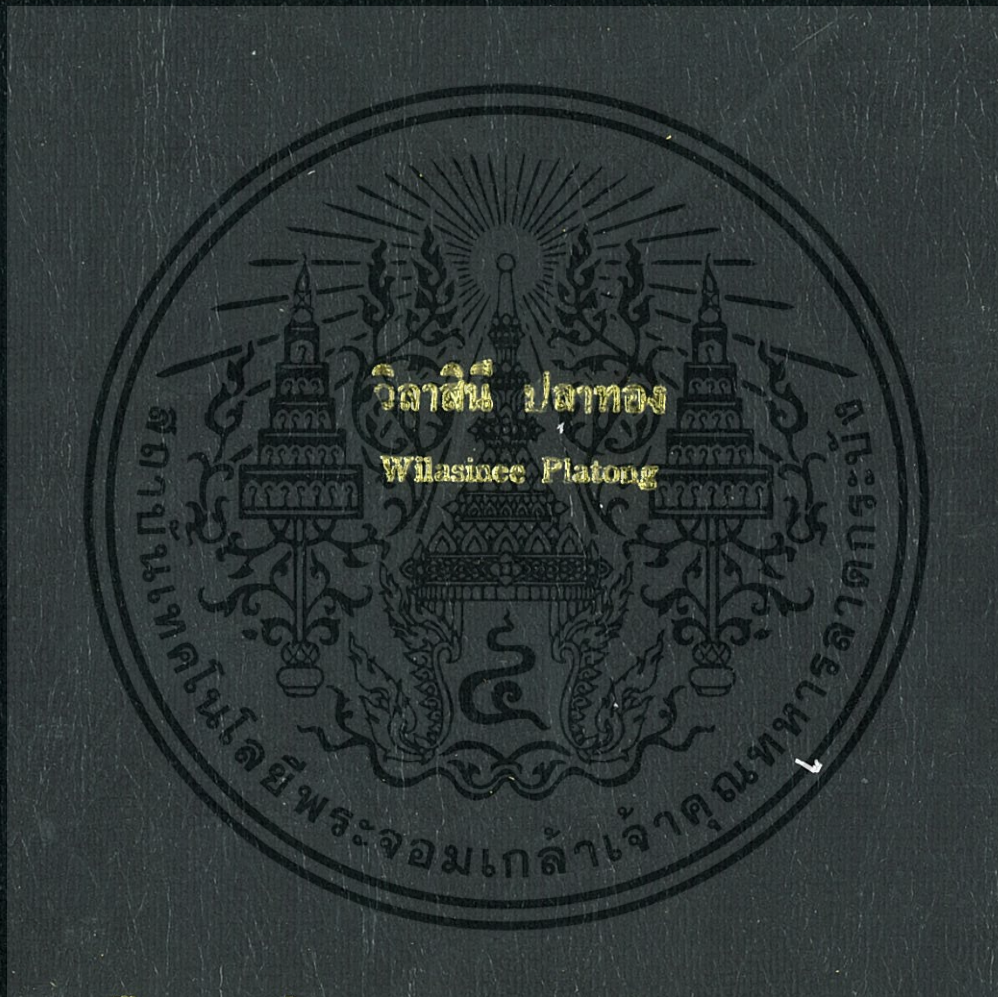


ผลของสารเชื่อมโครงที่มีต่อสมบัติของโฟมแป้งมันสำปะหลัง
ผสมพอลิไวน์แอลกอฮอล์

Effect of cross-linking agents on the properties of cassava starch/
poly(vinyl alcohol) foams



จัดทำขึ้นเป็นส่วนหนึ่งของงานศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. ๒๕๕๐

KMUTL-2013-SC-M-014-052

ผลของสารเชื่อมโยงที่มีต่อสมบัติของโฟมแป้งมันสำปะหลัง
ผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์

**Effect of cross-linking agents on the properties of cassava starch/
poly(vinyl alcohol) foams**



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2556

KMITL-SC-M-014-052

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Effect of cross-linking agents on the properties of cassava starch/
poly(vinyl alcohol) foams**

Wilasinee Platong

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT

OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF

MASTER OF SCIENCE IN POLYMER TECHNOLOGY

FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2013

KMITL-SC-M-014-052

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2013

FACULTY OF SCIENCE


KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ ผลของสารเชื่อมโยงที่มีต่อสมบัติของโฟมแป้งมันสำปะหลังผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์
Effect of cross-linking agents on the properties of cassava starch/poly (vinyl alcohol) foams

นักศึกษา นางสาววิลาสินี ปลาทอง
รหัสประจำตัว 54651104
ปริญญา วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา เทคโนโลยีพอลิเมอร์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.มาลินี ชัยศุกกิจสินธ์

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ลายมือชื่อ
รศ.ดร.สมศักดิ์ วรมงคลชัย	
รศ.ดร.จุฑารัตน์ ปรัชญาวรรการ	
ผศ.ดร.ชิดชนก มีใจชื่อ	
รศ.ดร.มาลินี ชัยศุกกิจสินธ์	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ 24 ธันวาคม พ.ศ. 2556 เวลา 9.00 – 12.00 น.
สถานที่สอบ ณ ห้อง 502 ชั้น 5 อาคารจุฬารามวลัยลักษณ์ 1

คณะวิทยาศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร.คุณิธี ธีระบริพัฒน์)
คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

วันที่ ๒1 เดือน ๑๒ พ.ศ. ๕๖

หัวข้อวิทยานิพนธ์ ผลของสารเชื่อม โยงที่มีต่อสมบัติของโฟมแป้งมันสำปะหลังผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์

นักศึกษา นางสาววิลาสินี ปลาทอง

รหัสประจำตัว 54651104

ปริญญา วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต

สาขาวิชา เทคโนโลยีพอลิเมอร์

พ.ศ. 2556

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.มาลินี ชัยสุภกิจสินธุ์

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการเตรียม โฟมจากสารละลายแป้งมันสำปะหลังความเข้มข้น 5% w/v ผสมสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ความเข้มข้น 5% w/v โดยอัตราส่วนระหว่างแป้งมันสำปะหลังผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เท่ากับ 100:0 80:20 60:40 40:60 20:80 และ 100:0 โดยสารเชื่อม โยงที่ใช้มี 3 ชนิด คือ Zinc Oxide (ZnO), Sodiumtripolyphosphate/Sodiumtrimetaphosphate (STMP/STPP) และ Citric acid (CA) ขึ้นรูปโดยเทคนิคการทำแห้งแบบเยือกแข็ง ศึกษาและเปรียบเทียบผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่างแป้งมันสำปะหลังและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์และสารเชื่อม โยง ต่อสมบัติกายภาพ สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย

ผลการทดลองพบว่า โฟมแป้งมันสำปะหลังผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่อัตราส่วน 60:40 มิลลิลิตร ที่ใช้ ZnO เป็นสารเชื่อม โยงมีสมบัติกายภาพ สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และสามารถยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย ได้ดีที่สุด เนื่องจาก โฟมขึ้นรูปได้และมีพื้นผิวเรียบให้สมบัติกายภาพ สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อนที่ดี และเมื่อปริมาณของ ZnO มากขึ้น ZnO ยังทำหน้าที่เป็นสารตัวเติม (Filler) ให้กับโฟมแป้ง ส่งผลให้สมบัติกายภาพ สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียเพิ่มสูงขึ้น

Thesis Title	Effect of cross-linking agents on the properties of cassava starch/ poly(vinyl alcohol) foams
Student	Wilasinee Platong
Student ID	54651104
Degree	Master of Science
Program	Polymer Technology
Year	2013
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr.Malinee Chaisupakitsin

ABSTRACT

This research studied on foam preparation by freeze-drying technique. The various ratio of 5% w/v Cassava starch solution and 5% w/v Poly(vinyl alcohol) solution were studied: 100:0 80:20 60:40 40:60 20:80 and 100:0. The foams were prepared by using Zinc Oxide (ZnO), Sodiumtripolyphosphate/Sodiumtrimetaphosphate (STMP/STPP) and Citric acid (CA) as a cross-linking agents. Investigation and comparison of various ratio of 5% w/v Cassava starch solution and 5% w/v Poly(vinyl alcohol) solution and cross-linking agent on properties of foams such as physical properties, mechanical properties, thermal properties and antimicrobial were studied.

The experimental results found that the ratio of 5% w/v Cassava starch solution and 5% w/v Poly(vinyl alcohol) solution at 60:40 ml and using ZnO as a crosslinker was provided good uniformity foam. Furthermore, physical, mechanical, thermal and antimicrobial properties were improved by ZnO. ZnO act as filler in the foams. When increasing the amount of ZnO, the physical, mechanical, thermal and antimicrobial properties were increased.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้เนื่องจากได้รับความช่วยเหลือ ความร่วมมือ ตลอดจนคำแนะนำต่างๆ ที่เป็นประโยชน์และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร. มาลินี ชัยสุภกิจสินธ์ อาจารย์ที่ปรึกษาที่กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ และให้ความช่วยเหลือในการดำเนินงานวิจัยมาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร. จุฑารัตน์ ปรัชญาวารากร รศ.ดร. สมศักดิ์ วรมงคลชัย และ ผศ.ดร. ชิดชนก มีใจชื้อ คณะกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาตรวจทานและแก้ไขวิทยานิพนธ์นี้ให้ถูกต้องสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่คอยให้กำลังใจตลอดมา ตลอดจนเพื่อนๆ เจ้าหน้าที่ภาควิชาเคมีทุกท่านที่คอยช่วยเหลือ และอำนวยความสะดวกให้การดำเนินงานวิจัยนี้ดำเนินไปได้ด้วยดี

นอกจากนี้ยังมีบุคคลท่านอื่นๆ ที่มีส่วนให้ความช่วยเหลือที่ยังมิได้กล่าวถึงอีกมากมาย ทางผู้จัดทำขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้ด้วย

วิลาสินี ปลายทอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา **III** และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VII
สารบัญรูป	X
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและที่มาของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย	2
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 พลาสติก	3
2.1.1 ประเภทของพลาสติก	3
2.1.2 พลาสติกที่นิยมใช้ในปัจจุบัน	4
2.1.3 พลาสติกย่อยสลายทางชีวภาพ	7
2.1.4 การใช้งานผลิตภัณฑ์พลาสติกย่อยสลายได้	8
2.1.5 ประเภทของพลาสติกย่อยสลายได้	10
2.2 วัสดุกันกระแทก	12
2.3 พอลิเมอร์โฟม	13
2.3.1 ทฤษฎีการเกิดโฟม	13
2.3.2 สมบัติโดยทั่วไปของพอลิเมอร์โฟม	15
2.3.3 สมบัติเชิงกล	15
2.3.4 สมบัติทางความร้อน	16

สารบัญ (ต่อ)

2.3.5 สมบัติอื่นๆของพอลิเมอร์โฟม	17
2.3.6 กรรมวิธีในการผลิตพอลิเมอร์โฟม	17
2.4 สารทำให้เกิดฟอง	17
2.4.1 สารที่ทำให้เกิดฟองทางกายภาพ	18
2.4.2 สารที่ทำให้เกิดฟองทางเคมี	19
2.4.3 สารทำให้เกิดฟองแบบผสม	21
2.5 แป้งและอนุพันธ์ของแป้ง	21
2.5.1 โครงสร้างทางเคมีของแป้ง	22
2.5.2 องค์ประกอบของแป้ง	23
2.5.3 สมบัติของแป้ง	25
2.5.4 แป้งมันสำปะหลัง	33
2.6 พอลิไวนิลแอลกอฮอล์	36
2.6.1 การผลิต	36
2.6.2 สมบัติทางเคมี	36
2.6.3 ประโยชน์ของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์	36
2.7 อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์	37
2.8 Sodiumtripolyphosphate	38
2.9 Sodiumtrimetaphosphate	39
2.10 Citric acid	40
2.11 เทคนิคการทำแห้งแบบเยือกแข็ง	40
2.11.1 ชนิดของผลิตภัณฑ์ที่ใช้กระบวนการทำแห้งแบบเยือกแข็ง	41
2.11.2 ข้อดีและข้อเสียของกระบวนการทำแห้งแบบเยือกแข็ง	42
2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	43
บทที่ 3 การวิจัยและการดำเนินงาน	49
3.1 สารเคมี	49
3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	52
3.3 วิธีการทดลอง	53
3.4 การทดสอบ	61

สารบัญ (ต่อ)

บทที่ 4 ผลการทดลอง	67
4.1 การหาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการเตรียมโฟมจากสารละลายแป้งมันสำปะหลัง ความเข้มข้น 5%w/v ผสมสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ความเข้มข้น 5%w/v	67
4.1.1 สมบัติทางกายภาพ	69
4.1.1.1 ความหนาแน่น	69
4.1.1.2 ปริมาตรรูพรุน	70
4.1.2 สมบัติเชิงกล	71
4.1.2.1 ความแข็งกด	71
4.1.2.2 ความแข็งแรงโค้งงอและมอดุลัสโค้งงอ	72
4.2 ศึกษาชนิดสารเชื่อมโยง	73
4.2.1 ศึกษาหาหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FT-IR	74
4.2.1.1 แป้งมันสำปะหลัง	75
4.2.1.2 พอลิไวนิลแอลกอฮอล์	76
4.2.1.3 การเปรียบเทียบอินฟราเรดสเปกตรัมของโฟมแป้งมันสำปะหลังผสม พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ทั้งที่ไม่มีและมีสารเชื่อมโยงปริมาณ 0.25 กรัม	77
4.2.2 สมบัติกายภาพ	79
4.2.2.1 ความหนาแน่น	79
4.2.2.2 ปริมาตรรูพรุน	80
4.2.2.3 ปริมาณความชื้น	81
4.2.2.4 การดูดซับน้ำ	82
4.2.2.5 สัมฐานวิทยา	88
4.2.3 สมบัติทางเชิงกล	90
4.2.3.1 ความแข็งกด	90
4.2.3.2 ความแข็งแรงโค้งงอและมอดุลัสโค้งงอ	91
4.2.4 สมบัติความร้อน	92
4.3 ศึกษาปริมาณของ ZnO	96
4.3.1 สมบัติทางกายภาพ	97
4.3.1.1 ความหนาแน่น	97
4.3.1.2 ปริมาตรรูพรุน	98

สารบัญ (ต่อ)

4.3.1.3 ปริมาณความชื้น	99
4.3.1.4 การดูดซับน้ำ	100
4.3.1.5 สัณฐานวิทยา	101
4.3.2 สมบัติทางเชิงกล	102
4.3.2.1 ความแข็งกด	102
4.3.2.2 ความแข็งแรงโค้งงอและมอดูลัสโค้งงอ	102
4.3.3 สมบัติความร้อน	104
4.3.4 ศึกษาการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย	106
บทที่ 5 สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ	109
5.1 สรุปผลงานวิจัย	109
5.2 ข้อเสนอแนะ	110
บรรณานุกรม	111
ภาคผนวก	116
ภาคผนวก ก	116
ภาคผนวก ข	124
ภาคผนวก ค	127
ภาคผนวก ง	129
ภาคผนวก จ	132
ภาคผนวก ฉ	139
ภาคผนวก ช	141
ภาคผนวก ซ	143
เปรียบเทียบความหนาแน่นและสมบัติเชิงกลระหว่างโฟมเป่ามันสำปะหลังผสมพอลิ ไวนิลแอลกอฮอล์โดยใช้ ZnO เป็นสารเชื่อมโยงกับโฟมพอลิสไตรีนชนิดทนแรงกระแทก	146

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 2.1 รูปร่างและขนาดของแป้งชนิดต่างๆ	22
ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบทางเคมีของแป้งธรรมชาติ	23
ตารางที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวของอะไมโลสและสีของสารประกอบเชิงซ้อนของอะไมโลสกับไอโอดีน	24
ตารางที่ 2.4 ผลของการดูดซับน้ำต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดแป้งและปริมาณการดูดซับน้ำของแป้งชนิดต่างๆ	26
ตารางที่ 2.5 อุณหภูมิการเกิดเจลของแป้งชนิดต่างๆ	28
ตารางที่ 2.6 ลักษณะเฉพาะของการเกิดเจลของแป้งธรรมชาติ	30
ตารางที่ 2.7 องค์ประกอบทางเคมีของแป้งมันสำปะหลังโดยทั่วไป	34
ตารางที่ 2.8 คุณสมบัติของซิงค์ออกไซด์นาโนที่ผลิตได้	38
ตารางที่ 3.1 สมบัติแป้งมันสำปะหลัง	49
ตารางที่ 3.2 สมบัติพอลิไวนิลแอลกอฮอล์	49
ตารางที่ 3.3 สมบัติ STMP	50
ตารางที่ 3.4 สมบัติ STPP	50
ตารางที่ 3.5 สมบัติ Nano ZnO	50
ตารางที่ 3.6 สมบัติ Citric acid	51
ตารางที่ 3.7 ตารางแสดงอัตราส่วนของสารละลายแป้งมันสำปะหลังและสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์	56
ตารางที่ 3.8 ตารางแสดงอัตราส่วนของสารละลายแป้งมันสำปะหลัง%5 (W/V) และสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ %5 (W/V) ที่อัตราส่วน 60:40 ที่ใช้ ZnO, STMP และ Citric acid เป็นสารเชื่อมโยง	58
ตารางที่ 3.9 ตารางแสดงอัตราส่วนของสารละลายแป้งมันสำปะหลัง%5 (W/V) และสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ %5 (W/V) อัตราส่วน 60:40 ที่ใช้ ZnO เป็นสารเชื่อมโยงในปริมาณที่ต่างกัน	60
ตารางที่ 4.1 การเตรียมโฟมจากสารละลายแป้งมันสำปะหลังความเข้มข้น 5%w/v ผสมสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ความเข้มข้น 5%w/v	68
ตารางที่ 4.2 การเตรียมโฟมจากสารละลายแป้งมันสำปะหลังความเข้มข้น 5%w/v ผสมสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ความเข้มข้น 5%w/v	

โดยใช้สารเชื่อมโยงต่างชนิด

73

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา VIII ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่ 4.3 อุณหภูมิของการสลายตัวของโฟมแป้งมันสำปะหลังผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ อัตราส่วน 60: 40 ทั้งที่ไม่มีและมีสารเชื่อมโยง ZnO STMP/STPP และ CA ปริมาณ 0.25 กรัม	92
ตารางที่ 4.4 การเตรียมโฟมจากสารละลายแป้งมันสำปะหลังความเข้มข้น 5%w/v ผสมสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ความเข้มข้น 5%w/v ในอัตราส่วน 60 : 40 และ ZnO ในปริมาณ 0.5 และ 1 กรัม	96
ตารางที่ 4.5 อุณหภูมิของการสลายตัวของโฟมแป้งมันสำปะหลังผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ อัตราส่วน 60: 40 มีสารเชื่อมโยง ZnO ปริมาณ 0.25 0.5 และ 1 กรัม	104
ตารางที่ 4.6 ค่าการทดสอบบัพยั้งเชื้อแบคทีเรีย	106
ตาราง ก ความถี่ของการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของหมูฟังก์ชั้นที่สามัญบางชนิด	117
ตาราง ข ความหนาแน่น	125
ตาราง ค ปริมาตรรูพรุน	128
ตาราง ง ปริมาณความชื้น	130
ตาราง จ การดูดซับน้ำ	133
ตาราง ฉ ความแข็งกด	140
ตาราง ช ความแข็งแรงโค้งงอและมอดูลัสโค้งงอ	142
ตาราง ฌ เปรียบเทียบความหนาแน่นและสมบัติเชิงกลระหว่างโฟมแป้งผสม พอลิไวนิลแอลกอฮอล์และสารเชื่อมโยงต่างชนิดและปริมาณ กับโฟมพอลิสไตรีนชนิดทนแรงกระแทก	146

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
รูปที่ 2.1 โครงสร้างโมเลกุลแบบเส้นค้ำหรือแบบลูกโซ่	3
รูปที่ 2.2 โครงสร้างโมเลกุลแบบตาข่าย	4
รูปที่ 2.3 พอลิเอทิลีนเทรฟทาเลต	4
รูปที่ 2.4 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง	5
รูปที่ 2.5 พอลิไวนิลคลอไรด์	5
รูปที่ 2.6 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ	6
รูปที่ 2.7 พอลิพรอพิลีน	6
รูปที่ 2.8 พอลิสไตรีน	7
รูปที่ 2.9 พลาสติกประเภทอื่นๆ	7
รูปที่ 2.10 โครงสร้างเซลล์เปิด และ แบบปิด	13
รูปที่ 2.11 โครงสร้างทางเคมีของแป้ง	21
รูปที่ 2.12 ลักษณะ SEM ของแป้งชนิดต่างๆ	22
รูปที่ 2.13 โครงสร้างของอะไมโลส	23
รูปที่ 2.14 ภาพจำลองการจับตัวของอะไมโลสกับสารอินทรีย์	24
รูปที่ 2.15 โครงสร้างของอะไมโลเพกติน	25
รูปที่ 2.16 การพองตัวของเม็ดแป้ง	26
รูปที่ 2.17 การเปลี่ยนแปลงของเม็ดแป้งขณะให้ความร้อน	27
รูปที่ 2.18 เทอร์โมแกรมของแป้งชนิดต่างๆ	29
รูปที่ 2.19 การคืนตัวของแป้งสุก	30
รูปที่ 2.20 การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งเมื่อให้ความร้อน	32
รูปที่ 2.21 รูปแบบความหนืดของแป้งสุกชนิดต่างๆ	32
รูปที่ 2.22 ลักษณะ Birefringence ของแป้งมันสำปะหลัง	34
รูปที่ 2.23 การพองตัวของแป้งชนิดต่างๆ	35
รูปที่ 2.24 SEM ของแป้งมันสำปะหลัง	35
รูปที่ 2.25 โครงสร้างโมเลกุลของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์	36
รูปที่ 2.26 โครงสร้างของซิงค์ออกไซด์	37
รูปที่ 2.27 โครงสร้างโมเลกุลของโซเดียมไตรพอสเฟต	38
รูปที่ 2.28 โครงสร้างโมเลกุลของโซเดียมไตรเมตาฟอสเฟต	39
รูปที่ 2.29 การผลิตกรดซัลฟิวริกผ่านวิถีไกลโคไลซิสของจุลินทรีย์	39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา **x** จะต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ 2.30 โครงสร้างโมเลกุลของกรดซิตริก	40
รูปที่ 2.31 เครื่องทำแห้งแบบเยือกแข็ง	40
รูปที่ 2.32 แสดงกระบวนการทำแห้งแบบเยือกแข็ง	41
รูปที่ 3.1 แป้งมันสำปะหลัง	49
รูปที่ 3.2 พอลิไวนิลแอลกอฮอล์	49
รูปที่ 3.3 Sodiumtrimetaphosphate	50
รูปที่ 3.4 Sodiumtripolyphosphate	50
รูปที่ 3.5 Nano ZnO	51
รูปที่ 3.6 Citric acid	51
รูปที่ 3.7 แผนภาพแสดงการเตรียมสารละลายแป้งมันสำปะหลัง 5% (W/V)	53
รูปที่ 3.8 แผนภาพแสดงการเตรียมสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ 5% (W/V)	54
รูปที่ 3.9 แผนผังแสดงอัตราส่วนที่เหมาะสมในการขึ้นรูปของโฟมแป้งมันสำปะหลังผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์	55
รูปที่ 3.10 แผนผังแสดงการศึกษาชนิดสารเชื่อม โยงของ โฟมแป้งมันสำปะหลังผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์	57
รูปที่ 3.11 แผนผังแสดงการศึกษ ปริมาณของ ZnO ที่ส่งผลต่อสมบัติของ โฟมแป้งมันสำปะหลังผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์	59
รูปที่ 3.12 แผนภาพการเตรียมเบคทีเรียที่ใช้ในการทดสอบ	61
รูปที่ 3.13 แผนภาพการศึกษาฤทธิ์ในการยับยั้งเชื้อเบคทีเรีย	62
รูปที่ 3.14 แผนภาพการหาปริมาณจุลินทรีย์	63
รูปที่ 4.1 ความหนาแน่นของ โฟมแป้งมันสำปะหลังความเข้มข้น 5%w/v ผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ความเข้มข้น 5%w/v ที่ไม่มีสารเชื่อมโยง	69
รูปที่ 4.2 ปริมาตรจุลินทรีย์ของ โฟมแป้งมันสำปะหลังความเข้มข้น 5%w/v ผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ความเข้มข้น 5%w/v ที่ไม่มีสารเชื่อมโยง	70
รูปที่ 4.3 ความแข็งแรงของ โฟมแป้งมันสำปะหลังความเข้มข้น 5%w/v ผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ความเข้มข้น 5%w/v ที่ไม่มีสารเชื่อมโยง	71
รูปที่ 4.4 ความแข็งแรงโค้งงอและมอดูลัสโค้งงอของ โฟมแป้งมันสำปะหลังความเข้มข้น 5%w/v ผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ความเข้มข้น 5%w/v ที่ไม่มีสารเชื่อมโยง	72
รูปที่ 4.5 อินฟราเรดสเปกตรัมของแป้งมันสำปะหลัง	75
รูปที่ 4.6 อินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์	76

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา **XI** และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ 4.7 อินฟราเรดสเปกตรัมของ โฟมเป็งมันสำปะหลังผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ อัตราส่วน 60:40 มิลลิลิตร ทั้งที่ไม่มีและมีสารเชื่อม โยง ZnO, STMP/STPP และ CA ปริมาณ 0.25 กรัม	77
รูปที่ 4.8 ความหนาแน่นของ โฟมเป็งมันสำปะหลังผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ อัตราส่วน 60: 40 มิลลิลิตร ทั้งที่ไม่มีและมีสารเชื่อม โยง ZnO, STMP/STPP และ CA ปริมาณ 0.25 กรัม	79
รูปที่ 4.9 ปริมาตรรูพรุนของ โฟมเป็งมันสำปะหลังผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ อัตราส่วน 60: 40 มิลลิลิตร ทั้งที่ไม่มีและมีสารเชื่อม โยง ZnO, STMP/STPP และ CA ปริมาณ 0.25 กรัม	80
รูปที่ 4.10 ปริมาณความชื้นของ โฟมเป็งมันสำปะหลังผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ อัตราส่วน 60: 40 มิลลิลิตร ทั้งที่ไม่มีและมีสารเชื่อม โยง ZnO, STMP/STPP และ CA ปริมาณ 0.25 กรัม	81
รูปที่ 4.11 การดูดซับน้ำของ โฟมเป็งมันสำปะหลังผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ อัตราส่วน 60: 40 มิลลิลิตร ทั้งที่ไม่มีและมีสารเชื่อม โยง ZnO, STMP/STPP และ CA ปริมาณ 0.25 กรัม	82
รูปที่ 4.12 แสดงลักษณะความเป็นไปได้ของพันธะ ZnO (ก) ใน โมเลกุลเป็งมันสำปะหลัง (ข) ใน โโมเลกุลเป็งมันสำปะหลังผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ และ (ค) ใน โโมเลกุลพอลิไวนิลแอลกอฮอล์	84
รูปที่ 4.13 แสดงลักษณะความเป็นไปได้ของพันธะ STMP/STPP (ก) ใน โโมเลกุลเป็งมันสำปะหลัง (ข) ใน โโมเลกุลเป็งมันสำปะหลังผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ และ (ค) ใน โโมเลกุลพอลิไวนิลแอลกอฮอล์	85
รูปที่ 4.14 แสดงลักษณะความเป็นไปได้ของพันธะ CA (ก) ใน โโมเลกุลเป็งมันสำปะหลัง (ข) ใน โโมเลกุลเป็งมันสำปะหลังผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ และ (ค) ใน โโมเลกุลพอลิไวนิลแอลกอฮอล์	87
รูปที่ 4.15 ฐานานวิทยาผิวด้านบน (ด้านที่ไม่สัมผัสแม่พิมพ์) ของ โฟมเป็งมันสำปะหลังผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์อัตราส่วน 60: 40 มิลลิลิตร ทั้งที่ไม่มีและมีสารเชื่อม โยง ZnO, STMP/STPP และ CA ปริมาณ 0.25 กรัม	88

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ 4.16 ความแข็งกดของโฟมเป่ามันสำปะหลังผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ อัตราส่วน 60: 40 มิลลิลิตร ทั้งที่ไม่มีและมีส่วนเชื่อมโยง ZnO, STMP/STPP และ CA ปริมาณ 0.25 กรัม	90
รูปที่ 4.17 ความแข็งแรงโค้งงอและมอดูลัสโค้งงอของโฟมเป่ามันสำปะหลังผสม พอลิไวนิลแอลกอฮอล์อัตราส่วน 60: 40 มิลลิลิตร ทั้งที่ไม่มีและมีส่วนเชื่อมโยง ZnO, STMP/STPP และ CA ปริมาณ 0.25 กรัม	91
รูปที่ 4.18 (ก) DTG และ (ข) TG ของโฟมเป่ามันสำปะหลังผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ในอัตราส่วน 100:0 60:40 และ 0:100 มิลลิลิตร	93
รูปที่ 4.19 (ก) DTG และ (ข) TG ของโฟมเป่ามันสำปะหลังผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ อัตราส่วน 60: 40 มิลลิลิตร ทั้งที่ไม่มีและมีส่วนเชื่อมโยง ZnO, STMP/STPP และ CA ปริมาณ 0.25 กรัม	94
รูปที่ 4.20 ความหนาแน่นของโฟมเป่ามันสำปะหลังผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์อัตราส่วน 60: 40 มิลลิลิตร ที่ใช้ ZnO ปริมาณ 0.25 0.5 และ 1 กรัม	97
รูปที่ 4.21 ปริมาตรรูพรุนของโฟมเป่ามันสำปะหลังผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์อัตราส่วน 60: 40 มิลลิลิตร ที่ใช้ ZnO ปริมาณ 0.25 0.5 และ 1 กรัม	98
รูปที่ 4.22 ปริมาณความชื้นของ โฟมเป่ามันสำปะหลังผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์อัตราส่วน 60: 40 มิลลิลิตร ที่ใช้ ZnO ปริมาณ 0.25 0.5 และ 1 กรัม	99
รูปที่ 4.23 การดูดซับน้ำของโฟมเป่ามันสำปะหลังผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์อัตราส่วน 60: 40 มิลลิลิตร ที่ใช้ ZnO ปริมาณ 0.25 0.5 และ 1 กรัม	100
รูปที่ 4.24 สัณฐานวิทยาผิวด้านบน (ด้านที่ไม่ได้สัมผัสแม่พิมพ์) ของโฟมเป่ามันสำปะหลัง ผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์อัตราส่วน 60: 40 มิลลิลิตรที่ใช้ ZnO ปริมาณ 0.25 0.5 และ 1 กรัม	101
รูปที่ 4.25 ความแข็งกดของโฟมเป่ามันสำปะหลังผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์อัตราส่วน 60: 40 มิลลิลิตร ที่มีสารเชื่อมโยง ZnO ปริมาณ 0.25 0.5 และ 1 กรัม	102
รูปที่ 4.26 ความแข็งแรงโค้งงอและมอดูลัสโค้งงอของโฟมเป่ามันสำปะหลังผสม พอลิไวนิลแอลกอฮอล์อัตราส่วน 60: 40 มิลลิลิตร ที่มีสารเชื่อมโยง ZnO ปริมาณ 0.25 0.5 และ 1 กรัม	103
รูปที่ 4.27 (ก) DTG และ (ข) TG ของโฟมเป่ามันสำปะหลังผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ อัตราส่วน 60: 40 มิลลิลิตร ทั้งส่วนเชื่อมโยง ZnO ปริมาณ 0.25 0.5 และ 1 กรัม	105
รูปที่ 4.28 บริเวณการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย <i>B. subtilis</i>	106

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ 4.29 บริเวณการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย <i>E. coli</i>	107
รูปที่ ก-1 แสดงความถี่ของการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของหมู่มงกัซันสามัญบางชนิด	119
รูปที่ ก-2 แสดง IR spectrum ของ แป้งมันสำปะหลัง	121
รูปที่ ก-3 แสดง IR spectrum ของ ZnO	121
รูปที่ ก-4 แสดง IR spectrum ของ CA	122
รูปที่ ก-5 แสดง IR spectrum ของ PVA	122
รูปที่ ก-6 แสดง IR spectrum ของ STMP	123
รูปที่ ก-7 แสดง IR spectrum ของ STPP	123
รูปที่ ซ-1 เทอร์โมแกรม สูตร F1	144
รูปที่ ซ-2 เทอร์โมแกรม สูตร F6	144
รูปที่ ซ-3 เทอร์โมแกรม สูตร F9	144
รูปที่ ซ-4 เทอร์โมแกรม สูตร F8	144
รูปที่ ซ-5 เทอร์โมแกรม สูตร F7	145
รูปที่ ซ-6 เทอร์โมแกรม สูตร F11	145



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

ปัจจุบันทั่วโลกกำลังประสบกับปัญหาสิ่งแวดล้อมที่ทวีความรุนแรงมากขึ้น เนื่องจากการกระทำของมนุษย์ที่มีการใช้ทรัพยากรธรรมชาติอย่างสิ้นเปลืองก่อให้เกิดปัญหาตามมา เช่น ภาวะโลกร้อน มลภาวะเป็นพิษ และขยะ ปัญหาเหล่านี้ส่งผลกระทบต่อประเทศไทยด้วยเช่นกัน ซึ่งประเทศไทยมีปริมาณขยะประมาณ 40,000 ตันต่อวัน โดยขยะที่มาจากพลาสติก (Plastic) ถึง 6,000 ตันต่อวัน[1] เนื่องจากพลาสติกมีราคาถูก และน้ำหนักเบาจึงนิยมมาทำเป็นบรรจุภัณฑ์[2] โฟม (Foam) เป็นบรรจุภัณฑ์ประเภทหนึ่งที่มีการใช้งานกันอย่างแพร่หลาย โดยทั่วไปโฟมที่ใช้งานกันในปัจจุบันจะผลิตจาก พอลิสไตรีน (Polystyrene; PS) พอลิยูรีเทน (Polyurethane; PU) และ พอลิเอทิลีน (Polyethylene; PE)[3] เป็นต้น ซึ่งวัตถุดิบตั้งต้นมาจากอุตสาหกรรมปิโตรเลียม (Petroleum) ส่งผลให้ต้นทุนในการผลิตบรรจุภัณฑ์ประเภทพลาสติก และ โฟมแปรผันตามราคาน้ำมัน นอกจากนี้ยังใช้เวลาในการย่อยสลายนานหลายปี ด้วยเหตุนี้ทำให้มนุษย์เริ่มหันมาคิดค้นที่จะผลิตวัสดุที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradable materials) โดยสามารถย่อยสลายได้โดยอาศัยจุลินทรีย์ที่มีในธรรมชาติ ส่งผลให้การตกค้างของขยะในธรรมชาติลดลง วัสดุประเภทนี้สามารถขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ด้วยวิธีการขึ้นรูปเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) โดยทั่วไปได้หลากหลายวิธี เช่น กระบวนการฉีด (Injection Molding) กระบวนการอัดรีด (Extrusion Molding) กระบวนการกดอัด (Compression Molding) และกระบวนการขึ้นรูปแบบเยือกแข็ง (Freeze Dry Technique)[4] เป็นต้น

แป้ง (Starch) เป็นพอลิเมอร์ (Polymer) ทางธรรมชาติที่ได้รับความสนใจในการผลิตวัสดุย่อยสลายได้ทางชีวภาพ เช่น แป้งถั่วเขียว (Mung bean starch) แป้งข้าวโพด (Corn starch) และ แป้งมันสำปะหลัง (Cassava starch)[5] เป็นต้น

มันสำปะหลัง (Cassava) เป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทย เนื่องจากประเทศไทยเป็นผู้ผลิตและส่งออกแป้งมันสำปะหลังรายใหญ่ของโลกในปีพ.ศ.2554 แต่ในทางกลับกันราคาแป้งมันสำปะหลังมักเกิดปัญหาตกต่ำ เพราะประสบปัญหาผลผลิตล้นตลาด[6] สมบัติทั่วไปของแป้งมันสำปะหลังคือ มีความบริสุทธิ์สูง ย่อยสลายได้ง่าย เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ใสเมื่อให้ความร้อน และสามารถนำมาขึ้นรูปเป็นโฟมได้จึงเหมาะสมในการนำมาพัฒนาเป็นวัสดุย่อยสลายได้ทางชีวภาพ[7] และยังเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับผลผลิตทางการเกษตรได้อีกทางหนึ่งด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Poly(vinyl alcohol); PVA) มีสมบัติที่ย่อยสลายทางชีวภาพได้[8] จึงถูกนำมาใช้ประโยชน์ในงานอุตสาหกรรมหลายด้าน เช่น ใช้เป็นวัสดุที่ย่อยสลายได้โดยความร้อน ถ้าไม่มีการเติมสารเติมแต่ง (Additive) จะสามารถสลายตัวได้ที่อุณหภูมิประมาณ 150 องศาเซลเซียส ใช้เตรียมแผ่นฟิล์มไฮโดรเจล (Hydrogel) ที่มีความสามารถในการดูดน้ำได้เป็นอย่างมาก เป็นต้น นอกจากนี้ยังสามารถใช้เคลือบผิวเส้นใยให้มีความอ่อนนุ่มและแข็งแรง ใช้เป็นวัสดุยึดติด (Adhesive materials) ใช้เป็นสารตัวเติม (Filler) ในอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์กระดาษ ใช้เป็นวัสดุประสาน (Binder) และใช้เป็นองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เครื่องสำอางต่างๆ เพราะพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ไม่มีพิษ[9]

งานวิจัยนี้ศึกษาการเตรียมโฟมจากแป้งมันสำปะหลังผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ด้วยเทคนิคการทำแห้งแบบเยือกแข็ง และมีการใช้สารเชื่อมโยง (Cross-linking agent) เพื่อปรับปรุงสมบัติด้านต่างๆ ศึกษาสมบัติทางกายภาพ (Physical properties) สมบัติเชิงกล (Mechanical properties) สมบัติความร้อน (Thermal properties) การศึกษาหุ้มฟังก์ชัน (IR Spectroscopy) ทดสอบการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียโดยเทคนิค Agar disc diffusion method ลักษณะทางวิทยา (Morphology) และการดูดซับน้ำ (Water absorption) เพื่อเป็นแนวทางและข้อมูลสำหรับการพัฒนาวัสดุที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพจากแป้งมันสำปะหลังต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อผลิตโฟมจากแป้งมันสำปะหลังด้วยเทคนิคการทำแห้งแบบเยือกแข็ง (Freeze drying Technique) ปรับปรุงสมบัติโฟมโดยผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ และสารเชื่อมโยงต่างชนิดและปริมาณ

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1.3.1 เตรียมโฟมจากแป้งมันสำปะหลัง

1.3.2 ศึกษาแนวทางในการปรับปรุงสมบัติของโฟมจากแป้ง โดยใช้พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ และสารเชื่อมโยงต่างชนิดและปริมาณด้วยเทคนิคการทำแห้งแบบเยือกแข็ง

1.3.3 ทดสอบสมบัติของโฟม ได้แก่ ศึกษาหุ้มฟังก์ชัน สมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล สมบัติความร้อน และการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย ตามลำดับ

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้โฟมจากแป้งมันสำปะหลัง และไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม

1.4.2 เพิ่มทางเลือกนำผลผลิตทางการเกษตรมาใช้ให้เป็นประโยชน์และเพิ่มมูลค่าให้กับแป้งมันสำปะหลัง

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 พลาสติก[10]

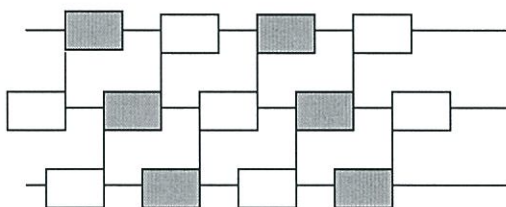
พลาสติกถูกผลิตขึ้นจากผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม สามารถหลอมละลายเป็นรูปร่างต่างๆ ได้โดยอาศัยแรงดัน (Pressure) และความร้อน (Heat) พลาสติกมีข้อดีคือ น้ำหนักเบา สะดวกต่อการขนส่ง และใช้งาน ตลอดจนมีความทนทานอยู่ได้เป็นระยะเวลาานาน และเนื่องจากประโยชน์ของพลาสติกที่มากทำให้พลาสติกเข้ามาแทนที่บรรพบุรุษที่ประเภทอื่นๆ

ถึงแม้ว่าพลาสติกจะมีประโยชน์ที่มากแต่ก็มีข้อเสียคือ พลาสติกถูกผลิตมาจากทรัพยากรธรรมชาติที่ไม่สามารถเกิดขึ้นมาใหม่ได้ เช่น น้ำมัน (Oil) ถ่านหิน (Coal) นอกจากนี้ก็ยากต่อการนำกลับมาใช้ใหม่ (Recycle) เนื่องจากต้องเสียค่าใช้จ่ายสูงในกระบวนการคัดแยกออกจากกัน เพราะพลาสติกมีหลายประเภท และพบว่ามีแค่ร้อยละ 3 ของถุงพลาสติกที่ใช้แล้วที่นำกลับมาเข้าสู่โรงงานเพื่อการนำกลับมาใช้ใหม่ ดังนั้นขยะพลาสติกที่ถูกทิ้งเป็นขยะในปัจจุบันจึงคงอยู่ในสภาพแวดล้อมไปอีกนาน[11]

2.1.1 ประเภทของพลาสติก[12]

พลาสติกสามารถแบ่งตามลักษณะการยึดเกาะตัวของโครงสร้างโมเลกุล (Molecule structure) ได้ 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ

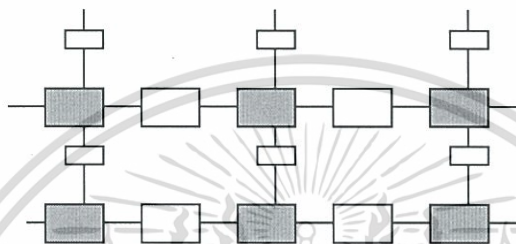
1. พลาสติกประเภทคั้นรูปเป็นพลาสติกที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่อีกภายหลังจากผ่านกระบวนการขึ้นรูปโครงสร้างของพลาสติกประเภทนี้จะประกอบด้วยโมเลกุลเดี่ยวเกาะตัวแบบต่อแขนยาวออกเป็นเส้นด้าย หรือแบบลูกโซ่ (Filament or Chain) การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของพลาสติกอาจทำได้ง่ายโดยการไหลเลื่อนระหว่างโมเลกุลต้านแรงแวนเดอวาล์ว (Van der Waal's forces) ซึ่งดึงดูดโมเลกุลเข้าไว้ด้วยกันอย่างอ่อนๆ ตัวอย่างเช่น พอลิเมทาอะครีเลต (Polymethacrylate; PMA) และพอลิเอไมด์ (Polyamide; Nylon) เป็นต้น



รูป 2.1 โครงสร้างโมเลกุลแบบเส้นด้ายหรือแบบลูกโซ่ (Filament or Chain Molecule) [12]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. พลาสติกประเภทคงรูป (Thermosetting) หรือที่รู้จักกันทั่วไปว่า พลาสติกแข็ง คือ พลาสติกที่มีรูปทรงถาวรซึ่งผ่านกรรมวิธีการผลิตโดยใช้ความร้อนหรือแรงดันขึ้นรูปแต่เมื่อเย็นตัวลงจะไม่สามารถทำให้อ่อนตัวโดยใช้ความร้อนหรือนำไปหลอมละลายขึ้นรูปใหม่ได้อีก โครงสร้างของพลาสติกแบบคงรูปจะมีการเกาะตัวของโมเลกุลเป็นแบบตาข่ายหรือร่างแห (Network) เวลาได้รับความร้อนจะไม่ยืดหรือหดตัวแต่จะเกิด พันธะโควาเลนต์ (Covalent bond) ยึดระหว่างโมเลกุลขึ้นเช่น ฟีนอลฟอร์มัลดีไฮด์ (Phenol formaldehyde; Bakelite) และ ยางดิบ (Natural rubber) เมื่อผ่านกรรมวิธี วัลคาไนเซชัน (Valcanization) ก็เป็นพลาสติกประเภทคงรูปอย่างหนึ่ง



รูป 2.2 โครงสร้างโมเลกุลแบบตาข่าย (Network Molecule) [12]

2.1.2 พลาสติกที่นิยมใช้ในปัจจุบัน[13]

พลาสติกที่นิยมนำมาใช้ในปัจจุบันกันอย่างแพร่หลายมีอยู่หลายประเภท โดยเฉพาะประเภทที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ จึงได้มีการกำหนดสัญลักษณ์ตัวเลขเพื่อง่ายต่อการแบ่งแยกประเภทของพลาสติก

1. พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (Poly(ethylene terephthalate); PET)

พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตมีสมบัติทนแรงกระแทก ไม่เปราะแตกง่าย สามารถทำให้ใสมองให้เห็นสิ่งที่บรรจุอยู่ภายใน นิยมใช้เป็นภาชนะบรรจุน้ำดื่ม น้ำมันพืช และเครื่องสำอาง นอกจากนี้ขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตยังมีสมบัติป้องกันการแพร่ผ่านของก๊าซได้เป็นอย่างดี จึงใช้เป็นบรรจุภัณฑ์น้ำอัดลม สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ โดยนำมาผลิตเป็นเส้นใยสำหรับทำเสื้อกันหนาว พรม และเส้นใยสังเคราะห์สำหรับอัดหมอน หรือเส้นใยสำหรับเล่นสกี



รูป 2.3 พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต[13]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง(High density polyethylene; HDPE)

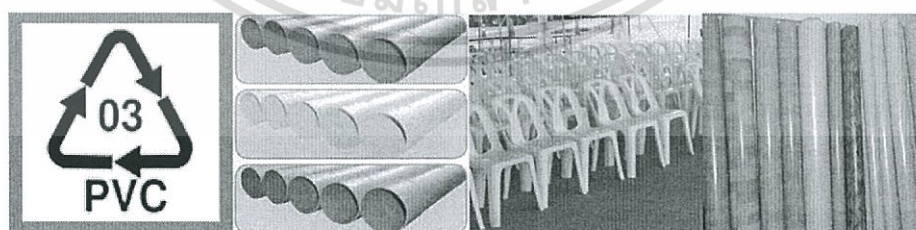
พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง มีสูตรโครงสร้างโมเลกุลเป็นสายโซ่ตรง ค่อนข้างแข็ง แต่ยืดได้มาก ไม่แตกง่าย ส่วนใหญ่ทำให้มีสีสันทสวยงาม ยกเว้นขวดบรรจุน้ำดื่ม ซึ่งจะมีลักษณะที่ขุ่นกว่าขวดพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลต ราคาถูกขึ้นรูปได้ง่าย ทนสารเคมีจึงนิยมทำบรรจุภัณฑ์ใส่น้ำยาทำความสะอาด แป้งเด็ก แชมพู และถุงหูหิ้ว นอกจากนี้ภาชนะที่ทำจากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง ยังมีสมบัติป้องกันการแพร่ผ่านของความชื้นได้เป็นอย่างดี จึงใช้เป็นขวดนมเพื่อยืดอายุของนมให้นานขึ้น พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ โดยจะถูกผลิตเป็นขวดต่างๆ เช่น ขวดใส่น้ำยาซักผ้า แท่งไม้เทียมเพื่อใช้ทำรั้วหรือม้านั่งในสนาม



รูป 2.4 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง[13]

3. พอลิไวนิลคลอไรด์(Poly(vinyl chloride); PVC)

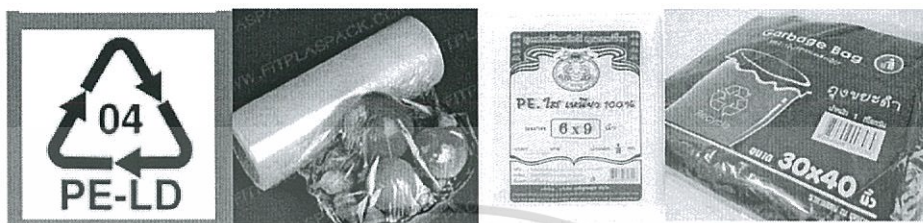
พอลิไวนิลคลอไรด์ เป็นพลาสติกแข็งที่ใช้ทำท่อ เช่นท่อประปา แต่สามารถทำให้นิ่มได้โดยใส่พลาสติกไซเซออร์(Platicizer) ใช้ทำสายยางใส แผ่นฟิล์มสำหรับห่ออาหาร ม่านในห้องอาบน้ำ แผ่นกระเบื้องยาง แผ่นพลาสติกปูโต๊ะ พอลิไวนิลคลอไรด์เป็นพลาสติกที่มีสมบัติหลากหลาย สามารถนำมาใช้ผลิตผลิตภัณฑ์อื่นได้อีกมาก เช่น ประตู หน้าต่าง วงกบ และหนังเทียม นอกจากนี้ พอลิไวนิลคลอไรด์ สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ เพื่อผลิตเป็นท่อประปาสำหรับการเกษตร กรวยจราจร และเฟอร์นิเจอร์ และม้านั่งพลาสติก



รูป 2.5 พอลิไวนิลคลอไรด์[13]

4. พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (Low density polyethylene; LDPE)

พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเป็นพลาสติกที่นิ่ม สามารถยืดตัวได้มาก มีความใส นิยมนำมาทำเป็นฟิล์มสำหรับห่ออาหารและห่อของ ถุงใส่ขนมปัง และถุงเย็นสำหรับบรรจุอาหาร นอกจากนี้พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้โดยใช้ผลิตเป็นถุงดำ สำหรับใส่ขยะ ถุงหูหิ้ว หรือถังขยะ



รูป 2.6 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ[13]

5. พอลิพรอพิลีน (Polypropylene; PP)

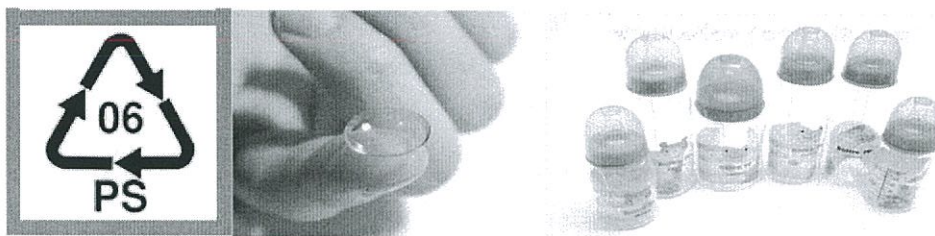
พอลิพรอพิลีนเป็นพลาสติกที่แข็ง ทนต่อแรงกระแทกได้ดี ทนต่อสารเคมี ความร้อน และน้ำมัน ส่วนใหญ่นิยมนำมาทำภาชนะบรรจุอาหาร เช่น กล่อง ขาม จาน ถัง หรือตะกร้า สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ โดยนิยมผลิตเป็นกล่องเบดเตอริร์ถยนต์ กันชนรถยนต์ และกรวยสำหรับน้ำมัน



รูป 2.7 พอลิพรอพิลีน[13]

6. พอลิสไตรีน (Polystyrene; PS)

พอลิสไตรีนเป็นพลาสติกที่แข็ง ใส แต่เปราะ และแตกง่าย ราคาถูก นิยมนำมาทำเป็นภาชนะบรรจุของใช้ เช่น เทปเพลง ไม่นิยมนำพลาสติกประเภทนี้มาบรรจุน้ำดื่มหรือแชมพูสระผม เนื่องจากอาจฉีกแตกแตกได้ นิยมนำพลาสติกประเภทนี้มาทำภาชนะหรือถาดโฟมสำหรับบรรจุอาหาร โฟมจะมีน้ำหนักเบาเนื่องจากประกอบด้วย พอลิสไตรีนประมาณ 2-5 เปอร์เซ็นต์ (%) เท่านั้น ส่วนที่เหลือเป็นอากาศที่แทรกอยู่ในช่องว่าง พอลิสไตรีนสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ โดยนิยมนำมาผลิตเป็นไม้แขวนเสื้อ กล่องวีดีโอ หรือไม้บรรทัด



รูป 2.8 พอลิสไตรีน[13]

7.อื่นๆ(Others)

สำหรับพลาสติกในกลุ่มที่ 7 เป็นพลาสติกชนิดอื่นที่ไม่ใช่ 6 ชนิดแรก นอกจากจะมีตัวเลขระบุแล้ว ควรใส่สัญลักษณ์ภาษาอังกฤษระบุชนิดของพลาสติกนั้นๆ ไว้ เพื่อสะดวกในการแยกและนำกลับมาใช้ใหม่ เช่น พอลิคาร์บอเนต (Polycarbonate; PC)



รูป 2.9 พลาสติกประเภทอื่นๆ [13]

2.1.3 พลาสติกย่อยสลายทางชีวภาพ (Biodegradable Plastic for Environmental Friendly) [14]

พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradable plastics) เป็นพลาสติกที่ผลิตจากพืชหรือวัตถุดิบที่สามารถสร้างขึ้นใหม่ได้ (Renewable resources) กระบวนการผลิตเป็นกระบวนการหมัก (Fermentation) ใช้พลังงานต่ำ และมีสมบัติที่สามารถย่อยสลายได้เป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon di Oxide) กับน้ำ (H_2O) เมื่อนำไปฝังกลบภายหลังการใช้งาน ปัจจุบันพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพได้รับความสนใจเป็นอย่างยิ่ง และเป็นแนวทางหลักแนวทางหนึ่งในการพัฒนาวัสดุสำหรับการใช้งานเพื่ออนุรักษ์สิ่งแวดล้อม กลุ่มอุตสาหกรรมแนวหน้าทั่วโลกตื่นตัวในการคิดค้นหาวัตถุดิบหรือพอลิเมอร์ตัวใหม่เพื่อพัฒนาพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ และให้มีสมบัติในการใช้งานได้ดีเทียบเท่ากับพลาสติกดั้งเดิมที่ได้จากอุตสาหกรรมปิโตรเคมี และสามารถทดแทนการใช้งานที่มีอยู่โดยพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพเป็นพลาสติกที่ถูกละทิ้งจากการกระทำของจุลินทรีย์ในสภาวะแวดล้อมต่างๆ เช่น ในดิน บ่อฝังกลบขยะ บ่อบำบัดน้ำเสีย แหล่งน้ำจืดหรือในทะเล หากการย่อยสลายได้ทางชีวภาพเกิดขึ้นในระบบการหมักภายใต้สภาวะที่มีการควบคุมจะเรียกว่า การย่อยแบบคอมโพสท์ (Compostable) เมื่อกระบวนการหมักแบบคอมโพสท์เกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์แล้วจะได้ผลิตภัณฑ์ คือ คาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ มวลชีวภาพ (Biomass) และสารอินทรีย์ ซึ่งการย่อยสลายแบบคอมโพสท์นี้เป็นการย่อยสลายอย่างสมบูรณ์ พืชสามารถ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำไปใช้สังเคราะห์แสง ซึ่งสิ่งเหล่านี้มีความจำเป็นในการเจริญเติบโต และดำรงชีวิตของพืช

ประเภทของพลาสติกย่อยสลายทางชีวภาพ

1.พอลิเมอร์ธรรมชาติ เช่น แป้ง ข้าวโพด(Corn) มันสำปะหลัง เส้นใย (Fibers) ไคติน (Chitin) และเซลลูโลส(Cellulose)

2.พอลิเมอร์สังเคราะห์จากจุลินทรีย์

3.พอลิเมอร์สังเคราะห์จากขบวนการเคมี เช่น พอลิแล็กติกแอซิด (Polylactic acid; PLA)

พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (Polybutylene succinate; PBS) พอลิบิวทิลีน-อะดิเปต-โค-เทเรฟทาเลต (Polybutylene adipate-co-terephthalate; PBAT) และ พอลิคาร์โปแลคโตน (Polycaprolactone; PCL)

2.1.4 การใช้งานผลิตภัณฑ์พลาสติกย่อยสลายได้ [15]

1.การใช้งานทางการแพทย์

พลาสติกย่อยสลายได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในการผลิตวัสดุทางการแพทย์ เช่น ผิวน้ำเทียม ยาที่ถูกออกแบบมาให้สามารถควบคุมการปลดปล่อยตัวย่างช้าๆ ภายในร่างกายในช่วงระยะเวลาหนึ่ง หรือไหมละลาย อุปกรณ์ประเภทสกรู และแผ่นดามกระดูกที่ได้รับการผ่าตัดและฝังอยู่ในร่างกายที่สามารถย่อยสลายได้เอง ภายหลังจากการทำหน้าที่ตามที่ได้รับการออกแบบไว้แล้วเสร็จสิ้น ทำให้ไม่ต้องทำการผ่าตัดซ้ำเพื่อนำวัสดุที่ใช้ในการรักษาเสร็จแล้วออกจากร่างกายผู้ป่วย

2.สารเคลือบกระดาษหรือโฟม

ปัจจุบันมีการนำพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพมาใช้งานเป็นสารเคลือบกระดาษสำหรับห่อแอมเบอร์เกอร์หรือถ้วยน้ำชนิดใช้แล้วทิ้ง

3.ฟิล์มคลุมดินและวัสดุสำหรับการเกษตร

ฟิล์มคลุมดินสำหรับการเกษตรเป็นอุปกรณ์ทางการเกษตรที่สำคัญในการเพาะปลูกพืชบางชนิด เช่น มะเขือเทศ ซึ่งแผ่นฟิล์มจะช่วยป้องกันการเติบโตของวัชพืชและรักษาความชื้นในดิน การใช้ฟิล์มสามารถผลิตได้จากพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพจะช่วยลดขั้นตอนการเก็บ และกำจัดฟิล์มภายหลังเสร็จสิ้นการใช้งาน เนื่องจากสามารถกำจัดโดยการไถพรวนลงดินได้โดยตรง ช่วยป้องกันการสูญเสียน้ำและสารอาหารบริเวณหน้าดินซึ่งมักเกิดขึ้นในขั้นตอนการเก็บ และกำจัดฟิล์ม นอกจากนี้ยังมีการนำพลาสติกย่อยสลายได้มาใช้เป็นวัสดุควบคุมการปลดปล่อยสารสำคัญ เช่น ตัวยา ปุ๋ย สารเคมีสำหรับการเกษตร วัสดุกักเก็บน้ำสำหรับการเพาะปลูกพืชในทะเลทราย รวมถึงถุงหรือกระถางสำหรับเพาะต้นกล้า

4.ถุงสำหรับใส่ของ (Shopping bag)

ถุงพลาสติกและฟิล์มพลาสติกสำหรับการใช้งานด้านบรรจุภัณฑ์ได้รับความนิยมในการใช้งานมากขึ้นในปัจจุบัน ส่งผลให้มีสัดส่วนอยู่ในขณะในปริมาณสูงและยังไม่ได้ได้รับความนิยมนำ

กลับมารีไซเคิลมากขึ้นเนื่องจากมีความยุ่งยากในขั้นตอนการคัดแยกและทำความสะอาด รวมถึงมีค่าใช้จ่ายในการขนส่งสูง ทำให้ไม่คุ้มค่าทางเศรษฐกิจ พลาสติกย่อยสลายได้จึงเป็นพลาสติกที่มีศักยภาพในการนำมาใช้แทนพลาสติกทั่วไปเพื่อผลิตเป็นถุงและฟิล์มในบางโอกาส

5. ฟิล์มและถุงสำหรับใส่ขยะเศษอาหาร (Food waste film and bag)

ฟิล์มและถุงพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพสำหรับใส่ใส่ขยะเศษอาหาร เหมาะสำหรับสถานที่ที่มีระบบการกำจัดขยะอินทรีย์ด้วยวิธีการคอมโพสท์ กำลังได้รับความนิยมในต่างประเทศ เนื่องจากสามารถกำจัด โดยการนำมาทำคอมโพสท์พร้อมขยะอินทรีย์อื่นๆ ทำให้เกิดความสะอาด ไม่ต้องแยกทิ้ง ปัจจุบันมีความต้องการใช้ถุงพลาสติกย่อยสลายได้สูงขึ้นอย่างมาก ตัวอย่างเช่น ในหลายเมืองของประเทศอิตาลี ได้ใช้พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพสำหรับใส่ขยะเศษอาหาร ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1998 โดยมีบริษัท Novamont ซึ่งเป็นผู้ผลิตหลักให้กับประเทศในสหภาพยุโรป ทำการผลิตถุงย่อยสลายได้ในสภาวะคอมโพสท์ 10,000 ต้นต่อปี ถุงที่ผลิตขึ้นนี้สามารถย่อยสลายได้อย่างสมบูรณ์ภายใน 8-10 สัปดาห์ภายใต้สภาวะการหมักในโรงงานคอมโพสท์เชิงอุตสาหกรรม

6. บรรจุภัณฑ์เพื่อการบริโภค (Consumer packaging materials)

ศักยภาพหนึ่งในการใช้งานพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ คือ การใช้งานด้านบรรจุภัณฑ์ ซึ่งตามปกติการใช้บรรจุภัณฑ์อาหารที่ผลิตจากพลาสติกทั่วไปมักไม่ได้รับความนิยมมากนักกลับมารีไซเคิลมากขึ้น เนื่องจากมีการปนเปื้อนสูง ทำให้ไม่สะดวกต่อการเก็บและทำความสะอาด การนำพลาสติกย่อยสลายได้มาผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์สำหรับอาหาร เช่น ถาดย่อยสลายได้สำหรับอาหารสำเร็จรูปและอาหารจานด่วน จึงเป็นแนวทางหนึ่งในการลดปัญหาด้านการจัดการขยะบรรจุภัณฑ์ลงได้

7. โฟมเม็ดกันกระแทก (Loose fill)

โฟมเม็ดกันกระแทกโดยทั่วไปผลิตจากพอลิสไตรีนเพื่อใช้ประโยชน์ ในด้านการขนส่งสินค้า มีข้อดีคือ มีความยืดหยุ่นสามารถป้องกันสินค้าจากแรงกระแทกระหว่างการเคลื่อนย้ายและขนส่งได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้ยังมีน้ำหนักเบาทำให้การขนส่งสินค้าเป็นไปได้อย่างสะดวกและประหยัดเชื้อเพลิง แต่ปัญหาคือ พอลิสไตรีน เป็นพลาสติกที่ย่อยสลายได้ยากและใช้เนื้อที่ในการจัดเก็บเพื่อการกำจัดสูง ในกรณีที่ต้องกำจัดด้วยการฝังกลบต้องใช้เนื้อที่ในบ่อฝังกลบมาก แม้ว่าจะนำมารีไซเคิลใช้ใหม่ได้แต่ยังไม่เป็นที่นิยมแพร่หลายมากนัก ปัจจุบันมีการพัฒนาการผลิตโฟมเม็ดกันกระแทกจากแป้งและพอลิเมอร์ชนิดอื่นที่ละลายน้ำและย่อยสลายได้ทางชีวภาพขึ้น ทำให้ง่ายต่อการใช้งานและสะดวกในการกำจัดเมื่อสิ้นสุดการใช้งานแล้ว

2.1.5 ประเภทของพลาสติกย่อยสลายได้

โดยทั่วไป เราสามารถแบ่งกลไกการย่อยสลายของพลาสติกเป็น 4 ประเภทใหญ่ๆ คือ

1.การย่อยสลายได้โดยแสง (Photodegradation) การย่อยสลายโดยแสงมักเกิดจากการเติมสารเติมแต่งที่มีความว่องไวต่อแสงลงในพลาสติกหรือสังเคราะห์โคพอลิเมอร์ (Co-Polymer) ให้มีหมู่ฟังก์ชัน (Functional group) หรือพันธะเคมี (Chemical bond) ที่ไม่แข็งแรง แตกหักง่ายภายใต้รังสีอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet; UV) เช่น หมู่คีโตน (Ketone group) อยู่ในโครงสร้าง เมื่อสารหรือหมู่ฟังก์ชันดังกล่าวสัมผัสกับรังสียูวีจะเกิดการแตกของพันธะกลายเป็นอนุมูลอิสระ (Free radical) ซึ่งไม่เสถียร จึงเข้าทำปฏิกิริยาต่ออย่างรวดเร็วที่พันธะเคมีบนตำแหน่งคาร์บอน (Carbon position) ในสายโซ่พอลิเมอร์ (Polymer chain) ทำให้เกิดการขาดของสายโซ่ แต่การย่อยสลายนี้จะไม่เกิดขึ้นภายในบ่อฝังกลบขยะ หรือสภาวะแวดล้อมอื่นที่มีมืด หรือแม้กระทั่งชั้นพลาสติกที่มีการเคลือบด้วยหมึกที่หนามากบนพื้นผิว เนื่องจากพลาสติกจะไม่ได้สัมผัสกับรังสียูวีโดยตรง

2.การย่อยสลายทางกล (Mechanical degradation) โดยการให้แรงกระทำแก่ชิ้นพลาสติกทำให้ชิ้นส่วนพลาสติกแตกออกเป็นชิ้น ซึ่งเป็นวิธีการที่ใช้โดยทั่วไปในการทำให้พลาสติกแตกเป็นชิ้นเล็กๆ

3.การย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidative degradation) การย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชันของพลาสติก เป็นปฏิกิริยาการเติมออกซิเจน (Oxygen) ลงในโมเลกุลของพอลิเมอร์ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้เองในธรรมชาติอย่างช้าๆ โดยมีออกซิเจน (Oxygen) และความร้อน แสงยูวี หรือแรงทางกลเป็นปัจจัยสำคัญ เกิดเป็นสารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (Hydroperoxide; ROOH) ในพลาสติกที่ไม่มีการเติม สารเติมแต่งที่ทำหน้าที่เพิ่มความเสถียร (Stabilizing additive) แสงและความร้อนจะทำให้สารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์ แตกตัวกลายเป็นอนุมูลอิสระ (Free radical) RO[•] และ OH[•] ที่ไม่เสถียรและเข้าทำปฏิกิริยาต่อที่พันธะเคมีบนตำแหน่งคาร์บอนในสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้เกิดการแตกหักและสูญเสียสมบัติเชิงกลอย่างรวดเร็ว แต่ด้วยเทคโนโลยีการผลิตที่ได้รับการวิจัยและพัฒนาขึ้นในปัจจุบันทำให้พอลิโอเลฟิน (Polyolefin) เกิดการย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชันกับออกซิเจนได้เร็วขึ้นภายในเวลาที่กำหนด โดยการเติมสารเติมแต่งที่เป็นเกลือของโลหะทรานซิชัน (Transition metals) ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเร่งการแตกตัวของสารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์ เป็นอนุมูลอิสระส่งผลให้สายโซ่พอลิเมอร์เกิดการแตกหักและสูญเสียสมบัติเชิงกลรวดเร็วยิ่งขึ้น

4.การย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolytic Degradation) การย่อยสลายของพอลิเมอร์ที่มีหมู่เอสเทอร์ (Ester group) หรือเอไมด์ (Amide group) เช่น แป้ง พอลิเอสเทอร์ (Polyester) พอลิแอนไฮไดรด์ (Polyanhydride) พอลิคาร์บอเนต (Polycarbonate) และพอลิยูรีเทน ผ่านปฏิกิริยาก่อให้เกิดการแตกหักของสายโซ่พอลิเมอร์ ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่เกิดขึ้น โดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ ประเภทที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic hydrolysis) และไม่ใช่ตัวเร่ง

ปฏิกิริยา (Non-catalytic hydrolysis) ซึ่งประเภทแรกยังแบ่งออกได้เป็น 2 แบบคือ แบบที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากภายนอกโมเลกุลของพอลิเมอร์เร่งให้เกิดการย่อยสลาย (External catalytic degradation) และแบบที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากภายในโมเลกุลของพอลิเมอร์เองในการเร่งให้เกิดการย่อยสลาย (Internal catalytic degradation) โดยตัวเร่งปฏิกิริยาจากภายนอกมี 2 ชนิด คือ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเอนไซม์ (Enzyme) ต่างๆ ในกรณีนี้จัดเป็นการย่อยสลายทางชีวภาพ และตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่ใช่เอนไซม์ (Non-enzyme) เช่น โลหะแอลคาไลด์ (Alkaline metal) เบส (Base) และกรด (Acid) ที่มีอยู่ในสภาวะแวดล้อมในธรรมชาติ ในกรณีนี้จัดเป็นการย่อยสลายทางเคมี สำหรับปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสแบบที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากภายในโมเลกุลของพอลิเมอร์นั้นใช้หมู่คาร์บอกซิล (Carboxyl group) ของหมู่เอสเทอร์หรือเอไมด์บริเวณปลายของสายโซ่พอลิเมอร์ในการเร่งปฏิกิริยาการย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส

5. การย่อยสลายทางชีวภาพ (Biodegradation) การย่อยสลายของพอลิเมอร์จากการทำงานของจุลินทรีย์โดยทั่วไปมีกระบวนการ 2 ขั้นตอน เนื่องจากขนาดของสายพอลิเมอร์ยังมีขนาดใหญ่และไม่ละลายน้ำ ในขั้นตอนแรกของการย่อยสลายจึงเกิดขึ้นภายนอกเซลล์โดยการปลดปล่อยเอนไซม์ของจุลินทรีย์ซึ่งเกิดได้ทั้งแบบเอนไซม์ที่ทำให้เกิดการแตกตัวของพันธะภายในสายโซ่พอลิเมอร์อย่างไม่เป็นระเบียบ (Endo-enzyme) และแบบเอนไซม์ที่ทำให้เกิดการแตกหักของพันธะที่ละหน่วยจากหน่วยซ้ำที่เล็กที่สุดที่อยู่ด้านปลายของสายโซ่พอลิเมอร์ (Exo-enzyme) เมื่อพอลิเมอร์แตกตัวจนมีขนาดเล็กพอจะแพร่ผ่านผนังเซลล์เข้าไปในเซลล์ และเกิดการย่อยสลายต่อในขั้นตอนที่ 2 ได้ผลิตภัณฑ์ในขั้นตอนนี้สุดท้าย (Ultimate biodegradation) คือ พลังงาน และสารประกอบขนาดเล็กที่เสถียรในธรรมชาติ (Mineralization) เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซมีเทน น้ำ เกลือแร่ธาตุต่างๆ และมวลชีวภาพ

หมายเหตุ มวลชีวภาพ หมายถึง มวลรวมของสสารที่เกิดขึ้นจากกระบวนการในการดำรงชีวิตและเติบโตของสิ่งมีชีวิต ซึ่งรวมถึงพืช สัตว์ และจุลินทรีย์

นอกจากนี้ยังพบว่า มีการใช้คำว่า พลาสติกย่อยสลายได้ในสภาวะแวดล้อมธรรมชาติ (Environmentally degradable plastics; EDP) ซึ่งหมายถึง พลาสติกที่สามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติเนื่องจากปัจจัยต่างๆ ในสภาวะแวดล้อม เช่น กรด เบส น้ำ และออกซิเจนในธรรมชาติ แสง จากดวงอาทิตย์ แรงเค้นจากการกระทบของเม็ดฝนและแรงลม หรือจากเอนไซม์ของจุลินทรีย์ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมี กลายเป็นสารที่ถูกดูดซึม และย่อยสลายต่อได้อย่างสมบูรณ์ โดยจุลินทรีย์ ได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ สารอนินทรีย์ และมวลชีวภาพ เป็นผลิตภัณฑ์ขั้นสุดท้าย โดยการย่อยสลายและการดูดซึมนี้อาจเกิดขึ้นได้รวดเร็วเพียงพอที่จะไม่ทำให้เกิดการสะสมในสภาวะแวดล้อม และคำว่า พลาสติกที่เป็นมิตรต่อสภาวะแวดล้อม (Environmental friendly plastics) หรือ พลาสติกสีเขียว (Green plastics) หมายถึง พลาสติกที่ทำให้ภาระในการจัดการขยะลดลง และส่งผลกระทบต่อสภาวะแวดล้อมน้อยกว่าพลาสติกที่ใช้กันอยู่ทั่วไปในปัจจุบัน

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 วัสดุกันกระแทก [16]

วัสดุกันกระแทกคือ วัสดุที่ถูกนำมาใช้เพื่อปกป้องสินค้าจากการสูญเสียเนื่องมาจากการกระแทกอย่างรุนแรงหรือการสั่นสะเทือนระหว่างกระบวนการขนส่ง เคลื่อนย้าย ขนถ่าย หลักการพื้นฐานสำคัญ 2 ประการของวัสดุกันกระแทกในการป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับสินค้า คือ

1. วัสดุกันกระแทกถูกนำมาใช้เพื่อดูดซับแรงกระแทก และป้องกันการส่งผ่านแรงกระแทกมายังตัวสินค้า
2. วัสดุกันการกระแทกมีประสิทธิภาพในการลดการเคลื่อนที่ของสินค้าในหีบห่อ ซึ่งเป็นการลดการเคลื่อนที่จากการสั่นสะเทือน

วัสดุกันกระแทกที่ใช้งานอยู่ในปัจจุบัน ได้แก่ แผ่นกระดาษลูกฟูก โฟมพอลิสไตรีน โฟมพอลิยูรีเทน โฟมพอลิเอทิลีน แผ่นพลาสติกอัดอากาศ ฝอยไม้ และฝอยกระดาษ วัสดุแต่ละชนิดมีสมบัติและความเหมาะสมต่อการใช้งานดังนี้

1. แผ่นกระดาษลูกฟูก ใช้ทำหน้าที่แผ่นรอง ตัวกันหรือแผ่นกัน เพื่อเก็บสินค้าภายในบรรจุภัณฑ์ หรือทำหน้าที่เป็นตัวห่อหุ้มสินค้า แผ่นกระดาษลูกฟูกมีข้อจำกัดในการดูดซับแรงกระแทกอย่างรุนแรง และไม่คืนกลับรูปร่างเดิม หลังจากถูกแรงกระทำ มีการดูดซับความชื้น และอ่อนตัวลงในสภาวะอากาศที่มีความชื้นสูง แต่เนื่องจากการที่สามารถนำกลับเข้ากระบวนการนำกลับมาใช้ใหม่ได้ จึงไม่ก่อให้เกิดปัญหาจากเศษวัสดุเหลือหลังใช้งาน

2. โฟมพอลิสไตรีน โครงสร้างเป็นเซลล์ปิด น้ำหนักเบา มีสมบัติป้องกันแรงกระแทกได้เป็นอย่างดี ไม่ดูดซับความชื้น แต่มีขีดจำกัดในการคืนรูป ทำให้ไม่เหมาะกับงานที่ต้องการรับแรงกระแทกอย่างรุนแรงหลายๆ ครั้ง

3. โฟมพอลิยูรีเทน โครงสร้างเป็นลักษณะเซลล์เปิดจนถึงเซลล์ปิด 80 เปอร์เซ็นต์ ยอมให้อากาศออกเมื่อได้รับแรงกระแทกและดูดอากาศเมื่อหมดแรงกระแทก การคืนรูปดีมากทำให้เป็นวัสดุกันกระแทกที่ดี ไม่ดูดซับความชื้นในอากาศ

4. โฟมพอลิเอทิลีน มีโครงสร้างเป็นเซลล์ปิด มีการคืนรูปดีหลังรับแรงกระแทก น้ำหนักเบา ทนทานต่อสารเคมี

5. แผ่นพลาสติกอัดอากาศ ทำจากแผ่นฟิล์มพอลิเอทิลีน 2 แผ่นประกบกัน โดยทำให้เกิดที่กันอากาศเล็กๆ เกิดขึ้นระหว่างแผ่น มีการผลิดออกมาในรูปม้วน มีความเหนียว สะอาด และไม่เป็นตัวการทำให้เกิดการผุกร่อน ไม่มีการดูดซับความชื้น ทนต่อแรงกระแทก

6. ฝอยไม้ เป็นวัสดุกันกระแทกที่มีการใช้งานมานาน โดยใช้ใส่ลงในช่องว่างของกล่องหรือลัง ความสามารถในการเป็นวัสดุกันกระแทกขึ้นกับความหนาแน่นในการบรรจุและความชื้นซึ่งปกติมีประมาณ 12-20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

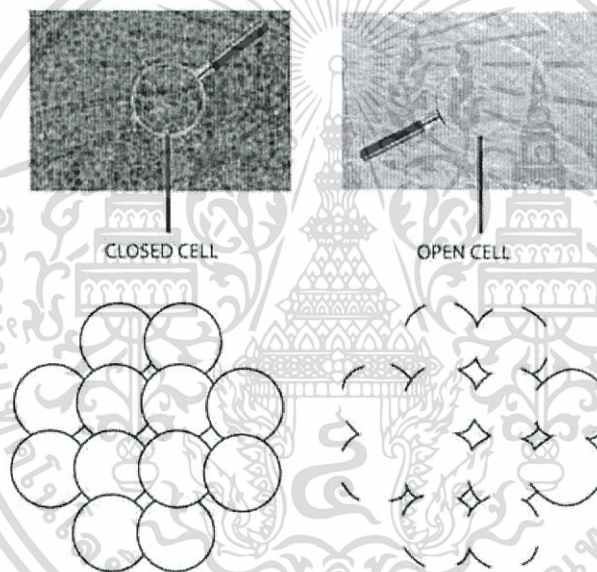
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. ฝอยกระดาษ มีการใช้งานเช่นเดียวกับฝอยไม้ เป็นวัสดุราคาถูก และหาได้ง่าย มีข้อเสียคือ ดูดซับความชื้นในอากาศได้ง่าย มีการปนเปื้อนของฝุ่นละอองและไม่สะอาดในประเทศอุตสาหกรรมจึงไม่นิยมใช้

2.3 พอลิเมอร์โฟม(Foam Polymer)[17]

พอลิเมอร์โฟม หมายถึง พอลิเมอร์ที่มีค่าความหนาแน่นลดลงเนื่องจากมีเซลล์จำนวนมากอยู่ในโครงสร้าง พอลิเมอร์โฟมนั้นเป็นวัสดุที่ประกอบด้วยอย่างน้อย 2 เฟส คือ เฟสของแก๊สกระจายอยู่ในเฟสของพอลิเมอร์ ส่วนที่เป็นพอลิเมอร์จะเป็นส่วนต่อเนื่องทำหน้าที่เป็นเมทริกซ์และส่วนแก๊สนั้นจะบรรจุอยู่ในช่องว่างเมทริกซ์ (Void) หรือเรียกว่าเซลล์ (Cell)

โครงสร้างแบบโฟมของพอลิเมอร์นั้นสามารถแบ่งตามลักษณะได้ 2 แบบ คือ โครงสร้างที่เป็นเซลล์เปิด (Open-cell) และ โครงสร้างที่เป็นเซลล์ปิด (Close-cell) ดังแสดงในรูป 2.10



รูป 2.10 โครงสร้างเซลล์เปิด และ แบบปิด[17]

โฟมที่มีโครงสร้างเป็นเซลล์แบบเปิดจะมีแต่ละเซลล์เชื่อมถึงกัน เฟสของแก๊สภายในจะเป็นอากาศ ส่วนโฟมที่มีโครงสร้างเป็นเซลล์ปิดนั้น เซลล์จะถูกแยกออกจากกันด้วยผนังเซลล์ ที่เป็นพอลิเมอร์ เมทริกซ์ ชนิดของแก๊สที่อยู่ภายในจะขึ้นกับชนิดของสารให้ฟอง (Foaming agent) ที่ใช้โดย โครงสร้างเซลล์นั้นจะเป็นตัวกำหนดสมบัติและการใช้งานของโฟมที่ได้

2.3.1 ทฤษฎีการเกิดโฟม

ระบบที่ใช้ในการผลิตพอลิเมอร์โฟมจะเกี่ยวกับ 3 ขั้นตอน ขั้นแรกคือการเกิดฟองก๊าซ (Bubble formation) ซึ่งเป็นขั้นตอนที่เกี่ยวกับการเกิดนิวเคลียสของฟองก๊าซขึ้นในพอลิเมอร์ หลอมเหลว ขั้นที่สองคือขั้นตอนการเกิดฟองก๊าซ (Bubble growth) เป็นกระบวนการที่ฟองก๊าซเกิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเจริญเติบโตและเกิดการเสถียร และกระบวนการสุดท้าย คือ กระบวนการเสถียรของฟองก๊าซ (Bubble stabilization) ซึ่งเป็นขั้นตอนที่เฟสของพอลิเมอร์เปลี่ยนสถานะกลายเป็นของแข็งผ่านกระบวนการเชื่อมโยง (Crosslink) หรือโดยการหล่อเย็น (Cooling) ทำให้ได้ระบบโครงสร้างของเซลล์ที่เสถียร

1. กระบวนการเกิดฟองก๊าซ

ถ้าฟองก๊าซที่เกิดขึ้นเป็นเนื้อเดียวกับพอลิเมอร์หลอมเหลวอย่างสมบูรณ์จะเรียกกระบวนการนี้ว่า Self-nucleation แต่ส่วนมากจำเป็นที่จะต้องมีการเติมอนุภาคของแข็งขนาดเล็ก เช่น ผงแป้ง (Talc) หรือซิลิกา (Silica) ลงไปในระบบเพื่อทำหน้าที่เป็นสารก่อนิวเคลียส (Nucleating agent) เพื่อควบคุมขนาดและการกระจายตัวของเซลล์ แต่ในกระบวนการที่ไม่มีการเติมสารก่อนิวเคลียส เฟสของพอลิเมอร์หลอมเหลวมักประกอบไปด้วยฟองอากาศขนาดเล็ก ซึ่งจะเป็นจุดที่ฟองก๊าซสามารถเติบโตต่อไปได้โดยไม่ต้องเติมฟองก๊าซใหม่

ปัจจัยทางกายภาพที่มีผลต่อการเกิดนิวเคลียสได้แก่ อุณหภูมิ (Temperature) ความดัน และความชื้นสัมพัทธ์ (Relative humidity) นอกจากนี้แล้วปัจจัยสำคัญต่อการเกิดนิวเคลียส คือ ความเรียบของพื้นผิวอนุภาคของแข็งของสารลดแรงตึงผิว (Surfactant) หรือ สารก่อนิวเคลียส (Nucleator) และอัตราการเกิดก๊าซในระบบพอลิเมอร์หลอมเหลว

2. กระบวนการเติบโตของฟองก๊าซ

เมื่อความดันของพอลิเมอร์หลอมเหลวลดลงจะทำให้โอกาสในการเกิดฟองก๊าซขึ้นใหม่ในพอลิเมอร์หลอมเหลวลดลง ก๊าซที่ละลายอยู่ในพอลิเมอร์หลอมเหลวจึงแพร่เข้าไปในฟองก๊าซ ทำให้ฟองก๊าซเกิดการขยายตัว เริ่มแรกฟองก๊าซจะมีลักษณะเป็นทรงกลมและเกิดการขยายตัวเนื่องจากผลของความแตกต่างความดันระหว่างภายในและภายนอกเซลล์ ที่สมดุลของฟองก๊าซภายในก๊าซทรงกลมจะมีค่ามากกว่าความดันของของเหลวที่อยู่ล้อมรอบ ค่าความแตกต่างของความดันระหว่างภายในและภายนอกเซลล์ของฟองก๊าซขนาดเล็กจะมีค่าสูงกว่าฟองก๊าซขนาดใหญ่ ทำให้ฟองก๊าซขนาดเล็กมีแนวโน้มจะลดความแตกต่างของความดัน โดยการขยายขนาดอย่างรวดเร็วทั้งโดยการไปรวมกับฟองก๊าซอื่นๆ หรือโดยการแพร่ของก๊าซขนาดเล็กและฟองก๊าซขนาดใหญ่

3. กระบวนการเสถียรของฟองก๊าซ

ฟองก๊าซจะถูกทำให้เสถียรได้ทั้งโดยการเกิดปฏิกิริยาเคมีของพอลิเมอร์เมทริกซ์กลายเป็นเจล (Gel) หรือโดยอิทธิพลทางกายภาพด้วยการหล่อเย็นพอลิเมอร์หลอมเหลวให้มีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิมอดตัวเพื่อป้องกันการเกิดการไหลของพอลิเมอร์ เมื่อพอลิเมอร์เปลี่ยนสถานะเป็นของแข็งทำให้รูปร่างของฟองก๊าซเสถียรรูปไปกลายเป็นแบบ แอนไอโซโทรปิก (Anisotropic) ส่งผลต่อสมบัติทางกายภาพของพอลิเมอร์โฟม ก๊าซภายในเซลล์โฟมจะอยู่ในสภาวะสมดุลเป็นระยะเวลาหนึ่งภายใต้สภาวะแวดล้อมอุณหภูมิและความดันล้อมรอบ ทำให้สมบัติของโฟมเปลี่ยนแปลงตามเวลา เนื่องจาก การเกิดการแพร่ของอากาศเข้าไปทดแทนก๊าซภายในเซลล์ สภาวะดังกล่าวจะเกิดการ

ลดลงเมื่อก๊าซที่อยู่ภายในเซลล์คืออากาศ หรือก๊าซที่มีสมบัติคล้ายกับอากาศ เช่น ก๊าซไนโตรเจน (Nitrogen) แต่หากก๊าซที่ใช้เป็นไฮโดรคาร์บอน (Hydrocarbon) จะทำให้เกิดการแพร่ของก๊าซออกมาภายนอกมากกว่าอัตราการแพร่ของอากาศเข้าไปในเซลล์ เป็นสาเหตุให้โครงสร้างของโฟมมีแนวโน้มที่จะสูญเสียรูปร่างหลังการผลิต

2.3.2 สมบัติโดยทั่วไปของพอลิเมอร์โฟม

พอลิเมอร์โฟมแต่ละชนิดมีความแตกต่างกันมากทั้งกายภาพและสมบัติเชิงกลขึ้นกับชนิดของพอลิเมอร์ สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์จะมีอิทธิพลอย่างมากกับสมบัติโฟม ปัจจัยอื่น ๆ ที่มีผลต่อสมบัติของโฟม ได้แก่ เทคนิคและสภาวะการผลิต การจัดเรียงตัวโมเลกุลของพอลิเมอร์ ความหนาแน่นของการเกิดเชื่อม โยงการเติมสารเติมแต่งแต่ละชนิดของสารให้ฟองที่ใช้

สมบัติของโฟมจะเปลี่ยนแปลงตามอัตราส่วนของก๊าซต่อพอลิเมอร์ หรือเปลี่ยนแปลงตามความหนาแน่นของโฟม ซึ่งปัจจัยดังกล่าวจะมีอิทธิพลต่อค่ามอดูลัส ค่าความทนทานต่อการดึงยืด ค่าความต้านทานต่อการกดอัดและค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานความร้อน

ความหนาแน่นของโฟมนั้นอาจเปลี่ยนแปลงได้ระหว่างกระบวนการบ่ม (Ageing) หากแบ่งชนิดของโฟมตามความหนาแน่นสามารถแบ่งได้ดังนี้

ถ้า $> 600 \text{ kg.m}^{-3}$	จัดเป็น	โฟมความหนาแน่นสูง
ถ้า $100 - 600 \text{ kg.m}^{-3}$	จัดเป็น	โฟมความหนาแน่นปานกลาง
ถ้า $< 100 \text{ kg.m}^{-3}$	จัดเป็น	โฟมความหนาแน่นต่ำ

เมื่อความหนาแน่นลดลงจะส่งผลให้ต้นทุนต่อผลิตภัณฑ์หนึ่งหน่วยลดลง ทำให้ความเป็นฉนวนความร้อนของโฟมเพิ่มขึ้น ค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) ลดลง ค่าความแข็งแรงโค้งงอ (Flexural strength) มากขึ้น และค่าความแข็งแรงต่อการกดอัด (Compression strength) ลดลง แต่ความสามารถในการดูดซับพลังงานเพิ่มขึ้น

2.3.3 สมบัติเชิงกล

ชนิดของโฟมสามารถแบ่งออกตามสมบัติเชิงกลได้เป็น 3 แบบ คือ Rigid cellular polymer, Structure foam และ Flexural cellular polymer

1. Rigid cellular polymer

พอลิเมอร์โฟมมีสมบัติเป็น rigid นั้นสามารถรายงานค่าความแข็งแรงการกด (Compressive strength) ได้ที่เกิดการเสียรูป (Deformation) ต่ำๆ 5-10 เปอร์เซ็นต์ เท่านั้น ค่ามอดูลัสการกดอัด (Compressive modulus) จะคำนวณจากการ Extrapolate สันกราฟไปที่ การเสียรูปที่ 0 เปอร์เซ็นต์ โดยปัจจัยที่มีผลต่อค่า ความแข็งแรงการกด และค่ามอดูลัสการกด ได้แก่ องค์ประกอบของเฟสของพอลิเมอร์ ความหนาแน่น โครงสร้างของเซลล์และองค์ประกอบของก๊าซตามลำดับ นอกจากนี้สมบัติเชิงกลอื่นๆของ Rigid cellular polymer เช่นค่าความแข็งแรงดึงมอดูลัสแรงดึง

(Tensile modulus) ความแข็งแรงโค้งงอของคูลัสโค้งงอ (Flexural modulus) จะเปลี่ยนแปลงตามความหนาแน่นของชิ้นงานอีกด้วย

2.Structural foam

พอลิเมอร์โฟมชนิดนี้มักผ่านการขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดขึ้นรูป หรือกระบวนการอัดรีด โดยปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลของโครงสร้างโฟม (Structural foam) ได้แก่ องค์ประกอบของเฟสพอลิเมอร์ ความหนาแน่น ขนาดและรูปร่างของเซลล์ ตามปกติโครงสร้างโฟม มักมีความหนาแน่นสูงและมักมีโครงสร้างของเซลล์ที่ไม่สม่ำเสมอ ทำให้สมบัติในแต่ละส่วนของชิ้นงานมีความแตกต่างกัน

3.Flexural cellular polymer

เมื่อได้รับแรงกดอัดที่มีค่าอยู่ระหว่าง 0-75 เปอร์เซ็นต์ การเสียรูปจะเป็นกระบวนการที่สามารถผันกลับได้ สำหรับ Flexible foam นั้น สมบัติทางด้านการกดอัดระหว่าง 0-75 เปอร์เซ็นต์ ทั้งภายใต้สภาวะที่เป็น Static และ Dynamic จะเป็นตัวกำหนดลักษณะการใช้งานของ Flexible foam โดยปัจจัยที่มีผลต่อพฤติกรรมของ Flexible foam เมื่อได้รับแรงกดอัด คือ องค์ประกอบของเฟสพอลิเมอร์ ความหนาแน่น ขนาดของเซลล์และรูปร่างของเซลล์

สมบัติทางด้านการกดอัดเป็นสมบัติที่มีความสำคัญมากของพอลิเมอร์โฟม ปริมาณของพลังงานที่โฟมดูดซับและลักษณะการเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของ โฟมนั้นขึ้นกับความหนาแน่นชนิดของพอลิเมอร์และชนิดของเซลล์โฟม

ในกรณีของโฟมเซลล์เปิด เมื่อได้รับแรงการ โค้งงอหรือแรงกดอัดจะเป็นกระบวนการที่ผันกลับได้ผนังเซลล์จะถูกบีบเมื่อได้รับแรงกดอัด ทำให้อากาศเกิดการแพร่ออกจากโฟมได้ยากขึ้น อากาศที่ติดค้างก็ไปขัดขวางการเกิดเปลี่ยนแปลงรูปร่างของ โฟมที่ขั้นตอนสุดท้ายของการกดอัด โดยกลไกการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง โฟมเซลล์เปิด แต่เมื่อโฟมมีโครงสร้างแบบเซลล์ปิดที่ไม่มีการไหลของอากาศเกิดขึ้น การเปลี่ยนแปลงรูปร่างเซลล์โฟมจะขึ้นอยู่กับปริมาณการกดอัดของก๊าซในเซลล์ การเกิดการ โค้งงอและการเสียรูปของผนังเซลล์ซึ่งเป็นกระบวนการที่ผันกลับไม่ได้ โดยแรงกดอัดที่รุนแรงอาจทำให้เซลล์เกิดการเสียรูปได้ Rigid foam ที่มีโครงสร้างเป็นเซลล์ปิด เช่น พอลิสไตรีน โฟมและพอลิยูรีเทน โฟม พอลิเมอร์จะมีค่า Yielding ที่ต่ำทำให้เกิดเปลี่ยนแปลงรูปร่างเชิงกล (Mechanical deformation) ของ Rigid foam นั้นขึ้นกับปริมาณการกดอัดของก๊าซและความแข็งแรงพอลิเมอร์เมทริกซ์ หาก Rigid foam ได้รับแรงกดอัดที่รุนแรงเซลล์ก็จะเกิดการเสียรูปเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

2.3.4 สมบัติทางความร้อน

ปัจจัยที่ส่งผลต่อการนำความร้อน (Thermal conductivity; k) ของโฟม คือ ค่าความหนาแน่นและองค์ประกอบของเฟสพอลิเมอร์ แต่ปริมาณความร้อนส่วนมากมักเกิดการถ่ายเทผ่านเฟสของก๊าซเนื่องจากเฟสของก๊าซที่ใช้เป็นสารให้ฟอง ตามปกติก๊าซจะมีสมบัติเป็นฉนวนความ

ร้อนได้ดีกว่าของแข็ง ทำให้เมื่อความหนาแน่นของโฟมลดลงค่าความต้านทานความร้อนของโฟมจะมีค่าเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากปริมาณของก๊าซภายในโฟมเพิ่มมากขึ้นจะทำให้กระบวนการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นเป็นกระบวนการแผ่รังสีความร้อน (Radiant heat transfer) เมื่อความหนาแน่นของโฟมเพิ่มมากขึ้นกระบวนการถ่ายเทความร้อนจะเกิดขึ้นได้มากขึ้นเนื่องจากโฟมมีปริมาณเนื้อของแข็งมากขึ้น

2.3.5 สมบัติอื่นๆของพอลิเมอร์โฟม

นอกจากสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนแล้วยังมีสมบัติอื่นๆ ที่สำคัญคือสมบัติทางด้านความทนทานต่อความชื้น (Moisture resistance) และสมบัติทางไฟฟ้า (Electrical properties) เป็นต้น

2.3.6 กรรมวิธีในการผลิตพอลิเมอร์โฟม

กรรมวิธีในการผลิตโฟมมีด้วยกัน 3 วิธี ได้แก่ การผลิตโฟมด้วยกรรมวิธีการผลิตทางกล การผลิตโฟมด้วยกรรมวิธีทางฟิสิกส์ และผลิตโฟมด้วยกรรมวิธีทางเคมี

1.การผลิตโฟมด้วยวิธีทางกล (Mechanical method)

โดยการใช้เครื่องมือกวนตีพลาสติกจนกระทั่งเกิดฟองอากาศขึ้นภายในพลาสติกเหลวแล้วให้ความร้อนแก่พลาสติกเหลว ซึ่งจะทำให้พลาสติกเหลวกลายเป็นก้อนโฟม โดยตัวอย่างพลาสติกที่ใช้วิธีทางกลคือ พอลิไวนิลคลอไรด์พลาสติกซอล (Polyvinyl chloride plastisol)

2. การผลิตโฟมด้วยวิธีทางฟิสิกส์ (Physical method)

โดยการอัดก๊าซหรือสารเคมีเข้าไปในพลาสติก จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางฟิสิกส์ได้เป็นโฟมออกมา เช่น การอัดก๊าซไนโตรเจนเข้าไปในพอลิเอทิลีนเหลวภายใต้แรงดัน

3.การผลิตโฟมด้วยวิธีทางเคมี (Chemical method)

ด้วยการเติมสารละลายทางเคมีลงไปในพลาสติกเหลวขณะที่พลาสติกกำลังร้อนทำให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมี เกิดฟองก๊าซขึ้น พลาสติกเหลวที่ผลิตด้วยกรรมวิธีนี้ได้แก่ พอลิยูรีเทน

2.4 สารทำให้เกิดฟอง (Foaming agent)[18]

สารทำให้เกิดฟอง ช่วยให้วัสดุ(ของแข็งของเหลวก๊าซหรือของผสม)เกิดเป็นฟอง โดยมีโครงสร้างเป็นแบบเซลล์ (Cell structure) กระบวนการทำให้เกิดฟองอาจทำได้โดยวิธีทางกายภาพ (Physical method) ทางกล (Mechanical method) และทางเคมี (Chemical method) โดยทุกวิธีประกอบด้วย 3 ขั้นตอนต่อไปนี้

1.สถานะของเหลว (Liquid state) ได้แก่ พอลิเมอร์หลอมเหลว (Melting polymer) พรีพอลิเมอร์ (Pre polymer) และเลเท็กซ์พลาสติกโซล (Latex plasisol)

2.การเกิดฟองอากาศ (Blow bubbles) ได้แก่ ก๊าซถาวร ของเหลวระเหยได้ และปฏิกิริยาเคมี

3.การเกิดเป็นของแข็ง (Solidify) ได้แก่ การหล่อเย็น การบ่มตัว การเกิดเจล และการระเหย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.1. สารที่ทำให้เกิดฟองทางกายภาพ

สารที่ทำให้เกิดฟองทางกายภาพเป็นการเปลี่ยนแปลงสถานะทางกายภาพในระหว่างการเกิดฟอง โดยส่วนมากสารทำให้เกิดฟองทางกายภาพจะเป็นของเหลวที่ระเหยได้ โดยสามารถทำให้เกิดเซลล์ขึ้นในขณะที่ของเหลวเปลี่ยนเป็นก๊าซ โดยปกติจุดเดือดจะต่ำกว่า 110 องศาเซลเซียสในการระเหยกลายเป็นไอของของเหลวจัดเป็นกระบวนการแบบดูดความร้อนและผันกลับได้ เมื่อพอลิเมอร์เกิดการขยายตัวจะทำให้เกิดสายโซ่โมเลกุลหรือการเชื่อมโยงเป็นโครงตาข่าย ส่งผลให้ความร้อนที่เกิดจากการระเหยกลายเป็นไอของสารทำให้เกิดฟองชนิดของเหลวช่วยในการควบคุมอุณหภูมิได้ รวมทั้งสามารถป้องกันการสูญเสียคุณภาพอันเนื่องมาจากความร้อน (Thermal degradation) ของพอลิเมอร์ได้ และสามารถผลิตโครงสร้างเซลล์แบบหนาได้อีกด้วย

1. ก๊าซ

สารทำให้เกิดฟองทางกายภาพได้จากการนำก๊าซที่มีอยู่ ได้แก่ ในโตรเจน คาร์บอนไดออกไซด์ และ อากาศเข้าไปในพอลิเมอร์ขณะที่เกิดการหลอมเหลว เช่น

» ในโตรเจนถูกอัดในพอลิเมอร์หลอมเหลวเพื่อให้เกิดโครงสร้างโฟมเทอร์โมพลาสติก

» การใส่อากาศเข้าไปในพลาสติกโซล และการทำฟองยูริเทนเหลว

2. ของเหลวระเหยได้

สารทำให้เกิดฟองทางกายภาพได้จากการนำของเหลวที่ระเหยง่ายมาช่วยผสมในระบบพอลิเมอร์ เพื่อทำให้เกิดสภาพพลาสติกชั่วคราว เนื่องมาจากการให้ความร้อนแก่กระบวนการส่งผลให้เกิดการขยายตัวของก๊าซและการปรับสภาพพลาสติกสิ้นสุดลงเมื่อเกิดการหล่อเย็น ของเหลวที่ระเหยได้ที่นิยมใช้ได้แก่

» เพนเทน (Pentane; C_5H_{12}) นำมาใช้กับพอลิสไตรีน ราคาถูกแต่ติดไฟได้ง่าย

» ไอโซเพนเทน (Iso-pentane; C_5H_{12}) บิวเทน (Butane; C_4H_{10}) เฮกเซน (Hexane; C_6H_{14})

» ฟลูโอโรคาร์บอน (Fluorocarbon) ใช้กับ โฟมยูริเทนชนิดแข็ง ชนิดยืดหยุ่น และพอลิสไตรีน โดยไม่เกิดการติดไฟและใช้เตรียมฉนวนกันความร้อนได้สูง แต่โดยปกติมีการแยกตัวจากเกิดขึ้นเนื่องจากการทำลายชั้นโอโซนในบรรยากาศชั้นบนที่ช่วยป้องกันการแผ่รังสีอัลตราไวโอเล็ต เดิมทีใช้ฟลูโอโรคาร์บอน เอฟ-11 (CCl_3F) ที่มีจุดเดือด 24 องศาเซลเซียส ต่อมาได้มีการใช้สารอื่นแทนดังต่อไปนี้คือ

» F-22 ($CHClF_2$) นิยมใช้ทางการค้า

» HCFC-123 ($CHCl_2CF_3$)

» F-141b (CH_2CCl_2F)

» F-141b (CH_2CClF_2)

» เมทิลฟอร์มเมท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

» คาร์บอนไดออกไซด์

3. โฟมซินแทคติก

ฟองที่มีลักษณะกลวงและขนาดเล็กทำจากแก้วหรือพลาสติก (ไวนิลไคลอโรไครด์/อะครีโล-ไนไตรล์, VDC/AN และ ฟีนอลิก) สามารถทำให้เกิดการกระจายตัวในระบบของเหลวได้ เช่น เอฟอกซี หลังจากนั้นจึงเกิดการบ่มตัว เหมาะสำหรับการผลิตกัณฑ์ที่ใช้กับการดำน้ำและพวกที่มีการนำไฟฟ้าค่อนข้างต่ำ

2.4.2. สารที่ทำให้เกิดฟองทางเคมี

สารทำให้เกิดฟองทางเคมีส่งผลให้เกิดการขยายตัวของก๊าซภายในเมทริกซ์ของพอลิเมอร์ โดยก๊าซที่ก่อตัวในเซลล์สามารถเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ร่วมจากการขยายตัวหรือการเชื่อม โครงตาข่ายของพอลิเมอร์ เช่น พอลิยูรีเทน รวมทั้งปฏิกิริยาการควบแน่นของไกลคอล (Glycol) และ ฟอรัมาลดีไฮด์ (Formaldehyde) ทำให้เกิดน้ำเป็นผลิตภัณฑ์ร่วมโดยสามารถทำให้เรซินฟีนอลิก (Phenolic resin) เกิดเป็นฟองได้ หรือพอลิเอทิลีนสามารถเกิดการขยายตัวได้ ถ้านำพอลิเมอร์ร้อนเข้าใกล้การแผ่รังสีแบบแตกตัวเป็นไอออน และเกิดไฮโดรเจนปล่อยออกจากพอลิเอทิลีนซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดฟองขึ้น สารเคมีที่ทำให้เกิดฟอง ได้แก่ วัสดุอินทรีย์ และอนินทรีย์ที่สามารถสลายตัวภายใต้อิทธิพลทางความร้อนเพื่อก๊าซที่เกิดขึ้นโดยอุณหภูมิจัดเป็นตัวแปรที่มีความสำคัญมากตัวแปรหนึ่ง และอุณหภูมิของการขยายตัวทางความร้อนเป็นตัวกำหนดประโยชน์ของสารได้ดีเท่ากับสถานะของกระบวนการ

การสลายตัวของสารทำให้เกิดฟองจะต้องเกิดได้ในช่วงอุณหภูมิต่ำจึงจะเหมาะสม ทั้งนี้เนื่องจากการสลายตัวที่อุณหภูมิสูงทำให้พอลิเมอร์เกิดการเสียดคุณภาพได้ สารทำให้เกิดฟองที่ใช้กัน ได้แก่ แกลีอินทรีย์ และ อนินทรีย์ทั่วไป (คาร์บอเนต (Carbonate; $(CO_3)_2$) ไบคาร์บอเนต (Bicarbonate) และ ออกซาเลต (Oxalate; $C_2O_{4,2}$)) โดยทั่วไปจะไม่ละลายในสารปรับสภาพพลาสติก และ/หรือตัวทำละลายอินทรีย์ แต่จะมีเสถียรภาพในการจัดเก็บต่ำ และเกิดการกระจายตัวในสารประกอบพลาสติกได้ยากมาก นอกจากนี้อาจใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และไอน้ำที่เกิดขึ้นจากการสลายตัวของสารทำให้เกิดฟองซึ่งขึ้นกับความดัน ตัวอย่างเช่น แอมโมเนีย (Ammonia; NH_3) และ โซเดียมไบคาร์บอเนต สำหรับไนลอน (Nylon) เอฟอกซี (Epoxy) แอลคีด (Alkyd) พอลิเอทิลีน พอลิไวนิลคลอไรด์ และโอมอนอเมอร์ การนำเกลือของกรดออกซาลิกมาใช้กับพอลิไวนิลคลอไรด์ และ ฟองน้ำที่ทำจากยาง หรือ การนำโบรอนไฮไดรด์ (Boron hydride) มาใช้กับ พอลิไวนิลคลอไรด์ชนิดแข็ง และ พอลิสไตรีน เป็นต้น

1. โซเดียมไบคาร์บอเนต และกรดซิตริก

การนำผสมของ โซเดียมไบคาร์บอเนตและกรดซิตริกที่เกิดจากการเคลือบแบบแห้ง มาใช้กับเม็ดพอลิสไตรีนทำให้เกิดฟองได้ เมื่อเม็ดพอลิสไตรีนได้รับไอน้ำผสมที่ได้จะละลายและเกิดปฏิกิริยาได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เกิดเป็นฟองขึ้น โดยก๊าซนี้ไม่จัดเป็นสารที่ทำให้เกิด

ฟองชนิดปฐมภูมิแต่จัดเป็นสารก่อให้เกิดนิเวศพิษ แต่ในกรณีของเพนเทนจัดเป็นสารที่ระเหยได้ ทำให้เกิดฟองอากาศที่มีขนาดเล็กและสม่ำเสมอและได้ฟองอากาศเป็นผลลัพท์

2, ไอโซไซยานทและน้ำ

โฟมยูรีเทนชนิดยืดหยุ่นได้จากการนำไอโซไซยานทที่มีปริมาณมากเกินไปมาทำปฏิกิริยากับน้ำที่มีปริมาณแน่นอนโดยในระหว่างปฏิกิริยาพอลิเมอไรซ์เซชันจะได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และได้พอลิเมอร์ที่มีฟองอากาศแทรกอยู่ภายในโมเลกุล

3. สารประกอบเอโซ(Azo)

ในทางการค้าสารที่ทำให้เกิดฟองในทางเคมีจัดเป็นสารประกอบไนโตรเจนประเภทอินทรีย์ โดยระหว่างให้ความร้อนในกระบวนการหลอมเหลวจะเกิดการสลายตัว และ ก๊าซที่ได้พบว่าการใช้สารทำให้เกิดฟองต่างกันจำนวน 1 กรัม ทำให้ได้ปริมาณก๊าซในหน่วยมิลลิตรต่อกรัม ที่สภาวะอุณหภูมิ และความดันมาตรฐานต่างกัน

สารประกอบเอโซที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมกันมาก ได้แก่ ABFA เนื่องจากเป็นสารไม่มีพิษ ไม่มีกลิ่น ไม่ทำให้เกิดรอยปนเปื้อน ไม่ทำให้สีหายไป มีเสถียรภาพในการจัดเก็บที่ดี ไม่ทำให้เกิดการเผาไหม้ และสามารถขับไฟได้เอง นอกจากนี้ยังสามารถเสริมประสิทธิภาพของ ABFA ให้ดีขึ้นได้โดยการใช้สารทำให้เกิดเสถียรภาพประเภทตะกั่ว สังกะสี และ/หรือ แคดเมียม ในสารประกอบไวนิลสก็ก็ได้ แต่ทั้งนี้ต้องคำนึงถึงความเป็นพิษในการพิจารณาประกอบการเลือกด้วย ABFA นำมาใช้กับผ้าไวนิลที่สามารถขยายตัวได้ โฟมพอลิไวนิลคลอไรด์ ชนิดความหนาแน่นต่ำและเป็นแบบเซลล์เปิด ใช้ในเส้นลวดไฟฟ้า และใช้ในการปิดผนึก และ ทำปะเก็นได้ เนื่องจาก ABFA ที่มีการเชื่อมโครงตาข่ายทำให้พอลิเอทิลีนที่มีการขยายตัวเกิดการหดตัวต่ำและมีสมบัติการอัดตัวที่ดี

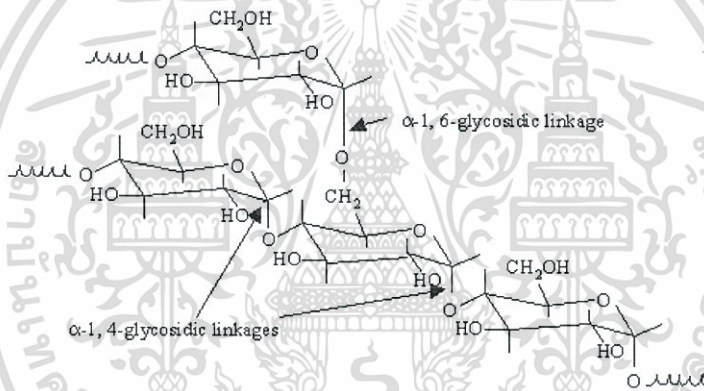
นอกจากนี้ยังมีสาร DNTA เป็นสารที่สามารถสลายตัวได้ที่อุณหภูมิต่ำ โดยมีปฏิกิริยาเป็นแบบคายความร้อน นิยมใช้ทำโฟมไวนิลที่มีความหนาแน่นมากกว่า 6 นิ้ว ใช้ทำพอลิเอไมด์ และ ยางซิลิโคนได้ดีเท่ากับผ้าไวนิล และ ไวนิลแบบต่างๆ ส่วนสาร DNPT นิยมใช้กันมากที่สุดในอุตสาหกรรมยาง แต่มีข้อจำกัดตรงที่โฟมพลาสติกขึ้นอยู่กับการสลายตัวแบบคายความร้อน และมีกลิ่นเหม็นของสารที่เหลือ

2.4.3 สารทำให้เกิดฟองแบบผสม

โดยปกตินักกระบวนการสนใจใช้สารเกิดฟองในลักษณะผสม เช่น การรวมไฮโดรคาร์บอนที่ระเหยได้หรือการรวมฟลูโอโรคาร์บอน เพื่อแทนที่คลอรีนที่เติม-ฟลูโอโรคาร์บอนด้วยเหตุนี้จึงมีการศึกษากันอย่างแพร่หลาย โดยพบว่าสารที่ทำให้เกิดฟองที่ใช้กันมีดังนี้

- » อากาศและไอโซไซยานเทนน้ำ
- » อากาศและฟลูโอโรคาร์บอน
- » ไฮโดรคาร์บอนและฟลูโอโรคาร์บอน
- » ไฮโดรคาร์บอนและคาร์บอนไดออกไซด์
- » ของเหลวระเหยได้ และสารทำให้เกิดโฟมทางเคมี

2.5 แป้งและอนุพันธ์ของแป้ง(Starch and Starch derivatives) [19]

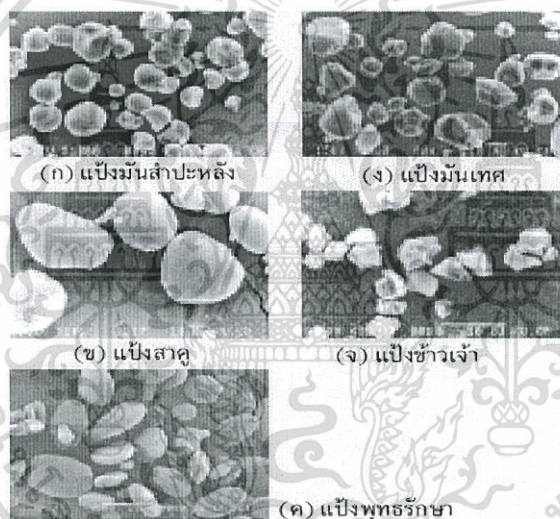


รูปที่ 2.11 โครงสร้างทางเคมีของแป้ง [19]

แป้งเป็นสารประกอบพอลิแซคคาไรด์ พบได้ในส่วนต่างๆของพืช เช่น ราก ลำต้น และเมล็ด แป้งมีลักษณะเป็นผงละเอียดสีขาว อาจไม่มีรสและกลิ่น มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1-100 ไมครอน (Micron) หรือมากกว่านี้ขึ้นอยู่กับแหล่งที่มาของแป้ง แป้งที่ผลิตเชิงการค้ามีแหล่งที่มาจากพืชไม่กี่ชนิด เช่น ข้าวโพด มันสำปะหลัง ข้าวเจ้า ข้าวสาลี และมันฝรั่ง ปริมาณรูปร่าง และขนาดของแป้งชนิดต่างๆในวัตถุดิบแต่ละประเภทจะแตกต่างกัน

ตารางที่ 2.1 รูปร่างและขนาดของแป้งชนิดต่างๆ [19]

ชนิดของแป้ง	รูปร่าง	เส้นผ่านศูนย์กลาง (μm)
แป้งข้าวเจ้า(Rice Starch)	Polygonal/tend to aggregate in clusters	3-8
แป้งมันสำปะหลัง(Cassava 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 [19]

2.5.1 โครงสร้างทางเคมีของแป้ง

แป้งธรรมชาติ (Native starch) มีโครงสร้างทางเคมีเป็นพอลิเมอร์หลักสองประเภท คือ อะไมโลส (Linear glucose polymer) และอะไมโลเพกทิน (Branched glucose polymer) มีโครงสร้างตามรูปที่ 2.11 และ 2.13 ตามลำดับโดยทั่วไปแป้งจะมีองค์ประกอบของอะไมโลเพกทินมากกว่าอะไมโลส โดยมีอัตราส่วนอะไมโลสต่ออะไมโลเพกทินประมาณ 30:70 หรือ 20:80 ขึ้นอยู่กับชนิดของแป้ง

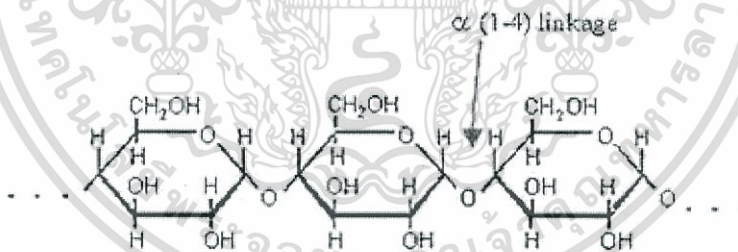
แป้งธรรมชาติได้มาจากพืชหลายชนิด แต่ที่ใช้มากในอุตสาหกรรม คือ แป้งข้าวโพด (Corn starch) แป้งมันสำปะหลัง แป้งมันฝรั่ง และแป้งสาลี รองลงมาได้แก่ แป้งข้าวเจ้า แป้งข้าวเหนียว (Waxy maize) และแป้งข้าวฟ่าง (Sorghum flour) ซึ่งแป้งจากพืชต่างชนิดกันก็มีองค์ประกอบทางเคมีและสมบัติทางกายภาพต่างกัน

ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบทางเคมีของแป้งธรรมชาติ [19]

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
Cassava	13	0.1	0.1
Waxy maize	13	0.2	0.2

2.5.2 องค์ประกอบของแป้ง

อะไมโลสเป็นพอลิเมอร์เชิงเส้น ประกอบด้วยหน่วยซ้ำของแอนไฮโดรกลูโคส (Anhydroglucose) เชื่อมโยงด้วยพันธะโคเวเลนต์ที่ตำแหน่งแอลฟา-ดี-1-4 (α -D-(1-4)) อาจมีหน่วยซ้ำของหน่วยแอนไฮโดรกลูโคสได้ตั้งแต่ 100-6000 หน่วย



รูปที่ 2.13 โครงสร้างของอะไมโลส [19]

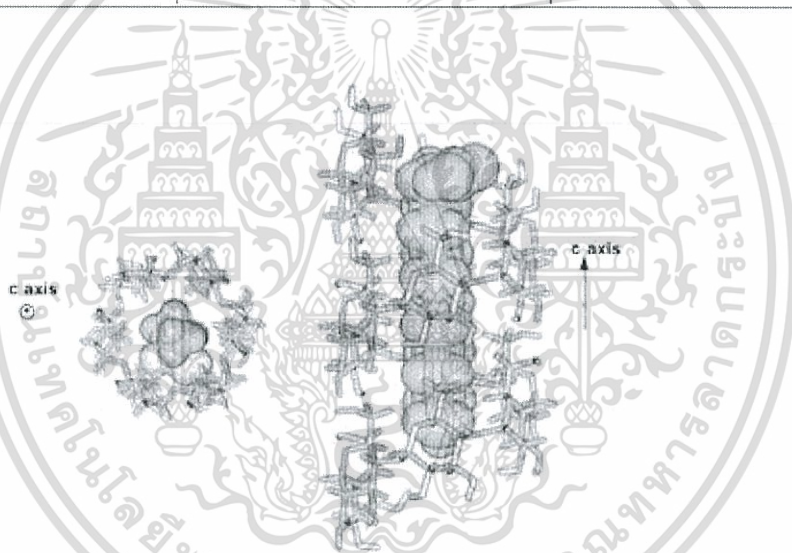
เนื่องจากอะไมโลสมีโครงสร้างสายโซ่พอลิเมอร์แบบเชิงเส้นมีส่วนที่ชอบน้ำ (Hydrophilic) และไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) อยู่ด้วยเช่น แอลกอฮอล์ (Alcohol) ที่มีสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนยาวจึงสามารถมีโครงสร้างบิดเกลียว (Helical conformation) เกิดเป็นช่องว่างทำให้ดูดซับน้ำและเกิดเป็นไมเซลล์ (Mice Cell) ในน้ำได้ และล้อมรอบโมเลกุลของไอโอดีน (Iodine) เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน โดยสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างอะไมโลสกับไอโอดีนจะให้สารละลายสีน้ำเงินเข้ม เมื่อนำไปวัดความเข้มสีหรือวัดศักย์ไฟฟ้า สามารถหาปริมาณอะไมโลสในแป้งได้ หรือการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างอะไมโลสกับบิวทานอลและสารอินทรีย์ที่มีส่วนชอบน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประเภทอื่น สามารถแยกอะไมโลสกับอะไมโลเพกตินออกจากกันได้ด้วยกระบวนการเลือกตกตะกอน

ตารางที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวของอะไมโลสและสีของสารประกอบเชิงซ้อนของอะไมโลสกับไอโอดีน [19]

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

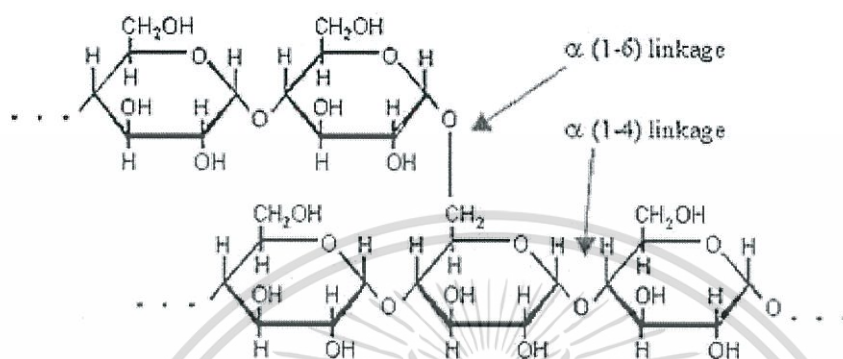


รูปที่ 2.14 ภาพจำลองการจับตัวของอะไมโลสกับสารอินทรีย์ [19]

โครงสร้างของอะไมโลสมีหมู่ไฮดรอกซิลจำนวนมากทำให้แป้งมีสมบัติชอบน้ำและกระจายตัวได้ดีในน้ำ เนื่องจากอะไมโลสมีโครงสร้างเชิงเส้นจึงจัดเรียงตัวชิดกัน ทำให้เกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลที่อยู่ติดกัน ความชอบน้ำของโมเลกุลอะไมโลสจะลดลง ทำให้ของผสมระหว่างอะไมโลสกับน้ำมีลักษณะโซล (Sol) ขุ่นมากขึ้น ในสภาวะที่สารละลายเจือจาง อะไมโลสมีแนวโน้มรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนแล้วตกตะกอน ในสภาวะที่สารละลายเข้มข้น อะไมโลสจะเกาะก่ซึ่งกันและกันแล้วไปรบกวนการจัดเรียงตัวของโมเลกุลจึงจัดเรียงตัวเป็นระเบียบได้แค่บางส่วน เกิดปริมาตรอิสระระหว่างสายโซ่จำนวนมาก ทำให้โมเลกุลของน้ำสามารถแทรกเข้าไปและสร้างพันธะไฮโดรเจนกับอะไมโลสเกิดเป็นโครงสร้างร่างแหสามมิติในรูปของเจล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อะไมโลเพกตินเป็นพอลิเมอร์สายโซ่กิ่งของหน่วยซ้ำแอนไฮโดรกลูโคส ซึ่งมีการเชื่อมโยงที่ตำแหน่ง แอลฟา-ดี-1-4 และที่ตำแหน่งคาร์บอนตัวที่ 6 ของหน่วยแอนไฮโดรกลูโคสด้วย ทำให้เกิดสายโซ่กิ่งขึ้น โดยทั่วไปทุกๆ 6-12 หน่วยจะพบสายโซ่กิ่งหนึ่งสาย แต่ละสายโซ่กิ่งจะมีหน่วยซ้ำของแอนไฮโดรกลูโคสประมาณ 12-15 หน่วยแต่ละหน่วยเชื่อมต่อกันด้วยโครงสร้างแบบ แอลฟา-ดี-1-4



รูปที่ 2.15 โครงสร้างของอะไมโลเพกติน [19]

อะไมโลเพกตินมีขนาดโมเลกุลใหญ่และมีสายโซ่กิ่งจำนวนมากทำให้ความสามารถในการเคลื่อนที่ของโมเลกุลลดลงและรบกวนการจัดเรียงตัวของโมเลกุล จึงเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลน้อย ของผสมระหว่างอะไมโลเพกตินกับน้ำในรูปของโซลจึงมีความใส มีเสถียรภาพและไม่เกิดเจลง่าย ทำให้อะไมโลเพกตินไม่สามารถเตรียมเป็นฟิล์มที่มีความแข็งแรงและยืดหยุ่นได้ การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับสารละลายไอโอดีนจะได้สารประกอบเชิงซ้อนสีม่วงน้ำตาล

ปริมาณอะไมโลสขึ้นอยู่กับชนิดของแป้ง เช่น แป้งข้าวโพด แป้งมันฝรั่ง และแป้งมันสำปะหลังจะพบอะไมโลสประมาณ 18-28 เปอร์เซ็นต์ และอาจมีการตัดแปรรูปให้มีปริมาณ อะไมโลสต่างไปจากค่าปกติ เช่น แป้งตัดแปรรูปจากข้าวโพด (Waxy corn) มีปริมาณอะไมโลสน้อยหรือแทบไม่มีเลย

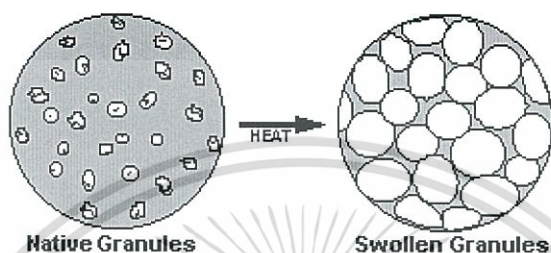
2.5.3 สมบัติของแป้ง

1. การพองตัวและการละลาย (Swelling and solubility)

แป้งไม่ละลายในน้ำเย็นแต่จะดูดซึมน้ำไว้ได้ประมาณ 25-30 เปอร์เซ็นต์ และพองตัวน้อยมากจนไม่สังเกตเห็นได้ ทั้งนี้เนื่องจากการจัดเรียงตัวกันระหว่างโมเลกุลของอะไมโลสและอะไมโลเพกติน ภายในเม็ดแป้งในส่วนผลึก (Crystallite) โมเลกุลอยู่กันอย่างหนาแน่นและเป็นระเบียบ ช่วยป้องกันการกระจายตัวและทำให้ไม่ละลายในน้ำเย็น ส่วนของอสัณฐาน (Amorphous) ซึ่งเป็นส่วนที่เกาะเกี่ยวกันอย่างหลวมๆ ไม่เป็นระเบียบและมีหมู่ไฮดรอกซิลอิสระมาก สามารถเกิดปฏิกิริยาการรับน้ำ (Hydration) ได้บ้างเมื่อน้ำเย็น เมื่อให้ความร้อนกับน้ำแป้งจะมีอุณหภูมิสูงขึ้นประมาณ 60 องศาเซลเซียส (°C) ขึ้นไป ส่วนอสัณฐานจับกับน้ำได้มากขึ้นและการจับกันของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โมเลกุลในส่วนผลึกเริ่มคลายความหนาแน่นลง โมเลกุลส่วนที่เริ่มคลายตัวออกจากกันจับกับน้ำทำให้เม็ดแป้งพองตัวเพิ่มขึ้น โมเลกุลในส่วนผลึก ที่เหลืออยู่เกิดสภาพคล้ายร่างแหเรียกว่า Micelle network ซึ่งยึดเหนี่ยวกันไว้ทำให้เม็ดแป้งยังคงสภาพอยู่ได้ แต่อาจมีโมเลกุลของอะไมโลสและอะไมโลเพกตินซึ่งมีขนาดเล็กและอิสระกระจายตัวออกจากเม็ดแป้ง เมื่อทำให้อุณหภูมิน้ำแป้งสูงขึ้นไปอีก ส่วนผลึก ที่เหลืออยู่นี้จะคลายตัวออกทำให้เม็ดแป้งพองมากขึ้นและโมเลกุลแป้งอยู่ในสภาพสารละลายมากขึ้น



รูปที่ 2.16 การพองตัวของเม็ดแป้ง [19]

ตารางที่ 2.4 ผลของการดูดซับน้ำต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดแป้งและปริมาณการดูดซับน้ำของแป้งชนิดต่างๆ [19]

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

2.การเกิดเจลาตินในเซซัน(Gelatinization)

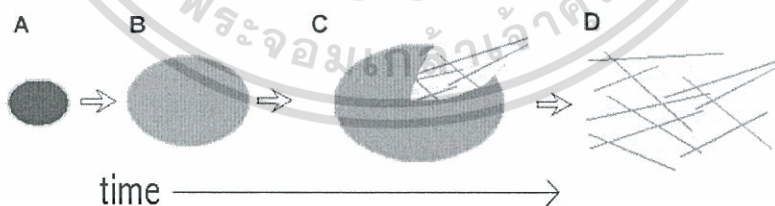
เจลหรือเจลลี่ (Jelly) ต่างๆเป็นสารที่พองตัวได้ง่ายในน้ำสามารถขยายตัวได้หลายเท่าของปริมาตรตัวเองเพราะน้ำทำให้เกิดโครงสร้างร่างแหสามมิติเจลลี่เป็นพวกอะกาโรส (Agarose) คาราจีแนน (Caragenan) ซึ่งมาจากสาหร่าย หรือพวก เด็กซ์ทรานส์ (Dextran) ซึ่งตัดแปรมาจากแป้ง เช่น ซีฟาเด็กซ์ (Sephadex) ต่างๆ ความสามารถในการจับกับน้ำขึ้นอยู่กับหมู่ไฮดรอกซิล และหมู่ที่มีประจุลบ ความสามารถในการอุ้มน้ำของ โมเลกุลเหล่านี้ขึ้นอยู่กับว่าได้จับกับ แคทไอออน (Cationic) อะไรบั้ง ซึ่งแคทไอออนเหล่านี้จะเป็นตัวช่วยให้อุ้มน้ำเพิ่มขึ้นด้วย

กลไกการเกิดเจลาตินในเซซัน

เมื่อนำแป้งใส่ในน้ำเย็น เม็ดแป้งดูดซับน้ำได้ในปริมาณจำกัดปริมาณหนึ่ง แต่จะยังไม่พองตัวหรือพองตัวได้จำกัดและสังเกตได้ยาก การพองตัวของเม็ดแป้งสาธิตในน้ำที่อุณหภูมิห้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์เพื่อการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นประโยชน์ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พบว่าแป้งที่พองตัวมีเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มขึ้น 10 เปอร์เซ็นต์และปรากฏการณ์นี้สามารถผันกลับได้ (Reversible) โดยเมื่อนำไปอบแห้งก็จะได้แป้งที่มีลักษณะและคุณสมบัติดั้งเดิม ทั้งนี้เนื่องจากโมเลกุลอะไมโลสและอะไมโลเพกตินในส่วนที่เป็นผลึก (Crystallite) จับตัวกันอย่างหนาแน่นแข็งแรงจึงไม่ละลายในน้ำเย็น แต่น้ำอาจจะซึมเข้าไปในส่วนของเม็ดแป้งซึ่งไม่เป็นระเบียบและมีกลุ่มไฮดรอกซิลอิสระได้บ้าง แต่เมื่อให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิหนึ่งประมาณ 60-75 องศาเซลเซียส หรือใช้สารเคมี เช่น ให้ความร้อน 60 องศาเซลเซียสแก่แป้งสาธิตจะมีผลทำให้การจับยึดกันระหว่างโมเลกุลของแป้งในส่วนผลึกลดลง เกิดปฏิกิริยาการรับน้ำและการพองตัวของเม็ดแป้งซึ่งไม่สามารถผันกลับได้ (Irreversible) และทำให้สารละลายแป้งมีความหนืดและความใสเพิ่มขึ้น กระบวนการนี้เรียกว่า “เจลาติไนเซชัน” ซึ่งเมื่อตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์พบว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพที่สำคัญขึ้นคือ มีการพองตัวของเม็ดแป้งและเครื่องหมายกากบาท (Maltese cross) ภายในเม็ดแป้งหายไป อุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนแปลงในลักษณะนี้จะเปลี่ยนแปลงไปตามชนิดของแป้ง เนื่องจากแป้งแต่ละชนิดมีโครงสร้างส่วนผลึกที่แตกต่างกัน ทั้งระดับการจับกัน (Degree of association) และความสม่ำเสมอของการเกิดเจลาติไนซ์ไม่พร้อมกันทุกเม็ด แม้แต่ในแป้งชนิดเดียวกันจากแหล่งเดียวกันก็ตาม อาจมีช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลาติไนซ์ที่ห่างกันถึง 8-10 องศาเซลเซียส โดยทั่วไปเม็ดแป้งขนาดใหญ่จะเกิดเจลาติไนซ์ได้ก่อนขนาดเล็กแต่เมื่อใช้เครื่องสแกนนิ่งอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope; SEM) ส่องดูโครงสร้างของเม็ดแป้งข้าวบาร์เลย์ซึ่งมีเม็ดแป้งขนาดเล็กอยู่ประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์พบว่าการสูญเสียเครื่องหมายกากบาทจะเกิดขึ้นได้พร้อมๆ กัน แป้งอาจเกิด เจลาติไนซ์ ได้ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสโดยการละลายในตัวทำละลาย (Solvent) เช่น เบส และแคลเซียมคลอไรด์ (Calcium chloride; CaCl_2)



รูปที่ 2.17 การเปลี่ยนแปลงของเม็ดแป้งขณะให้ความร้อน [19]

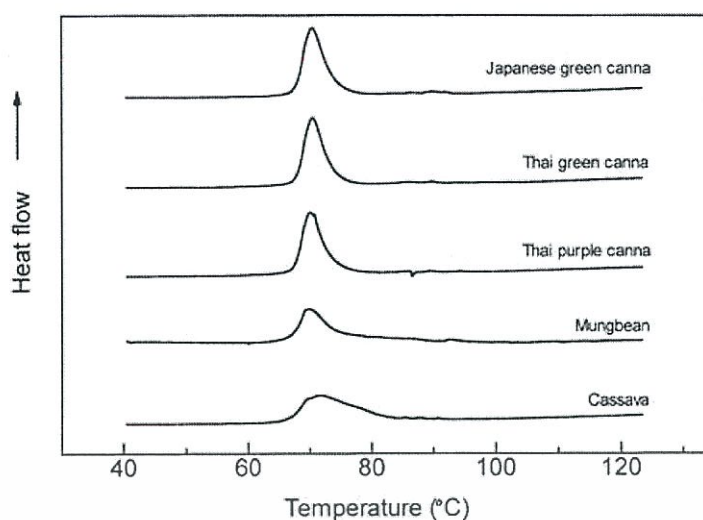
ตารางที่ 2.5 อุณหภูมิการเกิดเจลของแป้งชนิดต่างๆ[19]

ชนิดของแป้ง	อุณหภูมิการเกิดเจล (°C)
แป้งข้าวโพด	62-73
แป้งคัดแปรจากข้าวโพด	62.5-72
แป้งข้าวโพด	67-92
แป้งข้าวฟ่าง	68-75
แป้งคัดแปรจากข้าวฟ่าง	67.5-74
แป้งมันฝรั่ง Idaho	56-67
แป้งมันฝรั่ง Maine	59-67.5
แป้งมันสำปะหลัง	58.5-70
แป้งข้าวสาลี	58-64
แป้งข้าวเจ้า	68-78
แป้งข้าวฟ่าง	68-78
แป้งมันเทศ	58-72
แป้งปาล์มสาธุ	60-72
แป้งท้าวขาม่อม	62-70

การตรวจสอบช่วงอุณหภูมิช่วงเจลาคิโนเซชัน

วิธีที่ง่ายและแม่นยำ คือ วัดอุณหภูมิที่เม็ดแป้งสูญเสียเครื่องหมายกากบาทเมื่อให้ความร้อนกับน้ำแป้งเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ตรวจสอบโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบซึ่งเป็นกล้องจุลทรรศน์ที่มีระบบการให้ความร้อนแก่ตัวอย่างน้ำแป้งบนแผ่นสไลด์อย่างต่อเนื่องในอัตรา 2 องศาเซลเซียสต่อนาที เมื่อมองผ่านแสงโพลาไรซ์ (Polarize) พบว่าจุดเริ่มต้นของการเปลี่ยนแปลงที่เห็นคือ เม็ดแป้งประมาณ 2 เปอร์เซ็นต์ เริ่มพองตัวและสูญเสียเครื่องหมายกากบาท ที่จุดนี้เป็นจุดเริ่มต้นของการเกิดเจลาคิโนเซชัน (Initial of gelatinization) เมื่อเม็ดแป้งในตัวอย่างสูญเสียเครื่องหมายกากบาทไป 50 เปอร์เซ็นต์ จะเรียกเป็นจุดกลางของเจลาคิโนเซชัน (Midpoint of gelatinization) และเมื่อเม็ดแป้งในตัวอย่างสูญเสียเครื่องหมายไปประมาณ 98 เปอร์เซ็นต์ จะเรียกเป็นจุดสุดท้ายของเจลาคิโนเซชัน (Final of gelatinization หรือ Completion point) ดังนั้นส่วนใหญ่มักแสดงช่วงอุณหภูมิเจลาคิโนเซชันของแป้งเป็นตัวเลขชุด แต่ถ้าวัดเป็นอุณหภูมิเดียวมักเป็นจุดสุดท้ายของเจลาคิโนเซชัน (Birefringence end point temperature; BEPT)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.18 เทอร์โมแกรมของแป้งชนิดต่างๆ[19]

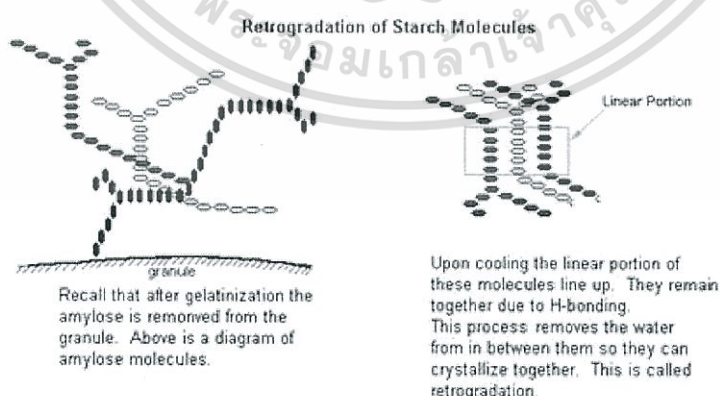
นอกจากการใช้การสังเกตการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างไบรฟรินเจนซ์ (Birefringence) ภายใต้กล้องจุลทรรศน์แล้วยังสามารถตรวจสอบอุณหภูมิในการเกิดเจลาติไนซ์โดยใช้เครื่องมือที่วัดและบันทึกปริมาณความร้อนที่เปลี่ยนแปลงระหว่างกระบวนการ เช่น เครื่องดีฟเฟอร์เรลเซียลสแกนนิ่ง แคลลอรیمیเตอร์ (Differential scanning calorimeter; DSC) ซึ่งใช้ติดตามการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพ หรือทางเคมีของวัสดุในรูปฟังก์ชันของปริมาณความร้อนที่เปลี่ยนแปลงกับอุณหภูมิ ปกติโพลีเมอร์ต่างๆในรูปผลึกและอสัณฐานจะเกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะได้เมื่อได้รับความร้อน แป้งก็เช่นเดียวกันในสภาพที่มีน้ำน้อย เมื่อให้ความร้อนจะมีอุณหภูมิหลอมละลาย (Melting point; T_m) ที่สูงมาก กล่าวคือในช่วงของ 160 ถึง 200 องศาเซลเซียส แต่เมื่อเพิ่ม ปริมาณน้ำมากขึ้นอุณหภูมิของการหลอมละลายก็จะลดลง เมื่อปริมาณน้ำมีประมาณ 70เปอร์เซ็นต์ แป้งจะเกิดเจลาติไนเซชันโดยทั่วไปจะถือว่าอุณหภูมิที่มีการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีสูงสุดแสดงถึงอุณหภูมิในการเกิดเจลาติไนเซชัน สำหรับการตรวจสอบการเกิด เจลาติไนเซชันของแป้งโดยใช้เครื่องดีฟเฟอร์เรลเซียล สแกนนิ่ง แคลลอรیمیเตอร์ ทำได้โดยการให้ความร้อนแก่ตัวอย่างแป้งกับน้ำในอัตรา 30/70 จนถึงอุณหภูมิที่คาดว่าเลขช่วงในการเกิดเจลาติไนเซชัน จะได้เทอร์โมแกรม (Thermogram) ซึ่งเป็นกราฟระหว่าง Heat flow และอุณหภูมิ พลังงานที่ใช้ในการเกิดเจลาติไนเซชันได้จากพื้นที่ใต้กราฟหารด้วยน้ำหนักแป้งตัวอย่าง

ตารางที่ 2.6 ลักษณะเฉพาะของการเกิดเจลของแป้งธรรมชาติ[19]

Starch	Pasting temperature °C	Average Peak viscosity 5% starch Brabender Unit	Swelling power by weight at 95 °C	Solubility at 95 °C (%)
มันฝรั่ง	60-65	3000	1153	82
ข้าวโพด	75-80	600	24	25
สาลี	80-85	300	21	41
มันสำปะหลัง	60-65	1000	71	48

3.การคืนตัวของแป้งสุก(Retrogradation)

การคืนตัวของแป้งสุกเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเมื่อน้ำแป้งสุกซึ่งร้อนมีอุณหภูมิลดต่ำลงขณะที่อุณหภูมิลดลง โมเลกุลอิสระของอะไมโลสซึ่งอยู่ใกล้กันจะเคลื่อนที่เข้ามาใกล้กันและจับตัวกันด้วยพันธะ ทำให้เกิดสภาพการจัดเรียงตัวของโมเลกุลขึ้นใหม่ โดยเปลี่ยนจากลักษณะการกระจายตัวของโมเลกุลมาเป็นส่วนที่เป็นผลึกซึ่งสามารถตรวจสอบได้โดยใช้เทคนิคเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน (X-ray diffraction; XRD) ถ้าน้ำแป้งสุกมีความเข้มข้นต่ำ การจัดเรียงตัวของโมเลกุลเหล่านี้จะทำให้เกิดลักษณะตะกอนขุ่นขาว แต่ถ้าน้ำแป้งสุกมีความเข้มข้นสูง เช่น แป้งข้าวโพด ความเข้มข้น 7 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก จำนวนโมเลกุลที่มาจัดเรียงตัวกันใหม่มีมากและระหว่างเคลื่อนที่เข้ามาจับกันจะสามารถเก็บกักน้ำไว้ได้ ทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้น และในที่สุดเกิดลักษณะเจลที่อ่อนนุ่ม



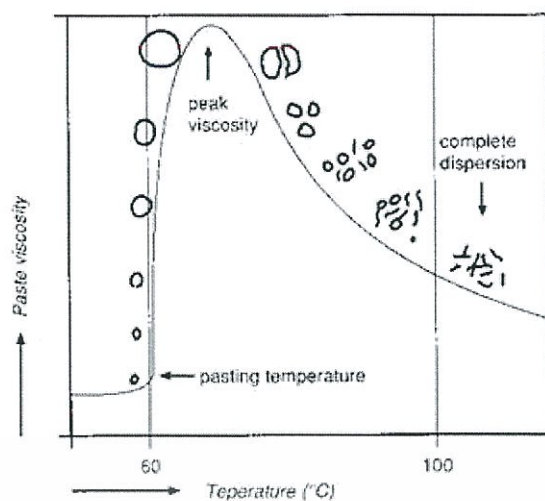
รูปที่ 2.19 การคืนตัวของแป้งสุก [19]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคืบตัวของน้ำแป้งโดยทั่วไปจะเกิดได้ดีเมื่อน้ำแป้งมีความเข้มข้นสูง และทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิต่ำ แป้งแต่ละชนิดมีอัตราการคืบตัวของน้ำแป้งแตกต่างกัน โดยทั่วไปแป้งจากรากหัวมีอัตราการคืบตัวช้ากว่าแป้งจากธัญพืช ทั้งนี้เป็นเพราะแป้งจากรากหรือหัว เมื่อได้รับความร้อนจะพองตัวมากและเร็ว และเมื่อดแป้งแตกง่าย ทำให้โมเลกุลแป้งทั้งหมดกระจายอยู่ทั่วไปในน้ำแป้ง ยากที่โมเลกุลอะไมโลสจะมาจัดเรียงตัวกันได้ใหม่ แต่แป้งจากธัญพืช เมื่อได้รับความร้อนจะพองตัวน้อยกว่า เม็ดแป้งแตกน้อย โมเลกุลที่คลายตัวยังอยู่ใกล้ชิดกันจึงเคลื่อนที่จับกันใหม่ได้ง่าย ซึ่งอาจจับตัวกันระหว่างเม็ดแป้งที่พองตัวซึ่งอยู่ใกล้กัน หรือระหว่างชิ้นส่วนของเม็ดแป้งหรือโมเลกุลอะไมโลสอิสระที่หลุดออกมา ทำให้เกิดสภาพเป็นเมทริกซ์ (Matrix) ซึ่งยึดอยู่ด้วยกันด้วยพันธะไฮโดรเจน และสามารถเก็บกักน้ำไว้ได้ การมีอะไมโลเพกตินอยู่ด้วยทำให้อัตราการคืบตัวของน้ำแป้งช้าลง เนื่องจากโมเลกุลของอะไมโลเพกตินมีกิ่งก้านสาขาทำให้เกาะกะ ยากที่โมเลกุลจะเคลื่อนที่เข้ามาจับกันใหม่ได้ จึงพบว่าแป้งประเภทที่มีการเชื่อมโยง (Waxy) มีอัตราการคืบตัวของน้ำแป้งช้ากว่าแป้งชนิดอื่น ขนาดโมเลกุลของอะไมโลสในแป้งแต่ละชนิดมีผลในการเกิดการคืบตัวของน้ำแป้งอีกด้วย โมเลกุลอะไมโลสที่มีขนาดพอเหมาะในการเคลื่อนที่มาจับกัน คือ ในช่วง 100-200 หน่วยกลูโคส ถ้าโมเลกุลใหญ่ เช่น แป้งมันฝรั่งมีอะไมโลสขนาดใหญ่ประมาณ 1,000-6,000 หน่วยกลูโคส จะเคลื่อนที่เข้ามาจับกันได้ยาก และถ้าโมเลกุลสั้นเกินไปจะเคลื่อนไหวอยู่ตลอดเวลา (Brownian movement) ทำให้จับกันยากเช่นกัน

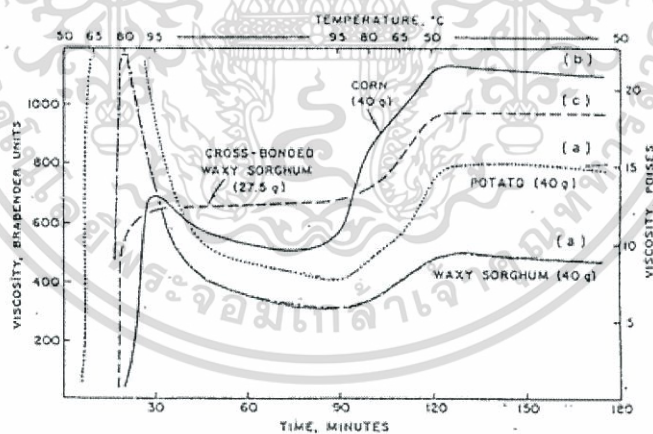
4. ความหนืด (Viscosity)

เป็นสมบัติที่สำคัญและเป็นประโยชน์มากที่สุดของแป้ง เมื่อให้ความร้อนกับน้ำแป้งทำให้เม็ดแป้งเกิดการพองตัวและมีความหนืดมากขึ้นพฤติกรรมความหนืดเป็นคุณสมบัติเฉพาะตัวและแตกต่างกันไปตามชนิดและสายพันธุ์ของแป้ง เมื่อเม็ดแป้งซึ่งแขวนลอยในน้ำได้รับความร้อนจนถึงระดับหนึ่งจะพองตัวได้อย่างรวดเร็ว ทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้นเร็วมาก อุณหภูมิที่ความหนืดเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วนี้เรียกว่าอุณหภูมิพลาสติง (Pasting temperature) ความหนืดจะเพิ่มขึ้นจนถึงความหนืดสูงสุด (Peak viscosity) จากนั้นอาจลดลงหรือคงที่ขึ้นกับชนิดของแป้ง การที่แป้งมีความหนืดสูงสุดเนื่องจากเมื่อเม็ดแป้งมีการพองตัวมากขึ้น และมีชิ้นส่วนของเม็ดแป้ง และหรือ โมเลกุลของอะไมโลสและอะไมโลเพกตินบางส่วนที่แตกสลายออกมาอยู่ในสารละลาย เมื่อส่วนที่แตกสลายและละลายออกมามีมากกว่าการพองตัวที่เพิ่มความหนืดจะเริ่มลดลง ซึ่งจะเห็นได้ชัดเมื่ออยู่ในช่วงการหุงต้มที่ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ดังนั้นค่าความหนืดของน้ำแป้งสูงจะเป็นผลมาจากการพองตัวของเม็ดแป้งและการแตกหักของเม็ดแป้งร่วมกับการละลายออกมาของโมเลกุลแป้ง



รูปที่ 2.20 การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งเมื่อให้ความร้อน [19]

เมื่อลดอุณหภูมิของโมเลกุลอิสระที่กระจัดกระจายออกมา (โดยเฉพาะส่วนของอะไมโลส) ถ้ามีขนาดโมเลกุลที่เหมาะสมคือไม่สั้นและยาวเกินไปก็จะสามารถเคลื่อนที่เข้ามาจับกัน และกักน้ำไว้ได้ทำให้ความหนืดสูงขึ้นอีก ความหนืดที่กลับสูงขึ้นนี้อีกนี้เรียกว่าเซตแบค (Setback) และปรากฏการณ์นี้ก็คือการคืนตัวของแป้ง ปัจจัยที่มีผลต่อความหนืดได้แก่ ชนิดของแป้ง ขนาดอนุภาค สัดส่วนของอะไมโลสต่ออะไมโลเพคตินแต่ปัจจัยที่มีผลมากที่สุดได้แก่ ชนิดของแป้ง



รูปที่ 2.21 รูปแบบความหนืดของแป้งสุกชนิดต่างๆ [19]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมบัติและข้อจำกัดของแป้ง

1. ไม่ละลายในน้ำเย็น
2. ถ้าให้ความร้อนกับแป้งที่ผสมกับน้ำที่อุณหภูมิไม่ต่ำกว่าอุณหภูมิการเกิดเจลแป้งจะเกิดเจลแล้วไม่กลับคืนรูปเดิม (Irreversible swelling)
3. โครงสร้างของแป้งไม่ทนต่ออุณหภูมิสูงอุณหภูมิและความร้อนและถ่ายเทความร้อนได้ยากการผสมแป้งในปริมาณมากๆ อาจเกิดการไหม้ กลายเป็นฟองของคาร์บอนไดออกไซด์
4. โครงสร้างของแป้งไม่ทนกรด และทนแรงเค้นต่ำ
5. แป้งสามารถบดระนาบแสงโพลาไรซ์ได้ เรียกว่า สมบัติไบร์พรินเจนซ์ แสดงถึง โครงสร้างที่มีความเป็นผลึกของเม็ดแป้ง
6. แป้งสามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับไอโอดีนได้

2.5.4 แป้งมันสำปะหลัง [20]

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

ในปี พ.ศ. 2548 ประเทศไทยผลิตมันสำปะหลังสดได้ทั้งหมด 16.94 ล้านตัน คิดเป็นร้อยละ 8 ของผลผลิตมันสำปะหลัง โลกและจัดเป็นผู้ผลิตหัวมันสำปะหลังสดเป็นอันดับที่ 4 รองจากไนจีเรีย บราซิล และอินโดนีเซีย มันสำปะหลังสดร้อยละ 73.5 ถูกส่งออกในรูปของมันอัดเม็ด มันเส้น และแป้งดิบ และเป็นประเทศผู้ส่งออกผลิตภัณฑ์มันสำปะหลังเป็นอันดับ 1 ของโลก ประมาณ 4.6 ล้านตันหรือคิดเป็นสัดส่วนตลาดร้อยละ 85.5 คิดเป็นมูลค่าการส่งออกมากกว่า 30,000 ล้านบาท โดยส่งออกให้ประเทศจีน และได้หวัน เป็นต้น ส่งผลให้มันสำปะหลังเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญชนิดหนึ่งของประเทศไทย มันสำปะหลังส่วนที่เหลืออีกร้อยละ 26.5 นั้นใช้บริโภคภายในประเทศ ซึ่งเกือบทั้งหมดถูกใช้ในรูปของแป้งดิบและนำไปแปรรูปในอุตสาหกรรมต่างๆ ได้แก่ อุตสาหกรรมผงชูรส อุตสาหกรรมไลซีน อุตสาหกรรมสารให้ความหวาน อุตสาหกรรมกระดาษ อุตสาหกรรมทอผ้า เป็นต้น อย่างไรก็ตามความต้องการมันสำปะหลังเพื่อตลาดส่งออกเป็นปัจจัยหลักต่อธุรกิจมันสำปะหลังของไทยในปัจจุบัน

แป้งมันสำปะหลัง ผลิตได้จากรากที่มีลักษณะคล้ายหัวของต้นมันสำปะหลัง มีชื่อเรียกทางวิทยาศาสตร์ว่า มานีฮอต อัลติลิสซิสมา (Manihot utilisissima) ในภาษาอังกฤษจะเรียกมันสำปะหลังว่า คาซาวา สตาร์ช (Cassava starch) เป็นส่วนของรากที่โตขึ้นสำหรับสะสมแป้ง หัวมันสำปะหลังสดมีน้ำอยู่ประมาณ 60-65 เปอร์เซ็นต์ และส่วนประกอบส่วนใหญ่คือแป้งหรือคาร์โบไฮเดรตประมาณ 20-35 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นหัวมันสำปะหลังจึงเป็นแหล่งคาร์โบไฮเดรตที่ให้พลังงานใน

อาหารของคน และสัตว์ แต่มีปริมาณ โปรตีนและไขมันน้อยมากไม่เหมาะที่จะใช้เป็นแหล่งของ โปรตีน และไขมัน การนำห้วมันสำปะหลังไปใช้มักจะทำให้แห้ง เพื่อลดความชื้นลงเสียก่อน เช่น มันเส้น มันอัดเม็ดหรือสกัดเฉพาะส่วนของแป้งออกจากห้วมันสำปะหลัง ซึ่งมีองค์ประกอบทางเคมี ดังตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 องค์ประกอบทางเคมีของแป้งมันสำปะหลัง โดยทั่วไป [20]

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

สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของแป้งมันสำปะหลัง

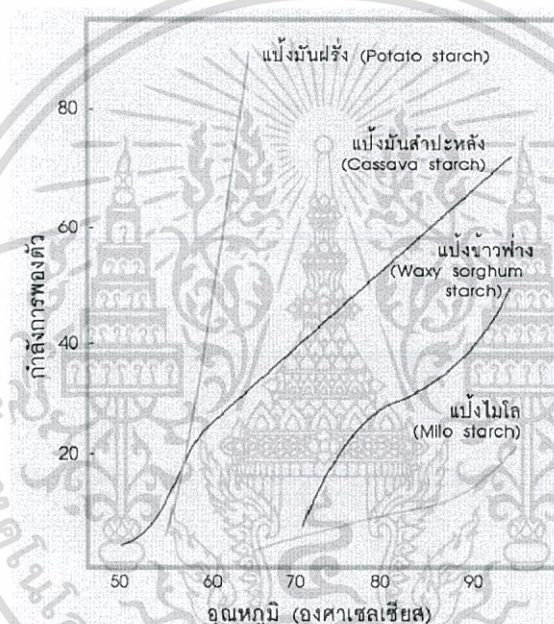
เม็ดแป้งมันสำปะหลังมีลักษณะคล้ายรูปถ้วยมีความยาวเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 ถึง 35 ไมครอน เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยโดยจำนวน (Number average diameter) เท่ากับ 20 ไมครอน เมื่อตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงโพลาไรซ์จะเห็นลักษณะกากบาทสีดำเรียกว่า ไบรฟ์พริเนนซ์



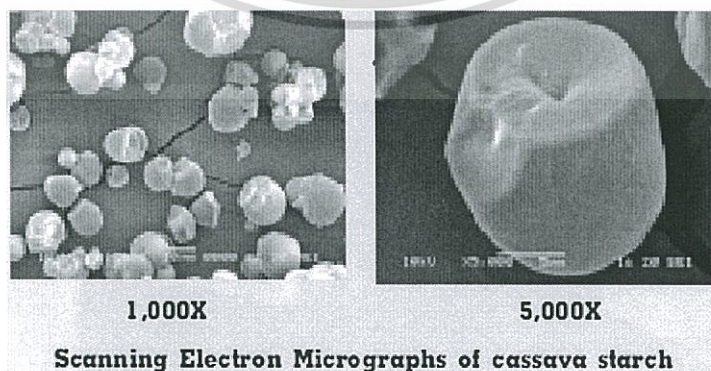
รูปที่ 2.22 ลักษณะ Birefringence ของแป้งมันสำปะหลัง [20]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภายในเม็ดแป้งประกอบด้วยอะไมโลส และอะไมโลเพกติน ซึ่งมีการจัดเรียงตัวต่างกัน แบ่งได้เป็น 2 แบบ แบบแรก สายพอลิเมอร์ของอะไมโลสเรียงตัวขนานกันอย่างเป็นระเบียบมีอะไมโลสบางส่วนเรียงขนานกับส่วนที่เป็นสายโซ่ตรงส่วนนอกของอะไมโลเพกติน และยึดติดกันด้วยพันธะไฮโดรเจนทำให้โมเลกุลบริเวณนี้จับกันอย่างหนาแน่น และแรงยึดเหนี่ยวสูง บริเวณนี้เรียกว่า ผลึกหรือไมเซลล์ (Micells) เป็นส่วนสำคัญที่ทำให้เกิดลักษณะไบร์พรินเจนซ์ ของเม็ดแป้ง ผลึกนี้มีความสามารถในการดูดน้ำและพองตัวต่ำมาก ส่วนแบบที่สอง โมเลกุลเรียงตัวกันอย่างไม่เป็นระเบียบ แรงดึงดูดระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ของอะไมโลส และอะไมโลเพกตินต่ำกว่าแบบแรก บริเวณที่มีการจัดเรียงตัวของโมเลกุลเหล่านี้เรียกว่า ออสัญฐานเป็นส่วนใหญ่ที่ดูดน้ำได้ดี และพองตัวได้ง่ายกว่า



รูปที่ 2.23 การพองตัวของแป้งชนิดต่างๆ [20]



รูปที่ 2.24 SEM ของแป้งมันสำปะหลัง [20]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Poly(vinyl alcohol); PVA) [21]

พอลิไวนิลแอลกอฮอล์เป็นเทอร์โมพลาสติกประเภทพอลิโอเลฟินเป็นผงสีขาวจนถึงครีม

2.6.1 การผลิต

พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ผลิตจากพอลิไวนิลแอะซีเตต(Poly(vinyl acetate)PVAc) ในสถานะที่เป็นกรดหรือเบส มีหลายเกรดตามความหนืด ซึ่งขึ้นอยู่กับดีกรีของพอลิเมอไรเซชัน (Polymerization) และเปอร์เซ็นต์ของแอลกอฮอล์ไฮซิส(Alcoholysis)

2.6.2 สมบัติทางเคมี

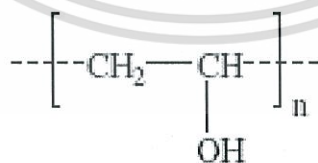
พอลิไวนิลแอลกอฮอล์จะสามารถละลายน้ำได้มากขึ้นเมื่อน้ำหนักโมเลกุลลดลง และความแข็งแรงการดึงยึด ความทนต่อการฉีกขาด และโค้งงอดีขึ้นเมื่อน้ำหนักโมเลกุลเพิ่มขึ้น

2.6.3 ประโยชน์ของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์

พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ใช้ประโยชน์ในการแต่งเส้นใยและเส้นด้าย เป็นสารทำให้ขุ่น และสารช่วยลดแบบของพลาสติกหล่อ เป็นกาวที่ใช้ในเครื่องสำอางค์ เซรามิก หนังสัตว์ ฝ้า และกระดาษพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ สามารถย่อยสลายได้โดยวิธีชีวภาพ และติดไฟได้คล้ายกระดาษ การใช้งานของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ แบ่งออกเป็น 2 ลักษณะคือ

1.อาศัยคุณสมบัติการละลายในน้ำ เช่น ใช้เป็นตัวช่วยทำให้ระบบอิมัลชัน และแขวนลอยต่างๆ ข้นขึ้น (ใช้เป็น Thickening agent) และใช้ทำแผ่นฟิล์มเคลือบกระดาษซึ่งมีความใสเหนียว และทนต่อการขีดข่วน

2.นำพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ไปทำปฏิกิริยาเคมีให้ไม่สามารถละลายแล้วจึงนำมาใช้งาน ซึ่งพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ไม่ละลายในน้ำนี้สามารถดูดน้ำและความชื้นได้เป็นอย่างดี (ประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) จึงใช้เป็นเส้นใยแทนฝ้ายได้ ฝ้ายที่ทำด้วยเส้นใยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์นี้ สวมใส่สบาย ซักง่าย ทนทานต่อการสึกหรอ และสามารถคงรูปได้เป็นอย่างดี



รูปที่ 2.25 โครงสร้างโมเลกุลของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ [21]

2.7 อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO) [22]

ซิงค์ออกไซด์ เป็นสารเคมีชนิดหนึ่งที่มีลักษณะเป็นผงละเอียดสีขาวขุ่น ละลายน้ำได้น้อยมาก มีความเป็นเบสเล็กน้อย มีลักษณะโครงสร้างเป็นรูปหกเหลี่ยมดังรูปที่ 2.25 เมื่อนำมาเผาที่อุณหภูมิถึง 500 องศาเซลเซียส สีจะเปลี่ยนเป็นสีเหลืองและจะกลับเป็นสีเดิมอีกเมื่อเย็นลง

ซิงค์ออกไซด์มีสมบัติที่ดีหลายประการ คือ มีขนาดอนุภาคที่เล็กมากประมาณ 0.1-0.3 ไมครอน อนุภาคเรียงตัวอย่างหนาแน่นจึงทึบแสง เป็นสารที่ใช้ยับยั้งแบคทีเรีย (Antibacteria) ไม่มีความเป็นพิษต่อร่างกาย นอกจากฆ่าแบคทีเรียแล้วยังช่วยป้องกันและยับยั้งการแบ่งเซลล์ของ

แบคทีเรีย ด้วยเหตุผลนี้ซิงค์ออกไซด์จึงเป็นหนึ่งในสารที่สำคัญในการเป็นยาต้านแบคทีเรีย สามารถป้องกันรังสีรังสีอัลตราไวโอเลตระดับคลื่นอันไม่พึงประสงค์ มีความจุความร้อนสูง จุดหลอมเหลวสูงสัมประสิทธิ์การขยายตัวต่ำ การนำความร้อนสูง สามารถกระทำให้มีความต้านทานต่อไฟฟ้าได้ จากสมบัติข้อนี้จึงได้มีการนำเอาซิงค์ออกไซด์มาผลิตเป็นสารเป็นสารกึ่งตัวนำ นอกจากนี้ยังเป็นสารแอมโฟเทอริก (Amphoteric) คือ สามารถละลายได้ทั้งในกรดและเบส ทำปฏิกิริยาได้ทั้งสารอินทรีย์และอนินทรีย์ ดังนั้นซิงค์ออกไซด์จึงเหมาะที่จะใช้เป็นตัวควบคุมความเป็นกรดและเบส คุณสมบัติของซิงค์ออกไซด์นาโน มีดังตารางที่ 2.8



รูปที่ 2.26 โครงสร้างของซิงค์ออกไซด์ [22]

ตารางที่ 2.8 คุณสมบัติของซิงค์ออกไซด์นาโนที่ผลิตได้ [22]

Product name	Zinc oxide nano partical
Molecular formula	ZnO
Molar mass	81.408 g/mol
Appearance	White solid
Crystal phase	Zincite (hexagonal)
Odor	odorless
Density	5.606 g/cm ³
Melting point	1975 °C (decomposes)
Boiling point	2360 °C

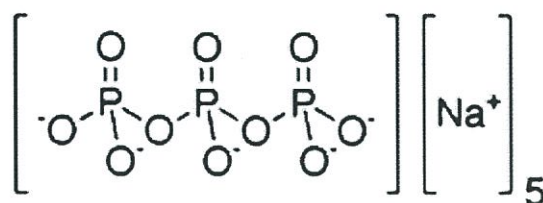
โดยกระบวนการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (Synthesis of ZnO nanoparticles)

มี 4 วิธี

- 1.) การตกตะกอนร่วม (Coprecipitation)
- 2.) โซล-เจล (Sol-gel)
- 3.) ไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal)
- 4.) การฉีดพ่นด้วยความร้อน (Flame spray pyrolysis)

2.8 Sodium tripolyphosphate (STPP) [23]

จัดเป็นสารในกลุ่มฟอสเฟต โมโนเอสเทอร์ ซึ่งเป็นสารฟอสเฟตในกลุ่มออร์โธฟอสเฟต (Orthophosphate) ประกอบด้วยฟอสฟอรัส 3 อะตอม มีลักษณะเป็นผงผลึกสีขาว สามารถละลายน้ำได้ดีกว่า STMP เมื่อละลายน้ำแล้วค่าพีเอช ไม่เปลี่ยนแปลง ทั้งนี้เนื่องจากโมเลกุลของสารมีลักษณะเป็นโซ่ยาว (Long chain) เมื่อนำมาใช้กับแป้งทำให้สมบัติของแป้งที่ได้มีคุณสมบัติในการเริ่มต้นความหนืดต่ำลง แป้งที่ได้มีลักษณะใส เหนียว และขึ้นหนืดสูง และยังลดการเกิดรีโทรเกรเดชันของแป้งเมื่อเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำ

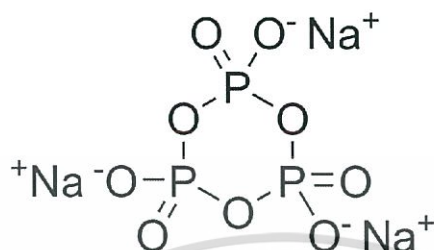


รูปที่ 2.27 โครงสร้างโมเลกุลของโซเดียมไตรพอลิฟอสเฟต[23]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9 Sodium trimetaphosphate (STMP) [24]

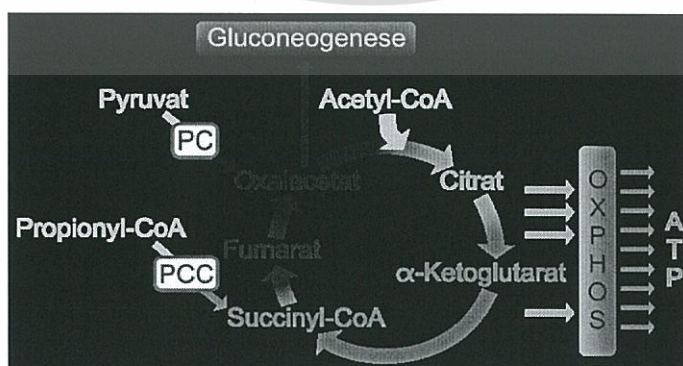
จัดเป็นสารในกลุ่มคอนเดนส์ฟอสเฟต(Condensed phosphate) ซึ่งมีการตัดเรียงตัวเป็นวงแหวนมีลักษณะเป็นผงผลึกสีขาว สามารถละลายน้ำได้ดี เมื่อละลายน้ำแล้วค่าพีเอช ไม่เปลี่ยนแปลง เมื่อนำมาใช้กับแป้งทำให้สมบัติของแป้งที่ได้มีความแข็งแรง ทนกรด ทนความร้อน



รูปที่ 2.28 โครงสร้างโมเลกุลของโซเดียมไตรเมตาฟอสเฟต[24]

2.10 Citric acid [25]

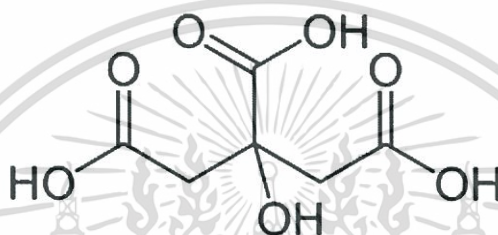
กรดซิตริกเป็นกรดอ่อนใช้ประโยชน์เพื่อการถนอมอาหารโดยมีบทบาทสำคัญ ในการเพิ่มรสชาติให้กับอาหารให้มีรสเปรี้ยว และมีกลิ่นหอมชวนรับประทาน ได้รับการยอมรับโดยทั่วไปว่ามีความปลอดภัยในการบริโภค สามารถเติมลงไปในการอาหารโดยไม่เกิดอันตราย และสามารถย่อยสลายได้ง่ายและไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม กรดซิตริกพบได้ตามธรรมชาติโดยทั่วไปในผักและผลไม้ที่มีรสเปรี้ยว โดยเฉพาะพืชตระกูลมะนาว สับปะรด และส้ม ซึ่งมีสัดส่วนกรดซิตริกเป็นองค์ประกอบสูง ในระยะแรก ๆ การผลิตกรดซิตริกโดยคั้นมะนาวโดยตรงเพื่อให้ได้น้ำมะนาวซึ่งมีส่วนประกอบที่มีกรดซิตริกประมาณร้อยละ 7-9 แต่ในปัจจุบันมีโรงงานผลิตกรดซิตริกจำนวนน้อยกว่า 100 โรงงาน ทั่วโลก ซึ่งนิยมผลิตด้วยวิธีการสังเคราะห์กรดซิตริกจากน้ำตาลกลูโคสผ่านวิถีไกลโคไลซิส (Glycolysis Pathway) ได้เป็นสารออกซาโลอะซิเตท (Oxaloacetate) แล้วสะสมเป็นกรดซิตริกโดยจุลินทรีย์ที่นิยมใช้ในการผลิตแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ เชื้อราและยีสต์



รูปที่ 2.29 การผลิตกรดซิตริกผ่านวิถีไกลโคไลซิสของจุลินทรีย์[25]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรดซิตริกมีคุณสมบัติที่สามารถใช้ประโยชน์ได้ในหลายทาง นิยมใช้ใน อุตสาหกรรมอาหารและเครื่องดื่ม เพื่อเป็นสารให้กลิ่น รส ในผลิตภัณฑ์อาหารแปรรูป นอกจากนั้นยังใช้เป็นสารลดความฟาด ลดการตกผลึกของน้ำตาลไม้ และสามารถควบคุมระดับค่าพีเอชในผลิตภัณฑ์อาหารทำให้จุลินทรีย์ที่เป็นโทษไม่สามารถเติบโตได้ จึงเป็นที่นิยมใช้เพื่อการถนอมอาหารและเครื่องดื่ม กรดซิตริกยังมีคุณสมบัติแก่น้ำกระด้าง โดยกรดซิตริกจะจับกับ โลหะหนัก ในน้ำโดยกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนกลายเป็นตะกอนด้วยคุณสมบัติดังกล่าว จึงนิยมนำมาใช้ในการทำสบู่ และน้ำยาล้างจาน และกรดซิตริกยังมีคุณสมบัติในการขัดคราบสนิม และคราบสกปรกที่พื้นและผนัง จึงนิยมนำมาใช้ขัดสนิมในอุปกรณ์วัสดุเหล็กในภาคอุตสาหกรรมต่าง ๆ ด้วย



รูปที่ 2.30 โครงสร้างโมเลกุลของกรดซิตริก[25]

2.11 เทคนิคการทำแห้งเยือกแบบแข็ง (Freeze-Drying Technique)[26]

เทคนิคการทำแห้งเยือกแบบแข็ง คือ การรักษาสภาพของสารที่เปียกหรือสารละลายในน้ำ โดยผลิตภัณฑ์จะถูกทำให้เย็นจนแข็งและอยู่ในบรรยากาศที่มีความชื้นต่ำ เกิดสถานะน้ำแข็งระเหิดคือการเปลี่ยนจากสถานะของแข็งเป็นสถานะก๊าซโดยไม่มีการละลายและหลีกเลี่ยงการเปลี่ยนแปลงทางเคมี ภายภาพ และเอ็นไซม์



รูปที่ 2.31 เครื่องทำแห้งแบบเยือกแข็ง [26]

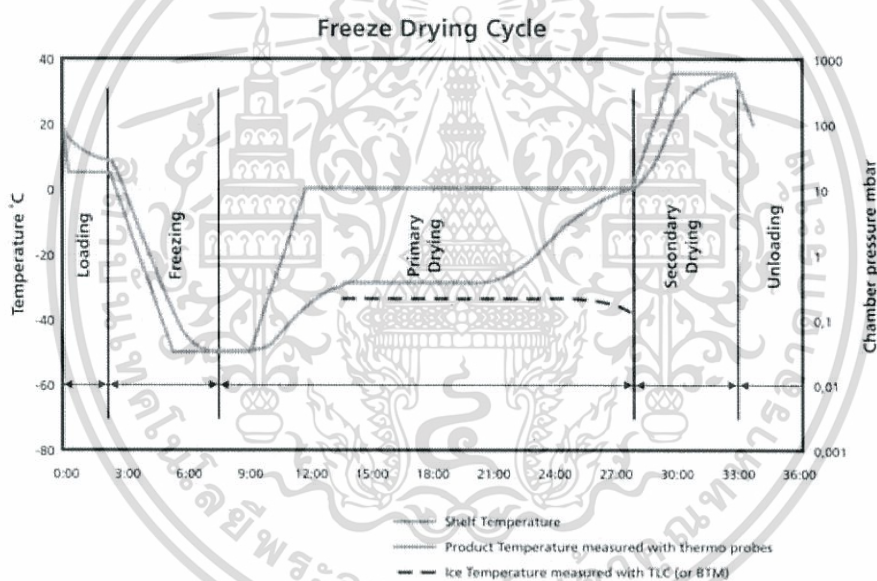
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการทำแห้งเยือกแบบแข็งประกอบด้วย 3 ขั้นตอน

1. ขั้นตอนการแช่แข็ง (Freezing) เป็นการลดอุณหภูมิของสารเพื่อทำให้เกิดก้อนผลึกของน้ำก่อนทำ Primary Drying ปกติอุณหภูมิแช่แข็งจะอยู่ระหว่าง -50 องศาเซลเซียสถึง -80 องศาเซลเซียส

2. ขั้นตอนการทำแห้งปฐมภูมิหรือการทำแห้งระยะที่ 1 (Primary Drying) เป็นสภาวะระเหิดเพื่อดึงเอาน้ำแข็งออกจากผลิตภัณฑ์ เมื่อ Primary Drying เสร็จสมบูรณ์ น้ำแข็งจะละลายไปหมดและจะมีความชื้นหลงเหลืออยู่ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่แห้งจะดูดความชื้นนั้นไว้จึงต้องเอาความชื้นนั้นออกโดยใช้ Secondary Drying

3. ขั้นตอนการทำแห้งทุติยภูมิหรือการทำแห้งระยะสุดท้าย (Secondary Drying) เป็นกระบวนการดูดความชื้นที่หลงเหลือจาก Primary Drying เพื่อลดปริมาณความชื้นจาก Primary Freeze



รูปที่ 2.32 แสดงกระบวนการทำแห้งแบบเยือกแข็ง [26]

2.11.1 ชนิดของผลิตภัณฑ์ที่ใช้กระบวนการทำแห้งแบบเยือกแข็ง [26]

1. Non-biological products เช่น การเตรียมผลิตภัณฑ์ยาฉีดชนิดผงสำหรับละลายน้ำ การเตรียมผลิตภัณฑ์จากสมุนไพรให้อยู่ในรูปผงแห้ง โดยจะคงสภาพสารสำคัญในสมุนไพรได้ เช่น เอสเซนเชียล ออยล์ (Essential oils) พิกเมนต์ (Pigment) ไฟโตนิวเทรียน (Phytonutrients) พอลิแซ็กคาไรด์ (Polysaccharides) และเอนไซม์ (Enzyme)

2. Non - living bio products โดย แบ่งเป็น

- ยาใหม่ที่ได้จากเทคโนโลยีชีวภาพ ซึ่งโดยปกติเป็นสารประกอบประเภท เปปไทด์ (Peptide) หรือ โปรตีน (Protein) เช่น อินเตอร์เฟอรอน (Interferon) ไซโตไคน์ (Cytokine) โกรทฮอร์โมน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอญูญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Growth hormone) และ วัคซีนป้องกันตับอักเสบบชนิดบี

- อาหาร เช่น ผัก ผลไม้ นม สาหร่าย กาแฟ โดยจะยังคงสภาพเดิมทั้งรูปร่าง สี ขนาด พื้นผิว รส กลิ่น และสารอาหาร

3. Living organisms เช่น แบคทีเรีย, รา และ วัคซีน โดยหลังจากการทำให้แห้ง สิ่งมีชีวิตจะสามารถ เจริญ และสืบพันธุ์ได้

2.11.2 ข้อดีและข้อเสียของกระบวนการทำแห้งแบบเยือกแข็ง [26]

ข้อดี

1. ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่มีความคงตัวดีเนื่องจากการแช่แข็งทำให้ปฏิกิริยาทางเคมีเกิดช้าลงและ กระบวนการเกิดภายในตู้สุญญากาศทำให้ไม่มีออกซิเจนที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) รวมทั้งกระบวนการใช้ออกซิเจนที่ต่ำมาก ทำให้ปฏิกิริยาของเอนไซม์และแบคทีเรียไม่สามารถเกิดได้โดยต่างจากการทำให้แห้งด้วยวิธีอื่นซึ่งเกิดที่อุณหภูมิสูง ออกซิเจนกระหาย และน้ำ ทำให้เกิดการสลายตัวและสูญเสียสารประกอบสำคัญ

2. รักษาสภาวะของผลิตภัณฑ์ให้คงสภาพเดิม ในเรื่อง สี รูปร่าง ขนาด รส พื้นผิว และ สารสำคัญใน ยา สมุนไพร อาหาร

3. ลดความเสี่ยงของการปนเปื้อนของแบคทีเรีย โดยส่วนมากพบในสมุนไพร ซึ่ง กระบวนการทำแห้งแบบเยือกแข็ง จะได้ผลิตภัณฑ์ที่สะอาดกว่าการทำให้แห้งในสภาวะปกติ

4. ทำให้น้ำหนักของผลิตภัณฑ์ลดลง 70-90 เปอร์เซ็นต์ โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาตร ทำให้ประหยัดและสะดวกในการขนส่งผลิตภัณฑ์

5. นำมาใช้ผลิตผลิตภัณฑ์ที่ได้จากวิธีทางเทคโนโลยีชีวภาพ เช่น ยาจำพวกเปปไทด์หรือ โปรตีน โดยจะเสื่อมสลายจากความร้อนหรือเมื่ออยู่ในรูปสารละลายในน้ำ จึงใช้กระบวนการทำแห้งแบบเยือกแข็งทำให้อยู่ในรูปผงแห้งซึ่งมีความคงตัวที่ดีกว่า

ข้อเสีย

ต้องเสียค่าใช้จ่ายสูงเนื่องจากเครื่องมือราคาแพง เพราะต้องใช้ระบบทำความเย็นจัดและ เครื่องปั๊มที่มีประสิทธิภาพสูงในการดูดให้เป็นสุญญากาศ และการใช้ที่ต้องการเทคนิคเฉพาะ รวมทั้งการดูแลรักษา จึงไม่ค่อยเป็นที่นิยมใช้ในระบบผลิตทั่ว ๆ ไป นอกจากผลิตภัณฑ์บางอย่าง เช่น Biological Substances หรือผลิตภัณฑ์ยาบางชนิด ซึ่งผลิตภัณฑ์ประเภทนี้ไม่สามารถทนต่อ ความร้อนสูง

2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Kerdchoechuen O. และคณะ[27] งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาถาดโพลีบิโอดีกรีจากวัสดุจากธรรมชาติ (Biodegradable tray) โดยใช้แป้งมันสำปะหลัง (Cassava starch) ผสมเส้นใยจากตะไคร้ (Lemongrass fiber) และเยื่อคราฟท์ (Kraft fiber) ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 ของน้ำหนักแป้ง ใช้เทคนิคการอบ (Baking in hot mold) โดยใช้เครื่องอบ (Baking machine) ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส (°C) เป็นเวลา 3 นาที (Minute) พบว่าการเติมเส้นใยจากตะไคร้และเยื่อคราฟท์ ไม่มีผลต่อค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) และค่าดัชนีการดูดซับน้ำ (Water absorption index ;WAI) แต่เส้นใยต่างชนิดกันมีผลทำให้เปอร์เซ็นต์การยืดออก ณ จุดขาด (%Elongation at break) และค่าดัชนีการละลายน้ำ (Water solubility index ;WSI) ต่างกัน โดยการเติมเยื่อคราฟท์มีผลให้เปอร์เซ็นต์การยืดออก ณ จุดขาด และค่าดัชนีการละลายน้ำ ของโพลีแป้งสูงกว่าเส้นใยตะไคร้ นอกจากนี้ยังพบว่าโพลีแป้งที่ผสมเส้นใยตะไคร้ร้อยละ 20 และเยื่อคราฟท์ร้อยละ 20-30 มีค่าความแข็งแรงดึงและเปอร์เซ็นต์การยืดออก ณ จุดขาดสูงที่สุด แต่มีค่าดัชนีการดูดซับน้ำและค่าดัชนีการละลายน้ำต่ำที่สุด

Reddy N. และคณะ[28] ปัจจุบันวิธีการตัดแปรโมเลกุลของแป้งจะมีความเป็นพิษและราคาแพง นอกจากนี้ยังไม่ได้สมบัติตามต้องการ งานวิจัยนี้กล่าวถึงการใช้กรดซิตริก (Citric acid) เป็นสารเชื่อมโยง (Cross-linking agent) ในแป้ง (Starch) ผลการทดลองพบว่าเมื่อเติมกรดซิตริกลงไปบนแผ่นฟิล์มแป้งส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) และ เสถียรภาพทางความร้อน (Thermal stability) เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังส่งผลให้ความสามารถในการละลาย (Solubility) ลดลงเมื่อเทียบกับแผ่นฟิล์มที่ไม่ได้ใส่สารเชื่อมโยง

Pablo W. และคณะ[29] งานวิจัยกล่าวถึงการผลิตถาดโพลีบิโอดีกรีจากชีวภาพ (Biodegradable Tray) โดยใช้แป้งมันสำปะหลัง (Cassava starch) ที่มีการผสมโปรตีนจากดอกทานตะวัน (Sunflower protein) และเส้นใยเซลลูโลส (Cellulose fiber) โดยใช้กระบวนการอบ (Baking Process) ในการขึ้นรูปถาดโพลีที่ผลิตได้นั้นจะมีความหนาแน่น (Density) ระหว่าง 0.46-0.59 กรัม/ตารางเซนติเมตร (g/cm^2) ทำการเติมเส้นใยเซลลูโลสลงไป 10-20 เปอร์เซ็นต์ (%) โดยน้ำหนักและเติมโปรตีนจากดอกทานตะวัน 0-10 เปอร์เซ็นต์ ส่งผลให้สมบัติเชิงกล (Mechanical properties) เพิ่มขึ้น การดูดซับน้ำ (Water absorption) ลดลง จากผลการทดลองพบว่าสูตรที่ดีที่สุดคือสูตรที่มีปริมาณเส้นใย 20 เปอร์เซ็นต์ และมีโปรตีนจากดอกทานตะวัน 10 เปอร์เซ็นต์ คือสามารถลดการดูดซับน้ำได้ถึง 38 เปอร์เซ็นต์

Lee W. [30] งานวิจัยนี้ทำการศึกษาสมบัติทางกายภาพ(Physical properties) ของแผ่นฟิล์มโดยใช้แป้งข้าวโพด (Corn starch) ผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Poly(vinyl alcohol); PVA) ใช้สัณฐาน (NS/PVA) และแป้งที่ใส่สารเชื่อมโยงผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ใช้สัณฐาน (RS4/PVA) ขึ้นรูปแผ่นฟิล์มโดยใช้กระบวนการหล่อ (Casting method) ศึกษาชนิดของสารเติมแต่ง(Additive) คือ กลีเซอรอล (Glycerol) และซอร์บิทอล (Sorbital) โดยใช้สารเชื่อมโยง (Cross-linking agent) คือ โซเดียมไตรเมทาฟอสเฟต (Sodiumtrimeta phosphate; STMP)ผสมโซเดียมไตรพอลิฟอสเฟต (Sodiumtripoly phosphate; STPP) ทำการทดสอบความแข็งแรงดึง (Tensile strength) เปรี่เซ็นต์การยืดออก ณ จุดขาด (%Elongation at break) พฤติกรรมการบวมตัว (Swelling behavior) และความสามารถในการละลาย (Solubility) ของแผ่นฟิล์มสูตร RS4/PVA ให้สมบัติที่ดีกว่าแผ่นฟิล์มสูตร NS/PVA ทุกสมบัติ

ณัฐพล ไชแสงศรี และคณะ[31] งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการพัฒนาถาดโฟมแป้งมันสำปะหลัง (Cassava starch foam tray) เพื่อใช้เป็นบรรจุภัณฑ์ในการบรรจุส้มโอ (Pomelo) ตัดแต่งสด โดยนำแป้งมันสำปะหลัง 80% ผสมไฟเบอร์จากเยื่อคราฟท์ (Kraft fiber) 0, 10, 20, 30 และ 40 เปรี่เซ็นต์ (%) และไคโตซาน (Chitosan) ความเข้มข้น 0, 2, 4 และ 6 เปรี่เซ็นต์ แล้วใช้เทคนิคเทคนิคการอบ (Baking in hot mold) โดยใช้เครื่องอบ (Baking machine) ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส (°C) เป็นเวลา 3 นาที (Minute) พบว่าโฟมแป้งที่มีปริมาณแป้งมันสำปะหลัง 80 เปรี่เซ็นต์ผสมเยื่อคราฟท์ 30 เปรี่เซ็นต์เติมไคโตซาน 4 เปรี่เซ็นต์มีสมบัติเชิงกล (Mechanical properties)ใกล้เคียงกับโฟมจากพอลิสไตรีน (Polystyrene) แต่การดูดซับน้ำ (Water absorption)และการละลายน้ำ (Water solubility) ของโฟมแป้งมีค่าสูงกว่าโฟมจากพอลิสไตรีน จึงพัฒนาประสิทธิภาพของโฟมแป้งผสมไคโตซาน และเยื่อคราฟท์ โดยการเติมสารเติมแต่ง(Additive) 2 ชนิด คือ น้ำมันถั่วเหลือง (Soybean oil) และ พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Poly(vinyl alcohol); PVA) 0, 5, 10 และ 15 เปรี่เซ็นต์ พบว่าการเติมน้ำมันถั่วเหลือง และ พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ 10 เปรี่เซ็นต์ ไม่มีผลต่อการต้านทานแรงฉีกขาด (Tear resistance) และ เปรี่เซ็นต์การยืดออก ณ จุดขาด (%Elongation at break) ของโฟมแป้ง แต่ทำให้การดูดซับน้ำและการละลายน้ำลดลง เมื่อนำถาดโฟมแป้งผสมเยื่อคราฟท์ และไคโตซานที่เติมน้ำมันถั่วเหลืองและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ 10 เปรี่เซ็นต์ มาใช้บรรจุส้มโอตัดแต่งสด พบว่าถาดโฟมแป้งที่เติมน้ำมันถั่วเหลือง มีสมบัติดีกว่าถาดโฟมแป้งที่เติมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์

Adina G. และคณะ[32] งานวิจัยนี้กล่าวถึงการศึกษาหาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการขึ้นรูปฟิล์มแป้งมันสำปะหลัง (Cassava starch film) ไคโตซาน (Chitosan) และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Poly(vinyl alcohol); PVA) โดยการนำแผ่นฟิล์มมาทดสอบความแข็งแรงดึง (Tensile test) หาหมู่ฟังก์ชันโดยเทคนิคอินฟราเรด สเปกโตรสโกปี (Infrared spectroscopy; IR) และทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดิน (Biodegradable test in soil) พบว่าแผ่นฟิล์มที่มีอัตราส่วนของ พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่มากส่งผลให้มีค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด (% Elongation at break) สูงตามไปด้วย หมู่ฟังก์ชันที่สำคัญของแผ่นฟิล์มคือ หมู่คาร์บอนิล (Carbonyl group) แสดงความยาวคลื่น (Wavelength) ที่ $1716-1732\text{ cm}^{-1}$ ผลการทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดิน พบว่าทุกตัวอย่างมีการน้ำหนักลดลง 50 เปอร์เซ็นต์ (%) ของแผ่นฟิล์มเมื่อเวลาผ่านไป 18 วัน

Laohakunjit N. และคณะ[33] งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการปรับปรุงคุณภาพของโฟมสำปะหลัง (Cassava starch foam) โดยการเติมสารเติมแต่ง (Additives) เพื่อเพิ่มความแข็งแรงดึง (Tensile strength) เปอร์เซ็นต์การยืดออก ณ จุดขาด (%Elongation at break) และการต้านทานน้ำ (Water resistance) สารเติมแต่ง (Additives) ที่ใช้ คือน้ำมันพืช (Vegetable oil) ร้อยละ 0,10,20 และ 30 พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Poly(vinyl alcohol); PVA) ร้อยละ 0,5,10 และ 15 ของน้ำหนักแป้งผสมลงในสารละลายเจลแป้งที่เตรียมจากแป้งมันสำปะหลัง 80 กรัม (g) ในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร (Mililiter; ml) และผสมเยื่อคราฟท์ (Kraft fiber) ร้อยละ 20 ของน้ำหนักแป้ง (หรือ 16 กรัม) ขึ้นรูปด้วยเทคนิคใช้เทคนิคการอบ (Baking in hot mold) โดยใช้เครื่องอบ (Baking machine) ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส ($^{\circ}\text{C}$) เป็นเวลา 3 นาที (Minute) วิเคราะห์สมบัติเชิงกล (Mechanical properties) ของโฟมแป้งมันสำปะหลัง ได้แก่ ความแข็งแรงดึง (Tensile strength) เปอร์เซ็นต์การยืดออก ณ จุดขาด (%Elongation at break) ค่าดัชนีการดูดซับน้ำ (Water absorption index ;WAI) และ ค่าดัชนีการละลายน้ำ (Water solubility index ;WSI) ผลการวิเคราะห์พบว่า การเติมน้ำมันพืชไม่มีผลต่อความแข็งแรงดึง และ เปอร์เซ็นต์การยืดออก ณ จุดขาด โดยเฉพาะน้ำมันพืชร้อยละ 20 และ 10 ส่งผลให้ค่าดัชนีการดูดซับน้ำ และ ค่าดัชนีการละลายน้ำ มีค่าต่ำสุดเท่ากับ 5.50 และ 5.47 ตามลำดับ สำหรับการเติมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์พบว่าไม่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์การยืดออก ณ จุดขาด แต่ทำให้ความแข็งแรงดึงเพิ่มขึ้น ค่าดัชนีการดูดซับน้ำ และ ค่าดัชนีการละลายน้ำ ลดลง โดยการเติมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ร้อยละ 10 ค่าดัชนีการดูดซับน้ำ และ ค่าดัชนีการละลายน้ำต่ำสุด แต่ยังมีค่ามากกว่าการใช้น้ำมันพืชเป็นสารเติมแต่ง

Wattanachant S. และคณะ[34] งานวิจัยมีการศึกษาเกี่ยวกับการดัดแปลงโครงสร้างทางเคมีของแป้งสาเก(Sago starch) เพื่อปรับปรุงสมบัติทางกายภาพ (Physical properties) ของแป้งสาเกระหว่างกระบวนการขึ้นรูปทำการศึกษานิดของสารเชื่อมโยง (Cross-linking agent) คือ 1.โซเดียมไตรเมทาฟอสเฟต (Sodiumtrimeta phosphate; STMP)ผสมโซเดียมไตรพอลิฟอสเฟต (Sodiumtripoly phosphate; STPP) 2.ฟอสฟอรัสไดออกไซด์ (Phosphorusoxide) และ 3.อิพิคลอโรไฮดริน (Epichlorohydrin) ผลการทดสอบพบว่าส่วนผสมระหว่างโซเดียมไตรเมทาฟอสเฟตกับโซเดียมไตรพอลิฟอสเฟต ทำให้ค่าความหนืด (Viscosity) ความสามารถในการละลาย (Solubility) ลดลงและความสามารถในการต้านทานกรดความเข้มข้นสูงได้เพิ่มมากขึ้น

Rui S. และคณะ[35] จากงานวิจัยที่การกล่าวถึงซีรีย์ (Series) ของแป้งข้าวโพด (Corn starch) ผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Poly(vinyl alcohol); PVA) ที่ขึ้นรูปเป็นฟิล์มแสดงสัญลักษณ์ด้วย SP มีที่ความเข้มข้นของซิตริกแอซิด (Citric acid; CA) ตั้งแต่ 5-30 เปอร์เซ็นต์ (%) ของน้ำหนักของแป้งข้าวโพด โดยซิตริกแอซิดทำหน้าที่เป็นสารเชื่อมโยง (Cross-linking agent) ทำการขึ้นรูปด้วยวิธีการหล่อ (Casting process) ที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส ($^{\circ}\text{C}$) เพื่อศึกษาโครงสร้างของฟิล์มสมบัติทางความร้อน (Thermal properties) สมบัติเชิงกล (Mechanical properties) และเทคนิคอินฟราเรด สเปกโตรสโคปี (Infrared spectroscopy; IR) จากเทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโคปีพบว่าระหว่างซิตริกแอซิด และ แป้งข้าวโพด และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ มีปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชัน (Esterification) และพันธะไฮโดรเจน เกิดขึ้นภายในแม่พิมพ์ (Mold) ที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส ปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันที่เกิดขึ้นแสดงผลการเชื่อม โยงระหว่างหมู่คาร์บอกซิล (Carboxyl group) ของซิตริกแอซิด กับ แป้งข้าวโพด ซึ่งสามารถเกิดง่าย แต่จะเกิดขึ้นระหว่างพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ กับ ซิตริกแอซิด ค่อนข้างยากนอกจากนี้หมู่คาร์บอกซิลที่เหลือของซิตริกแอซิดจะทำปฏิกิริยากับกลีเซอรอล (Glycerol) ซึ่งทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์ (Plasticizer) ผลการเชื่อม โยงระหว่างหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl) ของกลีเซอรอล กับ หมู่คาร์บอกซิลของซิตริกแอซิด ทำให้เกิดพันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bond) ที่แข็งแรง และส่งผลให้แผ่นฟิล์มมีเสถียรภาพทางความร้อน (Thermal stability) ที่เพิ่มสูงขึ้น การดูดซับน้ำ (Water absorption) ลดลง จาก 33เปอร์เซ็นต์เป็น 20 เปอร์เซ็นต์ เมื่อทำการเพิ่มปริมาณซิตริกแอซิด 5 เปอร์เซ็นต์ทำให้ค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) เพิ่มขึ้นจาก 39 เมกะปาสคาล (MPa) เป็น 48 เมกะปาสคาล และเมื่อเพิ่มปริมาณเป็น 30 เปอร์เซ็นต์ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึงลดลงจาก 48 เป็น 42 เมกะปาสคาล แต่เปอร์เซ็นต์การยืดออก ณ จุดขาด (%Elongation at break) เพิ่มขึ้นจาก 102 เปอร์เซ็นต์ เป็น 208 เปอร์เซ็นต์

Lee T. และคณะ[36] งานวิจัยกล่าวถึงปฏิกิริยาระหว่าง พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Poly(vinyl alcohol); PVA) กับ แป้งมันสำปะหลัง(Cassava starch) โดยทำการศึกษาสมบัติทางความร้อน (Thermal properties) โดยใช้เทคนิคดิฟฟิวเรลสแกนนิ่ง แคลอริเมทรี (Differential scanning calorimetry; DSC) ฟิล์มจะถูกเตรียมจากเทคนิคการหล่อขึ้นรูป (Casting method) จากเทอร์โมแกรม (Thermogram) ของแป้งมันสำปะหลังจะไม่แสดงพีคการดูดความร้อน (Endothermic peak) แต่เมื่อเติมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ลงไปพบว่าจะมีพีคการดูดความร้อนแสดงอย่างชัดเจน ซึ่งสามารถหาค่าอุณหภูมิเริ่มต้น (Onset temperature) และอุณหภูมิสุดท้าย(End-point temperature) จากเทอร์โมแกรมได้โดยจะมีอุณหภูมิเริ่มต้นและอุณหภูมิสุดท้าย สูงกว่าฟิล์มที่มีแต่พอลิไวนิลแอลกอฮอล์อย่างเดียว

กมลวรรณ เตือนเพ็ญ และคณะ[37] งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการเตรียมฟิล์มไฮโดรเจลจากการผสมสารละลายแป้งมันสำปะหลัง (Cassava starch) กับสารละลายโซเดียมอัลจิเนต (Sodium alginate) อุณหภูมิการเกิดปฏิกิริยาที่ 70 องศาเซลเซียส (°C) โดยใช้ เอ็น,เอ็น-เมทิลีนบิสอะคริลาไมด์ (N,N- Methylenebisacrylamide; MBA) เป็นสารก่อพันธะเชื่อมโยง แอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟต (Ammonium Persulfate; $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$) เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา กลีเซอรอล (Glycerol) เป็นพลาสติกไซเซอร์ (Plasticizer) และนาโนซิงค์ ออกไซด์ (Nano Zinc Oxide; ZnO) เป็นสารตัวเติม (Filler) ทำการขึ้นรูปฟิล์ม โดยการหล่อแบบ (Casting) นำมาอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ศึกษาความเข้มข้นของแป้ง ศึกษาอัตราส่วนระหว่างแป้งมันสำปะหลังกับโซเดียมอัลจิเนต 5 เปอร์เซ็นต์ (%) โดยน้ำหนักที่อัตราส่วนต่างกัน ศึกษาสารตัวเติมนาโนซิงค์ ออกไซด์ ที่มีผลต่อการยับยั้งแบคทีเรีย สมบัติที่ทดสอบ ได้แก่ การดูดซับน้ำ (Water absorption) สมบัติเชิงกล (Mechanical properties) สมบัติทางความร้อน (Thermal properties) และสมบัติการยับยั้งแบคทีเรียโดยเทคนิค Disc diffusion method ของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจล

จิราพร เกรียงยืนและคณะ[38] งานวิจัยนี้เป็นการเตรียมฟิล์มแป้งมันสำปะหลัง (Cassava Starch) ผสมกับคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (Carboxymethyl cellulose; CMC) และ นาโน ซิงค์ออกไซด์ (Nano Zinc Oxide; ZnO) โดยมีกลีเซอรอล (glycerol) เป็นพลาสติกไซเซอร์ (Plasticizer) เหน้ 5 มิลลิลิตร (Milliliter; ml) ผสมกับแป้งมันสำปะหลัง และเหน้ 10 มิลลิลิตร ผสมกับคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส จากนั้นนำส่วนผสมมาวัดให้เข้ากันตามอัตราส่วนแป้งมันสำปะหลัง: เป็น 5:5, 3:7 และ 0:10 ตามลำดับ นำส่วนผสมแป้งมันสำปะหลัง: คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ตามอัตราส่วนดังกล่าวมาเติมนาโน ซิงค์ออกไซด์ ลงไปอัตราส่วนละ 0.5 และ 1 กรัม โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ทั้งไว้ในอุณหภูมิ 1 คืน นำแต่ละสูตรมาขึ้นรูปด้วย เครื่องอัดขึ้นรูป (Compression molding) โดยใช้แม่พิมพ์ที่มีความหนา 2 มิลลิเมตร โดยให้อุณหภูมิความร้อนที่ 140 องศาเซลเซียส(°C) เป็นเวลา 5 นาที (Minute) และให้ความเย็น (Cooling) เป็นเวลา 5 นาทีเช่นเดียวกัน นำแผ่นฟิล์มแป้งมันสำปะหลังแต่ละสูตรมาศึกษาสมบัติทางความร้อน โดยใช้เทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริกแอนาไลซิส (Thermogravimetric Analysis; TGA) ศึกษาสัณฐานวิทยาของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) ตรวจสอบหุ้ฟังก์ชัน โดยใช้เครื่อง FT-IR (Fourier-transform Infrared Spectrophotometer) ศึกษาโครงสร้างผลึกของแผ่นฟิล์ม โดยใช้เครื่อง เอ็กซ์เรย์ ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (X-ray Diffractometer; XRD) ศึกษาสมบัติเชิงกลโดยใช้เครื่องทดสอบความแข็งแรงดึง (Tensile Strength) ศึกษาความคงตัวในกรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid; HCl) และในเบสโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodiumhydroxide; NaOH) ที่มีความเข้มข้น 0.01 โมลต่อลิตร (Mole/liter) ศึกษาความสามารถในการละลายน้ำ (Solubility) ศึกษาค่าความแข็งกด (Hardness test) จากการศึกษาพบว่า อัตราส่วนแป้งมันสำปะหลัง: คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่ 5:5 มีการเติมนาโน ซิงค์ออกไซด์ ลงไป 0.5 กรัม โดยน้ำหนัก เป็นสูตรที่ดีที่สุด เพราะมีสมบัติเชิงกล (Mechanical properties) และสมบัติทางกายภาพ (Physical properties) ดีที่สุด

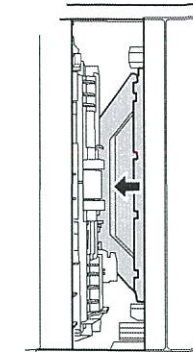
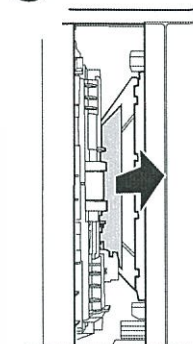
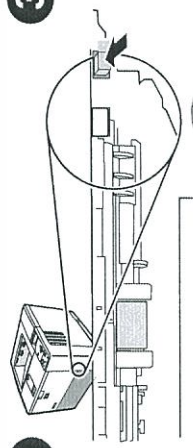
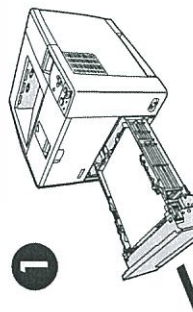
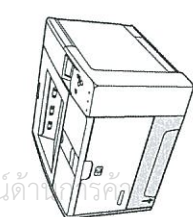
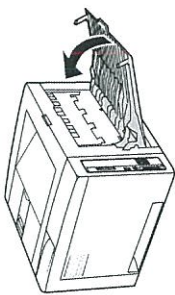
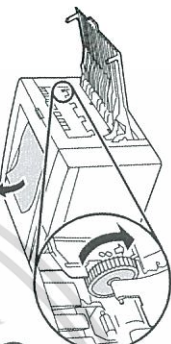
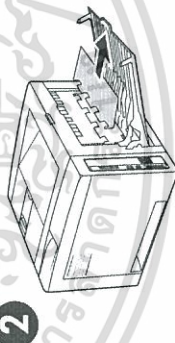
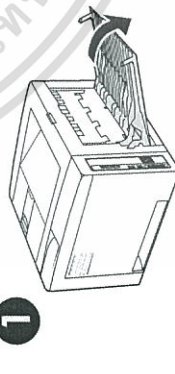
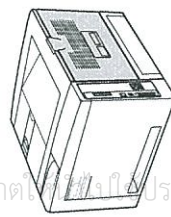
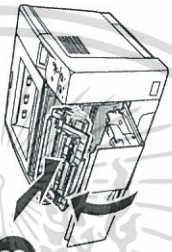
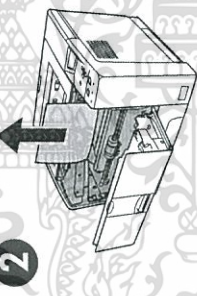
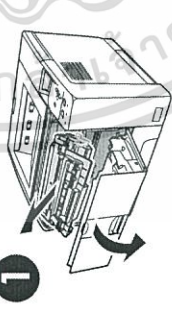
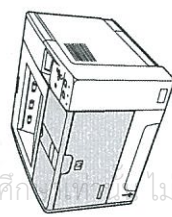
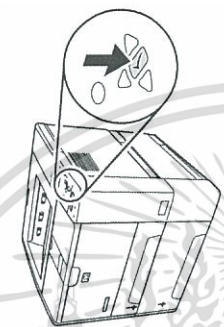
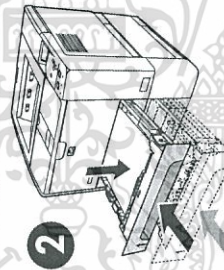
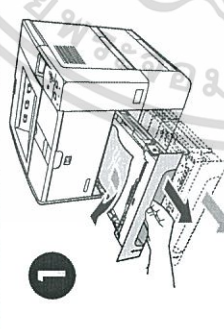
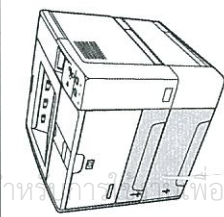
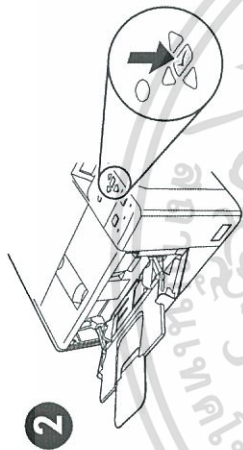
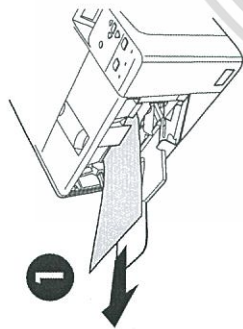
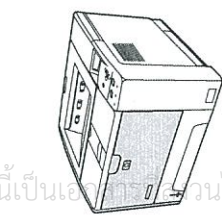
Clear Jams
清除卡紙
Elakadások elhárítása
Устранение замятий

Eliminer les bourrages
Odstranění uvíznutých médií
용지 걸림 해결
Rensa trassel

Staus beseitigen
Afhjælp papirstop
Fjerne fastkjørt papir
清除卡紙

Eliminazione degli inceppamenti
Storingen verhelpen
Usuwanie zacięć
Kağıt sıkışmalarını Giderme

Eliminación de atascos
Tukosten poistaminen
Limpar atolamentos



ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การวิจัยและการดำเนินงาน

3.1 สารเคมี

1. แป้งมันสำปะหลังเป็นผลิตภัณฑ์ของบริษัท นิวเกรด

ตารางที่ 3.1 สมบัติแป้งมันสำปะหลัง [39]

Properties	
น้ำหนักสุทธิ	400 g
หั่ว	20%
ราก	80%

2. (Poly(vinyl alcohol)); PVA ผลิตภัณฑ์ของบริษัท Sigma-Aldrich

ตารางที่ 3.2 สมบัติพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ [40]

Properties	
extent of labeling	97.5-99.5 mol% hydrolysis
	~1600 polymerization
mw	72000.00 g/mol
formula	$(\text{CH}_2\text{CH})_n\text{OH}$
ign. residue	$\leq 2.5\%$
viscosity	24-32 mPa.s, 4 % in H_2O (20 °C)
mp	~265 °C (dec.)
saponification value	15-25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.Sodiumtrimetaphosphate; STMP เป็นผลิตภัณฑ์ของบริษัท Sigma-Aldrich

ตารางที่ 3.3 สมบัติ STMP [41]

Properties	
grade	technical
mw	305.89 g/mol
formula	$\text{Na}_3\text{O}_9\text{P}_3$
assay	$\geq 95\%$

4.Sodiumtripolyphosphate; STPP เป็นผลิตภัณฑ์ของบริษัท Sigma-Aldrich

ตารางที่ 3.3 สมบัติ STPP [42]

Properties	
grade	technical
mw	367.86 g/mol
formula	$\text{Na}_5\text{O}_{10}\text{P}_3$
assay	$\geq 85\%$

5.Nano ZnO เป็นผลิตภัณฑ์ของบริษัท นาโนแมทรีเรียลส์ เทคโนโลยี จำกัด

ตารางที่ 3.4 สมบัติ Nano ZnO [43]

Properties	
appearance	white powder
crystal phase	hexagonal
mw	81.39 g/mol
formula	ZnO
purity	96.00
average particles size	20 - 40 nm
specific surface area	26.22 m^2/g
density	0.14 g/cc

6.Citric acid เป็นผลิตภัณฑ์ของบริษัท Fisher scientific

ตารางที่ 3.5 สมบัติ Citric acid [44]

Properties	
grade	analytical
mw	210.14 g/mol
formula	$C_6H_8O_7 \cdot H_2O$
Insoluble Matter	0.005% max.
Iron [Fe]	3ppm max.
Lead [Pb]	2ppm max.
Chloride	0.001% max.
Identification	Pass Test
Ignition Residue	0.02% max.
Oxalate	P.T. (about 0.05%)
Phosphate	0.001% max.
Sulfur Compounds	0.002% max.
Substances Darkened by H_2SO_4	Pass Test

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องทำแห้งแบบเย็น บริษัท Scan vac รุ่น Coolsafe 110-4
2. เครื่องทำความเย็น (Freezer) บริษัท GES รุ่น PLC-1055
3. แม่พิมพ์กล่องฟรอยด์ใส่ขนมเค้กพร้อมฝาปิด
5. มอเตอร์พร้อมใบพัดกวน
6. Hot plate บริษัท Daihanlabtech รุ่น Lab Tech
7. เครื่องชั่งแบบดิจิตอล บริษัท Denver Instrument รุ่น HR-200
8. เทอร์โมมิเตอร์
9. ตะแกรงลวด
10. แ่งแก้วคน
11. ซ้อนตักสาร
12. บีกเกอร์ขนาด 100 มิลลิลิตร
13. บีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร
14. ไมโครมิเตอร์

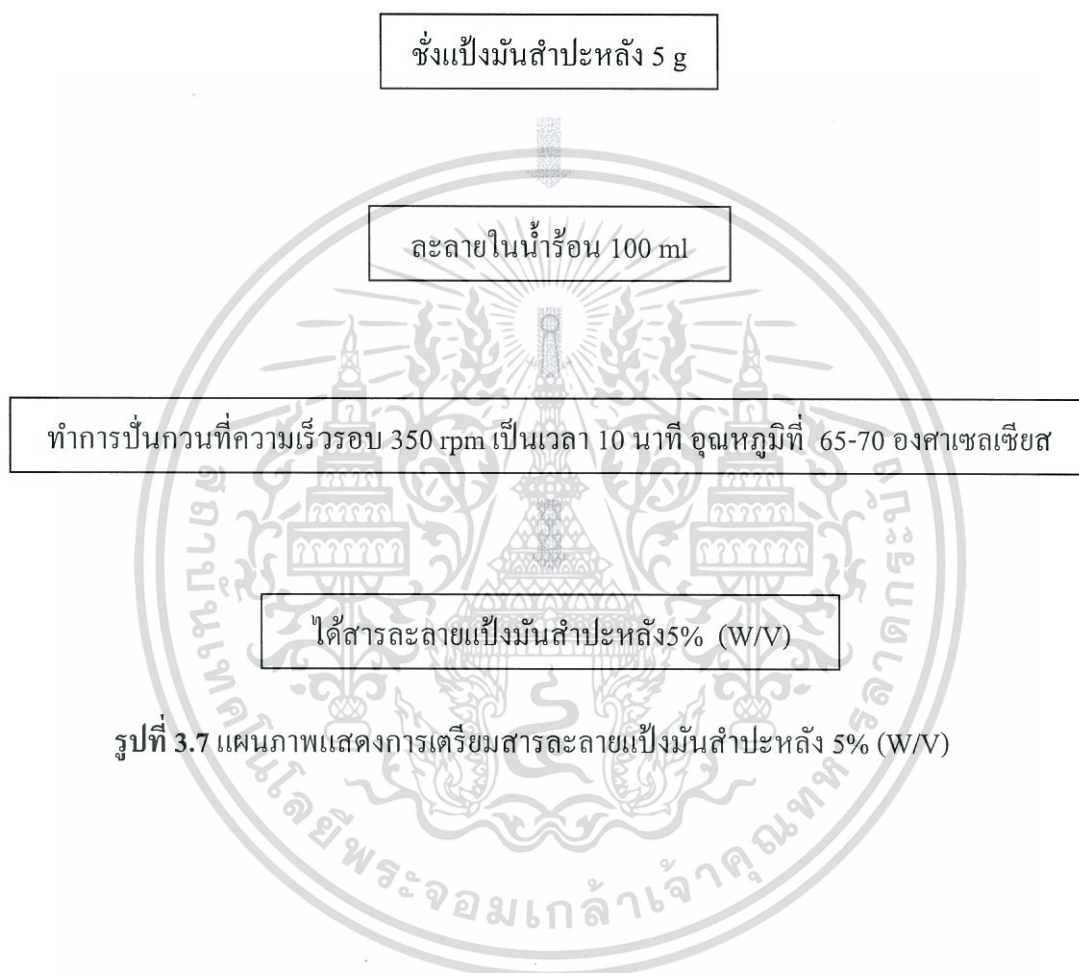


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 วิธีการทดลอง

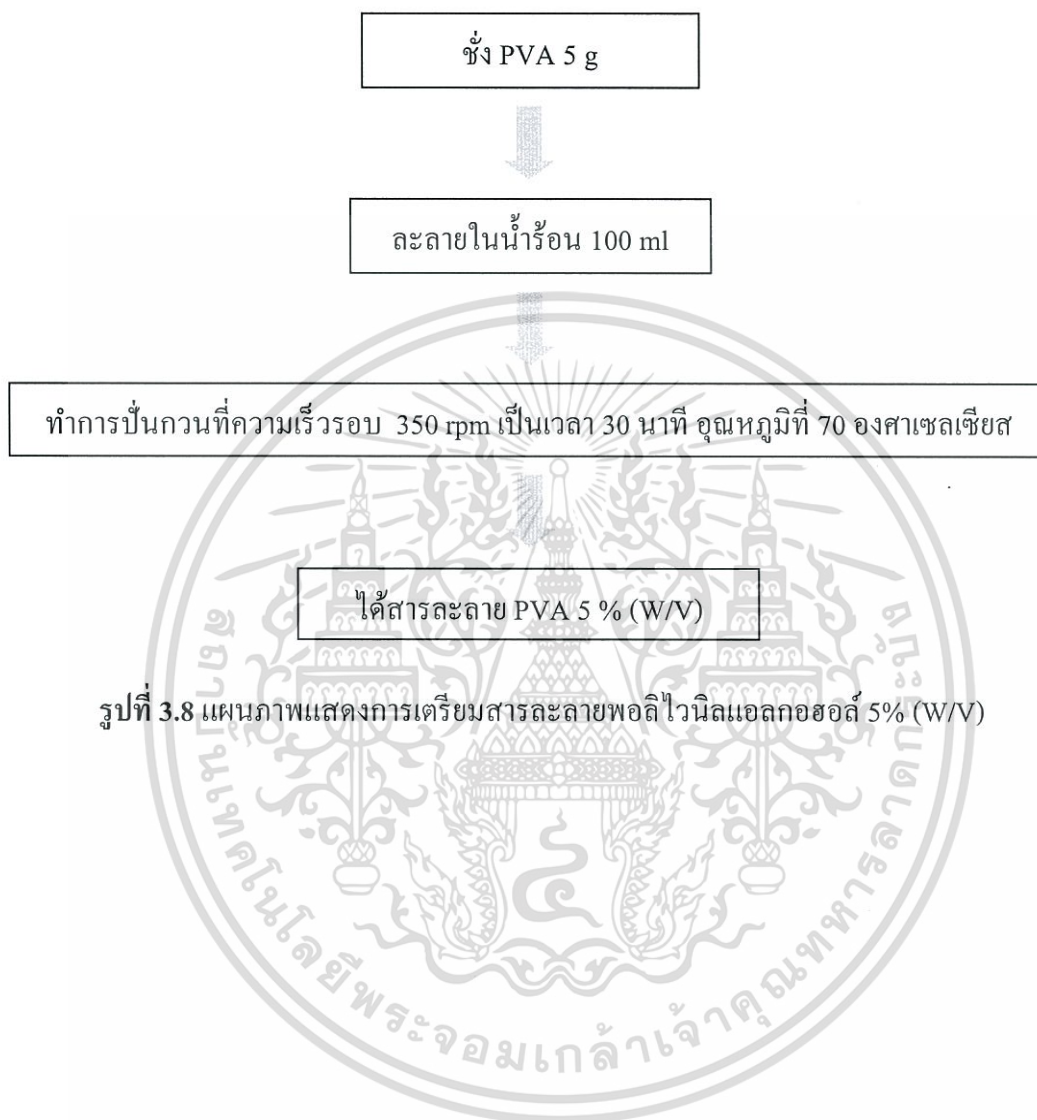
3.3.1 การเตรียมสารละลายแป้งมันสำปะหลัง 5% (W/V) และ สารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Poly (vinyl alcohol)); PVA 5 % (W/V)

1.การเตรียมสารละลายแป้งมันสำปะหลัง 5% (W/V)



รูปที่ 3.7 แผนภาพแสดงการเตรียมสารละลายแป้งมันสำปะหลัง 5% (W/V)

3.3.2 การเตรียมสารละลาย PVA 5% (W/V)

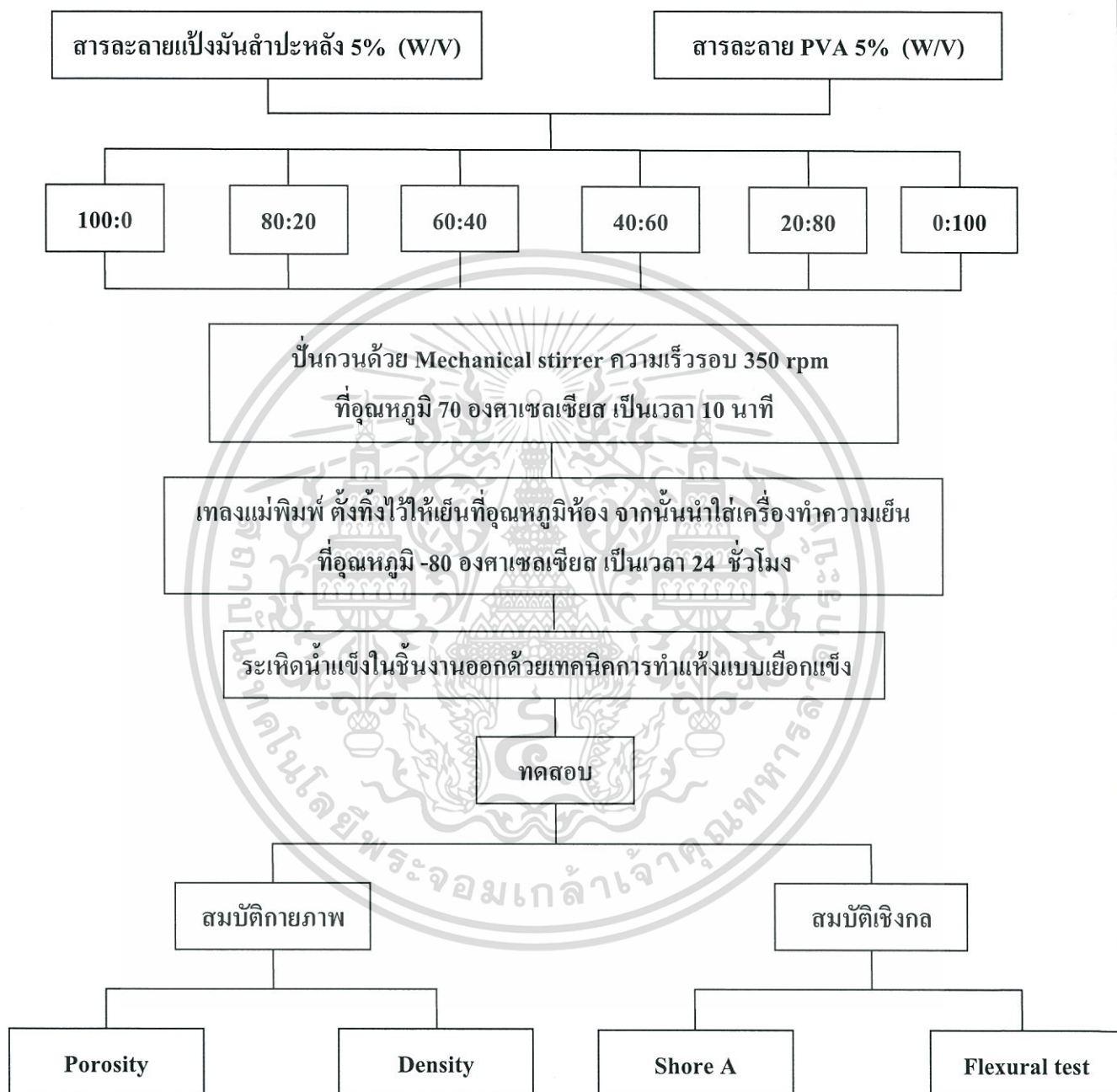


รูปที่ 3.8 แผนภาพแสดงการเตรียมสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ 5% (W/V)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตอนที่ 1 การเตรียมและทดสอบสมบัติของ โฟมแป้งมันสำปะหลังผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์

1. การเตรียมโฟมจากแป้งมันสำปะหลังผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์



รูปที่ 3.9 แผนผังแสดงอัตราส่วนที่เหมาะสมในการขึ้นรูปของโฟมแป้งมันสำปะหลังผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์

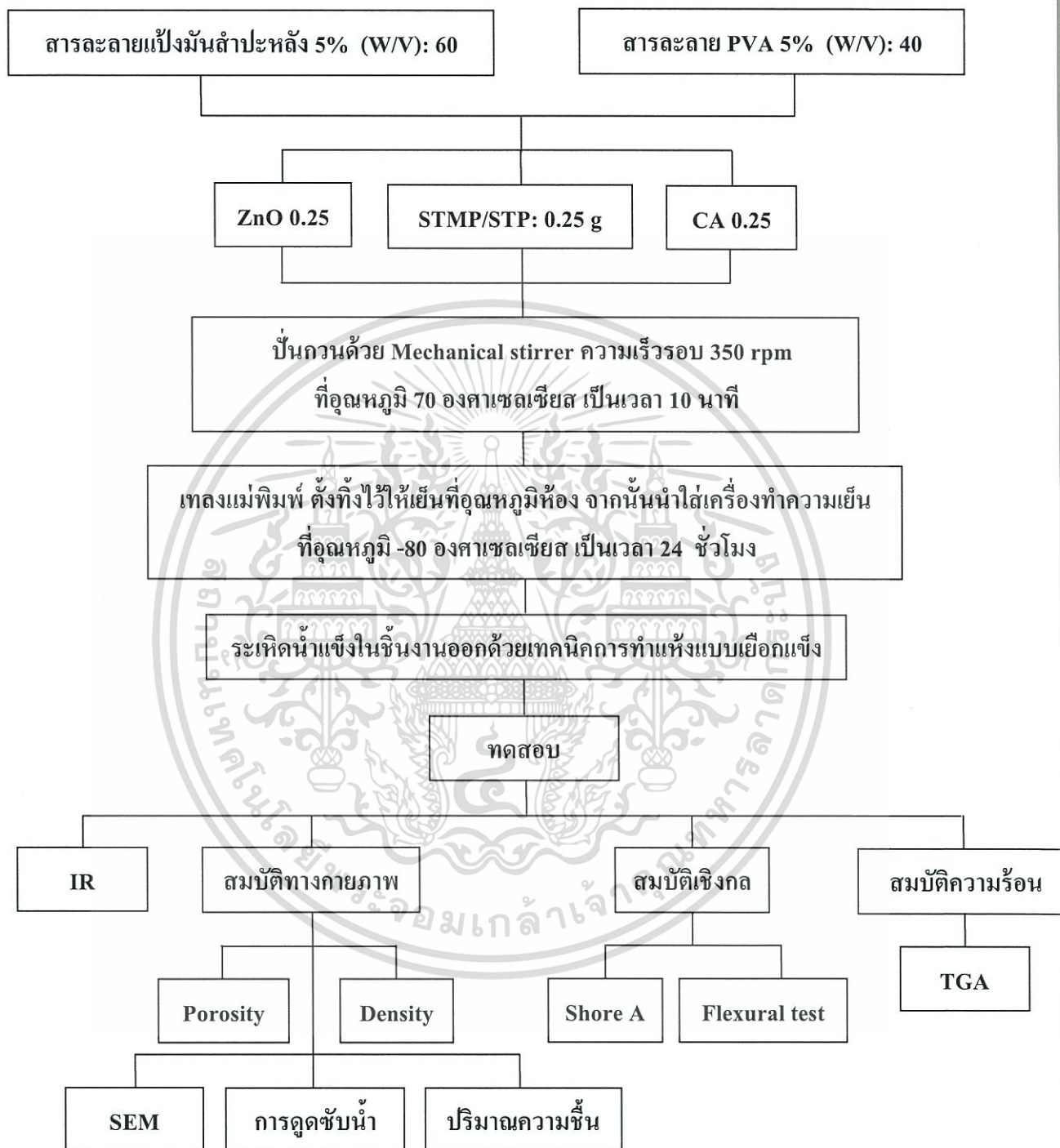
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.7 ตารางแสดงอัตราส่วนของสารละลายแป้งมันสำปะหลังและสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์

สูตร	สารละลาย 5% แป้งมันสำปะหลัง(W/V) (ml)	สารละลาย 5% PVA(W/V) (ml)
F1	100	0
F2	80	20
F3	60	40
F4	40	60
F5	20	80
F6	0	100

1. ตวงสารละลาย แป้งมันสำปะหลัง 5% (W/V) และ สารละลาย PVA 5% (W/V) ตามอัตราส่วนตามตาราง ทำการปั่นกวนที่ความเร็วรอบ 350 rpm เป็นเวลา 10 นาที ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส (อุณหภูมิที่แป้งมันสำปะหลังเกิดเจลาทีไนเซชัน)
2. เทสารละลายผสมที่ได้ลงแม่พิมพ์ ปิดฝา นำไปเข้าเครื่องทำความเย็น (Freezer) บริษัท GES รุ่น PLC-1055 ที่อุณหภูมิ -80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
3. นำออกมาเข้าเครื่องทำแห้งแบบเย็น บริษัท Scan vac รุ่น Coolsafe 110-4 ที่อุณหภูมิ -105 องศาเซลเซียส เวลา 24 ชั่วโมง
4. ได้ชิ้นงานตัวอย่าง F1- F6
5. นำชิ้นงานไปทดสอบสมบัติทางกายภาพ และเชิงกล ตามลำดับ

ตอนที่ 2 การศึกษาชนิดสารเชื่อมโยงของโฟมเป็งมันสำปะหลังผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์



รูปที่ 3.10 แผนผังแสดงการศึกษาชนิดสารเชื่อมโยงของโฟมเป็งมันสำปะหลังผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

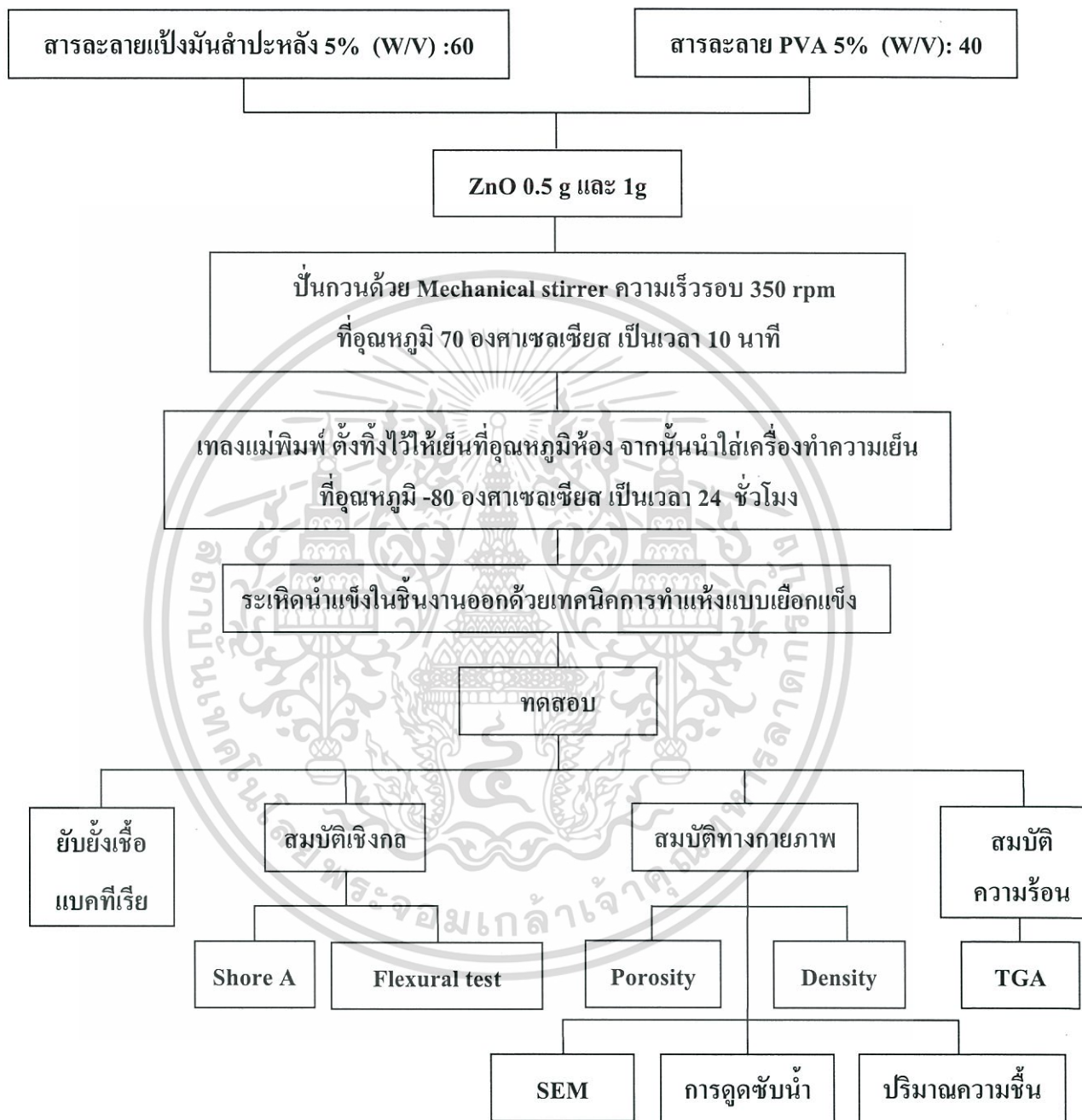
ตารางที่ 3.8 ตารางแสดงอัตราส่วนของสารละลายแป้งมันสำปะหลัง%5 (W/V) และสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ %5 (W/V) ที่อัตราส่วน 60:40 โดยใช้ ZnO, STMP/STPP และ Citric acid เป็นสารเชื่อมโยง

สูตร	สารละลาย แป้งมันสำปะหลัง%5 (W/V) (ml)	สารละลาย PVA 5% (W/V) (ml)	สารเชื่อมโยง (g)
F7	60	40	0.25
F8	60	40	0.25
F9	60	40	0.25

1. ตวงสารละลาย 5% PVA ผสมกับสารเชื่อมโยงตามอัตราส่วนตามตาราง ทำการปั่นกวนที่ความเร็วรอบ 350 rpm เป็นเวลา 10 นาที ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส
2. ค่อยๆเทสารละลาย แป้งมันสำปะหลัง%5 (W/V) ตามอัตราส่วนตามตาราง ลงไปในสารละลายผสมข้อ 1 ใช้เวลา 10 นาที ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส (อุณหภูมิที่แป้งมันสำปะหลังเกิดเจลาทีไนเซชัน)
3. เทสารละลายผสมที่ได้ลงแม่พิมพ์ ปิดฝา นำไปเข้าเครื่องทำความเย็น (Freezer) บริษัท GES รุ่น PLC-1055 ที่อุณหภูมิ -80 องศาเซลเซียส เวลา 24 ชั่วโมง
4. นำออกมาเข้าเครื่องทำแห้งแบบเย็น บริษัท Scan vac รุ่น Coolsafe 110-4 ที่อุณหภูมิ -105 องศาเซลเซียส เวลา 24 ชั่วโมง
5. ได้ชิ้นงานตัวอย่าง F7, F8 และ F9 ตามลำดับ
6. นำชิ้นงานไปทดสอบหาหมู่ฟังก์ชัน สมบัติทางกายภาพ เหนียว และความร้อน ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตอนที่ 3 การศึกษาปริมาณของ ZnO ที่ส่งผลต่อสมบัติของโฟมแป้งมันสำปะหลัง ผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์อัตราส่วน 60:40



รูปที่ 3.11 แผนผังแสดงการศึกษาปริมาณของ ZnO ที่ส่งผลต่อสมบัติของโฟมแป้งมันสำปะหลัง ผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์อัตราส่วน 60:40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.9 ตารางแสดงอัตราส่วนของสารละลายแป้งมันสำปะหลัง 5% (W/V) และสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ 5% (W/V) อัตราส่วน 60:40 ที่ใช้ ZnO เป็นสารเชื่อมโยงในปริมาณที่ต่างกัน

สูตร	สารละลาย แป้งมันสำปะหลัง 5% (W/V) (ml)	สารละลาย PVA 5% (W/V) (ml)	ปริมาณ ZnO (g)
F10	60	40	0.5
F11	60	40	1

1. ตวงสารละลาย 5% PVA ผสมกับ ZnO ตามอัตราส่วนตามตาราง ทำการปั่นกวนที่ความเร็วรอบ 350 rpm เป็นเวลา 10 นาที ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส
2. ต่อยๆ เทสารละลาย แป้งมันสำปะหลัง 5% (W/V) ตามอัตราส่วนตามตาราง ลงไปในสารละลายผสมข้อ 1 เป็นเวลา 10 นาที ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส (อุณหภูมิที่แป้งมันสำปะหลังเกิดเจลที่ในเซชัน)
3. เทสารละลายผสมที่ได้ลงแม่พิมพ์ ปิดฝา นำไปเข้าเครื่องทำความเย็น (Freezer) บริษัท GES รุ่น PLC-1055 ที่อุณหภูมิ -80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
4. นำออกมาเข้าเครื่องทำแห้งแบบเยน รุ่น Coolsafe 110-4 บริษัท Scan vac ที่อุณหภูมิ -105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
5. ได้ชิ้นงานตัวอย่าง F10 และ F11 ตามลำดับ
6. นำไปชิ้นงานทดสอบสมบัติทางกายภาพ เชิงกล ความร้อน และการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การทดสอบ

1. การศึกษาหมู่ฟังก์ชัน

» เครื่องอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (IR Spectrophotometer) บริษัท Perkin Elmer; รุ่น Model SPECTRUM GX

การศึกษากลุ่มฟังก์ชัน ของโพลิเมอร์สังเคราะห์หลังผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์อัตราส่วน 60:40 ที่ไม่มีและมีสารเชื่อมโยงในสูตรต่างๆ ทำโดยการนำโพลิเมอร์สูตรต่างๆ มาตัวอย่างละ 3 มิลลิกรัม นำมาบดรวมกับ KBr แล้วนำไปอัดให้เป็นแผ่น สภาวะที่ใช้คือ ที่ความยาวคลื่น $4,000 - 400 \text{ cm}^{-1}$ โดยทำการสแกน 6 ครั้งต่อตัวอย่างความละเอียดที่ใช้คือ 4 cm^{-1}

2. ทดสอบการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียโดยเทคนิค Agar disc diffusion method

ตามมาตรฐานของ (Clinical and Laboratory Standards Institute; CLSI) [45]

การเตรียมแบคทีเรียที่ใช้ทดสอบ

เชื้อโคโลนีของเชื้อที่ต้องการทดสอบที่เพาะเลี้ยงไว้ในจานอาหารเลี้ยงเชื้อที่มีอายุประมาณ 14-16 ชั่วโมง นำมาใส่ในอาหารสำหรับเลี้ยงเชื้อที่เตรียมไว้ในหลอด

นำหลอดอาหารเลี้ยงเชื้อไปเพาะเลี้ยงที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 18 - 24 ชั่วโมง

นำเชื้อที่ได้มาเจือจาง
โดยเจือจางด้วยอาหารเลี้ยงเชื้อ

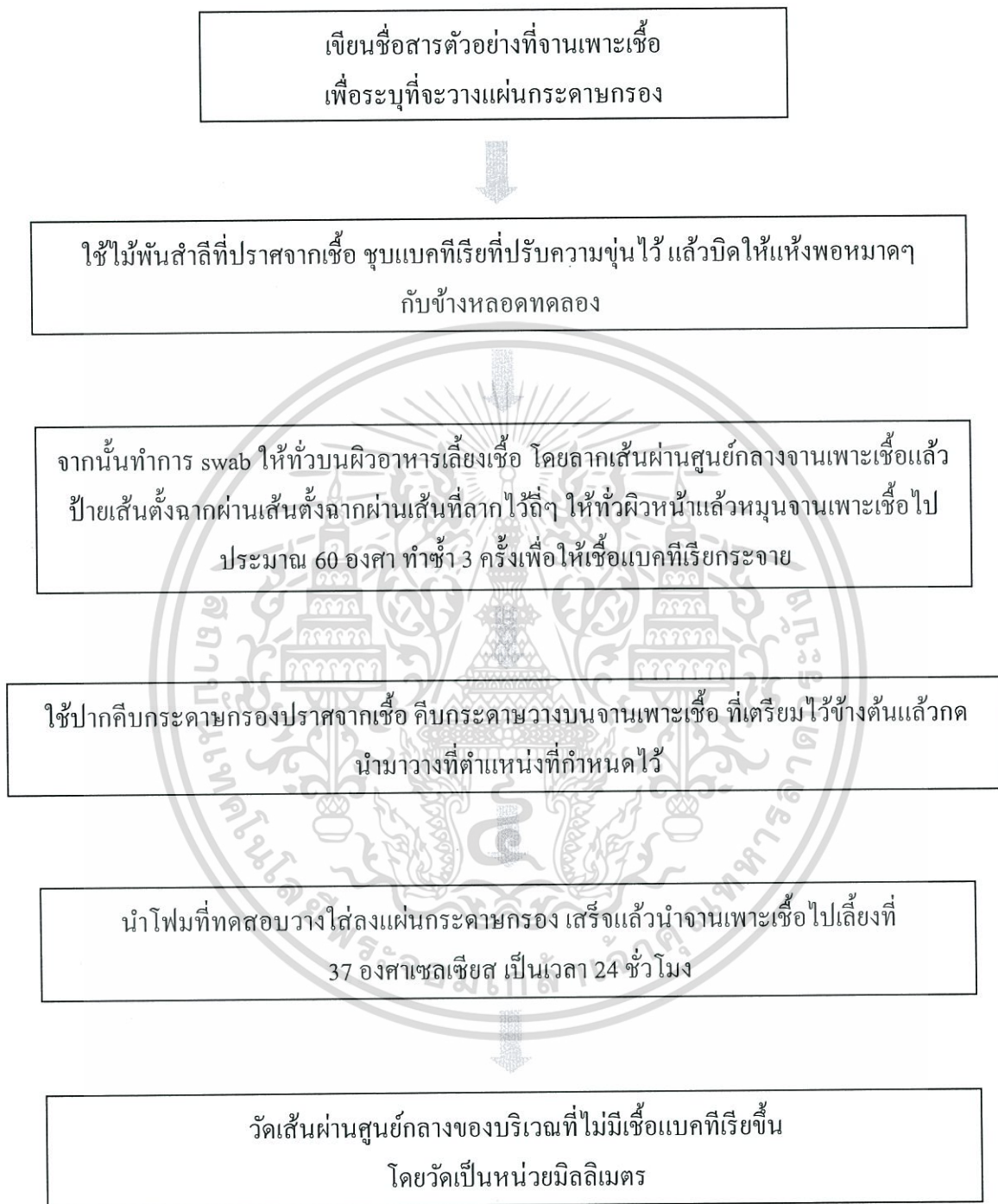
รูปที่ 3.12 แผนภาพการเตรียมแบคทีเรียที่ใช้ในการทดสอบ

หมายเหตุ ทดสอบเชื้อ *Bacillus subtilis* ATCC 6633 ซึ่งเป็นแบคทีเรียแกรมบวก

ทดสอบเชื้อ *Escherichia coli* ATCC 25922 ซึ่งเป็นแบคทีเรียแกรมลบ

แบคทีเรียทั้งสองชนิดเป็นสาเหตุให้แป้งมันสำปะหลังเสียและทำให้เกิดอาการท้องเสีย

การศึกษาการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย



รูปที่ 3.13 แผนภาพการศึกษาฤทธิ์ในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. การทดสอบสมบัติทางกายภาพ

3.1 ความหนาแน่น[46]

ตัดโฟมแข็งมันสำปะหลังผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ไม่มีและมีสารเชื่อมโยง ขนาด 1 ตารางนิ้ว วัดขนาดด้วยเวอร์เนียสเกล และชั่งน้ำหนักโฟมแข็งตัวอย่างต่างๆ คำนวณหาความหนาแน่นตามสมการ (3.1)

$$\text{ความหนาแน่น} = \frac{\text{น้ำหนักโฟม}}{\text{ปริมาตรโฟม}} \quad (3.1)$$

3.2 การหาปริมาตรรูพรุน[47]



รูปที่ 3.14 แผนภาพการหาปริมาตรรูพรุน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นนำค่าต่างๆมาคำนวณหาตามสมการที่ (3.2) - (3.4)

$$\text{ปริมาตรของโฟม} = V_2 - V_3 \quad (3.2)$$

$$\text{ปริมาตรของเฮกเซนภายในโฟม} = V_1 - V_3 \quad (3.3)$$

$$\text{ปริมาตรรวมของโฟม} (V) = (V_2 - V_1) / (V_1 - V_3) \quad (3.4)$$

เมื่อ V_1 คือ ปริมาตรเฮกเซนเริ่มต้น

V_2 คือ ปริมาตรเฮกเซนที่มีโฟมสูตรต่างๆ อยู่ในกระบอกตวง

V_3 คือ ปริมาตรเฮกเซนที่เหลือ

3.3 การหาปริมาณความชื้น [48]

ใช้มาตรฐาน ASTM D570 นำโฟมแข็งมันสำปะหลังผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ทั้งที่ไม่มีและมีส่วนเชื่อมโยง ขนาด 1 ตารางนิ้ว สูตรต่างๆ อบให้แห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ชั่งน้ำหนักที่ได้ จากนั้นตั้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 วัน นำชิ้นงานมาชั่งน้ำหนักคำนวณปริมาณความชื้นตามสมการ (3.5)

$$\% \text{ความชื้น} = \left(\frac{\text{น้ำหนักที่อุณหภูมิห้อง} - \text{น้ำหนักหลังอบ}}{\text{น้ำหนักที่อุณหภูมิห้อง}} \right) * 100 \quad (3.5)$$

3.4 การดูดซับน้ำ

ตัดโฟมแข็งมันสำปะหลังผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ทั้งที่ไม่มีและมีส่วนเชื่อมโยงให้มีขนาด 1 ตารางนิ้ว นำมาชั่งน้ำหนักก่อนการแช่น้ำ หลังจากนั้นนำโฟมสูตรต่างๆ ชั่งน้ำหนักทุก 1 ชั่วโมงจนน้ำหนักทุกชั่วโมงจนครบ 6 ชั่วโมง จดน้ำหนักภายหลังการดูดซับน้ำ โดยสามารถคำนวณหาปริมาณการดูดซับน้ำได้จากสมการ (3.6)

$$W_a = ((W_c - W_o) / W_o) * 100 \quad (3.6)$$

เมื่อ W_a คือ เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำ

W_c คือ น้ำหนักหลังการดูดน้ำซับน้ำ

W_o คือ น้ำหนักก่อนการดูดซับน้ำ

3.5 ฐานวิทยา

» กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope : SEM) บริษัท JEOL; รุ่น JSM-6400

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดได้นำมาใช้ศึกษาลักษณะรูพรุนของโฟมแป้งสำปะหลังผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ทั้งที่ไม่มีและมีสารเชื่อมโยง ทำการเตรียมตัวอย่างให้มีขนาด 0.5 ตารางมิลลิเมตร อบชิ้นงานที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส จากนั้นนำมาเคลือบทองและนำไปเข้าเครื่อง SEM

4. การทดสอบสมบัติเชิงกล

4.1 Hardness Test [49]

» เครื่องคูโรมิเตอร์ (Durometer; type A) ; รุ่น LX-AO

ใช้มาตรฐาน ASTM D638 เตรียมตัวอย่างโฟมแป้งมันสำปะหลังผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ทั้งที่ไม่มีและมีสารเชื่อมโยง โดยช้อนให้มีขนาดหน้าประมาณ ¼ นิ้ว หรือ 0.25 นิ้ว กัดค้างไว้ 30 วินาที โดยใช้คูโรมิเตอร์ชนิด A การกดอัดประมาณ 10 จุดต่อโฟมแป้งสูตรต่างๆ ค่าความแข็งกดที่รายงานจะเป็นค่าเฉลี่ย

4.2 Flexural Test [50]

» เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal Testing machine); บริษัท Lloyd Instrument รุ่น LR 5k

ใช้มาตรฐาน ASTM D790 เตรียมตัวอย่างโฟมแป้งมันสำปะหลังผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ทั้งที่ไม่มีและมีสารเชื่อมโยง ขนาด 20 x 100 มิลลิเมตร สภาวะที่ใช้ทดสอบคือ

Load cell	5	กิโลนิวตัน
Test speed	20	มิลลิเมตร/นาที
Span	50	มิลลิเมตร

โดยสามารถคำนวณหาความแข็งแรงโค้งงอและมอดุลัสโค้งงอได้จากสมการ (3.7) และ (3.8)

$$\text{ความแข็งแรงโค้งงอ; } \sigma = \frac{3FL}{2bh^2} \quad (3.7)$$

$$\text{มอดุลัสโค้งงอ; } E_b = \frac{L^3}{4bh^2} \times \frac{\Delta}{\Delta d} \quad (3.8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- F คือ แรงสุดที่ทำให้ชิ้นงาน โค้งงอ (หน่วยเป็นนิวตัน; N)
 L คือ Span length (หน่วยเป็นมิลลิเมตร; mm)
 B คือ ความกว้างของตัวอย่าง (หน่วยเป็นมิลลิเมตร; mm)
 ΔF คือ ผลต่างของแรงกดในช่วงการเปลี่ยนแปลงเป็นเส้นตรง (หน่วยเป็นนิวตัน; N)
 Δt คือ ระยะ โค้งงอในช่วงการเปลี่ยนแปลงเป็นเส้นตรง (หน่วยเป็นมิลลิเมตร; mm)

5. การทดสอบสมบัติทางความร้อน

» เครื่องวิเคราะห์ทางความร้อน (Thermogravimetric Analyzer) บริษัท Perkin Elmer; รุ่น PYRIS 1
 ศึกษาอุณหภูมิการสลายทางความร้อน (Degradation temperature) ของโพนจากแป้งมัน
 สำปะหลังผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์และสารเชื่อม โยงเครื่องเทอร์โมกราวิเมตริกอนาไลเซอร์ ทำ
 ได้โดยการชั่งตัวอย่างไม่เกิน 10 มิลลิกรัม และนำมาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง TGA ภายใต้สภาวะ
 บรรยากาศไนโตรเจน อุณหภูมิที่ใช้ในช่วง 50-600 องศาเซลเซียส และอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ
 (Heating rate) ที่ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที

บทที่ 4

ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเตรียมและทดสอบสมบัติของโฟมจากสารละลายแป้งมันสำปะหลังความเข้มข้น 5%w/v ผสมสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ความเข้มข้น 5%w/v ในอัตราส่วนต่างๆ โดยใช้สารเชื่อมโยงต่างชนิดและปริมาณเพื่อปรับปรุงสมบัติโดยแบ่งการศึกษาเป็น 3 ตอนดังนี้

ตอนที่ 4.1: ศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการเตรียมโฟมแป้งมันสำปะหลังผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ความเข้มข้น 5%w/v ในอัตราส่วน 100:0 80:20 60:40 40:60 20:80 และ 0:100 แสดงในสูตร F1-F6 ทำการทดสอบสมบัติ ได้แก่ สมบัติทางกายภาพ และสมบัติเชิงกล

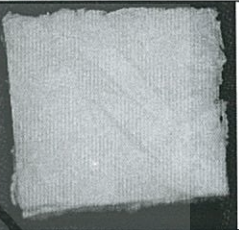


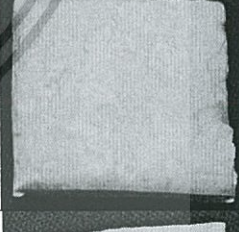


ตอนที่ 4.2: ศึกษาชนิดของสารเชื่อมโยงเพื่อปรับปรุงสมบัติของโฟมจากสารละลายแป้งมันสำปะหลัง ความเข้มข้น 5%w/v ผสมสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ความเข้มข้น 5%w/v อัตราส่วน 60:40 โดยชนิดของสารเชื่อมโยงที่ใช้ได้แก่ ZnO, STMP/STPP และ CA ปริมาณ 0.25 กรัม แสดงในสูตร F7-F9 จากนั้นทำการทดสอบสมบัติ ได้แก่ ศึกษาหมู่ฟังก์ชัน สมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล และสมบัติทางความร้อน

ตอนที่ 4.3: ศึกษาการแปรปริมาณของ ZnO เป็น 0.5 และ 1 กรัม แสดงในสูตร F10 และ F11 จากนั้นทำการทดสอบสมบัติ ได้แก่ ศึกษาสมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล สมบัติความร้อน และการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย

ตอนที่ 4.1: ศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการเตรียมโฟมแป้งมันสำปะหลังผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์

เตรียมสารละลายแป้งมันสำปะหลังความเข้มข้น 5%w/v ผสมสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ความเข้มข้น 5%w/v อัตราส่วนต่างๆ ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 การเตรียมโฟมจากสารละลายแป้งมันสำปะหลังความเข้มข้น 5%w/v ผสมสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ความเข้มข้น 5%w/v

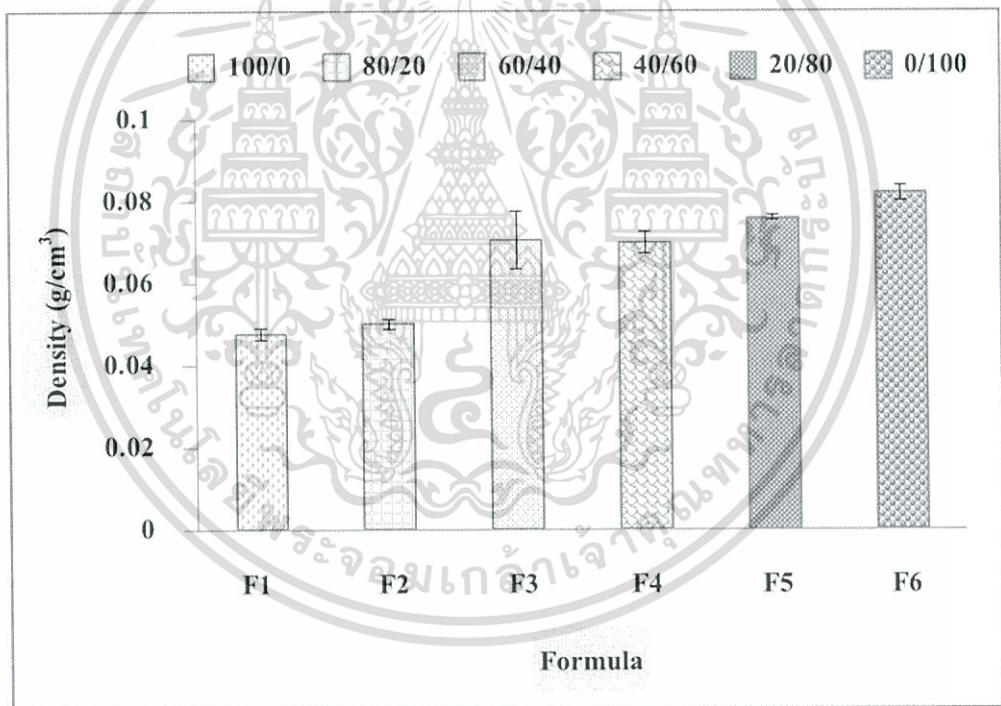
สูตร	สารละลายแป้งมันสำปะหลัง ความเข้มข้น 5%w/v (ml)	สารละลาย PVA ความเข้มข้น 5%w/v (ml)	ลักษณะชิ้นงาน
F1	100	0	
F2	80	20	
F3	60	40	
F4	40	60	
F5	20	80	
F6	0	100	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.1 สามารถเตรียมโพลีเมอร์จากสารละลายแป้งมันสำปะหลังความเข้มข้น 5%w/v และสารละลายผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังความเข้มข้น 5%w/v กับสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ความเข้มข้น 5%w/v ในอัตราส่วนต่างๆ พบว่าโพลีเมอร์ที่ได้ฟองอากาศ มีลักษณะแยกวัฏภาคระหว่างแป้งมันสำปะหลังกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ในสูตร F5 ซึ่งมีสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ความเข้มข้น 5%w/v 80 ส่วน ใน 100 ส่วน และโพลีเมอร์ที่เตรียมได้ในสูตร F6 ซึ่งมีส่วนประกอบของสารละลายแป้งมันสำปะหลังความเข้มข้น 5%w/v 100 ส่วน เนื่องจากพอลิไวนิลแอลกอฮอล์มีความหนืดสูง จากนั้นนำโพลีเมอร์ที่เตรียมได้ทุกสูตรมาทดสอบสมบัติกายภาพ และเชิงกลดังต่อไปนี้

4.1.1 สมบัติทางกายภาพ

4.1.1.1 ความหนาแน่น



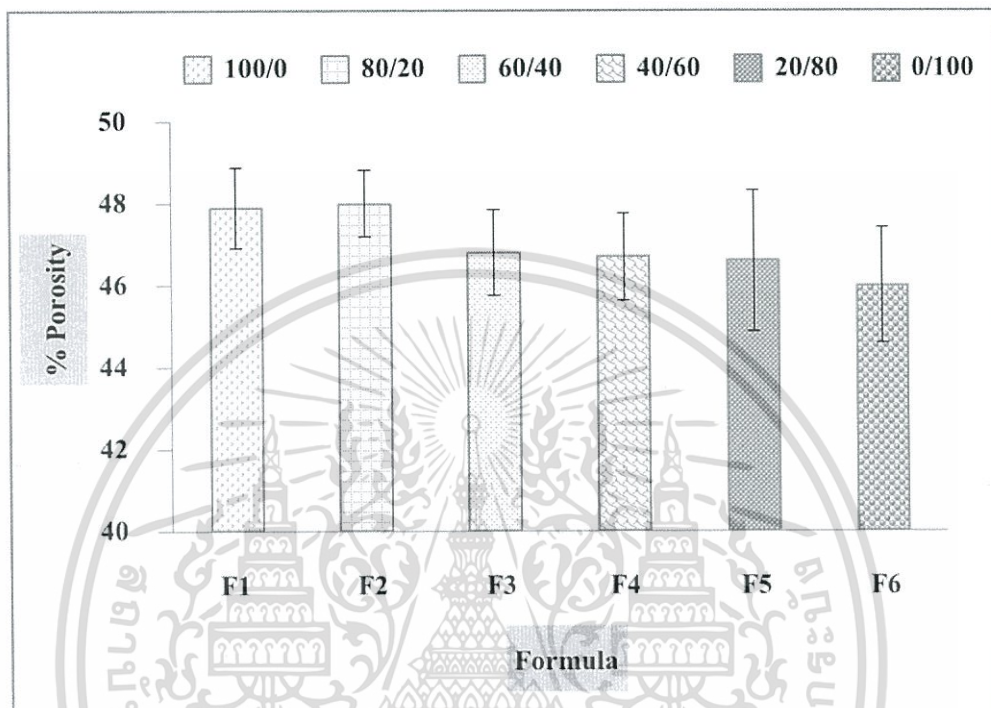
รูปที่ 4.1 ความหนาแน่นของโพลีเมอร์แป้งมันสำปะหลังความเข้มข้น 5%w/v ผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ความเข้มข้น 5%w/v ที่ไม่มีสารเชื่อมโยง

จากรูปที่ 4.1 ความหนาแน่นของโพลีเมอร์แป้งมันสำปะหลังผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ในอัตราส่วน 100:0 80:20 60:40 40:60 20:80 และ 100:0 แสดงในโพลีเมอร์สูตร F1 – F6 โดยโพลีเมอร์ที่มีส่วนประกอบของสารละลายแป้งมันสำปะหลังความเข้มข้น 5%w/v อัตราส่วน 100 มีความหนาแน่นน้อยที่สุดคือ 0.05 g/cm³ และจะมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ในสูตร F6 ซึ่งมีส่วนประกอบของสารละลายแป้งมันสำปะหลังความเข้มข้น 5%w/v 0 ส่วน และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ความเข้มข้น 5%w/v 100 ส่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แอลกอฮอล์ที่เพิ่มขึ้น โดยโพลีเมอร์ F6 มีส่วนประกอบของสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ความเข้มข้น 5%w/v อัตราส่วน 100 มีค่าความหนาแน่นสูงสุดเท่ากับ 0.08 g/cm^3

4.1.1.2 ปริมาตรรูพรุน



รูปที่ 4.2 ปริมาตรรูพรุนของโพลีเมอร์น้ำมันสำปะหลังความเข้มข้น 5%w/v ผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ความเข้มข้น 5%w/v ที่ไม่มีสารเชื่อม โยง

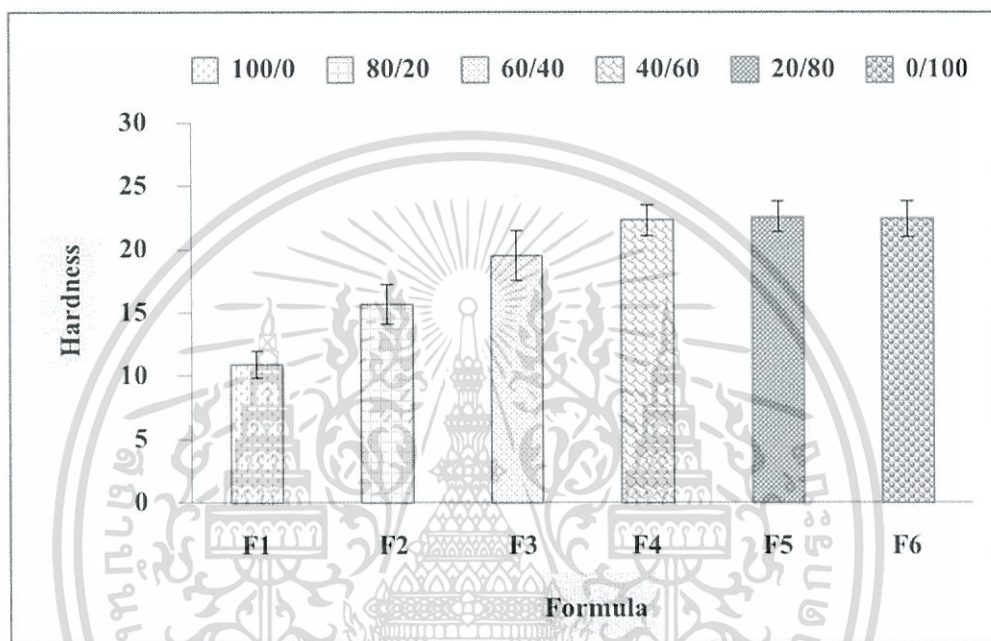
จากรูปที่ 4.2 ปริมาตรรูพรุนของโพลีเมอร์น้ำมันสำปะหลังผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ในอัตราส่วน 100:0 80:20 60:40 40:60 20:80 และ 100:0 แสดงในโพลีสูตร 1 – 6 ตามลำดับ พบว่า ปริมาตรรูพรุนมีค่าลดลงเมื่ออัตราส่วนของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เพิ่มขึ้น เนื่องจากพอลิไวนิลแอลกอฮอล์สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลแป้ง จึงทำให้หมู่ไฮดรอกซิลที่จะดึงดูดโมเลกุลน้ำได้จำนวนน้อยลง ปริมาตรรูพรุนของโพลีสูตร F3 – F5 จึงลดลงโดยมีค่าอยู่ระหว่าง 46% – 47% นอกจากนี้ พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ยังมีหมู่ไฮดรอกซิลในโมเลกุลน้อยกว่าโมเลกุลแป้งจึงดึงดูดน้ำได้น้อยกว่า [35] ส่งผลให้เมื่อขึ้นรูปโพลีด้วยเทคนิคการทำแห้งแบบเยือกแข็งเกิดการระเหิดน้ำออก ปริมาตรรูพรุนจึงน้อยกว่าแป้ง ส่วนโพลีสูตร F1 ซึ่งมีแต่แป้งน้ำมันสำปะหลัง สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลของน้ำได้มากกว่า เมื่อระเหิดน้ำออก ส่งผลให้มีปริมาตรรูพรุนมากกว่าเล็กน้อย คือมีค่า 48%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 สมบัติเชิงกล

4.1.2.1 ความแข็งกด

เตรียมตัวอย่างโพลีเมอร์ต่างๆ โดยช้อนให้มีความหนาประมาณ 6 มิลลิเมตร กว้างไว้ 30 วินาที โดยใช้คูโรมิเตอร์ชนิด A (ลักษณะปลายหัวทุ) ทำการกดอัดประมาณ 10 ครั้งต่อหนึ่งชิ้นงาน ค่าความแข็งกดของโพลีเมอร์ต่างๆ รายงานจะเป็นค่าเฉลี่ยแสดงในรูป 4.3



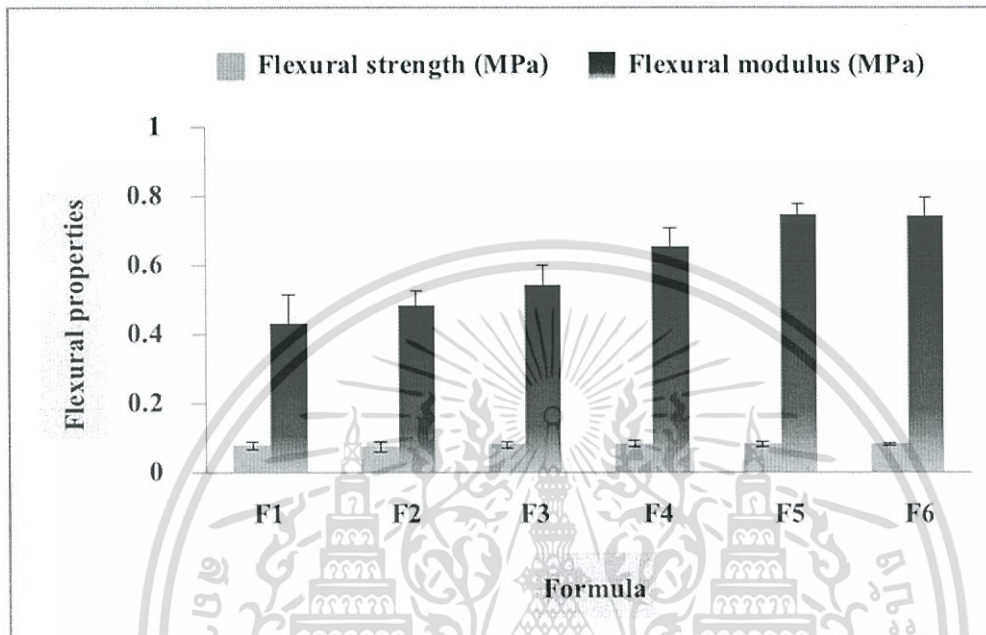
รูปที่ 4.3 ความแข็งกดของโพลีเมอร์แข็งมันสำปะหลังความเข้มข้น 5%w/v ผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ความเข้มข้น 5%w/v ที่ไม่มีสารเชื่อมโยง

จากรูปที่ 4.3 ความแข็งกดของโพลีเมอร์แข็งมันสำปะหลังผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ในอัตราส่วน 100:0 80:20 60:40 40:60 20:80 และ 100:0 ทดสอบโดยใช้คูโรมิเตอร์ ชนิด A แสดงในโพลีเมอร์ F1 – F6 ตามลำดับ พบว่า ความแข็งกดของโพลีเมอร์ F1 คือโพลีเมอร์ที่มีส่วนประกอบแข็งมันสำปะหลัง 100 มีค่าความแข็งกดน้อยที่สุดคือ 11 และโพลีเมอร์ที่มีส่วนประกอบของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ 100 มีค่าความแข็งกดมากที่สุดคือ 22 ความแข็งกดจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณอนุพันธ์ของโพลีเมอร์ต่างๆ เนื่องจากโมเลกุลของแข็งมันสำปะหลังมีหมู่ไฮดรอกซิลจำนวนมาก จึงสามารถดูดน้ำได้มาก เมื่อขึ้นรูปโพลีเมอร์ด้วยเทคนิคการทำแห้งแบบเยือกแข็ง จึงทำให้โพลีเมอร์มีปริมาณอนุพันธ์ของโพลีเมอร์สูง ความแข็งกดน้อย สำหรับโมเลกุลของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ดูดน้ำได้น้อยกว่าปริมาณอนุพันธ์จึงน้อยกว่า (ผลการทดลองในรูปที่ 4.2) ส่งผลให้ค่าความแข็งกดสูง และเมื่อผสมสารละลายแข็งมันสำปะหลังความเข้มข้น 5%w/v และ สารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ความเข้มข้น 5%w/v

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความแข็งแรงของโพลีเมอร์เพิ่มขึ้นตามปริมาณพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่เพิ่มขึ้นและปริมาณรพูนที่น้อยลง

4.1.2.2 ความแข็งแรงโค้งงอและมอดูลัสโค้งงอ



รูปที่ 4.4 ความแข็งแรงโค้งงอและมอดูลัสโค้งงอของโพลีเมอร์น้ำมันสำปะหลังความเข้มข้น 5%w/v ผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ความเข้มข้น 5%w/v ที่ไม่มีสารเชื่อมโยง

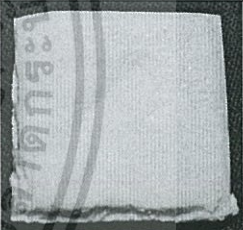
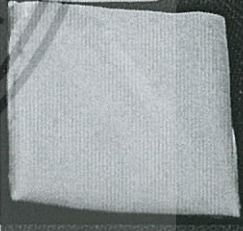
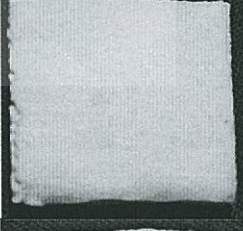

จากรูปที่ 4.4 ความแข็งแรงโค้งงอและมอดูลัสโค้งงอของโพลีเมอร์น้ำมันสำปะหลังผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ในอัตราส่วน 100:0 80:20 60:40 40:60 20:80 และ 100:0 แสดงในโพลีสูตร F1 – F6 ตามลำดับ พบว่า ค่าความแข็งแรงโค้งงอของโพลีสูตร F1 – F6 มีค่าไม่แตกต่างกัน ซึ่งจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0.07 – 0.08 MPa ซึ่งหมายถึงค่าแรงสูงสุดที่ให้ก่อนโพลีเกิดการเสียหาย แต่ค่ามอดูลัสโค้งงอมีแนวโน้มสูงขึ้น ตามอัตราส่วนของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์มากขึ้น ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 0.4 – 0.7 MPa แสดงว่าโพลีสามารถรับแรงได้มากขึ้นก่อนการเสียหาย นั่นคือแข่งกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เกิดแรงกระทำกันระหว่างกัน ซึ่งสอดคล้องกับการทดสอบปริมาตรรพูนในรูปที่ 4.2 และ ความแข็งแรงกดในรูปที่ 4.3 ตามลำดับ

จากทดสอบสมบัติทางกายภาพและเชิงกลของโพลีสูตร F1 – F6 พบว่า ความหนาแน่นและปริมาตรรพูนของโพลีสูตร F3 F4 และ F5 มีค่าใกล้เคียงกัน การทดสอบ ความแข็งแรงกด มอดูลัสโค้งงอไม่ต่างกันและความแข็งแรงโค้งงอเพิ่มสูงขึ้นเล็กน้อย ตามปริมาณพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เนื่องจากพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เป็นสารสังเคราะห์ จึงเลือกอัตราส่วนระหว่างน้ำมันสำปะหลังความเข้มข้น 5%w/v ผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ความเข้มข้น 5%w/v ที่อัตราส่วน 60:40 (สูตร F3) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตหากมีข้อผิดพลาดประการใดขออภัยเป็นอย่างสูง และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มาปรับปรุงสมบัติโดยใช้สารเชื่อมโยง 3 ชนิด ในตอนที่ 2 ได้แก่ ZnO, STMP/STPP และ CA แสดงในสูตร F7 F8 และ F9 เพื่อลดการใช้สารสังเคราะห์และได้โฟมจากแป้งมันสำปะหลังที่ไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมรวมถึงเพิ่มทางเลือกนำผลผลิตทางการเกษตรมาใช้ให้เป็นประโยชน์และเพิ่มมูลค่าให้กับแป้งมันสำปะหลังอีกด้วย

ตอนที่ 4.2: ศึกษาชนิดสารเชื่อมโยง ZnO ,STMP/STPP และ CA ที่มีต่อของโฟมแป้งมันสำปะหลังผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ อัตราส่วน 60 : 40

ตารางที่ 4.2 การเตรียมโฟมจากสารละลายแป้งมันสำปะหลังความเข้มข้น 5%w/v ผสมสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ความเข้มข้น 5%w/v โดยใช้สารเชื่อมโยงต่างชนิด

สูตร	สารละลายแป้งมัน : สารละลาย PVA ความ เข้มข้น 5%w/v (ml)	สารเชื่อมโยง	ปริมาณ (g)	ลักษณะชิ้นงาน
F3	60:40	-	0	
F7	60:40	ZnO	0.25	
F8	60:40	STMP/STPP	0.25	
F9	60:40	CA	0.25	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

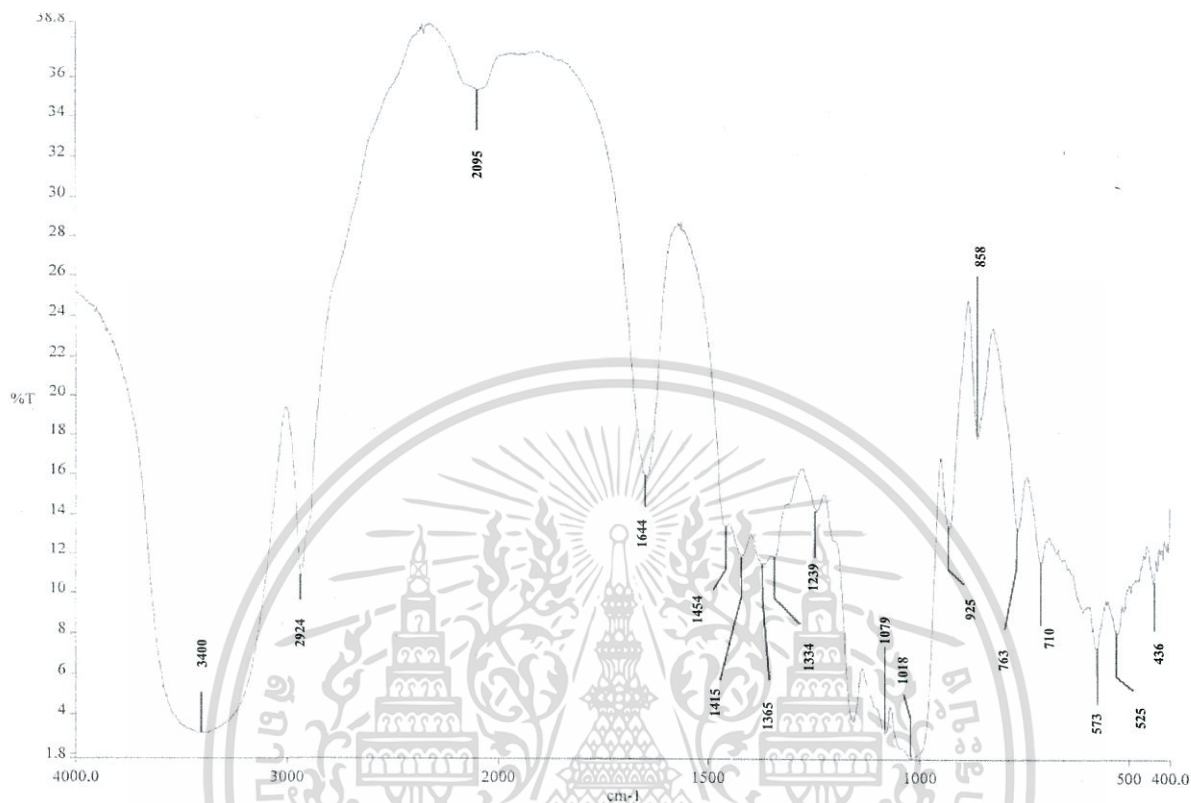
จากตารางที่ 4.2 เตรียมโพลีเมอร์จากสารละลายแป้งมันสำปะหลังความเข้มข้น 5%w/v และ สารละลายผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังความเข้มข้น 5%w/v กับสารละลายพอลิไวนิล แอลกอฮอล์ความเข้มข้น 5%w/v ในอัตราส่วน 60 : 40 โดยใช้สารเชื่อมโยง ได้แก่ ZnO, STMP/STPP และ CA ปริมาณ 0.25 กรัม ซึ่งแสดงในสูตร F7 F8 และ F9 พบว่าลักษณะพื้นผิว ของโพลีเมอร์เมื่อใส่สารเชื่อมโยงทุกชนิดให้ลักษณะเรียบ เป็นเนื้อเดียวกัน นำมาศึกษาหาหมู่ฟังก์ชัน สมบัติกายภาพ สมบัติเชิงกล และสมบัติความร้อนให้ผลการทดสอบดังนี้

4.2.1 ศึกษาหาหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FT-IR

ใช้เทคนิค FT-IR ศึกษาหาหมู่ฟังก์ชันของแป้งมันสำปะหลัง พอลิไวนิลแอลกอฮอล์และ โพลีเมอร์แป้งมันสำปะหลังความเข้มข้น 5%w/v ผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ความเข้มข้น 5%w/v อัตราส่วน 60:40 ทั้งที่ไม่มีและมีส่วนเชื่อมโยง ทำได้โดยการนำโพลีเมอร์ต่างๆ ประมาณ 3 มิลลิกรัม มาบดรวมกับ KBr แล้วนำไปอัดให้เป็นแผ่น สภาวะที่ใช้คือ ที่ความยาวคลื่น $4,000-600\text{ cm}^{-1}$ โดย ทำการสแกน 6 ครั้งต่อตัวอย่างความละเอียดที่ใช้คือ 4 cm^{-1}

ผลจากการศึกษาโดยเทคนิค FT-IR ของแป้งมันสำปะหลังแสดงในรูปที่ 4.5 พอลิไวนิล แอลกอฮอล์แสดงในรูปที่ 4.6 และโพลีเมอร์แป้งมันสำปะหลังความเข้มข้น 5%w/v ผสมพอลิไวนิล แอลกอฮอล์ความเข้มข้น 5%w/v อัตราส่วน 60:40 ใช้สารเชื่อมโยง คือ ZnO, STMP/STPP และ CA แสดงในรูปที่ 4.7 ตามลำดับ

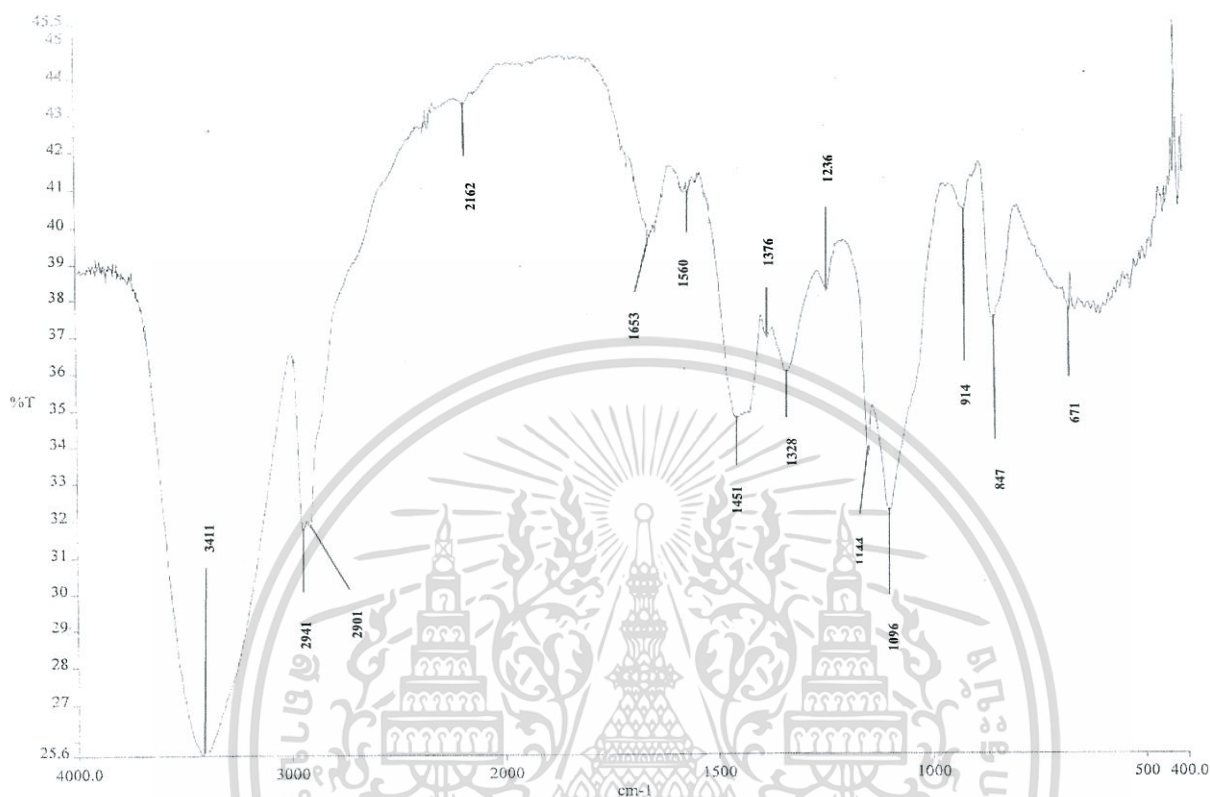
4.2.1.1 แป้งมันสำปะหลัง



รูปที่ 4.5 อินฟราเรดสเปกตรัมของแป้งมันสำปะหลัง

จากรูปที่ 4.5 แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของแป้งมันสำปะหลัง โดยพิจารณาเลขคลื่นช่วง $400-4000\text{ cm}^{-1}$ พบแถบการดูดกลืน $3300-3500\text{ cm}^{-1}$ เป็นการสั่นแบบ O-H stretching จากแป้ง แถบการดูดกลืน 2900 cm^{-1} ซึ่งเกิดจากการสั่นแบบ C-H stretching ของ CH_2 และ CH_3 ของแป้ง แถบการดูดกลืน 1650 cm^{-1} แสดง C-O-H stretching อธิบายถึงการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักโมเลกุลของน้ำแล้วเกิดการ ดึงน้ำออก (Dehydration) เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การเกิดรีโทรเกรดชัน แถบการดูดกลืน 1400 cm^{-1} เป็นช่วงของการดูดกลืนของ O-H bending แถบการดูดกลืนในช่วง $1100-1300\text{ cm}^{-1}$ ลักษณะการสั่นเป็นแบบ C-O-C stretching ของแป้ง [51]

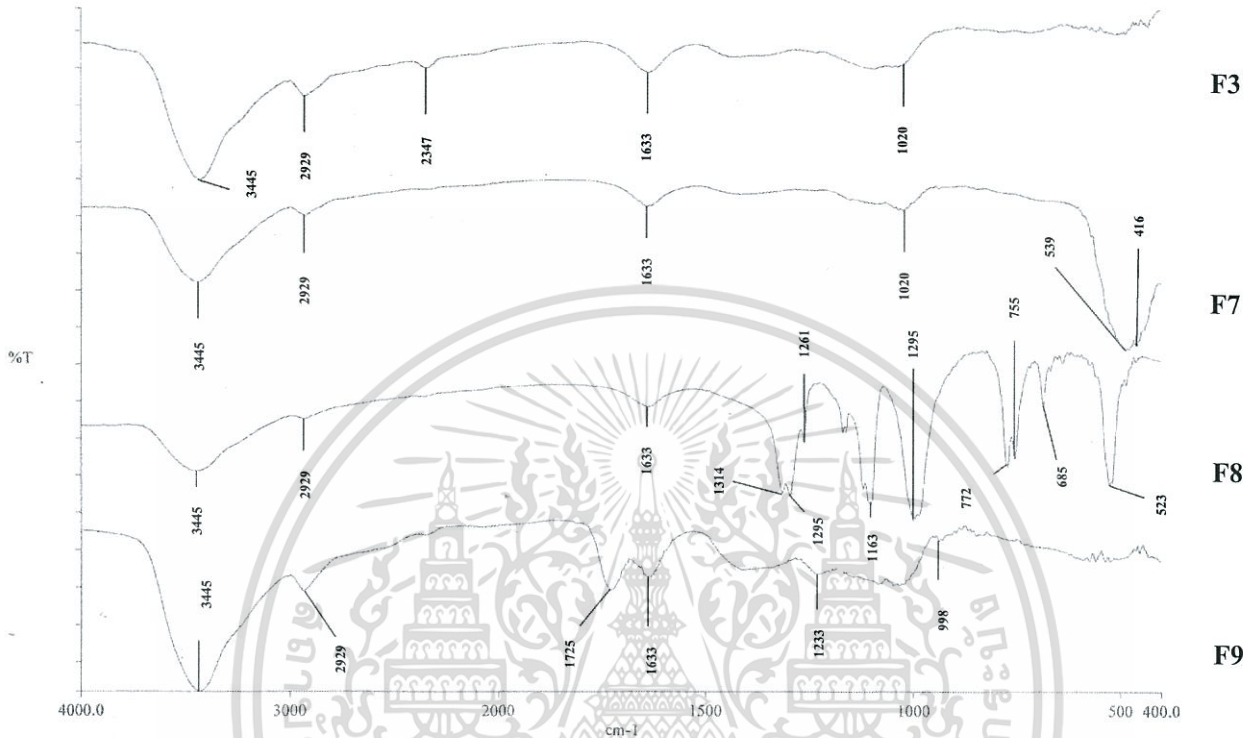
4.2.1.2 พอลิไวนิลแอลกอฮอล์



รูปที่ 4.6 อินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์

จากรูปที่ 4.6 แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ โดยพิจารณาเลขคลื่น ช่วง $400\text{-}4000\text{ cm}^{-1}$ พบแถบการดูดกลืน $3300\text{-}3500\text{ cm}^{-1}$ เป็นการสั่นแบบ O-H stretching จากพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ แถบการดูดกลืน 2900 cm^{-1} ซึ่งเกิดจากการสั่นแบบ C-H stretching ของ CH_2 และ CH_3 ของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ แถบการดูดกลืน 1653 cm^{-1} แสดงถึงการสั่นแบบ C=O และ 1100 cm^{-1} แสดงถึงการสั่นของ C-O stretching แถบการดูดกลืนคลื่นที่ 1250 cm^{-1} แสดงถึงการสั่นแบบ H-C-H bending ของหมู่ CH_3 แถบการดูดกลืนคลื่นที่ 850 cm^{-1} ซึ่งหมายถึงการสั่นแบบ C-C stretching และที่แถบการดูดกลืน 650 cm^{-1} แสดงถึงการสั่นแบบ H-C-H bending ของหมู่ CH_2 [52]

4.2.1.3 การเปรียบเทียบอินฟราเรดสเปกตรัมของโฟมแป้งมันสำปะหลังผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ทั้งที่ไม่มีและมีส่วนผสมของปริมาณ 0.25 กรัมตามลำดับ



รูปที่ 4.7 อินฟราเรดสเปกตรัมของโฟมแป้งมันสำปะหลังผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์อัตราส่วน 60:40 มิลลิลิตร ทั้งที่ไม่มีและมีส่วนผสมของ ZnO, STMP/STPP และ CA แสดงในสูตร F3 F7 F8 และ F9

จากรูปที่ 4.7 แสดงสเปกตรัมของร้อยละการส่องผ่านแสงของโฟมแป้งมันสำปะหลังผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ไม่มีและมีส่วนผสมในสูตร F3 F7 F8 และ F9 ตามลำดับ พบว่าอินฟราเรดสเปกตรัมแตกต่างกันดังนี้

สูตร F3 หรือโฟมแป้งมันสำปะหลังผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ไม่ใช้สารเติมลงในอัตราส่วน 60 : 40 มิลลิลิตร พบว่าแถบการดูดกลืนคลื่นที่ 3445 cm^{-1} แสดงถึง O-H stretching ของแป้งมันสำปะหลังและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ แถบการดูดกลืน 2900 cm^{-1} ซึ่งเกิดจากการสั่นแบบ C-H stretching ของ CH_2 และ CH_3 ของแป้งมันสำปะหลังและ พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ แถบการดูดกลืน 1633 cm^{-1} และ 1020 cm^{-1} แสดงถึงการสั่นแบบ C=O และ C-O stretching

สูตร F7 หรือโฟมแป้งมันสำปะปลั่งผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ใช้ ZnO เป็นสารเชื่อมโยงในอัตราส่วน 60 : 40 มิลลิลิตร มีแถบการดูดกลืนคลื่นที่คล้ายคลึงกันกับสูตร F3 แต่มีความแตกต่างกันที่แถบการดูดกลืนคลื่นช่วงที่ 539 cm^{-1} และ 416 cm^{-1} แสดงถึงหมู่ Zn

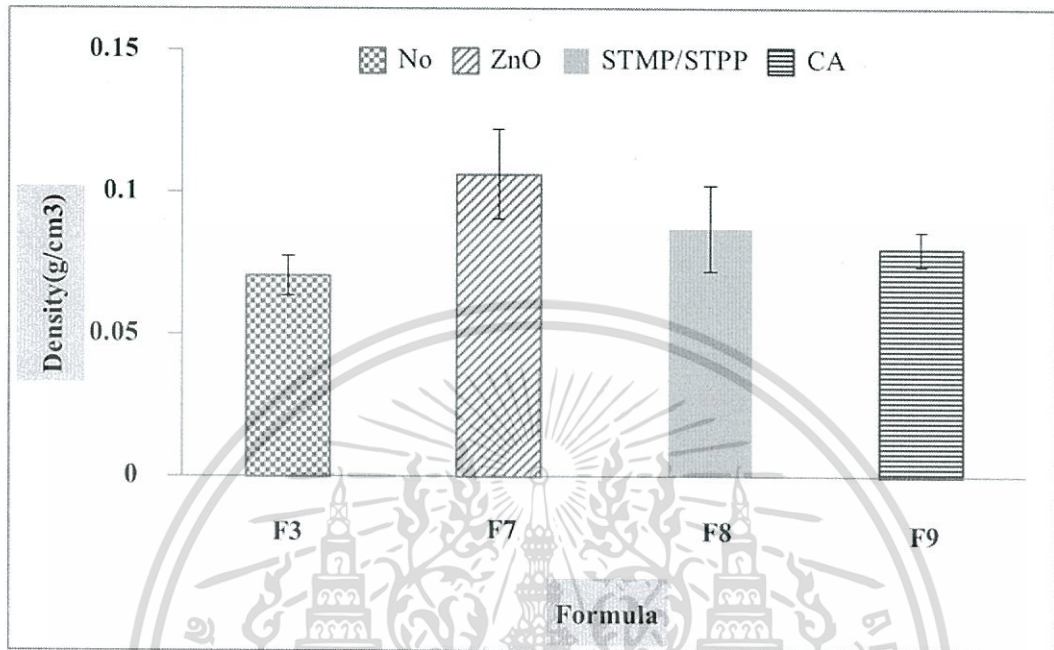
สูตร F8 หรือโฟมแป้งมันสำปะปลั่งผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ใช้ STMP/STPP เป็นสารเชื่อมโยงในอัตราส่วน 60 : 40 มิลลิลิตร มีแถบการดูดกลืนคลื่นที่คล้ายคลึงกันกับสูตร F3 แต่มีความแตกต่างกันที่แถบการดูดกลืนคลื่นช่วงที่ 1315 cm^{-1} แสดงถึง P=O ใน STMP

สูตร F9 หรือโฟมแป้งมันสำปะปลั่งผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ใช้ CA เป็นสารเชื่อมโยงในอัตราส่วน 60 : 40 มิลลิลิตร มีแถบการดูดกลืนคลื่นที่คล้ายคลึงกันกับสูตร F3 แต่มีความแตกต่างกันที่แถบการดูดกลืนคลื่นช่วงที่ 1730 cm^{-1} แสดงถึง C=O ของพันธะเอสเทอร์และหมู่คาร์บอนิลใน CA



4.2.2 สมบัติกายภาพ

4.2.2.1 ความหนาแน่น



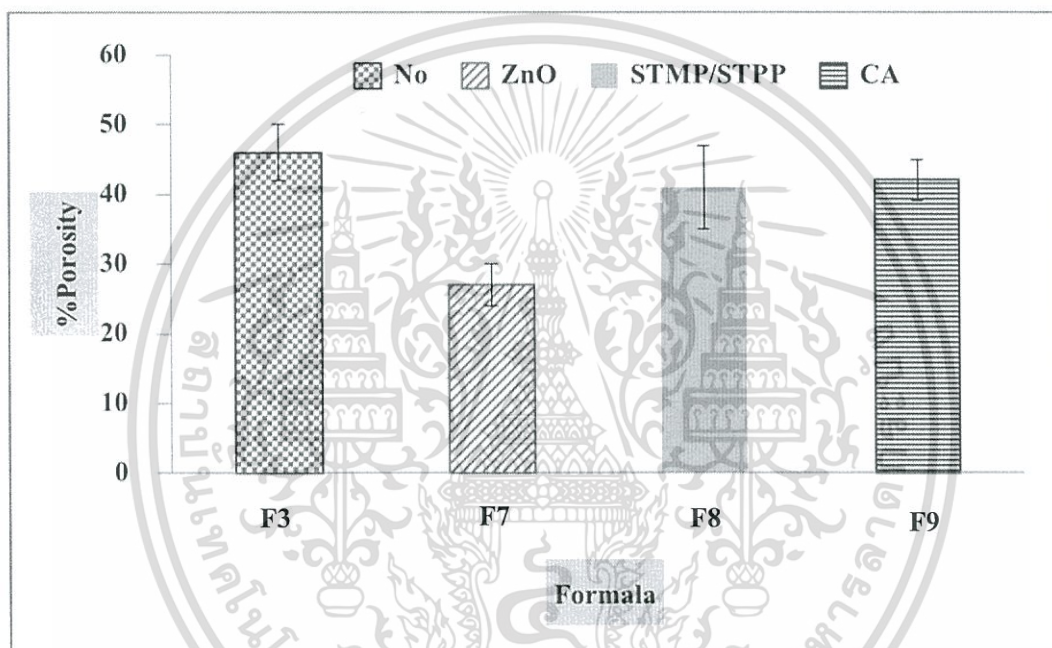
รูปที่ 4.8 ความหนาแน่นของโฟมแข็งมันสำปะหลังผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์อัตราส่วน 60: 40 ทั้งที่ไม่มีและมีส่วนผสมของ ZnO, STMP/STPP และ CA ปริมาณ 0.25 กรัม

จากรูปที่ 4.8 พบว่าโฟมแข็งมันสำปะหลังผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์อัตราส่วน 60: 40 เมื่อใส่สารเชื่อมโยง ZnO, STMP/STPP และ CA ปริมาณ 0.25 กรัม แสดงในสูตร F7 F8 และ F9 ส่งผลให้โฟมมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น โดยโฟมสูตรที่ใช้สารเชื่อมโยง ZnO หรือสูตร F7 มีความหนาแน่นมากที่สุด มีค่าประมาณ 0.12 g/cm^3 โฟมสูตรที่ใช้สารเชื่อมโยง STMP/STPP หรือสูตร F8 ซึ่งมีความหนาแน่นคือ 0.09 g/cm^3 การเพิ่มหมู่ฟอสเฟตเป็นการเพิ่มหมู่มีขั้วทำให้ดึงดูดโมเลกุลของน้ำได้มากกว่าการใช้ ZnO ปริมาตรรูพรุนของโฟมจึงมากกว่า ความหนาแน่นจึงน้อยกว่า ZnO และโฟมสูตรที่ใช้สารเชื่อมโยง CA หรือสูตร F9 มีความหนาแน่นน้อยสุด คือ 0.08 g/cm^3 เนื่องจากการเติม CA เป็นการเพิ่มหมู่คาร์บอกซิลิก 3 หมู่ และหมู่ไฮดรอกซิล 1 หมู่ซึ่งเป็นหมู่ที่มีขั้ว สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับหมู่ไฮดรอกซิลของแป้งมันสำปะหลังและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ได้ [53] เท่ากับเป็นการเพิ่มหมู่ที่ชอบน้ำให้กับโฟม เมื่อระเหิดน้ำออกจากเทคนิคขึ้นรูป จึงส่งผลให้ปริมาตรรูพรุนมีค่าสูง ความหนาแน่นต่ำ แต่อย่างไรก็ตามความหนาแน่นของโฟมสูตรที่ใช้สารเชื่อมโยง CA หรือสูตร F9 ก็ยังมีความหนาแน่นมากกว่า โฟมที่ไม่ได้ใส่สารเชื่อมโยง หรือสูตร F3 ซึ่งมีค่าเพียง 0.07 g/cm^3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2.2 ปริมาตรรูพรุน

ซึ่งนำหนักโพลีเมอร์แห้งสำหรับหลังผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์อัตราส่วน 60: 40 ทั้งที่ไม่มีและมีส่วนเชื่อมโยงทุกสูตร ขนาด 1x1 ตารางนิ้ว วัดปริมาตรเฮกเซนเริ่มต้น (V_1) ในกระบอกตวง หลังจากนั้นนำโพลีเมอร์ต่างๆ ใส่ลงในกระบอกตวงแช่ทิ้งงานทิ้งไว้นาน 5 นาที วัดปริมาตรเฮกเซนที่มีโพลีเมอร์อยู่ในกระบอกตวง (V_2) จากนั้นนำโพลีเมอร์ออกวัดปริมาตรเฮกเซนที่เหลือ (V_3) คำนวณหาปริมาตรรูพรุนของโพลีเมอร์แห้งสำหรับหลังผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ไม่มีและมีส่วนเชื่อมโยงอัตราส่วน 60: 40 สูตรต่างๆ ให้ผล แสดงในรูปที่ 4.9



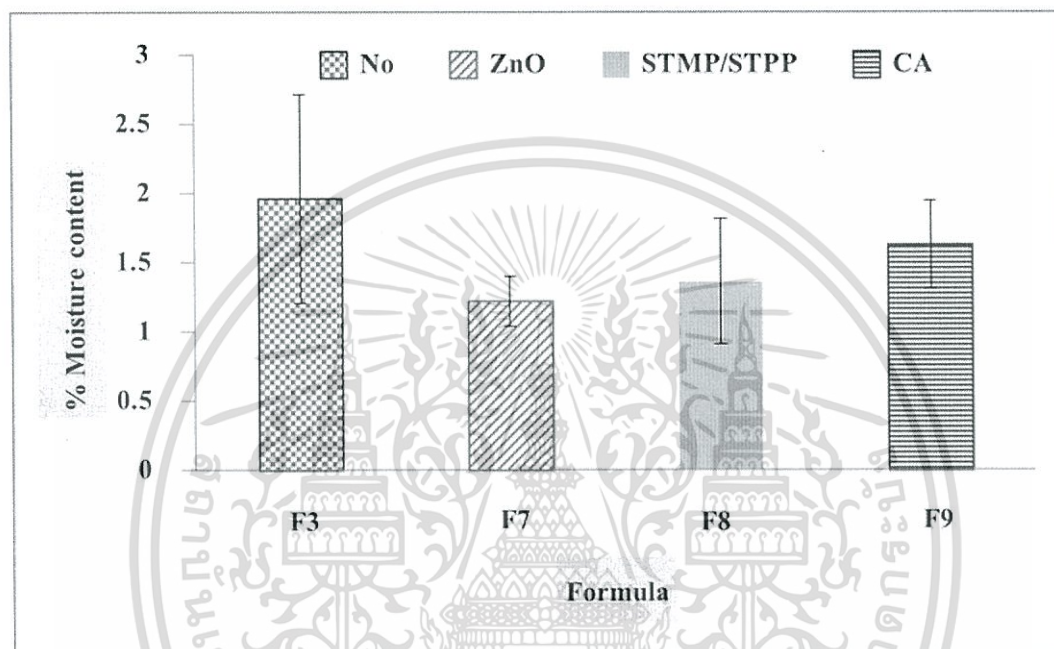
รูปที่ 4.9 ปริมาตรรูพรุนของโพลีเมอร์แห้งสำหรับหลังผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์อัตราส่วน 60: 40 ทั้งที่ไม่มีและมีส่วนเชื่อมโยง ZnO, STMP/STPP และ CA ปริมาณ 0.25 กรัม

จากรูปที่ 4.9 พบว่าปริมาตรรูพรุนของโพลีเมอร์แห้งสำหรับหลังผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์อัตราส่วน 60: 40 ไม่มีส่วนเชื่อมโยง หรือสูตร F3 มีค่า 48% แต่เมื่อมีส่วนเชื่อมโยง ZnO, STMP/STPP และ CA ปริมาณ 0.25 กรัมแสดงในสูตร F7 F8 และ F9 พบว่าปริมาตรรูพรุนมีค่าเปลี่ยนแปลงเป็น 27% 41% และ 42% ตามลำดับ ผลการทดสอบสอดคล้องกับความหนาแน่นในรูปที่ 4.8 ซึ่งโพลีเมอร์ที่ใช้ส่วนเชื่อมโยง ZnO หรือสูตร F7 มีความหนาแน่นมากที่สุด จึงมีปริมาตรรูพรุนน้อยที่สุด โพลีเมอร์ที่ใช้ส่วนเชื่อมโยง STMP/STPP หรือสูตร F8 มีปริมาตรรูพรุน 41% ซึ่งมีความหนาแน่น 0.09 g/cm^3 ใกล้เคียงกับโพลีเมอร์ที่ใช้ส่วนเชื่อมโยง CA หรือสูตร F9 มีปริมาตรรูพรุน 42% และมีความหนาแน่น คือ 0.08 g/cm^3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2.3 ปริมาณความชื้น

นำโคมแป้งมันสำปะหลังผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ทั้งที่ไม่มีและมีสารเชื่อมโยงขนาด 1 ตารางนิ้ว อบให้แห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสน้ำหนักที่ได้ จากนั้นวางชิ้นงานที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 วัน เพื่อให้เกิดสมดุล คำนวณหาปริมาณความชื้นของโคมแป้งสูตรต่างๆ ให้ผลแสดงในรูปที่ 4.10



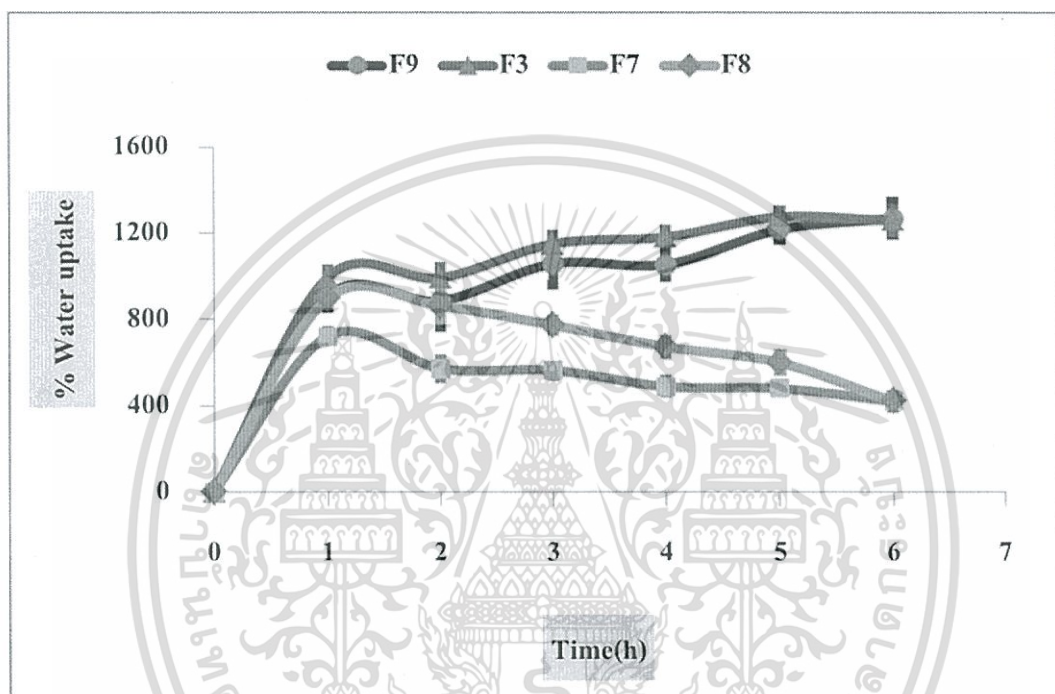
รูปที่ 4.10 ปริมาณความชื้นของโคมแป้งมันสำปะหลังผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์อัตราส่วน 60: 40 ทั้งที่ไม่มีและมีสารเชื่อมโยง ZnO, STMP/STPP และ CA ปริมาณ 0.25 กรัม

จากรูปที่ 4.10 พบว่าโคมแป้งมันสำปะหลังผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์สูตร F7 F8 และ F9 มีปริมาณความชื้นในชิ้นงานต่างกันโดยโคมแป้งมันสำปะหลังผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์อัตราส่วน 60: 40 หรือสูตร F3 มีความชื้นมากที่สุดคือ 2% เนื่องจากโคมสูตร F3 เป็นโคมที่ไม่ได้ใส่สารเชื่อมโยง โมเลกุลแป้งมันสำปะหลังและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์มีหมู่ไฮดรอกซิลอิสระอยู่จำนวนมากที่สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับไอน้ำในบรรยากาศได้ ส่วนโคมที่มีสารเชื่อมโยงแม้จะมีหมู่ไฮดรอกซิลอิสระเช่นเดียวกัน แต่จะมีหมู่ไฮดรอกซิลบางส่วนเกิดพันธะเชื่อมโยงกับสารเชื่อมโยง จึงทำให้มีหมู่ไฮดรอกซิลลดลง โดยมีความชื้นเรียงลำดับจากมากไปน้อยดังนี้โคมสูตรที่ใช้สารเชื่อมโยง CA หรือสูตร F9 มีความชื้น 1.6% โคมสูตรที่ใช้สารเชื่อมโยง STMP/STPP หรือสูตร F8 มีความชื้น 1.4% และโคมสูตรที่ใช้สารเชื่อมโยง ZnO หรือสูตร F7 มีความชื้นน้อยสุดคือ 1.2% อาจเนื่องจากอนุภาค ZnO

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2.4 การดูดซับน้ำ

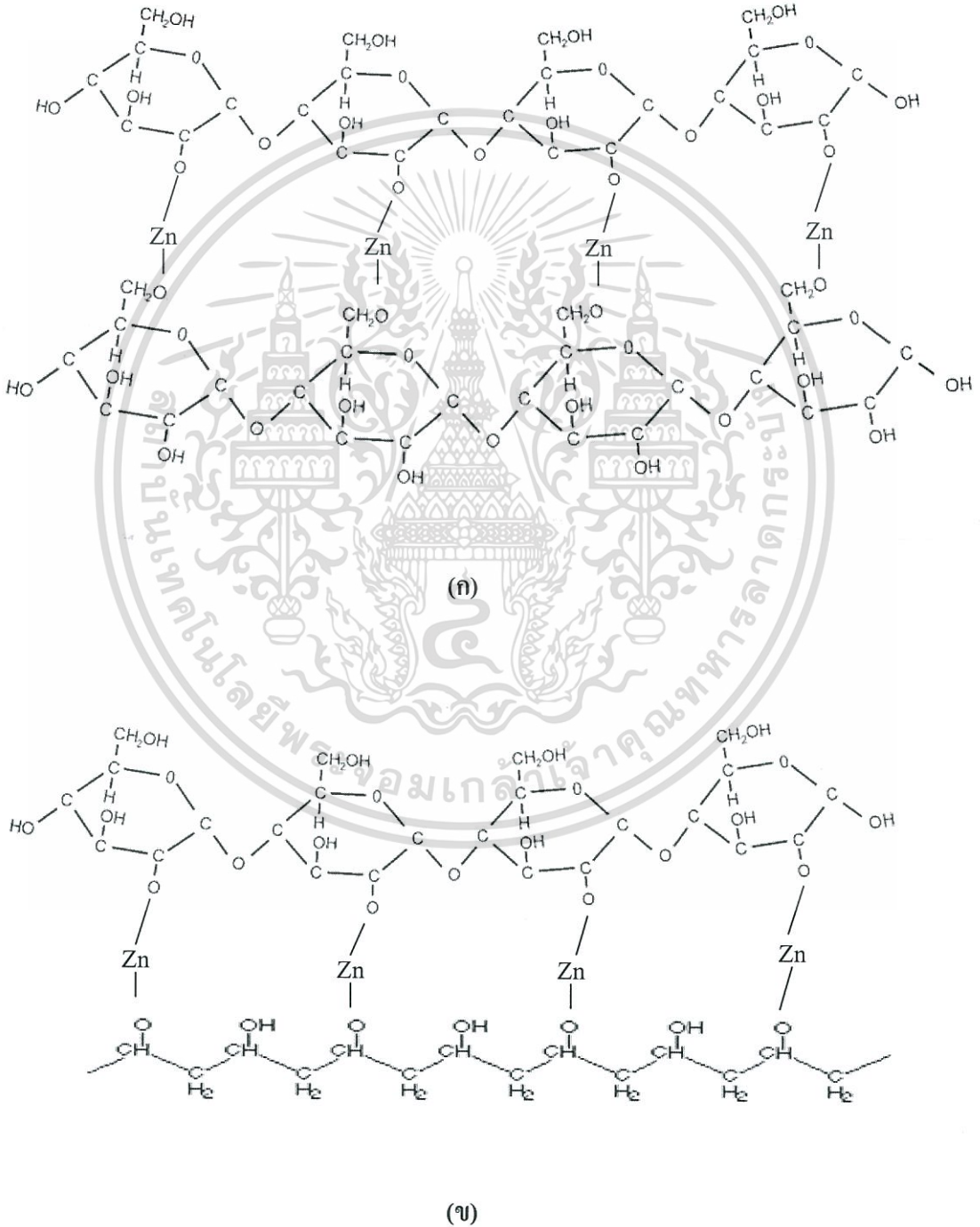
ตัดโคมแป้งมันสำปะหลังผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์อัตราส่วน 60: 40 ทั้งที่ไม่มีและมีส่วนเชื่อมโยงให้มีขนาด 1 ตารางนิ้ว นำมาชั่งน้ำหนักก่อนการแช่น้ำ หลังจากนั้นนำโคมสูตรต่างๆ ชั่งน้ำหนักทุก 1 ชั่วโมงจนน้ำหนักทุกชั่วโมงจนครบ 6 ชั่วโมงแล้วแช่ไว้ 24 ชั่วโมง จดน้ำหนักภายหลังการดูดซับน้ำ คำนวณหาปริมาณความชื้นของโคมสูตรต่างๆ ให้ผลแสดงในรูปที่ 4.11



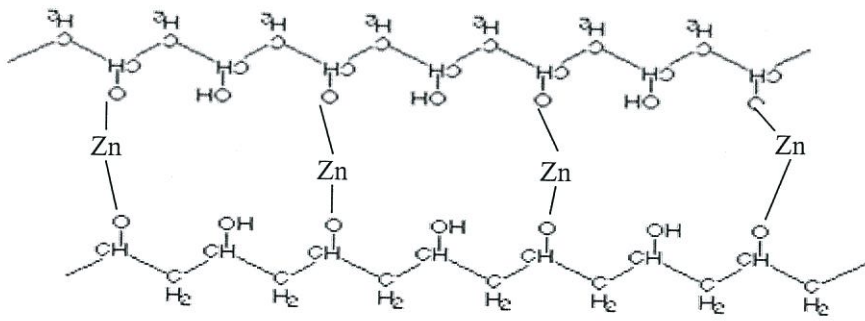
รูปที่ 4.11 การดูดซับน้ำของโคมแป้งมันสำปะหลังผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์อัตราส่วน 60: 40 ทั้งที่ไม่มีและมีส่วนเชื่อมโยง ZnO, STMP/STPP และ CA ปริมาณ 0.25 กรัม

จากรูป 4.11 การดูดซับน้ำของโคมแป้งมันสำปะหลังผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์อัตราส่วน 60: 40 ทั้งที่ไม่มีและมีส่วนเชื่อมโยง ZnO, STMP/STPP และ CA ปริมาณ 0.25 กรัม แสดงในสูตร F3 F7 F8 และ F9 พบว่าโคมทุกสูตรสามารถดูดซับน้ำได้สูงในชั่วโมงแรก โดยมีค่าที่ 992% 720% 896% และ 906% ตามลำดับ โคมสูตร F7 มี ZnO เป็นสารเชื่อมโยง ดูดซับน้ำได้น้อยสุด ในขณะที่โคมสูตร F8 มี STMP/STPP เป็นสารเชื่อมโยง และโคมสูตร F9 มี CA เป็นสารเชื่อมโยงมีหุ้มมีขั้ว จึงดูดซับน้ำได้ดีกว่า โคมสูตร F3 เป็นโคมที่ไม่มีสารเชื่อมโยง มีแนวโน้มการดูดซับน้ำสูงขึ้นในทุกๆ ชั่วโมงและมีค่าการดูดซับน้ำได้มากที่สุดในช่วงเวลาที่ 6 มีค่าประมาณ 1256% เนื่องจากองค์ประกอบของแป้งมันสำปะหลังนั้นมีหมู่ไฮดรอกซิลอิสระที่สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลของน้ำได้ สำหรับโคมที่มี ZnO เป็นสารเชื่อมโยงหรือสูตร F7 ความสามารถในการดูดซับน้ำของโคมในสูตร 7 มีค่าลดลงจาก 720% เป็น 419% และเมื่อใช้ STMP/STPP เป็นสารเชื่อมโยงหรือเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สูตร F8 ลดลงจาก 869% เป็น 418% ส่วนโพลีสูตร 9 ที่ใช้ CA เป็นสารเชื่อมโยงค่าการดูดซับน้ำ แนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น คล้ายโพลีสูตร 3 เนื่องจากการเติม CA เป็นการเพิ่มหมู่คาร์บอกซิลิก 3 หมู่ ซึ่งเป็นหมู่ที่มีขั้ว สามารถเกิดพันธะเอสเทอร์กับหมู่ ไฮดรอกซิล (-OH) ของแป้งมันสำปะหลังและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ได้ดังรูปที่ 4.14 แต่ยังมีเหลือหมู่คาร์บอกซิลิกและไฮดรอกซิลที่สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับน้ำได้ [48]

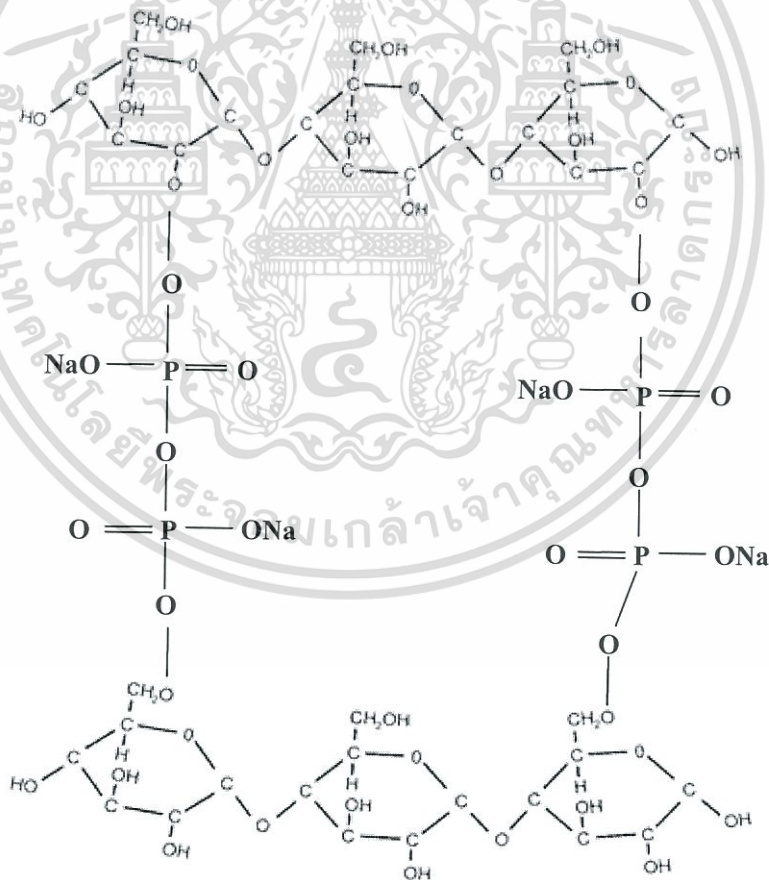


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



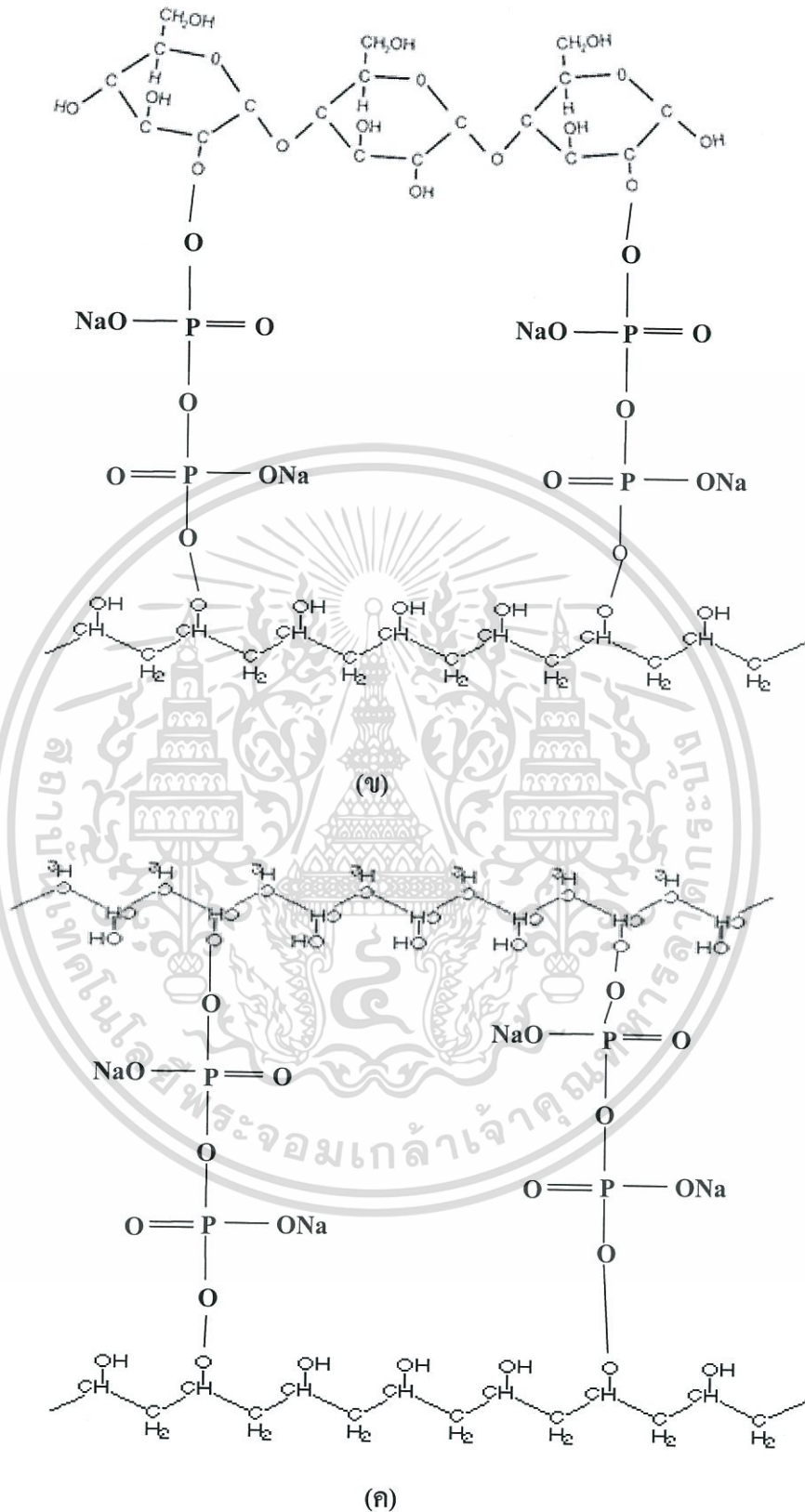
(ก)

รูปที่ 4.12 แสดงลักษณะความเป็นไปได้ของพันธะ ZnO (ก) ในโมเลกุลแป้งมันสำปะหลัง (ข) ในโมเลกุลแป้งมันสำปะหลังผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ และ (ค) ในโมเลกุลพอลิไวนิลแอลกอฮอล์



(ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

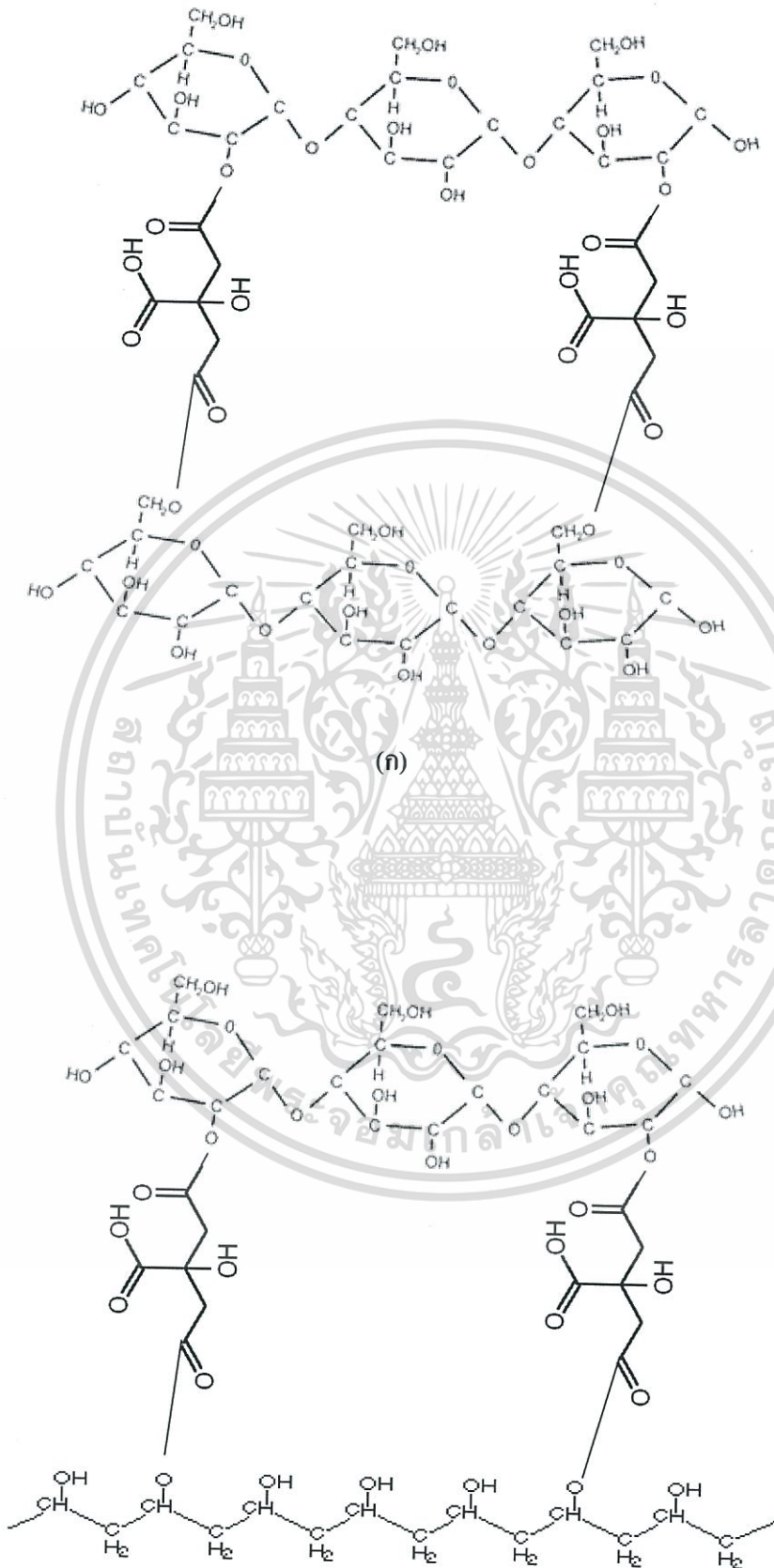


รูปที่ 4.13 แสดงลักษณะความเป็นไปได้ของพันธะ STMP/STPP

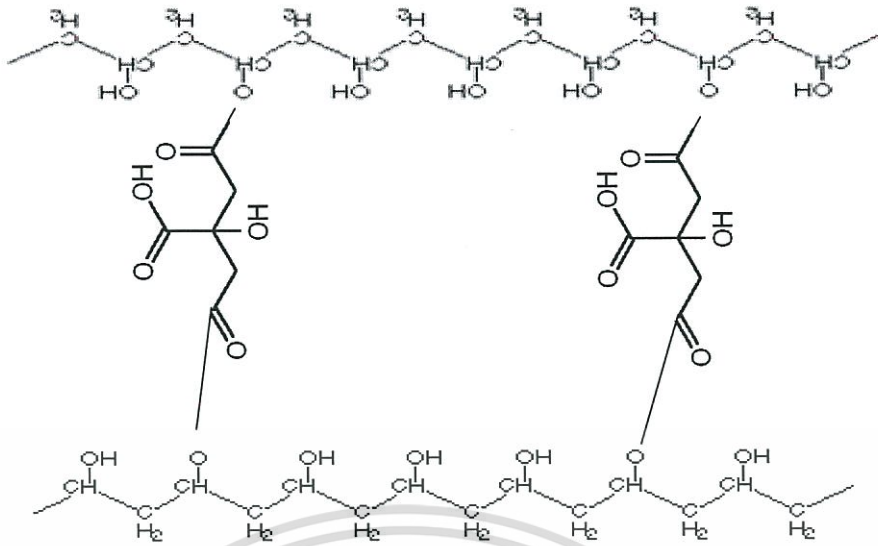
(ก) ในโมเลกุลแป้งมันสำปะหลัง (ข) ในโมเลกุลแป้งมันสำปะหลังผสมพอลิไวนิล

แอลกอฮอล์ และ (ค) ในโมเลกุลพอลิไวนิลแอลกอฮอล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิใช่ผู้ผู้ใดเห็นใจประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



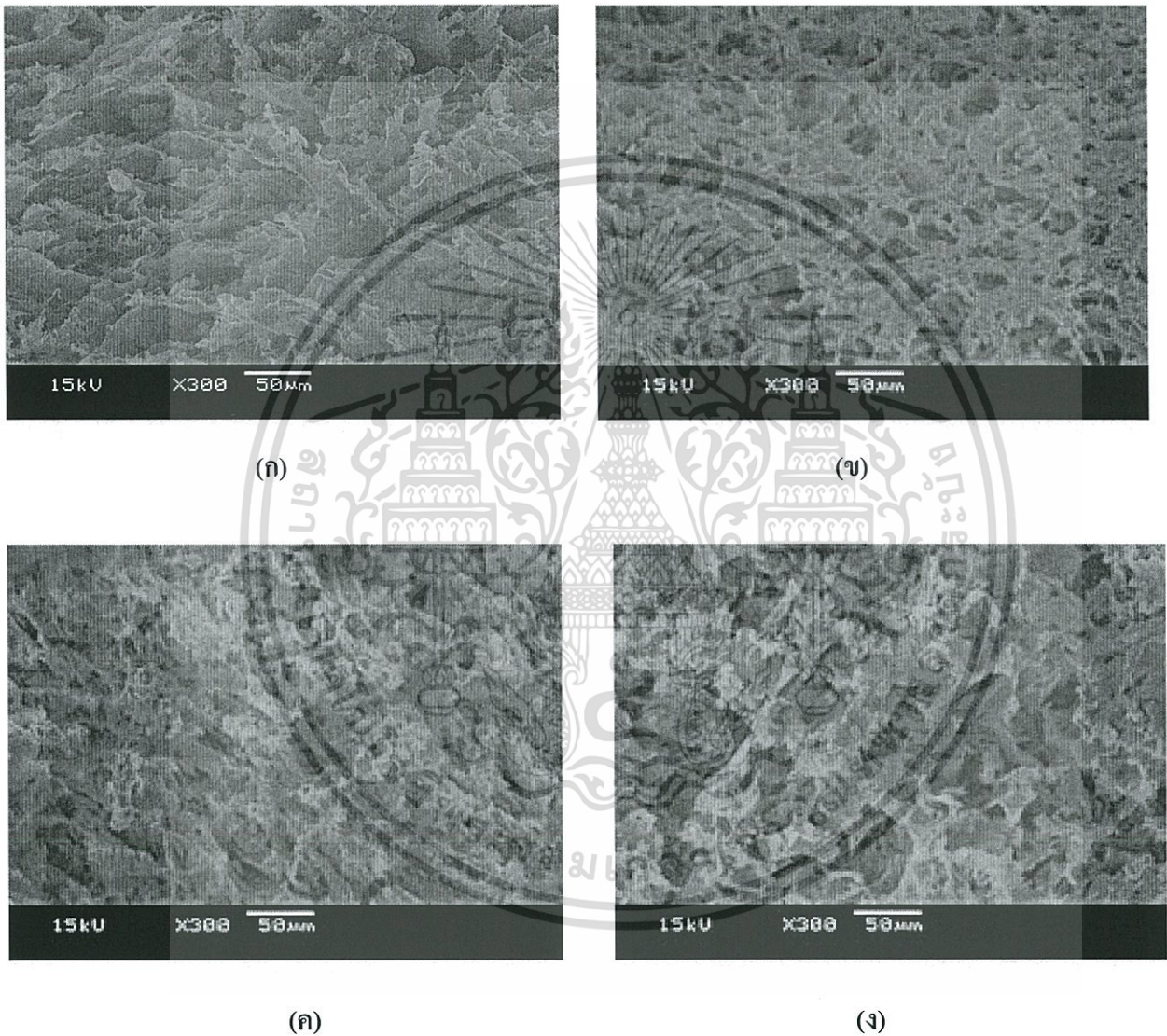
(ค)

รูปที่ 4.14 แสดงลักษณะความเป็นไปได้ของพันธะ CA (ค) ในโมเลกุลแป้งมันสำปะหลัง (ข) ในโมเลกุลแป้งมันสำปะหลังผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ และ (ค) ในโมเลกุลพอลิไวนิลแอลกอฮอล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2.5 สัณฐานวิทยา

เทคนิคการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดได้นำมาใช้ศึกษาลักษณะพื้นผิวด้านบน (ด้านที่ไม่ได้สัมผัสแม่พิมพ์) เนื่องจากชิ้นงานเป็นโฟมมีลักษณะฟู ทำการเตรียมตัวอย่างให้มีขนาด 0.5 ตารางมิลลิเมตร อบชิ้นงานที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส จากนั้นนำมาเคลือบทองและทดสอบโดยใช้เทคนิค SEM แสดงในรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 สัณฐานวิทยาผิวด้านบน (ด้านที่ไม่สัมผัสแม่พิมพ์) ของโฟมแป้งมันสำปะหลังผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์อัตราส่วน 60: 40 (ก) ไม่มีสารเชื่อมโยง และมีสารเชื่อมโยง (ข) ZnO (ค) STMP/STPP และ (ง) CA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

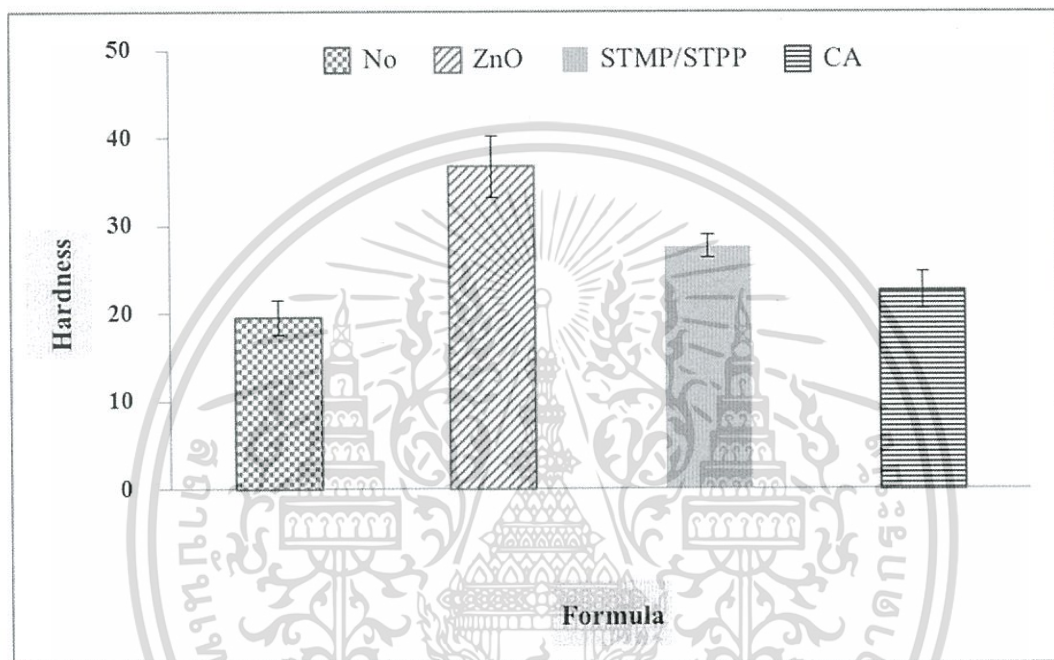
จากรูปที่ 4.15 ลักษณะวิทยาของพื้นผิวด้านบน (ด้านที่ไม่ได้สัมผัสแม่พิมพ์) ของโพลีเอสเตอร์ที่ผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์อัตราส่วน 60: 40 (ก) ไม่มีสารเชื่อมโยง (ข) ZnO (ค) STMP/STPP และ (ง) CA กำลังขยาย 300 เท่า พบว่า ลักษณะรูพรุนของโพลีเอสเตอร์เป็นเซลล์เปิด การใช้ STMP/STPP เป็นสารเชื่อมโยงในโพลีเอสเตอร์ F8 และการใช้ CA เป็นสารเชื่อมโยงในโพลีเอสเตอร์ F9 ส่งผลให้ปริมาตรรูพรุนสูงกว่า เมื่อใช้ ZnO เป็นสารเชื่อมโยงในโพลีเอสเตอร์ F7 โดยการใช้ CA โพลีเอสเตอร์ที่ได้จะมีลักษณะรูพรุนมากกว่า เมื่อใช้ STMP/STPP เป็นสารเชื่อมโยง ซึ่งสอดคล้องกับปริมาตรรูพรุนที่ได้จากการทดลองจากรูปที่ 4.9 ในทางกลับกัน โพลีเอสเตอร์ F7 มี ZnO เป็นสารเชื่อมโยงส่งผลให้รูพรุนมีขนาดเล็กลงอย่างเห็นได้ชัด โดยสอดคล้องกับความหนาแน่น แสดงว่าอนุภาค ZnO สามารถเกิดปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลโพลีเอสเตอร์และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ได้ เป็นการลดหมู่มีขั้วลง โมเลกุลน้ำแทรกเข้ามาได้น้อยลง ปริมาตรรูพรุนจึงลดลง



4.2.3 สมบัติทางเชิงกล

4.2.3.1 ความแข็งกด

เตรียมตัวอย่างโฟมแป้งมันสำปะหลังผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์อัตราส่วน 60: 40 ทั้งที่ไม่มีและมีสารเชื่อมโยงสูตรต่างๆ โดยซ้อนให้มีความหนาประมาณ 6 มิลลิเมตร กดค้างไว้ 30 วินาที โดยใช้คูโรมิเตอร์ชนิด A (ลักษณะปลายหัวทุ่) การกดอัดประมาณ 10 ครั้งต่อหนึ่งชิ้นงาน ค่าความแข็งกดของ โฟมสูตรต่างๆ รายงานจะเป็นค่าเฉลี่ยแสดงในรูป 4.16



รูปที่ 4.16 ความแข็งกดของ โฟมแป้งมันสำปะหลังผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์อัตราส่วน 60: 40 ทั้งที่ไม่มีและมีสารเชื่อมโยง ZnO, STMP/STPP และ CA ปริมาณ 0.25 กรัม

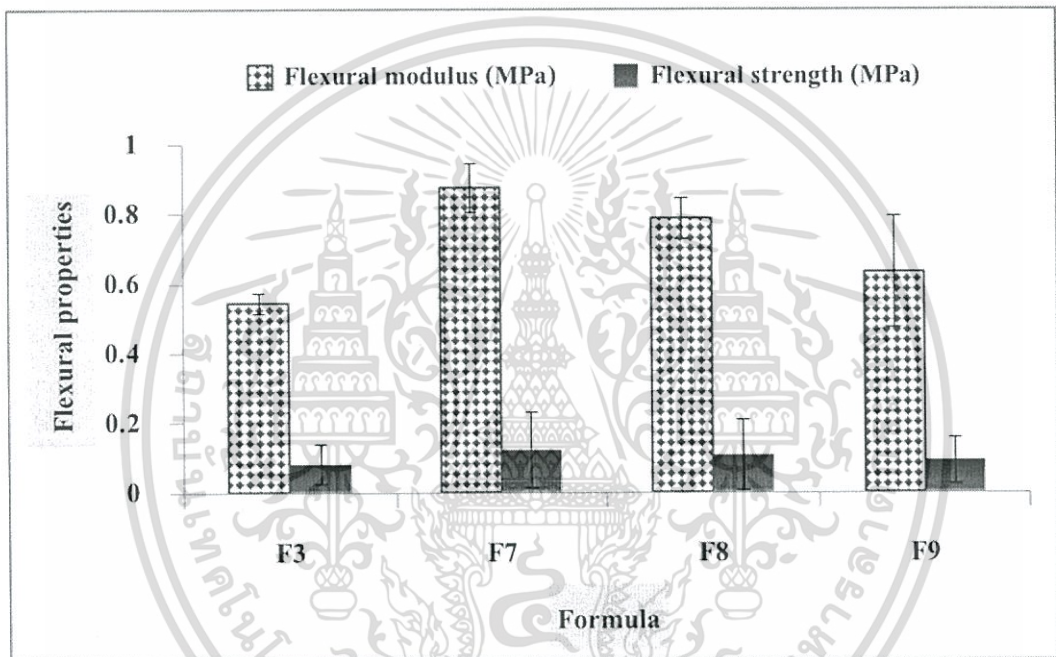
จากรูป 4.16 ความแข็งกดของ โฟมแป้งมันสำปะหลังผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์อัตราส่วน 60: 40 ทั้งที่ไม่มีและมีสารเชื่อมโยง ZnO, STMP/STPP และ CA ปริมาณ 0.25 กรัม แสดงในสูตร F3 F7 F8 และ F9 พบว่า โฟมสูตร F3 ซึ่งเป็นโฟมที่ไม่ได้ใส่สารเชื่อมโยง มีค่าความแข็งกดเท่ากับ 19 แต่เมื่อใส่ ZnO เป็นสารเชื่อมโยงหรือสูตร F7 ส่งผลให้ค่าความแข็งกดเพิ่มขึ้นสูงสุดโดยมีค่า 37 เนื่องจากอะตอมของออกซิเจนในโมเลกุลของ ZnO จะเกิดพันธะกับอะตอมของไฮโดรเจนที่หมู่ไฮดรอกซิล เหลือแต่อะตอมของ Zn ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับ STMP/STPP เป็นสารเชื่อมโยงหรือสูตร F8 และ โฟมสูตรที่ใช้สารเชื่อมโยง CA หรือสูตร F9 ความแข็งกดมีค่า 31 และ 24 ที่เมื่อเกิดพันธะ STMP/STPP จะเหลือหมู่ฟอสเฟส และ พันธะ CA จะเหลือหมู่ คาร์บอกซิลิก และไฮดรอกซิล ซึ่งเป็นหมู่ที่มีความเป็นขั้วที่มากกว่า Zn ส่งผลให้ดึงดูดโมเลกุลน้ำได้มากกว่า เมื่อระเหิดน้ำออกจึงมีปริมาตรรูพรุนที่สูงกว่า และความแข็งกดที่น้อยกว่าเมื่อใช้ ZnO เป็นสารเชื่อมโยง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่ค่าความแข็งกดของโฟมที่ใส่สารเชื่อมโยงทุกสูตรมีค่าสูงกว่าโฟมสูตร F3 เนื่องจากเมื่อใส่สารเชื่อมโยง ส่งผลให้ความหนาแน่นของโฟมสูตร F7 F8 และ F9 สูงขึ้น แสดงว่าสารเชื่อมโยงทำให้โมเลกุลของแป้งมันสำปะหลังและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์อยู่ใกล้กันมากขึ้น จึงส่งผลให้ค่าความแข็งกดเพิ่มสูงขึ้น

4.2.3.2 ความแข็งแรงโค้งงอและมอดุลัสโค้งงอ

ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของโฟมแป้งมันสำปะหลังผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์อัตราส่วน 60: 40 ที่ใช้สารเชื่อมโยงสูตรต่างๆ โดยใช้ปริมาณสารเชื่อมโยงแต่ละชนิดในปริมาณ 0.25 กรัม ให้ผลการทดสอบดังรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 ความแข็งแรงโค้งงอและมอดุลัสโค้งงอของโฟมแป้งมันสำปะหลังผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์อัตราส่วน 60: 40 ทั้งที่ไม่มีและมีสารเชื่อมโยง ZnO, STMP/STPP และ CA ปริมาณ 0.25 กรัม

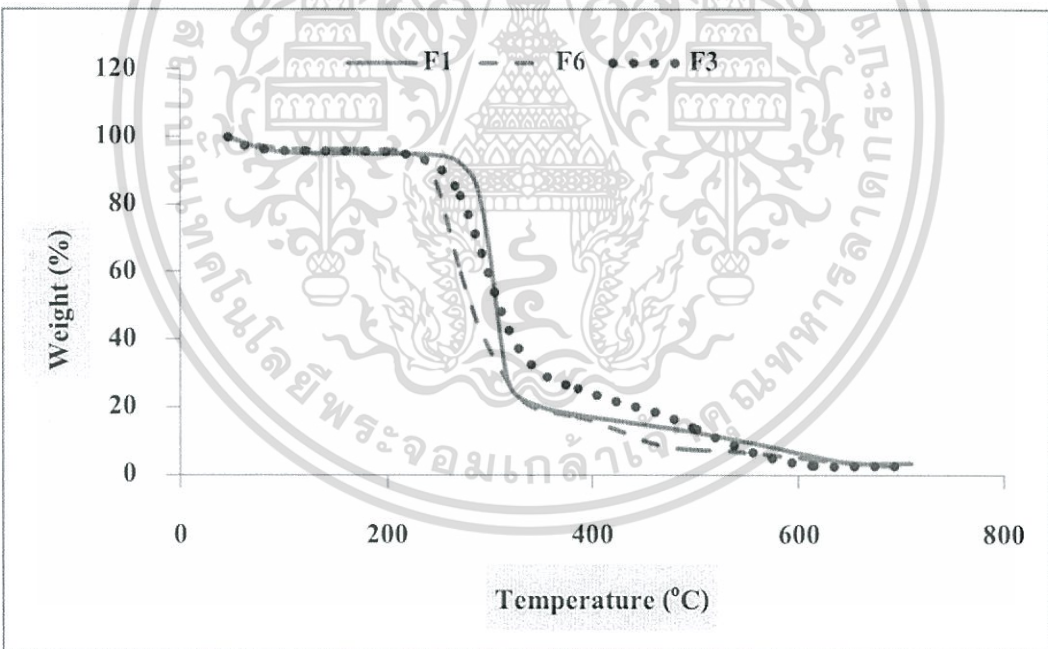
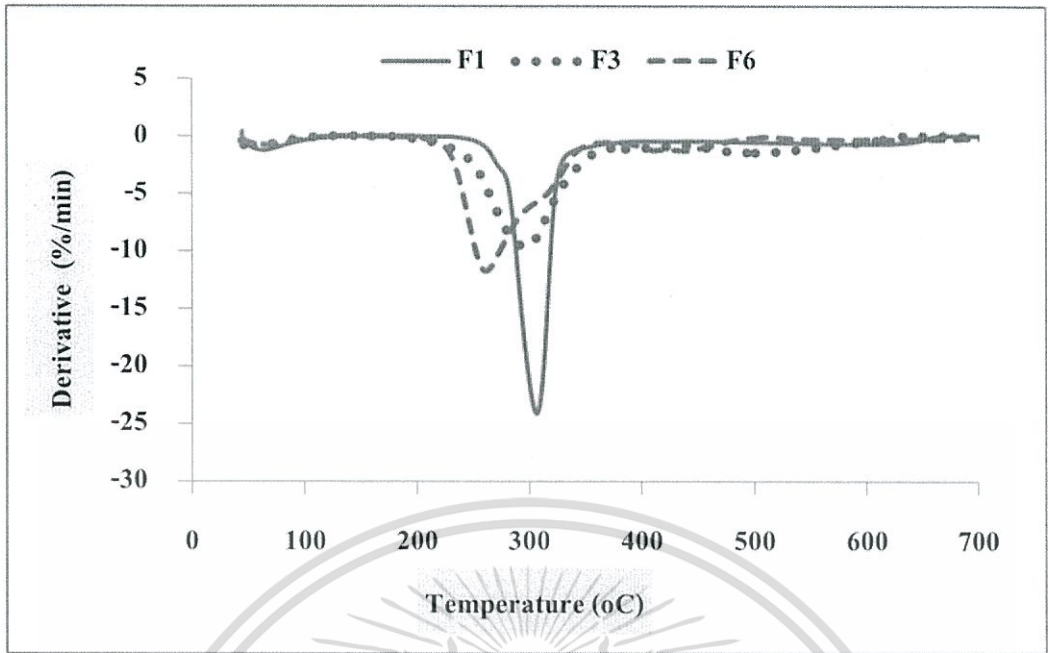
จากรูปที่ 4.17 พิจารณาผลของ ZnO, STMP/STPP และ CA ที่ปริมาณ 0.25 กรัมแสดงในสูตร F7 F8 และ F9 ที่ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงโค้งงอ พบว่ามีค่าความแข็งแรงโค้งงอไม่แตกต่างกัน โดยมีค่าอยู่ในช่วง 0.08 – 0.12 MPa เนื่องจากชิ้นงานเป็นโฟม มีลักษณะเป็นรูพรุน ค่ามอดุลัสโค้งงอเรียงลำดับจากมากไปน้อยดังนี้ สูตร F7 (ZnO) > สูตร F8 (STMP/STPP) > สูตร F9 (CA) > สูตร F3 (ไม่ใช้สารเชื่อมโยง) แสดงว่าการเกิดพันธะเชื่อมโยงส่งผลให้โฟมมีความแข็งแรงสูงขึ้นทนต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้มากกว่า

4.2.4 สมบัติความร้อน

ศึกษาถึงอุณหภูมิการสลายตัวของโพลีเมอร์ที่เห็นการลดลงของน้ำหนักของโพลีเมอร์เป่ามันสำปะหลังผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ทั้งที่ไม่มีและมีส่วนผสมของ ZnO STMP/STPP และ CA ด้วยเครื่อง Thermogravimetric analyzer (TGA) ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนอุณหภูมิช่วง 50 – 600 องศาเซลเซียสและอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ (Heating rate) 10 องศาเซลเซียสต่อนาที โดยสมบัติทางความร้อนที่ทำการศึกษา คือ การศึกษาอุณหภูมิการสลายตัว (Degradation temperature) ให้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.18 (ก) – (ข) รูปที่ 4.19 (ก) – (ข) และตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 อุณหภูมิของการสลายตัวของโพลีเมอร์เป่ามันสำปะหลังผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์อัตราส่วน 60: 40 มิลลิลิตร ทั้งที่ไม่มีและมีส่วนผสมของ ZnO STMP/STPP และ CA ปริมาณ 0.25 กรัม

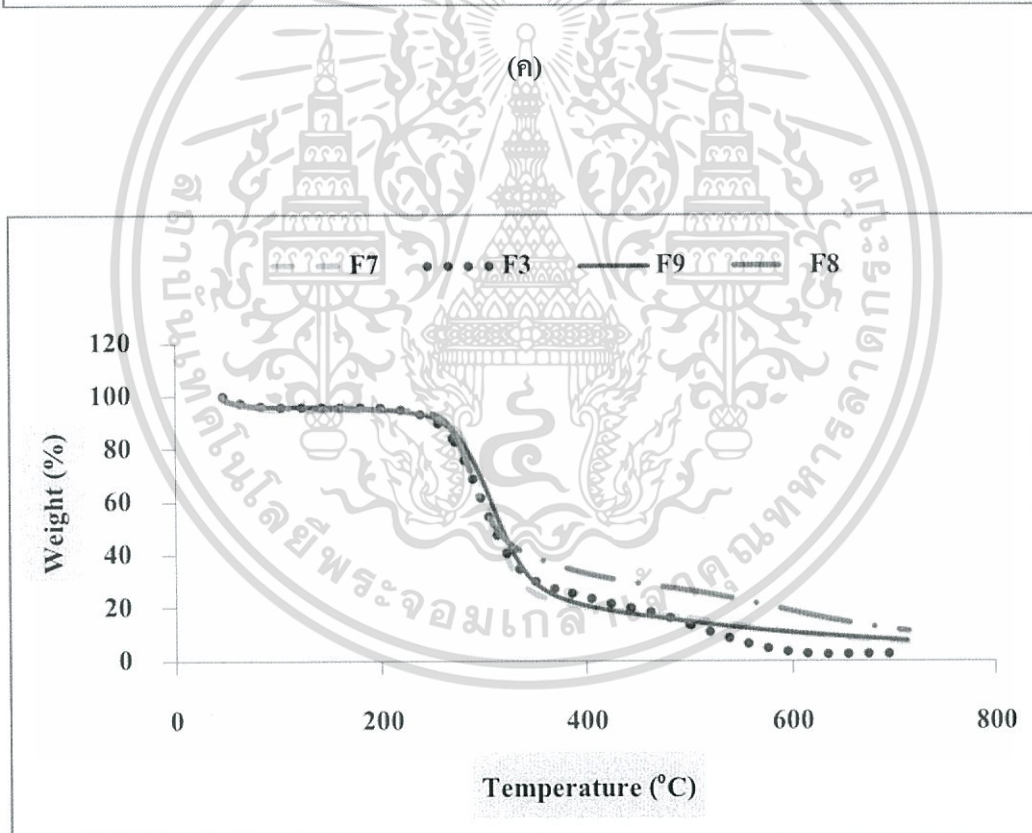
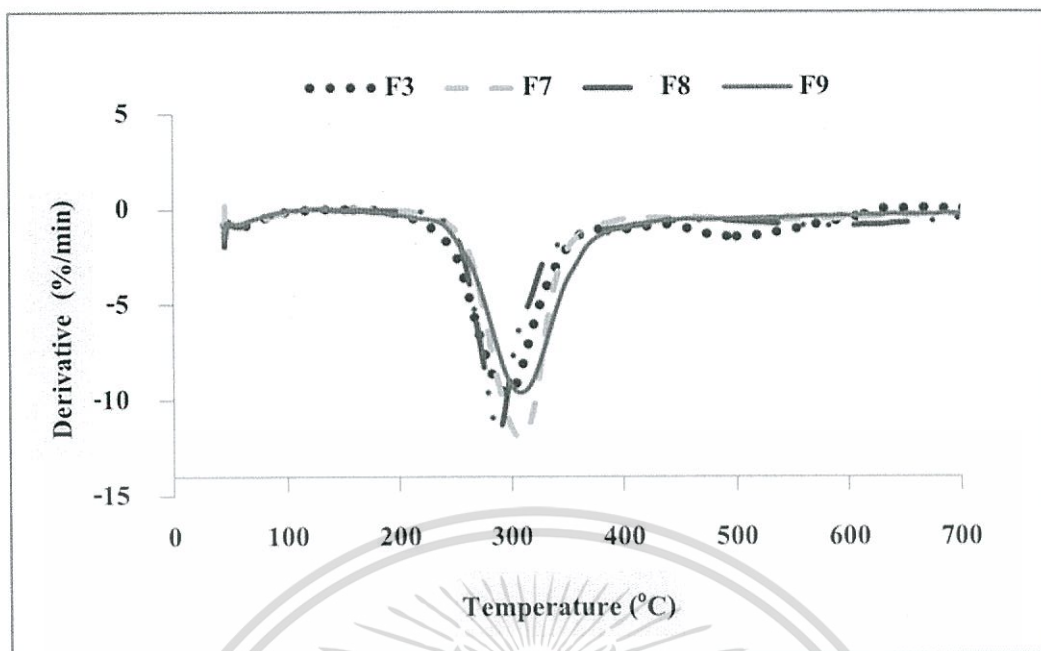
Formula	อุณหภูมิการสลายตัว(°C)		% Weight loss
	Onset	On peak	
F1	287	306	91.69
F6	200, 300	240, 320	78.34, 15.69
F3	267, 310	307, 320	75.12, 18.12
F7	274	307	87.52
F8	267	288	66.61
F9	267	308	87.99



(ข)

รูปที่ 4.18 (ก) DTG และ (ข) TG ของ โฟมแป้งมันสำปะหลังผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ใน อัตราส่วน 100:0 60:40 และ 0:100 แสดงในสูตร F1 F3 และ F6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ง)

รูปที่ 4.19 (ก) DTG และ (ข) TG ของ โฟมแป้งมันสำปะหลังผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์อัตราส่วน 60: 40 ทั้งที่ไม่มีและสารเชื่อมโยง ZnO, STMP/STPP และ CA ปริมาณ 0.25 กรัม แสดงในสูตร F3 F7 F8 และ F9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.18 (ก) - (ข) แสดงเทอร์โมแกรมของโพลีเมอร์ F1 F3 และ F6 และตารางที่ 4.3 พบว่าโพลีเมอร์ F1 หรือโพลีเมอร์ที่มีแต่แป้งมันสำปะหลัง มีอุณหภูมิการสลายตัวเพียงขั้นเดียวที่ 287°C และสลายตัวหมดที่ 306°C ซึ่งเป็นการสลายตัวของโมเลกุลของแป้งมันสำปะหลัง [54] โพลีเมอร์ F6 หรือโพลีเมอร์ที่มีแต่พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ มีการสลายตัวสองขั้น โดยมีอุณหภูมิเริ่มสลายตัวของขั้นที่ 1 คือ 240°C และสลายตัวหมดที่ 261°C ซึ่งเป็นการสลายตัวของโมเลกุลน้ำและ Side chain ของโมเลกุลพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ การสลายตัวขั้นที่ 2 มีอุณหภูมิเริ่มสลายตัวที่ 300°C และสลายตัวหมดที่ 320°C ซึ่งเป็นการสลายตัวของ Main chain ในโมเลกุลพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ [55] และโพลีเมอร์ F3 หรือโพลีเมอร์ที่มีอัตราส่วนของแป้งมันสำปะหลังผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ 60:40 มิลลิกรัม พบการสลายตัวสองขั้น โดยขั้นแรกมีอุณหภูมิเริ่มสลายตัวที่ 267°C และสลายตัวหมดที่ 307°C ขั้นที่สองมีอุณหภูมิเริ่มสลายตัวที่ 310°C และสลายตัวหมดที่ 320°C พบว่าอุณหภูมิการสลายตัวของโพลีเมอร์ F3 จะมีการสลายตัวสองขั้นคล้ายโพลีเมอร์ F6 โดยค่าอยู่ระหว่างโพลีเมอร์ F1 และ F6 [56] แสดงถึงความเข้ากันได้ และเป็นเนื้อเดียวกันของโพลีเมอร์ F3


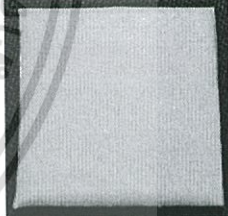
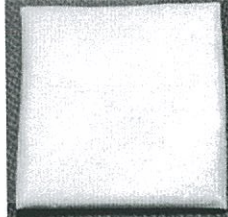
จากรูปที่ 4.19 (ก) - (ข) แสดงเทอร์โมแกรมของโพลีเมอร์เมื่อเติมสารเชื่อมโยง ZnO STMP/STPP และ CA ในปริมาณ 0.25 กรัม แสดงในสูตร F7 F8 และ F9 พบว่าเมื่อเติมสารเชื่อมโยงลงไปทำให้เทอร์โมแกรมของโพลีเมอร์ F7 F8 และ F9 มีการสลายตัว 1 ขั้น โดยที่มีอุณหภูมิเริ่มสลายตัวที่ $274, 267$ และ 267°C และสลายตัวหมดที่ $307, 288$ และ 308°C ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าโพลีเมอร์ผสมเมื่อมีสารเชื่อมโยงชนิดต่างๆ จะมีการสลายตัวที่ช้าลง

จากผลการทดลองเมื่อมีการใช้สารเชื่อมโยง 3 ชนิด คือ ZnO, STMP/STPP และ CA พบว่าเมื่อใช้ ZnO จะทำให้โพลีเมอร์มีปริมาตรฟูร่นน้อย ขนาดฟูร่นเล็ก ความหนาแน่นสูง ทำให้สมบัติเชิงกล คือ ความแข็งแรง โมดูลัส โค้งงอที่สูงขึ้น และการดูดซับน้ำน้อยลง จึงเลือกสูตร F7 ซึ่งเป็นสูตรที่มีอัตราส่วนระหว่างแป้งมันสำปะหลังและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เท่ากับ 60:40 และมี ZnO ปริมาณ 0.25 กรัม มาปรับปรุงสมบัติโดยเพิ่มปริมาณ ZnO ในตอนที่ 3

ตอนที่ 4.3: ศึกษาปริมาณของ ZnO ที่ส่งผลต่อสมบัติโฟมแป้งมันสำปะหลังผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์

ปรับปรุงสมบัติของ โฟมจากสารละลายแป้งมันสำปะหลังความเข้มข้น 5%w/v ผสมสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ความเข้มข้น 5%w/v ในอัตราส่วน 60:40 โดยเพิ่ม ปริมาณของ ZnO เป็น 0.5 และ 1 กรัมตามลำดับ

ตารางที่ 4.4 การเตรียมโฟมจากสารละลายแป้งมันสำปะหลังความเข้มข้น 5%w/v ผสมสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ความเข้มข้น 5%w/v ในอัตราส่วน 60 : 40 และ ZnO ในปริมาณ 0.5 และ 1 กรัมตามลำดับ

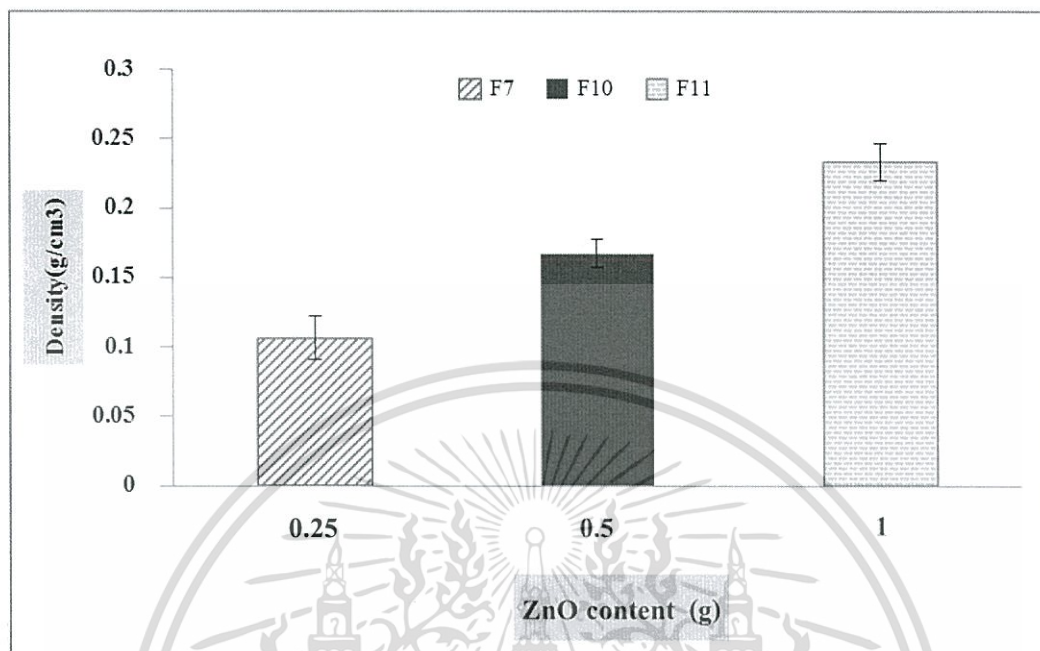
สูตร	สารละลายแป้งมัน : สารละลาย PVA ความ เข้มข้น 5%w/v (ml)	สารเชื่อมโยง	ปริมาณ (g)	ลักษณะชิ้นงาน
F7	60:40	ZnO	0.25	
F10	60:40	ZnO	0.5	
F11	60:40	ZnO	1	

จากตารางที่ 4.4 แสดงให้เห็นลักษณะของโฟมสูตร F10 และ F11 ที่มีการเพิ่มปริมาณ ZnO จาก 0.25 กรัม เป็น 0.5 และ 1 กรัม พบว่าโฟมมีลักษณะพื้นผิวที่เรียบ และเป็นเนื้อเดียวกันทุกสูตร จากนั้นนำมาทดสอบสมบัติกายภาพ สมบัติเชิงกล สมบัติความร้อนและการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย ให้ผลการทดสอบดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.1 สมบัติทางกายภาพ

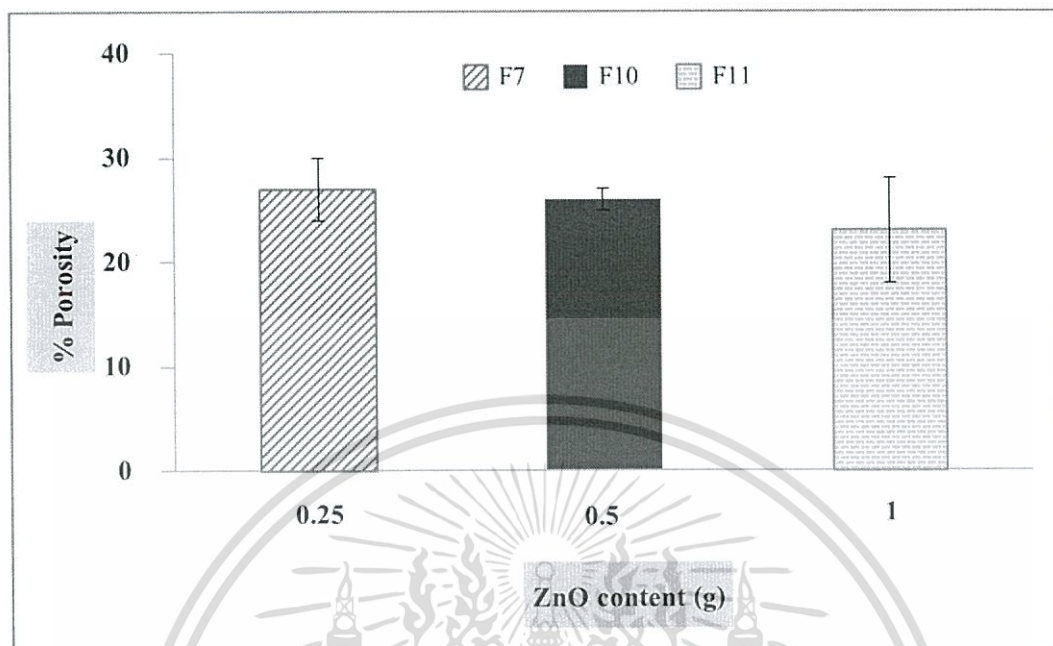
4.3.1.1 ความหนาแน่น



รูปที่ 4.20 ความหนาแน่นของโพลีเมอร์แข็งสำหรับหลังผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์อัตราส่วน 60: 40 ที่ใช้ ZnO ปริมาณ 0.25 0.5 และ 1 กรัม

จากรูปที่ 4.20 พบว่าเมื่อปริมาณ ZnO เพิ่มขึ้นจาก 0.25 กรัม (สูตร F7) เป็น 0.5 และ 1 กรัม ในสูตร F10 และ F11 ตามลำดับ ส่งผลให้ความหนาแน่นของโพลีเมอร์สูตร F10 และ F11 เพิ่มขึ้น โดยเรียงลำดับจากน้อยไปมากดังนี้ สูตร F7 < สูตร F10 < สูตร F11 โดยมีค่าเท่ากับ 0.10 g/cm³ 0.17 g/cm³ และ 0.23 g/cm³ ตามลำดับ เนื่องจากการเพิ่มอนุภาค ZnO เป็นการเพิ่มมวลของโพลีเมอร์ สามารถหาความหนาแน่นของโพลีเมอร์ได้จาก มวล/ปริมาตร ของชิ้นงาน จึงทำให้ความหนาแน่นเพิ่มขึ้นตามมวลของ ZnO ที่เพิ่มขึ้น

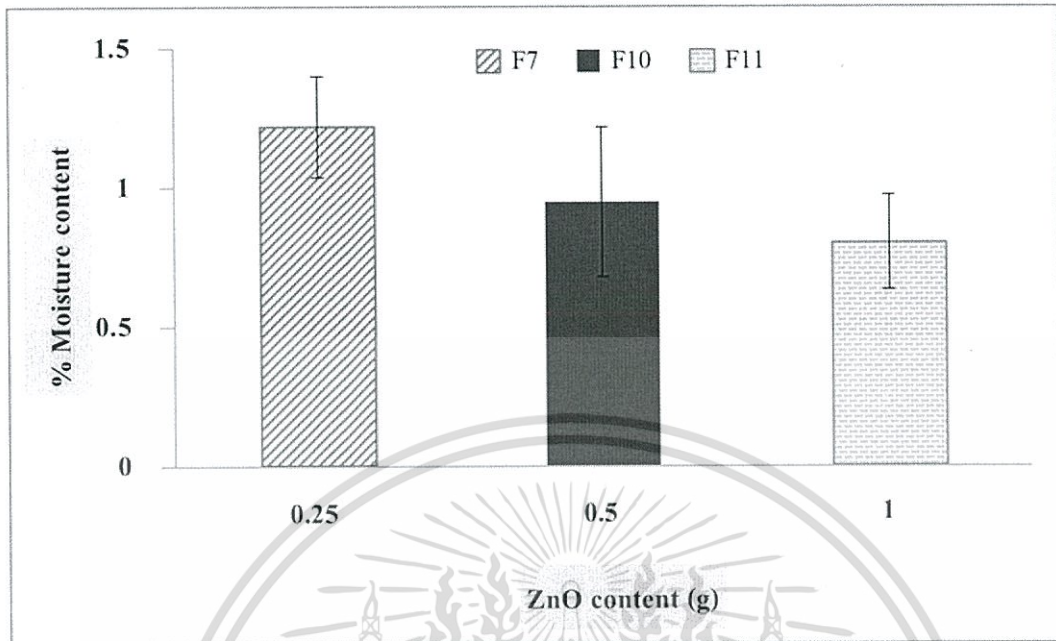
4.3.1.2 ปริมาตรรูพรุน



รูปที่ 4.21 ปริมาตรรูพรุนของโฟมแป้งมันสำปะหลังผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์อัตราส่วน 60: 40 ที่ใช้ ZnO ปริมาณ 0.25 0.5 และ 1 กรัม

จากรูปที่ 4.21 พบว่าเมื่อปริมาณ ZnO เพิ่มขึ้นจาก 0.25 กรัม จากสูตร F7 เป็น 0.5 และ 1 กรัม ในสูตร F10 และ F11 ตามลำดับ ส่งผลให้ปริมาตรรูพรุนของโฟมสูตร F10 และ F11 มีค่าลดลงจากโฟมสูตร F7 ซึ่งเท่ากับ 27% เปลี่ยนเป็น 26% และ 23% ในโฟมสูตร F10 และ F11 ตามลำดับ สอดคล้องกับความหนาแน่นของโฟมสูตร F10 และ F11 ที่มีค่าเพิ่มขึ้นที่แสดงในรูปที่ 4.20 ทั้งนี้เนื่องจาก ZnO เข้าไปสร้างพันธะกับหมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลของแป้งมันสำปะหลังและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ จึงลดหมู่ไฮดรอกซิลที่มีขั้วลง นอกจากนี้ผลจากการเพิ่มปริมาณ ZnO นั้น เป็นการเพิ่มความหนาแน่นการเชื่อมโยง (Crosslink density) ให้กับโฟม แสดงจากภาพ SEM ในรูปที่ 4.24 (จ) - (ค) ซึ่งส่งผลให้ปริมาตรรูพรุนของโฟมสูตร F10 และ F11 ลดลง

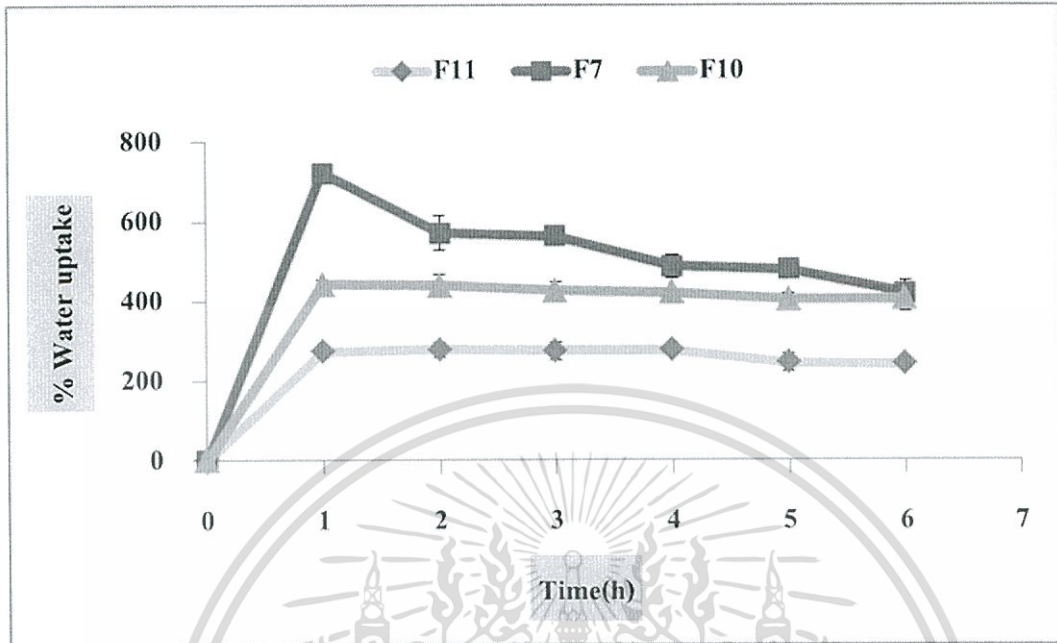
4.3.1.3 ปริมาณความชื้น



รูปที่ 4.22 ปริมาณความชื้นของ โฟมแป้งมันสำปะหลังผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์อัตราส่วน 60: 40 ที่ใช้ ZnO ปริมาณ 0.25 0.5 และ 1 กรัม

จากรูปที่ 4.22 พบว่าเมื่อปริมาณ ZnO เพิ่มขึ้นจาก 0.25 เป็น 0.5 และ 1 กรัม ในสูตร F10 และ F11 ตามลำดับ ส่งผลให้อุณหภูมิของ ZnO เข้าไปเกิดปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลในโมเลกุลของแป้งมันสำปะหลังและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ได้มากขึ้น[57] เนื่องจากหมู่ไฮดรอกซิลอิสระลดลง ส่งผลต่อปริมาณความชื้นในชิ้นงานของโฟมแป้งสูตร F10 และ F11 ลดลง โดยมีค่า 0.94% และ 0.80% ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับความหนาแน่นในหัวข้อ 4.3.1.1 และปริมาตรรูพรุน ในหัวข้อ 4.3.1.2

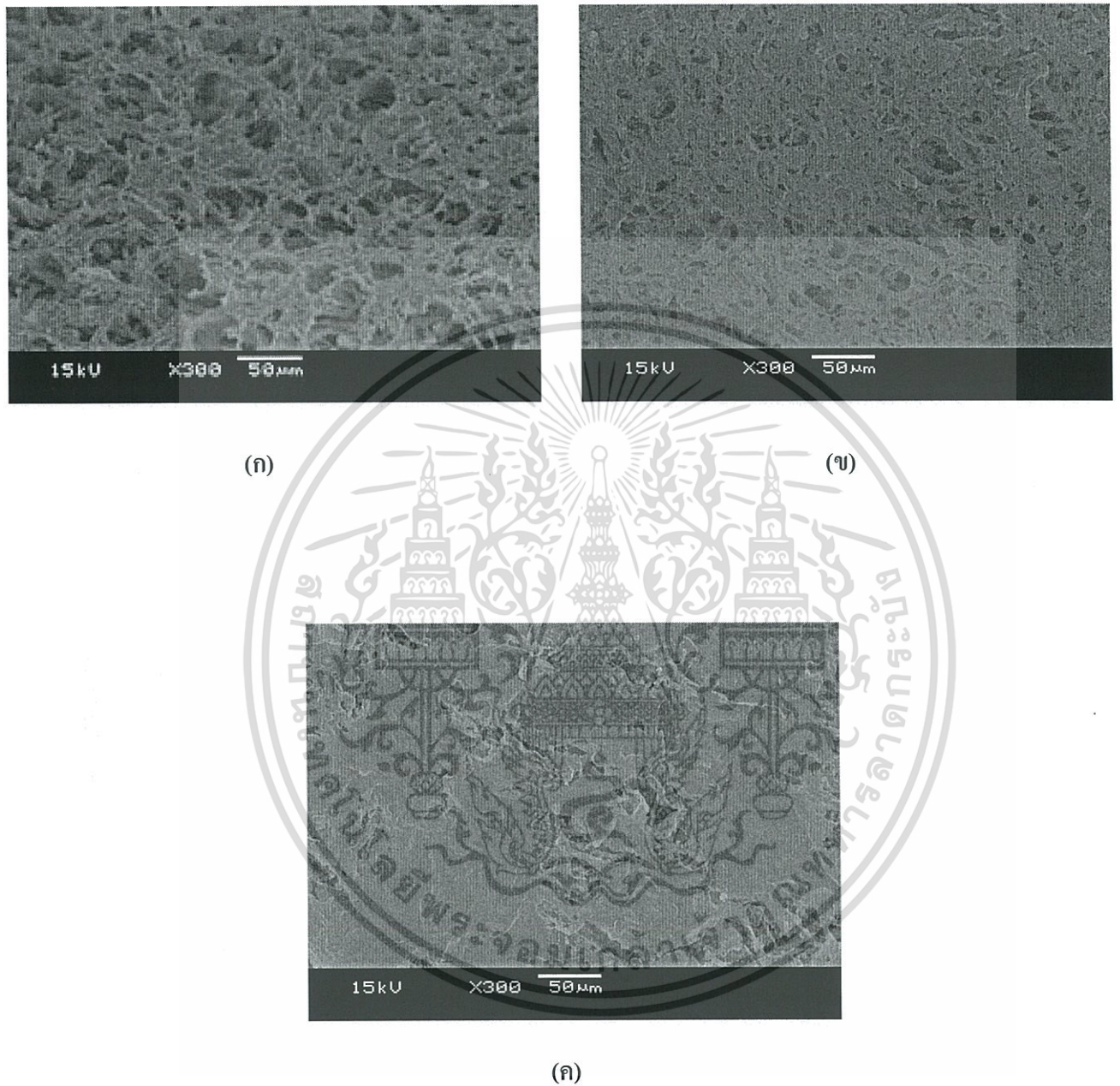
4.3.1.4 การดูดซับน้ำ



รูปที่ 4.23 การดูดซับน้ำของโฟมแป้งมันสำปะหลังผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์อัตราส่วน 60: 40 ที่ใช้ ZnO ปริมาณ 0.25 0.5 และ 1 กรัม

จากรูปที่ 4.23 พบว่าโฟมสูตร F7 F10 และ F11 มีการดูดซับน้ำสูงในช่วงแรกโดยมีค่า 720% 442% และ 272% ตามลำดับ โดยสูตร F10 ค่าการดูดซับน้ำในช่วงที่ 2 - 6 คงที่ประมาณ 400% และสูตร F11 คงที่ประมาณ 220% พบว่าแต่เมื่อใส่ ZnO ปริมาณมากขึ้น ส่งผลให้ความสามารถดูดซับน้ำของโฟมมีค่าลดลง เนื่องจาก ZnO เกิดพันธะเชื่อมโยงระหว่างแป้งมันสำปะหลังและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์แล้วกับโฟมได้มากขึ้น ความหนาแน่นเชื่อมโยงสูงขึ้น ส่งผลให้โฟมมีปริมาตรรูพรุนเล็กลง พื้นผิวเรียบขึ้นดังรูปที่ 4.24 (ข) - (ค) ซึ่งสามารถเรียงลำดับการดูดน้ำจากมากไปน้อยได้ดังนี้ $F7 > F10 > F11$ ตามลำดับ

4.3.1.5 สัณฐานวิทยา



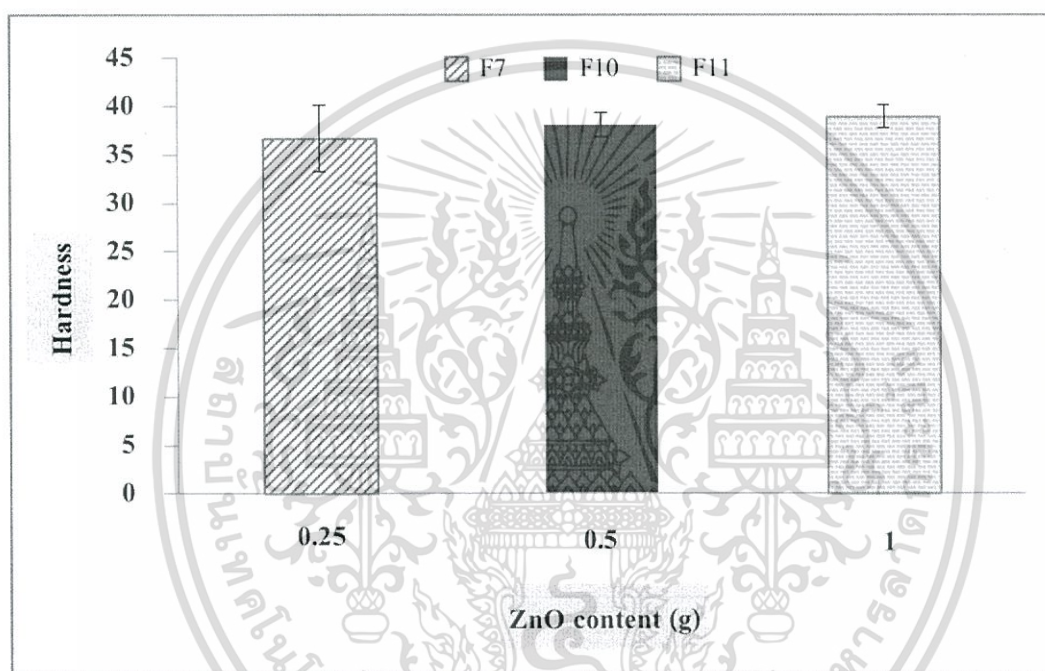
รูปที่ 4.24 สัณฐานวิทยาผิวด้านบน (ด้านที่ไม่ได้สัมผัสแม่พิมพ์) ของโพลีเอทิลีน
 สำปะหลัง ผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์อัตราส่วน 60: 40 ที่ใช้ ZnO
 (ก) ปริมาณ 0.25 กรัม (ข) 0.5 กรัม (ค) 1 กรัม กำลังขยาย 300 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.24 (ก) - 4.24 (ค) เมื่อเพิ่มปริมาณ ZnO ลักษณะพื้นผิวของโพลีเมอร์ F10 ลักษณะผิวเรียบขึ้น ปริมาตรรูพรุนน้อยลง และ F11 มีลักษณะผิวเรียบมากที่สุด ปริมาตรรูพรุนมีน้อย เพราะการเพิ่มปริมาณ ZnO จะเป็นการเพิ่มความหนาแน่นเชื่อมโยงให้กับโพลีเมอร์ F10 และ F11 ซึ่งสอดคล้องกับผลความหนาแน่น ปริมาตรรูพรุน ปริมาณความชื้น การดูดซับน้ำในหัวข้อ 4.3.1.1 - 4.3.1.4 ตามลำดับ

4.3.2 สมบัติทางเชิงกล

4.3.2.1 ความแข็งกด

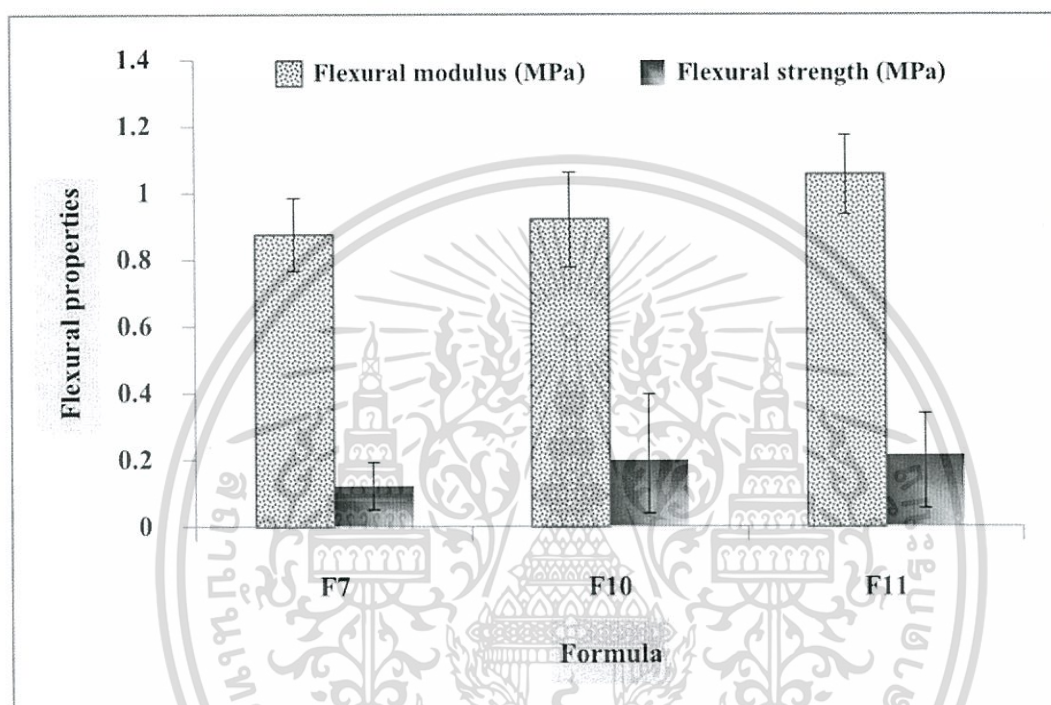


รูปที่ 4.25 ความแข็งกดของโพลีเมอร์สำหรับส่วหลังผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์อัตราส่วน 60: 40 ที่มีสารเชื่อมโยง ZnO ปริมาณ 0.25 0.5 และ 1 กรัม

จากรูป 4.25 พบว่าโพลีเมอร์ F7 F10 และ F11 มีค่าความแข็งกดคือ 37 38 และ 39 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ ZnO ส่งผลให้ค่าความแข็งกดเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย เนื่องจากลักษณะชิ้นงานเป็นโพลีเมอร์ ลักษณะชิ้นงานมีรูพรุน

4.3.2.2 ความแข็งแรงโค้งงอและมอดุลัสโค้งงอ

เตรียมตัวอย่าง โฟมแป้งมันสำปะหลังผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ทั้งที่ไม่มีและมีส่วนผสมเชื่อมโยง ขนาด 20 x 100 มิลลิเมตร สภาวะที่ใช้ทดสอบคือ Load cell 5 กิโลนิวตัน Test speed 20 มิลลิเมตร/นาที่ และ Span 50 มิลลิเมตร



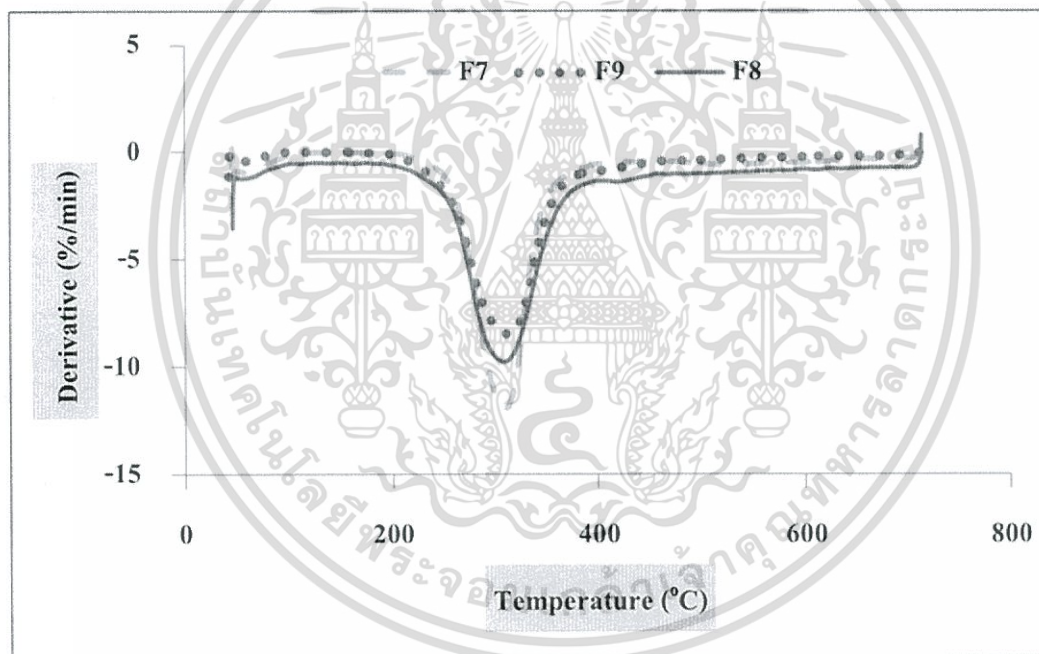
รูปที่ 4.26 ความแข็งแรงโค้งงอและมอดุลัสโค้งงอของโฟมแป้งมันสำปะหลังผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์อัตราส่วน 60: 40 ที่มีสารเชื่อม โยง ZnO ปริมาณ 0.25 0.5 และ 1 กรัม

จากรูปที่ 4.26 พิจารณาผลของการเพิ่มปริมาณของ ZnO จาก 0.25 กรัม ในสูตร 7 เป็น 0.5 และ 1 กรัม ในสูตร F10 และ F11 ตามลำดับ พบว่ามีค่าความแข็งแรงโค้งงอไม่แตกต่างกันเนื่องจากชิ้นงานเป็นโฟมมีลักษณะเป็นรูพรุน โดยมีค่า 0.19 และ 0.21 MPa ตามลำดับ ส่วนค่ามอดุลัสโค้งงอมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจาก ZnO ที่เพิ่มขึ้นเป็นการเพิ่มความหนาแน่นเชื่อมโยงจึง ส่งผลให้มอดุลัสโค้งงอเพิ่มขึ้น (ความแข็ง) เพิ่มเป็น 0.91 และ 1.05 MPa ตามลำดับ

4.3.3 สมบัติความร้อน

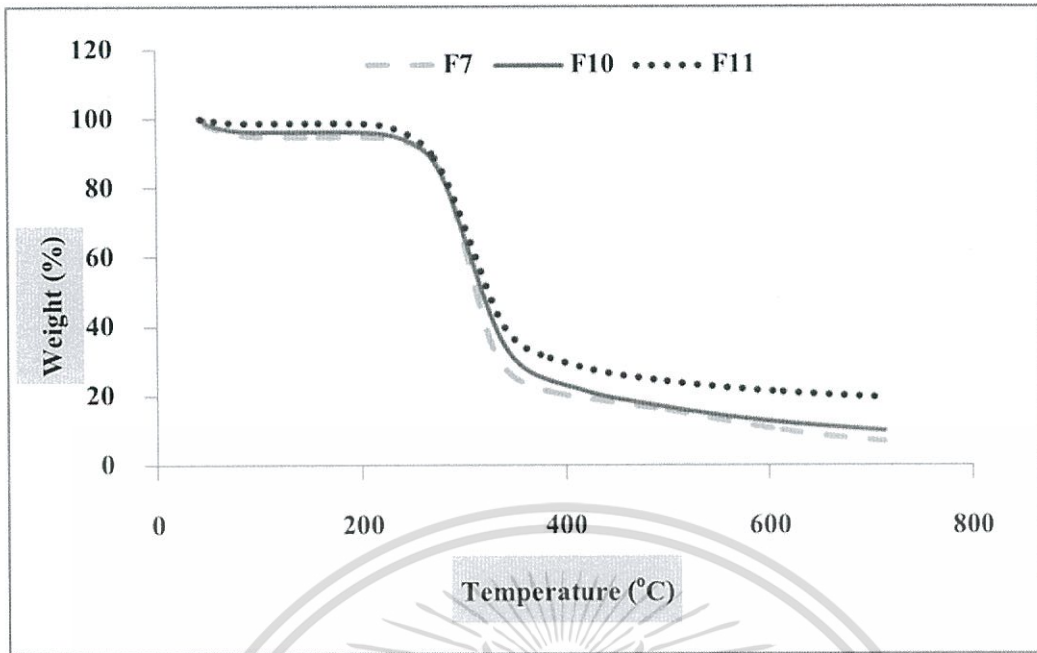
ตารางที่ 4.5 อุณหภูมิของการสลายตัวของโพลีเอทิลีนสำหรับผลผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ อัตราส่วน 60: 40 มีสารเชื่อมโยง ZnO ปริมาณ 0.25 0.5 และ 1 กรัม สูตร F7 F10 F11

สูตร	อุณหภูมิการสลายตัว(°C)		% Weight loss
	Onset	On peak	
F7	274	307	87.517
F10	266	307	83.234
F11	264	312	79.075



(ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข)

รูปที่ 4.27 (ก) DTG และ (ข) TG ของโฟมแข็งมันสำปะหลังผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์อัตราส่วน 60: 40 มี ZnO ปริมาณ 0.25 0.5 และ 1 กรัม

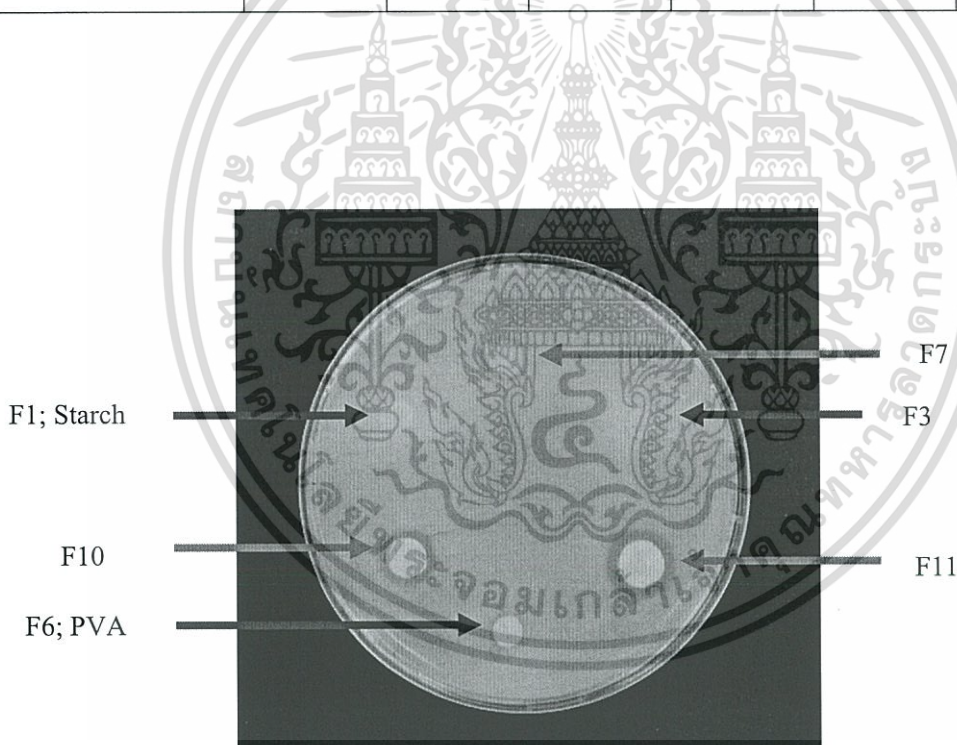
จากรูปที่ 4.27 (ก) – (ข) แสดงเทอร์โมแกรมของโฟมสูตร F7 F10 และ F11 และจากตารางที่ 4.5 พบว่าโฟมสูตร F7 มีอุณหภูมิเริ่มสลายตัวที่ 274 °C สลายตัวหมดที่ 307 °C ซึ่งเป็นโฟมที่มีส่วนประกอบของ ZnO 0.25 กรัม โฟมสูตร F10 มีอุณหภูมิเริ่มสลายตัวที่ 266 °C สลายตัวหมดที่ 307 °C ซึ่งเป็นโฟมที่มีส่วนประกอบของ ZnO 0.5 กรัม และโฟมสูตร F11 มีอุณหภูมิเริ่มสลายตัวที่ 264 °C และสลายตัวหมดที่ 312 °C ซึ่งเป็นโฟมที่มีส่วนประกอบของ ZnO 1 กรัม แสดงว่าปริมาณ ZnO ที่เพิ่มขึ้นในช่วงนี้ มีเสถียรภาพทางความร้อนไม่เปลี่ยนแปลง จึงไม่ส่งผลต่ออุณหภูมิสลายตัวของโฟมสูตร F10 และ F11 และจากตารางที่ 4.6 พบว่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปของโฟมสูตร F7 F10 และ F11 มีค่าลดลงตามปริมาณ ZnO ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจาก ZnO เป็นอนุภาคของแข็งและเป็นสารอนินทรีย์จะสลายตัวที่อุณหภูมิสูง เมื่อใส่ ZnO ในปริมาณที่สูงขึ้น ส่งผลให้โฟมมีเสถียรภาพทางความร้อนที่สูงขึ้นตามด้วย

4.3.4 ศึกษาการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย

การยับยั้งเชื้อแบคทีเรียชนิด *Bacillus subtilis* ATCC 6633 และ *Escherichia coli* ATCC 25922 โดยใช้ Agar disc diffusion method ตามมาตรฐานของ(Clinical and Laboratory Standards Institute; CLSI) ที่ส่งผลต่อสมบัติโฟมแป้งมันสำปะหลังผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์อัตราส่วน 60:40 เมื่อเติม ZnO ปริมาณ 0.25 0.5 และ 1 กรัมให้ผลการทดสอบดังตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.28 และ 4.29

ตารางที่ 4.6 ค่าการทดสอบยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย

Clear zone (มิลลิเมตร)	สูตร					
	F1	F3	F6	F7	F10	F11
<i>B. subtilis</i>	-	-	-	7	8	9
<i>E. coli</i>	-	-	-	9	12	13



รูปที่ 4.28 บริเวณการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย *B. subtilis* (มิลลิเมตร)

จากรูปที่ 4.28 เป็นการทดสอบการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียชนิด *B. subtilis* ของโฟมแป้งมันสำปะหลังผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์อัตราส่วน 100:0 60:40 และ 0:100 แสดงในสูตรสูตร F1 F3 และ F6 พบว่า โฟมสูตร F1 F3 และ F6 ไม่สามารถยับยั้งเชื้อแบคทีเรียชนิด *B. subtilis* ได้ เนื่องจากบริเวณรอบรัศมีขอบโฟมสูตร F1 F3 และ F6 ไม่มีการเกิดบริเวณที่เรียกว่า เคลียร์ โซน (Clear zone) หรือ บริเวณยับยั้ง ซึ่งเป็นบริเวณที่เชื้อแบคทีเรียไม่เกิด แต่เมื่อนำโฟมแป้งมันสำปะหลังผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์อัตราส่วน 60:40 มาเติม ZnO ปริมาณ 0.25 0.5 และ 1 กรัม ตามลำดับ แสดงในสูตร F7 F10 และ F11 ตามลำดับ พบว่าบริเวณรอบรัศมีขอบโฟมสูตร F7 F10 และ F11 มีการเกิดบริเวณ เคลียร์ โซน ซึ่งมีความยาว 7 8 และ 9 มิลลิเมตร ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าบริเวณ เคลียร์ โซน ที่เกิดขึ้นจะมีความยาวเพิ่มขึ้นตามปริมาณ ZnO ที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.29 บริเวณการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย *E. coli* (มิลลิเมตร)

หมายเหตุ อัตราส่วนภาพ 1:1

American Type Culture Collection; ATCC หมายถึงมาตรฐานของการเลี้ยงอาหารเลี้ยงเชื้อแบคทีเรียชนิดนั้นๆ

จากรูปที่ 4.29 เป็นการทดสอบการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียชนิด *E. coli* ของโฟมแป้งมันสำปะหลังผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์อัตราส่วน 100:0 60:40 และ 0:100 แสดงในสูตรสูตร F1 F3 และ F6 พบว่า โฟมสูตร F1 F3 และ F6 ไม่สามารถยับยั้งเชื้อแบคทีเรียชนิด *E. coli* เช่นเดียวกับเชื้อแบคทีเรียชนิด *B. subtilis* ในรูปที่ 4.28 เนื่องจากบริเวณรอบรัศมีขอบโฟมสูตร F1 F3 และ F6 ไม่มีการเกิดบริเวณ เคลียร์ โซน แต่เมื่อนำโฟมแป้งมันสำปะหลังผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราส่วน 60:40 มาเติม ZnO ปริมาณ 0.25 0.5 และ 1 กรัม ตามลำดับ แสดงในสูตร F7 F10 และ F11 ตามลำดับ พบว่าบริเวณรอบรัศมีขอบโพลีเมอร์ F7 F10 และ F11 มีการเกิดบริเวณ เคลียร์ โซน ซึ่งมีความยาว 9 10 และ 12 มิลลิเมตร ตามลำดับ

สรุปการทดสอบการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของโพลีเมอร์ F7 F10 และ F11 ซึ่งมี ZnO ปริมาณ 0.25 0.5 และ 1 กรัม ตามลำดับ พบว่าโพลีเมอร์มีสมบัติในการยับยั้งแบคทีเรียทั้งชนิด *Bacillus subtilis* ATCC 6633 และ *Escherichia coli* ATCC 25922 โดย ZnO สามารถยับยั้งเชื้อ *E. coli* ได้ดีกว่า เพราะ เคลียร์ โซนมีความยาวจากบริเวณรัศมีมากกว่า ทั้งนี้เพราะ ZnO สามารถสร้างออกซิเจนที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยา (Active oxygen species) เช่น ไฮโดรเจน แรดิคัล (Hydrogen radical; $\cdot\text{OH}$) และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide; H_2O_2) โดยเอกซิจีน (Active oxygen species) เหล่านี้เป็นพิษต่อเซลล์แบคทีเรีย เนื่องจากเป็นตัวออกซิไดซ์ (Oxidizing agent) ที่มีประสิทธิภาพสูงสุด[58]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลงานวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาสมบัติกายภาพ และ เชิงกลของโฟมแป้งมันสำปะหลังผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์อัตราส่วน 100:0 80:20 60:40 40:60 20:80 และ 0:100 มิลลิลิตร แสดงในสูตร F1 - F6 จากนั้นเลือกปรับปรุงสมบัติโฟมแป้งมันสำปะหลังผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ในอัตราส่วน 60:40 มิลลิลิตร โดยใช้ ZnO, STMP/STPP และ CA เป็นสารเชื่อมโยง ปริมาณ 0.25 กรัม แสดงในสูตร F7 - F9 ศึกษาหาหน่วงฟังก์ชัน สมบัติกายภาพ เชิงกล ความร้อน และสัณฐานวิทยา จากนั้นเลือกโฟมที่ใช้ ZnO เป็นสารเชื่อมโยงมาศึกษาปริมาณของ ZnO จาก 0.25 เป็น 0.5 และ 1 กรัม ในสูตร F10 และ F11 ตามลำดับ จากนั้นศึกษาสมบัติ กายภาพ เชิงกล ความร้อน สัณฐานวิทยา และการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย ผลการทดลองสรุปผลดังนี้

1. อัตราส่วนระหว่างแป้งมันสำปะหลังผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์คือ 60:40 มิลลิลิตร สูตร F3 ที่สามารถขึ้นรูปแล้วได้ชิ้นงานที่มีลักษณะเนื้อเดียวกัน ให้สมบัติเชิงกลที่ไม่แตกต่างจากอัตราส่วน 40:60 20:80 และ 0:100 มิลลิลิตร ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่มีพอลิไวนิลแอลกอฮอล์มากกว่า

2. สมบัติของโฟมเมื่อใช้ ZnO เป็นสารเชื่อมโยง ให้สมบัติเชิงกล คือ ความแข็งแรง ความแข็งแรงโค้งงอ โมดูลัสโค้งงอที่สูง สมบัติกายภาพ คือ การดูดซับน้ำ และปริมาณความชื้นที่ต่ำ ปริมาตรรูพรุนที่มีจำนวนน้อย ความหนาแน่นที่สูง และมีสมบัติการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย

3. สมบัติของโฟมเมื่อใช้ STMP/STPP เป็นสารเชื่อมโยง มีความหนาแน่นน้อย การดูดซับน้ำสูงกว่าใช้ ZnO โมดูลัสโค้งงอมีค่าใกล้เคียงกับโฟมที่ใช้ ZnO เป็นสารเชื่อมโยง

4. สมบัติของโฟมเมื่อใช้ CA เป็นสารเชื่อมโยง มีความหนาแน่นน้อย การดูดซับน้ำมีค่าสูง สมบัติเชิงกล คือ ความแข็งแรง และโมดูลัสโค้งงอน้อยกว่าโฟมสูตรที่ใช้ ZnO และ STMP/STPP เป็นสารเชื่อมโยง แต่สูงกว่าสูตรที่ไม่ได้ใช้สารเชื่อมโยง หรือ สูตร F3

5. สมบัติของโฟมเมื่อเพิ่มปริมาณ ZnO พบว่าทำให้โฟมสมบัติมีความหนาแน่นสูงขึ้น สมบัติเชิงกล คือ ความแข็งแรง ความแข็งแรงโค้งงอไม่เปลี่ยนแปลง แต่มีโมดูลัสโค้งงอที่สูงขึ้น สมบัติกายภาพ คือ การดูดซับน้ำ และปริมาณความชื้นที่ต่ำ ปริมาตรรูพรุนที่มีจำนวนน้อย และมีสมบัติการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย

6. โฟมสูตรที่ดีที่สุด คือ โฟมสูตร F11 เนื่องจากมีสมบัติเชิงกล คือ โมดูลัสโค้งงอหรือความแข็งแรง สมบัติทางความร้อน และการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียที่สูงสุด สมบัติกายภาพ คือ การดูดซับน้ำ และความชื้น และปริมาตรรูพรุนที่ต่ำที่สุด โดยสามารถนำไปพัฒนาเป็นโฟมกันกระแทกในบรรจุภัณฑ์อาหาร เช่น ไข่ไก่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 การเตรียมสารละลายแป้งมันสำปะหลังไม่ควรใช้อุณหภูมิที่สูงกว่า 70 องศาเซลเซียส เนื่องจากจะทำให้สารละลายแป้งมันสำปะหลังเสียสภาพ

5.2.2 ในการเตรียมโฟมควรทำให้ความหนาความสม่ำเสมอและไม่หนาจนเกินไป (ไม่เกิน 1 เซ็นติเมตร) เพราะชิ้นงานจะใช้เวลาในการระเหิดที่นานกว่า 24 ชั่วโมง ซึ่งเป็นผลให้ชิ้นงานเกิดการแตกไม่ฟู



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

- [1] 2555. ปริมาณขยะประเทศไทย. [Online]. Available: <http://www.thaibiogas.net>.
- [2] 2555. บรรจุภัณฑ์พลาสติก. [Online]. Available:
<http://www.pharm.su.ac.th/cheminlife/cms/index.php/kitchen-room/21-plastic.html>.
- [3] 2555. บรรจุภัณฑ์ประเภทโฟม. [Online]. Available:
http://www.mew6.com/composer/package/package_33.php.
- [4] 2555. กระบวนการขึ้นรูปพลาสติก. [Online]. Available:
<http://www.nstda.or.th/thairesearch/node/3376>.
- [5] 2555. วัสดุย่อยสลายได้ทางชีวภาพ. [Online]. Available:
<http://www.pantavanij.com/xcart/forum/showthread.php?t=139>.
- [6] 2555. ราตามันสำปะหลัง. [Online]. Available: <http://www.google.com>.
- [7] Kaisangsri N., Kerdchoechuen O. and Laohakunjit N. "Biodegradable foam tray from cassava starch blended with natural fiber and chitosan.", **Industrial crops and products.**, vol.37, 2012. Pp.542-546
- [8] 2555. พอลิไวนิลแอลกอฮอล์. [Online]. Available: <http://www.research.rmutt.ac.th/archives/4747>.
- [9] 2555. พอลิไวนิลแอลกอฮอล์. [Online]. Available:
<http://www.school.net.th/library/snet6/envi4/recycle/re.htm>.
- [10] 2555. พลาสติก. [Online]. Available:
<http://www.industrial.cmru.ac.th/Civil/wechsawan/materials/ch08/ch08.htm>.
- [11] 2555. พลาสติก. [Online]. Available: www.biofuels.com.
- [12] 2555. พลาสติก. [Online]. Available:
http://www2.mtec.or.th/th/special/biodegradable_plastic/type_and_usage_plas.html.
- [13] 2555. พลาสติก. [Online]. Available: <http://www.ussupplyamenity.com/newproducts02.html>.
- [14] 2555. พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ. [Online]. Available:
http://www2.mtec.or.th/th/special/biodegradable_plastic/usage_de_plas.html.
- [15] ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. 2549. พลาสติกย่อยสลายได้เพื่อสิ่งแวดล้อม. กรุงเทพฯ: ไทยวัฒนาพานิช.
- [16] สุพจน์ ประทีปถื่นทอง. 2539. การบรรจุภัณฑ์. กรุงเทพฯ: โอเดียนสโตร์.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [17] ชาญวิทย์ พูนศรีไชยสิทธิ์. 2551. เทคโนโลยีวัสดุ. กรุงเทพฯ:ไทยวัฒนาพานิช.
- [18] สมศักดิ์ วรมงคลชัย. 2547. สารปรับแต่งพอลิเมอร์. กรุงเทพฯ:บุ๊คเน็ค.
- [19] 2555. คาร์โบไฮเดรต. [Online]. Available:
<http://www.Carbohydratetechnology.eu.lib.kmutt.ac.th/elearning/Courseware/BCT611/chapter2.html>.
- [20] มรกต ตันติเจริญ, เกื้อกุล ปิยะจำขวัญ และกล้าณรงค์ ศรีรอด. 2555. อนาคตผลิตภัณฑ์แป้งมันสำปะหลัง. กรุงเทพฯ:เกษตรศาสตร์.
- [21] 2555. พอลิไวนิลแอลกอฮอล์. [Online]. Available:
<http://www.agsci.ubc.ca/.../fnh/301/water/water95.htm>.
- [22] 2555. ชิงค์ออกไซด์. [Online]. Available:
<http://www.mtec.or.th/laboratory/mech/index.php/knowledge/43-2009-06-25-03-17-43>.
- [23] 2555. **Sodium tripolyphosphate**. [Online]. Available: <http://www.engin.umich.edu.htm>.
- [24] 2555. **Sodium trimetaphosphate**. [Online]. Available: <http://www.wiz2.pharm.com>.
- [25] 2555. **Citric acid**. [Online]. Available:
http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=File:Zitronens%C3%A4ure_Citric_acid.svg&page=1.
- [26] 2555. **Freeze drying**. [Online]. Available:
202.129.59.198/rdi/html/t34-t35-935-938b.html.
- [27] Kaisangsri N., Kerdchoeuchuen O. and Laohakunjit N. “Biodegradable foam tray from cassava starch blended with natural fiber and chitosan.”, **Industrial crops and products**, vol.37, 2012. Pp.542-546
- [28] Reddy N. and Yang Y. “Citric acid cross-linking of starch films.”, **Food Chemistry**, vol.118, 2010. Pp.702-711
- [29] Palbo R., Vivian C. Schmidt., Sara E. Molina Ortiz., Adriana N. Mauri. and Joao B. Laurindo. “Biodegradable foams based on cassava starch, sunflower proteins and cellulose fibers obtained by a baking process.”, **Food Engineering**, vol.85, 2008. Pp.435-443
- [30] Wan J., Young N., Yeon H. and Soon D. “Physical Properties of chemically Modified Starch(RS4)/PVA Blend Films-Part1”., **Polymer Environment**. Vol.15, 2007. Pp.35-42
- [31] อนุรักษ์ ไชยแสงศรี อรพิน เกิดชูชื่น ภัฏฐา เลาหกุลจิตต์ และสุพจน์ ประทีปถิ่นทอง. 2553. “การพัฒนาถาดโฟม จากแป้งมันสำปะหลังในการบรรจุส้มโอตัดแต่งสด.” **วิทยาศาสตร์เกษตร**. 41(3): 669-672.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[32] Paloma L. da Silva., Anida M.M. Gomes., Carolina de L. e Moura., Claudio E.M. da Silva. and Nagila M.P.S. Ricardo. "Study of the Mechanical and Biodegradable Properties of Cassava Starch/Chitosan/ PVA Blends.", **Macromol. Symp.** Vol.299/300, 2011. Pp.220-226

[33] Laohakunjit N., Kaisangsri N., Kerdchoechuen O. and Pratheepthinthong S. "Development of Cassava Starch Based Foam by Adding the Agent.", **Agricultural Science.** Vol.40, 2009. Pp.113-116

[34] Wattanachant S., Muhammad K., Mat Hashim D. and Rahman Abd R. "Effect of crosslinking reagents and hydroxypropylation levels on dual-modified sago starch properties.", **Food Chemistry.** Vol.80, 2003. Pp.463-471

[35] Rui S., Jingliang B., Zizheng Z., Aichen Z., Dafu C., Xinhya Z., Liqun Z. and Wei T. "The effect of citric acid on the structural properties and cytotoxicity of the polyvinyl alcohol/starch films when molding at high temperature.", **Carbohydrate Polymers.** Vol.74, 2008. Pp.763-770

[36] Lee T., Rahman W. and Khan M.I. "Detection of synergistic interactions of polyvinyl alcohol-cassava starch blends through DSC.", **Carbohydrate Polymers.** Vol.79, 2010. Pp.224-226

[37] กมลวรรณ เดือนเพ็ญ มัทนา จำปาทอง และสวัสดิ์พงศ์ เรืองจรัส. 2554. "การเตรียมฟิล์มวัสดุดูดซับน้ำที่ยืดจากสารละลายผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังกับโซเดียมอัลจิเนต โดยใช้ N,N-Methylenebisacrylamide เป็นสารก่อก้อนเชื่อมโยงและนาโนซิงค์ออกไซด์เป็นสารตัวเติม." โครงการงานพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรม ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

[38] จิราพร เครือยั่งยืน, ณัฐชา กลั่นทรัพย์ และวิลาสินี ปลาทอง. 2553. "สมบัติของฟิล์มเตรียมจากแป้งมันสำปะหลังผสมกับซีเอ็มซีและนาโนซิงค์ออกไซด์". โครงการงานพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรม ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

[39] 2555. แป้งมันสำปะหลัง นิวเกรด. [Online]. Available:

http://www.google.co.th/imgres?um=1&sa=X&hl=th&biw=1280&bih=535&tbm=isch&tbnid=5QCJj4sLMDjWvM:&imgrefurl=http://www.twfp.co.th/web/product/sakhu.htm&docid=ayUJhNhkFaquBM&imgurl=http://www.twfp.co.th/image/product/pro_fl1.JPG&w=190&h=133&ei=5llvUuL0LMGLrQfT94GgCw&zoom=1&iact=hc&vpx=329&vpy=147&dur=1172&hovh=106&hovw=152&tx=136&ty=61&page=1&tbnh=106&tbnw=151&start=0&ndsp=20&ved=1t:429,r:2,s:0,i:82

[40] 2556. PVA sigma aldrich. [Online]. Available:

<http://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/aldrich/341584?lang=en®ion=TH>.

[41] 2556. STMP sigma Aldrich. [Online]. Available:

<http://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/sigma/s8639?lang=en®ion=TH>.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[42] 2556. STPP sigma aldrich. [Online]. Available:

<http://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/sigma/s8639?lang=en®ion=TH>.

[43] 2555. **ซิงค์ออกไซด์ บริษัทนาโนแมทรีเรียล**. [Online]. Available:

<http://www.nanomaterials.co.th/content.asp?SubID=71>.

[44] 2556. citric acid fisher scientific. [Online]. Available:

<http://www.fishersci.com/ecomm/servlet/itemdetail?catnum=BP339500&storeId=10652>.

[45] 2556. Agar diffusion method.[Online]. Available:

<http://www.google.co.th/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&frm=1&source=web&cd=1&ved=0CCoQFjAA>

<http://www.google.co.th/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&frm=1&source=web&cd=1&ved=0CCoQFjAA>

<http://www.google.co.th/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&frm=1&source=web&cd=1&ved=0CCoQFjAA>

<http://www.google.co.th/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&frm=1&source=web&cd=1&ved=0CCoQFjAA>

<http://www.google.co.th/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&frm=1&source=web&cd=1&ved=0CCoQFjAA>

[46] วิไลพรรณ สุวรรณัง, สุรีย์วัลย์ เบ็ญต๊อบ และฐานะ เทพธรณี. 2549. “โพลีเมอร์จากแป้งข้าวผสมฟางข้าว โดยกรรมวิธีการอบ.” โครงการงานพิเศษภาควิชาเทคโนโลยีการบรรจุ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

[47] ณิชชวิศรา รัศมีพงศ์. 2553. “การคัดแปรสารเมือกจากแมงลักเพื่อใช้เป็นวัสดุดูดซับน้ำที่ยั่งยืน.”

วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต คณะวิทยาศาสตร์สถาบัน เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

[48] กิตติวุฒิ ชนรัตนพัฒนกิจ, พชร เทียมธรา และราชวัลลภ แจ่มมงคล.2547. “การศึกษาพลาสติกย่อยสลายได้เพื่อใช้ในการฉีดขึ้นรูป.” โครงการงานพิเศษวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรม ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

[49] กรกมล ชมพูนรัตน์ และ บุญเมศ จันสุพรม. 2551. “สมบัติต่างๆ ของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งผสมระหว่างแป้งข้าวเจ้าและแป้งข้าวเหนียว.” โครงการงานพิเศษวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรม ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

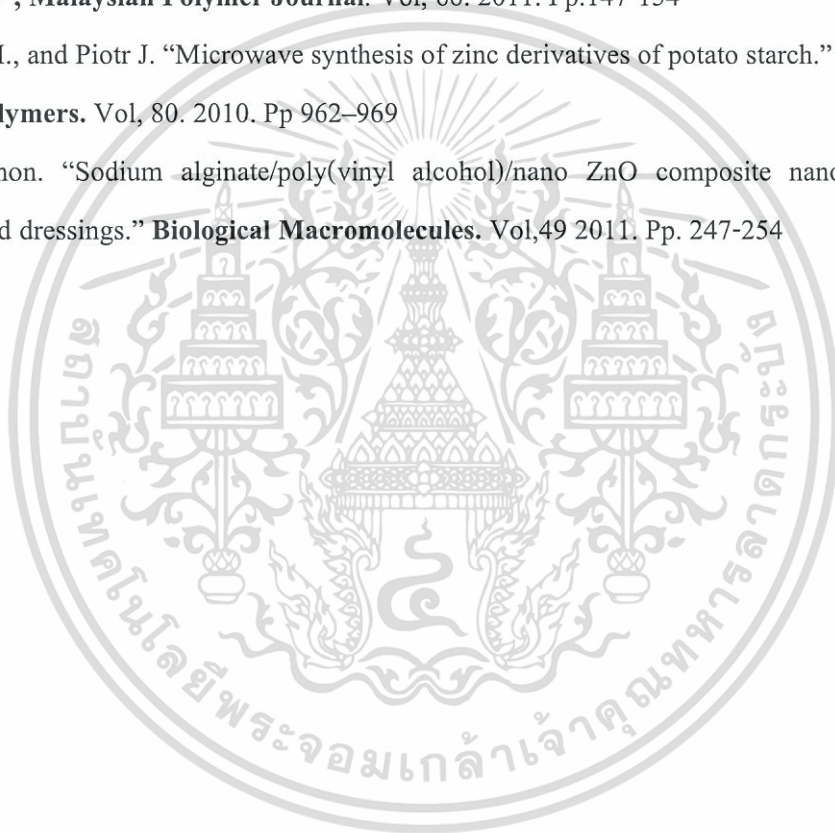
[50] กัญญาวีร์ สุวรรณชัย ภัทรภูมิ สุพรรณสมบุรณ์ และสุภาณี ชนะวงค์. 2542. “พอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโอลิฟินส์ที่ใช้แล้วกับแป้งมันสำปะหลัง.” โครงการงานพิเศษวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรม ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

[51] BeMiller J.N. and Whistler. R.L. **Starch: chemistry and technology**. 3rd ed. New York: Academic Press. 2009.

[52] Shehap. A. M. “Thermal and Spectroscopic Studies of Polyvinyl Alcohol/Sodium Carboxy Methyl Cellulose Blends.”, **Egypt. J. Solids**. Vol.31, 2008. Pp.75-91

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [53] Fahmy. H.M. and Moustafa M.G. Fouda. "Crosslinking of alginic acid/chitosan matrices using polycarboxylic acids and their utilization for sodium diclofenac release.", **Carbohydrate Polymers**. Vol.73, 2008. Pp.606 - 611
- [54] วีรเดช กิรดิธนวิทย์ ดวงหทัย เพ็ญตระกูล และ วิมลวรรณ พิมพ์พันธุ์. 2546. "การหาคุณลักษณะการกราฟต์ของแป้งมันสำปะหลังที่กราฟต์ด้วยพอลิซิสไตรีนโดยใช้เทคนิค TGA." วิทยานิพนธ์ระดับปริญญาโท สาขาวิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [55] RAJU L., RAO. J., REDDY. V., and VEERA BRAHMAM. K. "Thermal and IR studies on copper doped polyvinyl alcohol.", **Indian Academy of Sciences**. Vol, 30. 2007. Pp.215–218
- [56] Nadras O., NUR I., and HANAFI I. "Thermal Properties of Polyvinyl Alcohol (PVOH)/Corn Starch Blend Film.", **Malaysian Polymer Journal**. Vol, 66. 2011. Pp.147-154
- [57] Staroszczyk H., and Piotr J. "Microwave synthesis of zinc derivatives of potato starch." **Carbohydrate Polymers**. Vol, 80. 2010. Pp 962–969
- [58] K.T. Shalumon. "Sodium alginate/poly(vinyl alcohol)/nano ZnO composite nanofiber for antibacterial wound dressings." **Biological Macromolecules**. Vol,49 2011. Pp. 247-254





เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-1 ความถี่ของการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของหมู่ฟังก์ชันที่สามัญบางชนิด

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

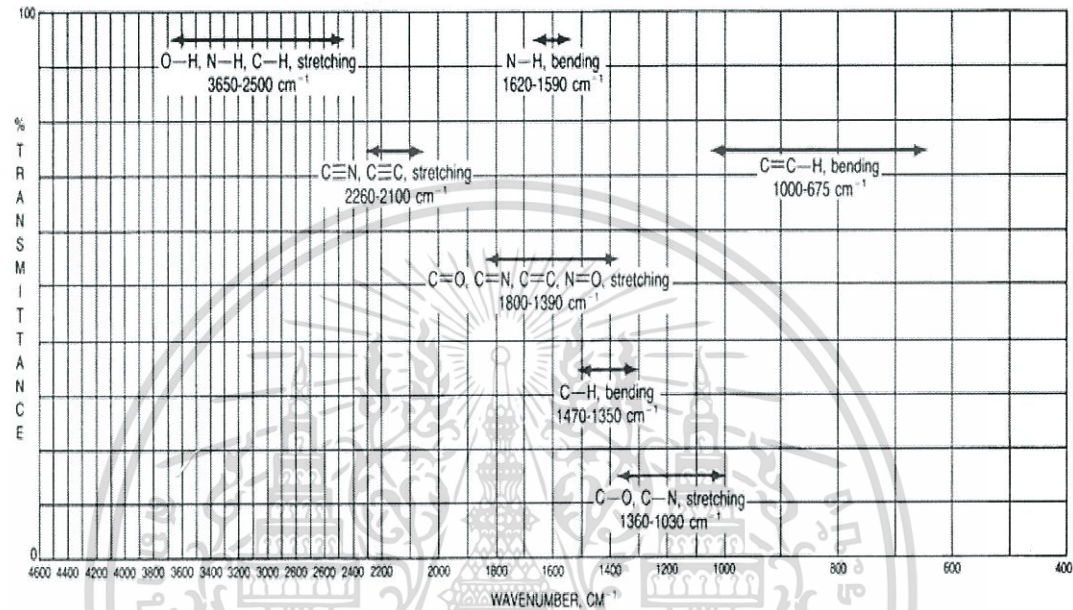
ตารางที่ ก-1 (ต่อ) ความถี่ของการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของหมู่ฟังก์ชันที่สามัญบางชนิด

Type of Vibration		Frequency (cm ⁻¹)	Intensity	
C≡C	Alkyne (stretching, terminal)	2140-2100	m-w	
	(stretching, internal)	2260-2190		
C=O	Aldehyde (stretching, saturated or alicyclic)	1740-1730	s	
	(stretching, C=C conjugation)	1705-1680		
	(stretching, aryl conjugation)	1715-1695		
	Ketone	(stretching, saturated or alicyclic)	1725-1705	s
		(stretching, C=C conjugation)	1690-1675	
		(stretching, aryl conjugation)	1715-1695	
	Carboxylic Acid	(stretching, saturated or alicyclic)	1725-1700	s
		(stretching, C=C or aryl conj.)	1705-1680	
	Ester	(stretching, saturated or alicyclic)	1750-1735	s
		(stretching, C=C or aryl conjugation)	1730-1717	
Amide	(stretching)	1670-1640	s	
Anhydride	(stretching)	1810 and 1760	s	
Acid chloride	(stretching)	1800	s	
C-O	Ethers, Esters, Carboxylic acids, Anhydrides	(stretching)	1300-1000	s
	Alcohols	(stretching, primary alcohol)	1050	
		(stretching, secondary alcohol)	1100	
		(stretching, tertiary alcohol)	1150	
	Phenols	(stretching)	1200	

ตารางที่ ก-1 (ต่อ) ความถี่ของการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของหมู่ฟังก์ชันที่สำคัญบางชนิด

O-H	Alcohols, (stretching, Free OH)	3650-3600	m
	Phenols	(stretching, H-bonded OH)	3500-3200
		(bending, 1° and 2° alcohols)	1350-1260
		(bending, 3° alcohol and phenol)	1410-1310
	Carboxylic acids (stretching, H-bonded OH)	3400-2400	m
N-H	1° and 2° Amines and Amides (stretching, Free NH)	3500-3100	m
		(bending)	1640-1550
C-N	Amines (stretching)	1350-1000	m-s
C=N	Imines and Oximes (stretching)	1690-1640	w-s
C≡N	Nitriles (stretching)	2260-2240	m

ตารางที่ ก-1 (ต่อ) ความถี่ของการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของหมู่ฟังก์ชันที่สามัญบางชนิด



รูปที่ ก-1 แสดงความถี่ของการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของหมู่ฟังก์ชันสามัญบางชนิด

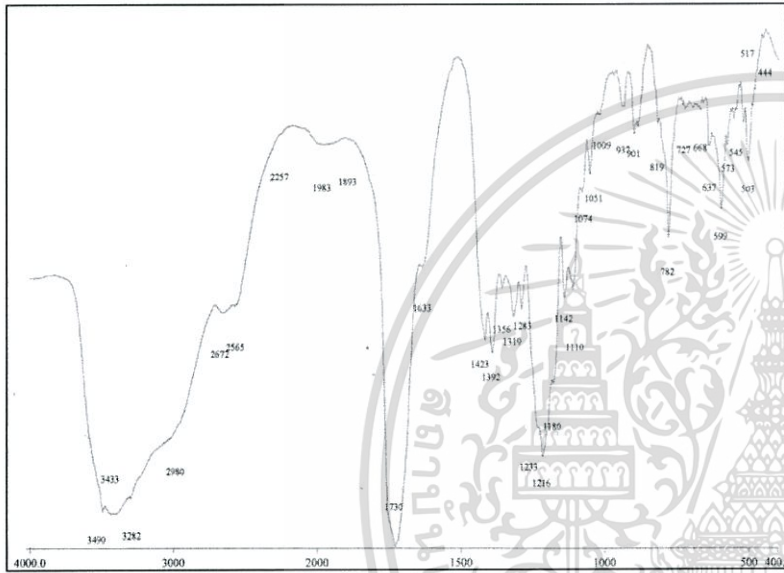
ที่มา : ชีรยุทธ วิไลวัลย์ และ วรวรรณ พันธุ์นาวัน ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (พ.ศ. 2548)

ภาพสเปกตรัม

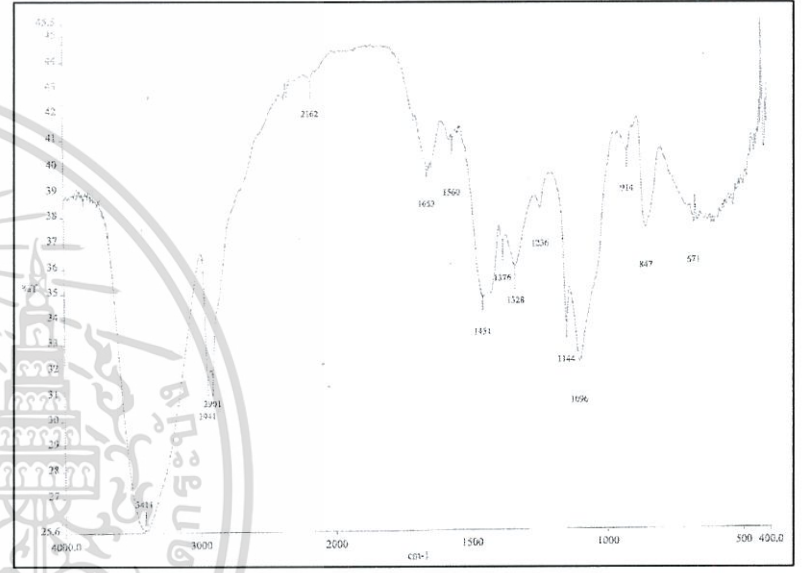


รูปที่ ก-2 แสดง IR spectrum ของ แป้งมันสำปะหลัง

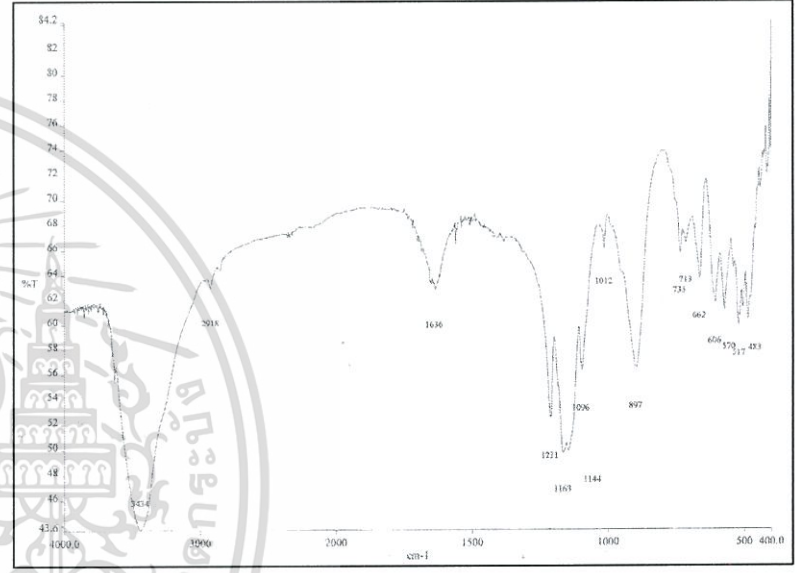
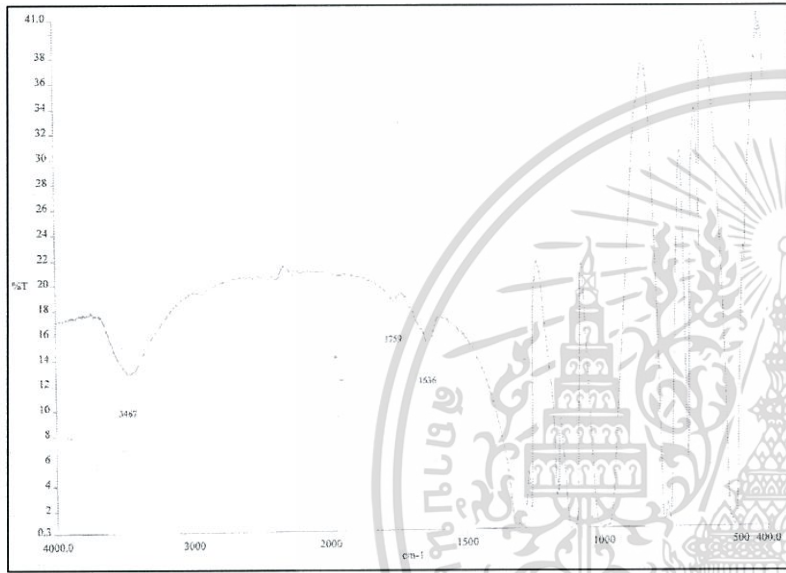
รูปที่ ก-3 แสดง IR spectrum ของ ZnO



รูปที่ ก-4 แสดง IR spectrum ของ CA



รูปที่ ก-5 แสดง IR spectrum ของ PVA



รูปที่ ก-6 แสดง IR spectrum ของ STMP

รูปที่ ก-7 แสดง IR spectrum ของ STPP



ภาคผนวก - ข

Density

ตาราง ข Density

Density (g/cm ³)												
สูตร	น้ำหนัก(g)	กว้าง*ยาว (cm2)	ความหนา(cm)					ปริมาตร(cm3)				
			F1	0.1878	6.26	0.6331	0.6452	0.5987	0.6356	0.6423	3.963206	4.038952
F2	0.18969	6.24	0.6145	0.6287	0.6097	0.6011	0.5921	3.83448	3.923088	3.804528	3.750864	3.694704
F3	0.2084	6.21	0.524	0.425	0.511	0.435	0.504	3.25404	2.63925	3.17331	2.70135	3.12984
F4	0.2145	6.22	0.4745	0.4944	0.5231	0.4998	0.4812	2.95139	3.075168	3.253682	3.108756	2.993064
F5	0.2365	6.24	0.4977	0.5053	0.4968	0.4975	0.5034	3.105648	3.153072	3.100032	3.1044	3.141216
F6	0.2423	6.25	0.4787	0.4745	0.4876	0.4676	0.4589	2.991875	2.965625	3.0475	2.9225	2.868125
F7	0.2199	6.24	0.335	0.385	0.267	0.368	0.33	2.0904	2.4024	1.66608	2.29632	2.0592
F8	0.2167	6.48	0.343	0.285	0.338	0.282	0.343	2.22264	1.8468	2.19024	1.82736	2.22264
F9	0.2114	6.21	0.424	0.38	0.451	0.456	0.423	2.63304	2.3598	2.80071	2.83176	2.62683
F10	0.3205	6.34	0.28	0.291	0.329	0.309	0.307	1.7752	1.84494	2.08586	1.95906	1.94638
F11	0.4086	6.24	0.274	0.311	0.283	0.273	0.268	1.70976	1.94064	1.76592	1.70352	1.67232

ตาราง ข (ต่อ) Density

Density (g/cm ³)							
สูตร	Density (g/cm ³)					เฉลี่ย	SD
F1	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.0015
F2	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.0014
F3	0.06	0.08	0.07	0.08	0.07	0.07	0.007
F4	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.0026
F5	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.006
F6	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.0019
F7	0.11	0.09	0.13	0.1	0.11	0.11	0.0157
F8	0.1	0.12	0.1	0.12	0.1	0.11	0.011
F9	0.08	0.09	0.08	0.07	0.08	0.08	0.0059
F10	0.18	0.17	0.15	0.16	0.16	0.17	0.0103
F11	0.24	0.21	0.23	0.24	0.24	0.23	0.0134



ภาคผนวก - ก

% Porosity

ตาราง ค % Porosity

%Porosity												
สูตร	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ครั้งที่ 6	ครั้งที่ 7	ครั้งที่ 8	ครั้งที่ 9	ครั้งที่ 10	เฉลี่ย	SD
F1	49	48	48	47	46	49	48	47	49	48	47.9	0.9944289
F2	47	49	48	48	49	47	48	49	47	48	48	0.8164966
F3	46	47	47	46	47	48	48	46	48	45	46.8	1.0327956
F4	48	46	47	48	48	47	46	46	46	45	46.7	1.0593499
F5	48	49	47	46	47	46	47	48	45	43	46.6	1.7126977
F6	46	48	46	46	45	47	47	45	47	43	46	1.4142136
F7	27	28	25	30	28	27	26	28	25	26	27	1.5634719
F8	41	40	41	40	41	42	41	42	41	41	41	0.6666667
F9	42	42	45	41	42	38	39	44	42	45	42	2.3094011
F10	27	24	25	26	27	28	25	27	26	25	26	1.2472191
F11	21	24	23	25	21	23	24	24	23	22	23	1.3333333



ภาคผนวก- ง

% Moisture content

ตาราง ง %Moisture content

%Moisture content										
สูตร	น้ำหนักก่อนอบ(g)					น้ำหนักหลังอบ(g)				
F3	0.2356	0.2321	0.231	0.2343	0.2324	0.23	0.2297	0.2277	0.2276	0.228
F7	0.2994	0.2987	0.2986	0.2976	0.2932	0.2963	0.2945	0.2945	0.2945	0.2898
F8	0.258	0.2565	0.2543	0.2522	0.253	0.2555	0.2516	0.25	0.2499	0.2499
F9	0.2487	0.2465	0.2445	0.2425	0.2454	0.2456	0.2427	0.2354	0.2409	0.2435
F10	0.3433	0.3389	0.3422	0.34	0.339	0.3389	0.3353	0.3398	0.3378	0.3356
F11	0.5435	0.5412	0.5369	0.5416	0.5387	0.5398	0.5377	0.5323	0.5376	0.533

ตาราง ง (ต่อ) %Moisture content

%Moisture content							
สูตร	(ก่อน-หลัง)/หลัง*100					เฉลี่ย	SD
F3	2.43	1.04	1.45	2.94	1.93	1.96	0.76
F7	1.05	1.43	1.39	1.05	1.17	1.22	0.18
F8	0.98	1.95	1.72	0.92	1.24	1.36	0.45
F9	1.26	1.57	3.87	0.66	0.78	1.63	0.32
F10	1.3	1.07	0.7	0.65	1.01	0.95	0.27
F11	0.6	0.65	0.86	0.74	1.07	0.8	0.17



ภาคผนวก- จ

%Water uptake

ตาราง จ %Water uptake

%Water absorption: สูตร F3																	
ชม.	น้ำหนักก่อนแช่(g)					น้ำหนักหลังแช่(g)					(หลัง-ก่อน)/ก่อน*100					เฉลี่ย	SD
1	0.2056	0.2021	0.201	0.2043	0.2024	2.1767	2.2342	2.2123	2.3424	2.1233	958.71	1005.5	1000.6	1046.5	949.06	992.09116	39.321091
2	0.2094	0.2087	0.2086	0.2076	0.2032	2.2985	2.2534	2.1457	2.2543	2.3654	997.66	979.73	928.62	985.89	1064.1	991.19443	48.55039
3	0.208	0.2065	0.2043	0.2022	0.2053	2.5948	2.4563	2.5467	2.5435	2.6754	1147.5	1089.5	1146.5	1157.9	1203.2	1148.924	40.505843
4	0.2087	0.2065	0.2045	0.2025	0.2054	2.6268	2.5453	2.6576	2.6435	2.6789	1158.6	1132.6	1199.6	1205.4	1204.2	1180.0934	32.864156
5	0.2033	0.2089	0.2022	0.2	0.2039	2.7865	2.7866	2.7655	2.7865	2.8654	1270.6	1233.9	1267.7	1293.3	1305.3	1274.1652	27.412085
6	0.2035	0.2012	0.2069	0.2016	0.2087	2.8432	2.8655	2.721	2.6432	2.7854	1297.1	1324.2	1215.1	1211.1	1234.6	1256.4474	51.200217

ตาราง จ (ต่อ)%Water uptake

%Water absorption: สูตร F7																	
ชม.	น้ำหนักก่อนแช่(g)					น้ำหนักหลังแช่(g)					(หลัง-ก่อน)/ก่อน*100					เฉลี่ย	SD
1	0.2134	0.2189	0.2235	0.2213	0.2213	1.7956	1.7543	1.7654	1.8765	1.8234	741.42	701.42	689.89	747.94	723.95	720.92445	25.016415
2	0.2157	0.2167	0.2278	0.2213	0.2146	1.4186	1.4346	1.4876	1.4097	1.599	557.67	562.02	553.03	537.01	645.11	570.96773	42.510228
3	0.2158	0.2134	0.2214	0.2198	0.2145	1.4099	1.4321	1.5434	1.4564	1.3543	553.34	571.09	597.11	562.6	531.38	563.10211	24.095953
4	0.2235	0.2122	0.2135	0.2213	0.2312	1.259	1.3547	1.2347	1.289	1.328	463.31	538.41	478.31	482.47	474.39	487.37873	29.402572
5	0.2124	0.2134	0.2246	0.2213	0.2231	1.2075	1.2679	1.2543	1.2675	1.3422	468.5	494.14	458.46	472.75	501.61	479.09406	18.109168
6	0.2234	0.2362	0.2287	0.221	0.2135	1.2347	1.2345	1.0798	1.1345	1.1456	452.69	422.65	372.15	413.35	436.58	419.48244	30.344389

ตาราง จ (ต่อ)% Water uptake

% Water absorption: สูตร F8																	
ชม.	น้ำหนักก่อนแช่(g)					น้ำหนักหลังแช่(g)					(หลัง-ก่อน)/ก่อน*100					เฉลี่ย	SD
1	0.2138	0.2043	0.214	0.2098	0.2076	2.0567	2.1289	2.1233	2.089	2.0543	861.97	942.05	892.2	895.71	889.55	896.2947	28.86942
2	0.2176	0.2135	0.2146	0.2074	0.2165	1.9523	2.1234	2.2569	1.9654	1.9765	797.2	894.57	951.68	847.64	812.93	860.80233	63.065127
3	0.2178	0.2135	0.2087	0.216	0.2178	1.8416	1.8578	1.9087	1.8909	1.8654	745.55	770.16	814.57	775.42	756.47	772.43343	26.300461
4	0.2136	0.2087	0.2232	0.2155	0.2167	1.6445	1.6479	1.6098	1.6543	1.754	669.9	689.6	621.24	667.66	709.41	671.56128	32.82109
5	0.2067	0.2097	0.2167	0.2056	0.2067	1.4365	1.4563	1.4879	1.5678	1.357	594.97	594.47	586.62	662.55	556.51	599.02199	38.840048
6	0.2108	0.2123	0.2198	0.2157	0.2087	1.095	1.1234	1.1324	1.0975	1.0869	419.45	429.16	415.2	408.81	420.8	418.68123	7.4903031

ตาราง จ (ต่อ)% Water uptake

%Water absorption: สูตร F9																	
ชม.	น้ำหนักก่อนแช่(g)					น้ำหนักหลังแช่(g)					(หลัง-ก่อน)/ก่อน*100					เฉลี่ย	SD
1	0.2189	0.1978	0.2089	0.1923	0.1987	2.0445	2.0232	2.0298	2.0326	2.0787	833.99	922.85	871.66	956.99	946.15	906.32896	52.107428
2	0.2156	0.2089	0.2189	0.2033	0.2807	2.1233	2.2423	2.1456	2.2213	2.2234	884.83	973.38	880.17	992.62	692.09	884.62079	118.98597
3	0.1998	0.2119	0.2045	0.2178	0.1945	2.3567	2.298	2.322	2.3432	2.5468	1079.5	984.47	1035.5	975.85	1209.4	1056.9428	94.928602
4	0.2099	0.2023	0.2185	0.1974	0.2178	2.5464	2.4566	2.3455	2.2567	2.4456	1113.1	1114.3	973.46	1043.2	1022.9	1053.4033	60.643173
5	0.2156	0.2156	0.2156	0.1955	0.1987	2.7456	2.7809	2.7654	2.6789	2.6989	1173.5	1189.8	1182.7	1270.3	1258.3	1214.905	45.642803
6	0.218	0.2123	0.2023	0.1945	0.1921	2.7433	2.789	2.8796	2.7987	2.6888	1158.4	1213.7	1323.4	1338.9	1299.7	1266.827	77.556799

ตาราง จ (ต่อ)%Water uptake

%Water absorption: สูตร F10																	
ชม.	น้ำหนักก่อนแช่(g)					น้ำหนักหลังแช่(g)					(หลัง-ก่อน)/ก่อน*100					เฉลี่ย	SD
1	0.3278	0.3135	0.3134	0.3124	0.3087	1.7432	1.7256	1.7567	1.6754	1.6532	431.79	450.43	460.53	436.3	435.54	442.91674	12.132496
2	0.3123	0.3245	0.3117	0.3165	0.3123	1.7544	1.6526	1.7465	1.7655	1.5777	461.77	409.28	460.31	457.82	405.19	438.87299	28.955126
3	0.3234	0.3155	0.3087	0.3054	0.3086	1.6755	1.6543	1.5456	1.6888	1.6579	418.09	424.34	400.68	452.98	437.23	426.6648	19.73757
4	0.3125	0.3098	0.3198	0.3154	0.3067	1.6544	1.6423	1.6443	1.6433	1.5643	429.41	430.12	414.17	421.02	410.04	420.95052	8.9522754
5	0.3233	0.3189	0.3222	0.3135	0.3241	1.6399	1.6321	1.6231	1.6312	1.5444	407.24	411.79	403.76	420.32	376.52	403.92448	16.527925
6	0.3126	0.3043	0.3178	0.3016	0.3125	1.6123	1.5967	1.4643	1.6213	1.5321	415.77	424.71	360.76	437.57	390.27	405.81664	30.560533

ตาราง จ (ต่อ)%Water uptake

%Water absorption: สูตร F11																	
ชม.	น้ำหนักก่อนแช่(g)					น้ำหนักหลังแช่(g)					(หลัง-ก่อน)/ก่อน*100					เฉลี่ย	SD
1	0.4355	0.4232	0.4232	0.389	0.4012	1.6765	1.6578	1.5432	1.4356	1.4198	284.96	291.73	264.65	269.05	253.89	272.85539	15.364884
2	0.3989	0.3987	0.4034	0.4123	0.4212	1.6433	1.4566	1.4576	1.5678	1.5678	311.96	265.34	261.33	280.26	272.22	278.22065	20.18444
3	0.398	0.4123	0.4245	0.3967	0.389	1.5834	1.5675	1.4356	1.5456	1.4356	297.84	280.18	238.19	289.61	269.05	274.97456	23.198926
4	0.4199	0.4031	0.4087	0.3967	0.3808	1.5654	1.5645	1.5678	1.4566	1.4223	272.8	288.12	283.61	267.18	273.5	277.04182	8.5661763
5	0.4098	0.419	0.4268	0.4267	0.4121	1.5342	1.3455	1.4436	1.5355	1.3543	274.38	221.12	238.24	259.85	228.63	244.44521	22.169365
6	0.4078	0.4321	0.4165	0.4321	0.3998	1.4323	1.4235	1.4876	1.4654	1.3235	251.23	229.44	257.17	239.13	231.04	241.60111	12.252487



ภาคผนวก - ฉ

Hardness

ตาราง Hardness

Hardness test												
สูตร	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ครั้งที่ 6	ครั้งที่ 7	ครั้งที่ 8	ครั้งที่ 9	ครั้งที่ 10	เฉลี่ย	SD
F1	10	12	12	11	12	10	10	9	11	12	10.9	1.1005049
F2	17	15	15	14	14	16	16	18	18	14	15.7	1.5670212
F3	22	17	18	21	22	19	18	17	20	21	19.5	1.95789
F4	23	24	21	24	21	23	23	21	22	21	22.3	1.2516656
F5	23	22	24	24	21	21	22	22	24	23	22.6	1.1737878
F6	23	23	22	25	23	23	21	23	21	20	22.4	1.4298407
F7	34	34	35	34	32	40	42	40	40	36	36.7	3.465705
F8	25	29	31	28	31	30	35	34	36	28	30.7	3.465705
F9	23	22	26	23	21	20	19	24	25	23	22.6	2.1705094
F10	38	37	36	39	40	39	41	39	38	37	37.4	1.5055453
F11	36	35	35	36	37	33	37	38	39	34	38	1.8257419



ภาคผนวก - ช

Flexural test

ตาราง ข Flexural test

Flexural Test												
สูตร	F1		F2		F3		F4		F5		F6	
	เฉลี่ย	SD	เฉลี่ย	SD	เฉลี่ย	SD	เฉลี่ย	SD	เฉลี่ย	SD	เฉลี่ย	SD
Flexural strength	0.0786	0.0124	0.0756	0.0147	0.0809	0.009	0.0829	0.0093	0.0837	0.0073	0.0819	0.0042
Flexural modulus	0.4325	0.0846	0.4843	0.0423	0.5432	0.0566	0.6534	0.0532	0.7453	0.0323	0.7432	0.0533

ตาราง ข (ต่อ) Flexural test

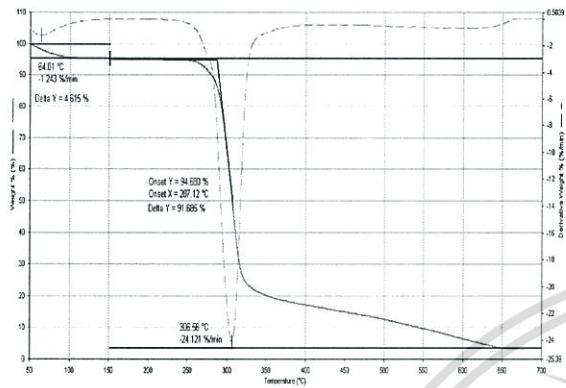
Flexural Test										
สูตร	F7		F8		F9		F10		F11	
	เฉลี่ย	SD	เฉลี่ย	SD	เฉลี่ย	SD	เฉลี่ย	SD	เฉลี่ย	SD
Flexural strength	0.1232	0.0699	0.1067	0.0589	0.0921	0.1598	0.1987	0.1988	0.2156	0.12579
Flexural modulus	0.8755	0.1088	0.7864	0.1009	0.6328	0.0668	0.9198	0.1438	1.0543	0.11977



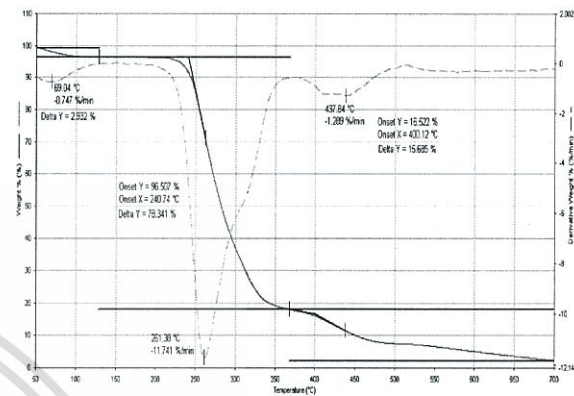
ภาคผนวก - ช

TGA

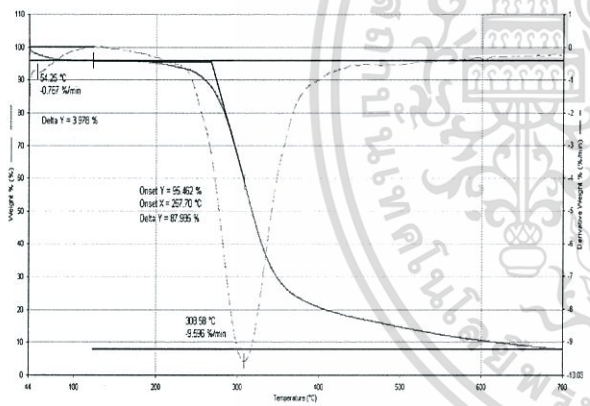
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



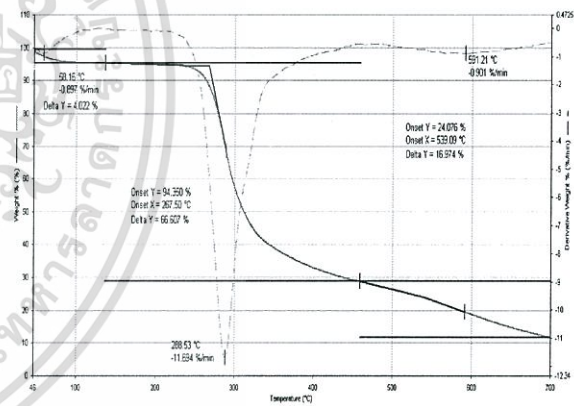
รูปที่ ข-1 เทอร์โมแกรม สูตร F1



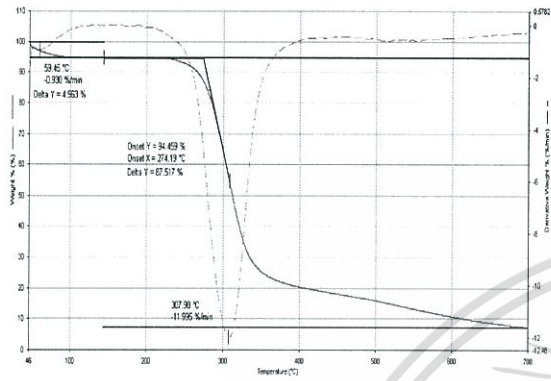
รูปที่ ข-2 เทอร์โมแกรม สูตร F6



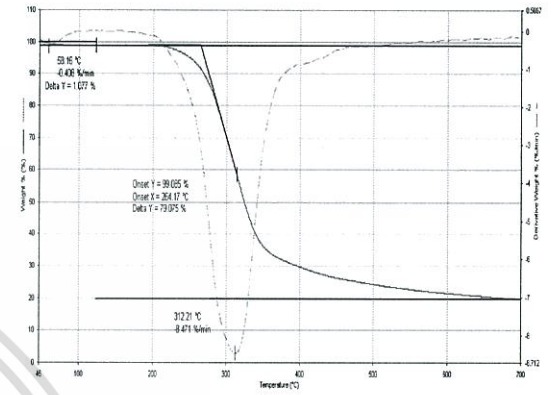
รูปที่ ข-3 เทอร์โมแกรม สูตร F9



รูปที่ ข-4 เทอร์โมแกรม สูตร F8



รูปที่ ๕-5 เทอร์โมแกรม สูตร F7



รูปที่ ๕-6 เทอร์โมแกรม สูตร F11



เปรียบเทียบความหนาแน่นและสมบัติเชิงกลระหว่างโพลีเมียงมันล่ำปะหลังผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์โดยั้ ZnO เป็นสารเชื่อมโยงกับโพลีพอลิสไตรีนชนิดทนแรงกระแทก

ตาราง ฅ เปรียบเทียบความหนาแน่นและสมบัติเชิงกลระหว่างโพลีเมียงและกับโพลีพอลิสไตรีนชนิดทนแรงกระแทก

ชนิดพอลิเมอร์	ความหนาแน่น (g/cm ³)	SD	ความแข็งแรงคั้งงอ (MPa)	SD	มอดุลัสคั้งงอ (MPa)	SD	ความแข็งกด	SD
พอลิสไตรีน๓	1.003	0.23	1.5	0.87	3.8		75.0	0.98
โพลีสูตร F1	0.05	0.01	0.08	0.01	0.43	0.08	11	1.10
โพลีสูตร F2	0.05	0.01	0.08	0.01	0.48	0.04	16	1.57
โพลีสูตร F3	0.07	0.01	0.08	0.23	0.54	0.23	20	1.96
โพลีสูตร F4	0.07	0.01	0.08	0.01	0.65	0.05	22	1.25
โพลีสูตร F5	0.08	0.01	0.08	0.01	0.74	0.03	23	1.17
โพลีสูตร F6	0.08	0.01	0.08	0.01	0.74	0.05	22	1.42
โพลีสูตร F7	0.11	0.02	0.12	0.07	0.88	0.11	37	3.47
โพลีสูตร F8	0.09	0.02	0.11	0.06	0.79	0.10	28	1.35
โพลีสูตร F9	0.08	0.01	0.09	0.16	0.63	0.07	23	2.17
โพลีสูตร F10	0.17	0.01	0.20	0.20	0.92	0.14	38.4	1.51
โพลีสูตร F11	0.23	0.01	0.22	0.13	1.05	0.12	36	1.83