์ประกอบทางเคมีของแป้งมันสำปะหลัง	9
ตารางที่ 2.2	สมบัติของแป้งข้าวโพดเปรียบเทียบกับแป้งมันสำปะหลัง	10
ตารางที่ 2.3	คุณสมบัติทางโครงสร้างของอะมิโลส	12
ตารางที่ 2.4	ปริมาณของอะมิโลสในแป้งชนิดต่างๆ	14
ตารางที่ 2.5	สมบัติของอะมิโลสจากแป้งชนิดต่างๆ	14
ตารางที่ 2.6	สมบัติของอะมิโลสจากแป้งชนิดต่างๆ (ต่อ)	15
ตารางที่ 2.7	ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวของอะมิโลสและสีของสารประกอบเชิงซ้อนของอะมิโลสกับไอโอดีน	16
ตารางที่ 2.8	คุณสมบัติของแป้งข้าวโพดที่มีปริมาณอะมิโลสต่างกัน	21
ตารางที่ 2.9	สมบัติที่แตกต่างกันของอะมิโลสและอะมิโลสเพกทิน	22
ตารางที่ 2.10	คุณสมบัติของฟิล์มของแป้งแต่ละชนิด	41
ตารางที่ 2.11	ขนาดไอออนชนิดต่างๆ	55
ตารางที่ 2.12	พลังงานที่ใช้สังเคราะห์พลาสติกชนิดสังเคราะห์	70
ตารางที่ 2.13	ปริมาณการปลดปล่อยแก๊สเรือนกระจกของพลาสติกชนิดย่อยสลายได้	71
ตารางที่ 2.14	ชนิดของโลหะในเคตะลิสต์	73
ตารางที่ 2.15	พลาสติกคลุมดิน	75
ตารางที่ 2.16	การใช้แผ่นฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดต่างๆในการคลุมดิน	76
ตารางที่ 2.17	ข้อมูลของแผ่นฟิล์มพลาสติกพอลีเอทิลีนที่ใช้ในการคลุมดิน	76
ตารางที่ 3.1	ส่วนผสมของแผ่นฟิล์มในแต่ละสูตร	92
ตารางที่ 4.1	สูตรแผ่นฟิล์มและสมบัติที่ทดสอบ	97
ตารางที่ 4.2	ลักษณะทางกายภาพของแผ่นฟิล์ม	98
ตารางที่ 4.3	ลักษณะของแผ่นฟิล์มหลังการบวมน้ำ	101
ตารางที่ 4.4	เลขคลื่นที่แสดงหมู่ฟังก์ชันของแป้งและวุ้นแมงลัก	121

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

เรื่อง		หน้า
ตารางที่ 4.5	อัตราส่วนผสมของสูตรฟิล์มที่ใช้ทดสอบสมบัติเชิงกล	122
ตารางที่ 4.6	อุณหภูมิการสลายตัวของแผ่นฟิล์ม	124
ตารางที่ 5.1	สรุปผลการทดสอบสมบัติต่างๆของฟิล์ม	128
ตารางที่ ก-1	ผลการทดลองการบวมน้ำของฟิล์ม	139
ตารางที่ ก-2	ผลการทดลองการบวมน้ำของฟิล์ม	141
ตารางที่ ก-3	ค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำ	155
ตารางที่ ก-4	ค่าปริมาณการดูดซับน้ำที่จุดสมดุล	156
ตารางที่ ก-5	น้ำหนักฟิล์มหลังการคายน้ำที่เวลาต่างๆ	156
ตารางที่ ก-6	ลักษณะของแผ่นฟิล์มหลังการคายน้ำที่เวลา 24 ชั่วโมง	157
ตารางที่ ก-7	ค่าเปอร์เซ็นต์การคายน้ำหรือความสามารถในการเก็บน้ำ	157
ตารางที่ ข-1	ความถี่ของการดูดกลืนรังสีอินฟาเรดของหมู่ฟังก์ชันสามัญบางชนิด	162
ตารางที่ ค-1	ผลการทดสอบสมบัติเชิงกล	170
ตารางที่ ค-2	ค่าเฉลี่ยและเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของ Tensile strength และ Elongation at break	171

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

เรื่อง		หน้า
รูปที่ 2.1	วัฏจักรเคลวิน	6
รูปที่ 2.2	กลไกของคาร์โบไฮเดรตและการสังเคราะห์แป้งระหว่างไซโตพลาสซึมและอะมิโลพลาสต์ภายในเอนโดสเปิร์มของข้าวโพด	8
รูปที่ 2.3	โครงสร้างของอะมิโลส	10
รูปที่ 2.4	ภาพจำลองการจัดเรียงตัวของอะมิโลสกับสารอินทรีย์	11
รูปที่ 2.5	ลักษณะเกลียวของอะมิโลส	13
รูปที่ 2.6	แบบจำลองโครงสร้างอะมิโลสที่อยู่ร่วมกับอะมิโลเพกทินและไขมัน	13
รูปที่ 2.7	กราฟแสดงองค์ประกอบของแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการย่อยด้วยเอนไซม์ไอโซอะมิเลสและทำการแยกสารด้วยโครมาโทกราฟีแบบการจำเพาะขนาดด้วยคอลัมน์โทโยเพิร์ล	18
รูปที่ 2.8	กราฟแสดงการกระจายตัวของสารโซ่แป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการย่อยด้วยเอนไซม์ไอโซอะมิเลสและทำการแยกสารด้วยโครมาโทกราฟีแบบการแลกเปลี่ยนประจุ	18
รูปที่ 2.9	ลักษณะของโครงสร้างอะมิโลเพกทินที่ประกอบด้วยส่วนที่เป็นผลึกและส่วนที่เป็นอสัณฐาน	19
รูปที่ 2.10	การจัดเรียงตัวของอะมิโลเพกทินภายในวงแหวน	20
รูปที่ 2.11	แบบจำลองโครงสร้างอะมิโลสและอะมิโลเพกทินในแป้งจากธัญพืช	21
รูปที่ 2.12	การเปลี่ยนแปลงของเม็ดแป้งในระหว่างการหุงต้ม	35
รูปที่ 2.13	ระยะในการเกิดเจลาติไนเซชันของเม็ดแป้ง	36
รูปที่ 2.14	กราฟแสดงการเกิดเจลาติไนเซชันของเม็ดแป้งแต่ละชนิด	37
รูปที่ 2.15	การเกิดรีโทรเกรเดชัน	38
รูปที่ 2.16	กลไกการคืนตัวของแป้ง	39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

เรื่อง		หน้า
รูปที่ 2.17	การสร้างและการย่อยสลายสารประกอบไซยาโนกลูโคซายด์ลินามาริน	43
รูปที่ 2.18	ตัวอย่างการเกิดพันธะไอออนิก	54
รูปที่ 2.19	โครงสร้างได-2-เอทิลเฮกซิลฟลาทาเลตหรือไดออกทิลฟลาทาเลต	56
รูปที่ 2.20	โครงสร้างของพีวีซีทั้งในกรณีที่ใส่และไม่ใส่พลาสติกไซเซอร์	58
รูปที่ 2.21	รูปร่างตัวอย่างของพอลิเมอร์ที่ใช้ทดสอบความเค้นและความเครียด	62
รูปที่ 2.22	ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียด	63
รูปที่ 2.23	การทดสอบความทนต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ที่มีสมบัติต่างๆกัน	63
รูปที่ 2.24	เทอร์โมแกรมที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย TGA	64
รูปที่ 4.1	กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์การบวมน้ำของฟิล์มแป้ง	109
รูปที่ 4.2	กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์การบวมน้ำของฟิล์มแมงลัก	110
รูปที่ 4.3	กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์การบวมน้ำของฟิล์มแป้งผสมแมงลักในอัตราส่วนต่างกันที่เติมไอออนโลหะเชื่อมโยง	112
รูปที่ 4.4	กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์จุดอิ่มตัวการบวมน้ำของฟิล์มแป้งผสมแมงลักในอัตราส่วนต่างกันที่เติมไอออนโลหะเชื่อมโยง	113
รูปที่ 4.5	กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความสามารถในการคายน้ำของฟิล์มแป้งผสมแมงลักในอัตราส่วนต่างกันที่เติมไอออนโลหะเชื่อมโยง	114
รูปที่ 4.6	สเปกตรัม IR ของฟิล์มแป้ง	115
รูปที่ 4.7	สเปกตรัม IR ของฟิล์มแมงลัก	116
รูปที่ 4.8	สเปกตรัม IR ของฟิล์มแป้งในสภาวะต่างๆ	117
รูปที่ 4.9	สเปกตรัม IR ของฟิล์มแมงลักในสภาวะต่างๆ	119
รูปที่ 4.10	สเปกตรัม IR ของฟิล์มแป้งผสมแมงลักที่มีการเติมไอออนโลหะ	120
รูปที่ 4.11	กราฟแสดงการดึงยืด ณ จุดขาด และค่าความแข็งแรงดึงกับฟิล์มสูตร 3 – 6	122

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

เรื่อง		หน้า
รูปที่ 4.12	แสดงผลเทอร์โมแกรม TGA ของฟิล์มแป้ง	125
รูปที่ 4.13	แสดงผลเทอร์โมแกรม TGA ของฟิล์มแมงลัก	126
รูปที่ 5.1	แบบจำลองการเชื่อมโยงของแป้งกับโลหะเชื่อมโยง K^+	130
รูปที่ 5.2	กลไกแสดงการเกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยงของแป้งกับโลหะเชื่อมโยง K^+	130
รูปที่ 5.3	แบบจำลองการเชื่อมโยงของแมงลักกับโลหะเชื่อมโยง Ca^{2+}	131
รูปที่ 5.4	กลไกแสดงการเกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยงของแมงลักกับโลหะเชื่อมโยง Ca^{2+}	131
รูปที่ ก-1	แผนภูมิแท่งแสดงค่าเปอร์เซ็นต์การบวมน้ำของฟิล์มแป้ง	158
รูปที่ ก-2	แผนภูมิแท่งแสดงค่าเปอร์เซ็นต์การบวมน้ำของฟิล์มแมงลัก	158
รูปที่ ก-3	แผนภูมิแท่งแสดงค่าเปอร์เซ็นต์การบวมน้ำของฟิล์มแป้งผสมแมงลัก ในอัตราส่วนต่างกันที่เติมไอออนโลหะเชื่อมโยง	159
รูปที่ ก-4	แผนภูมิแท่งแสดงค่าเปอร์เซ็นต์การอิ่มตัวในการบวมน้ำของฟิล์มแป้งผสมแมงลักในอัตราส่วนที่ต่างกันที่เติมไอออนโลหะเชื่อมโยง	159
รูปที่ ก-5	แผนภูมิแท่งแสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความสามารถในการเก็บน้ำของฟิล์มแป้งผสมแมงลักในอัตราส่วนต่างกันที่เติมไอออนโลหะเชื่อมโยง	160
รูปที่ ข-1	ความถี่ของการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของหมู่ฟังก์ชันสามัญบางชนิด	164
รูปที่ ข-2	สเปกตรัม IR ของฟิล์มแป้ง	164
รูปที่ ข-3	สเปกตรัม IR ของฟิล์มแป้งที่เชื่อมโยงด้วย KCl	164
รูปที่ ข-4	สเปกตรัม IR ของฟิล์มแป้งที่เชื่อมโยงด้วย $CaCl_2$	165
รูปที่ ข-5	สเปกตรัม IR ของฟิล์มแป้งที่เติมเบส NaOH และเชื่อมโยงด้วย KCl	165
รูปที่ ข-6	สเปกตรัม IR ของฟิล์มแป้งที่เติมเบส NaOH และเชื่อมโยงด้วย $CaCl_2$	165
รูปที่ ข-7	สเปกตรัม IR ของฟิล์มแมงลัก	166
รูปที่ ข-8	สเปกตรัม IR ของฟิล์มแมงลักที่เติมเบส NaOH	166
รูปที่ ข-9	สเปกตรัม IR ของฟิล์มแมงลัก 5g ที่เติมเบส NaOH และเชื่อมโยงด้วย KCl	166

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

เรื่อง		หน้า
รูปที่ ข-10	สเปกตรัม IR ของฟิล์มแมงลัก 5g ที่เติมเบส NaOH และเชื่อมโยงด้วย $CaCl_2$	166
รูปที่ ข-11	สเปกตรัม IR ของฟิล์มแมงลัก 3g ที่เติมเบส NaOH และเชื่อมโยงด้วย KCl	167
รูปที่ ข-12	สเปกตรัม IR ของฟิล์มแมงลัก 3g ที่เติมเบส NaOH และเชื่อมโยงด้วย $CaCl_2$	167
รูปที่ ข-13	สเปกตรัม IR ของฟิล์มแป้งต่อแมงลัก 7:3 g ที่เติมเบส NaOH และเชื่อมโยงด้วย KCl	167
รูปที่ ข-14	สเปกตรัม IR ของฟิล์มแป้งต่อแมงลัก 7:3 g ที่เติมเบส NaOH และเชื่อมโยงด้วย $CaCl_2$	167
รูปที่ ข-15	สเปกตรัม IR ของฟิล์มแป้งต่อแมงลัก 5:5 g ที่เติมเบส NaOH และเชื่อมโยงด้วย KCl	168
รูปที่ ข-16	สเปกตรัม IR ของฟิล์มแป้งต่อแมงลัก 5:5 g ที่เติมเบส NaOH และเชื่อมโยงด้วย $CaCl_2$	168
รูปที่ ง-1	เทอร์โมแกรม TGA ของฟิล์มแป้ง	173
รูปที่ ง-2	เทอร์โมแกรม TGA ของฟิล์มแป้งสภาวะต่างๆ	173
รูปที่ ง-3	เทอร์โมแกรม TGA ของฟิล์มแมงลัก	174
รูปที่ ง-4	เทอร์โมแกรม TGA ของฟิล์มแป้งผสมแมงลักที่อัตราส่วนต่างๆ	175

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงงานวิจัย

ในปัจจุบันปริมาณการใช้พลาสติกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากเป็นวัสดุสังเคราะห์ที่มีสมบัติเด่นมากมายที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย และมีสมบัติที่สามารถผลิตเป็นเครื่องใช้ในชีวิตประจำวันและดัดแปลงให้มีรูปร่างต่างๆตามต้องการได้ง่าย มีน้ำหนักเบา สะดวกในการขนส่ง แต่เนื่องจากพลาสติกที่สังเคราะห์จากสารพอลิเมอร์สังเคราะห์ มีความทนทานต่อสภาพแวดล้อมได้เป็นระยะเวลานานนับร้อยปีและไม่สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ โดยสาเหตุที่ไม่สามารถถูกย่อยสลายได้มี 2 ประการ ดังนี้

1. พลาสติกที่ผลิตจากสารพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงมาก ทำให้มีความทนทานต่อการย่อยสลายโดยเชื้อจุลินทรีย์
2. พลาสติกที่ผลิตจากสารพอลิเมอร์สังเคราะห์มีสมบัติไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) มีลักษณะไม่เป็นรูพรุนและมีพื้นที่ผิวน้อย ส่งผลทำให้เอนไซม์ที่ปลดปล่อยออกมาจากจุลินทรีย์ซึมผ่านตัวกลางที่เป็นน้ำไปสัมผัสกับผิวของพลาสติกน้อยลง จึงเป็นการยากที่จะทำให้พลาสติกย่อยสลายได้

ด้วยสาเหตุดังกล่าวนี้จึงก่อให้เกิดมลพิษทางขยะขึ้น ในปัจจุบันหลายประเทศจึงมีการผลักดันให้มีวิธีการปรับปรุงสมบัติของพลาสติกให้มีคุณภาพดีขึ้นและลดต้นทุนการผลิต โดยมุ่งเน้นไปที่การนำพลาสติกที่ใช้แล้วเข้าสู่กระบวนการผลิตใหม่ (Recycle) และการผลิตพลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพเพื่อลดมลพิษทางขยะ

การพัฒนาพลาสติกย่อยสลายได้ในประเทศไทย โดยมีวัตถุดิบหลักเป็นแป้ง โดยเฉพาะแป้งมันสำปะหลัง เนื่องจากมีสมบัติในการทำให้เกิดฟิล์มได้ดี ซึ่งส่วนสำคัญในการเกิดฟิล์ม เกิดจากโมเลกุลของอะมิโลสและโมเลกุลของอะมิโลเพกตินในแป้ง ทำให้เกิดโครงสร้างของฟิล์มที่ดี เกิดเป็นโครงร่างตาข่ายเชื่อมโมเลกุลแป้งเข้าด้วยกันและต่อเนื่องกัน ทำให้เกิดฟิล์มที่มีความแข็งแรงมากขึ้น ซึ่งโดยส่วนใหญ่จะเน้นทางด้านการใช้ในรูปของแป้งที่เป็นเจลแล้ว เนื่องจากมีราคาถูกและสามารถย่อยสลายได้ง่ายในดิน ทะเล โดยแป้งเป็นสารประเภท polysaccharides ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งที่ได้มาจากธรรมชาติ ทำให้ polysaccharides เป็นพอลิเมอร์ที่นิยมนำมาใช้ประโยชน์ใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้านต่างๆมากขึ้น ซึ่งรวมไปถึงงานด้านเกษตรกรรมด้วย เนื่องจากเป็นพอลิเมอร์ที่หาง่าย ราคาถูก นอกจากนั้นพอลิเมอร์ชนิดนี้ยังมีข้อดีในการช่วยลดปัญหาที่เกิดขึ้นในระบบนิเวศวิทยาอีกด้วย เนื่องจากมีสมบัติพิเศษในการย่อยสลายได้ทางชีวภาพ จึงมีแนวคิดที่จะนำ polysaccharides มาทำเป็นฟิล์มพลาสติกคลุมดิน ซึ่งเมื่อเวลาผ่านไปฟิล์มนั้นจะเกิดการย่อยสลายไปเป็นปุ๋ย เพื่อเพิ่มแร่ธาตุให้กับดิน แต่การใช้ประโยชน์ของแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการเจลาติไนซ์ (ทำให้เป็นวุ้นหรือกาวเคลือบด้วย gelatin) ในพลาสติกย่อยสลายได้มีข้อจำกัด เนื่องจากฟิล์มพลาสติกที่ได้จะมีความกรอบและแข็งเมื่อถูกทำให้แห้ง และมีสมบัติทางเชิงกลของแป้งไม่ดี จึงต้องมีการผสมกับพลาสติก-ไซเซอร์ เช่น กลีเซอรอล พอลิเอทิลีนไกลคอล เป็นต้น หรือผสมแป้งมันสำปะหลังกับสารอื่น เช่น วุ้นแมงลัก เป็นต้น เพื่อให้เกิดความยืดหยุ่นและเพื่อต้องการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของฟิล์มพลาสติก เช่น สมบัติทางความร้อน สมบัติการบวมน้ำ เป็นต้น

แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อเก็บไว้นาน แผ่นฟิล์มที่ได้จะมีความเปราะ ซึ่งอธิบายได้เนื่องจากการสูญเสียน้ำ หรือรวมทั้งการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของแป้ง เนื่องจากการเกิด retrogradation (การเสื่อมสภาพโดยการเปลี่ยนแปลงพันธะไฮโดรเจนหรือการคลายตัวของปริมาตรอิสระ) ด้วยเหตุนี้จึงมีการใช้พลาสติกไซเซอร์หรือตัวประสานในการผสมกับแป้ง ซึ่งมีหลายวัตถุประสงค์ คือ เพื่อให้เกิดการหล่อลื่นในกระบวนการขึ้นรูป เพื่อให้เกิดการเชื่อมโยงระหว่างแป้งกับวุ้นแมงลัก และเพื่อให้เกิดความยืดหยุ่นในโครงสร้างส่วนอสัณฐานของแป้งซึ่งเป็นการลดความเป็นผลึก โดยการใช้พลาสติกไซเซอร์ ประเภท polyhydric alcohol ในการช่วยให้เกิดความยืดหยุ่นกับฟิล์มอะมิโลสและแป้งที่มีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ และมีการใช้กลีเซอรอลในแป้ง polyvinyl alcohol poly(ethylene-co-acrylic acid) ซึ่งช่วยให้ %Elongation เพิ่มขึ้น แต่ให้ Tensile strength ลดลง **[1]** นอกจากนี้ยังมีการใช้ยูเรียเป็นพลาสติกไซเซอร์ในฟิล์มของแป้ง poly(ethylene-co-acrylic acid)-polyethylene ซึ่งทำให้ %Elongation มีค่าเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะเมื่อใช้ร่วมกับกลีเซอรอล **[1]** เช่นเดียวกับพลาสติกไซเซอร์ประเภทกรดอะมิโนที่มีการใช้ในฟิล์มแป้ง ซึ่งส่งผลให้สมบัติทางเชิงกลเพิ่มขึ้น ส่วนพลาสติกไซเซอร์ประเภทซูโครสเอสเตอร์ ก็มีผลทำให้ความหนืดของแป้งผสมลดลงเช่นกัน แต่ข้อเสียของพลาสติกไซเซอร์ คือ อาจทำให้มีกลิ่นตกค้างในผลิตภัณฑ์ได้ **[1]**

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะพัฒนาคุณภาพพลาสติกย่อยสลายได้จากแป้งมันสำปะหลังผสมวุ้นแมงลัก โดยการใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ และโลหะไอออนชนิดต่างๆ คือ KCl , $CaCl_2$ เป็นสารก่อพันธะเชื่อมโยง เพื่อใช้ประโยชน์เป็นวัสดุคลุมดิน ซึ่งเมื่อเวลาผ่านไปฟิล์มนั้นจะเกิดการย่อยสลายไปเป็นปุ๋ย เพื่อเพิ่มแร่ธาตุให้กับดิน ในการทดลองนี้ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฟิล์มพลาสติกที่ได้ในแต่ละสูตร ซึ่งใช้ปริมาณแป้งมันสำปะหลัง วุ้นแมงลัก พลาสติกไซเซอร์ และสารก่อพันธะเชื่อมโยงต่างชนิดกันและปริมาณต่างๆกัน จากนั้นนำแผ่นฟิล์มพลาสติกที่ได้มาทดสอบสมบัติเชิงกลตามมาตรฐาน ASTM D -1822 - L สมบัติการบวมน้ำ วิเคราะห์โครงสร้างทางเคมี และสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA

วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. ศึกษาและหาอัตราส่วนที่เหมาะสม ในการเตรียมฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังผสมวุ้นแมงลัก โดยใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์
2. เปรียบเทียบสมบัติของฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังผสมวุ้นแมงลักที่มี KCl,$CaCl_2$ เป็นสารก่อพันธะเชื่อมโยง และชนิดของโลหะไอออนที่สามารถเกิดพันธะเชื่อมโยงได้ดีที่สุด
3. เพื่อเตรียมฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังผสมวุ้นแมงลัก โดยมีโลหะไอออนเป็นสารก่อพันธะเชื่อมโยง เพื่อใช้เป็นวัสดุคลุมดิน

ขอบเขตของโครงงานวิจัย

1. ศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการเตรียมฟิล์มพลาสติกย่อยสลายได้จากแป้งมันสำปะหลังผสมวุ้นแมงลัก โดยมีโลหะไอออนเป็นสารก่อพันธะเชื่อมโยง ซึ่งมีการใส่กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์
2. ปรับปรุงฟิล์มให้นิ่มขึ้น ขจัดข้อจำกัดของฟิล์มที่ได้จาก polysaccharides ซึ่งเมื่อแห้งแล้วจะแข็ง แตกกรอบ และละลายน้ำได้ง่าย สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานด้านสิ่งแวดล้อมทางการเกษตร และช่วยลดปัญหาขยะพลาสติกต่อไป
3. ศึกษาสมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล วิเคราะห์โครงสร้างทางเคมี และสมบัติทางความร้อนของฟิล์มที่ได้ ตลอดจนทราบถึงชนิดของโลหะไอออนที่สามารถเกิดพันธะเชื่อมโยงได้ดีที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถเตรียมพลาสติกย่อยสลายได้จากแป้งมันสำปะหลังผสมวุ้นแมงลัก โดยมีโลหะไอออนเป็นสารก่อพันธะเชื่อมโยง
2. สามารถหาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการเตรียมพลาสติกย่อยสลายได้ที่เตรียมได้จากแป้งมันสำปะหลังผสมวุ้นแมงลัก โดยการใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์
3. ทราบถึงสมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล หมู่ฟังก์ชัน และสมบัติทางความร้อนของพลาสติกย่อยสลายได้ที่เตรียมจากแป้งมันสำปะหลังผสมวุ้นแมงลัก
4. ทราบชนิดของโลหะไอออนที่สามารถเกิดพันธะเชื่อมโยงได้ดีที่สุด สำหรับฟิล์มแป้งมันสำปะหลังและวุ้นแมงลัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ประวัติของแป้ง [2]

มันสำปะหลังมีถิ่นกำเนิดแถบอเมริกากลางและอเมริกาใต้ มันสำปะหลังได้แพร่กระจายจากแหล่งกำเนิดไปสู่ทวีปแอฟริกาในราวปี ค.ศ.ที่ 15 เรื่อยมาจนถึง ค.ศ.ที่ 18 สำหรับในทวีปเอเชียนั้นพบว่ามีการแพร่กระจายของมันสำปะหลังเข้ามาสู่ประเทศอินเดียในราวต้น ค.ศ.ที่ 18 จากนั้นราวปลาย ค.ศ.ที่ 18 ก็ได้มีการแพร่กระจายเข้าสู่ประเทศฟิลิปปินส์และอินโดนีเซีย แล้วแพร่มายังประเทศมาเลเซียและไทยในที่สุด ทั้งนี้เป็นไปตามการขยายอาณานิคมของชนชาติยุโรป

ในปี พ.ศ. 2548 ประเทศไทยผลิตมันสำปะหลังสดได้ทั้งหมด 16.94 ล้านตัน คิดเป็นร้อยละ 8 ของผลผลิตมันสำปะหลังโลกและจัดเป็นผู้ผลิตหัวมันสำปะหลังสดเป็นอันดับที่ 4 รองจากไนจีเรีย บราซิล และอินโดนีเซีย มันสำปะหลังสดร้อยละ 73.5 ถูกส่งออกในรูปของมันอัดเม็ด มันเส้นและแป้งดิบ และเป็นประเทศผู้ส่งออกผลิตภัณฑ์มันสำปะหลังเป็นอันดับ 1 ของโลก ประมาณ 4.6 ล้านตันหรือคิดเป็นสัดส่วนตลาดร้อยละ 85.5 คิดเป็นมูลค่าการส่งออกมากกกว่า 30,000 ล้านบาท โดยส่งออกให้ประเทศจีนและไต้หวัน เป็นต้น ส่งผลให้มันสำปะหลังเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญชนิดหนึ่งของประเทศไทย มันสำปะหลังส่วนที่เหลืออีกร้อยละ 26.5 นั้นใช้บริโภคภายในประเทศ ซึ่งเกือบทั้งหมดถูกใช้ในรูปของแป้งดิบและนำไปแปรรูปในอุตสาหกรรมต่างๆ ได้แก่ อุตสาหกรรมผงชูรส อุตสาหกรรมไลซีน อุตสาหกรรมสารให้ความหวาน อุตสาหกรรมกระดาษ อุตสาหกรรมทอผ้า เป็นต้น อย่างไรก็ตามความต้องการมันสำปะหลังเพื่อตลาดส่งออกเป็นปัจจัยหลักต่อธุรกิจมันสำปะหลังของไทยในปัจจุบัน

หัวมันสำปะหลังมีชื่อเรียกทางวิทยาศาสตร์ว่า Manihot utilisisma (ในภาษาอังกฤษจะเรียกแป้งมันสำปะหลังว่า Topica starch, Cassava starch) เป็นส่วนของรากที่โตขึ้นสำหรับสะสมแป้ง หัวมันสำปะหลังสดมีน้ำอยู่ประมาณ 60-65 เปอร์เซ็นต์ และส่วนประกอบส่วนใหญ่ คือแป้งหรือคาร์โบไฮเดรตประมาณ 20-35 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นหัวมันสำปะหลังจึงเป็นแหล่งคาร์โบไฮเดรตที่ให้พลังงานในอาหารของคนและสัตว์ แต่มีปริมาณโปรตีนและไขมันน้อยมาก ไม่เหมาะที่จะใช้เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

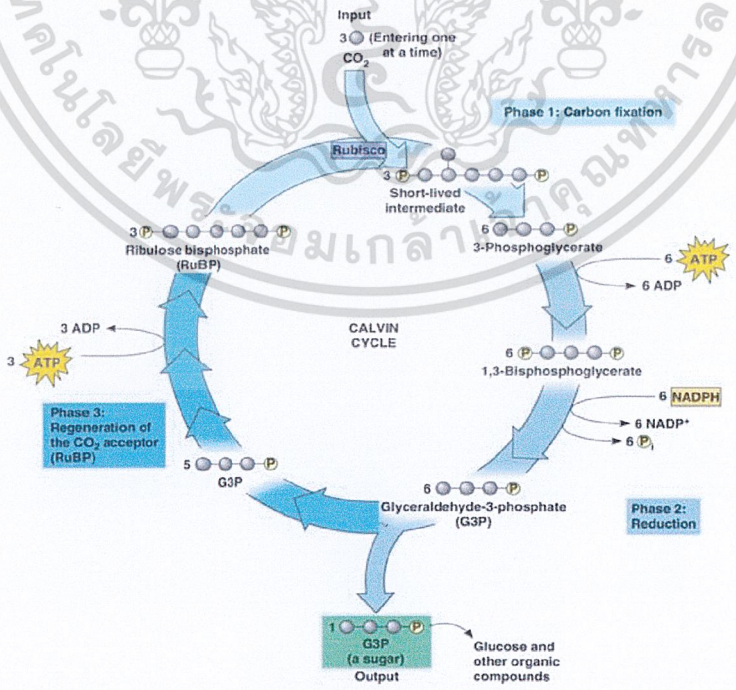
แหล่งของโปรตีนและไขมัน การนำหัวมันสำปะหลังไปใช้มักจะทำให้แห้ง เพื่อลดความชื้นลง เสียก่อน เช่น มันเส้น มันอัดเม็ดหรือสกัดเฉพาะส่วนของแป้งออกจากหัวมันสำปะหลัง

2.2 การสังเคราะห์แป้ง [3,10-17]

การสังเคราะห์แป้งเกิดขึ้นในส่วนของพืชที่มีสีเขียว ซึ่งมีคลอโรฟิลล์ในการจับพลังงานจากแสงอาทิตย์ ใช้คาร์บอนไดออกไซด์จากบรรยากาศและน้ำในการสร้างกลูโคสและออกซิเจน กระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง (photosynthesis) สามารถแสดงปฏิกิริยาได้ดังนี้

$$6CO_2 + 12H_2O \xrightarrow[\text{chlorophyll}]{\text{light}} C_6H_{12}O_6 + 6O_2 + 6H_2O$$

ในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง พืชสามารถตรึงคาร์บอนไดออกไซด์และสร้างกรดฟอสฟอกลีเซอริก (phosphoglyceric acid, PGA) ซึ่งเป็นสารอินทรีย์ที่มีคาร์บอน 3 อะตอม กรดฟอสฟอกลีเซอริกจะผ่านวัฏจักรเคลวิน (calvin cycle) ได้เป็นน้ำตาลคาร์บอน 6 อะตอม (hexose) เมื่อผ่านกระบวนการสังเคราะห์แสง จะมีการสร้างพอลิเมอร์ของกลูโคสขึ้นมาจากการทำงานของเอนไซม์ พอลิเมอร์ของกลูโคสนี้เรียกในขั้นต้นว่า “แป้ง” แสดงปฏิกิริยาการสังเคราะห์อย่างง่ายๆ ดังนี้



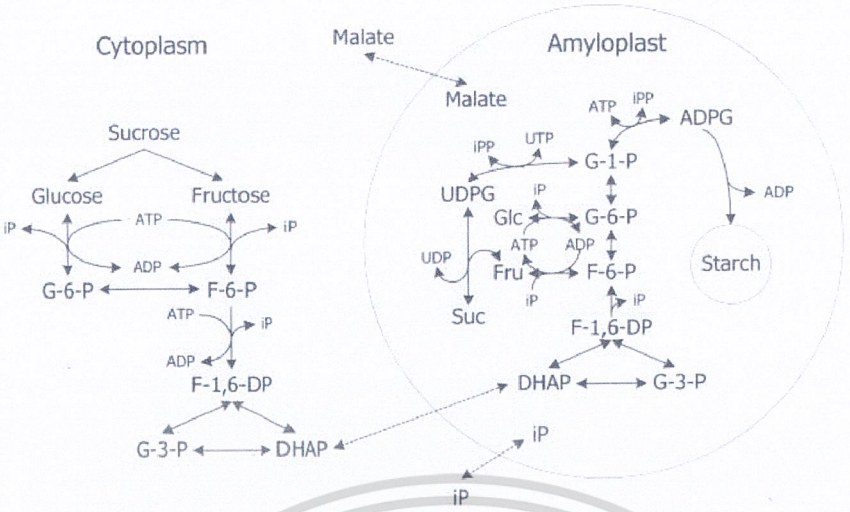
รูปที่ 2.1 *วัฏจักรเคลวิน* **[3]**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระหว่างการสังเคราะห์ด้วยแสงในเวลากลางวัน แป้งจะถูกเก็บไว้ที่ใบในรูปของเม็ดแป้งขนาด 1 ไมครอน ในช่วงเวลากลางคืนแป้งจะถูกย่อยโดยเอนไซม์ได้เป็นน้ำตาลซูโครส และถูกส่งไปเก็บสะสมในรูปของแป้งที่ส่วนต่างๆของพืช เช่น เก็บไว้ในเมล็ด (ข้าวสาลี ข้าวโพด ข้าวเจ้า ข้าวฟ่าง) เก็บไว้ในราก (มันสำปะหลัง) เก็บไว้ในส่วนหัว (มันฝรั่ง มันเทศ ท้าวยายม่อม) เก็บไว้ในลำต้น (สาคู สัปปะรด) เป็นต้น

กลไกการสังเคราะห์คาร์โบไฮเดรตภายในเอนโดสเปิร์ม เริ่มจากการเปลี่ยนน้ำตาลคาร์บอน 6 อะตอม (hexose)ไปเป็นไดไฮดรอกซีอะซีโตนฟอสเฟต (dihydroxyacetone phosphate, DHAP) โดยวิธีไกลโคไลซิส (glycolysis pathway) ภายในไซโตพลาสซึม หลังจากนั้นไดไฮดรอกซีแอซิโตนฟอสเฟตจะเคลื่อนที่ผ่าน phosphate translocaor เข้าไปยังอะมิโลพลาสต์ (amyloplast) และเกิดการสังเคราะห์แป้งขึ้น(gluconeogennesis และ starch synthesis) กระบวนการสังเคราะห์แป้งได้รับการควบคุมโดยอะดีโนซีนไดฟอสฟอกลูโคส (adenosine diphosphoglucose, ADPG) ซึ่งผลิตจากการทำงานของเอนไซม์อะดีโนซีนไดฟอสฟอกลูโคส ไพโรฟอสฟอรีเลส (ADPG pyrophosphorylase) ในระหว่างการตรึงคาร์บอน (carbon-fixation) จะมีการสร้างกรดฟอสฟอกลีเซอริกในคลอโรพลาสต์เพิ่มขึ้น ทำให้เกิดการกระตุ้นการสร้างอะดีโนซีนไดฟอสฟอกลูโคส การสังเคราะห์แป้งจึงเพิ่มมากขึ้น สำหรับในเวลากลางคืนไม่มีการสร้างกรดฟอสฟอกลีเซอริก จึงทำให้ระดับอะดีโนซีนไดฟอสฟอกลูโคสลดลง การสังเคราะห์แป้งจึงหยุดลง นอกจากนี้ในเวลากลางคืนจะมีการสร้างฟอสเฟตอนินทรีย์ (inorganic phosphate, iP) ในคลอโรพลาสต์เพิ่มขึ้น 30-50% และมีระดับความเป็นกรด-เบสของสโทรมา (stroma) ในคลอโรพลาสต์ลดลง เป็นผลให้เกิดการกระตุ้นการทำงานของเอนไซม์ย่อยแป้งเกิดเป็นน้ำตาลซูโครสขนย้ายไปยังส่วนต่างๆได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 กลไกของคาร์โบไฮเดรตและการสังเคราะห์แป้งระหว่าง
ไซโตพลาสซึมและอะมิโลพลาสต์ภายในเอนโดสเปิร์มของข้าวโพด **[3]**

การสังเคราะห์แป้งโดยเอนไซม์มี 4 ขั้นตอน คือ ขั้นเริ่มต้น (initiation) ขั้นต่อสายยาว (chain elongation) ขั้นต่อกิ่งก้าน (branching) และขั้นการสร้างเม็ดแป้ง (granule formation) การสังเคราะห์แป้งในขั้นเริ่มต้นเป็นการสร้างอะดีโนซีนไดฟอสฟอกลูโคส โดยเอนไซม์อะดีโนซีนไดฟอสฟอกลูโคสไพโรฟอสฟอรีเลส ในขั้นต่อสายยาวเอนไซม์สตาร์ชซินเทส (starch synthase) ทำหน้าที่เชื่อมหน่วยกลูโคสเข้ากับปลายที่ไม่มีหมู่รีดิวซิง (non-reducing end) ของอะมิโลสหรืออะมิโลเพกทิน

เมื่อโครงสร้างอะมิโลสมีสายยาวพอสมควร เอนไซม์ที่สร้างพันธะกิ่ง (branching enzyme) จะตัดพันธะ α -1,4 และสร้างพันธะ α-1,6 เกิดเป็นกิ่งก้านของอะมิโลเพกทินในขั้นตอนต่อกิ่งก้าน ช่วงที่เกิดการต่อสายยาว จะเกิดการเรียงตัวของโมเลกุลเป็นโครงสร้างที่เป็นระเบียบและผลึก (crystallization) ควบคู่กันด้วย และเกิดเป็นโมเลกุลเม็ดแป้งที่สมบูรณ์ในขั้นการสร้างเม็ดแป้ง โดยใช้เอนไซม์สตาร์ชซินเทสและเอนไซม์ที่สร้างพันธะกิ่ง

สตาร์ชซินเทส (starch synthase) ในอะมิโลพลาสต์แบ่งเป็น 2 ชนิด คือชนิดที่ติดอยู่กับเม็ดแป้ง (granule-bound starch synthase, GBSS) และชนิดที่ละลาย (soluble starch synthase, SSS) เอนไซม์ทั้ง 2 ชนิดใช้อะดีโนซีนไดฟอสฟอกลูโคสเป็นสารตั้งต้น ทำหน้าที่เชื่อมหน่วยกลูโคสกับสายอะมิโลสและอะมิโลเพกทิน โดยสตาร์ชซินเทสที่ติดอยู่กับเม็ดแป้ง (GBSS) สามารถสังเคราะห์ได้เฉพาะอะมิโลส แต่สำหรับสตาร์ชซินเทสชนิดละลาย (SSS) สามารถสังเคราะห์ได้ทั้งอะมิโลส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และอะมิโลพกทิน ดังนั้นสตาร์ชซินเทสชนิดต่างกันมีผลต่อการสังเคราะห์แป้งที่มีอัตราส่วนของอะมิโลสต่ออะมิโลเพกทินต่างกัน เช่น แป้งข้าวเหนียว (waxy starch) ที่ไม่มีเอนไซม์สตาร์ชซินเทสที่ติดอยู่กับเม็ดแป้งจะมีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นอะมิโลเพกทิน

2.3 องค์ประกอบภายในแป้ง

แป้งเป็นคาร์โบไฮเดรตที่ประกอบด้วยคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจนในอัตราส่วน 6:10:5 มีสูตรเคมีโดยทั่วไป คือ $(C_6H_{10}O_5)_n$ แป้งเป็นพอลิเมอร์ของกลูโคส ซึ่งประกอบด้วยหน่วยของน้ำตาลกลูโคสมาเชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิก (glucosidic linkage) ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 1 ทางด้านตอนปลายของสายพอลิเมอร์ซึ่งมีหน่วยกลูโคสที่มีหมู่แอลดีไฮด์ (aldehyde group) เรียกว่า "ปลายรีดิวซิง" (reducing end group) แป้งประกอบด้วยพอลิเมอร์ของกลูโคส 2 ชนิด คือ พอลิเมอร์เชิงเส้น (อะมิโลส) และพอลิเมอร์เชิงกิ่ง (อะมิโลเพกทิน) วางตัวในแนวรัศมีแสดงระดับโครงสร้างของเม็ดแป้ง แป้งจากแหล่งที่ต่างกันจะมีอัตราส่วนของอะมิโลสและอะมิโลเพกทินแตกต่างกัน ทำให้คุณสมบัติของแป้งแต่ละชนิดแตกต่างกัน

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบทางเคมีของแป้งมันสำปะหลัง [4]

องค์ประกอบ	ปริมาณ (ร้อยละ)
ความชื้น	12.59
แป้ง	87.00
ไขมัน	0.10
โปรตีน	0.10
เถ้า	0.20
ฟอสฟอรัส	0.01

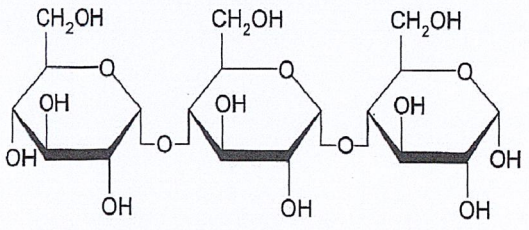
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 สมบัติของแป้งข้าวโพดเปรียบเทียบกับแป้งมันสำปะหลัง [4]

สมบัติ	แป้งข้าวโพด	แป้งมันสำปะหลัง
ขนาด (μm)	3-26	4-35
เฉลี่ย	15	20
ไขมัน (%w/w)	0.60	0.10
โปรตีน(%w/w)	0.35	0.10
อะมิโลส %	28	17
Degree of polymerisation	-	-
อะมิโลส	8000	300
อะมิโลเพกทิน x 10^6	2	2
Pesting temp ($^\circ$C)	75-80	65-70
Peak viscosity	600	1000
Swelling power ที่ 95° C	24	71
Paste viscosity	ปานกลาง	สูง
Paste and film clarity	ทึบแสง	ใส
Retrogradration rate	สูง	ต่ำ

2.3.1 อะมิโลส

อะมิโลสเป็นพอลิเมอร์เชิงเส้นที่ประกอบด้วยกลูโคสประมาณ 2,000 หน่วย เชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิก (glucosidic linkage) ชนิดแอลฟา-1,4 (α-1,4) ดังภาพ



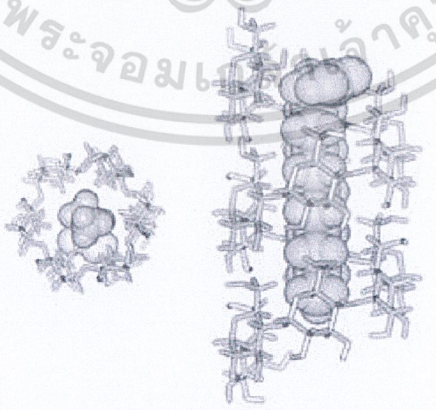
รูปที่ 2.3 *โครงสร้างของอะมิโลส* **[3]**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แป้งจากธัญพืช เช่น แป้งข้าวโพด แป้งสาลี แป้งข้าวฟ่าง มีปริมาณอะมิโลสสูงประมาณ 28% แป้งจากรากและหัว เช่น แป้งมันสำปะหลัง แป้งมันฝรั่ง แป้งสาคูมีปริมาณอะมิโลสต่ำประมาณ 20% แป้งข้าวเหนียว (waxy starch) ไม่มีอะมิโลสเลย และแป้งข้าวโพดอะมิโลเมส (amylomaize) มีอะมิโลสสูงมากถึง 80% น้ำหนักโมเลกุลของอะมิโลสอยู่ในช่วง 10^5 ถึง 10^6 ดาลตัน ซึ่งอะมิโลสในแป้งแต่ละชนิดจะมีน้ำหนักโมเลกุลที่แตกต่างกันไป ในแป้งมันฝรั่งและแป้งมันสำปะหลังมีน้ำหนักโมเลกุลสูงกว่าในแป้งข้าวโพดและแป้งสาลี แป้งแต่ละชนิดมีขนาดโมเลกุลหรือระดับขั้นการเกิดพอลิเมอร์ (Degree of polymerization, DP) ของอะมิโลสแตกต่างกัน แป้งมันฝรั่งและแป้งมันสำปะหลังมีขนาดโมเลกุลของอะมิโลสอยู่ในช่วง 1,000 ถึง 6,000 ซึ่งสูงกว่าแป้งข้าวโพดและแป้งสาลีซึ่งมีขนาดโมเลกุลของอะมิโลสในช่วง 200 ถึง 1,200 แป้งที่มีโมเลกุลของอะมิโลสยาวขึ้นจะมีแนวโน้มในการเกิดรีโทรเกรเดชัน (retrogradation) ลดลง ในธรรมชาติอะมิโลสมีกิ่งก้านอยู่บ้างแต่ไม่มาก

อะมิโลสสามารถรวมตัวเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับไอโอดีน และสารประกอบอินทรีย์อื่นๆ เช่น บิวทานอล กรดไขมัน สารลดแรงตึงผิว ฟีนอล และไฮโดรคาร์บอน สารประกอบเชิงซ้อนเหล่านี้จะไม่ละลายในน้ำ โดยอะมิโลสจะพันเป็นเกลียวล้อมรอบสารประกอบอินทรีย์

นอกจากนี้อะมิโลสที่รวมตัวกับไอโอดีนจะให้สีน้ำเงิน ซึ่งใช้เป็นลักษณะเฉพาะที่บ่งบอกถึงแป้งที่มีองค์ประกอบของอะมิโลส



รูปที่ 2.4 ภาพจำลองการจัดตัวของอะมิโลสกับสารอินทรีย์ **[3]**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตำแหน่งของอะมิโลสภายในเม็ดแป้งขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ของแป้ง อะมิโลสบางส่วนอยู่ในกลุ่มของอะมิโลเพกทิน บางส่วนกระจายอยู่ทั้งในส่วนอสัณฐาน (amorphous) และส่วนผลึก (crystalline)

ตารางที่ 2.3 สมบัติทางโครงสร้างของอะมิโลส [3]

แหล่งแป้ง	ปริมาณอะมิโลส (%)	β-Amylolysis Limit (%)	ขนาดโมเลกุล (DP) เฉลี่ย	จำนวนสายเฉลี่ย (NC)	ความยาวสายเฉลี่ย (CL)	โมเลกุลกิ่ง (%)
แป้งสาลี	28	88	1300	4.8	270	27
แป้งข้าวโพด	28	82	930	2.7	340	44
แป้งข้าวเจ้า	17	-	-	-	-	-
อินดิคา (Indica)		73	1000	4.0	250	49
จาโปนิค (Japonical)		81	1100	3.4	320	31
แป้งมันสำปะหลัง	17	75	2600	7.6	340	42
แป้งมันฝรั่ง	21	80	4900	9.5	240	-

ในแป้งสาลีพบอะมิโลสอยู่ในส่วนอสัณฐาน ในแป้งมันฝรั่งพบอะมิโลสอยู่ร่วมกับอะมิโล-เพกทินในส่วนผลึก การศึกษาการเกิดเจลาติไนซ์ของแป้งมันฝรั่งพบอะมิโลสในส่วนรอบนอกของเม็ดแป้งมากกว่าที่จะอยู่ในส่วนใจกลางเม็ดแป้ง อะมิโลสที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่จะพบเป็นเกลียวคู่กับอะมิโลเพกทินอยู่ใจกลางเม็ดแป้ง สำหรับอะมิโลสขนาดโมเลกุลเล็กจะพบอยู่ตามขอบเม็ดแป้ง จากการศึกษาครอสลิงของอะมิโลสและอะมิโลเพกทินจากแป้งข้าวโพดและแป้งมันฝรั่ง พบว่าอะมิโลสกระจายอยู่ทั่วไปในส่วนของอะมิโลเพกทินมากกว่าที่จะรวมกันเป็นกลุ่ม

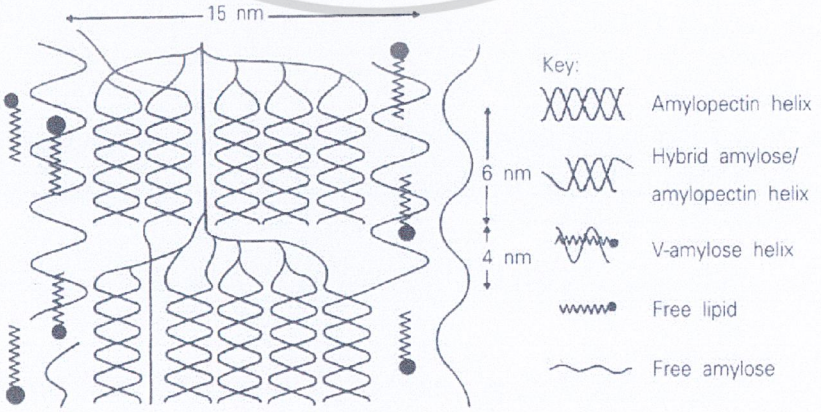
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างของอะมิโลส เมื่ออยู่ในสารละลายจะมีหลายรูปแบบ คือ ลักษณะที่เป็นเกลียวม้วน (helix) เกลียวที่คลายตัว (interrupted helix) หรือม้วนอย่างไม่เจาะจง (random coil) ในสารละลายที่อุณหภูมิห้อง อะมิโลสอยู่ในลักษณะเป็นเกลียวม้วนหรือเกลียวที่คลายตัว แต่ในตัวทำละลายบางชนิดอะมิโลสจะอยู่ในลักษณะม้วนอย่างไม่เจาะจง นอกจากนี้โครงสร้างของอะมิโลสยังขึ้นอยู่กับขนาดของโมเลกุลด้วย อะมิโลสที่มีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วง 6,500 ถึง 160,000 จะอยู่ในลักษณะเกลียวคู่ที่แข็ง (double helixs) ส่วนอะมิโลสที่มีน้ำหนักโมเลกุลน้อยกว่า 6,500 หรือมากกว่า 160,000 จะมีโมเลกุลเป็นม้วนอย่างไม่เจาะจง และอาจมีบางส่วนละลายได้



รูปที่ 2.5 ลักษณะเกลียวของอะมิโลส [3]

แบบจำลองของโครงสร้างอะมิโลสที่อยู่ร่วมกับอะมิโลเพกทิน และไขมัน (monoacyl lipid) ในส่วนผลึกของเม็ดแป้ง อะมิโลสภายในเม็ดแป้ง มีทั้งอยู่ในสภาพอิสระ สภาพที่อยู่ร่วมกับไขมัน และอยู่ร่วมกับอะมิโลเพกทินเป็นเกลียวคู่ (double helix)



รูปที่ 2.6 แบบจำลองโครงสร้างอะมิโลสที่อยู่ร่วมกับอะมิโลเพกทินและไขมัน [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.4 ปริมาณของอะมิโลสในแป้งชนิดต่างๆ [5]

แป้ง	ปริมาณอะมิโลส (% น.น. แห้ง) Apparent	ปริมาณอะมิโลส (% น.น. แห้ง) Absolute
ข้าวสาลี	28.8	25.8
ข้าวโพด	29.4	22.5
ข้าวเจ้า	25.0	20.5
ข้าวบาร์เลย์	25.5	23.6
มันฝรั่ง	36.0	16.9
มันสำปะหลัง	23.5	17.8
พุทธรักษา	43.2	22.7
ถั่วเขียว	37.9	30.7

ตารางที่ 2.5 สมบัติของอะมิโลสจากแป้งชนิดต่างๆ [5]

Property	Chestnut	Kuzu	Lily	Maize	Nagaimo yam
Iodine binding capacity (g 100 g^{-1})	19.9	20.0	20.0	20.0	19.9
[h] at 22.5 ^{O}C in M KOH (mg l^{-1})	242	228	312	169	-
***beta*-amylolysis limit (%)**	86	76	89	84	86
DP_w (range)	440-14900	480-12300	360-18900	390-13100	800-20000
DP_w (mean)	4020	3220	5010	2550	6300
DP_a (mean)	1690	1540	2310	960	2000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.5(ต่อ) สมบัติของอะมิโลสจากแป้งชนิดต่างๆ

Property	Chestnut	Kuzu	Lily	Maize	Nagaimo yam
DP_w/DP_a	2.38	2.09	2.17	2.66	3.15
CL	375	320	475	305	525
Chain number	4.6	4.8	4.9	3.1	3.8
Unbranched amylase (mol %)	66	47	61	52	71
P (mg g^{-1})	10	10	Trace	-	2

ตารางที่ 2.6 สมบัติของอะมิโลสจากแป้งชนิดต่างๆ (ต่อ) [5]

Property	Potato	Rice	Sweet potato	Tapioca	Water chestnut	Wheat
Iodine binding capacity (g 100 g^{-1})	20.5	20.0-21.1	20.2	20.0	20.2	19.9
beta-amylolysis limit (%)	80	73-84	73	75	95	82
DP_w (range)	840-21800	210-12900	840-19100	580-22400	160-8090	
DP_w/DP_a	1.29	2.64-3.39	1.31	2.51	5.76	
CL	670	***	***	340	420	270
Chain number	7.3	2.5-4.3	11	7.8	1.9	4.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อะมิโลสสามารถรวมตัวเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับไอโอดีนและสารประกอบอินทรีย์อื่นๆ เช่น butanol, fatty acid, surfactant, phenol และ hydrocarbon สารประกอบเชิงซ้อนเหล่านี้ จะไม่ละลายในน้ำ โดยอะมิโลสจะพันเป็นเกลียวล้อมรอบสารประกอบอินทรีย์ อะมิโลสที่มีความยาวสายโซ่มากกว่า 45 หน่วยกลูโคสเมื่อรวมตัวกับไอโอดีนจะให้สีน้ำเงินม่วง ซึ่งใช้เป็นลักษณะเฉพาะที่บ่งบอกถึงแป้งที่มีอะมิโลสเป็นองค์ประกอบ และใช้ในการตรวจสอบปริมาณอะมิโลสในแป้ง

ตารางที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวของอะมิโลสและสีของสารประกอบเชิงซ้อนของอะมิโลสกับไอโอดีน [5]

Chain length (glucose unit)	Number of helix turns	color
12	2	None
12-15>	2	Brown
20-30	3-5	Red
35-40	6-7	Purple
>45	9	Blue

การตรวจสอบปริมาณอะมิโลส โดยการทำให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับไอโอดีนและวัดสีที่เกิดขึ้น เป็นวิธีการที่ง่ายและนิยมใช้กันมาก แต่อาจมีข้อผิดพลาดได้จากความไม่อยู่ตัวของสีที่เกิดขึ้น การรบกวน ผลการวัดจากอะมิโลเพกทิน โดยเฉพาะอะมิโลเพกทินที่มีความยาวสายโซ่กิ่งมากๆ ซึ่งจะเกิดสารเชิงซ้อนกับไอโอดีนได้เช่นเดียวกัน ทำให้วิเคราะห์ปริมาณอะมิโลสได้มากเกินจริง นอกจากนี้ไขมันที่เกิดสารเชิงซ้อนกับอะมิโลสอยู่เดิม จะทำให้อะมิโลสโมเลกุลนั้นจับกับไอโอดีน ไม่ได้ทำให้ค่าที่วิเคราะห์ได้ต่ำกว่าความเป็นจริง ในกรณีนี้ต้องทำการสกัดไขมันออกก่อนการวิเคราะห์ปริมาณอะมิโลสอาจใช้วิธีการวัดเอนทรัลปีในการหลอมเหลวของstarch-lipid complex แต่ประสิทธิภาพของวิธีการนี้จะขึ้นกับความสามารถในการละลายของอะมิโลสในตัวอย่างแป้งแต่ละชนิด วิธีการที่มีความแม่นยำมากกว่า คือการใช้ gel permeation chromatography (GPC) แต่วิธีการนี้ไม่เหมาะกับตัวอย่างที่มีจำนวนมาก นอกจากนี้ก็มีการใช้ high pressure size exclusion

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

chromatography ซึ่งจะเร็วกว่าการใช้ GPC อีกหนึ่งวิธีการ คือการใช้ concanavalin A มาตกตะกอนอะมิโลเพกทินออกไปและวิเคราะห์ปริมาณอะมิโลสที่เหลืออยู่

2.3.2 อะมิโลเพกทิน [3,18-25]

อะมิโลเพกทินเป็นพอลิเมอร์เชิงกิ่งของกลูโคส ส่วนที่เป็นเส้นตรงของกลูโคสเชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิกชนิด α-1,4 และส่วนที่เป็นกิ่งสาขาที่เป็นพอลิเมอร์กลูโคสสายสั้นมีขนาดโมเลกุล (DP) อยู่ในช่วง 10 ถึง 60 หน่วย เชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิกชนิด α-1,6

หน่วยกลูโคสที่มีพันธะกลูโคซิดิกชนิด α-1,6 มีอยู่ประมาณ 5% ของปริมาณหน่วยกลูโคสในอะมิโลเพกทินทั้งหมด ขนาดโมเลกุลของอะมิโลเพกทินในแป้งแต่ละชนิดจะมีค่าประมาณ 2 ล้านหน่วย อะมิโลเพกทินมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 1,000 เท่าของอะมิโลส คือ ประมาณ 10^7 ถึง 10^9 ดาลตัน และมีอัตราในการคืนตัวต่ำ เนื่องจากอะมิโลเพกทินมีลักษณะโครงสร้างเป็นกิ่ง

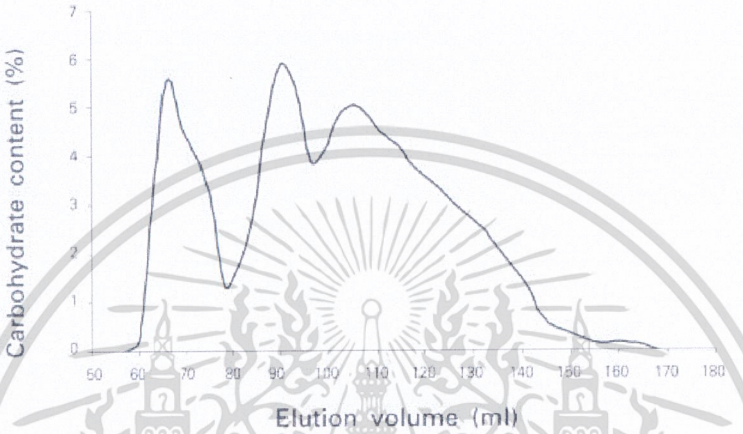
ลักษณะโครงสร้างแบบกิ่งของอะมิโลเพกทินประกอบด้วยสายโซ่ (chain) 3 ชนิด คือ

1) สาย A **(A-chain)** เชื่อมต่อกับสายอื่นที่ตำแหน่งเดียว ไม่มีกิ่งเชื่อมต่อออกจากสายชนิดนี้ (unbranched structure)
2) สาย B **(B-chain)** มีโครงสร้างแบบกิ่งเชื่อมต่อกับสายอื่นๆ 2 สายหรือมากกว่า โครงสร้างอะมิโลเพกทินประกอบด้วยสาย A และสาย B ในอัตราส่วน 0.8-0.9:1
3) สาย C **(C-chain)** เป็นสายแกนซึ่งประกอบด้วยหมู่รีดิวซิง 1 หมู่ ในอะมิโลเพกทินแต่ละโมเลกุลประกอยด้วยสาย C หนึ่งสายเท่านั้น

เมื่อนำอะมิโลสและอะมิโลเพกทินมาย่อยด้วยเอนไซม์ที่ย่อยพันธะกิ่ง (debranching enzyme) เช่นไอโซอะมิเลส (isoamylase) และพูลูลาเนส (pullulanase) เป็นต้น และนำไปแยกโดยใช้เทคนิคโครมาโทกราฟีชนิดแบบการจำเพาะขนาด (size exclusion chromatography) พบว่า โครงสร้างของแป้งจะประกอบด้วยโมเลกุลที่มีขนาดต่างๆกัน 3 กลุ่มตามความสามารถในการเกิดปฏิกิริยากับไอโอดีน (ค่าความยาวคลื่นสูงสุด, λ และค่าความเข้มของสีน้ำเงิน, Blue Value) ได้แก่ส่วนที่ 1 (Fraction I) ส่วนที่ 2 (Fraction II) และส่วนที่ 3 (Fraction III) โดยส่วนที่ 1 จะประกอบด้วยอะมิโลส ในขณะที่ส่วนที่ 2 และ 3 เป็นส่วนของอะมิโลเพกทินที่มีขนาดความยาวสายต่างกัน

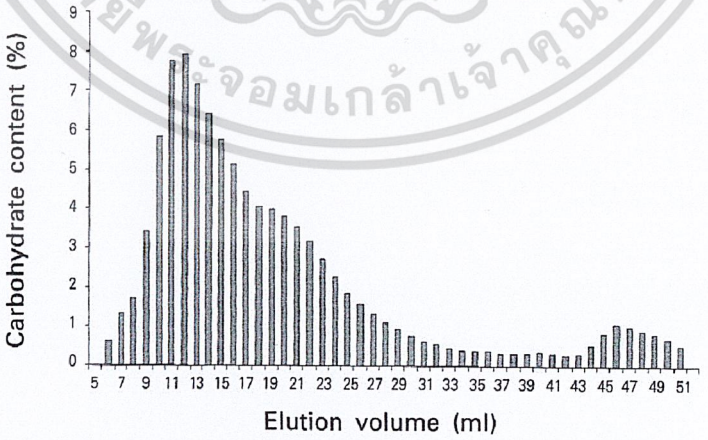
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
117181

ส่วนที่ 2 ประกอบด้วยสาย B ที่มีขนาดยาว (long B chain) ซึ่งมีขนาดโมเลกุลประมาณ 45 หน่วย และส่วนที่ 3 ประกอบด้วยสาย B ที่มีขนาดสั้น และสาย A (Short B และ A chains) ซึ่งมีขนาดโมเลกุลประมาณ 15 หน่วย เมื่อทำการวิเคราะห์โครงสร้างละเอียดของอะมิโลเพกทิน โดยการย่อยอะมิโลเพกทินด้วยเอนไซม์ที่ย่อยพันธะกิ่งและวิเคราะห์ด้วยเทคนิคโครมาโทกราฟีแบบการแลกเปลี่ยนประจุแอนไอออน (Anion-Exchange Chromatography)



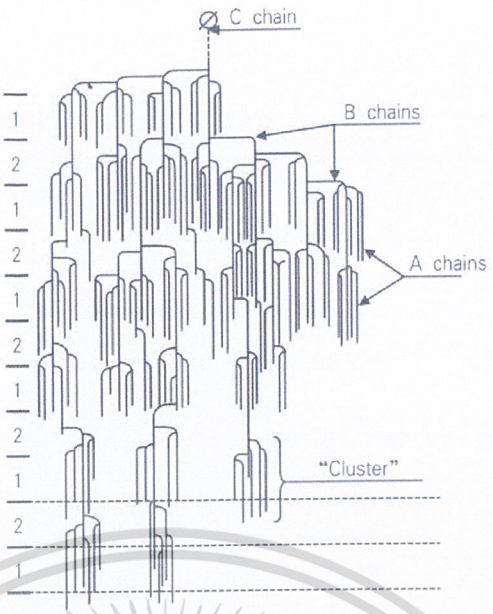
รูปที่ 2.7 กราฟแสดงองค์ประกอบของแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการย่อยด้วยเอนไซม์ไอโซอะมิเลสและทำการแยกสารด้วยโครมาโทกราฟีแบบการจำเพาะขนาดด้วยคอลัมน์โทโยเพิร์ล **[3]**

พบว่าขนาดของสายโซ่ในโครงสร้างอะมิโลเพกทินจะมีตั้งแต่ขนาดโมเลกุลเล็ก (DP = 6) จนถึงขนาดโมเลกุลใหญ่ (DP= 50-60)



รูปที่ 2.8 กราฟแสดงการกระจายตัวของสายโซ่แป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการย่อยด้วยเอนไซม์ไอโซอะมิเลสและทำการแยกด้วยโครมาโทกราฟีแบบการแลกเปลี่ยนประจุ **[3]**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 ภาพแสดงลักษณะโครงสร้างอะมิโลเพกทินที่ประกอบด้วยส่วนที่เป็นผลึก และส่วนที่เป็นอสัณฐาน 1 = ส่วนผลึก, 2 = ส่วนอสัณฐาน **[3]**

จากรูปที่ 2.9 แสดงแบบจำลองลักษณะโครงสร้างของอะมิโลเพกทิน ซึ่งมีอัตราส่วนของสาย A และสาย B เท่ากับ 0.8-0.9:1 และมีการเปลี่ยนแปลงในระหว่างการย่อย (amylolysis) ของอะมิโล-เพกทิน จากโครงสร้างของอะมิโลเพกทิน ลักษณะสาย A และสาย B1 จะประกอบเป็นกลุ่มเดี่ยว สำหรับสาย B2 และสาย B3 มีความยาวของสายแผ่ออกไป ทำให้เกิดเป็นกลุ่มสาย 2 และ 3 กลุ่ม ตามลำดับ โดยสาย A B1 และ B2 จะมีขนาดโมเลกุลอยู่ในช่วง 6-12,13-24 และ 25-45 ตามลำดับ

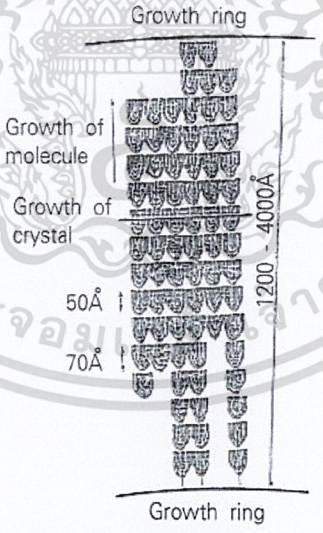
ขนาดโมเลกุลของอะมิโลเพกทินที่มีตั้งแต่ขนาดเล็ก จนถึงโมเลกุลขนาดใหญ่เหล่านี้จะอยู่รวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อน (cluster) ศึกษาโครงสร้างอย่างละเอียดของอะมิโลเพกทิน โดยใช้เอนไซม์ที่ย่อยพันธะกิ่ง (debranching enzyme) และเบต้าอะมิเลส (β-amylase) ย่อยอะมิโลเพกทินจากมันฝรั่ง โครงสร้างของอะมิโลเพกทิน ส่วนที่หนึ่งแสดงถึงส่วนผลึก (crystallite region) ส่วนที่สองที่เป็นส่วนที่มีโครงสร้างเป็นกิ่งเชื่อมแสดงถึงส่วนอสัณฐาน (amorphous region)

สำหรับอะมิโลเพกทินของแป้งข้าวเจ้า ข้าวเหนียว มันสำปะลัง และมันฝรั่ง สายส่วนใหญ่ประมาณ 80-90% ประกอบด้วยกลุ่มเดี่ยว ๆ และสายที่เหลืออีก 10-20% จะเป็นส่วนเชื่อมต่อของแต่ละกลุ่ม ในแต่ละกลุ่มประกอบไปด้วยสายประมาณ 22-25 สาย ทำให้เกิดเป็นส่วนผลึกของเม็ดแป้ง ในการจับกันเป็นกลุ่มของอะมิโลเพกทิน ทำให้เกิดเป็นเกลียวคู่ (double helix) ซึ่งช่วยให้เม็ดแป้งมีความคงทนต่อการทำปฏิกิริยาด้วยกรดและเอนไซม์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเกิดเกลียวคู่ของอะมิโลเพกทินต้องใช้พันธะไฮโดรเจนและแรงวันเดอร์วาลส์ในการเชื่อมต่อกัน กิ่งอะมิโลเพกทินภายในเม็ดแป้งสามารถเกิดเป็นผลึกได้ ทั้งกิ่งที่อยู่ใกล้กันในกลุ่ม (cluster) เดียวกัน หรือเกิดขึ้นระหว่างกลุ่มที่ใกล้เคียงกัน

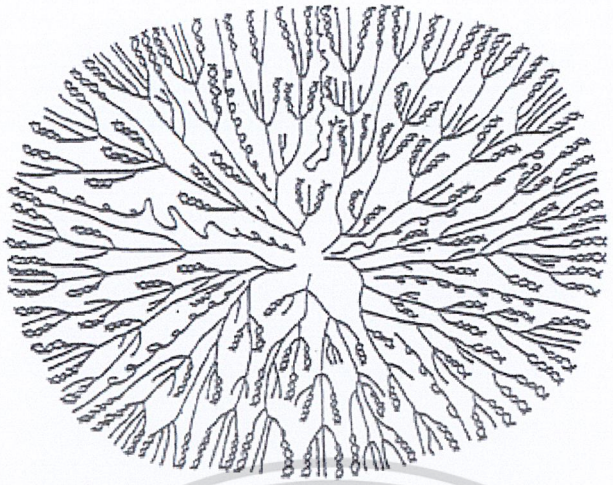
ภายในเม็ดแป้งประกอบด้วยวงแหวน (growth ring) หนาแน่น ซึ่งสังเกตได้จากการส่องกล้องจุลทรรศน์ชนิดอิเล็กตรอน (Scanning Electron Microscopy, SEM) ลักษณะเม็ดแป้งที่เปียกและสดจะสังเกตเห็นวงแหวนได้ง่าย เม็ดแป้งขนาดใหญ่ เช่น แป้งมันฝรั่ง แป้งต้นพุทธรักษา (Canna) ที่ผ่านการแช่น้ำ จะสังเกตเห็นวงแหวนได้ชัดเจน ในแป้งที่แห้งจะไม่พบวงแหวน สำหรับเม็ดแป้งขนาดเล็ก เช่น แป้งข้าวบาร์เลย์และแป้งข้าวเจ้าจะสังเกตได้ยากจากการส่องกล้องจุลทรรศน์ แต่สามารถสังเกตเห็นได้เมื่อนำแป้งผ่านปฏิกิริยาเคมีหรือเอนไซม์ และศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์ชนิดอิเล็กตรอน จากโครงสร้างของวงแหวน แสดงให้เห็นถึงลักษณะการเจริญของเม็ดแป้ง โดยเนื้อเยื่อชั้นแรกเจริญมาจากศูนย์กลางของเม็ดแป้ง (hilum) ซึ่งส่วนนี้ประกอบด้วยส่วนปลายที่มีหมู่รีดิวซิง (reducing end) ของโมเลกุลแป้ง มีส่วนปลายที่ไม่มีหมู่รีดิวซิง (non-reducing end) ของอะมิโลสและอะมิโลเพกทินแผ่กระจายออกไป จุดเชื่อมกิ่ง (branch point) ของอะมิโลเพกทินอยู่ในส่วนอสัณฐาน (amorphous) และสายอยู่ในส่วนผลึก (crystalline)



รูปที่ 2.10 ภาพแสดงการจัดเรียงตัวของอะมิโลเพกทินภายในวงแหวน **[3]**

แบบจำลองของเม็ดแป้งซึ่งประกอบด้วยอะมิโลเพกทิน ในแบบจำลองนี้แสดงถึงลักษณะเกลียวม้วนคู่ของอะมิโลเพกทินที่รวมกันเป็นผลึก รวมทั้งส่วนของอะมิโลสที่อยู่อย่างอิสระหรืออยู่ร่วมกับไขมันในลักษณะเป็นเกลียว ซึ่งจะพบในแป้งจากธัญพืช

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11 ภาพแสดงแบบจำลองโครงสร้างอะมิโลสและอะมิโลเพกทินในแป้งจากธัญพืช [3]

ปริมาณอะมิโลสและอะมิโลเพกทินในแป้งแต่ละชนิด [3]

อะมิโลเพกทิน ถือว่ามีความสำคัญมากกว่าอะมิโลสทั้งด้านโครงสร้าง หน้าที่ และการนำไปใช้ ดังนั้น เมื่อมีอะมิโลเพกทินเพียงอย่างเดียวสามารถรวมตัวเพื่อสร้างเม็ดแป้งได้ ปริมาณของอะมิโลสและอะมิโลเพกทินที่แตกต่างกัน ทำให้สมบัติของแป้งแตกต่างกัน แป้งจากข้าวโพดสายพันธุ์ที่มีปริมาณอะมิโลสสูงถึง 70% คือ ข้าวโพดอะมิโลเมส (amylomaize) และสายพันธุ์ที่ไม่มีอะมิโลส คือ ข้าวโพดเหนียว (waxy maize)

ตารางที่ 2.8 แสดงสมบัติของแป้งข้าวโพดที่มีปริมาณอะมิโลสต่างกัน [3]

ชนิดแป้ง	ปริมาณอะมิโลส (%)	คุณสมบัติ
ข้าวโพดเหนียว (waxy maize)	0 - 1	แป้งเปียกใส มีการคืนตัวหลังสุก (setback) น้อย ไม่เกิดเจล และเจลมีการสูญเสียน้ำ (syneresis) น้อย ยืดหยุ่นได้
ข้าวโพด (maizel)	27	เกิดเจลที่แข็งแรง แป้งเปียกขุ่น
ข้าวโพดอะมิโลเมส (amylomaize)	50 - 70	เม็ดแป้งพองตัวได้ยาก เกิดเจลที่แข็ง แป้งเปียกขุ่น อุณหภูมิการเกิดแป้งเปียกสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.9 แสดงสมบัติที่แตกต่างกันของอะมิโลสและอะมิโลเพกทิน [5]

อะมิโลส	อะมิโลเพกทิน
1. ประกอบด้วยโมเลกุลกลูโคสที่ต่อกันเป็น เส้นตรงด้วยพันธะ α-1,4	1. โมเลกุลกลูโคสที่ต่อกันด้วยพันธะ α-1,4 และมีการแตกกิ่งด้วยพันธะ α-1,6
2. ประกอบด้วยกลูโคส 200-6000 หน่วย	2. แต่ละกิ่งมีกลูโคส 20-25 หน่วย
3. ละลายน้ำได้น้อยกว่า	3. ละลายน้ำได้ดีกว่า
4. เมื่อต้มในน้ำจะมีความข้นหนืดน้อย	4. ข้นหนืดมากและใส
5. ให้สีน้ำเงินกับสารละลายไอโอดีน	5. ให้สีม่วงแดงหรือสีน้ำตาลแดงกับสารละลายไอโอดีน
6. ต้มแล้วทิ้งไว้จะจับตัวเป็นวุ้นและแผ่นแข็งได้	6. ไม่จับตัวเป็นวุ้นและแผ่นแข็ง

2.3.3 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของเป้งมันสำปะหลัง [4]

ลักษณะของแป้งมันสำปะหลังเมื่อดูด้วยกล้องจุลทรรศประกอบด้วยเม็ดแป้งตั้งแต่ 2 - 8 เม็ดรวมกัน แต่ละเม็ดยาวตั้งแต่ 4 - 35 ไมโครเมตร เม็ดแป้งส่วนมากมีลักษณะเป็นเป็นรูปไข่ ซึ่งปลายข้างหนึ่งถูกตัดออกและผิวตรงส่วนที่ตัดออกมีลักษณะเว้าเข้าข้างใน บางเม็ดอาจมีริมด้านหนึ่งโค้งอีกด้านหนึ่งแบนไม่สม่ำเสมอกัน เมื่อตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงโพลาไรซ์จะเห็นลักษณะกากบาทสีดำเรียกว่า “Birefrinence” ภายในเม็ดแป้งประกอบด้วย อะมิโลส และอะมิโล-เพกทิน ซึ่งมีการจัดเรียงตัวต่างกัน แบ่งได้เป็น 2 แบบ แบบแรกสายพอลิเมอร์ของอะมิโลสเรียงตัวขนานกันอย่างเป็นระเบียบ มีอะมิโลสบางส่วนเรียงขนานกับส่วนที่เป็นสายตรง ส่วนนอกของอะมิโลเพกทินยึดติดกันด้วยพันธะไฮโดรเจน ทำให้โมเลกุลบริเวณนี้จับกันอย่างหนาแน่นและมีแรงยึดเหนียวสูง บริเวณนี้เรียกว่า “cystalline regions” หรือ “Micelles” เป็นส่วนสำคัญที่ทำให้เกิดลักษณะ Birefnngepce ของเม็ดแป้ง cystalline regions นี้มีความสามารถในการดูดน้ำและพองตัวมาก ส่วนแบบที่สองโมเลกุลเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบ แรงดึงดูดระหว่างสายโซ่ พอลิเมอร์ของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อะมิโลส และอะมิโลเพกทินต่ำกว่าแบบแรก บริเวณที่มีการจัดเรียงตัวของโมเลกุลแบบนี้เรียกว่า "amorphous" เป็นส่วนที่ดูดน้ำได้ดีและพองตัวได้ง่าย

สมบัติในการเกิดปฏิกิริยากับน้ำเป็นสมบัติที่สำคัญในการนำแป้งไปใช้ประโยชน์ เป็นแป้งที่แขวนลอยอยู่ในน้ำ เมื่อได้รับความร้อนสูง พลังงานความร้อนจะไปทำลายพันธะไฮโดรเจนในโครงสร้างของเม็ดแป้ง ทำให้โมเลกุลของเม็ดแป้งเข้าไปจับหมู่ไฮดรอกซิลที่เป็นอิสระของเม็ดแป้งได้ เม็ดแป้งจะเริ่มพองตัวขึ้น เนื่องจากแป้งมันสำปะหลังมีปริมาณอะมิโลสมาก จึงมีการพองตัวที่ดีและมีค่าความสามารถในการละลายประมาณ 35 % ที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส ลักษณะการพองตัวของแป้งมันสำปะหลังที่อุณหภูมิต่างๆจะเป็นขั้นตอนเดียว (single stage swelllng) ในระหว่างที่ให้ความร้อนกับเม็ดแป้งแขวนลอยอยู่ในน้ำ และเม็ดแป้งเริ่มดูดซึมน้ำจากภายนอกนั้น เม็ดแแป้งจะเริ่มพองตัวพร้อมๆกับการสูญเสียความสามารถในการเบี่ยงเบนแสงโพลาไรซ์ (Birefigence)

ลักษณะเช่นนี้ทำให้การพองตัวของเม็ดแป้งเป็นแบบย้อนกลับไม่ได้ โดยปกติเม็ดแป้งที่พองตัวเมื่อได้รับความร้อนเม็ดแป้งจะเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของแป้งเปียก (paste) ที่มีความหนืดอย่างมากและเมื่อแป้งเปียกเย็นลงจะเกิดเป็นเจลขึ้น อุณหภูมิการเกิดจะอยู่ในช่วงใน 58-70 องศาเซลเซียส แป้งเปียกที่เกิดขึ้นจะไม่คงตัวมากนัก ซึ่งเป็นข้อจำกัดในการใช้แป้งมันสำปะหลัง จึงจำเป็นต้องมีการดัดแปรแป้งเพื่อช่วยเพิ่มความคงตัวของแป้งเปียกทำให้มันเย็นตัวลง ความหนืดจะเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น เนื่องจากเกิดการจับกันของหมู่ไฮดรอกซิลของอะมิโลสต่ำ แป้งมันสำปะหลังจัดเป็นแป้งที่เกิดการคืนตัวต่ำและให้ลักษณะของแป้งเปียกที่ใสและไม่ทึบแสง

2.3.4 ส่วนประกอบอื่นๆภายในเม็ดแป้ง [3,27]

ส่วนประกอบอื่นๆภายในเม็ดแป้ง แบ่งออกเป็น

1. ส่วนที่ไม่ใช่แป้งที่แยกได้จากแป้ง (particulate material) ได้แก่ โปรตีนที่ไม่ละลายและผนังเซลล์ ซึ่งจะมีผลกระทบต่อกระบวนการผลิตแป้ง
2. ส่วนที่ติดกับพื้นผิวของเม็ดแป้ง (surface material) ซึ่งสามารถสกัดออกได้โดยไม่ต้องทำลายเม็ดแป้ง เช่น เยื่อหุ้มอะมิโลพลาสต์
3. ส่วนที่ติดอยู่ภายในเม็ดแป้ง (internal components)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 สมบัติของแป้ง [3,41-45]

แป้งที่พบในธรรมชาติจะพบอยู่ในรูปเม็ดแป้งขนาด 1-100 ไมครอน เมื่อตรวจดูลักษณะของเม็ดแป้งชนิดต่างๆ ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบธรรมดาและกล้องจุลทรรศน์อิเล็คตรอน (Scanning-Electron Microscope; SEM) พบว่าเม็ดแป้งจะมีขนาด รูปร่าง และลักษณะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับชนิดของแป้งนั้นๆ

- ลักษณะของเม็ดแป้ง

  เม็ดแป้งมันฝรั่งและแป้งพุทธรักษามีลักษณะเป็นรูปไข่ขนาดใหญ่ ถือได้ว่ามีขนาดใหญ่ที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับแป้งอื่นๆ เม็ดแป้งสาลี บาร์เลย์และข้าวไรน์มี 2 แบบคือ แบบ A มีรูปร่างแบบ lenticular ขนาด 10 -30 ไมครอน และแบบ B รูปร่างกลม มีขนาดเล็กกว่า 10 ไมครอน เม็ดแป้งแบบ B มีจำนวนมากกว่า คือ ประมาณ 95% ของจำนวนเม็ดแป้งทั้งหมด แต่ถ้าเทียบเป็นน้ำหนักแล้วจะคิดเป็นเพียง 20-30% เท่านั้น ส่วนเม็ดแป้งมันสำปะหลังมีขนาดปานกลาง (20 ไมครอน) ขนาดใกล้เคียงกับเม็ดแป้งข้าวโพด

เม็ดแป้งประกอบด้วยวงแหวน เรียกว่า growth ring ซึ่งสังเกตได้จากการส่องกล้องจุลทรรศน์หรือ scanning electron microscopy เม็ดแป้งที่เปียกและสดจะสังเกตเห็น growth ring ได้ง่าย เม็ดแป้งขนาดใหญ่ เช่น แป้งมันฝรั่ง แป้งต้นพุทธรักษาที่ผ่านการแช่น้ำ จะสังเกตเห็น growth ring ได้ชัดเจน ในแป้งที่แห้งจะไม่พบ growth ring สำหรับเม็ดแป้งขนาดเล็ก เช่น แป้งข้าวบาร์เลย์ และแป้งข้าวเจ้าจะสังเกตได้ยากจากการส่องกล้องจุลทรรศน์ แต่สามารถสังเกตเห็นได้เมื่อนำแป้งผ่านปฏิกิริยาเคมีหรือย่อยด้วยเอนไซม์และศึกษาด้วย SEM โครงสร้างของ growth ring แสดงถึงลักษณะการเจริญของเม็ดแป้ง โดยเนื้อเยื่อชั้นแรกเจริญมาจากศูนย์กลางของเม็ดแป้ง (hilum) ซึ่งส่วนนี้ประกอบด้วยส่วน reducing end ของโมเลกุลแป้ง มีด้าน non–reducing end ของอะมิโลสและอะมิโลเพกทินแผ่กระจายออกไป จุดเชื่อมกิ่ง (branch point) ของอะมิโลเพกทินอยู่ในส่วนอสัณฐานและสายอยู่ในส่วนผลึก

ถ้าส่องด้วยกล้องโพลาไรซ์ (polarized microscope) จะมองเห็นวงแหวนและไฮลัมเป็นเครื่องหมายกากบาทสีดำชัดเจน (birefringence หรือ polarization cross) โดยจุดตัดของกากบาทจะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นตำแหน่งของไฮลัมและบริเวณอื่นจะเห็นเป็นแสงสว่างวาว ซึ่งเป็นสิ่งยืนยันถึงลักษณะที่โมเลกุลของแป้งมีการจัดเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบ

2.4.1 การดูดซับน้ำ การพองตัวและการละลาย

เมื่อเติมน้ำลงในแป้งและตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง เม็ดแป้งจะดูดซึมน้ำจากบรรยากาศ จะเกิดสมดุลระหว่างความชื้นภายในเม็ดแป้งกับความชื้นในบรรยากาศ ปริมาณน้ำที่ถูกดูดซึมจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ แป้งส่วนใหญ่เมื่อเกิดสมดุลภายใต้บรรยากาศปกติจะมีความชื้น 10 ถึง 17% พบว่า แป้งข้าวโพด แป้งมันสำปะหลัง แป้งมันฝรั่ง และแป้งข้าวโพดข้าวเหนียว สามารถดูดซึมน้ำได้ในปริมาณ 39.9 , 42.9 , 50.9 , และ 51.4 กรัมต่อน้ำหนักแป้งแห้ง 100 กรัม ตามลำดับ

น้ำที่อยู่ในปริมาณเม็ดแป้งมีอยู่ด้วยกัน 3 รูปแบบ คือ น้ำในผลึกในรูป bound water และน้ำที่อยู่ในรูปอิสระ (free water) โดยมีการจับแป้งได้แน่น ตามลำดับ และแป้งที่มีความชื้น 8 ถึง 100% สามารถจับน้ำได้แน่นกว่าแป้งที่มีความชื้นสูงกว่านี้ เนื่องจากการจับตัวของหมู่ไฮดรอกซิลที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 6 ของกลูโคสแต่ละหน่วยของแป้งจะได้สตาร์ชโมโนไฮเดรต [$n(C_6H_{10}O_5.H_2O)$]

น้ำหรือของเหลวชนิดอื่นที่สามารถแพร่และผ่านเข้าไปในโครงสร้างของไมเซลล์ (micells) ในเม็ดแป้งได้อย่างอิสระ ทดสอบได้จากการแขวนลอยเม็ดแป้งในสารละลายไอโอดีนเจือจาง จะเกิดสีในเม็ดแป้ง เมื่อใส่โซเดียมไทโอซัลเฟต (Sodium thiosulfate) ลงไป พบว่าสีหายไปอย่างรวดเร็ว และเมื่อนำมาส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน พบว่าเม็ดแป้งประกอบด้วยรูพรุนจำนวนมาก ซึ่งทำหน้าที่เป็น molecular sieve รูพรุนเหล่านี้อาจจะเกิดในขั้นตอนการทำแห้งในกระบวนการผลิตแป้ง หรืออาจมีอยู่แล้วในกระบวนการผลิตแป้งธรรมชาติ แต่มีขนาดขยายใหญ่ขึ้นเนื่องจากขั้นตอนการทำแห้งในกระบวนการผลิตแป้ง

แป้งดิบจะไม่ละลายน้ำในอุณหภูมิที่ต่ำกว่าอุณหภูมิเจลาติไนซ์เนื่องจากมีพันธะไฮโจรเจน ซึ่งเกิดจากหมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลแป้งที่อยู่ใกล้ๆกัน หรือ water bridge แต่เมื่ออุณหภูมิของสารผสมน้ำแป้งเพิ่มสูงกว่าช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลาติไนซ์ พันธะไฮโดรเจนจะถูกทำลาย โมเลกุลของน้ำจะมาจับกับหมู่ไฮดรอกซิลที่เป็นอิสระ เม็ดแป้งเกิดการพองตัวทำให้การละลาย ความหนืดและความใสเพิ่มขึ้น คุณสมบัติการเกิด birefringence จะหมดไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปัจจัยที่มีผลต่อการพองตัวและความสามารถในการละลาย คือ ชนิดของแป้ง ความแข็งแรงและลักษณะของร่างแหในเม็ดแป้ง สิ่งเจือปนภายในเม็ดแป้งที่ไม่ใช่คาร์โบไฮเดรต ปริมาณน้ำในสารละลายของแป้ง และการดัดแปลงทางเคมี รูปแบบในการพองตัวและการละลายของเม็ดแป้งแต่ละชนิดจะมีรูปแบบที่แตกต่างกันไป

เมื่อทำการให้ความร้อนแก่สารละลายน้ำแป้ง เม็ดแป้งบางส่วนจะเกิดการพองตัวและบางส่วนของแป้งจะเกิดการละลายออกมา กำลังการพองตัวของแป้งจะแสดงเป็นปริมาตรหรือน้ำหนักของเม็ดแป้งที่เพิ่มขึ้นมากที่สุดเมื่อเม็ดแป้งเกิดการพองตัวได้อย่างอิสระในน้ำ สำหรับความสามารถในการละลายจะแสดงเป็นน้ำหนักของแข็งทั้งหมดในสารละลายที่สามารถละลายได้ ซึ่งคุณสมบัติทั้งสองนี้มีความสัมพันธ์กัน

ปัจจัยที่มีผลต่อการพองตัวและความสามารถในการละลายของแป้งมีหลายประการ ได้แก่

(1) ชนิดของแป้ง

เม็ดแป้งแต่ละชนิดมีรูปแบบการพองตัวและการละลายที่แตกต่างกัน เมื่อพิจารณาความสามารถในการพองตัวและการละลายของแป้งแล้ว สามารถแบ่งออกเป็น 3 ชนิด คือ แป้งจากธัญพืช แป้งจากส่วนราก และแป้งจากส่วนหัว

1.1 แป้งจากธัญพืช มีรูปแบบการพองตัวการละลาย 2 ขั้น แสดงถึงแรงพันธะในเม็ดแป้งที่แตกต่างกัน 2 ชนิด คือ พันธะบริเวณผลึก และบริเวณอสัณฐานของเม็ดแป้ง แป้งจำพวกที่มีจำนวนพันธะสูงสุด แต่มีกำลังการพองตัวและการละลายต่ำสุด เนื่องจากมีปริมาณอะมิโลสสูง ซึ่งอะมิโลสจะทำให้โครงสร้างร่างแหในเม็ดแป้งแข็งแรงขึ้น ทำให้การพองตัวต่ำ

1.2 แป้งจากส่วนรากหรือ pith เช่น แป้งมันสำปะหลัง มีการพองตัวเพียงชั้นเดียว กำลังการพองตัวและการละลายมีค่าสูงกว่าแป้งจากธัญพืช เนื่องจากมีจำนวนพันธะน้อยกว่า แป้งจากส่วนรากจะเกิดเจลาติไนซ์ที่อุณหภูมิต่ำกว่าแป้งจากธัญพืช

1.3 แป้งจากส่วนหัว เช่น แป้งมันฝรั่ง จะมีการพองตัวสูง เนื่องจากพันธะภายในร่างแหอ่อนแอ นอกจากนี้หมู่ฟอสเฟตภายในแป้งมันฝรั่งยังทำให้เกิดการพองตัวสูงขึ้น เนื่องจากสามารถก่อให้เกิดแรงผลักดันทางไฟฟ้า การพองตัวในเม็ดแป้งจากส่วนหัวจะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกิดเพียงชั้นเดียว และเกิดที่อุณหภูมิต่ำ รูปแบบนี้จะเป็นลักษณะของเม็ดแป้งที่เป็นพอลิอิเล็กโทรไลต์ (polyelectrolyte)

(2) ความแข็งแรงและลักษณะของร่างแหภายในเม็ดแป้ง

ความแข็งแรงและลักษณะของร่างแหภายในเม็ดแป้ง หรืออีกนัยหนึ่ง คือ จำนวนและชนิดของพันธะภายในเม็ดแป้ง ในระดับโมเลกุลมีปัจจัยหลายปัจจัยที่มีผลกระทบต่อจำนวนของพันธะ ได้แก่ ขนาด รูปร่าง ส่วนประกอบและการกระจายของร่างแหภายในเม็ดแป้ง อัตราส่วนของอะมิโลสและอะมิโลสเพกทิน น้ำหนักโมเลกุล การกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุล จำนวนกิ่งก้านสาขา การจัดเรียงตัว และความยาวของกิ่งสาขาในอะมิโลเพกทิน

(3) สิ่งเจือปนในเม็ดแป้งที่ไม่ใช่คาร์โบไฮเดรต

สิ่งเจือปนเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อการพองตัวของชนิดแป้ง เช่น แป้งข้าวโพดที่ถูกสกัดไขมันออกจะมีการพองตัวอย่างอิสระและมีรูปแบบเดียวกัน ดีกว่าแป้งข้าวโพดปกติ เนื่องจากกรดไขมันในธรรมชาติของแป้งข้าวโพดปกติจะยับยั้งการพองตัวของเม็ดแป้งโดยเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับอะมิโลส (lipid – amylase complex) นอกจากนี้จากใส่สารลดแรงตึงผิวในเม็ดแป้งจะมีผลต่อกำลังการพองตัวของเม็ดแป้ง การใส่ potassium palmitate และ stearate จะลดกำลังการพองตัวของแป้งมันสำปะหลัง ในขณะที่การใส่ sodium sulfate และ cetyl trimetyl ammonium bromide จะเพิ่มกำลังการพองตัวของเม็ดแป้ง

(4) คุณสมบัติหลังการดัดแปรทางเคมี

คุณสมบัติการพองตัวและการละลายของแป้งจะเปลี่ยนไปเมื่อมีการดัดแปรทางเคมี การดัดแปรด้วยกรดหรือการเกิดออกซิเดชันด้วย hypochloride จะทำให้เกิดการแตกออกของพันธะภายในร่างแห ทำให้เม็ดแป้งแตกออกเป็นชั้นเล็กๆ การละลายและการพองตัวสูงขึ้น สำหรับการดัดแปลงด้วยปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน จะเกิดการแทนที่ของหมู่อื่นภายในโมเลกุลแป้ง ทำให้พันธะภายในเม็ดแป้งอ่อนแอลง อุณหภูมิที่ใช้ในการเกิดเจลาติไนซ์ต่ำลง การพองตัวสูงขึ้น ขอบเขตในการลดอุณหภูมิเจลาติไนซ์และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การพองตัวที่เพิ่มขึ้น ขึ้นอยู่กับจำนวนและธรรมชาติของที่หมู่ที่มาแทนที่ การทำครอสลิงจะทำให้ความแข็งแรงของพันธะภายในเม็ดแป้งเพิ่มขึ้น ความสามารถในการพองตัวและการละลายลดลง

(5) ปริมาณน้ำที่มีอยู่ในสภาวะที่เกิดการพองตัว

มีผลต่อการพองตัวและการละลาย สารละลายที่มีปริมาณแป้งต่ำกว่า 20% ค่าการละลายจะสูงกว่า เมื่อแป้งสูงกว่า 20% การพองตัวอย่างอิสระและการละลายที่สูงขึ้นจะถูกยับยั้งในสภาพสารละลายที่มีปริมาณน้อย สารประกอบอื่นๆ เช่น ซูโครส กลูโคส และสารอิเล็กโทรไลต์ เช่น (sodium chloride) มีผลกระทบต่อการพองตัวของแป้ง พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของซูโครส ความสามารถในการละลายของจะแป้งเพิ่มขึ้น นั่นคือการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำตาลและการลดลงของปริมาณแป้งมีผลทำให้การละลายของแป้งเพิ่มขึ้น

- **สมบัติทางเคมีของคาร์โบไฮเดรท-ไฮโดรคอลลอยด์ และการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม [6]**

สารไฮโดรคอลลอยด์ (Hydrocolloids)

เป็นพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งที่ได้จากพืช เช่น หัวบุก หรือสัตว์ เช่น สารไคโตซานในเปลือกกุ้ง เปลือกปู รวมถึงจุลินทรีย์และพอลิเมอร์ดัดแปรจากธรรมชาติหรือสังเคราะห์ โดยพอลิเมอร์เหล่านี้จะแสดงหน้าที่ที่สำคัญในอาหาร เช่น

- เป็นสารให้ความหนืด ทำให้เกิดเจล
- เป็นตัวช่วยให้น้ำกับน้ำมันเข้ากัน (emulsifier) และเป็นสารที่ทำให้เกิดความคงตัว
- ป้องกันปฏิกิริยาการตกตะกอนและการแยกตัวของน้ำออกจากเนื้ออาหาร

ประโยชน์ของไฮโดรคอลลอยด์นั้น จะนำมาใช้ในอุตสาหกรรมอาหารเป็นส่วนใหญ่ เช่น เติมลงในผลิตภัณฑ์นม ไอศกรีม หรือในไส้ขนมอบของเบเกอรี่ชนิดต่างๆ โดยจุดประสงค์หลักของการเติมสารไฮโดรคอลลอยด์ คือ จะทำให้อาหารมีความเหนียวหนืด นุ่ม คงรูป เป็นที่ถูกใจของผู้บริโภค

ส่วนผลพลอยได้ในการเติมไฮโดรคอลลอยด์ ก็คือ ทำให้อุตสาหกรรมอาหารเหล่านี้ลดการใช้ไขมันหรือแป้งลง เนื่องจากเมื่อเติมสารไฮโดรคอลลอยด์ลงไปในอาหาร จะทำให้อาหารยังคงมีความนุ่ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คงรูปมันวาว เหมือนมีแป้งหรือไขมันผสมอยู่ ดังนั้นหากลดการเติมไขมันหรือแป้งลงได้ ก็จะส่งผลดีต่อผู้บริโภคที่ต้องการบริโภคอาหารที่มีแคลลอรี่ต่ำ

ชนิดของไฮโดรคอลลอยด์สามารถแบ่งได้เป็น 3 กลุ่มตามแหล่งที่มา ได้แก่

1. ไฮโดรคอลลอยด์ที่ได้มาจากธรรมชาติ (natural hydrocolloids) ซึ่งได้จากส่วนต่างๆ ของพืช ได้แก่ เมล็ด ยาง เช่น โลคัสบีนกัม (locust bean gum) กัมอาราบิก (gum-arabic) ราก ลำต้น เช่น แป้ง หรือได้จากสาหร่ายทะเล เช่น คาร์ราจีแนน (carrageenan) หรือได้มาจากสัตว์ เช่น ไคติน (chitin) หรือจากกระบวนการหมักโดยเชื้อจุลินทรีย์ เช่น แซนแทนกัม (xanthan gum)
2. ไฮโดรคอลลอยด์ที่ดัดแปรจากสารที่ได้จากธรรมชาติ (modified natural hydrocolloids) ได้แก่ อนุพันธ์ของเซลลูโลส เช่น carboxymethyl cellulose (CMC)
3. ไฮโดรคอลลอยด์สังเคราะห์ (synthetic hydrocolloids) เช่น พอลีเอธิลีนออกไซด์ พอลิเมอร์(polyethylene oxide polymers)

➢ ไฮโดรคอลลอยด์ธรรมชาติ (Natural hydrocolloids) แบ่งออกเป็นกลุ่มตามแหล่งที่มา ได้แก่

- Seaweed extracts
- Plant extract
- Plant seed gums
- Plant exuded gums
- Animal-derived
- Microbial gums

อัลจิเนต (Alginate)

อัลจิเนตหรืออัลจินเป็นสารที่สกัดได้จากสาหร่ายทะเลสีน้ำตาล (Phaeophyceae) ในการผลิตอัลจิเนตเป็นอุตสาหกรรม สาหร่ายทะเลที่ใช้ ได้แก่ Macrocystis pyrifera มีอัลจินประมาณ 14-19 % , Laminaria cloustoni และ Laminaria digitata มีอัลจินประมาณ 15-40 % ปริมาณที่พบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะขึ้นกับชนิดของสาหร่าย ฤดูกาล และแหล่งที่สาหร่ายเจริญเติบโต สาหร่ายเหล่านี้พบได้ทั่วๆไปในโลก ประเทศที่ผลิตอัลจิเนตมาก คือ อเมริกา อังกฤษ ฝรั่งเศส สเปน นอร์เวย์ แคนนาดา และญี่ปุ่น

อัลจิเนตเป็น unbranched binary copolymer ของ 1,4-β-D-manuronic acid (M) และ L-guluronic acid (G) ในโมเลกุลประกอบด้วย homopolymeric regions ของ G และ M ที่เรียกว่า G และ M-blocks ตามลำดับ และยังมีบางส่วนของโมเลกุลเป็น MG-blocks สัดส่วนของ copolymer และโครงสร้างเหล่านี้จะเป็นตัวกำหนดสมบัติของอัลจิเนต เช่น ถ้าพอลิเมอร์มี G ในปริมาณที่สูงจะมีสมบัติเป็นเจลแข็งที่ความเข้มข้นของโลหะประจุบวก (polyvalent metal cation) แต่ถ้าพอลิเมอร์มี M ปริมาณสูงจะมีแนวโน้มที่จะเกิดเจลที่อ่อนนุ่ม และมีสภาวะในการเกิดเจลที่กว้างกว่า อัลจิเนตที่ผลิตจำหน่ายเป็นการค้ามีหลายอนุพันธ์ จึงมีสมบัติการละลายในน้ำที่แตกต่างกัน เช่น อนุพันธ์ของเกลือ Ca^{2+}, K^{+}, Na^{+}, NH_4^{+} และยังผลิตในรูปของ propylene glycol alginate ซึ่งได้จากปฏิกิริยาของ alginic acid กับ propylene oxide ภายใต้ความดัน อนุพันธ์เหล่านี้จะละลายได้ทั้งในน้ำร้อนและน้ำเย็น ความหนืดของสารละลายอัลจิเนตที่ได้ขึ้นอยู่กับ อุณหภูมิ ความเข้มข้น น้ำหนักโมเลกุล และการมีโลหะประจุบวก

อัลจิเนตไม่ทุกชนิดมีคุณสมบัติเป็นเจลและจะเกิดเจลได้เมื่อทำปฏิกิริยากับ Ca^{2+} โครงสร้างของเจลมีลักษณะคล้ายกล่องไข่ (egg box) โดยมี Ca^{2+} เกาะอยู่กับสายโพลิเมอร์

คุณสมบัติที่ดีของอัลจิเนต คือ ทำให้เกิด Irreversible gel ในน้ำเย็น เมื่อมี Ca^{2+} รวมอยู่ด้วย ซึ่งคุณสมบัติในการเกิดเจลที่อุณหภูมิต่ำนี้ ทำให้อัลจิเนตแตกต่างจากไฮโดรคอลลอยด์ที่ได้จากสาหร่ายสีแดง อัลจิเนตถูกนำไปใช้ในผลิตภัณฑ์อาหารหลายชนิดตั้งแต่ปี ค.ศ. 1920 โดยเติมในอาหารกระป๋องบางชนิด ใช้เป็นสารเพิ่มความหนืด สารเพิ่มความคงตัว ทำให้อิมัลชันคงตัว สารทำให้เกิดเจล และสารยับยั้งการเกิด syneresis ตัวอย่างเช่น propylene glycol alginate ใช้ในน้ำสลัด (salad dressing) และเบียร์ เพราะมีความสามารถละลายได้สูงที่ pH ต่ำ

โซเดียมอัลจิเนตใช้เป็นส่วนผสมในไส้พายมะนาวที่แช่เย็นเพื่อให้เกิดความคงตัวระหว่าง freeze-thaw ใช้เคลือบผิวชิ้นเนื้อปลาก่อนนำไปแช่เยือกแข็ง เพื่อป้องกันไม่ให้เกิด freeze burn กับชิ้นเนื้อปลา ใช้เป็นสารเพิ่มความคงตัวให้กับไอศกรีม, frozen dessert, sherbet, processed cheese และใช้เป็น Alginate gel restructured products เช่น Onion rings และ Shrimp-like fish products

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 ความหนืด [3,45-60]

2.5.1 ปัจจัยการเกิดความหนืด

ความหนืดเป็นสมบัติเฉพาะตัวที่สำคัญของแป้ง เกิดจากการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อความหนืดของแป้ง ได้แก่ ชนิดของแป้งและการดัดแปรแป้งด้วยวิธีต่างๆ

(ก) ชนิดของแป้ง

แป้งแต่ละชนิดมีสมบัติความหนืดที่แตกต่างกันไป ความหนืดที่เกิดขึ้นของน้ำแป้ง เมื่อให้ความร้อนและมีการกวนหรือคนอย่างสม่ำเสมอ จากอุณหภูมิ 50 ° C ไปถึง 95 ° C และคงที่ที่ 95 ° C เป็นเวลา 25 นาที จึงลดอุณหภูมิเป็น 50 ° C อีกครั้ง จะเห็นว่าแป้งแต่ละชนิดจะให้ลักษณะ (profile) ของความหนืดที่แตกต่างกัน จากการแบ่งประเภทของแป้งตามกราฟแสดงความหนืด ตามวิธีของ Schoch และ Mayward สามารถแบ่งรูปแบบความหนืดของแป้งสุกที่วัดด้วยเครื่อง Brabender Viscoamylograph ตามกำลังการพองตัวของแป้งแบ่งเป็น 4 แบบ ดังนี้

แบบ a : กราฟจากเม็ดแป้งที่มีกำลังการพองตัวสูง (high – swelling starches) เช่น แป้งมันฝรั่ง (potato starch) แป้งข้าวฟ่าง (waxy soghum starch) แป้งจากธัญพืช เมื่อให้ความร้อนแก่แป้ง เม็ดแป้งจะเกิดกำลังการพองตัวสูง ทำให้แรงที่ยึดกันภายในโมเลกุลที่อ่อนตัวลง เม็ดแป้งแตกออกเมื่อได้รับแรงเฉือน ลักษณะกราฟความหนืดจึงสูงขึ้นแล้วลดลงอย่างรวดเร็วระหว่างการต้มสุก

แบบ b : กราฟจากเม็ดแป้งที่มีกำลังพองตัวปานกลาง (moderate – swelling starches) ได้แก่ แป้งจากธัญพืชต่างๆ เม็ดแป้งไม่พองตัวมากถึงขั้นแตกออก จึงได้ลักษณะกราฟความหนืดที่สูงชันน้อยกว่าและเกิดการสลายตัวระหว่างการต้มสุกน้อยกว่า

แบบ c : กราฟจากเม็ดแป้งที่มีการพองตัวน้อย (restritced – swelling starches) ได้แก่ แป้งจากถั่วต่างๆ และแป้งครอสลิงหรือครอสบอนด์ (cross – bonded) วิธีครอสลิงทำให้เกิดการพองตัวและการละลายของเม็ดแป้งลดลง ทำให้เม็ดแป้งที่พองตัวที่มีความเสถียรมากขึ้น ลักษณะกราฟความหนืดจึงไม่ปรากฏ เป็นยอดสูงสุดมีค่าความหนืดสูง ซึ่งอาจจะคงที่หรือเพิ่มขึ้นระหว่างต้มสุก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบ d : กราฟจากเม็ดแป้งที่มีการพองตัวน้อยมาก (restritced – swelling starches) ได้แก่ แป้งที่มีปริมาณอะมิโลสสูง เช่น แป้ง amylomaize มีอะมิโลส 50 ถึง 80%

(ข) การดัดแปรแป้ง

- การดัดแปรโดยวิธีการทางกายภาพ เช่น แป้งพรีเจล (pregelatinzed starch) สามารถแพร่กระจายตัวในน้ำเย็นหรืออุณภูมิห้อง ให้ความหนืดได้ทันที เหมาะสมในการนำมาใช้ผลิตอาหารที่ไม่ต้องการให้ความร้อน เช่น ขนมพุดดิง น้ำเกรวี ซอส และไส้กึ่งสำเร็จรูป สำหรับอาหารประเภทพายหรือครีมหน้าขนมต่างๆ

- การดัดแปลงด้วยกรดหรือเดกซ์ทรินไนเซชัน ให้ความหนืดขณะร้อนต่ำกว่าแป้งดิบ เจลที่ได้จะมีลักษณะใสและแข็งกว่าแป้งดิบ ใช้สำหรับผลิตลูกกวาด ท๊อฟฟี่

- การดัดแปรแป้งด้วยปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน (esterifacation) ได้แป้งเอสเทอร์ เช่น สตาร์ชแอซิเทต (starch acetate) และสตาร์ชฟอตเฟสโมโนเอสเทอร์ (starch phosphate monoester) ซึ่งมีความหนืดสูงกว่าแป้งดิบและคงความหนืดไว้ได้ดี มี pasting temperature ต่ำกว่าแป้งดิบ ลักษณะเจลใส คงตัวต่ออุณหภูมิต่ำในสภาวะการแช่แข็งและละลาย เหมาะสำหรับการนำไปใช้กับผลิตภัณฑ์อาหารแช่แข็ง หรืออาหารที่ต้องการความหนืดที่ต้องการเก็บไว้ที่อุณหภูมิระหว่างการขนส่งและการเก็บรักษา

- การดัดแปรโดยวิธีครอสลิง (cross – linking) แป้งที่ได้สามารถรักษาความหนืดไว้ที่อุณหภูมิเหมาะสำหรับนำไปใช้ในผลิตภัณฑ์อาหารกระป๋อง ซึ่งต้องการความหนืดต่ำในช่วงแรก เพื่อให้เกิดการนำความร้อนในกระป๋องไปอย่างรวดเร็ว และใช้เวลาในการทำลายเชื้อจุลินทรีย์น้อยลง ผลิตภัณฑ์ที่จะได้มีความหนืดตามความต้องการเมื่อเย็นลง

นอกจากปัจจัยทั้งสองดังกล่าวแล้ว ปัจจัยอื่นๆที่เกี่ยวข้องอันเนื่องมาจากชนิดของแป้ง เมื่อวิเคราะห์ลงในรายละเอียด คือ ขนาดของเม็ดแป้ง ปริมาณอะมิโลส ก็มีส่วนสำคัญต่อความหนืด กล่าวคือ ขนาดของแป้งที่ใหญ่ ย่อมมีกำลังการพองตัวสูงและให้ความหนืดของ peak viscosity สูง ปริมาณอะมิโลสมีผลต่อการเกิดรีโทรเกรเดชัน (retrogradation) ถ้าแป้งชนิดใดมีปริมาณอะมิโมสสูงย่อมแสดงค่า final viscosity สูงด้วยเช่นกัน สำหรับปัจจัยการผลิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภายนอก คือ ถ้ามีการใช้ความร้อนสูงหรือมีการใช้แรงกลมาก จะทำให้เม็ดแป้งแตกและความหนืด (peak viscosity , trough , etc.) ลดลง

2.5.2 วิธีวัดความหนืด

วิธีตรวจวัดความหนืดสามารถกระทำได้หลายวิธีและเครื่องมือที่ใช้วัดมีหลายชนิด แต่ละชนิดมีหลักการการทำงานและการอ่านค่าความหนืดต่างๆ กันดังนี้

(ก) การใช้เครื่องมือวัดความหนืดแบบรูคฟิล์ด (Brokfield viscometer) สามารถวัดความหนืดได้ที่อุณหภูมิหนึ่งๆ การทำงานของเครื่อง เกิดจากการหมุนของวัตถุทรงกระบอกหรือแผ่นจานในของเหลวด้วยอัตราเร็วคงที่ ค่าความหนืดของของเหลววัดได้จากค่าความต้านทานการหมุนของของเหลวที่อัตราเร็วคงที่ แรงต้านจะทำให้สปริงเกิดการยืดตัวโดยแสดงด้วยเข็มสีแดงบนหน้าปัดเครื่อง ค่านี้จะคูณค่าคงที่ตามความเร็ว ขนาดและชนิดของเครื่อง ค่าที่ได้จากเครื่องนี้จะมีหน่วยตามความหนืดของของเหลวเป็นเซนติพอยด์ (centipoises)

(ข) การใช้เครื่องวัดความหนืดแบบหลอด (Capillary viscometer) สามารถใช้วัดความหนืดที่อุณหภูมิหนึ่งๆ เท่านั้น มีหน่วยความหนืดเป็น MPa.s

(ค) การใช้เครื่องบราเบนเตอร์ อะมิโลกราฟ (Brabender amylograph) ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมอย่างแพร่หลาย หลักการทำงาน คือ การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งในระหว่างการทำให้ร้อนจนถึงขั้นการทำให้เย็น ติดตามผล และแสดงรูปภาพในความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดและอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงได้ หน่วยความหนืดเป็น Brabender Unit (BU) สามารถเปลี่ยนเป็น Centipoise ได้โดยการเทียบความหนืดของสารละลายแป้งสุก 5% ความหนืด 500 BU เท่ากับ 2700 Centipoise ค่าความหนืดต่างๆ จะแสดงให้เห็นถึงลักษณะที่สำคัญของแป้งแต่ละชนิด เมื่อแป้งได้รับความร้อนจะดูดซึมน้ำและพองตัวขนาดใหญ่ขึ้น น้ำบริเวณรอบๆเม็ดแป้งเหลือน้อยลง ทำให้เม็ดแป้งเคลื่อนไหวได้ยาก เกิดความหนืดขึ้น อุณหภูมิที่เริ่มเกิดความหนืด เรียกว่า “อุณหภูมิเริ่มเปลี่ยนค่าความหนืด” (pastingtemperature) เมื่อเพิ่มอุณหภูมิขึ้น ความหนืดจะเพิ่มขึ้นจนถึงจุดที่มีความหนืดสูงสุด (peak viscosity) เป็นจุดที่เม็ดพองตัวเต็มที่ และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิและเวลาอีกต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

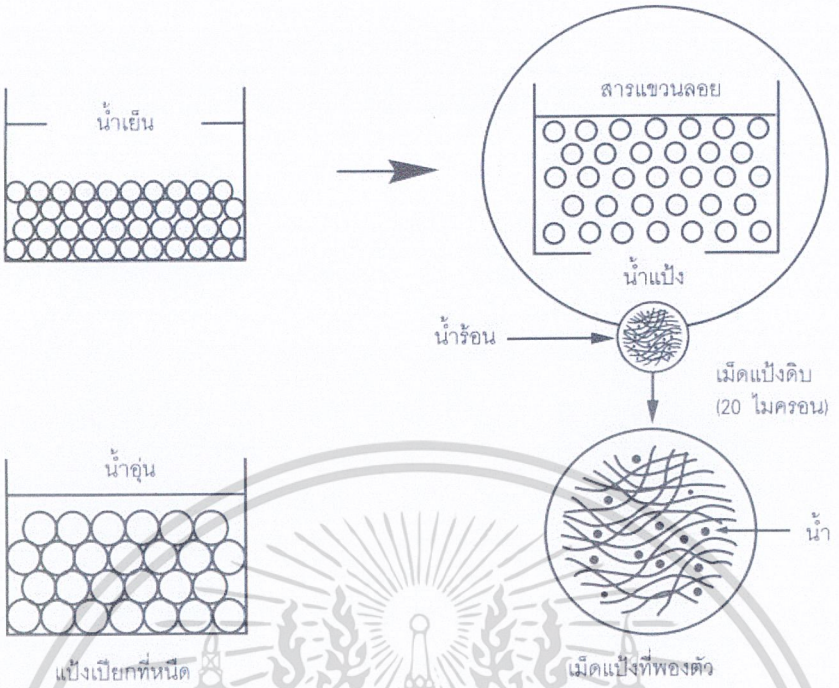
รวมทั้งมีการกวนอย่างต่อเนื่อง จะทำให้โครงสร้างภายในแตกออก ความหนืดลดลง เมื่อเวลาต่อมา ทำให้เกิดรีโทรเกรเดชัน ความหนืดจะเพิ่มขึ้นอีก ซึ่งเป็นความหนืดที่เกิดขึ้นจากการเรียงตัวกันใหม่ของโมเลกุลอะมิโลสที่หลุดออกจากเม็ดแป้ง

(ง) Rapid visco Analyzer (RVA) เป็นเครื่องมือสำหรับประเมินคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่จะต้องพิจารณาความหนืดขณะที่ให้ความร้อน คุณสมบัติพิเศษ คือ มีความสามารถในการเปลี่ยนระดับอุณหภูมิ สามารถทำให้เย็นได้อย่างแม่นยำ และรวดเร็ว สามารถรักษาอุณหภูมิให้คงที่ได้จึงทำให้สามารถหาลักษณะการเปลี่ยนแปลงความหนืด (pasting value) ภายในเวลาสั้นได้ เนื่องจากกลไกมีการส่งผ่านความร้อนได้ดีกว่า และใช้ปริมาณตัวอย่างที่น้อยกว่า

2.5.3 การเกิดเจลาติไนเซชัน

โมเลกุลของแป้งประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl group) จำนวนมากยึดเกาะกันด้วยพันธะไฮโจรเจน มีสมบัติชอบน้ำ (hydrophilic) แต่เนื่องจากเม็ดแป้งอยู่ในรูปร่างแห (micells) ดังนั้น การจัดเรียงตัวลักษณะนี้ จะทำให้เม็ดแป้งละลายน้ำเย็นได้ยาก ดังนั้นในขณะที่แป้งอยู่ในน้ำเย็น เม็ดแป้งจะดูดซึมน้ำและพองตัวได้เล็กน้อย แต่เมื่อให้ความร้อนกับสารละลายแป้ง พันธะไฮโดรเจนจะคลายตัวลง เม็ดแป้งจะดูดน้ำแล้วพองตัว ส่วนผสมของน้ำแป้งจะมีความหนืดเพิ่มขึ้น เนื่องจากโมเลกุลของน้ำอิสระที่เหลืออยู่รอบๆเม็ดแป้งเหลือน้อยลง เม็ดแป้งเคลื่อนไหวได้ยากขึ้น ทำให้เกิดความหนืด ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า การเกิดเจลาติไนเซชัน (gelatinization) อุณหภูมิที่สารละลายเริ่มเกิดความหนืดเรียกว่า อุณหภูมิเริ่มเจลาติไนซ์ เมื่อตรวจวัดโดยเครื่องมือวัดความหนืด มักจะเรียกจุดนี้ว่า อุณหภูมิที่เริ่มเปลี่ยนแปลงความหนืด (pasting temperature) หรือเวลาที่เริ่มเปลี่ยนแปลงความหนืด (pasting time) ซึ่งแตกต่างกันในแป้งแต่ละชนิด แป้งจากหัวพืช เช่น แป้งมันสำปะหลัง แป้งมันฝรั่งจะมีอุณหภูมิเริ่มเจลาติไนซ์ต่ำกว่าอุณหภูมิของแป้งธัญพืช

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



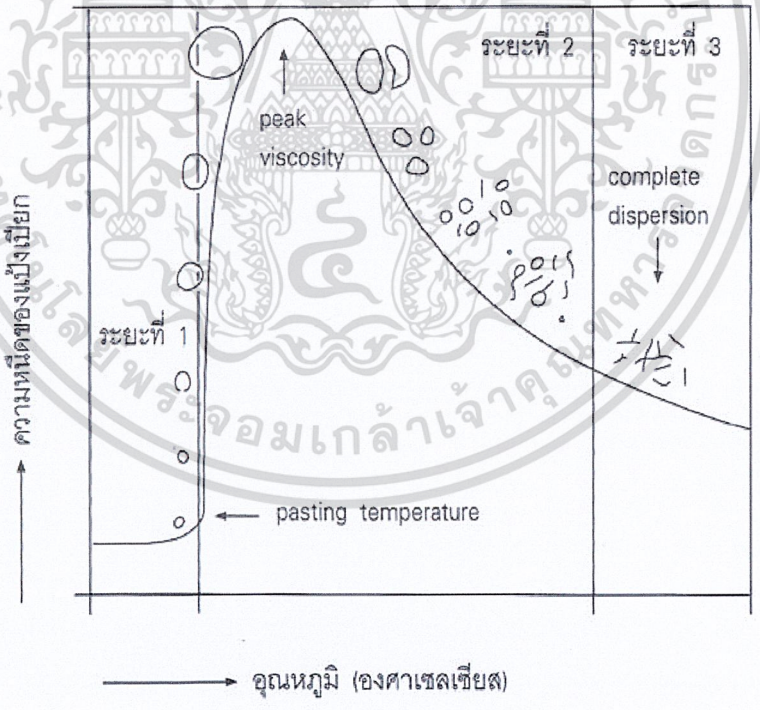
รูปที่ 2.12 ภาพแสดงการเปลี่ยนแปลงของเม็ดแป้งในระหว่างการหุงต้ม **[3]**

การเกิดเจลาติไนซ์ของเม็ดแป้งแบ่งได้ 3 ระยะ คือ ระยะแรก เม็ดแป้งจะเกิดดูดซึมน้ำเย็นได้อย่างจำกัดและเกิดการพองตัวแบบผันกลับได้ เนื่องจากร่างแหระหว่างไมเซลล์ (micelles) ยืดหยุ่นได้จำกัด ความหนืดของสารแขวนลอยจะไม่เพิ่มขึ้นจนเห็นได้ชัด เม็ดแป้งยังคงรักษารูปร่างและโครงสร้างแบบที่เกิดการบิดแสงระนาบโพลาไรซ์ได้ (birefringence) เมื่อใส่สารเคมีหรือเพิ่มอุณหภูมิให้สารละลายน้ำแป้งจนถึงประมาณ 65° C (อุณหภูมิที่แท้จริงขึ้นอยู่กับชนิดของเม็ดแป้ง) เมื่อเริ่มเข้าสู่ระยะที่ 2 เม็ดแป้งจะพองตัวอย่างรวดเร็ว ร่างแหระหว่างไมเซลล์ภายในเม็ดแป้งจะอ่อนแอลง เนื่องจากพันธะไฮโดรเจนจะถูกทำลาย เม็ดแป้งจะดูดซึมน้ำเข้ามามากและเกิดการพองตัวผันกลับไม่ได้ เรียกว่า การเกิดเจลาติไนเซชัน เม็ดแป้งมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและโครงสร้างแบบที่เกิดระนาบแสงโพลาไรซ์ได้ ความหนืดของสารละลายน้ำแป้งจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว แป้งที่ละลายได้จะเริ่มละลายออกมา ซึ่งถ้าแกว่งแยกส่วนใสและหยดสารละลายไอโอดีนลงในส่วนใสจะเกิดสีน้ำเงินขึ้น เมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิต่อไปอีกจนเข้าสู่ระยะที่ 3 รูปร่างของเม็ดแป้งจะไม่แน่นอน การละลายของเม็ดแป้งจะมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

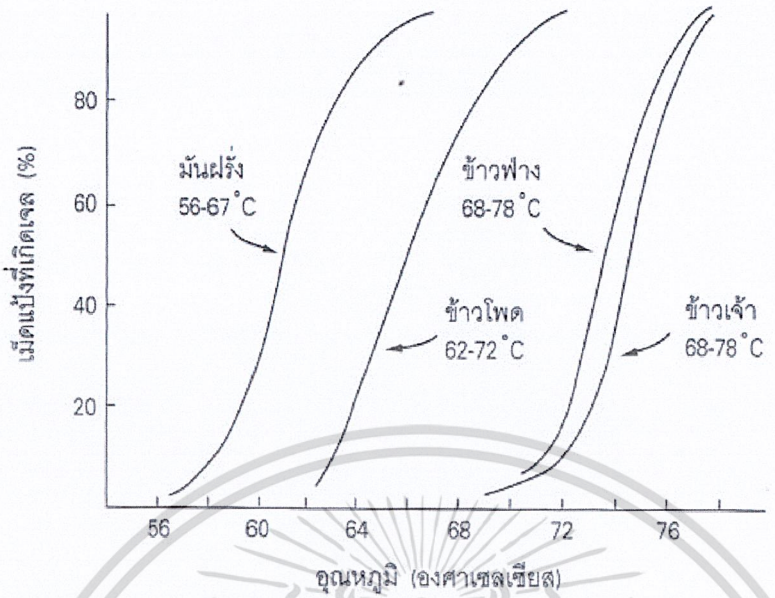
เมื่อนำไปทำให้เย็นจะเกิดเจล การเกิดเจลาติไนซ์ของเม็ดแป้งจะทำให้หมู่ไฮดรอกซิลของแป้งสามารถทำปฏิกิริยากับสารอื่นๆได้ดีขึ้น รวมทั้งพร้อมที่จะถูกย่อยด้วยน้ำย่อยต่างๆได้ดีกว่า

ความหนืดสูงสุดของสารละลายแป้งในระหว่างการเกิดเจลาติไนซ์จะแปรเปลี่ยนไปตามชนิดของแป้ง แป้งมันฝรั่งจะมีความหนืดสูงสุด (peak viscosity) สูงที่สุด และมีความสามารถทำให้ข้นหนืด (thickening power) สูงด้วย แม้ในขณะที่แป้งข้าวโพดและแป้งสาลีจะมีความหนืดสูงสุดต่ำ เนื่องจากเม็ดแป้งมีกำลังการพองตัวอยู่ในระดับปานกลาง ซึ่งเป็นผลมาจากปริมาณอะมิโลสและไขมัน นอกจากนี้ระดับอุณหภูมิในการเกิดเจลาติไนซ์จะแตกต่างกันไปตามชนิดและองค์ประกอบของแป้ง เช่น ปริมาณไขมัน สัดส่วนของอะมิโลสและอะมิโลเพกทิน การจัดเรียงและขนาดของเม็ดแป้ง เนื่องจากการจัดเรียงตัวของอะมิโลสและอะมิโลเพกทิน ภายในเม็ดแป้งมีความหนาแน่นไม่สม่ำเสมอกัน ทำให้เม็ดแป้งมีขนาดต่างกัน แป้งชนิดต่างๆ มีลักษณะการเกิดเจลที่แตกต่างกันไป



รูปที่ 2.13 ภาพแสดงระยะในการเกิดเจลาติไนเซชันของเม็ดแป้ง **[3]**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.14 กราฟแสดงการเกิดเจลาติไนเซชันของเม็ดแป้งแต่ละชนิด **[3]**

2.5.4 การเกิดรีโทรเกรเดชัน

เมื่อแป้งได้รับความร้อนจนถึงอุณหภูมิที่เกิดเจลาติไนซ์แล้วให้ความร้อนต่อไปจะทำให้เม็ดแป้งพองตัวเพิ่มขึ้นจนถึงจุดที่พองตัวเต็มที่และแตกออก โมเลกุลของอะมิโลสขนาดเล็กจะกระจัดกระจายออกมาทำให้ความหนืดลดลง เมื่อปล่อยให้เย็นตัวโมเลกุลที่อยู่ใกล้กันจะเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุล เกิดเป็นร่างแหสามมิติ โครงสร้างนี้สามารถอุ้มน้ำและไม่มีการดูดน้ำเข้ามาอีก ความหนืดคงตัวมากขึ้น เกิดลักษณะเจลเหนียวคล้ายฟิล์มหรือผลึก เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การเกิดรีโทรเกรเดชัน (retrogradation) หรือการคืนตัว (setback) เมื่อลดอุณภูมิให้ต่ำลงไปอีก ลักษณะการเรียงตัวของโครงสร้างจะแน่นมากขึ้น โมเลกุลอิสระของน้ำที่อยู่ในภายในจะถูกบีบออกนอกเจล ซึ่งเรียกว่า syneresis ปรากฏการณ์ทั้งสองทำให้เจลมีลักษณะขาวขุ่นและมีความหนืดเพิ่มขึ้น

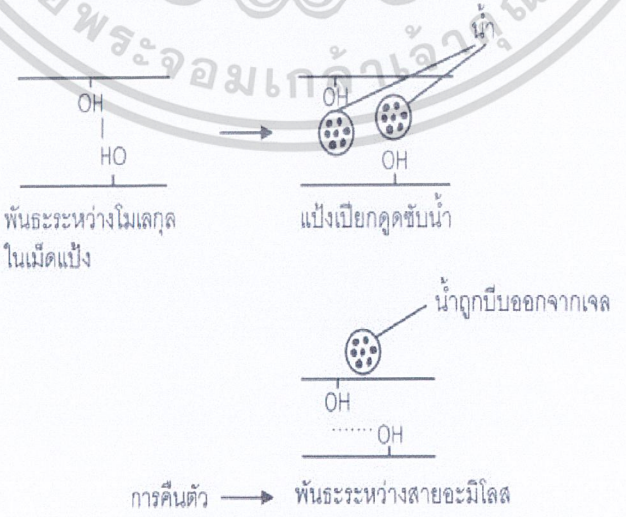
การคืนตัวของแป้งเปียกและสารละลายแป้งทำให้สารละลายมีความหนืดเพิ่มขึ้น มีลักษณะที่ขุ่นและทึบแสง เกิดชิ้นส่วนที่ไม่ละลายในแป้งเปียกที่ร้อน เกิดการตกตะกอนของอนุภาคแป้งที่ไม่ละลาย ทำให้เกิดเจล และโมเลกุลของน้ำถูกบีบออกมานอกเจล ในการคืนตัวของแป้งเมื่อเกิดขึ้นอย่างช้าๆ จะเกิดการตกตะกอน เมื่อเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วจะทำให้เกิดเจลขุ่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคืนตัวของแป้งขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ ได้แก่ ชนิดของแป้ง ความเข้มข้นของแป้ง กระบวนการให้ความร้อน กระบวนการให้ความเย็น อุณหภูมิ ระยะเวลา ความเป็นกรด – เบส ของสาระลาย ปริมาณและขนาดของอะมิโลส อะมิโลเพกทิน และองค์ประกอบทางเคมีอื่นๆ ในสภาวะที่อุณหภูมิต่ำและความเข้มข้นของแป้งสูง แป้งสามารถคืนตัวได้ดี

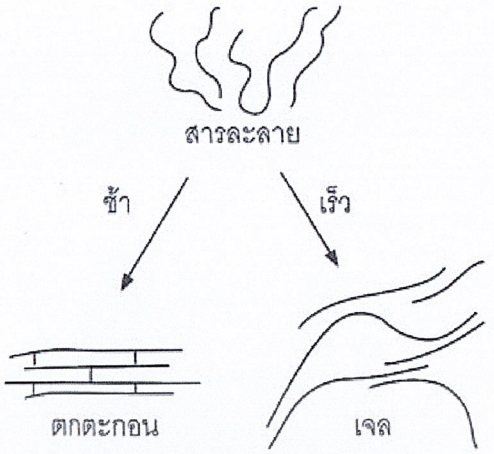
ในช่วง pH 5-7 แป้งสามารถคืนตัวได้ดีที่สุด สำหรับช่วง pH ที่สูงหรือต่ำกว่านี้แป้งจะเกิดการคืนตัวได้ช้าลง ในการชะลอการคืนตัวของแป้งจะใช้เกลือที่มีประจุบวกและลบ (monovalent anion และ cation) แคลเซียมไนเตรต (calcium nitrate) และยูเรีย (Urea)

ปริมาณและขนาดของอะมิโลสมีความสำคัญต่อการคืนตัวของแป้ง แป้งที่มีปริมาณอะมิโลสสูงจะเกิดการคืนตัวได้มากและเร็วกว่าแป้งที่มีปริมาณอะมิโลเพกทินสูง อัตราการคืนตัวจะสูงสุด (การละลายต่ำสุด) เมื่อขนาดโมเลกุล (Degree of polymerization) ของอะมิโลสเท่ากับ 100 ถึง 200 อัตราการคืนตัวจะลดลง เมื่อโมเลกุลของอะมิโลสยาวหรือสั้นกว่านี้ในการทำให้อะมิโลสที่คืนตัวกลับมาละลายได้อีกครั้งหนึ่งต้องใช้อุณหภูมิสูงถึง 100 ถึง 160 °C อะมิโลเพกทิน จะมีผลทำให้เกิดการคืนตัวแป้งน้อยมาก ดังนั้นแป้งแต่ละชนิดจะมีอัตราการคืนตัวที่แตกต่างกันออกไป ในแป้งข้าวโพดเหนียวจะมีอัตราการคืนตัวของแป้งต่ำสุด เนื่องจากไม่มีอะมิโลสในแป้งข้าวโพดเหนียว สำหรับแป้งข้าวโพดหรือแป้งสาลีจะมีอัตราการคืนตัวสูงกว่าแป้งมันสำปะหลังและแป้งมันฝรั่ง เนื่องมาจากในแป้งธัญพืชมีปริมาณอะมิโลสสูง (ประมาณ 28%) มีอะมิโลสโมเลกุลเล็ก และมีไขมันในปริมาณสูงทำให้เกิดการจับตัวเป็นสารประกอบเชิงซ้อนและไขมัน (amylose – lipid complex)



รูปที่ 2.15 การเกิดรีโทรเกรเดชัน [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.16 กลไกการคืนตัวของแป้ง [3]

การตรวจสอบความสามารถในการเกิดรีโทรเกรเดชัน (retrogradation) ของแป้งแต่ละชนิดอาจประมาณได้จากค่าการคืนตัว (setback) ของแป้ง ซึ่งเป็นผลต่างระหว่างความหนืดสุดท้ายกับความหนืดสูงสุด (setback from peak) หรือความหนืดสุดท้ายกับความหนืดต่ำสุด (setback from trough) ด้วยเครื่อง Brabender หรือ Rapod visco Analyzer นอกจากนี้การเกิดรีโทรเกรเดชัน สามารถวัดได้จากเครื่อง DSC โดยนำแป้งที่ผ่านเจลาติไนซ์ไปบ่มไว้ในสภาวะที่กำหนดเพื่อให้เกิดรีโทรเกรเดชัน ที่อุณหภูมิต่างๆ เช่น -2 , 4 , 25°C เป็นเวลาต่างกันตั้งแต่ 1 ถึง 21 วัน และนำแป้งที่เกิดรีโทรเกรเดชัน (retrogradation) มาตรวจสอบด้วยเครื่อง DSC อีกครั้ง บันทึกพลังงานที่ใช้ ($H_{retrogradation}$) เปอร์เซ็นต์รีโทรเกรเดชัน สามารถหาได้จากอัตราส่วนของเอนทรัลปีของแป้งรีโทรเกรเดชัน (retrogradation) ต่อเอนทาลปีของแป้งเจลาติไนเซชัน

$$\% \text{ retrogradation} = (H_{retrogradation} / H_{gelatinization}) \times 100$$

นอกจากนี้การเกิดรีโทรเกรเดชัน (retrogradation) ของแป้งจะทำให้เกิดการแยกตัวของน้ำจากเจล ซึ่งจะสัมพันธ์กับคุณสมบัติความคงตัวต่อการแช่เยือกแข็ง (Freeze- thaw stability) ของแป้งที่มีการเกิดรีโทรเกรเดชัน (retrogradation) ได้ดีจะมีความคงตัวต่อการแช่เยือกแข็งต่ำ ในขณะที่แป้งที่มีการเกิดรีโทรเกรเดชัน (retrogradation) ต่ำมีค่าความคงตัวต่อการแช่เยือกแข็งสูง ดังนั้นการวัดความคงตัวต่อการคืนรูปจากเยือกแข็งจึงสามารถนำไปใช้ประเมินการเกิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รีโทรเกรเดชัน (retrogradation) ของแป้งได้ แต่เนื่องจากแป้งส่วนใหญ่จะมีอะมิโลเพกทินสูง และการเกิดการคืนตัวนี้เกิดได้อย่างช้าๆจึงสร้างปัญหาให้กับผลิตภัณฑ์อาหารในระหว่างการเก็บ

2.6 สมบัติของแป้งฟิล์ม [3,60-61]

ในอุตสาหกรรมหลายประเภทมีการทำแป้งแห้งเพื่อจุดประสงค์ในการห่อหุ้มกระดาษ หรือเส้นใยผ้า (Coating) หรือเพื่อใช้เป็นกาว (Adhesive) สำหรับนำไปใช้ในอุตสาหกรรมกระดาษและสิ่งทอ แป้งฟิล์มจะมีคุณสมบัติเฉพาะ ได้แก่ ความเป็นพลาสติก ความแข็งแรง การละลายน้ำ การทนต่อความชื้น ความโปร่งใสของฟิล์ม และความเงามัน (gloss)

แป้งมันสำปะหลัง แป้งมันฝรั่ง และแป้งข้าวโพดเหนียว มีความยืดหยุ่นมากกว่าแป้งสาลี จึงเหมาะสมในการอบแห้งมากกว่าแป้งข้าวโพดและแป้งสาลี เนื่องจากขณะอบแห้งเม็ดแป้งข้าวโพดและเม็ดแป้งสาลีจะเปราะ แตกหักได้ง่าย

แป้งฟิล์มที่ได้จากแหล่งแป้งที่ต่างกันจะมีความสามารถในการละลายน้ำได้ต่างกัน และมีอัตราในการเกิดรีโทรเกรเดชันต่างกัน แป้งจากธัญพืชมีอะมิโลสและไขมันในปริมาณสูงทำให้เกิดการรีโทรเกรเดชันในระหว่างการทำแป้งแห้ง ทำให้ส่วนนั้นไม่ละลายและเกิดเป็นร่างแห ก่อให้เกิดการไม่ละลายของส่วนอะมิโลเพกทินอีกด้วย ในขณะที่แป้งมันฝรั่ง แป้งมันสำปะหลัง และแป้งข้าวโพดเหนียวมีแนวโน้มการเกิดรีโทรเกรเดชันต่ำ จึงสามารถละลายในน้ำเย็นได้อย่างสมบูรณ์

แป้งฟิล์มจะมีสมบัติในการรักษาความสามารถในการละลายน้ำและความเป็นกาวได้ในช่วงระยะเวลาหนึ่ง แป้งฟิล์มที่ได้นำไปใช้ในผลิตภัณฑ์ประเภทกาว เช่น ใช้ทำซองจดหมาย แสตมป์ กระดาษกาว

แป้งฟิล์มจากมันสำปะหลัง แป้งมันฝรั่ง และแป้งข้าวโพดเหนียวมีความใสและความมันเงามากกว่าแป้งฟิล์มจากธัญพืช เนื่องจากในระหว่างการทำแห้งและการเก็บรักษาแป้งจากธัญพืชจะเกิดรีโทรเกรเดชัน โมเลกุลอะมิโลสจะเกิดเป็นผลึกที่ไม่ละลายทำให้ฟิล์มขุ่น และเปราะง่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.10 แสดงสมบัติของฟิล์มจากแป้งแต่ละชนิด [3]

ลักษณะ	แป้งมันฝรั่ง	แป้งข้าวโพด	แป้งสาลี	แป้งมันสำปะหลัง	แป้งข้าวโพดเหนียว
ความใส	สูง	ต่ำ	ต่ำ	สูง	สูง
การละลาย	สูง	ต่ำ	ต่ำ	สูง	สูง
ความเรียบ-ยืดหยุ่น	สูง	ต่ำ	ต่ำ	สูง	สูง
ความแข็งแรง-เหนียว	สูง	ต่ำ	ต่ำ	สูง	สูง

2.7 ลักษณะที่สำคัญทางอุตสาหกรรม [3,68-72]

ลักษณะที่สำคัญของแป้งมันสำปะหลัง คือ องค์ประกอบต่างๆที่มีอยู่ในหัวมันสำปะหลัง ซึ่งกล่าวถึงสิ่งสำคัญที่สุด 4 องค์ประกอบ คือ ปริมาณแป้ง ปริมาณไซยาไนด์ ปริมาณเปลือก (เส้นใย) และสารประกอบที่ทำให้สีในเนื้อแป้ง

2.7.1 ปริมาณแป้ง

ในขณะที่ประเทศผู้ปลูกมันสำปะหลังรายใหญ่ เช่น บราซิล อินโดนีเซีย และประเทศในทวีปแอฟริกา บริโภคมันสำปะหลังเป็นอาหารและสนใจคุณสมบัติการรับประทานเป็นอาหาร (organic cooking quality) เป็นหลักนั้น ประเทศไทยได้ชื่อว่าเป็นประเทศที่ใช้มันสำปะหลังในแง่อุตสาหกรรมแป้งและแป้งแปรรูปมากที่สุด ปริมาณแป้งเป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุดขององค์ประกอบทั้งหมด ปริมาณแป้งในหัวมันสำปะหลังพันธุ์ต่างๆ มีอยู่ประมาณ 14-28%

2.7.2 ปริมาณไซยาไนด์

ไซยาไนด์เป็นพิษ พบในพืชมากกว่า 3000 ชนิด รวมทั้งมันสำปะหลังด้วย ไซยาไนด์ในมันสำปะหลังถูกสร้างขึ้นจากกรดอะมิโน 2 ตัว คือ แวลีน (valine) และไอโซลิวซีน (isoleucine)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสังเคราะห์จากแวลีนจะได้เป็นไกลโคไซด์ (glycoside) ของแอซีโตนไซยาโนไฮดริน (acetone-cyanohydrins) เรียกว่า ลินามาริน (linamarin) หรือ (2 – hydroxyl isobutylonitrile – β – D – glycoside) ถ้าสังเคราะห์จากไอโซลิวซีนจะได้โลทอสสตราลิน (lotaustralin) หรือ 2 – hydroxyl -2-methyronitrile – β – D – glycoside ซึ่งเป็นไกลโควด์ของเมทิลเอทิลคีโตนไซยาโนไฮดริน (methylene ketone cyanohydrins) ในมันสำปะหลังจะมีลินามารินอยู่ 93 ส่วน และโลทอสสตรา-ลินอยู่ 7 ส่วน สารประกอบที่สังเคราะห์ได้นี้จะอยู่ในเนื้อเยื่อพืช เมื่อเนื้อเยื่อพืชถูกทำลายจะมีการสลายตัวของสารประกอบนี้ โดยกระบวนการไฮโดรไลซิสของน้ำย่อยลินามาเรส (limanarase) และน้ำย่อยออกซิไนตริเลส (oxynitrilase) ย่อยสลายได้จากกรดอะมิโนและกรดไฮโดรไซยานิก ปรากฏการณ์ที่พืชสามารถย่อยกรดไฮโดรไซยานิกออกมานี้ เราเรียกว่า ไซยาโนเจนซิส (cyanogenesis) ซึ่งเป็นที่เข้าใจว่าเป็นการป้องกันตนเองของพืชจากการถูกทำลายโดยสัตว์และแมลง

ปัจจุบันยังไม่มีรายงานว่ามีมันสำปะหลังพันธุ์ที่ปราศจากกรด HCN เลย โดยทั่วไปปริมาณกรด HCN ในหัวมันสำปะหลังมีตั้งแต่ 14 – 400 มิลลิกรัม/กิโลกรัมแบ่งเป็น 3 กลุ่ม คือ

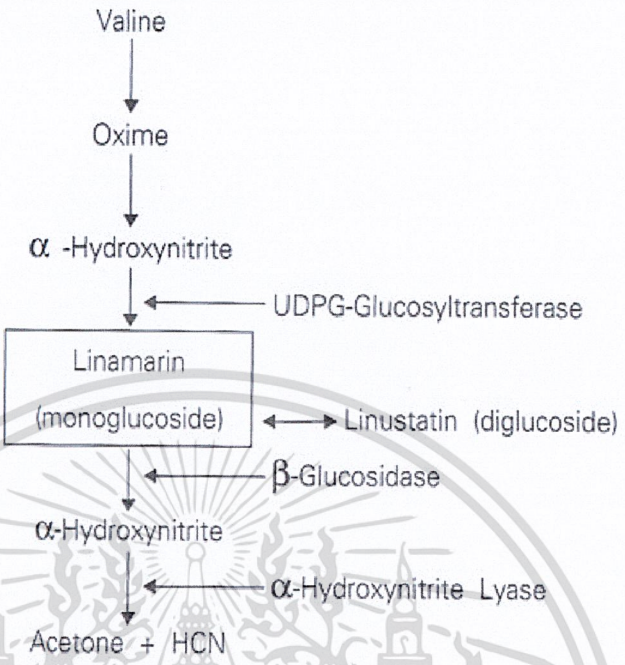
ก) Innocuous คือ หัวมันที่มีปริมาณ HCN อยู่น้อยกว่า 50 มิลลิกรัม/กิโลกรัมหัวมันที่ปอกเปลือก

ข) Moderately คือ หัวมันที่มีปริมาณ HCN อยู่ตั้งแต่ 50 - 100 มิลลิกรัม/กิโลกรัมหัวมันที่ปอกเปลือก

ค) Dangerous poisonous ที่มีปริมาณ HCN อยู่มากกว่า 100 มิลลิกรัม/กิโลกรัมหัวมันที่ปอกเปลือก

จากการวิจัยพบว่าอายุการเก็บเกี่ยวมันสำปะหลังมีผลต่อปริมาณไซยาไนด์ในหัวมันสำปะหลังที่เก็บเกี่ยวในช่วงอายุ 8-10 เดือนมีปริมาณไซยาไนด์สูง (210 ไมโครกรัมต่อกรัม) แต่หัวมันสำปะหลังในช่วง 12 เดือน จะมีปริมาณไซยาไนด์ที่ต่ำ คือ 16 ไมโครกรัมต่อกรัม อาจจะเป็นผลมาจากสภาวะแวดล้อมที่แตกต่างกันในระหว่างการเพาะปลูกและการเก็บเกี่ยว โดยมีรายงานว่าปริมาณไซยาไนด์ในหัวมันที่ปลูกในสภาวะแห้งแล้งจะมีมากกว่าในหัวมันที่ปลูกในสภาวะที่มีน้ำเพียงพอ ความสมบูรณ์ของแร่ในดิน โดยเฉพาะปริมาณแคลเซียมจะส่งผลต่อปริมาณไซยาไนด์ในหัวมันด้วยเช่นเดียวกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.17 การสร้างและการย่อยสลายสารประกอบไซยาโนกลูโคซายด์ลินามาริน [1]

2.7.3 ปริมาณเปลือก (เยื่อใย)

ปริมาณเปลือก ความหนาของเปลือก ถึงแม้ว่าจะเป็นประโยชน์ในการขนส่ง ทนทานต่อค่าการสูญเสียระหว่างการเก็บเกี่ยว แต่เมื่อผ่านกระบวนการผลิตตั้งแต่การชั่งน้ำหนักเพื่อหาปริมาณแป้ง เมื่อผ่านการล้างยังมีเปลือกและใยในเนื้อของตัวมันเองติดอยู่ จะเป็นการเพิ่มปริมาณเยื่อหรือกากมัน (pulp) และจะเพิ่มในการสกัด ลดประสิทธิภาพสกัดลง เปลือกมันสำปะหลังประกอบด้วยเนื้อเยื่อในชั้น periderm , schlerenchyma , cortical parenchyma และ phoem

ลักษณะของสรีระของหัวมันนั้นเป็นไปตามพันธุ์ การศึกษาลักษณะของการเปลี่ยนแปลงเยื่อใย (รวมทั้งเปลือกและเยื่อ) ในระหว่างการเจริญเติบโตของมันสำปะหลังพันธุ์ต่างๆ จึงจำเป็นต่อการวิจัยมาก เพราะเยื่อเป็นปัจจัยที่บ่งบอกถึง rasping effect และ rasping energy ของการสกัดในโรงงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.4 สารประกอบที่ทำให้เกิดสีในเนื้อแป้ง

หัวมันพันธุ์ต่างๆกันจะมีเนื้อสีที่แตกต่างกัน นอกจากนี้สีขาวยังมีเนื้อสีขาวนวลจนถึงสีเหลือง ยังไม่มีรายงานการวิเคราะห์หาสารประกอบสีหรือการสร้างและการเปลี่ยนแปลงตามอายุของหัวมันพันธุ์ต่างๆ ที่เกิดสีของพันธุ์ที่มีในประเทศไทย จากการรายงานของ CAT ถึงการเปลี่ยนแปลงหลังการเก็บเกี่ยว พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงชัดเจนที่ parenchyma พบสารประกอบพวก phenolic leucoanthocyanin และ cathethin ซึ่งต่อไปจะเปลี่ยนแปลงกลายเป็นสีน้ำเงินและดำ รวมถึงพบสารประกอบ scopoleitin และ coumarin ในขณะที่ไม่พบหรือพบสารเหล่านี้น้อยมากในหัวมันสด

ลักษณะสีที่มาจากพันธุ์หรือมาจากการเปลี่ยนแปลงหลังการเก็บเกี่ยวในเนื้อมันจะมีผลอย่างยิ่งในกระบวนการผลิต แม้ว่าสีเหล่านี้เป็นสีที่สามารถละลายน้ำได้ก็ตาม โอกาสของการพัฒนาพันธุ์ในอนาคตสำหรับมันสำปะหลังเพื่ออุตสาหกรรมนั้นควรมีเนื้อสีขาว และเมื่อเก็บเกี่ยวก็ยังมีสีขาวอยู่ได้เป็นเวลานานพอควร เพื่อให้ได้แป้งมันสำปะหลังที่มีคุณภาพดีต่อไป

2.8 คุณภาพของแป้งมันสำปะหลัง [3,87-88]

แป้งมันสำปะหลังมีลักษณะเป็นผงละเอียด สีขาว ลักษณะเด่นของแป้งมันสำปะหลัง คือ มีความบริสุทธิ์ที่สูง มีสิ่งเจือปนค่อนข้างต่ำ โดยมีแป้งอยู่มากกว่าร้อยละ 95 และมีปริมาณโปรตีนและไขมันค่อนข้างต่ำ (<1%) มีฟอสฟอรัสน้อยกว่า 0.04% ลักษณะของเม็ดแป้งเมื่อทำการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์จะมีรูปร่างเป็นเม็ดกลมหรือเป็นลูกโซ่ และอาจจะมีรอยบุ๋มด้านใดด้านหนึ่งของเม็ดแป้ง เม็ดแป้งโดยส่วนใหญ่จะมีขนาดปานกลางคืออยู่ในช่วง 3 – 40 ไมครอน และมีขนาดเฉลี่ยประมาณ 12 – 15 ไมครอนซึ่งมีขนาดเล็กกว่ามันฝรั่ง (5 – 100 ไมครอน) แต่ใหญ่กว่าแป้งข้าวเจ้า ลักษณะของโครงสร้างผลึกของเม็ดแป้งมันสำปะหลังเมื่อตรวจดูด้วย x – ray diffractometer จะมีทั้งแบบ A และแบบ C และมีปริมาณผลึก (Cystallinity) 15-18% โดยในขณะที่รายงานว่าแป้งมันสำปะหลังมีปริมาณผลึกสูงถึง 38%

แป้งมันสำปะหลังจัดเป็นแป้งที่มีปริมาณอะมิโลสค่อนข้างต่ำสุด คือ 18 – 23% และมีขนาดที่แตกต่างกัน โดยมีค่า degree of polymerization (DP) ตั้งแต่ 1100 – 3200 และขึ้นอยู่กับวิธีที่ใช้วัดขนาด โครงสร้างของอะมิโลสจะประกอบด้วยส่วนที่เป็นเส้นตรงและส่วนที่เป็นกิ่ง โดยอัตราส่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของโครงสร้างที่เป็นเส้นตรงต่อโครงสร้างที่เป็นกิ่งจะมีค่าเท่ากับ 0.58 ต่อ 0.42 ซึ่งจะมีค่าใกล้เคียงกับแป้งข้าวโพด (0.56:0.44)

คุณสมบัติในการเกิดปฏิกิริยากับน้ำเป็นคุณสมบัติสำคัญในการนำแป้งไปใช้ประโยชน์ เม็ดแป้งที่แขวนลอยอยู่ในน้ำเมื่อได้รับความร้อน พลังงานความร้อนจะเข้าไปทำลายพันธะไฮโดรเจนในโครงสร้างของเม็ดแป้ง ทำให้โมเลกุลน้ำสามารถเข้าไปจับกับหมู่ไฮดรอกซิลที่เป็นอิสระของเม็ดแป้งได้ เม็ดแป้งจะเริ่มพองขึ้น ซึ่งกำลังการพองตัวของเม็ดแป้งจะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ชนิดของเม็ดแป้ง ปริมาณและโครงสร้างของอะมิโลส และอะมิโลเพกทิน สารอื่นๆ ที่มีอยู่ในแป้ง เช่น ไขมัน หมู่ฟอสเฟต เป็นต้น แป้งที่มีอะมิโลสสูงจะมีกำลังการพองตัวต่ำกว่าแป้งที่มีอะมิโลสต่ำ ทั้งนี้เนื่องจากลักษณะโครงสร้างของอะมิโลสเป็นเส้นตรงจะทำให้เกิดพันธะระหว่างโมเลกุลได้ดี และอะมิโลสอาจจับตัวกับไขมันทำให้ขัดขวางการพองตัวของเม็ดแป้งได้ แป้งมันสำปะหลังจัดเป็นแป้งที่มีอะมิโลสต่ำ จึงมีกำลังการพองตัวที่ดี และมีค่าความสามารถในการละลายได้ซึ่งสัมพันธ์กับกำลังการพองตัวสูง โดยค่ากำลังการพองตัวซึ่งวัดได้จากน้ำหนักของเม็ดแป้งที่พองตัวอย่างอิสระในน้ำต่อน้ำหนักแห้งของเม็ดแป้ง จะมีค่าประมาณ 50 และการละลายได้ประมาณ 35% ที่อุณหภูมิ 95° C ซึ่งมีค่ามากกว่าแป้งข้าวโพด แต่ต่ำกว่าแป้งมันฝรั่ง ทั้งนี้เนื่องจากแป้งมันฝรั่งมีหมู่ฟอสเฟตที่สามารถแตกตัวและจับน้ำได้ดี จึงช่วยให้แป้งมันฝรั่งมีค่ากำลังการพองตัวสูงมาก (>1000) ลักษณะการพองตัวของเม็ดแป้งมันสำปะหลังที่อุณหภูมิต่างๆ กัน จะมีแบบขั้นเดียว ซึ่งจะแตกต่างจากแป้งธัญพืช ที่มักมีกำลังการพองตัวเป็นแบบ 2 ขั้นตอน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแป้งจากธัญพืชจะมีแรงภายในเม็ดแป้งมากกว่า 1 ชนิด และมีกำลังการพองตัวมากกว่าหัวพืช

ในระหว่างที่ให้ความร้อนแก่เม็ดแป้งที่แขวนลอยอยู่ในน้ำ เม็ดแป้งจะเริ่มดูดซึมน้ำจากภายนอกนั้น เม็ดแป้งจะเริ่มพองตัวพร้อมๆกับเม็ดแป้งสูญเสียความสามารถในการเบี่ยงเบนแสงโพลาไรซ์ ลักษณะเช่นนี้จะทำให้การพองตัวของเม็ดแป้งเป็นแบบผันกลับไม่ได้ และเม็ดแป้งเกิด gelatinization ขึ้น แป้งแต่ละชนิดจะมีอุณหภูมิเริ่มต้นและช่วงอุณหภูมิในการเกิด gelatinization จะอยู่ในช่วง 58 -70° C และพลังงานที่ใช้ในกระบวนการ gelatinization จะมีประมาณ 14 – 17 J/g เมื่อวิเคราะห์โดยเทคนิค Differential scanning calorimetry

โดยทั่วไปเม็ดแป้งจะพองตัวเมื่อได้รับความร้อน เม็ดแป้งจะเปลี่ยนสภาพเป็นแป้งเปียกที่มีความหนืดเพิ่มขึ้นอย่างมาก และเมื่อแป้งเปียกเย็นลงจะเกิดเป็นเจลขึ้น อย่างไรก็ตามลักษณะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความหนืดของแป้งเปียกและการเกิดเจลในเม็ดแป้งแต่ละชนิดจะแตกต่างกัน ลักษณะความหนืดของแป้งมันสำปะหลังที่เปลี่ยนแปลงไปภายใต้สภาวะที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและการกวนตลอดเวลา สามารถตรวจสอบได้โดยการใช้เครื่องมือวัดความหนืด Rapid visco Analyzers หรือ Brabender Visciamylograph แป้งมันสำปะหลังเมื่อได้รับความร้อนจะมีค่ากำลังการพองตัวสูง แต่แป้งเปียกก็ยังคงได้รับความร้อนและแรงกลอย่างต่อเนื่อง มีความหนืดลดลงอย่างรวดเร็ว ดังนั้น แป้งเปียกของมันสำปะหลังจะไม่คงตัวมากนัก ซึ่งลักษณะที่เป็นเช่นนี้เป็นข้อจำกัดในการใช้แป้งมันสำปะหลังเป็นสารให้ความหนืดในผลิตภัณฑ์บางชนิด จึงจำเป็นต้องมีการดัดแปลงแป้งเพื่อเพิ่มความคงตัวของแป้งเปียก เมื่อแป้งเปียกของแป้งมันสำปะหลังเย็นตัวลง ความหนืดจะเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ทั้งนี้เนื่องมากจากแป้งมันสำปะหลังมีอะมิโลสค่อนข้างต่ำ ทำให้เกิดการจับกันของหมู่ไฮดรอกซิลของอะมิโลสในระหว่างเย็นตัวต่ำ แป้งมันสำปะหลังจึงเป็นแป้งที่เกิดจากการคืนตัวต่ำ และให้ลักษณะของแป้งเปียกที่ใส ไม่ทึบแสงเมื่อเทียบกับแป้งเปียกชนิดอื่น

2.9 การดัดแปรแป้ง [3,126-130]

2.9.1 จุดประสงค์ในการดัดแปรแป้ง

เนื่องจากแป้งมีคุณสมบัติเฉพาะตัว ซึ่งบางครั้งไม่เป็นที่ต้องการต่อการใช้งานในระดับอุตสาหกรรม หรือยังไม่เหมาะสมกับสภาวะบางอย่าง จึงมีการนำแป้งมาปรับเปลี่ยนคุณสมบัติ แป้งดัดแปร (modified starch) ความหมายตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก.1073-2535 หมายถึง ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนำแป้ง (starch) เช่น แป้งมันสำปะหลัง แป้งข้าวโพด แป้งมันฝรั่ง แป้งสาลี มาเปลี่ยนสมบัติทางเคมีและ/หรือทางฟิสิกส์จากเดิมด้วยความร้อน และ/หรือเอนไซม์ และ/หรือสารเคมีชนิดต่างๆ เพื่อให้เหมาะสมกับการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมอาหารต่างๆ ซึ่งคุณลักษณะเป็นเกณฑ์ชี้บ่งของแป้งดัดแปร แป้งดัดแปรแต่ละประเภทจะต้องเป็นไปตามข้อกำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม 2535

ลักษณะจำเพาะของแป้งนั้นอาจเป็นลักษณะพิเศษมาจากแหล่งที่ผลิต เช่น แป้งที่ได้จากมันสำปะหลัง ซึ่งมีลักษณะจำเพาะ เช่น ขนาดรูปร่าง และการพองตัว แต่สิ่งที่แป้งทุกๆชนิดมีคล้ายกัน คือ ลักษณะการเปลี่ยนแปลงความหนืดเมื่อมีปัจจัยความร้อน แรงเฉือน และเวลาเข้ามาเกี่ยวข้อง ซึ่งแป้งแต่ละชนิดจะแสดงการเปลี่ยนแปลงคล้ายๆกันเมื่อตรวจสอบโดยเครื่อง Rapid-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Visco Analyzer (RVA) หรือ เครื่อง Brabender Viscomylograph ถ้าสามารถปรับเปลี่ยนคุณสมบัติเหล่านี้ได้ จะทำให้เราสามารถนำแป้งไปใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆได้มากขึ้น การดัดแปรแป้งจึงได้เริ่มมีผู้ค้นคว้าวิจัยขึ้น ทั้งโดยทางกายภาพและทางเคมี ทั้งนี้เนื่องจากแป้งมีความพร้อมในการทำปฏิกิริยาต่างๆได้ดีมาก

แป้งดิบโดยทั่วไปมีสมบัติบางประการไม่เหมาะสมกับการผลิตในอุตสาหกรรม ได้แก่ มีช่วงความหนืดที่แคบ มีลักษณะเนื้อสัมผัสไม่ดี มีความคงทนต่อแรงเฉือนในการกระบวนการผลิตหรือความคงทนต่อสภาวะต่างๆต่ำ ซึ่งทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพต่ำ และสิ้นเปลืองงบประมาณในการผลิตโดยไม่จำเป็น ดังนั้นจึงมีการดัดแปรคุณสมบัติบางประการของแป้งดิบเพื่อให้เหมาะสมต่อการใช้งาน เช่น ทำให้มีลักษณะเนื้อสัมผัสที่ดีขึ้น คงทนต่อสภาวะในการผลิตได้ดี การเกิดเจลาติไนซ์ (gelatinization) การคืนตัว (retrogradation) และการสูญเสียน้ำของเจลลดลง มีความคงตัวในการคืนรูปจากเยือกแข็ง (freeze-thaw) เพิ่มขึ้น มีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) หรือความสามารถในการผสมกับตัวทำละลายอื่นๆเพิ่มขึ้น

แป้งมันสำปะหลังเป็นแป้งที่มีความบริสุทธิ์สูง มีการปนเปื้อนของสารประกอบเคมีอื่นๆต่ำ เหมาะต่อการนำมาทำปฏิกิริยาเคมี ส่วนอสัณฐาน(Amorphous) ของอะมิโลเพกทินจะเป็นส่วนที่ทำปฏิกิริยาเคมีได้ดีที่สุด

2.9.2 การแบ่งประเภทของแป้งดัดแปร

การดัดแปรรูปแป้งนั้นมีผู้แบ่งกลุ่มไว้หลายประเภทและหลายรูปแบบ ในที่นี้จะขอแบ่งกลุ่มตาม BeMiller (1977) ที่เสนอกลุ่มดังนี้

(1) การดัดแปรทางเคมี (Chemical modification) แบ่งออกเป็น

1) การเกิดอนุพันธ์ (derivetization)

- การแทนที่สารในโมเลกุลเดี่ยวของแป้ง (monostarch substitution) ทั้งปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชัน เช่น แป้งแอซีเตต (starch acetate) หรือ ปฏิกิริยาอีเทอร์ริฟิเคชัน เช่น แป้งไฮดรอกซีเอทิล (hydroxyethyl starch)
- การแทนที่โมเลกุลที่มีหมู่ฟังก์ชันมากกว่า 1 หมู่ เช่น แป้ง แป้งครอสลิง (cross-linked starch)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) การลดขนาดโมเลกุลแป้งโดยกรด (acid thinning) เช่น แป้งย่อยด้วยกรด (acid-modified starch) หรือ thin-boiling starch

3) เดกซ์ทรินไนเซชัน (dextrinization) เป็นการลดขนาดหรือเปลี่ยนการจับเกาะ (depolymerization ransglycosylation) โดยใช้ความร้อน หรือความร้อนกับกรด เช่น เดกซ์ทริน (dextrin)

4) ออกซิเดชัน (Oxidation) ทำให้เกิดการฟอกสีและลดขนาดของโมเลกุลโดยปฏิกิริยาออกซิเดชัน (bleaching และ depolymerization) เช่น แป้งออกซิไดซ์ (oxidized starch)

5) การย่อยสลาย (hydrolysis) โดยใช้น้ำย่อยหรือกรด เพื่อย่อยสลายเป็นน้ำตาลโมเลกุลเล็ก เช่น มอลโตเดกซ์ทริน (maltodextrin)

(2) การดัดแปรทางกายภาพ (Physical modification)

1) เจลาติไนเซชัน (gelatinization) เป็นการให้ความร้อนจนผ่านขั้นตอนของเจลาติไนเซชัน แล้วทำให้แห้งทันที เช่น แป้งพรีเจลาติไนซ์ (Pregelatinized starch)

2) แป้งละลายน้ำเย็น (Granular-Cold-Water-Soluble-Starch : GCWSS) เป็นการแปรรูปจนได้แป้งที่สามารถละลายได้ในน้ำเย็น โดยไม่ต้องผ่านขั้นตอนการเกิดเจลาติไนเซชัน

3) การลดขนาดเม็ดแป้งโดยทางกล การทำให้เม็ดแป้งแตกโดยทางกล จะได้เม็ดแป้งขนาดเล็กกว่าปกติ

4) Annealing เป็นการให้ความร้อนในขณะที่เม็ดแป้งอยู่ในอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเจลาติไนเซชัน

5) การแปรรูปด้วยความร้อนชื้น (heat moisture treatment) เป็นการให้ความร้อนสูงกว่าจุดเจลาติไนเซชันแก่แป้ง ในขณะที่แป้งมีความชื้นต่ำ

(3) การแปรทางเทคโนโลยีชีวภาพ (Biotechnological Modification)

การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของแป้งโดยใช้การเปลี่ยนแปลงทางพันธุกรรม

1) waxy starch คือ แป้งที่มีอะมิโลสต่ำหรือไม่มีเลย

2) high-amylose starch คือ แป้งที่มีอะมิโลสสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9.3 การออกแบบปฏิกิริยาการดัดแปรแป้ง

การแปรรูปไม่ว่าจะเป็นแบบกายภาพหรือทางเคมี มีปฏิกิริยาสามารถเกิดขึ้นได้ในลักษณะต่างๆกัน และมีผลต่างๆกัน คือ

2.9.3.1 ปฏิกิริยาที่ออกแบบให้เกิดในแป้งที่ผ่านการเกิดเจลาติไนเซชันแล้ว

ปฏิกิริยาเช่นนี้นิยมใช้กับกระบวนการย่อยสลาย (hydrolysis) เช่น กระบวนการผลิตน้ำเชื่อมกลูโคส ในการผลิตสามารถเติมน้ำย่อยพร้อมกับแป้งดิบได้ และเมื่อผ่านกระบวนการเจลาติไนซ์ปฏิกิริยาการย่อยก็จะเกิดขึ้น ทำให้ความหนืดของสารละลายแป้งลดลง และสามารถทำปฏิกิริยากับของละลายที่มีปริมาณสูงได้ รวมทั้งเป็นการลดปริมาณจุลินทรีย์ที่ปนเปื้อนในแป้ง (pasteurization)

2.8.3.2 ปฏิกิริยาที่ใช้กับเม็ดแป้งแห้งหรือกึ่งแห้ง

ในปฏิกิริยานี้มีการผลิตอนุพันธ์ของแป้งโดยการให้ความร้อนแก่แป้งดิบ (แห้ง) และสารอนุพันธ์ (derivatizing agent) ที่อุณหภูมิ 100-200°C ในบางปฏิกิริยาใช้แป้งที่มีความชื้น 5-50% จึงเรียกปฏิกิริยานี้ว่าปฏิกิริยากึ่งแห้ง

2.8.3.3 ปฏิกิริยาที่ใช้กับเม็ดแป้งในสภาพแขวนลอย

เม็ดแป้งดิบในสภาพแขวนลอยสามารถทำปฏิกิริยากับสารเคมีได้หลายชนิด ในปฏิกิริยามีการเติมเบสและเกลือเบสบางชนิด เช่นโซเดียมไฮดรอกไซด์ หรือ แคลเซียม-ไฮดรอกไซด์ จะเพิ่มความสามารถในการทำปฏิกิริยาเคมี เกลือบางชนิด เช่น โซเดียม-คลอไรด์ หรือโซเดียมซัลเฟต ช่วยลดการพองตัวของเม็ดแป้ง อุณหภูมิที่ใช้อยู่ในช่วงอุณหภูมิห้องถึง 50°C ได้เป็นอนุพันธ์ของแป้ง แล้วนำไปกำจัดน้ำโดยการกรองหรือเหวี่ยง ต่อมาล้างเอาเกลือและสารเคมีที่เติมออกไป และทำให้แห้งเป็นขั้นตอนสุดท้าย

2.9.4 การดัดแปรทางเคมี

ในการทำปฏิกิริยาเคมีกับแป้ง โดยส่วนใหญ่แล้วจะทำในสภาพแขวนลอย ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเจลาติไนเซชัน (45-50°C) สารเคมีจะทำปฏิกิริยากับแป้งบริเวณพื้นผิวเม็ดแป้ง โดยจะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกิดปฏิกิริยาเคมีของเม็ดแป้งขึ้นที่บริเวณพื้นผิวของส่วนผลึก (crystallite) และภายในส่วนอสัณฐาน (Amorphous) เนื่องจากเม็ดแป้งประกอบด้วยส่วนอะมิโลสประมาณ 25% เมื่อทำปฏิกิริยาระหว่างเม็ดแป้งกับสารละลายไอโอดีน (มีน้ำเป็นตัวกลาง) เม็ดแป้งจะให้สารประกอบเชิงซ้อนสีน้ำเงินทันที แต่เมื่อทำปฏิกิริยาเม็ดแป้งแห้งกับไอของไอโอดีนจะได้สีน้ำตาลแดง ซึ่งแสดงว่าปฏิกิริยานี้เกิดขึ้นที่บริเวณพื้นผิวของเม็ดแป้งเท่านั้น ดังนั้นในการใช้สารเคมีทำปฏิกิริยากับเม็ดแป้งแห้ง สารเคมีจะไม่สามารถเข้าทำปฏิกิริยาได้ แต่เมื่อทำปฏิกิริยาเคมีกับเม็ดแป้งแห้งที่ชุ่มน้ำหรือเม็ดแป้งที่ผ่านการปรับสภาพด้วยด่าง เม็ดแป้งจะพองตัวและสามารถทำปฏิกิริยาเคมีกับสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลไม่เกิน 1,000 ได้

ในระหว่างการดัดแปรแป้งทางเคมี จะหลีกเลี่ยงการเกิดเจลาติไนเซชันได้โดยการเติมโซเดียม-ซัลเฟต หรือ โซเดียมคลอไรด์ลงในส่วนผสม การดัดแปรทางเคมีในระบบอุตสาหกรรมจะใช้สารเคมีในการทำปฏิกิริยาในปริมาณน้อย ปฏิกิริยาโดยส่วนใหญ่ทำในน้ำ ให้ค่าระดับการแทนที่ (degree of substitution , DS) ต่ำ ประมาณ 0.1-0.2 ใช้วิธีการดัดแปรหลายๆวิธีร่วมกัน ให้ได้ลักษณะทางเคมีของผลิตภัณฑ์ที่สามารถปรับปรุงได้

การแทนที่ของหมู่ฟังก์ชันภายในเม็ดแป้งแสดงเป็นค่าระดับการแทนที่ (degree of substitution, DS) คือ จำนวนหมู่ฟังก์ชันที่มาแทนที่หมู่ไฮดรอกซิลต่อจำนวนหน่วยกลูโคส ในโมเลกุลกลูโคสมีหมู่ไฮดรอกซิลที่ถูกแทนที่ได้ 3 หมู่ คือ คาร์บอนตำแหน่งที่ 2,3 และ 6 ถ้าหมู่ไฮดรอกซิลทั้ง 3 หมู่ถูกแทนที่จะมีค่า DS เท่ากับ 3 ถ้าแทนที่ 2 หมู่จะมีค่า DS เท่ากับ 2 และแทนที่ 1 หมู่จะมีค่า DS เท่ากับ 1 จะบ่งบอกถึงจำนวนหมู่ไฮดรอกซิลที่ถูกแทนที่เท่านั้น แต่ไม่ระบุถึงตำแหน่งที่ถูกแทนที่ การแสดงค่า DS จะเป็นการแสดงค่าเฉลี่ยของทั้งกลุ่มโมเลกุล

ระดับการแทนที่ (Degree of Substitution , DS)

$$DS = \frac{\text{โมลของหมู่ไฮดรอกซิลที่ถูกแทนที่โดยเฉลี่ย}}{\text{โมลของหมู่แอนไฮโดรกลูโคส}}$$

มีค่าได้มากที่สุด = 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.10 แมงลัก (Psylium) [7]

แมงลักมีชื่อเรียกในภาษาท้องถิ่นแตกต่างกันออกไป เช่น ทางภาคเหนือเรียกว่า ก้อมก้อข้าว, มังลัก, แมงลัก ก้อมก้อขาว, ทางภาคกลางเรียก มังลัก, ส่วนที่เลยเรียก ผักอีตู้

ชื่อวิทยาศาสตร์

ออกซิมัม บาซิลิคัม (Ocimum basilicum Linn. forma citratum Ba) จัดอยู่ในวงศ์ลาเบียตี้ (LABIATAE)

ลักษณะทางพฤกษศาสตร์

แมงลักเป็นพืชล้มลุก ที่ใช้เป็นอาหารได้ทั้งใบและเมล็ด ส่วนที่เป็นใบนั้นมีกลิ่นฉุน ใช้ประกอบอาหารเช่นเดียวกับกระเพราและโหระพา ส่วนมากจะใช้รับประทานกับขนมจีน หรือใส่เครื่องแกงต่างๆ ส่วนเมล็ดแมงลักใช้ทำเป็นขนมอื่นๆได้ นอกจากนี้ ปัจจุบันเมล็ดแมงลักนำมาทำเป็นยาระบายได้ และสามารถนำมาทำเป็นอาหารเสริมลดความอ้วนได้ มีลักษณะทรงพุ่มคล้ายโหระพา มีความสูงต้น 30-80 ซม. ใบเป็นใบเดี่ยว รูปรี กว้าง 1-2.5 ซม. ยาว 2-5 ซม. ปลายและโคนใบแหลม มีกลิ่นหอม ขอบใบเรียวหรือหยักมนๆ ดอกมีสีขาว ออกเป็นช่อที่ปลายกิ่ง ช่อดอกยาว 6-10 ซม. ใบประดับจะคงอยู่เมื่อเป็นผล ผลเป็นผลชนิดแห้ง

สรรพคุณ

- แก้ท้องผูก

ขนาดและวิธีใช้ ใช้เมล็ดแมงลัก 1-2 ช้อนชา เติมน้ำเมื่อพองเต็มที่ ควรได้ 3/4 - 1 แก้ว ดื่มก่อนนอนให้หมด สรรพคุณช่วยระบาย การที่เมล็ดแมงลักช่วยระบายได้เพราะเมื่อเมล็ดแมงลักเข้าสู่ร่างกายจะไม่ถูกย่อย จึงไปช่วยเพิ่มปริมาณกากอาหาร ทำให้ถ่ายอุจจาระออกมามากขึ้น และยังช่วยทำให้อุจจาระอ่อนตัวอีกด้วย เมล็ดแมงลักเมื่อแช่น้ำจะพองได้ถึง 45 เท่า เพราะมีสารมิวซิเลจ หากใช้เมล็ดแมงลัก ปริมาณ 2 ช้อนชา ผสมน้ำ 240 ซี.ซี. หรือประมาณ 1 แก้ว ให้ผลเป็นยาระบายในคนปกติ ผลคือ จะเพิ่มจำนวนครั้งในการถ่าย เพิ่มปริมาณอุจจาระ และทำให้อุจจาระอ่อนตัวกว่าปกติ และหากใช้ในผู้สูงอายุ โดยใช้ในขนาดต่างๆ คือ 1/2, 1, 1 1/2 ช้อนชา ในน้ำ 250 ซี.ซี. 3 ครั้งต่อวัน พบว่ามีอัตราการขับถ่ายเพิ่มขึ้น 80.6%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ช่วยขับลม

ลดอาการจุกเสียด แน่นท้อง แก้ท้องอืด ท้องเฟ้อ ใบแมงลักมีน้ำมันหอมระเหยซึ่งมีฤทธิ์ขับลม มักใช้ในรูปผักสดหรือใช้ปรุงเป็นอาหาร เช่น แกงเลียง ขนมจีนน้ำยา เป็นต้น

- รักษากลากน้ำนมที่หน้าเด็ก

ใช้ใบแมงลัก 10 ใบ นำมาตำผสมน้ำเล็กน้อย คั้นน้ำทาบริเวณที่เป็นกลากน้ำนม ซึ่งมักจะเห็นเป็นผื่นแดง ใช้ทาวันละครั้งเป็นเวลา 1 สัปดาห์

สารเคมีที่สำคัญในแมงลัก

เมล็ดแมงลักประกอบด้วยสารคาร์โบไฮเดรตหลายชนิดซึ่งเป็นโมเลกุลใหญ่ และสารประกอบอื่นๆ เช่น Camphene , mucillage , myrcene oil , D-Glucose เป็นต้น เปลือกผลแมงลักมีสารเมือก (mucilage) ซึ่งพองตัวในน้ำได้ ใบมีน้ำมันหอมระเหย ประเภทการบูร, เบอร์นีอัล, ซีนีออล และยูจีนอล

การใช้ประโยชน์

ส่วนที่ใช้เป็นยาจะใช้ผลแก่แห้ง (ซึ่งมักเรียกว่า เมล็ดแมงลัก) จากข้อมูลทางวิทยาศาสตร์พบว่าเมล็ดแมงลักประกอบด้วยสารคาร์โบไฮเดรตหลายชนิด ซึ่งเป็นโมเลกุลใหญ่ แลสารประกอบอื่นๆ เช่น แคมฟีน (Camphene) ยูซิลเลจ (ucillage) ไมร์ซีนออยล์ (myrcene oil) และดีกลูโคส (D-Glucose) เป็นต้น บริเวณเปลือกนอกของเมล็ดแมงลัก จะมีสารเมือก ซึ่งสามารถพองตัวได้ 45 เท่า และได้มีการวิจัยพบว่า เมล็ดแมงลักมีสรรพคุณเป็นยาระบาย เพิ่มกากอาหารได้ และสารเมือกยังสามารถช่วยหล่อลื่นให้อุจจาระอ่อนตัว สามารถขับถ่ายได้สะดวกยิ่งขึ้น จึงได้มีการนำเมล็ดแมงลักมารับประทานก่อนอาหาร หรือบางท่านก็รับประทานแทนอาหาร เพื่อไม่ให้กระเพาะอาหารว่าง จึงสามารถใช้ลดความอ้วนได้ เพราะเมล็ดแมงลักไม่ก่อให้เกิดพลังงาน สามารถเตรียมได้โดยใช้เมล็ดแมงลัก 1-2 ช้อนชา แช่น้ำ 1 แก้วใหญ่ ทิ้งไว้จนกว่าจะพองเต็มที่ ถ้าใช้เป็นยาระบายให้ทานก่อนนอน ถ้าเป็นยาลดความอ้วนให้ทานก่อนอาหาร หรือทดแทนอาหารเป็นบางมื้อเท่านั้น เพราะหากรับประทานเมล็ดแมงลักทดแทนอาหารทุกมื้ออาจจะทำให้เป็นโรคขาดสารอาหารได้ นอกจากนั้นแล้วการรับประทานเมล็ดแมงลักในปริมาณมากๆ อาจทำให้เกิดอาการแน่นท้อง หรือถ้ารับประทานในขณะที่เมล็ดแมงลักยังไม่พองเต็มที่ ก็จะเกิดการดูดน้ำจากกระเพาะอาหารได้ ทำให้เมล็ดแมงลักจับตัวเป็นก้อนแข็งและอุดตันลำไส้ ทำให้ท้องผูกได้มากขึ้น การขยายพันธุ์แมงลัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นิยมใช้วิธีปักชำกิ่ง หรือใช้เมล็ด แมงลักชอบขึ้นในที่ราบโล่งแจ้ง ปลูกง่ายในดินทุกชนิด โดยใช้เมล็ดโรยบนดิน หรือโรยเมล็ดลงในแปลงที่จะปลูก ควรปลูกต้นฤดูฝน

แมงลักเป็นพืชล้มลุกที่จัดอยู่ในตระกูล Plantaginaceae ที่มีชื่อทางพฤกษศาสตร์ว่า Plantago psyllium โดยพบว่าเมล็ดของต้นแมงลักจะมีเยื่อหุ้มเมล็ด (Husk) ซึ่งจะให้ใยอาหารหรือไฟเบอร์ที่มีคุณสมบัติดูดซับน้ำได้ถึง 25 เท่าของน้ำหนักตัวเอง และเมื่อดูดซับน้ำไว้แล้ว ไฟเบอร์จากเมล็ดแมงลักก็จะมีลักษณะเป็นเยื่อเมือกลื่นที่เรียกว่า Mucillage และส่วนนี้เองที่ถูกนำมาใช้ประโยชน์ทางด้านการแพทย์ และโภชนาการอย่างกว้างขวางในปัจจุบัน ในทางโภชนาการเราสามารถจำแนกชนิดของเส้นใยอาหารหรือไฟเบอร์อย่างง่ายๆ ตามลักษณะของการละลายน้ำได้ 2 ชนิด คือ [8]

2.10.1 ไฟเบอร์ที่ละลายน้ำได้ (Soluble fiber)

เมื่อไฟเบอร์นี้ละลายน้ำจะมีลักษณะเป็นเจลขึ้น ซึ่งเกาะติดกับโมเลกุลของไขมันจากอาหารที่รับประทานเข้าไปได้อย่างดี ทำให้ป้องกันการดูดซึมไขมันเข้าสู่กระแสเลือด และไฟเบอร์ชนิดนี้ก็จะนำพาสารอาหารที่ติดอยู่ขับออกไปทางอุจจาระ จึงช่วยลดระดับไขมันและน้ำตาลในคนไข้ที่มีปัญหาได้ดี และทำให้น้ำหนักค่อยๆลดลงอย่างปลอดภัย

2.10.2 ไฟเบอร์ที่ไม่ละลายน้ำ (Insoluble fiber)

ไฟเบอร์ชนิดนี้จะมีการทำงานคล้ายๆฟองน้ำ (sponge) โดยจะทำการดูดน้ำไว้กับตัวเองทำให้พองตัว ถ้าหากรับประทานไฟเบอร์ชนิดนี้เข้าไปก็จะทำให้รับประทานอาหารได้น้อยลง เพราะรู้สึกอิ่ม แน่นท้อง นอกจากนี้ก็จะส่งผลให้ปริมาณขับถ่ายมากขึ้น เร่งให้อุจจาระเคลื่อนที่ผ่านไปลำไส้ใหญ่ได้เร็วขึ้น จึงป้องกันปัญหาการดูดซึมสารอาหารเข้าร่างกาย และทำให้ลดและป้องกันภาวะท้องผูก

จากประโยชน์ดังกล่าวของไฟเบอร์จากเมล็ดแมงลัก จึงได้มีการนำเมล็ดแมงลักมาทำการลดน้ำหนัก แก้ปัญหาไขมันในเลือดสูง หรือน้ำตาลในเลือดสูง และใช้ป้องกันและรักษาปัญหาท้องผูก ซึ่งมักมีการผสมไฟเบอร์ทั้งสองแบบในสัดส่วนที่แตกต่างกันในแต่ละผลิตภัณฑ์ แต่ส่วนใหญ่ที่มีขายตามท้องตลาดก็มักจะประกอบด้วย ไฟเบอร์ชนิดละลายน้ำได้ประมาณ 70-80% เพื่อป้องกันการดูดซึมไขมันและน้ำตาลเข้ากระแสเลือด และไฟเบอร์ชนิดไม่ละลายน้ำประมาณ

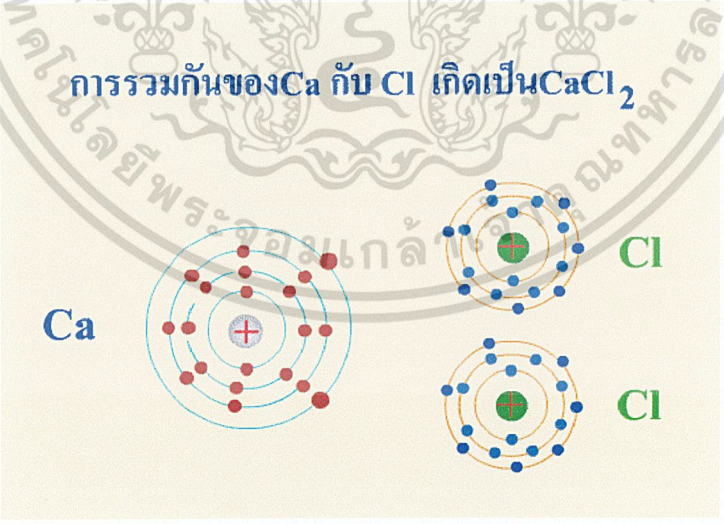
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

20-30% เพื่อช่วยทำให้อิ่มเร็วขึ้นและเร่งการขับถ่าย ไม่ให้ท้องผูก เพื่อแก้ปัญหาสารตกค้างในลำไส้ที่อาจก่อให้เกิดมะเร็ง และแก้ไขปัญหาริดสีดวงทวารในคนที่ขับถ่ายได้ลำบาก

2.11 พันธะไอออนิก (Ionic bond) [9]

หมายถึง พันธะระหว่างอะตอมที่อยู่ในสภาพไอออนที่มีประจุตรงกันข้ามกัน ซึ่งเกิดจากการเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอน 1 ตัวหรือมากกว่า จากอิเล็กตรอนวงนอกสุดของอะตอมหนึ่งไปยังอีกอะตอมหนึ่ง เพื่อให้จำนวนอิเล็กตรอนวงนอกสุดครบออกเตต ซึ่งเกิดขึ้นระหว่างอะตอมของโลหะกับอโลหะ โดยที่โลหะเป็นฝ่ายจ่ายอิเล็กตรอนในระดับพลังงานชั้นนอกสุดให้กับอโลหะ

เนื่องจากโลหะมีค่าพลังงานไอออไนเซชันต่ำ และอโลหะมีค่าพลังงานไอออไนเซชันสูง ดังนั้นพันธะไอออนิกจึงเกิดขึ้นระหว่างโลหะกับอโลหะได้ดี กล่าวคือ อะตอมของโลหะให้เวเลนต์อิเล็กตรอนแก่อโลหะ แล้วเกิดเป็นไอออนบวกและไอออนลบของอโลหะ เพื่อให้เวเลนต์อิเล็กตรอนเป็นแปดแบบก๊าซเฉื่อย ส่วนอโลหะรับเวเลนต์อิเล็กตรอนมานั้น ก็เพื่อปรับตัวเองให้เสถียรแบบก๊าซเฉื่อยเช่นกัน ไอออนบวกกับไอออนลบจึงดึงดูดระหว่างประจุไฟฟ้าต่างกันเกิดเป็นสารประกอบไอออนิก (Ionic compuond)



รูปที่ 2.18 ตัวอย่างการเกิดพันธะไอออนิก [9]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.11.1 ขนาดไอออน

ตารางที่ 2.11 แสดงขนาดไอออนชนิดต่างๆ

ไอออน	ขนาดไอออน (pm)
Li^+	136
Na^+	194
K^+	366
Rb^+	294
Mg^+	164
Ca^+	286

2.12 พลาสติกไซเซอร์ (Plasticizers) [10, 107-122]

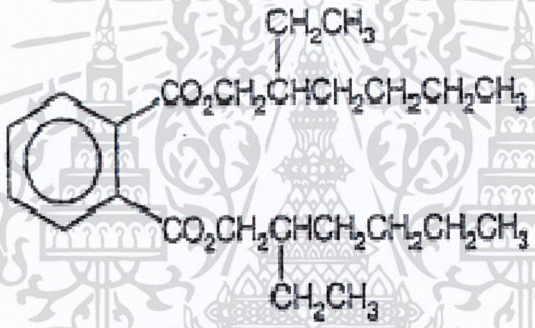
พอลิเมอร์บางชนิดมีสมบัติแข็ง เปราะ ไม่อิ่มตัวและแตกได้ง่ายเมื่อได้รับแรงกระแทกจึงทำให้ไม่เหมาะสมกับการใช้งานบางอย่างจนกว่าจะมีการทำให้พอลิเมอร์นั้นมีความอ่อนตัวเสียก่อน กระบวนการเพิ่มความอ่อนตัวให้กับพอลิเมอร์นี้เรียกว่า พลาสติกไซเซชัน (Plasticization) และสารเติมแต่งที่เข้าไปเพื่อเพิ่มความอ่อนตัวให้กับพอลิเมอร์นี้เรียกว่าพลาสติกไซเซอร์ (Plasticizer) ซึ่งพลาสติกไซเซอร์จะเพิ่มความอ่อนตัว ความสามารถในการหักงอได้ (Flexibility) และความสามารถในการยืดออก (Extensibility or strechability) ของพอลิเมอร์โดยการทำให้อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Tg) ลดลงต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง นอกจากนี้พลาสติกไซเซอร์ ยังช่วยเพิ่มความสามารถในการไหลแบบพลาสติก (Plastic flow) และลดความหนืดของพอลิเมอร์หลอมเหลว ทำให้กระบวนการขึ้นรูปได้ง่ายขึ้น

2.12.1 พลาสติกไซเซชันและพลาสติกไซเซอร์ (Plasticization and Plasticizer)

พลาสติกไซเซชัน หมายถึง กรรมวิธีหรือกระบวนการที่ทำให้พอลิเมอร์เกิดการไหลแบบพลาสติก ซึ่งอาจทำได้โดยการให้ความร้อนหรือการใส่พลาสติกไซเซอร์ โดยพลาสติกไซเซอร์จะไปลดแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์ทำให้พอลิเมอร์เคลื่อนที่ได้มากขึ้นเป็นผลให้พอลิเมอร์อ่อนตัวและเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้ง่ายขึ้น ซึ่งกระบวนการผสมพลาสติกไซเซอร์เข้าไปใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พอลิเมอร์โดยไม่มีปฏิกริยาเคมีเกิดขึ้นระหว่างพลาสติกไซเซอร์และพอลิเมอร์เรียกว่า พลาสติก-ไซเซชันภายนอก (external plasticization) และเรียกพลาสติกไซเซอร์ที่ผสมลงไปว่า พลาสติก-ไซเซอร์ภายนอก (external plasticizer) ซึ่งพลาสติกไซเซอร์ชนิดนี้จะช่วยให้พอลิเมอร์เกิดการไหลแบบพลาสติกโดยอำนาจการทำละลาย สำหรับสารที่นำมาใช้เป็นพลาสติกไซเซอร์ภายนอกมีหลายประเภท แต่ส่วนใหญ่คือสารประเภทเอสเทอร์โดยชนิดที่มีการผลิตมากที่สุดคือ พทาเลตเอสเทอร์ (Phthalate ester) และสารที่นำมาใช้มากที่สุดคือ ได-2- เอทิลเฮกซิลฟทาเลต (di-2-ethylhexyl phthalate , DEHP) หรือมักเรียกกันว่า ไดออกทิลฟาทาเลต (diethyl phthalate , DOP) โครงสร้างเคมีพลาสติกไซเซอร์ชนิดนี้แสดงดังรูป 2.19



รูปที่ 2.19 โครงสร้างได-2-เอทิลเฮกซิลพทาเลต *หรือ* ไดออกทิลพทาเลต **[5]**

ข้อดีของพลาสติกไซเซชันภายนอก คือ สามารถทำให้พอลิเมอร์มีความอ่อนตัวน้อยหรือมากตามความต้องการในการใช้งาน โดยการปรับชนิดและปริมาณของพลาสติกไซเซอร์ที่ใส่ลงไป อย่างไรก็ตาม พลาสติกไซเซชันภายนอกมีจุดอ่อนคือพลาสติกไซเซอร์ที่ใช้อาจถูกสกัดออกจากพอลิเมอร์ได้

โดยทั่วไปแล้ว พลาสติกไซเซอร์ภายนอกเป็นของเหลวที่มีจุดเดือดสูง มีความดันไอต่ำระเหยยาก ละลายได้ในพอลิเมอร์ และมีอุณหภูมิ Tg ประมาณหรือใกล้เคียง $-50^{\circ}C$ ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็นสองชนิด คือ ***พลาสติกไซเซอร์แท้จริงหรือพลาสติกไซเซอร์ปฐมภูมิ (true plasticizer or primary plasticizer)*** และ***พลาสติกไซเซอร์เสริมหรือพลาสติกไซเซอร์ทุติยภูมิ (secondary plasticizer)*** โดยพลาสติกไซเซอร์ที่แท้จริงสามารถเข้าเป็นเนื้อเดียวกันกับพอลิเมอร์ที่อุณหภูมิขึ้นรูปได้ดี สามารถใช้เดี่ยวๆได้ ในขณะที่พลาสติกไซเซอร์เสริมมีความสามารถในการเข้าเป็นเนื้อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เดียวกับพอลิเมอร์ได้จำกัด จึงไม่สามารถใช้ได้ตามลำพังต้องใช้ควบคู่กับพลาสติกไซเซอร์แท้จริง อีกอย่างยังลดต้นทุนการผลิตและปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ให้ดีขึ้นอีกด้วย

พลาสติกไซเซอร์ภายนอกใช้ได้ในพอลิเมอร์หลายชนิด ได้แก่ พอลิไวนิลคลอไรด์ อะคริลิก-พอลิเมอร์ อนุพันธ์เซลลูโลส ยาง ฯลฯ โดยพอลิเมอร์ที่ใช้พลาสติกไซเซอร์มากที่สุด 80 – 90 % คือ พอลิไวนิลคลอไรด์ ซึ่งสามารถนำพอลิเมอร์ชนิดนี้ไปทำเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆได้หลากหลาย

1. พลาสติกไซเซอร์ปริมาณเล็กน้อย ทำให้เกิดที่ว่างและปริมาณอิสระ(free volume) ระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ ซึ่งส่งผลให้พอลิเมอร์สามารถเคลื่อนที่ได้และเกิดการจัดตัวเป็นระเบียบได้ดีขึ้น ปริมาณผลึกจึงเพิ่มขึ้น ในกรณีนี้ เช่น การเติมพลาสติกไซเซอร์เพิ่มเข้าไปปริมาณสูงจะขัดขวางการเกิดผลึกของพอลิเมอร์ ทำให้ความแข็งของพอลิเมอร์ลดลงและเกิดกระบวนการพลาสติกไซเซชันขึ้น
2. โมเลกุลของพลาสติกไซเซอร์ซึ่งมีขนาดใหญ่ที่เกาะติดอยู่กับเนื้อพอลิเมอร์ ขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่พอลิเมอร์ (เกิด steric hindrance)
3. ในกรณีที่พลาสติกไซเซอร์มีสภาพมีขั้ว (polarity) สูง จะทำให้โมเลกุลของพลาสติก-ไซเซอร์ติดแน่นกับโมเลกุลของพอลิเมอร์ และอาจทำให้เกิดการเชื่อมขวางระหว่างโซ่โมเลกุลด้วย ส่งผลให้สายโซ่เกิดการเคลื่อนที่ได้ยากขึ้น

2.12.2 ทฤษฎีการทำงานของพลาสติกไซเซอร์ (Therories of Plasticizer Action)

มีอยู่หลายทฤษฎีอยู่ด้วยกันที่อธิบายกลไกการทำงานของพลาสติกไซเซอร์ภายนอกดังนี้

- Lubricity Theory

ทฤษฎีนี้อธิบายการทำงานของพลาสติกไซเซอร์ว่าทำหน้าที่เหมือนสารหล่อลื่น (lubricants) โดยไปลดแรงเสียดทานระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์ ทำให้สายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์เกิดการเคลื่อนที่ผ่านไปมาซึ่งกันและกันได้

- Gel Theory

ทฤษฎีนี้อธิบายไว้ว่า พลาสติกไซเซอร์จะทำลายแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์ โดยการแยกส่วนที่มีขั้วของพลาสติกไซเซอร์ทำให้อยู่ห่างกัน ดังนั้น พลาสติกไซเซอร์จะต้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประกอบด้วยส่วนที่มีขั้วและส่วนที่ไม่มีขั้ว โดยพลาสติกไซเซอร์ส่วนที่มีขั้วจะเข้ายึดกับไดโพล หรือบริเวณที่มีขั้วของพอลิเมอร์ ในขณะพลาสติกไซเซอร์ส่วนที่ไม่มีขั้วจะกำบัง (shield) บริเวณไดโพลของพอลิเมอร์ออกจากกัน

- Free volume Theory

ทฤษฎีนี้อธิบายไว้ว่า พลาสติกไซเซอร์จะเพิ่มที่ว่างหรือปริมาตรอิสระระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้พอลิเมอร์เคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้น



รูปที่ 2.20 โครงสร้างของ PVC ทั้งในกรณีที่ใส่และไม่ใส่พลาสติกไซเซอร์ **[5]**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.12.3 สมบัติที่ต้องการของพลาสติกไซเซอร์ (Plasticizer Requirements)

พลาสติกไซเซอร์ภายนอกที่ดีควรมีสมบัติดังต่อไปนี้ คือ

1. สามารถเข้ากันได้ดี (compatibility) กับพอลิเมอร์
2. มีประสิทธิภาพ (efficiency)
3. มีความคงตัวสูง (permanence) อยู่กับพอลิเมอร์ได้นาน
4. เสถียร ไม่ติดไฟ ไม่มีกลิ่น และไม่มีพิษ

2.12.4 ความสามารถเข้ากันได้กับพอลิเมอร์ (Compatibility)

สมบัติที่จำเป็นที่สุดของพลาสติกไซเซอร์ภายนอกในการนำมาใช้งาน คือ จะต้องรวมตัวเข้ากันได้ดีกับพอลิเมอร์ กล่าวคือ ระหว่างการขึ้นรูป พลาสติกไซเซอร์จะต้องผสมกับพอลิเมอร์ได้อย่างสม่ำเสมอ เกิดเป็นสารผสมที่มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน และเมื่อลดอุณหภูมิลงมา ผลิตภัณฑ์ที่ได้ก็จะต้องยังคงเป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งในการที่พลาสติกไซเซอร์จะรวมตัวกับพอลิเมอร์ได้ดีนั้น พลาสติกไซเซอร์จะต้องมีสภาพมีขั้วหรือพารามิเตอร์การละลาย (solubility parameter, δ) ใกล้เคียงกันกับของพอลิเมอร์ (ค่าต่างกันไม่ควรเกิน 2 $MPa^{1/2}$ (SI unit) หรือ 1 $(cal/cm^3)^{1/2}$

$$(\delta/MPa^{1/2} = 2.0455 \times \delta/(cal/cm^3)^{1/2} \text{ หรือ } \delta/(cal/cm^3)^{1/2} = 0.48888 \times \delta/MPa^{1/2})$$

โดยปกติ พารามิเตอร์การละลายหาได้จากการทำให้สารเป็นไอ ตามสมการของ Hildebrand ดังนี้

$$\delta = (\Delta E/V)^{1/2}$$

โดย δ = พลังงานการกลายเป็นไอของของเหลว (energy of vaporization of liquid) มีหน่วยเป็นแคลอรี

V = ปริมาตรโมลาร์ของของเหลว (molar volume of liquid) มีหน่วยเป็น ซม.^{3}

ในกรณีของของเหลวหรือตัวทำละลายที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ จะสามารถหาค่าพารามิเตอร์การละลายได้ง่าย แต่สำหรับพลาสติกไซเซอร์ ซึ่งโดยทั่วไปเป็นของเหลวที่มีความดันไอต่ำ และพอลิเมอร์ซึ่งไม่กลายเป็นไอ ทำให้หาค่าโดยตรงได้ยากหรือหาไม่ได้ จึงไม่สามารถนำสมการของ Hildebrand มาคำนวณหาพารามิเตอร์การละลายได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อย่างไรก็ตาม อาจคำนวณหาพารามิเตอร์การละลายของพลาสติกไซเซอร์หรือพอลิเมอร์ได้จากวิธีการของสมอลล์ (Small's method) ตามสมการ

$$\delta = D\Sigma G/M$$

โดย D = ความหนาแน่น

G = Molar attraction constant ของหมู่ต่างๆในโมเลกุลซึ่งรวบรวมโดย Small

M = น้ำหนักโมเลกุลของพลาสติกไซเซอร์หรือหน่วยซ้ำ

ในทางปฏิบัติอาจหาพารามิเตอร์การละลายของพอลิเมอร์ได้โดยการนำพอลิเมอร์ไปทดลองละลายในตัวทำละลายหลายๆชนิดที่ทราบค่าพารามิเตอร์การละลายแล้ว และตัดสินว่าพอลิเมอร์ละลายในตัวทำละลายเมื่อได้สารละลายที่ใส ณ อุณหภูมิห้อง โดยวิธีการนี้ ทำให้สามารถกำหนดค่าพารามิเตอร์การละลายของพอลิเมอร์ได้เป็นช่วงๆ

2.12.5 ผลของพลาสติกไซเซอร์ต่อสมบัติอื่นๆของพอลิเมอร์

การใช้พลาสติกไซเซอร์นอกจากจะทำให้พอลิเมอร์เปลี่ยนสมบัติจากแข็งเปราะเป็นอ่อนตัวแล้ว (มอดูลัสและอุณหภูมิ T_g ลดลง) ยังมีผลต่อสมบัติอื่นๆของพอลิเมอร์ ดังนี้

2.12.5.1 สมบัติเชิงกล

1. ความทนแรงดึง (tensile strength) ลดลง และแปรผันตามชนิดและปริมาณของพลาสติกไซเซอร์ที่เพิ่มขึ้น
2. ความแข็งที่ผิว (hardness) ลดลง และแปรผันตามชนิดและปริมาณของพลาสติก-ไซเซอร์ที่เพิ่มขึ้น
3. ความสามารถในการยืดออก (extensibility) และการยืดตัว ณ จุดขาด (elongation at break) เพิ่มขึ้น และแปรผันตามปริมาณพลาสติกไซเซอร์ที่เพิ่มขึ้น
4. ความอ่อนตัวไม่เปราะหรือความสามารถในการหักงอได้ ณ อุณหภูมิต่ำ (low temperature flexibility) เพิ่มขึ้น โดยสมบัติดังกล่าวสามารถวัดได้จากอุณหภูมิที่เรียกว่า "brittle temperature" หรือ "brittleness temperature" หรือ "flex temperature" หรือ "cold flex temperature" หรือ "cold fracture temperature" ซึ่งหมายถึงอุณหภูมิต่ำที่สุดที่ชิ้นงานทดสอบสามารถรับแรงกระแทกที่กำหนดได้โดยไม่เกิดการแตกหัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- **การทดสอบสมบัติเชิงกล (Mechanical Tests) [11]**

นักเคมีมักศึกษาลักษณะกายภาพของวัสดุต่าง ๆ โดยอาศัยความรู้เกี่ยวกับโครงสร้างของโมเลกุล (molecucular feature) เช่น การจัดเรียงอนุภาคในโมเลกุล รูปร่างของโมเลกุล และพลังงานพันธะ เป็นต้น ในขณะที่วิศวกรหรือผู้ที่นำวัสดุนั้นไปใช้งานมักจะมุ่งความสนใจไปที่ลักษณะสมบัติของวัสดุ ซึ่งมีประโยชน์ต่อการนำไปประยุกต์ใช้ ถึงแม้ว่าในระยะหลายปีที่ผ่านมาได้มีการศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของพอลิเมอร์ในขั้นสูงแล้วก็ตาม โดยทั่วไปพบว่าเราไม่สามารถทำนายสมบัติเชิงกล (mechanical properties) ของพอลิเมอร์โดยอาศัยความรู้จากโครงสร้างพื้นฐานทางเคมีได้อย่างแม่นยำ เช่น ความแข็งแรง (strength) ที่แท้จริงของพอลิเมอร์อาจมีค่าเพียง 0.1-0.01 เท่าของค่าที่ได้จากการคำนวณ โดยใช้ความรู้พื้นฐานจากความแข็งแรงของพันธะ และแรงระหว่างโมเลกุล เพราะฉะนั้นในปัจจุบันการทดสอบสมบัติเชิงกล จึงเป็นวิธีที่ดีที่จะศึกษาถึงสมบัติและความเป็นไปได้ในการนำเอาพอลิเมอร์ไปใช้งาน

- **ความทนต่อแรงดึง (Tensile Strength)**

ความทนต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ สามารถทดสอบจากลักษณะการยืดออกของตัวอย่างเมื่อได้รับแรงดึงจากภายนอก โดยอาศัยเทอม 2 เทอมที่สัมพันธ์กัน คือ ความเค้น (stress : σ) และความเครียด (strain : ε) ความเค้น คือ แรงที่ใช้ในการดึงหรือยืดตัวอย่างต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่หน้าตัด

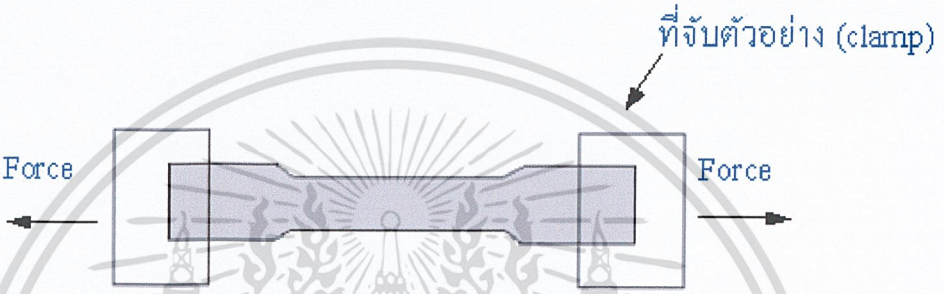
ความเครียด (ε) คือ อัตราส่วนระหว่างความยาวที่เปลี่ยนไปของตัวอย่างเมื่อได้รับแรงดึงต่อความยาวเริ่มต้น

$$\text{ความเครียด} = \frac{\text{ความยาวที่เปลี่ยนไป}}{\text{ความยาวเดิม}} = \frac{\triangle L}{L}$$

$$\text{โมดูลัส} = \frac{\text{ความเค้น}}{\text{ความเครียด}} = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากพฤติกรรมความเค้นและความเครียดของวัสดุเป็นลักษณะที่ขึ้นกับเวลา อัตราเร็วที่ความเค้นหรือแรงถูกให้กับตัวอย่าง จึงมีผลต่อการยืดของตัวอย่างหรือความเครียดเป็นอย่างมาก เช่น เมื่อนำตัวอย่างประเภทเส้นใยมาทดสอบ โดยใช้แรงดึงอย่างรวดเร็วจนทำให้เส้นใยขาดออกโดยง่าย แต่เมื่อใช้แรงขนาดเดิมแต่ดึงอย่างช้า ๆ จะทำให้เส้นใยยืดออกและทนต่อแรงดึงอยู่ได้นานก่อนที่จะขาด ในทางปฏิบัติทั่วไปการทดสอบความเค้นและความเครียดของพอลิเมอร์ มักใช้ตัวอย่างรูปร่างดังแสดงไว้ข้างล่าง

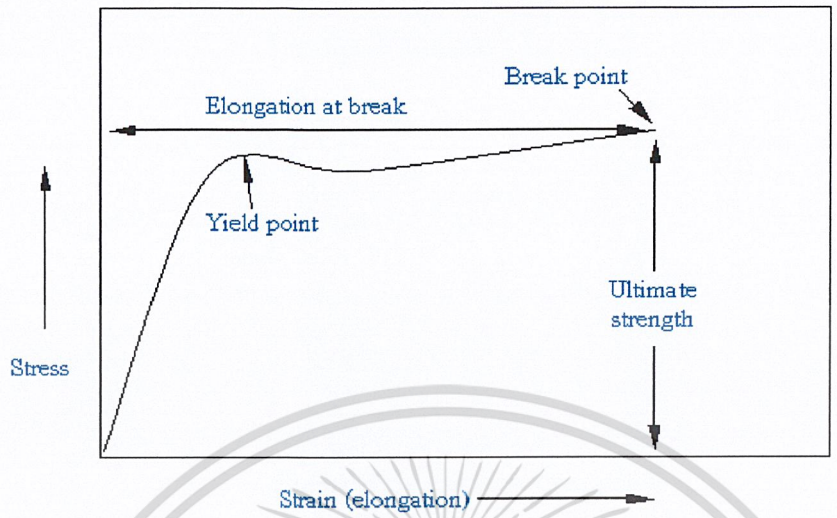


รูปที่ 2.21 รูปร่างตัวอย่างของพอลิเมอร์ที่ใช้ทดสอบความเค้น และ ความเครียด [6]

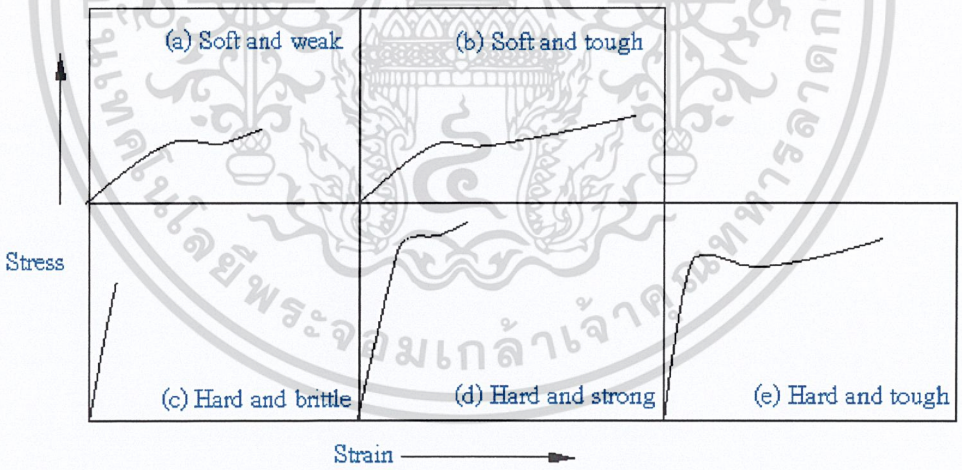
ปลายของตัวอย่างถูกยึดด้วยที่จับ และจะถูกดึงให้ยืดออกด้วยแรงที่รู้ขนาดแน่นอน จากนั้นจึงนำข้อมูลไปพลอตกราฟระหว่างความเค้นและความเครียด (stress-strain curve) สำหรับพอลิเมอร์ที่มีลักษณะคล้ายยาง (elastomer) ซึ่งเกิดการยืดออกได้ง่ายเมื่อได้รับแรงดึง กราฟที่ได้มีลักษณะดังรูปที่ 2.22 นอกจากความเค้นและความเครียด แล้วยังมีเทอมที่แสดงสมบัติเชิงกลประเภทอื่นของพอลิเมอร์อีก เช่น modulus หรือ stiffness

ซึ่งแสดงโดยค่าอัตราส่วนระหว่างความเค้นและความเครียด (หรือความชันในช่วงแรกของเส้นกราฟ) และ toughness ซึ่งแสดงความต้านทานต่อการขาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.22 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น- ความเครียด [6]



รูปที่ 2.23 การทดสอบความทนต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ที่มีสมบัติต่างๆกัน [6]

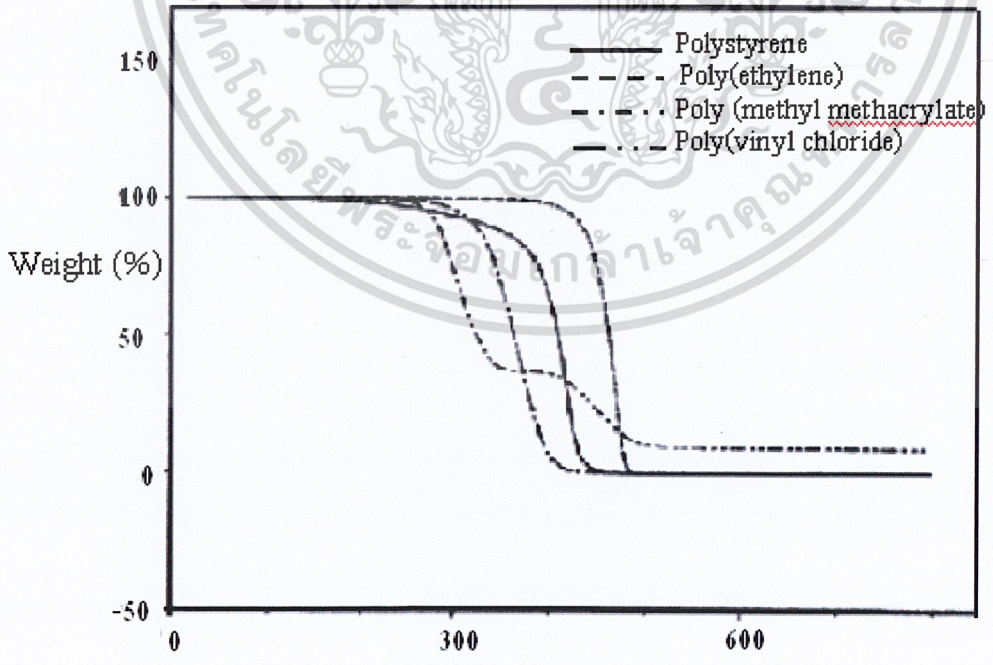
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.12.5.2 การวิเคราะห์สมบัติทางอุณหภูมิของพอลิเมอร์ (Thermal Analysis) **[12]**

สมบัติทางอุณหภูมิของพอลิเมอร์ เช่น อุณหภูมิหลอมเหลว อุณหภูมิเปลี่ยนสภาวะคล้ายแก้ว และอุณหภูมิการสลายตัวสามารถศึกษาโดยใช้เทคนิคต่าง ๆ ดังนี้

Thermogravimetric Analysis (TGA)

TGA เป็นวิธีเบื้องต้นในการวิเคราะห์ความเสถียรของพอลิเมอร์เมื่อได้รับความร้อน โดยใช้พื้นฐานการวัดน้ำหนักอย่างต่อเนื่องด้วยเครื่องชั่งที่มีความไวสูง (thermobalance) ในระหว่างการวิเคราะห์ อุณหภูมิของตัวอย่างซึ่งอยู่ในบรรยากาศปกติ หรือก๊าซเฉื่อยจะถูกทำให้เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ข้อมูลการวิเคราะห์จะถูกบันทึกเป็นเทอร์โมแกรมที่แสดงการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของตัวอย่างและอุณหภูมิ ดังรูปที่ 2.24 การสูญเสียน้ำหนักในช่วงแรกของการวิเคราะห์หรือที่อุณหภูมิต่ำ อาจเกิดจากการระเหยของน้ำหรือตัวทำละลาย แต่ที่อุณหภูมิสูงมักเกิดจากการสลายตัวของพอลิเมอร์ ข้อมูลเหล่านี้ทำให้ทราบเกี่ยวกับความเสถียรต่ออุณหภูมิของพอลิเมอร์ เทคนิคนี้ยังมีประโยชน์มากในการวิเคราะห์หาสารที่ระเหย หรือสารเติมแต่งที่ใส่ลงไปในพอลิเมอร์อีกด้วย



รูปที่ 2.24 เทอร์โมแกรมที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย TGA **[12]**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.13 พลาสติกย่อยสลายได้ [13]

2.13.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับพลาสติกย่อยสลายได้

ปัจจุบันนักวิทยาศาสตร์และนักเคมีอุตสาหกรรมชั้นแนวหน้าทั่วโลกให้ความสนใจในพลาสติกชีวภาพย่อยสลายได้ โดยเฉพาะพลาสติกชีวภาพย่อยสลายได้ที่ผลิตจากวัตถุดิบที่สามารถผลิตทดแทนขึ้นใหม่ได้ในธรรมชาติ (Renewable sources) ใช้พลังงานในกระบวนการผลิตต่ำ และสามารถย่อยสลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำได้ด้วยจุลินทรีย์ในธรรมชาติภายหลังจากการใช้งาน ทั้งนี้พลาสติกชีวภาพย่อยสลายได้นั้น จะมีสมบัติในการใช้งานได้เทียบเท่าพลาสติกจากอุตสาหกรรมปิโตรเคมีแบบทั่วไป (Commodify plastics) และสามารถทดแทนการใช้งานที่มีอยู่

พลาสติกย่อยสลายได้ (Degradable plastics) คือพลาสติกที่ได้รับการออกแบบมา เพื่อให้สามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีภายใต้สภาวะที่กำหนด เป็นผลให้เกิดการสูญเสียสมบัติบางประการที่สามารถวัดค่าได้โดยใช้วิธีทดสอบตามมาตรฐานต่างๆ พลาสติกย่อยสลายได้รับการยอมรับในปลายปี ค.ศ. 1960 ด้วยแนวคิดว่าจะเป็นการแก้ปัญหาขยะพลาสติก การพัฒนาพลาสติกย่อยสลายได้ จึงเกิดขึ้นอย่างกว้างขวาง ประมาณ 15% ของขยะในอเมริกาเป็นพลาสติกย่อยสลายได้ ในช่วงหลายสิบปีที่ผ่านมางานวิจัยด้านนี้มีเพิ่มมากขึ้น โดยในระยะแรกงานวิจัยมุ่งเน้นการใช้งานทางการแพทย์ เช่น การสังเคราะห์ไหมละลายและการเกษตร เช่น แผ่นฟิล์มคลุมหน้าดินหรือถุงสำหรับเพาะชำกล้วยไม้

American Society for Testing and Materials (ASTM) ได้ให้ความหมายพลาสติกย่อยสลายได้ว่าเป็นพลาสติกที่มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีเมื่ออยู่ภายใต้สภาวะแวดล้อมที่เหมาะสม เนื่องจากมีการสูญเสียสมบัติ แบ่งออกเป็น 4 ประเภท คือ

1. พลาสติกที่ย่อยสลายได้โดยแสง (Photodegradable plastics)
2. พลาสติกย่อยสลายได้โดยปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidatively degradable plastics)
3. พลาสติกย่อยสลายได้โดยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolytically degradable plastics)
4. พลาสติกย่อยสลายได้โดยทางชีวภาพ (Biodegradable plastics)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับพลาสติกย่อยสลายได้โดยทางชีวภาพมีความหมายหรือคำจำกัดความตามมาตรฐาน DIN 103.2 ระบุว่าการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ของวัสดุพลาสติก (Biodegradation of a plastic material) คือ กระบวนการที่นำไปสู่การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมี อันเนื่องมาจากจุลินทรีย์ วัสดุพลาสติกจะได้ชื่อว่าเป็นพลาสติกที่ย่อยสลายได้โดยจุลินทรีย์ ถ้าสารประกอบอินทรีย์ทั้งหมดถูกย่อยสลายได้โดยจุลินทรีย์ โดยที่สภาพแวดล้อมและอัตราการย่อยสลายจะถูกกำหนด ในการทดสอบตามมาตรฐานซึ่งมีหลายวิธี เช่น การใช้เอนไซม์ การใช้จุลินทรีย์ การคอมโพสท์ (Composting)

ตัวอย่างพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ได้แก่ พอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพชนิดที่มีแป้งเป็นส่วนประกอบพื้นฐาน (Biodegradable starch-based polymers) พอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพประเภทพอลิเอสเทอร์ (Biodegradable polyester) เช่น PHA – polyhydroxyalkanoate , PHB - polyhydroxybutylate, PHH – polyhydroxyhexanoate, PHV - polyhydroxyvalerate, PLA - polylactic aid และ PCL- polycaprolactone นอกจากนี้ยังมีพอลิเมอร์ย่อยสลายได้อื่นๆ เช่น พลาสติกย่อยสลายได้โดยแสง (Photodegradable plastics) พอลิเมอร์ที่มีการเติมสารเติมแต่งที่มีสมบัติควบคุมการย่อยสลาย (Controlled degradation additive masterbatches) เพื่อทำให้พอลิเมอร์มีขนาดโมเลกุลเหมาะสมต่อการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ต่อไป

2.13.2 ประเภทของพลาสติกย่อยสลายได้

ประเภทของพลาสติกย่อยสลายได้โดยทั่วไป เราสามารถแบ่งกลไกการย่อยสลายของพลาสติกเป็น 4 ประเภทใหญ่ๆ คือ

1. การย่อยสลายได้โดยแสง (Photodegradation) การย่อยสลายโดยแสงมักเกิดจากการเติมสารเติมแต่งที่มีความว่องไวต่อแสงลงในพลาสติกหรือสังเคราะห์โคพอลิเมอร์ให้มีหมู่ฟังก์ชันหรือพันธะเคมีที่ไม่แข็งแรง แตกหักง่ายภายใต้รังสี (UV) เช่น หมู่คีโตน (Ketone group) อยู่ในโครงสร้าง เมื่อสารหรือหมู่ฟังก์ชันดังกล่าวสัมผัสกับรังสียูวีจะเกิดการแตกของพันธะกลายเป็นอนุมูลอิสระ (Free radical) ซึ่งไม่เสถียร จึงเข้าทำปฏิกิริยาต่ออย่างรวดเร็วที่พันธะเคมีบนตำแหน่งคาร์บอนในสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้เกิดการขาดของสายโซ่ แต่การย่อยสลายนี้จะไม่เกิดขึ้นภายในบ่อฝังกลบขยะ กองคอมโพสท์หรือสภาวะแวดล้อมอื่นที่มืด เนื่องจากพลาสติกจะไม่ได้สัมผัสกับรังสียูวีโดยตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การย่อยสลายทางกล (Mechanical Degradation) โดยการให้แรงกระทำแก่ชิ้นพลาสติก ทำให้ชิ้นส่วนพลาสติกแตกออกเป็นชิ้น ซึ่งเป็นวิธีการที่ใช้โดยทั่วไปในการทำให้พลาสติกแตกเป็นชิ้นเล็กๆ

3. การย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidative Degradation) การย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชันของพลาสติกเป็นปฏิกิริยาการเติมออกซิเจนลงในโมเลกุลของพอลิเมอร์ ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้เองในธรรมชาติอย่างช้าๆ โดยมีออกซิเจนและความร้อน แสงยูวี หรือแรงทางกลเป็นปัจจัยสำคัญ เกิดเป็นสารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (hydroperoxide, ROOH) ในพลาสติกที่ไม่มีการเติมสารเติมแต่งที่ทำหน้าที่เพิ่มความเสถียร (stabilizing additive) แสงและความร้อน จะทำให้ ROOH แตกตัวกลายเป็นอนุมูลอิสระ $RO^{\cdot}$ และ $OH^{\cdot}$ ที่ไม่เสถียรและเข้าทำปฏิกิริยาต่อที่พันธะเคมีบนตำแหน่งคาร์บอนในสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้เกิดการแตกหักและสูญเสียสมบัติเชิงกลอย่างรวดเร็ว แต่ด้วยเทคโนโลยีการผลิตที่ได้รับการวิจัยและพัฒนาขึ้นในปัจจุบัน ทำให้พอลิโอเลฟินเกิดการย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชันกับออกซิเจนได้เร็วขึ้นภายในช่วงเวลาที่กำหนด โดยการเติมสารเติมแต่งที่เป็นเกลือของโลหะทรานสิชัน ซึ่งทำหน้าที่เคตะลิสต์เร่งการแตกตัวของสารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (Hydroperoxpide, ROOH) เป็นอนุมูลอิสระ (Free radical) ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์เกิดการแตกหักและสูญเสียสมบัติเชิงกลรวดเร็วยิ่งขึ้น

4. การย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolytic Degradation) การย่อยสลายของพอลิเมอร์ที่มีหมู่เอสเทอร์ หรือเอไมด์ เช่น แป้ง พอลิเอสเทอร์ พอลิแอนไฮดรายด์ พอลิคาร์บอเนต และพอลิยูริเทน ผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ก่อให้เกิดการแตกหักของสายโซ่พอลิเมอร์ ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่เกิดขึ้น โดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ ประเภทที่ใช้เคตะลิสต์ (Catalytic hydrolysis) และไม่ใช้เคตะลิสต์ (Non-Catalytic Hydrolysis) ซึ่งประเภทแรกยังแบ่งออกได้เป็น 2 แบบ คือ แบบที่ใช้เคตะลิสต์จากภายนอกโมเลกุลของพอลิเมอร์เร่งให้เกิดการย่อยสลาย (External Catalytic Degradation) และแบบที่ใช้เคตะลิสต์จากภายในโมเลกุลของพอลิเมอร์เองในการเร่งให้เกิดการย่อยสลาย (Internal catalytic degradation) โดยเคตะลิสต์จากภายนอกมี 2 ชนิด คือ เคตะลิสต์ที่เป็นเอนไซม์ต่างๆ (Enzyme) เช่น Depolymerase lipase esterase และ glycohydrolase ในกรณีนี้จัดเป็นการย่อยสลายทางชีวภาพ และเคตะลิสต์ที่ไม่ใช่เอนไซม์ (Non-enzyme) เช่น โลหะแอลคาไลด์ (alkaline metal) เบส (base) และกรด (acid) ที่มีอยู่ในสภาวะแวดล้อมในธรรมชาติ ในกรณีนี้จัดเป็นการย่อยสลายทางเคมี สำหรับปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสแบบที่ใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เคตะลิสต์จากภายในโมเลกุลของพอลิเมอร์นั้นใช้หมู่คาร์บอกซิล(Carboxyl Group) ของหมู่เอสเทอร์ หรือเอไมด์บริเวณปลายของสายโซ่พอลิเมอร์ในการเร่งปฏิกิริยาการย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส

5. การย่อยสลายทางชีวภาพ (Biodegradation) การย่อยสลายของพอลิเมอร์จากการทำงานของจุลินทรีย์ โดยทั่วไปมีกระบวนการ 2 ขั้นตอน เนื่องจากขนาดของสายพอลิเมอร์ยังมีขนาดใหญ่และไม่ละลายน้ำ ในขั้นตอนแรกของการย่อยสลายจึงเกิดขึ้นภายนอกเซลล์โดยการปลดปล่อยเอ็นไซม์ของจุลินทรีย์ ซึ่งเกิดได้ทั้งแบบใช้ endo-enzyme หรือ เอนไซม์ที่ทำให้เกิดการแตกตัวของพันธะภายในสายโซ่พอลิเมอร์อย่างไม่เป็นระเบียบ และแบบ exo-enzyme หรือเอนไซม์ที่ทำให้เกิดการแตกหักของพันธะทีละหน่วย จากหน่วยซ้ำที่เล็กที่สุดที่อยู่ด้านปลายของสายโซ่พอลิเมอร์ เมื่อพอลิเมอร์แตกตัวจนมีขนาดเล็กพอจะแพร่ผ่านผนังเซลล์เข้าไปในเซลล์ และเกิดการย่อยสลายต่อในขั้นตอนที่ 2 ได้ผลิตภัณฑ์ในขั้นตอนสุดท้าย (ultimate biodegradation) คือ พลังงานและสารประกอบขนาดเล็กที่เสถียรในธรรมชาติ (Mineralization) เช่น แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สมีเทน น้ำ เกลือ แร่ธาตุต่างๆ และมวลชีวภาพ (biomass)

นอกจากนี้ยังพบว่ามีการใช้คำว่า พลาสติกย่อยสลายได้ในสภาวะแวดล้อมธรรมชาติ (Environmentally Degradable Plastics, EDP) ซึ่งหมายถึง พลาสติกที่สามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติเนื่องจากปัจจัยต่างๆ ในสภาวะแวดล้อม เช่น กรด ด่าง น้ำ และออกซิเจนในธรรมชาติ แสงจากดวงอาทิตย์ แรงเค้นจากการกระทบของเม็ดฝนและแรงลม หรือจากเอนไซม์ของจุลินทรีย์ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมี กลายเป็นสารที่ถูกดูดซึม และย่อยสลายต่อได้อย่างสมบูรณ์โดยจุลินทรีย์ ได้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ สารอนินทรีย์ และมวลชีวภาพ เป็นผลิตภัณฑ์ขั้นสุดท้าย โดยการย่อยสลายและการดูดซึมนี้ต้องเกิดขึ้นได้รวดเร็วเพียงพอที่จะไม่ทำให้เกิดการสะสมในสภาวะแวดล้อม และคำว่าพลาสติกที่เป็นมิตรต่อสภาวะแวดล้อม (Environmental Friendly Plastics) หรือ พลาสติกสีเขียว (Green Plastics) หมายถึง พลาสติกที่ทำให้ภาระในการจัดการขยะลดลง และส่งผลกระทบโดยรวมต่อสภาวะแวดล้อมน้อยกว่าพลาสติกที่ใช้กันอยู่ทั่วไปในปัจจุบัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.13.3 ผลกระทบด้านบวกต่อสภาวะแวดล้อม

การประเมินผลกระทบด้านบวกต่อสภาวะแวดล้อมของการนำพลาสติกย่อยสลายได้มาใช้งานทดแทนพลาสติกทั่วไปในบางโอกาส สามารถทำได้โดยการใช้วิธีประเมินวัฏจักรชีวิต (Life cycle assessment) ของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ เปรียบเทียบกับพลาสติกทั่วไปที่ผลิตจากผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม เพื่อประเมินผลกระทบที่เป็นประโยชน์ต่อสังคมและสภาพแวดล้อมด้านต่างๆ เช่น แหล่งวัตถุดิบ ซึ่งอาจเป็นแหล่งวัตถุดิบที่ปลูกหรือผลิตทดแทนขึ้นใหม่ได้ หรือเป็นผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมี ปริมาณการใช้น้ำและพลังงานในกระบวนการผลิต การใช้สารเคมีในการเพาะปลูก และการปล่อยแก๊สเรือนกระจก เป็นต้น หากมีการนำพลาสติกย่อยสลายได้มาใช้งาน และมีการกำจัดอย่างมีประสิทธิภาพแล้วจะก่อให้เกิดประโยชน์ในด้านอื่นๆ ดังต่อไปนี้

1. คอมโพสท์ที่ได้จากการย่อยสลายพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพร่วมกับขยะอินทรีย์อื่นๆ สามารถนำมาใช้ในการปรับปรุงคุณภาพดินโดยช่วยเพิ่มสารอินทรีย์ ความชื้น และสารอาหารให้แก่ดิน พร้อมทั้งช่วยลดปริมาณการใช้ปุ๋ยและลดการเกิดโรคในพืช การหมักพลาสติกย่อยสลายได้ทำให้เกิดการหมุนเวียนของธาตุ ในขณะที่การใช้พลาสติกมักต้องกำจัดด้วยการฝังกลบหรือเผา
2. ลดเนื้อที่การใช้งานของบ่อฝังกลบขยะ โดยการใช้พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพและถุงที่ย่อยสลายได้ ทำให้เพิ่มศักยภาพในการย่อยสลายของเศษอาหารหรือขยะอินทรีย์ในบ่อฝังกลบ และเพิ่มศักยภาพในการผลิตแก๊สมีเทน สำหรับใช้เป็นเชื้อเพลิง ในกรณีที่บ่อฝังกลบได้ถูกออกแบบมาให้ผลิตและใช้ประโยชน์จากแก๊สมีเทนได้ใช้ฟิล์มพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพเป็นวัสดุคลุม
3. หน้าบ่อฝังกลบแทนดินในแต่ละวันเป็นการเพิ่มเนื้อที่ให้บ่อฝังกลบ เนื่องจากการปิดหน้าบ่อฝังกลบด้วยดินทุกวันจะใช้เนื้อที่รวม 25% ของเนื้อที่ในบ่อฝังกลบ
4. การใช้พลังงานในการสังเคราะห์ และผลิตพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพน้อยกว่าการผลิตพลาสติกทั่วไป ดังแสดงในตาราง 2.12 โดยเทียบกับพลังงานที่ใช้ในการผลิต HDPE และ LDPE โดยพลังงานที่ใช้ในการผลิต PHA ใกล้เคียงกับที่ใช้ในการผลิต PE หากการผลิตพลาสติกย่อยสลายได้โดยใช้สารอาหารน้ำตาลในน้ำทิ้งจากโรงงานผลิตแป้งกากน้ำตาล ตะกอนจากบ่อน้ำทิ้ง จะทำให้การใช้พลังงานลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.12 แสดงพลังงานที่ใช้สังเคราะห์พลาสติกชนิดสังเคราะห์

ชนิดพลาสติก	พลังงานที่ใช้ในการสังเคราะห์ (MJ/Kg)
LDPE	81
PHA – fermentation process	81
HDPE	80
PCL	77
PVOH	58
PLA	57
TPS + 60% PCL	52
TPL + 52.5% PCL	48
TPS	25
TPS + 15% PVOH	25

แหล่งที่มา: "Review of Life Cycle Assessment for Bioplastic" by Dr.Matin Patel, Utretch University, Natherlands, Nov. 2001 **[7]**

5. การปลดปล่อยแก๊สเรือนกระจก เป็นผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่สำคัญจากการใช้พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ แต่จากการศึกษาโดยวิธีประเมินวัฏจักร ตั้งแต่เริ่มการผลิตจนถึงการกำจัด ภายหลังเสร็จสิ้นการใช้งาน พบว่า พลาสติกย่อยสลายได้ก่อให้เกิดการปลดปล่อยแก๊สเรือนกระจกในปริมาณที่ต่ำกว่าพอลิเอทิลีน ซึ่งเห็นได้อย่างชัดเจนในกรณีที่เป็นพลาสติกที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบพื้นฐาน ซึ่งแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายของพลาสติกจะถูกใช้ไปในการเติบโตของพืชที่จะปลูกขึ้นมาใหม่ ทำให้เกิดการหมุนเวียนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในธรรมชาติซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของวัฏจักรคาร์บอน ทำให้เกิดความสมดุลของปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.13 แสดงปริมาณการปลดปล่อยแก๊สเรือนกระจกของพลาสติกชนิดย่อยสลายได้

ชนิดพลาสติก	ปริมาณการปลดปล่อยแก๊สเรือนกระจก
PCL	53
LDPE	50
HDPE	49
PVOH	42
TPS + 60% PCL	36
TPL + 52.5% PCL	33
TPS + 15% PVOH	17
Mater Bi TM film grade	12
Thermoplastic starch	11
Mater Bi TM foam grade	9
PLA	N/A
PLA-ferment	N/A

แหล่งที่มา: Review of Life Cycle Assessments for Bioplastics by Dr. Martin Patel, Department of Science, Technology and Society, Utrecht University, Nov. 2001. **[7]**

2.13.4 ผลกระทบด้านลบต่อสภาวะแวดล้อม

1. ก่อให้เกิดมลภาวะทางน้ำจากการเพิ่มของค่าความต้องการออกซิเจนทางชีวเคมี (biological oxygen demand, BOD) และค่าความต้องการออกซิเจนทางเคมี (chemical oxygen demand, COD) อันเนื่องมาจากการมีปริมาณสารอินทรีย์ หรือสารอาหารในแหล่งน้ำในปริมาณสูง ทำให้จุลินทรีย์มีความต้องการใช้ออกซิเจนในน้ำสูงขึ้นด้วย ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของระบบนิเวศน์ทางน้ำ
2. เกิดการปนเปื้อนของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการย่อยสลายของพลาสติกย่อยสลายได้ในสภาวะแวดล้อม เช่น การย่อยสลายของพลาสติกในสภาวะการฝังกลบหรือการคอมโพสท์ อาจทำให้สารเติมแต่งต่างๆ รวมถึง สี พลาสติกไซเซอร์ ตัวเร่งที่ตกค้าง รั่วไหล และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปนเปื้อนไปกับแหล่งน้ำใต้ดินและบนดิน ซึ่งสารบางชนิดอาจมีความเป็นพิษต่อระบบนิเวศน์

3. เกิดมลภาวะจากขยะ อันเนื่องมาจากการใช้พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่ถูกทิ้งหรือตกลงในสิ่งแวดล้อมที่มีสภาวะไม่เหมาะสมต่อการย่อยสลาย เช่น ถูกลมพัด และติดค้างอยู่บนกิ่งไม้ ซึ่งมีปริมาณจุลินทรีย์ไม่มากพอ ก็จะไม่สามารถย่อยสลายได้ดี นอกจากนี้การใช้พลาสติกย่อยสลายได้ อาจทำให้ผู้บริโภคเข้าใจผิดว่าจะสามารถกำจัดได้ง่ายและรวดเร็ว ทำให้มีการใช้งานเพิ่มขึ้น และพลาสติกย่อยสลายได้บางชนิดอาจใช้เวลานานหลายปีในการย่อยสลายทางชีวภาพอย่างสมบูรณ์ และก่อให้เกิดอันตรายต่อสัตว์ที่กลืนกินพลาสติกเข้าไป เนื่องจากไม่สามารถย่อยสลายได้ภายในกระเพาะของสัตว์
4. ความเป็นพิษของคอมโพสท์ที่ได้จากการหมักพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ เนื่องจากการมีสารตกค้าง หรือใช้สารเติมแต่งที่มีความเป็นพิษ และส่งผลกระทบต่อพืชและสัตว์ที่อาศัยอยู่ในดิน เช่น ไส้เดือน ดังนั้นจึงต้องศึกษาความเป็นพิษ (toxicity) ของคอมโพสท์ด้วย ชิ้นส่วนที่เกิดจากการหักเป็นชิ้นเล็กๆ เกิดการสะสมอยู่ในดินที่ใช้ทางการเกษตรในปริมาณเล็กน้อย จะช่วยให้เกิดการหมุนเวียนของอากาศได้ดี จึงนิยมใช้ในสวนดอกไม้ ไร่องุ่น และใส่ในกระถางเพื่อทำหน้าที่ปรับสมบัติของดิน แต่อย่างไรก็ตามอาจเกิดการสะสมของเศษพลาสติกในดินมากเกินไป อาจส่งผลต่อคุณภาพของดินและปริมาณผลิตผลที่เพาะปลูกได้
5. เกิดสารประกอบที่ไม่ย่อยสลาย เช่น สารประกอบประเภท aromatic จากการย่อยสลายของพลาสติกบางชนิด เช่น AACs โดยส่วนที่เป็นวงแหวน aromatic ในพอลิเมอร์ จะเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นสารประกอบขนาดเล็ก เช่น กรดเทเรฟทาลิก (terephthalic acid (TPA) ซึ่งย่อยสลายทางชีวภาพได้ไม่ดีนัก
6. การตกค้างของสารเติมแต่งที่เติมลงในพลาสติกย่อยสลายได้ เพื่อปรับสมบัติให้เหมาะสมกับการใช้งาน เช่นเดียวกับพลาสติกทั่วไป เมื่อพลาสติกเกิดการย่อยสลาย สารเติมแต่งเหล่านี้อาจปนเปื้อนอยู่ในสภาวะแวดล้อมได้ เช่น สารช่วยในการผสมพลาสติกต่างๆ เข้าด้วยกัน เช่น methylene diisocyanate (MDI) สารพลาสติกไซเซอร์ที่มักเติมในพลาสติก เพื่อความยืดหยุ่น glycerol, sorbital, propylene glycol, ethylene glycol, polyethylene glycol, triethyl citrate และ triacetine สารตัวเติมที่มักเติมลงในพลาสติกเพื่อทำให้ราคาถูกลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนใหญ่เป็นสารอนินทรีย์ จึงมักเกิดการสะสมในดินและสภาพแวดล้อม อย่างไรก็ตาม สารตัวเติมมักค่อนข้างเสถียร จึงมักไม่ทำให้เกิดความเป็นพิษ เช่น $CaCO_3$ TiO_2 SiO_2 และ talc เป็นต้น ตัวเร่งที่ใช้ในการสังเคราะห์พลาสติกย่อยสลายได้มักเป็นสารประกอบของโลหะ ซึ่งในการผลิตโดยทั่วไปมักมีเคตะลิสต์เหลือค้างอยู่ในเนื้อพลาสติกเสมอ หากเป็นพลาสติกทั่วไปที่ไม่ย่อยสลาย เคตะลิสต์จะติดค้างอยู่ในเนื้อพลาสติก แต่ในกรณีของพลาสติกย่อยสลายได้ เมื่อเกิดการย่อยสลายจะมีการปลดปล่อยเคตะลิสต์ที่เหลืออยู่ออกมาสู่สภาพแวดล้อมได้

ตารางที่ 2.14 ชนิดของโลหะในเคตะลิสต์ที่ใช้ในการผลิตพลาสติกย่อยสลายได้ [7]

ชนิดโลหะในเคตะลิสต์	ชนิดของพลาสติก
Tin	PVA, PCL
Antimony	Modified PET
Cobalt	Modified PET
Chromium	PE blends
Cobalt Managanese	Prodegradant polyethylene
Titanium	Copolyesters

2.14 พลาสติกเพื่อการเกษตร [14]

2.14.1 นิยามและความหมาย

พลาสติกเพื่อการเกษตร หรือ Plasticulture มาจากการรวมคำว่า Plastic กับ Agriculture เข้าไว้ด้วยกัน หมายถึง การใช้พลาสติกในงานทางด้านเกษตรกรรม เช่น ฟิล์มพลาสติกคลุมดินรอบโคน (plastic film mulch) ฟิล์มพลาสติกคลุมแปลงปลูก (Row cover หรือ Low tunnel และ High tunnel) โรงเรือนเพาะปลูกคลุมด้วยฟิล์มพลาสติก (Greenhouse) พลาสติกห่อม้วนหญ้าแห้ง (Hay bale wrap) รวมทั้งถาดถุงหรือกระถางที่ใช้ในการปลูกและย้ายต้นกล้า เป็นต้น ซึ่งการใช้พลาสติกเพื่อการเกษตรดังกล่าว โดยเฉพาะอย่างยิ่งการปลูกพืชชนิดต่างๆ เช่น ผัก ผลไม้ รวมทั้งดอกไม้และไม้ประดับนั้นกำลังได้รับความสนใจอย่างยิ่งในช่วงหลายสิบปีที่ผ่านมา เพราะพลาสติกเพื่อการเกษตรช่วยลดปัญหาเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอย่างรุนแรงของอากาศ ทั้งการเปลี่ยนแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุณหภูมิ ปริมาณน้ำฝน และลมตามธรรมชาติ ซึ่งบางครั้งการเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศที่รุนแรงดังกล่าว สามารถทำให้พืชที่ปลูกไว้ตาย เสียหาย หรือผลผลิตน้อยกว่าที่ควรจะเป็น

2.14.2 การใช้งานพลาสติกทางการเกษตร [14,33-38]

การใช้งานพลาสติกชนิดต่างๆในทางการเกษตรมีมากมาย ได้แก่

1. พลาสติกคลุมดิน (Mulching)

เกษตรกรใช้เทคนิคของการคลุมดิน เพื่อประหยัดน้ำและทำให้ผลผลิตออกก่อนฤดู ได้ผลผลิตสูงขึ้น ตลอดจนทำให้ผลผลิตที่ได้มีผิวสวยขึ้น การคลุมดินมีประโยชน์ต่อดินและสิ่งแวดล้อม ซึ่งรวมถึงการควบคุมความชื้น รักษาโครงสร้างของดิน ใช้ประโยชน์จากปุ๋ยได้มากขึ้น ปกป้องพืชที่ปลูกและตัดปัญหาการกำจัดวัชพืชถ้าใช้พลาสติกทึบแสง

การคลุมดินสมัยก่อนใช้ฟางข้าว ปัจจุบันถูกทดแทนโดยพลาสติก วิธีคลุมดินมี 2 วิธี คือ คลุมทั้งหมดและคลุมบางส่วน ซึ่งแต่ละวิธีดังกล่าวมีความแตกต่างกันอยู่ในตัวเอง

การติดตั้งแผ่นพลาสติกมีหลายวิธี ขึ้นอยู่กับชนิดของพลาสติกที่ใช้ อาจจะปูโดยการกลบทับด้านข้างและหัวท้ายด้วยดิน การเกษตรกรรมอื่นๆสามารถดำเนินการไปพร้อมๆกับการปูแผ่นพลาสติก ดินจะได้รับการไถพรวนใส่ปุ๋ยและปลูกไปพร้อมกันเลยทีเดียว ดังนั้นผลกระทบที่เครื่องจักร จะทำให้ดินชั้นล่างแน่นลดน้อยลง การใช้พลาสติกทุกชนิดในการคลุมดิน จะเพิ่มอุณหภูมิของดินในเวลากลางวัน นอกจากพลาสติกสีขาวและสีเงินซึ่งจะสะท้อนแสง พลาสติกสีดำจะป้องกันการงอกของวัชพืชได้ดีที่สุด ภายในโรงเรือนพลาสติกคลุมดินสีขาวถูกใช้ในการสะท้อนแสงเพื่อเพิ่มปริมาณแสงให้กับพืช

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.15 แสดงพลาสติกคลุมดิน **[14]**

ชนิดของแผ่นฟิล์มพลาสติก	วัตถุประสงค์หลัก
โปร่งใส	- เพิ่มอุณหภูมิในดินในช่วงกลางวัน - เร่งการเจริญเติบโต - จัดเก็บน้ำ
สีดำ	- ป้องกันวัชพืช - เพิ่มผลผลิต - จัดเก็บน้ำ
ทึบแสงและกักความร้อน	- กักความร้อนในช่วงกลางคืน - ป้องกันวัชพืช - จัดเก็บน้ำ
2 สี ดำ – ขาว	- ป้องกันวัชพืช - เพิ่มผลผลิต - สะท้อนแสง - จัดเก็บน้ำ
เสื่อมสลายได้	- เพิ่มอุณหภูมิของดิน - ทำให้สามารถใช้เครื่องจักรในการเก็บเกี่ยวได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.16 แสดงการใช้แผ่นฟิล์มพอลิเอทีลีนชนิดต่างๆในการคลุมดิน **[14]**

โปร่งใส	สำลี	สีเทา/สีเขียวอ่อน/สีน้ำตาล	สีดำขาว
พืชล้มลุกชนิดบาง เช่น แตง , ฝ้าย	พืชอายุ 1-3 ปี	พืชตามฤดูกาล อายุ 1-2 ปี	พืชล้มลุก พืชยืนต้น
ดินที่ไม่มีวัชพืช	ดินที่มีวัชพืช	ดินที่มีวัชพืชบ้าง	ดินที่มีวัชพืช
ในเขตที่มีอากาศหนาวที่มีโอกาสเกิดน้ำค้างแข็ง	ในเขตร้อนที่ปราศจากน้ำค้างแข็ง	ในเขตร้อนหรือหนาวที่ปราศจากน้ำค้างแข็ง	ในเขตร้อนที่ปราศจากน้ำค้างแข็งโดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อปลูกในฤดูร้อน
เพื่อเร่งให้ผลผลิตสุกเร็วมากกว่าการเพิ่มผลผลิต	เพิ่มผลผลิตมากกว่าการเร่งให้ผลผลิตสุกตัวเร็ว	เพิ่มผลผลิตและเร่งการให้ผลผลิตสุกเร็ว	เมื่อต้องการให้แสงสว่างมาก

ตารางที่ 2.17 แสดงข้อมูลของแผ่นฟิล์มพลาสติกพอลิเอทีลีนที่ใช้ในการคลุมดิน **[14]**

ชนิด	โปร่งใส	สีดำ	สีเทา	สีเขียว/สีน้ำตาล	สีดำและสีขาว
เปอร์เซนต์ของแสงที่ผ่าน	80%	-	35%	65%	-
การเจริญเติบโตของวัชพืช	สูง	-	น้อย	น้อยกว่าชนิดใส	-
การดูดซับความร้อน	ต่ำ	สูง	ปกติ	ต่ำ	ปกติ
อายุการใช้งาน	สั้น	นาน	ปกติ	สั้นกว่าแต่ดีกว่าชนิดใส	ค่อนข้างนาน
การป้องกันอากาศเย็น	ดี	ปกติ	ปานกลาง	ปกติ	น้อย
ปริมาณผลผลิต	น้อยกว่าชนิดดำ	สูง	ดีกว่าชนิดดำ	เหมือนชนิดใส	สูงกว่าชนิดดำ
ผลสุกและเก็บเกี่ยวได้ก่อน	สูง	ปานกลาง	ปกติ	สูง	สูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การพัฒนาพลาสติก ขึ้นอยู่กับสมบัติของพอลิเมอร์ เช่น พอลิเอทิลีนสีฟ้าสามารถให้ทั้งความร้อน และควบคุมวัชพืชได้ ด้วยความหนาเพียง 50 ไมครอน แผ่นฟิล์มจึงไม่ทำให้ผลผลิตเสียหาย

การคลุมดินมีประโยชน์อย่างยิ่งในเขตแห้งแล้ง ซึ่งช่วยให้การทำเกษตรยั่งยืน การคลุมดินไม่ได้จำกัดเฉพาะพืชที่ปลูกใหม่เท่านั้น ในพืชยืนต้นก็สามารถใช้ประโยชน์ได้เช่นเดียวกัน

2. พลาสติกคลุมโดยตรง (Direct covers)

พลาสติกที่ใช้คลุมโดยตรง จะใช้คลุมดินหลังจากหยอดเมล็ดหรือปลูกแล้ว พลาสติกนี้จะถูกพยุงไว้โดยต้นพืชและจะยกสูงขึ้นตามการเจริญเติบโตของพืช การใช้พลาสติกคลุมโดยตรง ซึ่งเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า พลาสติกคลุมโปง (Thermic blankets) สร้างสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมแก่การเจริญเติบโตของพืช ทำให้ผลผลิตมีคุณภาพสม่ำเสมอ มีขนาดใหญ่ขึ้นและแก่ก่อนกำหนดประมาณ 1 ถึง 2 สัปดาห์ และสามารถลดการใช้สารเคมีในการป้องกันกำจัดศัตรูพืช การใช้พลาสติกคลุมโปงเป็นเทคนิคการจัดการ ป้องกันและบังคับพืชที่ง่ายและต้นทุนต่ำ เหมาะที่จะนำไปใช้กับพืชสวนได้หลายชนิด ไม่ว่าจะปลูกในที่โล่งหรือภายในโรงเรือนและไม่ว่าจะคลุมโดยใช้เครื่องจักรหรือแรงคน

3. อุโมงค์หลังคาต่ำ (Low tunnels)

การใช้พลาสติกสร้างอุโมงค์หลังคาต่ำและใช้คลุมดินเพื่อการปลูกพืช เป็นเทคนิคที่รู้จักกันทั่ว เนื่องจากราคาถูกและใช้ง่าย ความยืดหยุ่นของแผ่นพลาสติกเป็นสิ่งที่สอดคล้องกับความต้องการของผู้ใช้ ในการสร้างโรงเรือนรูปโค้งครึ่งวงกลมแบบง่ายๆ แต่สามารถใช้งานตามวัตถุประสงค์ได้เป็นอย่างดี อุโมงค์หลังคาต่ำ ส่วนใหญ่มักใช้เพื่อช่วยในการผลิตพืช เพื่อต้องการให้สุกแก่เร็วขึ้น นอกจากนี้สามารถช่วยป้องกันความหนาว ลม หิมะ และสิ่งที่มาทำลายพืช ช่วยให้การใช้ปุ๋ยและน้ำมีประสิทธิภาพสูงขึ้น ค่าลงทุนในการติดตั้งพลาสติกคลุมลงบนโครงสร้างของอุโมงค์ขึ้นกับชนิดเครื่องจักรกลที่ใช้และรูปแบบของอุโมงค์ อุโมงค์หลังคาต่ำสามารถแบ่งออกได้เป็นหลายรูปแบบตามตัวแปรต่างๆ และระบบการให้น้ำ (ระบบหยด หรือให้น้ำแบบปล่อยท่วมบนผิวดิน)

4. โรงเรือนพลาสติก (Greenhouses)

การพัฒนาทางเทคโนโลยีพลาสติก ได้นำไปสู่การใช้งานใหม่ๆในอุตสาหกรรมเรือนเพาะชำ โรงเรือนแบบอุโมงค์จัดว่าเป็นต้นแบบเริ่มต้นที่นำไปสู่การพัฒนาโรงเรือนพลาสติก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ทันสมัย โครงสร้างที่มีลักษณะโค้งสามารถสร้างขึ้นมาได้จากพลาสติก ด้วยการใช้ประโยชน์จากคุณสมบัติของแผ่นฟิล์มและพลาสติกกึ่งคงรูป รูปแบบโรงเรือนพลาสติกถูกกำหนดโดยสภาพภูมิอากาศที่พืชต้องการในเขตอบอุ่น สภาพเศรษฐกิจและความต้องการทางการเกษตรที่เหมาะสมต่อการผลิตไม้ดอก ไม้ผลและผัก ปัจจุบันนี้การออกแบบโรงเรือนพลาสติกได้ก้าวหน้าไปมาก และการประมาณค่าใช้จ่ายไม่เพียงแต่คิดราคาต่อตารางเมตรเท่านั้น แต่รวมไปถึงประสิทธิภาพของการใช้พลังงาน การใช้ประโยชน์จากดิน โปรแกรมการปลูกพืชหลายๆชนิด และวัสดุที่ใช้คลุมโรงเรือน

5. การใช้พลาสติกในฟาร์ม (Farming applications)

พลาสติกถูกนำไปใช้ในการเลี้ยงสัตว์ เช่น นำไปมุงหลังคา ทำรั้วสำหรับเลี้ยงโค กระบือ และใช้ในการเก็บหญ้าอาหารสัตว์ การใช้งานเหล่านี้ส่วนใหญ่ใช้แผ่นฟิล์มชนิดทึบแสงและกันน้ำ (ก๊าซและของเหลวผ่านได้เล็กน้อย) ที่มีราคาถูก เทคนิคในการนำพลาสติกไปใช้งานในฟาร์มส่วนใหญ่ได้มาจากการพัฒนาคุณภาพและคุณลักษณะเฉพาะของพลาสติกเหล่านั้น

6. การให้น้ำหรือระบบชลประทาน (Farming applications)

ในปัจจุบันนี้การพัฒนาระบบชลประทานจะไม่สามารถทำได้เลย ถ้าไม่ได้นำเอาวัสดุที่ทำจากพลาสติกมาใช้งานอย่างกว้างขวาง การนำพลาสติกมาใช้งาน ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในวงการเกษตรอย่างมาก โดยเฉพาะในการชลประทาน วัสดุที่ทำจากพลาสติกถูกนำมาใช้กันแพร่หลายในการขนส่งน้ำไปให้ต้นพืช ผ่านท่อประธาน ท่อแขนง และท่อน้ำหยด

1 ใน 3 ของพลาสติกเพื่อการเกษตร ใช้อยู่ในระบบชลประทาน เป็นการยากที่จะประมาณพื้นที่ที่ใช้ระบบชลประทานน้ำน้อยทั้งหมดที่ใช้อยู่ทั่วโลกได้ แต่ไม่มีพืชสวนสมัยใหม่ชนิดใดเลยที่จะหลีกเลี่ยงการใช้ระบบให้น้ำแบบนี้ได้ ไม่ว่าสตรอเบอรี่ มะเขือเทศ เมลอน กล้วย ตลอดไปถึงมะกอก แม้กระทั่งการให้น้ำในโรงเรือน

7. การปลูกพืชโดยไม่ใช้ดิน (Hydrophonics)

การปลูกพืชโดยไม่ใช้ดินเป็นที่รู้จักกันว่า เป็นเทคโนโลยีใหม่ในการผลิตพืชสวน ซึ่งพัฒนาขึ้นมาเพื่อปลูกพืชผักต่างๆให้กับทหารที่ไปสู้รบในสมรภูมิที่ไม่มีพื้นที่ในการเพาะปลูกพืช ให้สามารถ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลิตผักเพื่อเป็นอาหารได้ การปลูกพืชโดยไม่ใช้ดินเป็นวิธีการที่มีศักยภาพในการผลิตพืชได้ดี แต่ต้องการความรู้และทักษะในการจัดการที่เหมาะสม

8. พลาสติกดาดแหล่งน้ำ (Waterproof sheeting)

พลาสติกช่วยป้องกันการสูญเสียน้ำจากระบบการกักเก็บ การลำเลียงและการจัดสรรน้ำ ช่วยให้การจัดการแหล่งน้ำมีประสิทธิภาพสูงขึ้น ในศตวรรษนี้การขาดแคลนน้ำในหลายพื้นที่ของโลกเป็นข้อจำกัดหลัก ในการปรับปรุงสภาพความเป็นอยู่ของประชากร การขาดแคลนน้ำเป็นเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นไม่แน่นอน ขณะเดียวกันฤดูกาลที่มีความต้องการสูงสุด มักจะตรงกับช่วงเวลาที่ปริมาณน้ำมีน้อยที่สุด ซึ่งเป็นเหตุให้ผลผลิตที่เก็บเกี่ยวได้ลดลง ดังนั้นการสร้างอ่างเก็บน้ำช่วยลดปัญหาเหล่านี้ลงได้ เกษตรกรแต่ละรายมักจะไม่มีความสามารถทางเศรษฐกิจที่จะสร้างอ่างเก็บน้ำขนาดใหญ่และคลองส่งน้ำดาดด้วยคอนกรีตของตนเองได้ ดังนั้นการใช้แผ่นพลาสติกดาดแหล่งน้ำซึ่งมีราคาถูกกว่าจึงเป็นทางออกที่ดีในการแก้ปัญหานี้

9. ตาข่ายและตะแกรงลดพลังงาน (Nets and energy screens)

ลมเป็นอุปสรรคอย่างหนึ่งในการทำการเกษตร การใช้ตาข่ายพลาสติกเป็นแนวกั้นลม ทำให้สามารถลดความหนาของกำแพงลงได้ จึงเหลือพื้นที่เพาะปลูกกว้างมากขึ้น แนวกั้นลมที่ใช้ตาข่ายพลาสติกกำลังเข้ามาแทนที่การปลูกต้นไม้เป็นแนวกั้นลม เพราะต้นไม้ที่ใช้เป็นแนวกั้นลมนั้นนอกจากจะแย่งน้ำและอาหารของพืชที่ปลูกแล้ว ยังเป็นแหล่งอาศัยของศัตรูพืชได้อีกด้วย การสร้างแนวกั้นลมจะมีผลต่อสภาพแวดล้อมในบริเวณนั้น เช่น ต่ออุณหภูมิ ความชื้นของดิน การคายน้ำของพืชจนไปถึงเรื่องการกระจายของฝนอีกด้วย

ชนิดของตาข่ายพลาสติก แบ่งออกเป็น

- ตาข่ายพลาสติกพรางแสง (Shading nets)
- ตาข่ายช่วงพยุงลำต้น และหลักพลาสติก (Trellising nets and stakes)
- ตาข่ายพลาสติกกันรากพืช (Anti-root nets)
- ตาข่ายพลาสติกลดความร้อน (Energy screens)
- ตาข่ายพลาสติกชนิดอื่นๆ (Other nets)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.15 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

S.Godbole และคณะ [15] ศึกษาการเตรียมและสมบัติของฟิล์มผสมย่อยสลายได้ของพอลิ-3-ไฮดรอกซีบิวทีเรท (Poly -3- hydroxybutyrate,PHB) ผสมแป้งมันฝรั่ง เพื่อทำการปรับปรุงสมบัติและลดต้นทุน และศึกษาสมบัติทางความร้อนและสมบัติเชิงกล พบว่า อัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดของ PHB:แป้ง คือ 70:30 (w/w) เนื่องจากมีสมบัติเชิงกลที่ดีที่สุด และสามารถลดต้นทุนวัตถุดิบได้ ส่วนค่าอุณหภูมิในการหลอมผลึก (T_m) และอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) เปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย เมื่อมีการเติมแป้งลงไป โดยวัสดุนี้อาจประยุกต์ใช้เป็นสารเคลือบบนแผ่นกระดาษหรือกระดาษแข็ง เพื่อใช้ในการทำบรรจุภัณฑ์อาหาร เป็นต้น

พรรวี สุมิตร [16] ได้ทำการศึกษาปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อสมบัติของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมชนิดรับประทานได้จากไคโตซานกับแป้งดัดแปรเอสเทอร์ โดยใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ พบว่า ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่มีอัตราส่วน 50:50 (w/w) มีค่าความแข็งแรงดึงและมอดูลัสสูงสุด ฟิล์มที่เตรียมจากแป้งดัดแปรที่มีองศาการแทนที่ 0.02 มีสมบัติเชิงกลและสมบัติการซึมผ่านของไอน้ำและออกซิเจนที่ดีกว่าแป้งดัดแปรที่มีองศาการแทนที่ 0.06 ส่วนผสมของปริมาณกลีเซอรอล พบว่า ฟิล์มที่ใช้กลีเซอรอลประมาณ 5% ให้สมบัติเชิงกลดีที่สุด และเมื่อเพิ่มปริมาณกลีเซอรอลทำให้มี (T_g) ลดลง

สุภสิทธิ์ ผู้มีโชค [17] ศึกษาการเตรียมพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังดัดแปรและไม่ดัดแปรกับพอลิโพรพิลีน โดยผสมกันในอัตราส่วนต่างๆ และขึ้นรูปเป็นแผ่นด้วยวิธีการอัดขึ้นรูป (Compression molding) จากผลการทดลองพบว่า เมื่อปริมาณแป้งสูงกว่า 50% แผ่นพอลิเมอร์ผสมมีความเปราะ จนไม่สามารถตัดเป็นชิ้นทดสอบได้ และเมื่อปริมาณแป้งเป็น 0-50% พบว่า พอลิเมอร์ที่เตรียมได้จากแป้งมันสำปะหลังดัดแปรมีสมบัติด้านความทนแรงดึง สมบัติด้านความทนการดัดโค้ง การดูดซึมความชื้น และความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพดีกว่าพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมจากแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปร โดยมีความทนแรงกระแทกใกล้เคียง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

G.S. Mugonzza และคณะ [18] ศึกษาสมบัติเชิงกลที่ลดลงและสัณฐานวิทยาของฟิล์มย่อยสลายได้ของฟิล์มทางการเกษตร โดยงานวิจัยใช้ฟิล์มคลุมดินที่ทำมาจาก Mater-Bi® ซึ่งเป็นเทอร์โมพลาสติกผสมกับแป้งและใช้ต้นสตรอเบอร์รี่ทดสอบ หาสมบัติเชิงกล วิเคราะห์ SEM , IR , Tensile และ ATR พบว่า ฟิล์มคลุมดินเกิดการย่อยสลายในส่วนที่เป็นแป้งก่อน บริเวณที่คลุมดินจะเกิดการย่อยสลายได้มากกว่าส่วนที่ไม่ถูกฝัง รวมทั้งค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดก็ลดลงมากกว่าด้วย และเมื่อทำการทดลองไปประมาณ 10 วัน ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด มีค่าลดลงประมาณ 300 เปอร์เซ็นต์

N. Tzankova Dintcheva และ F.P. La Matia [19] ศึกษาการออกซิเดชันด้วยแสงและสารเสถียรภาพทางแสงของพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ Mater – Bi ®เป็นสิ่งที่ได้มีการค้นคว้า เพื่อที่จะทราบความเป็นไปได้ที่จะใช้วัสดุนี้ในทางการเกษตร การย่อยสลายได้ดูจากสมบัติเชิงกลซึ่งเกี่ยวข้องกับเวลาการออกซิเดชันด้วยแสง ส่วนรายละเอียดอื่นๆ ดูจากค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด พอลิเมอร์ทำจากแป้งข้าวโพดและพอลิเอสเทอร์สังเคราะห์ที่สามารถย่อยสลายได้ จากการทดลองพบว่า วัสดุนี้มีความต้านทานจากรังสียูวีค่อนข้างต่ำ โดยดูจากค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดที่ลดลงอย่ารวดเร็ว แต่เมื่อใส่สารเสถียรภาพทางแสงลงในพอลิเมอร์เพียงเล็กน้อยก็สามารถเพิ่มความทนทานต่อแสงได้มาก สารเสถียรภาพ Benzophenone มีประสิทธิภาพการทำงานที่ดีกว่า Benzotrizoles , Triazine และ sterically hindered amine เพียงเล็กน้อย อาจเนื่องมาจากมีการดูดกลืนแสงในช่วงยูวีได้มากกว่าของพอลิเมอร์ย่อยสลายได้

ธนาวดี ลี้จากภัย , ก้องเกียรติ คงสุวรรณ และ นูกูล เอื้อพันธเศรษฐ , 2543 [20] ได้วิจัยและพัฒนาเพื่อผลิตเม็ดพลาสติกชีวภาพย่อยสลายได้สำหรับอุตสาหกรรมพลาสติกฟิล์มและถาดอาหาร ทำได้ยากและไม่คุ้มค่าทางเศรษฐกิจ ทำให้ปริมาณขยะประเภทนี้ถูกทิ้งเป็นปริมาณมาก ซึ่งเป็นการสูญเสียเนื้อที่ในบ่อฝังกลบ การพัฒนาและใช้งานพลาสติกที่ผลิตจากวัตถุดิบที่สามารถปลูกหรือสร้างทดแทนขึ้นใหม่ได้ และมีสมบัติในการย่อยสลายได้ดีจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการแก้ปัญหาดังกล่าวข้างต้น ในปัจจุบันอุตสาหกรรมด้านบรรจุภัณฑ์ได้ให้ความสนใจในการผลิตฟิล์ม และบรรจุภัณฑ์ที่มีสมบัติย่อยสลายได้อย่างสมบูรณ์ในบ่อหมักปุ๋ยอินทรีย์ แป้งจึงเป็นวัตถุดิบที่สำคัญหนึ่งที่ได้รับความสนใจในการนำมาผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์ประเภทใช้ครั้งเดียวทิ้ง โดยบรรจุภัณฑ์ที่มีแป้งเป็นส่วนประกอบหลักสามารถผลิตได้โดยกระบวนการขึ้นรูปเช่นเดียวกับพลาสติกทั่วไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในงานวิจัยนี้จะทำการพัฒนากระบวนการผลิตเม็ดพลาสติกที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบหลัก ที่มีสมบัติทนทานต่อความชื้นและมีสมบัติทางกายภาพและเชิงกลดีขึ้น ซึ่งสมบัติต่างๆเหล่านี้สามารถเพิ่มขึ้นได้ โดยใช้เทคนิคการศึกษาความสัมพันธ์ของสภาวะที่ใช้ในการขึ้นรูป และปรับปรุงสูตรแป้ง โดยการเพิ่มส่วนผสมอื่นๆที่เหมาะสม เพื่อเพิ่มความแข็งแรง ทำให้สามารถใช้งานได้นานขึ้น นอกจากนี้จะทำการศึกษาสมบัติต่างๆของพลาสติกที่พัฒนาขึ้น เช่นความหนาแน่น โครงสร้างของพื้นผิว ความแข็งแรง และอัตราการย่อยสลายของพลาสติกในสภาวะการหมักปุ๋ยในห้องปฏิบัติการด้วย

ภูมิพัฒน์ รัตนตรัยเจริญ , กิติโรจน์ หวันตาหลา และ ศิริวรรณ ศรีสรฉัตร์, 2546 [21] ศึกษาการดูดซับไอออนโพแทสเซียม และสังกะสีโดยใช้เถ้าแกลบ โดยศึกษาความสามารถในการดูดซับเมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเผา, ขนาดของเถ้าแกลบ , pH ของสารละลาย และอุณหภูมิของสารละลาย พบว่า เถ้าแกลบสามารถดูดซับไอออนสังกะสีได้ดีที่สุดเมื่อเผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส และมีขนาดเล็กกว่า 180 ไมโครเมตร ในสารละลาย pH เท่ากับ 6.5 และมีอุณหภูมิเท่ากับ 45 องศาเซลเซียส สำหรับไอออนโพแทสเซียมพบว่า เถ้าแกลบไม่สามารถดูดซับได้ นอกจากนั้นยังพบว่ามีการปล่อยไอออนโพแทสเซียมออกสู่สารละลายเท่ากับ 1.15 มิลลิกรัมต่อกรัม เมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับโดยใช้แกลบที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยกรดอะซิติก , โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมคลอไรด์ พบว่า แกลบมีความสามารถในการดูดซับลดลงเมื่อปรับปรุงคุณภาพด้วยกรดอะซิติกและโซเดียมคลอไรด์ และมีความสามารถในการดูดซับสูงขึ้นเมื่อปรับปรุงพื้นที่ผิวด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ สำหรับการดูดซับครั้งนี้สามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลองการดูดซับของแลงเมียร์ มีปริมาณการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 11.56 มิลลิกรัมต่อกรัม

คมสันต์ กุศล , 2551 [22] ได้สังเคราะห์อนุพันธ์ของโคพอลิ (สไตรีน/ ไดไวนิลเบนซีน / มาเลอิกแอนไฮไดรด์) ที่ประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิล (XSMAc) เอไมด์ (XSMANH) และหมู่แทนที่ 2,4 ไดอะมิโนฟีนิลไฮดราซีน (XSMADA) ตามลำดับ เพื่อใช้เป็นตัวดูดซับไอออนของโลหะหนักนิกเกิล [Ni(II)] ทองแดง [Cu(II)] สังกะสี [Zn(II)] และโครเมียม [Cr(III)] จากน้ำเสียสังเคราะห์ จากนั้นทำการศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับไอออนของโลหะหนักของ XSMAc , XSMANH และ XSMADA โดยใช้วิธีทีละเท (batch experiment) พบว่า สภาวะที่เหมาะสมสำหรับดูดซับไอออนของโลหะหนักต่างๆด้วยโคพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้ คือ ที่ pH เท่ากับ 5 และเวลาเข้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สู่สมดุล คือ 1 ชั่วโมง เมื่อใช้ปริมาณตัวดูดซับเท่ากับ 2.0000+-0.0005 กรัมต่อลิตรและความเข้มข้นของไอออนของโลหะหนักเท่ากับ 100 ppm โดยตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุด คือ XSMADA และตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับต่ำสุด คือ XSMAc และร้อยละการกำจัดไอออนของโลหะหนักนิกเกิล [Ni(II)] ทองแดง [Cu(II)] สังกะสี [Zn(II)] และโครเมียม [Cr(III)] ของ XSMADA เท่ากับ 99.47, 99.75 , 99.54 และ 95.57 ตามลำดับ นอกจากนี้ยังศึกษาประสิทธิภาพของ XSMAc ในการดูดซับสีย้อมเบสิกบลู 20 และไดเร็กเรด 80 ในน้ำเสียสังเคราะห์ พบว่า XSMAc สามารถดูดซับสีย้อมเบสิกบลู 20 ได้ดี แต่ดูดซับสีย้อมไดเร็กเรด 80 ได้น้อยมากในช่วง pH 3-6 สภาวะที่เหมาะสมสำหรับดูดซับสีย้อมเบสิกบลู 20 คือ ที่ pH เท่ากับ 4 และเวลาเข้าสู่สมดุล 6 ชั่วโมง เมื่อใช้ปริมาณตัวดูดซับเท่ากับ 0.2500+-0.0005 กรัมต่อลิตรและความเข้มข้นของสีย้อมเท่ากับ 100 ppm ซึ่งให้ร้อยละการกำจัดสีย้อมเบสิกบลู 20 และไดเร็กเรด 80 เทากับ 85.80 และ 1.39 ตามลำดับ พฤติกรรมในการดูดซับไอออนของโลหะหนักและสีย้อมเบสิกบลู 20 สามารถอธิบายได้ดีโดยใช้ไอโซเทอมการดูดซับของ Langmuir

Prachaub chaibu and Buncha chawanchai , 2548 [23] ได้วิจัยตัวดูดซับและศึกษาคุณสมบัติในการดูดซับไอออนของโลหะหนักในสารละลาย จากการปรับสภาพด้วยวิธีการต่างกัน 3 แบบ คือ เปลือกลำไยแห้ง เปลือกลำไยที่ปรับสภาพด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น และเปลือกลำไยที่ปรับสภาพด้วยสารละลายด่าง พบว่า เปลือกลำไยที่ปรับสภาพแล้วสามารถดูดซับไอออนของโลหะหนักได้ดีที่สุดเมื่อความเป็นกรด-ด่างของสารละลายเท่ากับ 4 คือ 87.53-97.77 เปอร์เซ็นต์ ภายในเวลา 1 ชั่วโมง มีความสามารถดูดซับไอออนของโลหะตะกั่วได้ดีกว่าแคดเมียม นอกจากนี้ปัจจัยความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายโลหะ ปริมาณและขนาดของตัวดูดซับ มีผลต่อการดูดซับไอออนของโลหะหนักแตกต่างกัน และการศึกษาสมดุลของการดูดซับแบบกะ ทำให้ทราบว่าการดูดซับของเปลือกลำไยที่ปรับสภาพสอดคล้องกับแบบจำลอง Langmiur Adsorption Isotherm โดยมีความจุสูงสุดของการดูดซับโลหะแคดเมียมและตะกั่วเท่ากับ 5.7405 , 1.2680 และ 3.5273 มิลลิกรัมต่อกรัม และ 8.7032 , 1.4766 และ 1.0075 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ และเมื่อทดลองกำจัดไอออนของโลหะแคดเมียมในน้ำเสียจากห้องปฏิบัติการภายใต้สภาวะที่เหมาะสม พบว่าเปลือกลำไยที่ปรับสภาพด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น สามารถกำจัดโลหะแคดเมียมได้สูงสุด คือ 88.75 เปอร์เซ็นต์ ส่วนเปลือกลำไยแห้ง และเปลือกลำไยที่ปรับสภาพด้วยสารละลายด่างกำจัดโลหะแคดเมียมได้ไม่แตกต่างกัน คือ 84.45 และ 83.75 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

H. Dave , P.V.C. Roa และ J. D Desai ค.ศ. 1997 [24] งานวิจัยนี้ได้ศึกษาแป้งที่ผสมด้วยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ และทำการเป่าขึ้นรูปเป็นฟิล์ม เพื่อทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพ ฟิล์มที่มีปริมาณแป้ง 30% โดยน้ำหนัก จะมีการย่อยสลายทางชีวภาพสูงสุด โดยจะสูญเสียน้ำหนักของโพลีเอทีลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ 6.3% และแป้ง 84.5 % เมื่อนำไปทำการฝังกลบในดินที่ผสมกับปุ๋ยเป็นเวลา 48 สัปดาห์ การย่อยสลายของแผ่นฟิล์มนี้ อาจถูกเร่งปฏิกิริยาการย่อยสลายจากการบ่มเชื้อในอาหารเพาะเลี้ยงที่ไม่เหมาะสมในสภาวะเขย่า พบว่า จะสูญเสียน้ำหนักของพอลิเอทีลีนชนิดความหนาแน่นต่ำกับแป้ง เท่ากับ 11.2% และ 68.9% ตามลำดับ ภายใน 6 สัปดาห์ จากนั้นทำการวิเคราะห์โดยเทคนิค FTIR และ 13C NMR ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่า น้ำหนักของแป้งที่สูญเสียจากการย่อยสลายทางชีวภาพนั้นประสบความสำเร็จ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของพอลีเอทีลีน ทำให้พื้นที่พีกของโซ่หลักและโซ่กิ่งลดลง

Y. J Kim , Y.M Lee และ Park , 1994 [25] งานวิจัยนี้ได้ทำการสำรวจการย่อยสลายทางชีวภาพของพอลิเมอร์ โดยแป้งจะต้องทำการดัดแปลงก่อนที่จะผสมด้วยพอลิเอทีลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ เพราะแป้งมีคุณสมบัติในการจับตัวกับน้ำได้ดี วิธีการดัดแปลงมี 3 วิธีที่จะนำมาประยุกต์ใช้ให้เข้ากับแป้งผสมพอลิเอทีลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ วิธีแรกปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชัน (Esterification) ของหมู่ไฮดรอกซีในแป้งกับอะซิติกไฮดราย (Acrylonitrile) และสไตรีนบนแป้ง วิธีสุดท้ายปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันของหมู่ไฮดรอกซิลในแป้งกับไอโอเมอร์ 3 ชนิด โดยพิจารณาค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) ค่าความยาว ณ จุดขาด (% Elongation at break) ค่ามอดูลัสยัง (Young' s modulus) และค่าความหนืดเฉือน (Shear viscosity) ของแป้งผสมดัดแปลง พบว่าการกำจัดมอนอเมอร์ในแป้ง จะแสดงถึงการเข้ากันได้ของแป้งผสมดัดแปลงกับพอลิเอทีลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ มีประสิทธิภาพมากที่สุด

G. H. Yew และคณะ [26] ได้ศึกษาการดูดซับน้ำ และการย่อยสลายของวัสดุประกอบพอลิแลคติกแอซิดและแป้งข้าวเจ้า พบว่า เมื่อเติมแป้งข้าวเจ้าลงไปประมาณ 20% จะทำให้ได้สมบัติทางด้านความแข็งแรงและความแข็งแรงอยู่ในเกณฑ์ดี แต่จะทำให้ความแข็งแรงดึง และการยืด ณ จุดขาด มีค่าลดลง คาดการณ์ว่าสาเหตุเกิดจากการรวมตัวจับเป็นกลุ่มก้อนของแป้งข้าวเจ้า และเมื่อเติมยางธรรมชาติชนิดอีพอกไซด์ (ENR50) จะทำให้ได้ความแข็งแรงดึง และการดึงยืด ณ จุดขาดของวัสดุประกอบเพิ่มขึ้น สำหรับการดูดซับน้ำจะใช้กฎของฟิค ซึ่งค่า M_m และ D จะขึ้นอยู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กับปริมาณของแป้งข้าวเจ้า และยางธรรมชาติ สมบัติการดึงจะต่ำลงภายหลังดูดซับน้ำ เมื่อใช้เอนไซม์ในการย่อยสลาย จะทำให้สมบัติการดึงลดลงอย่างมาก โดยยืนยันจากการส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่ามีการเสียสภาพบนพื้นผิว

R.L. Shogren และคณะ [27] ได้ศึกษาการย่อยสลายทางชีวภาพในดินของแท่งวัสดุประกอบระหว่างแป้งพอลิแลคติกแอซิด และพอลิไฮดรอกซีเอสเทอร์อีเทอร์ (PHEE) โดยการนำแท่งพอลิเมอร์ที่ทำการขึ้นรูปแล้วมาทำการฝังเป็นเวลา 1 ปี สังเกตผลของแป้งและ PHEE ที่มีต่ออัตราการย่อยสลายทางชีวภาพ พบว่า สามารถเรียงลำดับอัตราการย่อยสลายได้ดังนี้ PLA (ประมาณ 0% ต่อปี) < แป้ง/PLA (ประมาณ 0-150% ต่อปี) < แป้ง/PHEE/PLA (ประมาณ 4-50% ต่อปี) และจะเพิ่มขึ้นเมื่อทำการเพิ่มปริมาณแป้งกับ PHEE

MyleS E. Morse และคณะ [28] ทำการศึกษาพลาสติกย่อยสลายได้ที่มีความแข็งแรงสูงจากแป้งและพอลิแลคติกแอซิด (poly(lactic acid); PLA) เนื่องด้วยพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA และแป้งไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกัน โดยแป้งยังคงจับตัวเป็นกลุ่มก้อน ในวัฏภาคของ PLA มีผลให้พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคของ PLA กับแป้งลดลง จึงทำให้สมบัติเชิงกลลดลง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงทำการเติมสารช่วยผสม (compatibilizer) ลงไป เพื่อเพิ่มความเข้าเป็นเนื้อเดียวกันให้กับพอลิเมอร์ผสม จากงานวิจัยนี้พบว่า การใช้สารช่วยผสมเมทิลลีนไดฟีนิลไดไอโซไซยาเนต (Methylenediphenyl diisocyanate; MDI) ในปริมาณ 0.5 เปอร์เซ็นต์ (%) เทียบกับพอลิเมอร์ผสม หรือ 1 เปอร์เซ็นต์ของมาเลอิกแอนไฮดรายด์ (Maleic anhydride; MA) เป็นสารช่วยผสมกับ 10 เปอร์เซ็นต์ของ 2,5 บิสเทริทต์ บิวทิลเปอร์ออกซี 2,5 ไดเมทิลเฮกเซน (2,5 bis(Tert-butylperoxy)-2,5 dimethylhexane; L101) เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา ให้สมบัติเชิงกลที่ดีที่สุด

Jian-Feng Zhang และ Xiuzhi Sun [29] ศึกษาสมบัติเชิงกลของวัสดุผสมของ PLA กับแป้งสาลีที่ปรับปรุงสมบัติด้วยสารช่วยผสมมาลิอิกแอนไฮดรายด์ (Maleic anhydride; MA) และใช้ L101 เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา งานวิจัยนี้พบว่า แรงยึดติดระหว่างพื้นผิวของ PLA และแป้งเพิ่มขึ้นและสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้นเมื่อใช้สารช่วยผสม และพบว่า ที่อัตราส่วนผสม PLA กับแป้งที่ 55 ต่อ 45% ที่ประกอบด้วย 1 % MA และ 10% L101 ให้ค่าความแข็งแรงดึง (Tensile-strength) และเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (%Elongation at break) สูงที่สุด ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับ PLA บริสุทธิ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปิยนุสร์ น้อยด้วง และ วชิรพันธ์ จันทร์พงษ์ [30] การใช้มิวซิเลจแห้งจากเมล็ดแมงลักเป็นสารให้ความคงตัวในผลิตภัณฑ์ไอศกรีมกล้วยหอม การใช้มิวซิเลจจากเมล็ดแมงลักเป็นสารให้ความคงตัวแทนกัวร์กัมในการผลิตไอศกรีมกล้วยหอม โดยแปรปริมาณของมิวซิเลจจากเมล็ดแมงลักเป็น 3 ระดับ คือ ร้อยละ 0.3, 0.4 และ 0.5 (w/w) พบว่า เมื่อปริมาณของมิวซิเลจจากเมล็ดแมงลักเพิ่มขึ้น ไอศกรีมจะมีความหนืดสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และมีผลทำให้อัตราการขึ้นฟูและการละลายลดลง เมื่อนำมาทดสอบทางประสาทสัมผัส พบว่า ไอศกรีมกล้วยหอมที่เติมมิวซิเลจจากเมล็ดแมงลักร้อยละ 0.5 ได้คะแนนการยอมรับทางประสาทสัมผัสด้านเนื้อสัมผัส การละลายในปากและความชอบโดยรวมสูงที่สุด และเมื่อนำมาทดสอบเปรียบเทียบกับไอศกรีมกล้วยหอมสูตรมาตรฐานที่ใช้กัวร์กัมเป็นสารให้ความคงตัว พบว่า สูตรที่ใช้มิวซิเลจจากเมล็ดแมงลักมีเนื้อสัมผัส การละลายในปากและความชอบโดยรวมสูงกว่า และองค์ประกอบทางเคมีของไอศกรีมกล้วยหอมที่เติมมิวซิเลจจากเมล็ดแมงลัก ร้อยละ 0.5 พบว่า มีความชื้น คาร์โบไฮเดรต โปรตีน ไขมัน เถ้า และเส้นใย ร้อยละ 73.83, 16.07, 4.90, 4.20, 1.00 และ 7.30 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับไอศกรีมกล้วยหอมสูตรมาตรฐาน พบว่า มีปริมาณเส้นใยสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

พิมภรณ์ สมกิตติธรรม ,รัตนาพร นิละนนท์ ,วันดี กฤษณพันธ์ ,แม้นสรวง วุฒิอุดมเลิศ และธนาพร เอื้ออารีมิตร [31] แมงลัก (*Ocimum basilicum* L. f. *citratum* Back.) เป็นพืชล้มลุกที่จัดอยู่ในตระกูล Apiaceae (Labiatae) โดยพบว่า เมล็ดแมงลักจะมีเยื่อหุ้มเมล็ด (Husk) ซึ่งจะให้ใยอาหารหรือไฟเบอร์ ที่มีคุณสมบัติดูดซับน้ำได้ถึง 25 เท่าของน้ำหนักแห้งของเมล็ด จึงมีการนำเมล็ดแมงลักมาปรุงเป็นของหวานเพื่อรับประทานเป็นยาเย็น ทานให้อิ่ม ช่วยระบาย และช่วยลดน้ำหนัก จุดประสงค์ของการทดลองนี้ เพื่อต้องการศึกษาการเตรียมผงสำเร็จรูปพร้อมชงดื่มจากวุ้นของเมล็ดแมงลัก จากการวิจัยเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการพองตัวของวุ้นแมงลัก โดยนำเมล็ดแมงลักแห้งมาแช่ในน้ำที่อุณหภูมิต่างๆพบว่า วุ้นแมงลักสามารถพองตัวได้เต็มที่ในน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส นาน 90 นาที โดยมีความสามารถในการพองตัวเท่ากับ 88.6 มล./กรัม ในการนำวุ้นแมงลักที่พองตัวเต็มที่แล้วมาทำให้แห้งพบว่า สภาวะที่เหมาะสม คือ การอบแห้งที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส นาน 6 ชั่วโมง จากการทดสอบคุณภาพมาตรฐานเปรียบเทียบกับ Psylium seed ตามที่ระบุใน USP XXXI ในหัวข้อ Psylium Hemicellulose พบว่า ผงวุ้นแมงลักแห้งที่ได้มีค่าความสามารถในการพองตัว เท่ากับ 200 มล./กรัม, ค่า Loss on drying เท่ากับ 7.23%, ค่า Total ash เท่ากับ 4.16% และค่า Acid insoluble ash เท่ากับ 0.3%โดยน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นิวัตน์ บุญญะรัง , ศุภวรรณ ดีโรจนเดช และ สุธีจินต์ พยัคคง [32] งานวิจัยนี้เป็นการเตรียมฟิล์มไฮโดรเจล (Hydrogel) จากสารเมือก (Mucilage) ที่ได้จากการพองตัวของเม็ดแมงลัก (*Ocimum canum Sims.*) กับพลาสติไซเซอร์ (Plasticizer) 2 ชนิด ได้แก่ กลีเซอรอล (Glycerol) และพอลิเอทิลีนไกลคอล (Polyethylene glycol) โดยผสมแมงลักกับพลาสติกไซเซอร์ในอัตราส่วน 1:1, 1.5:1 และ 2:1 โดยน้ำหนัก ทำการเปรียบเทียบค่าการดูดซับน้ำ (Water Uptake) ร้อยละน้ำหนักของแข็งที่เหลือ (%Solid content) สมบัติเชิงกลของฟิล์มแมงลัก และฟิล์มแมงลักผสมพลาสติก-ไซเซอร์ที่ไม่แช่และแช่ในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์เป็นเวลา 0, 1, 3 และ 5 นาที ตามลำดับ ศึกษาสมบัติทางความร้อนของฟิล์มแมงลัก โดยใช้เทคนิค TGA และ DSC ศึกษาสัณฐานวิทยาของฟิล์มแมงลัก โดยใช้กล้องจุลทรรศน์โพลาไรซ์ (Optical polarized microscope) และตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันโดยใช้เครื่อง FT-IR จากการทดลองพบว่า สมบัติต่างๆของฟิล์มแมงลักแปรผันตามชนิด อัตราส่วนและระยะเวลาในการเชื่อมโยงในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ กลีเซอรอลเป็นพลาสติก-ไซเซอร์ที่ดีกว่าพอลิเอทิลีนไกลคอล โดยเฉพาะอัตราส่วนแมงลักต่อกลีเซอรอลเท่ากับ 2:1 ฟิล์มไฮโดรเจลที่อัตราส่วนนี้ แช่ในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ 3 นาที ให้สมบัติดีที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมี อุปกรณ์และเครื่องมือ

สารเคมี

1. เม็ดแมงลักยี่ห้อ ไร่ทิพย์ ขนาดบรรจุ 100 กรัม
2. แป้งมันสำปะหลังยี่ห้อ New Grade ขนาดบรรจุ 400 กรัม
3. โซเดียมคลอไรด์ (Sodium chloride , NaOH) บริษัท Univar Mw. 40 g/mol
4. โพแทสเซียมคลอไรด์ (Potassium chloride , KCl) บริษัท Univar Mw.74.551 g/mol
5. แคลเซียมคลอไรด์ (Calcium chloride , $CaCl_2$) ยี่ห้อ UNILAB , dried 15-2.5 mm , $CaCl_2$ = 110.99 , B/No.AF602459
6. กลีเซอรอล (Glycerol)
7. น้ำกลั่น

อุปกรณ์

1. บีกเกอร์ ขนาด 1000 มล.
   500 มล.
   250 มล.
   100 มล.
2. กระบอกตวง ขนาด 100 มล.
   10 มล.
3. ขวดวัดปริมาตร ขนาด 100 มล.
4. แท่งแก้วคน
5. กระจกนาฬิกา
6. ถาดอะลูมิเนียม
7. แผ่นฟอยด์อะลูมิเนียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. แผ่นใสพลาสติก
9. ถุงซิบล็อค
10. เหยือกน้ำพลาสติก
11. กรรไกร,คัตเตอร์
12. ช้อนตักสาร
13. กระดาษกรอง
14. ผ้าขาวบาง
15. กระบอกน้ำกลั่น
16. แทบกาว
17. ตะแกรง

เครื่องมือที่ใช้

1. เครื่องชั่งน้ำหนักทศนิยม 2 ตำแหน่งรุ่น HR-200 บริษัท Denver Instrument
2. ตู้อบ
3. เครื่องปั่นน้ำผลไม้ยี่ห้อ National super blender
4. มอเตอร์พร้อมใบพัดปั่นกวนแบบ 2 แฉก รุ่น stedfast stirrer Model SL 2400 บริษัท Fisher Scientific
5. แท่นให้ความร้อนรุ่น Tech lab
6. เครื่องทดสอบสมบัติเชิงกล (Tensile testing machine) ตามมาตรฐาน ASTM D - 1822-L โดยใช้ Crosshead speed 7.5 mm /min รุ่น LR 5K บริษัท LLOYD instrument
7. เครื่องเทอร์โมกราวิเมทริก (Thermogravimetric Analyser ,TGA) รุ่น TAC7/DX บริษัท Perin Elmer
8. เครื่องฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (Fourier Transform - Infrared spectrophotometer , FTIR) บริษัท Bruker

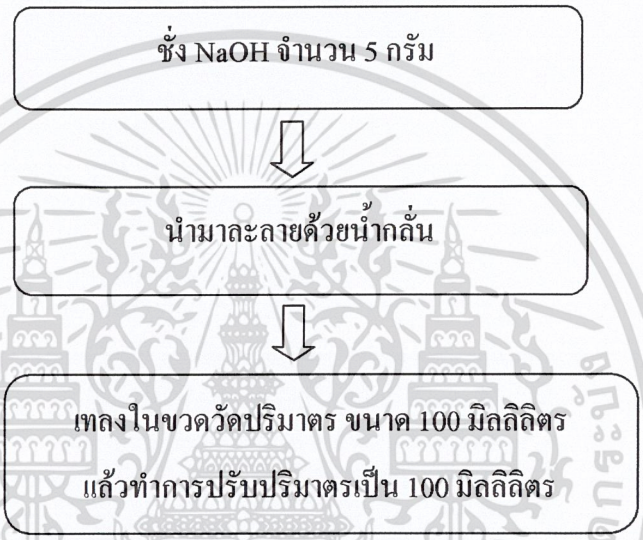
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 วิธีการทดลอง

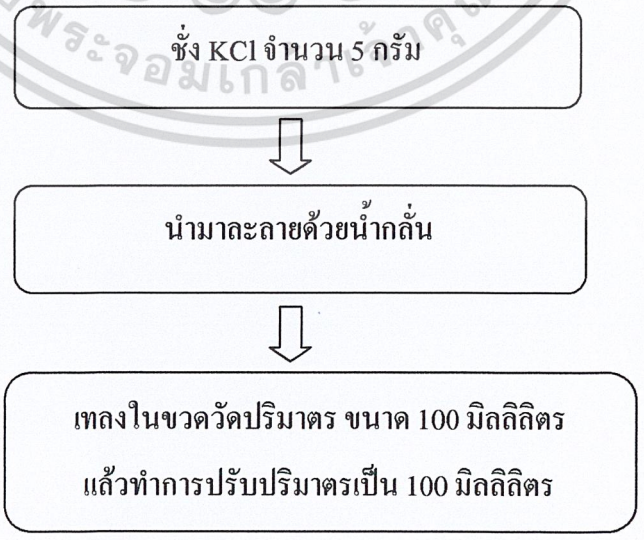
การทดลองสามารถแบ่งเป็นขั้นตอนดังต่อไปนี้

3.2.1 การเตรียมสารละลาย

- ขั้นตอนการเตรียมสารละลาย 5% w/v NaOH

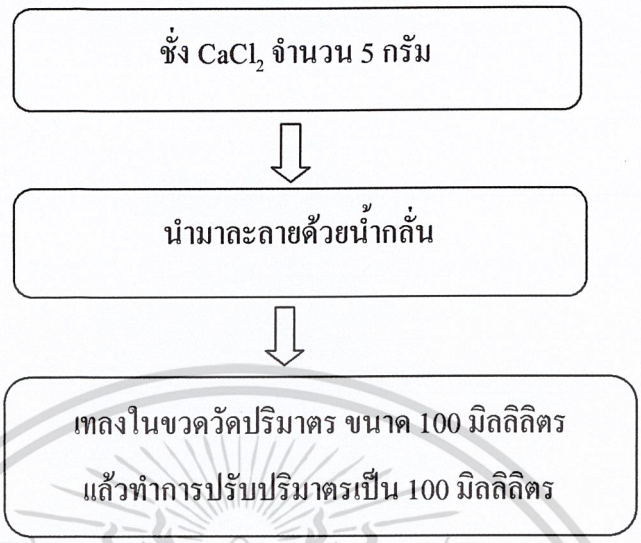


- ขั้นตอนการเตรียมสารละลาย 5% w/v KCl

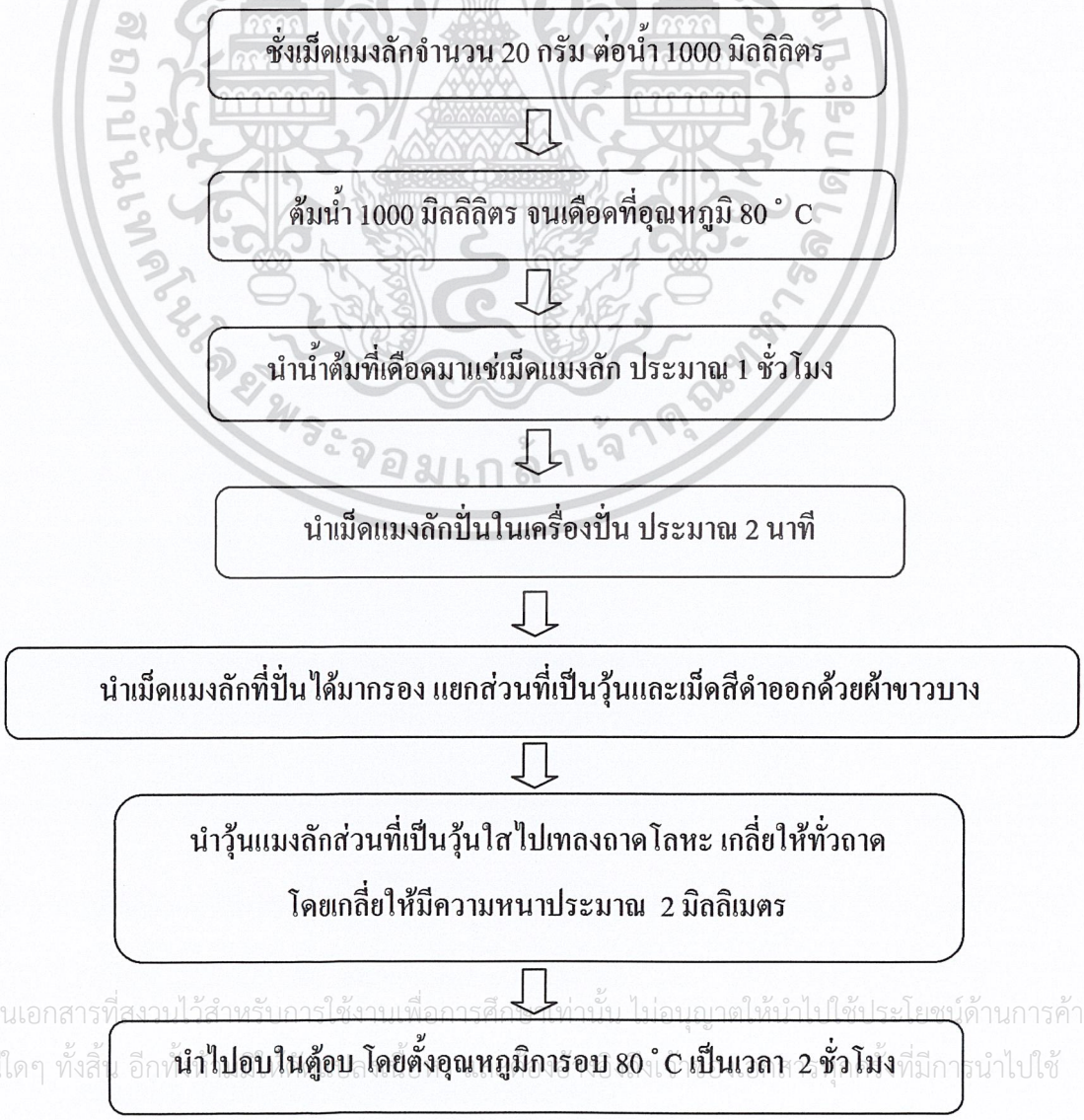


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ขั้นตอนการเตรียมสารละลาย 5% w/v $CaCl_2$



3.2.2 การเตรียมผงวุ้นเม็ดแมงลัก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

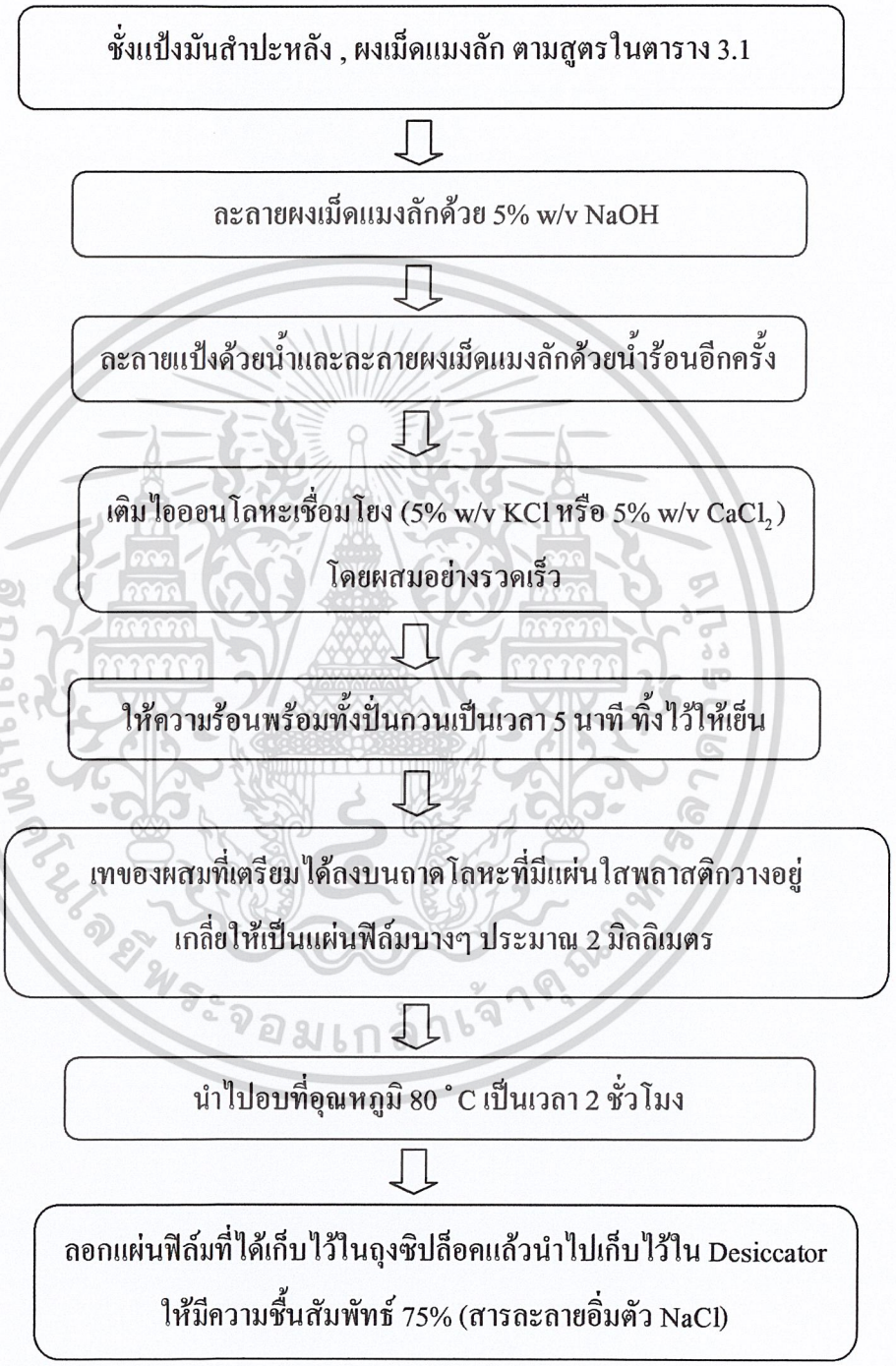
3.2.3 การเตรียมแผ่นฟิล์ม

ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนผสมของแผ่นฟิล์ม

สูตร	แป้งมัน (g)	น้ำร้อน (ml)	วุ้นแมงลัก (g)	5%NaOH (ml)	Glycerol (ml)	5%KCl (ml)	5%$CaCl_2$ (ml)
1	10	100	0	0	1	5	-
2	10	100	0	0	1	-	5
3	7	80	3	20	1	5	-
4	7	80	3	20	1	-	5
5	5	80	5	20	1	5	-
6	5	80	5	20	1	-	5
7	-	80	5	20	1	-	-
8	-	80	5	20	1	5	-
9	-	80	5	20	1	-	5
10	-	80	3	20	1	5	-
11	-	80	3	20	1	-	5
12	10	80	0	20	1	5	-
13	10	80	0	20	1	-	5
14	10	100	-	-	1	-	-
15	10	80	-	20	1	-	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.3.1 ขั้นตอนการขึ้นรูปแผ่นฟิล์ม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การทดสอบสมบัติทางกายภาพของแผ่นฟิล์ม

3.3.1 ทดสอบสมบัติการบวมน้ำ (Swelling properties)

1. นำแผ่นฟิล์มตัวอย่างมาตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 1X1 นิ้ว
2. แช่ในน้ำกลั่นทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง
3. นำมาวางบนกระดาษกรองเพื่อดูดซับน้ำส่วนเกิน ชั่งน้ำหนักทุก 1 ชั่วโมง เป็นเวลา 6 ชั่วโมง
4. คำนวณหา % Swelling ดังสูตร

การคำนวณ % Swelling

$$\% \text{ Swelling} = (Wt - Wg) / Wg \times 100$$

เมื่อ Wt = น้ำหนักฟิล์มหลังแช่น้ำที่เวลาใดๆ

Wg = น้ำหนักฟิล์มก่อนแช่น้ำ

3.3.2 ทดสอบหาจุดอิ่มตัวในการบวมน้ำ

1. นำแผ่นฟิล์มตัวอย่างจาก 3.3.1 มาแช่น้ำกลั่นทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องต่อจนครบ 24 ชั่วโมง
2. นำมาชั่งน้ำหนักบนกระจกนาฬิกา
3. คำนวณหา % Equilibrium water content ดังสูตร

การคำนวณ % Equilibrium water content

$$\% \text{ Equilibrium water content} = (We - Wg) / Wg \times 100$$

เมื่อ We = น้ำหนักฟิล์มหลังแช่น้ำที่เวลา 24 ชั่วโมง

Wg = น้ำหนักฟิล์มก่อนแช่น้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.3 ทดสอบหาปริมาณน้ำที่เหลืออยู่ในแผ่นฟิล์ม

1. นำฟิล์มจาก 3.3.2 ที่แช่น้ำจนอิ่มตัว (24 ชั่วโมง) วางบนกระจกนาฬิกา ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง
2. นำมาชั่งน้ำหนักทุกๆ 1 ชั่วโมง
3. คำนวณหา %Water retention ดังสูตร

$$\% \text{ Water retention} = \frac{\text{น้ำหนักของฟิล์มที่เหลือหลังจากวางไว้ 1ชั่วโมง}}{\text{น้ำหนักฟิล์มที่อิ่มตัวด้วยน้ำ}} \times 100$$

3.4 การทดสอบสมบัติเชิงกลตามมาตรฐาน ASTM D-882-02

1. นำแผ่นฟิล์มตัวอย่างมาตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าโดยมีขนาดความกว้าง 2.5 เซนติเมตร และความยาว 10 เซนติเมตร (ชิ้นงาน 3-5 ชิ้นต่อสูตร)
2. ตั้งค่าทดสอบโดยใช้ Load cell 100 N , Gage Length 15 mm. และตั้งสภาวะของเครื่องโดยใช้อัตราเร็วในการดึง (Crosshead speed 7.5 mm/min)
3. นำชิ้นงานที่ได้มาทดสอบหาค่า Tensile strength และ Elongation at break

3.5 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน

- หาอุณหภูมิการสลายตัว (T_d) ด้วยเทคนิค TGA

1. นำแผ่นฟิล์มในแต่ละสูตรมาชั่งน้ำหนักประมาณ 5 มิลลิกรัม
2. เตรียมตัวอย่างลงบน Pt Plate

   โดย (น้ำหนักแผ่นฟิล์ม 1 มิลลิกรัม = 20 มิลลิโวลต์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ตั้งสภาวะของเครื่อง ดังต่อไปนี้

- Initial temperature	50 ° C
- Maximum temperature	900 ° C
- Isothermal	1
- Heating rate	10 ° C/min

4. ทำการทดสอบหาอุณหภูมิในการสลายตัวของชิ้นงานตัวอย่างก่อนและหลังการเชื่อมโยง

3.6 การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีด้วยเทคนิค FTIR

1. เตรียมชิ้นงานตัวอย่าง โดยนำแผ่นฟิล์มในแต่ละสูตรมาบดผสมกับโพแทสเซียมโบรไมด์ (KBr)
2. นำผงตัวอย่างที่ได้มาอัดเป็นแผ่น โดยใช้เครื่องอัดที่ความดัน 10 บาร์ เป็นเวลา 5 นาที
3. นำแผ่นตัวอย่างที่ได้มาวางลงบนแผ่นแม่เหล็กและประกบด้วยแผ่นแม่เหล็กอีกแผ่น เพื่อยึดเม็ดตัวอย่างไว้
4. นำมาใส่เครื่องฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (FTIR) โดยทำการสแกนด้วยพอลิสไตรีน(Polystyrene) เป็นจำนวน 5 ครั้ง เพื่อตรวจสอบดูว่าฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (FTIR) สามารถตรวจวัดได้ตามมาตรฐานหรือไม่
5. ทำการวัดตัวอย่างซึ่งจะทำการวัดตัวอย่างในช่วง 400 – 4000 cm^{-1} สแกนทั้งหมด 5 ครั้ง
6. ทำจนครบทุกสูตร
7. เมื่อทำจนครบทุกสูตรแล้ว ทำการวิเคราะห์โดยเปลี่ยนจากแผ่นฟิล์มแป้งมันสำปะหลังเป็นฟิล์มแมงลัก และฟิล์มแป้งผสมวุ้นแมงลัก ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
ผลการวิจัยและอภิปรายผล

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาฟิล์มพลาสติกย่อยสลายได้จากแป้งมันสำปะหลังผสมแมงลัก โดยใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ และสารละลาย KCl , $CaCl_2$ เป็นสารก่อพันธะเชื่อมโยง เพื่อใช้ประโยชน์เป็นวัสดุคลุมดิน และได้ทำการศึกษาสมบัติของฟิล์มที่ได้แต่ละสูตร โดยการนำแผ่นฟิล์มพลาสติกที่ได้มาทดสอบสมบัติการบวมน้ำ (%Swelling) วิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีหาหมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่อง FTIR สมบัติเชิงกลตามมาตรฐาน ASTM D-1822-L ได้แก่ ความแข็งแรงดึง (Tensile-strength) และเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด (% Elongation at break) และวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA

4.1 ลักษณะทางกายภาพของแผ่นฟิล์ม

ตารางที่ 4.1 สูตรแผ่นฟิล์มและสมบัติที่ทดสอบ

สูตร	แป้ง (g)	น้ำร้อน (ml)	วุ้นแมงลัก (g)	5%NaOH (ml)	Glycerol (ml)	5%KCl (ml)	5%$CaCl_2$ (ml)	สมบัติที่ทดสอบ		
								สมบัติบวมน้ำ	สมบัติเชิงกล	สมบัติความร้อน
1	10	100	0	0	1	5	-	✓	✓	-
2	10	100	0	0	1	-	5	✓	×	-
3	7	80	3	20	1	5	-	✓	✓	✓
4	7	80	3	20	1	-	5	✓	✓	✓
5	5	80	5	20	1	5	-	✓	✓	✓
6	5	80	5	20	1	-	5	✓	✓	✓
7	-	80	5	20	1	-	-	✓	✓	✓
8	-	80	5	20	1	5	-	✓	✓	-
9	-	80	5	20	1	-	5	✓	✓	-
10	-	80	3	20	1	5	-	✓	✓	-
11	-	80	3	20	1	-	5	✓	✓	-
12	10	80	0	20	1	5	-	✓	×	-
13	10	80	0	20	1	-	5	✓	×	-
14	10	100	-	-	1	-	-	✓	×	✓
15	10	80	-	20	1	-	-	×	×	-
16	-	1000	20	-	-	-	-	-	-	✓

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

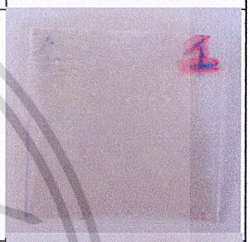
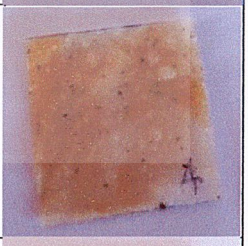
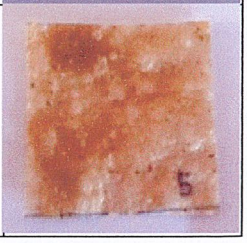
หมายเหตุ :

✓ หมายถึง สามารถทดสอบได้ และนำมาวิเคราะห์ อภิปรายผล

× หมายถึง ไม่สามารถนำมาทดสอบได้

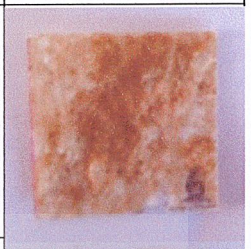
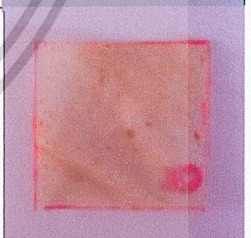
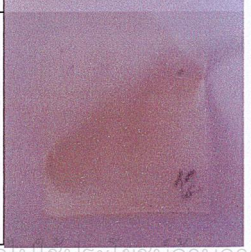
- หมายถึง ไม่นำมาวิเคราะห์ อภิปรายผล

ตารางที่ 4.2 ลักษณะทางกายภาพของแผ่นฟิล์ม

สูตร	ลักษณะของแผ่นฟิล์มที่ได้	ภาพประกอบ
1	ลักษณะใส แข็ง ค่อนข้างเปราะ มีฟองอากาศมาก พับงอได้	
2	ลักษณะใส แข็ง ค่อนข้างเปราะกว่าสูตร 1 มีฟองอากาศมาก พับงอได้	
3	สีเหลืองน้ำตาล ไม่เหนียวยืด ดึงแล้วขาด มีฟองอากาศ	
4	สีเหลืองน้ำตาล กรอบ เปราะ	
5	สีเหลืองน้ำตาล ไม่กรอบ (เมื่อเทียบกับสูตร 4) ก่อนเกลี่ยสารละลายหนืดมาก	

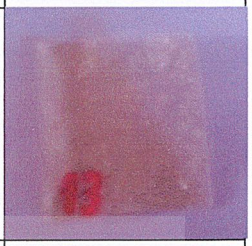
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 (ต่อ) ลักษณะทางกายภาพของแผ่นฟิล์ม

สูตร	ลักษณะของแผ่นฟิล์มที่ได้	ภาพประกอบ
6	สีเหลืองน้ำตาล กรอบ เปราะ เมื่อพับงอ	
7	สีเหลืองน้ำตาล แผ่นบางเรียบ เหนียวพอสมควร	
8	สีเหลืองน้ำตาล ฉีกแล้วขาด	
9	สีเหลืองน้ำตาล เหนียวยืดพอสมควร	
10	สีเหลืองน้ำตาล ไม่กรอบและไม่เหนียว ดึงแล้วขาด	
11	สีเหลืองน้ำตาล ไม่กรอบและไม่เหนียว ดึงแล้วขาด (คล้ายสูตร 10)	
12	มีสีเหลืองน้ำตาลอ่อน แข็งเปราะ แตกหัก ขึ้นรูปไม่เป็นแผ่น	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 (ต่อ) ลักษณะทางกายภาพของแผ่นฟิล์ม

สูตร	ลักษณะของแผ่นฟิล์มที่ได้	ภาพประกอบ
13	มีสีเหลืองน้ำตาลอ่อน ไม่แข็งเปราะ เหนียวพอสมควร	
14	มีสีขาวใส แข็งเหนียวไม่มาก ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นได้	-
15	สีเหลืองน้ำตาลอ่อน แข็งเปราะมาก ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นได้	-

พบว่า ฟิล์มที่ผสมแมงลักมีสีน้ำตาลตามสีแมงลัก เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบฟิล์มที่ผสม 5% KCl (สูตรที่ 1 , 3 , 5 , 8 , 10 และ 12) และฟิล์มที่ผสม 5% $CaCl_2$ (สูตรที่ 2 , 4 , 6 , 9 , 11 , และ 13) พบว่าส่วนใหญ่ขึ้นรูปแผ่นโดยวิธีเทหล่อ (Casting) ได้ เมื่อทดสอบความแข็งแรงด้วยการดึงยืดด้วยมือ พบว่าบางสูตรขาด บางสูตรเปราะแตกหักง่าย และบางสูตรเหนียว

ฟิล์มผสมระหว่างแป้งต่อแมงลักในอัตราส่วน 7:3 และ 5:5 ที่มี 5% KCl ผสมอยู่ด้วย ให้ลักษณะดึงยืดได้ดีกว่าเมื่อผสม 5% $CaCl_2$

ฟิล์มที่มีแต่วุ้นแมงลัก สูตร 9 (แมงลัก 5 กรัม) ที่มี 5% $CaCl_2$ มีความเหนียวมากกว่าฟิล์มสูตร 8 ที่มี 5% KCl และปริมาณแมงลักยิ่งมาก จะทำให้ฟิล์มมีลักษณะเหนียวมากขึ้นเมื่อดึงยืดด้วยมือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ผลการทดสอบการบวมตัว (% Swelling)

นำแผ่นฟิล์มทุกสูตรแช่น้ำที่อุณหภูมิห้องประมาณ 35 ° C แล้วนำมาชั่งน้ำหนักทุก ๆ 1 ชั่วโมง จนครบ 6 ชั่วโมง ทำการทดลองซ้ำสูตรละ 3 ชิ้น บันทึกการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของชิ้นงาน ดังตารางที่ 4.3 และปริมาณน้ำที่ดูดซับ ดังแสดงในตารางที่ ก-2 (ภาคผนวก ก)

ตารางที่ 4.3 ลักษณะของแผ่นฟิล์มหลังการบวมน้ำ

สูตร	ชิ้นที่	ลักษณะการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ					
		1 ชั่วโมง	2 ชั่วโมง	3 ชั่วโมง	4 ชั่วโมง	5 ชั่วโมง	6 ชั่วโมง
1	1	อ่อนตัว บวมเป็นเจลเล็กน้อย	เป็นวุ้นเจลใส นิ่มหนืด เริ่มไม่คงรูปเป็นแผ่น	เป็นวุ้นใสนิ่มหยุ่น คงรูปเป็นแผ่นเล็กน้อย	เป็นวุ้นใส ไม่คงรูป จับตัวเป็นก้อน	เป็นแผ่นบาง ใสนิ่ม เมื่อ-เทออกจะจับตัวเป็นก้อน	เป็นเยื่อบางและเป็นวุ้นใส นิ่มบาง ลื่น ไม่คงรูป
	2	เป็นเจลใส อ่อนตัว ยังคงรูปเป็นแผ่น พอสมควร	บวมตัว เป็นเจลวุ้นใส ละลายนิดหน่อย ไม่คงรูป เป็นแผ่น	เป็นวุ้นใสนิ่มหยุ่น คงรูปเป็นแผ่นเล็กน้อย	เป็นวุ้นใส จับตัวเป็นก้อน ไม่คงรูปเป็นแผ่น	เป็นวุ้น นิ่มลื่น ไม่คงรูปเป็นแผ่น	บวมตัวเป็นวุ้น หยุ่นตัว ไม่คงรูป จับตัวเป็นก้อน เมื่อเอาขึ้นจากน้ำ
	3	เป็นวุ้นใส อ่อนตัว	เป็นวุ้นใส นิ่ม ละลายบางส่วน ไม่คงรูป เป็นแผ่น	เป็นวุ้นใส นิ่ม ยืดหยุ่น คงรูปเป็นแผ่นเล็กน้อย	เป็นวุ้นใส จับตัวเป็นก้อน ไม่คงรูปเป็นแผ่น	เหลือเป็นเยื่อบางๆ เป็นวุ้นใส นิ่ม ลื่น	บวมตัวเป็นวุ้น หยุ่นตัว ไม่คงรูปเป็นแผ่น จับตัวเป็นก้อน เมื่อเอาขึ้นจากน้ำ

ตารางที่ 4.3 (ต่อ) ลักษณะของแผ่นฟิล์มหลังการบวมน้ำ

สูตร	ชิ้นที่	ลักษณะการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ					
		1 ชั่วโมง	2 ชั่วโมง	3 ชั่วโมง	4 ชั่วโมง	5 ชั่วโมง	6 ชั่วโมง
2	1	อ่อนตัว ม้วนงอ บวมเป็นเจลเล็กน้อย	เป็นวุ้น นิ่ม ใส ไม่คงรูปเป็นแผ่น	เป็นเจลใส นิ่ม คงรูปเป็นแผ่นบางส่วน	เป็นวุ้นเจลใส ละลายบางส่วน	เป็นวุ้นนิ่มลื่น ไม่คงรูปเป็นแผ่น	ละลายน้ำ เหลือเยื่อใสบางเล็กน้อย
	2	เป็นวุ้นใส นิ่มหยุ่น ไม่คงรูปเป็นแผ่น	เป็นวุ้นใส ไหลลื่น บวมตัว ไม่คงรูปเป็นแผ่น	เป็นเจลใส นิ่ม บวมตัว	บวมตัวเป็นวุ้นใส แหลกเหลว	ละลายน้ำเกือบหมด	บวมตัวมาก เป็นวุ้นเจลใส แต่แหลกไม่เป็นแผ่น
	3	ม้วนงอ เป็นวุ้นใส อ่อนตัว	เป็นวุ้นนิ่มใส บวมตัว	เป็นวุ้นใส นิ่มเหลว	ละลายไปกับน้ำ เหลือเป็นวุ้นเจลใส เล็กน้อย	ละลาย เหลือเป็นผุยเยื่อบางๆ	ละลาย เหลือเยื่อใสบางเล็กน้อย
3	1	เป็นแผ่นหนา บวมตัวเล็กน้อย แต่ไม่เป็นเจล คงรูปเป็นแผ่น	บวมตัวน้อย คงรูปเป็นแผ่น	บวมตัวน้อย ม้วนงอเล็กน้อย คงรูปเป็นแผ่น	บวมตัวเล็กน้อย ม้วนงอ คงรูปเป็นแผ่น	บวมตัวอืด คงรูปเป็นแผ่นแข็ง	ม้วนตัว คงรูปเป็นแผ่น
	2	บวมตัว ไม่เป็นเจล คงรูปเป็นแผ่น	บวมตัวบางส่วน คงรูปเป็นแผ่น	บวมตัวเล็กน้อย ม้วนงอ คงรูปเป็นแผ่น	บวมใส ม้วนงอ คงรูปเป็นแผ่น	บวมใส ม้วนงอ คงรูปเป็นแผ่น	บวมตัวเล็กน้อย ม้วนงอ คงรูปเป็นแผ่น
	3	บวมตัวเล็กน้อย คงรูปเป็นแผ่น	บวมตัวเล็กน้อย คงรูปเป็นแผ่น	บวมตัวเล็กน้อย คงรูปเป็นแผ่น	บวมตัวน้อย ม้วนตัวงอ คงรูปเป็นแผ่น	บวมใส คงรูปเป็นแผ่น	บวมตัวน้อย ม้วนงอ คงรูปเป็นแผ่น

ตารางที่ 4.3 (ต่อ) ลักษณะของแผ่นฟิล์มหลังการบวมน้ำ

สูตร	ชิ้นที่	ลักษณะการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ					
		1 ชั่วโมง	2 ชั่วโมง	3 ชั่วโมง	4 ชั่วโมง	5 ชั่วโมง	6 ชั่วโมง
4	1	บวมตัวเล็กน้อย ไม่เป็นเจล คงรูปเป็นแผ่น	บวมตัวน้อย คงรูปเป็นแผ่น	บวมตัวนิดหน่อย คงรูปเป็นแผ่น	ลื่น คงรูปเป็นแผ่น	บวมตัว ใส ลื่น คงรูปเป็นแผ่น	นิ่มลื่น คงรูปเป็นแผ่น
	2	บวมตัวเป็นแผ่นหนา ไม่เป็นเจล คงรูปเป็นแผ่น	บวมน้อย คงรูปเป็นแผ่น	บวมตัวนิดหน่อย คงรูปเป็นแผ่น	ลื่น นิ่ม คงรูปเป็นแผ่น	บวมใสเล็กน้อย ลื่น คงรูปเป็นแผ่น	บวมตัวเล็กน้อย นิ่มลื่น คงรูปเป็นแผ่น
	3	คงรูปเป็นแผ่น นิ่มลื่น	บวมตัวเล็กน้อย คงรูปเป็นแผ่น	บวมตัว ลื่น คงรูปเป็นแผ่น	บวมตัวน้อย ลื่น คงรูปเป็นแผ่น	บวมใส ลื่น คงรูปเป็นแผ่น	บวมตัวน้อย นิ่มลื่น คงรูปเป็นแผ่น
5	1	บวมตัวเล็กน้อย ไม่เป็นเจล คงรูปเป็นแผ่น	บวมตัว คงรูปเป็นแผ่น	บวมตัวอืด คงรูปเป็นแผ่น	บวมตัวมาก คงรูปเป็นแผ่น	บวมตัวอืด เป็นแผ่นหนา คงรูปเป็นแผ่น	บวมตัวมาก เป็นแผ่นหนา คงรูปเป็นแผ่น
	2	บวมตัวเล็กน้อย เป็นแผ่นหนา คงรูปเป็นแผ่น	บวมตัว ลื่น คงรูปเป็นแผ่น	บวมตัวอืด คงรูปเป็นแผ่นแข็ง	บวมตัวอืด คงรูปเป็นแผ่นแข็ง	บวมใส อืด เป็นแผ่นหนา คงรูปเป็นแผ่น	บวมตัวมาก เป็นแผ่นหนา คงรูปเป็นแผ่น
	3	บวมตัวเล็กน้อย คงรูปเป็นแผ่นมาก	บวมตัวมากกว่าสูตร 3,4 คงรูปเป็นแผ่น	ลื่น คงรูปเป็นแผ่นแข็ง	บวมตัว คงรูปเป็นแผ่นแข็ง	บวมตัวเป็นชิ้นหนา คงรูปเป็นแผ่นแข็ง	บวมตัวมาก เป็นแผ่นหนา คงรูปเป็นแผ่น

ตารางที่ 4.3 (ต่อ) ลักษณะของแผ่นฟิล์มหลังการบวมน้ำ

สูตร	ชิ้นที่	ลักษณะการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ					
		1 ชั่วโมง	2 ชั่วโมง	3 ชั่วโมง	4 ชั่วโมง	5 ชั่วโมง	6 ชั่วโมง
6	1	บวมตัวเล็กน้อย ไม่เป็นเจล คงรูปเป็นแผ่น	บวมตัว ไม่เป็นเจล คงรูปเป็นแผ่น	บวมตัวค่อนข้างมาก คงรูปเป็นแผ่น	บวมตัว ลื่น คงรูปเป็นแผ่น	บวมใส คงรูปเป็นแผ่น	บวมตัว เป็นแผ่นหนา คงรูปเป็นแผ่น
	2	บวมตัว เป็นแผ่นหนา คงรูปเป็นแผ่น	บวมตัว คงรูปเป็นแผ่น	บวมตัวค่อนข้างมาก คงรูปเป็นแผ่น	คงรูปเป็นแผ่นแข็ง	บวมใส ลื่น คงรูปเป็นแผ่น	บวมตัวมาก เป็นแผ่นหนา คงรูปเป็นแผ่น
	3	คงรูปเป็นแผ่น บวมตัวเล็กน้อย	บวมตัวเล็กน้อย คงรูปเป็นแผ่น	ลื่น คงรูปเป็นแผ่นแข็ง	บวมตัว คงรูปเป็นแผ่น	บวมตัว ลื่น คงรูปเป็นแผ่นแข็ง	บวมตัว คงรูปเป็นแผ่น
7	1	เป็นเจลหนืด ไม่คงรูปเป็นแผ่น	เป็นวุ้นใส ละลายหายไป ไม่คงรูปเป็นแผ่น	ละลายเกือบหมด เหลือเป็นวุ้นใสเล็กน้อย	ละลายไปแล้ว	ละลายไปแล้ว	ละลายไปแล้ว
	2	เป็นวุ้นนิ่ม คงรูปเป็นแผ่น	บวมตัว นิ่มเหลว เป็นเจลใส	ละลายเกือบหมด เหลือเป็นวุ้นใสเล็กน้อย	ละลายไปแล้ว	ละลายไปแล้ว	ละลายไปแล้ว
	3	เป็นวุ้นใสหนืด ไม่คงรูปเป็นแผ่น	เป็นวุ้นใสไหลนิ่ม ละลายบางส่วน ไม่คงรูป เป็นแผ่น	นิ่ม หยุ่น ลื่น คงรูปเป็นแผ่นเล็กน้อย	ละลายไปกับน้ำ เหลือเจลใสปนน้ำ	ละลายไปแล้ว	ละลายไปแล้ว

ตารางที่ 4.3 (ต่อ) ลักษณะของแผ่นฟิล์มหลังการบวมน้ำ

สูตร	ชิ้นที่	ลักษณะการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ					
		1 ชั่วโมง	2 ชั่วโมง	3 ชั่วโมง	4 ชั่วโมง	5 ชั่วโมง	6 ชั่วโมง
8	1	บวมตัวเล็กน้อย เป็นเจล ไม่ค่อยคงรูปเป็นแผ่น	เป็นวุ้นใส ไหลลื่น นิ่ม ไม่คงรูปเป็นแผ่น	เป็นวุ้นนิ่ม ไม่คงรูปเป็นแผ่น	เป็นวุ้นใส ไหลลื่น ไม่คงรูปเป็นแผ่น	ละลายไปแล้ว	ละลายไปแล้ว
	2	เป็นวุ้นนิ่ม คงรูปเป็นแผ่น	บวมตัว เป็นเจลนิ่ม คงรูปเป็นแผ่นเล็กน้อย	เป็นวุ้นนิ่ม ไม่คงรูปเป็นแผ่น	ไหลเหลวปนกับน้ำ ไม่คงรูปเป็นแผ่น	ละลายไปแล้ว	ละลายไปแล้ว
	3	เป็นวุ้นใส ลื่นนิ่ม คงรูปเป็นแผ่น	เป็นวุ้นใส บวมตัว คงรูปเป็นแผ่น	นิ่ม หยุ่น ลื่น คงรูปเป็นแผ่นเล็กน้อย	เป็นวุ้น นิ่ม บวมตัว ไม่คงรูปเป็นแผ่น	ละลายเปื่อยยุ่ย เหลือเยื่อ คล้ายทิชชู่ละลายน้ำ	เหลือเป็นเจลใส ไหลเหลว
9	1	บวมตัวเล็กน้อย หนืด คงรูปเป็นแผ่น	บวมตัว นิ่ม คงรูปเป็นแผ่น	เป็นวุ้น นิ่ม บวมตัวอืด คงรูปเป็นแผ่น	บวมตัว นิ่มหยุ่น คงรูปเป็นแผ่น	ละลายน้ำไปแล้ว	ละลายไปแล้ว
	2	เป็นวุ้นนิ่ม ม้วนงอ ไม่คงรูปเป็นแผ่น	เป็นวุ้นนิ่มเหลว หนืดน้อย ไม่คงรูปเป็นแผ่น	เป็นวุ้นนิ่ม บวมตัวอืด คงรูปเป็นแผ่น	เหลือเป็นเจลไหลปนน้ำ ไม่คงรูปเป็นแผ่น	เป็นวุ้นใส ลื่นนิ่ม ไม่คงรูปเป็นแผ่น	บวมตัวมาก เป็นวุ้นเจลใส แต่แหลกไม่เป็นแผ่น
	3	เป็นวุ้นใส ลื่นนิ่ม บวมตัวเล็กน้อย คงรูป	เป็นวุ้นใส บวมตัว คงรูปเป็นแผ่น	นิ่มลื่น บวมตัว ไม่คงรูป	บวมตัวเป็นวุ้นใส คงรูปเป็นแผ่นเล็กน้อย	ละลายเปื่อยยุ่ย เหลือวุ้นใสนิ่มลื่น	บวมตัวเป็นเจลใส แต่ไม่คงรูปเป็นแผ่น แหลก

ตารางที่ 4.3 (ต่อ) ลักษณะของแผ่นฟิล์มหลังการบวมน้ำ

สูตร	ชิ้นที่	ลักษณะการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ					
		1 ชั่วโมง	2 ชั่วโมง	3 ชั่วโมง	4 ชั่วโมง	5 ชั่วโมง	6 ชั่วโมง
10	1	เป็นวุ้นใสเล็กน้อย หนืด ไม่คงรูปเป็นแผ่น	เป็นวุ้นใสนิ่ม ไม่คงรูปเป็นแผ่น	เป็นวุ้นใสนิ่ม ละลายบางส่วน ไม่คงรูปเป็นแผ่น	เป็นวุ้นใสไหลปนกับน้ำ แหลกไม่เป็นแผ่น	ละลายไปแล้ว	ละลายไปแล้ว
	2	เป็นวุ้นลื่น คงรูปเป็นแผ่น	เป็นเจลวุ้น ไม่คงรูปเป็นแผ่น	เป็นวุ้นใสนิ่ม ละลายบางส่วน ไม่คงรูปเป็นแผ่น	ละลายหายไปกับน้ำ เหลือเจลใสเล็กน้อย	ละลายไปแล้ว	ละลายไปแล้ว
	3	เป็นวุ้นใสนิ่ม คงรูปเป็นแผ่น	เป็นวุ้นใสนิ่ม แผ่นบาง คงรูปเป็นแผ่น	เปื่อยยุ่ย สีใส บวมน้ำ ไม่คงรูปเป็นแผ่น	ละลาย เหลือวุ้นเจลใส บวมตัวเล็กน้อย	ละลายเปื่อยยุ่ย เหลือเยื่อบางๆ นิ่มลื่น	ละลายไปแล้ว
11	1	บวมตัวเป็นวุ้นนิ่ม หนืด ไม่คงรูปเป็นแผ่น	เป็นวุ้นใสนิ่ม ละลายหายไปบางส่วน ไม่คงรูปเป็นแผ่น	เป็นเจลใสไหลลื่น ละลาย เหลือเป็นผุยผง	ละลายไปแล้ว	ละลายไปแล้ว	ละลายไปแล้ว
	2	ไม่ค่อยบวมตัว ม้วนงอ ไม่คงรูปเป็นแผ่น	เป็นเจลนิ่ม ไม่คงรูปเป็นแผ่น	เป็นเจลใสไหลลื่น ละลาย เหลือเป็นผุยผง	เป็นเจลใส นิ่มหยุ่น ไม่คงรูปเป็นแผ่น	ละลายน้ำเกือบหมด เหลือวุ้นใสนิ่มลื่น ชิ้นเล็กๆ	ละลายเปื่อยยุ่ยไปกับน้ำ
	3	เป็นวุ้นหนืด คงรูปเป็นแผ่น	เป็นวุ้นใสนิ่ม หนืด คงรูปเป็นแผ่น	เปื่อยยุ่ย บวมน้ำ ไม่คงรูป เป็นแผ่น	ละลายไปแล้ว	ละลายไปแล้ว	ละลายไปแล้ว

ตารางที่ 4.3 (ต่อ) ลักษณะของแผ่นฟิล์มหลังการบวมน้ำ

สูตร	ชิ้นที่	ลักษณะการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ					
		1 ชั่วโมง	2 ชั่วโมง	3 ชั่วโมง	4 ชั่วโมง	5 ชั่วโมง	6 ชั่วโมง
12	1	บางเปื่อย เป็นวุ้นใส ไม่คงรูปเป็นแผ่น	เป็นเจลใสไหลลื่น ละลายบางส่วน ไม่คงรูปเป็นแผ่น	เป็นเจลใส ไหลลื่น ละลาย เหลือเป็นผุยผง	ละลายแหลกไปกับน้ำ เหลือเจลใสเล็กน้อย	ละลายไปแล้ว	ละลายไปแล้ว
	2	เป็นวุ้นใส ไหลลื่น ไม่คงรูปเป็นแผ่น	เป็นวุ้นแหลกไหล ใส ละลาย ไม่คงรูปเป็นแผ่น	เป็นเจลใส ไหลลื่น ละลาย เหลือเป็นผุยผง	ละลายไปแล้ว	ละลายไปแล้ว	ละลายไปแล้ว
	3	แหลกไหล ไม่คงรูปเป็นแผ่น	ไหลลื่น แหลก ละลายบางส่วน	เปื่อยยุ่ย ละลายน้ำ ไม่คงรูปเป็นแผ่น	ละลายไปแล้ว	ละลายไปแล้ว	ละลายไปแล้ว
13	1	เป็นวุ้นใส ไม่คงรูปเป็นแผ่น	เป็นวุ้นใสไหลลื่น บวมตัว ละลาย บางส่วน ไม่คงรูปเป็นแผ่น	เป็นเจลใส ไหลลื่น ละลายเกือบหมด เหลือผุยผง	ละลายไปแล้ว	ละลายไปแล้ว	ละลายไปแล้ว
	2	เป็นวุ้นใสนิ่ม ไม่คงรูปเป็นแผ่น	ละลายบางส่วน ไม่คงรูปเป็นแผ่น	เป็นเจลใส ไหลลื่น ละลายเกือบหมด	ละลายไปแล้ว	ละลายไปแล้ว	ละลายไปแล้ว
	3	เป็นวุ้นใสไหล บวมตัว ไม่คงรูปเป็นแผ่น	ไหลลื่น แหลก บวมตัว ละลายบางส่วน	ไม่จับตัวเป็นแผ่น	ละลายไปแล้ว	ละลายไปแล้ว	ละลายไปแล้ว

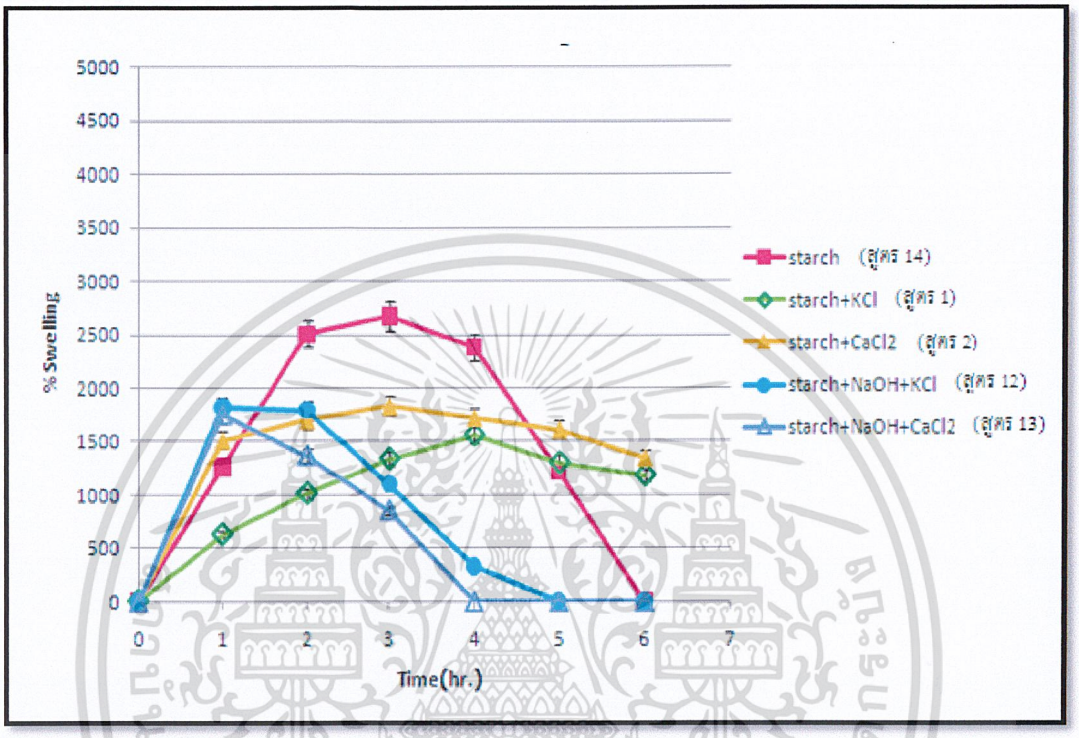
ตารางที่ 4.3 (ต่อ) ลักษณะของแผ่นฟิล์มหลังการบวมน้ำ

สูตร	ชิ้นที่	ลักษณะการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ					
		1 ชั่วโมง	2 ชั่วโมง	3 ชั่วโมง	4 ชั่วโมง	5 ชั่วโมง	6 ชั่วโมง
14	1	เป็นวุ้นใส เหนียวหนืด ไม่คงรูปเป็นแผ่น	เป็นวุ้นใสไหลลื่น นิ่ม บวมตัว ไม่คงรูปเป็นแผ่น	เป็นวุ้นใสหยุ่น ละลายหายไปบางส่วน	เป็นวุ้นใส นิ่มไหล แหลก	ละลายน้ำ เหลือเป็นผุย คล้ายทิชชู่ละลายน้ำ	ละลายน้ำ เหลือเป็นวุ้นเจลใสเล็กน้อย
	2	เป็นวุ้นใสบาง ไม่คงรูปเป็นแผ่น	เป็นวุ้นใสนิ่ม แหลก ไม่คงรูปเป็นแผ่น	เป็นวุ้นใสหยุ่น ละลายหายไป	เป็นวุ้นใส ไหลลื่น ไม่คงรูปเป็นแผ่น	ละลายเป็นผุย คล้ายเยื่อกระดาษทิชชู่ ละลายน้ำ	ละลายหายไปบางส่วน เหลือวุ้นนิ่มเล็กน้อย
	3	เป็นวุ้นใส ลื่นไหล ไม่คงรูปเป็นแผ่น	วุ้นใสไหลนิ่ม บวมตัว ไม่คงรูปเป็นแผ่น	ใส นุ่ม ลื่น จับตัวเป็นแผ่น	เปื่อยยุ่ยเป็นผุยผง คล้ายทิชชูละลายน้ำ บวมตัวเป็นเจลใส	เป็นวุ้นใสนิ่ม แหลกมาก ไม่คงรูปเป็นแผ่น	เจลใส ละลายไหลลื่นปนกับน้ำ

พบว่า ฟิล์มสูตรที่ 3,4 และ 5,6 ซึ่งเป็นฟิล์มสูตรผสมระหว่างแป้งต่อแมงลักที่อัตราส่วน 7:3 และ 5:5 ตามลำดับ ซึ่งในฟิล์มสูตรที่ 3,5 ใส่สารละลาย 5% KCl และฟิล์มสูตรที่ 4,6 ใส่สารละลาย 5% $CaCl_2$ เป็นสูตรฟิล์มที่คงรูปเป็นแผ่น เมื่อแช่น้ำนานถึง 6 ชั่วโมง ส่วนสูตรอื่นๆละลายน้ำหมด

4.3 การศึกษาสมบัติการบวมน้ำ

4.3.1 ฟิล์มแป้งมันสำปะหลังในสภาวะต่างๆ (สูตร 1,2,12,13 และ 14)



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์การบวมน้ำ (% Swelling) ของฟิล์มแป้ง

จากรูปที่ 4.1 พบว่า ฟิล์มแป้งสูตรที่ 14 มีค่าการบวมน้ำเพิ่มขึ้นใน 3 ชั่วโมงแรก โดยมีค่าการบวมน้ำสูงสุดเท่ากับ 2646 % ที่ชั่วโมงที่ 3 หลังจากนั้นค่าการบวมน้ำจะลดลงอย่างรวดเร็ว ส่วนสูตรแป้งที่มีการเติมด้วยสารละลาย KCl , $CaCl_2$ มีค่าการบวมน้ำเพิ่มขึ้นใน 4 ชั่วโมงแรกและ 3 ชั่วโมง ตามลำดับ โดยฟิล์มที่มีสารละลาย KCl ดูดน้ำสูงสุดเท่ากับ 1559.20% ที่ชั่วโมงที่ 4 และฟิล์มที่มี $CaCl_2$ ดูดน้ำสูงสุด 1830.77% ที่ชั่วโมงที่ 3 สำหรับสูตรแป้งที่มีการเติม NaOH ลงไปพร้อมกับสารละลาย KCl และ $CaCl_2$ นั้น พบว่า สูตรที่มีสารละลาย KCl และสูตรที่มีสารละลาย $CaCl_2$ มีค่าการบวมน้ำเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตั้งแต่ 1 ชั่วโมงแรกเท่ากับ 2721.43% และ 1817.86% ตามลำดับ และการบวมน้ำลดลงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น

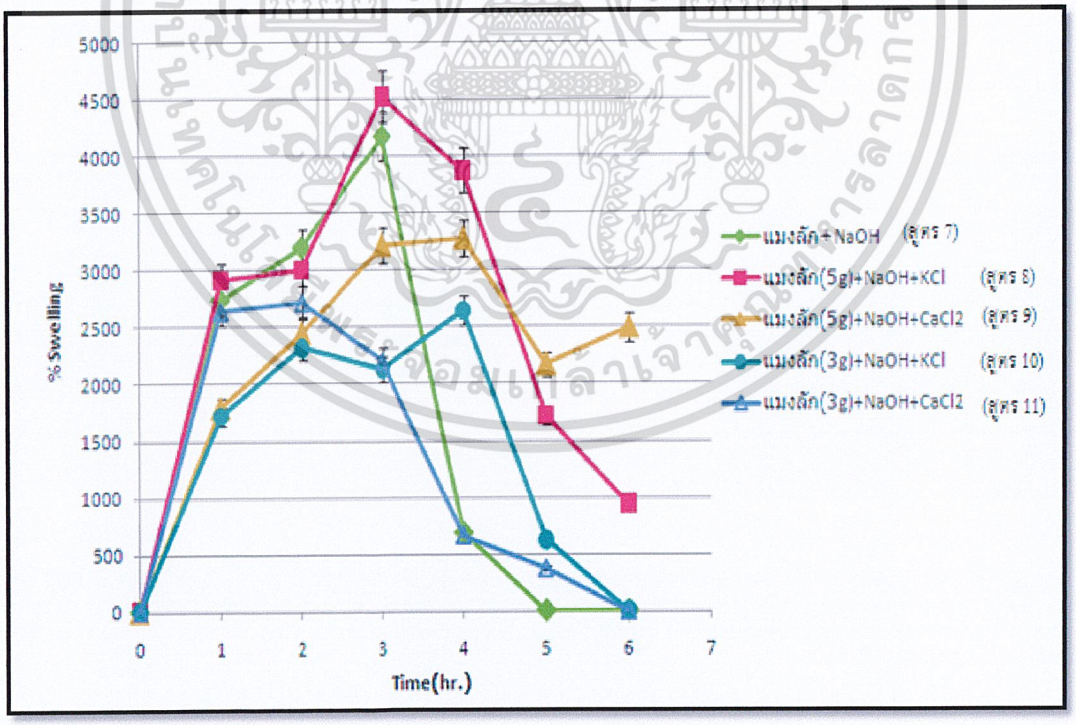
สรุปได้ว่าสูตรที่มีการบวมน้ำได้สูงสุด คือสูตรที่มีแต่แป้ง แสดงว่า แป้งเป็นโมเลกุลคาร์โบไฮเดรตที่มีหมู่ไฮดรอกซิล มีสมบัติชอบน้ำ จึงสามารถดูดซับน้ำได้มากที่สุด แต่ที่เวลา 4 ชั่วโมงสูตรที่มีแต่แป้งจะละลายก่อน เมื่อเทียบกับสูตรที่เติมด้วยไอออน K^+ หรือ Ca^{2+} พบว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สูตรที่มีไอออน K^+ หรือ Ca^{2+} จะมีการบวมน้ำเพิ่มขึ้นได้ดีอย่างต่อเนื่องจนถึงชั่วโมงที่ 4 หลังจากนั้นการบวมน้ำจะเริ่มลดลง แต่สามารถคงรูปร่างเป็นแผ่นอยู่ได้ แสดงว่าไอออนโลหะอาจเกิดการเชื่อมโยงกับ OH ของแป้ง ส่งผลให้โมเลกุลของน้ำแทรกตัวเข้าไปได้ยาก การดูดน้ำจึงน้อยกว่าสูตรที่มีแต่แป้งซึ่งไม่มีการเชื่อมโยง เมื่อเปรียบเทียบระหว่าง K^+ กับ Ca^{2+} พบว่า Ca^{2+} ทำให้ฟิล์มแป้งดูดน้ำได้มากกว่า เนื่องจากโมเลกุลของแป้งอาจมีความสามารถเกิดการเชื่อมโยงกับไอออน K^+ หรือ Ca^{2+} ได้พอๆกัน แต่ Ca^{2+} มีขนาดเล็กกว่า K^+ (แสดงดังหน้า 55) ทำให้มีแรงดึงดูดให้น้ำมาล้อมรอบไอออนได้มากกว่า

แต่เมื่อเติม NaOH ลงไปในแป้ง (สูตรที่ 12 และ 13) เบสจะไปดึง H ออกจาก OH ของแป้งเกิดเป็น O^- ทำให้เกิดการผลักกันของประจุลบดังกล่าว โมเลกุลของน้ำจึงแทรกตัวเข้าไปได้ง่าย ฟิล์มดูดน้ำได้เร็วขึ้น แต่ก็ละลายได้เร็วด้วย นอกจากนี้ประจุลบ (O^-) ที่เกิดขึ้น 2 โมเลกุลยังทำปฏิกิริยากับ Ca^{2+} ได้ดีกว่า ดังนั้นในกรณีมี NaOH ฟิล์มที่มี K^+ จึงดูดน้ำได้ดีกว่า

4.3.2 ฟิล์มแมงลักในสภาวะต่างๆ (สูตร 7,8,9,10 และ 11)



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์การบวมน้ำ (% Swelling) ของฟิล์มแมงลัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

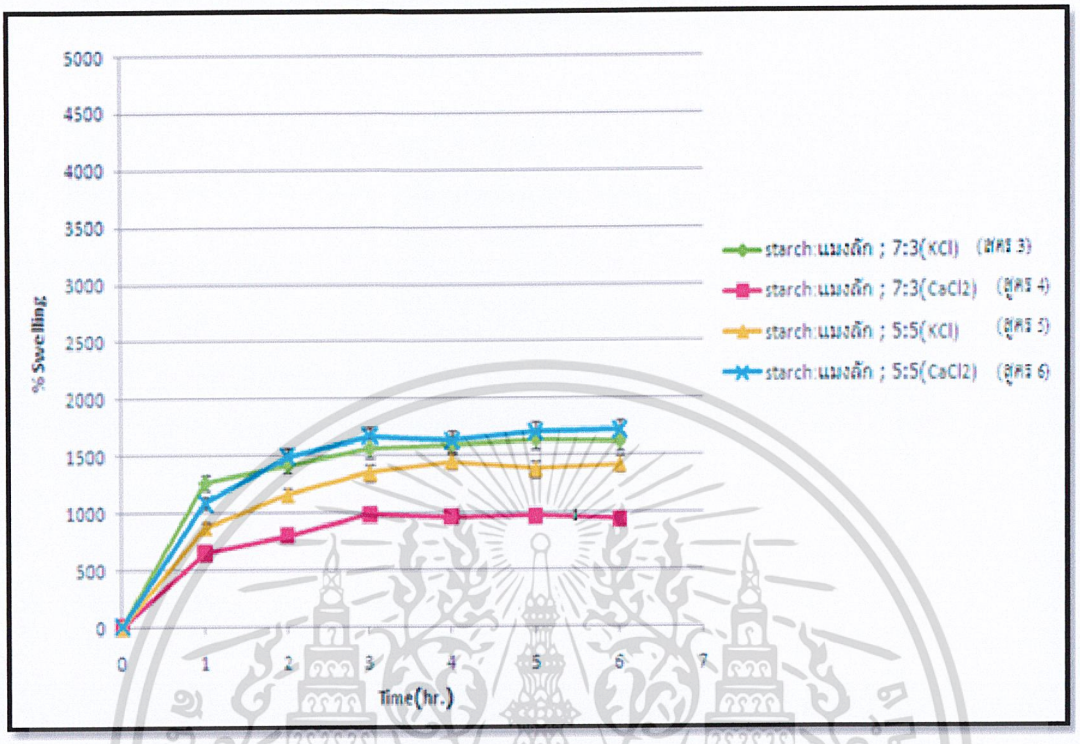
จากรูปที่ 4.2 พบว่า ฟิล์มแมงลัก (สูตรที่ 7) มีการเติม NaOH ลงไปทำปฏิกิริยาในฟิล์มแมงลักที่มีหมู่ COOH ซึ่งเป็นหมู่ที่ชอบน้ำอยู่ จะทำให้หมู่คาร์บอกซิลิก (COOH) กลายเป็นหมู่คาร์บอกซิเลต (COO^-) เกิดการผลักกันของประจุลบ ทำให้สายโซ่โมเลกุลของแมงลักอยู่ห่างกัน ความหนืดลดลง น้ำจึงแทรกเข้าไปได้เร็ว ค่าการบวมน้ำสูงขึ้นมากที่สุดเพียง 3 ชั่วโมงแรก เมื่อเปรียบเทียบกับสูตรอื่นๆ และละลายอย่างรวดเร็วในชั่วโมงที่ 4

เมื่อเปรียบเทียบปริมาณของฟิล์มแมงลัก 5 g ในสารละลาย NaOH ที่เติมด้วยสารละลาย KCl (สูตรที่ 8) พบว่า มีค่าการบวมน้ำเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนถึงชั่วโมงที่ 3 โดยเพิ่มขึ้นสูงสุดถึง 4528.21% และหลังจากนั้นจะลดลง ส่วนสูตรที่เติมด้วยสารละลาย $CaCl_2$ (สูตรที่ 9) พบว่า มีค่าการบวมน้ำเพิ่มขึ้นใน 4 ชั่วโมงแรก โดยเพิ่มขึ้นสูงสุดถึง 3277.25% และหลังจากนั้นจะลดลง ซึ่งสูตรที่เติมด้วยสารละลาย $CaCl_2$ จะมีความสามารถในการบวมน้ำได้น้อยกว่าสูตรที่เติมด้วยสารละลาย KCl แสดงว่าสารละลาย $CaCl_2$ ทำให้หมู่ COO^- ลดลงได้มากด้วยการเกิด $–COO^-\text{---}Ca^{2+}\text{---}^-OOC–$ น้ำจึงแทรกตัวเข้าไปได้ยาก ค่าการบวมน้ำจึงลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณของแมงลัก 3 g (สูตรที่ 10) ที่เติมด้วยสารละลาย KCl พบว่า มีค่าการบวมน้ำเพิ่มขึ้น โดยเพิ่มขึ้นสูงสุดถึง 2641.67% แต่สำหรับสูตรที่เชื่อมโยงด้วยสารละลาย $CaCl_2$ (สูตร 11) มีค่าการบวมน้ำสูงสุด เพียง 2 ชั่วโมงแรก และค่อยๆลดลง

ผลการทดลอง แสดงให้เห็นว่า NaOH ช่วยให้ฟิล์มแมงลักดูดน้ำได้เร็วและละลายเร็ว และพบว่าปริมาณแมงลักต่อ NaOH และชนิดของไอออนโลหะมีผลต่อการดูดน้ำของฟิล์มแมงลัก โดยถ้าปริมาณแมงลักมาก จะสามารถดูดน้ำได้มาก การเติม K^+ หรือ Ca^{2+} ช่วยให้ฟิล์มแมงลักคงสภาพอยู่ได้นานขึ้น แม้ว่าจะดูดน้ำได้ช้าและลดลงบางสูตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.3 ฟิล์มแป้งผสมแมงลักในสภาวะต่างๆ (สูตร 3,4,5 และ 6)



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์การบวมน้ำ (% Swelling) ของฟิล์มแป้งผสมแมงลักในอัตราส่วนต่างกัน ที่เติมไอออนโลหะเชื่อมโยง

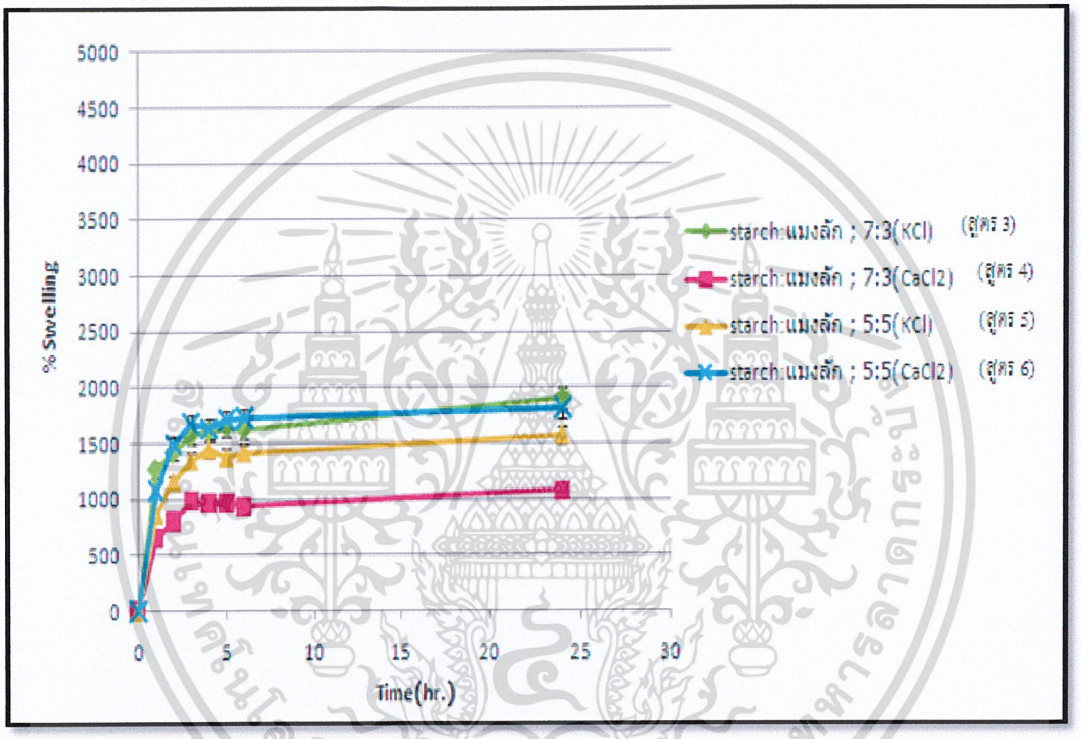
ผลการบวมน้ำของแผ่นฟิล์มแป้งผสมแมงลักที่อัตราส่วน 7:3 และอัตราส่วน 5:5 แสดงดังรูป 4.3 พบว่า ฟิล์มแป้งผสมแมงลักที่เติมด้วยสารละลาย KCl และ $CaCl_2$ มีค่าการบวมน้ำสูงขึ้นเรื่อยๆในช่วง 3-4 ชั่วโมงแรก หลังจากนั้นจะเริ่มคงที่จนถึงชั่วโมงที่ 6 เมื่อเปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่างแป้งต่อแมงลัก พบว่า สูตรที่อัตราส่วน 7:3 ที่เติมด้วยสารละลาย KCl (สูตรที่ 3) มีค่าการบวมน้ำสูงกว่าสูตรที่เติมด้วยสารละลาย $CaCl_2$ โดยที่ยังคงรูปร่างเดิมอยู่ได้ เนื่องจาก Ca^{2+} เกิดการเชื่อมโยงแบบไอออนิก ระหว่าง O^- กับ Ca^{2+} ได้ถึง 2 พันธะ ทำให้สายโซ่โมเลกุลมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นและเป็นระเบียบสูง โมเลกุลของน้ำจึงแทรกตัวเข้าไปได้ยากกว่า จึงดูดซับน้ำได้น้อย

ฟิล์มผสมอัตราส่วน 5:5 หรือสูตรที่ใช้แป้งลดน้อยลง พบว่า เมื่อเติมด้วยสารละลาย KCl (สูตรที่ 5) กลับมีค่าการบวมน้ำที่ต่ำกว่าสูตรที่เติมด้วย $CaCl_2$ (สูตร 6) เพราะสูตรนี้มีปริมาณแมงลักเพิ่มขึ้น ทำให้ฟิล์มผสมจับ Ca^{2+} ได้มากขึ้นด้วย ในขณะเดียวกัน Ca^{2+} มีขนาดอนุภาคเล็กกว่า K^+ จึงทำให้เกิดแรงดึงดูดให้น้ำมาล้อมรอบได้มากกว่า น้ำหนักโดยรวมของอัตรส่วนนี้จึงสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 การศึกษาหาจุดสมดุล หรือจุดอิ่มตัว ในการบวมน้ำของแผ่นฟิล์ม

ในการทดลองนี้ใช้ฟิล์มเฉพาะสูตรที่ 3-6 เนื่องจากฟิล์มสูตรอื่นๆที่ผ่านการแช่น้ำ 6 ชั่วโมง เกิดการละลายน้ำหมด ไม่สามารถนำมาศึกษาหาจุดอิ่มตัวของการบวมน้ำได้ ดังนั้นผลการทดลองที่จะนำเสนอจึงมีเพียงฟิล์มสูตรที่ 3-6 ซึ่งทำการทดลองโดยนำแผ่นฟิล์มมาแช่น้ำนาน 24 ชั่วโมง แล้วนำมาวางใส่กระดาษกรอง เพื่อดูดซับน้ำส่วนเกิน และทำการชั่งน้ำหนักบนกระจกนาฬิกา



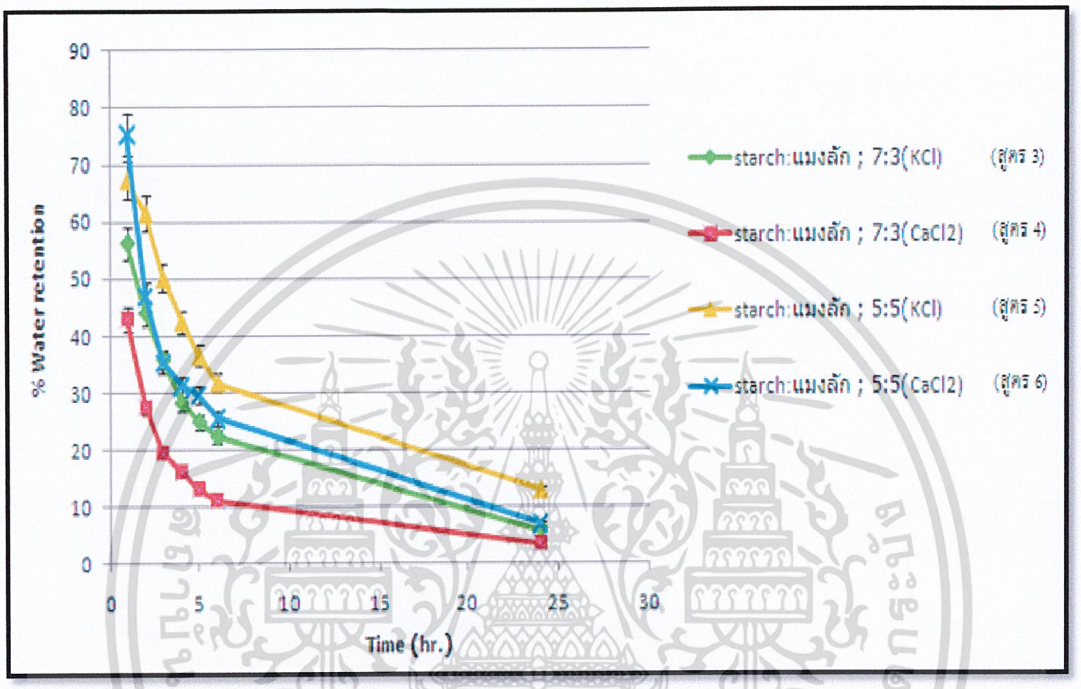
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์จุดอิ่มตัวการบวมน้ำ (% Equilibrium water content) ของฟิล์มแป้งผสมแมงลักในอัตราส่วนต่างกัน ที่เติมไอออนโลหะเชื่อมโยง

จากรูป 4.4 พบว่าฟิล์มสูตรที่ 3-6 มีค่าการบวมน้ำเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนถึง 24 ชั่วโมง ผลการทดลองคล้ายกับการดูดน้ำภายใน 6 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 การศึกษาปริมาณน้ำที่เหลืออยู่ในฟิล์มแป้งผสมวุ้นแมงลักที่เชื่อมโยงด้วยไอออนโลหะ

ในการทดลองนี้ใช้ฟิล์มสูตรที่ 3-6 เนื่องจากฟิล์มสูตรอื่นๆที่ผ่านการแช่น้ำ 6 ชั่วโมง เกิดการละลายน้ำหมด ไม่สามารถนำมาศึกษาปริมาณน้ำที่เหลืออยู่ได้



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความสามารถในการคายน้ำของฟิล์มแป้งผสมวุ้นแมงลักในอัตราส่วนต่างกัน ที่เติมไอออนโลหะเชื่อมโยง

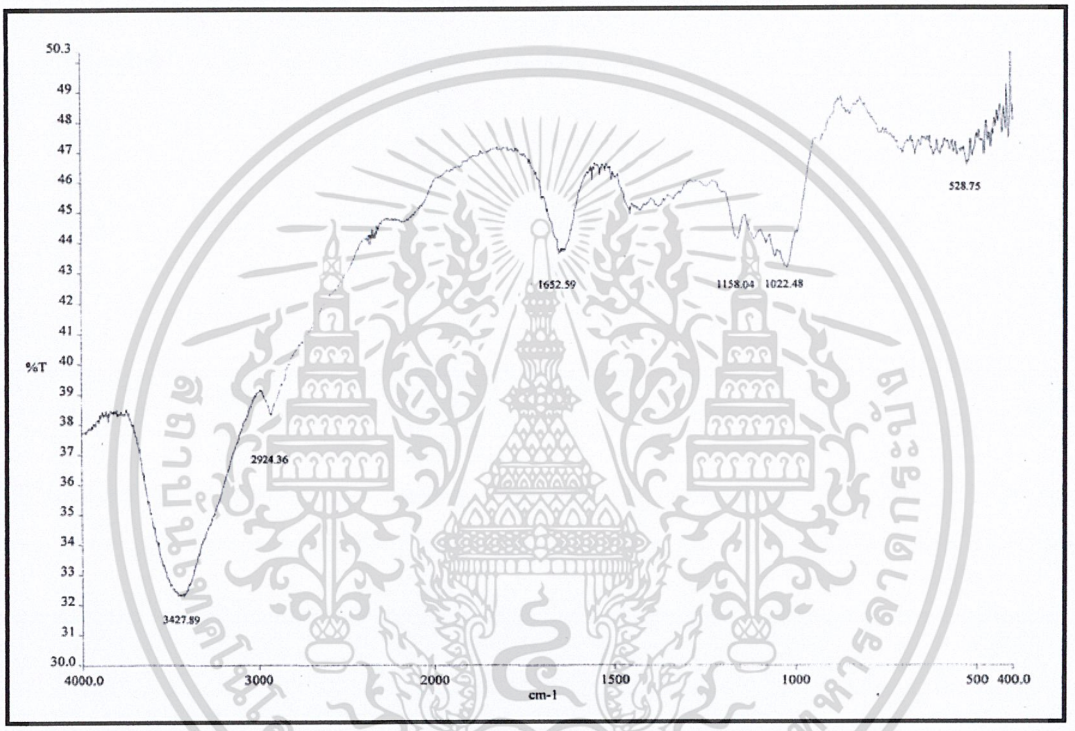
จากรูปที่ 4.5 พบว่าฟิล์ม สูตรที่ 3-6 มีความสามารถเก็บน้ำในชั่วโมงแรกสูงสุด เนื่องจากฟิล์มยังไม่เกิดการคายน้ำ หรือเกิดเพียงเล็กน้อย หลังจากนั้นฟิล์มทุกสูตรจะมีความสามารถในการเก็บน้ำลดลง หรือมีการคายน้ำเพิ่มมากขึ้นนั่นเอง เมื่อพิจารณาผลโดยรวมจากกราฟ พบว่า ฟิล์มสูตรที่มีอัตราส่วนระหว่างแป้งกับแมงลักเป็น 5:5 ที่เติมสารละลาย KCl มีความสามารถในการเก็บน้ำสูงที่สุด ตั้งแต่ชั่วโมงแรกถึงชั่วโมงที่ 24 และสูตรที่สามารถเก็บน้ำรองมา คือ ฟิล์มสูตร ที่มีอัตราส่วนระหว่างแป้งต่อแมงลักเป็น 5:5 ที่เติมสารละลาย $CaCl_2$ สำหรับฟิล์มสูตรที่มีความสามารถในการเก็บน้ำต่ำสุด คือฟิล์มสูตรที่มีอัตราส่วนระหว่างแป้งต่อแมงลักเป็น 7:3 และเติมสารละลาย $CaCl_2$ และพบว่าฟิล์มทุกสูตรมีแนวโน้มของอัตราการคายน้ำเหมือนกัน นั่นคือน้ำที่บริเวณผิวฟิล์มระเหยไปด้วยอัตราเดียวกัน แต่น้ำที่ดูดซับในแผ่นฟิล์มมีปริมาณต่างกัน จึงทำให้เส้นกราฟเหลื่อมกันเล็กน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับอัตราการดูดน้ำและการคายน้ำของฟิล์มชนิดเดียวกันที่เวลาเท่ากัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พบว่าอัตราส่วนผสมเป็นปัจจัยสำคัญกว่าชนิดของไอออน กล่าวคือ ฟิล์มผสมแป้งกับแมงลักที่มีอัตราส่วน 5:5 มีการเก็บน้ำได้มากกว่าอัตราส่วน 7:3 แสดงว่าความหนืดของระบบช่วยเก็บน้ำไว้ได้มาก

4.6 การตรวจสอบหมู่ฟังก์ชัน

4.6.1 ผลการทดสอบฟิล์มแป้ง

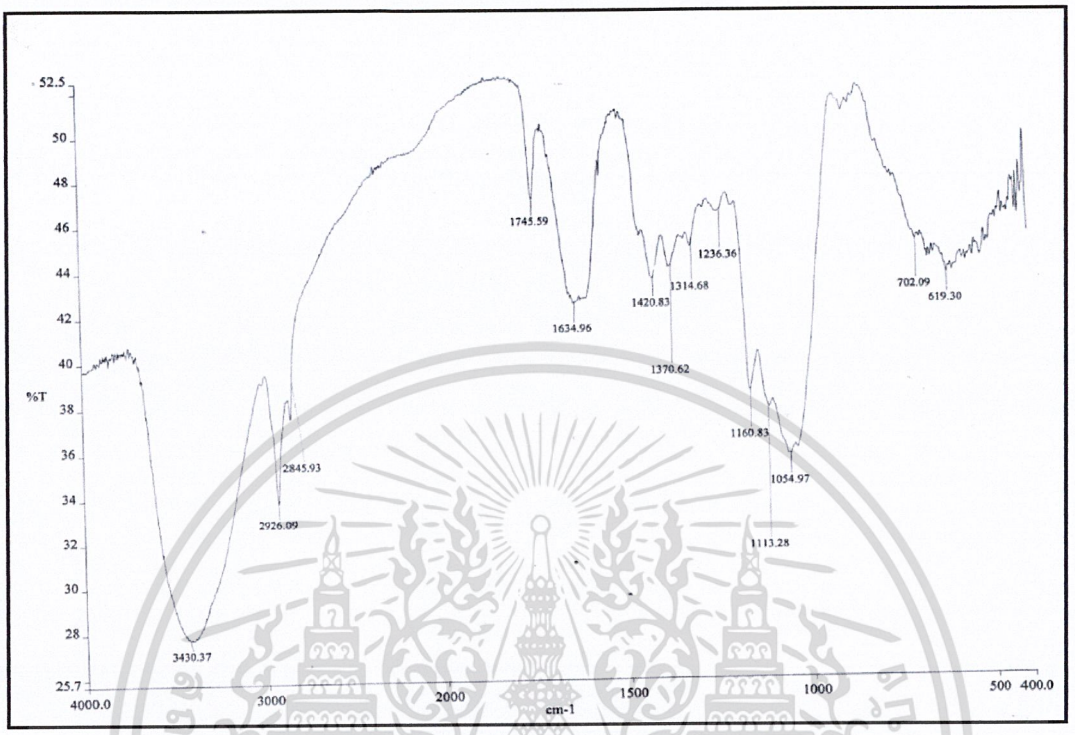


รูปที่ 4.6 แสดงสเปกตรัม IR ของฟิล์มแป้ง

จากรูปที่ 4.6 แสดงสเปกตรัม IR ของฟิล์มแป้ง พบว่าที่เลขคลื่น 3421.89 cm^{-1} ปรากฏพีคของ O-H stretching ที่เลขคลื่น 2924.36 cm^{-1} ปรากฏพีคของ C-H aliphatic stretching ที่เลขคลื่น 2215 cm^{-1} ปรากฏพีคของ –CN stretching และที่เลขคลื่น 1158 – 1022 cm^{-1} ปรากฏพีคของ -C-O-C- stretching

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6.2 ผลการทดสอบฟิล์มแมงลัก

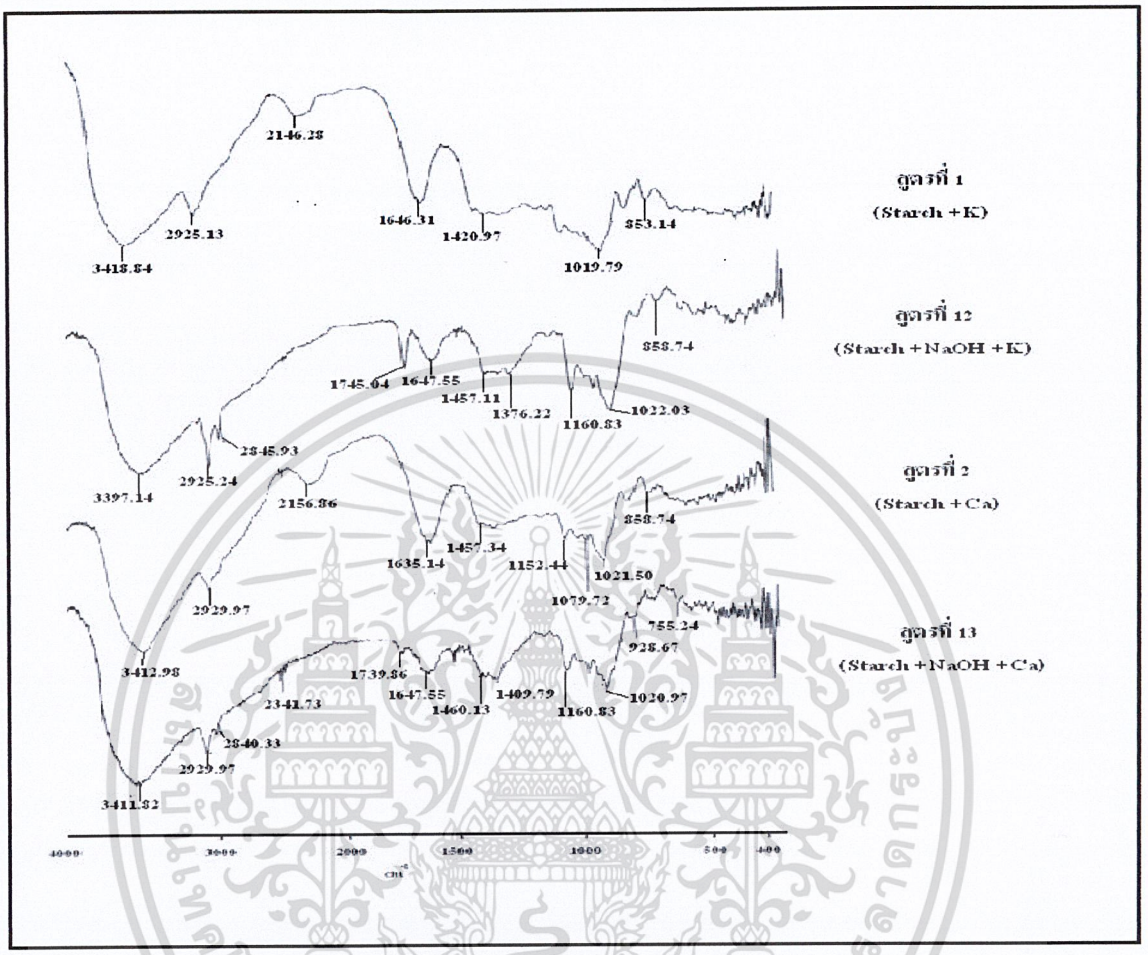


รูปที่ 4.7 แสดงสเปกตรัม IR ของแมงลัก

จากรูปที่ 4.7 แสดงสเปกตรัม IR ของแมงลักพบว่า ที่เลขคลื่น 3430.37 cm^{-1} จะปรากฏพีคของหมู่ไฮดรอกซิลในน้ำตาล ที่เลขคลื่น 2926.09 cm^{-1} ปรากฏพีคของ C-H aliphatic stretching ที่เลขคลื่น 1634.96 cm^{-1} ปรากฏพีคของหมู่คาร์บอนิล (C=O) ที่เลขคลื่น 1420.83 cm^{-1} ปรากฏพีค O-H blending ของหมู่คาร์บอกซิลิก ที่เลขคลื่น 1160.83 – 1054.97 cm^{-1} ปรากฏพีค -C-O-C- stretching ของน้ำตาล และที่เลขคลื่น 702.09 cm^{-1} ปรากฏพีคของ C=CH ซึ่งหมู่ฟังก์ชันเหล่านี้พบในโครงสร้างของ Uronide ที่เป็นโครงสร้างของแมงลัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6.3 ผลการทดสอบฟิล์มแป้งในสภาวะต่างๆ



รูปที่ 4.8 แสดงสเปกตรัมของฟิล์มแป้งในสภาวะต่าง ๆ

- ศึกษาผลของสารละลาย 5%NaOH ที่มีผลต่อฟิล์มแป้ง

จากรูปที่ 4.8 พิจารณาสเปกตรัมของฟิล์มสูตรที่ 1 และฟิล์มสูตรที่ 12 พบว่าฟิล์มที่ไม่เติมสารละลาย 5%NaOH พบพีคของหมู่คาร์บอนิล ปรากฏที่เลขคลื่น 1646.31 cm^{-1} และฟิล์มที่เติมสารละลาย 5%NaOH พบพีคของหมู่คาร์บอนิล ปรากฏที่เลขคลื่น 1745.04 cm^{-1} ซึ่งเป็นหมู่คาร์บอนิลของแอลดีไฮด์จากการเปิดวงของแป้ง การที่เห็นพีคของหมู่คาร์บอนิลต่างกัน แสดงว่าสารละลาย 5%NaOH เข้าไปทำปฏิกิริยากับแป้ง นอกจากนี้ที่เลขคลื่น 2146.28 cm^{-1} ซึ่งเป็นพีคของ -CN หายไป แสดงว่าเมื่อด่างต้มกับแป้งจะเกิดเปลี่ยนหมู่ –CN เป็น COOH จึงมีเลขคลื่นที่ 1745.04 cm^{-1} และ COO^-Na^+ ดังสมการ (a) และ สารละลาย 5%NaOH เข้าไปทำปฏิกิริยากับแป้ง โดยที่แป้งจะทำปฏิกิริยาที่ตำแหน่ง 2° Alcohol ทำให้ –OH เปลี่ยนเป็น $–O^-Na^+$ ดังสมการ (b)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R\text{-}CN + NaOH \longrightarrow R\text{-}COOH + NaOH \longrightarrow R\text{-}COO^{-}Na^{+} + H_2O \quad (a)$$

$$R\text{-}OH + NaOH \longrightarrow R\text{-}O^{-}Na^{+} + K^{+}\ (excess) \longrightarrow (R\text{-}O^{-})K + H_2O \quad (b)$$

เมื่อพิจารณาสเปกตรัมของฟิล์มสูตรที่ 2 และฟิล์มสูตรที่ 13 พบว่าฟิล์มที่ไม่เติมสารละลาย 5%NaOH พบพีคของหมู่คาร์บอนิลปรากฏที่เลขคลื่น 1635 cm^{-1} และฟิล์มที่เติมสารละลาย 5%NaOH พบพีคของหมู่คาร์บอนิลปรากฏที่เลขคลื่น 1647.55 cm^{-1} การที่เห็นพีคของหมู่คาร์บอนิลต่างกัน แสดงว่าสารละลาย 5%NaOH เข้าไปทำปฏิกิริยา ดังสมการ (c) , (d) และ (e) เช่นเดียวกัน

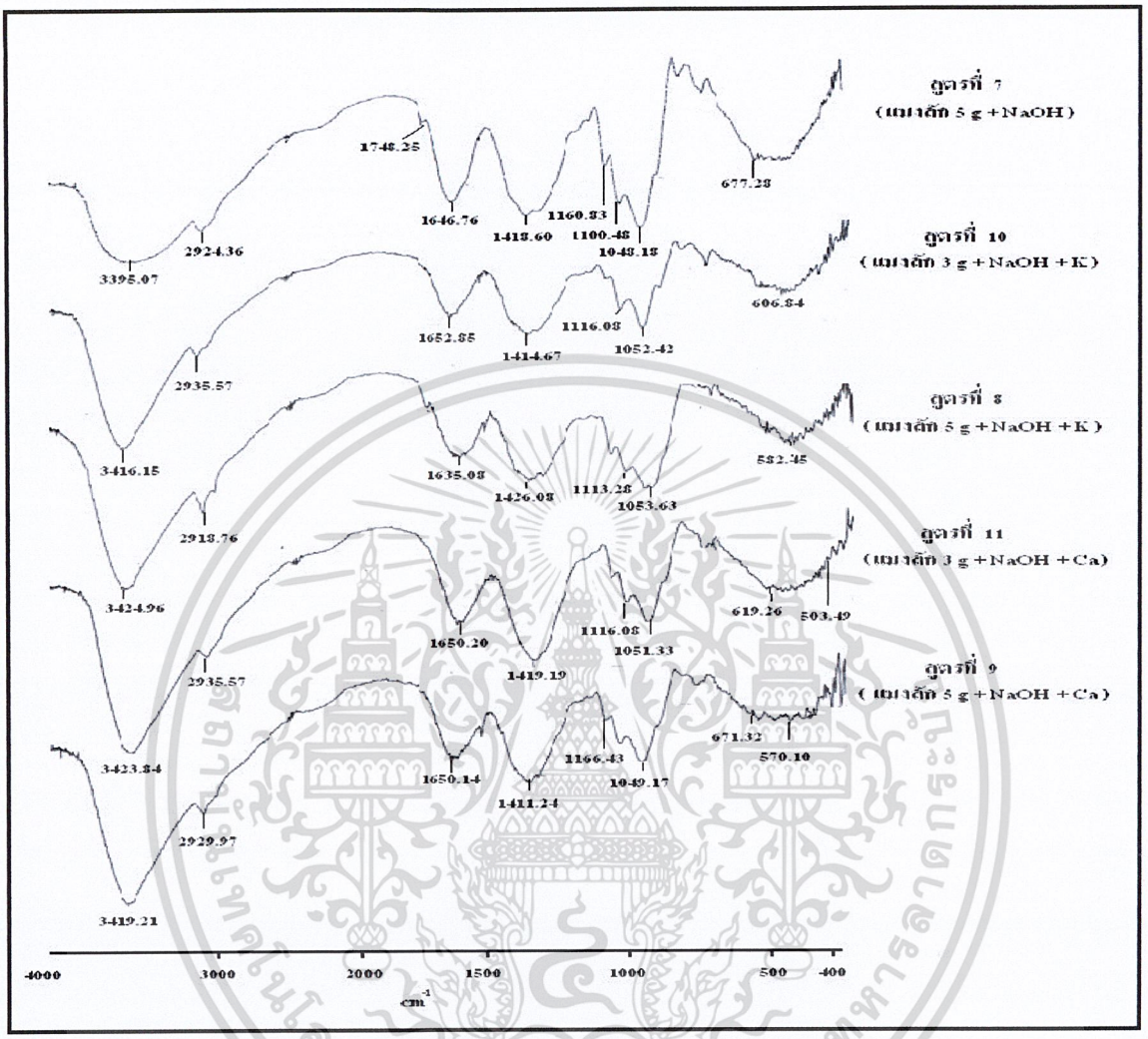
$$R\text{-}CN + NaOH \longrightarrow R\text{-}COOH + NaOH \longrightarrow R\text{-}COO^{-}Na^{+} + H_2O \quad (c)$$

$$R\text{-}OH + NaOH \longrightarrow R\text{-}O^{-}Na^{+} + Ca^{2+}\ (excess) \longrightarrow (R\text{-}O^{-})_2Ca + H_2O \quad (d)$$

$$2R\text{-}COO^{-} + Ca^{2+} \longrightarrow (RCOO^{-})_2\,Ca \quad (e)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6.4 ผลการทดสอบฟิล์มแมงลักที่สภาวะต่างๆ



รูปที่ 4.9 แสดงสเปกตรัมของฟิล์มแมงลักในสภาวะต่างๆ

- ศึกษาผลของไอออนโลหะเชื่อมโยงที่มีผลต่อฟิล์มแมงลัก

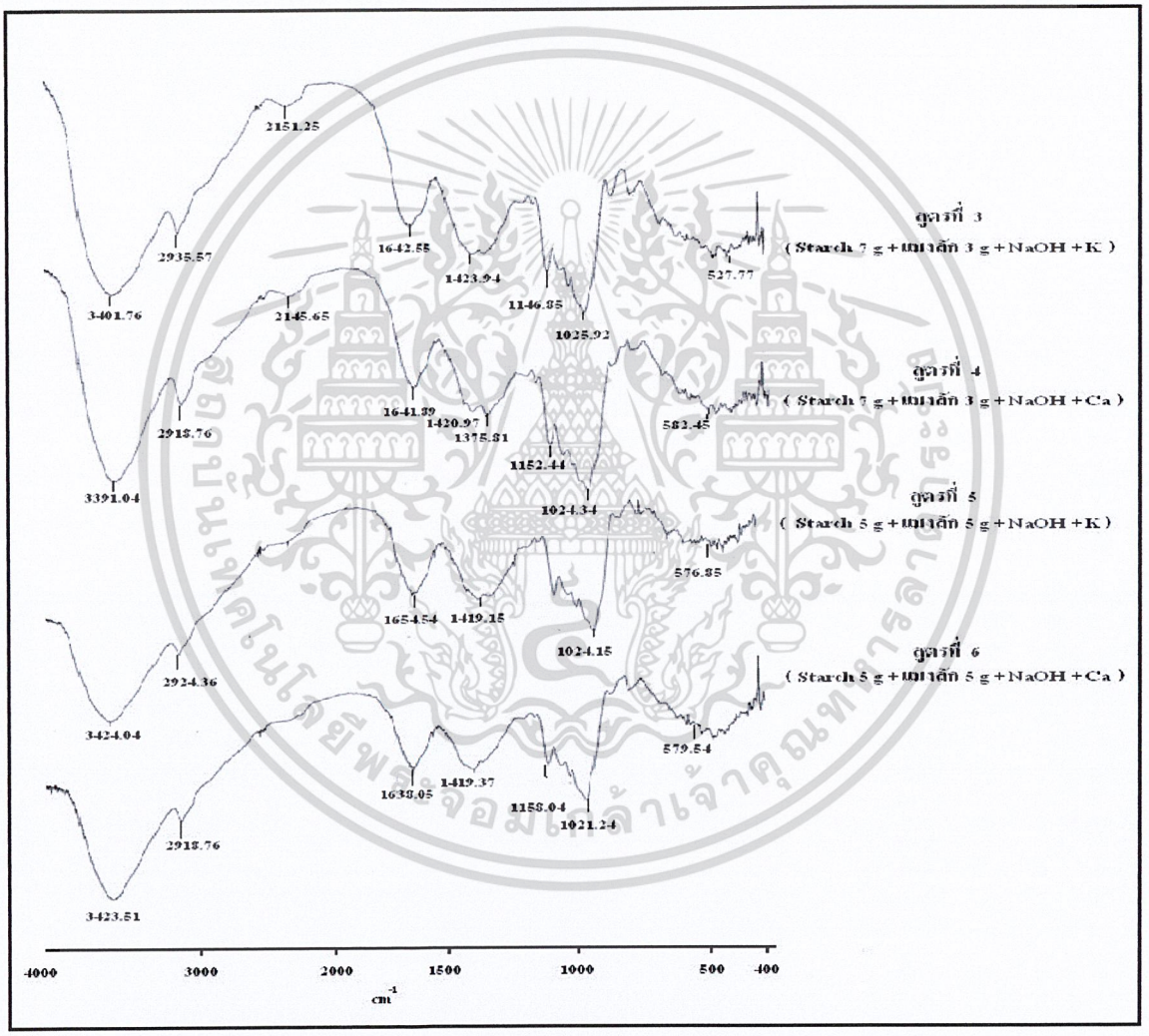
จากรูปที่ 4.9 พิจารณาสเปกตรัมของฟิล์มแมงลักสูตรที่ 7 ที่ไม่มีไอออนโลหะเชื่อมโยง พบพีคของ O-H stretching ที่เลขคลื่น 3397.07 cm^{-1} พีคคาร์บอนิลที่เลขคลื่น 1646.76 cm^{-1} และฟิล์มสูตรที่ 8 , 9 ที่ใช้ K^{+} และ Ca^{2+} เป็นโลหะเชื่อมโยง พบพีคของ O-H stretching ที่เลขคลื่น 3429.91 cm^{-1}, 3491.21 cm^{-1} ตามลำดับ นอกจากนี้พีค O-H stretching ของฟิล์มที่มี Ca^{2+} มีลักษณะแคบลง (sharp) แสดงว่า Ca^{2+} มีผลต่อหมู่ไฮดรอกซิลของแมงลัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ศึกษาผลของปริมาณแมงลักที่มีต่อฟิล์มแมงลัก

จากรูปที่ 4.9 พิจารณาสเปกตรัมของฟิล์มสูตรที่ 8, 9, 10, 11 พบว่าการเพิ่มขึ้นของแมงลักจาก 3g เป็น 5g ทำให้พีคที่เลขคลื่น 1423 cm^{-1} ของ -CH_2- scissoring และพีคที่เลขคลื่น 1325 cm^{-1} ของ O-H bending กว้างขึ้น

4.6.5 ผลการทดสอบฟิล์มแป้งผสมแมงลัก



รูปที่ 4.10 แสดงสเปกตรัม IR ของฟิล์มแป้งผสมแมงลักที่มีการเชื่อมโยงด้วยไอออนโลหะ

จากรูปที่ 4.10 แสดงสเปกตรัมของฟิล์มสูตรที่ 3 , 4 ที่มีอัตราส่วนแป้งต่อแมงลัก 7:3 พบพีคของ O-H stretching ปรากฏที่เลขคลื่น 3401.76 cm^{-1} , 3391.04 cm^{-1} ตามลำดับ พีคของ C-H stretching ปรากฏที่เลขคลื่น 2935.57 cm^{-1} , 2918.76 cm^{-1} ตามลำดับ และพีคของคาร์บอนิล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปรากฏที่เลขคลื่น 1642.55 cm^{-1} , 1641.89 cm^{-1} ตามลำดับ แต่ไม่พบหมู่คาร์บอนิลของแอลดีไฮด์จากการเปิดวงของแป้งที่เลขคลื่น 1715 - 1690 cm^{-1} เนื่องจากไม่พบพีค C-H stretching ของแอลดีไฮด์ที่เลขคลื่น 2900 – 2700 cm^{-1} ซึ่งพีคเหล่านี้เป็นหมู่ฟังก์ชันของแป้งและแมงลัก

สำหรับฟิล์มสูตรที่ 5 , 6 ที่มีอัตราส่วนแป้งต่อแมงลัก 5:5 ให้ผลสเปกตรัมของหมู่ฟังก์ชันเช่นเดียวกับอัตรส่วน 7:3 จะพบพีค O-H stretching ปรากฏที่เลขคลื่น 3424.04 cm^{-1}, 3423.51 cm^{-1} ตามลำดับพีคของ C-H stretching ปรากฏที่เลขคลื่น 2924.36 cm^{-1}, 2918.76 cm^{-1} ตามลำดับ และพีคของคาร์บอนิลปรากฏที่เลขคลื่น 1651.84 cm^{-1}, 1638.05 cm^{-1} ตามลำดับ

เมื่อสเปกตรัมของฟิล์มทั้ง 4 สูตรแล้ว พบว่าฟิล์มสูตรที่ 4 และฟิล์มสูตรที่ 6 มีพีค O-H stretching ที่แคบ (sharp) ลง แสดงว่า Ca^{2+} มีผลต่อหมู่ไฮดรอกซิลของแป้งและแมงลักมากกว่า K^{+}

จากรูปที่ 4.7-4.10 พบเลขคลื่นที่แสดงหมู่ฟังก์ชั่นของแป้ง วุ้นแมงลัก ดังแสดงในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 เลขคลื่นที่แสดงหมู่ฟังก์ชั่นของแป้งและวุ้นแมงลัก [33]

เลขคลื่น (cm^{-1})	หมู่ฟังก์ชั่น	ความน่าจะเป็น	หมายเหตุ
2215	-CN	เป็นหมู่ฟังก์ชันของแป้ง	
3391-3430	O-H	เป็นหมู่ฟังก์ชั่นของทั้งแป้งมันสำปะหลังและแมงลัก เนื่องจากสารทั้ง 2 ชนิดนี้มีหน่วยย่อยเหมือนกัน คือ กลูโคส	
2840-2935	C-H	เป็นหมู่ฟังก์ชั่นก์ของทั้งแป้งและวุ้นแมงลัก	
1625-1651	C=O	เป็นหมู่ฟังก์ชั่นของคาร์บอนิลในแป้งและแมงลัก	asymmetric stretching C=O
1420-1426	$\begin{matrix}O\\\|\\-C-O^{-}\end{matrix}$	เป็นหมู่ฟังก์ชั่นของแมงลัก	symmetric stretching C=O
1400-1450	$-CH_2-$	เป็นหมู่ฟังก์ชั่นของทั้งแป้งและวุ้นแมงลัก	$-CH_2-$ scissoring
1317-1370	O-H	เป็นหมู่ฟังชั่นก์ของทั้งแป้งและแมงลัก	O-H bending

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

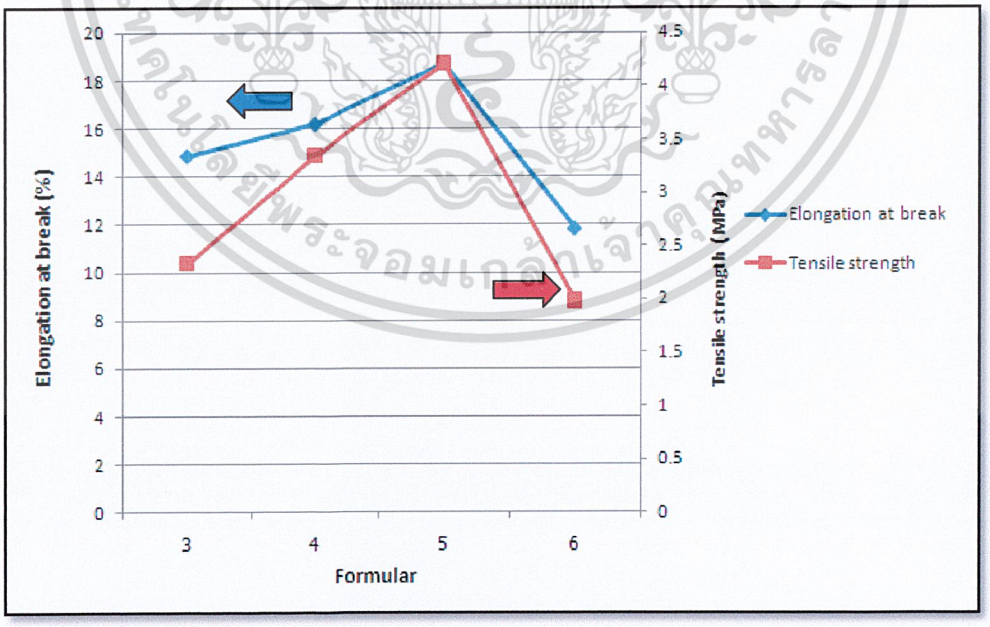
4.7 สมบัติเชิงกล

สูตรที่เลือกมาทดสอบสมบัติเชิงกลตามมาตรฐาน ASTMD-1822-L ได้แก่ สูตรแป้งต่อแมงลัก (5:5) และสูตรแป้งต่อแมงลัก (7:3) ที่มีไอออนโลหะโลหะ K+ และ Ca^{2+} เพราะสามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มได้ และสามารถคงรูปร่างอยู่ได้ในช่วงระยะเวลาหนึ่งเมื่อแช่น้ำ โดยไม่ละลายน้ำ

4.7.1 เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด (%Elongation at break) และ ความแข็งแรงดึง (Tensile strength)

ตารางที่ 4.5 อัตราส่วนผสมของสูตรฟิล์ม

สูตร	อัตราส่วนผสม	% Elongation at break	Tensile strength (MPa)
3	Starch7:แมงลัก3 + NaOH + KCl	14.850	2.333
4	Starch7:แมงลัก3 + NaOH + $CaCl_2$	16.170	3.454
5	Starch5:แมงลัก5 + NaOH + KCl	18.710	4.214
6	Starch5:แมงลัก5 + NaOH + $CaCl_2$	11.810	1.998



รูปที่ 4.11 กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด (% Elongation at break) และค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) กับฟิล์มสูตร 3-6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูป 4.11 พิจารณาฟิล์มที่ใช้อัตราส่วนแป้งต่อแมงลัก 7:3 ที่มีสารละลาย KCl พบว่ามีค่า %Elongation at break และ Tensile strength ต่ำกว่าฟิล์มสูตรที่มีสารละลาย $CaCl_2$ แสดงว่ามีพันธะเชื่อมโยงน้อยหรือไม่มีเลย (เป็นสูตรที่ดูดซับน้ำได้ดีที่สุด) เนื่องจากฟิล์มที่ใช้อัตราส่วนแป้งต่อแมงลัก 7:3 นั้นมีปริมาณของเมทริกซ์แป้งมาก แมงลักน้อย ทำให้ความหนาแน่นของหมู่คาร์บอกซิเลต (COO^-) น้อย การเกิดปฏิกิริยากับ Ca^{2+} น้อย

แต่เมื่อพิจารณาฟิล์มที่ใช้อัตราส่วนแป้งต่อแมงลัก 5:5 ซึ่งเป็นสูตรที่มีปริมาณแมงลักมาก ฟิล์มที่มีสารละลาย KCl พบว่า มีค่า %Elongation at break และ Tensile strength สูงกว่าฟิล์มสูตรที่เติมสารละลาย $CaCl_2$ แสดงว่าอาจมีพันธะเชื่อมโยงบ้างหรือไม่มีเลย แต่สมบัติแข็งเหนียว เพราะมีอัตราส่วนพอเหมาะ (เป็นสูตรที่มีการบวมน้ำได้ปานกลาง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.8 สมบัติทางความร้อน

การศึกษาสมบัติทางความร้อน (TGA)

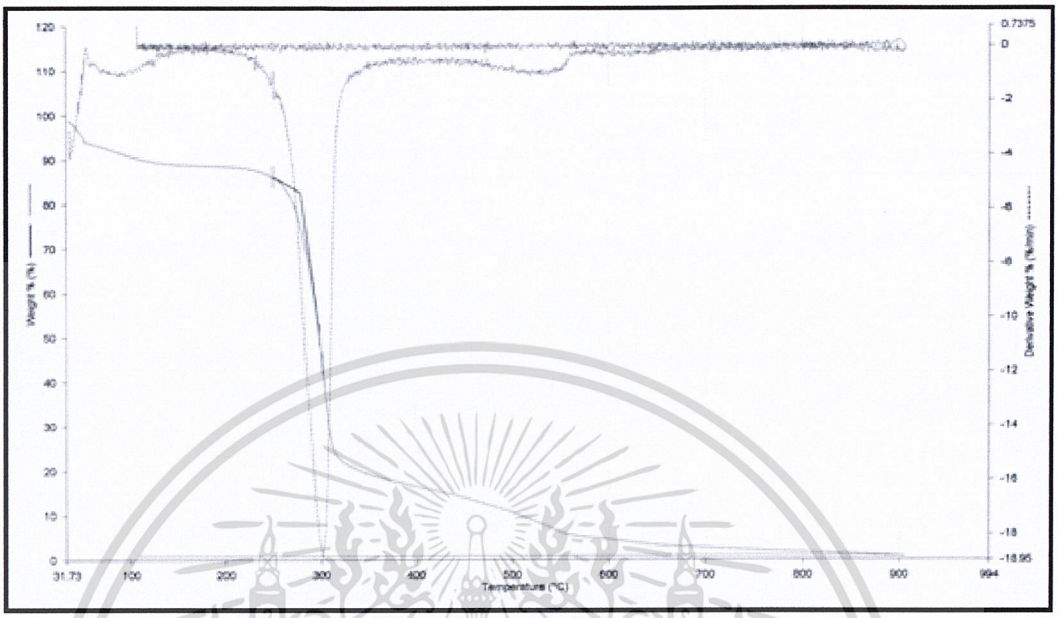
สูตรที่นำมาวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน คือ ฟิล์มแป้งผสมแมงลัก ที่เติมสารละลายไอออนโลหะ ซึ่งวิเคราะห์โดยใช้เทคนิคเทอร์มัลกราวิเมทริก (Thermogravimatric Analysis : TGA) ที่อัตราการให้ความร้อน 10°C/นาที ภายใต้สภาวะไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 50-900°C โดยพิจารณาอุณหภูมิการสลายตัว (T_d) ของฟิล์มแต่ละสูตร

ตารางที่ 4.6 ตารางแสดงอุณหภูมิการสลายตัว

สูตรฟิล์ม	อุณหภูมิเริ่มสลายตัว (T_{onset}, °C)			อุณหภูมิสลายตัว (T_d, °C)		
	$T_{onset\ 1}$	$T_{onset\ 2}$	$T_{onset\ 3}$	T_{d1}	T_{d2}	T_{d3}
Starch	165	497	-	301	529	-
Starch+NaOH+KCl	205	484	-	210	488	-
Starch+NaOH+$CaCl_2$	199	351	-	223	386	-
แมงลัก	203	358	421	264	407	428
แมงลัก 3g +NaOH+KCl	65	203	522	97	223	545
แมงลัก 3g +NaOH+$CaCl_2$	98	223	560	104	238	577
Starch:แมงลัก ; 7:3 (NaOH + KCl)	61	205	561	91	216	587
Starch:แมงลัก ;7:3 (NaOH + $CaCl_2$)	104	285	632	101	243	624
Starch:แมงลัก ;5:5 (NaOH + KCl)	98	137	668	80	224	798
Starch:แมงลัก ;5:5 (NaOH + $CaCl_2$)	111	201	676	57	228	808

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.8.1 ผลการทดสอบฟิล์มแป้ง

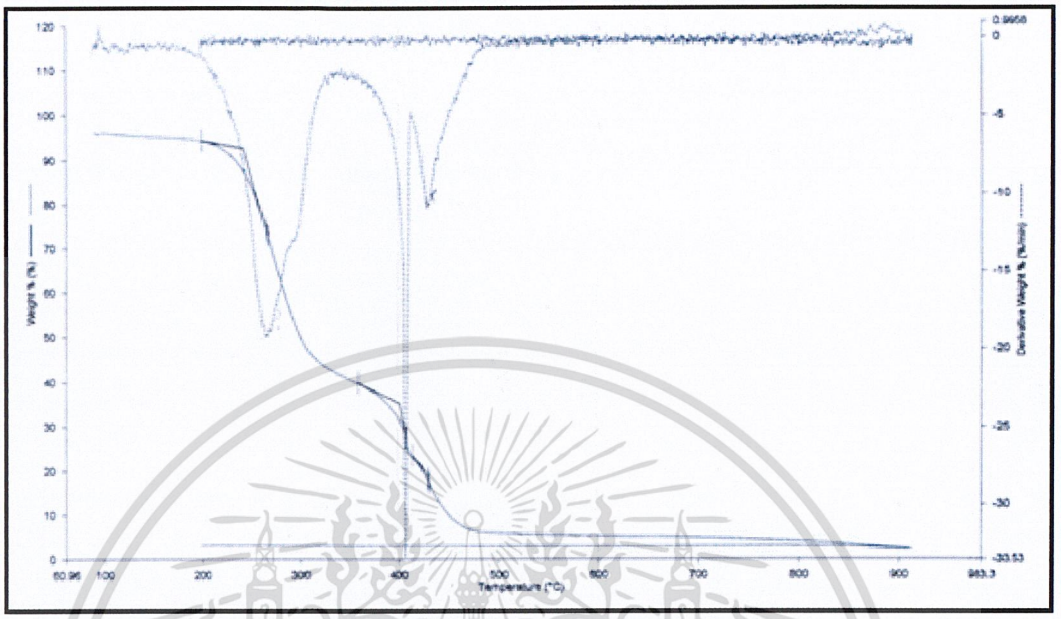


รูปที่ 4.12 แสดงผลเทอร์โมแกรม TGA ของฟิล์มแป้ง

จากรูป 4.12 พบว่า ฟิล์มแป้งมีอุณหภูมิในการสลายตัว 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนที่ 1 อุณหภูมิ T_{d1} = 301°C และขั้นตอนที่ 2 ที่อุณหภูมิ T_{d2} = 529°C เป็นผลมาจากองค์ประกอบในโมเลกุลแป้ง ซึ่งมีองค์ประกอบหลักอยู่ 2 ชนิด คือ อะมิโลส ซึ่งมีสายโซ่สั้นๆ สลายตัวก่อนที่อุณหภูมิ 301°C และอะมิโลเพกติน ซึ่งมีสายโซ่ยาว น้ำหนักโมเลกุลสูง สลายตัวทีหลังที่อุณหภูมิ 529°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.8.2 ผลการทดสอบฟิล์มแมงลัก



รูปที่ 4.13 แสดงเทอร์โมแกรม TGA ของฟิล์มแมงลัก

จากรูป 4.13 ฟิล์มแมงลักมีอุณหภูมิการสลายตัว 3 ขั้นตอน คือ ที่อุณหภูมิ T_{d1} = 264°C , T_{d2} = 407°C และ T_{d3} = 428°C ตามลำดับ ซึ่งแมงลักเป็นสารคาร์โบไฮเดรตโมเลกุลใหญ่มีองค์ประกอบ 2 กลุ่มหลัก คือ polyglucuronic acid (Glu) และ polygalacturonic acid (Gla) จึงทำให้มีอุณหภูมิการสลายตัวที่สูง (T_{d2} , T_{d3}) นอกจากนี้แมงลักยังประกอบด้วยสารประกอบอื่นๆที่มีโมเลกุลขนาดเล็กจำพวก Camphene , mucilage , myrcene oil จึงทำให้มีอุณหภูมิการสลายตัวต่ำที่ T_{d1}= 264°C

จากตารางที่ 4.6 ฟิล์มผสมแป้ง:แมงลัก ทั้ง 2 อัตราส่วนพบว่า มีอุณหภูมิการสลายตัว (T_d) เพิ่มขึ้น ไม่ว่าจะเติมไอออน K^+ หรือ Ca^{2+} แสดงว่าน่าจะเกิดปฏิกิริยากับไอออน เช่น เกิดพันธะเชื่อมโยง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.8.3 ผลการทดสอบของฟิล์มแป้งผสมผงวุ้นแมงลักในอัตราส่วนต่างๆ

จากตาราง 4.6 แสดงอุณหภูมิการสลายตัวของฟิล์มแป้งผสมแมงลักในอัตราส่วน 7:3 ที่เติมสารละลาย 5%NaOH และมี K^+, Ca^{2+} เป็นโลหะเชื่อมโยง พบว่า ในอัตราส่วนของแป้งต่อแมงลักและปริมาณของสารละลาย 5%NaOH เดียวกันนี้ มีอุณหภูมิการสลาย 3 ขั้นตอนเช่นเดียวกัน โดยฟิล์มสูตรที่ใช้ Ca^{2+} เป็นโลหะเชื่อมโยง มีอุณหภูมิการสลายตัวทั้ง 3 ขั้นตอนสูงกว่า ฟิล์มสูตรที่ใช้ K^+ เป็นโลหะเชื่อมโยง เนื่องจากโลหะ Ca^{+2} เกิดการเชื่อมโยงแบบไอออนิกระหว่าง O^- กับ Ca^{2+} กับสายโซ่โมเลกุลของแมงลัก ซึ่งเกิดได้ถึง 2 พันธะ ทำให้สายโซ่โมเลกุลมีความหนาแน่นและเป็นระเบียบมากขึ้น ส่งผลให้อุณหภูมิในการสลายตัวทั้ง 3 ขั้นตอนสูงตามไปด้วย โดยอุณหภูมิการสลายตัวทั้ง 3 ขั้นตอนนั้นเป็นผลมาจากองค์ประกอบในโครงสร้างโมเลกุลของแมงลัก

เมื่อพิจารณาอุณหภูมิการสลายตัวของฟิล์มแป้งผสมแมงลักในอัตราส่วน 5:5 ที่เติมสารละลาย 5%NaOH และมี K^+, Ca^{2+} เป็นโลหะเชื่อมโยง พบว่า ในอัตราส่วนแป้งต่อแมงลัก และปริมาณของสารละลาย 5%NaOH เดียวกันนี้ โดยฟิล์มสูตรที่ใช้ Ca^{2+} เป็นโลหะเชื่อมโยงมีค่าอุณหภูมิการสลายตัวขั้นตอนที่ 1 ต่ำกว่าสูตรที่ใช้ K^+ เป็นโลหะเชื่อมโยง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากโลหะ Ca^{+2} เกิดการเชื่อมโยงแบบไอออนิกระหว่าง O^- กับ Ca^{2+} กับสายโซ่โมเลกุลของแมงลัก ซึ่งเกิดได้ถึง 2 พันธะ ทำให้เหลือโมเลกุลเล็กๆที่ไม่เกิดการเชื่อมโยง ส่งผลให้ฟิล์มสูตรที่ใช้ Ca^{2+} เป็นโลหะเชื่อมโยงมีค่าอุณหภูมิการสลายตัวขององค์ประกอบสารโมเลกุลเล็กในขั้นตอนที่ 1 ต่ำ

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบผลของอัตราส่วนแป้งต่อแมงลัก 7:3 และ 5:5 โดยรวมพบว่าฟิล์มสูตรที่ใช้อัตราส่วนแป้งต่อแมงลัก 5:5 มีอุณหภูมิการสลายตัวที่สูงกว่าฟิล์มสูตรที่ใช้อัตราส่วนแป้งต่อแมงลัก 7:3 แสดงว่าอัตราส่วน 5:5 เกิดการเชื่อมโยงกับโลหะไอออนทั้งสอง (K^+,Ca^{2+}) ได้ดีกว่า จึงเป็นอัตราส่วนที่เหมาะสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาฟิล์มพลาสติกย่อยสลายได้ที่เตรียมจากแป้งมันสำปะหลังผสมแมงลักในอัตราส่วนต่างๆกัน โดยมีกลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ และโลหะไอออนชนิดต่างๆ คือ KCl , $CaCl_2$ เป็นสารก่อพันธะเชื่อมโยง โดยทำการตรวจวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FTIR สมบัติการบวมตัว สมบัติเชิงกล และสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค Thermogravimetric analysis (TGA) จากการทดลองสามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

5.1 สรุปผลการดำเนินงานวิจัย

ตารางที่ 5.1 สรุปผลการทดสอบสมบัติต่างๆของฟิล์ม

สูตร	% Swelling	% Equilibrium Water content	% Water content	Tensile Strength (MPa)	% Elongation at break	อุณหภูมิการสลายตัว (°C)
1	1181.53	-	-	1.62 ± 0.00	14.95 ± 3.31	227,266
2	1349.45	-	-	0.41 ± 0.24	0	93,233
*3	1621.03	1903.56	5.80	2.33 ± 0.20	14.85 ± 2.08	91,216,587
*4	937.26	1072.79	3.49	3.35 ± 0.00	16.17 ± 0.00	101,243,624
*5	1417.97	1576.37	12.90	4.21 ± 0.20	18.71 ± 2.77	80,224,798
*6	1720.64	1810.39	6.92	1.99 ± 0.26	14.28 ± 4.73	57,228,808
7	-	-	-	3.03 ± 0.70	42.78 ± 7.11	57,140,237
8	938.09	-	-	6.71 ± 0.02	16.26 ± 2.26	185,290,657
9	2493.65	-	-	4.71 ± 0.12	71.39 ± 12.00	204,323,698
10	-	-	-	3.85 ± 0.85	33.75 ± 5.45	97,223,545
11	-	-	-	3.71 ± 1.03	23.89 ± 3.40	104,238,577
12	-	-	-	×	×	210,488
13	-	-	-	2.30 ± 0.11	0	223,386
14	-	-	-	0.47 ± 0.33	0	301,529
15	-	-	-	×	×	209,643
16	7764.29	-	-	-	-	264,407,428

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมายเหตุ : - หมายถึง ฟิล์มเกิดการละลายน้ำ

× หมายถึง ไม่สามารถนำมาทดสอบได้

* หมายถึง สูตรที่มีสมบัติต่างๆค่อนข้างดี

สูตรที่ได้ทำการคัดเลือกมาทดสอบสมบัติเชิงกลตามมาตรฐาน ASTM D-1822-L ได้แก่ สูตรที่มีอัตราส่วนแป้งต่อแมงลัก 5:5 และ 7:3 ทั้งที่มีการเติมสารละลาย KCl และ $CaCl_2$ เพราะสามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มได้ และสามารถคงรูปร่างอยู่ได้ในช่วงระยะเวลาหนึ่ง โดยไม่ละลายน้ำ ซึ่งผลการวิเคราะห์ค่าความแข็งแรงดึงและค่า เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด พบว่า สำหรับอัตราส่วน 5:5 นั้น สูตรที่มีสารละลาย KCl มีค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดถึง 4.2 (MPa) และมีค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดสูงสุดถึง 18.71% และสำหรับอัตราส่วน 7:3 นั้น สูตรที่เติมสารละลาย $CaCl_2$ มีค่าความแข็งแรงดึงสูงที่ 3.45 (MPa) และมีค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดสูงที่ 16.17 %

ผลการวิเคราะห์ฟิล์มแป้งผสมแมงลักด้วยเทคนิค FTIR พบว่า Ca^{2+} เชื่อมโยงนั้นมีผลต่อรูปร่างและตำแหน่งเลขคลื่นหมู่ไฮดรอกซิลของแป้งและแมงลักมากกว่า K^+

ผลการวิเคราะห์ฟิล์มแป้งผสมแมงลักด้วยเทคนิค TGA พบว่า Ca^{2+} สามารถเกิดพันธะเชื่อมโยงกับฟิล์มแป้งผสมแมงลักได้ดีกว่า K^+ โดยสูตรที่มีอุณหภูมิการสลายตัวสูง คือ สูตรที่มีอัตราส่วนแป้งต่อแมงลัก 5:5 ซึ่งเชื่อมโยงด้วยสารละลายไอออนโลหะ $CaCl_2$ (สูตร6) มีอุณหภูมิสลายตัว คือ $T_{d1} = 57\ ^\circ C$, $T_{d2} = 228\ ^\circ C$ และ $T_{d3} = 808\ ^\circ C$

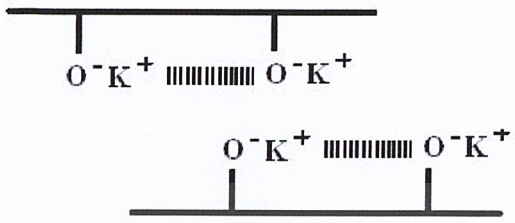
ผลการวิเคราะห์การบวมตัวของฟิล์ม พบว่า สูตรที่มีอัตราส่วนแป้งต่อแมงลัก 5:5 ซึ่งเชื่อมโยงด้วยสารละลายไอออนโลหะ $CaCl_2$ (สูตร6) สามารถบวมตัวและดูดซับน้ำได้มากที่สุดถึง 1720.64% รวมถึงมีจุดอิ่มตัวในการดูดซับน้ำสูงสุดที่ 1810.39% ภายใน 24 ชั่วโมง

ดังนั้นฟิล์มที่เหมาะสมในการนำไปคลุมดินคือ ฟิล์มสูตรที่ 5 (แป้งต่อแมงลัก 5:5 และมี K^+) เนื่องจากมีสมบัติเชิงกลสูงที่สุด ดูดน้ำได้ปานกลางที่ 1417.97% และมีความสามารถในการเก็บน้ำมากที่สุด อัตราการคายน้ำช้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

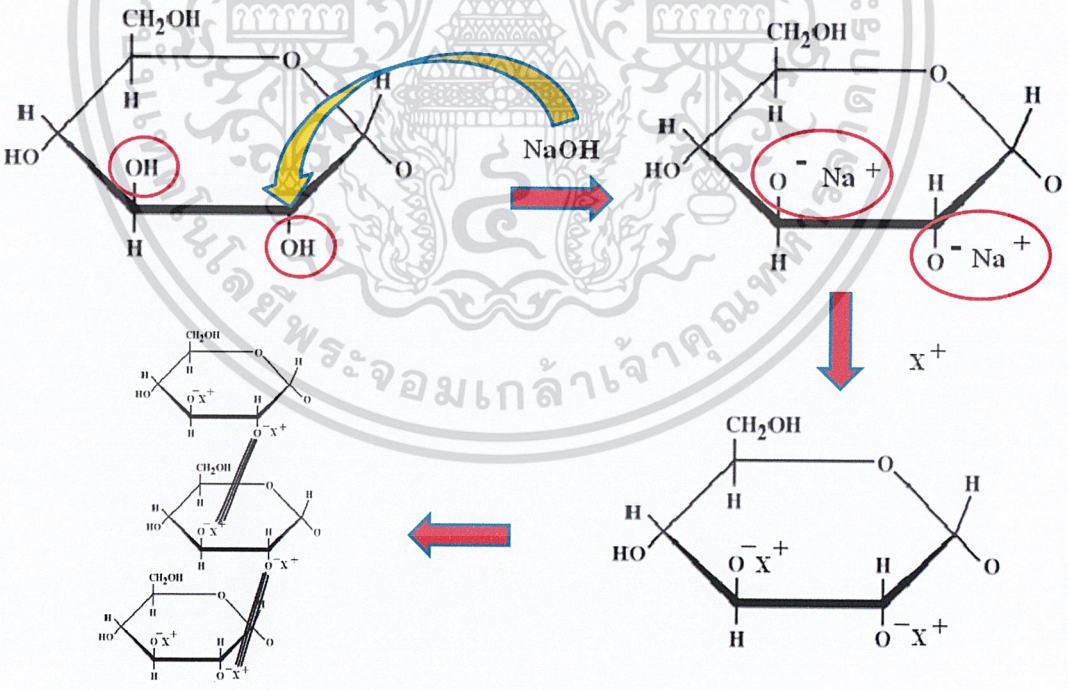
5.2 สันนิษฐานการเกิดพันธะเชื่อมโยง

- การเชื่อมโยงของแป้งกับโลหะไอออนเชื่อมโยง



รูปที่ 5.1 แบบจำลองการเชื่อมโยงของแป้งกับโลหะเชื่อมโยง K^+

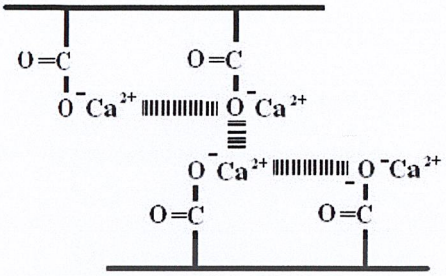
จากผลการวิเคราะห์ พบว่า แป้งสามารถเกิดพันธะเชื่อมโยงแบบไอออนิกในลักษณะ physical crosslink กับ K^+ เนื่องจากทำให้โครงสร้างของแป้งจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ ซึ่งกลไกการเกิดปฏิกิริยาแสดงดังรูป 5.2



รูปที่ 5.2 กลไกแสดงการเกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยงของแป้งกับโลหะเชื่อมโยง K^+

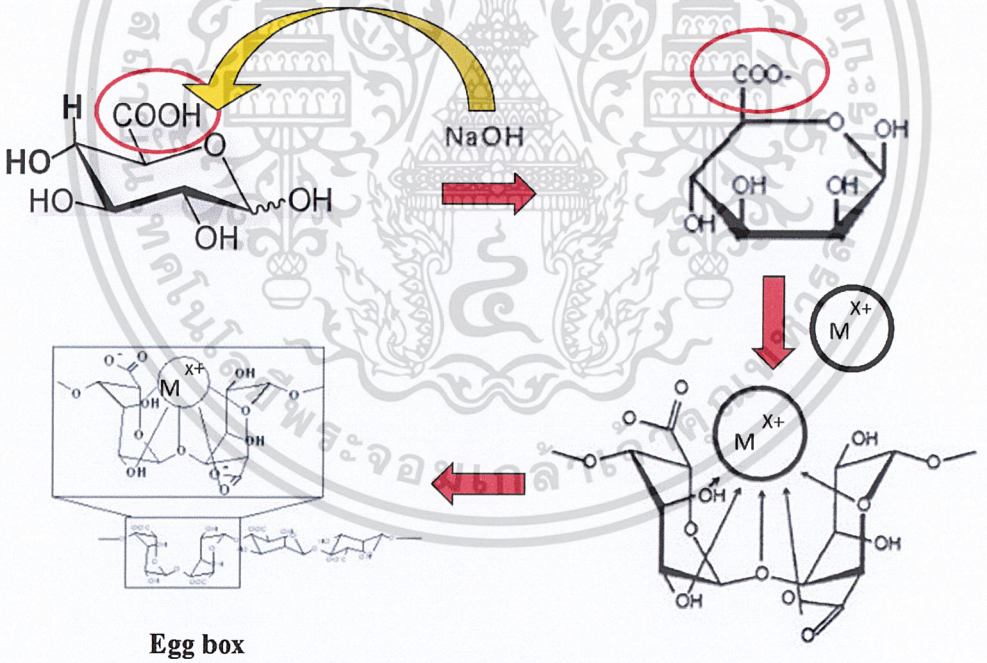
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- การเชื่อมโยงของแมงลักกับโลหะไอออนเชื่อมโยง



รูปที่ 5.3 แบบจำลองการเชื่อมโยงของแมงลักกับโลหะเชื่อมโยง Ca^{2+}

จากผลการวิเคราะห์ พบว่า แมงลักสามารถเกิดพันธะเชื่อมโยงแบบไอออนิกในลักษณะ physical crosslink กับ Ca^{2+} ได้โครงสร้างลักษณะ Egg box ซึ่งกลไกการเกิดปฏิกิริยาแสดงดังรูป 5.4



รูปที่ 5.4 กลไกแสดงการเกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยงของแมงลักกับโลหะเชื่อมโยง Ca^{2+}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3 ข้อเสนอแนะ

1. ควรศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการใช้ไอออนเชื่อมโยงตัวอื่น เช่น NH_4Cl , $MgCl_2$, PO_4^{3-} เป็นต้น เพื่อนำไปประยุกต์เป็นแผ่นฟิล์มคลุมดินให้ปุ๋ยที่มีแร่ธาตุหลากหลายให้แก่ดิน และเป็นการเพิ่มโอกาสในการผลิตพลาสติกย่อยสลายทางชีวภาพสู่อุตสาหกรรมด้วย
2. ในการศึกษาการดูดซับน้ำ ควรมีการศึกษาไอออนที่หลุดออกมาจากการละลายน้ำด้วยเทคนิค AAS (Atomic absorption spectrophotometry) เพื่อเป็นการศึกษาถึงระยะเวลาและปริมาณในการปลดปล่อยแร่ธาตุจากฟิล์มสู่ดิน
3. ควรทดสอบความคงทนของฟิล์ม เมื่อแช่ในสารละลาย pH กรดและด่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[1] กล้าณรงค์ ศรีรอต, เกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ, Liying Yang และ รังสิมา ชลคุป. 2543. 551-561. **"พลาสติไซเซอร์ในแป้งมันสำปะหลังผสมพอลีคาร์โปแลคโตน: สมบัติของ melt viscosity และสมบัติทางเชิงกล."** กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

[2] อนันต์ เกษมพันธ์, ดุสิต อนันตรักษ์, ณัฐวุฒิ บุญรักษ์วนิช, อรุณี เอี่ยวสีหยก และ อัญชลี ติรพรวดี. 2542. **"พลาสติกย่อยสลายได้."** [online]. Available: (15 ตุลาคม 2553) http://library.tu.ac.th/acc-pdf/mba/mba-259.pdf

[3] กล้าณรงค์ ศรีรอต และเกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ. 2550. **"เทคโนโลยีของแป้ง."** พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาเกษตรศาสตร์

[4] มรกต ตันติเจริญ, กล้าณรงค์ ศรีรอต และเกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ. 2543. 102-113. **"อนาคตผลิตภัณฑ์แป้งมันสำปะหลัง."** กรุงเทพฯ: สภาการค้าอุตสาหกรรมแห้งมันสำปะหลังไทย

[5] ดุษฎี อุตภาพ, น้องนุช เจริญกูล. **Carbohydrate technology**. [online]. Available: (18 ตุลาคม 2553) http://eu.lib.kmutt.ac.th/elearning/Courseware/BCT611/chapter2.html

[6] **Hydrocolloid.** [online]. Available: (15 ตุลาคม 2553) http://click2idc.com/index.php?lang=th&option=showtopic&wid=64&sub=5&forum=

[7] **เมล็ดแมงลัก.** [online]. Available: (15 ตุลาคม 2553) http://www.tungsong.com/samunpai/drug/53_manglux/manglux.html

[8] **ไฟเบอร์สกัดจากเมล็ดแมงลักกับการลดน้ำหนัก.** [online]. Available: (15 ตุลาคม 2553) http://www.samunpai.com/diet/show.php?id=53&cat=3

[9] **พันธะไอออนิก.** [online]. Available: (15 ตุลาคม 2553) http://writer.dek-d.com/dek-d/writer/viewlongc.php?id=313811&chapter=2

[10] **อรอุษา สรวารี. 2546 . สารเติมแต่งพอลิเมอร์. กรุงเทพฯ : ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[11] เต็มสุข แตงหอม, สิริรัตน์ พานิช, กฤษณา ปีวสาร, จุฑาทิพย์ นิลดูหา, วงศ์วลี ทองดอนง้าว และณรงค์ศักดิ์ เจริญศิริ. **การทดสอบสมบัติเชิงกล.** [online]. Available: (18 ตุลาคม 2553) http://www.sci.buu.ac.th/~chemistry/staff/thanida/Polymer_Chemistry/image_files/chapter5_3.html

[12] **การทดสอบสมบัติความร้อน.** [online]. Available: (18 ตุลาคม 2553) http://en.wikipedia.org/wiki/Differential_scanning_calorimetry

[13] National Metal and Materials Technology Center (MTEC). **"พลาสติกย่อยสลายได้. "** [online]. Available: (18 ตุลาคม 2553) http://www2.mtec.or.th/th/special/biodegradable_plastic/bio_de_plas.html

[14] อัจฉราพร รัตนมณี. **"ฟิล์มพลาสติกย่อยสลายได้จากอีโคเฟล็กผสมแป้งดัดแปรเอสเทอร์และแป้งพรีเจลสำหรับงานเกษตรกรรม."** วิทยานิพนธ์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยี-พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2552.

[15] S.Godbole.,S. Gote., M. Latkar and T.Chakrabarti. **" Preparation and characterization of biodegradable poly-3-hydroxybutyrate-starch blend films."** Bioresource technology. Vol.86, 2003. pp.33-37.

[16] พรรวี สุมิตร. **" การศึกษาฟิล์มพอลิเมอร์ผสมชนิดรับประทานได้จากไคโตซานกับแป้งดัดแปรเอสเทอร์."** วิทยานิพนธ์หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2547.

[17] สุภสิทธิ์ ผู้มีโชค. **" การเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังดัดแปรและพอลิ-โพรพิลีน."** วิทยานิพนธ์หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2547.

[18] G.S Mugnozza., E. Schettini., G. Vox., M. Malinconico., B. Immirzi and S. Pagliara. **" Mechanical properties decay and morphological behavior of biodegradable films for agricultural mulching in real scale experiment."** Polymer Degradation and Stability. Vol.91, 2006. pp. 2801-2808.

[19] N. Tzankova Dintcheva and F.P. La Mantia. **" Durability of a starch-based biodegradable polymer."** Polymer Degradation and Stability. 2007. pp. 630-634

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[20] ธนาวดี ลี้จากภัย, ก้องเกียรติ คงสุวรรณ และนุกูล เอื้อพันธเศรษฐ. **"การศึกษาการย่อยสลายของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช และแผ่นฟิล์มโพลิเอทิลีนผสมแป้ง โดยจุลินทรีย์แบบใช้ออกซิเจน."** [online]. Available: (18 ตุลาคม2553) http://www.researchgate.net/publication/39025724

[21] ภูมิพัฒน์ รัตนตรัยเจริญ, กิติโรจน์ หวันตาหลา และศิริวรรณ ศรีสรฉัตร์. **"การดูดซับไอออนโพแทสเซียมและสังกะสีโดยใช้เถ้าแกลบ."** [online]. Available: (18 ตุลาคม 2553) www.intania.com/scripts/viewjournal.asp?ID=167

[22] คมสันต์ กุศล. " **การสังเคราะห์อนุพันธ์ของโคพอลิ (สไตรีน / ไดไวนิลเบนซีน / มาเลอิกแอนไฮไดรด์) เพื่อใช้เป็นตัวดูดซับ."** [online]. Available: (18 ตุลาคม 2553) http://dcms.thailis.or.th/tdc/browse.php?option=show&browse_type=title&titleid=45910&display=list_subject&q=Adsorption

[23] Prachaub chaibu and Buncha chawanchai. **"วิจัยตัวดูดซับและศึกษาคุณสมบัติในการดูดซับไอออนของโลหะหนักในสารละลาย."** [online]. Available: (18 ตุลาคม 2553) ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/010/a1290e/a1290e10.pdf

[24] H. Dave , P.V.C. Roa และ J.D Desai .1997. " **แป้งที่ผสมด้วยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ และทำการเป่าขึ้นรูปเป็นฟิล์มเพื่อทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพ."** [online]. Available: (18 ตุลาคม 2553) www.stkc.go.th/library.php?app=libraryEIndexingDetail.php

[25] Y.J Kim , Y.M Lee และ Park .1994. " **การย่อยสลายทางชีวภาพของพอลิเมอร์โดยแป้ง."** [online]. Available: (19 ตุลาคม 2553) www.phtnet.org/research/perishable-fruit-step2.asp?id_name...id

[26] G.H. Yew , A.M. Mohd Yusof , Z.A. Mohd Ishak and U.S. Ishiku.2005. **Water absorbtion and enzymatic degradation of poly lactic acid)/rice starch composites.** Polymer and degradation and Stability. Vol.90: pp.488-500.

[27] R.L. shogren , W.M. Doane , D. Garlotta J.W. Lawton and J.W. Willett. **Biodegradation of starch/polylactic acid /poly(hydroxyester-ether) composite bars in soil.** 2003.Polymer degradation and Stability. Vol.79: pp.405-411.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[28] **High strength degradeble plastics from starch and poly(lactic acid).** [online]. Available: (18 ตุลาคม 2553) http://oaspub.epa.gov/eims/eimsapi.dispdetail?deid=80150

[29] Jian – Feng Zhang and Xiuzhi Sun.2004. **Mechanical Properties of poly(lactic-acid)/starch Composite Compatibillized by Maleic Anhydride .** Biomacromolecule. Vol.5: pp.1446-145.

[30] ปิยนุสร์ น้อยด้วง และ วชิรพันธ์ จันทร์พงษ์. **"การใช้มิวซิเลจแห้งจากเมล็ดแมงลักเป็นสารให้ความคงตัวในผลิตภัณฑ์ไอศกรีมกล้วยหอม."** [online]. Available: (20 ตุลาคม 2553) foodtech.siam.edu/.../ การใช้มิวซิเลจเป็นสารให้ความคงตัวในไอศกรีมกล้วยหอม.

[31] พิมภรณ์ สมกิตติธรรม, รัตนาพร นิละนนท์ และรองศาสตราจารย์ ดร. วันดี กฤษณพันธ์. " **การพัฒนาผลิตภัณฑ์เสริมอาหาร จากแมงลัก."** โครงงานพิเศษ ภาควิชาเภสัชวินิจฉัย คณะเภสัชศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล. 2552

[32] นิวัตน์ บุญญะรัง, ศุภวรรณ ดีโรจนเดช และ สุธีจินต์ พยัคคง. **"บทบาทของแคลเซียมไอออนที่มีต่อการเกิดพันธะเชื่อมโยงของวุ้นเม็ดแมงลัก."** โครงงานพิเศษ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2552

[33] ธีรยุทธ วิไลวัลย์ และ วรวรรณ พันธุมนาวิน. **"อินฟราเรดสเปกโทรเมทรี FTIR"**. ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2548

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

การบวมน้ำและคายน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- **การคำนวณเปอร์เซ็นต์การบวมน้ำ (% Swelling)**

$$\text{เปอร์เซ็นต์การบวมน้ำ (\% Swelling)} = \frac{w2-w1}{w1} \times 100$$

W_1 = น้ำหนักฟิล์มแห้งก่อนแช่น้ำ

W_2 = น้ำหนักฟิล์มหลังแช่น้ำ

- **การคำนวณเปอร์เซ็นต์จุดสมดุล หรือจุดอิ่มตัวในการบวมน้ำ (% Equilibrium water content)**

$$\text{\% Equilibrium water content} = \left(W_e - \frac{wg}{wg} \right) \times 100$$

W_e = น้ำหนักฟิล์มหลังแช่น้ำที่เวลา 24 ชั่วโมง

W_g = น้ำหนักฟิล์มก่อนแช่น้ำ

- **การคำนวณเปอร์เซ็นต์การคายน้ำ หรือความสามารถในเก็บน้ำ (%Water retention)**

$$\text{เปอร์เซ็นต์การคายน้ำ (\%Water retention)} = \frac{\text{น้ำหนักของฟิล์มแมงลักที่เหลือหลังจากวางไว้ 1ชั่วโมง}}{\text{น้ำหนักฟิล์มแมงลักที่อิ่มตัวด้วยน้ำ}} \times 100$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

➢ **ผลการทดสอบการบวมน้ำ (Swelling property)**

ตารางที่ ก-1 บันทึกผลการทดลองการบวมน้ำของฟิล์ม

สูตร	น้ำหนักฟิล์มแห้ง (g)			น้ำหนักแผ่นฟิล์มหลังแช่น้ำ																		น้ำหนักน้ำที่ดูดซับ 6 ชั่วโมง (g)	น้ำหนักน้ำที่ดูดซับ 24 ชั่วโมง (g)		
				1 ชั่วโมง			2 ชั่วโมง			3 ชั่วโมง			4 ชั่วโมง			5 ชั่วโมง			6 ชั่วโมง						
1	ชิ้น1	ชิ้น2	ชิ้น3	ชิ้น1	ชิ้น2	ชิ้น3	ชิ้น1	ชิ้น2	ชิ้น3	ชิ้น1	ชิ้น2	ชิ้น3	ชิ้น1	ชิ้น2	ชิ้น3	ชิ้น1	ชิ้น2	ชิ้น3	ชิ้น1	ชิ้น2	ชิ้น3	1.530			
	0.15	0.14	0.11	0.98	1.04	0.87	1.92	0.36	1.40	2.16	1.97	1.61	1.97	2.61	1.98	1.79	2.26	1.52	1.52	1.66	1.81		-		
2	ชิ้น1	ชิ้น2	ชิ้น3	ชิ้น1	ชิ้น2	ชิ้น3	ชิ้น1	ชิ้น2	ชิ้น3	ชิ้น1	ชิ้น2	ชิ้น3	ชิ้น1	ชิ้น2	ชิ้น3	ชิ้น1	ชิ้น2	ชิ้น3	ชิ้น1	ชิ้น2	ชิ้น3	0.947			
	0.13	0.14	0.09	0.96	2.11	1.55	1.46	2.66	2.14	2.16	1.25	1.98	2.06	2.71	1.76	2.27	2.79	1.26	1.80	2.12	0		-		
3	ชิ้น1	ชิ้น2	ชิ้น3	ชิ้น1	ชิ้น2	ชิ้น3	ชิ้น1	ชิ้น2	ชิ้น3	ชิ้น1	ชิ้น2	ชิ้น3	ชิ้น1	ชิ้น2	ชิ้น3	ชิ้น1	ชิ้น2	ชิ้น3	ชิ้น1	ชิ้น2	ชิ้น3	1.820	ชิ้น1	ชิ้น2	ชิ้น3
	0.13	0.09	0.12	1.40	1.24	1.62	1.90	1.34	1.76	1.89	1.71	1.96	1.82	1.85	1.96	2.47	1.76	1.64	2.23	1.70	1.87		2.52	1.88	2.38
4	ชิ้น1	ชิ้น2	ชิ้น3	ชิ้น1	ชิ้น2	ชิ้น3	ชิ้น1	ชิ้น2	ชิ้น3	ชิ้น1	ชิ้น2	ชิ้น3	ชิ้น1	ชิ้น2	ชิ้น3	ชิ้น1	ชิ้น2	ชิ้น3	ชิ้น1	ชิ้น2	ชิ้น3	1.690	ชิ้น1	ชิ้น2	ชิ้น3
	0.17	0.19	0.18	1.13	1.61	1.32	1.46	1.45	1.95	1.94	1.90	1.99	1.65	1.97	2.13	1.71	2.09	1.98	1.64	2.00	1.97		1.94	2.11	2.28
5	ชิ้น1	ชิ้น2	ชิ้น3	ชิ้น1	ชิ้น2	ชิ้น3	ชิ้น1	ชิ้น2	ชิ้น3	ชิ้น1	ชิ้น2	ชิ้น3	ชิ้น1	ชิ้น2	ชิ้น3	ชิ้น1	ชิ้น2	ชิ้น3	ชิ้น1	ชิ้น2	ชิ้น3	2.243	ชิ้น1	ชิ้น2	ชิ้น3
	0.22	0.18	0.16	1.41	1.84	1.48	2.14	2.20	2.07	2.53	2.80	2.63	2,83	3.04	2.67	2.77	2.86	2.54	2.89	3.02	2.50		3.28	3.50	2.55
6	ชิ้น1	ชิ้น2	ชิ้น3	ชิ้น1	ชิ้น2	ชิ้น3	ชิ้น1	ชิ้น2	ชิ้น3	ชิ้น1	ชิ้น2	ชิ้น3	ชิ้น1	ชิ้น2	ชิ้น3	ชิ้น1	ชิ้น2	ชิ้น3	ชิ้น1	ชิ้น2	ชิ้น3	2.747	ชิ้น1	ชิ้น2	ชิ้น3
	0.15	0.17	0.16	1.73	1.78	1.95	2.52	2.09	2.40	2.65	2.38	2.83	2.84	2.85	2.60	2.93	2.63	2.66	2.73	2.77	3.22		3.06	2.79	3.28
7	ชิ้น1	ชิ้น2	ชิ้น3	ชิ้น1	ชิ้น2	ชิ้น3	ชิ้น1	ชิ้น2	ชิ้น3	ชิ้น1	ชิ้น2	ชิ้น3	ชิ้น1	ชิ้น2	ชิ้น3	ชิ้น1	ชิ้น2	ชิ้น3	ชิ้น1	ชิ้น2	ชิ้น3	ละลาย			
	0.07	0.07	0.05	1.52	2.12	1.66	0.88	2.38	1.60	0.09	1.87	2.94	0	0	1.08	0	0	0	0	0	0		-		
8	ชิ้น1	ชิ้น2	ชิ้น3	ชิ้น1	ชิ้น2	ชิ้น3	ชิ้น1	ชิ้น2	ชิ้น3	ชิ้น1	ชิ้น2	ชิ้น3	ชิ้น1	ชิ้น2	ชิ้น3	ชิ้น1	ชิ้น2	ชิ้น3	ชิ้น1	ชิ้น2	ชิ้น3	0.730			
	0.07	0.07	0.07	1.09	2.18	2.04	2.64	2.17	1.71	1.76	3.28	3.20	1.64	4.00	2.70	0	0	3.68	0	0	2.40		-		
9	ชิ้น1	ชิ้น2	ชิ้น3	ชิ้น1	ชิ้น2	ชิ้น3	ชิ้น1	ชิ้น2	ชิ้น3	ชิ้น1	ชิ้น2	ชิ้น3	ชิ้น1	ชิ้น2	ชิ้น3	ชิ้น1	ชิ้น2	ชิ้น3	ชิ้น1	ชิ้น2	ชิ้น3	1.830			
	0.14	0.07	0.09	1.82	1.82	1.59	2.84	1.70	2.86	3.35	2.97	0.66	3.80	2.75	3.14	4.26	0	3.30	0	3.93	1.86		-		

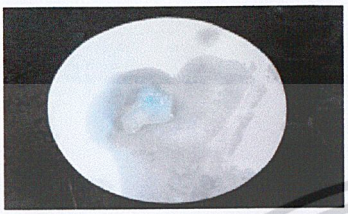
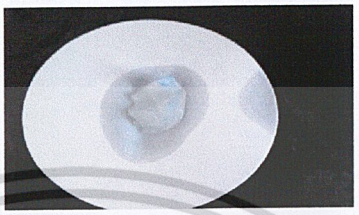
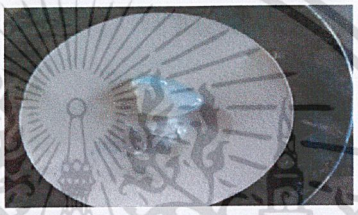
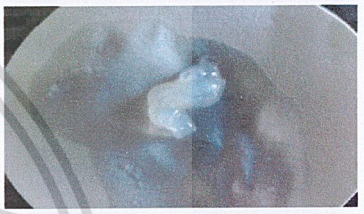
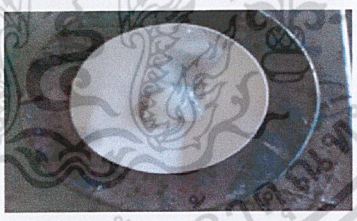
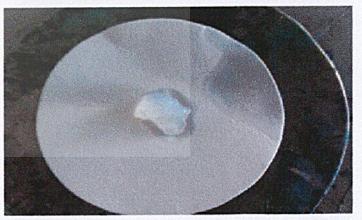
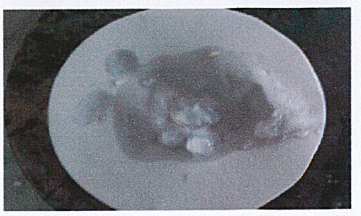
ตารางที่ ก-1 (ต่อ) บันทึกผลการทดลองการบวมน้ำของฟิล์ม

สูตร	น้ำหนักฟิล์มแห้ง (g)			น้ำหนักแผ่นฟิล์มหลังแช่น้ำ																		น้ำหนักน้ำที่ดูดซับ 6 ชั่วโมง (g)	น้ำหนักน้ำที่ดูดซับ 24 ชั่วโมง (g)
				1 ชั่วโมง			2 ชั่วโมง			3 ชั่วโมง			4 ชั่วโมง			5 ชั่วโมง			6 ชั่วโมง				
10	*ชิ้น1*	*ชิ้น2*	*ชิ้น3*	*ชิ้น1*	*ชิ้น2*	*ชิ้น3*	*ชิ้น1*	*ชิ้น2*	*ชิ้น3*	*ชิ้น1*	*ชิ้น2*	*ชิ้น3*	*ชิ้น1*	*ชิ้น2*	*ชิ้น3*	*ชิ้น1*	*ชิ้น2*	*ชิ้น3*	*ชิ้น1*	*ชิ้น2*	*ชิ้น3*	ละลาย	
	0.07	0.07	0.06	1.05	1.14	1.40	1.39	1.21	2.13	1.19	1.12	2.03	1.96	0.10	1.61	0	0	1.19	0	0	0		-
11	*ชิ้น1*	*ชิ้น2*	*ชิ้น3*	*ชิ้น1*	*ชิ้น2*	*ชิ้น3*	*ชิ้น1*	*ชิ้น2*	*ชิ้น3*	*ชิ้น1*	*ชิ้น2*	*ชิ้น3*	*ชิ้น1*	*ชิ้น2*	*ชิ้น3*	*ชิ้น1*	*ชิ้น2*	*ชิ้น3*	*ชิ้น1*	*ชิ้น2*	*ชิ้น3*	ละลาย	
	0.07	0.07	0.07	1.84	1.04	2.00	0.70	1.85	2.10	0.96	1.56	1.66	0	1.47	0	0	0.86	0	0	0	0		-
12	*ชิ้น1*	*ชิ้น2*	*ชิ้น3*	*ชิ้น1*	*ชิ้น2*	*ชิ้น3*	*ชิ้น1*	*ชิ้น2*	*ชิ้น3*	*ชิ้น1*	*ชิ้น2*	*ชิ้น3*	*ชิ้น1*	*ชิ้น2*	*ชิ้น3*	*ชิ้น1*	*ชิ้น2*	*ชิ้น3*	*ชิ้น1*	*ชิ้น2*	*ชิ้น3*	ละลาย	
	0.14	0.10	0.12	2.49	2.05	2.31	2.27	2.13	2.28	2.72	1.56	0	1.50	0	0	0	0	0	0	0	0		-
13	*ชิ้น1*	*ชิ้น2*	*ชิ้น3*	*ชิ้น1*	*ชิ้น2*	*ชิ้น3*	*ชิ้น1*	*ชิ้น2*	*ชิ้น3*	*ชิ้น1*	*ชิ้น2*	*ชิ้น3*	*ชิ้น1*	*ชิ้น2*	*ชิ้น3*	*ชิ้น1*	*ชิ้น2*	*ชิ้น3*	*ชิ้น1*	*ชิ้น2*	*ชิ้น3*	ละลาย	
	0.13	0.11	0.13	0.50	1.53	3.00	1.68	1.49	3.23	1.49	0	2.11	0	0	0	0	0	0	0	0	0		-
14	*ชิ้น1*	*ชิ้น2*	*ชิ้น3*	*ชิ้น1*	*ชิ้น2*	*ชิ้น3*	*ชิ้น1*	*ชิ้น2*	*ชิ้น3*	*ชิ้น1*	*ชิ้น2*	*ชิ้น3*	*ชิ้น1*	*ชิ้น2*	*ชิ้น3*	*ชิ้น1*	*ชิ้น2*	*ชิ้น3*	*ชิ้น1*	*ชิ้น2*	*ชิ้น3*	1.460	
	0.08	0.07	0.09	0.88	1.06	1.33	0.96	1.48	1.93	1.51	2.49	2.59	1.49	2.46	1.86	1.38	0	1.91	0	0	0		-
15	กรอบเปราะไม่เป็นแผ่น																						

เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

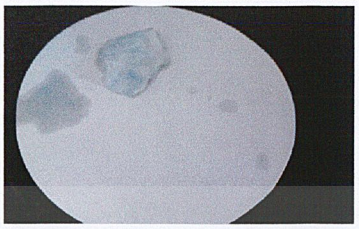
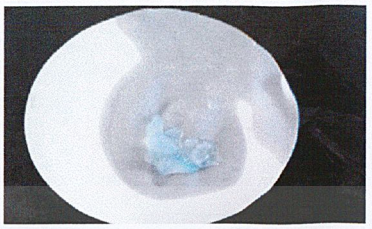
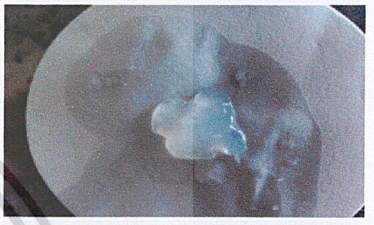
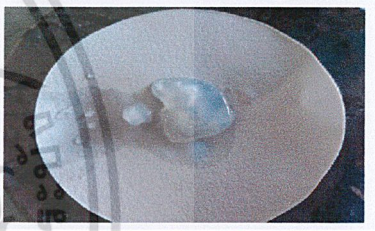
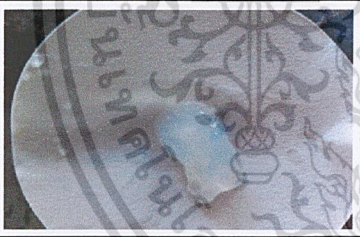
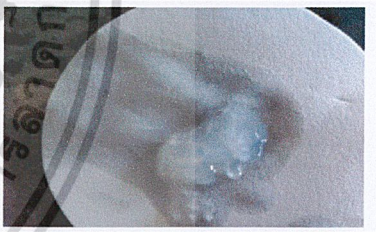
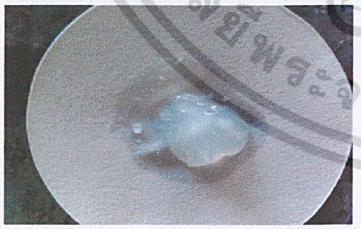
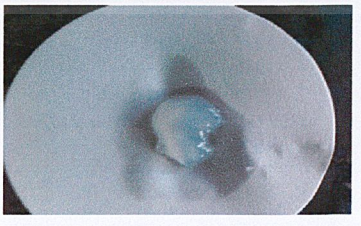
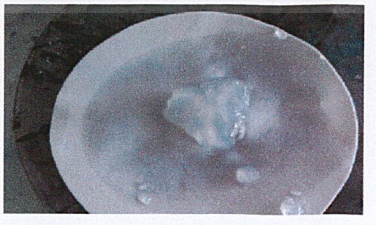
ตารางที่ ก-2 ลักษณะของแผ่นฟิล์มหลังการบวมน้ำที่เวลาต่างๆ

สูตร 1 : Starch 10g + KCl

ครั้งที่ / ชั่วโมง	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
1 ชั่วโมง			
2 ชั่วโมง			
3 ชั่วโมง			
4 ชั่วโมง			
5 ชั่วโมง			
6 ชั่วโมง			

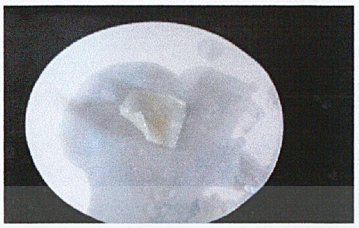
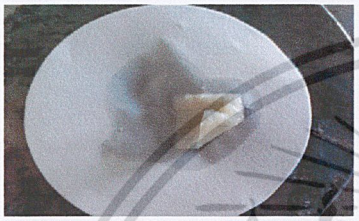
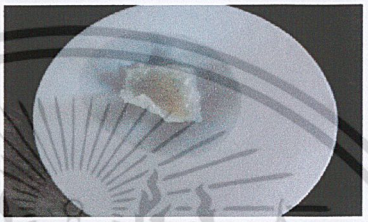
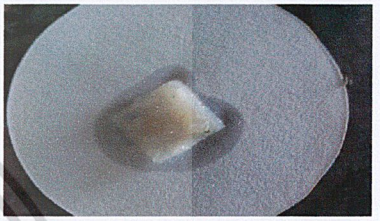
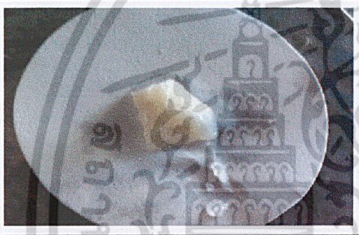
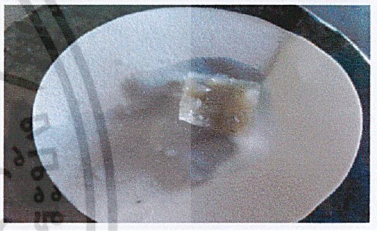
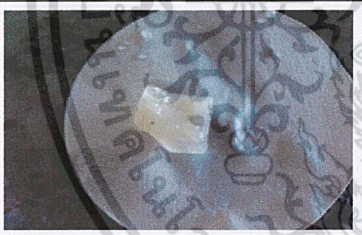
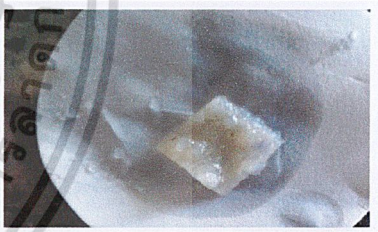
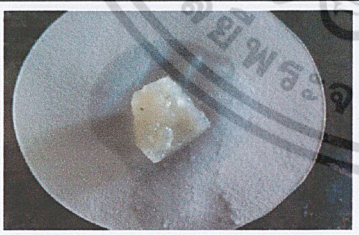
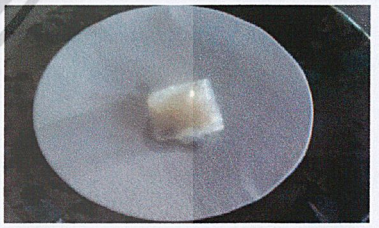
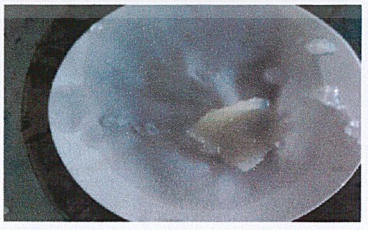
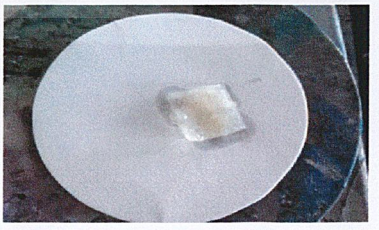
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<u>สูตร 2</u> : Starch 10g + $CaCl_2$

ครั้งที่ / ชั่วโมง	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
1 ชั่วโมง			
2 ชั่วโมง			
3 ชั่วโมง			
4 ชั่วโมง			
5 ชั่วโมง			
6 ชั่วโมง			

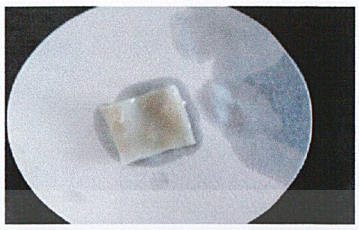
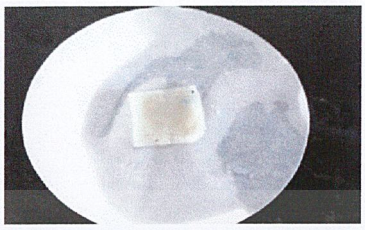
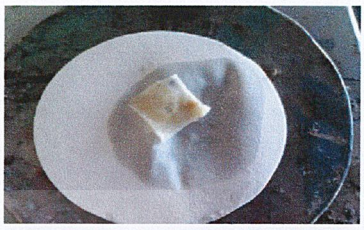
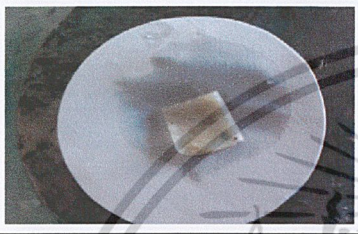
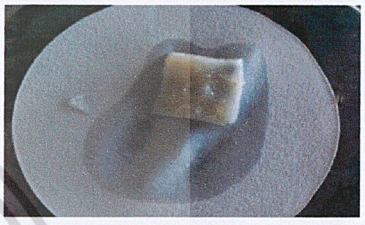
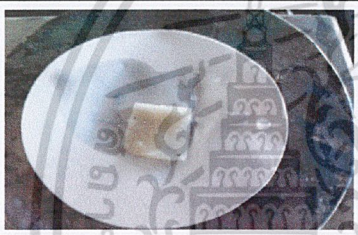
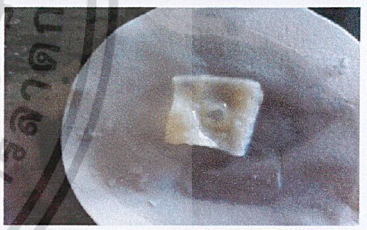
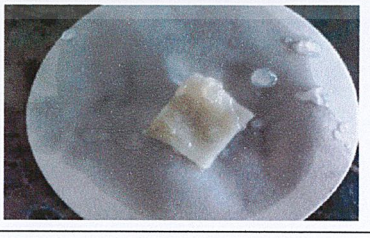
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<u>สูตร 3</u> : Starch 7g : แมงลัก 3g + KCl

ครั้งที่ / ชั่วโมง	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
1 ชั่วโมง			
2 ชั่วโมง			
3 ชั่วโมง			
4 ชั่วโมง			
5 ชั่วโมง			
6 ชั่วโมง			

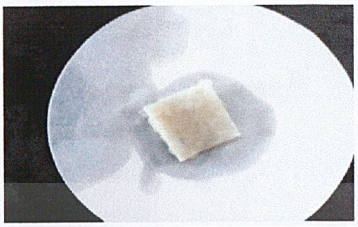
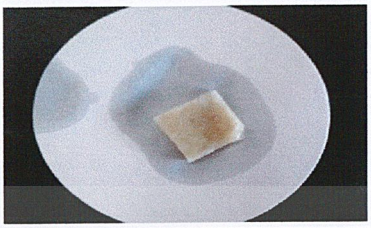
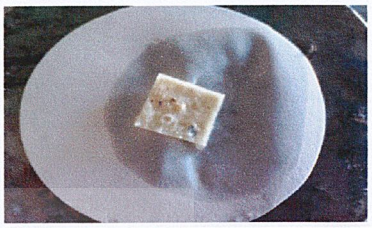
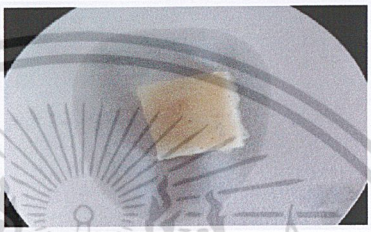
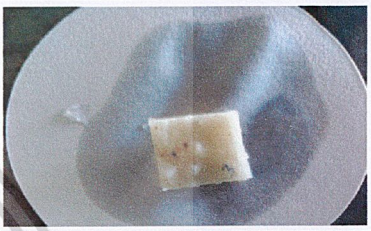
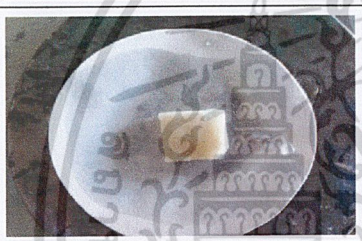
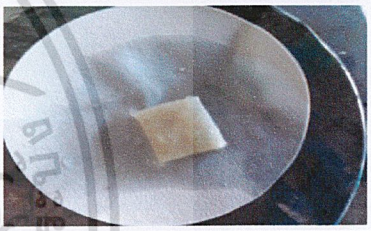
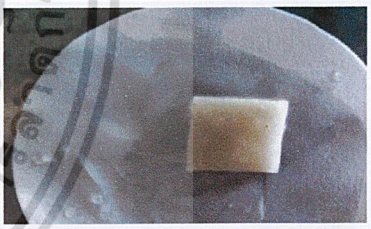
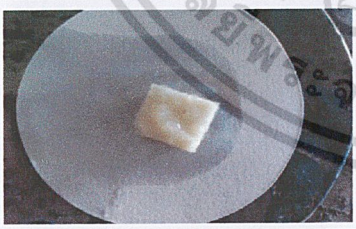
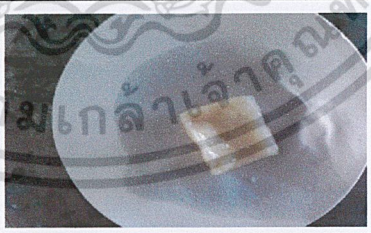
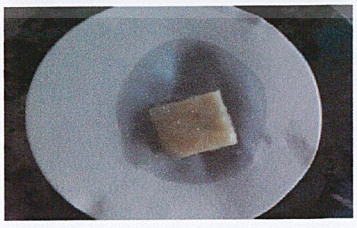
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<u>สูตร 4</u> : Starch 7g : แมงลัก 3g + $CaCl_2$

ครั้งที่ / ชั่วโมง	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
1 ชั่วโมง			
2 ชั่วโมง			
3 ชั่วโมง			
4 ชั่วโมง			
5 ชั่วโมง			
6 ชั่วโมง			

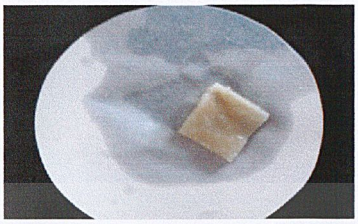
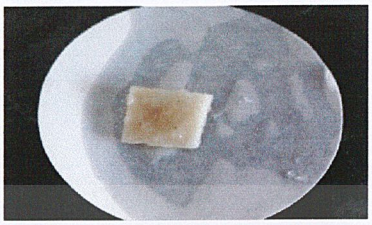
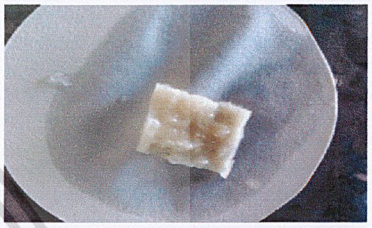
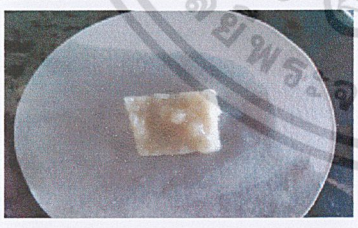
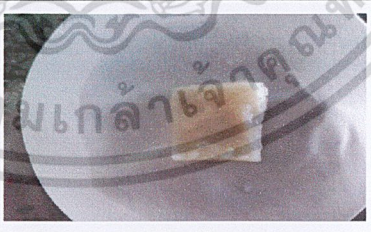
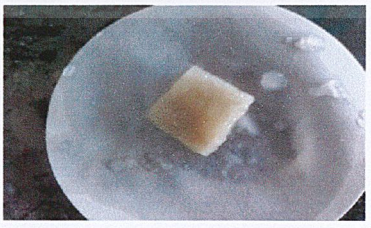
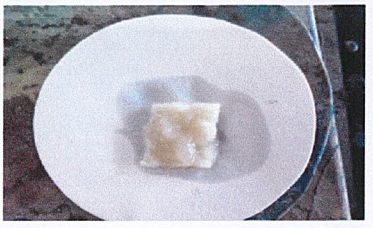
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สูตร 5 : Starch 5g : แมงลัก 5g + KCl

ครั้งที่ / ชั่วโมง	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
1 ชั่วโมง			
2 ชั่วโมง			
3 ชั่วโมง			
4 ชั่วโมง			
5 ชั่วโมง			
6 ชั่วโมง			

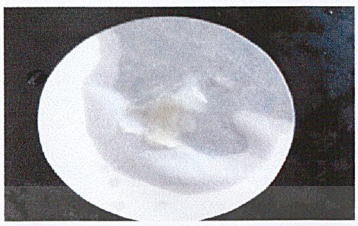
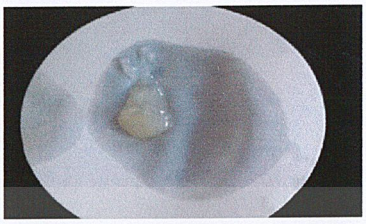
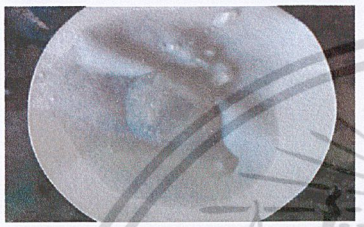
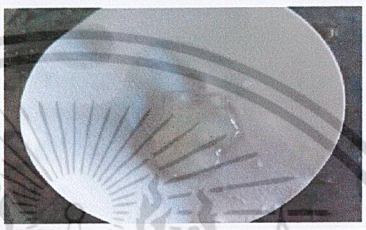
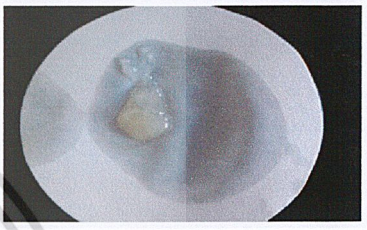
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<u>สูตร 6</u> : Starch 5g : แมงลัก 5g + $CaCl_2$

ครั้งที่ / ชั่วโมง	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
1 ชั่วโมง			
2 ชั่วโมง			
3 ชั่วโมง			
4 ชั่วโมง			
5 ชั่วโมง			
6 ชั่วโมง			

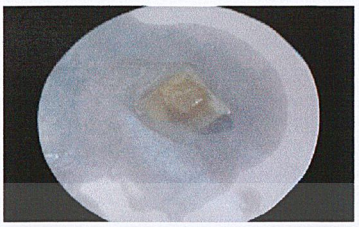
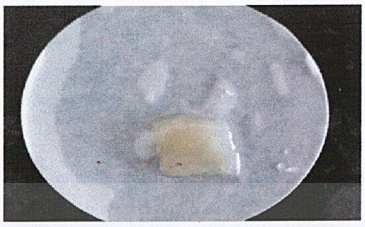
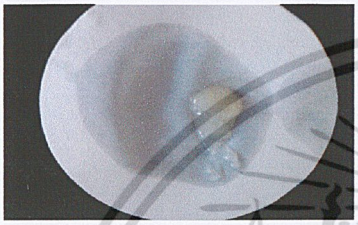
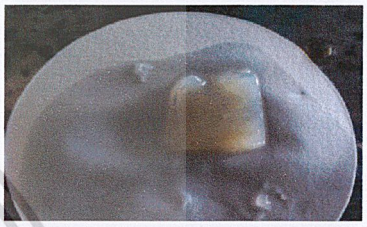
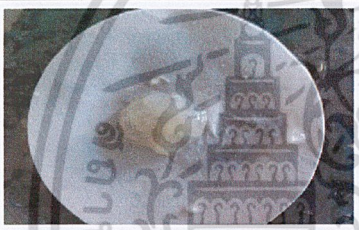
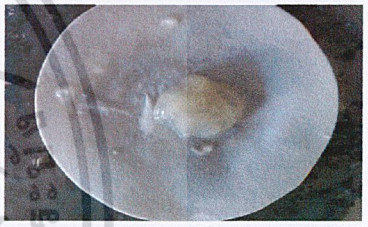
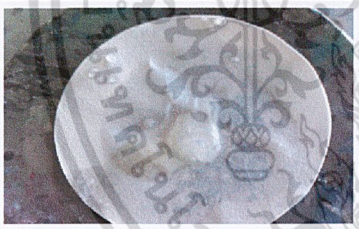
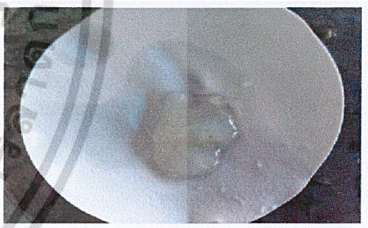
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<u>สูตร 7</u> : แมงลัก 5g + NaOH

ครั้งที่ / ชั่วโมง	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
1 ชั่วโมง			
2 ชั่วโมง			
3 ชั่วโมง			
4 ชั่วโมง	ละลายไปแล้ว	ละลายไปแล้ว	ละลายไปแล้ว เหลือเจลใสปนกับน้ำ
5 ชั่วโมง	ละลายไปแล้ว	ละลายไปแล้ว	ละลายไปแล้ว
6 ชั่วโมง	ละลายไปแล้ว	ละลายไปแล้ว	ละลายไปแล้ว

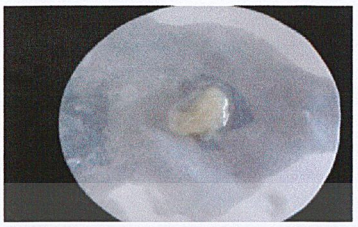
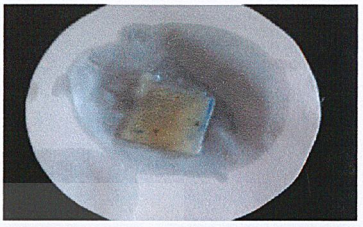
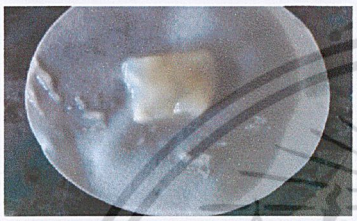
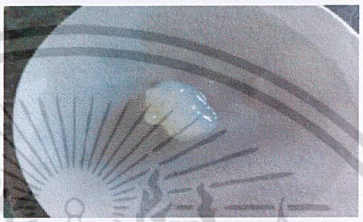
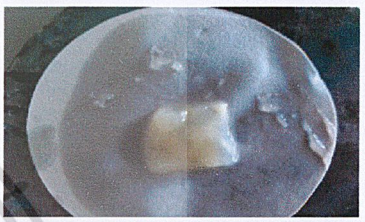
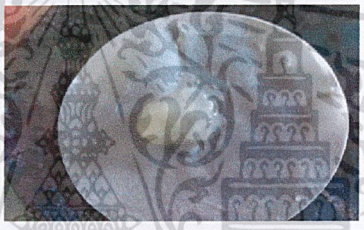
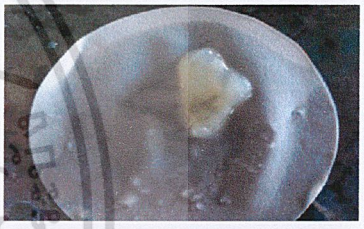
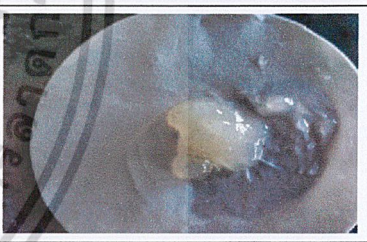
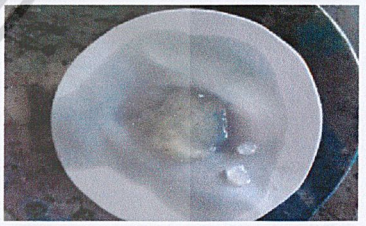
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<u>สูตร 8</u> : แมงลัก 5g + NaOH + KCl

ครั้งที่ / ชั่วโมง	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
1 ชั่วโมง			
2 ชั่วโมง			
3 ชั่วโมง			
4 ชั่วโมง		ไหลเหลวปนกับน้ำ	
5 ชั่วโมง	ละลายไปแล้ว	ละลายไปแล้ว	ละลายเปื่อยยุ่ย คล้ายทิชชูละลายน้ำ
6 ชั่วโมง	ละลายไปแล้ว	ละลายไปแล้ว	ไหลเหลวปนกับน้ำ

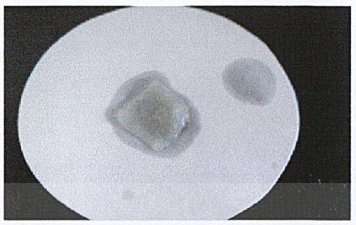
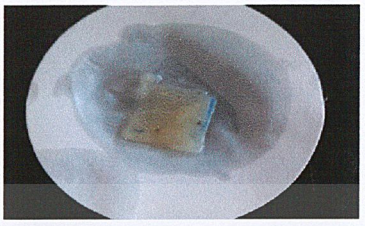
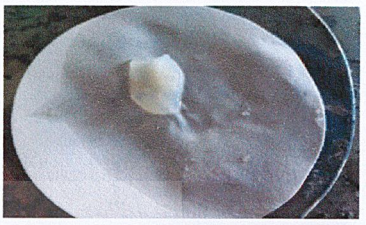
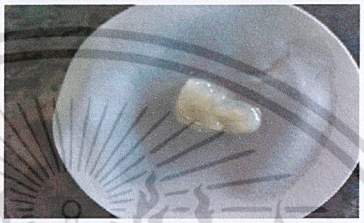
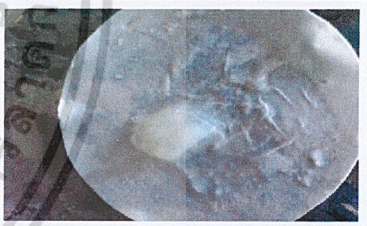
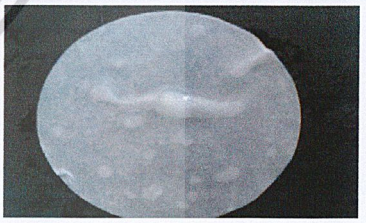
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สูตร 9 : แมงลัก 5g + NaOH + $CaCl_2$

ครั้งที่ / ชั่วโมง	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
1 ชั่วโมง			
2 ชั่วโมง			
3 ชั่วโมง			
4 ชั่วโมง			
5 ชั่วโมง	ละลายไปแล้ว		
6 ชั่วโมง	ละลายไปแล้ว		

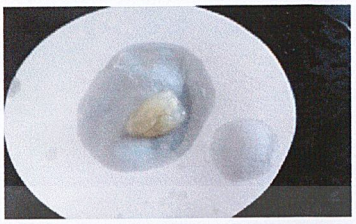
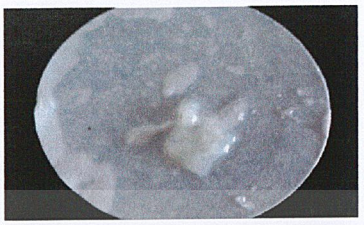
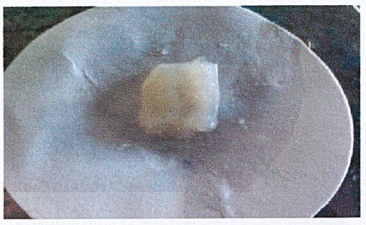
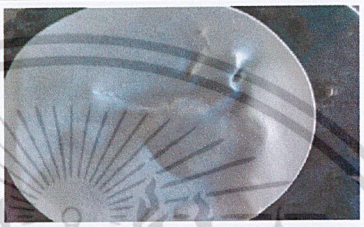
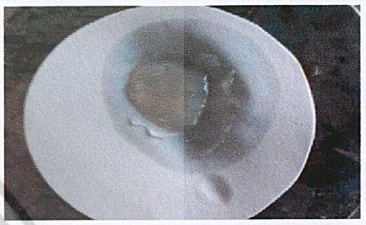
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<u>สูตร 10</u> : แมงลัก 3g + NaOH + KCl

ครั้งที่ / ชั่วโมง	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
1 ชั่วโมง			
2 ชั่วโมง			
3 ชั่วโมง			
4 ชั่วโมง			
5 ชั่วโมง	ละลายไปแล้ว	ละลายไปแล้ว	
6 ชั่วโมง	ละลายไปแล้ว	ละลายไปแล้ว	ละลายไปแล้ว

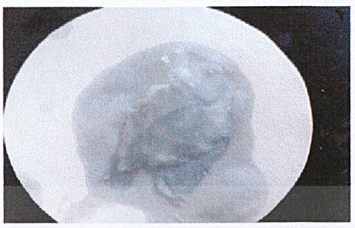
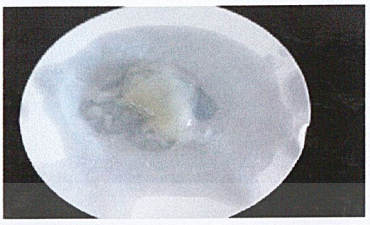
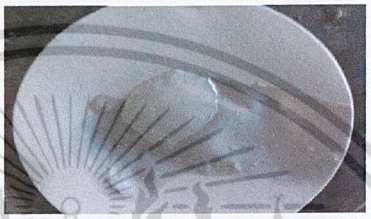
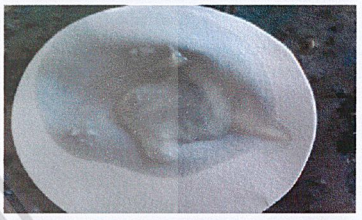
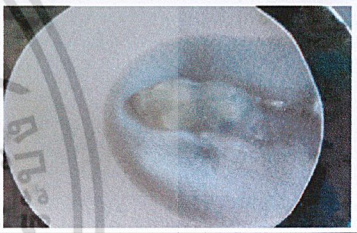
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สูตร 11 : แมงลัก 3g + NaOH + $CaCl_2$

ครั้งที่ / ชั่วโมง	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
1 ชั่วโมง			
2 ชั่วโมง			
3 ชั่วโมง			
4 ชั่วโมง	ละลายไปแล้ว		ละลายไปแล้ว
5 ชั่วโมง	ละลายไปแล้ว		ละลายไปแล้ว
6 ชั่วโมง	ละลายไปแล้ว	ละลายเปื่อยยุ่ยไปกับน้ำ	ละลายไปแล้ว

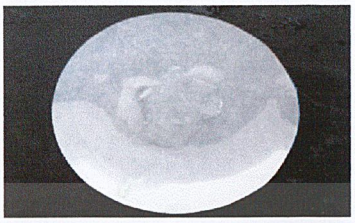
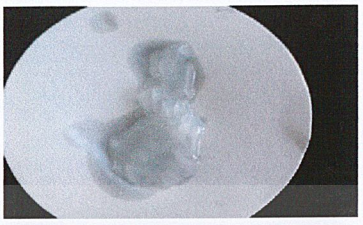
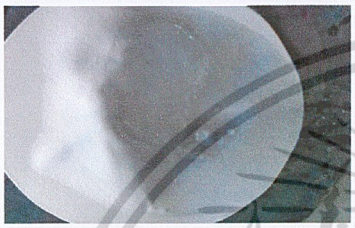
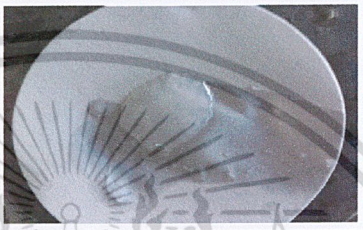
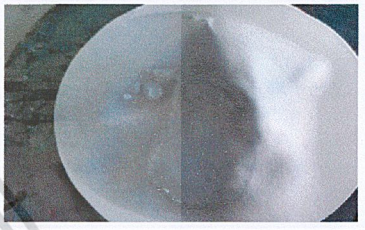
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สูตร 12 : Starch 10g + NaOH + KCl

ครั้งที่ / ชั่วโมง	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
1 ชั่วโมง			
2 ชั่วโมง			
3 ชั่วโมง			
4 ชั่วโมง		ละลายไปแล้ว	ละลายไปแล้ว
5 ชั่วโมง	ละลายไปแล้ว	ละลายไปแล้ว	ละลายไปแล้ว
6 ชั่วโมง	ละลายไปแล้ว	ละลายไปแล้ว	ละลายไปแล้ว

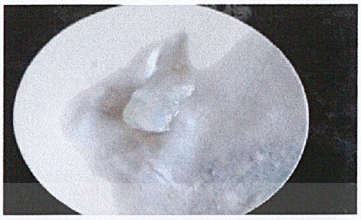
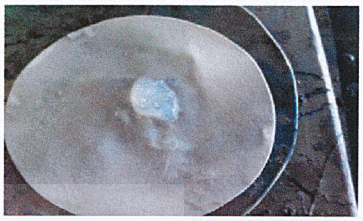
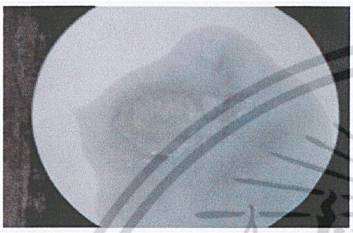
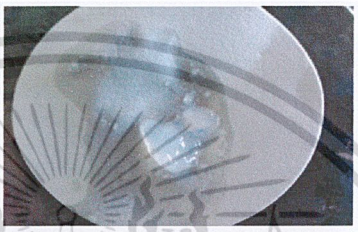
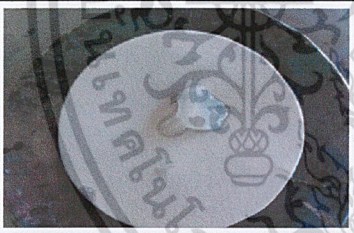
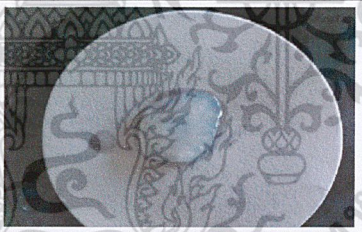
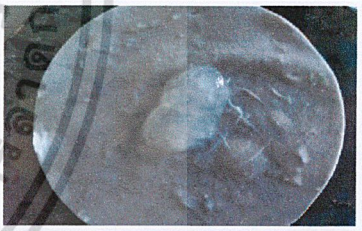
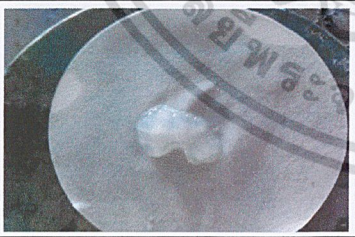
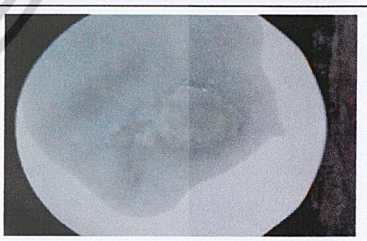
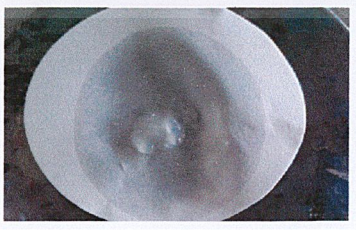
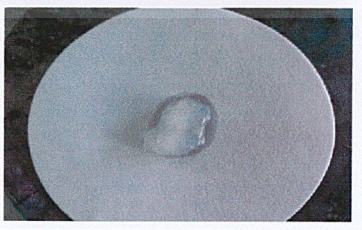
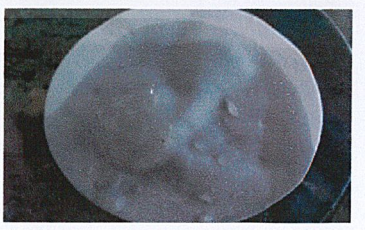
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<u>สูตร 13</u> : Starch 10g + NaOH + $CaCl_2$

ครั้งที่ / ชั่วโมง	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
1 ชั่วโมง			
2 ชั่วโมง			
3 ชั่วโมง			
4 ชั่วโมง	ละลายไปแล้ว	ละลายไปแล้ว	ละลายไปแล้ว
5 ชั่วโมง	ละลายไปแล้ว	ละลายไปแล้ว	ละลายไปแล้ว
6 ชั่วโมง	ละลายไปแล้ว	ละลายไปแล้ว	ละลายไปแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<u>สูตร 14</u> : Starch 10g

ครั้งที่ / ชั่วโมง	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
1 ชั่วโมง			
2 ชั่วโมง			
3 ชั่วโมง			
4 ชั่วโมง			
5 ชั่วโมง			
6 ชั่วโมง			

หมายเหตุ : *สูตร 15 : Starch 10g + NaOH* **ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นได้**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-3 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์การบวมน้ำ (% Swelling)

สูตรที่	% Swelling					
	1 ชั่วโมง	2 ชั่วโมง	3 ชั่วโมง	4 ชั่วโมง	5 ชั่วโมง	6 ชั่วโมง
1	629.03	1012.73	1335.39	1559.20	1296.47	1181.53
2	1514.68	1700.28	1830.77	1725.29	1612.98	1349.45
3	1263.89	1413.10	1562.39	1596.29	1640.74	1621.03
4	648.46	801.77	982.22	963.58	968.63	937.26
5	873.61	1157.99	1349.77	1448.00	1378.49	1417.97
6	1086.04	1490.00	1667.71	1631.60	1707.92	1720.64
7	2740.00	3200.00	4175.71	686.67	-	-
8	2914.28	3004.76	4528.21	3871.42	1719.05	938.09
9	1788.89	2444.97	3217.86	3277.25	2169.84	2493.65
10	1720.63	2321.43	2127.78	2641.67	627.78	-
11	2642.86	2721.43	2200.00	666.67	376.19	-
12	1817.86	1793.33	1100.95	323.81	-	-
13	1749.31	1366.90	856.41	-	-	-
14	1264.02	2505.82	2674.14	2381.15	1215.74	-

หลังจากครบ 6 ชั่วโมง แช่ชิ้นงานตัวอย่างต่อไปจนครบ 24 ชั่วโมง แล้วนำมาชั่งน้ำหนัก หาปริมาณน้ำที่สมดุล 24 ชั่วโมง ได้ดัง ***ตาราง ก-4***

หมายเหตุ : - หมายถึง ฟิล์มเกิดการละลายน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

➢ ผลการทดสอบปริมาณการบวมน้ำที่จุดสมดุล (Equilibrium water content)

ตารางที่ ก-4 แสดงค่าปริมาณการบวมน้ำที่จุดสมดุล (% Equilibrium water content) *(สูตรที่3-6)*

สูตรที่ / ชั่วโมง	% Equilibrium water content
	24 ชั่วโมง
3	1903.56
4	1072.79
5	1576.37
6	1810.39

➢ ผลการทดสอบปริมาณการคายน้ำ หรือความสามารถในเก็บน้ำ (Water retention) *(สูตรที่3-6)*

ตารางที่ ก-5 แสดงน้ำหนักฟิล์มหลังการคายน้ำที่เวลาต่างๆ

สูตร	น้ำหนักฟิล์มหลังการคายน้ำที่ 24 ชม. (g)			น้ำหนักฟิล์มหลังคายน้ำ (g)																	
				1 ชั่วโมง			2 ชั่วโมง			3 ชั่วโมง			4 ชั่วโมง			5 ชั่วโมง			6 ชั่วโมง		
3	ชิ้น 1	ชิ้น2	ชิ้น3	ชิ้น1	ชิ้น2	ชิ้น3	ชิ้น1	ชิ้น2	ชิ้น3	ชิ้น1	ชิ้น2	ชิ้น3	ชิ้น1	ชิ้น2	ชิ้น3	ชิ้น1	ชิ้น2	ชิ้น3	ชิ้น1	ชิ้น2	ชิ้น3
	0.18	0.09	0.13	2.04	1.02	1.39	1.22	0.69	1.12	0.94	0.59	0.92	0.79	0.41	0.75	0.65	0.34	0.57	0.57	0.32	0.52
4	ชิ้น 1	ชิ้น2	ชิ้น3	ชิ้น1	ชิ้น2	ชิ้น3	ชิ้น1	ชิ้น2	ชิ้น3	ชิ้น1	ชิ้น2	ชิ้น3	ชิ้น1	ชิ้น2	ชิ้น3	ชิ้น1	ชิ้น2	ชิ้น3	ชิ้น1	ชิ้น2	ชิ้น3
	0.07	0.08	0.07	0.88	0.86	2.11	0.44	0.62	0.70	0.33	0.44	0.46	0.26	0.39	0.37	0.23	0.28	0.32	0.20	0.24	0.27
5	ชิ้น 1	ชิ้น2	ชิ้น3	ชิ้น1	ชิ้น2	ชิ้น3	ชิ้น1	ชิ้น2	ชิ้น3	ชิ้น1	ชิ้น2	ชิ้น3	ชิ้น1	ชิ้น2	ชิ้น3	ชิ้น1	ชิ้น2	ชิ้น3	ชิ้น1	ชิ้น2	ชิ้น3
	0.37	0.24	0.37	2.15	2.16	1.91	1.92	2.00	1.76	1.67	1.64	1.34	1.45	1.40	1.10	1.26	1.22	0.93	1.08	1.07	0.81
6	ชิ้น 1	ชิ้น2	ชิ้น3	ชิ้น1	ชิ้น2	ชิ้น3	ชิ้น1	ชิ้น2	ชิ้น3	ชิ้น1	ชิ้น2	ชิ้น3	ชิ้น1	ชิ้น2	ชิ้น3	ชิ้น1	ชิ้น2	ชิ้น3	ชิ้น1	ชิ้น2	ชิ้น3
	0.19	0.36	0.25	2.35	2.06	1.58	1.57	1.90	1.40	1.21	1.61	1.02	1.03	1.28	0.94	0.83	1.08	0.75	0.74	0.90	0.66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-6 แสดงลักษณะของแผ่นฟิล์มหลังการคายน้ำ 24 ชั่วโมง

สูตร	ลักษณะ
3	แห้งติดกระดาษกรอง ม้วนงอ
4	แห้งสนิท ลอกร่อน ม้วนงอ
5	แห้งสนิท เหนียวติดกระดาษกรอง
6	แห้งสนิท เหนียวติดกระดาษกรอง

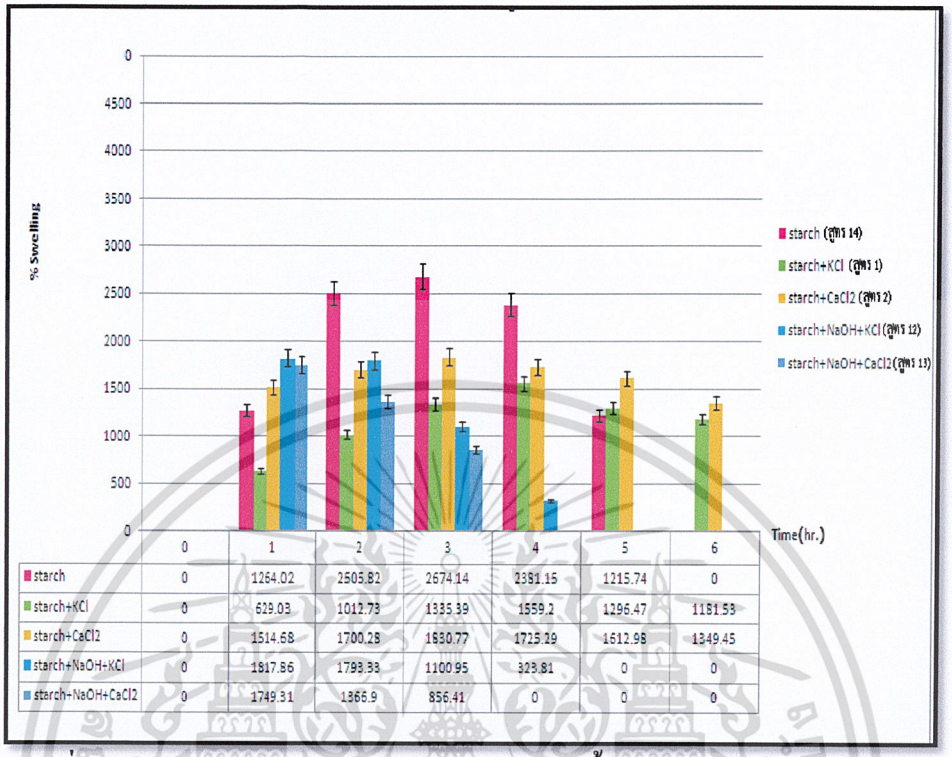
➢ ผลการทดสอบปริมาณการคายน้ำหรือความสามารถในการเก็บน้ำ (Water retention)

ตารางที่ ก-7 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์การคายน้ำหรือความสามารถในการเก็บน้ำ (% Water retention) *(สูตร 3-6)*

สูตร	% Water retention						
	1 ชั่วโมง	2 ชั่วโมง	3 ชั่วโมง	4 ชั่วโมง	5 ชั่วโมง	6 ชั่วโมง	24 ชั่วโมง
3	56.33	44.06	35.78	28.22	24.87	22.24	5.80
4	43.06	27.59	19.35	16.04	13.06	11.17	3.49
5	67.39	61.57	50.11	42.45	36.58	31.75	12.90
6	75.32	47.00	35.32	31.16	29.57	25.52	6.92

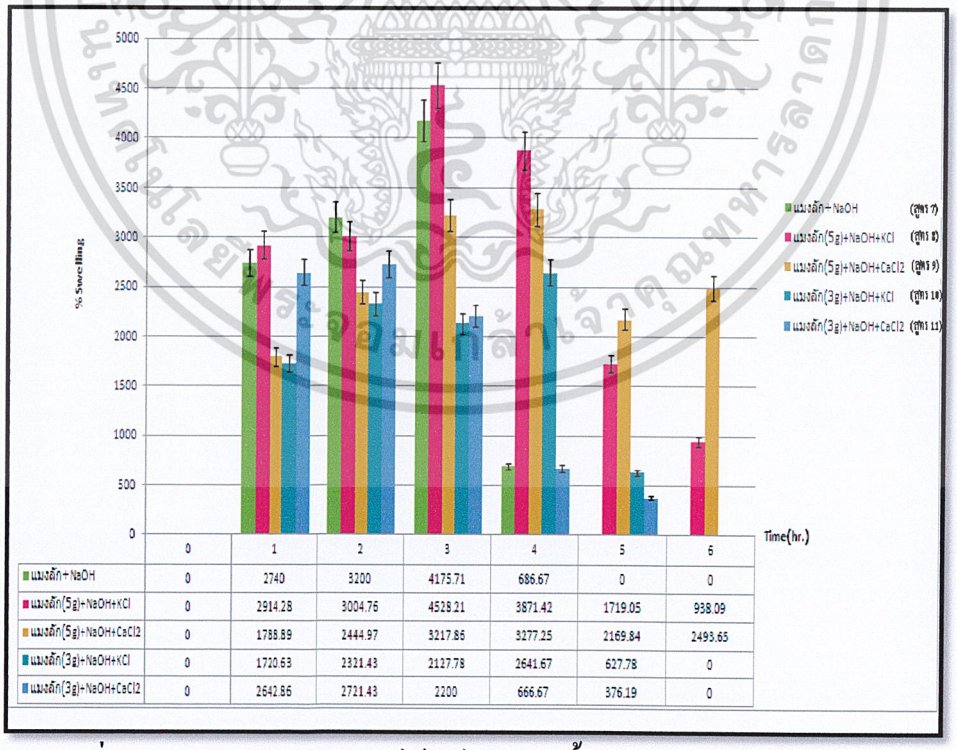
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

➢ **แผนภูมิแท่งแสดงผลการทดสอบการบวมน้ำ**



	0	1	2	3	4	5	6
starch	0	1264.02	2505.82	2674.14	2381.15	1215.74	0
starch+KCl	0	629.03	1012.73	1335.39	1559.2	1296.47	1181.53
starch+CaCl2	0	1514.68	1700.28	1830.77	1725.29	1612.98	1349.45
starch+NaOH+KCl	0	1817.86	1793.33	1100.95	323.81	0	0
starch+NaOH+CaCl2	0	1749.31	1366.9	856.41	0	0	0

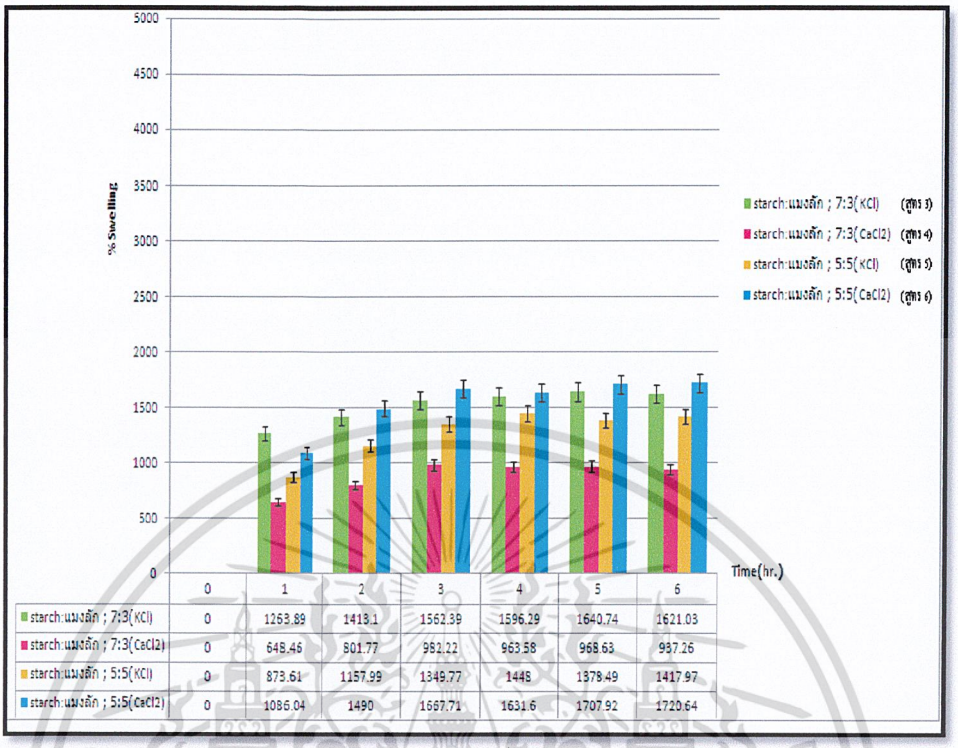
รูปที่ ก-1 แผนภูมิแท่งแสดงค่าเปอร์เซ็นต์การบวมน้ำ (% Swelling) ของฟิล์มแป้ง



	0	1	2	3	4	5	6
แมงลัก+NaOH	0	2740	3200	4175.71	686.67	0	0
แมงลัก(5g)+NaOH+KCl	0	2914.28	3004.76	4528.21	3871.42	1719.05	938.09
แมงลัก(5g)+NaOH+CaCl2	0	1788.89	2444.97	3217.86	3277.25	2169.84	2493.65
แมงลัก(3g)+NaOH+KCl	0	1720.63	2321.43	2127.78	2641.67	627.78	0
แมงลัก(3g)+NaOH+CaCl2	0	2642.86	2721.43	2200	666.67	376.19	0

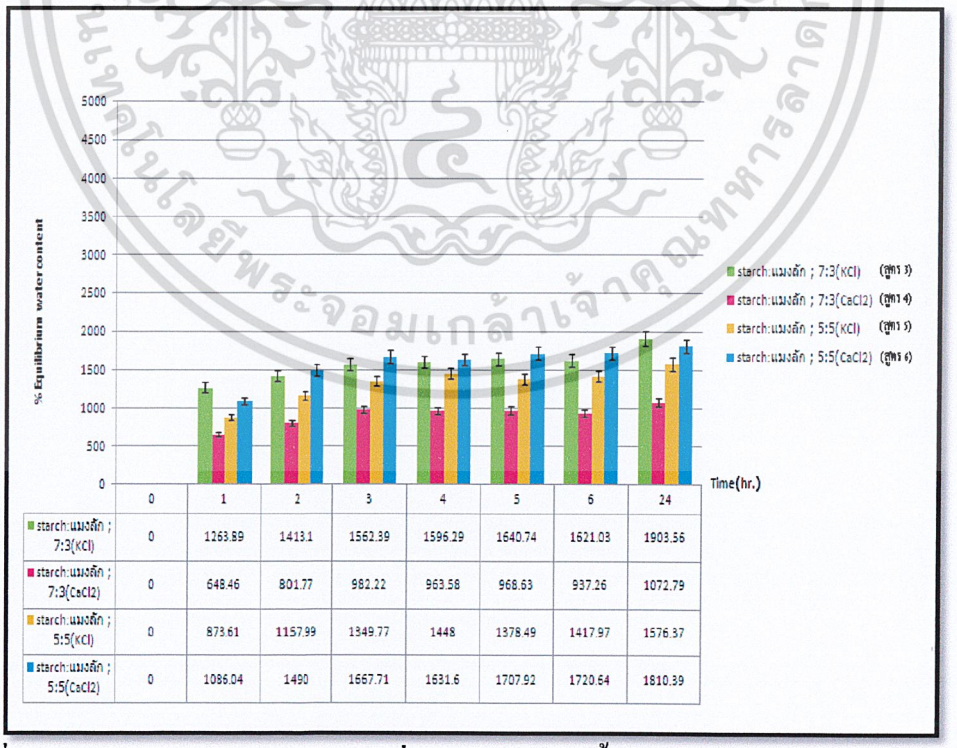
รูปที่ ก-2 แผนภูมิแสดงค่าเปอร์เซ็นต์การบวมน้ำ (% Swelling) ของฟิล์มแมงลัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



	0	1	2	3	4	5	6
starch:แมงลัก ; 7:3(KCl)	0	1263.89	1413.1	1562.39	1596.29	1640.74	1621.03
starch:แมงลัก ; 7:3(CaCl2)	0	648.46	801.77	982.22	963.58	968.63	937.26
starch:แมงลัก ; 5:5(KCl)	0	873.61	1157.99	1349.77	1448	1378.49	1417.97
starch:แมงลัก ; 5:5(CaCl2)	0	1086.04	1490	1667.71	1631.6	1707.92	1720.64

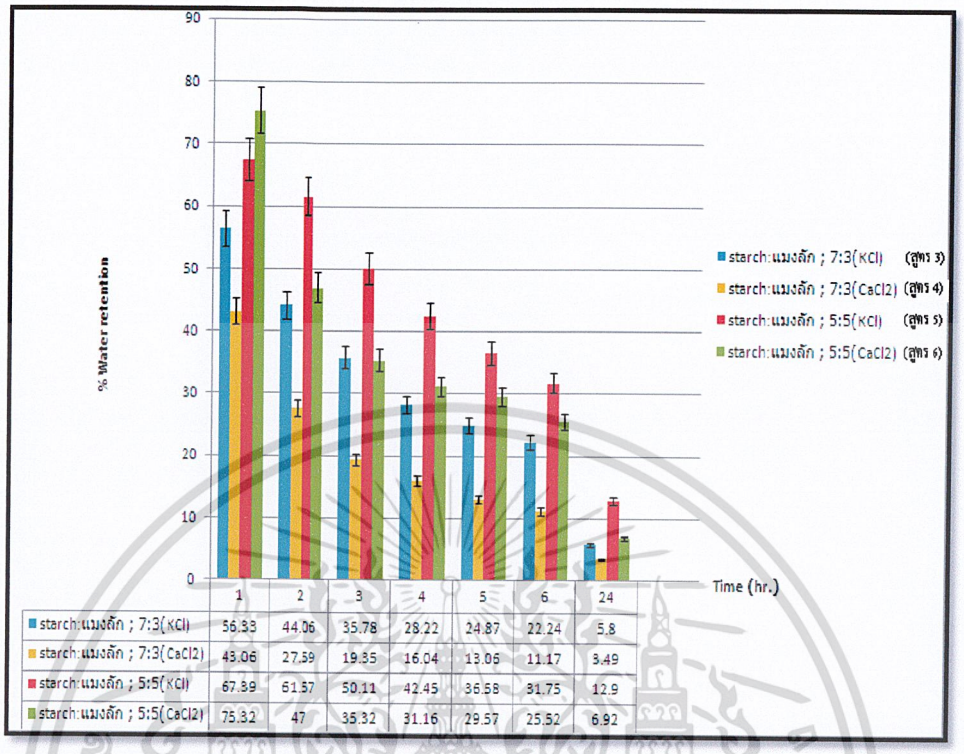
รูปที่ ก-3 แผนภูมิแสดงค่าเปอร์เซ็นต์การบวมน้ำ (% Swelling) ของฟิล์มแป้งผสมแมงลัก ในอัตราส่วนต่างกัน ที่เติมไอออนโลหะเชื่อมโยง



	0	1	2	3	4	5	6	24
starch:แมงลัก ; 7:3(KCl)	0	1263.89	1413.1	1562.39	1596.29	1640.74	1621.03	1903.56
starch:แมงลัก ; 7:3(CaCl2)	0	648.46	801.77	982.22	963.58	968.63	937.26	1072.79
starch:แมงลัก ; 5:5(KCl)	0	873.61	1157.99	1349.77	1448	1378.49	1417.97	1576.37
starch:แมงลัก ; 5:5(CaCl2)	0	1086.04	1490	1667.71	1631.6	1707.92	1720.64	1810.39

รูปที่ ก-4 แผนภูมิแสดงค่าเปอร์เซ็นต์จุดอิ่มตัวในการบวมน้ำ (% Equilibrium water content) ของฟิล์มแป้งผสมแมงลักในอัตราส่วนต่างกัน ที่เติมไอออนโลหะเชื่อมโยง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



	1	2	3	4	5	6	24
starch:แมงลัก ; 7:3(KCl)	56.33	44.06	35.78	28.22	24.87	22.24	5.8
starch:แมงลัก ; 7:3(CaCl2)	43.06	27.59	19.35	16.04	13.06	11.17	3.49
starch:แมงลัก ; 5:5(KCl)	67.89	61.57	50.11	42.45	36.58	31.75	12.9
starch:แมงลัก ; 5:5(CaCl2)	75.32	47	35.32	31.16	29.57	25.52	6.92

รูปที่ ก-5 แผนภูมิแสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความสามารถในการเก็บน้ำของฟิล์มแป้งผสมแมงลัก ในอัตราส่วนต่างกัน ที่ เติมไอออนโลหะเชื่อมโยง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

อินฟราเรดสเปกโทรเมทรี FTIR

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. อินฟราเรดสเปกโทรเมทรี FTIR

ตารางที่ ข-1 ความถี่ของการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของหมู่ฟังก์ชันที่สามัญบางชนิด

Type of Vibration			Frequency (cm^{-1})	Intensity
C-H	Alkanes	(stretching)	3000-2850	s
		$-CH_3$ (bending)	1450 and 1375	m
		$-CH_2-$ (bending)	1465	m
=C-H	Alkenes	(stretching, $R-CH=CH_2$)	3040-3010	m
		(stretching, cis R-CH=CH-R')	3040-3010	
		(stretching, trans R-CH=CH-R')	3040-3010	
		(stretching, $R_1R_2C=CH_2$)	3095-3075	
		(stretching, $R_1R_2C=CH-R_3$)	3040-3010	
		(bending, $R-CH=CH_2$)	990, 910	s
		(bending, $R_1R_2C=CH_2$)	890	
		(bending, cis R-CH=CH-R')	728-675	
		(bending, trans R-CH=CH-R')	970-960	
Ar-H	Ar	(stretching)	3150-3050	s
		(bending, monosubstituted)	770-730	s
			710-690	
		(bending, 1,2-disubstituted)	770-735	
		(bending, 1,3-disubstituted)	810-750	
		(bending, 1,4-disubstituted)	860-800	
≡C-H	Alkynes		3300	s
O=C-H	Aldehyde	(stretching)	2900-2700	m
C=C	Alkene	(stretching, nonconjugation)	1680-1625	m-w
		(stretching, C=C or C=O conjugation)	1600	
	Aromatic		1600 and 1475	m-w

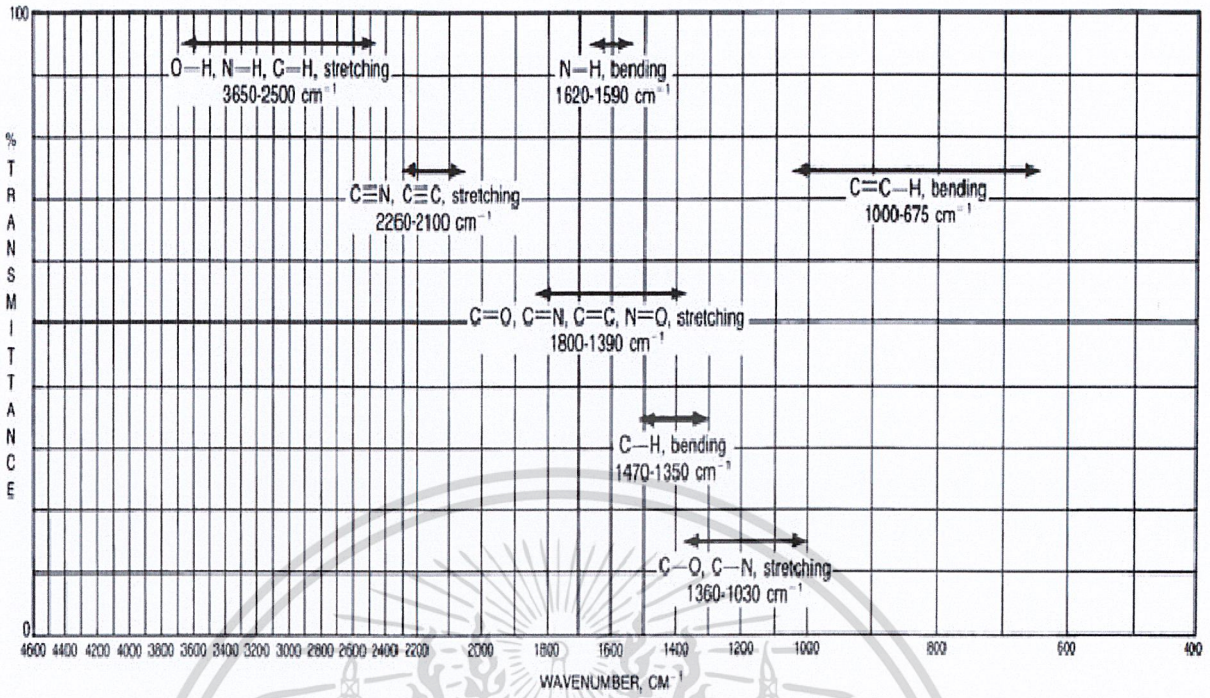
ที่มา : ธีรยุทธ วิไลวัลย์ และ วรวรรณ พันธุมนาวิน ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (พ.ศ. 2548)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-1 (ต่อ) ความถี่ของการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของหมู่ฟังก์ชันที่สามัญบางชนิด

Type of Vibration			Frequency (cm^{-1})	Intensity
C≡C	Alkyne	(stretching, terminal)	2140-2100	m-w
		(stretching, internal)	2260-2190	
C=O	Aldehyde	(stretching, saturated or alicyclic)	1740-1730	s
		(stretching, C=C conjugation)	1705-1680	
		(stretching, aryl conjugation)	1715-1695	
	Ketone	(stretching, saturated or alicyclic)	1725-1705	s
		(stretching, C=C conjugation)	1690-1675	
		(stretching, aryl conjugation)	1715-1695	
	Carboxylic Acid	(stretching, saturated or alicyclic)	1725-1700	s
		(stretching, C=C or aryl conj.)	1705-1680	
	Ester	(stretching, saturated or alicyclic)	1750-1735	s
		(stretching, C=C or aryl conjugation)	1730-1717	
	Amide	(stretching)	1670-1640	s
	Anhydride	(stretching)	1810 and 1760	s
	Acid chloride	(stretching)	1800	s
C-O	Ethers, Esters, Carboxylic acids, Anhydrides	(stretching)	1300-1000	s
	Alcohols	(stretching, primary alcohol)	1050	
		(stretching, secondary alcohol)	1100	
		(stretching, tertiary alcohol)	1150	
	Phenols	(stretching)	1200	
O-H	Alcohols, Phenols	(stretching, Free OH)	3650-3600	m
		(stretching, H-bonded OH)	3500-3200	m
		(bending, 1° and 2° alcohols)	1350-1260	
		(bending, 3° alcohol and phenol)	1410-1310	
	Carboxylic acids	(stretching, H-bonded OH)	3400-2400	m
N-H	1° and 2° Amines and Amides	(stretching, Free NH)	3500-3100	m
		(bending)	1640-1550	m-s
C-N	Amines	(stretching)	1350-1000	m-s
C=N	Imines and Oximes	(stretching)	1690-1640	w-s

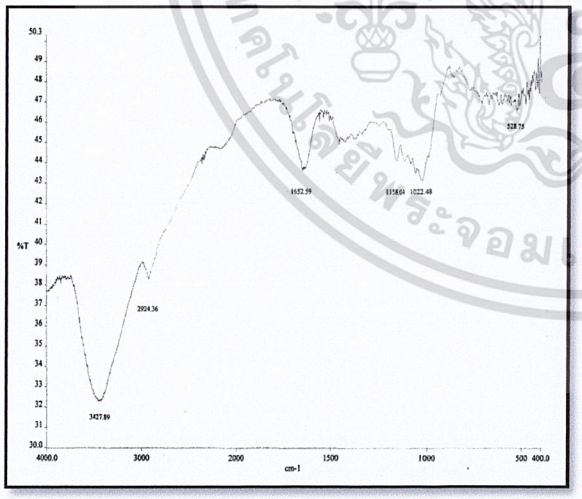
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



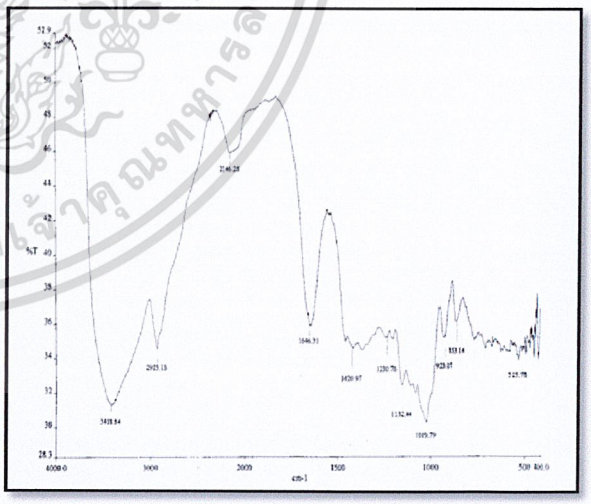
รูปที่ ข-1 แสดงความถี่ของการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของหมู่ฟังก์ชันสามัญบางชนิด

2. ภาพสเปคตรัมของแผ่นฟิล์ม

2.1 ฟิล์มแป้ง

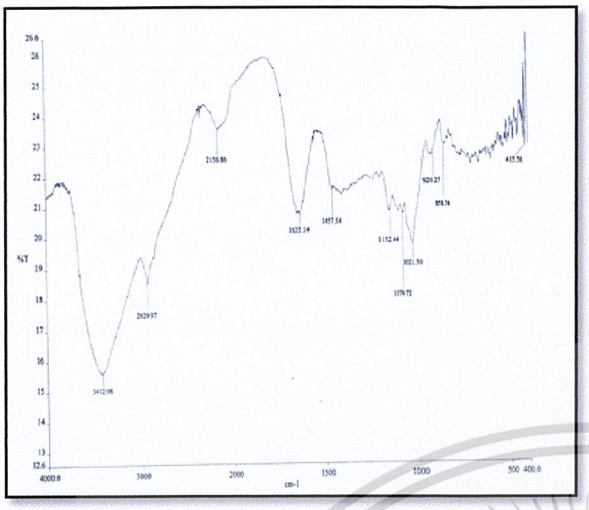


รูปที่ ข-2 สเปคตรัมของฟิล์มแป้ง

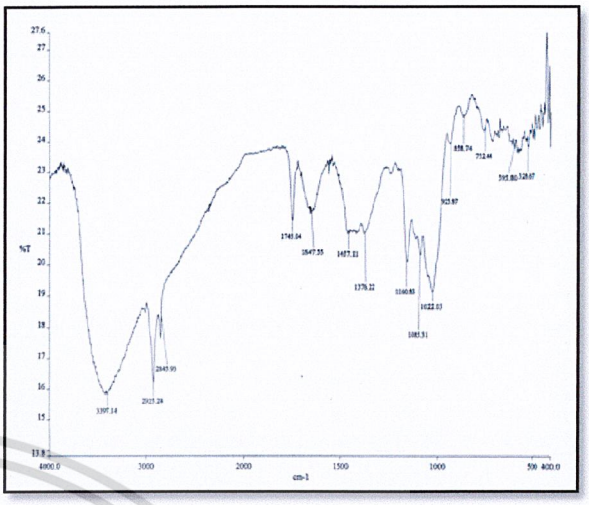


รูปที่ ข-3 สเปคตรัมของฟิล์มแป้งที่เชื่อมโยงด้วย KCl

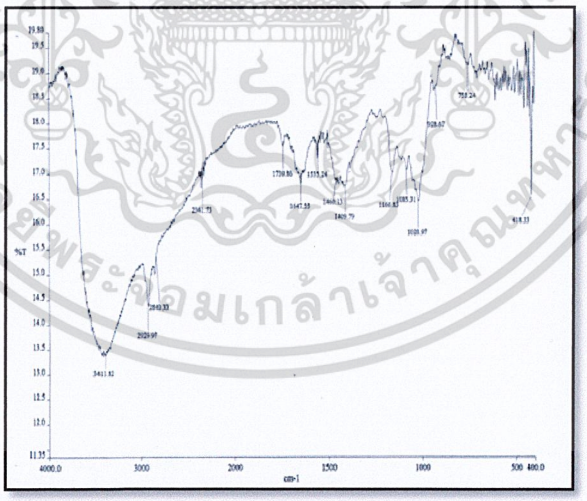
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข-4 สเปคตรัมของฟิล์มแป้งที่เชื่อมโยงด้วย $CaCl_2$



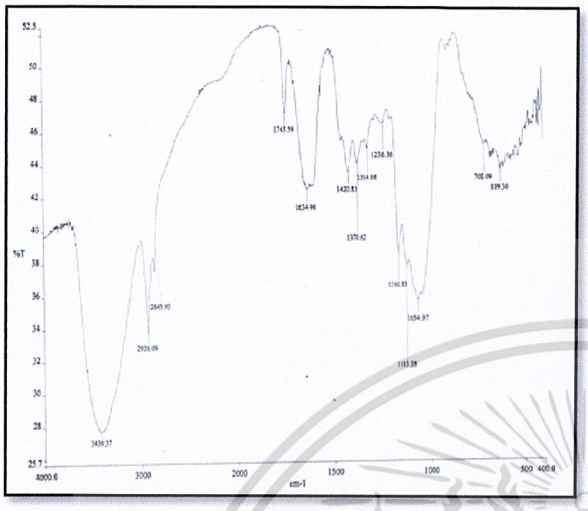
รูปที่ ข-5 สเปคตรัมของฟิล์มแป้งที่เติมเบส NaOH และเชื่อมโยงด้วย KCl



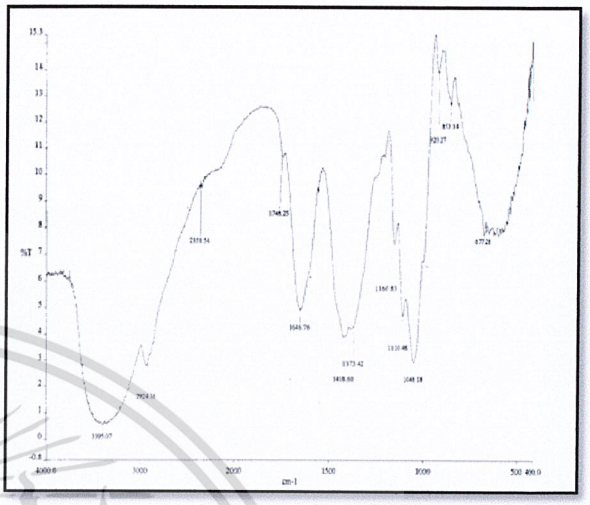
รูปที่ ข-6 สเปคตรัมของฟิล์มแป้งที่เติมเบส NaOH และเชื่อมโยงด้วย $CaCl_2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

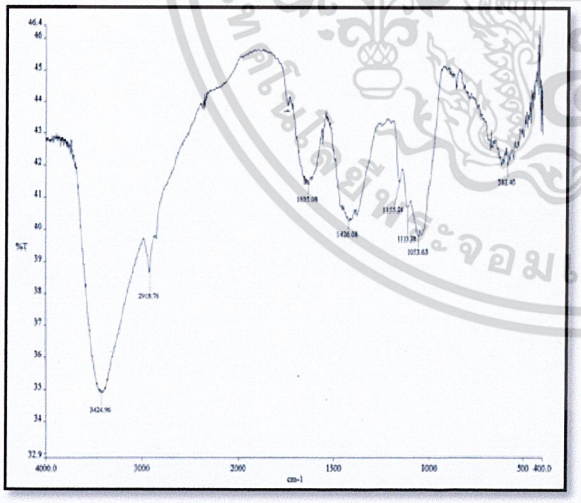
2.2 ฟิล์มแมงลัก



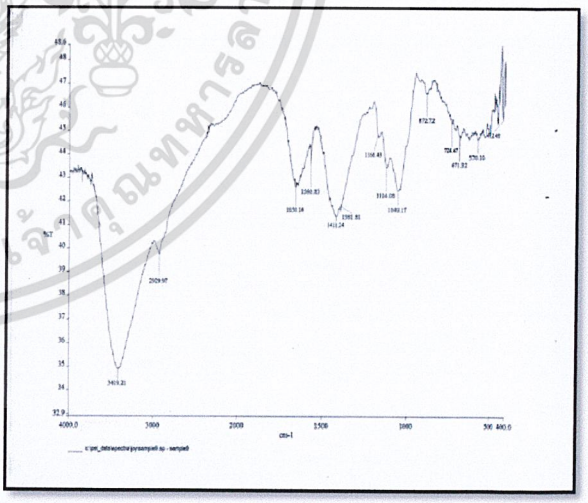
รูปที่ ข-7 สเปคตรัมของฟิล์มแมงลัก



รูปที่ ข-8 สเปคตรัมของฟิล์มแมงลักที่เติมเบส NaOH

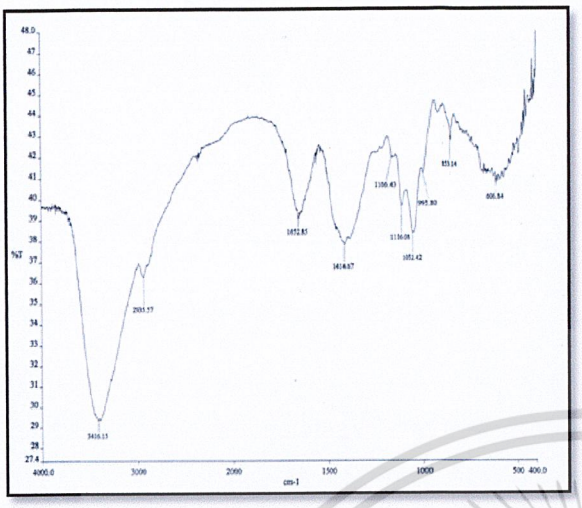


รูปที่ ข-9 สเปคตรัมของฟิล์มแมงลัก 5g ที่เติมเบส NaOH และเชื่อมโยงด้วย KCl

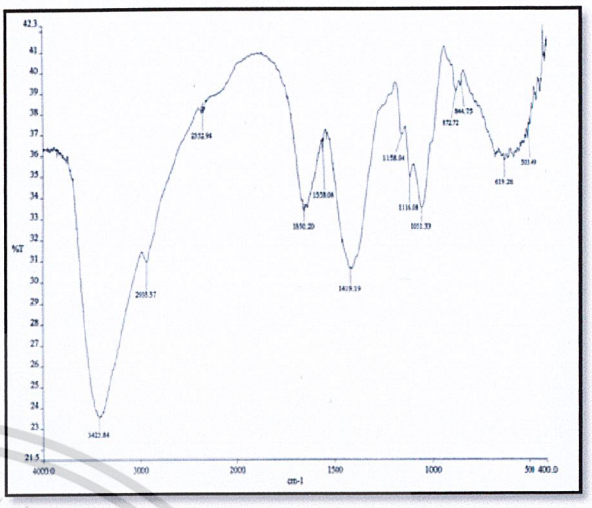


รูปที่ ข-10 สเปคตรัมของฟิล์มแมงลัก 5g ที่เติมเบส NaOH และเชื่อมโยงด้วย $CaCl_2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

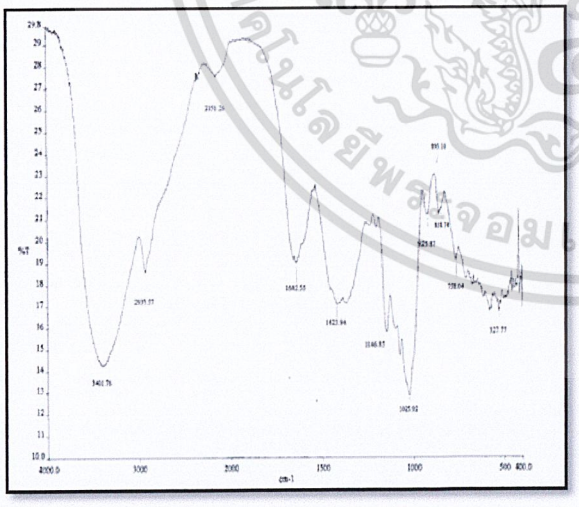


รูปที่ ข-11 สเปคตรัมของฟิล์มแมงลัก 3g ที่เติมเบส NaOH และเชื่อมโยงด้วย KCl

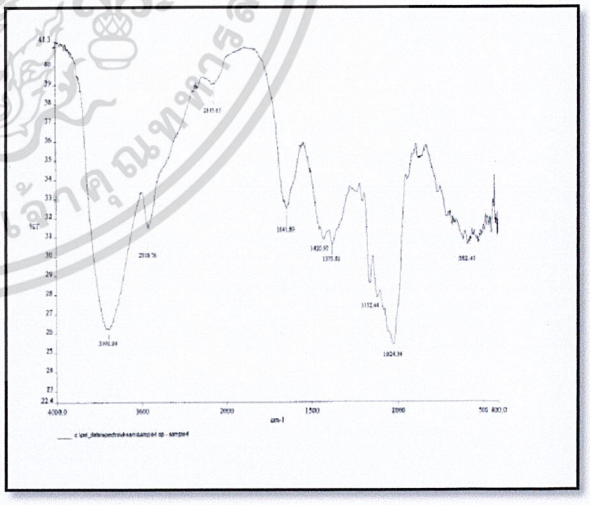


รูปที่ ข-12 สเปคตรัมของฟิล์มแมงลัก 3g ที่เติมเบส NaOH และเชื่อมโยงด้วย $CaCl_2$

2.3 ฟิล์มแป้งผสมแมงลัก

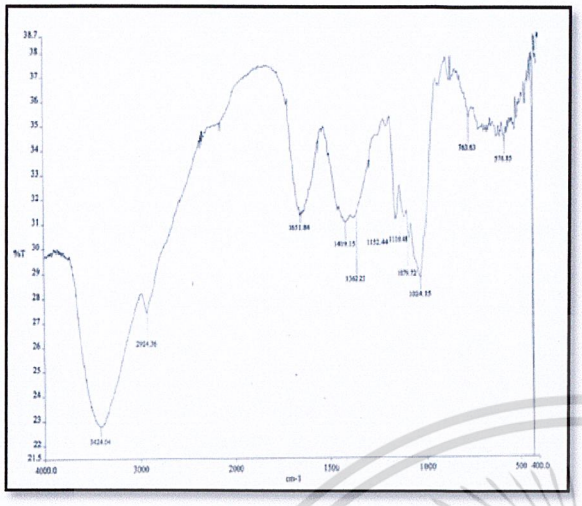


รูปที่ ข-13 สเปคตรัมของฟิล์มแป้ง 7g : แมงลัก 3g ที่เติมเบส NaOH และเชื่อมโยงด้วย KCl

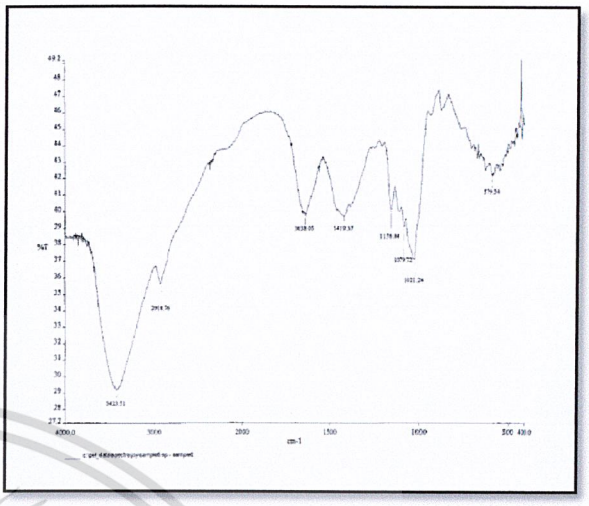


รูปที่ ข-14 สเปคตรัมของฟิล์มแป้ง 7g : แมงลัก 3g ที่เติมเบส NaOH และเชื่อมโยงด้วย KCl

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข-15 สเปคตรัมของฟิล์มแป้ง 5g : แมงลัก 5g ที่เติมเบส NaOH และเชื่อมโยงด้วย KCl



รูปที่ ข-16 สเปคตรัมของฟิล์มแป้ง 5g : แมงลัก 5g ที่เติมเบส NaOH และเชื่อมโยงด้วย $CaCl_2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal testing machine)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค-1 บันทึกผลการทดสอบสมบัติเชิงกล

สูตร	Tensile strength (MPa)			% Elongation at break		
1	1.6230	1.6170	-	18.27	14.93	11.65
2	0.4190	0.6426	0.1714	0		
3	2.4750	2.1910	-	13.38	16.33	-
4	3.3540	-	-	16.17	-	-
5	3.8290	4.6000	-	20.68	16.75	-
6	1.8140	2.1830	-	10.93	17.63	-
7	2.5360	3.5320	-	35.76	49.98	42.61
8	6.6920	6.7220	-	15.28	18.85	14.65
9	3.9210	5.5030	-	58.04	81.28	74.86
10	3.2470	4.4520	-	38.96	28.08	34.22
11	2.6200	3.8360	4.6610	24.20	27.13	20.34
12	×			×		
13	0.2641	0.2095	0.4192	0		
14	0.1624	0.4320	0.8125	0		
15	×			×		
16	×			×		

หมายเหตุ : × หมายถึง ไม่สามารถนำมาทดสอบได้

- หมายถึง ค่าที่คลาดเคลื่อน จึงตัดออก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค-2 แสดงค่าเฉลี่ยและเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของ Tensile strength และ % Elongation at break

สูตร	Tensile strength (MPa)	% Elongation at break
1	1.62 ± 0.00	14.95 ± 3.31
2	0.41 ± 0.24	0
3	2.33 ± 0.20	14.85 ± 2.08
4	3.35 ± 0.00	16.17 ± 0.00
5	4.21 ± 0.20	18.71 ± 2.77
6	1.99 ± 0.26	14.28 ± 4.73
7	3.03 ± 0.70	42.78 ± 7.11
8	6.71 ± 0.02	16.26 ± 2.26
9	4.71 ± 0.12	71.39 ± 12.00
10	3.85 ± 0.85	33.75 ± 5.45
11	3.71 ± 1.03	23.89 ± 3.40
12	×	×
13	2.30 ± 0.11	0
14	0.47 ± 0.33	0
15	×	×
16	×	×

หมายเหตุ : × หมายถึง ไม่สามารถนำมาทดสอบได้

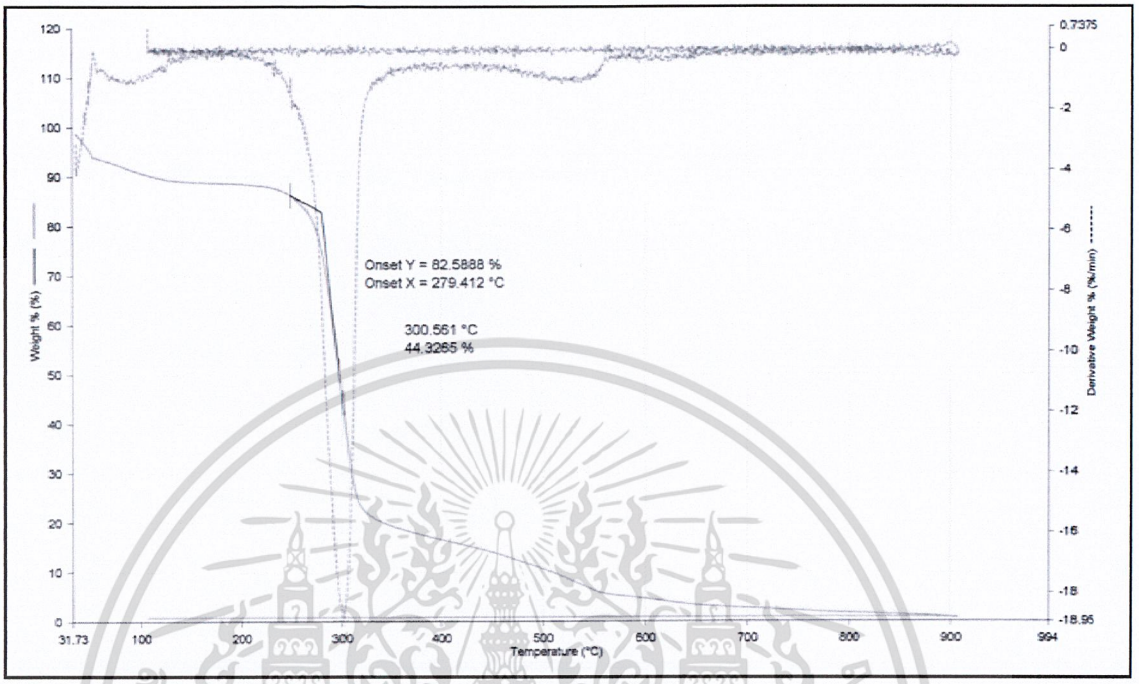
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง

ผลของเทอร์โมแกรม TGA

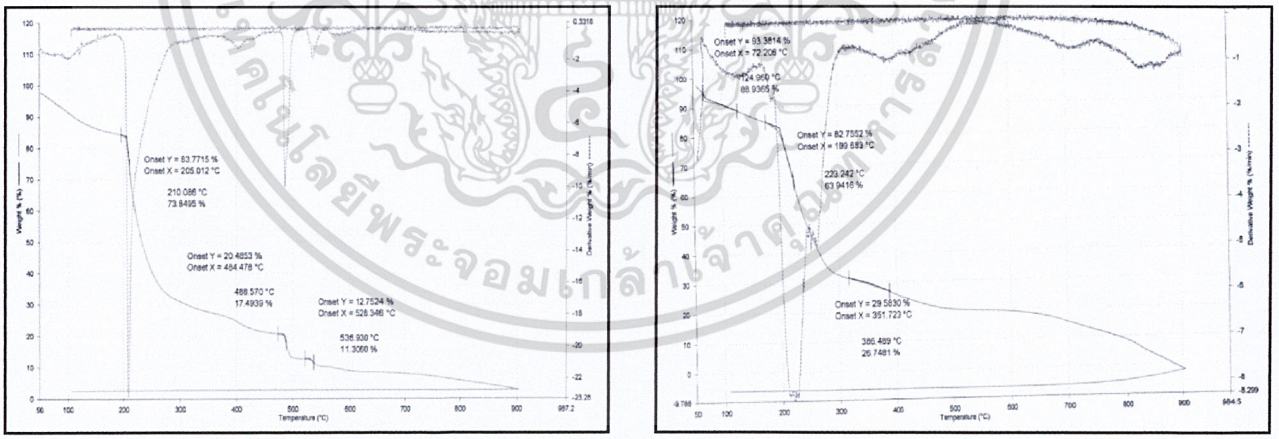
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ฟิล์มแป้งมันสำปะหลัง



รูปที่ ง-1 เทอร์โมแกรม TGA ของฟิล์มแป้ง

2. ฟิล์มแป้งในสภาวะต่างๆ



(ก) **(ข)**

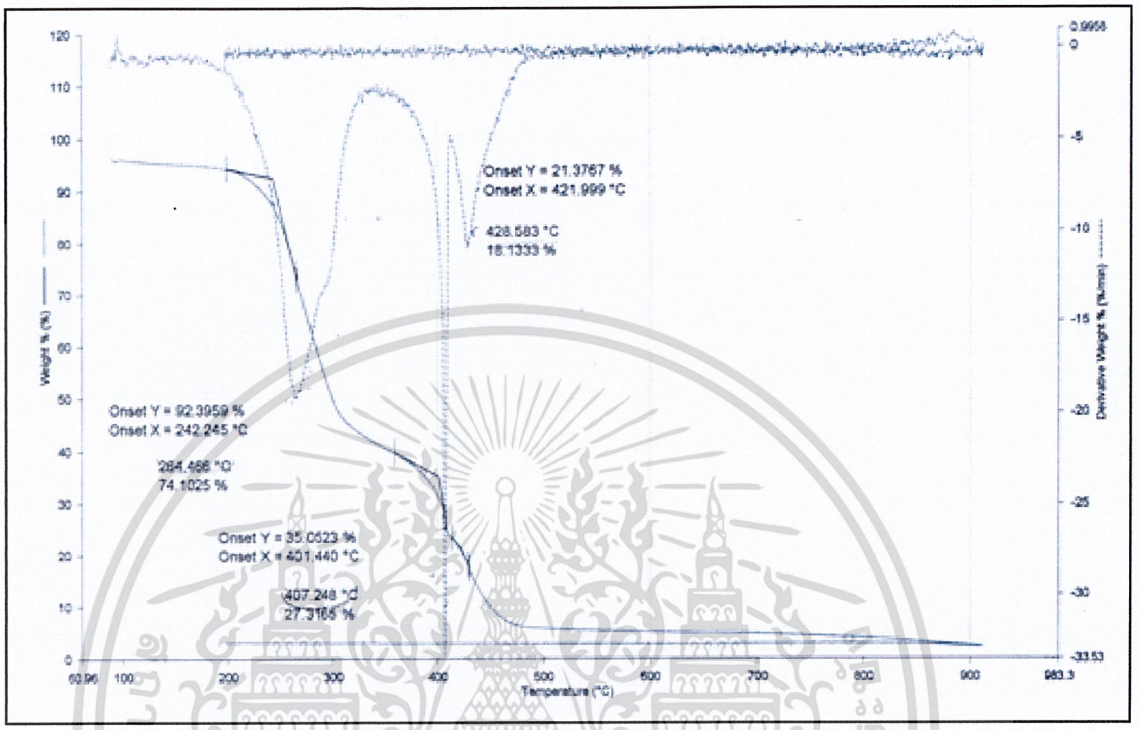
รูปที่ ง-2 เทอร์โมแกรม TGA ของฟิล์มแป้งในสภาวะต่างๆ

(ก) ฟิล์มแป้งที่เติมสารละลาย 5%KCl

(ข) ฟิล์มแป้งที่เติมสารละลาย 5%$CaCl_2$

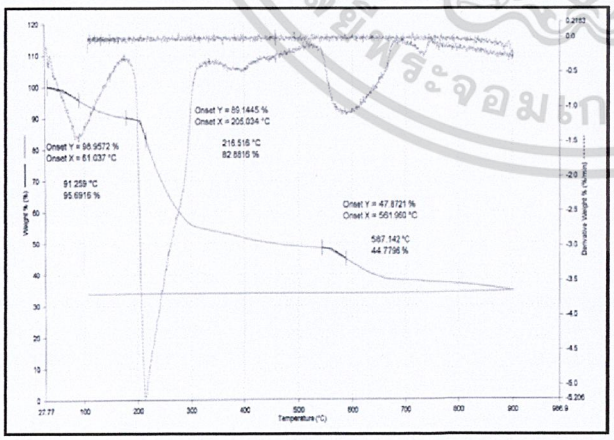
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ฟิล์มแมงลัก

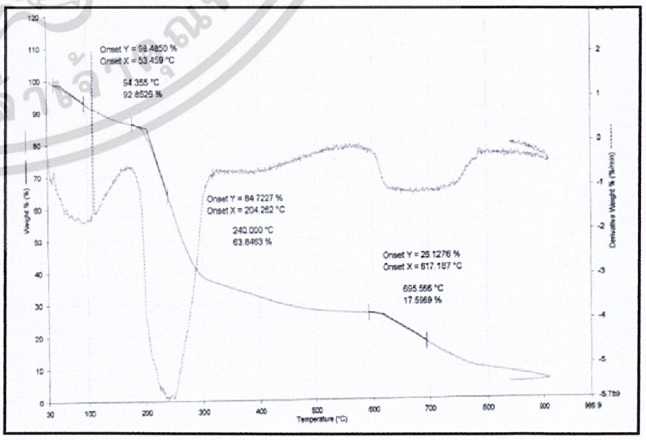


รูปที่ ง-3 เทอร์โมแกรม TGA ของฟิล์มแมงลัก

4. ฟิล์มแป้งผสมแมงลัก

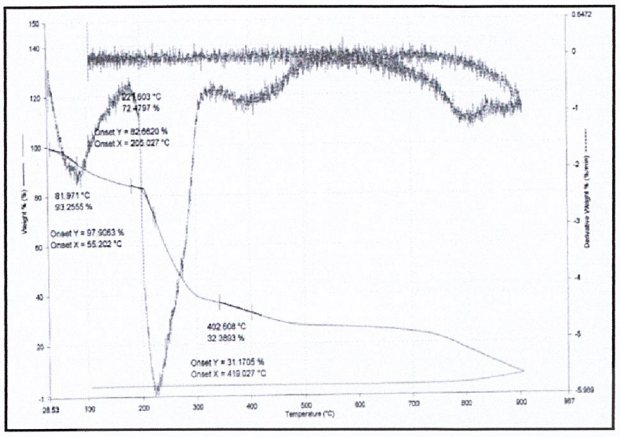


(ก)

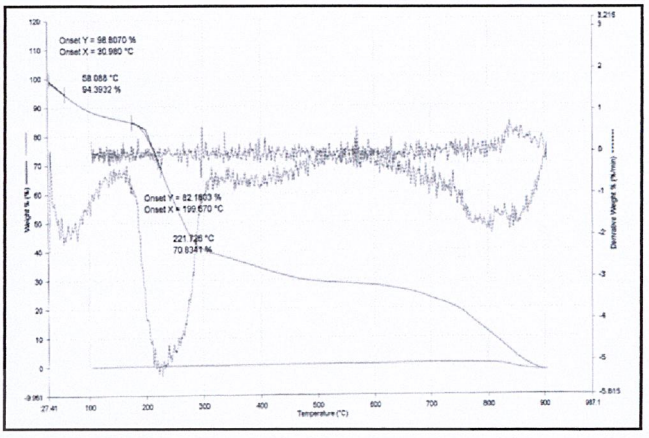


(ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค)



(ง)

รูปที่ ง-4 เทอร์โมแกรม TGA ของฟิล์มแป้งผสมแมงลักที่อัตราส่วนต่างๆ

(ก) ฟิล์มแป้งผสมแมงลักในอัตราส่วน 7:3 ที่เติมสารละลาย 5%NaOH โดยใช้ 5%KCl

(ข) ฟิล์มแป้งผสมแมงลักในอัตราส่วน 7:3 ที่เติมสารละลาย 5%NaOH โดยใช้ 5%$CaCl_2$

(ค) ฟิล์มแป้งผสมแมงลักในอัตราส่วน 5:5 ที่เติมสารละลาย 5%NaOH โดยใช้ 5%KCl

(ง) ฟิล์มแป้งผสมแมงลักในอัตราส่วน 5:5 ที่เติมสารละลาย 5%NaOH โดยใช้ 5%$CaCl_2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้