



การพัฒนากระดาษฟางข้าวลามีเนตด้วยฟิล์มย่อยสลายได้ทางชีวภาพผสมน้ำมันพืช  
สมุนไพร



เบญจวรรณ ชันโท

วิทยานิพนธ์เสนอบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยนเรศวร  
เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม  
ปีการศึกษา 2565  
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยนเรศวร

การพัฒนากระดาษฟางข้าวลามิเนตด้วยฟิล์มย่อยสลายได้ทางชีวภาพผสมน้ำมันพืช  
สมุนไพร



วิทยานิพนธ์เสนอบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยนเรศวร  
เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม  
ปีการศึกษา 2565  
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยนเรศวร

วิทยานิพนธ์ เรื่อง "การพัฒนากระดาษฟางข้าวลามีเนตด้วยฟิล์มย่อยสลายได้ทางชีวภาพผสมน้ำมัน  
พีชสมุนไพรร"

ของ เบญจวรรณ ชันโท

ได้รับการพิจารณาให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม

### คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริศาสตร์ เอื้อใจ)

..... ประธานที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศรารัตน์ มหาศรานนท์)

..... กรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.หนึ่งฤทัย สุพรม)

..... กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิภายใน  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภัตรา ประทุมชาติ)

อนุมัติ

.....  
(รองศาสตราจารย์ ดร.กรองกาญจน์ ชูทิพย์)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

<b>ชื่อเรื่อง</b>	การพัฒนากระดาษฟางข้าวลามิเนตด้วยฟิล์มย่อยสลายได้ทางชีวภาพผสมน้ำมันพืชสมุนไพร
<b>ผู้วิจัย</b>	เบญจวรรณ ชันโท
<b>ประธานที่ปรึกษา</b>	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศรารัตน์ มหาศรานนท์
<b>กรรมการที่ปรึกษา</b>	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.หนึ่งฤทัย สุพรม
<b>ประเภทสารนิพนธ์</b>	วิทยานิพนธ์ วท.ม. เคมีอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยนเรศวร, 2565
<b>คำสำคัญ</b>	พอลิแลคติกแอซิด น้ำมันสมุนไพร แป้งมันสำปะหลัง กระดาษฟางข้าวลามิเนต

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้สนใจเตรียมบรรจุภัณฑ์สำหรับบรรจุอาหารที่สามารถย่อยสลายได้ทางธรรมชาติ มีสมบัติป้องกันการรั่วซึมของน้ำ โดยการนำฟิล์มพอลิเมอร์ชีวภาพที่เตรียมได้ลามิเนตกับกระดาษฟางข้าว ในการวิจัยนี้แบ่งการศึกษาออกเป็น 3 ส่วนคือ ในส่วนแรกเป็นการเตรียมฟิล์มพอลิเมอร์ โดยผสม พอลิแลคติกแอซิด (Poly(lactic acid), PLA) และน้ำมันสมุนไพร 4 ชนิดได้แก่ น้ำมันมะพร้าว น้ำมันมะรุม น้ำมันกานพลู และ น้ำมันตะไคร้บ้าน ในอัตราส่วน 0.25 0.5 0.75 และ 1 wt.% ด้วยเครื่องอัดรีดเกลียวหนอนคู่ จากนั้นทำการขึ้นรูปโดยเครื่องเป่าฟิล์ม จากผลการทดลองพบว่าเมื่อทำการเติมน้ำมันสมุนไพร ส่งผลให้สมบัติอัตราการไหลของพลาสติกมีค่าเพิ่มขึ้น ลักษณะสัญญาณวิทยาของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมน้ำมันพืชสมุนไพร พบว่ามีพื้นผิวที่เรียบขึ้น สมบัติการทนต่อแรงดึง และมอดูลัสมีค่าลดลง แต่ค่าการยืดออก ณ จุดขาดมีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนสมบัติการซึมผ่านของไอน้ำมีค่าเพิ่มขึ้น และเมื่อทำการทดสอบการเคลื่อนย้ายของสารเคมีโดยการอบด้วยความร้อนและแช่ในสารละลายที่เป็นตัวแทนอาหารในสภาวะต่าง พบว่ามีค่าไม่เกิน 5% ซึ่งสามารถยอมรับได้น้ำมันสมุนไพรที่ผสมลงไปไม่สามารถหลุดออก จากผลการทดสอบพบว่าน้ำมันสมุนไพรที่เติมช่วยปรับปรุงความยืดหยุ่นของ PLA ซึ่งฟิล์ม PLA ผสมน้ำมันมะพร้าวที่อัตราส่วน 1 wt.% มีค่าการยืดออก ณ จุดขาดที่ดีที่สุดมากถึง 4 เท่า แต่ฟิล์มที่เตรียมเหล่านี้พบปัญหาฟิล์มติดกันทำให้ลอกออกจากกันได้ยาก ดังนั้นจึงได้ทำการปรับปรุงด้วยการเติมสารตัวเติมคือแป้งมันสำปะหลังที่อัตราส่วน 0.5 และ 1 wt.% ผสมกับ PLA และน้ำมันมะพร้าว 1 wt.% ด้วยเครื่องอัดรีดเกลียวหนอนคู่ จากนั้นทำการขึ้นรูปโดยเครื่องเป่าฟิล์ม พบว่าเมื่อมีการเติมแป้งมันสำปะหลัง ทำให้สมบัติอัตราการไหลของพลาสติกมีค่าเพิ่มขึ้น สัญญาณวิทยาสังเกตเห็นมีการกระจายตัวของอนุภาคแป้งมันสำปะหลัง ในเมทริกซ์ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม สมบัติการทนต่อแรงดึง และมอดูลัสมีค่าลดลง แต่ค่าการยืดตัวออก ณ จุดขาดมีค่าเพิ่มขึ้น สมบัติการซึมผ่านของไอน้ำมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อทำการทดสอบการเคลื่อนย้ายของสารเคมีโดย

การอบด้วยความร้อนและโดยการแช่ในสารละลายที่เป็นตัวแทนอาหารในสภาวะต่าง พบว่ามีค่าไม่เกิน 5% ในส่วนที่สอง ได้ศึกษาการเตรียมกระดาษจากเยื่อฟางข้าว โดยผ่านการบำบัดด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่ความเข้มข้น 5 10 และ 15 wt.% จากผลการทดสอบพบว่าเมื่อความเข้มข้นของ NaOH เพิ่มขึ้นค่าการดูดซับน้ำ และสมบัติการทนต่อแรงดึง ความยืดหยุ่น ณ จุดขาด ค่ามอดูลัสมีแนวโน้มลดลง แต่ค่าสีมีความสว่างขึ้น ในขั้นตอนนี้พบว่ากระดาษฟางข้าวที่บำบัดด้วย 10 wt.% NaOH มีค่าความแข็งแรงที่เหมาะสมที่จะนำไปลามิเนตกับฟิล์มพอลิเมอร์ชีวภาพต่อไป การศึกษาในตอนที่สาม คือ การเตรียมกระดาษฟางข้าวลามิเนตด้วยฟิล์ม PLA ผสมน้ำมันมะพร้าว 1 wt.% และแป้งมันสำปะหลัง 0.5 wt.% ด้วยสภาวะการลามิเนตที่ความชื้นที่แตกต่างกัน คือ 0 10 20 และ 30 % พบว่า การทดสอบการต้านทานต่อการลอกออกของฟิล์มพอลิเมอร์ชีวภาพ และกระดาษฟางข้าวเมื่อความชื้นเพิ่มมากขึ้นนั้น ค่าการต้านทานต่อการลอกออกมีค่าลดลง ดังนั้นจึงสรุปได้ว่ากระดาษฟางข้าวลามิเนตฟิล์มพอลิเมอร์ชีวภาพที่เตรียมได้ที่อัตราความชื้นที่ 10 wt.% มีค่าการต้านทานต่อการลอกออกที่ดีที่สุด สามารถพัฒนาเป็นบรรจุภัณฑ์ที่สามารถย่อยสลายได้ เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม มีสมบัติป้องกันการรั่วซึมของน้ำและน้ำมันได้

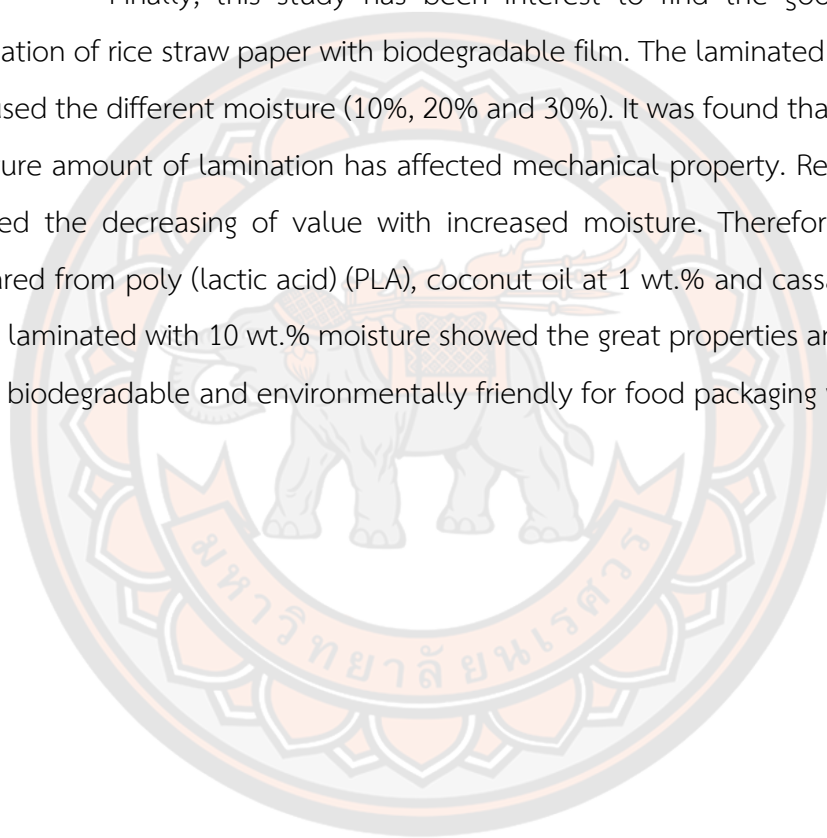
<b>Title</b>	DEVELOPMENTS OF LAMINATING RICE STAW PAPER BY BIODEGRADABLE FILMS WITH HERBAL OIL
<b>Author</b>	Benjawan Khantho
<b>Advisor</b>	Assistant Professor Sararat Mahasaranon, Ph.D.
<b>Co-Advisor</b>	Assistant Professor Nungruthai Suphrom, Ph.D.
<b>Academic Paper</b>	M.S. Thesis in Industrial Chemistry, Naresuan University, 2022
<b>Keywords</b>	Poly (lactic acid) Herbal oil Cassava starch Rice straw paper Laminate

### ABSTRACT

This research has been interested to prepare food packaging which can be biodegradable and waterproof property from poly (lactic acid), PLA, herbal oils, and cassava starch laminated with rice straw paper. This research was divided into three parts. First, various ratios of herbal oils (coconut oil, moringa oil, clove oil and lemongrass oil at 0.25 0.5 0.75 and 1 wt. %) were blended with PLA by melt mixing process using a twin screw extruder and film blowing machine. Mel flow index was increased with addition the herbal oils into PLA. The morphology of the obtained films showed a smooth surface. It was found that the tensile strength and modulus decreased but the elongation at break increased. The water vapor permeability properties increased. Moreover, for migration tests overall migration, the results of the biodegradable films show in the range of 0 to 5%. Especially, PLA and coconut oil 1 wt% film presented the largest improvement and showed an elongation at break around 40%. However, the problem of these films was difficult to peel off so interest to add the additive cassava starch at 0.5 and 1 wt.% with coconut oil 1 wt.% mixed with PLA by twin screw extruder and film blowing machine. After being mixed with cassava oil. The melt flow index of the obtained compound was increased. The morphology of this film showed the cassava starch particle separate on PLA matrix. Moreover, the addition of cassava starch into PLA film can be improved water vapor permeability and the elongation at break. On the other hand, the migration test

showed in the range of 0 to 5%. The second study, to prepare paper from rice straw which treated with NaOH solution 5 10 and 15 wt.%. The rice straw papers produced with increased the concentration of NaOH that presented the water absorption and mechanical properties decreased. However, the color parameter, the lightness ( $L^*$ ) has higher value. In this study, it has found that the rice straw with treated 10 wt.% NaOH has a good tensile strength for production the food packaging.

Finally, this study has been interest to find the good condition for lamination of rice straw paper with biodegradable film. The laminated rice straw paper was used the different moisture (10%, 20% and 30%). It was found that the use of high moisture amount of lamination has affected mechanical property. Result of peel test showed the decreasing of value with increased moisture. Therefore, this film was prepared from poly (lactic acid) (PLA), coconut oil at 1 wt.% and cassava starch at 0.5 wt.%. laminated with 10 wt.% moisture showed the great properties and to developed to be biodegradable and environmentally friendly for food packaging with waterproof.



## ประกาศคุณูปการ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จได้ด้วยความเอาใจใส่ดูแลเป็นอย่างดีจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศรา รัตน์ มหาศรานนท์ ประธานที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษา ให้คำแนะนำ ตลอดระยะเวลาการทำ วิทยานิพนธ์นี้ และแนะนำแนวคิด ในการทำวิจัยนี้แก่ผู้วิจัยด้วยดีมาโดยตลอด ผู้วิจัยขอขอบพระคุณในความ กรุณาของอาจารย์เป็นอย่างดี และขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.หนึ่งฤทัย สุพรม กรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ขอขอบคุณกรรมการสอบวิทยานิพนธ์อันประกอบไปด้วย ผู้ช่วย ศาสตราจารย์ ดร.ศิริศาสตร์ เอื้อใจ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภัตรา ประทุมชาติ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องของ วิทยานิพนธ์นี้ด้วยความเอาใจใส่ จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างสมบูรณ์

กราบขอบพระคุณอาจารย์ ภาควิชาเคมีทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ตลอด ระยะเวลาที่ผู้วิจัยเข้ารับการศึกษา ณ สถาบันการศึกษาแห่งนี้ และขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ของ มหาวิทยาลัยทุกท่าน ภาควิชาเคมี ศูนย์ปฏิบัติการวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ในการให้ความอนุเคราะห์การใช้เครื่องมือทดสอบ ให้ความรู้ คำแนะนำ ตลอดจนเอื้อเฟื้อสถานที่การทำ วิจัยนี้

เหนือสิ่งอื่นใดขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ของผู้วิจัยที่ให้กำลังใจ และให้การสนับสนุน ในทุก ๆ ด้านอย่างดีที่สุดเสมอมา นอกจากนี้ขอขอบคุณผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องในการทำวิจัยทุกท่าน ที่ให้ ความช่วยเหลือ และสนับสนุนการทำวิจัยครั้งนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่างานวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่สนใจไม่มากก็น้อย

เบญจวรรณ ชันโท



## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
ประกาศคุณูปการ.....	ช
สารบัญ.....	ซ
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ด
บทที่ 1 บทนำ.....	1
ความเป็นมาของปัญหา.....	1
จุดมุ่งหมายของการวิจัย.....	2
ขอบเขตการวิจัย.....	3
บทที่ 2.....	4
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 บรรจุภัณฑ์ (Packaging).....	4
2.2 การผลิตบรรจุภัณฑ์ด้วยเทคนิคลามิเนต (Laminate).....	5
2.3 พลาสติกชีวภาพ (Bioplastic).....	7
พอลิแลคติกแอซิด (Poly (lactic acid), PLA).....	7
การย่อยสลายของพอลิแลคติกแอซิดหรือพีแอลเอ.....	8
2.4 พลาสติไซเซอร์ (Plasticizers).....	10
ทฤษฎีการทำงานของพลาสติไซเซอร์ (Theories of Plasticizer Action).....	10

2.5 น้ำมันจากพืชสมุนไพร .....	11
2.6 น้ำมันจากสมุนไพรที่ใช้ในงานวิจัยนี้ .....	11
2.6.1 น้ำมันมะพร้าว .....	11
2.6.2 น้ำมันมะรุม .....	13
2.6.3 น้ำมันกานพลู .....	14
2.6.4 น้ำมันตะไคร้ .....	15
2.7 เครื่องหลอมอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ (Twin-screw extruder) .....	16
2.8 เครื่องหลอมอัดรีดเป่าฟิล์ม (Blow film extruder) .....	17
2.9 การเตรียมฟิล์มพอลิแลคติกแอซิด และน้ำมันจากสมุนไพร .....	18
2.10 กระดาษ (Paper) .....	19
2.11 เส้นใย (Fiber) ในการผลิตเยื่อกระดาษ .....	19
2.11.1 เส้นใยธรรมชาติ (Natural fibers) .....	20
2.11.2 เส้นใยประดิษฐ์ (Man-made fibers) .....	20
2.11.3 องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยจากพืช .....	21
2.11.4 ลักษณะเส้นใยจากพืช .....	21
2.11.5 ประเภทของต้นไม้ที่ใช้ในการผลิตเยื่อกระดาษ .....	21
2.12 กระบวนการผลิตกระดาษ .....	22
2.13 ฟางข้าว (Rice straw) .....	23
2.14 การเตรียมผลิตภัณฑ์เยื่อกระดาษจากเส้นใย .....	23
บทที่ 3 .....	25
วิธีดำเนินงานวิจัย .....	25
เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย .....	25

วัตถุดิบและสารเคมี .....	26
วิธีดำเนินงานวิจัย .....	27
1. फिल्मพอลิแลคติกแอซิด .....	27
1.1 การเตรียมพอลิแลคติกแอซิด และน้ำมันพีชสมุนไพรว...	27
1.2 การปรับปรุงฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิด น้ำมันพีชมะพร้าว ด้วยสารตัวเติม .....	28
2. การเตรียมผลิตภัณฑ์กระดาษจากเยื่อฟางข้าว .....	30
3. การเตรียมบรรจุภัณฑ์สำหรับบรรจุอาหารจากฟิล์มพอลิแลคติกแอซิด ผสมน้ำมันมะพร้าว.....	30
และแป้งมันสำปะหลังلاميเนตลงบนกระดาษจากเยื่อฟางข้าว .....	30
4. การทดสอบสมบัติของฟิล์มพอลิเมอร์.....	31
4.1 ทดสอบอัตราการไหลของพลาสติก (Melt Flow Index).....	31
4.2 ศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM).....	32
4.3 ทดสอบสมบัติทางกายภาพของฟิล์มพอลิเมอร์.....	32
4.3.1 ทดสอบความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำ (Water vapor permeability) .....	32
4.4 ทดสอบการเคลื่อนย้ายของสารเคมี (Migration test).....	32
4.4.1 ทดสอบ Plasticizer migration test.....	33
4.4.2. ทดสอบโดยใช้สารละลายที่เป็นตัวแทนอาหาร (Overall migration test).....	33
4.5 การทดสอบสมบัติเชิงกล.....	33
4.5.1 การทดสอบการทนต่อแรงดึง (Tensile test).....	33

4.6 การทดสอบสมบัติทางเคมี .....	34
4.6.1 การทดสอบการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FT-IR (Fourier Transform Infrared Spectroscopy).....	34
4.7 การทดสอบการย่อยสลายแบบฝังกลบดิน (Biodegradation).....	35
5. การทดสอบเยื่อกระดาษจากฟางข้าว .....	35
5.1 การทดสอบสมบัติทางกายภาพ.....	35
5.1.1 การหาเปอร์เซ็นต์การบวมตัว (%Swelling).....	35
5.1.2 การทดสอบการวัดสีด้วยเครื่อง colorimeter .....	36
5.2 การทดสอบสมบัติเชิงกล.....	36
5.2.1 การทดสอบการทนต่อแรงดึง (Tensile testing).....	36
5.2.2 การทดสอบความต้านทานต่อการฉีกขาด (Tear test).....	37
6. การทดสอบบรรจุภัณฑ์อาหารจากแผ่นฟิล์มพอลิแลคติกแอซิด ผสมน้ำมันพืช สมุนไพรลามีเนตลงบนกระดาษเยื่อฟางข้าว .....	38
6.1 ศึกษาสมบัติการสภาวะการเปียก ด้วยเครื่องวัดมุม (contact angle) .....	38
6.2 ศึกษาสมบัติเชิงกล .....	38
6.2.1 การทดสอบการยืดเกาะ (Peel test) .....	38
บทที่ 4 .....	40
ผลการวิจัย.....	40
1. ศึกษาสมบัติของฟิล์มพอลิแลคติก (PLA) ผสมน้ำมันสมุนไพร.....	40
1.1 ศึกษาสมบัติของฟิล์มพอลิแลคติกแอซิด (PLA) ผสมน้ำมันสมุนไพรทั้ง 4 ชนิดคือ น้ำมันมะพร้าว น้ำมันมะรุม น้ำมันกานพลู และน้ำมันตะไคร้บ้าน ที่อัตราส่วนที่ แตกต่างกัน.....	40

1.1.1 การศึกษาค่าอัตราการไหล (Melt Flow Rate) ของเม็ดคอมพาวด์พอลิแลคติกแอซิด (PLA) ผสมน้ำมันสนุนไพร์ ที่อัตราส่วนที่แตกต่างกัน.....	40
1.1.2. การศึกษาสัณฐานวิทยาของฟิล์มพอลิแลคติกแอซิด (PLA) ผสมน้ำมันสนุนไพร์อัตราส่วนที่แตกต่างกัน.....	41
1.1.3. การศึกษาความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำของฟิล์มพอลิ-แลคติกแอซิด ผสมน้ำมันสนุนไพร์ที่อัตราส่วนที่แตกต่างกัน .....	44
1.1.4. การศึกษาการเคลื่อนย้ายของสารเคมีของฟิล์มพอลิแลคติกแอซิดผสมน้ำมันสนุนไพร์ที่อัตราส่วนที่แตกต่างกัน แบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ.....	46
1. Plasticizer migration test.....	46
2. Overall migration test.....	48
1.1.5. การศึกษาการทนต่อแรงดึงของฟิล์มพอลิแลคติกแอซิดผสมน้ำมันสนุนไพร์ที่อัตราส่วนที่แตกต่างกัน.....	51
1.1.7. การศึกษาการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของฟิล์มพอลิแลคติกแอซิดผสมน้ำมันสนุนไพร์ที่อัตราส่วนที่แตกต่าง .....	59
1.1.8. การศึกษาการการย่อยสลายของฟิล์มพอลิแลคติกแอซิด (PLA) ผสมน้ำมันสนุนไพร์ที่อัตราส่วนที่แตกต่าง .....	60
1.2 ศึกษาสมบัติของฟิล์มพอลิแลคติก (PLA) น้ำมันมะพร้าว ผสมแป้งมันสำปะหลังที่มีอัตราส่วนของแป้งมันสำปะหลังที่แตกต่างกัน .....	64
1.2.1 การศึกษาสมบัติอัตราการไหลของเม็ดคอมพาวด์พอลิแลคติกแอซิด น้ำมันมะพร้าว ผสมกับแป้งมันสำปะหลัง.....	64
1.2.2 การศึกษาสัณฐานวิทยาของฟิล์มพอลิแลคติกแอซิด น้ำมันมะพร้าว ผสมแป้งมันสำปะหลัง .....	65
1.2.3 การศึกษาความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำของฟิล์มพอลิแลคติกแอซิด น้ำมันมะพร้าว ผสมแป้งมันสำปะหลัง.....	66

1.2.4. การศึกษาการเคลื่อนย้ายของสารเคมีของฟิล์มพอลิแลคติกแอซิดน้ำมันมะพร้าว ผสมแป้งมันสำปะหลัง แบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ .....	67
1. Plasticizer migration test.....	67
2. Overall migration test.....	69
1.2.5. การศึกษาการทนต่อแรงดึงของฟิล์มพอลิแลคติกแอซิดน้ำมันมะพร้าว ผสมแป้งมันสำปะหลัง.....	71
1.2.6. การศึกษาการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของฟิล์มพอลิแลคติกแอซิดน้ำมันมะพร้าว ผสมแป้งมันสำปะหลัง.....	76
1.2.7. การศึกษาการย่อยสลายของฟิล์มพอลิแลคติกแอซิดน้ำมันมะพร้าว ผสมแป้งมันสำปะหลัง .....	77
2. ศึกษาสมบัติของกระดาษจากเยื่อฟางข้าว.....	79
2.1 การศึกษาการหาเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำ (%Water absorption) ของกระดาษจากเยื่อฟางข้าว .....	79
2.2 การทดสอบการวัดสีด้วยเครื่อง colorimeter ของกระดาษจากเยื่อฟางข้าว .....	80
2.3 การศึกษาการทนต่อแรงดึงของกระดาษจากเยื่อฟางข้าว.....	81
2.4 การศึกษาความต้านทานต่อการฉีกขาดของกระดาษจากเยื่อฟางข้าว .....	83
3. ศึกษาสมบัติของบรรจุภัณฑ์อาหารจากแผ่นฟิล์มพอลิแลคติกแอซิด (PLA) ผสมน้ำมันมะพร้าวลามิเนตลงบนกระดาษจากเยื่อฟางข้าว .....	85
3.1 การศึกษาสภาวะการเปียกของฟิล์มพอลิแลคติกผสมน้ำมันมะพร้าว และแป้งมันสำปะหลังลามิเนตกระดาษจากเยื่อฟางข้าว.....	85
3.2 การศึกษาการยึดเกาะของฟิล์มพอลิแลคติกผสมน้ำมันมะพร้าว และแป้งมันสำปะหลังลามิเนตกระดาษจากเยื่อฟางข้าว .....	88
บทที่ 5.....	89

บทสรุป.....	89
สรุปผลการวิจัย.....	89
บรรณานุกรม.....	92
ประวัติผู้วิจัย.....	94



## สารบัญตาราง

	หน้า
ตาราง 1 อัตราส่วนการเตรียม PLA และน้ำมันพืชสมุนไพร.....	27
ตาราง 2 อัตราส่วนการเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA น้ำมันมะพร้าว และแป้งมันสำปะหลัง.....	29
ตาราง 4 ภาพถ่ายลักษณะพื้นผิวของตัวอย่างฟิล์มพอลิแลคติกแอซิด (PLA) ผสมน้ำมันสมุนไพร.....	42
ตาราง 5 แสดงผลค่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำของฟิล์มพอลิแลคติกแอซิดผสมน้ำมันสมุนไพรที่.....	44
ตาราง 6 ผลการทดสอบ Overall migration ของฟิล์มพอลิแลคติกแอซิด (PLA) ผสม .....	49
ตาราง 7 ภาพถ่าย SEM ของลักษณะพื้นผิวที่กำลังขยาย 200 เท่า และพื้นผิวภาคตัดขวางที่กำลังขยาย 1000 เท่า ของตัวอย่างฟิล์ม PLA น้ำมันมะพร้าวที่ผสมแป้งมันสำปะหลังในอัตราส่วน 0.5 และ 1% w/w .....	65
ตาราง 8 ค่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ (WVTR) ของฟิล์ม PLA น้ำมันมะพร้าวผสมแป้งมัน.....	67
ตาราง 9 การทดสอบ Overall migration ของฟิล์ม PLA น้ำมันมะพร้าว ผสมแป้งมัน.....	70
ตาราง 10 ค่าพารามิเตอร์สีของกระดาษจากฟางข้าวที่ทำการบำบัดสมบัติเส้นใยฟางข้าวโดยโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 5 10 และ 15 %.....	80
ตาราง 11 การทดสอบค่ามอดุลัสของแผ่นกระดาษฟางข้าวลามิเนตฟิล์มพอลิแลคติกแอซิดผสม .....	86
ตาราง 12 การทดสอบค่ามอดุลัสของแผ่นกระดาษฟางข้าวลามิเนตฟิล์มพอลิแลคติกผสมน้ำมัน.....	87



ตาราง 13 ค่าการยึดเกาะของแผ่นกระดาษฟางข้าวลามิเนตฟิล์มพอลิแลคติกผสมน้ำมัน  
มะพร้าว.....88



## สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพ 1 กระบวนการลามิเนตฟิล์มด้วยความร้อน.....	6
ภาพ 2 โครงสร้างทางเคมีของ (ก) PLLA (ข) PDLA และ (ค) มอนอเมอร์ของ PLA.....	8
ภาพ 3 การย่อยสลายของพีแอลเอโดยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส.....	9
ภาพ 4 กระบวนการสังเคราะห์พอลิแลคติกแอซิด.....	9
ภาพ 5 เนื้อมะพร้าวที่ใช้ในการสกัดน้ำมันมะพร้าว.....	12
ภาพ 6 โครงสร้างของกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบในน้ำมันมะพร้าว (ก) กรดลอริก.....	13
ภาพ 7 (ก) เมล็ดของต้นมะรุุม และ (ข) ฝักของต้นมะรุุม.....	13
ภาพ 8 โครงสร้างของกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบในน้ำมันมะรุุม (ก) กรดโอเลอิก.....	14
ภาพ 9 ใบและดอกกานพลู.....	14
ภาพ 10 โครงสร้างที่เป็นองค์ประกอบหลักของน้ำมันกานพลู (ก) ยูจีนอล และ.....	15
ภาพ 11 ต้นตะไคร้.....	15
ภาพ 12 โครงสร้างที่เป็นองค์ประกอบหลักของน้ำมันตะไคร้ (ก) geranial และ (ข) neral .....	16
ภาพ 13 เครื่องหลอมอัดรีดแบบเกลียวหอนคู่ (Twin-screw extruder).....	17
ภาพ 14 เครื่องหลอมอัดรีดเป่าฟิล์ม (Blow film extruder).....	17
ภาพ 15 เครื่องผสมแบบเกลียวหอนคู่ (Twin screw extruder ).....	29
ภาพ 16 การขึ้นรูปฟิล์มพอลิเมอร์ผสมด้วยเครื่องหลอมอัดรีดเป่าฟิล์ม (Blow film extruder).....	30
ภาพ 17 บรรจุภัณฑ์สำหรับบรรจุอาหารจากฟิล์มพอลิแลคติกแอซิด ผสมน้ำมันพืช สมุนไพรลาบ.....	31

ภาพ 18 เครื่องทดสอบค่าอัตราการไหลของพลาสติก (Melt flow index).....	31
ภาพ 19 เครื่องทดสอบการทนต่อแรงดึง (Universal testing machine).....	34
ภาพ 20 เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR).....	35
ภาพ 21 ตำแหน่งการวัดสีของตัวอย่างชิ้นงาน.....	36
ภาพ 22 เครื่องทดสอบการทนต่อแรงดึง (Universal testing machine).....	37
ภาพ 23 ตัวอย่างการดึงชิ้นงานการทดสอบความต้านทานต่อการฉีกขาด.....	37
ภาพ 24 เครื่องวัดมุมสัมผัส (Contact angle analyze).....	38
ภาพ 25 ตัวอย่างการดึงชิ้นงานการทดสอบการยึดเกาะ.....	39
ภาพ 26 ค่าอัตราการไหล (Melt Flow Rate) ของเม็ดคอมพาวด์พอลิแลคติกแอซิด (PLA) ผสม.....	41
ภาพ 27 ภาพถ่ายลักษณะพื้นผิวของตัวอย่างฟิล์มพอลิแลคติกแอซิด (PLA) ที่กำลังขยาย 200X.....	42
ภาพ 28 ค่าการสูญเสียเสียน้ำหนักของพลาสติกไฮเซออร์ของฟิล์มพอลิแลคติกแอซิด (PLA) ผสม.....	48
ภาพ 29 ผลการทดสอบการทนต่อแรงดึงในทิศทางตามแนวเครื่องจักร (MD) และทิศทางตาม.....	54
ภาพ 30 ผลการทดสอบการทนต่อแรงดึงในทิศทางตามแนวเครื่องจักร (MD) และทิศทางตาม.....	55
ภาพ 31 ผลการทดสอบการทนต่อแรงดึงในทิศทางตามแนวเครื่องจักร (MD) และ ทิศทางตาม.....	57
ภาพ 32 ผลการทดสอบการทนต่อแรงดึงในทิศทางตามแนวเครื่องจักร (MD) และ ทิศทางตาม.....	59

ภาพ 33 FTIR สเปกตรัมของฟิล์มพอลิแลคติกแอซิด (PLA) ผสมน้ำมันสนุนไพร์ที่อัตราส่วนที่.....	60
ภาพ 34 เปอร์เซ็นต์การย่อยสลายของฟิล์มพอลิแลคติกแอซิด (PLA) ผสมน้ำมันสนุนไพร์ที่.....	63
ภาพ 35 อัตราการไหลของเม็ดคอมพาวด์ของฟิล์ม PLA น้ำมันมะพร้าว และแป้งมันสำปะหลังใน	
65	
ภาพ 36 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปของการทดสอบ Plasticizer migration ของฟิล์ม PLA.....	69
ภาพ 37 ผลการทดสอบการทนต่อแรงดึงในทิศทางตามแนวเครื่องจักร (MD) ของฟิล์ม PLA.....	74
ภาพ 38 ผลการทดสอบการทนต่อแรงดึงในทิศทางตามแนวขวาง (TD) ของฟิล์ม PLAผสมน้ำมัน.....	76
ภาพ 39 FTIR สเปกตรัมของฟิล์มพอลิแลคติกแอซิด น้ำมันมะพร้าว ผสมแป้งมันสำปะหลังใน.....	77
ภาพ 40 เปอร์เซ็นต์การย่อยสลายของฟิล์มพอลิแลคติกแอซิด น้ำมันมะพร้าว ผสมแป้งมัน.....	78
ภาพ 41 เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของเยื่อกระดาษจากฟางข้าวที่ทำการบำบัดสมบัติเส้น 80	
ภาพ 42 การทนต่อแรงดึงของเยื่อกระดาษจากฟางข้าวที่ทำการบำบัดสมบัติเส้นใยฟางข้าวโดย.....	83
ภาพ 43 การต้านทานต่อการฉีกขาดของเยื่อกระดาษจากฟางข้าวที่ทำการบำบัดสมบัติเส้นใยฟาง.....	84

# บทที่ 1

## บทนำ

### ความเป็นมาของปัญหา

บรรจุภัณฑ์จะใช้เพื่อทำหน้าที่ในการบรรจุสิ่งของและใช้เพื่อป้องกันสิ่งของเสียหาย โดยในปัจจุบันที่จะทำจากวัสดุหลากหลาย ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภท นั่นคือ พลาสติกประมาณ 36% กระดาษประมาณ 34% และวัสดุอื่นๆ ประมาณ 30% เช่น โลหะ แก้ว เซรามิกส์ เป็นต้น (ประวีรา โพธิ์สุวรรณ, 2561) ซึ่งกระดาษนับว่าถูกใช้มาเป็นบรรจุภัณฑ์รองลงมาจากพลาสติกและได้รับความนิยมนำไปบรรจุสิ่งของหลายประเภท เช่น อุปกรณ์ไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ ก่อสร้าง เครื่องนุ่งห่ม ยา เครื่องสำอาง อาหารสดและอาหารแห้ง เป็นต้น โดยกระดาษที่ผลิตในประเทศไทยส่วนใหญ่ผลิตจากเยื่อคาลิปตัส ซึ่งต้นไม้นี้ไม่นิยมปลูกในประเทศไทย เนื่องจากมีข้อจำกัดทางด้านเกษตรกรรมจึงทำให้มีการนำเข้า แต่ปัจจุบันปริมาณการใช้กระดาษมีจำนวนสูงขึ้น แต่ต้นไม้มืออย่างจำกัดและใช้เวลาในการเจริญเติบโตและเกิดปัญหาด้านการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมซึ่งต้องทำการตัดต้นไม้อื่นเพื่อมาทำเป็นเยื่อผลิตกระดาษ จึงมีการหาวัตถุดิบเพื่อมาทดแทนการผลิตกระดาษขึ้นมาแทนการตัดต้นไม้อื่น เช่น ชานอ้อย ฟางข้าว กาบกล้วย ใบสับปะรด ผักตบชวาและวัชพืชต่างๆ เป็นต้น ซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งทางเกษตรกรรม แต่ทว่ามีข้อเสียของบรรจุภัณฑ์กระดาษเหล่านี้ไม่สามารถป้องกันการรั่วและการซึมของน้ำได้ โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมอาหาร การนำกระดาษมาเป็น กล่อง ถู ของ จาน ถาด ในการบรรจุใส่ทั้งอาหารสดและอาหารแห้ง ไม่สามารถป้องกันการซึมผ่านของน้ำและน้ำมันได้ ดังนั้นจึงมีการพัฒนาและปรับปรุงให้มีคุณสมบัติการทนน้ำ ทนการรั่วซึม โดยการใส่สารเติมแต่ง (additives) จำพวกสารต้านกันชื้นน้ำ (sizing agent) และมีการนำฟิล์มพลาสติกมาลามิเนตกับกระดาษโดยใช้กาวหรือทั้งกาวและความร้อนช่วยให้เกิดการยึดติด ซึ่งฟิล์มพลาสติกนี้ทำมาจากพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่ได้มาจากผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม ไม่สามารถย่อยสลายได้เองและใช้เวลาในการย่อยสลายเป็นเวลานานหลายร้อยปี อีกทั้งในปัจจุบันปริมาณการใช้พลาสติก และโพลีเมอร์บรรจุภัณฑ์อาหารมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง จนก่อให้เกิดเป็นปัญหาขยะพลาสติก โดยในประเทศไทยพบว่ามีปริมาณขยะที่เกิดจากขยะพลาสติกและโพลีเมอร์บรรจุภัณฑ์อาหารเป็นจำนวน 2.7 ล้านตัน/ปี (กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2562) ซึ่งส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมมากมาย เช่น ขยะพลาสติกเมื่อใช้ถูกทิ้งลงบนพื้นดิน แม่น้ำ ทะเล มีปัญหาด้านการกำจัด จนทำให้เต่าหรือสัตว์ทะเลที่อยู่ในทะเลกินถุงพลาสติกเข้าไปแล้วตาย เพราะไม่สามารถย่อยพลาสติกได้ นอกจากนี้ จะเกิดปัญหาการปนเปื้อนสารเติมแต่งที่หลุดรอดออกมาจากพลาสติก ซึ่งก็คือ สารจำพวก พลาสติกไซ

เซอร์ (plasticizers) เกิดการปนเปื้อนลงสู่แหล่งน้ำ แหล่งดิน รวมไปถึงอาหารการกินของมนุษย์และสัตว์ ซึ่งเมื่อมนุษย์และสัตว์ได้รับสารเหล่านี้ ทำให้เกิดเป็นพิษต่อระบบต่างๆ ในร่างกาย หรือเรียกว่าเป็นสารก่อมะเร็งให้แก่ร่างกายนั่นเอง นั่นคือนำไปสู่การพัฒนางานวิจัยที่จะแสวงหาและนำวัตถุดิบที่ได้จากธรรมชาติมาผลิตทดแทนพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่มาจากผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม ซึ่งได้พัฒนาพลาสติกชีวภาพ (Bioplastic) สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพขึ้นมาใช้ในการทำเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ทำให้ช่วยลดปริมาณขยะและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสนใจทำบรรจุภัณฑ์อาหารจากเยื่อกระดาษฟางข้าวลามีเนตด้วยฟิล์มพอลิแลคติกแอซิดผสมน้ำมันจากพืชสมุนไพร ซึ่งทำได้โดยการเตรียมฟิล์มจากพอลิแลคติกแอซิด (poly(lactic acid), PLA) เป็นพอลิเมอร์ที่ได้จากธรรมชาติสามารถย่อยสลายได้นำมาผสมน้ำมันจากสมุนไพร น้ำมันที่ใช้จะได้จากพืชสมุนไพรจากธรรมชาติ (น้ำมันมะพร้าว น้ำมันมะรุม น้ำมันกานพลู และ น้ำมันตะไคร้บ้าน) โดยน้ำมันจากสมุนไพรนี้ จัดเป็นพลาสติกไฮเซออร์ ทำหน้าที่เพิ่มความยืดหยุ่น ลดสมบัติความแข็งเปราะของฟิล์มพอลิแลคติกแอซิด ในการผสมเม็ด PLA กับน้ำมันจากพืชสมุนไพร จะใช้เครื่องหลอมอัดรีดเกลียวทวนคู่ (twin screw extruders) ได้ผลิตภัณฑ์คอมพาวด์ (compound) ที่จะถูกนำไปขึ้นรูปฟิล์มด้วยเครื่องเป่าฟิล์ม (blow film extruders) และการเตรียมเยื่อกระดาษฟางข้าว ทำการปรับปรุงสมบัติเส้นใยฟางข้าวโดยโซเดียมไฮดรอกไซด์ เส้นใยที่ผ่านการทำความสะอาดจะถูกนำมาขึ้นแผ่นกระดาษ ในขั้นตอนสุดท้ายเป็นการปรับปรุงการทนน้ำและน้ำมันของแผ่นกระดาษ ซึ่งกระดาษฟางข้าวจะถูกนำมาลามีเนตด้วยฟิล์มที่เตรียมได้ด้วยกาวและความร้อน ซึ่งจะเห็นว่าผลิตภัณฑ์ที่เตรียมได้ในงานวิจัยนี้จะเป็นบรรจุภัณฑ์อาหารที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ช่วยแก้ปัญหาขยะพลาสติกและช่วยลดปัญหาโลกร้อนด้วย จึงจัดเป็นผลิตภัณฑ์ที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมและช่วยสร้างมูลค่าเพิ่มให้แก่วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร อีกทั้งสร้างมูลค่าให้แก่น้ำมันจากพืชสมุนไพรไทยอีกด้วย

### จุดมุ่งหมายของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมฟิล์มพอลิแลคติกแอซิด และน้ำมันจากสมุนไพร ด้วยเทคนิคการผสมโดยเครื่องหลอมอัดรีดแบบสกรูคู่ และกระบวนการขึ้นรูปอัดรีดแบบเป่าฟิล์ม
2. ศึกษาผลของน้ำมันจากสมุนไพรที่มีต่อสมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล และสมบัติทางความร้อนของฟิล์มพอลิแลคติกแอซิดที่เตรียมได้
3. เพื่อศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมเยื่อกระดาษจากฟางข้าว

4. ศึกษาการปรับปรุงกระดาษฟางข้าวด้วยการลามิเนตฟิล์มพอลิแลคติกแอซิดที่เตรียมได้ และศึกษาสมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล ของกระดาษฟางข้าวที่ผ่านการปรับปรุงคุณสมบัติ

#### ขอบเขตการวิจัย

1. เตรียมพอลิแลคติกแอซิดผสมน้ำมันจากสมุนไพร โดยใช้เทคนิคการผสมโดยเครื่องหลอม อัดรีดแบบสกรูคู่ (Twin screw extruder) ทำการขึ้นรูปฟิล์มโดยเทคนิคอัดรีดแบบเป่าฟิล์ม (Blow film extruder) ตามอัตราส่วนที่กำหนด

2. ศึกษาสมบัติทางกายภาพของฟิล์มที่เตรียมได้ เช่น ความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำ (Water vapor transmission rate, WVTR), การเคลื่อนย้ายสาร (Migration test) ศึกษาสัญญาณวิทยาด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscopy (SEM) ศึกษาสมบัติเชิงกล เช่น สมบัติการทนต่อแรงดึง ศึกษาโครงสร้างทางเคมีด้วยเทคนิค FT-IR (Fourier Transform Infrared Spectroscopy)

3. เตรียมผลิตภัณฑ์กระดาษจากเยื่อฟางข้าวโดยการปรับปรุงคุณสมบัติของเยื่อกระดาษฟางข้าวด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์

4. ศึกษาสมบัติทางกายภาพ ของกระดาษฟางข้าวที่เตรียมได้ เช่น เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำ และการวัดสีด้วยเทคนิค Colorimetric ศึกษาสมบัติเชิงกล เช่น สมบัติการทนต่อแรงดึง และความต้านทานต่อการฉีกขาด

5. ลามิเนตกระดาษจากเยื่อฟางด้วยฟิล์มพอลิแลคติกแอซิดผสมน้ำมันจากสมุนไพรที่เตรียมได้

6. ศึกษาภาวะการเปียก (Contact angle) ของกระดาษฟางข้าวลามิเนตด้วยฟิล์มพอลิแลคติกแอซิดผสมน้ำมันจากสมุนไพรที่เตรียมได้และ ศึกษาความต้านทานต่อการลอกออก (Peel test) ของฟิล์มพอลิแลคติกแอซิดผสมน้ำมันจากสมุนไพรลามิเนตบนกระดาษจากเยื่อฟางข้าว

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 บรรจุภัณฑ์ (Packaging)

บรรจุภัณฑ์ (packaging) คือ สิ่งที่ใช้ห่อหุ้มผลิตภัณฑ์หรือภาชนะที่ใช้เพื่อป้องกันผลิตภัณฑ์จากความเสียหาย หรือจากการขนส่งผลิตภัณฑ์ ซึ่งจะช่วยอำนวยความสะดวกในการขนส่ง และช่วยเก็บรักษา

ประเภทของบรรจุภัณฑ์อาหารมีอยู่หลายชนิด ได้แก่

1. บรรจุภัณฑ์กระดาษ มีสัดส่วนในการผลิตมากที่สุดร้อยละ 36 เพราะกระดาษมีน้ำหนักเบา สามารถป้องกันการกระแทกได้ดี แต่ไม่สามารถป้องกันความชื้น การใช้งานส่วนใหญ่นำไปผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์กล่องกระดาษ ถูกระดาษ ฉลาก หรือนำไปใช้ร่วมกับวัสดุชนิดอื่น เช่น กระดาษผสมกับอะลูมิเนียม กระดาษลามิเนตพลาสติก ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการบรรจุอาหาร หรือเครื่องดื่ม

2. บรรจุภัณฑ์พลาสติก มีสัดส่วนในการผลิตอยู่ที่ร้อยละ 34 และมีแนวโน้มความต้องการที่มากขึ้น ข้อดีของพลาสติกมีน้ำหนักเบา สามารถป้องกันการซึมของอากาศ น้ำ ไขมัน แต่ใช้เวลานานในการย่อยสลาย อีกทั้งสารเคมีในพลาสติกยังส่งผลกระทบต่อผู้บริโภคโดยบรรจุภัณฑ์พลาสติกมีอยู่ 2 ประเภทคือ แบบคงรูปหรือแข็ง เช่น ขวดหรือกระปุกพลาสติก แบบอ่อนตัว เช่น ถูพลาสติก ซอง หรือห่อพลาสติก นอกจากนี้ในปัจจุบันยังมีพลาสติกที่มีลักษณะเป็นแบบหลายๆชั้น เพื่อลดข้อด้อยของพลาสติก เช่น การนำเอาพลาสติกหลายๆประเภทมาลามิเนตกัน หรือนำพลาสติกลามิเนตกับวัสดุชนิดอื่นๆ เช่น กระดาษ โลหะ

3. บรรจุภัณฑ์โลหะ มีสัดส่วนการผลิตมากเป็นลำดับที่ 3 อยู่ที่ร้อยละ 17 บรรจุภัณฑ์โลหะมีข้อดีคือมีความแข็งแรง สามารถป้องกันการซึมผ่านของความชื้นและอากาศ ส่วนใหญ่นำไปใช้งานอุตสาหกรรมประเภทอาหาร เช่น อาหารกระป๋อง เครื่องดื่ม และผักผลไม้กระป๋อง

4. บรรจุภัณฑ์แก้ว มีสัดส่วนการผลิตอยู่ที่ร้อยละ 10 มีข้อดีคือทนต่อความร้อน ความเป็นกรด-ด่างและสารละลาย สามารถมองเห็นผลิตภัณฑ์ที่อยู่ด้านบรรจุภัณฑ์ได้ แต่มีน้ำหนักมาก และแตกได้ง่าย ส่วนใหญ่นำมาผลิตเป็น ขวดแก้วหรือกระปุกแก้วบรรจุเครื่องดื่ม เช่น น้ำอัดลม น้ำผลไม้ เบียร์ ซอสปรุงรส

อุตสาหกรรมอาหารเป็นอุตสาหกรรมที่ใช้บรรจุภัณฑ์มากที่สุด คิดเป็นร้อยละ 60 ของปริมาณบรรจุภัณฑ์ที่ผลิตทั้งหมด เนื่องจากคนส่วนใหญ่เลือกซื้ออาหารจากรูปลักษณ์ของบรรจุภัณฑ์ จึงต้องมีการพัฒนาเทคโนโลยี และรูปแบบในการผลิตเพื่อดึงดูดความสนใจจากผู้บริโภค ปัจจุบัน



รูปแบบการดำเนินชีวิตของมนุษย์เปลี่ยนแปลงไป ผู้บริโภคต้องการความสะดวกสบาย ดังนั้นบรรจุภัณฑ์ที่มีน้ำหนักเบา มีขนาดเล็ก เปิดง่าย แบบใช้ครั้งเดียว จึงถูกนิยมนำมาใช้มากขึ้นเพื่อตอบสนองความต้องการของผู้บริโภค (ประวีรา โพธิ์สุวรรณ, 2561)

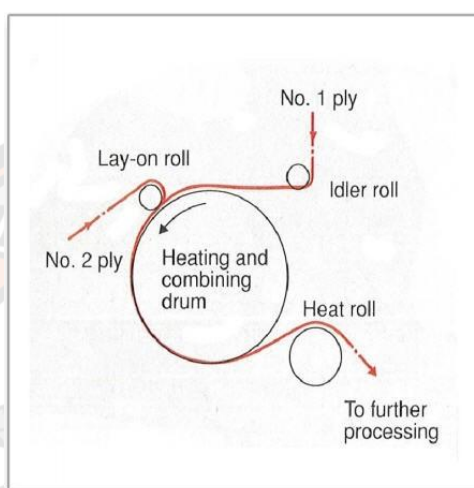
## 2.2 การผลิตบรรจุภัณฑ์ด้วยเทคนิคลามิเนต (Laminate)

ปัจจุบันได้มีการพัฒนาบรรจุภัณฑ์ให้มีคุณสมบัติที่ดีขึ้น โดยมีการนำพลาสติกหลายประเภทมาใช้ร่วมกันด้วยวิธีการลามิเนต (Laminate) ทำให้บรรจุภัณฑ์มีลักษณะเป็นแบบหลายชั้น (Multilayer) ส่วนใหญ่นิยมนำแผ่นฟิล์มพลาสติกหลายชั้นมาเคลือบติดเข้าด้วยกันเป็นแผ่นเดียว หรือเคลือบฟิล์มพลาสติกเข้ากับวัสดุอื่นๆ เช่น กระดาษหรือพอลิโพรพิลีน โดยใช้ความร้อนหรือกาว (adhesive) เป็นตัวประสาน ทำให้ได้ซองลามิเนตที่กันการซึมผ่านของอากาศและความชื้นได้ดี มีความยืดหยุ่นสูง ฟิล์มส่วนใหญ่ที่นำมาใช้ในการลามิเนต เช่น ONYLON OPET และ OPP เป็นต้น

ความหมายของการลามิเนตตามพจนานุกรมบัญญัติราชบัณฑิตยสถาน มีความหมายว่า การทำให้เป็นแผ่นบางๆ ประกอบด้วยชั้นบางๆ เช่นเดียวกับฟิล์มพลาสติกลามิเนตจึงหมายถึง แผ่นฟิล์มพลาสติกที่ผ่านกระบวนการลามิเนตโดยการนำฟิล์มพลาสติกหลายๆ ชั้นมาเคลือบติดเข้าด้วยกันเป็นฟิล์มแผ่นเดียวกัน หรือทำการเคลือบฟิล์มพลาสติกเข้ากับวัสดุอื่นๆ เช่นกระดาษหรือพอลิโพรพิลีน โดยทำการยึดติดระหว่างชั้นของฟิล์มด้วยการใช้ความร้อน หรือกาว (adhesive) โดยฟิล์มลามิเนตนั้นจะมีจำนวนชั้นของฟิล์มมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความต้องการของผู้ผลิต วัตถุประสงค์ในการผลิตฟิล์มลามิเนตคือเพื่อต้องการให้สามารถพิมพ์ตัวอักษรหรือลวดลายลงบนฟิล์มให้สามารถติดอยู่บนฟิล์มได้นานขึ้น โดยการนำแผ่นฟิล์มมาเคลือบติดบนฟิล์มอีกแผ่นหนึ่งที่ผ่านกระบวนการพิมพ์ลวดลายหรืออักษรลงไป เพื่อป้องกันไม่ให้ลวดลายหรือตัวอักษรที่พิมพ์ลบลื่นจากการขีดข่วน น้ำและความชื้น ซึ่งการลามิเนตนี้จะช่วยให้ลวดลายหรือตัวอักษรที่พิมพ์สามารถติดทนและนาน ทำให้สินค้ามีความสวยงาม น่าดู น่าใช้ อีกทั้งยังเป็นการช่วยยืดอายุของสินค้า (Shelf life) ให้ยาวนานขึ้น แต่ในปัจจุบันนอกจากจะต้องคำนึงวัตถุประสงค์ทางด้านความสวยงามแล้วต้องควบคู่ไปพร้อมๆ กับคุณภาพของฟิล์มไปพร้อมๆ กันด้วย เนื่องจากในปัจจุบันผู้ผลิตบรรจุภัณฑ์มีแนวโน้มการใช้บรรจุภัณฑ์พลาสติกทดแทนบรรจุภัณฑ์ประเภทอื่นๆ เช่น ขวดแก้ว กระดาษ หรือกระป๋องโลหะมากขึ้น ประกอบกับในปัจจุบันผู้บริโภคให้ความสำคัญในเรื่องสุขภาพอนามัยและด้านคุณภาพของสินค้ามากขึ้น เทคโนโลยีการผลิตฟิล์มลามิเนตในปัจจุบันได้มีการพัฒนาไปมาก โดยสามารถนำฟิล์มที่มีคุณสมบัติที่แตกต่างกันมาผ่านกระบวนการลามิเนตเพื่อให้ฟิล์มมีคุณภาพสูงยิ่งขึ้น

กระบวนการผลิตฟิล์มลามิเนตสามารถทำได้ 2 วิธีคือ

1. การลามิเนตให้ฟิล์มยึดติดประสานกันด้วยความร้อน (Thermal lamination) ตัวอย่างกระบวนการลามิเนตด้วยความร้อนดังภาพที่ 1 ฟิล์มจากหมายเลข 1 และฟิล์มจากหมายเลข 2 จะถูกส่งมาที่ Heating และ Combining Drum เพื่อทำการให้ความร้อน ส่งผลทำให้ฟิล์มประสานติดกัน หลังจากนั้นฟิล์มจะถูกส่งต่อไปยัง Heat roll และยังคงให้ความร้อนต่อเพื่อที่จะทำการรักษาระดับความหนา และขนาดของฟิล์มให้คงที่ก่อนที่จะทำการม้วนเก็บหรือส่งต่อไปยังกระบวนการอื่น



ภาพ 1 กระบวนการลามิเนตฟิล์มด้วยความร้อน  
(สถาบันปิโตรเลียมแห่งประเทศไทย, 2553a)

2. การลามิเนตโดยใช้กาวเป็นตัวประสานให้ฟิล์มยึดติดกัน (Wet Lamination) ใช้กาวหรือสารเคมีชนิดอื่นๆ มาเป็นตัวเชื่อมประสานระหว่างชั้นฟิล์ม เพราะฟิล์มบางชนิดไม่สามารถประสานติดกันได้อย่างสมบูรณ์ด้วยการใช้ความร้อนเพียงอย่างเดียว เนื่องจากคุณสมบัติทางกายภาพของฟิล์มทั้งสองชนิดไม่สามารถเข้ากันได้

ปัจจุบันได้มีการผลิตบรรจุภัณฑ์จากฟิล์มลามิเนตอย่างกว้างขวาง โดยฟิล์มลามิเนตถูกนำไปผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์ที่หลากหลาย เช่น

1. บรรจุภัณฑ์สำหรับอาหารแช่แข็งบรรจุภัณฑ์สุญญากาศ เช่น อาหาร เนื้อสัตว์แช่แข็ง อาหารพร้อมรับประทาน บรรจุภัณฑ์ประเภทนี้จะต้องมีความเหนียว เพื่อที่จะสามารถใช้กระบวนการบรรจุแบบสุญญากาศได้ ทนต่อกรด น้ำมัน ป้องกันการผ่านเข้าออกของก๊าซได้ดี และสามารถเก็บรักษากลิ่น รส และความสดของอาหารได้

2. บรรจุภัณฑ์สำหรับสินค้าประเภทผง เช่น ครีมเทียม กาแฟ ผงซักฟอก บรรจุภัณฑ์ประเภทนี้ต้องมีสมบัติในการป้องกันการผ่านเข้าออกของก๊าซ สามารถกันความชื้น ความร้อน และแสงได้

เพราะถ้าบรรจุภัณฑ์ประเภทนี้สัมผัสอากาศ ความร้อนหรือแสง จะทำให้สมบัติของสินค้าเปลี่ยนแปลงไปหรือเสื่อมลง

3. บรรจุภัณฑ์สำหรับขนมขบเคี้ยว เบเกอรี่ บรรจุภัณฑ์ประเภทนี้จะต้องมีความใส ผิวมันวาว ป้องกันแสงแดด ความชื้นได้ และเก็บรักษากลิ่นและรสของอาหารได้ดี เพื่อจะช่วยให้สินค้าคงความกรอบ สดใหม่อยู่เสมอ

4. บรรจุภัณฑ์สำหรับของเหลวเช่น น้ำยาล้างจาน น้ำยาปรับผ้านุ่ม บรรจุภัณฑ์สำหรับสินค้าแช่เย็น ซึ่งบรรจุภัณฑ์ประเภทนี้ต้องมีความยืดหยุ่นได้ดีในทุกๆสภาพอุณหภูมิ เพื่อป้องกันการฉีกขาด และต้องป้องกันการผ่านเข้าออกของก๊าซและน้ำมัน ทนต่อกรด-ด่าง (สถาบันปิโตรเลียมแห่งประเทศไทย, 2553b)

### 2.3 พลาสติกชีวภาพ (Bioplastic)

พลาสติกชีวภาพ คือ พลาสติกที่ผลิตได้จากพืชหรือวัตถุดิบที่สามารถปลูกทดแทนได้ (renewable resources) หรือพลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ (Biodegradable) เมื่อใช้หลักเกณฑ์ในการจำแนกชนิดของพลาสติกชีวภาพตามแหล่งที่มา สามารถจำแนกออกได้เป็น 2 ประเภท คือ

พลาสติกฐานฟอสซิล คือ พลาสติกที่ผลิตได้จากวัตถุดิบชีวมวล หรือ ปิโตรเคมี เตรียมจากมอนอเมอร์ที่ได้จากซากพืชซากสัตว์ (fossil) ซึ่งพลาสติกกลุ่มนี้เมื่อถูกใช้งานแล้วจะสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพโดยผ่านกระบวนการหมักทางชีวภาพ (fermentation) และกระบวนการไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ตัวอย่างเช่น พอลิคาโพรแล็กโตน (Polycaprolactone, PCL) พอลิบิวทิลีน อดิเพท เทอเรพทาเลท (Polybutylate adipate terephthalate, PBAT) และ พอลิบิวทิลีน ซัคซิเนต (Polybutylene Succinate, PBS) เป็นต้น

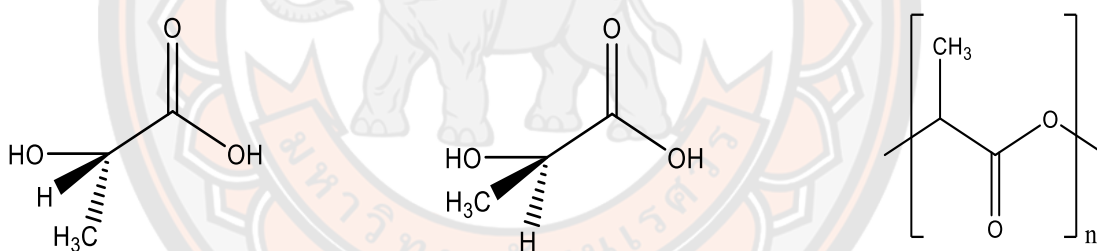
พลาสติกฐานชีวภาพ คือ พลาสติกที่ได้จากวัตถุดิบทางการเกษตร ที่ใช้แล้วไม่หมดไป สามารถปลูกขึ้นมาทดแทนใหม่ได้ พลาสติกเหล่านี้จะผลิตได้จากวัตถุดิบ เช่น น้ำตาล แป้ง น้ำมัน เซลลูโลสที่ได้จากพืช สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ตัวอย่างเช่น พอลิแลคติกแอซิด (Poly (lactic acid), PLA) และพอลิไฮดรอกซีแอลคาโนเอตส์ (Polyhydroxyalkanoates, PHAs) เป็นต้น (ชนาวดี ลีจากรัก, 2549)

พอลิแลคติกแอซิด (Poly (lactic acid), PLA)

พอลิแลคติกแอซิดหรือพีแอลเอ (Poly (lactic acid), PLA) (ภาพที่ 2) เป็นพลาสติกประเภทเทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์ ผลิตได้มาจากวัตถุดิบที่สามารถผลิตทดแทนใหม่ได้ เช่น ข้าวโพด อ้อย และมันสำปะหลัง เป็นต้น การสังเคราะห์ PLA สามารถสังเคราะห์ได้โดยปฏิกิริยาการควบแน่น

แบบอะซิโตรีปิค (Azeotropic dehydration condensation) หรือปฏิกิริยาการควบแน่นโดยตรงของกรดแลคติก (Direct Polycondensation Polymerization) และปฏิกิริยาการเปิดวง (Ring Open Polymerization) PLA ที่จัดจำหน่ายเชิงการค้าในปัจจุบันใช้กระบวนการสังเคราะห์คือกระบวนการเปิดวงของแลคไทด์ เป็นกระบวนการสังเคราะห์ที่นิยมใช้ (ภาพ 4)

ประเภทของพอลิแลคติกแอซิดสามารถแบ่งออกได้ 3 ชนิด ขึ้นอยู่กับวิธีการผลิต มีชื่อเรียกต่างกัน ได้แก่ Poly(L-lactic acid); PLLA, Poly(D-lactic acid); PDLA and Poly(D, L-lactic acid); PDLLA. พีแอลเอมีสมบัติการยืดตัวสูง มีลักษณะใส สามารถย่อยสลายได้ แต่มีลักษณะแข็งและค่อนข้างเปราะ พีแอลเอสามารถขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ได้หลายเทคนิค เช่น กระบวนการแบบหลอมอัดรีด (Extrusion) กระบวนการขึ้นรูปแบบเป่าฟิล์ม (Blow film) และกระบวนการหล่อฟิล์ม (Casting technique) มีการนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆ เช่น ทางด้านการแพทย์ การเกษตร และบรรจุภัณฑ์สำหรับอาหาร แต่เนื่องจากพีแอลเอมีสมบัติค่อนข้างเปราะ ดังนั้นการนำพีแอลเอไปประยุกต์ใช้ในด้านต่างๆ จำเป็นต้องมีการปรับปรุงสมบัติก่อน เช่น ต้องมีการนำไปผสมกับ สารเติมแต่ง หรือพลาสติกชนิดอื่นๆ (สุกัญญา รอส, 2561)

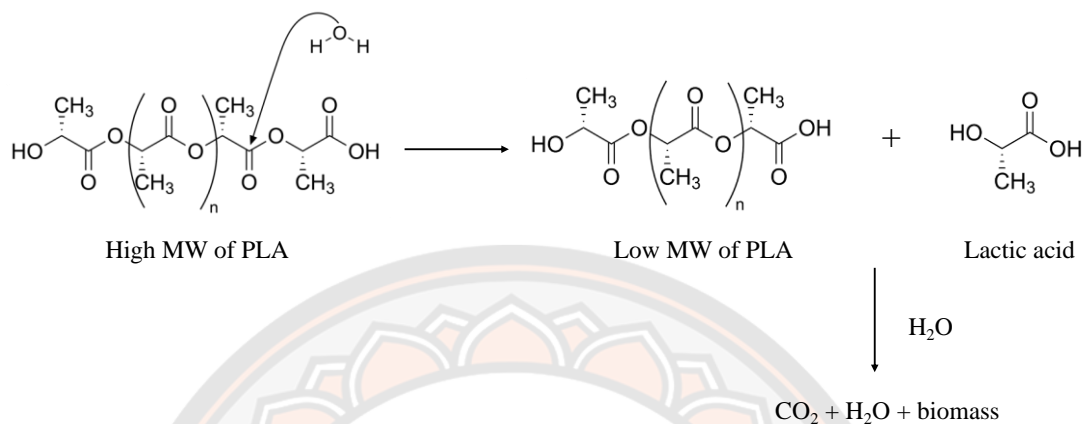


ภาพ 2 โครงสร้างทางเคมีของ (ก) PLLA (ข) PDLA และ (ค) มอนอเมอร์ของ PLA

การย่อยสลายของพอลิแลคติกแอซิดหรือพีแอลเอ

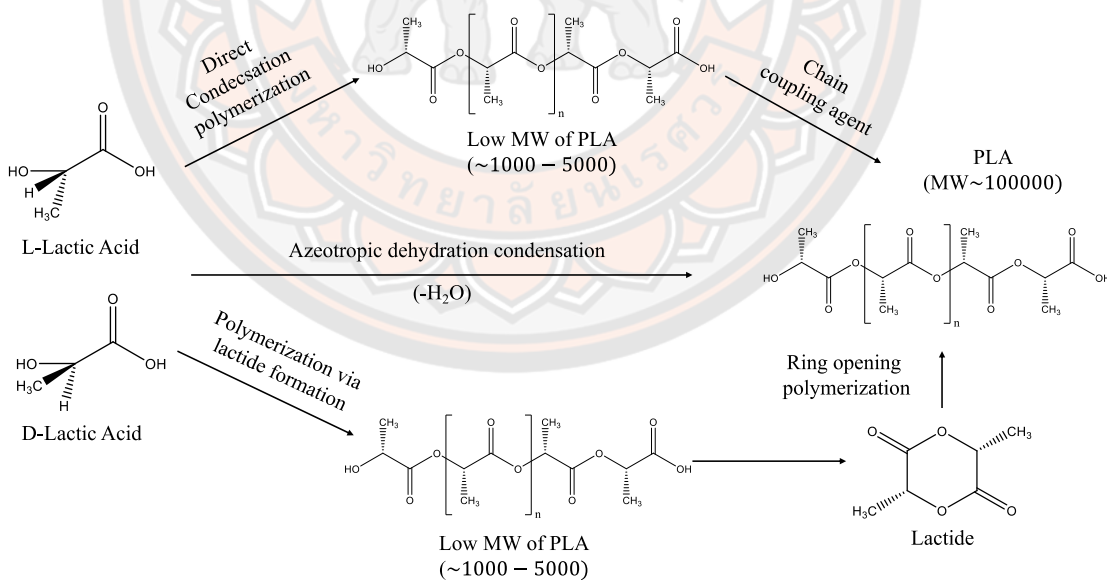
การเสื่อมสภาพของพีแอลเอขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น น้ำหนักโมเลกุล ระดับความเป็นผลึก อุณหภูมิ สภาพความเป็นกรด-ด่าง (pH) ความชื้น ปริมาณก๊าซออกซิเจน และจุลินทรีย์ สำหรับการย่อยสลายของพีแอลเอสามารถย่อยสลายได้โดยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ผ่านปฏิกิริยาการแตกหักของสายโซ่พอลิเมอร์ การย่อยสลายของพีแอลเอ เกิดการแตกตัวของพอลิเมอร์ โดยสายโซ่พีแอลเอจะขาดออก ณ ตำแหน่งหมู่เอสเตอร์ ความชื้นทำปฏิกิริยากับสายโซ่พอลิเมอร์ของพีแอลเอทำให้สายโซ่พอลิเมอร์เกิดการแตกออก โดยโมเลกุลน้ำแพร่ผ่านเข้าสู่ชิ้นงานทดสอบพอลิเมอร์ หลังจากนั้นโมเลกุลน้ำจะทำให้เกิดการแตกสลายโดยเกิดการขาดออกจากกันของสายโซ่พอลิเมอร์ตรงบริเวณ

หมู่เอสเทอร์ ทำให้น้ำหนักโมเลกุลลดลง ปฏิกริยาการแตกออกทำให้ส่วนที่เป็นอสัณฐาน (amorphos) ลดลงและส่วนที่เป็นผลึก (Crystinility) เพิ่มขึ้น (Zaaba, 2020)



ภาพ 3 การย่อยสลายของพีแอลเอโดยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส

(Hammajam et al., 2019)



ภาพ 4 กระบวนการสังเคราะห์พอลิแลคติกแอซิด

(Lim et al., 2008)

## 2.4 พลาสติไซเซอร์ (Plasticizers)

พลาสติไซเซอร์ หมายถึงกระบวนการที่ทำให้พอลิเมอร์เกิดการไหล ซึ่งอาจทำได้โดยการให้ความร้อนหรือการใส่พลาสติไซเซอร์ ตัวพลาสติไซเซอร์จะไปลดแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของ พอลิเมอร์ทำให้พอลิเมอร์สามารถเคลื่อนที่ได้มากขึ้น ส่งผลให้พอลิเมอร์มีความอ่อนตัวและสามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้ง่าย พลาสติไซเซอร์สามารถแบ่งออกได้เป็น พลาสติไซเซอร์ภายนอก และพลาสติไซเซอร์ภายใน

ซึ่งกระบวนการที่ผสมพลาสติไซเซอร์เข้าไปในพอลิเมอร์ โดยไม่มีปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นระหว่างพลาสติไซเซอร์และพอลิเมอร์ซึ่งกระบวนการนี้เรียกว่า พลาสติไซเซชันภายนอก (External plasticization) และเรียกพลาสติไซเซอร์ที่ผสมลงไปในพอลิเมอร์ว่า พลาสติไซเซอร์ภายนอก (external plasticizer) ซึ่งจะช่วยให้พอลิเมอร์เกิดการไหลแบบพลาสติกโดยอำนาจการทำลาย สารที่นำมาใช้เป็นพลาสติไซเซอร์ภายนอกส่วนใหญ่ คือ สารประกอบเอสเทอร์ ชนิดที่มีการผลิตและใช้มากที่สุดคือ พทาเลต (Phthalate) ได-2-เอทิลเฮกซิลพทาเลต (di-2-ethylhexyl phthalate, DEHP) ข้อดีของพลาสติไซเซอร์ภายนอกเหล่านี้คือ สามารถทำให้พอลิเมอร์มีความอ่อนตัวตามความต้องการในการใช้งานมากหรือน้อยได้โดยสามารถปรับชนิดและปริมาณที่ใส่ลงไป แต่ข้อด้อยของพลาสติไซเซอร์ภายนอกนี้คือ พลาสติไซเซอร์ที่ใช้อาจถูกสกัดออกจากพอลิเมอร์ได้

พลาสติไซเซอร์ภายใน (Internal plasticization) เป็นกระบวนการที่ผสมพลาสติไซเซอร์ลงไป ในพอลิเมอร์ แล้วพลาสติไซเซอร์จะเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างพลาสติไซเซอร์กับพอลิเมอร์ โดยที่พลาสติไซเซอร์ภายในจะไปลดแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล ส่งผลทำให้พอลิเมอร์อ่อนตัวเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นพลาสติไซเซอร์ภายในจะไม่สามารถถูกสกัดออกจากพอลิเมอร์ได้ จึงถือเป็นข้อดีของ พลาสติไซเซอร์ชนิดนี้

### ทฤษฎีการทำงานของพลาสติไซเซอร์ (Theories of Plasticizer Action)

ทฤษฎีที่ใช้ในการอธิบายกลไกการทำงานของพลาสติไซเซอร์ภายนอกมีด้วยกันหลายทฤษฎีซึ่งสามารถอธิบายการทำงานที่แตกต่างกันได้ดังนี้

1. Lubricity Theory พลาสติไซเซอร์ทำหน้าที่เหมือนสารหล่อลื่น (lubricant) โดยไปลดแรงเสียดทานระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์ ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์เกิดการเคลื่อนที่ไหลผ่านไปมาซึ่งกันและกัน

2. Gel Theory พลาสติไซเซอร์จะทำลายแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์โดยการแยกส่วนที่มีขั้วของพอลิเมอร์ให้อยู่ห่างกัน พลาสติไซเซอร์จึงประกอบด้วยส่วนที่มีขั้วและไม่มีขั้ว ซึ่งพลาสติไซเซอร์ส่วนที่มีขั้วยึดกับบริเวณมีขั้วของพอลิเมอร์ ขณะที่ส่วนที่ไม่มีขั้วจะกำบังบริเวณมีขั้วของพอลิเมอร์ออกจากกัน

3. Free-Volume Theory พลาสติไซเซอร์จะเพิ่มที่ว่างหรือปริมาตรอิสระระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้พอลิเมอร์เกิดการเคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้น (รองศาสตราจารย์อรอุษา สรวาวรี, 2546)

## 2.5 น้ำมันจากพืชสมุนไพร

สมุนไพร (Herbs) หมายถึง ผลผลิตทางธรรมชาติที่ได้จากพืช สัตว์ และแร่ธาตุที่นิยมนำมาใช้เป็นยาหรือนำมาผสมกับสารอื่นๆ (คณะแพทยศาสตร์โรงพยาบาลรามาธิบดี มหาวิทยาลัยมหิดล)

น้ำมันหอมระเหย (essential oil) พบได้ในส่วนต่างๆ ของพืช เช่น ใบ ดอก ผล องค์กรประกอบในน้ำมันจากพืชแต่ละชนิดจะมีความแตกต่างกัน ทำให้น้ำมันมีสมบัติและมีกลิ่นที่แตกต่างกัน ปัจจุบันมีการนำน้ำมันเหล่านี้ไปใช้ประโยชน์ที่หลากหลาย เช่น นำไปใช้ในการบำบัดด้วยกลิ่น ใช้เป็นสารต้านอนุมูลอิสระ (antioxidant) และใช้ประโยชน์ทางยา เช่น บรรเทาอาการปวด และฆ่าเชื้อโรค พืชที่มีน้ำมันหอมระเหยนั้นพบว่า พืชมีการสร้างน้ำมันและเก็บสะสมไว้ใน ต่อม (gland) ซึ่งจะกระจายอยู่ตามส่วนต่างๆ ของพืช เช่น อยู่ที่ดอก ใบ ผล หรือราก แตกต่างกันไปคุณภาพหรือปริมาณของน้ำมันในพืชขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ เช่น ชนิดพันธุ์ของพืช สิ่งแวดล้อม สภาพอากาศ และอายุหรือวิธีการเก็บเกี่ยว ตัวอย่างของพืชที่มีน้ำมันหอมระเหยและพบบ่อย ได้แก่ น้ำมันหอมระเหยจากดอก เช่น มะลิ กุหลาบ จำปี จำปา กานพลู น้ำมันหอมระเหยจากใบ เช่น กะเพรา มะกรูด ตะไคร้ ยูคาลิปตัส น้ำมันหอมระเหยจากผล เช่น ส้ม มะกรูด มะนาว น้ำมันหอมระเหยจากเมล็ด เช่น พริกไทย มะรุม จันทน์เทศ น้ำมันหอมระเหยจากต้น เช่น อบเชย ไม้จันทน์หอม และน้ำมันหอมระเหยจากรากหรือเหง้า เช่น กระชาย ขมิ้น ขิง ข่า ไพล (สถานวิจัยสมุนไพร และสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์, 2548)

## 2.6 น้ำมันจากสมุนไพรที่ใช้ในงานวิจัยนี้

### 2.6.1 น้ำมันมะพร้าว

มะพร้าว (Coconut) มีชื่อทางวิทยาศาสตร์คือ *Cocos nucifera* Linn. เป็นพืชยืนต้น ใบเลี้ยงเดี่ยวอยู่ในตระกูลปาล์ม ซึ่งน้ำมันมะพร้าวเป็นน้ำมันที่สกัดได้มาจากส่วนของเนื้อมะพร้าวของต้นมะพร้าว สามารถผลิตน้ำมันได้จากทั้งเนื้อมะพร้าวแห้ง และเนื้อมะพร้าวสด แสดงดังภาพที่ 5

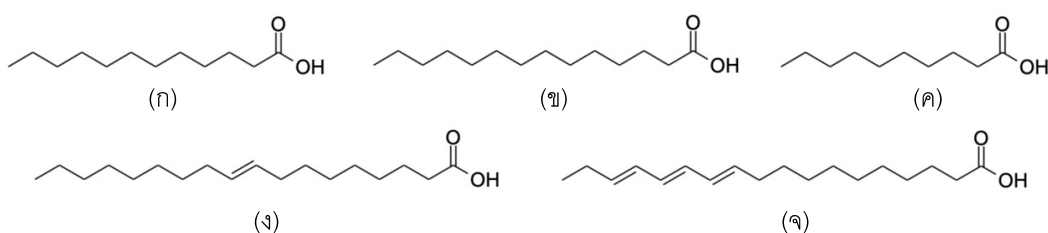
น้ำมันมะพร้าวที่สกัดได้จากเนื้อมะพร้าวแห้ง สามารถสกัดโดยการบีบหรือใช้ตัวทำละลาย นำไปผ่านกระบวนการทำให้บริสุทธิ์ ฟอกสี และกำจัดกลิ่นออก เพื่อให้เหมาะสมสำหรับบริโภค ซึ่งน้ำมันมะพร้าวที่ได้นี้จะมีสีเหลือง ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ไม่มีรส และไม่มีวิตามินอี

น้ำมันมะพร้าวที่ได้จากเนื้อมะพร้าวสด สามารถสกัดโดยการบีบน้ำมันออกโดยใช้เครื่องบีบแบบไม่ผ่านความร้อน ซึ่งน้ำมันที่ได้มีสีใส มีวิตามินอี ซึ่งจะให้กลิ่น และรส

องค์ประกอบของน้ำมันมะพร้าวประกอบไปด้วย กรดไขมัน ซึ่งส่วนใหญ่ประกอบด้วย ไขมันอิ่มตัวและกรดไขมันไม่อิ่มตัว ส่วนใหญ่ประกอบด้วยไขมันอิ่มตัวกว่า 90% ของกรดไขมันทั้งหมด และเป็นกรดไขมันอิ่มตัวที่มีจำนวนอะตอมของคาร์บอน 8-12 อะตอม จัดเป็นกรดไขมันที่มีความยาว โมเลกุลปานกลางทำให้ร่างกายย่อยและดูดซึมไปใช้ได้รวดเร็ว ส่วนใหญ่จะถูกดูดซึมไปเผาผลาญเป็นพลังงานที่ตับ ส่วนที่ถูกดูดซึมเข้าสู่กระแสเลือดจึงมีไม่มากพอที่จะสะสมเป็นไขมันใน ร่างกาย หรือ เกาะติดบนผนังเส้นเลือด อันเป็นสาเหตุของการแข็งตัวของเส้นเลือด ช่วยกระตุ้นให้ ต่อมไทรอยด์ ทำงานดีขึ้น จึงช่วยเผาผลาญอาหารที่ทานเข้าไปให้เป็นพลังงาน อีกทั้งยังเกิดความร้อน ไปช่วยเผาผลาญไขมันที่ร่างกายสะสมไว้จึงช่วยลดความอ้วนได้ กรดไขมันอิ่มตัวที่สำคัญในน้ำมันมะพร้าว ได้แก่ 43-53% กรดลอริก (Lauric acid, C12) 16-21% กรดไมริสติก (Myristic acid, C14) 4-8% กรดคาปริก (Capric acid, C10) และ นอกจากนี้ยังประกอบไปด้วยกรดโอเลอิก (Oleic acid, C18:1) และ กรดไลโนลิก (Linoleic acid, C18:3) รวม 9% ซึ่งโครงสร้างของกรดไขมันแสดงดังภาพ 6 โดยน้ำมันมะพร้าวนิยมนำไปใช้ประกอบอาหาร หรือใช้สำหรับเครื่องสำอาง เป็นสารต้านอนุมูลอิสระ (Antioxidant) และช่วยยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย (ศิริวัฒน์ ไทยอุดม, 2563)



ภาพ 5 เนื้อมะพร้าวที่ใช้ในการสกัดน้ำมันมะพร้าว





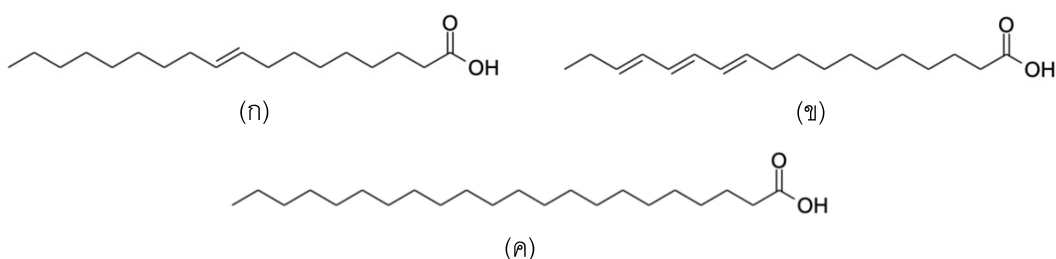
ภาพ 6 โครงสร้างของกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบในน้ำมันมะพร้าว (ก) กรดลอริก  
(ข) กรดไมริสติก (ค) กรดคาปริก (ง) กรดโอเลอิก และ (จ) กรดไลโนลิก

### 2.6.2 น้ำมันมะรุม

มะรุม เป็นไม้ยืนต้นขนาดกลางมีชื่อทางวิทยาศาสตร์คือ *Moringa oleifera* Lim. ต้นมะรุมพบได้ทุกภาคของประเทศไทย ส่วนใหญ่มักนำส่วน ยอด ดอก และฝักเขียวนำไปประกอบอาหาร น้ำมันมะรุมสกัดได้จากเมล็ดของต้นมะรุม (ภาพที่ 7) น้ำมันมะรุมสามารถสกัดได้หลายเทคนิค เช่น สกัดโดยใช้สารละลาย สกัดด้วยเอนไซม์ เป็นต้น น้ำมันมะรุมส่วนใหญ่ประกอบไปด้วยกรดไขมันซึ่งประกอบด้วย กรดโอเลอิก (Oleic acid, C18:1) มากถึง 65-85% กรดไลโนลิก (Linoleic acid, C18:3) 1% และกรดบีฮีนิก (Behenic acid, C22) 4-8% ซึ่งโครงสร้างของกรดไขมันแสดงดังภาพ 7 น้ำมันมะรุมนิยมนำไปใช้งาน เช่น มีประโยชน์ในด้านเครื่องสำอาง ใช้สำหรับประกอบอาหาร มีฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระ ยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ และลดการอักเสบ (ดวงจันทร์ เสงส์สวัสดิ์, 2011)



ภาพ 7 (ก) เมล็ดของต้นมะรุม และ (ข) ฝักของต้นมะรุม  
(พลิงเกษตร, 2018)



ภาพ 8 โครงสร้างของกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบในน้ำมันมะรุม (ก) กรดโอเลอิก  
(ข) กรดไลโนลิก และ (ค) กรดปาลิติก

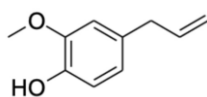
### 2.6.3 น้ำมันกานพลู

กานพลู เป็นพืชสมุนไพรที่มีกลิ่นหอมเฉพาะ เป็นพืชที่ชอบความชื้นสูง มักขึ้นในป่าดงดิบ เป็นพืชประจำถิ่นฟิลิปปินส์ มีชื่อทางวิทยาศาสตร์คือ *Eugenia caryophyllus* น้ำมันกานพลูสกัดได้จาก ดอก ตา (bud) ใบ (leaves) ของต้นกานพลู (ภาพที่ 9) องค์ประกอบหลักของน้ำมันกานพลูคือ ยูจีนอล (Eugenol) 60 - 90% ซึ่งเป็นส่วนประกอบของน้ำมันในพืชสมุนไพรหลายชนิด เช่น กานพลู ตะไคร้ ข่า มีฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระ (antioxidant) และยับยั้งเชื้อราและแบคทีเรีย (antimicrobial) และเบต้า-แคโรโอฟิลลิน ( $\beta$ -caryophyllene) 5 - 10% ซึ่งโครงสร้างองค์ประกอบหลักของน้ำมันกานพลูแสดงดังภาพ 9 น้ำมันกานพลูนิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมสารแต่งกลิ่นแต่งรส และเครื่องสำอาง มีฤทธิ์ฆ่าเชื้อโรค ยับยั้งการเจริญของเชื้อรา ซึ่งมีการนิยมนำมาใช้ในการใช้เป็นยาแก้ปวดฟัน ซึ่งในปัจจุบันนำน้ำมันกานพลูผสมลงในผลิตภัณฑ์เกี่ยวกับเหงือกและฟันหลายชนิด เพราะนอกจากจะช่วยบรรเทาอาการปวดโดยมีฤทธิ์เป็นยาชาแล้วยังเป็นยาฆ่าเชื้อได้ดี (Kalaiselvi et al., 2019)

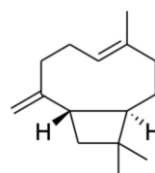


ภาพ 9 ใบและดอกกานพลู

(ไทยเกษตรศาสตร์, 2018)



(ก)



(ข)

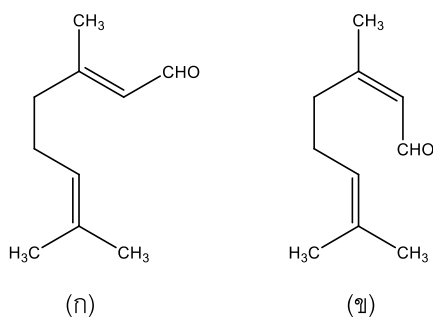
ภาพ 10 โครงสร้างที่เป็นองค์ประกอบหลักของน้ำมันกานพลู (ก) ยูจีนอล และ  
(ข) เบต้า-แคโรทีน

2.6.4 น้ำมันตะไคร้

ตะไคร้ เป็นพืชล้มลุกตระกูลหญ้า ใบมีลักษณะเรียวยาว ปลายใบมีขนหนาม นิยมปลูกทั่วไป มีชื่อทางวิทยาศาสตร์คือ *Cymbopogon citratus* น้ำมันตะไคร้สามารถสกัดได้จากใบและต้น (ภาพ 11) ส่วนในทางอุตสาหกรรมได้มีการนำตะไคร้กลั่นเป็นน้ำมันตะไคร้ (Lemongrass oil) ในน้ำมันตะไคร้มีสารประกอบที่สำคัญคือ ซิทราล (Citral) พบสารซิทราลเป็นองค์ประกอบหลักในน้ำมันตะไคร้มีปริมาณมากที่สุดประมาณ 65-80% จะให้กลิ่นส้มหรือมะนาว จัดเป็นอัลดีไฮด์เทอร์พีน พบในรูปที่เป็นสารผสมของอัลดีไฮด์ 2 ตัวที่เป็น สเตอริโอไอโซเมอร์ คือ geranial และ neral โดยจะพบในอัตราส่วนที่แตกต่างกันโดยจะพบสาร geranial ประมาณ 30-60% มีสมบัติช่วยไล่ยุงและแมลง และ neral ประมาณ 27-33% ซึ่งโครงสร้างองค์ประกอบหลักในน้ำมันตะไคร้แสดงดังภาพ 12 นอกจากนี้ยังพบว่าสารซิทราลนี้มีสมบัติในการยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย (antimicrobial) เช่น *E.coli* มีสารอื่นๆที่พบเมอร์ซีน (Myrcene) ประมาณ 12 – 20% และสารอื่นๆอีก เช่น ลินาลูล (Linalool) เจอรานีออล (Geraniol) ซิโตรเนลลอล (Citronellol) และเมอร์ซีน (Myrcene) น้ำมันตะไคร้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ต่างๆ เช่น ใช้ในการแต่งกลิ่นอาหาร เช่น อาหาร เครื่องดื่ม ขนมหวาน นำไปสกัดยา และมีฤทธิ์ฆ่าเชื้อแบคทีเรีย เชื้อรา (Silva Cde et al., 2008)



ภาพ 11 ต้นตะไคร้  
(บงกช บุปผา, 2553)



ภาพ 12 โครงสร้างที่เป็นองค์ประกอบหลักของน้ำมันตะไคร้ (ก) geranial และ (ข) neral

## 2.7 เครื่องหลอมอัดรีดแบบเกลียวทวนคู่ (Twin-screw extruder)

เป็นเทคนิคที่ใช้ทำคอมพาวด์ โดยเม็ดพลาสติกจะเข้าสู่เครื่องทาง Hopper จากนั้นจะถูกหลอมภายในเครื่องอัดรีด (extruder) โดยอาศัยทั้งความร้อน แรงเฉือน และความดัน พลาสติกหลอมจะถูกดันออกสู่แม่พิมพ์ (mould) ที่บริเวณปลายเปิด (Die) เพื่อขึ้นรูปตามต้องการ พลาสติกหลอมที่ออกจากหน้า Die เรียกว่า extrudate ในบางกระบวนการจะมีการให้ความเย็น (cooling) หลังจากพลาสติกออกจากหน้า Die แล้ว เพื่อให้คงรูปตามที่ต้องการ เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่มีมีประสิทธิภาพการผสมสูงกว่าเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว ทั้งนี้ เนื่องจากแรงเฉือนที่เกิดขึ้นจากการหมุนของสกรูคู่สูงกว่า โดยลักษณะการหมุนของสกรูคู่มี 2 แบบ ได้แก่ การหมุนในทิศทางเดียวกัน (Co-rotating screw) และการหมุนสวนทางกัน (Counterrotating screw) โดยในการทำคอมพาวด์พลาสติกมักใช้เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ที่มีลักษณะการหมุน ของสกรูคู่ แบบหมุนในทิศทางเดียวกัน (บริษัท ซี.ซี.ที.กรุ๊ป (1997) จำกัด, 2559)



ภาพ 13 เครื่องหลอมอัดรีดแบบเกลียวทวนคู่ (Twin-screw extruder)

## 2.8 เครื่องหลอมอัดรีดเป่าฟิล์ม (Blow film extruder)

การเป่าฟิล์มเป็นเทคโนโลยีในการผลิตฟิล์มพลาสติกที่ใช้กันทั่วไป โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์ โดยทั่วไปการเป่าฟิล์มจะเป็นการเป่าขึ้นในแนวตั้ง แต่ปัจจุบันการเป่าตามแนวนอนและเป่าลงในแนวตั้งก็มีทำกันทั่วไป กระบวนการเป่าฟิล์มเริ่มจากการนำเม็ดพลาสติกหลอมจนได้เป็นพลาสติกเหลวหนืด พอลิเมอร์เหลวจะถูก extrude ผ่าน die ทรงกลม เพื่อให้ได้ลูกโป่งฟิล์ม ลมที่ทำให้การเป่าจะเข้าทางศูนย์กลางของ die หลังจากนั้นลูกโป่งฟิล์มจะถูกดึงออกจาก die อย่างต่อเนื่องและถูกทำให้เย็นตัวลงโดยลมจาก air ring หลังจากฟิล์มแข็งตัวดีแล้วซึ่งเป็นจุดที่เกิดเส้นแข็งตัว ฟิล์มจะถูกดึงและหนีบโดย nip roll จากนั้นฟิล์มจะถูก puller rolls ดึงฟิล์มให้ตึงและส่งเก็บเข้าม้วนที่ windup (Meckley, 2017)



ภาพ 14 เครื่องหลอมอัดรีดเป่าฟิล์ม (Blow film extruder)

## 2.9 การเตรียมฟิล์มพอลิแลคติกแอซิด และน้ำมันจากสมุนไพรมะขาม

J.F. Balart และคณะ (Balart et al., 2016) ได้ศึกษาการเตรียมพอลิเมอร์ผสมจากพอลิแลคติกแอซิด แป้งจากเปลือกถั่วเฮเซลนัท และ น้ำมันลินินที่ทำการดัดแปรโดยผ่านกระบวนการอีพอกซิไดซ์ (Epoxydized linseed oil, ELO) ในอัตราส่วน 0, 7.5, 15 และ 22.5% ทำการผสมโดย เครื่องหลอมอัดรีดแบบเกลียวหอนคู่ (twin-screw extruder) และทำการขึ้นรูปโดยเครื่องฉีดพลาสติก (injection) เพื่อศึกษาผลของปริมาณน้ำมันลินินที่ทำการดัดแปรโดยผ่านกระบวนการอีพอกซิไดซ์ (Epoxydized linseed oil, ELO) ที่ปริมาณแตกต่างกันที่มีผลต่อสมบัติเชิงกล ความร้อน ความร้อนเชิงกล ของพอลิเมอร์ผสมจากพอลิแลคติกแอซิด และแป้งจากเปลือกถั่วเฮเซลนัท จากผลการทดสอบพบว่า สมบัติเชิงกล (การทนต่อแรงดึง ความยืดหยุ่นสูงสุด ณ จุดขาด และโมดูลัสของยัง) เมื่อเปอร์เซ็นต์ ELO เพิ่มขึ้นค่าการทนต่อ โมดูลัสมีค่าลดลง แต่ค่าความยืดหยุ่นสูงสุด ณ จุดขาดมีค่าเพิ่มขึ้น พบว่าเมื่อผสม ELO ปริมาณ 22.5% มีค่าความยืดหยุ่นสูงสุด ณ จุดขาดสูงสุดโดยเพิ่มขึ้นถึง 17% เมื่อเทียบกับพอลิเมอร์ผสมที่ไม่ได้ทำการผสมน้ำมัน และศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่มีสมรรถนะสูง (Field Emission Scanning Electron Microscope, FESEM) เมื่อผสม ELO ลงในพอลิเมอร์ผสมพบว่าช่วยลดช่องว่างระหว่างพื้นผิวของสารตัวเติม (filler) และพอลิเมอร์ผสม

Yuyue Qin และคณะ (Qin et al., 2017) ศึกษาฟิล์มบรรจุภัณฑ์แอคทีฟจากการเตรียมพอลิแลคติกแอซิดผสมกับ น้ำมันมะกอก น้ำมันตะไคร้ น้ำมันโรสแมรี่ และน้ำมันกานพลู 9% ทำเป็นฟิล์มโดยวิธีการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์แบบหล่อโดยใช้ตัวทำละลาย (solvent casting) โดยทำการศึกษาผลของน้ำมันหอมระเหยที่มีผลต่อสมบัติของ PLA ที่ทำการผสมน้ำมันหอมระเหย จากผลการทดลองพบว่า PLA ที่ทำการผสมน้ำมันมีสมบัติเชิงกล (การทนต่อแรงดึง ความยืดหยุ่นสูงสุด ณ จุดขาด และโมดูลัสของยัง) ที่ดีกว่า PLA ที่ไม่ได้ผสมน้ำมันหอมระเหย พบว่า PLA ที่มีการผสมน้ำมันมีเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่นสูงสุด ณ จุดขาดที่เพิ่มขึ้น การทดสอบการซึมผ่านไอน้ำของ PLA ที่ผสมน้ำมันมีค่าสูงกว่า PLA ที่ไม่ได้ผสมน้ำมัน และการทดสอบประสิทธิภาพการต้านเชื้อแบคทีเรีย ซึ่งพบว่า PLA ที่มีการผสมน้ำมันมีประสิทธิภาพในการต้านเชื้อแบคทีเรีย 2 ชนิด ได้แก่ *E.coli* และ *B. subtilis*

A. Orue, A. Eceiza และ A. Arbelaiz (Orue et al., 2018) ได้ศึกษาการเตรียมพอลิแลคติกแอซิดผสมน้ำมันจากพืชในอัตราส่วน 5 10 และ 20 wt% โดยใช้ น้ำมันลินิน และน้ำมันถั่วเหลือง ที่ทำการดัดแปร (epoxydized oil) และไม่ได้ทำการดัดแปร (non epoxydized oil) โดยผ่านกระบวนการอีพอกซิไดซ์เป็นพลาสติกไฮเซออร์ นอกจากนี้ยังทำการศึกษาการเตรียม PLA ผสม 10 wt% น้ำมันลินิน และน้ำมันถั่วเหลืองใช้เป็นพลาสติกไฮเซออร์ และผสม 30 wt% เส้นใยป่านที่ทำการปรับปรุงคุณสมบัติโดยโซเดียมไฮดรอกไซด์ใช้เป็นสารเสริมแรง โดยทำการผสมในเครื่อง HAAKE Rheomix เพื่อศึกษาผลของพลาสติกไฮเซออร์ในปริมาณที่แตกต่างกัน และศึกษาผลของการผสมพลาสติกไฮเซออร์ และเส้นใยที่มีผลต่อสมบัติเชิงกล และความร้อน จากผลการทดลองพบว่า PLA ที่ผสมน้ำมันที่ทำการ

epoxidized มีสมบัติเชิงกล (การทนต่อแรงดึง ความยืดหยุ่น จุดขาด และมอดูลัสของยัง) ที่ดีกว่า น้ำมัน non epoxidized ซึ่งมีค่ามีเปอร์เซ็นต์ความยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาดที่เพิ่มขึ้นประมาณ 70% เมื่อเปอร์เซ็นต์พลาสติกไซเซอร์เพิ่มขึ้น แต่เมื่อมีการผสมเส้นใยปานลงทำให้มีค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาดลดลง ทดสอบสัณฐานวิทยาพบว่า PLA ผสมน้ำมัน non epoxidized และน้ำมันถั่วเหลือง epoxidized เฟสเกิดการแยกกัน (phase separated) แต่ขนาดของช่องว่าง (microvoids) มีขนาดเล็กลงเมื่อเติมน้ำมัน epoxidized ลงไป แต่ในทางตรงกันข้าม PLA ที่ผสมน้ำมันลินิน epoxidized พื้นผิวส่วนใหญ่เป็นแบบเฟสเดียว (single phase) ไม่เห็นช่องว่าง (microvoids) เนื่องจาก PLA และน้ำมันลินิน epoxidized มีความเข้ากัน แต่เมื่อมีการเติมเส้นใยปานลงไปจะเห็นว่าเส้นใยกระจายตัวอยู่บนพื้นผิวซึ่งมีลักษณะเหมือนเป็นเนื้อเดียวกัน และทดสอบสมบัติความร้อนด้วยเทคนิค DSC พบว่าเมื่อมีการเติมน้ำมัน epoxidized ผสมใน PLA มีค่า Tg ที่ต่ำกว่าน้ำมัน non epoxidized อย่างไรก็ตามการเติมพลาสติกไซเซอร์ลงไปทำให้ช่วยเร่งการเกิดผลึก ทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกเพิ่มขึ้น (crystallinity degree) แต่เมื่อมีการเติมเส้นใยปานลงไปด้วยทำให้ค่าค่าเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก ค่า Tg และ Tm มีค่าลดลง เมื่อทดสอบสมบัติความร้อนด้วยเทคนิค TGA พบว่าเมื่อมีการเติมน้ำมัน epoxidized ผสมกับ PLA มีค่าเสถียรภาพทางความร้อนที่ต่ำกว่า น้ำมัน non epoxidized

## 2.10 กระดาษ (Paper)

กระดาษ หมายถึง แผ่นวัสดุบางที่ทำมาจากเส้นใย (fiber) ผสมกับสารเติมแต่งต่างๆ (additive) ซึ่งสารเติมแต่งเหล่านี้อาจทำการเติมก่อนหรือหลังการขึ้นแผ่นแล้วก็ได้ขึ้นอยู่กับสมบัติกระดาษที่ต้องการ

กระดาษมีการนำเข้าครั้งแรกโดยชาวโปรตุเกส ซึ่งคำว่า กระดาษ คำที่เพี้ยนมาจากภาษาโปรตุเกสว่า Cartas แปลว่า กระดาษ ในประเทศไทยไม่มีหลักฐานที่แน่นอนว่าเริ่มผลิตตั้งแต่สมัยใด แต่พบว่าประเทศไทยมีกระดาษใช้ตั้งแต่สมัยอยุธยา คือ พงศาวดาร ฉบับหลวงประเสริฐ ซึ่งเป็นหนังสือเก่าแก่ที่สุดเป็นกระดาษข่อย สีดำ ตัวอักษรสีขาว จึงนับว่ากระดาษข่อยเป็นกระดาษชนิดแรกที่คนไทยผลิตใช้เอง การผลิตกระดาษได้มีการพัฒนามาตามลำดับ โดยมีการเปลี่ยนวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิต เช่น ใบลาน ต้นปอสา (โสธรญา สัมเขี้ยวหวาน, 2557)

## 2.11 เส้นใย (Fiber) ในการผลิตเยื่อกระดาษ

เส้นใย (Fiber) หมายถึง สิ่งที่มีลักษณะเป็นเส้นยาวเรียวยาว องค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นเซลลูโลส เกิดจากการรวมตัวของพอลิแซคคาไรด์ (Polysaccharide) ของกลูโคส (Glucose) ซึ่งโมเลกุลของ

เซลลูโลสเรียงตัวกันในผนังเซลล์ของพืชเป็นหน่วยเส้นใยขนาดเล็กมาก เกิดการเกาะจับตัวกันเป็นเส้นใยขึ้น สามารถแยกประเภทเส้นใยได้โดยแบ่งตามแหล่งกำเนิดของเส้นใยได้เป็น 2 ประเภท คือ

### 2.11.1 เส้นใยธรรมชาติ (Natural fibers)

เส้นใยธรรมชาติเหล่านี้เป็นพอลิเมอร์ที่อยู่ในพืช สัตว์ และจากสินแร่ต่างๆ ที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติซึ่งแบ่งได้เป็น

1. เส้นใยจากพืช ได้แก่ เส้นใยจากเซลลูโลส เป็นเส้นใยที่ประกอบด้วยเซลลูโลส ซึ่งได้จากส่วนต่างๆของพืช เช่น ป่าน ปอ ลินิน ไยสับปะรด ไยมะพร้าว ฝ้าย หนุ่น ศรนารายณ์ เป็นต้น เซลลูโลสเป็นโฮโมพอลิเมอร์ ประกอบด้วยโมเลกุลของกลูโคสจำนวนมาก มีโครงสร้างเป็นกิ่งก้านสาขา

2. เส้นใยจากสัตว์ ได้แก่ เส้นใยธรรมชาติที่ได้จากสัตว์ เช่น เส้นใยโปรตีนจากขนสัตว์ (wool) ไหม (silk) ผม (hair) เล็บ เขา ไยไหม เป็นต้น สมบัติของเส้นใยเหล่านี้ คือ เมื่อเปียกน้ำความเหนียวและความแข็งแรงจะลดลง และถ้าสัมผัสแสงแดดนานๆ จะสลายตัว

3. เส้นใยจากสินแร่ เช่น แร่ใยหิน (asbestos) ข้อดีคือทนต่อการกัดกร่อนของสารเคมี ทนไฟ ไม่นำไฟฟ้า

ข้อดีของเส้นใยจากธรรมชาติ คือ น้ำหนักเบา เป็นฉนวนความร้อนที่ดี ใส่สบาย ปลอดภัยจากสารเคมี และมีความสวยงามเฉพาะตัว แต่มีข้อเสีย คือ คุณภาพไม่คงที่ ไม่ทนความร้อน ดูดความชื้น ไม่ทนต่อสารเคมี ผลิตได้ครั้งละไม่มาก และมีปัญหาเรื่องเชื้อราและจุลินทรีย์

### 2.11.2 เส้นใยประดิษฐ์ (Man-made fibers)

เส้นใยประดิษฐ์เป็นเส้นใยที่มนุษย์สังเคราะห์ขึ้นจากสารอนินทรีย์หรือสารอินทรีย์ใช้ทดแทนเส้นใยจากธรรมชาติ แบ่งเป็น 3 ประเภท

1. เส้นใยประดิษฐ์ทำจากสารพอลิเมอร์ธรรมชาติ (Regenerated cellulose fibers) โดยนำวัตถุดิบที่เป็นเซลลูโลสหรือโปรตีนมาทำปฏิกิริยาเคมีตามขั้นตอนจนได้พอลิเมอร์ ขึ้นเหน็ดแล้วนำไปอัดเป็นเส้นใยเช่น วิสโคสเรยอน เซลลูโลสอะซิเตท แอชลอน เป็นต้น

2. เส้นใยสังเคราะห์ (Synthetic fibers) โดยนำวัตถุดิบที่เป็นสารเริ่มต้น เช่น เอธิลีน พรอพิลีน เบนซีน แนฟทาลีน ไซลีน มาทำปฏิกิริยาจนได้สารพอลิเมอร์ แล้วผ่านกระบวนการขึ้นรูปเป็นเส้นใย เช่น ไนลอน พอลิเอสเตอร์ อะคริลิก เป็นต้น การผลิตเส้นใยประดิษฐ์นั้นต้องมีวัตถุดิบที่เป็นสารเริ่มต้นการผลิต ซึ่งส่วนใหญ่ได้มาจาก น้ำมันปิโตรเลียม และต้องใช้เทคโนโลยีที่เหมาะสมเพื่อผลิตพอลิเมอร์ (Polymerization) เทคโนโลยีการขึ้นรูปเส้นใย (Fiber spinning) และขั้นตอนการทำ ทำให้เส้นใยที่ผลิตได้มีสมบัติที่ดีเพิ่มขึ้นเหมาะสมสำหรับใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ

เส้นใยสังเคราะห์เป็นเส้นใยที่มีคุณสมบัติหลายอย่างที่แตกต่างไปจากเส้นใยธรรมชาติ เช่น ทนทานต่อสารเคมี ยับยาก ไม่ดูดซับน้ำ ชักง่ายแห้งเร็ว และยังสามารถผลิตในเชิงอุตสาหกรรม นอกจากนี้เส้นใยสังเคราะห์ยังมีคุณภาพสม่ำเสมอเท่าเทียมกัน ซึ่งต่างจากเส้นใยธรรมชาติที่คุณภาพ



ของเส้นใยอาจมีความแตกต่างกันได้ตามแหล่งผลิต (วีระศักดิ์ อุดมกิจเดชา และปราณี รัตนวีสิตโรจน์, 2010)

### 2.11.3 องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยจากพืช

องค์ประกอบทางเคมีของต้นไม้ทุกประเภทส่วนใหญ่ประกอบด้วย

1. เซลลูโลส (cellulose) เป็นสารคาร์โบไฮเดรตประเภทพอลิแซ็กคาไรด์ เซลลูโลสเป็นโครงสร้างหลักของเซลล์พืช เช่น ผัก ผลไม้ รวมอยู่กับเฮมิโลส มีสมบัติไม่ละลายน้ำ ตัวทำละลายอินทรีย์ และสารละลายต่าง

2. เฮมิเซลลูโลส (hemicellulose) เป็นสารคาร์โบไฮเดรตเช่นเดียวกับเซลลูโลสแต่มีโครงสร้างที่ใหญ่และไม่เป็นระเบียบจึงทำให้ดูดซึมน้ำได้ดี ซึ่งช่วยทำให้เส้นใยสามารถพองตัวได้เร็วทำให้ง่ายต่อการตีเยื่อ และยังช่วยทำให้เส้นใยมีสมบัติยืดหยุ่นตัวได้เพิ่มขึ้น

3. ลิกนิน (lignin) เป็นสารที่ประกอบด้วย คาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน รวมกันเป็นหน่วยย่อยหลายชนิด ซึ่งเป็นอะโรมาติก ลิกนินไม่สามารถละลายน้ำได้ และไม่มีสมบัติในการยืดหยุ่น จึงทำให้พืชที่มียังประกอบของลิกนินมากมีความแข็งแรงทนทาน อยู่ร่วมกับเซลลูโลส (พินิจกานต์ อารวิงษ์ และ วรณิษา นาคแกมทอง, 2555)

### 2.11.4 ลักษณะเส้นใยจากพืช

เส้นใยจากพืชสามารถจำแนกออกได้เป็น 2 ชนิด ได้แก่

1. เส้นใยสั้น เป็นเส้นใยที่มีความยาวอยู่ในช่วง ส่วนมากเป็นเส้นใยจากธรรมชาติทั้งหมด เช่น อ้อย ฟางข้าว ใบสับปะรด เส้นใยฝ้าย เส้นใยขนสัตว์ ส่วนเส้นใยสั้นที่มาจากเส้นใยประดิษฐ์มักจะทำเป็นเส้นใยยาวก่อนแล้วค่อยตัดเป็นเส้นในสั้นตามความยาวที่กำหนด เส้นใยชนิดนี้มักจะนำไปใช้ทำกระดาษที่ไม่ต้องการความเหนียวมากนัก

2. เส้นใยยาว เป็นเส้นใยที่มีความยาวเกิน 3 มิลลิเมตร ส่วนมากเป็นเส้นใยประดิษฐ์ ยกเว้นเส้นใยไหมซึ่งเป็นเส้นใยยาวที่มาจากธรรมชาติ เส้นใยยาวมีทั้งเส้นใยยาวชนิดเส้นใยเดี่ยว (monofilament) ที่มีเส้นใยเพียงเส้นเดียว หรือเส้นใยยาวกลุ่ม (multifilament) จะมีเส้นใยมากกว่า 1 เส้นรวมอยู่ด้วยกันตลอดความยาว (ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (เอ็มเทค))

### 2.11.5 ประเภทของต้นไม้ที่ใช้ในการผลิตเยื่อกระดาษ

เส้นใยที่ใช้ในการผลิตกระดาษอาจเป็นเส้นใยสัตว์ เส้นใยพืช เส้นใยแร่ หรือเส้นใยสังเคราะห์ แต่เส้นใยส่วนใหญ่ที่ใช้เป็นวัตถุดิบสำคัญในการผลิตเยื่อกระดาษ คือเส้นใยพืช ซึ่งพืชเกือบทุกชนิดสามารถนำมาทำเป็นเยื่อกระดาษได้ พืชสามารถจำแนกตามแหล่งที่มาได้ออกเป็น 2 กลุ่มคือ พืชยืนต้น (wood) และพืชล้มลุก (non-wood)

1. พืชยืนต้น (wood) แบ่งตามขนาดความยาวของเส้นใยได้เป็น 2 ประเภทคือ

1.1 ไม้เนื้ออ่อน (Soft wood) เช่น สนสองใบ และสามใบ เส้นใยที่ได้จากไม้เนื้ออ่อนมีความยาวเฉลี่ยประมาณ 3 - 4 มิลลิเมตร เยื่อที่ผลิตได้จากไม้เนื้ออ่อนเป็นเส้นใยยาว

1.2 ไม้เนื้อแข็ง (Hard wood) เช่น ยูคาลิปตัส ต้นยางพารา ต้นสัก เส้นใยที่ได้จากไม้เนื้อแข็งมีความยาวเฉลี่ยประมาณ 1 - 2 มิลลิเมตร จัดเป็นเส้นใยสั้น

2. พืชล้มลุก (non-wood) สามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภท

2.1 ส่วนที่เหลือทิ้งทางการเกษตร เช่น ฟางข้าว ชานอ้อย

2.2 พืชที่ปลูกขึ้นหรือเกิดขึ้นเอง เช่น ต้นไผ่ ผักตบชวา

2.3 เส้นใยจากพืชที่มีสมบัติใกล้เคียง ได้แก่ เส้นใยจากเปลือกและต้น เช่น ปอสา กัลวย เส้นใยจากใบ เช่น สับปะรด (ชยาภาส ทับทอง, 2549)

## 2.12 กระบวนการผลิตกระดาษ

การทำเยื่อกระดาษสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท

1. เยื่อเชิงกล (mechanical pulp) เป็นกระบวนการผลิตเยื่อโดยการบด มีการใช้พลังงานกลและพลังงานความร้อนร่วมด้วยในกระบวนการ เยื่อที่ได้จะมีลักษณะสั้นและขาดเป็นท่อน และยังมีลิกนิน เกือบหมด หางเหลืออยู่ เมื่อนำมาเยื่อชนิดนี้ผลิตกระดาษ ส่งผลให้กระดาษกลับสีเร็วโดยเปลี่ยนเป็นสีเหลืองเมื่อได้รับแสงเพราะยังมีสารลิกนินที่ยังคงเหลืออยู่ และไม่แข็งแรง แต่กระดาษที่ผลิตจากกระบวนการนี้จะมีสมบัติที่บดแสง ดูดความชื้นดี ราคาถูก และเก่าเร็ว เยื่อที่ได้จึงมักนำไปทำเป็นหนังสือพิมพ์

2. เยื่อเคมี (chemical pulp) เป็นเยื่อที่ผลิตโดยใช้สารเคมีและความร้อนในการแยกเยื่อและขจัดลิกนิน เยื่อที่ได้จากกระบวนการนี้มีความสมบูรณ์กว่าเยื่อบด แต่ได้ผลผลิตที่ต่ำกว่า แต่มีราคาสูง เช่น เยื่อเคมีที่ได้จากการใช้สารซัลเฟต จะเป็นเยื่อที่เหนียวมีสีคล้ำอมน้ำตาล ซึ่งมักจะนำไปใช้ทำกระดาษเหนียว (kraft paper) ที่ใช้ทำเป็นกระดาษสำหรับทำถุงบรรจุภัณฑ์ต่างๆ และเยื่อที่ได้จากการใช้ซัลไฟต์ เยื่อจะมีความแข็งแรงน้อยกว่าเยื่อซัลเฟต แต่จะนิยมนำไปฟอกขาวเพื่อใช้ทำเป็นกระดาษสำหรับเขียน

3. เยื่อกึ่งเคมี (semi - chemical pulp) เยื่อที่ผลิตโดยนำไม้ชิ้นต้มในสารเคมีเพื่อทำให้เยื่อแยกออกจากกันง่ายขึ้นและเพื่อละลายลิกนิน เสร็จแล้วนำมาบดด้วยจานบด วิธีนี้ได้เยื่อที่มีคุณภาพดีกว่าเยื่อบด ได้ผลผลิตมากกว่าเยื่อเคมีซึ่งมักนำไปใช้ในการผลิตกระดาษสำหรับบรรจุภัณฑ์เป็นส่วนใหญ่ (พินิจกานต์ อาริวงษ์ และ วรณิษา นาคแกมทอง, 2555)

### 2.13 ฟางข้าว (Rice straw)

ฟางข้าว เป็นส่วนของต้นข้าวที่เหลือหลังจากการเก็บเกี่ยวเมล็ดข้าวออกไปแล้ว ฟางข้าวเหล่านี้เมื่อหลังทำการเก็บเกี่ยวสามารถนำไปใช้ประโยชน์มากมาย เช่น นำเอาไปเป็นอาหารสำหรับเลี้ยงสัตว์ ทำเป็นปุ๋ยหรือคลุมแปลงผักเพื่อให้หน้าดินชุ่มชื้น ใช้ในการเพาะเห็ด แต่ก็ยังเหลือทิ้งอีกมากมาย ซึ่งส่วนใหญ่จะนำไปกำจัดโดยการเผาซึ่งกลายเป็นมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม ฟางข้าวถือว่าเป็นเส้นใยจากธรรมชาติอย่างหนึ่ง องค์ประกอบของฟางข้าวส่วนใหญ่ประกอบด้วย เซลลูโลสประมาณ 40% เฮมิเซลลูโลส 35% ลิกนิน 10% และ ซิลิกา 5% ปัจจุบันได้มีการนำฟางข้าวใช้ให้เกิดประโยชน์โดยการนำมาแปรรูปเพื่อเพิ่มมูลค่า

ประโยชน์จากฟางข้าว

1. ใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวภาพ (biofuels)
2. ใช้เป็นอาหารสำหรับเลี้ยงสัตว์
3. ใช้ทำภาชนะสำหรับบรรจุภัณฑ์ (Packaging) เพราะมีความแข็งแรง และทนทานต่อการกระทบ
4. ใช้ทำกระดาษ และเชือก
5. ทำเป็นงานหัตถกรรม เช่น หมวกและภาชนะสานต่างๆ
6. ใช้เป็นวัสดุก่อสร้าง โดยจะใช้ฟางผสมดินเหนียวและคอนกรีต เรียกว่า cob เป็นวัสดุในการก่อสร้างอย่างหนึ่ง และใช้สำหรับมุงหลังคา เนื่องจากฟางข้าวมีสมบัติกันฝนได้ดี มีน้ำหนักเบา เป็นฉนวนกันความร้อนได้ดีและมีราคาถูก
7. ใช้ในการปลูกพืช เช่น เพาะเห็ด ปลูกแตง (Boonyaruthutkalin et al., 2010)

### 2.14 การเตรียมผลิตภัณฑ์เยื่อกระดาษจากเส้นใย

Jamshid Mohammadi-Rovshandeh และคณะ (Mohammadi-Rovshandeh et al., 2005) ได้ทำการศึกษาการทำเยื่อฟางข้าวโดยใช้สารละลายในการต้มเยื่อ 3 ตัวที่แตกต่างกัน 1. ไดเอทิลีน ไกลคอล 2. ไดเอทิลีนไกลคอลและเอทิลีนไกลคอล 3. ไดเอทิลีนไกลคอล เอทิลีนไกลคอล และ 2% โซเดียมไฮดรอกไซด์ ใช้อุณหภูมิในการต้มเยื่อที่ 180 190 และ 200 องศาเซลเซียสที่ต่างกัน ทำเป็นกระดาษเพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิและสารละลายที่แตกต่างกันบนสมบัติของกระดาษ พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นการขจัดลิกนินจะเพิ่มขึ้น จากผลการทดลองพบว่าเมื่อใช้ 2% โซเดียมไฮดรอกไซด์ กระดาษมีสมบัติทางเชิงกลที่ดีกว่า ได้แก่ สมบัติการทดสอบความยาวเมื่อขาด (breaking length) ความต้านทานแรงดันทะลุ (burst index) การต้านต่อการหักพับ (folding endurance) จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น แต่สมบัติความต้านทานการฉีกขาด (tear index) ลดลง เพราะสมบัติ

ความต้านทานการฉีกขาดจะขึ้นอยู่กับความแข็งแรงและความยาวของเส้นใยซึ่งจากการทดลองพบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นเส้นใยบางส่วนจะถูกทำลายจึงทำให้ความแข็งแรงและความยาวของเส้นใยลดลงทำให้ค่าความต้านทานการฉีกขาดลดลง และจากการทดลองพบว่ากระดาษที่มีสมบัติเชิงกลที่ดีได้มาจากการใช้ 2% โซเดียมไฮดรอกไซด์ ผสม ไดเอทิลีนไกลคอล และเอทิลีนไกลคอล ที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส

Amit Ramdhonee และ Pratima Jeetah (Ramdhonee & Jeetah, 2017) ได้ทำการศึกษาการทำกระดาษจากเส้นใยกล้วย โดยการใช้เส้นใยกล้วยผสมขานอ้อย และเส้นใยกล้วยผสมกระดาษเหลือ ในอัตราส่วน 20:80, 40:60, 60:40 และ 80:20 โดยเส้นใยกล้วยและขานอ้อยถูกปรับปรุงสมบัติด้วย 12% โซเดียมไฮดรอกไซด์และ 4% โซเดียมซัลไฟด์โดยต้มเยื่อเป็นเวลา 1 ชั่วโมง 30 นาที เพื่อผลิตกระดาษสำหรับห่อ ความหนาของกระดาษอยู่ที่  $0.263 \pm 0.04$  มิลลิเมตร พบว่ากระดาษที่ทำจาก 100% เส้นใยกล้วย และ ขานอ้อย มีค่าการดูดซึมน้ำที่ใกล้เคียงกัน กระดาษที่ทำจากเส้นใยกล้วยผสมกับ 20% กระดาษเหลือใช้ มีค่าการต้านทานต่อการดึง (tensile index) สูงสุด (29.4 Nm/g) ตามด้วยกระดาษที่ได้จากเส้นใยกล้วย และ 20% ขานอ้อย (16.04 Nm/g) แต่กระดาษที่ได้จากเส้นใยกล้วย และ 20% กระดาษเหลือใช้มีค่าความต้านทานแรงดันทะลุ (bursting index) สูงสุด มีค่าความต้านทานต่อการขีดข่วน (abrasion resistance) เพิ่มขึ้นเมื่อเปอร์เซ็นต์เส้นใยกล้วยเพิ่มขึ้นและที่ผสม 20% เส้นใยขานอ้อยและกระดาษเหลือใช้มีค่าความต้านทานต่อการขีดข่วนดีที่สุด

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาการเตรียมและสมบัติฟิล์มพอลิเมอร์พอลิแลคติกแอซิดผสมน้ำมันพืชสมุนไพรลามีเนตกับกระดาษจากเยื่อฟางข้าว ดังนั้นได้แบ่งขั้นตอนการศึกษาออกเป็น 3 ส่วน ดังนี้

1. เตรียมฟิล์มพอลิแลคติกแอซิด แบ่งออกเป็น 2 ส่วนได้แก่

1.1 เตรียมฟิล์มพอลิแลคติกแอซิด ผสมน้ำมันพืชสมุนไพร 4 ชนิดได้แก่ น้ำมันมะพร้าว น้ำมันมะรุม น้ำมันกานพลู และน้ำมันตะไคร้บ้าน

1.2 เตรียมฟิล์มพอลิแลคติกแอซิด ผสมน้ำมันมะพร้าว และแป้งมันสำปะหลัง

2. เตรียมผลิตภัณฑ์กระดาษจากเยื่อฟางข้าวโดยการปรับปรุงคุณสมบัติของเยื่อกระดาษฟางข้าวด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์

#### เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

1. เครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่ขนาดเล็ก (Twin screw extruder) LABTECH Model LTE16-40
2. เครื่องเป่าฟิล์มขนาดเล็ก (Blow film extruder) LABTECH Model LE20-30/C & LF-250
3. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด Scanning electron microscope (SEM) จาก CARL ZEISS CO., LTD. รุ่น Leo 1455VP
4. เครื่องทดสอบค่าดัชนีการไหลพอลิเมอร์ (Melt Flow index, MFI) Instron's CEAST MF20
5. เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี Fourier Transform Infrared Spectrometer (FT-IR) ยี่ห้อ Perkin Elmer รุ่น Spectrum GX
6. เครื่องทดสอบแรงดึง (Tensile tester machine) (INSTRON CALIBRATION LAB รุ่น 5965)
7. เครื่องทดสอบแรงดึง (Tensile tester machine) (โมเดล WDW-5E รุ่น Time GROUPING)
8. เครื่องวิเคราะห์มุมสัมผัส (Contact angle analyzer) ยี่ห้อ Dataphysic รุ่น OCA20
9. เครื่องวัดสี Konica Minolta รุ่น CR-20

10. ตู้อบลมร้อน จาก BEC THAI ยี่ห้อ Memmer รุ่น UN-10
11. เครื่องไมโครมิเตอร์ จาก TONAN ASIA AUTOTECH CO., LTD
12. เครื่องชั่ง 2 ตำแหน่ง จาก BEC THAI ยี่ห้อ DENVER INSTRUMENT รุ่น TP-2102
13. เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง จาก BEC THAI ยี่ห้อ DENVER INSTRUMENT รุ่น SI-234
14. เครื่องให้ความร้อน (Hot plate)
15. เครื่องปั่นน้ำผลไม้ ยี่ห้อ Sharp รุ่น EM-ICE POWER กำลังไฟ 600 วัตต์
16. ปีกเกอร์ขนาด 25, 50, 100 และ 1000 mL
17. ซ้อนตักสารและแท่งแก้วคนสาร

### วัตถุดิบและสารเคมี

1. เม็ดพลาสติก Poly (lactic acid) จาก Nature Works, Ingeo™ Biopolymer 4043D, Specific Gravity 1.24 g/cm<sup>3</sup>
2. น้ำมันมะพร้าว ตรา Naturel จากบริษัท ล้ำสูง (ประเทศไทย) จำกัด มีจุดเดือด 177 องศาเซลเซียส ความหนาแน่น 0.925 g.cm<sup>3</sup> และความหนืด 80
3. น้ำมันมะรุม จากบริษัท รีเนเจอร์ จำกัด มีจุดเดือด 225 องศาเซลเซียส ความหนาแน่น 0.9073 g.cm<sup>3</sup> ที่ 24 องศาเซลเซียส และความหนืด 0.06078 Pas
4. น้ำมันตะไคร้บ้าน จากบริษัท เคมีภัณฑ์ คอร์ปอเรชั่น จำกัด มีจุดเดือด 224 องศาเซลเซียส ความหนาแน่น 0.880 g/mL และความหนืด 4.45 cSt
5. น้ำมันกานพลู จากบริษัทเวชกิจ เคมีภัณฑ์ จำกัด มีจุดเดือด 251 องศาเซลเซียส ความหนาแน่น 1.04 g/mL และความหนืด 17.5 cP
6. เอทานอล (C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH) จากบริษัท ทีทีเค ซายน์ จำกัด เกรดวิเคราะห์
7. อะซิติกแอซิด (CH<sub>3</sub>COOH) จากบริษัท อาร์ซีไอ แล็บสแกน จำกัด เกรดวิเคราะห์ (Analytical Reagent grad)
8. ไอโซออกเทน (2,2,4-Trimethylpentane, (CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>CHCH<sub>2</sub>C(CH<sub>3</sub>)<sub>3</sub>) จากบริษัท อาร์ซีไอ แล็บสแกน จำกัด เกรดวิเคราะห์ (Analytical Reagent grad)
9. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide 99%, NaOH) จากบริษัท ไทยอາซาฮี เคมีภัณฑ์ จำกัด เกรดเชิงการค้า (Commercial grad)
10. แป้งมันสำปะหลัง ตราไบหยก จากบริษัท บางกอกอินดอร์ฟู้ด จำกัด เกรดเชิงการค้า
11. น้ำกลั่นและน้ำ DI

## วิธีดำเนินงานวิจัย

### 1. พิล์มพอลิแลคติกแอซิด

#### 1.1 การเตรียมพอลิแลคติกแอซิด และน้ำมันพืชสมุนไพร

เตรียมเม็ดพลาสติก PLA นำไปอบเพื่อไล่ความชื้นในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ทำการเตรียมเม็ดคอมพาวด์จากเม็ด PLA ผสมน้ำมันพืชสมุนไพรได้แก่ น้ำมันมะพร้าว (PCO) น้ำมันมะรุม (PMO) น้ำมันกานพลู (PCL) และ น้ำมันตะไคร้บ้าน (PLG) ในสัดส่วนที่ต่างกันดังตารางที่ 1 หลังจากนั้นทำการผสมด้วยเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่ขนาดเล็ก (Twin-screw extruder) ยี่ห้อ LABTECH รุ่น LTE16-40 (ภาพ 15) อุณหภูมิที่ใช้ในการผสม 130, 170, 180, 190 และ 180 °C ด้วยความเร็วรอบ 100 rpm หลังจากนั้นนำเม็ดพอลิเมอร์คอมพาวด์ PLA และน้ำมันพืชสมุนไพรที่เตรียมได้ทำการขึ้นรูปฟิล์มด้วยเครื่องอัดรีดแบบเป่าถุง (Blow film extruder) LABTECH รุ่น LE20-30/C & LF-250 (ภาพ 16) อุณหภูมิที่ใช้ในการขึ้นรูป 140, 160, 170 และ 180 °C ควบคุมความกว้างของฟิล์มที่ 15-20 เซนติเมตร ความหนา 10-20 ไมโครเมตร พิล์มพอลิแลคติกแอซิดผสมน้ำมันพืชสมุนไพรที่เตรียมได้ทำการศึกษาสมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล และสมบัติเชิงความร้อน

ตาราง 1 อัตราส่วนการเตรียม PLA และน้ำมันพืชสมุนไพร

ตัวอย่าง	น้ำหนัก (g)	
	Poly (lactic acid)	น้ำมันพืชสมุนไพร
PLA	100	0
0.25PCO	99.75	0.25
0.5PCO	99.50	0.5
0.75PCO	99.25	0.75
1PCO	99	1
0.25PMO	99.75	0.25
0.5PMO	99.50	0.5

ตัวอย่าง	น้ำหนัก (g)	
	Poly (lactic acid)	น้ำมันพืชสมุนไพร
0.75PMO	99.25	0.75
1PMO	99	1
0.25PCL	99.75	0.25
0.5PCL	99.50	0.5
0.75PCL	99.25	0.75
1PCL	99	1
0.25PLG	99.75	0.25
0.5PLG	99.50	0.5
0.75PLG	99.25	0.75
1PLG	99	1

## 1.2 การปรับปรุงฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิด น้ำมันพืชมะพร้าวด้วยสารตัวเติม

เนื่องจากการเตรียมฟิล์ม PLA ผสมน้ำมันพืชสมุนไพร จากข้อที่ 1.1 พบว่าฟิล์มบางตามขนาดที่ต้องการเตรียมขึ้นมา พบปัญหาของฟิล์มติดกัน ดังนั้นเพื่อเป็นการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นในงานวิจัยนี้จึงมีการเติมสารตัวเติม โดยทำการศึกษาปริมาณของสารตัวเติมที่เหมาะสม คือ แป้งมันสำปะหลัง ซึ่งทำให้สมบัติทางกายภาพ และสมบัติเชิงกล ที่ดีขึ้น โดยมีวิธีการเตรียมดังนี้ ทำการเตรียมเม็ดคอมพาวด์จากเม็ด PLA ผสมน้ำมันมะพร้าว และสารตัวเติม (แป้งมันสำปะหลัง, CST) ตามสัดส่วนดังตารางที่ 2 หลังจากนั้นทำการผสมด้วยเครื่องหลอมอัดรีดแบบสกรูคู่ขนาดเล็ก (ภาพ 15) อุณหภูมิที่ใช้ในการผสม 130, 170, 180, 190 และ 180 °C ความเร็วรอบ 100 rpm เม็ดคอมพาวด์ที่เตรียมได้ทำการขึ้นรูปฟิล์มด้วยกระบวนการอัดรีดแบบเป่าถุง (ภาพ 16) อุณหภูมิที่ใช้ในการขึ้นรูป 140, 160, 170 และ 180 °C ควบคุมความกว้างของฟิล์มที่ 15-20 เซนติเมตร ความหนา 40-60



ไมโครเมตร พิล์มพอลิแลคติกแอซิดผสมน้ำมันมะพร้าวและแป้งมันสำปะหลังที่เตรียมได้ทำการศึกษาสมบัติทางกายภาพ และสมบัติเชิงกล

ตาราง 2 อัตราส่วนการเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA น้ำมันมะพร้าว และแป้งมันสำปะหลัง

ตัวอย่าง	น้ำหนัก (g)		
	Poly (lactic acid)	น้ำมันมะพร้าว	แป้งมันสำปะหลัง
PLA	100	-	-
0.5CST	98.5	1	0.5
1CST	98	1	1



ภาพ 15 เครื่องผสมแบบเกลียวหอนคู่ (Twin screw extruder )



ภาพ 16 การขึ้นรูปฟิล์มพอลิเมอร์ผสมด้วยเครื่องหลอมอัดรีดเป่าฟิล์ม (Blow film extruder)

## 2. การเตรียมผลิตภัณฑ์กระดาษจากเยื่อฟางข้าว

เตรียมเยื่อฟางข้าว 100 กรัม และเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 5, 10 และ 15% w/v ต้มเยื่อฟางข้าวในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์โดยใช้อุณหภูมิในการต้ม 100 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เมื่อครบเวลาที่กำหนดนำฟางข้าวที่ผ่านการบำบัดด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ทำการล้างทำความสะอาดสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ออกจากเยื่อฟางข้าวด้วยน้ำสะอาด และปรับสภาพให้เป็นกลาง โดยใช้กระดาษลิตมัสวัดค่า pH 7-8 เมื่อล้างทำความสะอาดสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ออกหมดแล้วนำเยื่อที่ได้ทำการปั่นด้วยเครื่องปั่นผลไม้เป็นเวลา 2 นาที หลังจากนั้นนำเยื่อที่ได้จากการลดขนาดทำการกระจายเยื่อลงในโมลเพื่อทำการขึ้นรูปแผ่นกระดาษด้วยตะแกรงขนาด 50.00 x 50.00 เซนติเมตร ทิ้งให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง แผ่นกระดาษฟางข้าวที่เตรียมได้นำไปทดสอบสมบัติทางกาย และสมบัติเชิงกล

3. การเตรียมบรรจุภัณฑ์สำหรับบรรจุอาหารจากฟิล์มพอลิแลคติกแอซิด ผสมน้ำมันมะพร้าว และแป้งมันสำปะหลังลามิเนตลงบนกระดาษจากเยื่อฟางข้าว

เตรียมฟิล์ม PLA ผสมน้ำมันมะพร้าว และแป้งมันสำปะหลัง ขนาด 19.00 x 25.00 เซนติเมตร และกระดาษฟางข้าว ขนาด 19.00 x 25.00 เซนติเมตร ทำการทากาวแปงลงบนแผ่นฟิล์ม PLA ผสมน้ำมันมะพร้าว และแป้งมันสำปะที่เตรียมไว้ จากนั้นประกบลงบนแผ่นกระดาษฟางข้าว และทำการลามิเนตฟิล์มลงบนกระดาษจากเยื่อฟางข้าวโดยทำการรีดกดทับให้ความร้อน หลังจากนั้นนำแผ่นกระดาษฟางข้าวลามิเนตด้วยฟิล์มพอลิเมอร์ที่เตรียมได้นำมาขึ้นรูปบรรจุภัณฑ์สำหรับบรรจุอาหารขนาด 13 x 13 เซนติเมตรดังภาพที่ 17



ภาพ 17 บรรจุภัณฑ์สำหรับบรรจุอาหารจากฟิล์มพอลิแลคติกแอซิด ผสมน้ำมันพืชสมุนไพรลาบ  
เนตลงบนกระดาษจากเยื่อฟางข้าว

#### 4. การทดสอบสมบัติของฟิล์มพอลิเมอร์

##### 4.1 ทดสอบอัตราการไหลของพลาสติก (Melt Flow Index)

นำตัวอย่างเม็ดคอมพาวด์ที่เตรียมได้หลังจากการผสมด้วยเครื่องหลอมอัตโนมัติเกลียว  
หนอนคู่ขนาดเล็ก ซึ่งน้ำหนักของพอลิเมอร์ผสม 6.00 – 8.00 กรัม นำไปทดสอบด้วยเครื่องวัดอัตรา  
การไหลของพลาสติก (ดังภาพ 18) สภาวะที่ใช้ในการทดสอบอุณหภูมิที่ 190 °C พลาสติกถูกดันผ่าน  
หัวฉีด (die) โดยน้ำหนักที่ใช้ดัน (load cell) 2.16 กิโลกรัม มีการกำหนดค่าความยาวในการวัดค่า  
เริ่มต้นของพอลิเมอร์หลอมอยู่ที่ระยะห่างระหว่าง piston กับ die ที่ 46 มิลลิเมตร จากนั้นจะวัดค่า  
MFR จนครบระยะเวลาที่พลาสติกหลอมไหลผ่าน die ครบ 60 วินาที ตามมาตรฐาน ASTM D1238  
โดยจะแสดงผลด้วยค่า MFR (Melt flow rate)



ภาพ 18 เครื่องทดสอบค่าอัตราการไหลของพลาสติก (Melt flow index)

#### 4.2 ศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)

นำตัวอย่างฟิล์มพอลิเมอร์ที่เตรียมได้จากข้อ 1. ศึกษาลักษณะพื้นผิวของฟิล์ม และรอยแตกหักของฟิล์มหลังจากการทดสอบการต้านทานการทนต่อแรงดึง โดยทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) รุ่น Leo 1455 VP ศักย์ไฟฟ้า 20 กิโลโวลต์ ในการเตรียมตัวอย่างชิ้นงานก่อนการทดสอบทำการนำตัวอย่างฟิล์มพอลิเมอร์วางลงบนสตั๊ปที่มีแผ่นเทปกาว carbon black หลังจากนั้นตัวอย่างจะถูกเคลือบด้วยทองคำก่อนนำไปทดสอบเพื่อศึกษาลักษณะพื้นผิวของฟิล์มพอลิเมอร์ และความเข้ากันได้ของ PLA และน้ำมันพืชสมุนไพร

#### 4.3 ทดสอบสมบัติทางกายภาพของฟิล์มพอลิเมอร์

##### 4.3.1 ทดสอบความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำ (Water vapor permeability)

ทดสอบความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำตามมาตรฐาน ASTM E90 นำตัวอย่างฟิล์มพอลิเมอร์ที่เตรียมได้จากข้อ 1 ตัดให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 7.00 เซนติเมตร นำซิลิกาเจลที่ผ่านการอบแห้งบรรจุลงในถ้วยทดสอบ และนำตัวอย่างฟิล์มพอลิเมอร์วางปิดบนปากถ้วยที่บรรจุซิลิกาเจล ผนึกขอบปากถ้วยด้วยซีเมนต์พาราฟินเพื่อไม่ให้มีรอยรั่ว (บันทึกน้ำหนักก่อน) หลังจากนั้นนำไปวางที่อุณหภูมิความชื้นควบคุมอุณหภูมิ 30 °C ร้อยละความชื้นสัมพัทธ์ 50% บันทึกน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงทุก 24 ชั่วโมงเป็นเวลา 7 วัน ค่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\text{Water vapor permeability rate (WVPR) (g/m}^2\cdot\text{day)} = \frac{G/t}{A} = \frac{\text{Slope}}{A}$$

เมื่อ  $G/t$  คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักต่อเวลาโดยสามารถหาได้จากความชันของกราฟระหว่างน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลง (g) และเวลา (24 ชั่วโมง)

$A$  คือ พื้นที่ผิวของตัวอย่าง ( $\text{m}^2$ )

##### 4.4 ทดสอบการเคลื่อนย้ายของสารเคมี (Migration test)

การทดสอบการเคลื่อนย้ายของสารเคมีสามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ดังนี้

#### 4.4.1 ทดสอบ Plasticizer migration test

นำตัวอย่างฟิล์มพอลิเมอร์ที่เตรียมได้จากข้อ 1 ขนาด 5.00 x 5.00 เซนติเมตร หลังจากนั้นนำตัวอย่างฟิล์มพอลิเมอร์วางในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 135 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมงชั่งน้ำหนักในเวลาที่แตกต่างกัน ทำการอบตัวอย่างฟิล์มพอลิเมอร์เป็นเวลา 1 ชั่วโมง บันทึกน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไปหลังจากการอบ (ทำซ้ำ 6 ครั้ง) ทำการอบเป็นเวลา 2 ชั่วโมง บันทึกน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลง (1 ครั้ง) หลังจากนั้นทำการอบต่ออีก 16 ชั่วโมงจนครบ 24 ชั่วโมง และบันทึกน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลง น้ำหนักที่หายไปของพลาสติกไซเซออร์แสดงเป็นเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักที่หายไปซึ่งสามารถคำนวณได้ดังนี้ (Orue et al., 2018)

$$W_s = \frac{(M_0 - M_t)}{M_0} \times 100$$

$W_s$  คือน้ำหนักที่หายไปของพลาสติกไซเซออร์ (กรัม)

$M_0$  คือน้ำหนักฟิล์มก่อนทำการอบ (กรัม)

$M_t$  คือน้ำหนักฟิล์มหลังการทดลองการเคลื่อนย้ายสารในเวลาที่แตกต่างกัน (กรัม)

#### 4.4.2. ทดสอบโดยใช้สารละลายที่เป็นตัวแทนอาหาร (Overall migration test)

เตรียมสารละลาย 10% (v/v) เอทานอล (ethanol) ไอโซออกเทน (isooctane) และ 3% (w/v) กรดอะซิติก (acetic acid) สารละลายเหล่านี้ใช้เป็นตัวแทนอาหารคือน้ำ น้ำมัน และกรด (ตามมาตราฐาน European Commission Regulation EU 10/ 2011) นำตัวอย่างฟิล์มพอลิเมอร์ที่ได้เตรียมจากข้อ 1 ขนาด 7.00 x 7.00 เซนติเมตร ตัวอย่างละ 5 ชิ้น (น้ำหนักก่อน) แช่ลงในสารละลายที่เตรียมไว้ในขวดแก้วปริมาตร 50 มิลลิลิตร ฟิล์มที่แช่ในสารละลาย ethanol และ acetic acid ควบคุมอุณหภูมิที่ 40 °C เป็นเวลา 10 วัน ในขณะที่ฟิล์มที่แช่ในสารละลาย isooctane ควบคุมอุณหภูมิที่ 20 °C เป็นเวลา 2 วัน (น้ำหนักหลัง) เมื่อครบกำหนดนำฟิล์มออกจากสารละลายและปล่อยให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง หลังจากนั้นชั่งน้ำหนักฟิล์มที่เปลี่ยนแปลงไป โดยจะรายงานผลเป็นค่าเฉลี่ย และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของ % Weight loss (Polat et al., 2018)

### 4.5 การทดสอบสมบัติเชิงกล

#### 4.5.1 การทดสอบการทนต่อแรงดึง (Tensile test)

นำตัวอย่างฟิล์มพอลิเมอร์ที่เตรียมได้จากข้อ 1. ตัดชิ้นงานเป็นรูปดัมเบล ตามมาตรฐาน ASTM D882 ชนิดดัมเบล Type I ตัวอย่างละ 8 ชิ้น ทั้งในทิศทางตามแนวเครื่องจักร (Mechanical direction, MD) และทิศทางตามแนวขวาง (Transverse direction, TD) นำไปวัด

ความกว้างและความหนาของชิ้นงาน ตัวอย่างถูกนำไปทดสอบสมบัติเชิงกลทางด้านการทนต่อแรงดึง ด้วยเครื่อง Universal testing machine ของบริษัท Instron (ดังภาพ 19) สภาวะที่ใช้ในการทดสอบ Load cell 1 kN อัตราเร็วในการดึง 20 มิลลิเมตร/นาที โดยจะรายงานผลด้วยค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของ Tensile strength Modulus at break และ %Elongation at break



ภาพ 19 เครื่องทดสอบการทนต่อแรงดึง (Universal testing machine)

#### 4.6 การทดสอบสมบัติทางเคมี

4.6.1 การทดสอบการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FT-IR (Fourier Transform Infrared Spectroscopy)

นำตัวอย่างฟิล์มพอลิเมอร์ที่เตรียมได้จากข้อ 1. ขนาด 2.00 x 2.00 เซนติเมตร นำไปทดสอบเพื่อวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FTIR Perkin Elmer system 2000 Attenuated total reflectance (ATR) ดังภาพ 20 โดยช่วงของการวิเคราะห์คือ  $4000 - 400 \text{ cm}^{-1}$



## ภาพ 20 เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)

### 4.7 การทดสอบการย่อยสลายแบบฝังกลบดิน (Biodegradation)

เตรียมตัวอย่างฟิล์มพอลิเมอร์ ขนาด 5.00 x 5.00 เซนติเมตร สูตรละ 3 ชิ้น ทำการอบไล่ความชื้นที่ตู้อบลมร้อน (บันทึกน้ำหนักก่อนการทดสอบ) ทำการใส่ดินลงกล่องพลาสติกที่เตรียมไว้โดยเตรียมดินให้มีความสูงประมาณ 10 เซนติเมตร ดินที่เตรียมสำหรับการทดสอบฝังกลบมีความชื้นเริ่มต้นอยู่ที่ประมาณ 80-90% หลังจากนั้นนำตัวอย่างฟิล์มพอลิเมอร์วางบนผิวดินในกล่องที่เตรียมดินไว้หลังจากนั้นเติมดินกลบปิดชิ้นงานฟิล์มพอลิเมอร์สูงอีกประมาณ 3-4 เซนติเมตร ระยะเวลาในการทดสอบ 3, 6, 9 และ 12 เดือน ตามลำดับ เมื่อครบกำหนดนำฟิล์มพอลิเมอร์ที่ฝังดินทำความสะอาดเอาดินออกให้หมด และทำการอบไล่ความชื้น (บันทึกน้ำหนักหลังการทดสอบ) บันทึกน้ำหนักก่อนและหลังการทดสอบทุกครั้งเพื่อหาน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไปของตัวอย่าง จะแสดงผลออกมาเป็นเปอร์เซ็นต์ของการย่อยสลาย สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\% \text{ Degradation} = \frac{(W_2 - W_1)}{W_1} \times 100$$

$W_1$  คือ น้ำหนักก่อนการทดสอบ (กรัม)

$W_2$  คือ น้ำหนักหลังการทดสอบ (กรัม)

### 5. การทดสอบเยื่อกระดาษจากฟางข้าว

#### 5.1 การทดสอบสมบัติทางกายภาพ

##### 5.1.1 การหาเปอร์เซ็นต์การบวมตัว (%Swelling)

นำกระดาษจากฟางข้าวที่เตรียมได้จากข้อ 2 ขนาด 2.00 x 2.00 เซนติเมตร ตัวอย่างละ 3 ชิ้น (บันทึกน้ำหนักก่อน) แช่ในน้ำกลั่นปริมาตร 20 มิลลิลิตร เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำชิ้นงานออกมาเช็ดน้ำบริเวณพื้นผิวออก (บันทึกน้ำหนักหลัง) แล้วบันทึกน้ำหนักก่อนและหลังการทดลองทุกครั้ง เพื่อหาเปอร์เซ็นต์การบวมตัว

$$\text{เปอร์เซ็นต์การบวมตัว} = \frac{(W_2 - W_1)}{W_1} \times 100$$

$W_1$  คือ น้ำหนักก่อนการแช่น้ำกลั่น (กรัม)

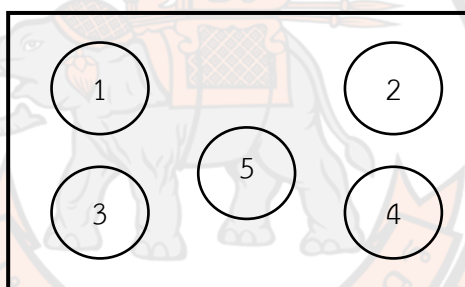
$W_2$  คือ น้ำหนักหลังการแช่น้ำกลั่น (กรัม)

### 5.1.2 การทดสอบการวัดสีด้วยเครื่อง colorimeter

นำกระดาษฟางข้าวที่เตรียมได้จากข้อ 2. ตัดให้มีขนาด 15.00 x 15.00 เซนติเมตร ทำการทดสอบด้วยเครื่องวัดสี Color Reader CR-20 ทำการวัดค่าสีตามตำแหน่งดังภาพที่ 21 โดยจะรายงานผลการวิเคราะห์ในรูปของค่าพารามิเตอร์สี  $L^*$ ,  $a^*$  และ  $b^*$  ดังนี้ ค่า  $L^*$  บรรยายถึงค่าความสว่าง (Lightness) โดยค่า  $+L^*$  แสดงถึงสีขาว  $-L^*$  แสดงถึงสีดำ ค่า  $a^*$  บรรยายถึงแกนสีเขียว ( $-a^*$ ) จนถึงสีแดง ( $+a^*$ ) และค่า  $b^*$  บรรยายถึงแกนสีน้ำเงิน ( $-b^*$ ) จนถึงสีเหลือง ( $+b^*$ )

$$\Delta E = \sqrt{(L_1^* - L_2^*)^2 + (a_1^* - a_2^*)^2 + (b_1^* - b_2^*)^2}$$

โดยที่ค่า  $\Delta E$  คือค่าความแตกต่างของค่าสี



ภาพ 21 ตำแหน่งการวัดสีของตัวอย่างชิ้นงาน

## 5.2 การทดสอบสมบัติเชิงกล

### 5.2.1 การทดสอบการทนต่อแรงดึง (Tensile testing)

เตรียมตัวอย่างกระดาษฟางข้าวขนาด 18.00 x 2.50 เซนติเมตร ตัวอย่างละ 8 ชิ้น ตามมาตรฐาน TAPPI T494 นำไปวัดความกว้างและความหนาของชิ้นงาน จากนั้นนำไปทดสอบโดยใช้เครื่อง Universal testing machine โมเดล WDW-5E รุ่น Time GROUPING (ดังภาพ 22) สภาวะที่ใช้ในการทดสอบ Load cell 1 kN อัตราเร็วในการดึง 25 มิลลิเมตร/นาที โดยจะรายงานผลด้วยค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของ Tensile strength Modulus at break และ %Elongation at break

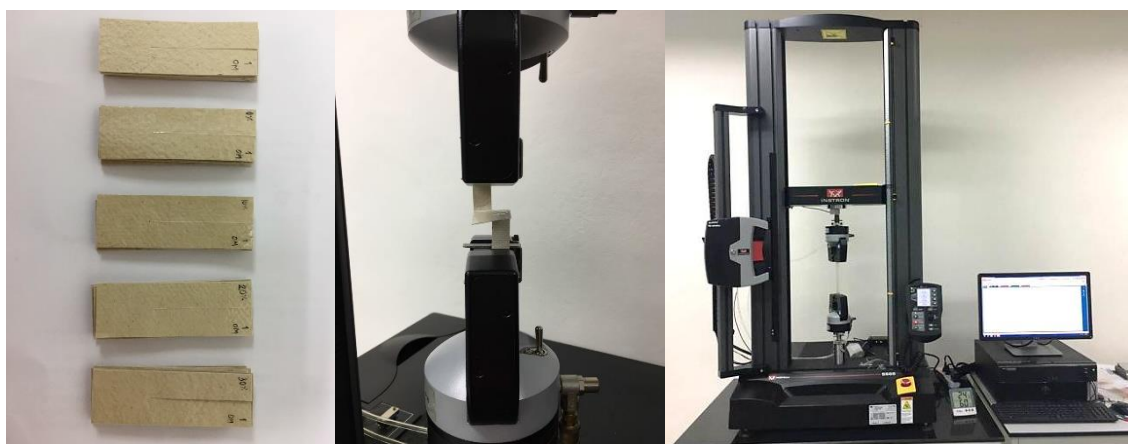




ภาพ 22 เครื่องทดสอบการทนต่อแรงดึง (Universal testing machine)

#### 5.2.2 การทดสอบความต้านทานต่อการฉีกขาด (Tear test)

นำตัวอย่างกระดาษฟางข้าวที่เตรียมได้ตัดให้มีขนาดความยาว 75.00 มม. ขนาดความกว้าง 25 มม. สร้างรอยขาดตรงกึ่งกลางเริ่มต้นยาว 50.00 มม. ทดสอบตัวอย่างละ 8 ชิ้น ตามมาตรฐาน ASTM D1938-02 ดังภาพ 23 ตัวอย่างถูกนำไปทดสอบสมบัติเชิงกลทางด้านค่าความต้านทานการฉีกขาดด้วยเครื่อง Universal testing machine ของบริษัท Instron (ดังภาพ 23) สภาวะที่ใช้ในการทดสอบ Load cell 1 kN อัตราเร็วในการดึง 20 มิลลิเมตร/นาที โดยจะรายงานผลด้วยค่าเฉลี่ย และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของ Tear strength



ภาพ 23 ตัวอย่างการดึงขึ้นงานการทดสอบความต้านทานต่อการฉีกขาด

6. การทดสอบบรรจุภัณฑ์อาหารจากแผ่นฟิล์มพอลิแลคติกแอซิด ผสมน้ำมันพืชสมุนไพรลามีเนตลงบนกระดาษจากเยื่อฟางข้าว

#### 6.1 ศึกษาสมบัติการสภาวะการเปียก ด้วยเครื่องวัดมุม (contact angle)

นำตัวอย่างแผ่นกระดาษฟางข้าวลามีเนตด้วยฟิล์มพอลิเมอร์ชีวภาพที่ทำการปรับปริมาณความชื้นของแผ่นกระดาษที่ปริมาณความชื้น 0,10,20 และ 30 โดยน้ำหนัก ทำการทดสอบตัวอย่างละ 3 ชิ้น โดยขึ้นงานตัวอย่างถูกตัดให้มีขนาดความยาว 20 มม. ขนาดความกว้าง 100.00 มม. ตามมาตรฐาน ASTM D5946 นำตัวอย่างที่เตรียมได้วางบนแผ่นสไลด์โดยการหยดน้ำกลั่นลงบนผิวของตัวอย่าง ทำการวัดมุมสัมผัส ที่เวลา 0 และ 3 นาทีและทำการบันทึกผล รายงานผลออกมาเป็นค่ามุมเริ่มต้น ค่ามุมสุดท้าย และค่าความชื้น



ภาพ 24 เครื่องวัดมุมสัมผัส (Contact angle analyze)

#### 6.2 ศึกษาสมบัติเชิงกล

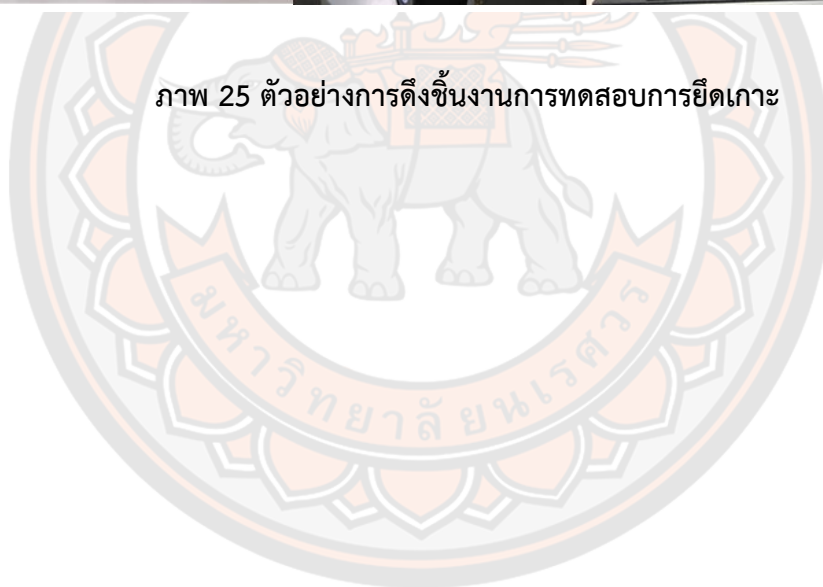
##### 6.2.1 การทดสอบการยึดเกาะ (Peel test)

นำตัวอย่างแผ่นกระดาษฟางข้าวลามีเนตด้วยฟิล์มพอลิเมอร์ชีวภาพที่ทำการปรับปริมาณความชื้นของแผ่นกระดาษที่ปริมาณความชื้น 0,10,20 และ 30 โดยน้ำหนัก ทำการทดสอบตัวอย่างละ 8 ชิ้น โดยขึ้นงานตัวอย่างถูกตัดให้มีขนาดความยาว 150.00 มม. ขนาดความกว้าง 25.00 มม. โดยทำการลอกระหว่างแผ่นกระดาษฟางข้าวกับฟิล์มออกจากกันเริ่มต้นยาว 50.00 มม. ลักษณะขึ้นงานคล้ายรูปตัว T ตามมาตรฐาน ASTM F904 ตัวอย่างถูกนำไปทดสอบสมบัติเชิงกลทางด้านการยึดเกาะโดยใช้เครื่อง Universal testing machine ของบริษัท Instron ทำการวางขึ้นงานเป็นรูปตัว T โดยให้หัวจับด้านบนจับปลายแผ่นฟิล์มพอลิแลคติกแอซิด ผสมน้ำมันพืชสมุนไพรที่ทำการลอกออก

จากกระดาษจากเยื่อฟางข้าว ส่วนปลายด้านล่างจับปลายกระดาษจากเยื่อฟางข้าว ดังภาพ 25  
สภาวะที่ใช้ในการทดสอบ Load cell 1 kN อัตราเร็วในการดึง 20 มิลลิเมตร/นาที โดยจะรายงานผล  
ออกมาด้วยค่าเฉลี่ย และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของ Peel strength



ภาพ 25 ตัวอย่างการดึงขึ้นงานการทดสอบการยึดเกาะ



## บทที่ 4

### ผลการวิจัย

งานวิจัยนี้สนใจการเตรียมบรรจุภัณฑ์สำหรับอาหารจากฟิล์มพอลิแลคติกแอซิด (PLA) ผสมน้ำมันสมุนไพรลาไมเนตแผ่นกระดาษจากเยื่อฟางข้าว จะแสดงรายละเอียดเกี่ยวกับผลการศึกษสมบัติของฟิล์มพอลิแลคติกแอซิด (PLA) ผสมน้ำมันสมุนไพรลาไมเนตแผ่นกระดาษจากเยื่อฟางข้าว แบ่งผลการศึกษาออกเป็น 3 ส่วน ดังนี้

#### 1. ศึกษาสมบัติของฟิล์มพอลิแลคติกแอซิด (PLA) ผสมน้ำมันสมุนไพร

1.1 ศึกษาสมบัติของฟิล์มพอลิแลคติกแอซิด (PLA) ผสมน้ำมันสมุนไพรทั้ง 4 ชนิดคือ น้ำมันมะพร้าว น้ำมันมะรุม น้ำมันกานพลู และน้ำมันตะไคร้บ้าน ที่อัตราส่วนที่แตกต่างกัน

1.2 ศึกษาสมบัติของฟิล์มพอลิแลคติกแอซิด (PLA) น้ำมันมะพร้าว ผสมแป้งมันสำปะหลัง ที่มีอัตราส่วนของแป้งมันสำปะหลังที่แตกต่างกัน

#### 2. ศึกษาสมบัติของกระดาษจากเยื่อฟางข้าว

3. ศึกษาสมบัติของบรรจุภัณฑ์อาหารจากแผ่นฟิล์มพอลิแลคติกแอซิด (PLA) ผสมน้ำมันมะพร้าวลาไมเนตลงบนกระดาษจากเยื่อฟางข้าว

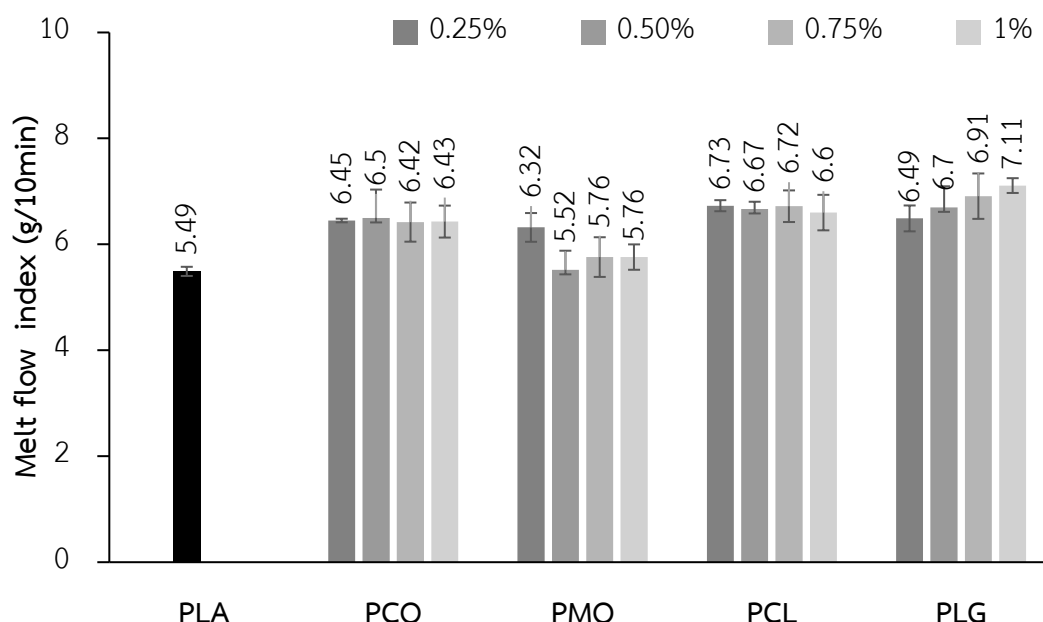
#### 1. ศึกษาสมบัติของฟิล์มพอลิแลคติก (PLA) ผสมน้ำมันสมุนไพร

1.1 ศึกษาสมบัติของฟิล์มพอลิแลคติกแอซิด (PLA) ผสมน้ำมันสมุนไพรทั้ง 4 ชนิดคือ น้ำมันมะพร้าว น้ำมันมะรุม น้ำมันกานพลู และน้ำมันตะไคร้บ้าน ที่อัตราส่วนที่แตกต่างกัน

1.1.1 การศึกษาค่าอัตราการไหล (Melt Flow Rate) ของเม็ดคอมพาวด์พอลิแลคติกแอซิด (PLA) ผสมน้ำมันสมุนไพร ที่อัตราส่วนที่แตกต่างกัน

จากผลการทดสอบค่าอัตราการไหล (Melt Flow Rate) ของเม็ดคอมพาวด์ของพอลิแลคติกแอซิด (PLA) ผสมน้ำมันสมุนไพรทั้ง 4 ชนิด คือ น้ำมันมะพร้าว น้ำมันมะรุม น้ำมันกานพลู และน้ำมันตะไคร้บ้าน ที่อัตราส่วนที่แตกต่างกันที่ 0.25 0.5 0.75 และ 1% ด้วยเครื่องทดสอบค่าอัตราการไหลของพลาสติก (Melt flow index) แสดงผลการทดสอบดังภาพ 26 พบว่าค่าดัชนีการไหล (MFR) ของเม็ดคอมพาวด์พอลิแลคติกแอซิด (PLA) มีค่าเท่ากับ 5.49 g/10 min เมื่อนำ PLA ผสมกับน้ำมันสมุนไพรที่อัตราส่วนที่แตกต่างกันที่ 0.25 0.5 0.75 และ 1% มีค่า MFR เพิ่มขึ้น พบว่าฟิล์ม PLA ผสมน้ำมันมะพร้าวที่อัตราส่วน 0.25 0.5 0.75 และ 1% มีค่า MFR ที่ 6.45 6.5 6.42 และ

6.43 g/10 min ตามลำดับ เม็ดคอมพาวด์ PLA ผสมน้ำมันมะรุมที่อัตราส่วน 0.25 0.5 0.75 และ 1% มีค่า MFR ที่ 6.32 5.52 5.76 และ 5.76 g/10 min เม็ดคอมพาวด์ PLA ผสมน้ำมันกานพลูที่อัตราส่วน 0.25 0.5 0.75 และ 1% มีค่า MFR ที่ 6.73 6.67 6.72 และ 6.6 g/10 min ตามลำดับ และเม็ดคอมพาวด์ PLA ผสมน้ำมันตะไคร้บ้านที่อัตราส่วน 0.25 0.5 0.75 และ 1% มีค่า MFR ที่ 6.49 6.7 6.91 และ 7.11 g/10 min ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าน้ำมันสมุนไพรทั้ง 4 ชนิด คือ น้ำมันมะพร้าว น้ำมันมะรุม น้ำมันกานพลู และ น้ำมันตะไคร้ ทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์ช่วยในกระบวนการผสมส่งผลต่ออัตราการไหลของ PLA เนื่องจากสมบัติของพลาสติกไซเซอร์สามารถเข้าไปแทรกอยู่ระหว่างสายโซ่โมเลกุลของ PLA ทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างสายโซ่โมเลกุลของ PLA ลดลง ทำให้สายโซ่เกิดการเคลื่อนไหวได้ง่าย ส่งผลให้อัตราการไหลของ PLA ผสมน้ำมันสมุนไพรเพิ่มขึ้น

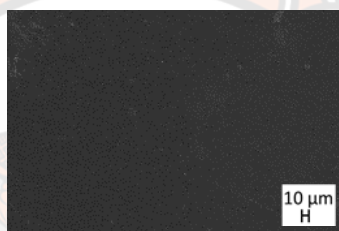


ภาพ 26 ค่าอัตราการไหล (Melt Flow Rate) ของเม็ดคอมพาวด์พอลิแลคติกแอซิด (PLA) ผสมน้ำมันสมุนไพร ที่อัตราส่วนที่แตกต่างกัน

### 1.1.2. การศึกษาสัณฐานวิทยาของฟิล์มพอลิแลคติกแอซิด (PLA) ผสมน้ำมันสมุนไพร อัตราส่วนที่แตกต่างกัน

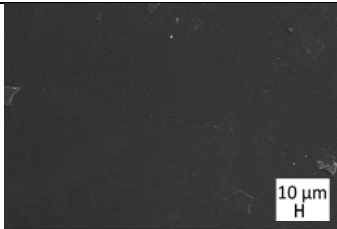
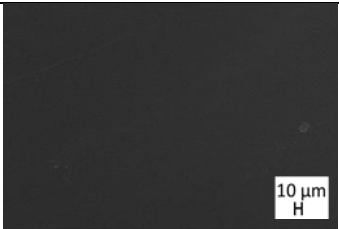
ผลการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยา ที่ทำการศึกษาลักษณะพื้นผิว ของฟิล์มพอลิแลคติกแอซิด(PLA) ผสมน้ำมันสมุนไพรทั้ง 4 ชนิดคือ น้ำมันมะพร้าว น้ำมันมะรุม น้ำมันกานพลู และน้ำมัน

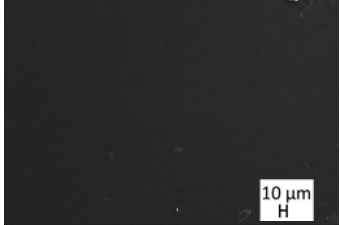
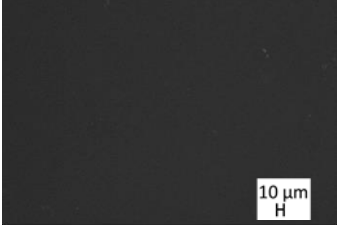
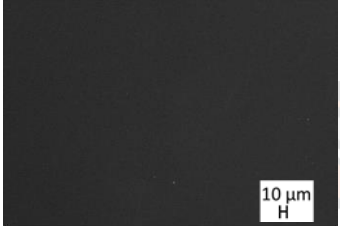

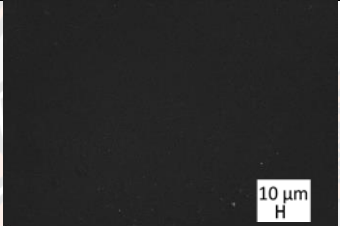
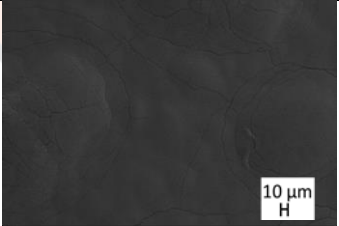
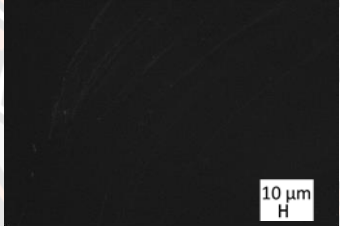
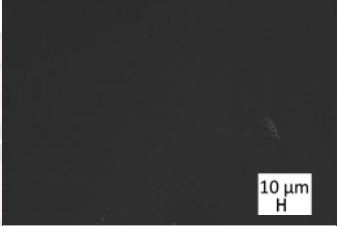
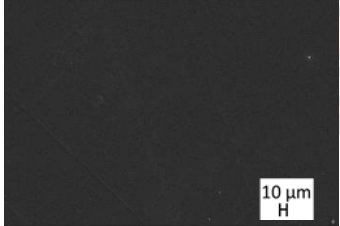
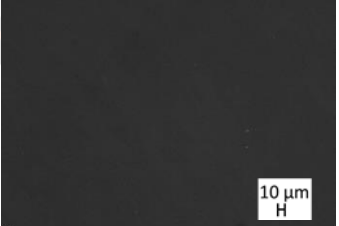
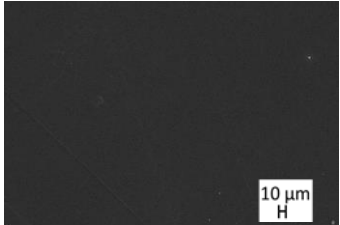
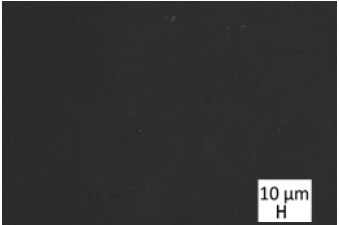
ตะไคร้บ้าน ที่อัตราส่วนที่แตกต่างกันที่ 0.25 0.5 0.75 และ 1% แสดงภาพ SEM ดังตารางที่ 3 เมื่อพิจารณาภาพถ่าย SEM ของฟิล์ม PLA ที่ไม่ได้ทำการผสมน้ำมันสนุนไพร (ภาพ 27) พบว่าลักษณะพื้นผิวของฟิล์ม PLA มีลักษณะขรุขระ ไม่เรียบ แต่เมื่อมีการเติมน้ำมันสนุนไพรทั้ง 4 ชนิด น้ำมันมะพร้าว น้ำมันมะรุม น้ำมันกานพลู และ น้ำมันตะไคร้บ้าน ที่อัตราส่วน 0.25 0.5 0.75 และ 1% พบว่าลักษณะพื้นผิว มีลักษณะเรียบ เป็นเนื้อเดียวกัน จากผลดังกล่าวอาจกล่าวได้ว่าน้ำมันสนุนไพรที่ทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์มีผลต่อความสามารถในการเข้ากันของฟิล์ม PLA ส่งผลทำให้ทำให้ฟิล์ม PLA ผสมน้ำมันสนุนไพรมีความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้น สังเกตได้จากผลการทนต่อแรงดึงที่ความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile strength) มีค่าลดลง แต่ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด (% Elongation at break) มีค่าเพิ่มขึ้น



ภาพ 27 ภาพถ่ายลักษณะพื้นผิวของตัวอย่างฟิล์มพอลิแลคติกแอซิด (PLA) ที่กำลังขยาย 200X

ตาราง 3 ภาพถ่ายลักษณะพื้นผิวของตัวอย่างฟิล์มพอลิแลคติกแอซิด (PLA) ผสมน้ำมันสนุนไพรที่อัตราส่วนที่แตกต่างกัน

ตัวอย่าง	พื้นผิว 200X	ตัวอย่าง	พื้นผิว 200X
0.25PCO		0.25PCL	

ตัวอย่าง	พื้นผิว 200X	ตัวอย่าง	พื้นผิว 200X
0.75PCO		0.75PCL	
1PCO		1PCL	
0.25PMO		0.25PLG	
0.5PMO		0.5PLG	
0.75PMO		0.75PLG	
1PMO		1PLG	

### 1.1.3. การศึกษาความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำของฟิล์มพอลิ-แลคติกแอซิดผสมน้ำมันสมุนไพรที่อัตราส่วนที่แตกต่างกัน

เนื่องจากน้ำมีส่วนสำคัญที่ทำให้แบคทีเรียเติบโต สมบัติในการซึมผ่านของไอน้ำจึงมีความสำคัญสำหรับบรรจุภัณฑ์ ค่าการซึมผ่านของไอน้ำต่ำแบคทีเรียมีโอกาสในการเจริญเติบโตต่ำ ส่งผลทำให้อาหารเกิดการเสื่อมสภาพได้ช้าลง แต่ถ้าค่าการซึมผ่านของไอน้ำสูงทำให้น้ำสามารถผ่านเข้าออกได้มาก และส่งผลต่อการการสูญเสียน้ำหนักของอาหาร ทำให้เกิดการเสื่อมสภาพได้เร็วขึ้น

ความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำของฟิล์มพอลิแลคติกแอซิดผสมน้ำมันทั้ง 4 ชนิด คือน้ำมันมะพร้าว น้ำมันมะรุม น้ำมันกานพลู และน้ำมันตะไคร้บ้าน ในอัตราส่วนที่แตกต่างกันที่ 0.25 0.5 0.75 และ 1% แสดงผลดังตารางที่ 4 พบว่าฟิล์มพอลิแลคติกแอซิด (PLA) ไม่ได้ทำการผสมน้ำมันสมุนไพรมีค่าเท่ากับ  $1.37 \text{ g/m}^2 \cdot \text{day}$  เมื่อมีการผสมน้ำมันสมุนไพรทั้ง 4 ชนิดที่อัตราส่วน 0.25 0.5 0.75 และ 1% โดยฟิล์ม PLA ผสมน้ำมันมะพร้าวที่อัตราส่วน 0.25 0.5 0.75 และ 1% มีค่าการซึมผ่านไอน้ำที่ 3.13 2.8 3.21 และ  $2.96 \text{ g/m}^2 \cdot \text{day}$  ตามลำดับ ฟิล์ม PLA ผสมน้ำมันมะรุมที่อัตราส่วน 0.25 0.5 0.75 และ 1% มีค่าการซึมผ่านไอน้ำที่ 2.76 2.96 3.12 และ  $3.01 \text{ g/m}^2 \cdot \text{day}$  ตามลำดับ ฟิล์ม PLA ผสมน้ำมันกานพลูที่อัตราส่วน 0.25 0.5 0.75 และ 1% มีค่าการซึมผ่านไอน้ำที่ 3.07 3.03 3.04 และ  $3.35 \text{ g/m}^2 \cdot \text{day}$  ตามลำดับ และ ฟิล์ม PLA ผสมน้ำมันตะไคร้บ้านที่อัตราส่วน 0.25 0.5 0.75 และ 1% มีค่าการซึมผ่านไอน้ำที่ 3.27 2.95 3.15 และ  $3.07 \text{ g/m}^2 \cdot \text{day}$  ตามลำดับ พบว่าเมื่อมีการผสมน้ำมันสมุนไพรทั้ง 4 ชนิด น้ำมันมะพร้าว น้ำมันมะรุม น้ำมันกานพลู และน้ำมันตะไคร้บ้าน ที่อัตราส่วน 0.25 0.5 0.75 และ 1% ค่าความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องมาจากน้ำมันสมุนไพรเหล่านี้ทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์เข้าไปแทรกอยู่ระหว่างสายโซ่โพลิเมอร์ช่วยลดแรงระหว่างโพลิเมอร์ทำให้มีการลดลงของช่องว่างจากที่ตอนแรกอยู่กันอย่างเป็นระเบียบแต่เมื่อมีการใส่น้ำมันสมุนไพรที่เป็นพลาสติกไซเซอร์ลงไปทำให้สายโซ่ที่อยู่กันเป็นระเบียบ ค่อยขยับออก ทำให้สายโซ่สามารถขยับง่ายขึ้นจึงทำให้มีค่าการซึมผ่านของไอน้ำที่เพิ่มขึ้น

ตาราง 4 แสดงผลค่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำของฟิล์มพอลิแลคติกแอซิดผสมน้ำมันสมุนไพรที่อัตราส่วนที่แตกต่างกัน

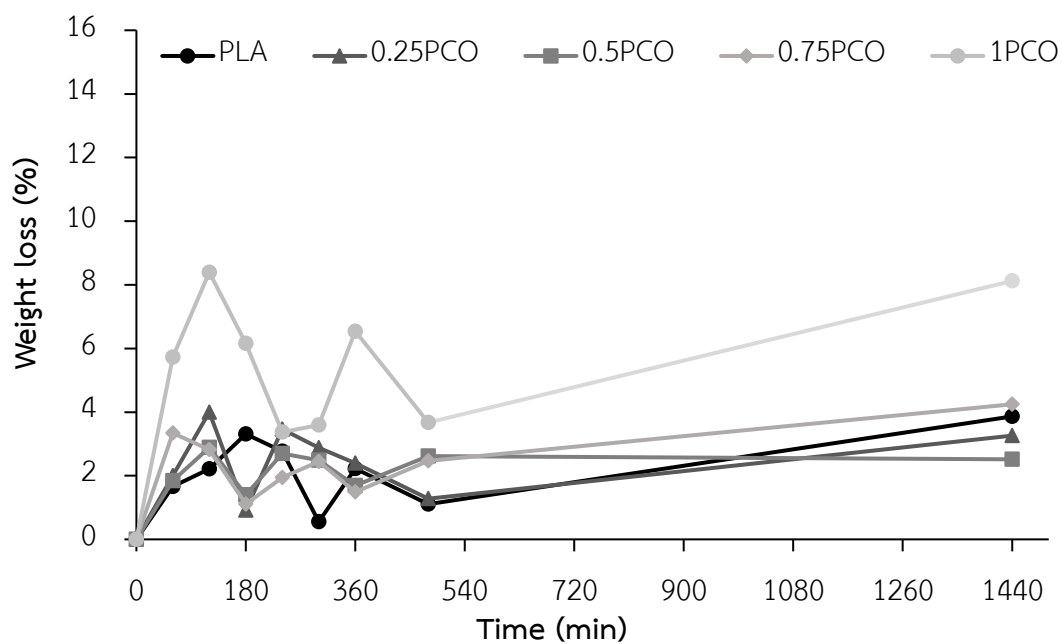


ตัวอย่าง	การซึมผ่านของไอน้ำ (g/m <sup>2</sup> .day)
PLA	1.37 ± 0.01
0.25PCO	3.13 ± 1.05
0.5PCO	2.8 ± 1.15
0.75PCO	3.21 ± 1.04
1PCO	2.96 ± 1.2
0.25PMO	2.76 ± 1.13
0.5PMO	2.96 ± 1.21
0.75PMO	3.12 ± 1.30
1PMO	3.01 ± 1.23
0.25PCL	3.07 ± 0.10
0.5PCL	3.03 ± 0.13
0.75PCL	3.04 ± 0.30
1PCL	3.35 ± 0.50
0.25PLG	3.27 ± 1.34
0.5PLG	2.95 ± 1.21
0.75PLG	3.15 ± 1.32
1PLG	3.07 ± 1.26

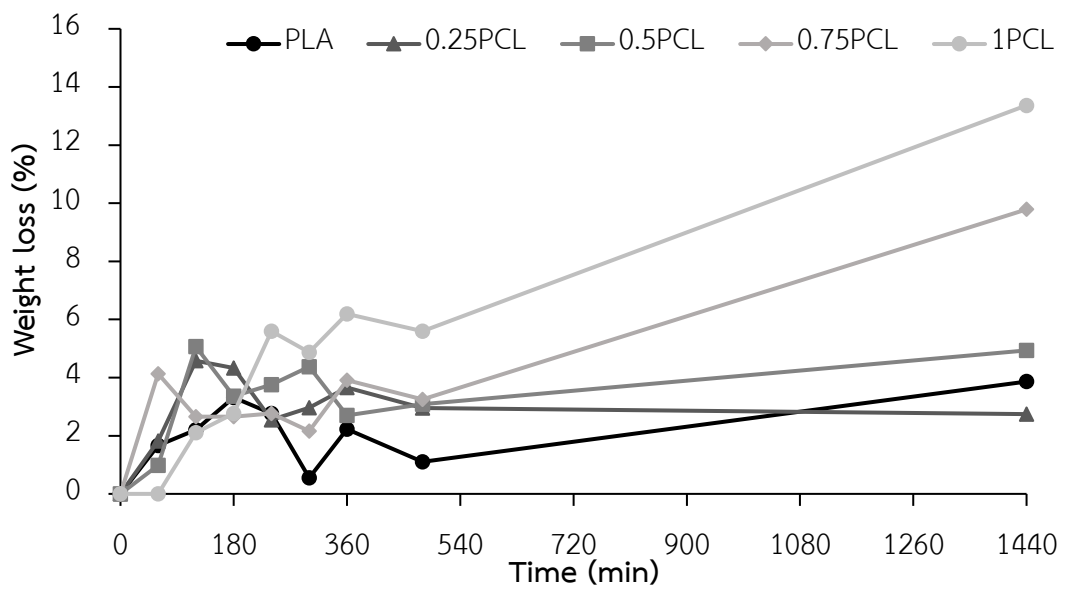
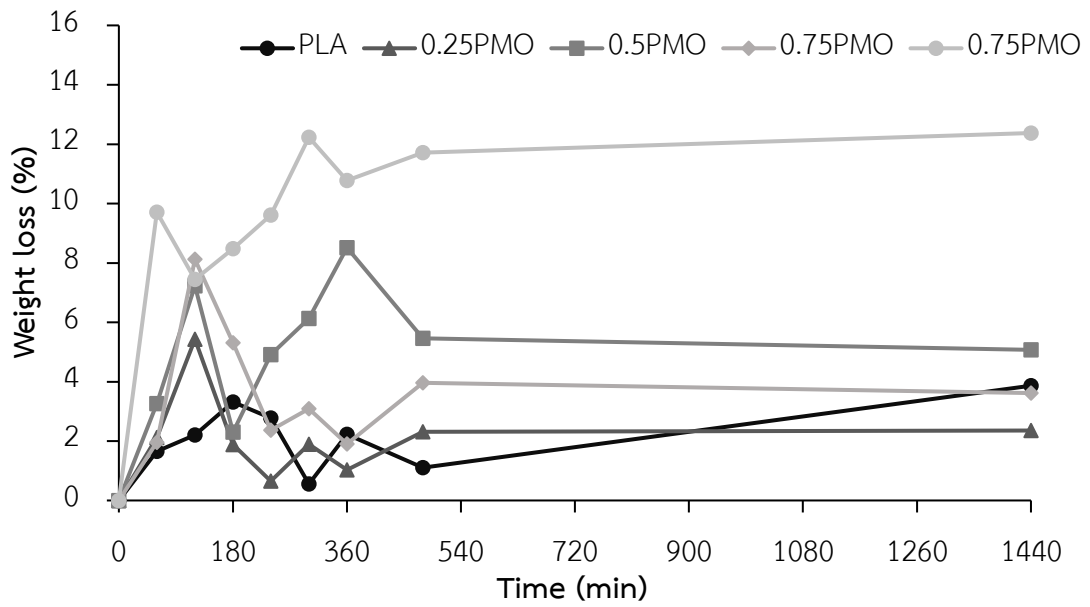
#### 1.1.4. การศึกษาการเคลื่อนย้ายของสารเคมีของฟิล์มพอลิแลคติกแอซิดผสมน้ำมัน สมุนไพรที่อัตราส่วนที่แตกต่างกัน แบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ

##### 1. Plasticizer migration test

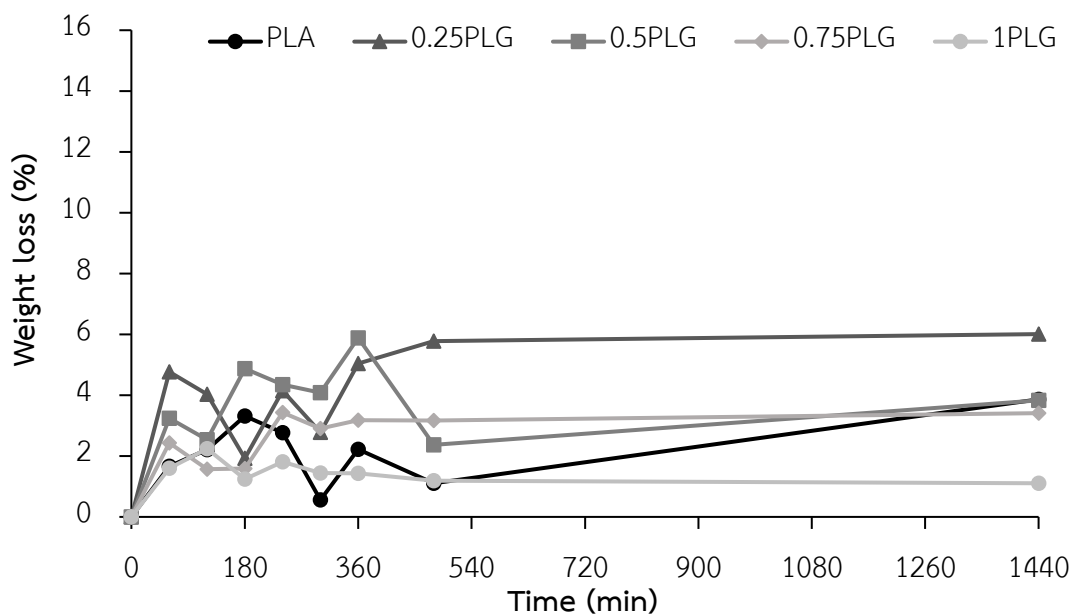
เปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปของการศึกษาการเคลื่อนย้ายของสารเคมีแสดงผลการศึกษาดังภาพ 28 จากผลการศึกษาการเคลื่อนย้ายของสารเคมีโดยให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 135 °C และระยะเวลาที่แตกต่างกัน เมื่อมีการผสมน้ำมันสมุนไพรทั้ง 4 ชนิด คือ น้ำมันมะพร้าว น้ำมันมะรุม น้ำมันกานพลู และ น้ำมันตะไคร้บ้าน ในอัตราส่วนต่างๆที่ 0.25 0.5 0.75 และ 1% ลงบนฟิล์ม PLA พบว่าการเคลื่อนย้ายของพลาสติกไซเซอร์มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับฟิล์ม PLA ฟิล์มที่ทดสอบมีขนาดบางประมาณ 10-20  $\mu\text{m}$  ทำให้ขณะทดสอบเมื่อฟิล์มได้รับความร้อนจึงเกิดการหดตัว



(ก)



(ค)



(ง)

ภาพ 28 ค่าการสูญเสียเสียน้ำหนักของพลาสติกไซเซออร์ของฟิล์มพอลิแลคติกแอซิด (PLA) ผสมน้ำมันสมุนไพร ที่อัตราส่วนที่แตกต่างกัน (ก) น้ำมันมะพร้าว (ข) น้ำมันมะรุม (ค) น้ำมันกานพลู (ง) น้ำมันตะไคร้บ้าน

## 2. Overall migration test

การทดสอบการเคลื่อนย้ายของสารเคมีที่ทำการทดสอบในสารละลาย 10% (v/v) เอทานอล ไอโซออกเทน และ 3% (w/v) อะซิติกแอซิด โดยสารละลายเหล่านี้ใช้เป็นตัวแทนของอาหารคือ น้ำมัน น้ำ และกรด ตามมาตรฐาน Commission Regulation EU N° 10/2011 จากตารางที่ 5 พบว่าในสารละลาย 10% (v/v) ethanol ฟิล์มพอลิแลคติกแอซิด (PLA) ที่ไม่ได้ทำการผสมน้ำมันสมุนไพรมีค่าการเคลื่อนย้ายของสารเคมี (migration test) 0.91% ในขณะที่ฟิล์มที่ผสมน้ำมันสมุนไพรทั้ง 4 ชนิดคือ น้ำมันมะพร้าว น้ำมันมะรุม น้ำมันกานพลู และน้ำมันตะไคร้บ้าน ในอัตราส่วนต่างที่แตกต่างกันที่ 0.25 0.5 0.75 และ 1% พบว่าฟิล์มพอลิแลคติกแอซิดผสมน้ำมันมะพร้าวที่อัตราส่วน 0.25 0.5 0.75 และ 1% มีค่าการเคลื่อนย้ายของสารเคมีที่ 1.65 1.81 1.69 และ 1.81% ตามลำดับ ฟิล์มพอลิแลคติกแอซิดผสมน้ำมันมะรุมที่อัตราส่วน 0.25 0.5 0.75 และ 1% มีค่าการเคลื่อนย้ายของสารเคมีที่ 1.44 1.14 1.00 และ 1.96% ฟิล์มพอลิแลคติกแอซิดผสมน้ำมันกานพลูที่อัตราส่วน 0.25 0.5 0.75 และ 1% มีค่าการเคลื่อนย้ายของสารเคมีที่ 0.74 0.56 0.76

และ 1.63% ตามลำดับ และฟิล์มพอลิแลคติกแอซิดผสมน้ำมันตะไคร้บ้านที่อัตราส่วน 0.25 0.5 0.75 และ 1% มีค่าการเคลื่อนย้ายของสารเคมีที่ 0.41 0.45 0.45 และ 0.52%ตามลำดับ

สารละลาย isooctane ฟิล์มพอลิแลคติกแอซิด (PLA) ที่ไม่ได้ทำการผสมน้ำมันสมุนไพรมีค่าการเคลื่อนที่ของสารเคมี (migration test) % พบว่าฟิล์มพอลิแลคติกแอซิดผสมน้ำมันมะพร้าวที่อัตราส่วน 0.25 0.5 0.75 และ 1% มีค่าการเคลื่อนย้ายของสารเคมีที่ 1.65 1.81 1.69 และ 1.81% ตามลำดับ ฟิล์มพอลิแลคติกแอซิดผสมน้ำมันมะรุมที่อัตราส่วน 0.25 0.5 0.75 และ 1% มีค่าการเคลื่อนย้ายของสารเคมีที่ 1.44 1.14 1.00 และ 1.96% ฟิล์มพอลิแลคติกแอซิดผสมน้ำมันกานพลูที่อัตราส่วน 0.25 0.5 0.75 และ 1% มีค่าการเคลื่อนย้ายของสารเคมีที่ 0.74 0.56 0.76 และ 1.63% ตามลำดับ และฟิล์มพอลิแลคติกแอซิดผสมน้ำมันตะไคร้บ้านที่อัตราส่วน 0.25 0.5 0.75 และ 1% มีค่าการเคลื่อนย้ายของสารเคมีที่ 0.41 0.45 0.45 และ 0.52%ตามลำดับ

สารละลาย 3% (w/v) acetic acid ฟิล์มพอลิแลคติกแอซิด (PLA) ที่ไม่ได้ทำการผสมน้ำมันสมุนไพรมีค่าการเคลื่อนที่ของสารเคมี (migration test) 3.25% พบว่าฟิล์มพอลิแลคติกแอซิดผสมน้ำมันมะพร้าวที่อัตราส่วน 0.25 0.5 0.75 และ 1% มีค่าการเคลื่อนย้ายของสารเคมีที่ 2.57 1.95 1.78 และ 0.94% ตามลำดับ ฟิล์มพอลิแลคติกแอซิดผสมน้ำมันมะรุมที่อัตราส่วน 0.25 0.5 0.75 และ 1% มีค่าการเคลื่อนย้ายของสารเคมีที่ 2.88 2.25 2.01 และ 1.57% ฟิล์มพอลิแลคติกแอซิดผสมน้ำมันกานพลูที่อัตราส่วน 0.25 0.5 0.75 และ 1% มีค่าการเคลื่อนย้ายของสารเคมีที่ 2.09 1.94 2.48 และ 2.49% ตามลำดับ และฟิล์มพอลิแลคติกแอซิดผสมน้ำมันตะไคร้บ้านที่อัตราส่วน 0.25 0.5 0.75 และ 1% มีค่าการเคลื่อนย้ายของสารเคมีที่ 0.57 0.35 0.35 และ 0.78% ตามลำดับ จากผลการทดสอบพบว่าฟิล์มพอลิแลคติกแอซิดผสมน้ำมันสมุนไพรทั้ง 4 ชนิดที่อัตราส่วนแตกต่างกันทั้งหมดซึ่งอยู่ในเกณฑ์ 5% เป็นช่วงที่ยอมรับได้ จากการทดสอบนี้สามารถนำฟิล์มเหล่านี้ประยุกต์ใช้ในการบรรจุอาหาร

#### ตาราง 5 ผลการทดสอบ Overall migration ของฟิล์มพอลิแลคติกแอซิด (PLA) ผสมน้ำมันสมุนไพรที่อัตราส่วนที่แตกต่างกัน

ตัวอย่าง	Food simulant (%)		
	10% (v/v) Ethanol	Isooctane	3% (w/v) Acetic acid
PLA	2.24±2.25	0.91±0.42	3.25±2.62
0.25PCO	1.65±0.99	0.29±0.34	2.57±1.76
0.5PCO	1.81±1.74	0.73±0.59	1.95±1.86
0.75PCO	1.69±0.08	0.85±0.71	1.78±0.11
1PCO	1.81±1.51	0.33±0.22	0.94±0.33
0.25PMO	1.44±0.46	0.13±0.22	2.88±2.23
0.5PMO	1.14±0.48	0.13±0.22	2.25±1.91
0.75PMO	1.00±0.59	0.41±0.37	2.01±1.01
1PMO	1.96±1.19	0.43±0.35	1.57±0.56
0.25PCL	0.74±0.7	0.23±0.44	2.09 ±2.0
0.5PCL	0.56±0.12	0.22±0.03	1.94±1.70
0.75PCL	0.74±0.91	0.38±0.27	2.48±1.70
1PCL	1.63±1.17	0.24±0.17	2.49±2.70
0.25PLG	0.41±0.44	0.45±0.32	0.57±0.35
0.5PLG	0.45±0.40	0.46±1.89	0.35±1.15
0.75PLG	0.45±0.40	0.46±1.89	0.35±1.15
1PLG	0.52±0.48	0.19±0.27	0.78±0.69

### 1.1.5. การศึกษาการทนต่อแรงดึงของฟิล์มพอลิแลคติกแอซิดผสมน้ำมันสมุนไพรที่อัตราส่วนที่แตกต่างกัน

การทดสอบการทนต่อแรงดึงของฟิล์มพอลิแลคติกแอซิดผสมน้ำมันสมุนไพรทั้ง 4 ชนิด คือน้ำมันมะพร้าว น้ำมันมะรุม น้ำมันกานพลู และน้ำมันตะไคร้บ้าน ในอัตราส่วนที่แตกต่างกันที่ 0.25 0.5 0.75 และ 1% ทำการทดสอบใน 2 ทิศทางคือ ในทิศทางตามแนวเครื่องจักร (MD) และทิศทางตามแนวขวาง (TD) (ภาพ 29-32) พบว่าฟิล์มพอลิแลคติกแอซิด (PLA) ที่ไม่ได้ทำการผสมน้ำมันสมุนไพรในทิศทางตามแนวเครื่องจักร (MD) มีค่าความต้านทานต่อแรงสูงสุด 50.35 MPa เปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด (%Elongation at break) 5.47 ค่า Modulus at beak เท่ากับ 889.31 MPa และทิศทางตามแนวขวาง (TD) มีค่าความต้านทานต่อแรงสูงสุด (Tensile strength) 48.73 MPa เปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด (%Elongation at break) เท่ากับ 4.11 ค่า Modulus at beak เท่ากับ 973.97 MPa เมื่อทำการผสมน้ำมันสมุนไพรทั้ง 4 ชนิด ในอัตราส่วนที่แตกต่างกันลงไป

ฟิล์มพอลิแลคติกแอซิดผสมน้ำมันมะพร้าวที่อัตราส่วน 0.25 0.5 0.75 และ 1% (ภาพ 24A-24C) ในทิศทางตามแนวเครื่องจักร (MD) มีผลการต้านทานต่อแรงสูงสุด (Tensile strength) เท่ากับ 38.75 37.60 36.96 และ 32.10 MPa ตามลำดับ เปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด (%Elongation at break) เท่ากับ 8.72 9.74 16.74 และ 47.04 ตามลำดับ ค่า Modulus at beak เท่ากับ 235.16 108.32 232.83 และ 117.24 ตามลำดับ ส่วนทิศทางตามแนวขวาง (TD) มีผลการต้านทานต่อแรงสูงสุด (Tensile strength) 40.15 41.52 31.65 และ 21.79 MPa ตามลำดับ เปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด (%Elongation at break) เท่ากับ 22.80 9.09 8.65 และ 32.02 ตามลำดับ ค่า Modulus at beak เท่ากับ 113.05 126.51 200.34 และ 97.53 ตามลำดับ

ฟิล์มพอลิแลคติกแอซิดผสมน้ำมันมะรุมที่อัตราส่วน 0.25 0.5 0.75 และ 1% (ภาพ 25A-25C) ในทิศทางตามแนวเครื่องจักร (MD) มีผลการต้านทานต่อแรงสูงสุด (Tensile strength) เท่ากับ 46.61 35.54 30.55 และ 39.58 MPa ตามลำดับ เปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด (%Elongation at break) เท่ากับ 6.49 9.70 12.0 และ 29.28 ตามลำดับ ค่า Modulus at beak เท่ากับ 431.46 339.83 238.08 และ 238.08 ตามลำดับ ส่วนทิศทางตามแนวขวาง (TD) มีผลการต้านทานต่อแรงสูงสุด (Tensile strength) 38.50 34.79 24.98 และ 42.19 MPa ตามลำดับ เปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด (%Elongation at break) เท่ากับ 5.07 9.20 9.20 และ 27.23 ตามลำดับ ค่า Modulus at beak เท่ากับ 363.52 301.85 231.49 และ 164.99 ตามลำดับ

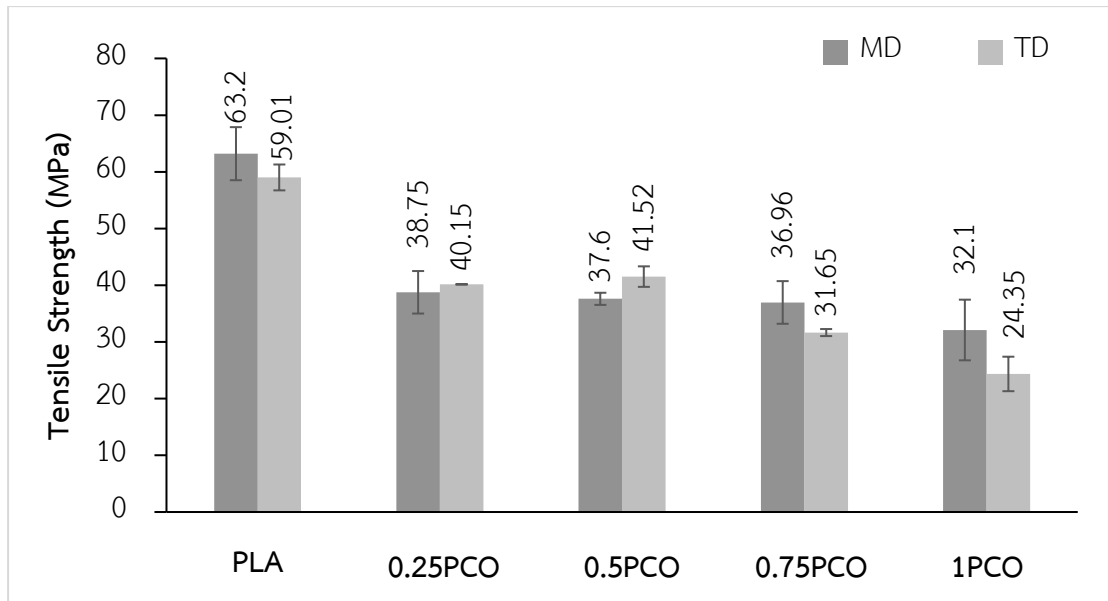
ฟิล์มพอลิแลคติกแอซิดผสมน้ำมันกานพลูที่อัตราส่วน 0.25 0.5 0.75 และ 1% (ภาพ 26A-26C) ในทิศทางตามแนวเครื่องจักร (MD) มีผลการต้านทานต่อแรงสูงสุด (Tensile strength) เท่ากับ 45.87 39.14 39.62 และ 36.67 MPa ตามลำดับ เปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด (%Elongation at break) เท่ากับ 5.74 8.94 6.91 และ 6.75 ตามลำดับ ค่า Modulus at beak

เท่ากับ 758.86 706.90 788.94 และ 612.48 ตามลำดับ ส่วนทิศทางตามแนวขวาง (TD) มีผลการต้านทานต่อแรงสูงสุด (Tensile strength) 32.52 36.52 21.04 และ 35.08MPa ตามลำดับ เปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด (%Elongation at break) เท่ากับ 5.40 5.26 5.83 และ 4.68 ตามลำดับ ค่า Modulus at beak เท่ากับ 360.73 490.06 544.63 และ 541.85 ตามลำดับ

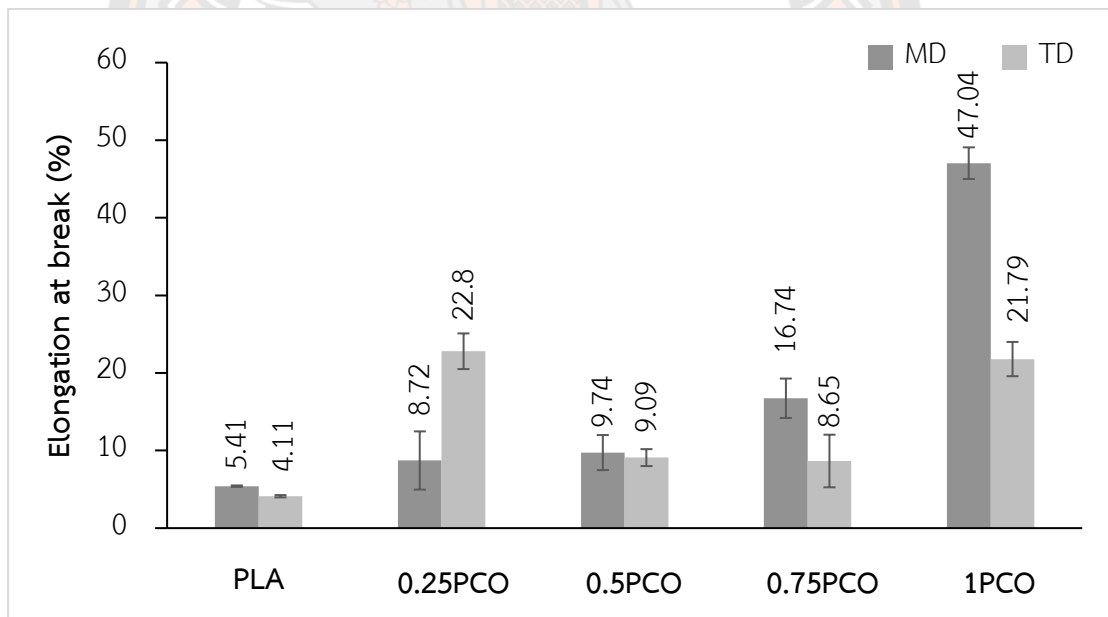
ฟิล์มพอลิแลคติกแอซิดผสมน้ำมันตะไคร้บ้านที่อัตราส่วน 0.25 0.5 0.75 และ 1% (ภาพ 27A-27C) ในทิศทางตามแนวเครื่องจักร (MD) มีผลการต้านทานต่อแรงสูงสุด (Tensile strength) เท่ากับ 63.47 66.29 81.21 และ 59.63MPa ตามลำดับ เปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด (%Elongation at break) เท่ากับ 5.48 6.28 5.84 และ 4.89 ตามลำดับ ค่า Modulus at beak เท่ากับ 1110.41 1111.76 1912.38 และ 1568.84 ตามลำดับ ส่วนทิศทางตามแนวขวาง (TD) มีผลการต้านทานต่อแรงสูงสุด (Tensile strength) 48.99 47.18 40.99 และ 42.77MPa ตามลำดับ เปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด (%Elongation at break) เท่ากับ 5.40 5.26 5.83 และ 4.33 ตามลำดับ ค่า Modulus at beak เท่ากับ 1105.34 1119.82 991.60 และ 1381.58 ตามลำดับ

จากผลการทดสอบพบว่าฟิล์มที่ทำการผสมน้ำมันสมุนไพรคือ น้ำมันมะพร้าว น้ำมันมะรุม และน้ำมันกานพลู มีค่าการต้านทานต่อแรงสูงสุด (Tensile strength) และค่ามอดูลัส (Modulus at break) ลดลงแต่ ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด (%elongation at break) เพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนของน้ำมันสมุนไพรเพิ่มขึ้น จากการทดลองนี้พบว่าน้ำมันสมุนไพรมีผลต่อคุณสมบัติทางกลช่วยเพิ่มความยืดหยุ่นของแผ่นฟิล์ม โดยสังเกตได้จากค่าเปอร์เซ็นต์ค่าความยืดหยุ่น ณ จุดขาด ที่เพิ่มขึ้น และ ค่าต้านทานแรงดึง ที่ลดลง เนื่องมาจากน้ำมันสมุนไพรที่ทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์เข้าไปแทรกกระหว่างสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์ทำให้ลดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล ให้สายโซ่สามารถขยับได้ง่ายขึ้น พบว่าเมื่อพิจารณาที่อัตราส่วน 1 wt.% ของน้ำมันสมุนไพร ในน้ำมันมะพร้าว มีค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาดสูงสุด รองลงมาคือ น้ำมันมะรุม น้ำมันกานพลู และ น้ำมันตะไคร้บ้าน เป็นผลเนื่องมาจากองค์ประกอบของน้ำมันในแต่ละชนิด ในน้ำมันมะพร้าวมีกรดลอริก (lauric acid) น้ำมันมะรุมมีกรดโอเลอิก (Oleic acid) องค์ประกอบหลักเป็นกรดไขมัน ซึ่งมีลักษณะเป็นสายโซ่ยาวอลิฟาติก น้ำมันกานพลูมียูจีนอล (eugenol) น้ำมันตะไคร้บ้านมีลินาลูล (Linalool) เป็นองค์ประกอบหลัก โครงสร้างที่เป็นลักษณะสายโซ่ยาวสามารถขยับง่ายกว่า

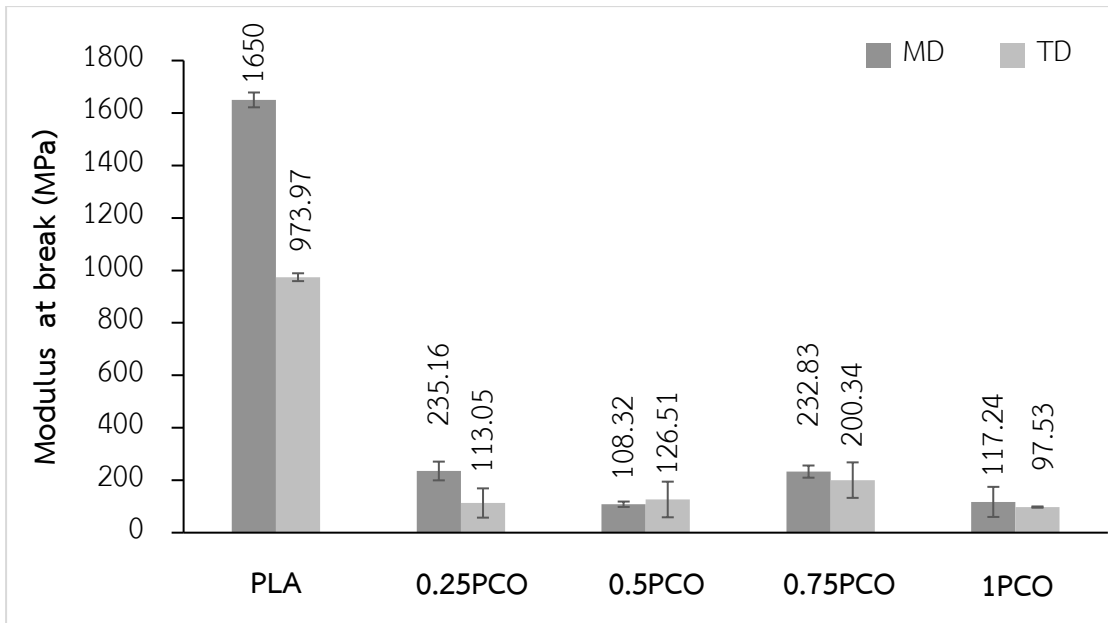




(n)

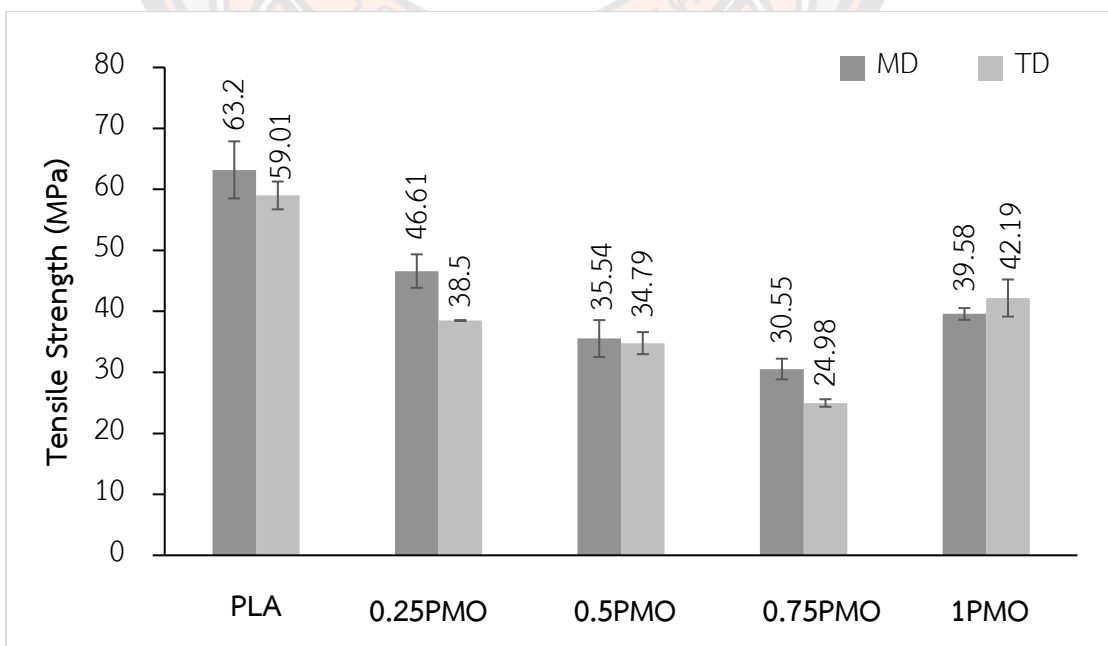


(o)

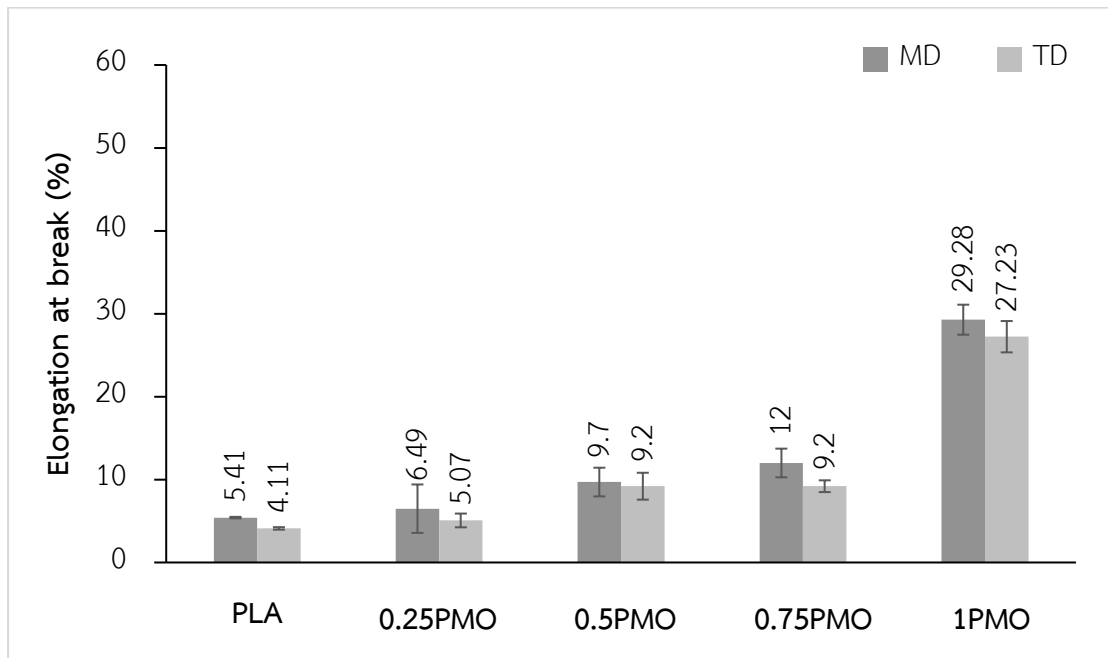


(ค)

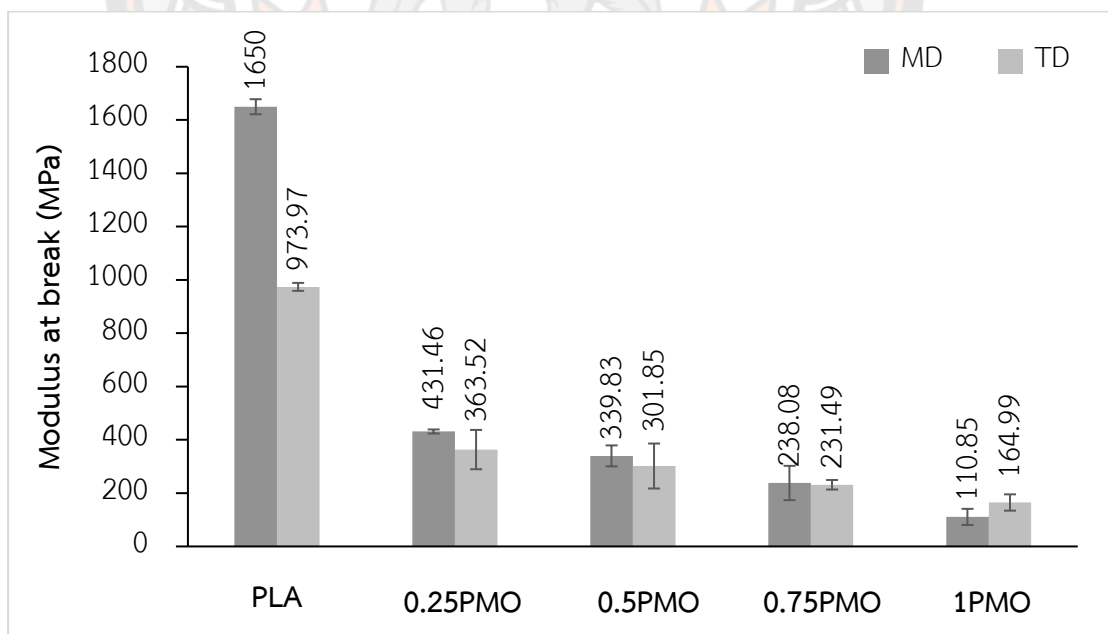
ภาพ 29 ผลการทดสอบการทนต่อแรงดึงในทิศทางตามแนวเครื่องจักร (MD) และทิศทางตามแนวขวาง (TD) ของฟิล์มพอลิแลคติกแอซิด (PLA) ผสมน้ำมันมะพร้าวที่อัตราส่วนที่แตกต่าง (ก) Tensile strength at break (ข) %Elongation at break (ค) Modulus at break



(ก)



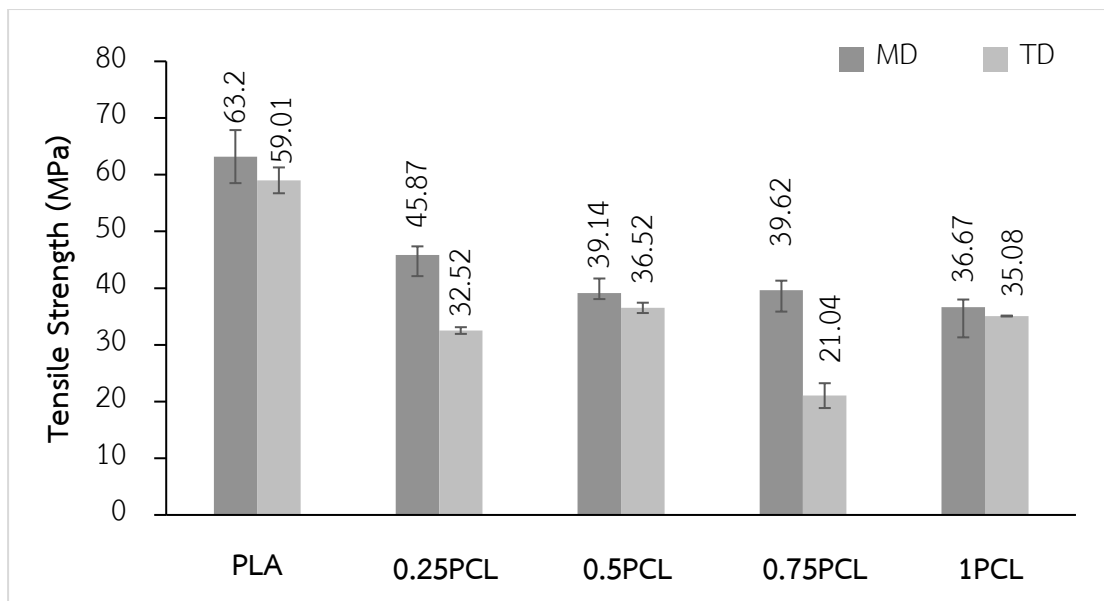
(จ)



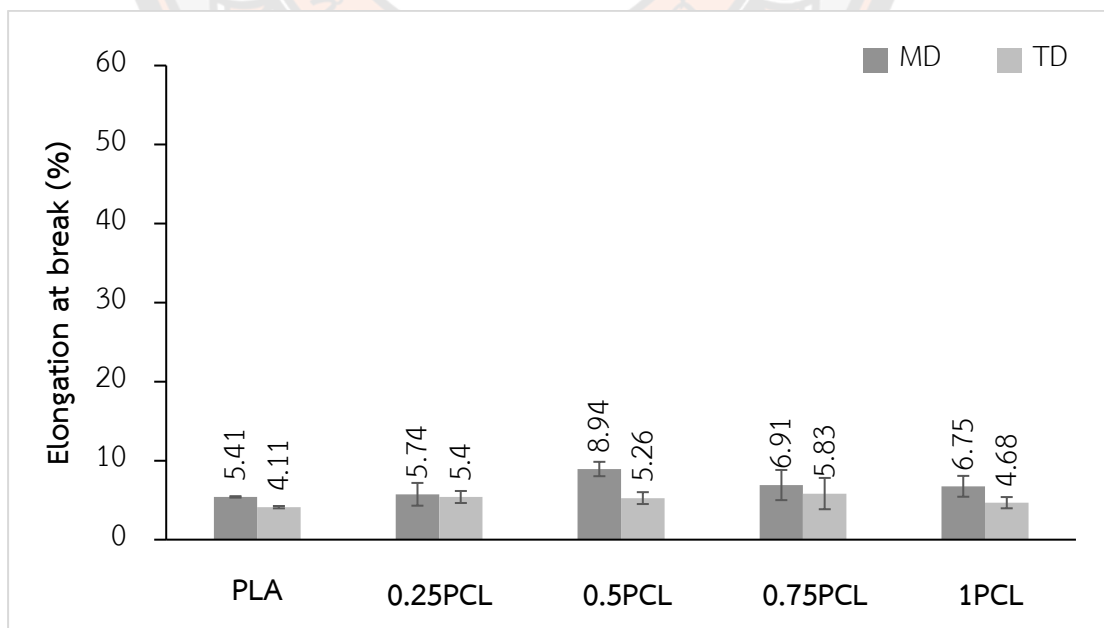
(ค)

ภาพ 30 ผลการทดสอบการทนต่อแรงดึงในทิศทางตามแนวเครื่องจักร (MD) และทิศทางตาม

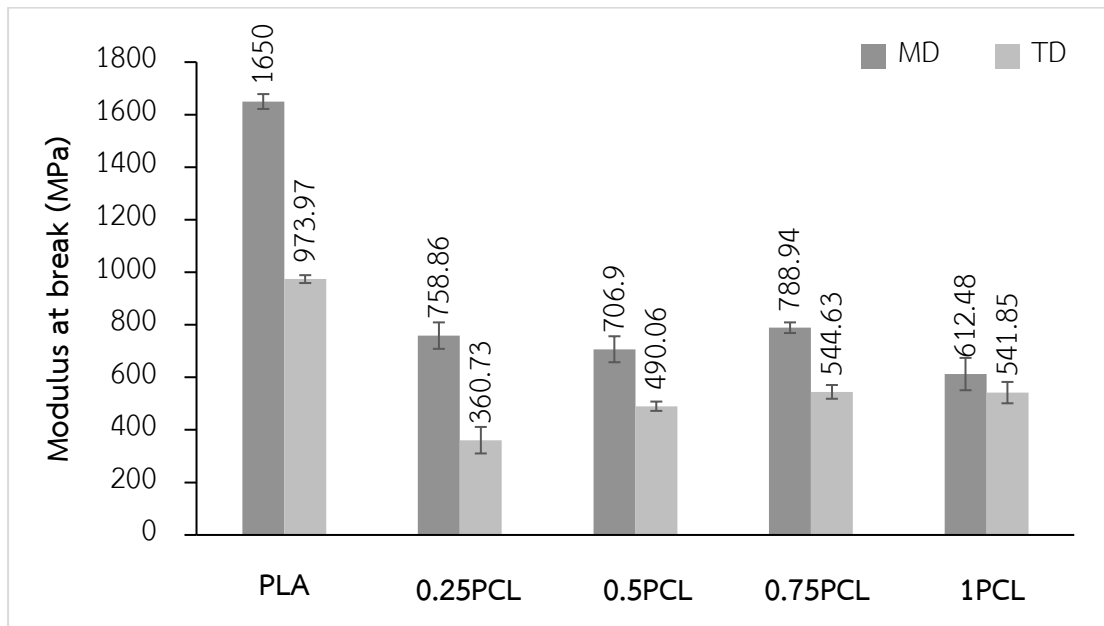
แนวขวาง (TD) ของฟิล์มพอลิแลคติกแอซิด (PLA) ผสมน้ำมันมะรุมที่อัตราส่วนที่  
 แตกต่าง (ก) Tensile strength at break (ข) %Elongation at break (ค)  
 Modulus at break



(ก)

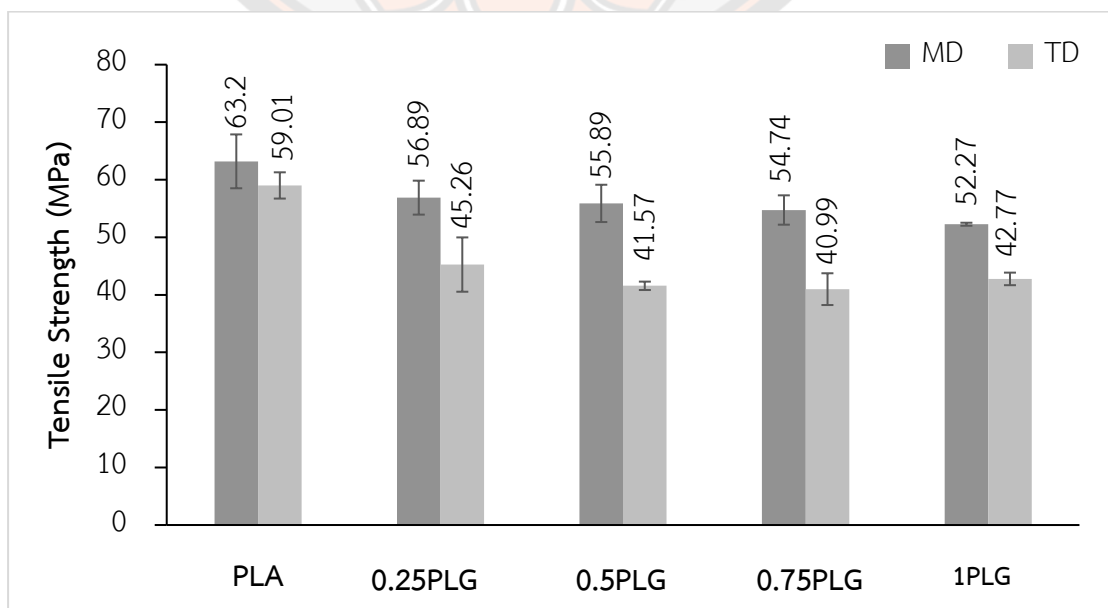


(ข)

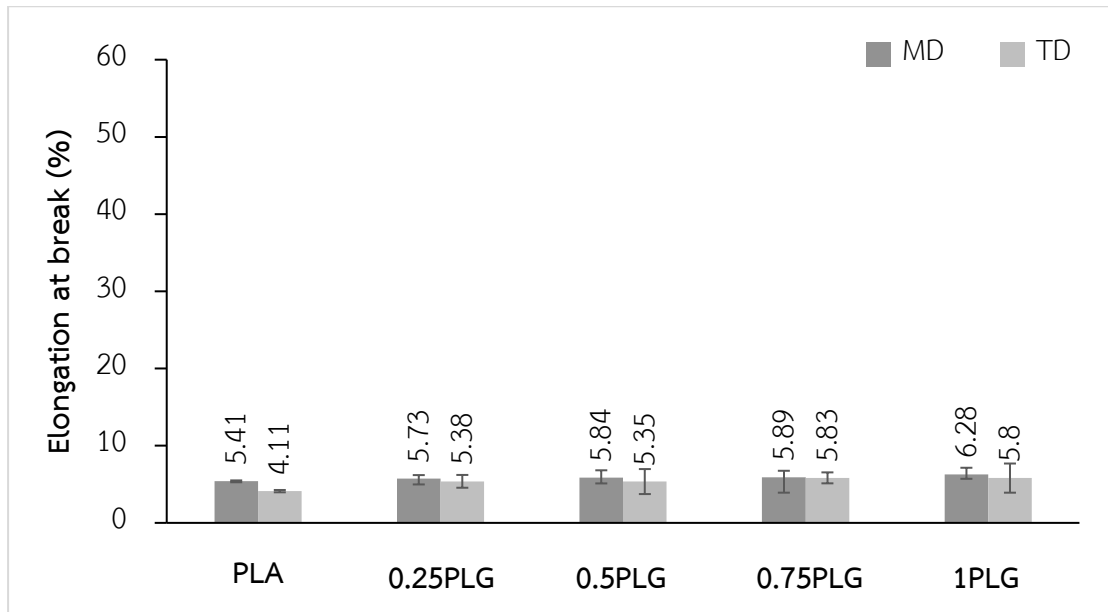


(ค)

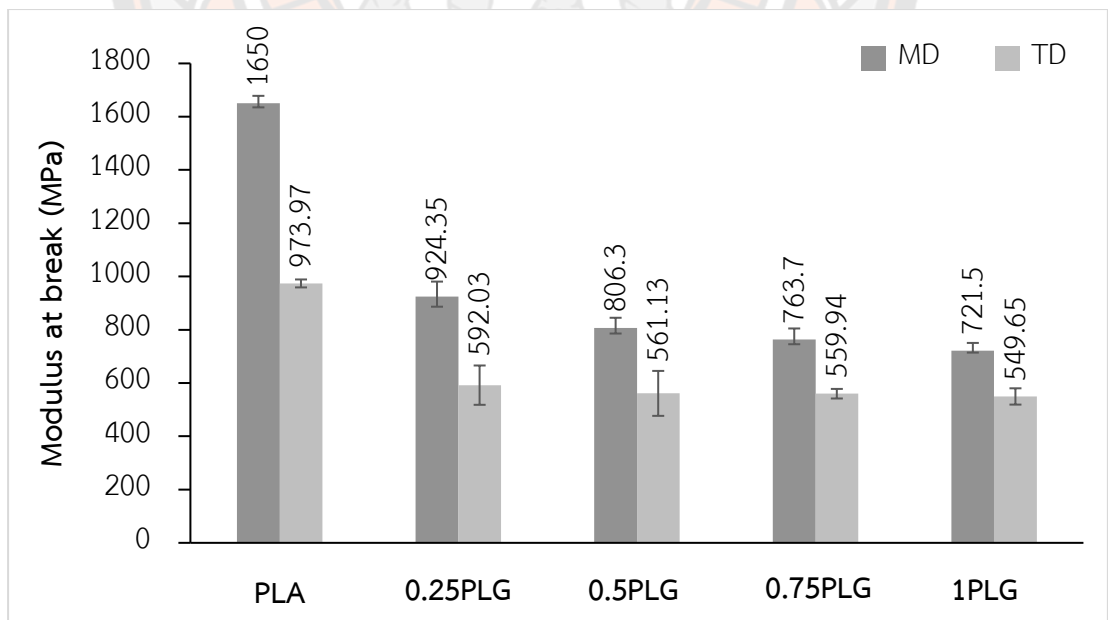
ภาพ 31 ผลการทดสอบการทนต่อแรงดึงในทิศทางตามแนวเครื่องจักร (MD) และ ทิศทางตามแนวขวาง (TD) ของฟิล์มพอลิแลคติกแอซิด (PLA) ผสมน้ำมันกานพลูที่อัตราส่วนที่แตกต่าง (ก) Tensile strength at break (ข) %Elongation at break (ค) Modulus at break



(n)



(o)

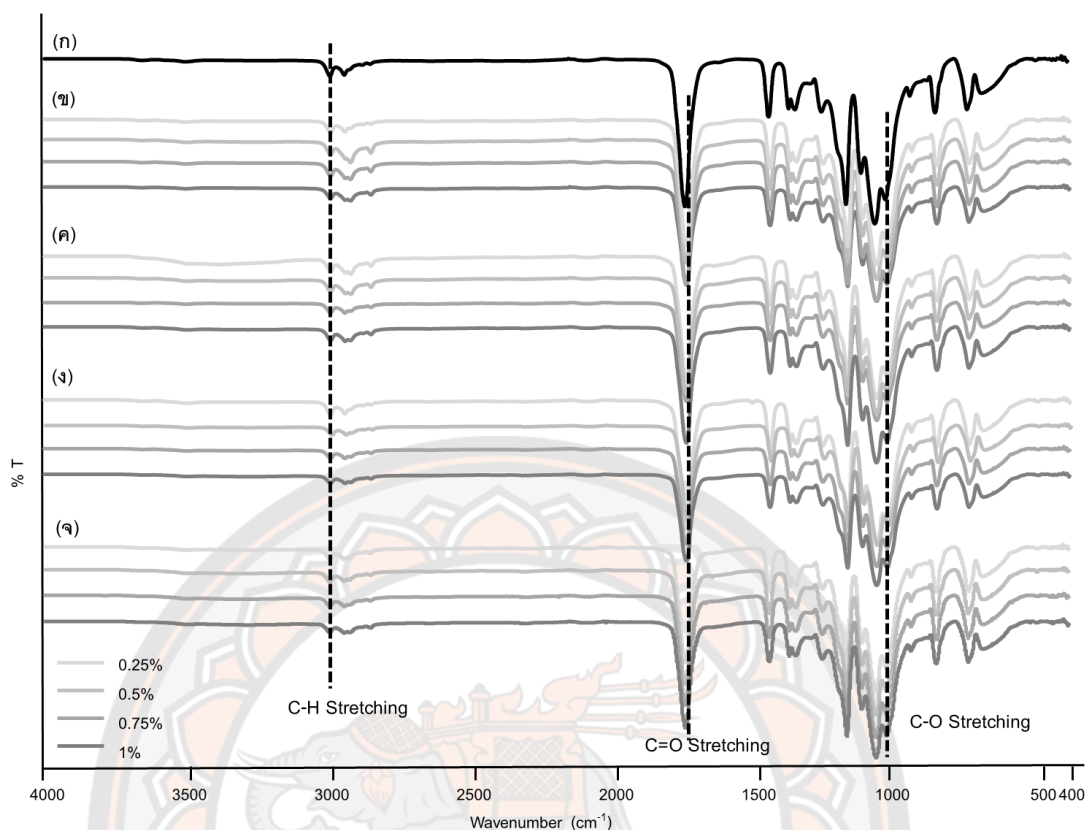


(p)

ภาพ 32 ผลการทดสอบการทนต่อแรงดึงในทิศทางตามแนวเครื่องจักร (MD) และ ทิศทางตามแนวขวาง (TD) ของฟิล์มพอลิแลคติกแอซิด (PLA) ผสมน้ำมันตะไคร้บ้านที่อัตราส่วนที่แตกต่างกัน (ก) Tensile strength (ข) %Elongation (ค) Modulus at break

### 1.1.7. การศึกษาการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของฟิล์มพอลิแลคติกแอซิดผสมน้ำมันสมุนไพรที่อัตราส่วนที่แตกต่าง

จากการวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของฟิล์มพอลิแลคติกแอซิดผสมน้ำมันสมุนไพรด้วยเทคนิค Fourier Transform Spectrometer (FTIR) ผลการทดลองแสดงดังภาพ 33 ฟิล์ม PLA ที่ไม่ได้ทำการผสมน้ำมันสมุนไพรปรากฏสัญญาณของ C-H stretching ที่บริเวณเลขคลื่น  $2994.56$  ปรากฏสัญญาณของหมู่ฟังก์ชันของคาร์บอนิล C=O ที่บริเวณเลขคลื่น  $1746.71 \text{ cm}^{-1}$  สัญญาณหมู่ฟังก์ชันเมทิล C-H ที่บริเวณเลขคลื่น  $1451.77 \text{ cm}^{-1}$  และ C-O stretching ที่บริเวณเลขคลื่น  $1266.35 \text{ cm}^{-1}$  ตามลำดับ เมื่อพิจารณาฟิล์มผสมน้ำมันสมุนไพรทั้ง 4 ชนิด คือ น้ำมันมะพร้าว น้ำมันมะรุม น้ำมันกานพลู และ น้ำมันตะไคร้บ้าน ในอัตราส่วนที่ต่างกันว่า 0.25 0.5 0.75 และ 1% พบว่าสเปกตรัมของฟิล์มผสมน้ำมันสมุนไพรแสดงสัญญาณสเปกตรัมที่มีลักษณะคล้ายของฟิล์ม PLA ที่ไม่ได้ทำการผสมน้ำมันสมุนไพร เนื่องจากปริมาณของน้ำมันสมุนไพรที่เติมลงไปมีปริมาณน้อย จึงอาจทำให้ไม่พบสัญญาณเลขคลื่นของน้ำมันสมุนไพรในแต่ละชนิด



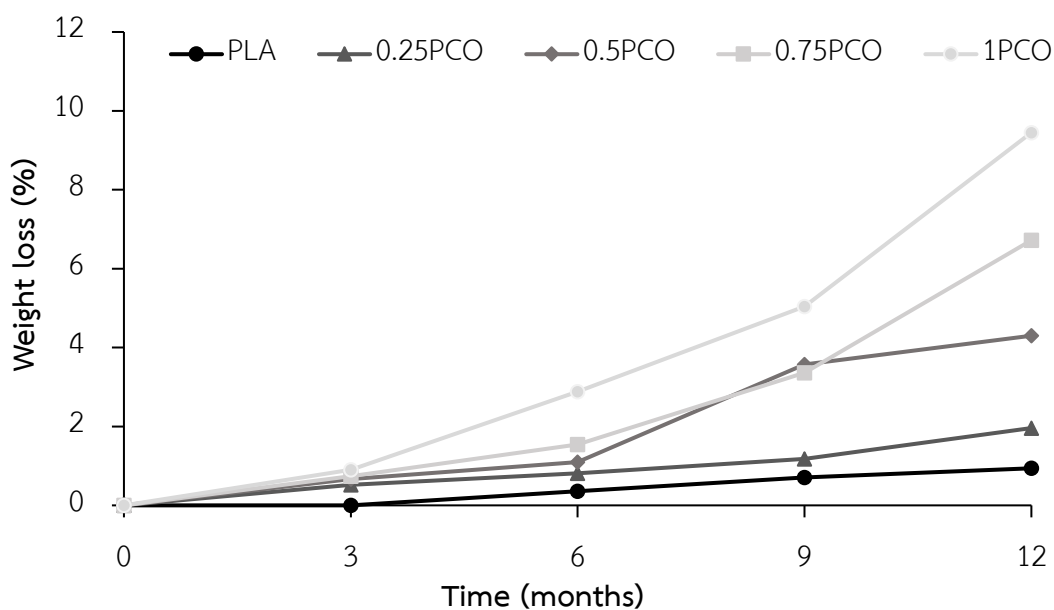
ภาพ 33 FTIR สเปกตรัมของฟิล์มพอลิแลคติกแอซิด (PLA) ผสมน้ำมันสนุนไพร์ที่อัตราส่วนที่แตกต่าง (ก) PLA (ข) PCO (ค) PMO (ง) PCL (จ) PLG

### 1.1.8. การศึกษาการการย่อยสลายของฟิล์มพอลิแลคติกแอซิด (PLA) ผสมน้ำมันสนุนไพร์ที่อัตราส่วนที่แตกต่าง

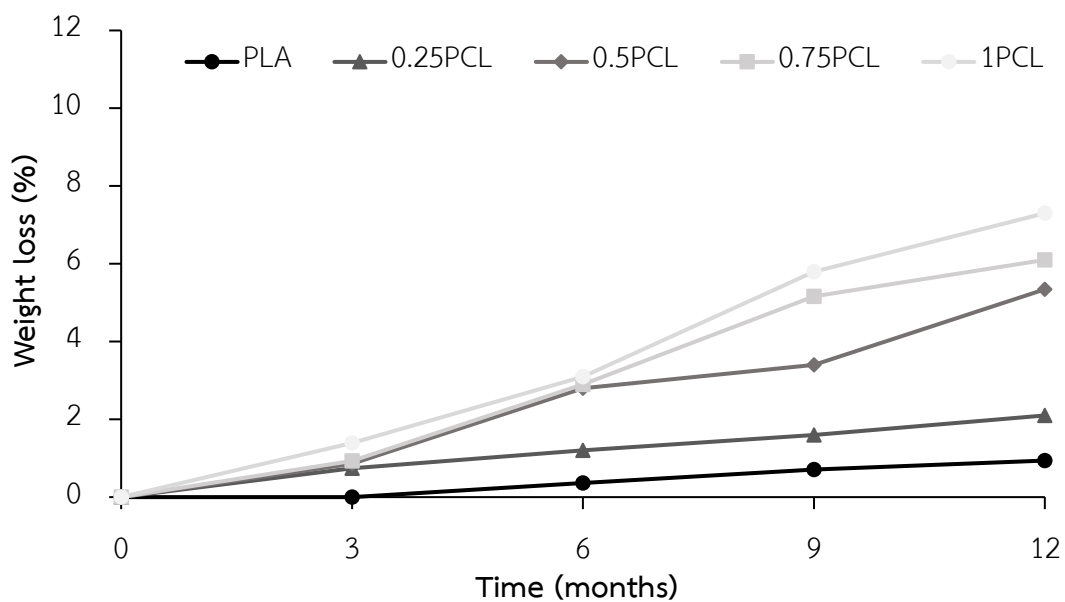
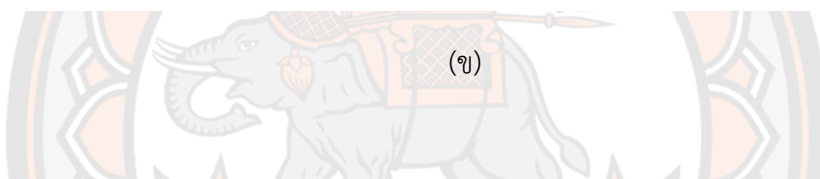
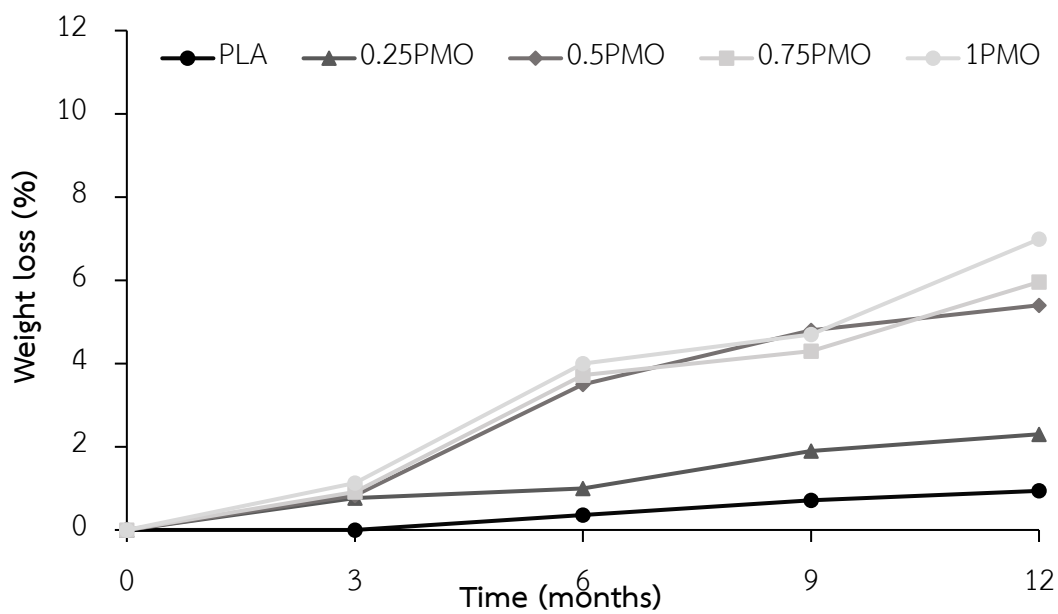
การทดสอบการย่อยสลายของฟิล์มพอลิเมอร์โดยการฝังกลบในดินที่บรรจุอยู่ในกล่องเป็นระยะเวลา 0 3 6 9 และ 12 เดือน จากภาพ 34 แสดงเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายฟิล์มพอลิแลคติกแอซิด (PLA) ผสมน้ำมันสนุนไพร์ 4 ชนิดคือ น้ำมันมะพร้าว น้ำมันมะรุม น้ำมันกานพลู และน้ำมันตะไคร้บ้าน ที่อัตราส่วนที่แตกต่าง 0.25 0.5 0.75 และ 1% ฟิล์มที่เตรียมได้มีความหนาอยู่ในช่วง 10-20 ไมครอน พบว่าฟิล์ม PLA เริ่มเกิดการย่อยสลายที่ระยะเวลา 6 เดือน โดยมีเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายที่ 0.369% และที่ระยะเวลา 12 เดือนมีเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายที่ 0.94% เมื่อพิจารณาเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายของฟิล์ม PLA ผสมน้ำมันสนุนไพร์ที่อัตราส่วนที่ต่างกัันพบว่า มีเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายที่เพิ่มขึ้น เริ่มเกิดการย่อยสลายที่ระยะเวลาที่เร็วขึ้นที่ 3 เดือน พบว่าที่ระยะเวลา 3 เดือน เริ่มเกิดการย่อยสลายบางส่วน ฟิล์ม PLA ผสมน้ำมันมะพร้าวที่อัตราส่วน 0.25



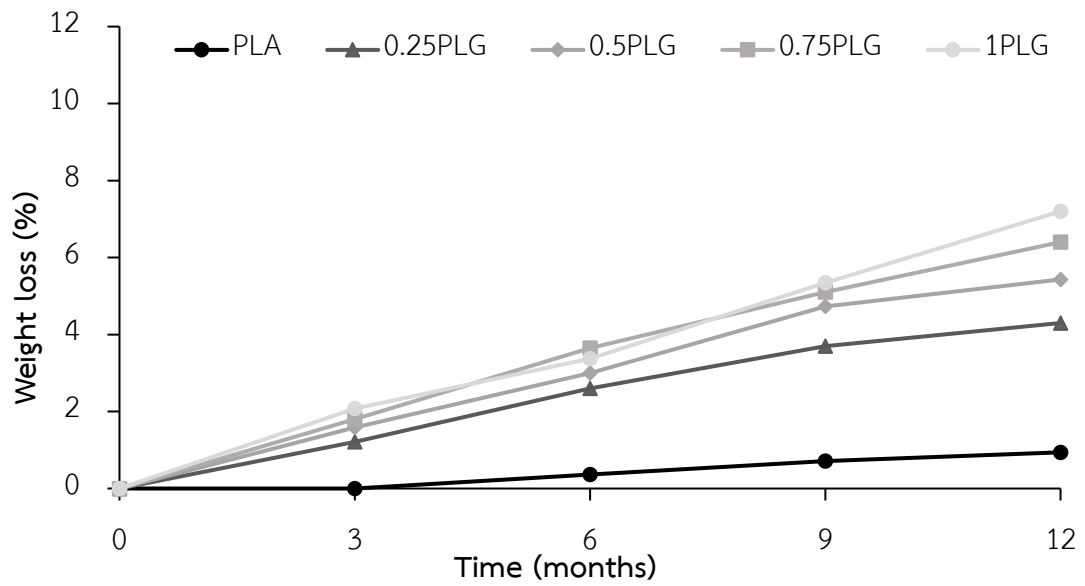
0.5 0.75 และ 1% มีเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายที่ 0.52 0.67 0.74 และ 0.9 % ตามลำดับ พิล์ม PLA ผสมน้ำมันมะรุมที่อัตราส่วน 0.25 0.5 0.75 และ 1% มีเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายที่ 0.77 0.83 0.91 และ 1.13 % ตามลำดับ พิล์ม PLA ผสมน้ำมันกานพลูที่อัตราส่วน 0.25 0.5 0.75 และ 1% มีเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายที่ 0.74 0.86 0.93 และ 1.39 % ตามลำดับ และ พิล์ม PLA ผสมตะไคร้บ้านที่อัตราส่วน 0.25 0.5 0.75 และ 1% มีเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายที่ 1.21 1.15 1.18 และ 2.07 % ตามลำดับ พบว่าที่ระยะเวลา 12 เดือน พิล์ม PLA ผสมน้ำมันมะพร้าวที่อัตราส่วน 0.25 0.5 0.75 และ 1% มีเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายที่ 1.96 4.3 6.71 และ 7.0 % ตามลำดับ พิล์ม PLA ผสมน้ำมันมะรุมที่อัตราส่วน 0.25 0.5 0.75 และ 1% มีเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายที่ 2.3 5.4 5.95 และ 6.98% ตามลำดับ พิล์ม PLA ผสมน้ำมันกานพลูที่อัตราส่วน 0.25 0.5 0.75 และ 1% มีเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายที่ 6.1 และ 2.1 5.34 6.1 และ 7.3 % ตามลำดับ และ พิล์ม PLA ผสมตะไคร้บ้านที่อัตราส่วน 0.25 0.5 0.75 และ 1% มีเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายที่ 4.3 5.43 6.4 และ 7.2 % ตามลำดับ พิล์มที่มีการเติมน้ำมันมีแนวโน้มเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายที่เพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนของการเติมน้ำมันเพิ่มขึ้น ที่ระยะเวลา 12 เดือน พบว่าพื้นผิวของฟิล์มเริ่มมีรอยแตกออกจากกันเพราะเกิดการย่อยสลาย ซึ่งโดยทั่วไปฟิล์ม PLA สามารถย่อยสลายได้โดยกระบวนการไฮโดรไลซิส และเนื่องจากในการทดสอบการฝังในดิน มีสภาพต่างๆ เช่น อุณหภูมิ ความชื้น แสงแดด ที่เหมาะแก่การเกิดการย่อยสลายทางไฮโดรไลซิส น้ำมันสมุนไพรเป็นสารธรรมชาติ สามารถดูดความชื้นได้ ซึ่งทำให้ความแข็งแรงระหว่างสายโซ่โพลีเมอร์มีความแข็งแรงที่ลดลง



(ก)



(ค)



(ง)

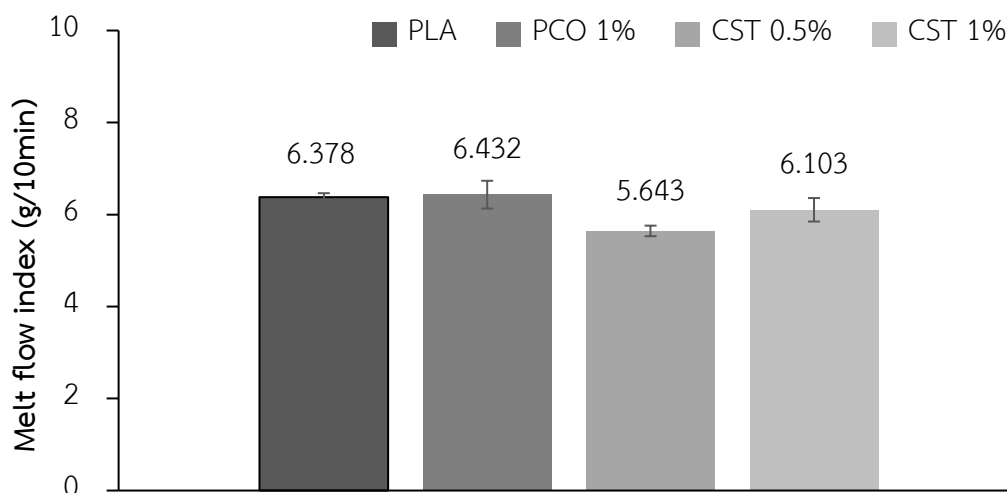
ภาพ 34 เปรียบเทียบการย่อยสลายของฟิล์มพอลิแลคติกแอซิด (PLA) ผสมน้ำมันสมุนไพรที่อัตราส่วนที่แตกต่าง (ก) น้ำมันมะพร้าว (ข) น้ำมันมะรุม (ค) น้ำมันกานพลู (ง) น้ำมันตะไคร้บ้าน

จากการศึกษาการเตรียมฟิล์มพอลิแลคติกแอซิด ผสมน้ำมันสนุนไพรรทั้ง 4 ชนิดได้แก่ น้ำมันมะพร้าว น้ำมันมะรุม น้ำมันกานพลู และน้ำมันตะไคร้บ้านในอัตราส่วน 0.25 0.5 0.75 และ 1% w/w พบว่าจากการทดสอบสมบัติที่กล่าวมาในหัวข้อ 4.1 เช่น สมบัติกายภาพ สมบัติเชิงกลของฟิล์ม PLA ผสมน้ำมันสนุนไพร พบว่าฟิล์ม PLA ผสมน้ำมันมะพร้าวที่ 1% w/w มีสมบัติกายภาพ ความสามารถการเคลื่อนย้ายสารเคมี และสมบัติเชิงกล คือ ความสามารถในการยืดออกดีที่สุด แต่ฟิล์มที่เตรียมได้จากหัวข้อ 1.1 พบว่าฟิล์มบางตามขนาดที่ต้องการเตรียมขึ้นมา พบปัญหาของฟิล์มติดกัน ดังนั้นเพื่อเป็นการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นในงานวิจัยนี้จึงมีการเติมสารตัวเติม คือ แป้งมันสำปะหลัง โดยทำการศึกษาปริมาณของสารตัวเติมใน 2 อัตราส่วนที่แตกต่างกันคือ 0.5 และ 1% w/w ที่ความหนา 40 - 60 micron ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ทำการเลือกอัตราส่วนของน้ำมันมะพร้าวที่ 1% w/w ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการเตรียมฟิล์มพอลิแลคติกแอซิด น้ำมันมะพร้าว ผสมแป้งมันสำปะหลัง

## 1.2 ศึกษาสมบัติของฟิล์มพอลิแลคติก (PLA) น้ำมันมะพร้าว ผสมแป้งมันสำปะหลังที่มีอัตราส่วนของแป้งมันสำปะหลังที่แตกต่างกัน

### 1.2.1 การศึกษาสมบัติอัตราการไหลของเม็ดคอมพาวด์พอลิแลคติกแอซิด น้ำมันมะพร้าว ผสมกับแป้งมันสำปะหลัง

การทดสอบค่าอัตราการไหลของเม็ดคอมพาวด์ของพอลิแลคติกแอซิดน้ำมันมะพร้าว 1% w/w ผสมแป้งมันสำปะหลังในอัตราส่วนที่แตกต่างกันที่ 0.5 และ 1 % w/w ด้วยเครื่องทดสอบค่าอัตราการไหลของพลาสติก (Melt flow index) แสดงผลการทดสอบดังภาพ 35 พบว่าค่า MFR ของเม็ดคอมพาวด์ PLA มีค่าเท่ากับ 6.37 g/10 min ค่า MFR ของเม็ดคอมพาวด์ PLA ผสมน้ำมันมะพร้าวที่อัตราส่วน 1% มีค่าเท่ากับ 6.43 g/10 min มีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากน้ำมันมะพร้าวทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์ช่วยในกระบวนการผสม แต่เมื่อทำการผสมสารตัวเติมแป้งมันสำปะหลังในปริมาณที่แตกต่างกันคือ 0.5 และ 1% พบว่ามีค่า MFR ลดลงเท่ากับ 5.64 และ 6.10 g/10 min ตามลำดับ เนื่องจากโมเลกุลแป้งมันสำปะหลังเหล่านี้เข้าไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่ ส่งผลทำให้สายโซ่มีการเคลื่อนที่ลดลงจึงทำให้มีค่า MFR ลดลง

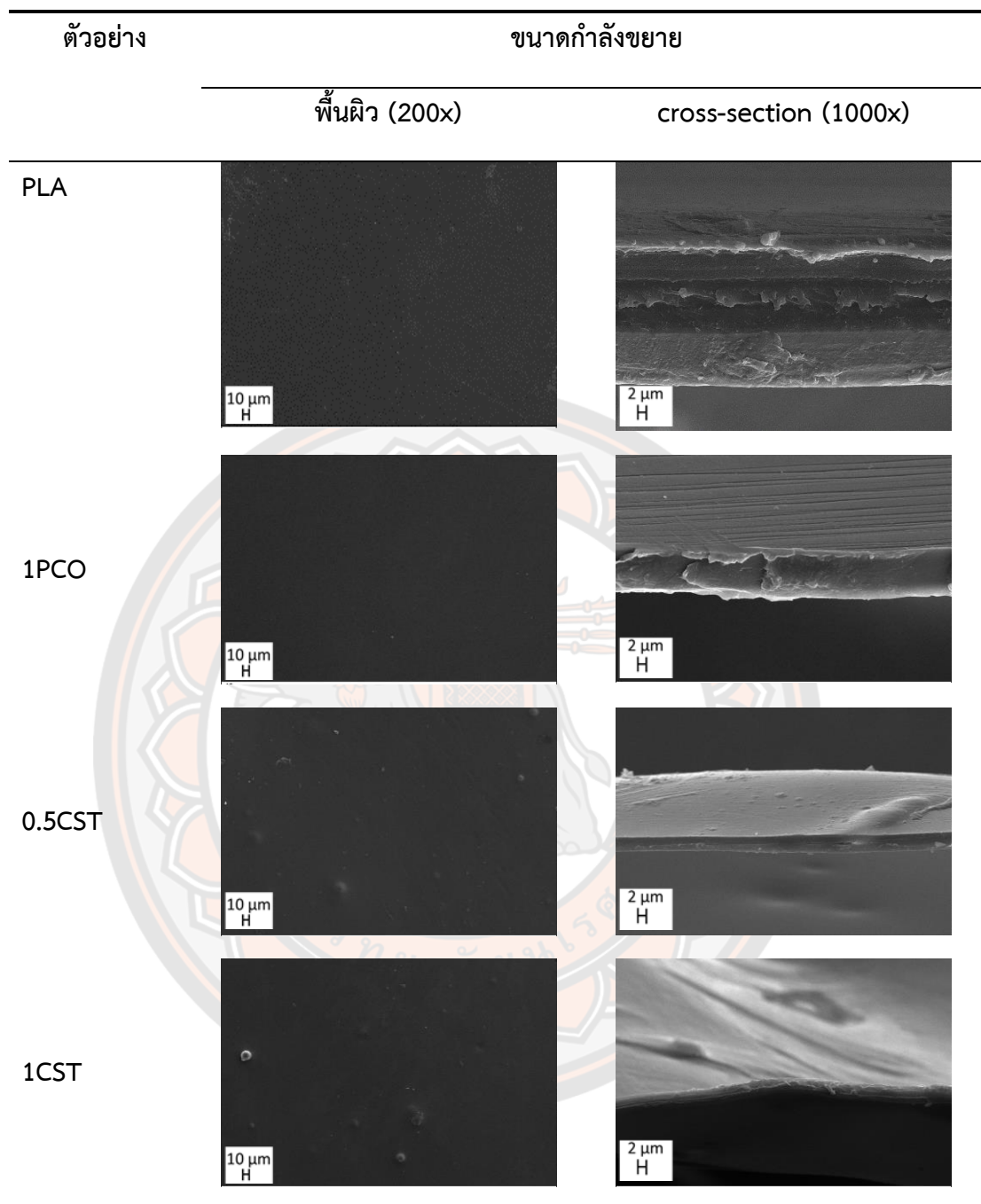


ภาพ 35 อัตราการไหลของเม็ดคอมพาวด์ของฟิล์ม PLA น้ำมันมะพร้าว และแป้งมัน สำปะหลังในอัตราส่วน 0.5 และ 1% w/w

### 1.2.2 การศึกษาสัณฐานวิทยาของฟิล์มพอลิแลคติกแอซิด น้ำมันมะพร้าว ผสมแป้งมัน สำปะหลัง

ตาราง 6 แสดงภาพผลการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยา ภาพพื้นผิว และพื้นผิวภาพตัดขวางหลังจากการทดสอบการต้านทานต่อแรงดึงของฟิล์ม PLA น้ำมันมะพร้าวที่อัตราส่วน 1% w/w ผสมแป้งมันสำปะหลัง ในอัตราส่วน 0.5 และ 1% w/w ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning electron microscope ,SEM) จากผลการศึกษาพบว่าลักษณะพื้นผิวของฟิล์ม PLA ที่ไม่ได้ทำการผสมน้ำมันสมุนไพรพื้นผิวมีลักษณะขรุขระ ไม่เรียบ แต่เมื่อมีการเติมน้ำมันมะพร้าวที่อัตราส่วน 1% w/w พบว่าพื้นผิวมีลักษณะเรียบ เป็นเนื้อเดียวกัน เนื่องจากพอลิเมอร์ และน้ำมันมะพร้าวมีความสามารถเข้ากันได้ และเมื่อมีการเติมสารตัวเติมแป้งมันสำปะหลังในอัตราส่วนต่างๆ พบว่าพื้นผิวมีลักษณะเรียบ ไม่ขรุขระ นอกจากนั้นยังพบว่าบนพื้นผิวพบอนุภาคมีลักษณะค่อนข้างกลมกระจายตัวอยู่บนแผ่นฟิล์ม อาจเป็นเม็ดแป้ง ส่วนการศึกษาลักษณะภาคตัดขวางพบว่ารอยแตกหักของฟิล์มที่ผสมแป้งมันสำปะหลังมีรอยแตกหักที่เรียบ เป็นเนื้อเดียวกัน

ตาราง 6 ภาพถ่าย SEM ของลักษณะพื้นผิวที่กำลังขยาย 200 เท่า และพื้นผิวภาคตัดขวางที่กำลังขยาย 1000 เท่า ของตัวอย่างฟิล์ม PLA น้ำมันมะพร้าวที่ผสมแป้งมันสำปะหลังในอัตราส่วน 0.5 และ 1% w/w



### 1.2.3 การศึกษาความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำของฟิล์มพอลิแลคติกแอซิด น้ำมันมะพร้าว ผสมแป้งมันสำปะหลัง

ตาราง 7 แสดงค่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ (WVTR) ของฟิล์ม PLA น้ำมันมะพร้าว 1% w/w ผสมแป้งมันสำปะหลังในอัตราส่วน 0.5 และ 1% w/w ที่เตรียมได้ความหนาของฟิล์มอยู่ในช่วง 40-60 มิลลิเมตร พบว่าค่า WVTR ของฟิล์ม PLA มีค่าเท่ากับ  $0.21 \pm 0.01$ ,  $0.23 \pm 0.02$  และ

0.20±0.01g/m<sup>2</sup>.day ตามลำดับ เมื่อมีการผสมแป้งมันสำปะหลังที่อัตราส่วน 0.5% w/w มีค่าเท่ากับ 0.25±0.01, 0.26±0.09 และ 0.25±0.01 g/m<sup>2</sup>.day ส่วนในอัตราส่วน 1% w/w พบว่ามีค่า WVTR เท่ากับ 0.26±0.02, 0.25±0.02 และ 0.22±0.02 g/m<sup>2</sup>.day ตามลำดับ ซึ่งค่าการซึมผ่านไอน้ำสูงทำให้มีอายุการเก็บรักษาที่สั้นลง ซึ่งพบว่าฟิล์มที่ทำการผสมแป้งมันสำปะหลังในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน มีค่าเพิ่มขึ้นแต่ไม่ได้มีค่าแตกต่างกับค่าการซึมผ่านไอน้ำของ PLA อาจเนื่องมาจากผลของการจัดเรียงตัวที่เป็นระเบียบ ทำให้โมเลกุลของน้ำเคลื่อนที่ผ่านได้ยาก

ตาราง 7 ค่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ (WVTR) ของฟิล์ม PLA น้ำมันมะพร้าวผสมแป้งมันสำปะหลังในอัตราส่วน 0.5 และ 1 % w/w

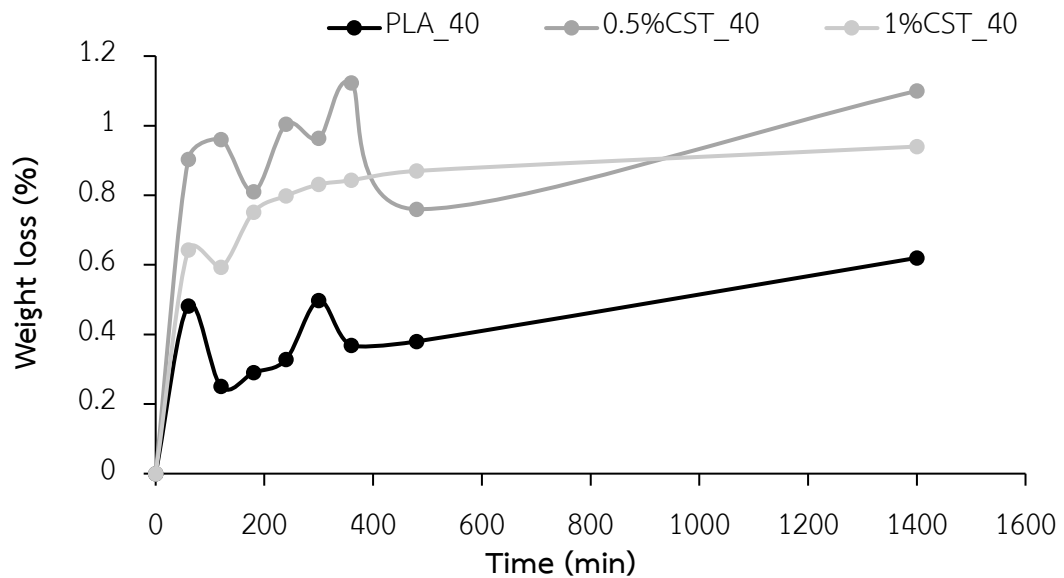
ตัวอย่าง	WVTR (g/m <sup>2</sup> .day)
PLA_40	0.21±0.01
PLA_50	0.23±0.02
PLA_60	0.20±0.01
0.5CST_40	0.25±0.01
0.5CST_50	0.26±0.09
0.5CST_60	0.25±0.01
1CST_40	0.26±0.02
1CST_50	0.25±0.02
1CST_60	0.22±0.02

#### 1.2.4. การศึกษาการเคลื่อนย้ายของสารเคมีของฟิล์มพอลิแลคติกแอซิดน้ำมันมะพร้าวผสมแป้งมันสำปะหลัง แบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ

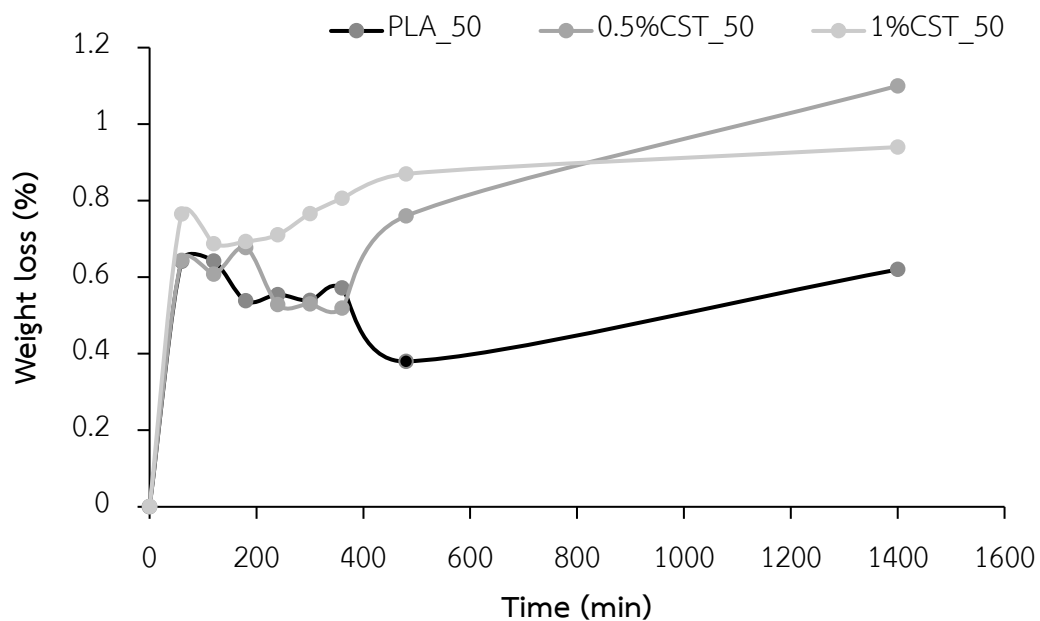
##### 1. Plasticizer migration test

การศึกษาเปอร์เซ็นต์น้ำหนักพลาสติกไซเซอร์ที่หายไปโดยการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 135 °C ในระยะเวลาที่แตกต่างกันของฟิล์ม PLA น้ำมันมะพร้าว 1% w/w ผสมแป้งมันสำปะหลังในอัตราส่วน 0.5 และ 1% w/w ที่ความหนา 40-60 มิลลิเมตรแสดงดังภาพ 36 พบว่าฟิล์มที่มีการผสมแป้งมันสำปะหลังในอัตราส่วนต่างๆมีเปอร์เซ็นต์น้ำหนักพลาสติกไซเซอร์ที่หายไปเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์ม PLA ที่แสดงค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปน้อยกว่าในทุกความหนาของฟิล์มที่

เตรียมได้ในช่วง 40-60 มิลลิเมตรเพราะฟิล์ม PLA ไม่ได้มีการผสมสารพลาสติกไซเซอร์ หรือสารตัวเติมลงไปจึงทำให้ PLA มีน้ำหนักน้อยกว่า แรงยึดเหนี่ยวระหว่างพันธะที่แข็งแรงแต่เมื่อมีการเติมสารพลาสติกไซเซอร์ หรือสารตัวเติมลงไปและเข้าไปแทรกกระหว่างสายโซ่ช่วยลดแรงยึดเหนี่ยวทำให้สายโซ่ขยับได้ง่ายขึ้น ทำให้สามารถเกิดการเคลื่อนย้ายของพลาสติกไซเซอร์ได้

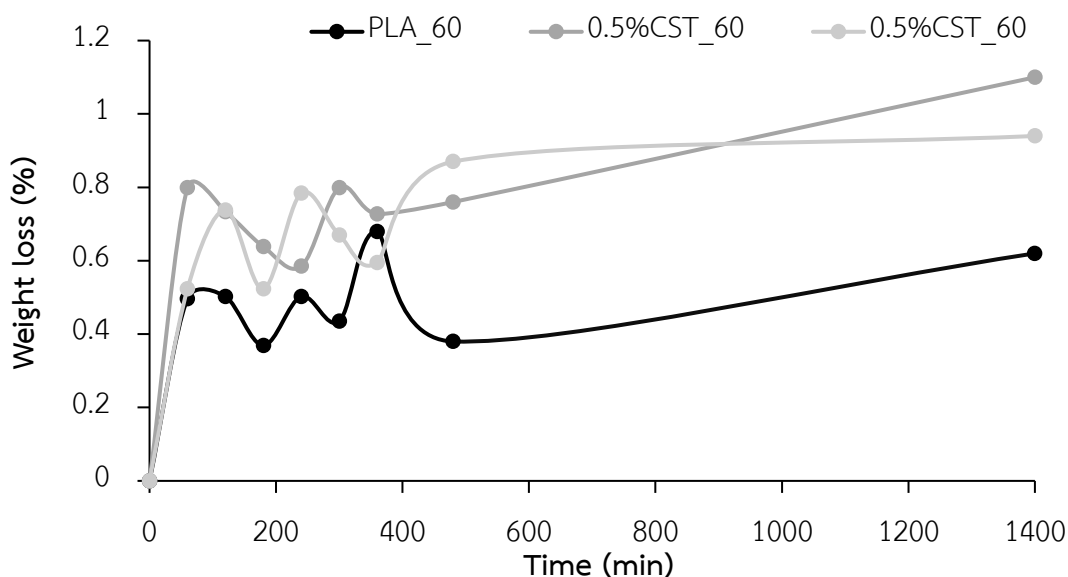


(ก)





(ข)



(ค)

ภาพ 36 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปของการทดสอบ Plasticizer migration ของฟิล์ม PLA น้ำมันมะพร้าว ผสมแป้งมันสำปะหลังในอัตราส่วน 0.5 และ 1% w/w

## 2. Overall migration test

ตาราง 8 แสดงเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปของพลาสติกไซเซอร์ที่ทำการทดสอบโดยการแช่ฟิล์ม PLA น้ำมันมะพร้าว 1% w/w ผสมแป้งมันสำปะหลังในอัตราส่วน 0.5 และ 1% w/w โดยเตรียมความหนาในช่วง 40-60 มิลลิเมตร ในสารละลาย 10% (v/v) เอทานอล (ethanol) ไอโซออกเทน (isooctane) และ 3% (w/v) อะซิติกแอติก (acetic acid) โดยสารละลายเหล่านี้ใช้เป็นตัวแทนของอาหารคือ น้ำมัน น้ำ และกรด ตามมาตรฐาน Commission Regulation EU N° 10/2011

เมื่อทำการแช่ในสารละลาย 10% (v/v) ethanol เป็นระยะเวลา 10 วัน ที่ความหนาในช่วง 40-60 มิลลิเมตร ฟิล์ม PLA มีค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปเท่ากับ  $0.26 \pm 0.18$ ,  $0.30 \pm 0.09$  และ  $0.50 \pm 0.15\%$  แต่เมื่อทำการผสมแป้งมันสำปะหลังในอัตราส่วน 0.5% w/w มีค่าเท่ากับ  $1.70 \pm 2.62$ ,  $0.54 \pm 0.34$  และ  $0.29 \pm 0.06\%$  แต่ในขณะที่ฟิล์มที่ผสมแป้งมันสำปะหลังอัตราส่วน 1% w/w มีค่าเท่ากับ  $1.42 \pm 0.30$ ,  $0.41 \pm 0.29$  และ  $0.37 \pm 0.11\%$  ตามลำดับ

แซในสารละลาย isooctane เป็นระยะเวลา 2 วันฟิล์ม PLA มีค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปเท่ากับ  $0.08 \pm 2.62$ ,  $0.16 \pm 0.42$  และ  $0.36 \pm 0.42\%$  แต่เมื่อทำการผสมแป้งมันสำปะหลังในอัตราส่วน 0.5% w/w มีค่าเท่ากับ  $0.29 \pm 0.58$ ,  $0.25 \pm 1.35$  และ  $0.15 \pm 0.11\%$  แต่ในขณะที่ฟิล์มที่ผสมแป้งมันสำปะหลังอัตราส่วน 1% w/w มีค่าเท่ากับ  $0.11 \pm 0.16$ ,  $0.94 \pm 1.23$  และ  $0.63 \pm 0.33\%$  ตามลำดับ

ฟิล์มที่แซในสารละลาย 3% (w/v) acetic acid เป็นระยะเวลา 10 วันฟิล์ม PLA มีค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปเท่ากับ  $0.26 \pm 0.18$ ,  $0.30 \pm 0.09$  และ  $0.50 \pm 0.15\%$  แต่เมื่อทำการผสมแป้งมันสำปะหลังในอัตราส่วน 0.5% w/w มีค่าเท่ากับ  $0.83 \pm 0.28$ ,  $0.54 \pm 0.34$  และ  $0.29 \pm 0.06\%$  แต่ในขณะที่ฟิล์มที่ผสมแป้งมันสำปะหลังอัตราส่วน 1% w/w มีค่าเท่ากับ  $0.24 \pm 0.26$ ,  $0.41 \pm 0.29$  และ  $0.37 \pm 0.19$  ตามลำดับ

จากผลการทดสอบพบว่าฟิล์มที่ผสมแป้งมันสำปะหลังอัตราส่วน 0.5 และ 1% w/w ที่แตกต่างกันทั้งหมดซึ่งอยู่ในเกณฑ์ 5% เป็นช่วงที่ยอมรับได้ที่ทำให้สามารถนำฟิล์มเหล่านี้ประยุกต์ใช้ในการบรรจุอาหาร

ตาราง 8 การทดสอบ Overall migration ของฟิล์ม PLA น้ำมัน มะพร้าว ผสมแป้งมันสำปะหลังในอัตราส่วน 0.5 และ 1 % w/w

ตัวอย่าง	Food simulant (%)		
	10 % (v/v) Ethanol	Isooctane	3% (w/v) Acetic acid
PLA_40	$0.26 \pm 0.18$	$0.08 \pm 2.62$	$0.26 \pm 0.18$
PLA_50	$0.30 \pm 0.09$	$0.16 \pm 0.42$	$0.30 \pm 0.09$
PLA_60	$0.50 \pm 0.15$	$0.36 \pm 0.42$	$0.50 \pm 0.15$
0.5CST_40	$1.70 \pm 2.62$	$0.29 \pm 0.58$	$0.83 \pm 0.28$
0.5CST_50	$0.54 \pm 0.34$	$0.25 \pm 1.35$	$0.54 \pm 0.34$
0.5CST_60	$0.29 \pm 0.06$	$0.15 \pm 0.11$	$0.29 \pm 0.06$
1CST_40	$1.42 \pm 0.30$	$0.11 \pm 0.16$	$0.24 \pm 0.26$
1CST_50	$0.41 \pm 0.29$	$0.94 \pm 1.23$	$0.41 \pm 0.29$
1CST_60	$0.37 \pm 0.11$	$0.63 \pm 0.33$	$0.37 \pm 0.19$

### 1.2.5. การศึกษาการทนต่อแรงดึงของฟิล์มพอลิแลคติกแอซิดน้ำมันมะพร้าว ผสมแป้งมันสำปะหลัง

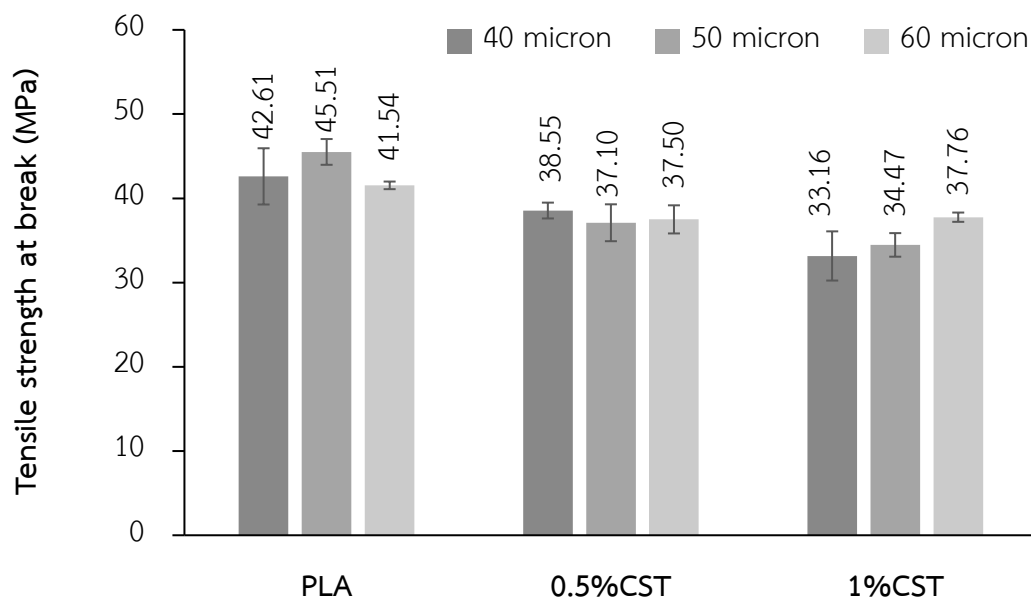
การทดสอบสมบัติเชิงกลการทนต่อแรงดึงของฟิล์มพอลิแลคติกแอซิด น้ำมันมะพร้าว 1% w/w ผสมแป้งมันสำปะหลังในอัตราส่วนที่แตกต่างกันที่ 0.5 และ 1% w/w ที่ความหนา 40-60 ไมโครเมตร ในทิศทางตามแนวเครื่องจักร (Machine direction, MD) และทิศทางตามแนวขวาง (Transverse direction, TD) ดังภาพ 37-38 แสดงสมบัติการทนต่อแรงดึงของฟิล์มพบว่าฟิล์ม PLA ที่ความหนา 40 50 และ 60 ไมโครเมตร มีค่าความต้านทานต่อแรงสูงสุด (Tensile strength) ในทิศ MD เท่ากับ 42.61 45.51 และ 41.54 MPa ตามลำดับ ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด (%Elongation at break) ในทิศ MD เท่ากับ 8.92 14.71 และ 11.24 MPa ในทิศ TD เท่ากับ 4.76 4. และ 14 5.91 MPa ค่ามอดูลัส (Modulus at break) ในทิศ MD เท่ากับ 538.75 316.61 และ 11.24 MPa ในทิศ TD เท่ากับ 1120.74 1089.55 และ 782.26 MPa ตามลำดับ เมื่อทำการผสมน้ำมันมะพร้าวในอัตราส่วน 1% w/w กับ PLA ซึ่งได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 1.1 พบว่ามีค่าการทนต่อแรงสูงสุด (Tensile strength) ค่ามอดูลัส (Modulus at break) ลดลง และค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด (%Elongation at break) เพิ่มขึ้น ซึ่งน้ำมันมะพร้าวนี้นำมาทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์

แต่เมื่อพิจารณาผลการทดสอบการทนต่อแรงดึงของฟิล์มที่ทำการผสมแป้งมันสำปะหลังในอัตราส่วน 0.5 และ 1% w/w ที่ความหนา 40 – 60 micron จากภาพ 37ก-38ก แสดงค่าความต้านทานแรงสูงสุด (Tensile strength) ของฟิล์มที่ผสมแป้งมันสำปะหลังที่อัตราส่วน 0.5 % w/w ในทิศ MD มีค่าเท่ากับ 38.55 37.10 และ 37.50 MPa ทิศ TD เท่ากับ 38.74 40.06 และ 39.01 MPa ตามลำดับ และที่แป้งมันสำปะหลังในอัตราส่วน 1% w/w ในทิศ MD เท่ากับ 33.16 34.47 และ 37.76 MPa ในทิศ TD เท่ากับ 32.66 32.72 และ 33.49 MPa ตามลำดับพบว่าฟิล์มที่มีการผสมแป้งมันสำปะหลังมีค่าการทนต่อแรงดึงสูงสุด (Tensile strength) ลดลง

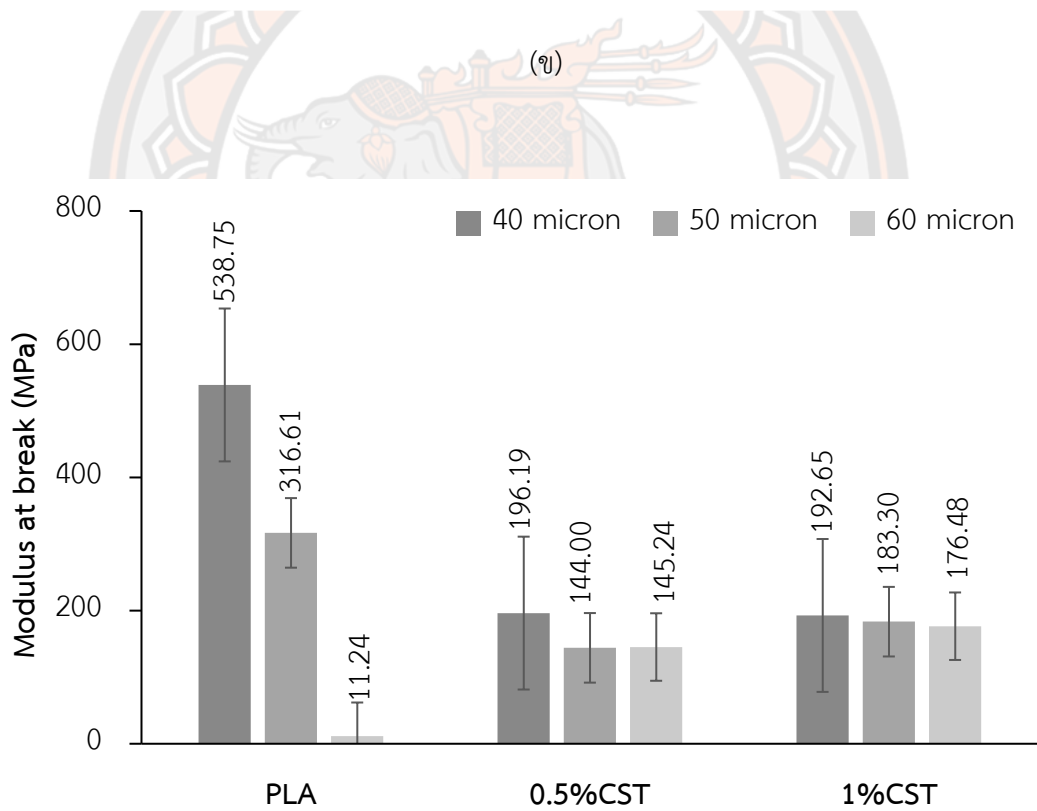
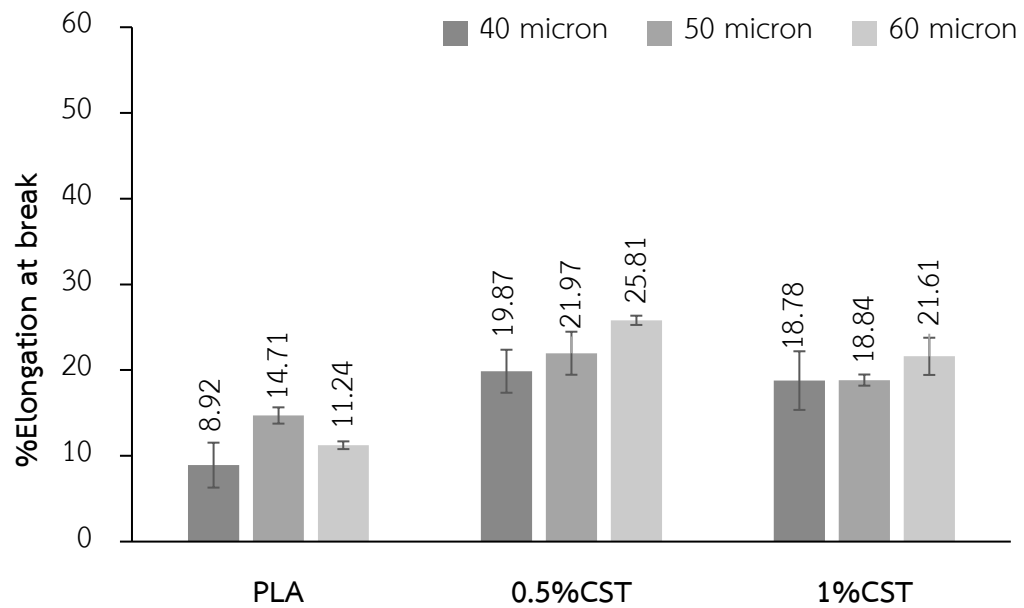
จากภาพ 37ข-38ข แสดงค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด (%Elongation at break) ของฟิล์มผสมแป้งมันสำปะหลังที่อัตราส่วน 0.5% w/w ในทิศ MD เท่ากับ 19.87 21.97 และ 25.81 MPa ทิศ TD เท่ากับ 20.71 4.31 และ 11.23 MPa ตามลำดับและที่อัตราส่วน 1% w/w ในทิศ MD เท่ากับ 18.78 18.84 และ 21.61 MPa ทิศ TD เท่ากับ 18.78 18.84 และ 8.83 MPa ตามลำดับ เมื่อมีการเติมแป้งมันสำปะหลังพบว่ามีค่าการยืดตัว ณ จุดขาด เพิ่มขึ้นเนื่องจากแป้งมันสำปะหลังที่เติมลงไปช่วยทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์ช่วยเพิ่มความยืดหยุ่น

ภาพ 37ค-38ค แสดงค่ามอดูลัส (Modulus at break) ของฟิล์มผสมแป้งมันสำปะหลังที่อัตราส่วน 0.5% w/w ในทิศ MD เท่ากับ 196.19 144.00 และ 145.24 MPa ในทิศ TD เท่ากับ 196.91 170.21 และ 331.57 MPa ตามลำดับ และที่อัตราส่วน 1% w/w ในทิศ MD เท่ากับ 192.65 183.30 และ 176.48 MPa ทิศ TD เท่ากับ 213.95 181.20 และ 467.15 MPa ตามลำดับ

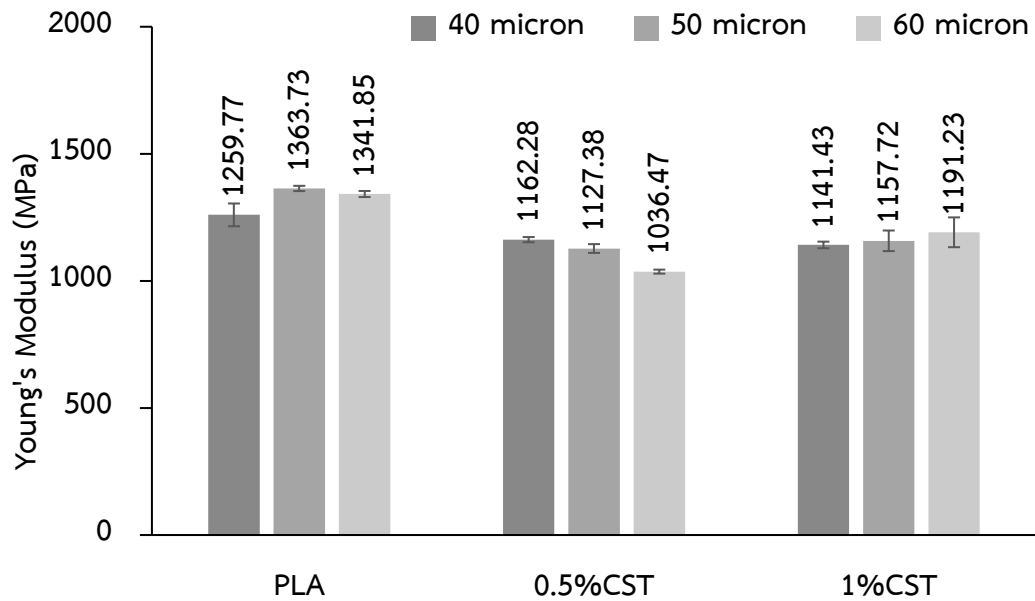
แต่เมื่อมีการผสมแป้งมันสำปะหลังในอัตราส่วน 0.5 และ 1% w/w พบว่ามีค่าความต้านทานต่อแรงสูงสุด (Tensile strength) และ ค่ามอดูลัส (Modulus at break) มีค่าลดลง แต่ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด (%elongation at break) มีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องมาจากน้ำมันมะพร้าวและแป้งมันสำปะหลังที่เติมลงไปเป็นสารเสริมแรงช่วยเพิ่มความยืดหยุ่นให้กับฟิล์ม PLA เข้าไปแทรกสายโซ่โมเลกุลของ PLA ทำให้ลดแรงดึงดูระหว่างสายโซ่โมเลกุลลดลง จึงส่งผลทำให้ฟิล์ม PLA ลดความแข็งเปราะและเพิ่มความยืดหยุ่น



(ก)

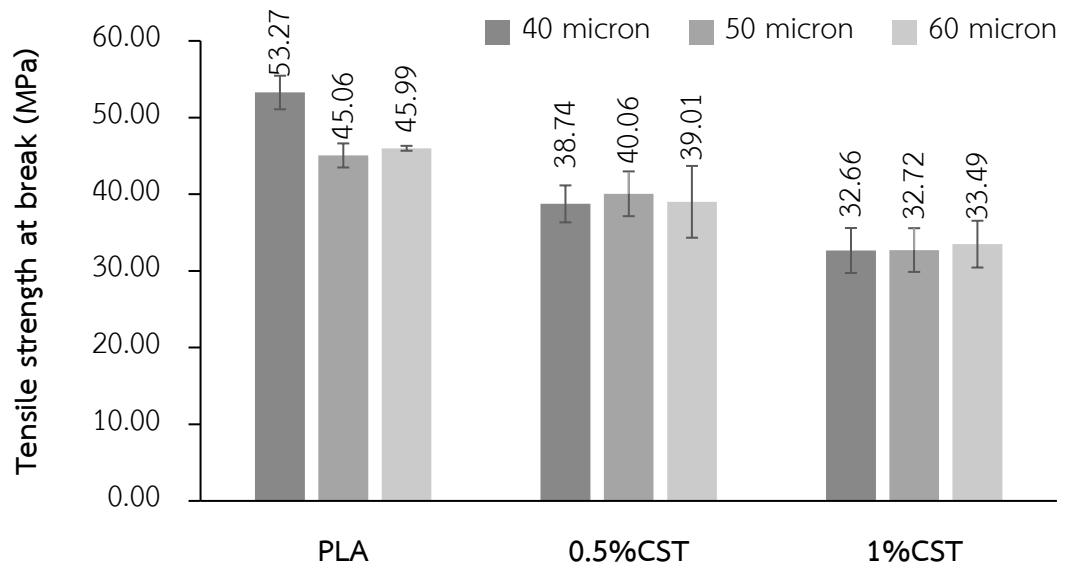


(b)

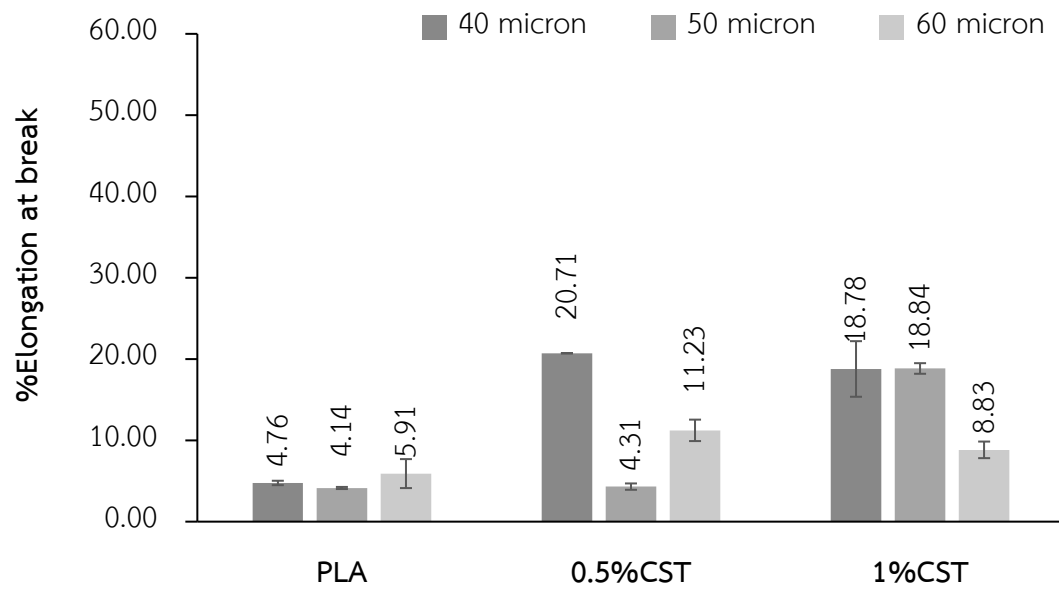


(ง)

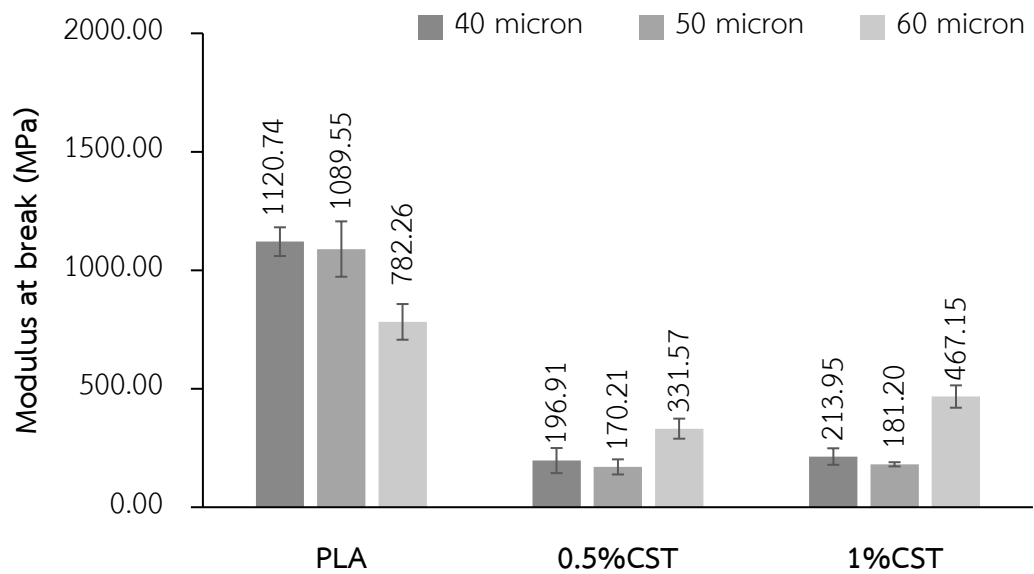
ภาพ 37 ผลการทดสอบการทนต่อแรงดึงในทิศทางตามแนวเครื่องจักร (MD) ของฟิล์ม PLA ผสมน้ำมันมะพร้าว และแป้งมันสำปะหลังในอัตราส่วนต่างๆ ที่ความหนา 40-60  $\mu\text{m}$  (ก) ค่าการทนต่อแรงดึง (Tensile strength) (ข) ค่าการยืดตัวออก ณ จุดขาด (%Elongation at break) (ค) ค่ายังมอดุลัส ณ จุดขาด (Modulus at break) (ง) ค่ายังมอดุลัส (Young's Modulus)

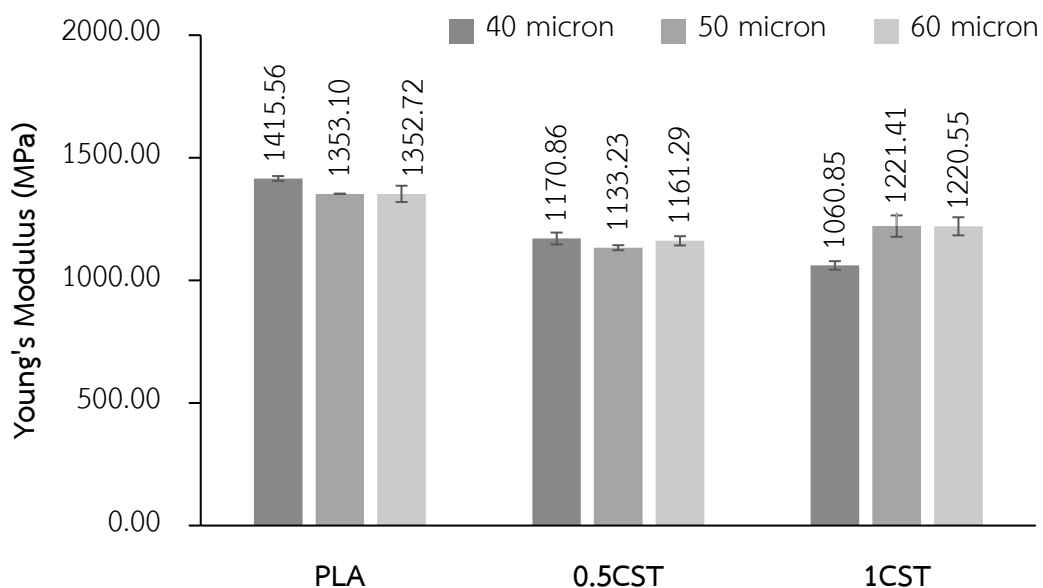


(n)



(o)





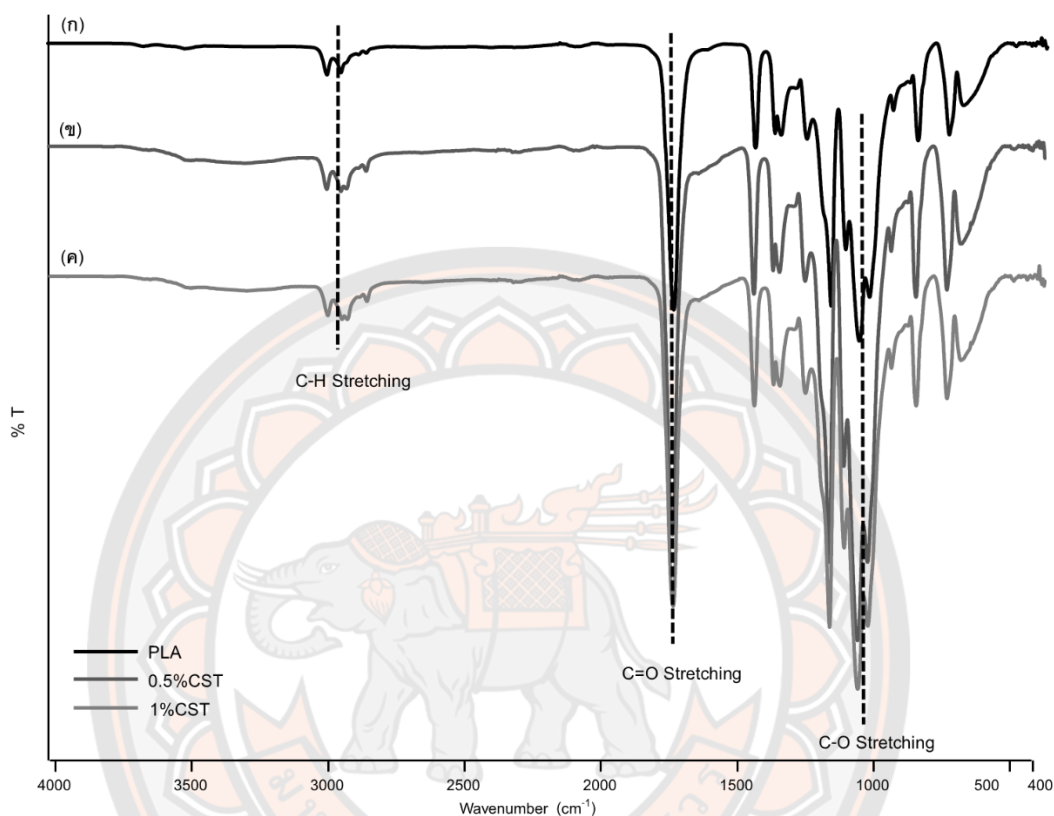
ภาพ 38 ผลการทดสอบการทนต่อแรงดึงในทิศทางตามแนวขวาง (TD) ของฟิล์ม PLAผสมน้ำมันมะพร้าว และแป้งมันสำปะหลังในอัตราส่วนต่างๆ ที่ความหนา 40-60  $\mu\text{m}$  (ก) ค่าการทนต่อแรงดึง (Tensile strength) (ข) ค่าการยืดตัวออก ณ จุดขาด (%Elongation at break) (ค) ค่าYoung's Modulus ณ จุดขาด (Modulus at break) (ง) ค่าYoung's Modulus (Young's Modulus)

#### 1.2.6. การศึกษาการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของฟิล์มพอลิแลคติกแอซิดน้ำมันมะพร้าว ผสมแป้งมันสำปะหลัง

ภาพ 39 แสดง FT-IR สเปกตรัมของฟิล์ม PLA น้ำมันมะพร้าว 1% w/w และแป้งมันสำปะหลังในอัตราส่วนที่ต่างกันที่ 0.5 และ 1% w/w พบว่าสเปกตรัมของ PLA (ภาพ 39ก) ปรากฏสัญญาณที่แสดงถึงฟิล์ม PLA ของ C-H stretching บริเวณเลขคลื่น  $2994.56\text{ cm}^{-1}$  หมู่ฟังก์ชันของคาร์บอนิล C=O stretching ที่บริเวณเลขคลื่น  $1746.43\text{ cm}^{-1}$  และปรากฏสัญญาณของหมู่ฟังก์ชันของคาร์บอนิล C-O ที่บริเวณเลขคลื่น  $1078.51\text{ cm}^{-1}$  แต่เมื่อผสมแป้งมันสำปะหลังในอัตราส่วน 0.5 และ 1% w/w (ภาพ 5B-C) ปรากฏสัญญาณของ C-H stretching บริเวณเลขคลื่น  $2994.44\text{ cm}^{-1}$ ,  $2994.34\text{ cm}^{-1}$  หมู่ฟังก์ชันของคาร์บอนิล C=O stretching ที่บริเวณเลขคลื่น  $1745.86\text{ cm}^{-1}$ ,  $1745.19\text{ cm}^{-1}$  และปรากฏสัญญาณของหมู่ฟังก์ชันของคาร์บอนิล C-O ที่บริเวณเลขคลื่น  $1077.37\text{ cm}^{-1}$ ,  $1077.61\text{ cm}^{-1}$  ตามลำดับ ซึ่งสัญญาณของฟิล์มที่ทำการผสมน้ำมันมะพร้าว 1% w/w และแป้งมันสำปะหลังในอัตราส่วน 0.5 และ 1% w/w ที่ปรากฏดังกล่าวมีลักษณะคล้ายสัญญาณของ PLA



ซึ่งไม่ปรากฏสัญญาณของแป้งมันสำปะหลังเนื่องจากปริมาณของแป้งมันสำปะหลังที่ทำการเติมมีปริมาณที่น้อย จึงทำให้ไม่ปรากฏสัญญาณของแป้งมันสำปะหลัง

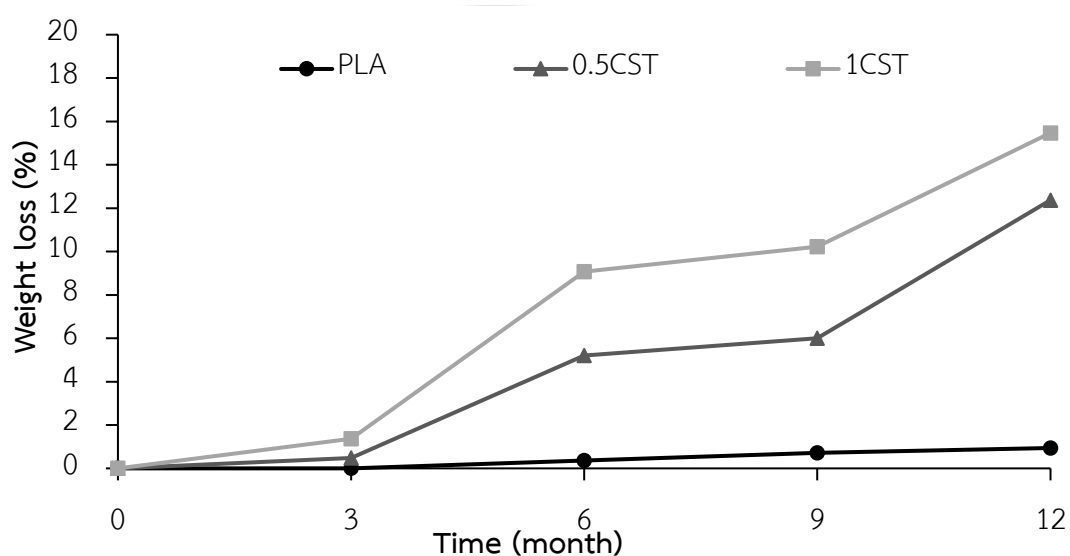


ภาพ 39 FTIR สเปกตรัมของฟิล์มพอลิแลคติกแอซิด น้ำมันมะพร้าว ผสมแป้งมันสำปะหลังในอัตราส่วนที่แตกต่าง (ก) PLA (ข) 0.5CST (ค) 1CST

### 1.2.7. การศึกษาการย่อยสลายของฟิล์มพอลิแลคติกแอซิดน้ำมันมะพร้าว ผสมแป้งมันสำปะหลัง

การศึกษาการย่อยสลายโดยธรรมชาติของแผ่นฟิล์มพอลิแลคติกแอซิดน้ำมันมะพร้าว ผสมแป้งมันสำปะหลัง (ภาพ 40) พบว่าฟิล์ม PLA เริ่มเกิดการย่อยสลายในเดือนที่ 6 มีเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายที่ 0.36% ส่วนฟิล์มพอลิแลคติกแอซิด น้ำมันมะพร้าว และแป้งมันสำปะหลังที่อัตราส่วน 0.5 และ 1% w/w เริ่มเกิดการย่อยสลายที่เดือน 3 เกิดการย่อยสลายเพียงเล็กน้อยโดยมีเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายเท่ากับ 0.48 และ 1.37 % ตามลำดับ เมื่อพิจารณาการย่อยสลายของฟิล์มที่ทำการเติมแป้งมันสำปะหลังที่ 0.5 และ 1% ที่ระยะเวลา 12 เดือนพบว่า มีเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายที่เพิ่มสูงขึ้น

คือ 12.37 และ 15.47% จากผลการทดสอบพบว่าฟิล์มที่มีการผสมสารเติมแต่งแป้งมันสำปะหลังมีค่าเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายที่ไวกว่าฟิล์ม PLA เนื่องมาจากอาจเป็นผลมาจากการเติมแป้งมันสำปะหลังและน้ำมันมะพร้าว ซึ่งแป้งมันสำปะหลัง และน้ำมันมะพร้าวเหล่านี้เป็นสารธรรมชาติทำให้สามารถย่อยสลายได้ง่าย แป้งมันสำปะหลังสามารถดูดความชื้นได้ซึ่งทำให้ความแข็งแรงระหว่างสายโซ่โมเลกุลมีความแข็งแรงที่ลดลง ประกอบกับสภาวะที่เกิดขึ้นทั้ง แสงแดด ความชื้น จุลินทรีย์ในดิน ที่เป็นสภาวะเหมาะสมที่ทำให้เกิดการย่อยสลายจึงช่วยให้ฟิล์มสามารถย่อยสลายได้ดีกว่าฟิล์ม PLA



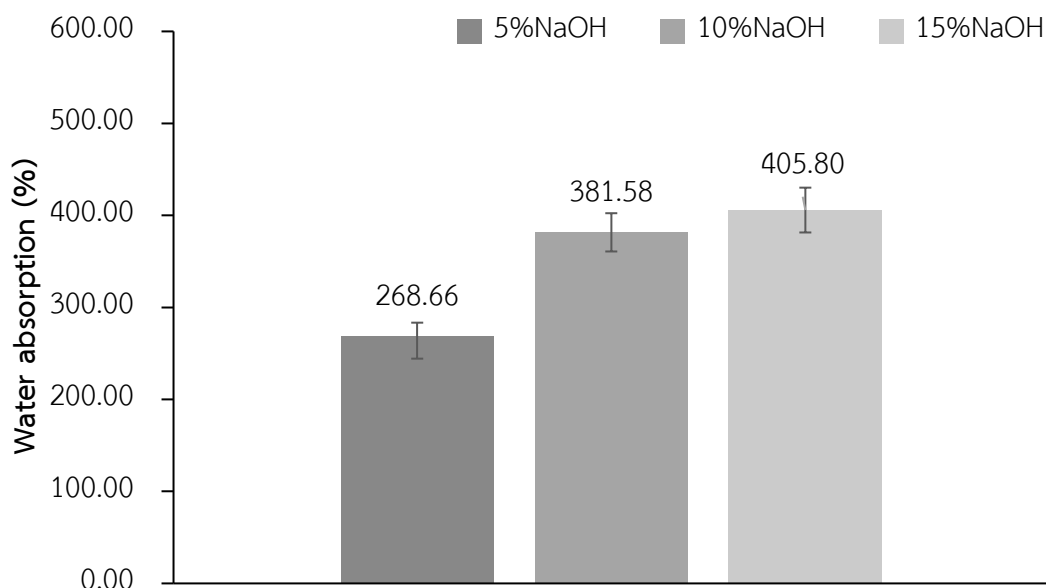
ภาพ 40 เปอร์เซ็นต์การย่อยสลายของฟิล์มพอลิแลคติกแอซิด น้ำมันมะพร้าว ผสมแป้งมันสำปะหลังในอัตราส่วนที่แตกต่าง

ส่วนนี้เป็นการศึกษาการพัฒนาผลิตภัณฑ์กระดาษเพื่อนำไปใช้ในการลามิเนตกับฟิล์มพอลิเมอร์เพื่อผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์สำหรับบรรจุอาหาร งานวิจัยนี้สนใจที่จะพัฒนากระดาษจากเยื่อฟางข้าว ซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร จึงทำการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมเส้นใยฟางข้าว และทดสอบสมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล ของกระดาษดังนี้

## 2. ศึกษาสมบัติของกระดาษจากเยื่อฟางข้าว

### 2.1 การศึกษาการหาเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำ (%Water absorption) ของกระดาษจากเยื่อฟางข้าว

การศึกษากการหาเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของกระดาษจากเยื่อฟางข้าวที่ทำการบำบัดสมบัติเส้นใยฟางข้าวโดยโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 5 10 และ 15 % โดยทำการแช่ในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิห้อง เป็นระยะเวลา 1 วัน พบว่าที่ความเข้มข้น 5% มีค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำเท่ากับ 268.66 ที่ความเข้มข้น 10% มีค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำเท่ากับ 381.58 และที่ความเข้มข้น 15% มีค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำเท่ากับ 405.80 แสดงดังภาพ 41 จากผลการทดสอบพบว่าเมื่อเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้นค่าการดูดซับน้ำของกระดาษจากเยื่อฟางข้าวมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องมาจากมีการบำบัดสมบัติของเส้นใยฟางข้าวโดยโซเดียมไฮดรอกไซด์จึงทำให้มีการกำจัดลิกนินออก อาจทำให้สูญเสียสมบัติการดูดซับน้ำ ทำให้น้ำสามารถแทรกตัวเข้าไปสร้างพันธะกับอะตอมของหมู่ไฮดรอกซิลของเส้นใยได้มากขึ้น ซึ่งหมู่ไฮดรอกซิลเป็นตัวดึงดูดความชื้นจึงทำให้มีความสามารถในการดูดความชื้น และทำให้เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำมีค่ามากขึ้นเมื่อความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้น



ภาพ 41 เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของเยื่อกระดาษจากฟางข้าวที่ทำการบำบัดสมบัติเส้นใยฟางข้าวโดยโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 5 10 และ 15 %

## 2.2 การทดสอบการวัดสีด้วยเครื่อง colorimeter ของกระดาษจากเยื่อฟางข้าว

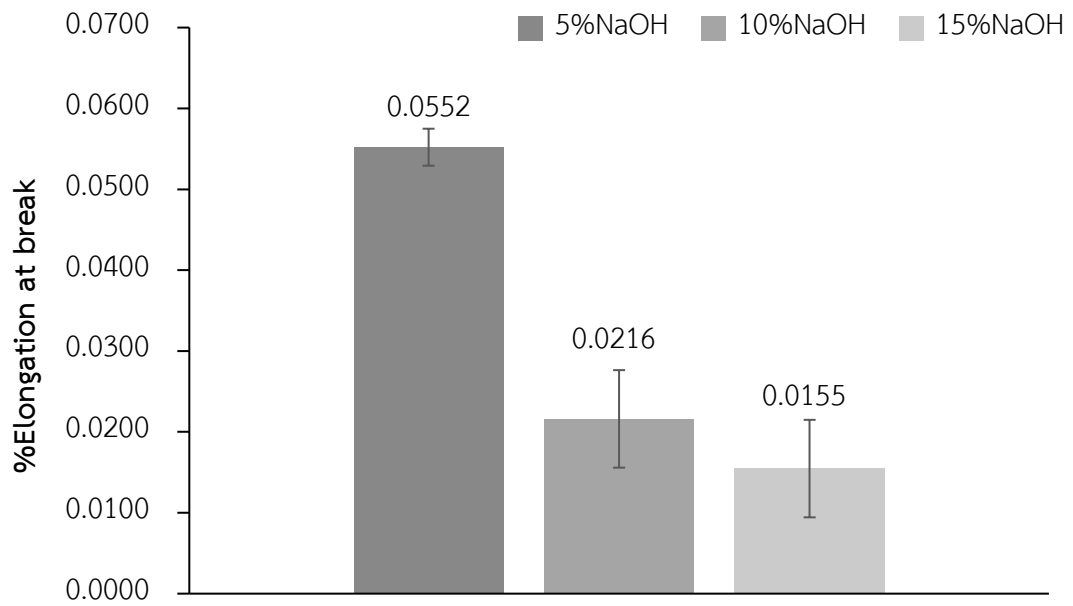
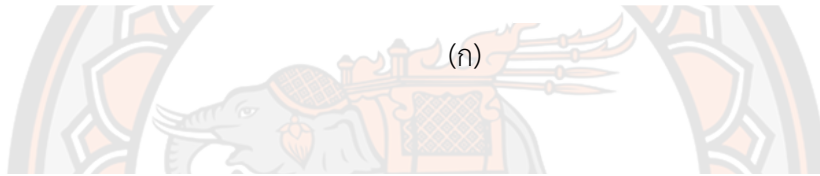
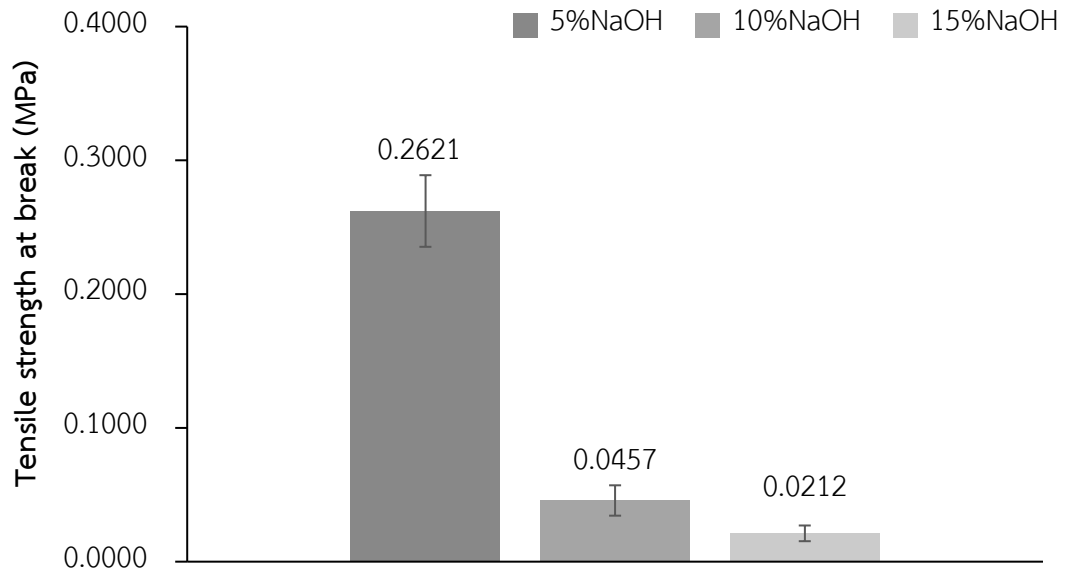
การศึกษากการวัดค่าสี แสดงค่าพารามิเตอร์สี ค่า  $L^*$   $a^*$   $b^*$  ซึ่งค่า  $L^*$  แสดงถึงค่าความสว่าง ค่า  $a^*$  แสดงค่าพารามิเตอร์สีแดงไปสีเขียว  $b^*$  แสดงค่าพารามิเตอร์สีเหลืองไปสีน้ำเงิน แสดงดังตารางที่ 9 พบว่ากระดาษจากฟางข้าวที่ทำการบำบัดสมบัติเส้นใยฟางข้าวโดยโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 5 10 และ 15 % เมื่อเปรียบเทียบค่าความสว่าง ( $L$ ) พบว่าเมื่อความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์มากขึ้นกระดาษฟางข้าวมี  $L^*$  (ค่าความสว่าง) คือ 81.30 81.63 และ 82.13 ตามลำดับ ส่วนค่า  $a^*$  (แสดงค่าแดง-สีเขียว) คือ 2.61 2.52 และ 2.67 ตามลำดับ ส่วนค่า  $b^*$  (แสดงค่าสีเหลือง-สีน้ำเงิน) คือ 12.51 11.94 และ 12.80 ตามลำดับ ค่าความแตกต่างสี ( $\Delta E$ ) ของกระดาษอยู่ในช่วง 0.66 และ 0.88 ซึ่งยังอยู่ในเกณฑ์สามารถยอมรับความแตกต่างของสีได้คือน้อยกว่า 5 จากการทดลองพบว่าเมื่อความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้น ทำให้มีปริมาณของลิกนินลดลง ทำให้ค่าความสว่างของกระดาษมากขึ้น เนื่องมาจากการบำบัดด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ ทำให้มีการกำจัดลิกนินออก

ตาราง 9 ค่าพารามิเตอร์สีของกระดาษจากฟางข้าวที่ทำการบำบัดสมบัติเส้นใยฟางข้าวโดยโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 5 10 และ 15 %

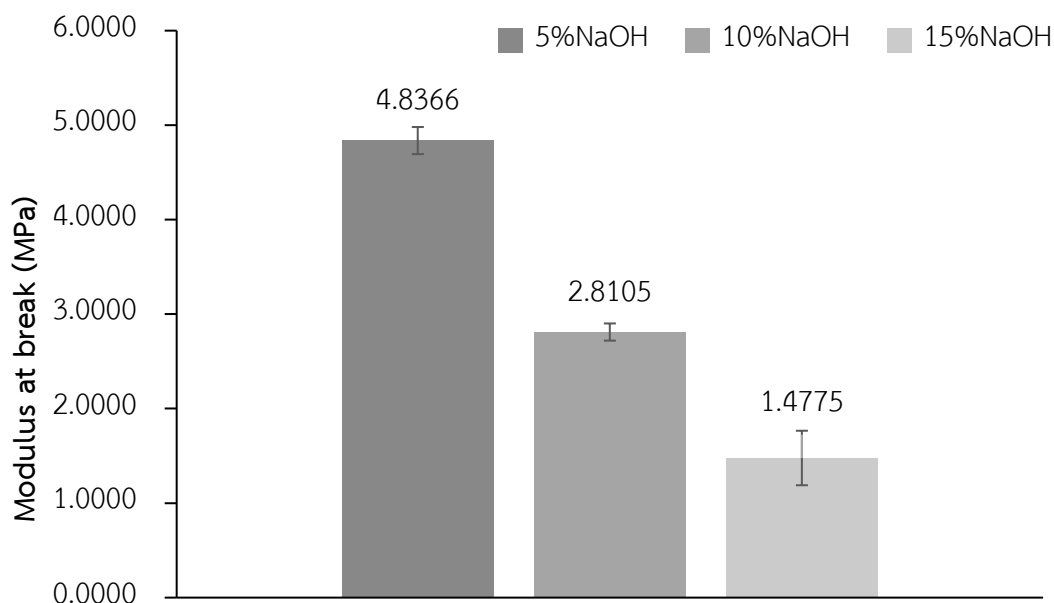
ตัวอย่าง	L*	a*	b*	ΔE
5%NaOH	81.30±0.52	2.61±0.09	12.51±0.58	0.00
10%NaOH	81.63±0.49	2.52±0.12	11.94±0.32	0.66
15%NaOH	82.13±0.39	2.67±0.11	12.80±0.43	0.88

### 2.3 การศึกษาการทนต่อแรงดึงของเยื่อกระดาษจากเยื่อฟางข้าว

จากการศึกษาการทนต่อแรงดึงของเยื่อกระดาษจากฟางข้าวที่ทำการบำบัดสมบัติเส้นใยฟางข้าวโดยโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 5 10 และ 15 % (ภาพ 42) พบว่ากระดาษฟางข้าวที่ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ 5% มีค่าการทนต่อแรงดึงสูงสุดคือ (Tensile strength at break) เท่ากับ 0.2621 MPa เปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด (%Elongation at break) เท่ากับ 0.0557 ค่ามอดูลัส (Modulus at break) เท่ากับ 4.8366 ที่ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10% มีค่าการต้านทานต่อแรงดึงสูงสุด (Tensile strength at break) เท่ากับ 0.0457 MPa เปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด (%Elongation at break) เท่ากับ 0.0216 ค่ามอดูลัส (Modulus) เท่ากับ 2.8105 และที่ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ 15% มีค่าการทนต่อแรงดึง (Tensile strength at break) เท่ากับ 0.0212 MPa เปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด (%Elongation at break) เท่ากับ 0.0155 ค่ามอดูลัส (Modulus) เท่ากับ 1.4775 จากผลการทดสอบพบว่าเมื่อความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้น ค่าการทนต่อแรงดึงสูงสุด (Tensile strength at break) เปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด (%Elongation at break) และ ค่ามอดูลัส (Modulus) มีค่าลดลงเนื่องมาจาก เมื่อความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์มากขึ้นจึงทำให้เส้นใยมีลักษณะอ่อนนุ่มขึ้น และปริมาณลิกนิน ถูกกำจัดออกมาในปริมาณที่มากขึ้น ทำให้ความแข็งแรงของเส้นใยลดลง การเกี่ยวพันกันของเส้นใยลดลงจึงทำให้มีค่าการทนต่อแรงดึงลดลง



(o)

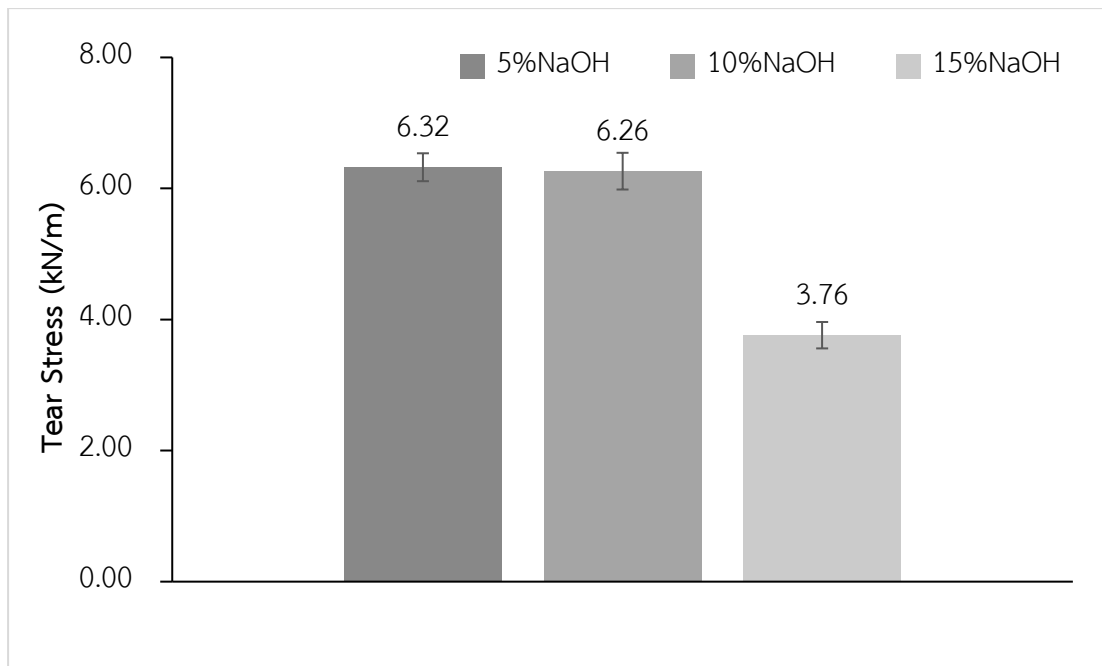


(ค)

ภาพ 42 การทนต่อแรงดึงของเยื่อกระดาษจากฟางข้าวที่ทำการบำบัดสมบัติเส้นใยฟางข้าวโดยโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 5 10 และ 15 % (ก) Tensile strength at break (ข) %Elongation at break (ค) Modulus at break

#### 2.4 การศึกษาความต้านทานต่อการฉีกขาดของกระดาษจากเยื่อฟางข้าว

จากการศึกษาการทนต่อแรงดึงของเยื่อกระดาษจากฟางข้าวที่ทำการบำบัดสมบัติเส้นใยฟางข้าวโดยโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 5 10 และ 15 % (ภาพ 43) พบว่าค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดมีค่าลดลงเมื่อความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้น โดยเยื่อกระดาษจากฟางข้าวที่ทำการบำบัดสมบัติเส้นใยฟางข้าวโดยโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 5% มีค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดเท่ากับ 6.32 kN/m ที่ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10% มีค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดเท่ากับ 6.26 kN/m และที่ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ 15% มีค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดเท่ากับ 3.11 kN/m เนื่องมาจากเมื่อความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มากขึ้นทำให้ลิกนินที่ประกอบไปด้วยส่วนของเซลลูโลสถูกกำจัดได้มากขึ้น แรงยึดเกาะระหว่างเส้นใยลดลงจึงทำให้ความแข็งแรงต่อแรงฉีกขาดมีค่าลดลง



ภาพ 43 การต้านทานต่อการฉีกขาดของเยื่อกระดาษจากฟางข้าวที่ทำการบำบัดสมบัติเส้นใยฟางข้าวโดยโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 5 10 และ 15 %




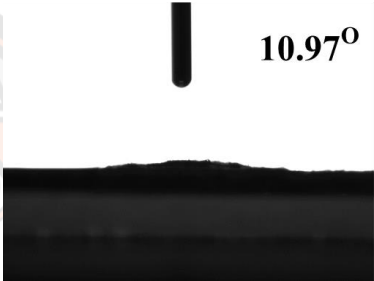
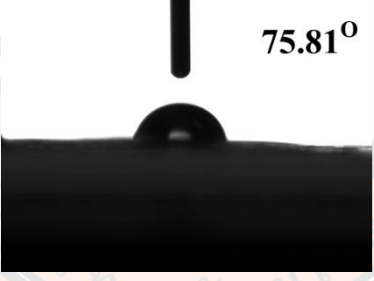

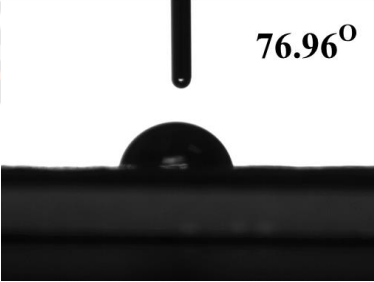

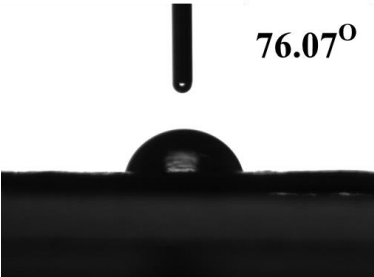

เนื่องจากงานวิจัยนี้สนใจที่ผลิตบรรจุภัณฑ์สำหรับบรรจุอาหารที่สามารถย่อยสลายได้ จากการทดสอบในหัวข้อที่ 1 พบว่าในส่วนของฟิล์มที่นำมาใช้ในการลามิเนต ได้ทำการเลือกฟิล์มพอลิแลคติกผสมน้ำมันมะพร้าว และแป้งมันสำปะหลังที่ 0.5% เนื่องจากมีคุณสมบัติเชิงกลที่ และในหัวข้อ 2 ในส่วนของกระดาษพบว่ากระดาษจากเยื่อฟางข้าวที่ความเข้มข้น 10% เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการทำบรรจุภัณฑ์ ดังนั้นจึงทำการเตรียมฟิล์มจากพอลิแลคติกแอซิดผสมน้ำมันมะพร้าวที่ 1% w/w และแป้งมันสำปะหลังที่ 0.5% ทำการลามิเนตกับกระดาษฟางข้าวที่ผ่านการปรับพื้นผิวด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 10% NaOH ซึ่งจะทำให้การปรับปริมาณความชื้นของแผ่นกระดาษที่จะลามิเนตด้วยฟิล์ม ให้มีปริมาณความชื้นที่ร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนัก เพื่อพัฒนาเป็นบรรจุภัณฑ์ และศึกษาสมบัติของบรรจุภัณฑ์สำหรับบรรจุอาหาร ดังนี้


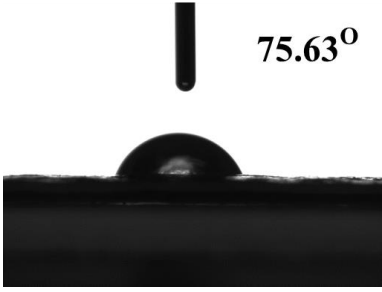

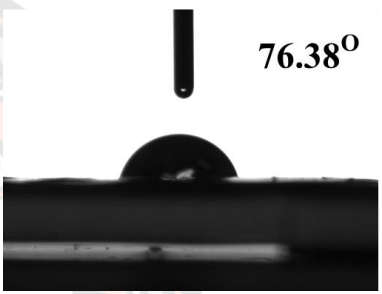
### 3. ศึกษาสมบัติของบรรจุภัณฑ์อาหารจากแผ่นฟิล์มพอลิแลคติกแอซิด (PLA) ผสมน้ำมันมะพร้าว ลามิเนตลงบนกระดาษจากเยื่อฟางข้าว

#### 3.1 การศึกษาสถานะการเปียกของฟิล์มพอลิแลคติกผสมน้ำมันมะพร้าว และแป้งมันสำปะหลัง ลามิเนตกระดาษจากเยื่อฟางข้าว

ตารางที่ 10 แสดงค่ามุมสัมผัส (Contact angle) ของฟิล์มพอลิแลคติกแอซิดผสมน้ำมันมะพร้าวและแป้งมันสำปะหลังลามิเนตกระดาษฟางข้าวที่ความชื้นที่แตกต่างกันคือ 0 10 20 และ 30% OM ที่ได้จากการวัดค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำกลิ้งในปริมาตร 5 ไมโครลิตรบนพื้นผิวของฟิล์มลามิเนตกระดาษ โดยเมื่อทำการทดสอบกับกระดาษที่ยังไม่ได้ทำการลามิเนตฟิล์ม ซึ่งทำการสังเกตการเปลี่ยนแปลงของค่ามุมสัมผัสเมื่อทำการหยดน้ำสัมผัสกับผิวกระดาษพบว่ามุมเริ่มต้นเท่ากับ  $75.55^{\circ}$  เมื่อหยดน้ำสัมผัสผิวกระดาษไปเรื่อยๆ พบว่าที่ระยะเวลาประมาณ 3 วินาที หยดน้ำได้ทำการซึมผ่านผิวกระดาษลงไปยังอย่างรวดเร็วสามารถวัดมุมสัมผัสสุดท้ายได้เท่ากับ  $10.97^{\circ}$  ส่วนกระดาษฟางข้าวที่มีการลามิเนตฟิล์มพอลิแลคติกแอซิดผสมน้ำมันมะพร้าว และแป้งมันสำปะหลังที่ความชื้นที่แตกต่างกันคือ 0 10 20 และ 30% OM เมื่อทำการวัดมุมสัมผัสเริ่มต้นเท่ากับ  $76.96$   $76.07$   $78.04$  และ  $78.15^{\circ}$  เมื่อระยะเวลาที่หยดน้ำสัมผัสกับผิวของฟิล์มลามิเนตกระดาษนานขึ้นที่ระยะเวลา 3 นาทีพบว่าหยดน้ำยังไม่ได้ทำการซึมผ่านผิวกระดาษลงไปยังเห็นเป็นหยดน้ำบนพื้นผิวอยู่ซึ่งสามารถวัดมุมสุดท้ายได้เท่ากับ  $71.83$   $74.01$   $75.63$  และ  $76.38^{\circ}$  กระดาษที่ทำการลามิเนตฟิล์มมีแนวโน้มการลดลงของค่ามุมสัมผัส น้ำสามารถซึมผ่านพื้นผิวของกระดาษได้น้อยลง เนื่องจากฟิล์มที่ใช้ในการลามิเนตมีความไม่ชอบน้ำ

ตาราง 10 การทดสอบค่ามุมสัมผัสของแผ่นกระดาษฟางข้าวลามิเนตฟิล์มพอลิแลคติกแอซิดผสม  
น้ำมันมะพร้าวและแป้งมันสำปะหลังที่ความชื้นที่แตกต่างกันคือ 0 10 20 และ 30%  
OM

ตัวอย่าง	Contact angle (degree)	
	มุมเริ่มต้น	มุมสุดท้าย
Paper RS	 75.77 <sup>o</sup>	 10.97 <sup>o</sup>
Film ST 0.5%	 75.81 <sup>o</sup>	 72.72 <sup>o</sup>
PRS 0% OM	 76.96 <sup>o</sup>	 71.83 <sup>o</sup>
PRS 10% OM	 76.07 <sup>o</sup>	 74.01 <sup>o</sup>

ตัวอย่าง	Contact angle (degree)	
	มุมเริ่มต้น	มุมสุดท้าย
PRS 20% OM	 78.04 <sup>o</sup>	 75.63 <sup>o</sup>
PRS 30% OM	 78.15 <sup>o</sup>	 76.38 <sup>o</sup>

ตาราง 11 การทดสอบค่ามุมสัมผัสของแผ่นกระดาษฟางข้าวลามิเนตฟิล์มพอลิแลคติกผสมน้ำมันมะพร้าวและแป้งมันสำปะหลังที่ความชื้นที่แตกต่างกันคือ 0 10 20 และ 30% OM

ตัวอย่าง	Contact angle (degree)	
	มุมเริ่มต้น	มุมสุดท้าย
Paper RS	75.77±2.03	10.97±0.48
Film ST 0.5%	75.81±2.32	72.72± 2.18
PRS 0% OM	76.96±2.81	71.83±2.34
PRS 10% OM	76.07±2.46	74.01±2.41
PRS 20% OM	78.04±2.61	75.63±2.60
PRS 30% OM	78.15±2.63	76.38±2.60

### 3.2 การศึกษาการยึดเกาะของฟิล์มพอลิแลคติกผสมน้ำมันมะพร้าว และแป้งมันสำปะหลัง ลามิเนตกระดาษจากเยื่อฟางข้าว

จากผลการทดสอบค่าความทนต่อการหลุดลอกของตัวอย่างกระดาษฟางข้าวลามิเนตด้วยฟิล์มพอลิแลคติกผสมน้ำมันมะพร้าว และแป้งมันสำปะหลังที่สภาวะความชื้นของกระดาษที่แตกต่างกันคือ 0 10 20 และ 30% OM ตามลำดับ แสดงดังตารางที่ 11 ตัวอย่างที่ถูกลามิเนตด้วยฟิล์มพอลิเมอร์ชีวภาพที่ความชื้น 0% OM มีค่าความทนต่อการหลุดลอกเท่ากับ  $0.00201 \pm 0.00027$  N/mm พบว่าตัวอย่างกระดาษฟางข้าวลามิเนตด้วยฟิล์มพอลิเมอร์ชีวภาพที่สภาวะความชื้นที่แตกต่างกัน คือ 10 20 และ 30% OM มีค่าความทนต่อการหลุดลอกเท่ากับ  $0.00363 \pm 0.00037$   $0.00224 \pm 0.00043$  และ  $0.00177 \pm 0.00034$  N/mm ตามลำดับ เมื่อความชื้นของกระดาษเพิ่มขึ้นทำให้ค่าความต้านทานต่อการลอกออกของฟิล์มกับกระดาษมีค่าลดลงเนื่องมาจากความชื้นเหล่านี้ทำให้กระดาษมีความแข็งแรงลดลงเพราะในกระดาษมีองค์ประกอบหลักพวกเซลลูโลสซึ่งมีความชอบน้ำจึงดูดความชื้น ส่งผลต่อค่าความทนต่อการหลุดลอกจึงทำให้ค่าความทนต่อการหลุดลอก มีค่าลดลง ซึ่งพบว่าที่สภาวะการลามิเนตด้วยสภาวะความชื้นที่ 10% OM เป็นช่วงความชื้นของกระดาษลามิเนตที่ทำให้ความสามารถในการยึดเกาะระหว่างเฟสของเส้นใยฟางข้าวและฟิล์มพอลิเมอร์ชีวภาพมีความแข็งแรงสูงกว่ากระดาษลามิเนตที่สภาวะความชื้นที่ 20 และ 30% OM

ตาราง 12 ค่าการยึดเกาะของแผ่นกระดาษฟางข้าวลามิเนตฟิล์มพอลิแลคติกผสมน้ำมันมะพร้าว และแป้งมันสำปะหลังที่สภาวะความชื้นที่แตกต่างกันคือ 0 10 20 และ 30%

ตัวอย่าง	Peel strength (N/mm)
PRS 0% OM	$0.00201 \pm 0.00027$
PRS 10% OM	$0.00363 \pm 0.00037$
PRS 20% OM	$0.00224 \pm 0.00043$
PRS 30% OM	$0.00177 \pm 0.00034$

## บทที่ 5

### บทสรุป

#### สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้สนใจการผลิตบรรจุภัณฑ์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่มีสมบัติในการป้องกันการรั่วซึมของน้ำและน้ำมัน จากแผ่นกระดาษฟางข้าวลามีเนตด้วยฟิล์มพอลิเมอร์ชีวภาพ ซึ่งผลิตจากวัตถุดิบจากธรรมชาติและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม พร้อมทั้งศึกษาสมบัติต่างๆ เช่น การทดสอบอัตราการไหลของพลาสติก ทดสอบสมบัติเชิงกล ทดสอบสัณฐานวิทยา ทดสอบความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำ การปลดปล่อยสารเคมี (Migration test) การทดสอบการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FT-IR และทดสอบการย่อยสลายโดยวิธีการฝังกลบในดิน

ในขั้นแรกของงานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมฟิล์มพอลิแลคติกแอซิดผสมน้ำมันพืชสมุนไพร โดยทำการเตรียมพอลิแลคติกแอซิด (PLA) ผสมกับน้ำมันพืชสมุนไพร 4 ชนิด ได้แก่ น้ำมันมะพร้าว น้ำมันมะรุม น้ำมันกานพลู และน้ำมันตะไคร้บ้าน ที่อัตราส่วน 0.25 0.5 0.75 และ 1 %wt. ตามลำดับ โดยน้ำมันสมุนไพรเหล่านี้ทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์จากธรรมชาติทดแทนการใช้สารเคมีสังเคราะห์ ทำการผสมด้วยเครื่องอัดรีดเกลียวหนอนคู่ พอลิเมอร์คอมพาวด์ที่ได้นำมาทดสอบค่าอัตราการไหลพบว่าเมื่อทำการผสมน้ำมันสมุนไพรทำให้มีค่าการไหลที่เพิ่มขึ้น หลังจากนั้นนำเม็ดคอมพาวด์ที่ได้ทำการเป่าขึ้นรูปฟิล์มด้วยเครื่องเป่าฟิล์ม ฟิล์มผสมน้ำมันพืชสมุนไพรทั้ง 4 ชนิดที่อัตราส่วน 0.25 0.5 0.75 และ 1% ตามลำดับ ความหนา 10-20 ไมครอน ที่เตรียมได้นำไปทดสอบสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค SEM พบว่าฟิล์มที่มีการผสมน้ำมันสมุนไพรทั้ง 4 ชนิดพื้นผิวฟิล์มมีลักษณะเรียบ ไม่ขรุขระ ทดสอบความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำ พบว่าการผสมน้ำมันพืชสมุนไพรช่วยให้ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมมีค่า WVTR ลดลง ส่วนผลการศึกษาการปลดปล่อยสารเคมีออกจากฟิล์มตามมาตรฐาน Food Contact Plastics Regulation (EU) 10/2011 กับตัวแทนอาหาร 3 ชนิด ได้แก่ 10 % (v/v) Ethanol, Isooctane และ 3% (w/v) Acetic acid พบว่ามีค่าไม่เกิน 5% ซึ่งไม่เกินมาตรฐานกำหนดสามารถยอมรับได้ ผลการทดสอบสมบัติเชิงกล ค่าการทนต่อแรงดึง และค่ามอดูลัส มีแนวโน้มลดลงแต่ค่าความสามารถในการยืดออก ณ จุดขาด เพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าน้ำมันสมุนไพรที่ใส่สามารถทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์เข้าไปแทรกระหว่างสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์ทำให้ลดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล ให้สายโซ่สามารถขยับได้ง่ายขึ้น ช่วยเพิ่มความยืดหยุ่นให้กับฟิล์ม ลดความแข็งเปราะของ PLA ลง สำหรับการวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันด้วย FT-IR ของฟิล์ม PLA ผสมน้ำมันพืชสมุนไพรที่เตรียมได้พบสัญญาณของแอลเคน (-CH-stretching) สัญญาณของหมู่คาร์บอนิล (-C=O) สัญญาณ

ของหมู่เมทิล (-CH bending) และสัญญาณของ -C-O stretching ซึ่งสัญญาณของหมู่ต่างๆที่พบเหล่านี้สอดคล้องกับโครงสร้างของ PLA แสดงให้เห็นว่าปริมาณน้ำมันพืชสมุนไพรที่เติมลงใน PLA มีปริมาณน้อยทำให้ไม่พบสัญญาณของน้ำมันพืชสมุนไพรทั้ง 4 ชนิดที่เติมลงไป นอกจากนี้การเติมน้ำมันพืชสมุนไพรทั้ง 4 ชนิดในอัตราส่วนต่างๆ ยังช่วยทำให้เกิดการย่อยสลายที่เร็วขึ้นเมื่อทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังกลบดินพบว่าฟิล์มผสมน้ำมันพืชสมุนไพรเริ่มเสถียรภาพและเกิดการย่อยสลายในเดือนที่ 3 และเกิดการย่อยสลายเพิ่มมากขึ้นตามระยะเวลาที่ฝังกลบดิน จากผลการทดสอบพบว่าฟิล์มพอลิแลคติกแอซิดผสมน้ำมันมะพร้าว 1 %wt. มีผลการทดสอบสมบัติเชิงกลที่ดี คือ ค่าความสามารถในการยืดออก ณ จุดขาดมากถึง 40% เทียบกับฟิล์ม PLA ฟิล์มที่ทำการผสมน้ำมันมะพร้าวมีสมบัติเชิงกลที่ดีที่สุด ช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลโดยมีค่าความยืดหยุ่น ณ จุดขาดมากถึง 40%

จากการเตรียมฟิล์มพอลิแลคติกแอซิดผสมน้ำมันพืชสมุนไพร 4 ชนิดพบว่าฟิล์มพอลิแลคติกแอซิดผสมน้ำมันมะพร้าวที่ 1% w/w มีสมบัติทางกายภาพ การปลดปล่อยสารเคมีออกจากฟิล์มสมบัติเชิงกล ค่าความสามารถในการยืดออก ณ จุดขาด ที่ดีแต่ฟิล์มบางตามขนาดที่เตรียมได้เหล่านี้เกิดปัญหาฟิล์มติดกันทำให้ลอกออกจากกันได้ยาก ดังนั้นจึงทำการแก้ปัญหาเหล่านี้โดยการเติมสารเติมแต่ง คือ แป้งมันสำปะหลัง ทำการเตรียม PLA ผสมน้ำมันมะพร้าวที่ 1 %wt. และแป้งมันสำปะหลังในอัตราส่วน 0.5 และ 1% wt. ผสมด้วยเครื่องอัดรีดเกลียวหนอนคู่ เม็ดพอลิเมอร์คอมพาวด์ที่ได้ทำการศึกษาอัตราการไหลพบว่าเมื่อมีการผสมแป้งมันสำปะหลังลงไปมีค่าอัตราการไหลลดลง หลังจากนั้นนำเม็ดคอมพาวด์ที่ได้นำไปขึ้นรูปฟิล์มด้วยเครื่องเป่าฟิล์ม ฟิล์ม ความหนา 40-60 ไมครอน ที่ได้นำไปทดสอบสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค SEM พบว่าที่พื้นผิวของฟิล์มมีอนุภาคเล็กกระจายอยู่บนฟิล์มซึ่งคาดว่าเป็นแป้งมันสำปะหลังที่ทำการเติมลงไป ค่าการซึมผ่านของไอน้ำมีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนผลการศึกษาการปลดปล่อยสารเคมีออกจากฟิล์มตามมาตรฐาน Food Contact Plastics Regulation (EU) 10/2011 กับตัวแทนอาหาร 3 ชนิด ได้แก่ 10 % (v/v) Ethanol, Isooctane และ 3% (w/v) Acetic acid พบว่ามีค่าไม่เกิน 5% ซึ่งไม่เกินมาตรฐานกำหนดสามารถยอมรับได้ ผลการทดสอบสมบัติเชิงกล ค่าการทนต่อแรงดึง และค่ามอดูลัส มีแนวโน้มลดลง แต่ค่าความสามารถในการยืดออก ณ จุดขาด เพิ่มขึ้น สำหรับการวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันด้วย FT-IR ของฟิล์ม PLA ผสมน้ำมันพืชสมุนไพรที่เตรียมได้พบสัญญาณของแอลเคน (-CH-stretching) สัญญาณของหมู่คาร์บอนิล (-C=O) สัญญาณของหมู่เมทิล (-CH bending) และสัญญาณของ -C-O stretching ซึ่งสัญญาณของหมู่ต่างๆที่พบเหล่านี้สอดคล้องกับโครงสร้างของ PLA แสดงให้เห็นว่าปริมาณน้ำมันมะพร้าว และแป้งมันสำปะหลังที่เติมลงใน PLA มีปริมาณน้อยทำให้ไม่พบสัญญาณของสารเหล่านี้เมื่อทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังกลบดินพบว่าฟิล์มผสมแป้งมันสำปะหลังที่อัตราส่วน 0.5 และ 1 %wt. ตามลำดับ เริ่มเสถียรภาพและเกิดการย่อยสลายในเดือนที่ 3 คือ 0.48 1.37% ตามลำดับ และเกิดการย่อยสลายเพิ่มมากขึ้นตามระยะเวลาที่ฝังกลบดิน จากผลการทดสอบพบว่าฟิล์ม PLA ผสม

น้ำมันมะพร้าว 1 %wt. และแป้งมันสำปะหลัง 0.5 %wt. มีผลการทดสอบสมบัติเชิงกลที่ดี ค่าค่าความสามารถในการยืดออก ณ จุดขาด ซึ่งเหมาะสมสำหรับนำไปใช้งานในการลามิเนตกระดาษฟางข้าวเพื่อขึ้นรูปเป็นบรรจุภัณฑ์ ในขั้นสองของงานวิจัยนี้ทำการเตรียมกระดาษจากเยื่อกระดาษฟางข้าวเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของกระดาษฟางข้าว ทำการต้มเยื่อกระดาษฟางข้าวโดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ในการกำจัดลิกนิน และเอมิเซลลูโลสที่ความเข้มข้น 5 10 และ 15% กระดาษฟางข้าวที่ได้มีสีสว่างขึ้นเมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้น ค่าการดูดซึมน้ำที่เพิ่มขึ้น แต่สมบัติเชิงกล ค่าการทนต่อแรงดึง ค่าการยืดออก และค่ามอดูลัส มีแนวโน้มลดลงเมื่อความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้น จากการศึกษาพบว่าที่ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10% เยื่อที่ได้จะมีลักษณะละเอียดเหมาะสมในการนำไปพัฒนาเป็นกระดาษเพื่อลามิเนตด้วยฟิล์มพอลิแลคติกแอซิดมากกว่าเยื่อกระดาษที่ต้มด้วยความเข้มข้น 5% เพราะลักษณะเยื่อกระดาษที่ได้มีลักษณะหยาบและเส้นใยแข็งกว่า และ ในส่วนของเยื่อกระดาษที่ได้จากความเข้มข้น 15% เยื่อกระดาษที่ได้จะมีลักษณะละเอียดแต่เปื่อยยุ่ยมากกว่าจึงไม่เหมาะนำมาทำกระดาษ

จากผลการทดสอบพบว่าฟิล์มพอลิแลคติกแอซิดผสมน้ำมันมะพร้าว 1% และแป้งมันสำปะหลัง 0.5% มีผลการทดสอบสมบัติเชิงกลที่ดี และกระดาษฟางข้าวที่ความเข้มข้น 10% NaOH มีสมบัติที่เหมาะสม ดังนั้นจึงได้นำฟิล์มพอลิแลคติกแอซิดผสมน้ำมันมะพร้าว 1% และแป้งมันสำปะหลัง 0.5% ลามิเนตกระดาษฟางข้าวที่ความเข้มข้น 10% NaOH ทำการปรับปริมาณความชื้นของกระดาษในสภาวะความชื้นที่แตกต่างกัน 0 10 20 และ 30% OM ตามลำดับ เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการลามิเนต พบว่าที่สภาวะความชื้น 10% OM เป็นช่วงความชื้นที่เหมาะสมเมื่อทดสอบภาวะการเปียกโดยการวัดค่ามุมสัมผัสของพื้นผิวกระดาษลามิเนตด้วยฟิล์มมีค่ามุมสัมผัสอยู่ระหว่าง  $0-90^{\circ}$  ซึ่งมีสมบัติไม่ชอบน้ำ สามารถป้องกันการรั่วซึมของน้ำและน้ำมันได้ มีสมบัติเชิงกลที่ดี ค่าการทนต่อการฉีกขาด มีค่าใกล้เคียงกันในทุกสภาวะความชื้น ค่าความทนต่อการหลุดลอกมีแนวโน้มลดลงเมื่อทดสอบการหลุดลอกที่ความชื้น 10 % OM เป็นช่วงความชื้นของกระดาษฟางข้าวลามิเนตที่ทำให้ความสามารถในการยึดเกาะระหว่างเฟสของเส้นใยฟางข้าวและฟิล์มพอลิเมอร์ชีวภาพมีความแข็งแรงสูงกว่าที่ความชื้น 20 และ 30% OM ตามลำดับ

จากงานวิจัยนี้พบว่าฟิล์มพอลิแลคติกแอซิดผสมน้ำมันมะพร้าว 1% และแป้งมันสำปะหลัง 0.5% ลามิเนตกระดาษฟางข้าวที่ความเข้มข้น 10% NaOH ที่สภาวะความชื้น 10% OM มีผลการทดสอบภาวะการเปียกโดยการวัดค่ามุมสัมผัสของพื้นผิว ทดสอบสมบัติเชิงกล ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาด ค่าการหลุดลอกออกที่ดีเหมาะสมสำหรับนำไปพัฒนาและขึ้นรูปเป็นบรรจุภัณฑ์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพสำหรับบรรจุอาหาร ที่ไม่มีการรั่วซึมของน้ำและน้ำมัน สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

# บรรณานุกรม

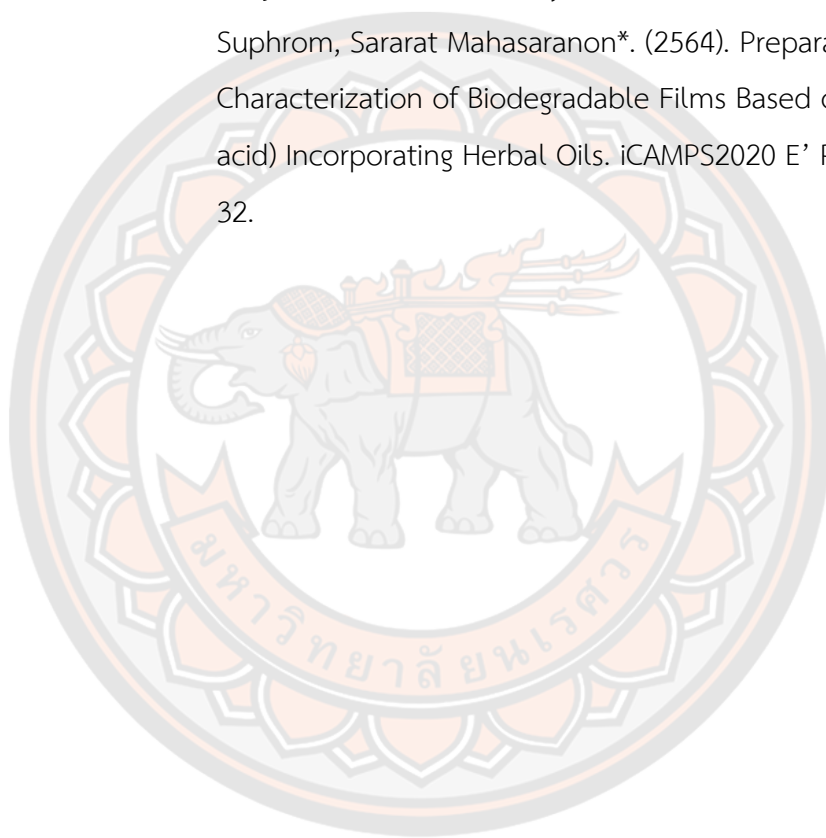






## ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-นามสกุล	นางสาวเบญจวรรณ ชันโท
วัน เดือน ปี เกิด	15 กรกฎาคม 2537
ที่อยู่ปัจจุบัน	1992 ม.1 ต.สลกบาตร อ.ชาณุวรลักษบุรี จ.กำแพงเพชร 62140
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2560 วท.บ (เคมี) มหาวิทยาลัยนเรศวร
ผลงานตีพิมพ์	Benjawan Khantho, Sukunya Ross, Gareth Ross, Nungruthai Suphrom, Sararat Mahasaranon*. (2564). Preparation and Characterization of Biodegradable Films Based on Poly(lactic acid) Incorporating Herbal Oils. iCAMPS2020 E' Proceedings. 27-32.



- Balart, J. F., Fombuena, V., Fenollar, O., Boronat, T., & Sánchez-Nacher, L. (2016). Processing and characterization of high environmental efficiency composites based on PLA and hazelnut shell flour (HSF) with biobased plasticizers derived from epoxidized linseed oil (ELO). *Composites Part B: Engineering*, 86, 168-177. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.09.063>
- Boonyaruthukalin, T., Wichiranon, S., & Polyium, U. (2010). The Development of rice paper straw products ; การพัฒนาผลิตภัณฑ์กระดาษจากฟางข้าว. In Thailand, Australia.
- Cholleti, E., & Gibson, I. (2018). ABS Nano Composite Materials in Additive Manufacturing. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 455, 012038. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/455/1/012038>
- Hammajam, A., El-Jummah, A., & Zahari, N. (2019). The Green Composites: Millet Husk Fiber (MHF) Filled Poly Lactic Acid (PLA) and Degradability Effects on Environment. *Open Journal of Composite Materials*, 09, 300-311. <https://doi.org/10.4236/ojcm.2019.93018>
- Kalaiselvi, A., Aswin Jenio, J. G., Roopan, S. M., Madhumitha, G., & Nakkeeran, E. (2019). Chemical composition of clove bud oil and development of clove bud oil loaded niosomes against three larvae species. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 137, 102-108. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2018.12.004>
- Lim, L. T., Auras, R., & Rubino, M. (2008). Processing technologies for poly(lactic acid). *Progress in Polymer Science*, 33(8), 820-852. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2008.05.004>
- Meckley, J. (2017). 2 - Plastic Film Production. In M. D. Orzolek (Ed.), *A Guide to the Manufacture, Performance, and Potential of Plastics in Agriculture* (pp. 21-43). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102170-5.00002-6>
- Mohammadi-Rovshandeh, J., Talebizadeh, A., & Rezayati Charani, P. (2005). Pulping of Rice Straw by High Boiling Solvents in Atmospheric Pressure. *Iranian Polymer Journal*, 14, 223-227.

- Orue, A., Eceiza, A., & Arbelaiz, A. (2018). Preparation and characterization of poly(lactic acid) plasticized with vegetable oils and reinforced with sisal fibers. *Industrial Crops and Products*, 112, 170-180.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.11.011>
- Polat, S., Fenercioğlu, H., & Güçlü, M. (2018). Effects of metal nanoparticles on the physical and migration properties of low density polyethylene films. *Journal of Food Engineering*, 229, 32-42.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.12.004>
- Qin, Y., Li, W., Liu, D., Yuan, M., & Li, L. (2017). Development of active packaging film made from poly (lactic acid) incorporated essential oil. *Progress in Organic Coatings*, 103, 76-82.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2016.10.017>
- Ramdhonee, A., & Jeetah, P. (2017). Production of wrapping paper from banana fibres. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 5(5), 4298-4306.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jece.2017.08.011>
- Silva Cde, B., Guterres, S. S., Weisheimer, V., & Schapoval, E. E. (2008). Antifungal activity of the lemongrass oil and citral against *Candida* spp. *Braz J Infect Dis*, 12(1), 63-66. <https://doi.org/10.1590/s1413-86702008000100014>
- Sing siang machinery. (2017). blow film extruder. In.
- Zaaba, N. (2020). A review on degradation mechanisms of polylactic acid: Hydrolytic, photodegradative, microbial, and enzymatic degradation. *Polymer Engineering & Science*, 60. <https://doi.org/10.1002/pen.25511>
- โสรญา สัมเขียวหวาน. (2557). ศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตกระดาษอย่างง่ายจากเปลือกกล้วยสดและจากผลผลิตเหลือทิ้งหลังการหมักเอทานอล มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์].  
<https://kb.psu.ac.th/psukb/bitstream/2010/9778/3/391207.pdf>
- ไทยเกษตรศาสตร์. (2018). ดอกและใบกานพลู. In.
- กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. (2562). รายงานสถานการณ์มลพิษของประเทศไทยปี 2562. Retrieved 1 มีนาคม 2562 from <https://www.pcd.go.th/publication/8013/>
- คณะแพทยศาสตร์โรงพยาบาลรามาธิบดี มหาวิทยาลัยมหิดล. สมุนไพร. Retrieved 1 มีนาคม 2562 from <https://www.rama.mahidol.ac.th/poisoncenter/th/pois-cov/Herbal>

ชยาภาส ทับทอง. (2549). กระดาษทำมือจากต้นกล้วย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ].

[http://thesis.swu.ac.th/swufac/Eng/Chayaphas\\_T\\_R354194.pdf](http://thesis.swu.ac.th/swufac/Eng/Chayaphas_T_R354194.pdf)

ดวงจันทร์ เสงส์สวัสดิ์. (2011). มะรุม <http://158.108.94.117/Public/PUB0693.pdf>

ธนาวดี ลีจากภัย. (2549). พลาสติกย่อยสลายได้เพื่อสิ่งแวดล้อม. ไทยเอฟเฟคท์สตูดิโอ, กรุงเทพฯ.

บงกช บุปผา. (2553). ต้นตะไคร้. In.

บริษัท ซี.ซี.ที กรุ๊ป (1997) จำกัด. (2559). กระบวนการอัดรีด *extrusion*. Retrieved 1 มีนาคม 2562 from

<https://www.cctgroup.co.th/%E0%B8%81%E0%B8%B2%E0%B8%A3%E0%B8%AD%E0%B8%B1%E0%B8%94%E0%B8%A3%E0%B8%B5%E0%B8%94%E0%B8%9E%E0%B8%A5%E0%B8%B2%E0%B8%AA%E0%B8%95%E0%B8%B4%E0%B8%81/>

ประวีรา โพธิ์สุวรรณ. (2561). รายงานการศึกษาภาวะเศรษฐกิจอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์. Retrieved 1 มีนาคม 2562 from

[https://www.oie.go.th/assets/portals/1/files/study\\_report/packaging\\_praveera.pdf](https://www.oie.go.th/assets/portals/1/files/study_report/packaging_praveera.pdf)

พลังเกษตร. (2018). มะรุม. In.

พินิจกานต์ อาริวงษ์ และ วรณิษา นาคแกมทอง. (2555). การผลิตเยื่อกระดาษจากฟางข้าวด้วยวิธีทางชีวภาพร่วมกับกรรมวิธีโซดา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี].

<http://www.research.rmutt.ac.th/wp-content/uploads/2014/03/127278.pdf>

รองศาสตราจารย์อรอุษา สราวาริ. (2546). สารเติมแต่งพอลิเมอร์. กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

วีระศักดิ์ อุดมกิจเดชา และปราณี รัตนวลิตโรจน์. (2010). อุตสาหกรรมสิ่งทอไทยกับกลยุทธ์ของการวิจัยและพัฒนา. In: สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2010-04-22T04:14:20Z 2010-04-22T04:14:20Z 2540.

ศิวฒ ไทยอุดม. (2563). ผลของน้ำมันมะพร้าวบริสุทธิ์ในการใช้เป็นสารทดแทนมันเนยต่อคุณภาพของไอศกรีมที่มีปริมาณน้ำตาลแล็กโทสต่ำ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

<http://sutir.sut.ac.th:8080/jspui/handle/123456789/8509>

ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (เอ็มเทค). วิทยาศาสตร์สิ่งทอ : เส้นใย. Retrieved 1 มีนาคม 2562 from <https://www.mtec.or.th/laboratory/textiles/knowlegde/18-fibers>

สถานวิจัยสมุนไพร และสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์. (2548). สมุนไพรป้องกันกำจัดแมลงทางการแพทย์ 2 น้ำมันหอมระเหย. สมุทรปราการ ; บริษัท ดีไซร์ จำกัด. Retrieved 1 มีนาคม 2562

from <http://e->

[library.dmsc.moph.go.th/ebooks/files/%E0%B8%AA%E0%B8%A1%E0%B8%B8%E0%B8%99%E0%B9%84%E0%B8%9E%E0%B8%A3%E0%B8%9B%E0%B9%89%E0%B8%AD%E0%B8%87%E0%B8%81%E0%B8%B1%E0%B8%99%E0%B8%81%E0%B8%B3%E0%B8%88%E0%B8%B1%E0%B8%94%E0%B9%81%E0%B8%A1%E0%B8%A5%E0%B8%87%E0%B8%97%E0%B8%B2%E0%B8%87%E0%B8%81%E0%B8%B2%E0%B8%A3%E0%B9%81%E0%B8%9E%E0%B8%97%E0%B8%A2%E0%B9%8C2.pdf](http://e-library.dmsc.moph.go.th/ebooks/files/%E0%B8%AA%E0%B8%A1%E0%B8%B8%E0%B8%99%E0%B9%84%E0%B8%9E%E0%B8%A3%E0%B8%9B%E0%B9%89%E0%B8%AD%E0%B8%87%E0%B8%81%E0%B8%B1%E0%B8%99%E0%B8%81%E0%B8%B3%E0%B8%88%E0%B8%B1%E0%B8%94%E0%B9%81%E0%B8%A1%E0%B8%A5%E0%B8%87%E0%B8%97%E0%B8%B2%E0%B8%87%E0%B8%81%E0%B8%B2%E0%B8%A3%E0%B9%81%E0%B8%9E%E0%B8%97%E0%B8%A2%E0%B9%8C2.pdf)

สถาบันปิโตรเลียมแห่งประเทศไทย. (2553a). การลามิเนตฟิล์มด้วยความร้อน. In.

สถาบันปิโตรเลียมแห่งประเทศไทย. (2553b). ฟิล์มลามิเนต. Retrieved 1 มีนาคม 2562 from

[http://saica.co.th/docs/film\\_knowledge.pdf](http://saica.co.th/docs/film_knowledge.pdf)

สุกัญญา รอส. (2561). วัสดุชีวภาพ = *Biomaterials*. พิษณุโลก : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยนเรศวร.

