



วิทยานิพนธ์

ผลของอนุภาคโลหะออกไซด์ระดับนาโนต่อคุณสมบัติและประสิทธิภาพยืดอายุ
อาหารของบรรจุภัณฑ์พลาสติกชีวภาพที่ผลิตด้วยกระบวนการอัดรีด

**EFFECT OF METAL OXIDE NANOPARTICLE ON PROPERTIES
AND EFFICIENCY TO EXTEND SHELF LIFE OF FOOD OF
EXTRUDED BIOPLASTIC PACKAGING**

นางสาวดนยา โปธิสารัตนะ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ปีการศึกษา ๒๕๖๔

ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ปริญญา วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีการบรรจุ)

สาขาวิชา เทคโนโลยีการบรรจุ

ภาควิชา เทคโนโลยีการบรรจุและวัสดุ

เรื่อง ผลของอนุภาคโลหะออกไซด์ระดับนาโนต่อคุณสมบัติและประสิทธิภาพยืดอายุอาหารของบรรจุภัณฑ์พลาสติกชีวภาพที่ผลิตด้วยกระบวนการอัดรีด

Effect of Metal Oxide Nanoparticle on Properties and Efficiency to Extend Shelf Life of Food of Extruded Bioplastic Packaging

นามผู้วิจัย นางสาวคนยา โพธิสารัตนะ

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์ณัฐคนัย หาญการสุจริต, ปร.ด.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(อาจารย์ณัฐทิณี บำบัดสรรพโรค, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(รองศาสตราจารย์เลอพงศ์ จารุพันธ์, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ศรีจิตรา เจริญลาภนพรัตน์, Ph.D.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

ผลของอนุภาคโลหะออกไซด์ระดับนาโนต่อคุณสมบัติและประสิทธิภาพยืดอายุอาหารของบรรจุภัณฑ์พลาสติกชีวภาพที่ผลิตด้วยกระบวนการอัดรีด

Effect of Metal Oxide Nanoparticle on Properties and Efficiency to Extend Shelf Life of Food of Extruded Bioplastic Packaging

โดย

นางสาวคนยา โพธิ์สารัตนะ

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีการบรรจุ)

ปีการศึกษา 2564

คณา โพรซาร์ตนะ : ผลของอนุภาคโลหะออกไซด์ระดับนาโนต่อคุณสมบัติและประสิทธิภาพ
 ยืดอายุอาหารของบรรจุภัณฑ์พลาสติกชีวภาพที่ผลิตด้วยกระบวนการอัดรีด ปริญญาวิทยาศาสตร
 มหบัณฑิต (เทคโนโลยีการบรรจุ) สาขาวิชาเทคโนโลยีการบรรจุ ภาควิชาเทคโนโลยีการบรรจุ
 และวัสดุ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รองศาสตราจารย์ณัฐคนัย หาญการสุจริต, ปร.ด.

ปีการศึกษา 2564

การผลิตพลาสติกชีวภาพทั่วโลกมีปริมาณเพิ่มขึ้นทุกปีเนื่องจากประเด็นด้าน
 สิ่งแวดล้อม และขยะจากพลาสติก อย่างไรก็ตามพลาสติกชีวภาพมีสมบัติที่ด้อยกว่าพลาสติกฐาน
 ปิโตรเลียมที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของอนุภาคโลหะ
 ออกไซด์ระดับนาโนต่อคุณสมบัติของฟิล์มพลาสติกย่อยสลายทางชีวภาพที่ผลิตด้วย
 กระบวนการอัดรีดและประสิทธิภาพในการรักษาคุณภาพและยืดอายุการเก็บรักษาอาหาร ใน
 งานวิจัยนี้ใช้พอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลทผสมร่วมกับเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชและ
 โลหะออกไซด์ชนิดไทเทเนียมไดออกไซด์ ซิงค์ออกไซด์ และซิลิกอนไดออกไซด์และขึ้นรูปด้วย
 กระบวนการอัดรีดเป่าฟิล์ม จากการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของฟิล์มด้วยกล้องจุลทรรศน์
 อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมพบว่าการเติมโลหะออกไซด์มี
 แนวโน้มส่งเสริมการหลอมเหลวของพอลิเมอร์แต่เพิ่มความไม่เข้ากันของเมทริกซ์และรูพรุน
 ขนาดเล็กทำให้สภาพการซึมผ่านได้ของไอน้ำและแก๊สออกซิเจนของฟิล์มเพิ่มขึ้น ฟิล์มที่เติม
 ซิลิกอนไดออกไซด์และไทเทเนียมไดออกไซด์ร้อยละ 1 และ 5 ให้ผลเสริมความต้านทานแรงดึง
 ยืดของฟิล์มเนื่องจากการกระจายตัวที่ดีของอนุภาคและอันตรกิริยาที่ติระหว่างโลหะออกไซด์กับ
 เมทริกซ์พอลิเมอร์ ฟิล์มที่เติมซิงค์ออกไซด์มีค่าโมดูลัสสูงที่สุดแต่ยังคงต่ำกว่าขีดจำกัดตาม
 มาตรฐาน นอกจากนี้ฟิล์มที่เติมไทเทเนียมไดออกไซด์และซิงค์ออกไซด์ปรากฏสมบัติด้าน
 เชื้อจุลินทรีย์ในเนื้อหุบค และสามารถยืดอายุเนื้อหุบคได้มากกว่า 12 วัน และฟิล์มที่เติม
 ไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถชะลอการสุกของกล้วยหอมได้จากสมบัติการเร่งด้วยแสงของ
 ไทเทเนียมไดออกไซด์และซิงค์ออกไซด์ ดังนั้นการผสมโลหะออกไซด์ร่วมกับพลาสติกชีวภาพ
 ด้วยกระบวนการอัดรีดจึงเป็นหนึ่งวิธีที่มีศักยภาพสำหรับการผลิตบรรจุภัณฑ์แอคทีฟที่สามารถ
 ย่อยสลายทางชีวภาพ

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Danaya Phothisarattana : Effect of Metal Oxide Nanoparticle on Properties and Efficiency to Extend Shelf Life of Food of Extruded Bioplastic Packaging. Master of Science (Packaging Technology), Major Field: Packaging Technology, Department of Packaging and Materials Technology.

Thesis Advisor: Associate Professor Nathdanai Harnkarnsujarit, Ph.D.

Academic Year 2021

Global production of bioplastic has increased due to environmental issue. However, bioplastics still have lower properties than conventional petroleum based non-biodegradable plastics. This research aims to investigate effect of metal oxide nanoparticle on morphology thermal properties and efficiency to extend shelf life of food. In this research, poly (butylene adipate-co-terephthalate) (PBAT) was blended with thermoplastic starch (TPS) containing metal oxide nano particles (titanium dioxide (TiO_2), zinc oxide (ZnO) and silicon dioxide (SiO_2)) via extrusion and blown films. Microstructure of films were investigated using scanning electron microscope (SEM) and atomic force microscopy (AFM). The result showed that incorporated metal oxide nano particles tend to enhance melting of polymer but increased incompatibility between polymer matrices. An increased micro pore increased water vapor and oxygen permeability (WVP and OP). Incorporated SiO_2 and 1 and 5% of TiO_2 increased tensile strength due to uniform dispersion of metal oxide nano particle and good interaction between polymer matrices and surface of metal oxide. ZnO show highest specific migration of metal; however, the levels of Zn migration were still lower than limit by regulation. Films with ZnO and TiO_2 present photocatalytic property which increased shelf-life of packaged meat and banana due to enhanced antimicrobial functions and ethylene scavenging activity, respectively. Accordingly, incorporation of metal oxide into bioplastic via extrusion process potentially produces biodegradable active packaging.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

____ / ____ / ____

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ รศ.ดร.ณัฐคนัย หาญการสุจริต อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก และ อ.ณัฐทิณี บำบัดสรรพโรค อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษาและสนับสนุนในการทำวิจัยตลอดจนการตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนเสร็จสิ้นสมบูรณ์ และขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ภาควิชาเทคโนโลยีการบรรจุและวัสดุ และขอขอบคุณนิสิตปริญญาโทและปริญญาเอกภาควิชาเทคโนโลยีการบรรจุและวัสดุและเจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการที่ได้ให้ความรู้ข้อแนะนำในการแก้ไขข้อบกพร่อง ตลอดจนให้ความช่วยเหลือและสนับสนุนตลอดการทำวิจัย

คนยา โพธิสารัตนะ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ง
กิตติกรรมประกาศ	จ
สารบัญ	ฉ
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญภาพ	ฎ
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
1. พลาสติกชีวภาพ (bioplastic)	4
1.1 เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (thermoplastic starch, TPS)	6
1.2 พอลิบิวทิลีนอะดิเพต-โค-เทเรฟทาเลท (poly(butylene adipate-co-terephthalate), PBAT)	8
2. โลหะออกไซด์ (metal oxide)	10
3. การเสื่อมเสียของอาหาร (food deterioration)	14
3.1 เนื้อสัตว์	15
3.2 ผักและผลไม้	16
4. งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตบรรจุภัณฑ์ที่เติม โลหะออกไซด์กับคุณภาพอาหาร	17
4.1 โครงสร้างระดับจุลภาค	21
4.2 สมบัติเชิงกล	21
4.3 สภาพผิวของพื้นผิวฟิล์ม	22

4.4 สมบัติการป้องกันแก๊สและไอน้ำ.....	23
4.5 สมบัติทางความร้อนและปริมาณผลึก.....	23
4.6 การป้องกันการส่องผ่านของแสงยูวี	24
4.7 การประยุกต์ใช้ฟิล์ม/สารเคลือบคอมโพสิตกับอาหาร	24
4.7.1 ผลไม้.....	25
ไทเทเนียมไดออกไซด์	25
ซิงค์ออกไซด์.....	27
ซิลิคอนออกไซด์	28
4.7.2 เนื้อสัตว์สด	29
4.7.3 ผลิตภัณฑ์แปรรูป	29
อุปกรณ์และวิธีการ	31
อุปกรณ์.....	31
วิธีการ	33
1. การขึ้นรูปฟิล์มพลาสติกเทอร์โมพลาสติกสตาบิลไรซ์ผสมโลหะออกไซด์และพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท	33
2. การวิเคราะห์สมบัติเม็ดพลาสติก.....	33
2.1 คำนีการหลอมไหลของเม็ดพลาสติก	33
3. การวิเคราะห์สมบัติฟิล์ม	33
3.1 สเปกตรัมการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของฟิล์ม	33
3.2 โครงสร้างจุลภาคของฟิล์ม	34
3.3 สภาพพื้นผิวระดับจุลภาคของฟิล์ม.....	35
3.4 สมบัติเชิงกล	35
3.5 สมบัติการส่องผ่านของแสง.....	35
3.6 สมบัติการป้องกันการซึมผ่านของไอน้ำ.....	35

3.8 มุมสัมผัสหยดน้ำบนพื้นผิว.....	36
3.9 สมบัติเชิงกลพลวัต โดยตัดตัวอย่างขนาด.....	36
3.10 ไมเกรชันจำเพาะของโลหะ.....	36
4. การศึกษาประสิทธิภาพของฟิล์มในการรักษาคุณภาพอาหาร	37
4.1 การศึกษาประสิทธิภาพของฟิล์มในการรักษาคุณภาพเนื้อสัตว์.....	37
4.2 การศึกษาประสิทธิภาพของฟิล์มในการรักษาคุณภาพผลไม้.....	37
5. การวิเคราะห์ทางสถิติ	37
ผลและวิจารณ์.....	38
1. ดัชนีการหลอมไหลของเม็ดพลาสติก	38
2. ลักษณะปรากฏและสมบัติการส่องผ่านของแสงของฟิล์ม	39
3. สเปกตรัมการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของฟิล์ม	41
4. โครงสร้างจุลภาคของฟิล์ม	48
5. สภาพความขรุขระพื้นผิวของฟิล์ม.....	52
6. สมบัติเชิงกล	54
7. สมบัติป้องกันการซึมผ่านของแก๊สและไอน้ำ.....	59
8. ค่ามุมสัมผัสหยดน้ำ.....	59
9. อุณหภูมิรีแกล็กเซชันเชิงกล	62
10. ไมเกรชันจำเพาะ	65
11. การประยุกต์ใช้ฟิล์มเป็นบรรจุภัณฑ์เนื้อสัตว์.....	68
12. การประยุกต์ใช้ฟิล์มเป็นบรรจุภัณฑ์ผลไม้.....	70
สรุปและข้อเสนอแนะ	72
สรุป	72
ข้อเสนอแนะ.....	72
เอกสารและสิ่งอ้างอิง.....	74

ประวัติการศึกษา และการทำงาน83



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 รายชื่อสารแอกทีฟที่เกี่ยวข้องและเงื่อนไขการใช้ในวัสดุสัมผัสอาหารและวัสดุแอกทีฟที่สัมผัสอาหาร.....	14
ตารางที่ 2 ปัจจัยการเสื่อมเสียหลักของอาหารจากการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ กิจกรรมของเอนไซม์ ปฏิกริยาทางเคมี กายภาพ และแรงเชิงกล.....	15
ตารางที่ 3 ส่วนประกอบของกล้ามเนื้อสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม.....	16
ตารางที่ 4 งานวิจัยก่อนหน้าที่เกี่ยวข้องกับพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพลาสติกชีวภาพกับโลหะออกไซด์.....	18
ตารางที่ 5 งานวิจัยก่อนหน้าที่ประยุกต์ใช้พอลิเมอร์คอมโพสิตกับโลหะออกไซด์สำหรับการบรรจุอาหาร.....	19
ตารางที่ 6 สัดส่วนโดยมวลของสตาร์ช กลิเซอรอล และโลหะออกไซด์.....	34
ตารางที่ 7 ค่าไมเกรชันของซิลิโคนในอาหารจำลองของฟิล์มพอลิบีวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลทและเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชเบลนด์ผสมซิลิโคนไดออกไซด์.....	66

1943

สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่ 1 ประเภทของพลาสติกแบ่งตามแหล่งวัตถุดิบและความสามารถในการย่อยสลาย	5
ภาพที่ 2 ชนิดของกลไกการย่อยสลายตามธรรมชาติ	6
ภาพที่ 3 โครงสร้างโมเลกุลของสตาร์ช (ก) อะไมโลส และ (ข) อะไมโลเพกติน	7
ภาพที่ 4 การสังเคราะห์สตาร์ชเอเชียเตดด้วยปฏิกิริยาอะซิติลเลชัน	8
ภาพที่ 5 การสังเคราะห์พอลิเมอร์พอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท	9
ภาพที่ 6 กลไกการเกิดอนุมูลอิสระจากสมบัติการเร่งด้วยแสงของไทเทเนียมไดออกไซด์	11
ภาพที่ 7 กลไกการฆ่าเชื้อของอนุมูลอิสระของหมู่ไฮดรอกซิลโดยมีอนุภาคซิลเวอร์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา	12
ภาพที่ 8 ลักษณะปรากฏของกล้วยในบรรจุภัณฑ์ที่ไม่ใส่แผ่นฟิล์ม ใส่แผ่นฟิล์มคาร์บอนซีเมทิลเซลลูโลส แผ่นฟิล์มคอมโพสิตกับไทเทเนียมไดออกไซด์ และแผ่นฟิล์มผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับคอปเปอร์	25
ภาพที่ 9 ลักษณะปรากฏของมะเขือเทศราชินีที่ไม่ถูกบรรจุด้วยฟิล์ม (หมายเลข 0) ห่อด้วยฟิล์มพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท (หมายเลข 1) และห่อด้วยฟิล์มคอมโพสิต (หมายเลข 2)	26
ภาพที่ 10 ลักษณะปรากฏขององุ่นเขียวหลังการเก็บรักษา 9 วันที่ถูกบรรจุในฟิล์ม (ก) พอลิเอทิลีน (ข) อาการ์ (ค) อาการ์ผสมซิงค์ออกไซด์ร้อยละ 2 และ (ง) อาการ์ผสมซิงค์ออกไซด์ร้อยละ 4	27
ภาพที่ 11 ลักษณะปรากฏของผลพุทราที่ถูกเคลือบด้วย (ก) ไคโตซาน/โซเดียมแอลจินेट (ข) ไคโตซาน/โซเดียมแอลจินेटผสมซิลิโคนไดออกไซด์ และ (ค) กรดแอบไซซิก	29
ภาพที่ 12 ฉันทนาการหลอมไหลของเม็ดพลาสติกพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลทและเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชเบลนด์ผสมโลหะออกไซด์ (ก) ไทเทเนียมไดออกไซด์ (ข) ซิงค์ออกไซด์ และ (ค) ซิลิโคนไดออกไซด์	38
ภาพที่ 13 ลักษณะปรากฏของฟิล์มพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลทและเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชเบลนด์ผสมโลหะออกไซด์ขณะขึ้นรูป	40

ภาพที่ 14 ร้อยละการส่องผ่านของแสงของฟิล์มพอลิไบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลทและเทอร์โมพลาสติกสตาโรลเบลนด์ผสมโลหะออกไซด์ชั้นรูป (ก) โทเทเนียมไดออกไซด์ (ข) ซิงค์ออกไซด์ และ (ค) ซีลิกอนไดออกไซด์.....41

ภาพที่ 15 สเปกตรัมการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของฟิล์มพอลิไบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลทและเทอร์โมพลาสติกสตาโรลเบลนด์ผสมโลหะออกไซด์ (ก) โทเทเนียมไดออกไซด์ (ข) ซิงค์ออกไซด์ และ (ค) ซีลิกอนไดออกไซด์46

ภาพที่ 16 อัตราส่วนของสเปกตรัมการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของแต่ละเลขคลื่นของฟิล์มพอลิไบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลทและเทอร์โมพลาสติกสตาโรลเบลนด์ผสมโลหะออกไซด์ (ก) โทเทเนียมไดออกไซด์ (ข) ซิงค์ออกไซด์ และ (ค) ซีลิกอนไดออกไซด์47

ภาพที่ 17 โครงสร้างจุลภาคของฟิล์มพอลิไบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลทและเทอร์โมพลาสติกสตาโรลเบลนด์ผสมโทเทเนียมไดออกไซด์ (ก) บริเวณพื้นผิว และ (ข) บริเวณพื้นที่ตัดขวาง.....50

ภาพที่ 18 โครงสร้างจุลภาคของฟิล์มพอลิไบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลทและเทอร์โมพลาสติกสตาโรลเบลนด์ผสมซิงค์ออกไซด์ (ก) บริเวณพื้นผิว และ (ข) บริเวณพื้นที่ตัดขวาง51

ภาพที่ 19 โครงสร้างจุลภาคของฟิล์มพอลิไบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลทและเทอร์โมพลาสติกสตาโรลเบลนด์ผสมซีลิกอนไดออกไซด์ (ก) บริเวณพื้นผิว และ (ข) บริเวณพื้นที่ตัดขวาง52

ภาพที่ 20 สภาพความขรุขระของพื้นผิวของฟิล์มพอลิไบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลทและเทอร์โมพลาสติกสตาโรลเบลนด์ผสมโลหะออกไซด์ (ก) โทเทเนียมไดออกไซด์ (ข) ซิงค์ออกไซด์ และ (ค) ซีลิกอนไดออกไซด์.....54

ภาพที่ 21 สมบัติเชิงกลของฟิล์มพอลิไบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลทและเทอร์โมพลาสติกสตาโรลเบลนด์ผสมโทเทเนียมไดออกไซด์ (ก) ความต้านทานแรงดึง (TS) (ข) ร้อยละการยืดตัวก่อนขาด (EB) และ (ค) โมดูลัสของยัง (YM)56

ภาพที่ 22 สมบัติเชิงกลของฟิล์มพอลิไบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลทและเทอร์โมพลาสติกสตาโรลเบลนด์ผสมซิงค์ออกไซด์ (ก) ความต้านทานแรงดึง (TS) (ข) ร้อยละการยืดตัวก่อนขาด (EB) และ (ค) โมดูลัสของยัง (YM)57

ภาพที่ 23 สมบัติเชิงกลของฟิล์มพอลิไบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลทและเทอร์โมพลาสติกสตาโรลเบลนด์ผสมซีลิกอนไดออกไซด์ (ก) ความต้านทานแรงดึง (TS) (ข) ร้อยละการยืดตัวก่อนขาด (EB) และ (ค) โมดูลัสของยัง (YM)58

ภาพที่ 24 สภาพการซึมผ่านได้ของแก๊สออกซิเจน (OP) สภาพการซึมผ่านได้ของไอน้ำ (WVP) และค่ามุมสัมผัสหยดน้ำ (CA) ของฟิล์มพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลทและเทอร์โมพลาสติกสตาอริลเบลนด์ผสมโลหะออกไซด์ (ก) ไทเทเนียมไดออกไซด์ (ข) ซิงค์ออกไซด์ และ (ค) ซิลิกอนไดออกไซด์	61
ภาพที่ 25 การรีแเล็กเซชันเชิงกลของฟิล์มพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลทและเทอร์โมพลาสติกสตาอริลเบลนด์ผสมโลหะออกไซด์ (ก) ไทเทเนียมไดออกไซด์ (ข) ซิงค์ออกไซด์ และ (ค) ซิลิกอนไดออกไซด์	64
ภาพที่ 26 โมดูลของโลหะในอาหารจำลองของฟิล์มพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลทและเทอร์โมพลาสติกสตาอริลเบลนด์ผสมโลหะออกไซด์ (ก) ไทเทเนียมไดออกไซด์ และ (ข) ซิงค์ออกไซด์	67
ภาพที่ 27 ลักษณะปรากฏของเนื้อหุ้มบดที่บรรจุในฟิล์มพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลทและเทอร์โมพลาสติกสตาอริลเบลนด์ผสมโลหะออกไซด์ชนิดไทเทเนียมไดออกไซด์และซิงค์ออกไซด์ และบรรจุเข้าในถุงสุญญากาศระหว่างการเก็บรักษาระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 วัน	69
ภาพที่ 28 จำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมด (TVC) ในเนื้อหุ้มบดที่บรรจุในฟิล์มพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลทและเทอร์โมพลาสติกสตาอริลเบลนด์ผสมโลหะออกไซด์ชนิดไทเทเนียมไดออกไซด์และซิงค์ออกไซด์ และบรรจุเข้าในถุงสุญญากาศระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 วัน	70
ภาพที่ 29 ลักษณะปรากฏของกลิ่นหอมซึ่งถูกบรรจุในฟิล์มพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลทและเทอร์โมพลาสติกสตาอริลเบลนด์ และพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลทและเทอร์โมพลาสติกสตาอริลเบลนด์ผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ร้อยละ 3 และ 5	71

ผลของอนุภาคโลหะออกไซด์ระดับนาโนต่อคุณสมบัติและประสิทธิภาพยืดอายุอาหาร
ของบรรจุภัณฑ์พลาสติกชีวภาพที่ผลิตด้วยกระบวนการอัดรีด

EFFECT OF METAL OXIDE NANOPARTICLE ON PROPERTIES AND
EFFICIENCY TO EXTEND SHELF LIFE OF FOOD OF EXTRUDED
BIOPLASTIC PACKAGING

คำนำ

ในสถานการณ์ปัจจุบันความตระหนักถึงความรับผิดชอบต่อสังคมและสิ่งแวดล้อมได้ถูกยกระดับสู่บรรทัดฐานในภาคอุตสาหกรรมหลายแขนงซึ่งส่งผลต่อภาพลักษณ์ในการประกอบธุรกิจ รวมถึงการเลือกซื้อสินค้าและการใช้บริการของผู้บริโภค การใช้บรรจุภัณฑ์พลาสติกฐานปิโตรเลียม โคน โจมตีอย่างหนักกว่าเป็นสาเหตุของปัญหาทางสิ่งแวดล้อม สร้างมลพิษจากการกลั่นน้ำมันดิบ การใช้แหล่งทรัพยากรวัตถุดิบที่มีอย่างจำกัด และโดยเฉพาะอย่างยิ่งขยะตกค้างในสิ่งแวดล้อม ส่งผลอย่างยิ่งต่อคุณภาพชีวิตของมนุษย์ สัตว์ป่า และสัตว์ทะเล ทำให้มาตรการด้านการใช้และการกำจัดบรรจุภัณฑ์ พลาสติกกรีไซเคิล พลาสติกชีวภาพ การใช้วัสดุทดแทนที่สามารถผลิตขึ้นใหม่ได้จากวัตถุดิบทางธรรมชาติ หรือการใช้วัสดุที่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้รับความสนใจเพื่อสร้างความยั่งยืนทางสิ่งแวดล้อม European bioplastics รายงานการเติบโตอย่างต่อเนื่องของการผลิตพลาสติกชีวภาพระดับอุตสาหกรรมทั่วโลก โดยเฉพาะการผลิตพลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ เช่น เทอร์โมพลาสติกสตาเรช พอลิบีวาทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท และพอลิบีวาทิลีนซัคซิเนต (European bioplastics, 2021)

พลาสติกฐานชีวภาพมีข้อจำกัดด้านสมบัติเชิงกล สมบัติการป้องกันการซึมผ่านและราคาที่สูงกว่าเมื่อเทียบกับพลาสติกฐานปิโตรเลียม ทำให้การใช้พลาสติกชีวภาพอาจยังไม่เป็นที่แพร่หลายนัก การผสมพลาสติกชีวภาพหลายชนิด หรือการเติมสารเติมแต่งเป็นแนวทางการปรับปรุงและเพิ่มเติมสมบัติของพลาสติกชีวภาพให้เหมาะสมกับการใช้งาน โลหะออกไซด์ขนาดนาโน เช่น ไทเทเนียมไดออกไซด์ ซิงค์ออกไซด์ และซิลิกอนไดออกไซด์ เป็นสารเติมแต่งในการผลิตพลาสติกที่มีศักยภาพในการประยุกต์ใช้กับพลาสติกชีวภาพ เนื่องจากมีความเข้ากันได้ทางชีวภาพกับร่างกาย

และบางชนิดยังมีสมบัติลดการส่องผ่านของแสงในช่วงยูวี รวมถึงต้านจุลินทรีย์ได้อย่างดีจึงเหมาะสำหรับนำมาปรับปรุงคุณภาพบรรจุภัณฑ์อาหาร

การเสื่อมคุณภาพของอาหารเป็นการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของอาหาร ทั้งในด้านโภชนาการ ความปลอดภัย และประสาทสัมผัส เช่น การเกิดสีน้ำตาลในผักและผลไม้ การเกิดกลิ่นหืนของเนื้อสัตว์ หรือกลิ่นรสที่ไม่พึงประสงค์ ซึ่งอาจมีสาเหตุเนื่องจากการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ การสูญเสียความชื้น การออกซิเดชันของไขมัน การเน่าเสียจากปริมาณของเหลวสะสมในบรรจุภัณฑ์ การชราของผักและผลไม้จากกิจกรรมของเซลล์ และการเพิ่มขึ้นของฮอว์โมนเอทิลีน บรรจุภัณฑ์จึงเป็นส่วนสำคัญในการรักษาคุณภาพและความปลอดภัยของอาหาร โดยเฉพาะบรรจุภัณฑ์แบบแอคทีฟที่เพิ่มประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ หรือควบคุมการหายใจของพืช

งานวิจัยก่อนหน้านี้ส่วนมากนิยมขึ้นรูปพลาสติกชีวภาพผสม โลหะออกไซด์ด้วยกระบวนการหล่อขึ้นรูปด้วยตัวทำละลาย (solvent casting) ซึ่งอาจไม่เหมาะสมต่อการผลิตระดับอุตสาหกรรม เกิดข้อเสียดังกล่าวที่ระเหยตัวทำละลาย ขั้นตอนยุ่งยาก และกำลังการผลิตต่ำ กระบวนการอัดรีดเป็นเทคนิคการผลิตบรรจุภัณฑ์พลาสติกในระดับอุตสาหกรรม ปราศจากตัวทำละลาย และอาศัยการหลอมวัสดุด้วยความร้อนภายใต้แรงเฉือน การเกิดโครงสร้างวัสดุ ลักษณะสัณฐานวิทยา อันตรกิริยาระหว่างสารเติมแต่งกับพอลิเมอร์ รวมถึงสมบัติฟิล์มที่ใช้เป็นบรรจุภัณฑ์ จึงมีความแตกต่างจากกระบวนการขึ้นรูปด้วยตัวทำละลาย งานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาการประยุกต์ใช้ออนุภาคโหหะออกไซด์ระดับนาโนในการปรับปรุงสมบัติของฟิล์มและประสิทธิภาพยืดอายุอาหารของพลาสติกชีวภาพซึ่งขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดรีด เพื่อเป็นข้อมูลเชิงวิชาการรองรับการผลิตในภาคอุตสาหกรรมเพื่อการจำหน่ายเชิงพาณิชย์

คนยา โปธิสารัตนะ

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาผลของอนุภาคโลหะออกไซด์ระดับนาโนต่อคุณสมบัติของฟิล์มพลาสติกย่อยสลายทางชีวภาพที่ผลิตด้วยกระบวนการอัดรีดในด้านสัณฐานวิทยา สมบัติเชิงความร้อน สมบัติบรรจุภัณฑ์ และประสิทธิภาพการต้านเชื้อจุลินทรีย์ในอาหาร

2. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของบรรจุภัณฑ์จากฟิล์มพลาสติกย่อยสลายทางชีวภาพผสมโลหะออกไซด์ระดับนาโนต่ออายุการเก็บและการเปลี่ยนแปลงคุณภาพอาหาร

การตรวจเอกสาร

1. พลาสติกชีวภาพ (bioplastic)

International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC) ได้ให้คำนิยามถึง พลาสติกชีวภาพ (bioplastic) ไว้ว่าเป็นชีวมวล หรือมอนอเมอร์ ซึ่งเป็นผลผลิตจากชีวมวลซึ่งผ่านกระบวนการเพื่อขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์สุดท้าย และสามารถขึ้นรูปด้วยการไหล นอกจากนี้พลาสติกชีวภาพ และยังลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ถึงร้อยละ 30 ถึง 70 รวมถึงสอดคล้องกับหลักการเคมีสีเขียวหรือเคมีที่ยั่งยืน (green chemistry or sustainable chemistry) ซึ่งหมายถึงการออกแบบผลิตภัณฑ์และกระบวนการทางเคมีที่ลดหรือกำจัดการใช้หรือการสร้างสารที่เป็นอันตรายต่อมนุษย์ สัตว์ พืช และสิ่งแวดล้อม โดยที่ประสิทธิภาพพลังงานควรสูงและไม่มีของเสียตกค้าง (Jeremic *et al.*, 2020; Lackner, 2015) พลาสติกชีวภาพสามารถแบ่งประเภทด้วยลักษณะ 2 ประการ (Dilkes-Hoffman *et al.*, 2019; Jariyasakoolroj *et al.*, 2020; Jeremic *et al.*, 2020) ดังภาพที่ 1 ได้แก่

1. พลาสติกฐานชีวภาพ (bio-based plastic) สามารถผลิตได้จากวัตถุดิบจากสิ่งมีชีวิต ทั้งพืช สัตว์ และแบคทีเรีย ซึ่งเป็นวัตถุดิบจากแหล่งหมุนเวียน (renewable resource) โดยสามารถแบ่งตามแหล่งที่มาของพอลิเมอร์ได้สามประเภท ได้แก่

(ก) พลาสติกที่สามารถสกัดได้จากพืชและสัตว์ได้โดยตรง เช่น สตาร์ช เซลลูโลส ไคติน ไคโตซาน และโปรตีน

(ข) พลาสติกที่ได้จากการสังเคราะห์ขึ้นจากมอนอเมอร์ที่ได้จากการวัตถุดิบทางการเกษตร เช่น พอลิแลคติกแอซิด (polylactic acid, PLA) และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (polybutylene succinate, PBS)

(ค) พลาสติกที่สามารถสกัดได้โดยตรงจากแบคทีเรีย เช่น พอลิไฮดรอกซีอัลคาโนเอต (polyhydroxyalkanoates, PHAs)

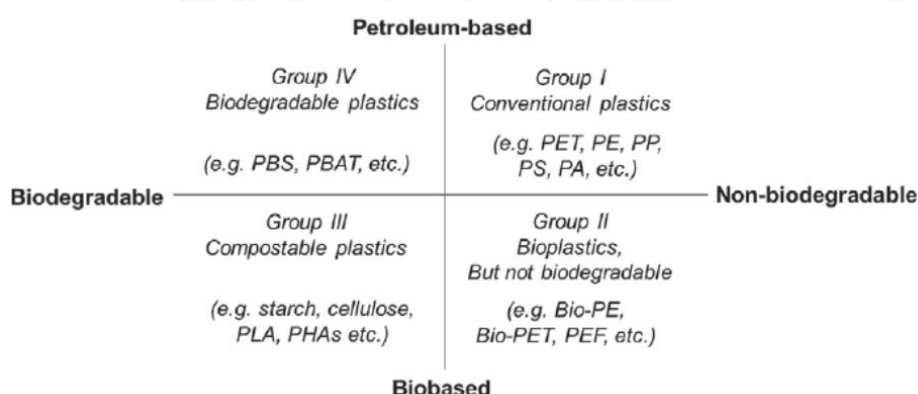
2. พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (biodegradable plastics) สามารถย่อยสลายโดยกิจกรรมของจุลินทรีย์ ในสภาวะอุณหภูมิ และความชื้นที่เหมาะสม โดยการย่อยสลายของพอลิเมอร์

นั้นขึ้นอยู่กับสองกระบวนการหลัก ได้แก่ ไฮโดรไลซิส (hydrolysis) และการออกซิเดชันทางชีวภาพ (biological oxidation) ดังภาพที่ 2 โดยมีสภาพแวดล้อม ชนิดพอลิเมอร์ และชนิดของจุลินทรีย์เป็นปัจจัยสำคัญ โดยกระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพประกอบด้วยสามกระบวนการ (Jeremic *et al.*, 2020; Luyt and Malik, 2019) ได้แก่

(ก) การเสื่อมสภาพทางชีวภาพ (biodegradation) การเจริญของจุลินทรีย์บนพื้นผิวของพอลิเมอร์ หรือภายในพอลิเมอร์ ซึ่งส่งผลให้สมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล และสมบัติเชิงเคมีของพอลิเมอร์เปลี่ยนแปลงไป

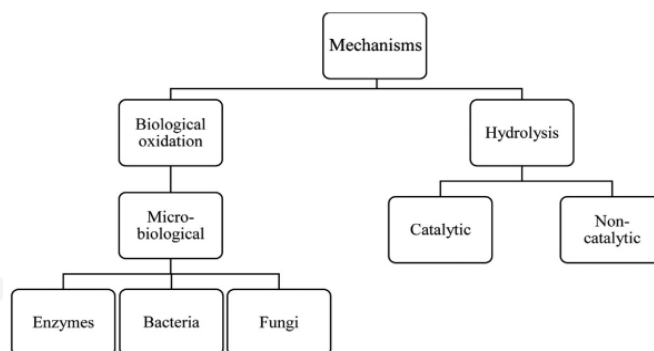
(ข) การแตกตัวทางชีวภาพ (bio fragmentation) โดยการปล่อยเอนไซม์ของจุลินทรีย์เพื่อทำลายสายโซ่พอลิเมอร์ส่งผลให้ขนาดของสายโซ่โมเลกุลเล็กลงจนเป็นมอนอเมอร์ หรือ โอลิโกเมอร์ ที่มีขนาดเล็กพอสำหรับการแพร่ผ่านผนังและเยื่อหุ้มเซลล์เข้าสู่ภายในเซลล์

(ค) การดูดซึม (assimilation) พอลิเมอร์เข้าสู่ภายในเซลล์จุลินทรีย์โดยกลไกการแพร่ผ่าน และเกิดการย่อยสลายภายในเซลล์ และได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายเป็นพลังงาน และสารประกอบขนาดเล็กที่เสถียรในธรรมชาติ (mineralization) เช่น แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สมีเทน น้ำ กลีเซอรอล และมวลชีวภาพ (biomass) เป็นต้น โดยกระบวนการย่อยสลายทางธรรมชาติจะสิ้นสุดเมื่อสารประกอบคาร์บอน แร่ธาตุ และน้ำกลับคืนสู่สิ่งแวดล้อม



ภาพที่ 1 ประเภทของพลาสติกแบ่งตามแหล่งวัตถุดิบและความสามารถในการย่อยสลาย

ที่มา: Jariyasakoolroj *et al.* (2020)



ภาพที่ 2 ชนิดของกลไกการย่อยสลายตามธรรมชาติ

ที่มา: Luyt and Malik (2019)

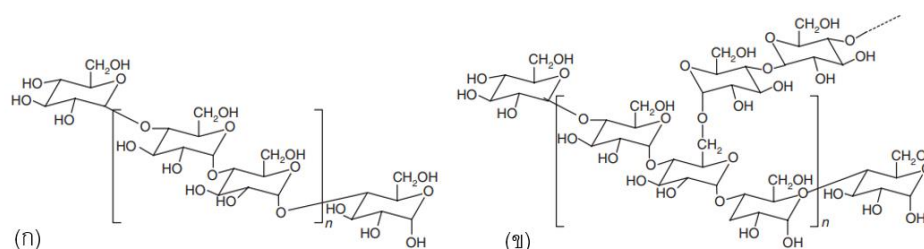
ในงานวิจัยนี้จะกล่าวถึงพลาสติกชีวภาพสองชนิด ได้แก่ เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช และพอลิ บิวทิลีนอะดิเปตเทเรฟทาเรท

1.1 เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (thermoplastic starch, TPS)

เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชเป็นพลาสติกชีวภาพที่สามารถผลิตขึ้นได้จากสตาร์ช (starch) ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่สามารถพบได้ในส่วนต่าง ๆ ของพืช เช่น เอนโดสเปิร์ม ราก ใบ และเนื้อผลไม้ โดยสะสมอยู่ในรูปแกรนูลซึ่งมีน้ำตาลกลูโคสเป็นมอนอเมอร์ เชื่อมต่อกันด้วยพันธะไกลโคซิดิก สามารถแบ่งออกได้เป็นสองประเภท คือ อะไมโลส (amylose) ซึ่งมีโครงสร้างส่วนใหญ่เป็นเส้นตรงของโมเลกุล α -(1 \rightarrow 4)-d-glucopyranosyl ที่เกิดจากการต่อกันของ เดกซ์โตรส (dextrose, d-glucose) ด้วยพันธะไกลโคซิดิกที่ตำแหน่ง α (1 \rightarrow 4) และอะไมโลเพกทิน (amylopectin) ซึ่งมีโครงสร้างเป็นแบบกิ่ง ประกอบด้วยเดกซ์โตรสซึ่งเชื่อมต่อกันด้วยพันธะไกลโคซิดิกที่ตำแหน่ง α (1 \rightarrow 4) และ 1,6-glycosidic linkage ดังภาพที่ 3 (Carvalho, 2013)

เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชผลิตจากสตาร์ชที่ผ่านกระบวนการเจลาติไนซ์ (gelatinization) ซึ่งเป็นการทำลายโครงสร้างภายใต้ความร้อนและแรงเฉือนร่วมกับพลาสติกไซเซอร์ เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชมีลักษณะเป็นพอลิเมอร์กึ่งผลึก มีหน่วยของผลึกและอสัณฐานเรียงสลับกันในอัตราส่วนที่

แตกต่างกันตามแหล่งที่มาของสตาร์ช (Tanetrungroj and Prachayawarakorn, 2015) สตาร์ชที่มีปริมาณอะไมโลสปานกลางถึงสูงจะสามารถขึ้นรูปฟิล์มได้ดีกว่าสตาร์ชที่มีปริมาณอะไมโลสต่ำเทอร์โมพลาสติกสามารถหลอมขึ้นรูปซ้ำด้วยแรงเฉือนร่วมกับความร้อนสูง 40 ถึง 160 องศาเซลเซียส การขึ้นรูปโดยเครื่องอัดรีดสามารถขึ้นรูปได้หลากหลาย สามารถผลิตเป็นฟิล์มที่สามารถบริโภคได้และสามารถย่อยสลายได้ แต่ไวต่อความชื้นและมีความหนืดเมื่อหลอมเหลวสูง จึงนิยมผสมร่วมกับพอลิเมอร์อื่น เช่น พอลิเอทิลีน (polyethylene, PE) พอลิสไตรีน (polystyrene, PS) พอลิแลคติกแอซิด (poly(lactic acid), PLA) พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (polyvinyl alcohol, PVOH, PVA) เพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการขึ้นรูปและความคงตัว ทั้งนี้ชนิดและปริมาณสารพลาสติกไซเซอร์สามารถควบคุมความอ่อนตัว การยืดตัว และความเหนียวแข็งแรงของวัสดุ (Carvalho, 2013; Jariyasakoolroj *et al.*, 2020; Tanetrungroj and Prachayawarakorn, 2015)



ภาพที่ 3 โครงสร้างโมเลกุลของสตาร์ช (ก) อะไมโลส และ (ข) อะไมโลเพกติน

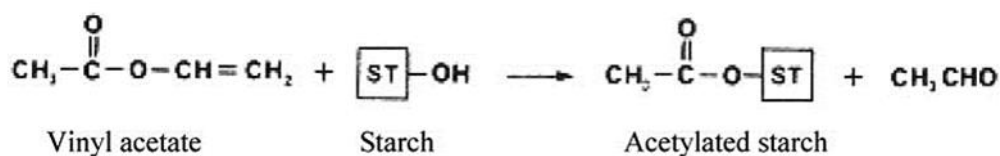
ที่มา: Carvalho (2013)

นอกจากนี้หมู่ไฮดรอกซิลในโครงสร้างของมอนอเมอร์ ทำให้เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชมีลักษณะชอบน้ำ (hydrophilic) ส่งผลให้มีคุณสมบัติต้านทานน้ำและความชื้นต่ำ แต่ต้านทานแก๊สออกซิเจนได้ดี การเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุล ทั้งภายในสตาร์ชสายโซ่เดียวกัน และต่างสายโซ่ ทำให้อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (glass transition temperature) ของอะไมโลสและอะไมโลเพกตินสูงถึง 227 องศาเซลเซียส จึงไม่สามารถหลอมขึ้นรูปได้หากไม่เติมพลาสติกไซเซอร์ เช่น กลีเซอรอล ยูเรีย ฟรุคโตส ไซลิตอล ซอร์บิทอล มัลติทอล ไกลคอล เอทานอลามีน และฟอร์มามิโด เพื่อลดแรงของพันธะไฮโดรเจนและอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพคล้ายแก้วให้สตาร์ชสามารถหลอมขึ้นรูปด้วยความร้อนได้ อย่างไรก็ตามเมื่อเก็บรักษาเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชเป็นเวลานานจะเกิดการ

ตกผลึกซ้ำทำให้มีลักษณะที่แข็งและเปราะส่งผลให้สมบัติเชิงกลลดลง (Carvalho, 2013; Mina *et al.*, 2010)

นอกจากนี้ยังมีการดัดแปร โครงสร้างของสตาร์ชเพื่อปรับปรุงสมบัติให้เหมาะแก่การใช้งาน ทั้งการดัดแปรทางกายภาพ และการดัดแปรทางเคมี เช่น สตาร์ชไฮดรอกซีโพรพิล (hydroxypropyl starch) สตาร์ชแอซีเทต (acetate starch) และสตาร์ชคาร์บอกซีเมทิล (carboxymethyl starch) (Mina *et al.*, 2010; Raina *et al.*, 2006) ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้สตาร์ชดัดแปรชนิดสตาร์ชแอซีเทต

สตาร์ชแอซีเทต (acetylated starch) เป็นสตาร์ชดัดแปร (modified starch) ที่ผ่านกระบวนการทางเคมีที่เรียกว่าอะซิทิเลชัน (acetylation) โดยการแทนที่หมู่ไฮดรอกซิลของมอนอเมอร์กลูโคส ให้กลายเป็นหมู่แอซีทิล (acetyl, CH₃CO-) ดังภาพที่ 4 โดยขึ้นกับแหล่งที่มาของสตาร์ช ระดับการแทนที่ (degree of substitution, DS) และอัตราส่วนระหว่างอะไมโลส และอะไมโลเพกติน การดัดแปรสตาร์ชด้วยอะซิทิเลชันช่วยลดความเป็นผลึกของสตาร์ช ส่งผลต่อคุณสมบัติเชิงกลโดยมีความต้านทานแรงดึงลดลงและมีการยืดตัวเพิ่มขึ้น ดัดแปลงคุณสมบัติเชิงความร้อนโดยลดอุณหภูมิการสลายตัวและเพิ่มความเสถียรทางความร้อน สตาร์ชที่ผ่านการดัดแปรจะมีคุณสมบัติในการละลายน้ำดีขึ้น มีปริมาณความชื้นมากขึ้น และสามารถย่อยสลายได้เร็วกว่าสตาร์ชที่ไม่ผ่านการดัดแปร (Colussi *et al.*, 2017; Colussi *et al.*, 2014)



ภาพที่ 4 การสังเคราะห์สตาร์ชแอซีเทตด้วยปฏิกิริยาอะซิทิเลชัน

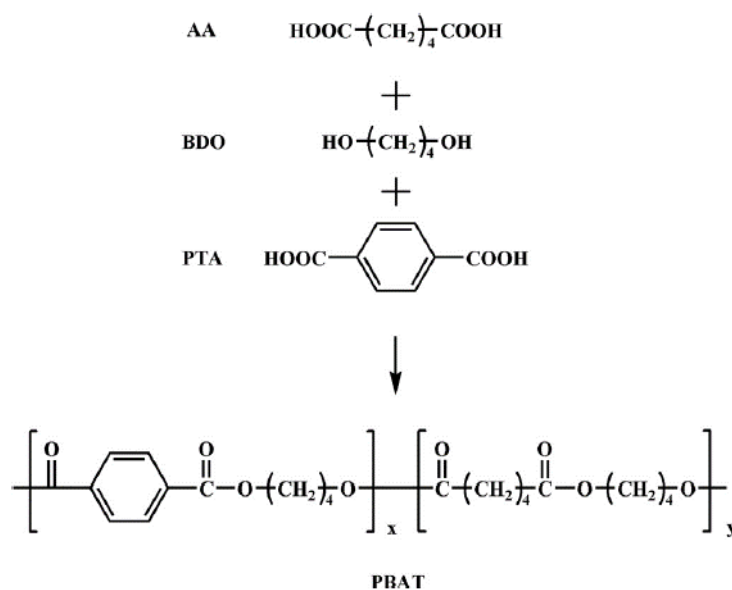
ที่มา: Raina *et al.* (2006)

1.2 พอลิบิวทิลีนอะดิเพต-โค-เทเรฟทาเลต (poly(butylene adipate-co-terephthalate), PBAT)

พอลิบิวทิลีนอะดิเพต-โค-เทเรฟทาเลตเป็นพอลิเมอร์สังเคราะห์ได้จากวัสดูฐานปิโตรเลียม โดยมีโครงสร้างกิ่งผลึกที่มีส่วนประกอบของอะโรมาติก-อะลิฟาติก โค พอลิเอสเทอร์ สามารถ

สังเคราะห์ได้จากปฏิกิริยาควบแน่นของบิวเทนไดออล (butanediol, BDO) กรดอะดิปิก (adipic acid, AA) และกรดเทเรพทาติก (terephthalic acid, PTA) ดังภาพที่ 5 (Jian *et al.*, 2020; Venkatesan and Rajeswari, 2016)

พอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรพทาเลทเป็นพลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ มีการเข้ากันได้ทางชีวภาพกับร่างกาย (biocompatibility) มีสมบัติเชิงกลที่ดีเยี่ยม มีความเหนียวและยืดหยุ่นสูง มีความต้านทานน้ำดี และยังสามารถขึ้นรูปได้หลากหลายแต่มีอัตราการก่อผลึกที่ช้า ความต้านทานแรงดึงต่ำ และสมบัติการป้องกันแก๊สที่ไม่ดี (Cao *et al.*, 2020; Venkatesan and Rajeswari, 2016, 2017) ในปัจจุบันพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรพทาเลทถูกใช้ในอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์และแผ่นพลาสติกคลุมดิน (Jian *et al.*, 2020)



ภาพที่ 5 การสังเคราะห์พอลิเมอร์พอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรพทาเลท

ที่มา: Jian *et al.* (2020)

2. โลหะออกไซด์ (metal oxide)

โลหะออกไซด์ คือ ของแข็งผลึกที่มีไอออนบวกของโลหะและไอออนลบของออกไซด์ โดยทั่วไปจะทำปฏิกิริยากับน้ำเพื่อสร้างเบสหรือทำปฏิกิริยากับกรดเพื่อสร้างเกลือ มีบทบาทสำคัญในด้านเคมี ฟิสิกส์ วัสดุศาสตร์ มีการใช้โลหะออกไซด์อย่างแพร่หลายในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ การฟื้นฟูสิ่งแวดล้อม และอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์อาหาร (Fernández-Garcia and Rodriguez, 2007; Oskam, 2006)

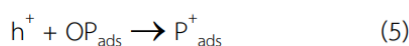
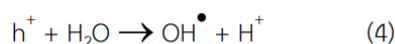
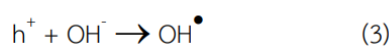
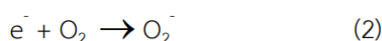
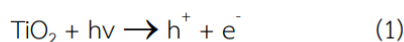
มีการใช้โลหะออกไซด์ในอุตสาหกรรมการผลิตบรรจุภัณฑ์อาหารเนื่องจากเป็นสารเสริมแรงที่ให้คุณสมบัติที่เชื่อมโยง สามารถเพิ่มสมบัติการป้องกันแก๊สและไอน้ำได้อย่างดี มีราคาไม่แพง เป็นวัสดุที่มีการเข้ากันได้ทางชีวภาพกับร่างกาย ปลอดภัย มีเสถียรทางเคมีและความร้อน และการใช้อนุภาคออกไซด์ในระดับนาโนซึ่งมีขนาดอยู่ในช่วง 1 ถึง 100 นาโนเมตร จะให้ผลการปรับปรุงสมบัติที่แตกต่างไปจากอนุภาคระดับไมโคร เนื่องจากการมีพื้นที่ผิวที่มากกว่า ส่งผลให้เกิดอันตรกิริยาหรือปฏิกิริยาที่มากกว่า (Garcia *et al.*, 2018; Ostafińska *et al.*, 2017) ในงานวิจัยนี้จะกล่าวถึงโลหะออกไซด์สามประเภท ได้แก่ ไทเทเนียมไดออกไซด์ ซิงค์ออกไซด์ และซิลิกอนไดออกไซด์

นอกจากสมบัติทั่วไปของวัสดุคอมโพสิตเมื่อผสมกับโลหะออกไซด์ดังกล่าวข้างต้นแล้ว ไทเทเนียมไดออกไซด์และซิงค์ออกไซด์ยังสามารถป้องกันการส่องทะลุผ่านของรังสียูวีเอ ยูวีบี และยูวีซีรวมถึงมีความทึบแสงจึงถูกใช้กันอย่างกว้างขวางในหลายอุตสาหกรรม เช่น ใช้เป็นสารให้สีในอุตสาหกรรมครีมนันแดด อุตสาหกรรมอาหาร และอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์ (Abdullah *et al.*, 2020; Al-Tayyar, 2020; Cao *et al.*, 2020; Garcia *et al.*, 2018) และซิลิกอนไดออกไซด์เป็นสารที่มีโมเลกุลขนาดเล็กแต่มีพื้นที่ผิวจำเพาะขนาดใหญ่ มีพลังงานพื้นผิวสูง มีพันธะเคมีไม่อิ่มตัว มีหมู่ไฮดรอกซิลบนพื้นผิวทำให้สามารถกระจายตัวได้ง่ายในเมทริกซ์พอลิเมอร์ (Al-Tayyar, 2020; Garcia *et al.*, 2018; Hassannia-Kolaee *et al.*, 2016)

นอกจากนี้ไทเทเนียมไดออกไซด์และซิงค์ออกไซด์ยังมีสมบัติการทำความสะอาดด้วยตนเอง (self-cleaning) เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาเร่งด้วยแสง (photocatalyst) โดยเมื่ออยู่ภายใต้แสงโดยเฉพาะแสงยูวีดังกล่าวในภาพที่ 6 โดยจะเกิดการกระตุ้นให้โมเลกุลน้ำและออกซิเจนผลิตอนุมูลอิสระของหมู่ไฮดรอกซิล ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และประจุลบของซูเปอร์ออกไซด์แอนไอออน

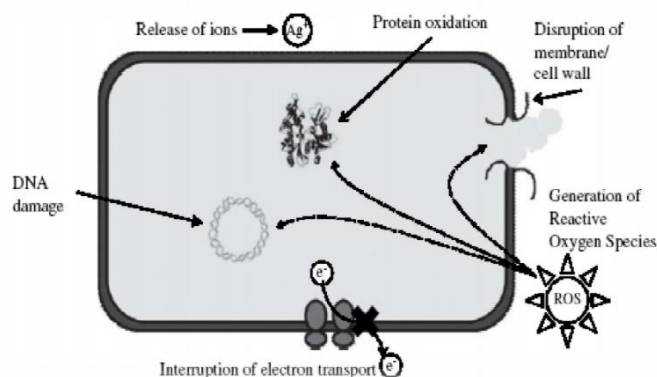
ซึ่งเป็นสารออกไซด์ที่รุนแรงส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันทำลายโมเลกุลอินทรีย์ เช่น เอทีลิน รวมถึงทำลายเชื้อหุ้มเซลล์และฆ่าจุลินทรีย์ได้ดังภาพที่ 7 (Ezati *et al.*, 2022; Sirelkhatim *et al.*, 2015; Zakharova and Gusev, 2020; ชลดา, 2555)

ซิงค์ออกไซด์ยังแสดงปฏิกิริยาเร่งด้วยแสงที่สูงสุดในกลุ่มของสารอนินทรีย์ที่มีสมบัติการเกิดปฏิกิริยาเร่งด้วยแสง อีกทั้งยังสามารถเกิดการเร่งด้วยแสงได้แม้ว่าจะปิดแสงยูวีไปแล้ว และเมื่อซิงค์ออกไซด์สัมผัสโดยตรงกับอาหารจะมีการแพร่ผ่านของซิงค์ไอออน (Zn^{2+}) ซึ่งมีคุณสมบัติในการฆ่าจุลินทรีย์ โดยสามารถยับยั้งแบคทีเรียแกรมบวกซึ่งมีชั้นผนังเซลล์หนา เช่น *Staphylococcus aureus* ได้อย่างมีประสิทธิภาพกว่าโลหะออกไซด์ชนิดอื่น เช่น ไทเทเนียมไดออกไซด์ คอปเปอร์ออกไซด์ (CuO) แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) และซีเรียมออกไซด์ (CeO_2) (Abdullah *et al.*, 2020; Al-Tayyar, 2020; Garcia *et al.*, 2018; Sirelkhatim *et al.*, 2015) นอกจากนี้ยังมีการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์หรือซิงค์ออกไซด์ผสมด้วยโลหะหรือสารชนิดอื่น เช่น ซิลเวอร์ (Ag) คอปเปอร์ (Cu) และกราฟีนออกไซด์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาที่เร่งด้วยแสงของไทเทเนียมไดออกไซด์ (Cao *et al.*, 2020; Dong *et al.*, 2021; Efatian *et al.*, 2021; Li *et al.*, 2018)



ภาพที่ 6 กลไกการเกิดอนุมูลอิสระจากสมบัติการเร่งด้วยแสงของไทเทเนียมไดออกไซด์

ที่มา: ชลดา (2555)



ภาพที่ 7 กลไกการฆ่าเชื้อของอนุภาคนิวเคลียสของหมู่ไฮดรอกซิลโดยมีอนุภาคซิลเวอร์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

ที่มา: Li *et al.* (2018)

ในด้านกฎหมายที่เกี่ยวข้องตาม (EC) No 1935/2004 (วันที่ 27 ตุลาคม พ. ศ. 2547) ซึ่งว่าด้วยวัสดุและสิ่งสัมผัสกับอาหารได้กล่าวถึงวัสดุแอคทีฟและอินเทลลิเจนท์ว่าสามารถสัมผัสกับอาหารได้และสามารถถ่ายโอนส่วนประกอบไปยังอาหารภายใต้สภาวะการใช้งานปกติหรือที่คาดการณ์ได้ในปริมาณที่เหมาะสม และข้อกำหนดทั่วไปสำหรับวัสดุแอคทีฟและวัสดุอินเทลลิเจนท์ (active and intelligent material) (European Commission, 2004)

(EC) No 450/2009 ซึ่งว่าด้วยเรื่องวัสดุแอคทีฟและอินเทลลิเจนท์และสิ่งที่จะนำมาสัมผัสอาหารได้กล่าวถึงข้อกำหนดวัสดุแอคทีฟและอินเทลลิเจนท์ไว้ว่าต้องเหมาะสมกับวัตถุประสงค์การใช้งาน ต้องไม่ปลดปล่อยสารสู่อาหารมากจนอันตรายต่อสุขภาพมนุษย์ หรือก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางองค์ประกอบ รสชาติ หรือกลิ่นซึ่งไม่เป็นที่ยอมรับ และต้องไม่หลอกลวงผู้บริโภคผ่านการติดฉลาก การนำเสนอหรือการโฆษณา และได้กำหนดให้สารที่อยู่ในรายชื่อของ Union list of authorised substances สามารถใช้ในวัสดุแอคทีฟและอินเทลลิเจนท์ได้โดย FCM and Articles Regulation, Annex I - Authorised Substances (ปรับปรุงล่าสุดเมื่อ 24 กุมภาพันธ์ 2565) ได้อนุญาตการใช้สารแอคทีฟที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยดังตารางที่ 1 (European Commission, 2009)

(EU) No 10/2011 ว่าด้วยเรื่องวัสดุพลาสติกสัมผัสอาหาร (วันที่ 14 มกราคม พ. ศ. 2554) ได้กล่าวถึงวิธีการและสภาวะสำหรับการทดสอบไมเกรชันของบรรจุภัณฑ์พลาสติกสำหรับการ

สัมผัสอาหาร และอนุญาตให้สารโลหะออกไซด์เป็นสารเติมแต่งพอลิเมอร์ดังตารางที่ 1 รวมถึงกำหนดค่าไม่เกรซันทั้งหมดของบรรจุภัณฑ์อยู่ที่ 10 มิลลิกรัมของสารไมเกรนซ์/ตารางเดซิเมตรของพื้นที่ผิวสัมผัส และยังมีฉบับปรับปรุงคือ COMMISSION REGULATION (EU) 2016/1416 ซึ่งได้กำหนดค่าไม่เกรซันจำเพาะของซิงค์ คือ 5 มิลลิกรัมของซิงค์/กิโลกรัมของอาหารหรืออาหารจำลอง (European Commission, 2011, 2016)

ในส่วนของการอาหารและยา (Food and Drug Administration, FDA) ประเทศสหรัฐอเมริกาได้ออกข้อกำหนด 21CFR178.3297 ว่าด้วยเรื่องสารเติมแต่งในพอลิเมอร์สัมผัสอาหารสำหรับเป็นสารให้สี ได้อนุญาตไทเทเนียมไดออกไซด์และซิลิกอนไดออกไซด์ให้เป็นสารให้สีในพอลิเมอร์ และ 21CFR177.2420 ยังอนุญาตให้ซิลิกอนไดออกไซด์เป็นสารเติมแต่งเพื่อปรับปรุงสมบัติพอลิเอสเทอร์ นอกจากนี้ซิงค์ออกไซด์ยังอยู่ในรายชื่อสารที่ได้รับการยอมรับโดยทั่วไปเป็นที่ปลอดภัย (generally recognized as safe, GRAS) อีกด้วย (U.S. Food and Drug Administration, 2022a, 2022b)

นอกจากนี้ยังมีบัญญัติหมายเลข 1 แนบท้ายประกาศกระทรวงสาธารณสุข (ฉบับที่ 418) พ.ศ. 2563 ในพระราชบัญญัติอาหาร พ.ศ. 2522 เรื่อง กำหนดหลักเกณฑ์เงื่อนไข วิธีการใช้ และอัตราส่วนของวัตถุเจือปนอาหาร (ฉบับที่ 2) โดยอนุญาตให้ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์และซิลิกอนไดออกไซด์ในปริมาณที่เหมาะสม ขณะที่ซิงค์ออกไซด์ไม่ได้อยู่ในรายการแต่บัญญัติหมายเลข 3 แนบท้ายประกาศกระทรวงสาธารณสุข (ฉบับที่ 182) พ.ศ.2541 กล่าวถึงสารอาหารที่แนะนำให้บริโภคประจำวันสำหรับคนไทยอายุตั้งแต่ 6 ปีขึ้นไป แนะนำให้บริโภคซิงค์ไม่เกิน 15 มิลลิกรัม/วัน (ราชกิจจานุเบกษา, 2563)

ตารางที่ 1 รายชื่อสารแอดทีฟที่เกี่ยวข้องและเงื่อนไขการใช้ในวัสดุสัมผัสอาหารและวัสดุแอดทีฟที่สัมผัสอาหาร

สารแอดทีฟ	FCM		เงื่อนไขการใช้	
	No	(EC) No 450/2009	(EU) No 10/2011	
ไทเทเนียมไดออกไซด์	610	-	อนุญาตให้ใช้เป็นสารเติมแต่งพอลิเมอร์	
ซิงค์ออกไซด์	1050	อนุญาตให้ใช้ได้เฉพาะในพอลิเมอร์ที่ไม่มีสารพลาสติกไซค์ในการขึ้นรูป	อนุญาตให้ใช้เป็นสารเติมแต่งพอลิเมอร์	
ซิลิคอนไดออกไซด์	504	อนุญาตให้ใช้ในรูปอสัณฐานสังเคราะห์ที่มีอนุภาคปฐมภูมิมิขนาด 1 ถึง 100 นาโนเมตร ซึ่งรวมกันเป็นขนาด 0.1 ถึง 1.0 ไมโครเมตรซึ่งอาจจับตัวเป็นก้อนภายในการกระจายขนาด 0.3 ไมโครเมตรถึงขนาดมิลลิเมตร		

3. การเสื่อมเสียของอาหาร (food deterioration)

การเสื่อมเสียของอาหาร หมายถึง การเปลี่ยนแปลงของอาหารทั้งทางคุณภาพด้านประสาทสัมผัส และคุณค่าทางโภชนาการ อันนำมาซึ่งการไม่ยอมรับของผู้บริโภคและ/หรือความปลอดภัยจากการบริโภค ซึ่งอาหารอาจเสื่อมเสียได้จากหลายสาเหตุ ได้แก่ การเสื่อมเสียจากสาเหตุเชิงกล การเสื่อมเสียจากเคมี การเสื่อมเสียจากปัจจัยทางกายภาพ และการเสื่อมเสียจากจุลินทรีย์ ดังตารางที่ 2 ซึ่งอาหารอาจเริ่มเสื่อมเสียตั้งแต่หลังการเก็บเกี่ยว ระหว่างการขนส่ง ระหว่างการจัดเก็บ โดยมีปัจจัยสภาพแวดล้อมที่สำคัญคือ ความดัน อุณหภูมิ ความชื้น แก๊สออกซิเจน เวลา แรงเชิงกล และแสง ความชื้นในบรรยากาศมีผลต่อปริมาณน้ำโดยเมื่อความชื้นสัมพัทธ์เพิ่มขึ้นจะเพิ่มโมเลกุลน้ำอิสระที่ส่งเสริมการเจริญของจุลินทรีย์ รอยฟกช้ำหรือบาดแผลของผักและผลไม้ การสูญเสียน้ำจากผักและผลไม้ การเปลี่ยนแปลงของส่วนประกอบในอาหารเนื่องจากอุณหภูมิและระยะเวลาการจัดเก็บที่ยาวนาน การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ส่งเสริมการเจริญของจุลินทรีย์บางชนิด การเกิดสีน้ำตาล และการเกิดกลิ่นหืน (Rahman, 2007; Taoukis *et al.*, 1997)

ตารางที่ 2 ปัจจัยการเสื่อมเสียหลักของอาหารจากการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ กิจกรรมของเอนไซม์ ปฏิกริยาทางเคมี กายภาพ และแรงเชิงกล

Microbiological	Enzymatic	Chemical	Physical	Mechanical
Microorganism growth	Browning	Color loss	Collapse	Bruising due to vibration
Off-flavor	Color change	Flavor loss	Controlled release	Cracking
Toxin production	Off-flavor	Nonenzymatic browning Nutrient loss Oxidation–reduction Rancidity	Crystallization Flavor encapsulation Phase changes Recrystallization Shrinkage Transport of component	Damage due to pressure

ที่มา: Rahman (2007)

3.1 เนื้อสัตว์

เนื้อสัตว์ เป็นผลิตภัณฑ์ซึ่งอุดมไปด้วยโปรตีน และมีส่วนประกอบของน้ำอยู่เป็นจำนวนมากดังตารางที่ 3 การที่เนื้อสัตว์มีค่าออกซิเดชันสูงและมีสารอาหารอยู่มากส่งผลให้เกิดการเน่าเสียได้ง่ายจากการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ นอกจากนี้การเสื่อมคุณภาพของเนื้อสัตว์ยังรวมถึงการเกิดไนโตรซามีนในเนื้อ การเกิดไบโอเจนิคเอมีน (biogenic amine) จากกิจกรรมของจุลินทรีย์ รวมถึงการเกิดออกซิเดชันของไขมันและโปรตีนสารอาหารและจุลินทรีย์อีกด้วย (Reigand and Toldrá, 2010; Robertson, 2013)

การเกิดออกซิเดชันของไขมันเป็นปัจจัยหลักในการเสื่อมเสียของเนื้อสัตว์ และผลิตภัณฑ์จากเนื้อสัตว์ โดยเป็นปฏิกิริยาถูกโซ่จากอนุมูลอิสระและเกิดผลิตภัณฑ์หลักคือ ไฮโดรเปอร์ออกไซด์ ซึ่งเกิดปฏิกิริยาเป็นผลิตภัณฑ์ขั้นทุติยภูมิ ได้แก่ แอลดีไฮด์ คีโตน แอลเคน แอลคีน แอลกอฮอล์ เอสเทอร์ กรด และไฮโดรคาร์บอนซึ่งส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสี กลิ่นรส รวมถึงอาจสร้างสารพิษขึ้นได้ โดยเฉพาะสารประกอบแอลดีไฮด์ ฟอสโฟลิปิดในไขมันสัตว์ประกอบด้วยพันธะไม่อิ่มตัวจำนวนมาก นอกจากนี้ยังมีไตรเอซิลกลีเซอรอล ฟอสโฟลิปิด ไลโปโปรตีน และโคเลสเตอรอลซึ่งไวต่อการเกิดออกซิเดชัน และปฏิกิริยาออกซิเดชันนี้อาจถูกกระตุ้นด้วยแสง

ไอออนของโลหะ เอนไซม์ หรือผลิตภัณฑ์จากกิจกรรมของจุลินทรีย์ก็ได้ (Amaral *et al.*, 2018; Reigand and Toldrá, 2010; Robertson, 2013)

เนื้อสัตว์จัดเป็นอาหารเน่าเสียง่าย (perishable food) ซึ่งเสื่อมเสียง่ายจากจุลินทรีย์ โดยเฉพาะแบคทีเรีย โดยมีปัจจัยหลักมาจากลักษณะของอาหารและสภาพแวดล้อม เช่น พิเศษของอาหาร ปริมาณน้ำอิสระ การถนอมอาหาร โดยการแช่เย็นช่วยชะลอการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ หลายชนิดแต่ยังคงมีแบคทีเรียที่ชอบอุณหภูมิต่ำ (psychrophilic bacteria) ที่สามารถเจริญได้อยู่ (Robertson, 2013)

ตารางที่ 3 ส่วนประกอบของกล้ามเนื้อสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม

ส่วนประกอบ	ร้อยละโดยน้ำหนักในกล้ามเนื้อ
น้ำ	65-80
โปรตีน	16-22
ไขมัน	1-13
คาร์โบไฮเดรต	0.5-1.5
สารประกอบไนโตรเจนที่ไม่ใช่โปรตีน	1-2
สารประกอบอื่นที่ไม่ใช่โปรตีน	0.5-1

ที่มา: ดัดแปลงจาก Reigand and Toldrá (2010)

3.2 ผักและผลไม้

ผัก และผลไม้ หมายถึง พืชที่ปลูกเพื่อเป็นอาหารไม่ว่าจะเป็นการรับประทานทั้งต้นหรือการรับประทานส่วนประกอบต่าง ๆ ของพืช รวมถึงผลไม้บางประเภท พืชตระกูลถั่ว เชื้อรา และเห็ด ซึ่งอุดมไปด้วยสารอาหารและแร่ธาตุที่จำเป็นสำหรับมนุษย์ เช่น แร่ธาตุ (โพแทสเซียม เหล็ก โซเดียม แคลเซียม และแมกนีเซียม) โปรตีน โยอาหาร แป้ง ไขมัน หรือวิตามินโดยเฉพาะ วิตามินบีรวม วิตามินซี และวิตามินเค โดยทั่วไปแล้วผักมีคาร์โบไฮเดรตร้อยละ 3 ถึง 20 ซึ่งจัดเก็บในรูปของพอลิแซ็กคาไรด์ มีโปรตีนร้อยละ 0.5 ถึง 3.5 และไขมันร้อยละ 0.1 ถึง 3 นอกจากนี้ยังมีสารอาหารอื่น ๆ เช่น แอนโทไซยานิน เบตาแคโรทีน และไลโคพีนซึ่งเป็นสารต้านอนุมูลอิสระอีกด้วย พีระมิด

อาหารค้ำโภชนาการ (USDA's Food Guide Pyramid) จึงแนะนำให้บริโภคผัก 3 ถึง 5 หน่วยบริโภคเพื่อสุขภาพที่ดี อย่างไรก็ตาม วิตามินในผักสามารถเสื่อมสภาพได้โดยขึ้นกับชนิดของพืช ออกซิเจน แสง และความร้อน การเก็บรักษาผักในอุณหภูมิต่ำ หรือบรรจุภัณฑ์คัดแปรสภาพ บรรยากาศสามารถยืดอายุการเก็บรักษา และรักษาคุณภาพผักได้ โดยชะลอการหายใจและการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ที่ปนเปื้อนบนพื้นผิวและเปลือก (Radovich, 2018)

อายุการเก็บรักษาของผักและผลไม้ขึ้นกับอัตราการหายใจซึ่งจะแปรผกผันกับอายุการเก็บรักษา ผักและผลไม้ที่มีอัตราการหายใจต่ำส่วนใหญ่มีการเปลี่ยนแปลงช้าและมีอายุการเก็บรักษาที่ยาวนาน การหายใจของผักผลไม้หลังการเก็บเกี่ยวยังส่งผลให้เกิดความร้อนซึ่งเป็นอีกหนึ่งปัจจัยของการเสื่อมเสียของผักและผลไม้ การหายใจของผักผลไม้หลังการเก็บเกี่ยวมีปัจจัยสำคัญมาจากสภาพบรรยากาศ อุณหภูมิ ระยะการเจริญเติบโตของพืช รวมถึงความไวต่อฮอร์โมนเอทิลีนของผลไม้ที่บ่มให้สุกได้ (climacteric fruit) (Ji *et al.*, 2021; Radovich, 2018; Toivonen, 2010)

ก๊าซเอทิลีนมีอิทธิพลอย่างมากต่อการเร่งการสุกและการชราของผักและผลไม้ นำมาซึ่งการเปลี่ยนแปลงลักษณะของผักและผลไม้หลายประการ เช่น เนื้อสัมผัสนุ่มลง การเปลี่ยนแปลงสี กลิ่น รส หรือโครงสร้าง เช่น การนิ่มของผักและผลไม้ การสลายตัวของแป้ง และสลายตัวของคลอโรฟิลล์ซึ่งนำมาสู่การเปลี่ยนแปลงสีของผักและผลไม้ (Iqbal *et al.*, 2017; Ji *et al.*, 2021)

4. งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตบรรจุภัณฑ์ที่เติมโลหะออกไซด์กับคุณภาพอาหาร

งานวิจัยก่อนหน้านี้แสดงให้เห็นว่าการเติมโลหะออกไซด์แต่ละประเภทมีแนวโน้มปรับปรุงสัณฐานวิทยา และสมบัติบรรจุภัณฑ์ซึ่งมีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของพอลิเมอร์ และการผลิตบรรจุภัณฑ์ที่เติมโลหะออกไซด์อาจช่วยรักษาคุณภาพผลิตภัณฑ์อาหารแต่ละประเภท ตารางที่ 4 และ 5 แสดงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการปรับปรุงสมบัติของฟิล์มด้วยโลหะออกไซด์ ได้แก่ ไทเทเนียมไดออกไซด์ ซิงค์ออกไซด์ และซิลิกอนไดออกไซด์ และการประยุกต์ใช้กับอาหาร โดยงานวิจัยที่ผ่านมาส่วนใหญ่เป็นการศึกษาด้วยการขึ้นรูปด้วยวิธีหล่อขึ้นรูปด้วยตัวทำละลาย แล้วศึกษาผลของการเติมโลหะออกไซด์ต่อสมบัติของวัสดุ ดังนี้

ตารางที่ 4 งานวิจัยก่อนหน้าที่เกี่ยวข้องกับพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพลาสติกชีวภาพกับโลหะออกไซด์

Composite or Additive	Polymer	Method	Reference
TiO₂	PBAT	Solution casting	(Venkatesan and Rajeswari, 2017)
	Corn starch	Solution casting	(Amin <i>et al.</i> , 2019)
	Wheat A-starch	Solution casting and melt mixing	(Ostařínska <i>et al.</i> , 2017)
ZnO	Potato starch	Solution casting	(Oleyaei <i>et al.</i> , 2016)
	Cassava starch	Solution casting	(Abdullah <i>et al.</i> , 2020)
	PBAT	Solution casting	(Venkatesan and Rajeswari, 2016)
	PBS	Blow film extrusion	(Petchwattana <i>et al.</i> , 2016)
	PLA/PBAT	Solution casting	(Shankar and Rhim, 2019)
ZnO-SiO₂	PVA/Chitosan	Solution casting	(Al-Tayyar, 2020)
	Whey protein isolate/Pullulan	Solution casting	(Hassannia-Kolace <i>et al.</i> , 2016)
SiO₂	PVA/Gelatin	Solution casting	(Kariminejad <i>et al.</i> , 2018)

ตารางที่ 5 งานวิจัยก่อนหน้าที่ประยุกต์ใช้พอลิเมอร์คอมโพสิตกับโลหะออกไซด์สำหรับการบรรจุอาหาร

Composite or Additive	Polymer	Method	Food	Reference
TiO ₂	K-carrageenan/Konjac Glucomannan	Solution casting	Strawberry	(Duan <i>et al.</i> , 2021)
	Pullulan/Carboxymethyl Cellulose	Solution casting	Strawberry	(Zhang <i>et al.</i> , 2021c)
TiO ₂ -Ag	LDPE	Melt mixing	Almond and pistachio	(Nasiri <i>et al.</i> , 2012)
	PBAT	Solution casting	Cherry tomato	(Cao <i>et al.</i> , 2020)
TiO ₂ -Ag-Cu	PLA	Solution casting	Yunnan cottage cheese	(Li <i>et al.</i> , 2018)
	LDPE	Melt mixing	Nile tilapia	(Efatian <i>et al.</i> , 2021)
TiO ₂ -Cu	Carboxyl Methyl Cellulose	Solution casting	Banana	(Ezati <i>et al.</i> , 2022)
	PLA	Electrostatic spinning	Green peppers	(Dong <i>et al.</i> , 2021)
TiO ₂ -Graphene oxide	HDPE	Blow film extrusion	Stracchino	(Gumiero <i>et al.</i> , 2013)
	PET	Melt mixing	Mayonnaise sauce	(Kohannia <i>et al.</i> , 2021)
TiO ₂ -CaCO ₃	Agar	Solution casting	Green grape	(Kumar <i>et al.</i> , 2019)
	Chitosan	Solution casting	Raw meat	(Rahman <i>et al.</i> , 2017)
ZnO	Chitosan/Cellulose Acetate Phthalate	Solution casting	Black grape	(Indumathi <i>et al.</i> , 2019)
	PLA/PEG/PCL	Solution casting	Scrambled egg	(Ahmed <i>et al.</i> , 2019)
ZnO-Clove essential oil	PVA/Chitosan	Solution casting	Bread	(Al-Tayyar, 2020)

ตารางที่ 5 (ต่อ)

Composite or Additive	Polymer	Method	Food	Reference
SiO ₂	LDPE	Solution casting	Loquat fruit	(Wang <i>et al.</i> , 2020)
	Chitosan/Sodium alginate	Coating solution	Winter jujube	(Kou <i>et al.</i> , 2019)
	Chitosan	Coating solution	Jujube	(Yu <i>et al.</i> , 2012)

4.1 โครงสร้างระดับจุลภาค

Venkatesan and Rajeswari (2017) ได้อธิบายถึงโครงสร้างจุลภาคของฟิล์มพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท คอมโพลีทกับไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการหล่อขึ้นรูปถึงการกระจายตัวที่ดีของไทเทเนียมไดออกไซด์ในเมทริกซ์เมื่อเติมอนุภาคออกไซด์ลงไป ปริมาณน้อย และการรวมตัวของอนุภาคเมื่อเติมไทเทเนียมไดออกไซด์ร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก ซึ่งเป็นปริมาณที่มากเกินไป การรวมตัวหรือเกาะกลุ่มของอนุภาคเหล่านี้เกิดจากการเพิ่มปริมาณอนุภาคที่ไม่หลอมละลายในปริมาณเมทริกซ์ที่จำกัด และการเกิดพันธะระหว่างอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยกัน ขณะที่ Hassannia-Kolae *et al.* (2016) ไม่พบการรวมกลุ่มกันของอนุภาคซิลิคอนไดออกไซด์ในฟิล์มเวียโปรตีน/พอลิแลน อนุภาคซิลิคอนไดออกไซด์กระจายตัวอย่างดีเยี่ยมในเมทริกซ์พอลิเมอร์แม้ว่าจะเติมซิลิคอนไดออกไซด์ถึงร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก แสดงถึงความสามารถในการกระจายตัวที่ดีของซิลิคอนไดออกไซด์แม้จะเติมในปริมาณที่มาก

การกระจายตัวที่ดีของอนุภาคในเมทริกซ์จากการเติมอนุภาคโลหะออกไซด์ในปริมาณน้อย นำมาซึ่งการเพิ่มขึ้นของสมบัติเชิงกล ความเสถียรทางความร้อน สมบัติการป้องกันแก๊สและไอน้ำ ในขณะที่การเติมอนุภาคโลหะออกไซด์มากเกินไปจะส่งผลให้เกิดการรวมกลุ่มกันของอนุภาค และนำมาซึ่งผลลัพท์ในทางตรงกันข้ามกับพอลิเมอร์ซึ่งอนุภาคกระจายตัวดีในเมทริกซ์ ซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

4.2 สมบัติเชิงกล

การปรับปรุงสมบัติเชิงกลของฟิล์มที่เติมอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ Cao *et al.* (2020) ได้ศึกษาสมบัติของฟิล์มพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลทผสมไทเทเนียมไดออกไซด์และซิลเวอร์ด้วยวิธีการหล่อขึ้นรูป โดยการผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักส่งผลเพิ่มค่าแรงต้านทานการดึงถึงร้อยละ 109.3 และเพิ่มร้อยละการยืดตัวก่อนขาดถึงร้อยละ 250 ซึ่งเป็นผลมาจากการถ่ายเทความเครียดที่ดีจากเมทริกซ์ของพอลิเมอร์สู่ออนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์และซิลเวอร์ การถ่ายเทความเครียดซึ่งสามารถป้องกันการแตกหักของเมทริกซ์พอลิเมอร์ได้นี้เป็นผลต่อเนื่องมาจากการกระจายตัวที่ดีของอนุภาคอนินทรีย์ในเมทริกซ์พอลิเมอร์ ขณะเดียวกันการเติมไทเทเนียมไดออกไซด์และซิลเวอร์ที่มากเกินไปอันส่งผลให้เกิดการรวมตัวของอนุภาคเหล่านี้ นำมาสู่รอยแตกในเมทริกซ์พอลิเมอร์ส่งผลให้ค่าต้านทานแรงดึงยี่ดลดลง

นอกจากนี้ยังมีการรายงานถึงการเพิ่มความแข็งตึงของฟิล์ม และสมบัติการเป็นแอนไท-พลาสติกไซเซชัน (anti-plasticization) ของไทเทเนียมไดออกไซด์และซิงค์ออกไซด์ซึ่งส่งผลให้สมบัติการยึดตัวของฟิล์มลดลง (Dong *et al.*, 2021; Ezati *et al.*, 2022; Venkatesan and Rajeswari, 2016, 2017) Petchwattana *et al.* (2016) ได้ศึกษาฟิล์มพอลิเอทิลีนซัคซินเนตผสมซิงค์ออกไซด์ด้วยกระบวนการอัดรีดเป่าฟิล์ม และรายงานถึงความต้านทานแรงกระแทก และความต้านทานการฉีกขาดที่ลดลงร้อยละ 29 และ 18 เมื่อเติมซิงค์ออกไซด์ร้อยละ 6 และการเพิ่มขึ้นของความแข็งตึงอันเนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของผลึกของพอลิเมอร์โดยเมื่อผสมกับซิงค์ออกไซด์เป็นคอมโพสิตจะทำให้อุณหภูมิการก่อผลึกมีค่าลดลงและปริมาณผลึกเพิ่มขึ้น ดังนั้นการเติมอนุภาคโลหะออกไซด์ในปริมาณที่เหมาะสมจะส่งผลเพิ่มความต้านทานแรงตึงจากการกระจายความเครียดที่ดี มีแนวโน้มในการเพิ่มความแข็งตึงและลดการยึดตัวของฟิล์ม

4.3 สภาพผิวของพื้นผิวฟิล์ม

ในด้านการปรับปรุงสภาพผิวของฟิล์ม Abdullah *et al.* (2020) ได้ทำการศึกษาค่ามุมสัมผัสหยดน้ำของฟิล์มสตาร์ชมันสำปะหลังก่อนและหลังเติมซิงค์ออกไซด์ พบว่าค่ามุมสัมผัสหยดน้ำมีค่าเพิ่มมากขึ้นแสดงถึงการเพิ่มความไม่ชอบน้ำของพื้นผิวฟิล์ม ซึ่งเป็นผลมาจากการเกิดอันตรกิริยาระหว่างซิงค์ออกไซด์และสตาร์ชผ่านพันธะไฮโดรเจนก่อให้เกิดโครงสร้างเครือข่ายและลดจำนวนหมู่ไฮดรอกซิลอิสระที่สามารถเกิดพันธะกับโมเลกุลน้ำได้ ความไม่ชอบน้ำของพื้นผิวฟิล์มจึงเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ Hassannia-Kolace *et al.* (2016) ยังได้รายงานถึงการลดลงของการละลายได้ในน้ำ ปริมาณความชื้นในฟิล์ม และปริมาณการดูดความชื้นถึงร้อยละ 15.48, 12.05 และ 10.44 การลดลงของการละลายในน้ำของฟิล์มและการดูดความชื้นเมื่อเติมซิลิกอนไดออกไซด์ต่อฟิล์มเวียโปรตีน/พุลลูแลนร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก โดย Oleyaei *et al.* (2016) ซึ่งศึกษาฟิล์มสตาร์ชมันฝรั่งผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ ได้อธิบายเพิ่มเติมถึงการเพิ่มขึ้นของความไม่ชอบน้ำของฟิล์มด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างไทเทเนียมไดออกไซด์และสตาร์ช (TiO_2 และ $-\text{OH}$ หรือ $-\text{CH}_2$) และพันธะโควาเลนต์อื่น ก่อเป็นโครงสร้างที่ชะลอการเคลื่อนตัวของโมเลกุลไอน้ำ รวมถึงลดจำนวนด้านอิสระของโมเลกุล (active site) ที่สามารถจับกับน้ำได้ ขณะที่ Gumiero *et al.* (2013) ค้นพบผลลัพธ์ที่แตกต่างกัน Gumiero *et al.* (2013) ได้ศึกษาสมบัติของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง/แคลเซียมคาร์บอเนตผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ และค้นพบค่ามุมสัมผัสหยดน้ำที่ลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณของ

ไทเทเนียมไดออกไซด์อันเนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของหมู่ไฮดรอกซิลในเมทริกซ์พอลิเมอร์จากอนุภาคของไทเทเนียมไดออกไซด์ ส่งผลให้ฟิล์มมีความชอบน้ำเพิ่มขึ้น

แนวโน้มการปรับปรุงสภาพผิวของพื้นผิวและฟิล์มเมื่อเติมอนุภาคโลหะออกไซด์นั้นมีส่วนขึ้นกับสภาพแวดล้อมของพอลิเมอร์ โดยหากพอลิเมอร์ดั้งเดิมมีความชอบน้ำและสามารถเกิดพันธะกับอนุภาคโลหะออกไซด์ได้เมื่อเติมโลหะออกไซด์จะส่งผลเพิ่มความไม่ชอบน้ำ ขณะที่เติมโลหะออกไซด์ในพอลิเมอร์ไม่มีขั้วหรือไม่ชอบน้ำจะส่งผลเพิ่มความชอบน้ำของพื้นผิวฟิล์มคอมโพสิต

4.4 สมบัติการป้องกันแก๊สและไอน้ำ

Cao *et al.* (2020) รายงานถึงค่าสภาพการซึมผ่านของไอน้ำที่ลดลงร้อยละ 37 และสภาพการซึมผ่านของออกซิเจนที่ลดลงร้อยละ 71 เมื่อเติมไทเทเนียมไดออกไซด์และซิลเวอร์ร้อยละ 5 จาก การสร้างเส้นทางที่คดเคี้ยวสำหรับ โมเลกุลแก๊สและไอน้ำของไทเทเนียมไดออกไซด์และซิลเวอร์ ซึ่งเป็นผลต่อเนื่องมาจากการกระจายตัวของอนุภาคในเมทริกซ์พอลิเมอร์ กลไกการสร้างเส้นทางคดเคี้ยวขัดขวางการซึมผ่านของโมเลกุลของแก๊สและไอน้ำอันส่งเสริมสมบัติการป้องกันแก๊สและไอน้ำยังถูกพบในฟิล์มที่ผสมด้วยซิงค์ออกไซด์และซิลิคอนไดออกไซด์ (Abdullah *et al.*, 2020; Al-Tayyar, 2020; Hassannia-Kolaee *et al.*, 2016)

นอกจากนี้ Tang *et al.* (2020) ยังรายงานถึงการลดลงของสมบัติป้องกันการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนและไอน้ำในฟิล์มพอลิแลคติกแอซิดผสมซิงค์ออกไซด์ร้อยละ 15 ขณะที่การเติมซิงค์ออกไซด์ที่ความเข้มข้นต่ำกว่า (ร้อยละ 1 ถึง 9) ส่งเสริมสมบัติป้องกันแก๊สออกซิเจนและไอน้ำ เป็นผลจากการรวมกลุ่มของซิงค์ออกไซด์ในเมทริกซ์พอลิเมอร์ก่อให้เกิดเส้นทางการซึมผ่านของแก๊สและไอน้ำ

4.5 สมบัติทางความร้อนและปริมาณผลึก

Cao *et al.* (2020) ได้รายงานถึงปริมาณผลึกที่เพิ่มขึ้นของพอลิเมอร์ที่ผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ซึ่งเป็นผลมาจากสมบัติการเป็นสารก่อผลึกของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์และซิลเวอร์ และอุณหภูมิก่อผลึกที่เพิ่มขึ้นจากการยับยั้งการเคลื่อนที่ของโมเลกุลสายโซ่เนื่องจากอันตรกิริยา

ระหว่างพอลิเมอร์กับอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ สำหรับฟิล์มที่ผสมซิลิคอนไดออกไซด์ Hassannia-Kolae *et al.* (2016) ได้รายงานถึงความเสถียรทางความร้อนที่เพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจากการเกิดพันธะภายในของหมู่ซิลินอล (silinol group, Si-OH) ซึ่งมีผลลดสภาพการเคลื่อนที่ได้ของโมเลกุลสายโซ่พอลิเมอร์ นอกจากนี้ Venkatesan and Rajeswari (2017) ยังได้อธิบายถึงเสถียรภาพทางความร้อนที่เพิ่มขึ้นและอุณหภูมิการเสื่อมสลายที่สูงขึ้น เนื่องจากการกระจายตัวที่ดีของอนุภาคขนาดเล็กที่มีพื้นที่ผิวมากมีผลในการถ่ายเทความร้อนและยับยั้งการตัดสายโซ่แบบสุ่มด้วยความร้อน และ Venkatesan and Rajeswari (2016) ได้อธิบายถึงการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิการเสื่อมสลายที่เพิ่มขึ้นราว 20 องศาเซลเซียส ของฟิล์มพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลทผสมกับซิงค์ออกไซด์ ถึงผลการกำบังของอิเล็กตรอน (shielding effect) ของซิงค์ออกไซด์ต่อเมทริกซ์พอลิเมอร์ เนื่องจากอันตรกิริยาของซิงค์ออกไซด์กับเมทริกซ์ซึ่งชะลออัตราการสูญเสียมวลเนื่องจากความร้อน

จากงานวิจัยข้างต้นเมื่อเติมอนุภาคโลหะออกไซด์ ฟิล์มจะมีปริมาณผลึกเพิ่มขึ้นจากสมบัติการเป็นสารก่อผลึกของโลหะออกไซด์ การเกิดพันธะและการกระจายตัวที่ดีของอนุภาคโลหะออกไซด์ในเมทริกซ์พอลิเมอร์ช่วยเพิ่มความเสถียรทางความร้อน

4.6 การป้องกันการส่องผ่านของแสงยูวี

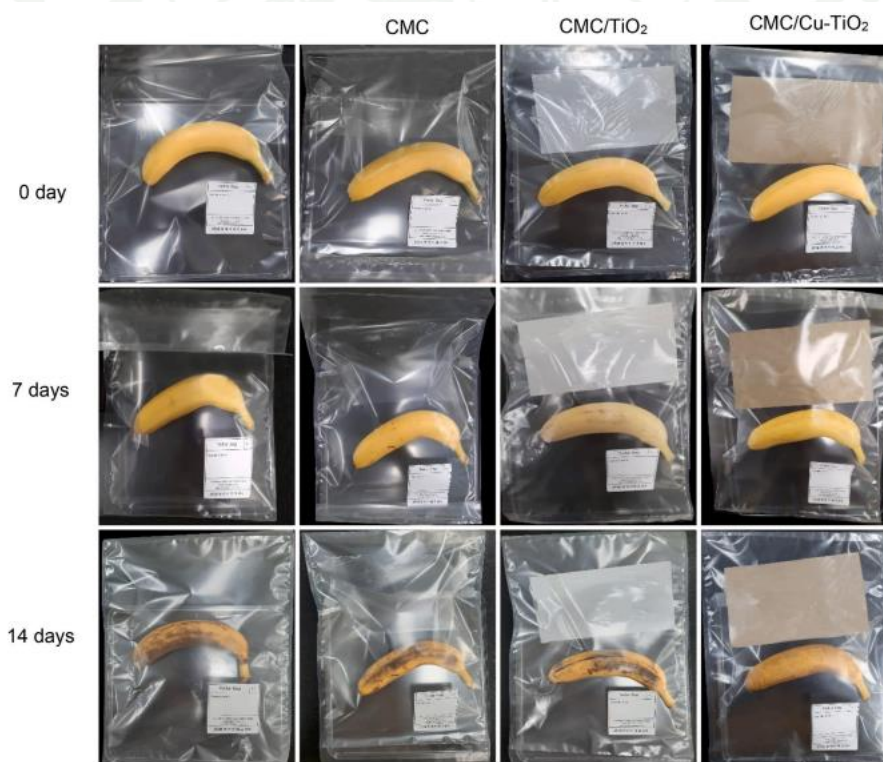
Oleyaei *et al.* (2016) ได้ทำการศึกษาฟิล์มสตาร์ซผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ร้อยละ 0.5 ถึง 2 และรายงานความสามารถป้องกันการส่องผ่านของแสงยูวีเอ ยูวีบี และยูวีซีได้มากกว่าร้อยละ 90 เนื่องจากดัชนีการหักเหที่มาก และพื้นที่ผิวอนุภาคที่ใหญ่ส่งผลสะท้อนและกระจายแสงเมื่อตกกระทบลงบนผิวฟิล์ม และ Shankar and Rhim (2019) ยังได้อธิบายถึงสมบัติการป้องกันแสงในช่วงคลื่นยูวีและช่วงแสงที่มองเห็นได้ของฟิล์มพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท/พอลิแลกติกแอซิดผสมซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ด้วย ซิงค์แอซิเตท ซิงค์คลอไรด์ และซิงค์ไนเตรท ด้วยอัตราส่วนระหว่างแนวตั้งกับแนวนอนของอนุภาคโลหะออกไซด์ (aspect ratio) ที่มาก และความ เป็นผลึกของฟิล์มมีผลส่งเสริมการกระเจิงของแสง ดังนั้นการเติมอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ และซิงค์ออกไซด์จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพป้องกันการส่องผ่านของแสงยูวี โดยประสิทธิภาพการป้องกันดังกล่าวจะขึ้นกับปริมาณและอัตราส่วนของอนุภาคโลหะ

4.7 การประยุกต์ใช้ฟิล์ม/สารเคลือบคอมโพสิตกับอาหาร

4.7.1 ผลไม้

ไทเทเนียมไดออกไซด์

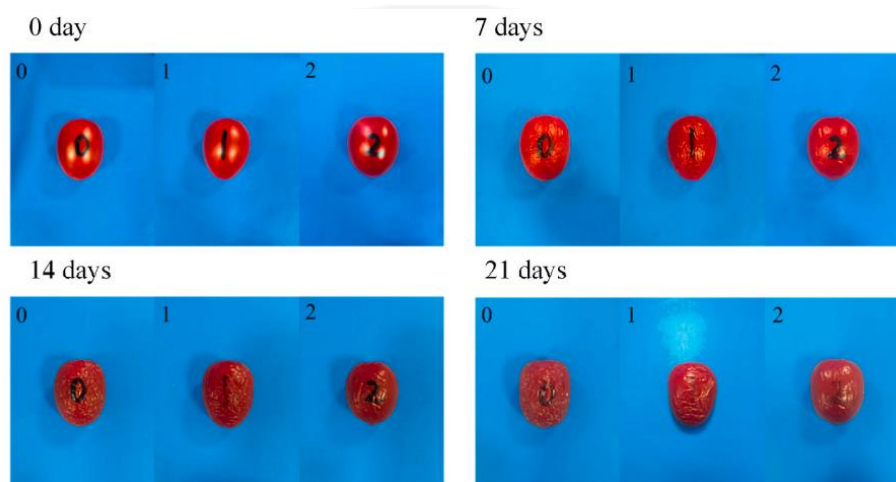
Ezati *et al.* (2022) ทดลองรักษาคุณภาพและยืดอายุการเก็บรักษาของกล้วยด้วยฟิล์มคอมโพสิตคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่เติมไทเทเนียมไดออกไซด์และคอปเปอร์รวมกันร้อยละ 3 ดังภาพที่ 8 โดยฟิล์มคอมโพสิตสามารถชะลอการเกิดสีน้ำตาลด้วยกลไกการสลายเอทิลีนด้วยปฏิกิริยาเร่งด้วยแสง และการเติมคอปเปอร์มีผลส่งเสริมการเกิดปฏิกิริยาเร่งด้วยแสงของไทเทเนียมไดออกไซด์



ภาพที่ 8 ลักษณะปรากฏของกล้วยในบรรจุภัณฑ์ที่ไม่ใส่แผ่นฟิล์ม ใส่แผ่นฟิล์มคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส แผ่นฟิล์มคอมโพสิตกับไทเทเนียมไดออกไซด์ และแผ่นฟิล์มผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับคอปเปอร์

ที่มา: Ezati *et al.* (2022)

Cao *et al.* (2020) รายงานสมบัติป้องกันแก๊สและไอน้ำที่เพิ่มขึ้นของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์-ซิลเวอร์คอมโพสิต ซึ่งสามารถรักษาลักษณะปรากฏภายนอกและลดการสูญเสียน้ำของมะเขือเทศราชินีได้อย่างมีประสิทธิภาพดังภาพที่ 9



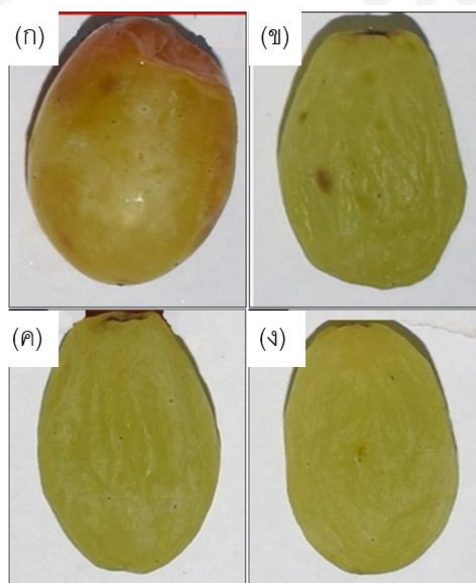
ภาพที่ 9 ลักษณะปรากฏของมะเขือเทศราชินีที่ไม่ถูกบรรจุด้วยฟิล์ม (หมายเลข 0) ห่อด้วยฟิล์มพอลิเอทิลีนอะดิเพท-โค-เทรฟทาเลท (หมายเลข 1) และห่อด้วยฟิล์มคอมโพสิต (หมายเลข 2)

ที่มา: Cao *et al.* (2020)

Zhang *et al.* (2021c) ได้รายงานถึงการรักษาคุณภาพและยืดอายุการเก็บรักษาของสตอร์ว์เบอร์รี่ด้วยสมบัติป้องกันแก๊สและไอน้ำที่มากขึ้นเช่นกัน สมบัติป้องกันแก๊สและไอน้ำที่ดีขึ้นนำมาสู่การลดการสูญเสียน้ำหนัก การคงสภาพกรดแอสคอร์บิก การลดอัตราการหายใจและเมตาบอลิซึมซึ่งนำไปสู่การคงสภาพความแน่นของเนื้อสตอร์ว์เบอร์รี่ รักษาปริมาณกรดทั้งหมดที่สามารถไทเทรตได้ในอาหาร (titratable acidity) และชะลอการเกิดสีน้ำตาลรวมถึงการเน่าเสีย เช่นเดียวกับ Dong *et al.* (2021) ซึ่งทำการศึกษาการรักษาคุณภาพและยืดอายุการเก็บรักษาของพริกเขียวด้วยพอลิแลคติกแอซิดร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์และกราฟีนออกไซด์ โดยชะลอการเกิดสีแดงและการเน่าของพริก และรักษาปริมาณของแข็งที่สามารถละลายได้ และคลอโรฟิลล์ด้วยการสลายเอทิลีน โดยปฏิกิริยาเร่งด้วยแสงของไทเทเนียมไดออกไซด์ ลดการสูญเสียน้ำหนักด้วยการสมบัติการป้องกันไอน้ำ และยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ด้วยปฏิกิริยาเร่งด้วยแสงของไทเทเนียมไดออกไซด์และการดูดซับ (adsorption) ของกราฟีนออกไซด์ นอกจากนี้กราฟีนออกไซด์ยังมีผลส่งเสริมปฏิกิริยาเร่งด้วยแสงของไทเทเนียมไดออกไซด์อีกด้วย

ซิงค์ออกไซด์

Kumar *et al.* (2019) พัฒนาฟิล์มอาหารผสมซิงค์ออกไซด์ในการยืดอายุการเก็บรักษาขององุ่นเขียวดังภาพที่ 10 องุ่นที่บรรจุในฟิล์มพอลิเอทิลีนปรากฏจุดของโรคราน้ำค้างและมีน้ำเหนียวไหลออกจากผลองุ่น องุ่นในฟิล์มอาหารแสดงเฉพาะอาการของโรคราน้ำค้าง ขณะที่ฟิล์มคอมโพสิตผสมซิงค์ออกไซด์ร้อยละ 2 และ 4 สามารถคงการยอมรับของผู้บริโภคได้ถึง 14 และ 21 วันตามลำดับ



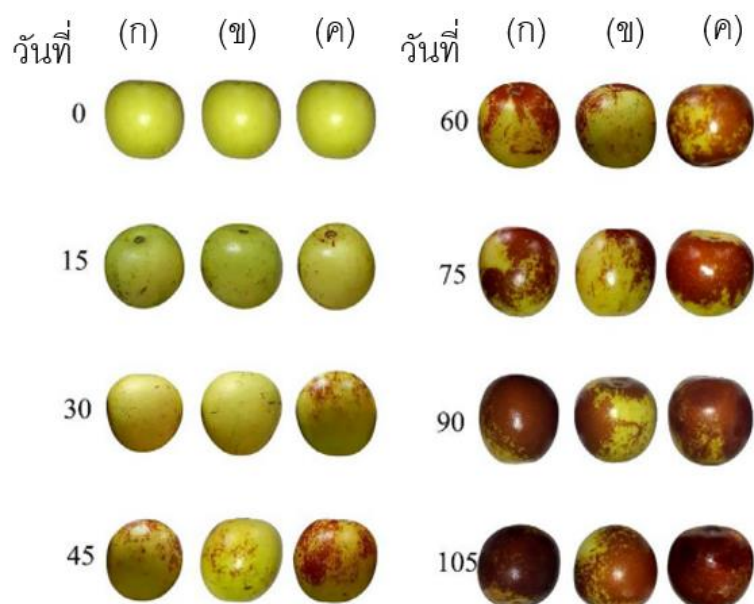
ภาพที่ 10 ลักษณะปรากฏขององุ่นเขียวหลังการเก็บรักษา 9 วันที่ถูกบรรจุในฟิล์ม (ก) พอลิเอทิลีน (ข) อาหาร (ค) อาหารผสมซิงค์ออกไซด์ร้อยละ 2 และ (ง) อาหารผสมซิงค์ออกไซด์ร้อยละ 4

ที่มา: Kumar *et al.* (2019)

ซัลฟอนออกไซด์

Wang *et al.* (2020) ได้ทำการทดลองรักษาคุณภาพและยืดอายุการเก็บรักษาของผลปีแป้ (loquat fruit) ชนิดเนื้อขาวและเนื้อแดงด้วยฟิล์มคอมโพสิตพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงร่วมกับซัลฟอนไดออกไซด์ร้อยละ 0.1 โดยฟิล์มคอมโพสิตแสดงผลยังยั้งการเกิดสีน้ำตาลได้ถึงร้อยละ 36.34 ชะลอการเน่าเสียโดยมีดัชนีการเน่าเสียน้อยกว่าฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำถึงร้อยละ 42.84 ถึง 53.25 ชะลอการเสื่อมสภาพของของแข็งที่สามารถละลายได้ รักษากลิ่นรส รักษาปริมาณกรดแอสคอร์บิก และน้ำตาลที่ละลายได้ ชะลอการเพิ่มของดัชนีการเน่าเสียและการเกิดสีน้ำตาลจากสภาพการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนและไอน้ำของฟิล์มที่ลดลง ส่งผลลดการหายใจของผลปีแป้ ชะลอการชรา ลดความเสียหายจากการสะสมของออกซิเจนที่ไวต่อปฏิกิริยา (reactive oxygen species) และลดการเกิดออกซิเดชันและการเกิดอนุมูลอิสระด้วยการกระตุ้นเอนไซม์ เช่นเดียวกับ Kou *et al.* (2019) โดยกระตุ้นเอนไซม์ซูเปอร์ออกไซด์ดิสมิวเทส (superoxide dismutase, SOD) และเอนไซม์คะตาเลส (catalase, CAT) โดยเอนไซม์ซูเปอร์ออกไซด์ดิสมิวเทสทำการเปลี่ยนรูปประจุลบของออกซิเจน (O_2^-) ให้เป็นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) และเอนไซม์คะตาเลส มีหน้าที่กำจัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ การกระตุ้นการทำงานของเอนไซม์

Kou *et al.* (2019) ซึ่งศึกษาการรักษาคุณภาพและยืดอายุการเก็บรักษาของผลพุทราด้วยสารเคลือบไคโตซาน/โซเดียมแอลจินेट ร่วมกับซัลฟอนไดออกไซด์ร้อยละ 0.0125 โดยพบว่าผลพุทราที่ถูกเคลือบด้วยสารเคลือบร่วมกับซัลฟอนไดออกไซด์สามารถยืดอายุการเก็บรักษาได้มากกว่าสารเคลือบกรดแอบไซซิก (abscisic acid, ABA) ประมาณ 1 เดือน เมื่อเปรียบเทียบกับพุทราที่ถูกเคลือบด้วยสารเคลือบกรดแอบไซซิกและไคโตซาน/โซเดียมแอลจินेटแล้ว ผลพุทราที่ถูกเคลือบด้วยสารเคลือบร่วมกับซัลฟอนไดออกไซด์มีกิจกรรมของเอนไซม์ซูเปอร์ออกไซด์ดิสมิวเทส และเพอร์ออกซิเดส (peroxidase, POD) ที่สูงกว่าส่งผลกำจัดอนุมูลอิสระทำให้มีค่ามาลอนไดอัลดีไฮด์ (malondialdehyde, MDA) ที่ต่ำกว่า และมีกิจกรรมของพอลิฟีนอลออกซิเดส (polyphenol oxidase, PPO) ต่ำกว่าส่งผลชะลอการเกิดสีน้ำตาลในพุทรา มีค่าการสูญเสียน้ำหนักและการเปลี่ยนแปลงสีที่ต่ำกว่า รวมถึงสามารถรักษาปริมาณของกรดแอสคอร์บิกและคลอโรฟิลล์ได้ดีกว่าเช่นเดียวกับ Yu *et al.* (2012)



ภาพที่ 11 ลักษณะปรากฏของผลพุทราที่ถูกเคลือบด้วย (ก) โคลโตซาน/โซเดียมแอลจินेट (ข) โคลโตซาน/โซเดียมแอลจินेटผสมซิลิกอนไดออกไซด์ และ (ค) กรดแอบไซซิก

ที่มา: คัดแปลงจาก Kou *et al.* (2019)

4.7.2 เนื้อสัตว์สด

Rahman *et al.* (2017) ได้ศึกษาประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ในเนื้อสดด้วยฟิล์มโคลโตซานร่วมกับซิงค์ออกไซด์ในรูปของซิงค์แอสซิเตทร้อยละ 2 โดยในการเก็บรักษาวันที่ 5 เนื้อสัตว์ที่ถูกบรรจุในฟิล์มพอลิเอทิลีน แสดงจำนวนของเชื้อในวุ้นเลี้ยงเชื้อ 110×10^8 โคโลนี/มิลลิลิตร ขณะที่เนื้อสัตว์ที่บรรจุในฟิล์มคอมโพสิตแสดงจำนวนเชื้อจุลินทรีย์ 4.56×10^8 โคโลนี/มิลลิลิตร จากปฏิกิริยาเร่งด้วยแสงของซิงค์ออกไซด์

4.7.3 ผลกระทบที่แปรรูป

Li *et al.* (2018) ได้ทำการทดลองรักษาคุณภาพและยืดอายุการเก็บรักษาของเนยแข็ง ด้วยพอลิแลกติกแอซิดร่วมกับอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ร้อยละ 2 และซิลเวอร์ร้อยละ

1 เป็นวัสดุคอมโพสิตโดยพบว่าเนยแข็งที่บรรจุในฟิล์มคอมโพสิตสามารถยืดอายุการเก็บรักษาได้มากกว่าฟิล์มพอลิแลคติกแอซิดและพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำถึง 15 วัน และฟิล์มคอมโพสิตยังสามารถรักษาค่าพีเอช และคุณภาพทางประสาทสัมผัสของเนยแข็งได้ดีกว่า เนื่องจากประสิทธิภาพยับยั้งแบคทีเรียแลคติกแอซิด นอกจากนี้ Gumiero *et al.* (2013) ยังได้ทำการทดลองรักษาคุณภาพของเนยแข็งสตรีกกีโนด้วยถาดพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ร้อยละ 1 โดยน้ำหนักและแคลเซียมคาร์บอเนต โดยสามารถรักษาโครงสร้างดั้งเดิมของเนยแข็งได้จากการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียแลคติกแอซิดจาก 5.9 เป็น 3.1 log (โคโลนี/กรัม) และ โคลิฟอร์มจาก 2.8 เป็น 1.0 log (โคโลนี/กรัม) ในวันที่ 28 ของการเก็บรักษา

จากงานวิจัยข้างต้นฟิล์มโลหะออกไซด์คอมโพสิตมีส่วนในการยืดอายุผลไม้ด้วยการเพิ่มสมบัติป้องกันการซึมผ่านของแก๊สและไอน้ำของฟิล์ม ส่งผลให้ผลไม้ไม่มีการสูญเสียน้ำหนักที่น้อยกว่า และลดอัตราการหายใจซึ่งนำมาสู่การลดกิจกรรม และการชราของเซลล์

ไทเทเนียมไดออกไซด์มีสมบัติการกำจัดเอทิลีนส่งผลลดอัตราการเกิดสีน้ำตาลในผลไม้ และซิลิกอนไดออกไซด์ยังมีผลกระตุ้นการทำงานของเอนไซม์ซึ่งมีส่วนเกี่ยวข้องกับการกำจัดสารอนุมูลอิสระ นอกจากนี้ไทเทเนียมไดออกไซด์และซิงค์ออกไซด์มีประสิทธิภาพต้านทานเชื้อจุลินทรีย์ได้จากการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงซึ่งช่วยลดอัตราการเน่าเสียจากจุลินทรีย์ในผลไม้เนื้อสัตว์ และผลิตภัณฑ์แปรรูป

จากงานวิจัยข้างต้นจะเห็นว่าการใช้ฟิล์มโลหะออกไซด์คอมโพสิตในปริมาณที่เหมาะสมส่งผลส่งเสริมทั้งสมบัติเชิงกล สมบัติการป้องกันแก๊สและไอน้ำ รวมถึงความเสถียรทางความร้อนและเมื่อนำมาเป็นบรรจุภัณฑ์ยังให้ผลการรักษาคุณภาพรวมถึงการยืดอายุการเก็บรักษาที่ดี แต่งานวิจัยส่วนมากทำการขึ้นรูปฟิล์มด้วยกระบวนการหล่อขึ้นรูปด้วยตัวทำละลาย ซึ่งอาจไม่เหมาะสมกับการผลิตในระดับอุตสาหกรรมและอาจมีตัวทำละลายที่เป็นอันตรายตกค้าง หรือต้องมีการจัดการของเสียจากกระบวนการผลิต ซึ่งแตกต่างจากกระบวนการอัดรีด งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นศึกษาการปรับปรุงสมบัติฟิล์มพลาสติกชีวภาพด้วยการผสมอนุภาคโลหะออกไซด์และขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดรีดซึ่งสามารถผลิตออกได้ในปริมาณมากและไม่มีการใช้ทำละลาย การผลิตบรรจุภัณฑ์ด้วยกระบวนการอัดรีดมีศักยภาพสูงต่อการประยุกต์ใช้ในการผลิตพลาสติกชีวภาพระดับอุตสาหกรรม ผลผลิตที่เกิดขึ้นจากงานวิจัยนี้จะเป็นข้อมูลที่สำคัญสำหรับการผลิตพลาสติกชีวภาพที่มีการเติมโลหะออกไซด์สำหรับการประยุกต์ใช้ในระดับอุตสาหกรรม

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

วัสดุ

1. สตาร์ชมันสำปะหลังแเอเชียเทต (SMS Corporation Co., Ltd, Thailand)
2. พอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทรฟทาเลท (Polymats co. ltd, Thailand)
3. กสิเชอรอล (Sac Sci-Eng Ltd., Thailand)
4. ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Prime Nanotechnology Co., Ltd., Thailand)
5. ซิงค์ออกไซด์ (Prime Nanotechnology Co., Ltd., Thailand)
6. ซิลิคอนไดออกไซด์ (Prime Nanotechnology Co., Ltd., Thailand)
7. เปปโติน (Himedia, India)
8. 3 M Petrifilm™ aerobic plate (3 M, USA)
9. 3 M Petrifilm™ lactic acid bacteria (3 M, USA)
10. กรดแอซิดิก (Merk, Germany)
11. เอทานอล (Merk, Germany)
12. พาราฟอร์มัลดีไฮด์ (Merk, Germany)

อุปกรณ์

1. เดซีเคเตอร์ (A.I.M.project Co., Ltd., Thailand)
2. ไมโครมิเตอร์ (547-401, Mitutoyo, Japan)
3. เครื่องผสมแป้ง (Stelang Electric Appliance Co., Ltd., China)
4. เครื่องอัดรีดสกรูคู่ (Labtech Engineering, Thailand)
5. เครื่องเป่าฟิล์มสกรูเดี่ยว (Labtech Engineering, Thailand)
6. เครื่องตัดเม็ดพลาสติก (Labtech Engineering, Thailand)
7. ตู้อบลมร้อน (WTB BinderFD R3 controller: ED53/E2, USA)
8. ตู้ควบคุมความชื้นและอุณหภูมิ (Climate chamber Binder KBF 720, GmbH, Germany)

9. เครื่องวัดอัตราการไหล (MF30, Instron, USA)
10. เครื่องทดสอบแรงดึง (Instron test machine) (Model 5965, Instron, UK)
11. เครื่องวัดอัตราการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจน (Oxygen permeation analyzer) (Model 8501, Illinois, USA)
12. เครื่องทดสอบมุมสัมผัส (Dataphysics OCA15EC, Dataphysics Instruments GmbH, Germany)
13. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) (FEI Quanta 450, Thermo Fisher Scientific, USA)
14. เครื่องฉาบผิวตัวอย่างด้วยโลหะหนัก (sputter coater) (SCD 040, Balzers Union Ltd.)
15. กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic force microscopy, AFM) (MFP-3D-Bio, Asylum Research, USA)
16. เครื่องยววิชิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Evolution 300 UV-Vis Spectrophotometer, USA)
17. เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (Fourier transform infrared spectrometer) (Tensor 27 FTIR, Bruker Corporation, Germany)
18. เครื่องตีบดตัวอย่าง (BagMixer 400 Model P, Interscience, Singapore)
19. เครื่องวิเคราะห์ชนิดและธาตุปริมาณน้อยโดยหลักการคายแสงของธาตุด้วยการกระตุ้นจากพลาสมา (Agilent 5100 SVDV ICP-OES, Agilent Technologies Inc., Santa Clara, CA, USA)
20. เครื่องวิเคราะห์เชิงกลแบบไดนามิก (Dynamic Mechanical Thermal Analysis, DMTA) (Mettler Toledo, Switzerland)
21. ตู้เย็น (Sanden inter cool, YEM-1105iP, Italy)
22. เครื่องไฮโมจิไนซ์ (IKA, Ultra Terrax T18, Germany)
23. หม้อนึ่งแรงดันไอน้ำ (Autoclave) (ES-315, Tomy Seiko Co., Ltd., Japan)

วิธีการ

1. การขึ้นรูปฟิล์มพลาสติกเทอร์โมพลาสติกสตาบิลไอโซเมอร์ออกไซด์และพอลิวิทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท

อบไล่ความชื้นสตาบิลไอโซเมอร์สำปะหลังแอซีเทตที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมงและนำสตาบิลไอโซเมอร์ และ ไอโซเมอร์ออกไซด์ ผสมกันในอัตราส่วนโดยน้ำหนักตามตารางที่ 6 ด้วยเครื่องผสมแป้งเป็นเวลา 10 นาที นำวัสดุผสมไปขึ้นรูปเป็นเม็ดพลาสติกด้วยเครื่องอัดรีดสกรูคู่ที่อุณหภูมิ 80 ถึง 150 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบสกรู 180 รอบ/นาที และนำเส้นพลาสติกที่ได้เข้าสู่เครื่องตัดเม็ด จากนั้นนำเม็ดพลาสติกที่ได้มาผสมกับเม็ดพลาสติกพอลิวิทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท ในอัตราส่วนโดยน้ำหนัก 40:60 สำหรับสตาบิลไอโซเมอร์และพอลิวิทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลทตามลำดับ ขึ้นรูปเป็นเม็ดพลาสติกด้วยเครื่องอัดรีดสกรูคู่ โดยใช้อุณหภูมิ 80 ถึง 145 องศาเซลเซียส ใช้ความเร็วรอบสกรู 200 รอบ/นาที นำเส้นพลาสติกที่ได้เข้าสู่เครื่องตัดเม็ด และนำมาขึ้นรูปฟิล์มด้วยกระบวนการอัดรีดเป่าฟิล์มด้วยเครื่องอัดรีดสกรูเดี่ยวโดยใช้อุณหภูมิ 150 ถึง 165 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบสกรู 29 ถึง 35 รอบ/นาที ความเร็วลูกกลิ้งหนีบ 2.0 ถึง 3.5 เมตร/นาที และเก็บรักษาฟิล์มในถุงอะลูมิเนียมจนกว่าจะนำไปศึกษา

2. การวิเคราะห์สมบัติเม็ดพลาสติก

2.1 ดัชนีการหลอมไหลของเม็ดพลาสติก โดยอบไล่ความชื้นเม็ดพลาสติกที่ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนการทดสอบอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM1238-10 ด้วยเครื่องวัดอัตราการหลอมไหล โดยวัดดัชนีการหลอมไหลของเม็ดพลาสติก 5 กรัม ที่สภาวะอุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส และใช้น้ำหนักกดทับ 2.16 กิโลกรัม ตัดพลาสติกหลอมที่ไหลออกมาภายในเวลา 30 วินาที จำนวน 5 ซ้ำ และชั่งน้ำหนัก คำนวณดัชนีการหลอมไหลในหน่วย กรัม/10นาที

3. การวิเคราะห์สมบัติฟิล์ม

3.1 สเปกตรัมการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของฟิล์ม วิเคราะห์ด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี โดยตัดตัวอย่างฟิล์มขนาด 1×1 เซนติเมตร บ่มในสภาวะความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 50 และอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส อย่างน้อย 2 วัน ก่อนการทดสอบ และวิเคราะห์

สเปกตรัมการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดด้วยโหมดการใช้งานแบบลดทอนแสงสะท้อนรวม (attenuated total reflectance, ATR) ใช้หัวกดเพชร วัดค่าสเปกตรัมการดูดกลืนในช่วง 500 ถึง 4000 เซนติเมตร⁻¹ ที่ความละเอียด 4 เซนติเมตร⁻¹ โดยทดสอบฟิล์มสุตรละ 2 ชั้น

3.2 โครงสร้างจุลภาคของฟิล์ม โดยตัดตัวอย่างขนาด 1×10 เซนติเมตร แช่และหักตัวอย่างในไนโตรเจนเหลวด้วยปากคีบ ตัดตัวอย่างลงบนฐานวางด้วยเทปคาร์บอน นำไปเคลือบด้วยทองด้วยเครื่องฉาบผิวตัวอย่างด้วยโลหะหนัก และวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด โดยใช้แรงดันไฟฟ้า 10 กิโลโวลต์ บันทึกภาพที่กำลังขยาย 1000 เท่าสำหรับพื้นที่ผิวและ 2000 เท่าสำหรับพื้นที่หน้าตัด

ตารางที่ 6 สัดส่วนโดยมวลของสตาร์ช กลีเซอรอล และโลหะออกไซด์

สูตร	สตาร์ช (กรัม)	กลีเซอรอล (กรัม)	ไทเทเนียม ไดออกไซด์ (กรัม)	ซิงค์ ออกไซด์ (กรัม)	ซิลิกอน ไดออกไซด์ (กรัม)
TPS	100	35	-	-	-
TPS_TiO ₂ 1%	100	35	2.5	-	-
TPS_TiO ₂ 2%	100	35	5.0	-	-
TPS_TiO ₂ 3%	100	35	7.5	-	-
TPS_TiO ₂ 4%	100	35	10.0	-	-
TPS_TiO ₂ 5%	100	35	12.5	-	-
TPS_ZnO 1%	100	35	-	2.5	-
TPS_ZnO 2%	100	35	-	5.0	-
TPS_ZnO 3%	100	35	-	7.5	-
TPS_ZnO 4%	100	35	-	10.0	-
TPS_ZnO 5%	100	35	-	12.5	-
TPS_SiO ₂ 0.5%	100	35	-	-	1.25
TPS_SiO ₂ 1%	100	35	-	-	2.5

3.3 สภาพพื้นผิวระดับจุลภาคของฟิล์มขนาด 5×5 ไมโครเมตร วิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมด้วยเทคนิค Tapping Mode ที่ระยะห่าง 225 ไมโครเมตร คลื่นความถี่ 190 กิโลเฮิร์ตซ์ ใช้ที่ปลายความโค้งปลายรัศมี 8 นาโนเมตร และอัตราสแกน 0.8 เฮิร์ตซ์

3.4 สมบัติเชิงกล วิเคราะห์ด้วยค่าต้านทานแรงดึง (tensile test) อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D882 ตัดตัวอย่างฟิล์มขนาด 2.5×15 เซนติเมตร ในทิศตามแนวเครื่องจักรและตามขวาง เครื่องจักรจำนวนทีละ 10 ซ้ำ วัดความหนาฟิล์มด้วยไมโครมิเตอร์และบ่มในสภาวะความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 50 และอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส อย่างน้อย 2 วัน ก่อนการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง โดยใช้ความเร็วในการดึงทดสอบ 500 มิลลิเมตร/นาที และระยะห่างระหว่างตัวจับ 5 เซนติเมตร

3.5 สมบัติการส่องผ่านของแสง วิเคราะห์ด้วยเครื่องยูวีวิซิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ตัดตัวอย่างฟิล์มขนาด 3×4 เซนติเมตร วัดความหนาฟิล์มด้วยไมโครมิเตอร์ วางฟิล์มบนแท่นโลหะที่มีร่อง (slit) ยึดด้วยแม่เหล็ก และศึกษาอัตราการส่องผ่านของแสงในช่วงความยาวคลื่นแสง 200 ถึง 800 นาโนเมตร โดยทดสอบฟิล์มสุตรละ 3 ซ้ำ

3.6 สมบัติการป้องกันการซึมผ่านของไอน้ำ วิเคราะห์ด้วย standard cup method อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM E96-80 โดยใช้ฟิล์มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7 เซนติเมตร สุตรละ 3 ซ้ำ วัดความหนาฟิล์มด้วยไมโครมิเตอร์และบ่มในสภาวะความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 50 และอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส อย่างน้อย 2 วัน ก่อนการทดสอบ บรรจุซิลิกาเจลลงในถ้วยอะลูมิเนียม ยึดฟิล์มด้วยวงแหวนและปิดผนึกด้วยพาราฟิน เก็บรักษาตัวอย่างในสภาวะความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 50 และอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส จดบันทึกค่าการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของถ้วยต่อเวลา และคำนวณสภาพให้ซึมผ่านของไอน้ำดังสมการ [1]

$$\text{สภาพให้ซึมผ่านของไอน้ำ} = \frac{(\text{อัตราการซึมผ่านของไอน้ำ} \times \text{ความหนาฟิล์ม})}{\text{ความแตกต่างของความดันไอน้ำระหว่าง 2 ด้านของฟิล์ม}} \quad [1]$$

3.7 สมบัติการป้องกันการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจน อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D3985 โดยใช้ฟิล์มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 13 เซนติเมตร สุตรละ 3 ซ้ำ วัดความหนาฟิล์มด้วย

ไมโครมิเตอร์และบ่มในสภาวะความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 50 และอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส อย่างน้อย 2 วัน ก่อนการทดสอบ วิเคราะห์การซึมผ่านของแก๊สออกซิเจน ด้วยเครื่องวัดอัตราการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจน และคำนวณค่าสภาพให้ซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนดังสมการ [2]

$$\text{สภาพให้ซึมผ่านของแก๊สออกซิเจน} = \frac{(\text{อัตราการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจน} \times \text{ความหนาฟิล์ม})}{\text{ความแตกต่างของความดันออกซิเจนระหว่าง 2 ด้านของฟิล์ม}}$$

[2]

3.8 มุมสัมผัสหยดน้ำบนพื้นผิว วิเคราะห์ด้วยเครื่องทดสอบมุมสัมผัส หยดน้ำกลั่นปริมาตร 3 ไมโครลิตร จากไมโครไซริงค์ลงฟิล์มขนาด 1×10 เซนติเมตร บนแท่นวาง ถ่ายภาพหยดน้ำโดยทันทีด้วยโปรแกรม SCA และคำนวณค่ามุมสัมผัสหยดน้ำจากค่าเฉลี่ยของมุมสัมผัสหยดน้ำจำนวน 6 หยด

3.9 สมบัติเชิงกลพลวัต โดยตัดตัวอย่างขนาด 5×5 เซนติเมตร นำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์เชิงกลแบบไดนามิกในโหมดการดึงที่อุณหภูมิระหว่าง -100 ถึง 100 องศาเซลเซียส ใช้อัตราการให้ความร้อน 3 องศาเซลเซียส/นาที และอัตราการแสกน 0.5, 1, 5, 10 และ 20 เฮิร์ตซ์

3.10 ไมเกรชันจำเพาะของโลหะ อ้างอิงตาม COMMISSION REGULATION (EU) No. 10/2011 โดยแช่ฟิล์มผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ (ขนาด 5×5 เซนติเมตร) ซิงค์ออกไซด์ (ขนาด 10×10 เซนติเมตร) และซิลิคอนไดออกไซด์ (ขนาด 10×10 เซนติเมตร) ชนิดละ 2 ชั่ว ในอาหารจำลองเอทานอลความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยปริมาตร กรดแอสซิติคความเข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก/ปริมาตร และน้ำกลั่น (ปริมาตร 120 มิลลิลิตร สำหรับฟิล์มที่ผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ และ 100 มิลลิลิตร สำหรับฟิล์มที่ผสมซิงค์ออกไซด์และซิลิคอนไดออกไซด์) ในภาชนะปิดและปิดผนึกซ้ำด้วยพาราฟิล์ม เก็บรักษาตัวอย่างในตู้ควบคุมอุณหภูมิที่ 5 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 วัน และนำอาหารจำลองที่ผ่านการทดสอบเข้าสู่การวิเคราะห์ค่าไมเกรชันเฉพาะ (specific migration) ของโลหะ (วิเคราะห์โลหะชนิดไทเทเนียม ซิงค์ และซิลิคอนสำหรับฟิล์มที่ผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ ซิงค์ออกไซด์ และซิลิคอนไดออกไซด์ตามลำดับ) ด้วยเครื่องวิเคราะห์ชนิดและธาตุปริมาณน้อยโดยหลักการคายแสงของธาตุด้วยการกระตุ้นจากพลาสมาจำนวน 2 ชั่ว ต่อตัวอย่างทดลอง ด้วยสภาวะการไหลของแก๊สชนิดพ่น พลาสมา และแก๊สช่วยในอัตรา 0.8, 12 และ 1 ลิตร/นาที ตามลำดับ ใช้พลังงานความถี่วิทยุ 1.20 กิโลวัตต์ เวลาในการรักษาเสถียรภาพ 20 วินาที

บันทึกค่าที่เวลา 5 วินาที ด้วยมุมมองคู่แนวตั้งแบบซิงโครนัสที่ระดับความสูง 8 มิลลิเมตร และรายงานค่าไมเกรชันจำเพาะของโลหะในหน่วย มิลลิกรัมของโลหะ/ตารางเดซิเมตรของพื้นที่ฟิล์ม

4. การศึกษาประสิทธิภาพของฟิล์มในการรักษาคุณภาพอาหาร

4.1 การศึกษาประสิทธิภาพของฟิล์มในการรักษาคุณภาพเนื้อสัตว์

ตัดฟิล์มขนาด 10×10 เซนติเมตร ปิดผนึกด้วยความร้อนสามด้าน และฆ่าเชื้อด้วยแสงยูวีเป็นเวลา 7 นาที บรรจุเนื้อหมูบดลงถุงซิลสามด้านจากฟิล์มที่ผลิตขึ้นและบรรจุตัวอย่างชำลงถุงสุญญากาศและปิดผนึกด้วยความร้อน เก็บรักษาตัวอย่างในตู้เย็นอุณหภูมิ 5 ± 2 องศาเซลเซียส ซักตัวอย่างมาวิเคราะห์ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ชนิดแบคทีเรียที่ต้องการออกซิเจน (aerobic bacteria) ในเนื้อที่ผ่านการเก็บรักษาวันที่ 0, 3, 6, 9 และ 12 โดยปั่นเนื้อตัวอย่างกับสารละลายเปปโตนความเข้มข้นร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก/ปริมาตร เจือจางตัวอย่างด้วยสารละลายเปปโตนด้วยอัตราส่วน 1:10 หยดตัวอย่างที่เจือจางปริมาณ 1 มิลลิลิตร ลงแผ่นเลี้ยงเชื้อ 3 M Petrifilm™ aerobic plate bacteria บ่มที่ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ถึง 48 ชั่วโมง นับจำนวนโคโลนี และรายงานจำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมด (total viable count, TVC) ในหน่วย log (โคโลนี/กรัมเนื้อหมูบด)

4.2 การศึกษาประสิทธิภาพของฟิล์มในการรักษาคุณภาพผลไม้

ตัดฟิล์มขนาด 10×20 เซนติเมตร ปิดผนึกด้วยความร้อนสามด้าน และฆ่าเชื้อด้วยแสงยูวีเป็นเวลา 7 นาที บรรจุกล้วยหอมดิบด้วยถุงซิลสามด้านจากฟิล์มที่ผลิตขึ้นและปิดผนึกด้วยความร้อน เก็บตัวอย่างที่อุณหภูมิห้องและมีแสงธรรมชาติ และบันทึกลักษณะปรากฏระหว่างการเก็บรักษาด้วยการถ่ายภาพ

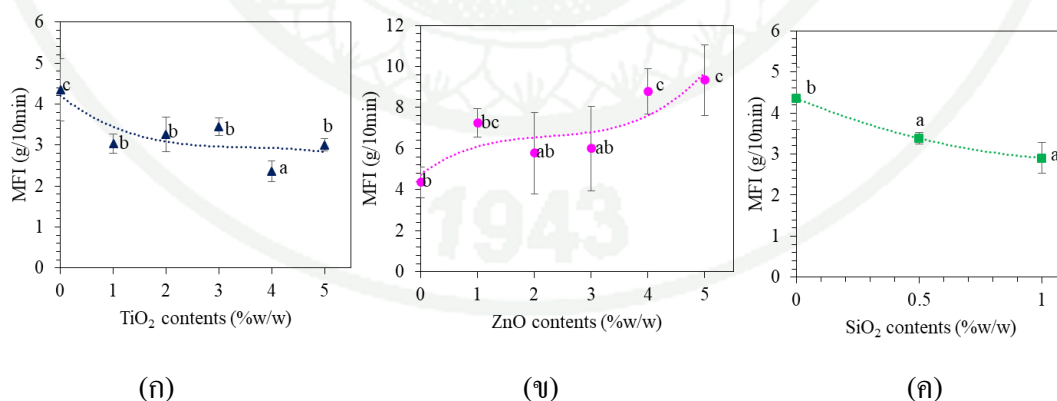
5. การวิเคราะห์ทางสถิติ

วิเคราะห์ความแตกต่างทางสถิติด้วยโปรแกรม SPSS version 17 โดยการวิเคราะห์ความแปรปรวน (analysis of variance, ANOVA) ด้วยวิธี Duncan ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ตัวอักษร A ถึง E, a ถึง e และ α ถึง δ แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติของตัวอย่าง

ผลและวิจารณ์

1. ดัชนีการหลอมไหลของเม็ดพลาสติก

ดัชนีการหลอมไหลของเม็ดพลาสติกพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทรฟทาเลทและเทอร์โมพลาสติกสไตร์ชเบลนด์ผสมโลหะออกไซด์แสดงดังภาพที่ 12 เมื่อผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ (ภาพที่ 12 ก) ดัชนีการหลอมไหลของเม็ดพลาสติกลดลงจาก 4.4 ± 0.8 กรัม/10นาที เป็น 2.4 ถึง 3.4 เมื่อเติมไทเทเนียมไดออกไซด์ดังแสดงในภาพที่ 16 ก บ่งชี้ว่าความหนืดเมื่อหลอมเหลวของเม็ดพลาสติกเพิ่มขึ้นจากการส่งเสริมการกระจายความร้อนของไทเทเนียมไดออกไซด์ในเมทริกซ์ และอันตรกิริยาที่ระหว่างไทเทเนียมไดออกไซด์และเมทริกซ์พอลิเมอร์ส่งผลด้านทานการไหลของพอลิเมอร์หลอม ดัชนีการหลอมไหลของเม็ดพลาสติกเบลนด์ที่ผสมซิงค์ออกไซด์ในภาพที่ 12 ข มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเพิ่มปริมาณซิงค์ออกไซด์มากกว่าร้อยละ 3 แสดงถึงผลของอันตรกิริยาระหว่างซิงค์ออกไซด์และเมทริกซ์พอลิเมอร์ต่อการลดความหนืดขณะหลอมเหลว เมื่อเพิ่มปริมาณซิงค์ออกไซด์ และซิงค์ไอออนยังมีผลต่อการจัดขวางการรวมตัวของสายโซ่พอลิเมอร์ ซึ่งมีผลในการลดอันตรกิริยาระหว่างสายโซ่ของพอลิเมอร์ส่งผลให้การไหลขณะหลอมเหลวเพิ่มขึ้น และดัชนีการหลอมไหลของเม็ดพลาสติกเบลนด์ที่ผสมซิลิคอนไดออกไซด์และในภาพที่ 12 ค ดัชนีการหลอมเหลวของเม็ดพลาสติกเพิ่มขึ้นเมื่อเติมซิลิคอนไดออกไซด์เช่นเดียวกับไทเทเนียมไดออกไซด์



ภาพที่ 12 ดัชนีการหลอมไหลของเม็ดพลาสติกพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทรฟทาเลทและเทอร์โมพลาสติกสไตร์ชเบลนด์ผสมโลหะออกไซด์ (ก) ไทเทเนียมไดออกไซด์ (ข) ซิงค์ออกไซด์ และ (ค) ซิลิคอนไดออกไซด์

2. ลักษณะปรากฏและสมบัติการส่องผ่านของแสงของฟิล์ม

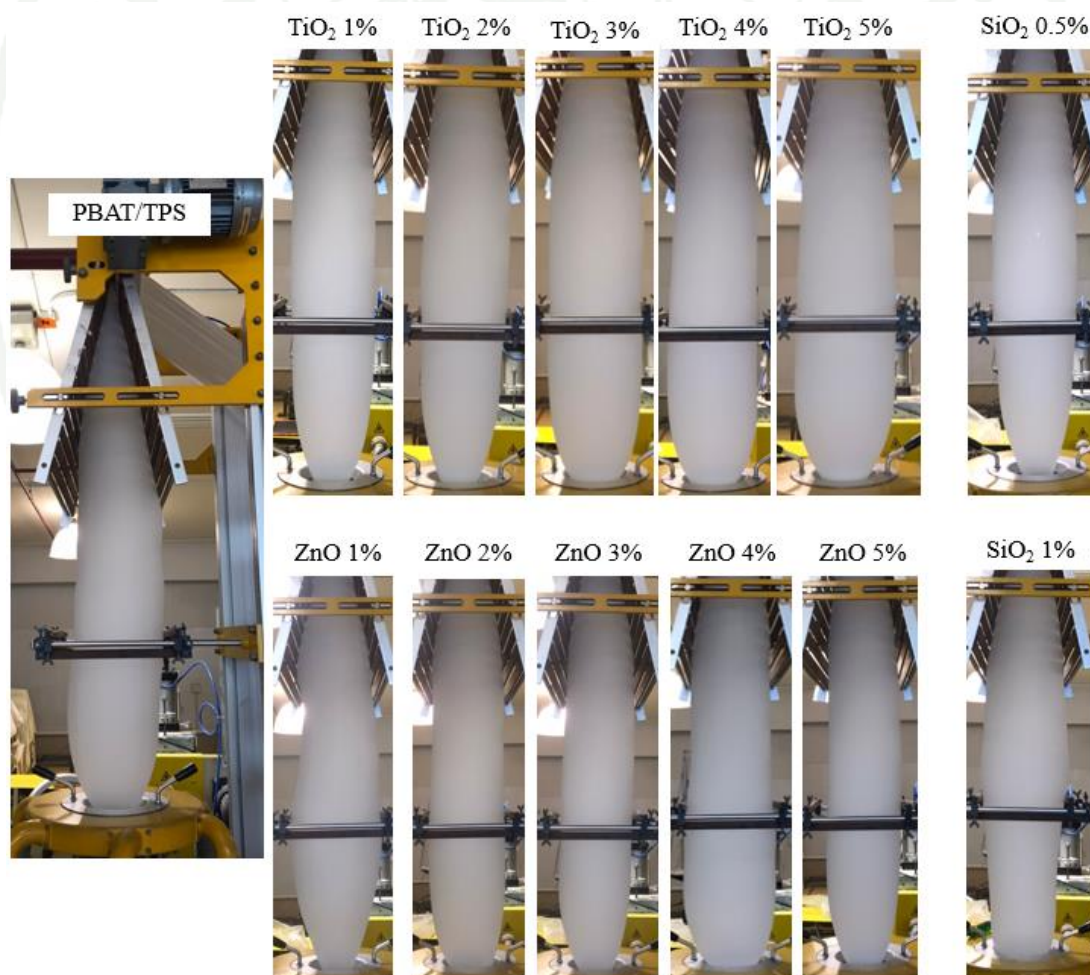
ลักษณะปรากฏของฟิล์มขณะขึ้นรูปโดยกระบวนการเป่าอัดรีดแสดงดังภาพที่ 13 ฟิล์มพอลิ บิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลทและเทอร์โมพลาสติกสตาโรซเบลนด์ผสมโลหะออกไซด์สามารถ เป่าขึ้นรูปเป็นรูปทรงทอกลมได้ทุกสูตร ฟิล์มมีลักษณะขุ่นและความขุ่นของฟิล์มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่ม ปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์และซิงค์ออกไซด์ดังภาพที่ 14 ซึ่งแสดงร้อยละการส่องผ่านของ แสงผ่านฟิล์มพอลิ บิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลทและเทอร์โมพลาสติกสตาโรซเบลนด์ผสมโลหะ ออกไซด์ และยังแสดงถึงการป้องกันการส่องผ่านของแสงอย่างสมบูรณ์ในช่วงคลื่นต่ำกว่า 300 นา โนเมตร อันเป็นผลเนื่องมาจากการดูดกลืนแสงของวงแหวนอะโรมาติกในโครงสร้างพอลิบิวทิ ลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท

ภาพที่ 14 ก เมื่อเติมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 2 ถึง 5 ส่งผลลดการส่อง ผ่านของแสง ในช่วงคลื่นแสงที่มองเห็นได้ (400 ถึง 700 นาโนเมตร) ด้วยการกระเจิงแสงของ ไทเทเนียมไดออกไซด์บริเวณพื้นที่ผิวของอนุภาคโลหะออกไซด์และเมทริกซ์พอลิเมอร์ การเติม ไทเทเนียมไดออกไซด์ร้อยละ 1 ส่งผลเพิ่มร้อยละการส่องผ่านของแสงในช่วงความยาวคลื่นที่สูง กว่า 650 นาโนเมตร เป็นผลมาจากการปรับปรุงโครงสร้างของฟิล์ม โดยไทเทเนียมไดออกไซด์โดย การเพิ่มปริมาณ โครงสร้างออสซิลอนของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซการส่องผ่านของแสงจึงเพิ่มขึ้น ทั้งนี้การเติมไทเทเนียมไดออกไซด์ร้อยละ 1 ช่วยป้องกันการส่องผ่านของแสงในช่วงคลื่นแสงยูวี โดยเฉพาะยูวีเอ (315 ถึง 400 นาโนเมตร) ได้เป็นอย่างมากซึ่งเป็นประโยชน์สำหรับการบรรจุอาหาร ที่เสื่อมคุณภาพจากแสงหรือไวดต่อการเปลี่ยนแปลงที่เหนียวนำด้วยแสงยูวีได้ง่าย

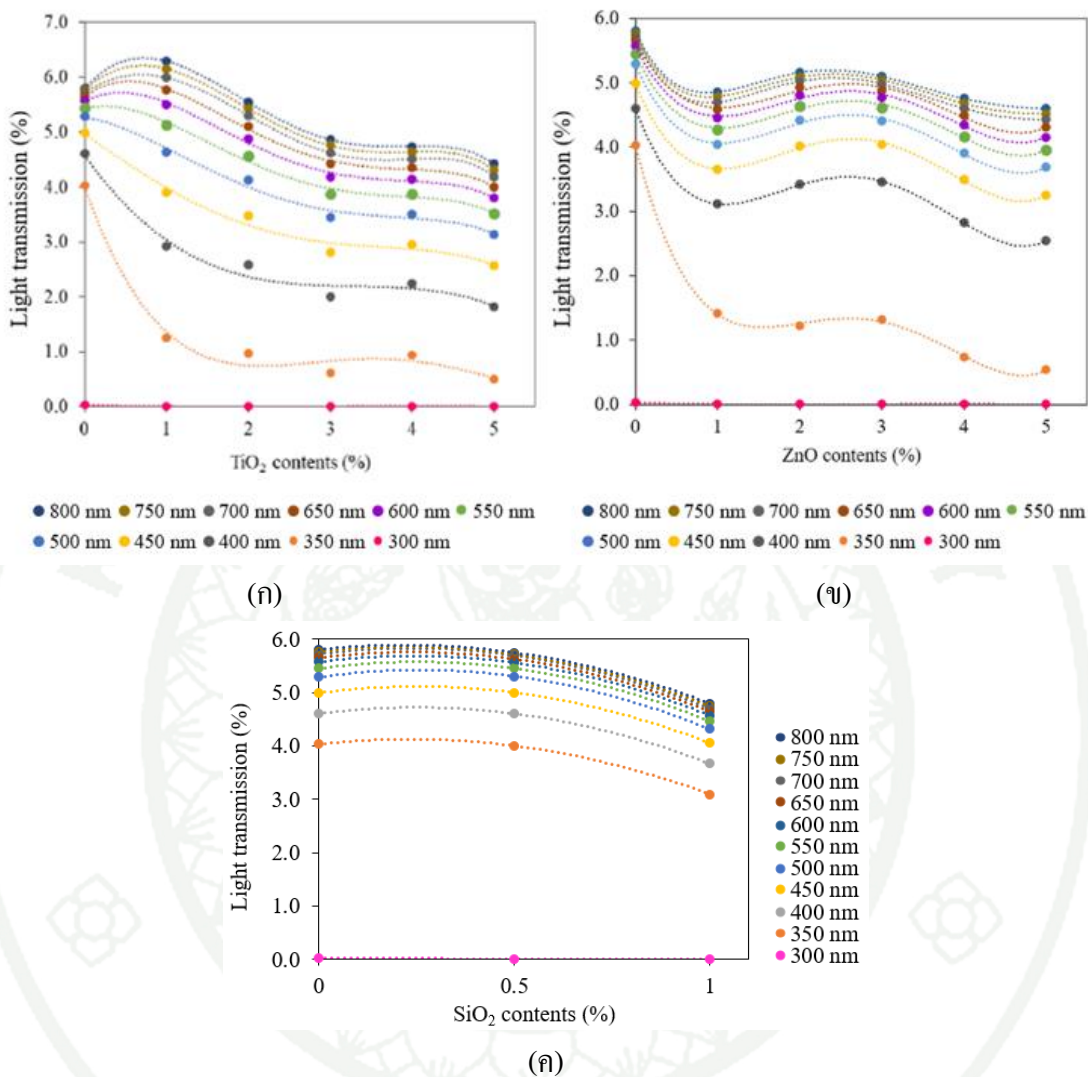
ภาพที่ 14 ข เมื่อเติมซิงค์ออกไซด์พบว่าค่าร้อยละการส่องผ่านของแสงในช่วงคลื่นที่ มองเห็นได้ลดลงเนื่องจากการกระเจิงและสะท้อนแสงของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ และลดการส่อง ผ่านของแสงในช่วงความยาวคลื่นต่ำกว่า 380 นาโนเมตร (ช่วงแสงยูวี) โดยเฉพาะฟิล์มที่เติมซิงค์ออก ไซด์ร้อยละ 4 และ 5 ซึ่งปรากฏร้อยละการส่องผ่านของแสงเพียงน้อยกว่า 1 ในช่วงคลื่นที่ต่ำกว่า 380 นาโนเมตร

เมื่อเติมซิลิคอนไดออกไซด์ร้อยละ 1 (ภาพที่ 14 ค) ส่งผลให้ค่าการส่องผ่านของแสงลดลง จากการกระเจิงแสงและสะท้อนแสงของอนุภาคซิลิคอนไดออกไซด์ แต่ไม่มีผลในการลดการส่อง ผ่านของแสงในช่วงยูวี ความแตกต่างในการลดการส่องผ่านของแสงของโลหะออกไซด์ทั้งสาม

ชนิดในช่วงแสงยูวีเป็นผลมาจากความสามารถในการดูดกลืนแสงในช่วงรังสียูวีที่แตกต่างกัน โดยมีปัจจัยหลักมาจากช่องว่างระหว่างแถบพลังงานของโลหะออกไซด์ โดยไทเทเนียมไดออกไซด์ ซิงค์ออกไซด์ และซิลิคอนไดออกไซด์มีช่องว่างระหว่างแถบพลังงานที่ประมาณ 3.20, 3.37 และ 9.30 อิเล็กตรอนโวลต์ตามลำดับ และแสงในช่วงรังสียูวีมีพลังงานโฟตอนประมาณ 3.15 ถึง 3.94 อิเล็กตรอนโวลต์ ไทเทเนียมไดออกไซด์และซิงค์ออกไซด์จึงแสดงการดูดกลืนรังสียูวีเอ ซึ่งการป้องกันการส่องผ่านของรังสียูวีนี้มีผลอย่างมากในด้านของการลดการเสื่อมเสียของผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาซึ่งถูกกระตุ้นด้วยแสง การเกิดออกซิเดชัน ซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสีหรือกลิ่นรสของผลิตภัณฑ์ โดยฟิล์มที่ผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ร้อยละ 5 ปรากฏการป้องกันการส่องผ่านของแสงสูงที่สุด



ภาพที่ 13 ลักษณะปรากฏของฟิล์มพอลิบิวทิลีนอะดิเพต-โค-เทเรฟทาเลทและเทอร์โมพลาสติกสตาบิลไรเซอร์ผสมโลหะออกไซด์ชนิดขึ้นรูป



ภาพที่ 14 ร้อยละการส่องผ่านของแสงของฟิล์มพอลิเมอร์ที่ลิโนอะดิเพท-โค-เทรฟทาเลทและเทอร์โมพลาสติกสตาเรชเบลนด์ผสมโลหะออกไซด์ขณะขึ้นรูป (ก) ไทเทเนียมไดออกไซด์ (ข) ซิงค์ออกไซด์ และ (ค) ซิลิคอนไดออกไซด์

3. สเปกตรัมการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของฟิล์ม

สเปกตรัมการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของฟิล์มพอลิเมอร์ที่ลิโนอะดิเพท-โค-เทรฟทาเลทและเทอร์โมพลาสติกสตาเรชเบลนด์ผสมโลหะออกไซด์และอัตราส่วนสเปกตรัมการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดแสดงดังภาพที่ 15 และ 16 สเปกตรัมการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดที่เลขคลื่น 500 ถึง 1500

เซนติเมตร⁻¹ แสดงถึงลักษณะทางเคมีของส่วนประกอบของพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท และเทอร์โมพลาสติกสตาโรซ์ (Bumbudsanpharoke *et al.*, 2022)

พอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลทดูดกลืนรังสีอินฟราเรดแสดงพีคที่เลขคลื่น 728 และ 874 เซนติเมตร⁻¹ เนื่องจากการสั่นของโครงสร้างวงแหวนฟีนิลในแบบการสั่นนอกระนาบและในระนาบ (out-of-plane bending และ in-plane bending) ตามลำดับ การดูดกลืนรังสีอินฟราเรดที่เลขคลื่น 1732 และ 1714 เซนติเมตร⁻¹ แสดงถึงการสั่นของพันธะคู่ระหว่างคาร์บอน=ออกซิเจน (C=O stretching) ในหมู่คาร์บอนิลในโครงสร้างของพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท ในส่วนของโครงสร้างอสังฐานและผลึกตามลำดับ นอกจากนี้สเปกตรัมการดูดกลืนที่เลขคลื่น 1714 เซนติเมตร⁻¹ ยังรวมเข้ากับเลขคลื่น 1713 เซนติเมตร⁻¹ อัตราส่วนการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดที่ 1732 และ 1713 (I_{1732}/I_{1713}) จึงแสดงถึงอัตราส่วนโครงสร้างอสังฐานต่อผลึกของพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท

เฟสของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซ์ดูดกลืนรังสีอินฟราเรดแสดงพีคที่เลขคลื่น 1018 และ 1080 เซนติเมตร⁻¹ เนื่องจากการสั่นของพันธะระหว่างอะตอมคาร์บอน-ออกซิเจน (C-O stretching) และคาร์บอน-ออกซิเจน-คาร์บอน (C-O-C stretching) ตามลำดับ การดูดกลืนรังสีอินฟราเรดที่เลขคลื่น 1047 และ 995 เซนติเมตร⁻¹ จึงแสดงถึงพันธะคาร์บอน-หมู่ไฮดรอกซิล (C-OH) ในโครงสร้างสตาโรซ์แบบผลึก ขณะที่เลขคลื่น 1022 เซนติเมตร⁻¹ แสดงถึงโครงสร้างสตาโรซ์แบบอสังฐาน อัตราส่วนการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดที่ 1022 และ 995 เซนติเมตร⁻¹ (I_{1022}/I_{995}) จึงแสดงถึงอัตราส่วนโครงสร้างสตาโรซ์แบบอสังฐานต่อโครงสร้างแบบผลึก (Zhu *et al.*, 2021) การดูดกลืนรังสีอินฟราเรดที่เลขคลื่น 3000 ถึง 3600 เซนติเมตร⁻¹ แสดงถึงการสั่นของพันธะระหว่างอะตอมออกซิเจนและไฮโดรเจน (O-H stretching) เนื่องจากพันธะไฮโดรเจน ระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของสตาโรซ์และอัตราส่วนการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดที่ 3331 และ 1713 เซนติเมตร⁻¹ (I_{3331}/I_{1713}) แสดงถึงอัตราส่วนของพันธะไฮโดรเจนในเทอร์โมพลาสติกสตาโรซ์ต่อพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท (Abdullah *et al.*, 2020; Bumbudsanpharoke *et al.*, 2022; Cao *et al.*, 2020)

ภาพที่ 16 ก แสดงอัตราส่วนของสเปกตรัมการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของฟิล์มพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลทและเทอร์โมพลาสติกสตาโรซ์เบลนด์ผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ ฟิล์มที่เติมไทเทเนียมไดออกไซด์แม้สูงถึงร้อยละ 5 ปรากฏสเปกตรัมการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดในเฟสของพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลทที่เหมือนกับฟิล์มที่ไม่เติมอนุภาค

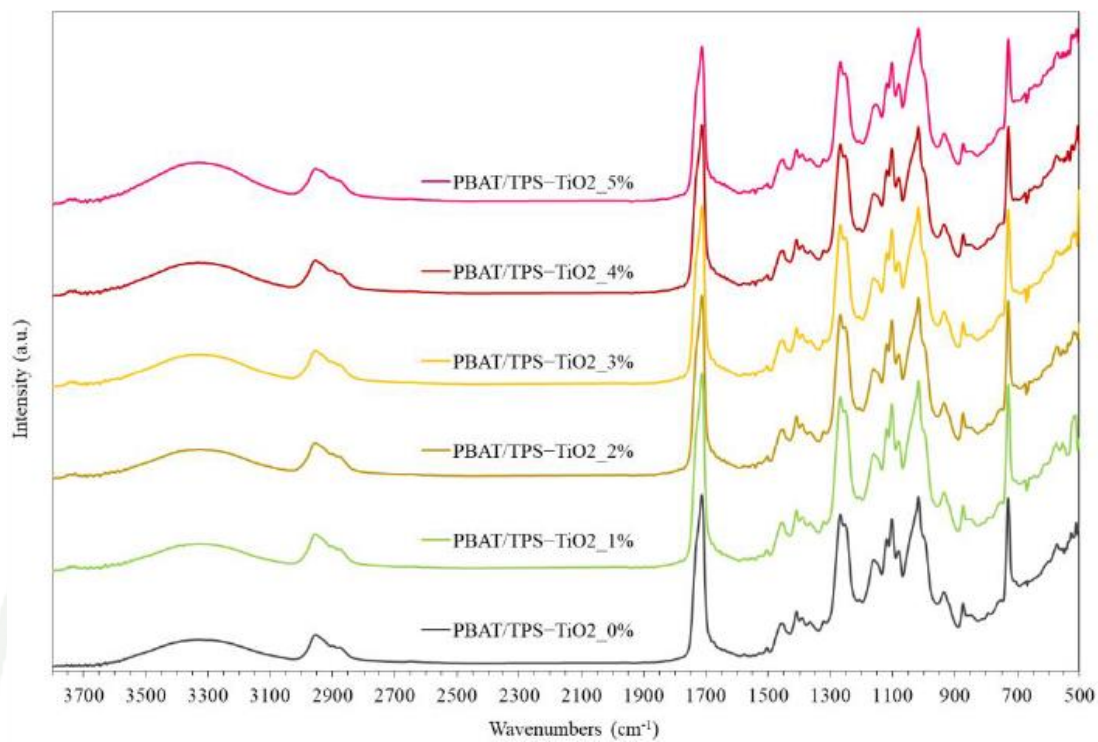
โลหะออกไซด์ ดังนั้นการเติมไทเทเนียมไดออกไซด์จึงไม่ส่งผลต่อพันธะทางเคมีกับพอลิโพรพิลีนอะดิเพต-โค-เทเรฟทาเลท ในเฟสของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช I_{1022}/I_{995} มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณร้อยละของไทเทเนียมไดออกไซด์ แสดงถึงการเพิ่มขึ้นของโครงสร้างออสซิลอนของสตาร์ซึ่งบ่งชี้ว่าไทเทเนียมไดออกไซด์อาจช่วยส่งเสริมการสลายตัวของผลึกสตาร์ชหรือการหลอมเหลวของพอลิเมอร์ในกระบวนการอัดรีด (Ostafińska *et al.*, 2017; Phothisarattana *et al.*, 2022) นอกจากนี้ I_{3331}/I_{1713} มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์ แสดงถึงปริมาณพันธะไฮโดรเจนที่เพิ่มขึ้นจากอะตอมออกซิเจนของโลหะออกไซด์และไฮโดรเจนของหมู่ไฮดรอกซิลในสตาร์ช (Abdullah *et al.*, 2020; Bumbudsanpharoke *et al.*, 2022; Cao *et al.*, 2020)

ภาพที่ 16 ข แสดงอัตราส่วนของสเปกตรัมการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของฟิล์มพอลิโพรพิลีนอะดิเพต-โค-เทเรฟทาเลทและเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชเบลนด์ผสมซิงค์ออกไซด์ จาก I_{1732}/I_{1713} การเพิ่มปริมาณซิงค์ออกไซด์ส่งผลลดความเป็นออสซิลอนของพอลิโพรพิลีนอะดิเพต-โค-เทเรฟทาเลทก่อนที่ความเป็นออสซิลอนจะเพิ่มขึ้นอีกครั้งเมื่อเติมซิงค์ออกไซด์ร้อยละ 5 การดูดกลืนรังสีอินฟราเรดที่เลขคลื่น 1269 และ 1254 เซนติเมตร⁻¹ แสดงถึงการสั่นของพันธะคาร์บอน-ออกซิเจน (C-O) ในหมู่เอะโรมาติกเอสเทอร์แบบอสมมาตรและสมมาตรตามลำดับ และอัตราส่วนการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดที่ 1269 และ 1254 เซนติเมตร⁻¹ (I_{1269}/I_{1254}) ของฟิล์มที่ผสมซิงค์ออกไซด์แสดงความแตกต่างซึ่งแสดงถึงผลกระทบต่อการจัดเรียงตัวของวงแหวนอะโรมาติกในพอลิโพรพิลีนอะดิเพต-โค-เทเรฟทาเลท อย่างไรก็ตามฟิล์มที่เติมซิงค์ออกไซด์ปรากฏสเปกตรัมการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดในเฟสของพอลิโพรพิลีนอะดิเพต-โค-เทเรฟทาเลทที่เหมือนกับฟิล์มที่ไม่เติมอนุภาคโลหะออกไซด์ การเติมซิงค์ออกไซด์จึงไม่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงการสั่นสะเทือนของพันธะหรืออาจไม่เกิดพันธะทางเคมีระหว่างโลหะออกไซด์และพอลิโพรพิลีนอะดิเพต-โค-เทเรฟทาเลท (Amjadi *et al.*, 2020; Bumbudsanpharoke *et al.*, 2022; Phothisarattana *et al.*, 2022) ในเฟสของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช I_{3331}/I_{1713} มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณซิงค์ออกไซด์แสดงถึงการก่อพันธะไฮโดรเจนเช่นเดียวกับไทเทเนียมไดออกไซด์

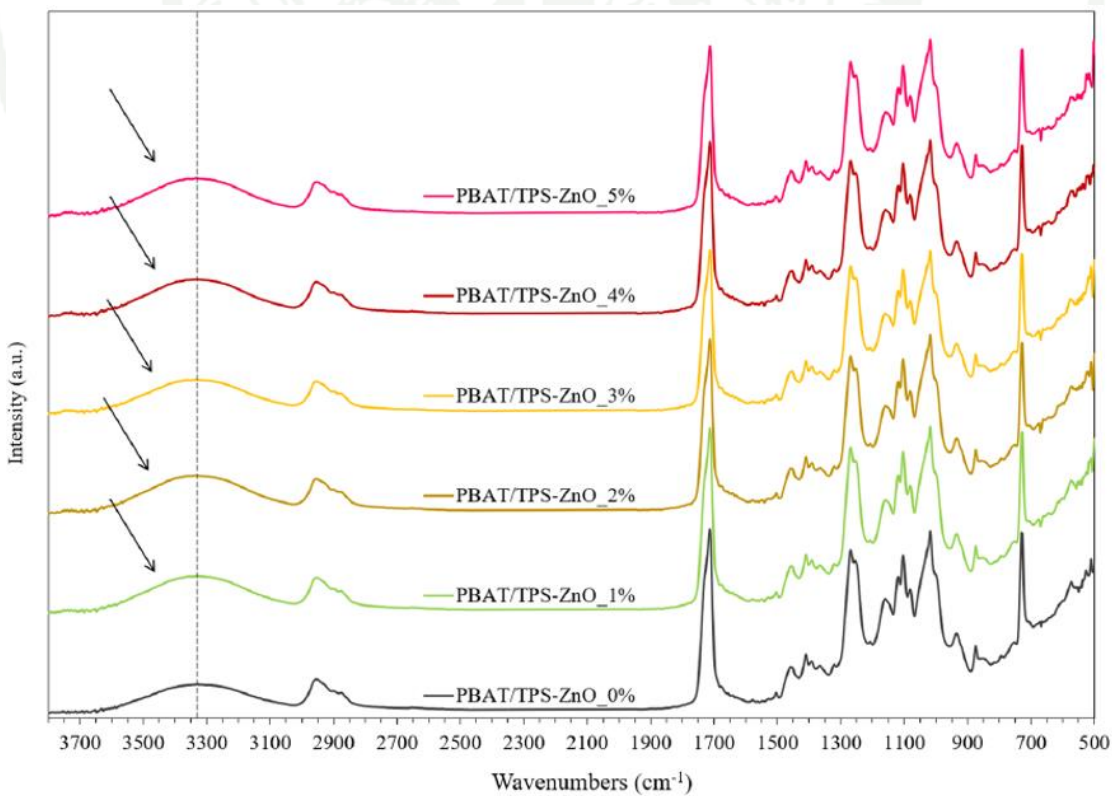
ภาพที่ 16 ค แสดงอัตราส่วนของสเปกตรัมการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของฟิล์มพอลิโพรพิลีนอะดิเพต-โค-เทเรฟทาเลทและเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชเบลนด์ผสมซิลิกอนไดออกไซด์ การเติมซิลิกอนไดออกไซด์ไม่ส่งผลต่อพันธะทางเคมีกับพอลิโพรพิลีนอะดิเพต-โค-เทเรฟทาเลทเช่นเดียวกับไทเทเนียมไดออกไซด์และซิงค์ออกไซด์ และ I_{1732}/I_{1713} ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเติมซิลิกอนไดออกไซด์ในความเข้มข้นร้อยละ 0.5 และ 1 ซิลิกอนไดออกไซด์จึงไม่

ส่งผลต่อปริมาณผลึกในโครงสร้างของพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท ในเฟสของเทอร์โมพลาสติคสตาร์ช I_{1022}/I_{995} มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเติมซิลิกอนไดออกไซด์ร้อยละ 1 แสดงถึงการเพิ่มขึ้นของโครงสร้างสตาร์ชอสัณฐานเช่นเดียวกับไทเทเนียมไดออกไซด์และซิงค์ออกไซด์ การดูดกลืนรังสีอินฟราเรดที่เลขคลื่น 995 เซนติเมตร⁻¹ เป็นเลขคลื่นที่ไวต่อการเปลี่ยนแปลงเมื่อมีการดูดซึมน้ำอิสระจากบรรยากาศของโครงสร้างสตาร์ช ขณะที่การดูดกลืนรังสีที่เลขคลื่น 1047 เซนติเมตร⁻¹ เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำ การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดที่ 1047 และ 995 เซนติเมตร⁻¹ (I_{1047}/I_{995}) เมื่อเติมซิลิกอนไดออกไซด์ร้อยละ 0.5 และ 1 จึงแสดงถึงความสามารถในการแข่งขันดูดซึมน้ำของซิลิกอนไดออกไซด์ต่อสตาร์ช การดูดกลืนรังสีอินฟราเรดที่เลขคลื่น 1161 เซนติเมตร⁻¹ แสดงถึงการสั่นของพันธะคาร์บอน-ออกซิเจน (C-O stretching) ในโครงสร้างของหมู่เอเทอร์ (C-O-C) เมื่อเติมซิลิกอนไดออกไซด์ฟลักที่เลขคลื่น 1161 เซนติเมตร⁻¹ เคลื่อนไปยังเลขคลื่นที่ต่ำกว่า แสดงถึงอันตรกิริยาระหว่างซิลิกอนไดออกไซด์และสตาร์ชในตำแหน่งที่เกี่ยวข้องกับหมู่เอเทอร์ (Zhu *et al.*, 2021) I_{3331}/I_{1713} มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณของซิลิกอนไดออกไซด์ แสดงถึงการก่อพันธะไฮโดรเจนเช่นเดียวกับไทเทเนียมไดออกไซด์และซิงค์ออกไซด์ การดูดกลืนรังสีอินฟราเรดที่เลขคลื่น 2955 และ 2900 เซนติเมตร⁻¹ แสดงถึงการสั่นของหมู่เมทิล (-CH₃) แบบอสมมาตรและสมมาตรตามลำดับ และ การดูดกลืนรังสีที่เลขคลื่น 2935 และ 2878 เซนติเมตร⁻¹ แสดงถึงการสั่นของหมู่เมทิลีน (-CH₂) แบบอสมมาตรและสมมาตรตามลำดับ การเติมซิลิกอนไดออกไซด์ร้อยละ 1 ลดอัตราส่วนการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดที่ 2955 และ 2901 เซนติเมตร⁻¹ (I_{2955}/I_{2901}) และ 2935 และ 2878 เซนติเมตร⁻¹ (I_{2935}/I_{2878}) แสดงถึงผลกระทบของซิลิกอนไดออกไซด์ต่อการจัดเรียงตัวแบบสมมาตรและอสมมาตรของหมู่เมทิลและเมทิลีน (Abdullah *et al.*, 2020; Bumbudsanpharoke *et al.*, 2022; Cao *et al.*, 2020)

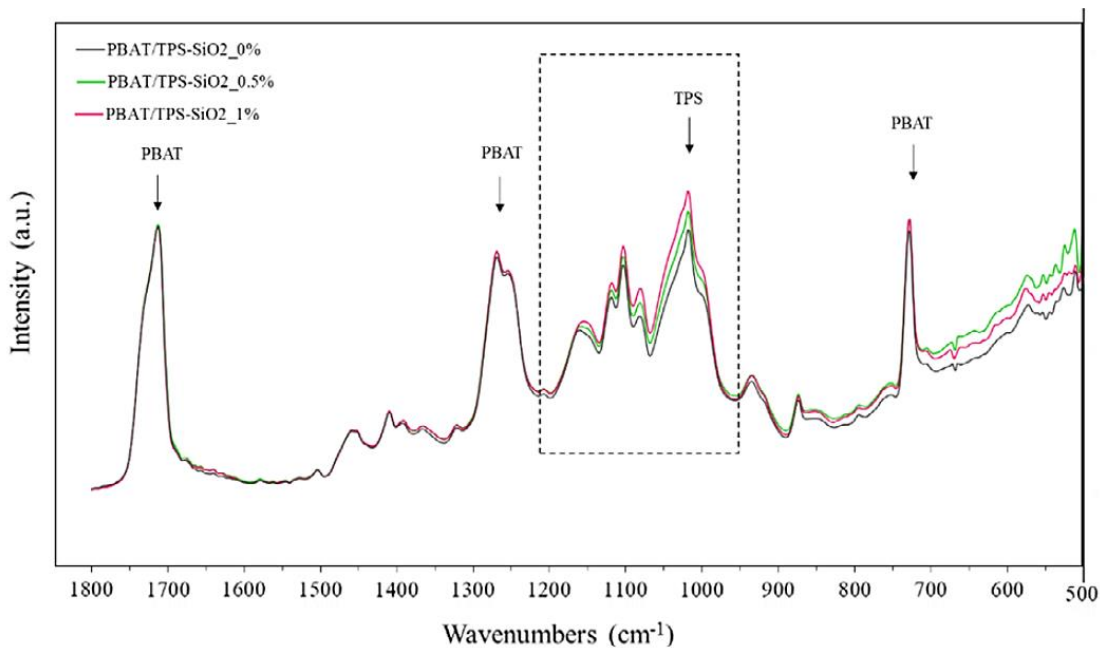
1943



(f)

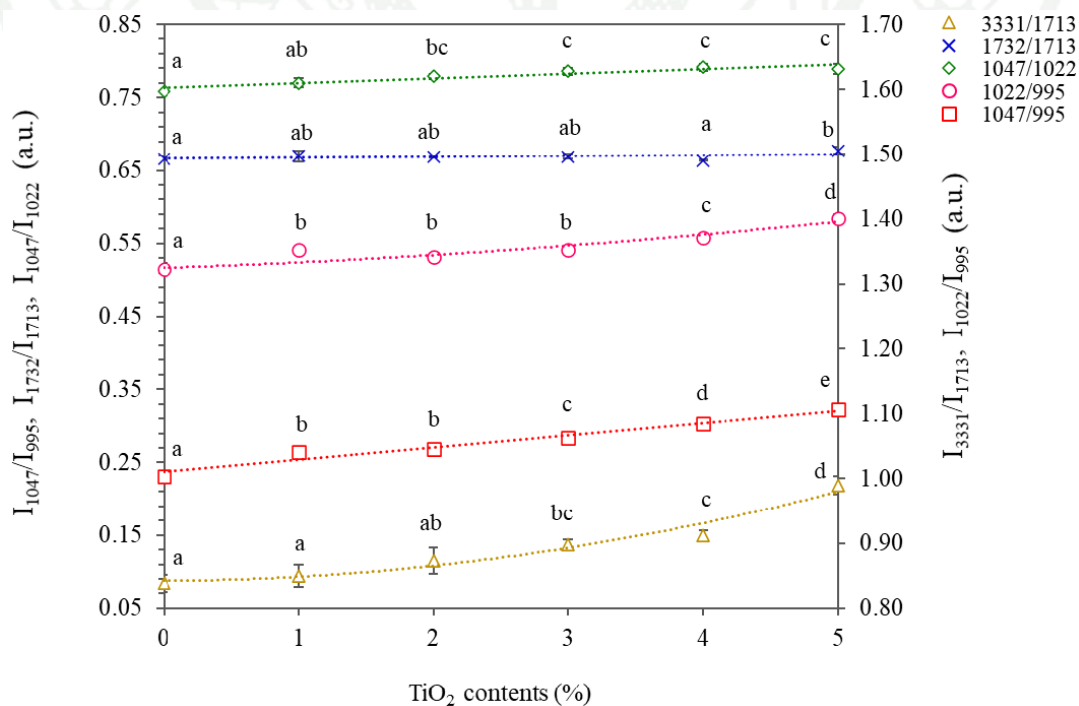


(g)

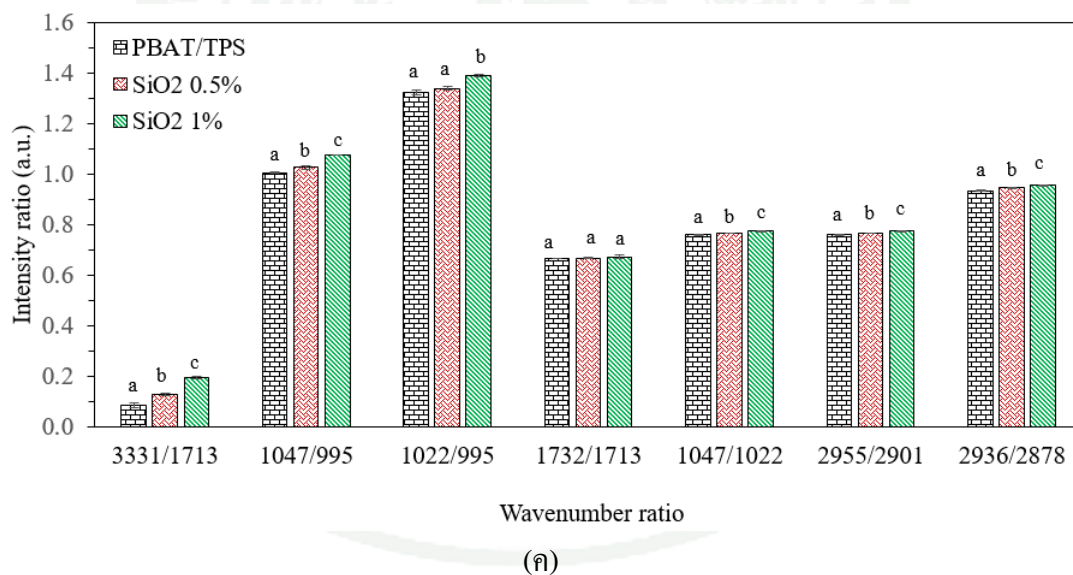
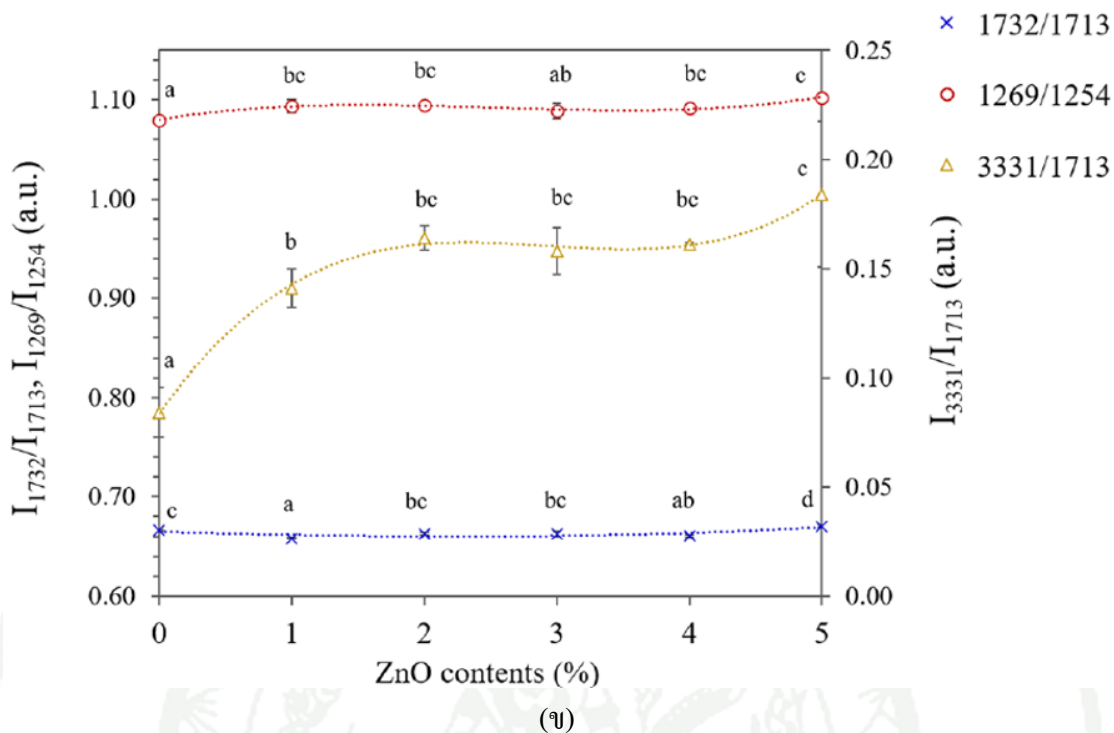


(ค)

ภาพที่ 15 สเปกตรัมการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของฟิล์มพอลิบิวทิลีนอะดิเพต-โค-เทเรฟทาเลทและเทอร์โมพลาสติกสไตร์ชเบลนด์ผสมโลหะออกไซด์ (ก) ไทเทเนียมไดออกไซด์ (ข) ซิงค์ออกไซด์ และ (ค) ซิลิกอนไดออกไซด์



(ก)



ภาพที่ 16 อัตราส่วนของสเปกตรัมการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดที่แต่ละเลขคลื่นของฟิล์มพอลิเอทิลีนอะดิเพต-โค-เทเรฟทาเลทและเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์เบลนด์ผสมโลหะออกไซด์ (ก) ไทเทเนียมไดออกไซด์ (ข) ซิงค์ออกไซด์ และ (ค) ซิลิคอนไดออกไซด์

4. โครงสร้างจุลภาคของฟิล์ม

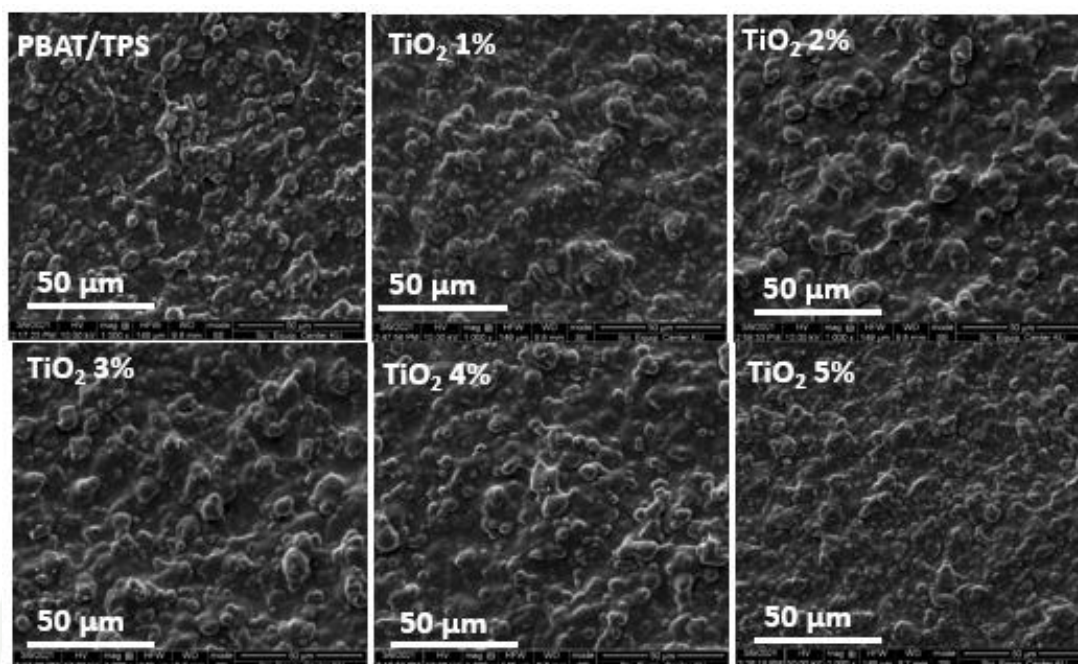
ภาพโครงสร้างจุลภาคของพื้นผิวฟิล์มแสดงดังภาพที่ 17 ก, 18 ก และ 19 ก พื้นผิวของฟิล์มพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรพทาเลทและเทอร์โมพลาสติกสตาโรลเบลนด์ปรากฏความขรุขระและการเกาะกลุ่มของแกรนูลบนพื้นผิวฟิล์ม ซึ่งแสดงถึงความไม่เข้ากันระหว่างเมทริกซ์ของพอลิเมอร์ระหว่างพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรพทาเลทและเทอร์โมพลาสติกสตาโรล เนื่องจากความแตกต่างของสภาพความชอบน้ำของพอลิเมอร์ โครงสร้างทางเคมีของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิลจำนวนมากจึงมีลักษณะชอบน้ำมาก ขณะที่โครงสร้างทางเคมีของพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรพทาเลทประกอบด้วยไฮโดรคาร์บอนและวงเบนซีนเป็นจำนวนมากจึงมีลักษณะไม่ชอบน้ำ และยังพบอนุภาคของพอลิเมอร์ที่หลอมเหลวไม่สมบูรณ์ ความไม่เข้ากันระหว่างเมทริกซ์พอลิเมอร์นี้ส่งผลถึงการแยกเฟสในเมทริกซ์พอลิเมอร์ และภาพพื้นที่ตัดขวางของฟิล์มแสดงดังภาพที่ 17 ข, 18 ข และ 19 ข พื้นที่ตัดขวางของฟิล์มปรากฏความขรุขระบน โครงสร้างตัดขวางและรูพรุนจำนวนมาก รูพรุนและความขรุขระเหล่านี้เป็นผลมาจากความไม่เข้ากันระหว่างเมทริกซ์พอลิเมอร์และการกระจายตัวของพอลิเมอร์ที่หลอมเหลวไม่สมบูรณ์ รวมถึงการระเหยออกของน้ำในโครงสร้างของสตาโรล (Leelaphiwat *et al.*, 2022; Phothisarattana *et al.*, 2021)

ภาพที่ 17 ก แสดงโครงสร้างจุลภาคของพื้นผิวฟิล์มพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรพทาเลทและเทอร์โมพลาสติกสตาโรลเบลนด์ผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ ฟิล์มที่เติมไทเทเนียมไดออกไซด์ร้อยละ 2, 3 และ 4 ปรากฏการเพิ่มขนาดแกรนูลที่แยกเฟสในเมทริกซ์พอลิเมอร์ ขณะที่ฟิล์มที่เติมไทเทเนียมไดออกไซด์ร้อยละ 5 แสดงลักษณะพื้นผิวที่เรียบกว่าและขนาดการเกาะกลุ่มของพอลิเมอร์ที่ต่ำกว่า การเพิ่มปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์ส่งผลเพิ่มปริมาณสตาโรลสังเคราะห์การกระจายตัวของสตาโรลในเฟสของพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรพทาเลท เมื่อแสดงผลร่วมกับอิทธิพลของการสังเคราะห์การหลอมเหลวของสตาโรลของไทเทเนียมไดออกไซด์ ทำให้อนุภาคของไทเทเนียมไดออกไซด์กระจายตัวได้ดีในเมทริกซ์และเกิดอันตรกิริยากับสตาโรลผ่านพันธะไฮโดรเจน ส่งผลให้ขนาดอนุภาคบนพื้นผิวฟิล์มมีขนาดเล็กลง (Leelaphiwat *et al.*, 2022; Wangprasertkul *et al.*, 2021) และภาพที่ 17 ข แสดงโครงสร้างจุลภาคของพื้นที่ตัดขวางของฟิล์มที่เติมไทเทเนียมไดออกไซด์ ฟิล์มที่เติมไทเทเนียมไดออกไซด์ร้อยละ 1 ถึง 4 ปรากฏการรวมตัวกันของอนุภาคขณะที่ฟิล์มที่เติมไทเทเนียมไดออกไซด์ร้อยละ 5 มีพื้นที่ตัดขวางที่เรียบกว่าฟิล์มที่ไม่เติมไทเทเนียมไดออกไซด์ซึ่งเป็นผลมาจากการสังเคราะห์การหลอมเหลวของพอลิเมอร์ของไทเทเนียมไดออกไซด์ทำให้ขนาดอนุภาคที่กระจายตัวมีขนาดเล็กกว่า

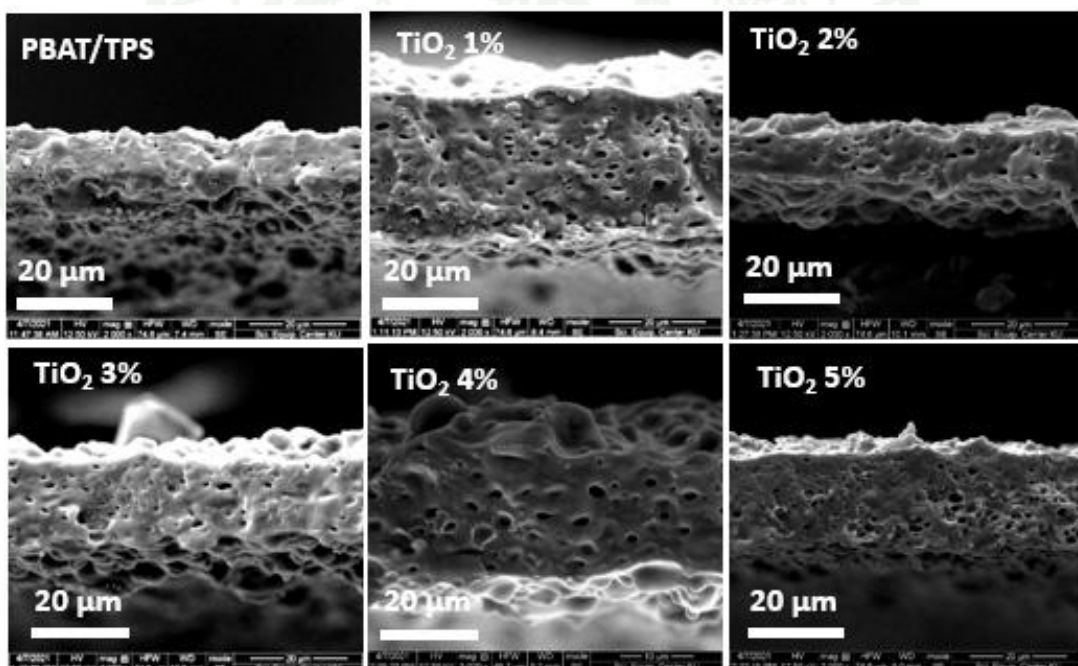
ภาพที่ 18 ก แสดงโครงสร้างจุลภาคของพื้นผิวฟิล์มพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท และเทอร์โมพลาสติกสตาโรลเบลนด์ผสมซิงค์ออกไซด์ การเติมและการเพิ่มปริมาณซิงค์ออกไซด์ในฟิล์มส่งผลเพิ่มขนาดอนุภาคที่เกาะกลุ่มกันของเมทริกซ์บนพื้นผิวแสดงถึงการเพิ่มความไม่เข้ากันของเมทริกซ์พอลิเมอร์และการเกาะกลุ่มกันของอนุภาคโลหะออกไซด์ โดยฟิล์มที่เติมซิงค์ออกไซด์ร้อยละ 3 และ 4 ปรากฏการรวมกลุ่มกันของอนุภาคมากที่สุด ขณะที่ฟิล์มที่เติมซิงค์ออกไซด์ร้อยละ 5 เม็ดของอนุภาคปรากฏการเกาะกลุ่มต่ำกว่า เนื่องจากการอันตรกิริยาระหว่างซิงค์ออกไซด์และเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ส่งเสริมการหลอมเหลวและการกระจายตัวของเทอร์โมพลาสติกสตาโรล (เนื่องจากการหลอมของแกรนูลสตาโรล) ในเมทริกซ์ของพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท และภาพที่ 18 ข แสดงโครงสร้างจุลภาคของพื้นที่ตัดขวางของฟิล์มที่เติมซิงค์ออกไซด์ การเพิ่มปริมาณซิงค์ออกไซด์ส่งผลเพิ่มจำนวนรูพรุนในโครงสร้างของฟิล์ม อย่างไรก็ตามฟิล์มที่เติมซิงค์ออกไซด์ร้อยละ 5 ปรากฏรูพรุนที่น้อยกว่าฟิล์มที่เติมซิงค์ออกไซด์ร้อยละ 3 และ 4 เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของโครงสร้างอสัณฐานของสตาโรลส่งเสริมการเกิดอันตรกิริยาระหว่างซิงค์ออกไซด์และสตาโรล ส่งผลให้รูพรุนมีจำนวนน้อยลง

ภาพที่ 19 ก แสดงโครงสร้างจุลภาคของพื้นผิวฟิล์มพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท และเทอร์โมพลาสติกสตาโรลเบลนด์ผสมซิลิคอนไดออกไซด์ การเติมซิลิคอนไดออกไซด์ร้อยละ 0.5 ปรากฏแกรนูลของอนุภาคซิลิคอนไดออกไซด์บนพื้นผิวฟิล์ม และภาพที่ 19 ข แสดงโครงสร้างจุลภาคของพื้นที่ตัดขวางของฟิล์มที่เติมซิลิคอนไดออกไซด์ พบว่าการเพิ่มปริมาณซิลิคอนไดออกไซด์ส่งผลเพิ่มจำนวนรูพรุนในโครงสร้างของฟิล์มจากการระเหยของน้ำขณะขึ้นรูป นอกจากนี้การกระจายตัวของอนุภาคซิลิคอนไดออกไซด์ยังขัดขวางการเชื่อมต่อของโครงสร้างและขัดขวางความเป็นเนื้อเดียวกันของพอลิเมอร์เช่นเดียวกับซิงค์ออกไซด์

ฟิล์มพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลทและเทอร์โมพลาสติกสตาโรลเบลนด์มีความไม่เข้ากันของเมทริกซ์พอลิเมอร์ เมื่อมีการเติมโลหะออกไซด์ในฟิล์มแนวโน้มเพิ่มความไม่เข้ากันของเมทริกซ์และรูพรุนในโครงสร้างของฟิล์ม เมื่อเพิ่มปริมาณโลหะออกไซด์จนถึงความเข้มข้นหนึ่งผลของการเพิ่มปริมาณอสัณฐานของสตาโรลจะเพิ่มการกระจายตัวของสตาโรลในพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลทและเพิ่มอันตรกิริยาระหว่างสตาโรลและโลหะออกไซด์ส่งผลให้เมทริกซ์มีความเข้ากันได้ที่มากกว่าฟิล์มที่เติมโลหะออกไซด์ในปริมาณที่ต่ำกว่า

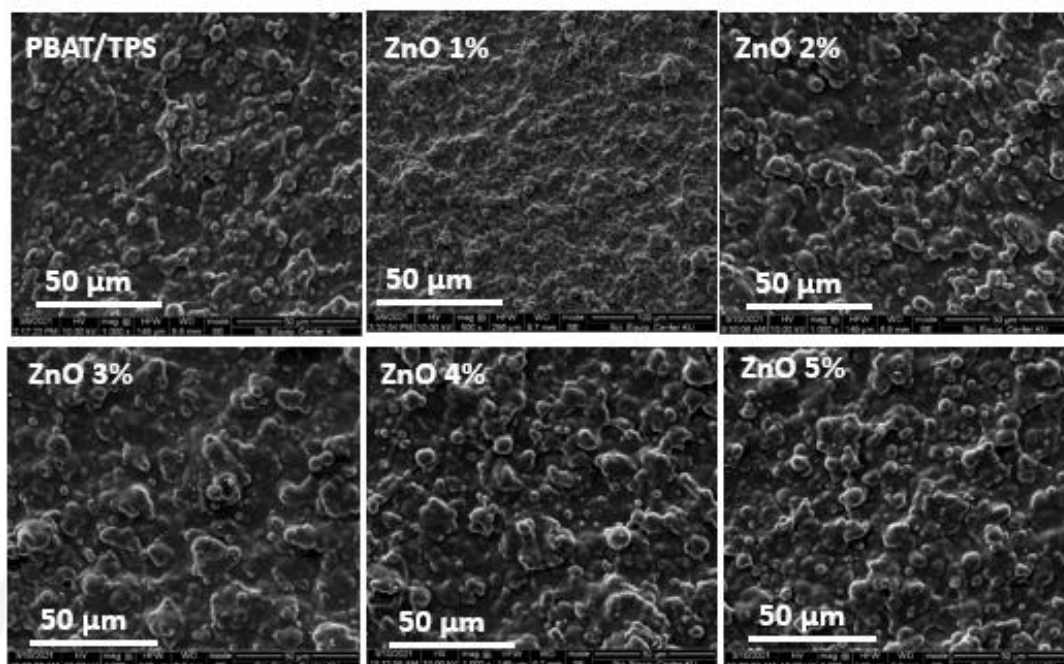


(ก)

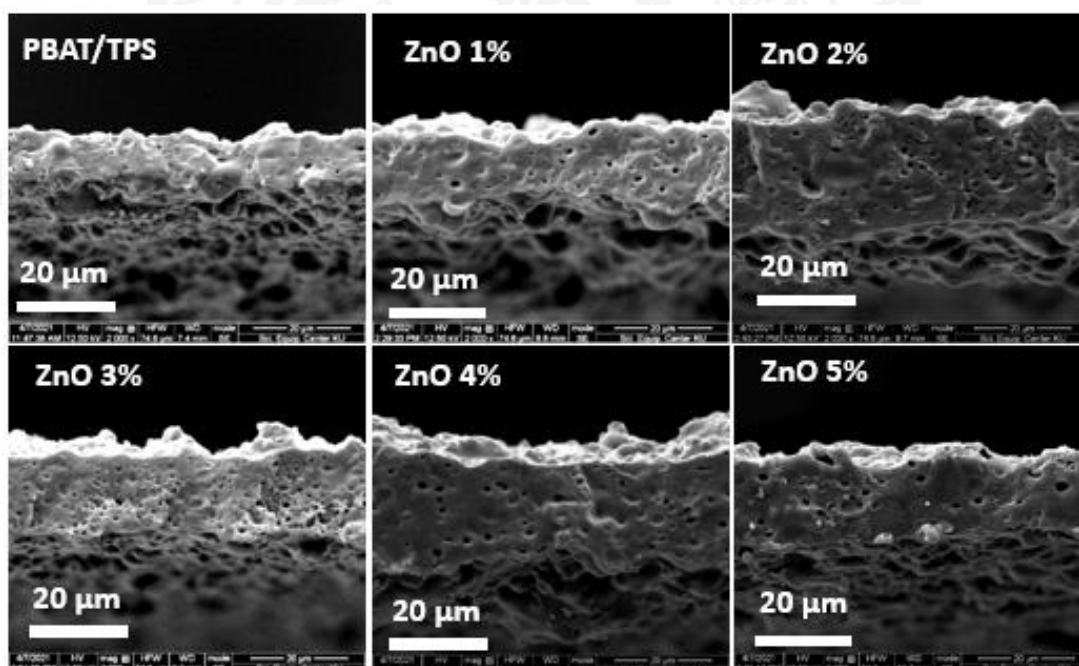


(ข)

ภาพที่ 17 โครงสร้างจุลภาคของฟิล์มพอลิบิวทิลีนอะดิเพต-โค-เทเรฟทาเลทและเทอร์โมพลาสติก
สตาร์ชเบลนด์ผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ (ก) บริเวณพื้นผิว และ (ข) บริเวณพื้นที่ตัดขวาง

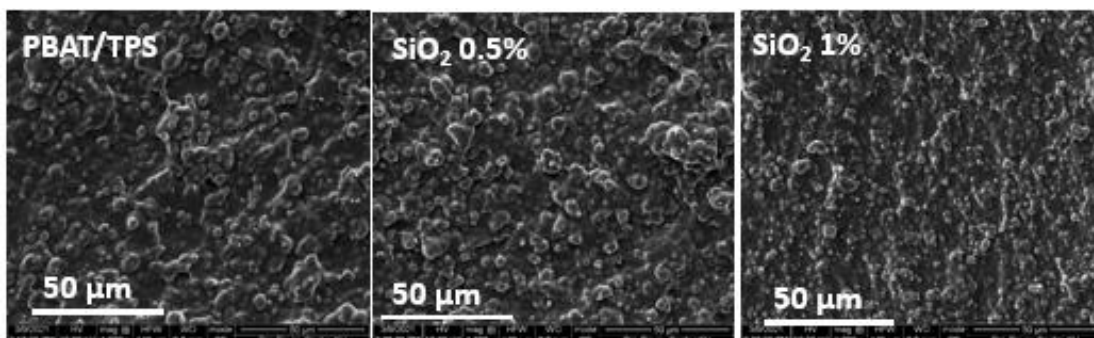


(ก)

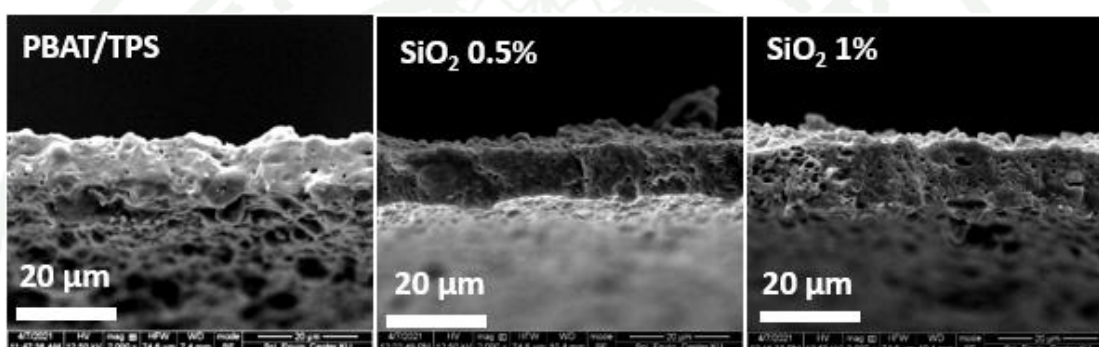


(ข)

ภาพที่ 18 โครงสร้างจุลภาคของฟิล์มพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลทและเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชเบลนด์ผสมซิงค์ออกไซด์ (ก) บริเวณพื้นผิว และ (ข) บริเวณพื้นที่ตัดขวาง



(ก)



(ข)

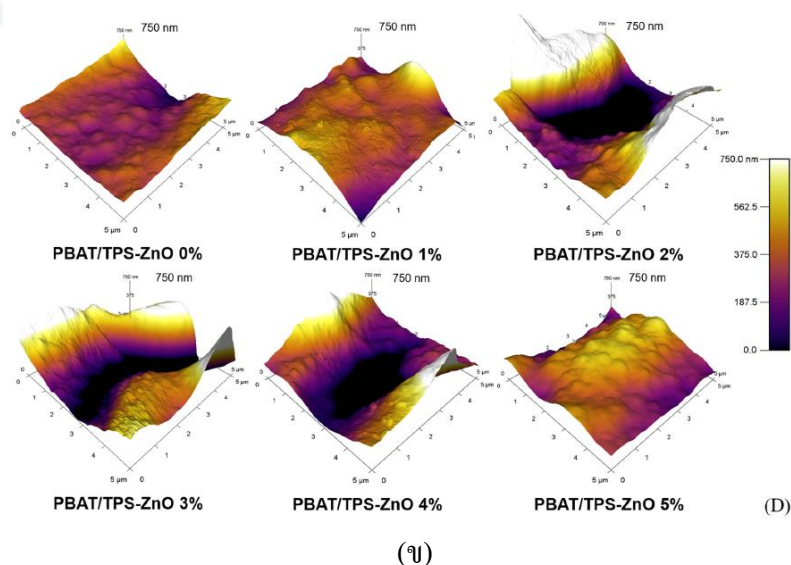
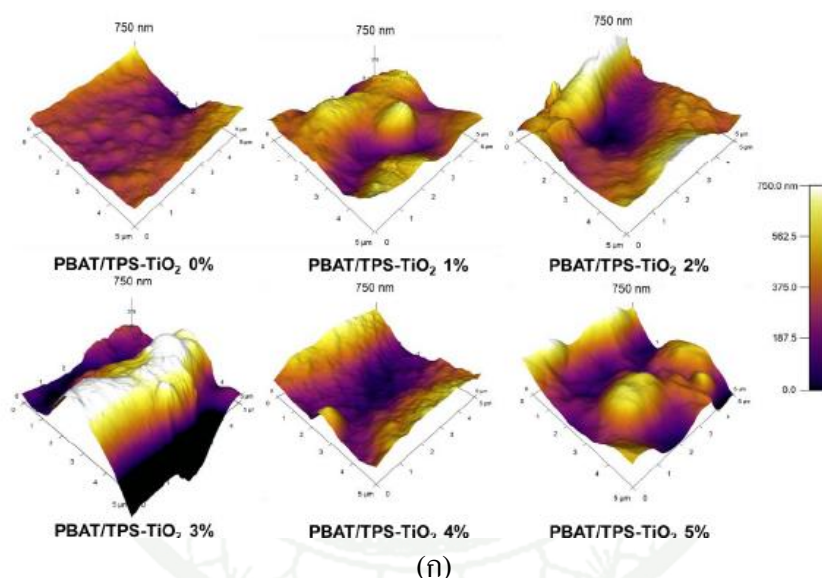
ภาพที่ 19 โครงสร้างจุลภาคของฟิล์มพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลทและเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชเบลนด์ผสมซิลิคอนไดออกไซด์ (ก) บริเวณพื้นผิว และ (ข) บริเวณพื้นที่ตัดขวาง

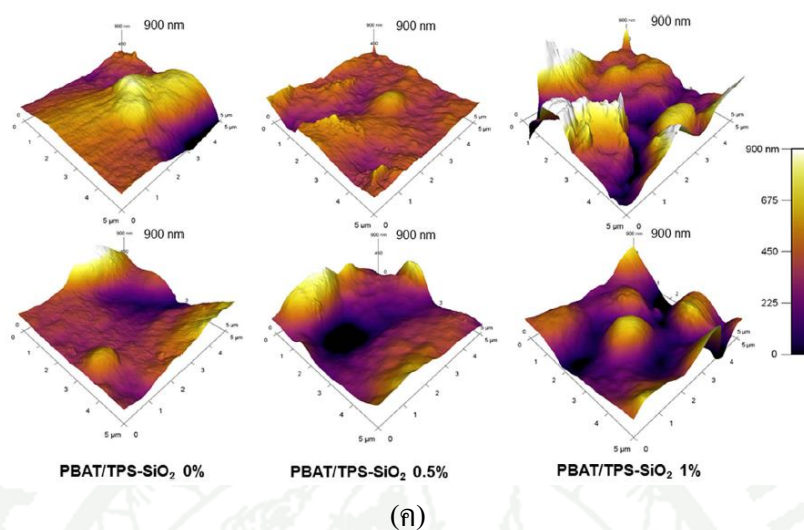
5. สภาพความขรุขระพื้นผิวของฟิล์ม

สภาพความขรุขระของพื้นผิวของฟิล์มแสดงดังภาพที่ 20 สีขาว-สว่างแสดงถึงพื้นผิวของฟิล์มที่มีความสูง และสีดำ-มืดแสดงถึงพื้นที่ต่ำของฟิล์ม ฟิล์มพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลทและเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชเบลนด์ที่ไม่เติมอนุภาคโลหะออกไซด์ปรากฏพื้นผิวที่เรียบที่สุด ลักษณะของฟิคและช่องลึกซึ่งแสดงถึงความขรุขระของพื้นผิวฟิล์ม

ภาพที่ 20 ก แสดงสภาพความขรุขระของพื้นผิวของฟิล์มที่เติมไทเทเนียมไดออกไซด์ การเติมและเพิ่มปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์ส่งผลเพิ่มความขรุขระของพื้นผิวฟิล์มและช่องว่างจนสูงที่สุดในฟิล์มที่เติมไทเทเนียมไดออกไซด์ร้อยละ 3 จากการเพิ่มความไม่เข้ากันของเมทริกซ์พอลิเมอร์ การเกาะกลุ่มกันของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ และเมื่อเพิ่มปริมาณไทเทเนียมได

ออกไซด์ที่ร้อยละ 4 และ 5 ส่งผลต่อความขรุขระและช่องว่างของพื้นผิวฟิล์มจากการปรับปรุงโครงสร้างของสตาร์ช ภาพที่ 20 ข แสดงสภาพความขรุขระของพื้นผิวของฟิล์มที่เติมซิงค์ออกไซด์เมื่อเติมและเพิ่มปริมาณของซิงค์ออกไซด์ถึงซิงค์ออกไซด์ร้อยละ 4 ส่งผลเพิ่มความขรุขระของพื้นผิวฟิล์ม เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของความไม่เข้ากันของเมทริกซ์พอลิเมอร์ และการสูญเสียอนุภาคที่ไม่ได้ยึดเกาะบนพื้นผิวฟิล์ม และฟิล์มที่เติมซิงค์ออกไซด์ร้อยละ 5 ปรากฏพื้นผิวฟิล์มที่เรียกว่าฟิล์มที่เติมซิงค์ออกไซด์ในปริมาณที่ต่ำกว่าเช่นเดียวกับไทเทเนียมไดออกไซด์ และสภาพความขรุขระของพื้นผิวของฟิล์มที่เติมซิลิกอนไดออกไซด์แสดงดังภาพที่ 20 ค แสดงซึ่งเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของซิลิกอนไดออกไซด์เช่นเดียวกับไทเทเนียมไดออกไซด์และซิงค์ออกไซด์





ภาพที่ 20 สภาพความขรุขระของพื้นผิวของฟิล์มพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรพทาเลทและเทอร์โมพลาสติกสตาบิลไรซ์เบลนด์ผสมโลหะออกไซด์ (ก) ไทเทเนียมไดออกไซด์ (ข) ซิงค์ออกไซด์ และ (ค) ซิลิคอนไดออกไซด์

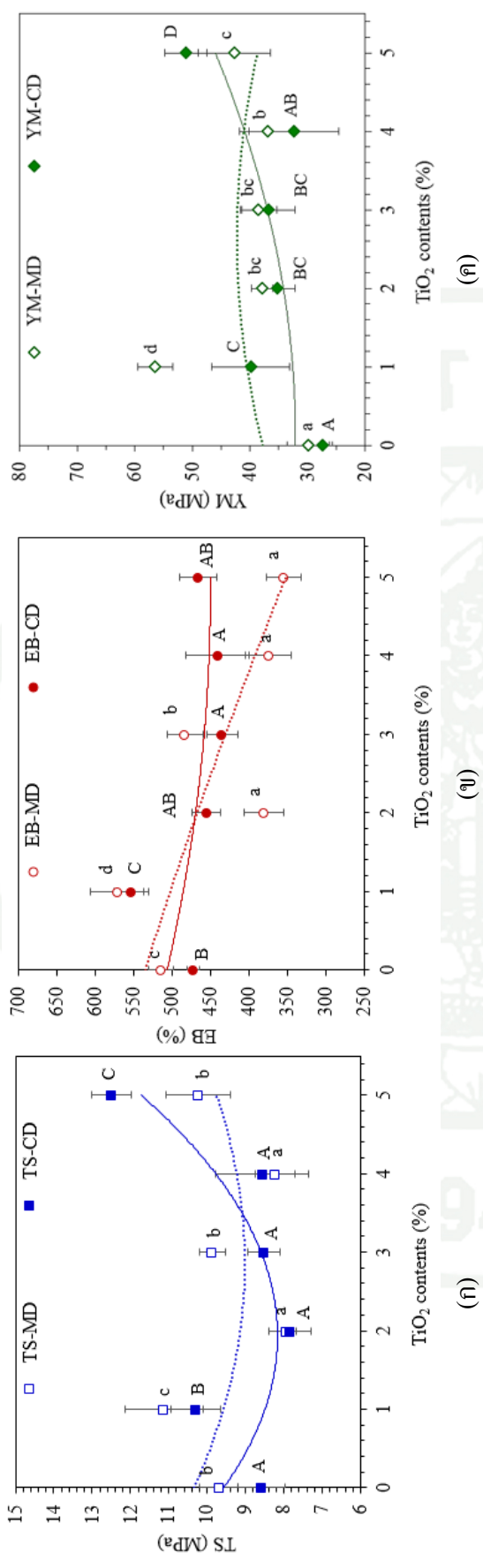
6. สมบัติเชิงกล

สมบัติเชิงกลของฟิล์มแสดงดังภาพที่ 21 สมบัติด้านทานแรงดึง (tensile strength, TS) ร้อยละการยืดตัวก่อนขาด (elongation at break, EB) และมอดูลัสของยัง (Young's modulus, YM) ในทิศทางเครื่องจักรและทิศขวางเครื่องจักรของฟิล์มพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรพทาเลทและเทอร์โมพลาสติกสตาบิลไรซ์เบลนด์ผสมโลหะออกไซด์ แสดงดังภาพที่ 21, 22 และ 23 โดยความต้านทานแรงดึงในทิศทางเครื่องจักรมีแนวโน้มสูงกว่าทิศขวางเครื่องจักรเนื่องจากการจัดเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์ขณะขึ้นรูป

ภาพที่ 21 ก แสดงความต้านทานแรงดึงของฟิล์มที่เติมไทเทเนียมไดออกไซด์ เมื่อเติมไทเทเนียมไดออกไซด์ร้อยละ 1 สมบัติด้านทานแรงดึงเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญในทิศทางและขวางเครื่องจักร และฟิล์มที่เติมไทเทเนียมไดออกไซด์ร้อยละ 5 มีความต้านทานแรงดึงเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญในทิศขวางเครื่องจักร เป็นผลมาจากการเพิ่มขึ้นของสตาบิลไรซ์พื้นฐานซึ่งส่งเสริมการกระจายตัวของสตาบิลไรซ์และอนุภาคไนเมทริกซ์พอลิเมอร์และอันตรกิริยาระหว่างไทเทเนียมได

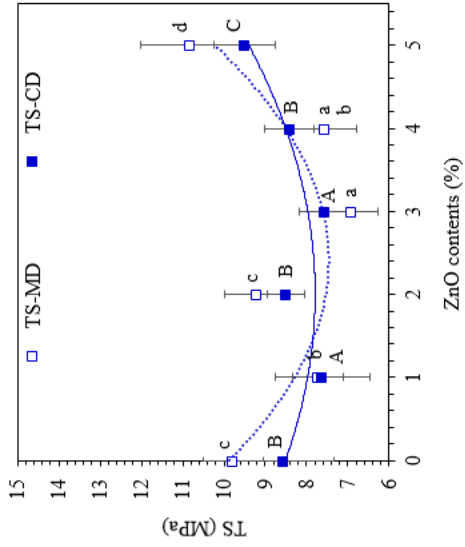
ออกไซด์และสสารซึ่งทำให้กระจายความเครียดที่ฟิล์มได้รับจากแรงดึงได้มากขึ้น และยับยั้งการขาดของฟิล์ม เช่นเดียวกับการเติมซิงค์ออกไซด์ร้อยละ 5 (ภาพที่ 22 ก) และการเติมซิลิคอนไดออกไซด์ (ภาพที่ 23 ก) แต่เมื่อเติมไทเทเนียมไดออกไซด์ในความเข้มข้นร้อยละ 2 และ 4 ส่งผลให้ความต้านทานแรงดึงลดลง เนื่องจากความไม่เข้ากันของเมทริกซ์พอลิเมอร์ การเกาะกลุ่มของอนุภาค และการยับยั้งการเกิดอันตรกิริยาระหว่างสายโซ่ของพอลิเมอร์ส่งผลให้ความต้านทานแรงดึงลดลง เช่นเดียวกับการเติมซิงค์ออกไซด์ร้อยละ 1, 3 และ 4 ดังแสดงภาพที่ 22 ก

การยึดตัวของฟิล์มเกี่ยวเนื่องกับอันตรกิริยาระหว่างสายโซ่ของพอลิเมอร์และอันตรกิริยาระหว่างไทเทเนียมไดออกไซด์และเมทริกซ์ รวมถึงความเป็นเนื้อเดียวกันของเมทริกซ์พอลิเมอร์ ภาพที่ 21 ข แสดงร้อยละการดึงยึดของฟิล์มที่เติมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ลดลงเมื่อเติมไทเทเนียมไดออกไซด์ร้อยละ 2, 4 และ 5 เป็นผลมาจากความไม่เข้ากันของเมทริกซ์พอลิเมอร์ การเกาะกลุ่มกันของอนุภาค และการขัดขวางอันตรกิริยาระหว่างสายโซ่ของพอลิเมอร์ เช่นเดียวกับซิงค์ออกไซด์และซิลิคอนไดออกไซด์ดังแสดงในภาพที่ 22 ข และ 23 ข ตามลำดับ ขณะที่การเติมไทเทเนียมไดออกไซด์ร้อยละ 1 ส่งผลเพิ่มร้อยละการดึงยึดในทิศทางเครื่องจักรจากการกระจายตัวที่ดีของไทเทเนียมไดออกไซด์ในเมทริกซ์พอลิเมอร์และการปรับปรุงโครงสร้างของสสาร นอกจากนี้โลหะออกไซด์ยังมีความแข็งและผลของอันตรกิริยาของโลหะออกไซด์และสสารส่งผลค่ามอดูลัสของยังจึงเพิ่มขึ้น ดังภาพที่ 21 ค, 22 ค และ 23 ค (Cao *et al.*, 2020; Petchwattana *et al.*, 2016; Venkatesan and Rajeswari, 2017)

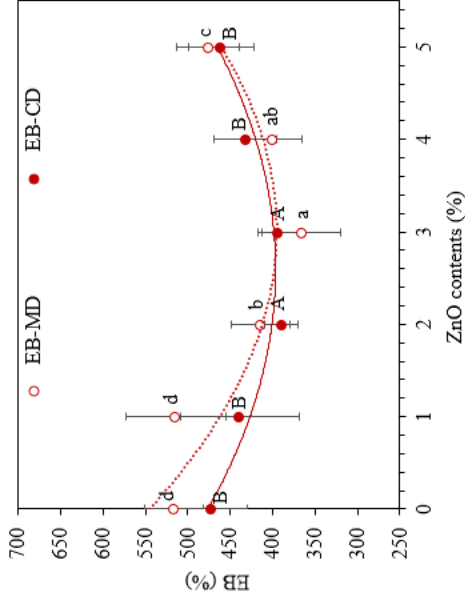


ภาพที่ 21 สมบัติเชิงกลของฟิล์มพอลิไวนิลอะคริเลต-โกลิเทอราและเทอร์โมพลาสติกชีวเบคทีเรียไทเทเนียมไดออกไซด์ (ก) ความต้านทานแรงดึง (TS) (ข) ร้อยละการยืดตัวก่อนขาด (EB) และ (ค) มอดูลัสของยัง (YM)

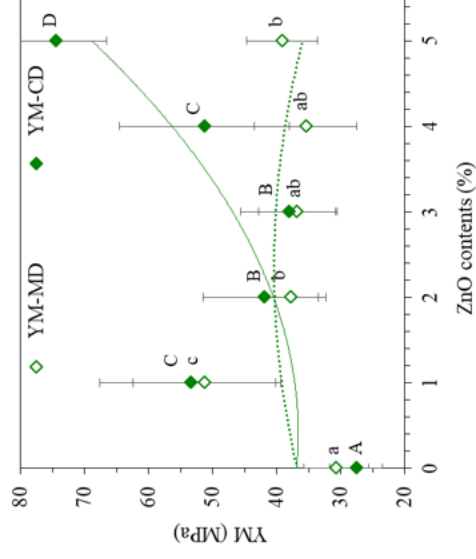
หมายเหตุ MD (machine direction) คือ ทิศทางขนานหรือตามแนวเครื่องจักร
 CD (cross direction) คือ ทิศทางตามขวางเครื่องจักร



(ก)



(ข)

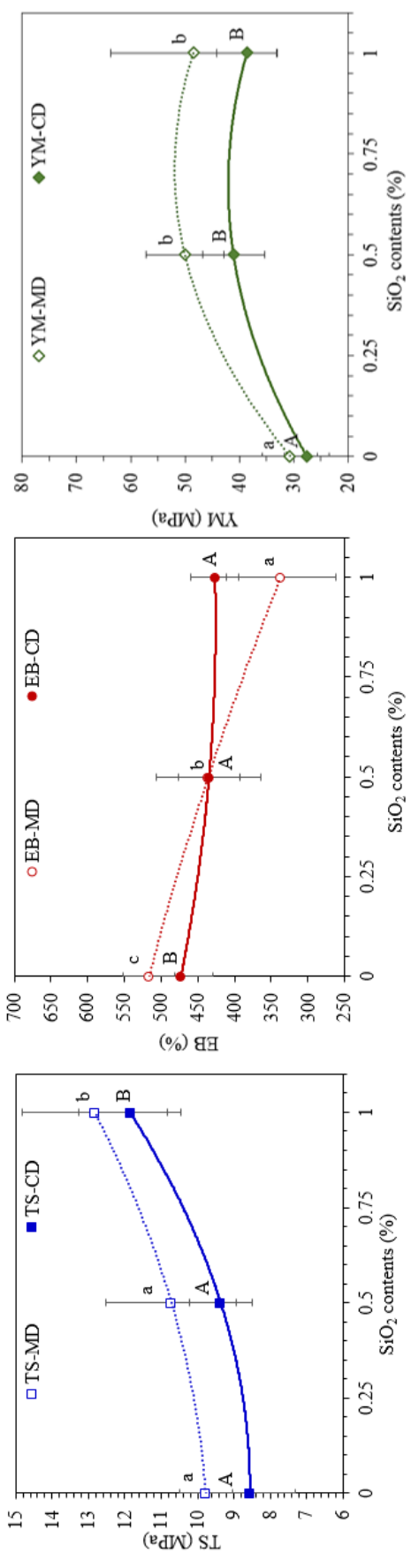


(ค)

ภาพที่ 22 สมบัติเชิงกลของฟิล์มพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทรฟทาเลทและเทอร์โมพลาสติกสังเคราะห์ชนิดผสมซิงค์ออกไซด์ (ก) ความต้านทานแรงดึง (TS) (ข) ร้อยละการยืดตัวก่อนขาด (EB) และ (ค) มอดูลัสของยัง (YM)

หมายเหตุ MD (machine direction) คือ ทิศทางขนานหรือตามแนวเครื่องจักร

CD (cross direction) คือ ทิศทางตามขวางเครื่องจักร



ภาพที่ 23 สมบัติเชิงกลของฟิล์มพอลิไวนิลคลอไรด์ที่เติมอะดิเพท-โกลิเทอรอลและเทอร์โมพลาสติกสไตร์อะคริลิกอนิไดออกไซด์ (ก) ความต้านทานแรงดึง (TS) (ข) ร้อยละการยืดตัวก่อนขาด (EB) และ (ค) มอดูลัสของยัง (YM)

หมายเหตุ MD (machine direction) คือ ทิศทางขนานหรือตามแนวเครื่องจักร
 CD (cross direction) คือ ทิศทางตามขวางเครื่องจักร

7. สมบัติป้องกันการซึมผ่านของแก๊สและไอน้ำ

ค่าสภาพการยอมให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำ (water vapor permeability, WVP) และแก๊สออกซิเจน (oxygen permeability, OP) ของฟิล์มแสดงดังภาพที่ 24 ฟิล์มพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โคเทเรฟทาเลทและเทอร์โมพลาสติกสตาเรชเบลนด์มีค่าสภาพการยอมให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำและแก๊สออกซิเจนเป็น 270.43 ± 5.3 กรัม·มิลลิเมตร/ตารางเมตร·วัน·ความดันบรรยากาศ และ 28.3 ± 3.4 มิลลิลิตร·มิลลิเมตร/ตารางเมตร·วัน·ความดันบรรยากาศ ตามลำดับ

เมื่อเติมโลหะออกไซด์ค่าสภาพการยอมให้ซึมผ่านได้ของแก๊สออกซิเจนและไอน้ำมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเติมไทเทเนียมไดออกไซด์และซิงค์ออกไซด์ร้อยละ 2 ถึง 3 และเมื่อเติมซิลิคอนไดออกไซด์ร้อยละ 0.5 และ 1 ดังแสดงในภาพที่ 24 การเพิ่มขึ้นของสภาพการยอมให้ซึมผ่านได้เป็นผลมาจากความไม่เข้ากันและการแยกเฟสของเมทริกซ์พอลิเมอร์ รวมถึงรูพรุนในโครงสร้างของฟิล์มดังภาพที่ 17 ข, 18 ข และ 19 ข นอกจากนี้การเพิ่มขึ้นของสตาเรชองค์ฐานเมื่อเพิ่มปริมาณของโลหะออกไซด์ยังส่งเสริมการแพร่ผ่านของโมเลกุลแก๊สออกซิเจนและไอน้ำ (เมื่อเทียบกับโครงสร้างผลึก) โดยเฉพาะการซึมผ่านของไอน้ำผ่านเฟสของสตาเรช

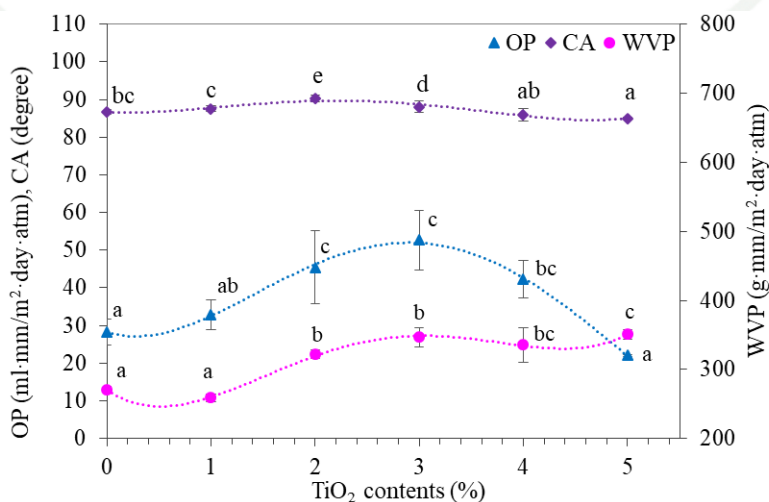
เมื่อเพิ่มปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์และซิงค์ออกไซด์ขึ้นมากกว่าร้อยละ 3 ค่าสภาพการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนและไอน้ำมีแนวโน้มที่ลดลง เนื่องจากการปรับปรุงโครงสร้างพอลิเมอร์ในเฟสของเทอร์โมพลาสติกสตาเรช เมื่อเติมโลหะออกไซด์ในปริมาณร้อยละ 4 และ 5 มีผลส่งเสริมการกระจายตัวของเทอร์โมพลาสติกสตาเรชและโลหะออกไซด์ในเมทริกซ์พอลิเมอร์ สอดคล้องกับภาพพื้นผิวของฟิล์มที่มีความขรุขระลดลงในภาพที่ 20 ก และ ข นอกจากนี้ยังส่งเสริมอันตรกิริยาระหว่างสตาเรชและโลหะออกไซด์ผ่านพันธะไฮโดรเจน และการกระจายตัวของโลหะออกไซด์ในฟิล์มยังสร้างเส้นทางคดเคี้ยวสำหรับการเคลื่อนที่ของโมเลกุลแก๊สและไอน้ำผ่านฟิล์ม ส่งผลเพิ่มระยะทางในการแพร่ผ่านฟิล์มของโมเลกุลเหล่านี้ ค่าสภาพการซึมผ่านของแก๊สและไอน้ำจึงลดลง

8. ค่ามุมสัมผัสหยดน้ำ

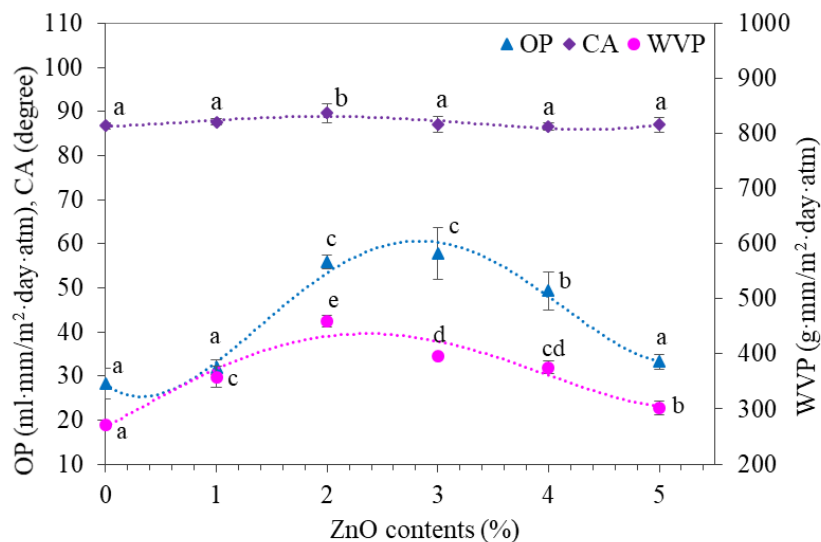
ค่ามุมสัมผัสหยดน้ำ (contact angle, CA) ของฟิล์มแสดงถึงสภาพขั้วของพื้นผิวฟิล์มถึงความชอบและไม่ชอบน้ำ (ภาพที่ 24) เมื่อมุมสัมผัสหยดน้ำมีค่ามากกว่า 90 องศา บ่งชี้ว่าวัสดุมีความ

ไม่ชอบน้ำ फिल्मพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท และเทอร์โมพลาสติกสตาโรลซ์เบลนด์มีค่ามุมสัมผัสหยดน้ำที่ 86.7 ± 0.6 องศา ใกล้เคียงกับสภาพพื้นผิวไม่ชอบน้ำแสดงถึงอิทธิพลของความไม่ชอบน้ำของพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท

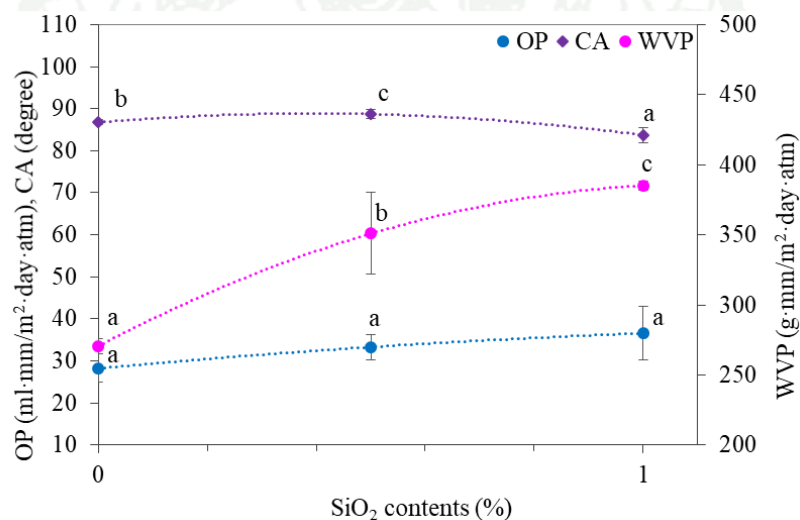
เมื่อเติมโลหะออกไซด์ค่ามุมสัมผัสหยดน้ำเพิ่มขึ้นจะสูงสุดที่ 90.3 ± 1.0 และ 89.7 ± 2.1 องศา สำหรับฟิล์มที่เติมไทเทเนียมไดออกไซด์และซิงค์ออกไซด์ร้อยละ 2 ตามลำดับ เป็นผลหมู่ไฮดรอกซิลจำนวนมากในเฟสของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลซ์ซึ่งไวต่อการเกิดอันตรกิริยากับ โมเลกุลของน้ำดังนั้นฟิล์มสตาโรลซ์เบลนด์จึงมีสภาพพื้นผิวที่ชอบน้ำสูง เมื่อเติมโลหะออกไซด์อะตอมออกซิเจนในโครงสร้างของโลหะออกไซด์เหล่านี้สามารถเกิดอันตรกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลอิสระนี้ได้ ส่งผลให้จำนวนหมู่ไฮดรอกซิลอิสระที่สามารถเกิดอันตรกิริยากับโมเลกุลน้ำลดลง นอกจากนี้การเติมโลหะออกไซด์ยังส่งผลเพิ่มความขรุขระบนพื้นผิวฟิล์มซึ่งทำให้ค่ามุมสัมผัสหยดน้ำเพิ่มขึ้น พื้นผิวของฟิล์มจึงมีความไม่ชอบน้ำเพิ่มขึ้น และเมื่อเติมโลหะออกไซด์จนถึงระดับความเข้มข้นหนึ่งโลหะออกไซด์เหล่านี้จะสามารถเกิดอันตรกิริยากับโมเลกุลของน้ำผ่านพันธะไฮโดรเจน และเพิ่มอัตราส่วนของสตาโรลซ์พื้นฐานจากการปรับปรุงโครงสร้างฟิล์ม ดังภาพที่ 16 ก และ ข ส่งผลให้ค่ามุมสัมผัสหยดน้ำลดลง (Gumiero *et al.*, 2013) เมื่อเติมซิลิกอนไดออกไซด์ร้อยละ 0.5 ค่ามุมสัมผัสหยดน้ำเพิ่มขึ้นเป็น 88.6 ± 1.0 องศา ก่อนลดลงเมื่อความเข้มข้นของซิลิกอนไดออกไซด์ถึงร้อยละ 1 เช่นเดียวกับการเติมไทเทเนียมไดออกไซด์และซิงค์ออกไซด์ เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของสตาโรลซ์พื้นฐานดังภาพที่ 16 ค นอกจากนี้อนุภาคซิลิกอนไดออกไซด์ยังมีโครงสร้างที่มีความเป็นรูพรุนสูงทำให้ไวต่อการดูดซับน้ำ ส่งผลให้ค่ามุมสัมผัสหยดน้ำลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณซิลิกอนไดออกไซด์เป็นร้อยละ 1



(ก)



(ข)



(ค)

ภาพที่ 24 สภาพการซึมผ่านได้ของแก๊สออกซิเจน (OP) สภาพการซึมผ่านได้ของไอน้ำ (WVP) และค่ามุมสัมผัสหยดน้ำ (CA) ของฟิล์มพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลทและเทอร์โมพลาสติกสตาบิลไนต์ผสมโลหะออกไซด์ (ก) ไทเทเนียมไดออกไซด์ (ข) ซิงค์ออกไซด์ และ (ค) ซิลิกอนไดออกไซด์

9. อุณหภูมิรีแลกเซชันเชิงกล

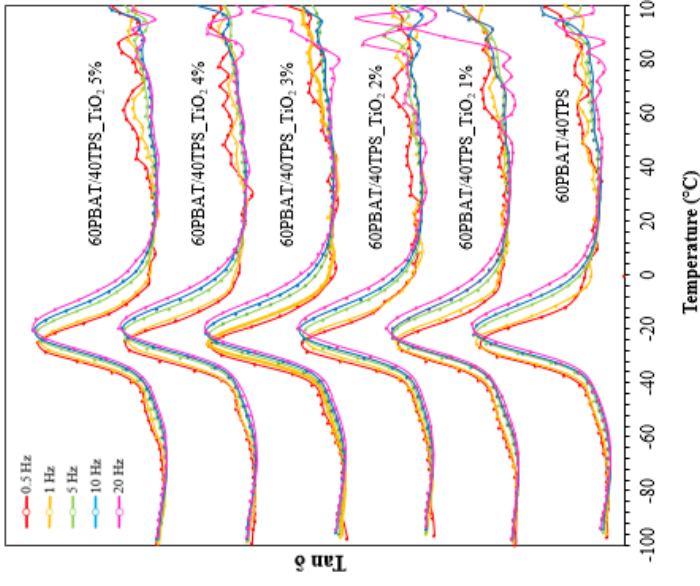
อุณหภูมิรีแลกเซชันเชิงกล (mechanical relaxation temperature) ของฟิล์มแสดงดังภาพที่ 25 ค่า $\tan \delta$ คำนวณจากอัตราส่วนระหว่างมอดูลัสกักเก็บ (storage modulus) และมอดูลัสสูญเสีย (loss modulus) โดยพิกของ $\tan \delta$ แสดงการเปลี่ยนแปลงเฟสของส่วนประกอบฟิล์มในส่วนอสัณฐาน เมื่อวัสดุอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (glass transition temperature, T_g) โมเลกุลจะมีสภาพการเคลื่อนที่สูงขึ้น ส่งผลให้ฟิล์มมีความอ่อนตัวมากขึ้น ปรากฏการณ์การเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วนำไปสู่การเคลื่อนที่ของโมเลกุลในเฟสอสัณฐาน และส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุ

ภาพที่ 25 ก แสดงค่า $\tan \delta$ ที่อุณหภูมิต่างๆของฟิล์มที่เติมไทเทเนียมไดออกไซด์ พิกของ $\tan \delta$ บ่งชี้ถึงอุณหภูมิแอลฟารีแลกเซชัน (T_α) ใหญ่พิกที่อุณหภูมิ -75 C ถึง -40 องศาเซลเซียส เกิดจากเฟสที่อุดมด้วยกลีเซอรอล (glycerol-rich phase) ในส่วนประกอบของเทอร์โมพลาสติกสตาไรซ์ พิกหลักระหว่าง -40 ถึง 10 องศาเซลเซียส เกิดจากส่วนประกอบของพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท ซึ่งสอดคล้องกับอุณหภูมิรีแลกเซชัน ระหว่าง -25 องศาเซลเซียส (0.5 เอิร์ตซ์) และ -20 องศาเซลเซียส (5 เอิร์ตซ์) ฟิล์มที่เติมไทเทเนียมไดออกไซด์แสดงค่า $\tan \delta$ และตำแหน่งของพิกไม่ต่างจากฟิล์มพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลทและเทอร์โมพลาสติกสตาไรซ์เบลนด์บ่งชี้ว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ไม่มีผลต่ออุณหภูมิรีแลกเซชัน อย่างไรก็ตาม ที่อุณหภูมิเหนือ 25 องศาเซลเซียส $\tan \delta$ มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์โดยเฉพาะในการทดสอบที่ความถี่สูง อาจเป็นผลจากอันตรกิริยาของไทเทเนียมไดออกไซด์และเทอร์โมพลาสติกสตาไรซ์ผ่านพันธะไฮโดรเจน

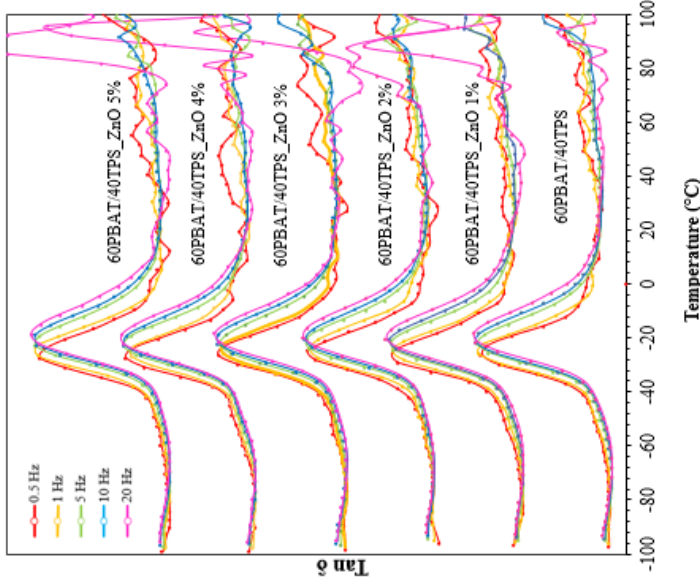
ภาพที่ 25 ข แสดงค่า $\tan \delta$ ที่อุณหภูมิต่างๆของฟิล์มที่เติมซิงค์ออกไซด์ พิกหลักระหว่างอุณหภูมิ -42 ถึง 12 องศาเซลเซียส ของพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท รวมเข้ากับใหญ่พิกที่ -72 ถึง -42 องศาเซลเซียส ของเฟสเทอร์โมพลาสติกสตาไรซ์ ฟิล์มที่เติมซิงค์ออกไซด์ร้อยละ 5 มีค่า $\tan \delta$ ต่ำที่สุดเป็นผลมาจากอันตรกิริยาระหว่างซิงค์ออกไซด์ สตาไรซ์ และกลีเซอรอล

ภาพที่ 25 ค แสดงค่า $\tan \delta$ ที่อุณหภูมิต่างๆของฟิล์มที่เติมซิลิกอนไดออกไซด์ พิกหลักของ $\tan \delta$ ระหว่างอุณหภูมิ -40 ถึง 15 องศาเซลเซียส ส่วนมากมาจากเฟสของพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท การเติมซิลิกอนไดออกไซด์ไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่ออุณหภูมิรีแลกเซชันที่ความถี่ต่ำกว่า 10 เอิร์ตซ์ โดยการเติมซิลิกอนไดออกไซด์ร้อยละ 1 ที่ความถี่การทดสอบ 20 เอิร์ตซ์มีค่า

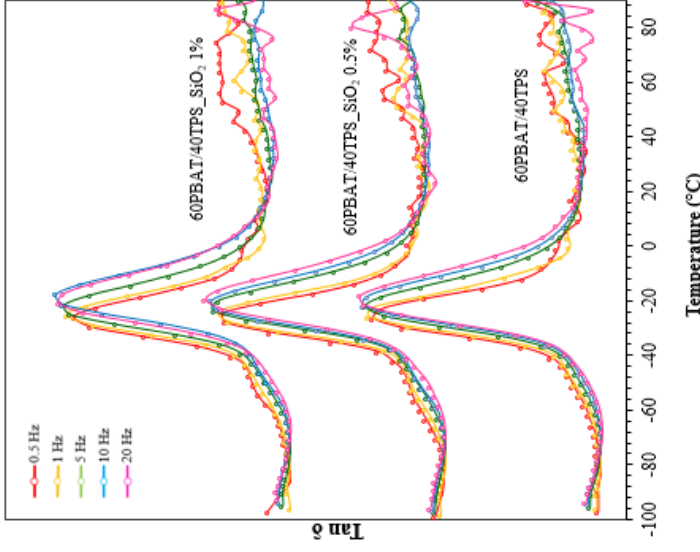
อุณหภูมิรีเล็กเซชันที่ต่ำที่สุด และการเติมซิลิคอนไดออกไซด์ยังลดความสูงของพีค $\tan \delta$ โดยเป็นผลมาจากการลดลงของความยืดหยุ่นของสายโซ่พอลิเมอร์ นอกจากนี้ที่อุณหภูมิเหนือ 20 องศาเซลเซียส ยังปรากฏพีค $\tan \delta$ ของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่มีความสูงลดลงเมื่อปริมาณซิลิคอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น และไหลพีคระหว่าง -60 ถึง -40 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นส่วนของเฟสที่อุดมด้วยกลีเซอรอลมีความสูงพีคที่มากขึ้น เนื่องจากอันตรกิริยาระหว่างซิลิคอนไดออกไซด์และสตาร์ชผ่านพันธะไฮโดรเจน ซึ่งส่งผลให้อันตรกิริยาระหว่างกลีเซอรอลและสตาร์ชลดลง



(ก)



(ข)



(ค)

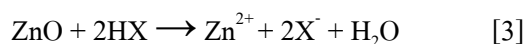
ภาพที่ 25 การวิเคราะห์เชิงกลของฟิล์มพอลิเอทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลทเทอร์โมพลาสติกสตาบิลไฮดรอกไซด์ (ก) เทเพเนียมไดออกไซด์ (ข) ซึ่งก่อออกไซด์ และ (ค) ซิลิคอนไดออกไซด์

10. ไมเกรชันจำเพาะ

การเกิดไมเกรชันจำเพาะของฟิล์มแสดงดั่งภาพที่ 26 และตารางที่ 7 ในสภาวะการเก็บรักษาที่ 5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 วัน การทดลองนี้ออกแบบเพื่อวิเคราะห์หาปริมาณของธาตุไทเทเนียม ซิงค์ และซิลิคอนที่แพร่กระจายจากฟิล์มที่เติมไทเทเนียม ไดออกไซด์ ซิงค์ไดออกไซด์ และซิลิคอนไดออกไซด์ตามลำดับ

ภาพที่ 26 ก แสดงปริมาณไมเกรชันของธาตุไทเทเนียมจากฟิล์มที่เติมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ปริมาณต่าง ๆ ซึ่งพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ในฟิล์มจะทำให้ระดับไมเกรชันสูงขึ้นจนถึงปริมาณสูงสุด (ไทเทเนียมไดออกไซด์ร้อยละ 4 สำหรับอาหารจำลองน้ำกลั่น และเอทานอลร้อยละ 10) ก่อนลดลงในฟิล์มที่เติมไทเทเนียมไดออกไซด์ร้อยละ 5 อันเป็นผลเนื่องมาจากการปรับปรุงโครงสร้างของฟิล์ม โดยเฉพาะในเฟสของสตาร์ซดั่ง โครงสร้างจุลภาคที่ปรากฏการกระจายตัวของสตาร์ซที่มากกว่าดั่งแสดงในภาพที่ 17 ก และการเกิดอันตรกิริยาระหว่างสตาร์ซโซลชันและไทเทเนียมไดออกไซด์ (ร้อยละ 5) มีผลยับยั้งการไมเกรชันของไทเทเนียมจากเมทริกซ์พอลิเมอร์ในอาหารจำลองทุกชนิด ค่าไมเกรชันของไทเทเนียมแตกต่างกันตามชนิดของอาหารจำลอง และฟิล์มที่เติมไทเทเนียมไดออกไซด์ปรากฏค่าไมเกรชันสูงสุดในน้ำกลั่นตามมาด้วยเอทานอลเข้มข้นร้อยละ 10 และกรดแอสซิติคเข้มข้นร้อยละ 3 ตามลำดับ เป็นผลจากการบวมน้ำของฟิล์มในเฟสของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ซซึ่งไวต่อน้ำและความชื้น ส่งผลให้น้ำกลั่นสามารถแทรกตัวในเมทริกซ์ได้มากขึ้น เกิดการพองตัวของเมทริกซ์ นอกจากนี้ยังมีผลของอันตรกิริยาระหว่างน้ำกลั่นและสตาร์ซผ่านพันธะไฮโดรเจนซึ่งแทนที่อันตรกิริยาดั้งเดิมระหว่างไทเทเนียมไดออกไซด์และสตาร์ซส่งผลให้แรงยึดเกาะระหว่างพอลิเมอร์และไทเทเนียมไดออกไซด์ลดลง ไทเทเนียมไดออกไซด์จึงเคลื่อนที่ออกจากเมทริกซ์ได้มากขึ้น โดยฟิล์มที่เติมไทเทเนียมไดออกไซด์ร้อยละ 3 และ 4 ปรากฏค่าไมเกรชันสูงสุด (Enescu *et al.*, 2020; Lin *et al.*, 2014)

ปริมาณไมเกรชันของซิงค์จากฟิล์มที่เติมซิงค์ไดออกไซด์แสดงดั่งภาพที่ 26 ข มีค่าสูงกว่าฟิล์มที่เติมไทเทเนียมไดออกไซด์และซิลิคอนไดออกไซด์ และปรากฏการไมเกรชันสูงสุดในอาหารจำลองกรดแอสซิติคเข้มข้นร้อยละ 3 จากการละลายและไมเกรชันของซิงค์ไอออน เนื่องจากการเกิดไอออนในเซชันของซิงค์ไดออกไซด์ในสารละลายกรดส่งผลเร่งการละลายของซิงค์จากฟิล์มสู่อาหารจำลอง ดังสมการที่ [3] ขณะที่ซิลิคอนไดออกไซด์และไทเทเนียมไดออกไซด์มีความไวต่อปฏิกิริยาที่ต่ำกว่า (Bumbudsanpharoke *et al.*, 2019)



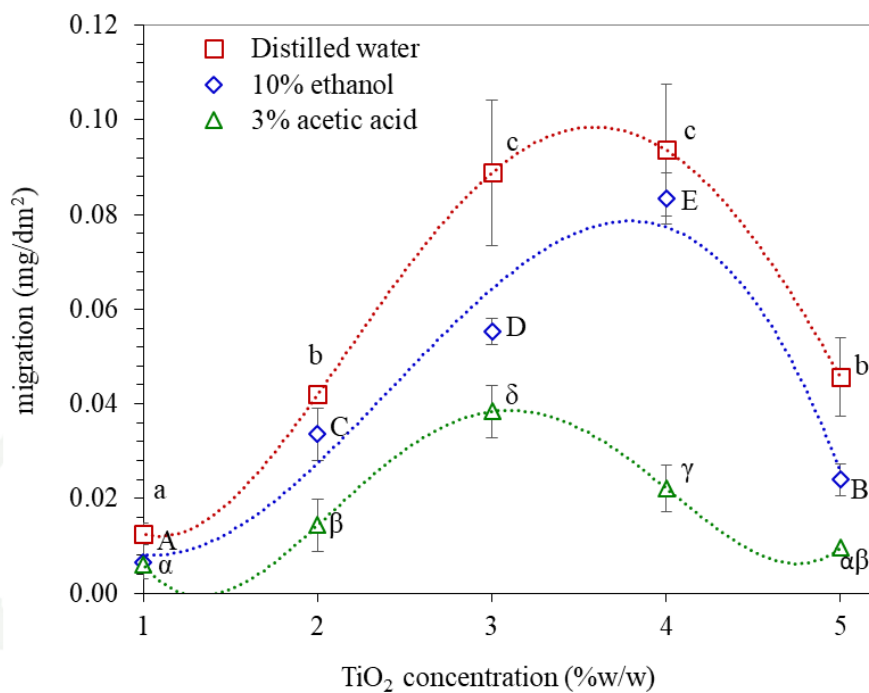
นอกจากนี้อาหารจำลองประเภทกรดยังมีอิทธิพลต่อการปรับปรุงโครงสร้างของพอลิเมอร์ในเฟสของพอลิเมอร์ที่ลิโนอะดิเพท-โค-เทเรพทาเลทและเทอร์โมพลาสติคสตาร์ช การละลายของซิงค์ไอออนยังส่งผลทำลายโครงสร้างของฟิล์มนำไปสู่การเร่งปรากฏการณ์ไมเกรชันของส่วนประกอบฟิล์ม การไมเกรชันของซิงค์ในน้ำกลั่นสูงกว่าในสารละลายเอทานอลซึ่งความเข้มข้นต่ำกว่าน้ำ เช่นเดียวกับไทเทเนียมไดออกไซด์และซิลิกอนไดออกไซด์ซึ่งบ่งชี้อิทธิพลของความชอบน้ำของพอลิเมอร์ต่อระดับการเกิดไมเกรชัน

ซิลิกอนไดออกไซด์ปรากฏการไมเกรชันของซิลิกอนมากที่สุดเมื่อแช่ในน้ำกลั่นดังแสดงในตารางที่ 7 โดยเมื่อเพิ่มปริมาณซิลิกอนไดออกไซด์จากร้อยละ 0.5 เป็นร้อยละ 1 ค่าไมเกรชันของซิลิกอนเพิ่มขึ้น 1.39 เท่า ในน้ำกลั่น ตามมาด้วยกรดแอสติคและตรวจไม่พบซิลิกอนในอาหารจำลองเอทานอล จากการทดลองข้างต้นแสดงให้เห็นว่า ระดับการเกิดไมเกรชันที่แตกต่างกันของโลหะจากฟิล์มผสมโลหะออกไซด์ทั้งสามชนิดขึ้นกับการเกิดอันตรกิริยาหรือปฏิสัมพันธ์ระหว่างพอลิเมอร์ อนุภาคโลหะออกไซด์ และอาหารจำลอง เช่น โครงสร้างและการบวมของฟิล์ม การละลายของส่วนประกอบของฟิล์ม (พอลิเมอร์และโลหะ) ในอาหารจำลอง อันตรกิริยาระหว่างอนุภาคโลหะออกไซด์และเมทริกซ์พอลิเมอร์ และปฏิสัมพันธ์ระหว่างส่วนประกอบของฟิล์มกับตัวทำละลาย

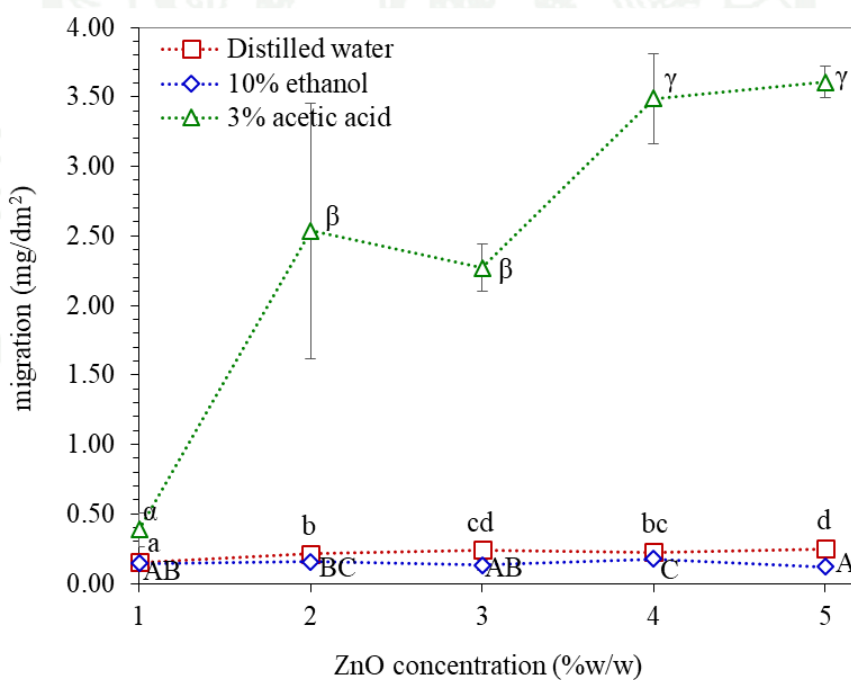
ตารางที่ 7 ค่าไมเกรชันของซิลิกอนในอาหารจำลองของฟิล์มพอลิเมอร์ที่ลิโนอะดิเพท-โค-เทเรพทาเลทและเทอร์โมพลาสติคสตาร์ชเบลนด์ผสมซิลิกอนไดออกไซด์

ร้อยละของซิลิกอน ไดออกไซด์	ซิลิกอนไมเกรชัน $\times 10^{-2}$ (มิลลิกรัม/ตารางเดซิเมตร)		
	น้ำกลั่น	กรดแอสติคร้อยละ 3	เอทานอลร้อยละ 10
0.5	0.478 \pm 0.099	n.d.	n.d.
1	0.664 \pm 0.173	0.148 \pm 0.022	n.d.

หมายเหตุ n.d. (not detected) คือ ตรวจไม่พบหรือมีปริมาณน้อยกว่าขีดความสามารถของเครื่องมือ



(ก)



(ข)

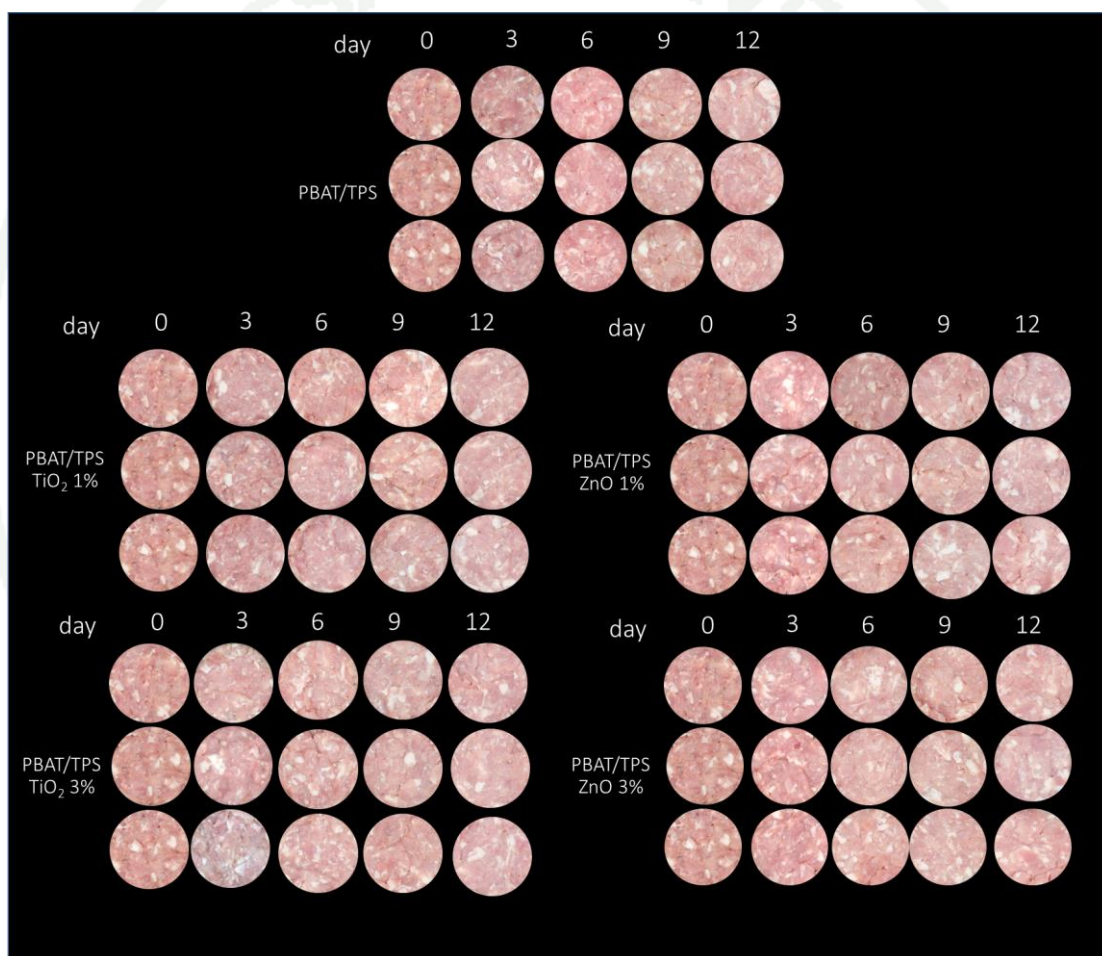
ภาพที่ 26 ไมเกรชั่นของโลหะในอาหารจำลองของฟิล์มพอลิบีวทิลินอะดิเพท-โค-เทรฟทาเลทและเทอร์โมพลาสติกสไตรซ์เบลนด์ผสมโลหะออกไซด์ (ก) ไทเทเนียมไดออกไซด์ และ (ข) ซิงค์ออกไซด์

11. การประยุกต์ใช้ฟิล์มเป็นบรรจุภัณฑ์เนื้อสัตว์

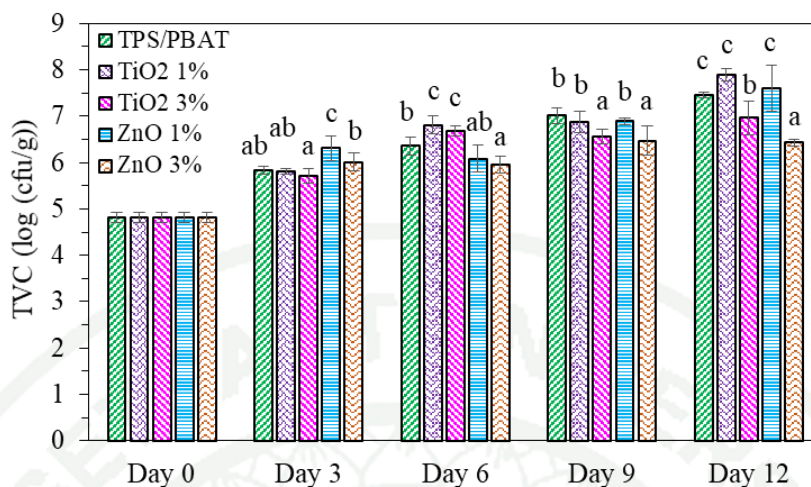
ลักษณะปรากฏของเนื้อหมูปอดและจำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมด (total viable count, TVC) ในเนื้อหมูปอดที่บรรจุในถุงจากฟิล์มพอลิเอทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลทและเทอร์โมพลาสติกสตาบิลไนต์ผสมโลหะออกไซด์ชนิดไทเทเนียมไดออกไซด์และซิงค์ออกไซด์ด้วยความเข้มข้นร้อยละ 0, 1 และ 3 แสดงดังภาพที่ 27 และ 28 ในวันเริ่มต้นเนื้อหมูมีปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมด $4.81 \log$ (โคโลนี/กรัม) ตามข้อกำหนดของคณะกรรมการระหว่างประเทศว่าด้วยคุณสมบัติทางจุลชีววิทยาสำหรับอาหาร (International Commission on Microbiological Specifications for Foods, ICMSF) ได้กำหนดค่าเชื้อจุลินทรีย์สำหรับเนื้อสดไม่เกิน $7 \log$ (โคโลนี/กรัม) เนื้อหมูปอดซึ่งบรรจุในฟิล์มที่ไม่ได้เติมโลหะออกไซด์มีค่าเชื้อจุลินทรีย์เกินข้อกำหนดตั้งแต่วันที่ 9 ขณะที่ฟิล์มที่เติมไทเทเนียมไดออกไซด์และซิงค์ออกไซด์ร้อยละ 3 สามารถยืดอายุรักษาเนื้อหมูปอดได้ยาวนานกว่า 12 วัน

สมบัติการต้านจุลินทรีย์นี้เป็นผลมาจากการถูกกระตุ้นด้วยแสงของไทเทเนียมไดออกไซด์และซิงค์ออกไซด์ เมื่ออยู่ภายใต้รังสียูวี ไทเทเนียมไดออกไซด์และซิงค์ออกไซด์จะเกิดการดูดซับโฟตอนและกระตุ้นอิเล็กตรอนให้เคลื่อนที่จากแถบวาเลนซ์เข้าสู่แถบนำไฟฟ้า ก่อให้เกิดช่องว่างประจุบวกในแถบวาเลนซ์และอิเล็กตรอนอิสระในแถบนำไฟฟ้า ผลิตภัณฑ์เหล่านี้สามารถทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของน้ำและออกซิเจนในบรรยากาศก่อให้เกิดอนุมูลอิสระของออกซิเจนที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยา ได้แก่ อนุมูลอิสระของไฮดรอกซิล ($\text{OH}\cdot$) ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) และประจุลบของซูเปอร์แอนไอออน ($\text{O}_2^{\cdot-}$) ผลิตภัณฑ์เหล่านี้เป็นสารออกซิไดซ์ที่รุนแรงสามารถเกิดออกซิเดชันที่เยื่อหุ้มเซลล์ของจุลินทรีย์และฆ่าจุลินทรีย์ได้ นอกจากนี้ฟิล์มที่เติมซิงค์ออกไซด์ยังแสดงการยับยั้งจุลินทรีย์ที่เหนือกว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ เนื่องจากซิงค์ออกไซด์มีการเกิดปฏิกิริยาเร่งด้วยแสงสูงสุดในหมู่สารอนินทรีย์ที่สามารถเกิดปฏิกิริยาเร่งด้วยแสงได้ และซิงค์ออกไซด์ยังสามารถเกิดปฏิกิริยาเร่งด้วยแสงได้แม้ว่าภายหลังจะไม่ได้อยู่ภายใต้แสงยูวี เนื่องมาจากการดูดซับอะตอมของออกซิเจน (O_2 และ $\text{O}_2^{\cdot-}$) บนพื้นผิวของซิงค์ออกไซด์ส่งผลให้เมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสงยูวี ซิงค์ออกไซด์จะคลายพันธะ (desorption) ของออกซิเจนส่งผลลดพื้นที่พร่องอิเล็กตรอน (electron depletion region) และส่งเสริมการเกิดปฏิกิริยาเร่งด้วยแสง นอกจากนี้เมื่อสัมผัสกับอาหารซิงค์ออกไซด์ยังสามารถปล่อยซิงค์ไอออน (Zn^{2+}) ลงสู่อาหารนำมาซึ่งสมบัติการต้านเชื้อจุลินทรีย์ ขณะที่ไทเทเนียมไอออน (Ti^{4+}) ไม่ปรากฏสมบัติการต้านเชื้อจุลินทรีย์ ฟิล์มที่เติมซิงค์ออกไซด์จึงแสดงการต้านเชื้อที่เหนือกว่า (Sirelkhathim *et al.*, 2015; Zakharova and Gusev, 2020; Zhang *et al.*,

2021a; ชลดา, 2555) เช่นเดียวกับ Zhang *et al.* (2021b) ที่ได้ศึกษาประสิทธิภาพการรักษาคุณภาพเนื้อหมูแช่แข็งของฟิล์มพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลทผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ และรายงานการต้านเชื้อของฟิล์มที่ผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เหนือกว่าฟิล์มพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท และ Saedi *et al.* (2021) ได้ศึกษาประสิทธิภาพการต้านเชื้อจุลินทรีย์ก่อโรคในอาหาร และรายงานการต้านเชื้อของฟิล์มที่ผสมซิงค์ออกไซด์ด้วยกลไกไฟฟ้าสถิตย์ การทำปฏิกิริยากับไฮโดรฟลาซิมของซิงค์ไอออน และการออกซิเดชันจากปฏิกิริยาเร่งด้วยแสง



ภาพที่ 27 ลักษณะปรากฏของเนื้อหมูดิบที่บรรจุในฟิล์มพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลทและเทอร์โมพลาสติกสตาบิลไรเซอร์ผสมโลหะออกไซด์ชนิดไทเทเนียมไดออกไซด์และซิงค์ออกไซด์และบรรจุซ้ำในถุงสุญญากาศระหว่างการเก็บรักษาระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 วัน

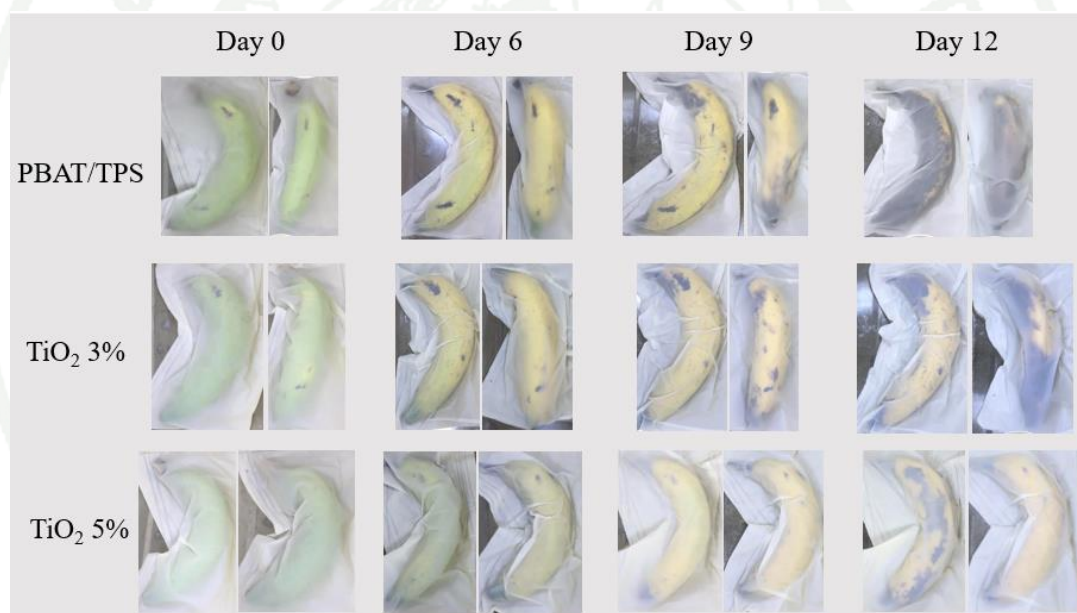


ภาพที่ 28 จำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมด (TVC) ในเนื้อหมูปดที่บรรจุในฟิล์มพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โกลเทเรฟทาเลทและเทอร์โมพลาสติกสตาโรซเบลนค์ผสมโลหะออกไซด์ชนิดไทเทเนียมไดออกไซด์และซิงค์ออกไซด์ และบรรจุเข้าในถุงสุญญากาศระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 12 วัน

12. การประยุกต์ใช้ฟิล์มเป็นบรรจุภัณฑ์ผลไม้

ภาพที่ 29 แสดงกล้วยหอมที่บรรจุในฟิล์มที่มีปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ระดับต่าง ๆ กล้วยหอมที่บรรจุในฟิล์มที่เติมไทเทเนียมไดออกไซด์ร้อยละ 3 และ 5 ปรากฏสีน้ำตาลและเน่าเสียช้าลงตามความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มากขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากสมบัติการกำจัดเอทิลีนของไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยการเกิดผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาเร่งด้วยแสงซึ่งเป็นสารออกซิไดซ์ที่แรงนั้นสามารถเกิดปฏิกิริยากับก๊าซเอทิลีนในบรรยากาศโดยทำลายพันธะคู่ (C=C) ในโครงสร้างของก๊าซเอทิลีน นำไปสู่การกำจัดเอทิลีนในบรรยากาศบรรจุภัณฑ์และชะลอการเน่าเสียของกล้วยหอม เช่นเดียวกับ Ezati *et al.* (2022) ที่ศึกษาการชะลอการเกิดสีน้ำตาลของกล้วยด้วยฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์-คอปเปอร์คอมโพสิตภายใต้แสงจากหลอดไฟ LED สีขาว การชะลอการเกิดสีน้ำตาลนี้เป็นผลสืบเนื่องมาจากปริมาณก๊าซเอทิลีนซึ่งมีอิทธิพลต่อปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์ในบรรจุภัณฑ์ถูกย่อยสลายเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) และน้ำ (H₂O) และการใช้คอปเปอร์ร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ยังส่งผลลดช่องว่างระหว่างแถบพลังงาน (energy gap) เป็น 2.55 อิเล็กตรอนโวลต์ ส่งผลให้อนุภาคนาโนไทเทเนียม-คอปเปอร์สามารถเกิดปฏิกิริยาเร่งด้วยแสงภายใต้แสงในช่วงคลื่นที่มองเห็นได้ และ Xie *et al.* (2022) ที่ศึกษาการ

รักษาคุณภาพของกล้วยด้วยฟิล์มพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ ซิลเวอร์ออกไซด์ (Ag_2O) และบิสมัททังสเตท (Bi_2WO_6) รายงานการรักษาคุณภาพและชะลอการสุกของกล้วยโดยการยับยั้งการแลกเปลี่ยนก๊าซกับบรรยากาศภายนอกบรรจุภัณฑ์และการย่อยสลายก๊าซเอทิลีน นำมาสู่การลดการสูญเสียน้ำหนัก ยับยั้งการสลายตัวของไกลโคเจน รักษาความแข็งของเนื้อกล้วยและปริมาณกรดที่สามารถไทเทรตได้ และลดกิจกรรมของเอนไซม์พอลิฟีนอลออกซิเดสซึ่งมีบทบาทเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารประกอบฟีนอลกับออกซิเจนเกิดเป็นสารสีน้ำตาล นอกจากนี้การใช้ซิลเวอร์ออกไซด์และบิสมัททังสเตทร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ยังส่งเสริมการเกิดปฏิกิริยาเร่งด้วยแสงของสารเคลือบฟิล์มเนื่องจากสารทั้งสามชนิดล้วนมีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาเร่งด้วยแสงทั้งสิ้น



ภาพที่ 29 ลักษณะปรากฏของกล้วยหอมซึ่งถูกบรรจุในฟิล์มพอลิไวนิลอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท และเทอร์โมพลาสติกสตาไรซ์เบลนด์ และพอลิไวนิลอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลทและเทอร์โมพลาสติกสตาไรซ์เบลนด์ผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ร้อยละ 3 และ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

ฟิล์มพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลทผสมเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่มีส่วนผสมของไทเทเนียมไดออกไซด์ (ร้อยละ 1 ถึง 5) ซิงค์ออกไซด์ (ร้อยละ 1 ถึง 5) และซิลิกอนไดออกไซด์ (ร้อยละ 0.5 ถึง 1) สามารถขึ้นรูปได้ด้วยกระบวนการอัดรีด การเติมโลหะออกไซด์มีแนวโน้มส่งเสริมการหลอมเหลวของพอลิเมอร์แต่เพิ่มความไม่เข้ากันของเมทริกซ์ส่งผลเพิ่มรูพรุนในโครงสร้างของฟิล์ม นอกจากนี้การเพิ่มปริมาณโลหะออกไซด์มีแนวโน้มเกิดการรวมกลุ่มของอนุภาคโลหะออกไซด์และขัดขวางอันตรกิริยาระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้สภาพการซึมผ่านได้ของไอน้ำและแก๊สออกซิเจนของฟิล์มเพิ่มขึ้น ความต้านทานแรงดึงและร้อยละการยืดตัวลดลงขณะเดียวกันเมื่อเติมโลหะออกไซด์มากถึงจุดหนึ่งจะทำให้การเพิ่มขึ้นของโครงสร้างอัดพื้นฐานของสตาโรลมีส่วนช่วยในการแตกตัวของแกรนูลสตาโรลและส่งเสริมการกระจายตัวของสายโซ่สตาโรลในเมทริกซ์พอลิเมอร์ เมื่อรวมกับผลของอันตรกิริยาระหว่างโลหะออกไซด์และเมทริกซ์พอลิเมอร์ส่งผลให้มีความต้านทานแรงดึงและการป้องกันการซึมผ่านของแก๊สและไอน้ำของฟิล์มเพิ่มขึ้น ทั้งนี้การเติมโลหะออกไซด์ไม่ส่งผลต่ออุณหภูมิแก้วและอุณหภูมิหลอมอย่างมีนัยสำคัญ

นอกจากนี้ฟิล์มที่เติมไทเทเนียมไดออกไซด์และซิงค์ออกไซด์มีบทบาทเป็นบรรจุภัณฑ์แอคทีฟสามารถชะลอการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ในเนื้อหมูปดและทำลายสปอร์โมเนอเทลินที่ปลดปล่อยจากกล้วยหอมทำให้อายุการเก็บอาหารนานขึ้น และการเติมอนุภาคโลหะออกไซด์ยังช่วยลดการส่องผ่านของแสง โดยเฉพาะในช่วงแสงยูวี ในส่วนของซิลิกอนไดออกไซด์ในงานวิจัยนี้ไม่ปรากฏสมบัติปฏิกิริยาเร่งด้วยแสงแต่มีความสามารถในการปรับปรุงสมบัติป้องกันการซึมผ่านแก๊สและไอน้ำของฟิล์มและสามารถใช้สำหรับงานวิจัยต่อยอดได้ จากผลการวิจัยเหล่านี้การใช้โลหะออกไซด์ชนิดไทเทเนียมไดออกไซด์ และซิงค์ออกไซด์ร่วมกับพลาสติกชีวภาพด้วยกระบวนการอัดรีดจึงเป็นหนึ่งวิธีที่สามารถผลิตบรรจุภัณฑ์แอคทีฟเพื่อยืดอายุอาหาร

ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยแสดงถึงศักยภาพของโลหะออกไซด์ต่อการส่งเสริมสมบัติของพลาสติกชีวภาพและบทบาทการเป็นบรรจุภัณฑ์แอคทีฟสำหรับอาหาร อย่างไรก็ตามพลาสติกชีวภาพในงานวิจัยนี้มี

ข้อจำกัดในด้านความไม่เข้ากันของพอลิเมอร์ ส่งผลให้สมบัติโดยรวมลดลง การเลือกชนิดพอลิเมอร์ซึ่งสามารถเข้ากันได้ การส่งเสริมการเกิดอันตรกิริยากับเมทริกซ์พอลิเมอร์และการส่งเสริมปฏิกิริยาเร่งด้วยแสงด้วยวิธีต่าง ๆ เช่น ขนาดของอนุภาคโลหะออกไซด์ การเลือกสารตั้งต้นสำหรับการสังเคราะห์โลหะออกไซด์ การเคลือบอนุภาคโลหะออกไซด์ การผสมโลหะชนิดอื่นร่วม หรือกระบวนการสำหรับส่งเสริมการกระจายตัวของโลหะออกไซด์ในวัสดุคอมโพสิต จึงเป็นส่วนสำคัญในการพัฒนาต่อวัสดุสำหรับบรรจุภัณฑ์แอคทีฟเพื่อยืดอายุอาหาร

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- ชลดา ชีรการณวงศ์. 2555. โทเทเนียมไดออกไซด์: วัสดุฆ่าเชื้อแบคทีเรีย. วารสารวิทยาศาสตร์ มข., 40 (4): 1049-1058.
- ราชกิจจานุเบกษา. 2563. ประกาศกระทรวงสาธารณสุข เล่ม 137 ตอนพิเศษ 237 ง, หน้า 460-564.
- Abdullah, A. H. D., O. D. Putri, A. K. Fikriyyah, R. C. Nissa, S. Hidayat, R. F. Septiyanto, M. Karina, and R. Satoto. 2020. Harnessing the excellent mechanical, barrier and antimicrobial properties of zinc Oxide (ZnO) to improve the performance of starch-based bioplastic. **Polymer-Plastics Technology and Materials**, 59 (12): 1259-1267.
- Ahmed, J., M. Mulla, H. Jacob, G. Luciano, B. T.B, and A. Almusallam. 2019. Polylactide/poly(ϵ -caprolactone)/zinc oxide/clove essential oil composite antimicrobial films for scrambled egg packaging. **Food Packaging and Shelf Life**, 21: 100355.
- Al-Tayyar, N. A., A. M. Youssef and R. R. Al-Hindi 2020. Antimicrobial packaging efficiency of ZnO-SiO₂ nanocomposites infused into PVA/CS film for enhancing the shelf life of food products. **Food Packaging and Shelf Life**, 25: 100523.
- Amaral, A. B., M. V. d. Silva, and S. C. d. S. Lannes. 2018. Lipid oxidation in meat: mechanisms and protective factors – a review. **Food Science and Technology**, 38 (suppl 1): 1-15.
- Amin, M. R., M. A. Chowdhury, and M. A. Kowser. 2019. Characterization and performance analysis of composite bioplastics synthesized using titanium dioxide nanoparticles with corn starch. **Heliyon**, 5 (8): e02009.
- Amjadi, S., M. Nazari, S. A. Alizadeh, and H. Hamishehkar. 2020. Multifunctional betanin nanoliposomes-incorporated gelatin/chitosan nanofiber/ZnO nanoparticles nanocomposite film for fresh beef preservation. **Meat Science**, 167: 108161.
- Bumbudsanpharoke, N., J. Choi, H. J. Park, and S. Ko. 2019. Zinc migration and its effect on the functionality of a low density polyethylene-ZnO nanocomposite film. **Food Packaging and Shelf Life**, 20: 100301.
- Bumbudsanpharoke, N., P. Wongphan, K. Promhuad, P. Leelaphiwat, and N. Harnkarnsujarit. 2022. Morphology and permeability of bio-based poly(butylene adipate-co-terephthalate)

- (PBAT), poly(butylene succinate) (PBS) and linear low-density polyethylene (LLDPE) blend films control shelf-life of packaged bread. **Food Control**, 132: 108541.
- Cao, C., Y. Wang, S. Zheng, J. Zhang, W. Li, B. Li, R. Guo, and J. Yu. 2020. Poly (butylene adipate-co-terephthalate)/titanium dioxide/silver composite biofilms for food packaging application. **Lwt**, 132: 109874.
- Carvalho, A. J. F. 2013. Starch: major sources, properties and applications as thermoplastic materials, pp. 129-152. *In* S. Ebnesajjad, eds. **Handbook of Biopolymers and Biodegradable Plastics**. William Andrew, Norwich, NY.
- Colussi, R., V. Z. Pinto, S. L. M. E. Halal, B. Biduski, L. Prietto, D. D. Castilhos, E. d. R. Zavareze, and A. R. G. Dias. 2017. Acetylated rice starches films with different levels of amylose: Mechanical, water vapor barrier, thermal, and biodegradability properties. **Food Chemistry**, 221: 1614-1620.
- Colussi, R., V. Z. Pinto, S. L. M. E. Halal, N. L. Vanier, F. A. Villanov, R. M. e. Silva, E. d. R. Zavareze, and A. R. G. Dias. 2014. Structural, morphological, and physicochemical properties of acetylated high-, medium-, and low-amylose rice starches. **Carbohydrate Polymers**, 103: 405-413.
- Dilkes-Hoffman, L., P. Ashworth, B. Laycock, S. Pratt, and P. Lant. 2019. Public attitudes towards bioplastics – knowledge, perception and end-of-life management. **Resources, Conservation & Recycling**, 151: 104479.
- Dong, X., X. Liang, Y. Zhou, K. Bao, D. E. Sameen, S. Ahmed, J. Dai, W. Qin, and Y. Liu. 2021. Preparation of polylactic acid/TiO₂/GO nano-fibrous films and their preservation effect on green peppers. **International Journal of Biological Macromolecules**, 177: 135-148.
- Duan, N., Q. Li, X. Meng, Z. Wang, and S. Wu. 2021. Preparation and characterization of k-carrageenan/konjac glucomannan/TiO₂ nanocomposite film with efficient anti-fungal activity and its application in strawberry preservation. **Food Chemistry**, 364: 130441.
- Efatian, H., H. Ahari, D. Shahbazzadeh, B. Nowruzi, and S. Yousefi. 2021. Fabrication and characterization of LDPE/silver-copper/titanium dioxide nanocomposite films for application in Nile Tilapia (*Oreochromis niloticus*) packaging. **Journal of Food Measurement and Characterization**, 15 (3): 2430-2439.
- Enescu, D., A. Dehelean, C. Gonçalves, M. A. Cerqueira, D. A. Magdas, P. Fucinos, and L. M.

- Pastrana. 2020. Evaluation of the specific migration according to EU standards of titanium from Chitosan/Metal complexes films containing TiO₂ particles into different food simulants. A comparative study of the nano-sized vs micro-sized particles. **Food Packaging and Shelf Life**, 26: 100579.
- European bioplastics. (2021). **Bioplastics market data**. Available Source: <https://www.european-bioplastics.org/market/>, January 2, 2022.
- European Commission. 2004. Regulation (EC) No 1935/2004 of the European Parliament and of the Council of 27 October 2004. **Official Journal of the European Union**, 338: 4-17.
- European Commission. 2009. Commission Regulation (EC) No 450/2009 of 29 May 2009 on active and intelligent materials and articles intended to come into contact with food. **Official Journal of the European Union**, 135: 3-11.
- European Commission. 2011. Commission Regulation (EU) No 10/2011 of 14 January 2011 on plastic materials and articles intended to come into contact with food. **Official Journal of the European Union**, 12: 1-89.
- European Commission. 2016. Commission Regulation (EU) 2016/1416 of 24 August 2016 amending and correcting Regulation (EU) No 10/2011 on plastic materials and articles intended to come into contact with food. **Official Journal of the European Union**, 230: 22-42.
- Ezati, P., Z. Riahi, and J. W. Rhim. 2022. CMC-based functional film incorporated with copper-doped TiO₂ to prevent banana browning. **Food Hydrocolloids** 122: 107104.
- Fernández-García, M., and J. A. Rodríguez. 2007. **Metal oxide nanoparticles**. Brookhaven National Lab, Upton, NY.
- García, C. V., G. H. Shin, and J. T. Kim. 2018. Metal oxide-based nanocomposites in food packaging: Applications, migration, and regulations. **Trends in Food Science & Technology**, 82: 21-31.
- Gumiero, M., D. Peressini, A. Pizzariello, A. Sensidoni, L. Iacumin, G. Comi, and R. Toniolo. 2013. Effect of TiO₂ photocatalytic activity in a HDPE-based food packaging on the structural and microbiological stability of a short-ripened cheese. **Food Chemistry**, 138 (2-3): 1633-1640.
- Hassannia-Kolae, M., F. Khodaiyan, R. Pourahmad, and I. Shahabi-Ghahfarrokhi. 2016. Development of ecofriendly bionanocomposite: Whey protein isolate/pullulan films with

- nano-SiO₂. **International Journal of Biological Macromolecules**, 86: 139-144.
- Indumathi, M. P., K. Saral Sarojini, and G. R. Rajarajeswari. 2019. Antimicrobial and biodegradable chitosan/cellulose acetate phthalate/ZnO nano composite films with optimal oxygen permeability and hydrophobicity for extending the shelf life of black grape fruits. **International Journal of Biological Macromolecules**, 132: 1112-1120.
- Iqbal, N., N. A. Khan, A. Ferrante, A. Trivellini, A. Francini, and M. I. R. Khan. 2017. Ethylene Role in Plant Growth, Development and Senescence: Interaction with Other Phytohormones. **Frontiers in plant science**, 8: 475.
- Jariyasakoolroj, P., P. Leelaphiwat, and N. Harnkarnsujarit. 2020. Advances in research and development of bioplastic for food packaging. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, 100 (14): 5032-5045.
- Jeremic, S., J. Milovanovic, M. Mojicevic, S. Skaro-Bogojevic, and J. Nikodinovic-Runic. 2020. Understanding bioplastic materials - current state and trends. **Journal of the Serbian Chemical Society**, 85 (12): 1507-1538.
- Ji, Y., M. Xu, and A. Wang. 2021. Recent Advances in the Regulation of Climacteric Fruit Ripening: Hormone, Transcription Factor and Epigenetic Modifications. **Frontiers of Agricultural Science and Engineering**, 8 (2): 314-334.
- Jian, J., Z. Xiangbin, and H. Xianbo. 2020. An overview on synthesis, properties and applications of poly(butylene-adipate-co-terephthalate)-PBAT. **Advanced Industrial and Engineering Polymer Research**, 3 (1): 19-26.
- Kariminejad, M., E. Sadeghi, M. Rouhi, R. Mohammadi, F. Askari, M. Taghizadeh, and S. Moradi. 2018. The effect of nano-SiO₂ on the physicochemical and structural properties of gelatin-polyvinyl alcohol composite films. **Journal of Food Process Engineering**, 41 (6): e12817.
- Kohannia, N., F. Beigmohammadi, A. Ramzani Ghara, and K. Nayebzadeh. 2021. Effect of polyethylene terephthalate incorporated with titanium dioxide and zinc oxide nanoparticles on shelf-life extension of mayonnaise sauce. **Journal of Food Processing and Preservation**, 45 (5): e15453.
- Kou, X., Y. He, Y. Li, X. Chen, Y. Feng, and Z. Xue. 2019. Effect of abscisic acid (ABA) and chitosan/nano-silica/sodium alginate composite film on the color development and quality of postharvest Chinese winter jujube (*Zizyphus jujuba* Mill. cv. Dongzao). **Food**

Chemistry, 270: 385-394.

- Kumar, S., J. C. Boro, D. Ray, A. Mukherjee, and J. Dutta. 2019. Bionanocomposite films of agar incorporated with ZnO nanoparticles as an active packaging material for shelf life extension of green grape. **Heliyon**, 5 (6): e01867.
- Lackner, M. 2015. Bioplastics, pp. 1-41. *In*eds. **Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology**. John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey.
- Leelaphiwat, P., C. Pechprankan, P. Siripho, N. Bumbudsanpharoke, and N. Harnkarnsujarit. 2022. Effects of nisin and EDTA on morphology and properties of thermoplastic starch and PBAT biodegradable films for meat packaging. **Food Chemistry**, 369: 130956.
- Li, W., L. Li, H. Zhang, M. Yuan, and Y. Qin. 2018. Evaluation of PLA nanocomposite films on physicochemical and microbiological properties of refrigerated cottage cheese. **Journal of Food Processing and Preservation**, 42 (1): 1-9.
- Lin, Q. B., H. Li, H. N. Zhong, Q. Zhao, D. H. Xiao, and Z. W. Wang. 2014. Migration of Ti from nano-TiO₂-polyethylene composite packaging into food simulants. **Food Additives & Contaminants: Part A**, 31 (7): 1284-1290.
- Luyt, A. S., and S. S. Malik. 2019. Can Biodegradable Plastics Solve Plastic Solid Waste Accumulation?, pp. 403-423. *In*eds. **Plastics to Energy**. William Andrew, Norwich, NY.
- Mina, J., A. Valadez-Gonzalez, P. Herrera-Franco, F. Zuluaga, and S. Delvasto. 2010. Physicochemical Characterization of Natural and Acetylated Thermoplastic Cassava Starch. **Dyna** 78: 166-173.
- Nasiri, A., M. Shariaty-Niasar, and Z. Akbari. 2012. Synthesis of LDPE/Nano TiO₂ nanocomposite for packaging applications. **International Journal of Nanoscience and Nanotechnology**, 8 (3): 165-170.
- Oleyaei, S. A., Y. Zahedi, B. Ghanbarzadeh, and A. A. Moayedi. 2016. Modification of physicochemical and thermal properties of starch films by incorporation of TiO₂ nanoparticles. **International Journal of Biological Macromolecules**, 89: 256-264.
- Oskam, G. 2006. Metal oxide nanoparticles: synthesis, characterization and application. **Journal of Sol-Gel Science and Technology**, 37 (3): 161-164.
- Ostafiňska, A., J. Mikešová, S. Krejčiková, M. Nevalová, A. Šturcová, A. Zhigunov, D. Micháľková, and M. Šlouf. 2017. Thermoplastic starch composites with TiO₂ particles:

- Preparation, morphology, rheology and mechanical properties. **International Journal of Biological Macromolecules**, 101: 273-282.
- Petchwattana, N., S. Covavisaruch, S. Wibooranawong, and P. Naknaen. 2016. Antimicrobial food packaging prepared from poly(butylene succinate) and zinc oxide. **Measurement**, 93: 442-448.
- Phothisarattana, D., P. Wongphan, K. Promhuad, J. Promsorn, and N. Harnkarnsujarit. 2021. Biodegradable Poly(Butylene Adipate-Co-Terephthalate) and Thermoplastic Starch-Blended TiO₂ Nanocomposite Blown Films as Functional Active Packaging of Fresh Fruit. **Polymers**, 13 (23): 4192.
- Phothisarattana, D., P. Wongphan, K. Promhuad, J. Promsorn, and N. Harnkarnsujarit. 2022. Blown film extrusion of PBAT/TPS/ZnO nanocomposites for shelf-life extension of meat packaging. **Colloids and Surfaces B: Biointerfaces**, 214: 112472.
- Radovich, T. J. 2018. Biology and classification of vegetables, pp. 3-22. *In* N. K. Sinha, eds. **Handbook of Vegetables and Vegetable Processing**. John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey.
- Rahman, M. S. 2007. Food preservation: overview, pp. 3-18. *In* M. S. Rahman, eds. **Handbook of food preservation**. CRC press, Boca Raton, FL.
- Rahman, P. M., V. M. Mujeeb, and K. Muraleedharan. 2017. Flexible chitosan-nano ZnO antimicrobial pouches as a new material for extending the shelf life of raw meat. **International Journal of Biological Macromolecules**, 97: 382-391.
- Raina, C. S., S. Singh, A. S. Bawa, and D. C. Saxena. 2006. Some characteristics of acetylated, cross-linked and dual modified Indian rice starches. **European Food Research and Technology**, 223 (4): 561-570.
- Reigand, M., and F. Toldrá. 2010. Detection of chemical hazards, pp. 469-480. *In* F. Toldrá, eds. **Handbook of meat processing**. John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey.
- Robertson, G. L. 2013. **Food Packaging Principles and Practice** (3 ed.). CRC press, Boca Raton, FL.
- Saedi, S., M. Shokri, J. T. Kim, and G. H. Shin. 2021. Semi-transparent regenerated cellulose/ZnONP nanocomposite film as a potential antimicrobial food packaging material. **Journal of Food Engineering**, 307: 110665.

- Shankar, S., and J.-W. Rhim. 2019. Effect of types of zinc oxide nanoparticles on structural, mechanical and antibacterial properties of poly(lactide)/poly(butylene adipate-co-terephthalate) composite films. **Food Packaging and Shelf Life**, 21: 100327.
- Sirelkhatim, A., S. Mahmud, A. Seeni, N. H. M. Kaus, L. C. Ann, S. K. M. Bakhori, H. Hasan, and D. Mohamad. 2015. Review on Zinc Oxide Nanoparticles: Antibacterial Activity and Toxicity Mechanism. **Nano-micro letters**, 7 (3): 219-242.
- Tanetrungroj, Y., and J. Prachayawarakorn. 2015. Effect of starch types on properties of biodegradable polymer based on thermoplastic starch process by injection molding technique. **Songklanakarin Journal of Science & Technology**, 37 (2): 193-199.
- Tang, Z., F. Fan, Z. Chu, C. Fan, and Y. Qin. 2020. Barrier Properties and Characterizations of Poly(lactic Acid)/ZnO Nanocomposites. **Molecules**, 25 (6): 1310.
- Taoukis, P. S., T. P. Labuza, and I. S. Saguy. 1997. Kinetics of food deterioration and shelf-life prediction. In E. Rotstein, eds. **Handbook of food engineering practice**. CRC press, Boca Raton, FL.
- Toivonen, P. M. 2010. Postharvest physiology of vegetables, pp. 199-220. In N. K. Sinha, eds. **Handbook of Vegetables and Vegetable Processing**. John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey.
- U.S. Food and Drug Administration. (2022a). **Indirect Food Additives: Adjuvants, Production Aids, and Sanitizers**. Available Source: <https://www.accessdata.fda.gov/scripts/cdrh/cfdocs/cfCFR/CFRSearch.cfm?fr=178.3297>, May 1, 2022.
- U.S. Food and Drug Administration. (2022b). **indirect food additives: polymers**. Available Source: <https://www.accessdata.fda.gov/scripts/cdrh/cfdocs/cfcfr/CFRSearch.cfm?fr=177.2420>, May 1, 2022.
- Venkatesan, R., and N. Rajeswari. 2016. ZnO/PBAT nanocomposite films: Investigation on the mechanical and biological activity for food packaging. **Polymers for Advanced Technologies**, 28 (1): 20-27.
- Venkatesan, R., and N. Rajeswari. 2017. TiO₂ nanoparticles/poly(butylene adipate-co-terephthalate) bionanocomposite films for packaging applications. **Polymers for Advanced Technologies**, 28 (12): 1699-1706.

- Wang, L., S. Shao, M. P. Madebo, Y. Hou, Y. Zheng, and P. Jin. 2020. Effect of nano-SiO₂ packing on postharvest quality and antioxidant capacity of loquat fruit under ambient temperature storage. **Food Chemistry**, 315: 126295.
- Wangprasertkul, J., R. Siriwatanapong, and N. Harnkarnsujarit. 2021. Antifungal packaging of sorbate and benzoate incorporated biodegradable films for fresh noodles. **Food Control**, 123: 107763.
- Xie, J., R. Wang, Y. Li, Z. Ni, W. Situ, S. Ye, and X. Song. 2022. A novel Ag₂O-TiO₂--Bi₂WO₆/polyvinyl alcohol composite film with ethylene photocatalytic degradation performance towards banana preservation. **Food Chemistry**, 375: 131708.
- Yu, Y., S. Zhang, Y. Ren, H. Li, X. Zhang, and J. Di. 2012. Jujube preservation using chitosan film with nano-silicon dioxide. **Journal of Food Engineering**, 113 (3): 408-414.
- Zakharova, O. V., and A. A. Gusev. 2020. Photocatalytically Active Zinc Oxide and Titanium Dioxide Nanoparticles in Clonal Micropropagation of Plants: Prospects. **Nanotechnologies in Russia**, 14 (7-8): 311-324.
- Zhang, E., X. Zhao, J. Hu, R. Wang, S. Fu, and G. Qin. 2021a. Antibacterial metals and alloys for potential biomedical implants. **Bioactive Materials**, 6 (8): 2569-2612.
- Zhang, P., S. Luo, and D. Gao. 2021b. Effects of poly(butylene adipate-co-terephthalate)/TiO₂ nanocomposite antimicrobial films on chilled pork quality. **Packaging Technology and Science**, 34 (11-12): 709-715.
- Zhang, X., Z. Li, R. Ji, K. Li, and W. Zhang. 2021c. Preparation and Characterization of Pullulan/Carboxymethyl Cellulose/Nano-TiO₂ Composite Films for Strawberry Preservation. **Food Biophysics**, 16 (4): 460-473.
- Zhu, J., W. Gao, B. Wang, X. Kang, P. Liu, B. Cui, and A. M. Abd El-Aty. 2021. Preparation and evaluation of starch-based extrusion-blown nanocomposite films incorporated with nano-ZnO and nano-SiO₂. **International Journal of Biological Macromolecules**, 183: 1371-1378.



ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ-นามสกุล	คนยา โปธิสารัตนะ
วัน เดือน ปี เกิด	5 เมษายน 2543
สถานที่เกิด	กรุงเทพฯ
ที่อยู่ปัจจุบัน	99 หมู่ 2 ต.คลองตำหรุ อ.เมือง จ.ชลบุรี 20000
ประวัติการศึกษา	วทบ. (เทคโนโลยีการบรรจุและวัสดุ) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผลงานตีพิมพ์	<ol style="list-style-type: none"> 1. Phothisarattana, D., and N. Harnkarnsujarit. 2022a. Characterisations of cassava starch and poly(butylene adipate-co-terephthalate) blown film with silicon dioxide nanocomposites. <i>International Journal of Food Science & Technology</i>. 2. Phothisarattana, D., and N. Harnkarnsujarit. 2022b. Migration, aggregations and thermal degradation behaviors of TiO₂ and ZnO incorporated PBAT/TPS nanocomposite blown films. <i>Food Packaging and Shelf Life</i>, 33: 100901. 3. Phothisarattana, D., P. Wongphan, K. Promhuad, J. Promsorn, and N. Harnkarnsujarit. 2021. Biodegradable Poly(Butylene Adipate-Co-Terephthalate) and Thermoplastic Starch-Blended TiO₂ Nanocomposite Blown Films as Functional Active Packaging of Fresh Fruit. <i>Polymers</i>, 13 (23): 4192. 4. Phothisarattana, D., P. Wongphan, K. Promhuad, J. Promsorn, and N. Harnkarnsujarit. 2022. Blown film extrusion of PBAT/TPS/ZnO nanocomposites for shelf-life extension of meat packaging. <i>Colloids and Surfaces B: Biointerfaces</i>, 214: 112472.
ทุนการศึกษา	ทุนการศึกษาสำหรับนิสิตที่เข้าร่วมโครงการเรียนล่วงหน้า que เข้าศึกษาในระดับบัณฑิตศึกษา ภาคต้น ปีการศึกษา 2564