ผลของเส้นใยธรรมชาติและการปรับปรุงผิวที่มีต่อสมบัติทางความร้อนและกายภาพของพอลิแลคติกแอซิด

Effect of Natural Fiber and Surface Treatment on Thermal and Physical Properties of Polylactic Acid

โดย

ผศ.ดร.กัลทิมา เชาว์ชาญชัยกุล

ดร.วรนุช ดีละมัน

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากงบประมาณเงินรายได้

ประจำปีงบประมาณ ๒๕๖๔ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการเติมเส้นใยป่านศรนารายณ์ และการปรับปรุงผิวเส้นใยด้วยสารอีพอกซีไซเลนที่มีต่อสมบัติทางกายภาพและทางความร้อนของพอลิแลคติกแอซิด ชิ้นงานทดสอบพอลิแลคติกแอซิดและวัสดุเชิงประกอบที่มีการจัดเรียงตัวเส้นใยในทิศทางเดียวถูกขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดแรงดัน และถูกประเมินผลของการเติมเส้นใยป่านศรนารายณ์ และการปรับปรุงผิวเส้นใยโดยการทดสอบการดูดซับน้ำและการวิเคราะห์ด้วยดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิงแคลอริมิทรี จากผลการทดลอง พบว่าค่าการดูดซับน้ำมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อมีการเติมเส้นใยป่านศรนารายณ์ ในขณะที่การปรับปรุงผิวเส้นใยป่านศรนารายณ์ด้วยสารอีพอกซีไซเลนช่วยปรับปรุงความทนต่อน้ำของวัสดุเชิงประกอบ ค่าการดูดซับน้ำสำหรับเวลาในการแช่น้ำ 5 วัน ที่อุณหภูมิห้อง มีค่าเท่ากับ 0.89, 1.13 และ 1.26 % สำหรับกรณีพอลิแลคติกแอซิด วัสดุเชิงประกอบที่มีการเติมเส้นใยที่ผ่านการปรับปรุงผิว และวัสดุเชิงประกอบที่มีการเติมเส้นใยที่ไม่ผ่านการปรับปรุงผิว ตามลำดับ สำหรับผลของสมบัติทางความร้อน พบว่า การเติมเส้นใยป่านศรนารายณ์มีผลทำให้ค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว และปริมาณผลึกของพอลิแลคติกแอซิดมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากการมีอยู่ของเส้นใยที่มีความยาวต่อเนื่องอาจไปขัดขวางการเกิดผลึกของพอลิ แลคติกแอซิด การปรับปรุงผิวเส้นใยที่มีความยาวต่อเนื่องด้วยสารอีพอกซีไซเลนมีผลทำให้การเกิดผลึกของพอลิแลคติกแอซิดเกิดได้ยากมากขึ้น เนื่องจากการยึดเกาะระหว่างเฟสที่ดีอาจยิ่งไปขัดขวางการจัดเรียงตัวเป็นผลึกมากยิ่งขึ้น

คำสำคัญ: พอลิแลคติกแอซิด/เส้นใยธรรมชาติ/การปรับปรุงผิว/การดูดซับน้ำ/สมบัติทางความร้อน

Abstract

This research work aimed to study the effects of the addition of sisal fiber and surface treatment by epoxy silane on the physical and thermal properties of polylactic acid (PLA). Specimens of PLA and unidirectional fiber-reinforced composite were processed by a compression molding machine and evaluated the physical and thermal properties by water absorption measurement and differential scanning calorimetry (DSC) analysis, respectively. The result showed that water absorption tended to increase by adding sisal fiber whereas surface treatment of sisal fiber by epoxy silane improved water resistance of composites. The water absorption values at immersion time of 5 days were 0.89, 1.13, and 1.26 % for PLA, PLA/treated sisal fiber composite, and PLA/untreated sisal fiber composite, respectively. For thermal properties, the addition of sisal fiber led to decreases in glass transition temperature and crystallinity. These were because the presence of continuous fiber might interfere with the crystallization of PLA. The surface treatment of continuous fiber with epoxy silane led to difficult crystallization. The good interfacial adhesion interrupted PLA alignment.

Keywords: Polylactic acid/natural fiber/surface treatment/thermal properties/water absorption

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจาก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ภายใต้ทุนงบประมาณเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2564 และขอขอบคุณสาขาวิชาวัสดุศาสตร์อุตสาหกรรมที่ให้การสนับสนุนทางด้านเครื่องมือวิจัย

คณะวิจัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
บัญชีตาราง	จ
บัญชีรูป	ฉ

บทที่

1. บทนำ	**1**
1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	**3**
2.1 พอลิแลคติกแอซิด	3
2.2 ป่านศรนารายณ์	8
2.3 การปรับปรุงผิวเส้นใยธรรมชาติด้วยสารไซเลน	11
2.4 การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง	13
3. วิธีการดำเนินการวิจัย	**15**
3.1 วัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย	15
3.2 แผนการดำเนินการวิจัย	16
3.3 วิธีการดำเนินการวิจัย	17
4. ผลการทดลองและอภิปรายผล	**21**
4.1 ผลการทดสอบการดูดซับน้ำ	21
4.2 ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อน	23
5. สรุปและวิเคราะห์ผล	**25**
เอกสารอ้างอิง	**26**
ประวัตินักวิจัย	**28**

บัญชีตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยป่านศรนารายณ์	8
2.2	สมบัติทางกายภาพของเส้นใยป่านศรนารายณ์	10
2.3	ค่ามอดุลัสจำเพาะของเส้นใยธรรมชาติที่สำคัญ เปรียบเทียบกับเส้นใยแก้ว	11
4.1	สมบัติทางความร้อนของพอลิแลคติกแอซิด และวัสดุเชิงประกอบพอลิแลคติกแอซิดและเส้นใยป่านศรนารายณ์ที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วยสารอีพอกซีไซเลน และไม่ผ่านการปรับปรุงผิว	24

บัญชีรูป

รูปที่		หน้า
2.1	สูตรโครงสร้างทางเคมีของพอลิแลคติกแอซิด	3
2.2	โครงสร้างของกรดแลคติก รูปแบบดี- และแอล-ไอโซเมอร์	4
2.3	กระบวนการสังเคราะห์พอลิแลคติกแอซิดที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง	6
2.4	โครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส	9
2.5	ตัวอย่างโครงสร้างทางเคมีของเฮมิเซลลูโลส	9
2.6	โครงสร้างทางเคมีของลิกนิน	10
3.1	เม็ดพอลิแลคติกแอซิด เกรด 4043D จากบริษัท Nature Works LLC	15
3.2	ลักษณะของเส้นใยป่านศรนารายณ์ที่ใช้ในการวิจัย	15
3.3	สูตรโครงสร้างทางเคมีของสารอีพอกซีไซเลน KBM403	16
3.4	แผนภาพการดำเนินงานวิจัยการศึกษาผลของเส้นใยป่านศรนารายณ์และการปรับปรุงผิวเส้นใยที่มีต่อสมบัติทางความร้อนและทางกายภาพของพอลิแลคติกแอซิด	16
3.5	เครื่องอัดด้วยความดัน รุ่น QC-601T ของบริษัท Cometech ประเทศไต้หวัน	18
3.6	ลักษณะการจัดเรียงตัวของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบพอลิแลคติกแอซิดและเส้นใยป่านศรนารายณ์	18
3.7	ชิ้นงานทดสอบพอลิแลคติกแอซิด และชิ้นงานทดสอบวัสดุเชิงประกอบ	18
3.8	เครื่อง Thermogravimetric analyzer รุ่น TGA/DSC3+ ของบริษัท Mettler-Toledo จำกัด	20
4.1	ค่าการดูดซับน้ำของชิ้นงานพอลิแลคติกแอซิด และชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบพอลิแลคติกแอซิดและเส้นใยป่านศรนารายณ์ที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วยสารอีพอกซีไซเลนและที่ไม่ผ่านการปรับปรุงผิว ณ เวลาในการแช่น้ำ 0 ถึง 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง	21
4.2	ค่าการดูดซับน้ำของชิ้นงานพอลิแลคติกแอซิด และชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบพอลิแลคติกแอซิดและเส้นใยป่านศรนารายณ์ที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วยสารอีพอกซีไซเลนและไม่ผ่านการปรับปรุงผิว ณ เวลาในการแช่น้ำ 0 ถึง 120 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง	22
4.3	กราฟแสดงผลการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของพอลิแลคติกแอซิดในชิ้นงานพอลิแลคติกแอซิด วัสดุเชิงประกอบพอลิแลคติกแอซิดและเส้นใยป่านศรนารายณ์ที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วยสารอีพอกซีไซเลน และไม่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิงแคลอริเมททรี สำหรับการให้ความร้อนครั้งที่ 2	23

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการวิจัย

ปัจจุบันขยะพลาสติกได้กลายเป็นปัญหาทางสิ่งแวดล้อมที่ทั่วโลกให้ความสำคัญเพิ่มมากขึ้น เพราะขยะพลาสติกโดยเฉพาะขยะพลาสติกที่มาจากบรรจุภัณฑ์แบบใช้ครั้งเดียวได้ส่งผลกระทบต่อสภาวะแวดล้อมอย่างรุนแรง สหประชาชาติได้ประเมินว่าขยะพลาสติกที่ถูกปล่อยทิ้งลงสู่มหาสมุทรมีปริมาณมากถึง 5-13 ล้านตันต่อปี และได้สำรวจพบเศษพลาสติกในระบบทางเดินอาหารของนก และสัตว์ทะเลที่อยู่บริเวณทะเลและมหาสมุทร [1] ซึ่งถ้าเรานำสัตว์เหล่านั้นมาบริโภคจะส่งผลกระทบต่อสุขภาพร่างกายเราไปด้วย ดังนั้นแนวทางหนึ่งในการแก้ไขปัญหาขยะพลาสติก คือ การเลือกใช้พลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradable plastic)

พอลิแลคติกแอซิด (Polylactic acid) จัดเป็นพลาสติกชีวภาพ (Bioplastic) ที่สามารถย่อยสลายได้ด้วยวิธีการทางชีวภาพ และได้รับความนิยมมากยิ่งขึ้นในการนำมาผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์ทดแทนการใช้พลาสติกทางการค้า (Commodity plastics) ที่สังเคราะห์มาจากน้ำมันปิโตรเลียมซึ่งย่อยสลายได้ยาก เพราะพอลิแลคติกแอซิดผลิตได้จากวัตถุดิบที่มาจากพืช มีสมบัติทางการรับแรงที่ดี ย่อยสลายได้ด้วยวิธีทางชีวภาพ สามารถถูกขึ้นรูปได้ง่ายด้วยวิธีการขึ้นรูปแบบพลาสติกทั่วไป และสามารถนำมาใช้งานในอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์ และทางด้านการแพทย์ แต่อย่างไรก็ตาม พอลิแลคติกแอซิดยังคงมีข้อด้อยในเรื่องของราคาที่ค่อนข้างสูง และมีความเหนียวต่ำ [2] จากงานวิจัยที่ผ่านมาของคณะวิจัยได้ทำการศึกษาผลของการใช้เส้นใยธรรมชาติ เติมลงในพอลิแลคติกแอซิดเพื่อลดต้นทุน โดยได้ทำการศึกษาผลของการเติมเส้นใยป่านศรนารายณ์ (Sisal fiber) ผลของการปรับปรุงผิวเส้นใย และผลของทิศทางการจัดเรียงเส้นใยที่มีต่อสมบัติทางกล [3] เพื่อให้เกิดความเข้าใจสมบัติของพอลิแลคติกแอซิดที่มีการเติมเส้นใยธรรมชาติเพิ่มมากขึ้น โครงการวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาสมบัติทางความร้อนและทางกายภาพของวัสดุเชิงประกอบพอลิแลคติกแอซิดและเส้นใยป่านศรนารายณ์ เนื่องจากสมบัติดังกล่าวถือว่าเป็นสมบัติที่มีความสำคัญต่อการนำไปใช้งานเช่นเดียวกันกับสมบัติทางกล และเนื่องจากความไม่เข้ากันทางโครงสร้างเคมีระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและเส้นใยป่านศรนารายณ์ซึ่งเป็นวัสดุที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic material) และวัสดุที่ชอบน้ำ (Hydrophilic material) ตามลำดับ ทางคณะวิจัยจึงได้ทำศึกษาผลของการปรับปรุงผิวเส้นใยป่านศรนารายณ์ด้วยสารคู่ควบไซเลนเพิ่มเติมด้วย

โครงการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการเติมเส้นใยป่านศรนารายณ์ และการปรับปรุงผิวเส้นใยที่มีต่อสมบัติทางความร้อนและทางกายภาพของพอลิแลคติกแอซิด โดยการประเมินผลสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิงแคลอริเมททรี (Differential scanning calorimetry, DSC) และสมบัติทางกายภาพด้วยการวัดค่าการดูดซับน้ำซึ่งเป็นสมบัติทางกายภาพที่มีความเกี่ยวข้องกับการนำไปใช้งานเป็นบรรจุภัณฑ์ที่อาจต้องสัมผัสกับน้ำหรือความชื้น

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

เพื่อศึกษาผลของเส้นใยป่านศรนารายณ์ และสารไซเลนที่มีต่ออุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วและปริมาณผลึกของพอลิแลคติกแอซิด และค่าการดูดซับน้ำ

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

1.3.1 วัตถุดิบหลักที่ใช้ในการวิจัย ประกอบด้วย พอลิแลคติกแอซิด และเส้นใยป่านศรนารายณ์

1.3.2 เครื่องมือที่ใช้การผสมและขึ้นรูปชิ้นงาน คือ เครื่องอัดขึ้นรูปด้วยความดัน

1.3.3 ตัวแปรที่ทำการศึกษา คือ การเติมและไม่เติมเส้นใยป่านศรนารายณ์ และการปรับปรุงผิวและการไม่ปรับปรุงผิวเส้นใยป่านศรนารายณ์ด้วยสารไซเลน

1.3.4 สมบัติที่ทำการทดสอบ มีดังนี้

- สมบัติทางความร้อน ด้วยการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิงแคลอริเมททรี
- ค่าการดูดซับน้ำ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

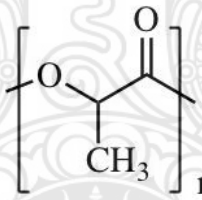
1.4.1 ด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี – ทราบผลของเส้นใยป่านศรนารายณ์และการปรับปรุงผิวเส้นใยด้วยสารไซเลนที่ต่อสมบัติทางความร้อนและกายภาพของพอลิแลคติกแอซิด ควบคู่ไปกับการเสริมสร้างความรู้และทักษะทางการวิจัยให้กับนักวิจัยไทย

1.4.2 ด้านวิชาการ – เผยแพร่องค์ความรู้ที่ได้รับในงานนิทรรศการ หรือการประชุมวิชาการแก่ผู้มีส่วนเกี่ยวข้อง หรือผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย ภายหลังการเสร็จสิ้นโครงการวิจัย

บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 พอลิแลคติกแอซิด

พอลิแลคติกแอซิดเป็นหนึ่งในพลาสติกชีวภาพที่สามารถย่อยสลายได้ด้วยวิธีการทางชีวภาพ หรือด้วยวิธีการฝังดิน โดยจัดอยู่ในตระกูลของพอลิเอสเทอร์แบบสายโซ่ตรง (Aliphatic polyester) พอลิแลคติกแอซิดมีสูตรโครงสร้างเคมี ดัง**รูปที่ 2.1** พอลิแลคติกแอซิดสามารถสังเคราะห์ได้จากกรดแลคติก (Lactic acid) ซึ่งเกิดได้จากการนำแป้งหรือน้ำตาลจากพืช เช่น แป้งข้าวโพด หรือแป้งมันสำปะหลัง ข้าว สาลี หรืออ้อยมาผ่านกระบวนการหมักด้วยจุลินทรีย์จนกระทั่งเกิดการย่อยกลายเป็นกรดแลคติก [4] พอลิแลคติกแอซิดเป็นพอลิเมอร์กึ่งผลึก (Semi-crystalline polymer) มีอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature, T_g) อยู่ในช่วง 55-59 องศาเซลเซียส และมีจุดหลอมเหลวอยู่ที่ 174-184 องศาเซลเซียส พอลิแลคติกแอซิดมีค่าความแข็งแรงทางกลและค่ามอดุลัสสูง แต่มีความเหนียวต่ำ สามารถขึ้นรูปได้ง่ายด้วยกระบวนการขึ้นรูปทั่วไปที่ใช้ในการขึ้นรูปเทอร์โมพลาสติก เช่น กระบวนการฉีดขึ้นรูป (injection moulding) กระบวนการอัดรีด (Extrusion) และกระบวนการอัดขึ้นรูป (Compression moulding) เป็นต้น [2,4]



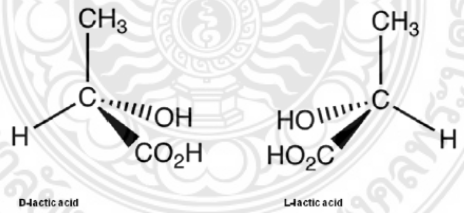
รูปที่ 2.1 สูตรโครงสร้างทางเคมีของพอลิแลคติกแอซิด [5]

พอลิแลคติกแอซิดสามารถย่อยสลายได้โดยการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis reaction) ของพันธะเอสเทอร์ และไม่จำเป็นต้องมีเอนไซม์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราการสลายตัวของพอลิแลคติกแอซิด ขึ้นอยู่กับ ขนาดและรูปร่างของชิ้นงาน อัตราส่วนระหว่างแอล- และดี-ไอโซเมอร์ และอุณหภูมิของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส พอลิแลคติกแอซิดสามารถเกิดการเสื่อมสภาพที่อุณหภูมิมากกว่า 200 องศาเซลเซียส สำหรับอุณหภูมิที่ใช้ในการขึ้นรูป พอลิแลคติกแอซิดอยู่ที่ช่วงอุณหภูมิสูงกว่า 185-190 องศาเซลเซียส ณ ช่วงอุณหภูมิดังกล่าว พอลิแลคติกแอซิดจะเกิดปฏิกิริยาการเปิดออกของซิป (unzipping) และการขาดของสายโซ่ (Chain scission) นำไปสู่การสูญเสียน้ำหนักโมเลกุลซึ่งเป็นการเสื่อมสภาพทางความร้อนของพอลิแลคติกแอซิด ดังนั้นพอลิแลคติกแอซิดจึงมีช่วงอุณหภูมิการขึ้นรูปที่แคบ วิธีการปรับปรุงความสามารถในการขึ้นรูปของพอลิแลคติกแอซิดที่ใช้กันอย่างกว้างขวาง คือ การปรับลดจุดหลอมเหลวให้ลดลงโดยการทำให้เกิดแลคไตด์อิแนนซิโอเมอร์ (Lactide enantiomers) จำนวนเล็กน้อยภายในโครงสร้างให้มีการจัดเรียงตัวแบบสุ่ม การลดลงของจุดหลอมเหลวเกิดขึ้นพร้อมกับการลดลงของ

ปริมาณผลึก และอัตราการเกิดผลึก พอลิแลคติกแอซิดที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงมีสมบัติที่คล้ายคลึงกับพอลิสไตรีน (PS) คือ เป็นเทอร์โมพลาสติกที่ใสไม่มีสี มีความมันเงา และคงรูปร่าง พอลิแลคติกแอซิดมีอายุการใช้งานที่เหมาะสมกับการนำมาทำเป็นบรรจุภัณฑ์แบบใช้ครั้งเดียว และเมื่อถูกกำจัดทิ้งอย่างเหมาะสมจะเกิดการไฮโดรไลซิสไปเป็นสารธรรมชาติที่ไม่อันตราย พอลิแลคติกแอซิดสามารถเกิดผลึกได้ในสภาวะที่ทำให้เกิดการเย็นตัวอย่างช้าๆ หรือทำการบ่ม ณ ที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว หรือการทำให้เกิดผลึกโดยการดึงยืด [5]

การสังเคราะห์พอลิแลคติกแอซิด

พอลิแลคติกแอซิดถูกสังเคราะห์ขึ้นมาจากกรดแลคติก หรือกรดอัลฟาไฮดรอกซี (**α**-Hydroxy acids) กรดแลคติกสามารถถูกผลิตขึ้นจากการหมักสารคาร์บอไฮเดรต หรือการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมี ปัจจุบันวิธีการหมักได้รับความนิยมมากกว่าการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมี การหมักจะทำการเปลี่ยนจากน้ำตาลหรือแป้งให้กลายเป็นกรดแลคติกโดยใช้แบคทีเรีย [6-7] กรดแลคติกมีชื่อทางเคมี คือ 2-ไฮดรอกซีโพรพิโอนิคแอซิด (2-Hydroxy propionic acid) เป็นโครงสร้างรูปแบบหนึ่งของกรดอัลฟาไฮดรอกซี กรดแลคติกมีไอโซเมอร์ 2 รูปแบบ คือ แบบดี และแบบแอล ดัง**รูปที่ 2.2** โดยทั้งแบบดี และแอลอิแนนซิโอเมอร์ (enantiomers) มีความว่องไวต่อแสงแตกต่างกัน กล่าวคือ มีสูตรเคมีที่เหมือนกันแต่มีการจัดเรียงตัวในสามมิติแตกต่างกัน และบิดระนาบแสงโพลาไรซ์ในทิศทางที่แตกต่างกัน ส่วนใหญ่ในธรรมชาติพบในรูปแบบแอล-ไอโซเมอร์ หรือพบในรูปของผสมระหว่างแอล- และดี-ไอโซเมอร์ เรียกว่า ของผสมราซิมิก (Racemic mixture, อัตราส่วน = 1:1 เขียนแทนด้วย DL) หรือสารประกอบมีโซ (meso-compound) ซึ่งไม่มีสมบัติบิดระนาบแสงโพลาไรซ์ พอลิแลคติกแอซิดที่มีความบริสุทธิ์เชิงแสงที่ดี ถูกผลิตได้จากการหมักสารคาร์บอไฮเดรตให้กลายเป็นกรดแลคติกโดยการหมัก [4]

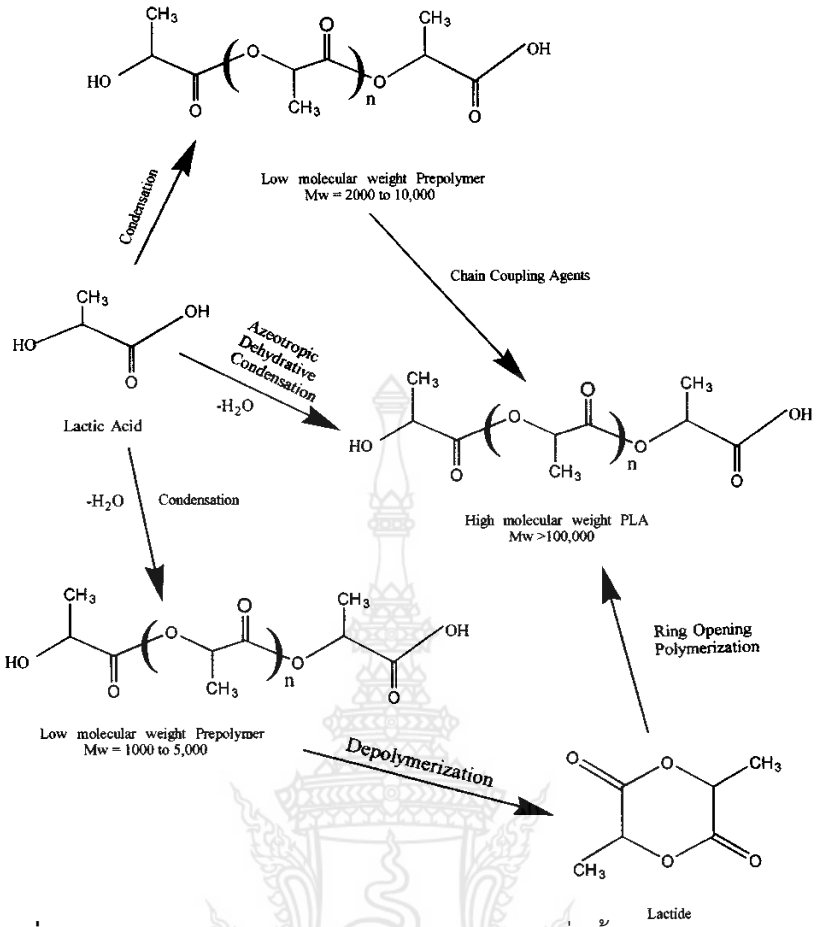


รูปที่ 2.2 โครงสร้างของกรดแลคติก รูปแบบดี- และแอล-ไอโซเมอร์ [4]

การสังเคราะห์กรดแลคติกให้กลายเป็นพอลิแลคติกที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงสามารถสังเคราะห์ได้จากกระบวนการพอลิเมอไรเซชัน 3 วิธีแตกต่างกัน ดังแสดงใน**รูปที่ 2.3** ได้แก่ ปฏิกิริยาการควบแน่นแบบโดยตรง (Direct condensation) และการใช้สารคู่ควบ (coupling agent) และ/หรือการสังเคราะห์โดยผ่านการเกิดแลคไทด์ (Lactide formation) และการสังเคราะห์พอลิแลคติกแอซิดผ่านปฏิกิริยาควบแน่นแบบอะซิโอโทรปิค (Azeotropic dehydrative condensation)

- การเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบควบแน่นโดยตรง กรดแลคติกจะถูกสังเคราะห์โดยปฏิกิริยาการควบแน่นจนกระทั่งได้เป็นพอลิเมอร์สมบัติคล้ายแก้วที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำซึ่งมีเสถียรภาพต่ำไม่เหมาะสมกับการนำไปใช้งาน ดังนั้นการเพิ่มน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำทำโดยการใช้สารคู่ควบ (coupling agent) สาเหตุที่ทำให้พอลิเมอร์ที่ได้จากการเกิดปฏิกิริยาการควบแน่นมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำเนื่องมาจากการมีอยู่ของน้ำ สารปนเปื้อน และการมีหมู่ที่มีความว่องไวต่อการทำปฏิกิริยาต่ำ [4-5]
- การสังเคราะห์พอลิแลคติกแอซิดโดยผ่านการเกิดแลคไทด์ คือ การเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันเกิดเป็นพรีพอลิเมอร์ (Prepolymer) ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ นำพรีพอลิเมอร์ไปผ่านกระบวนการแตกตัวย้อนกลับ (Depolymerization) ทำให้เกิดเป็นแลคไตด์ที่มีความบริสุทธิ์มากขึ้น จากนั้นทำให้แลคไตด์เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบการเปิดวง (Ring opening polymerization) เกิดเป็นพอลิแลคติกแอซิดที่มีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยสูง (M_w > 100,000) วิธีการสร้างแลคไตด์เป็นวิธีการเดียวเท่านั้นที่ทำให้ได้พอลิแลคติกแอซิดที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงและความบริสุทธิ์สูง [4-5]
- การสังเคราะห์พอลิแลคติกแอซิดผ่านปฏิกิริยาควบแน่นแบบอะซิโอโทรปิค คิดค้นโดย บริษัท Mitsui Toatsu Chemical เพื่อใช้ในการสังเคราะห์พอลิแลคติกแอซิดในทางการค้า โดยการใช้กรดแลคติกและตัวเร่งปฏิกิริยาผ่านกระบวนควบแน่น และการกำจัดน้ำออก (dehydration) ภายใต้สภาวะลดความดัน จนกระทั่งได้พอลิแลคติกแอซิดที่มีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยมากกว่า 300,000 [4-5]

กรดแลคติกมีไอโซเมอร์ 2 รูปแบบ คือ แบบดี และแบบแอล ดังนั้นพอลิแลคติกแอซิดที่สังเคราะห์ได้ส่วนใหญ่อาจประกอบขึ้นจากโมโนเมอร์ชนิดแอล-ไอโซเมอร์เกือบทั้งหมด (พอลิแอล-แลคติกแอซิด (PLLA)) หรือประกอบขึ้นจากโมโนเมอร์ที่เป็นของผสมราซิมิก (พอลิดีแอล-แลคติกแอซิด (PDLLA)) ในปัจจุบันการผลิตดี-ไอโซเมอร์ของกรดแลคติกที่บริสุทธิ์นั้นทำได้ยาก ดังนั้นการผลิตพอลิแลคติกแอซิดที่มีสายโซ่หลักประกอบไปด้วยโมโนเมอร์ชนิด ดี หรือพอลิดี-แลคติกแอซิด (PDLA) ในเชิงพาณิชย์จึงยังไม่เกิดขึ้น พอลิแลคติกแอซิดมีโครงสร้างผลึก 3 รูปแบบ ได้แก่ แอลฟา (α) เบตา (β) และแกมมา (γ) ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของอิแนนชิโอเมอร์แอล หรือดี,แอล โครงสร้างแบบแอลฟาเป็นโครงสร้างที่เสถียรที่สุด สามารถหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 185 องศาเซลเซียส ในขณะที่โครงสร้างเบต้าหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 175 องศาเซลเซียส [4]



รูปที่ 2.3 กระบวนการสังเคราะห์พอลิแลคติกแอซิดที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง [5]

สมบัติของพอลิแลคติกแอซิด [4]

ปริมาณแอล-ไอโซเมอร์ และ ดี-ไอโซเมอร์ในสายโซ่พอลิแลคติกแอซิดมีผลต่อสมบัติทางกล ทางความร้อน และสมบัติความต้านการซึมผ่านของก๊าซและของเหลว (Barrier properties) รวมถึงปริมาณการเกิดผลึก พอลิแลคติกแอซิดที่มีสัดส่วนของแอล-ไอโซเมอร์สูงกว่าร้อยละ 90 มีแนวโน้มเป็นพอลิเมอร์กึ่งผลึก มีอุณหภูมิการหลอมเหลว และอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วสูง ในขณะที่พอลิแลคติกแอซิดที่มีดี-ไอโซเมอร์ในสัดส่วนที่เพิ่มขึ้น มีผลทำให้สัดส่วนความเป็นผลึกลดลง อุณหภูมิการหลอมเหลว และอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วมีแนวโน้มลดลงตามสัดส่วนของแอล-ไอโซเมอร์ที่ลดลงด้วย ดังนั้น การสังเคราะห์พอลิแลคติกแอซิดให้มีสัดส่วนของไอโซเมอร์ที่แตกต่างกัน มีผลทำให้ได้พอลิแลคติกแอซิดที่มีสมบัติแตกต่างกัน ดังนั้นในการสังเคราะห์พอลิแลคติกแอซิดจึงสามารถปรับโครงสร้างของพอลิแลคติกแอซิดเพื่อให้ได้สมบัติตามที่ต้องการนำไปใช้งาน

- สมบัติด้านการละลาย

ความสามารถในการละลายของพอลิแลคติกแอซิด ขึ้นอยู่กับ สัดส่วนของไอโซเมอร์ที่เป็นองค์ประกอบในสายโซ่พอลิแลคติกแอซิด และระดับความเป็นผลึก (Degree of crystallinity) พอลิแลคติกแอซิดไม่ละลายในน้ำ แอลกอฮอล์ และสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีหมู่แทนที่ เช่น เฮกเซน

(Hexane) และเฮปเทน (Heptane) ตัวทำละลายที่ดีสำหรับพอลิแลคติกแอซิด กรณีพอลิแอล-แลคติกแอซิด สามารถละลายได้ดีในตัวทำละลายอินทรีย์กลุ่มคลอริเนเตทและฟลูออริเนเตท (Chlorinatedor fluorinated organic solvents) ไดออกเซน (Dioxane) ไดออกโซเลน (Dioxolane) และฟูเรน (Furane) ส่วนราซิมิคพอลิแลคติกแอซิดสามารถละลายได้ดีในกลุ่มตัวทำละลายข้างต้นแล้ว ยังสามารถละลายได้ดีในอะซิโตน (Acetone) ไพริดีน (Pyridine) เอทิลแลคเตท (Ethyl lactate) เอทิลอะซิเตท (Ethyl acetate) เตตระไฮโดรฟูแรน (Tetrahydrofuran) ไซลีน (Xylene) ไดเมทิลซัลฟอกไซด์ (Dimethylsulfoxide) เอ็น,เอ็น-ไดเมทิลฟอร์มาไมด์ (N,N- dimethylformamide) และเมทิลเอทิลคีโตน (Methyl ethyl ketone)

- สมบัติทางกล

กรณีพอลิแลคติกแอซิดที่ไม่ผ่านการดึงยืดมีความคงรูป และความแข็งแรงสูง แต่มีความเปราะค่อนข้างมาก แต่เมื่อนำพอลิแลคติกแอซิดไปผ่านการดึงยืด พอลิแลคติกแอซิดมีสมบัติเปลี่ยนแปลงไป โดยมีสมบัติที่ใกล้เคียงกับพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต แต่ดีกว่าพอลิสไตรีนที่ผ่านการดึงยืด ค่ามอดุลัสความต้านทานแรงดึงและแรงดัด (Tensile and flexural moduli) ของพอลิแลคติกแอซิดมีค่าสูงกว่าพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (HDPE) พอลิโพรพิลีน และพอลิสไตรีน แต่ความทนต่อแรงกระแทก (Izod impact strength) และการยืดตัว ณ จุดขาด (Elongation at break) มีค่าต่ำกว่าพอลิเมอร์ชนิดอื่นๆ

- สมบัติความต้านการซึมผ่านของก๊าซและของเหลว

ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ออกซิเจน และไนโตรเจนผ่านได้ของพอลิแลคติกแอซิดมีค่าน้อยกว่าพอลิสไตรีน แต่สูงกว่าพอลิเอทธิลีนเทเรฟทาเลต ส่วนการยอมให้ไอน้ำซึมผ่านมีค่าใกล้เคียงกันกับพอลิสไตรีน และพอลิเอทธิลีนเทเรฟทาเลต นอกจากนี้พอลิแลคติกแอซิดยังมีสมบัติป้องกันการแพร่ผ่านของกลิ่นได้ดี โดยพิจารณาจากสัมประสิทธิ์การแพร่ผ่านของสารประกอบอินทรีย์ เช่น เอทิลอะซิเตท และดี-ไลโมนีน (D-linonene) พบว่ามีค่าใกล้เคียงกับพอลิเอทธิลีนเทเรฟทาเลต

การเสื่อมสภาพของพอลิแลคติกแอซิด [4]

การเสื่อมสภาพของพอลิแลคติกแอซิดส่วนใหญ่เกิดจากการขาดออกของสายโซ่ เนื่องจากการถูกกระตุ้นด้วยความร้อน ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส การเสื่อมสภาพด้วยวิธีทางชีวภาพ (เอนไซม์) ปฏิกิริยาออกซิเดชัน การเสื่อมสภาพด้วยแสงหรือด้วยรังสี ปัจจัยที่มีผลต่อการเสื่อมสภาพของพอลิแลคติกแอซิดมีอยู่ด้วยกันหลายปัจจัย เช่น ระดับความเป็นผลึก น้ำหนักโมเลกุล ความบริสุทธิ์ สภาพแวดล้อมความเป็นกรด-เบส อุณหภูมิ ปริมาณออกซิเจน เป็นต้น การเสื่อมสภาพเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของพอลิแลคติกแอซิดมักเกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการขึ้นรูป ถ้าไม่นำพอลิแลคติกแอซิดไปอบไล่ความชื้นก่อนการนำมาขึ้นรูปพอลิแลคติกแอซิดจะถูกไฮโดรไลซ์ด้วยน้ำ ณ อุณหภูมิที่ใช้ในการขึ้นรูปทำให้เกิดกรดแลคติก ส่วนการเสื่อมสภาพของพอลิแลคติกแอซิดด้วยการย่อยสลายทางชีวภาพเนื่องจากเอนไซม์ที่ขับออกมาจากจุลินทรีย์ ได้แก่ เอนไซม์กลุ่มเอสเทอร์เรส (Esterase) โปรติเอส (Protease) และไลเปส

(Lipase) ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการย่อยสลายด้วยเอนไซม์สามารถถูกดูดซึมได้โดยจุลินทรีย์ เช่น เห็ด รา และแบคทีเรีย

2.2 ป่านศรนารายณ์

ป่านศรนารายณ์เป็นพืชเศรษฐกิจที่มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ คือ อะกาเว ไซซาลานา (Agave sisalana) มีลำต้นหนา ปล้องถี่ มีรากอยู่ใต้พื้นดิน มีลักษณะใบเป็นใบเลี้ยงเดี่ยว (simple leaf) เส้นยาว เกิดเป็นพุ่มแจ้เวียนรอบลำต้นอย่างหนาแน่น สีเขียวเข้ม มีไข (waxy bloom) คลุมตลอดใบ ปลายใบมีหนามแข็งสีดำ ปริมาณของเส้นใย อยู่ระหว่าง 3.5-5 % เส้นใยป่านศรนารายณ์ได้มาจากส่วนใบของต้นป่านศรนารายณ์ [8-9] สำหรับองค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยป่านศรนารายณ์ มีรายละเอียดดัง **ตารางที่ 2.1** ประกอบด้วย เซลลูโลส (Cellulose) ประมาณ 65.8 % เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) ประมาณ 12.0 % ลิกนิน (Lignin) ประมาณ 9.9 % เพกติน (Pectin) ประมาณ 0.8% องค์ประกอบที่ละลายน้ำ ประมาณ 1.2% แวกซ์ (wax) ประมาณ 0.3 % และน้ำ ประมาณ 10.0% [10] สำหรับคุณภาพของเส้นใยป่านศรนารายณ์ ขึ้นอยู่กับ สภาวะแวดล้อมของเส้นใยป่านศรนารายณ์ เช่น แหล่งเพาะปลูก ปริมาณน้ำและอาหารที่พืชได้รับ และอายุของพืช เป็นต้น [9]

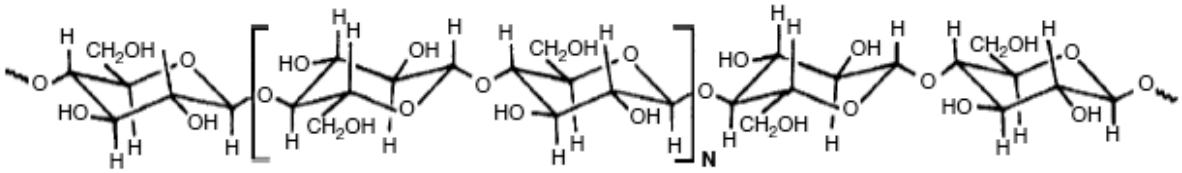
ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยป่านศรนารายณ์ [10]

องค์ประกอบทางเคมี	**ปริมาณ (%)**
เซลลูโลส	65.8
เฮมิเซลลูโลส	12.0
ลิกนิน	9.9
เพกติน	0.8
องค์ประกอบที่ละลายน้ำ	1.2
แวกซ์	0.3
น้ำ	10.0

ลักษณะโครงสร้างทางเคมีและสมบัติขององค์ประกอบทางเคมีหลักที่มีอยู่ในเส้นใยป่านศรนารายณ์ [11-12] มีดังนี้

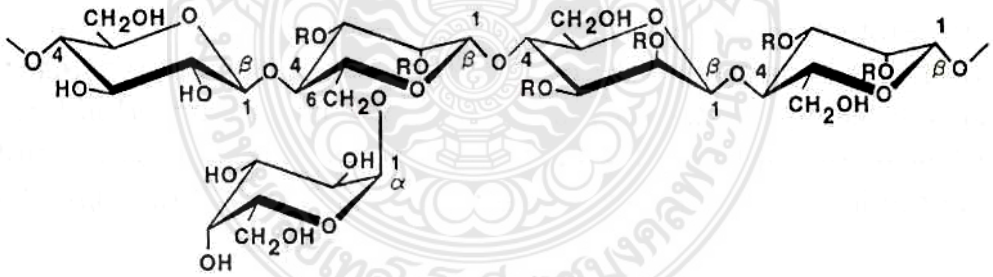
1. เซลลูโลส: จัดเป็นพวกโฮโมพอลิแซคคาไรด์ (homopolysaccharide) เชิงเส้นตรง ประกอบด้วยหน่วยของβ-D-gluccopyranose เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ 1,4-β-glucosidic bonds ดังแสดงใน**รูปที่ 2.4** เนื่องจากเซลลูโลสมีโครงสร้างเป็นเส้นตรงและมีแรงดึงดูดระหว่างกันทั้งภายในและภายนอกที่แข็งแรงด้วยพันธะไฮโดรเจนทำให้เซลลูโลสมีความเป็นผลึกสูง การรวมตัวเป็นกลุ่มของโมเลกุลเซลลูโลสเกิดเป็นไมโครไฟบริล (microfibrils) และไมโครไฟบริลรวมตัวกันเป็นไฟบริล (fibril) และในท้ายที่สุดได้

เป็นเส้นใยเซลลูโลส โครงสร้างที่มีลักษณะเป็นเส้นใยและพันธะไฮโดรเจนที่แข็งแรงของเซลลูโลสส่งผลทำให้เซลลูโลสมีสมบัติความทนแรงดึงที่แข็งแรงและทนต่อตัวทำละลายได้ดี



รูปที่ 2.4 โครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส [12]

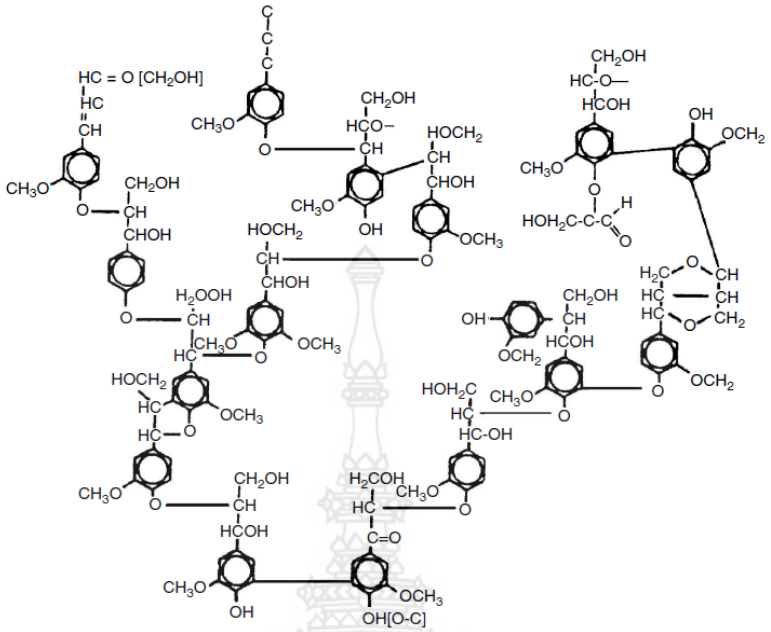
2. เฮมิเซลลูโลส: จัดอยู่ในกลุ่มของเฮทเทอร์โรพอลิแซคคาไรด์ (heteropolysaccharides) แบบอสัณฐาน มีลักษณะโครงสร้างแบบกิ่ง เฮมิเซลลูโลส ประกอบด้วย ส่วนของน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวหลายชนิดเชื่อมต่อกัน เฮมิเซลลูโลสสามารถถูกไฮโดรไลซ์ได้ง่ายด้วยกรดได้เป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว เช่น D-glucose, D-galactose, D-xylose, L-arabose เป็นต้น ความแตกต่างระหว่างเฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลสมีอยู่ด้วยกัน 3 ประการ ประการแรก คือ เฮมิเซลลูโลสประกอบด้วยน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวหลายชนิดแต่เซลลูโลสมีเพียง 1,4-β-D-gluccopyranose เชื่อมต่อกันเท่านั้น ประการที่สอง คือ ภายในโครงสร้างของเฮมิเซลลูโลสมีส่วนที่เป็นกิ่งก้านในขณะที่เซลลูโลสมีโครงสร้างเป็นเส้นตรง ส่วนประการที่สาม คือ องศาการเกิดพอลิเมอไรเซชันของเซลลูโลสโดยธรรมชาติแล้วมีค่ามากกว่าเฮมิเซลลูโลสประมาณ 10 ถึง 100 เท่า เฮมิเซลลูโลสส่วนมากมีองศาการเกิดพอลิเมอไรเซชันประมาณ 200 เท่านั้น **รูปที่ 2.5** เป็นตัวอย่างของโครงสร้างทางเคมีของเฮมิเซลลูโลส



รูปที่ 2.5 ตัวอย่างโครงสร้างทางเคมีของเฮมิเซลลูโลส [11]

3. ลิกนิน: พอลิเมอร์เชิงซ้อน แบบอสัณฐาน ซึ่งมีโครงสร้างที่มีความซับซ้อนค่อนข้างมากและมีน้ำหนักโมเลกุลสูง ภายในโครงสร้างประกอบด้วยส่วนของอะลิฟาติก (aliphatic) และอะโรมาติก (aromatic) โมโนเมอร์ของลิกนิน คือ ฟีนิลโพรเพน (phenylpropane) สมบัติเชิงกลของลิกนินมีค่าต่ำกว่าของเซลลูโลส ลิกนินมีผลทำให้เส้นใยธรรมชาติมีความแข็งสูง ลิกนินสามารถถูกย่อยสลายได้ด้วยเอนไซม์

ลิกเนส (lignase) หรือลิกนินเนส (ligninase) ซึ่งเป็นจุลินทรีย์ที่สำคัญในรา โครงสร้างทางเคมีของลิกนิน ดังแสดงใน**รูปที่ 2.6**



รูปที่ 2.6 โครงสร้างทางเคมีของลิกนิน [10]

สำหรับสมบัติของเส้นใยป่านศรนารายณ์ สมบัติทางกายภาพของเส้นใยป่านศรนารายณ์ มีรายละเอียดดัง**ตารางที่ 2.2** โดยมีค่าความหนาแน่นจำเพาะ เท่ากับ 1.327 มีความยาวของเส้นใยประมาณไม่เกิน 1.5 เมตร และมีเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เกิน 0.2 มิลลิเมตร แปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำ 170 % [8] ส่วนสมบัติทางกลของเส้นใยป่านศรนารายณ์ถือว่าเป็นเส้นใยธรรมชาติที่มีสมบัติทางกลค่อนข้างดี โดยมีค่าความทนแรงดึง 511-635 MPa ค่ามอดุลัสของยังก์ 9.4 – 22.0 GPa และค่าการยืดตัว ณ จุดขาด 2.0-2.5% [8] และเมื่อเปรียบเทียบค่ามอดุลัสกับเส้นใยชนิดอื่น ดังแสดงใน**ตารางที่ 2.3** พบว่า เส้นใยป่านศรนารายณ์มีค่ามอดุลัสจำเพาะต่ำกว่าเพียงเส้นใยกัญชง และป่านลินินเท่านั้น แต่มีค่ามอดุลัสจำเพาะเท่ากันกับเส้นใยแก้ว นอกจากนี้เส้นใยป่านศรนารายณ์ยังเป็นพืชที่ปลูกได้ง่าย ราคาไม่แพง และสามารถย่อยสลายได้ด้วยวิธีตามธรรมชาติ จากข้อดีที่กล่าวมาข้างต้นนี้ จึงเป็นเหตุผลที่ทำให้มีการนำเส้นใยป่านศรนารายณ์มาทำเป็นสารเสริมแรงให้กับพอลิเมอร์ [9]

ตารางที่ 2.2 สมบัติทางกายภาพของเส้นใยป่านศรนารายณ์ [8]

สมบัติทางกายภาพ	
ค่าความถ่วงจำเพาะ	1.327
ความยาวเส้นใย (มิลลิเมตร)	1200 - 1500
เส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย (มิลลิเมตร)	0.15 – 0.20
ปริมาณการดูดซับน้ำ (%)	170

ตารางที่ 2.3 ค่ามอดุลัสจำเพาะของเส้นใยธรรมชาติที่สำคัญ เปรียบเทียบกับเส้นใยแก้ว [9]

ชนิดของเส้นใย	ค่าความหนาแน่น	ค่ามอดุลัสจำเพาะ
เส้นใยแก้ว	2.55	29
เส้นใยกัญชง	1.48	47
เส้นใยป่านลินิน	1.4	43-57
เส้นใยปอกระเจา	1.46	7-21
เส้นใยป่านศรนารายณ์	1.33	29
เส้นใยเปลือกลูกมะพร้าว	1.25	5
เส้นใยฝ้าย	1.51	8

สำหรับการนำเส้นใยป่านศรนารายณ์ไปใช้ประโยชน์ นิยมนำเส้นใยป่านศรนารายณ์มาทำเป็นเชือกขนาดใหญ่สำหรับลากจูงเรือและใช้ในอุตสาหกรรมการเกษตร ทอเป็นผ้ารองพรม ทำพรม และงานหัตถกรรมต่างๆ เช่น หมวก กระเป๋า เป็นต้น สำหรับการนำมาทำเป็นสารเสริมแรงในพอลิเมอร์ ป่านศรนารายณ์สามารถนำมาทำเป็นสารเสริมแรงได้ทั้งในเทอร์โมพลาสติก และเทอร์โมเซต [9]

2.3 การปรับปรุงผิวเส้นใยธรรมชาติด้วยสารไซเลน [10, 13-14]

สารไซเลนที่มีหมู่สารอินทรีย์ (organofunctional silane) คือ สารไซเลนที่เป็นของผสมระหว่างซิลิคอนและสารอินทรีย์ที่มีลักษณะคล้ายคลึงกับพอลิเมอร์หรือเรซิน จึงนิยมนำมาใช้เป็นสารช่วยในการยึดเกาะกันที่ดีขึ้นหรือสารคู่ควบระหว่างพอลิเมอร์และสารเสริมแรงที่เป็นพวกแร่ธาตุหรือเส้นใยธรรมชาติ เนื่องจากภายในโครงสร้างโมเลกุลของสารไซเลนมีส่วนที่สามารถเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสกับน้ำเปลี่ยนไปเป็นหมู่ไฮดรอกซิลซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับเซลลูโลสได้ และมีหมู่ที่สามารถเกิดปฏิกิริยาทางเคมีหรือสามารถเข้ากันได้กับพอลิเมอร์เมทริกซ์ ดังนั้นการใช้สารไซเลนเป็นสารคู่ควบจึงมีผลทำให้พันธะระหว่างเฟสมีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้น

โครงสร้างทางเคมีของสารไซเลนโดยทั่วไป คือ

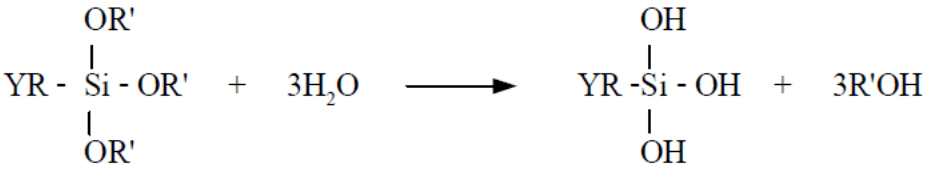
$$X_3SiRY$$

โดยที่ X คือ ตำแหน่งที่สามารถเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (hydrolysable groups หรือ alkoxy groups) โดย X เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสกับน้ำเกิดเป็นสารไซลานอล (silanol) ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ของเซลลูโลสได้และสามารถทำปฏิกิริยาควบแน่นกันเองได้ (self condensation)

Y คือ หมู่ที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาหรือสามารถเข้ากันได้กับพอลิเมอร์ (organofunctional group)

กลไกการสร้างพันธะของสารไซเลนกับเส้นใยธรรมชาติ แบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอน ดังนี้

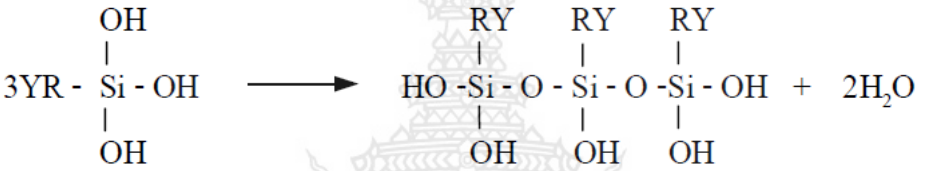
ขั้นตอนที่ 1: การเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสกับน้ำ



(2.1)

จากสมการที่ 2.1 แสดงปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของสารไซเลนกับน้ำ โดยทำปฏิกิริยาที่ตำแหน่งของหมู่ alkoxy (X หรือ OR') เกิดเป็นสารไซลานอลซึ่งมีหมู่ไฮดรอกซิลอยู่ในโครงสร้าง ในการทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสอาจใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมด้วย

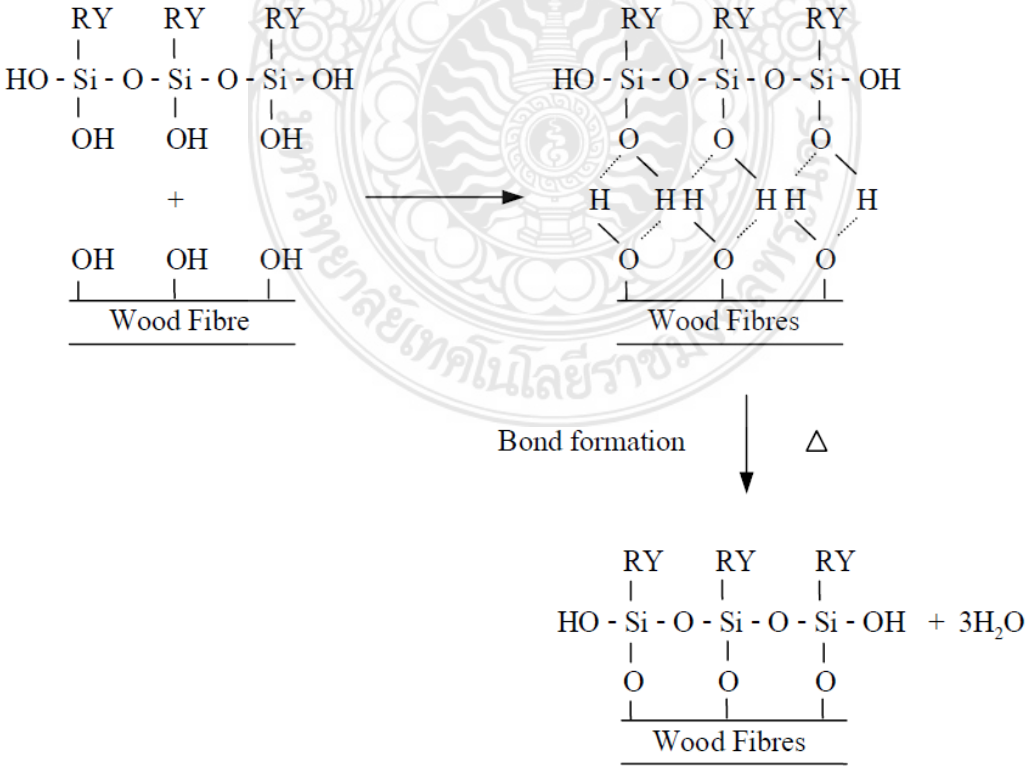
ขั้นตอนที่ 2: การเกิดปฏิกิริยาควบแน่น



(2.2)

จากสมการที่ 2.2 แสดงปฏิกิริยาการควบแน่นกันเองของสารไซนอล ซึ่งการเกิดปฏิกิริยาอาจใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมด้วย โดยทั่วไปแล้วเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาตัวเดียวกับของกรณีการเกิดไฮโดรไลซิส

ขั้นตอนที่ 3: การสร้างพันธะระหว่างสารไซลานอลและเส้นใยเซลลูโลส



(2.3)

จากสมการที่ 2.3 แสดงการสร้างพันธะระหว่างสารไซลานอลและเส้นใย โดยการสร้างพันธะเกิดขึ้นภายใต้สภาวะกรดหรือเบส เพื่อเร่งให้กลไกการสร้างพันธะเกิดได้เร็วขึ้น และให้ความร้อนในระหว่างการทำ ปฏิกิริยา นอกจากการทำปฏิกิริยาของไซลานอลกับหมู่ไฮดรอกซิลของพื้นผิวเส้นใยแล้วยังมีการสร้างพอลิไซลอคเซนเกิดขึ้นด้วย

ขั้นตอนที่ 4: การเกิดแรงกระทำ ระหว่างกันของพอลิเมอร์และสารไซเลน

ในขั้นตอนนี้พอลิเมอร์ที่ทำหน้าที่เป็นเมทริกซ์สามารถเข้ากับเส้นใยธรรมชาติที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วยสารไซเลนได้มากขึ้น เนื่องจากการปรับปรุงผิวด้วยสารไซเลนมีผลทำให้หมู่ไฮดรอกซิลของเส้นใยลดลงและสารไซเลน ณ ตำแหน่ง Y ซึ่งเป็นหมู่ที่สามารถทำปฏิกิริยากับพอลิเมอร์หรือมีความสามารถในการเข้ากันกับพอลิเมอร์ได้ ทำให้มีการยึดเกาะระหว่างเฟสที่ดีขึ้น

2.4 การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

Buasri และคณะ (2012) [15] ศึกษาผลของปริมาณเส้นใยผักตบชวาและการปรับปรุงผิวเส้นใยด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีต่อสมบัติทางกลและทางความร้อนของพอลิแลคติกแอซิด การปรับปรุงผิวเส้นใยด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 15 %w/v ที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากงานวิจัยพบว่า การเติมเส้นใยผักตบชวามีผลทำให้ค่ามอดุลัสแรงดึงเพิ่มสูงขึ้น แต่ลดค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดและค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว การปรับปรุงผิวเส้นใยด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ช่วยปรับปรุงความสามารถในการรับแรงให้ดีขึ้น โดยการเพิ่มแรงกระทำระหว่างเฟสและเพิ่มความสามารถในการเปียกผิวของเมทริกซ์บนผิวเส้นใย ปริมาณผลึกของพอลิแลคติกแอซิดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเส้นใยผักตบชวาเพิ่มขึ้น นี้แสดงว่า เส้นใยผักตบชวาทำหน้าที่เป็นสารก่อผลึกของพอลิแลคติกแอซิด

Sujaritjun และคณะ (2013) [16] ได้ทำการศึกษาผลของชนิดและปริมาณเส้นใยธรรมชาติและการปรับปรุงผิวเส้นใยธรรมชาติด้วยอีพอกซิไดซ์พอลิบิวตะไดอีน (Epoxidized polybutadiene) ที่มีต่อพอลิแลคติกแอซิด จากงานวิจัยพบว่า เส้นใยไผ่มีประสิทธิภาพเป็นสารเสริมแรงให้กับพอลิแลคติกแอซิดที่ดีที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับเส้นใยจากหญ้าแฝกและเส้นใยมะพร้าว การเพิ่มปริมาณเส้นใยธรรมชาติมีผลทำให้ค่ามอดุลัสความต้านทานแรงดึงเพิ่มขึ้น แต่มีผลทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงลดลง การปรับปรุงผิวเส้นใยธรรมชาติด้วยอีพอกซิไดซ์พอลิบิวตะไดอีนสามารถปรับปรุงค่าความต้านทานแรงดึงเฉพาะกรณีเส้นใยไผ่และเส้นใยมะพร้าวเท่านั้น แต่กรณีเส้นใยหญ้าแฝกไม่สามารถสังเกตเห็นผลของการปรับปรุงผิวเส้นใยได้ชัดเจนมากนัก

Manshor และคณะ (2014) [17] ได้ทำการศึกษาผลของปริมาณเส้นใยจากเปลือกทุเรียน และการปรับปรุงผิวเส้นใยด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ 4 % ที่มีต่อค่าความต้านทานแรงกระแทกและสมบัติทางความร้อนของพอลิแลคติกแอซิด จากงานวิจัยพบว่า การปรับปรุงผิวเส้นใยเปลือกทุเรียนด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ช่วยปรับปรุงค่าความต้านทานแรงกระแทก โดยทำให้ค่าความต้านทานแรงกระแทกกรณีการเติมเส้นใยเปลือกทุเรียนที่ผ่านการปรับปรุงผิว ปริมาณเส้นใย 30 %โดยน้ำหนัก มีค่าเพิ่มสูงขึ้นและมีค่า

ใกล้เคียงกับกรณีพอลิแลคติกแอซิด และการปรับปรุงผิวเส้นใยด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ยังมีส่วนช่วยในการปรับปรุงเสถียรภาพทางความร้อนของวัสดุเชิงประกอบพอลิแลคติกแอซิดและเส้นใยเปลือกทุเรียน และการเพิ่มขึ้นของค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว อุณหภูมิการเกิดผลึก และอุณหภูมิจุดหลอมเหลวเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุเชิงประกอบที่เติมเส้นใยที่ไม่ผ่านการปรับปรุงผิว จากผลดังกล่าวชี้ว่า การปรับปรุงผิวด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ช่วยปรับปรุงประสิทธิภาพการเสริมแรงของเส้นใยเปลือกทุเรียน

González-López และคณะ (2019) [18] ได้ทำการศึกษาผลของวิธีการปรับปรุงผิวเส้นใยมะพร้าวที่มีต่อการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเส้นใยมะพร้าวและพอลิแลคติกแอซิด วิธีการปรับปรุงผิวทางเคมีที่เลือกมาทำการศึกษา คือ การปรับปรุงผิวด้วยสารละลายโคพอลิเมอร์แบบกิ่งของพอลิแลคติกแอซิดที่ถูกกราฟท์ด้วยมาลิอิกแอนไฮดราย (maleic anhydride grafted to poly(lactic acid), MAPLA) และการปรับปรุงผิวด้วยสารละลายโคพอลิเมอร์แบบสลับระหว่างพอลิเมทิลไวนิลอีเทอร์และมาลิอิกแอนไฮดราย (poly(methyl vinyl ether-alt-maleic anhydride), MA-c-PMVE) จากงานวิจัยพบว่า การปรับปรุงผิวด้วย MA-c-PMVE มีประสิทธิภาพในการปรับปรุงค่าความต้านทานแรงดึงมากกว่ากรณีการปรับปรุงผิวด้วย MAPLA นอกจากนี้การปรับปรุงผิวยังมีส่วนช่วยลดการดูดซับน้ำของวัสดุเชิงประกอบ

สุพรรษา นพวงค์ และคณะ (2563) [3] ได้ทำการศึกษาผลของการเติมเส้นใยป่านศรนารายณ์ ทิศทางการจัดเรียงของเส้นใย และผลของการปรับปรุงผิวด้วยสารอีพอกซีไซเลนที่มีต่อสมบัติการรับแรงดึง แรงดัด และแรงกระแทกของพอลิแลคติกแอซิด จากงานวิจัยพบว่า การเติมเส้นใยป่านศรนารายณ์มีผลทำให้ค่ามอดุลัสแรงดึงและแรงดัด และค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดมีค่าเพิ่มสูงขึ้น แต่มีผลทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด และค่าความต้านทานแรงกระแทกลดลง การปรับปรุงผิวเส้นใยด้วยสารอีพอกซีไซเลนมีส่วนช่วยปรับปรุงค่ามอดุลัสของแรงดึงและแรงดัดให้มีค่าเพิ่มสูงขึ้น โดยสารอีพอกซีไซเลนอาจช่วยเพิ่มการยึดเกาะระหว่างเฟสด้วยการเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างวงแหวนออกซิเรนของสารไซเลนและหมู่ไฮดรอกซิลของพอลิแลคติกแอซิด ส่วนผลของทิศทางการจัดเรียงตัวเส้นใย พบว่า วัสดุเชิงประกอบที่มีการจัดเรียงตัวเส้นใยในทิศทาง 0 องศา มีประสิทธิภาพในการรับแรงดึงได้สูงกว่ากรณีการจัดเรียงตัวเส้นใยในทิศทาง 45 องศา

บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 วัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

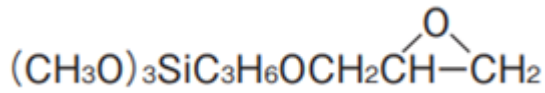
3.1.1 เม็ดพอลิแลคติกแอซิด เกรด 4043D สำหรับผลิตฟิล์มแบบจัดเรียงตัว 2 ทิศทาง (Biaxially oriented films) จากบริษัท Nature Works LLC (USA) ดัง**รูปที่ 3.1**

รูปที่ 3.1 เม็ดพอลิแลคติกแอซิด เกรด 4043D จากบริษัท Nature Works LLC

3.1.2 เส้นใยป่านศรนารายณ์ จากสหกรณ์หุบกะพง จังหวัดเพชรบุรี มีลักษณะเป็นเส้นใยยาว ดังแสดงใน **รูปที่ 3.2**

รูปที่ 3.2 ลักษณะของเส้นใยป่านศรนารายณ์ที่ใช้ในการวิจัย

3.1.3 สารอีพอกซีไซเลน (Epoxy silane) จากบริษัท Shin-Etsu Silicones (ประเทศไทย) จำกัด ถูกใช้ในการปรับปรุงผิวเส้นใยป่านศรนารายณ์ โดยมีชื่อทางการค้า คือ KBM403 และมีชื่อทางเคมี คือ 3-ไกลซิดอกซีพรอพิล ไตรเมทอกซีไซเลน (3-Glycidoxypropyl trimethoxysilane) และมีโครงสร้างทางเคมีดังรูปที่ 3.3

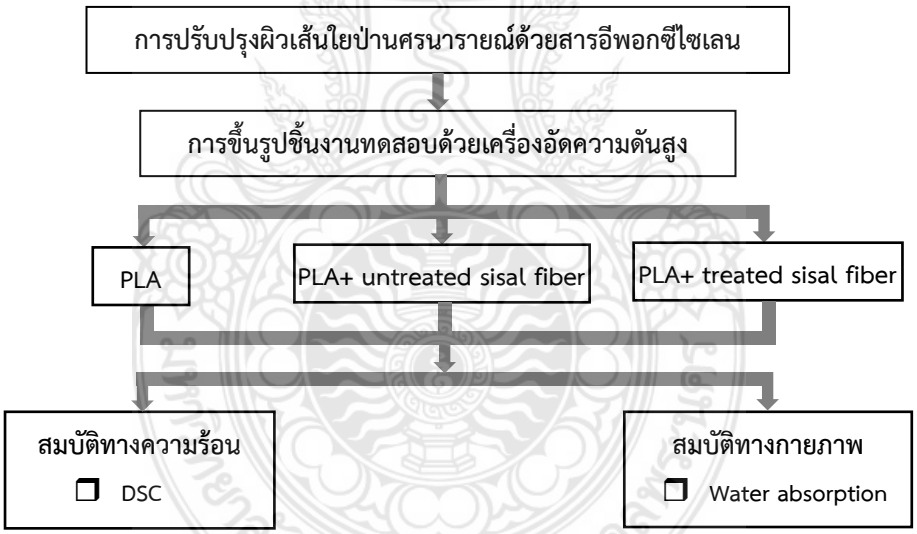


รูปที่ 3.3 สูตรโครงสร้างทางเคมีของสารอีพอกซีไซเลน KBM403

3.1.4 กรดอะซิติก (Acetic acid) จากบริษัท แกมมาโก้ (ประเทศไทย) จำกัด ถูกใช้ในการปรับค่า pH ในการขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสระหว่างสารอีพอกซีไซเลนและน้ำกลั่น

3.2 แผนการดำเนินการวิจัย

แผนการดำเนินการวิจัยของโครงการวิจัยนี้ มีรายละเอียดดัง**รูปที่ 3.4** เริ่มจากการปรับปรุงผิวเส้นใยป่านศรนารายณ์ด้วยสารอีพกซีไซเลน หลังจากนั้นทำการขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบด้วยเครื่องอัดความดันสูง ดยทำการขึ้นรูปพอลิแลคติกแอซิด วัสดุเชิงประกอบระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและเส้นใยป่านศรนารายณ์ที่มีการปรับผิวด้วยสารอีพอกซีไซเลน และที่ไม่มีการปรับปรุงผิว และสุดท้ายนำชิ้นงานมาทำการทดสอบวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิงแคลอริมิเตอร์ และทำการทดสอบวัดค่าการดูดซับน้ำ และทำการวิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง



รูปที่ 3.4 แผนภาพการดำเนินงานวิจัยการศึกษาผลของเส้นใยป่านศรนารายณ์และการปรับปรุงผิวเส้นใยที่มีต่อสมบัติทางความร้อนและทางกายภาพของพอลิแลคติกแอซิด

3.3 วิธีการดำเนินการวิจัย

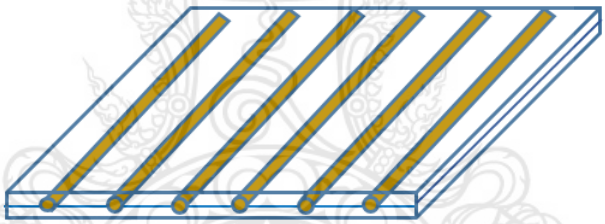
3.3.1 ขั้นตอนการปรับปรุงผิวเส้นใยป่านศรนารายณ์ด้วยสารอีพอกซีไซเลน

- ทำการอบไล่ความชื้นเส้นใยป่านศรนารายณ์ด้วยตู้อบลมร้อน ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หรือจนกระทั่งน้ำหนักคงที่
- ทำการเตรียมสารละลายอีพอกซีไซเลน KBM403 ความเข้มข้น 0.5 %โดยน้ำหนักของสารละลาย โดยใช้น้ำกลั่น และมีการเติมกรดอะซิติกเพื่อทำการปรับค่า pH ให้มีค่าเท่ากับ 3 ทำการกวนสารละลายตลอดเวลาด้วยเครื่องกวนแม่เหล็ก (Magnetic stirrer) เป็นเวลา 30 นาที เพื่อทำให้สารอีพอกซีไซเลนเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสกับน้ำกลั่น
- ทำการปรับปรุงผิวเส้นใยป่านศรนารายณ์ โดยการนำเส้นใยป่านศรนารายณ์มาแช่ในสารละลายอีพอกซีไซเลน โดยสัดส่วนของสารอีพอกซีไซเลน 1.0 %โดยน้ำหนักของเส้นใย และนำของผสมไปอบ ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาการควบแน่นและการเกิดปฏิกิริยาระหว่างเส้นใยและสารอีพอกซีไซเลน จากนั้นนำเส้นใยที่ผ่านการอบมาล้างสารอีพอกซีไซเลนส่วนเกินออกจากผิวเส้นใยด้วยน้ำกลั่น และสุดท้ายอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส จนกระทั่งน้ำหนักคงที่

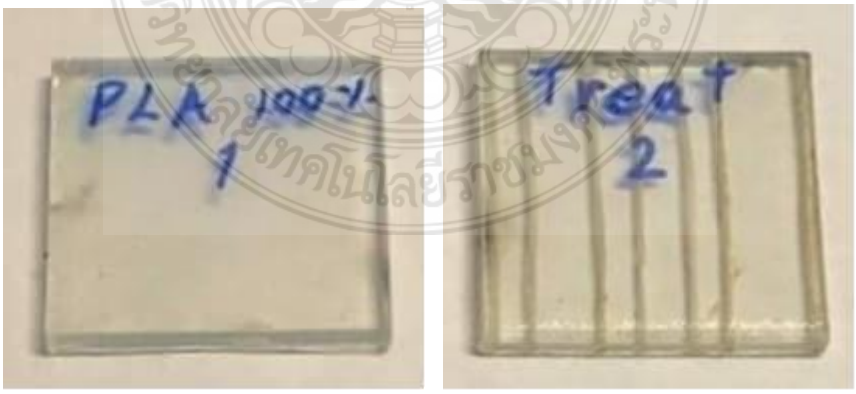
3.3.2 ขั้นตอนการขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบด้วยเครื่องอัดความดันสูง

- ขั้นตอนการขึ้นรูปแผ่นชีทพอลิแลคติกแอซิด เริ่มต้นจากการนำเม็ดพลาสติกพอลิแลคติกแอซิดมาทำการอบไล่ความชื้น ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จากนั้นนำเม็ดพอลิแลคติกแอซิดมาทำการขึ้นรูปเป็นแผ่นพอลิแลคติกแอซิด ด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปด้วยความดันสูง ยี่ห้อ Cometech รุ่น QC-601T ของบริษัท Cometech ประเทศไต้หวัน ดัง**รูปที่ 3.5** โดยใช้แม่พิมพ์ ขนาด 130 x 130 x 1 มิลลิเมตร^3 อุณหภูมิที่ใช้ในการขึ้นรูป คือ 185 องศาเซลเซียส ความดันที่ใช้ในการอัดขึ้นรูป คือ 2,000 psi เวลาที่ใช้ในการอุ่นความร้อน (Pre-heat) 5 นาที เวลาที่ใช้ในการอัดขึ้นรูป 5 นาที และทำการหล่อเย็นด้วยน้ำหล่อเย็น เป็นเวลา 4 นาที
- ขั้นตอนการขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบ กรณีการขึ้นรูปชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบพอลิแลคติกแอซิดและเส้นใยป่านศรนารายณ์เริ่มต้นจากการนำแผ่นชีทพอลิแลคติกแอซิด จำนวน 2 แผ่น มาทำการประกบบนล่างกับเส้นใยป่านศรนารายณ์ที่ทำการตรึงเส้นใยให้จัดเรียงเป็นเส้นตรง ดัง**รูปที่ 3.6** สัดส่วนของปริมาณเส้นใย อยู่ที่ประมาณ 0.34 %โดยน้ำหนัก และนำมาทำการอัดขึ้นรูปชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปด้วยความดันสูง โดยใช้อุณหภูมิ 185 องศาเซลเซียส ความดันที่ใช้ในการอัดขึ้นรูป 1,200 psi เวลาที่ใช้ในการอุ่นความร้อน 12 นาที เวลาที่ใช้ในการอัดขึ้นรูป 12 นาที และทำการหล่อเย็นด้วยน้ำหล่อเย็น เป็นเวลา 6 นาที ส่วนกรณีการเตรียมชิ้นงานทดสอบพอลิแลคติกแอซิดมีขั้นตอนและสภาวะที่ใช้ในการขึ้นรูปเช่นเดียวกับชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบ หลังจากนั้นนำแผ่นชิ้นงานมาทำการตัดเป็นชิ้นงานทดสอบ ดังแสดงใน**รูปที่ 3.7** มีขนาดชิ้นงานทดสอบ 20 x 20 มิลลิเมตร^2

รูปที่ 3.5 เครื่องอัดด้วยความดัน รุ่น QC-601T ของบริษัท Cometech ประเทศไต้หวัน



รูปที่ 3.6 ลักษณะการจัดเรียงตัวของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบพอลิแลคติกแอซิดและเส้นใยป่านศรนารายณ์



รูปที่ 3.7 ชิ้นงานทดสอบพอลิแลคติกแอซิด และชิ้นงานทดสอบวัสดุเชิงประกอบ

3.3.3 ขั้นตอนการทดสอบสมบัติ

- สมบัติทางกายภาพ

การทดสอบการดูดซับน้ำ (Water absorption) ดำเนินการโดยนำชิ้นงานพอลิแลคติกแอซิด และชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบกรณีเส้นใยที่ผ่านการปรับปรุงผิว และไม่ผ่านการปรับปรุงผิว ขนาด 20 x 20 มิลลิเมตร^2 สูตรละ 3 ชิ้นงาน นำมาอบไล่ความชื้นในตู้อบ ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นทำการชั่งน้ำหนักชิ้นงานแห้งด้วยเครื่องชั่งดิจิตอล แบบทศนิยม 2 ตำแหน่ง นำชิ้นงานที่ผ่านการอบมาแช่ในน้ำที่กลั่น หลังจากนั้นทำการเก็บตัวอย่างชิ้นงานที่เวลาแช่น้ำต่างๆ กัน คือ 0 0.5 1 2 4 8 24 48 72 96 และ 120 ชั่วโมง เพื่อทำการชั่งน้ำหนักชิ้นงานเปียก โดยนำชิ้นงานทดสอบออกจากน้ำและทำการซับด้วยกระดาษซับก่อนชั่งน้ำหนัก และทำการคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ ดังสมการที่ 3.1

$$\%water\ absorption = \frac{W_t - W_o}{W_o} \times 100 \qquad (3.1)$$

โดยที่ W_t คือ น้ำหนักของชิ้นงานทดสอบที่ผ่านการแช่น้ำ ณ เวลา t

W_o คือ น้ำหนักของชิ้นงานทดสอบที่ผ่านการอบ อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

- การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิงแคลอริมิเตอร์ (Differential scanning calorimeter, DSC)

ทำการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของชิ้นงานทดสอบ โดยใช้ Differential scanning calorimeter รุ่น TGA/DSC3+ ของบริษัท Mettler-Toledo (ประเทศไทย) จำกัด ดังแสดงใน**รูปที่ 3.8** สภาวะที่ใช้ในการทดสอบ คือ ทำการทดสอบภายใต้สภาวะไนโตรเจน และมีการให้ความร้อน 2 ครั้ง การให้ความร้อนครั้งที่ 1 ที่อุณหภูมิ 25-200 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที จากนั้นทำการลดอุณหภูมิจาก 200 ถึง 25 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการลดความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที และทำการให้ความร้อนครั้งที่ 2 ที่อุณหภูมิ 25-200 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที หลังจากนั้นนำกราฟให้ความร้อนครั้งที่ 2 มาทำการวิเคราะห์หาค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว อุณหภูมิการเกิดผลึกขณะให้ความร้อน (Cold crystallization temperature, Tc) จุดหลอมเหลว (Melting temperature, Tm) และปริมาณผลึกของพอลิแลคติกแอซิดในชิ้นงานทดสอบ สำหรับการหาค่าเปอร์เซ็นต์การเกิดผลึก (Percentage crystallinity, X_c) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 3.2

$$X_c = \frac{(H_m - H_{cc})}{H_m^o} \times \frac{100}{W_{PLA}} \qquad (3.2)$$

โดยที่ H_m คือ ค่าเอนทัลปีในการหลอมเหลว (Melting enthalpy) ของชิ้นงานทดสอบ

H_m° คือ ค่าเอนทัลปีในการหลอมเหลว สำหรับกรณี PLA ที่มีปริมาณผลึก 100 % ซึ่งมีค่าเท่ากับ 97.2 J/g [19]

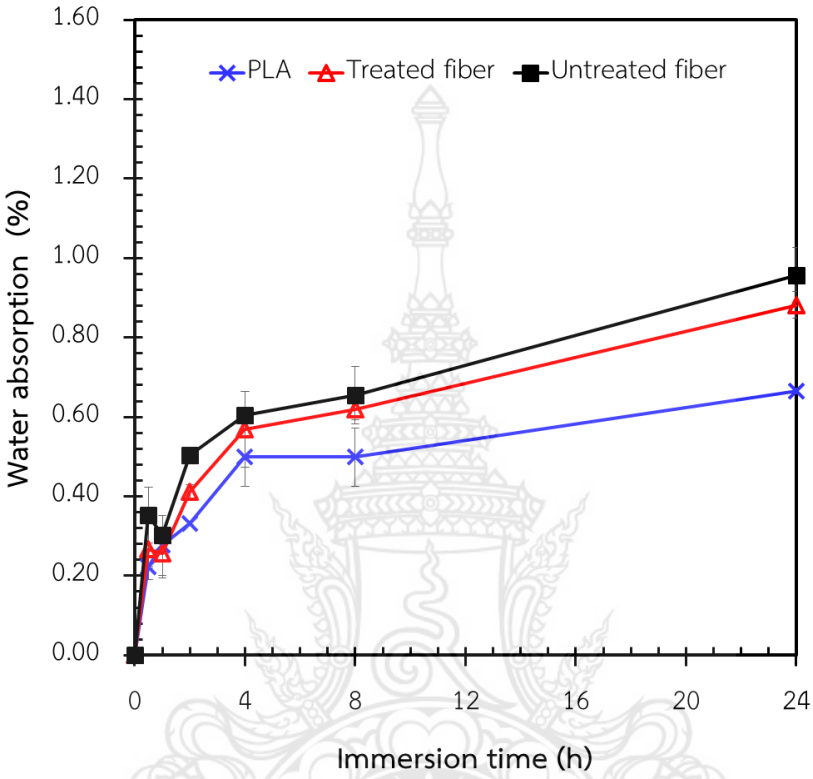
H_{cc} คือ ค่าเอนทัลปีในการเกิดผลึกในระหว่างการทดสอบ

w_{PLA} คือ สัดส่วนโดยน้ำหนักของพอลิแลคติกแอซิด

รูปที่ 3.8 เครื่อง Thermogravimetric analyzer รุ่น TGA/DSC3+ ของบริษัท Mettler-Toledo จำกัด

บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล

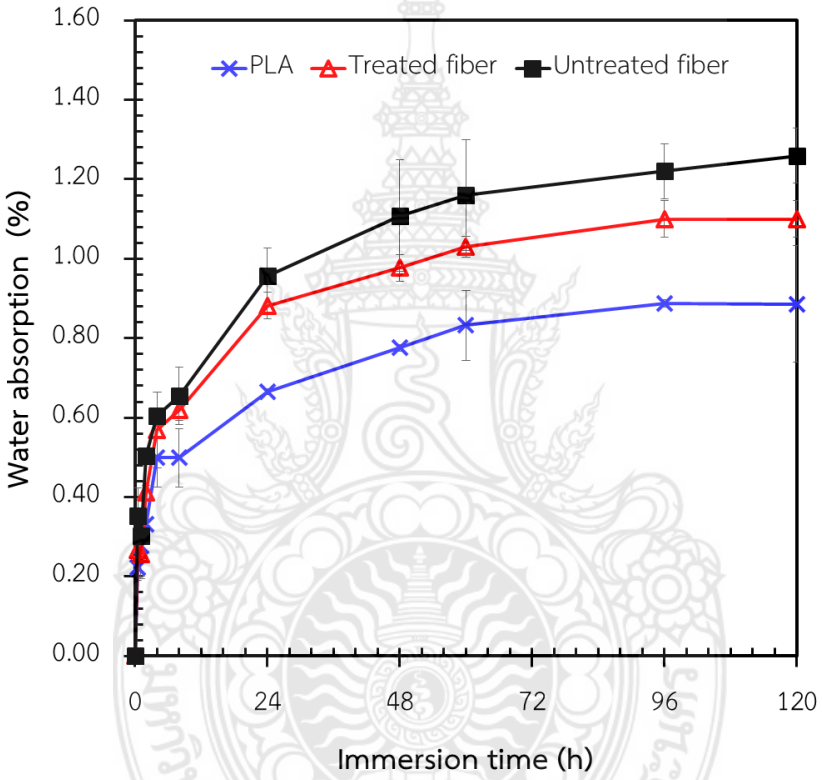
4.1 ผลการทดสอบการดูดซับน้ำ



รูปที่ 4.1 ค่าการดูดซับน้ำของชิ้นงานพอลิแลคติกแอซิด และชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบพอลิแลคติกแอซิดและเส้นใยป่านศรนารายณ์ที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วยสารอีพอกซีไซเลนและที่ไม่ผ่านการปรับปรุงผิว ณ เวลาในการแช่น้ำ 0 ถึง 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง

รูปที่ 4.1 แสดงค่าการดูดซับน้ำของชิ้นงานพอลิแลคติกแอซิด และชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบพอลิแลคติกแอซิดและเส้นใยป่านศรนารายณ์ที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วยสารอีพอกซีไซเลนและที่ไม่ผ่านการปรับปรุงผิว ภายในเวลา 24 ชั่วโมง จากผลการทดลองพบว่า ค่าการดูดซับน้ำทั้งกรณีพอลิแลคติกแอซิด และวัสดุเชิงประกอบมีแนวโน้มเพิ่มสูงอย่างรวดเร็วในช่วงเวลาการแช่น้ำเริ่มต้น คือ ช่วงเวลาในการแช่น้ำ 0 – 4 ชั่วโมง หลังจากนั้นค่าการดูดซับน้ำเริ่มมีอัตราการเพิ่มขึ้นที่ลดลง เมื่อเวลาในการแช่ชิ้นงานมากกว่า 4 ชั่วโมง และเมื่อเปรียบเทียบผลของส่วนผสมในชิ้นงานที่มีต่อค่าการดูดซับน้ำ พบว่า พอลิแลคติกแอซิดมีค่าการดูดซับน้ำต่ำที่สุด รองลงมา คือ วัสดุเชิงประกอบที่มีการเติมเส้นใยป่านศรนารายณ์ที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วยสารอีพอกซีไซเลน และวัสดุเชิงประกอบที่มีการเติมเส้นใยป่านศรนารายณ์ที่ไม่ผ่านการปรับปรุงผิว ตามลำดับ ทั้งนี้เพราะพอลิแลคติกแอซิดมีหมู่เอสเทอร์ (ester group, COO)ใน

โครงสร้างซึ่งเป็นหมู่ที่ไม่ชอบน้ำ ส่วนเส้นใยป่านศรนารายณ์มีเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบซึ่งมีหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl group, OH) ซึ่งเป็นหมู่ที่ชอบน้ำ สำหรับผลของการปรับปรุงผิวเส้นใยด้วยสารอีพอกซีไซเลน พบว่า การปรับปรุงเส้นใยป่านศรนารายณ์ด้วยสารอีพอกซีไซเลนมีส่วนช่วยทำให้การดูดซับน้ำของวัสดุเชิงประกอบลดลง ทั้งนี้เพราะสารอีพอกซีไซเลนจะเข้าทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลของเซลลูโลสจึงช่วยลดหมู่ที่ชอบน้ำลง และการปรับปรุงผิวเส้นใยด้วยสารอีพอกซีไซเลนมีส่วนช่วยทำให้การยึดเกาะระหว่างเฟสของพอลิแลคติกแอซิดและเส้นใยป่านศรนารายณ์มีประสิทธิภาพมากขึ้นจึงช่วยการเกิดช่องว่างระหว่างเฟสที่อาจเกิดขึ้นได้เนื่องจากความไม่เข้ากันทางโครงสร้างทางเคมีระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและเส้นใยป่านศรนารายณ์

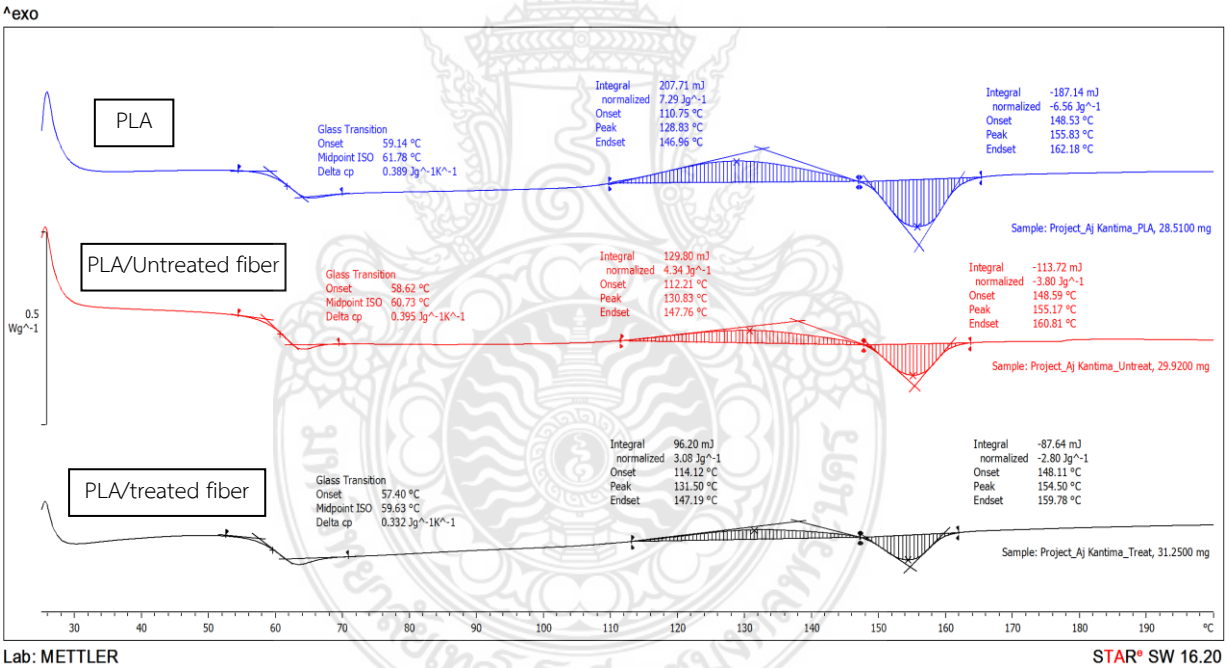


รูปที่ 4.2 ค่าการดูดซับน้ำของชิ้นงานพอลิแลคติกแอซิด และชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบพอลิแลคติกแอซิดและเส้นใยป่านศรนารายณ์ที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วยสารอีพอกซีไซเลนและไม่ผ่านการปรับปรุงผิว ณ เวลาในการแช่น้ำ 0 ถึง 120 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง

รูปที่ 4.2 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงของค่าการดูดซับน้ำของชิ้นงานพอลิแลคติกแอซิด และวัสดุเชิงประกอบพอลิแลคติกแอซิดที่มีการเติมเส้นใยป่านศรนารายณ์ที่ผ่านแลไม่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วยสารอีพอกซีไซเลน ภายในเวลา 5 วัน หรือ 120 ชั่วโมง จากผลการทดลองพบว่าเมื่อเวลาการแช่น้ำเพิ่มขึ้นมีผลทำให้ค่าการดูดซับน้ำเพิ่มสูง และพอลิแลคติกแอซิดมีค่าการดูดซับน้ำต่ำที่สุด รองลงมา คือ วัสดุเชิงประกอบที่มีการเติมเส้นใยป่านศรนารายณ์ที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วยสารอีพอกซีไซเลน และวัสดุเชิง

ประกอบที่มีการเติมเส้นใยป่านศรนารายณ์ที่ไม่ผ่านการปรับปรุงผิว ตามลำดับ ผลที่ได้มีแนวโน้มเช่นเดียวกับกรณีการแช่ชิ้นงานที่เวลา 24 ชั่วโมง แต่ผลที่แตกต่างกัน คือ เมื่อเวลาการในแช่น้ำนานขึ้นตั้งแต่ 24 ชั่วโมงขึ้นไป พบว่า ค่าการดูดซับน้ำระหว่างพอลิแลคติกแอซิด และวัสดุเชิงประกอบที่เป็นผลมาจากการเติมเส้นใยป่านศรนารายณ์ และการปรับปรุงผิวเส้นใยด้วยสารอีพอกซีไซเลนมีค่าแตกต่างกันอย่างชัดเจนมากยิ่งขึ้น เมื่อเวลาในการแช่น้ำนานมากกว่า 24 ชั่วโมง และอัตราการเพิ่มขึ้นของค่าการดูดซับน้ำเริ่มลดลง โดยสามารถสังเกตเห็นว่า ค่าการดูดซับน้ำของชิ้นงานพอลิแลคติกแอซิดและชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบที่มีการเติมเส้นใยป่านศรนารายณ์ที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วยสารอีพอกซีไซเลนมีแนวโน้มค่าการดูดซับน้ำเริ่มคงที่เมื่อเวลาในการแช่น้ำ 96 ชั่วโมง ผลดังกล่าวนี้มีสาเหตุเช่นเดียวกันกับที่อธิบายไว้ในคำอธิบาย**รูปที่ 4.1** แต่ผลของการมีอยู่ของเส้นใยป่านศรนารายณ์ และผลของการปรับปรุงผิวด้วยสารอีพอกซีไซเลนจะเห็นผลอย่างชัดเจนมากยิ่งขึ้น เมื่อเวลาในการแช่น้ำมากกว่า 24 ชั่วโมง

4.2 ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อน



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงผลการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของพอลิแลคติกแอซิดในชิ้นงานพอลิแลคติกแอซิด วัสดุเชิงประกอบพอลิแลคติกแอซิดและเส้นใยป่านศรนารายณ์ที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วยสารอีพอกซีไซเลน และไม่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิงแคลอริเมททรี สำหรับการให้ความร้อนครั้งที่ 2

ตารางที่ 4.1 สมบัติทางความร้อนของพอลิแลคติกแอซิด และวัสดุเชิงประกอบพอลิแลคติกแอซิดและเส้นใยป่านศรนารายณ์ที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วยสารอีพอกซีไซเลน และไม่ผ่านการปรับปรุงผิว

Formulations	Tg (°C)	Tc (°C)	ΔHcc (J/g)	Tm (°C)	ΔHm (J/g)	%Crystallinity
PLA	59.14	128.83	155.83	7.29	6.56	1.03
PLA/treated sisal fiber composite	57.40	131.50	154.50	3.08	2.80	0.29
PLA/untreated sisal fiber composite	58.62	130.83	155.17	4.34	3.80	0.56

รูปที่ 4.3 และ**ตารางที่ 4.1** แสดงผลของการเติมเส้นใยป่านศรนารายณ์และการปรับปรุงผิวเส้นใยป่านศรนารายณ์ด้วยสารอีพอกซีไซเลนที่มีต่อสมบัติทางความร้อนของพอลิแลคติกแอซิด โดยทำการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของพอลิแลคติกแอซิดจากการตรวจสอบด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิงแคลอริเมททรี จากการให้ความร้อนครั้งที่ 2 สำหรับผลของการเติมเส้นใยป่านศรนารายณ์ พบว่า การมีอยู่ของเส้นใยป่านศรนารายณ์ที่มีลักษณะเป็นเส้นใยยาวแบบต่อเนื่องมีผลทำให้ค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว และจุดหลอมเหลวผลึกมีค่าลดลงไม่มากนัก แต่มีผลต่อการเกิดผลึกเกิดได้ยากมากขึ้น โดยพิจารณาจากผลของค่าอุณหภูมิการเกิดผลึกที่เพิ่มสูงขึ้น และปริมาณผลึกของพอลิแลคติกแอซิดลดลง เมื่อมีการเติมเส้นใยป่านศรานารายณ์ ผลดังกล่าวนี้ แสดงให้เห็นว่า การมีอยู่ของเส้นใยป่านศรนารายณ์ที่มีลักษณะเป็นเส้นใยยาวต่อเนื่องอาจไปขัดขวางการเกิดผลึกของพอลิแลคติกแอซิด ผลที่ได้นี้มีความคล้ายคลึงกับงานวิจัยของ Seong และคณะ [20] ซึ่งพบว่า การเติมเส้นใยที่มีความยาวเพิ่มมากขึ้น มีผลทำให้การเกิดผลึกของพอลิเมอร์มีแนวโน้มลดลง สำหรับผลของการปรับปรุงผิวเส้นใยด้วยสารอีพอกซีไซเลนที่มีต่อสมบัติทางความร้อนของพอลิแลคติกแอซิด พบว่า อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วและจุดหลอมเหลวผลึกสำหรับกรณีวัสดุเชิงประกอบที่เติมเส้นใยป่านศรนารายณ์ที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วยสารอีพอกซีไซเลนมีค่าลดลงเล็กน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีวัสดุเชิงประกอบที่เติมเส้นใยป่านศรนารายณ์ที่ไม่ผ่านการปรับปรุงผิว แต่มีผลทำให้การเกิดผลึกของพอลิแลคติกแอซิดมีแนวโน้มเกิดได้ยากขึ้น เมื่อวัสดุเชิงประกอบเติมเส้นใยป่านศรนารายณ์ผ่านการปรับปรุงผิวด้วยสารอีพอกซีไซเลน โดยพบว่า สำหรับกรณีวัสดุเชิงประกอบที่เติมเส้นใยป่านศรนารายณ์ที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วยสารอีพอกซีไซเลนมีค่าอุณหภูมิการเกิดผลึกมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเล็กน้อย และปริมาณผลึกของพอลิแลคติกแอซิดมีค่าลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีวัสดุเชิงประกอบที่เติมเส้นใยป่านศรนารายณ์ที่ไม่ผ่านการปรับปรุงผิว ผลดังกล่าวนี้ แสดงให้เห็นว่า การยึดเกาะระหว่างเฟสที่ดีขึ้นสำหรับกรณีเส้นใยที่มีความยาวต่อเนื่องอาจไปขัดขวางการเกิดผลึกของพอลิแลคติกแอซิด

บทที่ 5 สรุปและวิเคราะห์ผล

โครงการวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของการเติมเส้นใยป่านศรนารายณ์ และผลของการปรับปรุงผิวเส้นใยด้วยสารอีพอกซีไซเลนที่มีต่อค่าการดูดซับน้ำ และสมบัติทางความร้อนของพอลิแลคติกแอซิด จากผลการทดลองสามารถสรุปผลได้ดังนี้

- ผลของการเติมเส้นใยป่านศรนารายณ์ พบว่า การมีอยู่ของเส้นใยป่านศรนารายณ์มีผลทำให้ค่าการดูดซับน้ำเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากเส้นใยป่านศรนารายณ์เป็นวัสดุที่ชอบน้ำ โดยสามารถสังเกตเห็นผลชัดเจนมากยิ่งขึ้น เมื่อเวลาในการแช่น้ำมากกว่า 24 ชั่วโมง และการเติมเส้นใยป่านศรนารายณ์มีผลทำให้การเกิดผลึกของพอลิแลคติกแอซิดเกิดได้ยากมากขึ้น
- ผลของการปรับปรุงผิวเส้นใยด้วยสารอีพอกซีไซเลน พบว่า ช่วยลดค่าการดูดซับน้ำของวัสดุเชิงประกอบให้มีค่าลดลง และมีผลทำให้การเกิดผลึกของพอลิแลคติกแอซิดเกิดได้ยากมากขึ้น เนื่องจากการยึดเกาะที่ดีระหว่างเฟสของเส้นใยยาวต่อเนื่องอาจไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่พอลิแลคติกแอซิด

เอกสารอ้างอิง

1. **ไทยร่วมกับ 3 ชาติเอเชียจับมือลดขยะพลาสติกในมหาสมุทร** สืบค้นข้อมูลจาก https://www.bbc.com/thai/amp/international-40199329
2. Auras, R., Lim, L. T., Selke, S. E. M. and Tsuji, H., 2010, **Poly(Lactic Acid): Synthesis, Structures, Properties, Processing, and Applications**, John Wiley & Sons, Inc.
3. สุพรรษา นพวงค์, อรวรรณ มีใย และกัลทิมา เชาว์ชาญชัยกุล, 2563, "การพัฒนาบรรจุภัณฑ์ที่ย่อยสลายได้จากวัสดุเชิงประกอบพลาสติกชีวภาพและเส้นใยธรรมชาติที่ผ่านการปรับปรุงด้วยสารไซเลน", **รายงานสืบเนื่องจากการประชุมวิชาการระดับชาติ ด้านวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และนวัตกรรม ครั้งที่ 3 คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร**, 31 สิงหาคม 2563.
4. Pankaew, P., Klumdoung, P. and Naemchanthara, K., 2015, "A Study of the Preparation of Silk Sericin/chitosan Composite Film for Future Wound Dressing Applications", **Applied Mechanics and Materials**, Vol. 804, pp. 179-82.
5. Garlotta, D., 2001, "A Literature Review of Poly(Lactic Acid)", **Journal of Polymers and the Environment**, Vol. 9, pp. 63-84.
6. Adsul, M. G., Varmab, A. J. and Gokhale, D. V., 2007, "Lactic Acid Production from Waste Sugarcane Bagasse Derived Cellulose", **Green Chemistry**, Vol. 9, pp. 58-62.
7. Gupta, B., Revagade, N. and Hilborn, J., 2007, "Poly(lactic acid) Fiber: An Overview" **Progress in Polymer Science**, Vol. 34, pp. 455-482.
8. วิมลลักษณ์ สุตะพันธ์, กษมา จารุกำจร และยุพาพร รักสกุลพิวัฒน์, 2554, **รายงานการวิจัย เรื่อง การศึกษาผลการดัดแปรด้วยความร้อนต่อลักษณะจำเพาะของเส้นใยป่านศรนารายณ์ที่ปลูกในนครราชสีมา**, ทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยสุรนารี ปีงบประมาณ 2554.
9. ปราณี ชุมสำโรง และนิธินาถ ศุภกาญจน์, 2553, **รายงานการวิจัย เรื่อง การศึกษาการใช้เส้นใยป่านศรนารายณ์เสริมแรงอีพอกซีเรซินที่ปรับปรุงด้วยยางธรรมชาติ**, ทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยสุรนารี ปีงบประมาณ 2553.
10. Bledzki, A.K. and Gassan, J., 1999, "Composites Reinforced with Cellulose-Based Fibers", **Progress in Polymer Science**, Vol. 24, pp. 225-228.
11. Sjöström, E., 1993, **Wood Chemistry Fundamentals and Application**, 2nd ed., Academic Press, INC., New York, pp. 55-89.
12. Rowell, R.M., 2005, **Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites**, Chapter 3, CRC Press, Danvers, pp. 1-12.

13. Plueddemann, E.P., 1991, **Silane Coupling Agents**, Plenum Press, New York, pp. 1-31.
14. Grossman, R.F., 2001, "Coupling agents" In **Polymer Modifiers and Additives**, Lutz, J.T. and Grossman, R.F. (Ed.), Marcel Dekker, New York, pp. 95-99.
15. Buasri, A., Chaiyut, N., Petsungwan, T., Boonyuen, Y. and Moonmanee, S., 2012, "Effect of Surface Treatment on Interfacial and Properties of Water Hyacinth Fiber Reinforced Poly(Lactic Acid) Composites", **Advanced Materials Research**, Vol. 463-464, pp. 449-452.
16. Sujaritjun, W., Uawongsuwan, P., Pivsa-Art, W. and Hamada, Hiroyuki, 2013, "Mechanical Property of Surface Modified Natural Fiber Reinforced PLA Biocomposites", **Energy Procedia**, Vol. 34, pp. 664-672.
17. Manshor, M.R., Anuar, H., Nur Aimi, M.N., Ahmad Fitrie, M.I., Wan Nazri, W.B., Sapuan, S.M., El-Shekeil, Y.A., Wahit, M.U., 2014, "Mechanical, Thermal and Morphological Properties of Durian Skin Fibre Reinforced PLA Biocomposites", **Materials and Design**, Vol. 59, pp. 279-286.
18. González-López, M.E., Pérez-Fonseca, A.A., Manríquez-González, R., Arellano, M., Rodrigue, D., Robledo-Ortíz, J.R., 2019, "Effect of Surface Treatment on the Physical and Mechanical Properties of Injection Molded Poly(Lactic Acid)-Coir Fiber Biocomposites", **Polymer Composites**, Vol. 40, pp. 2132–2141.
19. Vasanthan, N. and Ly, O., 2009, "Effect of Microstructure on Hydrolytic Degradation Studies of Poly(l-lactic acid) by FTIR Spectroscopy and Differential Scanning Calorimetry", **Polymer Degradation and Stability**, Vol. 94, pp. 1364–1372.
20. Seong, D.G., Kang, C., Pak, S.Y., Kim, C.H., Song, Y.S., 2019, "Influence of Fiber Length and its Distribution in Three Phase Poly(propylene) Composites", **Composite Part B: Engineering**, Vol. 168, pp. 218–225.

ไม่มีเนื้อหาจากต้นฉบับ

ประวัตินักวิจัย

หัวหน้าโครงการ

1. ชื่อ - นามสกุล

(ภาษาไทย) ผศ.ดร.กัลทิมา เชาว์ชาญชัยกุล

(ภาษาอังกฤษ) Asst. Prof. Dr. Kantima Chaochanchaikul

2. ตำแหน่งปัจจุบัน

อาจารย์ประจำสาขาวิชาวัสดุศาสตร์อุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

3. หน่วยงานและสถานที่อยู่ที่ติดต่อได้สะดวก

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
1381 ถนนประชาราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง
เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800
โทรศัพท์ 02 836 3000
E-mail : kantima.c@rmutp.ac.th

4. ประวัติการศึกษา

วท.บ.(วัสดุศาสตร์)	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
วศ.ม. (เทคโนโลยีวัสดุ)	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ปร.ด. (เทคโนโลยีวัสดุ)	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

5. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ

Wood/Natural Fiber Plastic Composites
Polymer Composites
Polymer Degradation
Bioplastics

6. ประสบการณ์งานวิจัย

1. Chaochanchaikul, K., 2019, “Improvement of Mechanical Properties and Water Absorption in Wheat Gluten by Epoxidized Natural Rubber”, **Applied Mechanics and Materials**, Vol. 891, pp. 163-168.
2. Hachana, N., Wongwanchai, T., Chaochanchaikul, K. and Harnnarongchai, W., 2017, “Influence of Crosslinking Agent and Chain Extender on Properties of Gamma-Irradiated PLA”, **Journal of Polymers and the Environment**, Vol. 25, pp. 323-333.
3. Tomyangkul, S., Pongmuksuwan, P., Harnnarongchai, W. and Chaochanchaikul K., 2016, “Enhancing Sound Absorption Properties of Open-cell Natural Rubber Foams with Treated Bagasse and Oil Palm Fibers”, **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, Vol. 35, pp. 672-681.
4. Harnnarongchai, W. and Chaochanchaikul, K., 2015, "Effect of Blowing Agent on Cell Morphology and Acoustic Absorption of Natural Rubber Foam", **Applied Mechanics and Materials**, Vol. 804, pp. 25-29.
5. Chaochanchaikul, K. and Harnnarongchai, W., 2015 "Influence of Multifunctional Monomers on Gamma Irradiated Polylactic Acid", **Applied Mechanics and Materials**, Vol. 804, pp. 59-62.
6. Chaochanchaikul, K., Rosarpitak, V. and Sombatsompop, N., 2013, “Photo-degradation and UV Penetration Profiles of PVC Compound and Wood/PVC Composites under UV Weathering”, **Express Polymer Letters,** Vol. 7, No. 2, pp. 146-160.
7. Chaochanchaikul, K., Jayaraman, K., Rosarpitak, V. and Sombatsompop, N., 2012, “Influence of Lignin Content on Photodegradation in Wood/HDPE Composites under UV Weathering”, **BioResources**, Vol. 7, No. 1, pp. 38-55.
8. Chaochanchaikul, K., Rosarpitak, V. and Sombatsompop, N., 2011, “Structural and Thermal Stabilizations of PVC and Wood/PVC Composites by Metal Sterates and Organotin”, **BioResources**, Vol. 6, No. 3, pp. 3115-3131.
9. Chaochanchaikul, K. and Sombatsompop, N., 2011, “Stabilizations of Molecular Structures and Mechanical Properties of PVC and Wood/PVC Composites by Tinuvin and TiO_2 Stabilizers”, **Polymer Engineering and Science**, Vol. 51, No. 6, pp. 1354-1365.
10. Pattamasattayasonti, N., Chaochanchaikul, K., Rosarpitak, V. and Sombatsompop, N., 2010, “Effects of UV-Weathering Aging and CeO_2 Based Coating Layer on

Mechanical and Structural Changes in Wood/PVC Composites", **Journal of Vinyl & Additive Technology, Vol. 17, No. 1, pp. 9-16**.

11. Pulngern, T., Choocheepsakul, S., Padyenchean, C., Rosarpitak, V., Prapruit, W., Chaochanchaikul, K. and Sombatsompop, N., 2010, "Effects of Cross-section Design and Loading Direction on Creep and Fatigue Properties of Wood/PVC Composite Beams", **Journal of Vinyl & Additive Technology**, Vol. 16, No. 1, pp. 42-49.
12. Sombatsompop, N., Prapruit, W., Chaochanchaikul, K., Pulngern, T. and Rosarpitak, V., 2010, "Effect of Cross-section Design and Testing Conditions on Flexural Properties of Wood/PVC Composite Beams", **Journal of Vinyl & Additive Technology**, Vol. 16, No. 1, pp. 33-41.
13. Chaochanchaikul, K., Kositchaiyong, A., and Sombatsompop, N., 2009, "Blending Techniques Affecting Mechanical and Morphological Properties of Fly Ash/LDPE and $CaCO_3$/LDPE Composites", **Polymers & Polymer Composites**, Vol. 17, No. 5, pp. 281-290.
14. Sombatsompop, N., Taptim, K., Chaochanchaikul, K., Thongpin, C. and Rosarpitak, V., 2008, "Improvement of Structural and Thermal Stabilities of PVC and Wood/PVC Composites by Pb and Zn Stearates, and Zeolite", **Journal of Macromolecular Science. Part A: Pure and Applied Chemistry**, Vol. 45, No. 7, pp. 534-541.
15. Tungjitpornkull, S., Chaochanchaikul, K. and Sombatsompop, N., 2007, "Mechanical Characterization of E-Chopped Strand Glass Fiber Reinforced Wood/PVC Composites", **Journal of Thermoplastic Composite Materials**, Vol. 20, No. 6, pp. 535-550.
16. Chotirat, L., Chaochanchaikul, K. and Sombatsompop, N., 2007, "On Adhesion Mechanisms and Interfacial Strength in ABS/Wood Sawdust Composites", **International Journal of Adhesion and Adhesives**, Vol. 27, No. 8, pp. 669-678.
17. Sombatsompop, N., Uawongsuwan, P. and Chaochanchaikul, K., 2007, "Effect of Molecular Structure on Extrudate Swell Behavior for Different Thermoplastic Melts in an Electro-magnetized Die", **Polymer Engineering and Science**, Vol. 47, No. 3, pp. 270-280.
18. Prachayawarakorn, J., Kumsri, J., Chaochanchaikul, K. and Sombatsompop, N., 2006, "Effects of Compatibilizer Type and Rubber-Wood Sawdust Content on the

Mechanical, Morphological and Thermal Properties of PVC/LDPE Blend", **Journal of Applied Polymer Science,** Vol.102, No. 1, pp. 598-606.

19. Sombatsompop, N. and Chaochanchaikul, K., 2005, "Average Mixing Torque, Tensile and Impact Properties and Thermal Stability of PVC/Sawdust Composites with Different Silane Coupling Agents", **Journal of Applied Polymer Science**, Vol. 96, No. 1, pp. 213-221.
20. Sombatsompop, N. and Chaochanchaikul, K., 2004, "Effect of Moisture Content on Mechanical Properties, Thermal and Structural Stability, and Extrudate Texture of PVC/Wood Sawdust Composites", **Polymer International**, Vol. 53, No. 9, pp. 1210-1218.
21. Sombatsompop, N., Chaochanchaikul, K., Phromchirasuk, C. and Thongsang, S., 2003, "Effect of Wood Sawdust Content on Rheological and Structural Changes, and Thermo-Mechanical Properties of PVC/Sawdust Composites", **Polymer International**, Vol. 52, No. 12, pp. 1847-1855.

ผู้ร่วมวิจัย

1. ชื่อ - นามสกุล

(ภาษาไทย) ดร.วรนุช ดีละมัน

(ภาษาอังกฤษ) Dr.Woranuch Deelaman

2. ตำแหน่งปัจจุบัน

อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

3. หน่วยงานและสถานที่อยู่ที่ติดต่อได้สะดวก

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
1381 ถนนประชาราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง
เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800
โทรศัพท์ 02-8363016 หรือ 081-0677254
E-mail : woranuch.d @rmutp.ac.th

4. ประวัติการศึกษา

วท.บ.(วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม)	มหาวิทยาลัยทักษิณ
วท.ม.(การจัดการสิ่งแวดล้อม)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ปร.ด. (การจัดการสิ่งแวดล้อม)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

5. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ

Environmental managemet

Sediment

Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs)

6. ประสบการณ์งานวิจัย

1. Apiratikul, R., Pongpiachan, S. and Deelaman, W., 2021, “Spatial Distribution, Sources and Quantitative Human Health Risk Assessments of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Urban and Suburban Soils of Chile”, **Environmental Geochemistry and Health**.

2. Deelaman, W., Pongpiachan, S., Tipmanee, D, Choochuay, C., Iadtem, N., Suttinun, O., Wang, Q.Y., Xing, L., Li, G.H., Han, Y.M., Hashmi, M.Z. and Cao, J.J., 2020, "Source Identification of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Terrestrial Soils in Chile", **Journal of South American Earth Sciences**, Vol. 99, 102514.
3. Deelaman, W., Pongpiachan, S., Tipmanee, D., Suttinun, O., Choochuay, C., Iadtem, N., Charoenkalunyuta, T. and Promdee, K., 2020, "Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Terrestrial Soils of King George Island, Antarctica", **Journal of South American Earth Sciences,** Vol. 104, 102832.
4. ChooChuay, C., Pongpiachan, S., Tipmanee, D., Deelaman, W., Iadtem, N., Suttinun, O., Wang, Q., Xing, L., Li, G., Han, Y., Hashmi, M.Z., Palakun, J., Poshyachinda, S., Aukkaravittayapun, S., Surapipith, V. and Cao, J., 2020, "Effects of Agricultural Waste Burning on pm2.5-Bound Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, Carbonaceous Compositions, and Water-Soluble Ionic Species in the Ambient Air of Chiang-Mai, Thailand. **Polycyclic Aromatic Compound**, pp. 1–22.
5. ChooChuay, C., Pongpiachan, S., Tipmanee, D., Deelaman, W., Suttinun, O., Wang, Q., Xing, L., Li, G., Han, Y., Palakun, J., Poshyachinda, S., Aukkaravittayapun, S., Surapipith, V. and Cao, J., 2020, "Long-range Transboundary Atmospheric Transport of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, Carbonaceous Compositions, and Water-soluble Ionic Species in Southern Thailand", **Aerosol and Air Quality Research**, Vol. 20, pp. 1591–1606.
6. ChooChuay, C., Pongpiachan, S., Tipmanee, D., Suttinun, O., Deelamana, W., Wang, Q., Li, X., Li, G., Han, Y., Palakun, J., Cao, J., 2020, "Impacts of $PM_{2.5}$ sources on Variations in Particulate Chemical Compounds in Ambient Air of Bangkok, Thailand", **Atmospheric Pollution Research**, Vo. 11, pp. 1657-1667.
7. Pongpiachan, S,. Tipmanee, D., Choochuay, C., Hattayanone, M., Deelaman, W., Iadtem, N., Bunsomboonsakul, S., Palakun, J., Poshyachinda, S., Leckngam, A., Somboonpon, P., Panyaphirawat, T., Aukkaravittayapun, S., Wang, Q.Y., Xing, L., Li, G.H. and Han, Y.M., 2019, "Vertical Profile of Organic and Elemental Carbon in Sediments of Songkhla Lake, Thailand", **Limnology**, Vol. 20, pp. 203–214.
8. Pongpiachan, S., Deelaman, W., Choochuay, C., Iadtem, N., Surapipith, V., Hashmi, MZ., Latif, M., Sohail, M., Eqani, SAMAS., Charoenkalunyuta, T. and Promdee, K., 2019, "Data Relating to Spatial Distribution of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in

Terrestrial Soils of Pakistan and King George Island, Antarctica", J**ournal Data in Brief**, Vol. 25, 104327.

9. Deelaman, W., Chaochanchaikul, K. and Tungsudjawong, K., 2018, "Effect of Banana Fibers on Mechanical and Physical Properties of Light Weight Concrete Blocks", **Applied Mechanics and Materials**, Vol. 879, pp. 151–155.
10. Deelaman, W., Lakthandee, M., Inchan, W., Srilarat, P. and Panthong, N., 2017, "Development Plant Pots from Carbon Powder and Oil Palm Fiber", **Applied Mechanics and Materials**, Vol. 866, pp. 176–179.
11. Deelaman, W., Lakthandee, M., Inchan, W., Srilarat, P. and Panthong, N., 2017, "Development Plant Pots from Carbon Powder and Oil Palm Fiber", **Applied Mechanics and Materials**, Vol. 866, pp. 176–179.
12. Pongpiachan, S., Tipmanee, D., Deelaman, W., Muprasit, J., Feldens, P. and Schwarzer, K., 2013, "Risk Assessment of the Presence of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Coastal Areas of Thailand Affected by the 2004 tsunami", **Marine Pollution Bulletin** , Vol. 76, pp. 370-378.
13. Tipmanee, D., Deelaman,W., Pongpiachan, S., Schwarzer, K. and Sompongchaiyakul, P., 2012, "Using Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) as a Chemical Proxy to Indicate Tsunami 2004 Backwash in Khao Lak Coastal Area", **Thailand. Nat. Hazards Earth Syst. Sci.**, Vol. 12, pp. 1441–1451.