

รายละเอียดโครงการการเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์

ปีการศึกษา 2561

ผลของสารเสริมสภาพพลาสติกที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมต่อสารเคลือบผิวสำหรับกระดาษ
(Effect of environmentally friendly plasticizer for paper coating)

นิสิตผู้รับผิดชอบโครงการ

นางสาวธนพร อุทัยน้อย 5832616023

นายณภัทร ดวงรัมย์ 5832611923

รายงานโครงการวิทยาศาสตร์นี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาบัณฑิต

ภาควิชาเทคโนโลยีทางภาพและการพิมพ์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2561

หัวข้องานวิจัย ผลของสารเสริมสภาพพลาสติกที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมต่อสารเคลือบผิวสำหรับกระดาษ

โดย นางสาวธนพร อุทัยน้อย

นายณภัทร ดวงรัมย์

สาขาวิชา เทคโนโลยีทางภาพและการพิมพ์

อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สิริวรรณ พัฒนาฤดี

ภาควิชาเทคโนโลยีทางภาพและการพิมพ์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รายงานโครงการ
วิทยาสตรฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีทางภาพและการ
พิมพ์

กสิณดา เกตุเมฆ

หัวหน้าภาควิชา

(รองศาสตราจารย์ ดร.พิชญดา เกตุเมฆ)

สิริวรรณ พัฒนาฤดี

อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สิริวรรณ พัฒนาฤดี)

ผู้ดำเนินงาน นางสาวธนพร อุทัยน้อย 5832616023

 นายณภัทร ดวงรัมย์ 5832611923

ชื่อเรื่อง ผลของสารเสริมสภาพพลาสติกที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมต่อสารเคลือบผิวสำหรับกระดาษ

อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ ผศ.ดร. สิริวรรณ พัฒนาฤดี

บทคัดย่อ

บรรจุภัณฑ์จากกระดาษเป็นที่นิยมมากขึ้น โดยมีปัจจัยทางด้านความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เพื่อเพิ่มสมบัติทางกายภาพของกระดาษ หรือเพิ่มความสามารถรองรับทางด้านกราฟิกให้ได้มากขึ้น เพื่อเพิ่มมูลค่าของงานบรรจุภัณฑ์ที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ดังนั้นโครงการนี้จึงได้ให้ความสนใจในด้านของการเคลือบกระดาษชนิดที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม โดยใช้พอลิเมอร์ชีวภาพที่สามารถสลายได้ชนิดพอลิแล็กติกแอซิด ผสมกับสารเสริมสภาพพลาสติกชนิดที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมที่เคลือบบนผิวกระดาษ โครงการนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของปริมาณสารเสริมสภาพพลาสติกที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมที่เหมาะสมสำหรับสารเคลือบผิวกระดาษจากพลาสติกชีวภาพ และศึกษาสมบัติทางกายภาพของกระดาษหลังการเคลือบผิว ได้แก่ ความต้านทานต่อแรงดึง เปอร์เซ็นต์ระเหยยึด สมบัติการทรงรูป สมบัติความต้านทานอากาศ สมบัติการเปียกผิว และสมบัติการยึดติดของหมึกพิมพ์เฟล็กโซกรานน้ำ จากผลการทดลองพบว่าเมื่อใส่ สารเสริมสภาพพลาสติกชนิดที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม จะทำให้สมบัติการทนต่อแรงดึง ความทรงรูปที่ดีขึ้น เมื่อเทียบกับสารเคลือบพอลิเมอร์ชีวภาพที่ไม่ผสมสารเสริมสภาพพลาสติก และกระดาษไม่เคลือบผิวและระดับการยึดติดของหมึกพิมพ์มีระดับค่อนข้างดีมา

คำสำคัญ : พลาสติกชีวภาพ, สารเสริมสภาพพลาสติก, พอลิแล็กติกแอซิด, สารเคลือบผิว

ภาควิชาเทคโนโลยีทางภาพและการพิมพ์

ลายมือชื่อนิสิต..... ณัฏพร อุทัยน้อย

ปีการศึกษา 2561

ลายมือชื่อนิสิต..... พชภัทร ดวงรัมย์

ลายมือชื่ออาจารย์..... สิริวรรณ พัฒนาฤดี

Student name Thanaporn Uthainoy 5832616023

 Napat Duangratsamee 5832611923

Project Effect of environmentally friendly plasticizer for paper coating

Project Advisor Siriwan Phattananarudee, Assistant Professor, Ph.D.

Abstract

Paper packaging has gained more attention. To increase value of environmentally friendly packaging, it requires good physical properties and improved printability. Therefore, this project has paid attention in the field of environmentally friendly paper coatings, by using biodegradable polymer, polylactic acid, mixed with environmentally friendly plasticizer. This project focused on the effect of plasticizer concentrations on coated papers. Physical properties, i.e. tensile strength, elongation, stiffness, air resistance, wetting and ink adhesion of the coated papers were also investigated. It was found that by adding the plasticizer, the physical properties were improved compared with uncoated and unplasticizer coated papers. Ink adhesion by tape test indicated good level of adhesion between printing ink and plasticized coating on paper.

Key words: biodegradable, polylactic acid, plasticizer, coating

Department of Imaging

and Printing Technology

Academic year 2018

Student signature.....*Thanaporn Uthainoy*.....

Student signature.....*Napat Duangratsamee*.....

Project Advisor signature.....*Sirinam Phattananarudee*.....

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดีและสำเร็จลุล่วงเป็นไปตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ ด้วยความช่วยเหลือของผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สิริวรรณ พัฒนาฤดี อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการวิจัย ซึ่งท่านได้ให้ความรู้ คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่าง ๆ อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการทำวิจัย อีกทั้งยังช่วยแก้ปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างการดำเนินงานอีกด้วย

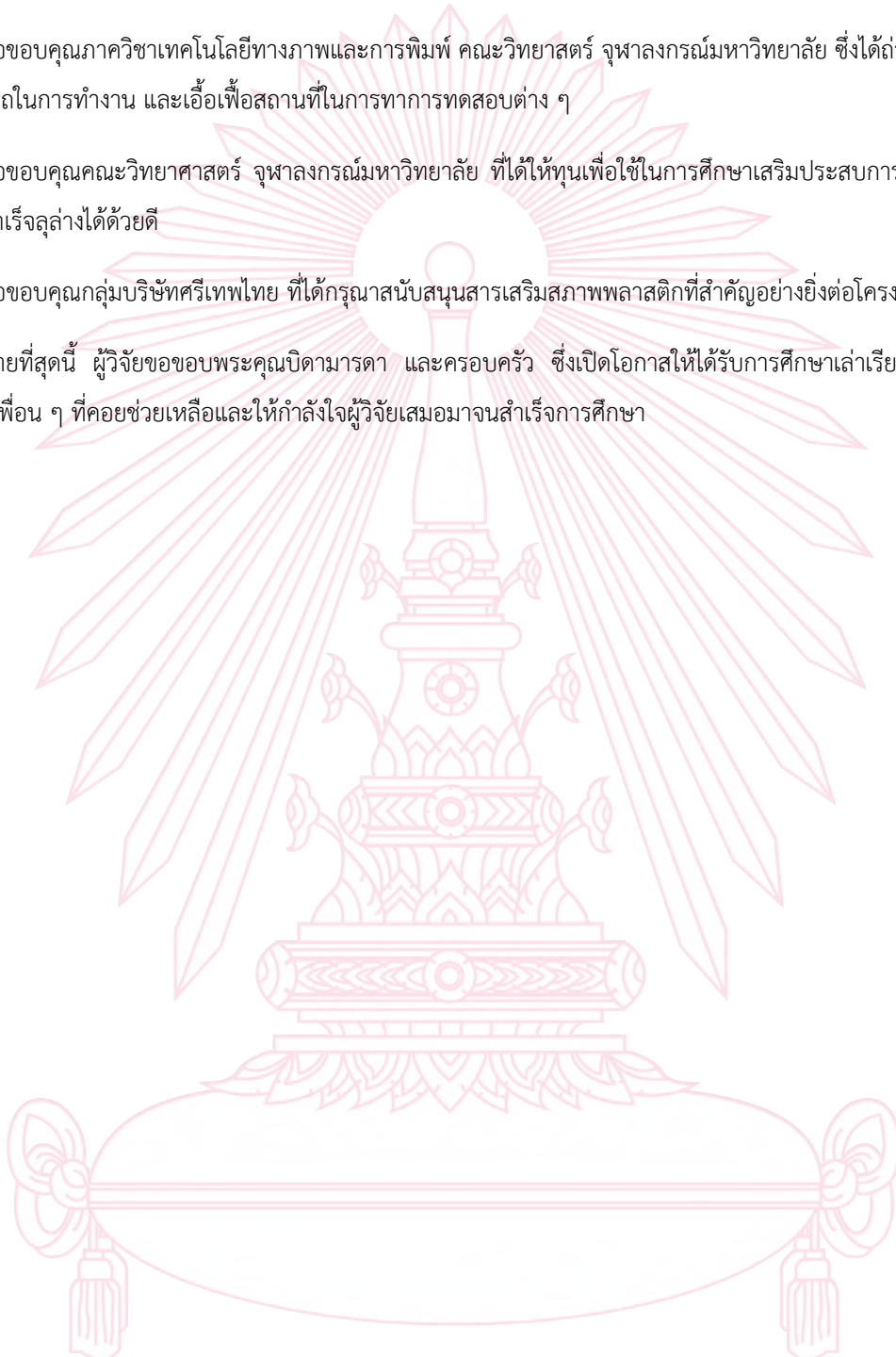
ขอขอบคุณภาควิชาเทคโนโลยีทางภาพและการพิมพ์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งได้ถ่ายทอดความรู้ความสามารถในการทำงาน และเอื้อเฟื้อสถานที่ในการทำการทดสอบต่าง ๆ

ขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้ทุนเพื่อใช้ในการศึกษาเสริมประสบการณ์ครั้งนี้ จนกระทั่งสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

ขอขอบคุณกลุ่มบริษัทศรีเทพไทย ที่ได้กรุณาสนับสนุนสารเสริมสภาพพลาสติกที่สำคัญอย่างยิ่งต่อโครงการวิจัยนี้

ท้ายที่สุดนี้ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบิดามารดา และครอบครัว ซึ่งเปิดโอกาสให้ได้รับการศึกษาเล่าเรียน นอกจากนี้ขอขอบคุณเพื่อน ๆ ที่คอยช่วยเหลือและให้กำลังใจผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

คณะผู้จัดทำ



สารบัญ

| | หน้า |
|---|-----------|
| บทคัดย่อ | I |
| ABSTRACT | II |
| กิตติกรรมประกาศ | III |
| สารบัญ | IV |
| สารบัญภาพ | VI |
| สารบัญตาราง | VII |
| บทที่ 1 บทนำ | 1 |
| 1.1 ความเป็นมาและมูลเหตุจูงใจในการเสนอโครงการ | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ | 1 |
| 1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ | 1 |
| บทที่ 2 ทฤษฎี | 3 |
| 2.1 สารเสริมสภาพพลาสติก | 3 |
| 2.2 พอลิเมอร์ที่ถูกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ | 5 |
| 2.3 วัสดุสารเคลือบที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมที่มาจากน้ำมันพืชที่ได้จากธรรมชาติ | 6 |
| 2.4 บรรจุภัณฑ์กระดาษชานอ้อย | 7 |
| 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง | 8 |
| บทที่ 3 การทดลอง | 13 |
| 3.1 วัสดุอุปกรณ์ | 13 |
| 3.2 วิธีการทดลอง | 14 |
| บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล | 18 |
| 4.1 นำหนักสารเคลือบผิวกระดาษหลังการเคลือบผิว | 18 |
| 4.2 สมบัติความต้านทานต่อแรงดึง | 18 |
| 4.3 เปอร์เซ็นต์ระเหยยึด | 20 |
| 4.4 สมบัติความทรงรูป | 21 |
| 4.5 สมบัติการเปียกผิว | 22 |
| 4.6 สมบัติความต้านทานอากาศ | 22 |
| 4.7 ความสามารถในการยึดติดของหมึกพิมพ์ | 24 |
| บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ | 27 |

| | | |
|-----|----------------|----|
| 5.1 | สรุปผลการทดลอง | 29 |
| 5.2 | ข้อเสนอแนะ | 29 |
| | เอกสารอ้างอิง | 30 |
| | ภาคผนวก | 31 |

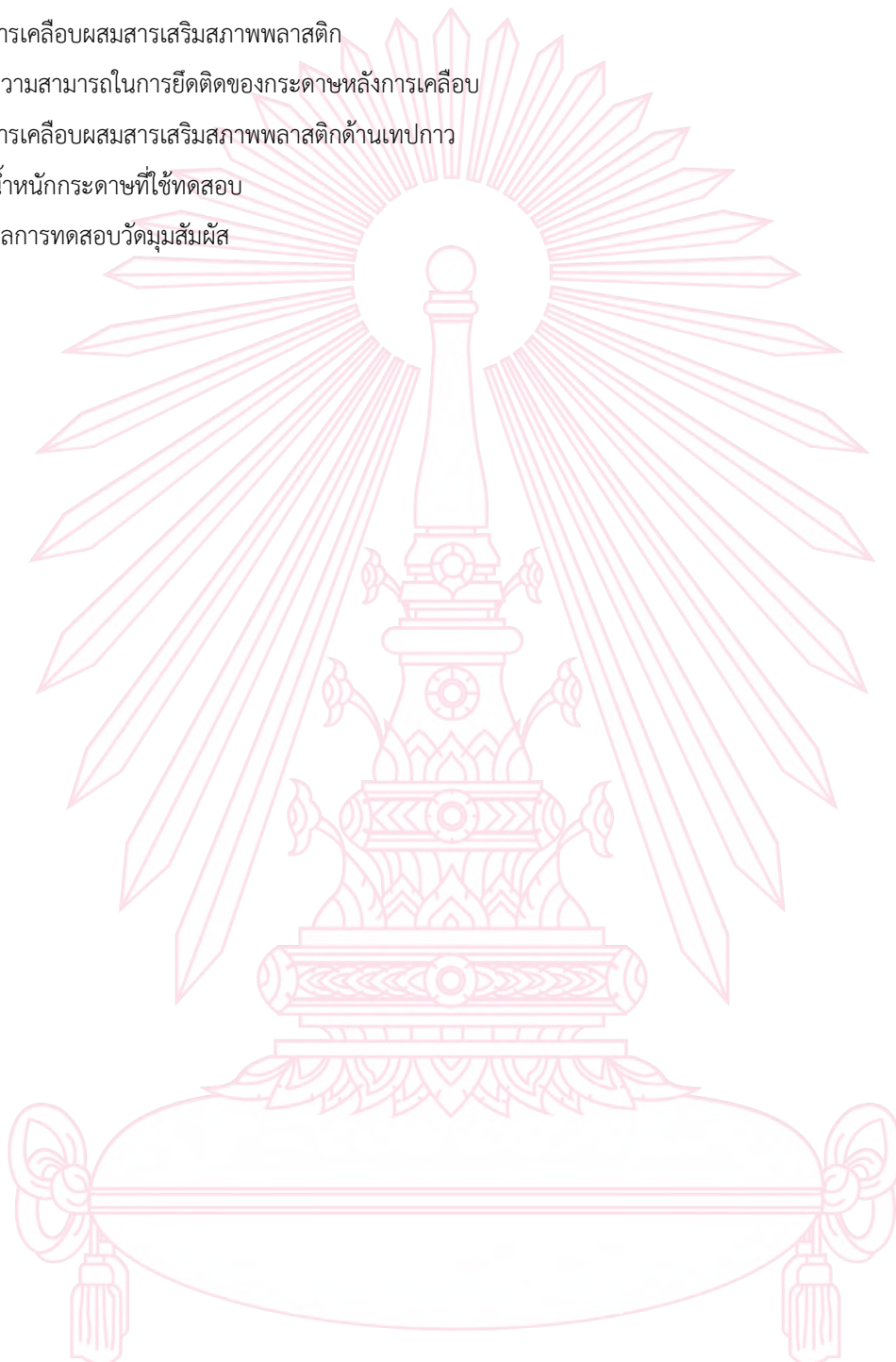


สารบัญภาพ

| | |
|---|----|
| ภาพที่ 1 โครงสร้างน้ำมันถั่วเหลือง | 3 |
| ภาพที่ 2 โครงสร้างน้ำมันละหุ่ง | 3 |
| ภาพที่ 3 โครงสร้างน้ำมันลินสีด | 4 |
| ภาพที่ 4 โครงสร้างน้ำมันถั่วเหลืองอีพอกซีไซด์ | 4 |
| ภาพที่ 5 บรรจุภัณฑ์จากเยื่อชานอ้อย | 7 |
| ภาพที่ 6 โครงสร้างของ EPO, EPSO และ PLA | 8 |
| ภาพที่ 7 ค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงของ PLA/EPO และ PLA/EPSO | 9 |
| ภาพที่ 8 เปอร์เซ็นต์ระยะยึด ณ จุดขาด ของ PLA/EPO และ PLA/EPSO | 9 |
| ภาพที่ 9 SEM MICROGRAPH ของ (A) PLA (B) PLA/EPO (C) PLA/EPSO | 10 |
| ภาพที่ 10 อันตรกิริยา ระหว่างน้ำมันปาล์มอีพอกซีไคซ์ กับพอลิแล็กติกแอซิด | 11 |
| ภาพที่ 11 ค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงของ PLA/EPO | 11 |
| ภาพที่ 12 เปอร์เซ็นต์ระยะยึด ณ จุดขาด ของ PLA/EPO | 12 |
| ภาพที่ 13 ค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงของ PLA/ESO | 12 |
| ภาพที่ 14 การจำแนกการหลุดลอกของสารเคลือบ | 17 |
| ภาพที่ 15 ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงของกระดาษ ก่อนและหลังการเคลือบด้วยสารเคลือบผสมสารเสริมสภาพพลาสติก | 19 |
| ภาพที่ 16 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ระยะยึดของกระดาษ ก่อนและหลังการเคลือบด้วยสารเคลือบผสมสารเสริมสภาพพลาสติก | 20 |
| ภาพที่ 17 ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติความทรงรูปของกระดาษ ก่อนและหลังการเคลือบด้วยสารเคลือบผสมสารเสริมสภาพพลาสติก | 21 |
| ภาพที่ 18 ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติความต้านทานอากาศ ของกระดาษ ก่อนและหลังการเคลือบด้วยสารเคลือบผสมสารเสริมสภาพพลาสติก | 22 |
| ภาพที่ 19 ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติการเปียกผิวของกระดาษ ก่อนและหลังการเคลือบด้วยสารเคลือบผสมสารเสริมสภาพพลาสติก | 23 |

สารบัญตาราง

| | |
|---|----|
| ตารางที่ 1 ค่าเฟกเตอร์ที่ใช้สำหรับวัดความต้านทานการไหลของอากาศต่อ 100 มิลลิลิตร | 16 |
| ตารางที่ 2 น้ำหนักสารเคลือบผิวกระดาษ | 18 |
| ตารางที่ 3 ความสามารถในการยึดติดของกระดาษก่อนและหลังการเคลือบ ด้วยสารเคลือบผสมสารเสริมสภาพพลาสติก | 24 |
| ตารางที่ 4 ความสามารถในการยึดติดของกระดาษหลังการเคลือบ ด้วยสารเคลือบผสมสารเสริมสภาพพลาสติกด้านเทปกาว | 27 |
| ตารางที่ 5 น้ำหนักกระดาษที่ใช้ทดสอบ | 31 |
| ตารางที่ 6 ผลการทดสอบวัดมุมสัมผัส | 32 |



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและมูลเหตุจูงใจในการเสนอโครงการ

ปัจจุบันกระดาษเป็นวัสดุที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายในการทำบรรจุภัณฑ์ แต่โครงสร้างภายในของกระดาษมีสมบัติบางประการที่จำเป็นต้องมีการปรับปรุง รวมทั้งการอนุรักษ์ธรรมชาติมีมากขึ้น จึงได้นำแนวคิดทั้ง 2 แนวคิดนี้มาประยุกต์ร่วมกันเพื่อปรับปรุงสมบัติของกระดาษให้เหมาะสม สำหรับการใช้งานเป็นบรรจุภัณฑ์ ดังนั้น โครงการวิจัยนี้จึงศึกษาการประยุกต์ใช้งานพอลิเมอร์ชีวภาพที่สามารถสลายได้ชนิดพอลิแล็กติกแอซิด poly(lactic acid) นำมาเคลือบผิวกระดาษ แต่ด้วยพอลิเมอร์ชนิดนี้มีลักษณะแข็งเปราะ ดังนั้นโครงการนี้จึงมีความสนใจเตรียมสารเคลือบผิวผสมระหว่าง พอลิแล็กติกแอซิด และสารเสริมสภาพพลาสติกที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ซึ่งเป็นสารที่ปรับปรุงสมบัติความยืดหยุ่นให้กับพอลิเมอร์ และเป็นสารที่มีความปลอดภัยและสามารถประยุกต์ใช้งานสำหรับบรรจุภัณฑ์อาหารได้

Al-Mulla และคณะ [1] ศึกษาใช้สารเสริมสภาพพลาสติกชนิดเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม คือ epoxidized palm oil (EPO) ร่วมกับพอลิแล็กติกแอซิด มีการตรวจวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของสารเสริมสภาพพลาสติกกับพอลิแล็กติกแอซิดพบว่า มีพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของสารทั้งสองชนิด และพบว่า การเติม EPO ช่วยปรับปรุงความยืดหยุ่นของพอลิแล็กติกแอซิดให้ดียิ่งขึ้น และจากการทดสอบสมบัติการทนต่อแรงดึง พบว่าการใช้พอลิแล็กติกแอซิดเพียงอย่างเดียวมีเปอร์เซ็นต์ระยะยืด ณ จุดขาด (%elongation) ที่ 43% เมื่อเติมสารเสริมสภาพพลาสติกส่งผลให้ฟิล์มมีระยะยืด ณ จุดขาด เพิ่มขึ้นเป็น 210%

Chiang และคณะ [2] ศึกษา epoxidized vegetable oil (EVO) โดยใช้เป็นสารเสริมสภาพพลาสติกสำหรับพอลิแล็กติกแอซิด ผลการวิจัยนี้พบว่า EVO สามารถใช้เป็นสารเสริมสภาพพลาสติกสำหรับพอลิแล็กติกแอซิดได้ โดยช่วยให้มีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น ได้แก่ ความแข็งแรงต่อแรงดึง, เปอร์เซ็นต์ระยะยืด ณ จุดขาด และความเข้ากันได้ของสาร นอกจากนี้การใช้พอลิแล็กติกแอซิดร่วมกับ EVO ยังเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมอีกด้วยเนื่องจากสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

1.2 วัตถุประสงค์

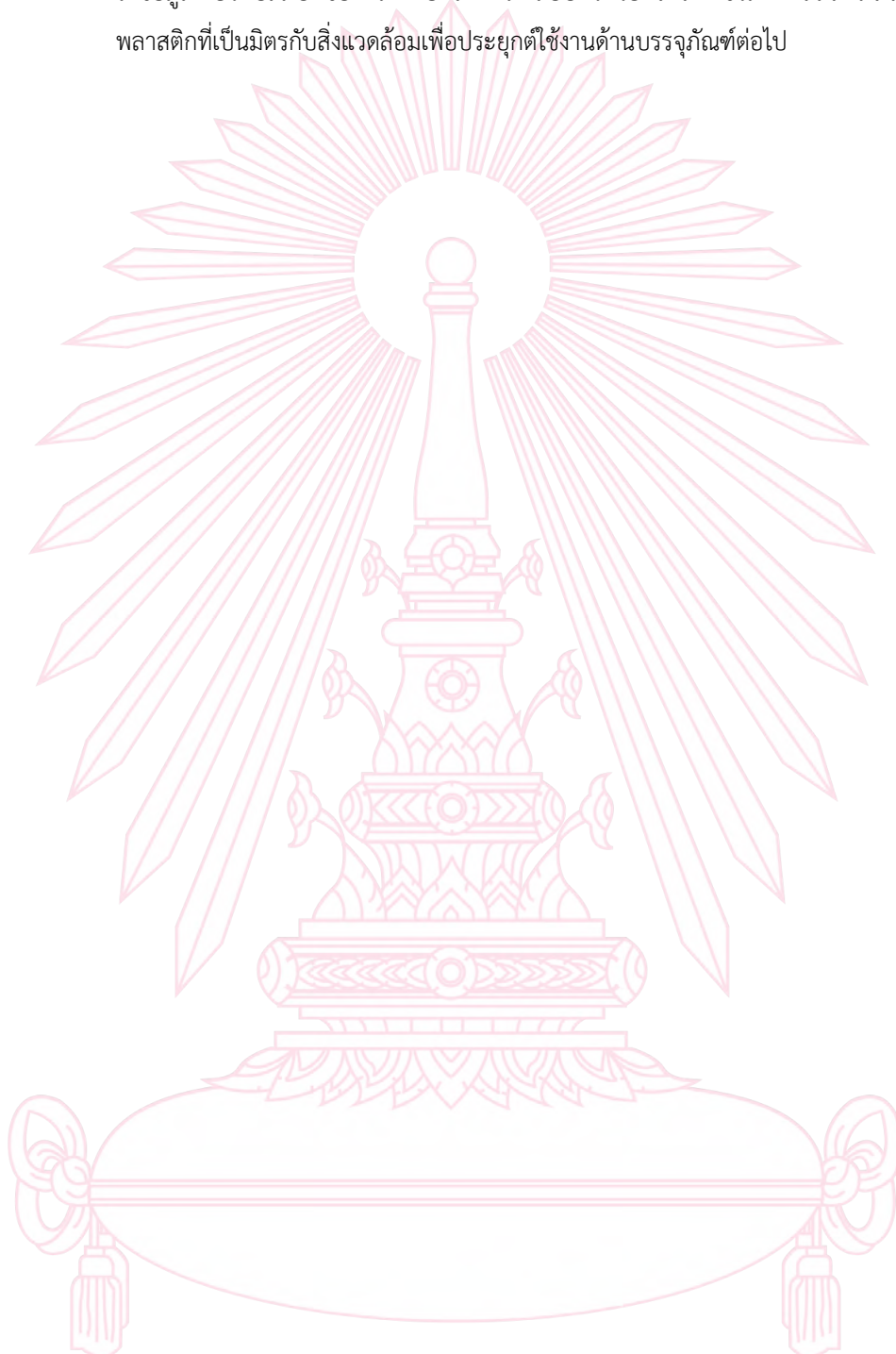
- 1.2.1 ศึกษาผลของปริมาณสารเสริมสภาพพลาสติกที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ที่เหมาะสมสำหรับสารเคลือบผิวกระดาษจากพลาสติกชีวภาพ
- 1.2.2 ศึกษาสมบัติทางกายภาพของกระดาษหลังการเคลือบผิว ได้แก่ ความต้านทานต่อแรงดึง สมบัติความทรงรูป สมบัติต้านทานอากาศ สมบัติการเปียกผิว และสมบัติการยึดติดของหมึกพิมพ์ฐานน้ำ

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.3.1 ในด้านความรู้และประสบการณ์ต่อตัวนิสิตเอง
 1. ได้ความรู้วิธีการเตรียมสารเคลือบผิวและเทคนิคในการเคลือบผิวกระดาษ
 2. เรียนรู้วิธีการทดสอบสมบัติกระดาษ
 3. นำความรู้ไปประยุกต์ใช้หรือแก้ปัญหาในงานที่ทำในอนาคตได้

1.3.2 ความรู้ ความเข้าใจที่นำไปสู่การแก้ไขปัญหของสังคมหรือสภาพแวดล้อม

1. ได้อัตราส่วนผสมระหว่างพอลิแล็กติกแอซิดผสมสารเสริมสภาพพลาสติกที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมที่เหมาะสม
2. ได้ข้อมูลเกี่ยวกับสมบัติของกระดาษหลังการเคลือบผิวด้วยพลาสติกชีวภาพผสมสารเสริมสภาพพลาสติกที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมเพื่อประยุกต์ใช้งานด้านบรรจุภัณฑ์ต่อไป



บทที่ 2

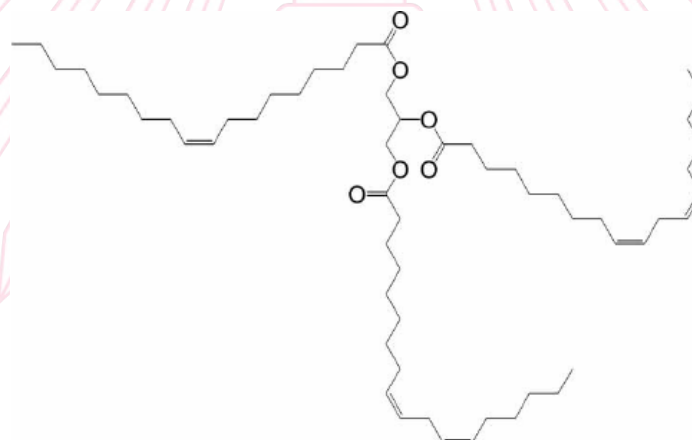
ทฤษฎี

2.1 สารเสริมสภาพพลาสติก (plasticizer)

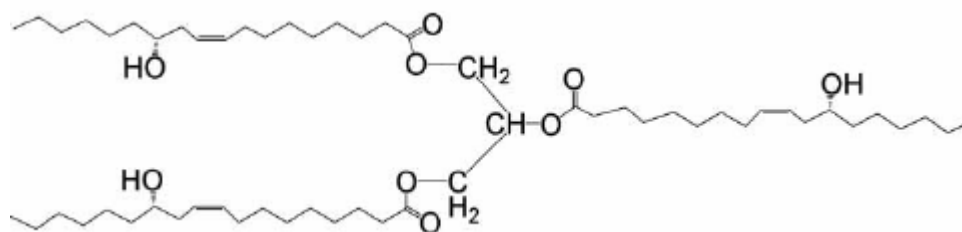
สารเสริมสภาพพลาสติก (plasticizer) เป็นกลุ่มของสารประกอบที่ไม่ระเหย ซึ่งมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ นิยมใช้เป็นสารเติมแต่ง (additives) ในอุตสาหกรรมพอลิเมอร์ บทบาทหลักของสารเสริมสภาพพลาสติก คือ การปรับปรุงความยืดหยุ่น และการขึ้นรูปของพอลิเมอร์

IUPAC ได้ให้คำจำกัดความสารเสริมสภาพพลาสติก (plasticizer) ว่าเป็น “สารหรือวัสดุที่รวมอยู่ในวัสดุ (มักเป็นพลาสติกหรือ elastomer) เพื่อเพิ่มความยืดหยุ่น และความสามารถในการยืดตัวได้” สารเหล่านี้ช่วยลดการเปลี่ยนรูป, ความแข็ง, ความหนาแน่น, ความหนืด, และประจุไฟฟ้าสถิตของพอลิเมอร์ นอกจากนี้ยังเพิ่มความยืดหยุ่นของชิ้นงาน, ความต้านทานต่อการแตกหัก, และความเป็นฉนวนอีกด้วย

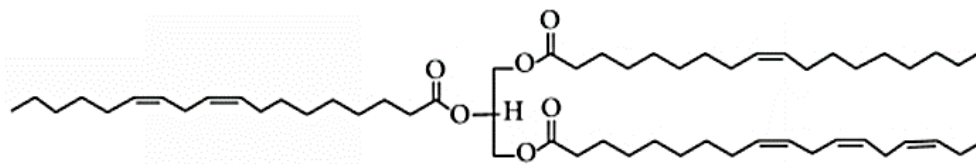
ปัจจุบันสารเสริมสภาพพลาสติกจากธรรมชาติได้รับความสนใจเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากมีความเป็นพิษต่ำ และการเคลื่อนตัวของสาร (migration) ต่ำ สารในกลุ่มนี้ประกอบไปด้วย epoxidized triglyceride vegetable oils จาก น้ำมันถั่วเหลือง (soybean oil), น้ำมันลินสีด (linseed oil), น้ำมันละหุ่ง (castor-oil), น้ำมันดอกทานตะวัน (sunflower oil), และ เอสเทอร์ของกรดไขมัน (fatty acid esters, (FAEs)) [3]



ภาพที่ 1 โครงสร้างน้ำมันถั่วเหลือง (soybean oil) [4]

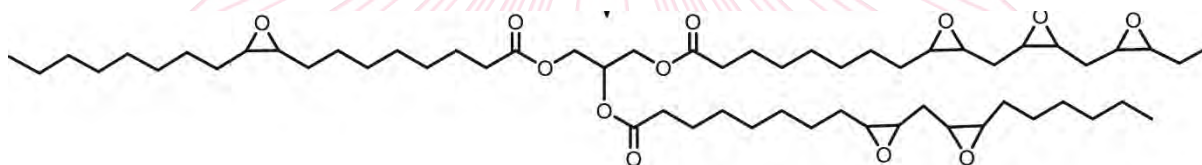


ภาพที่ 2 โครงสร้างน้ำมันละหุ่ง (castor-oil) [4]



ภาพที่ 3 โครงสร้างน้ำมันลินสีด (linseed oil) [5]

Epoxidized soybean oil (ESO) เป็นพลาสติกไซเซอร์ (plasticizers) ที่เติมลงไปในการผลิตพลาสติก โดยเข้าไปแทรกตัวระหว่างโมเลกุลพอลิเมอร์ จึงทำให้มีความยืดหยุ่นและอ่อนนุ่ม โดยสาร ESO ซึ่งสามารถนำไปใช้ในบรรจุภัณฑ์อาหาร เพื่อเป็นวัสดุที่สัมผัสอาหาร (food contact surface) เช่น นำไปใช้กับฝาปะก้น เพื่อทำให้การปิดฝาแน่นสนิทยิ่งขึ้น ไม่ให้อากาศผ่านเข้าไปสัมผัสอาหารเกิดปฏิกิริยาที่ทำให้อาหารเสื่อมเสีย เช่น การเกิดออกซิเดชันของลิพิด (lipid oxidation) และป้องกันการเจริญของจุลินทรีย์



ภาพที่ 4 โครงสร้างน้ำมันถั่วเหลืองอีพอกไซด์ (epoxidized soybean oil) [6]

2.2 พอลิเมอร์ที่ถูกละลายได้ทางชีวภาพ (biodegradable polymers)

พลาสติกที่ถูกละลายได้ทางชีวภาพที่มีคุณสมบัติแตกต่างไปจากพลาสติกสังเคราะห์ทั่วไป ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อลดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมทางด้านการสะสมของขยะพลาสติก หรือมลพิษทางอากาศจากการเผาเพื่อกำจัดขยะพลาสติก โดยพลาสติกชีวภาพ หรือ พลาสติกที่ถูกละลายได้ทางชีวภาพมีแนวโน้มการใช้งานเพิ่มมากขึ้น ทำให้บริษัทต่าง ๆ ทำการผลิตพลาสติกย่อยสลายได้ที่มีสมบัติที่หลากหลายแตกต่างกัน บางครั้งผลิตภัณฑ์เหล่านี้ไม่เกิดการย่อยสลายผ่านกระบวนการทางชีวภาพอย่างแท้จริง เพื่อควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ดังกล่าว ปัจจุบันจึงมีหลายองค์กรทั่วโลกได้ดำเนินการจัดทำมาตรฐานผลิตภัณฑ์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (biodegradable Plastics) ขึ้น และให้คำจำกัดความของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพซึ่งมีความแตกต่างกันเล็กน้อยไว้ ดังนี้ [7]

มาตรฐาน ASTM D20-96 พลาสติกที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ คือ พลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ซึ่งเป็นการย่อยสลายที่เป็นผลมาจากการกระทำของจุลินทรีย์ที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติเช่น แบคทีเรีย ราและสาหร่าย

มาตรฐาน ISO 472 : 1998 พลาสติกที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ คือ พลาสติกที่ถูกออกแบบมาให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีภายใต้สภาวะแวดล้อมที่กำหนดไว้โดยเฉพาะ เป็นสาเหตุทำให้สมบัติต่าง ๆ ของพลาสติกลดลงภายในช่วงเวลาหนึ่งซึ่งสามารถวัดได้โดยใช้วิธีทดสอบมาตรฐานที่เหมาะสมกับชนิดของพลาสติกและการใช้งาน ผลการทดสอบสามารถนำมาใช้เป็นเกณฑ์ในการจำแนกประเภทของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ โดยการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีดังกล่าวต้องเกิดจากการทำงานของจุลินทรีย์ในธรรมชาติเท่านั้น

มาตรฐาน BPS Japan (1994) พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ คือ วัสดุพอลิเมอร์ที่สามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นสารประกอบที่มีน้ำหนักโมเลกุลลดต่ำลงได้ โดยมีอย่างน้อย 1 ขั้นตอนในกระบวนการย่อยสลายนี้เกิดผ่านกระบวนการเมทาบอลิซึมของจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในธรรมชาติ

มาตรฐาน DIN FNK103.2 (1993) วัสดุพลาสติกจะได้อธิบายว่าเป็นพลาสติกที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ก็ต่อเมื่อสารประกอบอินทรีย์ทั้งหมดถูกย่อยสลายอย่างสมบูรณ์โดยจุลินทรีย์ ที่มีอยู่ในสภาพแวดล้อม และมีอัตราการย่อยสลายอยู่ภายใต้ข้อกำหนดในการทดสอบตามมาตรฐาน

มาตรฐาน วัสดุย่อยสลายได้ คือ วัสดุที่การย่อยสลายเป็นผลมาจากการทำงานของจุลินทรีย์ทำให้วัสดุเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นน้ำ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และ/ หรือ แก๊สมีเทน และมวลชีวภาพใหม่ เป็นผลิตภัณฑ์ในขั้นตอนสุดท้าย

พอลิเมอร์ที่ถูกละลายได้ทางชีวภาพถูกจำแนกออกเป็น 4 ประเภทโดยใช้หลักเกณฑ์การจำแนกจากกระบวนการสังเคราะห์และแหล่งของวัตถุดิบที่นำมาใช้ในกระบวนการผลิตที่แตกต่างกัน ดังนี้ [8]

2.2.1 พอลิเมอร์ที่ได้มาจากวัตถุดิบที่เป็นมวลชีวภาพ (biomass) ได้แก่ วัตถุดิบที่เป็นพอลิแซคคาไรด์ ที่ได้จากแป้ง ข้าวสาลี แป้งมันฝรั่ง แป้งข้าวโพด หรือ วัตถุดิบที่เป็นผลิตภัณฑ์ลิกโนเซลลูโลส เช่น ฟาง ไม้ เป็นต้น นอกจากนั้นยังรวมไปถึงวัตถุดิบในกลุ่มของไคโตซานและไคติน ซึ่งเมื่อนำมาละลายในกรดอินทรีย์จะมีลักษณะเป็นสารละลายเหนียวใสคล้ายวุ้น และสามารถนำมาขึ้นรูปเป็นพลาสติกได้ หรือวัตถุดิบในกลุ่มคอลลาเจนและเจลาตินที่สกัดได้จากโปรตีนพืชและสัตว์ก็สามารถนำมาขึ้นรูปเป็นพลาสติกได้เช่นกัน

2.2.2 พอลิเมอร์ที่ได้มาจากการผลิตจากจุลินทรีย์ ได้แก่โพลิเมอร์ในกลุ่ม PHAs เช่น poly(hydroxybutyrate) (PHB) และ poly(hydroxybutyrate-co-hydroxyvalerate) (PHBV) เป็นต้น

2.2.3 พอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ขึ้นจากกระบวนการทางเคมี ที่ใช้วัตถุดิบที่เป็นมอนอเมอร์ที่ได้จากผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร เช่น ข้าวโพด มันสำปะหลัง อ้อย เป็นต้น โดยเมื่อผ่านกระบวนการทางเทคโนโลยีชีวภาพแล้วจะเปลี่ยนแปลงที่ได้จากวัตถุดิบ ไปเป็นน้ำตาลและเปลี่ยนน้ำตาลไปเป็นมอนอเมอร์ซึ่งก็คือ กรดแล็กติก (Lactic acid) และนำกรดแล็กติกที่ได้มาต่อเชื่อม เป็นพอลิเมอร์สายยาว ซึ่งพอลิเมอร์ประเภทนี้คือ poly(lactic acid) (PLA)

2.2.4 พอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ขึ้นจากมอนอเมอร์หรือพอลิเมอร์จากอุตสาหกรรมปิโตรเคมี ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มหลักคือ กลุ่มที่มีโครงสร้างเป็นโซ่สายตรง เช่น poly(butylene succinate) (PBS) ที่ได้จากมอนอเมอร์คือกรดซัคซินิกและ 1,4 - บิวเทนไดออล และ กลุ่มที่มีโครงสร้างเป็นวงอะโรมาติก เช่น poly(butylene adipate/terephthalate) (PBAT) เป็นต้น

2.3 วัสดุสารเคลือบที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมที่มาจากน้ำมันพืชที่ได้จากธรรมชาติ

2.3.1 อัลคิิด (alkyds)

อัลคิิด (alkyds) เป็นพอลิเอสเทอร์ที่ตัดแปรจากน้ำมันซึ่งประกอบด้วย polyol (โดยปกติคือ glycerol, trimethylolpropane หรือ pentaerythritol), multi-functional acid (กรด phthalic หรือ trimellitic) และกรดไขมันไม่อิ่มตัวที่เกิดจากปฏิกิริยา polycondensation โดยอัลคิิดมีหน้าที่เป็นสารยึดเกาะในการเคลือบพื้นผิว [9]

2.3.2 พอลิเอสเทอร์เอไมด์ (polyesteramides, (PEA))

พอลิเอสเทอร์เอไมด์ (polyesteramides, (PEA)) เป็นอัลคิิดที่ตัดแปรจากเอไมด์ ได้จากปฏิกิริยา esterification ระหว่าง vegetable oil amide diol กับกรดพอลิเอสเทอร์เอไมด์มีหน่วยเอสเทอร์และเอไมด์ซ้ำ ในโครงสร้างหลัก มีสมบัติที่ดีขึ้นมากกว่าอัลคิิด เช่น ความแข็ง, แห้งตัวได้เร็ว, ความต้านทานต่อไอน้ำ, และ ความต้านทานต่อสารเคมี

2.3.3 อีพ็อกซี (epoxies)

การใช้อีพ็อกซีในการเคลือบผิวอาจช่วยลดการใช้สารเคมีจากปิโตรเลียมและอาจลดค่าใช้จ่ายได้ โดยไม่กระทบต่อสมรรถนะและอายุการใช้งานของสารเคลือบ กรดไขมันอีพ็อกซีไดซ์นิยมนำมาใช้ในงาน ทาสีและเคลือบผิวฟิล์มที่ได้จากการผสมของอีพ็อกซีกับพอลิไวนิลคลอไรด์และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ แสดงให้เห็นว่าฟิล์มสามารถย่อยสลายทางชีวภาพและอาจประยุกต์ใช้ในบรรจุภัณฑ์อาหาร มีการนำอีพ็อกซีมาผสมกับพอลิเมทิลเมทาคริเลตและพอลิสไตรีนใช้เป็นสารป้องกันการกัดกร่อนอีกด้วย

2.4 บรรจุภัณฑ์กระดาษชานอ้อย

ชานอ้อยเป็นผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมน้ำตาลและเป็นวัตถุดิบในการผลิตกระดาษอีกชนิดหนึ่ง เยื่อจากชานอ้อยเป็นเยื่อพีชธรรมชาติที่สามารถย่อยสลายแบบชีวภาพ กลับคืนสู่ธรรมชาติได้ 100% ภายใน 6 สัปดาห์ โดยกระบวนการเริ่มจากโรงงานน้ำตาลผลิตน้ำตาลและเหลือเป็นชานอ้อยออกมา หลังจากนั้นมีการนำชานอ้อยมาแปรรูปเป็นเยื่อชานอ้อย โดยการนำชานอ้อยที่รีตน้ำออกหมดแล้ว มาตีกระจายให้กลายเป็นเส้นใย เพื่อเข้าสู่กระบวนการทำเป็นแผ่นกระดาษ แต่ถ้าจะทำให้บรรจุภัณฑ์สีขาวสะอาด ก็เพียงนำเส้นใยมาฟอกสีตามมาตรฐานความปลอดภัยด้านอาหาร จากนั้นนำเส้นใยมาขึ้นรูปด้วยแป้นพิมพ์ ความร้อนสูงกว่า 250 องศาเซลเซียส ทำให้บรรจุภัณฑ์ด้านที่ถูความร้อนมีผิวเรียบมัน แล้วนำไปอบด้วยความร้อนเพื่อไล่ความชื้น จะได้บรรจุภัณฑ์ที่ปลอดภัยต่อสุขภาพและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม แล้วเมื่อนำบรรจุภัณฑ์มาใช้งานแล้วทิ้งโดยการฝังกลบลงในดิน บรรจุภัณฑ์นั้นจะย่อยสลายกลับคืนสู่ธรรมชาติได้ 100% กลายเป็นปุ๋ยให้กับพืชต่าง ๆ จากนั้นชาวไรตัดต้นอ้อยเพื่อนำเข้าสู่โรงงานน้ำตาล วนเวียนเป็นวงจรที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมอย่างยั่งยืน

เยื่อชานอ้อยสามารถนำมาทำเป็นบรรจุภัณฑ์กระดาษเมื่อเปรียบเทียบกับพลาสติกและโฟมก็พบว่า ข้อดีคือทนน้ำ ทนน้ำมัน อาหารทั้งเย็นจัดจนถึงร้อนจัด (-40 ถึง 250 องศาเซลเซียส) เข้าเตาอบและเตาไมโครเวฟได้ ไม่มีสารปนเปื้อนก่อนมะเร็ง ไม่มีกากของเสีย น้ำเสีย จากกระบวนการผลิตและชานอ้อยไม่ใช่เยื่อจากไม้ยืนต้น จึงไม่เป็นการทำลายป่า และสามารถปลูกทดแทน [10]

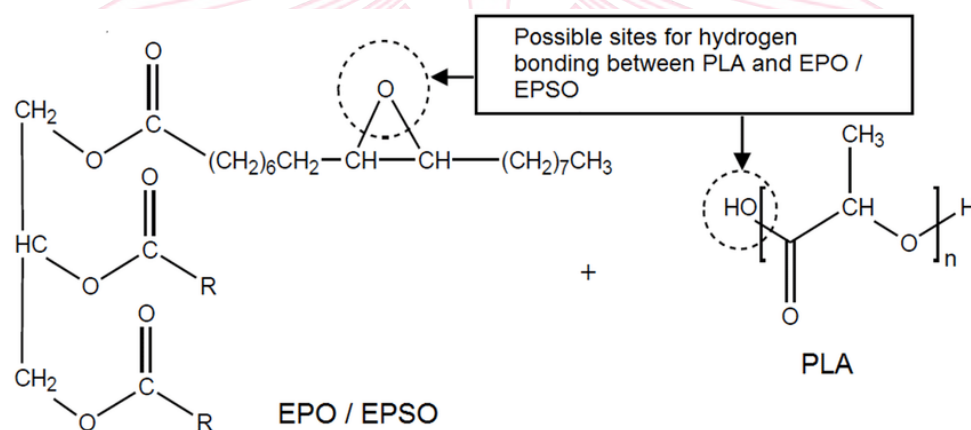


ภาพที่ 5 บรรจุภัณฑ์จากเยื่อชานอ้อย [11]

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

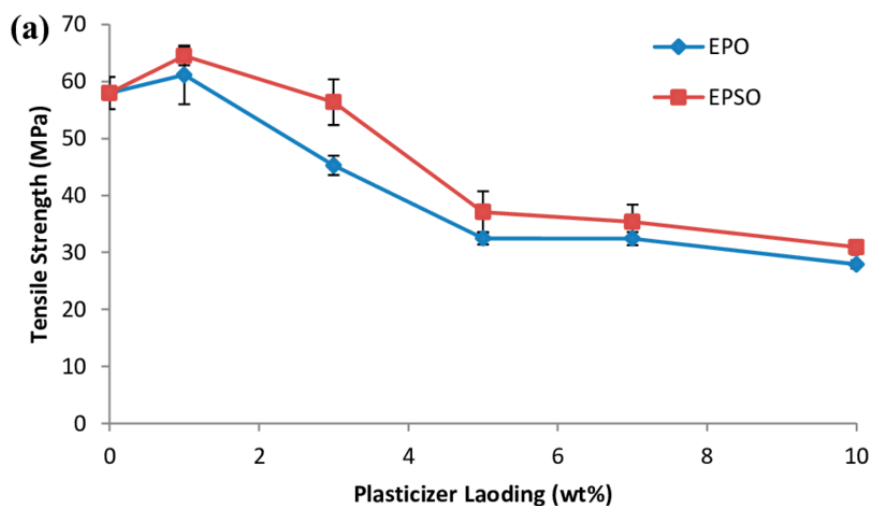
Chiang และคณะ [2] งานวิจัยนี้ใช้น้ำมันพืชอีพอกไซด์ (epoxidized vegetable oil, (EVO)) เป็นสารเสริมสภาพพลาสติก สำหรับพอลิแล็กติกแอซิด (polylactic (PLA)) เพื่อเพิ่มความสามารถในการขึ้นรูปของพอลิแล็กติกแอซิด โดยเตรียมของผสมระหว่างน้ำมันพืชอีพอกไซด์ (epoxidized vegetable oil, (EVO)) กับพอลิแล็กติกแอซิด (polylactic (PLA)) ได้จากการผสมแบบหลอมเหลว

ในงานวิจัยนี้ประยุกต์ใช้น้ำมันพืชอีพอกไซด์ (epoxidized vegetable oil, (EVO)) 2 ชนิด ได้แก่ น้ำมันปาล์มอีพอกไซด์ (epoxidized palm oil, (EPO)) และ น้ำมันถั่วเหลืองอีพอกไซด์ (epoxidized soybean oil, (ESO)) โดยใช้น้ำมันปาล์มอีพอกไซด์ (epoxidized palm oil, (EPO)) ร่วมกับพอลิแล็กติกแอซิด (polylactic (PLA)) และผสมระหว่างน้ำมันปาล์มอีพอกไซด์ (EPO) กับน้ำมันถั่วเหลืองอีพอกไซด์ (ESO) ใช้กับพอลิแล็กติกแอซิด



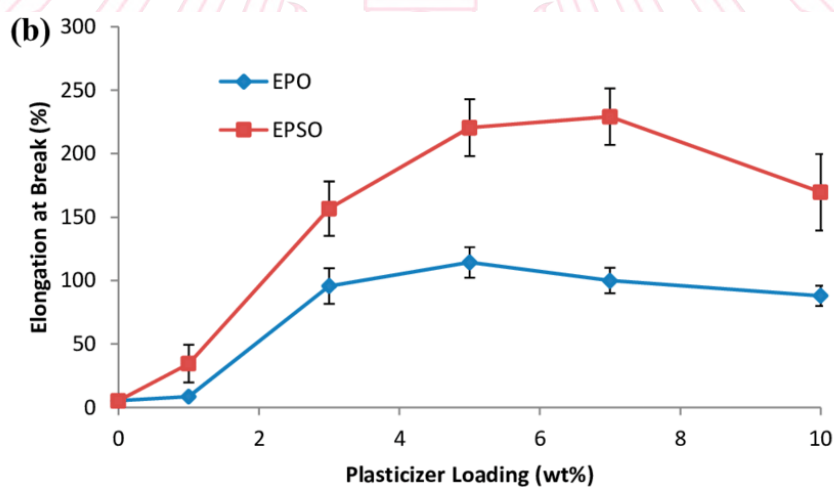
ภาพที่ 6 โครงสร้างของ EPO, EPISO และ PLA

ทดสอบสมบัติเชิงกลด้วยวิธีวัดค่าความแข็งแรงต่อแรงดึง (tensile strength) พบว่าการเติมน้ำมันพืชอีพอกไซด์ (epoxidized vegetable oil, (EVO)) ช่วยให้ค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงเพิ่มมากขึ้น แต่หากใส่ EVO ในปริมาณมากจะทำให้ความแข็งแรงต่อแรงดึงลดลง และการใช้ EPISO ให้ผลที่ค่อนข้างดีกว่า EPO



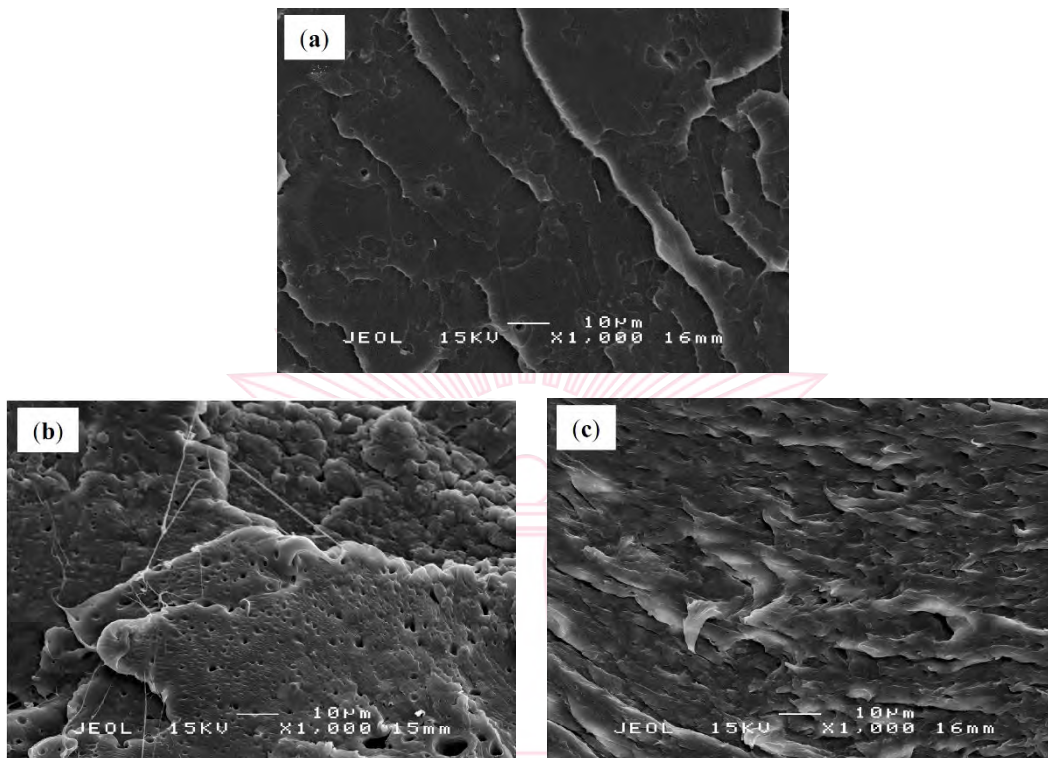
ภาพที่ 7 ค่าความแข็งแรงต่อแรงดึง (tensile strength) ของ PLA/EPO และ PLA/EPPO

การทดสอบเปอร์เซ็นต์ระยะยืด ณ จุดขาด (elongation at break) พบว่าการใส่ EVO ที่ประมาณ 5-7 wt% มีเปอร์เซ็นต์ระยะยืด ณ จุดขาดมากที่สุด โดยการใช้ EPPO ให้ผลที่ดีกว่า EPO



ภาพที่ 8 เปอร์เซ็นต์ระยะยืด ณ จุดขาด (elongation at break) ของ PLA/EPO และ PLA/EPPO

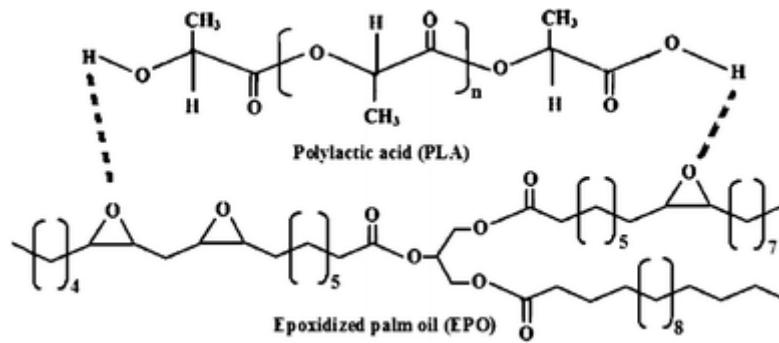
งานวิจัยนี้ศึกษาความเข้ากันได้ของ PLA และ EVO โดย Scanning electron microscope (SEM) ภาพจาก SEM พบว่า PLA และ EVO สามารถเข้ากันได้ดี มีแรงยึดระหว่างผิว (interfacial adhesion) ที่ดี



ภาพที่ 9 SEM micrograph ของ (a) PLA (b) PLA/EPO (c) PLA/EPSO

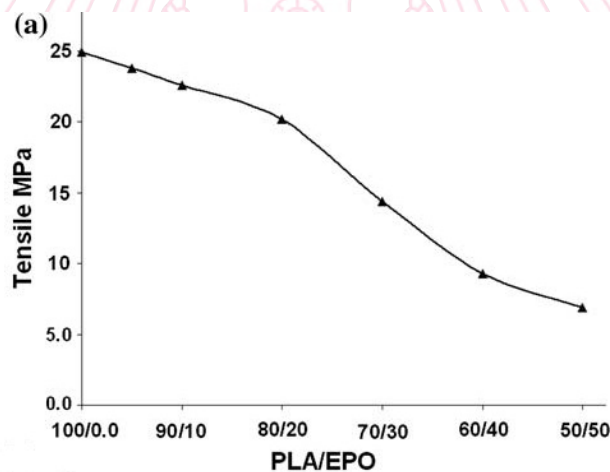
ผลการวิจัยนี้พบว่า น้ำมันพืชอีพอกซีไดซ์สามารถใช้เป็นสารเสริมสภาพพลาสติกสำหรับพอลิแล็กติกแอซิดได้ โดยช่วยให้มีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น ได้แก่ ความแข็งแรงต่อนแรงดึง, เปอร์เซ็นตระยะยืด ณ จุดขาด และความเข้ากันได้ของสาร นอกจากนี้ การใช้ PLA ร่วมกับ EVO ยังเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมอีกด้วยเนื่องจากย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

Al Mulla และคณะ [1] งานวิจัยนี้ศึกษาผลของการใช้น้ำมันปาล์มอีพอกซีไดซ์ (epoxidized palm oil, (EPO)) ใช้เป็นสารเสริมสภาพพลาสติกสำหรับพอลิแล็กติกแอซิด (polylactic (PLA)) โดยใช้คลอโรฟอร์มเป็นตัวทำละลาย (PLA/EPO) ปริมาณการเติมที่อัตราส่วนแตกต่างกัน 6 อัตราส่วน คือ 95/05, 90/10, 80/20, 70/30, 60 /40 และ 50/50 ตามลำดับทำการทดสอบเสถียรภาพความร้อน, สมบัติเชิงกล, และสัณฐานวิทยาของฟิล์มผสมสารเสริมสภาพพลาสติก มีการใช้เทคนิค Fourier-transform infrared (FTIR) spectroscopy ตรวจวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของ PLA และ EPO จากผลการทดสอบพบว่า พันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุล PLA และ EPO

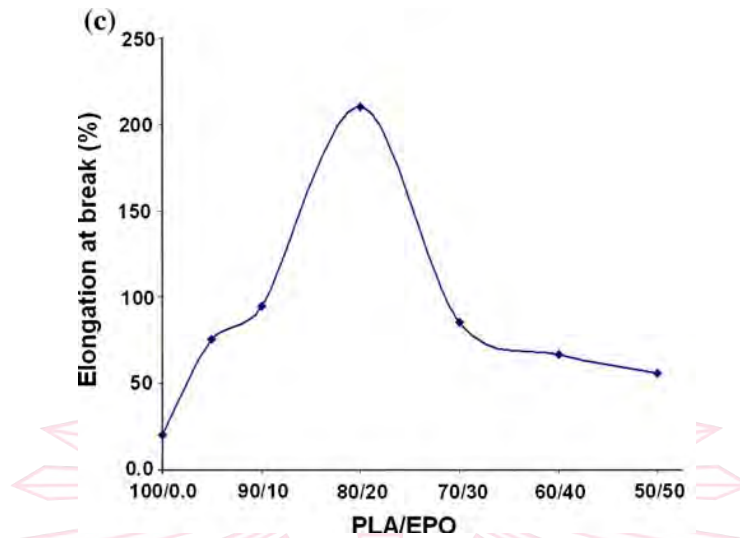


ภาพที่ 10 อันตรกิริยา (interaction) ระหว่างน้ำมันปาล์มอีพอกไซด์กับพอลิแล็กติกแอซิด

งานวิจัยนี้ทำการทดสอบสมบัติเชิงกลด้วยวิธีวัดค่าความแข็งแรงต่อแรงดึง (tensile strength) และเปอร์เซ็นต์ระยะยืด ณ จุดขาด (elongation at break) โดยเปรียบเทียบระหว่างการใช้ PLA เพียงอย่างเดียว กับการใช้ PLA ร่วมกับ EPO ใน 6 อัตราส่วน คือ 95/05, 90/10, 80/20, 70/30, 60/40 และ 50/50 ตามลำดับ จากการทดสอบความแข็งแรงต่อแรงดึง (tensile strength) พบว่าการใช้ PLA เพียงอย่างเดียว มีค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงประมาณ 25 MPa เมื่อเพิ่ม EPO เข้าไปทำให้ค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงลดลง จากการทดสอบเปอร์เซ็นต์การยืดจนถึงระยะที่ขาด (elongation at break) พบว่าการใช้ PLA เพียงอย่างเดียวมีค่าการยืดตัวที่ 43% เมื่อเพิ่ม EPO เข้าไปทำให้ได้ค่าการยืดตัวสูงสุดถึง 210% แต่หากเพิ่มปริมาณของ EPO จะทำให้ค่าการยืดตัวลดลง

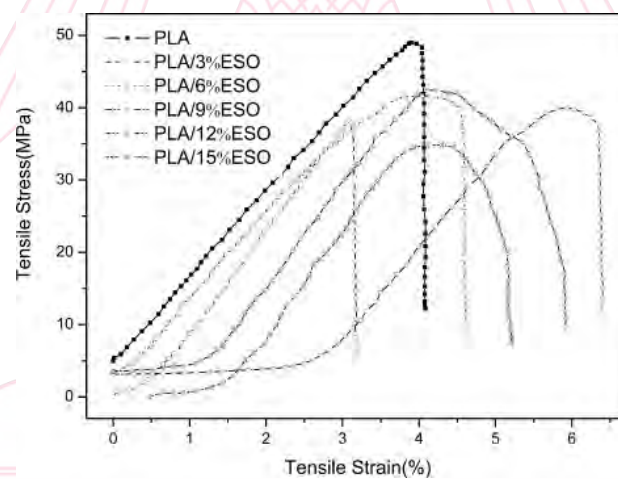


ภาพที่ 11 ค่าความแข็งแรงต่อแรงดึง (tensile strength) ของ PLA/EPO



ภาพที่ 12 เปอร์เซ็นต์ระยะยืด ณ จุดขาด (elongation at break) ของ PLA/EPO

Xu และ Qu [12] ศึกษาการใช้ epoxidized soybean oil (ESO) เป็นสารเสริมสภาพพลาสติกของ พอลิแล็กติกแอซิด นำของผสมใช้กับเครื่องอัดรีดพลาสติกแบบสกรูคู่ ที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน คือ 3, 6, 9, 12 และ 15 wt % ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ PLA เพียงอย่างเดียว ในทุกชุดของการผสมที่ความเข้มข้นต่าง ๆ แสดงการปรับปรุงสมบัติ ด้านความยืดหยุ่น โดยที่ความเข้มข้นของ ESO 9 wt % เพิ่มการยืดตัวที่จุดขาดสูงสุดพบที่ 63 % ส่วนความต้านทานแรงดึง เพิ่มสูงสุดที่ความเข้มข้นที่ 6 wt %



ภาพที่ 13 ค่าความแข็งแรงต่อแรงดึง (tensile strength) ของ PLA/ESO

บทที่ 3

การทดลอง

3.1 วัสดุอุปกรณ์

- 3.1.1 สารเคมี และกระดาษที่ใช้ในการทดลอง
1. พอลิแล็กติกแอซิด
 2. บิวทิลแอซิเตท
 3. สารเสริมสภาพพลาสติก (epoxidized soy bean oil (ESO))
 4. กระดาษชานอ้อย $339 \pm 55 \text{ g/m}^2$
- 3.1.2 อุปกรณ์ทำการทดลอง
1. เตอบ
 2. K-bar coater เบอร์ 9 ความหนา 120 ไมโครเมตร (ความหนาขณะเปียก)
 3. เครื่องชั่งน้ำหนัก ทศนิยม 3 ตำแหน่ง
 4. เครื่องกวนสารด้วยความร้อน
 5. ขวดแก้วทดลอง ขนาด 250 มิลลิลิตร
 6. หลอดหยด (พลาสติกและแก้ว)
 7. บีกเกอร์ ขนาด 250 มิลลิลิตร
 8. แท่งแม่เหล็กกวนสาร
 9. กระบอกตวงแก้ว ขนาด 100 มิลลิลิตร
 10. เทอร์โมมิเตอร์ (0 - 200 °C)
- 3.1.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ
1. เครื่องทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง Toyoseiki Stograph Model E-S
 2. เครื่องทดสอบความทรงรูป Taber V5
 3. เครื่องทดสอบความต้านทานการไหลของอากาศ Toyoseiki
 4. เครื่องวัดมุมสัมผัสแบบอัตโนมัติ POCKET GONIOMETER รุ่น PG-X
 5. เทปใส ยี่ห้อ 3M
 6. หมึกพิมพ์เฟล็กโซฐานน้ำ สีน้ำเงิน บริษัท โตโยอิงค์ (ประเทศไทย) จำกัด

3.2 วิธีการทดลอง

1. การเตรียมกระดาษ

เลือกกระดาษขานอ้อยในเกรดทางการค้า ที่มีการกระจายของเส้นใยสม่ำเสมอ ไม่มีรอยสกปรก จุดดำ หรือหลุมอากาศบริเวณผิวหน้า

2. เตรียมสารเคลือบผิวกระดาษที่ผสมจากพอลิแลกติกแอซิด และ พลาสติกไซเซออร์

เตรียมพอลิแลกติกแอซิดที่ปริมาณ 6 เปอร์เซ็นต์ (w/v) ในตัวทำละลายบิวทิลแอซิเตท จากนั้นเติมสารเสริมสภาพพลาสติกที่ปริมาณที่แตกต่างกัน 0, 6, 9, 12, 15 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักพอลิแลกติกแอซิด โดยกวนสารด้วยเครื่องกวนสาร พร้อมให้ความร้อนที่ประมาณ 100 องศาเซลเซียส ทำการละลายจนสารละลายเป็นเนื้อเดียวกัน

3. การเคลือบผิวกระดาษ

เตรียมกระดาษก่อนเคลือบผิวกระดาษ โดยทำการอบกระดาษที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลาประมาณ 30 นาที ทำการเคลือบผิวกระดาษด้วย K-bar coater เบอร์ 9 ด้วยแรงกดและความเร็วที่สม่ำเสมอบนกระดาษ แล้วนำกระดาษหลังเคลือบไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที หลังจากนั้นนำกระดาษมาชั่ง เพื่อคำนวณหาน้ำหนักสารเคลือบผิวกระดาษต่อไป

4. ทดสอบกระดาษ

นำกระดาษที่มีสารเคลือบและไม่มีสารเคลือบ มาทดสอบสมบัติในด้านกายภาพต่าง ๆ ได้แก่ น้ำหนักสารเคลือบผิวกระดาษ ความต้านทานแรงดึง ความทรงรูป ความต้านทานอากาศ สมบัติการเปียกผิว และความสามารถในการยึดติดของหมึกพิมพ์เฟล็กโซฐานน้ำ (กระดาษที่ทดสอบมีการเก็บในห้องทดลองที่ควบคุมอุณหภูมิ ก่อนทำการทดสอบ)

4.1 การหาน้ำหนักสารเคลือบของกระดาษหลังเคลือบผิว

คำนวณโดยเอาผลต่างน้ำหนักของกระดาษก่อนและหลังเคลือบผิวหารด้วยพื้นที่ผิวกระดาษ ผลรายงานเป็นหน่วยน้ำหนักต่อพื้นที่ หรือกรัมต่อตารางเมตร (g/m^2)

4.2 ทดสอบความต้านทานแรงดึง

การคำนวณ อ้างอิงตามมาตรฐาน TAPPI 494 om-96 - Tensile properties of paper and paperboard (using constant rate of elongation apparatus)

ค่าความแข็งแรงต่อแรงดึง (tensile strength หรือ tensile breaking strength) (รายงานในหน่วย kN/m)

$$\text{tensile strength} = \frac{\text{force}}{\text{width}}$$

force คือ แรง หน่วยเป็นนิวตัน

width คือ ความกว้างของกระดาษ หน่วยเป็นเมตร

ค่าร้อยละการยืด (% Elongation) รายงานในหน่วย %

$$\% \text{ Elongation} = \frac{\text{ความยาวที่เปลี่ยนไป}}{\text{ความยาวเริ่มต้น}} \times 100$$

เมื่อ ความยาวที่เปลี่ยนไป = ความยาวสุดท้าย - ความยาวเริ่มต้น

4.3 ทดสอบความทรงรูป

วิธีการทดสอบความทรงรูป อ้างอิงตามมาตรฐาน TAPPI 489 - Bending resistance (stiffness) of paper and paperboard

1. ตัดกระดาษที่จะใช้ทดสอบ โดยใช้เครื่องตัดกระดาษยี่ห้อ TABER ที่ใช้กับเครื่องวัดความโค้งงอ
2. ปรับสเกลของเครื่องวัดให้อยู่ในตำแหน่ง 0 โดยใช้สวิตช์ปรับไปทางซ้ายและขวา
3. ปรับระดับของเครื่องโดยใช้ Level Adjust ทั้ง 3 ตำแหน่ง ให้เข็มชี้ของ Pendulum อยู่ที่ 0
4. นำกระดาษที่ต้องการจะทดสอบมาใส่ โดยเริ่มจากด้านบนก่อน ให้กระดาษตัวอย่างอยู่กึ่งกลางของหัวจับ จากนั้นจึงหมุนหัวจับให้แน่น
5. เมื่อหัวจับแน่นแล้วให้หมุนทวนเข็มนาฬิกาประมาณ 1 ส่วน 4 รอบโดยสังเกตชี้จากจุดหมุน
6. เมื่อใส่ชิ้นงานเรียบร้อยแล้ว ให้หมุนปรับมุมในการทดสอบโดยใช้ Operating Switch ไปทางซ้ายและขวา จนถึง 15 องศา

หมายเหตุ : หากค่าที่ได้มีค่าเกิน 100 จำเป็นที่จะต้องใส่ตุ้มน้ำหนักเข้าไปด้วย

4.4 ทดสอบความต้านทานอากาศ

วิธีการทดสอบความต้านทานอากาศ อ้างอิงตามมาตรฐาน T 460 om-11 - Air resistance of paper (Gurley method)

1. หมุนแกนที่ฐานเครื่องวัดความต้านอากาศ เพื่อปรับช่องว่างสำหรับให้ตัวอย่างมีช่องว่างมากพอ
2. ดึงกระบอกที่เป็นแกนวัดขึ้น จากนั้นใช้แท่งเหล็กค้ำกระบอกวัดเอาไว้
3. เมื่อใส่กระดาษตัวอย่างเข้าไปที่ฐานของเครื่องวัดความต้านอากาศแล้ว ให้หมุนแกนที่ฐานอีกครั้งเพื่อให้กระดาษอยู่ชิดกับหัววัด
4. ดึงแท่งเหล็กที่ใช้ค้ำกระบอกวัดออก ระดับของกระบอกวัดจะลดลงเรื่อย ๆ
5. จับเวลาเมื่อระดับของแกนวัดเลื่อนลงมาอยู่ที่ 0 มิลลิลิตร และหยุดจับเวลาเมื่อกระบอกเลื่อนลงมาอยู่ที่ 100 มิลลิลิตร แล้วบันทึกเวลาที่จับได้

6. จากนั้นนำค่าที่ได้มาคูณด้วยค่าแฟกเตอร์ตามตารางที่ 1 จะได้ค่าความต้านทานการไหลของอากาศต่ออากาศ 100 มิลลิลิตร

ตารางที่ 1 ค่าแฟกเตอร์ที่ใช้สำหรับวัดความต้านทานการไหลของอากาศต่อ 100 มิลลิลิตร

| Scale markers used | Correction factor (multiplier) |
|--------------------|--------------------------------|
| 0 to 100 ml | 1.017 |
| 50 to 150 ml | 1.011 |
| 100 to 200 ml | 1.006 |
| 150 to 250 ml | 1.000 |
| 200 to 300 ml | 0.994 |
| 250 to 350 ml | 0.988 |

4.5 การทดสอบการเปียกผิวของกระดาษ

วิธีการทดสอบการเปียกผิวของกระดาษ อ้างอิงตามมาตรฐาน T 558 om-97 Surface wettability and absorbency of sheeted materials using an automated contact angle tester โดยวัดขนาดหยดน้ำเฉลี่ยได้ 4.47 ± 0.15 ไมโครลิตร และใช้โหมด dynamic วัดมุมสัมผัส

4.6 ทดสอบความสามารถในการยึดติดของหมึกพิมพ์

วิธีการทดสอบความสามารถในการยึดติดของหมึกพิมพ์โดยใช้วิธีการทดสอบแบบเทปกาว อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D3359 – 09 Standard test methods for measuring adhesion by tape test โดยใช้วิธีการทดสอบแบบ B โดยการตีตาราง 6x6 เส้น และดึงเทปที่มุม 180 องศา ใช้เทปหน้ากว้าง 1 นิ้ว ในโครงการวิจัยนี้ใช้หมึกพิมพ์เพล็กซ์โซฐานน้ำ ใช้แท่ง K-bar Coater เบอร์ 3 มีความหนาขณะเปียกที่ 24 ไมโครเมตร โดยอ่านผลการทดสอบตามเกณฑ์ 6 ระดับ คือ 0B 1B 2B 3B 4B และ 5B ตามรูปภาพที่ 14

5B ขอบของการกรีดนั้นเรียบสนิท และไม่มีหลุดลอกในช่องสี่เหลี่ยมหรือไม่มีการหลุดลอก

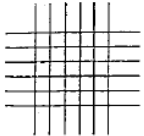
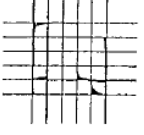
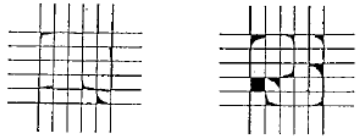
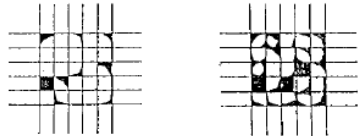
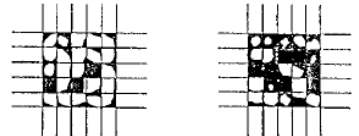
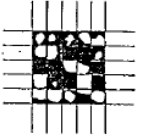
4B บริเวณจุดตัดจะหลุดลอกเล็ก ๆ พื้นที่การหลุดลอกน้อยกว่า 5 %

3B บริเวณขอบ และจุดตัดมีการหลุดลอก พื้นที่การหลุดลอกระหว่าง 5 – 15 %

2B มีการหลุดลอกตามขอบ และบนพื้นที่สี่เหลี่ยม พื้นที่การหลุดลอกระหว่าง 15 – 35 %

1B มีการหลุดลอกตามขอบ และบนพื้นที่สี่เหลี่ยม มีขนาดใหญ่ พื้นที่การหลุดลอกระหว่าง 35 – 65 %

0B การหลุดลอกมากกว่า 1B

| CLASSIFICATION OF ADHESION TEST RESULTS | | |
|---|----------------------|---|
| CLASSIFICATION | PERCENT AREA REMOVED | SURFACE OF CROSS-CUT AREA FROM WHICH FLAKING HAS OCCURRED FOR SIX PARALLEL CUTS AND ADHESION RANGE BY PERCENT |
| 5B | 0% None |  |
| 4B | Less than 5% |  |
| 3B | 5 - 15% |  |
| 2B | 15 - 35% |  |
| 1B | 35 - 65% |  |
| 0B | Greater than 65% |  |

ภาพที่ 14 การจำแนกการหลุดลอกของสารเคลือบ

5. วิเคราะห์ผลการทดลอง
6. สรุปผลกาทดลอง

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผล

4.1 น้ำหนักสารเคลือบผิวกระดาษหลังการเคลือบผิว

น้ำหนักสารเคลือบผิวกระดาษเคลือบด้วย K-bar coater เบอร์ 9 ทั้ง 6 ความเข้มข้น มีปริมาณใกล้เคียงกัน พบในช่วง $21 - 23 \text{ g/m}^2$

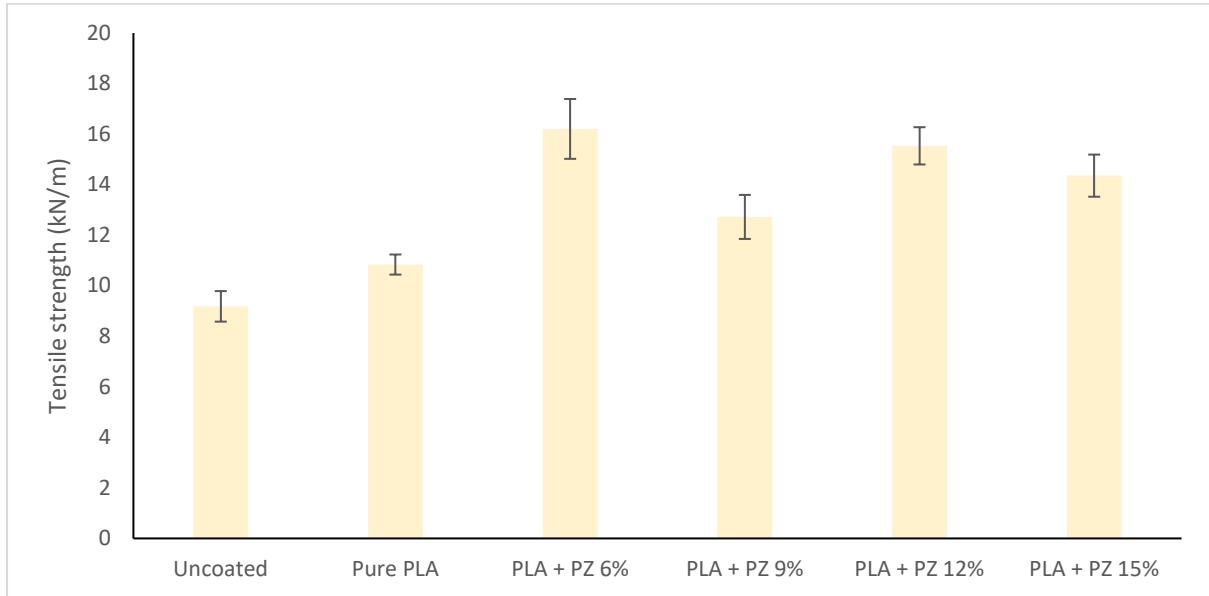
ตารางที่ 2 น้ำหนักสารเคลือบผิวกระดาษ

| ชนิด | น้ำหนัก (กรัมต่อตารางเมตร) |
|--------------|----------------------------|
| Pure PLA | 23.15 ± 2.38 |
| PLA + PZ 6% | 23.33 ± 3.33 |
| PLA + PZ 9% | 22.79 ± 2.69 |
| PLA + PZ 12% | 21.21 ± 2.29 |
| PLA + PZ 15% | 22.53 ± 2.41 |

หมายเหตุ PZ หมายถึง สารเสริมสภาพพลาสติกชนิดที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

4.2 สมบัติความต้านทานต่อแรงดึง

การทดสอบค่าความแข็งแรงต่อแรงดึง จากภาพที่ 15 พบว่ากระดาษที่ไม่เคลือบผิวมีค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงต่ำที่สุด เมื่อทำการเคลือบกระดาษด้วย Pure PLA ค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงมีค่าเพิ่มขึ้นจากกระดาษที่ไม่เคลือบผิวเล็กน้อย ส่วนกระดาษที่เคลือบด้วย PLA ผสมกับสารเสริมสภาพพลาสติกที่ความเข้มข้น 6%, 9%, 12% และ 15% ค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงมีค่าเพิ่มขึ้นพบอยู่ในช่วง $13 - 16 \text{ kN/m}$ ซึ่งมากกว่ากระดาษที่ไม่เคลือบผิว (9 kN/m) และกระดาษที่เคลือบ Pure PLA (11 kN/m) ทั้งนี้เนื่องจากสารเคลือบผสมสารเสริมสภาพพลาสติกมีการเคลือบที่ผิวกระดาษ และ/หรือ ซึมเข้าไปแทรกตัวอยู่ระหว่างเส้นใยจึงทำหน้าที่เป็นสารยึดติดระหว่างเส้นใย ทำให้มีการยึดเกาะกันระหว่างเส้นใยดีขึ้น และมีแรงดึงดูดแบบพันธะไฮโดรเจนเกิดขึ้นระหว่างโมเลกุลหมู่ไฮดรอกซิลของ PLA และหมู่อีพอกซีของพลาสติกไซเซออร์ [2] กระดาษจึงมีความแข็งแรงมากขึ้น จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการเติมสารเสริมสภาพพลาสติกช่วยปรับปรุงสมบัติด้านความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษได้ แต่มีการลดลงที่ 9% อาจเนื่องมาจากปัจจัยที่มีสารเคลือบในบางพื้นที่กระดาษที่ไม่สม่ำเสมอ

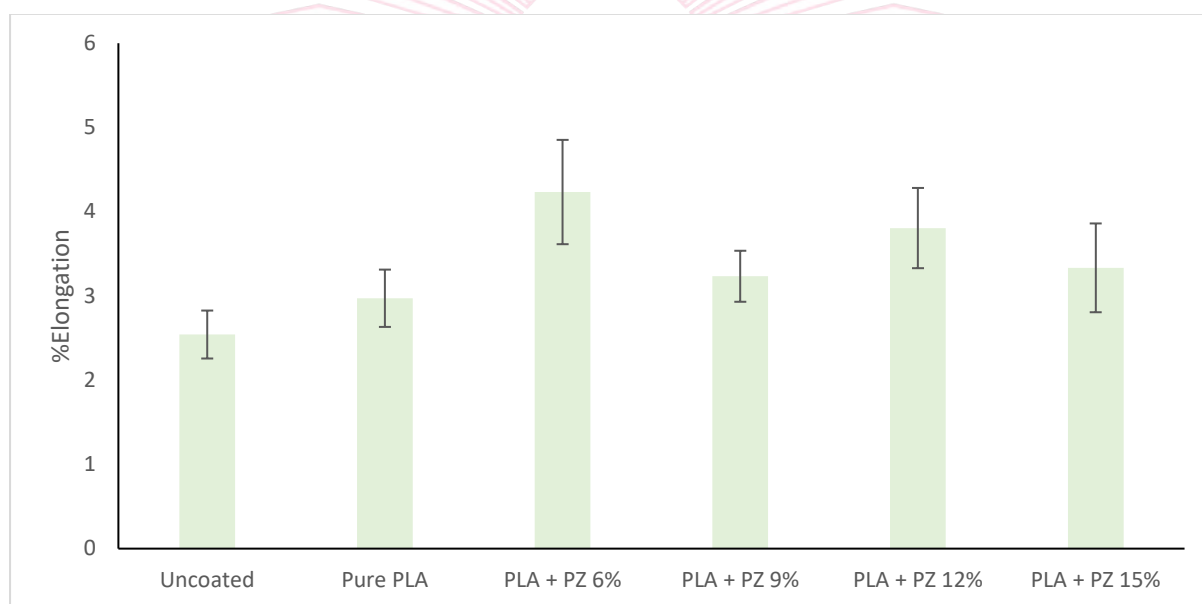


ภาพที่ 15 ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติความต้านทานต่อแรงดึง (tensile strength) ของกระดาษก่อนและหลังการเคลือบด้วยสารเคลือบผสมสารเสริมสภาพพลาสติก



4.3 เปอร์เซ็นต์ระยะยืด

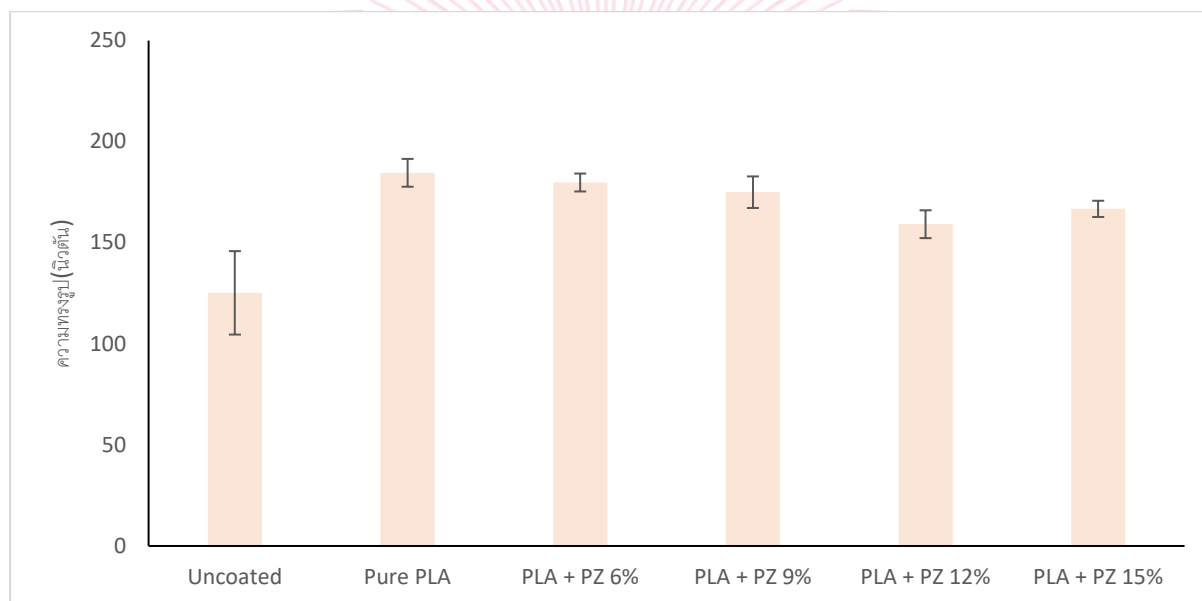
จากภาพที่ 16 พบว่ากระดาษที่ไม่เคลือบผิวมีเปอร์เซ็นต์การยืดตัวน้อยที่สุดอยู่ที่ 2.54 ± 0.28 % เมื่อทำการเคลือบกระดาษด้วย Pure PLA เปอร์เซ็นต์การยืดตัวเพิ่มขึ้นจากกระดาษที่ไม่เคลือบผิวเล็กน้อย เมื่อทำการเติมสารเสริมสภาพพลาสติก จะเห็นว่าสารเสริมสภาพพลาสติกที่ความเข้มข้น 6% ให้ค่า %elongation ที่มีแนวโน้มสูงที่สุดอยู่ที่ 4.23 ± 0.62 % ตามด้วยความเข้มข้น 12%, 15% และ 9% จากผลการทดลอง แสดงให้เห็นถึงการปรับปรุงสมบัติด้านการยืดตัวที่ดีขึ้นของกระดาษที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบ PLA ผสมสารเสริมสภาพพลาสติกเมื่อเทียบกับกระดาษที่ไม่เคลือบผิว และกระดาษที่เคลือบ Pure PLA เนื่องจากสารเสริมสภาพพลาสติกส่งผลให้ชั้นฟิล์มของสารเคลือบมีความยืดหยุ่นเพิ่มมากขึ้น



ภาพที่ 16 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ระยะยืด (%elongation) ของกระดาษก่อนและหลังการเคลือบด้วยสารเคลือบผสมสารเสริมสภาพพลาสติก

4.4 สมบัติความทรงรูป

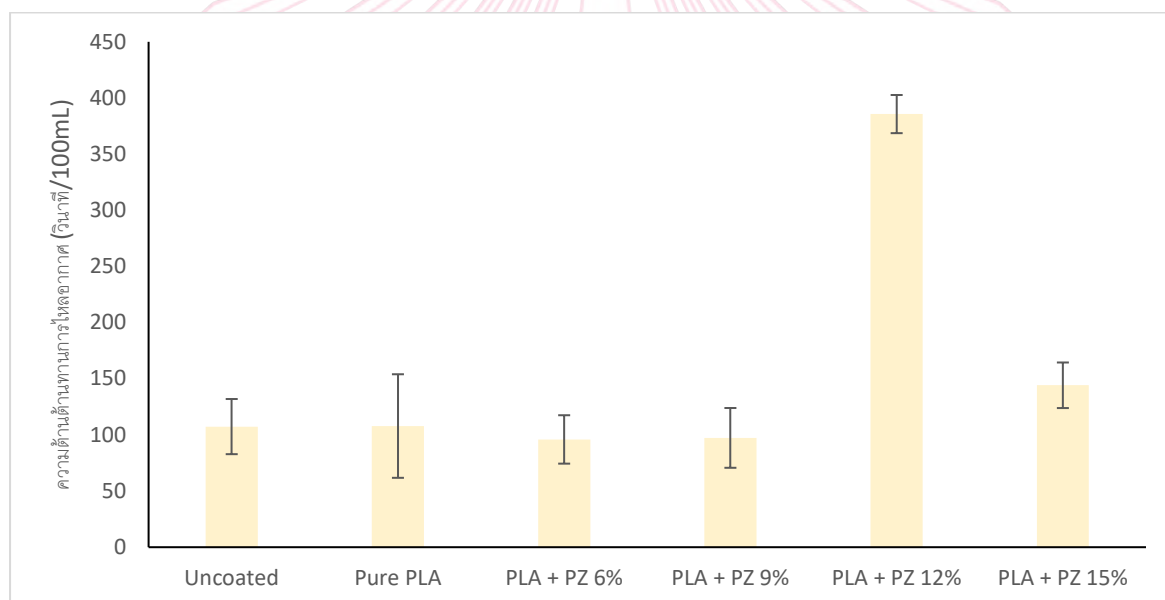
จากภาพที่ 17 พบว่ากระดาษที่ไม่เคลือบผิวมีความทรงรูปน้อยกว่ากระดาษที่เคลือบด้วย Pure PLA แสดงให้เห็นว่าการเคลือบผิวกระดาษด้วย PLA ช่วยเพิ่มความทรงรูปและความแข็งตึงให้กับกระดาษ แต่เนื่องจาก PLA มีลักษณะแข็งเปราะ จึงเติมสารเสริมสภาพพลาสติกเพื่อปรับปรุงสมบัติด้านความยืดหยุ่น เมื่อเติมสารเสริมสภาพพลาสติกส่งผลให้ความทรงรูปของกระดาษหลังเคลือบผิวมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับกระดาษเคลือบผิวด้วย Pure PLA แสดงให้เห็นว่ากระดาษมีความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้นเนื่องจากสารเสริมสภาพพลาสติกสามารถเข้ากันได้ดีกับ PLA



ภาพที่ 17 ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติความทรงรูป (stiffness) ของกระดาษก่อนและหลังการเคลือบด้วยสารเคลือบผสมสารเสริมสภาพพลาสติก

4.5 สมบัติความต้านทานอากาศ

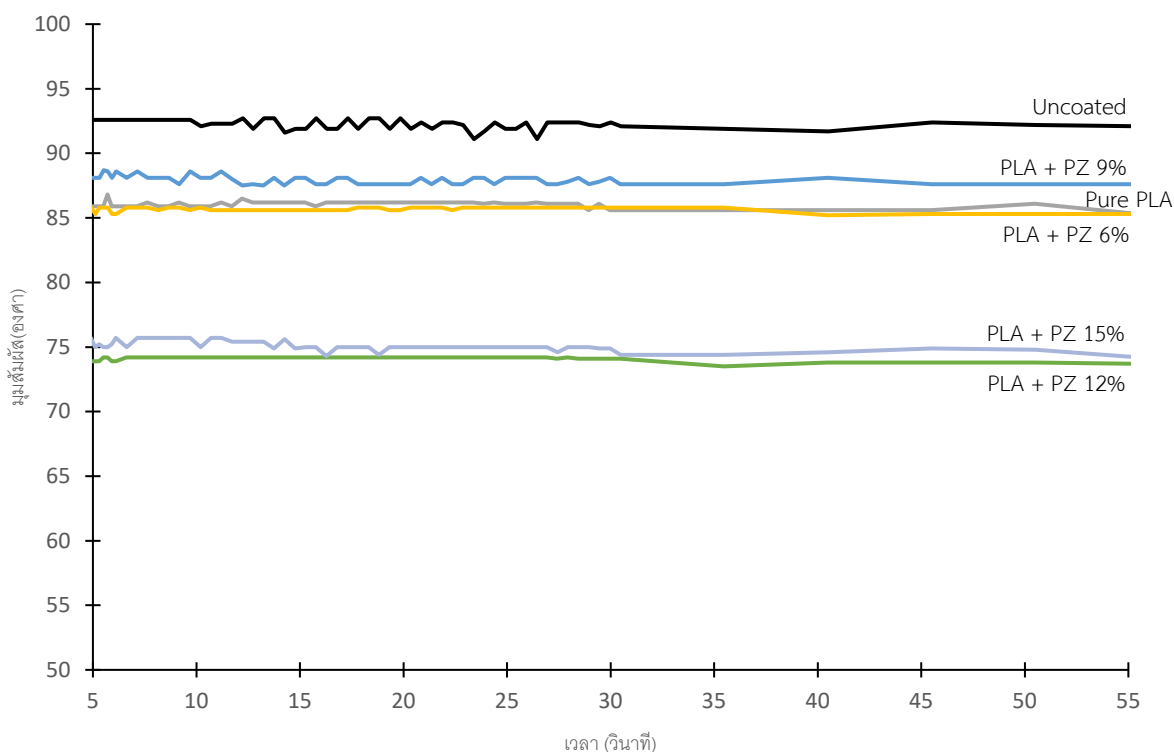
การทดสอบความต้านทานอากาศของกระดาษ กระดาษที่ไม่เคลือบผิวมีระยะเวลาในการทดสอบต่ำแสดงถึงความต้านทานอากาศต่ำ ปัจจัยมาจากความพรุนของกระดาษไม่เคลือบผิว เมื่อทำการเคลือบด้วย Pure PLA และสารเคลือบผสมสารเสริมสภาพพลาสติกที่ 6 และ 9 % จะเห็นว่าค่าความต้านทานอากาศมีค่าใกล้เคียงกับกระดาษไม่เคลือบผิว ทั้งนี้เนื่องจากปัจจัยของรูพรุนกระดาษและความขรุขระของกระดาษหลังเคลือบผิว ส่งผลให้กระดาษยังมีความต้านทานอากาศต่ำ จากภาพที่ 18 พบว่ากระดาษที่เคลือบ PLA ผสมสารเสริมสภาพพลาสติกที่ความเข้มข้น 12% และ 15% มีแนวโน้มค่าความต้านทานอากาศสูงขึ้น เมื่อเทียบกับกระดาษเคลือบ Pure PLA และกระดาษเคลือบผิว PLA ผสมสารเสริมสภาพพลาสติกที่ความเข้มข้น 6% กับ 9% ทั้งนี้เนื่องจากการเติมสารเสริมสภาพพลาสติกที่ 12 และ 15 % ส่งผลให้ความหนืดของสารเคลือบผิวมีค่าต่ำลง ดังนั้นสารเคลือบผิวจึงซึมเข้าเนื้อกระดาษได้ดี ช่วยลดรูพรุนระหว่างเส้นใยและปิดบริเวณผิวกระดาษได้มากขึ้น ทำให้กระดาษสามารถต้านทานอากาศได้ดีขึ้น ดังนั้นการเติมสารเสริมสภาพพลาสติกที่ปริมาณสูงจึงช่วยปรับปรุงสมบัติความต้านทานอากาศของกระดาษได้



ภาพที่ 18 ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติความต้านทานอากาศ (air resistance) ของกระดาษก่อนและหลังการเคลือบด้วยสารเคลือบผสมสารเสริมสภาพพลาสติก

4.6 สมบัติการเปียกผิว

การทดสอบการเปียกผิว (wetting) จากภาพที่ 19 พบว่ากระดาษไม่เคลือบผิวมีค่ามุมสัมผัส มากกว่า 90° แสดงว่าผิวหน้ามีสมบัติที่ไม่ชอบน้ำ ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากสารกันซึมในกระดาษ แต่เมื่อทำการเคลือบผิวกระดาษด้วย Pure PLA และการเคลือบผิวกระดาษด้วย PLA ผสมสารเสริมสภาพพลาสติกที่ความเข้มข้น 6% กับ 9% พบว่าค่ามุมสัมผัสมีค่าลดลงและใกล้เคียงกับ 90° แสดงถึงผิวหน้ามีแนวโน้มที่ไม่ชอบน้ำ ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากหมู่ไฮดรอกซิลในโครงสร้างของ PLA ซึ่งมีสมบัติความไม่ชอบน้ำ เมื่อทำการเคลือบผิวกระดาษด้วย PLA ผสมสารเสริมสภาพพลาสติก ที่ความเข้มข้น 12% กับ 15% พบว่าค่ามุมสัมผัสลดลงอยู่ระหว่าง 70°-80° แสดงให้เห็นว่าผิวหน้ามีแนวโน้มมีสมบัติความชอบน้ำเพิ่มขึ้น เนื่องจากสารเคลือบ PLA ผสมสารเสริมสภาพพลาสติกสามารถปิดผิวหน้ากระดาษได้มากขึ้นและสารเสริมสภาพพลาสติกมีสมบัติความมีขั้วจากหมู่ฟังก์ชันอีพอกซี ดังนั้น การเติมสารเสริมสภาพพลาสติกที่ปริมาณสูง (12-15%) จึงช่วยให้มีสมบัติความชอบน้ำและเปียกผิวได้ดียิ่งขึ้น

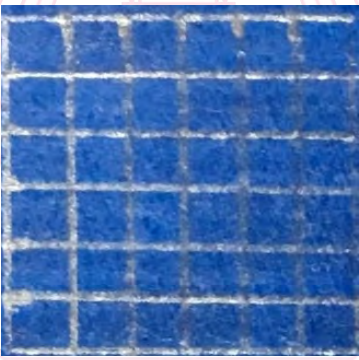
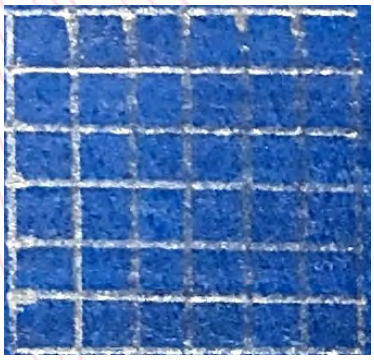
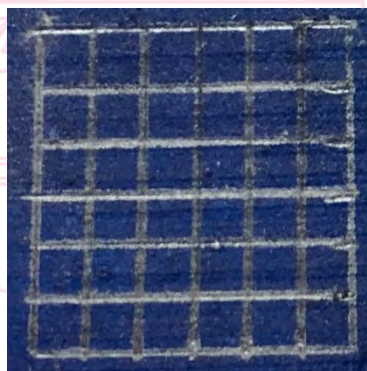
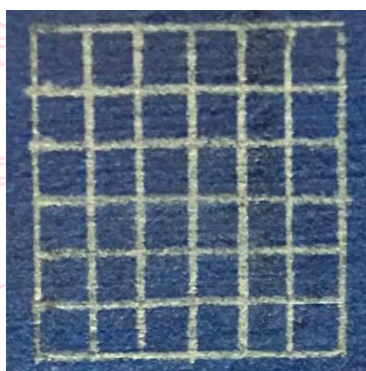


ภาพที่ 19 ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติการเปียกผิว (wetting) ของกระดาษก่อนและหลังการเคลือบด้วยสารเคลือบผสมสารเสริมสภาพพลาสติก

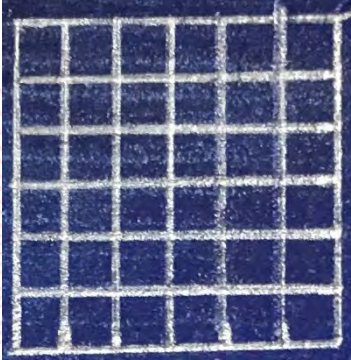
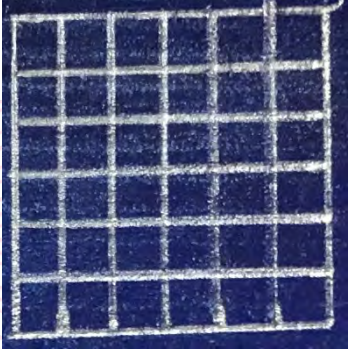
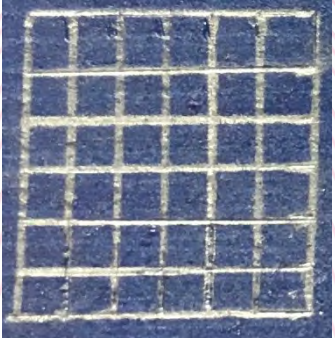
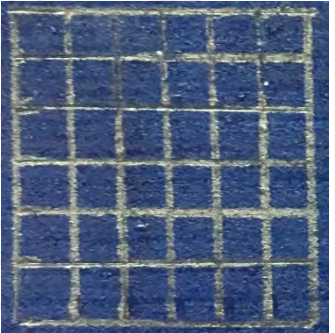
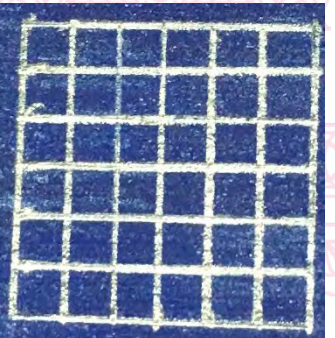
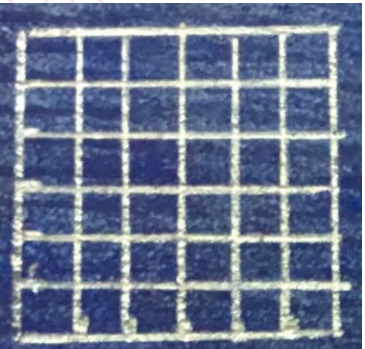
4.7 ความสามารถในการยึดติดของหมึกพิมพ์

จากการทดสอบความสามารถในการยึดติดของหมึกพิมพ์ โดยพิมพ์พื้นตายด้วยหมึกเฟล็กโซ ฐานน้ำ สีไซแอน จากนั้นทำการวัด adhesion ด้วย tape test ASTM D3359-09 ใช้ test method B (ตาราง 6x6 เส้น) มุมในการดึงเทป 180° ผลการทดสอบพบว่ากระดาษไม่เคลือบผิว มีค่า adhesion อยู่ที่ระดับ 4B หมายถึง เปอร์เซ็นต์การหลุดลอกประมาณ 5% แสดงถึงระดับการยึดติดที่ค่อนข้างดีมาก ทั้งนี้เนื่องจากหมึกพิมพ์สามารถซึมผ่านรูพรุนที่ผิวหน้ากระดาษ ส่วนกระดาษเคลือบ Pure PLA และกระดาษเคลือบ PLA ผสมสารเสริมสภาพพลาสติกที่ความเข้มข้น 6 กับ 9% มีค่าการยึดติดอยู่ระดับ 3B หมายถึง บริเวณขอบ และจุดตัดมีการหลุดลอก พื้นที่การหลุดลอกระหว่าง 5 – 15 % ซึ่งระดับการยึดติดลดลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับกระดาษไม่เคลือบผิว อาจเนื่องมาจากสารเคลือบผิวมีสมบัติความไม่ชอบน้ำและปัจจัยของความขรุขระของผิวหน้ากระดาษ ส่งผลให้การยึดติดกับหมึกพิมพ์ลดต่ำลง เมื่อทำการเคลือบผิว PLA ผสมสารเสริมสภาพพลาสติกที่ความเข้มข้น 12 กับ 15% ผลการยึดติดที่ได้อยู่ในระดับค่อนข้างดีมาก (4B) เนื่องจากสารเคลือบผิวที่ความเข้มข้นนี้มีสมบัติการเปียกผิวที่ดี (ผลแสดงในหัวข้อ 4.6) ส่งผลให้มีความสามารถการยึดติดกับหมึกพิมพ์ได้ดี

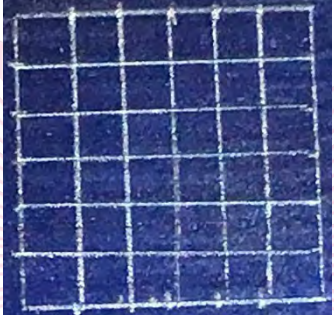
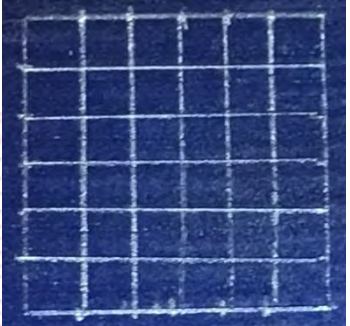
ตารางที่ 3 ความสามารถในการยึดติด (adhesion) ของกระดาษก่อนและหลังการเคลือบด้วยสารเคลือบผสมสารเสริมสภาพพลาสติก

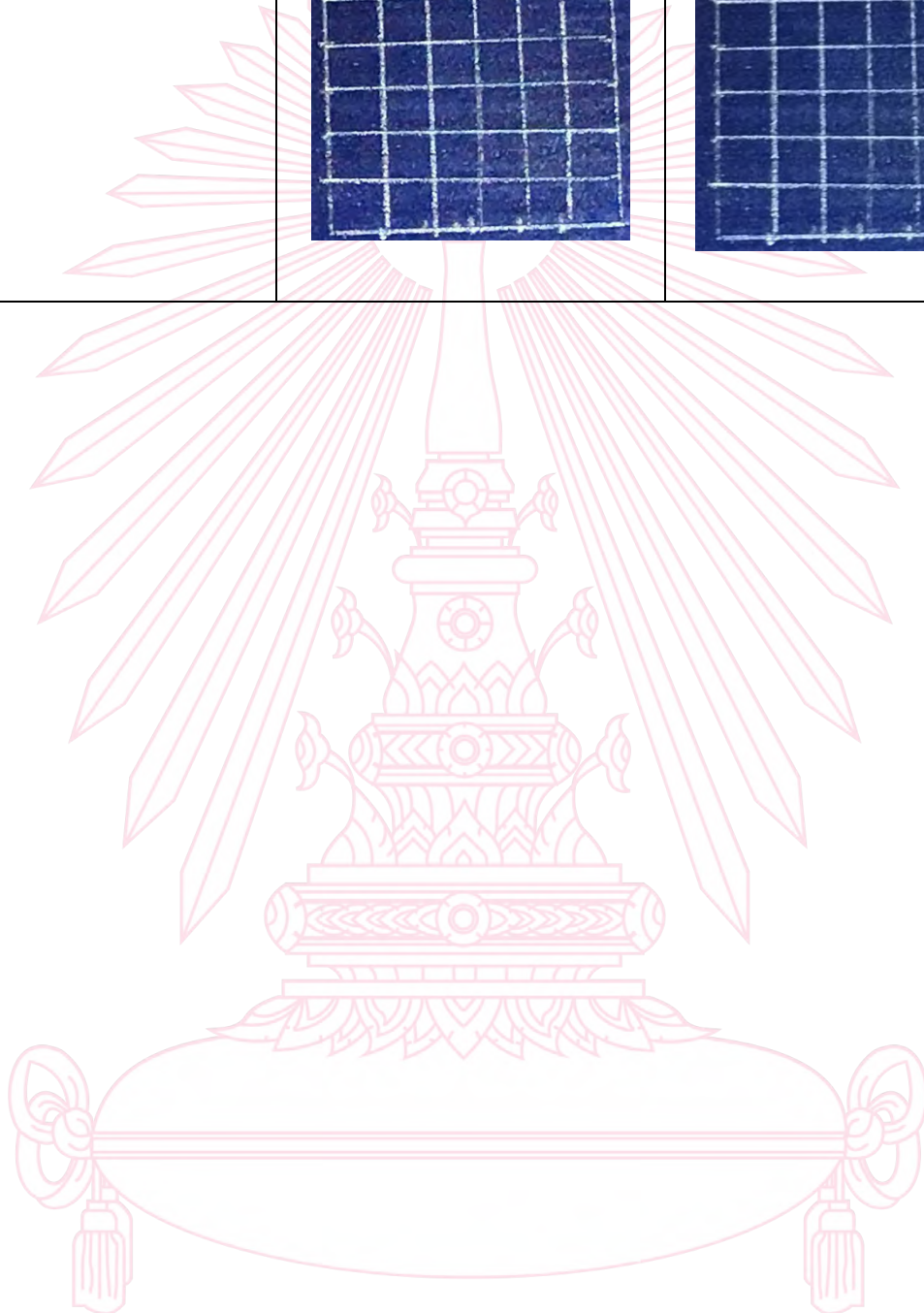
| | ก่อน | หลัง |
|-------------------------------|---|---|
| Uncoated ระดับการยึดติด 4B |  |  |
| Pure PLA ระดับการยึดติด 3B |  |  |

ตารางที่ 3 ความสามารถในการยึดติด (adhesion) ของกระดาษก่อนและหลังการเคลือบด้วยสารเคลือบผสมสารเสริมสภาพพลาสติก (ต่อ)


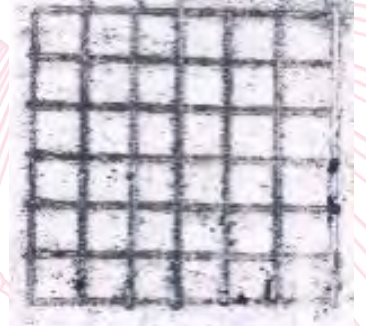
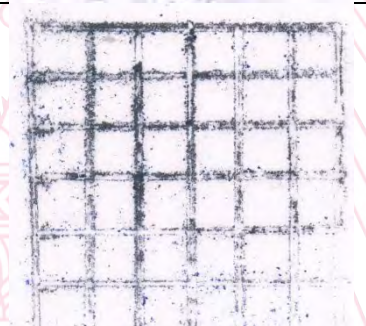
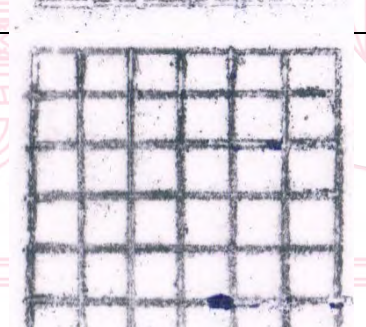
| | ก่อน | หลัง |
|-----------------------------------|---|---|
| PLA + PZ 6% ระดับการยึดติด 3B |  |  |
| PLA + PZ 9% ระดับการยึดติด 3B |  |  |
| PLA + PZ 12% ระดับการยึดติด 4B |  |  |

ตารางที่ 3 ความสามารถในการยึดติด (adhesion) ของกระดาษก่อนและหลังการเคลือบด้วยสารเคลือบผสมสารเสริมสภาพพลาสติก (ต่อ)

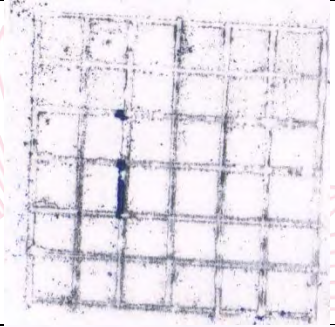
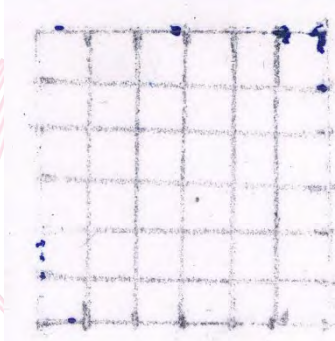
| | ก่อน | หลัง |
|-----------------------------------|---|---|
| PLA + PZ 15% ระดับการยึดติด 4B |  |  |



ตารางที่ 4 ความสามารถในการยึดติด (adhesion) ของกระดาษหลังการเคลือบด้วยสารเคลือบผสมสารเสริมสภาพพลาสติก
ด้านเทปกาว

| ชนิด | รูป |
|----------------------------------|--|
| Uncoated ระดับการยึดติด 4B |  |
| Pure PLA ระดับการยึดติด 3B |  |
| PLA + PZ 6% ระดับการยึดติด 3B |  |
| PLA + PZ 9% ระดับการยึดติด 3B |  |

ตารางที่ 4 ความสามารถในการยึดติด (adhesion) ของกระดาษหลังการเคลือบด้วยสารเคลือบผสมสารเสริมสภาพพลาสติก ด้านเทปกาว (ต่อ)

| ชนิด | รูป |
|-----------------------------------|---|
| PLA + PZ 12% ระดับการยึดติด 4B |  |
| PLA + PZ 15% ระดับการยึดติด 4B |  |

บทที่ 5

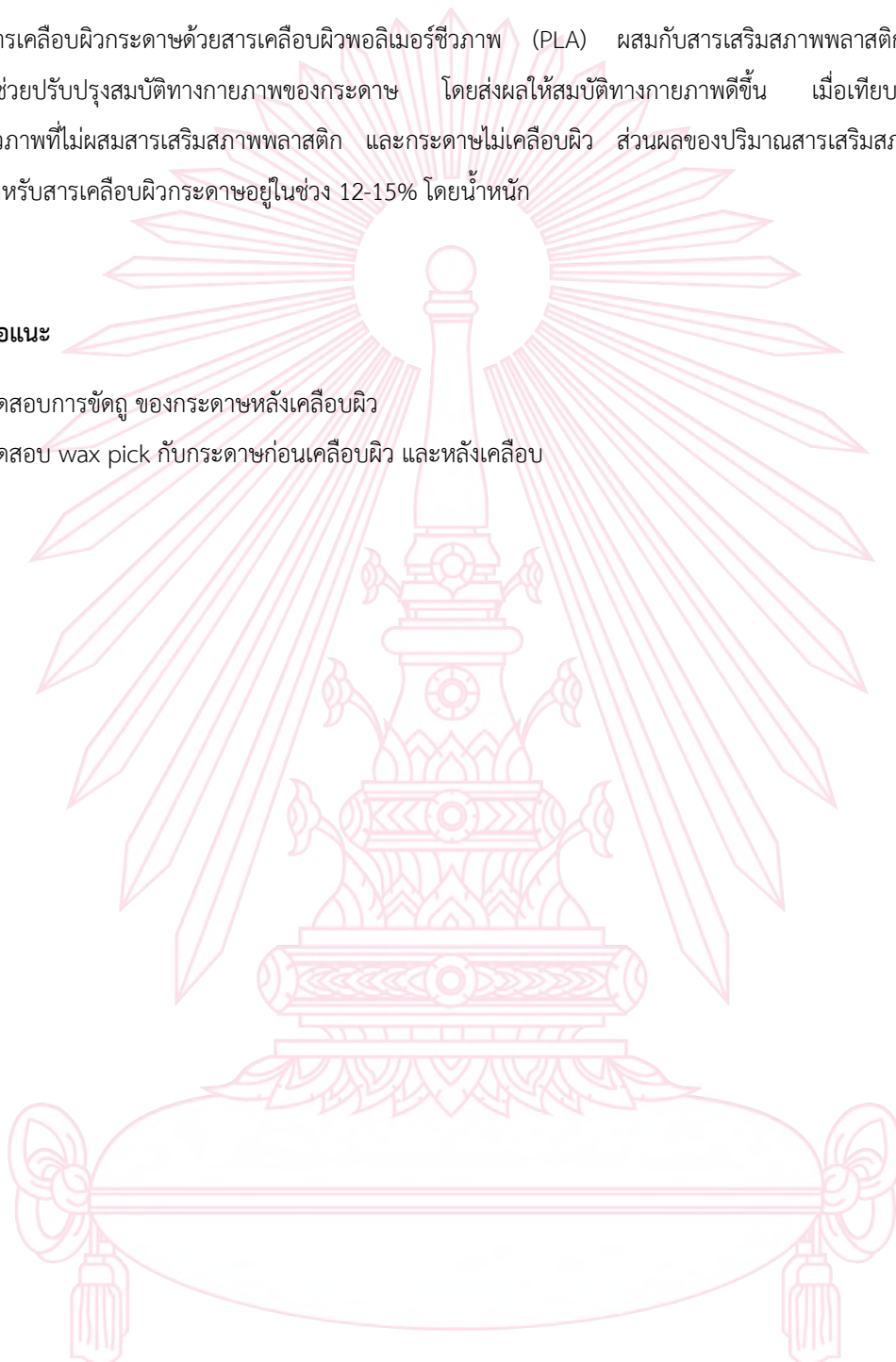
สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

การเคลือบผิวกระดาษด้วยสารเคลือบผิวพอลิเมอร์ชีวภาพ (PLA) ผสมกับสารเสริมสภาพพลาสติกที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมช่วยปรับปรุงสมบัติทางกายภาพของกระดาษ โดยส่งผลให้สมบัติทางกายภาพดีขึ้น เมื่อเทียบกับสารเคลือบพอลิเมอร์ชีวภาพที่ไม่ผสมสารเสริมสภาพพลาสติก และกระดาษไม่เคลือบผิว ส่วนผลของปริมาณสารเสริมสภาพพลาสติกที่เหมาะสมสำหรับสารเคลือบผิวกระดาษอยู่ในช่วง 12-15% โดยน้ำหนัก

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ทดสอบการขัดถู ของกระดาษหลังเคลือบผิว
2. ทดสอบ wax pick กับกระดาษก่อนเคลือบผิว และหลังเคลือบ

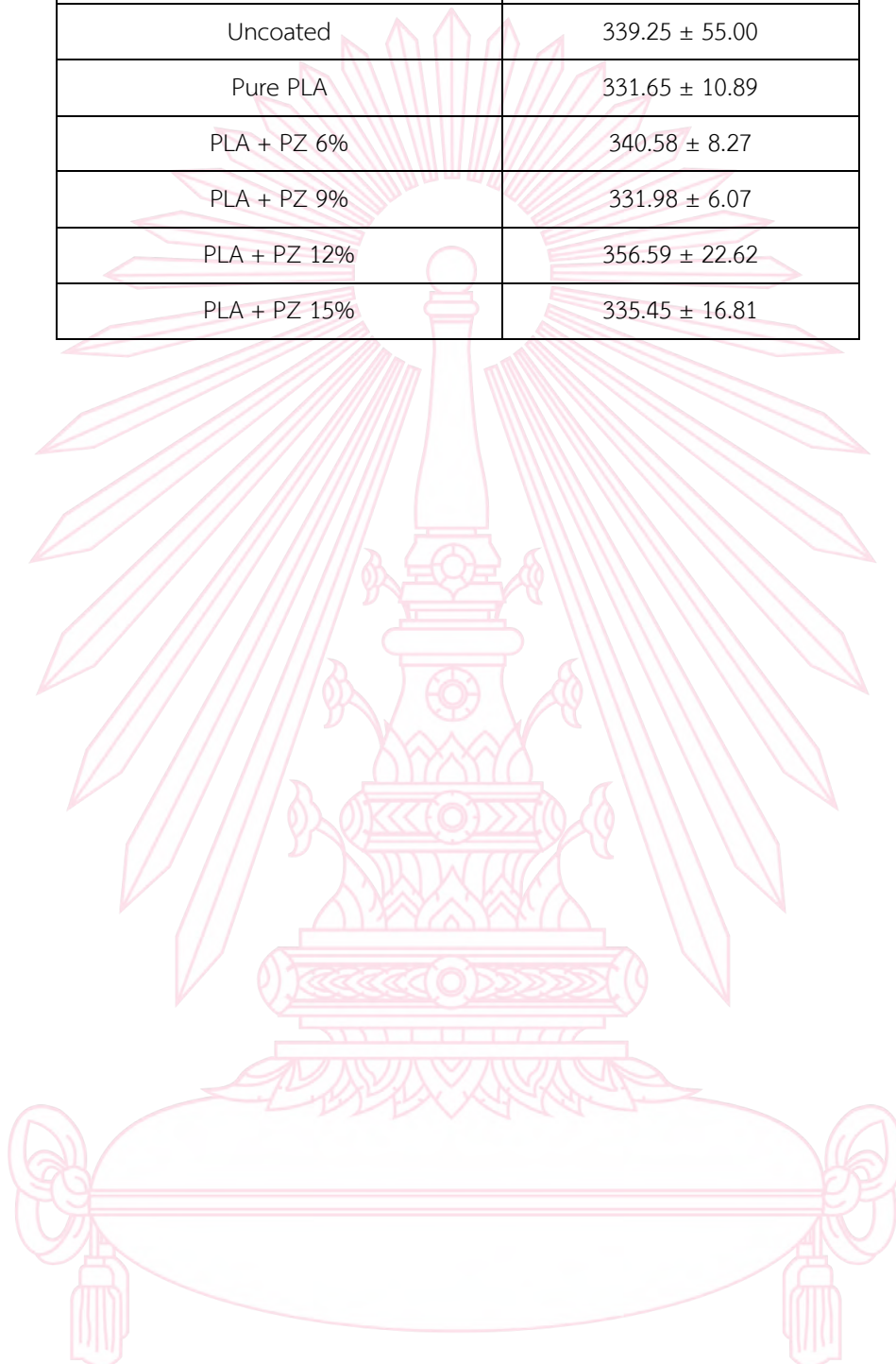


เอกสารอ้างอิง

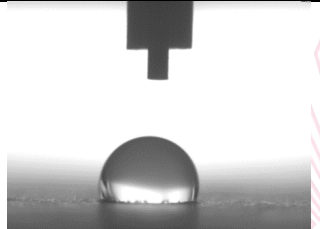
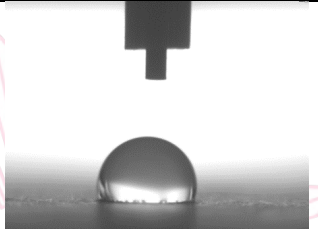
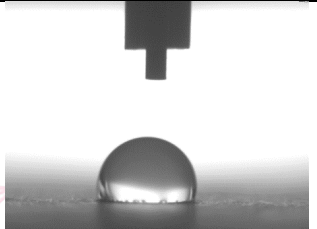
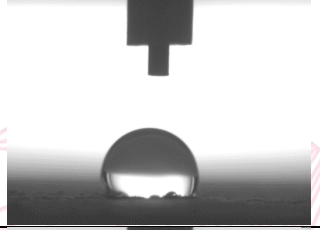
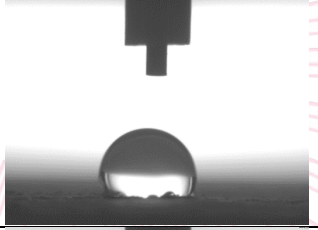
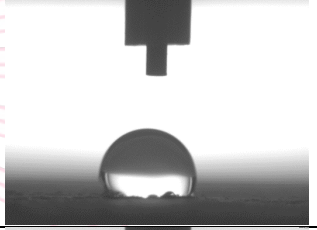
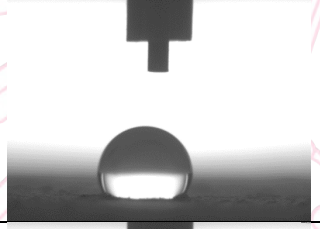
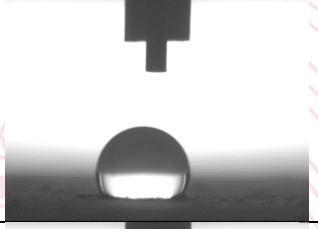
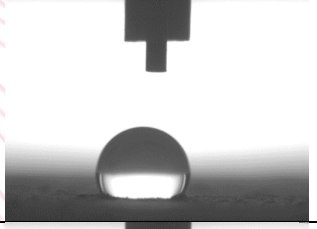
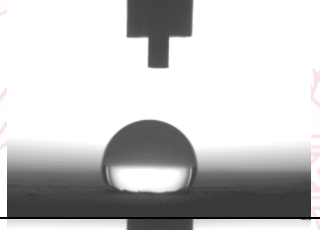
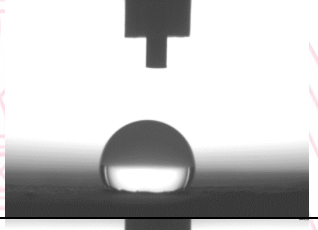
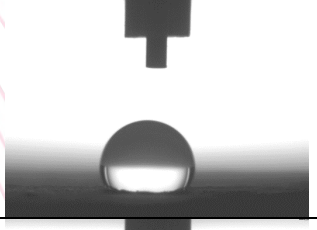
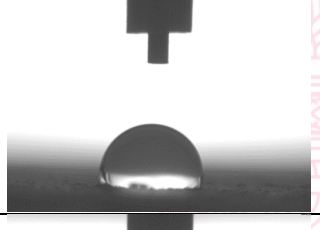
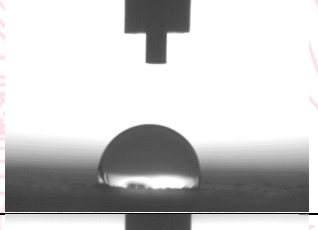
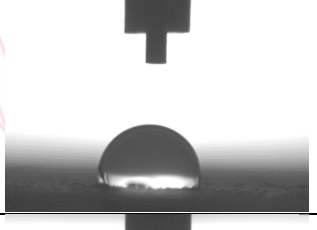
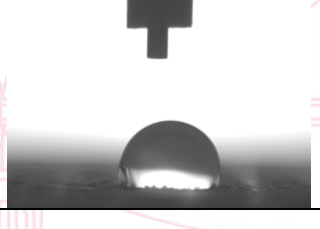
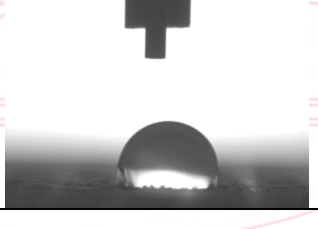
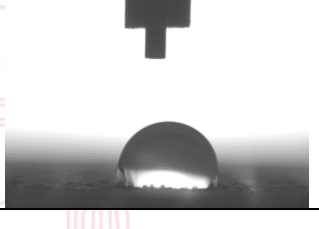
1. E. A. J. Al-Mulla, W. Md. Z. W. Yunus, N. A. B. Ibrahim, M. Z. Ab. Rahman, Properties of epoxidized palm oil plasticized polylactic acid, *Journal of Materials Science* 2010, 45, 1942–1946.
2. B. W. Chieng, N. A. Ibrahim, Y. Y. Then, Y. Y. Loo, Epoxidized vegetable oils plasticized poly(lactic acid) biocomposites. *Molecules* 2014, 19, 16024-16038.
3. M. G. A. Vieira, M. A. da Silva, L. O. dos Santos, M. M. Beppu. Natural based plasticizers and biopolymer films. *European Polymer Journal* 2011, 47, 254–263.
4. Z.S. Petrovic, Polyurethanes from Vegetable Oils, *Polymer Reviews*, 2008, 48(1), 109-155.
5. R. Jiménez, S. H. López, E. V. Santiago, Conductive polymeric composites based on multiwalled carbon nanotubes and linseed oil functionalized and cross-linked with diacetylenes from propargyl alcohol. *Journal of Nanomaterials* 2015, 15, 1-7.
6. C. S. R. Gangireddy, Y. Hu, Efficient chemical transformations of epoxidized soybean oil to cross-linked polymers by phosphorus-containing nucleophiles and study their thermal properties. *Polymer Degradation and Stability* 2017, 140, 156-165.
7. พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ. 2017. <http://www2.mtec.or.th> [วันที่เข้าถึง 5 พฤษภาคม 2562]
8. จุฑากานต์ บุญมี, พลาสติกชีวภาพ (Biodegradable plastic) ทางเลือกที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม. *วารสารสิ่งแวดล้อม* 2555, 2, 15-19.
9. M. Alam, D. Akram, E. Sharmin, F. Zafar, S. Ahmad. Vegetable oil based eco-friendly coating materials. *Arabian Journal of Chemistry*. 2014, 7, 469–479.
10. วงจรธรรมชาติดูธรรมชาติ. <http://www.gracz.co.th> [วันที่เข้าถึง 5 พฤษภาคม 2562]
11. บรรจุภัณฑ์ชานอ้อย ไบโอบีโอ นวัตกรรมใหม่ทดแทนกล่องโฟม. <http://www.youngmea.com> [วันที่เข้าถึง 5 พฤษภาคม 2562]
12. Y. Q. Xu, J. P. Qu, Mechanical and rheological properties of epoxidized soybean oil plasticized poly(lactic acid). *Journal of Applied Polymer Science* 2009, 112, 3185-3191.

ภาคผนวก
ตารางที่ 5 น้ำหนักกระดาษที่ใช้ทดสอบ

| ชนิด | น้ำหนัก (กรัมต่อตารางเมตร) |
|--------------|----------------------------|
| Uncoated | 339.25 ± 55.00 |
| Pure PLA | 331.65 ± 10.89 |
| PLA + PZ 6% | 340.58 ± 8.27 |
| PLA + PZ 9% | 331.98 ± 6.07 |
| PLA + PZ 12% | 356.59 ± 22.62 |
| PLA + PZ 15% | 335.45 ± 16.81 |



ตารางที่ 6 ผลการทดสอบวัดมุมสัมผัส

| ชนิด | เวลา (วินาที) | | |
|--------------|---|--|---|
| | 10 | 30 | 50 |
| Uncoated |  |  |  |
| Pure PLA |  |  |  |
| PLA + PZ 6% |  |  |  |
| PLA + PZ 9% |  |  |  |
| PLA + PZ 12% |  |  |  |
| PLA + PZ 15% |  |  |  |