

การปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้ง
ท้าวยายม่อมด้วยไททาเนียมไดออกไซด์และซิงค์ออกไซด์

PROPERTIES MODIFICATION OF THERMOPLASTIC
ARROWROOT STARCH BY TiO_2 AND ZnO



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2561

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PROPERTIES MODIFICATION OF THERMOPLASTIC
ARROWROOT STARCH BY TiO_2 AND ZnO



THANAYUT JONGRUNGROTBAWORN
HATHAITHIP THANASAPTRAKUL

A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENTS FOR
THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE (INDUSTRIAL CHEMISTRY)
DEPARTMENT OF CHEMISTRY, FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2018

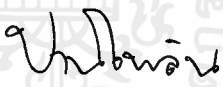
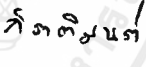
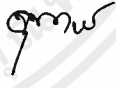
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ การปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกจากแป้งท้าวยาม่อมด้วยไททาเนียมไดออกไซด์และซิงค์ออกไซด์
Properties modification of thermoplastic arrowroot starch by TiO₂ and ZnO

ชื่อนักศึกษา นายธนายุทธ จรุงโรจน์บวร รหัสนักศึกษา 58050485
นางสาวหทัยทิพย์ ธนทรัพย์ตระกูล รหัสนักศึกษา 58050568

ปริญญา วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)
ภาควิชา เคมี
คณะ วิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)
ปีการศึกษา 2561
อาจารย์ที่ปรึกษา รศ. ดร. จุฑารัตน์ ปรัชญาวารากร

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม) ประจำปีการศึกษา 2561

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร. ปานไพลิน สีหาราช ประธานกรรมการ	
ดร. กิตติมนต์ จิระกิตติดุสย์ กรรมการ	
รศ.ดร. จุฑารัตน์ ปรัชญาวารากร กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งท้าวยายม่อมด้วยไททาเนียมไดออกไซด์และซิงค์ออกไซด์
ชื่อนักศึกษา	นายธนายุทธ จรุงโรจน์บวร รหัสนักศึกษา 58050485 นางสาวหทัยทิพย์ ธนทรัพย์ตระกูล รหัสนักศึกษา 58050568
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)
ภาควิชา	เคมี
คณะ	วิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)
ปีการศึกษา	2561
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร.จุฑารัตน์ ปรัชญาวรากร

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสมบัติของพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้จากเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช จากแป้งท้าวยายม่อม (Thermoplastic arrowroot starch, TPAS) ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยไททาเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide : TiO_2) และซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide : ZnO) โดยทำการศึกษาผลของปริมาณของไททาเนียมไดออกไซด์ และซิงค์ออกไซด์ ได้แก่ 0, 10 และ 20 phr เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชถูกเตรียมโดยทำการผสมด้วยเครื่องผสมแบบปิด (Internal mixer) และขึ้นด้วยเครื่องอัดขึ้นรูป (Compression molding) จากผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน ไม่พบพีคใหม่ปรากฏในเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช นอกจากนี้ พบว่าการเพิ่มปริมาณของอนุภาคโลหะออกไซด์ทำให้เปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก ความเค้น ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด โมดูลัส เสถียรภาพทางความร้อน และดัชนีความขาวมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม เปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้น เปอร์เซ็นต์ความเครียด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด และอุณหภูมิการสลายตัวมีแนวโน้มลดลง จากผลการทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดิน พบว่าการเติมอนุภาคโลหะออกไซด์ไม่ได้ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อความสามารถในการย่อยสลายของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช นอกจากนี้พบว่าเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ปรับปรุงด้วยอนุภาคไททาเนียมไดออกไซด์ไม่สามารถต้านเชื้อจุลินทรีย์ได้ อย่างไรก็ตาม เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ปรับปรุงด้วยอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่ปริมาณ 10 และ 20 phr มีประสิทธิภาพในการต้านเชื้อ *S.aureus* ได้

คำสำคัญ : การย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ซิงค์ออกไซด์ เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช ไททาเนียมไดออกไซด์ แป้งท้าวยายม่อม

Title	Properties modification of thermoplastic arrowroot starch by TiO ₂ and ZnO
Students	Mr. Thanayut Jongrungrotbaworn Student ID 58050485 Miss Hathithip Thanasaptrakul Student ID 58050568
Degree	Bachelor of Science (Industrial Chemistry)
Department	Chemistry
Faculty	Science
University	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)
Academic Year	2018
Advisor	Assoc.Prof.Dr.Jutarat Prachayawarakorn

Abstract

This research focused on biodegradable thermoplastic arrowroot starch (TPAS) modified by titanium dioxide (TiO₂) and zinc oxide (ZnO). Different contents of titanium dioxide and zinc oxide, i.e. 0, 10 and 20 phr were varied. Thermoplastic starch was prepared by using internal mixer and compression molding machine. From FTIR analysis, no new absorbed peak was observed in thermoplastic starch. Moreover, the increase of metal oxide content resulted in the increase of crystallinity, stress at maximum load, modulus, thermal stability and whiteness index. However, water absorption, strain at maximum load and thermal decomposition temperature of the modified thermoplastic starch decreased. For biodegradation test, metal oxide was not significantly affected to the degradation of thermoplastic starch. Furthermore, thermoplastic starch modified by titanium dioxide exhibited no antibacterial activity. Nevertheless, thermoplastic starch modified by 10 and 20 phr of zinc oxide showed an antibacterial activity against *S. aureus*.

Keyword : Biodegradable, Zinc oxide, Thermoplastic starch, Titanium dioxide, Arrowroot starch

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับคำแนะนำ คำปรึกษา ความกรุณา ตลอดจนความร่วมมือของทุกๆ ท่านอันเป็นประโยชน์ต่อคณะผู้จัดทำ ดังต่อไปนี้

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร. จุฑารัตน์ ปรัชญาวรากร อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ ที่กรุณาให้คำปรึกษา ดูแลอย่างใกล้ชิด และให้คำแนะนำที่ดีในการปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่อง เกี่ยวกับการทำโครงการพิเศษนี้ จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ปานไพลิน สีหาราช และดร. กิตติมนต์ จิระกิตติดุสีย์ ที่กรุณาเป็นกรรมการตรวจสอบโครงการพิเศษ โดยกรุณาช่วยตรวจทาน ให้ข้อคิดเห็น และคำแนะนำในการทำโครงการพิเศษนี้ให้ถูกต้องสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ คุณกฤษณะ เกษประดิษฐ์ และคุณสุดใจ สอนสะอาด เจ้าหน้าที่อาคารฝึกงานทางอุตสาหกรรมเคมีและพอลิเมอร์ ที่คอยอำนวยความสะดวกและให้ความช่วยเหลือ รวมถึงให้คำแนะนำในการใช้เครื่องมือตลอดการดำเนินโครงการพิเศษนี้

ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการเคมี และเจ้าหน้าที่ห้องธุรการ สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ ที่ให้ความช่วยเหลือ คำแนะนำในการใช้อุปกรณ์ต่างๆ และอำนวยความสะดวกในการทำโครงการพิเศษให้สำเร็จไปด้วยดี

ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่ศูนย์บริการเครื่องมือ อาคารจุฬารกรณ์วลัยลักษณ์ 2 คณะวิทยาศาสตร์ ที่ให้ความช่วยเหลือ และการสอนเทคนิคต่างๆ เกี่ยวกับเครื่องมือที่ใช้ในโครงการพิเศษนี้

ขอขอบคุณพี่ๆ ปริญญาโท และปริญญาเอกทุกท่าน ที่สละเวลาในการช่วยตรวจทาน ให้คำปรึกษา และให้คำแนะนำที่ดีในการทำโครงการพิเศษจนสำเร็จไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่ให้ได้รับการศึกษา คอยอบรม เลี้ยงดู เป็นกำลังใจ และเป็นแรงผลักดันในการทำโครงการพิเศษให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี รวมถึงเพื่อนๆ และบุคคลอื่นๆ ที่ไม่ได้กล่าวถึง คณะผู้จัดทำโครงการขอขอบคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้

นายยุทธ จรุงโรจน์บวร

หทัยทิพย์ ธนทรัพย์ตระกูล

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ซ
คำย่อ/สัญลักษณ์.....	ญ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 พลาสติกย่อยสลาย	5
2.1.1 พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradable plastic).....	6
2.1.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการย่อยสลายทางชีวภาพ.....	7
2.2 การเปลี่ยนแปลงให้เป็นพลาสติก.....	8
2.2.1 เทอร์โมพลาสติกสตาเรช	8
2.2.2 การผลิตเทอร์โมพลาสติกสตาเรช.....	8
2.3 แป้ง	9
2.3.1 องค์ประกอบภายในแป้ง.....	9
2.3.1.1 อะไมโลส (Amylose).....	10
2.3.1.2 อะไมโลเพคติน (Amylopectin).....	10
2.3.1.3 สารตัวกลาง (Intermediate material).....	11
2.3.1.4 ส่วนประกอบอื่นๆ ภายในแป้ง.....	11
2.3.2 โครงสร้างของเม็ดแป้ง	11
2.3.3 สมบัติของแป้ง	12
2.3.3.1 การดูดซับน้ำ การพองตัว และการละลาย.....	12
2.3.3.2 การเกิดเจลาทีโนเซชัน (Gelatinization).....	12
2.3.3.3 การเกิดรีโทรเกรเดชัน (Retrogradation).....	14
2.3.4 แป้งดัดแปร (Modified starch).....	15
2.4 แป้งท้าวายม่อม (Arrowroot starch).....	16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5 ไททาเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide).....	18
2.5.1 ลักษณะสมบัติเฉพาะของไททาเนียมไดออกไซด์.....	19
2.6 ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide).....	20
2.6.1 ลักษณะสมบัติเฉพาะของซิงค์ออกไซด์	20
2.7 กลไกการเกิดปฏิกิริยาเร่งด้วยแสง.....	21
2.8 พลาสติกไฮเซออร์.....	22
2.8.1 กลีเซอรอล.....	22
2.9 วัสดุเชิงประกอบ	23
2.10 เครื่องผสมแบบปิดหรือเครื่องผสมภายใน (Internal mixer)	24
2.11 การขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์แบบกดอัด (Compression molding).....	25
2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	26
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	29
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	29
3.2 อุปกรณ์ และเครื่องมือ	30
3.3 แผนภาพการดำเนินงานวิจัย	32
3.4 วิธีการทดลอง	33
3.4.1 การเตรียมแป้งท้าวายม่อม.....	33
3.4.2 การเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งท้าวายม่อม	33
3.4.3 การขึ้นรูปเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งท้าวายม่อม	33
3.4.4 การปรับปรุงสมบัติเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชด้วยไททาเนียมไดออกไซด์ และ ซิงค์ออกไซด์.....	33
3.5 การทดสอบบัติต่างๆ	34
3.5.1 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน (Fourier-transform infrared spectroscopy).....	34
3.5.2 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction)	34
3.4.3 การดูดซับความชื้น (Moisture uptake)	35
3.4.4 การทดสอบสัณฐานวิทยา (Morphology)	35
3.4.5 การทดสอบสมบัติเชิงกล (Mechanical properties).....	35
3.4.6 การทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดิน (Soil burial test)	36
3.4.7 การทดสอบสมบัติทางความร้อน (Thermal properties)	36
3.4.8 การวัดค่าสี (Color measurement).....	37
3.4.9 การทดสอบประสิทธิภาพการต้านทานเชื้อจุลินทรีย์ (Antimicrobial testing).....	37
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง	38
4.1 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน (Fourier-transform infrared spectroscopy).....	40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2 การวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction).....	42
4.3 การทดสอบการดูดซับความชื้น (Moisture uptake).....	44
4.4 การทดสอบสัณฐานวิทยา (Morphology).....	45
4.5 การทดสอบสมบัติเชิงกล (Mechanical properties).....	48
4.6 การทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดิน (Soil burial test).....	50
4.7 การทดสอบสมบัติทางความร้อน (Thermal properties).....	52
4.8 การวิเคราะห์ความเปลี่ยนแปลงของสี (Color Measurement).....	55
4.9 การทดสอบประสิทธิภาพการต้านเชื้อจุลินทรีย์ (Antimicrobial testing).....	56
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	58
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	58
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	59
เอกสารอ้างอิง.....	60
ภาคผนวก.....	65
ภาคผนวก ก.....	66
ภาคผนวก ข.....	70
ภาคผนวก ค.....	73
ภาคผนวก ง.....	74
ภาคผนวก จ.....	78
ภาคผนวก ฉ.....	81

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 สมบัติที่แตกต่างกันของอะไมโลส และอะไมโลเพคติน	9
2.2 องค์ประกอบทางเคมีร้อยละน้ำหนักของแป้งท้าวยาย่ม่อม.....	17
2.3 สมบัติของแป้งท้าวยาย่ม่อม	17
2.4 ลักษณะสมบัติของไททาเนียมไดออกไซด์.....	19
2.5 ลักษณะสมบัติของซิงค์ออกไซด์.....	20
3.1 องค์ประกอบทางเคมีของแป้งท้าวยาย่ม่อม	29
3.2 รายละเอียดเฉพาะ (Specification) ของไททาเนียมไดออกไซด์ ชนิดรูโพล์.....	29
3.3 รายละเอียดเฉพาะ (Specification) ของซิงค์ออกไซด์.....	30
3.4 อัตราส่วนของแป้งท้าวยาย่ม่อม กลีเซอรอล ไททาเนียมไดออกไซด์ และซิงค์ออกไซด์ ที่ใช้ปรับปรุงสมบัติเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช.....	34
3.5 มาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่เตรียมได้.....	35
4.1 อักษรย่อของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่เตรียมได้จากงานวิจัยนี้.....	38
4.2 พิกสเปกท럼ที่ปรากฏในเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่เตรียมได้จากงานวิจัยนี้.....	40
4.3 ปริมาณผลึกของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งท้าวยาย่ม่อมที่เติมอนุภาค โลหะออกไซด์ชนิดต่างๆ ที่แตกต่างกัน.....	43
4.4 อุณหภูมิการสลายตัว และเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช จากแป้งท้าวยาย่ม่อมที่เติมอนุภาคโลหะออกไซด์ทั้งสองชนิด.....	54
4.5 การวัดค่าสีของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งท้าวยาย่ม่อมที่เติมไททาเนียมไดออกไซด์ และซิงค์ออกไซด์ในปริมาณ 0, 10 และ 20 phr.....	55
4.6 ระยะในการต้านเชื้อแบคทีเรียของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งท้าวยาย่ม่อม ที่เติมไททาเนียมไดออกไซด์และซิงค์ออกไซด์ ในปริมาณ 0, 10 และ 20 phr.....	56

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 โครงสร้างของอะไมโลส	10
2.2 โครงสร้างของอะไมโลเพคติน	11
2.3 การเปลี่ยนแปลงของเม็ดแป้งขณะให้ความร้อน.....	13
2.4 ระยะในการเกิดเจลลาที่โนเซชันของเม็ดแป้ง.....	14
2.5 (ก) การเกิดรีโทรเกรดชัน และ (ข) กลไกการคืนตัวของแป้ง.....	15
2.6 ต้นท้าวายม่อม.....	17
2.7 โครงสร้างแบบต่างๆ ของไททานเนียมไดออกไซด์.....	18
2.8 กลไกการเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติก.....	22
2.9 การรวมตัวของกลีเซอรอลกับกรดไขมัน 3 โมเลกุลได้ไตรกลีเซอไรด์.....	23
2.10 เครื่องผสมแบบปิด (Internal mixer).....	25
2.11 เครื่องกดอัดระบบไฮดรอลิก.....	25
3.1 แผนภาพการดำเนินงานวิจัยในโครงการพิเศษ.....	32
4.1 อันตรกิริยาที่คาดว่าจะเกิดขึ้นในการเติมอนุภาคโลหะออกไซด์ใน เทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งท้าวายม่อม.....	39
4.2 อินฟราเรดสเปกตรัมของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งท้าวายม่อม ที่เติมไททานเนียมไดออกไซด์ ที่ปริมาณแตกต่างกัน (ก) TPAS (ข) TPAS/10TiO ₂ และ (ค) TPAS/20TiO ₂	41
4.3 อินฟราเรดสเปกตรัมของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งท้าวายม่อม ที่เติมซิงค์ออกไซด์ ที่ปริมาณแตกต่างกัน (ก) TPAS (ข) TPAS/10ZnO และ (ค) TPAS/20ZnO.....	41
4.4 ดิฟแฟรกโทแกรมของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งท้าวายม่อมที่เติมอนุภาค โลหะออกไซด์ชนิดต่างๆ ที่ปริมาณแตกต่างกัน (ก) TPAS (ข) TPAS/10TiO ₂ (ค) TPAS/20TiO ₂ (ง) TPAS/10ZnO และ (จ) TPAS/20ZnO.....	43

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.5	
เปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งท้าวยายม่อม	
ที่เติมไททาเนียมไดออกไซด์ และซิงค์ออกไซด์ในปริมาณแตกต่างกัน	
ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 99±1 %.....	
	44
4.6	
ลักษณะสัณฐานวิทยาของอนุภาคไททาเนียมไดออกไซด์และซิงค์ออกไซด์	
โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 40000 เท่า.....	
	45
4.7	
สัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งท้าวยายม่อม โดยใช้กล้อง	
จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่กำลังขยายภาพ 1000 เท่า และ 4000 เท่า.....	
	46
4.8	
สัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งท้าวยายม่อมที่เติมอนุภาค	
ไททาเนียมไดออกไซด์ในปริมาณ 10 และ 20 phr โดยใช้กล้องจุลทรรศน์	
อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่กำลังขยายภาพ 1000 เท่า และ 4000 เท่า.....	
	46
4.9	
สัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งท้าวยายม่อมที่เติมอนุภาค	
ซิงค์ออกไซด์ในปริมาณ 10 และ 20 phr โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน	
แบบส่องกราด ที่กำลังขยายภาพ 1000 เท่า และ 4000 เท่า.....	
	47
4.10	
สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งท้าวยายม่อมที่เติม	
ไททาเนียมไดออกไซด์ ที่ปริมาณ 0, 10 และ 20 phr.....	
	48
4.11	
สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งท้าวยายม่อม	
ที่เติมซิงค์ออกไซด์ที่ปริมาณ 0, 10 และ 20 phr.....	
	49
4.12	
สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งท้าวยายม่อมที่เติมอนุภาค	
โลหะออกไซด์ทั้งสองชนิดที่ปริมาณ 0, 10 และ 20 phr ภายหลังการฝังดินเป็น	
ระยะเวลา 3 และ 5 วัน (ก) ความเค้น ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด (ข) มอดุลัส และ	
(ค) เปอร์เซ็นต์ความเครียด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด.....	
	51
4.13	
เทอร์โมแกรมของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งท้าวยายม่อมที่เติมอนุภาค	
ไททาเนียมไดออกไซด์ที่ปริมาณแตกต่างกัน (ก) TGA และ (ข) DTG.....	
	52
4.14	
เทอร์โมแกรมของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งท้าวยายม่อมที่เติมอนุภาค	
ซิงค์ออกไซด์ ที่ปริมาณแตกต่างกัน (ก) TGA และ (ข) DTG.....	
	53

คำย่อ/สัญลักษณ์

คำย่อ/สัญลักษณ์	คำอธิบาย
TPS	เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช
AS	แป้งท้าวยายม่อม
TPAS	เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งท้าวยายม่อม
TiO ₂	ไททาเนียมไดออกไซด์
ZnO	ซิงค์ออกไซด์
TPAS/10TiO ₂	เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งท้าวยายม่อมที่เติมอนุภาคไททาเนียมไดออกไซด์ 10 phr
TPAS/20TiO ₂	เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งท้าวยายม่อมที่เติมอนุภาคไททาเนียมไดออกไซด์ 20 phr
TPAS/10ZnO	เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งท้าวยายม่อมที่เติมอนุภาคซิงค์ออกไซด์ 10 phr
TPAS/20ZnO	เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งท้าวยายม่อมที่เติมอนุภาคซิงค์ออกไซด์ 20 phr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

พลาสติกนั้นเป็นวัสดุที่ปัจจุบันมีการใช้งานอย่างกว้างขวางทั่วโลก และมีแนวโน้มการใช้งานที่เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากมีการนำพลาสติกมาใช้ทดแทนทรัพยากรธรรมชาติ เช่น ไม้และเหล็กได้เป็นอย่างดี ผลิตภัณฑ์จากพลาสติกนั้นมีราคาถูก น้ำหนักเบา ทนต่อความชื้นและสามารถขึ้นรูปได้ง่ายกว่าวัสดุอื่นๆ แต่พลาสติกที่มีอยู่ในตลาดส่วนใหญ่นั้น เป็นพลาสติกที่ทำมาจากปิโตรเคมี ซึ่งสามารถปลดปล่อยสารเคมีที่เป็นพิษต่อร่างกาย โดยเฉพาะเมื่อต้องนำมาทำบรรจุภัณฑ์สำหรับอาหารและเครื่องดื่มทำให้สารเคมีเข้าสู่ร่างกายได้ง่ายขึ้น และการย่อยสลายของพลาสติกนั้นย่อยสลายได้ช้าเมื่อมีการใช้งานแล้วนำไปทิ้งทำให้มีขยะพลาสติกเกิดขึ้นเป็นจำนวนมาก และยังก่อให้เกิดก๊าซพิษที่เกิดจากการนำพลาสติกไปย่อยสลายด้วยการเผาทำลาย หรือหากนำไปฝังกลบอาจทำให้ดินบริเวณนั้นเสื่อมสภาพไปด้วย จึงได้เห็นว่าปัญหาจากการย่อยสลายของพลาสติกนั้นส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศน์และสิ่งแวดล้อมเป็นอย่างมาก

ในปัจจุบันหลายๆ ประเทศกลับมาตระหนักถึงปัญหาขยะพลาสติกที่เพิ่มมากขึ้น จึงนำมาสู่การวิจัยและพัฒนาพลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradable plastic) เพื่อที่จะนำมาใช้แทนพลาสติกที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ (Non-biodegradable plastic) ซึ่งเป็นแนวทางหนึ่งในแก้ไขปัญหาค้นคว้าวัสดุสำหรับการใช้งานเพื่ออนุรักษ์สิ่งแวดล้อม ทั้งในด้านวัตถุดิบ กระบวนการผลิต และกระบวนการกำจัด [1]

พลาสติกที่ย่อยสลายทางชีวภาพ ผลิตขึ้นจากวัสดุธรรมชาติ ส่วนใหญ่เป็นพืช เช่น แป้ง (Starch) แป้งเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติ ย่อยสลายได้ง่าย เปลี่ยนรูปได้ มีจำนวนมากและราคาถูก มีความบริสุทธิ์สูง จึงเป็นวัตถุดิบที่น่าสนใจในการนำมาใช้ผลิตพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ [1] แต่เนื่องจากโดยทั่วไปสตาร์ชในรูปของเม็ดแป้ง ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงหรือขึ้นรูปได้โดยใช้เทคโนโลยีที่ใช้กับพอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมพลาสติกได้ เนื่องจากอุณหภูมิหลอมเหลวของเม็ดสตาร์ช สูงกว่าอุณหภูมิการสลายตัว ส่งผลให้เม็ดแป้งสลายตัวก่อนหลอมเหลว การผสมเม็ดแป้งกับพลาสติกไซเซออร์ (เช่น กลีเซอรอล น้ำ และซอลบิทอล เป็นต้น) ในสถานะที่มีการให้ความร้อน ความดัน และแรงเฉือน จะทำให้ได้วัสดุที่เรียกว่า เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (Thermoplastic starch, TPS) ซึ่งสามารถขึ้นรูปได้ด้วยได้ด้วยการหลอมหรือใช้ความร้อนเข้าช่วย แต่พลาสติกชีวภาพที่ได้จากแป้งนั้นยังมีข้อด้อยคือ ไวต่อความชื้น สมบัติเชิงกล และสมบัติทางความร้อนที่ไม่ดีนัก จึงมีการปรับปรุงดัดแปลงสมบัติเหล่านี้ให้ดีขึ้น

แป้งท้าวยายม่อม (Arrowroot starch) เป็นแป้งที่ทำมาจากหัวท้าวยายม่อม จัดเป็นไม้ล้มลุกอายุหลายปี ลักษณะของแป้งเป็นผงสีขาวมีเม็ดสีเหลี่ยมเล็กๆ นำไปใช้ให้ความหนืดแก่อาหาร และนำไปทำขนมทำให้ขนมมีลักษณะใส แป้งละลายง่าย สุกง่าย เมื่อสุกจะเริ่มใส มีเงาในเนื้อแป้ง เหนียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปานกลาง เมื่อเย็นแล้วแปรงรวมตัวเป็นก้อน จะมีความเหนียวตัวมากกว่าแป้งมันสำปะหลัง จึงนิยมนำมาผสมกับแป้งชนิดอื่นๆ [2]

สำหรับอุตสาหกรรมพลาสติกมีการนำทั้งสารอินทรีย์ และสารอนินทรีย์มาเป็นสารปรับปรุงสมบัติของพลาสติก ซึ่งสารอนินทรีย์ที่นำมาใช้นั้นยังใช้เป็นสารตัวเติมเพื่อให้มีราคาถูกลงด้วย สารอนินทรีย์ที่นิยมใช้ เช่น ไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) และซิงค์ออกไซด์ (ZnO)

ไททาเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide) โครงสร้างของไททาเนียมไดออกไซด์มีสูตรโมเลกุลทั่วไป คือ TiO_2 ลักษณะโครงสร้างผลึกมีอยู่ 3 แบบ คือ แบบอนาเทส (Anatase) แบบรูไทล์ (Rutile) และแบบบรูคไคท์ (Brookite) ซึ่งไททาเนียมไดออกไซด์มีลักษณะสมบัติเฉพาะตัว คือ มีค่าดัชนีหักเหสูง การดูดซับแสงอัลตราไวโอเล็ตได้ดี การต้านเชื้อโรค การแผ่กระจายของน้ำ และการเป็นสารเร่งปฏิกิริยา [3]

ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide) ซิงค์ออกไซด์มีลักษณะสมบัติเฉพาะตัว คือ การมีค่าดัชนีหักเหสูง ลักษณะสมบัติทางแสงใกล้เคียงแกลเลียมไนไตรด์ การต้านเชื้อโรค สมบัติการนำไฟฟ้า การเป็นสารเร่งปฏิกิริยา [4]

จากสมบัติของไททาเนียมไดออกไซด์ และซิงค์ออกไซด์ที่กล่าวมานั้น ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะศึกษาการปรับปรุงสมบัติเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งท้าวยายม่อม โดยเติมไททาเนียมไดออกไซด์ และซิงค์ออกไซด์ ในปริมาณต่างๆ ซึ่งทางผู้วิจัยคาดว่าจะสามารถปรับปรุงสมบัติเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชให้รองรับต่อความชื้นน้อยลง มีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น มีเสถียรภาพทางความร้อนเพิ่มขึ้น ทำให้เทอร์โมพลาสติกมีดัชนีความขาวเพิ่มขึ้น และสามารถต้านทานเชื้อแบคทีเรียได้ เพื่อนำไปใช้ทดแทนพลาสติกที่ย่อยสลายไม่ได้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ในการปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช โดยการเติมไททาเนียมไดออกไซด์ และซิงค์ออกไซด์ สามารถเตรียมชิ้นงานได้จากวิธีการเทหล่อ (Casting) เป็นฟิล์ม [5-10] เมื่อปรับปรุงสมบัติด้วยไททาเนียมไดออกไซด์ พบว่าเมื่อปริมาณไททาเนียมไดออกไซด์ที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความแข็งแรงดึง และมอดูลัสเพิ่มขึ้น แต่เปอร์เซ็นต์การดึงยืดที่จุดขาดต่ำลง ความสว่าง ดัชนีความขาว และความทึบแสงเพิ่มขึ้น [5] มีสมบัติการต้านทานรังสียูวีที่ดี และความไม่ชอบน้ำเพิ่มขึ้น [6] เมื่อปรับปรุงสมบัติด้วยซิงค์ออกไซด์ พบว่าเมื่อปริมาณซิงค์ออกไซด์ที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้การซึมผ่านของไอน้ำ ความสามารถในการละลายน้ำ ปริมาณความชื้นลดลง มีค่าการส่องผ่านของรังสียูวี 0 เปอร์เซ็นต์ และมีความสามารถในการต้านทานเชื้อจุลินทรีย์ *S.aureus* และ *E.coli* [7]

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังกล่าวพบว่า ในการขึ้นรูปชิ้นงานตัวอย่างนั้น จะใช้วิธีการเทหล่อ (Casting) ได้เป็นฟิล์ม ใช้ขนาดอนุภาคของไททาเนียมไดออกไซด์ และซิงค์ออกไซด์ในระดับนาโน โดยใช้ปริมาณ 0-5 wt%

งานวิจัยนี้จึงนำงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังกล่าวมาศึกษาเป็นแนวทาง ในการปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งท้าวยายม่อม โดยการเติมไททาเนียมไดออกไซด์ และซิงค์ออกไซด์ ใน

ขนาดอนุภาคระดับไมโคร ในปริมาณ 0, 10 และ 20 phr โดยใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ ทำการเตรียมชิ้นงานโดยใช้เครื่องผสมแบบปิด (Internal mixer) และขึ้นรูปชิ้นงานด้วยวิธีการกดอัด (Compression molding) โดยคาดหวังจะทำให้สมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชมีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น ดูดซับความชื้นน้อยลง รวมถึงมีความสามารถในการต้านเชื้อจุลินทรีย์

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งท้าวยายม่อม (Thermoplastic arrowroot starch, TPAS) โดยมีกลีเซอรอล (Glycerol) เป็นพลาสติกไซเซอร์

1.2.2 ศึกษาการปรับปรุงเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งท้าวยายม่อมโดยใช้ไททาเนียมไดออกไซด์ และซิงค์ออกไซด์ในปริมาณที่ต่างกัน

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 ศึกษาและทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.3.2 เตรียมเทอร์โมพลาสติกจากแป้งท้าวยายม่อม โดยมีกลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์

1.3.3 เพื่อศึกษาการปรับปรุงเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งท้าวยายม่อมโดยใช้ไททาเนียมไดออกไซด์ และซิงค์ออกไซด์ในปริมาณที่ต่างกัน

1.3.4 ศึกษาและวิเคราะห์สมบัติต่างๆ ของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชดังนี้

1.3.4.1 โครงสร้างและหมู่ฟังก์ชัน (Fourier-transform infrared spectroscopy, FTIR)

1.3.4.2 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ เพื่อศึกษาโครงสร้างของผลึก (X-ray diffraction, XRD)

1.3.4.3 การดูดซับความชื้น (Moisture uptake)

1.3.4.4 สัณฐานวิทยา ด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

1.3.4.5 สมบัติเชิงกล (Mechanical properties)

1.3.4.6 ความสามารถในการย่อยสลายโดยการฝังดิน (Soil burial test)

1.3.4.7 สมบัติทางความร้อน (TGA)

1.3.4.8 การวัดค่าสี (Color Measurement)

1.3.4.9 การทดสอบประสิทธิภาพการต้านเชื้อจุลินทรีย์ (Antimicrobial testing)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 สามารถปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาเรช จากไททาเนียมไดออกไซด์ และซิงค์ออกไซด์ได้

1.4.2 เทอร์โมพลาสติกที่เตรียมได้สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ช่วยลดปริมาณขยะพลาสติกที่จะเกิดขึ้นได้

1.4.3 เป็นการนำวัสดุที่มีอยู่ในธรรมชาติมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด

1.4.4 สามารถลดการใช้วัตถุดิบที่มาจากปิโตรเคมี ซึ่งค่อนข้างมีอยู่อย่างจำกัดและสามารถปลดปล่อยสารเคมีที่เป็นพิษต่อร่างกายและสิ่งแวดล้อมได้ในกระบวนการผลิต



บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

พลาสติกนั้นเป็นวัสดุที่มีการนำมาใช้ประโยชน์แทนโลหะ ไม้ หรือวัสดุธรรมชาติอื่นๆ ซึ่งวัตถุดิบที่นำมาผลิตพลาสติกคือ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปิโตรเลียมก๊าซธรรมชาติ ถ่านหินแร่ธาตุต่างๆ เป็นส่วนใหญ่ นอกจากนี้อาจผลิตจากน้ำมันพืช และส่วนต่างๆ ของพืชได้เช่นกัน พลาสติกส่วนใหญ่ที่ใช้กันไม่สามารถย่อยสลายได้รวดเร็ว จึงมีปัญหาเรื่องขยะ หลายประเทศจึงมีการพัฒนาหรือใช้งานพอลิเมอร์ที่สามารถสลายตัวได้เมื่อหมดประโยชน์การใช้งานแล้ว

2.1 พลาสติกย่อยสลาย

โดยทั่วไป เราสามารถแบ่งการย่อยสลายของพลาสติกตามกลไกเป็น 5 ประเภท คือ

1. การย่อยสลายได้โดยแสง (Photodegradation) การย่อยสลายโดยแสงมักเกิดจากการเติมสารเติมแต่งที่มีความไวต่อแสงลงในพลาสติกหรือสังเคราะห์โคพอลิเมอร์ให้มีหมู่ฟังก์ชันหรือพันธะเคมีที่ไม่แข็งแรง แตกหักง่ายภายใต้รังสียูวี (UV) เช่น หมู่คีโตน (Ketone group) อยู่ในโครงสร้าง

2. การย่อยสลายทางกล (Mechanical degradation) โดยการให้แรงกระทำแก่ชิ้นพลาสติกทำให้ชิ้นส่วนพลาสติกแตกออกเป็นชิ้น ซึ่งเป็นวิธีการที่ใช้โดยทั่วไปในการทำให้พลาสติกแตกเป็นชิ้นเล็ก

3. การย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidative degradation) สามารถเกิดขึ้นได้เองในธรรมชาติอย่างช้าๆ โดยมีออกซิเจน และความร้อน แสงยูวี หรือแรงทางกลเป็นปัจจัยสำคัญ เกิดเป็นสารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (Hydroperoxide, ROOH) โดย ROOH แตกตัวกลายเป็นอนุมูลอิสระ RO และ OH ที่ไม่เสถียรและเข้าทำปฏิกิริยาต่อที่พันธะเคมีบนตำแหน่งคาร์บอนในสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้เกิดการแตกหักและสูญเสียสมบัติเชิงกลอย่างรวดเร็ว

4. การย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolytic degradation) การย่อยสลายของพอลิเมอร์ที่มีหมู่เอสเทอร์ หรือเอไมด์ เช่น แป้ง พอลิเอสเทอร์ พอลิแอนไฮดราต พอลิคาร์บอนเนต และพอลิยูรีเทน ผ่านปฏิกิริยาก่อให้เกิดการแตกหักของสายโซ่พอลิเมอร์ ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่เกิดขึ้น โดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ ประเภทที่ใช้คะตะลิสต์ (Catalytic hydrolysis) และไม่ใช้คะตะลิสต์ (Non-Catalytic Hydrolysis)

5. การย่อยสลายทางชีวภาพ (Biodegradation) เป็นการย่อยสลายของพอลิเมอร์จากการทำงานของจุลินทรีย์ชนิดต่างๆ เช่น จุลินทรีย์ แบคทีเรีย เชื้อรา เป็นต้น มีกระบวนการอยู่ 2 ขั้นตอน ขั้นตอนแรก เป็นการย่อยสลายสายพอลิเมอร์ที่มีขนาดใหญ่และไม่ละลายน้ำให้เล็กลง ซึ่งการย่อยครั้งแรกนี้เกิดขึ้นภายนอกเซลล์โดยการปลดปล่อยเอนไซม์ของจุลินทรีย์ซึ่งเกิดได้ทั้งแบบใช้ Endo-enzyme หรือ เอนไซม์ที่ทำให้เกิดการแตกตัวของพันธะภายในสายโซ่พอลิเมอร์อย่างไม่เป็นระเบียบ และแบบ Exo-enzyme หรือเอนไซม์ที่ทำให้เกิดการแตกหักของพันธะทีละหน่วยจากหน่วยซ้ำที่เล็กที่สุดที่อยู่ด้านปลายของสายโซ่พอลิเมอร์ เมื่อพอลิเมอร์แตกตัวจนมีขนาดเล็กพอจะแพร่ผ่านผนังเซลล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เข้าไปในเซลล์ และเกิดการย่อยสลายต่อในขั้นตอนที่ 2 ได้ผลิตภัณฑ์ในขั้นตอนสุดท้าย (Ultimate biodegradation) คือ พลังงาน และสารประกอบขนาดเล็กที่เสถียรในธรรมชาติ (Mineralization) เช่น แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สมีเทน น้ำ เกลือ แร่ธาตุต่างๆ และมวลชีวภาพ (Biomass) [11]

2.1.1 พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradable plastic)

พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ คือ พลาสติกที่มีการย่อยสลายด้วยเอนไซม์จุลินทรีย์ หรือแบคทีเรียที่มีอยู่ในธรรมชาติ ทำให้เกิดให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีภายใต้สภาวะ และช่วงเวลาที่เหมาะสมในช่วงเวลาที่กำหนดอย่างสมบูรณ์ เมื่อย่อยสลายแล้วสามารถวัดได้โดยวิธีการทดสอบมาตรฐาน เมื่อย่อยสลายหมดแล้วก็จะได้ผลิตภัณฑ์เป็นน้ำมวลชีวภาพ ก๊าซมีเทน และ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

สำหรับพลาสติกชีวภาพย่อยสลายได้นั้นจะมีคุณสมบัติในการใช้งานได้เทียบเท่าพลาสติก จากอุตสาหกรรมปิโตรเคมีแบบดั้งเดิม (Commodity plastics) และสามารถทดแทนการใช้งานที่มีอยู่ได้ โดยผู้บริโภคไม่ต้องกังวลพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพนี้จะเกิดการย่อยสลายไปในขณะที่ใช้งานทำให้อายุการใช้งานสั้นไม่คุ้มค่าในการใช้งาน เพราะตราบใดที่เราไม่ทิ้งพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพนี้ให้เป็นขยะโดยเฉพาะเมื่อถูกฝังกลบ ในสภาวะที่เหมาะสมกับการย่อยสลาย ก็จะไม่เกิดการย่อยสลาย พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่มีแนวโน้มทางการตลาดที่ดี และมีการผลิตเพื่อใช้เป็นผลิตภัณฑ์ ได้แก่ กรดพอลิแลคติก (Polylactic Acid หรือ PLA) และพอลิไฮดรอกซีอัลคาโนเอต (Polyhydroxyalkanoates หรือ PHAs) ซึ่งเป็นพลาสติกที่ได้จากธรรมชาติ คือใช้กระบวนการทางชีวเคมีในการเปลี่ยนสภาพจากแป้งที่ได้จากมันสำปะหลังและข้าวโพด [12]

พอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพแบ่งได้ 3 ประเภท

1. พอลิเมอร์ที่ได้จากธรรมชาติ พอลิเมอร์ที่ได้จากธรรมชาติไม่ว่าเป็นพืช สัตว์หรือ จุลินทรีย์รวมถึงอนุพันธ์ของพอลิเมอร์ชีวภาพเหล่านี้ เช่น ยาง แป้ง เซลลูโลส ไคติน/ไคโตซาน เคซีน และวุ้น โดยมากอยู่ในจำพวกพอลิแซ็กคาไรด์ และโปรตีน ซึ่งพอลิเมอร์ชีวภาพประเภทนี้มักชอบความชื้น

2. พอลิเมอร์ที่ได้จากการสังเคราะห์โมโนเมอร์ชีวภาพ พอลิเมอร์ที่ได้จากการสังเคราะห์ โมโนเมอร์ชีวภาพ เช่น พอลิแลคติก (Polylactic acid; PLA) จากกรดแลคติกที่ได้จากแป้งและ พอลิยูรีเทน จากน้ำมันมะพร้าว พอลิไวนิล แอลกอฮอล์ (Polyvinyl alcohol) พอลิคาโพรแลคโตน (Polycaprolactone) พอลิเอทิลีนไกลคอล (Polyethylene glycol) พอลิไฮดรอกซีอัลคาโนเอต (Polyhydroxyl alkanoate) เป็นต้น พอลิเมอร์ดังกล่าวมีสมบัติที่ดีกว่าพอลิเมอร์ที่ได้จากธรรมชาติ เช่น แป้ง และเมื่อนำไปผสมกับแป้งทำให้มีสมบัติทางกลที่ดีและมีความสามารถต้านทานความชื้นได้ดี

3. พอลิเมอร์ที่สร้างจากจุลินทรีย์หรือแบคทีเรีย พอลิเมอร์ที่สร้างจากจุลินทรีย์หรือแบคทีเรียที่ผ่านการตัดแต่งทางพันธุกรรม เช่น เซลลูโลสจากแบคทีเรีย และพอลิไฮดรอกซีบิวทิเรต ซึ่งเป็นแหล่งพลังงานคาร์บอนของแบคทีเรีย [13]

2.1.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการย่อยสลายทางชีวภาพ

พลาสติคทางชีวภาพจะย่อยสลายได้เร็วหรือช้าขึ้นกับปัจจัยต่อไปนี้ที่ต้องพิจารณา คือ

1. โครงสร้างทางเคมีของพอลิเมอร์ พอลิเมอร์ที่ย่อยได้ทางชีวภาพจะมีโครงสร้างโมเลกุลที่เอื้อต่อการทำงานของเอนไซม์จากจุลินทรีย์ ซึ่งส่วนใหญ่มักต้องมีเฮเทอโรอะตอม (Heteroatom) เช่น อะตอมของธาตุดอกซิเจน หรือไนโตรเจนอยู่บนโครงสร้างหลักของสายโซ่พอลิเมอร์ หรือมีพันธะที่เอื้อต่อการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ทำให้สายโซ่เกิดการแตกหักและมีน้ำหนักโมเลกุลลดลงเรื่อยๆ ทำให้ละลายน้ำได้ และสามารถแพร่ผ่านผนังเซลล์ของจุลินทรีย์ได้ นอกจากนี้พอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างเป็นเส้นตรงจะย่อยสลายได้เร็วกว่าโครงสร้างที่เป็นกิ่งเนื่องกิ่งก้านจะกีดขวางการเข้ามาสัมผัสของเอนไซม์จากจุลินทรีย์ พอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลน้อยกว่าจะย่อยสลายได้เร็วกว่า เนื่องจากถูกส่งผ่านเข้าไปในเซลล์จุลินทรีย์ได้ง่ายกว่า และถ้าความเป็นผลึกของพอลิเมอร์เพิ่มขึ้น อัตราการย่อยสลายจะลดลง

2. ชนิดของจุลินทรีย์ จุลินทรีย์แต่ละชนิดสามารถสังเคราะห์เอนไซม์ที่มีความจำเพาะเหมาะสมต่อการย่อยสลายพอลิเมอร์ประเภทใดประเภทหนึ่งโดยเฉพาะ ในการย่อยสลายของพอลิเมอร์สามารถเกิดขึ้นโดยการทำงานของจุลินทรีย์มากกว่าหนึ่งสายพันธุ์ ในสภาวะแวดล้อมที่ไม่มีจุลินทรีย์ การย่อยสลายทางชีวภาพแทบไม่สามารถเกิดขึ้นได้เลย

3. สภาวะแวดล้อม เป็นปัจจัยที่สำคัญอีกปัจจัยเนื่องการปรับจากสภาวะแวดล้อมที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ที่ย่อยสลายพอลิเมอร์ได้ จะทำให้เกิดการย่อยสลายอย่างรวดเร็ว โดยปัจจัยที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์คือ

3.1 อุณหภูมิและความชื้น จุลินทรีย์ส่วนใหญ่มักเป็นกลุ่มเจริญได้ดีช่วยอุณหภูมิปานกลาง (Mesophile) คือช่วง 25-45 องศาเซลเซียส ซึ่งอุณหภูมิสูงขึ้นจะเร่งอัตราย่อยสลายทางชีวภาพได้มาก โดยเฉพาะช่วงอุณหภูมิ 25-35 องศาเซลเซียส เป็นช่วงอุณหภูมิที่พบทั่วไปในธรรมชาติ ส่วนความชื้นพบว่าในแถบที่ร้อนและมีความชื้นสัมพัทธ์สูงจะเกิดได้ย่อยได้เร็วกว่าร้อนแต่แล้ง ความชื้นสัมพัทธ์ที่เหมาะสมย่อยสลายทางชีวภาพได้รวดเร็วอยู่ที่ 45-55 เปอร์เซ็นต์

3.2 ปริมาณก๊าซออกซิเจน ก๊าซออกซิเจนจะช่วยให้เกิดการสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเจนชัน ซึ่งจะทำให้เกิดการย่อยสลายได้เร็ว และสมบูรณ์ สำหรับการย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจนจะย่อยสลายช้า และเกิดกลิ่นเหม็น

3.3 ความเป็นกรดต่าง (pH) โดยทั่วไป pH ที่เป็นกลางจะเกิดการย่อยสลายได้รวดเร็วกว่าช่วงที่เป็นกรดหรือด่างมากเกินไป โดยแบคทีเรียค่อนข้างเจริญได้ดีที่สภาวะเป็นกลางถึงด่าง (pH 6-8) ราจะเจริญได้ดีในสภาวะที่เป็นกรด (pH 4-6) [1]

2.2 การเปลี่ยนแปลงให้เป็นพลาสติก

โดยทั่วไปแป้งไม่สามารถนำมาขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ได้ตามวิธีการขึ้นรูปเทอร์โมพลาสติกทั่วไป เนื่องจากเม็ดแป้งมีอุณหภูมิหลอมเหลว ($T_m = 220-240$ องศาเซลเซียส) ซึ่งสูงกว่าอุณหภูมิการสลายตัว ($T_d = 220$ องศาเซลเซียส) ส่งผลให้เม็ดแป้งเกิดการสลายตัวก่อนหลอมเหลว ดังนั้นการนำแป้งมาทำเป็นเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช จึงจำเป็นต้องเติมพลาสติกไซเซอร์ (Plasticizer) เช่น กลีเซอรอล เอทานอลามีน พอร์มาไมด์ และซอบิทอล ลงไปภายใต้อุณหภูมิสูงประมาณ 90-180 องศาเซลเซียส และได้รับแรงเฉือนอย่างเพียงพอที่สามารถทำให้แป้งหลอมและไหลจนสามารถนำมาขึ้นรูปด้วยกระบวนการต่างๆ ได้ [14]

2.2.1 เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช

เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช หมายถึง พลาสติกที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบพื้นฐานโดยสามารถหลอมตัว และไปขึ้นรูปด้วยกระบวนการต่างๆ ได้ โดยใช้ความร้อนและความดันสูง ซึ่งโดยธรรมชาติแล้วแป้งไม่มีสมบัติเป็นเทอร์โมพลาสติก ไม่สามารถหลอมเหลวได้ แต่สามารถทำได้โดยการใช้สารเติมแต่ง (Additive) คือ พลาสติกไซเซอร์ (Plasticizer) จะช่วยทำให้เม็ดแป้งเกิดการหลอมตัวที่อุณหภูมิต่ำลง โมเลกุลของอะไมโลส และอะไมโลเพคตินมีอิสระมากขึ้น แป้งจึงสามารถขึ้นรูปในกระบวนการต่างๆ ได้ [14]

2.2.2 การผลิตเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช

พลาสติกไซเซอร์จะช่วยทำให้เม็ดแป้งเกิดการหลอมละลายได้ภายใต้สภาวะที่มีความร้อนและแรงกล (Mechanical energy) ได้สารที่เรียกว่า เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (Thermoplastic starch) เม็ดพลาสติกเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ผลิตได้สามารถนำไปขึ้นรูปด้วยเครื่องมือและกระบวนการผลิตมาตรฐานที่ใช้สำหรับพลาสติกทั่วไป เช่น เอกซ์ทรูเดอร์ เครื่องฉีด และเครื่องเป่าฟิล์ม เป็นต้น ถึงแม้ว่าจะทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์ของแป้งได้ดี แต่เนื่องจากน้ำระเหยได้ง่ายทำให้พลาสติกที่ได้มีลักษณะเปราะ จึงไม่นิยมใช้น้ำในการผลิต สารที่นิยมใช้เป็นพลาสติกไซเซอร์ในการผลิตเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชได้แก่ กลีเซอรอล

เนื่องจากเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชสามารถหลอมตัวได้เมื่อได้รับความร้อน และแรงกลที่เหมาะสม จึงสามารถใช้เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชเป็นส่วนประกอบหลักในการผลิตพลาสติก อย่างไรก็ตามพลาสติกที่ผลิตจากเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช มีข้อจำกัดที่สำคัญสองประการ คือ มีสมบัติเชิงกลต่ำ (Poor mechanical properties) และไม่ทนน้ำ งานวิจัยและพัฒนาส่วนใหญ่จึงมุ่งเน้นเพื่อปรับปรุงสมบัติทั้งสองด้านของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชให้ดีขึ้น ซึ่งแนวทางที่นิยมได้แก่ การดัดแปรโครงสร้างของแป้งด้วยกระบวนการทางเคมี และการผสมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช กับพลาสติกสังเคราะห์ชนิดอื่นๆ [15]

2.3 แป้ง

แป้งเป็นคาร์โบไฮเดรตที่สะสมอยู่ในพืชชั้นสูง พบในคลอโรพลาสต์ (ในใบ) และส่วนที่ใช้เป็นแหล่งเก็บอาหาร เช่น เมล็ด และหัว “แป้ง” ในทางการผลิต คือ คาร์โบไฮเดรตที่มีองค์ประกอบของคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจนเป็นส่วนใหญ่ มีสิ่งเจือปน เช่น โปรตีน ไขมัน เกลือแร่ น้อยมาก ส่วนแป้งที่ผลิตโดยทั่วไปที่ยังมีส่วนประกอบอื่นๆ อยู่มาก จะเรียกว่า ฟลาวัวร์ (Flour) แต่ถ้าสิ่งเจือปนถูกกำจัดออกไป จนเหลือแป้งบริสุทธิ์เป็นส่วนใหญ่จึงเรียกว่าเป็นแป้งสตาร์ช (Starch) แป้งสตาร์ชที่ยังไม่ถูกดัดแปรหรือแปรรูป นิยมเรียกว่าแป้งดิบ (Raw starch หรือ Native starch) แป้งที่ดัดแปรแล้วเรียกว่า แป้งดัดแปร (Modified starch) [16]

2.3.1 องค์ประกอบภายในแป้ง

แป้งเป็นคาร์โบไฮเดรตที่ประกอบด้วยคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน มีสูตรเคมีโดยทั่วไปคือ $(C_6H_{10}O_5)_n$ แป้งเป็นพอลิเมอร์ของกลูโคส ซึ่งประกอบด้วยหน่วยของน้ำตาลกลูโคสมาเชื่อมต่อกันด้วยพันธะแอลฟา ไกลโคซิดิก (α -glycosidic linkage) ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 1 ของหน่วยกลูโคสกับคาร์บอนตำแหน่งที่ 4 ของหน่วยกลูโคสที่อยู่ถัดไป ด้านปลายของโมเลกุลแป้งจะมี Anomeric carbon (C_1) ซึ่งไม่ได้จับกับโมเลกุลอื่นๆ ดังนั้นแต่ละโมเลกุลของแป้งจะมีด้านปลาย ซึ่งมีสมบัติรีดิวซ์ (Reducing end) นั่นคือแป้งหนึ่งโมเลกุลจะมี Reducing end 1 ตำแหน่ง

องค์ประกอบที่สำคัญของแป้งคือ อะไมโลส (Amylose) มีลักษณะเป็นพอลิเมอร์เชิงเส้น และอะไมโลเพคติน (Amylopectin) มีลักษณะเป็นพอลิเมอร์เชิงกิ่ง ซึ่งสมบัติของอะไมโลส และอะไมโลเพคตินมีความแตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สมบัติที่แตกต่างกันของอะไมโลส และอะไมโลเพคติน [16]

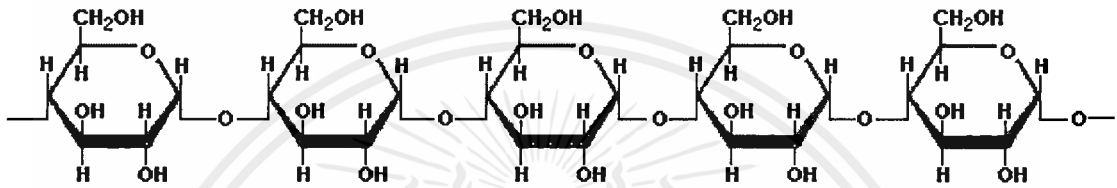
คุณสมบัติ	อะไมโลส	อะไมโลเพคติน
ลักษณะโครงสร้าง	สารประกอบของน้ำตาลกลูโคส เกาะกันเป็นเส้นตรง	สารประกอบของน้ำตาลกลูโคสเกาะ กันเป็นกิ่งก้าน
พันธะที่จับ	α -1,4	α -1,4 และ α -1,6
ขนาด	200-2,000 หน่วยกลูโคส	มากกว่า 10,000 หน่วยกลูโคส
การละลาย	ละลายในน้ำได้น้อยกว่า	ละลายได้น้ำได้ดีกว่า
การทำปฏิกิริยากับ ไอโอดีน	สีน้ำเงิน	สีแดงม่วง
การจับตัว	เมื่อให้ความร้อนแล้วทิ้งไว้จะจับ เป็นวุ้นและแผ่นแข็ง	ไม่จับตัวเป็นแผ่นแข็ง

องค์ประกอบหลักภายในแป้ง ได้แก่

1. อะไมโลส (Amylose)
2. อะไมโลเพคติน (Amylopectin)
3. สารตัวกลาง (Intermediate material)

2.3.1.1 อะไมโลส (Amylose)

อะไมโลสเป็นพอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยกลูโคสประมาณ 2,000 หน่วย เชื่อมต่อกันด้วยพันธะไกลโคซิดิกชนิด α -1, 4 (α -1, 4-glycosidic linkage) ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ซึ่งในธรรมชาติโมเลกุลอะไมโลสอาจจะมีกิ่งบ้างเล็กน้อย



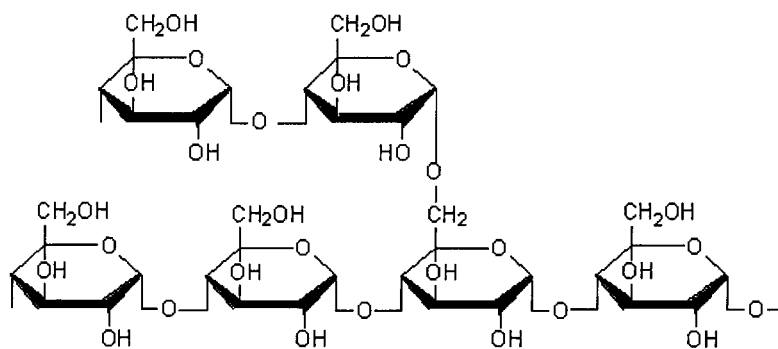
รูปที่ 2.1 โครงสร้างอะไมโลส [17]

แป้งจากรัญพืช เช่น แป้งข้าวโพด แป้งสาลี แป้งข้าวฟ่าง มีปริมาณอะไมโลสสูงประมาณ 28 เปอร์เซ็นต์ แป้งจากรากและหัว เช่น แป้งมันฝรั่ง แป้งสาคุ แป้งมันสำปะหลังมีปริมาณอะไมโลสประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ และแป้งข้าวเหนียวไม่มีอะไมโลสเลย น้ำหนักโมเลกุลของอะไมโลสอยู่ในช่วง 10^5 - 10^6 ดาลตัน ซึ่งอะไมโลสในแป้งแต่ละชนิดจะมีน้ำหนักแตกต่างกันไป และแป้งแต่ละชนิดจะมีขนาดโมเลกุลหรือระดับขั้นการเกิดพอลิเมอร์ (Degree of polymerization, DP) ของอะไมโลสแตกต่างกัน แป้งมันฝรั่ง และแป้งมันสำปะหลังมีขนาดโมเลกุลของอะไมโลสอยู่ในช่วง 1,000-6,000 สูงกว่าแป้งสาลี และข้าวโพดซึ่งโมเลกุล อะไมโลสมีขนาด 200-1,200 แป้งที่มีโมเลกุลอะไมโลสยาวขึ้นจะมีแนวโน้มในการเกิดรีโทรเกรดชัน (Retrogradation) ลดลง

อะไมโลสสามารถรวมตัวเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับไอโอดีน และสารประกอบอินทรีย์อื่นๆ เช่น บิวทานอล กรดไขมัน สารลดแรงตึงผิว ฟีนอล และไฮโดรคาร์บอน สารประกอบเชิงซ้อนเหล่านี้จะไม่ละลายน้ำ โดยอะไมโลสจะพันเป็นเกลียวรอบสารประกอบอินทรีย์ นอกจากนี้ อะไมโลสที่รวมตัวกับไอโอดีนจะเป็นสีน้ำเงิน ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะที่บ่งบอกว่าแป้งมีอะไมโลสเป็นองค์ประกอบ [16]

2.3.1.2 อะไมโลเพคติน (Amylopectin)

อะไมโลเพคตินเป็นพอลิเมอร์กิ่งของกลูโคส ส่วนที่เป็นเส้นตรงของกลูโคสเชื่อมต่อกันด้วยพันธะไกลโคซิดิกชนิด α -1, 4 (α -1, 4-glycosidic linkage) และส่วนที่เป็นกิ่งเชื่อมต่อกันด้วยพันธะไกลโคซิดิกชนิด α -1, 6 (α -1, 6-glycosidic linkage) ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของอะไมโลเพคติน [17]

ซึ่งพันธะไกลโคซิดิกชนิด α -1, 6 (α -1, 6-glycosidic linkage) มีอยู่ประมาณ 5 เปอร์เซ็นต์ ของปริมาณหน่วยกลูโคสในอะไมโลเพคตินทั้งหมด อะไมโลเพคตินมีขนาดโมเลกุล (DP) อยู่ในช่วง 10-60 หน่วย มีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 1,000 เท่าของอะไมโลส คือ ประมาณ 10^7 - 10^9 ดาลตัน และมีอัตราการคืนตัวต่ำ เนื่องจากอะไมโลเพคตินมีโครงสร้างเป็นกิ่งอะไมโลเพคตินทำหน้าที่เป็นองค์ประกอบหลักของแป้ง ดังนั้นเมื่อมีอะไมโลเพคตินอย่างเดียวสามารถรวมตัวกันสร้างเม็ดแป้งได้ ปริมาณของอะไมโลส และอะไมโลเพคตินที่แตกต่างกันจะทำให้แป้งมีสมบัติแตกต่างกัน [16]

2.3.1.3 สารตัวกลาง (Intermediate material)

สารตัวกลางเป็นองค์ประกอบที่มีมวลโมเลกุลน้อยกว่าอะไมโลเพคติน แต่ใหญ่กว่าอะไมโลส มีโครงสร้างลักษณะเชิงกิ่งเหมือนอะไมโลเพคติน แต่จะมีกิ่งที่ยาวกว่า ซึ่งปริมาณโครงสร้างตัวกลางจะขึ้นอยู่กับชนิด และอายุการเก็บเกี่ยวของพืชด้วย อย่างไรก็ตาม มีบางรายงานกล่าวว่า สารตัวกลางที่พบในแป้งอาจเป็นผลมาจากวิธีที่ใช้แยกองค์ประกอบของแป้ง [16]

2.3.1.4 ส่วนประกอบอื่นๆ ภายในแป้ง

1. ส่วนที่ไม่ใช่แป้งที่แยกได้จากแป้ง (Particulate material) ได้แก่ โปรตีนที่ไม่ละลาย และผนังเซลล์ซึ่งจะมีผลกระทบต่อกระบวนการผลิตแป้ง
2. ส่วนที่ติดกับพื้นผิวของเม็ดแป้ง (Surface material) ซึ่งสามารถสกัดออกได้โดยไม่ต้องทำลายเม็ดแป้ง
3. ส่วนที่ติดอยู่ภายในเม็ดแป้ง (Internal component) สามารถแยกออกได้โดยการทำลายเม็ดแป้ง เช่นไขมันในแป้งจากธัญพืช หมู่ฟอสเฟตในแป้งมันฝรั่ง และสารประกอบไนโตรเจนจากแป้ง [16]

2.3.2 โครงสร้างของเม็ดแป้ง

แป้งที่พบในธรรมชาติจะอยู่ในรูปเม็ดแป้ง (Granule) ขนาดเล็ก ซึ่งเม็ดแป้งจะมีลักษณะต่างกันไปขึ้นกับแหล่งของแป้งนั้น

เม็ดแป้งมีโครงสร้างแบบกึ่งผลึก (Semi-crystalline) โดยโมเลกุลของอะไมโลส และอะไมโลเพคตินจะจัดเรียงตัวเป็นโครงสร้างทั้งส่วนที่เป็นผลึก (Crystalline) และส่วนอสัณฐาน (Amorphous หรือ Gel phase) โดยส่วนสายโซ่สั้นของอะไมโลเพคตินจะจัดเรียงในลักษณะเกลียวเอกสารเป็นเอกสารที่สว่นไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ม้วนคู่ (Doble helices) ซึ่งบางส่วนจะเกิดเป็นโครงสร้างผลึก ส่วนโมเลกุลอะไมโลส และสายโซ่ยาวของอะไมโลเพคติน จะเป็นส่วนอสัญฐานของเม็ดแป้ง เม็ดแป้งจะมีโครงสร้างผลึก 3 แบบขึ้นกับความหนาแน่นในการจัดเรียงตัวของเกลียวคู่ และเม็ดแป้งจะมีสมบัติทำให้เกิดการบิดระนาบแสงโพลาไรซ์ หรือเรียกว่า ไบรีฟรินเจนซ์ (Birefringence) [16]

2.3.3 สมบัติของแป้ง

2.3.3.1 การดูดซับน้ำ การพองตัว และการละลาย

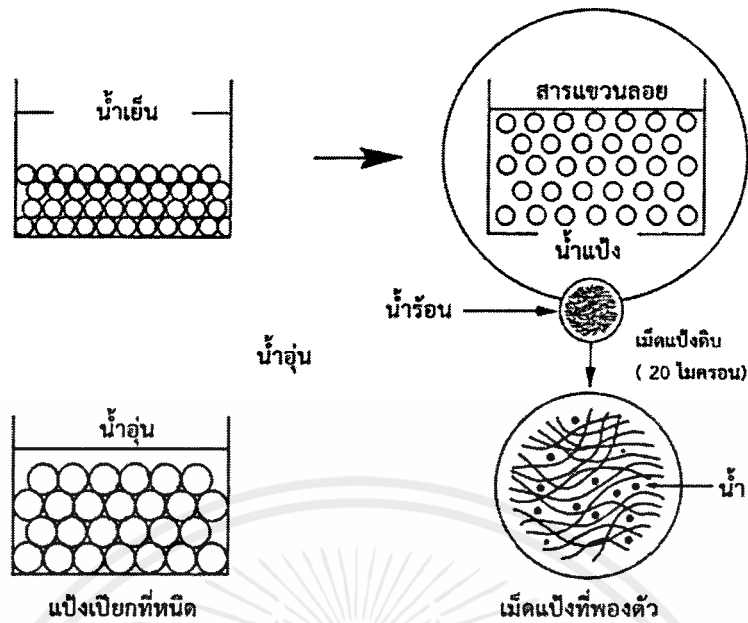
แป้งสามารถดูดซับน้ำได้ภายใต้สภาวะบรรยากาศห้อง จนเกิดสมดุลระหว่างความชื้นภายในเม็ดแป้งกับน้ำที่เติมและความชื้นในบรรยากาศ แป้งส่วนใหญ่เมื่อเกิดสมดุลภายใต้บรรยากาศปกติจะมีความชื้น 10-17 เปอร์เซ็นต์ น้ำที่มีอยู่ในเม็ดแป้งจะมี 3 รูปแบบ คือ น้ำในผลึกน้ำในรูปไม่อิสระ (Bound water) และน้ำในรูปอิสระ (Free water) โดยมีการจับกับแป้งได้แน่นตามลำดับ แป้งที่มีความชื้น 8-10 เปอร์เซ็นต์ สามารถจับกับน้ำได้แน่นกว่าแป้งที่มีความชื้นสูงกว่านี้ เนื่องจากการจับของน้ำกับหมู่ไฮดรอกซิลที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 6 ของกลูโคสแต่ละหน่วยของแป้ง จะได้สตาร์ชโมโนไฮเดรต [$nC_6H_{10}O_5 \cdot H_2O$]

แป้งดิบไม่สามารถละลายน้ำได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเจลาทีไนซ์ เนื่องจากมีพันธะไฮโดรเจนจากหมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลแป้งที่อยู่ใกล้กันเชื่อมต่อกันอยู่ แต่เมื่ออุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิเจลาทีไนซ์ พันธะไฮโดรเจนจะถูกทำลาย โมเลกุลน้ำจะมาจับหมู่ไฮดรอกซิลที่เป็นอิสระ เม็ดแป้งจะเกิดการพองตัว ทำให้ละลาย ความหนืดและความใสเพิ่มขึ้น เนื่องจากสมบัติ ไบรีฟรินเจนซ์ (Birefringence) ถูกทำลาย

ปัจจัยที่มีผลต่อการพองตัว และความสามารถในการละลายคือ ชนิดของแป้ง ความแข็งแรง ลักษณะร่างแหภายในเม็ดแป้ง สิ่งเจือปนในเม็ดแป้งที่ไม่ใช่คาร์โบไฮเดรต ปริมาณน้ำในสารละลายแป้ง และการตัดแปรทางเคมี โดยถ้ามีการให้ความร้อนแก่สารละลายน้ำแป้ง เม็ดแป้งจะพองตัว และบางส่วนของแป้งจะละลายออกมา [16]

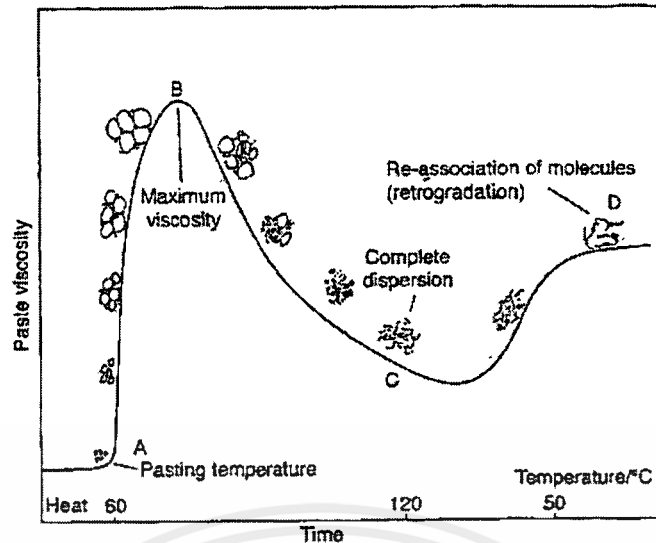
2.3.3.2 การเกิดเจลาทีไนเซชัน (Gelatinization)

โมเลกุลของแป้งประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl group) จำนวนมาก ยึดเกาะกันด้วยพันธะไฮโดรเจน มีคุณสมบัติชอบน้ำ (Hydrophilic) โดยเม็ดแป้งจะละลายน้ำเย็นได้ยาก เนื่องจากเม็ดแป้งอยู่ในรูปร่างแห (Micelle) ในขณะที่แป้งอยู่ในน้ำเย็นเม็ดแป้งจึงดูดซับน้ำ และพองตัวเพียงเล็กน้อย แต่เมื่อให้ความร้อนกับสารละลายแป้ง พันธะไฮโดรเจนจะถูกทำลาย เม็ดแป้งจะดูดน้ำแล้วพองออก ดังแสดงในรูปที่ 2.3 น้ำแป้งจะหนืด และใสขึ้น เนื่องจากน้ำโมเลกุลอิสระที่เหลือรอบๆ เม็ดแป้งเหลือน้อยลง เม็ดแป้งเคลื่อนไหวยากขึ้น ทำให้เกิดความหนืด ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า การเกิดเจลาทีไนเซชัน (Gelatinization) อุณหภูมิที่สารเริ่มหนืดเรียกว่า อุณหภูมิเริ่มเจลาทีไนซ์ เมื่อตรวจวัดด้วยเครื่องวัดความหนืดจะเรียกจุดนี้ว่า อุณหภูมิเริ่มเปลี่ยนแปลงความหนืด (Pasting temperature) หรือเวลาเริ่มเปลี่ยนแปลงความหนืด (Pasting time) ซึ่งจะต่างกันในแต่ละชนิดแป้งจากพืชหัว เช่น แป้งมันสำปะหลัง จะมีอุณหภูมิเริ่มเจลาทีไนซ์ต่ำกว่าอุณหภูมิจากแป้งธัญพืช [16]



รูปที่ 2.3 การเปลี่ยนแปลงของเม็คแป้งขณะให้ความร้อน [18]

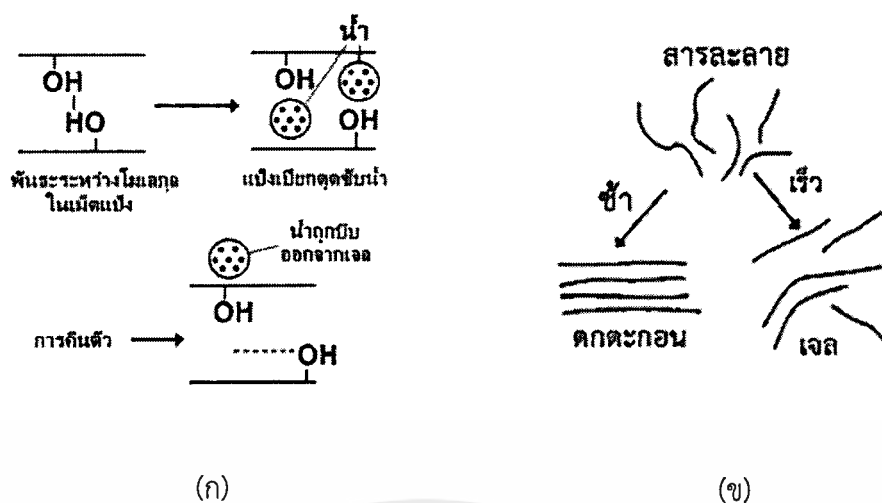
การเกิดเจลลาทีนในเซชันของเม็คแป้งมี 3 ระยะ ระยะแรกคือ เม็คแป้งจะดูดซึมน้ำเย็นได้จำกัด และเกิดการพองตัวแบบผันกลับได้ เนื่องจากร่างแหระหว่างไมเซลล์ยึดหยุ่นได้จำกัด ความหนืดยังไม่เพิ่มจนได้เห็นชัด แป้งยังคงรักษารูปร่างและโครงสร้างแบบที่เกิดการบิดระนาบแสงโพลาไรซ์ได้ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจนถึงประมาณ 65 องศาเซลเซียส (อุณหภูมิที่แท้จริงขึ้นกับชนิดของแป้ง) เริ่มเข้าสู่ระยะที่ 2 เม็คแป้งจะพองตัวอย่างรวดเร็ว ร่างแหระหว่างไมเซลล์จะอ่อนแอลงเนื่องจากพันธะไฮโดรเจนถูกทำลาย เม็คแป้งจะดูดน้ำเข้ามามาก และเกิดการพองตัวแบบผันกลับไม่ได้ เม็คแป้งเกิดการเปลี่ยนรูปร่างและโครงสร้างแบบที่เกิดการบิดแสงระนาบโพลาไรซ์ได้ ความหนืดจะเพิ่มอย่างรวดเร็ว แป้งที่ละลายได้เริ่มละลายออกมา เมื่อเพิ่มอุณหภูมิไปอีกจนถึงระยะที่ 3 รูปแป้งจะไม่แน่นอน การละลายของแป้งเพิ่มขึ้น เมื่อไปทำให้เย็นจะเกิดเจล ดังแสดงในรูปที่ 2.4 การเกิดเจลลาทีนในซี จะทำให้หมู่ไฮดรอกซิลของแป้งทำปฏิกิริยากับสารอื่นๆได้ดีขึ้น รวมทั้งถูกย่อยด้วยน้ำย่อยต่างๆได้ดีกว่า [16]



รูปที่ 2.4 ระยะการเกิดเจลที่ไนซ์ของเม็ดแป้ง [19]

2.3.3.3 การเกิดรีโทรเกรเดชัน (Retrogradation)

แป้งเมื่อได้รับความร้อนจนถึงอุณหภูมิเจลที่ไนซ์แล้วและให้ความร้อนต่อไป เม็ดแป้งจะพองตัวมากขึ้นจนถึงจุดที่พองตัวเต็มที่ และแตกออก โมเลกุลของอะไมโลสจะแตกออกมาทำให้ความหนืดลดลง เมื่อปล่อยให้เย็นตัวโมเลกุลอะไมโลสที่อยู่ใกล้กันจะจัดเรียงตัวกันใหม่ด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุล เกิดเป็นร่างแหสามมิติ โครงสร้างใหม่นี้สามารถอุ้มน้ำและไม่มีการดูดน้ำเข้ามาอีก ความหนืดคงตัวมากขึ้น เกิดเจลเหนียวคล้ายฟิล์มหรือผลึก เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การเกิดรีโทรเกรเดชัน (Retrogradation) หรือการคืนตัว (Setback) เมื่อลดอุณหภูมิต่ำลงไปอีกการเรียงตัวของโครงสร้างจะแน่นมากขึ้น โมเลกุลอิสระของน้ำที่อยู่ภายในจะถูกบีบออกมานอกเจล เรียกว่า Syneresis ปรากฏการณ์ทั้งสองนี้จะทำให้เจลมีลักษณะขาวขุ่น และมีความหนืดเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.5 (ก) ในการคืนตัวของแป้งเปียก และสารละลายแป้ง สารละลายมีความหนืดเพิ่มขึ้นขุ่น และทึบแสง เกิดขึ้นส่วนที่ไม่ละลายในแป้งเปียกที่ร้อน เกิดการตกตะกอนของอนุภาคแป้งที่ไม่ละลาย ทำให้เกิดเจล และโมเลกุลน้ำถูกบีบออกมานอกเจลถ้าเกิดขึ้นอย่างช้าๆ จะเกิดการตกตะกอน ถ้าเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วจะทำให้เกิดเจลขุ่น ดังแสดงในรูปที่ 2.5 (ข)



รูปที่ 2.5 (ก) การเกิดรีโทรเกรเดชัน [19] และ (ข) กลไกการคืนตัวของแป้ง [20]

การคืนตัวของแป้งขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ ได้แก่ ชนิดของแป้ง ความเข้มข้นของแป้ง กระบวนการให้ความร้อน กระบวนการให้ความเย็น อุณหภูมิ ระยะเวลา ความเป็นกรด-เบส (pH) ของสารละลาย ปริมาณ และขนาดอะไมโลส อะไมโลเพคติน และองค์ประกอบทางเคมีอื่นๆ ในแป้ง แป้งสามารถคืนตัวได้ดี และเร็วที่สุด ในช่วง pH 5-7 สำหรับช่วง pH ที่สูงหรือต่ำกว่านี้แป้งจะคืนตัวได้ช้าลงแป้งที่มีปริมาณอะไมโลสสูงจะเกิดการคืนตัวได้มากกว่าแป้งที่มีปริมาณอะไมโลเพคตินสูง และการคืนตัวของแป้งจะเกิดได้ดี เมื่อน้ำแป้งมีความเข้มข้นสูง และทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิต่ำ อัตราการคืนตัวของแป้งแต่ละชนิดจะแตกต่างกันไป [16]

2.3.4 แป้งดัดแปร (Modified starch)

เนื่องจากแป้งมีสมบัติเฉพาะตัว ซึ่งบางครั้งยังไม่เป็นที่ต้องการใช้ในระดับอุตสาหกรรม หรือยังไม่เหมาะสมกับสภาวะบางอย่าง จึงมีการนำแป้งมาปรับเปลี่ยนสมบัติ

แป้งดัดแปร (Modified starch) คือ แป้งที่ได้จากการนำแป้งดิบ (Native starch) มาเปลี่ยนสมบัติทางเคมี และกายภาพ โดยมาผ่านกรรมวิธีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง เพื่อลดขนาดโมเลกุลแป้ง ทำให้สมบัติเปลี่ยนไปตามต้องการ เช่น ความหนืดลดลง คงตัวต่อความร้อน กรด และแรงเฉือน วิธีการผลิตแป้งดัดแปรโดยวิธีทางเคมี กายภาพ เอนไซม์ หรือโดยจุลินทรีย์ แป้งที่นำมาใช้แปรรูปเป็นแป้งดัดแปร ได้แก่ แป้งมันสำปะหลัง (Tapioca starch) แป้งข้าวโพด (Corn starch) และแป้งข้าวเหนียว (Glutinous rice starch) ชนิดของแป้งดัดแปรแบ่งเป็น

1. แป้งดัดแปรด้วยกระบวนการเคมี เป็นแป้งดัดแปรส่วนใหญ่ที่มีการผลิต และใช้กันกัน ในระดับอุตสาหกรรม แป้งที่ผ่านกระบวนการดัดแปรทางเคมีมีหลายชนิด ขึ้นกับสารเคมีที่ใช้ และระดับการดัดแปร (Degree of Substitution, DS) เช่น แป้งไฮดรอกซีโพรพิล (Hydroxypropyl) แป้งครอสลิง (Crosslinked starch) แป้งแอซิเตต (Acetate starch) แป้งคาร์บอกซีเมทิล (Carboxymethyl starch) เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. แป้งดัดแปรทางกายภาพ เป็นการทำให้แป้งเกิดการเปลี่ยนแปลงภายใต้โครงสร้างภายในโมเลกุล โดยใช้พลังงานความร้อนหรือพลังงานจลน์หรือทั้งสองอย่างประกอบกัน เมื่อโครงสร้างโมเลกุลภายในเม็ดแป้งถูกเปลี่ยนแปลงไปคุณสมบัติของแป้งก็เปลี่ยนไปเช่นกัน เช่น แป้งเจลาตินไนซ์ [18]

2.4 แป้งท้าวยายม่อม (Arrowroot starch)

แป้งท้าวยายม่อม (Arrowroot starch) เป็นแป้งที่ทำมาจากหัวท้าวยายม่อม อยู่ในวงศ์ Taccaceae มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Tacca leontopetaloides* (L.) Kuntze ชื่ออื่นๆ เช่น บุกรอ ไม้เท้าฤๅษี สิงโตดำ, East Indian Arrowroot และ Tahiti Arrowroot เป็นต้น มีเขตการกระจายพันธุ์กว้างตั้งแต่แอฟริกา เอเชียตะวันออกเฉียงใต้ หมู่เกาะแปซิฟิก ไปจนถึงออสเตรเลีย ส่วนในประเทศไทยพบขึ้นกระจายแบบห่างๆ และพบขึ้นหนาแน่นในบางพื้นที่ ยกเว้นทางภาคเหนือ และภาคตะวันออกเฉียงเหนือ โดยจะขึ้นได้ร่มเงาในป่าดิบแล้งระดับต่ำ ป่าผลัดใบ ดินเป็นดินทราย และตามป่าชายหาด

ท้าวยายม่อมจัดเป็นไม้ล้มลุกอายุหลายปี ส่วนที่อยู่เหนือดินมีความสูงได้ถึง 1.5 เมตร มีหัวใต้ดินสะสมอาหาร (ใช้ทำแป้ง) ลักษณะของหัวเป็นรูปกลม กลมแบน หรือรูปรี มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.5-4 นิ้ว ผิวด้านนอกบางเป็นสีน้ำตาล เนื้อในหัวเป็นสีขาวใส ดอกสีเหลืองหรือเขียวแกมม่วงเข้ม ผลสีส้มอ่อน ดังแสดงในรูปที่ 2.6 มีการขยายพันธุ์ได้ 2 แบบคือ การใช้เมล็ด และใช้หัว การใช้เมล็ดต้องใช้เวลาประมาณ 2 ปีจึงหัวที่สามารถผลิตแป้งได้ สำหรับการใช้หัวพบว่าสามารถปลูกพืชหมุนเวียนได้ทุกปี ซึ่งการเก็บหัวได้ปีละครั้งจึงทำให้เป็นแป้งที่มีราคาแพง การงอกของเมล็ด และหัวช่วงเดือนเมษายน และพฤษภาคม การเก็บผลผลิตจะเก็บในช่วงเดือนธันวาคม ซึ่งเป็นระยะพักตัวหัวท้าวยายม่อมจะเหี่ยว และตายไป เหลือแต่หัวสะสมสะสมอาหารไว้ ถ้าเก็บเกี่ยวช่วงที่ต้นมีการพักตัวจะได้ปริมาณแป้งที่สกัดน้อยลง

ลักษณะของแป้งเป็นผงสีขาวมีเม็ดสีเหลี่ยมเล็กๆ นำไปใช้ให้ความหนืดแก้อาหารและนำไปทำขนมทำให้ขนมมีลักษณะใส แป้งละลายง่าย สุกง่าย เมื่อสุกจะเริ่มใส มีเงาในเนื้อแป้ง เหนียวปานกลาง เมื่อเย็นแล้วแป้งรวมตัวเป็นก้อน จะมีความเหนียวตัวมากกว่าแป้งมันสำปะหลัง จึงนิยมนำมาผสมกับแป้งชนิดอื่นๆ เช่น ผสมกับแป้งมันสำปะหลัง แป้งข้าวโพด และแป้งข้าวเจ้า เพื่อให้ได้อาหารที่มีความเข้มข้น และเป็นมันวาว เช่น ขนมชั้น ขนมเปียกปูนหรือขนม น้ำดอกไม้ ขนมบัวลอย ขนมลอดช่อง เป็นต้น องค์ประกอบ และสมบัติของแป้งท้าวยายม่อม ดังแสดงในตารางที่ 2.2 และ 2.3 [2]



รูปที่ 2.6 ต้นท้าวยายม่อม [21]

ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบทางเคมีและร้อยละน้ำหนักของแป้งท้าวยายม่อม [22]

องค์ประกอบ	ปริมาณ (ร้อยละ)
ไขมัน	0.03
เส้นใยหยาบ	0.41
โปรตีน	0.05
คาร์โบไฮเดรต	99.36
-อะไมโลส	18.0-24.5
-อะไมโลเพกติน	75.4-81.0
เถ้า	0.15

ตารางที่ 2.3 สมบัติของแป้งท้าวยายม่อม [22]

สมบัติ	แป้งท้าวยายม่อม
ขนาดเม็ดแป้ง (ไมโคร)	13-70
ขนาดอะไมโลส	3430
Pasting temperature	76.20
Peak viscosity (RVU)	420
Final viscosity (RVU)	188
Onset temperature	71.12
Peak temperature	76.06
Enthalpy	16.06

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 ไททาเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide)

ไททาเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide) หรือ ไททาเนีย (Titania) มีสูตรโมเลกุลทั่วไปคือ TiO_2 ดังแสดงในตารางที่ 2.4 ลักษณะโครงสร้างผลึกมีอยู่ 3 แบบ ดังแสดงในรูปที่ 2.7 แบบแรกเป็นโครงสร้างแบบอนาเทส (ก) มีลักษณะโครงสร้างผลึกแบบเทตระโกนอล แบบที่สองเป็นโครงสร้างแบบรูไทล์ (ข) มีลักษณะโครงสร้างผลึกแบบเทตระโกนอลเช่นเดียวกับโครงสร้างแบบอนาเทส ประกอบด้วยไททาเนียมไดออกไซด์ออกตะฮีดรอล (TiO_6^{2-}) ที่ช่องว่างของออกตะฮีดรอลของออกไซด์ไอออนจะมีไอออน TiO^{4+} อยู่แต่ไททาเนียมไดออกไซด์โครงสร้างอนาเทส และรูไทล์จะมีการเชื่อมกันของไททาเนียมกับออกซิเจนแตกต่างกัน ซึ่งทำให้มีผลต่อการสร้างผลึกของไททาเนียมไดออกไซด์คือการใช้ร่วมกันที่ขอบมุมซึ่งรูไทล์มีการเชื่อมกันที่ขอบ และมุม ขอบทั้งสองของออกตะฮีดรอลอยู่ในลักษณะตรงข้ามกัน และเชื่อมกันผ่านออกซิเจน ส่วนโครงสร้างอนาเทสจะไม่มีการใช้ร่วมกันที่มุมแต่ขอบทั้งสองใช้ร่วมกันต่อหนึ่งออกตะฮีดรอล แบบที่สามเป็นโครงสร้างแบบบรูคไคท์ (ค) มีโครงสร้างผลึกแบบออร์โธโรมบิก [23]



รูปที่ 2.7 โครงสร้างแบบต่างๆ ของไททาเนียมไดออกไซด์ [23]

ตารางที่ 2.4 ลักษณะสมบัติของไททาเนียมไดออกไซด์ [3]

ชื่อตามระบบ IUPAC	Titanium dioxide, Titanium(IV) oxide
CAS number	13463-67-7
สูตรโมเลกุล	TiO ₂
น้ำหนักโมเลกุล	79.866 กรัมต่อโมล
ความหนาแน่น	4.23 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
จุดหลอมเหลว	1843 องศาเซลเซียส
จุดเดือด	2972 องศาเซลเซียส
ลักษณะทั่วไป	<ul style="list-style-type: none"> - ของแข็งสีขาว ไม่มีกลิ่น - สารไม่ลุกติดไฟ (Non-flammable) - สารไม่ละลายน้ำ (Water insoluble) - โครงสร้างหลัก 3 แบบ คือ อนาเทส รูไทล์ และบลูคไคท์

2.5.1 ลักษณะสมบัติเฉพาะของไททาเนียมไดออกไซด์ [3]

1. การมีค่าดัชนีหักเหสูง (High refractive index) ทำให้วัสดุที่เคลือบด้วยไททาเนียมไดออกไซด์หรือมีส่วนผสมของไททาเนียมไดออกไซด์ เกิดการสะท้อนแสงได้ดี และวัสดุที่ถูกเคลือบจะมีความสว่างสูง (Brightness) [24-25]

2. การดูดซับแสงอัลตราไวโอเล็ตได้ดี (UV absorber) ทำให้วัสดุที่เคลือบด้วยไททาเนียมไดออกไซด์ หรือมีส่วนผสมของไททาเนียมไดออกไซด์ สามารถดูดซับแสง และเปลี่ยนแสงที่ได้เป็นความร้อนระบายออกจากวัสดุจากปฏิกิริยาเคมีทางแสง (Photochemistry reaction) ทำให้วัสดุนั้นไม่เสื่อมสภาพเมื่อได้รับแสงอัลตราไวโอเล็ต

3. การทำความสะอาดด้วยตัวเอง (Self-purification) ไททาเนียมไดออกไซด์สามารถรับแสงอัลตราไวโอเล็ตแล้วทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ที่อยู่บนพื้นผิวของไททาเนียมไดออกไซด์ด้วยปฏิกิริยาเคมีทางแสง (Photochemistry reaction) ทำให้สารอินทรีย์นั้นๆ เกิดการย่อยสลายเป็นสารที่มีขนาดโมเลกุลเล็กลง หรือเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ การเคลือบวัสดุด้วยไททาเนียมไดออกไซด์จึงทำให้วัสดุที่ถูกเคลือบเกิดการทำความสะอาดด้วยตัวเอง ซึ่งลักษณะสมบัตินี้ได้นำไปใช้กับการกำจัดกลิ่นด้วยเช่นกัน (กลิ่นมักมาจากสารอินทรีย์ที่เคลือบบนผิววัสดุ) [24-26]

4. การต้านเชื้อโรค (Antibacterial) ไททาเนียมไดออกไซด์สามารถรับแสงอัลตราไวโอเล็ต แล้วทำปฏิกิริยากับจุลินทรีย์ที่อยู่บนพื้นผิวของไททาเนียมไดออกไซด์ด้วยปฏิกิริยาเคมีทางแสง (Photochemistry reaction) ทำให้เกิดอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลเรดิคัลที่สามารถกำจัดหรือฆ่าจุลินทรีย์บนพื้นผิวนั้นๆ [24]

5. การแผ่กระจายของน้ำ (Superhydrophilicity) เป็นลักษณะสมบัติของไททาเนียมไดออกไซด์ที่ทำให้หยดน้ำที่เกาะบนพื้นผิวแผ่กระจายเป็นฟิล์มบางๆ ลักษณะสมบัตินี้เกิดขึ้นเมื่อพื้นผิวที่มีไททาเนียมไดออกไซด์มีหยดน้ำมาเกาะ มุมสัมผัสของน้ำมีค่าเป็นศูนย์ (No contact angle) ทำให้น้ำไม่ยืดยาวบนพื้นผิวไททาเนียมไดออกไซด์ แต่จะแผ่กระจายไม่เกาะเป็นหยดน้ำ [24-27]

6. การเป็นสารเร่งปฏิกิริยา (Photocatalyst) เป็นลักษณะเฉพาะของไททาเนียมไดออกไซด์ในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแบบใช้แสง ซึ่งทำให้ปฏิกิริยาทางเคมีเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วในเวลาอันสั้น ซึ่งมาจากคุณสมบัติของการสารเป็นสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) ของไททาเนียมไดออกไซด์ [27]

2.6 ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide)

เป็นสารประกอบที่มีสูตรเคมี ZnO ดังแสดงในตารางที่ 2.5 มีลักษณะเป็นผงที่ไม่ละลายในน้ำ และใช้ผสมในผลิตภัณฑ์หลายชนิดเช่น ยาง พลาสติก เซรามิก แก้ว น้ำมันเครื่อง สีทา สารยึดเกาะอาหาร แบตเตอรี่ และอื่นๆ ในธรรมชาติพบในรูปซินไซต์ แต่ส่วนใหญ่ได้จากการสังเคราะห์ [28]

ตารางที่ 2.5 ลักษณะสมบัติของซิงค์ออกไซด์ [4]

ชื่อตามระบบ IUPAC	Zinc oxide หรือ Oxozinc
CAS number	1314-13-2
สูตรโมเลกุล	ZnO
น้ำหนักโมเลกุล	81.408 กรัมต่อโมล
ความหนาแน่น	5.606 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
จุดหลอมเหลว	1975 องศาเซลเซียส
จุดเดือด	2360 องศาเซลเซียส
ลักษณะทั่วไป	<ul style="list-style-type: none"> - ของแข็งสีขาว - สารไม่ละลายน้ำ (Water insoluble) - ลักษณะโครงสร้าง Hexagonalwurtzite และ Cubiczincblende

2.6.1 ลักษณะสมบัติเฉพาะของซิงค์ออกไซด์ [4]

1. การมีค่าดัชนีหักเหสูง (High refractive index) การทนความร้อน และอุณหภูมิได้ดี โดยซิงค์ออกไซด์มีค่าดัชนีหักเหประมาณ 1.95-2.10 ทำให้วัสดุที่เคลือบด้วยซิงค์ออกไซด์เกิดการสะท้อนแสงได้ดี และวัสดุที่ถูกเคลือบจะมีความสว่างสูง และมีความเสถียรทางอุณหภูมิแม้ว่าอุณหภูมิ

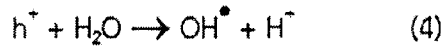
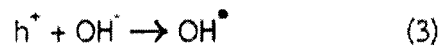
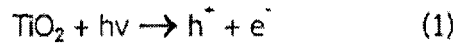
สูงถึง 1800 องศาเซลเซียส ทำให้มีสมบัติในการเป็นตัวกลางไฟฟ้าได้ดี รวมทั้งทนความร้อนได้ดี และสามารถนำไปใช้ได้หลายอุตสาหกรรม

2. ลักษณะสมบัติทางแสง จากการที่ซิงค์ออกไซด์เป็นสารกึ่งตัวนำที่มีค่าช่องว่างของแถบพลังงาน (Band gap) เป็น 3.37 อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งใกล้เคียงกับค่าช่องว่างของแถบพลังงาน 3.39 อิเล็กตรอนโวลต์ของแกเลียมไนไตรด์ (GaN) แต่เนื่องจากซิงค์ออกไซด์มีราคาถูกกว่ามากโดยปัจจุบันนิยมนำมาใช้แทนวัสดุ GaN สำหรับการนำไปใช้เป็นเครื่องมืออิเล็กทรอนิกส์ ที่ทำงานในช่วงของแสงอัลตราไวโอเล็ตได้ดี เช่น LEDs, Laser diodes หรือ Photodetectors เป็นต้น

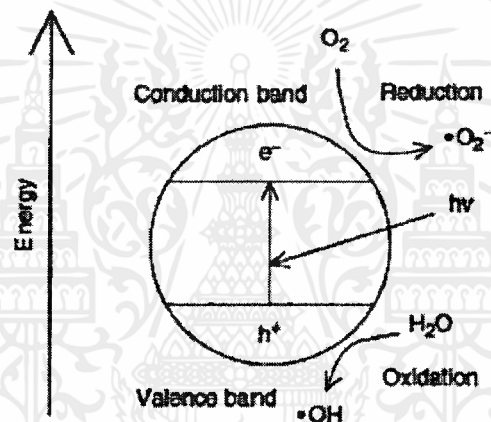
3. การเป็นสารเร่งปฏิกิริยา (Photocatalyst) เป็นลักษณะเฉพาะของซิงค์ออกไซด์ในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแบบใช้แสง ซึ่งทำให้ปฏิกิริยาทางเคมีเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วในเวลาอันสั้น ซึ่งมาจากคุณสมบัติของการสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) ของซิงค์ออกไซด์ [4]

2.7 กลไกการเกิดปฏิกิริยาเร่งด้วยแสง

กลไกการเกิดปฏิกิริยาเร่งด้วยแสง สารตัวนำ และกึ่งตัวนำจะมีแถบพลังงานอยู่ 2 แถบ คือ แถบเวเลนซ์ (Valence band) และแถบการนำไฟฟ้า (Conduction band) โดยสารทั้ง 2 ประเภท มีความแตกต่างกันคือ หากเป็นสารตัวนำ แถบทั้งสองจะอยู่ติดกันแต่สารกึ่งตัวนำจะมีแถบช่องว่างพลังงาน (Band gap) คั่นอยู่ระหว่างแถบพลังงานทั้งสอง กระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงเริ่มจากเมื่อสารกึ่งตัวนำได้รับพลังงานเท่ากับหรือสูงกว่าช่องว่างพลังงาน อิเล็กตรอนที่สถานะพื้นจะถูกกระตุ้นให้เคลื่อนที่ไปยังแถบกระตุ้น หรือแถบการนำไฟฟ้านั้นเอง และทิ้งช่องว่างอิเล็กตรอนที่แถบเวเลนซ์ไว้ เรียกว่า โฮล (Hole) ซึ่งมีประจุบวก ส่วนอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ไปยังแถบการนำไฟฟ้านั้นจะสามารถกลับมาอยู่ในสถานะเดิมได้อีก เรียกว่า รีคอมบิเนชัน (Recombination) จากที่กล่าววาระดับพลังงานของสารกึ่งตัวนำต่างจากโลหะ เพราะมีช่องว่างของระดับพลังงานคั่นอยู่ทำให้ทั้งอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้น และโฮลมีระยะเวลาเพียงพอในการเคลื่อนที่ผ่านไปยังพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา และเกิดปฏิกิริยาในที่สุด เมื่อฉายแสงยูวีไปยังตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น ไททาเนียมไดออกไซด์ หรือซิงค์ออกไซด์จะทำให้เกิดไฮดรอกซิลเรดิคัล (Hydroxyl radical) ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide) และประจุลบของซูเปอร์ออกไซด์แอนไอออน (Superoxide anion) ซึ่งสารตระกูลดังกล่าวเป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรง สามารถทำลายโครงสร้าง และยับยั้งชีวเคมีของแบคทีเรีย และเซลล์ที่ติดเชื้อไวรัส หรือจะทำให้สารประกอบอินทรีย์ถูกออกซิไดซ์กลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำในที่สุด กลไกการย่อยสลายดังแสดงในรูปที่ 2.8 และสมการต่อไปนี้ [29]



เมื่อ OPads คือ สารมลพิษอินทรีย์ (organic pollutant) ที่ดูดซับบนผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยา [29]



รูปที่ 2.8 กลไกการเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติก [30]

2.8 พลาสติไซเซอร์

พลาสติไซเซอร์ (Plasticizer) เป็นสารที่ใส่ในพอลิเมอร์หรือผลิตภัณฑ์พลาสติก ซึ่งช่วยลดอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature, Tg) ของพอลิเมอร์ให้ต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง ทำให้พอลิเมอร์มีความยืดหยุ่น อ่อนตัวมากขึ้น ช่วยเพิ่มความสามารถในการไหล และลดความหนืดของพอลิเมอร์ ส่งผลให้ขึ้นรูปง่าย อีกทั้งยังมีคุณสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้า ทนต่อกรดต่าง ทนน้ำมัน และผงซักฟอก พลาสติไซเซอร์จึงมีความสำคัญต่ออุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์พลาสติกเป็นอย่างยิ่ง ตัวอย่างของพลาสติไซเซอร์ เช่น น้ำ กลีเซอรอล เป็นต้น

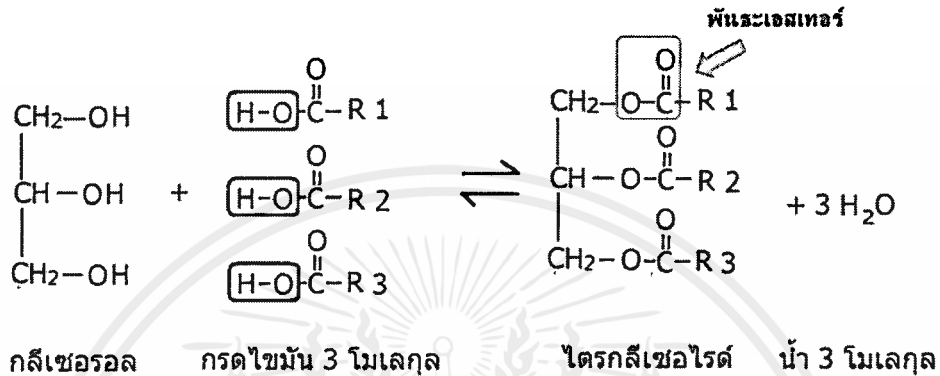
2.8.1 กลีเซอรอล

กลีเซอรอล (Glycerol) อาจเรียกว่า กลีเซอริน (Glycerine หรือ Glycerin) มีโครงสร้างโมเลกุลเป็นพอลิออล (Polyol) เป็นสารที่เป็นของเหลวใส ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น มีรสหวานเล็กน้อย ในโมเลกุลมีหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) 3 หมู่ จึงทำให้ละลายในน้ำได้ดี มีสมบัติในการดูดจับน้ำได้ดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Hydroscopic) กลีเซอรอลเป็นส่วนประกอบหลักในโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์ (Triglyceride) ซึ่งได้จากการรวมตัวของกลีเซอรอลกับกรดไขมัน (Fatty acid) 3 โมเลกุลดังแสดงในรูปที่ 2.9

จะได้กลีเซอรอลที่เกิดจากขบวนการผลิต ซึ่งเป็นวัตถุดิบสำคัญที่นิยมใช้กันมากในอุตสาหกรรมอาหาร ยา และเครื่องสำอางที่ใช้ไขมัน และสารไขมันในรูปเคมีภัณฑ์ต่างๆ หลายรูปแบบ เช่น ผลิตเป็นอาหาร ตัวกระจายพื้นผิวหรือสารลดแรงตึงผิว วัสดุเคลือบพื้นผิว สารหล่อลื่น ตัวเพิ่มสภาพยืดหยุ่นแก่พลาสติก เชื้อเพลิง เครื่องสำอาง และยา [31]



รูปที่ 2.9 การรวมตัวของกลีเซอรอลกับกรดไขมัน 3 โมเลกุลได้ไตรกลีเซอไรด์ [32]

2.9 วัสดุเชิงประกอบ

วัสดุเชิงประกอบ หรือวัสดุคอมโพสิต (Composite materials) หมายถึง วัสดุที่เกิดจากการรวมตัวของวัสดุมากกว่าหนึ่งชนิดขึ้นไปแล้วทำให้สมบัติของวัสดุรวมดีขึ้น สำหรับความหมายเชิงวิศวกรรมของวัสดุเชิงประกอบ หมายถึง วัสดุที่ประกอบขึ้นจากวัสดุ ที่มีสมบัติแตกต่างกันตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป โดยไม่เกิดการรวมตัวเป็นเนื้อเดียวกัน ทำให้สมบัติของวัสดุเชิงประกอบที่เกิดขึ้นมีสมบัติร่วมกันของวัสดุที่เป็นองค์ประกอบ ดังนั้น การทำนายหรือคาดคะเนสมบัติของวัสดุเชิงประกอบจึงไม่สามารถทำนายได้จากวัสดุที่เป็นองค์ประกอบชนิดใดเพียงชนิดเดียว

องค์ประกอบของวัสดุเชิงประกอบ ได้แก่ วัสดุที่เป็นเนื้อหลัก และเป็นเฟสต่อเนื่อง เรียกว่า เมทริกซ์ (Matrix) และวัสดุส่วนเหลือที่กระจายตัวอยู่ในวัสดุเนื้อหลักนั้น เรียกว่า สารเสริมแรง (Reinforcement) โดยเมทริกซ์จะทำหน้าที่ห่อหุ้มสารเสริมแรง และทำให้ วัสดุเชิงประกอบเป็นรูปร่างขึ้น ส่วนสารเสริมแรง จะทำหน้าที่เสริมสมบัติให้เมทริกซ์ และทำให้วัสดุเชิงประกอบมีสมบัติตามต้องการ ดังนั้น ถ้าจำแนกวัสดุเชิงประกอบตามชนิดของวัสดุที่เป็นเมทริกซ์จะสามารถจำแนกออกเป็น 3 ประเภท

1. วัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์ (Polymer matrix composite, PMC) ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่พบเห็นได้ง่ายของวัสดุเชิงประกอบกลุ่มนี้ คือ ผลิตภัณฑ์ที่ทำจากไฟเบอร์กลาสต่างๆ โดยมีพอลิเมอร์ ซึ่งอาจจะเป็นพลาสติก หรือยางเป็นเนื้อหลัก และใช้วัสดุเสริมแรงได้หลายชนิด เช่น เส้นใยแก้ว เส้นใยคาร์บอน เส้นลวดโลหะ เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. วัสดุเชิงประกอบเซรามิก (Ceramic matrix composite, CMC) คอนกรีต และคอนกรีตเสริมเหล็ก (ปูน กรวด ทราย เหล็กเส้น) เป็นตัวแทนที่พบเห็นได้ทั่วไปของวัสดุกลุ่มนี้ ขณะที่วัสดุเสริมแรงที่มีเนื้อหลักเป็นเซรามิก และใช้วัสดุเสริมแรงเป็นเส้นใย คอมโพสิตกลุ่มนี้มักนำมาใช้งานในสภาวะแวดล้อมที่มีอุณหภูมิสูง เช่น กังหันใบพัดของเครื่องยนต์ไอพ่น เป็นต้น

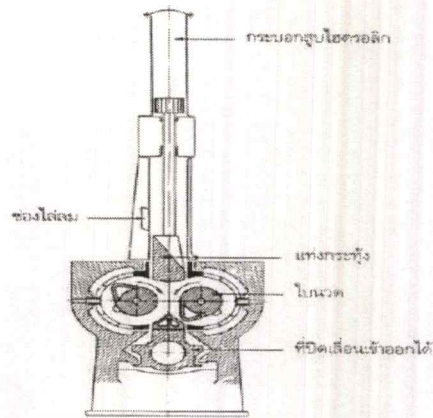
3. วัสดุเชิงประกอบโลหะ (Metal matrix composites, MMCs) วัสดุเชิงประกอบกลุ่มนี้พบมากในผลิตภัณฑ์กลุ่มอุตสาหกรรมยานยนต์ โดยมี โลหะเป็นเนื้อหลัก เช่น อะลูมิเนียม สำหรับวัสดุเสริมแรงของวัสดุเชิงประกอบกลุ่มนี้ เป็นวัสดุเซรามิกส์ เช่น กลุ่มคาร์ไบด์ กลุ่มไนไตรด์ เป็นต้น

สามารถจำแนกย่อยต่อไปได้อีกตามลักษณะของสารเสริมแรง ได้แก่ อนุภาค (Particle) เส้นใย (Fiber) และวิสเกอร์ (Whisker) อนุภาคเสริมแรงจะมีลักษณะเป็นเม็ด หรือผง เช่น ผงถ่านดำ ซิลิกอนคาร์ไบด์ เป็นต้น และถ้าพิจารณาอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (Aspect ratio) ถ้าอัตราส่วนดังกล่าวมากกว่า 100 ขึ้นไปจะเรียกรวมเสริมแรง นั้นเป็นเส้นใย ซึ่งอาจจำแนกตามความยาว เป็นเส้นใยต่อเนื่อง (Continuous fiber) และเส้นใยไม่ต่อเนื่อง (Discontinuous fiber) และยังสามารถจำแนกเส้นใยไม่ต่อเนื่องตามอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางได้เป็นเส้นใยยาว (Long fiber) ซึ่งมีอัตราส่วนมากกว่า 1,000 ขึ้นไป และเส้นใยสั้น (Short fiber) ซึ่งมีอัตราส่วนน้อยกว่า 1,000 เส้นใยมีทั้งที่เป็น เส้นใยอินทรีย์ และเส้นใยอนินทรีย์ ตัวอย่างเส้นใยอินทรีย์ เช่น เส้นใยอะรามิด เส้นใยเซลลูโลส เป็นต้น ส่วนเส้นใยอนินทรีย์อาจเป็นเส้นใยแก้ว เส้นใยคาร์บอน หรือเส้นใยโลหะ เช่น เส้นใยโบรอน เส้นใยทองแดง เป็นต้น ส่วนวิสเกอร์เป็น ลักษณะของเส้นใยขนาดเล็กมากที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางในหน่วยไมโครเมตร และมีความยาวเพียงไม่กี่มิลลิเมตร ซึ่งเกิดจากการก่อตัวทางยาวของผลึกเดี่ยว (Elongated single crystal) จึงมีแนวโน้มที่จะเป็นผลึกสมบูรณ์ที่ปราศจากการเคลื่อน (Dislocation) ทำให้วิสเกอร์มีความแข็งแรงสูงมาก เช่น วิสเกอร์ซิลิกอนคาร์ไบด์ [33]

2.10 เครื่องผสมแบบปิดหรือเครื่องผสมภายใน (Internal mixer)

โดยทั่วไปเครื่องผสมแบบปิดมีองค์ประกอบที่สำคัญ 4 ส่วนได้แก่ ห้องผสม (Chamber) ตัวบดผสมหรือโรเตอร์ (Rotor) แท่งกดหรือแรม (Ram) และระบบหล่อเย็น (Cooling system) ซึ่งโรเตอร์มีพื้นผิวไม่ราบเรียบเหมือนผิวลูกกลิ้งจำนวนสองชุดบรรจุอยู่ในห้องผสมที่สามารถปรับอุณหภูมิได้โดยใช้น้ำมันร้อนหรือน้ำไหลหมุนเวียน โรเตอร์ทั้งสองหมุนสวนทางกันด้วยความเร็วในการหมุนที่สามารถปรับได้ การหมุนของโรเตอร์ภายในห้องผสมทำให้เกิดแรงเฉือนภายในห้องผสมสูงมาก จึงทำให้การกระจายตัวของสารเติมแต่งในพลาสติกเกิดขึ้นได้ดี เครื่องผสมแบบปิดดังแสดงในรูปที่ 2.10

ข้อดีของเครื่องผสมแบบนี้ คือ ใช้เวลาในการผสมสั้น ผู้ปฏิบัติไม่จำเป็นต้องมีทักษะสูง ไม่มีการสูญเสียวัสดุหรือเกิดการปนเปื้อน เนื่องจากการผสมทำในระบบปิด ขนาด และความสม่ำเสมอของการผสมในแต่ละครั้งค่อนข้างแน่นอน สำหรับข้อเสียของเครื่องผสมแบบนี้ คือ ไม่สามารถมองเห็นการผสมได้ และการทำความสะอาดห้องผสมทำได้ยาก [34]



รูปที่ 2.10 เครื่องผสมแบบปิด (Internal mixer) [35]

2.11 การขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์แบบกดอัด (Compression molding)

การขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์แบบกดอัดเป็นวิธีที่ใช้กันมากที่สุดในอุตสาหกรรมเมื่อเทียบกับการขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์แบบอื่น เพราะเป็นวิธีที่ง่าย และเครื่องจักรที่ใช้มีราคาไม่สูงมากนัก เครื่องจักรที่ใช้ ได้แก่ เครื่องกดอัดระบบไฮดรอลิก (Hydraulic press) ซึ่งประกอบด้วยแผ่นกดอัด (Platen) จำนวน 2 แผ่น หรือมากกว่า 2 แผ่น ดังแสดงในรูปที่ 2.11 แผ่นกดอัดจะเลื่อนขึ้นลงด้วยระบบไฮดรอลิกเพื่ออัด และส่งผ่านแรงดันไปสู่แม่พิมพ์ที่อยู่ตรงกลางระหว่างแผ่นกดอัด เครื่องจะสามารถตั้งอุณหภูมิ และควบคุมความร้อนให้คงที่ระหว่างการผลิต

ในส่วนของแม่พิมพ์แบบกดอัดนี้ประกอบด้วยแม่พิมพ์ 2 ส่วน คือ แม่พิมพ์ส่วนบน (Lid) และแม่พิมพ์ส่วนล่าง (Base) โดยแม่พิมพ์ส่วนล่างจะมีช่องเป็นรูปร่างของผลิตภัณฑ์ เรียกว่า เบ้าพิมพ์ (Cavity) สำหรับใส่พอลิเมอร์ที่จะขึ้นรูป จากนั้นนำแม่พิมพ์ส่วนบนมาปิดทับสลัก (Pin) ที่ติดอยู่กับแม่พิมพ์ส่วนบนจะช่วย ล็อกไม่ให้เกิดการเคลื่อนตัวในแนวระนาบขณะที่ได้รับแรงกดอัด เมื่อให้แรงดันแก่แม่พิมพ์ พอลิเมอร์จะถูกบังคับให้ไหลจนเต็มเบ้าพิมพ์ และความร้อนจากแม่พิมพ์จะทำให้เกิดการคงรูป [36]



รูปที่ 2.11 เครื่องกดอัดระบบไฮดรอลิก [36]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.12.1 Oleyaei. et al. (2016) งานวิจัยนี้ศึกษาการปรับปรุงสมบัติของฟิล์มจากแป้งมันฝรั่งด้วยอนุภาคนาโนของไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) โดยใช้ปริมาณ TiO_2 0, 0.5, 1 และ 2 wt% โดยนำมาปั่นกวนกับแป้งมันฝรั่งที่มีกลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ (40% w/w) เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และทำการ Sonication ในอ่าง Ultrasonic เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำมาเทหล่อ (Casting) เป็นฟิล์มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร จากผลการทดสอบพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณ TiO_2 ส่งผลให้ฟิล์มมีสมบัติที่เกี่ยวข้องกับน้ำ (การละลายน้ำ การซึมผ่านของน้ำ การดูดความชื้น) ลดลง แผ่นฟิล์มมีความต้านทานแรงดึง (Ultimate tensile strength) เพิ่มขึ้น เปอร์เซ็นต์การดึงยืดที่จุดขาด (% Elongation at break) มีแนวโน้มลดลง แต่เมื่อความเข้มข้น TiO_2 2 wt% ความต้านทานแรงดึงลดลงเนื่องจากเกิดการรวมตัวของ TiO_2 ที่มากเกินไป และในการตรวจสอบสมบัติทางแสงพบว่า ความสว่างดัชนีความขาว ความแตกต่างของสี ความทึบแสงเพิ่มขึ้น ปริมาณการของแสงที่ผ่านฟิล์มในช่วง Visible, UV-A, UV-B, และ UV-C ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ สมบัติทางความร้อนศึกษาโดย Differential scanning calorimetry (DSC) พบว่า อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature) และอุณหภูมิลอมเหลว (Melting temperature) เพิ่มขึ้น [5]

2.12.2 Goudarzi. et al. (2017) งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการเตรียมวัสดุสำหรับบรรจุภัณฑ์ใส่อาหารที่มีสมบัติป้องกันรังสียูวี (UV-protective) โดยใช้ปริมาณนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ (Nano- TiO_2) ที่แตกต่างกันคือ 1, 3 และ 5 wt% โดยนำ TiO_2 ที่ผ่านการทำ Sonication ไปผสมกับสารละลายแป้งข้าวสาลี โดยมีกลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ เป็นเวลา 10 นาที และทำการเทหล่อ (Casting) เป็นฟิล์มที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร จากผลการทดสอบพบว่า เมื่อปริมาณ TiO_2 เพิ่มขึ้น ทำให้ความไม่ชอบน้ำ (Hydrophobicity) ของฟิล์มเพิ่มขึ้น ความแข็งแรงดึง (Tensile strength) และมอดุลัส (Young's modulus) มีค่าลดลง ในขณะที่เปอร์เซ็นต์การดึงยืดที่จุดขาด (% Elongation at break) และพลังงานในการดึงยืดที่ทำให้เกิดการขาด (Tensile energy to break) มีค่าเพิ่มขึ้น สมบัติทางความร้อน อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature) มีค่าเพิ่มขึ้น แต่อุณหภูมิลอมเหลว (Melting temperature) มีค่าลดลง เมื่อปริมาณ TiO_2 เพิ่มขึ้น และฟิล์ม Starch/ TiO_2 nanocomposites มีสมบัติการป้องกันรังสียูวีที่ดี [6]

2.12.3 Kochkina. and Skobeleva. (2018) งานวิจัยนี้เป็นการศึกษา การขึ้นรูปฟิล์มจากแป้งข้าวโพดที่เจลาติไนซ์ (GS) และอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ที่มีกลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ โดยใช้คลื่นเรโซแนนซ์ในการผสม โดยปริมาณ TiO_2 ที่ใช้คือ 0, 0.5, 1 และ 1.5 wt% ซึ่งสังเคราะห์โดยเทคนิคโซล-เจล และทำการเทหล่อ (Casting) เป็นฟิล์มหนา 100 ไมโคร เมื่อตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าฟิล์ม Pure GS มีพื้นผิวสม่ำเสมอ เม็ดแป้งที่บวมตัวนั้นแตกออกมีขนาดเล็ก และกระจายตัวสม่ำเสมอ ส่วนฟิล์ม GS/ TiO_2 พบว่า TiO_2 สามารถกระจายตัวได้ดี ไม่รวมเป็นก้อนขนาดใหญ่จึงทำให้ฟิล์ม GS/ TiO_2 มีค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ TiO_2 เพิ่มขึ้น โดยเมื่อทดสอบการซึมผ่านของไอน้ำพบว่ามีความ

ลดลง นอกจากนี้อัตราการผ่านของแสง UVB (300 nm) และ UVA (360 nm) มีค่าลดลงเมื่อปริมาณ TiO_2 เพิ่มขึ้น ซึ่งที่ TiO_2 1.5 wt% นั้นช่วยป้องกันรังสีได้ถึง 80 เปอร์เซ็นต์ ในช่วงความยาวคลื่น 300–400 nm [37]

2.12.4 Wang. *et al.* (2014) งานวิจัยนี้ศึกษาการเตรียม และปรับปรุงสมบัติของแป้งข้าวโพดที่ Plastized ด้วยกลีเซอรอล (Glycerol plasticized-corn starch, GPS) โดยการใส่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ Nano- TiO_2 0.5, 1, 2, 3 และ 4 wt% ผสมกับกลีเซอรอล 0.5 กรัม ในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร แล้วทำ Ultrasonic เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นจึงใส่แป้งข้าวโพดลงไป 5 กรัม ทำการให้ความร้อน 90 องศาเซลเซียส และปั่นจนเป็นเวลา 40 นาที จากนั้นขึ้นรูปด้วยการเทหล่อ (Casting) เป็นฟิล์ม จากผลการทดสอบสัญญาณวิทยาพบว่า Nano- TiO_2 กระจายสม่ำเสมอใน GPS เมทริกซ์ และเกิดการรวมตัวของ Nano- TiO_2 เล็กน้อยเมื่อปริมาณ Nano- TiO_2 เพิ่มขึ้น ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลพบว่าความแข็งแรงดึงที่จุดคราก (Tensile yield strength) และมอดุลัส (Young's modulus) เพิ่มขึ้นจาก 2.11 เป็น 8.35 MPa และเพิ่มขึ้นจาก 21.3 เป็น 211.6 MPa ตามลำดับ แต่เปอร์เซ็นต์การดึงยืดที่จุดขาด (% Elongation at break) ลดลงจาก 44.3 เปอร์เซ็นต์ เป็น 20.1 เปอร์เซ็นต์ [8]

2.12.5 Ma. *et al.* (2009) งานวิจัยนี้เป็นศึกษาการทำวัสดุประกอบทางชีวภาพ โดยการเตรียมจากอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO nanoparticle) และแป้งถั่ว (Pea starch) โดยมีกลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ (Plasticizer) จากการกระจายอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ ปริมาณ 0, 0.5, 1, 2, 3 และ 4 wt% ในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร และกลีเซอรอล 1.5 กรัม ทำการ Ultrasonicated เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นนำไปปั่นจนกับแป้งถั่ว 5 กรัม ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที และทำการขึ้นรูปด้วยวิธีการเทหล่อ (Casting) จากการทดลองพบว่า เมื่ออนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์เพิ่มขึ้น พบว่าสารละลายแป้งมีความหนืดมอดุลัสสะสม (Storage modulus) อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature) และการดูดซับแสงยูวี (UV absorbance) มีค่าเพิ่มขึ้น และเมื่อใส่อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ปริมาณ 0-4 wt% ส่งผลให้ความแข็งแรงดึงที่จุดคราก (Tensile yield strength) เพิ่มขึ้นจาก 3.94 เป็น 10.80 MPa และมอดุลัส (Young's modulus) เพิ่มขึ้นจาก 49.80 เป็น 137.00 MPa แต่เปอร์เซ็นต์การดึงยืดที่จุดขาด (% Elongation at break) ลดลงจาก 42.2 เปอร์เซ็นต์ เป็น 20.4 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้พบว่าค่าการซึมผ่านของไอน้ำ (Water vapor permeabilities, WVP) มีค่าลดลงจาก $4.76 \times 10^{10} \text{ gm}^1 \text{ s}^1 \text{ Pa}^1$ เป็น $2.18 \times 10^{10} \text{ gm}^1 \text{ s}^1 \text{ Pa}^1$ [9]

2.12.6 Nafchi. *et al.* (2012) งานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของซิงค์ออกไซด์รูปทรงแท่งขนาดนาโน ต่อสมบัติการต้านทานเชื้อจุลินทรีย์ (Antimicrobial) สมบัติการไหล (Rheological) ไอโซเทอมของความชื้น (Sorption isotherm) การซึมผ่านของไอน้ำ (Water vapor permeability) และการส่องผ่านรังสียูวี (UV Transmission) ของฟิล์มแป้งสาकु โดยการเตรียมซิงค์ออกไซด์รูปทรงแท่งขนาดนาโน (Nanorod-rich ZnO, ZnO-N) ให้เป็นเนื้อเดียวกันโดยการ Sonication และนำไปผสมกับแป้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สาเหตุโดยมีซอร์บิทอล และกลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ในอัตราส่วน 3:1 ปริมาณ 40% (w/w) ในปริมาณ 1%, 2%, 3% และ 5% (w/w) ของแป้ง แล้วจึงนำไปเทหล่อ (Casting) เป็นฟิล์มขนาด $16 \times 16 \text{ cm}^2$ ผลการทดสอบพบว่า เมื่อปริมาณ ZnO-N เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความหนืดของสารละลายเพิ่มขึ้น แต่การซึมผ่านของไอน้ำ ความสามารถในการละลายน้ำ และปริมาณความชื้นลดลง และพบว่าฟิล์ม ZnO-N มีค่าการส่องผ่านของแสงยูวี 0% และฟิล์ม ZnO-N มีความสามารถยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ *Staphylococcus aureus* ได้ดี [7]

2.12.7 Babaei-Ghazvin. *et al.* (2018) งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการเตรียมฟิล์มสำหรับบรรจุภัณฑ์ที่มีสมบัติป้องกันรังสียูวีจาก แป้งสาทิ/สารสกัดจากแบคทีเรีย (Kefiran)/ZnO nanocomposite โดยการผสม kefirin กับ แป้งสาทิในอัตราส่วน 1:1 โดยมีกลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ 40% (w/w) แล้วนำไปผสมกับกับซิงค์ออกไซด์ขนาดนาโน ที่ทำการ Sonicated ด้วยเครื่อง Ultrasonic homogenizer ที่ปริมาณ 1, 3 และ 5 wt% แล้วจึงนำไปเทหล่อ (Casting) เป็นฟิล์ม จากผลการทดสอบพบว่า ที่ 3% ของซิงค์ออกไซด์ ทำให้ค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) และมอดุลัส (Young's modulus) มีค่าเพิ่มขึ้น แต่ เปอร์เซ็นต์การดึงยืดที่จุดขาด (% Elongation at break) ลดลง สเปกตรัมของ UV-vis (UV-vis spectrum) ให้ผลยืนยันว่าฟิล์มมีสมบัติต้านทานรังสียูวี สมบัติทางความร้อน อุณหภูมิหลอมเหลว (Melting temperature) มีค่าลดลง ผลจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่า การรวมตัวกัน (Aggregation) ของซิงค์ออกไซด์เพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณซิงค์ออกไซด์เพิ่มขึ้น [10]

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

3.1.1 แป้งท้าวยายม่อม (Arrowroot starch) ตราปลาไทย 5 ดาว จากบริษัท อี. ที. ซี. เอียบตงจัน จำกัด

ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบของแป้งท้าวยายม่อม

องค์ประกอบ	ปริมาณ (ร้อยละ)
โปรตีน	0.05
ไขมัน	0.03
ความชื้น	0.2
ซีเล้า	0.15
คาร์โบไฮเดรต	
- อะไมโลส	18.0 - 24.5
- อะไมโลเพกติน	75.4 - 81.0

หมายเหตุ ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

3.1.2 ไททาเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide) เกรดทางการค้า จากบริษัท เคมีภัณฑ์

ตารางที่ 3.2 รายละเอียดเฉพาะ (Specification) ของไททาเนียมไดออกไซด์ ชนิดรูโพล์

Information	Identification
Trading name	TIONA
Other name	Titanium dioxide pigment
Appearance	Fine white powder
Melting point	Approximately 1830 °C
Density	3.7-4.2 kg/L
Solubility in water	Insoluble
Titanium dioxide (TiO ₂)	80-99 %mass
Amorphous silica	<10 %mass
Aluminium hydroxides	<10 %mass

หมายเหตุ ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

3.1.3 ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide) เกรดทางการค้า จากบริษัท เคมีภัณฑ์จำกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3 รายละเอียดเฉพาะ (Specification) ของซิงค์ออกไซด์

ASSAYS	SPECIFICATION	RESULT
	(ASTM method)	
Zinc Oxide	99.75 Min	99.78
Sieve Residue 325 Mesh	0.1 Max	0.005
Moisture	0.1 Max	0.04
Soluble matter	0.1 Max	0.03
Iron	0.008 Max	0.0000
Lead	0.01 Max	0.0000
Manganese	0.0008 Max	0.0000
Copper	0.001 Max	0.0000

หมายเหตุ ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

3.1.4 กลีเซอรอล (Glycerol) เกรดทางการค้า จากบริษัท Lab System จำกัด

3.1.5 น้ำมันซิลิโคน (Silicone oil) จากบริษัท Dow Corning Corporation จำกัด

3.2 อุปกรณ์ และเครื่องมือ

3.2.1 เครื่องผสมแบบปิด (Internal mixer): Brabender รุ่น PL 2000/PL 2001

3.2.2 เครื่องอัดขึ้นรูป (Compression molding): Model MGLP-20AT M/C NO.2008

3.2.3 เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal testing machine; UTM) บริษัท LLOYD Instrument จำกัด รุ่น LR 5K

3.2.4 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM): LEO รุ่น 1450k

3.2.5 เครื่องทดสอบทางความร้อน (Thermogravimetric Analyzer; TGA): Perkin Elmer รุ่น Pyris 1 TGA HT

3.2.6 เครื่องวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน (Fourier Transform Infrared Spectrophotometer; FT-IR): Perkin Elmer รุ่น FT-IR spectrum GX

3.2.7 เครื่องตัดชิ้นงานรูปดัมเบลล์: CEAST รุ่น 6052

3.2.8 เครื่องชั่งแบบดิจิทัล ความละเอียด 2 ตำแหน่ง (g): Precisa Instrument

3.2.9 แม่พิมพ์รูปสี่เหลี่ยมหนา 2 มิลลิเมตร

3.2.10 ถังมือกันความร้อน

3.2.11 ถังมือพลาสติก

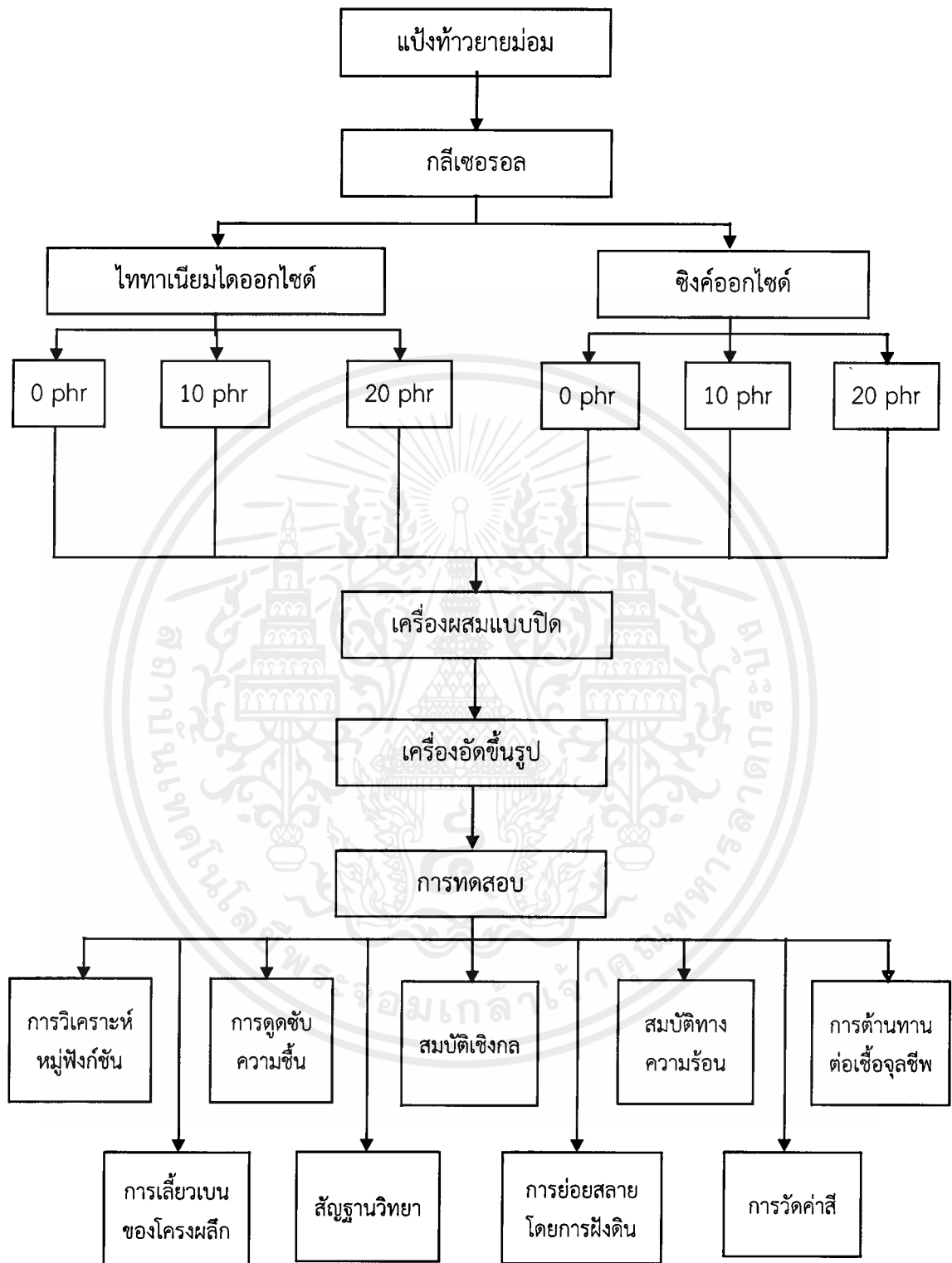
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 3.2.12 เกรียง
- 3.2.13 ครกดิน
- 3.2.14 กล้องปิดสนิท
- 3.2.15 แผ่นใสถ่ายเอกสาร
- 3.2.16 ไมโครมิเตอร์
- 3.2.17 ถุงชิบล๊อค
- 3.2.18 กรรไกร
- 3.2.19 แก้วพลาสติก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 แผนภาพการดำเนินงานวิจัย



รูปที่ 3.1 แผนภาพการดำเนินงานวิจัยในโครงการพิเศษ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 วิธีการทดลอง

3.4.1 การเตรียมแป้งท้าวยายม่อม

3.4.1.1 นำแป้งท้าวยายม่อม มาบดให้ละเอียดด้วยครกดิน

3.4.2 การเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งท้าวยายม่อม

3.4.2.1 นำแป้งท้าวยายม่อม และกลีเซอรอลมาชั่งในอัตราส่วน 65:35

3.4.2.2 จากนั้นหมักแป้ง และกลีเซอรอลให้เข้ากันเป็นเวลา 2 ชั่วโมง และทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

3.4.2.3 ชั่งแป้งที่หมักเตรียมไว้ปริมาณ 50 กรัม นำมาใส่ในเครื่องผสมแบบปิด (Internal mixer) ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบ 40 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลา 5 นาที

3.4.3 การขึ้นรูปเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งท้าวยายม่อม

3.4.3.1 ขึ้นรูปเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากเครื่องอัดขึ้นรูป (Compression molding) โดยใช้แม่พิมพ์รูปสี่เหลี่ยม ความหนา 2 มิลลิเมตร

3.4.3.2 ทาน้ำมันซิลิโคนด้านที่สัมผัสกับเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช จากนั้นวางแผ่นใสถ่ายเอกสาร แล้วทาน้ำมันซิลิโคนที่แผ่นใสถ่ายเอกสารอีกรอบหนึ่ง

3.4.3.3 นำเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากเครื่องผสมแบบปิด มาวางบนแม่พิมพ์ ประกบแม่พิมพ์ แล้วนำเข้าเครื่องอัดขึ้นรูป โดยใช้อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ความดัน 1700 psi เป็นเวลา 5 นาที และทำการหล่อเย็นอีก 5 นาที

3.4.4 การปรับปรุงสมบัติเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชด้วยไททานเนียมไดออกไซด์ และ ซิงค์ออกไซด์

ทำการขึ้นรูปเช่นเดียวกับหัวข้อ 3.4.3 และปรับปรุงสมบัติเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช โดยการเติมไททานเนียมไดออกไซด์ และซิงค์ออกไซด์ ในปริมาณที่ต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 อัตราส่วนของแป้งท้าวยายม่อม กลีเซอรอล ไททาเนียมไดออกไซด์ และซิงค์ออกไซด์ ที่ใช้ปรับปรุงสมบัติเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช

แป้งท้าวยายม่อม (กรัม)	กลีเซอรอล (กรัม)	ไททาเนียมไดออกไซด์ (กรัม)	ซิงค์ออกไซด์ (กรัม)
65	35	0	0
65	35	10	0
65	35	20	0
65	35	0	10
65	35	0	20

3.4.4.1 นำเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ปรับปรุงสมบัติด้วยไททาเนียมไดออกไซด์ และซิงค์ออกไซด์ มาผสมในเครื่องผสมแบบปิด ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบ 40 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที

3.4.4.2 แล้วนำเข้าสู่เครื่องอัดขึ้นรูป โดยใช้อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ความดัน 1700 psi เป็นเวลา 5 นาที และทำการหล่อเย็นอีก 5 นาที

3.4.4.3 นำเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ขึ้นรูปแล้วไปทดสอบสมบัติต่างๆ

3.5 การทดสอบบัติต่างๆ

3.5.1 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน (Fourier-transform infrared spectroscopy)

วิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของสารตัวอย่าง โดยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Infrared spectroscopy) ทำการเตรียมสารตัวอย่าง โดยนำสารตัวอย่างไปอบเพื่อไล่ความชื้น ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นนำสารมา 2-3 มิลลิกรัม บดรวมกับโพแทสเซียมโบรไมด์ที่อบแห้งแล้ว 0.2-0.5 กรัม ให้เข้ากัน ใส่ลงในแม่พิมพ์ และนำเข้าสู่เครื่องอัดเม็ดภายใต้ความดัน 10^{-4} kg/cm² เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นนำเม็ดที่อัดแล้วออกมา และนำไปวิเคราะห์ จะได้สเปกตรัมของสารตัวอย่าง

3.5.2 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction)

วิเคราะห์หาโครงสร้างของผลึก และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกโดยใช้หลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ที่ตกกระทบผลึกของพอลิเมอร์ผสมที่มุมต่างๆ กัน เพื่อระบุวัฏภาคของค้ำประกอบของพอลิเมอร์ผสม โดยนำพอลิเมอร์ผสมมาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-ray diffractometer โดยเตรียมสารตัวอย่างที่ความหนา 200 μ m และขนาดของมุมตกกระทบที่ใช้ (2θ) ในช่วง 5-60 องศา ด้วยอัตราเร็ว 1 องศาต่อนาที แล้วปล่อยรังสีเอกซ์ (CuK α) เข้าชิ้นงานตัวอย่าง โดยใช้ Step time 5 นาที โดยเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกสามารถคำนวณได้จาก

$$X_{cry} (\%) = \frac{A_c}{(A_c + A_a)} \times 100$$

เมื่อ X_{cry} คือ เปอร์เซ็นต์ของความเป็นผลึก

A_c คือ พื้นที่ใต้กราฟส่วนที่เป็นผลึก

A_a คือ พื้นที่ใต้กราฟส่วนที่เป็นอสัณฐาน

3.4.3 การดูดซับความชื้น (Moisture uptake)

ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM E 104 โดยนำชิ้นงานตัวอย่างที่ได้ไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส จนน้ำหนักไว้ จากนั้นนำไปวางในบรรยากาศที่อิ่มตัวด้วยน้ำกลั่น (Distilled water) ซึ่งให้ความชื้นสัมพัทธ์ 99 ± 1 เปอร์เซ็นต์ และนำชิ้นงานขึ้นมาบันทึกน้ำหนักทุกๆ วัน ปริมาณการดูดซับความชื้นสามารถคำนวณได้จาก

$$M_a (\%) = \frac{W_f - W_i}{W_i} \times 100$$

เมื่อ M_a (%) คือ เปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้น

W_i คือ น้ำหนักของชิ้นงานก่อนดูดซับความชื้น

W_f คือ น้ำหนักของชิ้นงานหลังดูดซับความชื้น

3.4.4 การทดสอบสัณฐานวิทยา (Morphology)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope; SEM) ใช้ในการศึกษาลักษณะพื้นผิวของพอลิเมอร์ที่อุณหภูมิต่ำ (Cryogenic fracture) ทำการเตรียมตัวอย่างที่ได้ โดยนำชิ้นงานตัวอย่างมาหักหลังจากแช่ไนโตรเจนเหลว จากนั้นนำตัวอย่างเคลือบด้วยทอง และนำเข้าเครื่อง SEM ต่อไป โดยศึกษาภาพตัดขวางของตัวอย่างผสมในสูตรต่างๆ เพื่อดูการกระจายตัวของไททานเนียมไดออกไซด์ และซิงค์ออกไซด์ในเทอร์โมพลาสติกสตาติซ และรอยต่อระหว่างวัฏภาค

3.4.5 การทดสอบสมบัติเชิงกล (Mechanical properties)

การทดสอบสมบัติต่างๆ ตามมาตรฐานดังแสดงในตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 มาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาติซที่เตรียมได้

สมบัติ	มาตรฐานที่ใช้ทดสอบ	หน่วยที่รายงาน
ความเค้น ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด (Stress at maximum load)	ASTM D 638	MPa
มอดุลัส (Young's Modulus, E)	ASTM D 638	MPa
เปอร์เซ็นต์ความเครียด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด (Percentage of strain at maximum load)	ASTM D 638	%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบสมบัติเชิงกล (Universal Testing Machine) โดยทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 638 พร้อมทั้งใช้โปรแกรม NEXYGEN ซึ่่งงานที่ใช้ในการทดสอบมีลักษณะเป็นรูปดัมเบลล์ จำนวน 10 ชิ้นต่อ 1 สูตร โดยทำการควบคุมชิ้นงานที่จะใช้ในการทดสอบ ที่อุณหภูมิ 23 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ 60 ± 2 เปอร์เซ็นต์ ตามสภาวะดังนี้

Test Speed:	40 mm/min
Gauge length:	25 mm
Load cell:	100 N

ความเค้น ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด มอดุลัส และเปอร์เซ็นต์ความเครียด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \text{ความเค้น ณ จุดแรงดึงสูงสุด} &= \frac{F}{A} \\ \text{มอดุลัส} &= \frac{F/A}{(L-L_0)/L_0} \\ \text{เปอร์เซ็นต์ความเครียด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด} &= \frac{L-L_0}{L_0} \times 100 \end{aligned}$$

- เมื่อ
- F คือ แรงที่ใช้ดึงยึดชิ้นงานตัวอย่าง (N)
 - A คือ พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานตัวอย่าง (mm^2)
 - L คือ ระยะทางระหว่างจุดสองจุด หลังทำการดึงยึดชิ้นงานตัวอย่าง (mm)
 - L_0 คือ ระยะทางที่ชิ้นงานตัวอย่างแคบที่สุด และพื้นที่หน้าตัดขนานกัน (mm)

3.4.6 การทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดิน (Soil burial test)

ตัดชิ้นงานเป็นรูปดัมเบลล์ สูตรละ 5 ชิ้น ฝังดินลึกประมาณ 10 เซนติเมตร โดยควบคุมความชื้นในดินให้อยู่ในช่วง 5–10 เปอร์เซ็นต์ ทำการฝังดินเป็นระยะเวลา 3-5 วัน จากนั้นนำมาทดสอบสมบัติเชิงกลเทียบกับตัวอย่างที่ไม่ได้ฝังดิน

3.4.7 การทดสอบสมบัติทางความร้อน (Thermal properties)

ศึกษาสมบัติทางความร้อน และอุณหภูมิการสลายตัว (Degradation temperature) และเปอร์เซ็นต์การลดลงของน้ำหนักที่อุณหภูมิเริ่มต้นของการสลายตัว (% Weight loss at maximum degradation rate) ของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช ด้วยเครื่องเทอร์โมกราวิเมตริกแอนนาไลเซอร์ (Thermogravimetric Analyzer, TGA) ทำได้โดยชั่งสารตัวอย่างประมาณ 10–12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มิลลิกรัม และนำมาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง TGA สภาวะที่ใช้ทดสอบคือ อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ใช้ช่วงอุณหภูมิ 50–600 องศาเซลเซียส ภายใต้สภาวะบรรยากาศไนโตรเจน โดยคำนวณเปอร์เซ็นต์การลดลงของน้ำหนักแบ่งที่อุณหภูมิช่วง 260-320 องศาเซลเซียส

3.4.8 การวัดค่าสี (Color measurement)

ทดสอบชิ้นงานแห้งที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยเครื่องวัดสีตามมาตรฐาน ASTM D-1925 เตรียมตัวอย่างโดยตัดชิ้นงานให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร แล้วเปรียบเทียบกับมาตรฐาน โดยวัดทั้งสิ้น 10 จุด เพื่อแสดงการเปลี่ยนแปลงสีของชิ้นงานตามระบบของ Hunter และ CIE ภายใต้แหล่งกำเนิดแสงทั้งสเดนหรือซินอน D 65/10° โดย

L*	:	ใช้กำหนดความสว่าง (Lightness)
		L = 0 = perfect black sample
		L = 100 = perfect white sample
a*	:	ใช้กำหนดสีแดงหรือสีเขียว (red-green)
		a เป็น + สีจะไปในทิศทางของแดง
		a เป็น - สีจะไปในทิศทางของเขียว
b*	:	ใช้กำหนดสีเหลืองหรือสีน้ำเงิน (yellow-blue)
		b เป็น + สีจะไปในทิศทางของเหลือง
		b เป็น - สีจะไปในทิศทางของน้ำเงิน
WI	:	ค่าดัชนีความขาว ใช้กำหนดสีขาว
		WI = 100 : สีขาวที่คล้ายกับสีขาวมาตรฐาน
		คำนวณได้จาก $WI = (L^* - 3b^*) + 3a^*$

3.4.9 การทดสอบประสิทธิภาพการต้านทานเชื้อจุลินทรีย์ (Antimicrobial testing)

ทำการทดสอบเชิงปริมาณตามมาตรฐาน ASTM F895-11 (Agar diffusion method) โดยทดสอบหาบริเวณยับยั้งเชื้อ (Zone of inhibition) ของชิ้นงานตัวอย่างในอะการ์ที่เตรียมได้ในขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร ใช้ตัวทำละลายไดเมทิลซัลฟอกไซด์ (Dimethyl Sulfoxide, DMSO) ความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์ และเอทานอลความเข้มข้น 95 เปอร์เซ็นต์ เป็นสภาวะควบคุม ใส่ชิ้นงานบนกระดาษกรองปราศจากเชื้อ แล้วนำไปเพาะเลี้ยงร่วมกับเชื้อในจานเพาะ (Petri dish) โดยเชื้อจุลินทรีย์ที่ได้คือ แบคทีเรียชนิดแกรมลบ *Escherichia coli* (*E. coli*) ATCC 25922 *Staphylococcus aureus* (*S. aureus*) ATCC 25923 เพาะเลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจน ที่มีอุณหภูมิ 35-37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วทำการวัดเส้นผ่าศูนย์กลางของบริเวณที่ยับยั้งที่เกิดขึ้นในหน่วยมิลลิเมตร

บทที่ 4

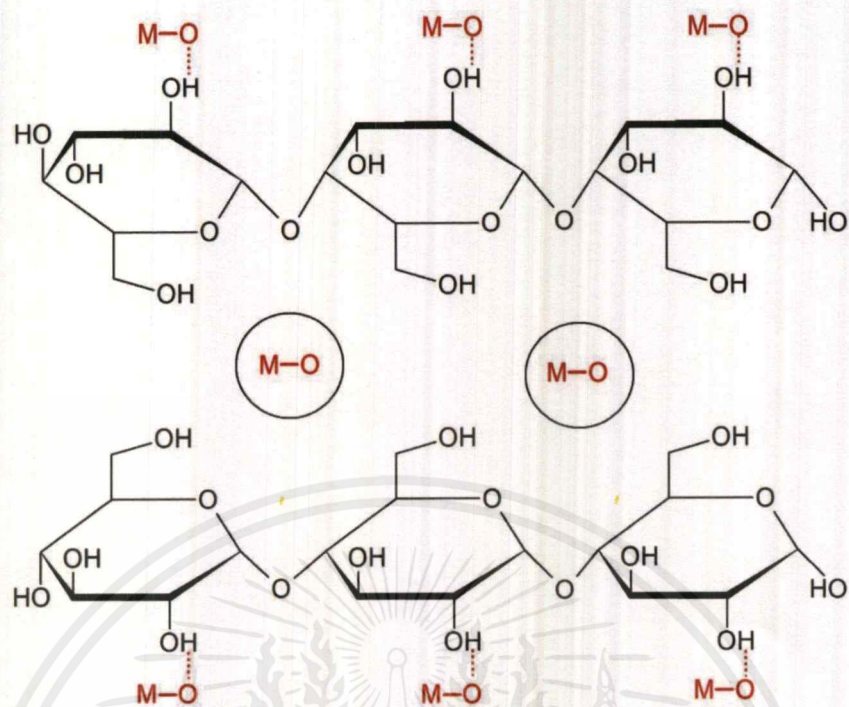
ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ศึกษาการปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลจากแป้งท้าวยาย่ม้อมด้วยไททาเนียมไดออกไซด์ และซิงค์ออกไซด์ โดยมีกลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ ในการทดลองนี้ เป็นการศึกษาผลของการเติมอนุภาคโลหะออกไซด์สองชนิด คือ ไททาเนียมไดออกไซด์ และซิงค์ออกไซด์ ในปริมาณ 0, 10 และ 20 phr ดังแสดงในตารางที่ 4.1 จากนั้นทำการขึ้นรูปโดยวิธีการกดอัด แล้วจึงนำชิ้นงานที่ได้มาทดสอบสมบัติต่างๆ ได้แก่ โครงสร้าง และหมู่ฟังก์ชัน การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ สัณฐานวิทยา การดูดซับความชื้น สมบัติเชิงกล ความสามารถในการย่อยสลายโดยการฝังดิน สมบัติทางความร้อน การวัดค่าสี และการทดสอบประสิทธิภาพการต้านทานเชื้อจุลินทรีย์

ตารางที่ 4.1 อักษรย่อของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลที่เตรียมได้จากงานวิจัยนี้

ลำดับ	สูตร/อักษรย่อที่ใช้	ความหมาย
1	TPAS	เทอร์โมพลาสติกสตาบิลจากแป้งท้าวยาย่ม้อมที่ไม่ได้มีการเติมอนุภาคโลหะออกไซด์
2	TPAS/10TiO ₂	เทอร์โมพลาสติกสตาบิลจากแป้งท้าวยาย่ม้อมที่เติมอนุภาคไททาเนียมไดออกไซด์ 10 phr
3	TPAS/20TiO ₂	เทอร์โมพลาสติกสตาบิลจากแป้งท้าวยาย่ม้อมที่เติมอนุภาคไททาเนียมไดออกไซด์ 20 phr
4	TPAS/10ZnO	เทอร์โมพลาสติกสตาบิลจากแป้งท้าวยาย่ม้อมที่เติมอนุภาคซิงค์ออกไซด์ 10 phr
5	TPAS/20ZnO	เทอร์โมพลาสติกสตาบิลจากแป้งท้าวยาย่ม้อมที่เติมอนุภาคซิงค์ออกไซด์ 20 phr

โดยผลจากการเติมอนุภาคโลหะออกไซด์ไททาเนียมไดออกไซด์ และซิงค์ออกไซด์ ในเทอร์โมพลาสติกสตาบิลจากแป้งท้าวยาย่ม้อม ส่งผลให้เกิดอันตรกิริยาระหว่างอนุภาคโลหะออกไซด์กับหมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลแป้ง โดยอาจเกิดพันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bonding) [38-39] ดังแสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 อันตรกิริยาที่คาดว่าจะเกิดขึ้นในการเติมอนุภาคโลหะออกไซด์ในเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช จากแป้งท้าวยายม่อม

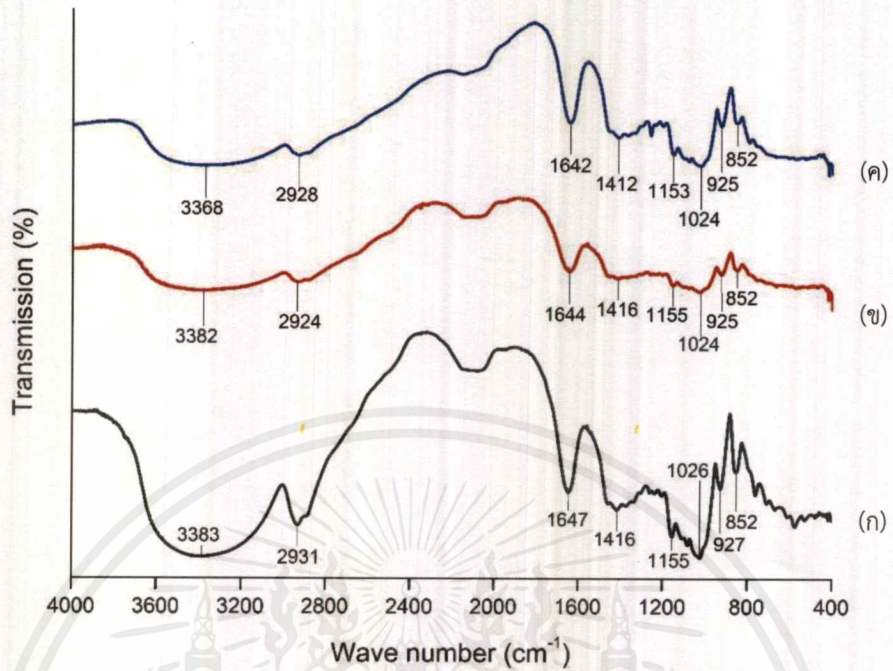
4.1 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน (Fourier-transform infrared spectroscopy)

การวิเคราะห์ศึกษาหาหมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่อง FTIR (Fourier transform infrared spectrophotometer) เพื่อตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชก่อน และหลังใส่อนุภาคโลหะออกไซด์ที่ปริมาณต่างๆ จากการทดลอง ปรากฏพีกมีลักษณะคล้ายกัน ดังแสดงในตารางที่ 4.2

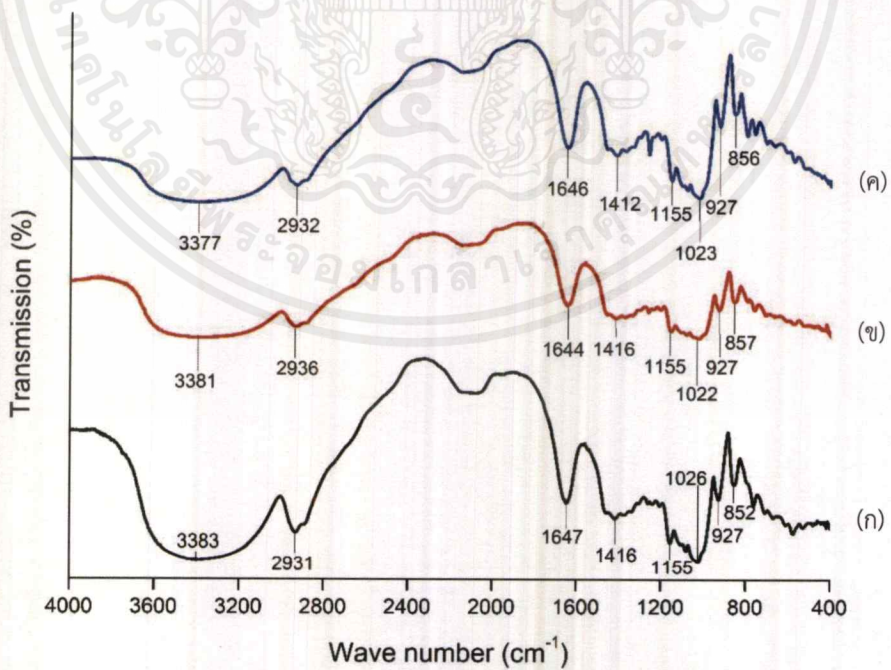
ตารางที่ 4.2 พิคสเปกตรัมที่ปรากฏในเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่เตรียมได้จากงานวิจัยนี้

เลขคลื่น (cm^{-1})	ลักษณะการสั่น
3600-3200	O-H stretching
3000-2800	Saturated C-H stretching
1650-1600	Bound water
1485-1445	O-H bending
1300-1000	C-O-C stretching
1200-1000	C-O-H bending
940-900	C-H out-of-plane bending
860-800	C-H out-of-plane bending
700-500	Ti-O stretching
500-440	Zn-O stretching

อินฟราเรดสเปกตรัมของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งทำวยายม่อมโดยเติมอนุภาคโลหะออกไซด์สองชนิด ได้แก่ ไททาเนียมไดออกไซด์ และซิงค์ออกไซด์ ที่ปริมาณ 0, 10 และ 20 phr ดังแสดงในรูปที่ 4.2 และ 4.3



รูปที่ 4.2 อินฟราเรดสเปกตรัมของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งท้าวยายม่อมที่เติมไททาเนียมไดออกไซด์ ที่ปริมาณแตกต่างกัน (ก) TPAS (ข) TPAS/10TiO₂ และ (ค) TPAS/20TiO₂



รูปที่ 4.3 อินฟราเรดสเปกตรัมของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งท้าวยายม่อมที่เติมซิงค์ออกไซด์ ที่ปริมาณแตกต่างกัน (ก) TPAS (ข) TPAS/10ZnO และ (ค) TPAS/20ZnO

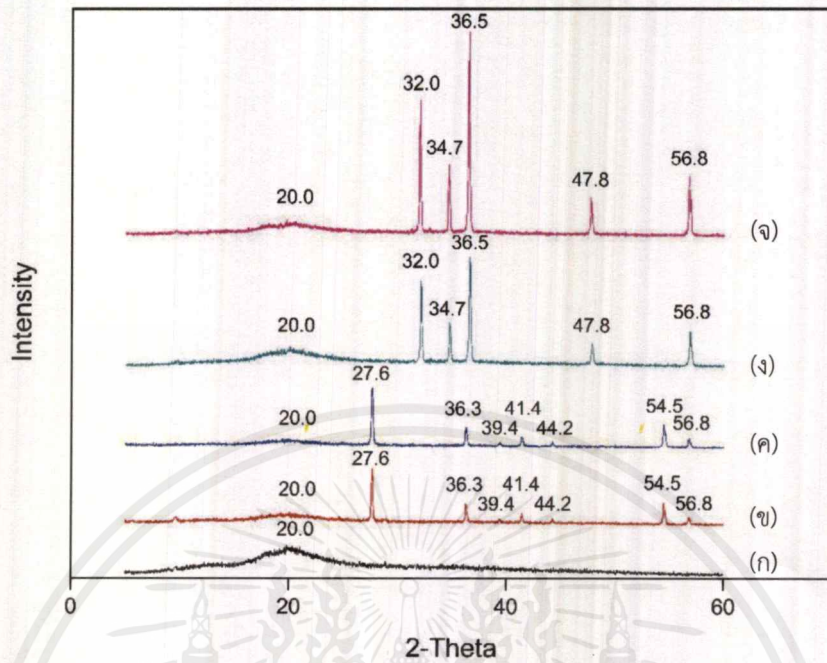
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.2-4.3 และภาคผนวก ก แสดงผลวิเคราะห์การหาหมู่ฟังก์ชันของเทอร์โมพลาสติก สตาร์ชจากแป้งท้าวยายม่อมที่เติมอนุภาคโลหะออกไซด์ชนิดต่างๆ ที่ปริมาณแตกต่างกัน จากผลการ ทดลองพบสเปกตรัมทุกสูตรของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งท้าวยายม่อมที่เติมอนุภาคโลหะ ออกไซด์ทั้งสองชนิด (ก) (ข) และ (ค) มีลักษณะใกล้เคียงกันเป็นโครงสร้างของแป้งที่ประกอบไปด้วย โครงสร้างหลัก คือ อะไมโลส ได้แก่ พีคในช่วง $3383-3368\text{ cm}^{-1}$ แสดงการสั่นของ O-H stretching พีคในช่วง $2936-2924\text{ cm}^{-1}$ แสดงการสั่นของ Saturated C-H stretching คือ CH_2 หรือ CH_3 ใน โมเลกุลของแป้ง พีคในช่วง $1647-1642\text{ cm}^{-1}$ เป็นพีคของ O-H bending ของโมเลกุลน้ำที่อยู่ใน โครงสร้างของแป้ง พีคในช่วง $1416-1412\text{ cm}^{-1}$ แสดงการสั่นของ O-H bending พีคในช่วง $1026-1023\text{ cm}^{-1}$ แสดงการสั่นของ C-O-C stretching พีคในช่วง $1155-1153\text{ cm}^{-1}$ แสดงการสั่นของ C-O-H bending และพีคในช่วง $927-852\text{ cm}^{-1}$ แสดงการสั่นของ C-H out-of-plane bending ที่ พบได้ในโมเลกุลของแป้ง [40]

ผลจากการเติมอนุภาคโลหะออกไซด์ในปริมาณต่างๆ ในเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้ง ท้าวยายม่อม รูปที่ 4.2 และ 4.3 (ข) และ (ค) คาดว่าจะพบพีคใหม่ซึ่งเป็นพีคเอกลักษณ์ของโลหะ ออกไซด์แต่ละชนิด ได้แก่ไททาเนียมไดออกไซด์ คือ พีคที่ 669 cm^{-1} (รูปที่ ก.1) แสดงการสั่นของ Ti-O stretching [5] และซิงค์ออกไซด์ คือ พีคที่ 435 cm^{-1} (รูปที่ ก.2) แสดงการสั่นของ Zn-O stretching [8] แต่จากผลการทดลองไม่พบพีคเอกลักษณ์ดังกล่าวของอนุภาคโลหะออกไซด์ทั้งสอง ชนิด อาจเกิดจากปริมาณโลหะออกไซด์ที่มีในปริมาณน้อย และพีคเอกลักษณ์ของอนุภาคโลหะ ออกไซด์ทั้งสอง ซ้อนทับกับพีคของแป้ง จึงทำให้ไม่สามารถตรวจพบพีคเอกลักษณ์ของอนุภาคโลหะ ออกไซด์ทั้งสองได้ นอกจากนี้การเติมอนุภาคโลหะส่งผลให้พีคแสดงการสั่นของ O-H stretching และ O-H bending เคลื่อนไปยังตำแหน่งเลขคลื่นที่ลดลง แสดงให้เห็นว่า มีพันธะไฮโดรเจนเกิดขึ้นระหว่าง แป้งกับโลหะออกไซด์ทั้งสองชนิด ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Oleyaei. *et al.* ที่ทำการปรับปรุง สมบัติของแป้งมันสำปะหลังด้วยไททาเนียมไดออกไซด์ ผลการทดลองพบว่า เมื่อทำการเติมอนุภาค โลหะออกไซด์ ทำให้พีคแสดงการสั่นของ O-H stretching และ O-H bending เคลื่อนที่ไปที่เลขคลื่น ต่ำลง เป็นผลมาจากการเพิ่มขึ้นของจำนวนพันธะไฮโดรเจนระหว่างไททาเนียมไดออกไซด์กับหมู่ ไฮดรอกซิลของแป้ง และอาจเป็นผลของแรงดึงดูดระหว่างประจุระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของแป้งกับ อะตอมของ Ti^{2+} และ Zn^{2+} [5]

4.2 การวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction)

วิเคราะห์หาโครงสร้างของผลึก และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกโดยใช้หลักการเลี้ยวเบนของรังสี เอกซ์ ที่ตกกระทบผลึกของพอลิเมอร์ผสมที่มุมต่างๆ กันของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจาก แป้งท้าวยายม่อมที่เติมไททาเนียมไดออกไซด์ และซิงค์ออกไซด์ ปริมาณ 0, 10 และ 20 phr ได้ผล การทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.4 และตารางที่ 4.3



รูปที่ 4.4 ดิฟแฟรกโทแกรมของอมพอลิทีเทอร์โม่พลาสติคสตาร์ชจากแป้งท้าวยายม่อมที่เติมอนุภาคโลหะออกไซด์ชนิดต่างๆ ที่ปริมาณแตกต่างกัน (ก) TPAS (ข) TPAS/10TiO₂ (ค) TPAS/20TiO₂ (ง) TPAS/10ZnO และ (จ) TPAS/20ZnO

ตารางที่ 4.3 ปริมาณผลึกของเทอร์โม่พลาสติคสตาร์ชจากแป้งท้าวยายม่อมที่เติมอนุภาคโลหะออกไซด์ชนิดต่างๆ ที่แตกต่างกัน

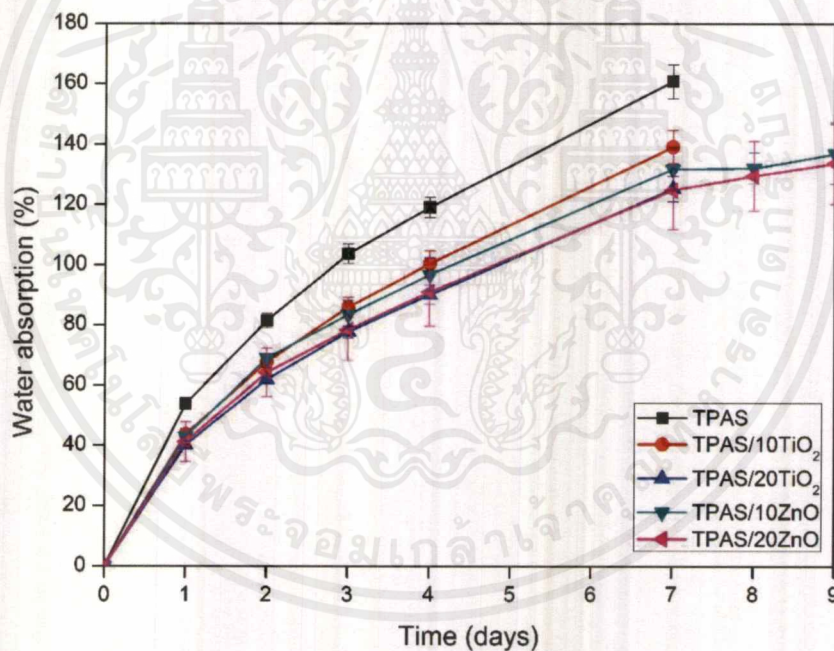
สูตร	ปริมาณผลึก (%)
TPAS	38.07
TPAS/10TiO ₂	30.02
TPAS/20TiO ₂	25.23
TPAS/10ZnO	28.78
TPAS/20ZnO	22.23

จากรูปที่ 4.4 แสดงโครงผลึกของเทอร์โม่พลาสติคสตาร์ชจากแป้งท้าวยายม่อมที่เติมอนุภาคโลหะออกไซด์ชนิดต่างๆ ที่ปริมาณแตกต่างกัน พบว่าดิฟแฟรกโทแกรมที่ได้ ปรากฏพีกที่มุม 2θ เท่ากับ 20.0 เช่นเดียวกับดิฟแฟรกโทแกรมของแป้งท้าวยายม่อม โดยการนำแป้งมาเติมพลาสติไซเซอร์ และผ่านกระบวนการเจลาทีไนเซชันโดยความร้อนและน้ำ ส่งผลให้ผลึกแป้งถูกทำลาย และเกิดเป็นผลึกใหม่ชนิด V_n-type [22] และผลของเติมการอนุภาคโลหะออกไซด์ พบพีกเอกลักษณ์ที่มุม 2θ เท่ากับ 27.6, 36.3, 39.4, 41.4, 44.2, 54.5 และ 56.8 ซึ่งบ่งบอกถึงระนาบความเป็นผลึก

ของไททานเนียมไดออกไซด์ (ชนิดรูไทล์) [41] และพบพีคเอกลักษณ์ที่มุม 2θ เท่ากับ 32.0, 34.7, 36.5, 47.8 และ 56.8 ซึ่งบ่งบอกระนาบความเป็นผลึกของซิงค์ออกไซด์ [42] โดยจากรูปที่ 4.3 และตารางที่ 4.3 แสดงปริมาณผลึกของเทอร์โมพลาสติกสตาเรซ พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณอนุภาคโลหะออกไซด์ ส่งผลให้ความเข้มของพีคเอกลักษณ์ของอนุภาคโลหะออกไซด์แต่ละชนิดเพิ่มขึ้น แต่ปริมาณผลึกของแบ่งลดลง อาจเกิดจากอนุภาคโลหะออกไซด์ ไปขัดขวางการเกิดผลึกของแบ่ง ทำให้เปอร์เซ็นต์ความเป็นของแบ่งมีค่าลดลง

4.3 การทดสอบการดูดซับความชื้น (Moisture uptake)

จากการทดสอบการดูดซับความชื้น เพื่อทำการศึกษสมบัติการดูดซับความชื้นของเทอร์โมพลาสติกสตาเรซจากแบ่งท้าวายม่อมที่เติมไททานเนียมไดออกไซด์ และซิงค์ออกไซด์ในปริมาณ 0, 10 และ 20 phr โดยการนำไปเก็บในบรรยากาศที่อิ่มตัวด้วยน้ำกลั่น มีความชื้นสัมพัทธ์ $99\pm 1\%$ ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 7-9 วัน ให้ผลการทดลองเป็นดังนี้



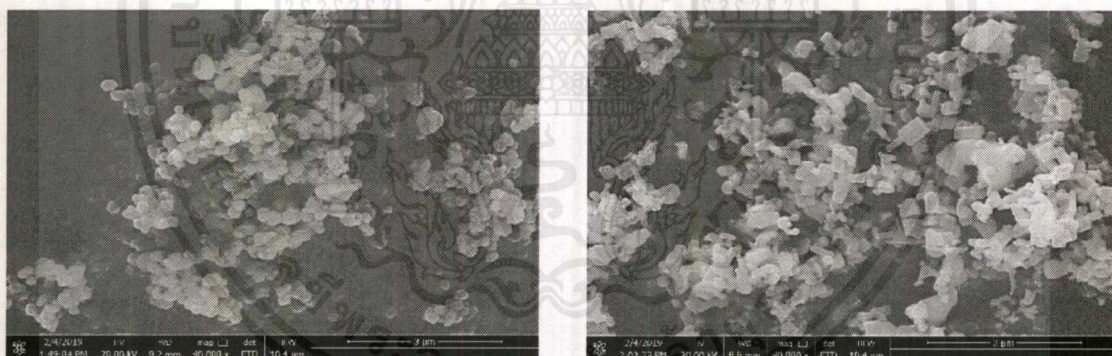
รูปที่ 4.5 เปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของเทอร์โมพลาสติกสตาเรซจากแบ่งท้าวายม่อมที่เติมไททานเนียมไดออกไซด์ และซิงค์ออกไซด์ในปริมาณแตกต่างกัน ที่ความชื้นสัมพัทธ์ $99\pm 1\%$

จากรูปที่ 4.5 และภาคผนวก ข แสดงผลเปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้น TPAS, TPAS/10TiO₂, TPAS/20TiO₂, TPAS/10ZnO และ TPAS/20ZnO พบว่าการดูดซับความชื้นของทุกสูตรมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป โดย TPAS ดูดซับความชื้นสูงที่สุดเนื่องจากโครงสร้างของแบ่งมีหมู่ไฮดรอกซิล

จำนวนมาก ทำให้ดูดซับความชื้นได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้พบว่า การดูดซับความชื้นของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลลดลง เมื่อปริมาณไททานเนียมไดออกไซด์ และซิงค์ออกไซด์มีปริมาณเพิ่มขึ้น เนื่องจากไททานเนียมไดออกไซด์ และซิงค์ออกไซด์ที่เติมลงไปสามารถเกิดอันตรกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลของแบง์ผ่านพันธะไฮโดรเจน หมู่ไฮดรอกซิลอิสระของแบง์จึงลดลง ส่งผลให้ความชอบน้ำ (Hydrophilic) ลดลง และการดูดซับความชื้นลดลง นอกจากนี้ยังเป็นผลมาจากอนุภาคโลหะออกไซด์ทั้งสองชนิดมีขนาดเล็ก อาจไปแทรกอยู่ในโครงสร้างของแบง์ทำให้ขัดขวางการแทรกของโมเลกุลน้ำได้มากขึ้น เมื่อปริมาณเพิ่มขึ้น [40] และจากการทดลองพบว่าเริ่มมีเชื้อราขึ้นในวันที่ 7 สำหรับ TPAS, TPAS/10TiO₂ และ TPAS/20TiO₂ และมีเชื้อราขึ้นในวันที่ 9 สำหรับ TPAS/10ZnO และ TPAS/20ZnO

4.4 การทดสอบสัณฐานวิทยา (Morphology)

การทดสอบสัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลชนิดต่างๆ โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) เพื่อทำการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยา ลักษณะการกระจายตัว และความเข้ากันได้ของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแบง์ทำวยายม่อมที่เติมไททานเนียมไดออกไซด์ และซิงค์ออกไซด์ ในปริมาณ 0, 10 และ 20 phr แสดงสัณฐานวิทยาดังรูปที่ 4.6-4.8



(ก) TiO₂, 40000X

(ข) ZnO, 40000X

รูปที่ 4.6 ลักษณะสัณฐานวิทยาของอนุภาคไททานเนียมไดออกไซด์และซิงค์ออกไซด์ โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 40000 เท่า

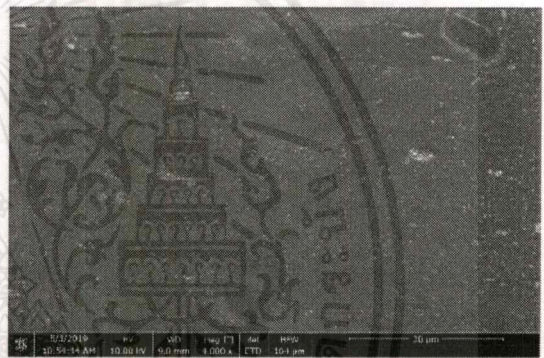
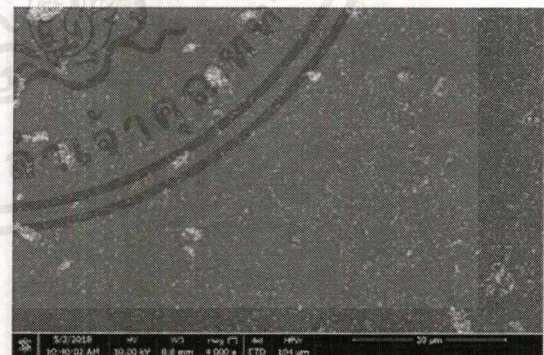


(ก) TPAS, 1000X



(ข) TPAS, 4000X

รูปที่ 4.7 สัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งท้าวยายม่อม โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่กำลังขยายภาพ 1000 เท่า และ 4000 เท่า

(ก) TPAS/10TiO₂, 1000X(ข) TPAS/10TiO₂, 4000X(ค) TPAS/20TiO₂, 1000X(ง) TPAS/20TiO₂, 4000X

รูปที่ 4.8 สัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งท้าวยายม่อมที่เติมอนุภาคไททาเนียมไดออกไซด์ในปริมาณ 10 และ 20 phr โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่กำลังขยายภาพ 1000 เท่า และ 4000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



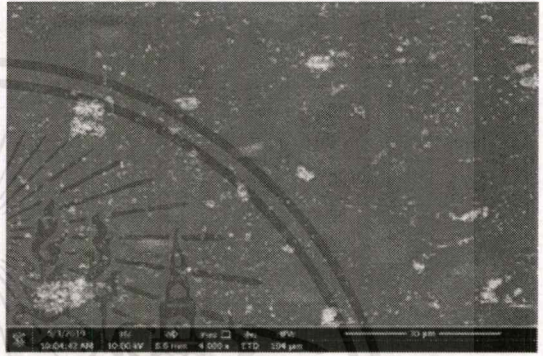
(ก) TPAS/10ZnO, 1000X



(ข) TPAS/10ZnO, 4000X



(ค) TPAS/20ZnO, 1000X



(ง) TPAS/20ZnO, 4000X

รูปที่ 4.9 สัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งท้าวยายม่อมที่เติมอนุภาคซิงค์ออกไซด์ในปริมาณ 10 และ 20 phr โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่กำลังขยายภาพ 1000 เท่า และ 4000 เท่า

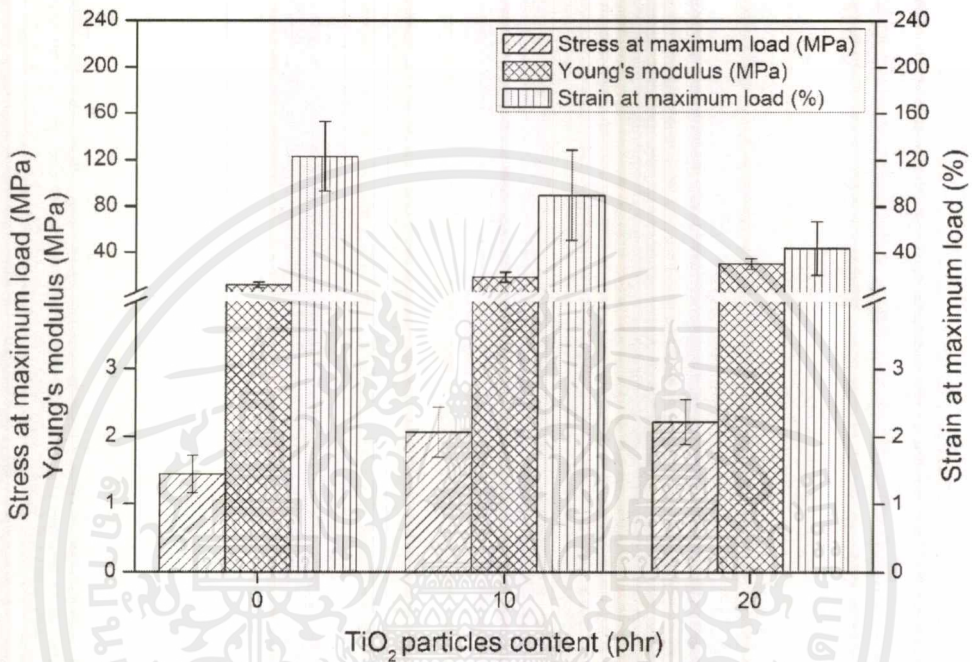
การศึกษาสัณฐานวิทยาของอนุภาคไททาเนียมไดออกไซด์และซิงค์ออกไซด์พบว่าไททาเนียมไดออกไซด์มีรูปร่างเป็นทรงกลม มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 314.08 นาโนเมตร แต่ซิงค์ออกไซด์มีรูปร่างเป็นแบบแท่ง มีขนาดความยาวเฉลี่ย 431.85 นาโนเมตร ความกว้างเฉลี่ย 294.13 นาโนเมตร L/D เท่ากับ 1.49 ดังแสดงในรูปที่ 4.6

จากรูปที่ 4.7-4.9 พบว่าเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งท้าวยายม่อมนั้นพบเม็ดแป้งบางส่วนไม่หลอม และเมื่อเติมไททาเนียมไดออกไซด์และซิงค์ออกไซด์ในปริมาณ 10 และ 20 phr พบว่าอนุภาคโลหะออกไซด์นั้นไม่ได้รวมเป็นเนื้อเดียวกันกับเทอร์โมพลาสติกสตาโรซ แต่มีการกระจายตัวอยู่ทั่วบริเวณเมทริกซ์ของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซ และมีการรวมเป็นกลุ่มก้อนบางบริเวณ และมีแนวโน้มรวมเป็นกลุ่มก้อนมากขึ้นเมื่อปริมาณอนุภาคโลหะออกไซด์เพิ่มมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Oleyaei. *et al.* ที่ศึกษาการปรับปรุงสมบัติของฟิล์มจากแป้งมันฝรั่ง ด้วยอนุภาคนาโนของไททาเนียมไดออกไซด์ โดยใช้ปริมาณ 0, 0.5, 1 และ 2 wt% พบว่าปริมาณ 2 wt% เกิดการรวมเป็นกลุ่มก้อนของอนุภาคไททาเนียมไดออกไซด์ [5]

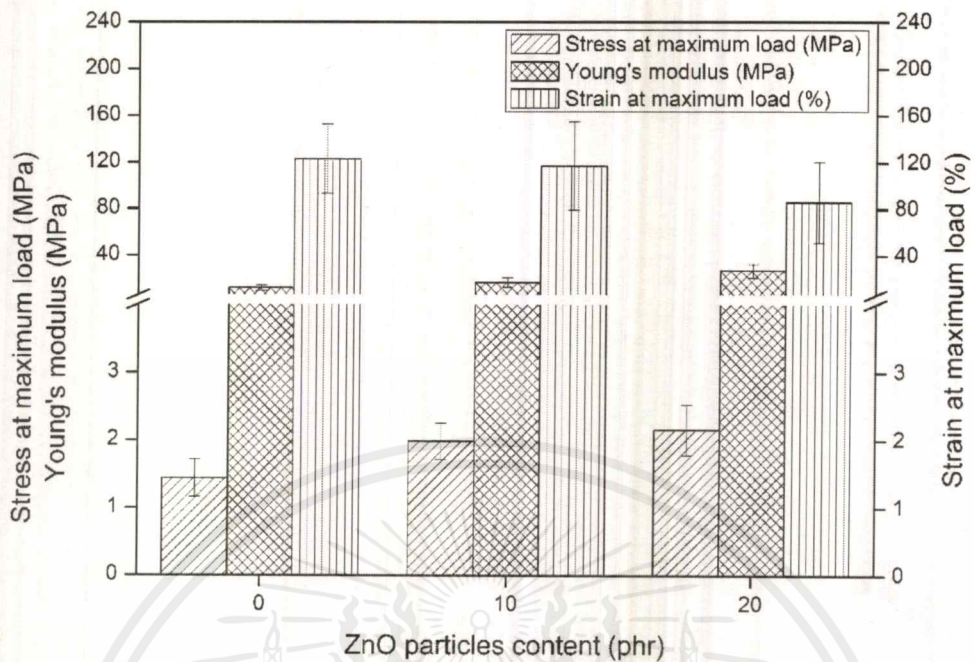
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 การทดสอบสมบัติเชิงกล (Mechanical properties)

ทดสอบสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งท้าวยายม่อมที่เติมอนุภาคโลหะออกไซด์ชนิดต่างๆ ที่ปริมาณต่างๆ โดยศึกษาความเค้น ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด โมดูลัส และความเครียด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด ทำการทดลองโดยใช้จำนวน 10 ชิ้นต่อ 1 สูตร ดังแสดงในรูปที่ 4.9 และ 4.10



รูปที่ 4.10 สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งท้าวยายม่อมที่เติมไททาเนียมไดออกไซด์ ที่ปริมาณ 0, 10 และ 20 phr

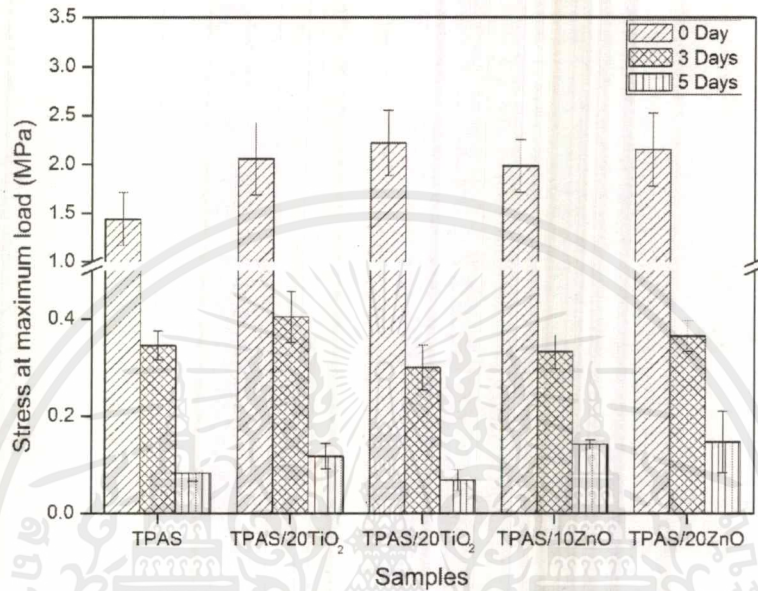


รูปที่ 4.11 สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาเรชจากแป้งท้าวยายม่อมที่เติมซิงค์ออกไซด์ที่ปริมาณ 0, 10 และ 20 phr

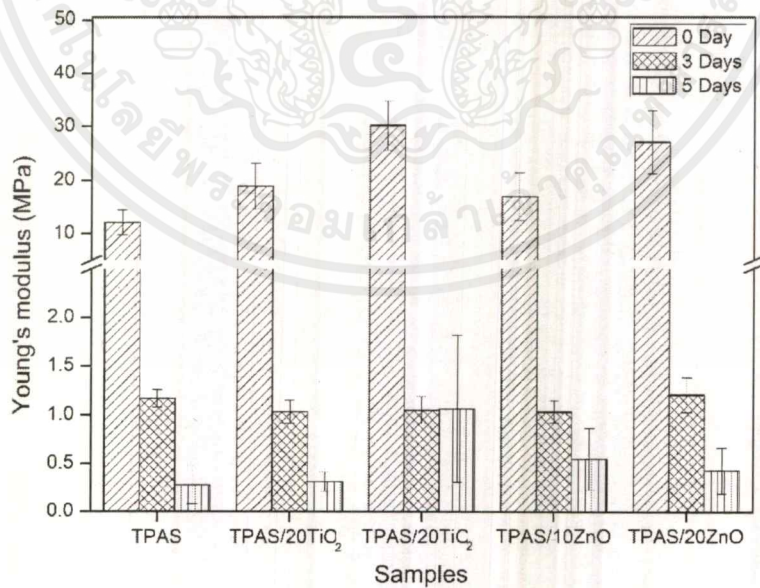
จากรูปที่ 4.10-4.11 และภาคผนวก ก แสดงสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาเรชจากแป้งท้าวยายม่อมที่เติมอนุภาคโลหะออกไซด์ชนิดต่างๆ คือ ไททาเนียมไดออกไซด์ และซิงค์ออกไซด์ที่ปริมาณ 0, 10 และ 20 phr จากผลการทดลองพบว่า เมื่อเติมอนุภาคโลหะออกไซด์ลงไปในเทอร์โมพลาสติกสตาเรช ทำให้ความเค้น ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด (Stress at maximum load) และมอดุลัส (Modulus) มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น ตามปริมาณอนุภาคโลหะออกไซด์ แต่เปอร์เซ็นต์ความเครียด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด (Strain at maximum load) มีแนวโน้มลดลงตามปริมาณอนุภาคโลหะออกไซด์ เนื่องจากอนุภาคโลหะออกไซด์ที่เติมลงไปมีขนาดเล็กระดับไมโคร (0.3-0.4 ไมครอน หรือ 300-400 นาโนเมตร) ทำให้มีพื้นที่ผิวสูง สามารถส่งผ่านแรงได้ดี และอนุภาคโลหะออกไซด์มีความแข็งมากกว่าแป้ง จึงทำให้เกิดการเสริมแรงในชิ้นงาน นอกจากนี้อนุภาคโลหะออกไซด์สามารถเกิดอันตรกิริยากับแป้งได้ โดยเกิดเป็นพันธะไฮโดรเจน ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ศึกษาหาหมู่ฟังก์ชัน ทำให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงมากขึ้น และสอดคล้องกับงานวิจัยของ Oleyaei. *et al.* [5] และ Ma. *et al.* [9] ที่ทำการปรับปรุงสมบัติแป้งมันสำปะหลังด้วยไททาเนียมไดออกไซด์ และปรับปรุงสมบัติแป้งถั่วเขียวด้วยซิงค์ออกไซด์ ตามลำดับ จากผลการทดลองพบว่า อนุภาคโลหะออกไซด์ทั้งสองชนิดทำให้ฟิล์มมีความแข็งแรงขึ้น เนื่องจากการเกิดอันตรกิริยาระหว่างแป้งกับอนุภาคโลหะออกไซด์ทั้งสองชนิด โดยเกิดเป็นพันธะไฮโดรเจน

4.6 การทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดิน (Soil burial test)

นำชิ้นงานมาทดสอบโดยการฝังดินลึกประมาณ 10 เซนติเมตร โดยควบคุมความชื้นในดินให้อยู่ในช่วง 5-10 เปอร์เซ็นต์ ทำการฝังดินเป็นระยะเวลา 3-5 วัน จากนั้นนำมาทดสอบสมบัติเชิงกลเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ไม่ได้ฝังดิน ได้ผลการทดสอบดังนี้

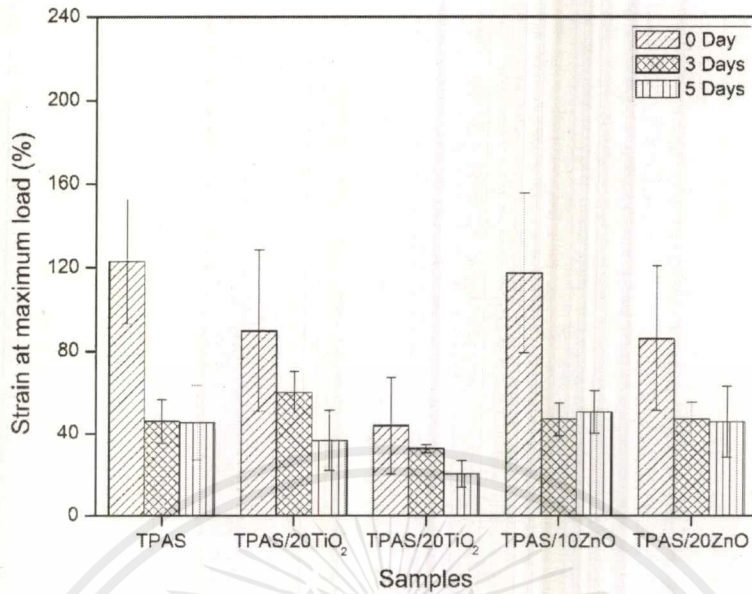


(ก)



(ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค)

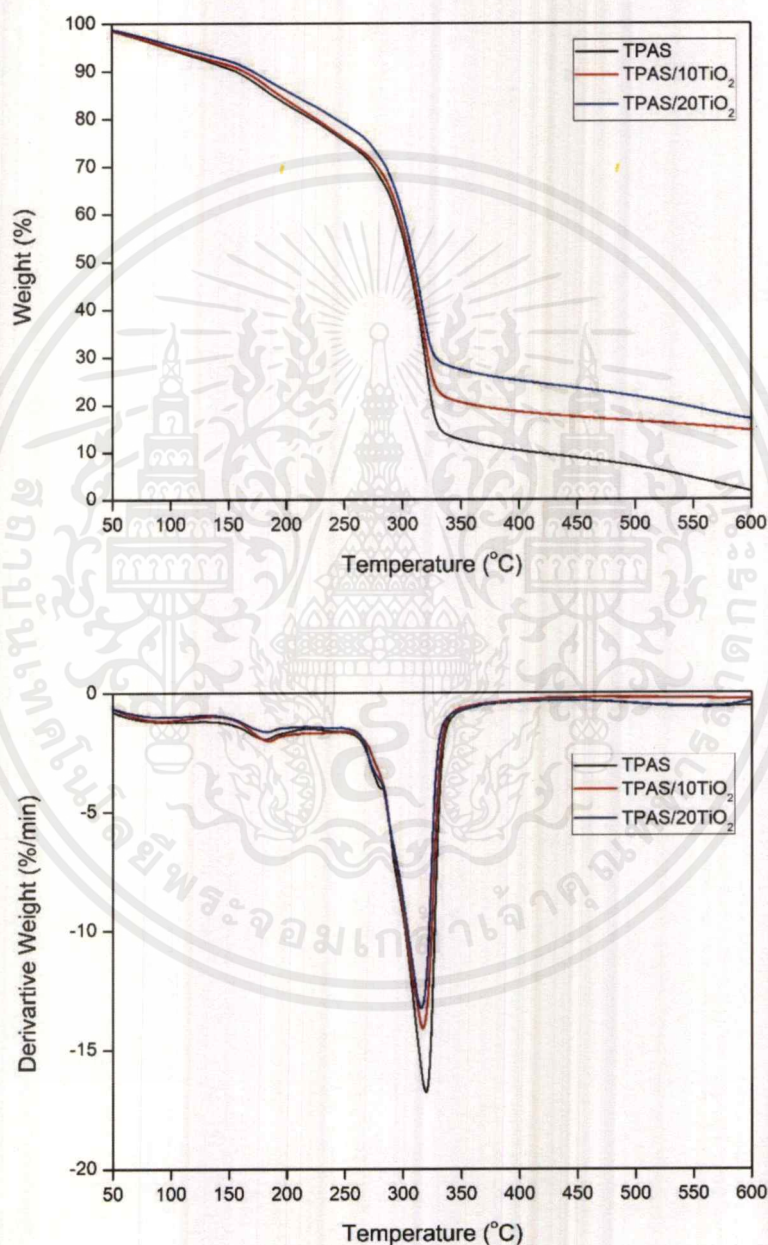
รูปที่ 4.12 สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งท้าวยายม่อมที่เติมอนุภาคโลหะออกไซด์ทั้งสองชนิดที่ปริมาณ 0, 10 และ 20 phr ภายหลังจากฝังดินเป็นระยะเวลา 3 และ 5 วัน (ก) ความเค้น ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด (ข) มอดุลัส และ (ค) เปอร์เซ็นต์ความเครียด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด

จากรูปที่ 4.12 และภาคผนวก จ แสดงสมบัติเชิงกลของชิ้นงานที่มีการเติมอนุภาคโลหะออกไซด์ชนิดต่างๆ ที่ปริมาณ 0, 10 และ 20 phr ภายหลังจากฝังดินเป็นระยะเวลา 3 และ 5 วัน พบว่าสมบัติเชิงกลของชิ้นงานมีแนวโน้มลดลงเมื่อใช้ระยะเวลาการฝังดินนานขึ้น เมื่อพิจารณาจากเปอร์เซ็นต์การลดลงของสมบัติเชิงกล (ตารางที่ จ.1) พบว่าค่าความเค้น ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด และค่ามอดุลัส ลดลงไปกว่า 70-90 เปอร์เซ็นต์ ที่ระยะเวลาการฝังดิน 3 วัน และลดลงไปกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ ที่ระยะเวลาการฝังดิน 5 วัน เนื่องจากชิ้นงานมีแป้ง และกลีเซอรอลเป็นส่วนประกอบ จึงมีหมู่ไฮดรอกซิลที่สามารถจับกับโมเลกุลของน้ำได้ ชิ้นงานจึงดูดน้ำ และความชื้นในดิน ทำให้ชิ้นงานเกิดการบวมตัว นอกจากนี้ยังเกิดการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ในดิน ทำให้เกิดจุดบกพร่องในชิ้นงาน เมื่อนำมาทดสอบสมบัติเชิงกล จึงทำให้สมบัติเชิงกลของชิ้นงานมีค่าลดลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Hejri. *et al.* ที่ทำการศึกษาฟิล์มที่ย่อยสลายได้จากแป้งข้าวโพด/PVA ที่เสริมแรงด้วยนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ จากผลการทดลองพบว่า เมื่อนำฟิล์มไปทำการฝังดิน ฟิล์มมีการย่อยสลายเพิ่มขึ้น เนื่องจากน้ำได้แพร่เข้าไปในฟิล์มที่ทดสอบ ส่งผลให้ฟิล์มเกิดการบวมตัว และช่วยในการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ ซึ่งจุลินทรีย์จะปล่อยเอนไซม์ที่ทำลายโครงสร้างของแป้งได้ [43]

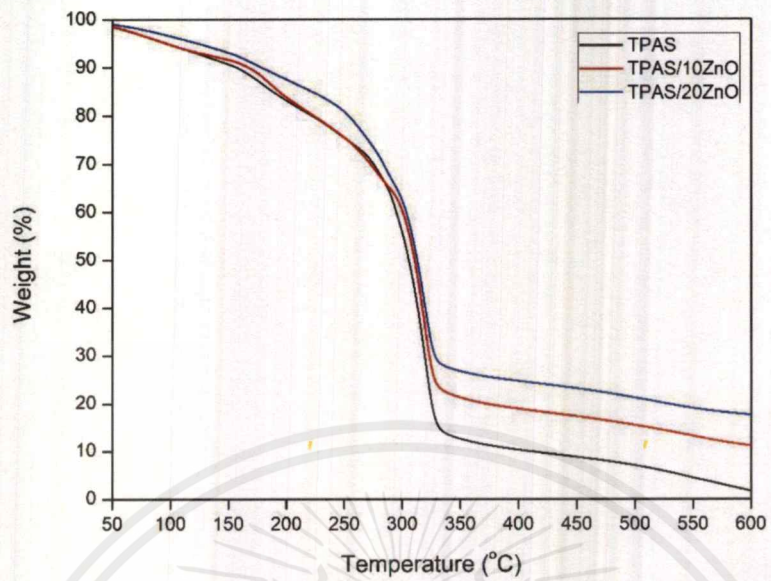
4.7 การทดสอบสมบัติทางความร้อน (Thermal properties)

ศึกษาสมบัติทางความร้อน และอุณหภูมิการสลายตัวสถานะที่ใช้ทดสอบ คือ อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ใช้ช่วงอุณหภูมิ 50–600 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน

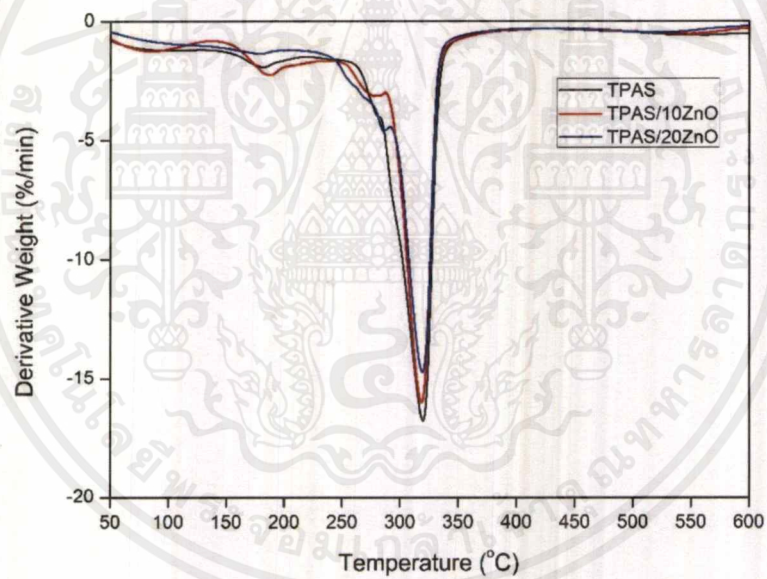
การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลจากแป้งท้าวยาย่มที่เติมอนุภาคไททาเนียมไดออกไซด์ และซิงค์ออกไซด์ที่ปริมาณ 0, 10 และ 20 phr ให้ผลการทดลองดังนี้



รูปที่ 4.13 เทอร์โมแกรมของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลจากแป้งท้าวยาย่มที่เติมอนุภาคไททาเนียมไดออกไซด์ที่ปริมาณแตกต่างกัน (ก) TGA และ (ข) DTG



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.14 เทอร์โมแกรมของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลจากแป้งท้าวยาย่มอมที่เติมอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่ปริมาณแตกต่างกัน (ก) TGA และ (ข) DTG

ตารางที่ 4.4 อุณหภูมิการสลายตัว และเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาเรซ จากแป้งท้าวายม่อมที่เติมอนุภาคโลหะออกไซด์ทั้งสองชนิด

ตัวอย่าง	อุณหภูมิการสลายตัว (°C)				น้ำหนักที่หายไปของแป้งช่วงที่ 3 และ 4 (%)
	ช่วงที่ 1 (น้ำ)	ช่วงที่ 2 (กลีเซอรอล)	ช่วงที่ 3 (แป้งที่เสียดสภาพจากความร้อน)	ช่วงที่ 4 (แป้ง)	
TPAS	96.93	181.59	279.36	319.39	56.64
TPAS/10TiO ₂	90.49	184.21	281.91	316.48	55.57
TPAS/20TiO ₂	87.75	182.90	276.74	315.46	47.45
TPAS/10ZnO	83.15	186.84	278.71	318.08	47.34
TPAS/20ZnO	95.94	177.72	260.15	318.84	41.19

จากรูปที่ 4.13-4.14 ตารางที่ 4.4 และภาคผนวก ฉ แสดงข้อมูลของผลวิเคราะห์ทางความร้อนของเทอร์โมพลาสติกสตาเรซจากแป้งท้าวายม่อมที่เติมอนุภาคไททาเนียมไดออกไซด์ และซิงค์ออกไซด์ที่ปริมาณ 0, 10 และ 20 phr จากผลการทดลองพบว่าชิ้นงานทุกสูตรมีอุณหภูมิการสลายตัว 3 ช่วง ได้แก่ ช่วงที่ 1 เป็นอุณหภูมิการสลายตัวของน้ำที่ 80-100 องศาเซลเซียส ช่วงที่ 2 เป็นอุณหภูมิการสลายตัวของกลีเซอรอลที่ 170-190 องศาเซลเซียส ช่วงที่ 3 เป็นอุณหภูมิการสลายตัวของแป้งที่เสียดสภาพจากความร้อนที่ 260-290 องศาเซลเซียส และช่วงที่ 4 เป็นอุณหภูมิการสลายตัวของแป้งที่ 318-320 องศาเซลเซียส [22] ผลจากการเติมอนุภาคโลหะออกไซด์ พบว่าอุณหภูมิการสลายตัวของแป้ง (ช่วงที่ 3) มีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้อาจเกิดจากอนุภาคโลหะออกไซด์ที่เติมลงไปมีความสามารถในการนำความร้อนได้ดี เมื่อผ่านกระบวนการผสม และก่อดัดขึ้นรูปที่อุณหภูมิสูง อนุภาคโลหะออกไซด์จึงส่งผ่านความร้อนไปยังแป้ง ส่งผลให้แป้งเกิดการเสียดสภาพ จึงทำให้แป้งสลายตัวได้เร็วขึ้น หรือใช้อุณหภูมิการสลายตัวต่ำลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Anžlovar. *et al.* ที่ศึกษาการสลายตัวของ PLA/ZnO และ (poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate), PHBV)/ZnO ที่เตรียมจากกระบวนการหลอมเหลว และงานวิจัยของ Liu. *et al.* ที่ศึกษาสารเชิงซ้อน Starch-zinc chloride และผลของการเสริมแรง โดยทั้งสองงานวิจัยได้ทำการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยวิธีกดอัดขึ้นรูป พบว่าชิ้นงานที่เติมซิงค์ออกไซด์ และซิงค์คลอไรด์ ทำให้อุณหภูมิการสลายตัวของเมทริกซ์หลัก (PLA และ PHBV) และแป้งมีแนวโน้มลดลง อาจเกิดจากอนุภาคโลหะออกไซด์ส่งผ่านความร้อนไปยังเมทริกซ์หลักในระหว่างกระบวนการขึ้นรูป ส่งผลให้เมทริกซ์หลักเกิดการเสียดสภาพ [44-45] แต่พบว่าชิ้นงานสูตร TPAS/10TiO₂, TPAS/20TiO₂, TPAS/10ZnO และ TPAS/20ZnO มีเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปลดลง แสดงให้เห็นว่ามีเสถียรภาพทางความร้อนเพิ่มขึ้น เนื่องจากอนุภาคโลหะออกไซด์มีเสถียรภาพทางความร้อนที่ดี เมื่ออนุภาคโลหะออกไซด์เกิดอันตรกิริยากับแป้ง สามารถช่วย

เพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนให้กับแบง์ได้ [43] แม้ว่าอุณหภูมิการสลายตัวมีแนวโน้มลดลง แต่เมื่อถึงอุณหภูมิการสลายตัวของแบง์ แบง์จะสลายตัวได้ช้าลง ส่งผลให้เปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปมีค่าลดลง

จากการศึกษาผลของชนิดอนุภาคโลหะออกไซด์ พบว่าเมื่อเติมอนุภาคของไททาเนียมไดออกไซด์ ทำอุณหภูมิการสลายตัวของแบง์มีแนวโน้มลดลงมากกว่าการเติมอนุภาคของซิงค์ออกไซด์ ทั้งนี้เนื่องจากไททาเนียมไดออกไซด์มีค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity) เท่ากับ $11.7 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ [46] มากกว่าซิงค์ออกไซด์ที่มีค่าการนำความร้อน $0.75\text{-}1.16 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ [47] ชิ้นงานที่เติมอนุภาคไททาเนียมไดออกไซด์จึงส่งผ่านความร้อนไปยังแบง์ได้สูงกว่า ทำให้แบง์เสถียรภาพมากกว่า อุณหภูมิการสลายตัวของแบง์จึงลดลงมากกว่าชิ้นงานที่เติมซิงค์ออกไซด์

4.8 การวิเคราะห์ความเปลี่ยนแปลงของสี (Color Measurement)

การวิเคราะห์ความเปลี่ยนแปลงของสีของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลจากแบง์ทำวยายม่อมที่เติมไททาเนียมไดออกไซด์ และซิงค์ออกไซด์ ในปริมาณ 0, 10 และ 20 phr โดยเครื่อง Spectrophotometer เพื่อวัดค่า L^* , a^* , b^* และ WI แสดงผลการทดสอบดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.5 การวัดค่าสีของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลจากแบง์ทำวยายม่อมที่เติมไททาเนียมไดออกไซด์และซิงค์ออกไซด์ในปริมาณ 0, 10 และ 20 phr

ตัวอย่าง	L^*	a^*	b^*	WI
TPAS	34.69 ± 1.15	0.83 ± 0.45	3.89 ± 0.50	3.94 ± 0.36
TPAS/10TiO ₂	96.06 ± 0.45	-0.72 ± 0.35	4.81 ± 0.48	64.50 ± 1.92
TPAS/20TiO ₂	97.04 ± 0.45	-0.51 ± 0.48	4.01 ± 0.59	71.06 ± 2.72
TPAS/10ZnO	90.59 ± 0.95	0.54 ± 0.57	4.92 ± 0.68	52.60 ± 2.45
TPAS/20ZnO	93.13 ± 0.46	0.53 ± 0.72	4.01 ± 0.96	62.05 ± 4.01

หมายเหตุ ค่า L^* แสดงค่าความสว่าง

ค่า a^* แสดงค่าสีแดงหรือสีเขียว ถ้า $a^* > 1$ แสดงสีแดง ถ้า $a^* < 1$ แสดงสีเขียว

ค่า b^* แสดงสีเหลืองหรือสีน้ำเงิน ถ้า $b^* > 1$ แสดงสีเหลือง ถ้า $b^* < 1$ แสดงสีน้ำเงิน

และ WI แสดงดัชนีความขาว

จากตารางที่ 4.5 แสดงการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสีของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลจากแบง์ทำวยายม่อมที่เติมอนุภาคโลหะออกไซด์ทั้งสองชนิด พบว่าเมื่อเติมไททาเนียมไดออกไซด์ และซิงค์ออกไซด์ทำให้ชิ้นงานมีค่าความสว่าง และดัชนีความขาวมากขึ้น โดยชิ้นงานที่เติมไททาเนียมไดออกไซด์มีค่าความสว่าง และดัชนีความขาวมากกว่าชิ้นงานที่เติมซิงค์ออกไซด์ เนื่องจากไททาเนียมไดออกไซด์มีค่าดัชนีหักเห (Refractive index) สูงกว่าซิงค์ออกไซด์ [40] นอกจากนี้พบว่า

เมื่อเติมไททาเนียมไดออกไซด์ให้ค่าความเป็นสีเขียว และค่าความเป็นสีเหลืองเพิ่มมากขึ้น ส่วนการเติมซิงค์ออกไซด์ให้ค่าความเป็นสีแดงลดลง และค่าความเป็นสีเหลืองเพิ่มมากขึ้น

4.9 การทดสอบประสิทธิภาพการต้านเชื้อจุลินทรีย์ (Antimicrobial testing)

การทดสอบประสิทธิภาพการต้านเชื้อจุลินทรีย์ของเทอร์โมพลาสติกสตาจจากแปงทำวยายม่อมที่เติมไททาเนียมไดออกไซด์ และซิงค์ออกไซด์ในปริมาณ 0, 10 และ 20 phr ด้วยวิธี Agar diffusion เพาะเลี้ยงร่วมกับเชื้อแบคทีเรียแกรมลบ *Escherichia coli* (*E.coli*) และ ชนิดแกรมบวก *Staphylococcus aureus* (*S.aureus*) ให้ผลการทดลองเป็นดังนี้

ตารางที่ 4.6 ระยะเวลาการต้านเชื้อแบคทีเรียของเทอร์โมพลาสติกสตาจจากแปงทำวยายม่อมที่เติมไททาเนียมไดออกไซด์และซิงค์ออกไซด์ ในปริมาณ 0, 10 และ 20 phr

ตัวอย่าง	บริเวณที่ต้านเชื้อ (มิลลิเมตร)		การต่อต้านเชื้อ
	<i>E.coli</i>	<i>S.aureus</i>	
TPAS	-	-	Inactive
TPAS/10TiO ₂	-	-	Inactive
TPAS/20TiO ₂	-	-	Inactive
TPAS/10ZnO	-	11	Active
TPAS/20ZnO	-	11	Active

หมายเหตุ วัตรระยะการต้านเชื้อจากเส้นผ่าศูนย์กลางของชิ้นงาน

จากตารางที่ 4.6 และภาคผนวก ฉ พบว่าเทอร์โมพลาสติกสตาจจากแปงทำวยายม่อมที่เติมอนุภาคของไททาเนียมไดออกไซด์ และซิงค์ออกไซด์ทุกสูตรไม่สามารถต้านเชื้อแบคทีเรียแกรมลบ *E. coli* ได้ ในขณะที่เทอร์โมพลาสติกสตาจจากแปงทำวยายม่อมที่เติมซิงค์ออกไซด์ปริมาณ 10 และ 20 phr สามารถต้านเชื้อแบคทีเรียแกรมบวก *S.aureus* ได้เล็กน้อย โดยวัตรระยะการต้านเชื้อจากเส้นผ่าศูนย์กลางของชิ้นงานตัวอย่างได้ 11 มิลลิเมตร ซึ่งสอดคล้องกับการทดสอบดูดซับความชื้นโดย TPAS/10ZnO และ TPAS/20ZnO มีเชื้อราขึ้นในวันที่ 9 TPAS, TPAS/10TiO₂ และ TPAS/20TiO₂ มีเชื้อราขึ้นในวันที่ 7 ทั้งนี้อาจเป็นเพราะชิ้นงานมีความหนาค่อนข้างมาก และอนุภาคโลหะส่วนใหญ่ฝังอยู่ในเนื้อของชิ้นงาน นอกจากนี้แสงช่วงตามองเห็น (Visible light) อาจมีพลังงานไม่เพียงพอที่ทำให้การเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลติก (Photocatalytic) ได้ ซึ่งไททาเนียมไดออกไซด์นั้นต้องใช้แสงในการกระตุ้นเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลติก จึงสามารถต้านเชื้อได้ ต่างกับซิงค์ออกไซด์นั้นสามารถต้านเชื้อได้โดยไม่ต้องมีแสง [48] ดังนั้น ไททาเนียมไดออกไซด์จึงไม่สามารถต้านเชื้อแบคทีเรียได้ ส่วนซิงค์ออกไซด์ให้ผลระยะการต้านเชื้อที่น้อย โดยซิงค์ออกไซด์สามารถทำให้เกิดสารออกซิไดซ์ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในที่ไม่มีแสงได้ ซึ่งจะไปทำลายผนังเซลล์และเซลล์เมมเบรนของเชื้อแบคทีเรีย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำให้เซลล์แบคทีเรียทำงานผิดปกติ ทำให้เชื้อแบคทีเรียตายในที่สุด [40, 49] ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของกิตติชัย ที่เตรียมฟิล์มจากแป้งข้าวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกที่ปริมาณ 20% และเติมอนุภาคโลหะออกไซด์สองชนิด พบว่าซิงค์ออกไซด์มีระยะเวลาการต้านเชื้อมากกว่าไททาเนียมไดออกไซด์ [40]

นอกจากนี้การที่ซิงค์ออกไซด์สามารถต้านเชื้อแบคทีเรียแกรมบวก *S.aureus* ได้เล็กน้อยแต่ไม่สามารถต้านแบคทีเรียแกรมลบ *E.coli* ได้เนื่องจากแบคทีเรียแกรมลบนั้นมีผนังเซลล์ที่ซับซ้อนมากกว่า โดยมีชั้นที่ปกคลุมผนังเซลล์อยู่ด้านบน เรียกว่า Outer membrane มีส่วนช่วยป้องกันสารเคมีที่เป็นพิษไม่ให้เข้าสู่ภายในเซลล์ [50]



บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษา และปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้จากเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งท้าวยายม่อม โดยมีกลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ ทำการปรับปรุงสมบัติเทอร์โมพลาสติกสตาโรซด้วยไททานเนียมไดออกไซด์ และซิงค์ออกไซด์ ปริมาณ 0, 10 และ 20 phr โดยทำการผสมด้วยเครื่องผสมแบบปิด และขึ้นด้วยเครื่องอัดขึ้นรูป จากนั้นนำเทอร์โมพลาสติกสตาโรซที่เตรียมได้ไปศึกษาสมบัติต่างๆ ซึ่งสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

1. จากการศึกษาการวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชัน ไม่พบพีคใหม่ปรากฏในเทอร์โมพลาสติกสตาโรซ นอกจากนี้พีคที่แสดงการสั่นของ O-H stretching และ O-H bending เกิดการเคลื่อนที่มาที่เลขคลื่นต่ำลง แสดงให้เห็นถึงอันตรกิริยาระหว่างแป้ง และอนุภาคโลหะออกไซด์ทั้งสองชนิด

2. จากการศึกษาผลการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ พบว่าเมื่อเติมไททานเนียมไดออกไซด์ และซิงค์ออกไซด์ ทำให้ปริมาณผลึกของชิ้นงานมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ไม่ได้ใส่อนุภาคโลหะออกไซด์ โดยไททานเนียมไดออกไซด์ส่งผลให้ปริมาณผลึกของชิ้นงานเพิ่มสูงกว่าซิงค์ออกไซด์

3. จากการศึกษาการดูดซับความชื้น พบว่าเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งท้าวยายม่อมมีการดูดซับความชื้นสูงที่สุด เมื่อเติมอนุภาคไททานเนียมไดออกไซด์ และอนุภาคซิงค์ออกไซด์ในปริมาณที่เพิ่มมากขึ้น มีแนวโน้มของการดูดซับความชื้นลดลง โดยเมื่อเปรียบเทียบกับวันที่ 7 เทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งท้าวยายม่อมที่เติมซิงค์ออกไซด์ 20 phr ดูดซับความชื้นต่ำที่สุด

4. จากการศึกษาสัณฐานวิทยา พบว่าเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งท้าวยายม่อมมีเม็ดแป้งบางส่วนที่ไม่หลอมและเมื่อเติมไททานเนียมไดออกไซด์ และซิงค์ออกไซด์พบว่า อนุภาคโลหะออกไซด์นั้นมีการกระจายตัวอยู่ในเมทริกซ์ของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซ เมื่อเพิ่มปริมาณอนุภาคโลหะออกไซด์พบว่ามีการเกาะกลุ่มกันเป็นก้อนบางบริเวณมากขึ้น

5. จากการศึกษาสมบัติเชิงกล พบว่าค่าความเค้น ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด และมอดุลัสมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น แต่เปอร์เซ็นต์ความเครียด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุดมีแนวโน้มลดลง

6. จากการศึกษาการย่อยสลายโดยการฝังดิน พบว่า ค่าความเค้น ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด มอดุลัส และเปอร์เซ็นต์ความเครียด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานแนวโน้มลดลง และเมื่อระยะเวลาในการฝังดินเพิ่มขึ้น ส่งผลให้การย่อยสลายมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

7. จากการศึกษาสมบัติทางความร้อน พบว่าเมื่อเติมอนุภาคโลหะออกไซด์ทั้งสองชนิด ส่งผลให้เสถียรภาพทางความร้อนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แต่อุณหภูมิการสลายตัวของแป้งมีแนวโน้มลดลง โดยเมื่อเติมอนุภาคซิงค์ออกไซด์ส่งผลให้เทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งท้าวยายม่อมมีเสถียรภาพทางความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ร้อนมากกว่า และส่งผลให้อุณหภูมิการสลายตัวของแป้งสูงกว่าการเติมอนุภาคไททาเนียมไดออกไซด์

8. จากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของสีพบว่า เมื่อเติมอนุภาคไททาเนียมไดออกไซด์ และซิงค์ออกไซด์ทำให้ชิ้นงานมีค่าความสว่าง และดัชนีความขาวเพิ่มมากขึ้น โดยชิ้นงานที่เติมอนุภาคไททาเนียมไดออกไซด์มีค่าความสว่าง และดัชนีความขาวมากกว่าการเติมอนุภาคซิงค์ออกไซด์ นอกจากนี้พบว่าเมื่อเติมอนุภาคไททาเนียมไดออกไซด์ส่งผลให้ค่าความเป็นสีเขียว และค่าความเป็นสีเหลืองเพิ่มมากขึ้น ส่วนการเติมอนุภาคซิงค์ออกไซด์ให้ค่าความเป็นสีแดงลดลง และค่าความเป็นสีเหลืองเพิ่มมากขึ้น

9. จากการศึกษาประสิทธิภาพการต้านเชื้อจุลินทรีย์ พบว่าเทอร์โมพลาสติกสตาเรซจากแป้งท้าวยาย่มอมที่เติมอนุภาคไททาเนียมไดออกไซด์ และอนุภาคซิงค์ออกไซด์ ไม่สามารถต้านเชื้อแบคทีเรียแกรมลบ *E.coli* ได้ ในขณะที่เทอร์โมพลาสติกสตาเรซที่เติมอนุภาคซิงค์ออกไซด์ปริมาณ 10 และ 20 phr สามารถต้านเชื้อแบคทีเรียแกรมบวก *S.aureus* ได้เล็กน้อย โดยวัดระยะการต้านเชื้อจากเส้นผ่าศูนย์กลางของชิ้นงานตัวอย่างได้ 11 มิลลิเมตร

10. จากผลการทดสอบสมบัติทั้งหมดสามารถสรุปได้ว่า เทอร์โมพลาสติกสตาเรซจากแป้งท้าวยาย่มอมที่เติมอนุภาคไททาเนียมไดออกไซด์ 20 phr ให้สมบัติโดยรวมดีที่สุด โดยพิจารณาจากการทดสอบการดูดซับความชื้นมีค่าลดลง สมบัติเชิงกลเพิ่มขึ้น สมบัติการย่อยสลายโดยการฝังดินเพิ่มขึ้น และมีดัชนีความขาวเพิ่มขึ้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากผลการทดสอบสมบัติต่างๆ ของเทอร์โมพลาสติกสตาเรซจากแป้งท้าวยาย่มอมที่เติมอนุภาคโลหะออกไซด์ทั้งสองชนิด สามารถนำไปพัฒนา และปรับปรุงให้ดีขึ้นได้ดังนี้

1. ควรทำการบดเม็ดแป้งให้ละเอียดขึ้นด้วยโรงแบบบดสาร จากนั้นนำแป้งไปร่อนด้วยตะแกรงร่อน เพื่อให้ได้เม็ดแป้งที่ละเอียดมากขึ้น และมีขนาดใกล้เคียงกันมากขึ้น ซึ่งจะเพิ่มความสามารถในการผสมให้เข้ากับกลีเซอรอล และทำให้แป้งสามารถหลอมเป็นเนื้อเดียวกันดีขึ้น

2. ศึกษาผลการทดสอบประสิทธิภาพการต้านเชื้อจุลินทรีย์โดยการนำอนุภาคโลหะออกไซด์ไปกระตุ้นด้วยแสงที่มีพลังงานที่สูงขึ้นก่อนนำมาผสม เช่น รังสียูวี เป็นต้น ซึ่งคาดว่าจะให้ผลการต้านเชื้อจุลินทรีย์ที่ดีขึ้น

3. ควรทำการคัดแยกขนาดอนุภาคของอนุภาคโลหะออกไซด์ก่อนนำไปทำการผสมขึ้นรูป เพื่อให้ได้ขนาดอนุภาคที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งอาจลดการรวมตัวเป็นกลุ่มก้อนได้ดีขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] ธนาวดี ลีจากภัย. 2549. **พลาสติกย่อยสลายได้ เพื่อสิ่งแวดล้อม**. กรุงเทพฯ : ไทยเอเफด์ท์ สตุดีโอ.
- [2] ทศนัย อรุณพรพิทักษ์. 2546. “สมบัติทางเคมีและสตาเร็กซ์ทำวยายม่อม.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณูฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีทางการอาหาร, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [3] สถานวิจัยเพื่อความเป็นเลิศทางวิชาการด้านวิจัยและนวัตกรรมเพื่อสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยนเรศวร. 2561. **ไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO₂)**. [Online]. Available : http://web.eng.nu.ac.th/eng2012/ceři/nanodatabase/info_index.php?cat_id=1.
- [4] สถานวิจัยเพื่อความเป็นเลิศทางวิชาการด้านวิจัยและนวัตกรรมเพื่อสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยนเรศวร. 2561. **ซิงค์ออกไซด์ (ZnO)**. [Online]. Available : http://web.eng.nu.ac.th/eng2012/ceři/nanodatabase/info_index.php?cat_id=2.
- [5] Oleyaei, S.A., Zahedi, Y., Ghanbarzadeh, B. and Moayedi, A.A. 2016. “Modification of physicochemical and thermal properties of starch films by incorporation of TiO₂ nanoparticles.” *International Journal of Biological Macromolecules*. 89 : 256-264.
- [6] Goudarzi, V., Shahabi-Ghahfarrokhi, I. and Babaei-Ghazvini, A. 2017. “Preparation of ecofriendly UV- protective food packaging material by starch/ TiO₂ bio-nanocomposite: Characterization.” *International Journal of Biological Macromolecules*. 95 : 306-313.
- [7] Wang, C., Yan, X., Yu, L. and Fang, R. 2014. “Preparation and properties of glycerol plasticized-corn starch/ Titaniumdioxide-starch bionanocomposites.” *Advanced Materials Research*. 997 : 480-483.
- [8] Ma, X., Chang, P.R., Yang, J. and Yu, J. 2009. “Preparation and Properties of glycerol plasticized- pea starch/ zinc oxide starch bionanocomposite.” *Carbohydrate Polymers*. 75 : 472-478.
- [9] Nafchi, A.M., Alias, A.K., Mahmud, S. and Robal, M. 2012. “Antimicrobial, rheological and physicochemical properties of sago starch films filled with nanorod-rich zinc oxide.” *Journal of Food Engineering*. 113 : 511-519.
- [10] Babaei-Ghazvin, A., Shahabi-Ghahfarrokhi, I. and Goudarzi, V. 2018. “Preparation of UV- protective starch/kefiran/ ZnO nanocomposite as a packaging film characterization.” *Food Packaging and Shelf Life*. 16 : 103-111.

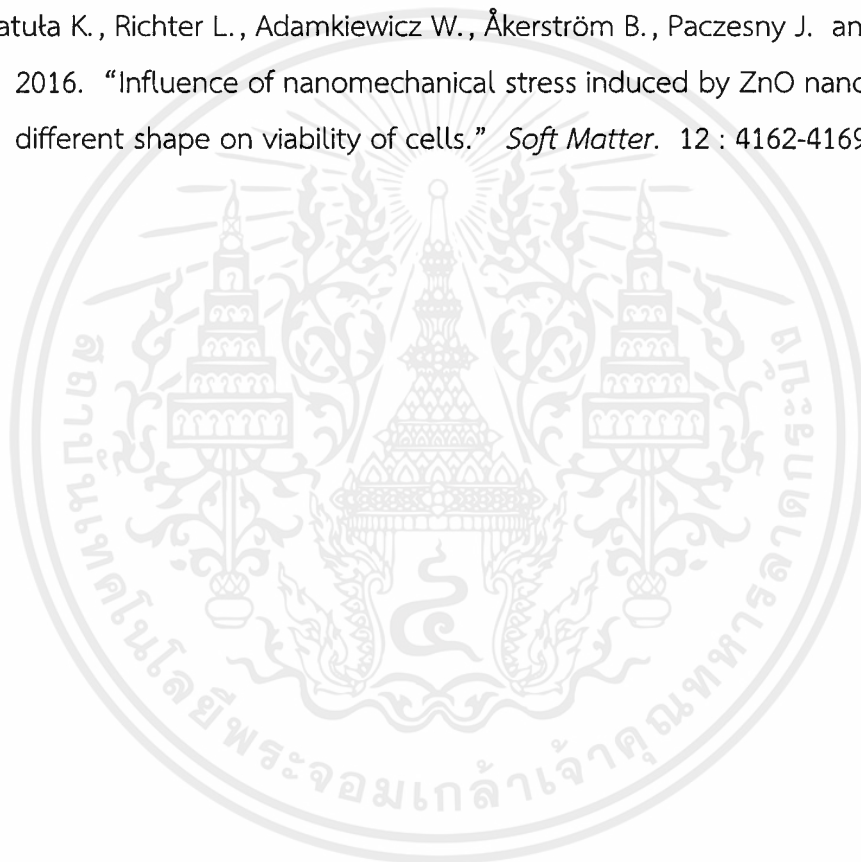
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [11] ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ. 2551. ประเภทของพลาสติกย่อยสลายได้. [Online]. Available : https://www2.mtec.or.th/th/special/biodegradableplastic/Typ_de_plas.html.
- [12] วชิระ ยมาภัย. 2554. ไบโอพลาสติก. [Online]. Available : <https://enchemcom1po.wordpress.com/bioplastic>.
- [13] อภิสีทธิ์ ศิริญาติ. 2555. พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ. [Online]. Available : <http://compositfoam.blogspot.com/2012/08/polymerbiodegradablepolymer.html>.
- [14] ประรณณา คำใส, ลัดดาวัลย์ เฌรยอด และศันสนีย์ เกตุอ่วม. 2556. “ผลของปริมาณและขนาดอนุภาคซีลี้อยที่มีผลต่อสมบัติของพอลิเมอร์ย่อยสลายที่เตรียมจากเทอร์โมพลาสติกสตาซจากแป้งท้าวยาย่ม่อม.” โครงการงานพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรม, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [15] สำนักประชาสัมพันธ์เขต 1 ขอนแก่น. 2558. แป้งกลายเป็นพลาสติกได้อย่างไร. [Online]. Available : http://region1.prd.go.th/ewt_news.php?nid=33275.
- [16] กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ. 2546. เทคโนโลยีของแป้ง. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [17] อลิษา วารี. 2561. कार्बोไฮเดรต. [Online]. Available : <https://sites.google.com/site/alisa6280/sar-xinthry/2-2-khar-bo-dert>.
- [18] เจตนิพัทธ์ บุญยสวัสดิ์, สุนีย์ สหสโพธิ์, อภิญญา มานะโรจน์ และจักรารุช ภู่มสม. 2556. “การศึกษาการทำไดฟูกู.” รายงานวิจัย สาขาเทคโนโลยีการอาหาร, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร.
- [19] พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ และนิธิยา รัตนาปนนท์. 2561. การเจลาติไนซ์. [Online]. Available : <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/0350/gelatinization-การเจลาติไนซ์>.
- [20] วิลาสินี เกิดเกลื่อน. 2553. “การเตรียมและการนำแป้งครอสลิงค์ชนิดพอสเฟดไปประโยชน์.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- [21] ธวัชชัย ศรีภักดี. 2561. เท้ายาย่ม่อม สรรพคุณ และการปลูกเท้ายาย่ม่อม. [Online]. Available : <https://puechkaset.com>.
- [22] นารณัญญา ช่างเจริญ, นิรันดร์รัตน์ สิริรัมย์ และอัจฉรา คำดี. 2560. “ผลของกรดซิตริกที่มีต่อสมบัติของคอมพอสิตเทอร์โมพลาสติกสตาซจากแป้งท้าวยาย่ม่อมเสริมแรงด้วยเส้นใยุ่น” โครงการงานพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

- [23] สำนักงานการวิจัยแห่งชาติ. 2561. **ไททาเนียมไดออกไซด์**. [Online]. Available : http://doi.nrct.go.th/ListDoi/Download/300020/49e11016f388cc7d09469cef16140b31?Resolve_DOI=10.14457/KKU.res.2013.48.
- [24] Fujishima, A. and Honda, K. 1972. "Electrochemical Photolysis of Water at a Semiconductor Electrode." *Nature*. 238 : 37-38.
- [25] Hoffmann, M. R. , Martin, S. T. , Choi, W. Y. and Bahnemann, D. W. 1995. "Environmental Applications of Semiconductor Photocatalysis. " *ChemicalReview*. 95 : 69-96.
- [26] Fujishima, A., Zhang, X. and Tryk, D.A. 2008. "TiO₂ photocatalysis and related surface phenomena." *Surface Science Reports*. 63 : 515-582.
- [27] Handerson, AM. 2011. "A surface science perspective on TiO₂ photocatalysis." *Surface Science Reports*. 66 : 185-297.
- [28] วิกิพีเดีย สารานุกรมเสรี. 2561. **สังกะสีออกไซด์**. [Online]. Available : <https://th.wikipedia.org/wiki/สังกะสีออกไซด์>.
- [29] ชลดา อีรการุณวงศ์. 2555. "ไทเทเนียมไดออกไซด์: วัสดุฆ่าเชื้อแบคทีเรีย." *วารสารวิทยาศาสตร์ มช.* 40(4) : 1049-1058.
- [30] วีระชัย แสงฉาย. 2559. "สมบัติโฟโตแคตะไลติกของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ได้บเล็กละเอียดบนใยแก้ว." *วารสารวิชาการคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง*. 9(1) : 87-99
- [31] พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ และ นิธิยา รัตนานพนธ์. 2556. **กลีเซอรอล**. [Online]. Available : <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/1926/glycerol>.
- [32] พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ และ นิธิยา รัตนานพนธ์. 2561. **ไตรกลีเซอไรด์**. [Online]. Available : <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/1001/triglyceride-ไตรกลีเซอไรด์>.
- [33] หฤทภาค กิรติเสว, ฉัตรชัย วีระนิติสกุล และอภิรัตน์ เล่าห์บุตร. 2553. "ภาพรวมของวัสดุประกอบ." *วิศวกรรมสาร มก.* 22(70) : 1-15.
- [34] เจริญ นาคะสรรค์. 2546. **เทคโนโลยีเบื้องต้นทางพลาสติก**. กรุงเทพฯ : โพรเพช.
- [35] ดร.รชนี พัทธวรการ. 2562. **เทคโนโลยีกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์**. [Online]. Available : <http://www.inc.science.cmu.ac.th/thai/upload/article/file/12-02-16-fe9fc.pdf>.
- [36] ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการยาง (RTEC). 2557. **เทคโนโลยีการขึ้นรูปยาง**. [Online]. Available : <http://srksealing.blogspot.com/2014/11/forming.html>.

- [37] Kochkina, N.E. and Skobeleva, O.A. 2018. "Structure and functional properties of glycerol-plasticized starch/TiO₂ nanocomposite materials obtained through resonant wave mixing." *Iranian Polymer Journal*. 27 : 851–859.
- [38] Zamiri, R., Zakaria, A., Ahangar, H.A., Darroudi, M., Zak, A.K., and Drummen, G.P.C. 2012. "Aqueous starch as a stabilizer in zinc oxide nanoparticle synthesis via laser ablation." *Journal of Alloys and Compounds*. 516 : 41–48.
- [39] Zhou, J. J. , Wang, S. Y. , and Gunasekaran, S. 2009. "Preparation and Characterization of Whey Protein Film Incorporated with TiO₂ Nanoparticles." *Journal of Food Science*. 74 : 50-56.
- [40] กิตติชัย ศรีสำแดง. 2562. "สมบัติของฟิล์มพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพจากแป้งข้าวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก และใช้นุภาคโลหะออกไซด์เป็นสารต้านเชื้อแบคทีเรีย." วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [41] Frizzo, C.P., Salbego, P.R.S., Bender, C.R., Wust, K., Farias, C.A.A., Beck, T.S., Beck T.S., Machado G., Vaucher R.A. and Martins, M.A.P. 2018. "Interaction of pharmaceutical ionic liquids with TiO₂ in anatase and rutile phase." *Journal of Molecular Liquids*. 269 : 912-919.
- [42] Guz, L., Famá, L., Candal, R. and Goyanes, S. 2017. "Size effect of ZnO nanorods on physicochemical properties of plasticized starch composites." *Carbohydrate Polymers*. 157 : 1611–1619.
- [43] Hejri, Z. , Seifkordi, A. A. , Ahmadpour, A. , Zebarjad, S.M. and Maskooki, A. 2013. "Biodegradable starch/poly (vinyl alcohol) film reinforced with titanium dioxide nanoparticles." *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*. 20 : 1001–1011.
- [44] Anžlovar, A., Kržan, A. and Žagar, E. 2018. "Degradation of PLA/ZnO and PHBV/ZnO composites prepared by melt processing." *Arabian Journal of Chemistry*. 11 : 343–352.
- [45] Liu, P. , Li, Y. , Shang, X. and Xie, F. 2018. "Starch–zinc complex and its reinforcement effect on starch-based materials." *Carbohydrate Polymers*. 206 : 528-538.
- [46] Goodfellow. 2012. **Titanium Dioxide-Titania (TiO₂)**. [Online]. Available : <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=1179>.

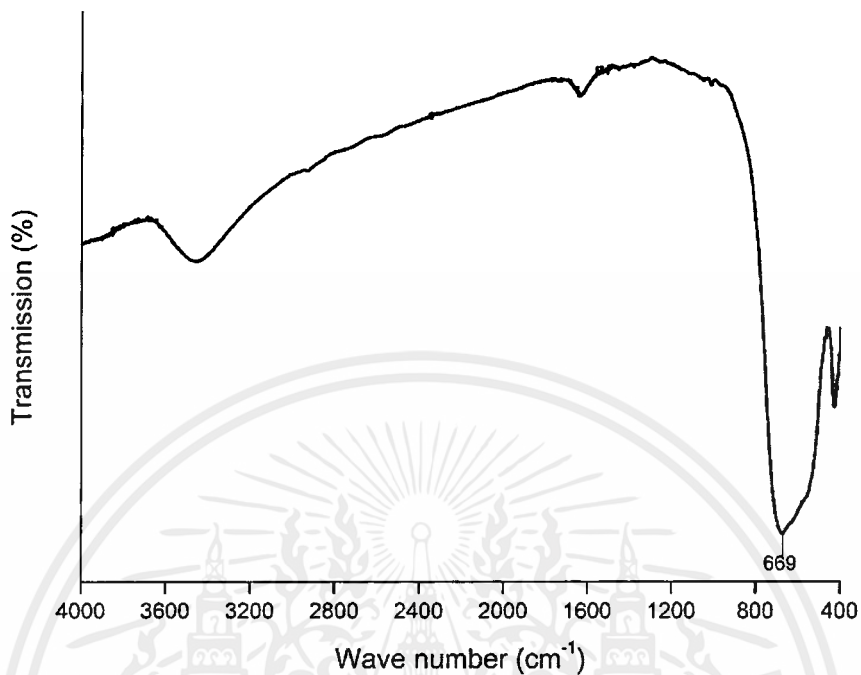
- [47] Olorunyolemi, T., Birnboim, A., Carmel, Y., Wilson, O.C., Lloyd, I.K., Smith, S. and Campbell, R. 2004. "Thermal Conductivity of Zinc Oxide: From Green to Sintered State." *Journal of the American Ceramic Society*. 85 : 1249–1253.
- [48] Ma, J., Zhu, W., Tian, Y. and Wang, Z. 2016. "Preparation of Zinc Oxide-Starch Nanocomposite and Its Application on Coating." *Nanoscale Research Letters*. 11 : 1-9.
- [49] Prasanna, V. and Vijayaraghavan, R. 2015. "Insight into the Mechanism of Antibacterial Activity of ZnO: Surface Defects Mediated Reactive Oxygen Species Even in the Dark." *Langmuir*. 31 : 9155-9162.
- [50] Matuła K., Richter L., Adamkiewicz W., Åkerström B., Paczesny J. and Hołyst R. 2016. "Influence of nanomechanical stress induced by ZnO nanoparticles of different shape on viability of cells." *Soft Matter*. 12 : 4162-4169.



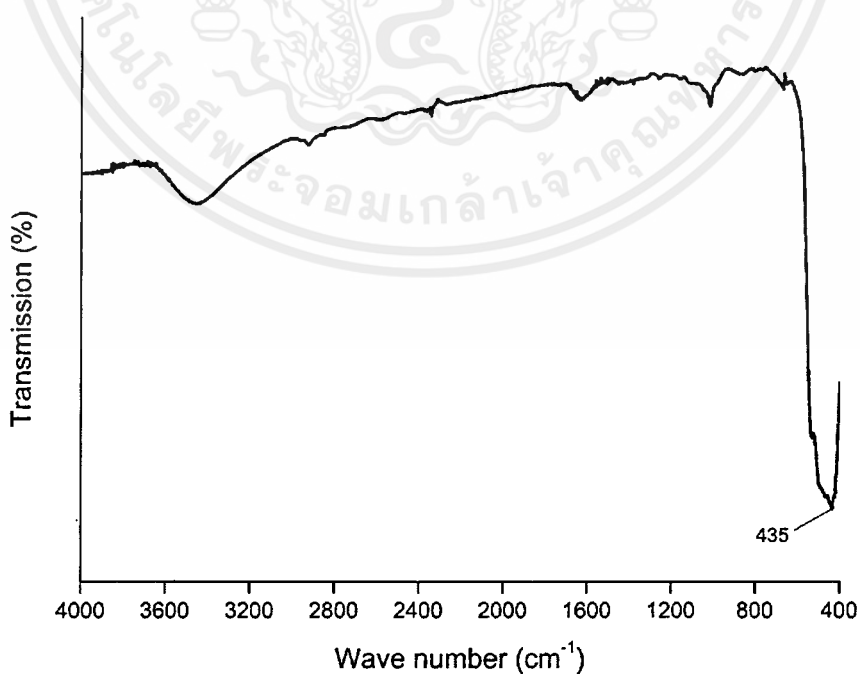


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

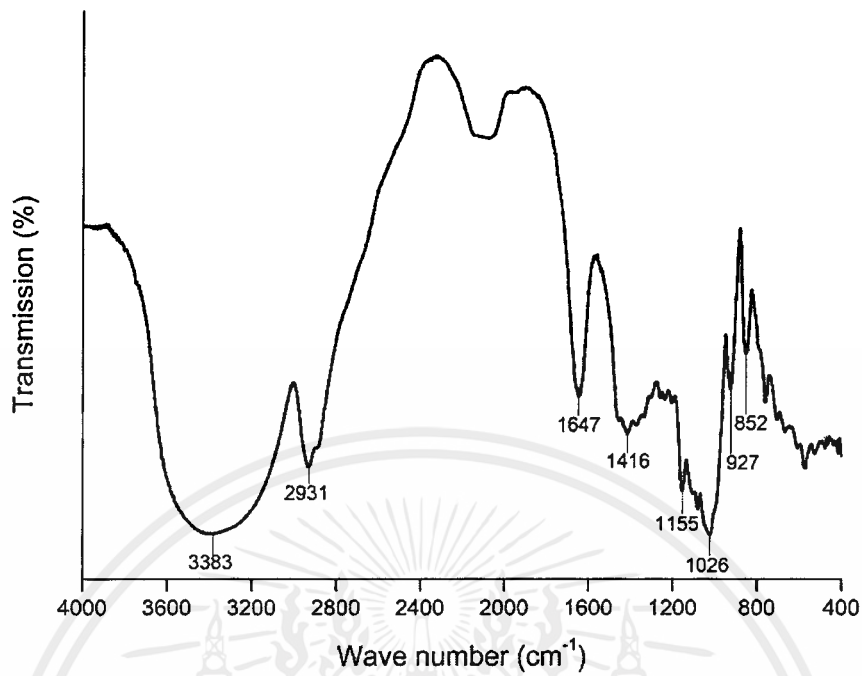


รูปที่ ก.1 อินฟราเรดสเปกตรัมของไททาเนียมไดออกไซด์

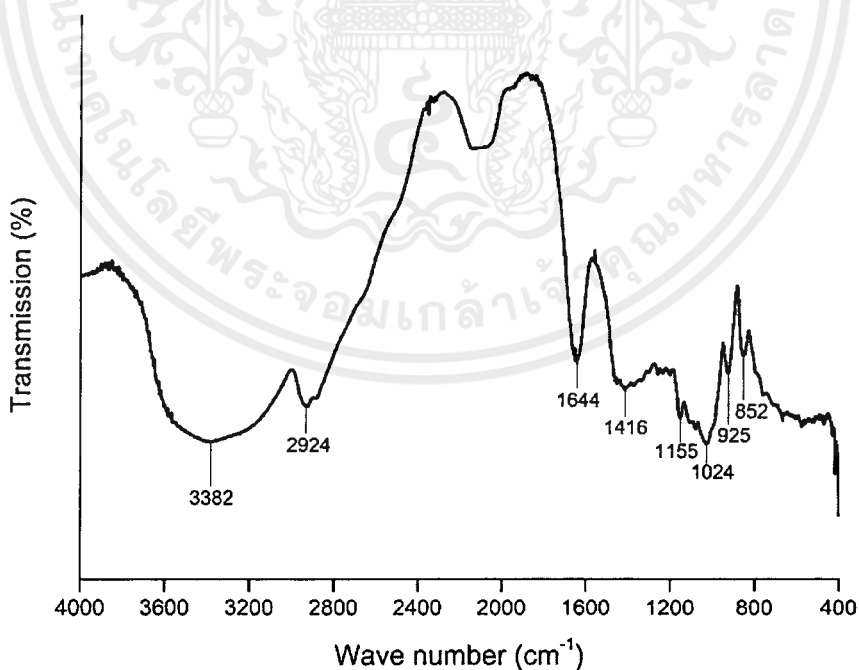


รูปที่ ก.2 อินฟราเรดสเปกตรัมของซิงค์ออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

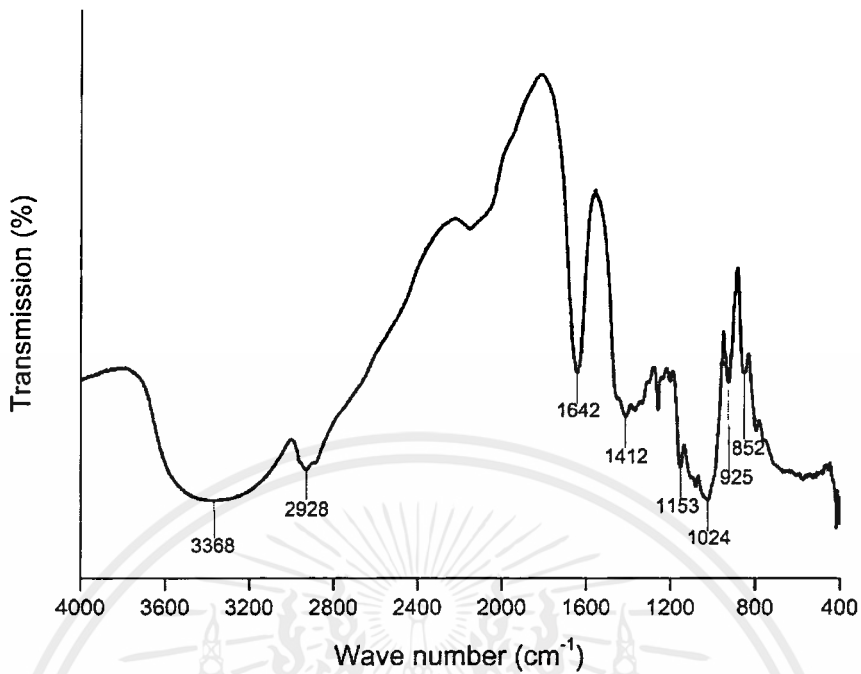


รูปที่ ก.3 อินฟราเรดสเปกตรัมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งท้าวยายม่อมที่ไม่ได้มีการเติมอนุภาคโลหะออกไซด์

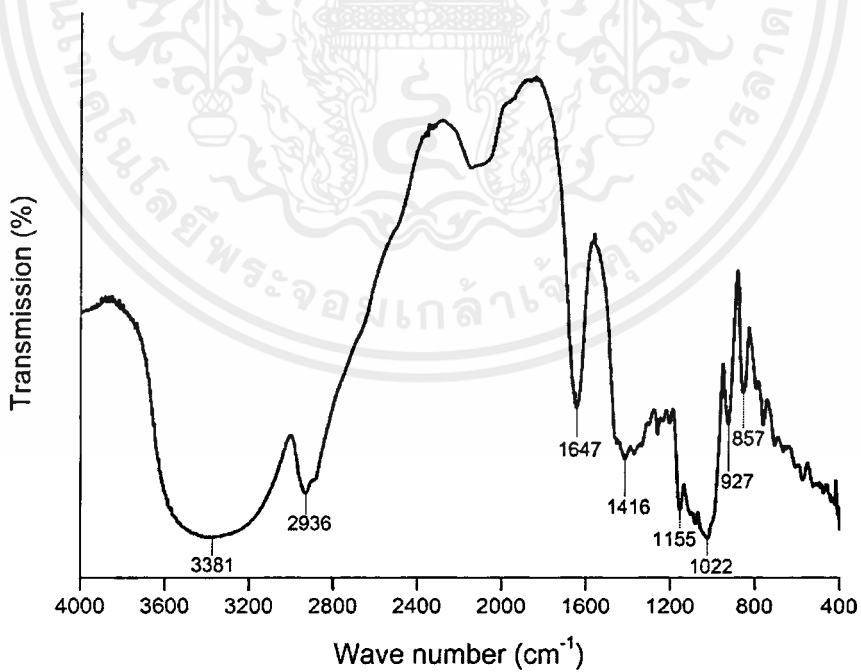


รูปที่ ก.4 อินฟราเรดสเปกตรัมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งท้าวยายม่อมที่เติมไททาเนียมไดออกไซด์ 10 phr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

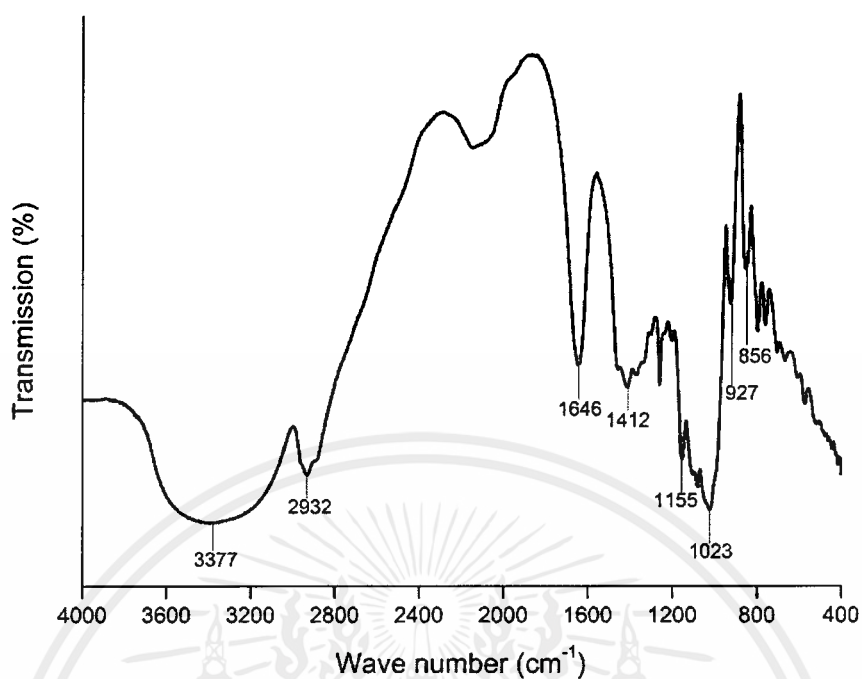


รูปที่ ก.5 อินฟราเรดสเปกตรัมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งท้าวยายม่อมที่เติม
ไททาเนียมไดออกไซด์ 20 phr



รูปที่ ก.6 อินฟราเรดสเปกตรัมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งท้าวยายม่อมที่เติม
ซิงค์ออกไซด์ 10 phr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.7 อินฟราเรดสเปกตรัมเทอร์โมพลาสติกสตาบิลไรเซอร์จากแป้งท้าวยายม่อมที่เติม ซิงค์ออกไซด์ 20 phr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




ภาคผนวก ข

ตารางที่ ข.1 รูปชิ้นงานที่ทดสอบการดูดซับความชื้นของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งท้าวยายม่อมที่ ที่ความชื้นสัมพัทธ์ $99\pm 1\%$

สูตร	วันที่	รูปชิ้นงานที่ทดสอบการดูดซับความชื้น
TPAS	1	
	4	
	7	

ตารางที่ ข.2 รูปชิ้นงานที่ทดสอบการดูดซับความชื้นของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งท้าวยายม่อมที่ปรับปรุงสมบัติด้วยไททาเนียมไดออกไซด์ในปริมาณ 10 และ 20 phr ที่ความชื้นสัมพัทธ์ $99\pm 1\%$




สูตร	วันที่	รูปชิ้นงานที่ทดสอบการดูดซับความชื้น
TPAS/10TiO ₂	1	
	4	
	7	

TPAS/20TiO ₂	1	
	4	
	7	

ตารางที่ ข.3 รูปชิ้นงานที่ทดสอบการดูดซับความชื้นของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งท้าวยายม่อมที่ปรับปรุงสมบัติด้วยซิงค์ออกไซด์ในปริมาณ 10 และ 20 phr ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 99±1%

สูตร	วันที่	รูปชิ้นงานที่ทดสอบการดูดซับความชื้น
TPAS/10ZnO	1	
	4	
	9	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TPAS/20ZnO	1	
	4	
	9	

ตารางที่ ข.4 ค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นที่ปริมาณความชื้น $99 \pm 1\%$ ของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ปรับปรุงสมบัติด้วยไททาเนียมไดออกไซด์ และซิงค์ออกไซด์ในปริมาณ 10 และ 20 phr

จำนวนวัน	การดูดซับความชื้น (%)				
	TPAS	TPAS/10TiO ₂	TPAS/20TiO ₂	TPAS/10ZnO	TPAS/20ZnO
0	0	0	0	0	0
1	53.91	43.65	40.10	42.95	41.14
2	81.47	67.82	61.96	69.04	64.24
3	103.61	85.86	77.75	83.41	78.37
4	119.04	100.38	90.03	96.77	91.00
7	160.84	139.13	125.26	131.83	124.78
8	-	-	-	133.18	129.54
9	-	-	-	136.91	133.79

ภาคผนวก ค

ตารางที่ ค.1 สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลจากแป้งท้าวยายม่อมที่ใส่อนุภาคโลหะ ออกไซด์ทั้ง 2 ชนิด ที่ปริมาณ 0, 10 และ 20 phr

ตัวอย่าง	สมบัติเชิงกล		
	ความเค้น ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด (MPa)	มอดุลัส (MPa)	ความเครียด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด (%)
TPAS	1.44±0.27	12.07±2.30	122.94±29.78
TPAS/10TiO ₂	2.06±0.37	18.84±4.33	89.64±38.95
TPAS/20TiO ₂	2.22±0.33	30.22±4.63	43.77±23.26
TPAS/10ZnO	1.98±0.27	16.93±4.45	117.22±38.12
TPAS/20ZnO	2.15±0.37	27.10±5.84	85.89±34.75

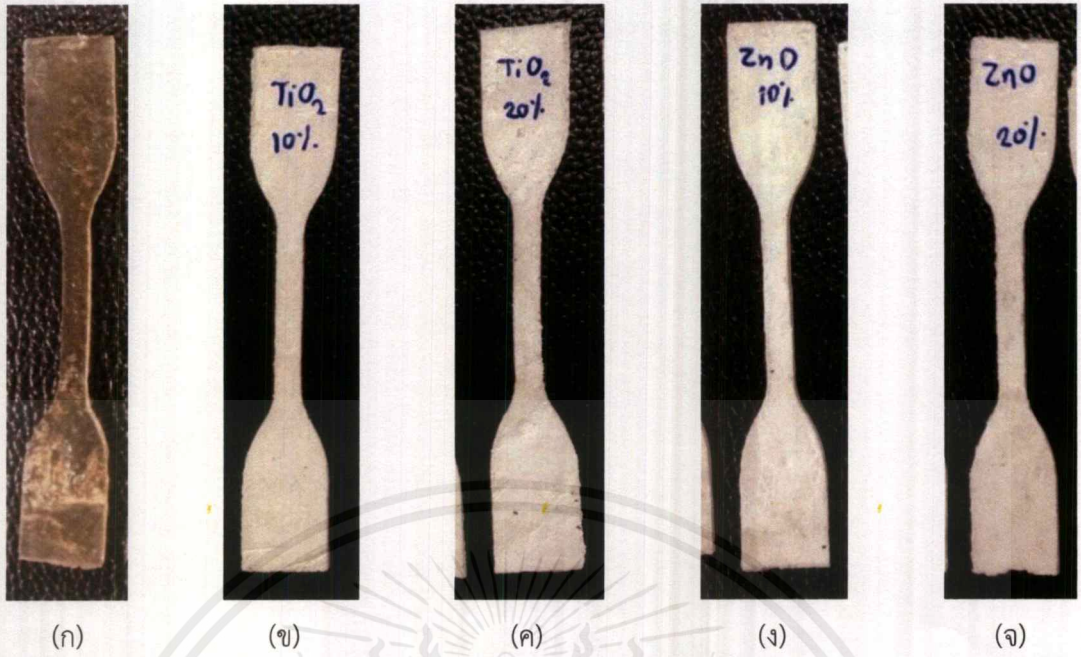
ภาคผนวก ง

ตารางที่ ง.1 เปรอร์เซ็นต์การลดลงของสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาเรชจากแป้ง
ท้าวยายม่อมที่เติมอนุภาคโลหะออกไซด์ทั้งสองชนิด ภายหลังจากฝังดินเป็น
ระยะเวลา 3 และ 5 วัน

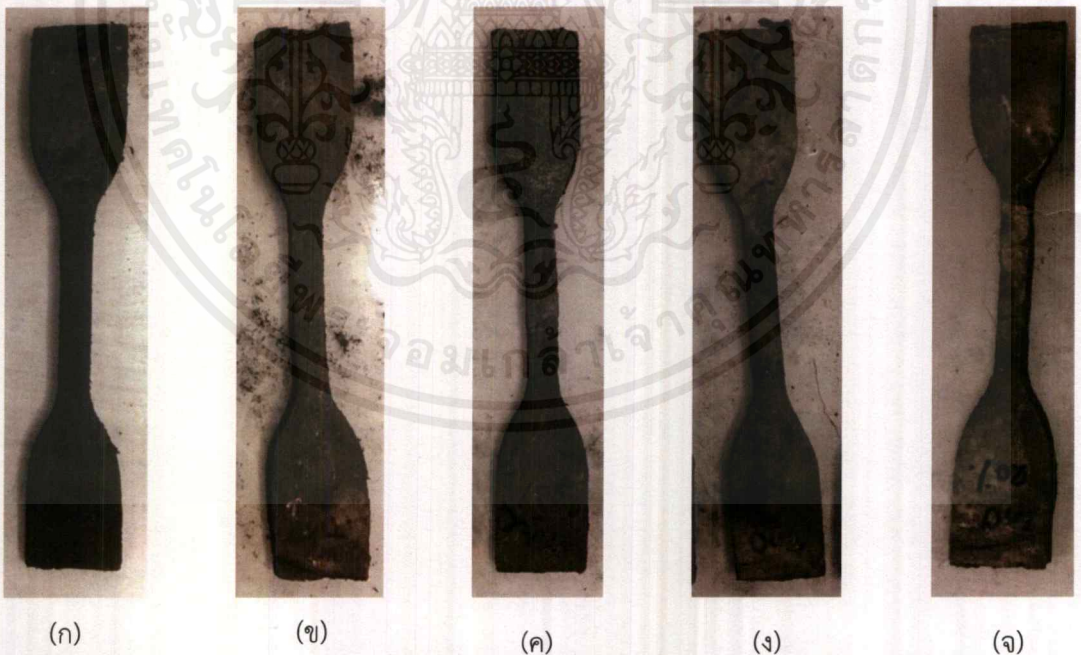
ตัวอย่าง	การลดลงของสมบัติเชิงกล (%)					
	3 วัน			5 วัน		
	ความเค้น ณ จุดรับ แรงดึง สูงสุด	มอดุลัส	ความ เครีียด ณ จุดรับแรง ดึงสูงสุด	ความเค้น ณ จุดรับ แรงดึง สูงสุด	มอดุลัส	ความ เครีียด ณ จุดรับแรง ดึงสูงสุด
TPAS	76.01	90.33	62.56	94.27	97.68	63.15
TPAS/10TiO ₂	80.37	94.52	33.18	94.26	98.33	59.19
TPAS/20TiO ₂	86.50	96.54	25.31	96.92	96.49	53.18
TPAS/10ZnO	83.25	93.93	59.96	92.82	96.79	56.98
TPAS/20ZnO	83.05	95.57	45.34	93.15	98.44	46.81

ตารางที่ ง.2 สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลิซเซอร์จากแป้งท้าวยายม่อมที่ใส่อนุภาคโลหะออกไซด์ทั้ง 2 ชนิดที่ปริมาณ 0, 10 และ 20 phr ภายหลังจากฝังดินเป็นระยะเวลา 3 และ 5 วัน

สมบัติเชิงกล	ตัวอย่าง	จำนวนวันในการทดสอบ		
		0	3	5
ความเค้น ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด (MPa)	TPAS	1.44±0.27	0.34±0.03	0.08±0.01
	TPAS/10TiO ₂	2.06±0.37	0.40±0.05	0.12±0.03
	TPAS/20TiO ₂	2.22±0.33	0.30±0.05	0.07±0.02
	TPAS/10ZnO	1.98±0.27	0.33±0.03	0.14±0.01
	TPAS/20ZnO	2.15±0.37	0.36±0.03	0.15±0.06
มอดุลัส (MPa)	TPAS	12.07±2.30	1.17±0.09	0.28±0.20
	TPAS/10TiO ₂	18.84±4.33	1.03±0.12	0.31±0.10
	TPAS/20TiO ₂	30.22±4.63	1.05±0.14	1.06±0.77
	TPAS/10ZnO	16.93±4.45	1.03±0.12	0.54±0.31
	TPAS/20ZnO	27.10±5.84	1.20±0.18	0.42±0.24
ความเครียด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด (%)	TPAS	122.94±29.78	46.03±10.48	45.30±14.85
	TPAS/10TiO ₂	89.64±38.95	59.90±10.14	36.59±14.55
	TPAS/20TiO ₂	43.77±23.26	32.70±2.0	20.49±6.40
	TPAS/10ZnO	117.22±38.12	46.93±7.94	50.43±10.17
	TPAS/20ZnO	85.89±34.75	46.95±8.34	45.69±17.10

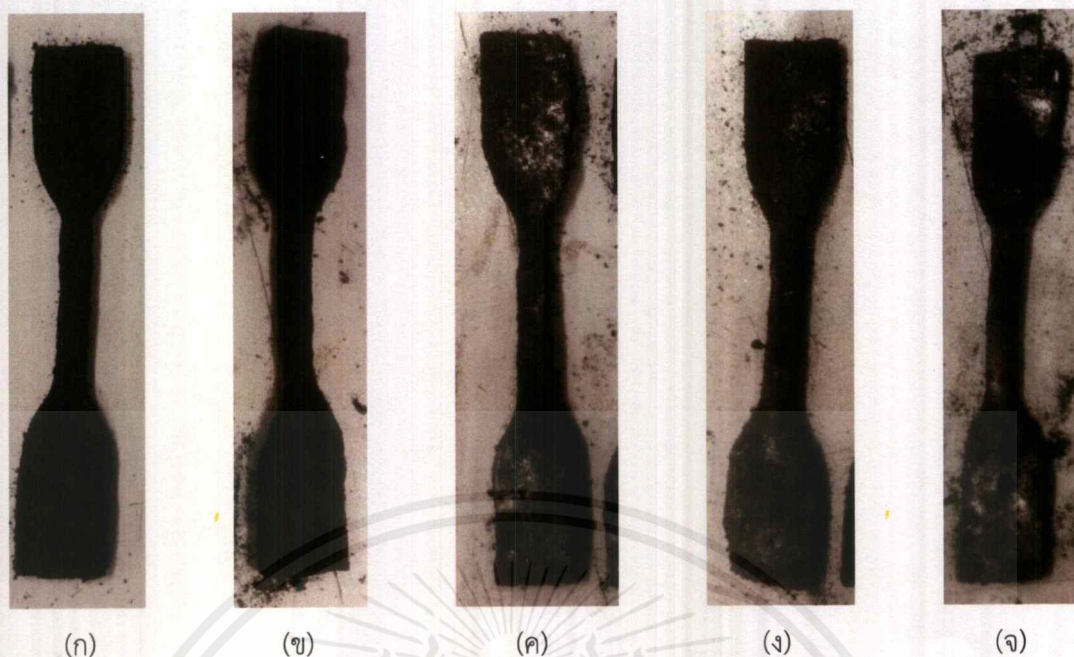


รูปที่ ๑.1 สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งท้าวยาย่มอมที่ใส่อนุภาคโลหะออกไซด์ ทั้งสองชนิดที่ปริมาณ 0, 10 และ 20 phr ก่อนการฝังดิน (ก) TPAS (ข) TPAS/10TiO₂ (ค) TPAS/20TiO₂ (ง) TPAS/10ZnO และ (จ) TPAS/20ZnO



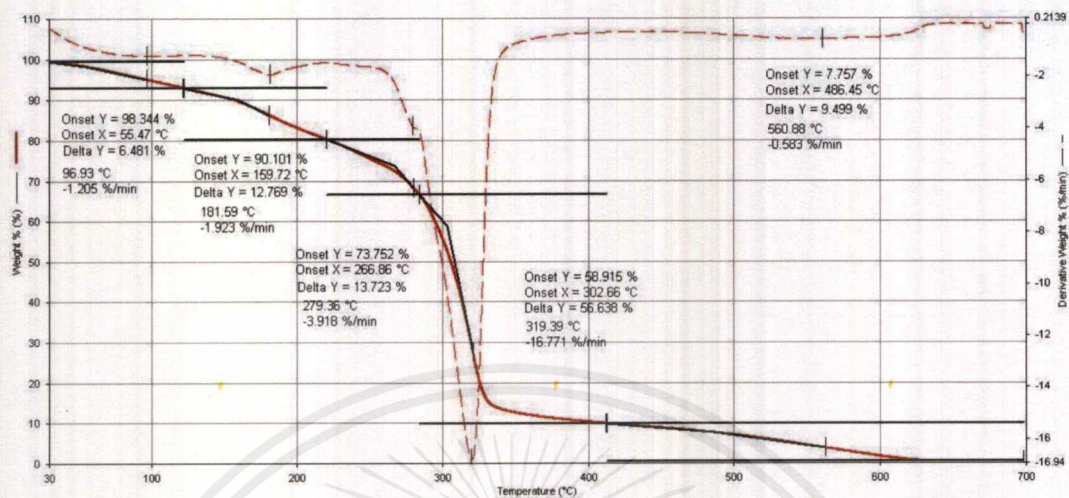
รูปที่ ๑.2 สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งท้าวยาย่มอมที่ใส่อนุภาคโลหะออกไซด์ ทั้งสองชนิดที่ปริมาณ 0, 10 และ 20 phr หลังฝังดินเป็นระยะเวลา 3 วัน (ก) TPAS (ข) TPAS/10TiO₂ (ค) TPAS/20TiO₂ (ง) TPAS/10ZnO และ (จ) TPAS/20ZnO

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



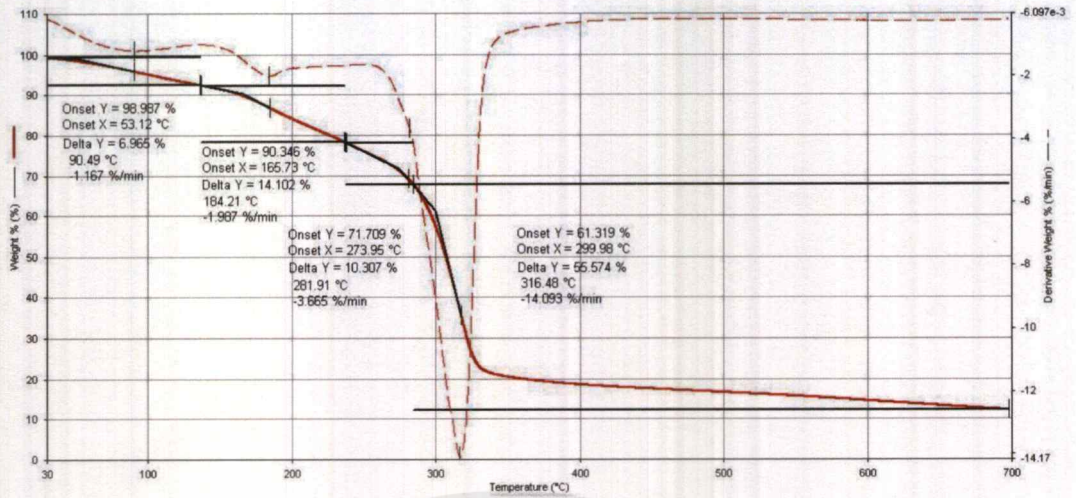
รูปที่ 3.3 สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลไรเซอร์จากแป้งท้าวยายม่อมที่ใส่อนุภาคโลหะออกไซด์ ทั้ง 2 ชนิดที่ปริมาณ 0, 10 และ 20 phr หลังฝังดินเป็นระยะเวลา 5 วัน
 (ก) TPAS (ข) TPAS/10TiO₂ (ค) TPAS/20TiO₂ (ง) TPAS/10ZnO และ (จ) TPAS/20ZnO

ภาคผนวก จ

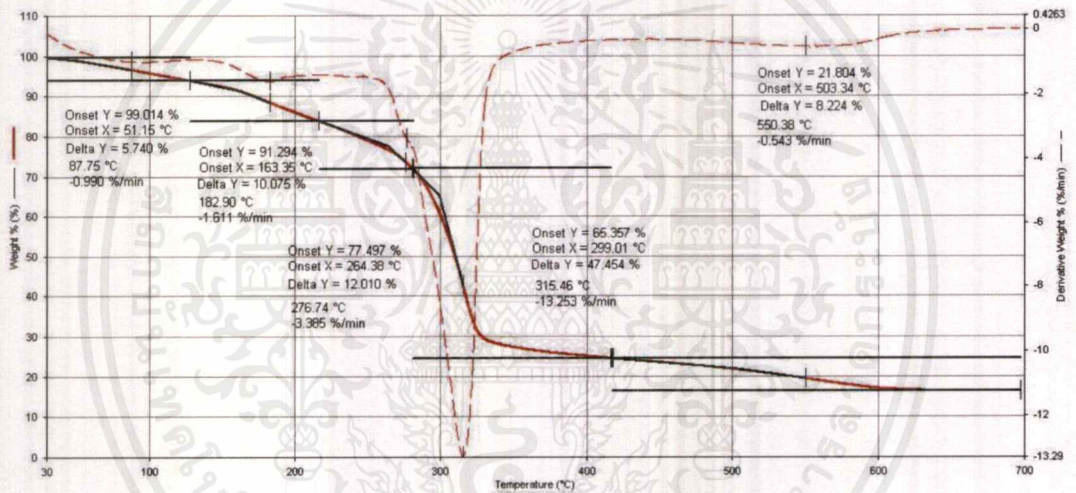


รูปที่ จ.1 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งท้าวยายม่อมที่ไม่ได้เติมอนุภาคโลหะออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



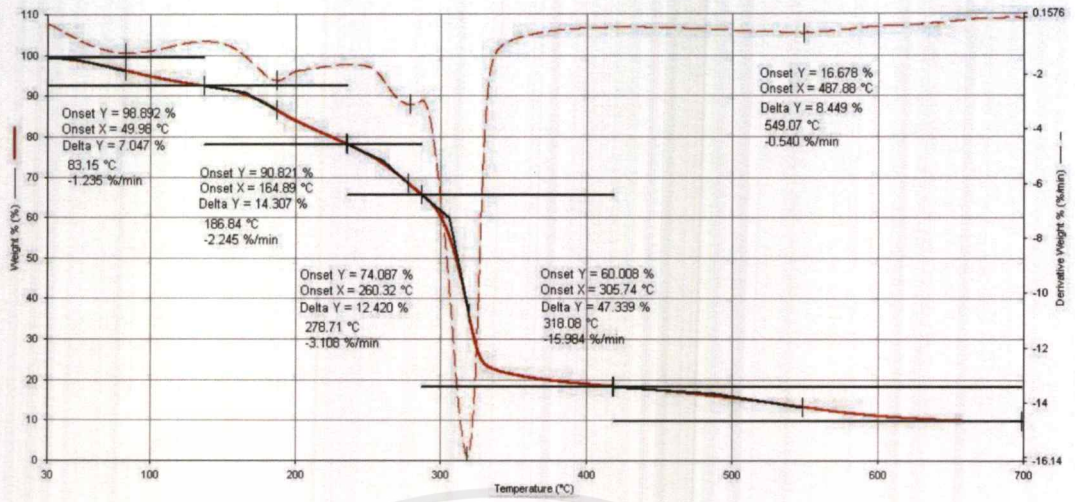
(ก)



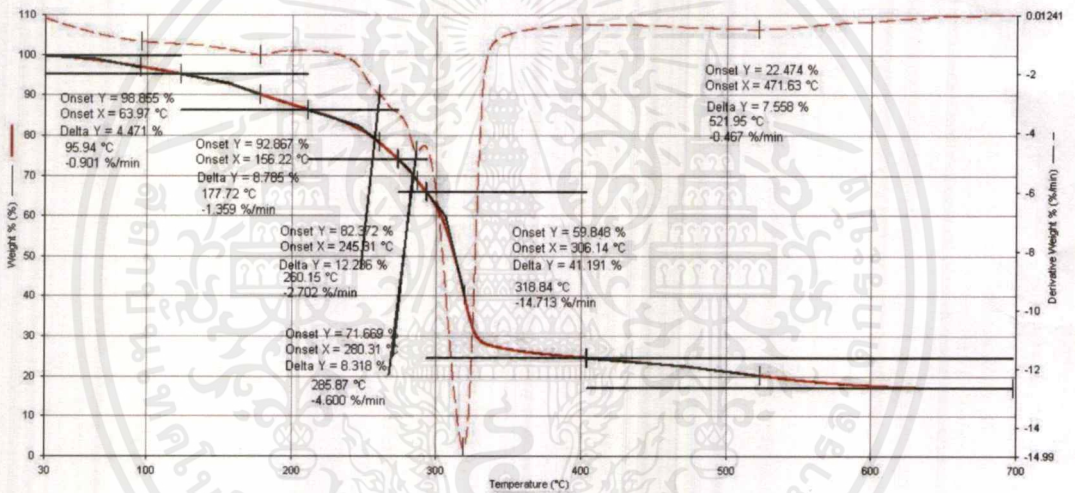
(ข)

รูปที่ จ.2 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งท้าวยายม่อมที่เติมอนุภาคไททาเนียมไดออกไซด์ (ก) 10 phr และ (ข) 20 phr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)

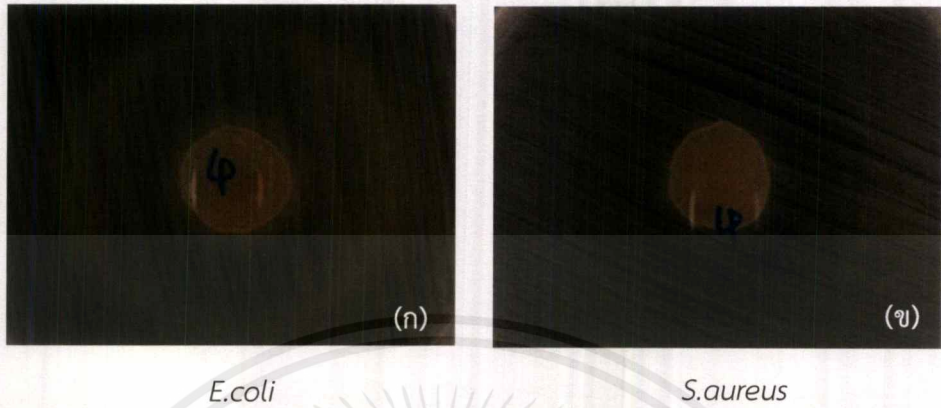


(ข)

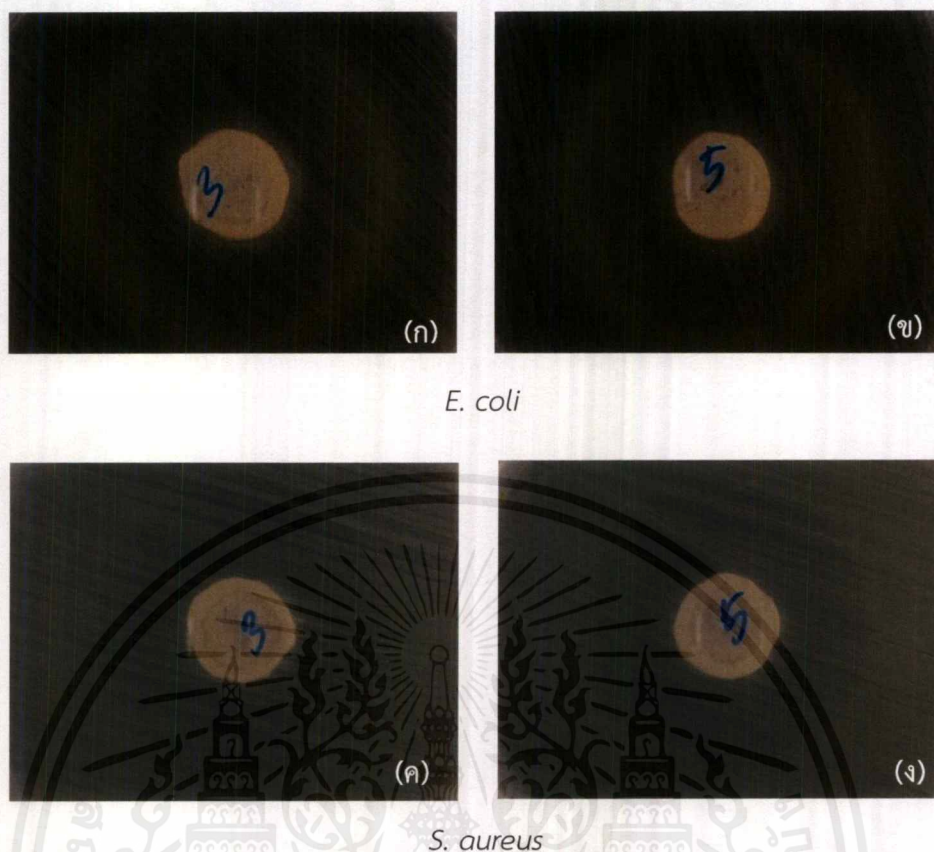
รูปที่ จ.3 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลไรเซอร์จากแป้งท้าวยายม่อมที่เติมอนุภาคซิงค์ออกไซด์ (ก) 10 phr และ (ข) 20 phr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

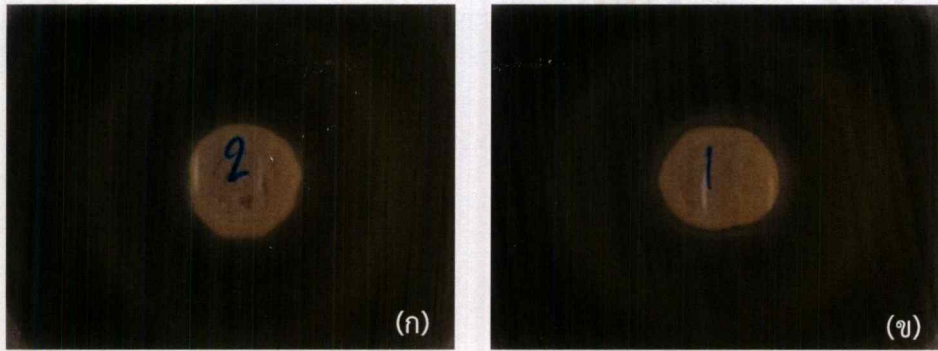
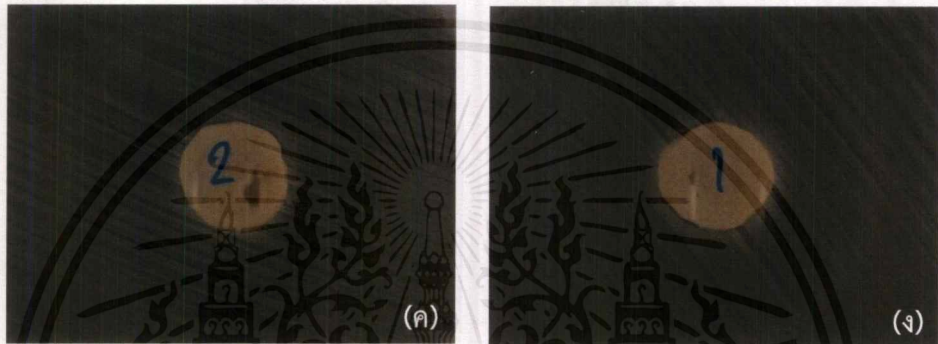
ภาคผนวก ฉ



รูปที่ ฉ.1 ระยะการต้านเชื้อแบคทีเรียของชิ้นงานแป่งทำวยายม่อมที่ไม่ได้เติมอนุภาคโลหะออกไซด์ (TPAS) ต่อ (ก) แบคทีเรียแกรมลบ *E.coli* และ (ข) แบคทีเรียแกรมบวก *S.aureus*



รูปที่ ๑.๒ ระยะการดำเนิเชื้อแบคทีเรียของเทอร์โมพลาสติกสตาตาร์ชจากแป้งท้าวยายม่อมที่เติมอนุภาคของไททาเนียมไดออกไซด์ต่อแบคทีเรียแกรมลบ *E.coli* และแบคทีเรียแกรมบวก *S.aureus* (ก), (ค) TPAS/10TiO₂ และ (ข), (ง) TPAS/20TiO₂

*E. coli**S.aureus*

รูปที่ ๓.3 แสดงระยะการต้านเชื้อแบคทีเรียของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งท้าวยาย่มอ่มที่เติมอนุภาคซิงค์ออกไซด์ต่อแบคทีเรียแกรมลบ *E.coli* และแบคทีเรียแกรมบวก *S.aureus* (ก), (ค) TPAS/10ZnO และ (ข), (ง) TPAS/20ZnO



งานทะเบียนคณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

คำรับรองเล่มโครงการพิเศษ

วันที่ 24 เดือน มิถุนายน พ.ศ 2562

ข้าพเจ้า นาย ธนายุทธ จรุงโรจน์บวร รหัสประจำตัว 58050485

นางสาว หทัยทิพย์ ธนทรัพย์ตระกูล รหัสประจำตัว 58050568

นักศึกษาหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม ภาควิชาเคมี ขอรับรองว่าโครงการ
พิเศษ เรื่อง

ชื่อภาษาไทย การปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาarch จากแป้งท้าวยายม่อมด้วย
ไททาเนียมไดออกไซด์และซิงค์ออกไซด์

ชื่อภาษาอังกฤษ PROPERTIES MODIFICATION OF THERMOPLASTIC ARROWROOT STARCH
BY TiO₂ AND ZnO

ปีการศึกษา 2561

เป็นผลงานวิจัยที่มีได้คัดลอกหรือละเมิดลิขสิทธิ์ของผู้อื่นและได้ผ่านการตรวจสอบความซ้ำซ้อน
เรียบร้อยแล้ว และได้แนบเอกสารการตรวจสอบการลอกเลียนงานวรรณกรรมที่ตรวจสอบจากเล่ม
โครงการพิเศษฉบับสมบูรณ์แล้ว

โปรแกรมอักขราวิสุทธิ์ 6.36%

ลงชื่อ.....ธนายุทธ.....

ลงชื่อ.....หทัยทิพย์.....

(นายธนายุทธ จรุงโรจน์บวร)

(นางสาวหทัยทิพย์ ธนทรัพย์ตระกูล)

นักศึกษา

นักศึกษา

ข้าพเจ้า ผศ. ดร. จุฑารัตน์ ปรัชญาวรรกร อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ ได้ตรวจสอบโครงการ
พิเศษนักศึกษาข้างต้น แล้ว ขอรับรองว่าเป็นผลงานวิจัยของนักศึกษาจริงและมีเนื้อหาสมบูรณ์ จึงลง
ชื่อไว้เป็นหลักฐาน

ลงชื่อ.....จุฑารัตน์.....

(รศ.ดร. จุฑารัตน์ ปรัชญาวรรกร)

อาจารย์ที่ปรึกษา