

สมบัติต่างๆ ของฟิล์มเทอร์โมพลาสติกที่ทำจากแป้งมันสำปะหลังและ
แป้งหัวหนามที่ปรับปรุงสมบัติด้วยสาร

PROPERTIES OF THERMOPLASTIC STARCH FILM FROM
CASSAVA STARCH AND ARROWROOT STARCH MODIFIED BY AGAR

นางสาวเฟรมนุชทิพย์ เกตุเที่ยง
นางสาวพาขวัญ ตันแสง
นางสาวสุปรียา ตันฉวีบุตย์ศรี

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของงานศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2556

สมบัติต่างๆ ของฟิล์มเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังและ
แป้งท้าวยายม่อมที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอะการ์

**PROPERTIES OF THERMOPLASTIC STARCH FILM FROM
CASSAVA STARCH AND ARROWROOT STARCH MODIFIED BY AGAR**

นางสาวเปรมฤทัย

เกตุแห่ง

นางสาวพาขวัญ

ต้นเฮง

นางสาวสุปรียา

กนกวิบูลย์ศรี

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาเคมีอุตสาหกรรม

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2556

**PROPERTIES OF THERMOPLASTIC STARCH FILM FROM
CASSAVA STARCH AND ARROWROOT STARCH MODIFIED BY AGAR**

MISS PREAMRUTAI KETHENG

MISS PAKHWAN TANHENG

MISS SUPREEYA GANOKVIBULSRI


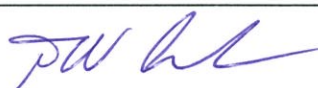

**A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE
IN INDUSTRIAL CHEMISTRY
FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2013**

หัวข้อโครงการพิเศษ สมบัติต่างๆ ของฟิล์มเทอร์โมพลาสติกสตาarch จากแป้งมันสำปะหลังและ
แป้งท้าวยายม่อมที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอะการ์

Properties of thermoplastic starch film from cassava starch and
arrowroot starch modified by agar

ชื่อนักศึกษา	นางสาวเปรมฤทัย	เกตุแห่ง	รหัสนักศึกษา	53050279
	นางสาวพาขวัญ	ตันเฮง	รหัสนักศึกษา	53050298
	นางสาวสุปรียา	กนกวิบูลย์ศรี	รหัสนักศึกษา	53050380
ปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต			
สาขาวิชา	เคมีอุตสาหกรรม			
ปีการศึกษา	2556			
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร. จุฑารัตน์	ปรัชญาวรากร		

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมี
อุตสาหกรรม ประจำปีการศึกษา 2556

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

ลิขสิทธิ์ของภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

หัวข้อโครงการพิเศษ	สมบัติต่างๆ ของฟิล์มเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งมันสำปะหลังและแป้งท้าวยายม่อมที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอะคาร์		
ชื่อนักศึกษา	นางสาวเปรมฤทัย	เกตุหัง	รหัสนักศึกษา 53050279
	นางสาวพาขวัญ	ตันเฮง	รหัสนักศึกษา 53050298
	นางสาวสุปรียา	กนกวิบูลย์ศรี	รหัสนักศึกษา 53050380
ปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต		
สาขาวิชา	เคมีอุตสาหกรรม		
ปีการศึกษา	2556		
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร. จุฑารัตน์	ปรัชญาวรากร	

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของชนิดแป้งต่อสมบัติของฟิล์มเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งมันสำปะหลัง (TPCS) และฟิล์มเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งท้าวยายม่อม (TPAS) ที่ปรับปรุงโดยใช้อะคาร์ ในปริมาณ 0% , 5% , 10% , 15% และ 20% ของน้ำหนักแป้งตามลำดับ โดยฟิล์ม TPCS และ TPAS ถูกผสมและขึ้นรูปด้วยเครื่องผสมแบบระบบปิด (Internal mixer) และเครื่องอัดขึ้นรูป (Compression molding) ตามลำดับ จาก สเปกตรัม FTIR พบว่า พีคการสั่นแบบยืด-หดของหมู่ไฮดรอกซิล เคลื่อนไปยังเลขคลื่นที่ลดต่ำลง แสดงว่าเกิดพันธะไฮโดรเจนใหม่ขึ้น เมื่อปริมาณอะคาร์เพิ่มขึ้นมีแนวโน้มความเป็นผลึกของทั้งฟิล์ม TPCS และ TPAS เพิ่มขึ้น จากภาพระดับจุลภาค พบว่าเมื่อปริมาณอะคาร์เพิ่มขึ้นทำให้ความขรุขระของฟิล์มทั้งสองเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ค่าความแข็งแรง ณ จุดแรงดึงสูงสุด และค่ามอดุลัสของฟิล์ม TPCS และ TPAS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอะคาร์ 20% มีค่าสูงกว่าฟิล์ม TPCS และ TPAS ที่ไม่ได้ปรับปรุงสมบัติด้วยอะคาร์ อย่างไรก็ตาม การดูดซับน้ำของฟิล์ม TPCS และ TPAS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอะคาร์ สูงกว่าฟิล์ม TPCS และ TPAS ที่ไม่ได้ปรับปรุงสมบัติด้วยอะคาร์ นอกจากนี้ การรวมตัวกันของอะคาร์ในฟิล์ม TPCS และ TPAS ไม่มีผลต่อเสถียรภาพทางความร้อน และสุดท้ายฟิล์ม TPAS ที่ปรับปรุงด้วยอะคาร์ 20% แสดงผลการย่อยสลายเร็วที่สุดซึ่งทดสอบโดยการฝังดิน

คำสำคัญ : เทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งมันสำปะหลัง, เทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งท้าวยายม่อม, อะคาร์

Title Properties of thermoplastic starch film from cassava starch and arrowroot starch modified by agar

Students Miss. Preamrutai Ketheng 53050279
Miss. Pakhwan Tanheng 53050298
Miss. Supreeya Ganokvibulsri 53050380

Degree Bachelor of Science

Major Program Industrial Chemistry

Academic Year 2013

Thesis Advisor Assoc.Prof.Dr.Jutarat Prachayawarakorn

ABSTRACT

This research focused on the effect of starch types on properties of thermoplastic cassava starch (TPCS) and thermoplastic arrowroot starch (TPAS) films. Different contents of agar, i.e., 0%, 5%, 10%, 15% and 20% by starch weight, were examined. The films were compounded and shaped using an internal mixer and a compression molding machine respectively. It was found from FTIR spectra that the O-H stretching peak from different TPCS and TPAS films modified by agar shifted to lower wavenumber, indicating of new hydrogen bond formation. The addition of agar tended to increase crystallinity of both TPCS and TPAS films. From SEM micrographs, the increasing agar contents led to more roughness of both TPCS and TPAS films. Moreover, stress at maximum load and Young's modulus of the 20% agar-modified TPCS and TPAS films were higher than those of the non-modified TPCS and TPAS films; however, water absorption of agar-modified TPCS and TPAS films was higher than those of non-modified films. In addition, the incorporation of agar into the TPCS and TPAS films did not cause the change in thermal degradation temperature. Finally, the TPAS film modified by 20% agar showed the quickest biodegradation determined by soil burial test.

Keywords : Thermoplastic cassava starch, Thermoplastic arrowroot starch, Agar

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยเรื่องสมบัติต่างๆของฟิล์มเทอร์โมพลาสติกสตาarchจากแป้งมันสำปะหลัง และ แป้งท้าวยายม่อมที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอะการ์ (Properties of thermoplastic starch film from cassava starch and arrowroot starch modified by agar) สำเร็จลุล่วงได้ดี ด้วยความช่วยเหลือจากคณาจารย์และบุคคลหลายฝ่ายที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อความสำเร็จของโครงการนี้ ทางผู้จัดทำโครงการพิเศษนี้จึงขอขอบพระคุณผู้ให้ความช่วยเหลือและความอนุเคราะห์ดังรายนามต่อไปนี้

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร. จุฑารัตน์ ปรีชญาวรากร ที่เป็นอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษนี้ ที่กรุณาให้คำแนะนำและคำปรึกษา ชี้แนะแนวทางการแก้ไขในการทำโครงการพิเศษฉบับนี้ให้มีความสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร. สมศักดิ์ วรมงคลชัย และ รศ.ดร.มาลินี ชัยสุภกิจสินธุ์ ที่กรุณาเป็นกรรมการตรวจสอบแก้ไขให้โครงการพิเศษฉบับนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ คุณกฤษณะ เกษประดิษฐ์ และ คุณสุคใจ สอนสะอาด เจ้าหน้าที่อาคารฝึกงานทางอุตสาหกรรมเคมีและพอลิเมอร์ที่คอยอำนวยความสะดวกและให้ความช่วยเหลือตลอดการดำเนินงานวิจัยนี้

นอกจากนี้ยังขอขอบคุณบุคลากรท่านอื่นๆ ที่ให้ความช่วยเหลือ ซึ่งผู้จัดทำมิได้กล่าวถึงทางผู้จัดทำขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้ด้วย

นางสาวเปรมฤทัย เกตุแห่ง

นางสาวพาขวัญ ต้นเฮง

นางสาวสุปรียา กนกวิบูลย์ศรี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VIII
สารบัญรูป	IX
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาของโครงการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์	3
1.3 ขอบเขตงานวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	5
2.1 พลาสติกย่อยสลายได้จากแป้ง	5
2.1.1 การย่อยสลายของพลาสติก	5
2.1.2 เทคโนโลยีพลาสติกจากแป้ง	11
2.1.2.1 การใช้สารพอลิเมอร์ธรรมชาติ(แป้ง)	11
เป็นองค์ประกอบหลัก	
2.1.2.2 แป้งผสมพอลิเมอร์ย่อยสลายได้	12
2.2 แป้ง	15
2.2.1 ลักษณะของเม็ดแป้ง	16
2.2.2 องค์ประกอบภายในแป้ง	18
2.2.3 โครงสร้างและการรวมตัวเป็นเม็ดแป้ง	27
2.2.4 สมบัติของแป้ง	28

สารบัญ (ต่อ)

2.2.4.1 การดูดซับน้ำ การพองตัวและการละลาย	28
2.2.4.2 การเกิดเจลาทีโนเซชัน (Gelatinization)	29
2.2.4.3 การเกิดรีโทรเกรเดชัน (Retrogradation)	30
2.2.5 แป้งมันสำปะหลัง	33
2.2.6 แป้งท้าวยายม่อม	34
2.3 อะการ์	37
2.4 พลาสติไซเซออร์และพลาสติไซเซชัน	38
2.5 ก्लीเซอรอล	39
2.6 สารหล่อลื่น	39
2.6.1 สารหล่อลื่นภายใน และสารหล่อลื่นภายนอก	40
2.7 แมกนีเซียม สเตียเรท	41
2.8 การคอมปาวด์	43
2.9 กระบวนการอัด	45
2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	47
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย	51
3.1 สารเคมี	51
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในโรงงานพิเศษ	52
3.3 วิธีทำการทดลอง	54
3.4 การทดสอบ	57
3.4.1 การวิเคราะห์ด้วยสเปกโทรสโคปีชนิดแสงอินฟราเรด	57
3.4.2 การทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์	57
3.4.3 สัมฐานวิทยา	57
3.4.4 การทดสอบสมบัติทางความร้อน	57
3.4.5 การทดสอบสมบัติเชิงกล	58
3.4.6 การดูดซับความชื้น	58
3.4.7 การทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดิน	59

สารบัญ (ต่อ)

บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล	60
4.1 การศึกษาหมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่อง FTIR	60
4.1.1 การเปรียบเทียบอินฟราเรดสเปกตรัมของ ฟิล์มเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งมันสำปะหลัง (TPCS) ที่ปริมาณอะการ์ต่างๆ	61
4.1.2 การเปรียบเทียบอินฟราเรดสเปกตรัมของ ฟิล์มเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งท้าวายม่อม (TPAS) ที่ปริมาณอะการ์ต่างๆ	63
4.2 การวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์	65
4.2.1 การวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD) ของฟิล์ม TPCS ที่ปรับปรุงสมบัติโดยใช้อะการ์ในปริมาณต่างๆ	65
4.2.2 การวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD) ของฟิล์ม TPAS ที่ปรับปรุงสมบัติโดยใช้อะการ์ในปริมาณต่างๆ	66
4.3 การทดสอบสัณฐานวิทยา	68
4.3.1 การศึกษาลักษณะพื้นผิวของฟิล์ม TPCS ที่ผสมอะการ์ในปริมาณต่าง ๆ	68
4.3.2 การศึกษาลักษณะพื้นผิวของฟิล์ม TPAS ที่ผสมอะการ์ในปริมาณต่าง	69
4.3.3 การศึกษาลักษณะภาคตัดขวางของฟิล์ม TPCS ที่ผสมอะการ์ในปริมาณต่างๆ	70
4.3.4 การศึกษาลักษณะภาคตัดขวางของฟิล์ม TPAS ที่ผสมอะการ์ในปริมาณต่างๆ	72
4.4 สมบัติเชิงกล	74

สารบัญ (ต่อ)

4.4.1 สมบัติเชิงกลของฟิล์ม TPCS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอะคาร์ในปริมาณต่างๆ	74
4.4.2 สมบัติเชิงกลของฟิล์ม TPAS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอะคาร์ในปริมาณต่างๆ	77
4.5 การดูดซับความชื้น	81
4.6 สมบัติทางความร้อน	83
4.7 สมบัติการย่อยสลาย	86
4.7.1 สมบัติเชิงกลก่อนฝังดิน และหลังฝังดินของฟิล์ม TPCS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอะคาร์ในปริมาณต่างๆ	88
4.7.2 สมบัติเชิงกลก่อนฝังดิน และหลังฝังดินของฟิล์ม TPAS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอะคาร์ในปริมาณต่างๆ	90
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	92
5.1 สรุปผลการวิจัย	92
5.2 ข้อเสนอแนะ	93
เอกสารอ้างอิง	94
ภาคผนวก ก	98
ภาคผนวก ข	101
ภาคผนวก ค	104
ภาคผนวก ง	107
ภาคผนวก จ	110
ภาคผนวก ฉ	113

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ลักษณะ โครงสร้างและปริมาณผลึกของแป้งแต่ละชนิด	18
ตารางที่ 2.2 สมบัติที่แตกต่างกันของอะไมโลสและอะไมโลเพคติน	19
ตารางที่ 2.3 ปริมาณของอะไมโลสในแป้งชนิดต่างๆ	20
ตารางที่ 2.4 สมบัติของอะไมโลสจากแป้งชนิดต่างๆ	21
ตารางที่ 2.5 สมบัติทางโครงสร้างของอะไมโลเพคติน	24
ตารางที่ 2.6 องค์ประกอบทางเคมีของแป้งมันสำปะหลัง	32
ตารางที่ 2.7 องค์ประกอบทางเคมีร้อยละน้ำหนักแห้งของแป้งท้าวยายม่อม	34
ตารางที่ 2.8 สมบัติของแป้งท้าวยายม่อม	35
ตารางที่ 2.9 เปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีของแป้ง	35
ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนในการผสมแป้ง กับอะการ์ ที่ผ่านการหมักด้วยกลีเซอรอลแล้ว	54
ตารางที่ 3.2 มาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์มแป้งกล้วยที่เตรียมได้	57
ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงเลขคลื่นและลักษณะการสั่นของพีคที่ปรากฏ	59
ตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของฟิล์ม TPCS และ TPAS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วย อะการ์	66
ตารางที่ 4.3 อุณหภูมิการสลายตัว ($^{\circ}\text{C}$) ของฟิล์ม TPCS และฟิล์ม TPAS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วย อะการ์ในปริมาณต่างๆ	84

สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 วัฏจักรของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ	11
รูปที่ 2.2 การผลิตพลาสติกย่อยสลายได้ที่ใช้แป้งในรูปเจลาทีน	13
รูปที่ 2.3 โครงสร้างของสตาร์ชกราฟท์โคพอลิเมอร์	14
รูปที่ 2.4 โครงสร้างผลึกของเม็ดแป้ง ชนิด A และ B ของอะไมโลส	16
รูปที่ 2.5 X-ray diffraction ของแป้งที่มีโครงสร้างผลึกต่างกัน	17
รูปที่ 2.6 โครงสร้างของคาร์โบไฮเดรต	20
รูปที่ 2.7 โครงสร้างของอะไมโลส	20
รูปที่ 2.8 โครงสร้างของอะไมโลเพคติน	22
รูปที่ 2.9 โครงสร้างของไขมัน	26
รูปที่ 2.10 การเปลี่ยนแปลงของเม็ดแป้งในระหว่างการหุงต้ม	30
รูปที่ 2.11 การเกิดรีโทรเกรเดชัน	32
รูปที่ 2.12 กลไกการคืนตัวของแป้ง	32
รูปที่ 2.13 ต้นทำวายม่อม	35
รูปที่ 2.14 โครงสร้างของอะการ์	37
รูปที่ 2.15 โครงสร้างของกลีเซอรอล	39
รูปที่ 2.16 โครงสร้างแมกนีเซียม สเตียเรท	43
รูปที่ 2.17 เครื่องผสมแบบปิด (Internal mixer)	44
รูปที่ 2.18 ลักษณะของเครื่องอัด (Compression molding)	45
รูปที่ 2.19 วัฏจักรการอัดแผ่นพลาสติก (Sheet molding compound)	47
รูปที่ 3.1 แผนภาพแสดงขั้นตอนการดำเนินงาน	52
รูปที่ 4.1 อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์ม TPCS ที่ปรับปรุงด้วยอะการ์ในปริมาณต่างๆ	60
รูปที่ 4.2 อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์ม TPAS ที่ปรับปรุงด้วยอะการ์ในปริมาณต่างๆ	62
รูปที่ 4.3 ดิฟแฟรกโตแกรมของฟิล์ม TPCS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอะการ์ ในปริมาณต่างๆ	64

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่ 4.4	ดิฟแฟร็กโทแกรมของฟิล์ม TPAS ที่ปรับปรุงด้วยอะการ์ ในปริมาณต่างๆ (ก) 0%, (ข) 10% และ (ค) 20%	65
รูปที่ 4.5	สัณฐานวิทยาภาพพื้นผิวของฟิล์ม TPCS ที่ปรับปรุงสมบัติโดยใช้อะการ์ ที่ปริมาณต่างๆ	67
รูปที่ 4.6	สัณฐานวิทยาภาพพื้นผิวของฟิล์ม TPAS ที่ปรับปรุงสมบัติโดยใช้อะการ์ ที่ปริมาณต่างๆ	68
รูปที่ 4.7	สัณฐานวิทยาภาคตัดขวางของฟิล์ม TPCS ที่ปรับปรุงสมบัติโดยใช้อะการ์ ที่ปริมาณต่างๆ	69
รูปที่ 4.8	สัณฐานวิทยาภาคตัดขวางของฟิล์ม TPAS ที่ปรับปรุงสมบัติ โดยใช้อะการ์ที่ปริมาณต่างๆ	71
รูปที่ 4.9	สมบัติเชิงกลของฟิล์ม TPCS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอะการ์ในปริมาณต่างๆ	75
รูปที่ 4.10	สมบัติเชิงกลของฟิล์ม TPAS ที่ปรับปรุงสมบัติโดยอะการ์ ในปริมาณต่างๆ	78
รูปที่ 4.11	เปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของฟิล์ม TPCS และ TPAS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอะการ์ในปริมาณต่างๆ ที่ช่วงความชื้นสัมพัทธ์ 90-100%	80
รูปที่ 4.12 (ก)	TGA และ (ข) DTA ของฟิล์ม TPCS ปรับปรุงสมบัติ ด้วยอะการ์ที่ปริมาณต่างๆ	82
รูปที่ 4.13 (ก)	TGA และ (ข) DTA ของฟิล์ม TPAS ปรับปรุงสมบัติ ด้วยอะการ์ที่ปริมาณต่างๆ	83
รูปที่ 4.14	ลักษณะทางกายภาพของฟิล์ม TPCS ที่ปรับปรุงปริมาณ ด้วยอะการ์ในปริมาณต่างๆ	85
รูปที่ 4.15	ลักษณะทางกายภาพของฟิล์ม TPAS ที่ปรับปรุงปริมาณ ด้วยอะการ์ในปริมาณต่างๆ	86
รูปที่ 4.16	สมบัติเชิงกลก่อน และหลังฝังดินของฟิล์ม TPCS ที่ปรับปรุงสมบัติ ด้วยอะการ์ในปริมาณต่างๆ	87
รูปที่ 4.17	สมบัติเชิงกลก่อน และหลังฝังดินของฟิล์ม TPAS ที่ปรับปรุงสมบัติ ด้วยอะการ์ในปริมาณต่างๆ	89

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของงานวิจัย

ในปัจจุบันปัญหาภาวะโลกร้อนเป็นปัญหาที่มีผู้คนส่วนใหญ่ให้ความสนใจเป็นอย่างมาก ซึ่งขัดต่อกรกระทำที่นับวันปริมาณการใช้พลาสติกยิ่งเพิ่มมากขึ้นตามความต้องการของมนุษย์และมีแนวโน้มที่จะมีความต้องการใช้พลาสติกมากขึ้นเรื่อยๆ และเป็นที่น่าตกใจที่ว่า พลาสติกนั้นใช้เวลาในการย่อยสลายนานกว่าวัสดุธรรมชาติอื่นๆ อยู่พอสมควร ส่งผลต่อปริมาณขยะที่เกิดจากพลาสติกเพิ่มสูงขึ้นเช่นกัน ก่อให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมตามมา

โดยพลาสติกสังเคราะห์ส่วนใหญ่ เป็นผลพลอยได้จากกระบวนการทางปิโตรเคมีแต่พลาสติกมีข้อจำกัดด้านปริมาณของวัตถุดิบและก๊าซธรรมชาติ ซึ่งคาดการณ์ว่าจะต้องหมดไปในที่สุด นอกจากนี้ในกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์จากอุตสาหกรรมปิโตรเคมี โดยเฉพาะการเผาไหม้ยังก่อให้เกิดการสะสมของมลภาวะ ซึ่งได้ขยายไปในวงกว้างต่อระบบนิเวศน์ เนื่องจากพลาสติกส่วนใหญ่เกิดการย่อยสลายได้ยากและใช้เวลานาน เพื่อใช้ประโยชน์เพียงเล็กน้อยในช่วงเวลาสั้นๆ จากพลาสติก จึงส่งผลให้ปริมาณขยะพลาสติกมีจำนวนเพิ่มมากขึ้น ก่อให้เกิดปัญหาในด้านการจัดการและกำจัดขยะพลาสติกเหล่านี้ เนื่องจากต้องใช้พื้นที่ในการฝังกลบขยะเหล่านี้เป็นจำนวนมาก หรือการกำจัดด้วยวิธีการเผา จะก่อให้เกิดปัญหาทางด้านมลพิษและสิ่งแวดล้อม แม้ว่าจะมีการนำขยะพลาสติกเหล่านี้กลับมาใช้ใหม่ (Recycle) จะสามารถช่วยแก้ปัญหาได้เพียงส่วนหนึ่ง แต่ไม่สามารถแก้ปัญหาได้อย่างสมบูรณ์ ทำให้เกิดโทษต่อระบบนิเวศและชีวิตของผู้บริโภคอย่างต่อเนื่องและยาวนาน เกิดผลกระทบต่อภาวะโลกร้อนเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะการใช้ถุงพลาสติกใส่ขยะมูลฝอย จะทำให้เกิดการแปรสภาพขยะมูลฝอยในภาวะที่ขาดอากาศ เป็นผลทำให้เกิด ก๊าซชีวภาพที่เป็นต้นเหตุของการเกิดภาวะเรือนกระจกและทำให้โลกร้อนขึ้น

การสังเคราะห์พลาสติกที่มาจากวัสดุทางธรรมชาติถือว่าเป็นอีกแนวทางหนึ่งในการแก้ปัญหาสิ่งแวดล้อม การเลือกใช้วัสดุที่ย่อยสลายได้เองในธรรมชาติ เช่น พอลิแซคคาไรด์ เซลลูโลส อนุพันธ์ของแป้ง อะคาร์ อัลจินेट คาราจีแนน เพกติน ไคโตซาน โพรตีน เป็นต้น ในบรรดาชีวมวลจากธรรมชาติทั้งหลาย แป้งซึ่งเป็นพอลิแซคคาไรด์ จัดเป็นวัตถุดิบที่มีศักยภาพสูง

และได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก เนื่องจาก มีปริมาณมาก หาง่าย ราคาถูก และที่สำคัญสามารถย่อยสลายได้

เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (Thermoplastic starch หรือเรียกย่อว่า TPS) คือ การนำแป้งมาใช้ในการผลิตเป็นพลาสติกซึ่งมีลักษณะคล้ายกับเทอร์โมพลาสติกที่มาจากอุตสาหกรรมปิโตรเคมีทั่วไป แต่เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชเป็นวัสดุที่ได้จากธรรมชาติ จึงสามารถย่อยสลายได้ดีกว่าเทอร์โมพลาสติกทั่วไป ในปัจจุบันได้มีการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกันอย่างกว้างขวาง เช่น เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่มาจาก แป้งมันสำปะหลัง (Cassava starch) [6] แป้งท้าวยายม่อม (Arrowroot Starch) [8] เป็นต้น แต่ข้อจำกัดของแป้ง คือ โครงสร้างผลึกในแกรนูลของแป้งมีความแข็งแรงมาก โดยธรรมชาติจะไม่มีสมบัติเป็นเทอร์โมพลาสติก จึงไม่สามารถหลอมละลายได้ หากเราให้ความร้อนแก่แป้งที่ปราศจากความชื้นแทนที่จะหลอมเหลว แกรนูลแป้งจะเกิดการเผาไหม้และสลาย อย่างไรก็ตามหากมีการเติมสารเติมแต่ง (Additive) ที่เรียกว่า Plasticizer จะช่วยทำให้แกรนูลแป้งเกิดการหลอมละลายได้ภายใต้สภาวะที่มีความร้อนและแรงกล (Mechanical energy) [14] ได้ และข้อเสียของ TPS ที่เห็นได้ชัด คือ การดูดความชื้น และความว่องไวต่อน้ำของแป้ง เนื่องจากโครงสร้างภายในโมเลกุลของ TPS นั้นมีหมู่ไฮดรอกซิลอยู่เป็นจำนวนมาก ทำให้สมบัติเชิงกลของ TPS ที่ทำจากแป้งชนิดเดียว และปราศจากสารเติมแต่ง มีสมบัติที่ลดต่ำลง ด้วยเหตุนี้จึงมีการปรับปรุงคุณสมบัติเพื่อลดการดูดความชื้น และความว่องไวต่อน้ำของ TPS ให้ต่ำลง

โครงการวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาผลของชนิดแป้งต่อสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ปรับปรุงสมบัติโดยใช้อะการ์ในปริมาณต่างๆ อะการ์ (Agar) ซึ่งเป็นวัสดุที่ได้จากธรรมชาติสามารถย่อยสลายได้ง่าย และมีความเข้ากันได้ระหว่างแป้งกับอะการ์ได้ดี เนื่องจากโครงสร้างทางเคมีของอะการ์มีหมู่ไฮดรอกซิลเช่นเดียวกับแป้ง [26] ซึ่งชนิดแป้งที่ใช้ในการศึกษาได้แก่ แป้งมันสำปะหลัง และแป้งท้าวยายม่อม โดยมีกลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ เตรียมชิ้นงานในลักษณะเป็นแผ่นฟิล์ม โดยใช้เทคนิคกดอัด (Compression molding) [19] ซึ่งฟิล์มที่เตรียมได้คาดว่าจะมีสมบัติเชิงกลใกล้เคียงกับพอลิเมอร์สังเคราะห์ และสามารถย่อยสลายได้ง่าย อาจจะนำไปใช้ในด้านการเกษตร เช่น ถุงเพาะชำ ถุงบรรจุดิน เป็นต้น

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อเตรียมฟิล์มย่อยสลายได้จากเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช จากแป้งมันสำปะหลัง และแป้งท้าวยายม่อม เพื่อทดแทนการใช้พลาสติกที่ย่อยสลายได้ยาก
2. เพื่อปรับปรุงสมบัติของฟิล์มย่อยสลายได้จากเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งทั้งสองชนิด โดยใช้อะการ์

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1. ศึกษาและทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. เตรียมฟิล์มที่ย่อยสลายได้จากแป้งสองชนิด ได้แก่ แป้งมันสำปะหลัง และแป้งท้าวยายม่อม โดยมีกลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์
3. ปรับปรุงสมบัติของฟิล์มเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชโดยใช้อะการ์ในปริมาณต่างๆ
4. ศึกษาสมบัติต่างๆ ของฟิล์มเทอร์โมพลาสติกที่เตรียมได้ ได้แก่
 - โครงสร้างและหมู่ฟังก์ชัน ด้วยเทคนิค Infrared Spectroscopy (IR)
 - การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์
 - สัณฐานวิทยา ด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)
 - สมบัติเชิงกล ด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal Testing Machine)
 - สมบัติทางกายภาพ ได้แก่ การดูดซับความชื้น
 - สมบัติทางความร้อน ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงของวัสดุ
 - ความสามารถโดยการย่อยสลายโดยการฝังดิน
5. เปรียบเทียบสมบัติของฟิล์มเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ได้จากแป้งทั้งสองชนิด

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถเตรียมพลาสติกที่ย่อยสลายได้จากเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจาก แป้งมันสำปะหลัง และแป้งท้าวยายม่อม
2. เพื่อมาทดแทนพลาสติกที่ย่อยสลายได้ยาก เป็นการช่วยลดปัญหาภาวะโลกร้อนในปัจจุบันและอนาคตได้

3. เพื่อแปรรูปแป๊ะง ให้มีมูลค่าทางเศรษฐกิจสูงขึ้น ส่งเสริมการนำวัสดุจากธรรมชาติไปใช้ให้เกิดประโยชน์ได้กว้างขึ้น

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

2.1 พลาสติกย่อยสลายได้จากแป้ง [1]

แป้งเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติ ย่อยสลายได้ง่าย มีมากเป็นอันดับสองรองจากเซลลูโลส สามารถพองตัวขึ้นแผ่นฟิล์มได้ รวมทั้งมีลักษณะที่เปลี่ยนรูปได้ นำมาขึ้นรูปในแม่พิมพ์ได้ ราคาถูก มีความบริสุทธิ์สูง จึงเป็นวัตถุดิบที่น่าสนใจในการนำมาเป็นวัตถุดิบใช้ทดแทนพลาสติกในบางส่วนของการใช้งาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งแป้งมันสำปะหลัง ในฐานะที่ประเทศไทยเป็นผู้ผลิตและส่งออก รายใหญ่ของโลก ปัจจุบันได้มีการนำแป้งมาผลิตพลาสติกย่อยสลายได้ในรูปของสารตัวเติม (Filler) เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (Thermoplastic starch) หรือกราฟโคพอลิเมอร์ (Graft copolymer) อยู่บ้างแล้ว ในการผลิตพลาสติกที่ย่อยสลายได้ควรเน้นถึงอัตราส่วนของแป้งที่ควรใช้เป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งนอกจากจะเพิ่มความสามารถในการย่อยสลายแล้ว ยังทำให้ราคาของผลิตภัณฑ์สามารถแข่งขันได้กับพลาสติกทั่วๆ ไปได้

2.1.1 การย่อยสลายของพลาสติก [2]

พลาสติกย่อยสลายได้ (Degradable plastics) หมายถึง พลาสติกที่มีการเปลี่ยนโครงสร้างเคมีเมื่ออยู่ภายใต้สภาวะแวดล้อมที่เหมาะสม เนื่องจากมีสมบัติที่เปลี่ยนไป พลาสติกย่อยสลายได้แบ่งออกเป็น 4 ประเภท คือ

1. การย่อยสลายได้โดยแสง (Photodegradation)

การย่อยสลายโดยแสงมักเกิดจากการเติมสารเติมแต่งที่มีความว่องไวต่อแสงลงในพลาสติกหรือสังเคราะห์โคพอลิเมอร์ให้มีหมู่ฟังก์ชันหรือพันธะเคมีที่ไม่แข็งแรง แตกหักง่ายภายใต้รังสี (UV) เช่น หมู่คีโตน (Ketone group) อยู่ในโครงสร้าง เมื่อสารหรือหมู่ฟังก์ชันดังกล่าวสัมผัสกับรังสียูวีจะเกิดการแตกของพันธะกลายเป็นอนุมูลอิสระ (Free radical) ซึ่งไม่เสถียร จึงเข้าทำปฏิกิริยาต่ออย่างรวดเร็วที่พันธะเคมีบนตำแหน่งคาร์บอนในสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้เกิดการขาดของสายโซ่ แต่การย่อยสลายนี้จะ

ไม่เกิดขึ้นภายในบ่อฝังกลบขยะ กองคอมโพสท์ หรือสภาวะแวดล้อมอื่นที่มีด หรือแม้กระทั่งชั้นพลาสติกที่มีหมึกที่หนามากบนพื้นผิว เนื่องจากพลาสติกจะไม่ได้สัมผัสกับรังสียูวีโดยตรง

2. การย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidative degradation)

การย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชันของพลาสติก เป็นปฏิกิริยาการเติมออกซิเจนลงในโมเลกุลของพอลิเมอร์ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้เองในธรรมชาติอย่างช้าๆ โดยมีออกซิเจนและความร้อน แสงยูวี หรือแรงทางเชิงกลเป็นปัจจัยสำคัญ เกิดเป็นสารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (Hydroperoxide, ROOH) ในพลาสติกที่ไม่มีการเติม สารเติมแต่งที่ทำหน้าที่เพิ่มความเสถียร (Stabilizing additive) แสงและความร้อนจะทำให้ ROOH แตกตัวกลายเป็นอนุมูลอิสระ RO และ OH ที่ไม่เสถียรและเข้าทำปฏิกิริยาต่อที่พันธะเคมีบนตำแหน่งคาร์บอนในสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้เกิดการแตกหักและสูญเสียสมบัติเชิงกลอย่างรวดเร็ว แต่ด้วยเทคโนโลยีการผลิตที่ได้รับการวิจัยและพัฒนาขึ้นในปัจจุบันทำให้พอลิโอเลฟินเกิดการย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชันกับออกซิเจนได้เร็วขึ้นภายในเวลาที่กำหนด โดยการเติมสารเติมแต่งที่เป็นเกลือของโลหะทรานสิชัน ซึ่งทำหน้าที่ตัวเร่งปฏิกิริยาเร่งการแตกตัวของสารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (Hydroperoxide, ROOH) เป็นอนุมูลอิสระ (Free radical) ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์เกิดการแตกหักและสูญเสียสมบัติเชิงกลรวดเร็วยิ่งขึ้น

3. การย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolytic degradation)

การย่อยสลายของพอลิเมอร์ที่มีหมู่เอสเทอร์ หรือเอไมด์ เช่น แป้ง พอลิเอสเทอร์ พอลิเอโนไฮดรไรต์ พอลิคาร์บอเนต และพอลิยูรีเทน ผ่านปฏิกิริยาก่อให้เกิดการแตกหักของสายโซ่พอลิเมอร์ ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่เกิดขึ้น โดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ ประเภทที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic hydrolysis) และไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Non-catalytic hydrolysis) ซึ่งประเภทแรกยังแบ่งออกได้เป็น 2 แบบคือ แบบที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากภายนอกโมเลกุลของพอลิเมอร์เร่งให้เกิดการย่อยสลาย (External catalytic degradation) และแบบที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากภายในโมเลกุลของพอลิเมอร์เอง ในการเร่งให้เกิดการย่อยสลาย (Internal catalytic degradation) โดยตัวเร่งปฏิกิริยาจากภายนอกมี 2 ชนิดคือ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเอนไซม์ต่างๆ (Enzyme) เช่น Depolymerase lipase esterase และ glycohydrolase ในกรณีนี้จัดเป็นการย่อยสลายทางชีวภาพ และตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่ใช่เอนไซม์ (Non-enzyme) เช่น โลหะแอสคาโลด (Alkaline metal) เบส (Base) และกรด (Acid) ที่มีอยู่ในสภาวะแวดล้อมในธรรมชาติ ในกรณีนี้จัดเป็นการย่อยสลายทางเคมี สำหรับปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสแบบที่ใช้ตัวเร่ง

ปฏิกิริยาจากภายใน โมเลกุลของพอลิเมอร์นั้นให้หมู่คาร์บอกซิล (Carboxyl group) ของหมู่เอสเทอร์ หรือเอไมด์บริเวณปลายของสายโซ่พอลิเมอร์ในการเร่งปฏิกิริยาการย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส

4. การย่อยสลายทางชีวภาพ (Biodegradation)

การย่อยสลายของพอลิเมอร์จากการทำงานของจุลินทรีย์โดยทั่วไปมีกระบวนการ 2 ขั้นตอน เนื่องจากขนาดของสายพอลิเมอร์ยังมีขนาดใหญ่และไม่ละลายน้ำ ในขั้นตอนแรกของการย่อยสลาย จึงเกิดขึ้นภายนอกเซลล์โดยการปลดปล่อยเอนไซม์ของจุลินทรีย์ซึ่งเกิดได้ทั้งแบบใช้ Endo-enzyme หรือ เอนไซม์ที่ทำให้เกิดการแตกตัวของพันธะภายในสายโซ่พอลิเมอร์อย่างไม่เป็นระเบียบ และแบบ Exo-enzyme หรือเอนไซม์ที่ทำให้เกิดการแตกหักของพันธะที่ละหน่วยจากหน่วยซ้ำที่เล็กที่สุดที่อยู่ด้านปลายของสายโซ่พอลิเมอร์ เมื่อพอลิเมอร์แตกตัวจนมีขนาดเล็กพอจะแพร่ผ่านผนังเซลล์เข้าไปในเซลล์ และเกิดการย่อยสลายต่อในขั้นตอนที่ 2 ได้ผลิตภัณฑ์ในขั้นสุดท้าย (Ultimate biodegradation) คือ พลังงาน และสารประกอบขนาดเล็กที่เสถียรในธรรมชาติ (Mineralization) เช่น แก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สมีเทน น้ำ เกลือแร่ธาตุต่างๆ และมวลชีวภาพ (Biomass)

*มวลชีวภาพ หมายถึง มวลรวมของสารที่เกิดขึ้นจากกระบวนการในการดำรงชีวิตและเติบโตของสิ่งมีชีวิต ซึ่งรวมถึงพืช สัตว์ และจุลินทรีย์

นอกจากนี้ยังพบว่า มีการใช้คำว่า พลาสติกย่อยสลายได้ในสภาวะแวดล้อมธรรมชาติ (Environmentally Degradable Plastics, EDP) ซึ่งหมายถึง พลาสติกที่สามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติเนื่องจากปัจจัยต่างๆ ในสภาวะแวดล้อม เช่น กรด ด่าง น้ำ และออกซิเจนในธรรมชาติ แสงจากดวงอาทิตย์ แรงเค้นจากการกระทบของเม็ดฝนและแรงลม หรือจากเอนไซม์ของจุลินทรีย์ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมี กลายเป็นสารที่ถูกดูดซึม และย่อยสลายต่อได้อย่างสมบูรณ์โดยจุลินทรีย์ได้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ สารอนินทรีย์ และมวลชีวภาพ เป็นผลิตภัณฑ์ขั้นสุดท้าย โดยการย่อยสลายและการดูดซึมนี้อาจเกิดขึ้นได้รวดเร็วเพียงพอที่จะไม่ทำให้เกิดการสะสมในสภาวะแวดล้อม และคำว่า พลาสติกที่เป็นมิตรต่อสภาวะแวดล้อม (Environmental friendly plastics) หรือ พลาสติกสีเขียว (Green plastics) หมายถึง พลาสติกที่ทำให้ภาระในการจัดการขยะลดลง และส่งผลกระทบต่อสภาวะแวดล้อมน้อยกว่าพลาสติกที่ใช้กันอยู่ทั่วไปในปัจจุบัน

การใช้งานผลิตภัณฑ์พลาสติกย่อยสลายได้ [3]

1. การใช้งานทางการแพทย์

พลาสติกย่อยสลายได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในการผลิตวัสดุทางการแพทย์ เช่น ผิวน้ำแข็งเทียม ยา ที่ถูกออกแบบมาให้สามารถควบคุมการปลดปล่อยด้วยอย่างช้าๆ ภายในร่างกายในช่วงระยะเวลาหนึ่ง หรือไหมละลาย อุปกรณ์ประเภทสกรู และแผ่นดามกระดูกที่ได้รับการผ่าตัดและฝังอยู่ในร่างกายที่สามารถย่อยสลายได้เองภายหลังจากการทำหน้าที่ตามที่ได้รับการออกแบบไว้แล้วเสร็จสิ้น ทำให้ไม่ต้องทำการผ่าตัดซ้ำเพื่อนำวัสดุที่ใช้ในการรักษาเสร็จแล้วออกจากร่างกายผู้ป่วย

2. สารเคลือบกระดาษ หรือโฟม

ปัจจุบันมีการนำพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพมาใช้งานเป็นสารเคลือบกระดาษสำหรับห่อแฮมเบอร์เกอร์ หรือถ้วยน้ำชนิดใช้แล้วทิ้ง

3. फिल्मคลุมดิน และวัสดุสำหรับการเกษตร

ฟิล์มคลุมดินสำหรับการเกษตรเป็นอุปกรณ์ทางการเกษตรที่สำคัญในการเพาะปลูกพืชบางชนิด เช่น มะเขือเทศ ซึ่งแผ่นฟิล์มจะช่วยป้องกันการเติบโตของวัชพืชและรักษาความชื้นในดิน การใช้ฟิล์มสามารถผลิตได้จากพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพจะช่วยลดขั้นตอนการเก็บและกำจัดฟิล์มภายหลังเสร็จสิ้นการใช้งาน เนื่องจากสามารถกำจัดโดยการไถพรวนลงดินได้โดยตรง ช่วยป้องกันการสูญเสียแร่ธาตุและสารอาหารบริเวณหน้าดินซึ่งมักเกิดขึ้นใน ขั้นตอนการเก็บและกำจัดฟิล์ม นอกจากนี้ยังมีการนำพลาสติกย่อยสลายได้มาใช้เป็นวัสดุควบคุมการปลดปล่อยสาร สำคัญ เช่น ตัวยา ปุ๋ย สารเคมี สำหรับการเกษตร วัสดุกักเก็บน้ำสำหรับการเพาะปลูกพืชในทะเลทราย รวมถึงถุงหรือกระถางสำหรับเพาะต้นกล้า

4. ถุงสำหรับใส่ของ (Shopping bags)

ถุงพลาสติกและฟิล์มพลาสติกสำหรับการใช้งานด้านบรรจุภัณฑ์ได้รับความนิยมในการใช้งานมากขึ้นในปัจจุบัน ส่งผลให้มีสัดส่วนอยู่ในขณะในปริมาณสูงและยังไม่ได้ได้รับความนิยมนำกลับมารีไซเคิลมากนักเนื่องจากมีความยุ่งยากในขั้นตอนการคัดแยกและทำความสะอาด รวมถึงมีค่าใช้จ่ายในการขนส่งสูง ทำให้ไม่คุ้มค่าทางเศรษฐกิจ พลาสติกย่อยสลายได้จึงเป็นพลาสติกที่มีศักยภาพในการนำมาใช้แทนพลาสติกทั่วไป เพื่อผลิตเป็นถุงและฟิล์มในบางโอกาส

5. ฟิล์ม และถุงสำหรับใส่ขยะเศษอาหาร (Food waste film and bags)

ฟิล์ม และถุงพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพสำหรับใส่ขยะเศษอาหาร เหมาะสำหรับสถานที่ที่มีระบบการกำจัดขยะอินทรีย์ด้วยวิธีการคอมโพสท์ กำลังได้รับความนิยมในต่างประเทศ เนื่องจากสามารถกำจัดโดยการนำมาทำคอมโพสท์พร้อมขยะอินทรีย์อื่นๆ ทำให้เกิดความสะดวกรวดเร็วกว่าต้องแยกทิ้ง ปัจจุบันมีความต้องการใช้ถุงพลาสติกย่อยสลายได้สูงขึ้นอย่างมาก ตัวอย่างเช่น ในหลายเมืองของประเทศอิตาลี ได้ใช้พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพสำหรับใส่ขยะเศษอาหารตั้งแต่ปี ค.ศ. 1998 โดยมีบริษัท Novamont ซึ่งเป็นผู้ผลิตหลักให้กับประเทศในสหภาพยุโรป ทำการผลิตถุงย่อยสลายได้ในสภาวะคอมโพสท์ 10,000 ตันต่อปี ถุงที่ผลิตขึ้นนี้สามารถย่อยสลายได้อย่างสมบูรณ์ภายใน 8-10 สัปดาห์ภายใต้สภาวะการหมักในโรงงานคอมโพสท์เชิงอุตสาหกรรม

6. บรรจุภัณฑ์เพื่อการบริโภค (Consumer packaging materials)

ศักยภาพหนึ่งในการใช้งานพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ คือ การใช้งานด้านบรรจุภัณฑ์ ซึ่งตามปกติการใช้บรรจุภัณฑ์อาหารที่ผลิตจากพลาสติกทั่วไปมักไม่ได้รับความนิยมนักกลับมารีไซเคิลมากนัก เนื่องจากมีการปนเปื้อนสูง ทำให้ไม่สะดวกต่อการเก็บและทำความสะอาด การนำพลาสติกย่อยสลายได้มาผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์สำหรับอาหาร เช่น ถาดย่อยสลายได้สำหรับอาหารสำเร็จรูปและอาหารจานด่วน จึงเป็นแนวทางหนึ่งในการลดปัญหาด้านการจัดการขยะบรรจุภัณฑ์ลงได้

7. โฟมเม็ดกันกระแทก (Loose fill)

โฟม เม็ดกันกระแทก (loose fill) โดยทั่วไปผลิตจากพอลิสไตรีน (PS) เพื่อใช้ประโยชน์ในด้านการขนส่งสินค้า มีข้อดีคือ มีความยืดหยุ่นสามารถป้องกันสินค้าจากแรงกระแทกระหว่างการเคลื่อนย้ายและขนส่งได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้ยังมีน้ำหนักเบาทำให้การขนส่งสินค้าเป็นไปได้อย่างสะดวกและประหยัด เชื้อเพลิง แต่ปัญหาคือ พอลิสไตรีน เป็นพลาสติกที่ย่อยสลายได้ยากและใช้เนื้อที่ในการจัดเก็บเพื่อการกำจัดสูง ในกรณีที่ต้องกำจัดด้วยการฝังกลบต้องใช้เนื้อที่ในบ่อฝังกลบมาก แม้ว่าจะนำมารีไซเคิลใช้ใหม่ได้แต่ยังไม่เป็นที่นิยมแพร่หลายมากนัก ปัจจุบันมีการพัฒนาการผลิตโฟมเม็ดกันกระแทกจากแป้งและพอลิเมอร์ชนิดอื่นที่ ละลายน้ำและย่อยสลายได้ทางชีวภาพขึ้น ทำให้ง่ายต่อการใช้งานและสะดวกในการกำจัดเมื่อสิ้นสุดการใช้งานแล้ว

ข้อดีของพลาสติกย่อยสลายได้ [3]

1. คอมโพสท์ที่ได้จากการย่อยสลายพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพร่วมกับขยะอินทรีย์อื่นๆ สามารถนำมาใช้ในการปรับปรุงคุณภาพดิน โดยช่วยเพิ่มสารอินทรีย์ ความชื้น และสารอาหารให้แก่ดิน พร้อมทั้งช่วยลดปริมาณการใช้ปุ๋ยและลดการเกิดโรคในพืช การหมักพลาสติกย่อยสลายได้ทำให้เกิดการหมุนเวียนของธาตุ ในขณะที่การใช้พลาสติกมักต้องกำจัดด้วยการฝังกลบหรือเผา

2. ลดเนื้อที่การใช้งานของบ่อฝังกลบขยะ โดยการใช้พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพและถุงที่ย่อยสลายได้ทำให้เพิ่มศักยภาพในการย่อยสลายของเศษอาหารหรือขยะอินทรีย์ในบ่อฝังกลบ และเพิ่มศักยภาพในการผลิตแก๊สมีเทนสำหรับใช้เป็นเชื้อเพลิงในกรณีที่บ่อฝังกลบได้ถูกออกแบบมาให้ผลิตและใช้ประโยชน์จากแก๊สมีเทนได้ การใช้ฟิล์มพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพเป็นวัสดุคลุมหน้าบ่อฝังกลบแทนดินในแต่ละวันเป็นการเพิ่มเนื้อที่ให้บ่อฝังกลบ เนื่องจากการปิดหน้าบ่อฝังกลบด้วยดินทุกวันจะใช้เนื้อที่รวม 25% ของเนื้อที่ในบ่อฝังกลบ

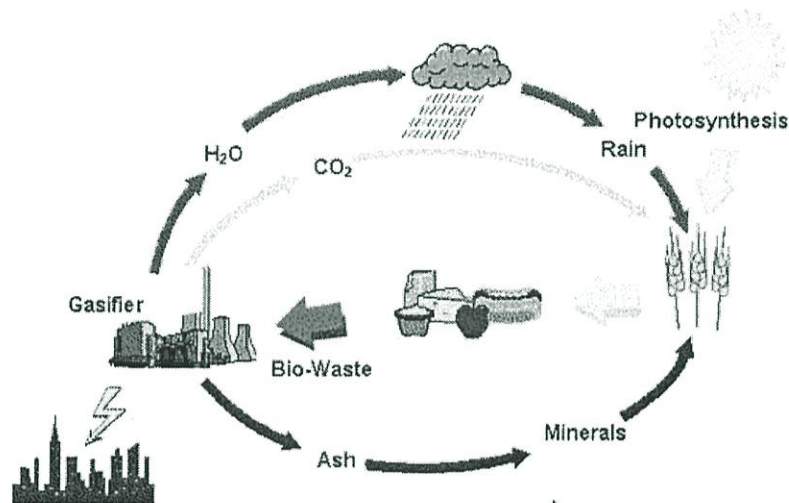
3. การใช้พลังงานในการสังเคราะห์และผลิตพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพน้อยกว่าการผลิตพลาสติกทั่วไป

4. การปลดปล่อยแก๊สเรือนกระจกเป็นผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่สำคัญจากการใช้ พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ แต่จากการศึกษาโดยวิธีประเมินวัฏจักร ตั้งแต่เริ่มการผลิต จนถึงการกำจัด ภายหลังเสร็จสิ้นการใช้งาน พบว่า พลาสติกย่อยสลายได้ก่อให้เกิดการปลดปล่อยแก๊สเรือนกระจกในปริมาณที่ต่ำกว่า พอลิเอทิลีน ซึ่งเห็นได้อย่างชัดเจนในกรณีที่เป็พลาสติกที่มีเป็งเป็นองค์ประกอบพื้นฐาน ซึ่งแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายของพลาสติกจะถูกใช้ไปในการเติบโตของพืชที่จะปลูกขึ้นมาใหม่ทำให้เกิดการหมุนเวียนแก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์ในธรรมชาติซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของวัฏจักรคาร์บอน ทำให้เกิดความสมดุลของปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศ

วัฏจักรของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ [4]

พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพจะมีสมบัติต่างๆ ในการใช้งาน เช่นเดียวกับพลาสติก โดยทั่วไป แต่จะมีความแตกต่างกันตรงที่เมื่อทิ้งพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพนี้ไปเป็นขยะซึ่งจะอยู่ในสภาวะที่เหมาะสม คือ มีแบคทีเรียและเอนไซม์ พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ก็จะเกิดการย่อยสลายได้หรือถูกหมักเป็นปุ๋ยในสภาวะที่เหมาะสม การพัฒนาของระบบในธรรมชาตินั้นเริ่มจากมวลชีวภาพหลายพันล้านตันถูกผลิตขึ้น โดยผ่านกระบวนการสังเคราะห์แสงของพืช ซึ่งมวลชีวภาพนี้จะถูก

ย่อยสลายได้กลับสู่ธรรมชาติกลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ รวมทั้งชีวภาพและแร่ธาตุ การเกิดขึ้นในวัฏจักรนี้ผ่านกระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพโดยจุลินทรีย์ ซึ่งวัฏจักรของธรรมชาตินี้มีเกิดขึ้นและย่อยสลายได้ครบวงจร โดยไม่จำเป็นต้องมีกระบวนการกำจัดขยะซึ่งทำให้เกิดปัญหาด้านมลพิษและไม่เสียค่าใช้จ่ายสูง หลังจากผลิตภัณฑ์พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพถูกนำไปกำจัดโดยตรงย่อยเป็นปุ๋ยเพื่อให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และมวลชีวภาพ ซึ่งก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกปล่อยออกมานั้น จะถูกนำไปใช้ในกระบวนการสังเคราะห์แสงของพืชเป็นวงจรชีวิตผลิตภัณฑ์



รูปที่ 2.1 วัฏจักรของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ [4]

2.1.2 เทคโนโลยีพลาสติกจากแป้ง [1]

การพัฒนาพลาสติกได้มีการพัฒนามาเป็นเวลานานแล้ว เริ่มตั้งแต่ G.J.L. Griffin (U.S. Patent 4,016,177) ที่เริ่มใช้พอลิเมอร์ธรรมชาติราคาถูกคือแป้งผสมในการฉีดพลาสติก และได้รับการพัฒนาจากนักวิทยาศาสตร์โดยทั่วไป ขณะนี้สามารถแบ่งเทคโนโลยีการผลิตย่อยสลายได้ออกเป็นกลุ่มใหญ่ๆ ได้ดังนี้

2.1.2.1 การใช้สารพอลิเมอร์ธรรมชาติ (แป้ง) เป็นองค์ประกอบหลัก

กลุ่มนี้จะใช้แป้งทั้งหมดหรือมากกว่า 90 % ผลิตภัณฑ์ที่รู้จักจะอยู่ในรูปที่เรียกว่า Gelatinized starch puff หรือ Plate expanded by extrusion หรือ Baking with water หมายความว่าให้การให้แป้งเกิดการพองตัวขึ้นเนื่องจากแรงดันของน้ำในตัวแป้งเมื่อถูกความร้อนสูงกลายเป็นไอ ลักษณะของ

ผลิตภัณฑ์จะเป็นการทดลองโพลีที่ทำจาก Polystyrene เรียกกันว่า โพลีแบง ใช้ในการรองรับภาชนะกันกระแทกในกล่อง ฯลฯ

1. โพลีพลาสติกจากแบง

การใช้แบงเป็นวัตถุดิบอัดด้วยความดันสูงในเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ (extruder) แบงจะพองออกจากหัวฉีด เนื่องจากสูญเสียความชื้นและลดแรงดัน เมื่อเย็นตัวลงจะมีโครงสร้างแข็ง มีรูพรุนคล้ายโพลีสำหรับอุ้มอากาศ คุณสมบัติของโพลีแบงนี้ (ความหนาแน่น ความเหนียว) เกิดจากคุณสมบัติของแบง ปริมาณน้ำ และชนิดและปริมาณของสารเติมแต่ง (Additive)

2. โพลีจากแบง

เป็นการใช้ลักษณะการขยาย (Expansion) ของส่วนผสมจากแบงและเส้นใย เช่น เยื่อ (Pulp) เพื่อสร้างความแข็งแรงของผลิตภัณฑ์เมื่อขึ้นรูปในแม่พิมพ์ เช่น ภาชนะใส่ของถ้วย ถาด เป็นต้น

2.1.2.2 แบงผสมพอลิเมอร์ย่อยสลายได้

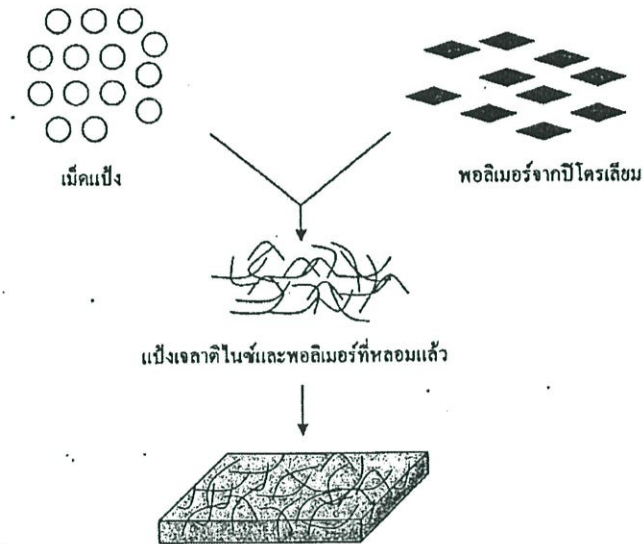
พลาสติกที่ผลิตได้จากกลุ่มนี้จะประกอบด้วยส่วนประกอบ 2 ส่วนที่ต่างกัน คือ ส่วนที่เป็นแบงสามารถย่อยสลายได้ และส่วนที่เป็นพอลิเมอร์อนุพันธ์ของปีโตรเคมี แบงที่ใช้ในกระบวนการนี้สามารถใช้ได้ 2 รูป คือ ในรูปเม็ดแบงหรือแบงที่ผ่านการเจลาทีไนซ์ อย่างไรก็ตาม พลาสติกที่ได้จากรีไซเคิลนี้ จุลินทรีย์ไม่สามารถย่อยได้ 100% โดยจุลินทรีย์จะย่อยแบงที่กระจายอยู่ทั่วพลาสติก เกิดรูพรุนส่วนที่เป็นพอลิเมอร์อนุพันธ์ของปีโตรเคมีจะถูกทำลายต่อไปด้วยแรงกลหรือปฏิกิริยาเคมี เป็นต้น

1. ในรูปเม็ดแบง

แบงจะผสมกับพอลิเมอร์อนุพันธ์ของปีโตรเคมี นำไปขึ้นรูปเลยโดยไม่ต้องทำให้เม็ดแบงแตกออก ปริมาณแบงที่ใช้ในวิธีนี้ถูกจำกัดไม่ให้เกิน 10% และต้องมีความชื้นน้อยกว่า 1% เพื่อป้องกันการเกิดไอน้ำระหว่างกระบวนการอัดด้วยความดันสูงหรือการอัดรีด (Extrusion) อาจมีการใส่สารเติมแต่งอื่นๆ ได้ เช่น ใส่น้ำมันข้าวโพดซึ่งเป็น Auto-oxidant เข้าไปในกระบวนการผลิต เพื่อให้ไปทำปฏิกิริยากับเกลือโลหะในดินหรือสิ่งแวดล้อม เกิด Peroxide radical ซึ่งจะย่อยพอลิเมอร์อนุพันธ์ของปีโตรเคมีให้ได้ Oligomer ที่เล็กลง ง่ายต่อการย่อยสลายต่อไป

2. ในรูปแป้งเจลลาทีโนซ์

วิธีนี้แป้งจะแตกตัวทั้งหมดผสมรวมกับอนุพันธ์ปิโตรเคมีที่หลอมละลาย กระบวนการผลิตแสดงได้ดังรูปที่ 2.2



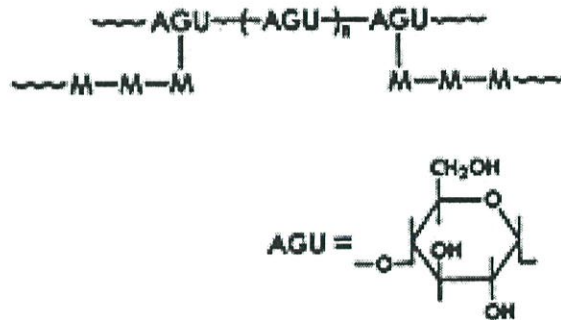
รูปที่ 2.2 การผลิตพลาสติกย่อยสลายได้ที่ใช้แป้งในรูปเจลลาทีโนซ์ [1]

แป้งมันสำปะหลังได้ใช้ผลิตพลาสติกย่อยสลายได้ในเชิงเปรียบเทียบกับแป้งจากแหล่งอื่นๆ ในประเทศไทยได้ทดลองผลิตพลาสติกย่อยสลายได้จากส่วนผสมของแป้งมันสำปะหลังและโพลีคาโพรแลคโตน (Polycaprolactone , PCL) โดยแป้งมันที่ใช้จะอยู่ในรูปเม็ดแป้งและแป้งเจลลาทีโนซ์ ทำการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและความสามารถในการย่อยสลาย ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าคุณสมบัติของส่วนผสมขึ้นอยู่กับสัดส่วนของแป้งที่ใช้ เมื่อปริมาณแป้งในรูปเม็ดแป้งและแป้งเจลลาทีโนซ์ ส่วนผสมต่ำกว่า 40% พบว่าค่าความต้านแรงดึง (Tensile strength) ของส่วนผสมทั้ง 2 รูปไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ร้อยละการยืดตัว (% Elongation) ขึ้นอยู่กับรูปแป้งที่ใช้ถ้าปริมาณน้อยกว่า 30% ในการทดลองพบว่าในรูปเม็ดแป้งจะมีค่าร้อยละการยืดตัวสูงกว่ารูปแป้งเจลลาทีโนซ์ถึง 125 เท่าที่ปริมาณแป้ง 50% อย่างไรก็ตามเมื่อตรวจสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ทั้งหมด (Total organic carbon analyzer) และกล้องจุลทรรศน์ชนิดอิเล็กตรอน (Scanning electron microscope) พบว่าในรูปแป้งเจลลาทีโนซ์สามารถย่อยสลายได้ง่ายกว่าเนื่องจากมีโครงสร้างลำดับที่น้อยกว่าในรูปเม็ดแป้ง เมื่อทำการทดสอบส่วนผสมที่มีอัตราส่วนต่างๆ กัน พบว่าส่วนผสมที่มีแป้งเจลลาทีโนซ์ 30% และ

PCL 70% เป็นส่วนผสมที่เหมาะสมในการผลิตพลาสติกที่คุณสมบัติทางกายภาพดีและความสามารถในการย่อยสลายสูง

3. แป้งกราฟท์โคพอลิเมอร์

โครงสร้างของแป้งกราฟท์โคพอลิเมอร์ (Starch graft copolymer) แสดงได้ดังรูปที่ 2.3 โดยที่ AGU เป็นหน่วยกลูโคสและ M เป็นมอนอเมอร์ที่จะมาทำปฏิกิริยากับแป้ง แป้งที่ใช้อาจจะใช้ในรูปแบบเม็ด แป้งเจลาทีไนซ์ การทำปฏิกิริยา Graft copolymerization ขั้นแรกจะต้องทำให้เกิดอนุมูลอิสระ (Free radical) บนสายโซ่โมเลกุลของแป้งก่อน ซึ่งมี 2 วิธี คือ โดยวิธีทางเคมีและวิธีฉายรังสี ซึ่งจะใช้วิธีใด ขึ้นอยู่กับชนิดของมอนอเมอร์ วิธีทางเคมีเป็นที่นิยมที่สุด คือ ปฏิกิริยาของแป้งกับเกลือซีริก (Ceric salts)



รูปที่ 2.3 โครงสร้างของสตาร์ชกราฟท์โคพอลิเมอร์ [1]

เมื่อเกิดอนุมูลอิสระบนโมเลกุลแป้ง ไอออนของมอนอเมอร์ปีโตรเคมีตัวแรกจะเข้ามาสร้างพันธะกัน จากนั้นตัวต่อๆ ไปจะเข้ามาต่อกับตัวแรก เป็นเช่นนี้เรื่อยๆ จนได้กิ่งที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ซึ่งในแป้งแต่ละโมเลกุลจะมีกิ่งก้านจำนวนน้อย ความถี่ในการเกิด Graft จะเป็นจำนวนหน่วยกลูโคสต่อ 1 graft ที่เกิด

2.2 แป้ง [1]

แป้งเป็น Homopolysaccharide ชนิดหนึ่งที่พบมากในพืช และเป็นพอลิเมอร์ของน้ำตาลกลูโคสที่ได้จากกระบวนการสังเคราะห์แสง พืชเก็บสะสมแป้งไว้ตามส่วนต่าง ๆ เช่น หัว ราก เมล็ด ลำต้น และผล โดยรวมตัวกันอยู่เป็นเม็ดแป้ง (Starch granule) แป้งส่วนใหญ่ได้มาจากเมล็ดของธัญพืช เช่น ข้าวเจ้า ข้าวโพด ข้าวสาลี ข้าวฟ่างและบางส่วนได้มาจากหัวและรากของพืช เช่น มันเทศ มันฝรั่ง และมันสำปะหลัง แป้งที่ได้จากพืชแต่ละชนิดจะมีลักษณะเฉพาะ คือ มีโครงสร้างทางเคมีในโมเลกุลแตกต่างกันและเม็ดแป้งจะมีขนาดรูปร่าง และสมบัติทางกายภาพแตกต่างกันด้วย โดยเฉพาะรูปร่างของเม็ดแป้งที่มาจากพืชแต่ละชนิดจะแตกต่างกัน

“แป้ง” ในการผลิตนั้น หมายถึง คาร์โบไฮเดรต ที่มีองค์ประกอบของคาร์บอน ไฮโดรเจนและออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ มีสิ่งเจือปน เช่น โปรตีน ไขมัน เกลือแร่ น้อยมาก ส่วนแป้งที่ผลิตโดยทั่วไปที่ยังมีส่วนประกอบอื่นๆ อยู่มาก เรียกว่า ฟลาว (Flour) ตัวอย่างเช่น แป้งข้าวโพด แป้งสาลี ถ้ายังมีส่วนประกอบของโปรตีนสูง จะจัดอยู่ในรูปประเภทฟลาว เรียกว่า Corn flour ,Wheat flour เช่นเดียวกับแป้งข้าวเจ้า ที่มีปริมาณโปรตีนสูงถึง 7 % ถึง 8% เรียกว่า Rice flour แต่เมื่อสิ่งเจือปนได้แก่ โปรตีน ไขมัน เกลือแร่ อื่นถูกสกัดออกไป จนเหลือแป้งบริสุทธิ์เป็นส่วนใหญ่ จึงเรียกว่า สตาร์ช (Starch) เช่น Corn starch,Wheat starch เป็นต้น ซึ่งแป้งที่พบในธรรมชาตินั้นจะพบอยู่ในรูปเม็ดแป้งขนาด 1-100 ไมครอน เมื่อตรวจดูลักษณะของเม็ดแป้งชนิดต่างๆ ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบธรรมดา และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Scanning Electron Microscopy) พบว่าเม็ดแป้งจะมีขนาด รูปร่าง และลักษณะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับชนิดของแป้งนั้นๆ

1. Starch ผลิตได้จากพืชผลทางการเกษตรหลายชนิด เช่น ข้าวโพด ข้าวสาลี และจากพืชหัวชนิดต่างๆ เช่น มันฝรั่ง มันสำปะหลัง สำหรับกระบวนการผลิตแป้งต้องเป็นแบบเปียก (Wet grinding) จะทำให้แยก Starch ออกมาได้

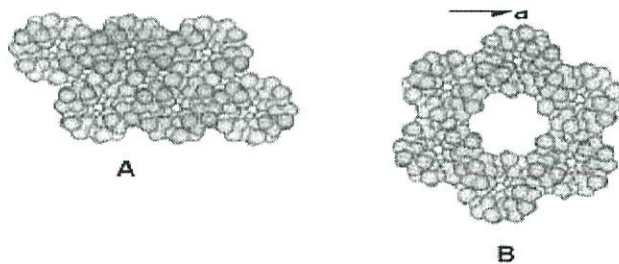
2. Flour ผลิตได้จากการโม่แบบแห้ง และยังคงเหลือองค์ประกอบของโปรตีนอยู่ด้วย จึงทำให้มีสมบัติต่างไปจาก Starch

2.2.1 ลักษณะของเม็ดแป้ง

เม็ดแป้งประกอบด้วยวงแหวน เรียกว่า Growth ring ซึ่งสังเกตได้จากการส่องกล้องจุลทรรศน์ หรือ Scanning electron microscopy เม็ดแป้งที่เปียกและสดจะสังเกตเห็น Growth ring ได้ง่าย เม็ดแป้งขนาดใหญ่ เช่น แป้งมันฝรั่ง แป้งต้นพุทธรักษาที่ผ่านการแช่น้ำ จะสังเกตเห็น Growth ring ได้ชัดเจน ในแป้งที่แห้งจะไม่พบ Growth ring สำหรับเม็ดแป้งขนาดเล็ก เช่น แป้งข้าวบาร์เลย์ และแป้งข้าวเจ้าจะสังเกตได้ยากจากการส่องกล้องจุลทรรศน์ แต่สามารถสังเกตเห็นได้เมื่อนำแป้งผ่านปฏิกิริยาเคมีหรือย่อยด้วยเอนไซม์และศึกษาด้วย SEM โครงสร้างของ Growth ring แสดงถึงลักษณะการเจริญของเม็ดแป้งโดยเนื้อเยื่อชั้นแรกเจริญมาจากศูนย์กลางของเม็ดแป้ง (Hilum) ซึ่งส่วนนี้ประกอบด้วยส่วน Reducing end ของโมเลกุลแป้ง มีด้าน Non-reducing end ของอะไมโลสและอะไมโลเพกตินแผ่กระจายออกไป จุดเชื่อมกิ่ง (Branch point) ของอะไมโลเพกตินอยู่ในส่วน อดัณฐานและสายอยู่ในส่วนผลึก

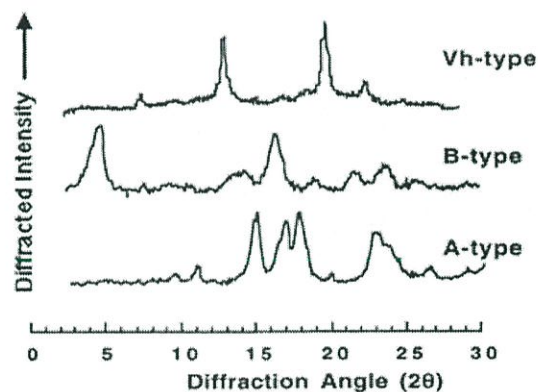
ถ้าส่องด้วยกล้องโพลาไรซ์ (Polarized microscope) จะมองเห็นวงแหวนและไฮลัม เป็นเครื่องหมายกากบาทสีดำชัดเจน (Birefringence หรือ Polarization cross) โดยจุดตัดของ กากบาทจะเป็นตำแหน่งของไฮลัมและบริเวณอื่นจะเห็นเป็นแสงสว่างวาว ซึ่งเป็นสิ่งยืนยันถึงลักษณะ ที่โมเลกุลของแป้งมีการจัดเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบ

เม็ดแป้งมีลักษณะโครงสร้างผลึก 3 แบบขึ้นอยู่กับลักษณะในการจัดเรียงตัวของเกลียวคู่ ถ้ามีการเรียงตัวหนาแน่นมากและมีปริมาณน้ำต่ำจะจัดเป็นผลึกแบบ A (แป้งจากธัญพืชต่างๆ) ถ้ามีการเรียงตัวกันหลวมๆ และมีปริมาณน้ำสูงจะจัดเป็นผลึกแบบ B (แป้งจากพืชหัว) ดังรูปที่ 2.4 ถ้ามีการเรียงตัวทั้งแบบ A และ B รวมกันจัดเป็นผลึกแบบ C (แป้งจากพืชตระกูลถั่ว) สารประกอบเชิงซ้อนของอะมิโลสกับโมเลกุลของสารอินทรีย์ที่มีขั้วมีรูปแบบผลึกเป็นแบบ V



รูปที่ 2.4 โครงสร้างผลึกของเม็ดแป้ง ชนิด A และ B ของอะมิโลส [5]

โครงสร้างของผลึกที่ต่างกันทำให้ลักษณะการกระจายตัวของแสงต่างกัน ซึ่งสามารถตรวจสอบชนิดโครงสร้างของเม็ดแป้งได้โดยเทคนิค Wide angle x-ray diffraction (WAXS) แป้งที่มีโครงสร้างผลึกต่างกันให้รูปแบบของ X-ray diffraction ต่างกันดังรูปที่ แป้งที่มีโครงสร้างผลึกแบบ A ให้พีคที่ 2θ เท่ากับ 17° และ 18° และพีคเดี่ยวที่ 2θ เท่ากับ 23° แต่ไม่มีพีคที่ 2θ เท่ากับ 5.6° แป้งจากธัญพืช เช่น ข้าวโพด ข้าวเจ้า มีลักษณะผลึกแบบ A แป้งที่มีโครงสร้างผลึกแบบ B ให้พีคที่ 2θ เท่ากับ 5.6° และ 17° แต่ไม่มีพีคที่ 2θ เท่ากับ 18° และมีพีคคู่ (Doublet) ที่ 2θ เท่ากับ 22° และ 24° ซึ่งได้แก่ แป้งจากพืชหัวและแป้งที่มีอะไมโลสสูง เช่น มันฝรั่ง เป็นต้น แป้งที่มีโครงสร้างผลึกแบบ C ให้ลักษณะร่วมกันระหว่างผลึกแบบ A และ B กล่าวคือ มีพีคที่ 2θ เท่ากับ 5.6° และ 17.9° ตัวอย่างเช่น แป้งจากพืชตระกูลถั่ว ราก ลำต้นและแป้งผลไม้บางชนิด แป้งบางชนิดอาจให้ลักษณะของผลึกได้มากกว่า 1 ชนิด เช่น แป้งมันสำปะหลังซึ่งสามารถตรวจพบลักษณะผลึกทั้งแบบ A และ C โครงสร้างผลึกของเม็ดแป้งดิบในธรรมชาติอาจเปลี่ยนแปลงได้ขึ้นอยู่กับกาปฏิบัติ (Treatment) ต่อเม็ดแป้ง เช่น แป้งมันฝรั่งซึ่งที่ถูกบ่มไว้นานที่อุณหภูมิสูง (110°C , 30 นาที : Heat moisture treatment) มีชนิดของผลึกเปลี่ยนจากเดิมที่เป็นชนิด B ไปเป็นชนิด A ลักษณะ โครงสร้างและปริมาณผลึกของแป้งแต่ละชนิดแสดงในตารางที่ 2.1



รูปที่ 2.5 X-ray diffraction ของแป้งที่มีโครงสร้างผลึกต่างกัน [5]

ตารางที่ 2.1 ลักษณะโครงสร้างและปริมาณผลึกของแป้งแต่ละชนิด [5]

ชนิดแป้ง	ความเป็นผลึก (%)	อุณหภูมิการเกิดเจลาตินในเซชัน (°C)	ปริมาณอะไมโลส (%)
โครงสร้าง A			
ข้าวโอ๊ต	33	60.7	23
ข้าวสาลี	36	63.5	23
ข้าวเหนียว	37	64.5	-
ข้าวฟ่าง	37	72.2	25
ข้าวเจ้า	38	70.0	17
ข้าวโพด	40	71.3	27
โครงสร้าง B			
Amylomaize	15 – 22	86.0	55 – 75
สาธู	26	70.5	28
มันฝรั่ง	28	67.3	22
โครงสร้าง C			
มันเทศ	38	70.0	20
มันสำปะหลัง	38	66.0	18

2.2.2 องค์ประกอบภายในแป้ง [1]

แป้งเป็นพอลิเมอร์ของกลูโคสที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่มีสูตรทั่วไปคือ $(C_6H_{10}O_5)_n$ แป้งมีหน่วยพื้นฐานเป็น Anhydroglucose unit เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α -glycosidic linkage ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 1 ของหน่วยกลูโคสกับคาร์บอนตำแหน่งที่ 4 ของหน่วยกลูโคสที่อยู่ถัดไป ด้านปลายของโมเลกุลแป้งจะมี Anomeric carbon (C1) ซึ่งว่างอยู่ไม่ได้จับกับโมเลกุลอื่นๆ ดังนั้นแต่ละโมเลกุลของแป้งจะมีด้านปลาย ที่มีคุณสมบัติรีดิวซ์ (Reducing end) นั่นคือ แป้งหนึ่งโมเลกุลจะมีตำแหน่ง Reducing end 1 ตำแหน่ง ซึ่งแป้งประกอบด้วย พอลิเมอร์ของกลูโคส 2 ชนิด คือ พอลิเมอร์เชิงเส้น (Amylose) และพอลิเมอร์เชิงกิ่ง (Amylopectin) วางตัวในแนวรัศมี Amylose ประกอบด้วยกลูโคส 250-300 โมเลกุลซึ่งต่อกันเป็นโซ่ยาวแบบไม่มีกิ่งแต่โซ่จะมีลักษณะขดเป็นเกลียว (Helix) อะไมโลส ซึ่งมีขนาดเล็กและมี

กิ่งก้านสาขาเพียงเล็กน้อยและ อะไมโลเพคตินซึ่งมีขนาดใหญ่และมีกิ่งก้านสาขามากมาย นอกจากนี้ยังพบ โมเลกุลแป้งอีกชนิดหนึ่ง ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าอะไมโลสแต่เล็กกว่าอะไมโลเพคติน เรียกว่า “ Intermediate material ” แต่พบในปริมาณไม่มากนัก อะไมโลสและ อะไมโลเพคตินมีสมบัติที่แตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 2.2

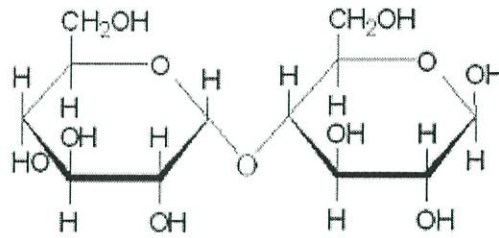
ตารางที่ 2.2 สมบัติที่แตกต่างกันของอะไมโลสและอะไมโลเพคติน [5]

อะไมโลส	อะไมโลเพคติน
1. ประกอบด้วยโมเลกุลกลูโคสที่ต่อกันเป็นเส้นตรงด้วยพันธะ α -1,4	1. โมเลกุลกลูโคสที่ต่อกันด้วยพันธะ α -1,4 และมีการแตกกิ่งด้วยพันธะ α -1,6
2. ประกอบด้วยกลูโคส 200-6000 หน่วย	2. แต่ละกิ่งมีกลูโคส 20-25 หน่วย
3. ละลายน้ำได้น้อยกว่า	3. ละลายน้ำได้ดีกว่า
4. เมื่อต้มในน้ำจะมีความข้นหนืดน้อย	4. ข้นหนืดมากและใส
5. ให้สีน้ำเงินกับสารละลายไอโอดีน	5. ให้สีม่วงแดงหรือสีน้ำตาลแดงกับสารละลายไอโอดีน
6. ต้มแล้วทิ้งไว้จะจับตัวเป็นวุ้นและแผ่นแข็งได้	6. ไม่จับตัวเป็นวุ้นและแผ่นแข็ง

องค์ประกอบหลักภายในเม็ดแป้ง [5]

1. แป้ง (starch) หรือ คาร์โบไฮเดรต (Carbohydrate)

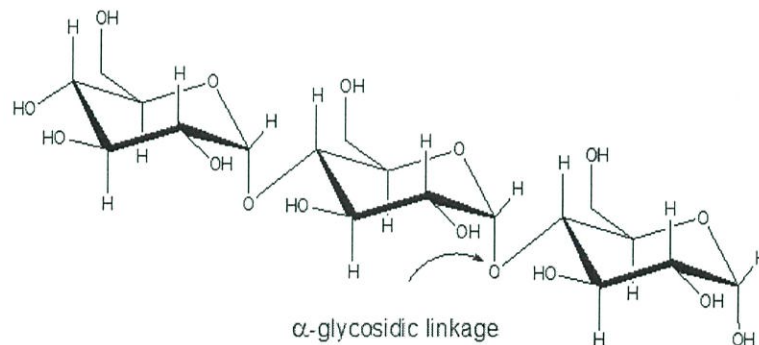
แป้งหรือคาร์โบไฮเดรตเป็น โพลิเมอร์ของกลูโคสที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่มีสูตรทั่วไปคือ $(C_6H_{10}O_5)_n$ แป้งมีหน่วย พื้นฐานเป็น anhydroglucose unit เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α -glycosidic linkage ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 1 ของหน่วยกลูโคสกับคาร์บอนตำแหน่งที่ 4 ของหน่วยกลูโคสที่อยู่ถัดไป ด้านปลายของโมเลกุลแป้งจะมี anomeric carbon (C1) ซึ่งว่างอยู่ไม่ได้จับกับโมเลกุลอื่นๆ ดังนั้นแต่ละโมเลกุลของแป้งจะมีด้านปลาย ที่มีคุณสมบัติรีดิวซ์ (reducing end) นั่นคือ แป้งหนึ่งโมเลกุลจะมีตำแหน่ง reducing end 1 ตำแหน่ง



รูปที่ 2.6 โครงสร้างของคาร์โบไฮเดรต [5]

2. อะไมโลส (Amylose)

อะไมโลสเป็นพอลิเมอร์เชิงเส้นที่ประกอบด้วยกลูโคสประมาณ 1,000 – 6,000 หน่วย เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α -1, 4 –glycosidic linkage และส่วนน้อยเป็น α -1,6- glycosidic bonds อาจพบกิ่งก้านสาขาในโมเลกุลของอะไมโลสได้บ้างในปริมาณเล็กน้อย



รูปที่ 2.7 โครงสร้างของอะไมโลส [5]

โดยทั่วไปแป้งจากธัญพืช เช่น แป้งข้าวโพด แป้งสาลี แป้งข้าวฟ่าง มีปริมาณอะไมโลสสูงประมาณ 22-30% ส่วนแป้งจากรากและหัว เช่น แป้งมันสำปะหลัง แป้งมันฝรั่ง แป้งสาकुจะมีปริมาณ อะไมโลสต่ำกว่าคืออยู่ในช่วง 18-24% น้ำหนักโมเลกุลอะไมโลสอยู่ในช่วง 105 ถึง 106 ดาลตัน โดย อะไมโลส ในแป้งแต่ละชนิดจะมีน้ำหนักโมเลกุลที่แตกต่างกันไป เนื่องจากแป้งแต่ละชนิดมี Degree of polymerization (DP) ของอะไมโลสแตกต่างกัน แป้งมันฝรั่งและแป้งมันสำปะหลังมี DP ของ อะไมโลส อยู่ในช่วง 1,000 ถึง 6,000 สูงกว่าแป้งข้าวโพดและแป้งสาลีซึ่งมี DP ของอะไมโลสในช่วง 200 ถึง 1,200 แป้งที่มีสายของอะไมโลสยาวมากจะมีแนวโน้มในการเกิดปรากฏการณ์ รีโทรเกรเดชัน (Retrogradation) ลดลง ปริมาณและสมบัติของอะไมโลสในแป้งแต่ละชนิดแสดง ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ปริมาณของอะไมโลสในแป้งชนิดต่างๆ [5]

แป้ง	ปริมาณอะไมโลส (% น.น.แห้ง)
ข้าวสาลี	28.8
ข้าวโพด	29.4
ข้าวเจ้า	25.0
ข้าวบาร์เลย์	25.5
มันฝรั่ง	36.0
มันสำปะหลัง	23.5
พุทธรักษา	43.2
ถั่วเขียว	37.9

ตำแหน่งของอะไมโลสภายในเม็ดแป้งขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ของแป้ง อะไมโลสบางส่วนอยู่ในกลุ่มของอะไมโลเพคติน บางส่วนกระจายอยู่ทั้งในส่วนอสัณฐาน (Amorphous) และส่วนผลึก (Crystalline) ไม่ละลายน้ำแต่เมื่อเติมน้ำลงไปอะไมโลสจะเกาะตัวกันเป็นตะกอนที่ไม่ละลาย และเนื่องจากโมเลกุลของอะไมโลสเป็นสายยาวจึงมีโอกาที่จะจับคู่กับอะไมโลสอีกโมเลกุลหนึ่ง เป็นสายยาวคู่ขนานเกาะกันด้วยพันธะไฮโดรเจนกลายเป็นตาข่ายมีขนาดใหญ่ขึ้น ทำให้ความสามารถในการอุ้มน้ำลดลงและตกตะกอนได้ ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า Retrogradation แต่ Waxy starch ซึ่งไม่มีอะไมโลสเลยหรือมีอะไมโลสเป็นองค์ประกอบน้อยมากจะไม่เกิด Retrogradation การศึกษาการเกิดเจลลาทีโนสของแป้งมันฝรั่ง พบอะไมโลสในส่วนรอบนอกของเม็ดแป้งมากกว่าที่จะอยู่ในส่วนใจกลางเม็ดแป้ง

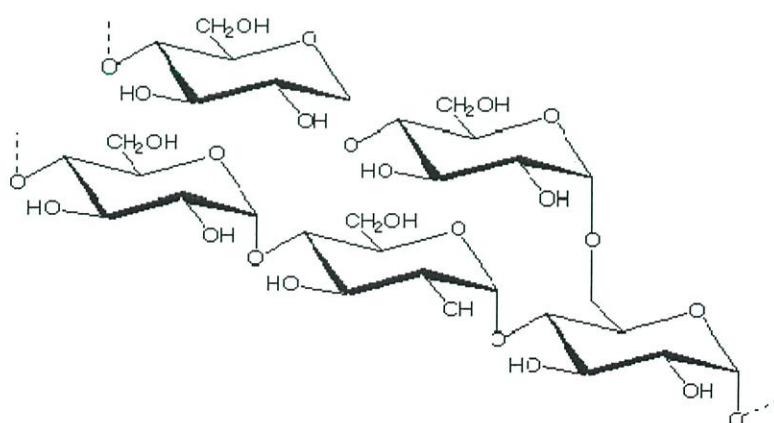
ตารางที่ 2.4 สมบัติของอะไมโลสจากแป้งชนิดต่างๆ [5]

สมบัติ	มันฝรั่ง	แป้งข้าว	มันเทศ	มันสำปะหลัง	เกาลัด	ถั่ว
Iodine binding capacity(g 100 g ⁻¹)	20.5	20.0-21.1	20.2	20.0	20.2	19.9
beta-amylolysis limit	80	73-84	73	75	95	82

(%)						
DP _w (range)	840-21800	210-12900	840-19100	580-22400	160-8090	
DP _w (mean)	6360	2750-3320	5430	6680	4210	
DP _n (mean)	4920	920-1110	4100	2660	800	1290
DP _w /DP _n	1.29	2.64-3.39	1.31	2.51	5.76	
CL ความยาวเฉลี่ย	670	***	***	340	420	270
Chain number	7.3	2.5-4.3	11	7.8	1.9	4.8
Unbranched amylose (mol %)	66	69	30	58	89	73

3. อะไมโลเพคติน (amylopectin)

อะไมโลเพคตินเป็นพอลิเมอร์เชิงกิ่งของกลูโคส มีโครงสร้างของโมเลกุลเป็นพอลิเมอร์ของน้ำตาลกลูโคสที่มีสายแขนงแยกออกมาซึ่งแต่ละแขนงจะมีน้ำตาลกลูโคสประมาณ 20-35 หน่วย ส่วนที่เป็นเส้นตรงของกลูโคสเชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α -1, 4- glycosidic linkage และส่วนที่เป็นกิ่งสาขาที่เป็นพอลิเมอร์กลูโคสสายสั้นมี DP อยู่ในช่วง 10 ถึง 60 หน่วย เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α -1, 6-glycosidic linkage ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 โครงสร้างของอะไมโลเพคติน [4]

โดยปกติอะไมโลเพคตินมีขนาดโมเลกุลใหญ่กว่าอะไมโลสมาก อะไมโลเพคตินมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 1,000 เท่าของอะไมโลสคือ ประมาณ 10^7 ถึง 10^9 ดาล อะไมโลเพคตินมีพันธะไฮโดรเจนน้อยกว่าอะไมโลสและมีความคงตัวมากกว่า ยังคงสภาพเหลว มีความหนืดยืดหยุ่นสำหรับอะไมโลเพคตินของแป้งข้าวเจ้า ข้าวเหนียว มันสำปะหลังและมันฝรั่ง สายส่วนใหญ่ประมาณ 80-90 % ประกอบด้วยกลุ่มเดี่ยว ๆ และสายที่เหลืออีก 10-20 % จะเป็นส่วนเชื่อมต่อของแต่ละกลุ่ม ในแต่ละกลุ่มประกอบไปด้วยสายประมาณ 22-25 สาย ทำให้เกิดเป็นส่วนผลึกของเม็ดแป้ง ในการจับกันเป็นกลุ่มของอะไมโลเพคตินทำให้เกิดเป็นเกลียวคู่ (Double helix) การเกิดเกลียวคู่ของอะไมโลเพคตินต้องใช้พันธะไฮโดรเจนและแรงแวนเดอร์วาลส์ในการเชื่อมต่อกันกึ่งอะไมโลเพคตินภายในเม็ดแป้งสามารถเกิดเป็นผลึกได้ ทั้งกึ่งที่อยู่ใกล้กันในกลุ่มเดียวกันหรือเกิดขึ้นระหว่างกลุ่มที่ใกล้เคียงกัน

หน่วยกลูโคสที่มีพันธะ α -1, 6 glycosidic linkage มีอยู่ประมาณ 5% ของปริมาณหน่วยกลูโคสใน อะไมโลเพคตินทั้งหมด อะไมโลเพคตินมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 1,000 เท่าของ อะไมโลสคือ ประมาณ 10^7 ถึง 10^9 ดาลตัน และมีการคืนตัวต่ำ เนื่องจากอะไมโลเพคตินมีลักษณะโครงสร้างเป็นกึ่ง อะไมโลเพคตินทำหน้าที่เป็นโครงสร้างหลักของเม็ดแป้ง อะไมโลสประกอบด้วยสายโซ่ 3 แบบคือ

- 1) สาย A (A-chain) เชื่อมต่อกับสายอื่นที่ตำแหน่งเดียว ไม่มีกึ่งเชื่อมต่อออกจากสายชนิดนี้ (Unbranched structure)
- 2) สาย B (B-chain) มีโครงสร้างแบบกึ่งเชื่อมต่อกับสายอื่นๆ 2 สาย หรือมากกว่า สายโซ่แบบ B นี้ยังแบ่งเป็นกลุ่มย่อย B1, B2, B3 และ B4 ซึ่งมีความยาวคร่อมหนึ่ง สอง สามและสี่ คลัสเตอร์ (Cluster) ตามลำดับ
- 3) สาย C (C-chain) แบบสายแกนซึ่งประกอบด้วยหมู่รีดิวซิง 1 หมู่ ในอะไมโลเพคตินแต่ละโมเลกุล ประกอบด้วยสาย C หนึ่งสายเท่านั้น

ความยาวของสายกิ่งอะไมโลเพคตินมีตั้งแต่ขนาดเล็กซึ่งมี DP ประมาณ 15 หน่วย ประกอบด้วยสาย A และสาย B ขนาดเล็ก จนถึงโมเลกุลขนาดใหญ่ซึ่งมี DP ประมาณ 45-60 หน่วย ประกอบด้วยสาย B สายยาว สายโซ่เหล่านี้อยู่รวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อน (Cluster)

ขนาดโมเลกุลของอะไมโลเพคตินที่มี ตั้งแต่ขนาดเล็กจนถึงขนาดใหญ่เหล่านี้ จะอยู่รวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อน (Cluster) โดยลักษณะสาย A และสาย B1 จะประกอบเป็นกลุ่มเดี่ยว (Cluster) สำหรับสาย B2 และสาย B3 มีความยาวของสายแผ่ออกไปในโครงสร้างที่ประกอบด้วย 2 และ 3 กลุ่มตามลำดับ โดยสาย A , B1 และ B2 จะมีขนาดโมเลกุล (Degree of polymerization, DP) อยู่ช่วง 6-12 , 12-24 และ 24-25 ตามลำดับ ทั้งนี้ได้ทำการศึกษาโครงสร้างอย่างละเอียดของอะไมโลเพคตินจากมันฝรั่งโดยใช้เอนไซม์ที่ย่อยพันธะกิ่ง โดยส่วนหนึ่งแสดงถึงส่วนผลึก (Crystallite region) ที่เกิดจากสายโซ่ที่เป็นเส้นตรงสั้นๆ ของอะไมโลเพคติน ในขณะที่ส่วนที่สองจะเป็นโครงสร้างบริเวณที่เป็นกิ่งเชื่อมต่อของสายโซ่กลูโคส ซึ่งแสดงถึงส่วนอสัณฐาน (Amorphous region) ของแป้ง

ตารางที่ 2.5 สมบัติทางโครงสร้างของอะไมโลเพคติน [4]

แหล่งแป้ง	ปริมาณอะไมโลเพคติน(%)	ความยาวสายภายนอกเฉลี่ย (CL)	ขนาดของโมเลกุลเฉลี่ย (DP)	จำนวนสายเฉลี่ย (NC)	ความยาวสายเฉลี่ย (CL)	โมเลกุลกิ่ง (%)
แป้งสาลี	72	13	4,800	250	19	5
แป้งข้าวโพด	72	15	8,200	370	22	6
แป้งข้าวเจ้า	83	14	4,700	220	21	6
- อินดิคา	-	13	12,800	670	19	5
- จาโปนิก	-	12	18,500	1,000	18	5
- ข้าวเหนียว	79	15	9,800	410	24	8

4. สารตัวกลาง (Intermediate material)

สารตัวกลางมีเพียงส่วนน้อยในแป้งบางชนิด องค์ประกอบนี้มีน้ำหนักโมเลกุลน้อยกว่าอะไมโลเพคตินแต่ใหญ่กว่าอะไมโลส และสารตัวกลางนี้มีโครงสร้างเป็นลักษณะเชิงกิ่งเช่นเดียวกับอะ

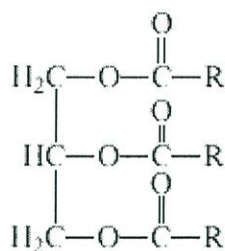
ไมโทเพคตินแต่จะมีถึงที่ยาวกว่าปริมาณหรือสัดส่วนของอะไมโลสกับอะไมโลเพคตินและสารตัวกลางในเมล็ดแป้งไม่คงที่ขึ้นอยู่กับสภาพการเพาะปลูกเช่น เวลาในการเพาะปลูกและปริมาณน้ำระหว่างเพาะปลูก เป็นต้น

5. ส่วนประกอบอื่นๆ ภายในเมล็ดแป้ง

ส่วนประกอบอื่นๆ ภายในเมล็ดแป้ง ได้แก่

5.1 ไขมัน

ไขมันที่สกัดได้จากเมล็ดแป้งอาจเป็นไขมันที่เป็นส่วนหนึ่งของเมล็ดแป้งจริงๆ หรืออาจมาจากเนื้อเยื่อส่วนอื่นๆ และมาจับอยู่กับเมล็ดแป้งในขณะที่ทำการสกัดแป้ง แป้งจากเอนโดสเปิร์มของพวกธัญพืชจะมี ลักษณะเฉพาะคือ มีไลปิดเป็นส่วนหนึ่งของเมล็ดแป้ง (integral components) ในขณะที่เมล็ดแป้งจากมันฝรั่ง เม็ดถั่วประเภทต่างๆ หรือจากส่วนอื่นๆ ของธัญพืชไม่พบ integral lipids ไลปิดที่จับอยู่กับเมล็ดแป้งนี้แบ่งได้เป็น 2 ประเภทคือ ไลปิดที่มาจากเนื้อเยื่ออื่นๆ เช่น จากเมมเบรนและสเฟียร์โรโซม ซึ่งจะจับอยู่กับเมล็ดแป้งแบบหลวมๆ ประกอบด้วยไลปิดพวกไตรกรีเซอไรด์ ไดเอซิลไกลโคไลปิดและฟอสโฟไลปิด ระหว่างการเจริญของเมล็ดข้าว จะเกิดการย่อยสลายไลปิดบางส่วนได้กรดไขมัน และโมนอเอซิลกรีเซอไรด์ ในขณะที่สกัดแป้ง แม้ว่าเมล็ดแป้งจะพองตัวเพียงเล็กน้อยเท่านั้น แต่กรดไขมันและโมนอเอซิลไลปิดเหล่านี้สามารถถูกดูดซึมเข้าไปในบริเวณชั้นผิวของเมล็ดแป้งได้ จึงเรียกไลปิดส่วนนี้ว่า “starch surface lipids” ส่วนไลปิดที่เป็นส่วนหนึ่งของเมล็ดแป้งอย่างแท้จริงจะพบอยู่ภายในเมล็ดแป้ง ในแป้งข้าวบาร์เลย์และข้าวสาลีพบว่า เป็นไลปิดประเภทไลโซฟอสโฟไลปิดทั้งหมด ในขณะที่ในแป้งข้าวเจ้า ข้าวโอตและข้าวโพด พบว่าเป็นกรดไขมันประมาณ 30-60% แป้งข้าวเหนียว ข้าวโพดเหนียว ข้าวบาร์เลย์เหนียว และข้าวสาลีเหนียวซึ่งมีอะไมโลสต่ำมาก พบว่ามีปริมาณไลปิดต่ำเช่นกัน และแป้งจากข้าวเหล่านี้ เมื่อกลายพันธุ์ให้มีอะไมโลสสูงก็จะพบไลปิดในปริมาณมากด้วย (Morrison, 1995) แป้งข้าวโอตมีไลปิด อะไมโลสและฟอสฟอรัสสูงกว่าแป้งจากธัญพืชอื่นๆ (Sowa & White, 1992) ตารางที่ 2.7 แสดงปริมาณกรดไขมันและฟอสโฟไลปิดในแป้งจากธัญพืช



รูปที่ 2.9 โครงสร้างของไขมัน [5]

5.2 โปรตีน

โปรตีนที่สกัดได้จากเม็ดแป้งก็แบ่งได้เป็น 2 กลุ่มเช่นเดียวกันคือ เป็นโปรตีนที่จับอยู่ที่ผิวของเม็ดแป้ง (surface protein) ซึ่งสกัดออกได้ง่ายที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิในการเกิดเจลลาติไนซ์ และโปรตีนที่เป็นส่วนหนึ่งของเม็ดแป้ง (integral protein) ซึ่งการสกัดต้องใช้อุณหภูมิใกล้เคียงหรือสูงกว่าอุณหภูมิในการเกิดเจลลาติไนซ์ Galliard & Bowler (1987) รายงานว่าประมาณ 10% ของโปรตีนทั้งหมดที่สกัดได้จากแป้งสาลีเป็นโปรตีนที่จับอยู่ที่ผิว โปรตีนที่อยู่ภายในเม็ดแป้งส่วนใหญ่เป็นเอนไซม์ที่ทำหน้าที่สังเคราะห์แป้ง แป้งจากส่วนหัวของพืชมีโปรตีนในปริมาณที่ต่ำ (0.1% w/w หรือน้อยกว่า) เมื่อเปรียบเทียบกับแป้งจากธัญพืช เช่น ข้าวโพดและข้าวสาลี ซึ่งมีปริมาณโปรตีน 0.3-0.5% (w/w) โปรตีนที่อยู่ในแป้งจะเกี่ยวข้องกับการทำให้เกิดกลิ่นรสและการเกิดฟองในแป้ง

5.3 ฟอสฟอรัส

ฟอสฟอรัสในแป้งจากธัญพืชมักพบในรูปของฟอสโฟลิปิด (lysophospholipid) ในขณะที่แป้งจากรากและหัวมักมีฟอสฟอรัสในปริมาณที่ต่ำและอยู่ในรูปของฟอสเฟต แป้งมันฝรั่งเป็นแป้งจากหัวที่มีปริมาณฟอสฟอรัสในรูปของฟอสเฟตเอสเทอร์ (phosphate ester) สูง ปริมาณ phosphate group ในแป้งมันฝรั่งมีประมาณ 1 group ต่อ 200-400 หน่วยของน้ำตาลกลูโคส (200-800 ppm) โดยหมู่ฟอสเฟตทำให้แป้งมีคุณสมบัติเป็น polyelectrolyte ทำให้เม็ดแป้งกระจายตัวในน้ำและพองตัวได้ดีเนื่องจากโมเลกุลแป้งผลัดกันเอง

5.4 เถ้าและสารอนินทรีย์อื่นๆ

สารอนินทรีย์อื่นๆ ในแป้ง เช่น Ca^+ , K^+ , Mg^+ และ Zn^+ พบในปริมาณเล็กน้อย ปริมาณของสารเหล่านี้หาได้จากสิ่งที่เหลือจากการเผาที่อุณหภูมิเฉพาะ แป้งมันฝรั่งมีหมู่ฟอสเฟตในรูปของเกลือที่มีอยู่ในมันฝรั่งเองหรือได้จากกระบวนการล้างน้ำ ปริมาณเถ้าของแป้งมันฝรั่งเท่ากับปริมาณหมู่ฟอสเฟต ปริมาณเถ้าบางส่วนในแป้งธัญพืชคือปริมาณฟอสฟอริค ปริมาณเถ้าของแป้งที่ใช้ในทางการค้า โดยทั่วไปคือ สารประกอบโลหะของโซเดียม โพแทสเซียม แมกนีเซียม และแคลเซียม

5.5 ความชื้น

ปริมาณความชื้นของแป้งขึ้นอยู่กับความชื้นสัมพัทธ์ (relative humidity; RH) ของอากาศ ขณะที่เก็บผลิตภัณฑ์ ถ้ามีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำแป้งจะมีความชื้นต่ำด้วย ถ้าความชื้นสูงเม็ดแป้งจะดูดซับน้ำไ้มาก ปริมาณความชื้นสมดุล (equilibrium moisture content) ของแป้งขึ้นอยู่กับชนิดของแป้ง ภายใต้สภาวะอากาศปกติแป้งโดยทั่วไปจะมีความชื้น 10-20% (w/w)

2.2.3 โครงสร้างและการรวมตัวเป็นเม็ดแป้ง

แป้งที่พบในธรรมชาติจะพบอยู่ในรูปเม็ดแป้ง (Granule) ขนาดเล็ก โดยเมื่อตรวจดูลักษณะของเม็ดแป้งชนิดต่างๆ ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบธรรมดา และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่าเม็ดแป้งจะมีขนาด รูปร่าง และลักษณะแตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับแหล่งของแป้งนั้นๆ

เม็ดแป้งมีโครงสร้างเป็นแบบกึ่งผลึก (Semi-crystalline) โดยโมเลกุลของอะไมโลสและ อะไมโลเพกตินจะจัดเรียงตัวในเม็ดแป้งเป็นโครงสร้างทั้งส่วนที่เป็นผลึกและส่วนอสัณฐาน ส่วนสายโซ่ของอะไมโลเพกตินจะจัดเรียงตัวในลักษณะเกลียวม้วนคู่ (Double helices) ซึ่งบางส่วนจะเกิดโครงสร้างที่เป็นผลึก ส่วนอสัณฐานของเม็ดแป้งจะประกอบด้วย โมเลกุลของอะไมโลส และสายโซ่ยาวของอะไมโลเพกติน เม็ดแป้งจะมีลักษณะโครงสร้างผลึก 3 แบบขึ้นอยู่กับความหนาแน่นในการจัดเรียงตัวของเกลียวคู่

2.2.4 สมบัติของแป้ง [5]

2.2.4.1 การดูดซับน้ำ การพองตัวและการละลาย

เมื่อเติมน้ำลงไปแป้งและตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง เม็ดแป้งจะดูดซึมน้ำจากบรรยากาศจนเกิดสมดุลระหว่างความชื้นภายในเม็ดแป้งกับความชื้นในบรรยากาศ ปริมาณน้ำที่ถูกดูดซึมจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ แป้งส่วนใหญ่เมื่อเกิดสมดุลภายใต้บรรยากาศปกติจะมีความชื้น 10-16%

น้ำที่อยู่ในเม็ดแป้งมีอยู่ด้วยกัน 3 รูปแบบ คือ น้ำในผลึก น้ำในรูป Bound water และน้ำในรูปอิสระ (Free water) โดยมีการจับกับแป้งได้แน่นตามลำดับ และแป้งที่มีความชื้น 8-10% สามารถจับกับน้ำได้แน่นกว่าแป้งที่มีความชื้นสูงกว่านี้ เนื่องจากการจับของน้ำกับหมู่ไฮดรอกซิลที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 6 แต่ละหน่วยแป้งจะได้สูตรโมโนไฮเดรต : $[n(C_6H_{10}O_5 \cdot H_2O)]$

น้ำหรือของเหลวชนิดอื่นสามารถแพร่และผ่านเข้าไปในร่างแหของไมเซล (Micelles) ในเม็ดแป้งได้อย่างอิสระ ทดสอบได้จากการแขวนลอยเม็ดแป้งในสารละลายไอโอดีนเจือจาง จะเกิดสีขึ้นในเม็ดเม็ด เมื่อใส่โซเดียมไทโอซัลเฟตลงไป พบว่าสีจะหายไปอย่างรวดเร็วและเมื่อนำมาส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนพบว่าเม็ดแป้งประกอบด้วยรูพรุนจำนวนมากซึ่งจะทำหน้าที่เป็น Molecular sieve รูพรุนเหล่านี้อาจจะเกิดขึ้นในขั้นตอนการทำแห้งในกระบวนการผลิตแป้งหรืออาจจะมียูอยู่แล้วในแป้งธรรมชาติ แต่มีขนาดขยายใหญ่ขึ้นเนื่องจากขั้นตอนการทำแห้งในกระบวนการผลิตแป้ง

แป้งดิบจะไม่ละลายในน้ำที่อุณหภูมิเจลาทีไนซ์ เนื่องจากมีพันธะไฮโดรเจนซึ่งเกิดจากหมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลแป้งที่อยู่ใกล้ๆกัน หรือ Water bridges แต่เมื่ออุณหภูมิของสารผสมน้ำแป้งเพิ่มสูงกว่าช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลาทีไนซ์ พันธะไฮโดรเจนจะถูกทำลายโมเลกุลของน้ำจะเข้ามาจับกับหมู่ไฮดรอกซิลที่เป็นอิสระ เม็ดแป้งเกิดการพองตัว ทำให้การละลายความหนืดและความใสเพิ่มขึ้น คุณสมบัติของการเกิด Birefringence จะหมดไปปัจจัยที่มีผลต่อการพองตัวและความสามารถในการละลาย คือ ชนิดของแป้ง ความแข็งแรงและลักษณะภายในเม็ดแป้ง สิ่งเจือปนภายในเม็ดแป้งที่ไม่ใช่คาร์โบไฮเดรต ปริมาณน้ำในสารละลายแป้งและการดัดแปลงแป้งทางเคมี รูปแบบในการพองตัวและการละลายของเม็ดแป้งแต่ละชนิดจะมีรูปแบบที่แตกต่างกันไป

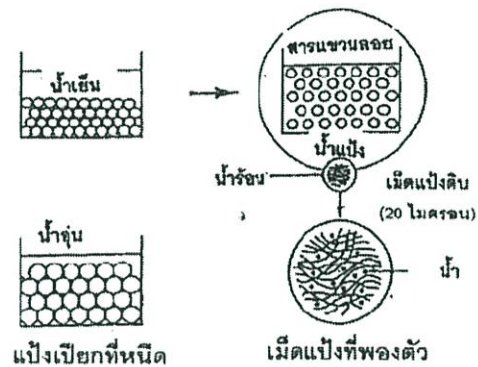
เมื่อมีการให้ความร้อนแก่สารละลายน้ำแป้ง เม็ดแป้งจะเกิดการพองตัวและบางส่วนของแป้งจะเกิดการละลายออกมา กำลังการพองตัวของแป้งจะแสดงเป็นปริมาตรหรือน้ำหนักของเม็ดแป้งที่เพิ่มขึ้นมากที่สุดเมื่อเม็ดแป้งพองตัวได้อย่างอิสระในน้ำ

2.2.4.2 การเกิดเจลาตินในเซชัน (Gelatinization)

โมเลกุลของแป้งประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิลจำนวนมาก ยึดเกาะกันด้วยพันธะไฮโดรเจนมีคุณสมบัติชอบน้ำ (Hydrophilic) แต่เนื่องจากเม็ดแป้งอยู่ในรูปของร่างแหไมเซลล์ ดังนั้นการจัดเรียงตัวลักษณะนี้จะทำให้เม็ดแป้งละลายน้ำเย็นได้ยาก ดังนั้นในขณะที่แป้งอยู่ในน้ำเย็นเม็ดแป้งจะดูดซึมน้ำและพองตัวได้เล็กน้อยแต่เมื่อให้ความร้อนกับสารละลายเม็ดแป้ง พันธะไฮโดรเจนจะคลายตัวลง เม็ดแป้งจะดูดน้ำและพองตัวส่วนผสมของน้ำแป้งจะมีความหนืดมากขึ้นและใสขึ้น เนื่องจากโมเลกุลของน้ำอิสระที่อยู่รอบๆ เม็ดแป้งเหลือน้อยลง เม็ดแป้งเคลื่อนไปหาได้ยากขึ้นทำให้เกิดความหนืดปรากฏการณ์นี้เรียกว่า “เจลาตินในเซชัน” (Gelatinization) อุณหภูมิที่สารละลายที่เกิดความหนืดเรียกว่า “อุณหภูมิเริ่มเจลาตินในซ์” เมื่อตรวจวัดโดยเครื่องมือวัดความหนืดมักจะเรียกจุดนี้ว่า “อุณหภูมิที่เริ่มเปลี่ยนแปลงความหนืด” (Pasting temperature) หรือเวลาที่เริ่มเปลี่ยนแปลงความหนืด (Pasting time) ซึ่งจะแตกต่างกันในแป้งแต่ละชนิด

การเกิดเจลาตินในเซชันของเม็ดแป้งแบ่งได้ 3 ระยะ คือ ระยะแรกเม็ดแป้งจะดูดซึมน้ำได้อย่างจำกัดและเกิดการพองตัวแบบผันกลับได้ เนื่องจากร่างแหระหว่างไมเซลล์ยึดหยุ่นได้อย่างจำกัดความหนืดของสารแขวนลอยจะไม่เพิ่มขึ้นจนเห็นได้ชัด เม็ดแป้งยังคงรักษารูปร่างและโครงสร้างแบบ Birefringence ได้ เมื่อมีการใส่สารเคมีหรือเพิ่มอุณหภูมิจากสารละลายน้ำแป้งจนถึงประมาณ 65 องศาเซลเซียส (อุณหภูมิที่แท้จริงขึ้นอยู่กับชนิดของแป้ง) เมื่อเริ่มเข้าสู่ระยะที่ 2 เม็ดแป้งจะพองตัวอย่างรวดเร็วร่างแหระหว่างไมเซลล์ภายในเม็ดแป้งจะอ่อนแอลงเนื่องจากพันธะไฮโดรเจนจะถูกทำลายเม็ดแป้งจะดูดซึมน้ำเข้ามา และเกิดการพองตัวแบบผันกลับไม่ได้ เรียกว่า “การเกิดเจลาตินในเซชัน” เม็ดแป้งมีการเปลี่ยนรูปร่างและโครงสร้าง Birefringence ความหนืดของสารละลายน้ำแป้งจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว แป้งที่ละลายได้จะเริ่มละลายออกมา ซึ่งถ้าเหวี่ยงแยกส่วนใสและหยดสารละลายไอโอดีนลงในส่วนใสจะเกิดสีน้ำเงินขึ้น เมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิต่อไปอีกจนเข้าสู่ระยะที่ 3 รูปร่างเม็ดแป้งไม่แน่นอน

การละลายของแป้งจะเพิ่มขึ้นเมื่อนำไปทำให้เย็นจะเกิดเจล การเกิด เจลาทีโนเซชันของแป้งจะทำให้หมู่ไฮดรอกซิลของแป้งสามารถทำปฏิกิริยาของแป้งได้ตีมากขึ้นรวมทั้งพร้อมที่จะถูกย่อยด้วยน้ำย่อยต่างๆ ได้ดีกว่า



รูปที่ 2.10 การเปลี่ยนแปลงของเม็ดแป้งในระหว่างการหุงต้ม [1]

2.2.4.3 การเกิดรีโทรเกรเดชัน (Retrogradation)

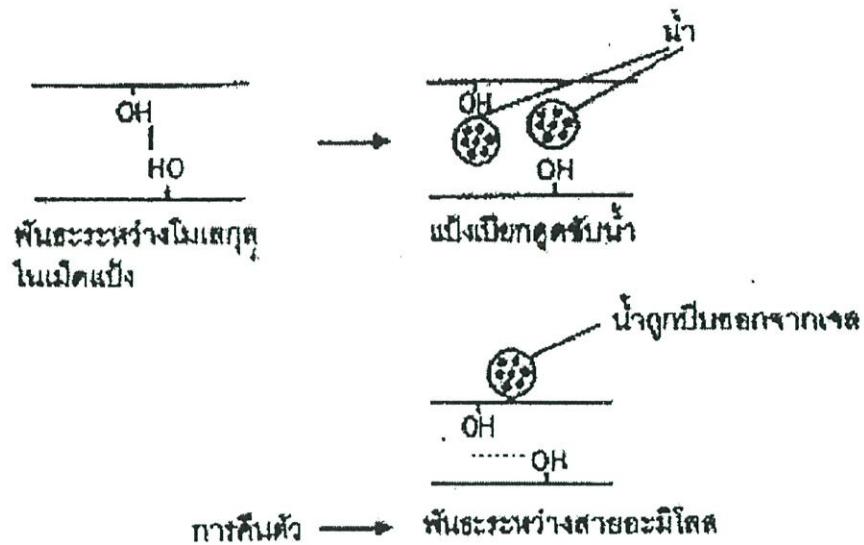
เมื่อแป้งได้รับความร้อนจนถึงอุณหภูมิที่เกิดเจลาทีโนเซชัน แล้วให้ความร้อนต่อไปจะทำให้เม็ดแป้งพองตัวเพิ่มขึ้น จะถึงจุดที่พองตัวเต็มที่แล้วแตกออกโมเลกุลของอะไมโลสขนาดเล็กระบายออกมาทำให้ความหนืดลดลง เมื่อปล่อยให้เย็นตัวโมเลกุลของอะไมโลสที่อยู่ใกล้กันจะเกิดการจับเรียงตัวกันใหม่ด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลเกิดเป็นร่างแห 3 มิติ โครงสร้างใหม่ที่สามารถอุ้มน้ำและไม่มีการควบแน่นเข้ามามีความหนืดคงตัวมากขึ้น เกิดลักษณะเจลเหนียวคล้ายฟิล์มหรือผลึก เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า “รีโทรเกรเดชัน” (Retrogradation) หรือการคืนตัว หรือ Setback เมื่อลดอุณหภูมิให้ต่ำลงอีกลักษณะการเรียงจัดของโครงสร้างจะแน่นมากขึ้น โมเลกุลอิสระของน้ำที่อยู่ภายในจะถูกบีบออกมาออกเจล ซึ่งเรียกว่า “Syneresis” ปรากฏการณ์ทั้ง 2 นี้จะทำให้เจลมีลักษณะขาวขุ่นและมีความหนืดมากขึ้น

การคืนตัวของแป้งเปียกและสารละลายแป้งทำให้สารละลายมีความหนืดเพิ่มขึ้น มีลักษณะขุ่นและทึบแสง เกิดขึ้นส่วนที่ไม่ละลายในแป้งเปียกที่ร้อน เกิดการตกตะกอนของอนุภาคแป้งที่ไม่ละลาย

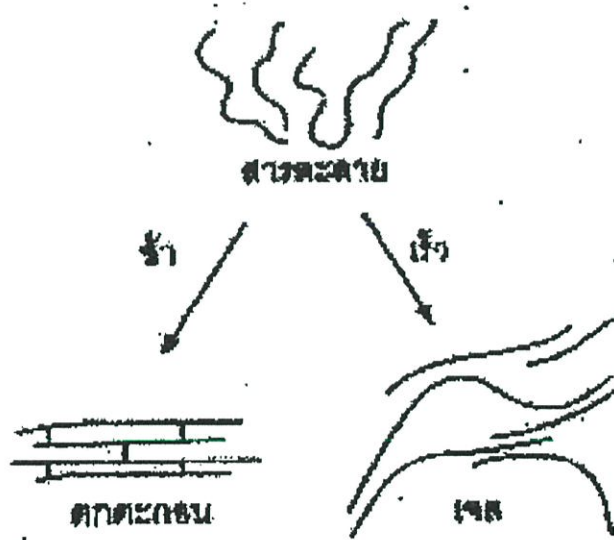
ทำให้เกิดเจลและโมเลกุลน้ำที่ถูกบีบออกมาออกเจล ในการคั้นตัวของแป้งเมื่อเกิดขึ้นอย่างช้าๆจะเกิดการตกตะกอนเมื่อเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วจะทำให้เกิดเจลขุ่น

การคั้นตัวของแป้งขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ ได้แก่ ชนิดของแป้งความเข้มข้นของแป้งกระบวนการให้ความร้อน กระบวนการให้ความเย็น อุณหภูมิ ระยะเวลา ความเป็นกรด – เบสของสารละลาย ปริมาณและขนาดของอะไมเลส อะไมโลเพคติน และองค์ประกอบทางเคมีอื่นๆ ในแป้ง ในสถานะที่อุณหภูมิต่ำและความเข้มข้นของแป้งสูง แป้งสามารถคั้นตัวได้ดี ในช่วง pH 5-7 แป้งสามารถคั้นตัวได้เร็วที่สุด สำหรับช่วง pH ที่สูงหรือต่ำกว่านี้แห้งจะคั้นตัวได้ช้าลง ในการชะลอการคั้นตัวของแป้งจะได้เกลือของ Monovalent anion และ Mation nitrate และ Urea

ปริมาณและขนาดของอะไมโลสมีความสำคัญต่อการคั้นตัวของแป้ง แป้งที่มีปริมาณอะไมโลสสูงจะเกิดการคั้นตัวมากและเร็วกว่าแป้งที่มีปริมาณอะไมโลเพคตินสูง อัตราในการคั้นตัวสูงสุด(การละลายต่ำที่สุด) ที่ Degree of polymerization ของอะไมโลสเท่ากับ 100-200 อัตราในการคั้นตัวจะลดลงเมื่อโมเลกุลของอะไมโลสยาวหรือสั้นกว่านี้ ในการทำให้อะไมโลสที่คั้นตัวกลับมาละลายได้อีกครั้งหนึ่งต้องใช้อุณหภูมิสูงถึง 100 ถึง 160 องศาเซลเซียส อะไมโลเพคตินจะมีผล ทำให้เกิดการคั้นตัวน้อยมาก ดังนั้นแป้งแต่ละชนิดจะมีอัตราการคั้นตัวที่แตกต่างกัน ในแป้งข้าวโพด ข้าวเหนียวจะมีอัตราการคั้นตัวของแป้งต่ำที่สุด เนื่องจากไม่มีอะไมโลสในแป้งข้าวโพดข้าวเหนียว สำหรับแป้งข้าวโพดและแป้งสาลีจะมีอัตราการคั้นตัวสูงกว่าแป้งมันฝรั่งและแป้งมันสำปะหลัง เนื่องจากในแป้งธัญพืชมีปริมาณอะไมโลสสูง (ประมาณ 28%) มีอะไมโลสโมเลกุลเล็ก และมีไขมันในปริมาณสูงทำให้เกิดการจับตัวเป็น Amylose-lipid complex



รูปที่ 2.11 การเกิดรีโทรเกรเดชัน [1]



รูปที่ 2.12 กลไกการคืนตัวของแป้ง [1]

การตรวจสอบความสามารถในการเกิด Retrogradation ของแป้งแต่ละชนิดอาจประมาณได้จากค่า setback ของแป้ง ซึ่งเป็นค่าผลต่างระหว่างความหนืดสุดท้ายกับความหนืดสูงสุด (Setback from trough) โดยเครื่อง Brabender หรือ Rapid visco analyzer นอกจากนี้การเกิด Retrogradation ของแป้งสามารถวัดได้โดยการใช้เครื่อง Differential scanning calorimeter โดยนำแป้งดิบไปหาค่าพลังงานที่ใช้ในการ

เกิดเจลลิตินในเซชัน (เอนทาลปี, $\Delta H_{\text{gelatinization}}$) แล้วนำแป้งที่ผ่านเจลลิตินในเซชันนี้ไปต้มไว้ในสภาวะที่กำหนดเพื่อให้เกิดรีโทรเกรเดชันโดยใช้อุณหภูมิต่างๆ กัน เช่น -20, 4, 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลาต่างกันตั้งแต่ 1 ถึง 21 วัน แล้วนำแป้งที่เกิดรีโทรเกรเดชันแล้วไปตรวจสอบด้วยเครื่อง DSC อีกครั้ง บันทึกค่าพลังงานที่ใช้ ($\Delta H_{\text{gelatinization}}$) % รีโทรเกรเดชันสามารถหาได้จากอัตราส่วนของเอนทาลปีของแป้งรีโทรเกรเดชันต่อ เอนทาลปีของแป้งเจลลิตินในเซชันสามารถหาได้จากอัตราส่วนของเอนทาลปีของแป้งรีโทรเกรเดชันต่อเอนทาลปีของแป้งเจลลิตินในเซชัน คือ

$$\% \text{ Retrogradation} = \frac{\Delta H_{\text{gelatinization}}}{\Delta H_{\text{Retrogradation}}}$$

นอกจากนี้การเกิดรีโทรเกรเดชันของแป้งจะทำให้เกิดการแยกตัวของน้ำจากเจล (Syneresis) ซึ่งจะสัมพันธ์กับคุณสมบัติ Freeze-thaw stability ของแป้ง โดยแป้งที่มีการเกิดรีโทรเกรเดชันได้ดีจะมีค่า Freeze-thaw stability ต่ำ ในขณะที่แป้งที่เกิดรีโทรเกรเดชันต่ำจะมีค่า Freeze-thaw stability สูง ดังนั้นการวัด Freeze-thaw stability จึงสามารถชี้ประเมินการเกิดรีโทรเกรเดชันของแป้งได้

2.2.5 แป้งมันสำปะหลัง [6]

แป้งมันสำปะหลังผลิตได้จากรากที่มีลักษณะคล้ายหัวของต้นมันสำปะหลังมีชื่อเรียกทางวิทยาศาสตร์ว่า *Manihot utilisima* ในภาษาอังกฤษจะเรียกแป้งมันสำปะหลังว่า Topioca starch , Cassava starch หรือ Monioc starch โดยมีองค์ประกอบดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 องค์ประกอบทางเคมีของแป้งมันสำปะหลัง [6-7]

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

พอสฟอรัส	0.01
อะไมโลส	16.4 – 17.0
อะไมโลเพกติน	83.0 – 83.6

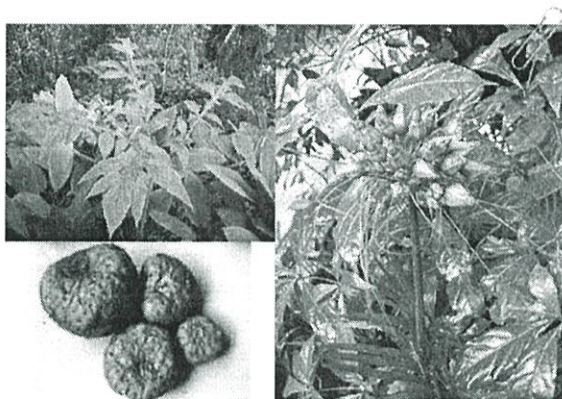
การผลิตแป้งมันสำปะหลัง ใช้วิธีการผลิตอย่างต่อเนื่อง คือ หัวมันสำปะหลังจะถูกลำเลียงส่งเข้าเครื่องจักรในแต่ละชุดติดต่อกันไปเรื่อยๆ โดยในการผ่านเครื่องจักรแต่ละชุดวัตถุดิบจะถูกแปรสภาพไปเรื่อยๆ โดยมีขั้นตอนเริ่มจากการทำความสะอาดหัวมัน การสับและการม่หัวมัน การแยกโปรตีนและน้ำยางหรือเมือก การแยกกากมัน การแยกโปรตีน ชั้นหลังการสกัดน้ำให้แห้ง และขั้นตอนสุดท้ายคือ การเป่าให้แห้ง แล้วทำให้เย็นจากนั้นค่อยบรรจุใส่ถุง

เม็ดแป้งมันสำปะหลังมีลักษณะคล้ายรูปถ้วยมีความยาวเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 ถึง 5 ไมครอน เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยโดยจำนวน (Number average diameter) เท่ากับ 20 ไมครอน เมื่อตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงโพลาไรซ์จะเห็นลักษณะกากบาทสีดำเรียกว่า Birefringence

ภายในเม็ดแป้งประกอบด้วยอะมิโลส และอะมิโลเพกติน ซึ่งมีการจัดเรียงตัวต่างกัน แบ่งได้เป็น 2 แบบคือ แบบแรก สายพอลิเมอร์ของอะมิโลสเรียงตัวขนานกันอย่างเป็นระเบียบมีอะมิโลสบางส่วนเรียงขนานกับส่วนที่เป็นสายตรงส่วนนอกของอะมิโลเพกติน และยึดเหนี่ยวสูง บริเวณนี้เรียกว่า Crystalline regions หรือ Micelles เป็นส่วนสำคัญที่ทำให้เกิดลักษณะ Birefringence ของเม็ดแป้ง Crystalline regions นี้มีความสามารถในการดูดน้ำ และพองตัวต่ำมาก ส่วนแบบที่สอง โมเลกุลเรียงตัวกันอย่างไม่เป็นระเบียบ แรงดึงดูดระหว่างสายพอลิเมอร์ของอะมิโลส และอะมิโลเพกตินต่ำกว่าแบบแรก บริเวณที่มีการจัดเรียงตัวของโมเลกุลแบบนี้เรียกว่า Amorphous regions เป็นส่วนที่ดูดน้ำได้ดี และพองตัวได้ง่าย

2.2.6 แป้งท้าวายม่อม [8]

แป้งท้าวายม่อม (Arrowroot starch) มีชื่อเรียกว่าต้นสาคุ เป็นพืชที่มีถิ่นกำเนิดในอเมริกาใต้ Arrowroot ในภาษาพื้นเมืองชื่อว่า Zulu มีพืชอีกชนิดหนึ่งที่มีลักษณะใกล้เคียงกับ Arrowroot คือ Amaranth มีภาษาพื้นเมืองว่า Sagu เนื่องจากพืชสองชนิดนี้มีลักษณะใกล้เคียงกันมาก เป็นไปได้ว่า เราเรียกชื่อ Arrowroot สลับกับ Sagu และไม่เกี่ยวข้องกันกับลำต้นปาล์มสาคุ (Metroxylon sagu)



รูปที่ 2.13 ต้นท้าวายม่อม [10]

ส่วนของต้นท้าวายม่อมที่เก็บแป้งจะเป็นส่วนราก (Rhizome) และเป็นส่วนที่ขยายพันธุ์ได้ ต้นท้าวายม่อมเป็นพืชล้มลุก อายุ 1 ปี ในฤดูร้อนใบจะแห้ง หยดการเจริญสามารถเก็บเกี่ยวได้เมื่อฝนตกใหม่ก็จะงอกเจริญเติบโตต่อไป ในกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลัง แต่ต้องผ่านขั้นตอนการล้างมากกว่า เพื่อหลีกเลี่ยงรสขมจากเปลือกนอกของหัวเมื่อบีบแป้งมีขนาด 13-70 ไมครอน ซึ่งใหญ่กว่าขนาดเมื่อบีบแป้งมันสำปะหลัง ซึ่งมีขนาด 5-35 ไมครอน สามารถสกัดแป้งได้ 25-30% ซึ่งองค์ประกอบทางเคมีร้อยละน้ำหนักแห้งของแป้งท้าวายม่อมเป็นดังตาราง 2.7

ตารางที่ 2.7 องค์ประกอบทางเคมีร้อยละน้ำหนักแห้งของแป้งท้าวายม่อม [11]

องค์ประกอบ	ปริมาณ (ร้อยละ)
ไขมัน	0.03
เส้นใยหยาบ	0.41
โปรตีน	0.05
คาร์โบไฮเดรต	99.36
เถ้า	0.15

เนื่องจากการผลิตในระดับอุตสาหกรรมมีในแถบหมู่เกาะ West Indies ส่วนในฟิลิปปินส์และจีน ยังเป็นแบบอุตสาหกรรมขนาดเล็ก การแยกแป้งยังใช้วิธีการตกตะกอน และการทำแห้งยังใช้วิธีการตากแดด หรือทำแห้งบนพื้นที่ให้ความร้อน ในประเทศไทยมีการปลูกต้นท้าวายม่อมกันทั่วไป แต่ยังไม่ใช่พืชหลักและยังไม่มีการผลิตแป้งในระดับอุตสาหกรรมท้องถิ่น มักเรียกกันว่า รากสาธุ

ลักษณะพิเศษของแป้งท้าวยายม่อม คือ มีเม็ดแป้งที่ใหญ่และมีความแข็งแรงของเม็ดสูง ทำให้มีอุณหภูมิของการเปลี่ยนสถานะ (Pasting temperature) สูง คุณสมบัติของแป้งท้าวยายม่อม แสดงไว้ในตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.8 สมบัติของแป้งท้าวยายม่อม [8]

สมบัติ	แป้งท้าวยายม่อม
ขนาดเม็ดแป้ง (ไมครอน)	13-70
ปริมาณอะมิโลส	18.0 – 24.5
ปริมาณอะมิโลเพกทิน	75.1 – 81.0
ขนาดอะมิโลส	3,430
Pasting temperature (°C)	76.20
Peak viscosity (RVU)	420
Final viscosity (RVU)	271
Trough viscosity (RVU)	188
Onset temperature (°C)	71.12
Peak temperature (°C)	76.06
Enthalpy ($\Delta H, J/g$)	16.60

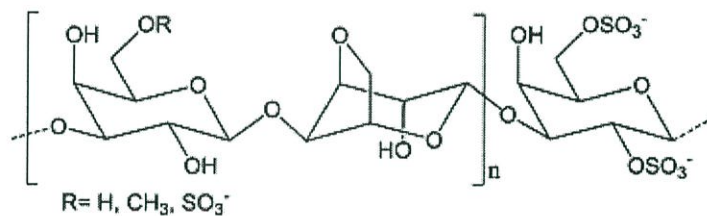
ตารางที่ 2.9 เปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีของแป้ง [6-9]

องค์ประกอบ(ร้อยละ) ชนิดของแป้ง	แป้งมันสำปะหลัง	แป้งท้าวยายม่อม
อะไมโลส	16.4 - 17.0	18.0 - 24.5
อะไมโลเพกทิน	83.0 - 83.6	75.4 – 81.0
ความชื้น	0.5	0.2
โปรตีน	0.3	0.05
คาร์โบไฮเดรต	85.0	99.3
ไขมัน	1.1	0.03
เถ้า	0.2	0.1
อื่นๆ	0.6	0.5

2.3 อะการ์ [12]

อะการ์หรือผงวุ้นเป็นสารสกัดที่ได้จากสาหร่ายทะเลสีแดง (Rhodophyceae) ที่นิยมใช้มาก คือ *Gelidium cartilagineum* , *Gracilaria confervoides* และ *Pteroclaia capillacea* ซึ่งสองชนิดแรกใช้ผลิตอะการ์ทางการค้า ประเทศที่ผลิตได้แก่ ญี่ปุ่น สเปน ชิลี และเกาหลี

อะการ์ประกอบด้วย Agarose และ Agaropectin ซึ่ง Agarose เป็นพอลิแซคคาไรด์ประกอบด้วย 1,4-linked 3,6-anhydro-L-galactose และ 1,3 link β -D-galactose เรียงสลับกันไป (รูปที่ 2.12) ส่วน Agaropectin เป็นพอลิแซคคาไรด์ซัลเฟตที่มีโครงสร้างเหมือนกันกับ Agarose แต่ 3,6-anhydro-L-galactose บางโมเลกุลถูกแทนที่ด้วยซัลเฟตประมาณ 5-8 %



รูปที่ 2.14 โครงสร้างของอะการ์ [13]

ผงวุ้นไม่ละลายในน้ำเย็น ละลายได้อย่างช้าๆ ในน้ำร้อน ละลายได้ดีที่ความเข้มข้นไม่เกิน 4% ในน้ำเดือดถ้าใช้ที่ความเข้มข้นสูงให้ Autoclave ที่ 120°C เพื่อช่วยในการละลายผงวุ้น มีความสามารถในการดูดน้ำได้ดีทำให้เกิดเจลได้ที่ความเข้มข้นต่ำเพียง 0.04% เกิดเจลได้โดยไม่ต้องอาศัยสารอื่นๆ ช่วยในการเกิดเจล ซึ่งการเกิดเจลแบบนี้เรียกว่า Physical gels โดยเมื่อโมเลกุลของ Agarose ละลายอยู่ในน้ำจะมีลักษณะเป็น Random coil และเมื่ออุณหภูมิลดลงใกล้อุณหภูมิเกิดเจล จะเกิดการจับกันของสายโซ่พอลิเมอร์ เจลที่ได้จะมีลักษณะเนื้อแข็งขุ่น สีเหลืองอ่อน เปราะแตกได้ง่าย (Brittle) เนื้อสัมผัสเป็นแบบ Juiciness และ Crunchy และเกิด Syneresis การเติมน้ำตาลหรือเดกซ์ตรินหรือผสมกับ Locust bean gum จะทำให้เกิดเจลที่แข็งขึ้นมี Gel strength และความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้น ลดการเกิด Syneresis แต่ถ้าเติมแป้งหรือโซเดียมอัลจินเนตจะให้ผลตรงกันข้าม คือทำให้เจลที่ได้มีความแข็งแรงลดลง เจลที่เกิดจากผงวุ้นทนความร้อนเพราะอุณหภูมิที่ทำให้เกิดเจล และจุดหลอมเหลวของเจลมีช่วงห่างกันมาก

การใช้อะการ์ในอุตสาหกรรมต่างๆ มีดังนี้

- Bakery industry ใช้อะการ์เพื่อแก้ปัญหาการหลอมตัวของน้ำตาลที่เคลือบ (Icing) การเกาะติดของ Icing กับวัสดุหุ้ม ลดการแตกหักและหลุดร่วงของ Icing
- Confectioneries เช่น ใช้ใน Jelly candies , Maringues และ Pudding
- Meat and fish product เช่น Canned tuna in jelly หรือ ผสมใน Fish extract ผง เพื่อใช้เตรียม Flavor และผลิต Soup
- Vegetarian and health products ใช้เป็น Bulk agent แทนแป้ง
- ใช้ทางเภสัชศาสตร์จะใช้เป็น Slow release ingredient เพราะอะการ์ไม่สามารถย่อยในร่างกายมนุษย์ได้เนื่องจากไม่มีเอนไซม์
- ใช้เป็น Tissue culture media ในการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อ

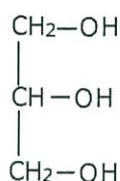
2.4 พลาสติไซเซอร์ (Plasticizers) และ พลาสติไซเซชัน (Plasticization) [14]

พลาสติไซเซอร์ เป็นสารเติมแต่งที่ผสมในพลาสติกเพื่อเพิ่มความนิ่ม ความสามารถในการยืดและความยืดหยุ่นแก่ชิ้นงาน พลาสติไซเซอร์ที่เติมจะช่วยให้แรงดึงดูดระหว่างโซ่พอลิเมอร์ลดลง เนื่องจากตัวมันเองจะเกิดพันธะกับโซ่พอลิเมอร์โดยพันธะไฮโดรเจนหรือแรงวันเดอวาล์ นอกจากนั้น จะช่วยให้โซ่พอลิเมอร์อยู่ห่างกันขึ้น ทำให้การพันกันระหว่างโซ่พอลิเมอร์ลดลง ทำให้โซ่พอลิเมอร์เป็นอิสระ สามารถเคลื่อนที่ผ่านซึ่งกันและกันเพิ่มขึ้น

พอลิเมอร์บางชนิดมีสมบัติแข็ง เปราะ ไม่อ่อนตัว และแตกได้ง่ายเมื่อได้รับแรงกระทำจึงทำให้ไม่เหมาะกับการใช้งานบางอย่างจนกว่าจะมีการทำให้พอลิเมอร์นั้นมีความอ่อนตัวเสียก่อน กระบวนการเพิ่มความอ่อนตัวให้กับพอลิเมอร์นั้นเรียกว่า พลาสติไซเซชัน (Plasticization) และสารเติมแต่งที่ใส่เข้าไปเพื่อเพิ่มความอ่อนตัวนี้เรียกว่า พลาสติไซเซอร์ (Plasticizer) ซึ่งพลาสติไซเซอร์จะเพิ่มความอ่อนตัวความสามารถในการหักงอได้ (Flexibility) และความสามารถในการยืดออก (Extensibility or Stretchability) ของพอลิเมอร์ โดยการทำให้อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) ลดลงต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง นอกจากนี้พลาสติไซเซอร์ยังช่วยเพิ่มความสามารถในการไหลแบบพลาสติกและลดความหนืดของพอลิเมอร์หลอมเหลว ทำให้กระบวนการขึ้นรูปทำได้ง่ายขึ้น

2.5 ก्लीเซอรอล (Glycol) [14]

กลีเซอรอลเป็นสารประกอบอินทรีย์พวกแอลกอฮอล์ชนิดหนึ่ง เป็นพอลิเมอร์ที่มีคาร์บอน 3 อะตอม สูตรเคมีคือ $C_3H_8O_3$ โครงสร้างโมเลกุลดังรูป 2.13 กลีเซอรอลเป็นของเหลวข้น ไม่มีสี มีจุดเดือด 290 องศาเซลเซียส ละลายน้ำได้ เป็นองค์ประกอบสำคัญของไขมันหรือน้ำมัน เรียกอีกชื่อว่า กลีเซอริน ใช้ในอุตสาหกรรมทำยา เครื่องสำอาง สบู่ เป็นต้น กลีเซอรอลเป็นสารลดความเป็นผลึก (Plasticized) และทำให้แข็งเกิดสถานะเหนียวหนืดสามารถขึ้นรูปได้



รูปที่ 2.15 โครงสร้างของกลีเซอรอล [14]

2.6 สารหล่อลื่น (lubricants) [15]

การนำสารหล่อลื่นมาใช้จะช่วยทำให้แรงเสียดทานระหว่างโมเลกุลลดลง ช่วยปรับปรุงสมบัติการไหลของพอลิเมอร์ และลักษณะการไหลให้ดีขึ้น ช่วยลดอุณหภูมิของกระบวนการลง ช่วยให้พอลิเมอร์หลอมเหลวรวมเป็นเนื้อเดียวกับองค์ประกอบอื่น ๆ และช่วยเพิ่มผลผลิต นอกจากนี้ยังมีหน้าที่ดังต่อไปนี้

- เม็ดพลาสติกที่มีสารลื่นอยู่ ทำให้การไหลในอุปกรณ์เป็อนวัสดุเป็นไปได้ด้วยดี
- ควบคุมความร้อนเนื่องจากแรงเสียดทานและอัตราการหลอมเหลว
- ลดความหนืดของหลอมเหลว และกำลังที่ต้องใช้ ทำให้เกิดการไหลได้อย่างรวดเร็ว
- ลดการบวมของคาย
- ลดการเสียดคุณภาพเนื่องจากความเฉือน (Shear degradation)
- ช่วยให้พอลิเมอร์หลุดออกจากอุปกรณ์ทางกระบวนการ เช่น คาย แม่พิมพ์
- เพิ่มความเงา
- ใช้เป็นสารหล่อลื่น

2.6.1 สารหล่อลื่นภายใน และสารหล่อลื่นภายนอก (Internal and External Lubricants)

สารหล่อลื่นภายในละลายได้ดีในพอลิเมอร์และทำหน้าที่เหมือนกับสารปรับสภาพพลาสติกจำนวนเล็กน้อยหรือเป็นพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ช่วยทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลแตกออก เกิดการไหลไปมาได้ จึงช่วยลดความหนืดของพอลิเมอร์หลอมเหลวได้ เช่น สารหล่อลื่นภายในที่ใช้กับพอลิไวนิลคลอไรด์ได้แก่ ไกลคอล มอนอสเตียเรท (Glycol monostearate , GMS) บิวทิลสเตียเรท (Butyl stearate) กลีเซอรอล ไดสเตียเรท (Glycerol distearate) ส่วนสารหล่อลื่นภายนอก จัดเป็นสารที่ละลายเข้ากันได้เพียงครั้งหนึ่งหรือไม่เข้ากันเลย (Semi-compatible or incompatible) กับพอลิเมอร์และบริเวณผิวโดยสามารถควบคุมอัตราได้ (Controlled rate) เพื่อที่จะปล่อยพอลิเมอร์ให้หลุดออกจากอุปกรณ์ในกระบวนการหรือเพื่อลดแรงเสียดทานและการยึดเกาะของผลิตภัณฑ์สุดท้ายในการนำไปใช้ได้จริง เช่น สารหล่อลื่นภายนอกที่ใช้กับพอลิไวนิลคลอไรด์ ได้แก่ พาราฟินส์แวกซ์ (Paraffin waxes) กรดสเตียริก (Stearic acid) และกรดมอนแทนนิค เอสเทอร์ (Montanic acid ester)

ตารางที่ 2.10 ลักษณะเฉพาะของสารหล่อลื่นภายในและสารหล่อลื่นภายนอก [15]

สารหล่อลื่นภายใน	สารหล่อลื่นภายนอก
1. วัสดุที่ใช้เป็นสารหล่อลื่นภายในต้องสามารถเข้ากันได้กับพอลิเมอร์	1. วัสดุที่ใช้เป็นสามหล่อลื่นภายนอกไม่สามารถเข้ากันได้กับพอลิเมอร์ที่ใช้
2. สารหล่อลื่นภายในทำให้เกิดแรงระหว่างโมเลกุล	2. สารหล่อลื่นภายนอกมีความสามารถในการละลายได้กับพอลิเมอร์ค่อนข้างต่ำ และเกิดเป็นฟิล์มโมเลกุลเดี่ยวอยู่ระหว่างอนุภาค พอลิเมอร์และผิวโลหะร้อน ทำให้ลดแรงยึดเกาะระหว่างโมเลกุลลง
3. หน้าที่หลักของสารหล่อลื่นภายในคือการลดความหนืดของหล่อลื่น ช่วยให้ พอลิเมอร์หล่อลื่นได้โดยไม่มีผลต่อการหล่อลื่นของสารประกอบ	3. หน้าที่หลักของสารหล่อลื่นภายนอกคือลดความเสียดทานระหว่างอนุภาคในกระบวนการหล่อลื่น ด้วยเหตุนี้จึงมีผลอย่างมากต่อเวลาที่ใช้การหล่อลื่นสูตรผสม
4. ภายหลังการหล่อลื่น สารหล่อลื่นภายในมีผลต่อสายโซ่ของพอลิเมอร์	4. ภายหลังการหล่อลื่น สารหล่อลื่นภายนอกจะอยู่ข้างผิวของพอลิเมอร์หล่อลื่นเหลว และมีผลในการเตรียมสารหล่อลื่นด้านผิวโลหะร้อนของอุปกรณ์ในกระบวนการ

2.7 แมกนีเซียม สเตียเรท [16-17]

Magnesium stearate หรือเรียกว่า octadecanoic acid, magnesium salt, เป็นสารสีขาว มีลักษณะเป็นผงของแข็งที่อุณหภูมิห้อง มีสูตรทางเคมีว่า $Mg(C_{18}H_{35}O_2)_2$ เป็นเกลือที่มี 2 equivalents ของ stearate (ประจุลบของกรด stearate) และมีประจุบวก (Mg^{2+}) Magnesium stearate มีจุดหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 88 องศาเซลเซียส ไม่ละลายน้ำ และปลอดภัยต่อมนุษย์ หากได้รับในปริมาณไม่เกิน 2500มก./กก. ต่อวัน

ในปี 1979 คณะอนุกรรมการองค์การอาหารและยา ของ GRAS substances(SCOGS)รายงานว่า ไม่มีหลักฐานที่ชี้ว่า Magnesium stearate เป็นอันตรายต่อสาธารณสุข เมื่อมีการใช้ในระดับที่ใช้ในปัจจุบัน หรือใช้อย่างระมัดระวังหรือในอนาคต

การเกิด

Magnesium stearate เกิดจากการปฏิกิริยาระหว่าง sodium stearate และ magnesium sulfate

การใช้งาน

Magnesium stearate มักใช้ในการทำ anti-adherent ในกระบวนการผลิตยาเม็ด แคปซูลและผงยา ในการนี้สารนี้ยังมีประโยชน์เพราะมีคุณสมบัติหล่อลื่นป้องกันไม่ให้ ส่วนผสมไปเกาะกับอุปกรณ์ ในระหว่างการผลิตซึ่งเป็นที่นิยมที่สุดในการใช้หล่อลื่นในการผลิตยา มีการศึกษาแสดงให้เห็นว่า Magnesium stearate อาจส่งผลกระทบต่อเวลาปล่อยของส่วนผสมที่ใช้งานในการผลิตยา ฯลฯ แต่ไม่ได้หมายความว่า จะช่วยลดการดูดซึมโดยรวมของส่วนผสมเหล่านั้น เป็นสารเติมแต่งอาหารหรือสารช่วยทางเภสัชกรรม e หมายเลขของมันคือ E470b

Magnesium stearate ยังใช้ในการผูกน้ำตาลในการผลิตลูกกวาดและยังเป็นส่วนผสมของสูตรทารกด้วย Magnesium stearate ในรูปแบบผงบริสุทธิ์ เป็นสารอันตราย สามารถระเบิดได้

Magnesium stearate เป็นผลิตภัณฑ์ที่ผลิตจากทั้งน้ำมันจากสัตว์และพืช โดยบางส่วนของที่เสริมโภชนาการจะมาจากผักและผลไม้

Magnesium stearate เป็นส่วนประกอบหลักของ bathtub rings เมื่อถูกผสมโดยน้ำและสบู่

Magnesium stearate และ calcium stearate ผสมกันจะออกมาเป็นของแข็งสีขาวที่ไม่ละลาย ที่รู้จักในชื่อ สบู่

คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพ

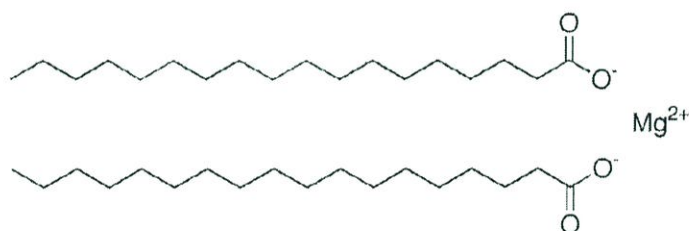
- มีลักษณะเป็นของแข็ง สีขาว
- ไม่มีกลิ่น ไม่มีรส
- จุดหลอมเหลว 88 ° C
- ละลายได้ในน้ำเย็นเล็กน้อย

ผลกระทบต่อสุขภาพเฉียบพลัน

- เป็นอันตรายในกรณีของการบริโภค
- เป็นอันตรายในกรณีที่ถูกผิวหนัง (ระคายเคือง) จากตา (ระคายเคือง) จากการสูดดม

ผลกระทบต่อสุขภาพเรื้อรัง

- เป็นสารก่อมะเร็ง



รูปที่ 2.16 โครงสร้างแมกนีเซียม สเตียเรท [18]

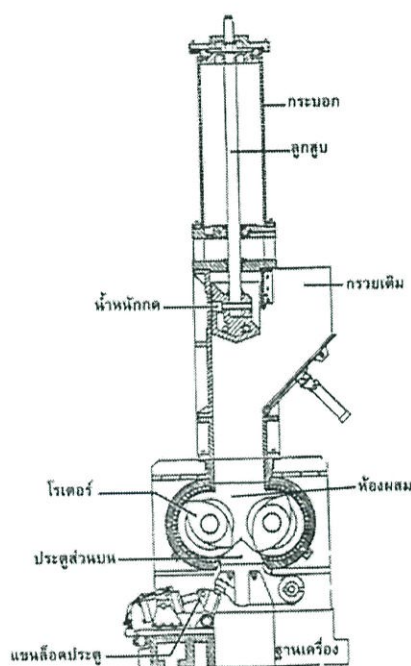
2.8 การคอมปาวด์ (Compounding) [19]

การคอมปาวด์พลาสติก เป็นการผสมสารเติมแต่งชนิดต่างๆ กับพลาสติก โดยการหลอมพลาสติกและทำการนวดผสมองค์ประกอบต่างๆ เข้าด้วยกัน

เครื่องผสมแบบปิด (Internal Mixer)

การคอมปาวด์พลาสติกในเครื่องผสมแบบปิด (internal mixer) อาศัยการหมุนของโรเตอร์ (rotor) ในห้องผสม (mixing chamber) เพื่อผสมสารเคมีกับพลาสติกเข้าด้วยกัน ลักษณะของโรเตอร์จะ

ไม่ราบเรียบเหมือนผิวของลูกกลิ้ง ทำให้ในขณะที่หมุนเกิดแรงเสียดภายในของผสมสูงกว่า ส่งผลให้การกระจายตัวของสารเคมีในพลาสติกดีกว่า และใช้เวลาในการผสมน้อยกว่ามาก กล่าวคือ ใช้เวลาในการผสมประมาณ 4 ถึง 5 นาที เท่านั้น ลักษณะของเครื่องผสมแบบปิด แสดงดังรูปที่ ส่วนประกอบหลักของเครื่อง คือ โรเตอร์สองชุดหมุนสวนทางกันและสามารถปรับความเร็วได้ ห้องผสมซึ่งโดยทั่วไปปรับอุณหภูมิโดยใช้น้ำมันร้อนและน้ำไหลหมุนเวียน น้ำหนักกดซึ่งใช้ในการเปิดห้องผสมขณะเดินเครื่อง ประตูและระบบล๊อคใช้ในการเปิดให้คอมปาวด์ออกจากห้องผสม เป็นต้น



รูปที่ 2.17 เครื่องผสมแบบปิด (Internal mixer) [19]

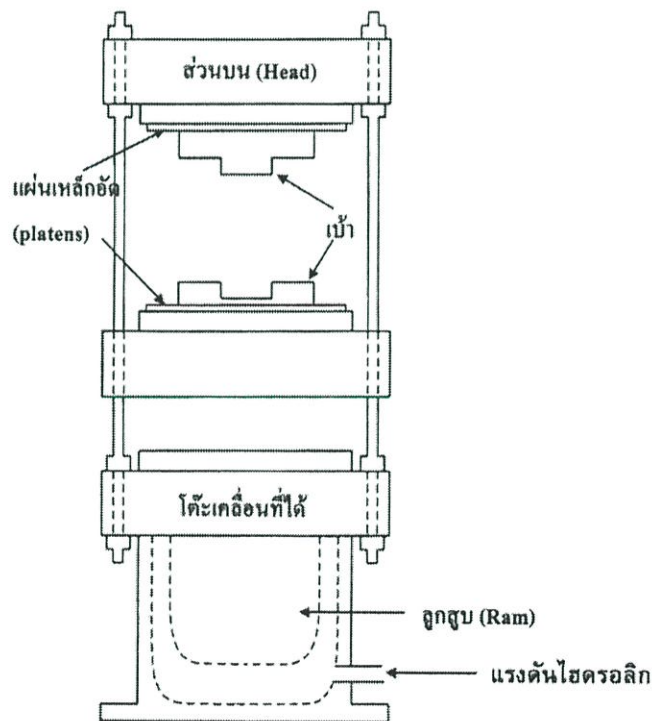
ข้อดีของการผสมโดยใช้เครื่องผสมแบบปิด คือ เตรียมได้คอมปาวด์เร็ว ผู้ใช้ไม่จำเป็นต้องมีทักษะสูงมากนัก ไม่มีการสูญเสียวัสดุเนื่องจากการผสมกระทำในภาชนะปิด และขนาดของเบชในการผสมแต่ละครั้งค่อนข้างแน่นอน ดังนั้นการคอมปาวด์โดยใช้เครื่องนี้ จะทำได้โดยมีประสิทธิภาพสูงกว่ากรณีเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง

ข้อเสียของการผสมแบบนี้ คือ ไม่สามารถมองเห็นการผสม ทำความสะอาดห้องผสมได้ยาก โดยเฉพาะการผสมสี นอกจากนี้ กรณีการผสมเป็นแบทใหญ่ มีความจำเป็นที่จะต้องใช้เครื่องมืออื่นช่วยในการเตรียมตัวอย่างก่อนนำไปขึ้นรูป เช่น ใช้เครื่องผสมสองลูกกลิ้งบีบให้เป็นแผ่น ก่อนที่จะนำแผ่น

คอมปาวด์ไปทำเป็นเม็ดโดยใช้เครื่องบด หรือ เครื่องทำเม็ดพลาสติก เพื่อให้สามารถนำเม็ดพลาสติกไปใช้แปรรูปโดยกระบวนการเอ็กทรูด หรือ กระบวนการฉีดพลาสติกเข้าเบ้า ข้อเสียอื่น ๆ ของการผสมแบบปิด คือ มีโอกาสที่สารเคมีบางตัว ติดภายในห้องผสม ทำให้ปริมาณของสารเคมีชนิดนั้นในคอมปาวด์ต่ำกว่าที่ต้องการ

2.9 กระบวนการอัด (Compression molding process) [19]

เทคนิคการอัด ใช้เครื่องอัดเบ้าที่ไม่มีความซับซ้อน ส่วนประกอบหลักของเครื่อง คือ แผ่นอัดเหล็ก (platens) จำนวนสองชุด ซึ่งแผ่นหนึ่งสามารถเคลื่อนที่ขึ้นลงได้ อีกแผ่นจะยึดติดกับที่ ทำให้สามารถทำการปิด และเปิดเบ้าได้เนื่องจากเบ้าถูกยึดติดกับแผ่นเหล็กทั้งสองแผ่นนี้ ส่วนประกอบอื่นๆ คือ อุปกรณ์ให้ความร้อน ระบบไฮดรอลิก และอาจมีอุปกรณ์หล่อเย็น ลักษณะเครื่องที่ใช้แปรรูปพลาสติกโดยการอัด แสดงดังรูปที่ 2.15

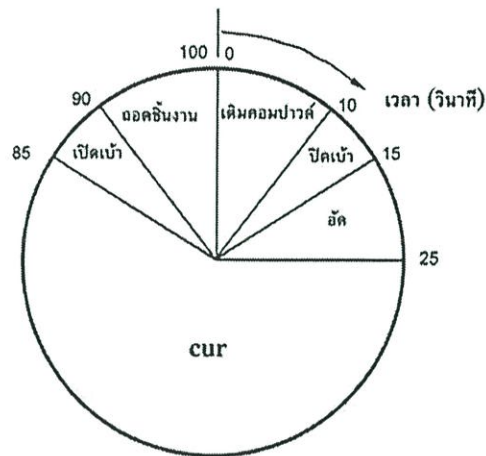


รูปที่ 2.18 ลักษณะของเครื่องอัด (Compression molding) [19]

เครื่องอัดเบ้าส่วนใหญ่จะเคลื่อนที่แผ่นเหล็กอัดขึ้นลง โดยใช้แรงขับเคลื่อนจากไฮดรอลิก แต่มีเครื่องอัดบางชนิดที่เคลื่อนที่โดยใช้แรงลม (Pneumatically operation) นอกจากทำหน้าที่ให้แผ่นเหล็กอัดจะเคลื่อนที่ขึ้นลงแล้ว ระบบขับเคลื่อนจะทำหน้าที่ในการให้แรงดันในการอัด ซึ่งเครื่องขนาดเล็กที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ จะให้แรงดันอยู่ในช่วง 5-100 ตัน ส่วนเครื่องที่ใช้ในระดับอุตสาหกรรม จะให้แรงดันอยู่ในช่วง 10-4000 ตัน ขนาดของแรงดันขึ้นกับขนาดของแผ่นเหล็กอัดมีขนาดอยู่ในช่วง 8 ตารางนิ้ว ถึง 5 ตารางฟุต

การแปรรูปโดยการอัด เริ่มจากการยัดเบ้าติดกับแผ่นเหล็กอัด (Platens) ทั้งสองแผ่น แล้วให้ความร้อน ถ้าพอลิเมอร์ทำการแปรรูปเป็นเทอร์โมเซต ตั้งตามอุณหภูมิการเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยง (Cross-linking reaction) ตามชนิดของเทอร์โมเซตที่ใช้ โดยทั่วไปอุณหภูมิของเบ้าสำหรับการอัดเทอร์โมเซต อยู่ในช่วง 140-200°C หลังจากนั้นเติมคอมปาวด์ที่ได้ผสมกับสารเติมแต่งชนิดต่างๆ และได้เตรียมให้อยู่ในลักษณะผงหรือเม็ด โดยเติมปริมาณของคอมปาวด์ให้เหมาะสมกับขนาดของชิ้นงาน หลังจากนั้นปิดเบ้า โดยใช้แรงอัดที่เหมาะสม เนื่องจากคอมปาวด์ร้อนขึ้นจะเกิดการอ่อนตัว และการใช้แรงอัดทำให้วัสดุเกิดการไหลเข้าในช่องว่าง (Cavities) ของเบ้า ในขณะเดียวกันจะเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยง หลังจากปล่อยให้เกิดปฏิกิริยาเวลาระยะเวลาหนึ่ง (ตามระยะเวลาของการสุกเทอร์โมเซตนั้นๆ) เปิดเบ้า เอาชิ้นงานออกขณะร้อน เติมคอมปาวด์ลงในเบ้าเพื่อเริ่มต้นวัฏจักรใหม่

ตัวอย่างวัฏจักรของการแปรรูปพลาสติกโดยการอัด แสดงดังรูปที่ ซึ่งเป็นการผลิตพลาสติกแผ่น (sheet molding compound , SMC) พบว่าในการอัดแต่ละครั้ง ใช้เวลาประมาณ 100 วินาที เวลาส่วนใหญ่ (ประมาณ 60 วินาที) สูญเสียไปเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงของเรซิน (curing process) ดังนั้นการลดเวลาของวัฏจักรการผลิตชิ้นงานชนิดนี้ น่าจะพิจารณาเทคนิคในการลดเวลาในการเชื่อมโยงเป็นพิเศษ



รูปที่ 2.19 วัฏจักรการอัดแผ่นพลาสติก (Sheet molding compound) [19]

2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

H. Tian และคณะ [20] ได้เตรียมฟิล์มจากอนุพันธ์ของโปรตีนถั่วเหลืองผสมกับผงวุ้นโดยใช้กลีเซอรอล 33% เป็นพลาสติกไซเซออร์ นำมาขึ้นรูปโดยใช้วิธี Solution casting และวิธี Thermo-molding คือการนำสารผสมที่อยู่ในรูปสารละลายเทใส่แม่พิมพ์ที่มีอุณหภูมิ 140 °C ทำการทดสอบสมบัติเชิงกลและโครงสร้างของฟิล์มในแง่ของอัตราส่วนของผงวุ้น/โปรตีนและวิธีการขึ้นรูป ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่ามีพันธะไฮโดรเจนเกิดขึ้นระหว่างโมเลกุลของโปรตีนถั่วเหลืองกับผงวุ้น และพบว่าฟิล์มหล่อแบบ (Casting film) มีพื้นผิวที่เป็นเนื้อเดียวกันมากกว่าฟิล์มที่ใช้แม่พิมพ์ (Molding film) ทำให้ฟิล์มหล่อแบบนั้นมีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่าฟิล์มที่ใช้แม่พิมพ์ จากโครงสร้างร่างแหสามมิติของผงวุ้นจึงทำให้ค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) ของฟิล์มหล่อแบบผสมเพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณผงวุ้นที่เพิ่มขึ้นส่งผลทำให้ฟิล์มมีความหนาแน่นการเชื่อมโยงเพิ่มมากขึ้นทำให้ได้ค่าความแข็งแรงดึงที่แตกต่างกัน

Y. Wu และคณะ [21] ได้ศึกษาเทอร์โมพลาสติกสตาบิลฟิล์มที่ทำจากแป้งมันฝรั่งและนำไปทดสอบเพื่อที่จะนำไปใช้งานในด้านบรรจุภัณฑ์สำหรับอาหาร โดยมีกลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซออร์และมีการเติมผงวุ้น ทำการขึ้นรูปแบบหล่อ (Casting) จากเครื่องฟูเรียร์ ทรานฟอร์ม อินฟราเรด สเปกโตรสโกปียืนยันว่าแป้งและผงวุ้นสามารถเข้ากันได้ และพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลยังคงมีอยู่ จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของคอมโพสิตฟิล์มที่ 15% ของผงวุ้น แสดงให้เห็น

ว่าผงวุ้นกับแป้งเป็นเนื้อเดียวกัน จากเทคนิค XRD ซึ่งให้เห็นว่า คอมโพลิตฟิล์มมีโครงสร้างเป็นอสัณฐาน ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 50% การเติมผงวุ้นช่วยเพิ่มความแข็งแรงดึงจาก 5.33 เป็น 11.76 MPa ส่วนที่ความชื้นสัมพัทธ์สูง (75%) การเติมผงวุ้นเพิ่มความแข็งแรงดึงจาก 0.84 เป็น 3.36 MPa การเติมผงวุ้น 5% เพิ่มการดึงยืดจาก 32.5% เป็น 58.33% การซึมผ่านของไอน้ำลดลง สรุปได้ว่าการเติมผงวุ้นช่วยปรับปรุงโครงสร้างของฟิล์มแป้ง และให้สมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น

D. Phan และคณะ [22] ได้ศึกษาการทำแผ่นฟิล์มที่ทำมาจากผงวุ้น (Agar) แป้ง มันสำปะหลัง แป้งข้าวเจ้า หรือแป้งข้าวเหนียว ได้ทำการศึกษารายละเอียด และทดสอบสมบัติต่างๆ เพื่อนำมาใช้งานด้านบรรจุภัณฑ์ หรือการเคลือบ ทำการเตรียมแผ่นฟิล์มโดยใช้วิธีการหล่อแบบ (Casting) โดยได้ทำการทดสอบความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำ โดยทำการเปรียบเทียบแผ่นฟิล์มที่ได้เตรียมไว้ พบว่าความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำขึ้นอยู่กับความชื้นสัมพัทธ์ โดยการซึมผ่านของไอน้ำในแผ่นฟิล์มมีค่าเปลี่ยนแปลงและเกือบคงที่เมื่อค่าความชื้นสัมพัทธ์มากกว่า 85% ได้ทำการทดสอบโดยพบว่า เมื่อทำให้แผ่นฟิล์มเปียก ทำให้เกิดการไล่องค์ประกอบของไขมันระเหยออกไปจากพื้นผิวของแผ่นฟิล์มในขณะที่ทำให้ฟิล์มแห้ง นอกจากนี้ฟิล์มที่ทำมาจากผงวุ้นและแป้งมันสำปะหลังมีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่า มีความโปร่งแสง มีความเป็นเนื้อเดียวกัน ยืดหยุ่น ส่วนแป้งข้าวเจ้าและแป้งข้าวเหนียวนั้นมีความเปราะและมีค่าการต้านทานแรงดึงที่ต่ำกว่า เมื่อทำการตรวจสอบโครงสร้างภายในพบว่าแผ่นฟิล์มของผงวุ้นและแป้งมันสำปะหลังมีโครงสร้างที่มีสมบัติที่ดี เหมาะที่จะนำไปใช้ในอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์ หรือใช้เป็นแผ่นฟิล์มเคลือบผิวแทนแป้งข้าวเจ้าและแป้งข้าวเหนียว

Y. Freile-Pelegrin และคณะ [23] ได้ศึกษาการสลายตัวของแผ่นฟิล์มที่ทำจากผงวุ้นที่ขึ้นรูปด้วยวิธี Solution casting ซึ่งถูกควบคุมให้อยู่ในสภาพอากาศร้อนชื้นและได้รับแสงเป็นเวลา 90 วัน เพื่อตรวจสอบพฤติกรรมการย่อยสลายได้ทางชีวภาพ โดยนำตัวอย่างแผ่นฟิล์มที่ได้รับแสงเป็นเวลา 15, 30, 45, 60 และ 90 วัน นำมาทดสอบสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน สมบัติทางโครงสร้างและสัณฐานวิทยา โดยใช้การทดสอบแรงดึง, Attenuated Reflectance Infrared- spectroscopy (ATR-FTIR), X-ray Diffraction (XRD) และ Environmental Scanning Electron- Microscope (ESEM) พบว่ากระบวนการย่อยสลายด้วยแสงและความร้อน มีความสัมพันธ์กับปริมาณความชื้นซึ่งทำให้สมบัติเชิงกลของผงวุ้นลดลงในระยะแรก (30-45วัน) เนื่องจากเกิดการลดลงของขนาดโมเลกุลในวุ้น รวมถึงการ

ลดลงของจำนวนหมู่ซัลเฟต ส่งผลต่อความเป็นผลึกของผงวุ้น โดยทำให้เกิดการหดตัว ซึ่งนำไปสู่การเสียดสภาพ และเร่งให้เกิดการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ นอกจากนี้สภาพอากาศมีบทบาทสำคัญต่อการย่อยสลายของแผ่นฟิล์มที่ทำจากผงวุ้นด้วย

D. Phan และคณะ [24] ทำการเตรียมฟิล์มที่บริโกลได้ ซึ่งมีส่วนผสมของผงวุ้น (AG) , แป้งมันสำปะหลัง (CAS) และ Arabinoxylan (AX) แล้วนำมาศึกษาโครงสร้าง การต้านการซึมผ่านของ ความชื้น และสมบัติเชิงกล จากเครื่องอิเล็กทรอนิกส์แบบส่องกราดแสดงให้เห็นว่าการกระจายตัวและการแยกวัฏภาคกัน โดยเฉพาะในโครงสร้างของฟิล์มผสมของ AG-CAS และ AG-AX แต่โครงสร้างของฟิล์มผสมของ CAS-AX นั้นเป็นเนื้อเดียวกัน ในสถานะที่มีความชื้นสูง (84% และ 99%) การเพิ่มขึ้นของปริมาณ AX ในฟิล์ม CAS สามารถปรับปรุงสมบัติการต้านการซึมผ่านของความชื้นได้ ในทางตรงกันข้ามการซึมผ่านไอน้ำ (WVP) ของฟิล์ม AG ลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อ AX ถูกนำมาใช้เป็นสารเติมแต่ง ในทางกลับกันฟิล์มผสมของ AG-CAS พบว่าปริมาณ CAS ที่เพิ่มขึ้นเป็นการเพิ่มความสามารถในการเปียกที่พื้นผิวดีขึ้น แต่ถ้าวัดปริมาณ CAS ลงทำให้การดึงยึดและความแข็งแรงดึงของฟิล์มเพิ่มขึ้น สมบัติเชิงกลของฟิล์มจากผงวุ้นมีแนวโน้มลดลงเมื่อมีการใส่ CAS หรือ AX จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าผงวุ้นสามารถเป็นเมทริกซ์ที่ยึดติดภายในโมเลกุลได้ดีมาก ซึ่งสามารถเพิ่มสมบัติเชิงกลของฟิล์มที่เป็นพอลิแซ็กคาไรด์ชนิดอื่นได้ด้วย

วัชรီ คุณวิวัฒน์ และคณะ [25] งานวิจัยนี้เป็นการปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (Thermoplastic starch, TPS) โดยใช้แป้งชนิดต่างๆ ได้แก่ แป้งข้าวเจ้า แป้งมันสำปะหลัง แป้งท้าวยายม่อม หรือแป้งถั่วเขียว ในอัตราส่วนต่างๆ ดังนี้ 100:0 75:25 50:50 25:75 และ 0:100 โดยเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชเตรียมได้จากการผสมด้วยเครื่องผสมแบบระบบปิด (Internal mixer) แล้วขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดขึ้นรูป (Compression molding) จากนั้นทำการศึกษาการวัดสี พบว่าเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งท้าวยายม่อมมีความสว่างมากที่สุด และเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวเจ้ามีสีออกสีแดงมากที่สุด สมบัติเชิงกลโดยรวมที่สูงที่สุดพบได้ในเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งถั่วเขียว สำหรับแป้งผสมนั้นเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งผสมของแป้งข้าวเจ้าและแป้ง ถั่วเขียวแสดงสมบัติเชิงกลโดยรวมดีที่สุด ส่วนการทดสอบการดูดซับน้ำ ผลของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่มีความสามารถในการดูดซับน้ำมากที่สุดและน้อยที่สุด คือ เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวเจ้า และเทอร์โมพลาสติก

สตาร์ชจากแป้งถั่วเขียว ตามลำดับ นอกจากนี้เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งทุกสูตรแสดงให้เห็นว่ามีเสถียรภาพทางความร้อนที่สูงขึ้น สำหรับการย่อยสลายทางชีวภาพด้วยการฝังดิน เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่มีสมบัติโดยรวมดีที่สุด คือ เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งถั่วเขียว

นิศานาด หลิมศิริวงษ์ และคณะ [26] งานวิจัยนี้เป็นการปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวเหนียว โดยการใช้แป้งข้าวเหนียว และทำการผสมกับผงวุ้นในปริมาณ 10% , 20% และ 30% และผสมกับเส้นใยฝ้ายในปริมาณ 5% , 10% , และ 15% และใช้ผงวุ้นผสมกับเส้นใยฝ้ายที่มีปริมาณ 10% ในอัตราส่วน 10:0 8:2 6:4 2:8 0:10 เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของ เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวเหนียว โดยเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชเตรียมได้จากการผสมด้วยเครื่องระบบปิด (Internal mixer) จากนั้นทำการทดสอบสมบัติต่างๆ ได้แก่ สมบัติทางกายภาพ สัณฐานวิทยา สมบัติเชิงกล สมบัติการดูดซับน้ำ และการย่อยสลาย จากการวัดสีพบว่า เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวเหนียวผสมผงวุ้น 30% มีสีออกแดงมากที่สุด และมีความสว่างน้อยที่สุด สมบัติเชิงกลโดยรวมที่สูงที่สุดพบได้ในเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวเหนียวผสม ผงวุ้นและเส้นใยฝ้ายในอัตราส่วน 4:6 ส่วน การทดสอบการดูดซับน้ำผลของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวเหนียวที่มีความสามารถในการดูดซับน้ำได้น้อยที่สุด คือ เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวเหนียวผสมผงวุ้น 10 % และเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวเหนียวผสมเส้นใยฝ้าย 10% ตามลำดับ จากเทอร์โมแกรมพบว่าอุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัวของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวเหนียวที่ปรับปรุงด้วยผงวุ้นและเส้นใยฝ้ายในอัตราส่วนต่างๆ เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน สำหรับการย่อยสลายทางชีวภาพด้วยการฝังดิน พบว่าเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวเหนียว มีการย่อยสลายเร็วที่สุด และจากการศึกษานี้เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่มีสมบัติโดยรวมที่ดีที่สุด คือ เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวเหนียวผสมผงวุ้นและเส้นใยฝ้ายในอัตราส่วน 4:6

บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

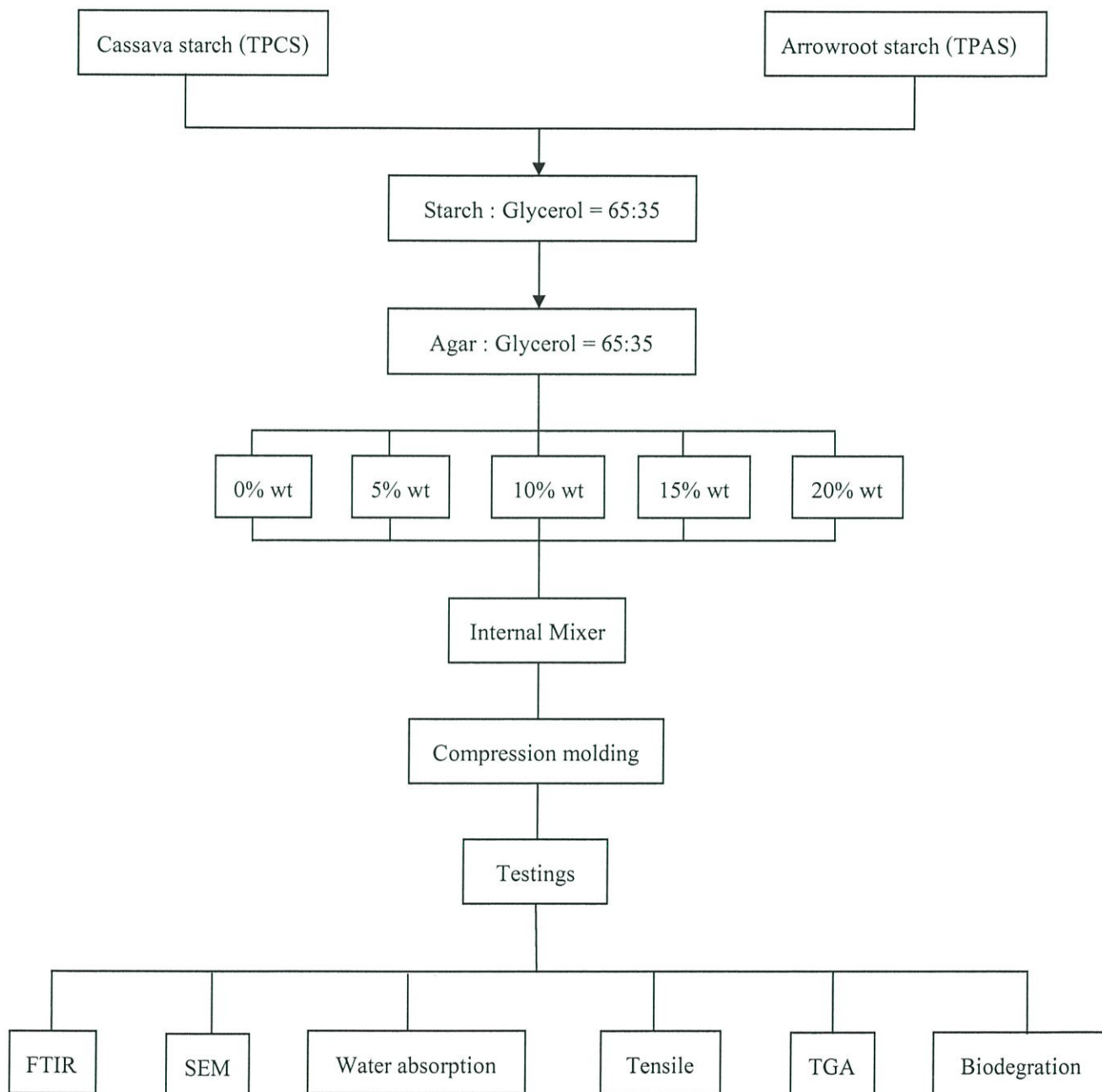
3.1 สารเคมี

1. แป้งมันสำปะหลัง ตรา ปลาไทยห้าดาว จาก บจก. อี.ที.ซี.เอียบตงจัน จำกัด
2. แป้งท้าวขาม่อม ตรา ปลาไทยห้าดาว จาก บจก. อี.ที.ซี.เอียบตงจัน จำกัด
3. อะการ์ ชนิดแข็ง เกรดอาหาร ตรา นางเงือก จาก หุ่นส่วนจำกัด พัฒนาสินเอ็นเตอร์ไพรส์
4. กลีเซอรอล (Glycerol) เกรดการค้า จาก บริษัท Lab System
5. แมกนีเซียม สเตียเรท (Magnesium Stearate) CODE NO. CA1305 จาก บริษัท เคมีภัณฑ์
6. น้ำมันซิลิโคน

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในโครงการพิเศษ

1. เครื่องผสมระบบปิด (Internal mixer) : Brabender รุ่น PL 2000/PL 2001
2. เครื่องอัดขึ้นรูป (Compression Molding) : Model MGLP-20 AT M/C NO.228
3. เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal Testing Machine) : LLYOD INSTRUMENT LTD.
รุ่น LR 5K
4. เครื่องทดสอบทางความร้อน (Thermogravimetric Analyzer, TGA) : Parkin Elmer Instrument
Co.,Ltd รุ่น Pyris I TGA HT
5. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) : LEO รุ่น
1455VP
6. กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscope, OM) : Hollywood International LTD. รุ่น
Nikon AFX-IIA
7. เครื่องอินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Fourier transform infrared spectrophotometer, FTIR) :
Perkin Elmer รุ่น FTIR Spectrum GX
8. เครื่องชั่งแบบละเอียด (เทคนิค 4 ตำแหน่ง)
9. เครื่องตัดชิ้นงานรูปคัมเบล
10. แม่พิมพ์ประกบ
11. เกรียง
12. ถูมือกันความร้อน
13. เดชเคเตอร์
14. ตู้อบ
15. แปรง

แผนผังขั้นตอนการดำเนินงาน



รูปที่ 3.1 แผนภาพแสดงขั้นตอนการดำเนินงาน

3.3 วิธีทำการทดลอง

ตอนที่ 1 การเตรียมแป้งและอะการ์

- 1.1 ชั่งน้ำหนัก แป้งทั้งสองชนิดตามอัตราส่วนต่อกลีเซอรอล คือ 65:35 จากนั้นคนให้เข้ากัน และหมักทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง
- 1.2 ชั่งน้ำหนักอะการ์ตามอัตราส่วนต่อกลีเซอรอล คือ 65:35 จากนั้นคนให้เข้ากันและหมักทิ้งไว้ 24 ชั่วโมงในภาชนะที่ปิดสนิท

ตอนที่ 2 การผสมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช

- 2.1 ผสมโดยใช้เครื่องผสมแบบปิด (Internal mixer) ในสถานะอุณหภูมิผสมที่ 140 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบเท่ากับ 40 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที
- 2.2 ล้างเครื่องผสมแบบปิดให้สะอาด โดยใช้แปรงทองเหลืองขัดทำความสะอาดก่อนใช้งาน
- 2.3 เปิดเครื่องผสมแบบปิด และตั้งค่าอุณหภูมิ ความเร็วรอบ ให้เรียบร้อย รอจนเครื่องมีสถานะตามที่ตั้งค่าไว้
- 2.4 นำแป้ง และอะการ์ที่หมักค้างคืนไว้มาชั่งน้ำหนักตามอัตราส่วนดังตารางที่ 3.1 โดยน้ำหนักรวมทั้งหมดในการผสมต่อครั้งเท่ากับ 30 กรัม
- 2.5 ชั่งน้ำหนักแมกนีเซียม สเตียเรท 2% wt ต่อน้ำหนักรวมทั้งหมดเท่ากับ 0.6 กรัม
- 2.6 นำส่วนผสมทั้งหมดเทลงในเครื่องผสมแบบปิด ผสมเป็นเวลา 5 นาที
- 2.7 จากนั้นนำเทอร์โมพลาสติกที่ผสมได้ (แป้งผสม) นำมาปั่นเป็นก้อนและกดให้แบนขณะร้อน เพื่อสะดวกในการขึ้นรูป

ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนในการผสมแป้ง กับอะการ์ ที่ผ่านการหมักด้วยกลีเซอรอลแล้ว

แป้ง (กรัม)	อะการ์ (กรัม)	เปอร์เซ็นต์	แมกนีเซียม สเตียเรท (กรัม)
แป้งมันสำปะหลัง 30.0	0.0	0%	0.6
แป้งมันสำปะหลัง 28.5	1.5	5%	
แป้งมันสำปะหลัง 27.0	3.0	10%	
แป้งมันสำปะหลัง 25.5	4.5	15%	
แป้งมันสำปะหลัง 24.0	6.0	20%	
แป้งท้าวยายหม่อม 30.0	0.0	0%	0.6
แป้งท้าวยายหม่อม 28.5	1.5	5%	
แป้งท้าวยายหม่อม 27.5	3.0	10%	
แป้งท้าวยายหม่อม 25.5	4.5	15%	
แป้งท้าวยายหม่อม 24.0	6.0	20%	

ตอนที่ 3 การขึ้นรูปฟิล์มเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช

- 3.1 ขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มโดย เครื่องกดอัด (Compression molding) ที่สภาวะขึ้นรูป ได้แก่ อุณหภูมิ ที่ 140 องศาเซลเซียส ความดัน 150 บาร์ เวลากดอัด 300 วินาที เวลาในการหล่อเย็น 300 วินาที
- 3.2 เปิดเครื่องกดอัด และตั้งค่าเครื่องตามสภาวะการขึ้นรูป
- 3.3 นำแป้งผสมที่ได้จากเครื่องผสมแบบปิด และทำให้เป็นก้อนขณะร้อน มาวางบนแผ่นใส ที่ทา น้ำมันชลิโคนบางๆ
- 3.4 จากนั้นประกบแป้งผสมด้วยแผ่นใส และนำไปวางลงบนแผ่นแม่พิมพ์เหล็กประกบ
- 3.5 นำแม่พิมพ์ที่มีแป้งผสมอยู่ เข้าเครื่องกดอัด เป็นเวลา 300 วินาที และหล่อเย็นเป็นเวลา 300 วินาที
- 3.6 นำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์

3.4 การทดสอบ

3.4.1 การวิเคราะห์ด้วยสเปกโทรสโกปีชนิดแสงอินฟราเรด

การศึกษาหาหมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่อง FTIR ทำได้โดยการใช้เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) โดยใช้ฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลัง และแป้งท้าวยายม่อมในสูตรต่างๆ ทำได้โดยการนำฟิล์มไปบดกับ KBr แล้วนำไปอัดแผ่น สภาวะที่ใช้คือ $400-4000\text{ cm}^{-1}$ โดยสแกน 16 ครั้งต่อตัวอย่าง ความละเอียดที่ใช้คือ 4 cm^{-1}

3.4.2 สัณฐานวิทยา

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope , SEM) ได้นำมาใช้ศึกษาลักษณะพื้นผิวของฟิล์มแป้ง นำชิ้นงานไปหักในไนโตรเจนเหลวโดยแช่เป็นเวลา 7 วินาที ทำการเตรียมตัวอย่างโดยนำมาเคลือบด้วยทอง และนำไปเข้าเครื่อง SEM โดยการศึกษาสัณฐานวิทยาของฟิล์มแป้งก่อนและหลังการปรับปรุงสมบัติด้วยอะการ

3.4.3 การทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

วิเคราะห์หาโครงสร้างของผลึกขนาดอนุภาคและองค์ประกอบทางเคมีของแป้งมันสำปะหลัง และแป้งท้าวยายม่อมที่เตรียมได้ โดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ตกกระทบหน้าผลึกของฟิล์มแป้งที่เตรียมได้ที่มุมต่างๆเพื่อระบุวิฤภาคองค์ประกอบนำมาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-ray diffractometer โดยการเตรียมฟิล์มแป้งที่ความหนา 200 ไมโครเมตร และขนาดของมุมตกกระทบ (2θ) ใช้ในช่วง $3-60^\circ$ ด้วยอัตราเร็ว $1^\circ/\text{นาที/มิลลิแอมป์/โวลต์}$ โดยใช้โปรแกรม OriginPro 8 คำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของฟิล์มแป้ง

3.4.4 การทดสอบสมบัติทางความร้อน

ศึกษาอุณหภูมิการสลายทางความร้อน (Onset degradation temperature) และเปอร์เซ็นต์การลดลงของน้ำหนัก (%Weight loss) ของฟิล์มแป้งด้วยเครื่องเทอร์โมกราวิเมตริกแอนาไลเซอร์ (Thermogravimetric analyzer, TGA) ทำได้โดยการชั่งตัวอย่างประมาณ 16 มิลลิกรัม และนำมา

วิเคราะห์ด้วยเครื่อง TGA ภายใต้สภาวะบรรยากาศไนโตรเจน อุณหภูมิที่ให้อยู่ช่วง 50-600 องศาเซลเซียส และอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ (Heating rate) ที่ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที

3.4.5 การทดสอบสมบัติเชิงกล

ทำการทดสอบสมบัติต่างๆ ตามมาตรฐาน ดังแสดงใน ตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 มาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์มแป้งกล้วยที่เตรียมได้

สมบัติ	มาตรฐานที่ใช้ทดสอบ	หน่วยที่รายงาน
ความแข็งแรงดึง (Tensile strength)	ASTM D 882	MPa
มอดูลัส (Young' s modulus)	ASTM D 882	MPa
% การดึงยืด ณ จุดขาด	ASTM D 882	%

ความแข็งแรงดึง มอดูลัส และเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด

ทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบสมบัติเชิงกล(Universal Testing Machine) โดยทำการทดสอบด้วยมาตรฐาน ASTM D882 ชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบจะมีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาด 100×15 มิลลิเมตร² จำนวน 5 ชิ้นงานของแต่ละสูตร โดยทำการควบคุมสภาวะของชิ้นงานที่จะใช้ทดสอบที่อุณหภูมิ 23 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ 75% ทดสอบตามสภาวะดังนี้

Test speed : 50 mm./min

Gauge length : 50 mm.

Load cell : 100 N

ค่าความแข็งแรงดึง มอดูลัส และเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด สามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\text{ความแข็งแรงดึง (Tensile Strength)} = F/A$$

$$\text{มอดูลัส (Young's modulus)} = (F/A) / [(L-L_0)/L_0]$$

$$\text{เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด (\% Elongation at break)} = [(L-L_0)/L_0] \times 100$$

3.4.6 การดูดซับความชื้น (Water absorption)

ทำการอบฟิล์มแป้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง นำฟิล์มแป้งมาชั่งน้ำหนัก (ภายใต้สภาวะนี้การระเหยของพลาสติกไฮเซออร์จะยังไม่เกิดขึ้น) จากนั้นนำมาเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 37

องศาเซลเซียส และเก็บตัวอย่างในภาชนะปิดที่บรรจุด้วยน้ำกลั่น ซึ่งให้ความชื้นสัมพัทธ์ 90 – 100 % ตามมาตรฐาน ASTM E 104 แล้วทำการชั่งน้ำหนักภายหลังการดูดซับน้ำทุกวัน โดยสามารถคำนวณหาปริมาณการดูดซับน้ำได้จากสมการนี้

$$W_a = ((W_c - W_o) / W_o) * 100$$

เมื่อ W_a คือ เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำ

W_c คือ น้ำหนักหลังการดูดน้ำ

W_o คือ น้ำหนักก่อนการดูดซับน้ำ

3.4.7 การทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดิน

ตัดฟิล์มแป้งที่ต้องการทดสอบเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 100×15 มิลลิเมตร² ฝังในดินลึกประมาณ 10 เซนติเมตร โดยควบคุมความชื้นในดินให้อยู่ในช่วง 5-7% ฝังชิ้นงานเป็นระยะเวลาประมาณ 4 วัน จากนั้นทำการเก็บตัวอย่างต้องทำด้วยความระมัดระวังเนื่องจาก ตัวอย่างอาจจะกระจายไปกับดิน แล้วนำชิ้นงานมาทดสอบสมบัติเชิงกลต่อไป

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเตรียมและทดสอบสมบัติต่างๆของฟิล์มเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งมันสำปะหลัง (TPCS) และแป้งท้าวยายม่อม (TPAS) โดยใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์และทำการปรับปรุงสมบัติของฟิล์มเทอร์โมพลาสติกสตาโรซด้วยอะการในปริมาณต่างๆ จากนั้นทดสอบสมบัติต่างๆ ได้แก่ การศึกษาหมู่ฟังก์ชัน (FTIR) การวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) สัณฐานวิทยา (SEM) สมบัติเชิงกล สมบัติการดูดซับความชื้น สมบัติทางความร้อน (TGA) และสมบัติการย่อยสลาย

จากการศึกษาสมบัติต่างๆของฟิล์ม TPCS และ TPAS ที่เตรียมได้ให้ผลดังนี้

4.1 การศึกษาหมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่อง FTIR

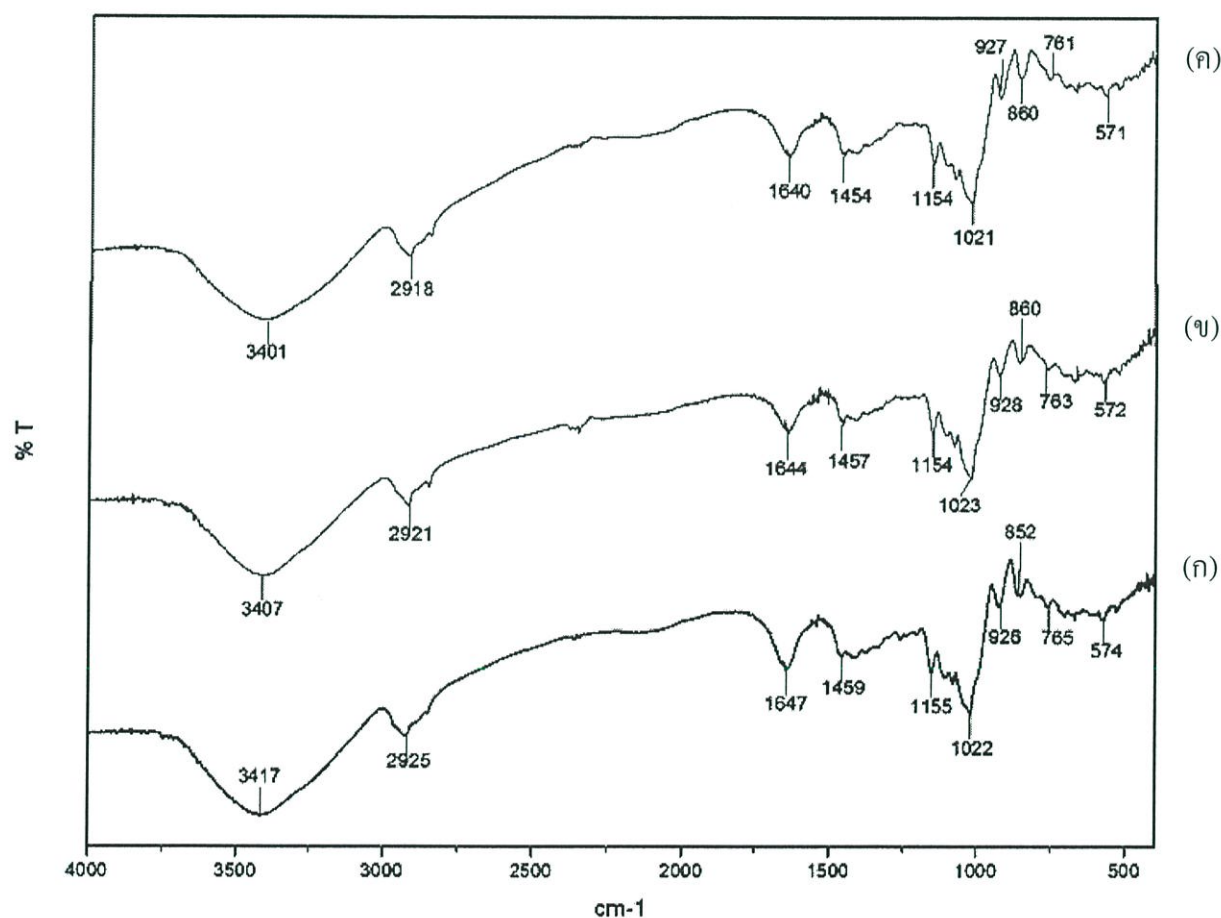
การศึกษาหมู่ฟังก์ชันทำได้โดยการใช้เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) โดยใช้ฟิล์ม TPCS และ TPAS ที่ผสมอะการในปริมาณต่างๆ พบว่า พิกที่ปรากฏมีลักษณะคล้ายกันดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงเลขคลื่นและลักษณะการสั่นของพิกที่ปรากฏ [27]

เลขคลื่น (cm^{-1})	ลักษณะการสั่น
3200-3600	O-H stretching
2800-3000	C-H stretching
1647	H-O-H stretching (Bounded water)
1445-1485	O-H bending
1000-1300	C-O-C stretching

1000-1200	C-O-H bending
980-1225	S=O stretching
570-710	C-H bending

4.1.1 การเปรียบเทียบอินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มเทอร์โมพลาสติกสตาเรชจากแป้งมันสำปะหลัง (TPCS) ที่ปริมาณอะการ์ต่างๆ



รูปที่ 4.1 อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์ม TPCS ที่ปรับปรุงด้วยอะการ์ในปริมาณต่างๆ (ก) 0% (ข) 10% และ (ค) 20%

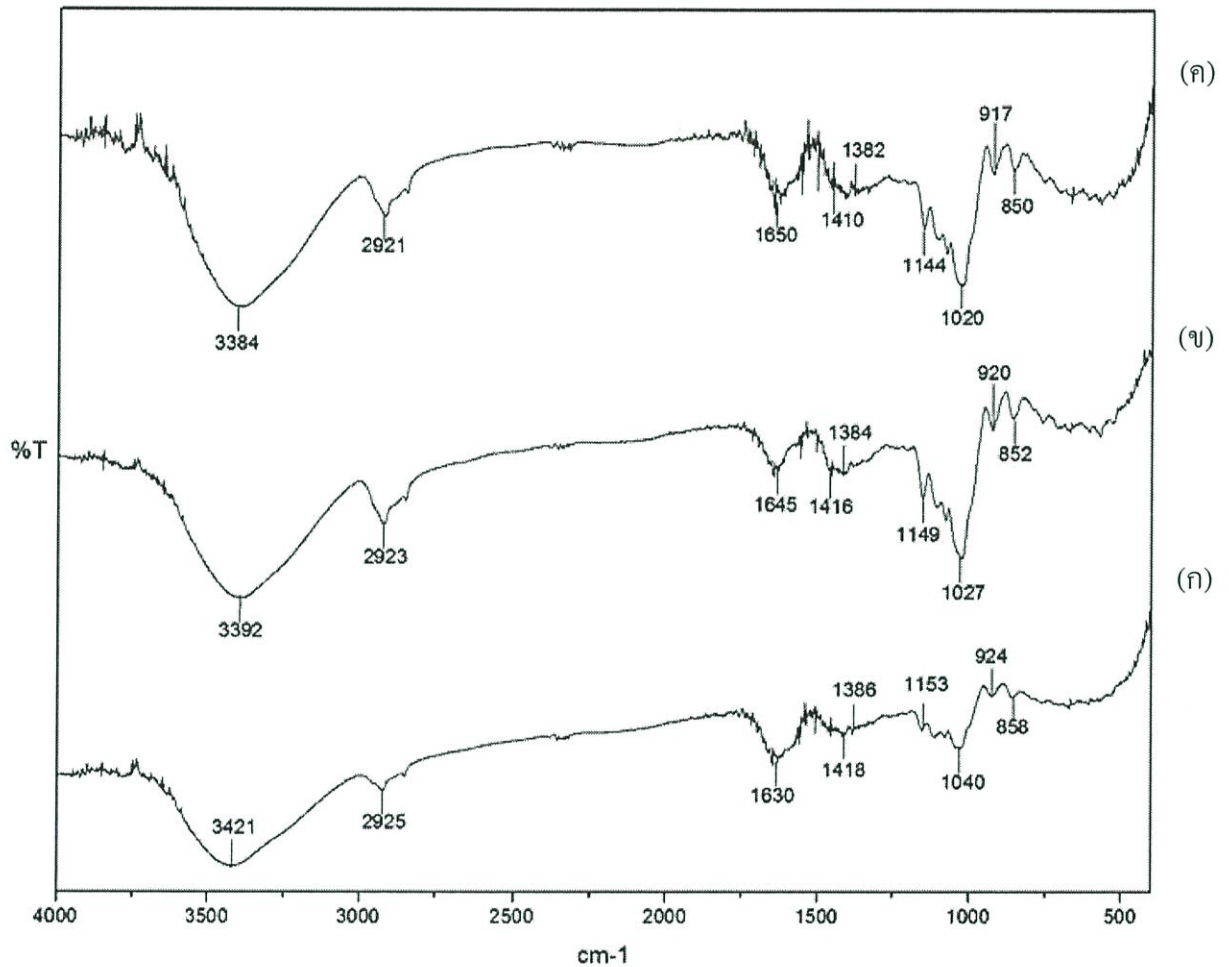
จากรูปที่ 4.1 แสดงสเปกตรัมของร้อยละการส่งผ่านแสงของฟิล์ม TPCS ที่ปริมาณอะการ์ต่างๆ พบพีคที่ตำแหน่ง 3417 cm^{-1} เป็นลักษณะการสั่นของ O-H stretching แถบพีคที่ตำแหน่ง 2925 cm^{-1} เป็นลักษณะการสั่นของ C-H stretching แถบพีคที่ตำแหน่ง 1647 cm^{-1} เป็นลักษณะการสั่นของ

O-H ของโมเลกุลน้ำที่อยู่ในแป้ง แถบพีคที่ตำแหน่ง 1459 cm^{-1} เป็นลักษณะการสั่นของ O-H bending ของแป้ง แถบพีคที่ตำแหน่ง 1155 cm^{-1} เป็นลักษณะการสั่นของ C-O-H bending ของแป้ง แถบพีคที่ตำแหน่ง 1022 cm^{-1} เป็นลักษณะการสั่นของ C-O-C stretching ของแป้ง

เมื่อเปรียบเทียบสเปกตรัมจากรูปที่ 4.1 พบว่า รูปที่ 4.1 (ข)-(ค) พีคที่ตำแหน่ง 3417 cm^{-1} ซึ่งแสดงลักษณะการสั่นแบบ O-H stretching เคลื่อน (Shift) ไปที่เลขคลื่นลดลง และยังพบว่าพีคตำแหน่ง 1459 cm^{-1} ซึ่งเกิดจากการการสั่นของ O-H bending มีการเลื่อนตำแหน่ง (Shift) ไปที่เลขคลื่นลดลงเช่นเดียวกัน ซึ่งผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ A.Pawlak and M.Mucha และ K.Aoi et al [28-29] โดยงานวิจัยทั้งสองได้กล่าวว่าการเปลี่ยนแปลงของพีคที่มีการเคลื่อนที่ไปยังเลขคลื่นที่ลดลงนี้แสดงให้เห็นว่าเกิดอันตรกิริยาทางเคมีเกิดขึ้น แสดงให้เห็นถึงพันธะไฮโดรเจนเกิดขึ้นใหม่ระหว่างแป้งและอะการ์ที่เติมลงไป

จากงานวิจัยของนิศานาถ หลิมศิริวงษ์ และคณะ [26] พบว่าอะการ์แสดงพีคที่ 1644 cm^{-1} ซึ่งเกิดจากการสั่นแบบ O-H stretching เมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์ม TPCS พบว่าพีคนี้ซ้อนทับกับพีค 1647 cm^{-1} ซึ่งแสดงการสั่นของ O-H stretching ของโมเลกุลน้ำที่อยู่ในแป้ง จึงทำให้ไม่พบพีคใหม่ที่เกิดจากการเติมอะการ์ลงไปในฟิล์ม TPCS

4.1.2 การเปรียบเทียบอินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์จากแป้ง ท้าวายม่อม (TPAS) ที่ปริมาณอะคาร์ต่างๆ



รูปที่ 4.2 อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์ม TPAS ที่ปรับปรุงด้วยอะคาร์ในปริมาณต่างๆ (ก) 0% (ข) 10% และ (ค) 20%

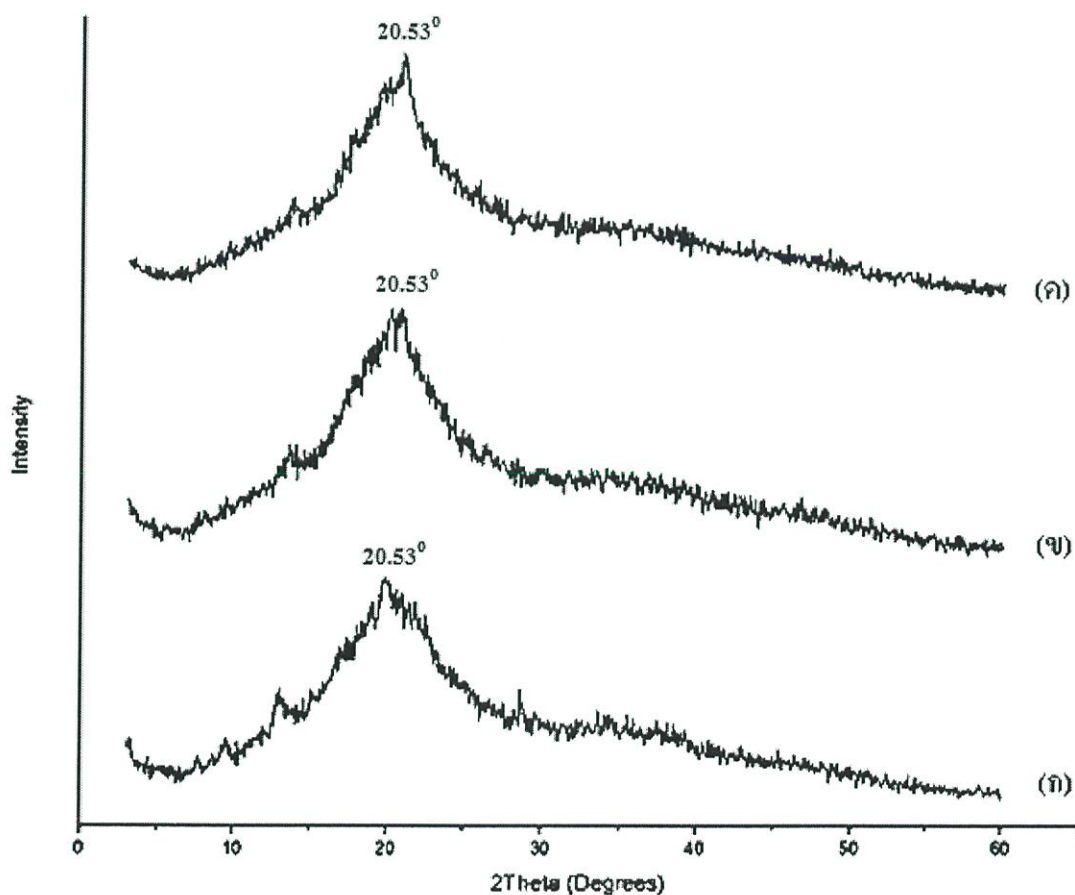
จากรูปที่ 4.2 แสดงสเปกตรัมของฟิล์ม TPAS ที่ปรับปรุงด้วยอะคาร์ในปริมาณต่างๆ พบพีคที่ตำแหน่ง 3421 cm^{-1} เป็นลักษณะการสั่นของ O-H stretching แถบพีคที่ตำแหน่ง 2925 cm^{-1} เป็นลักษณะการสั่นของ C-H stretching แถบพีคที่ตำแหน่ง 1630 cm^{-1} เป็นลักษณะการสั่นของ H-O-H ของโมเลกุลน้ำที่อยู่ในแป้ง แถบพีคที่ตำแหน่ง 1418 cm^{-1} เป็นลักษณะการสั่นของ O-H bending ของแป้ง แถบพีคที่ตำแหน่ง 1153 cm^{-1} เป็นลักษณะการสั่นของ C-O-H bending ของแป้ง แถบพีคที่ตำแหน่ง 1040 cm^{-1} เป็นลักษณะการสั่นของ C-O-C stretching ของแป้ง

เมื่อพิจารณาดำแหน่งสเปกตรัมของฟิล์ม TPAS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอะคาร์ในปริมาณต่างๆ พบว่า รูปที่ 4.2 (ข)-(ค) พีคที่ 3421 cm^{-1} ซึ่งแสดงลักษณะการสั่นแบบ O-H stretching และพีคตำแหน่ง 1418 cm^{-1} ซึ่งแสดงการสั่นของ O-H bending มีการเลื่อนตำแหน่ง (Shift) ไปที่เลขคลื่นลดลงแสดงถึงการเกิดพันธะไฮโดรเจนขึ้นใหม่เช่นเดียวกับกรณีของฟิล์ม TPCS และไม่พบพีคใหม่เกิดขึ้นจากการเติมอะคาร์ลงในฟิล์ม TPAS เช่นกัน

4.2 การวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD)

เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction technique) เป็นเทคนิคที่อาศัยหลักการเลี้ยวเบนและการกระเจิงของรังสีเอ็กซ์ภายในเนื้อวัสดุ เครื่องมือที่ใช้ คือ เครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน (X-ray diffraction; XRD) โดยขนาดมุมตกกระทบที่ใช้ (2θ) ในช่วง $3-60^\circ$ ด้วยอัตราเร็ว 1° / นาที และนำดิฟแฟรกโตแกรมที่วิเคราะห์ได้มาเปรียบเทียบกับเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของฟิล์ม TPCS และ TPAS ที่ปรับปรุงสมบัติโดยใช้อะคาร์ในปริมาณต่างๆ ให้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.3-4.4

4.2.1 การวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD) ของฟิล์ม TPCS ที่ปรับปรุงสมบัติโดยใช้อะคาร์ในปริมาณต่างๆ



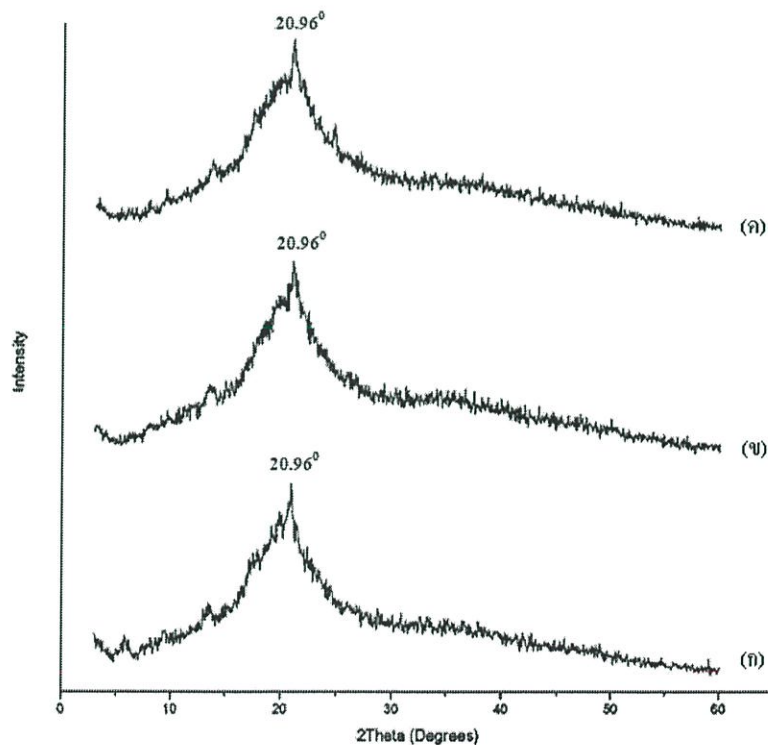
รูปที่ 4.3 ดิฟแฟรกโตแกรมของฟิล์ม TPCS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอะคาร์ในปริมาณต่างๆ

(ก) 0%, (ข) 10% และ (ค) 20%

จากรูปที่ 4.3 (ก) – (ค) แสดงดิฟแฟร็กโตแกรมของฟิล์ม TPCS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอะคาร์ในปริมาณต่างๆ พบว่าโครงสร้างผลึกของฟิล์ม TPCS มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบ V_H - type [30] พบพีคของผลึกของฟิล์ม TPCS ที่ปรับปรุงด้วยอะคาร์ 0%, 10% และ 20% ที่มุม 2θ ที่ประมาณ 20°

เมื่อนำผลที่วิเคราะห์ได้มาคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก พบว่าค่าเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของฟิล์ม TPCS ที่ปรับปรุงด้วยอะคาร์ 0%, 10% และ 20% มีค่าเท่ากับ 26.90%, 28.80% และ 30.42% ตามลำดับ ดังนั้นค่าเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น เมื่อปรับปรุงสมบัติด้วยอะคาร์ในปริมาณมากขึ้น เนื่องจากเกิดการจัดเรียงตัวกันเป็นผลึกมากขึ้นและอาจเกิดผลึกใหม่เพิ่มมากขึ้นระหว่างแป้งมันสำปะหลังกับอะคาร์จากกระบวนการขึ้นรูปของฟิล์ม TPCS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอะคาร์ที่ปริมาณต่างๆ

4.2.2 การวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD) ของฟิล์ม TPAS ที่ปรับปรุงสมบัติโดยใช้อะคาร์ในปริมาณต่างๆ



รูปที่ 4.4 ดิฟแฟร็กโตแกรมของฟิล์ม TPAS ที่ปรับปรุงด้วยอะคาร์ในปริมาณต่างๆ (ก) 0%, (ข) 10% และ (ค) 20%

ดิฟแฟรกโตแกรมของฟิล์ม TPAS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอะคาร์ในปริมาณต่างๆ (รูปที่ 4.4) พบว่าโครงสร้างผลึกของฟิล์ม TPAS มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบ V_H -type พบพีคของผลึกของฟิล์ม TPAS ที่ปรับปรุงด้วยอะคาร์ 0%, 10% และ 20% ที่มีมุม 2θ ที่ประมาณ 21°

เมื่อนำผลที่วิเคราะห์ได้มาคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก พบว่าค่าเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของฟิล์ม TPAS ที่ปรับปรุงด้วยอะคาร์ 0%, 10% และ 20% มีค่าเท่ากับ 27.25%, 29.41% และ 31.72% ตามลำดับ ดังนั้นค่าเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น จากการเพิ่มปริมาณอะคาร์ลงในฟิล์ม TPAS เนื่องจากเกิดการจัดเรียงตัวกันเป็นผลึกมากขึ้นและอาจเกิดผลึกใหม่เพิ่มมากขึ้นระหว่างแป้งมันสำปะหลังกับอะคาร์จากกระบวนการขึ้นรูปของฟิล์ม TPAS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอะคาร์ที่ปริมาณต่างๆ

ตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของฟิล์ม TPCS และ TPAS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอะคาร์

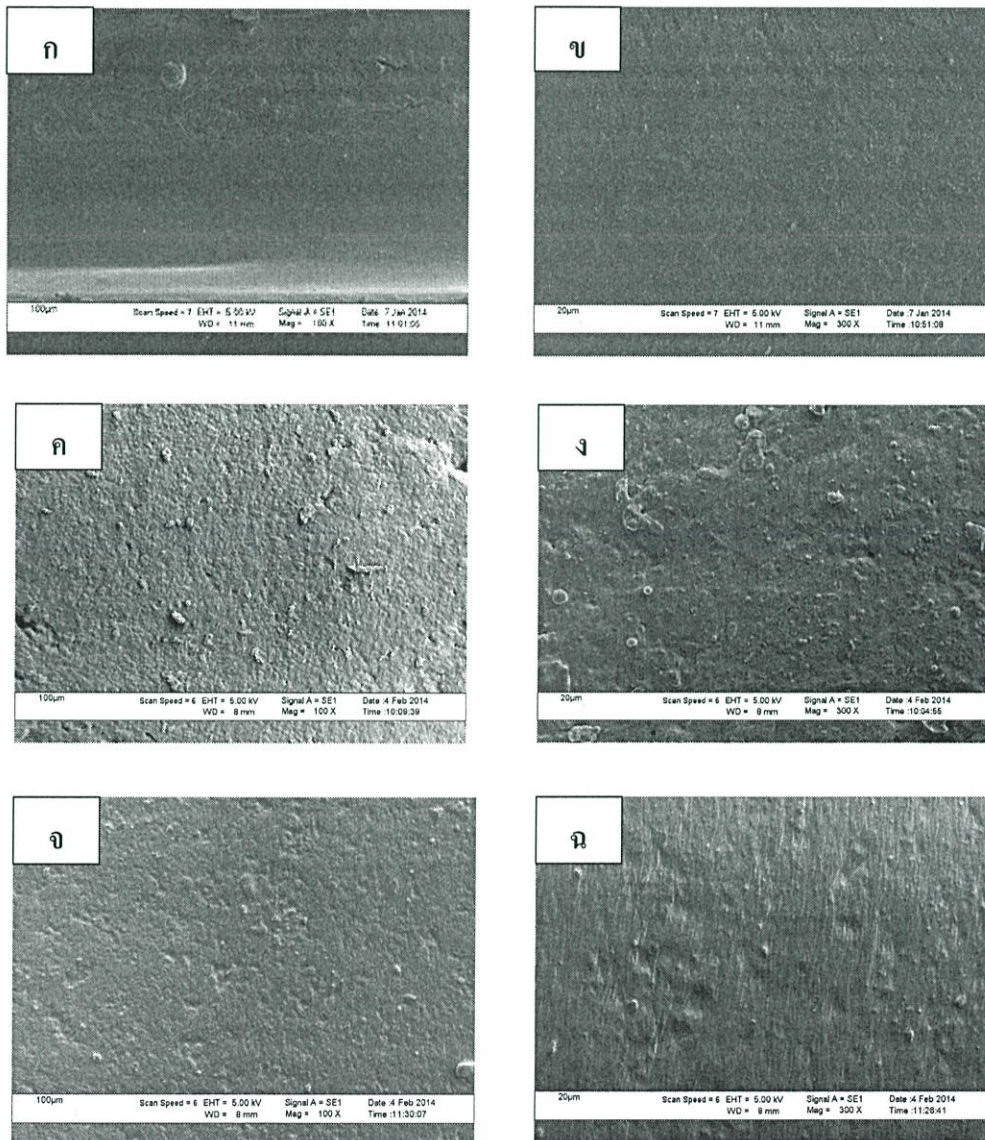
ชนิดของฟิล์ม	เปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก (%)		
	0%	10%	20%
TPCS	26.90	28.80	30.42
TPAS	27.25	29.41	31.72

จากตารางที่ 4.2 พบว่าเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของฟิล์ม TPCS และ TPAS มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณอะคาร์เพิ่มขึ้น อาจเกิดจากการจัดเรียงตัวกันเป็นผลึกมากขึ้น จึงทำให้เปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกมากขึ้น แต่พบว่าเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของฟิล์ม TPCS และ TPAS มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

4.3 การทดสอบสัณฐานวิทยา

เทคนิคการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) ได้นำมาใช้ในการศึกษาลักษณะพื้นผิวระหว่างวัฏภาค (Interfacial surface) ของฟิล์ม TPCS และ TPAS โดยศึกษาสัณฐานวิทยาของฟิล์มแป้นทั้งสองชนิดที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอะคาร์

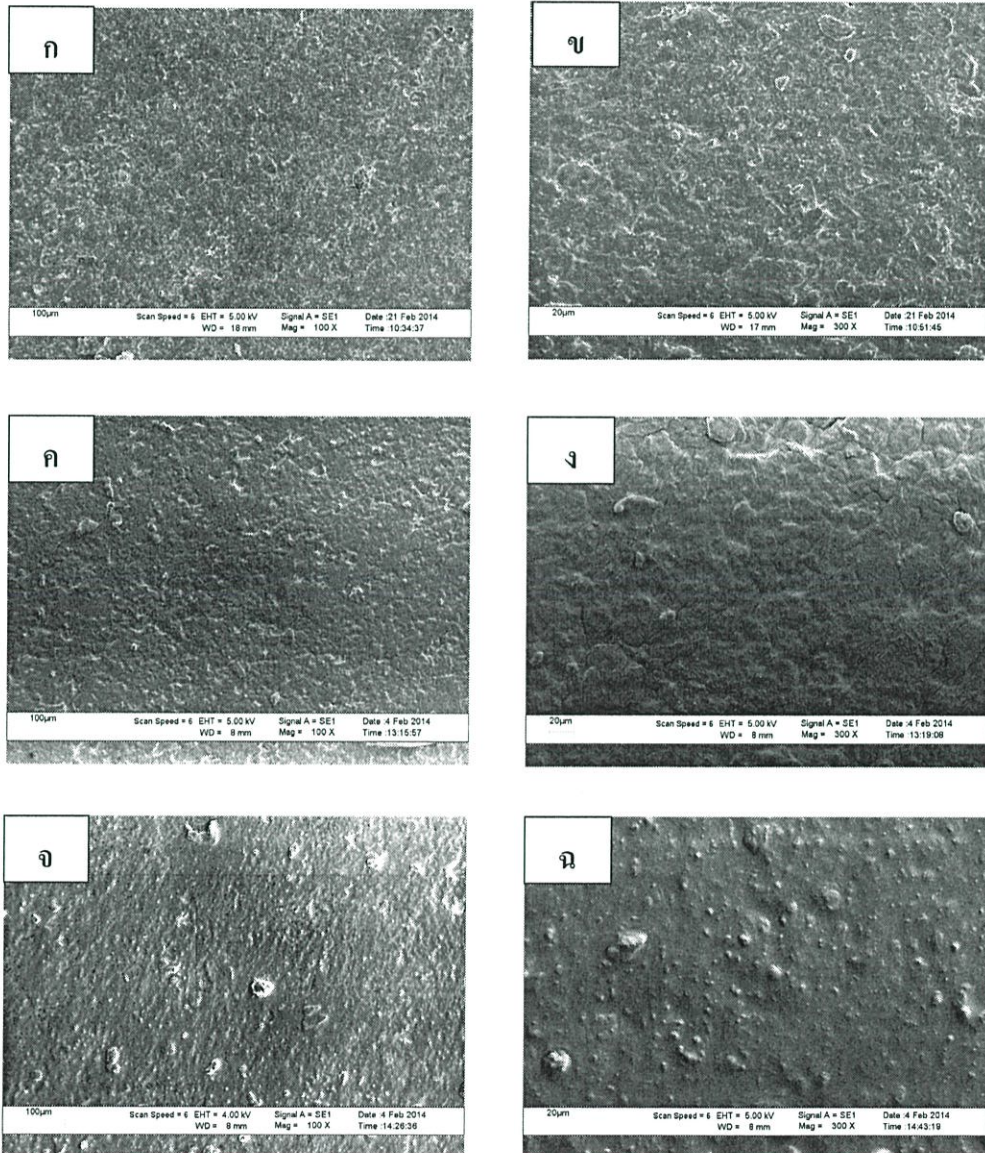
4.3.1 การศึกษาลักษณะพื้นผิวของฟิล์ม TPCS ที่ผสมอะคาร์ในปริมาณต่างๆ



รูปที่ 4.5 สัณฐานวิทยาภาพพื้นผิวของฟิล์ม TPCS ที่ปรับปรุงสมบัติโดยใช้อะคาร์ที่ปริมาณต่างๆ ที่กำลังขยาย 100 เท่า (ซ้าย) และ 300 เท่า (ขวา) (ก)-(ข) 0%, (ค)-(ง) 10% และ (จ)-(ฉ) 20%

จากรูปที่ 4.5 แสดงให้เห็นถึงลักษณะพื้นผิวของฟิล์ม TPCS ที่ปรับปรุงด้วยอะคาร์ ใน ปริมาณต่างๆ ที่กำลังขยาย 100 เท่า และ 300 เท่า พบว่าพื้นผิวของฟิล์ม TPCS ที่ปรับปรุงสมบัติ ด้วยอะคาร์ มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน เมื่อปริมาณอะคาร์เพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงถึงความเข้ากันได้ระหว่าง แป้งมันสำปะหลังกับอะคาร์ที่มีโครงสร้างพื้นฐานมาจากพอลิแซคคาไรด์เช่นเดียวกัน

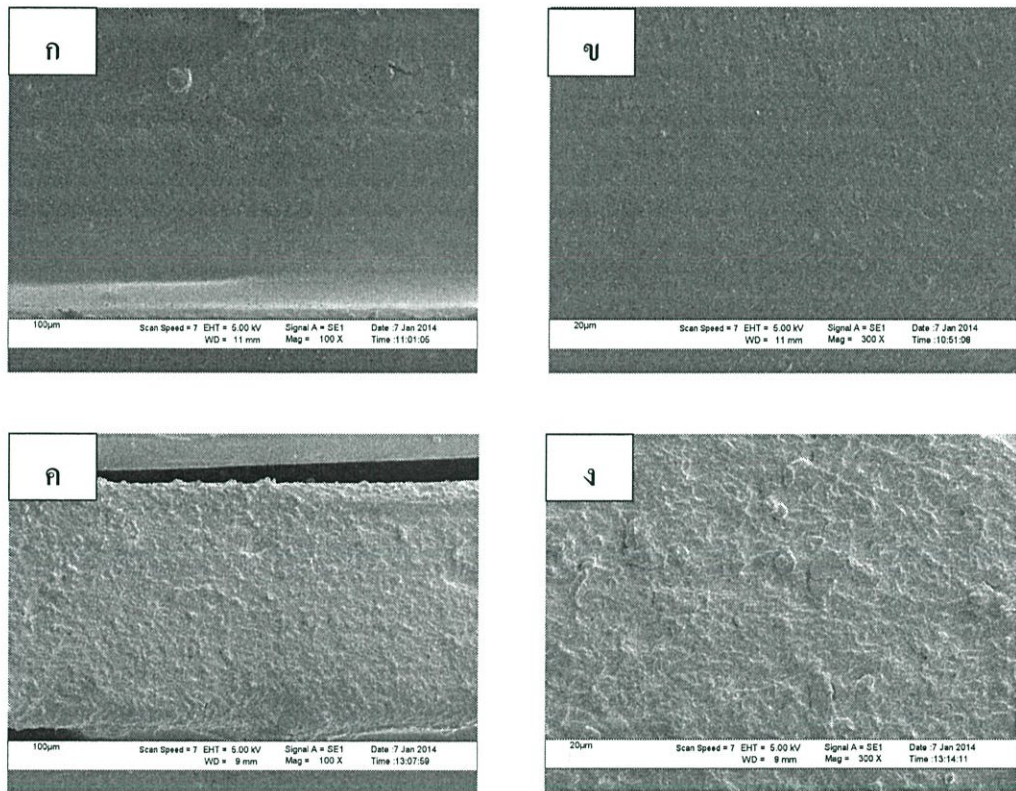
4.3.2 การศึกษาลักษณะพื้นผิวของฟิล์ม TPAS ที่ผสมอะคาร์ในปริมาณต่างๆ



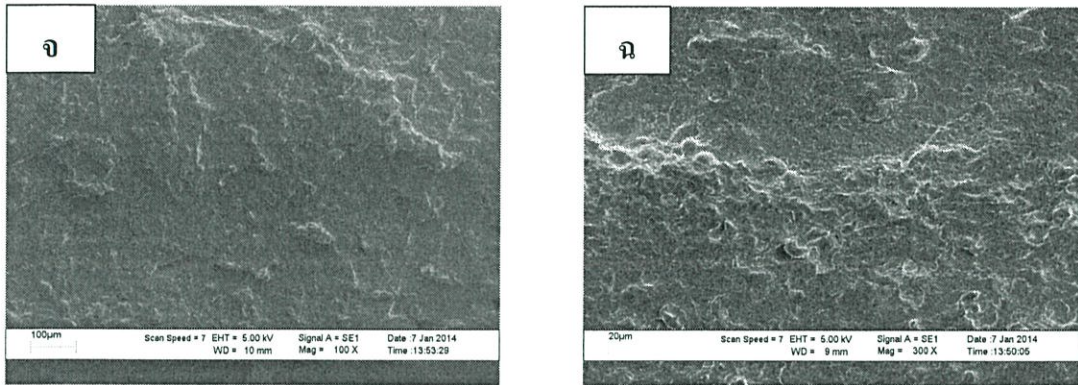
รูปที่ 4.6 สัณฐานวิทยาภาพพื้นผิวของฟิล์ม TPAS ที่ปรับปรุงสมบัติโดยใช้อะคาร์ที่ปริมาณต่างๆ ที่ กำลังขยาย 100 เท่า (ซ้าย) และ 300 เท่า (ขวา) (ก)-(ข) 0%, (ค)-(ง) 10% และ (จ)-(ฉ) 20%

รูปที่ 4.6 แสดงให้เห็นถึงลักษณะพื้นผิวของฟิล์ม TPAS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอะคาร์ ในปริมาณต่างๆ ที่กำลังขยาย 100 เท่า และ 300 เท่า พบว่า พื้นผิวของฟิล์ม TPAS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอะคาร์ มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน เมื่อปริมาณอะคาร์เพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงถึงความเข้ากันได้ระหว่างแป้งท้าวขยวม่อกับอะคาร์ที่มีโครงสร้างพื้นฐานมาจากพอลิแซคคาไรด์เช่นเดียวกัน

4.3.3 การศึกษาลักษณะภาคตัดขวางของฟิล์ม TPCS ที่ผสมอะคาร์ในปริมาณต่างๆ



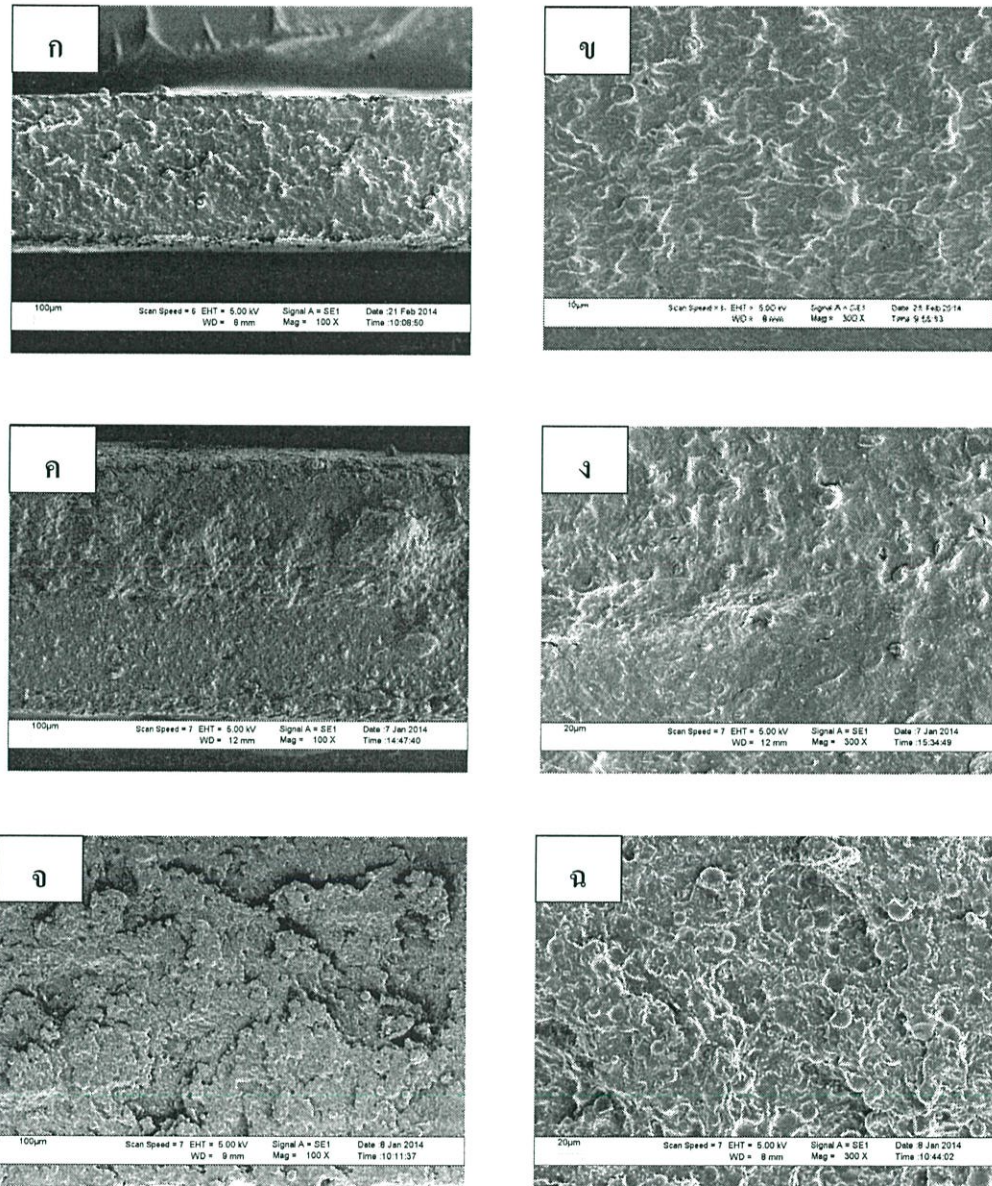
รูปที่ 4.7 ลักษณะวิทยาภาคตัดขวางของฟิล์ม TPCS ที่ปรับปรุงสมบัติโดยใช้อะคาร์ที่ปริมาณต่างๆ ที่กำลังขยาย 100 เท่า (ซ้าย) และ 300 เท่า (ขวา) (ก)-(ข) 0% และ (ค)-(ง) 10%



รูปที่ 4.7 สัณฐานวิทยาภาคตัดขวางของฟิล์ม TPCS ที่ปรับปรุงสมบัติโดยใช้อะคาร์ที่ปริมาณต่างๆ ที่กำลังขยาย 100 เท่า (ซ้าย) และ 300 เท่า (ขวา) (จ)-(ค) 20%

จากรูปที่ 4.7 (ก)-(ค) แสดงให้เห็นถึงลักษณะภาคตัดขวางของฟิล์ม TPCS ที่ปริมาณอะคาร์ต่างๆ ที่กำลังขยาย 100 เท่า และ 300 เท่า พบว่าฟิล์ม TPCS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอะคาร์ในปริมาณต่างๆ มีลักษณะภาคตัดขวางเป็นเนื้อเดียวกันสม่ำเสมอ และค่อนข้างเรียบ ไม่มีการแยกวัฏภาคเกิดขึ้น แสดงถึงการเข้ากันได้และการยึดเกาะที่ดีระหว่างแป้งมันสำปะหลังและอะคาร์

4.3.4 การศึกษาลักษณะภาคตัดขวางของฟิล์ม TPAS ที่ผสมอะการีนปริมาณต่างๆ



รูปที่ 4.8 สัณฐานวิทยาภาพภาคตัดขวางของฟิล์ม TPAS ที่ปรับปรุงสมบัติโดยใช้อะการีนที่ปริมาณต่างๆ ที่กำลังขยาย 100 เท่า (ซ้าย) และ 300 เท่า (ขวา) (ก)-(ข) 0%, (ค)-(ง) 10% และ (จ)-(ฉ) 20%

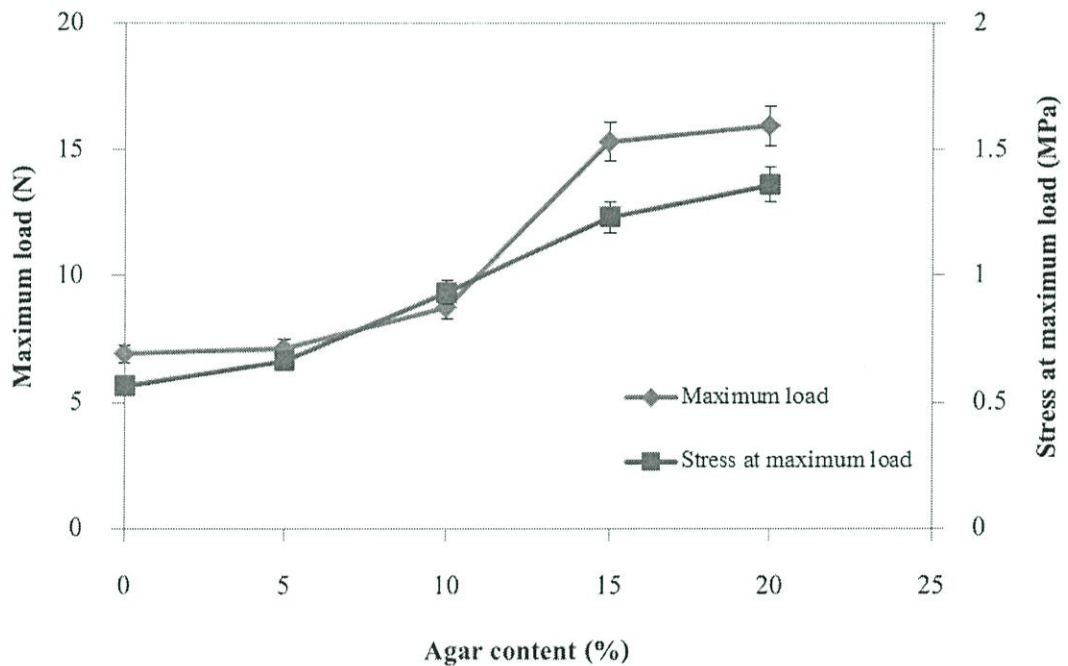
จากรูปที่ 4.8 (ก)-(จ) แสดงให้เห็นถึงลักษณะภาคตัดขวางของฟิล์ม TPAS ที่ปรับปรุงด้วย อะคาร์ในปริมาณต่างๆ ที่กำลังขยาย 100 เท่า และ 300 เท่า พบว่าเมื่อปริมาณอะคาร์เพิ่มขึ้น ลักษณะ ภาคตัดขวางเป็นเนื้อเดียวกัน แสดงถึงความเข้ากันได้ระหว่างแป้งท้าวขย่มอมกับอะคาร์ที่มี โครงสร้างพื้นฐานมาจากพอลิแซคคาไรด์เช่นเดียวกัน และฟิล์มทั้งสองชนิด มีสถานะวิทยาที่เป็น วัฏภาคต่อเนื่องกันทั้งลักษณะพื้นผิวและภาคตัดขวาง แสดงถึงความเข้ากันได้และการยึดเกาะที่ ดีระหว่างแป้งและอะคาร์ที่มีโครงสร้างพื้นฐานมาจากพอลิแซคคาไรด์เช่นเดียวกัน

4.4 สมบัติเชิงกล

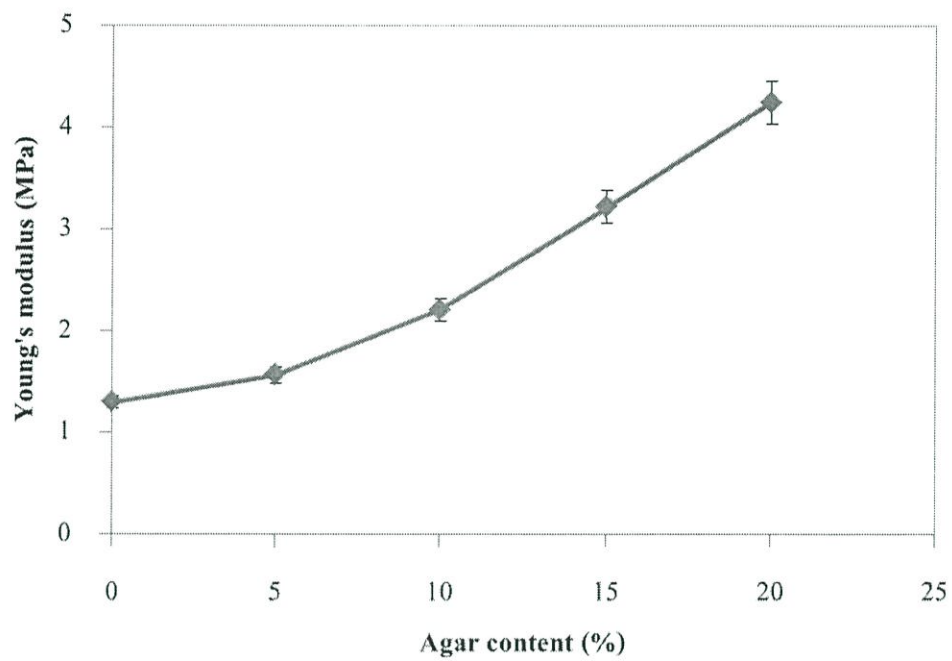
สมบัติเชิงกลที่ทำการศึกษาได้แก่ แรงดึงสูงสุด (Maximum load) ความแข็งแรง ณ จุดแรงดึงสูงสุด (Stress at maximum load) โมดูลัส (Young's modulus) การดึงยืด ณ จุดแรงดึงสูงสุด (Extension at maximum load) และเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดแรงดึงสูงสุด (Strain at maximum load)

4.4.1 สมบัติเชิงกลของฟิล์ม TPCS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอะการ์ในปริมาณต่างๆ

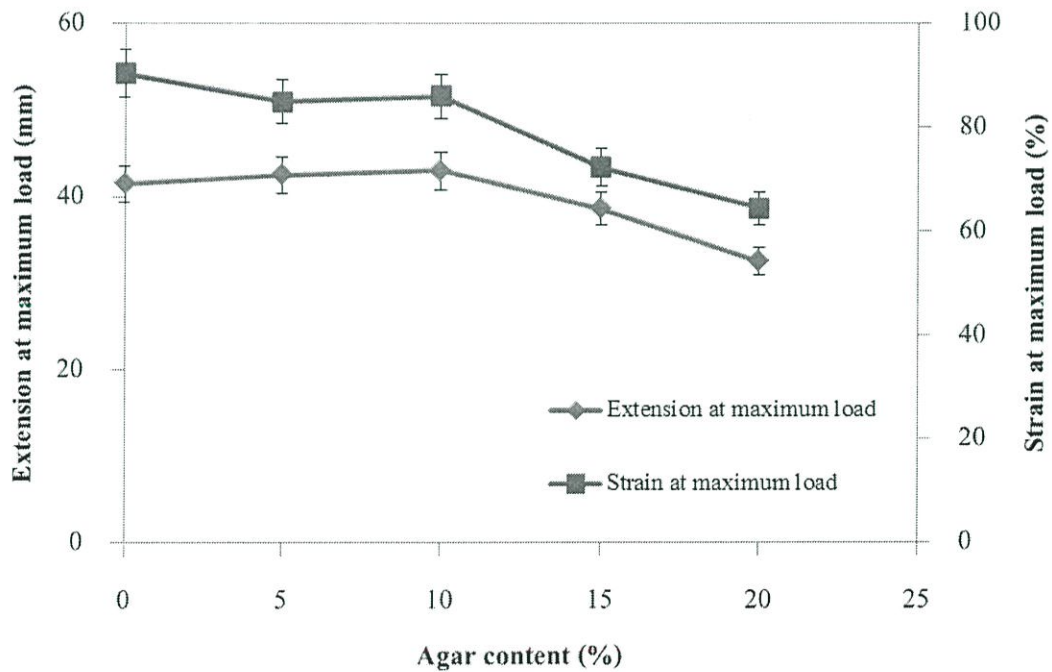
ผลการทดลองสมบัติเชิงกลของฟิล์ม TPCS โดยใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ โดยใช้ปริมาณอะการ์ที่ 0 %, 5 %, 10 %, 15 % และ 20 % ซึ่งให้ผลการทดลองดังนี้



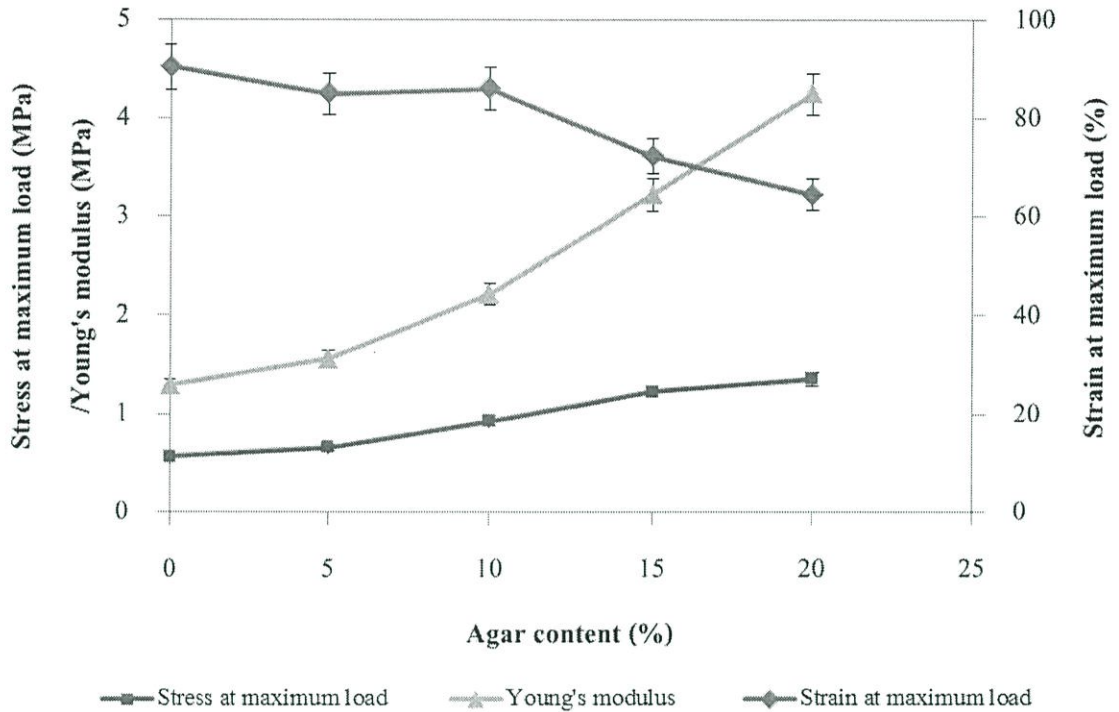
(ก)



(a)



(b)



(ง)

รูปที่ 4.9 สมบัติเชิงกลของฟิล์ม TPCS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอะการ์ในปริมาณต่างๆ (ก) แรงดึง และความแข็งแรง ณ จุดแรงดึงสูงสุด (ข) การดึงยืด ณ จุดแรงดึงสูงสุด และเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดแรงดึงสูงสุด (ค) มอดุลัส และ(ง) ความแข็งแรง ณ จุดแรงดึงสูงสุด มอดุลัส และเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดแรงดึงสูงสุด

จาก รูปที่ 4.9 (ก)-(ข) พิจารณาผลของปริมาณอะการ์ที่ปริมาณ 0 %, 10 % และ 20 % ค่าแรงดึงสูงสุด ค่าความแข็งแรง ณ จุดแรงดึงสูงสุด และมอดุลัสของฟิล์ม TPCS มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น เมื่อปริมาณอะการ์เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าฟิล์ม TPCS ที่ปรับปรุงด้วย 20 % มีค่ามากที่สุด เนื่องจากอะการ์สามารถเกิดลักษณะที่เป็นเจลได้ [12] ทำให้ชิ้นงานมีลักษณะแข็ง โดยเมื่อเพิ่มปริมาณอะการ์ทำให้ฟิล์มมีโครงสร้างจัดเรียงตัวกันแน่นขึ้น จากผลเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกเมื่อปริมาณอะการ์เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ฟิล์ม TPCS ที่ปรับปรุงด้วยอะการ์ 20 % มีความเป็นผลึกมาก เนื่องจากโครงสร้างมีการจัดเรียงตัวกันเป็นระเบียบเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้อาจเกิดพันธะไฮโดรเจนขึ้นใหม่ระหว่างแป้งมันสำปะหลังกับอะการ์มากขึ้น (รูปที่ 4.1) และจากสัณฐานวิทยาพบว่ามีความเข้ากันได้ เป็นเนื้อเดียวกัน

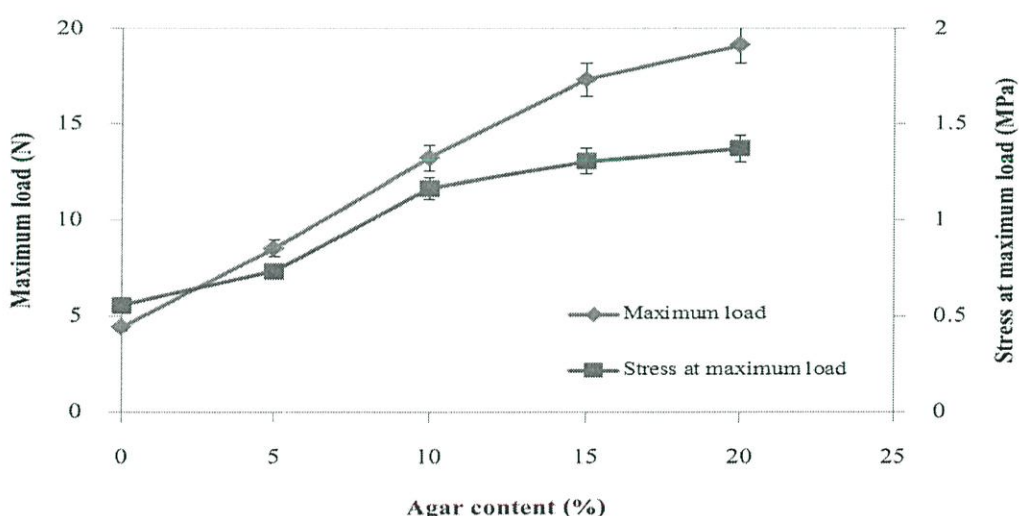
และมีการยึดเกาะกันดี (รูปที่ 4.5) ดังนั้นปริมาณอะการ์เพิ่มมากขึ้นส่งผลต่อการรับแรง ความแข็งแรง ณ จุดแรงดึงสูงสุด และมอดุลัสสูงขึ้นไปด้วย

รูปที่ 4.11 (ค) แสดงการดึงยึด ณ จุดแรงดึงสูงสุด และเปอร์เซ็นต์การดึงยึด ณ จุดแรงดึงสูงสุด พบว่าฟิล์ม TPCS มีค่ามากที่สุด เนื่องจาก ชีงงานมีความเหนียว ยืดหยุ่น และดึงยึดได้ดี ส่วนฟิล์ม TPCS ที่ปรับปรุงด้วยอะการ์ในปริมาณ 10 % และ 20 % มีค่าการดึงยึด และเปอร์เซ็นต์การดึงยึด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุดลดลง ตามลำดับ เนื่องจากมีปริมาณอะการ์เพิ่มขึ้น ทำให้ชีงงานมีลักษณะแข็งเปราะ จึงดึงยึดและยืดหยุ่นได้น้อยลง

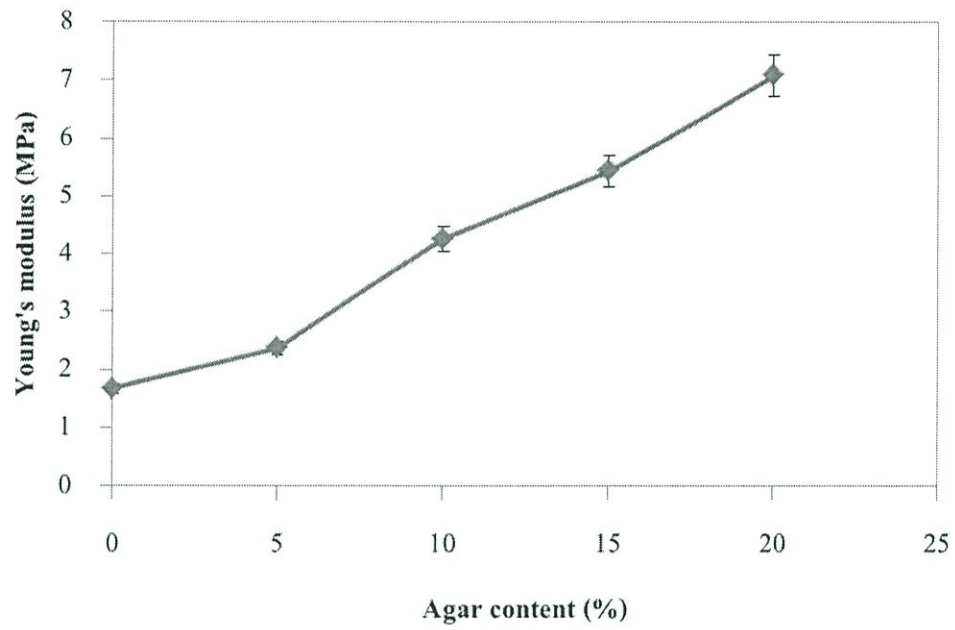
จากสมบัติเชิงกลสรุปได้ว่า ฟิล์ม TPCS ที่ปรับปรุงด้วยอะการ์ 20 % มีสมบัติเชิงกลดีที่สุด โดยพิจารณาจากค่าแรงดึงสูงสุด ความแข็งแรง ณ จุดแรงดึงสูงสุด และมอดุลัสสูงที่สุด โดยมีค่าเพิ่มขึ้น 58.75 % , 58.47 % และ 69.64 % ตามลำดับ

4.4.2 สมบัติเชิงกลของฟิล์ม TPAS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอะการ์ในปริมาณต่างๆ

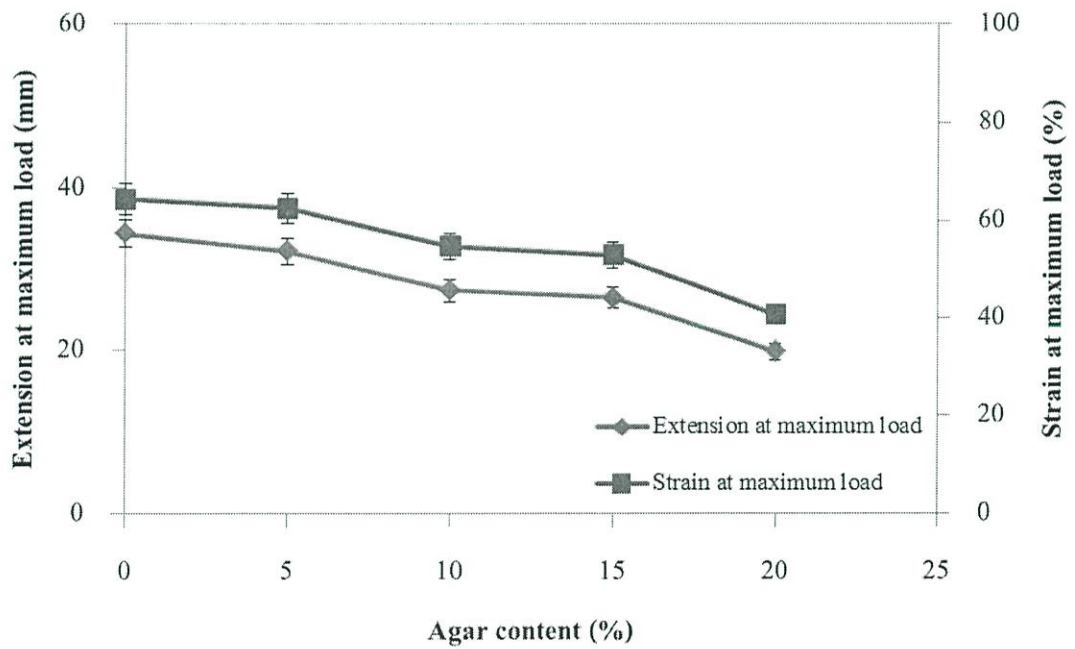
ผลการทดลองสมบัติเชิงกลของฟิล์ม TPAS โดยใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ โดยใช้ปริมาณอะการ์ที่ 0 % , 5 % , 10 % , 15 % และ 20 % ซึ่งให้ผลการทดลองดังนี้



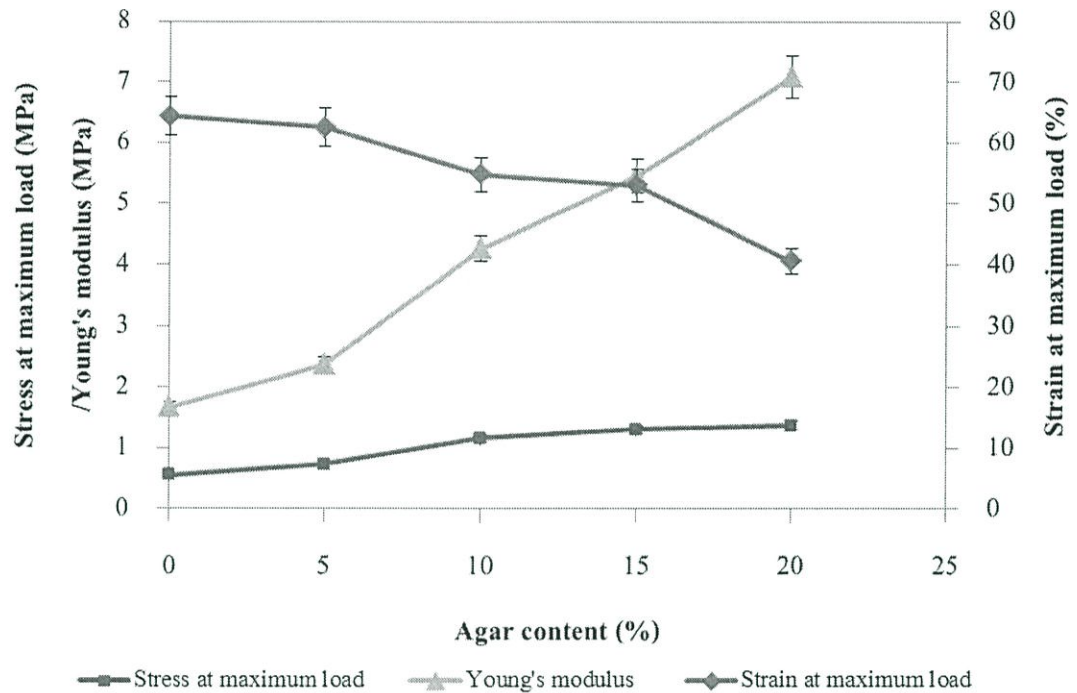
(ก)



(v)



(vi)



(ง)

รูปที่ 4.10 สมบัติเชิงกลของฟิล์ม TPAS ที่ปรับปรุงสมบัติโดยอะการ์ ในปริมาณต่างๆ (ก) แรงดึง และความแข็งแรงดึง (ข) การดึงยืด และเปอร์เซ็นต์การดึงยืด (ค) มอดุลัส และ (ง) ความแข็งแรงดึง มอดุลัส และเปอร์เซ็นต์การดึงยืด

จากการทดสอบสมบัติเชิงกลพบว่าค่าความแข็งแรง ณ จุดแรงดึงสูงสุด และมอดุลัส มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณอะการ์เพิ่มขึ้น (รูปที่ 4.10 (ก)-(ข)) ซึ่งฟิล์ม TPAS ที่ปรับปรุงด้วยอะการ์ 20 % มีค่ามากที่สุด เนื่องจากอะการ์สามารถเกิดเป็นเจลได้ ทำให้ชิ้นงานมีลักษณะแข็งขึ้น จากผลเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก ฟิล์ม TPCS ที่ปรับปรุงด้วยอะการ์ 20 % มีความเป็นผลึกมาก เมื่อปริมาณอะการ์เพิ่มขึ้น เนื่องจากโครงสร้างมีการจัดเรียงตัวกันเป็นระเบียบเพิ่มมากขึ้น และจากฐานฐานวิทยา ฟิล์ม TPAS ที่ปรับปรุงด้วยอะการ์ 20 % มีความเป็นเนื้อเดียวกันและเข้ากันได้ดี (รูปที่ 4.6) ส่งผลให้ความสามารถในการรับแรง และมอดุลัสสูงที่สุด

ส่วนการดึงยืด และเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด มีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณอะการ์เพิ่มขึ้น (รูปที่ 4.10 (ค)) ซึ่งพบว่า ฟิล์ม TPAS มีค่ามากที่สุด ฟิล์มมีความเหนียว ยืดหยุ่น และดึง

ยึดได้ดี ส่วน फिल्म TPAS ที่ปรับปรุงด้วยอะคาร์ในปริมาณ 10 % และ 20 % ให้ค่าการดึงยึด และเปอร์เซ็นต์การดึงยึด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุดลดลง ตามลำดับ เนื่องจากอะคาร์ ทำให้ฟิล์มมีลักษณะแข็งเปราะ จึงดึงยึดและยึดหยุ่นได้น้อยลง

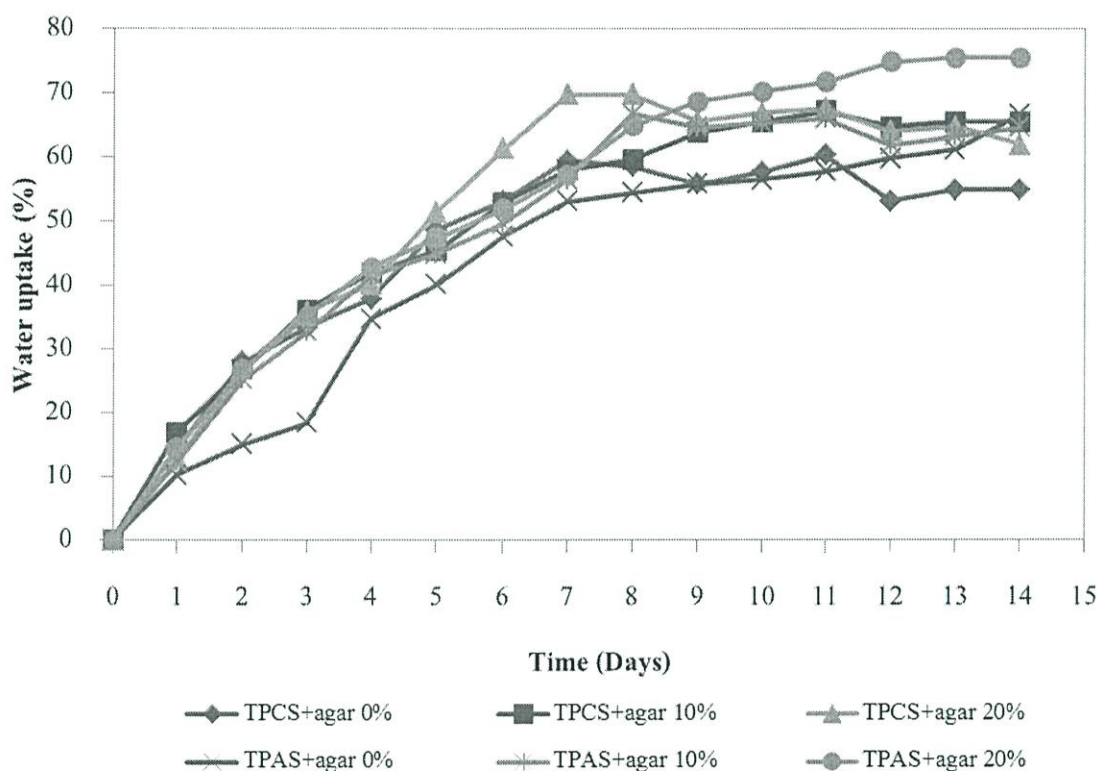
จากสมบัติเชิงกลสรุปได้ว่า फिल्म TPAS ที่ปรับปรุงด้วยอะคาร์ 20 % สมบัติเชิงกลดีที่สุด โดยพิจารณาจากค่าแรงดึง ความแข็งแรง ณ จุดแรงดึงสูงสุด และมอดุลัส โดยมีค่าเพิ่มขึ้น 76.88 % , 59.48 % และ 76.45 % ตามลำดับ

จากผลเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก फिल्म TPCS และ TPAS มีค่าเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกใกล้เคียงกัน ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แต่เมื่อเปรียบเทียบระหว่าง फिल्म TPCS และ TPAS ที่ปรับปรุงด้วยอะคาร์ 20 % พบว่าแรงดึงสูงสุด ความแข็งแรง ณ จุดแรงดึงสูงสุด และมอดุลัส ของ फिल्म TPAS ที่ปรับปรุงด้วยอะคาร์ในปริมาณ 20 % มีค่ามากกว่า TPCS ที่ปรับปรุงด้วยอะคาร์ 20 % เนื่องจากองค์ประกอบทางเคมีของแป้งท้าวายม่อมมีปริมาณ Amylose มากกว่าแป้งมันสำปะหลัง [6-9] ซึ่ง Amylose มีโครงสร้างเชิงเส้น ทำให้แป้งท้าวายม่อมมีการจัดเรียงตัวเป็นระเบียบดีกว่า จึงส่งผลให้ फिल्म TPAS ที่ปรับปรุงด้วยอะคาร์ในปริมาณ 20 % มีค่าแรงดึงสูงสุด ความแข็งแรง ณ จุดแรงดึงสูงสุด และมอดุลัสสูงที่สุด

จากงานวิจัยนี้พบว่า फिल्म TPAS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอะคาร์ 20 % มีสมบัติเชิงกลโดยรวมสูงที่สุด

4.5 การดูดซับความชื้น

การศึกษาการดูดซับความชื้นของฟิล์ม TPCS และ TPAS ที่ปรับปรุงสมบัติโดยอะการ์ในปริมาณต่างๆ ได้แก่ 0 % 10 % และ 20 % ภายใต้ช่วงความชื้นสัมพัทธ์ 90-100% แสดงได้ดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 เปรอ์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของฟิล์ม TPCS และ TPAS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอะการ์ในปริมาณต่างๆ ที่ช่วงความชื้นสัมพัทธ์ 90-100%

จากการทดสอบการดูดซับความชื้น ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 90-100% (รูปที่ 4.11) พบว่าช่วง 5 วันแรก ฟิล์ม TPCS และ TPAS มีการดูดซับความชื้นอย่างรวดเร็ว จากนั้นการดูดซับความชื้นเริ่มมีแนวโน้มอึมตัว โดย TPCS และ TPAS ที่ปรับปรุงด้วยอะการ์ 20 % มีการดูดซับความชื้นมากที่สุด เนื่องจาก เพราะอะการ์สามารถกักเก็บน้ำแล้วเกิดเจลได้ [12]

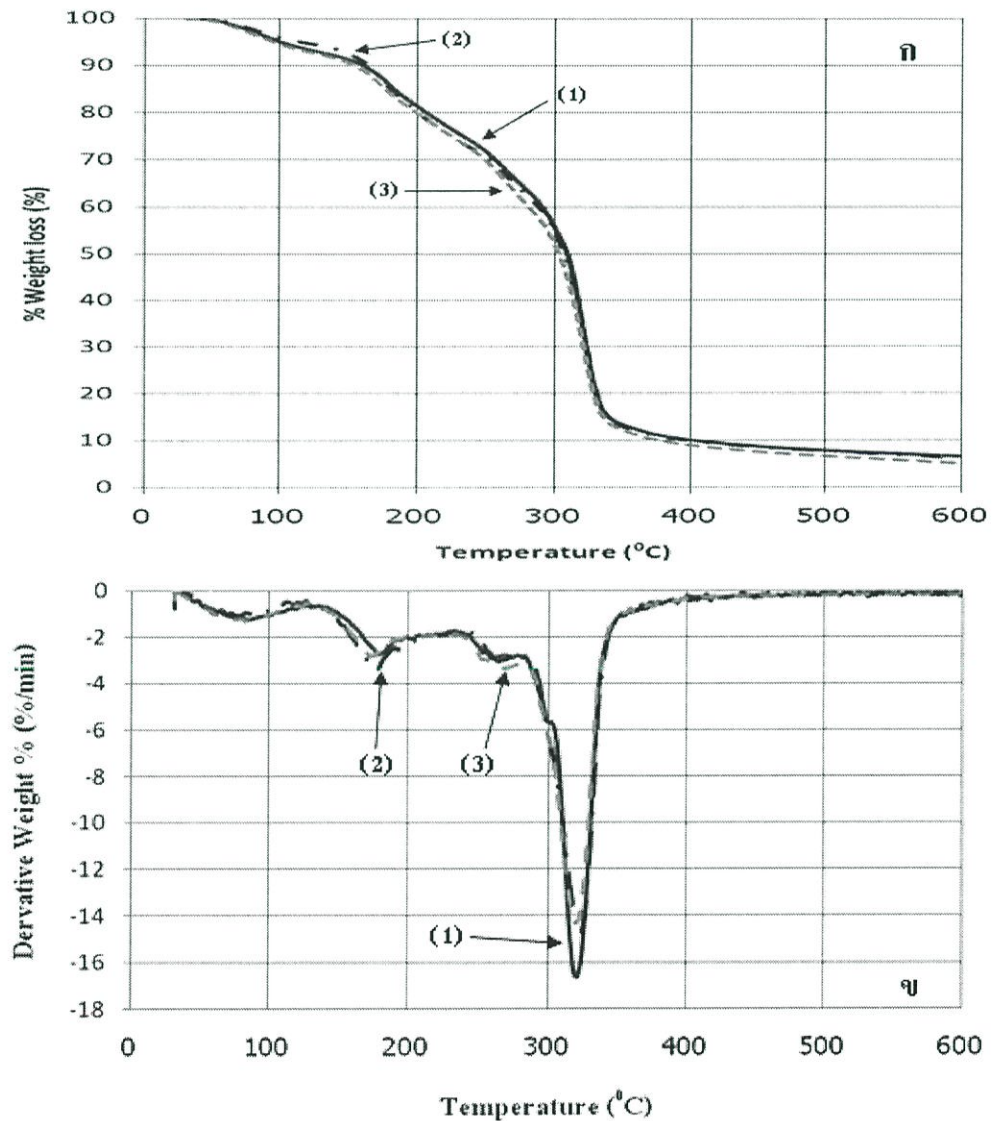
จากการทดสอบการดูดซับความชื้น สามารถสรุปได้ว่า ที่ช่วงความชื้นสัมพัทธ์ 90-100% ฟิล์ม TPCS และ TPAS ที่ปรับปรุงด้วยอะการ์ 20 % สามารถดูดซับความชื้นได้สูงที่สุด ส่วนฟิล์ม TPCS และ

TPAS ที่ปริมาณอะการ์ 0 % ดูดซับความชื้นต่ำที่สุด กล่าวคือ ปริมาณอะการ์มีผลทำให้ फिल्म TPCS กับ TPAS ดูดน้ำได้มากขึ้น เนื่องจากอะการ์ประกอบไปด้วยหมู่ไฮดรอกซิล และซัลเฟต ซึ่งมีความชอบน้ำ จึงสามารถกักเก็บน้ำแล้วเกิดเจลได้ [12]

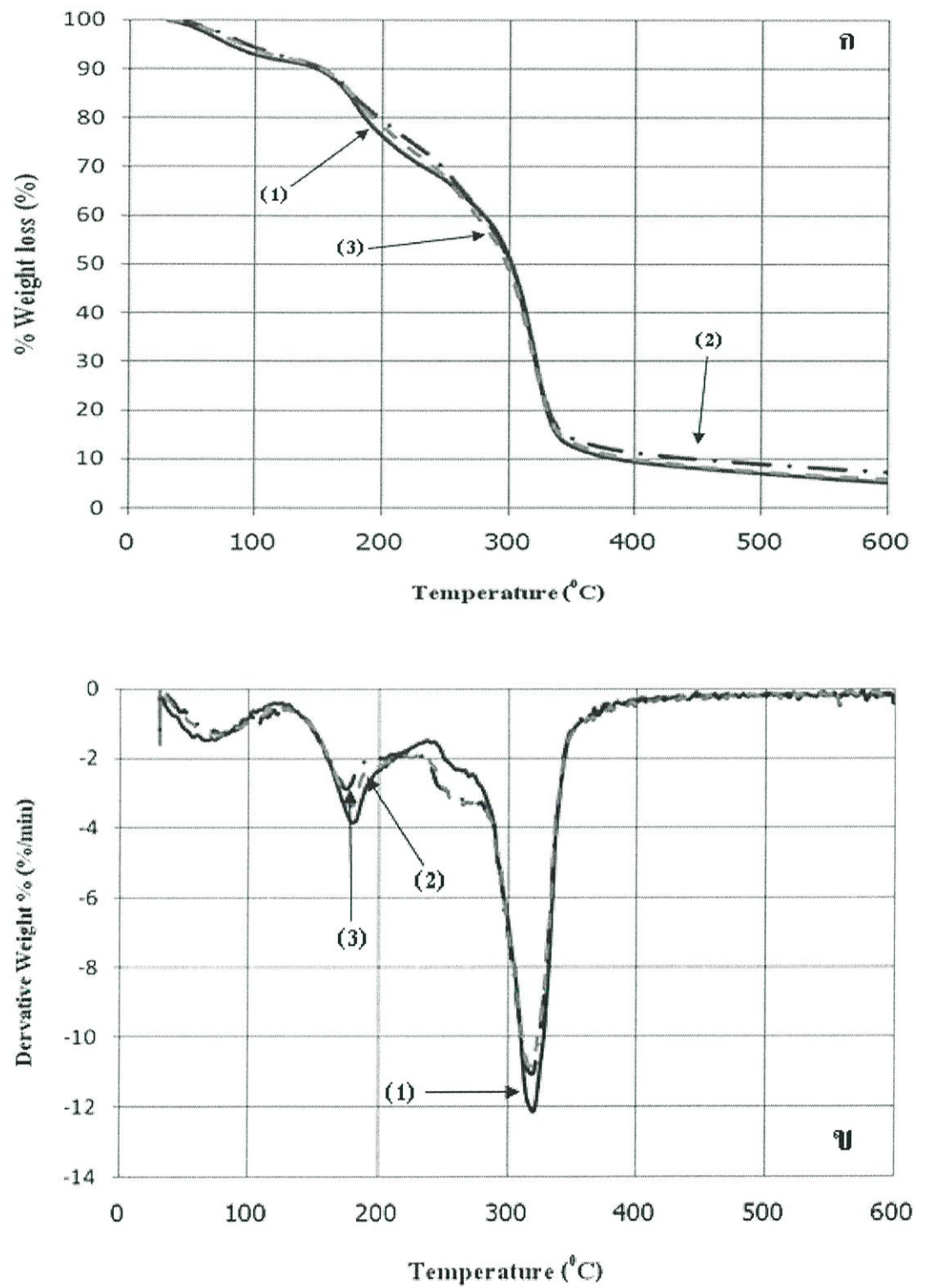
นอกจากนี้ फिल्म TPAS มีการดูดซับความชื้นสูงกว่า फिल्म TPCS ที่ปรับปรุงด้วยอะการ์ 20 % ซึ่งแป้งท้าวขย่มอมมีปริมาณไขมันที่น้อยกว่าแป้งมันสำปะหลัง [6-9] เนื่องจากโครงสร้างของ ไขมันมีส่วนที่เป็นไฮโดรคาร์บอนสายโซ่ยาว [5] จึงส่งผลให้ फिल्म TPCS ที่ปรับปรุงด้วยอะการ์ 20 % มีความเป็น Hydrophilic น้อยกว่า फिल्म TPAS ที่ปรับปรุงด้วยอะการ์ 20 % และแป้งท้าวขย่มอมมีปริมาณคาร์โบไฮเดรตที่มากกว่าแป้งมันสำปะหลัง [6-9] เนื่องจากโครงสร้างของคาร์โบไฮเดรตประกอบไปด้วยหมู่ไฮดรอกซิลจำนวนมาก [5] ทำให้ความเป็น Hydrophilic ของ फिल्म TPAS เพิ่มมากขึ้น จึงส่งผลให้ फिल्म TPAS ที่ปรับปรุงด้วยอะการ์ 20 % มีการดูดซับความชื้นมากที่สุด

4.6 สมบัติทางความร้อน

ศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่องเทอร์โมกราวิเมตริกแอนาไลเซอร์ (Thermogravimetric analyzer, TGA) ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน (N_2) และใช้สภาวะในการทดสอบ คือ อุณหภูมิที่ให้อยู่ในช่วง 50 – 600 องศาเซลเซียส และมีอัตราการให้ความร้อน (Heating rate) ที่ 10 องศาเซลเซียส/นาที โดยสมบัติทางความร้อนที่ทำการศึกษา ได้แก่ การศึกษาอุณหภูมิการสลายตัว (Degradation temperature) และเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไป (% Weight loss) ซึ่งให้ผลการทดลองดังนี้



รูปที่ 4.12 (ก) TGA และ (ข) DTA ของฟิล์ม TPCS ปรับปรุงสมบัติด้วยอะคาร์ที่ปริมาณต่างๆ (1) 0%, (2) 10% และ (3) 20%



รูปที่ 4.13 (ก) TGA และ (ข) DTA ของฟิล์ม TPAS ปรับปรุงสมบัติด้วยอะคาร์ที่ปริมาณต่างๆ (1)

0%, (2) 10% และ (3) 20%

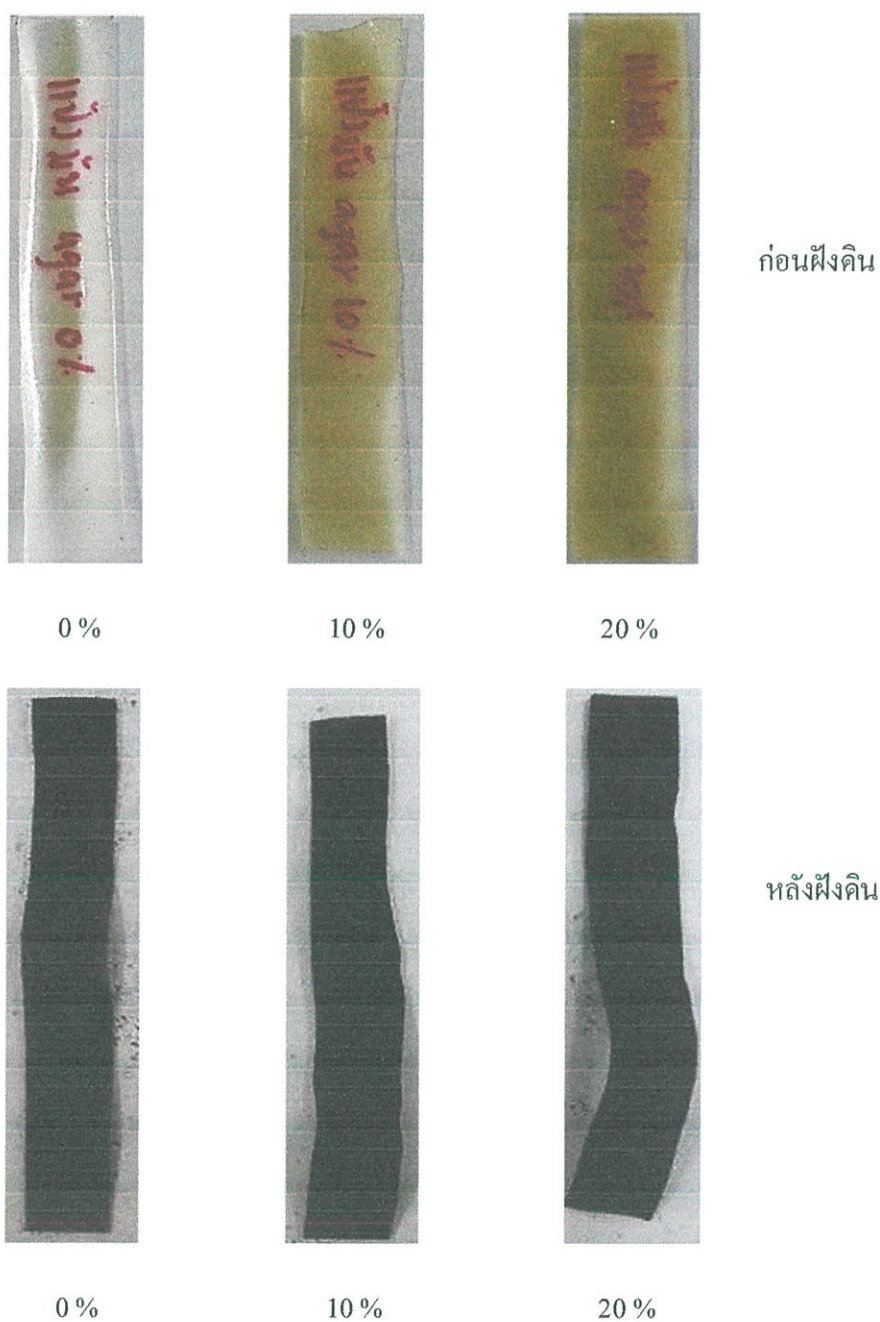
ตารางที่ 4.3 อุณหภูมิการสลายตัว ($^{\circ}\text{C}$) ของฟิล์ม TPCS และฟิล์ม TPAS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วย อะคาร์ในปริมาณต่างๆ

ชนิดของฟิล์ม	อุณหภูมิการสลายตัว ($^{\circ}\text{C}$)		
	ช่วงที่ 1 (กลีเซอรอล)	ช่วงที่ 2 (แป้งและอะคาร์)	ช่วงที่ 3 (แป้ง)
TPS +Agar			
TPCS+Agar 0%	178.0	259.5	320.4
TPCS+Agar 10%	176.0	264.4	322.6
TPCS+Agar 20%	172.6	266.6	320.2
TPAS+Agar 0%	180.1	261.4	319.8
TPAS+Agar 10%	174.5	262.3	319.0
TPAS+Agar 20%	178.0	265.1	317.4

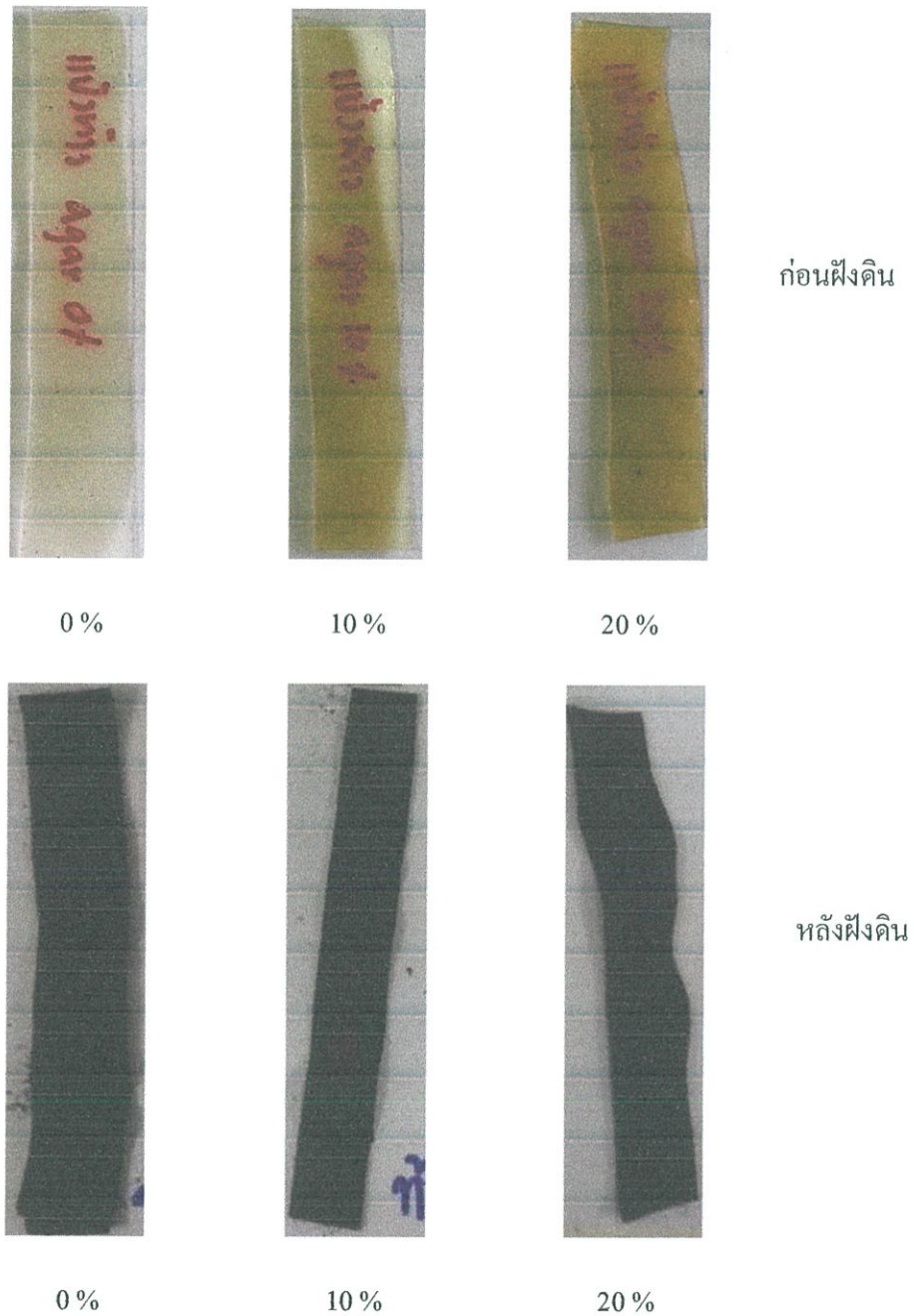
จากรูปที่ 4.12-4.13 และ ตารางที่ 4.3 จากการศึกษาฟิล์ม TPCS และ TPAS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอะคาร์ในปริมาณต่างๆ พบว่า อุณหภูมิการสลายตัวของกลีเซอรอลอยู่ในช่วง 172.6-180.1 องศาเซลเซียส [31] ช่วงที่ 2 เป็นอุณหภูมิการสลายตัวของแป้งและอะคาร์ โดยอุณหภูมิการสลายตัวของแป้งและอะคาร์อยู่ในช่วง 259.5-266.6 องศาเซลเซียส [32] และอุณหภูมิการสลายตัวช่วงที่ 3เป็นอุณหภูมิการสลายตัวของแป้งที่อยู่ในช่วง 317.4-322.6 องศาเซลเซียส [33] พบว่า อุณหภูมิการสลายตัวของแป้ง (ช่วงที่ 3) ของฟิล์มทุกตัวอย่างไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อปริมาณอะคาร์เพิ่มขึ้น

4.7 สมบัติการย่อยสลาย

สมบัติการย่อยสลายทดสอบได้โดยการฝังดินสามารถทำได้โดยนำฟิล์ม TPCS และ TPAS มาฝังดิน และควบคุมความชื้นของดินที่ช่วง 5-7 % เป็นเวลา 4 วัน ซึ่งให้ผลการทดลองแสดงดังนี้



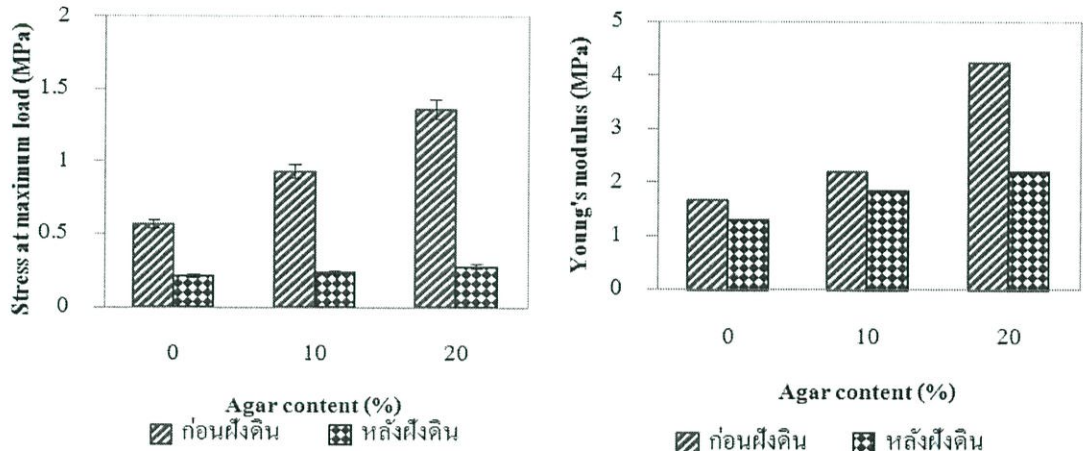
รูปที่ 4.14 ลักษณะทางกายภาพของฟิล์ม TPCS ที่ปรับปรุงปริมาณด้วยอะคาร์ในปริมาณต่าง



รูปที่ 4.15 ลักษณะทางกายภาพของฟิล์ม TPAS ที่ปรับปรุงปริมาณด้วยอะการ์ในปริมาณต่างๆ

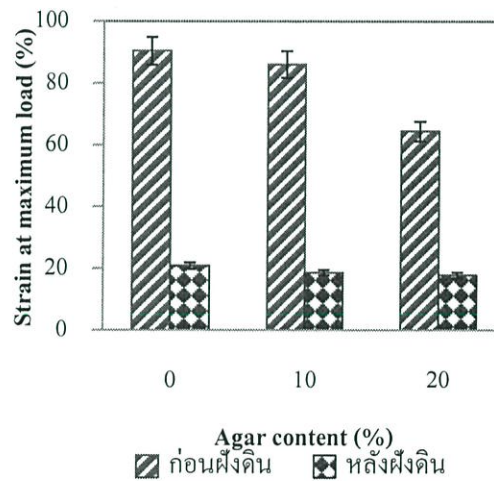
พบว่าลักษณะของชิ้นงาน TPCS และ TPAS จากการฝงคืนหลังจากผ่านไป 4 วันฟิล์มมีลักษณะบวมขึ้น สีขาวเหลืองขุ่น เนื้อฟิล์มนุ่ม จึกขาดได้ง่าย

4.7.1 สมบัติเชิงกลก่อนฝังดิน และหลังฝังดินของฟิล์ม TPCS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอะการ์ในปริมาณต่างๆ



(ก)

(ข)



(ค)

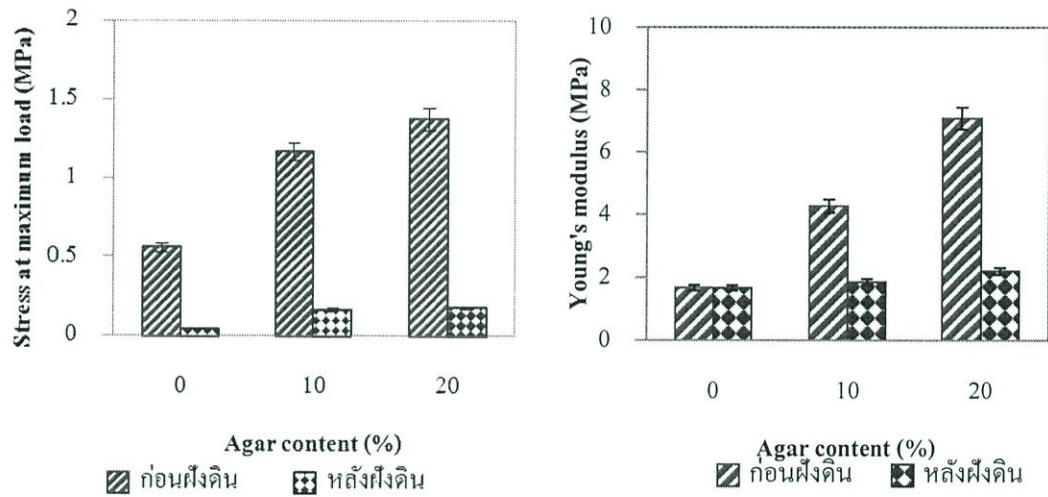
รูปที่ 4.16 สมบัติเชิงกลก่อน และหลังฝังดินของฟิล์ม TPCS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอะการ์ในปริมาณต่างๆ (ก) ความแข็งแรง ณ จุดแรงดึงสูงสุด (ข) โมดูลัส และ (ค) เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดแรงดึงสูงสุด

ค่าความแข็งแรง ณ จุดแรงดึงสูงสุดของฟิล์ม TPCS ที่ปรับปรุงด้วยอะคาร์ในปริมาณ 0 % , 10 % และ 20 % หลังฝังดินมีค่าลดลง 62.45 % , 74.55 % และ 79.45 % ตามลำดับ และค่ามอดูลัสของฟิล์ม TPCS ที่ปรับปรุงด้วยอะคาร์ในปริมาณ 0 % , 10 % และ 20 % หลังฝังดินมีค่าลดลง 22.37 % , 16.04 % และ 48.21 % (รูปที่ 4.16 (ก)-(ข)) พบว่าฟิล์ม TPCS ที่ปรับปรุงด้วยอะคาร์ 20 % หลังฝังดินมีค่าความแข็งแรง ณ จุดแรงดึงสูงสุด และมอดูลัสลดลงมากที่สุด เนื่องจากในดินมีความชื้น ฟิล์มสามารถดูดความชื้นจากดิน เพราะฟิล์มมีส่วนประกอบของแป้ง กลิเซอรอล และอะคาร์ซึ่งมีหมู่ไฮดรอกซิล และหมู่ซัลเฟต และฟิล์มมีส่วนที่เป็นอสัณฐาน ทำให้ความชื้นหรือน้ำเข้าไปแทรกโครงสร้างของฟิล์มได้ ทำให้ฟิล์มมีลักษณะบวมพอง ง่ายต่อการฉีกขาด ส่งผลให้ค่าความแข็งแรง ณ จุดแรงดึงสูงสุด และมอดูลัสมีค่าลดลงอย่างชัดเจน

จากรูปที่ 4.16 (ค) เปอร์เซ็นต์การดึงยึดมีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัด ทั้งนี้ผลมาจากความชื้นหรือน้ำเข้าไปแทรกในส่วนของอสัณฐานทำให้สายโซ่ถูกตัดขาด ทำให้ความสามารถในการดึงยึดลดลง

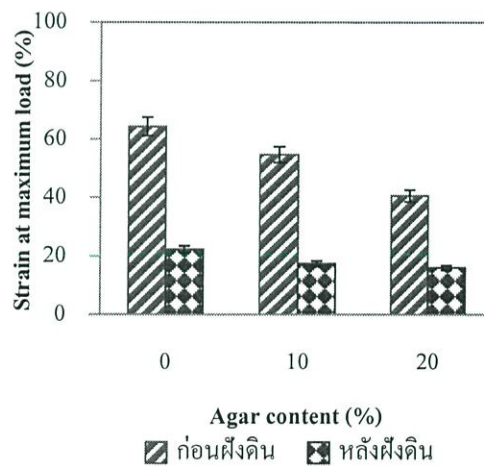
จากสมบัติเชิงกลของฟิล์ม TPCS หลังฝังดินที่ปรับปรุงด้วยอะคาร์ในปริมาณต่างๆ พบว่าค่าความแข็งแรง ณ จุดแรงดึงสูงสุด มอดูลัส และเปอร์เซ็นต์การดึงยึด ณ จุดแรงดึงสูงสุด ยังคงมีแนวโน้มเป็นไปในทางเดียวกับ ฟิล์ม TPCS ก่อนฝังดินที่ปรับปรุงด้วยอะคาร์ในปริมาณต่างๆ (รูปที่ 4.9 (ง)) กล่าวคือ ความแข็งแรง ณ จุดแรงดึงสูงสุด และมอดูลัสของฟิล์ม TPCS หลังฝังดินมีแนวโน้มมากขึ้น (รูปที่ 4.16 (ก)-(ข)) และเปอร์เซ็นต์การดึงยึด ณ จุดแรงดึงสูงสุดของฟิล์ม TPCS มีแนวโน้มลดลง (รูปที่ 4.16 (ค)) เมื่อปริมาณอะคาร์เพิ่มขึ้น

4.7.2 สมบัติเชิงกลก่อนฝังดิน และหลังฝังดินของฟิล์ม TPAS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอะการ์ในปริมาณต่างๆ



(ก)

(ข)



(ค)

รูปที่ 4.17 สมบัติเชิงกลก่อน และหลังฝังดินของฟิล์ม TPAS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอะการ์ในปริมาณต่างๆ (ก) ความแข็งแรง ณ จุดแรงดึงสูงสุด (ข) โมดูลัส และ และ (ค) เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดแรงดึงสูงสุด

จากรูปที่ 4.17 (ก)-(ข) พบว่าฟิล์ม TPAS ที่ปรับปรุงด้วยอะคาร์ในปริมาณ 0 % , 10 % และ 20 % หลังฝังดินมีค่าความแข็งแรง ณ จุดแรงดึงสูงสุด มีค่าลดลง 80.48 % , 85.88 % และ 87.06 % ตามลำดับ และค่ามอดูลัสของฟิล์ม TPAS ที่ปรับปรุงด้วยอะคาร์ในปริมาณ 0 % , 10 % และ 20 % หลังฝังดินมีค่าลดลง 19.21 % , 64.90 % และ 74.80 % ตามลำดับ พบว่าฟิล์ม TPAS ที่ปรับปรุงด้วยอะคาร์ 20 % หลังฝังดินมีค่าความแข็งแรง ณ จุดแรงดึงสูงสุด และมอดูลัสลดลงมากที่สุด เนื่องจากในดินยังคงมีความชื้น และฟิล์มมีส่วนที่เป็นอสัณฐาน ทำให้ความชื้นหรือน้ำเข้าไปแทรกโครงสร้างของฟิล์มได้ และจากผลการดูดซับความชื้นในดิน ฟิล์ม TPAS ที่ปรับปรุงด้วยอะคาร์ 20 % มีการดูดซับความชื้นดีที่สุด ทำให้ฟิล์ม TPAS ที่ปรับปรุงด้วยอะคาร์ 20 % มีลักษณะบวมพอง ง่ายต่อการฉีกขาด จึงมีการย่อยสลายเร็วที่สุด

ส่วนเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดแรงดึงสูงสุดฟิล์มหลังฝังดิน (รูปที่ 4.17 (ค)) มีการดูดซับความชื้นจากดิน และฟิล์มมีส่วนที่เป็นอสัณฐาน ทำให้ความชื้นหรือน้ำเข้าไปแทรกโครงสร้างของฟิล์มเกิดการตัดขาดของสายโซ่ ทำให้ฟิล์มมีการดึงยืดลดลง

นอกจากนี้ฟิล์ม TPAS หลังฝังดินที่ปรับปรุงด้วยอะคาร์ในปริมาณต่างๆ มีแนวโน้มของค่าความเค้น ณ จุดแรงดึงสูงสุด และมอดูลัสมีค่ามากขึ้น และเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดแรงดึงสูงสุดมีแนวโน้มลดลง ซึ่งแนวโน้มคล้ายกับ ฟิล์ม TPAS ก่อนฝังดินที่ปรับปรุงด้วยอะคาร์ในปริมาณต่างๆ (รูปที่ 4.10 (ง))

จากรูปที่ 4.16 และ 4.17 พิจารณาความต่างระหว่างค่าความแข็งแรง ณ จุดแรงดึงสูงสุด และมอดูลัสก่อน และหลังฝังดิน พบว่า TPAS ที่ปรับปรุงด้วยอะคาร์ 20 % หลังฝังดินให้ค่าความแข็งแรง ณ จุดแรงดึงสูงสุด และมอดูลัสมีค่าลดลง 87.06 % และ 74.80 % ตามลำดับ ซึ่งมีค่าลดลงมากกว่าฟิล์ม TPCS ที่ปรับปรุงด้วยอะคาร์ 20 % เมื่อเปรียบเทียบกับก่อนฝังดิน ซึ่งสัมพันธ์กับผลการดูดซับความชื้นที่ฟิล์ม TPAS ที่ปรับปรุงด้วยอะคาร์ 20 % ดูดซับความชื้นได้มากกว่า ฟิล์ม TPCS ที่ปรับปรุงด้วยอะคาร์ 20 % (รูปที่ 4.11) ทั้งนี้เป็นผลมาจากความชื้นหรือน้ำเข้าไปแทรกในส่วนที่เป็นอสัณฐาน เกิดการตัดขาดของสายโซ่ และจุลินทรีย์อาจจะเข้าไปทำลายในส่วนที่เป็นอสัณฐานของฟิล์ม ส่งผลให้ฟิล์ม TPAS ที่ปรับปรุงด้วยอะคาร์ 20 % มีความสามารถในการย่อยสลายเร็วที่สุด

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

จากการเตรียมฟิล์ม TPCS และ TPAS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอะคาร์ในปริมาณ 0%, 10% และ 20% ของน้ำหนักแป้งโดยใช้เทคนิคการกดอัด จากนั้นศึกษาปริมาณของอะคาร์ที่มีผลต่อหมู่ฟังก์ชัน เปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก สัณฐานวิทยา สมบัติเชิงกล สมบัติการดูดซับความชื้น สมบัติทางความร้อน และสมบัติการย่อยสลาย ของฟิล์ม TPCS และ TPAS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอะคาร์ในปริมาณต่างๆ สรุปผลได้ดังนี้

5.1 สรุปผลการวิจัย

1. จากการศึกษาหมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่อง FTIR พบว่าในฟิล์ม TPCS และ TPAS ทุกตัวอย่างพิกที่ตำแหน่ง $3300-3600\text{ cm}^{-1}$ และที่ตำแหน่ง $1400-1450\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเป็นการสั่นของหมู่ไฮดรอกซิลเคลื่อนไปที่เลขคลื่นลดลง แสดงว่า เกิดพันธะไฮโดรเจนขึ้นใหม่ระหว่างแป้งและอะคาร์
2. จากการศึกษาการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD) พบว่าโครงสร้างเป็นแบบ V_H -type และค่าเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณอะคาร์เพิ่มมากขึ้น และพบว่าฟิล์ม TPAS มีแนวโน้มความเป็นผลึกใกล้เคียงฟิล์ม TPCS
3. จากการศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่า เมื่อปริมาณอะคาร์เพิ่มขึ้นฟิล์มแป้งทั้งสองชนิดมีลักษณะพื้นผิวและภาคตัดขวางที่ยังคงเป็นเนื้อเดียวกันอยู่ แสดงถึงการยึดเกาะที่ดีระหว่างแป้งกับอะคาร์
4. จากการศึกษาสมบัติเชิงกล พบว่า ฟิล์ม TPCS และ TPAS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอะคาร์มีค่าความความแข็งแรง ณ จุดแรงดึงสูงสุด และค่ามอดูลัสเพิ่มมากขึ้น เมื่อปริมาณอะคาร์เพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ฟิล์ม TPCS และ TPAS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอะคาร์ 20% มีค่าความแข็งแรง ณ จุดแรงดึงสูงสุดและค่ามอดูลัสสูงสุด

5. จากการศึกษาการดูดซับความชื้น พบว่าฟิล์ม TPCS และ TPAS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอะคาร์ ดูดซับความชื้นได้มากขึ้น เมื่อปริมาณอะคาร์เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ฟิล์ม TPAS สามารถดูดซับความชื้นได้มากกว่าฟิล์ม TPCS

6. จากการทดสอบทางความร้อน พบว่า อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของฟิล์ม TPCS และ TPAS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอะคาร์ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อปริมาณอะคาร์เพิ่มขึ้น

7. จากการทดสอบสมบัติเชิงกลหลังการฝังดิน พบว่าฟิล์ม TPCS และ TPAS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอะคาร์ในปริมาณต่างๆ ให้สมบัติเชิงกลลดลง และฟิล์ม TPAS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอะคาร์ 20% มีอัตราการย่อยสลายเร็วที่สุด ส่วนฟิล์ม TPCS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอะคาร์ 0% ย่อยสลายช้าที่สุด

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาส่วนเสริมแรงชนิดอื่นที่มีความสามารถในการเสริมแรงนอกจากอะคาร์ ลงในฟิล์มเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช เช่น กัมธรรมชาติชนิดต่างๆ เพื่อเพิ่มสมบัติเชิงกล สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลายมากขึ้น
2. อาจศึกษาเพิ่มเติมถึงปริมาณสารกันเสีย เพื่อยืดอายุการใช้งานของฟิล์ม
3. ควรทำการเปรียบเทียบแบ่งชนิดอื่นๆ ที่มีองค์ประกอบทางเคมีต่างกัน ซึ่งอาจให้สมบัติต่างๆของฟิล์มเปลี่ยนไป
4. ในการทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดิน ควรควบคุมสภาวะทดสอบในระบบเปิด เพื่อให้เหมือนในสภาวะจริง
5. ควรเพิ่มการทดสอบการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันหลังจากการทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดิน
6. ศึกษาวิธีการขึ้นรูปวิธีอื่น เพื่อการนำไปใช้ที่หลากหลาย

เอกสารอ้างอิง

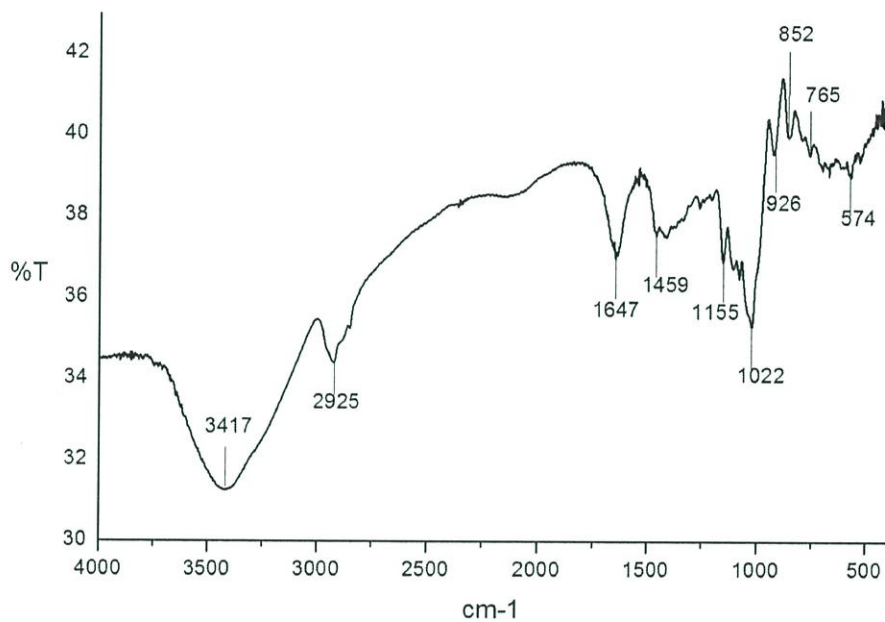
- [1] กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ. เทคโนโลยีของแป้ง. พิมพ์ครั้งที่ 3 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2546
- [2] การย่อยสลายของพลาสติก. [ออนไลน์]. เข้าถึงจาก : http://www2.mtec.or.th/th/special/biodegradable_plastic/type_de_plas.html. (วันสืบค้นข้อมูล : 1 กันยายน 2556).
- [3] การใช้งานผลิตภัณฑ์พลาสติกย่อยสลายได้. [ออนไลน์]. เข้าถึงจาก : http://www2.mtec.or.th/th/special/biodegradable_plastic/usage_de_plas.html. (วันสืบค้นข้อมูล : 1 กันยายน 2556).
- [4] วัฏจักรของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ. [ออนไลน์]. เข้าถึงจาก : <http://european-bioplastic.org>. (วันสืบค้นข้อมูล : 1 กันยายน 2556).
- [5] เคมีและสมบัติของแป้ง. [ออนไลน์]. เข้าถึงจาก : <http://eu.lib.kmutt.ac.th/elearning/Courseware/BCT611/chapter2.html>. (วันสืบค้นข้อมูล : 1 กันยายน 2556).
- [6] แป้งมันสำปะหลัง. [ออนไลน์]. เข้าถึงจาก : http://www.thaipta.com/thaipta/portals/0/file/ascn_potato1.doc (วันสืบค้นข้อมูล : 2 กันยายน 2556).
- [7] องค์ประกอบทางเคมีของแป้งมันสำปะหลัง. [ออนไลน์]. เข้าถึงจาก : http://gains.org.gh/articles/gjas_v12_p143_145.pdf (วันสืบค้นข้อมูล : 2 กันยายน 2556).
- [8] กล้าณรงค์ ศรีรอด, 2544. แป้งและอนุพันธ์ ของแป้ง : การผลิตและประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร. เอกสารประกอบการบรรยายทางวิชาการ – มุลนิธิอานินโอะโมะโด้ะ. กรุงเทพฯ : 1-8
- [9] ทศนัย อรรถพรพิทักษ์ กัลยา เลหาสงคราม และ สายวรุฬ ชัยวานิชศิริ. สมบัติทางเคมีและทางกายภาพของสตาร์ชท้าวายม่อม. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2546.

- [10] ต้นทำวยายม่อม. [ออนไลน์]. เข้าถึงจาก : <http://thaiherb.info/> (วันสืบค้นข้อมูล : 2 กันยายน 2556).
- [11] องค์ประกอบทางเคมีร้อยละน้ำหนักแห้งของแป้งทำวยายม่อม. [ออนไลน์]. เข้าถึงจาก : <http://lib2.dss.go.th> (วันสืบค้นข้อมูล : 2 กันยายน 2556).
- [12] อะการ์. [ออนไลน์]. เข้าถึงจาก : <http://www.lsbu.ac.uk/water/hyagar.html> (วันสืบค้นข้อมูล : 2 กันยายน 2556).
- [13] C.Alvarez, B.B Fernandez, A.M Puga. “**Crosslinked ionic polysaccharides for stimu- sensitive drug delivery**”, *Advanced Drug Delivery Reviews*, 65 (2013) 1148-1171.
- [14] อรุษา สรวารี. สารเติมแต่งพอลิเมอร์เล่ม 1. ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2546
- [15] สมศักดิ์ วรมงคลชัย. สารปรับแต่งพอลิเมอร์. พิมพ์ครั้งที่ 1 ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2547
- [16] แมกนีเซียมสเตียเรท. [ออนไลน์]. เข้าถึงจาก : <http://www.sciencelab.com/msds.php?msdsId=9927217>. (วันสืบค้นข้อมูล : 8 กันยายน 2556)
- [17] แมกนีเซียมสเตียเรท [ออนไลน์]. เข้าถึงจาก : http://en.wikipedia.org/wiki/Magnesium_stearate. (วันสืบค้นข้อมูล : 12 ธันวาคม 2556)
- [18] โครงสร้างแมกนีเซียมสเตียเรท. [ออนไลน์]. เข้าถึงจาก : http://en.wikipedia.org/wiki/Magnesium_stearate. (วันสืบค้นข้อมูล : 8 กันยายน 2556)
- [19] เจริญ นาคะสรรค์. เทคโนโลยีเบื้องต้นทางพลาสติก. พิมพ์ครั้งที่ 1 ภาควิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี, 2545
- [20] H. Tian, G. Xu, B. Yang and G. Guo “**Microstructure and mechanical properties of soy protein/agar blend films: Effect of composition and processing methods**”, *Journal of Food Engineering*, 107 (2011) 21-26.
- [21] Y. Wu, F. Geng P R. Chang, J. Yu and X. Ma “**Effect of agar on the microstructure and performance of potato starch film**”, *Carbohydrate Polymers*, 76 (2009) 299-304.

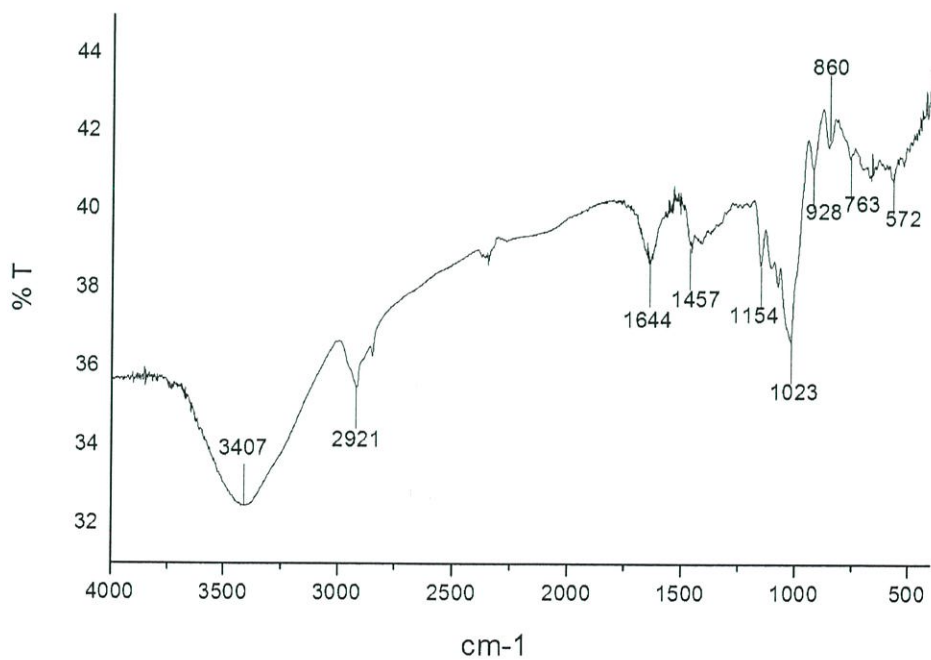
- [22] D. Phan, F. Debeaufort, D. Luu and A. Voilley “**Moisture barrier, wetting and mechanical properties of shellac/agar or shellac/cassava starch bilayer bio-membrane for food applications**”, Original Research Article Journal of Membrane Science, 325 (2008) 277-283.
- [23] Y. Freile-Pelegri, T. Madera-Santana and D. Robledo “**Degradation of agar film in a humid tropical climate: Thermal, mechanical, morphological and structural changes**”, Polymer Degradation and Stability, 92 (2007) 244-252.
- [24] D. Phan, F. Debeaufort, A. Voilley and D. Luu “**Biopolymer interactions affect the functional properties of edible films based on agar, cassava starch and arabinoxylan blends**”, Original Research Article Journal of Food Engineering, 90 (2009) 548-558.
- [25] วชิร คุณวิวัฒน์, จีราวรรณ โสธร และนสวรรณวรงค์ สุทชะ. สมบัติต่างๆ ของเทอร์โมพลาสติกสตา์ชจากแป้งข้าวเจ้าผสมกับแป้งมันสำปะหลัง แป้งท้าวยายม่อม หรือแป้งถั่วเขียว. โครงการงานพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2552
- [26] นิสานาถ หลิมศิริวงษ์, รัชชนา คงจินตมณี และสุภาวรัตน์ สุระกิจ. การปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตา์ชจากแป้งข้าวเหนียวโดยใช้ผงวุ้น. โครงการงานพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2553
- [27] C. Chung and M. Lee. “**Characterization of cotton fabric scouring by FT-IR ATR spectroscopy**”, Carbohydrate Polymer, 58(2004) 417-420.
- [28] K.Aoi, A. Takasu and M. Okada. “**DNA-based polymer hybrids Part 1. Compatibility and physical properties of poly(vinyl alcohol)/DNA sodium salt blend**”, Polymer, 41 (2000) 2847-2853
- [29] A.A.S. Curvelo, A.J.F. Carvalho and J.A.M Agnello. “**Thermoplastic starch cellulosic fibers composite preliminary results**”, Carbohydrate Polymer, 45 (2001) 183-188.

- [30] J.L.Guimarães, F.Wypych, C.KSaul,L.P.Ramos and K.G.Satyanarana.“**Studies of the processing and characterization of corn starch and its composites with banana and sugarcane fibers from Brazil**”, Carbohydrate Polymers, (2010) 130-138
- [31] A.A.S. Curvelo, A.J.F. Carvalho and J.A.M Agnello. “**Thermoplastic starch cellulosic fibers composite preliminary results**”, Carbohydrate Polymer, 45 (2001) 183-188.
- [32] Jong-Whan Rhima, Long-Feng Wanga, Yonghoon Leeb and SeokIn Hong. “**Preparation and characterization of bio-nanocomposite films of agar and silver nanoparticles: Laser ablation method**”, Carbohydrate Polymer, 103 (2014) 456–465.
- [33] L. Dobricau, P.A Sreekumar, R. Satah, N. Leblane, C. Terrie, R. Gattin and J.M. Saiter. “**Wheat flour thermoplastic matrix reinforced by waste fiber:Agro-green composite**”, Composites Part A : Applied Science and Manufacturing, 40 (2009) 329-334.

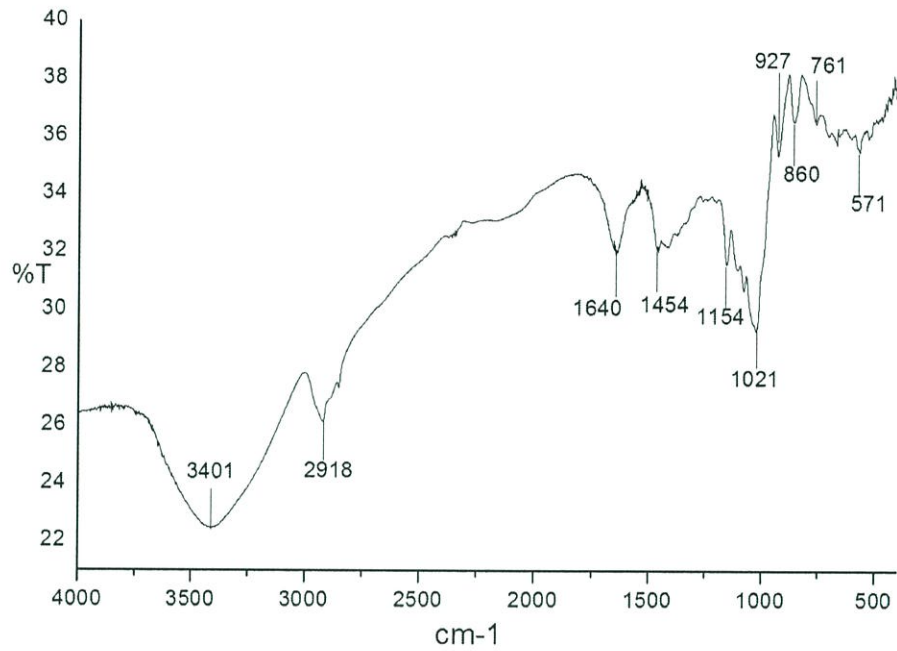
ภาคผนวก ก



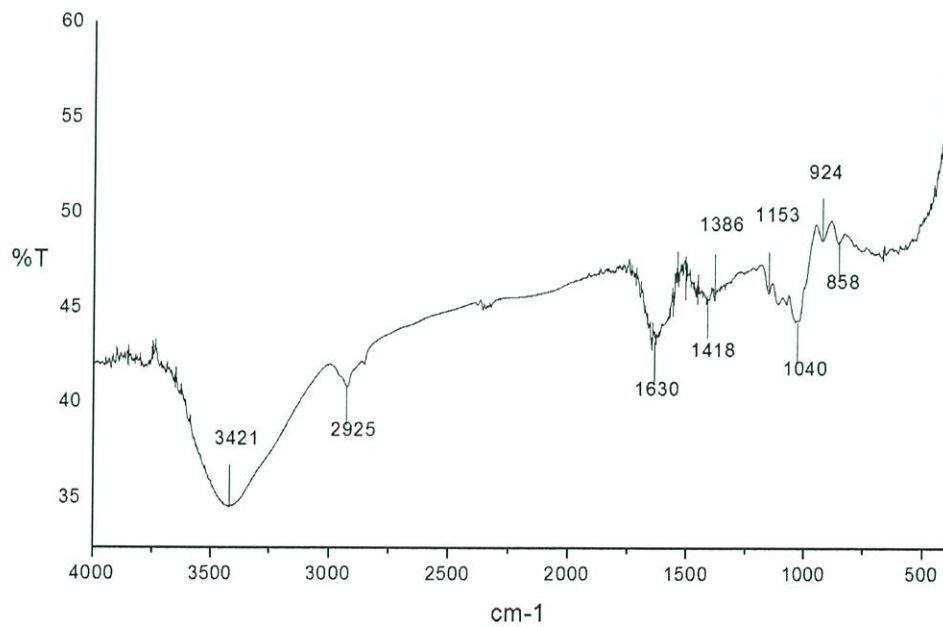
อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์ม TPCS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอะการ์ 0%



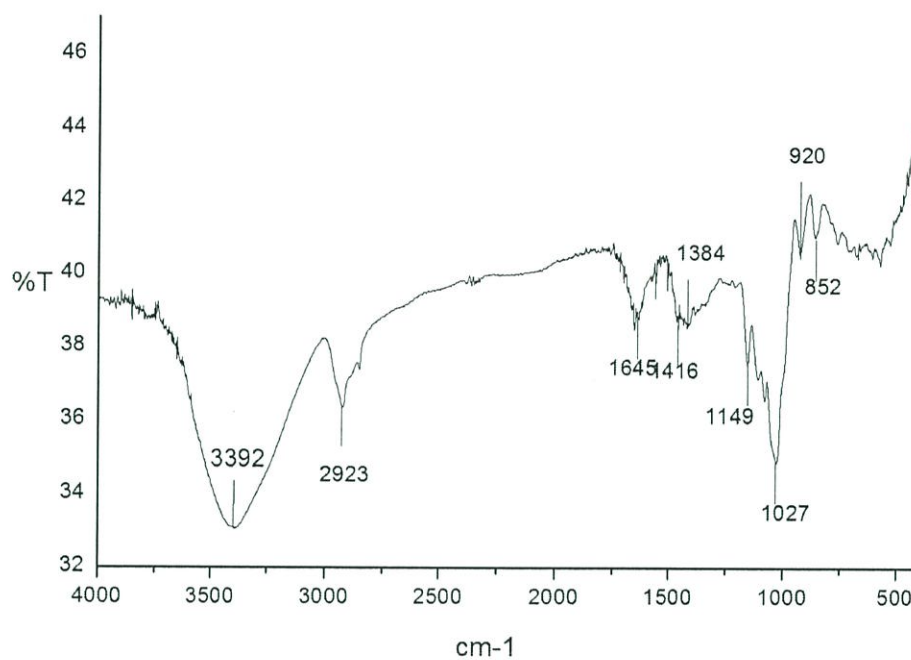
อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์ม TPCS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอะการ์ 10%



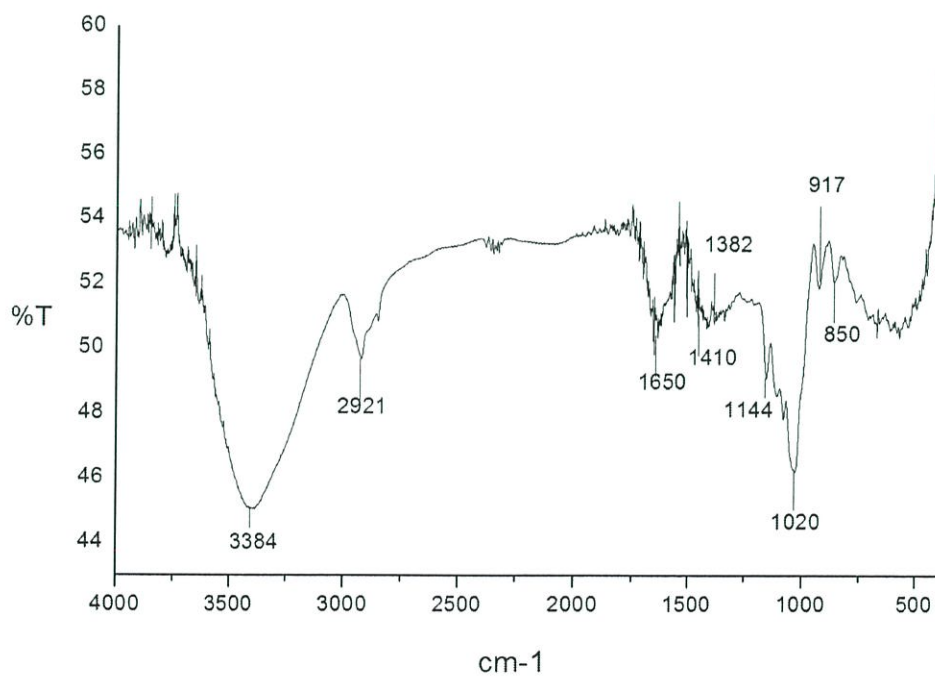
อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์ม TPCS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอะการ์ 10%



อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์ม TPAS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอะการ์ 0%

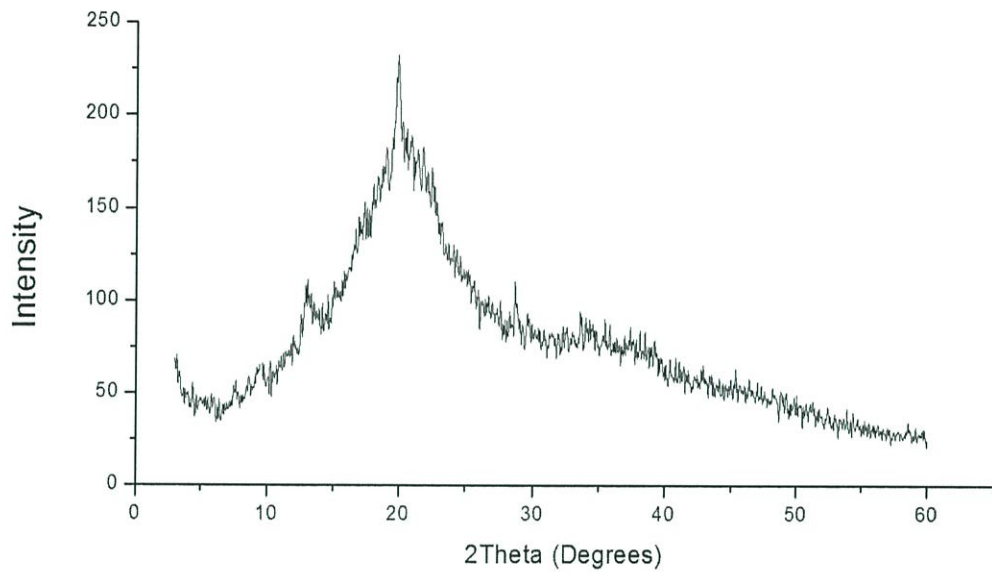


อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์ม TPAS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอะการ์ 10%

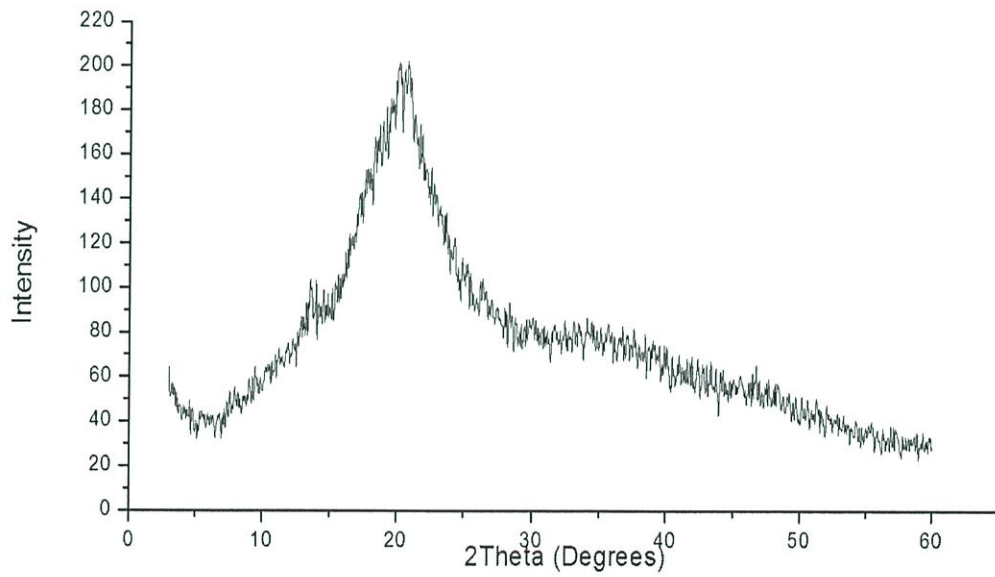


อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์ม TPAS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอะการ์ 20%

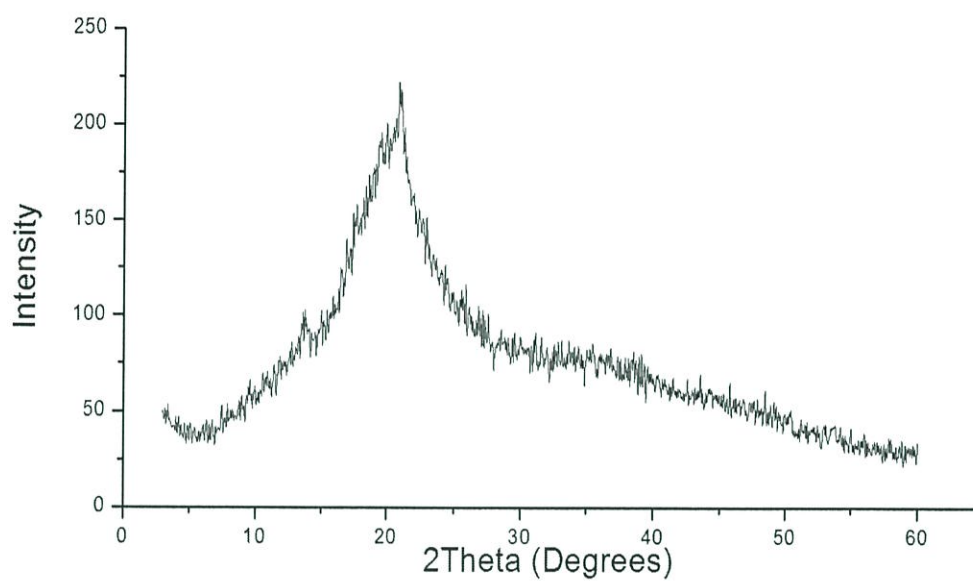
ภาคผนวก ข



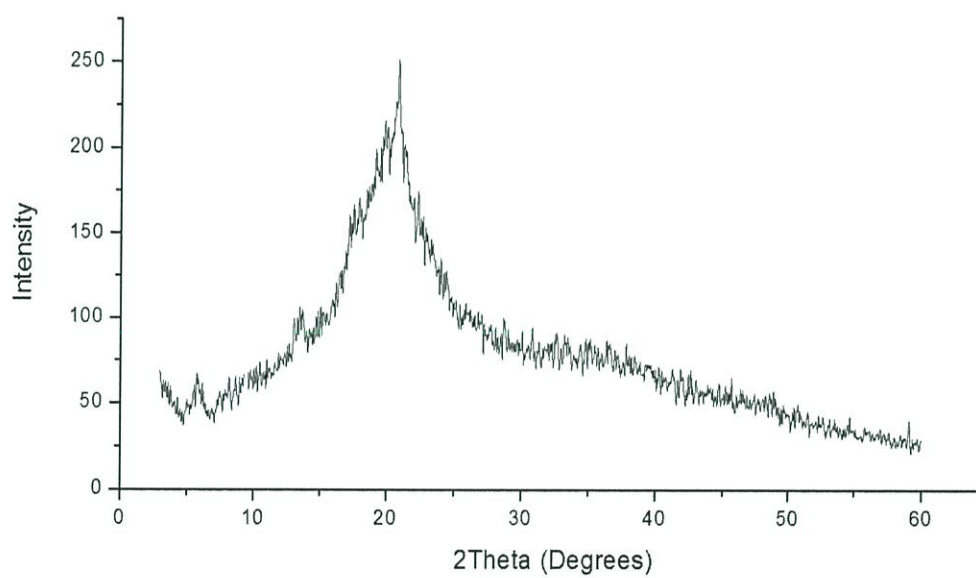
ดิฟแฟรคโตแกรมของฟิล์ม TPCS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอะการ์ 0%



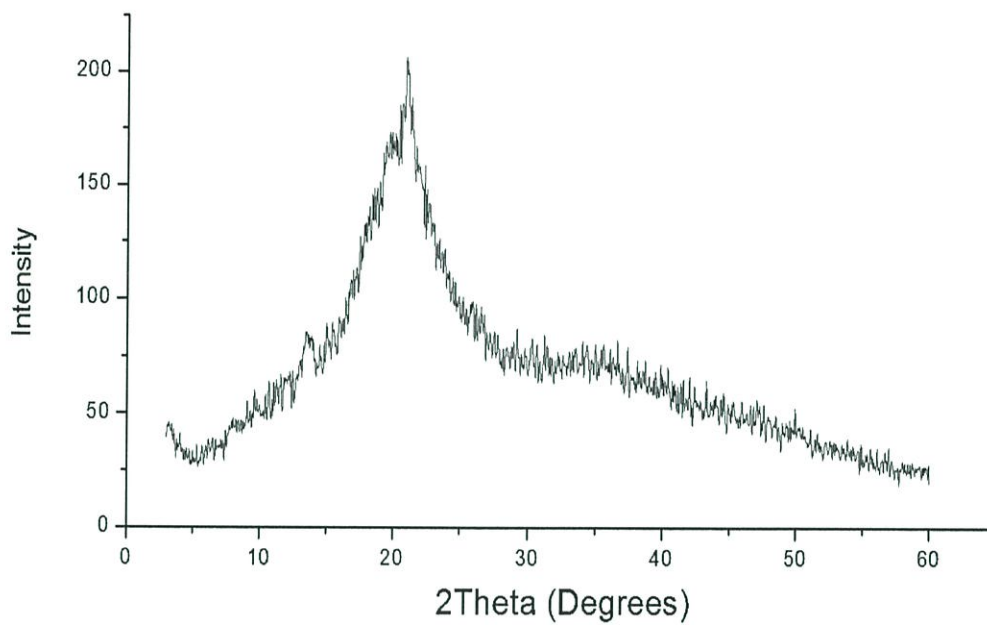
ดิฟแฟรคโตแกรมของฟิล์ม TPCS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอะการ์ 10%



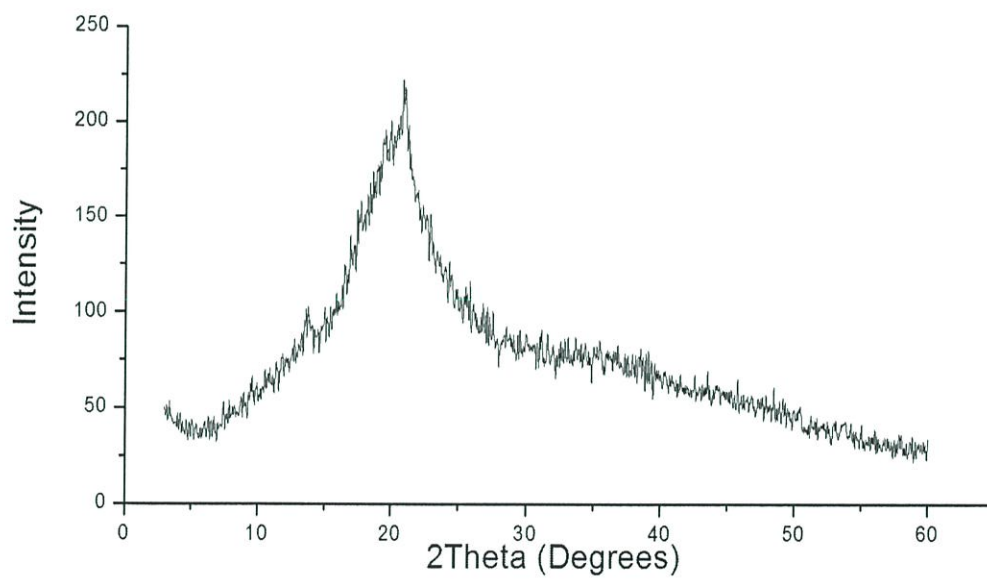
ดิฟแฟรคโตแกรมของฟิล์ม TPCS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอะการ์ 20%



ดิฟแฟรคโตแกรมของฟิล์ม TPAS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอะการ์ 0%



ดิฟแฟรคโตแกรมของฟิล์ม TPAS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอะการ์ 10%



ดิฟแฟรคโตแกรมของฟิล์ม TPAS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอะการ์ 20%

ภาคผนวก ค

ตารางแสดงสมบัติเชิงกลของฟิล์ม TPCS และ TPAS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอะการ

ค่าแรงดึงสูงสุด

ชั้นทดสอบ	Load (N)
TPCS + อะการ 0%	6.90 ± 0.35
TPCS + อะการ 10%	8.74 ± 0.44
TPCS + อะการ 20%	15.96 ± 0.80
TPAS + อะการ 0%	4.43 ± 0.22
TPAS + อะการ 10%	13.24 ± 0.66
TPAS + อะการ 20%	19.14 ± 0.96

ความเค้น ณ จุดแรงดึงสูงสุด

ชั้นทดสอบ	Stress at max load (MPa)
TPCS + อะการ 0%	0.25 ± 0.01
TPCS + อะการ 10%	0.93 ± 0.05
TPCS + อะการ 20%	1.36 ± 0.07
TPAS + อะการ 0%	0.56 ± 0.03
TPAS + อะการ 10%	1.16 ± 0.06
TPAS + อะการ 20%	1.37 ± 0.07

เปอร์เซ็นต์ความเครียด ณ จุดแรงดึงสูงสุด

ชั้นทดสอบ	Strain at max load
TPCS + อะการ 0%	90.40 ± 4.52
TPCS + อะการ 10%	85.99 ± 4.30
TPCS + อะการ 20%	64.40 ± 3.22
TPAS + อะการ 0%	64.39 ± 3.22
TPAS + อะการ 10%	54.74 ± 2.74
TPAS + อะการ 20%	40.61 ± 2.03

มอดุลัส

ชั้นทดสอบ	Young's modulus (MPa)
TPCS + อะการ 0%	0.57 ± 0.03
TPCS + อะการ 10%	2.21 ± 0.11
TPCS + อะการ 20%	4.25 ± 0.21
TPAS + อะการ 0%	1.67 ± 0.08
TPAS + อะการ 10%	4.27 ± 0.21
TPAS + อะการ 20%	7.09 ± 0.35

การยืดออก ณ จุดแรงดึงสูงสุด

ชนิดทดสอบ	Extension at max load (mm)
TPCS + อะการี 0%	41.48 ± 2.07
TPCS + อะการี 10%	43.00 ± 2.15
TPCS + อะการี 20%	32.54 ± 1.63
TPAS + อะการี 0%	34.42 ± 1.72
TPAS + อะการี 10%	27.37 ± 1.37
TPAS + อะการี 20%	19.81 ± 0.99

ภาคผนวก ง

ตารางแสดงเปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของฟิล์ม TPCS และ TPAS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอะการ์ใน
ปริมาณต่างๆ ที่ช่วงความชื้นสัมพัทธ์ 70-80%

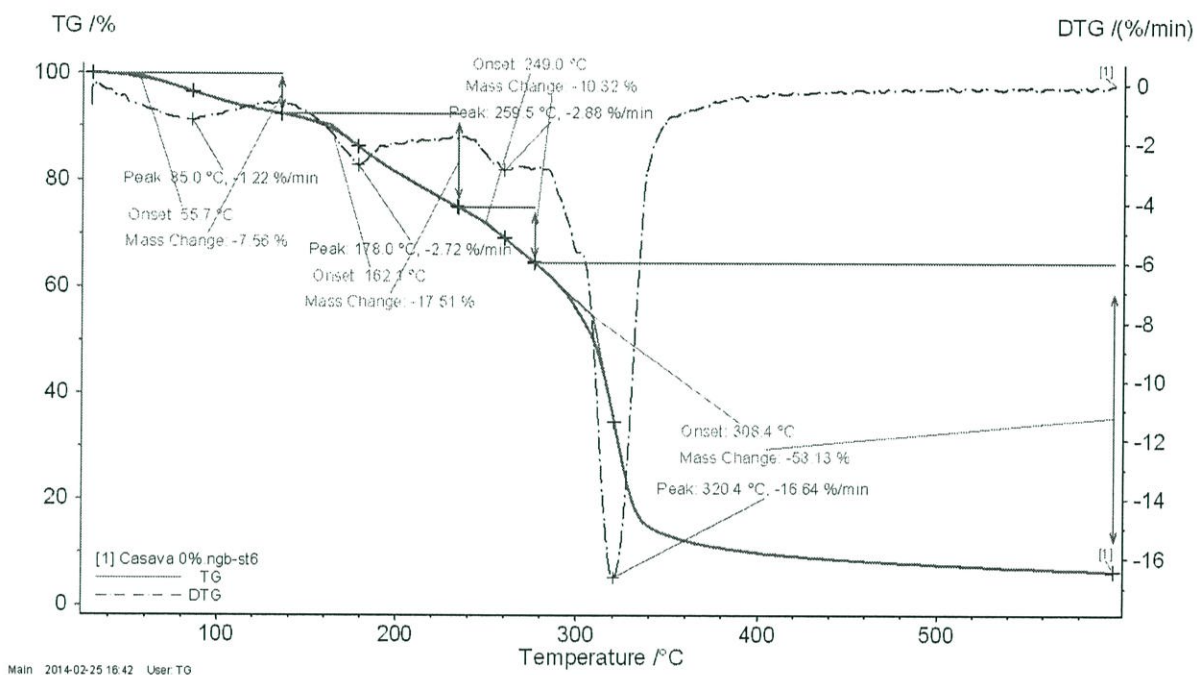
วันที่	TPCS + อะการ์ 0%	TPCS + อะการ์ 10%	TPCS + อะการ์ 20%	TPAS + อะการ์ 0%	TPAS + อะการ์ 10%	TPAS + อะการ์ 20%
1	0	0	0	0	0	0
2	2.08	6.45	7.27	1.53	8.62	2.30
3	8.33	12.10	12.12	2.29	13.79	5.17
4	11.81	15.32	13.94	4.58	14.66	6.90
5	13.89	16.94	16.36	7.63	17.24	8.05
6	17.36	18.55	17.58	9.16	19.83	8.62
7	15.97	20.16	18.79	11.45	18.97	10.34
8	16.67	20.97	19.39	12.21	20.69	10.92
9	16.67	22.58	21.82	13.74	19.83	12.64
10	20.14	21.77	21.82	14.50	22.41	13.79
11	21.53	24.19	23.03	16.03	24.14	14.37
12	21.53	25.00	23.64	18.32	24.14	15.52
13	22.22	24.19	23.64	19.85	25.86	16.67
14	21.53	21.77	23.03	22.90	25.86	14.37
15	19.44	22.58	20.00	22.14	27.59	15.52
16	23.61	25.00	23.64	23.66	26.72	18.97
17	25.69	27.42	27.88	25.19	26.72	18.39
18	23.61	25.81	25.45	24.43	27.59	19.54
19	22.22	25.81	25.45	25.95	26.72	18.39
20	22.92	26.61	24.85	22.90	24.14	17.82

วันที่	TPCS + อะการี 0%	TPCS + อะการี 10%	TPCS + อะการี 20%	TPAS + อะการี 0%	TPAS + อะการี 10%	TPAS + อะการี 20%
21	22.92	26.61	24.85	24.43	23.28	17.24
22	22.92	27.42	23.64	25.95	26.72	16.09
23	22.22	27.42	24.85	22.14	25.00	17.82
24	23.61	27.42	25.45	23.66	27.59	18.97
25	23.61	25.00	24.24	24.43	28.45	17.24
26	24.31	26.61	26.67	25.19	25.86	18.39
27	25.00	27.42	25.45	25.19	26.72	19.54
28	25.00	27.42	26.67	26.72	26.72	18.97
29	26.39	28.23	26.67	29.01	31.03	21.26
30	27.08	29.03	26.67	27.48	31.90	21.26

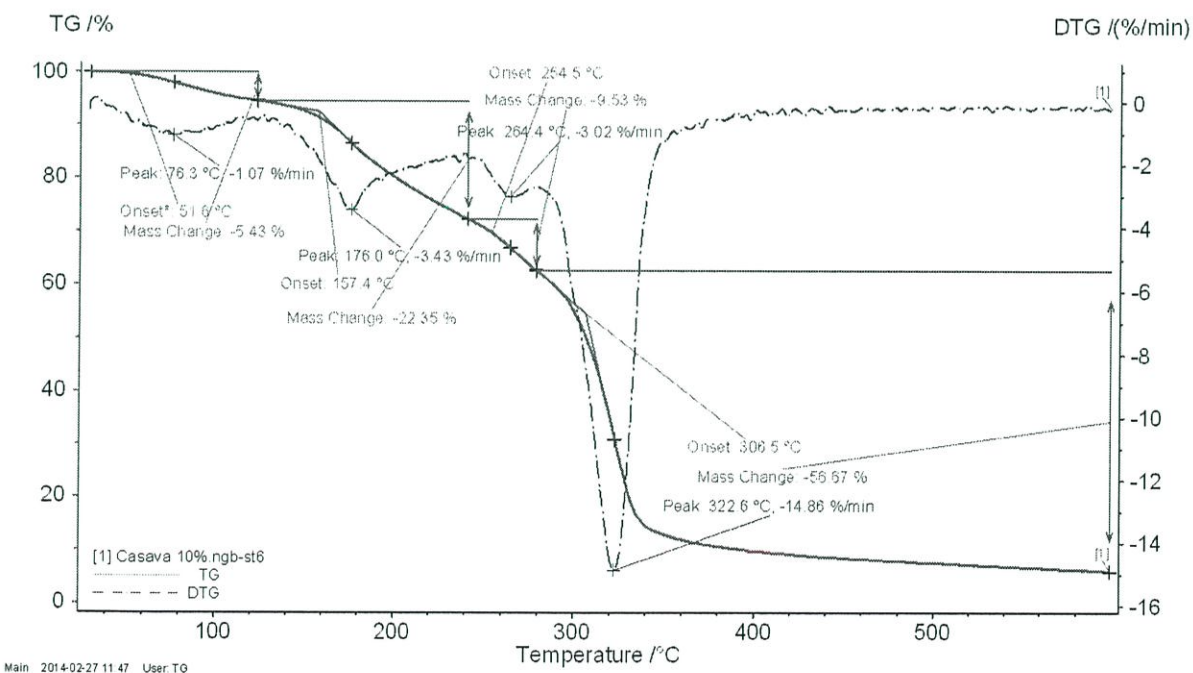
ตารางแสดงเปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของฟิล์ม TPCS และ TPAS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอะการีน
ปริมาณต่างๆ ที่ช่วงความชื้นสัมพัทธ์ 90-100%

วันที่	TPCS + อะการีน 0%	TPCS + อะการีน 10%	TPCS + อะการีน 20%	TPAS + อะการีน 0%	TPAS + อะการีน 10%	TPAS + อะการีน 20%
1	0	0	0	0	0	0
2	14.41	16.81	12.68	10.20	12.24	14.50
3	27.93	26.89	26.76	14.97	25.17	26.72
4	33.33	36.13	35.92	18.37	32.65	35.11
5	37.84	42.02	40.14	34.69	41.50	42.75
6	48.65	45.38	51.41	40.14	44.90	47.33
7	53.15	52.94	61.27	47.62	49.66	51.91
8	59.46	57.98	69.72	53.06	56.46	57.25
9	58.56	59.66	69.72	54.42	66.67	64.89
10	55.86	63.87	65.49	55.78	64.63	68.70
11	57.66	65.55	66.90	56.46	65.31	70.23
12	60.36	67.23	67.61	57.82	65.99	71.76
13	53.15	64.71	64.08	59.86	61.90	74.81
14	54.95	65.55	64.79	61.22	63.27	75.57
15	54.95	65.55	61.97	66.67	64.63	75.57

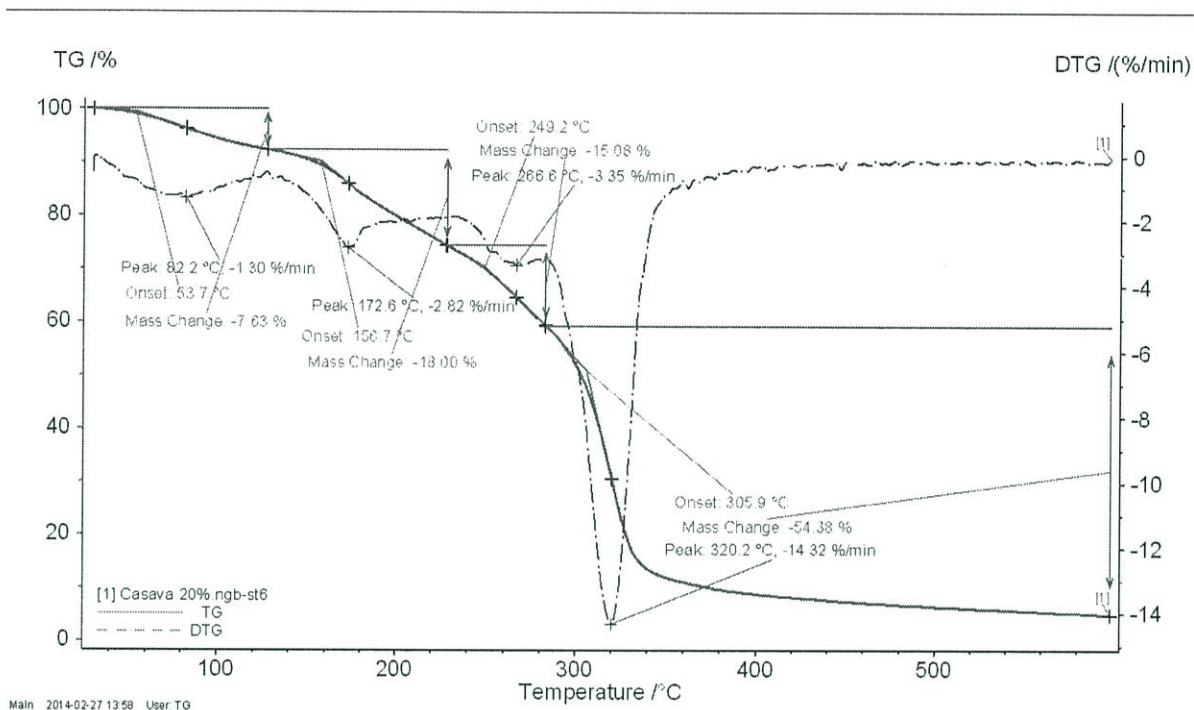
ภาคผนวก จ



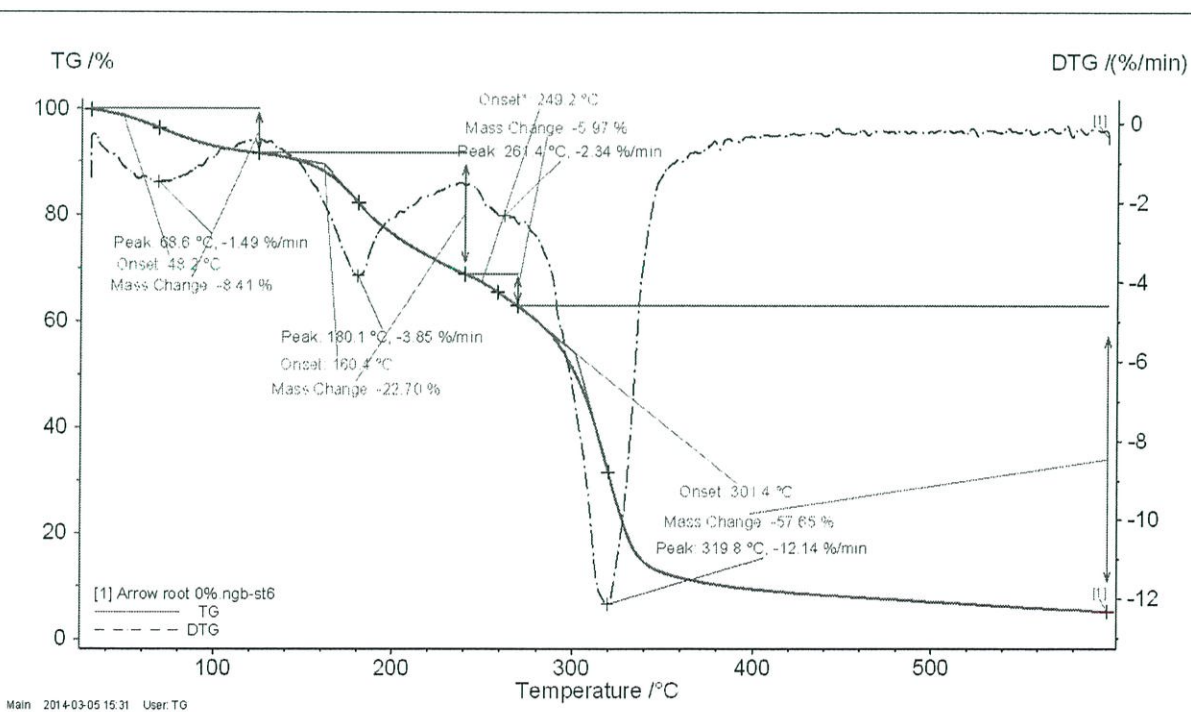
เทอร์โมแกรมของฟิล์ม TPCS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอะคาร์ 0%



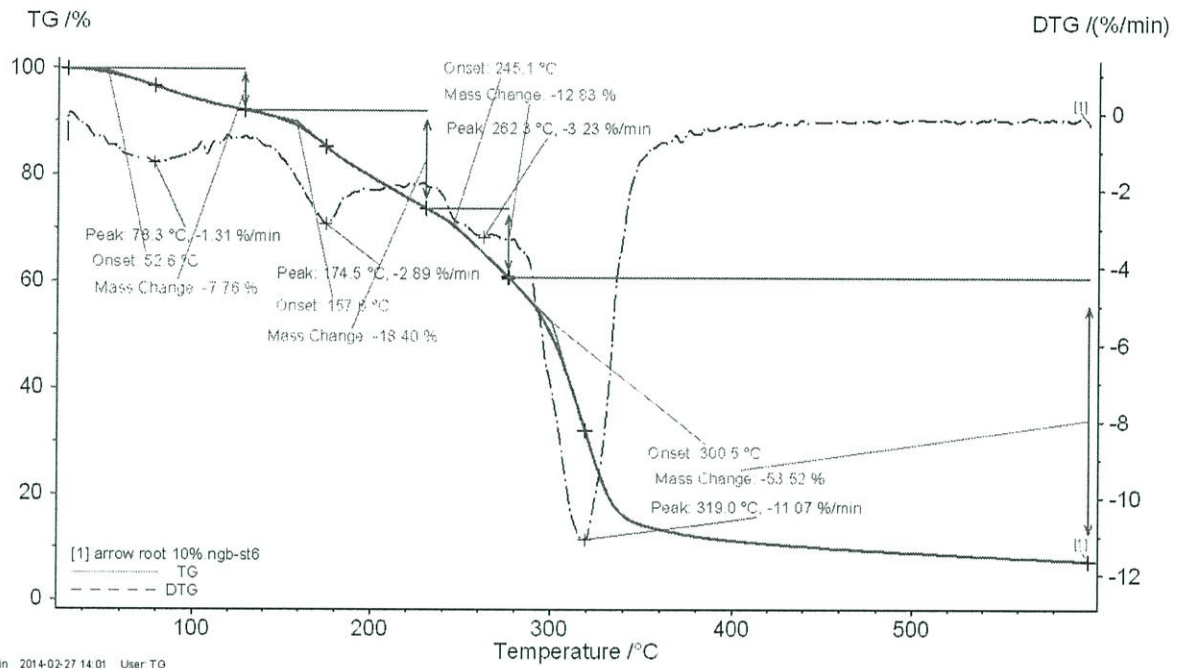
เทอร์โมแกรมของฟิล์ม TPCS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอะคาร์ 10%



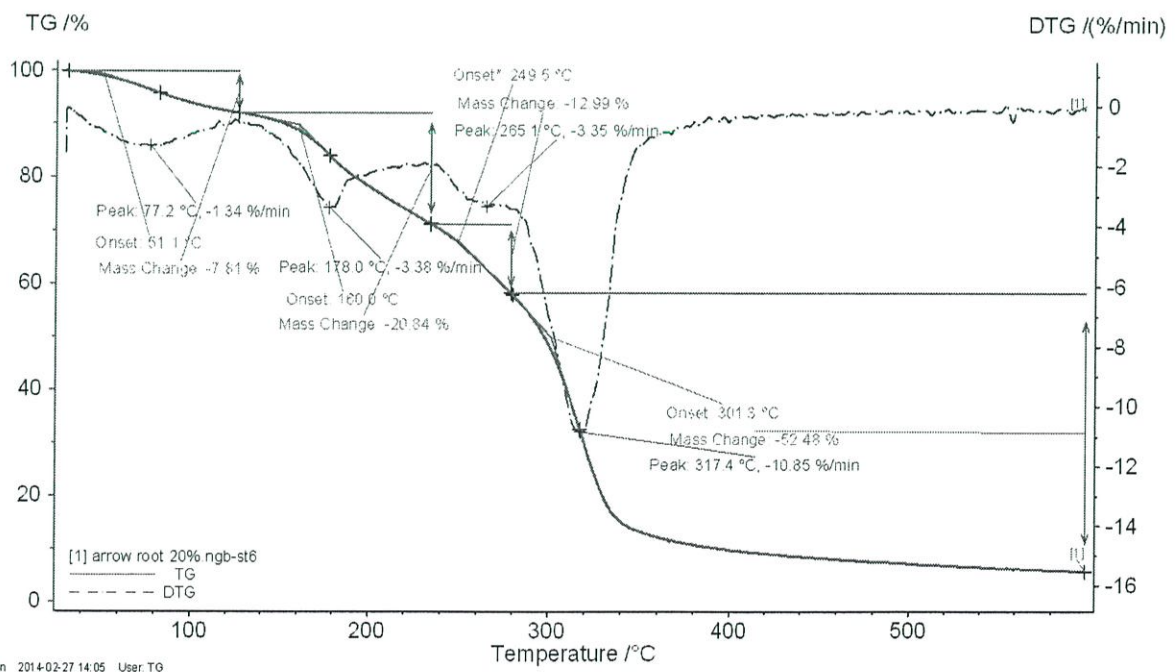
เทอร์โมแกรมของฟิล์ม TPCS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอะการ์ 20%



เทอร์โมแกรมของฟิล์ม TPAS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอะการ์ 0%



เทอร์โมแกรมของฟิล์ม TPAS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอะการ์ 10%



เทอร์โมแกรมของฟิล์ม TPAS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอะการ์ 20%

ภาคผนวก ก

ความแข็งแรง ณ จุดแรงดึงสูงสุด

ชนิดทดสอบ	Stress at max load (MPa)	
	ก่อนฝังดิน	หลังฝังดิน
TPCS + อะการี่ 0%	0.25 ± 0.01	0.21 ± 0.01
TPCS + อะการี่ 10%	0.93 ± 0.05	0.23 ± 0.01
TPCS + อะการี่ 20%	1.36 ± 0.07	0.28 ± 0.01
TPAS + อะการี่ 0%	0.56 ± 0.02	0.04 ± 0.002
TPAS + อะการี่ 10%	1.16 ± 0.05	0.16 ± 0.01
TPAS + อะการี่ 20%	1.37 ± 0.07	0.17 ± 0.01

เปอร์เซ็นต์ความเครียดสูงสุด

ชนิดทดสอบ	Strain at max load	
	ก่อนฝังดิน	หลังฝังดิน
TPCS + อะการี่ 0%	90.40 ± 4.52	20.82 ± 1.04
TPCS + อะการี่ 10%	85.99 ± 4.30	18.63 ± 0.93
TPCS + อะการี่ 20%	64.40 ± 3.22	17.80 ± 0.89
TPAS + อะการี่ 0%	64.39 ± 3.21	22.31 ± 1.12

TPAS + อะการ์ 10%	54.74 ± 2.73	17.41 ± 0.87
TPAS + อะการ์ 20%	40.61 ± 2.03	15.96 ± 0.80

มอดูลัส

ชนิดทดสอบ	Young's modulus (MPa)	
	ก่อนฝังดิน	หลังฝังดิน
TPCS + อะการ์ 0%	0.57 ± 0.23	1.66 ± 0.08
TPCS + อะการ์ 10%	2.21 ± 0.11	1.85 ± 0.09
TPCS + อะการ์ 20%	4.25 ± 0.21	2.20 ± 0.11
TPAS + อะการ์ 0%	1.67 ± 0.83	1.35 ± 0.07
TPAS + อะการ์ 10%	4.27 ± 0.21	1.49 ± 0.07
TPAS + อะการ์ 20%	7.09 ± 0.35	1.78 ± 0.09