



วิทยานิพนธ์

การพัฒนาแผ่นรองใต้ฝาจากพลาสติกชีวภาพผสมกรดแกลลิกและไพโร
แกลลอลสำหรับบรรจุภัณฑ์ดูดซับออกซิเจน

DEVELOPMENT OF BIOPLASTIC CLOSURE LINER WITH GALLIC
ACID AND PYROGALLOL FOR OXYGEN SCAVENGING PACKAGING

นางสาวจุฑาทิพย์ พรหมสอน

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ปีการศึกษา ๒๕๖๔

ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ปริญญา วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีการบรรจุ)

สาขาวิชา เทคโนโลยีการบรรจุ

ภาควิชา เทคโนโลยีการบรรจุและวัสดุ

เรื่อง การพัฒนาแผ่นรองใต้ฝาจากพลาสติกชีวภาพผสมกรดแกลลิกและไพโรกาอลสำหรับบรรจุ
ภัณฑ์ดูดซับออกซิเจน

Development of Bioplastic Closure Liner with Gallic Acid and Pyrogallol for
Oxygen Scavenging Packaging

نامผู้วิจัย นางสาวจุฑาทิพย์ พรหมสอน

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

หลัก

(รองศาสตราจารย์ณัฐดนัย หาญการสุจริต, ปร.ด.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(รองศาสตราจารย์รังรอง ยกसान, วท.ด.)

หัวหน้าภาควิชา

(รองศาสตราจารย์เลอพงศ์ จารุพันธ์, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ศรัจิตรา เจริญลาภนพรัตน์, Ph.D.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การพัฒนาแผ่นรองใต้ฝาจากพลาสติกชีวภาพผสมกรดแกลลิกและไพโรกาเทลอลสำหรับบรรจุภัณฑ์ดูด
ซับออกซิเจน

Development of Bioplastic Closure Liner with Gallic Acid and Pyrogallol for Oxygen
Scavenging Packaging

โดย

นางสาวจุฑาทิพย์ พรหมสอน

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีการบรรจุ)

ปีการศึกษา 2564

จุฑาทิพย์ พรหมสอน : การพัฒนาแผ่นรองใต้ฝ่าจากพลาสติกชีวภาพผสมกรดแกลลิกและไฟโร
 แกลลอลสำหรับบรรจุภัณฑ์ดูดซับออกซิเจน ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีการ
 บรรจุ) สาขาวิชาเทคโนโลยีการบรรจุ ภาควิชาเทคโนโลยีการบรรจุและวัสดุ
 อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รองศาสตราจารย์ณัฐดนัย หาญการสุจริต, ประ.ด.
 ปีการศึกษา 2564

ออกซิเจนเร่งการเสื่อมคุณภาพอาหาร เครื่องดื่มและวิตามิน การพัฒนาบรรจุภัณฑ์
 แอ็กทีฟที่มีประสิทธิภาพดูดซับออกซิเจนจะช่วยถนอมคุณภาพและยืดอายุการเก็บอาหาร งานวิจัย
 นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาชีวพลาสติกชีวภาพที่มีประสิทธิภาพดูดซับออกซิเจนจากพอลิเมอร์ผสม
 ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชและโพลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นที่มีการเติมกรดแกลลิก
 และไฟโรแกลลอล โดยขึ้นรูปซีทด้วยกระบวนการอัดรีด แล้วทดสอบสมบัติของบรรจุภัณฑ์
 พลาสติก และความสามารถในการดูดซับออกซิเจน จากการทดลองพบว่าการเติมกรดแกลลิกและ
 ไฟโรแกลลอลในซีทจะช่วยเพิ่มการกระจายตัวของพอลิเมอร์สตาร์ชในเมทริกซ์ของพอลิเอทิลีน
 ความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น ปรับปรุงการกระจายตัวและความเข้ากันได้ระหว่างพอลิเมอร์ผสม โดย
 กรดแกลลิกและไฟโรแกลลอลสร้างพันธะไฮโดรเจน รวมถึงดัดแปลงการสัมผัสระหว่างอะตอม
 คาร์บอนและไฮโดรเจนซึ่งบ่งชี้การถ่ายเทอิเล็กตรอนระหว่างกรดแกลลิก ไฟโรแกลลอล กับพอลิ
 เมอร์ผสม นอกจากนี้กรดแกลลิกเกิดปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันกับเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช อันตร
 กิริยาดังกล่าวดัดแปรสมบัติการคลายตัวของพอลิเมอร์ โครงสร้างจุลภาค และความเป็นผลึกของ
 วัสดุ จากการศึกษาความสามารถในการดูดซับออกซิเจนที่อุณหภูมิต่าง ๆ (4, 25 และ 50 องศา
 เซลเซียส) พบว่าประสิทธิภาพการดูดซับออกซิเจนขึ้นอยู่กับปริมาณของกรดแกลลิกและไฟโร
 แกลลอล และอุณหภูมิ ปริมาณการดูดซับออกซิเจนเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น เนื่องจากอัตราการ
 เกิดปฏิกิริยาระหว่างกรดแกลลิกและออกซิเจนสูงขึ้น ทำให้ปริมาณออกซิเจนคงเหลือในบรรจุภัณฑ์
 ลดลง จากการประยุกต์ใช้เป็นแผ่นรองใต้ฝ่าสำหรับบรรจุภัณฑ์เครื่องดื่มพบว่าแผ่นซีทที่เติมกรด
 แกลลิกและไฟโรแกลลอลสามารถรักษาความคงตัวของวิตามินซีในเครื่องดื่มที่บรรจุขวด ดังนั้นการ
 เติมกรดแกลลิกและไฟโรแกลลอลในเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชผสมพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิง
 เส้นสามารถผลิตซีทที่มีประสิทธิภาพใช้เป็นบรรจุภัณฑ์แอ็กทีฟสำหรับใช้บรรจุผลิตภัณฑ์ที่ไวต่อ
 ออกซิเจนให้มีความเสถียร และยืดอายุการเก็บรักษาอาหารและเครื่องดื่ม

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Juthathip Promsorn : Development of Bioplastic Closure Liner with Gallic Acid and Pyrogallol for Oxygen Scavenging 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

Oxygen accelerates quality deterioration of food, beverages and vitamins. Development of active packaging that absorbs oxygen will help preserve food quality and extend shelf life. The objective of this research was to develop oxygen scavenging bioplastic sheet from bio-based polymer blend of thermoplastic starch (TPS) and linear low-density polyethylene (LLDPE). Gallic acid (GA) and pyrogallol (PG) were compounded with polymer blends to form sheet by cast-extrusion process. Properties of plastic packaging and ability to absorb oxygen were investigated. Results indicated that addition of GA and PG to the sheet increased the dispersion and compatibility of starch polymers in the LLDPE matrices. GA and PG formed hydrogen bonds which modified vibrations between the carbon and hydrogen atoms, indicating electron transfer between GA, PG and blended polymers. In addition, GA formed esterification with TPS. This interaction modified properties of the polymer, microstructure and crystallinity of the materials. The investigations of oxygen adsorption capacity at different temperatures (4, 25 and 50 °C) showed that the oxygen adsorption efficiency depended on the content of GA and PG as well as temperature. Increasing temperature increased absorption capacity due to enhanced reaction rate between GA and oxygen. This reduced the residual amount of oxygen in the package headspace. The sheets were applied as bottle liners for capping in beverage packaging. Active sheets with GA and PG were able to retain stability of vitamin C in beverages. Accordingly, the incorporations of GA and PG to TPS/LLDPE blends efficiently produced active packaging for oxygen-sensitive products to extend the shelf life of food and beverages.

_____/_____/_____
 Student's signature Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดีด้วยความช่วยเหลือของรองศาสตราจารย์ดร. ณัฐดนัย หาญการ
สุจริต อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ดร. รังรอง ยกसान อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมที่ให้
คำแนะนำ รวมถึงแก้ไขปัญหามากมายในงานวิจัยมาโดยตลอดเพื่อให้งานวิจัยนี้สมบูรณ์สำเร็จไปได้ด้วยดี
ขอขอบพระคุณอาจารย์ภาควิชาเทคโนโลยีการบรรจุและวัสดุรวมไปถึงเจ้าหน้าที่ประจำภาคที่ได้ให้
ความรู้อันเป็นประโยชน์ต่อการนำไปประยุกต์ใช้กับงานวิจัยและการทำงานในอนาคต อีกทั้งให้ความ
ช่วยเหลือต่างๆและขอบคุณคณะอุตสาหกรรมเกษตรที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ในการทำงานวิจัย
สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณครอบครัว ซึ่งเปิดโอกาสให้ได้รับการศึกษาเล่าเรียน ตลอดจนคอย
ช่วยเหลือในทุกๆเรื่องและให้กำลังใจมาโดยตลอดจนสำเร็จการศึกษา รวมถึง รุ่นพี่ เพื่อน รุ่นน้องที่คอย
อยู่เคียงข้างให้กำลังใจ แก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด

จุฑาทิพย์ พรหมสอน

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ณ
สารบัญภาพ	ญ
คำนำ.....	1
วัตถุประสงค์.....	3
การตรวจเอกสาร.....	4
1. บรรจุภัณฑ์ดูดซับออกซิเจน	4
2. กรดแกลลิก	7
3. ไพโรแกลลอล	9
4. พลาสติกชีวภาพ.....	10
5. แผ่นรองใต้ผ้า	12
6. วิตามินซี.....	16
7. งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาบรรจุภัณฑ์และพอลิเมอร์ดูดซับออกซิเจน.....	17
แผนการวิจัย.....	20
วิธีการทดลอง	22
1. การเตรียมพลาสติกชีวภาพดูดซับออกซิเจนพลาสติกฐานเทอร์โมพลาสติกสตา์ช และโพลิเอ ทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น	22
2. การวิเคราะห์สมบัติซีท	26

2.1 ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างทางเคมีด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรด สเปกโตรสโคปี	26
2.2 วิเคราะห์สัณฐานวิทยาของซีทด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	26
2.3 วิเคราะห์สมบัติทางสัณฐานวิทยาพื้นผิว	26
2.4 วิเคราะห์สมบัติสมบัติเชิงกลพลวัต	26
2.5 วิเคราะห์คุณสมบัติการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์	26
2.6 ศึกษาสมบัติทางกลโดยทดสอบค่าต้านทานแรงดึง	27
2.7 ศึกษาลักษณะพื้นผิวโดยอธิบายด้วยค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำ	27
2.8 ศึกษาสมบัติการซึมผ่านของไอน้ำ	27
2.9 ศึกษาสมบัติการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจน	27
3. การวิเคราะห์ประสิทธิภาพดูดซับออกซิเจนในบรรจุภัณฑ์	27
4. การประยุกต์ใช้เป็นแผ่นรองใต้ฝ่าเท้าสำหรับการบรรจุเครื่องดื่มวิตามิน	28
5. การวิเคราะห์ทางสถิติ	29
ผลและวิจารณ์	30
1. การขึ้นรูปซีทพลาสติกฐานเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช และโพลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นที่มี ส่วนผสมของกรดกลูติกและไฟโรกลอสอล	30
2. ซีทพลาสติกฐานเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช และโพลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นผสมกรดกลู ติก	32
2.1 การเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างทางเคมี	32
2.2 สัณฐานวิทยาของซีท	33
2.3 สัณฐานวิทยาพื้นผิว	36
2.4 สมบัติเชิงกลพลวัต	37
2.5 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์	39
2.6 สมบัติเชิงกล	41
2.7 มุมสัมผัสและสมบัติการซึมผ่านของไอน้ำ	42

2.8 ประสิทธิภาพดูดซับออกซิเจนในบรรจุภัณฑ์.....	44
2.9 ความคงตัวของวิตามินซี.....	47
3. ซีทพลาสติกฐานเทอร์โมพลาสติกสตาซ์และโพลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นผสมไฟโร แกลลอล.....	48
3.1 การเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างทางเคมี.....	48
3.2 สันฐานวิทยาของซีท.....	51
3.3 วิเคราะห์สมบัติทางสันฐานวิทยาพื้นผิว.....	53
3.4 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์.....	54
3.5 สมบัติเชิงกลพลวัต.....	56
3.6 สมบัติเชิงกลและมุมสัมผัส.....	57
3.7 ประสิทธิภาพดูดซับออกซิเจนในบรรจุภัณฑ์.....	59
3.8 ความคงตัวของวิตามินซี.....	60
4. ลักษณะปรากฏของแผ่นรองใต้ฝ่า.....	62
สรุปผล.....	63
ข้อเสนอแนะ.....	64
เอกสารและสิ่งอ้างอิง.....	65
ประวัติการศึกษา และการทำงาน.....	73

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 ประเภทของสารดูดซับออกซิเจนและกลไกการเกิดออกซิเดชัน	6
ตารางที่ 2 ปริมาณส่วนผสมที่ใช้ในการทำพลาสติกชีวภาพดูดซับออกซิเจนฐานเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช และโพลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น	23
ตารางที่ 3 สมบัติเชิงกลและมุมสัมผัสของพลาสติกฐานเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชและโพลิเอทิลีนความ หนาแน่นต่ำเชิงเส้นผสมไฟโรแคลลอล	58

สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 1 ซองดูดซับออกซิเจนทางการค้า.....	5
ภาพที่ 2 ซีทหลายชั้นมีสมบัติกีดกันและดูดซับออกซิเจน.....	7
ภาพที่ 3 โครงสร้างทางเคมีของกรดแกลลิก	8
ภาพที่ 4 โครงสร้างของกรดแกลลิกไดเมอร์ (Dimer) และ ควิโนน (Quinone).....	8
ภาพที่ 5 โครงสร้างของไพโรแกลลอล.....	9
ภาพที่ 6 แผ่นรองใต้ผ้าที่ใช้ในทางการค้า.....	12
ภาพที่ 7 แผ่นรองใต้ผ้า SNIFF SEAL®	15
ภาพที่ 8 โครงสร้างวิตามินซี.....	16
ภาพที่ 9 ระบบการเก็บตัวอย่างเพื่อทดสอบประสิทธิภาพดูดซับออกซิเจน	28
ภาพที่ 10 การประยุกต์ใช้เป็นแผ่นรองใต้ผ้า	28
ภาพที่ 11 ลักษณะของพลาสติกฐานเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ และพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นผสมกรดแกลลิก (GA) และไพโรแกลลอล (PG) ร้อยละ 0, 1, 3, 5, 7 และ 10.....	31
ภาพที่ 12 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงอินฟราเรดของพลาสติกฐานเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์และพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นที่มีปริมาณกรดแกลลิก (GA) ร้อยละ 0, 3, 5, 7 และ 10.....	33
ภาพที่ 13 สันฐานวิทยาของซีทจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงโครงสร้างจุลภาคของ ก) ด้านพื้นผิวหน้าของซีท ข) ด้านตัดขวางของซีทพลาสติกฐานเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์และพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นที่มีปริมาณกรดแกลลิก (GA) ร้อยละ 0, 1, 3, 5, 7 และ 10.....	35
ภาพที่ 14 สันฐานวิทยาพื้นผิวจากกล้องจุลทรรศน์แบบอะตอมมิกฟอรัซ (atomic force microscopy) ของพลาสติกฐานเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ และพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นที่มีปริมาณกรดแกลลิก (GA) ร้อยละ 0, 1, 3, 5, 7 และ 10.....	36
ภาพที่ 15 สมบัติทางกลเชิงไดนามิกของพลาสติกฐานเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์และพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นที่มีปริมาณกรดแกลลิก (GA) ร้อยละ 0, 1, 3, 5, 7 และ 10.....	38

ภาพที่ 16 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (ก) ดิฟแฟรคโตแกรม (diffractogram) และ (ข) ความเข้มของการเลี้ยวเบนที่ 2 ที่ตา (theta) ของพลาสติกฐานเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ และพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นผสมกรดแกลลิกร้อยละ 0, 1, 3, 5, 7 และ 10.....	40
ภาพที่ 17 สมบัติเชิงกลของพลาสติกฐานเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ และพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นผสมกรดแกลลิกร้อยละ 0, 1, 3, 5, 7 และ 10.....	42
ภาพที่ 18 สมบัติการซึมผ่านของไอน้ำและมัมสัมผัสของพลาสติกฐานเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ และพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นผสมกรดแกลลิกร้อยละ 0, 1, 3, 5, 7 และ 10.....	44
ภาพที่ 19 ประสิทธิภาพดูดซับออกซิเจนในบรรจุภัณฑ์ของพลาสติกฐานเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ และพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นที่มีปริมาณกรดแกลลิก (GA) ร้อยละ 0, 1, 3, 5, 7 และ 10 ในสภาวะอุณหภูมิ 4, 25 และ 50 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 100.....	47
ภาพที่ 20 ปริมาณวิตามินซี (Ascorbic acid) ในบรรจุภัณฑ์ที่มีการประยุกต์ใช้พลาสติกฐานเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ และพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นที่มีปริมาณกรดแกลลิก (GA) ร้อยละ 0, 1, 3, 5, 7 และ 10 เป็นแผ่นรองใต้ฝา ในสภาวะอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เก็บรักษาเป็นเวลา 4 วัน.....	48
ภาพที่ 21 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงอินฟราเรดของพลาสติกฐานเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์และพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นที่มีปริมาณไพโรแกลลอล (PG) ร้อยละ 0, 1, 3, 5, 7 และ 10.....	50
ภาพที่ 22 สันฐานวิทยาของซีทจากกล่องจุลทรรศน์อิเล็กทรอนิกส์แบบส่องกราดแสดงโครงสร้างจุลภาคของ ก) ด้านพื้นผิวหน้าของซีท ข) ด้านตัดขวางของซีทพลาสติกฐานเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์และพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นที่มีปริมาณไพโรแกลลอล (PG) ร้อยละ 0, 1, 3, 5, 7 และ 10.....	52
ภาพที่ 23 พื้นผิวของซีทฐานพลาสติกฐานเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ และพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น ที่มีปริมาณไพโรแกลลอล (PG) ร้อยละ 0, 1, 3, 5, 7 และ 10	53
ภาพที่ 24 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (ก) ดิฟแฟรคโตแกรม (diffractogram) (ข) อัตราส่วนความเข้มของการเลี้ยวเบนระหว่างมุม 2 ที่ตา (theta) = 21.5 และ 23.8 องศา และ (ค) ความเป็นผลึกของพลาสติกฐานเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ และพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นผสมไพโรแกลลอลร้อยละ 0, 1, 3, 5, 7 และ 10	55
ภาพที่ 25 สมบัติทางกลเชิงไดนามิกของพลาสติกฐานเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์และพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นที่มีปริมาณไพโรแกลลอล (GA) ร้อยละ 0, 1, 3, 5, 7 และ 10.....	57

ภาพที่ 26 ประสิทธิภาพดูดซับออกซิเจนในบรรจุภัณฑ์ของพลาสติกฐานเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ และ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นที่มีปริมาณไฮดรอกซีล (PG) ร้อยละ 0, 1, 3, 5, 7 และ 10 ใน สภาวะอุณหภูมิ 4, 25 และ 50 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 100.....	60
ภาพที่ 27 ปริมาณวิตามินซี (Ascorbic acid) ในบรรจุภัณฑ์ที่มีการประยุกต์ใช้พลาสติกฐานเทอร์โม พลาสติกสตาเร็กซ์ และพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นที่มีปริมาณไฮดรอกซีล (PG) ร้อยละ 0, 1, 3, 5, 7 และ 10 เป็นแผ่นรองใต้ฝา ในสภาวะอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เก็บรักษาเป็นเวลา 8 วัน	61
ภาพที่ 28 การประยุกต์ใช้ซีพีทีฐานเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ และพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิง เส้นที่มีการเติมสารดูดซับออกซิเจนอินทรีย์เป็นแผ่นรองใต้ฝา.....	62

**การพัฒนาแผ่นรองใต้ฝาจากพลาสติกชีวภาพผสมกรดแกลลิกและไพโรแกลลอล
สำหรับบรรจุภัณฑ์ดูดซับออกซิเจน**
**Development of Bioplastic Closure Liner with Gallic Acid and Pyrogallol
for Oxygen Scavenging Packaging**

คำนำ

ปัจจุบันผลิตภัณฑ์อาหารสุขภาพ อาหารเสริม และเครื่องดื่มวิตามินได้รับความนิยมในกลุ่มผู้บริโภคที่หันมาสนใจสุขภาพ หลังเกิดการแพร่ระบาดของโควิด-19 ธุรกิจผลิตภัณฑ์ดังกล่าวมีการขยายตัวและเติบโตสูงขึ้นในประเทศไทยและทั่วโลก ผลิตภัณฑ์อาหารและเครื่องดื่มที่มีประโยชน์ต่อสุขภาพจะมีส่วนประกอบฟังก์ชันหรือสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่ให้ประโยชน์ต่อร่างกาย ซึ่งสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพส่วนใหญ่มีความไวต่อออกซิเจนและสลายตัวได้ง่ายจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน ส่งผลต่อการเสื่อมคุณภาพของผลิตภัณฑ์และการลดลงของคุณค่าทางโภชนาการ เทคโนโลยีการบรรจุแบบแอ็กทีฟที่มีการใช้สารดูดซับออกซิเจนจึงเป็นแนวทางสำคัญที่ช่วยรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์และยืดอายุการเก็บรักษา

สารดูดซับออกซิเจนที่ใช้ในอุตสาหกรรมอาหารจะอยู่ในรูปของบรรจุสารประกอบออกไซด์ของเหล็กบรรจุในบรรจุภัณฑ์อาหาร ซึ่งใช้ได้กับผลิตภัณฑ์อาหารแห้ง อาหารเสริม หรือผลิตภัณฑ์ที่มีความชื้นต่ำ แต่ไม่เหมาะต่อการใช้กับผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลว และเครื่องดื่ม นอกจากนี้ช่องดูดซับออกซิเจนอาจไม่เป็นที่ยอมรับเนื่องจากการผสมอยู่กับชิ้นอาหาร ซึ่งอาจทำให้เกิดความไม่ปลอดภัยในการบริโภคจากการปะปนกับสินค้า ผู้บริโภคที่เป็นเด็กอาจเข้าใจว่าซองดังกล่าวสามารถรับประทานได้ การฉีกขาดของซองที่ทำให้เกิดการรั่วไหลของสารประกอบออกไซด์ของเหล็กในช่องปนเปื้อนสู่อาหาร การพัฒนาพอลิเมอร์ที่มีประสิทธิภาพดูดซับออกซิเจนโดยประยุกต์ใช้เป็นแผ่นรองใต้ฝาสำหรับผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มเพื่อกำจัดออกซิเจนที่ตกค้างในบรรจุภัณฑ์สามารถแก้ปัญหาข้อจำกัดการใช้ช่องดูดซับออกซิเจนในผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มบรรจุขวด และมีแนวโน้มใช้ทดแทนช่องดูดซับออกซิเจนในอนาคตรับรองสำหรับผลิตภัณฑ์อาหารเสริม และเครื่องดื่มวิตามินส่วนใหญ่ ได้แก่ ขวด หรือบรรจุภัณฑ์ชนิดมีฝาที่มีแผ่นรองใต้ฝา ทำหน้าที่ช่วยให้การปิดผนึกระหว่างฝาและปากขวดแนบสนิท ป้องกันอากาศหรือความชื้นเข้าสู่ภายในบรรจุภัณฑ์ โดยสามารถทำได้จากวัสดุหลายชนิดทั้งอะลูมิเนียมฟอยล์ กระดาษ และพลาสติกซึ่งส่วนใหญ่จะผลิตจากวัสดุฐานปิโตรเลียม ในขณะที่ประชาชนทั่วโลกให้ความสนใจและต้องการมีส่วนร่วมในการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมมากขึ้น ผู้บริโภคโดยเฉพาะในประเทศที่พัฒนาแล้วนิยมเลือกใช้ผลิตภัณฑ์และบรรจุภัณฑ์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

ความต้องการแก้ปัญหาขยะและของเสียจากบรรจุภัณฑ์ภายหลังการใช้งานผลิตภัณฑ์ให้เกิดการพัฒนาพลาสติกชีวภาพสำหรับใช้เป็นบรรจุภัณฑ์อาหาร การพัฒนาแผ่นรองใต้ฝาจากพลาสติกชีวภาพจะเป็นวัสดุทางเลือกให้อุตสาหกรรมอาหาร และผลิตภัณฑ์อาหารเสริมเพื่อลดปัญหาผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของบรรจุภัณฑ์พลาสติกฐานปิโตรเลียม นอกจากนี้การพัฒนาแผ่นรองใต้ฝาให้มีประสิทธิภาพในการดูดซับออกซิเจนโดยใช้สารดูดซับออกซิเจนที่มาจากสารสกัดธรรมชาติ ได้แก่ กรดแกลลิก และไฟโรแกลลอล จะช่วยตอบสนองความต้องการผู้บริโภคที่ให้ความสำคัญต่อการใช้ประโยชน์ส่วนประกอบจากธรรมชาติ และเพิ่มสมบัติเชิงหน้าที่ยืดอายุอาหารให้แก่ส่วนประกอบบรรจุภัณฑ์ ซึ่งช่วยรักษาคุณภาพและประโยชน์ต่อสุขภาพของผลิตภัณฑ์อาหารเสริม และเครื่องดื่มเพื่อสุขภาพได้

จุฑาทิพย์ พรหมสอน

วัตถุประสงค์

1. เพื่อพัฒนาพลาสติกชีวภาพที่มีประสิทธิภาพดูดซับออกซิเจนด้วยกรดแกลลิก และไฟโรแกลลอลโดยกระบวนการอัดรีด
2. เพื่อศึกษาผลของกรดแกลลิกและไฟโรแกลลอลต่อสมบัติของพลาสติกชีวภาพและประสิทธิภาพดูดซับออกซิเจนของพอลิเมอร์
3. เพื่อประยุกต์ใช้พลาสติกชีวภาพผสมกรดแกลลิกและไฟโรแกลลอลเป็นแผ่นรองใต้ผ้าและประเมินการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของผลิตภัณฑ์วิตามินในรูปของเหลวที่บรรจุในขวด

การตรวจเอกสาร

1. บรรจุภัณฑ์ดูดซับออกซิเจน

แก๊สออกซิเจนเป็นปัจจัยสำคัญที่เร่งการเสื่อมคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหารและเครื่องดื่ม โดยเฉพาะผลิตภัณฑ์ที่มีส่วนประกอบฟังก์ชัน (functional ingredient) หรือสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ (bioactive compound) ซึ่งสลายตัวหรือเกิดการเปลี่ยนแปลงได้ง่ายจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน ผลิตภัณฑ์อาหารบางชนิดมีความไวต่อออกซิเจน เมื่อสัมผัสออกซิเจนจะทำให้คุณภาพของอาหารเสื่อมลง รสชาติ กลิ่น และสีของอาหารเปลี่ยนไป ออกซิเจนสนับสนุนการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ที่ใช้อากาศ (aerobic microorganism) ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณภาพทางประสาทสัมผัสอย่างรวดเร็วและกระทบต่อความปลอดภัยในการบริโภคอาหาร (Day, 2008)

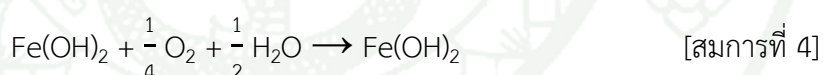
สารดูดซับออกซิเจน (oxygen scavenger) ช่วยรักษาคุณภาพผลิตภัณฑ์อาหารโดยชะลอการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของลิพิดซึ่งเป็นสาเหตุของกลิ่นหืน ยับยั้งการเกิดออกซิเดชันของสารให้สีและวิตามิน และชะลอการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ที่ใช้อากาศ การบรรจุภายใต้อากาศปกติเป็นสภาวะที่มีแก๊สออกซิเจนในบรรยากาศภายในบรรจุภัณฑ์ โดยประกอบด้วยออกซิเจนร้อยละ 21 ไนโตรเจนร้อยละ 79 และคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 0.04 การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในอาหารที่มีส่วนประกอบไขมันหรือน้ำมันสูงนำไปสู่การเกิดกลิ่นหืน ออกซิเจนทำให้เกิดสีน้ำตาลในผักและผลไม้ตัดแต่ง (fresh-cut) จากกิจกรรมของเอนไซม์ การกำจัดออกซิเจนออกจากบรรจุภัณฑ์จึงมีความสำคัญต่อการยืดอายุการเก็บรักษา เนื่องจากอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันจะแปรผันตามความเข้มข้นของออกซิเจน อัตราการทำงานของเอนไซม์กลุ่มออกซิเดซีมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความเข้มข้นแก๊สออกซิเจนซึ่งเป็นไปตามความสัมพันธ์ Michaelis-Menten (Day, 2008)

สารดูดซับออกซิเจนที่ใช้อย่างแพร่หลายในผลิตภัณฑ์อาหารอยู่ในรูปแบบของขนาดเล็กที่ประกอบด้วยผงออกไซด์ของธาตุเหล็กและสารเร่งปฏิกิริยา ดังภาพที่ 1 ใส่ไว้ในบรรจุภัณฑ์ หรือเติมในพอลิเมอร์ที่ใช้ผลิตบรรจุภัณฑ์ เพื่อช่วยในการดูดซับออกซิเจนภายในบรรจุภัณฑ์และป้องกันไม่ให้ออกซิเจนจากภายนอกสัมผัสกับอาหารได้ (Cichello, 2015)



ภาพที่ 1 ซองดูดซับออกซิเจนทางการค้า

ซองดูดซับออกซิเจนเหมาะสำหรับใช้บรรจุอาหารทั่วไป เช่น อาหารแห้ง เบเกอรี่ ขนมปัง พาสต้า และผลิตภัณฑ์จากเนื้อสัตว์ เช่น ไส้กรอก แฮม ชีส เป็นต้น โดยผงธาตุเหล็กจะทำปฏิกิริยากับแก๊สออกซิเจนในสถานะที่มีความชื้น หรือน้ำที่ออกมาจากอาหาร เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเป็นสารรีดิวซ์โลหะไฮเดรต และเปลี่ยนกลับเป็นออกไซด์ที่เสถียร เกิดการดูดซับออกซิเจนภายในบรรจุภัณฑ์อาหาร ดังสมการที่ 1-4 (Cooksey, 2010)



ประเทศไทยมีการจัดจำหน่ายวัตถุดิบดูดซับออกซิเจนซึ่งทำหน้าที่รักษาคุณภาพอาหารในขนาดต่าง ๆ เช่น 30 ลูกบาศก์เซนติเมตร 50 ลูกบาศก์เซนติเมตร 100 ลูกบาศก์เซนติเมตร 200 ลูกบาศก์เซนติเมตร และ 300 ลูกบาศก์เซนติเมตร โดยมีชื่อทางการค้า เช่น Ageless® HiDri® โดยจัดเป็นวัตถุเจือปนอาหารประเภทวัตถุที่ใช้รักษาคุณภาพหรือมาตรฐานของอาหาร (Food additives which are used to prolong or maintain quality of food) ตามประกาศของกระทรวงสาธารณสุข ทั้งนี้การแสดงผลของวัตถุเจือปนอาหารประเภทวัตถุที่ใช้รักษาคุณภาพหรือมาตรฐานของอาหารดังกล่าว นอกจากให้ปฏิบัติตาม ประกาศกระทรวงสาธารณสุขว่าด้วยเรื่อง ฉลาก และต้องแสดงข้อความ “มีซองวัตถุดิบดูดออกซิเจน” ด้วยตัวอักษรสีแดง ขนาด ตัวอักษรไม่ต่ำกว่า 3 มิลลิเมตร บนพื้นสีขาว

ประเภทของสารดูดซับออกซิเจนและกลไกการเกิดออกซิเดชัน

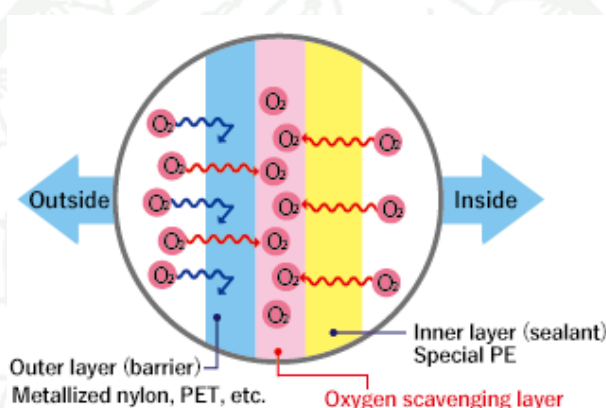
สารดูดซับออกซิเจนที่นิยมใช้ในภาคอุตสาหกรรมสำหรับผลิตภัณฑ์อาหารผลิตจากธาตุเหล็ก มีการพัฒนาสารประกอบประเภทอื่นเพื่อทดแทนการใช้โลหะ เช่น สารรีดิวซ์ สารอินทรีย์ และ เอนไซม์ เพื่อให้ได้รับการยอมรับจากผู้บริโภค ลดปัญหาความไม่ปลอดภัยจากการปนเปื้อน และ แก้ปัญหาการใช้งานกับเครื่องตรวจจับโลหะที่มีความไวสูง ตารางที่ 1 จำแนกประเภทของสารดูดซับออกซิเจนตามแหล่งที่มาของสาร ซึ่งแต่ละประเภทจะมีกลไกการทำปฏิกิริยาเพื่อกำจัดออกซิเจนแตกต่างกันออกไป โดยการนำไปใช้งานจะขึ้นอยู่กับสถานะของผลิตภัณฑ์ที่อยู่ในบรรจุภัณฑ์

ตารางที่ 1 ประเภทของสารดูดซับออกซิเจนและกลไกการเกิดออกซิเดชัน

ประเภท	ตัวอย่างสาร	กลไกการเกิดออกซิเดชัน
ธาตุเหล็ก	ผงเหล็ก เฟอร์รอสออกไซด์ เกลือของเหล็ก โคบอลต์(II) สังกะสี	ออกซิเดชันของเหล็กโดยมีความชื้นเป็นตัวเร่ง
สารอินทรีย์	กรดแอสคอร์บิก เกลือของกรดแอสคอร์บิก กรดไอโซแอสคอร์บิก โทโคฟีรอล ไฮโดรควิโนโนน กรดแกลลิก ลิกนิน	ออกซิเดชันของสารอินทรีย์ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะหรืออัลคาไลน์
สารอนินทรีย์	ซัลเฟต ไธโอซัลเฟต ไดไทโอไนต์ ไฮโดรเจนซัลเฟต ไททาเนียมไดออกไซด์	ออกซิเดชันของสารอนินทรีย์ด้วยแสงอัลตราไวโอเลต
ฐานพอลิเมอร์	เรซินออกซิเดชัน-รีดักชัน (Oxidation-reduction resin), สารประกอบพอลิเมอร์เหล็กเชิงซ้อน (polymer metallic complex)	ออกซิเดชันของสารประกอบพอลิเมอร์ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะ (ส่วนใหญ่เป็นโคบอลต์)
เอนไซม์	กลูโคสออกซิเดส แลคเคส เอทานอลออกซิเดส	การตรึงรูป (Immobilization)

ที่มา : Gaikwad et al. (2018)

ปัจจุบันมีการพัฒนาบรรจุภัณฑ์แอคทีฟโดยการเติมสารดูดซับออกซิเจนลงในผสมกับวัสดุที่ใช้ในการขึ้นรูปบรรจุภัณฑ์ซีทพลาสติกหลายชั้นที่มีคุณสมบัติการดูดซับออกซิเจน ดังภาพที่ 2 โดยชั้นกึ่งกลางมีความสามารถในการกีดกันออกซิเจนที่แทรกซึมจากภายนอกและดูดซับออกซิเจนที่ตกค้างอยู่ภายในเพื่อรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ไวต่อออกซิเจนเป็นเวลานาน ซึ่งมีข้อดี คือไม่จำเป็นต้องใส่ช่องบรรจุสารดูดซับออกซิเจน สามารถป้องกันความเสี่ยงจากการรับประทานหรือดื่มดูดซับออกซิเจนโดยไม่ได้ตั้งใจได้ กระบวนการผลิตเข้าสู่ระบบอุตสาหกรรมได้ ลดบรรจุภัณฑ์ที่ใช้แล้วทิ้งและไม่จำเป็นต้องทิ้งช่องดูดซับออกซิเจนแยกต่างหาก (Toyo Seikan Co.)



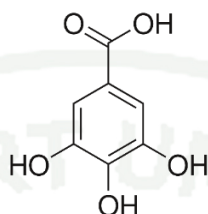
ภาพที่ 2 ซีทหลายชั้นมีสมบัติกีดกันและดูดซับออกซิเจน

ที่มา: Toyo Seikan Co.

2. กรดแกลลิก

กรดแกลลิก (gallic acid) เป็นสารอินทรีย์ที่จัดอยู่ในกลุ่มพอลิฟีนอล โครงสร้างทางเคมีประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิลจำนวน 3 หมู่ ต่อกับวงแหวนเบนซีนและมีหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลิก (ภาพที่ 3) สามารถให้อิเล็กตรอนกับโมเลกุลอื่นได้ มีโครงสร้างทางเคมีที่ทำให้ละลายน้ำได้ง่าย เป็นสารที่พบในพืชหลายชนิดในรูปสารอิสระ หรือสารประกอบเป็นแกลโลแทนนิน หากมีอยู่ในระดับร้อยละ 40-60 รวมกันเป็นกรดแกลโลทานิก (gallotanic acid) เมื่อได้รับความร้อนถึง 200–250 องศา

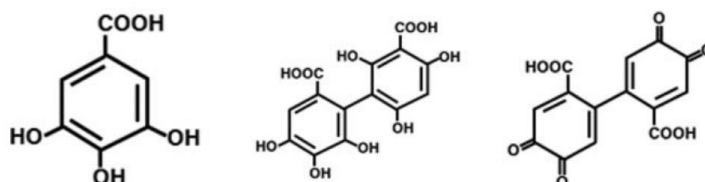
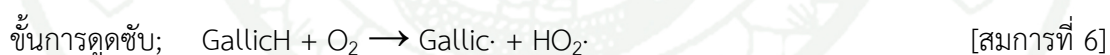
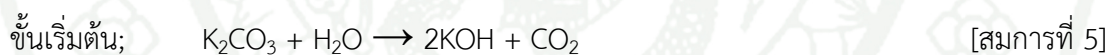
เซลล์พืช กรดแกลลิกจะแยกออกเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และไฟโรแกลลอล กรดแกลลิกเป็นสารต้านอนุมูลอิสระที่สำคัญในการป้องกันการเหม็นหืนในน้ำมันและไขมันที่บริโภคได้ (Jiang et al., 2000)



ภาพที่ 3 โครงสร้างทางเคมีของกรดแกลลิก

กรดแกลลิกมีชื่อทางเคมี คือ 3,4,5-ไตรไฮดรอกซีเบนโซอิกโมโนไฮเดรต (3,4,5-trihydroxybenzoic acid monohydrate) หรือ $C_7H_6O_5$ โมเลกุลของกรดแกลลิก มีพันธะไฮโดรเจนภายในโมเลกุล จากหมู่ไฮดรอกซิล และจับกับน้ำในโมเลกุลทำให้โมเลกุลของกรดแกลลิกมีความเสถียร (Jiang et al., 2000)

กลไกการดูดซับออกซิเจนของกรดแกลลิกมี 2 ขั้นตอน ดังสมการ 5-10 (Ahn et al., 2016)



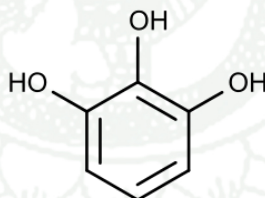
ภาพที่ 4 โครงสร้างของกรดแกลลิกไดเมอร์ (Dimer) และ ควิโนน (Quinone)

ที่มา : Ahn et al. (2016)

3. ไพรโกลลอล

ไพรโกลลอล เป็นสารประกอบฟีนอลตามธรรมชาติที่พบในพืชผักและผลไม้ต่าง ๆ มีการรายงานว่าไพรโกลลอลเป็นส่วนประกอบของฟลาโวนอยด์ (flavonoid) และเมื่อไพรโกลลอลทำปฏิกิริยากับออกซิเจนจะสามารถดูดซับออกซิเจนได้สูงในสภาพแวดล้อมที่เป็นต่าง ทำให้ละลายในโซเดียมคาร์บอเนต เพื่อใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยานอกจากนี้ยังสามารถด้านจุลินทรีย์ ด้านอนุมูลอิสระ และสามารถนำไปพัฒนาเป็นบรรจุภัณฑ์แอคทีฟได้

ไพรโกลลอล มีชื่อทางเคมีว่า 1, 2, 3-trihydroxybenzene หรือ $C_6H_3(OH)_3$ อนุพันธ์ของไพรโกลลอล เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์จากธรรมชาติมากมาย เช่น แทนนิน แอนโทไซยานิน และอัลคาลอยด์ มีลักษณะเป็นผลึกไม่มีสี โดยจะเกิดการเปลี่ยนเป็นสีเทาเข้มเมื่อสัมผัสกับอากาศหรือแสง สามารถละลายได้ในน้ำและตัวทำละลายมีขั้ว ละลายได้เล็กน้อยในคลอโรฟอร์มและคาร์บอนไดซัลไฟด์ มีจุดหลอมเหลวที่ 133-134 องศาเซลเซียส จุดเดือดที่ 309 องศาเซลเซียส (Fiege et al., 2000)

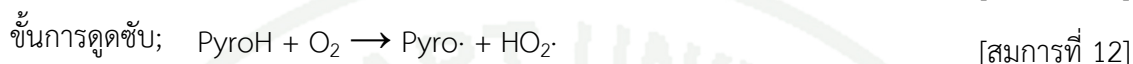


ภาพที่ 5 โครงสร้างของไพรโกลลอล

ที่มา : Shin et al. (2019)

ไพรโกลลอลเป็นสารรีดิวซ์ที่แรงที่สุดในบรรดาพอลิไฮดรอกซีเบนซีน (Gaikwad et al., 2017) เมื่อดูดซับแก๊สออกซิเจนจะกลายเป็นตะกอนสีน้ำตาลเข้ม เนื่องจากคุณสมบัตินี้ไพรโกลลอลมักใช้ในการวิเคราะห์เชิงปริมาณสำหรับออกซิเจน ไพรโกลลอลที่มีขายทั่วไปสามารถผลิตได้โดยกระบวนการดีคาร์บอกซิเลชันของกรดแกลลิก ซึ่งเตรียมโดยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของแทนนิน ส่วนใหญ่นำไปใช้ประโยชน์ด้านการถ่ายภาพ การพิมพ์หินและสีย้อมผม นอกจากนี้ยังใช้เป็นสารต้านอนุมูล

อิสระและสารเพิ่มความคงตัว ไพโรแกลลอลดูดซับออกซิเจนภายใต้สภาวะที่เป็นต่างในการเกิดปฏิกิริยาซึ่งมี 2 ขั้นตอน ดังสมการที่ 11-16 (Gaikwad et al., 2017)



4. พลาสติกชีวภาพ

พลาสติกชีวภาพ (bioplastic) คือ สารประกอบอินทรีย์ที่ผลิตจากวัตถุดิบทางการเกษตรหรือจากธรรมชาติโดยส่วนใหญ่ได้มาจากพืช เช่น เซลลูโลส คอลลาเจน เคซีน พอลิเอสเทอร์ สตาร์ช และโปรตีนจากถั่ว หรือจากน้ำมันปิโตรเลียม สตาร์ชเป็นวัสดุธรรมชาติที่นิยมนำมาผลิตพลาสติกชีวภาพและมีศักยภาพใช้ในภาคอุตสาหกรรมมากที่สุด เนื่องจากเป็นแหล่งวัตถุดิบที่หาได้ง่าย มีปริมาณมากเพียงพอ และราคาถูก เนื่องจากสตาร์ชสามารถผลิตได้จากพืชหลายชนิด เช่น ข้าวโพด ข้าวสาลี มันฝรั่ง มันเทศ และมันสำปะหลัง พลาสติกชีวภาพประเภทพอลิเมอร์เสื่อมสลายทางชีวภาพส่วนใหญ่สามารถสลายตัวได้โดยจุลินทรีย์ในธรรมชาติ จึงไม่ก่อให้เกิดการตกค้างของขยะพลาสติกภายหลังการใช้งาน (Huang et al., 1990) นอกจากนี้ยังเป็นวัสดุที่มาจากธรรมชาติซึ่งไม่ก่อให้เกิดอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต และสามารถหาใหม่ทดแทนได้ ปัจจุบันวัสดุชีวภาพได้เข้ามามีบทบาทเพื่อทดแทนวัสดุสังเคราะห์จากอุตสาหกรรมปิโตรเคมี ซึ่งใช้เป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตพลาสติกทั้งในรูปของบรรจุภัณฑ์ที่ใช้กันทั่วไป เฟอร์นิเจอร์ ชิ้นส่วนของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ และชิ้นส่วนยานยนต์ เป็นต้น

เทอร์โมพลาสติกสตาโรซ

สตาโรซเป็นพอลิแซคคาไรด์ซึ่งมีแหล่งกำเนิดมาจากข้าวสาลี ข้าวโพด ข้าว มันฝรั่ง มันสำปะหลัง และพืชตระกูลถั่ว โดยทั่วไปสตาโรซที่พบในธรรมชาติอยู่ในรูปแกรนูลซึ่งเป็นแหล่งสะสมพลังงานของพืช เม็ดแกรนูลสตาโรซในพืชแต่ละชนิดจะมีอะไมโลสและอะไมโลเพคตินเป็นส่วนประกอบในสัดส่วนที่แตกต่างกันตามแหล่งที่มา (Diyana et al., 2021) ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญต่อสมบัติที่เกี่ยวข้องกับสมบัติและการนำไปใช้ประโยชน์ เช่น การเกิดเจลลาติไนซ์ ความหนืด การพองตัว การเกิดรีโทรเกรเดชัน สตาโรซสามารถใช้เป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตพลาสติกชีวภาพเทอร์โมพลาสติกสตาโรซ และพอลิแลคติกแอซิด นอกจากนี้สตาโรซยังถูกใช้เป็นสารยึดติด (adhesive) ในบรรจุภัณฑ์กระดาษ ใช้ลดต้นทุนการผลิตพลาสติก และปรับปรุงสมบัติการเสื่อมสลายได้ทางชีวภาพของพลาสติกชีวภาพบางชนิด (Khan et al., 2017)

สตาโรซที่อยู่ในรูปของเม็ดแกรนูลซึ่งผลึกไม่สามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (deform) หรือขึ้นรูปโดยวิธีการเดียวกับพอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมพลาสติกได้ เพราะอุณหภูมิละลายตัวของสตาโรซในรูปเม็ดแกรนูลที่ 220 องศาเซลเซียสสูงกว่าอุณหภูมิการหลอมเหลวคือ 220-240 องศาเซลเซียส (Zhang et al., 2014) ทำให้เม็ดสตาโรซละลายตัวก่อนที่จะหลอมเหลว ซึ่งสามารถขึ้นรูปสตาโรซเป็นเทอร์โมพลาสติกสตาโรซได้โดยการผสมเม็ดสตาโรซกับพลาสติกไซเซอร์ เช่น น้ำ กลิเซอรอล และซอร์บิทอล ในสถานะที่มีความร้อนหรือกระบวนการหลอม ความดัน และแรงเฉือน จะทำให้เม็ดแกรนูลของสตาโรซแตก ปลดปล่อยอะไมโลสและอะไมโลเพคตินที่อยู่ภายในเม็ดแกรนูล ความเป็นผลึกลดลง สายโซ่ของโครงสร้างอยู่ห่างกันมากขึ้น และเกิดการหลอมเป็นพลาสติกไซส์สตาโรซ (Zhang et al., 2014) แต่เทอร์โมพลาสติกสตาโรซยังมีข้อจำกัดในเรื่องของการไวต่อความชื้น ความยืดหยุ่น หรือความอ่อนตัว และการทนต่อความร้อน รวมถึงผลผลิตที่ได้จากกระบวนการขึ้นรูปบรรจุภัณฑ์ต่ำ เกิดของเสียสูง (Diyana et al., 2021) ทำให้การนำไปใช้เป็นบรรจุภัณฑ์อาหารไม่แพร่หลาย

การปรับปรุงสมบัติเทอร์โมพลาสติกสตาโรซด้วยเทคนิคต่าง ๆ ช่วยพัฒนาประสิทธิภาพการใช้เป็นบรรจุภัณฑ์ ประสิทธิภาพการขึ้นรูปวัสดุ เพื่อให้สามารถผลิตและนำไปใช้งานเป็นบรรจุภัณฑ์ได้

หลากหลายมากขึ้นด้วยเติมพอลิเมอร์ชนิดอื่น กรผสมเทอร์โมพลาสติกสตา์ชกับพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่ไม่สามารถเสื่อมสลายทางชีวภาพ (non-biodegradable synthetic polymers) เช่น พอลิเอทิลีน เอทิลีนไวนิลแอลกอฮอล์ (EVA) และพอลิเอทิลีนไวนิลแอลกอฮอล์ (PVOH) หรือพอลิเมอร์ที่สามารถเสื่อมสลายทางชีวภาพซึ่งส่วนใหญ่เป็นพอลิเอสเทอร์ เช่น พอลิแล็กติกแอซิด พอลิไฮดรอกซีแอลคาโนเอท เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่สามารถเสื่อมสลายทางชีวภาพได้อย่างสมบูรณ์ ซึ่งการผสมเทอร์โมพลาสติกสตา์ชกับพอลิเมอร์อื่นจะช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตา์ชและลดการดูดซึบความชื้นและลดการหดตัวขณะขึ้นรูปและเก็บรักษาได้ (Debiagi et al., 2017)

5. แผ่นรองใต้ฝ่า

แผ่นรองใต้ฝ่าเป็นวัสดุซับในทำหน้าที่ช่วยการปิดผนึกระหว่างฝ่าขวดและปากขวดให้แน่นสนิท (ภาพที่ 6) วัสดุรองฝ่าเป็นตัวกันระหว่างฝ่าปิดกับสิ่งของในภาชนะ ทำให้มีการปิดผนึกเพิ่มเติมสำหรับผลิตภัณฑ์สำเร็จรูป ช่วยรักษาความสมบูรณ์ในการปิดสนิทของผลิตภัณฑ์ระหว่างการขนส่งและตลอดเวลาที่ใช้บนชั้นวางขายปลีก แผ่นรองใต้ฝ่ายังสัมผัสโดยตรงกับผลิตภัณฑ์ ดังนั้นความเข้ากันได้ทางเคมีของแผ่นรองใต้ฝ่าและผลิตภัณฑ์จึงเป็นปัจจัยสำคัญในการเลือกวัสดุที่ใช้ทำแผ่นรองใต้ฝ่า เพราะอาจส่งผลโดยตรงต่อผลิตภัณฑ์



ภาพที่ 6 แผ่นรองใต้ฝ่าที่ใช้ในทางการค้า

ที่มา : TEKNIPLEX (2018)

ประเภทของแผ่นรองใต้ฝ่า

1. โฟมพอลิเอทิลีน

แผ่นรองใต้ฝ่าชนิดโฟมพอลิเอทิลีน ประกอบด้วยชั้นด้านนอกของแผ่นทำมาจากวัสดุพอลิเอทิลีนชนิดใส ด้านในเป็นโฟมพอลิเอทิลีนแบบนุ่ม นิยมใช้กับฝ่าพลาสติกชนิด F-217 สามารถใช้งานได้ทนนานเพราะมีความยืดหยุ่น สามารถซึบได้ ทนทานต่อสารเคมี อัตราการถ่ายเทความชื้นต่ำ และสามารถรักษากลิ่นและรสได้ดี

2. พลาสติกซอล

แผ่นรองใต้ฝ่าชนิดพลาสติกซอล เป็นแผ่นรองฝ่าที่นิยมใช้กับการปิดฝ่าโลหะสำหรับขูดแก้ว และขูดโหลแบบสุญญากาศชนิดที่มีเกลียว นิยมใช้กับผลิตภัณฑ์อาหารที่มีการบรรจุขณะร้อน หรือสุญญากาศ

3. แผ่นปิดไวต่อแรงกด (Pressure sensitive)

แผ่นปิดไวต่อแรงกดทำขึ้นจากวัสดุโพลีสไตรีนที่มีการเคลือบด้านหนึ่งด้วยกาว ใช้สำหรับยึดติดกับขวดพลาสติกหรือขวดแก้ว เมื่อทำการปิดฝ่าขวดแผ่นรองใต้ฝ่าจะถูกกดลงในฝ่าปิดและยึดติดกับผิวปากขวดตามแรงกดติดกับภาชนะเพราะด้านหนึ่งของแผ่นรองใต้ฝ่าเคลือบด้วยกาว เหมาะสำหรับใช้กับผลิตภัณฑ์แห้ง เช่น วิตามิน อาหาร และยาเท่านั้น

4. กรวยพอลิซิล

แผ่นรองใต้ฝ่าชนิดกรวยพอลิซิลขึ้นรูปด้วยพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ ลักษณะเป็นกรวยสูงด้านในของคอขวดซึ่งทำให้สามารถป้องกันการรั่วซึมซึ่ง การไหลย้อนกลับและการระเหยของผลิตภัณฑ์ภายในได้ เหมาะสำหรับใช้กับผลิตภัณฑ์ที่เป็นกรดและน้ำมันหอมระเหย เหมาะสำหรับใช้กับขวดแก้ว

กระบวนการขึ้นรูปและประกอบแผ่นรองใต้ฝา

ปกติจะนิยมใช้แผ่นรองใต้ฝาพอลิเอทิลีนสำหรับใส่ในฝาเครื่องต้มโดยจะใช้กระบวนการตัดแบบหมุน (Rotary cutting system) เพื่อให้เศษเหลือของการตัดไม่ปะปนกันและป้องกันฝุ่นผงอนุภาคพอลิเอทิลีน แผ่นรองใต้ฝาที่ตัดเสร็จแล้วจะถูกส่งไปทำความสะอาดและประกอบเข้าฝาดังนั้นจะเข้าสู่กระบวนการประกอบแผ่นรองใต้ฝาซึ่งขึ้นอยู่กับประเภทของฝา ดังนี้

1. การกดติด

กระบวนการประกอบแผ่นรองใต้ฝาและฝา ด้วยวิธีการกดติดสามารถทำได้โดยกดแผ่นรองใต้ฝาเข้าไปในฝาโดยใช้แรงเสียดทานเพื่อให้แผ่นรองใต้ฝาเข้าที่ ฝาที่จะใช้ในกระบวนการกดติดจะมีวงแหวนยึดซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเล็กกว่าฐานของฝาปิดแผ่นรองใต้ฝายู่ โดยแผ่นรองใต้ฝาจะถูกผลักผ่านวงแหวนยึดเพื่อให้เข้าที่ตามบริเวณรอบเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก โดยทั่วไปแล้วแผ่นรองใต้ฝาที่จะเข้ากระบวนการกดติดจะมีขนาดใหญ่กว่าแผ่นรองใต้ฟาที่จะนำมาเข้ากระบวนการติດกาวหรืออัลตราโซนิก เพื่อให้สามารถใส่ในฝาของบรรจุภัณฑ์ได้พอดี

2. การติดกาว

กระบวนการประกอบแผ่นรองใต้ฝาและฝาด้วยการทาการเข้าไปที่ด้านในของฝาก่อนที่จะกดแผ่นรองใต้ฟาให้เข้าที่ การทำหน้าที่ยึดแผ่นรองฝาและฟาให้แนบสนิท โดยชนิดของกาวมีหลายชนิดขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้ สามารถจ่ายกาวได้หลายวิธีเพื่อให้พอดีกับฝา เช่น การจ่ายตรงกลาง การจ่ายที่ขอบ หรือการจ่ายตามจุดที่กำหนด และต้องกดแผ่นรองใต้ฟาเข้าไปในฝาดัดเพื่อกระจายกาวไปตามพื้นที่ที่กำหนดของพื้นผิวแผ่นรองใต้ฟา กาวต้องใช้เวลาในการทำให้แห้งเพื่อให้ยึดเกาะได้ดี เวลาที่กาวจะแห้งจะแตกต่างกันไปตามปริมาณที่ใช้และประเภทของกาว วัสดุฝาและวัสดุแผ่นรองใต้ฟา

3. การใช้อัลตราโซนิก (Ultrasonic)

เป็นการนำแผ่นรองใต้ฟาเชื่อมเข้ากับฝาด้วยการใช้ความถี่อัลตราโซนิกเพื่อป้องกันไม่ให้แผ่นรองใต้ฟาหลุดออก และกดแผ่นรองใต้ฟาค้างไว้ในขณะที่ให้ความถี่ จากนั้นความถี่จะถูกส่งผ่านเข้าไป

ในฝา ความถี่จะเขย่าฝาย่างรวดเร็วทำให้ยึดแผ่นรองใต้ฝาให้เข้าที่ และทำให้เกิดการเสียดสีระหว่างแผ่นรองใต้ฝาและฝา การเสียดสีนี้จะทำให้เกิดการหลอมเหลวระหว่างฝาและแผ่นรองใต้ฟาลอมรวมเข้าด้วยกัน หลังจากวัสดุจะเย็นตัวลงจะทำให้เกิดเป็นพันธะที่แข็งแรงระหว่างฝาและแผ่นรองใต้ซึ่งวัสดุของฝาและแผ่นรองใต้จะต้องเป็นวัสดุเดียวกันกับจึงจะเกิดพันธะได้

มีรายงานการประดิษฐ์แผ่นรองใต้ฟาดูดซับออกซิเจนโดยการเติมผงเหล็ก (McKedy & Williams, 1998) ในชั้นดูดซับออกซิเจนของแผ่นรองใต้ฝา โดยการละลายตัวดูดซับออกซิเจนภายในเรซินตัวพา (ในสถานะของเหลวหนืด) โดยผสมในเครื่องผสมไฟฟ้าความเร็วสูง จากนั้นใส่ของเหลวลงบนพื้นผิวด้านในของฝา เป็นการเคลือบชั้นดูดซับออกซิเจนลงบนฝา

เทคโนโลยีแผ่นรองใต้ฝา SNIFF SEAL[®] ดังภาพที่ 7 คือแผ่นรองใต้ฝาที่ผู้บริโภคสามารถได้สัมผัสกลิ่น/อโรมาของผลิตภัณฑ์ภายในโดยไม่ต้องเปิดฉีกหรือเปิดสินค้า อำนวยความสะดวกในการเลือกกลิ่นสำหรับผู้บริโภค เหมาะสำหรับผลิตภัณฑ์หลากหลายประเภท รวมทั้งผลิตภัณฑ์ดูแลส่วนบุคคลเช่น อาหาร เครื่องสำอาง เครื่องดื่ม

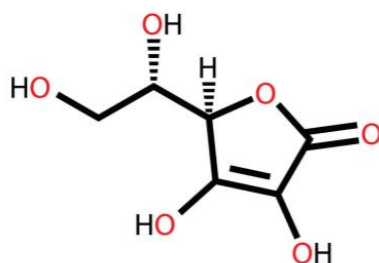


ภาพที่ 7 แผ่นรองใต้ฝา SNIFF SEAL[®]

ที่มา : TEKNIPLEX (2018)

6. วิตามินซี

วิตามินซี หรือกรดแอสคอร์บิก หรือกรดแอล-แอสคอร์บิก (L-ascorbic acid) หรือแอสคอร์เบต เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ สูตรเคมี คือ $C_6H_8O_6$ ดังภาพที่ 8 มีคุณสมบัติต้านอนุมูลอิสระ พบได้ทั้งในสัตว์และพืช มีลักษณะเป็นผงสีขาว ละลายได้ดีในน้ำ แต่สลายตัวได้ง่ายเมื่อได้รับความร้อน แสง และออกซิเจน อุณหภูมิหลอมเหลว 190 องศาเซลเซียส จุดเดือดที่ 553 องศาเซลเซียส เป็นวิตามินที่ละลายน้ำได้ (Devaki & Raveendran, 2017)



ภาพที่ 8 โครงสร้างวิตามินซี

วิตามินซีพบได้จากแหล่งธรรมชาติ ผักและผลไม้สด พืชที่อุดมไปด้วยกรดแอสคอร์บิก ได้แก่ ผลไม้รสเปรี้ยว เช่น มะนาว ส้ม มะนาว มะเขือเทศ ฟรุ้ง มะละกอ พริกเขียวและแดง กีวี สตรอเบอร์รี่ และแคนตาลูป ผักใบเขียว เช่น บร็อคโคลี่ และน้ำผลไม้ก็เป็นแหล่งวิตามินซีที่อุดมไปด้วยแหล่งวิตามินซี

ในอุตสาหกรรมอาหาร เครื่องดื่ม ผลิตภัณฑ์เสริมอาหารและ วิตามินซีมักถูกใช้เพื่อเพิ่มความเปรี้ยวและเสริมวิตามินเป็นส่วนใหญ่ ปัจจุบันมีผลิตภัณฑ์วิตามินซีวางจำหน่ายอยู่หลากหลายขนาดและรูปแบบ ได้แก่ รูปแบบเม็ดสำหรับรับประทาน แบบเม็ดอม แบบเม็ดเคี้ยว แบบเม็ดฟู่ แบบแคปซูล และแบบเครื่องดื่ม เป็นต้น นอกจากนี้ในผลิตภัณฑ์บางชนิดยังใช้ กรดแอสคอร์บิก ในการทำหน้าที่เป็นสารต้านอนุมูลอิสระ เพื่อให้สินค้ามีความเสถียร และอายุการเก็บรักษาเพิ่มมากขึ้น (Pehlivan, 2017)

7. งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาบรรจุภัณฑ์และพอลิเมอร์ดูดซับออกซิเจน

งานวิจัยที่มีการพัฒนาบรรจุภัณฑ์ดูดซับออกซิเจนโดยการเติมสารดูดซับออกซิเจนชนิดต่างๆ เช่น กรดแอสคอร์บิก กรดแกลลิก ไพรโกลลอล ลงในพอลิเมอร์เพื่อขึ้นรูปเป็นซีทที่มีคุณสมบัติการดูดซับออกซิเจน มีรายงานดังนี้

Di Maio et al. (2015) รายงานว่าซีทแอคทีฟสามชั้นจากพอลิเอสเตอร์ที่ขึ้นรูปโดยกระบวนการอัดรีดร่วมที่อัตราส่วนแตกต่างกัน สร้างโครงสร้างสมมาตรที่ประกอบด้วยพอลิเอทิลีน เทเรพทาเลตกับพอลิเมอร์ดูดซับออกซิเจนที่เป็นชั้นหลักและพอลิเอทิลีน เทเรพทาเลตบริสุทธิ์เป็นชั้นภายนอก การทดสอบการดูดซับออกซิเจนพบว่า ความหนาของชั้นพอลิเมอร์ดูดซับออกซิเจนมีผลต่ออัตราการดูดซับเพิ่มขึ้นตามปริมาณของชั้นแอคทีฟ และมีการทดสอบอายุการเก็บรักษาในแอปเปิ้ลสด พบว่าซีทแอคทีฟสามชั้นที่พัฒนาแล้วมีศักยภาพในการยืดอายุการเก็บรักษาของแอปเปิ้ล และ Kordjazi and Ajji (2021) ศึกษาสมบัติการดูดซับออกซิเจนของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ และพอลิแลคติกแอซิด ผสมไททาเนียมไดออกไซด์ โดยกระบวนการอัดรีดขึ้นรูป ภาพการวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของซีทด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงให้เห็นว่าซีทเป็นเนื้อเดียวกัน ซีทที่มีไททาเนียมไดออกไซด์ 10 และ 13 % สามารถดูดซับออกซิเจนได้ถึง 30 และ 27 ซีซี/กรัม เมื่อผ่านไป 30 วัน โดย Ahn et al. (2016) เตรียมซีทพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำที่สามารถดูดซับออกซิเจนได้โดยใช้กรดแกลลิก และโพแทสเซียมคลอไรด์เพื่อปรับความเป็นกรด-ด่างสำหรับการดูดซับออกซิเจน ขึ้นรูปพลาสติกด้วยกระบวนการอัดรีดแบบแผ่น (cast extrusion) และวิเคราะห์ความสามารถในการดูดซับออกซิเจนของซีทที่อุณหภูมิต่างกัน โดยพบว่าปริมาณออกซิเจนเริ่มต้นในขวด (ร้อยละ 20.9) ลดลงเหลือร้อยละ 16.6 ที่ 4 องศาเซลเซียส ร้อยละ 14.6 ที่ 23 องศาเซลเซียส และ ร้อยละ 12.7 ที่ 50 องศาเซลเซียส หลังการเก็บเป็นเวลา 7 วัน ด้วยซีทที่มีสารดูดซับออกซิเจน ร้อยละ 20 แต่งานวิจัยนี้จำเป็นต้องปรับปรุงเกี่ยวกับการกระจายตัวของสารดูดซับออกซิเจนบนโครงสร้างซีท และ Pant et al. (2017) ได้ศึกษาสารดูดซับออกซิเจนจากกรดแกลลิกที่ผสมกับพอลิเอทิลีนฐานชีวภาพ (bio-PE) และขึ้นรูปเป็นซีทหลายชั้น (multilayer) ผลิตด้วยกระบวนการสามขั้นตอน ได้แก่ การผสม การอัดขึ้นรูปแผ่นซีท และการเคลือบ เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับ

ออกซิเจนที่แต่ละความชื้นสัมพัทธ์ (ร้อยละ 100, 86, 75, 31, 0) และอุณหภูมิ (4, 21, 38 องศาเซลเซียส) โดยที่ 21 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 100 ความสามารถในการดูดซับออกซิเจนสูงสุดที่ 447 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักกรดกลลิก (กรัม) ในตอนแรกซีทมีน้ำตาลแดงจากนั้นเปลี่ยนเป็นสีเขียวอมดำในระหว่างการดูดซับออกซิเจนภายใต้สภาวะที่มีความชื้น การรวมตัวกันของกรดกลลิกเข้ากับพอลิเมอร์ทำให้อัตราการดูดซับออกซิเจนลดลงเมื่อเทียบกับผงกลลิก เนื่องจากพอลิเมอร์เป็นตัวขัดขวางการแพร่ของออกซิเจนและไอน้ำ นอกจากนี้ Pant et al. (2018) ยังได้ศึกษาผลของอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ต่อจลนศาสตร์ของปฏิกิริยาของสารดูดซับออกซิเจนซึ่งประกอบด้วยกรดกลลิก และโซเดียมคาร์บอเนต ซึ่งพบว่าการดูดซับออกซิเจนเป็นไปตามจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาอันดับสอง การดูดซับออกซิเจนเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น และความชื้นสัมพัทธ์ที่สูงขึ้น โดย Gaikwad et al. (2017) ได้ศึกษาการใช้ไฟโรแกรรอลเคลือบลงบนซีทพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำที่ผ่านการดัดแปรทำให้ซีทมีพื้นผิวที่หยาบเล็กน้อยโดยใช้เครื่องเคลือบแบบแห้งส่งผลให้การซึมผ่านของน้ำและออกซิเจนสูงขึ้น ปริมาณออกซิเจนของตัวอย่างซีทพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำที่เคลือบด้วยไฟโรแกรรอลร้อยละ 20 ลดลงเหลือร้อยละ 9.42 หลังจาก 8 วัน ที่อุณหภูมิ 23 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ Lee et al. (2018) ยังมีการใช้กรดแอสคอร์บิกเป็นสารดูดซับออกซิเจนในซีทโดยมีการพัฒนาสารดูดซับออกซิเจน ซึ่งประกอบด้วย ถ่านกัมมันต์ และ โซเดียม แอล แอสคอร์เบท เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการกักเก็บของเนื้อสัตว์ดิบ โดยอัตราส่วน 1: 1.6 สามารถดูดซับออกซิเจนได้ดีที่สุด และถูกนำไปใช้เป็นบรรจุภัณฑ์ของเนื้อสัตว์ดิบ

จากงานวิจัยข้างต้นพบว่าการผลิตซีทโดยการเติมสารสกัดจากธรรมชาติบางชนิด เช่น ไททาเนียไดออกไซด์ กรดกลลิก ไฟโรแกรรอล และกรดแอสคอร์บิก ทำให้ซีทมีประสิทธิภาพในการดูดซับออกซิเจน โดยสภาวะการเก็บรักษา ได้แก่ ความชื้นและอุณหภูมิมีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับออกซิเจน ซึ่งสามารถประยุกต์ใช้และพัฒนาเป็นแผ่นรองใต้ผ้าเพื่อรักษาความคงตัวของวิตามินในผลิตภัณฑ์อาหารเหลวหรือเครื่องดื่มที่สามารถเสื่อมคุณภาพได้จากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างออกซิเจนที่เหลืออยู่ในภาชนะบรรจุกับวิตามิน งานวิจัยนี้พัฒนาพลาสติกชีวภาพที่มีประสิทธิภาพดูดซับออกซิเจน และรักษาความคงตัวของวิตามินในผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มวิตามินซีด้วยกรดกลลิกและไฟโรแกรรอล ศึกษาผลของกรดกลลิกและไฟโรแกรรอลต่อสมบัติของพลาสติก

ชีวภาพ และวิเคราะห์คุณภาพของผลิตภัณฑ์วิตามินที่บรรจุในขวดโดยประยุกต์ใช้พลาสติกชีวภาพ ผสมกรดแลคติกและไฟโรแกลรอลเป็นแผ่นรองใต้ฝา เพื่อยืดอายุการเก็บรักษาและคงคุณภาพของ ผลิตภัณฑ์วิตามิน แก้ไขปัญหาบรรจุภัณฑ์พลาสติกฐานปิโตรเลียมที่ไม่สามารถเสื่อมสลายได้ 100 เปอร์เซ็นต์จากแผ่นรองใต้ฝาที่ผลิตจากวัสดุฐานปิโตรเลียม ลดการใช้สารดูดซับออกซิเจนแบบของ ชนิดผงโลหะออกไซด์ที่อาจเกิดอันตรายต่อผู้บริโภค

แผนการวิจัย

สมมุติฐาน

1. พลาสติกชีวภาพเติมกรดแกลลิกและไพโรแกลลอลผลิตด้วยกระบวนการอัดรีดมีประสิทธิภาพในการดูดซับออกซิเจน สามารถดูดซับออกซิเจนได้ดีเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นตามลำดับ
2. การประยุกต์แผ่นรองไฟฟ้าที่ผลิตจากพลาสติกชีวภาพเติมกรดแกลลิกและไพโรแกลลอลสามารถรักษาความคงตัวของวิตามินซีได้

วัสดุและอุปกรณ์

วัสดุ

1. สตาร์ชอะซิเตตเลตมันสำปะหลัง (Acetylate cassava starch) (SMS Corporation Co., Ltd, Thailand)
2. กรดแกลลิก (Gallic acid) (Xi'an Ceres Biotech Co., Ltd, China)
3. ไพโรแกลลอล (Pyrogallol) (Xi'an Ceres Biotech Co., Ltd, China)
4. โพแทสเซียมคาร์บอเนต (Potassium carbonate) (Laboratory reagent, Kemaus, Australia)
5. กลีเซอรอล (Glycerol) (Asian scientific, Thailand)
6. โพลีเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (Linear low-density polyethylene ;LLDPE) (PTT Global Chemical Public, Thailand)

อุปกรณ์

1. เครื่องอัดรีดสกรูคู่ (Labtech Engineering, Samut Prakan, Thailand)
2. เครื่องปั่น (HM-275; Otto King Glass Co., Ltd., China)
3. เครื่อง Hotplate stirrer (Yellowline MSH Basic MSH B, Thailand)
4. เครื่องชั่งทศนิยม 2 ตำแหน่ง (Satorius BP 3100S, Germany)

5. เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง (Satorius 110S, Germany)
6. ตู้อบลมร้อน (WTB Binder FD R3 controller: ED53/E2, USA)
7. ตู้ควบคุมความชื้นและอุณหภูมิ (Climate chamber Binder KBF720, GmbH, Germany)
8. เครื่องทดสอบแรงดึง (Instron test machine) (5065, Instron, UK)
9. เครื่องวัดอัตราการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจน (Illinois Instruments, Inc., Johnsbury IL, USA)
10. เครื่องทดสอบมุมสัมผัส (OCA 15EC contact angle analyzer, Germany)
11. เครื่องวิเคราะห์คุณสมบัติการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction, XRD) (Diffractometer D8, Bruker AXS, Germany)
12. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM) (JSM-6610 Series Scanning Electron Microscope, JEOL Ltd., USA)
13. เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (Fourier Transform Infrared Spectrophotometer) (Tensor 27 FTIR, Bruker Corporation, Germany)
14. เครื่องวัดสี (NH310, 4mm aperture, Shenzhen 3 nh Technology Co., Ltd, China)
15. เครื่องทดสอบเชิงกลพลวัต (DMTA, Mettler Toledo-DMA 1, Switzerland)
16. กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM, MFP-3D-Bio, Asylum Research, USA)
17. เครื่องวัดแก๊สในช่องว่างภายในบรรจุภัณฑ์ (Gas headspace analyzer) (Dansensor[®] CheckPoint3, Dansensor, Ringsted, Denmark)
18. เครื่องอัลตราไวโอเลตสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Genesys 10 UV, Thermo Electron Corporation, USA)

วิธีการทดลอง

1. การเตรียมพลาสติกชีวภาพดูดซับออกซิเจนพลาสติกฐานเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช และโพลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น

อบสตาร์ชอะซิติกเลดมันสำปะหลัง ด้วยตู้อบลมร้อนที่ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ซังสตาร์ชอะซิติกเลดมันสำปะหลัง และกลีเซอรอลร้อยละ 35 ของน้ำหนักสตาร์ช จากนั้นนำกลีเซอรอลที่ได้ไปปั่นผสมกับสตาร์ชอะซิติกเลดมันสำปะหลังเป็นเวลา 10 นาที นำสตาร์ชอะซิติกเลดมันสำปะหลังที่ผสมกับกลีเซอรอลไปผ่านกระบวนการอัดรีดด้วยเครื่องอัดรีดสกรูคู่ (twin screw extruder) ที่อุณหภูมิ 90 - 145 องศาเซลเซียส และความเร็วสกรู 200 รอบต่อนาที จากนั้นนำมาตัดเป็นเม็ดขนาด 2.5 มิลลิเมตร ได้เป็นเม็ดเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชและนำไปอบด้วยตู้อบลมร้อนที่ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมงเพื่อไล่ความชื้นก่อนขึ้นรูปเป็นแผ่น นำเม็ดเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชมาผสมกับโพลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น ที่อัตราส่วนเม็ดเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชต่อโพลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นเท่ากับ 50 ต่อ 50 และเติมสารดูดซับออกซิเจน ได้แก่ กรดแกลลิกและไพโรแกลลอลความเข้มข้นร้อยละ 1, 3, 5, 7 และ 10 ของน้ำหนักพอลิเมอร์ และเติมโพแทสเซียมคาร์บอเนตในอัตราส่วน 2:1 ของสารดูดซับออกซิเจน (กรดแกลลิก และไพโรแกลลอล) ต่อโพแทสเซียมคาร์บอเนต (ดังตารางที่ 2) ผสมให้เข้ากันจากนั้นนำไปผ่านกระบวนการอัดรีดด้วยเครื่องอัดรีดสกรูคู่ โดยผ่านหัวตายแบบรีดแผ่น (sheet die) ที่อุณหภูมิ 110 - 195 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบสกรู 70-110 รอบต่อนาที จากนั้นเก็บในถุงซิปล็อคสุญญากาศ

ตารางที่ 2 ปริมาณส่วนผสมที่ใช้ในการทำพลาสติกชีวภาพดูดซับออกซิเจนฐานเทอร์โมพลาสติกสตาโรล และโพลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น

ลำดับ	สูตร	เทอร์โมพลาสติกสตาโรล (กรัม)	โพลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (กรัม)	กรดแกลลิก (กรัม)	ไฟโรแกลลอล (กรัม)	โพแทสเซียมคาร์บอเนต (กรัม)
1	เทอร์โมพลาสติกสตาโรล/โพลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น	500	500	-	-	-
2	เทอร์โมพลาสติกสตาโรล/โพลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น+1%กรดแกลลิก	500	500	10	-	5
3	เทอร์โมพลาสติกสตาโรล/โพลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น+3%กรดแกลลิก	500	500	30	-	15
4	เทอร์โมพลาสติกสตาโรล/โพลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น+5%กรดแกลลิก	500	500	50	-	25
5	เทอร์โมพลาสติกสตาโรล/โพลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น+7%กรดแกลลิก	500	500	70	-	35

ตารางที่ 2 ปริมาณส่วนผสมที่ใช้ในการทำพลาสติกชีวภาพดูดซับออกซิเจนฐานเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช และโพลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (ต่อ)

ลำดับ	สูตร	เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (กรัม)	พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (กรัม)	กรดแกลลิก (กรัม)	ไฟโรแกลลอล (กรัม)	โพแทสเซียม คาร์บอเนต (กรัม)
6	เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช/โพลิเอทิลีน ความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น+10%กรด แกลลิก	500	500	100	-	50
7	เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช/โพลิเอทิลีน ความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น+1%ไฟโร แกลลอล	500	500	-	10	5
8	เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช/โพลิเอทิลีน ความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น+3%ไฟโร แกลลอล	500	500	-	30	15
9	เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช/โพลิเอทิลีน ความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น+5%ไฟโร แกลลอล	500	500	-	50	25

ตารางที่ 2 ปริมาณส่วนผสมที่ใช้ในการทำพลาสติกชีวภาพดูดซับออกซิเจนฐานเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช และโพลีเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (ต่อ)

ลำดับ	สูตร	เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (กรัม)	พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (กรัม)	กรดแกลลิก (กรัม)	ไฟโรแกลลอล (กรัม)	โพแทสเซียม คาร์บอเนต (กรัม)
10	เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช/โพลีเอทิลีน ความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น+7%ไฟโร แกลลอล	500	500	-	70	35
11	เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช/โพลีเอทิลีน ความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น+10%ไฟโร แกลลอล	500	500	-	100	50

2. การวิเคราะห์สมบัติเชิง

2.1 ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างทางเคมีด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรด สเปกโตรสโคปี (Fourier Transform Infrared Spectrophotometer) โหมดการใช้งานแบบ attenuated total reflectance (ATR) โดยตัดตัวอย่างขนาด 1×1 เซนติเมตร และทดสอบโดย สแกนช่วงความยาวคลื่น 450 cm^{-1} ถึง 4000 cm^{-1} จำนวน 5 ซ้ำต่อตัวอย่าง

2.2 วิเคราะห์สัณฐานวิทยาของซีทด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM) ทดสอบตัวอย่างบริเวณพื้นผิว (surface) และบริเวณตัดขวาง (cross section) เตรียมตัวอย่างโดยแช่และหักในไนโตรเจนเหลว และใช้เทปคาร์บอนติดตัวอย่างลงบนฐาน วางตัวอย่าง (stub) จากนั้นนำตัวอย่างไปฉายด้วยอนุภาคทองแล้วนำไปวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์ บันทึกภาพที่ได้ดูพื้นผิวของซีทที่กำลังขยาย 100 เท่า

2.3 วิเคราะห์สมบัติทางสัณฐานวิทยาพื้นผิว (Atomic force microscopy) โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม วัดรูปทรงของสภาพผิวตัวอย่างขนาด 25 ตารางไมโครเมตร ด้วยโหมด tapping โดยใช้ความยาวของเข็มวัดที่ 225 ไมโครเมตร ความถี่ในการสั่น 190 กิโลเฮิรซ์ และรัศมีปลายความโค้ง 8 นาโนเมตร ที่อัตราการสแกน 0.8 เฮิรซ์

2.4 วิเคราะห์สมบัติสมบัติเชิงกลพลวัต (Dynamic mechanical thermal analysis) ตัดตัวอย่างขนาด 10×20 มิลลิเมตร โดยใช้โหมดการทดสอบแบบดึงยืด (tension mode) ผ่านเครื่อง dynamic mechanical thermal analyzer ช่วงอุณหภูมิ -100 ถึง 100 องศาเซลเซียสด้วยความเร็ว 2 องศาเซลเซียสต่อนาที ที่ความถี่ 0.5, 1, 5, 10 และ 20 เฮิรตซ์

2.5 วิเคราะห์คุณสมบัติการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction, XRD) เตรียมตัวอย่างโดยตัดตัวอย่างขนาด 1×1 เซนติเมตรและเก็บในกล่องที่บรรจุซิลิกาเจลเป็นเวลาอย่างน้อย 2 วันก่อนการนำซีทไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD ที่มุมที่ต่าง ๆ ตั้งแต่ 4 จนถึง 40 ด้วยอัตราเร็วในการสแกน 0.02° ต่อวินาที

2.6 ศึกษาสมบัติทางกลโดยทดสอบค่าต้านทานแรงดึง (tensile test) โดยตัดตัวอย่างขนาด 2.5×10 ซม. และวัดความหนาด้วยไมโครมิเตอร์ เก็บตัวอย่างในตู้ควบคุมความชื้น ที่ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 50 และอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลาอย่างน้อย 2 วัน ระยะห่างระหว่างตัวหนีบ 5 เซนติเมตร ใช้ความเร็ว 500 มิลลิเมตรต่อนาที โดยทดสอบตัวอย่างละ 15 ซ้ำ (ASTM D882-88)

2.7 ศึกษาลักษณะพื้นผิวโดยอธิบายด้วยค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำ โดยใช้เครื่องทดสอบมุมสัมผัส ด้วยโปรแกรม SCA 20 โดยตัดตัวอย่างขนาด 1×10 เซนติเมตร ปริมาตรน้ำกลั่นที่ใช้ 3 ไมโครลิตร วิเคราะห์มุมสัมผัสโดยจับภาพภายหลังหยดน้ำกลั่นทันที จำนวน 10 ตัวอย่าง แต่ละตัวอย่างจำนวน 5 ซ้ำ

2.8 ศึกษาสมบัติการซึมผ่านของไอน้ำด้วยวิธี Cup method (ASTM E96-80) โดยเตรียมตัวอย่างเป็นวงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 7 เซนติเมตร ตัวอย่างละ 5 ชิ้น วัดความหนาของซีทด้วยไมโครมิเตอร์ เก็บในตู้ควบคุมความชื้นที่ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 50 อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลาอย่างน้อย 2 วัน ใส่ซิลิกาเจลลงในถ้วยอลูมิเนียม และยึดตัวอย่างให้ติดกับถ้วยทดสอบด้วยพาราฟิน จากนั้นชั่งน้ำหนักถ้วยอลูมิเนียมก่อนนำใส่ในตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นที่ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 50 อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส บันทึกค่าการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของถ้วยต่อเวลา

$$\text{สภาพให้ซึมผ่านของไอน้ำ} = \frac{(\text{อัตราการซึมผ่านของไอน้ำ} \times \text{ความหนาของซีท})}{\text{ความแตกต่างของความดันไอน้ำ ระหว่าง 2 ด้านของซีท}}$$

2.9 ศึกษาสมบัติการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจน ตัดตัวอย่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 14 เซนติเมตร ตัวอย่างละ 3 ซ้ำ และวัดความหนาด้วยไมโครมิเตอร์ แล้ววิเคราะห์ด้วยเครื่องวัดอัตราการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจน คำนวณการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนผ่านสมการ (ASTM D 3985-81)

$$\text{สภาพให้ซึมผ่านของแก๊สออกซิเจน} = \frac{(\text{อัตราการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจน} \times \text{ความหนาของซีท})}{\text{ความแตกต่างของความดันของแก๊สระหว่าง 2 ด้านของซีท}}$$

3. การวิเคราะห์ประสิทธิภาพดูดซับออกซิเจนในบรรจุภัณฑ์

วัดความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนในช่องว่างภายในบรรจุภัณฑ์ (headspace) ด้วยเครื่องวัดแก๊สในช่องว่างภายในบรรจุภัณฑ์ (Gas headspace analyzer) โดยการตัดตัวอย่างขนาด 5×5 cm² และบรรจุในขวดแก้วใสขนาด 480 มล. ปิดด้วยฟอลูมิเนียมที่มีการเจาะรู 2 รูสำหรับใส่ท่อโพลียูรี

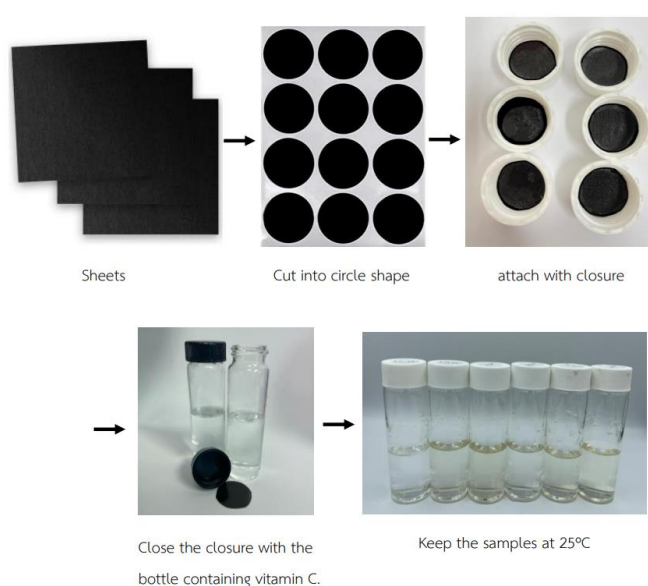
เทน และสายยางลาเท็กซ์ อุดช่องว่างของบรรจุภัณฑ์ด้วยซิลิโคน ดิดเซปตัม (septum) เพื่อใช้ในการ ทิ่มเข็มในการวัดตัวอย่าง ดังภาพที่ 9 โดยตัวอย่างจะถูกเก็บไว้ในสภาวะที่ต่างกันคือที่อุณหภูมิ 4, 25, 50 องศาเซลเซียส และควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ที่ร้อยละ 50, 75 และ 100 โดยใช้สารละลายเกลือ อิมิตัวแมกนีเซียมไนเตรท โซเดียมคลอไรด์ และน้ำกลั่น ตามลำดับ



ภาพที่ 9 ระบบการเก็บตัวอย่างเพื่อทดสอบประสิทธิภาพดูดซับออกซิเจน

4. การประยุกต์ใช้เป็นแผ่นรองใต้ฝาสำหรับการบรรจุเครื่องดื่มวิตามิน

การประยุกต์ใช้เป็นแผ่นรองใต้ฝา เตรียมตัวอย่างแผ่นรองใต้ฝาพลาสติกชีวภาพ โดยตัด ตัวอย่างพลาสติกชีวภาพที่ได้จากการกระบวนการอัดรีดเป็นวงกลมขนาดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 22 มิลลิเมตร จำนวน 3 ซ้ำ บรรจุแผ่นรองใต้ฝาเข้ากับฝาขวด ขนาด 40 มิลลิเมตรที่บรรจุสารละลาย วิตามินซีความเข้มข้น 20 ไมโครกรัมต่อลิตร ปริมาตร 20 มิลลิตร ดังภาพที่ 10 และปิดฝาให้สนิท ห่อด้วยอลูมิเนียมฟอยด์เพื่อกันแสง เก็บตัวอย่างไว้ที่อุณหภูมิห้อง



ภาพที่ 10 การประยุกต์ใช้เป็นแผ่นรองใต้ฝา

วิเคราะห์ปริมาณวิตามินซีในบรรจุภัณฑ์โดยนำตัวอย่างมาวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องอัลตราไวโอเลตสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 291 นาโนเมตร วิเคราะห์ตัวอย่างละ 3 ซ้ำ ชักตัวอย่างสารละลาย จำนวน 3 ซ้ำ ในระหว่างการเก็บรักษาวันที่ 0, 2, 4, 6, 8, 10 สร้างกราฟมาตรฐานโดยเตรียมสารละลายมาตรฐาน 5 ความเข้มข้น โดยชั่งกรดแอสคอร์บิก 0.0500 กรัมในน้ำ 100 มิลลิลิตรเพื่อเตรียมสารละลายวิตามินซีความเข้มข้น 500 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตรจากนั้นนำไปเจือจางเพื่อให้ได้ความเข้มข้น 5, 10, 15, 20 และ 25 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร สร้างกราฟมาตรฐานจากค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องอัลตราไวโอเลตสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 291 นาโนเมตร วิเคราะห์ความเข้มข้นละ 3 ซ้ำ

5. การวิเคราะห์ทางสถิติ

นำข้อมูลที่ได้จากการออกแบบการทดลองแบบการสุ่มแบบสมบูรณ์ (Completely Randomized Design, CRD) เนื่องจากสิ่งทดลองทั้งหมดมีความสม่ำเสมอกัน โดยใช้องค์ประกอบของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นอิทธิพลของแต่ละทรีทเมนต์ วิเคราะห์ความแตกต่างของข้อมูลแต่ละทรีทเมนต์ จากการวิเคราะห์ความแปรปรวน (analysis of variance, ANOVA) ด้วยโปรแกรม SPSS (Statistical Package for Social Science, Chicago) เวอร์ชัน 26

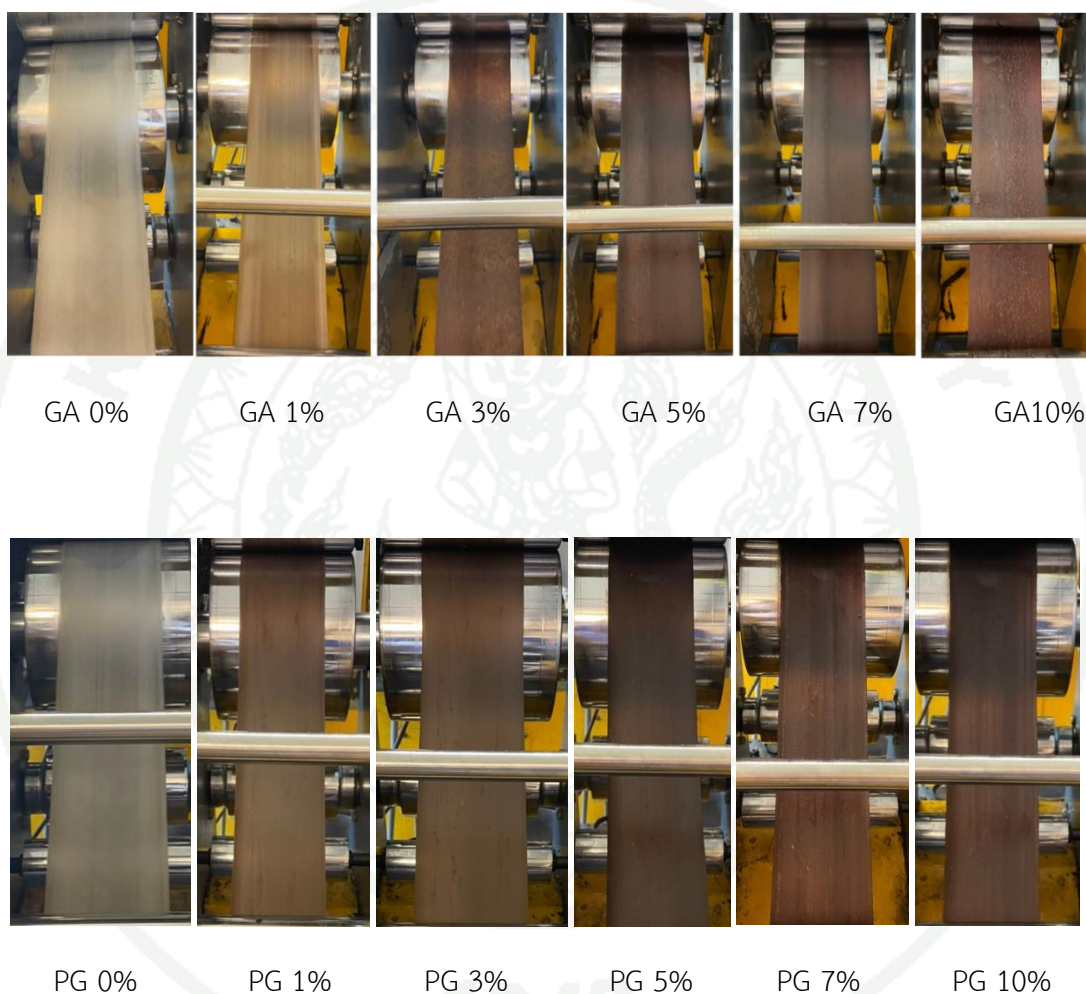
ผลและวิจารณ์

งานวิจัยนี้พัฒนาซีทพลาสติกชีวภาพที่มีการเติมกรดแกลลิกและไฟโรแกลลอลเพื่อพัฒนาประสิทธิภาพการดูดซับออกซิเจนในพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์และโพลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น การแสดงผลการทดลองและวิจารณ์จะแบ่งเป็น 3 ส่วน ได้แก่ (i) การขึ้นรูปซีทพลาสติกฐานเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ และโพลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (ii) การวิเคราะห์วัสดุฐานกรดแกลลิก และ (iii) การวิเคราะห์วัสดุฐานไฟโรแกลลอล ดังนี้

1. การขึ้นรูปซีทพลาสติกฐานเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ และโพลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นที่มีส่วนผสมของกรดแกลลิกและไฟโรแกลลอล

การขึ้นรูปพลาสติกฐานเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ และโพลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นผสมกรดแกลลิกร้อยละ 0, 1, 3, 5 และ 10 ด้วยเครื่องอัดรีดสกรูคู่โดยผ่านหัวตายแบบบริดแผ่น (sheet die) แสดงดังภาพที่ 11 ซีทมีลักษณะเป็นแผ่นเดียวกันต่อเนื่องกันเมื่อเติมกรดแกลลิกปริมาณสูงถึงร้อยละ 10 การเติมกรดแกลลิกร้อยละ 1 ทำให้ซีทมีสีเหลือง คล้ายกับงานวิจัยที่มีการเติมกรดแกลลิกลงในซีทพลาสติกชีวภาพพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (bio-HDPE) (Quiles-Carrillo et al., 2019) โคโตซาน (Singh et al., 2020) และพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (Ahn et al., 2016) เมื่อความเข้มข้นของกรดแกลลิกมากกว่าร้อยละ 1 แผ่นซีทจะมีสีเข้มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด การเติมกรดแกลลิกร้อยละ 10 ทำให้ซีทไม่เป็นเนื้อเดียวกันโดยมีอนุภาคสีขาวของกรดแกลลิกกระจายตัวอยู่ในขณะเดียวกันการขึ้นรูปพลาสติกฐานเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ และโพลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นผสมไฟโรแกลลอลร้อยละ 0, 1, 3, 5 และ 10 ด้วยเครื่องอัดรีดสกรูคู่โดยผ่านหัวตายแบบบริดแผ่น (sheet die) ทำให้ซีทมีลักษณะเป็นแผ่นต่อเนื่องกันเช่นเดียวกับการเติมกรดแกลลิก อีกทั้งการเติมไฟโรแกลลอลร้อยละ 1, 3 ทำให้ซีทมีสีน้ำตาลอ่อนแต่จะมีสีเข้มขึ้นเมื่อเติมไฟโรแกลลอลร้อยละ 5, 7, 10 หากเปรียบเทียบระหว่างซีทที่มีการเติมกรดแกลลิกและไฟโรแกลลอลสามารถสังเกตได้ว่าในซีทที่มีการเติมสารร้อยละ 1 ซีทที่มีการเติมไฟโรแกลลอลจะมีสีเข้มกว่าซีทที่เติมกรดแกลลิก การเติมสารปริมาณมากขึ้นทำให้สีของซีทเข้มขึ้น การเติมกรดแกลลิกร้อยละ 10 พบอนุภาคสีขาวบนซีทซึ่งไม่พบบนซีทที่เติมไฟโรแกลลอลร้อยละ 10 นอกจากนี้ซีทที่มีการเติมสารทั้งสองชนิดนี้ยังเกิดพื้นผิวที่มี

ลักษณะคล้ายเส้นใยในแนวของกระบวนการอัดรีด ที่เห็นได้ชัดในซีทที่เติมสารปริมาณมากขึ้น ยกเว้นในซีทที่เติมกรดแกลลิกร้อยละ 10 ซึ่งอาจเกิดจากการเกาะตัวกันอนุภาคสีขาของกรดแกลลิกครดอยู่



ภาพที่ 11 ลักษณะของพลาสติกฐานเทอร์โมพลาสติกสตา์ช และพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นผสมกรดแกลลิก (GA) และไฟโรแกลลอล (PG) ร้อยละ 0, 1, 3, 5, 7 และ 10

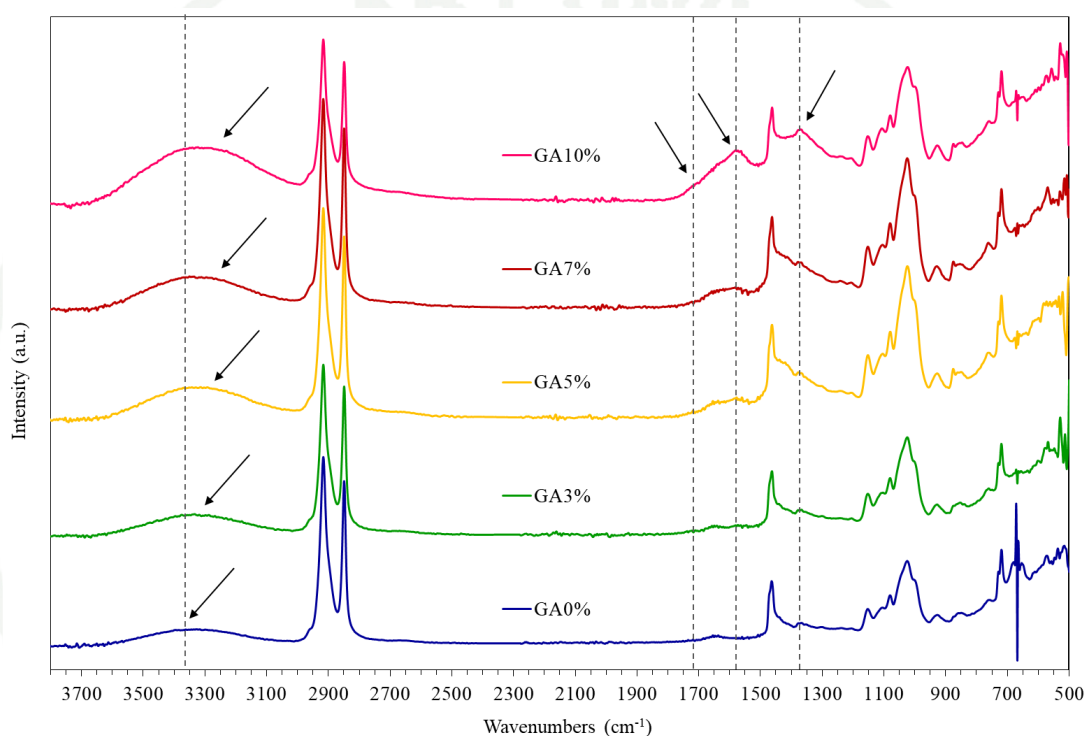
2. ซิทพลาสติกฐานเทอร์โมพลาสติกสตาบิล และโพลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นผสมกรด แกลลิก

2.1 การเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างทางเคมี

สเปกตรัมการดูดกลืนแสงอินฟราเรดของพลาสติกผสมเทอร์โมพลาสติกสตาบิลและโพลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นแสดงดังภาพที่ 12 การดูดกลืนแสงช่วงระหว่าง 3000-3700 cm^{-1} เป็นช่วงการสั่นของพันธะ O-H stretching ในเทอร์โมพลาสติกสตาบิลและกรดแกลลิก ความเข้มของการดูดกลืนแสงเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณกรดแกลลิกมากขึ้น นอกจากนี้แถบพันธะ O-H มีความกว้างมากขึ้นและจุดสูงสุดของพีคเลื่อนไปทางเลขคลื่นที่ลดลง (จาก 3362 ไป 3337 cm^{-1}) ซึ่งบ่งชี้ว่าพันธะไฮโดรเจนที่อยู่ระหว่างโมเลกุลและภายในโมเลกุลเกิดการตัดแปลง (Wangprasertkul et al., 2021) เทอร์โมพลาสติกสตาบิลที่มีหมู่ไฮดรอกซิล (R-O-H) จำนวนมาก ในขณะที่หนึ่งโมเลกุลของกรดแกลลิกมีหมู่ไฮดรอกซิล 3 หมู่ (R'-O-H) ซึ่งสามารถสร้างพันธะไฮโดรเจนได้ง่าย นอกจากนี้การเติมกรดแกลลิกมากขึ้นทำให้การดูดกลืนแสงมากขึ้นที่ 1725 และ 1572 cm^{-1} ซึ่งเป็นช่วงที่กำหนดไว้สำหรับ การสั่นของพันธะ C=O stretching ของหมู่เอสเทอร์และหมู่คาร์บอกซิลิก (-RCOO-) (Miao et al., 2014) การเพิ่มความสูงของแถบเหล่านี้ระบุโครงสร้างเอสเทอร์ในโมเลกุลสตาบิล การดูดกลืนช่วง 1720-1730 cm^{-1} บ่งชี้ถึงปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างสตาบิลกับกรดซิตริก (Miao et al., 2014; Shi et al., 2007; Zheng et al., 2017)

ผลการทดลองบ่งชี้ว่าหมู่ไฮดรอกซิล (R-O-H) ในสตาบิลทำปฏิกิริยากับหมู่คาร์บอกซิลิก (R'-COOH) ในโมเลกุลของกรดแกลลิกผ่านทางพันธะเอสเทอร์ (R-C-O-C-R') Robert et al. (2012) ยังชี้ว่าหมู่อะซิติลบนสายโซ่หลักของพอลิเมอร์ช่วยให้เกิดอันตรกิริยาระหว่างกรดแกลลิกและพอลิเมอร์ การดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นระหว่าง 2800 - 3000 cm^{-1} แสดงให้เห็นถึงการสั่นของ C-H stretching ที่เกิดจากกลุ่ม -CH₂ (เมทิลีน) และ -CH₃ (เมทิล) ในส่วนประกอบเทอร์โมพลาสติกสตาบิลและโพลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น โดยกลุ่มเมทิลีนทำให้เกิดการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดสูงสุดที่ 2916 และ 2849 cm^{-1} ในการการสั่นแบบอสมมาตรและสมมาตรตามลำดับ ใหญ่ของพีคที่ 2963 และ 2897 cm^{-1} เกิดจากพันธะ C-H ที่ไม่สมมาตรและสมมาตรของกลุ่มเมทิล ตามลำดับ

อัตราส่วนความเข้มข้นของแถบเหล่านี้เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณกรดแกลลิกเพิ่มขึ้น กรดแกลลิกไม่มีการดูดกลืนแสงในช่วงพันธะ C-H ซึ่งบ่งชี้ว่าพันธะ C-H ในกรดแกลลิกไม่ได้รับอิทธิพลโดยตรงจากการดัดแปลงของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชและพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นที่ดัดแปลง



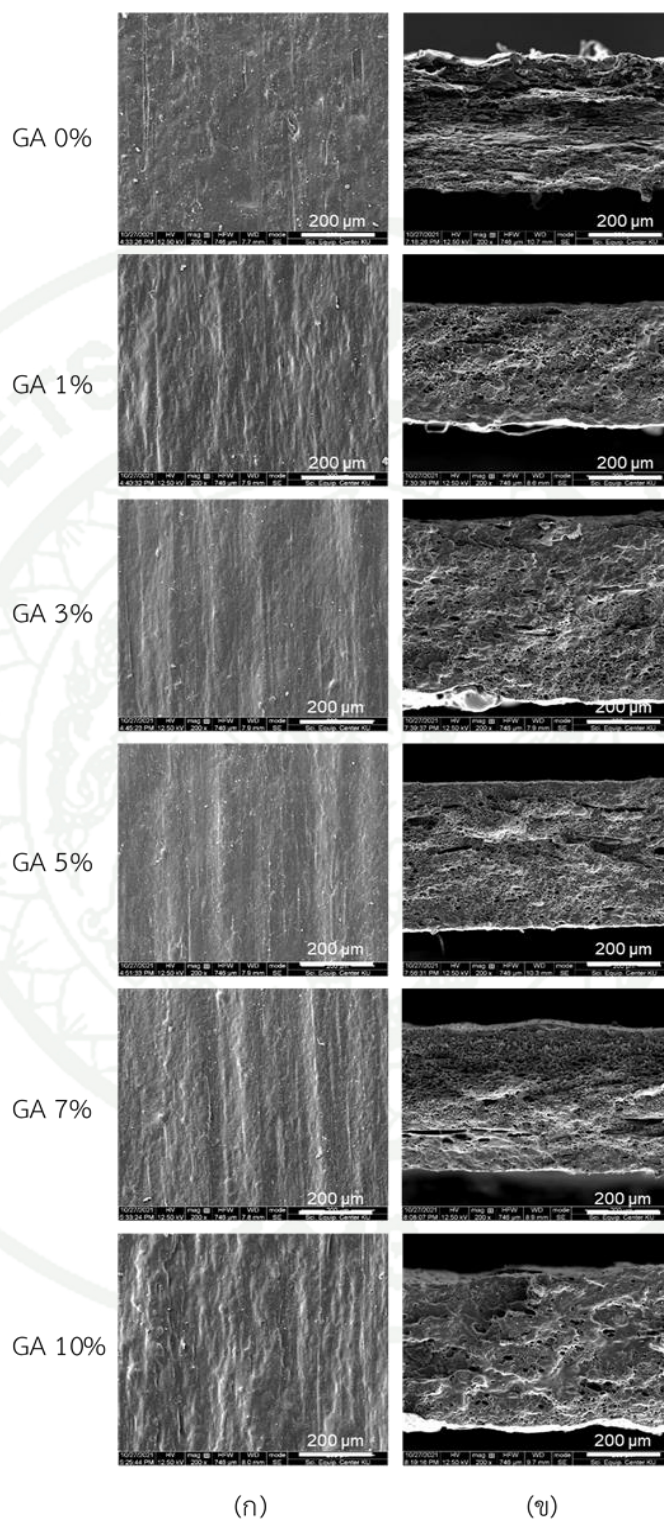
ภาพที่ 12 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงอินฟราเรดของพลาสติกฐานเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชและพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นที่มีปริมาณกรดแกลลิก (GA) ร้อยละ 0, 3, 5, 7 และ 10

2.2 สันฐานวิทยาของซีท

ภาพที่ 13 (ก) และ (ข) แสดงโครงสร้างจุลภาคพื้นผิวและหน้าตัดของซีทพลาสติกฐานเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชและพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นที่มีปริมาณกรดแกลลิกแตกต่างกัน พื้นผิวของซีทที่ไม่มีกรดแกลลิกมีความไม่เรียบเนื่องจากความไม่เข้ากันของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชและพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น ในขณะที่ซีทที่มีกรดแกลลิกร้อยละ 1 มีเส้นที่เกิดจากทิศทางการเคลื่อนที่ของซีทในกระบวนการขึ้นรูปแบบอัดรีด กรดแกลลิกเป็นโมเลกุลที่มีน้ำหนักโมเลกุลน้อยและ

ชอบน้ำ ซึ่งทำให้เกิดพันธะไฮโดรเจนและเอสเทอร์ฟิเคชันกับสตาร์ซจึงเกิดปฏิกิริยาพลาสติกไซเซชัน (Zhao et al., 2018) การเกิดปฏิกิริยาพลาสติกไซเซชันที่มากขึ้นและการหลอมที่เพิ่มขึ้นของสตาร์ซแกรนูล ทำให้เกิดการกระจายตัวที่ดีขึ้นของเครือข่ายสตาร์ซในเมทริกซ์ของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (Chatkitanan & Harnkarnsujarit, 2021) การยืดตัวระหว่างการขึ้นรูปเป็นการจัดเรียงตัวการวางแนวของเครือข่ายเทอร์โมพลาสติกสตาร์ซในทิศทางของกระบวนการ นอกจากนี้การเพิ่มกรดแกลลิกร้อยละ 3-5 ทำให้พื้นผิวของซีทเรียบขึ้น ซึ่งบ่งชี้ถึงความเข้ากันที่ดีขึ้นระหว่างส่วนผสมของพอลิเมอร์ อย่างไรก็ตามพบจุดเล็กน้อยในซีทที่เติมกรดแกลลิกร้อยละ 7 ในขณะที่ซีทที่เติมกรดแกลลิกร้อยละ 10 พบจุดจำนวนมากเนื่องจากมีกรดแกลลิกในปริมาณสูง ซึ่งปริมาณกรดแกลลิกที่มากเกินไปทำให้เกิดพื้นผิวที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน

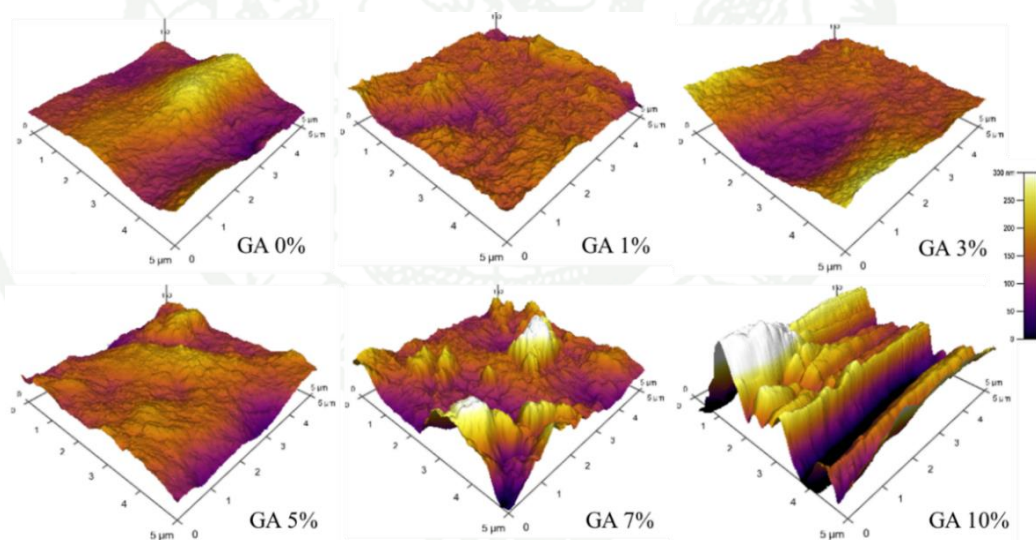
ภาพตัดขวางของซีทที่ไม่มีการเติมกรดแกลลิกมีชั้นบาง ๆ จำนวนมากของส่วนผสมพอลิเมอร์ที่เข้ากันไม่ได้ (ภาพ ข) พื้นที่ขนาดใหญ่ระหว่างชั้นทำให้เห็นถึงความไม่เข้ากันระหว่างเครือข่ายของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ซที่ชอบน้ำกับเครือข่ายของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นที่ไม่ชอบน้ำ (Codou et al., 2018; Khumkomgool et al., 2020) การเติมกรดแกลลิกช่วยลดชั้นบางๆที่แยกจากกัน ซึ่งบ่งชี้ว่าการกระจายตัวของพอลิเมอร์ดีขึ้น ซีทที่มีกรดแกลลิกร้อยละ 1 มีรูพรุนเล็กๆจำนวนมากอยู่ในเมทริกซ์ดังที่มักพบในพอลิเมอร์ที่ชอบน้ำ การระเหยของโมเลกุลของน้ำและก๊าซในระหว่างการแข็งตัวของพอลิเมอร์จากการหลอมในกระบวนการอัดรีดทำให้เกิดรูพรุนจำนวนมาก (Wangprasertkul et al., 2021) บริเวณรูพรุนที่กระจายตัวในเมทริกซ์ แสดงให้เห็นการแยกเฟสของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ซและพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นโดยปริมาณของรูพรุนขนาดเล็กมีเพิ่มขึ้นตามปริมาณกรดแกลลิกที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสะท้อนถึงการกระจายตัวของสตาร์ซได้ดีขึ้นในพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น



ภาพที่ 13 สัณฐานวิทยาของซีทจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงโครงสร้างจุลภาคของ ก) ด้านพื้นผิวหน้าของซีท ข) ด้านตัดขวางของซีทพลาสติกฐานเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชและพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นที่มีปริมาณกรดกลูตอลิก (GA) ร้อยละ 0, 1, 3, 5, 7 และ 10

2.3 สันฐานวิทยาพื้นผิว

ภาพสันฐานวิทยาพื้นผิวบ่งบอกความขรุขระพื้นผิว (surface roughness) ของซีทผสมฐานเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ และพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (ภาพที่ 14) พิกและหลุมแสดงด้วยสีที่สว่างและเข้มขึ้นตามลำดับ การเติมกรดแกลลิกในปริมาณร้อยละ 1-5 ทำให้เกิดพื้นผิวที่เรียบคล้ายกับซีทที่ไม่มีการเติมสาร ในขณะที่การเติมกรดแกลลิกจากร้อยละ 7 เป็น 10 ทำให้เกิดพื้นที่สีขาวและดำที่ใหญ่ขึ้น สีเข้มแสดงถึงช่องว่างระหว่างโมเลกุลที่เข้ากันไม่ได้และความแตกต่างของแรงดึงดูดที่เกิดจากการดัดแปลงที่สูง (Codou et al., 2018) การรวมตัวของอนุภาคของการดัดแปลงทำให้ความสูงของพื้นผิวของวัสดุเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ความเข้ากันไม่ได้ระหว่างกรดแกลลิกและพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นยังก่อให้เกิดช่องว่างระหว่างพื้นผิวหน้า (interface) ของโมเลกุล



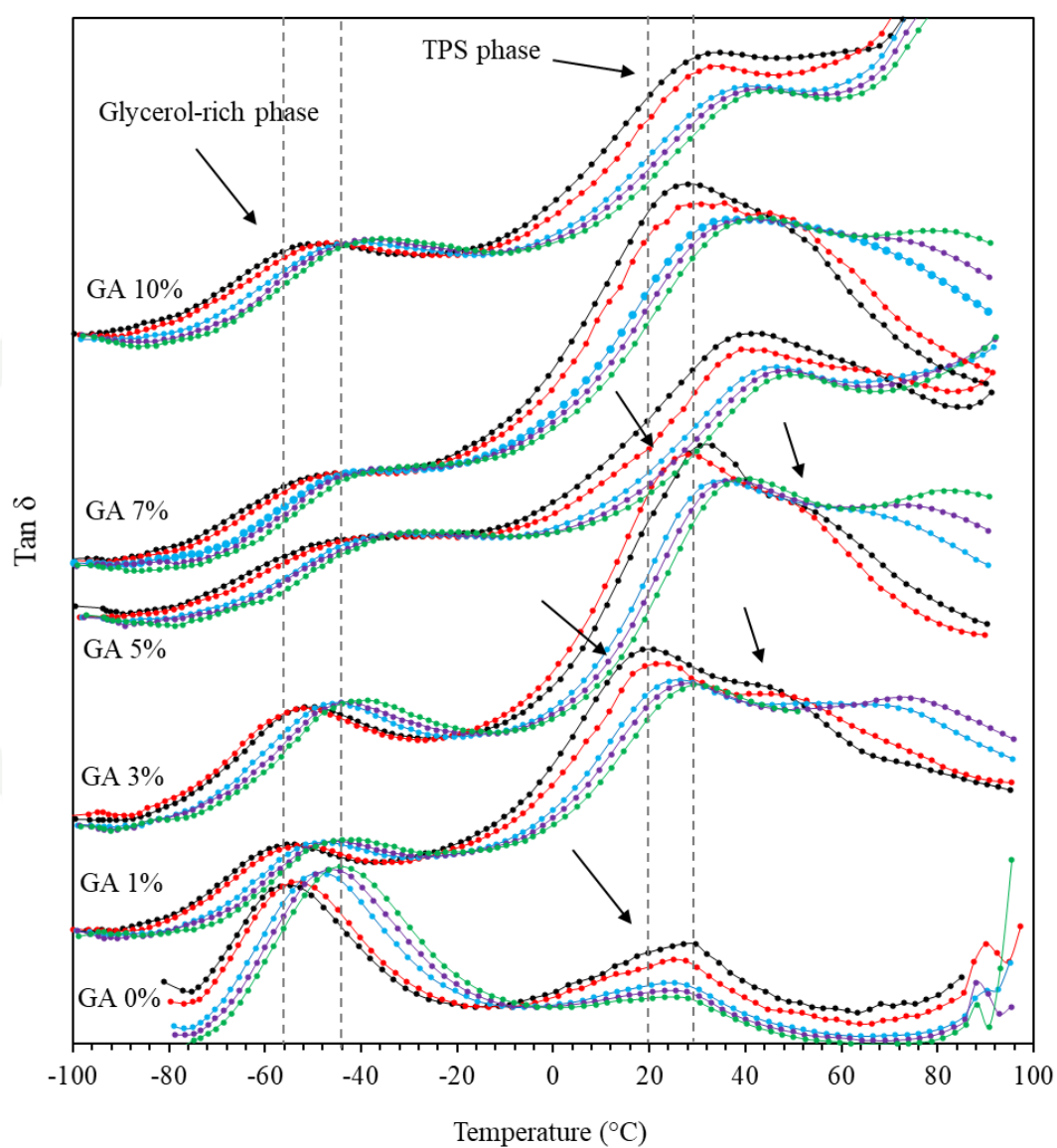
ภาพที่ 14 สันฐานวิทยาพื้นผิวจากกล้องจุลทรรศน์แบบอะตอมมิกฟอร์ซ (atomic force microscopy) ของพลาสติกฐานเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ และพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นที่มีปริมาณกรดแกลลิก (GA) ร้อยละ 0, 1, 3, 5, 7 และ 10

2.4 สมบัติเชิงกลพลวัต

การคลายตัวเชิงกล (mechanical relaxation) ที่ความถี่ต่างกันแสดงด้วยค่า $\tan \delta$ ดังภาพที่ 15 ค่าสูงสุดของ $\tan \delta$ บอกถึงอุณหภูมิการคลายตัวซึ่งขึ้นอยู่กับความถี่ ซิทที่ไม่ได้เติมกรดแกลลิกมีพีคการคลายตัวสองพีคที่อุณหภูมิต่ำกว่า 0 องศาเซลเซียส (-20 ถึง -80 องศาเซลเซียส) และประมาณ 0 ถึง 60 องศาเซลเซียสที่เกิดจากเทอร์โมพลาสติกสตาโรล และพอลิเมอร์ การคลายตัวของพอลิเมอร์เกี่ยวข้องกับอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (glass transition temperature; T_g) ซึ่งการเพิ่มอุณหภูมิสูงกว่า T_g จะทำให้สถานะคล้ายแก้วอสัณฐาน (glassy amorphous) กลายเป็นสถานะคล้ายยาง (rubbery state) การเคลื่อนที่ของโมเลกุลที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเหนือ T_g ทำให้เกิดการคลายตัวสูงสุดของพอลิเมอร์ ซึ่งกำหนดเป็นอุณหภูมิ α -relaxation หรือ " T_α " (Leelaphiwat et al., 2022; Phothisarattana et al., 2021) ส่วนผสมที่เข้ากันไม่ได้มักแสดงพฤติกรรมการคลายตัวที่ตำแหน่งต่างกัน พีคความเข้มของการคลายตัวของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น มี T_α เริ่มต้นประมาณ -50 องศาเซลเซียสรวมเข้ากับพีคความเข้มของกลีเซอรอลในพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาโรลและพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (Tanaporn Chatkitanan & Harnkarnsujarit, 2020) ความสูงของพีคการคลายตัวของเฟสที่มีกลีเซอรอลสูงกว่าเฟสของสตาโรลในพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาโรลและพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นที่ไม่มีการเติมกรดแกลลิก (TPS/LLDPE/GA 0%) แต่เมื่อเพิ่มปริมาณกรดแกลลิกทำให้ความสูงของพีคกลีเซอรอลลดลง ในขณะที่ความเข้มของ T_α เพิ่มขึ้น ความเข้มของการคลายตัวที่สูงขึ้นชี้ให้เห็นว่าความเป็นอสัณฐานของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลสูงขึ้น ในขณะที่เมื่อปริมาณกลีเซอรอลสูงขึ้นจะทำให้มีอันตรกิริยาและเกิดพลาสติกไซเซชันมากขึ้น นอกจากนี้กรดแกลลิกยังทำปฏิกิริยากับกลีเซอรอลเนื่องจากมีความชอบน้ำสูง (Zhao & Saldaña, 2019) จึงเป็นการลดการคลายตัวของกลีเซอรอล

ที่อุณหภูมิสูงกว่า 40 องศาเซลเซียสแสดงพีคการคลายตัวของซิทที่มีการเติมกรดแกลลิกเกิดปฏิกิริยาพลาสติกไซเซชันของหมู่เอซิดิลในเทอร์โมพลาสติกสตาโรลมากขึ้น เนื่องจากมีการทำปฏิกิริยากันของกรดแกลลิกกับหมู่เอซิดิล ลดอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วและอุณหภูมิการคลายตัว (Robert et al., 2012) พีคดังกล่าวมีแนวโน้มที่จะผสานเข้ากับเฟสการคลายตัวของเทอร์

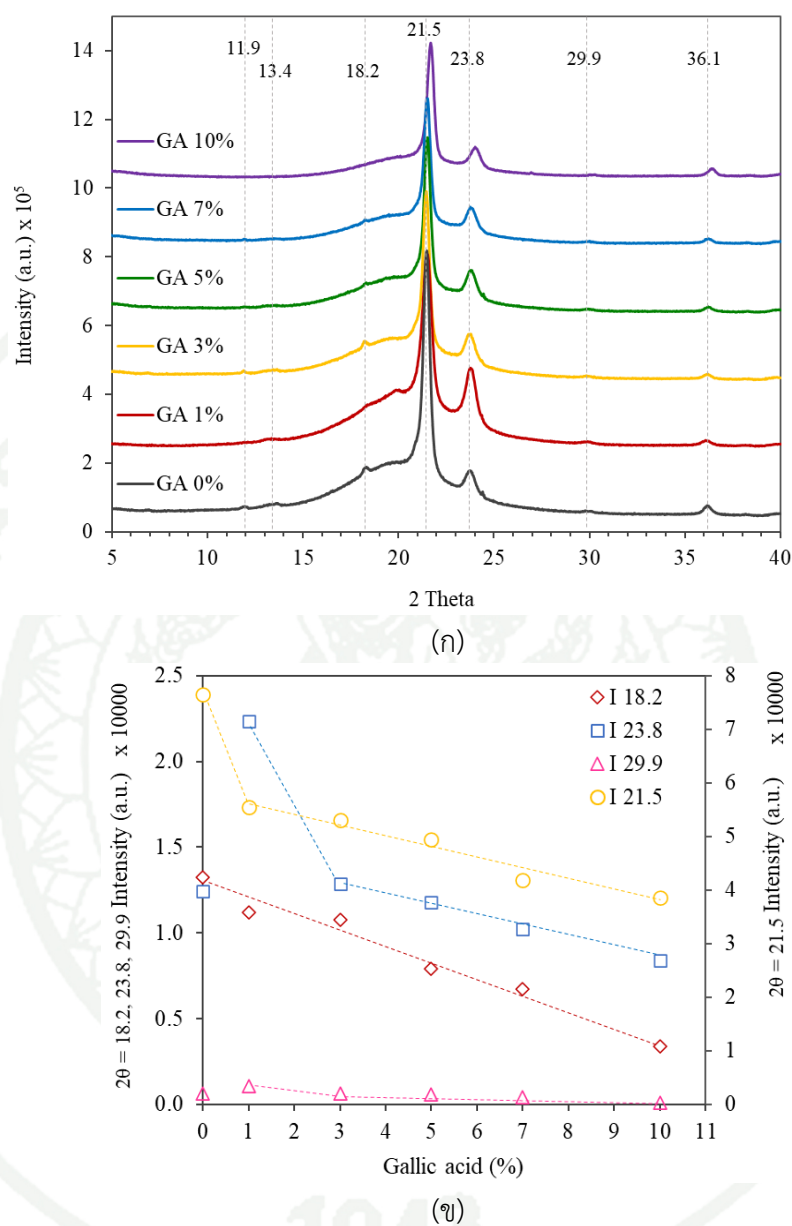
พลาสติกสตาร์ชซึ่งบ่งชี้ว่าเมื่อมีการเติมกรดแกลลิกทำให้เกิดพลาสติกไฮเซชันที่สูงขึ้นในเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช



ภาพที่ 15 สมบัติทางกลเชิงไดนามิกของพลาสติกฐานเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชและพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นที่มีปริมาณกรดแกลลิก (GA) ร้อยละ 0, 1, 3, 5, 7 และ 10

2.5 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ดังภาพที่ 16 (ก) แสดงให้เห็นพีคที่ $2\theta = 21.5, 23.8, 29.9$ และ 36.1 องศาของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นในพอลิเมอร์ผสม การเลี้ยวเบนที่ $2\theta = 13.4$ องศา แสดงผลึกชนิดวี (V-type crystal) ขณะที่พีคที่ $2\theta = 18.2$ และ 24.2 องศา มาจากผลึกชนิดบี (B-type crystal) ในเฟสของเทอร์โมพลาสติคสตาร์ช (Chen & Qu, 2004) (Nattaporn Khanonkon et al., 2016b) การเติมกรดแกลลิกร้อยละ 10 ทำให้ 2θ พีคของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นเลื่อนตำแหน่งบ่งชี้ความยาวที่ลดลงของของออร์โธรอมบิกยูนิตเซลล์ (orthorhombic unit cell) ในผลึกพอลิเอทิลีน (Moly et al., 2005) ภาพที่ 18 (ข) แสดงความเข้มการเลี้ยวเบนของพีค (intensity) จากส่วนประกอบพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น ($21.5^\circ, 23.8^\circ$ และ 29.9°) และเทอร์โมพลาสติคสตาร์ช (18.2°) ของซีท การเติมกรดแกลลิกร้อยละ 1 ทำให้ความเป็นผลึกของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นลดลงอย่างเห็นได้ชัด ในขณะที่เมื่อเพิ่มกรดแกลลิกขึ้นถึงร้อยละ 10 จะลดความเข้มของการเลี้ยวเบนซึ่งบ่งชี้ความเป็นผลึกที่ลดลง เนื่องจากการหลอมและการเกิดสตาร์ชอสันฐานที่เพิ่มขึ้นในเครือข่ายของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น ทำให้ลดความเป็นผลึกของพอลิเอทิลีนได้อย่างมาก เทอร์โมพลาสติคสตาร์ชทำหน้าที่เป็นเฟสที่กระจายตัวในเมทริกซ์ผสมในซีทที่ไม่มีการเติมกรดแกลลิก ในขณะที่การปรับปรุงการหลอมเหลว การกระจายตัวของสายพอลิเมอร์สตาร์ชซึ่งเกี่ยวพันกัน และลดการสร้างพันธะที่ไม่ชอบน้ำในสายพอลิเอทิลีน เทอร์โมพลาสติคสตาร์ชได้สร้างเครือข่ายที่เชื่อมต่อกันมากขึ้นและกลายเป็นเฟสที่เกี่ยวพันกับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น การเติมกรดแกลลิกมีผลทำให้อัตราส่วนระหว่างเทอร์โมพลาสติคสตาร์ชและพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นลดลง ซึ่งไม่มีผลกระทบโดยตรงต่อโครงสร้างผลึกของสตาร์ช แต่เป็นการดัดแปรระดับความเป็นผลึกของพอลิเอทิลีน

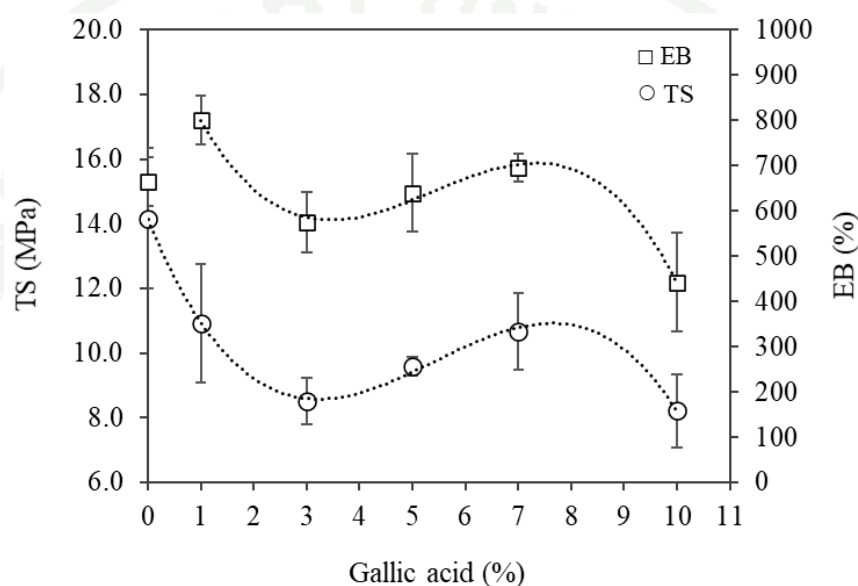


ภาพที่ 16 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (ก) ดิฟแฟรคโตแกรม (diffractogram) และ (ข) ความเข้มของการเลี้ยวเบนที่ 2 ทีตา (theta) ของพลาสติกฐานเทอร์โมพลาस्टิกสตาร์ช และพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นผสมกรดแกลลิกร้อยละ 0, 1, 3, 5, 7 และ 10

2.6 สมบัติเชิงกล

การทดสอบสมบัติความต้านทานแรงดึงแสดงเป็นค่าความต้านทานแรงดึงยืด (tensile strength, TS) และร้อยละการยืดตัว (elongation at break, EB) ดังภาพที่ 17 จากผลการทดลองพบว่าพลาสติกฐานเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ และพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นที่ผสมกรดกลลิกร้อยละ 1 มีค่าความต้านทานแรงดึงยืดลดลงในขณะที่ร้อยละการยืดตัวเพิ่มขึ้น ซึ่งให้เห็นถึงความแข็งแรงที่ลดลงของเมทริกซ์ โดย Sun et al. (2014) รายงานว่าซีพีไคโตซานที่ผสมกรดกลลิกร้อยละ 1 มีค่าความต้านทานแรงดึงยืดเพิ่มขึ้นในขณะที่เมื่อปริมาณกรดกลลิกมากขึ้นทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงยืดลดลง เนื่องจากกรดกลลิกสร้างพันธะกับเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ เกิดปรากฏการณ์พลาสติกไซเซชันและทำให้จุดหลอมเหลวลดลง จึงทำให้อนุภาคของสตาเร็กซ์หลอมได้ง่ายขึ้น และสร้างเครือข่ายพอลิเมอร์สตาเร็กซ์กระจายตัวในเมทริกซ์ของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น ความแข็งแรงของพันธะไฮโดรเจนในสายโซ่ของเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์มีส่วนทำให้โครงสร้างมีความแข็งแรงและยืดหยุ่นน้อยกว่าพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (Sabetzadeh et al., 2017) การพันกันของสายโซ่เทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่เพิ่มขึ้น ช่วยลดความยืดหยุ่นของเครือข่ายพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นซึ่งทำให้เกิดความแข็งแรงของโครงสร้าง การเพิ่มกรดกลลิกถึงร้อยละ 3 ทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงยืด และร้อยละการยืดตัวลดลง การสร้างเครือข่ายอย่างต่อเนื่องของเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ในพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นทำให้เกิดความไม่เป็นเนื้อเดียวกันจึงลดความแข็งแรงเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์และพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น นอกจากนี้การเพิ่มกรดกลลิกถึงร้อยละ 7 ทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงยืด และร้อยละการยืดตัวเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ซึ่งการเติมกรดกลลิกในปริมาณที่มากขึ้นอาจไม่ได้ทำให้เกิดการสร้างเครือข่ายในพอลิเมอร์ แต่กรดกลลิกอาจทำหน้าที่เป็นสารตัวเติม (filler) ที่ช่วยเพิ่มความแข็งแรง อีกทั้งกรดกลลิกมีส่วนประกอบของหมู่คาร์บอกซิลิกและหมู่ไฮดรอกซิล ซึ่งดูดซับน้ำได้ดีและทำให้เกิดพลาสติกไซเซชัน (Pelissari et al., 2011; Sun et al., 2014) โมเลกุลของพอลิเมอร์ง่ายต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเมื่อถูกกระทำจากแรงภายนอกและการปรับปรุงความแข็งแรงทำให้เกิดการยืดตัวได้มากขึ้น (Gontard, Guilbert & Cuq, 1993) อย่างไรก็ตามเมื่อเติมกรดกลลิกร้อยละ 10 ทำให้สมบัติเชิงกลลดลงเล็กน้อยเนื่องจากความไม่เป็นเนื้อเดียวกันของซีพีไคโตซานในการดึง

ตัวอย่างจึงไม่สามารถกระจายแรงผ่านเครือข่ายของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชและพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น ผลการวิจัยชี้ให้เห็นถึงความซับซ้อนของการจัดเรียงตัวของโครงข่ายพอลิเมอร์พลาสติกไฮเซชัน สารตัวเติมเสริมแรง และโครงสร้างจุลภาคต่อคุณสมบัติเชิงกลของพลาสติก



ภาพที่ 17 สมบัติเชิงกลของพลาสติกฐานเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช และพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นผสมกรดแกลลิคร้อยละ 0, 1, 3, 5, 7 และ 10

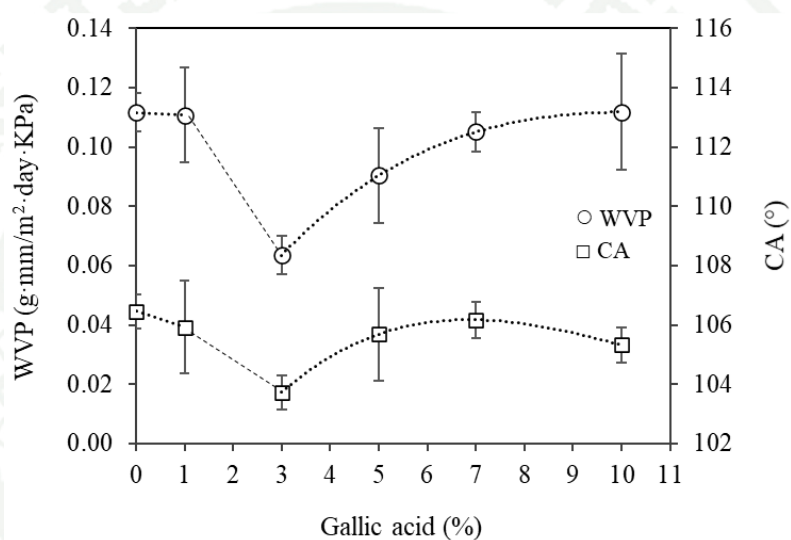
2.7 มุมสัมผัสและสมบัติการซึมผ่านของไอน้ำ

ค่ามุมสัมผัสของน้ำบนพื้นผิวของซีทแสดงถึงความชอบน้ำหรือไม่ชอบน้ำของพื้นผิวของซีท โดยค่ามุมสัมผัสของซีทที่เติมกรดแกลลิคร้อยละ 1-10 (ภาพที่ 18) อยู่ในช่วง 104-106 องศา ซึ่งมีความหมายว่าพื้นผิวของซีทมีลักษณะที่คล้ายคลึงกันกับพื้นผิวของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชและพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น ซึ่งอธิบายด้วยสมมติฐานว่า เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ชอบน้ำเกี่ยวข้องกับโครงข่ายของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นภายใต้ผิวหน้า (surface) ที่สัมผัสกับบรรยากาศ ทำให้เกิดชั้นที่ไม่ชอบน้ำบนพื้นผิวของซีท (Tanaporn Chatkitanan & Harnkarnsujarit, 2020) การเติมกรดแกลลิคร้อยละ 3 ทำให้ค่ามุมสัมผัสลดลง 2 องศา อย่างไรก็ตาม

ตามทุกตัวอย่างถือเป็นพื้นผิวที่ไม่ชอบน้ำเพราะค่ามุมสัมผัสมากกว่า 90 องศา การเติมกรดแกลลิคร้อยละ 10 ช่วยให้พื้นผิวไม่ชอบน้ำเช่นเดียวกับซีทพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น แสดงให้เห็นว่ากรดแกลลิคเกิดพันธะกับทั้งส่วนที่ชอบน้ำของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซ และเมทริกซ์พอลิเอทิลีน ความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นทำให้เกิดการสร้างชั้นที่ไม่ชอบน้ำของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นที่บริเวณผิวหน้าที่สัมผัสกับอากาศแวดล้อม

กลไกการซึมผ่านของไอน้ำผ่านเมทริกซ์พอลิเมอร์ประกอบด้วย การดูดซับบนพื้นผิว (absorption) การแพร่ผ่าน (diffusion) และการคายการดูดซับ (desorption) โดยจากการทดลองพบว่าค่ามุมสัมผัสไม่มีความสัมพันธ์กับการซึมผ่านของไอน้ำซึ่งบ่งชี้ว่าความไม่ชอบน้ำพื้นผิวอาจไม่ได้ส่งผลต่อค่าการซึมผ่านของไอน้ำโดยตรง ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าซีทที่มีการเติมกรดแกลลิคร้อยละ 3 มีค่าการซึมผ่านของไอน้ำลดลงอย่างมากเนื่องจากซีทมีการเกิดรูพรุนเล็ก ๆ อยู่ในเมทแทนที่รูพรุนขนาดใหญ่ทำให้การซึมผ่านลดลง ผลการทดลองแสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวที่ดีของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซในพอลิเมอร์ผสม การกระจายตัวของพอลิเมอร์สองชนิดที่ไม่เข้ากันทำให้เกิดการแยกชั้นของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นหลายชั้น ซึ่งมีสมบัติไม่ชอบน้ำทำให้สามารถป้องกันการซึมผ่านของไอน้ำ ในทางกลับกันเมื่อเติมกรดแกลลิคเป็นร้อยละ 10 ทำให้เกิดช่องว่างขนาดใหญ่ซึ่งสอดคล้องกับค่าการซึมผ่านของไอน้ำที่เพิ่มมากขึ้น ช่องว่างขนาดใหญ่เกิดจากการแยกเฟสของส่วนที่เข้ากันไม่ได้ของพอลิเมอร์จึงทำให้การแพร่กระจายของไอน้ำเร็วขึ้น (Otoni et al., 2016) ความเป็นผลึกของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาโรซและพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นลดลงเมื่อปริมาณกรดแกลลิคมากขึ้นซึ่งเป็นการเพิ่มการซึมผ่านของสารระเหย นอกจากนี้ความชอบน้ำของหมู่ไฮดรอกซิลและหมู่คาร์บอกซิลิกอิสระในโมเลกุลกรดแกลลิคเพิ่มความสามารถในการซึมผ่านของน้ำเข้าไปในเมทริกซ์ พลาสติกไฮเซชันของน้ำและกรดแกลลิคยังเพิ่มสภาพการเคลื่อนที่ของโมเลกุล (molecular mobility) ซึ่งทำให้การซึมผ่านของสารระเหย และไอน้ำเร็วขึ้น (Pelissari et al., 2011) Ahn et al. (2016) รายงานว่าค่าการซึมผ่านของไอน้ำเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณกรดแกลลิคในซีทพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น เนื่องจากหมู่คาร์บอกซิลิกและหมู่ไฮดรอกซิลในกรดแกลลิคเพิ่มความชอบน้ำของเมทริกซ์และเพิ่มการซึมผ่านไอน้ำ ในทางกลับกัน Singh et al. (2020) รายงานว่าซีทไคโตซานที่มีความชอบน้ำสูงมีค่าการซึมผ่านของไอน้ำลดลงเมื่อเติมกรดแกลลิคมากขึ้น อย่างไรก็ตามกรดแกลลิคสามารถละลายและผสมกับไคโตซานได้ดีทำให้เข้ากันได้ดีในวิธีขึ้นรูปแบบ

การหล่อแบบสารละลาย (solution casting) ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ศึกษาและขึ้นรูปซีทด้วยกระบวนการที่ไม่มีตัวทำละลายโดยกระบวนการอัดรีด การศึกษานี้ประกอบด้วยเมทริกซ์ของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ชอบน้ำและพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นที่ไม่ชอบน้ำซึ่งทำให้ยากต่อการซึมผ่านของไอน้ำ ดังนั้นโครงสร้างจุลภาคและความชอบน้ำของเมทริกซ์มีผลสำคัญต่อการซึมผ่านของไอน้ำในพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชและพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น



ภาพที่ 18 สมบัติการซึมผ่านของไอน้ำและมุมสัมผัสของพลาสติกฐานเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชและพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นผสมกรดแกลลิกร้อยละ 0, 1, 3, 5, 7 และ 10

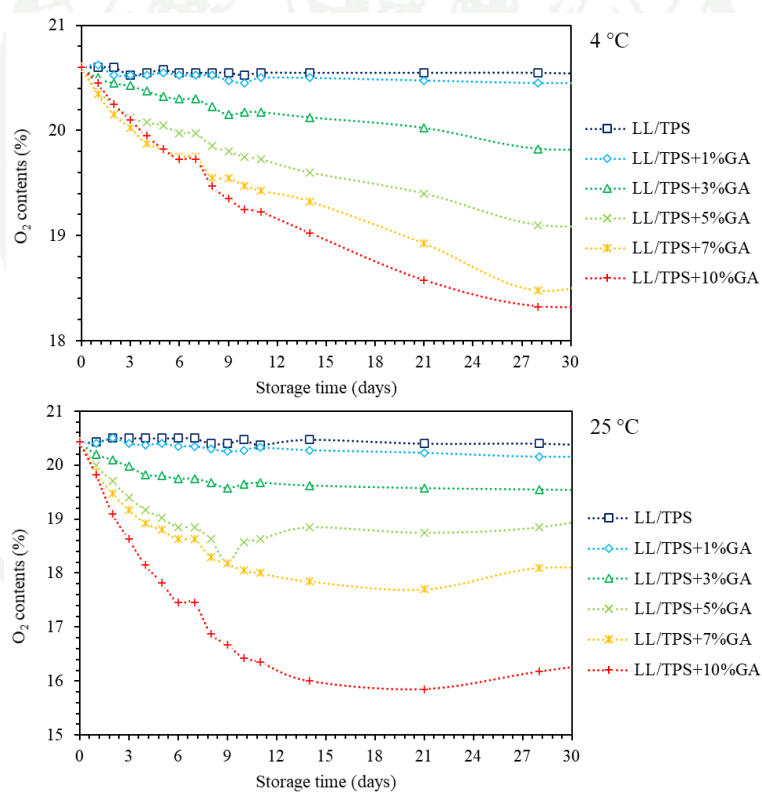
2.8 ประสิทธิภาพดูดซับออกซิเจนในบรรจุภัณฑ์

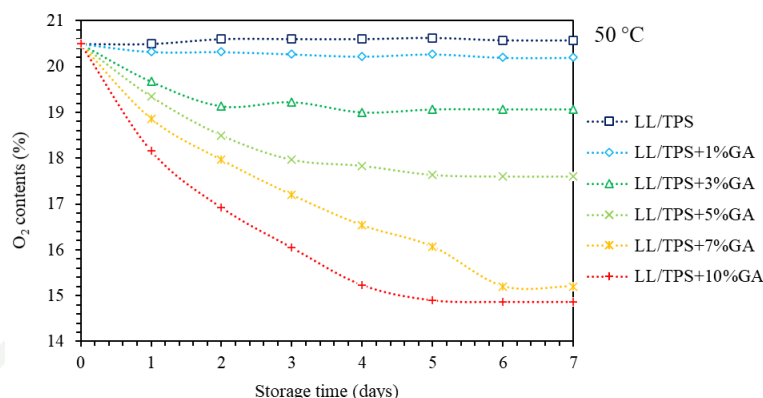
การผสมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชและพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นกับกรดแกลลิกผลิตภัณฑ์ที่สามารถดูดซับออกซิเจนดังแสดงในภาพที่ 19 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพการดูดซับออกซิเจนของซีทระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิสูงถึง 50 องศาเซลเซียส สะท้อนการประยุกต์ใช้กับอาหารร้อนและเครื่องดื่ม ช่องว่างภายในบรรจุภัณฑ์เริ่มต้นมีบรรยากาศที่ประกอบด้วยก๊าซออกซิเจนประมาณร้อยละ 20.95 พลาสติกผสมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชและพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นที่มีกรดแกลลิกช่วยลดระดับออกซิเจนระหว่างการจัดเก็บ โดยมีปริมาณออกซิเจนที่เหลืออยู่ต่ำสุดขึ้นอยู่กับปริมาณกรดแกลลิกและอุณหภูมิในการเก็บรักษา การเพิ่มปริมาณกรดแกลลิกทำให้

ความสามารถในการดูดซับออกซิเจนสูงขึ้น ส่งผลให้ออกซิเจนตกค้างในช่องว่างภายในของบรรจุภัณฑ์ลดลง กรดแกลลิกสามารถถูกออกซิไดซ์ได้โดยออกซิเจนและผลิตไฮโดรเปอร์ออกไซด์อิสระ ($\text{HO}_2\cdot$) ทำให้เกิดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) และควิโนนตามมาซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับออกซิเจน (Ahn et al., 2016) ออกซิเจนเป็นโมเลกุลที่ไม่มีขั้วจะแพร่ผ่านพื้นผิวที่ไม่ชอบน้ำของซีทเทอร์โมพลาสติกสตาบิลิซเซอร์และพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นและทำปฏิกิริยากับกรดแกลลิกในเมทริกซ์ของพอลิเมอร์ การลดลงของออกซิเจนในช่องว่างของบรรจุภัณฑ์สัมพันธ์กับการก่อตัวของเม็ดสีเช่นควิโนน ดังนั้น สีของซีทจึงเข้มขึ้นเมื่อสัมผัสกับออกซิเจนนานขึ้น (Pant et al., 2017) Singh et al. (2020) ได้พัฒนาซีทโคโตะซานที่มีกรดแกลลิกโดยวิธีการขึ้นรูปแบบการหล่อสารละลาย (solution casting) และพบอัตราการดูดซับออกซิเจนสูงสุดที่ 2.66 มิลลิลิตรออกซิเจน/กรัม·วัน และปริมาตร 19.55 มิลลิลิตรออกซิเจน/กรัม ในซีทที่มีปริมาณกรดแกลลิกร้อยละ 20 นอกจากนี้อุณหภูมิที่สูงขึ้นยังทำให้ความสามารถในการดูดซับออกซิเจนสูงขึ้น เนื่องจากอัตราการเกิดปฏิกิริยาระหว่างกรดแกลลิกและโมเลกุลออกซิเจนที่เพิ่มขึ้น เมื่อเก็บตัวอย่างเป็นเวลา 5 วัน ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ปริมาณของออกซิเจนคงเหลือประมาณร้อยละ 15 ในซีทที่มีการเติมกรดแกลลิกร้อยละ 10 Pant et al. (2017) พบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับออกซิเจนดีขึ้น 2 และ 5 เท่า ด้วยการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 21 องศาเซลเซียส และ 38 องศาเซลเซียส เมื่อเทียบกับ 4 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

ภาพที่ 19 บ่งชี้ถึงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณออกซิเจนกับอัตราการดูดซับออกซิเจน โดยปริมาณออกซิเจนในบรรจุภัณฑ์ลดลงที่ทุกอุณหภูมิการเก็บรักษา เมื่ออุณหภูมิการเก็บรักษาที่สูงขึ้นทำให้อัตราการดูดซับออกซิเจนเร็วขึ้นและสามารถดูดซับออกซิเจนได้มากขึ้น ซีทที่มีปริมาณกรดแกลลิกร้อยละ 10 มีค่าปริมาณออกซิเจนเบี่ยงเบนจากแนวโน้มเล็กน้อย เนื่องจากการผสมและความเข้ากันได้ไม่ดีของกรดแกลลิกความเข้มข้นสูงในเมทริกซ์ของพอลิเมอร์ทำให้เกิดการจับตัวเป็นก้อนขนาดใหญ่ส่งผลให้พื้นที่ผิวในการดูดซับออกซิเจนลดลง การจับตัวเป็นก้อนของกรดแกลลิกทำให้การทำปฏิกิริยาระหว่างออกซิเจนกับกรดแกลลิกน้อยลงเนื่องจากพื้นที่ผิวสัมผัสลดลง ส่งผลให้มีออกซิเจนเหลือมากกว่าซีทที่มีปริมาณกรดแกลลิกสูง

อัตราเริ่มต้นของการดูดซับออกซิเจนเพิ่มขึ้นตามสมการพหุนามอันดับ 2 อัตราการดูดซับเพิ่มขึ้น 3.63 และ 3.58 เท่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 4 เป็น 25 และ 25 เป็น 50 องศาเซลเซียส ตามลำดับ Pant et al. (2018) ระบุอัตราการดูดซับออกซิเจนที่สูงขึ้นตามจลนพลศาสตร์อันดับสองของผงกรดแกลลิกที่อุณหภูมิการเก็บรักษาสูงถึง 38 องศาเซลเซียส เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะเพิ่มสภาพการเคลื่อนที่ของโมเลกุลและอัตราการแพร่กระจายของโมเลกุลผ่านเมทริกซ์ซึ่งทำให้เกิดปฏิกิริยาสูงขึ้น นอกจากนี้ อุณหภูมิที่สูงขึ้นยังลดมุมและความแข็งแรงของพันธะไฮโดรเจนในพอลิเมอร์ (Moskala et al., 1984; Skrovanek et al., 1985) ซึ่งอาจเป็นการลดความแข็งแรงในพันธะของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลไรเซอร์และกรดแกลลิกซึ่งช่วยในการทำปฏิกิริยากับออกซิเจน



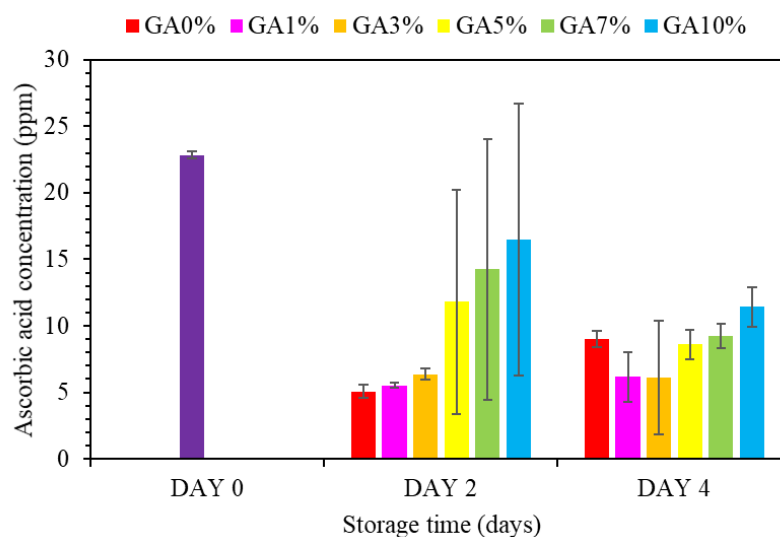


ภาพที่ 19 ประสิทธิภาพดูดซับออกซิเจนในบรรจุภัณฑ์ของพลาสติกฐานเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ และ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นที่มีปริมาณกรดแกลลิก (GA) ร้อยละ 0, 1, 3, 5, 7 และ 10 ใน สภาวะอุณหภูมิ 4, 25 และ 50 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 100

2.9 ความคงตัวของวิตามินซี

ภาพที่ 20 แสดงปริมาณวิตามินซี (Ascorbic acid) ในบรรจุภัณฑ์ที่มีการประยุกต์ใช้ซีทฐาน เทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ และพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นที่มีปริมาณกรดแกลลิก (GA) ร้อย ละ 0, 1, 3, 5, 7 และ 10 เป็นแผ่นรองใต้ฝา ในสภาวะอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส จากผลการ ทดลองพบว่า ปริมาณวิตามินซีลดลงเมื่อเวลาการเก็บรักษามากขึ้น แต่ในซีทที่มีการเติมกรดแกลลิกมี ปริมาณวิตามินซีคงเหลือมากกว่าซีทที่ไม่มีการเติม โดยเฉพาะซีทที่มีการเติมกรดแกลลิกร้อยละ 10 มี ปริมาณวิตามินซีคงเหลือสูงสุด 16.51 และ 11.43 ppm ในระยะเวลาการเก็บรักษา 2 และ 4 วัน ตามลำดับ จากความเข้มข้นเริ่มต้นของวิตามินซีในบรรจุภัณฑ์ 22.85 ppm ซึ่งมีประสิทธิภาพในการ คงความคงตัวของวิตามินซีได้ถึงร้อยละ 73.11 และ 50.62 ในระยะเวลาการเก็บรักษา 2 และ 4 วัน ตามลำดับ นอกจากนี้ซีทที่มีการเติมกรดแกลลิกร้อยละ 1, 3, 5 และ 7 ยังมีความสามารถในการ รักษาความคงตัวของวิตามินซีได้มากขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณกรดแกลลิกมากขึ้น ซึ่งให้เห็นว่าซีทที่มี ประสิทธิภาพการดูดซับออกซิเจนสูงจะทำให้ออกซิเจนที่คงเหลืออยู่ในช่องว่างของบรรจุภัณฑ์ต่ำลงจึง ส่งผลให้ความเข้มข้นของวิตามินซีมากขึ้นเนื่องมาจากการลดอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ระหว่างวิตามินซีที่เป็นสารที่ไวต่อออกซิเจน คล้ายคลึงกับ Zerdin et al. (2003) รายงานว่าเมื่อบรรจุ น้ำส้มในถุงซีทดูดซับออกซิเจนจะทำให้อัตราการออกซิเดชันของกรดแอสคอร์บิกในน้ำส้มต่ำกว่าเมื่อ

บรรจุในถุงที่ไม่สามารถดูดซับออกซิเจนได้ โดยอัตราการออกซิเดชันของแอสคอร์บิกขึ้นอยู่กับปริมาณออกซิเจน อุณหภูมิ และระยะเวลาในการเก็บรักษา



ภาพที่ 20 ปริมาณวิตามินซี (Ascorbic acid) ในบรรจุภัณฑ์ที่มีการประยุกต์ใช้พลาสติกฐานเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ และพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นที่มีปริมาณกรดแกลลิก (GA) ร้อยละ 0, 1, 3, 5, 7 และ 10 เป็นแผ่นรองใต้ฝา ในสภาวะอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เก็บรักษาเป็นเวลา 4 วัน

3. ซีทพลาสติกฐานเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์และพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นผสมไฟโรกลลอล

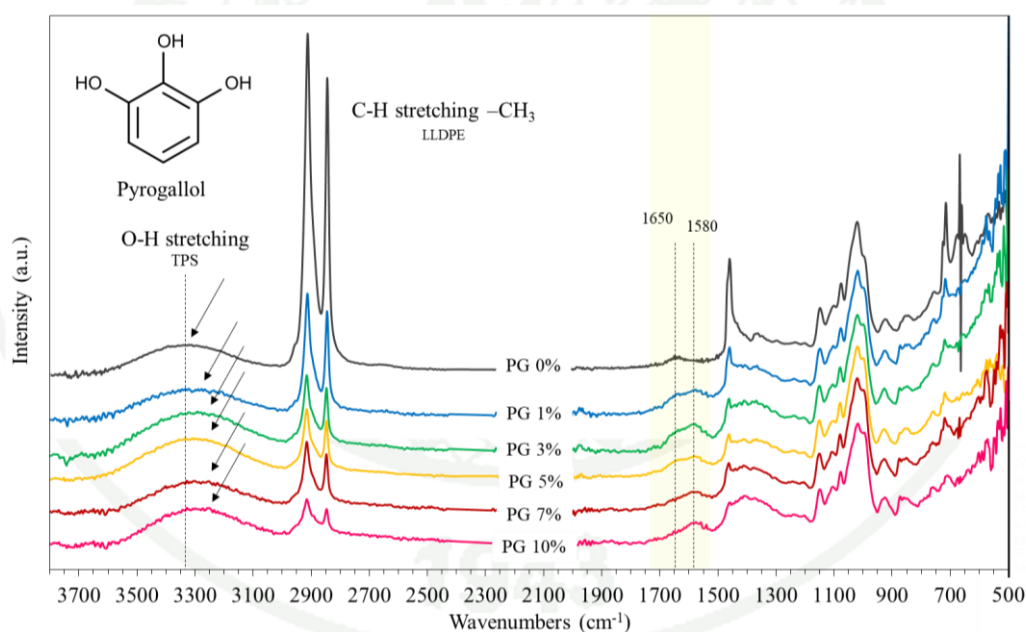
3.1 การเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างทางเคมี

สเปกตรัมการดูดกลืนแสงอินฟราเรดของเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์และพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นที่มีเติมไฟโรกลลอลแสดงดังภาพที่ 21 การสั่นของพันธะ C-O stretching ของสายโซ่หลักของกลูโคสในเฟสของเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์แสดงพีคที่มีความสูงสูงสุดที่ 1024 cm^{-1} (Chatkitanan & Harnkarnsujarit, 2021) การเติมไฟโรกลลอลร้อยละ 1-10 ทำให้พีคดังกล่าวเคลื่อนไปทางเลขคลื่นต่ำลง ที่ 1020 cm^{-1} ซึ่งบ่งชี้ถึงการเกิดปฏิกิริยาระหว่างไฟโรกลลอลกับ

สตาร์ชซึ่งมีการดัดแปลงโครงสร้างของสายสตาร์ช แถบดูดกลืนสเปกตรัมช่วงระหว่าง 3000 - 3600 ซม.⁻¹ แสดงถึงการสั่นของพันธะ O-H stretching ของเพสเตอร์โมพลาสติคสตาร์ชที่มีกลุ่มไฮดรอกซิลจำนวนมาก ความกว้างพีคมีผลต่อพันธะไฮโดรเจนระหว่างและภายในโมเลกุล ในขณะที่มีพันธะไฮโดรเจนที่เพิ่มขึ้นทำให้แถบการดูดซับอินฟราเรดเคลื่อนไปทางเลขคลื่นที่ต่ำกว่า (Flakus & Chelmecki, 2002; Mohammed-Ziegler & Billes, 2002; Wongphan et al., 2022) การเกาะกลุ่มกันของไฟโรเกลลอลทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของพีค O-H stretching ไปทางเลขคลื่นที่ต่ำกว่า ซึ่งชี้ให้เห็นถึงการเกิดปฏิกิริยาระหว่างเทอร์โมพลาสติคสตาร์ช (ประกอบด้วยสตาร์ชและกลีเซอรอล) และไฟโรเกลลอลผ่านพันธะไฮโดรเจน

น้ำที่ดูดซับ (bounded water) อยู่ในซีททำให้เกิดการดูดกลืนแสงอินฟราเรดสูงสุดที่ความยาวคลื่น 1650 ซม.⁻¹ ในซีทที่ไม่มีการเติมไฟโรเกลลอล แสดงการสั่นของโมเลกุล H₂O ความเข้มของแถบที่ 1650 ซม.⁻¹ เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณไฟโรเกลลอลเพิ่มขึ้น แสดงถึงปริมาณน้ำในซีทที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากความชอบน้ำที่เพิ่มขึ้นของพอลิเมอร์เพราะโมเลกุลของไฟโรเกลลอลมีหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) จำนวน 3 หมู่ ซึ่งสร้างพันธะไฮโดรเจนกับน้ำ การสั่นของพันธะ -C=C- ในวงแหวนเบนซินอโรมาติกของไฟโรเกลลอลแสดงในช่วงความยาวคลื่น 1550 ถึง 1615 ซม.⁻¹ (Mohammed-Ziegler & Billes, 2002; Ricci et al., 2015) ความเข้มของความยาวคลื่นที่ 1580 ซม.⁻¹ เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณไฟโรเกลลอลเพิ่มขึ้นเนื่องจากจำนวนวงแหวนเบนซินที่สูงขึ้นในเมทริกซ์พอลิเมอร์ซึ่งสอดคล้องกับการดูดกลืนแสงที่เพิ่มขึ้นที่ 876 ซม.⁻¹ เนื่องจากการสั่นแบบสมมาตรของ -C-O จากโครงสร้างพีนอลิก (Doncea & Ion, 2014) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นแสดงพีคการดูดกลืนสูงสุดที่ 2916 และ 2948 ซม.⁻¹ ที่เกิดจากการสั่นของ C-H stretching แบบอสมมาตรและสมมาตรของกลุ่มเมทิล (-CH₃) ความเข้มระหว่างแถบเหล่านี้เพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของไฟโรเกลลอล ความเข้มที่เปลี่ยนแปลงแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของรูปแบบในปลายสายโซ่หรือกลุ่มเทอร์มินัล -CH₃ ในเฟสของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นและการเกิดปฏิกิริยาระหว่างไฟโรเกลลอลและพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น การเปลี่ยนแปลงของแถบ C-H stretching เกิดจากการไฮเปอร์คอนจูเกชัน (hyperconjugation) ของออร์บิทัลของกลุ่มเมทิลในพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น ไปยัง π อิเล็กตรอน (C=C) ส่งผลให้มีการถ่ายโอนอิเล็กตรอนจาก C-H ไปยัง C-C ในโมเลกุลอื่นทำให้

เกิดปฏิกิริยา (Gussoni, 1999) ไพโรแกลลอลประกอบด้วยวงแหวนเบนซีนอะโรมาติกซึ่งสามารถถ่ายโอนอิเล็กตรอนที่ทำหน้าที่เป็นตัวรีดิวซ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Ramasarma et al., 2015; Shin et al., 2019) อันตรกิริยาไฮโดรโฟบิก (hydrophobic interaction) ของไฮโดรคาร์บอน (C-H) ระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นและไพโรแกลลอลเกิดขึ้นหลังจากการเย็นตัวในกระบวนการอัดรีดและมีความคงตัวที่อุณหภูมิต่ำ (Shin et al., 2019) ผลลัพธ์ชี้ให้เห็นถึงปฏิกิริยาระหว่างวงแหวนอะโรมาติกในสายโซ่ไพโรแกลลอลและพอลิเอทิลีน ความเข้มลดลงเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของไพโรแกลลอลถึงร้อยละ 3 ในช่วงการดูดกลืนที่ความยาวคลื่นสูงสุด 1024 cm^{-1} และ 1001 cm^{-1} ที่เกิดจากเฟสของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช บ่งชี้ว่าไพโรแกลลอลเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเฟสเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช อันเนื่องมาจากการเกิดปฏิกิริยาผ่านทางพันธะไฮโดรเจน

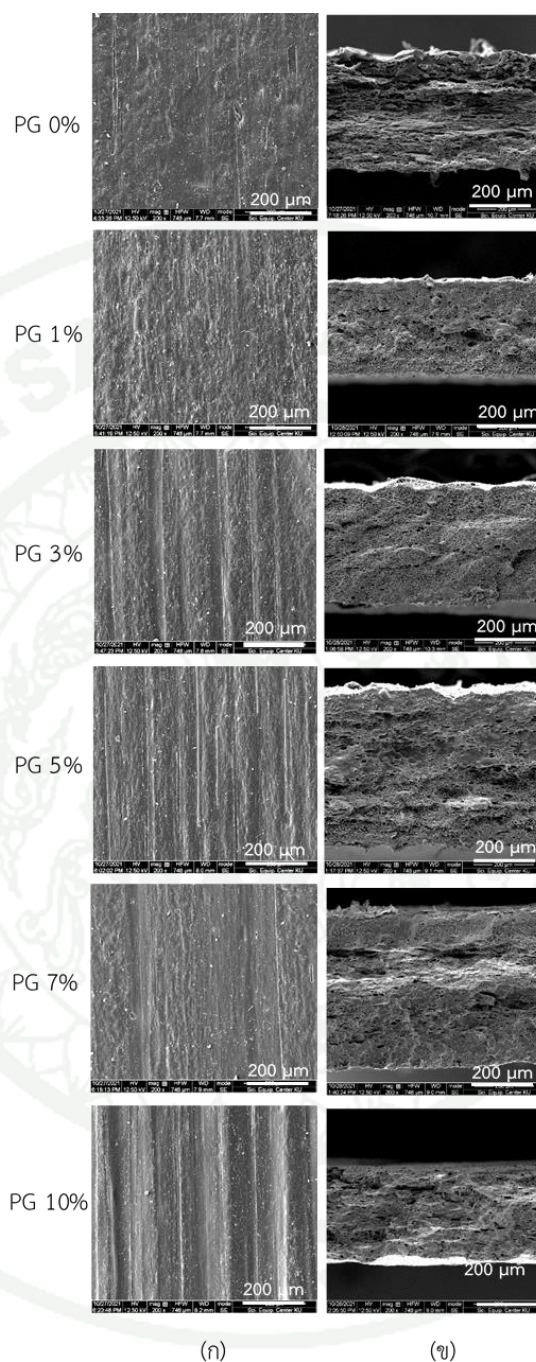


ภาพที่ 21 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงอินฟราเรดของพลาสติกฐานเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชและพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นที่มีปริมาณไพโรแกลลอล (PG) ร้อยละ 0, 1, 3, 5, 7 และ 10

3.2 สันฐานวิทยาของซีท

โครงสร้างจุลภาคของซีทแสดงดังภาพที่ 22 ภาพตัดขวางของซีทที่ไม่ได้เติมไฟโรแกลลอล แสดงการแยกเฟสอย่างชัดเจนเนื่องจากความไม่เข้ากันระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ชอบน้ำกับ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นที่ไม่ชอบน้ำ มีช่องว่างขนาดใหญ่หลายช่อง และรูพรุนขนาดเล็ก อยู่ในเมทริกซ์ของพอลิเมอร์ การเติมไฟโรแกลลอลมากถึงร้อยละ 3 ช่วยลดช่องว่างและทำให้ โครงสร้างจุลภาคเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น มีการทำปฏิกิริยาของไฟโรแกลลอลกับเฟสของเทอร์โม พลาสติกสตาร์ชและพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ ดังนั้นไฟโรแกลลอลจึงทำหน้าที่เป็นตัวประสานให้ พอลิเมอร์ที่เข้ากันไม่ได้สามารถเข้ากันได้ดี (Shujun et al., 2005) เมื่อปริมาณไฟโรแกลลอลมีความ เข้มข้นที่สูงขึ้นจะทำให้มีอนุภาคของไฟโรแกลลอลจำนวนมากที่ไม่สามารถสร้างเครือข่าย และทำ หน้าที่เป็นสารตัวเติมที่กระจายตัวในเมทริกซ์พอลิเมอร์ได้ การรวมตัวของไฟโรแกลลอลจะไปขัดขวาง การเชื่อมต่อและการสร้างเครือข่ายของพอลิเมอร์ซึ่งทำให้เกิดช่องว่างในเมทริกซ์ นอกจากนี้ไฟโร แกลลอลยังสามารถดูดซับน้ำได้สูงเนื่องจากมีหมู่ไฮดรอกซิล ซึ่งเมื่อเข้าสู่กระบวนการอัดรีดจะทำให้มี การการระเหยของน้ำและเกิดฟองเล็กๆระหว่างการเกิดโครงสร้างซีท (Leelaphiwat et al., 2022; Taguet et al., 2009)

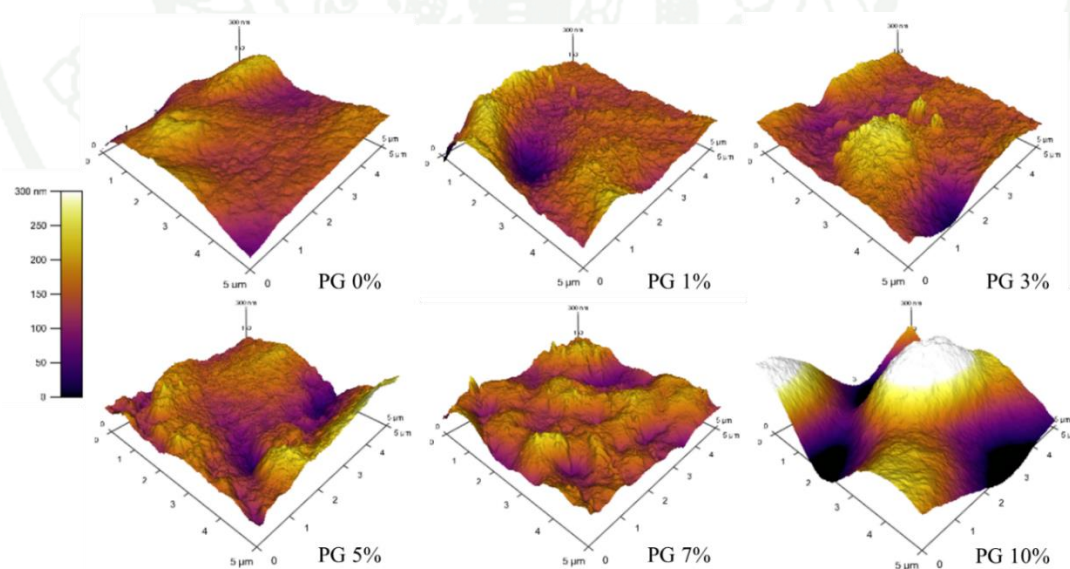
โครงสร้างจุลภาคของพื้นผิวของซีท เมื่อปริมาณไฟโรแกลลอลเพิ่มขึ้นทำให้เกิดโครงสร้าง คล้ายเส้นใยในทิศทางที่กระบวนการอัดรีด งานวิจัยก่อนหน้านี้แสดงให้เห็นว่าการหลอมละลายของ สตาร์ชแกรนูลและการสร้างของสายสตาร์ชอสันฐานเพิ่มขึ้นเนื่องจากการทำพลาสติกไซเซชันของสารที่ ชอบน้ำ (Harnkarnsujarit et al., 2021; Katekhong et al., 2022) อันตรกิริยาของไฟโรแกลลอล กับสายโสตาร์ชรวมกับน้ำเพิ่มขึ้นทำให้เกิดปฏิกิริยาพลาสติกไซเซชันซึ่งช่วยในการหลอมสตาร์ชใน ระหว่างการให้ความร้อนและการตัดเฉือนในการกระบวนการอัดรีด การจับตัวของเส้นใยไฟเบอร์ แสดงให้เห็นถึงการพันกันของพอลิเมอร์ที่เข้ากันไม่ได้ซึ่งทำให้เครือข่ายเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช สามารถกระจายตัวได้ในเฟสต่อเนื่องของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น กระบวนการอัดรีดทำ ให้เกิดการวางจัดเรียงตัวของสายโสตาร์ชในทิศทางที่ยึดออกในระหว่างการเย็นตัว (Khumkomgool et al., 2020; Lim et al., 1992)



ภาพที่ 22 สัณฐานวิทยาของซีตจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงโครงสร้างจุลภาคของ ก) ด้านพื้นผิวหน้าของซีต ข) ด้านตัดขวางของซีตพลาสติกรฐานเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชและโพลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นมีปริมาณโพรแกลลอล (PG) ร้อยละ 0, 1, 3, 5, 7 และ 10

3.3 วิเคราะห์สมบัติทางสัณฐานวิทยาพื้นผิว

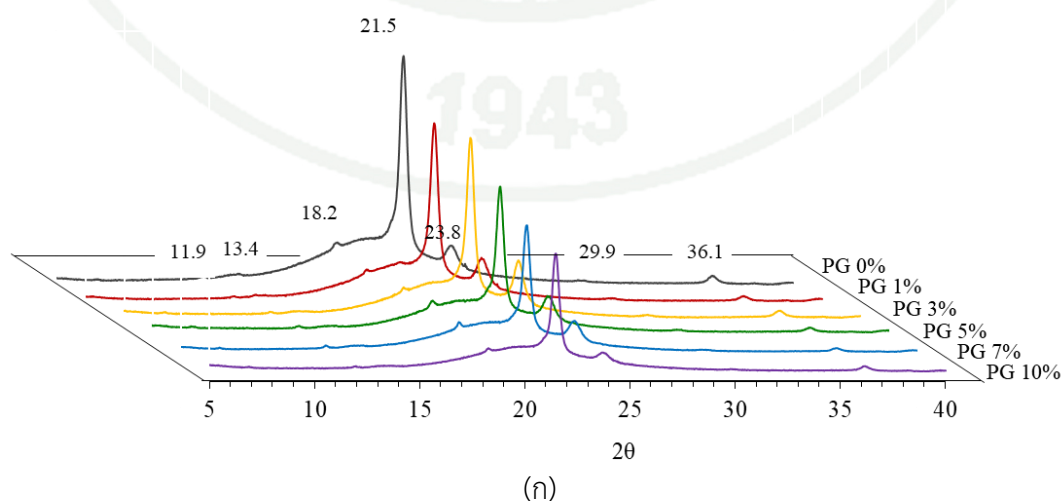
ภาพพื้นผิวของซีทและพื้นผิวที่มีความสูงที่สุดและต่ำสุดแสดงดังภาพที่ 23 ปริมาณไฟโร แกลลอลที่เพิ่มขึ้นทำให้เกิดพื้นผิวที่ขรุขระ เนื่องจากการจับตัวกันของไฟโรแกลลอลและการกระจายตัวของสตาร์ชในเมทริกซ์พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น สีเข้มแสดงถึงหลุมที่เกิดจากช่องว่าง การเพิ่มไฟโรแกลลอลทำให้เกิดช่องว่างขนาดใหญ่ขึ้นเนื่องจากจำนวนและขนาดของกลุ่มก้อนไฟโร แกลลอลที่ใหญ่ขึ้น ซึ่งขัดขวางการเชื่อมต่อของเครือข่ายพอลิเมอร์ (Lim et al., 1992; Wangprasertkul et al., 2021) แรงดึงดูดที่เพิ่มขึ้นเกิดจากพันธะที่ไม่ใช่โควาเลนต์ ซึ่งรวมถึงอันตรกิริยาที่ไม่ชอบน้ำของวงแหวนอะโรมาติกและพันธะไฮโดรเจนของหมู่ไฮดรอกซิลในโมเลกุลของไฟโร แกลลอล (Shin et al., 2019) นอกจากนี้การเกาะกลุ่มกันเองของไฟโรแกลลอลลดตำแหน่งที่เกิดอันตรกิริยากับสายพอลิเมอร์ (เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชและพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น) และก่อนอนุภาคของไฟโรแกลลอลขนาดใหญ่ที่อยู่พื้นผิวพอลิเมอร์ยังทำให้ความสูงของพื้นผิวสูงขึ้นด้วย

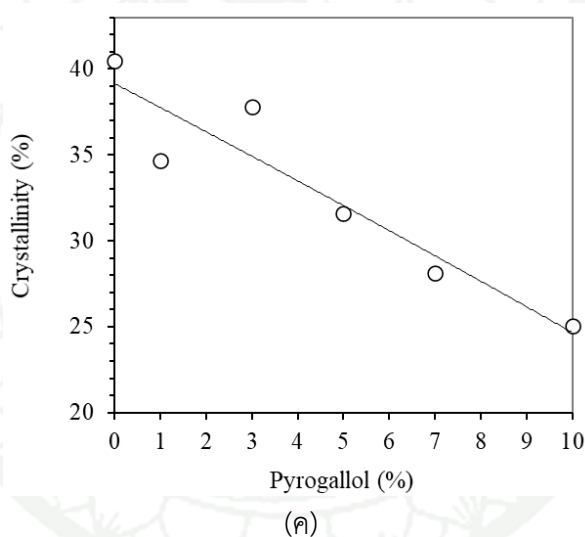
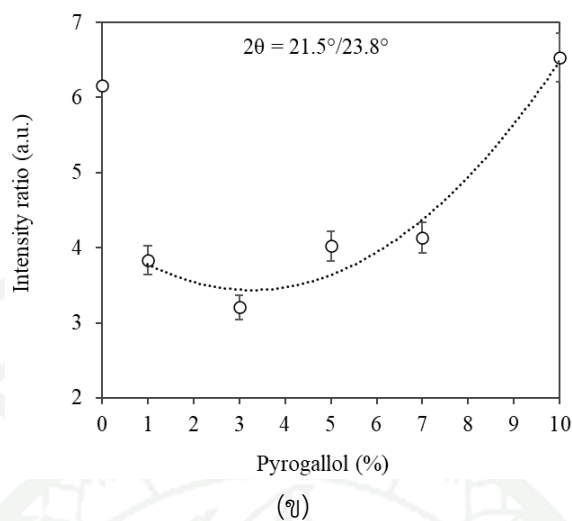


ภาพที่ 23 พื้นผิวของซีทฐานพลาสติกฐานเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช และพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น ที่มีปริมาณไฟโรแกลลอล (PG) ร้อยละ 0, 1, 3, 5, 7 และ 10

3.4 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

พิกในกราฟการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ใช้ในการระบุโครงสร้างผลึกของซีทดังภาพที่ 24 (ก) เทอร์พลาสติกสตาร์ชแสดงค่าสูงสุดของการเลี้ยวเบนที่ $2\theta = 13.4$ องศา เนื่องจากการสร้างโครงสร้างผลึกประเภทวี (V-type crystalline) ซึ่งเกิดขึ้นหลังจากการอัดรีดขึ้นรูป นอกจากนี้พิกขนาดเล็กที่ $2\theta = 18.2$ องศาและ 24.2 องศา คือ ผลึกของสตาร์ชมันสำปะหลังชนิดบี (B-type crystals) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นแสดงพิกที่ $2\theta = 21.5$ องศาและ 23.8 องศา เนื่องมาจากการสะท้อนของระนาบผลึกออร์โธพิกและพิกขนาดเล็กที่ $2\theta = 29.9$ องศาและ 36.1 องศา (Asada et al., 2012; N. Khanonkon et al., 2016a; Leelaphiwat et al., 2022) การเพิ่มปริมาณไฟโรแกลลอลจะลดความเข้มของพิกที่ $2\theta = 21.5$ องศาในขณะที่ความเข้มสูงสุดที่ $2\theta = 23.8$ องศาเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ซีทที่มีไฟโรแกลลอลร้อยละ 3 แสดงอัตราส่วนความเข้มระหว่างจุดสูงสุดที่ 2θ ที่ $21.5^\circ/23.8^\circ$ อัตราส่วนเหล่านี้ลดลงอย่างรวดเร็วด้วยการเพิ่มปริมาณไฟโรแกลลอลเป็นร้อยละ 3 บ่งชี้ว่าปฏิกิริยาระหว่าง ไฟโรแกลลอลและพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นมีการปรับเปลี่ยนโครงสร้างผลึกแบบออร์โธโรมบิก (orthorhombic crystal structure) ในพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น ภาพที่ 26 (ค) แสดงให้เห็นว่าปริมาณของผลึกในซีทลดลง เมื่อปริมาณไฟโรแกลลอลมากขึ้น นอกจากนี้ไฟโรแกลลอลยังเพิ่มการหลอมเหลวของสตาร์ชซึ่งทำให้อัตราส่วนของสตาร์ชอสัณฐานในเมทริกซ์พอลิเมอร์เพิ่มขึ้น

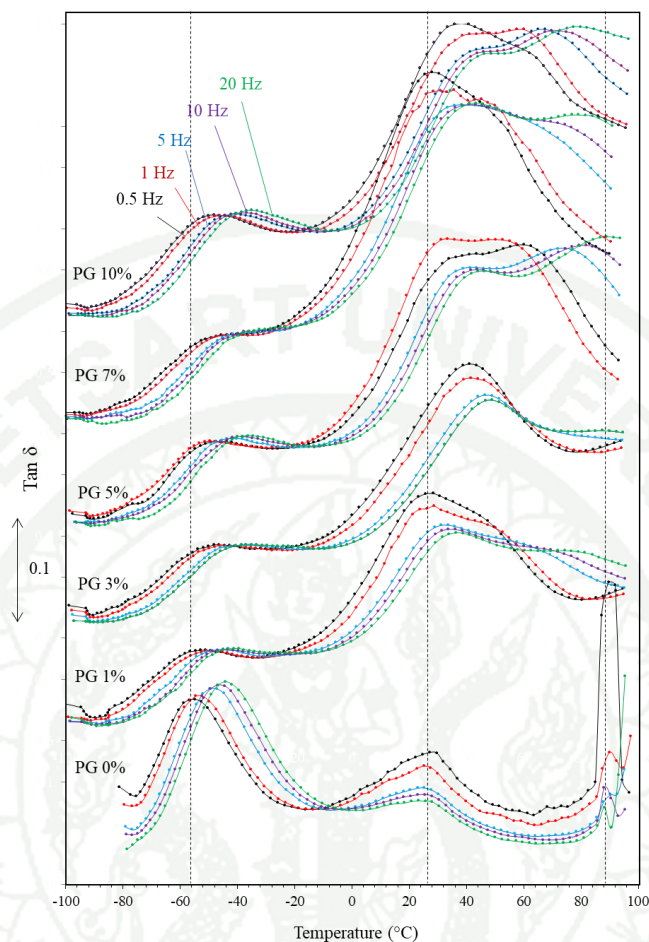




ภาพที่ 24 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (ก) ดิฟแฟรคโตแกรม (diffractogram) (ข) อัตราส่วนความเข้มของการเลี้ยวเบนระหว่างมุม 2θ ที่ 21.5° และ 23.8° องศา และ (ค) ความเป็นผลึกของพลาสติกฐานเทอร์โมพลาสติกสตาบิล และพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นผสมไพโรแกลลอล ลำร้อยละ 0, 1, 3, 5, 7 และ 10

3.5 สมบัติเชิงกลพลวัต

ภาพที่ 25 แสดงอุณหภูมิการคลายตัวที่ความถี่ต่างกัน (0.5 ถึง 20 เฮิรตซ์) บ่งชี้ถึงการเคลื่อนที่ของโมเลกุลที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเหนืออุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) ซึ่ที่ไม่เติมไฟโรแกลลอล มีพีคที่แสดงค่าการคลายตัวจำนวน 2 พีค ตำแหน่งสูงสุดที่ประมาณ -60 องศาเซลเซียส และ 25 องศาเซลเซียส โดยเกิดจากเฟสที่ประกอบด้วยกลีเซอรอลและสตาร์ช (เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช) (Taguet et al., 2009) การคลายตัวของเฟสที่มีกลีเซอรอลมีความสูงของพีคมากกว่าการคลายตัวของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ไม่มีการเติมไฟโรแกลลอล อย่างไรก็ตามการเพิ่มไฟโรแกลลอลทำให้การคลายตัวลดลงและความเข้มของพีคเพิ่มขึ้น การคลายตัวที่ลดลงของเฟสที่มีกลีเซอรอลส่งผลให้อุณหภูมิการคลายตัวเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของไฟโรแกลลอลเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 3 เป็น 10 หมู่ไฮดรอกซิลในไฟโรแกลลอลสร้างพันธะไฮโดรเจนกับกลีเซอรอล ซึ่งลดจำนวนของกลีเซอรอลอิสระในเมทริกซ์พอลิเมอร์ทำให้ความเข้มของการคลายตัวลดลง (Wadaugsorn et al., 2022) อีกทั้งปริมาณเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชข้อสันฐานที่เพิ่มขึ้นทำให้โมเลกุลของสตาร์ชเกิดอันตรกิริยากับกลีเซอรอลสูงขึ้น ฐานของพีคการคลายตัวของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกว้างขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณไฟโรแกลลอลจากร้อยละ 5 เป็น 10 ทำให้พีคของ $\tan \delta$ สูงกว่า 50 องศาเซลเซียส โดยผลการวิจัยชี้ให้เห็นถึงระดับการเกิดพลาสติกไซเซชันที่แตกต่างกันของเฟสของสตาร์ชในเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชมีปริมาณข้อสันฐานสูง โดยไฟโรแกลลอลและกลีเซอรอลเกิดพลาสติกไซเซชันกับเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชทำให้ค่า T_g แตกต่างกัน อีกทั้งการเกิดอันตรกิริยาของสตาร์ช-กลีเซอรอล-ไฟโรแกลลอล และสตาร์ช-ไฟโรแกลลอล ทำให้การคลายตัวลดลง



ภาพที่ 25 สมบัติทางกลเชิงไดนามิกของพลาสติกฐานเทอร์โมพลาสติกสตา์ชและพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นที่มีปริมาณโพรแกลลอล (GA) ร้อยละ 0, 1, 3, 5, 7 และ 10

3.6 สมบัติเชิงกลและมุมสัมผัส

ค่าความต้านทานแรงดึงยืดและร้อยละการยืดตัวของซีทแสดงไว้ในตารางที่ 3 การเพิ่มปริมาณโพรแกลลอลร้อยละ 1-5 ทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงยืดเพิ่มขึ้นโดยมีค่าสูงสุดที่โพรแกลลอลร้อยละ 5 โพรแกลลอลมีความแข็งและเกิดอันตรกิริยากับพอลิเมอร์ทำให้เกิดการกระจายตัวที่ดีซึ่งเพิ่มความแข็งแรงให้พอลิเมอร์ นอกจากนี้โพรแกลลอลที่ความเข้มข้นต่ำยังทำปฏิกิริยากับทั้งเทอร์โมพลาสติกสตา์ชและพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น ซึ่งอาจปรับปรุงการยึดเกาะระหว่างผิวพอลิเมอร์ (Shujun et al., 2005) และเมื่อเพิ่มปริมาณโพรแกลลอลขึ้นอีกเป็นร้อยละ 7 และ 10 ทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงยืดลดลง เนื่องจากความเข้มข้นของโพรแกลลอลที่สูงขึ้นและ

การจับเป็นก้อนของไฟโรแกลลอลที่ขนาดใหญ่ขึ้นซึ่งขัดขวางการเชื่อมต่อของเครือข่ายพอลิเมอร์ การเชื่อมต่อที่น้อยลงของพอลิเมอร์ทำให้ความแข็งแรงในการทนต่อแรงภายนอกลดลง (Khumkongool et al., 2020) ในทำนองเดียวกันร้อยละการยืดตัวลดลงถึง 66% เมื่อเพิ่มปริมาณไฟโรแกลลอล การกระจายตัวของไฟโรแกลลอลทำให้โมเลกุลแปลกปลอมเข้าสู่เครือข่ายพอลิเมอร์ซึ่งลดการยืดเกาะระหว่างสายโซ่ นอกจากนี้ไฟโรแกลลอลไม่ได้สร้างเครือข่ายร่างแหแต่ทำหน้าที่เป็นสารตัวเติมเพิ่มความแข็งแรงซึ่งเป็นการลดการยืดตัว ซิทที่มีปริมาณไฟโรแกลลอลร้อยละ 5 มีร้อยละการยืดตัวเหมือนกันกับซิทที่ไม่ได้เติมไฟโรแกลลอล ซึ่งผลการวิจัยพบว่าซิทที่เติมไฟโรแกลลอลร้อยละ 5 มีความแข็งแรงเชิงกลสูงสุด

ตารางที่ 3 แสดงค่ามุมสัมผัสซึ่งสะท้อนความสามารถในการเปียกของซิท ซิทที่มีการเติมไฟโรแกลลอลที่เพิ่มขึ้นมีแนวโน้มที่จะลดค่ามุมสัมผัส ซึ่งบ่งชี้ว่าพื้นผิวมีความไม่ชอบน้ำลดลง เนื่องจากไฟโรแกลลอลเป็นโมเลกุลที่ชอบน้ำและดูดซึมน้ำได้ง่าย

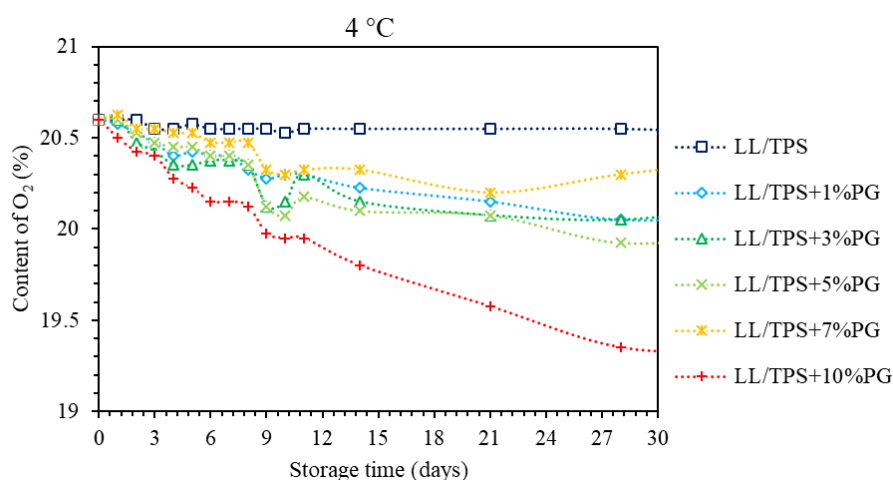
ตารางที่ 3 สมบัติเชิงกลและมุมสัมผัสของพลาสติกฐานเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์และโพลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นผสมไฟโรแกลลอล

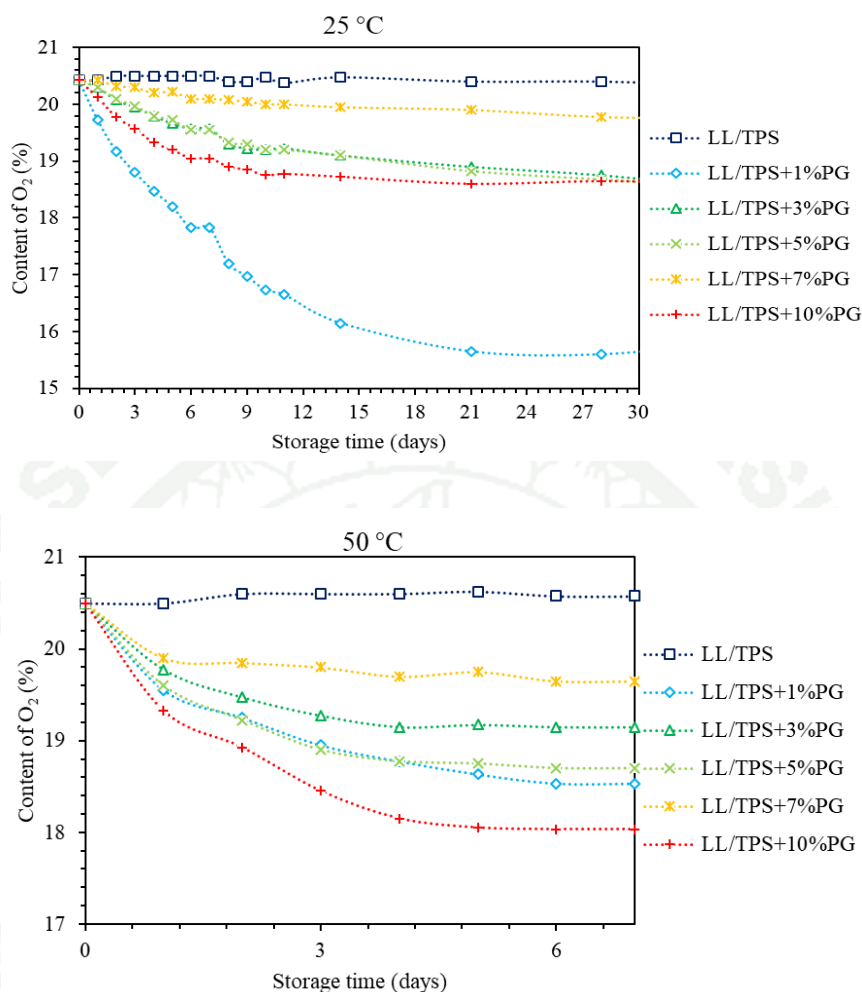
สูตรซิท	ค่าต้านทานแรงดึง (MPa)	ร้อยละความดึงยืด (%)	มุมสัมผัส (°)
TPS/LLDPE	14.1 ± 2.4 ^b	669 ± 59 ^a	106 ± 1 ^a
TPS/LLDPE/PG1%	14.0 ± 1.2 ^b	478 ± 26 ^b	107 ± 1 ^a
TPS/LLDPE/PG 3%	16.5 ± 1.0 ^a	444 ± 29 ^b	104 ± 1 ^b
TPS/LLDPE/PG 5%	17.2 ± 1.5 ^a	655 ± 40 ^a	97 ± 1 ^d
TPS/LLDPE/PG 7%	12.4 ± 1.2 ^c	467 ± 47 ^b	103 ± 1 ^b
TPS/LLDPE/PG 10%	11.0 ± 1.6 ^c	493 ± 91 ^b	100 ± 3 ^c

ตัวอักษร a, b, c ที่แตกต่างกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญภายในคอลัมน์เดียวกัน (p≤0.05)

3.7 ประสิทธิภาพดูดซับออกซิเจนในบรรจุภัณฑ์

ซีทที่เติมไฟโรแกลลอลแสดงประสิทธิภาพในการดูดซับออกซิเจนในช่องว่างของบรรจุภัณฑ์ ดังภาพที่ 26 ปริมาณไฟโรแกลลอลที่เพิ่มขึ้นทำให้ความสามารถในการดูดซับออกซิเจนสูงขึ้น ซีทที่มีปริมาณไฟโรแกลลอลร้อยละ 10 มีความสามารถในการดูดซับออกซิเจนสูงสุดที่อุณหภูมิการเก็บรักษาทั้งหมด (4, 25 และ 50 องศาเซลเซียส) อัตราการดูดซับออกซิเจนสูงในตอนเริ่มต้นและเข้าสู่สมดุลระดับออกซิเจนจะเข้าสู่สมดุลเร็วขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ปริมาณออกซิเจนจะสมดุลหลังการเก็บรักษาเป็นเวลา 5 วัน ที่ 50 องศาเซลเซียส 21 วัน และ 30 วันในการเก็บรักษาที่ 25 และ 4 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ผลการวิจัยพบว่าอุณหภูมิที่สูงขึ้นส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาสำหรับการดูดซับออกซิเจนเพิ่มขึ้น การทำปฏิกิริยาระหว่างไฟโรแกลลอลกับออกซิเจนที่แพร่ผ่านพอลิเมอร์ทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (autoxidation) ของไฟโรแกลลอลภายใต้ตัวกลางที่เป็นต่างและใช้ออกซิเจนจากช่องว่างภายในบรรจุภัณฑ์สำหรับการถ่ายโอนอิเล็กตรอนจากไฟโรแกลลอล (PGH) ก่อให้เกิดอนุมูลของไฟโรแกลลอล (PG·) และไฮโดรเปอร์ออกไซด์อิสระ ($\text{HO}_2\cdot$) สร้างพันธะใน PG dimer และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) เกิดปฏิกิริยากับ PG dimer และโมเลกุลของออกซิเจนสร้างโมเลกุลควิโนที่ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนสองอะตอมและทำให้ออกซิเจนในสิ่งแวดล้อมลดลง (Gaikwad et al., 2017; Ramasarma et al., 2015)



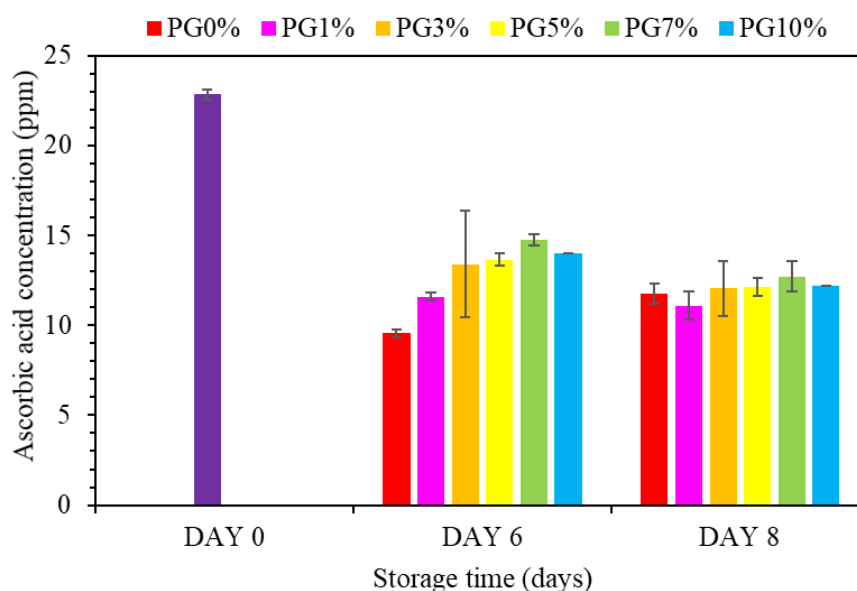


ภาพที่ 26 ประสิทธิภาพดูดซับออกซิเจนในบรรจุภัณฑ์ของพลาสติกฐานเทอร์โมพลาสติกสตาโรล และ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นที่มีปริมาณไพโรกลลอล (PG) ร้อยละ 0, 1, 3, 5, 7 และ 10 ใน สภาวะอุณหภูมิ 4, 25 และ 50 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 100

3.8 ความคงตัวของวิตามินซี

ปริมาณวิตามินซี (Ascorbic acid) ในบรรจุภัณฑ์ขวดที่มีการประยุกต์ใช้ซีทฐานเทอร์โม พลาสติกสตาโรล และพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นที่มีปริมาณไพโรกลลอล (PG) ร้อยละ 0, 1, 3, 5, 7 และ 10 เป็นแผ่นรองใต้ฝา แสดงดังภาพที่ 27 จากกราฟพบว่าในซีทที่ไม่มีการเติมไพโร กลลอลมีปริมาณวิตามินซีคงเหลือต่ำกว่าซีทที่เติมไพโรกลลอลเมื่อเวลาการเก็บรักษามากขึ้น แต่ใน ซีทที่มีการเติมไพโรกลลอลมีปริมาณวิตามินซีคงเหลือมากขึ้น เมื่อเติมไพโรกลลอลร้อยละ 1, 3, 5

และ 7 โดยซีทที่มีการเติมกรดแกลลิกร้อยละ 7 มีประสิทธิภาพในการรักษาความคงตัวของวิตามินซีได้ถึงร้อยละ 64.64 และ 55.67 ในระยะเวลาการเก็บรักษา 6 และ 8 วัน ตามลำดับ นอกจากนี้ซีทที่มีการเติมไฟโรแกลลอลร้อยละ 10 มีปริมาณวิตามินซีคงเหลือต่ำกว่าซีทเติมไฟโรแกลลอลร้อยละ 7 เนื่องจากซีทที่เติมไฟโรแกลลอลร้อยละ 10 การกระจายตัวไม่ดีมีการเกาะตัวกันของไฟโรแกลลอลทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างไฟโรแกลลอลกับออกซิเจนลดน้อยลง ความสามารถในการดูดซับออกซิเจนต่ำลงจึงทำให้ความคงตัวของวิตามินซีลดลง เพราะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างออกซิเจนในช่องว่างระหว่างบรรจุภัณฑ์และวิตามินซี



ภาพที่ 27 ปริมาณวิตามินซี (Ascorbic acid) ในบรรจุภัณฑ์ที่มีการประยุกต์ใช้พลาสติกฐานเทอร์โมพลาสติกสตาโรล และพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นที่มีปริมาณไฟโรแกลลอล (PG) ร้อยละ 0, 1, 3, 5, 7 และ 10 เป็นแผ่นรองใต้ฝา ในสภาวะอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เก็บรักษาเป็นเวลา 8 วัน

4. ลักษณะปรากฏของแผ่นรองใต้ฝา

จากการขึ้นรูปซีทฐานเทอร์โมพลาสติกสตาเรช และพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นที่มีการเติมสารดูดซับออกซิเจนอินทรีย์ ได้แก่ กรดแกลลิก และไพโรแกลลอล โดยกระบวนการอัดรีดสกรูคู่โดยผ่านหัวตายแบบรีดแผ่น (sheet die) พบว่าซีทมีประสิทธิภาพในการดูดซับออกซิเจน และสามารถรักษาความคงตัวของวิตามินซีในรูปแบบของของเหลวได้ ภาพที่ 28 แสดงให้เห็นถึงลักษณะของซีทเมื่อนำไปประยุกต์ใช้เป็นแผ่นรองใต้ฝา เพื่อกำจัดออกซิเจน และยืดอายุการเก็บรักษาเครื่องดื่มทางเลือกเพื่อสุขภาพ เครื่องดื่มวิตามินซี น้ำผลไม้ เป็นต้น เมื่อนำซีทไปประยุกต์ใช้กับบรรจุภัณฑ์โดยการติดผนึกซีทเข้ากับฝาเป็นแผ่นรองใต้ฝา นอกจากจะทำหน้าที่ช่วยการปิดผนึกระหว่างฝาขวดและปากขวดให้แน่นสนิทแล้ว ยังสามารถดูดซับออกซิเจนที่อยู่ภายในช่องว่างของบรรจุภัณฑ์ให้มีปริมาณลดลง เนื่องจากการลดการเกิดปฏิกิริยาระหว่างออกซิเจนและผลิตภัณฑ์ภายในบรรจุภัณฑ์ที่มีความไวต่อออกซิเจน



ภาพที่ 28 การประยุกต์ใช้ซีทซีทฐานเทอร์โมพลาสติกสตาเรช และพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นที่มีการเติมสารดูดซับออกซิเจนอินทรีย์เป็นแผ่นรองใต้ฝา

สรุปผล

การขึ้นรูปพลาสติกชีวภาพดูดซับออกซิเจนฐานเทอร์โมพลาสติกสตาโรลและพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นโดยกระบวนการอัดรีดโดยผ่านหัวตายแบบรีดแผ่น (sheet die) ที่เติมสารดูดซับออกซิเจนอินทรีย์ ได้แก่ กรดแกลลิกและไพโรแกลลอล สามารถผลิตพอลิเมอร์ชีวภาพที่สามารถกำจัดออกซิเจนได้ กรดแกลลิกและไพโรแกลลอลช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ของซีตระหว่างส่วนของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลและพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น ทำให้ซีตมีความเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น ป้องกันการซึมผ่านของไอน้ำของซีต แต่หากเติมในปริมาณที่มากจะส่งผลให้เกิดการจับตัวกันของสารดูดซับออกซิเจนทำให้สมบัติเชิงกลและสมบัติป้องกันการซึมผ่านลดลง อีกทั้งกรดแกลลิกและไพโรแกลลอลยังสามารถเป็นสารตัวเติมเสริมความแข็งแรงให้กับซีตได้

นอกจากนี้ความสามารถในการดูดซับออกซิเจนของซีตเพิ่มขึ้นด้วยการเพิ่มปริมาณสารดูดซับออกซิเจน และอุณหภูมิการเก็บรักษา ซึ่งอัตราการดูดซับออกซิเจนของซีตที่เติมกรดแกลลิกเพิ่มขึ้นถึง 3.6 เท่า และ 3.7 เท่าในซีตที่เติมไพโรแกลลอล เมื่ออุณหภูมิการเก็บรักษาเพิ่มขึ้นจาก 4 เป็น 25 องศาเซลเซียส และ 25 ถึง 50 องศาเซลเซียส ทำให้ออกซิเจนที่เหลืออยู่ในช่องว่างของบรรจุภัณฑ์ลดลง นอกจากนี้เมื่อนำซีตไปประยุกต์ใช้เป็นแผ่นรองใต้ผ้าในบรรจุภัณฑ์บรรจุวิตามินซีสามารถรักษาความคงตัวของวิตามินซีได้ถึงร้อยละ 50.62 ในซีตที่เติมกรดแกลลิกเมื่อเก็บรักษาเป็นเวลา 4 วัน และร้อยละ 55.67 ในซีตที่เติมไพโรแกลลอล เมื่อเก็บรักษาไว้ 8 วัน สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับผลิตภัณฑ์ที่มีความไวต่อออกซิเจนและเป็นของเหลวได้ เช่น ผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มเพื่อสุขภาพและวิตามินบรรจุขวด เพื่อรักษาความคงตัวของสารอาหารโดยนำไปใช้ประโยชน์เป็นบรรจุภัณฑ์แบบแอคทีฟ เช่น ภาชนะและแผ่นรองใต้ผ้าในขวด เพื่อกำจัดออกซิเจนเพื่อยืดอายุการเก็บรักษาอาหารและเครื่องดื่ม

ข้อเสนอแนะ

ซีทพลาสติกชีวภาพฐานเทอร์โมพลาสติกสตาซ์และพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นที่เติมสารดูดซับออกซิเจนได้แก่ กรดแกลลิกและไฟโรแกลลอล มีประสิทธิภาพในการดูดซับออกซิเจน และสามารถรักษาความคงตัวของวิตามินซีในรูปแบบของของเหลวได้ ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับผลิตภัณฑ์อื่น ๆ ที่มีความไวต่อออกซิเจน ไม่ว่าจะเป็นแผ่นรองใต้ฝา บรรจุภัณฑ์ แผ่นดูดซับออกซิเจน นอกจากนี้ยังสามารถนำสารดูดซับออกซิเจนอินทรีย์เหล่านี้ไปผสมกับพอลิเมอร์ชนิดอื่นๆ เพื่อให้พลาสติกแอกทีฟสามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ทั้งหมด ซึ่งจะเป็นประโยชน์ทั้งต่อผู้ผลิตอุตสาหกรรม ผู้บริโภค และสิ่งแวดล้อม

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- Ahn, B. J., Gaikwad, K. K., & Lee, Y. S. (2016). Characterization and properties of LDPE film with gallic-acid-based oxygen scavenging system useful as a functional packaging material. *Journal of Applied Polymer Science*, 133(43). doi:10.1002/app.44138
- Asada, M., Jiang, N., Sendogdular, L., Gin, P., Wang, Y., Endoh, M. K., . . . Takahara, A. (2012). Heterogeneous Lamellar Structures Near the Polymer/Substrate Interface. *Macromolecules*, 45(17), 7098-7106. doi:10.1021/ma301000z
- Chatkitanan, & Harnkarnsujarit, N. (2021). Effects of nitrite incorporated active films on quality of pork. *Meat Sci*, 172, 108367. doi:10.1016/j.meatsci.2020.108367
- Chatkitanan, T., & Harnkarnsujarit, N. (2020). Development of nitrite compounded starch-based films to improve color and quality of vacuum-packaged pork. *Food Packaging and Shelf Life*, 25. doi:10.1016/j.fpsl.2020.100521
- Chen, W., & Qu, B. (2004). LLDPE/ZnAl LDH-exfoliated nanocomposites: effects of nanolayers on thermal and mechanical properties. *J. Mater. Chem.*, 14(11), 1705-1710. doi:10.1039/b401790k
- Cichello, S. A. (2015). Oxygen absorbers in food preservation: a review. *J Food Sci Technol*, 52(4), 1889-1895. doi:10.1007/s13197-014-1265-2
- Codou, A., Anstey, A., Misra, M., & Mohanty, A. K. (2018). Novel compatibilized nylon-based ternary blends with polypropylene and poly(lactic acid): morphology evolution and rheological behaviour. *RSC Advances*, 8(28), 15709-15724. doi:10.1039/c8ra01707g
- Cooksey, K. (2010). OXYGEN SCAVENGING PACKAGING SYSTEMS. *Encyclopedia of Polymer Science and Technology*.
- Day, B. P. F. (2008). Active Packaging for Food. In J. Kerry & P. Butler (Eds.), *Smart Packaging Technologies for Fast Moving Consumer Goods* (pp. 1-18). John Wiley & Sons, Ltd.
- Debiagi, F., Mello, L. R. P. F., & Mali, S. (2017). Thermoplastic Starch-Based Blends. In *Starch-Based Materials in Food Packaging* (pp. 153-186).

- Devaki, S. J., & Raveendran, R. L. (2017). Vitamin C: Sources, Functions, Sensing and Analysis. In *Vitamin C*.
- Di Maio, L., Scarfato, P., Galdi, M. R., & Incarnato, L. (2015). Development and oxygen scavenging performance of three-layer active PET films for food packaging. *Journal of Applied Polymer Science*, 132(7), n/a-n/a. doi:10.1002/app.41465
- Diyana, Z. N., Jumaidin, R., Selamat, M. Z., Ghazali, I., Julmohammad, N., Huda, N., & Ilyas, R. A. (2021). Physical Properties of Thermoplastic Starch Derived from Natural Resources and Its Blends: A Review. *Polymers*, 13(9). doi:10.3390/polym13091396
- Doncea, S. M., & Ion, R. M. (2014). FTIR (DRIFT) ANALYSIS OF SOME PRINTING INKS FROM THE 19th AND 20th CENTURIES. *Revue Roumaine de Chimie*, 59(3-4), 173-183.
- Fiege, H., Voges, H.-W., Hamamoto, T., Umemura, S., Iwata, T., Miki, H., . . . Paulus, W. (2000). Phenol Derivatives. In *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*.
- Flakus, H. T., & Chelmecki, M. (2002). Infrared spectra of the hydrogen bond in benzoic acid crystals: temperature and polarization effects. *Spectrochim Acta A Mol Biomol Spectrosc*, 58(1), 179-196. doi:10.1016/s1386-1425(01)00525-x
- Gaikwad, K. K., Singh, S., & Lee, Y. S. (2017). A pyrogallol-coated modified LDPE film as an oxygen scavenging film for active packaging materials. *Progress in Organic Coatings*, 111, 186-195. doi:10.1016/j.porgcoat.2017.05.016
- Gaikwad, K. K., Singh, S., & Lee, Y. S. (2018). Oxygen scavenging films in food packaging. *Environmental Chemistry Letters*, 16(2), 523-538. doi:10.1007/s10311-018-0705-z
- Gussoni, M., & Castiglioni, C. . (1999). Infrared intensities. Use of the CH-stretching band intensity as a tool for evaluating the acidity of hydrogen atoms in hydrocarbons. *Journal of Molecular Structure: THEOCHEM*, 521(1-3), 1-18.
- Harnkarnsujarit, N., Wongphan, P., Chatkitanan, T., Laorenza, Y., & Srisa, A. (2021). Bioplastic for Sustainable Food Packaging. In *Sustainable Food Processing and Engineering Challenges* (pp. 203-277).
- Huang, J.-C., Shew, A. S., & Wang, M.-S. (1990). Biodegradable Plastics: A Review. *John Wiley & Sons, Inc*, 10, 23-30.

- Jiang, R.-W., Ming, D.-S., But, P. P. H., & Mak, T. C. W. (2000). organic compounds. In *International Union of Crystallography* (pp. 594-595).
- Katekhong, W., Wongphan, P., Klinmalai, P., & Harnkarnsujarit, N. (2022). Thermoplastic starch blown films functionalized by plasticized nitrite blended with PBAT for superior oxygen barrier and active biodegradable meat packaging. *Food Chem*, 374, 131709. doi:10.1016/j.foodchem.2021.131709
- Khan, B., Bilal Khan Niazi, M., Samin, G., & Jahan, Z. (2017). Thermoplastic Starch: A Possible Biodegradable Food Packaging Material-A Review. *Journal of Food Process Engineering*, 40(3). doi:10.1111/jfpe.12447
- Khanoonkon, N., Yoksan, R., & Ogale, A. A. (2016a). Effect of stearic acid-grafted starch compatibilizer on properties of linear low density polyethylene/thermoplastic starch blown film. *Carbohydr Polym*, 137, 165-173. doi:10.1016/j.carbpol.2015.10.038
- Khanoonkon, N., Yoksan, R., & Ogale, A. A. (2016b). Morphological characteristics of stearic acid-grafted starch-compatible linear low density polyethylene/thermoplastic starch blown film. *European Polymer Journal*, 76, 266-277. doi:10.1016/j.eurpolymj.2016.02.001
- Khumkomgool, A., Saneluksana, T., & Harnkarnsujarit, N. (2020). Active meat packaging from thermoplastic cassava starch containing sappan and cinnamon herbal extracts via LLDPE blown-film extrusion. *Food Packaging and Shelf Life*, 26. doi:10.1016/j.fpsl.2020.100557
- Kordjazi, Z., & Ajji, A. (2021). Development of TiO₂ catalyzed HTPB based oxygen scavenging films for food packaging applications. *Food Control*, 121. doi:10.1016/j.foodcont.2020.107639
- Lee, J. S., Chang, Y., Lee, E. S., Song, H. G., Chang, P. S., & Han, J. (2018). Ascorbic Acid-Based Oxygen Scavenger in Active Food Packaging System for Raw Meatloaf. *J Food Sci*, 83(3), 682-688. doi:10.1111/1750-3841.14061
- Leelaphiwat, P., Pechprankan, C., Siripho, P., Bumbudsanpharoke, N., & Harnkarnsujarit, N. (2022). Effects of nisin and EDTA on morphology and properties of thermoplastic starch and PBAT biodegradable films for meat packaging. *Food Chem*, 369, 130956. doi:10.1016/j.foodchem.2021.130956
- Lim, S., Jane, J. L., Rajagopalan, S., & Seib, P. A. (1992). Effect of starch granule size on

- physical properties of starch-filled polyethylene film. *Biotechnology Progress*, 8(1), 51-57. doi:10.1021/bp00013a008
- McKedy, G. E., & Williamsville. (1998). United States Patent No.
- Miao, M., Li, R., Jiang, B., Cui, S. W., Zhang, T., & Jin, Z. (2014). Structure and physicochemical properties of octenyl succinic esters of sugary maize soluble starch and waxy maize starch. *Food Chem*, 151, 154-160. doi:10.1016/j.foodchem.2013.11.043
- Mohammed-Ziegler, I., & Billes, F. (2002). Vibrational spectroscopic calculations on pyrogallol and gallic acid. *Journal of Molecular Structure-Theochem*, 618(3), 259-265. doi:Pii S0166-1280(02)00547-X
- Doi 10.1016/S0166-1280(02)00547-X
- Moly, K. A., Radusch, H. J., Androsh, R., Bhagawan, S. S., & Thomas, S. (2005). Nonisothermal crystallisation, melting behavior and wide angle X-ray scattering investigations on linear low density polyethylene (LLDPE)/ethylene vinyl acetate (EVA) blends: effects of compatibilisation and dynamic crosslinking. *European Polymer Journal*, 41(6), 1410-1419. doi:10.1016/j.eurpolymj.2004.10.016
- Moskala, E. J., Howe, S. E., Painter, P. C., & Coleman, M. M. (1984). On the Role of Intermolecular Hydrogen-Bonding in Miscible Polymer Blends. *Macromolecules*, 17(9), 1671-1678. doi:DOI 10.1021/ma00139a006
- Otoni, C. G., Avena-Bustillos, R. J., Olsen, C. W., Bilbao-Sáinz, C., & McHugh, T. H. (2016). Mechanical and water barrier properties of isolated soy protein composite edible films as affected by carvacrol and cinnamaldehyde micro and nanoemulsions. *Food Hydrocolloids*, 57, 72-79. doi:10.1016/j.foodhyd.2016.01.012
- Pant, A. F., Dorn, J., & Reinelt, M. (2018). Effect of Temperature and Relative Humidity on the Reaction Kinetics of an Oxygen Scavenger Based on Gallic Acid. *Front Chem*, 6, 587. doi:10.3389/fchem.2018.00587
- Pant, A. F., Sangerlaub, S., & Muller, K. (2017). Gallic Acid as an Oxygen Scavenger in Bio-Based Multilayer Packaging Films. *Materials (Basel)*, 10(5). doi:10.3390/ma10050489
- Pehlivan, F. E. (2017). Vitamin C: An Antioxidant Agent. In *Vitamin C*.
- Pelissari, F. M., Yamashita, F., & Grossmann, M. V. E. (2011). Extrusion parameters related

- to starch/chitosan active films properties. *International Journal of Food Science & Technology*, 46(4), 702-710. doi:10.1111/j.1365-2621.2010.02533.x
- Phothisarattana, D., Wongphan, P., Promhuad, K., Promsorn, J., & Harnkarnsujarit, N. (2021). Biodegradable Poly(Butylene Adipate-Co-Terephthalate) and Thermoplastic Starch-Blended TiO₂ Nanocomposite Blown Films as Functional Active Packaging of Fresh Fruit. *Polymers (Basel)*, 13(23). doi:10.3390/polym13234192
- Quiles-Carrillo, L., Montava-Jorda, S., Boronat, T., Sammon, C., Balart, R., & Torres-Giner, S. (2019). On the Use of Gallic Acid as a Potential Natural Antioxidant and Ultraviolet Light Stabilizer in Cast-Extruded Bio-Based High-Density Polyethylene Films. *Polymers (Basel)*, 12(1). doi:10.3390/polym12010031
- Ramasarma, T., Rao, A. V., Devi, M. M., Omkumar, R. V., Bhagyashree, K. S., & Bhat, S. V. (2015). New insights of superoxide dismutase inhibition of pyrogallol autoxidation. *Mol Cell Biochem*, 400(1-2), 277-285. doi:10.1007/s11010-014-2284-z
- Ricci, A., Olejar, K. J., Parpinello, G. P., Kilmartin, P. A., & Versari, A. (2015). Application of Fourier Transform Infrared (FTIR) Spectroscopy in the Characterization of Tannins. *Applied Spectroscopy Reviews*, 50(5), 407-442. doi:10.1080/05704928.2014.1000461
- Robert, P., García, P., Reyes, N., Chávez, J., & Santos, J. (2012). Acetylated starch and inulin as encapsulating agents of gallic acid and their release behaviour in a hydrophilic system. *Food Chemistry*, 134(1), 1-8. doi:10.1016/j.foodchem.2012.02.019
- Sabetzadeh, M., Bagheri, R., & Masoomi, M. (2017). Morphology and rheological properties of compatibilized low-density polyethylene/linear low-density polyethylene/thermoplastic starch blends. *Journal of Applied Polymer Science*, 134(16). doi:10.1002/app.44719
- Saint-Gobain. (2018). Cap & Liner Assembly Processes.
- Shi, R., Zhang, Z., Liu, Q., Han, Y., Zhang, L., Chen, D., & Tian, W. (2007). Characterization of citric acid/glycerol co-plasticized thermoplastic starch prepared by melt blending. *Carbohydrate Polymers*, 69(4), 748-755. doi:10.1016/j.carbpol.2007.02.010

- Shin, M., Park, E., & Lee, H. (2019). Plant-Inspired Pyrogallol-Containing Functional Materials. *Advanced Functional Materials*, 29(43). doi:10.1002/adfm.201903022
- Shujun, W., Jiugao, Y., & Jinglin, Y. (2005). Preparation and characterization of compatible thermoplastic starch/polyethylene blends. *Polymer Degradation and Stability*, 87(3), 395-401. doi:10.1016/j.polymdegradstab.2004.08.012
- Singh, G., Singh, S., Kumar, B., & Gaikwad, K. K. (2020). Active barrier chitosan films containing gallic acid based oxygen scavenger. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 15(1), 585-593. doi:10.1007/s11694-020-00669-w
- Skrovanek, D. J., Howe, S. E., Painter, P. C., & Coleman, M. M. (1985). Hydrogen-Bonding in Polymers - Infrared Temperature Studies of an Amorphous Polyamide. *Macromolecules*, 18(9), 1676-1683. doi:DOI 10.1021/ma00151a006
- Sun, X., Wang, Z., Kadouh, H., & Zhou, K. (2014). The antimicrobial, mechanical, physical and structural properties of chitosan-gallic acid films. *LWT - Food Science and Technology*, 57(1), 83-89. doi:10.1016/j.lwt.2013.11.037
- Taguet, A., Huneault, M. A., & Favis, B. D. (2009). Interface/morphology relationships in polymer blends with thermoplastic starch. *Polymer*, 50(24), 5733-5743. doi:10.1016/j.polymer.2009.09.055
- TEKNIPLEX. (2018). Sniff Seal® technology.
- Toyo Seikan Co., L. Barrier Technology.
- Wadaugsorn, K., Panrong, T., Wongphan, P., & Harnkarnsujarit, N. (2022). Plasticized hydroxypropyl cassava starch blended PBAT for improved clarity blown films: Morphology and properties. *Industrial Crops and Products*, 176. doi:10.1016/j.indcrop.2021.114311
- Wangprasertkul, J., Siriwatanapong, R., & Harnkarnsujarit, N. (2021). Antifungal packaging of sorbate and benzoate incorporated biodegradable films for fresh noodles. *Food Control*, 123. doi:10.1016/j.foodcont.2020.107763
- Wongphan, P., Khowthong, M., Supatrawiporn, T., & Harnkarnsujarit, N. (2022). Novel edible starch films incorporating papain for meat tenderization. *Food Packaging and Shelf Life*, 31. doi:10.1016/j.fpsl.2021.100787
- Zerdin, K., Rooney, M. L., & Vermuë, J. (2003). The vitamin C content of orange juice

packed in an oxygen scavenger material. *Food Chemistry*, 82(3), 387-395.

doi:10.1016/s0308-8146(02)00559-9

Zhang, Y., Rempel, C., & Liu, Q. (2014). Thermoplastic starch processing and characteristics-a review. *Crit Rev Food Sci Nutr*, 54(10), 1353-1370.

doi:10.1080/10408398.2011.636156

Zhao, Y., & Saldaña, M. D. A. (2019). Use of potato by-products and gallic acid for development of bioactive film packaging by subcritical water technology. *The Journal of Supercritical Fluids*, 143, 97-106. doi:10.1016/j.supflu.2018.07.025

Zhao, Y., Teixeira, J. S., Gänzle, M. M., & Saldaña, M. D. A. (2018). Development of antimicrobial films based on cassava starch, chitosan and gallic acid using subcritical water technology. *The Journal of Supercritical Fluids*, 137, 101-110.

doi:10.1016/j.supflu.2018.03.010

Zheng, Y., Hu, L., Ding, N., Liu, P., Yao, C., & Zhang, H. (2017). Physicochemical and structural characteristics of the octenyl succinic ester of ginkgo starch. *Int J Biol Macromol*, 94(Pt A), 566-570. doi:10.1016/j.ijbiomac.2016.10.017



ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ-นามสกุล	จุฑาทิพย์ พรหมสอน
วัน เดือน ปี เกิด	27 กรกฎาคม 2540
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
ที่อยู่ปัจจุบัน	121/477 หมู่บ้านเอกราช ถนนร่วมมิตรพัฒนา ท่าแร้ง บางเขน กรุงเทพมหานคร 10220
ประวัติการศึกษา	วทบ. (เทคโนโลยีการบรรจุและวัสดุ) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ประสบการณ์การทำงาน	1. แสดงผลงานโดยการนำเสนอแบบปากเปล่าในงานการประชุมวิชาการ International Conference on Food and Applied Bioscience 2022 (FAB2022) จังหวัดเชียงใหม่ ประเทศไทย ในหัวข้อ Characterization of Gallic acid incorporated Films for Oxygen Scavenging Active Packaging ในระหว่างวันที่ 14-15 กุมภาพันธ์ 2565 2. แสดงผลงานโดยการนำเสนอแบบปากเปล่าในงานการประชุมวิชาการ The 23rd World Packaging Conference (IAPRI Bangkok 2022) กรุงเทพมหานคร ประเทศไทย ในหัวข้อ Pyrogallol incorporated Thermoplastic Starch Based Films as Oxygen Scavenging Active Bioplastic Packaging ในระหว่างวันที่ 12-16 มิถุนายน 2565
ผลงานตีพิมพ์	1. Promsorn, J., & Harnkarnsujarit, N. (2022). Pyrogallol loaded thermoplastic cassava starch based films as bio-based oxygen scavengers. Industrial Crops and Products, 186, 115226. 2. Promsorn J. & Harnkarnsujarit N., Oxygen absorbing food packaging made by extrusion compounding of thermoplastic cassava starch with gallic acid, Food Control (2022), doi: https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2022.109273 . 3. Promsorn, J., & Harnkarnsujarit, N. (2022). Characterization of Gallic acid incorporated Films for Oxygen Scavenging Active Packaging. Proceeding FAB 2022, 47-52.
ทุนการศึกษา	โครงการวิจัยรูปแบบใหม่ของการจัดการการศึกษาในการเพิ่มศักยภาพและขีดความสามารถขั้นสูงของกำลังคนทางด้านการเกษตรและอาหารสำหรับ

อนาคต ภายใต้แผนงานโครงการพลิกโฉมระบบอุดมศึกษาของประเทศไทย
(Reinventing University Program) ปีงบประมาณ พ.ศ. 2564 ครั้งที่ 1
กิจกรรมโครงการพัฒนาศักยภาพด้านการวิจัยขั้นสูงในต่างประเทศ
(Outbound Exchange)

