

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การเตรียมวัสดุดูดซับยิ่งยวดจากแป้งมันสำปะหลังผสมคาร์บอกซี
เมททิลเซลลูโลส โดยใช้ *N,N*-Methylenebisacrylamide เป็นสารก่อ
พันธะเชื่อมโยง

PREPARATION OF SUPERABSORBENT MATERIAL FROM
CASSAVA STARCH/CMC BY USING
N, N- METHYLENEBISACRYLAMIDE AS CROSSLINKER



T117185

ณัฐนิชา

วิเชียร

ณัฐพล

ปาปะเถ

ทติยาภา

ประมวลทรัพย์

เลขที่.....
เลขทะเบียน..... 117185
วัน,เดือน,ปี..... 19 ก.ค. 2554

b..... 103.11.915
i.....

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม

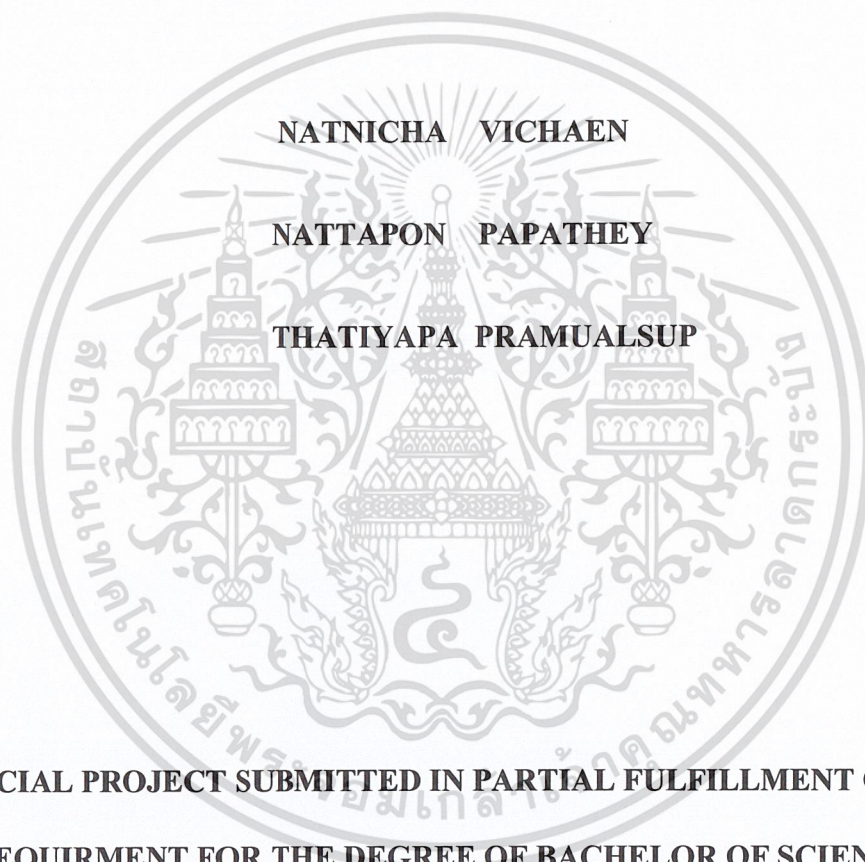
คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2553

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**PREPARATION OF SUPERABSORBENT MATERIAL FROM
CASSAVA STARCH/CMC BY USING
N, N- METHYLENEBISACRYLAMIDE AS CROSSLINKER**



**A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE
REQUIRMENT FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE**

IN INDUSTRIAL CHEMISTRY

FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

ACADEMIC YEAR 2010

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ

การเตรียมวัสดุดูดซับยิ่งยวดจากแป้งมันสำปะหลังผสมคาร์บอกซีเมทิล เซลลูโลสโดยใช้ *N,N*-Methylenebisacrylamide เป็นสารก่อพันธะเชื่อมโยง

Preparation of superabsorbent material from Cassava

Starch/CMC by using *N,N*-Methylenebisacrylamide as crosslinker

ชื่อนักศึกษา

นางสาว ณัฐนิชา วิเชียร

นาย ณัฐพล ปาปะเถ

นางสาว ทศยาภา ประมวลทรัพย์

ปริญญา

วิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชา

เคมีอุตสาหกรรม

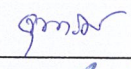
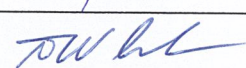
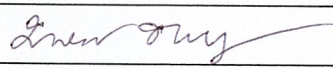
ปีการศึกษา

2553

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร.มาลินี ชัยสุภกิจสินธุ์

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้ับโครงการพิเศษเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรม ประจำปีการศึกษา 2553

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
รศ.ดร.จุฑารัตน์ ปรัชญาวารากร	
รศ.ดร.สมศักดิ์ วรมงคลชัย	
รศ.ดร.มาลินี ชัยสุภกิจสินธุ์	

ลิขสิทธิของคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การเตรียมวัสดุคูกัดขัวยิงยวดจากแป้งมันสำปะหลังผสมคาร์บอกซีเมททิลเซลลูโลสโดยใช้ <i>N,N</i> -Methylenebisacrylamide เป็นสารก่อพันธะเชื่อมโยง
ชื่อนักศึกษา	นางสาว ณัฐนิชา วิเชียร นาย ณัฐพล ปาปะเถ นางสาว ทศยาภา ประมวลทรัพย์
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต
สาขาวิชา	เคมีอุตสาหกรรม
ปีการศึกษา	2553
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร.มาลินี ชัยศุกกิจสินธุ์

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาวัสดุคูกัดขัวยิงยวดประกอบด้วยแป้งมันสำปะหลังและซีเอ็มซีโดยใช้ *N,N*-methylenebisacrylamide เป็นสารก่อพันธะเชื่อมโยง แอม โมเนียมเปอร์ซัลเฟตเป็นสารริเริ่มปฏิกิริยา สารละลายผสมโดยใช้ใบพัดกวนเชิงกลที่อุณหภูมิ 65-70°C फिल्मของ S:CMC เตรียมโดยการเทของผสมลงในแม่พิมพ์พลาสติก และอบที่อุณหภูมิ 50°C ในตู้อบ

ผลการทดลองพบว่า फिल्म S:CMC อัตราส่วนโดยน้ำหนัก 3:7, MBA และ APS 0.095 กรัม หลังแช่น้ำ 6 ชั่วโมงจะให้ फिल्मที่คงรูปร่างและดูดน้ำได้ 368% มีของแข็งที่เหลืออยู่ 43% फिल्मที่เดิม MBA 2 เท่ามีการดูดน้ำลดลงแต่ของแข็งที่เหลืออยู่สูงขึ้น FTIR spectrum แสดงพีกที่เลขคลื่น 1744 cm^{-1} และ 1525 cm^{-1} ซึ่งเป็นของหมู่คาร์บอนิล (C=O) และหมู่ -NH bending ในเอไมด์ของ MBA เทอโมแกรมของ TGA ยืนยันว่ามีพันธะเชื่อมโยงเกิดขึ้นใน फिल्मเนื่องจากมีอุณหภูมิการสลายตัวสูงขึ้น

Special Project	Preparation of superabsorbent material from Cassava Starch/CMC by using <i>N, N</i> -Methylenebisacrylamide as crosslinker
Name	Miss.Natnicha Vichaen Mr.Nattapol Papathey Miss.Thatiyapa Pramualsup
Degree	Bachelor of Science
Department	Chemistry
Academic Year	2010
Special Project advisor	Assoc.Prof.Dr.Malinee Chaisupakitsin

ABSTRACT

This research studied on preparation of superabsorbent material composed of cassava starch (S) and carboxymethylcellulose (CMC) by using *N,N*-methylenebisacrylamide (MBA) as and crosslinking agent. Ammonium persulfate (APS) was used as an initiator. Mechanical stirrer was used for preparing the solution blend, at 65-70 °C. To obtain the S:CMC blend films, the mixture was cast into a plastic mold and placed in an oven at 50 °C until dry.

The experimental result found that film S:CMC weight ratio of 3:7, 0.095 of MBA and APS gave stable film and 368% water absorption after immersion under water 6 h. The gel fraction was 43%. Film containing double amount of MBA showed lower water absorption but higher gel fraction. FTIR spectrum showed peak of carbonyl at 1744 cm⁻¹ and peak of -NH bending at 1525 cm⁻¹ which corresponding to amide bond of MBA. TGA thermogram confirmed that there is crosslinking occurred in the file due to higher decomposition temperature.

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จได้ด้วยความอนุเคราะห์ของบุคคลหลายท่าน คณะผู้จัดทำงานวิจัยขอกราบ
ขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.มาลินี ชัยศุกกิจสินธุ์ ที่ได้กรุณาสละเวลาเป็นอาจารย์ที่ปรึกษา
งานวิจัยและได้ให้ความช่วยเหลือในการให้คำแนะนำและตรวจแก้ไขในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
ให้สำเร็จลงได้ด้วยดี

กราบขอบพระคุณท่าน รองศาสตราจารย์ ดร.จุฑารัตน์ ปรัชญาวรากร และรอง
ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ วรรณมงคลชัย ที่กรุณารับเป็นกรรมการงานวิจัย และได้สละเวลามา
ดำเนินการสอบงานวิจัยนี้ ทั้งได้กรุณาให้คำแนะนำและชี้แนะแนวทางงานวิจัยนี้มีความสมบูรณ์
มากยิ่งขึ้น และขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่
ได้เอื้อเฟื้อสถานที่ อุปกรณ์ และข้อมูลสำหรับทำงานวิจัย

ท้ายที่สุดคณะผู้จัดทำงานวิจัยขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่ได้อบรมสั่งสอนและ
ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ ให้ความช่วยเหลือในการให้คำแนะนำงานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลงด้วยดี

นางสาว ณัฐนิชา วิเชียร
นาย ณัฐพล ปาปะเถ
นางสาว ทศยาภา ประมวลทรัพย์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	VIII
สารบัญตาราง	XI
คำอธิบายสัญลักษณ์และอักษรย่อ	XIII
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตโครงการวิจัย	3
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 ไฮโดรเจล	4
2.1.1 กระบวนการเตรียมไฮโดรเจล	4
2.1.2 สมบัติของไฮโดรเจล	5
2.1.3 การนำไปใช้งาน	5
2.2 คาร์โบไฮเดรต	10
2.3 แป้งและอนุพันธ์ของแป้ง	14
2.3.1 โครงสร้างทางเคมีของแป้ง	15
2.3.2 ชนิดของแป้ง	15
2.3.3 สมบัติของแป้ง	18

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.3.4 แป้งมันสำปะหลัง	26
2.4 คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (CMC)	29
2.5 พอลิเมอร์ผสม (Polymer Blend)	30
2.5.1 ความสามารถในการละลายเข้ากันได้ และความสามารถในการผสมเข้ากันได้	32
2.5.2 เคมีของพอลิเมอร์ผสม	33
2.5.3 สมบัติโดยทั่วไป	34
2.6 กลีเซอรอล	35
2.7 สารเคมี	
2.7.1 Ammonium persulfate	37
2.7.2 <i>N,N</i> -Methylenebisacrylamide	38
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	39
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย	
3.1 สารเคมี อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย	43
3.2 วิธีการทดลอง <u>ตอนที่ 1</u> : การศึกษาปริมาณของแป้งมันสำปะหลัง และคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่มีผลต่อสมบัติของฟิล์ม	
1. ขั้นตอนการเตรียมแผ่นฟิล์มไฮโดรเจล	45
2. การวิเคราะห์สมบัติของไฮโดรเจล	46
2.1. ลักษณะทางกายภาพของฟิล์มไฮโดรเจล	46
2.2 ทดสอบการวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชัน	46
2.3 ทดสอบสมบัติการบวมน้ำ	46
2.4 หาสัดส่วนของแข็งที่ไม่ละลาย	47
2.5 ทดสอบสมบัติเชิงกล	47
2.6 ทดสอบสมบัติทางความร้อน	47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3. ขั้นตอนการเตรียมแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลที่มี การปรับปรุงปริมาณสารก่อพันธะเชื่อม โยง	48
4. การวิเคราะห์สมบัติของไฮโดรเจล	48

บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

วิเคราะห์ผลทดลองตอนที่ 1: การศึกษาปริมาณของแป้งมันสำปะหลังและ

คาร์บอกซีเมททิลเซลลูโลสที่มีผลต่อสมบัติของฟิล์ม

4.1 ลักษณะทางกายภาพของฟิล์มไฮโดรเจล	49
4.2 การวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FT-IR	52
4.3 ผลการทดสอบสมบัติการบวมน้ำ	60
4.3.1 ผลการทดสอบการบวมน้ำทุก 1 ชั่วโมง เป็นเวลา 6 ชั่วโมง	63
4.3.2 ผลการทดสอบการบวมน้ำที่เวลา 24 ชั่วโมง	65
4.4 ผลการหาสัดส่วนของแข็งที่ไม่ละลาย	66
4.5 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกล	67
4.6 วิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA	68

วิเคราะห์ผลทดลองตอนที่ 2: ศึกษาผลของปริมาณสารเชื่อม โยง

N,N-Methylenebisacrylamide (MBA) ที่มีผลต่อสมบัติของฟิล์ม

4.7 ลักษณะทางกายภาพของฟิล์มไฮโดรเจล	70
4.8 การวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FT-IR	71
4.9 ผลการทดสอบสมบัติการบวมน้ำ	72
4.9.1 ผลการทดสอบการบวมน้ำทุก 1 ชั่วโมง เป็นเวลา 6 ชั่วโมง	73
4.9.2 ผลการทดสอบการบวมน้ำที่เวลา 24 ชั่วโมง	74
4.10 ผลการหาสัดส่วนของแข็งที่ไม่ละลาย	75
4.11 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกล	76

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.12 วิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA	77
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการวิจัย	78
5.2 ข้อเสนอแนะ	83
เอกสารอ้างอิง	84
ภาคผนวก ก	88
ภาคผนวก ข	102
ภาคผนวก ค	106



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา VII นี้ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 แสดงโครงสร้างของไฮโดรเจล	4
รูปที่ 2.2 แสดงการบวมตัวของ Physical hydrogel	6
รูปที่ 2.3 แสดงโครงสร้างและการบวมตัวของไฮโดรเจล	6
รูปที่ 2.4 แสดงลักษณะของน้ำที่อยู่ในไฮโดรเจล	7
รูปที่ 2.5 แสดงไฮโดรเจลขณะแห้ง (ซ้าย) และไฮโดรเจลที่เกิดการพองตัวในน้ำ	8
รูปที่ 2.6 แสดงรูพรุนที่เกิดขึ้นของไฮโดรเจลด้วย SEM	8
รูปที่ 2.7 แสดงโครงสร้างของ dextran	9
รูปที่ 2.8 แสดงการเกิด dextran hydrogels	9
รูปที่ 2.9 โครงสร้างของกลีเซอรอลดีไฮด์และไดไฮดรอกซีอะซิโตน	10
รูปที่ 2.10 โครงสร้างและตัวอย่างการเรียกชื่อน้ำตาลโคแซคคาไรด์	12
รูปที่ 2.11 โครงสร้างอย่างง่ายของแป้งและเซลลูโลส	13
รูปที่ 2.12 ลักษณะ SEM ของแป้งชนิดต่างๆ	14
รูปที่ 2.13 โครงสร้างของอะไมโลส	15
รูปที่ 2.14 ภาพจำลองการจับตัวของอะไมโลสกับสารอินทรีย์	16
รูปที่ 2.15 โครงสร้างของอะไมโลเพคติน	17
รูปที่ 2.16 การพองตัวของเม็ดแป้ง	18
รูปที่ 2.17 การเปลี่ยนแปลงของเม็ดแป้งขณะให้ความร้อน	20
รูปที่ 2.18 DSC Thermogram ของแป้ง	22
รูปที่ 2.19 การคืนตัวของแป้งสุก	23
รูปที่ 2.20 การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งเมื่อให้ความร้อน	25
รูปที่ 2.21 รูปแบบความหนืดของแป้งสุกชนิดต่างๆ	25
รูปที่ 2.22 โครงสร้างทางเคมีของแป้ง	27
รูปที่ 2.23 ลักษณะ Birefringence ของแป้งมันสำปะหลัง	28
รูปที่ 2.24 การพองตัวของแป้งชนิดต่างๆ	29
รูปที่ 2.25 SEM ของแป้งมันสำปะหลัง	29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา VIII ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 2.26 โครงสร้างทางเคมีของคาร์บอกซีเมททิลเซลลูโลส	30
รูปที่ 2.27 โครงสร้างของกลีเซอรอล	36
รูปที่ 4.1 สเปกตรัมของ <i>N,N</i> -Methylenebisacrylamide (MBA)	52
รูปที่ 4.2 สเปกตรัมของแป้งมันสำปะหลัง (Cassava Starch)	53
รูปที่ 4.3 สเปกตรัมของสเปกตรัมของแป้งที่ไม่มีสารก่อพันธะเชื่อมโยงกับแป้งที่เกิดการเชื่อมโยง	54
รูปที่ 4.4 สเปกตรัมของคาร์บอกซีเมททิลเซลลูโลส (CMC)	55
รูปที่ 4.5 สเปกตรัมของคาร์บอกซีเมททิลเซลลูโลสที่ไม่มีสารก่อพันธะเชื่อมโยงกับคาร์บอกซีเมททิลเซลลูโลสที่เกิดการเชื่อมโยง	56
รูปที่ 4.6 IR สเปกตรัมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังผสมกับคาร์บอกซีเมททิลเซลลูโลสที่อัตราส่วนต่างๆ โดยมี MBA เป็นสารก่อพันธะเชื่อมโยง	57
รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง % Swelling กับ Time (hour) ของแป้งมันสำปะหลังและซีเอ็มซีที่เติมและไม่เติมสารก่อพันธะเชื่อมโยง	63
รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง % Swelling กับ Time (hour) ของแป้งมันสำปะหลังผสมกับซีเอ็มซีที่อัตราส่วนต่างๆ โดยมี MBA เป็นสารก่อพันธะเชื่อมโยง	64
รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง %Equilibrium water content กับ CMC content (g)	65
รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง % Gel fraction กับ CMC content (g)	66
รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึงและการยึด ณ จุดขาดของฟิล์มผสมระหว่างแป้งกับ CMC ที่อัตราส่วนต่างๆ โดยมี MBA เป็นสารก่อพันธะเชื่อมโยง	67

สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.12 สเปกตรัมของแป้งมันสำปะหลังผสมกับคาร์บอกซีเมททิลเซลลูโลส อัตราส่วน 3:7 ที่ปริมาณสารเชื่อม โยงแตกต่างกัน	71
รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง % Swelling กับ Time (hour)	73
รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง %Equilibrium water content กับ CMC content (g)	74
รูปที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง % Gel fractionกับ CMC content (g)	75
รูปที่ 4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึง และการยืด ณ จุดขาดของฟิล์มผสมระหว่างแป้งกับ CMC ที่อัตราส่วนต่างๆ	76
รูปที่ 5.1 สันนิษฐาน โครงสร้างของแป้งที่เกิดพันธะเชื่อมโยง	81
รูปที่ 5.2 สันนิษฐานการเกิด โครงสร้างของคาร์บอกซีเมททิลเซลลูโลส	82
รูปที่ 5.3 สันนิษฐานการ โครงสร้างที่อาจเกิดขึ้นในฟิล์มผสมแป้งมันสำปะหลังกับ CMC โดยมี MBA เป็นสารก่อพันธะเชื่อม โยง	83

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 รูปร่างและขนาดของแป้งชนิดต่างๆ	14
ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบทางเคมีของแป้งธรรมชาติ	15
ตารางที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวของอะไมโลส และสีของสารประกอบเชิงซ้อนของอะไมโลสกับไอโอดีน	16
ตารางที่ 2.4 ผลของการดูดซับน้ำต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดแป้ง และปริมาณการดูดซับน้ำของแป้งชนิดต่างๆ	19
ตารางที่ 2.5 อุณหภูมิการเกิดเจล (Kofler gelatinization temperature) ของแป้งชนิดต่างๆ	21
ตารางที่ 2.6 Gelatinization Characteristic ของแป้งธรรมชาติ	23
ตารางที่ 2.7 องค์ประกอบทางเคมีของแป้งมันสำปะหลังโดยทั่วไป	27
ตารางที่ 3.1 ปริมาณสารต่างๆในการเตรียมฟิล์มไฮโดรเจล	45
ตารางที่ 3.2 ปริมาณสารต่างๆในการเตรียมฟิล์มไฮโดรเจล	48
ตารางที่ 4.1 ลักษณะทางกายภาพของฟิล์มไฮโดรเจลสูตรต่างๆ	49
ตารางที่ 4.2 แสดงเลขคลื่นของหมู่ฟังก์ชันต่างๆ	58
ตารางที่ 4.3 ลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานหลังการแช่ลงในน้ำกลั่น	60
ตารางที่ 4.4 แสดงอุณหภูมิเริ่มการสลายตัวของฟิล์มตัวอย่างสูตรที่ 1-9	68
ตารางที่ 4.5 ลักษณะทางกายภาพของฟิล์มสูตรที่มีการปรับปรุงด้วยสารเชื่อมโยง	70
ตารางที่ 4.6 ลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานหลังการแช่ลงในน้ำกลั่น	72
ตารางที่ 4.7 วิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA	77

คำอธิบายสัญลักษณ์และอักษรย่อ

CMC	Carboxymethylcellulose
APS	Ammonium persulfate
MBA	<i>N,N</i> -Methylenebisacrylamide
FTIR	Fourier Transform Infrared Spectroscopy
TGA	Thermogravimetric Analysis
S	Cassava Starch
C	Carboxymethylcellulose



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของโครงการพิเศษ

ปัจจุบันปริมาณการใช้พอลิเมอร์สังเคราะห์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งพลาสติกได้มีการใช้เพิ่มขึ้นอย่างก้าวกระโดด ซึ่งเนื่องมาจากแนวโน้มของประชากรที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ความเจริญเติบโตทางด้านเศรษฐกิจ รวมถึงสมบัติที่ดีของพลาสติกที่มีความคงทนต่อสภาวะแวดล้อมต่างๆ จึงทำให้มีการใช้พลาสติกอย่างกว้างขวางและเมื่ออัตราการผลิตเพิ่มขึ้นอย่างมหาศาล การกำจัดขยะพลาสติกจึงทำได้ยาก หากจะทิ้งให้ย่อยสลายเองก็ใช้เวลาหลายสิบปีหรือพลาสติกบางชนิดอาจไม่ย่อยสลายเลย ทำให้เกิดปัญหาของวัสดุที่ย่อยสลายได้ยากเกิดขึ้นซึ่งก่อให้เกิดมลภาวะ เกิดปัญหาขยะล้นโลกตามขึ้นมาและยังก่อให้เกิดมลพิษทางอ้อมคือ เมื่อนำพลาสติกมาเผาจะทำให้เกิดก๊าซพิษที่ส่งผลต่อปัญหาภาวะทางอากาศเพิ่มขึ้นและเมื่อมองในวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตพลาสติก คือ ปิโตรเคมีที่ได้จากเชื้อเพลิงฟอสซิล (Fossil fuel) พบว่ามีปริมาณลดลงอย่างมาก เพราะอัตราการเกิดของเชื้อเพลิงฟอสซิลขึ้นทดแทนนั้นเกิดได้ช้ามากใช้เวลาหลายร้อยหรือหลายพันปี ดังนั้นจึงได้หาแนวทางหนึ่งที่จะช่วยลดปัญหานี้คือ การหาวัสดุอื่นมาทดแทนพลาสติกเหล่านี้ โดยการใช้พลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ (Degradable polymer) ที่มีส่วนประกอบมาจากทางธรรมชาติซึ่งจะช่วยแก้ปัญหาการสะสมของพอลิเมอร์และลดการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลอีกด้วย

วัสดุดูดซับน้ำที่ยาวอดที่ใช้ทางการแพทย์ โดยเฉพาะวัสดุปิดแผล (Wound dressing) ไฟไฟไหม้ น้ำร้อนลวกหรือใช้ในผ้าอ้อม เป็นอีกวัสดุหนึ่งที่มีส่วนมากเตรียมจากพอลิเมอร์สังเคราะห์ ทำให้สามารถย่อยสลายได้ยาก จึงได้มีการพัฒนาวัสดุประเภทนี้ขึ้น ซึ่งวัตถุดิบที่ได้รับความนิยมในการผลิตนั้นวัสดุดังกล่าวต้องมีสมบัติเป็นวัสดุที่สามารถย่อยสลายได้ทางธรรมชาติและสามารถดูดซับน้ำได้ดี นั่นคือ แป้งมันสำปะหลัง ซึ่งมีราคาถูกและมีการผลิตในประเทศไทยเป็นจำนวนมาก จึงควรที่จะนำแป้งมาปรับปรุงเพื่อเพิ่มมูลค่า และนอกจากนี้วัสดุปิดแผลนั้นต้องสัมผัสกับบาดแผลโดยตรง ดังนั้นการใช้วัสดุจากธรรมชาติจึงไม่ก่อให้เกิดอันตรายอีกด้วย

แนวทางหนึ่งในการเตรียมวัสดุคูดซบนำยิ่งยวดคือ การนำแป้งมันสำปะหลังมาผลิต ซึ่งจะ
 มีสมบัติการคูดซบนำได้คืออยู่แล้ว แต่ปัญหาที่พบนั้นคือ เมื่อนำแป้งไปขึ้นรูปเป็นฟิล์มแล้วนั้น
 สมบัติเชิงกลจะมีค่าค่อนข้างต่ำ ดังนั้นจึงได้มีการปรับปรุงสมบัติโดยการเติมสารคาร์บอกซี
 เมททิลเซลลูโลส (Carboxy methyl cellulose ; CMC) ซึ่งเป็นสารที่สกัดได้ทางธรรมชาติเช่นกัน
 โดยสารคาร์บอกซีเมททิลเซลลูโลสนั้นมีสมบัติยึดหยุ่นได้ดี ทนต่อแรงดึงยึด เป็นสารที่ช่วยใน
 การยึดเกาะ ดังนั้นจึงทำให้วัสดุคูดซบนำยิ่งยวดมีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น แต่วัสดุดังกล่าวนั้นยังไม่
 สามารถที่จะขึ้นรูปเป็นฟิล์มได้ จึงมีการเติมสารก่อพันธะเชื่อมโยงหลายชนิด เช่น *N,N*-
Methylenebisacrylamide ซึ่งสารดังกล่าวจะก่อให้เกิดพันธะเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่ของแป้ง
 มันสำปะหลังและสารคาร์บอกซีเมททิลเซลลูโลส ส่งผลให้สามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มได้ดี
 ซึ่งจากงานวิจัย [1] พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ *N,N*-*Methylenebisacrylamide* ในสารละลาย
 แป้งและสารคาร์บอกซีเมททิลเซลลูโลสแล้วสารละลายดังกล่าวสามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มได้
 ดีขึ้น แต่การคูดซบนำมีค่าที่ลดลง ซึ่งหากต้องการให้การคูดซบนำดีขึ้นต้องทำการเพิ่มปริมาณ
 คาร์บอกซีเมททิลเซลลูโลสลงไป ดังนั้นการเติมสารก่อพันธะเชื่อมโยงจึงคาดว่าจะช่วย
 ปรับปรุงสมบัติของวัสดุคูดซบนำยิ่งยวดได้

ในโครงการวิจัยนี้จะศึกษาเกี่ยวกับการขึ้นรูปและการทดสอบสมบัติของวัสดุคูดซบนำ
 ยิ่งยวด โดยเตรียมจากแป้งมันสำปะหลังผสมกับสารคาร์บอกซีเมททิลเซลลูโลสโดยใช้ *N,N*-
Methylenebisacrylamide เป็นสารก่อพันธะเชื่อมโยงซึ่งคาดว่าพอลิเมอร์ที่เตรียมได้จะมีสมบัติ
 เชิงกลที่ดีขึ้นและสามารถย่อยสลายได้ทางธรรมชาติ

1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อเตรียมวัสดุคูดซบนำยิ่งยวดในรูปของฟิล์มระหว่างแป้งมันสำปะหลังกับคาร์บอกซีเมททิล
 เซลลูโลส โดยมี *N,N*-*Methylenebisacrylamide* เป็นสารก่อพันธะเชื่อมโยง

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.3.1 เตรียมวัสดุคูดซับน้ำที่ยังยวดยาวจากสารละลายแป้งมันสำปะหลังผสมกับสารละลายคาร์บอกซีเมททิลเซลลูโลส โดยมี *N,N*-Methylenebisacrylamide เป็นสารก่อพันธะเชื่อมโยง
- 1.3.2 ศึกษาอัตราส่วนของวัสดุคูดซับน้ำที่ยังยวดยาวจากแป้งมันสำปะหลังผสมกับคาร์บอกซีเมททิลเซลลูโลสและศึกษาอัตราส่วนของ *N,N*-Methylenebisacrylamide ที่มีผลต่อสมบัติของคูดซับน้ำ
- 1.3.3 เพื่อทดสอบสมบัติทางกายภาพ การวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชัน สมบัติการคูดซับน้ำ สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 สามารถเตรียมวัสดุคูดซับน้ำที่ยังยวดยาวที่สามารถย่อยสลายได้ จากแป้งมันสำปะหลังและคาร์บอกซีเมททิลเซลลูโลสที่มีความสามารถเข้ากันได้ โดยมีสมบัติการคูดซับน้ำที่ใกล้เคียงกับพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่ย่อยสลายได้ที่ใช้งานกันทั่วไป
- 1.4.2 สามารถเพิ่มมูลค่าของวัสดุจากธรรมชาติอย่างแป้งมันสำปะหลังได้
- 1.4.3 ทราบปริมาณของ *N,N*-Methylenebisacrylamide ที่สามารถนำมาใช้ในการผลิตไฮโดรเจลจากแป้งมันสำปะหลังผสมกับคาร์บอกซีเมททิลเซลลูโลส

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ไฮโดรเจล [2]

ไฮโดรเจล (Hydrogel) เป็นพอลิเมอร์โครงสร้างร่างแหที่ละลายน้ำได้ บางครั้งเรียกว่า colloidal gel ซึ่งน้ำสามารถแพร่กระจายได้ในระดับปานกลาง ไฮโดรเจลเป็น super absorbent ที่ได้จากธรรมชาติและจากการสังเคราะห์ คือ สามารถดูดซับน้ำได้มากกว่า 99%



รูปที่ 2.1 แสดงโครงสร้างของไฮโดรเจล [2]

2.1.1 กระบวนการเตรียมไฮโดรเจล [2]

พอลิเมอร์ที่ใช้ในการสังเคราะห์ให้เกิดไฮโดรเจลต้องละลายน้ำได้ในน้ำ เช่น Poly(vinyl alcohol) [PVA], Poly (vinyl pyrrolidone) [PVP], Poly(ethylene oxide) [PEO], Polyacrylamide [PMMA], Poly(acrylic acid) [PAA] และ Poly(Vinyl methyl ether) [PVME] ซึ่งสมบัติในการเลือกนำมาสังเคราะห์ เช่น ต้องมี pH ที่เหมาะสม ionic strength ของ PAA และอุณหภูมิของ PVME เป็นต้น

2.1.2 สมบัติของไฮโดรเจล

ส่วนประกอบที่ทำให้เกิดไฮโดรเจลมี 2 อย่างขึ้นไป คือ มีโครงสร้างของไฮโดรเจลที่มีการเชื่อมโยงแบบ 3 มิติ และมีส่วนของน้ำ ซึ่งจะเข้าไปอยู่ระหว่างในช่องว่างของพอลิเมอร์โมเลกุลหนาแน่น จึงทำให้เกิดไฮโดรเจล สมบัติของพอลิเมอร์ที่นำมาใช้ควรเป็นพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างเป็นแบบอสัณฐาน เพราะโครงสร้างอสัณฐานมีช่องว่างในโครงสร้างมากจึงทำให้น้ำเข้าไปแทรกได้ดี ซึ่งจะทำให้พอลิเมอร์นั้นเกิดการบวมและขยายตัวมาเป็นเจลเปื่อย ซึ่งสัดส่วนของน้ำจะมากกว่าพอลิเมอร์ ไฮโดรเจลโดยทั่วไปสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท โดยประเภทที่ 1 เป็นไฮโดรเจลที่ได้จากกระบวนการทางฟิสิกส์ หรือเรียกว่า “เจลเทียม” ซึ่งเกิดจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างพันธะ โดยพันธะไฮโดรเจนของโมเลกุลจะเข้ามาจับกับอีกโมเลกุลหนึ่ง เจลที่ได้นี้มีจุดหลอมเหลวสูง ส่วนประเภทที่ 2 ได้จากกระบวนการทางเคมี ซึ่งมักจะใส่สารที่ทำให้เกิดการเชื่อมโยงลงไป

ไฮโดรเจล คือพอลิเมอร์ที่เชื่อมโยงในตัวเองที่เป็นน้ำ และมีความสามารถในการดูดน้ำได้ดี มีลักษณะคล้ายกับเฮลลี่ ไฮโดรเจลชอบน้ำ เพราะมีหมู่ไฮดรอกซิล (OH) และคาร์บอกซิล (COOH) และโครงสร้างที่มีการเชื่อมโยงเป็นตาข่ายจึงช่วยในการจับน้ำและดูดซึมน้ำเก็บเอาไว้ การสังเคราะห์ไฮโดรเจลโดยวิธีการทางรังสีนั้น ต้องทำให้พอลิเมอร์อยู่ในรูปสารละลาย

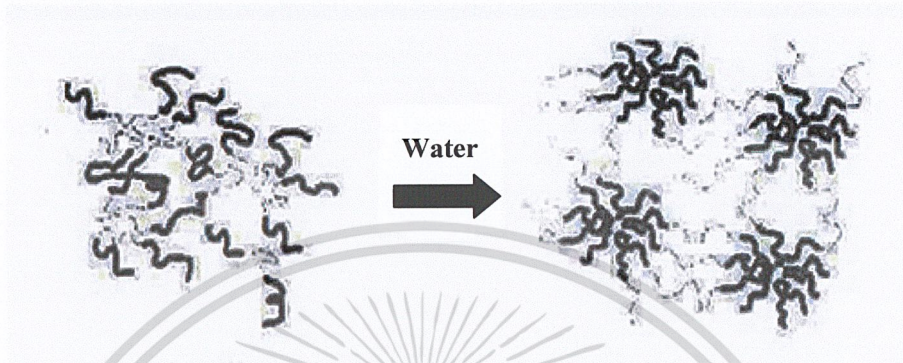
2.1.3 การนำไปใช้งาน

- บรรจุยาที่ต้องการให้ปลดปล่อยตามระยะเวลา
- ใช้เป็นผ้าอ้อมเด็กที่ใช้แล้วทิ้งซึ่งจะดูดซับปัสสาวะ หรือผ้าอนามัย
- เสริมหน้าอก
- ใช้โรยหน้าดินให้ความชุ่มชื้นกับดินที่แห้งแล้ง
- คอนแทกเลนส์ (ซิลิโคน ไฮโดรเจล, พอลิอะคริลามายด์)
- ผ้าปิดแผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างของพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่ใช้ทำไฮโดรเจล ได้แก่ poly(vinyl alcohol) , sodium polyacrylate , acrylate polymer และ copolymer ที่มีหมู่ไม่ชอบน้ำ (hydrophilic) มากๆ ซึ่งแบ่งออกเป็น

- Physical hydrogel คือ ไฮโดรเจลที่มีโครงสร้างเป็นโครงร่างตาข่าย 3 มิติ ซึ่งแต่ละสายโซ่มีการเชื่อมโยงกันด้วยพันธะไฮโดรเจนอ่อนๆ หรือแรงทางไฟฟ้าสถิต



รูปที่ 2.2 แสดงการบวมตัวของ Physical hydrogel [2]

ส่วนที่ชอบน้ำ เช่น Poly(ethylene glycol) (PEG)

ส่วนที่ไม่ชอบน้ำ เช่น Poly(propylene oxide) (PPO), Poly(butylenes oxide) (PBO)

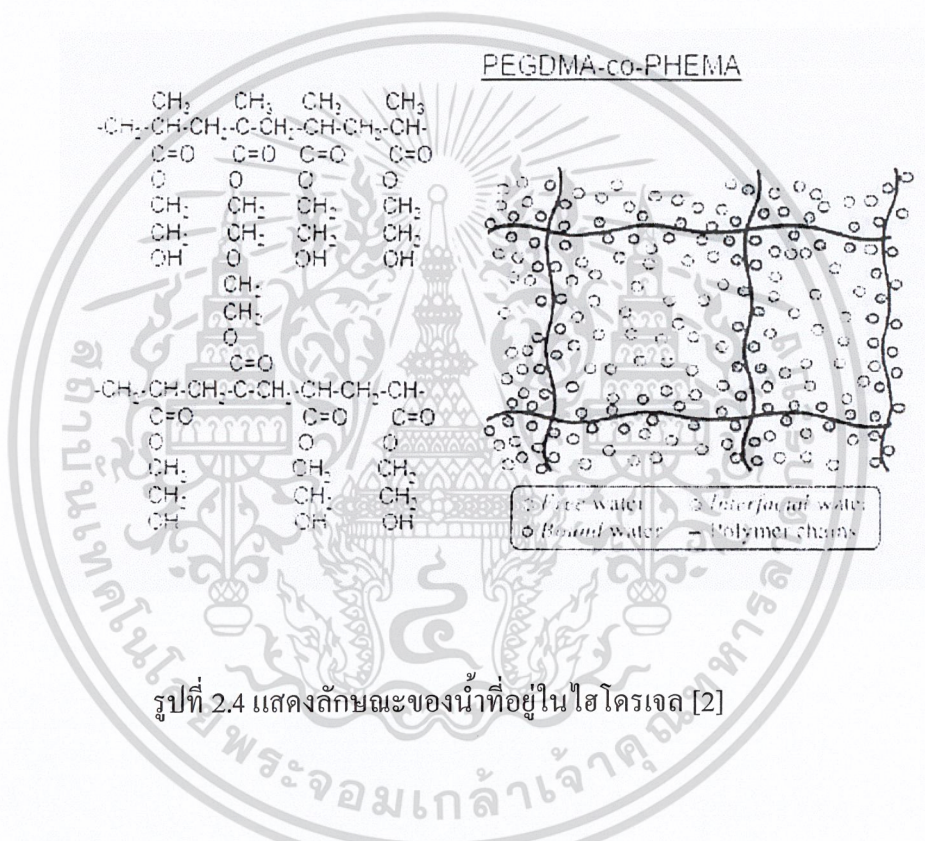
- Chemical hydrogel คือ ไฮโดรเจลที่มีโครงสร้างเป็นโครงร่างตาข่าย 3 มิติ ซึ่งแต่ละสายโซ่พอลิเมอร์จะเกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยงกันด้วยพันธะโควาเลนต์ที่มีความแข็งแรง



รูปที่ 2.3 แสดงโครงสร้างและการบวมตัวของไฮโดรเจล [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างร่างตาข่าย 3 มิติ เกิดจากการเกี่ยวพันกันของมอนอเมอร์ในสารละลายที่ประกอบด้วยน้ำและมีพันธะเชื่อมโยงอยู่ด้วย ตัวอย่าง สารก่อพันธะเชื่อมโยง เช่น bisacrylamide โครงสร้างร่างตาข่าย 3 มิติ ส่วนที่ชอบน้ำของไวนิลมอนอเมอร์ เช่น hydroxyethyl methacrylate, poly(ethylene glycol) methacrylate, acrylamide, acrylic acid, N-isopropylacrylamide รูปที่ 2.1.3.3 แสดงโครงสร้างและการบวมตัวของไฮโดรเจล โดยที่ X คือ สารก่อพันธะเชื่อมโยง และคือมอนอเมอร์ที่เกิดพอลิเมอร์ไรเซชันได้เป็นไฮโดรเจล ในงานวิจัยนี้ใช้ Polyvinyl alcohol ซึ่งเป็นหนึ่งในไฮโดรเจลที่ใช้ในการแพทย์ คือ ใช้ทำคอนแทคเลนส์

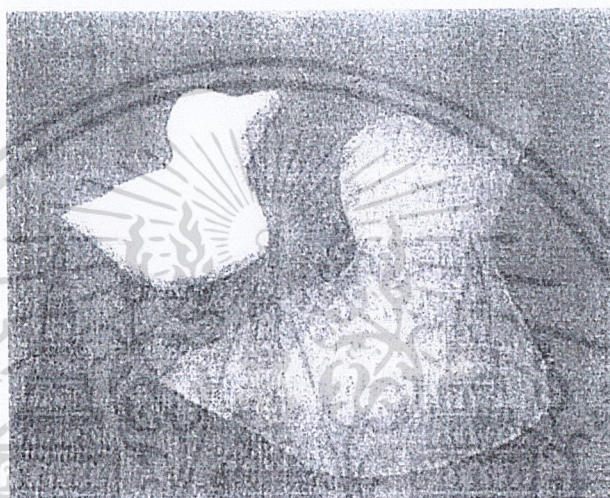


เมื่อไฮโดรเจลเกิดการบวมตัวในน้ำจะมีลักษณะของน้ำที่อยู่ในไฮโดรเจล 3 แบบ คือ

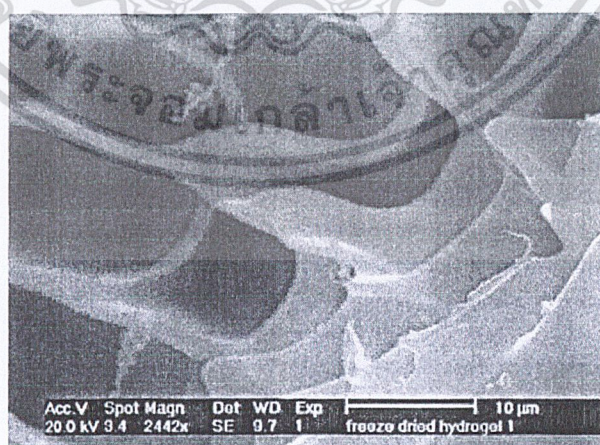
1. Free water คือ น้ำที่อยู่บริเวณผิวนอกของไฮโดรเจล
2. Interfacial water คือ น้ำที่แทรกอยู่ในโมเลกุลของไฮโดรเจล
3. Bound water คือ น้ำที่ดึงดูดกับไฮโดรเจลด้วยพันธะไฮโดรเจน

ใน Chemical hydrogel เป็นพอลิเมอร์ดูดซับน้ำ ซึ่งมีพันธะโคเวเลนต์เป็นพันธะเชื่อมโยงในโครงสร้างร่างตาข่าย 3 มิติไฮโดรเจนเป็นโมเลกุลที่ไม่จำกัดเรื่องขนาด ดังนั้น ไฮโดรเจลบางครั้งจึงเรียก Supermacromolecules สมบัติของไฮโดรเจล คือสามารถคงรูปทรงได้หลังจากเกิดการพองตัว เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แล้ว ดังแสดงในรูปที่ 2.5 แสดงไฮโดรเจลที่แห้งและไฮโดรเจลที่เกิดการพองตัวแล้ว คือ รูปทรงยังเหมือนเดิมแต่ขนาดใหญ่ขึ้น รูปที่ 2.6 แสดงรูพรุนที่เกิดขึ้นของไฮโดรเจลด้วย SEM (Scanning electron microscopy) ไฮโดรเจลที่มีอัตราการดูดซับน้ำช้าๆ นิยมนำไปใช้ประโยชน์ในทางด้านการปลดปล่อยยา ในขณะที่งานหลายๆ ประเภทต้องการไฮโดรเจลที่มีการดูดซับน้ำที่เร็ว การดูดซับน้ำที่เร็วต้องทำให้อนุภาคของไฮโดรเจลมีขนาดเล็กและเกิดการกระจายตัวที่ดีของอนุภาคไฮโดรเจลในระดับไมโคร



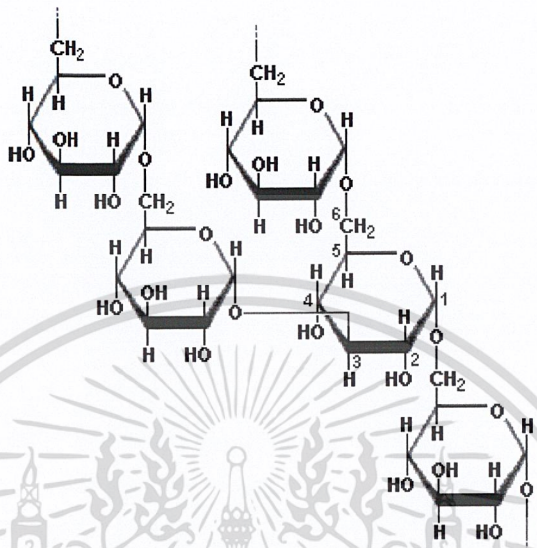
รูปที่ 2.5 แสดงไฮโดรเจลขณะแห้ง (ซ้าย) และไฮโดรเจลที่เกิดการพองตัวในน้ำ (ขวา) [2]



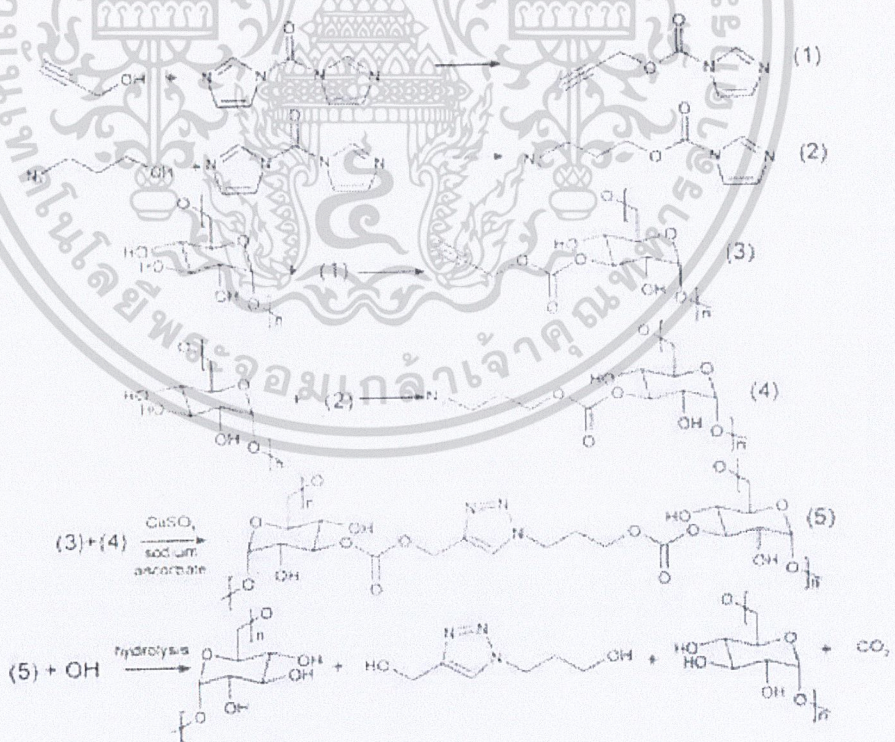
รูปที่ 2.6 แสดงรูพรุนที่เกิดขึ้นของไฮโดรเจลด้วย SEM [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างกลไกการเกิดปฏิกิริยาของ Biodegradable Hydrogels คือ dextran hydrogels dextran จะเกิดปฏิกิริยากับ methacrylate หลังจากนั้นจะเกิดพันธะเชื่อม โยงกันที่ vinyl monomer ดังรูป 2.8



รูปที่ 2.7 แสดง โครงสร้างของ dextran [2]



รูปที่ 2.8 แสดงการเกิด dextran hydrogels [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

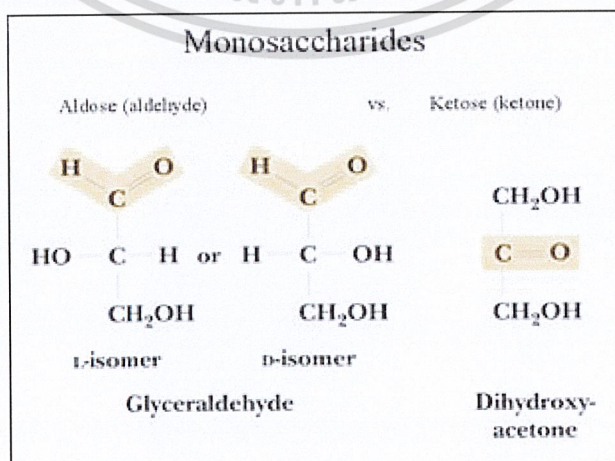
2.2 คาร์โบไฮเดรต [3]

คาร์โบไฮเดรต คือ สารประกอบไฮโดรคาร์บอน มีตั้งแต่ลักษณะ โมเลกุลเล็กและ โมเลกุลใหญ่(มีทั้งที่เป็นน้ำตาล โมเลกุลเดี่ยวและ โพลีเมอร์ที่ได้จากน้ำตาลเดี่ยว) คาร์โบไฮเดรตอาจอยู่รวมกับสารอื่นๆได้ เช่น ATP กรดนิวคลีอิก หรือจับกับโปรตีน มีวโคโปรตีน ไกลโคโปรตีน และไกลโคลิปิด เป็นต้น

คาร์โบไฮเดรต มีบทบาทสำคัญต่อสิ่งมีชีวิต เช่น เมื่อถูกออกซิไดซ์จะได้พลังงานเพื่อไปขับเคลื่อนเมตาบอลิซึมต่างๆในสัตว์ และพืช คาร์โบไฮเดรตทำหน้าที่เป็นชีวโมเลกุลที่เก็บพลังงานในสิ่งมีชีวิตหลายๆชนิด มีคาร์โบไฮเดรต เป็นส่วนประกอบของผนังเซลล์หรือสารที่เคลือบอยู่บนเซลล์ อนุพันธ์ของคาร์โบไฮเดรตสามารถพบได้ ในชีวโมเลกุล เช่นในโคเอนไซม์ กรดนิวคลีอิก เป็นต้น

คาร์โบไฮเดรตอาจจำแนกได้ ตามขนาด โมเลกุลดังนี้

1. Monosaccharideคือคาร์โบไฮเดรตที่มีคาร์บอนตั้งแต่ 3-7ตัว มีหมู่ที่สำคัญ คือ หมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl) ซึ่งสามารถถูกออกซิไดซ์เป็นอัลดีไฮด์ หรือ หมู่คีโตน (Ketone) ซึ่งสามารถถูกออกซิไดซ์ต่อเป็นหมู่คาร์บอกซิลิกซึ่งมีประจุลบถ้าออกซิไดซ์ต่อไปก็จะได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ หมู่ไฮดรอกซิลยังมีความสามารถในการอุ้มน้ำ จึงมีประโยชน์ในการเป็นสารทำให้เกิดความเหนียว เช่น ใส่น้ำเชื่อม ใช้ในการป้องกันการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย หรือใช้ในทางการแพทย์ หมู่อัลดีไฮด์มีคุณสมบัติเป็นหมู่ที่ช่วยในการรีดิวซ์ ทำให้สามารถตรวจสอบน้ำตาลตัวเล็กๆที่หมูรีดิวซ์ได้



รูปที่ 2.9 โครงสร้างของกลีเซอรอลดีไฮด์และไดไฮดรอกซีอะซีโตน [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในสิ่งมีชีวิตพบอนุพันธ์ของโมโนแซคคาไรด์หลายๆ ชนิด เช่น ในรูปของฟอสเฟต น้ำตาลดีออกซี น้ำตาลอะมิโน น้ำตาลแอลกอฮอล์ กรดน้ำตาลและกรดแอสคอบิก (วิตามิน C) เป็นต้น อนุพันธ์เหล่านี้ จะพบเป็นองค์ประกอบของโพลิแซคคาไรด์และโพลีแซคคาไรด์ ซึ่งในการเขียนสูตรโมเลกุลบางครั้งจะใช้ ชื่อย่อ ของอนุพันธ์

2. Disaccharide คือน้ำตาลที่มี monosaccharide ต่อกัน 2 หน่วยด้วยพันธะโคเวเลนต์ (Covalent) เช่น maltose , sucrose และ lactose พันธะโคเวเลนต์นี้มีทั้งชนิดแอลฟา และชนิดเบต้า ในการเกิดไดแซคคาไรด์ อะโนเมอร์คาร์บอนของน้ำตาลตัวหนึ่งสามารถเกิดพันธะอะซิทัล กับหมู่ไฮดรอกซิลที่ตำแหน่งใดๆของน้ำตาลอีกโมเลกุลหนึ่ง

ในการกล่าวถึงไดแซคคาไรด์ หรือ โพลีเมอร์ของคาร์โบไฮเดรตอื่นๆ จึงมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องระบุถึง ชนิดของ โมโนแซคคาไรด์รวมถึงตำแหน่งอะตอมที่เกิดพันธะไกลโคซิดิก

โครงสร้างและตัวอย่างการเรียกชื่อน้ำตาลไดแซคคาไรด์ 4 ชนิด ที่พบได้บ่อยๆ

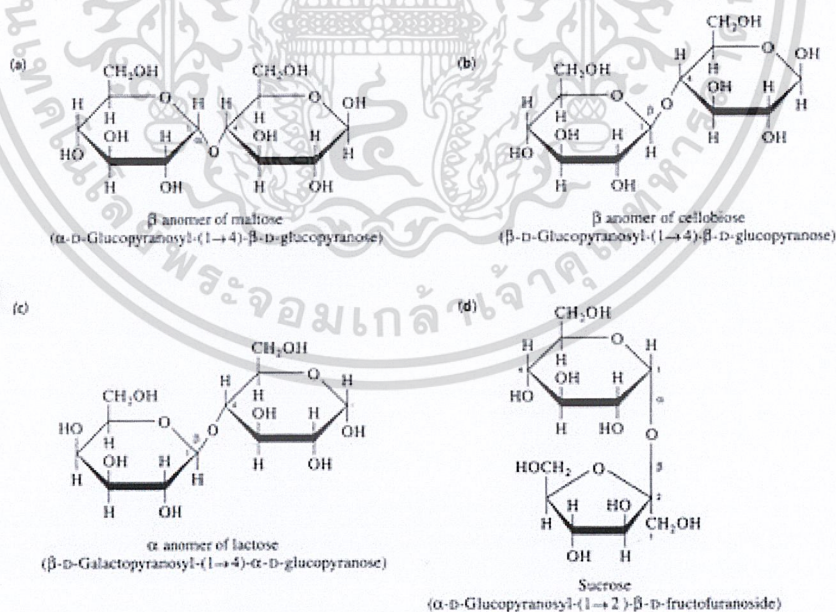
- มอลโตส (รูปที่ 2.10a) เป็นไดแซคคาไรด์ที่ได้จากการย่อยสลายแป้งมอลโตส ประกอบด้วย D-glucose 2 หน่วยจับกันด้วยพันธะ α -glucosidic ซึ่งเชื่อมระหว่าง C-1 ของน้ำตาลตัวแรกกับออกซิเจน อะตอมที่จับอยู่กับ C-4 ของน้ำตาลตัวที่สอง ดังนั้นชื่อของมอลโตสคือ α -D-glucopyranosyl-(1-4)-D-glucose จากรูปจะสังเกตเห็นได้ว่ากลูโคสโมเลกุลที่อยู่ทางซ้ายมือซึ่งอะโนเมอร์คาร์บอนของมัน จะสร้าง พันธะไกลโคซิดิกกับอีกโมเลกุลหนึ่งจะถูกจับยึดไว้โดยมีรูปแบบเป็น α -configuration ในขณะที่กลูโคส โมเลกุลที่สองที่อยู่ทางขวามือจะมีรูปแบบที่เปลี่ยนแปลงได้อย่างอิสระคือ มีรูปแบบได้ทั้ง α, β และ โครงสร้างแบบเปิด โครงสร้างที่แสดงในรูปที่ 2.10a เป็น β -ไพราโนส ซึ่งเป็นรูปแบบที่พบว่า มีปริมาณมากที่สุด
- เซลโลไบโอส (cellobiose; β -D-glucopyranosyl-(C1-4)-D-glucose) ประกอบด้วย น้ำตาลกลูโคส 2 หน่วยเช่นกัน (รูปที่ 2.10 b) พบในโครงสร้างของเซลลูโลส ความแตกต่างของเซลโลไบโอสและมอลโตสอยู่ที่พันธะไกลโคซิดิกโดยในเซลโลไบโอสเป็นแบบ β ส่วนในมอลโตส เป็นแบบ α กลูโคสโมเลกุลที่อยู่ทางขวามือจะมีรูปแบบที่เปลี่ยน ไปเปลี่ยนมาระหว่าง α, β และ โครงสร้าง แบบเปิด
- แลคโตส (β -D-galactopyranosyl-(1-4)-D-glucose) เป็นน้ำตาลที่พบมากในน้ำนม น้ำตาลแลคโตสเป็นคู่อิพเมอร์กับน้ำตาลเซลโลไบโอส α -anomer ของแลคโตสที่พบในธรรมชาติ จะมีความหวานและความสามารถในการละลายดีกว่ารูปแบบ β -anomer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ซูโครส (α-D-glucopyranosyl-(1-2)- β-D-fructofuranoside) เป็นน้ำตาลไดแซคคาไรด์ ที่พบมากที่สุด ในธรรมชาติ เป็นน้ำตาลที่สังเคราะห์ในพืชเท่านั้น (รูปที่ 2.10d) ซูโครส ประกอบด้วย น้ำตาล 2 ชนิด คือกลูโคสและฟรุกโตสจับยึดกันที่ตำแหน่งอะโนเมอริกคาร์บอนทั้งคู่ ดังนั้นทั้ง กลูโคไพราโนสและฟรุกโตไฟราโนสจะมี Configuration ที่คงที่

3. โอลิโกแซคคาไรด์ (Oligosaccharides) เป็นโพลิเมอร์ที่ประกอบไปด้วยโมโนแซคคาไรด์ ในช่วง 2-20 หน่วย ที่รู้จักกันดีคือ พวกที่ประกอบด้วยโมโนแซคคาไรด์ 2 หน่วย เช่น น้ำตาลซูโครส น้ำตาลมอลโตส เป็นต้น

4. พอลิแซคคาไรด์ (Polysaccharides) คือ โครงสร้างสายโซ่พอลิเมอร์ที่มีองค์ประกอบหลัก คือ อะตอมของไฮโดรเจน ออกซิเจน และคาร์บอน แต่ละหน่วยของมอนอเมอร์เชื่อมโยงด้วยหมู่เอซิทัล (Acetal linkages) เกิดจากปฏิกิริยาการควบแน่นของหมู่เฮมิเอซิทัล (Hemiacetal group) ของมอนอเมอร์กับหมู่ไฮดรอกซิล ของมอนอเมอร์หน่วยถัดไป โดยมีการกำจัดโมเลกุลของน้ำออกไป หน่วยมอนอเมอร์ของพอลิแซคคาไรด์ เรียกว่า มอนอแซคคาไรด์ (Monosaccharides) หรือน้ำตาล หรือ คาร์โบไฮเดรต จัดเป็นสารประกอบเชิงเส้นของพอลิเมอร์จากปฏิกิริยาควบแน่นของน้ำตาล พอลิแซคคาไรด์มีมากมายหลายชนิด พบได้ทั้งในพืช สัตว์ และสิ่งมีชีวิตขนาดเล็ก ชนิดของพอลิแซคคาไรด์ที่มีความสำคัญได้แก่ แป้ง เซลลูโลส ไกลโคเจน และไคติน-ไคโตซาน เป็นต้น



รูปที่ 2.10 โครงสร้างและตัวอย่างการเรียกชื่อน้ำตาลไดแซคคาไรด์ [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างของพอลิแซคคาไรด์มีทั้งเป็นพอลิเมอร์ชนิดเดียว (Homopolymer) และพอลิเมอร์ร่วม (Copolymer) มีสูตรโมเลกุลอย่างง่ายเป็น $C_n(H_2O)_{n-1}$ หรือแสดงเป็นสูตรโมเลกุลทั่วไปคือ $(C_6H_{10}O_5)_n$ มีการจัดโครงสร้างทั้งแบบเชิงเส้น และแบบโซ่กิ่ง และอาจมีองค์ประกอบที่ไม่ใช่คาร์โบไฮเดรตปนอยู่ด้วย เช่น เอสเตอร์ซึ่งเกิดจากหน่วยฟอสเฟต ซัลเฟต มัลโลเนต หรือไฟรูเวต

แป้งและเซลลูโลสจัดเป็นโฮโมพอลิเมอร์ซึ่งประกอบขึ้นจากหน่วยของกลูโคสไพราโนส โดยมีการเชื่อมโยงแต่ละหน่วยมอนอเมอร์ที่ตำแหน่ง 1 และ 4 ด้วยการควมแน่นของหมู่ไฮดรอกซิล สำหรับสิ่งที่ต่างกันของพอลิแซคคาไรด์ทั้งสองชนิดนี้ คือ มีการจัดเรียงตัวของมอนอเมอร์ในพอลิเมอร์ (Configurations) และองศาของโซ่กิ่งต่างกัน ซึ่งสามารถเขียนเป็นโครงสร้างอย่างง่าย ดังรูป



รูปที่ 2.11 โครงสร้างอย่างง่ายของแป้ง [4]

รูปที่ 2.11 โครงสร้างอย่างง่ายของเซลลูโลส [4]

โดยทั่วไปอาจเรียกรวมสารประกอบคาร์โบไฮเดรตที่เป็นโพลิเมอร์ว่าไกลแคน (glycan) ซึ่งหมายถึง พอลิเมอร์ที่อาจประกอบด้วยโมโนแซคคาไรด์ประเภทเดียว (homoglycan) หรืออาจประกอบด้วย โมโนแซคคาไรด์หลายๆ ชนิด (heteroglycan) ก็ได้

Glycoconjugates จะหมายถึงอนุพันธ์ของคาร์โบไฮเดรตซึ่งมีโมเลกุลของคาร์โบไฮเดรตไปจับกับ เปปไทด์ โปรตีนหรือไขมันด้วยพันธะโควาเลนต์ ตัวอย่างอนุพันธ์เหล่านี้ เช่น โปรติโอไกลแคน เปปติโดไกลแคน ไกลโคโปรตีนและไกลโคไลปิด

Glycosaminoglycan เป็นโมเลกุลที่มีน้ำหนักประมาณ 1 หมื่นดัลตัน ตัวอย่างเช่น hyaluronic acid, chondroitin, keratin sulfate ซึ่งประกอบด้วย disaccharide ต่อกันเป็นหน่วยซ้ำๆ disaccharide เหล่านี้มีประจุลบอยู่จำนวนมาก และมีความสามารถในการอุ้มน้ำสูง ทำให้พองอยู่ในน้ำและทำหน้าที่เป็นสารกันชนในสิ่งมีชีวิต เช่นในกระดูกอ่อน ผิวหนัง และตามหลอดเลือด

ประโยชน์ในบางอุตสาหกรรม คือ การนำ hyaluronic acid ที่ได้จากหงอนไก่มาทาผิวเพราะสามารถเก็บความชุ่มชื้นได้นาน ผิวจึงไม่แห้ง ส่วน heparin มีประจุทำให้จับกับโมเลกุลของ antithrombin ได้ในสภาพธรรมชาติ ทำให้ thrombin ไม่ทำงาน และไม่เกิดการแข็งตัวของเลือด

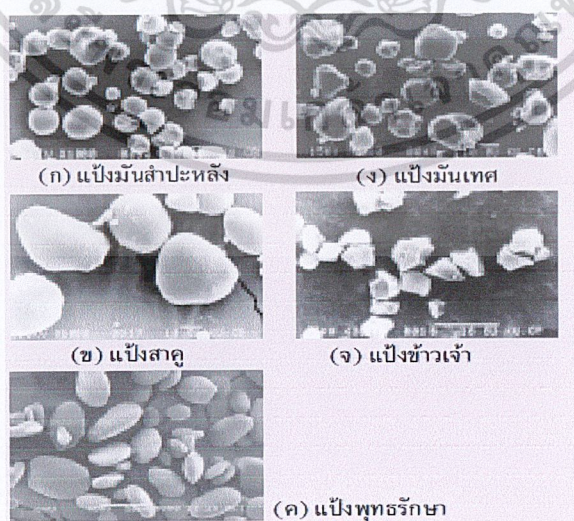
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 แป้งและอนุพันธ์ของแป้ง [3]

แป้งเป็นสารประกอบพอลิแซคคาไรด์ พบได้ในส่วนต่างๆของพืช เช่น ราก ลำต้น และ เมล็ด แป้งมีลักษณะเป็นผงละเอียดสีขาว อาจไม่มีรสและกลิ่น มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1-100 ไมครอนหรือมากกว่านี้ขึ้นอยู่กับแหล่งที่มาของแป้ง แป้งที่ผลิตเชิงการค้ามีแหล่งที่มาจากพืชไม่กี่ชนิด เช่น ข้าวโพด มันสำปะหลัง ข้าวเจ้า ข้าวสาลี และมันฝรั่ง ปริมาณ รูปร่าง และขนาดของ แป้งชนิดต่างๆในวัตถุดิบแต่ละประเภทจะแตกต่างกัน

ตารางที่ 2.1 รูปร่างและขนาดของแป้งชนิดต่างๆ [3]

ชนิดของแป้ง	รูปร่าง	เส้นผ่านศูนย์กลาง (μm)
แป้งข้าวเจ้า(Rice Starch)	Polygonal/tend to aggregate in clusters	3-8
แป้งมันสำปะหลัง(Tapioca starch)	Rounded shapes	5-35
แป้งข้าวสาลี(Wheat starch)	Flat, round or elliptical granules/tend to cluster	2-10 และ 20-35
แป้งมันฝรั่ง (Potato Starch)	Largest granules of any commercial starch oval or egg shaped	15-100



รูปที่ 2.12 ลักษณะ SEM ของแป้งชนิดต่างๆ [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.1 โครงสร้างทางเคมีของแป้ง

แป้งธรรมชาติ (Native starch) มีโครงสร้างทางเคมีเป็นพอลิเมอร์หลักสองประเภท คือ อะไมโลส (linear glucose polymer) และอะไมโลเพคติน (branched glucose polymer) มีโครงสร้างตามรูปที่ โดยทั่วไปแป้งจะมีองค์ประกอบของอะไมโลเพคตินมากกว่าอะไมโลส โดยมีอัตราส่วนอะไมโลสต่ออะไมโลเพคตินประมาณ 30:70 หรือ 20:80 ขึ้นอยู่กับชนิดของแป้ง

แป้งธรรมชาติได้มาจากพืชหลายชนิด แต่ที่ใช้มากในอุตสาหกรรม คือ แป้งข้าวโพด แป้งมันสำปะหลัง แป้งมันฝรั่ง และแป้งข้าวสาลี รองลงมาได้แก่ แป้งข้าวโพด แป้งข้าวเหนียว แป้งข้าวเจ้า และแป้งข้าวฟ่าง ซึ่งแป้งจากพืชต่างชนิดกันก็มีองค์ประกอบทางเคมีและสมบัติทางกายภาพต่างกัน

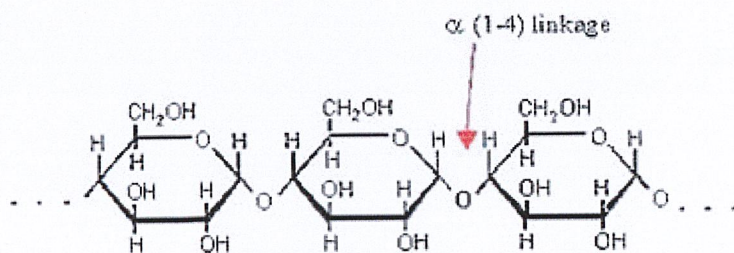
ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบทางเคมีของแป้งธรรมชาติ [3]

Starch	% Moisture at 20°C	% Lipids	% Protein
Potato	19	0.1	0.1
Maize	13	0.8	0.35
Wheat	13	0.9	0.4
Tapioca	13	0.1	0.1
Waxy maize	13	0.2	0.2

2.3.2 ชนิดของแป้ง

- อะไมโลส

อะไมโลสเป็นพอลิเมอร์เชิงเส้น ประกอบด้วยหน่วยซ้ำของแอนไฮโดรกลูโคส เชื่อมโยงด้วยพันธะโคเวเลนต์ที่ตำแหน่ง α -D-(1-4) อาจมีหน่วยซ้ำของหน่วยแอนไฮโดรกลูโคสได้ตั้งแต่ 100-6000 หน่วย



รูปที่ 2.13 โครงสร้างของอะไมโลส [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากอะไมโลสมีโครงสร้างสายโซ่พอลิเมอร์แบบเชิงเส้นมีส่วนที่ชอบน้ำและไม่ชอบน้ำอยู่ด้วยเช่น แอลกอฮอล์ที่มีสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนยาว จึงสามารถมีโครงสร้างบิดเกลียว (helical conformation) เกิดเป็นช่องว่างทำให้ดูดซับน้ำและเกิดเป็นไมเซลในน้ำได้ และล้อมรอบโมเลกุลของไอโอดีน เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน โดยสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างอะไมโลสกับไอโอดีนจะให้สารละลายสีน้ำเงินเข้ม เมื่อนำไปวัดความเข้มสีหรือวัดศักย์ไฟฟ้า สามารถหาปริมาณอะไมโลสในแป้งได้ หรือการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างอะไมโลสกับบิวทานอล และสารอินทรีย์ที่มีส่วนชอบน้ำประเภทอื่น สามารถแยกอะไมโลสกับอะไมโลเปคตินออกจากกันได้ด้วยกระบวนการเลือกตกตะกอน

ตารางที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวของอะไมโลสและสีของสารประกอบเชิงซ้อนของอะไมโลสกับไอโอดีน [3]

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



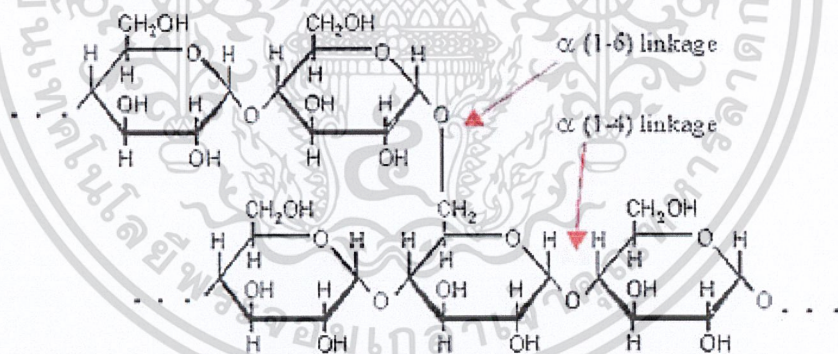
รูปที่ 2.14 ภาพจำลองการจับตัวของอะไมโลสกับสารอินทรีย์ [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างของอะไมโลสมีหมู่ไฮดรอกซิลจำนวนมากทำให้แป้งมีสมบัติชอบน้ำและกระจายตัวได้ดีในน้ำ เนื่องจากอะไมโลสมีโครงสร้างเชิงเส้นจึงจัดเรียงตัวชิดกัน ทำให้เกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลที่อยู่ติดกัน ความชอบน้ำของโมเลกุลอะไมโลสจะลดลง ทำให้ของผสมระหว่างอะไมโลสกับน้ำมีลักษณะโซล (sol) ขุ่นมากขึ้น ในสภาวะที่สารละลายเจือจาง อะไมโลสมีแนวโน้มรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนแล้วตกตะกอน ในสภาวะที่สารละลายเข้มข้น อะไมโลสจะเกาะกันและกันแล้วไปรบกวนการจัดเรียงตัวของโมเลกุลจึงจัดเรียงตัวเป็นระเบียบได้แค่บางส่วน เกิดปริมาตรอิสระระหว่างสายโซ่จำนวนมาก ทำให้โมเลกุลของน้ำสามารถแทรกเข้าไปและสร้างพันธะไฮโดรเจนกับอะไมโลสเกิดเป็นโครงสร้างร่างแหสามมิติในรูปของเจล

- อะไมโลเพคติน

อะไมโลเพคตินเป็นพอลิเมอร์สายโซ่กิ่งของหน่วยซ้ำแอนไฮโดรกลูโคส ซึ่งมีการเชื่อมโยงที่ตำแหน่ง α -D-(1-4) และที่ตำแหน่งคาร์บอนตัวที่ 6 ของหน่วยแอนไฮโดรกลูโคสด้วย ทำให้เกิดสายโซ่กิ่งขึ้น โดยทั่วไปทุกๆ 6-12 หน่วยจะพบสายโซ่กิ่งหนึ่งสาย แต่ละสายโซ่กิ่งจะมีหน่วยซ้ำของแอนไฮโดรกลูโคสประมาณ 12-15 หน่วยแต่ละหน่วยเชื่อมต่อกันด้วยโครงสร้างแบบ α -D-(1-4)



รูปที่ 2.15 โครงสร้างของอะไมโลเพคติน [3]

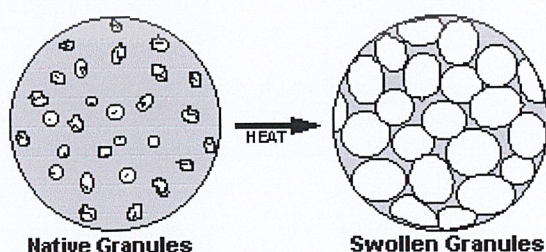
อะไมโลเพคตินมีขนาดโมเลกุลใหญ่และมีสายโซ่กิ่งจำนวนมากทำให้ความสามารถในการเคลื่อนที่ของโมเลกุลลดลงและรบกวนการจัดเรียงตัวของโมเลกุล จึงเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลน้อย ของผสมระหว่างอะไมโลเพคตินกับน้ำในรูปของโซลจึงมีความใส มีเสถียรภาพและไม่เกิดเจลง่าย ทำให้ อะไมโลเพคตินไม่สามารถเตรียมเป็นฟิล์มที่มีความแข็งแรงและยืดหยุ่นได้ การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับสารละลายไอโอดีนจะได้สารประกอบเชิงซ้อนสีม่วงน้ำตาล

ปริมาณอะไมโลสขึ้นอยู่กับชนิดของแป้ง เช่น แป้งข้าวโพด แป้งมันฝรั่ง และแป้งมันสำปะหลังจะพบอะไมโลสประมาณ 18-28 เปอร์เซ็นต์ และอาจมีการคัดแปรแป้งให้มีปริมาณอะไมโลสต่างไปจากค่าปกติ เช่น แป้งคัดแปรจากข้าวโพด (waxy corn) มีปริมาณอะไมโลสน้อยหรือแทบไม่มีเลย

2.3.3 สมบัติของแป้ง

การพองตัวและการละลาย (Swelling and solubility)

แป้งไม่ละลายในน้ำเย็นแต่จะดูดซึมน้ำไว้ได้ประมาณ 25-30% และพองตัวน้อยมากจนไม่สังเกตเห็นได้ ทั้งนี้เนื่องจากการจัดเรียงตัวกันระหว่างโมเลกุลของอะไมโลสและอะไมโลเพคติน (intermixed) ภายในเม็ดแป้ง ในส่วน crystallite โมเลกุลอยู่กันอย่างหนาแน่นและเป็นระเบียบ ช่วยป้องกันการกระจายตัวและทำให้ไม่ละลายในน้ำเย็น ส่วนของ amorphous ซึ่งเป็นส่วนที่เกาะเกี่ยวกันอย่างหลวมๆ ไม่เป็นระเบียบและมีหมู่ไฮดรอกซิลอิสระมาก สามารถเกิดปฏิกิริยาการรับน้ำ (hydration) ได้บ้างแม้ในน้ำเย็น เมื่อให้ความร้อนกับน้ำแป้งจะมีอุณหภูมิสูงขึ้นประมาณ 60 °C ขึ้นไป ส่วน amorphous จับกับน้ำได้มากขึ้นและการจับกันของโมเลกุลในส่วน crystallite เริ่มคลายความหนาแน่นลง โมเลกุลส่วนที่เริ่มคลายตัวออกจากกันจับกับน้ำทำให้เม็ดแป้งพองตัวเพิ่มขึ้น (รูปที่ 2.16) โมเลกุลในส่วน crystallite ที่เหลืออยู่เกิดสภาพคล้ายร่างแหเรียกว่า micelle network ซึ่งยึดเหนี่ยวกันไว้ทำให้เม็ดแป้งยังคงสภาพอยู่ได้ แต่อาจมีโมเลกุลของอะไมโลสและอะไมโลเพคตินซึ่งมีขนาดเล็กและอิสระกระจายตัวออกจากเม็ดแป้ง เมื่อทำให้อุณหภูมิน้ำแป้งสูงขึ้นไปอีก ส่วน crystallite ที่เหลืออยู่นี้จะคลายตัวออกทำให้เม็ดแป้งพองมากขึ้นและ โมเลกุลแป้งอยู่ในสภาวะละลายมากขึ้น



รูปที่ 2.16 การพองตัวของเม็ดแป้ง [5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.4 ผลของการดูดซับน้ำต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดแป้งและปริมาณการดูดซับน้ำของแป้งชนิดต่างๆ [3]

แหล่งที่มาของแป้ง	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่เพิ่มขึ้นเฉลี่ย (%)	การดูดซับน้ำต่อ 100 กรัมของแป้งแห้ง (กรัม)
ข้าวโพด	9.1	39.9
มันฝรั่ง	12.7	50.9
มันสำปะหลัง	28.4	47.9
Waxy corn	22.7	51.4

การเกิดเจลาตินในเซชัน (Gelatinization)

เจล (Jelly) หรือเจลลี่ต่างๆเป็นสารที่พองตัวได้ง่ายในน้ำ สามารถขยายตัวได้หลายเท่าของปริมาตรตัวเอง เพราะน้ำทำให้เกิดโครงสร้างร่างแหสามมิติ เจลลี่เป็นพวก agarose, caragenan ซึ่งมาจากสาหร่าย หรือพวก dextran ซึ่งตัดแปรมาจากแป้ง เช่น Sephadex ต่างๆ

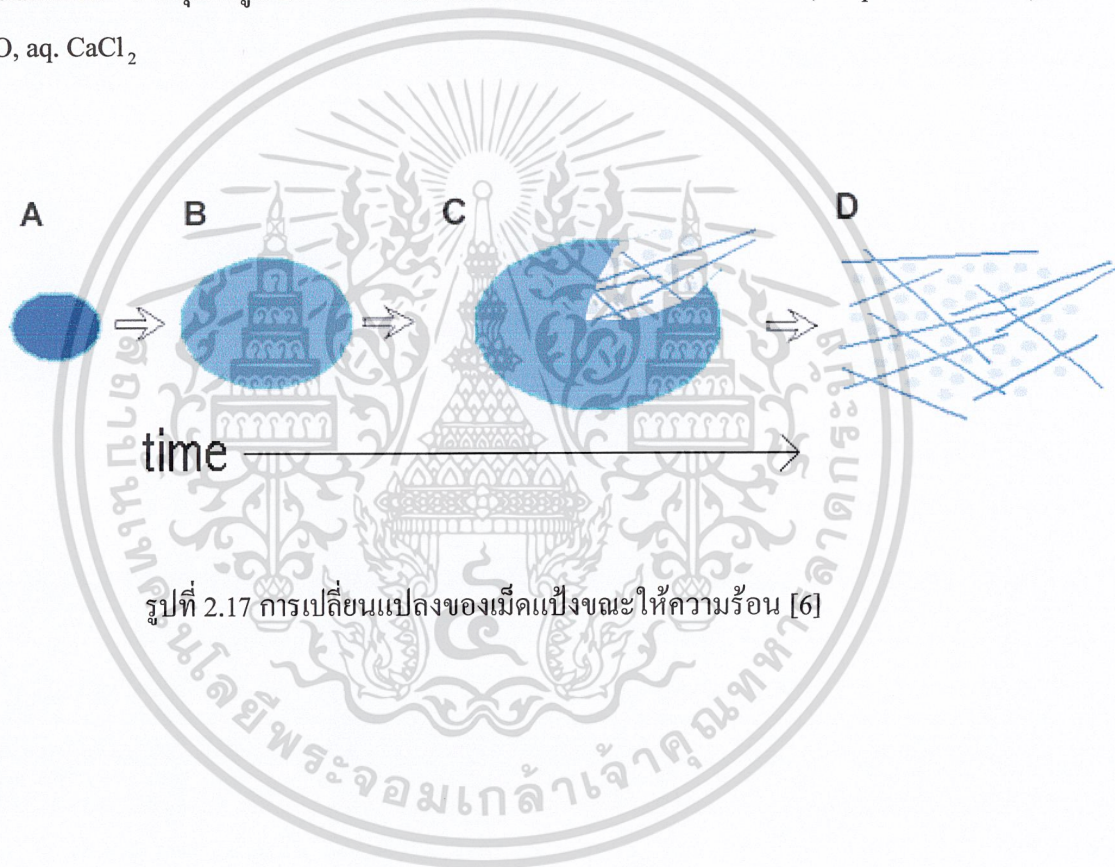
ความสามารถในการจับกับน้ำขึ้นอยู่กับหมู่ไฮดรอกซิล และหมู่ที่มีประจุลบ ความสามารถในการอุ้มน้ำของโมเลกุลเหล่านี้ขึ้นอยู่กับว่าได้จับกับ แคทไอออน อะไรบ้าง ซึ่งแคทไอออนเหล่านี้จะเป็นตัวช่วยให้อุ้มน้ำเพิ่มขึ้นด้วย

กลไกการเกิดเจลาตินในเซชัน

เมื่อนำแป้งใส่ในน้ำเย็น เม็ดแป้งดูดซับน้ำได้ในปริมาณจำกัดปริมาณหนึ่ง แต่จะยังไม่พองตัวหรือพองตัวได้จำกัดมากและสังเกตได้ยาก Collison [1968] สังเกตการพองตัวของเม็ดแป้งสาลิในน้ำที่อุณหภูมิห้องพบว่าแป้งที่พองตัวมีเส้นผ่าศูนย์กลางเพิ่มขึ้น 10% และปรากฏการณ์นี้สามารถผันกลับได้ (reversible) โดยเมื่อนำไปอบแห้งก็จะได้แป้งที่มีลักษณะและคุณสมบัติดั้งเดิม ทั้งนี้เนื่องจากโมเลกุลอะไมโลสและอะไมโลเพคตินในส่วนที่เป็น crystallite จับตัวกันอย่างหนาแน่นแข็งแรงจึงไม่ละลายในน้ำเย็น แต่น้ำอาจจะซึมเข้าไปในส่วนของเม็ดแป้งซึ่งไม่เป็นระเบียบและมีกลุ่มไฮดรอกซิลอิสระได้บ้าง แต่เมื่อให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิหนึ่งประมาณ 60-75°C หรือใช้สารเคมี เช่น ให้ความร้อน 60°C แก่แป้งสาลิจะมีผลทำให้การจับยึดกันระหว่างโมเลกุลของแป้งในส่วน crystallite ลดลง เกิดปฏิกิริยาการรับน้ำและการพองตัวของเม็ดแป้งซึ่งไม่สามารถผันกลับได้ (irreversible) และทำให้สารละลายแป้งมีความหนืดและความใสเพิ่มขึ้น กระบวนการนี้เรียกว่า “เจลาตินในเซชัน” ซึ่งเมื่อตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์พบว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพที่สำคัญ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขึ้นคือ มีการพองตัวของเม็ดแป้งและเครื่องหมายกากบาท (maltese cross) ภายในเม็ดแป้งหายไป อุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนแปลงในลักษณะนี้จะเปลี่ยนแปลงไปตามชนิดของแป้ง เนื่องจากแป้งแต่ละชนิดมีโครงสร้างส่วน crystallite ที่แตกต่างกัน ทั้งระดับการจับกัน (degree of association) และความสม่ำเสมอของการเกิดเจลาตินไนซ์ไม่พร้อมกันทุกเม็ด แม้แต่ในแป้งชนิดเดียวกันจากแหล่งเดียวกันก็ตาม อาจมีช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลาตินไนซ์ที่ห่างกันถึง 8-10 °C โดยทั่วไปเม็ดแป้งขนาดใหญ่จะเกิดเจลาตินไนซ์ได้ก่อนขนาดเล็ก [Morrison และ Laignelet, 1983; Collison, 1968] แต่เมื่อใช้ SEM ส่องดูโครงสร้างของเม็ดแป้งข้าวบาร์เลย์ซึ่งมีเม็ดแป้งขนาดเล็กอยู่ประมาณ 30% พบว่าการสูญเสียเครื่องหมายกากบาทจะเกิดขึ้นได้พร้อมๆ กัน [Goering และคณะ, 1960] แป้งอาจเกิด gelatinized ได้ที่อุณหภูมิ 25 °C โดยการละลายใน Solvent เช่น alkali, liquid ammonia, DMSO, aq. CaCl₂



รูปที่ 2.17 การเปลี่ยนแปลงของเม็ดแป้งขณะให้ความร้อน [6]

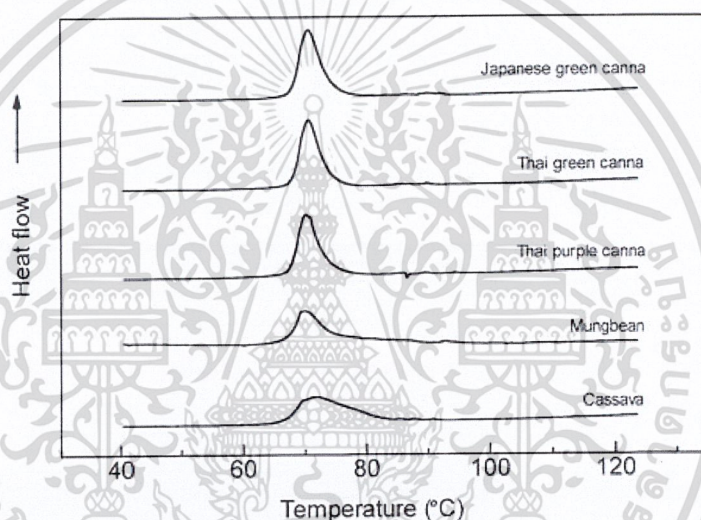
ตารางที่ 2.5 อุณหภูมิการเกิดเจล (Kofler gelatinization temperature) ของแป้งชนิดต่างๆ [6]

ชนิดของแป้ง	อุณหภูมิการเกิดเจล (°C)
แป้งข้าวโพด	62-73
แป้ง Waxy maize	62.5-72
แป้งข้าวโพด amylo maize	67-92
แป้ง Sorghum	68-75
แป้ง Waxy sorghum	67.5-74
แป้งมันฝรั่ง Idaho	56-67
แป้งมันฝรั่ง Maine	59-67.5
แป้งมันสำปะหลัง Dominican	58.5-70
แป้งข้าวสาลี (Wheat)	58-64
แป้งข้าวเจ้า	68-78
แป้งข้าวฟ่าง	68-78
แป้งมันเทศ	58-72
แป้งปาล์มสาธุ	60-72
แป้งท้าวยายม่อม	62-70

การตรวจสอบช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลในตัวแป้ง

วิธีที่ง่ายและแม่นยำ คือ วัดอุณหภูมิที่เม็ดแป้งสูญเสียเครื่องหมายจากบาทเมื่อให้ความร้อนกับน้ำแป้งเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ตรวจสอบโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบ Kofler (Kofler hot stage เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

microscope) ซึ่งเป็นกล้องจุลทรรศน์ที่มีระบบการให้ความร้อนแก่ตัวอย่างน้ำแป้งบนแผ่นสไลด์อย่างต่อเนืองในอัตรา 2°C ต่อนาที เมื่อมองผ่านแสงโพลาไรซ์ พบว่าจุดเริ่มต้นของการเปลี่ยนแปลงที่เห็นคือ เม็ดแป้งประมาณ 2% เริ่มพองตัวและสูญเสียเครื่องหมายกากบาท ที่จุดนี้เป็นจุดเริ่มต้นของการเกิดเจลาตินในเซชัน (initial of gelatinization) เมื่อเม็ดแป้งในตัวอย่างสูญเสียเครื่องหมายกากบาทไป 50% จะเรียกเป็นจุดกลางของเจลาตินในเซชัน (midpoint of gelatinization) และเมื่อเม็ดแป้งในตัวอย่างสูญเสียเครื่องหมายไปประมาณ 98% จะเรียกเป็นจุดสุดท้ายของเจลาตินในเซชัน (final of gelatinization หรือ completion point) [Schoch และ Maywald, 1956; Watson, 1964] ดังนั้นส่วนใหญ่มักแสดงช่วงอุณหภูมิเจลาตินในเซชันของแป้งเป็นตัวเลขชุด แต่ถ้าระบุเป็นอุณหภูมิเดียวมักเป็นจุดสุดท้ายของเจลาตินในเซชันหรือที่เรียกกันว่า Birefringence end point temperature (BEPT)



รูปที่ 2.18 DSC Thermogram ของแป้ง [6]

นอกจากการใช้การสังเกตการเปลี่ยนแปลง โครงสร้าง birefringence ภายใต้กล้องจุลทรรศน์แล้ว ยังสามารถตรวจสอบอุณหภูมิในการเกิดเจลาตินในซ์โดยใช้เครื่องมือที่วัด และบันทึกปริมาณความร้อนที่เปลี่ยนแปลงระหว่างกระบวนการ เช่น เครื่อง differential scanning calorimeter (DSC) ซึ่งใช้ติดตามการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพ หรือทางเคมีของวัสดุในรูปฟังก์ชันของปริมาณความร้อนที่เปลี่ยนแปลงกับอุณหภูมิ ปกติโพลีเมอร์ต่างๆ ในรูปผลึกและอสัณฐานจะเกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะได้เมื่อได้รับความร้อน แป้งก็เช่นเดียวกันในสภาพที่มีน้ำน้อย เมื่อให้ความร้อนจะมีอุณหภูมิหลอมละลาย (T_m) ที่สูงมาก กล่าวคือในช่วงของ 160 ถึง 200°C แต่เมื่อเพิ่มปริมาณน้ำมากขึ้นอุณหภูมิของการหลอมละลายก็จะลดลง เมื่อปริมาณน้ำมีประมาณ 70% แป้งจะเกิดเจลาตินในเซชัน โดยทั่วไปจะถือว่าอุณหภูมิที่มีการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีสูงสุด (peak temperature) คืออุณหภูมิในการเกิดเจลาตินในเซชัน สำหรับการตรวจสอบการเกิด เจลาตินในเซชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

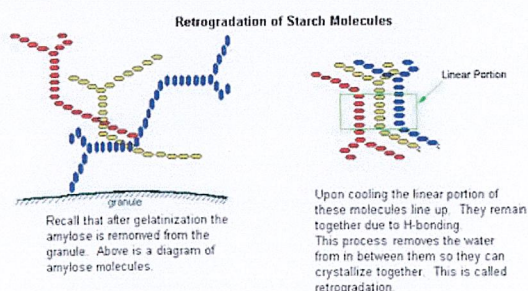
ของแป้งโดยใช้เครื่อง DSC ทำได้โดยการให้ความร้อนแก่ตัวอย่างแป้งกับน้ำในอัตรา 30/70 จนถึงอุณหภูมิที่คาดว่าเลขช่วงในการเกิดเจลลาติไนเซชัน จะได้ Thermogram ดังรูปที่ 2.3.3.3 ซึ่งเป็นกราฟระหว่าง heat flow และอุณหภูมิ พลังงานที่ใช้ในการเกิดเจลลาติไนเซชัน (DH, cal/g) ได้จากพื้นที่ใต้กราฟหารด้วยน้ำหนักแป้งตัวอย่าง

ตารางที่ 2.6 Gelatinization Characteristic ของแป้งธรรมชาติ [7]

Starch	Pasting temperature °C	Average Peak viscosity 5% starch Brabender Unit	Swelling power by weight at 95 °C	Solubility at 95 °C (%)
Potato	60-65	3000	1153	82
Maize	75-80	600	24	25
Wheat	80-85	300	21	41
Tapioca	60-65	1000	71	48
Waxy maize	65-70	800	64	23

การคืนตัวของแป้งสุก (Retrogradation)

การคืนตัวของแป้งสุกเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเมื่อน้ำแป้งสุกซึ่งร้อนมีอุณหภูมิลดต่ำลงขณะที่อุณหภูมิลดลง โมเลกุลอิสระของอะไมโลสซึ่งอยู่ใกล้กันจะเคลื่อนที่เข้ามาใกล้กันและจับตัวกันด้วยพันธะไฮโดรเจน (ดังรูปที่ 2.12) ทำให้เกิดสภาพการจัดเรียงตัวของโมเลกุลขึ้นใหม่ โดยเปลี่ยนจากลักษณะการกระจายตัวของโมเลกุลมาเป็นส่วนที่เป็น crystallite ซึ่งสามารถตรวจสอบได้โดยใช้ X-ray diffraction [Collison, 1968] ถ้าน้ำแป้งสุกมีความเข้มข้นต่ำ การจัดเรียงตัวของโมเลกุลเหล่านี้จะทำให้เกิดลักษณะตะกอนขุ่นขาว แต่ถ้าน้ำแป้งสุกมีความเข้มข้นสูง เช่น แป้งข้าวโพดความเข้มข้น 7% โดยน้ำหนัก จำนวนโมเลกุลที่มการจัดเรียงตัวกันใหม่มีมากและระหว่างเคลื่อนที่เข้ามาจับกันจะสามารถเก็บกักน้ำไว้ได้ ทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้น และในที่สุดเกิดลักษณะเจลที่อ่อนนุ่ม



รูปที่ 2.19 การคืนตัวของแป้งสุก [7]

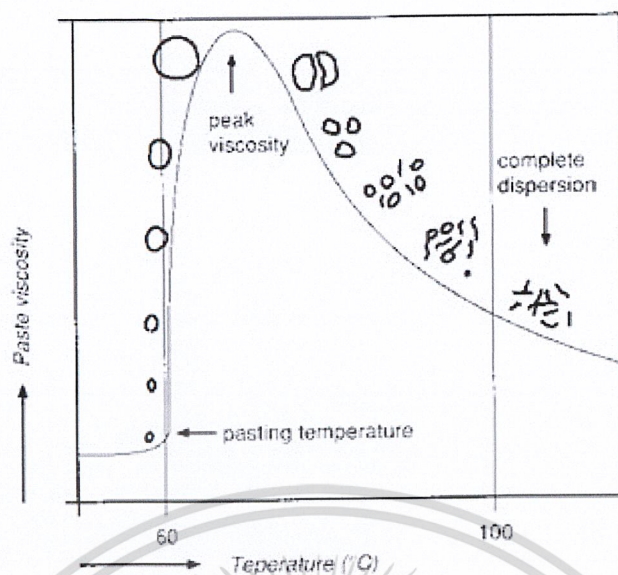
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคืนตัวของน้ำแข็ง โดยทั่วไปจะเกิดได้ดีเมื่อน้ำแข็งมีความเข้มข้นสูง และทิ้งไว้ให้เย็นที่ อุณหภูมิต่ำ แป้งแต่ละชนิดมีอัตราการคืนตัวของน้ำแข็งแตกต่างกัน โดยทั่วไปแป้งจากราก หัว มีอัตราการคืนตัวช้ากว่าแป้งจากธัญพืช ทั้งนี้เป็นเพราะแป้งจากรากหรือหัว เมื่อได้รับความร้อนจะ พองตัวมากและเร็ว และเม็ดแป้งแตกง่าย ทำให้โมเลกุลแป้งทั้งหมดกระจายอยู่ทั่วไปในน้ำแป้ง ยาก ที่โมเลกุลอะไมโลสจะมาจัดเรียงตัวกันได้ใหม่ แต่แป้งจากธัญพืช เมื่อได้รับความร้อนจะพองตัว น้อยกว่า เม็ดแป้งแตกน้อย โมเลกุลที่คลายตัวยังอยู่ใกล้ชิดกันจึงเคลื่อนที่จับกันใหม่ได้ง่าย ซึ่งอาจ จับตัวกันระหว่างเม็ดแป้งที่พองตัวซึ่งอยู่ใกล้กัน หรือระหว่างชิ้นส่วนของเม็ดแป้งหรือโมเลกุลอะ ไมโลสอิสระที่หลุดออกมา ทำให้เกิดสภาพเป็น matrix ซึ่งยึดอยู่ด้วยกันด้วยพันธะไฮโดรเจน และ สามารถเก็บกักน้ำไว้ได้ การมีอะไมโลเพคตินอยู่ด้วยทำให้อัตราการคืนตัวของน้ำแป้งสุกช้าลง เนื่องจากโมเลกุลของอะไมโลเพคตินมีกิ่งก้านสาขาทำให้เกาะกะ ยากที่โมเลกุลจะเคลื่อนที่เข้ามาจับ กันใหม่ได้ จึงพบว่าแป้งประเภท waxy มีอัตราการคืนตัวของน้ำแป้งสุกน้อยกว่าแป้งชนิดอื่น ขนาด โมเลกุลของอะไมโลสในแป้งแต่ละชนิดมีผลในการเกิดการคืนตัวของน้ำแป้งสุกด้วย โมเลกุลอะ ไมโลสที่มีขนาดพอเหมาะในการเคลื่อนที่มาจับกัน คือ ในช่วง 100-200 หน่วยกลูโคส ถ้าโมเลกุล ใหญ่ เช่น แป้งมันฝรั่งมีอะไมโลสขนาดใหญ่ประมาณ 1,000-6,000 หน่วยกลูโคส จะเคลื่อนที่เข้ามา จับกันได้ยาก และถ้าโมเลกุลสั้นเกินไปจะเคลื่อนไหวอยู่ตลอดเวลา (Brownian movement) ทำให้ จับกันยากเช่นกัน

ความหนืด (Viscosity)

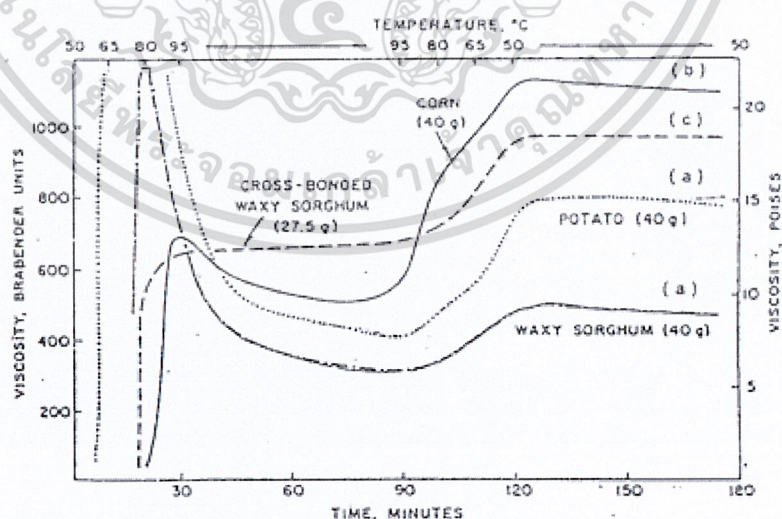
เป็นคุณสมบัติที่สำคัญและเป็นประโยชน์มากที่สุดของแป้ง เมื่อให้ความร้อนกับน้ำแป้งทำให้ เม็ดแป้งเกิดการพองตัวและมีความหนืดมากขึ้น (รูปที่ 2.20) พฤติกรรมความหนืดเป็นคุณสมบัติ เฉพาะตัวและแตกต่างกันไปตามชนิดและสายพันธุ์ของแป้ง เมื่อเม็ดแป้งซึ่งแขวนลอยในน้ำได้รับความ ร้อนจนถึงระดับหนึ่งจะพองตัวได้อย่างรวดเร็ว ทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้นเร็วมาก อุณหภูมิที่ ความหนืดเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วนี้เรียกว่า pasting temperature ความหนืดจะเพิ่มขึ้นจนถึงความหนืด สูงสุด (peak viscosity) จากนั้นอาจลดลงหรือคงที่ขึ้นกับชนิดของแป้ง การที่แป้งมีความหนืดสูงสุด เนื่องจากเมื่อเม็ดแป้งมีการพองตัวมากขึ้น และมีชิ้นส่วนของเม็ดแป้ง และหรือโมเลกุลของอะ ไมโลสและอะไมโลเพคตินบางส่วนที่แตกสลายออกมาอยู่ในสารละลาย เมื่อส่วนที่แตกสลายและ ละลายออกมามีมากกว่าการพองตัวที่เพิ่มความหนืดจะเริ่มลดลง ซึ่งจะเห็นได้ชัดเมื่ออยู่ในช่วง การหุงต้มที่ 95°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ดังนั้นค่าความหนืดของน้ำแป้งสุกจะเป็นผลมาจากการพองตัว ของเม็ดแป้ง และการแตกหักของเม็ดแป้งร่วมกับการละลายออกมาของโมเลกุลแป้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.20 การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งเมื่อให้ความร้อน [7]

เมื่อลดอุณหภูมิลง โมเลกุลอิสระที่กระจัดกระจายออกมา (โดยเฉพาะส่วนของอะไมโลส) ถ้ามีขนาดโมเลกุลที่เหมาะสมคือ ไม่สั้นและยาวเกินไปก็จะสามารถเคลื่อนที่เข้ามาจับกัน และกักน้ำไว้ได้ ทำให้ความหนืดสูงขึ้นอีก ความหนืดที่กลับสูงขึ้นนี้อีกนี้เรียกว่า setback และปรากฏการณ์นี้ก็คือการคืนตัวของแป้ง (Retrogradation) ปัจจัยที่มีผลต่อความหนืดได้แก่ ชนิดของแป้ง ขนาดอนุภาค สัดส่วนของอะไมโลสต่ออะไมโลเพคติน อุณหภูมิ shear rate ฯลฯ แต่ที่มีผลมากที่สุดได้แก่ ชนิดของแป้ง



รูปที่ 2.21 รูปแบบความหนืดของแป้งสุกชนิดต่างๆ [7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมบัติและข้อจำกัดของแป้ง

- ไม่ละลายในน้ำเย็น
- ถ้าให้ความร้อนกับแป้งที่ผสมกับน้ำที่อุณหภูมิไม่ต่ำกว่าอุณหภูมิการเกิดเจล แป้งจะเกิดเจลแล้วไม่กลับคืนรูปเดิม (irreversible swelling)
- โครงสร้างของแป้งไม่ทนต่ออุณหภูมิสูง อมความร้อนและถ่ายเทความร้อนได้ยาก การผสมแป้งในปริมาณมากอาจเกิดการไหม้ กลายเป็นฟองของคาร์บอน ไดออกไซด์
- โครงสร้างของแป้งไม่ทนกรด และทนแรงเฉือนต่ำ
- แป้งสามารถบิกระนาบแสงโพลาไรซ์ได้ เรียกว่า สมบัติไบรฟรินเจนซ์ (Birefringence) แสดงถึงโครงสร้างที่มีความเป็นผลึกของเม็ดแป้ง
- แป้งสามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับไอโอดีนได้

2.3.4 แป้งมันสำปะหลัง [8]

มันสำปะหลังมีถิ่นกำเนิดแถบอเมริกากลางและอเมริกาใต้ มันสำปะหลังได้แพร่กระจายจากแหล่งกำเนิดไปสู่ทวีปแอฟริกาในราวปี ค.ศ. ที่ 15 เรื่อยมาจนถึง ค.ศ.ที่ 18 สำหรับในทวีปเอเชียนั้น พบว่ามีการแพร่กระจายของมันสำปะหลังเข้ามาสู่ประเทศอินเดียในราวต้น 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 มันเส้น และแป้งดิบ และเป็นประเทศผู้ส่งออกผลิตภัณฑ์มันสำปะหลังเป็นอันดับ 1 ของโลก ประมาณ 4.6 ล้านตันหรือคิดเป็นสัดส่วนตลาดร้อยละ 85.5 คิดเป็นมูลค่าการส่งออกมากกว่า 30,000 ล้านบาท โดยส่งออกให้ประเทศจีน และไต้หวัน เป็นต้น ส่งผลให้มันสำปะหลังเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญชนิดหนึ่งของประเทศไทย มันสำปะหลังส่วนที่เหลืออีกร้อยละ 26.5 นั้นใช้บริโภคภายในประเทศ ซึ่งเกือบทั้งหมดถูกใช้ในรูปของแป้งดิบและนำไปแปรรูปในอุตสาหกรรมต่างๆ ได้แก่ อุตสาหกรรมผงชูรส อุตสาหกรรมไลซีน อุตสาหกรรมสารให้ความหวาน อุตสาหกรรม

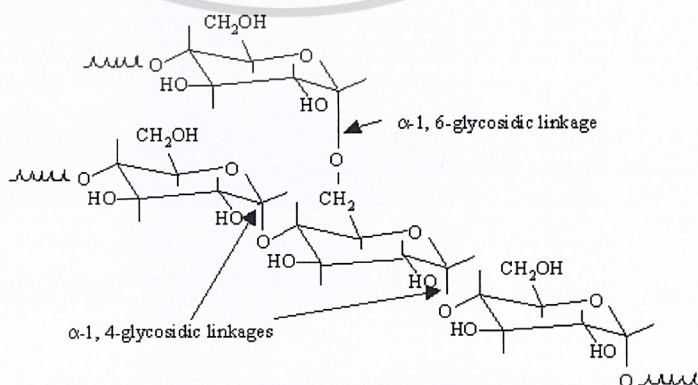
กระดาษ อุตสาหกรรมทอผ้า เป็นต้น อย่างไรก็ตามความต้องการมันสำปะหลังเพื่อตลาดส่งออกเป็นปัจจัยหลักต่อธุรกิจมันสำปะหลังของไทยในปัจจุบัน

แป้งมันสำปะหลัง ผลิตได้จากรากที่มีลักษณะคล้ายหัวของต้นมันสำปะหลัง มีชื่อเรียกทางวิทยาศาสตร์ว่า *Manihot utilisima* ในภาษาอังกฤษจะเรียกมันสำปะหลังว่า Tapioca starch, Cassava starch หรือ Monioc starch เป็นส่วนของรากที่โตขึ้นสำหรับสะสมแป้ง หัวมันสำปะหลังสดมีน้ำอยู่ประมาณ 60-65 เปอร์เซ็นต์ และส่วนประกอบส่วนใหญ่คือแป้งหรือคาร์โบไฮเดรตประมาณ 20-35 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นหัวมันสำปะหลังจึงเป็นแหล่งคาร์โบไฮเดรตที่ให้พลังงานในอาหารของคน และสัตว์ แต่มีปริมาณ โปรตีนและไขมันน้อยมากไม่เหมาะที่จะใช้เป็นแหล่งของโปรตีน และไขมัน การนำหัวมันสำปะหลังไปใช้มักจะทำให้แห้ง เพื่อลดความชื้นลงเสียก่อน เช่น มันเส้น มันอัดเม็ดหรือสกัดเฉพาะส่วนของแป้งออกจากหัวมันสำปะหลัง ซึ่งมีองค์ประกอบทางเคมีดังตารางที่ 2.3.4

ตารางที่ 2.7 องค์ประกอบทางเคมีของแป้งมันสำปะหลังโดยทั่วไป [8]

องค์ประกอบ	ปริมาณ (ร้อยละ)
ความชื้น	12.59
แป้ง	87.0
ไขมัน	0.1
โปรตีน	0.1
เถ้า	0.2
ฟอสฟอรัส	0.01

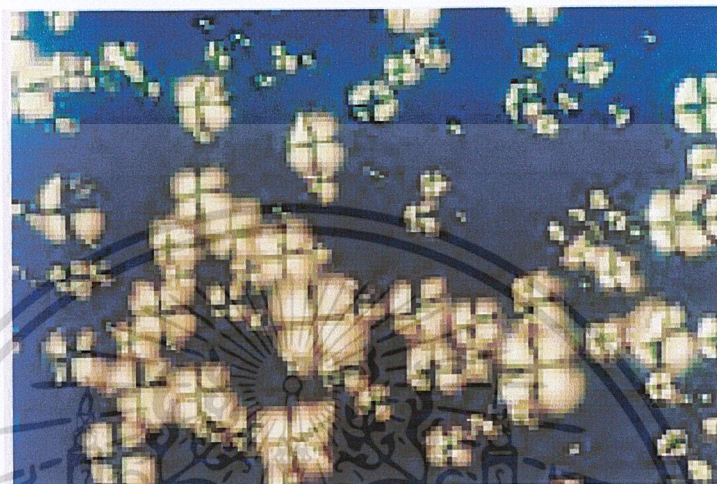
สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของแป้งมันสำปะหลัง



รูปที่ 2.22 โครงสร้างทางเคมีของแป้ง [4]

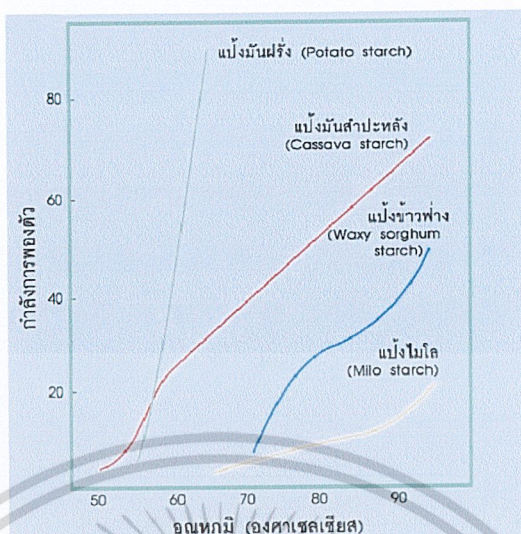
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เม็ดแป้งมันสำปะหลังมีลักษณะคล้ายรูปกล้วยมีความยาวเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 ถึง 35 ไมครอน เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยโดยจำนวน (Number average diameter) เท่ากับ 20 ไมครอน เมื่อตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงโพลาไรซ์จะเห็นลักษณะกากบาทสีดำเรียกว่า Birefringence

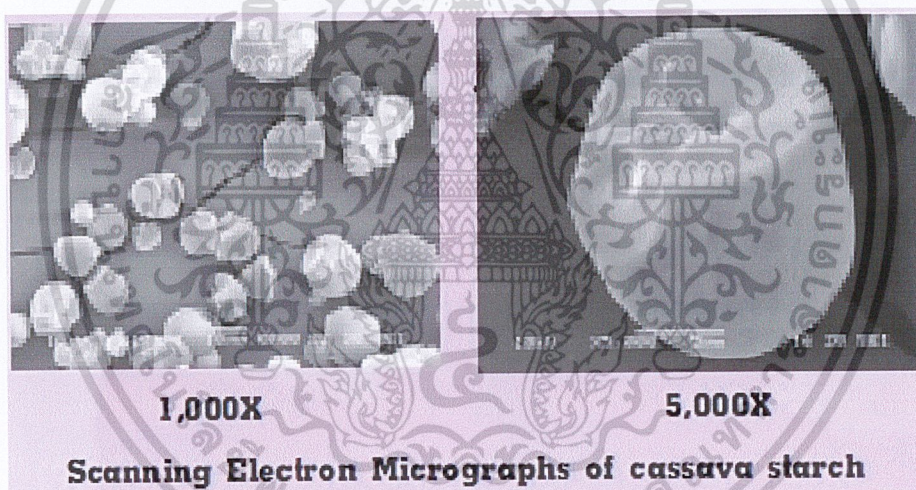


รูปที่ 2.23 ลักษณะ Birefringence ของแป้งมันสำปะหลัง [4]

ภายในเม็ดแป้งประกอบด้วยอะไมโลส และอะไมโลเพกติน ซึ่งมีการจัดเรียงตัวต่างกัน แบ่งได้เป็น 2 แบบ แบบแรก สายพอลิเมอร์ของอะไมโลสเรียงตัวขนานกันอย่างเป็นระเบียบมีอะไมโลสบางส่วนเรียงขนานกับส่วนที่เป็นสายโซ่ตรงส่วนนอกของอะไมโลเพกติน และยึดติดกันด้วยพันธะไฮโดรเจนทำให้โมเลกุลบริเวณนี้จับกันอย่างหนาแน่น และแรงยึดเหนี่ยวสูง บริเวณนี้เรียกว่า Crystalline regions หรือ Micells เป็นส่วนสำคัญที่ทำให้เกิดลักษณะ Birefringence ของเม็ดแป้ง Crystalline regions นี้มีความสามารถในการดูดน้ำและพองตัวต่ำมาก ส่วนแบบที่สอง โมเลกุลเรียงตัวกันอย่างไม่เป็นระเบียบ แรงดึงดูดระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ของอะไมโลส และอะไมโลเพกตินต่ำกว่าแบบแรก บริเวณที่มีการจัดเรียงตัวของโมเลกุลเหล่านี้เรียกว่า Amorphous regions เป็นส่วนที่ดูดน้ำได้ดี และพองตัวได้ง่าย



รูปที่ 2.24 การพองตัวของแป้งชนิดต่างๆ [4]



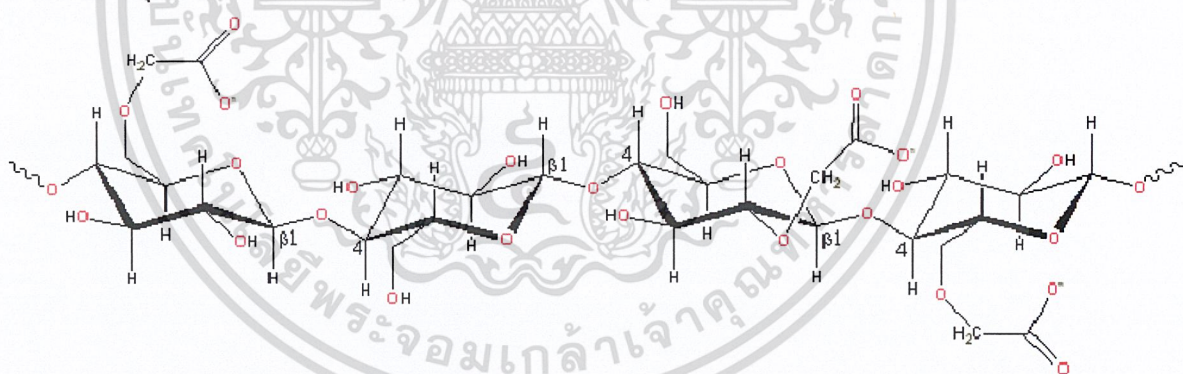
รูปที่ 2.25 SEM ของแป้งมันสำปะหลัง [4]

2.4 คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (Carboxymethyl Cellulose; CMC) [9]

เซลลูโลสเป็นพอลิแซ็กคาไรด์น้ำหนักโมเลกุลสูง จัดเป็นพอลิเมอร์ชีวภาพที่พบมากที่สุดในโลก โดยพบเป็นองค์ประกอบหลักอยู่ในพืชต่างๆ ไป เซลลูโลสเป็น โฮโมพอลิเมอร์ของหน่วย แอนไฮโดรกลูโคส (Anhydroglucose) ซึ่งเหมือนกับแป้งและไกลโคเจน แต่โครงสร้างนี้จะเชื่อมต่อกันแบบ 1,4- β -linkag และอาจมีค่าองศาการพอลิเมอไรซ์ (Degree of Polymeriization ; DP) ถึง 3500 ทำให้เซลลูโลสมีสมบัติต่างจากแป้งและไกลโคเจน เซลลูโลสมีโครงสร้างเป็นสายโซ่ตรงโดยเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่สายโซ่โมเลกุลมีการจัดเรียงตัวแบบ Fully extended chains ซึ่งมีแรงดึงดูดระหว่างสายโซ่โมเลกุลด้วยพันธะไฮโดรเจน ซึ่งมีผลทำให้เกิด โครงสร้างผลึกขึ้น ดังนั้นเซลลูโลสจึงไม่ละลายในน้ำ เมื่อเปรียบเทียบกับแป้งพบว่าเซลลูโลสมีความเป็นผลึกสูงกว่าแป้งมาก ถ้าต้องการเปลี่ยนโครงสร้างผลึกของเซลลูโลสให้เป็นอสัญฐานต้องให้ความร้อนแก่เซลลูโลสที่กระจายตัวอยู่ในน้ำถึง 320 องศาเซลเซียส ความดัน 25 เมกะปาสคาล

คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเป็นอนุพันธ์ของเซลลูโลสที่หมู่ไฮดรอกซิลถูกแทนที่ด้วยหมู่กรด (-OCH₂COOH) คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่ผลิตในเชิงพาณิชย์ส่วนใหญ่อยู่ในรูปของโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส อาจมีชื่อเรียกว่า เซลลูโลสแกม (Cellulose Gum) หรือโซเดียมเซลลูโลสไกลโคเลต (Sodium cellulose glycolate) จัดอยู่ในพวกแอนไอออนิกเซลลูโลสอิเทอร์ คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่ผลิตเชิงการค้าโดยทั่วไปจะมีค่าองศาการแทนที่ประมาณ 0.4-1.5 ซึ่งสามารถละลายน้ำได้ ในขณะที่คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่มีค่าองศาการแทนที่ 0.1-0.3 จะละลายน้ำได้ไม่ดี คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสแบ่งออกเป็นเกรดต่างๆตามการนำไปใช้ประโยชน์ ซึ่งการแบ่งเกรดขึ้นอยู่กับ ค่าองศาการแทนที่ ความสม่ำเสมอของหมู่แทนที่ องศาการเกิดพอลิเมอร์ และองศาความบริสุทธิ์



รูปที่ 2.26 โครงสร้างทางเคมีของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส [9]

2.5 พอลิเมอร์ผสม (Polymer Blend) [10]

การทำพอลิเมอร์ผสม เป็นวิธีการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ที่นิยมใช้กันมาก โดยการนำพอลิเมอร์ 2 ชนิด ซึ่งอยู่ในสถานะที่เป็นของไหล ได้แก่ เป็นสารละลาย (solution) หรือสารหลอมเหลว (molten) มาผสมให้อยู่รวมเป็นเนื้อเดียวกัน (blending) ได้เป็นพอลิเมอร์ผสม (Polymer blend) ซึ่งสมบัติที่ดีของพอลิเมอร์แต่ละชนิดมารวมกัน แต่การผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกันของพอลิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมอร์ต่างชนิดกันนั้น โดยธรรมชาติแล้วจะเป็นไปได้ยาก ดังนั้น พอลิเมอร์ผสมที่ได้จึงไม่เป็นสารละลายของแข็งที่แท้จริง และพบว่าเมื่ออยู่ในสถานะที่เป็นของแข็ง พอลิเมอร์ชนิดหนึ่งจะกระจายอยู่ในเนื้อหรือเมตริกซ์ที่ต่อเนื่อง (continuous matrix) ของพอลิเมอร์อีกชนิดหนึ่ง ทั้งนี้การกระจายตัวดังกล่าวต้องเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ มิฉะนั้น จะทำให้เกิดเป็นข้อบกพร่อง (defect) ของผลิตภัณฑ์ และส่งผลให้คุณสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมต่ำกว่าของพอลิเมอร์ บริสุทธิ์ได้ ดังนั้นจึงต้องพิจารณาถึงสภาพเข้ากันได้ (compatibility) ของพอลิเมอร์ที่นำมาผสมกันซึ่งบางชนิดสามารถเข้ากันได้ดี บางชนิดไม่สามารถเข้ากันได้เนื่องจากโครงสร้างสายโซ่ต่างกันจึงไม่สามารถกระจายตัวอย่างอิสระเกิดการแยกชั้น นอกจากนี้ ยังมีปัจจัยทางพลังงาน (energy factor) ที่ทำให้พอลิเมอร์ 2 ชนิดเข้ากันไม่ได้ นั่นคือ พลังงานที่ใช้ในการผสมผสาน โมเลกุลหรือสายโซ่ของพอลิเมอร์ เช่น การดูดกลืนพลังงานความร้อนของพอลิเมอร์แต่ละชนิดต่างกัน

1. กลไกสภาพเข้ากันได้ (Compatibility Mechanism)

พอลิเมอร์ผสมส่วนใหญ่จะให้สมบัติที่ค่อนข้างต่ำ โดยเฉพาะสมบัติเชิงกล ทั้งนี้เนื่องจากแรงดึงดูกระหว่างผิวสัมผัสที่ต่ำและความเค้นสะสม (stress concentration) จากคิสเพอร์สในเมตริกซ์ ดังนั้นเพื่อเพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้ในการผสม จึงนิยมใช้สารช่วยผสมหรือการทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีในระหว่างการผสม (in-situ chemical reaction) เพื่อปรับปรุงแรงดึงดูกระหว่างผิวสัมผัสของพอลิเมอร์ผสมเพื่อให้ได้โครงสร้างสัณฐานวิทยาและสมบัติของพอลิเมอร์ผสมที่เหมาะสม

2. วิธีการผสมเพื่อความเข้ากันได้ (Method of Compatibilization)

เทคนิคที่ใช้ในการผสม เพื่อความสามารถในการเข้ากันได้ และทำให้ได้พอลิเมอร์ผสมที่มีสมบัติตามต้องการนั้นมีอยู่ด้วยกันหลายวิธี โดยแต่ละวิธีอาจมีความเกี่ยวข้องกัน ดังนั้นการเลือกใช้ขึ้นอยู่กับผู้ผลิตเป็นหลัก โดยจะพิจารณาจากต้นทุนเป็นสำคัญ เทคนิคเหล่านี้คือ

-การพิจารณาสภาพผสมเข้ากันได้ทางเทอร์โมไดนามิกส์ เป็นหลักการที่ได้มีการนำไปใช้ประโยชน์ในกระบวนการผลิตทางการค้า โดยหลักการดังกล่าวนี้ขึ้นอยู่กับ สมดุลระหว่างเอนทัลปีและเอนโทรปีของการผสม ที่มีต่อพลังงานเสรีของการผสม (free energy of mixing) การเปลี่ยนแปลงพลังงานเสรีของการผสมสามารถแสดงได้ดังสมการ

$$\Delta G = \Delta H - \Delta TS$$

ΔG = การเปลี่ยนแปลงพลังงานเสรีของการผสม

ΔH = การเปลี่ยนแปลงเอนทาลปีของการผสม

ΔS = การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีของการผสม

T = อุณหภูมิ (K)

3. เกิดการขาดและรวมกันใหม่ของแต่ละโมเลกุล เพื่อสร้างบล็อกหรือกราฟโคพอลิเมอร์ โดยกระบวนการดังกล่าวจะเกิดภายใต้ภาวะที่แรงเฉือนสูง

4. ส่งเสริมให้เกิดปฏิกิริยา โดยการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา (catalyst)

2.5.1 ความสามารถในการละลายเข้ากันได้และความสามารถในการผสมเข้ากันได้ (Miscibility and Compatibility)

ความสามารถในการละลายเข้ากันได้ (Miscibility) ในระดับโมเลกุลจัดเป็นมโนทัศน์ทางทฤษฎีเทอร์โมไดนามิกส์ กล่าวคือ เมื่อเกิดขึ้นจะทำให้เกิดระบบวัฏภาคเดี่ยวเนื้อเดียว (Homogeneous single-phase system) มีสมบัติอยู่ระหว่างพอลิเมอร์ 2 ชนิด และโดยทั่วไปจะเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของพอลิเมอร์ชนิดนั้นๆ พอลิเมอร์ผสมจัดเป็นสิ่งที่มีความเกี่ยวข้องกับการค้า โดยเฉพาะเมื่อองค์ประกอบมีส่วนเกี่ยวข้องกับความสามารถในการละลายเข้ากันได้ของโมเลกุล (molecular miscibility) ได้แก่ น้ำหนักโมเลกุลต่ำ ความเป็นผลึกมีค่าเท่ากับศูนย์ ความมีขั้วคล้ายกัน พันธะไฮโดรเจนร่วมกัน

ความสามารถในการผสมเข้ากันได้ (Compatibility) จัดเป็นสมบัติในทางปฏิบัติของพอลิเมอร์ผสมบางชนิดซึ่งละลายได้ในระดับโมเลกุลและมีประโยชน์ในทางการค้าเป็นระบบที่ละลาย (immiscible) ในระดับโมเลกุล และแยกออกเป็นระบบวัฏภาค (multi-phase system) ในขณะที่ระบบหลายวัฏภาคนั้นนานขึ้นจะมีแรงยึดเกาะระหว่างผิวมากขึ้น (strong interfacial adhesion) ทำให้สามารถรวมสมบัติที่ดีที่สุดของแต่ละวัฏภาคและเกิดเป็นความสมดุลของสมบัติ ทั้งหมดที่ไม่สามารถได้จากสมบัติของพอลิเมอร์บริสุทธิ์ โดยลำพัง ยิ่งไปกว่านั้นระบบชั้นนำหลายๆระบบมีการปรับปรุงระบบผสมรวมที่สำคัญ (major synergistic improvement) มากกว่า 1 สมบัติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.2 เคมีของพอลิเมอร์ผสม

ระบบพอลิเมอร์แบบหลายวัฏภาคอาจเกิดขึ้นได้หลายวิธีดังนี้

พอลิเมอร์ผลึก (Crystalline Polymer) ในทางปฏิบัติไม่มีผลึก 100 เปอร์เซ็นต์ แต่จะเป็นระบบ 2 วัฏภาค คือ ผลึก (Crystalline) และอสัณฐาน (amorphous) โดยในแต่ละวัฏภาคมีส่วนทำให้เกิดการกระจายตัวของสมบัติทั้งหมด ในบางวิธีสมบัติที่ได้เหมาะกับมโนทัศน์ทั่วไปของระบบพอลิเมอร์แบบหลายวัฏภาคแต่อย่างยังไม่มีความรู้พื้นฐานเพียงพอที่จะรวมเข้าในหัวข้อปัจจุบันได้

พอลิเมอร์ผสม (Polymer Blend) เกิดจากการผสมพอลิเมอร์ที่แตกต่างกัน 2 ชนิด ในขณะที่ระบบบางชนิดอาจเหมาะสมกับความต้องการทางเทอร์โมไดนามิกส์ เพื่อให้เกิดความสามารถในการละลายเข้ากันได้ของโมเลกุลที่สมบูรณ์ แต่โดยส่วนมากจัดเป็นการละลายได้บางส่วนหรือไม่ละลาย และแยกวัฏภาคออกเป็น 2 หรือมากกว่า 2 วัฏภาค ด้วยเหตุนี้คำว่าพอลิเมอร์ผสมและระบบหลายวัฏภาคจึงนิยมใช้แทนระบบนี้

พอลิเมอร์ร่วมแบบบล็อกและตอกกิ่ง (Block and Graft Copolymer) ประกอบด้วยโครงสร้างพอลิเมอร์ที่ไม่เหมือนกันตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป ซึ่งไม่สามารถละลายเข้ากันได้ ถ้าพอลิเมอร์ถูกทำให้แยกออกจากกันหรือแม้แต่การเกิดพันธะโคเวเลนต์เป็นโมเลกุลเดี่ยวก็ตามจะมีแนวโน้มแยกออกจากกันเป็นแต่ละวัฏภาค (individual phases) ทำให้เกิดโครงสร้างเป็นแบบหลายวัฏภาคได้ยิ่งไปกว่านั้นเทคนิคส่วนมากที่ใช้ในการสังเคราะห์พอลิเมอร์ร่วมแบบบล็อกหรือตอกกิ่ง 100 เปอร์เซ็นต์ต่อมาจึงทราบว่าการพัฒนาทางการค้าที่จะสำเร็จได้ดีที่สุดคือการพัฒนาผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการผสมระหว่างพอลิเมอร์เดี่ยว 2 ชนิด ให้เกิดเป็นพอลิเมอร์ร่วมแบบบล็อกหรือตอกกิ่งที่มีแรงยึดเหนี่ยวที่แข็งแรงระหว่างวัฏภาคที่แยกออกจากกัน

ไอโอโนเมอร์ (Ionomer) โดยทั่วไปจะประกอบด้วยสัดส่วนของไอออนิกที่มีประจุ (charged ionic groups) อยู่เล็กน้อยในพอลิเมอร์อินทรีย์ที่มีสัดส่วนอยู่มาก โดยมีพันธะเป็นแบบโคเวเลนต์และมีความเป็นขั้วต่ำมาก ในที่นี้ประกอบด้วยโครงสร้าง 2 โครงสร้างที่ไม่เหมือนกัน และพยายามแยกออกเป็นแต่ละวัฏภาคอย่างดีที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากกลุ่มไอออนิกมีอยู่น้อย โดยทั่วไปจะเกิดเป็นวัฏภาคเล็กๆ ที่ไม่ต่อเนื่อง (discrete microphases) ในขณะที่พอลิเมอร์โคเวเลนต์ (covalent polymer) ที่มีอยู่มากเกิดเป็นวัฏภาคเมตริกซ์ต่อเนื่อง (continious matrix phase) ระบบนี้จึงจัดเป็นระบบหลายวัฏภาค (mulyiphase system) เช่นกัน ไอโอโนเมอร์ นี้ มีความคล้ายคลึงกันกับชนิดอื่นๆ แต่ยังอยู่ในระหว่างการศึกษารายละเอียดเพื่อจัดรวมเข้ากับทฤษฎีที่มีอยู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างร่างแหพอลิเมอร์แบบสามมิติ (Interpenetrating polymer Network, (IPN)) เกิดขึ้นอย่างเหมาะสม โดย

1. เริ่มจากการพอลิเมอไรซ์มอนอเมอร์ A ไปเป็นพอลิเมอร์ A
2. จากนั้นทำให้เกิดการเชื่อมโยง (crosslinking) เล็กน้อย
3. ทำให้บวม (swelling) ด้วยของเหลวมอนอเมอร์ B หรือ โอลิโกเมอร์ B
- 4 พอลิเมอไรซ์มอนอเมอร์ B ไปยังพอลิเมอร์ B
5. สุดท้ายเชื่อมโยงพอลิเมอร์ B

การทำเช่นนี้ ทำให้พอลิเมอร์ผสมที่ถักกันอย่างหนาแน่น (tightly interwoven) บนโครงสร้างมีขนาดเล็กมาก และทำให้เกิดโครงสร้างที่มีเสถียรภาพอย่างถาวร ด้วยเหตุนี้จึงทำให้เกิดวิธีการที่ซับซ้อนในการควบคุมการผลิตโครงสร้างแบบหลายวัฏภาค

2.5.3 สมบัติโดยทั่วไป

สมบัติกับอัตราส่วนระหว่าง A และ B เมื่อพอลิเมอร์ A และ B นำมาผสมกันในอัตราส่วน จาก 1/100 ถึง 0/100 และเขียนกราฟระหว่างสมบัติกับอัตราส่วน A/B อาจสังเกตพฤติกรรมได้เป็นลักษณะใดลักษณะหนึ่งใน 4 แบบต่อไปนี้

แบบที่ 1 ละลายเข้ากันได้ (Miscible)

ถ้าพอลิเมอร์ละลายซึ่งกันและกันได้อย่างสมบูรณ์ ในระดับโมเลกุล และเกิดเป็นวัฏภาคเนื้อเดียว

โดยทั่วไปสมบัติที่ได้จะเป็นสัดส่วนกับอัตราส่วนของพอลิเมอร์ทั้งสอง ในพอลิเมอร์ผสม ทำให้ได้กราฟเป็นเส้นตรง หรืออย่างน้อยที่สุดเป็นเส้น โค้งที่สม่ำเสมอ (simple monotonic curve) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับหน่วยที่ใช้ในการวัดหรือ การเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ เส้น โค้งแบบนี้ อาจใช้ได้ทางทฤษฎีเพื่อให้คำจำกัดความเป็นระบบเนื้อเดียว (homogeneous system) หรืออย่างน้อยเพื่อจำกัดพฤติกรรมแบบเนื้อเดียว (homogenous behavior) ในทางปฏิบัติมีประโยชน์สำหรับนักผลิตสารประกอบที่ต้องการผลิตสเปกตรัมสมดุลของสมบัติที่ได้ (spectrum of balance of properties) อย่างง่าย ๆ จากพอลิเมอร์ธรรมดาสองชนิด พบว่าระบบพอลิเมอร์ผสมในทางการค้าที่สำคัญหลายชนิดแสดงพฤติกรรมเช่นนี้

พฤติกรรมแบบเนื้อเดี่ยวนี้อาจจะสังเกตได้แม้ว่าพอลิเมอร์ทั้งสองไม่ละลายซึ่งกันและกัน ในระดับโมเลกุล โดยสามารถอธิบายด้วยเหตุผล 2 ประการ

- 1) สมบัติต่างๆ ขึ้นอยู่กับลักษณะ โครงสร้างที่สำคัญ และไม่ไวต่อโครงสร้าง

ในระดับไมโคร (fine-detail microstructure) ดังนั้นการทดสอบอย่างง่าย ๆ เพื่อที่จะเห็นการแยกของวัฏภาคเล็กๆ จึงทำไม่ได้ผล โดยทั่วไปการทดสอบในอัตราที่ต่ำ (conventional low-rate tests) เช่น มอดูลัสและการทดสอบการเบี่ยงเบนทางความร้อน (HDT) เป็นวิธีที่ใช้กันสำหรับพฤติกรรมแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นี้ในขณะที่อาจทำให้การวิเคราะห์ในทางทฤษฎี เกิดความผิดพลาดแต่ก็เป็นที่ยอมรับใช้กันสำหรับนักผลิตสารประกอบ และการประยุกต์ใช้ทางพอลิเมอร์ผสม

2) การไหลของของไหลที่อัตราความเฉือนสูง จะเป็นแบบทิศทางเดียวโดยเฉพาะในการ อัดรีด (extrusion) จะทำให้เกิด โครงสร้างแบบลามลลา ซึ่งพอลิเมอร์ที่ไม่ละลายสองชนิดเกิดเป็นอนุกรมสลับกัน อยู่ในโครงสร้างของวัฏภาคต่อเนื่อง จากนั้นเป็นการทดสอบตามแนวแกน (axial tests) เช่น สมบัติแรงดึงที่ใช้วัดสมบัติเฉลี่ยที่คำนวณจากพื้นที่ภาคตัดขวางของวัฏภาคทั้งสอง ในส่วนผสม ซึ่งจุดนี้เป็นส่วนที่ทำให้เกิดข้อผิดพลาดในทางทฤษฎีได้ แต่สมบัติที่ได้ อาจจะมีประโยชน์ในทางปฏิบัติสำหรับผลิตภัณฑ์เฉพาะงาน

แบบที่ 2 การผสมเข้ากันได้แบบกึ่งหนึ่ง (Semi-compatible)

เมื่อพอลิเมอร์สองชนิดผสมกันแล้ว ไม่ละลายเข้ากันและแยกออกเป็นวัฏภาคเมตริกซ์แบบต่อเนื่อง และควบคุมสมบัติทั้งหมดไว้ ในขณะที่พอลิเมอร์รองเกิดเป็น โดเมนกระจายตัว (dispersed domain) และกระทำหน้าที่เหมือนเป็นสารเติมซึ่งมีผลเพียงส่วนน้อยต่อสมบัติที่ได้ด้วยเหตุนี้อัตราส่วนระหว่าง A และ B ที่สูงจะมีสมบัติคล้ายกับพอลิเมอร์ A และอัตราส่วนระหว่าง B และ A ที่สูงจะมีสมบัติคล้ายกับพอลิเมอร์ B และแน่นอนเมื่ออัตราส่วนระหว่าง A และ B เท่ากัน จะทำให้เกิดการเปลี่ยนกลับของวัฏภาค (phase inversion) ด้วยการเปลี่ยนแปลงสมบัติอย่างรวดเร็วจากวัฏภาค (two-phase system)

2.6 กลีเซอรอล[11]

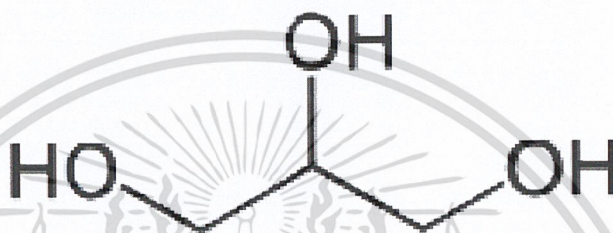
พลาสติกไซเซอร (Plasticizer) ตามนิยามของ IUPAC หมายถึง สารที่เข้าไปรวมอยู่กับพลาสติก หรือ Elastomer แล้วช่วยเพิ่มความอ่อนตัว ความคงทนการใช้งาน และการยืดตัว แบ่งเป็น 2 ประเภท คือ พลาสติกไซเซอรภายนอก (External plasticizer) เป็นสารที่เติมลงไป ในโครงสร้างพอลิเมอร์แล้วทำให้เกิดสารเชิงซ้อนหรือการจับกลุ่มของ โมเลกุล เนื่องจาก พลาสติกไซเซอรไปจับยึดกับพอลิเมอร์ด้วยพันธะโคเวเลนต์ทุติยภูมิ พลาสติกไซเซอรภายใน (Internal plasticizer) เป็นสารที่เติมลงไปแล้วทำหน้าที่เป็นสารร่วมช่วยในการเกิด พอลิเมอร์

สมบัติของพลาสติกไซเซอรที่ดีต้องรวมเป็นเนื้อเดียวกับพอลิเมอร์ที่ใช้ โดยมีแรงระหว่างโมเลกุลของสารทั้งสองใกล้เคียงกัน มีจุดเดือดสูง ระเหยยาก ละลายในตัวทำละลายที่ใช้ได้ดี นอกจากนี้ควรมีไม่มีสี กลิ่น รส ไม่เป็นพิษ และไม่ติดไฟ ถ้าใช้พลาสติกไซเซอรที่มีสมบัติเหมาะสมจะช่วยป้องกันไม่ให้เกิดการแยกตัวระหว่างทำผลิตภัณฑ์ให้แห้ง พลาสติกที่ดีต้องมีลักษณะทางกายภาพดี สามารถทนยืดหยุ่นตลอดการใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พลาสติกไซเซอรที่นำมาใช้กับพลาสติกจากแป้งมีหลายประเภท ได้แก่ มอนอแซ็กคาไรด์ โดแซ็กคาไรด์ และ โอลิโกแซ็กคาไรด์ พอลิออลและลิพิดหรืออนุพันธ์ของลิพิด

กลีเซอรอล (Glycerol) หรือกลีเซอริน (Glycerine) เป็นพอลิออลที่มีคาร์บอน 3 อะตอม มีสูตรโมเลกุล $C_3H_8O_3$ โครงสร้างโมเลกุลดังรูปที่ มีน้ำหนักโมเลกุล 92 เป็นผลพลอยได้จากการผลิตสบู่และกรดไขมัน มีสมบัติเป็นของเหลวที่มีความหนืด รสหวาน 0.6 เท่าของน้ำตาล ผสมเป็นเนื้อเดียวกันกับน้ำและแอลกอฮอล์ได้ดีมาก เป็นสารละลายที่ละลายน้ำมันได้ดีพอสมควร ดูดความชื้นจากอากาศได้ปานกลาง



รูปที่ 2.27 โครงสร้างของกลีเซอรอล [11]

สมบัติทางกายภาพ

กลีเซอรอลบริสุทธิ์เป็นของเหลว ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ไม่มีพิษ และมีโครงสร้างคล้ายน้ำตาลจึงทำให้กลีเซอรอลมีรสหวาน และเนื่องจากในโมเลกุลมีพันธะไฮโดรเจนจึงทำให้กลีเซอรอลเป็นของเหลวหนืด กลีเซอรอลมีจุดเดือด 290 องศาเซลเซียสที่ความดันบรรยากาศ (101.3 kPa) และจุดเดือดจะลดลงตามความดันที่ลดลง

กลีเซอรอลสามารถละลายได้ดีกับน้ำ, เมทานอล, เอทานอล, และไอโซเมอร์ของโพรพานอล บิวทานอล และเพนทานอล รวมทั้งฟีนอล, ไกลคอล, โพรเพนไดออล, เอมีน และสารประกอบที่เป็น เซทเทอโรไซคลิกที่ประกอบด้วยอะตอมของไนโตรเจนในวงแหวน (เช่น ไพรีดีน, ควิโนลีน) กลีเซอรอลไม่สามารถละลายได้ในไฮโดรคาร์บอนเกือบทั้งหมด แอลกอฮอล์ที่มีโซ่ยาว น้ำมันพืชและสัตว์ และตัวทำละลายประเภทฮาโลเจน เช่น คลอโรฟอร์ม เป็นต้น

สมบัติทางเคมี

กลีเซอรอลสามารถเกิดปฏิกิริยาได้เหมือนกับแอลกอฮอล์ทั่วไป โดยที่หมู่ไฮดรอกซีด้านนอกจะมีความไวต่อการเกิดปฏิกิริยามากกว่าหมู่ไฮดรอกซีตรงกลาง ภายใต้สภาวะที่เป็นกลางหรือเอกสาร์นี่เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่าง กลีเซอรอลสามารถทนความร้อนได้ถึง 275 องศาเซลเซียส โดยไม่เกิดเป็นอะโครลีน ในทางตรงกันข้ามในสภาวะกรดเล็กน้อยพบว่าที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส จะมีกลิ่นของอะโครลีน (อยู่ในช่วง 0.2-0.4 ppm) โดยที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส อะโครลีนจะเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว ดังนั้นปฏิกิริยาของกลีเซอรอลควรทำในสภาวะที่เป็นกลางหรือด่างและที่อุณหภูมิห้องกลีเซอรอลจะดูดความชื้นได้อย่างรวดเร็ว

นอกจากนี้กลีเซอรอลยังถูกออกซิไดซ์ได้ง่ายโดยที่อะตอมคาร์บอนภายนอกจะถูกออกซิไดซ์เป็นหมู่คาร์บอกซิล และอะตอมคาร์บอนตรงกลางจะเกิดเป็นหมู่คาร์บอนิล

2.7 สารเคมี

2.7.1) Ammonium persulfate[12]

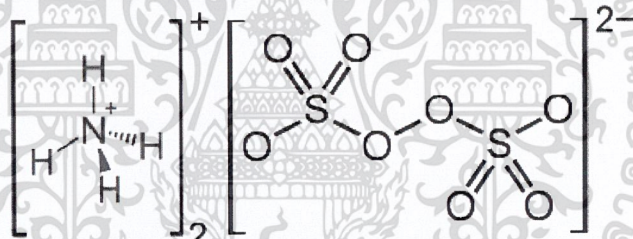
ชื่อเคมี

Ammonium persulfate

สูตร โมเลกุล

$(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$

สูตร โครงสร้าง



สมบัติทางกายภาพและทางเคมี (Physical and Properties)

- | | |
|-------------------------|------------|
| ● สถานะ | ผลึก |
| ● สี | ขาว |
| ● กลิ่น | ไม่มีกลิ่น |
| ● น้ำหนักโมเลกุล | 228.18 |
| ● จุดเดือด | 120 °C |
| ● ความถ่วงจำเพาะ(น้ำ=1) | 1.982 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อันตรายจากสารเคมี

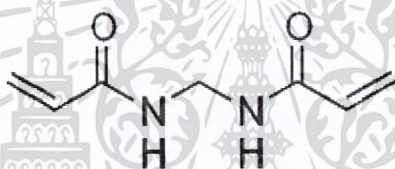
เป็นอันตรายหากกลืนหรือรับประทาน ทำให้ระคายเคืองและลุดติดไฟได้ เป็นสารออกซิไดซ์อย่างรุนแรงเมื่อสัมผัสกับวัตถุอื่นอาจทำให้ลุดติดไฟได้ เก็บไว้ในที่ห่างจากความร้อน ประกายไฟหรือเปลวไฟ หลีกเลี่ยงการสัมผัส ดวงตาผิวหนัง เสื้อผ้า เก็บภาชนะปิดสนิท ใช้ในสถานที่ที่มีระบายอากาศเพียงพอ ทำความสะอาดหลังการสัมผัส

2.7.2) *N,N'*-Methylenebisacrylamide[12]

ชื่อเคมี *N,N'*-Methylenebisacrylamide

สูตรโมเลกุล $C_7H_{10}O_2N_2$

สูตรโครงสร้าง



สมบัติทางกายภาพและเคมี (Physical and Properties)

- Purity >99.0%
- A290 (2%.water) <0.4
- Conductivity (2%,water) <10 mmho
- Acrylic acid <0.001%

อันตรายจากสารเคมี

หากกลืนหรือรับประทานอาจเป็นอันตรายถึงตายได้ หลีกเลี่ยงการสูดดม การสัมผัสกับตา ผิวหนังหรือเสื้อผ้า หลังการใช้งานควรล้างมือให้สะอาดและควรอ่านคู่มือใช้งานก่อน

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

A. Pourjavadi และคณะ (2006) [1] ศึกษาการเตรียมพอลิเมอร์ดูดซับยิ่งยวด (Superabsorbent hydrogel) ตั้งเคราะห์จากคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสผสมกับโซเดียมอัลจีเนต (Na-Alg) โดยใช้ *N,N*-Methylenebisacrylamide (MBA) เป็นสารก่อพันธะเชื่อมโยงและใช้ Ammonium persulfate (APS) เป็นสารริเริ่มปฏิกิริยา แล้วศึกษาสมบัติการบวมตัวในน้ำของไฮโดรเจล ซึ่งมีผลแปรตามตัวแปร คือ อุณหภูมิ, อัตราส่วนน้ำหนักระหว่างโซเดียมอัลจีเนตต่อคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส, ความเข้มข้นของ MBA, และความเข้มข้นของ APS พบว่าค่าการบวมตัวในน้ำของไฮโดรเจลจะลดลงเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ MBA และ APS เพิ่มขึ้น และค่าการบวมตัวในน้ำจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาเป็น 85 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนน้ำหนักโซเดียมอัลจีเนตต่อคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเป็น 0.54 จากนั้นยืนยันลักษณะของไฮโดรเจลที่ตั้งเคราะห์ได้ด้วย วิธีสเปกโตรสโกปีอินฟราเรด (FTIR Spectroscopy) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ศึกษาอิทธิพลที่มีต่อจลนศาสตร์การบวมตัวของไฮโดรเจลจากตัวแปรดังนี้ คือ ค่าพีเอช, ขนาดอนุภาค, และความเข้มข้นของ MBA การทดสอบการดูดซับของไฮโดรเจลในสารละลายเกลือ NaCl, CaCl₂ และ AlCl₃ ได้ผลดังนี้คือ $Na^+ > Ca^{2+} > Al^{3+}$ และการดูดซับในสารละลายเกลือประเภท Monovalent cation คือ $LiCl > NaCl > KCl$

เกศินี เหมวิเชียร และคณะ (2005) [13] ทำการเชื่อมโยงแป้งมันสำปะหลังทำโดยใช้โซเดียมไตรเมทาฟอสเฟต (5% ของน้ำหนักแป้ง) และทำคาร์บอกซีเมทิลเลชันด้วยโซเดียมโมโนคลอโรอะซีเตต (5, 10, 15, 20, 25, และ 30% ของน้ำหนักแป้ง) แป้งมันสำปะหลังที่ทำครอสลิงค์และคาร์บอกซีเมทิลเลชัน ได้รับการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติโดย FTIR, TGA, และ DSC ประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนักของแป้งมันสำปะหลังที่ถูกรอสลิงค์และคาร์บอกซีเมทิลเลชัน ถูกตรวจสอบโดยการนำตัวอย่างมาใส่ในสารละลายของโลหะหนัก ความเข้มข้นของไอออนของโลหะหนักก่อนและหลังการทดสอบ ถูกวิเคราะห์โดยใช้ ICP-AES ผลการทดลองพบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนักขึ้นอยู่กับปริมาณของ โซเดียมโมโนคลอโรอะซีเตต ประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนักเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของ โซเดียมคลอโรอะซีเตตเพิ่มขึ้น

Chunyu Chang และคณะ (2009) [14] ทำการเตรียมไฮโดรเจลดูดซับยิ่งยวด (Superabsorbent hydrogel) จากคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสและเซลลูโลสในระบบของของเหลวโซเดียมไฮดรอกไซด์/ยูเรีย (NaOH/Urea aqueous system) โดยใช้เอพิคลอโรไฮดริน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Epichlorohydrin ; ECH) เป็นสารก่อพันธะเชื่อมโยง แล้วศึกษาลักษณะโครงสร้างและสัณฐานวิทยาด้วย FT-IR spectroscopy, Thermogravimetric analysis และ Scanning electron microscope พบว่า CMC จะทำให้ขนาดของรูพรุนเพิ่มมากขึ้น โดย เซลลูโลสที่เป็นสายโซ่หลักของไฮโดรเจลเป็นส่วนสำคัญในการคำนวณโครงสร้างไว้ ค่าอัตราส่วนสมดุลการบวมตัวในน้ำกลั่น และสรีระศาสตร์ของไหลที่ระเหยออกมา จะแสดงถึงค่าอัตราส่วนการบวมตัวในน้ำซึ่งอาจมากถึงระดับ 1000 โดยโครงสร้างของไฮโดรเจลยังคงตัวอยู่ ไฮโดรเจลที่เตรียมได้นี้ นอกจากจะมีสมบัติการบวมตัวที่ดีแล้วยังมีสมบัติการหดตัวในสารละลายโซเดียมคลอไรด์และแคลเซียมคลอไรด์อีกด้วย

Wei Li และคณะ (2009) [15] ศึกษาโครงสร้างของพันธะไฮโดรเจนในฟิล์มคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสด้วยเทคนิคสเปกโตรสโกปีชนิดแสงอินฟราเรดในช่วงอุณหภูมิ 40-220 องศาเซลเซียส จุดเปลี่ยนที่สำคัญ 2 จุด (Two important transition points) จะชัดเจนขึ้นด้วยการทดสอบ DSC ร่วมกับการวิเคราะห์ด้วยแสงอินฟราเรด ซึ่งที่ 100 องศาเซลเซียสมีการสลายตัวของโมเลกุลน้ำที่ 170 องศาเซลเซียสจะเริ่มเกิดการออกซิไดซ์ของ O6H6 วิเคราะห์อันดับชุดของแถบแสงอินฟราเรดที่เกิดขึ้นระหว่างช่วงอุณหภูมิ 40-220 องศาเซลเซียส โดยวิธี Two-dimensional correlation method พบว่าโมเลกุลน้ำเกี่ยวข้องกับหมู่คาร์บอนิล ($C=O$) และหมู่ไฮดรอกซิล ($-OH$) เมื่อน้ำระเหย หมู่คาร์บอนิลที่มีน้ำอยู่ (Dehydrated $C=O$ group) จะกลายเป็นหมู่คาร์บอนิลที่ไม่มีน้ำ (Non-hydrated $C=O$ group) เมื่ออุณหภูมิสูงมากขึ้นพันธะไฮโดรเจนภายในสายโซ่จะอ่อนแอลงและเมื่ออุณหภูมิสูงมากกว่า 170 องศาเซลเซียสหมู่ O6H6 จะค่อยๆถูกออกซิไดซ์ และทำให้พันธะไฮโดรเจนภายในสายโซ่ทำปฏิกิริยากับ CH_3COONa แล้วทำให้หมู่ O6H6 อ่อนแอลง ดังนั้นจึงกำหนดพันธะไฮโดรเจนชนิดหลักๆในคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสและเปลี่ยนแปลงโครงสร้างพันธะไฮโดรเจน

ระหว่างกระบวนการทางความร้อนซึ่งอาจก่อให้เกิดให้เกิดประโยชน์อย่างกว้างขวางมากขึ้นในการใช้งานในห้องปฏิบัติการและในทางอุตสาหกรรม

กุลธิดา แซ่ฮ่วย (2550) [18] ได้ศึกษาการเตรียมผงสารเมือกแห้งจากเม็ดแมงลัก และเตรียมไฮโดรเจลจาก Poly(2-hydroxyethyl methacrylate) ผสมกับสารเมือกจากเม็ดแมงลัก เนื่องจากสารเมือกจากเม็ดแมงลักมีสมบัติการดูดซับน้ำได้ดี จึงเหมาะที่จะนำมาพัฒนาและเตรียมเป็นไฮโดรเจล โดยศึกษาปริมาณของสารเมือกจากเม็ดแมงลัก ปริมาณสารเชื่อมโยง (crosslinking agent) ปริมาณตัวริเริ่มปฏิกิริยา (Initiator) ผลของอุณหภูมิในขณะที่ทำการผสมที่มีต่อพฤติกรรมทางฟองตัวและสมบัติเชิงกลของไฮโดรเจล ผลจากการทดสอบพบว่า อุณหภูมิของปฏิกิริยาไม่มีผลต่อการเกิดพันธะเชื่อมโยงในสารเมือกจากเม็ดแมงลัก แต่มีผลกระทบต่อการศึกษา Poly(2-hydroxyethyl methacrylate) โดยที่อุณหภูมิสูงเกิดพอลิเมอร์ได้มาก เมื่อสารเชื่อมโยง และตัวริเริ่มปฏิกิริยามีน้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลจากการตรวจวิเคราะห์ด้วย FTIR, TGA และ SEM พบว่าไม่มีความแตกต่างกัน ผลการทดลอง แสดงว่า สารเมือกจากเมล็ดแมงลักสามารถนำมาทำเป็นฟิล์มไฮโดรเจลที่มีความสามารถดูดซับน้ำได้ โดยใช้สารเชื่อมโยง N,N-Methylenebisacrylamide

D.R.Lu, C.M. Xiao, S.J. Xu (2552) [19] แป้งคือพอลิเมอร์ตามธรรมชาติที่มีลักษณะ เฉพาะตัวหลายๆอย่างพอลิเมอร์สังเคราะห์บางตัวนั้นสามารถสลายตัวทางชีวภาพได้ และยัง สามารถนำไปทำเสื้อผ้าได้อย่างง่ายดายอีกด้วย ดังนั้นถ้านำข้อดีของแป้ง และพอลิเมอร์สังเคราะห์ มารวมกันจะได้พอลิเมอร์ที่สลายตัวทางชีวภาพได้อย่างสมบูรณ์โดยมีแป้งเป็นองค์ประกอบหลัก (SCBP) เพื่อใช้ในทางการแพทย์ และสิ่งแวดล้อม ในงานวิจัยนี้แนะนำโครงสร้าง และ ลักษณะเฉพาะแบบคร่าวๆ รวมถึงการเตรียม SCBP ผ่านการผสมทางกายภาพ และทางเคมี สุดท้าย จะเป็นการยกตัวอย่างการนำไปใช้ประโยชน์ต่างๆ และการพัฒนาเพื่อลดปริมาณการใช้ผลิตภัณฑ์ จากปิโตรเคมีลง และเพื่อช่วยลดปัญหาทางสิ่งแวดล้อมด้วย

T. Siriwittayacom, N. Suebsanti, R.Molly, P. Siriwittayacom, และ M. Prasitsilp,(2544) [20] เตรียมไฮโดรเจลพอลิเมอร์ของ 2-hydroxyethyl methylacrylate และ โคพอลิเมอร์ของ 2-hydroxyethylmethacrylate-co-methyl acrylate จากเทคนิคบิลด์ใช้ปริมาณของ methyl acrylate อยู่ใน ช่วง 0-25 % โดยน้ำหนัก พบว่าเมื่อ methyl acrylate เพิ่มขึ้น ปริมาณน้ำที่ดูดซึมจนอิ่มตัว ปริมาณ การกักเก็บน้ำ อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว และความทนแรงดึงลดลง แต่ความทนความร้อนสูงขึ้น โคพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์มีแนวโน้มที่จะนำมาทำผิวหนังเทียมได้

S.K. Bajpai (2542) [21] ศึกษาการเตรียมไฮโดรเจลจาก Casein (โปรตีนในนม) ผสมกับ Polyacrylamide แล้วทำให้เกิดพันธะเชื่อมโยง และศึกษาพฤติกรรมการบวมตัวและการปลดปล่อย ยา วิธีการเตรียมทำได้โดยนำ Casein มาละลายใน NaOH เติมนอนอเมอร์ Acrylamide, N,N-Methylenebisacrylamide (เป็นสารก่อเชื่อมโยง), Sodium metabisulphite และ Potassium persulphate (เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยาแบบ Redox) และน้ำได้ Casein crosslink กับ Polyacrylamide และพบว่าไฮโดรเจลบวมตัวได้มากที่สุดที่สถานะเป็นกลาง

Y. J Kim , Y.M Lee และ Park , 1994 [22] งานวิจัยนี้ได้ทำการสำรวจการย่อยสลายทางชีวภาพของพอลิเมอร์ โดยแป้งจะต้องทำการตัดแปลงก่อนที่จะผสมด้วยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ เพราะแป้งมีคุณสมบัติในการจับตัวกับน้ำได้ดี วิธีการตัดแปลงมี 3 วิธีที่จะนำมาประยุกต์ใช้ให้เข้ากับแป้งผสมพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ วิธีแรกปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชัน (Esterification) ของหมู่ไฮดรอกซิลในแป้งกับอะซิติกไฮดรอย (Acrylonitrile) และสไตรีนบนแป้ง วิธีสุดท้ายปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของหมู่ไฮดรอกซิลในแป้งกับไอโอเมอร์ 3 ชนิด โดยพิจารณาค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) ค่าความยาว ณ จุดขาด (% Elongation at break) ค่ามอดูลัสยัง (Young' s modulus) และค่าความหนืดเฉือน (Shear viscosity) ของแป้งผสมตัดแปลง พบว่าการกำจัดมอนอเมอร์ในแป้ง จะแสดงถึงการเข้ากันได้ของแป้งผสมตัดแปลงกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ มีประสิทธิภาพมากที่สุด

ธนาวดี ลีจากภัย , ก้องเกียรติ คงสุวรรณ และ นุศุล เอื้อพันธเศรษฐ , 2543 [23] ได้วิจัยและพัฒนาเพื่อผลิตเม็ดพลาสติกชีวภาพย่อยสลายได้สำหรับอุตสาหกรรมพลาสติกฟิล์มและถาดอาหาร ทำได้ยากและไม่คุ้มค่าทางเศรษฐกิจ ทำให้ปริมาณขยะประเภทนี้ถูกทิ้งเป็นปริมาณมาก ซึ่งเป็นการสูญเสียเนื้อที่ในบ่อฝังกลบ การพัฒนาและใช้งานพลาสติกที่ผลิตจากวัตถุดิบที่สามารถปลูกหรือสร้างทดแทนขึ้นใหม่ได้ และมีสมบัติในการย่อยสลายได้ดีจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการแก้ปัญหาดังกล่าวข้างต้น ในปัจจุบันอุตสาหกรรมด้านบรรจุภัณฑ์ได้ให้ความสนใจในการผลิตฟิล์ม และบรรจุภัณฑ์ที่มีสมบัติย่อยสลายได้อย่างสมบูรณ์ในบ่อหมักปุ๋ยอินทรีย์ แป้งจึงเป็นวัตถุดิบที่สำคัญหนึ่งที่ได้รับ ความสนใจในการนำมาผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์ประเภทใช้ครั้งเดียวทิ้ง โดยบรรจุภัณฑ์ที่มีแป้งเป็นส่วนประกอบหลักสามารถผลิตได้โดยกระบวนการขึ้นรูปเช่นเดียวกับพลาสติกทั่วไป

ในงานวิจัยนี้จะทำการพัฒนากระบวนการผลิตเม็ดพลาสติกที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบหลักที่มีสมบัติทนทานต่อความชื้นและมีสมบัติทางกายภาพและเชิงกลดีขึ้น ซึ่งสมบัติต่างๆเหล่านี้สามารถเพิ่มขึ้นได้ โดยใช้เทคนิคการศึกษาความสัมพันธ์ของสภาวะที่ใช้ในการขึ้นรูป และปรับปรุงสูตรแป้ง โดยการเพิ่มส่วนผสมอื่นๆที่เหมาะสม เพื่อเพิ่มความแข็งแรง ทำให้สามารถใช้งานได้นานขึ้น นอกจากนี้จะทำการศึกษาสมบัติต่างๆของพลาสติกที่พัฒนาขึ้น เช่นความหนาแน่น โครงสร้างของพื้นผิว ความแข็งแรง และอัตราการย่อยสลายของพลาสติก

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมี อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

วัตถุดิบและสารเคมี

- แป้งมันสำปะหลัง (Cassava Starch) ตรา New Grade น้ำหนักสุทธิ 400 กรัม
- คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (Carboxymethyl Cellulose; CMC) ตรา ACROS ORGANICS
MW. = 90000
- แอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟต ($(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$) บริษัท Uniuar reagent MW. = 228.19
- *N,N*-Methylenebisacrylamide (MBA) บริษัท Fluka chemika $M_r = 154.17$
- กลีเซอรอล (Glycerol) บริษัท Fluka chemika $M_r = 92.0 + \text{aq.}$

อุปกรณ์

- บีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร
- บีกเกอร์ขนาด 100 มิลลิลิตร
- งานเพาะเชื้อ- โมลพลาสติกขนาด 6×7 นิ้ว
- กระบอกตวงขนาด 100 มิลลิลิตร
- แท่งแก้วคนสาร
- ช้อนตักสาร
- ถุงมือกันความร้อน
- ถ้วยพลาสติกขนาด 24 ออนซ์
- แผ่นอะลูมิเนียมฟอยล์
- เขี่ยกพลาสติก
- กรรไกร
- กระจกทรงเบอร์ 1

● ปากคีบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

- เครื่องฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทสโกปี (Fourier Transform Spectroscopy; FTIR) ของบริษัท K. Wasana Perkin Elmer LTD.
- เครื่องเทอร์โมกราวิเมตริก (Thermogravimetric Analysis; TGA) ของบริษัท Perkin Elmer รุ่น Pyris 1 TGA
- เครื่องทดสอบความแข็งแรงดึง (Tensile testing machine)
- ตู้อบ ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส
- ตู้เย็นธรรมดา
- แทนไฟให้ความร้อน
- เครื่องชั่งน้ำหนัก 3 ตำแหน่ง
- เครื่องปั่นความเร็วสูง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 วิธีการทดลอง

ตอนที่ 1: การศึกษาปริมาณของแป้งมันสำปะหลังและคาร์บอกซีเมททิลเซลลูโลส (CMC) ที่มีผลต่อสมบัติของฟิล์มไฮโดรเจล

1. ขั้นตอนการเตรียมแผ่นฟิล์มไฮโดรเจล

การเตรียมไฮโดรเจลจากแป้งมันสำปะหลังผสมคาร์บอกซีเมททิลเซลลูโลสโดยใช้แอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟตเป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยาและใช้ *N,N*-Methylenebisacrylamide เป็นสารก่อก้อนระเชื่อมโย

- เตรียมสารละลายแป้งมันสำปะหลัง 5% wt และสารละลายคาร์บอกซีเมททิลเซลลูโลส 5% wt
- ทำการเตรียมสารละลายต่างๆตามที่สูตรกำหนด ดังในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ปริมาณสารต่างๆในการเตรียมฟิล์มไฮโดรเจล

สูตรที่	5% แป้งมันสำปะหลัง (g)	5% CMC (g)	APS (g)	MBA (g)	กลีเซอรอล (g)
1	10	0	0.000	0.000	0
2	10	0	0.095	0.095	1
3	9	1	0.095	0.095	1
4	7	3	0.095	0.095	1
5	5	5	0.095	0.095	1
6	3	7	0.095	0.095	1
7	1	9	0.095	0.095	1
8	0	10	0.095	0.095	1
9	0	10	0.000	0.000	0

โดยทำการต้มสารละลายแป้งมันสำปะหลังที่อุณหภูมิ 80 °C ทำการปั่นกวนเป็นเวลา 20 นาทีจนสารละลายมีลักษณะใสไม่มีสีและเหนียว จากนั้นจึงทำการเติม *N,N*-Methylenebisacrylamide และกลีเซอรอล ทำการปั่นกวนต่อ เป็นเวลา 5 นาทีที่อุณหภูมิ 65-70 °C แล้วจึงเติมเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารละลายของคาร์บอกซีเมททิลเซลลูโลสที่ได้เตรียมไว้ ปั่นกวนจนมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันกวนทิ้งไว้ 1 นาที โดยอุณหภูมิยังคงไว้ที่ 65-70 °C จากนั้นจึงเติมแอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟต ปั่นกวนต่อ 10 นาที จะได้ของผสมที่เหนียวขึ้น นำมาวางทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง ทำการเทลงแม่พิมพ์ที่ทำด้วยโมลพลาสติกลักษณะสี่เหลี่ยมขนาด 6×7 นิ้ว อบที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

2. การวิเคราะห์สมบัติของไฮโดรเจล

2.1 ลักษณะทางกายภาพของฟิล์มไฮโดรเจล

พิจารณาลักษณะไฮโดรเจลที่เตรียมได้หลังจากการทำให้แห้งโดยการอบที่อุณหภูมิ 60 °C

2.2 ทดสอบการวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชัน

วิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันที่อยู่ในสารตัวอย่าง โดยใช้เทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier Transform Spectroscopy; FTIR) ทำการเตรียมตัวอย่างฟิล์มผสมโดยนำตัวอย่างแห้งที่ได้จากการหา Gel fraction มาบดผสมกับโพแทสเซียมโบรไมด์ที่อบแห้งแล้วจำนวน 0.2-0.5 กรัม ให้เข้ากันแล้วอัดเป็นแผ่น แล้วจึงนำไปวิเคราะห์ และนอกจากนั้นยังทำการวิเคราะห์แป้งมันสำปะหลัง คาร์บอกซีเมททิลเซลลูโลส *N,N*-Methylenebisacrylamide บริสุทธิ์ด้วย ซึ่งหลังทำการวิเคราะห์จะได้กราฟสเปกตรัมของสารตัวอย่างแล้วจึงทำการวิเคราะห์สเปกตรัมว่าแต่ละพีกที่ปรากฏเป็นของหมู่ฟังก์ชันใด

2.3 ทดสอบสมบัติการบวมน้ำ (Swelling property)

นำชิ้นงานที่ตัดเป็นแผ่นสี่เหลี่ยมขนาด 1×1 นิ้ว ของทุกๆ สุ่มมาแช่ลงในน้ำกลั่น โดยทำการทดสอบที่อุณหภูมิห้องและจึงหีบขึ้นมาชั่งน้ำหนักส่วนเกินออก โดยนำมาชั่งทุก 1 ชั่วโมง เป็นเวลา 6 ชั่วโมง จากนั้นจึงแช่ต่อจนครบ 24 ชั่วโมง แล้วจึงทำการชั่งน้ำหนักอีกครั้ง น้ำหนักที่ได้มาคำนวณตามสูตรดังนี้

$$\bullet \quad \% \text{Swelling} = [W_t - W_g / W_g] \times 100$$

โดย W_t คือ น้ำหนักของตัวอย่างแช่น้ำที่เวลาใดๆ

และ W_g คือ น้ำหนักของตัวอย่างแห้งก่อนแช่น้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\bullet \quad \% \text{Equilibrium water content} = [W_e - W_g / W_g] \times 100$$

โดย W_e คือ น้ำหนักของตัวอย่างแช่น้ำที่เวลา 24 ชั่วโมง

2.4 การหาสัดส่วนของแข็งที่ไม่ละลาย (Gel fraction)

ทำการหาสัดส่วนของแข็งที่ไม่ละลาย (Gel fraction) โดยนำตัวอย่างหลังแช่น้ำกลั่นเป็นเวลา 24 ชั่วโมง มาอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส แล้วจึงจมน้ำหนักของแข็งที่ไม่ละลาย โดยทำเช่นนี้ทุกๆ สัปดาห์ ทำสัปดาห์ละ 2 ครั้ง จากนั้นจึงนำมาคำนวณหา % Gel fraction ตามสูตรดังนี้

$$\% \text{ Gel fraction} = [W_g / W_o] \times 100$$

โดย W_g คือ น้ำหนักของตัวอย่างอบแห้งหลังแช่น้ำ

และ W_o คือ น้ำหนักของตัวอย่างแห้งก่อนแช่น้ำ

2.5 ทดสอบสมบัติเชิงกล

1. ตัดตัวอย่างของแผ่นฟิล์มที่เตรียมได้ให้มีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมขนาด 2.5×10 เซนติเมตร สัปดาห์ละ 3 ตัวอย่าง
2. นำมาทดสอบด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแรงดึง (Tensile testing machine) ตามมาตรฐาน ASTM D-1822 โดยใช้ Crosshead speed 5 mm/min จะได้ค่า Tensile strength และค่า % Elongation at break

2.6 ทดสอบสมบัติทางความร้อน

ทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค Thermogravimetric Analysis (TGA)

1. เตรียมฟิล์มตัวอย่างที่จะส่วนที่ไม่เกิดปฏิกิริยาออกแล้ว โดยให้น้ำหนักของตัวอย่างไม่เกิน 20 มิลลิกรัม
2. เทียบมาตรฐานเครื่องเทอร์มัลกราวิเมตรีโดยใช้ถ้วยเปล่า (Pan) โดยทำทดสอบภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน (N_2)

3. นำตัวอย่างที่เตรียมได้ใส่ลงถ้วยและทำการวิเคราะห์ตั้งแต่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส จนถึงอุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส โดยให้ความร้อนเพิ่มขึ้นด้วยอัตรา 10 องศาเซลเซียสต่อนาที เมื่อครบกำหนดเวลาแล้วจะได้กราฟการสลายตัวออกมาและทำการพลาโนพังก์
4. ทำซ้ำตามสูตรที่กำหนด

ตอนที่ 2: การศึกษาผลของปริมาณสารเชื่อมโยง *N,N*-Methylenebisacrylamide (MBA) ที่มีผลต่อสมบัติของฟิล์มไฮโดรเจล

3. ขั้นตอนการเตรียมแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลที่มีการปรับปรุงปริมาณสารก่อกัมพันธะเชื่อมโยง

การเตรียมไฮโดรเจลจากแป้งมันสำปะหลังผสมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสโดยใช้แอมโมเนียมเพอร์ซัลเฟตเป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยาและใช้ *N,N*-Methylenebisacrylamide เป็นสารก่อกัมพันธะเชื่อมโยง

- เตรียมสารละลายแป้งมันสำปะหลัง 5% wt และสารละลายคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส 5% wt
- ทำการเตรียมสารละลายต่างๆตามที่สูตรกำหนด ดังในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ปริมาณสารต่างๆในการเตรียมฟิล์มไฮโดรเจล

สูตรที่	5% แป้งมันสำปะหลัง (g)	5% CMC (g)	APS (g)	MBA (g)	กลีเซอรอล (g)
10	3	7	0.095	0.0475	1
11	3	7	0.095	0.1900	1

วิธีการเตรียมฟิล์มตัวอย่างทำการเตรียมเช่นเดียวกับตอนที่ 3.2.1

4. การวิเคราะห์สมบัติของไฮโดรเจล

ทำการวิเคราะห์ ลักษณะทางกายภาพของฟิล์มไฮโดรเจล ทดสอบการวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันทดสอบสมบัติการบวมน้ำ (Swelling property) หาสัดส่วนของแข็งที่ไม่ละลาย (Gel fraction) ทดสอบสมบัติเชิงกลและทดสอบสมบัติทางความร้อน โดยมีวิธีทำเช่นเดียวกับทำการวิเคราะห์ตอนที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4


ผลการทดลอง

แผ่นฟิล์มไฮโดรเจลที่เตรียมได้ จากการนำสารละลาย 5% แป้งมันสำปะหลังผสมกับสารก่อพันธะเชื่อม โยง *N,N*-Methylenebisacrylamide (MBA) และกลีเซอรอล ปั่นกวนพร้อมกันให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิ 65-70 °C จากนั้นเติมสารละลาย 5% คาร์บอกซีเมททิลเซลลูโลส(CMC) ปั่นกวนให้เป็นเนื้อเดียวกันแล้วเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยาแอม โมเนียมเปอร์ซัลเฟต (APS) ปั่นกวนต่อเป็นเวลา 10 นาที จากนั้นจึงเทลงแม่พิมพ์พลาสติกขนาด 6×7 นิ้ว อบที่อุณหภูมิ 60 °C อัตราส่วนที่ใช้ในการผสมตัวอย่างแต่ละสูตรแสดงดังตารางที่ 3.1 และตารางที่ 3.2 ที่กล่าวมาแล้วข้างต้น

ตอนที่ 1 : ศึกษาปริมาณของแป้งมันสำปะหลังและคาร์บอกซีเมททิลเซลลูโลส (CMC) ที่มีผลต่อสมบัติของฟิล์มไฮโดรเจล

4.1 ลักษณะทางกายภาพของฟิล์มไฮโดรเจล

ตารางที่ 4.1 ลักษณะทางกายภาพของฟิล์มไฮโดรเจลสูตรต่างๆ

สูตร	5% แป้งมันสำปะหลัง (g)	5% CMC (g)	MBA (g)	รูปแผ่นฟิล์มไฮโดรเจล	ลักษณะทางกายภาพ
1	10	0	0.000		มีความโปร่งแสง มันทั้งสองด้าน ความหนาไม่สม่ำเสมอ มีความแข็งเปราะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สูตร	5% แป้ง มัน สำปะหลัง (g)	5% CMC (g)	MBA (g)	รูปแผ่นฟิล์ม ไฮโดรเจล	ลักษณะทาง กายภาพ
2	10	0	0.095		โปร่งแสง ชุ่ม เล็กน้อย ขาดง่าย แต่สามารถคงรูป ได้ ชิ้นงานมีความ มัน
3	9	1	0.095		โปร่งแสง มีสีออก เหลืองเล็กน้อย สามารถดึงยืดได้ดี ขึ้น หนาสม่ำเสมอ
4	7	3	0.095		โปร่งแสงมีสี เหลืองอ่อน ชิ้นงานยืดได้ดี ชิ้นงานมีความมัน มากขึ้น
5	5	5	0.095		ชิ้นงานมีสีเหลือง เข้มขึ้น โปร่งแสง สามารถดึงยืดได้ดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

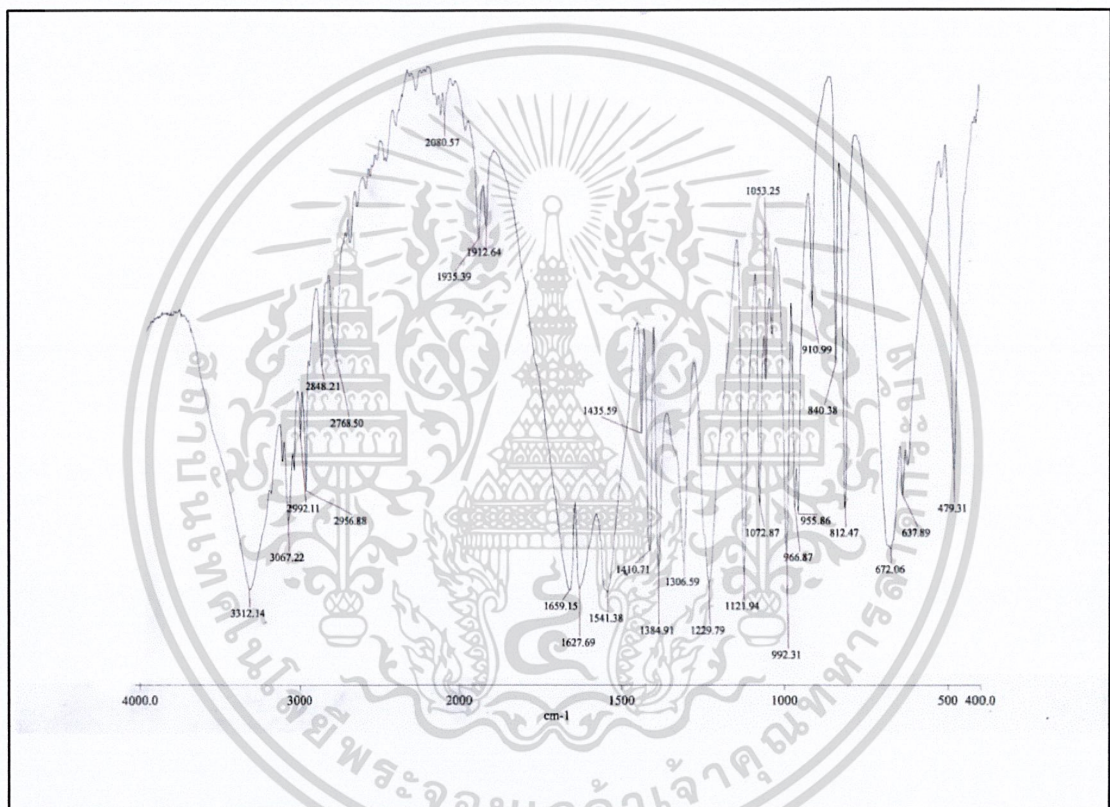
สูตร	5% แป้ง มัน ตำปะหลัง (g)	5% CMC (g)	MBA (g)	รูปแผ่นฟิล์ม ไฮโดรเจล	ลักษณะทาง กายภาพ
6	3	7	0.095		แผ่นโปร่งแสง ค่อนข้างขุ่น มัน ด้านหนึ่ง สามารถ ดึงยึดได้ดี
7	1	9	0.095		แผ่นใส โปร่งแสง มีสีเหลืองเข้ม พองอากาศกระจาย อยู่
8	0	10	0.095		มีสีเหลืองเข้ม โปร่งแสง สามารถ ดึงยึดได้ดี มี ลักษณะพื้นผิวด้าน
9	0	10	0.000		มีลักษณะแข็ง เปราะ ไม่สามารถ ดึงยึดได้ดีสีเหลือง อ่อน โปร่งแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการเปรียบเทียบสมบัติของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลที่ได้จากแป้งมันสำปะหลังผสมกับคาร์บอกซีเมททิลเซลลูโลส โดยสมบัติที่ทดสอบ ได้แก่ การตรวจสอบหมู่ฟังก์ชัน การทดสอบสมบัติการบวมน้ำทุกๆ 1 ชั่วโมง เป็นเวลา 6 ชั่วโมงและเวลา 24 ชั่วโมง การหาสัดส่วนของแข็งที่ไม่ละลาย (Gel fraction) การทดสอบสมบัติเชิงกลและการทดสอบสมบัติทางความร้อน

4.2 การวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared

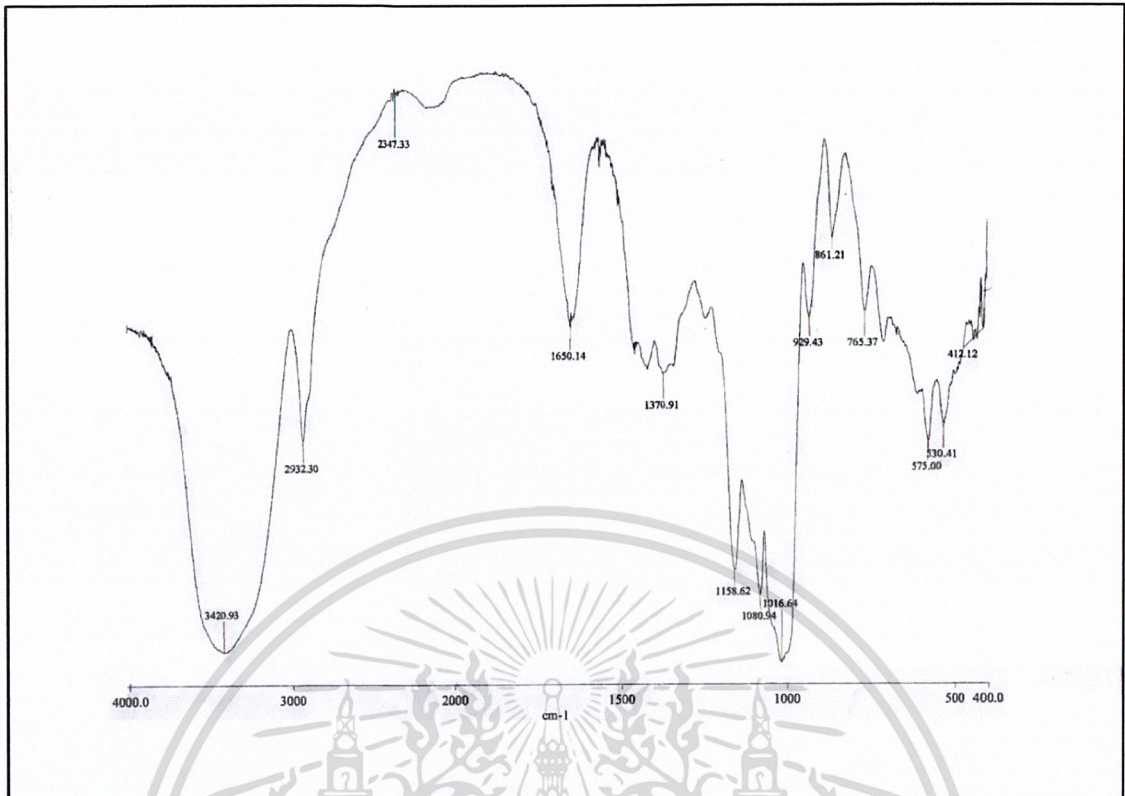
Spectroscopy (FT-IR)



รูปที่ 4.1 สเปกตรัมของ *N,N*-Methylenebisacrylamide (MBA)

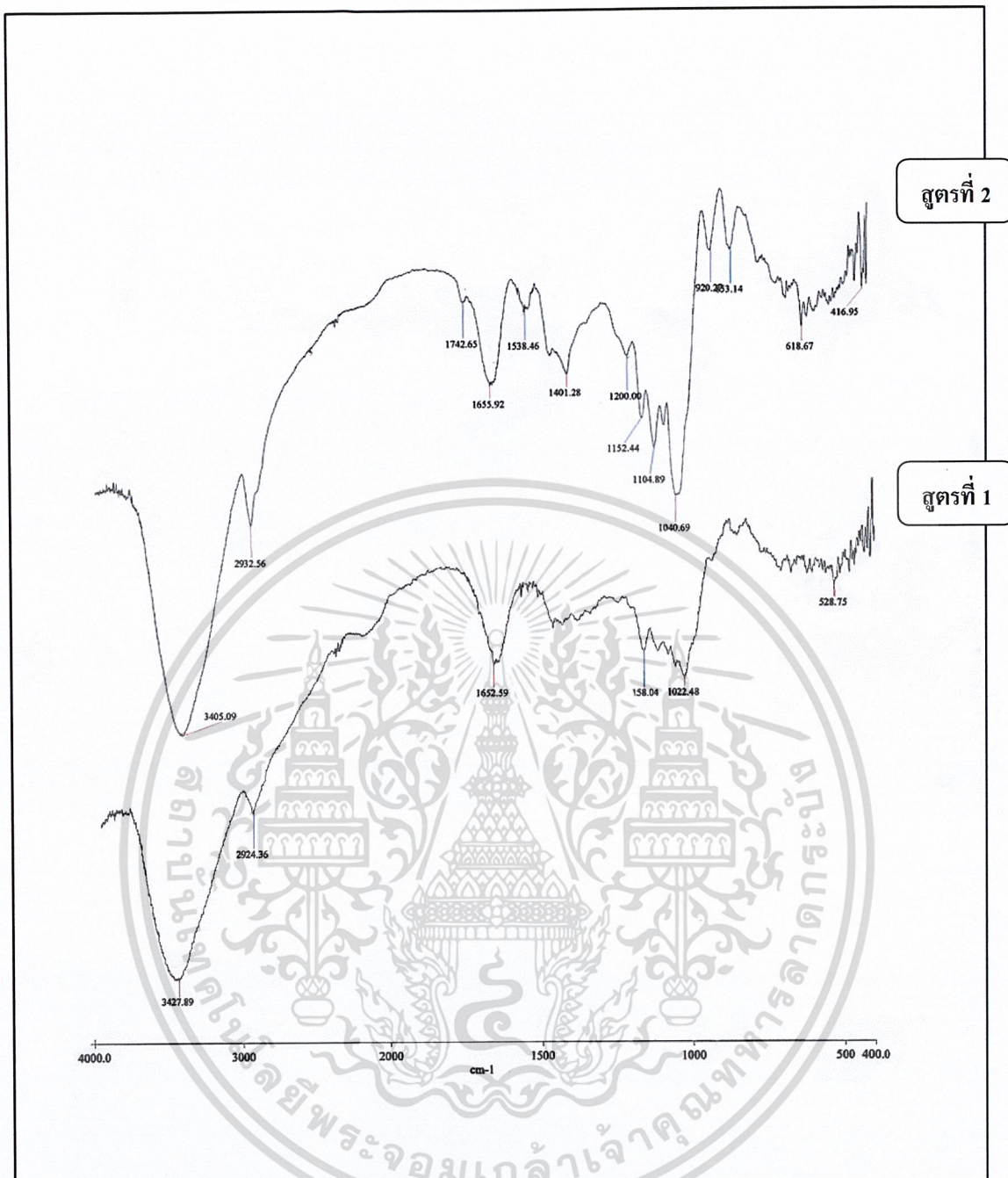
จากรูปที่ 4.1 พบพีคที่เลขคลื่น 3312 cm^{-1} เป็นของหมู่ NH เลขคลื่นช่วง 2992 cm^{-1} เป็นเลขคลื่นของ C-H stretching เลขคลื่น 1627 และ 1659 cm^{-1} เป็นของ O=C-C=C และ 1541 cm^{-1} เป็นเลขคลื่นของ -NH bending ในเอไมด์ และเลขคลื่น $1340\text{-}1420\text{ cm}^{-1}$ เป็นของ C-N stretching [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 สเปกตรัมของแป้งมันสำปะหลัง (Cassava Starch)

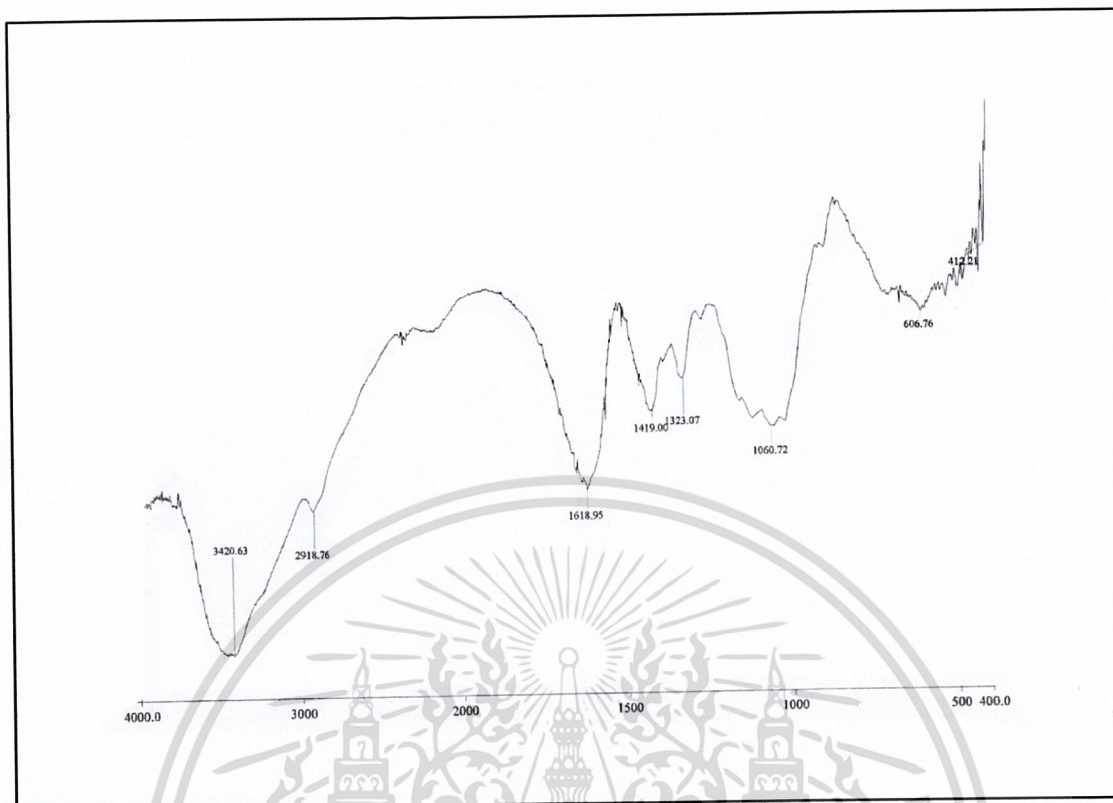
จากรูปที่ 4.2 พบเลขคลื่นที่ 3420 cm^{-1} แสดงถึง -OH stretching เลขคลื่นที่ 2932 cm^{-1} แสดงถึง -CH_2 stretching เลขคลื่น 1650 cm^{-1} แสดงถึง C=O ของแป้งมันสำปะหลังซึ่งเกิดจากการสลายตัวของกลูโคส เลขคลื่นบริเวณ 1450 cm^{-1} เป็น -CH_2 scissoring ของ Cyclohexyl compound และเลขคลื่นที่ 1370 cm^{-1} เป็นของ -OH bending เลขคลื่น $1158, 1080, 1016\text{ cm}^{-1}$ เป็น $\text{-CH}_2\text{-O-CH}_2$ เป็น Asymmetric stretching เลขคลื่นที่ 929 cm^{-1} เป็น Out of plane bending ของ -C-OH [13]



รูปที่ 4.3 สเปกตรัมของแป้งที่ไม่เติมสารก่อพันธะเชื่อมโยงและแป้งที่เติมสารก่อพันธะเชื่อมโยง

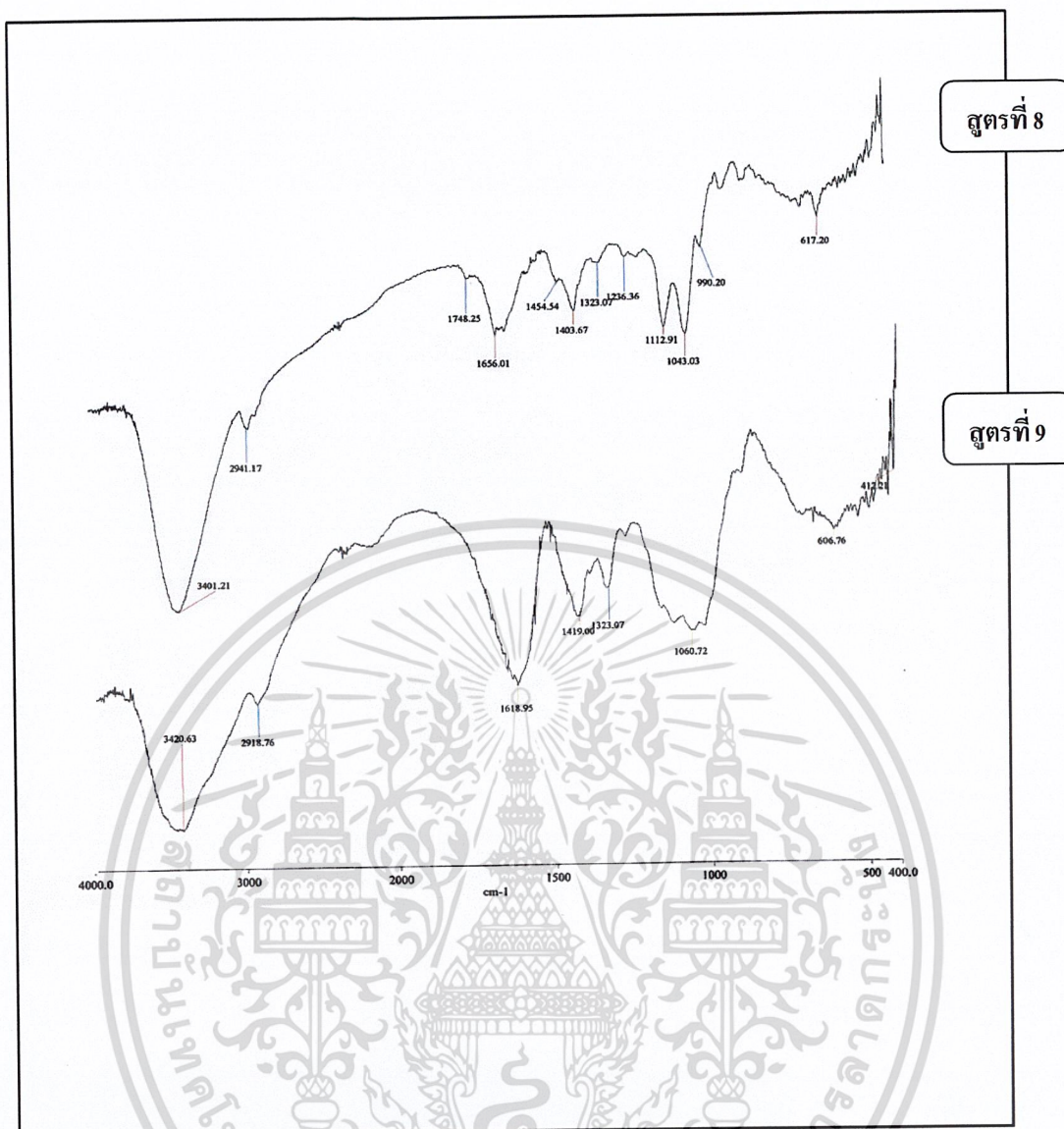
จากรูปที่ 4.3 เป็นการเปรียบเทียบสเปกตรัมของแป้ง สูตรที่ 1 กับแป้งที่เกิดการเชื่อมโยง แล้วด้วย *N,N*-Methylenebisacrylamide (MBA) พบว่าในสเปกตรัมของแป้งที่เกิดการเชื่อมโยง พบ พีกช่วงเลขคลื่น 1742 cm^{-1} ซึ่งเป็นของ C=O ใน *N,N*-Methylenebisacrylamide พีกที่เลขคลื่น 1538 cm^{-1} เป็นเลขคลื่นของ NH [16] ซึ่งสามารถยืนยันได้ว่าสารก่อพันธะเชื่อมโยงสามารถ เกิดปฏิกิริยากับแป้งได้จริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 สเปกตรัมของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (CMC)

จากรูปที่ 4.4 พบพีคช่วงเลขคลื่น 3420 cm^{-1} เป็นของหมู่ -OH บนสายโซ่ของเซลลูโลส เลขคลื่น $3000\text{-}2500\text{ cm}^{-1}$ เป็นเลขคลื่น -OH ของกรดในคาร์บอกซีเมทิล เลขคลื่นช่วง 2932 cm^{-1} เป็นเลขคลื่นของ C-H stretching เลขคลื่น 1618 cm^{-1} เป็นของ Asymmetrical stretching ของ C=O และที่เลขคลื่น 1419 cm^{-1} เป็นของ Symmetrical stretching หมู่ COO^- และที่เลขคลื่นช่วง 1060 cm^{-1} เป็นของ C-O ในเซลลูโลส [1]

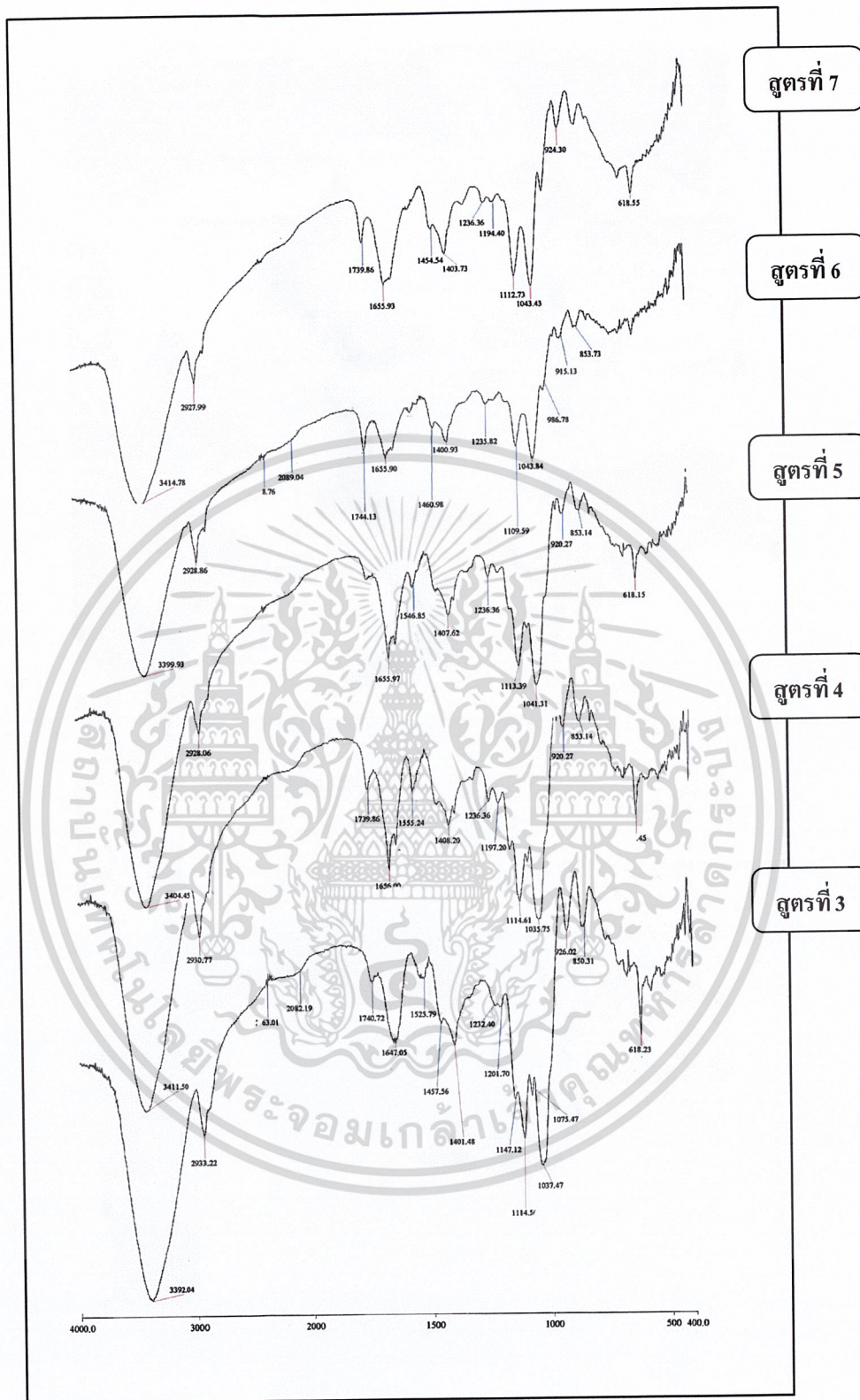


รูปที่ 4.5 สเปกตรัมของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่ไม่เติมสารก่อพันธะเชื่อม โยงกับ คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่เติมสารก่อพันธะเชื่อม โยง

จากรูปที่ 4.5 เป็นการเปรียบเทียบสเปกตรัมของของ CMC สูตรที่ 9 กับ CMC ที่เกิดการเชื่อม โยงแล้วด้วย *N,N*-Methylenebisacrylamide (MBA) สูตรที่ 8 พบว่าในสเปกตรัมของ CMC ที่เกิดการเชื่อม โยงพบพีกเลขคลื่น 1748 cm^{-1} ซึ่งเป็นของ C=O ใน *N,N*-Methylenebisacrylamide ที่เกิดการ Shift ขึ้น [1] ซึ่งสามารถยืนยันได้ว่าสารก่อพันธะเชื่อม โยงสามารถเกิดปฏิกิริยากับ CMC ได้จริง นอกจากนี้พบว่าพีกที่เลขคลื่นประมาณ $1100\text{-}1016\text{ cm}^{-1}$ รูปร่างเปลี่ยนไปหลังเกิดพันธะเชื่อม โยงด้วย MBA มีพีกแยกออกเป็น 2 พีกชัดเจนที่ 1112 cm^{-1} และ 1043 cm^{-1} ซึ่งเป็นพีกของ

$\text{CH}_2\text{-O-CH}_2$ Asymmetric stretch

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 IR สเปกตรัมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังผสมกับคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (CMC) ที่

อัตราส่วนต่างๆ โดยมี MBA เป็นสารก่อพันธะเชื่อม โยง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.6 พบเลขคลื่นที่แสดงหมู่ฟังก์ชันของแป้งมันสำปะหลัง คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (CMC) และสารก่อกัมมันต์เชื่อมโยง (MBA) ที่อัตราส่วนต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 แสดงเลขคลื่นของหมู่ฟังก์ชันต่างๆ

หมู่ฟังก์ชัน	ช่วงเลขคลื่น (cm ⁻¹)	ความน่าจะเป็น	หมายเหตุ
-OH	3392-3414	เป็นหมู่ฟังก์ชันของทั้งแป้งมันสำปะหลังและ CMC เนื่องจากสารทั้ง 2 ชนิดมีหน่วยย่อยเหมือนกันคือ กลูโคส	-
C-H stretching	2927-2933	เป็นหมู่ฟังก์ชันของทั้งแป้งมันสำปะหลังและ CMC	C-H stretching แป้งมีช่วงเลขคลื่น 2918cm ⁻¹ และของ CMC อยู่ช่วง 2932 cm ⁻¹
C=O	1739-1744	เป็นหมู่ฟังก์ชันของคาร์บอนิลใน MBA ที่เกิดการ Shift จาก 1659 cm ⁻¹	C=O ของเอไมด์ที่เป็นวง มีเลขคลื่น 1760 ± 5 cm ⁻¹
C=O	1647-1656	เป็นหมู่ฟังก์ชันของคาร์บอนิลในโครงสร้างของแป้ง	
C=O	1618	เป็นหมู่ฟังก์ชันของคาร์บอนิลในโครงสร้างของ CMC	หมู่ O=C-O ⁻ ของ CMC ปรากฏที่ 1603 cm ⁻¹ [16]
N-H bending	1525-1555	บอกว่า MBA นั้น เกิดปฏิกิริยาแล้ว มีอยู่ในโครงสร้างจริง	-NH ของเอไมด์
-CH ₂ -	1400-1457	อยู่ในโครงสร้างของทั้งแป้งกับ CMC	-CH ₂ scissoring
-OH	1320-1370	โครงสร้างแอลกอฮอล์ในน้ำตาล กลูโคส	-OH bending [16]
C-O	1020-1120	เป็นหมู่ฟังก์ชันที่อยู่ในทั้งแป้งมันสำปะหลังและ CMC	-
-NH	618-619	เป็นหมู่ฟังก์ชันใน MBA	NH wagging vibration [16]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูป IR สเปกตรัมรวมของฟิล์มผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังกับ CMC พบว่าในทุก
 สูตรพบพีคที่เลขคลื่น 1740 cm^{-1} คู่กับ 1525 cm^{-1} ซึ่งแสดงถึงหมู่คาร์บอนิล (-C=O) และหมู่ของ -NH
 ของเอไมด์ ซึ่งมาจากสารก่อพันธะเชื่อมโยง MBA แสดงว่าฟิล์มเกิดการเชื่อมโยง

เมื่อพิจารณาเลขคลื่นที่ประมาณ 1647 cm^{-1} ซึ่งเป็นของหมู่คาร์บอนิล พบว่ากรณีมีแป้งมัน
 สำปะหลังมาก ปรากฏเพียงพีคเดียว และเมื่อเพิ่มปริมาณของ CMC มากขึ้น ทำให้พีคแยกออกเป็น
 สองพีค เนื่องจากคาร์บอนิลของหมู่ O=C-OH ใน CMC อยู่ที่เลขคลื่นต่ำกว่าประมาณ 1618 cm^{-1}

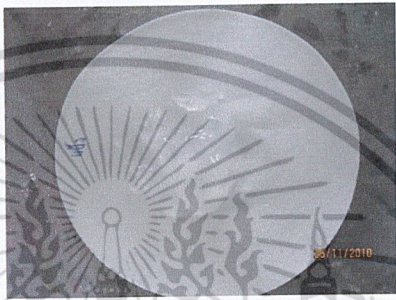
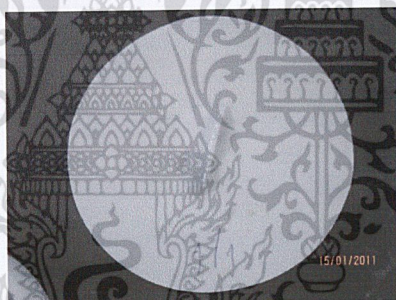
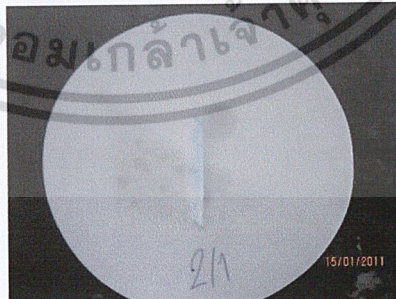
IR สเปกตรัมของแป้งมีพีคที่เลขคลื่น 1370 cm^{-1} ซึ่งแสดงหมู่ -OH bending ดังแสดงในรูป
 ที่ 4.2 แต่เมื่อนำแป้งมาผสมกับ CMC แล้ว เดิมสารเชื่อมโยง พีคที่เลขคลื่น 1370 cm^{-1} หายไป เหลือ
 แต่พีคที่เลขคลื่น 1401 cm^{-1} ปรากฏชัดเจนขึ้นในสูตรที่ 3-7

ดังนั้นสามารถสรุปจาก IR สเปกตรัมได้ว่า เกิดพันธะเชื่อมโยงในฟิล์มผสมระหว่างแป้งมัน
 สำปะหลังกับ CMC

4.3 ผลการทดสอบสมบัติการบวมน้ำ

นำชิ้นงานที่ตัดเป็นแผ่นสี่เหลี่ยมขนาด 1×1 นิ้ว แช่ลงในน้ำกลั่น ที่อุณหภูมิห้อง นำมาชั่งทุก 1 ชั่วโมง เป็นเวลา 6 ชั่วโมง จากนั้นแช่น้ำต่อจนครบ 24 ชั่วโมง และจึงนำมาชั่งน้ำหนักอีกครั้ง

ตารางที่ 4.3 ลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานหลังการแช่ลงในน้ำกลั่น

สูตร	แป้ง:CMC	MBA (g)	รูปแผ่นฟิล์ม ไฮโดรเจลหลังแช่น้ำกลั่น	ลักษณะทางกายภาพ
1	10:0	0.000		มีลักษณะเป็นเจลใส ไม่มีสี ไม่สามารถคง รูปร่าง
2	10:0	0.095		มีสีขาวขุ่น เมื่อบวม ตัวจะเกิดการม้วนงอ เป็นหลอด
3	9:1	0.095		มีสีขาวขุ่น คงรูปเป็น แผ่นสี่เหลี่ยมได้แต่ จะเกิดการม้วนงอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สูตร	แป้ง:CMC	MBA (g)	รูปแผ่นฟิล์ม ไฮโดรเจลหลังแช่น้ำกลั่น	ลักษณะทางกายภาพ
4	7:3	0.095		มีสีขาวขุ่น สามารถ คงรูปได้แต่มีวงงอ เล็กน้อยจากปลาย ขอบ
5	5:5	0.095		มีสีขาวขุ่น มีวงงอ จากบริเวณริมขอบ ของชิ้นงาน และเกิด การขาดของชิ้นงาน
6	3:7	0.095		สีขาวขุ่น สามารถคง รูปได้ มีวงงอ เล็กน้อย

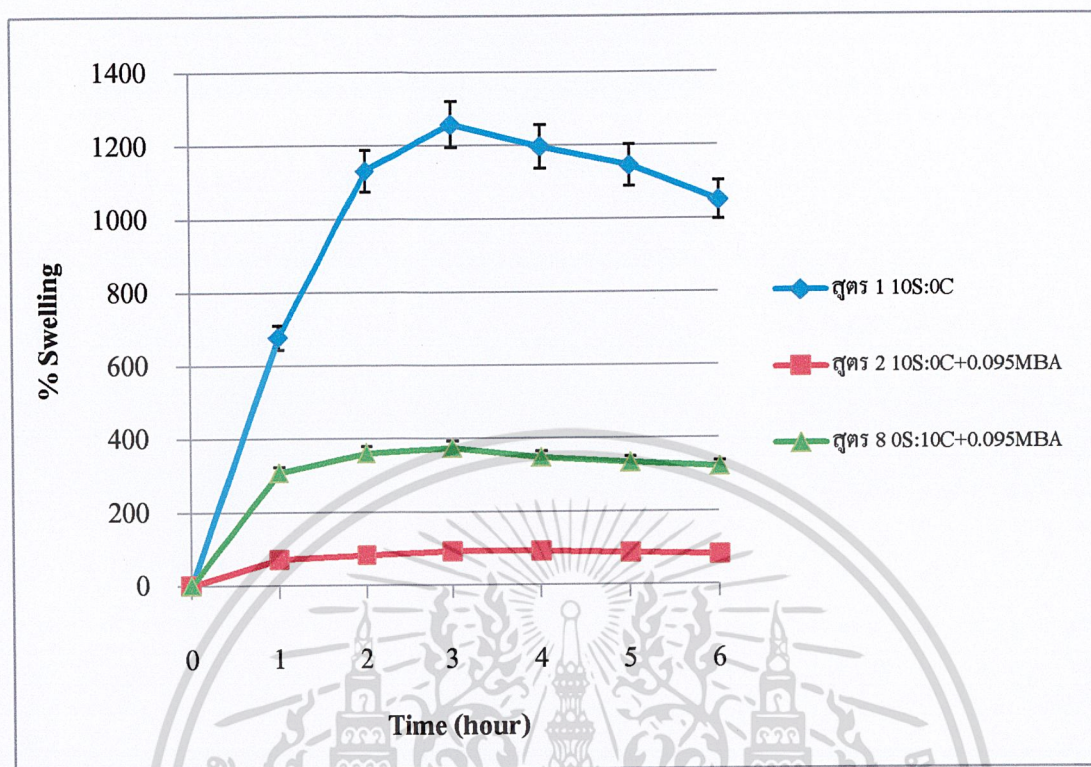
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สูตร	แป้ง:CMC	MBA (g)	รูปแผ่นฟิล์ม ไฮโดรเจลหลังแช่น้ำกลั่น	ลักษณะทางกายภาพ
7	1:9	0.095		ชิ้นงานมีลักษณะ คล้ายเจล ม้วนงอและ ค่อนข้างโปร่งแสง
8	0:10	0.095		ชิ้นงานมีสีเหลือง ออก น้ำตาล ขยาย ขนาดมากขึ้นและเกิด การม้วนงอ

หมายเหตุ : สูตรที่ 9 ชิ้นงานเกิดการละลายทันทีหลังจากแช่น้ำกลั่น

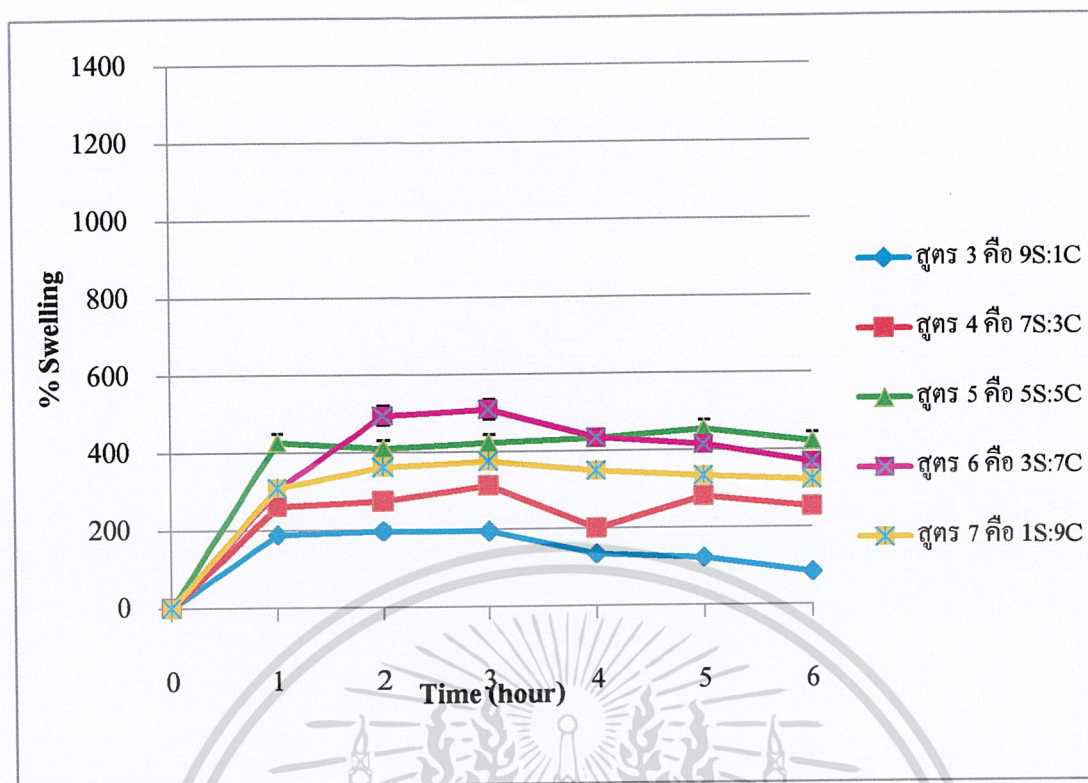
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.1 ผลการทดสอบการบวมน้ำทุก 1 ชั่วโมง เป็นเวลา 6 ชั่วโมง (% Swelling)



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง % Swelling กับ Time (hour) ของแป้งมันสำปะหลังและซีเอ็มซีที่เติมและไม่เติมสารก่อพันธะเชื่อมโยง

จากรูปที่ 4.7 เป็นการเปรียบเทียบการบวมน้ำของฟิล์มแป้งและฟิล์มซีเอ็มซีทั้งที่เติมสารเชื่อมโยงและไม่เติมสารเชื่อมโยง พบว่า แป้งที่ไม่เติมสารเชื่อมโยง (สูตรที่ 1) สามารถดูดน้ำได้ดี โดยแป้งดูดน้ำได้มากถึง 1050.25 % ณ เวลาที่ 6 ชั่วโมง เนื่องจากแป้งนั้นมีโครงสร้าง 2 ส่วน ทั้งที่เป็นทั้งผลึกและอสัณฐาน ส่งผลให้น้ำไม่สามารถแทรกเข้าไปอยู่ในส่วนผลึกได้ แป้งจึงไม่ละลายน้ำหมด เมื่อเปรียบเทียบแป้งที่ไม่มีและมีสารก่อพันธะเชื่อมโยง สูตรที่ 1 และสูตรที่ 2 ตามลำดับ พบว่า แป้งเกิดพันธะเชื่อมโยงทำให้ -OH ของแป้งลดลง จึงดูดน้ำได้ลดลงเหลือ 82.31% สำหรับซีเอ็มซีที่เกิดการเชื่อมโยง สูตรที่ 8 สามารถดูดน้ำได้ 322.32% ณ ชั่วโมงที่ 6 เนื่องจากซีเอ็มซีมีหมู่คาร์บอกซี ซึ่งเป็นหมู่ที่มีสมบัติชอบน้ำดังนั้นจึงสามารถดูดน้ำได้ดี

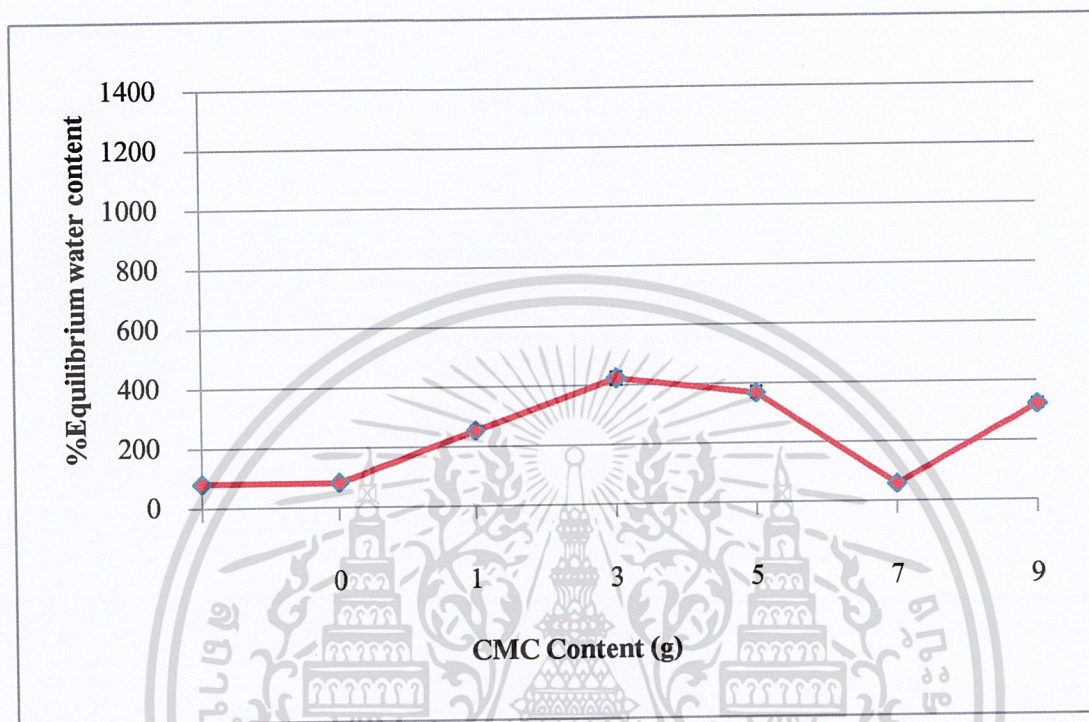


รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง % Swelling กับ Time (hour) ของแป้งมันสำปะหลังผสมกับซีเอ็มซีที่อัตราส่วนต่างๆ โดยมี MBA เป็นสารก่อพันธะเชื่อมโยง

จากรูปที่ 4.8 แสดงผลการคูดน้ำภายใน 6 ชั่วโมงของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่มีการผสมซีเอ็มซี โดยมี MBA เป็นสารก่อพันธะเชื่อมโยง พบว่า เมื่อปริมาณซีเอ็มซีเพิ่มขึ้น การคูดน้ำมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากบนสายโซ่ของซีเอ็มซีมีหมู่ของคาร์บอกซี ซึ่งเป็นหมู่ที่มีขั้วทำให้มีสมบัติชอบน้ำ แต่เมื่อปริมาณซีเอ็มซีเพิ่มขึ้น ปริมาณของแป้งลดลงด้วยเช่นกัน ทำให้มีส่วนผลึกจากแป้งลดลง น้ำจึงสามารถแทรกตัวเข้าไปในโครงสร้างได้มากขึ้น [1] พิจารณาได้จากชั่วโมงที่ 6 เช่น สูตรที่ 3 คูดน้ำ 84.66 % สูตรที่ 4 คูดน้ำได้ 253.34 % และสูตรที่ 5 คูดน้ำได้ 422.54 % แต่เมื่อปริมาณซีเอ็มซีมาก การคูดน้ำของฟิล์มกลับมีค่าลดลง เนื่องจากเมื่อซีเอ็มซีมากขึ้น ส่งผลให้ระบบมีความหนืดมาก เกิดการแพร่กระจายของสารเชื่อมโยงได้น้อย [1] ส่วนของซีเอ็มซีที่ไม่สามารถเกิดเป็นโครงสร้างร่างแหเกิดการละลายออก ทำให้การคูดน้ำลดลง พิจารณาได้จากชั่วโมงที่ 6 เช่น สูตรที่ 6 คูดน้ำได้ 368.42 % และสูตรที่ 7 คูดน้ำได้ 58.36 % และเมื่อเปรียบเทียบชั่วโมงที่ใช้ในการคูดน้ำ พบว่า การคูดน้ำมีค่าเพิ่มขึ้นในชั่วโมงที่ 1-3 และจะมีค่าลดลงเรื่อยๆเมื่อผ่านชั่วโมงที่ 3 เนื่องจาก หลังผ่านชั่วโมงที่ 3 แล้วการคูดน้ำของฟิล์มเริ่มอิ่มตัวและมีบางส่วนที่ไม่เกิดการเชื่อมโยงเกิดการละลายของ

ฟิล์มไฮโดรเจล การดูดน้ำจึงมีค่าลดลง ซึ่งสูตรที่มีแนวโน้มการดูดน้ำได้ดีแล้วสามารถคงรูปร่างนั้นคือ สูตรที่ 5 และสูตรที่ 6 คือ แป้ง:ซีเอ็มซี มีค่าเท่ากับ 5:5 และ 3:7 ตามลำดับ

4.3.2 ผลการทดสอบการบวมน้ำที่เวลา 24 ชั่วโมง (%Equilibrium water content)

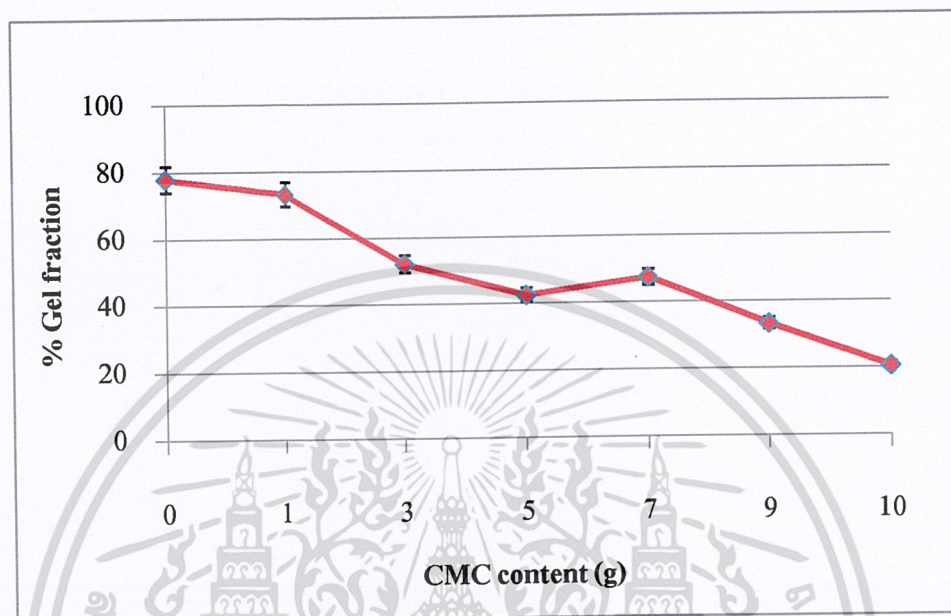


รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง %Equilibrium water content กับ CMC content (g)

จากรูปที่ 4.9 แสดงถึงความสามารถในการดูดซับน้ำได้สูงสุดในเวลา 24 ชั่วโมงของฟิล์มตัวอย่างที่เกิดการเชื่อมโยงด้วย MBA พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณซีเอ็มซีจาก 1 กรัมเป็น 5 กรัม การดูดน้ำเพิ่มขึ้น นั่นแสดงว่าซีเอ็มซีช่วยเพิ่มการดูดน้ำ แต่เมื่อเพิ่มปริมาณซีเอ็มซีมากกว่า 5 กรัม คือ 7 และ 9 กรัม สารก่อพันธะเชื่อมโยงเข้าทำปฏิกิริยากับซีเอ็มซีได้น้อย เนื่องจากระบบมีความหนืดมากขึ้น ทำให้เกิดการขัดขวางการแพร่กระจายของสายโซ่ ทำให้การดูดน้ำลดลง ซึ่งแนวโน้มการดูดน้ำที่เวลา 24 ชั่วโมง มีค่าใกล้เคียงมาตั้งแต่ชั่วโมงที่ 6

4.4 ผลการหาสัดส่วนของแข็งที่ไม่ละลาย (Gel fraction)

นำชิ้นงานที่บวมตัวเป็นเวลา 24 ชั่วโมง มาอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 °C และทำการชั่งน้ำหนักของแข็งที่ไม่ละลาย

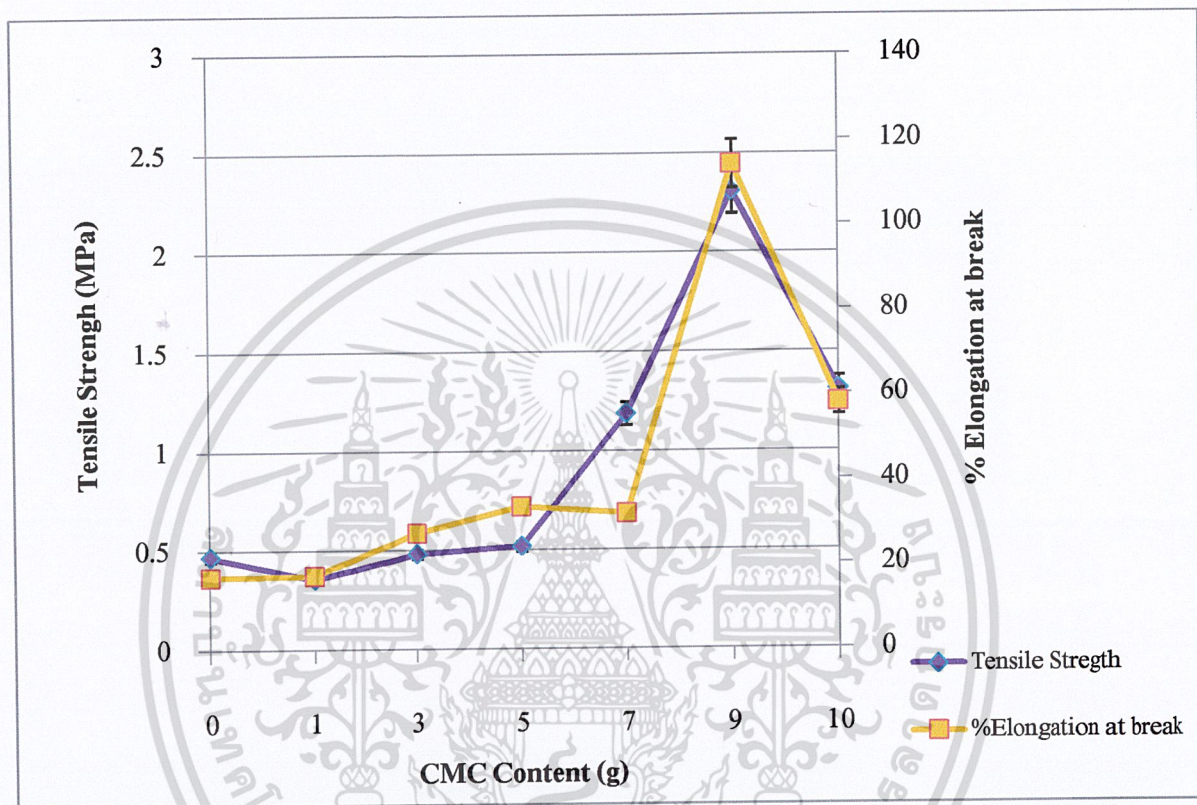


รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง % Gel fraction กับ CMC content (g)

จากรูปที่ 4.10 แสดงน้ำหนักของแข็งที่เหลืออยู่หลังจากแช่น้ำเป็นเวลา 24 ชั่วโมงของฟิล์มตัวอย่างที่เกิดการเชื่อมโยงด้วย MBA พบว่า น้ำหนักของแข็งที่เหลืออยู่ทุกๆ ชิ้นงานมีค่าลดลง เมื่อเทียบกับชิ้นงานเริ่มต้น แสดงให้เห็นว่าส่วนผสมที่ใช้เกิดการละลาย โดยเมื่อนำไปแช่น้ำกลั่นแล้ว ส่วนที่ไม่เกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยงได้เกิดละลายออกไป ส่งผลให้น้ำหนักของฟิล์มมีค่าลดลง และนอกจากนั้นส่วนผสมที่ใช้ทั้งแป้งมันสำปะหลังและ ซีเอ็มซีเป็นโครงสร้างที่มีขั้ว มีสมบัติชอบน้ำ ดังนั้นจึงทำให้ทั้ง 2 ส่วนนี้อาจเกิดการละลายได้ แม้จะเกิดการเชื่อมโยงแล้วก็ตาม จากรูป พบว่าเมื่อปริมาณของซีเอ็มซีมากขึ้น สัดส่วนของแข็งมีค่าลดลงเนื่องจาก มีการเกิดพันธะเชื่อมโยงกับซีเอ็มซีได้น้อย จึงเกิดการละลายออกมามาก กรณีของซีเอ็มซีที่ไม่มีแป้ง พบว่ามีของแข็งเหลืออยู่น้อยที่สุด แสดงว่ามีพันธะเชื่อมโยงน้อย ดังได้อธิบายในหัวข้อ 4.3.2

4.5 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกล

นำชิ้นงานที่ตัดเป็นแผ่นสี่เหลี่ยมขนาด 2.5x10 เซนติเมตร มาทดสอบสมบัติเชิงกลตามมาตรฐาน ASTM D-1822-L ด้วยเครื่อง Universal Testing Machine ได้ค่า Tensile Strength และ % Elongation at Break



รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึง และการยืด ณ จุดขาดของฟิล์มผสมระหว่างแป้งกับ CMC ที่อัตราส่วนต่างๆ โดยมี MBA เป็นสารก่อก้อนระเชื่อมโยง

จากรูปที่ 4.11 แสดงค่าความแข็งแรงดึงและการยืด ณ จุดขาดที่เป็นสัดส่วนกับปริมาณของซีเอ็มซี พบว่าที่ไม่มีซีเอ็มซีผสมในฟิล์มไฮโดรเจล ค่าความแข็งแรงดึงและการยืด ณ จุดขาดมีค่าต่ำ แสดงให้เห็นว่าชิ้นงานมีความแข็งแรงและที่ปริมาณซีเอ็มซี 10 กรัมชิ้นงานมีสมบัติแข็งแรงเหนียว และเมื่อพิจารณาที่ปริมาณซีเอ็มซีเพิ่มขึ้น พบว่า ค่าความแข็งแรงดึงและการยืด ณ จุดขาดมีค่าเพิ่มขึ้นตามลำดับ เนื่องจากการเพิ่มสมบัติให้ชิ้นงานมีความเหนียวมากขึ้นและนอกจากนั้นซีเอ็มซีมีลักษณะเป็นสายโซ่ตรง มวลโมเลกุลสูง [9] จึงเกิดการเกี่ยวพันของสายโซ่มาก ดังนั้นจึงส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึงและการยืด ณ จุดขาดมีค่าเพิ่มขึ้น

ซีเอ็มซีมีลักษณะเป็นสายโซ่ตรง มวลโมเลกุลสูง [9] จึงเกิดการเกี่ยวพันของสายโซ่มาก ดังนั้นจึงส่งผลให้ให้ค่าความแข็งแรงดึงและการยึด ฉ จุดขาดมีค่าเพิ่มขึ้น

4.6 วิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค **Thermal Gravimetric Analysis (TGA)**

ตารางที่ 4.4 แสดงอุณหภูมิเริ่มการสลายตัวของฟิล์มตัวอย่างสูตรที่ 1-9

สูตร	แป้ง:CMC	MBA (g)	To1 (°C)	To2 (°C)	To3 (°C)
1	10:0	0.000	279	-	-
2	10:0	0.095	210	700	-
4	7:3	0.095	147	218	780
5	5:5	0.095	145	261	640
6	3:7	0.095	145	264	775
8	0:10	0.095	143	259	718
9	0:10	0.000	243	337	579

จากตารางที่ 4.4 แสดงอุณหภูมิเริ่มการสลายตัวของฟิล์มที่อัตราส่วนต่างๆ พบว่าฟิล์มแป้งที่ไม่เกิดการเชื่อมโยง (สูตรที่ 1) มีการสลายตัว 1 ขั้น คือ อุณหภูมิ 279 °C และเมื่อมีการเติมสารเชื่อมโยงลงในแป้ง (สูตรที่ 2) มีการสลายตัวทางความร้อนที่อุณหภูมิสูงขึ้น โดยสลายตัว 2 ขั้นตอนที่อุณหภูมิ 210 และ 700 °C ส่วนซีเอ็มซีที่มีพันธะเชื่อมโยง (สูตรที่ 8) พบว่า มีการสลายตัว 3 ขั้นตอนที่อุณหภูมิ 143, 259 และ 718 °C เมื่อนำแป้งผสมกับซีเอ็มซีแล้วทำการเชื่อมโยงพบว่าการสลายตัวอย่างชัดเจน 3 ขั้นตอนที่แสดงว่าฟิล์มผสมเกิดการแยกวัฏภาคหลังการเชื่อมโยง โดยอุณหภูมิการสลายตัวของแต่ละวัฏภาคขึ้นกับอัตราส่วนที่ผสมกัน อุณหภูมิที่คาดว่าแสดงการเกิดพันธะเชื่อมโยงระหว่างแป้งกับซีเอ็มซี คือ อุณหภูมิ To3 กรณีที่ฟิล์มผสมมี แป้ง : ซีเอ็มซี เท่ากับ 7:3 มีค่า To3 สูงสุดคือ 780 °C และน้ำหนักที่ลดลงมีค่าประมาณ 25% แสดงว่าพันธะเชื่อมโยงเกิดได้ดีระหว่างแป้งกับแป้ง มากกว่าแป้งกับซีเอ็มซี ฟิล์มที่มีส่วนผสมแป้ง : ซีเอ็มซี เท่ากับ 5:5 มีค่า To3 สูงสุดคือ 640 °C อาจเนื่องจากพันธะเชื่อมโยงระหว่างแป้งกับซีเอ็มซีมากขึ้น ฟิล์มที่มีส่วนผสมแป้ง : ซีเอ็มซี เท่ากับ 3:7 มีค่า To3 สูงสุดคือ 775 °C ในสภาวะนี้มีแป้งน้อยแม้ว่าแป้งทำปฏิกิริยากับ MBA ได้ดีกว่าซีเอ็มซี แต่สภาวะนี้มีซีเอ็มซีมากกว่า ดังนั้นจะเกิดการเชื่อมโยงระหว่างแป้งและแป้งกับซีเอ็มซีมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นทำการเลือกอัตราที่น่าสนใจมาปรับปรุง โดยการเติมสารก่อพันธะเชื่อมโยงต่างกัน พิจารณาได้จาก ค่าการดูดน้ำ น้ำหนักของแข็งที่เหลือ สมบัติทางกายภาพและสมบัติทางความร้อน พบว่า สูตรที่ 6 มีปริมาณซีเอ็มซีเท่ากับ 7 กรัม มีความเหมาะสมทั้งสามารถดูดน้ำได้ค่อนข้างดี สามารถคงรูปได้และมีสมบัติเชิงกลที่ดี ดังนั้นจึงเลือกอัตราส่วนที่ แป้ง:ซีเอ็มซี เท่ากับ 3:7



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตอนที่ 2 : ศึกษาผลของปริมาณสารเชื่อมโยง *N,N*-Methylenebisacrylamide (MBA) ที่มีผลต่อสมบัติของฟิล์มไฮโดรเจล

4.7 ลักษณะทางกายภาพของฟิล์มไฮโดรเจล

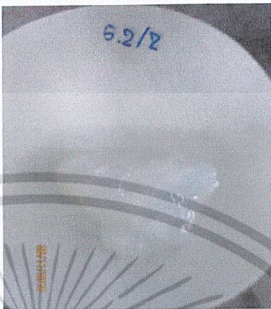
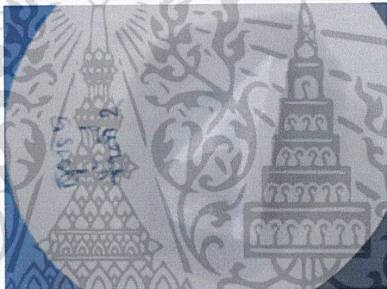
ตารางที่ 4.5 ลักษณะทางกายภาพของฟิล์มไฮโดรเจลสูตรที่มีการปรับปรุงด้วยสารเชื่อมโยง

สูตร	5% แป้ง มัน สำปะหลัง (g)	5% CMC (g)	MBA (g)	รูปแผ่นฟิล์มไฮโดรเจล	ลักษณะทาง กายภาพ
10	3	7	0.0475		ชิ้นงานมีสีออก เหลือง โปร่งแสง ค่อนข้างบาง ขาด ง่าย
6	3	7	0.095		แผ่นโปร่งแสง ค่อนข้างขุ่น มัน ด้านหนึ่ง สามารถ ดึงยืดได้ดี
11	3	7	0.1900		สีออกเหลืองเข้ม ไม่โปร่งแสง ดึงยืด ได้ดีมาก การหดตัว ไม่สม่ำเสมอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

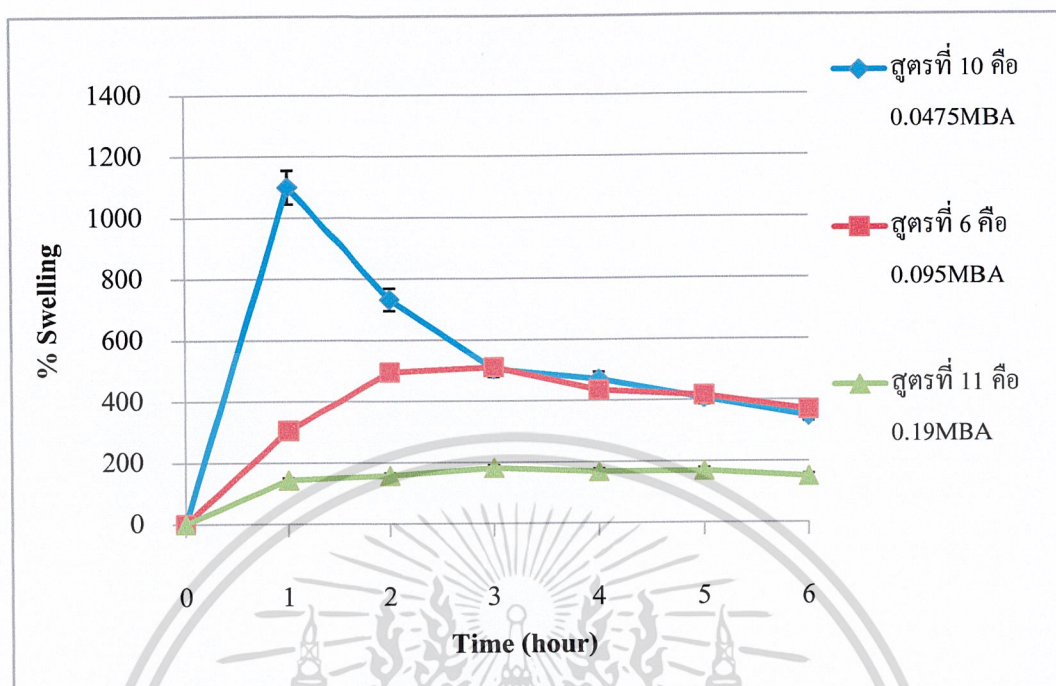
4.9 ผลการทดสอบสมบัติการบวมน้ำ

ตารางที่ 4.6 ลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานที่ปริมาณสารเชื่อมโยงต่างกันหลังการแช่ลงในน้ำกลั่น

สูตร	แป้ง:CMC	MBA (g)	รูปแผ่นฟิล์ม ไฮโดรเจลหลังแช่น้ำกลั่น	ลักษณะทางกายภาพ
10	3:7	0.0475		มีลักษณะเป็นเจล สีใส ไม่สามารถคงรูปเป็นแผ่นชิ้นงานได้
6	3:7	0.095		มีสีขาวขุ่น สามารถคงรูปเป็นแผ่นได้แต่เกิดการม้วนงอเล็กน้อย
11	3:7	0.19		มีลักษณะสีใส เกิดม้วนงอของชิ้นงานแต่ยังคงสามารถคงรูปได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

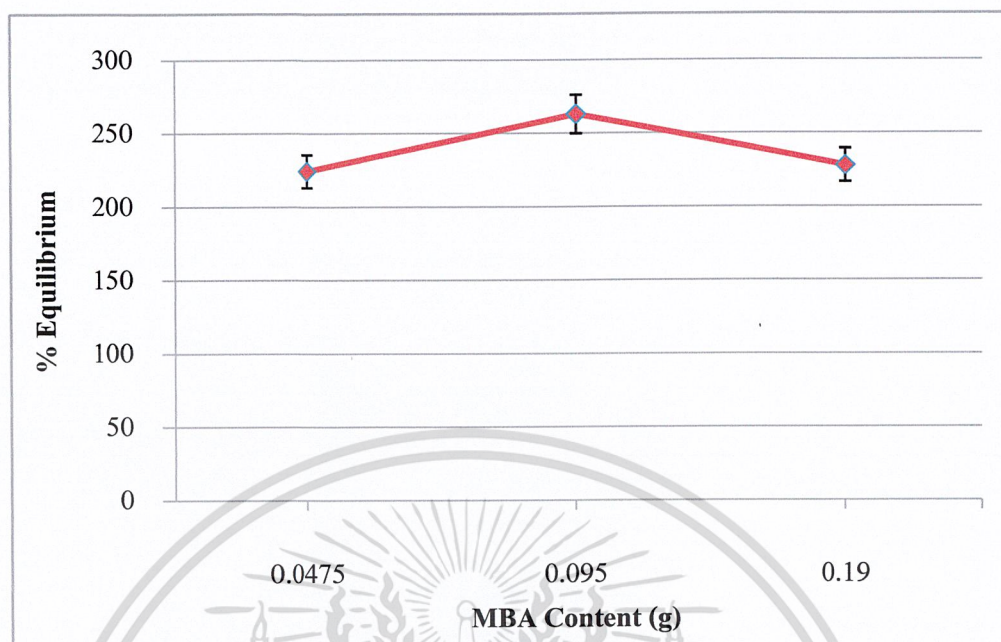
4.9.1 ผลการทดสอบการบวมน้ำทุก 1 ชั่วโมง เป็นเวลา 6 ชั่วโมง (% Swelling)



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง % Swelling กับ Time (hour)

จากรูปที่ 4.14 แสดงความสัมพันธ์ % Swelling กับปริมาณของสารก่อพันธะเชื่อม โยง (MBA) ของฟิล์มไฮโดรเจลที่อัตราส่วนแป้ง: ซีเอ็มซี เท่ากับ 3:7 พบว่า ที่ชั่วโมงที่ 1 ที่อัตราส่วน ของ MBA เท่ากับ 0.0475 กรัม ดูดน้ำได้มากถึง 1100% และที่ปริมาณ MBA เท่ากับ 0.095, 0.14 กรัม ดูดน้ำภายในชั่วโมงที่ 1 ได้ 305.26, 143.24% ตามลำดับ นั่นคือสามารถบอกได้ว่าเมื่อปริมาณ MBA เพิ่มขึ้นส่งผลให้การดูดน้ำลดลงเนื่องจาก เมื่อปริมาณสารก่อพันธะเชื่อม โยงมาก จุดเชื่อม โยงระหว่างสายโซ่มีค่ามากขึ้น (Crosslink Density) ช่วงว่างระหว่างสายโซ่ลดลงหรือมีช่องว่างขนาดเล็กลง และนอกจากนั้นหมู่ที่ชอบน้ำทั้งของแป้งและซีเอ็มซีมีค่าลดลง [1] เพราะเมื่อปริมาณ MBA มากขึ้น การเกิดปฏิกิริยาก็มากขึ้นเช่นกัน ดังนั้นจึงมีการดูดน้ำได้น้อยลง จากกราฟพบว่าที่ปริมาณ MBA เท่ากับ 0.0475 กรัม (สูตรที่ 10) สามารถดูดน้ำได้มากที่สุด แสดงว่ามีการเชื่อม โยงน้อยและ ละลายตั้งแต่ชั่วโมงที่ 2

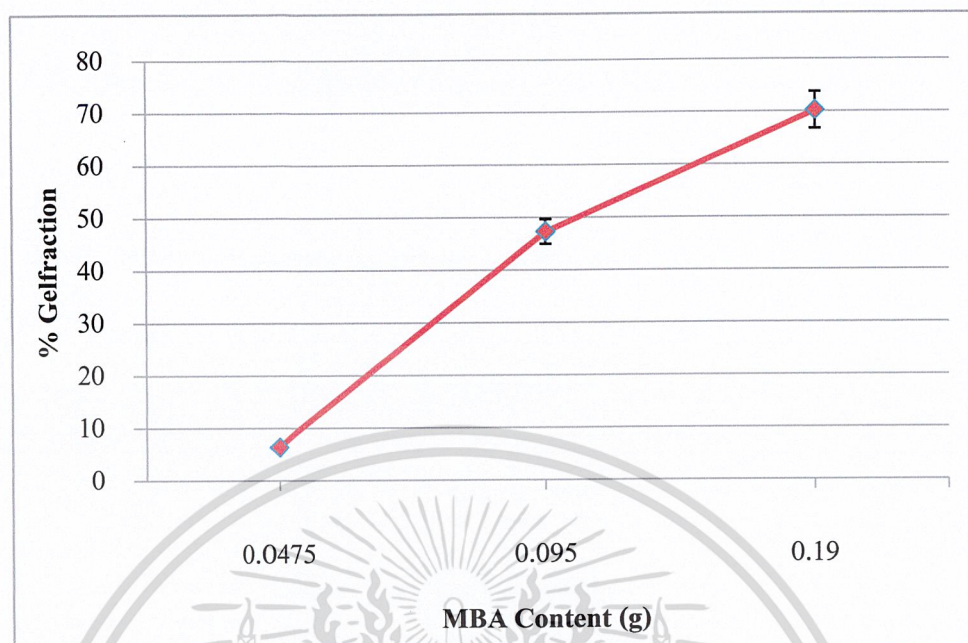
4.9.2 ผลการทดสอบการบวมน้ำที่เวลา 24 ชั่วโมง (%Equilibrium water content)



รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง %Equilibrium water content กับ CMC content (g)

จากกราฟ 4.15 พบว่า เมื่อถึงจุดสมดุล ที่ปริมาณ MBA เท่ากับ 0.095 กรัม สามารถดูดน้ำได้มากที่สุด และดูดน้ำได้น้อยที่สุด คือ 0.0475 กรัม มีเหตุผลมาจาก เมื่อปริมาณของ MBA มีค่าน้อย การเกิดพันธะเชื่อมโยงลดลง เกิดโครงสร้างร่างแหน้อย ส่งผลให้ เกิดการละลายของส่วนที่ไม่เกิดปฏิกิริยาออกมา ทำให้การมีน้ำหนักลดลง แต่เมื่อปริมาณของ MBA มีค่ามากก็ส่งผลให้การดูดน้ำลดลงเช่นกัน แสดงว่าพันธะเชื่อมโยงที่เกิดขึ้น ไปลดหมู่ที่สามารถดูดน้ำให้น้อยลง [1] นั่นคือพันธะเชื่อมโยงเกิดที่หมู่ไฮดรอกซีและหมู่คาร์บอกซี

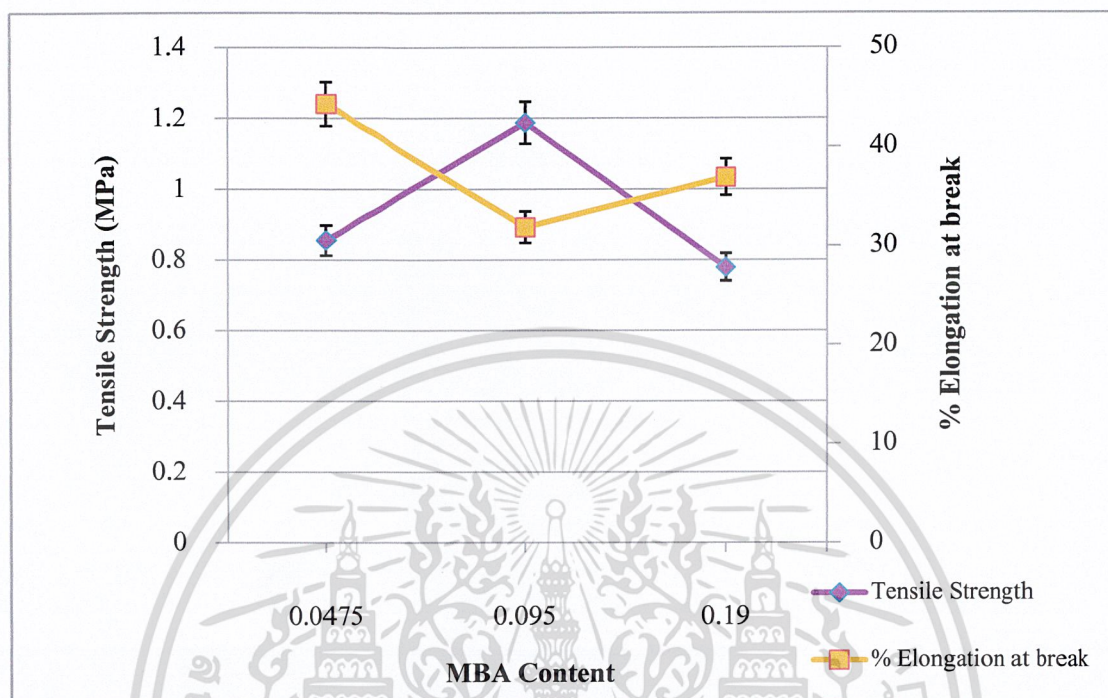
4.10 ผลการหาสัดส่วนของแข็งที่ไม่ละลาย (Gel fraction)



รูปที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง % Gel fraction กับ CMC content (g)

จากรูปที่ 4.16 แสดงน้ำหนักของแข็งที่เหลืออยู่หลังจากแช่น้ำเป็นเวลา 24 ชั่วโมง พบว่าที่ ปริมาณของ MBA เท่ากับ 0.19 กรัม มีน้ำหนักของแข็งที่เหลือมากที่สุดคือ 70.24% นั้นแสดงให้เห็น ว่าที่ปริมาณของ MBA มาก สามารถเกิดโครงสร้างตาข่ายได้ดี มีจุดเชื่อมโยงในโครงสร้างสูง ดังนั้น จึงมีน้ำหนักของแข็งเหลืออยู่มากที่สุด และที่ปริมาณ MBA 0.0475 กรัม เหลือน้ำหนักของแข็งน้อย ที่สุดเพราะมีการการเชื่อมโยงใน โครงสร้างอยู่น้อย เกิดการละลายออกมามาก ดังนั้นจึงสรุปได้ไม่

4.11 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกล



รูปที่ 4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึง และการยืด ณ จุดขาดของฟิล์มผสมระหว่างแป้งกับ CMC ที่อัตราส่วนต่างๆ

จากรูปที่ 4.17 แสดงความสัมพันธ์ค่าความแข็งแรงดึงและการดึงยืด ณ จุดขาดของแผ่นฟิล์มที่มีการปรับปรุงสารเชื่อมโยง (MBA) พบว่า เมื่อปริมาณสารเชื่อมโยงเพิ่มขึ้น (ปริมาณสารเชื่อมโยงเท่ากับ 0.095 กรัม) ค่าความแข็งแรงดึงมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อสารเชื่อมโยงมีค่ามากส่งผลให้เกิดการเชื่อม โยงใน โครงสร้างมากขึ้น ทำให้ชิ้นงานมีความแข็งแรง สามารถทนต่อแรงดึงยืดได้ดี แต่เมื่อปริมาณสารเชื่อมโยงมีค่ามากเกินไป (ปริมาณสารเชื่อม โยงเท่ากับ 0.19 กรัม) มีจุดเชื่อม โยงในสายโซ่มาก ทำให้มีชิ้นงานมีสมบัติแข็งแต่เปราะ ดังนั้นค่าความแข็งแรงดึงจึงมีค่าลดลง และเมื่อปริมาณสารเชื่อม โยงมีค่าน้อย (ปริมาณสารเชื่อม โยงเท่ากับ 0.0475 กรัม) ส่งผลให้ชิ้นงานมีค่าความแข็งแรงดึงต่ำ เพราะเกิดการเชื่อม โยงใน โครงสร้างน้อยนั่นเอง

และเมื่อพิจารณาค่าการยืด ณ จุดขาด พบว่ามีการแปรผกผันกับค่าความแข็งแรงดึง เนื่องจาก เมื่อปริมาณสารเชื่อม โยงมาก มีจุดเชื่อม โยงมาก ชิ้นงานมีความแข็งแรงเปราะ มีการยืด ได้น้อย

ดังนั้นจึงมีค่าความแข็งแรงดิ่งต่ำกว่าชิ้นงานที่มีปริมาณสารเชื่อมโยงน้อย (ปริมาณสารเชื่อมโยงเท่ากับ 0.0475 กรัม) และเมื่อปริมาณสารเชื่อมโยงเพิ่มขึ้น (ปริมาณสารเชื่อมโยงเท่ากับ 0.19 กรัม) กลับมีค่าการยึด ฉ จุดขาดมากกว่าที่ปริมาณสารเชื่อมโยงเท่ากับ 0.095 กรัม เนื่องจากปริมาณสารเชื่อมโยงที่มากกว่า มีการเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่ที่ดี มีการกระจายของการเชื่อม โยงทั่วทั้งแผ่น จึงทำให้มีสมบัติการยึดที่ดี ค่าการยึด ฉ จุดขาดจึงมีค่ามากกว่า

4.12 วิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค **Thermal Gravimetric Analysis (TGA)**

ตารางที่ 4.7 แสดงอุณหภูมิเริ่มการสลายตัวของฟิล์มตัวอย่างสูตรที่ 10 และสูตรที่ 11

สูตร	MBA (g)	To1 (°C)	To2 (°C)	To3 (°C)
10	0.0475	167	233	768
6	0.095	145	264	775
11	0.1900	-	227	820

จากตารางที่ 4.7 แสดงอุณหภูมิเริ่มการสลายตัวของฟิล์มตัวอย่างสูตรที่ 6, 10 และสูตรที่ 11 ที่มีปริมาณแป้งมันสำปะหลังผสมกับคาร์บอนซีเมทิลเซลลูโลสอัตราส่วน 3:7 โดยมีปริมาณสารเชื่อมโยงแตกต่างกัน พบว่าเมื่อปริมาณสารเชื่อมโยงมากขึ้น (ปริมาณสารเชื่อมโยงเท่ากับ 0.19 กรัม สูตรที่ 11) เกิดการสลายตัวของส่วนที่เกิดการเชื่อม โยงที่อุณหภูมิสูงขึ้น โดยสลายตัวที่อุณหภูมิ 820 °C ซึ่งการสลายตัวที่อุณหภูมิสูงขึ้น เนื่องจากเกิดการเชื่อม โยงในโครงสร้างได้ดีขึ้น มีจุดเชื่อม โยงมาก แต่เมื่อปริมาณสารเชื่อม โยงน้อยลง(ปริมาณสารเชื่อม โยงเท่ากับ 0.0475 กรัม สูตรที่ 10) กลับพบว่า อุณหภูมิในการสลายตัวของส่วนที่เกิดการเชื่อม โยง มีการสลายตัวที่อุณหภูมิลดลงเกี่ยวกับสูตรที่ 6 (ปริมาณสารเชื่อม โยงเท่ากับ 0.095 กรัม) นั้นแสดงให้เห็นว่า มีความหนาแน่นของการเชื่อม โยงในโครงสร้างพอกัน ซึ่งปริมาณสารเชื่อม โยงที่ลดลงไม่ได้ส่งผลต่ออุณหภูมิการสลายตัวมากนัก

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

ตอนที่ 1: ศึกษาปริมาณของแป้งมันสำปะหลังและคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (CMC) ที่มีผลต่อสมบัติของฟิล์มไฮโดรเจล

1 สมบัติทางกายภาพ

จากการศึกษาลักษณะทางกายภาพที่ปรากฏของชิ้นงานพบว่า ขึ้นอยู่กับปริมาณของแป้งมันสำปะหลังและซีเอ็มซี โดยพบว่า เมื่อปริมาณของซีเอ็มซีเพิ่มขึ้น ชิ้นงานที่ได้มีลักษณะเหนียว สามารถทนต่อแรงดึงยึดได้ดีขึ้น

2 การวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR)

จากการตรวจสอบหาหมู่ฟังก์ชัน พบว่าอินฟราเรดสเปกตรัมที่ได้มีลักษณะที่มีลักษณะคล้ายกัน เนื่องจากซีเอ็มซีเป็นอนุพันธ์กันของแป้ง ดังนั้นหมู่ฟังก์ชันหลักที่มีการขึ้นของสเปกตรัมที่ตำแหน่งตัวเลขใกล้เคียงกัน แต่จากอินฟราเรดสเปกตรัมก็สามารถทำให้ทราบได้ว่าการเกิดพันธะเชื่อมโยงอยู่ใน โครงสร้างของฟิล์มจริง สังเกตได้จากลักษณะพีคที่เลขคลื่น 1740 cm^{-1} คู่กับ 1525 cm^{-1} ซึ่งเป็นเลขคลื่นของเอไมด์ใน MBA

3 การทดสอบความสามารถในการดูดน้ำที่เวลา 6 ชั่วโมงและที่จุดสมดุล

ชิ้นงานที่เตรียมโดยใช้ซีเอ็มซีปริมาณที่มากส่งผลให้มีความสามารถในการดูดน้ำได้สูงกว่าที่ปริมาณซีเอ็มซีต่ำ เนื่องจากสามารถเกิดการเชื่อมโยงในซีเอ็มซีน้อย จึงมีหมู่ฟังก์ชันที่มีสมบัติชอบน้ำมาก การดูดน้ำจึงมีค่าสูง

4 สัดส่วนของแข็งที่ไม่ละลาย (Gel fraction)

น้ำหนักของแข็งที่เหลือหลังจากการแช่น้ำเป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยผ่านการอบที่อุณหภูมิ 60 °C พบว่า ที่ปริมาณการเชื่อมโยงในโครงสร้างสูง นั่นคือ ที่ปริมาณของซีเอ็มซีน้อย มีน้ำหนักของแข็งเหลืออยู่ปริมาณมาก

5 สมบัติเชิงกล

จากการทดสอบสมบัติทางกายภาพ พบว่า เมื่อปริมาณของซีเอ็มซีเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงเหนียวมากขึ้น จึงทำให้ค่าความแข็งแรงดึงและค่าการยืด ณ จุดขาด มีค่ามากหรือที่ปริมาณของแป้งมาก ค่าความแข็งแรงดึงและค่าการยืด ณ จุดขาด มีค่าต่ำ นั่นคือ ทำให้มีสมบัติแข็งเปราะ

6 สมบัติทางความร้อน

จากการทดสอบสมบัติทางความร้อน พบว่า ชิ้นงานของฟิล์มไฮโดรเจลที่มีการเติมสารก่อพันธะเชื่อมโยง (MBA) มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิการสลายตัว นั่นแสดงให้เห็นว่า สามารถเกิดการเชื่อมโยงบนสายโซ่ของแป้งมันสำปะหลังและซีเอ็มซีได้ จึงส่งผลให้อุณหภูมิการสลายตัวเปลี่ยนแปลงไป

ตอนที่ 2: ศึกษาผลของปริมาณสารเชื่อมโยง *N,N*-Methylenebisacrylamide (MBA) ที่มีผลต่อสมบัติของฟิล์มไฮโดรเจล

7 สมบัติทางกายภาพ

ลักษณะทางกายภาพที่ปรากฏของชิ้นงานเมื่อเติมสารก่อพันธะเชื่อมโยง (MBA) ปริมาณมาก ส่งผลให้ชิ้นงานมีความแข็ง และเมื่อปริมาณสารเชื่อมโยงน้อย ชิ้นงานบางและสามารถขาดได้ง่าย ไม่ทนต่อแรงดึงยึด

8 การวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR)

จากการศึกษา พบว่าอินฟราเรดสเปกตรัมของแป้งมันสำปะหลังผสมกับซีเอ็มซีในอัตราส่วน 3:7 ที่ปริมาณสารเชื่อมโยงแตกต่างกัน ลักษณะของอินฟราเรดสเปกตรัมที่ได้มีความ

คล้ายกันโดยพบว่า ที่ปริมาณสารเชื่อมโยงมาก ส่งผลให้พีคที่เลขคลื่น 1535 cm^{-1} มีลักษณะที่แหลมมากขึ้น ซึ่งเลขคลื่นดังกล่าวเป็นของ NH ที่เกิดการเชื่อมโยงใน โครงสร้าง นั้นแสดงว่า ใน โครงสร้างเกิดการเชื่อมโยงมากขึ้นนั่นเอง

9 การทดสอบความสามารถในการดูดน้ำที่เวลา 6 ชั่วโมงและที่จุดสมดุล

ชิ้นงานที่เตรียมได้ ที่มีปริมาณสารเชื่อมโยงมาก นั่นคือ มีจุดเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่มากขึ้น จึงทำให้การดูดน้ำมีค่าน้อย และเมื่อปริมาณสารเชื่อมโยงมีค่าน้อย จุดเชื่อมโยงน้อยลง การดูดน้ำจึงดีขึ้น

10 สัดส่วนของแข็งที่ไม่ละลาย (Gel fraction)

น้ำหนักของแข็งที่เหลือหลังจากการแช่น้ำเป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยผ่านการอบที่อุณหภูมิ $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ พบว่า ชิ้นงานที่มีการเชื่อมโยงใน โครงสร้างสูง มีน้ำหนักของแข็งเหลืออยู่มาก เนื่องจากสามารถเกิดเป็น โครงสร้างร่างแหได้ดีและมีส่วนที่ไม่เกิดการเชื่อมโยงอยู่น้อย ดังนั้นจึงเกิดการละลายออกมาน้อย น้ำหนักจึงเหลืออยู่มาก

11 สมบัติเชิงกล

ชิ้นงานที่มีปริมาณสารเชื่อมโยงที่มาก มีลักษณะความแข็งแรงมากขึ้นส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึงมีค่ามากขึ้น เนื่องจากใน โครงสร้างเกิดการเชื่อมโยงมากและกระจายค่อนข้างสม่ำเสมอ

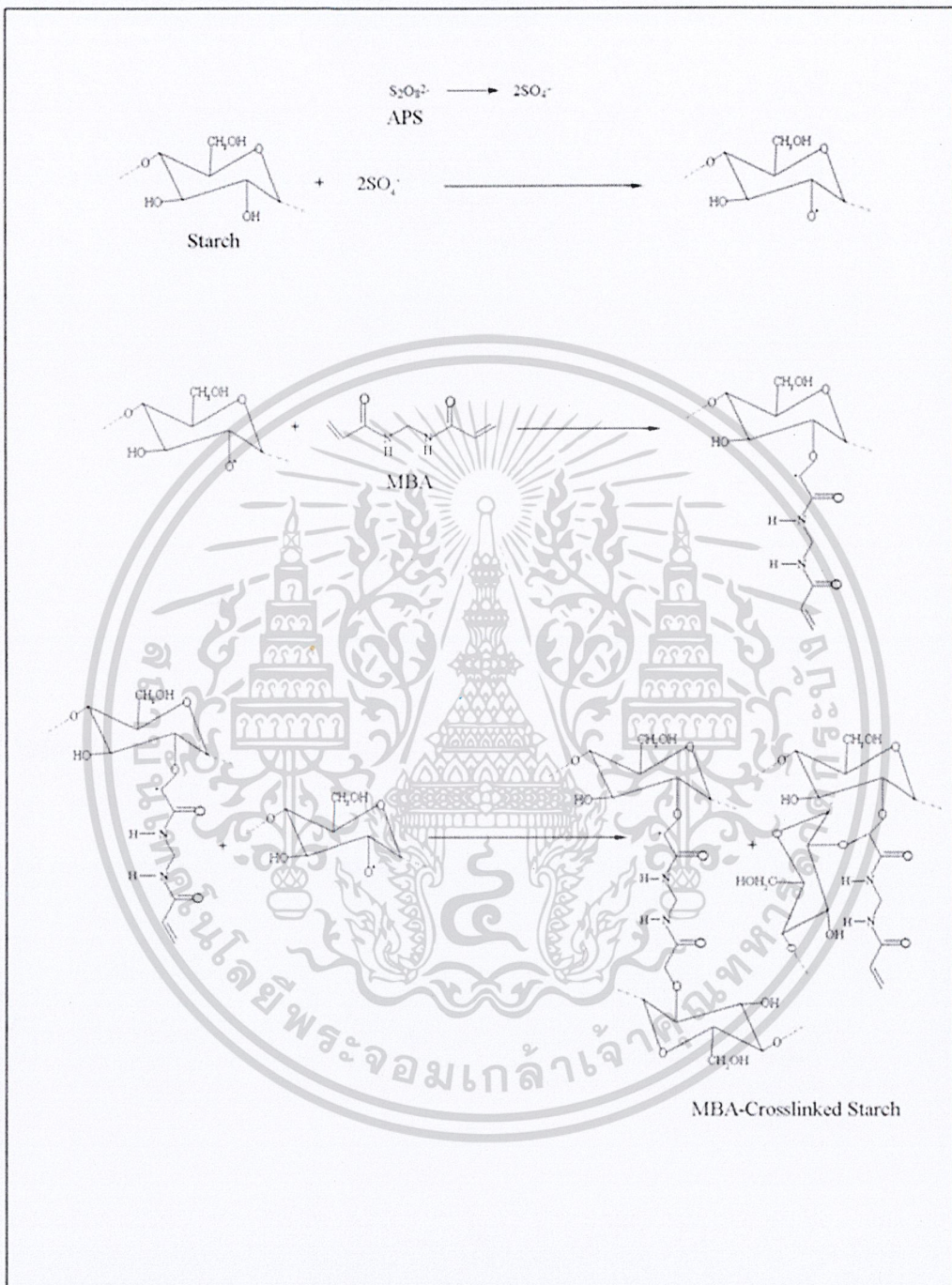
12 สมบัติทางความร้อน

จากการศึกษาการสลายตัวทางความร้อน พบว่าเมื่อปริมาณสารเชื่อมโยงมากขึ้น ส่งผลให้มีอุณหภูมิการสลายตัวที่สูงขึ้น นั่นคือ มีการจัดเรียงตัวใน โครงสร้างที่ดี มีการเชื่อมโยงใน โครงสร้าง มากนั่นเอง

จากการวิเคราะห์สมบัติของแผ่นฟิล์มผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังผสมกับคาร์บอกซีเมททิลเซลลูโลส (CMC) โดยมี *N,N*-Methylenebisacrylamide (MBA) เป็นสารก่อพันธะเชื่อมโยง ซึ่งมีการพิจารณาถึงสมบัติทางกายภาพในการขึ้นรูป ความสามารถในการดูดน้ำที่เวลา 6 ชั่วโมงและที่จุดสมดุล การหาสัดส่วนของแข็งที่ไม่ละลายหรือการคงรูป สมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อน พบว่าสูตรที่ 6 มีสมบัติของวัสดุดูดซับที่ยังคงที่สามารถขึ้นรูปเป็นฟิล์มได้และยังมีสมบัติเชิงกล

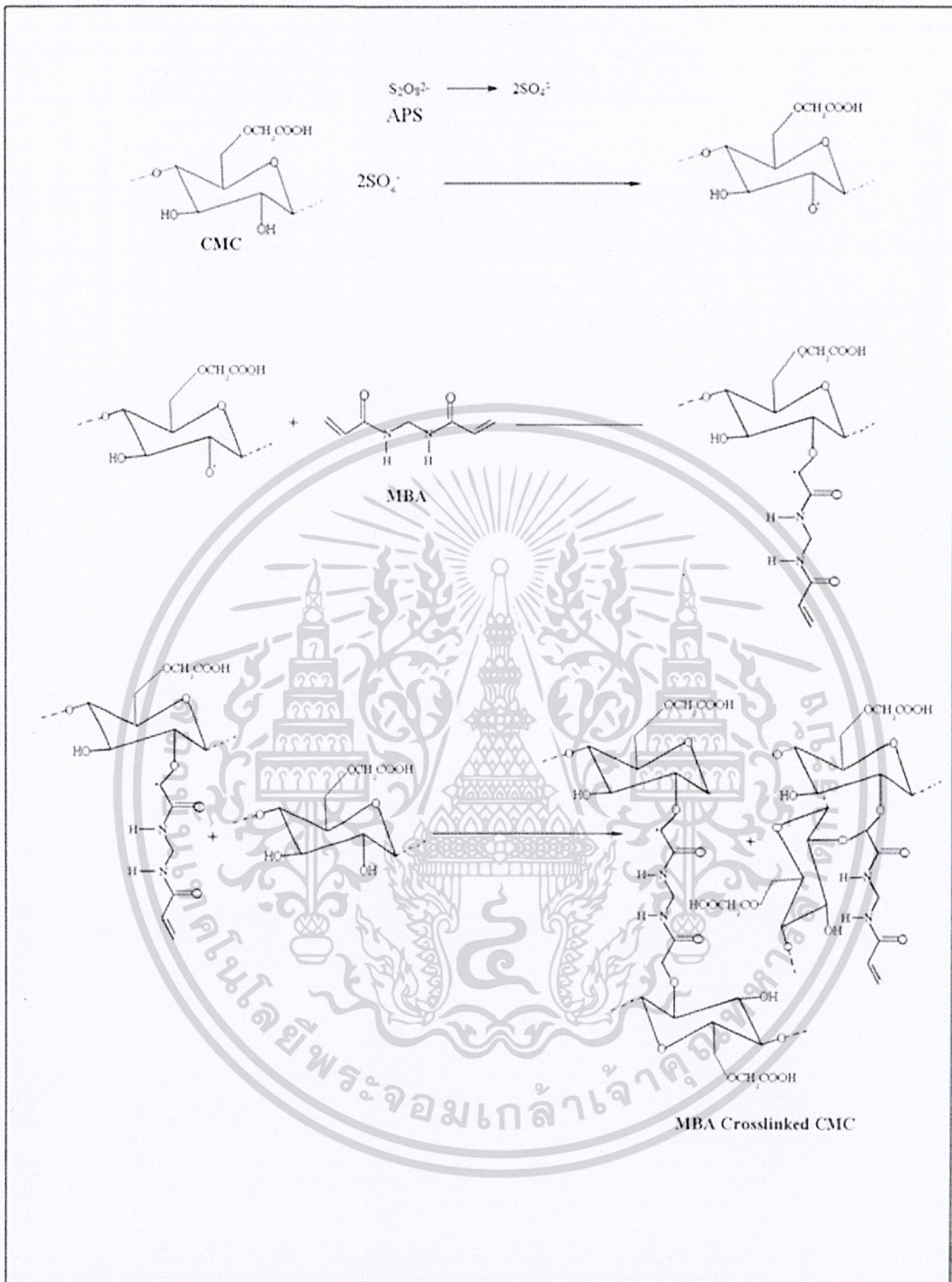
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตามที่ต้องการ โดยอัตราส่วนของสารที่เหมาะสม นั่นคือ แป้งมันสำปะหลัง:ซีเอ็มซี เท่ากับ 3:7 และมีปริมาณของสารเชื่อม โยงเท่ากับ 0.095 กรัม



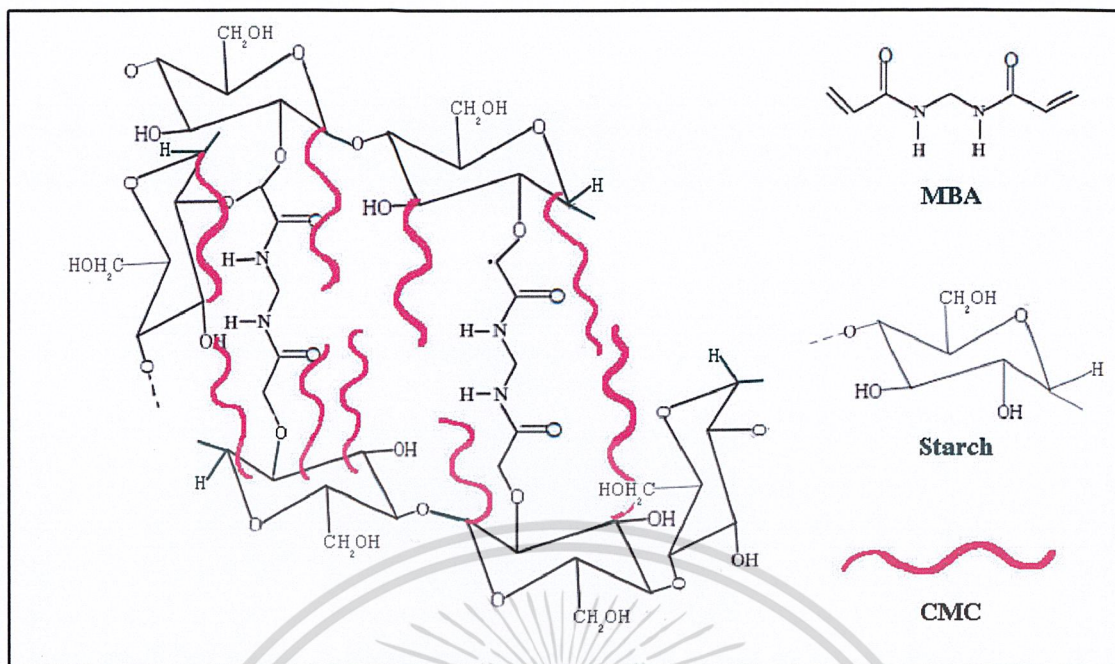
รูปที่ 5.1 สันนิษฐาน โครงสร้างของแป้งที่เกิดพันธะเชื่อม โยงกับ N,N-methylenebisacrylamide

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.2 สันนิษฐาน โครงสร้างของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (CMC) ที่เกิดพันธะเชื่อมโยงกับ N,N-methylenebisacrylamide (MBA)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.3 สันนิษฐานโครงสร้างที่อาจเกิดขึ้นในฟิล์มผสมแป้งมันสำปะหลังกับซีเอ็มซี โดยมี N,N-methylenebisacrylamide (MBA) เป็นสารก่อก้อนระเชื่อมโยง

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาปริมาณสารของแป้งมันสำปะหลัง: ซีเอ็มซี เท่ากับ 5:5 ซึ่งมีสมบัติในการขึ้นรูปที่ดีเช่นกัน
2. ศึกษาถึงสิ่งที่มีผลต่อสมบัติของชิ้นงาน เช่นการบวมตัวสารละลายที่ pH ต่างๆ เนื่องจากคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (CMC) มีความว่องไวต่อสารละลายกรด-ด่าง
3. ศึกษาผลของปริมาณสารริเริ่มปฏิกิริยาแอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟต (APS) ที่มีผลการขึ้นรูปและสมบัติเชิงกลของชิ้นงาน
4. ศึกษาวิธีการลดฟองในชิ้นงานด้วยเครื่องสั่นแบบ Ultrasonic
5. ศึกษาผลของการเติมซิงก์ออกไซด์ (ZnO) เพื่อกำจัดแบคทีเรียของชิ้นงานตัวอย่างในการใช้งานเป็นวัสดุปิดแผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] A.Pourjavadi, Sh.Barzegar and G.R.Mahdavinia. 2006. MBA-crosslinked Na-Alg/CMC as a smart full-polysaccharide superabsorbent hydrogels. Carbohydrate polymer 66, 386-395.
- [2] ชนาธิป สามารถ, วัชรสมน สรไชยสัมฤทธิ์. 2542. การเตรียมไฮโดรเจลเพื่อใช้ในการนำยา. โครงการงานพิเศษวิทยาศาสตร์ สาขาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. หน้า 12
- [3] [Online]. Available : Carbohydrate technology, eu.lib.kmutt.ac.th/elearning/Courseware/BCT611/chapter2.html (28/01/54)
- [4] ภิญญา พานิชพันธ์, รศ.ดร. ความรู้พื้นฐานที่ทันสมัยและเป็นประโยชน์เกี่ยวกับคาร์โบไฮเดรต
- [5] [Online]. Available : Wiz2.pharm.wayne.edu/biochem/enzyme_cofactors.ppt, By henry warmser (28/01/54)
- [6] [Online]. Available : www.engin.umich.edu/.../potato/starch3.htm (28/01/54)
- [7] [Online]. Available : www.agsci.ubc.ca/.../fnh/301/water/water95.htm (28/01/54)
- [8] มรกต ตันติเจริญ, เกื้อกุล ปิยะจำขวัญ และกล้าณรงค์ ศรีรอด. อนาคตผลิตภัณฑ์แป้งมันสำปะหลัง. 24th ANNIVERSARY THE THAI TAPIOCA FLOUR INDUSTRIES TRADE ASSOCIATION. กรุงเทพฯ
- [9] ภัทรารุช มนต์วิเศษ, ผศ.ดร. เซลลูโลสและอนุพันธ์ของเซลลูโลส. 2553. เอกสารประกอบการเรียนการสอนไบโอโพลิเมอร์.
- [10] ลลิตา บุญโถม, วราภรณ์ พุทธิสสะ. 2542. การผลิตวัสดุโฟมจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโอลิฟินส์และสาหร่ายสีแดง (*Gracilaria fisheri*). โครงการงานพิเศษวิทยาศาสตร์ สาขาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. หน้า 16-19
- [11] อัมณฑ รักรัตน์. 2552. ผลของสารเบนโซฟีโนนที่มีต่อการสลายตัวของฟิล์มระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำและแป้งมันสำปะหลัง. โครงการงานพิเศษวิทยาศาสตร์ สาขาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. หน้า 38-39

- [12] กนกวรรณ กองคำดี, รณณ สุภรัตน์นันต์ และวราพร เลิศสุวรรณ. 2552. การปรับปรุงฟิล์มไฮโดรเจลจากไหมไทยนางน้อยด้วย 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลตและบิสอะคริลาไมด์เป็นสารเชื่อมโยง. ศึกษานพิเศษวิทยาศาสตร์ สาขาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. หน้า 26-31
- [13] Kasinee Hemvichain, Phiriyatorn Suwanmala and Manit Sonsuk, Preparation of Cross-linked Caboxymethyl Cassava Starch for The Adsorption of Heavy Metal Ions, 31st Congress on Science and Technology of Thailand at Suranaree University of Technology, 18 – 20 October 2005.
- [14] Chunyu Chang, Bo Duan, Jie Cai, Lina Zhang, Superabsorbent hydrogels based on cellulose for smart swelling and controllable delivery, *European Polymer Journal* 46 (2010) 92–100.
- [15] Wei Li, Bingjie Sun, Peiyi Wu, Study on hydrogen bonds of carboxymethyl cellulose sodium film with two-dimensional correlation infrared spectroscopy, *Carbohydrate Polymers* 78 (2009) 454–461.
- [16] D.R. Biowal, R.P.Singh, Characterisation of carboxymethyl cellulose and polyacrylamind graft copolymer. “*Carbohydrate polymer*” 57(2004) 379-387
- [17] ฉนวนลาภ เต็มพงษ์พิจิต, พรศักดิ์ธนากร. 2541. การศึกษาเทคนิคกระบวนการขึ้นรูปของพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อของแป้งมันสำปะหลัง โครงการพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรม ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [18] กุลธิดา แซ่ฮู่. 2550. การศึกษาของไฮโดรเจลผสมระหว่างพอลิ-2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต และสารเมื่อจากเม็ดแมงลัก. *วิทยานิพนธ์ ภาควิชาเคมี สาขาเทคโนโลยี พอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.*
- [19] D.R. Lu, C. M. Xiao and S. J. Xu. 2009. Starch-based completely biodegradable polymer materials. *Express Polymer Letters*. 3(6), 366-375.
- [20] T. Siritittayacom, N. Suebsanti, R.Molly, P. Siritittayacom, and M. Prasitsilp. 2001. Synthesis and characterization of Poly (2-hydroxyethyl methacrylate-co-methyl acrylate) hydrogels for use as temporary skin substitutes. *Chiang Mai Journal Science*. 28(2), 71-82.

- [21] S.K. Bajpai. 1999. Casein Cross-linked Polyacrylamide Hydrogel: Study of Swelling and Drug Release Behaviour. *Iranian Polymer*. 8, 231-239.
- [22] Y.J Kim , Y.M Lee และ Park .1994. “ การย่อยสลายทางชีวภาพของพอลิเมอร์โดยแป้ง.” [online]. Available: www.phtnet.org/research/perishable-fruit-step2.asp?id_name...id
- [23] ฐนาดี ถีจจากภัย , ก้องเกียรติ คงสุวรรณ และนุกุล เอื้อพันธ์เศรษฐ. “การศึกษาการย่อยสลายของเทอร์โมพลาสติกสตาโรล และแผ่นฟิล์มโพลีเอทิลีนผสมแป้ง โดยจุลินทรีย์แบบใช้ออกซิเจน.” [online]. Available: <http://www.researchgate.net/publication/39025724>



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ค่าความสามารถการดูดน้ำของวัสดุดูดซับยิ่งยวด

- ตอนที่ 1 ศึกษาปริมาณของแป้งมันสำปะหลังและคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (CMC) ที่มีผลต่อสมบัติฟิล์ม

ตารางแสดงการบวมน้ำสูตรที่ 0-8 ที่ 6 ชั่วโมง และ 24 ชั่วโมง

สูตร	น้ำหนัก ก่อนแช่น้ำ (g)	เวลา (ชั่วโมง) ชั้นที่ 1						
		1	2	3	4	5	6	24
1	0.22	1.80	2.73	3.05	2.66	2.50	2.23	2.86
2	0.26	0.45	0.47	0.48	0.50	0.49	0.48	0.49
3	0.23	0.54	0.57	0.65	0.47	0.52	0.43	0.39
4	0.24	0.58	0.97	0.95	0.65	0.81	0.76	0.71
5	0.34	1.70	1.50	1.65	1.66	1.73	1.67	1.68
6	0.20	0.82	1.34	1.01	1.02	0.98	0.94	0.75
7	0.28	0.56	0.55	0.64	0.54	0.53	0.25	0.07
8	0.24	0.75	0.88	0.89	0.84	0.82	0.79	0.72
9	0.05	ละลาย ทันที	-	-	-	-	-	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สูตร	น้ำหนัก ก่อนแช่น้ำ (g)	เวลา (ชั่วโมง) ชั้นที่ 2						
		1	2	3	4	5	6	24
1	0.16	1.18	1.98	2.13	2.22	2.17	2.06	2.35
2	0.25	0.42	0.46	0.50	0.48	0.46	0.45	0.42
3	0.17	0.58	0.59	0.52	0.45	0.37	0.31	0.30
4	0.20	0.95	0.83	0.86	0.66	0.85	0.78	0.69
5	0.32	1.78	1.72	1.80	1.86	1.93	1.78	1.72
6	0.18	0.72	0.92	0.93	1.01	0.98	0.64	0.65
7	0.25	0.50	0.52	0.60	0.49	0.49	0.20	0.07
8	0.16	0.49	0.57	0.61	0.56	0.53	0.50	0.47
9	0.09	ละลาย ทันที	-	-	-	-	-	-

ตารางแสดงค่า %Swelling สูตรที่ 0-8 ที่ 6 ชั่วโมง และ 24 ชั่วโมง

สูตร	เวลา (ชั่วโมง) ชั้นที่ 1						
	1	2	3	4	5	6	24
1	718.18	1125.00	1286.36	1109.09	1036.36	913.64	1200
2	73.08	80.77	84.62	92.31	88.46	84.62	88.46
3	134.78	147.83	182.61	104.38	126.09	86.96	69.57
4	141.67	405.14	295.83	170.83	237.5	216.67	195.83
5	400	341.18	385.29	388.24	408.82	391.18	394.12
6	310.00	570.00	505.45	410.00	390.00	370	375.23
7	100.00	96.43	128.57	92.86	89.29	88.66	22.55
8	310.75	365.95	370.48	350.59	340.00	331.78	300.44
9	-	-	-	-	-	-	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สูตร	เวลา (ชั่วโมง) ชั้นที่ 2						
	1	2	3	4	5	6	24
1	637.50	1139.20	1231.25	1287.50	1256.25	1187.50	1368.75
2	68.00	84.00	100.00	92.00	84.00	80.00	68.00
3	241.18	247.06	205.88	164.71	117.65	82.35	76.47
4	375.00	415.50	330.00	230.00	325.00	290.00	245.00
5	456.25	437.50	462.50	481.25	503.13	456.25	437.50
6	300.00	411.11	514.99	461.11	444.44	255.56	361.61
7	100.00	108.00	140.00	96.00	96.00	80.62	17.75
8	307.11	357.27	379.52	346.73	327.86	312.86	290.20
9	-	-	-	-	-	-	-

ตารางแสดงค่า %Swelling สูตรที่ 0-8 ที่ 6 ชั่วโมง และ 24 ชั่วโมงเฉลี่ย

สูตร	เวลา (ชั่วโมง)						
	1	2	3	4	5	6	24
1	677.84	1132.10	1258.81	1198.29	1146.31	1050.57	1284.38
2	70.54	82.39	92.31	92.16	86.23	82.31	78.23
3	187.98	197.45	194.25	134.53	121.87	84.66	73.02
4	258.34	410.32	312.92	200.42	281.25	253.34	220.42
5	428.13	389.34	423.89	434.75	455.96	423.72	415.81
6	305.00	490.56	510.22	435.56	417.22	312.78	368.42
7	100.00	102.22	134.29	94.43	92.65	84.64	20.15
8	308.93	361.61	375.00	348.66	333.93	322.32	295.32
9	-	-	-	-	-	-	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางแสดงค่าของแข็งที่ไม่ละลายน้ำ (Gel Fraction) ของสูตรที่ 1-9

สูตร	น้ำหนักก่อนแห้งน้ำ (g) ชั้นที่ 1	Gel Fraction ชั้นที่ 1
1	0.22	0.20
2	0.26	0.19
3	0.23	0.16
4	0.24	0.13
5	0.34	0.13
6	0.20	0.09
7	0.28	0.09
8	0.24	0.04
9	0.05	-

สูตร	น้ำหนักก่อนแห้งน้ำ (g) ชั้นที่ 2	Gel Fraction ชั้นที่ 2
1	0.16	0.14
2	0.25	0.20
3	0.17	0.12
4	0.20	0.10
5	0.32	0.15
6	0.18	0.09
7	0.25	0.08
8	0.16	0.02
9	0.09	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางแสดงค่า % Gel Fraction ของสูตรที่ 1-9

สูตร	Gel Fraction ชั้นที่ 1	Gel Fraction ชั้นที่ 2	Gel Fraction เฉลี่ย
1	90.91	87.50	89.21
2	73.08	80.00	76.54
3	75.15	71.09	73.12
4	54.45	49.61	52.03
5	38.24	46.88	42.56
6	45.00	50.00	47.50
7	35.45	31.05	33.25
8	16.67	12.50	14.59
9	-	-	-

ลักษณะทางกายภาพหลังการบวมตัวในน้ำกลั่น

● สูตรที่ 1

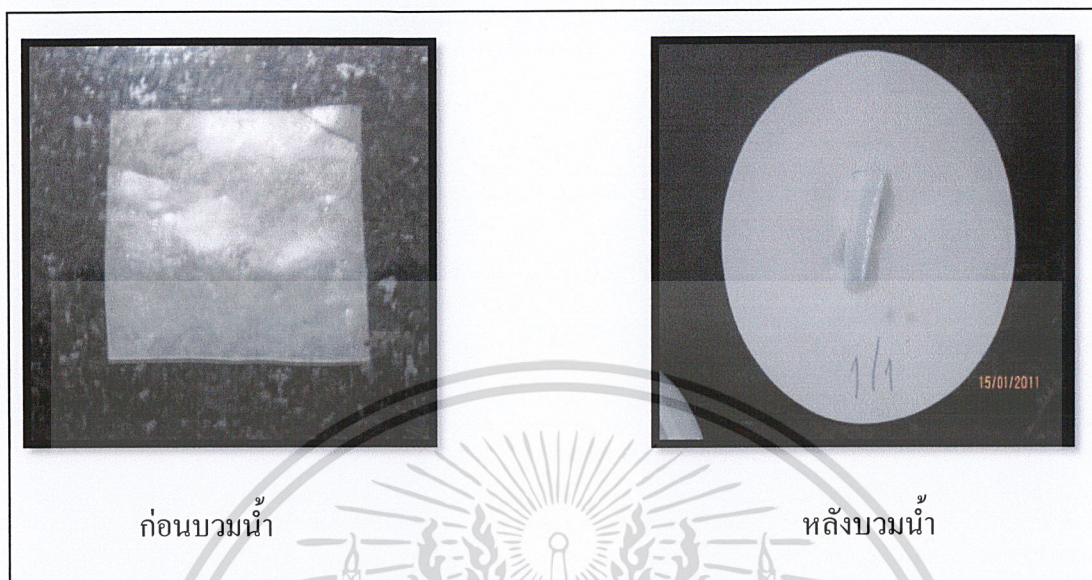


ก่อนบวมน้ำ

หลังบวมน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- สูตรที่ 2



- สูตรที่ 3

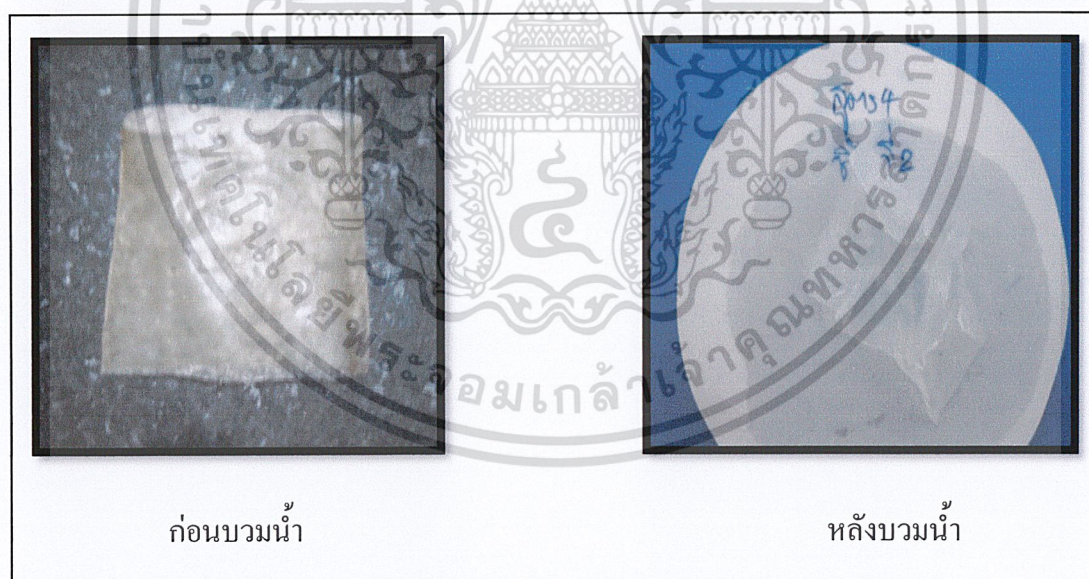


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- สูตรที่ 4

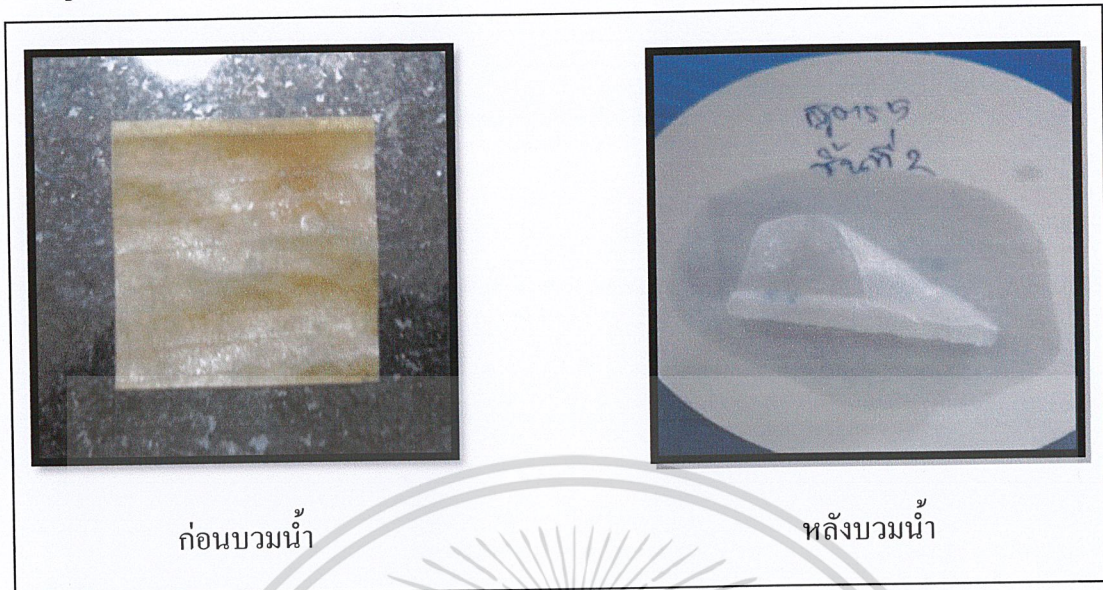


- สูตรที่ 5



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- สูตรที่ 6



ก่อนบวมน้ำ

หลังบวมน้ำ

- สูตรที่ 7



ก่อนบวมน้ำ

หลังบวมน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- สูตรที่ 8



ก่อนบวมน้ำ



หลังบวมน้ำ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- **ตอนที่ 2** ศึกษาผลของปริมาณสารเชื่อมโยงที่มีผลต่อสมบัติของฟิล์ม
ตารางแสดงการบวมน้ำสูตรที่ 10-11 ที่ 6 ชั่วโมง และ 24 ชั่วโมง

สูตร	น้ำหนัก ก่อนแช่น้ำ (g)	เวลา (ชั่วโมง) ชั้นที่ 1						
		1	2	3	4	5	6	24
10	0.24	2.86	2.03	1.44	1.38	1.21	0.98	0.75
11	0.38	0.96	0.99	1.08	1.04	1.00	0.96	1.12

สูตร	น้ำหนัก ก่อนแช่น้ำ (g)	เวลา (ชั่วโมง) ชั้นที่ 2						
		1	2	3	4	5	6	24
10	0.22	2.66	1.80	1.34	1.24	1.12	1.07	0.74
11	0.36	0.84	0.91	1.00	0.94	0.99	0.89	1.30

ตารางแสดงค่า %Swelling สูตรที่ 10-11 ที่ 6 ชั่วโมง และ 24 ชั่วโมง

สูตร	เวลา (ชั่วโมง) ชั้นที่ 1						
	1	2	3	4	5	6	24
10	1091.67	745.83	500.00	475.00	404.17	308.33	212.50
11	152.63	160.53	184.21	173.68	163.16	152.63	194.74

สูตร	เวลา (ชั่วโมง) ชั้นที่ 2						
	1	2	3	4	5	6	24
10	1109.09	718.18	509.09	463.64	409.09	386.36	236.36
11	133.33	152.78	177.78	161.11	175.00	147.22	261.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางแสดงค่าของแข็งที่ไม่ละลายน้ำ (Gel Fraction) ของสูตรที่ 10-11

สูตร	ชั้นที่ 1	
	น้ำหนักก่อนแช่น้ำ (g)	Gel Fraction
10	0.24	0.02
11	0.38	0.11

สูตร	ชั้นที่ 2	
	น้ำหนักก่อนแช่น้ำ (g)	Gel Fraction
10	0.22	0.01
11	0.36	0.11

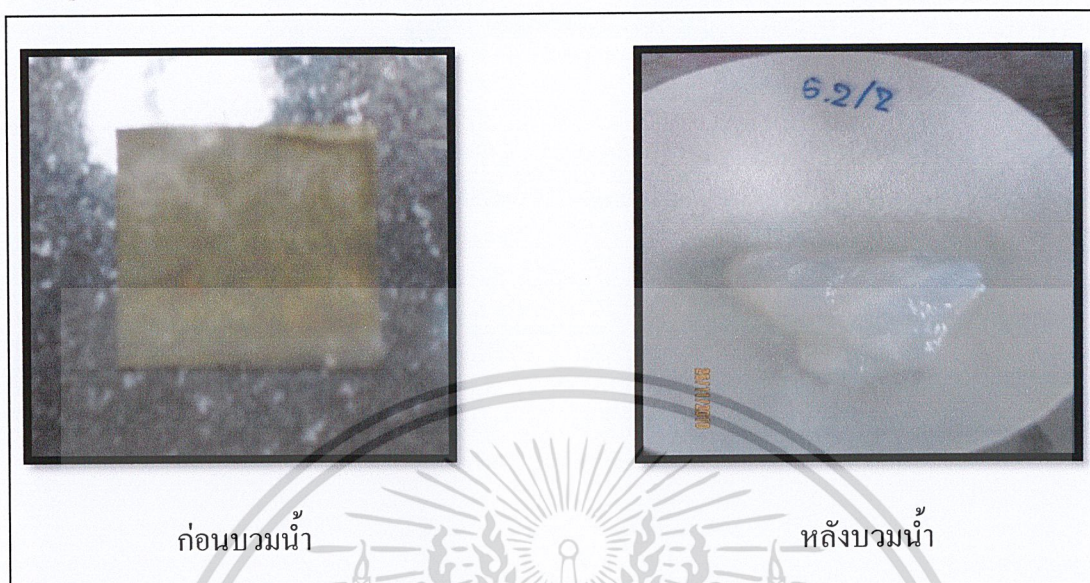
ตารางแสดงค่า % Gel Fraction ของสูตรที่ 10-11

สูตร	Gel Fraction	Gel Fraction	เฉลี่ย
	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	
10	8.33	4.55	6.44
11	28.95	30.56	29.76

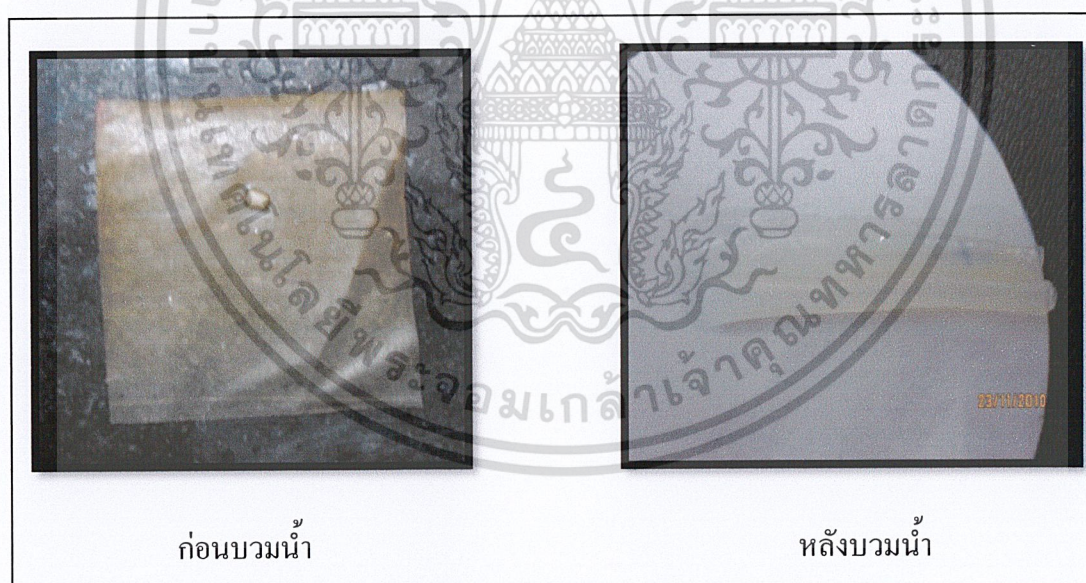
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะทางกายภาพหลังการบวมตัวในน้ำกลั่น

- สูตรที่ 7



- สูตรที่ 11



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณเปอร์เซ็นต์ Gel Fraction

$$\text{จะได้ว่าเปอร์เซ็นต์ Gel Fraction} = \left(\frac{W_2}{W_1} \right) \times 100$$

หมายเหตุ : W_1 = น้ำหนักชิ้นงานก่อนแช่น้ำ (g)

W_2 = น้ำหนักชิ้นงานหลังแช่น้ำ (g)

ตัวอย่างการคำนวณ

สำหรับชิ้นงานที่เตรียมได้จากสูตรที่ 5 ชั้นที่ 2 ในชั่วโมงที่ 5 แสดงวิธีการคำนวณดังนี้

โดย $W_1 = 0.32 \text{ g}$

$W_2 = 1.93 \text{ g}$

$$\text{จะได้ เปอร์เซ็นต์การดูดน้ำ} = \left(\frac{1.93}{0.32} \right) \times 100 = 603.13 \%$$

การคำนวณเปอร์เซ็นต์การดูดน้ำ

$$\text{จะได้ว่าเปอร์เซ็นต์การดูดน้ำ} = \frac{(W_1 - W_2)}{W_1} \times 100$$

หมายเหตุ : W_1 = น้ำหนักชิ้นงานก่อนแช่น้ำ (g)

W_2 = น้ำหนักชิ้นงานหลังแช่น้ำ (g)

ตัวอย่างการคำนวณ

สำหรับชิ้นงานที่เตรียมได้จากสูตรที่ 5 ชั้นที่ 2 ในชั่วโมงที่ 5 แสดงวิธีการคำนวณดังนี้

โดย $W_1 = 0.18 \text{ g}$

$W_2 = 0.98 \text{ g}$

$$\text{จะได้ เปอร์เซ็นต์การดูดน้ำ} = \frac{(0.98 - 0.18)}{0.18} \times 100 = 444.44 \%$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การดูน้ำเฉลี่ย

$$\text{จะได้ว่าเปอร์เซ็นต์การดูน้ำ} = \frac{(SW_1 + SW_2)}{2}$$

หมายเหตุ : SW_1 = เปอร์เซ็นต์การดูน้ำขึ้นที่ 1 (%)

SW_2 = เปอร์เซ็นต์การดูน้ำขึ้นที่ 2 (%)

ตัวอย่างการคำนวณ

สำหรับชิ้นงานที่เตรียมได้จากสูตรที่ 5 ขึ้นที่ 1 และขึ้นที่ 2 ในชั่วโมงที่ 5 แสดงวิธีการคำนวณดังนี้

โดย $SW_1 = 390.00 \%$

$SW_2 = 444.44 \%$

จะได้ เปอร์เซ็นต์การดูน้ำเฉลี่ย = $\frac{(390 + 444.44)}{2} = 417.22 \%$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

ค่าแสดงสมบัติเชิงกลของฟิล์มไฮโดรเจล

ตอนที่ 1 ศึกษาปริมาณของแป้งมันสำปะหลังและคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (CMC) ที่มีผลต่อสมบัติฟิล์ม

ตารางแสดงค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) และค่า %การยืด ณ จุดขาด (%Elongation at break)

- สูตรที่ 2

Sample	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)
1	0.4401	17.13
2	0.8645	14.38
3	0.4706	18.99
เฉลี่ย	0.5917	16.83

- สูตรที่ 3

Sample	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)
1	0.5018	27.88
2	0.3470	16.21
3	0.3560	17.37
เฉลี่ย	0.4016	20.49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- สูตรที่ 4

Sample	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)
1	0.4329	20.57
2	0.5318	34.25
3	0.7439	46.79
เฉลี่ย	0.5696	33.87

- สูตรที่ 5

Sample	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)
1	0.5928	33.57
2	0.4459	18.23
3	-	-
เฉลี่ย	0.5194	25.90

- สูตรที่ 6

Sample	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)
1	1.1880	30.61
2	1.6440	45.54
3	1.0490	31.88
เฉลี่ย	1.2930	36.01

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

● สูตรที่ 7

Sample	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)
1	2.3110	114.20
2	1.6110	66.020
3	3.1600	129.10
เฉลี่ย	2.3610	103.10

● สูตรที่ 8

Sample	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)
1	1.0250	63.60
2	0.2868	32.06
3	1.2140	78.62
เฉลี่ย	0.8419	58.09

ตารางแสดงค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) และค่า %การยืด ณ จุดขาด (% Elongation at break) เฉลี่ยของแต่ละสูตร

สูตรที่	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)
2	0.5917	16.83
3	0.4016	20.49
4	0.5696	33.87
5	0.5194	25.90
6	1.2930	36.01
7	2.3610	103.10
8	0.8419	58.09

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตอนที่ 2 ศึกษาผลของปริมาณสารเชื่อมโยงที่มีผลต่อสมบัติของฟิล์ม

• สูตรที่ 10

Sample	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)
1	1.0210	49.53
2	0.8704	50.43
3	-	-
เฉลี่ย	0.9455	49.98

• สูตรที่ 11

Sample	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)
1	0.4549	24.68
2	0.7789	37.08
3	0.8930	36.91
เฉลี่ย	0.7090	32.89

ตารางแสดงค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) และค่า %การยืด ณ จุดขาด (%Elongation at break) เฉลี่ยของแต่ละสูตร

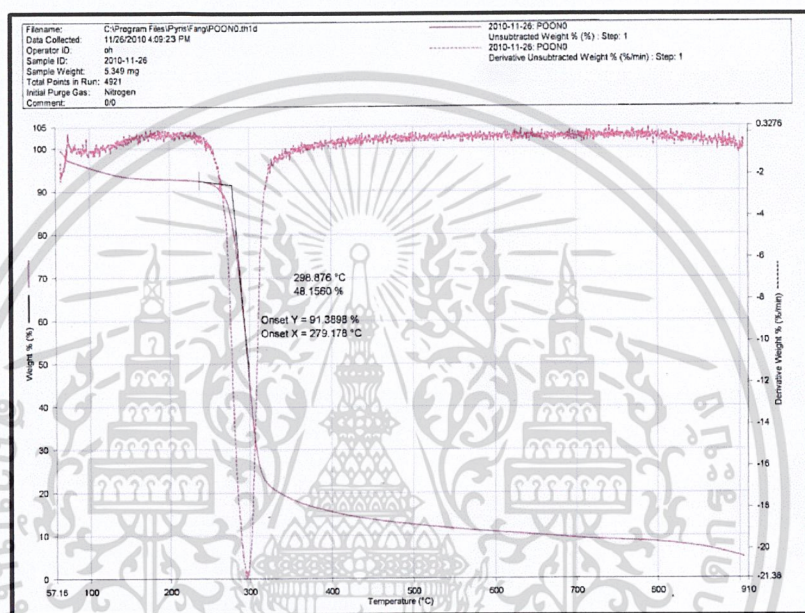
สูตรที่	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)
10	0.9455	49.98
11	0.7090	32.89

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

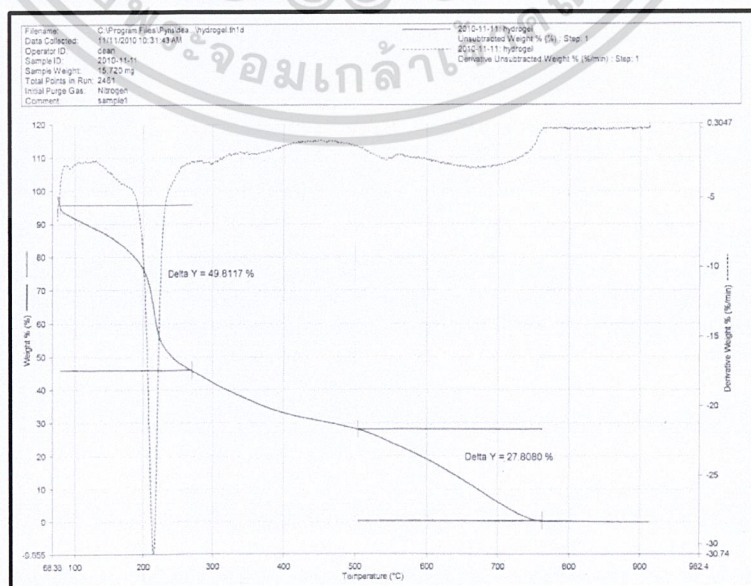
ภาคผนวก ค

ค่าแสดงอุณหภูมิเริ่มการสลายตัวของฟิล์มตัวอย่าง

ตอนที่ 1 : ศึกษาปริมาณของแป้งมันสำปะหลังและคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (CMC) ที่มีผลต่อสมบัติฟิล์ม

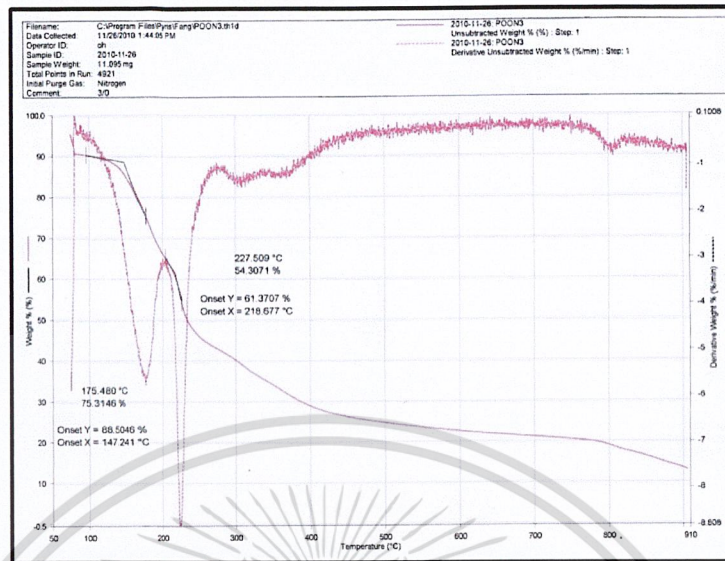


เทอร์โมแกรมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลัง (สูตรที่ 1)

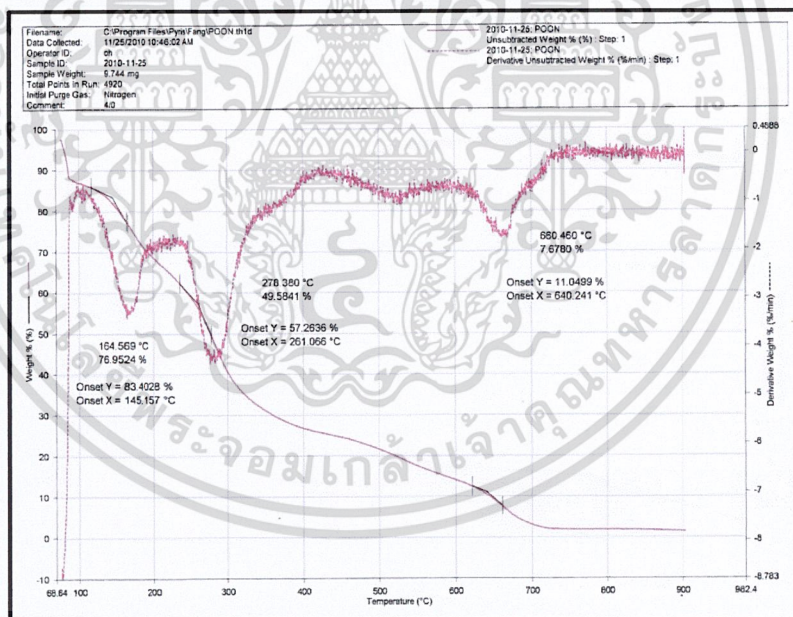


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทอร์โมแกรมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เกิดการเชื่อมโยง (สูตรที่ 2)

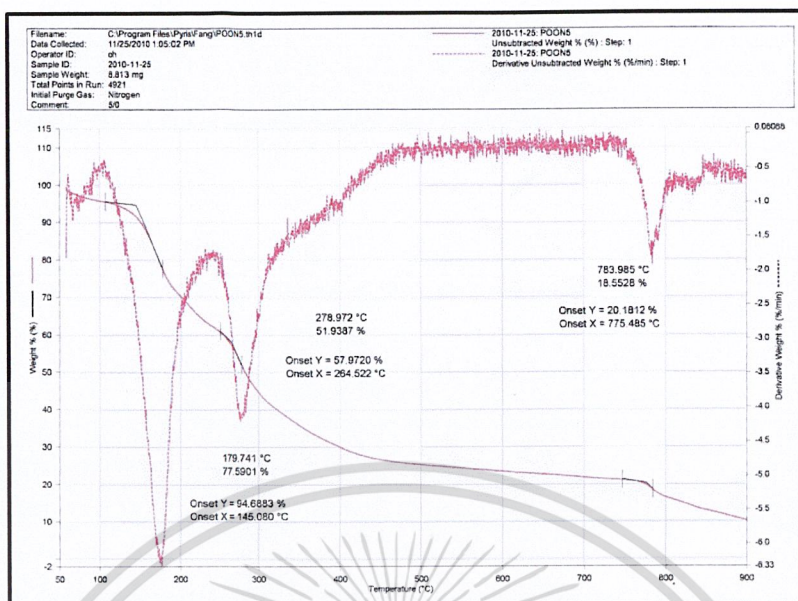


เทอร์โมแกรมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังผสมกับซีเอ็มซีที่อัตราส่วน 7:3 (สูตรที่ 4)

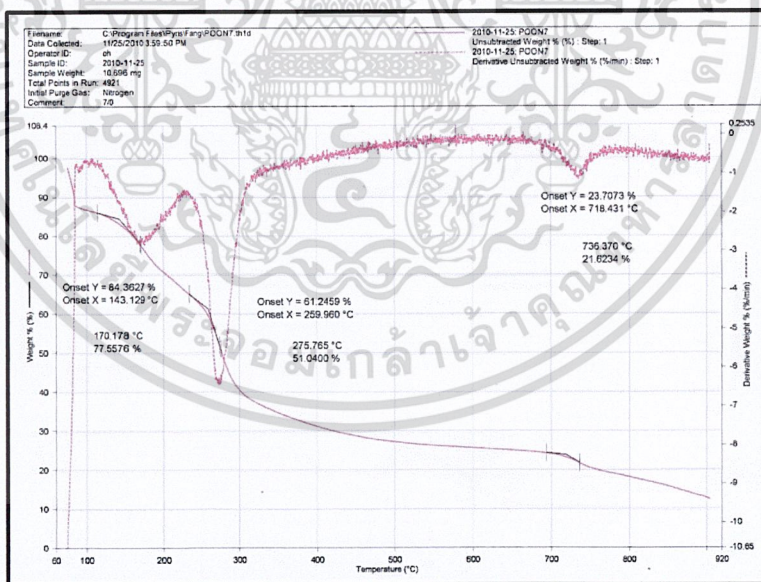


เทอร์โมแกรมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังผสมกับซีเอ็มซีที่อัตราส่วน 5:5 (สูตรที่ 5)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

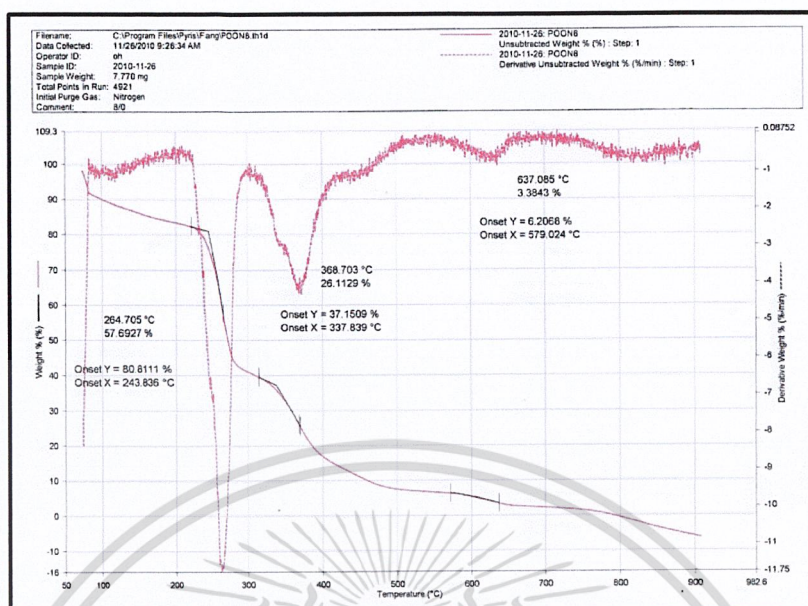


เทอร์โมแกรมของฟิล์มเป้งมันดำปะหลังผสมกับซีเอ็มซีที่อัตราส่วน 3:7 (สูตรที่ 6)

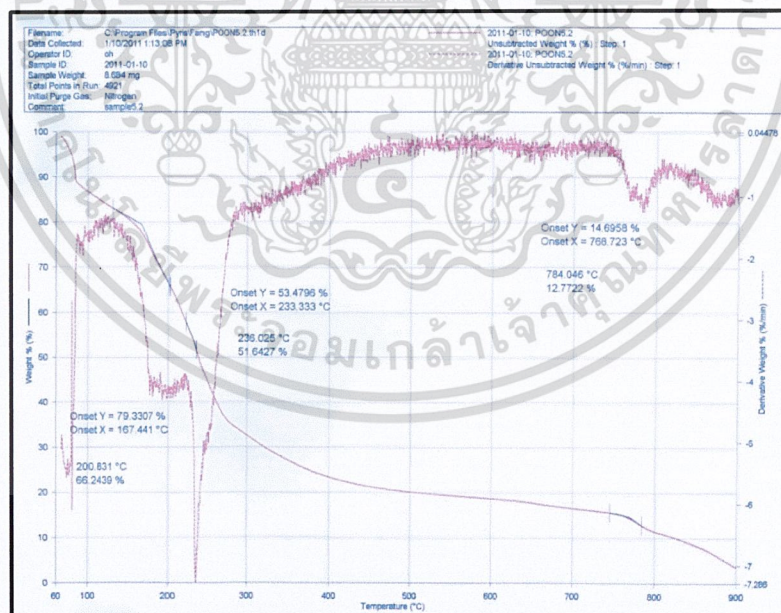


เทอร์โมแกรมของฟิล์มซีเอ็มซีที่เกิดการเชื่อมโยง (สูตรที่ 8)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



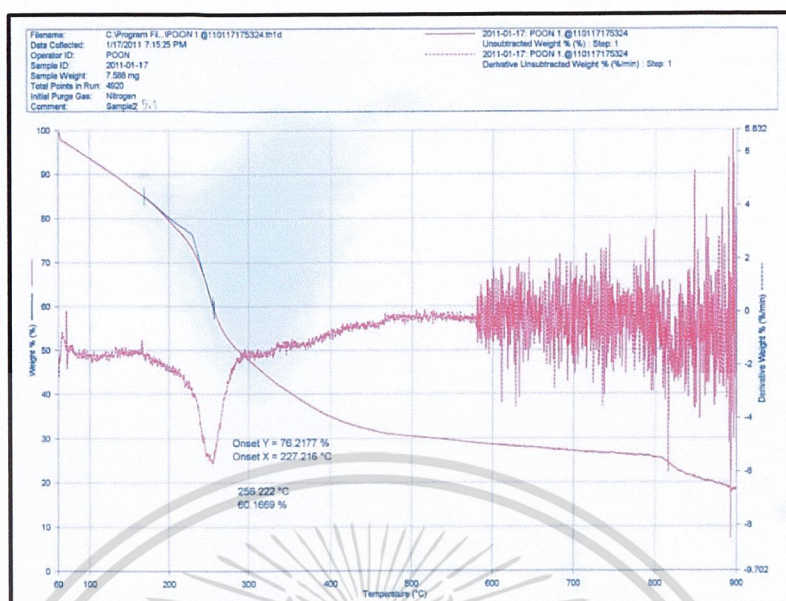
เทอร์โมแกรมของฟิล์มซีเอ็มซี (สูตรที่ 9)



เทอร์โมแกรมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังผสมกับซีเอ็มซีที่อัตราส่วน 3:7 โดยมีการปรับปรุงปริมาณ

สารเชื่อมโยง (สูตรที่ 10)

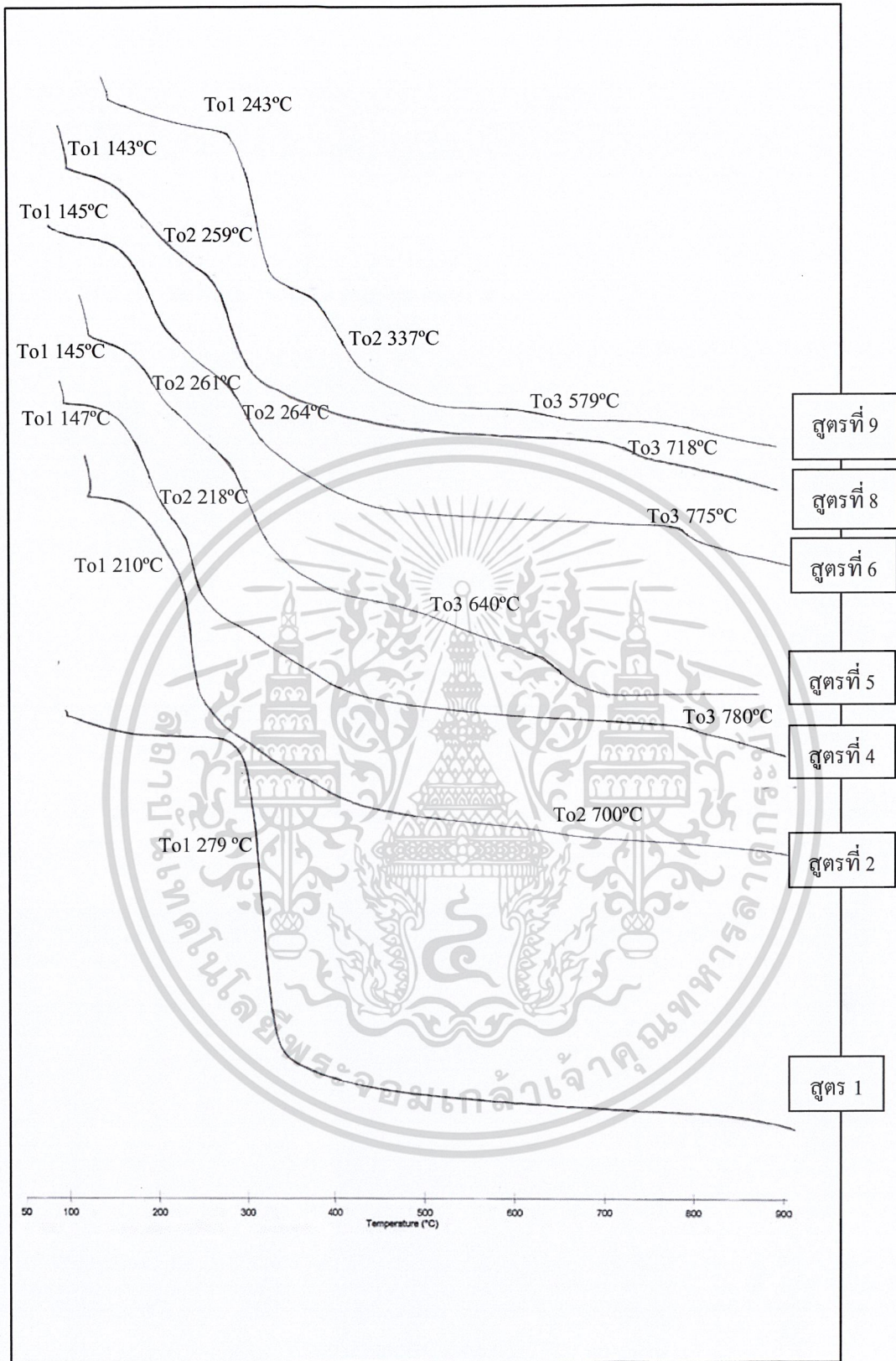
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เทอร์โมแกรมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังผสมกับซีเอ็มซีที่อัตราส่วน 3:7 โดยมีการปรับปรุงปริมาณ

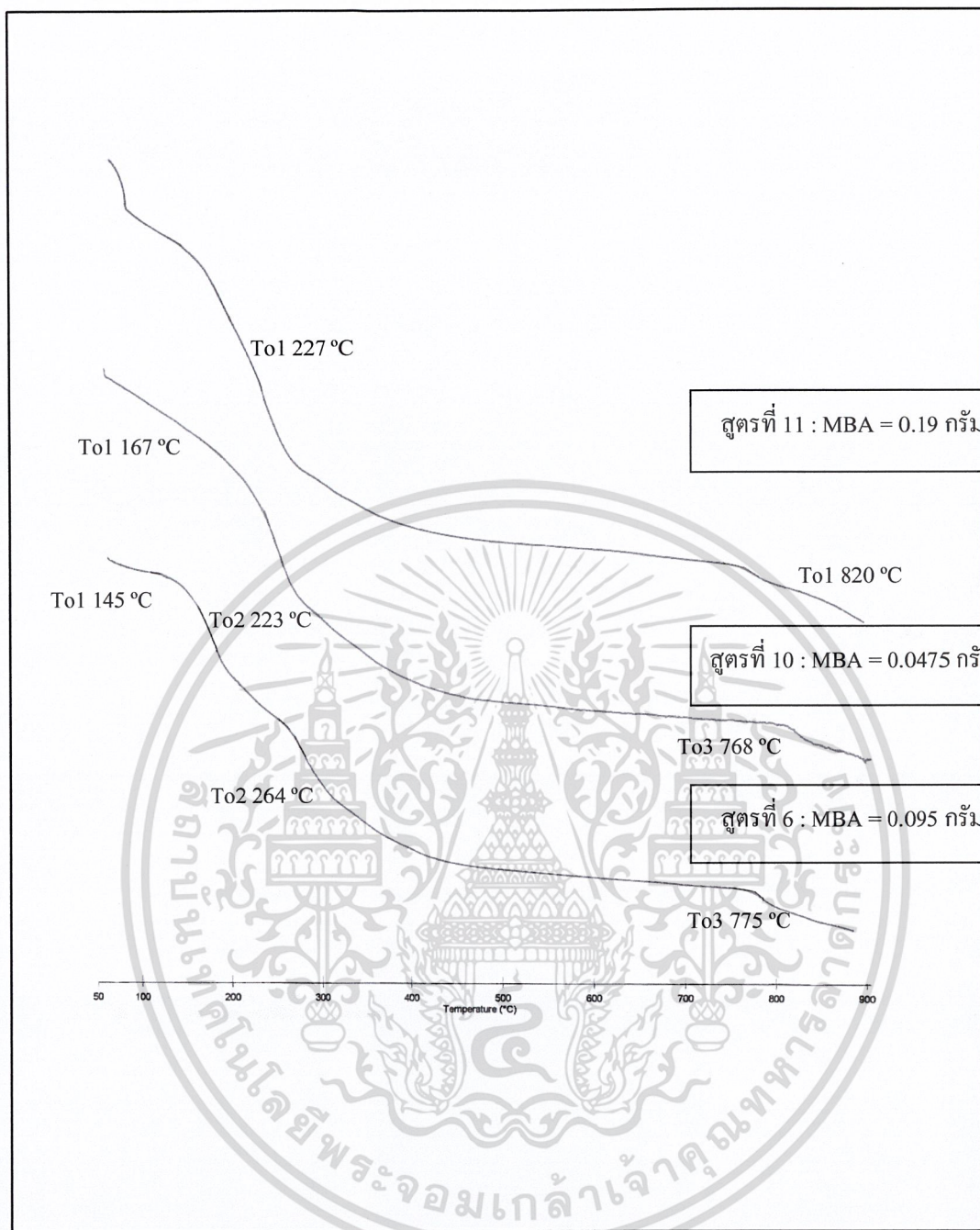
สารเชื่อมโยง (สูตรที่ 11)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เทอร์โมแกรมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังผสมกับซีเอ็มซีที่อัตราส่วนต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เทอร์โมแกรมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังผสมกับซีเอ็มซีที่อัตราส่วน 3:7 โดยมีการปรับปรุงปริมาณสารเชื่อมโยง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้