

การหาสมบัติเชิงกลที่เหมาะสมของวัสดุเชิงประกอบผสม พอลิแลคติกแอซิด
เสริมแรงด้วยเส้นใยป่านศรนารายณ์และเส้นใยมะพร้าว

OPTIMIZATION OF MECHANICAL PROPERTIES OF POLY (LACTIC ACID) HYBRID
NATURAL FIBER COMPOSITES REINFORCED WITH SISAL AND COIR FIBER

อารีญา พรหมเมตตา

ARIYA PRAEMETTHA

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2561

KMITL-2019-EN-M-217-011

การหาสมบัติเชิงกลที่เหมาะสมของวัสดุเชิงประกอบผสม พอลิแลคติกแอซิด
เสริมแรงด้วยเส้นใยป่านศรนารายณ์และเส้นใยมะพร้าว

OPTIMIZATION OF MECHANICAL PROPERTIES OF POLY (LACTIC ACID) HYBRID
NATURAL FIBER COMPOSITES REINFORCED WITH SISAL AND COIR FIBER

อารีญา แพร์เมตตา

ARIYA PRAEMETTHA

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2561

KMITL-2019-EN-M-217-011

OPTIMIZATION OF MECHANICAL PROPERTIES OF POLY (LACTIC ACID) HYBRID
NATURAL FIBER COMPOSITES REINFORCED WITH SISAL AND COIR FIBER

ARIYA PRAEMETTHA

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN INDUSTRIAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2018

KMITL-2019-EN-M-217-011

COPYRIGHT 2019

FACULTY OF ENGINEERING KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY

LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การหาสมบัติเชิงกลที่เหมาะสมของวัสดุเชิงประกอบผสม พอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใยปานครนารายณ์และ เส้นใยมะพร้าว
นักศึกษา	อารีญา แพร่เมตตา
รหัสประจำตัว	59601265
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ
พ.ศ.	2561
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.วิภู ศรีสืบสาย

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาวัสดุเชิงประกอบผสมเสริมแรงด้วยเส้นใยธรรมชาติ โดยใช้พอลิแลคติกแอซิดเป็นเมทริกซ์ที่ทำการเสริมแรงด้วยเส้นใยปานครนารายณ์และเส้นใยมะพร้าว ซึ่งถูกเตรียมด้วยเครื่องผสมแบบปิด และขึ้นรูปโดยใช้การขึ้นรูปแบบกดอัด โดยนำเทคนิคการออกแบบการทดลองแบบผสมแบบมีข้อจำกัดมาประยุกต์ใช้สำหรับการออกแบบการทดลองเพื่อหาอัตราส่วนของวัสดุเชิงประกอบผสมที่เหมาะสมและศึกษาอิทธิพลของแต่ละปัจจัยที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง ความทนต่อแรงดึงและความทนต่อแรงกระแทก ผลจากการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่า เส้นใยปานครนารายณ์และเส้นใยมะพร้าวมีอิทธิพลต่อค่าความทนต่อแรงดึงและความทนต่อแรงกระแทก ในการหารูปแบบทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมสำหรับการหาอัตราส่วนผสมวัสดุเชิงประกอบผสม ได้สมการถดถอยสำหรับค่าความทนต่อแรงดึงและค่าความทนต่อแรงกระแทกคือ $Y_1 = 0.58X_1 - 0.88X_2 - 1.10X_3 + 9.94 \times 10^5 X_1X_2X_3 + 1.05X_1X_2X_3$ และ $Y_2 = 0.12X_1 + 120.75X_2 + 289.43X_3 - 1.24X_1X_2 - 3.00X_1X_3$ ตามลำดับ

จากการวิเคราะห์พื้นที่ผิวตอบสนองพบว่า อัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดที่ตอบสนองต่อค่าความทนต่อแรงดึงคือ พอลิแลคติกแอซิดร้อยละ 98.58 เส้นใยปานครนารายณ์ร้อยละ 1.22 และเส้นใยมะพร้าวร้อยละ 0.20 อัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดที่ตอบสนองต่อค่าความทนต่อแรงกระแทกคือ พอลิแลคติกแอซิดร้อยละ 95.00 เส้นใยปานครนารายณ์ร้อยละ 1.08 และเส้นใยมะพร้าวร้อยละ 3.92 และอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดที่ตอบสนองต่อผลรวมค่าความทนต่อแรงดึงและค่าความทนต่อแรงกระแทกคือ พอลิแลคติกแอซิดร้อยละ 95.22 เส้นใยปานครนารายณ์ร้อยละ 0.78 และเส้นใยมะพร้าวร้อยละ 4.00 ในการดำเนินการทดลองยืนยันผลจากการวิเคราะห์ผลรวมตัวแปรตอบสนองพบว่า ไม่มีความแตกต่างกันของค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 จากการทดสอบการดูดซึมน้ำของวัสดุเชิงประกอบผสมพบว่าการเสริมแรงด้วยเส้นใยปานครนารายณ์และเส้นใยมะพร้าวส่งผลในค่าการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้น

Thesis title	Optimization of mechanical properties of poly (lactic acid) hybrid natural fiber composites reinforced with sisal and coir fiber
Student	Ms. Ariya Praemettha
Student ID	59601265
Degree	Master of Engineering
Program	Industrial Engineering
Year	2018
Thesis Advisor	Asst.Prof.Dr. Wipoo Sriseubsai

Abstract

The hybrid natural fiber composites were prepared by using polylactic acid (PLA) as a matrix. Sisal and coir were reinforcement. The hybrid composites were prepared by using an internal mixer and then the samples were molded by compression molding machine. This research applied a constrained mixture design to determine the combinations of hybrid composite material and effects of a tensile strength and an impact strength. The results showed that sisal fiber and coir fiber factors affect both responses. A mathematical model is used to determine the combinations of hybrid composite material. A mathematical model for a tensile strength is $Y_1 = 0.58X_1 - 0.88X_2 - 1.10X_3 + 9.94 \cdot 10^5 X_1X_2X_3 + 1.05X_1X_2X_3$. A mathematical model for an impact strength is $Y_1 = 0.12X_1 + 120.75X_2 + 289.43X_3 - 1.24X_1X_2 - 3.00X_1X_3$.

The response surface methodology showed that the proper levels to a response of a tensile strength is the mixtures on a plastic polylactic acid 98.58% a sisal fiber 1.22% and coir fiber 0.20%. The proper levels to a response of an impact strength is the mixtures on a plastic polylactic acid 95.00% a sisal fiber 1.08% and coir fiber 3.92%. The proper levels to a response of both responses is the mixtures on a plastic polylactic acid 95.22% a sisal fiber 0.78% and coir fiber 4.00%. The confirmation experiments from the response surface methodology of the proper levels to a both responses showed that the mean of data were no difference at a significance level of 0.05. The increasing the addition of natural fibers in the hybrid composite resulted in an increase of the water absorption.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เรื่อง วัสดุเชิงประกอบผสมพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใยปานครนารายณ์ และเส้นใยมะพร้าวฉบับนี้ ได้สำเร็จลุล่วงด้วยดีและบรรลุวัตถุประสงค์ของงานวิจัยได้อย่างสมบูรณ์ เนื่องจากได้รับความกรุณาอย่างสูง และความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจาก ผศ.ดร. วิภู ศรีสืบสาย ภาควิชา วิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระเจ้าเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้มอบโอกาสทางการศึกษา ให้ความช่วยเหลือ คำแนะนำในการแก้ปัญหา รวมถึงคอยให้คำปรึกษาและช่วยตรวจแก้ไขในการดำเนินการจัดทำวิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยขอขอบคุณท่านเป็นอย่างสูง ณ โอกาสนี้

ขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ห้องปฏิบัติการในการทำวิจัย และอุปกรณ์เครื่องมือต่างๆ ที่ใช้ในงานวิจัย

ขอขอบคุณ บริษัท TT&G Fiber อำเภอบางละมุง จังหวัดชลบุรี ที่ให้การสนับสนุนเส้นใยมะพร้าว เพื่อใช้ในการศึกษาวิจัย

ขอขอบคุณผู้มีส่วนร่วมในการให้คำแนะนำในด้านต่างๆ รวมถึงการให้ข้อมูลที่มีประโยชน์ต่อ งานวิจัย และให้กำลังใจเสมอมาจนทำให้งานวิจัยฉบับนี้เสร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

คุณงานความดีอันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบแต่บิดา มารดา อันเป็นที่เคารพยิ่ง ผู้ให้การสนับสนุนในทุกๆ ด้าน และคณาจารย์ผู้ทรงความรู้ ตลอดจนทุกท่านที่ช่วยเหลือให้วิทยานิพนธ์นี้ เสร็จสมบูรณ์

อารียา แพร์เมตตา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	IX
สารบัญรูป.....	XI
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	3
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	3
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	4
บทที่ 2 งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	9
2.2.1 พอลิแลคติกแอซิด (Polylactic acid, PLA).....	9
2.2.1.1 โครงสร้างองค์ประกอบ และการสังเคราะห์ พอลิแลคติกแอซิด.....	10
2.2.1.2 สมบัติของพอลิแลคติกแอซิด.....	11
2.2.2 เส้นใย (Fiber).....	11
2.2.2.1 เส้นใยที่มนุษย์สร้างขึ้น (Manmade fibers).....	12
2.2.2.2 เส้นใยธรรมชาติ (Natural fibers).....	12
2.2.3 เส้นใยป่านครนารายณ์ (Sisal).....	16
2.2.4 เส้นใยมะพร้าว (Coir).....	17
2.2.5 การทดสอบสมบัติของเส้นใยเสริมแรง.....	18
2.2.5.1 การวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างสัณฐานวิทยาของ เส้นใยเสริมแรง.....	18
2.2.5.2 การวิเคราะห์ความหนาแน่นของเส้นใยเสริมแรง (Density)...	18
2.2.6 วัสดุเชิงประกอบ (Composite materials).....	18

	หน้า
2.2.7 วัสดุเชิงประกอบชีวภาพ (Biocomposite materials).....	20
2.2.7 วัสดุเชิงประกอบชีวภาพ (Biocomposite materials).....	20
2.2.9 วิธีพื้นที่ผิวตอบ (Response Surface Methodology, RSM).....	22
2.2.10 การออกแบบการทดลองแบบผสม (Mixture Design).....	23
2.2.11 ฟังก์ชันความพึงพอใจ (Desirability Function).....	27
2.2.12 เครื่องมือวิเคราะห์ทางสถิติ.....	29
2.2.12.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA).....	29
2.2.12.2 การทดสอบสมมติฐาน (Hypothesis Testing).....	31
2.2.12.3 การใช้ P-Value ในการทดสอบสมมติฐาน.....	32
2.2.12.4 การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบ (Model Adequacy Checking).....	33
2.2.12.5 การวิเคราะห์การถดถอย (Regression Analysis).....	34
2.2.12.6 การประมาณค่าพารามิเตอร์ในแบบจำลองสมการถดถอย...	37
2.2.12.7 ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination, R^2).....	38
2.2.12.8 การทดสอบความเหมาะสมของแบบจำลองสมการถดถอย (Lack of Fit).....	38
2.2.13 กระบวนการอัด (Compression molding).....	40
2.2.14 การทดสอบแรงดึง (Tensile Test).....	41
2.2.15 การทดสอบแรงกระแทก (Tensile Test).....	44
2.2.16 การทดสอบการดูดซึมน้ำ (Water absorption).....	45
2.2.17 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscope, OM).....	45
2.2.18 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดกำลังสูง (Field Emission Scanning Electron Microscope, FESEM).....	47
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย	48
3.1 วัสดุ.....	49
3.1.1 พอลิแลคติกแอซิด.....	49

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.1.2 เส้นใยป่านศรนารายณ์ (Sisal Fiber, SF).....	49
3.1.3 เส้นใยมะพร้าว (Coir Fiber, CF).....	49
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์.....	50
3.3 วิธีการทดลอง.....	50
3.3.1 การศึกษาสมบัติของเส้นใยธรรมชาติ.....	50
3.3.1.1 การวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างสัณฐานวิทยาของเส้นใย เสริมแรง.....	50
3.3.1.2 การวิเคราะห์เส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยเสริมแรง.....	51
3.3.1.3 การทดสอบสมบัติความหนาแน่นของเส้นใยเสริมแรง.....	52
3.3.1.4 การทดสอบสมบัติความทนต่อแรงดึงของเส้นใยเสริมแรง.....	53
3.3.2 การออกแบบการทดลอง.....	54
3.3.2.1 การเลือกระดับของปัจจัย.....	56
3.3.2.2 การกำหนดตัวแปรตอบสนอง.....	56
3.3.2.3 การออกแบบการทดลองแบบผสมแบบมีข้อจำกัด (Constrained mixture design).....	56
3.3.2.4 การวิเคราะห์พื้นผิวตอบ (Response surface).....	58
3.3.2.5 การยืนยันผลการทดลองและการสรุปผลการทดลอง.....	58
3.3.3 การเตรียมเส้นใย.....	58
3.3.4 การเตรียมวัสดุเชิงประกอบผสมชีวภาพ.....	60
3.3.5 การเตรียมชิ้นงานทดสอบ.....	60
3.3.6 การศึกษาสมบัติของวัสดุเชิงประกอบผสมชีวภาพ.....	62
3.3.6.1 การทดสอบความทนต่อแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบผสม ชีวภาพ.....	62
3.3.6.2 การทดสอบความทนต่อแรงกระแทกของวัสดุเชิงประกอบ ผสมชีวภาพ.....	63
3.3.6.3 การทดสอบการดูดซึมน้ำ.....	64
3.3.6.4. การศึกษาสัณฐานวิทยาของเส้นใยเสริมแรงและวัสดุเชิง ประกอบผสมโดยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด.....	64
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	65

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.1 การศึกษาสมบัติของเส้นใยธรรมชาติ.....	65
4.1.1 การวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างสัณฐานวิทยาของเส้นใยเสริมแรง.....	65
4.1.2 การวิเคราะห์เส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยเสริมแรง.....	67
4.1.3 การทดสอบสมบัติความหนาแน่นของเส้นใยเสริมแรง.....	67
4.1.4 การทดสอบสมบัติความทนต่อแรงดึงของเส้นใยเสริมแรง.....	67
4.2 การออกแบบการทดลอง.....	69
4.2.1 การวิเคราะห์การกระจายตัวและการจัดเรียงตัวของเส้นใยเสริมแรงในวัสดุเชิงประกอบผสมพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใยป่านศรนารายณ์และเส้นใยมะพร้าว.....	71
4.2.2 ผลการทดลองของตัวแปรตอบสนองความทนต่อแรงดึง (Tensile Strength).....	73
4.2.3 ผลการทดลองของตัวแปรตอบสนองความทนต่อแรงกระแทก (Impact Strength).....	79
4.2.4 ผลรวมการวิเคราะห์ของตัวแปรตอบสนองความทนต่อแรงดึงและความทนต่อแรงกระแทก	85
4.2.5 ผลการทดสอบยืนยันผลจากการวิเคราะห์ด้วย Overlaid Response Optimizer	87
4.2.6 ผลการทดลองสมบัติการดูดซับน้ำของวัสดุเชิงประกอบผสมเสริมแรงด้วยเส้นใยป่านศรนารายณ์และเส้นใยมะพร้าว.....	89
4.2.7 ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบผสมพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใยป่านศรนารายณ์และเส้นใยมะพร้าว.....	91
4.2.8 ผลการเปรียบเทียบการเสริมแรงด้วยเส้นใยธรรมชาติสองชนิดและการเสริมแรงด้วยเส้นใยธรรมชาติชนิดเดียวของวัสดุเชิงประกอบพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใยธรรมชาติ.....	92
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	94
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	94

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
เอกสารอ้างอิง.....	96
ภาคผนวก	102
ภาคผนวก ก บทความที่ได้รับการตีพิมพ์.....	103
ภาคผนวก ข เอกสารรับรองพลาสติก.....	109
ภาคผนวก ค ค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยเสริมแรง.....	112
ภาคผนวก ง ค่าความหนาแน่นของเส้นใยเสริมแรง.....	117
ภาคผนวก จ ค่าความทนต่อแรงดึงของเส้นใยเสริมแรง.....	119
ภาคผนวก ฉ ค่าความทนต่อแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบผสมพอลิแลคติกแอซิด เสริมแรงด้วยเส้นใยปานครนารายณ์และเส้นใยมะพร้าว.....	122
ภาคผนวก ช ค่าความทนต่อแรงกระแทกของวัสดุเชิงประกอบผสมพอลิแลคติกแอซิด เสริมแรงด้วยเส้นใยปานครนารายณ์และเส้นใยมะพร้าว.....	126
ภาคผนวก ซ ข้อมูลการวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยโปรแกรมMinitab.....	128
ภาคผนวก ฌ การดูดซับน้ำของวัสดุเชิงประกอบผสมเสริมแรงด้วยเส้นใยปาน ครนารายณ์และเส้นใยมะพร้าว.....	131
ภาคผนวก ฎ ผลการเปรียบเทียบการเสริมแรงด้วยเส้นใยธรรมชาติสองชนิดและ การเสริมแรงด้วยเส้นใยธรรมชาติชนิดเดียวของวัสดุเชิงประกอบผสมพอลิแลคติกแอซิด เสริมแรงด้วยเส้นใยธรรมชาติ.....	138
ภาคผนวก ฏ กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นและค่าความเครียดของวัสดุเชิง ประกอบผสมเสริมแรงด้วยเส้นใยปานครนารายณ์และเส้นใยมะพร้าว.....	140
ประวัติผู้เขียน.....	151

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยธรรมชาติ.....	15
2.2 สมบัติบางประการของเส้นใยธรรมชาติและเส้นใยสังเคราะห์	16
2.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA Table).....	31
2.4 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของแบบจำลองสมการถดถอย.....	40
3.1 สมบัติของพอลิแลคติกแอซิด.....	49
3.2 ปัจจัยและข้อจำกัดของการออกแบบการทดลอง.....	56
3.3 การออกแบบการทดลองแบบผสมแบบมีข้อจำกัด.....	57
4.1 ผลการทดสอบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยป่านศรนารายณ์และเส้นใยมะพร้าว.....	67
4.2 ผลการทดสอบความหนาแน่นของเส้นใยป่านศรนารายณ์และเส้นใยมะพร้าว.....	67
4.3 ผลการทดสอบความทนต่อแรงดึงของเส้นใยป่านศรนารายณ์และเส้นใยมะพร้าว.....	67
4.4 ผลการทดลองจากการออกแบบการทดลองแบบผสม.....	69
4.5 ค่าระยะยืด ๓ จุดขาด และค่ายังมอดูลัสของวัสดุเชิงประกอบผสมที่อัตราส่วนผสมของการออกแบบการทดลองแบบผสมทั้งหมด 7 การทดลอง และ PLA.....	70
4.6 การกระจายตัวและการจัดเรียงตัวของเส้นใยเสริมแรงในวัสดุเชิงประกอบผสมพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใยป่านศรนารายณ์และเส้นใยมะพร้าว.....	71
4.7 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA) ของแบบจำลองสมการถดถอยเชิงเส้นของตัวแปรตอบสนองความทนต่อแรงดึง.....	75
4.8 ผลการวิเคราะห์หาแบบจำลองสมการถดถอยของตัวแปรตอบสนองความทนต่อแรงดึง.....	76
4.9 ผลทางสถิติของแบบจำลองสมการถดถอยของตัวแปรตอบสนองความทนต่อแรงดึง.....	77
4.10 ผลการวิเคราะห์ Optimization Plot ของค่าความทนต่อแรงดึง.....	78
4.11 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของแบบจำลองสมการถดถอยเชิงเส้นของตัวแปรตอบสนองความทนต่อแรงกระแทก.....	81
4.12 ผลการวิเคราะห์หาแบบจำลองสมการถดถอยของตัวแปรตอบสนองความทนต่อแรงกระแทก.....	82
4.13 ผลทางสถิติของแบบจำลองถดถอยเชิงเส้นของตัวแปรตอบสนองความทนต่อแรงกระแทก.....	83
4.14 ผลการวิเคราะห์ Optimization Plot ของค่าความทนต่อแรงกระแทก.....	84
4.15 ผลการวิเคราะห์ Optimization Overlaid Plot ของค่าความทนต่อแรงดึงและความทนต่อแรงกระแทก.....	86

4.16 ผลการทดสอบความทนต่อแรงดึงและความทนต่อแรงกระแทกในการยืนยันผลจากการวิเคราะห์ด้วย Overlaid Response Optimizer.....	88
4.17 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติการเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยความทนต่อแรงดึง.....	88
4.18 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติการเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยความทนต่อแรงกระแทก.....	89

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 วัฏจักรการผลิตและการย่อยสลายของไบโอพอลิเมอร์.....	9
2.2 โครงสร้างไอโซเมอร์เชิงแสงของกรดแลคติก	10
2.3 ปฏิกิริยาการสังเคราะห์พอลิแลคติกแอซิดจากกรดแลคติก	10
2.4 ประเภทของเส้นใย.....	11
2.5 โครงสร้างของเส้นใยธรรมชาติ	13
2.6 การจัดโครงสร้างขององค์ประกอบทางเคมีหลัก 3 ชนิดของเส้นใยธรรมชาติ	13
2.7 โครงสร้างของเซลลูโลส	14
2.8 โครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส	14
2.9 โครงสร้างของลิกนิน (a) p-coumaryl alcohol (b) coniferyl alcohol (c) sinapyl alcohol.....	15
2.10 ภาพตัวอย่างลักษณะต้นป่านศรนารายณ์และภาพตัดขวางของใบป่านศรนารายณ์	17
2.11 ส่วนประกอบของผลมะพร้าว	18
2.12 ประเภทของวัสดุเชิงประกอบ.....	19
2.13 ชนิดของวัสดุเชิงประกอบชีวภาพ	20
2.14 แบบจำลองทั่วไปของกระบวนการ.....	21
2.15 พื้นผิวที่ผิวตอแบบสามมิติ	23
2.16 ช่องว่างที่ถูกจำกัดของปัจจัยของส่วนผสมที่มี $p = 2$ และ $p = 3$	24
2.17 ระบบโคออร์ดิเนทกราฟสามแกน.....	24
2.18 การออกแบบการทดลองแบบซิมแพล็กซ์แล็คทิสที่มี $p = 3$ และ $p = 4$	25
2.19 การออกแบบการทดลองแบบซิมแพล็กซ์เซ็นทรอยด์ที่มี $p = 3$ และ $p = 4$	26
2.20 การออกแบบการทดลองแบบซิมเพล็กซ์แอกเซียลที่มี $p = 3$	26
2.21 รูปร่างของ $d_i(Y_i)$ ในรูปแบบยิ่งมากยิ่งขึ้น.....	27
2.22 รูปร่างของ $d_i(Y_i)$ ในรูปแบบยิ่งน้อยยิ่งขึ้น.....	28
2.23 รูปร่างของ $d_i(Y_i)$ ในรูปแบบค่ากลางคือค่าที่ดีที่สุด	29
2.24 รูปแบบการกระจายตัวของข้อมูล.....	34
2.25 ส่วนประกอบทั่วไปของเครื่องกัดอัด.....	41
2.26 ขั้นตอนกระบวนการอัดขึ้นรูป.....	41
2.27 ลักษณะและการติดตั้งชิ้นงานบนเครื่องทดสอบแรงดึง.....	43
2.28 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของชิ้นงาน.....	43

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.29 หลักการทำงานและส่วนประกอบเครื่องทดสอบแรงกระแทก	44
2.30 รูปแบบการวางชิ้นงานทดสอบแรงกระแทก	44
2.31 ขนาดของชิ้นงานทดสอบแรงกระแทก	45
2.32 ส่วนประกอบหลักของกล้องจุลทรรศน์แบบแสง	46
2.33 การทำงานของกล้องจุลทรรศน์แบบแสง	46
2.34 การทำงานของกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด	47
3.1 แผนภาพแสดงขั้นตอนการดำเนินงาน.....	48
3.2 กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด.....	51
3.3 เครื่องขัดชิ้นงานและตัวเรือนการหล่อเรซินเส้นใยเสริมแรง.....	51
3.4 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง.....	52
3.5 การทดสอบสมบัติความหนาแน่นของเส้นใยเสริมแรง.....	53
3.6 การติดเส้นใยเสริมแรงลงในกระดาษเพื่อใช้ในการทดสอบความทนต่อแรงดึงของเส้นใยเสริมแรง.....	53
3.7 การทดสอบความทนต่อแรงดึงของเส้นใยเสริมแรง.....	54
3.8 ขั้นตอนการออกแบบการทดลอง.....	55
3.9 แผนการทดลองแบบผสมแบบมีข้อจำกัด.....	58
3.10 (a) เส้นใยปานครนารายณ์สั้นและ (b) เส้นใยมะพร้าวสั้น.....	59
3.11 ตู้อบ.....	59
3.12 (a) เครื่องผสมแบบปิดและ (b) เครื่องบดเม็ดพลาสติก.....	60
3.13 (a) ขนาดของชิ้นงาน Type I ในการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D638 (b) ชิ้นงานทดสอบ PLA และชิ้นงานทดสอบตามอัตราส่วนจากการออกแบบการทดสอบ RUN1-RUN7 ตามลำดับ.....	61
3.14 (a) ขนาดของชิ้นงาน Izod Type ในการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D256 (b) ชิ้นงานทดสอบ PLA และชิ้นงานทดสอบตามอัตราส่วนจากการออกแบบการทดสอบ RUN1-RUN7 ตามลำดับ.....	61
3.15 เครื่องทำรอยบากแบบอัตโนมัติ.....	62
3.16 เครื่องทดสอบแรงดึงและการติดตั้งชิ้นงานทดสอบ.....	62
3.17 การทดสอบสมบัติความทนต่อแรงกระแทกแบบไอซอด (Izod type) Test method E ตามมาตรฐาน ASTM	63
3.18 เครื่องทดสอบแรงกระแทก.....	63

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.1 ภาพถ่ายตัดขวางของเส้นใยปานศรนารายณ์.....	65
4.2 ภาพถ่ายพื้นผิวของเส้นใยปานศรนารายณ์.....	66
4.3 ภาพตัดขวางของเส้นใยมะพร้าว.....	66
4.4 ภาพถ่ายพื้นผิวของเส้นใยมะพร้าว.....	66
4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นและค่าความเครียดของเส้นใยปานศรนารายณ์และเส้นใยมะพร้าว.....	68
4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นและค่าความเครียดของวัสดุเชิงประกอบผสมที่อัตราส่วนผสมของการออกแบบการทดลองแบบผสมทั้งหมด 7 การทดลอง และ PLA.....	70
4.7 Normal Probability Plot ของค่าความทนต่อแรงดึง.....	73
4.8 Versus Fits ของค่าความทนต่อแรงดึง.....	73
4.9 Versus Order ของค่าความทนต่อแรงดึง.....	74
4.10 Mixture Contour Plot ของความทนต่อแรงดึง.....	78
4.11 Normal Probability Plot ของค่าความทนต่อแรงกระแทก.....	79
4.12 Versus Fits ของค่าความทนต่อแรงกระแทก.....	79
4.13 Versus Order ของค่าความทนต่อแรงกระแทก.....	80
4.14 Mixture Contour Plot ของความทนต่อแรงกระแทก.....	84
4.15 Overlaid Contour Plot ของความทนต่อแรงดึงและความทนต่อแรงกระแทก.....	86
4.16 การทดลองสมบัติการดูดซับน้ำของวัสดุเชิงประกอบผสมเสริมแรงด้วยเส้นใยปานศรนารายณ์และเส้นใยมะพร้าว.....	90
4.17 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาบริเวณรอยแตกหักของวัสดุเชิงประกอบผสมพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใยปานศรนารายณ์และเส้นใยมะพร้าว.....	91
4.18 ผลทดสอบความทนต่อแรงดึงและความทนต่อแรงกระแทกของ P95.22 : S0.78 : C4.0, P95.22 : S4.78, P95.22 : S4.78 และ PLA	93

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

พลาสติกเป็นสารประกอบอินทรีย์ที่สังเคราะห์ขึ้นเพื่อนำมาใช้ทดแทนวัสดุทางธรรมชาติ ซึ่งพลาสติกเป็นพอลิเมอร์ที่ได้จากการสังเคราะห์โดยกระบวนการทางเคมีโพลิเมอร์ไรเซชัน (polymerization) ที่มีสารตั้งต้นมาจากอุตสาหกรรมปิโตรเคมี ทำให้พลาสติกมีคุณสมบัติยากต่อการสลายตัว ในปัจจุบันพลาสติกเป็นวัสดุหลักสำหรับผลิตภัณฑ์และสิ่งของเครื่องใช้ที่ใช้ในชีวิตประจำวันเช่น อุปกรณ์ยานยนต์ วัสดุก่อสร้าง เครื่องนุ่งห่ม เป็นต้น โดยพลาสติกที่ได้รับความนิยมในการใช้อย่างแพร่หลายได้แก่ พอลิเอทิลีน (Polyethylene, PE) พอลิโพรไพลีน (Polypropylene, PP) พอลิไวนิลคลอไรด์ (Polyvinylchloride, PVC) ไนลอน (Nylon) เป็นต้น ในปัจจุบันปริมาณการใช้พลาสติกที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทำให้เกิดขยะจากพลาสติกเป็นจำนวนมากก่อให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม และข้อจำกัดด้านปริมาณของวัตถุดิบน้ำมันดิบและก๊าซธรรมชาติซึ่งคาดว่าจะลดลงอย่างต่อเนื่อง จากการที่พลาสติกยากต่อการสลายตัวทำให้เกิดเป็นขยะมูลฝอยประเภทพลาสติกตกค้างในธรรมชาติเป็นเวลานาน ส่งผลให้ในปัจจุบันมีการตระหนักถึงปัญหาสิ่งแวดล้อม[1] ทำให้มีการพัฒนาพลาสติกชีวภาพ (Bioplastic) ที่สังเคราะห์จากแหล่งทรัพยากรที่สามารถผลิตทดแทนใหม่ได้ในธรรมชาติ (renewable resource) เช่น อ้อย มันสำปะหลัง เป็นต้น หรือเรียกว่า พลาสติกสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradable plastic) เป็นพลาสติกที่มีคุณสมบัติเหมือนพลาสติกทั่วไปแต่มีความสามารถในการย่อยสลายเมื่อผ่านกระบวนการหมักทางชีวภาพได้เป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ[2] ซึ่งเป็นการผลิตวัสดุทดแทนในการใช้พลาสติกจากปิโตรเคมีเพื่อลดปัญหาสิ่งแวดล้อม ตัวอย่างพอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายได้เช่น พอลิแลคติกแอซิด (Polylactic acid, PLA) พอลิไกลโคไลด์ (Polyglycolide, PGA) เป็นต้น แต่อย่างไรก็ตามพลาสติกชีวภาพย่อยสลายได้ทางชีวภาพยังคงมีสมบัติบางอย่างที่เป็นข้อด้อยอยู่คือ มีลักษณะแข็งเปราะ ทนความร้อนต่ำ ความแข็งแรงต่ำ มีการขึ้นรูปที่ยากซับซ้อนเนื่องจากมีความชื้นที่สูง และมีราคาค่อนข้างแพง[3] จึงยังมีข้อจำกัดในการใช้งาน ทำให้ต้องมีการพัฒนาคุณสมบัติให้เหมาะในการใช้งานมากขึ้น

การพัฒนาคุณสมบัติของพลาสติกมีอยู่หลายวิธีขึ้นอยู่กับการนำไปใช้งาน วิธีหนึ่งที่ได้รับค่านิยมเป็นอย่างมากคือ การใช้วัสดุเสริมแรง (Reinforcement) ทำหน้าที่เป็นส่วนเสริมสมบัติให้กับวัสดุผสมกับพลาสติกที่ทำหน้าที่เป็นเนื้อหลักเรียกว่า เมทริกซ์ (Matrix) ได้เป็นวัสดุเชิงประกอบ (Composite) เนื่องจากพอลิเมอร์มีข้อจำกัดในด้านความแข็งแรง ดังนั้นการเสริมแรงด้วยเส้นใยเสริมแรงจึงเป็นการเพิ่ม

ความแข็งแรงให้กับพอลิเมอร์เป็นอย่างมาก นอกจากนี้ในปัจจุบันยังมีการพัฒนาวัสดุเชิงประกอบให้มีคุณสมบัติมากยิ่งขึ้น โดยการใช้วัสดุเสริมแรงมากกว่า 2 ชนิดที่มีคุณสมบัติแตกต่างกันเพื่อเสริมสมบัติซึ่งกันและกันเรียกว่า วัสดุเชิงประกอบผสม (Hybrid composite)[4] เป็นการทำให้วัสดุเชิงประกอบให้มีสมบัติที่ดีมากขึ้นและสามารถนำไปใช้งานที่ต้องการสมบัติเฉพาะตัวที่ไม่สามารถหาได้จากการใช้วัสดุเสริมแรงเพียงชนิดเดียวหรือพัฒนาให้มีคุณสมบัติต่างๆ ที่ตอบสนองต่อความต้องการหรือการนำไปประยุกต์ใช้ในงานอุตสาหกรรมที่ต้องการคุณสมบัติของวัสดุเชิงประกอบมากกว่าหนึ่งคุณสมบัติ

เส้นใยธรรมชาติ (Natural fiber) นิยมนำมาเป็นเส้นใยเสริมแรง (Fiber reinforcement) ในวัสดุเชิงประกอบมากขึ้นเมื่อเทียบกับเส้นใยสังเคราะห์ (Synthesis fiber) เนื่องจากเส้นใยธรรมชาติ มีราคาถูก ความหนาแน่นต่ำ ความแข็งแรงค่อนข้างสูง และสามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติ (Biodegradability)[5,6] ซึ่งตอบสนองความต้องการในการแก้ปัญหาสิ่งแวดล้อมในปัจจุบัน เส้นใยธรรมชาติที่มีการศึกษาวิจัยอย่างแพร่หลายได้แก่ เส้นใยจากปอติลิน (Flex)[7] ป่านครนารายณ์ (Sisal)[8] สับปะรด (Pineapple leaf)[9] มะพร้าว (Coir)[10] กัญชง (Hemp)[11] ฝ้าย (Cotton)[12] เป็นต้น โดยเส้นใยธรรมชาติที่งานวิจัยนี้สนใจได้แก่ เส้นใยป่านครนารายณ์เป็นเส้นใยธรรมชาติชนิดหนึ่งที่มีคุณสมบัติเด่นเรื่องความความทนต่อแรงดึงที่สูง พบได้ง่ายในพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย และเส้นใยมะพร้าวเป็นเส้นใยที่มีความแข็งแรง เหนียว และความทนต่อแรงดึงได้ดี มีปริมาณมากสามารถหาได้ทั่วไปในประเทศไทย

สำหรับงานวิจัยนี้ได้เลือกเส้นใยป่านครนารายณ์และเส้นใยมะพร้าว ที่มีคุณสมบัติเชิงกลและสมบัติทางกายภาพที่แตกต่างกันทำหน้าที่เป็นเส้นใยเสริมแรง โดยมีพอลิแลคติกแอซิดเป็นเมทริกซ์ เพื่อพัฒนาวัสดุเชิงประกอบผสมเสริมแรงด้วยเส้นใยธรรมชาติ (Hybrid natural fiber reinforced composites) ให้มีคุณสมบัติเพิ่มขึ้นกว่าการใช้เส้นใยเสริมแรงเพียงชนิดเดียว โดยใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองแบบผสม (Mixture design) ซึ่งเป็นการออกแบบการทดลองเพื่อหาสัดส่วนที่เหมาะสมของปัจจัยเชิงปริมาณตั้งแต่ 2 ปัจจัยขึ้นไป โดยผลรวมของปัจจัยทั้งหมดคือ 1.0 หรือ 100%[13] ในการศึกษาอัตราส่วนผสมทั้ง 3 ชนิดของวัสดุเชิงประกอบผสมเสริมแรงด้วยเส้นใยธรรมชาติคือ พอลิแลคติกแอซิด เส้นใยป่านครนารายณ์ และเส้นใยมะพร้าวที่เหมาะสมและมีอิทธิพลต่อ ความทนต่อแรงดึง ความทนต่อแรงกระแทก และการดูดซึมน้ำ

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.2.1 เพื่อศึกษาการประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองแบบผสม (Mixture design) สำหรับการกำหนดอัตราส่วนผสมของวัสดุเชิงประกอบผสมเสริมแรงด้วยเส้นใยธรรมชาติ

1.2.2. เพื่อศึกษาถึงอัตราส่วนผสมของวัสดุเชิงประกอบผสมเสริมแรงด้วยเส้นใยธรรมชาติที่เหมาะสม และมีอิทธิพลต่อ ความทนต่อแรงดึง ความทนต่อแรงกระแทก และ การดูดซึมน้ำ

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1.3.1 ทดสอบสมบัติเชิงกลและสมบัติทางสัญญาณวิทยาของเส้นใยป่านศรนารายณ์และเส้นใยมะพร้าว

1.3.2 ออกแบบการทดลองโดยใช้การออกแบบการทดลองแบบผสมแบบมีข้อจำกัด (Constrained mixture design)

1.3.3 ทดสอบผลของอัตราส่วนผสมของวัสดุเชิงประกอบผสมเสริมแรงด้วยเส้นใยธรรมชาติ ที่เหมาะสมโดยกำหนดอัตราส่วนของเส้นใยป่านศรนารายณ์และเส้นใยมะพร้าวรวมกันไม่เกิน 5 wt% ที่มีผลต่อความทนต่อแรงดึง ความทนต่อแรงกระแทก และ การดูดซึมน้ำ

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1.4.1 ศึกษาและรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับพอลิแลคติกแอซิด เส้นใยป่านศรนารายณ์ เส้นใยมะพร้าว และทฤษฎีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิธีการปรับปรุงคุณสมบัติของพอลิแลคติกแอซิด

1.4.2 ศึกษาทฤษฎีการออกแบบการทดลองแบบผสม เพื่อใช้ในการออกแบบการทดลองที่เหมาะสม

1.4.3 ศึกษาวิธีการและขั้นตอนการทดสอบตามมาตรฐานการทดสอบ

1.4.4 ออกแบบการทดลองและเตรียมอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในงานวิจัย

1.4.5 ทำการทดลองโดยการทดสอบสมบัติเชิงกลและสมบัติทางสัญญาณวิทยาของเส้นใยป่านศรนารายณ์และเส้นใยมะพร้าว

1.4.6 ทำการทดลองโดยการขึ้นรูปชิ้นงานตามอัตราส่วนจากการออกแบบการทดลอง จากนั้นทำการทดสอบวัสดุเชิงประกอบผสมเสริมแรงด้วยเส้นใยธรรมชาติได้แก่ ความทนต่อแรงดึง ความทนต่อแรงกระแทก การดูดซึมน้ำ และสมบัติทางสัญญาณวิทยา

1.4.7 วิเคราะห์ผลการทดสอบวัสดุเชิงประกอบผสมเสริมแรงด้วยเส้นใยธรรมชาติได้แก่ ความทนต่อแรงดึง ความทนต่อแรงกระแทก และการดูดซึมน้ำ

1.4.8 วิเคราะห์ลักษณะทางสัญญาณวิทยาของวัสดุเชิงประกอบผสมพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใยป่านศรนารายณ์และเส้นใยมะพร้าว

1.4.9 เปรียบเทียบการเสริมแรงด้วยเส้นใยธรรมชาติสองชนิดและการเสริมแรงด้วยเส้นใยธรรมชาติชนิดเดียวของวัสดุเชิงประกอบพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใยธรรมชาติ

1.4.10 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะที่ได้จากการทดลอง

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ

1.5.1 สามารถทราบถึงการประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองในการศึกษาวัสดุเชิงประกอบผสมพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใยป่านครนารายณ์และเส้นใยมะพร้าว

1.5.2 สามารถทราบอิทธิพลของแต่ละปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติกลของวัสดุเชิงประกอบผสมพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใยป่านครนารายณ์และเส้นใยมะพร้าว

1.5.3 สามารถทราบอัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับวัสดุเชิงประกอบผสมพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใยป่านครนารายณ์และเส้นใยมะพร้าว

บทที่ 2

งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปัจจุบันพลาสติกชีวภาพย่อยสลายได้ถูกพัฒนาให้มีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับพลาสติกที่ได้จากการสังเคราะห์จากปิโตรเคมีที่ใช้กันอย่างแพร่หลายและยากต่อการย่อยสลาย ทำให้มีการศึกษาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพพลาสติกชีวภาพย่อยสลายได้ในคุณสมบัติด้านต่างๆ เช่น ความทนต่อแรงดึง (Tensile Strength) ความทนต่อแรงกระแทก (Impact Strength) ความสามารถในการดูดซึมน้ำ (Water absorption) และ ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของวัสดุคอมโพสิต (Microstructure) โดยงานวิจัยนี้ได้ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องข้างดังนี้

ในงานวิจัยของ Bravo และคณะ [6] ทำการศึกษาวัสดุไบโอคอมโพสิตโดยมีพอลิเอทิลีนธรรมชาติ (Natural Polyethylene, NPE) เป็นเมทริกซ์และเสริมแรงด้วยเส้นใยสับเบิร์ช (Birch) และทำการเปรียบเทียบกับเมทริกซ์อีก 2 ชนิดคือ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (Linear Low Density Polyethylene, LLDPE) และพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (High Density Polyethylene, HDPE) โดยศึกษาปริมาณเส้นใยเบิร์ชที่ 10, 20, 30 และ 40 wt% และเติมสารควบคู่ (coupling agent) พบว่าในเมทริกซ์ทั้งสามชนิดเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยทำให้ความทนต่อแรงดึงเพิ่มขึ้น โดยเมทริกซ์พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นให้ความทนต่อแรงดึงมากที่สุด จากการวิเคราะห์โดยเทคนิคอคูสติกอิมิซันส์ (Acoustic Emission testing) พบว่าการเติมสารควบคู่ส่งผลให้สมบัติเชิงกลของวัสดุเพิ่มขึ้นในทุกเมทริกซ์

ในงานวิจัยของ Cheng และคณะ [14] ทำการศึกษาวัสดุพอลิแลคติกแอซิดคอมโพสิตเสริมแรงด้วยขี้เถ้าที่ปริมาณ 2-10 wt% ที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อน พบว่าความทนต่อแรงดึงของวัสดุพอลิแลคติกแอซิดคอมโพสิตเสริมแรงด้วยขี้เถ้าเพิ่มขึ้นตามปริมาณขี้เถ้ามีค่าสูงสุดที่ปริมาณขี้เถ้า 5% โดยเพิ่มขึ้น 16% จากพอลิแลคติกแอซิด จากการส่องกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดพบว่าขี้เถ้ามีการกระจายตัวในเมทริกซ์ดี ซึ่งผลการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของวัสดุเชิงกลแบบไดนามิก แบบเชิงกล การวิเคราะห์ความเสถียรของวัสดุ พบว่าค่ามอดูลัสของวัสดุเพิ่มขึ้น อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะ T_g ลดน้อยลง และความเสถียรภาพทางความร้อนเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับพอลิแลคติกแอซิด

ในงานวิจัยของ Bax และ Mussig [15] ทำการศึกษาเปรียบเทียบวัสดุพอลิแลคติกแอซิดคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใย Cordenka และเส้นใยลินิน ที่มีผลต่อความทนต่อแรงดึงและความทนต่อแรงกระแทก ที่ปริมาณเส้นใย 10-30 wt% พบว่าความทนต่อแรงดึงเพิ่มขึ้นเมื่อเสริมแรงพอลิแลคติกแอซิด

ด้วยเส้นใย Cordenka ที่ปริมาณ 30 wt% แต่ค่ามอดูลัสเพิ่มขึ้นเมื่อเสริมแรงพอลิแลคติกแอซิดด้วยเส้นใยลินินตามปริมาณที่เพิ่มขึ้น จากการส่องกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด พบว่าการยึดเกาะกันระหว่างเมตริกซ์และเส้นใยทั้งสองชนิดมีการยึดเกาะกันค่อนข้างต่ำ

ในงานวิจัยของ Oksman และคณะ [16] ทำการศึกษาปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลของพอลิแลคติกแอซิดคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยลินิน ที่ปริมาณ 30 wt% และ 40 wt% พบว่าที่ปริมาณเส้นใยลินินที่ 30 wt% มีความทนต่อแรงดึงมากที่สุด แต่ลดลงเมื่อปริมาณของเส้นใยลินินเพิ่มขึ้น จากนั้นทำการศึกษาเปรียบเทียบกับพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยลินินที่ปริมาณเส้นใยเท่ากัน ซึ่งพอลิโพรพิลีนเป็นพลาสติกที่ใช้ทั่วไปในอุตสาหกรรม พบว่าวัสดุคอมโพสิตทั้งสองชนิดมีค่าความทนต่อแรงดึงใกล้เคียงกัน

ในงานวิจัยของ Silva และคณะ [17] ทำการศึกษาพอลิยูรีเทนคอมโพสิตใช้เส้นใยปานครนารายณ์และเส้นใยมะพร้าวเป็นเส้นใยเสริมแรง โดยทำการเปรียบเทียบระหว่างเส้นใยเสริมแรงสั้นและเส้นใยเสริมแรงที่ทอเป็นผืน ซึ่งพบว่าพอลิยูรีเทนที่เสริมแรงด้วยเส้นใยสั้นทั้งสองชนิดมีการรับแรงที่เพิ่มขึ้น โดยพอลิยูรีเทนที่เสริมแรงด้วยเส้นใยปานครนารายณ์มีสมบัติการรับแรงได้มากกว่าพอลิยูรีเทนที่เสริมแรงด้วยเส้นใยมะพร้าวสั้น และพอลิยูรีเทนที่เสริมแรงด้วยเส้นใยเสริมแรงปานครนารายณ์ที่ทอเป็นผืนสามารถรับแรงได้มากที่สุด

ในงานวิจัยของ Alavudeen และคณะ [18] ทำการศึกษามูลของรูปแบบการจัดเรียงตัวของเส้นใยธรรมชาติแบบทอผืนผ้าและการจัดเรียงตัวแบบสุ่มต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุพอลิเอสเตอร์คอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยกล้วย เส้นใยปอ และผสมระหว่างเส้นใยกล้วยกับเส้นใยปอ พบว่าวัสดุพอลิเอสเตอร์คอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยผสมระหว่างเส้นใยกล้วยและเส้นใยปอทั้งแบบทอผืนผ้าและแบบจัดเรียงตัวแบบสุ่มมีค่าสมบัติเชิงกลที่สูงกว่าการใช้เส้นใยเดี่ยว จากภาพการส่องกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดพบว่าการยึดเกาะกันระหว่างเมตริกซ์และเส้นใยทั้งสองชนิดดีกว่าเส้นใยชนิดเดียว

ในงานวิจัยของ Yusoff และคณะ [19] ทำการศึกษาวัดคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุพอลิแลคติกแอซิดผสมเสริมแรงด้วยเส้นใยปอ เส้นใยไผ่ และเส้นใยมะพร้าว ที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุพอลิแลคติกแอซิดคอมโพสิตผสม พบว่าการเสริมแรงด้วยเส้นใยธรรมชาติทำให้วัสดุมีความทนต่อแรงดึงเพิ่มขึ้น ซึ่งวัสดุพอลิแลคติกแอซิดผสมเสริมแรงด้วยเส้นใยปอ เส้นใยไผ่ และเส้นใยพร้าว มีความทนต่อแรงดึงมากที่สุด โดยเพิ่มขึ้น 78% จากพอลิแลคติกแอซิด ต่อมาได้แก่วสดุพอลิแลคติกแอซิดคอมโพสิตผสมเสริมแรงด้วยเส้นใยปอและเส้นใยมะพร้าว ซึ่งพบว่าเส้นใยปอและเส้นใยไผ่มีค่ามอดูลัสที่มากช่วยให้วัสดุมีความทนต่อแรงดึงเพิ่มขึ้น และเส้นใยมะพร้าวมีความเหนียวมากทำให้มีคุณสมบัติในการรับแรงมาก จึงทำให้การใช้เส้นใยเสริมแรงมากกว่าหนึ่งชนิดสามารถปรับปรุงคุณสมบัติทางกลของวัสดุได้มากกว่าการใช้เส้นใยเสริมแรงชนิดเดียว

ในงานวิจัยของ Shanmugam และ Thiruchitrambalam [20] ทำการศึกษาวัสดุพอลิเอสเตอร์ผสมคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยปาล์มและเส้นใยปอ ที่มีผลต่อการเปลี่ยนรูปและสมบัติเชิงกล ที่อัตราส่วนเส้นใยปาล์มต่อเส้นใยปอ 100:0 75:25 50:50 25:75 และ 100:0 พบว่าการเสริมแรงด้วยเส้นใยทั้งสองชนิดมีความทนต่อแรงดึงและความทนต่อแรงกดมากกว่าการเสริมแรงด้วยเส้นใยชนิดเดียว โดยที่เมื่อเพิ่มอัตราส่วนของเส้นใยปอทำให้ความทนต่อแรงดึงเพิ่มขึ้นและลดลงเมื่ออัตราส่วนของเส้นใยเท่ากับ 100 โดยความทนต่อแรงกระแทกลดลงเมื่อเสริมแรงด้วยเส้นใยทั้งสองชนิด จากการวิเคราะห์ความเสถียรของวัสดุพบว่าเสถียรภาพของวัสดุพอลิเอสเตอร์ผสมคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยปาล์มและเส้นใยปอไม่เปลี่ยนแปลงมาก

ในงานวิจัยของ Milanese และคณะ [21] ทำการศึกษาและเปรียบเทียบสมบัติความทนต่อแรงดึงของวัสดุคอมโพสิตที่มีพอลิยูรีเทนและเรซินพีนอลิกเป็นเมตริกซ์ โดยมีเส้นใยเสริมแรงเป็นเส้นใยปานครนารายณ์ที่ผ่านการอบไล่ความชื้นและเส้นใยปานครนารายณ์ที่ไม่ผ่านการอบไล่ความชื้น พบว่าวัสดุเรซินพีนอลิกเสริมแรงด้วยเส้นใยปานครนารายณ์ที่ผ่านการอบไล่ความชื้นมีความทนต่อแรงดึงที่สูงที่สุดตามด้วยวัสดุพอลิยูรีเทนเสริมแรงด้วยเส้นใยปานครนารายณ์ที่ผ่านการอบไล่ความชื้น เนื่องจากเส้นใยปานครนารายณ์ที่ผ่านการอบไล่ความชื้นมีการยึดเกาะกับเมตริกซ์ที่ดีกว่าเส้นใยปานครนารายณ์ที่ไม่ผ่านการอบไล่ความชื้น จากภาพการส่องกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดพบว่าช่องว่างระหว่างเมตริกซ์กับเส้นใยปานครนารายณ์ที่ผ่านการอบไล่ความชื้นมีน้อยกว่าเส้นใยปานครนารายณ์ที่ไม่ผ่านการอบไล่ความชื้น

ในงานวิจัยของ Venkateshwaran และคณะ [22] ทำการศึกษาผลของวัสดุอีพ็อกซีคอมโพสิตผสมเสริมแรงด้วยเส้นใยกล้วยและเส้นใยปานครนารายณ์ต่อสมบัติเชิงกลและสมบัติการดูดซึมน้ำ ซึ่งศึกษาที่ความยาวของเส้นใยที่ 5-20 mm ปริมาณของเส้นใยที่ 8-20 wt% และอัตราระหว่างเส้นใยกล้วยและเส้นใยปานครนารายณ์ พบว่าเมื่อความยาวของเส้นใยมากกว่า 5 mm ทำให้ความทนต่อแรงดึงลดลงแต่ความทนต่อแรงกระแทกเพิ่มขึ้น ซึ่งความทนต่อแรงดึงและความทนต่อแรงกระแทกเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของเส้นใยเพิ่มขึ้นแต่จะลดลงเมื่อปริมาณของเส้นใยเกิน 12 wt% และเมื่อทำการศึกษาสมบัติการดูดซึมน้ำ พบว่าเมื่ออัตราส่วนของเส้นใยปานครนารายณ์เพิ่มขึ้นส่งผลให้การดูดซึมน้ำลดลง จากภาพการส่องกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด พบว่ามีการยึดเกาะกันระหว่างเมตริกซ์และเส้นใยเสริมแรงที่ต่ำ โดยสังเกตจากมีช่องว่างระหว่างเมตริกซ์และเส้นใยเสริมแรง

ในงานวิจัยของ Ochi [23] ทำการศึกษาสมบัติของเส้นใยปอแก้ว โดยการทำความร้อนเส้นใยปอแก้วตั้งแต่เวลา 160-200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15-30 นาที และวัสดุพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใยปอแก้ว พบว่าความทนต่อแรงดึงของเส้นใยปอแก้วเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ แต่เมื่อให้ความร้อนจนถึง 180 องศาเซลเซียสความทนต่อความร้อนจะลดลง ซึ่งเวลาที่เหมาะสมสำหรับการให้ความร้อนเส้น

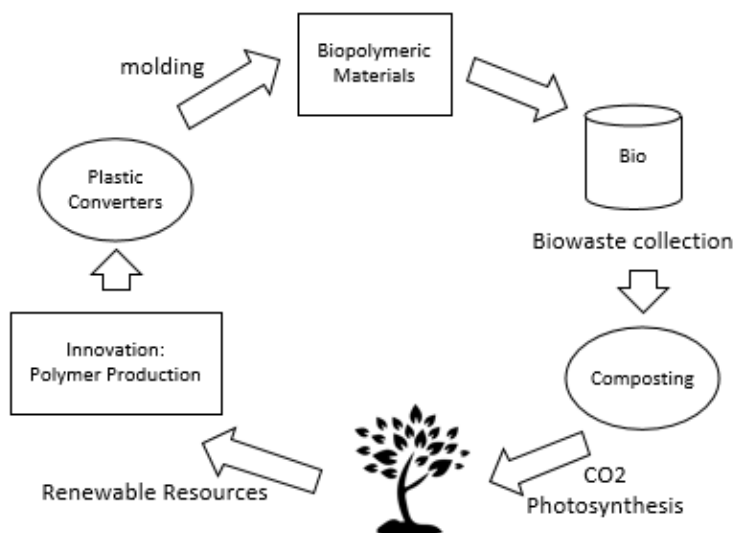
ใยปอแก้วคือ 160 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที และ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ความทนต่อแรงดึงของวัสดุพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใยปอแก้วเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยปอแก้วจนถึง 50 % จากนั้นความทนต่อแรงดึงจะลดลง จากนั้นทำการศึกษากการย่อยสลายของวัสดุพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใยปอโดยเครื่องย่อยสลายเป็นเวลา 1 เดือน พบว่าน้ำหนักของชิ้นงานลดลงเนื่องจากการย่อยสลายไป 38%

ในงานวิจัยของ Memon และ Nakai [24] ทำการศึกษาผลของการขึ้นรูปวัสดุแบบกดอัดวัสดุพอลิแลคติกแอซิดคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยปอที่มีต่อสมบัติเชิงกล โดยทำการวิเคราะห์ทางความร้อนหรือ TGA ของเส้นใยปอและพอลิแลคติกแอซิดในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 40-600 องศาเซลเซียส อัตราความร้อนที่ 50 องศาเซลเซียสต่อนาที พบว่าเส้นใยปอและพอลิแลคติกแอซิดมีการเสีรูปร่างที่อุณหภูมิประมาณ 240 องศาเซลเซียส และประมาณ 320 องศาเซลเซียสตามลำดับ จากนั้นทำการขึ้นรูปชิ้นงานโดยเครื่องอัดขึ้นรูปที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 175-240 องศาเซลเซียส เนื่องจากพอลิแลคติกแอซิดมีอุณหภูมิหลอมเหลวที่ 175 องศาเซลเซียส ที่ความดัน 1.33 MPa เป็นเวลา 8 นาที พบว่าอุณหภูมิของแม่พิมพ์ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุ เนื่องจากอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นทำการมีการกระจายตัวของเส้นใยและการยึดเกาะของเมทริกซ์และเส้นใยที่ดีขึ้น แต่จะลดลงเมื่ออุณหภูมิมากกว่า 195 องศาเซลเซียส ซึ่งอุณหภูมิที่เหมาะสมคือ 185-195 องศาเซลเซียส

2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.2.1 พอลิแลคติกแอซิด (Polylactic acid, PLA)

พอลิแลคติกแอซิด (Polylactic acid, PLA) หรือพอลิแลคไทด์ (Polylactide) เป็นไบโอพอลิเมอร์หรือพอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพชนิดหนึ่ง สังเคราะห์มาจากระบวนการทางเคมีปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันของกรดแลคติกที่ได้จากการหมักผลผลิตทางการเกษตรที่มีแป้งและน้ำตาลเป็นองค์ประกอบหลักเช่น ข้าวโพด มันสำปะหลัง หรืออ้อย โดยใช้จุลินทรีย์เปลี่ยนน้ำตาลให้เป็นกรดแลคติกแล้วนำมาผ่านกระบวนการสังเคราะห์เป็นพอลิแลคติกแอซิด ซึ่งทรัพยากรเหล่านี้สร้างทดแทนขึ้นได้อย่างต่อเนื่อง พอลิแลคติกแอซิดสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพโดยการฝังกลบดิน โดยการย่อยสลายของพอลิแลคติกแอซิดผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสได้กรดแลคติกเป็นผลิตภัณฑ์ซึ่งสามารถย่อยโดยจุลินทรีย์ได้เป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กับน้ำภายในเวลา 3-4 สัปดาห์แสดงดังรูปที่ 2.1 ถือว่าเป็นระยะเวลาที่สั้นเมื่อเทียบกับพลาสติกที่มาจากกระบวนการสังเคราะห์โดยปิโตรเคมี และพอลิแลคติกสามารถขึ้นรูปได้ด้วยกระบวนการผลิตทั่วไป

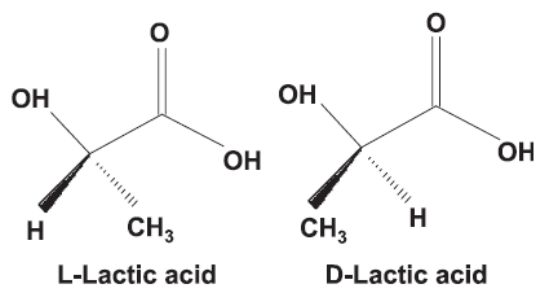


รูปที่ 2.1 วัฏจักรการผลิตและการย่อยสลายของไบโอพอลิเมอร์ [25]

2.2.1.1 โครงสร้างองค์ประกอบ และการสังเคราะห์พอลิแลคติกแอซิด

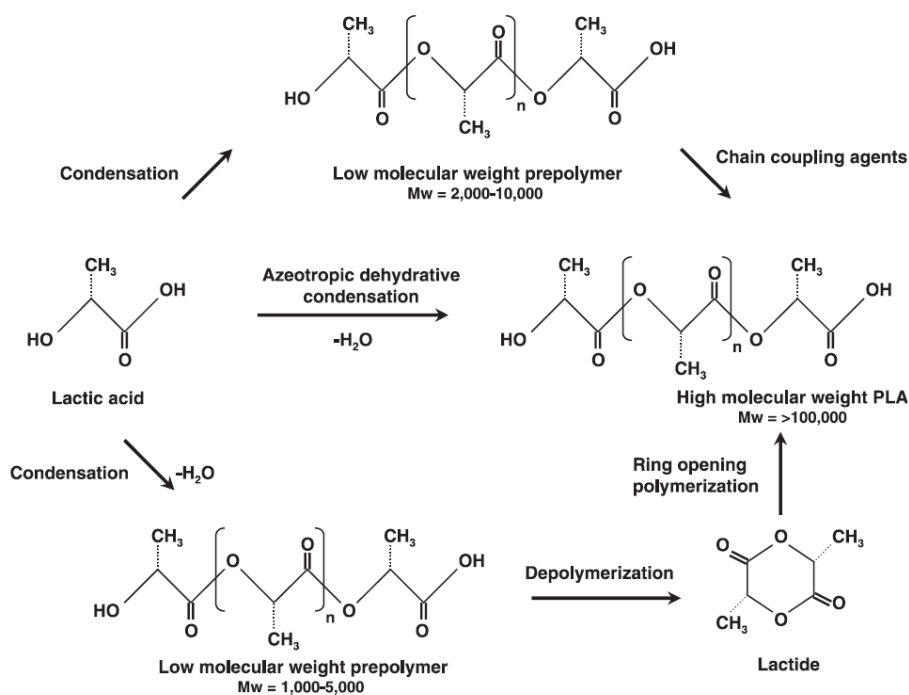
พอลิแลคติกแอซิดเกิดจากกระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชัน (Polymerization) โดยมีกรดแลคติก เป็นมอนอเมอร์ กรดแลคติกมีสมบัติไครัล (Chiral) จึงมีไอโซเมอร์สองรูปแบบคือ L-Lactic acid และ D-Lactic acid แสดงรูปที่ 2.2 เป็นอีนันชิโอเมอร์ (Enantiomer) ที่มีความไวต่อแสง (Optical

active) ต่างกัน ในการผลิตกรดแลคติกที่ได้จากการหมักทำให้พอลิแลคติกแอซิดมีความบริสุทธิ์เชิงแสง (Optical purity) ที่ดี



รูปที่ 2.2 โครงสร้างไอโซเมอร์เชิงแสงของกรดแลคติก [26]

การสังเคราะห์พอลิแลคติกแอซิดโดยปฏิกิริยาการควบแน่นแบบอะซีโอโทรปิก (Azeotropic dehydration condensation) หรือการสังเคราะห์โดยผ่านการเปิดวง (Ring-opening polymerization) ซึ่งจะทำให้ได้พอลิแลคติกแอซิดที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงถึงระดับมากกว่า 100,000 ดาลตัน และปฏิกิริยาควบแน่นโดยตรง (Direct condensation polymerization) ของกรดแลคติกได้พอลิแลคติกแอซิดที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำประมาณ 1,000 – 5,000 ดาลตัน แสดงดังรูปที่ 2.3



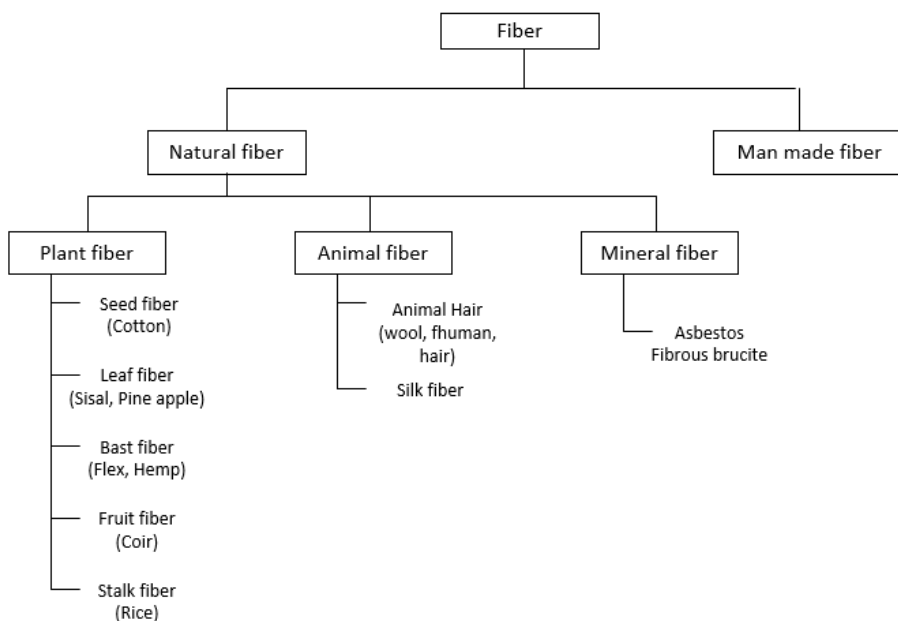
รูปที่ 2.3 ปฏิกิริยาการสังเคราะห์พอลิแลคติกแอซิดจากกรดแลคติก [26]

2.2.1.2 สมบัติของพอลิแลคติกแอซิด

พอลิแลคติกเป็นพลาสติกที่มีความมันวาวและใส สามารถนำไปใช้งานได้เช่นเดียวกับพลาสติกพื้นฐานทั่วไป ซึ่งความบริสุทธิ์เชิงแสงของพอลิแลคติกแอซิดส่งผลต่อสมบัติทางความร้อน สมบัติทางกลของพอลิแลคติกแอซิด โดยพอลิแลคติกแอซิดที่มีสัดส่วนของ L-Lactic acid สูงกว่าร้อยละ 90 มีแนวโน้มเป็นพอลิเมอร์กึ่งผลึก (Semi-crystalline polymer) พอลิแลคติกแอซิดที่มีสัดส่วนของ D-Lactic acid มากก็จะมีคุณสมบัติเชิงแสงลดลงและมีแนวโน้มเป็นพอลิเมอร์อสัณฐาน (Amorphous) โดยทั่วไปแล้วพอลิแลคติกแอซิดไม่ละลายน้ำ และแอลกอฮอล์ พอลิแลคติกแอซิดมีค่ามอดุลัสสูงใกล้เคียงกับพอลิสไตรีนอยู่ในช่วง 3000-4000 MPa และความทนต่อแรงดึงอยู่ในช่วง 50-70 MPa แต่มีค่าความยืดหยุ่นค่อนข้างต่ำ โดยพอลิแลคติกแอซิดมีค่า T_g อยู่ในช่วง 60-70 °C ทำให้มีความเปราะที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งพลาสติกพอลิแลคติกแอซิดสามารถกักเก็บกลิ่น และรสชาติได้ มีความต้านทานต่อน้ำมันและไขมันสูง ก้าวออกซิเจน และน้ำสามารถแพร่ผ่านได้ดี โดยพอลิแลคติกแอซิดสามารถนำไปปรับปรุงสมบัติด้านต่างๆ ได้เหมือนกับพลาสติกที่ผ่านการสังเคราะห์มาจากปิโตรเคมี

2.2.2 เส้นใย (Fiber)

เส้นใยเป็นวัสดุประเภทหนึ่งที่เกิดจากธรรมชาติหรือมนุษย์สร้างขึ้น โดยประเภทของเส้นใยแสดงดังรูปที่ 2.4[27] ซึ่งเส้นใยจะมีลักษณะเป็นเส้นยาวต่อเนื่อง หรือมีชิ้นส่วนยาวต่อเนื่องแยกออกจากกันที่มีอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อเส้นผ่าศูนย์กลาง (Aspect Ratio) เท่ากับหรือมากกว่า 100



รูปที่ 2.4 ประเภทของเส้นใย

2.2.2.1 เส้นใยที่มนุษย์สร้างขึ้น (Manmade fibers)

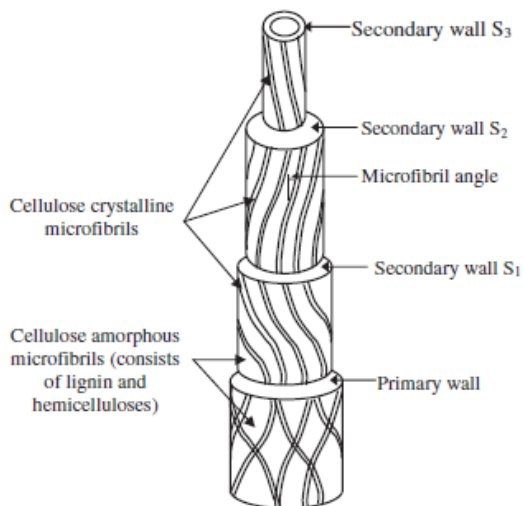
เส้นใยที่มนุษย์สร้างขึ้นหรือเส้นใยสังเคราะห์ (Synthetic fibers) เป็นเส้นใยที่สังเคราะห์ผ่านกระบวนการทางปฏิกิริยาเคมี ซึ่งจะมีความสม่ำเสมอและมีสมบัติบางประการที่สูงกว่าเส้นใยธรรมชาติ แต่มีราคาสูงกว่าเส้นใยธรรมชาติ จึงไม่เป็นที่นิยมในการนำมาเป็นเส้นใยเสริมแรงของวัสดุคอมโพสิต ตัวอย่างเส้นใยสังเคราะห์เช่น เรยอน (Rayon) ไนลอน (Nylon) เส้นใยแก้ว (Glass fiber) เป็นต้น

2.2.2.2 เส้นใยธรรมชาติ (Natural fibers)

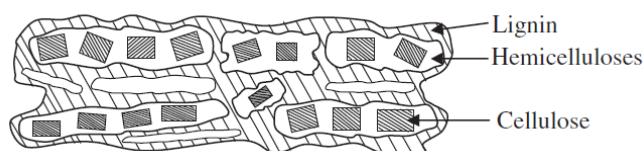
เส้นใยธรรมชาติที่นำมาใช้ประโยชน์โดยทั่วไปสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่มตามแหล่งที่มาแสดงดังรูปที่ 2.4 คือ เส้นใยจากแร่ธรรมชาติเช่น แร่ใยหิน เป็นต้น แต่เนื่องจากเส้นใยจากแร่ธรรมชาติส่งผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์ จึงไม่เป็นที่นิยม เส้นใยจากสัตว์ ซึ่งมีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นโปรตีนเช่น ไหม เส้นผม และขนสัตว์ ซึ่งเป็นเส้นใยที่แข็งแรง แต่มีราคาสูงและผลิตได้ค่อนข้างยาก และเส้นใยจากพืชที่มีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นเซลลูโลส[28] ได้จากหลายส่วนของพืชเช่น เมล็ด ใบ ก้าน ผล และเปลือก ตัวอย่างเส้นใยจากพืชเช่น เส้นใยกล้วย เส้นใยป่าน ปอ และลินิน เป็นต้น การนำเส้นใยธรรมชาติมาใช้เป็นเส้นใยเสริมแรงในวัสดุคอมโพสิตจะทำให้วัสดุคอมโพสิตมีความแข็งแรงสูงขึ้น และน้ำหนักเบา ซึ่งเส้นใยธรรมชาติที่ได้รับความนิยมในการนำมาเสริมแรงในวัสดุคอมโพสิตคือ เส้นใยจากพืชเนื่องจากมีราคาถูกและหาได้ง่าย

โครงสร้างของเส้นใยธรรมชาติ

เส้นใยธรรมชาติจะประกอบด้วยผนังเซลล์ 2 ชั้นแสดงดังรูปที่ 2.5 ชั้นที่หนึ่งเรียกว่าผนังเซลล์ปฐมภูมิ (Primary wall) ประกอบด้วยร่างแหของเซลลูโลสหรือที่เรียกว่า Microfibril เป็นเส้นใยขนาดเล็ก ที่จัดเรียงตัวแบบไม่แน่นอน (Cellulose amorphous microfibrils) ชั้นที่สองเรียกว่าผนังเซลล์ทุติยภูมิ (Secondary wall) ซึ่งจะประกอบด้วยผนังเซลล์ 3 ชั้นได้แก่ ชั้นนอก (Secondary wall S1) ชั้นกลาง (Secondary wall S2) และชั้นใน (Secondary wall S3) ประกอบด้วยเซลลูโลสที่จัดเรียงตัวเป็นระเบียบ (Cellulose crystalline microfibrils) โดยมีเฮมิเซลลูโลสและลิกนินทำหน้าที่ยึดระหว่าง Microfibrils แสดงดังรูปที่ 2.6 ซึ่งผนังเซลล์ทุติยภูมิชั้นกลางเป็นชั้นที่มีผลต่อสมบัติของเส้นใยธรรมชาติ เนื่องจากเป็นชั้นที่มีความหนามากที่สุด ในแต่ละ Microfibril จะมีมุมในการบิดเกลียว (Microfibril angle) ขนาดไมครอน โดยมุมในการบิดเกลียวที่ต่ำจะส่งผลกระทบต่อความแข็งแรงของเส้นใยธรรมชาติให้สูงขึ้น [29]



รูปที่ 2.5 โครงสร้างของเส้นใยธรรมชาติ [29]

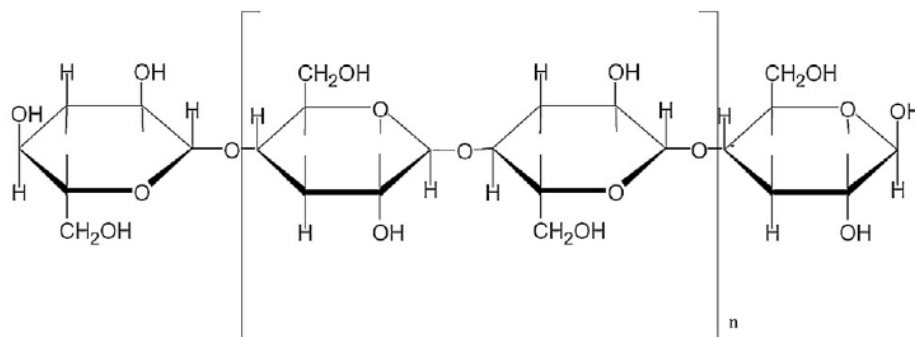


รูปที่ 2.6 การจัดโครงสร้างขององค์ประกอบทางเคมีหลัก 3 ชนิดของเส้นใยธรรมชาติ [29]

องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยธรรมชาติ

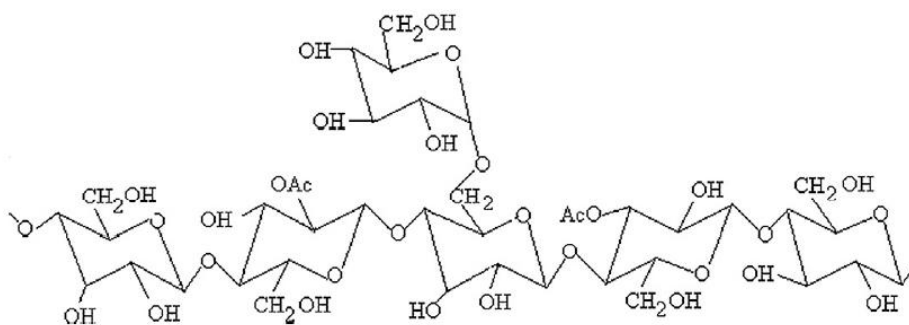
เส้นใยธรรมชาติมีองค์ประกอบทางเคมีอื่นๆ ที่นอกเหนือจากเส้นใยโดยมีเซลลูโลส (Cellulose) เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) และลิกนิน (Lignin) เป็นองค์ประกอบหลักแสดงดังรูปที่ 2.6 ซึ่งมีอิทธิพลต่อคุณสมบัติทางกายภาพและเชิงกลของเส้นใย โดยประกอบด้วย

เซลลูโลส (Cellulose) เป็นองค์ประกอบหลักของเส้นใยธรรมชาติที่มีอยู่ถึงประมาณ 60-70% ที่ประกอบด้วยหน่วยย่อยของ β -D-anhydroglucopyranose หรือน้ำตาลกลูโคส ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 1 และ 4 ของโมเลกุลน้ำตาลเชื่อมต่อกันด้วยพันธะไฮโดรเจนเป็นสายโซ่ตรงเป็นระเบียบทำให้มีความเป็นผลึกสูงส่งผลให้เส้นใยธรรมชาติมีความแข็งแรงมาก หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่าเส้นใยธรรมชาติชนิดใดมีปริมาณของเซลลูโลสที่มากจะส่งผลให้เส้นใยธรรมชาติชนิดนั้นมีความแข็งแรงที่สูง[30] โครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลสประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) แสดงดังรูปที่ 2.7 ทำให้เส้นใยมีความเป็นขั้วสูง และมีสมบัติชอบน้ำ



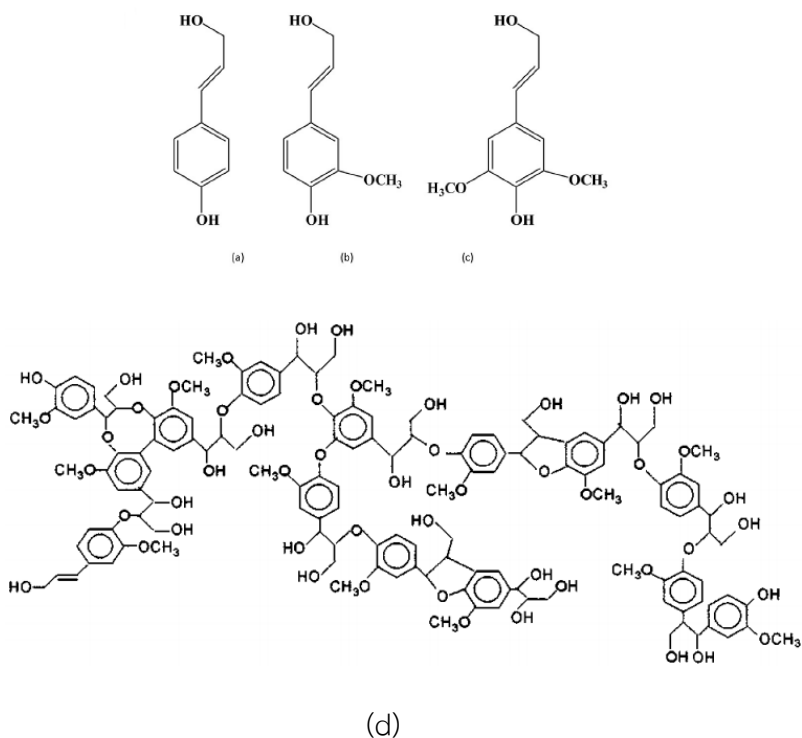
รูปที่ 2.7 โครงสร้างของเซลลูโลส [28]

เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) เป็นพอลิแซ็กคาไรด์ (Polysaccharides) ที่ประกอบด้วยโมเลกุลของน้ำตาลวงห้าเหลี่ยมหรือหกเหลี่ยมต่อโมเลกุล มีโครงสร้างแบบกึ่งแสดงดังรูปที่ 2.8 ทำให้เฮมิเซลลูโลสมีโครงสร้างอสัณฐาน (Amorphous) มากกว่าเซลลูโลสที่มีโครงสร้างแบบเส้นตรง เฮมิเซลลูโลสมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำกว่าเซลลูโลสและพบในเส้นใยน้อยกว่าเซลลูโลส โดยเฮมิเซลลูโลสทำหน้าที่ช่วยยึดโครงสร้างของเซลลูโลส โครงสร้างทางเคมีของเฮมิเซลลูโลสประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ซึ่งมีความเป็นขั้วทำให้สามารถดูดความชื้นได้ดี



รูปที่ 2.8 โครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส [28]

ลิกนิน (Lignin) เป็นสารประกอบอะโรมาติกแอลกอฮอล์ (Aromatic alcohol) 3 ชนิดได้แก่ คูมาริล (Coumaryl alcohol) โคนิเฟอริล (Coniferyl alcohol) และ ซินาพิล (Sinapyl alcohol) จัดเรียงตัวเป็นรูปแบบสามมิติ มีโครงสร้างแบบกึ่งแสดงดังรูปที่ 2.9 ทำให้ลิกนินมีความเป็นอสัณฐานสูง และเนื่องจากลิกนินเป็นสารประกอบอะโรมาติกแอลกอฮอล์ทำให้มีคุณสมบัติไม่ละลายน้ำ ลิกนินทำหน้าที่เป็นองค์ประกอบภายนอกผนังเซลล์ของเส้นใย ปกป้องเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสจากสภาพแวดล้อมภายนอก



รูปที่ 2.9 โครงสร้างของลิกนิน (a) p-coumaryl alcohol (b) coniferyl alcohol (c) sinapyl alcohol [25] [28]

เส้นใยธรรมชาติแต่ละชนิดมีองค์ประกอบทางเคมีในปริมาณที่แตกต่างกัน และปริมาณองค์ประกอบเคมีที่แตกต่างกับของเส้นใยชนิดเดียวขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยเช่น วิธีการวัด อายุ และแหล่งที่มา ตัวอย่างแสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยธรรมชาติ [27]

เส้นใย	เซลลูโลส (wt%)	เฮมิเซลลูโลส (wt%)	ลิกนิน (wt%)
Sisal	78	10	8
Coir	37	20	42
Bamboo	26-43	30	1-31
Hemp	70.2-74.4	17.9-22.4	3.7-5.7
Abaca	56-63	20-25	7-9
Ramie	68.6-91	5-14.7	0.4-0.7
Jute	61-71.5	17.9-22.4	12-13
Kenaf	45-57	8-13	21.5

สมบัติของเส้นใยธรรมชาติ

สมบัติของเส้นใยธรรมชาติขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย แต่ปัจจัยหลักที่มีผลคือ ปริมาณองค์ประกอบเคมีและมุมในการบิดเกลียวของ Microfibril [27] ดังนั้นเส้นใยธรรมชาติที่มีปริมาณผลึกของเซลลูโลสมาก และมุมในการบิดเกลียวของ Microfibril ที่ต่ำ จะส่งผลให้คุณสมบัติของเส้นใยธรรมชาติที่สูงขึ้น นอกจากนี้สายพันธุ์และพื้นที่การเพาะปลูกที่แตกต่างกันยังส่งผลต่อสมบัติของเส้นใยเช่นกัน ซึ่งสมบัติของเส้นใยธรรมชาติค่อนข้างมีข้อด้อยเมื่อเปรียบเทียบกับเส้นใยสังเคราะห์ แต่เนื่องจากเส้นใยธรรมชาติมีความหนาแน่นที่ต่ำหรือมีความแข็งแรงที่สูงเมื่อเทียบกับความหนาแน่น จึงทำให้เป็นที่สนใจในการนำเส้นใยธรรมชาติมาใช้เป็นเส้นใยเสริมแรงในวัสดุคอมโพสิต โดยสมบัติบางประการของเส้นใยธรรมชาติและเส้นใยสังเคราะห์แสดงดังตารางที่ 2.2

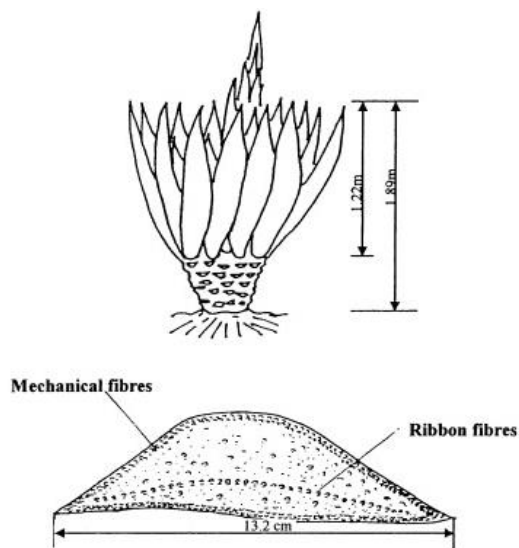
ตารางที่ 2.2 สมบัติบางประการของเส้นใยธรรมชาติและเส้นใยสังเคราะห์ [27]

เส้นใย	ความหนาแน่น (g/cm ³)	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (μm)	Tensile Strength (MPa)	Young's modulus (GPa)	Elongation at break (%)
Sisal	1.45	50-300	530-640	9.4-22	3-7
Coir	1.2	-	175	4-6	30
Bamboo	1.1	240-330	500	35.91	1.40
Hemp	1.48	-	550-900	70	2-4
Abaca	1.5	-	400	12	3-10
Ramie	1.5	50	220-938	44-128	2-3.8
Jute	1.46	40-350	269-548	10-30	1.5-1.8
Kenaf	1.45	70-250	930	53	1.6
E-glass	2.55	<17	3400	73	3.4
S-glass	2.5	-	4580	85	4.6
Aramid	1.44	11.9	3000	124	2.5
HS carbon	1.82	8.2	2550	200	1.3

2.2.3 เส้นใยป่านศรนารายณ์ (Sisal)

เส้นใยป่านศรนารายณ์ (Sisal fiber) เป็นเส้นใยธรรมชาติที่มีความแข็ง ได้จากเปลือกลำต้นป่านศรนารายณ์มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Agave sisalana* Parr. เป็นพืชตระกูล Agaveceae ป่านศรนารายณ์เป็นพืชใบเลี้ยงเดี่ยว ใบหนาและยาวมีน้ำหนักประมาณ 200 กรัม ซึ่งให้เส้นใยประมาณร้อยละ 2 ลำต้นสั้น ขยายพันธุ์ได้ด้วยหน่อหรือต้นอ่อน โดยป่านศรนารายณ์มีปริมาณเส้นใยเซลลูโลสประมาณ 78%

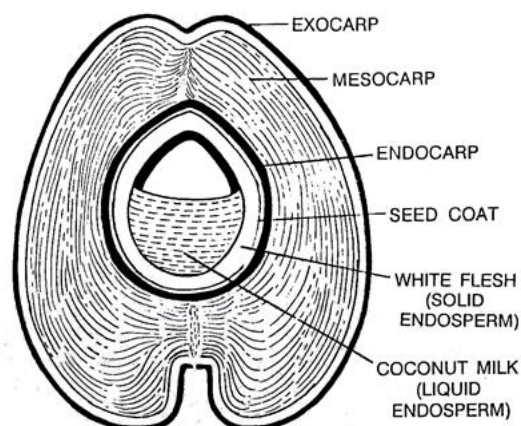
ความยาวเส้นใยประมาณ 1.5 เมตร มีเส้นผ่าศูนย์กลางน้อยกว่า 0.3 มิลลิเมตร[27] ส่วนใหญ่เส้นใยป่านศรนารายณ์จะถูกใช้ในการผลิตเส้นเชือกลากจูงเรือ เนื่องจากเส้นใยมีความแข็งแรงและมีสมบัติทนต่อน้ำ นอกจากนี้ยังนำเส้นใยไปใช้ในงานหัตถกรรมเช่น ไม้กวาด พรม ผ้าทอ เป็นต้น



รูปที่ 2.10 ภาพตัวอย่างลักษณะต้นป่านศรนารายณ์และภาพตัดขวางของใบป่านศรนารายณ์ [31]

2.2.4 เส้นใยมะพร้าว (Coir)

ต้นมะพร้าวมีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Cocos nucifera* Linn. โดยเส้นใยมะพร้าว (coir fiber) เป็นเส้นใยที่ได้มาจากด้านในของเปลือกมะพร้าวของลูกมะพร้าวหรือที่เรียกว่า มีโซคาร์ป (Mesocarp) เป็นเส้นใยที่มีการนำมาใช้ในอุตสาหกรรมก่อสร้าง เนื่องจากเป็นวัสดุธรรมชาติที่สามารถหาได้ทั่วไป มีปริมาณมาก ราคาต่ำ เส้นใยมะพร้าวมีประมาณเส้นใยเซลลูโลสประมาณ 37% ความยาวเส้นใยประมาณ 350 มิลลิเมตร เส้นผ่าศูนย์กลาง 0.12-0.25 มิลลิเมตร[27] เป็นเส้นใยที่มีความแข็งแรง มีความทนต่อแรงดึงได้ดี



รูปที่ 2.11 ส่วนประกอบของผลมะพร้าว [39]

2.2.5 การทดสอบสมบัติของเส้นใยเสริมแรง

2.2.5.1 การวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างพื้นฐานวิทยาของเส้นใยเสริมแรง

ในการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างพื้นฐานวิทยาของเส้นใยเสริมแรงเป็นการดูลักษณะของเส้นใยตามภาพตัดขวาง (Cross section) และภาพตามแนวยาว (Long section) โดยเส้นใยแต่ละชนิดจะมีลักษณะเฉพาะตัว เมื่อถูกมองภายใต้กล้องจุลทรรศน์ที่มีกำลังขยายสูง ซึ่งลักษณะเฉพาะของแต่ละเส้นใยทำให้มีสมบัติที่แตกต่างกัน

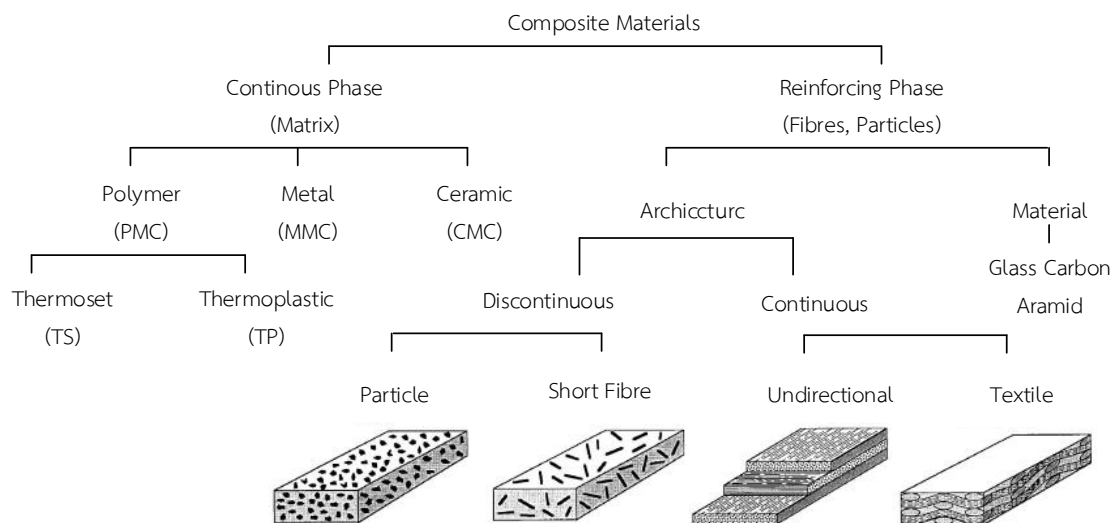
2.2.5.2 การวิเคราะห์ความหนาแน่นของเส้นใยเสริมแรง (Density)

ความหนาแน่นของเส้นใย (Density) หมายถึงน้ำหนักของเส้นใยต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร มีหน่วยเป็นกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (g/cm^3) โดยการวัดความหนาแน่นของเส้นใย ใช้หลักการทางฟิสิกส์ที่ว่า สสารชนิดใดมีความหนาแน่นสัมพัทธ์ (Relative density) ต่ำกว่าของเหลวชนิดหนึ่งสสารชนิดนั้นจะลอย และสสารชนิดใดมีความหนาแน่นสัมพัทธ์สูงกว่าของเหลวชนิดหนึ่งสสารชนิดนั้นจะจม [32] จากหลักการทางฟิสิกส์ข้างต้น จึงได้วิธีการวัดความหนาแน่นของเส้นใยอย่างง่าย โดยนำของเหลวชนิดต่างๆ ที่ทราบความหนาแน่นสัมพัทธ์ที่แน่นอนและมีความหนาแน่นสัมพัทธ์ที่แตกต่างกันเทใส่กระบอกทรงสูง โดยของเหลวที่มีความหนาแน่นสัมพัทธ์ต่ำจะลอยตัวอยู่ด้านบนและของเหลวที่มีความหนาแน่นสัมพัทธ์สูงจะอยู่ล่างสุด

2.2.6 วัสดุเชิงประกอบ (Composites material)

วัสดุเชิงประกอบหรือเรียกว่า วัสดุคอมโพสิต (Composite material) เป็นวัสดุที่ประกอบด้วยวัสดุที่มีองค์ประกอบทางเคมีหรือรูปร่างแตกต่างกันสองชนิดหรือมากกว่าสองชนิดมาผสมกัน โดยไม่เป็น

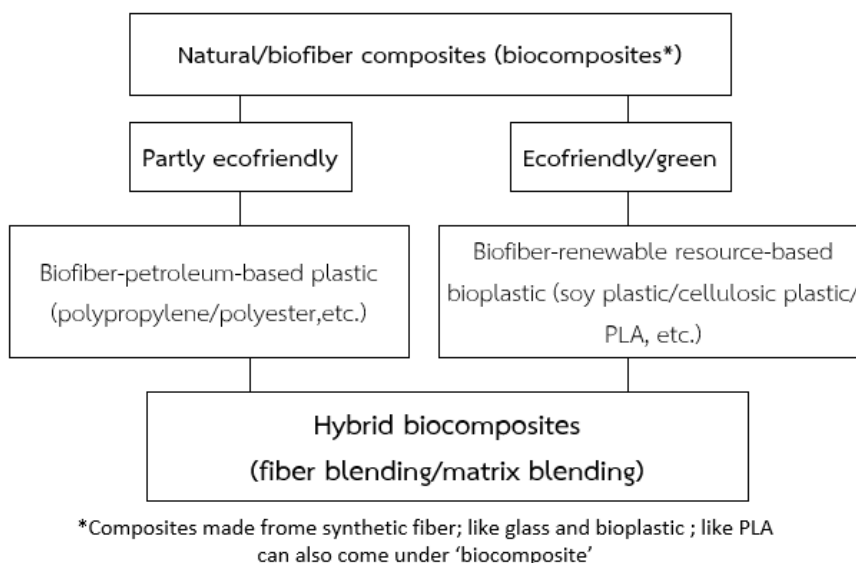
เนื้อเดียวกัน เพื่อให้ได้วัสดุที่มีความแข็งแรงมากกว่าวัสดุย่อยแต่ละส่วนประกอบเช่น การใช้เหล็กเสริมแรงในคอนกรีตเพื่อเพิ่มความแข็งแรง ซึ่งวัสดุเชิงประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก ส่วนที่แรกเรียกว่า ส่วนเนื้อหลัก (Matrix phase) เป็นองค์ประกอบหลักของวัสดุเชิงประกอบอยู่ด้วยกันอย่างต่อเนื่อง (Continuous phase) โดยทั่วไปจะมีส่วนเนื้อหลักอยู่ 3 ประเภทคือ พอลิเมอร์คอมโพสิต (Polymer Matrix Composites, PMC) เมทัลคอมโพสิต (Metal Matrix Composites, MMC) และเซรามิกคอมโพสิต (Ceramic Matrix Composites, CMC) โดยทั่วไปแล้วส่วนเนื้อหลักจะทำหน้าที่รักษารูปร่างของวัสดุเชิงประกอบต้องไม่เปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพและเกิดปฏิกิริยาทางเคมีกับวัสดุเสริมแรง ส่วนที่สองเรียกว่า ส่วนเสริมแรง (Reinforcement phase) กระจายอยู่ในส่วนเนื้อหลัก ช่วยปรับปรุงคุณสมบัติของวัสดุส่วนเนื้อหลักให้มีคุณสมบัติสูงขึ้น โดยส่วนเสริมแรงจะมีลักษณะเป็นเส้นใย (fiber) หรืออนุภาค (Particle) แสดงดังรูปที่ 2.12 ซึ่งวัสดุเสริมแรงที่ได้รับความนิยมในการนำมาเป็นส่วนเสริมแรงคือ เส้นใยต่างๆ เช่น เส้นใยธรรมชาติ (natural fiber) และเส้นใยสังเคราะห์ (Synthetic fiber) โดยแบ่งออกเป็นเส้นใยต่อเนื่อง (Continuous fiber) เส้นใยสั้น (Short fiber) เป็นต้น โดยสมบัติที่ดีของส่วนเสริมแรงจะต้องมีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่าส่วนเนื้อหลัก เช่น ความแข็งแรง ความเหนียว และความยืดหยุ่น เป็นต้น โดยทั่วไปแล้ววัสดุเชิงประกอบจะเกิดขึ้นจากวัสดุที่มีสมบัติแตกต่างกันสองชนิดโดยแต่ละชนิดทำหน้าที่เป็นส่วนเนื้อหลักและส่วนเสริมแรง ต่อมาได้มีการพัฒนาวัสดุเชิงประกอบโดยการนำวัสดุมากกว่า 2 ชนิดมาเป็นส่วนเนื้อหลักหรือส่วนเสริมแรง จะทำหน้าที่เสริมสมบัติซึ่งกันและกันเรียกว่า วัสดุเชิงประกอบผสม (Hybrid composite)



รูปที่ 2.12 ประเภทของวัสดุเชิงประกอบ

2.2.7 วัสดุเชิงประกอบชีวภาพ (Biocomposites material)

วัสดุเชิงประกอบชีวภาพเป็นวัสดุที่ผสมระหว่างเส้นใยธรรมชาติ (Natural fiber หรือ Biofiber) และพอลิเมอร์จากอุตสาหกรรมปิโตรเคมีเช่น พอลิโพรไพลีน (Polypropylene) พอลีเอสเตอร์ (Polyester) เป็นต้น หรือวัสดุที่ผสมระหว่างเส้นใยธรรมชาติและไบโอพอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายได้เช่น พอลิแลคติกแอซิด (Polylactic acid, PLA) พอลิไฮดรอกซีอัลคาโนเอต (Polyhydroxyalkanoate, PHAs) ซึ่งรวมไปถึงวัสดุที่ผสมระหว่างเส้นใยสังเคราะห์ เช่น เส้นใยแก้ว (Glass fiber) เส้นใยคาร์บอน (Carbon fiber) เป็นต้น และไบโอพอลิเมอร์แสดงดังรูปที่ 2.13 โดยวัสดุเชิงประกอบที่ใช้เส้นใยธรรมชาติเป็นวัสดุเสริมแรงและไบโอพอลิเมอร์เป็นส่วนเนื้อหลัก ถือว่าเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมมากที่สุดเพราะสามารถย่อยสลายได้ทั้งสองส่วน ซึ่งวัสดุชนิดนี้จะถูกเรียกว่า วัสดุเชิงประกอบสะอาด (Green composite) ยังมีวัสดุอีกชนิดที่เรียกว่า วัสดุเชิงประกอบผสมชีวภาพ (Hybrid biocomposite) เป็นการนำวัสดุมากกว่า 2 ชนิดมาผสมกันในแต่ละส่วนคือ การนำเส้นใยธรรมชาติสองชนิดผสมกัน เส้นใยธรรมชาติผสมกับเส้นใยสังเคราะห์มาเป็นส่วนเสริมแรง[33] หรือ ไบโอพอลิเมอร์สองชนิดผสมกัน หรือไบโอพอลิเมอร์ผสมกับพอลิเมอร์จากอุตสาหกรรมปิโตรเคมี

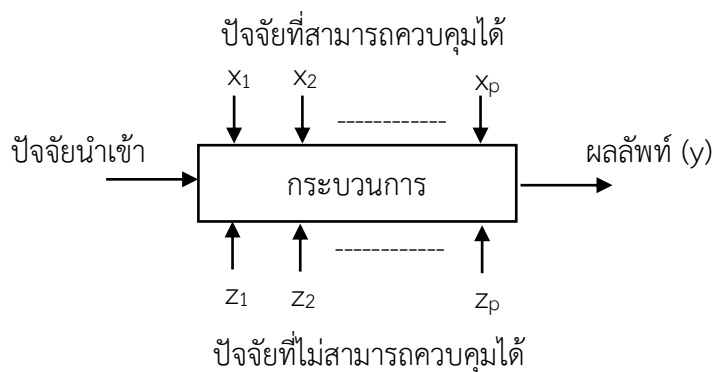


รูปที่ 2.13 ชนิดของวัสดุเชิงประกอบชีวภาพ [33]

2.2.8 การออกแบบการทดลอง (Design of Experiments, DOE)

การออกแบบการทดลอง (Design of Experiments, DOE) เป็นกระบวนการในการวางแผนการทดลองเพื่อการได้มาของข้อมูลที่เหมาะสมที่สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์ทางสถิติ หรือกระบวนการในการวางแผนเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่เหมาะสม โดยการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimization) ซึ่งอธิบาย

ความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยกระบวนการจะมีปัจจัย (Factors) ต่างๆ ที่ส่งผลต่อผลิตภัณฑ์หรือผลลัพธ์แสดงดังรูปที่ 2.14 ดังนั้นการออกแบบการทดลองเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพโดยการเปลี่ยนแปลงค่าของปัจจัย (Factors) และสังเกตการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรตอบสนอง (Response) ที่เกิดขึ้น



รูปที่ 2.14 แบบจำลองทั่วไปของกระบวนการ

หลักการพื้นฐานในการออกแบบการทดลองมี 3 ประการคือ การทำการทดลองซ้ำ (Replication) ซึ่งทำให้ผู้ทดลองสามารถหาค่าประมาณความผิดพลาดในการทดลองได้และค่าเฉลี่ยจะถูกนำมาใช้เพื่อประมาณผลที่ได้จากปัจจัยหนึ่งในการทดลอง การทำการทดลองแบบสุ่ม (Randomization) คือการทดลองที่มีลำดับการทดลองและการใช้วัสดุในการทดลองแบบสุ่ม (Random) เนื่องจากวิธีการทางสถิติกำหนดว่าข้อมูลหรือความผิดพลาดจะต้องมีการกระจายแบบอิสระ เป็นการลดผลของปัจจัยภายนอกที่อาจปรากฏขึ้นในการทดลอง และการทำการทดลองแบบบล็อก (Blocking) เป็นเทคนิคสำหรับเพิ่มความเที่ยงตรง (Precision) กับการทดลอง โดยหนึ่งบล็อกหมายถึงส่วนหนึ่งของวัสดุที่ใช้ในการทดลองที่ควรมีความเป็นหนึ่งเดียวกันมากกว่าเซตทั้งหมดของวัสดุ

ขั้นตอนการออกแบบการทดลองหรือการใช้วิธีเชิงสถิติในการออกแบบและการวิเคราะห์ผลการทดลอง มีขั้นตอนดังนี้

1. การทำความเข้าใจถึงปัญหา ทำการศึกษาและทำความเข้าใจกระบวนการการทดลองเพื่อกำหนดปัญหาและวัตถุประสงค์ในการทดลอง
2. การเลือกปัจจัยและระดับของปัจจัย ทำการเลือกปัจจัยที่มีผลต่อการทดลอง และกำหนดระดับของปัจจัย (Level) โดยจำเป็นต้องพิจารณาถึงการควบคุมปัจจัย เป็นการกรองปัจจัย (Screening) ที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของผลลัพธ์

3. การเลือกตัวแปรตอบสนอง ทำการเลือกตัวแปรที่ให้ข้อมูลเกี่ยวกับกระบวนการหรือการทดลองที่ทำการศึกษ โดยตัวแปรตอบสนองสามารถมีได้มากกว่าหนึ่งตัวแปร

4. การเลือกวิธีการออกแบบการทดลอง การออกแบบการทดลองมีหลายรูปแบบแต่ละรูปแบบจะมีรูปแบบที่เฉพาะตัว ดังนั้นในการเลือกวิธีการออกแบบการทดลองจะต้องพิจารณาถึงวัตถุประสงค์ของการทดลอง รวมไปถึงขนาดของตัวอย่าง จำนวนการทดลองซ้ำและการบล็อก

5. การทำการทดลอง เมื่อทำการทดลองจะต้องดำเนินการทดลองให้เป็นไปตามที่ทำการออกแบบการทดลองไว้ เพื่อเป็นการแน่ใจว่าจะไม่เกิดข้อผิดพลาดเกี่ยวกับการทดลอง ซึ่งอาจจะทำให้ได้ผลลัพธ์ที่ผิดพลาดได้

6. การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ นำวิธีการทางสถิติมาใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลจากการทำการทดลอง เพื่อหาข้อสรุปของผลลัพธ์ว่าเป็นไปตามวัตถุประสงค์ของการทดลอง ซึ่งถ้าการทดลองมีการออกแบบการทดลองอย่างเหมาะสมผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นตามวัตถุประสงค์ของการทดลอง

7. สรุปผลและข้อเสนอแนะ ทำการหาข้อสรุปหลังจากทำการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ เพื่อหาแนวทางต่อไปของการทดลองที่อาจเกิดขึ้นในอนาคต

2.2.9 วิธีพื้นที่ผิวตอบ (Response Surface Methodology, RSM)

วิธีพื้นที่ผิวตอบเป็นการนำเอาเทคนิคทางคณิตศาสตร์และทางสถิติมาวิเคราะห์ร่วมกัน ซึ่งเป็นวิธีการที่มีประโยชน์ต่อการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการวิเคราะห์ปัญหา โดยผลตอบสนองที่สนใจนั้นขึ้นอยู่กับหลายตัวแปรอิสระหรือปัจจัยและมีวัตถุประสงค์ที่จะหาค่าที่เหมาะสมของผลตอบสนอง โดยที่ผลตอบสนอง Y เป็นฟังก์ชันของ X_i จะสามารถแสดงสมการได้ดังต่อไปนี้

$$Y = f(X_i) + \epsilon \quad \text{โดยที่ } i = 1, 2, \dots, n \quad (2.1)$$

เมื่อ ϵ คือค่าความคลาดเคลื่อน (Residual error) ของผลตอบสนอง Y จึงกำหนดว่า $E(Y) = f(X_i) = \eta$ ดังนั้นจะสามารถแสดงสมการพื้นผิวได้ดังต่อไปนี้

$$\eta = f(x_i) \quad (2.2)$$

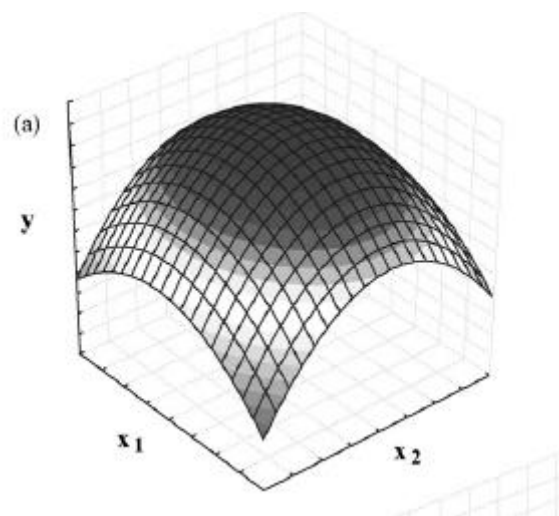
โดยปัญหาของพื้นที่ผิวตอบส่วนมากมักจะไม่นำความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระและตัวแปรตอบสนอง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องหาตัวประมาณที่เหมาะสมที่จะใช้เป็นตัวแทนสำหรับแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเซตของตัวแปรอิสระกับค่าตัวแปรตอบสนอง โดยทั่วไปจะใช้ฟังก์ชันพหุนามที่มีกำลังต่ำ ที่อยู่ภายใต้อาณาเขตบางส่วนของตัวแปรอิสระ ซึ่งถ้าแบบจำลองผลตอบมีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นตรงกับตัว

แปรอิสระ จะใช้ฟังก์ชันในการประมาณความสัมพันธ์คือ แบบจำลองแบบเชิงเส้นตรง สามารถแสดงดังสมการดังต่อไปนี้

$$\hat{Y} = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \varepsilon \quad (2.3)$$

แต่ถ้าแบบจำลองผลตอบมีความสัมพันธ์แบบไม่เป็นเส้นตรงกับตัวแปรอิสระ จะใช้ฟังก์ชันในการประมาณความสัมพันธ์คือ แบบจำลองแบบไม่เป็นเส้นตรง สามารถแสดงดังสมการดังต่อไปนี้

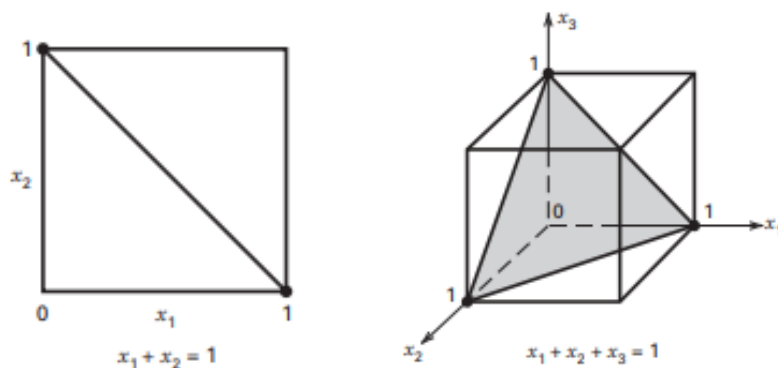
$$\hat{Y} = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1, j < i}^k \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (2.4)$$



รูปที่ 2.15 พื้นผิวที่ผิวตอบแบบสามมิติ [40]

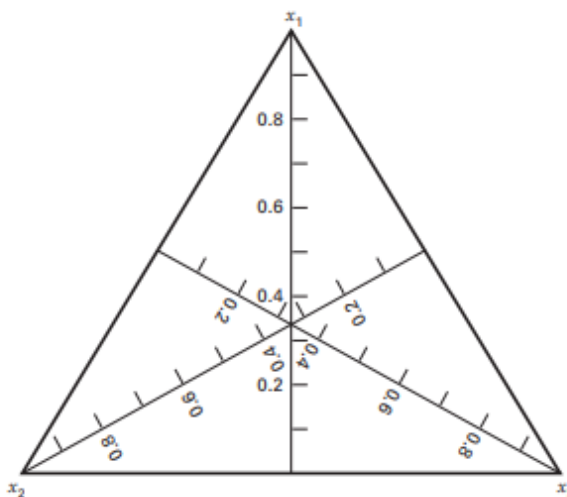
2.2.10 การออกแบบการทดลองแบบผสม (Mixture Design)

การออกแบบการทดลองแบบผสม (Mixture Design) เป็นการทดลองเพื่อหาสัดส่วนที่เหมาะสมของปัจจัยตั้งแต่ 2 ปัจจัยขึ้นไป ซึ่งเป็นการออกแบบพื้นที่ตอบสนองประเภทหนึ่ง โดยระดับของปัจจัยหรือส่วนผสมต้องไม่อิสระต่อกัน เช่น ถ้า x_1, x_2, \dots, x_p เป็นสัดส่วนหรือส่วนผสม p ผลรวมของแต่ละส่วนผสมจะต้องเท่ากับ 100 เปอร์เซ็นต์ โดยช่องว่างระหว่างปัจจัยสำหรับการออกแบบจะรวมเอาค่าทั้งหมดของส่วนผสมที่อยู่บนส่วนของเส้นตรง $x_1 + x_2 + \dots + x_p = 1$ ซึ่งแต่ละส่วนจะถูกจำกัดด้วยขอบเขต 0 ถึง 1 แสดงดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.16 ช่องว่างที่ถูกจำกัดของปัจจัยของส่วนผสมที่มี $p = 2$ และ $p = 3$ [41]

เมื่อส่วนผสมมี 3 ส่วนประกอบ บริเวณของการทดลองที่ถูกจำกัดสามารถเขียนได้อยู่บนกราฟสามแกน แสดงดังรูปที่ 2.16 โดยแต่ละมุมของทั้งสามมุมจะเป็นส่วนผสมหรือปัจจัยแต่ละชนิด และเพิ่มขึ้นจนถึง 100 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 2.17 ระบบโคออร์ดิเนตกราฟสามแกน [41]

การออกแบบการทดลองแบบผสมมี 4 แบบดังนี้

1. การออกแบบการทดลองแบบซิมเพล็กซ์แลตทิซ (Simplex Lattice Design) แบบการออกแบบอย่างง่ายสำหรับ p ส่วนผสมหรือปัจจัย ซึ่งแต่ละตัวแปรสามารถกำหนดระดับได้ดังต่อไปนี้

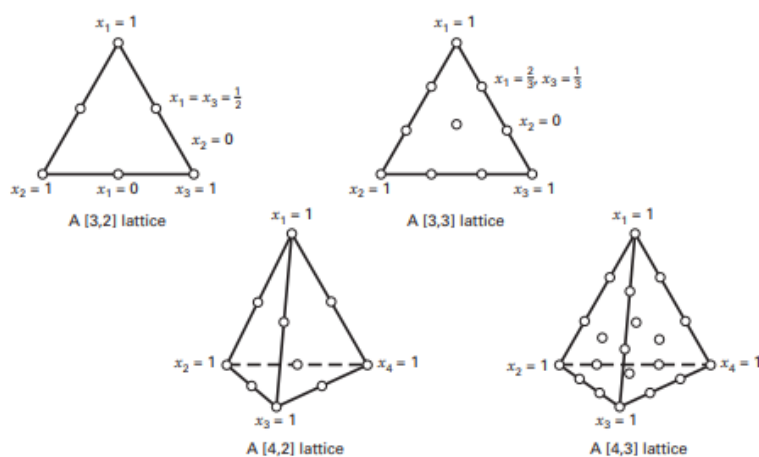
$$x_i = 0, \frac{1}{m}, \frac{2}{m}, \dots, 1 \quad (2.5)$$

โดย m สัดส่วนของแต่ละปัจจัยจาก 0-1
 p จำนวนส่วนผสมหรือปัจจัย
 $i = 1, 2, 3, \dots, p$

โดยจำนวนจุดของการออกแบบการทดลองคือ

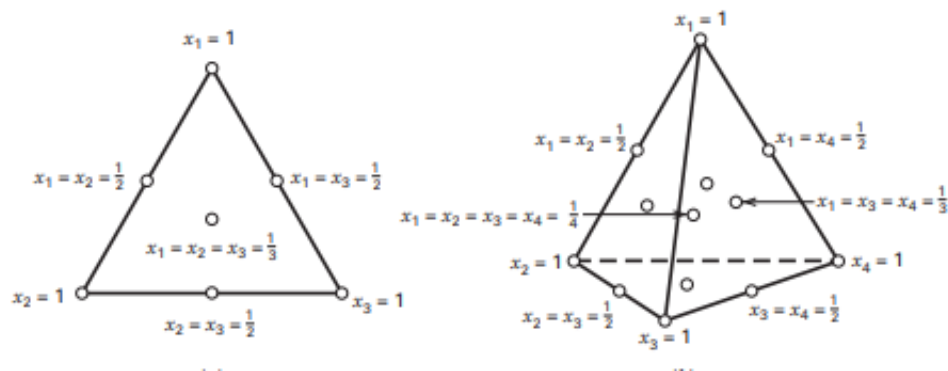
$$N = \frac{(p + m - 1)!}{m!(p - 1)!} \tag{2.6}$$

ตัวอย่างของการออกแบบการทดลองที่มีจำนวน p และ m ต่างๆ แสดงดังรูปที่ 2.17



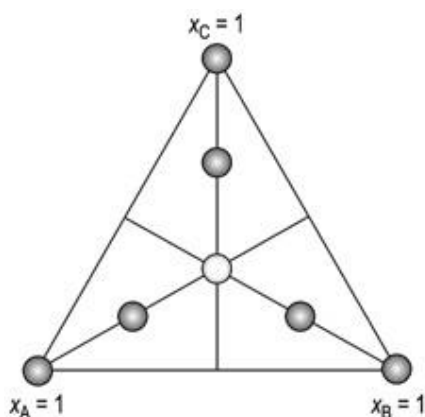
รูปที่ 2.18 การออกแบบการทดลองแบบซิมเพล็กซ์แลตทิซที่มี $p = 3$ และ $p = 4$ [41]

2. การออกแบบการทดลองแบบซิมเพล็กซ์เซ็นทรอยด์ (Simplex Centroid Design) เป็นการออกแบบสำหรับ p ส่วนผสมหรือปัจจัยเท่ากับ $2^p - 1$ โดยแต่ละปัจจัยมีสัดส่วนเท่ากันทั้งหมด โดยในการออกแบบการทดลองนี้จะมีจุดที่เป็นปัจจัยนั้นๆ 100% หรือเท่ากับ 1 คือ $1/2, 1/2, 0, \dots, 0$ สำหรับ $p = 2$ (Binary Mixture) และ $1/3, 1/3, 1/3, 0, \dots, 0$ สำหรับ $p = 3$ (Ternary Mixture) ตัวอย่างของการออกแบบการทดลองที่มีจำนวน p ต่างๆ แสดงดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.19 การออกแบบการทดลองแบบซิมเพล็กซ์เซ็นทรอยด์ที่มี $p = 3$ และ $p = 4$ [41]

3. การออกแบบการทดลองแบบซิมเพล็กซ์แอกเซียล (Simplex Axial Design) เป็นการออกแบบที่สนใจทุกๆ ส่วนผสม โดยมีจุดกึ่งกลางของส่วนผสมยื่นส่วน Axial แสดงดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.20 การออกแบบการทดลองแบบซิมเพล็กซ์แอกเซียลที่มี $p = 3$ [41]

4. การออกแบบการทดลองแบบเอ็กซ์ตรีมเวอร์ทิส (Extreme Vertices Design) เป็นการออกแบบการทดลองที่มีข้อจำกัดสัดส่วนของส่วนผสม (Design with constraints on proportion) หรือการออกแบบการทดลองแบบมีข้อจำกัด (Constrained mixture design) โดยในการออกแบบการทดลองประเภทนี้ทุกส่วนผสมหรือปัจจัยไม่จำเป็นต้องเป็น 0-100% (0-1) อาจจะเป็น 20-30% (0.2-0.3) หรือ 70-80% (0.7-0.8) เนื่องจากความจำเป็นหรือความต้องการในการทดลอง เช่น ในงานวิจัยนี้ต้องการศึกษาวัสดุเชิงประกอบผสมชีวภาพ มีปัจจัยทั้งหมด 3 ปัจจัยคือ พอลิแลคติกแอซิดและเส้นใย 2 ชนิดในการเสริมแรง โดยมีข้อจำกัดคือ ปริมาณเส้นใยเสริมแรงที่ใช้ผสมจะต้องไม่เกิน 5 % โดยปริมาณ และเนื่องจากต้องการศึกษาวัสดุเชิงประกอบชีวภาพจึงไม่สามารถให้ปัจจัยที่เป็นเส้นใยเสริมแรงเป็น 100% ได้

2.2.11 ฟังก์ชันความพึงพอใจ (Desirability Function)

ฟังก์ชันความพึงพอใจ (Desirability Function) เป็นวิธีการหาค่าที่เหมาะสม (Optimization) ของวิธีการพื้นผิวดตอบ โดยค่าความพึงพอใจ (Desirability, d) จะมีค่าระหว่าง 0-1 โดยที่ค่า d มีค่าเท่ากับ ศูนย์ แสดงว่าผลตอบที่ได้นั้นอยู่นอกเหนือขอบเขตของการยอมรับ ถ้าค่า d มากกว่าศูนย์ แสดงว่าผลตอบที่ได้นั้นอยู่ในขอบเขตของการยอมรับแต่ยังไม่สมบูรณ์ โดยมีค่ามากขึ้นผลตอบที่ได้นั้นจะอยู่ในขอบเขตของการยอมรับมากขึ้น และถ้าค่า d เท่ากับหนึ่ง แสดงว่าผลตอบอยู่ในขอบเขตของการยอมรับอย่างสมบูรณ์ โดยสมการหาค่าความพึงพอใจมี 4 รูปแบบขึ้นอยู่กับหลักเกณฑ์ที่ใช้ในการพิจารณาสำหรับแต่ละตัวแปรตอบสนองคือ

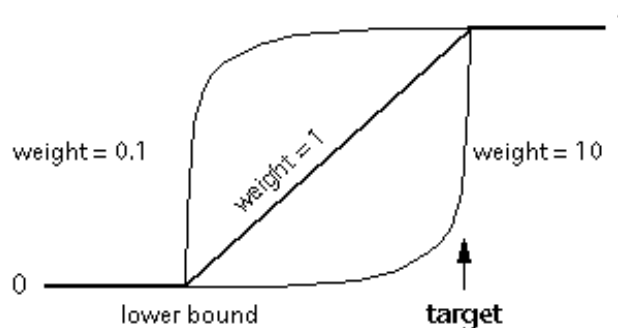
1. ยิ่งมากยิ่งดี (The larger, the better) ในกรณีที่ต้องการค่าตัวแปรตอบสนองมากที่สุด (Maximization) โดย $d_i(Y_i)$ ถูกนิยามดังต่อไปนี้

$$d_i(y_i) = 0 \quad : y \leq L_i \quad (2.7)$$

$$d_i(y_i) = \left(\frac{y_i - L_i}{U_i - L_i} \right)^{X_i} \quad : L_i \leq y_i \leq U_i \quad (2.8)$$

$$d_i(y_i) = 1 \quad : y_i \geq U_i \quad (2.9)$$

เมื่อ L_i คือขอบเขตล่างของ y_i และ U_i คือขอบเขตบนของ y_i และ W_i คือน้ำหนักสำหรับ y_i



รูปที่ 2.21 รูปร่างของ $d_i(Y_i)$ ในรูปแบบยิ่งมากยิ่งดี [42]

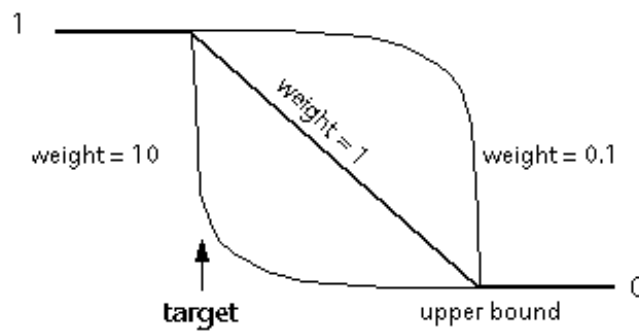
2. ยิ่งน้อยยิ่งดี (The smaller, the better) ในกรณีที่ต้องการค่าตัวแปรตอบสนองน้อยที่สุด (Minimization) โดย $d_i(Y_i)$ ถูกนิยามดังต่อไปนี้

$$d_i(y_i) = 1 \quad : y \leq L_i \quad (2.10)$$

$$d_i(y_i) = \left(\frac{U_i - y_i}{U_i - L_i} \right)^{X_i} \quad : L_i \leq y_i \leq U_i \quad (2.11)$$

$$d_i(y_i) = 0 \quad : y_i \geq U_i \quad (2.12)$$

เมื่อ L_i คือขอบเขตล่างของ y_i และ U_i คือขอบเขตบนของ y_i และ W_i คือน้ำหนักสำหรับ y_i



รูปที่ 2.22 รูปร่างของ $d_i(Y_i)$ ในรูปแบบยิ่งน้อยยิ่งดี [42]

3. ค่ากลางคือค่าที่ดีที่สุด (Nominal the best) ในกรณี มีค่าเป้าหมาย T_i (Target) ของค่าตัวแปรตอบสนองมากที่สุดตามค่า T_i โดย $d_i(Y_i)$ ถูกนิยามดังต่อไปนี้

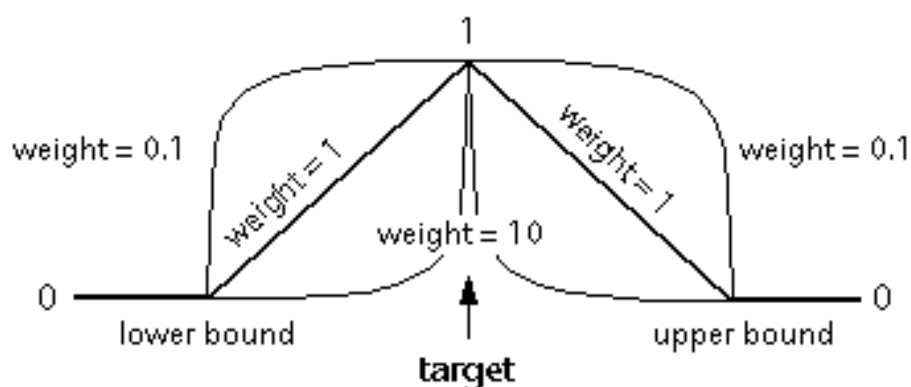
$$d_i(y_i) = 0 \quad : y \leq L_i \quad (2.13)$$

$$d_i(y_i) = \left(\frac{y_i - L_i}{T_i - L_i} \right)^{X_i} \quad : L_i \leq y_i \leq T_i \quad (2.14)$$

$$d_i(y_i) = \left(\frac{y_i - U_i}{T_i - U_i} \right)^{X_i} \quad : T_i \leq y_i \leq U_i \quad (2.15)$$

$$d_i(y_i) = 0 \quad : y_i \geq U_i \quad (2.16)$$

เมื่อ L_i คือขอบเขตล่างของ y_i และ U_i คือขอบเขตบนของ y_i และ W_i คือน้ำหนักสำหรับ y_i



รูปที่ 2.23 รูปร่างของ $d_i(Y_i)$ ในรูปแบบค่ากลางคือค่าที่ดีที่สุด [42]

4. แบบมีข้อจำกัด (Constraint) ในกรณีที่ค่าตัวแปรตอบสนองอยู่ภายใต้ข้อจำกัดหรือขอบเขต $L_i \leq y_i \leq U_i$ โดย $d_i(Y_i)$ ถูกนิยามดังต่อไปนี้

$$d_i(y_i) = 0 \quad : y \leq L_i \quad (2.17)$$

$$d_i(y_i) = 1 \quad : L_i \leq y_i \leq U_i \quad (2.18)$$

$$d_i(y_i) = 0 \quad : y_i \geq U_i \quad (2.19)$$

เมื่อ L_i คือขอบเขตล่างของ y_i และ U_i คือขอบเขตบนของ y_i และ W_i คือน้ำหนักสำหรับ y_i

2.2.12 เครื่องมือวิเคราะห์ทางสถิติ

2.2.12.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA)

การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA) เป็นเครื่องมือในการทดสอบสมมติฐานที่มีการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยที่มากกว่า 2 กลุ่มขึ้นไป หรือจากกลุ่มที่มีอยู่ทั้งหมด โดยใช้วิธีการทางคณิตศาสตร์ที่แบ่งความแปรปรวนของข้อมูลออกเป็นสาเหตุของความแปรปรวน ซึ่งทำการทดสอบโดยเปรียบเทียบความแปรปรวนด้วยตัวสถิติ F หรือ F-statistic ในการตรวจสอบความแตกต่างของสาเหตุของความแปรปรวนว่ามีนัยสำคัญทางสถิติหรือไม่ โดยข้อมูลที่สามารถวิเคราะห์ความแปรปรวนจะต้องเป็นกลุ่มตัวอย่างที่สุ่มมาจากประชากรที่มีการแจกแจงปกติ และประชากรแต่ละกลุ่มต้องเป็นอิสระต่อกัน ซึ่งการวิเคราะห์ความแปรปรวนจะมีการแยกผลรวมส่วนเบี่ยงเบนกำลังสองออกเป็น ส่วนต่างๆ ดังนี้

ผลรวมกำลังสองระหว่างกลุ่ม (Sum square between sample, SSTR)

$$SSTR = \sum_{j=1}^k (\bar{x}_j - \bar{x})^2 \quad (2.20)$$

ผลรวมกำลังสองภายในกลุ่ม (Sum square within group, SSE)

$$SSE = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_j)^2 \quad (2.21)$$

ผลรวมส่วนเบี่ยงเบนกำลังสองรวม (Sum square total, SST)

$$SST = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^n (x_{ij} - \bar{x})^2 \quad (2.22)$$

หรือ
$$SST = SSTR + SSE \quad (2.23)$$

กำลังสองเฉลี่ย (Mean Square, MS) คือ ค่าวิเคราะห์ความแปรปรวนที่สามารถคำนวณได้จากสัดส่วนของผลรวมกำลังสองและองศาเสรี (df) โดยค่า df จะคำนวณจากจำนวนค่าทั้งหมดของส่วนนั้นแล้วลบด้วย 1 ยกเว้นส่วนของความคลาดเคลื่อน ซึ่งแสดงดังต่อไปนี้

$$df \text{ Treatment} = k - 1 \quad (2.24)$$

$$df \text{ Error} = N - k \quad (2.25)$$

และ
$$df \text{ Total} = N - 1 \quad (2.26)$$

จะได้
$$MST = \frac{SSTR}{k - 1} \quad (2.27)$$

และ
$$MSE = \frac{SSE}{n - k} \quad (2.28)$$

ค่าทดสอบสถิติในการตรวจสอบอิทธิพลของทุกกลุ่มหรือทรีตเมนต์คือการนำค่าความแปรปรวน 2 ค่ามาเปรียบเทียบกันจะได้ค่าทดสอบสถิติที่มีการแจกแจงแบบเอฟ หรือที่เรียกว่า การทดสอบแบบเอฟ (F-test) ดังนั้นการทดสอบว่าทรีตเมนต์มีอิทธิพลหรือไม่สามารถทดสอบได้จาก

$$F = \frac{MSTr}{MSE} \quad (2.29)$$

$$\text{โดย } df = k-1, N-1 \quad (2.30)$$

ในการพิจารณาว่าทรีตเมนต์มีอิทธิพลหรือค่าเฉลี่ยของทรีตเมนต์อย่างน้อย 2 ค่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญหรือไม่ จะพิจารณาจากค่าทดสอบสถิติ F ที่ได้จากการคำนวณเทียบกับ F ที่ได้จากตาราง โดยถ้า $F_{\text{คำนวณ}} > F_{\text{ตาราง}}$ แสดงว่าค่าเฉลี่ยของทรีตเมนต์อย่างน้อย 2 ค่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ 2.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA Table)

Source of Variation	Degree of Freedom (DF)	Sum of Square (SS)	Mean Square (MS)	F-Test
Between Sample (Treatments)	k-1	SSTr	$MST = \frac{SSTr}{k-1}$	$\frac{MSTr}{MSE}$
Within Sample (Error)	n-k	SSE	$MSE = \frac{SSE}{n-k}$	MSE
Total	n-1	SST		

2.2.12.2 การทดสอบสมมติฐาน (Hypothesis Testing)

การทดสอบสมมติฐาน (Hypothesis Testing) เป็นสถิติเชิงอนุมาน (Statistical Inference) แบบหนึ่ง ซึ่งเป็นการทดสอบพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่าแน่นอน โดยสุ่มจากประชากร และอาศัยการแจกแจงของตัวสถิติในการสร้างสมมติฐานทางสถิติทดสอบเกี่ยวกับพารามิเตอร์ที่ต้องการทดสอบ การสร้างสมมติฐานจะประกอบด้วย

1. สมมติฐานหลัก (Null Hypothesis: H_0) คือ สมมติฐานที่เชื่อว่าเป็นจริงและต้องการทำการทดสอบเพื่อที่จะปฏิเสธสมมติฐานนี้

2. สมมติฐานรอง (Alternative Hypothesis: H_1) คือ สมมติฐานที่ใช้แย้งสมมติฐานหลัก

โดยการตัดสินใจแบบทดสอบสมมติฐานจะมีโอกาสในการตัดสินใจพลาดได้ 2 แบบคือ

1. ความผิดพลาดแบบที่ 1 (Type I Error) เป็นการปฏิเสธสมมติฐานหลัก โดยที่สมมติฐานหลักถูกต้อง เรียกว่าระดับนัยสำคัญ (Significant Level) แทนด้วยสัญลักษณ์ α

2. ความผิดพลาดแบบที่ 2 (Type II error) เป็นการไม่ปฏิเสธสมมติฐานหลัก โดยที่สมมติฐานหลักไม่ถูกต้องแทนด้วยสัญลักษณ์ β ซึ่ง $1-\beta$ คืออำนาจในการทดสอบ (Power of test) ในการทดสอบสมมติฐานจะต้องเลือกวิธีการตัดสินใจให้มีระดับนัยสำคัญคงที่และมีค่าค่อนข้างต่ำ เช่น 0.05 หรือ 0.1 เพื่อให้การตัดสินใจปฏิเสธ H_0 กระทำอย่างมีเหตุผล

ตัวอย่างในการทดสอบความแตกต่างกันของพารามิเตอร์ที่หนึ่งและพารามิเตอร์ที่สองมีความแตกต่างกันหรือไม่ สามารถเขียนได้ดังนี้

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2$$

$$H_1 : \mu_1 \neq \mu_2$$

โดยที่ μ_1 เป็นพารามิเตอร์ของตัวอย่างกลุ่มที่หนึ่ง และ μ_2 เป็นพารามิเตอร์ของตัวอย่างกลุ่มที่สอง

ขั้นตอนการทดสอบสมมติฐานมีดังต่อไปนี้

1. ตั้งสมมติฐานหลัก (H_0) และสมมติฐานรอง (H_1) ตามที่ต้องการทดสอบ
2. กำหนดช่วงการปฏิเสธและการยอมรับภายใต้ค่าระดับนัยสำคัญ
3. ออกแบบการทดลอง ด้วยการกำหนดขนาดตัวอย่างโดยให้อำนาจในการทดสอบอยู่ในระดับที่ยอมรับได้
4. ดำเนินการทดลองตามที่ออกแบบไว้
5. ตัดสินใจตามวิธีการตัดสินใจที่กำหนดไว้ โดยหากข้อมูลอยู่ในช่วงการยอมรับให้สรุปว่าไม่มีเหตุผลเพียงพอในการปฏิเสธสมมติฐาน แต่หากข้อมูลอยู่ในช่วงการปฏิเสธให้สรุปว่ามีหลักฐานเพียงพอที่จะปฏิเสธสมมติฐาน

2.2.12.3 การใช้ P-Value ในการทดสอบสมมติฐาน

P-Value คือ ความน่าจะเป็นที่ค่าทดสอบทางสถิติ จะมีค่าเป็นอย่างน้อยที่จะทำให้ค่านี้มีค่ามากเท่ากับค่าสังเกต ในทางสถิติเมื่อสมมติฐานหลักเป็นจริง ดังนั้น P-Value นี้จะแสดงถึงน้ำหนักของหลักฐานที่จะใช้ในการปฏิเสธ H_0 และผู้ตัดสินใจสามารถสร้างข้อสรุปที่ระดับนัยสำคัญอื่นๆ ได้นอกจากนี้ยังสามารถนิยาม P-Value ว่าเป็นเหมือนกับค่าที่น้อยที่สุดของระดับนัยสำคัญซึ่งนำไปสู่การปฏิเสธสมมติฐานหลัก H_0 ก็ได้ ปกติแล้วนิยามที่จะบอกว่าค่าทดสอบทางสถิติมีนัยสำคัญก็ต่อเมื่อ สมมติฐานหลัก H_0 ถูกปฏิเสธ ดังนั้นอาจจะพิจารณาค่า P-Value ว่าเป็นค่า α ที่น้อยที่สุด ซึ่งทำให้ข้อมูลมีนัยสำคัญเมื่อรู้

ค่า P-Value แล้ว ผู้ตัดสินใจก็สามารถทราบว่าคุณมีนัยสำคัญอย่างไร โดยไม่ต้องอาศัยการวิเคราะห์ข้อมูลซึ่งมีการกำหนดระดับนัยสำคัญไว้

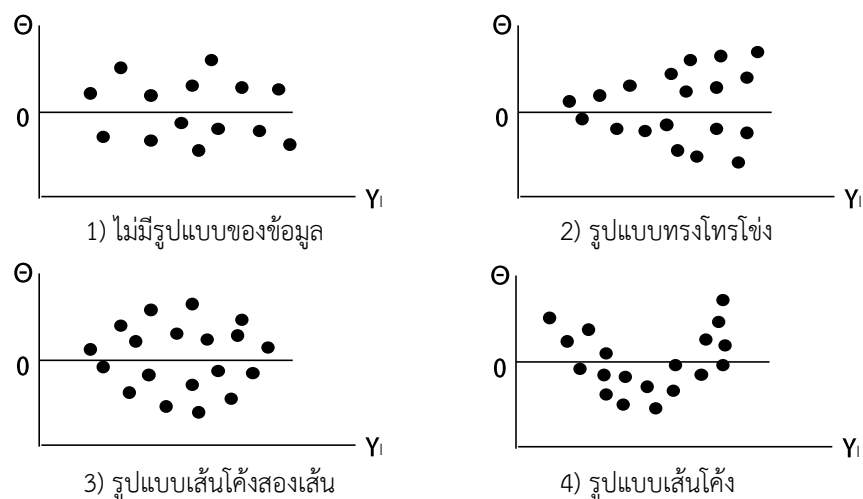
2.2.12.4 การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบ (Model Adequacy Checking)

ในการนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองไปวิเคราะห์จะต้องทำการตรวจสอบคุณภาพของข้อมูลที่ได้จากการทดลองว่ามีคุณภาพหรือไม่ โดยการตรวจสอบจะมี 3 ขั้นตอนคือ

1. การทดสอบความเป็นปกติของข้อมูล (Normal Distribution) ว่าข้อมูลมีการกระจายตัวแบบปกติหรือไม่ ($iid \sim N(0, \sigma^2)$) โดยที่ข้อมูลแต่ละตัวจะต้องมีแนวโน้มที่ค่าจะเข้าใกล้ค่าใดค่าหนึ่ง และมีการกระจายตัวรอบค่าดังกล่าวในลักษณะสมมาตรที่เป็นอิสระ ทั้งนี้หากข้อมูลไม่ได้มีรูปแบบปกติแล้วก็จะทำให้วิเคราะห์ข้อมูลไม่ได้ ดังนั้นถ้าหากข้อมูลไม่ได้เป็นตัวแปรสุ่มปกติแล้ว แสดงว่าข้อมูลที่ได้มาจากกระบวนการที่มีได้กำหนดมาตรฐาน ไม่สามารถนำไปวิเคราะห์ผลทางสถิติได้ โดยสามารถตรวจสอบได้ด้วยการทำ Normal Probability Plot

2. การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูล (Independence) โดยใช้แผนภูมิการกระจาย (Scatter Plot) แล้วดูลักษณะการกระจายของจุดที่แทนข้อมูลบนแผนภูมิ ว่าเป็นอิสระหรือไม่ ข้อมูลมีความอิสระหมายความว่า ข้อมูลแต่ละตัวที่ใช้ในการสร้างแบบถดถอยจะต้องเป็นอิสระต่อกันอันเนื่องมาจากการสุ่ม ทั้งนี้หากข้อมูลไม่มีการสุ่มแล้ว จะทำให้วิเคราะห์ข้อมูลไม่ได้ โดยเฉพาะการหาค่าเฉลี่ย หรือค่าความคาดหมายของตัวแปรตาม ดังนั้นถ้าหากข้อมูลไม่มีการสุ่ม แสดงว่าข้อมูลมีความลำเอียง (Bias) ไม่สามารถนำไปวิเคราะห์ผลทางสถิติได้

3. การทดสอบความเสถียรความแปรปรวน (Variance Stability) โดยใช้แผนภูมิการกระจาย ซึ่งเป็นแผนภูมิการกระจายของค่าความคาดเคลื่อน (Residual Plot) ในแต่ละระดับของปัจจัย โดยได้จากการพล็อตค่าความคลาดเคลื่อนกับลำดับของการเก็บข้อมูลลักษณะการกระจายของแผนภาพที่ได้ต้องไม่เกิดแนวโน้มหรือมีรูปแบบของข้อมูล (Pattern) จึงจะเป็นการแสดงว่าข้อมูลแต่ละค่ามีความเป็นอิสระกันและไม่ขึ้นอยู่กัลำดับของการเก็บข้อมูล แต่ถ้าแผนภาพที่ได้เกิดแนวโน้มหรือมีรูปแบบของข้อมูลแสดงว่าข้อมูลแต่ละค่าไม่มีความเป็นอิสระต่อกันที่เกิดจากปัจจัยที่สามารถควบคุมได้ แต่ไม่ได้รับการควบคุม (Assignable Cause) ทำให้ไม่สามารถนำไปวิเคราะห์ผลทางสถิติได้ โดยรูปแบบการกระจายตัวของข้อมูลจะแสดงดังรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.24 รูปแบบการกระจายตัวของข้อมูล

2.2.12.5 การวิเคราะห์การถดถอย (Regression Analysis)

การวิเคราะห์การถดถอยเป็นวิธีทางสถิติที่ใช้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระ (Independent Variable) และตัวแปรตอบสนอง (Response) โดยทั่วไปแล้วจะมีการศึกษาความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง (Linear Regression) ระหว่างตัวแปรอิสระและตัวแปรตอบสนอง 2 รูปแบบคือ

1. การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย (Simple Linear Regression) เป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระหนึ่งตัวและตัวแปรตอบสนองหนึ่งตัว และสามารถนำค่าของตัวแปรอิสระไปพยากรณ์ตัวแปรตามได้ ซึ่งสามารถบอกขนาดความสามารถในการทำนายตัวแปรตามว่ามีผลมากน้อยเพียงใด โดยสามารถเขียนความสัมพันธ์ในรูปแบบสมการได้ดังต่อไปนี้

$$Y = \alpha + \beta x + \varepsilon \quad (2.31)$$

โดยที่

Y คือ ค่าของตัวแปรตอบสนอง

x คือ ค่าของตัวแปรอิสระ

α คือ ค่าคงที่ (Constant) ของสมการถดถอย โดยที่ α เป็นจุดตัดแกน y ของสมการ

β คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย (Regression Coefficient) ของตัวแปรอิสระ โดยที่ค่า β จะแสดงอัตราการเปลี่ยนของค่า x ต่อค่า y

ϵ คือ ค่าความคลาดเคลื่อน (Residual error) ระหว่างค่า Y ที่ได้จากตัวอย่าง และค่า Y ที่ได้จากการประมาณค่า

2. การวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุคูณ (Multiple Linear Regression) เป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระหลายตัวและตัวแปรตอบสนองหนึ่งตัว เพื่อศึกษาว่ามีตัวแปรอิสระตัวใดบ้างที่ส่งผลต่อตัวแปรตอบสนองหรืออธิบายการผันแปรของตัวแปรตามได้ โดยสามารถเขียนความสัมพันธ์ในรูปแบบสมการได้ดังต่อไปนี้

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \epsilon_i, i = 1, 2, \dots, k \quad (2.32)$$

โดยที่

Y คือ ค่าของตัวแปรตอบสนอง

x_i คือ ค่าของตัวแปรอิสระ

k คือ จำนวนตัวแปรอิสระในสมการถดถอย

β_0 คือ ค่าคงที่ (Constant) ของสมการถดถอย โดยที่ β_0 เป็นจุดตัดแกน y ของสมการ

β_i คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย (Regression Coefficient) ของตัวแปรอิสระ x_i โดยที่ β_i จะแสดงอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่า x_i ต่อค่า Y

ϵ คือ ค่าความคลาดเคลื่อน (Residual error) ระหว่างค่า Y ที่ได้จากตัวอย่างและค่า Y ที่ได้จากการประมาณค่า

ซึ่งถ้าความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระและตัวแปรตอบสนองไม่เป็นความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง จะมีความสัมพันธ์อีกหนึ่งรูปแบบคือ ความสัมพันธ์ไม่เป็นเส้นตรง (Non Linear Regression) โดยทั่วไปแล้วความสัมพันธ์จะแบ่งเป็น 2 รูปแบบคือ

1. การวิเคราะห์การถดถอยพหุนาม (Polynomial Regression) เป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระหนึ่งตัวและตัวแปรตอบสนองหนึ่งตัว เมื่อมีความสัมพันธ์แบบไม่เป็นเส้นตรงหรือเป็นเส้นโค้ง โดยสามารถเขียนความสัมพันธ์ในรูปแบบสมการได้ดังต่อไปนี้

รูปแบบสมการเทอมที่มีกำลังสอง (Quadratic)

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X + \beta_2 X^2 + \varepsilon \quad (2.33)$$

รูปแบบสมการเทอมที่มีกำลังสาม (Cubic)

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X + \beta_2 X^2 + \beta_3 X^3 + \varepsilon \quad (2.34)$$

Y คือ ค่าของตัวแปรตอบสนอง

x คือ ค่าของตัวแปรอิสระ

β_0 คือ ค่าคงที่ (Constant) ของสมการถดถอย โดยที่ β_0 เป็นจุดตัดแกน y ของสมการ

$\beta_1, \beta_2, \beta_3$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย (Regression Coefficient) ของตัวแปรอิสระ x โดยที่ $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ จะแสดงอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่า x ต่อค่า Y ในแต่ละเทอม

ε คือ ค่าความคลาดเคลื่อน (Residual error) ระหว่างค่า Y ที่ได้จากตัวอย่าง และค่า Y ที่ได้จากการประมาณค่า

1. การวิเคราะห์การถดถอยโพลิโนเมียลพหุคูณ (Multiple Polynomial Regression) เป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระหลายตัวและตัวแปรตอบสนองหนึ่งตัว เมื่อมีความสัมพันธ์แบบไม่เป็นเส้นตรงหรือเป็นเส้นโค้ง โดยสามารถเขียนความสัมพันธ์ในรูปแบบสมการได้ดังต่อไปนี้

$$Y = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j X_j + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i < j < k} \beta_{ij} X_i X_j + \varepsilon \quad (2.35)$$

โดยที่

Y คือ ค่าของตัวแปรตอบสนอง

x_i คือ ค่าของตัวแปรอิสระที่ $i = 1, 2, \dots, k$

x_j คือ ค่าของตัวแปรอิสระที่ $j = 1, 2, \dots, k$

k คือ จำนวนตัวแปรอิสระในสมการถดถอย

β_0 คือ ค่าคงที่ (Constant) ของสมการถดถอย โดยที่ β_0 เป็นจุดตัดแกน y ของสมการ

- β_i คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย (Regression Coefficient) ของตัวแปรอิสระ x_i โดยที่ β_i จะแสดงอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่า x_i ต่อค่า Y
- β_{ii} คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย (Regression Coefficient) ของตัวแปรอิสระ x_i ในเทอมที่มีกำลังสองโดยที่ β_{ii} จะแสดงอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่า x_i ต่อค่า Y
- β_{ij} คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย (Regression Coefficient) ของตัวแปรอิสระ x_i และ x_j ในเทอมที่มีกำลังสองโดยที่ β_{ij} จะแสดงอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่า x_i และ x_j ต่อค่า Y
- ϵ คือ ค่าความคลาดเคลื่อน (Residual error) ระหว่างค่า Y ที่ได้จากตัวอย่าง และค่า Y ที่ได้จากการประมาณค่า

2.2.12.6 การประมาณค่าพารามิเตอร์ในแบบจำลองสมการถดถอย

การประมาณค่าพารามิเตอร์ในแบบจำลองสมการถดถอย โดยทั่วไปจะใช้วิธีกำลังสองน้อยสุด (Least Square) เป็นวิธีในการประมาณค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยสำหรับแบบจำลองสมการถดถอยเชิงเส้นและพหุคูณ เนื่องสมการถดถอยในทางปฏิบัติไม่ใช่สมการเชิงเส้นตรง $\mu_y(X_1, \dots, X_k)$ แต่ไม่ทราบค่าพารามิเตอร์ β_0, \dots, β_p โดยที่ p คือจำนวนพารามิเตอร์ โดยวิธีกำลังสองน้อยสุดจะประมาณค่าพารามิเตอร์ β_0, \dots, β_p โดยเลือกค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยเพื่อให้ผลรวมกำลังสองของความคลาดเคลื่อน $\sum_{i=1}^n e_i^2$ น้อยที่สุด เมื่อ

$$e_i = y_i - \mu_y(X_{i,1}, \dots, X_{i,k}) \quad (2.36)$$

ค่าประมาณของพารามิเตอร์ β_0, \dots, β_p แทนด้วย $\hat{\beta}_1, \dots, \hat{\beta}_p$

ค่าประมาณของค่าเฉลี่ยของประชากรย่อย $\mu_y(X_1, \dots, X_k)$ แทนด้วย $\hat{\mu}_y(X_1, \dots, X_k)$

จะได้ความคลาดเคลื่อนของกลุ่มตัวอย่างที่ i

$$\hat{e}_i = y_i - \hat{\mu}_y(X_{i,1}, \dots, X_{i,k}) \quad (2.37)$$

ดังนั้นค่าที่น้อยที่สุดของผลบวกกำลังสองของความคลาดเคลื่อน (Mean Square Error) ของการพยากรณ์คือ

$$SSE = \sum_{i=1}^n \hat{e}_i^2 \quad (2.38)$$

และ

$$MSE = \frac{SSE}{(n - p)} \quad (2.39)$$

2.2.12.7 ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination, R^2)

ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเป็นค่าที่แสดงอิทธิพลของตัวแปรอิสระที่มีค่าตัวแปรตอบสนองในแบบจำลองสมการถดถอย โดยค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0-100% ซึ่งถ้าค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจมีค่ามาก จะแสดงให้เห็นว่า แบบจำลองสมการถดถอยนั้นสามารถอธิบายความผันแปรของตัวแปรตอบสนองได้ดี โดยสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$R^2 = \frac{SS_R}{SS_T} \quad (2.40)$$

ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ปรับแก้แล้ว (Adjusted R Square) เป็นค่าที่แสดงอิทธิพลของตัวแปรอิสระที่มีต่อตัวแปรตอบสนองในแบบจำลองสมการถดถอยอีกค่าหนึ่ง ซึ่งถ้าข้อมูลที่นำมาวิเคราะห์แบบจำลองสมการถดถอยมีจำนวนน้อยกว่า 30 ข้อมูล ควรพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ปรับแก้แล้วแทนค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ โดยสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ปรับแก้แล้วได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\text{Adjusted } R^2 = \frac{SS_R / (n - 2)}{SS_T / (n - 1)} \quad (2.41)$$

2.2.12.8 การทดสอบความเหมาะสมของแบบจำลองสมการถดถอย (Lack of Fit)

การทดสอบความเหมาะสมของแบบจำลองสมการถดถอยเป็นการทดสอบว่าแบบจำลองสมการถดถอยที่ได้เหมาะสมกับข้อมูลที่นำมาวิเคราะห์หรือไม่ โดยการทดสอบจะทำการแบ่งผลรวมกำลังสองของความคลาดเคลื่อน (SS_E) เป็นสองส่วนคือ ผลรวมกำลังสองของความคลาดเคลื่อนแท้จริง (Pure Error Sum of Squares, SS_{PE}) และผลรวมกำลังสองของความคลาดเคลื่อนที่ไม่เหมาะสม (Lack of Fit Sum of Squares, SS_{LOF}) สามารถแสดงดังสมการต่อไปนี้

$$SS_E = SS_{PE} + SS_{LOF} \quad (2.42)$$

สมมติให้ที่ระดับของ X_i ($i = 1, \dots, m$) มีค่า Y_{ij} ($j = 1, \dots, n$) อยู่ n_i ตัว โดย Y_{ij} คือค่า Y ตัวที่ j ของ X ในระดับที่ i

ค่า SS_{PE} เป็นผลรวมกำลังสองของการวัดความผันแปรของค่า Y ที่ตำแหน่ง X หนึ่ง เมื่อเทียบกับค่าเฉลี่ย Y ที่ตำแหน่งนั้น สามารถแสดงดังสมการดังต่อไปนี้

$$SS_{PE} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n_i} (Y_{ij} - \bar{Y}_i)^2 \quad (2.43)$$

$$\text{ซึ่งองศาเสรีของ } SS_{PE} = \sum_{i=1}^m (n_i - 1) = n - m \quad (2.44)$$

ค่า SS_{LOF} เป็นผลรวมกำลังสองของการวัดความผันแปรของค่าเฉลี่ย Y ในแต่ละระดับ X เมื่อเปรียบเทียบกับค่าพยากรณ์ สามารถแสดงดังสมการดังต่อไปนี้

$$SS_{LOF} = \sum_{i=1}^m n_i (\bar{Y}_i - \hat{Y}_i)^2 \quad (2.45)$$

$$\text{ซึ่งองศาเสรีของ } SS_{LOF} = m - 2 \quad (2.46)$$

โดยถ้าค่า SS_{PE} และค่า SS_{LOF} มีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง แสดงว่าค่าเฉลี่ยของแต่ละกลุ่มควรมีค่าไม่แตกต่างจากค่าที่ได้จากการพยากรณ์ แต่ถ้าค่า SS_{PE} และค่า SS_{LOF} ไม่มีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง แสดงว่าค่าเฉลี่ยของแต่ละกลุ่มจะมีค่าที่แตกต่างจากค่าที่ได้จากการพยากรณ์มาก สำหรับสถิติที่ใช้ในการทดสอบ Lack of Fit คือการทดสอบแบบ F สามารถแสดงดังสมการดังต่อไปนี้

$$F = \frac{SS_{LOF} / (m - 2)}{SS_{PE} / (n - m)} = \frac{MS_{LOF}}{MS_{PE}} \quad (2.47)$$

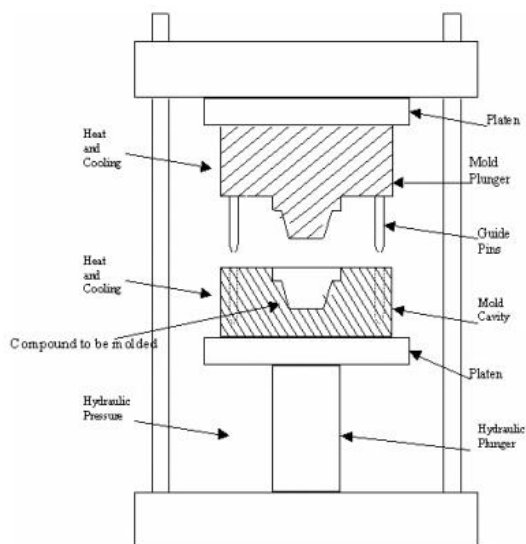
โดยถ้า $F \leq F_{\alpha, m-2, n-m}$ จะสามารถสรุปได้ว่าแบบจำลองสมการถดถอยที่ได้เหมาะสมกับข้อมูลที่นำมาวิเคราะห์

ตารางที่ 2.4 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของแบบจำลองสมการถดถอย

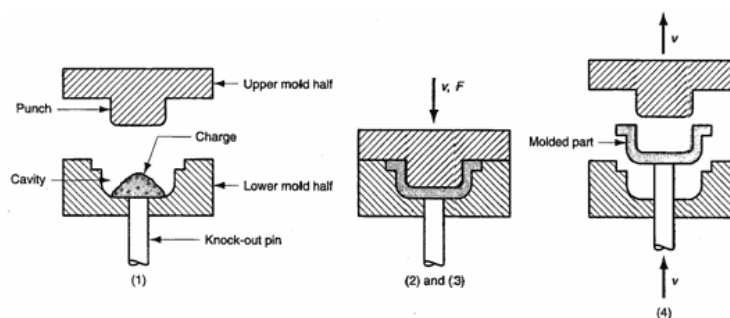
Source	Df	Sum of Squares	Mean Squares	F-Statistic
Regression	k	SS_R	MS_R	MS_R/MS_E
Residual error	n-k-1	SS_E	MS_E	
Lack of Fit	m-2	SS_{LOF}	MS_{LOF}	MS_{LOF}/MS_{PE}
Pure Error	n-m	SS_{PE}	MS_{PE}	
Total	n-1	SS_T		

2.2.13 กระบวนการอัด (Compression molding)

กระบวนการขึ้นรูปพอลิเมอร์หรือพลาสติกเป็นการนำเอาเม็ดพลาสติกผลิตเป็นรูปทรงต่างๆ ซึ่งกระบวนการอัดขึ้นรูป (Compression molding) เป็นกระบวนการขึ้นรูปพลาสติกประเภทหนึ่ง มีการใช้กระบวนการนี้อย่างกว้างขวางในการขึ้นรูปวัสดุต่างๆ เช่น ยาง (Rubber) และเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) นอกจากนี้ยังนิยมใช้กับการขึ้นรูปเทอร์โมพลาสติกที่ขึ้นรูปได้ยาก เช่น การขึ้นรูปเทอร์โมพลาสติกที่มีการเสริมแรงด้วยไฟเบอร์ เป็นต้น กระบวนการอัดขึ้นรูปเป็นการขึ้นรูปพลาสติกที่ไม่ซับซ้อน การทำงานของกระบวนการอัดขึ้นรูปจะมีแผ่นเหล็ก (Platens) 2 ส่วน แสดงดังรูปที่ 2.25 โดยแผ่นเหล็กส่วนแรกทำหน้าที่เป็นแผ่นเหล็กอัดเข้า สามารถเคลื่อนที่ขึ้นลงได้ด้วยระบบแรงลมหรือระบบไฮดรอลิก (Movable platen) ซึ่งจะมีระบบให้ความร้อนที่ทำให้พลาสติกหลอมและไหลเข้าสู่ช่องว่างภายในแม่พิมพ์ (Cavity) ส่วนแผ่นเหล็กส่วนที่สองทำหน้าที่เป็นเบ้าแม่พิมพ์อยู่ยึดติดกับฐานเครื่องอัด (Fixed platen) ซึ่งจะมีระบบน้ำหล่อเย็นไหลหมุนเวียนในการช่วยให้ชิ้นงานแข็งตัวและทำการปลดชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ แสดงดังรูปที่ 2.26



รูปที่ 2.25 ส่วนประกอบทั่วไปของเครื่องกดอัด [34]



รูปที่ 2.26 ขั้นตอนกระบวนการอัดขึ้นรูป [34]

กระบวนการอัดขึ้นรูปได้รับความนิยมในการขึ้นรูปพลาสติกเนื่องจากมีข้อดีกว่ากระบวนการอื่นๆ คือ แม่พิมพ์และเครื่องกดอัดมีราคาถูก ไม่เกิดเส้นรอยเชื่อม (Weld line) หรือตำหนิบนชิ้นงานเนื่องจากไม่มีส่วนของท่อวิ่ง (Runner) และใช้พลาสติกหรือวัสดุปริมาณน้อยเมื่อเทียบกับกระบวนการอื่น จึงเป็นกระบวนการที่น่าสนใจเมื่อมีพลาสติกปริมาณจำกัดแต่ต้องการขึ้นรูปชิ้นงาน ถึงแม้ว่าจะมีข้อได้เปรียบเมื่อเทียบกับกระบวนการอื่น แต่ก็ยังมีข้อเสียคือ ไม่สามารถผลิตชิ้นงานที่มีความซับซ้อนได้ และมีวัฏจักรการผลิต (Cycle time) ที่นานทำให้กำลังการผลิตต่ำ

2.2.14 การทดสอบแรงดึง (Tensile Test)

การทดสอบแรงดึงเป็นการทดสอบในการหาสมบัติความแข็งแรง (Strength) ของชิ้นงานโดยการให้แรงดึงด้วยแรงที่เพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอแสดงดังรูปที่ 2.27 และความยาวของชิ้นทดสอบที่ยืดออก

ในช่วงของแรงต่างๆ จนกระทั่งชิ้นงานขาด โดยค่าของแรงและความยาวที่มีการเปลี่ยนแปลงจะถูกคิดเป็นค่าของ ความเค้น (Stress, σ) จากสัดส่วนของขนาดของแรงต่อพื้นที่หน้าตัด และความเครียด (Strain, ϵ) จากสัดส่วนของระยะยืดต่อความยาวเดิมของชิ้นงาน โดยเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (2.48)$$

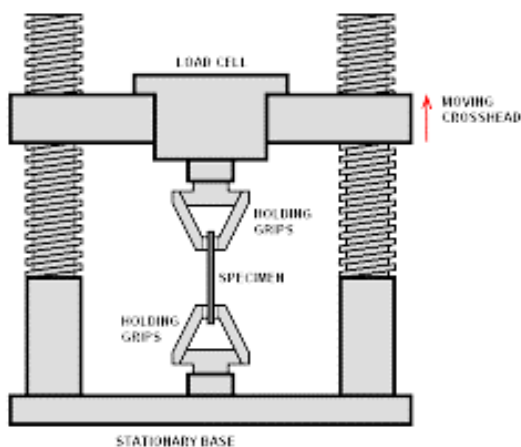
เมื่อ σ คือความเค้นทางวิศวกรรม (N/m^2)
 F คือแรงที่กระทำตั้งฉากกับพื้นที่หน้าตัด (N)
 A_0 คือพื้นที่หน้าตัดขวางที่ถูกแรงกระทำ (m^2)

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (2.49)$$

เมื่อ ϵ คือความเครียดทางวิศวกรรม
 ΔL คือความยาวที่เปลี่ยนแปลงไป
 L_0 คือความยาวเมื่อได้รับแรงกระทำ

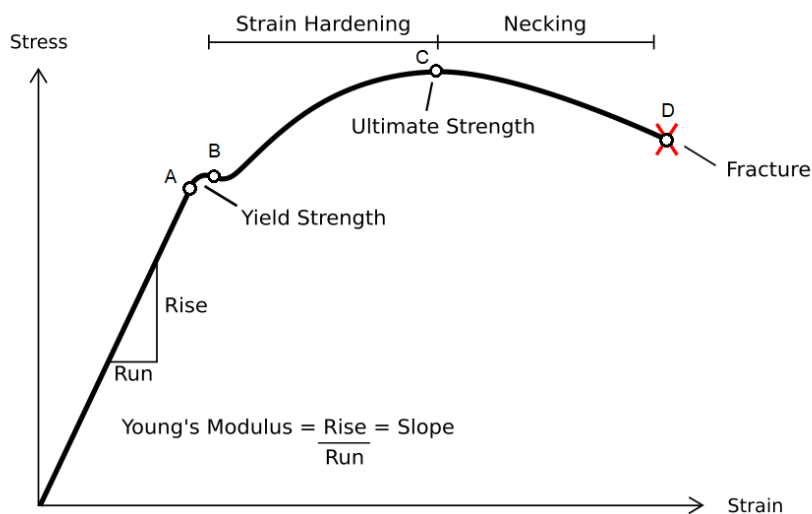
จากความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดในช่วงสภาวะยืดหยุ่น โดยเป็นค่าความชันของกราฟเรียกว่า โมดูลัสยัง (Young's modulus, E) ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงขนาดและความเค้นของชิ้นงานที่เป็นสัดส่วนโดยตรงต่อกัน แสดงดังสมการดังนี้

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (2.50)$$



รูปที่ 2.27 ลักษณะและการติดตั้งชิ้นงานบนเครื่องทดสอบแรงดึง [35]

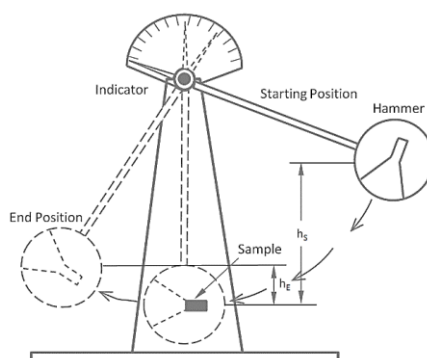
จากความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดแสดงดังรูปที่ 2.28 ในช่วงแรกของการทดสอบ ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดจะเป็นสัดส่วนคงที่ จากการศึกษาชิ้นงานมีการยืดตัวอย่างช้าๆ จนถึงจุด A ได้เป็นกราฟเส้นตรง ซึ่งเป็นช่วงที่วัสดุมีพฤติกรรมในการคืนรูปยืดหยุ่น หรือสามารถคืนกับรูปเดิมได้ เมื่อให้แรงต่อไปจนถึงจุด B จะเป็นจุดคราก (Yield point) หรือความแข็งแรง ณ จุดคราก (Yield strength) ซึ่งเป็นจุดที่มีค่าเท่ากับความเค้นสูงสุดของชิ้นงานนั้น โดยที่ไม่เกิดการเปลี่ยนรูปถาวรของชิ้นงาน และเมื่อให้แรงต่อไปหลังจากจุดคราก ความเค้นจะเพิ่มขึ้นต่อเนื่องจนถึงจุด C ซึ่งเป็นจุดความเค้นแรงดึง (Tensile strength) หรือจุดความแข็งแรงของชิ้นงาน (Ultimate strength) เป็นความเค้นสูงสุดที่ชิ้นงานสามารถทนได้ก่อนที่จะชิ้นงานจะขาดออกจากกัน



รูปที่ 2.28 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของชิ้นงาน [43]

2.2.15 การทดสอบแรงกระแทก (Tensile Test)

การทดสอบแรงกระแทกเป็นการทดสอบในการหาสมบัติความเหนียวแน่น (Toughness) ของชิ้นงาน หรือความสามารถในการรับแรงที่มากระทำกับชิ้นงานด้วยความรวดเร็ว มีหลักการทดสอบแรงกระแทกจะใช้ค้อนเหวี่ยง (Hammer) กระแทกชิ้นงาน แสดงดังรูปที่ 2.29 โดยอ่านค่าปริมาณพลังงานที่ใช้ในการกระแทกชิ้นงานจากหน้าปัดเครื่อง ซึ่งเป็นค่าพลังงานที่ชิ้นงานดูดซับไว้ตั้งแต่ค้อนเหวี่ยงกระทบจนถึงชิ้นงานแตกหัก มีหน่วยเป็นจูล (Joule)

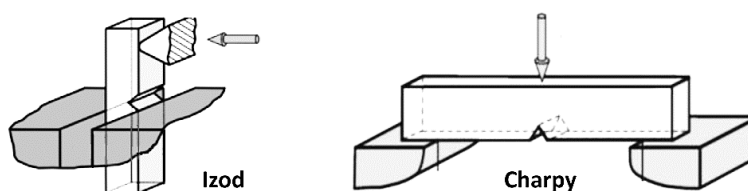


รูปที่ 2.29 หลักการทำงานและส่วนประกอบเครื่องทดสอบแรงกระแทก [36]

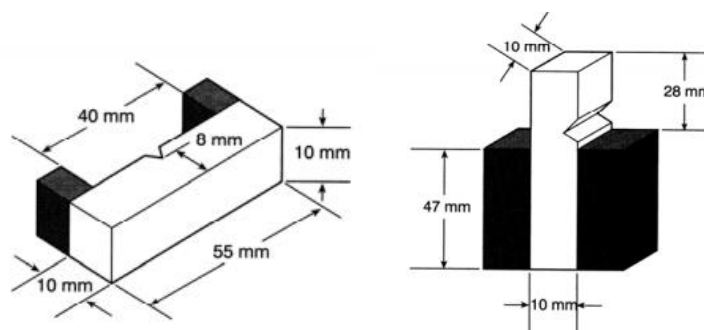
จากพลังงานที่ได้จากการอ่านค่าสามารถนำมาคำนวณ Impact strength ได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\text{Impact strength} = \frac{\text{Energy(kJ)}}{\text{Thickness(m}^2\text{)}} \quad (2.51)$$

การทดสอบแรงกระแทกที่นิยมใช้ 2 แบบขึ้นอยู่กับวิธีการวางชิ้นงานคือ แบบชาร์ปี (Charpy test) ที่วางชิ้นงานแนวนอนโดยหันด้านหลังรอยบากเข้าจุดกระทบของค้อนเหวี่ยง และแบบไอซอด (Izod test) ที่วางชิ้นงานแนวดิ่งโดยหันรอยบากเข้าจุดกระทบของค้อนเหวี่ยงแสดงดังรูปที่ 2.24 และขนาดของชิ้นงานแสดงดังรูปที่ 2.25



รูปที่ 2.30 รูปแบบการวางชิ้นงานทดสอบแรงกระแทก [44]



รูปที่ 2.31 ขนาดของชิ้นงานทดสอบแรงกระแทก [44]

2.2.16 การทดสอบการดูดซึมน้ำ (Water absorption)

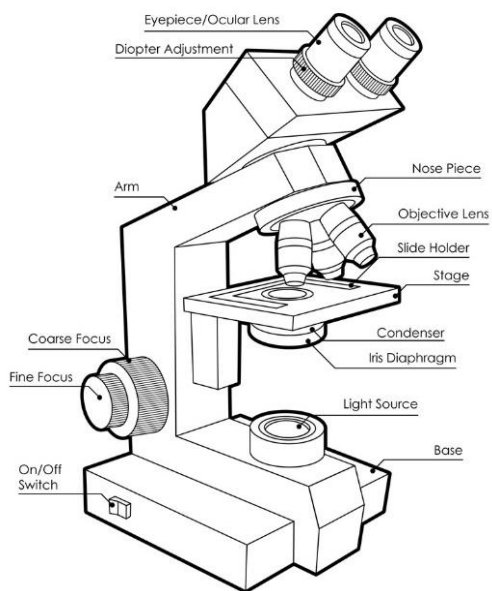
วัสดุส่วนใหญ่มีความสามารถในการดูดซึมน้ำ ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดและโครงสร้างทางเคมีของวัสดุ โดยวัสดุที่มีองค์ประกอบของหมู่ไฮดรอกซิลที่มีความเป็นขั้วสูงหรือเป็นหมู่ที่ชอบน้ำทำให้วัสดุมีความไวต่อการดูดซึมน้ำมาก การดูดซึมน้ำในวัสดุอาจมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อมีการใส่สารเติมแต่งหรือตัวเสริมแรงเช่น เส้นใยธรรมชาติ เส้นใยสังเคราะห์ เป็นต้น การทดสอบการดูดซึมน้ำสามารถหาค่าได้จากการชั่งชิ้นงานแห้งและชิ้นงานที่ผ่านการแช่ในน้ำตามเวลาที่กำหนด สามารถเขียนเป็นสมการดังต่อไปนี้

$$\text{Water absorption (\%)} = \frac{W_W - W_D}{W_D} \times 100\% \quad (2.52)$$

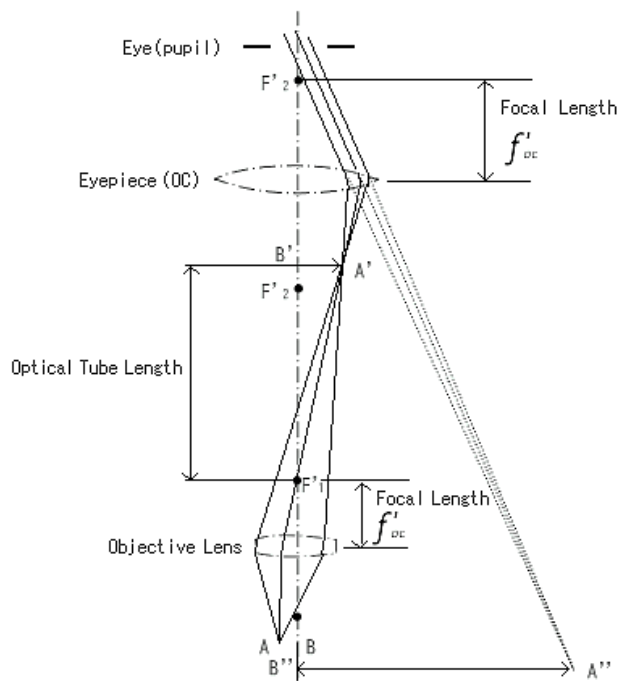
เมื่อ W_W คือน้ำหนักชิ้นงานหลังการทดสอบการดูดซึมน้ำ
 W_D คือน้ำหนักชิ้นงานก่อนการทดสอบการดูดซึมน้ำ

2.2.17 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscope, OM)

กล้องจุลทรรศน์แบบแสงเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาลักษณะโครงสร้างพื้นผิวขนาดเล็ก แสดงดังรูปที่ 2.26 ที่ใช้คุณสมบัติทางแสงเป็นพื้นฐานโดยรวบรวมแสงจากเลนส์รวมแสงไปตกกระทบชิ้นงานที่วางบนแท่นวางชิ้นงาน โดยหลักการทั่วไปของกล้องจุลทรรศน์จะประกอบด้วยเลนส์ 2 ชนิดคือ เลนส์ใกล้วัตถุที่ทำหน้าที่เป้นตัวขยายวัตถุ และเลนส์ใกล้ตาที่ทำหน้าที่ขยายภาพอีกครั้งและส่งภาพมาที่ตาอย่างชัดเจนหลังจากได้รับภาพมาจากเลนส์ใกล้วัตถุ แสดงดังรูปที่ 2.32 ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ใช้เทคนิคการตรวจสอบด้วยเทคนิค เมทัลโลกราฟี (Metallography) ในการศึกษาลักษณะชิ้นงานหรือเส้นใยผ่านกล้องจุลทรรศน์ โดยที่เตรียมชิ้นงานได้ผ่านการขัดจนชิ้นงานชิ้นเงาเหมือนกระจก



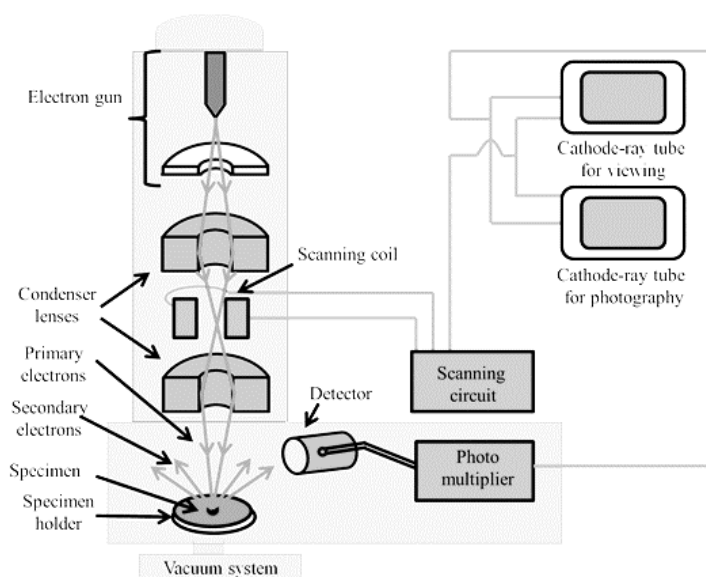
รูปที่ 2.32 ส่วนประกอบหลักของกล้องจุลทรรศน์แบบแสง [45]



รูปที่ 2.33 การทำงานของกล้องจุลทรรศน์แบบแสง [46]

2.2.18 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดกำลังสูง (Field Emission Scanning Electron Microscope, FESEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดกำลังสูงเป็นกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้ศึกษาพื้นผิวของชิ้นงานหรือโครงสร้างขนาดระดับไมโครหรือนาโน โดยใช้ลำอิเล็กตรอนส่องกราดไปยังผิวของชิ้นงาน ทำให้ได้ภาพลักษณะภาพ 3 มิติ โดยมีกำลังขยายสูงถึงระดับ 2,000,000 เท่า หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด แสดงดังรูปที่ 2.34 โดยมี Electron gun เป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน ซึ่งกลุ่มอิเล็กตรอนจะผ่านเลนส์คอนเดนเซอร์ (Condenser lens) กลายเป็นลำอิเล็กตรอน ซึ่งส่งผ่านไปยังเลนส์วัตถุ (Objective lens) ที่ทำหน้าที่โฟกัสลำอิเล็กตรอนให้ไปตกที่ผิวของชิ้นงาน โดยมีสแกนคอยล์ (Scanning coil) ทำหน้าที่กราดอิเล็กตรอนไปลงบนผิวของชิ้นงานเกิดเป็นอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electrons) ซึ่งเป็นสัญญาณที่ใช้ในการให้ข้อมูลเกี่ยวกับลักษณะพื้นผิวของชิ้นงานมาปรากฏที่จอรับภาพ โดยงานวิจัยนี้ใช้กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด รุ่น Merlin compact ยี่ห้อ Zeiss โดยมีกำลังขยายสูงถึงระดับ 12-2,000,000 เท่า ได้ภาพมีความละเอียดสูงถึง 0.8 nm ที่แรงดันที่ 15 kv และ 1.5 nm ที่แรงดัน 1 kv สำหรับศึกษาโครงสร้างของเส้นใยป่านศรนารายณ์และเส้นใยมะพร้าว เนื่องจากชิ้นงานเป็นเส้นใยธรรมชาติจึงไม่มีคุณสมบัตินำไฟฟ้า จึงจำเป็นต้องเคลือบด้วยโลหะหรือวัสดุที่นำไฟฟ้า เช่น การเคลือบทอง หรือแพทตินัม [37]

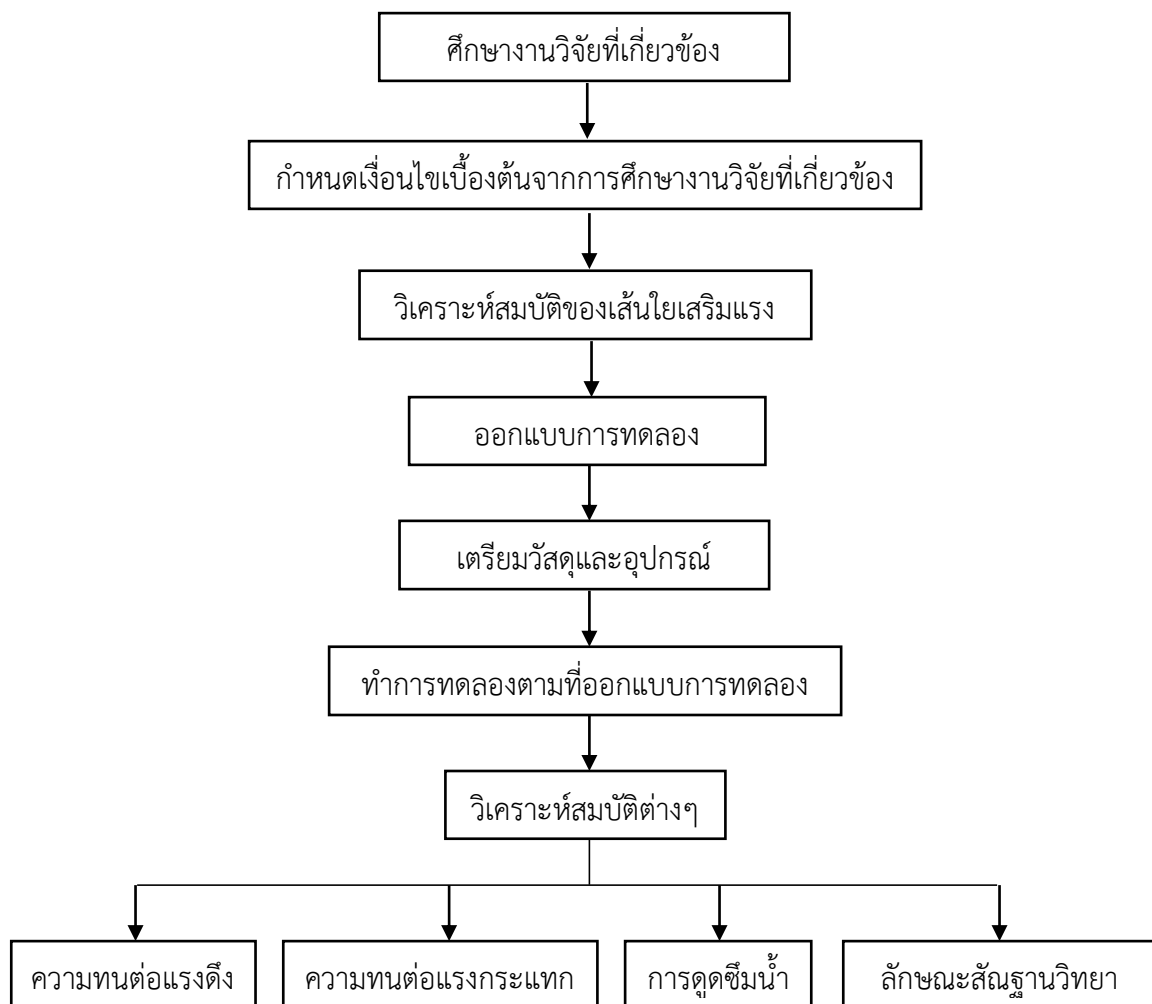


รูปที่ 2.34 การทำงานของกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด [47]

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จัดทำขึ้นเพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาและศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมของวัสดุเชิงประกอบผสมเสริมแรงด้วยเส้นใยธรรมชาติ โดยมีพอลิแลคติกแอซิดเป็นเมทริกซ์ เส้นใยป่าน ฝักรายณ์และเส้นใยมะพร้าวเป็นเส้นใยเสริมแรง โดยวิธีการดำเนินงานวิจัยเริ่มต้นจากการศึกษา งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และทำการวิเคราะห์สมบัติของเส้นใยเสริมแรง จากนั้นทำการออกแบบการทดลอง โดยใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองแบบผสมแบบมีข้อจำกัด ทำการศึกษาอิทธิพลของเส้นใยป่าน ฝักรายณ์และเส้นใยมะพร้าวที่มีผลต่อความทนต่อแรงดึง ความทนต่อแรงกระแทก การดูดซึมน้ำ และ ลักษณะทางสัณฐานวิทยา แสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนภาพแสดงขั้นตอนการดำเนินงาน

3.1 วัสดุ

3.1.1 พอลิแลคติกแอซิด

พอลิแลคติกแอซิดเกรด 4043D ผลิตโดยบริษัท NatureWorks Asia Pacific Ltd. จากบริษัท พีซี โพลีเมอร์ส มาร์เก็ตติ้ง จำกัด แสดงคุณสมบัติดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สมบัติของพอลิแลคติกแอซิด

Physical Properties	Ingeo Resin	ASTM Method
Specific Gravity, g/cc	1.24	D792
Relative Viscosity	4.0	D5225
Peak Melt Temperature, °C	145-160	D3418
Glass Transition Temperature, °C	55-60	D3418
Clarity	Transparent	-
Melt Temperature, °C	210	-
Mechanical Property		
Tensile Yield Strength, MPa	60	D882
Tensile Strength at Break, MPa	53	D882
Tensile Modulus, MPa	3.6	D882
Tensile Elongation, %	6	D882
Notched Izod Impact, J/m	16	D256
Flexural Strength, MPa	83	D790
Flexural Modulus, MPa	3.8	D790

3.1.2 เส้นใยป่านศรนารายณ์ (Sisal Fiber, SF)

เส้นใยป่านศรนารายณ์ โดยกลุ่มอาชีพสตรีจักสานป่านศรนารายณ์ อำเภอชะอำ จังหวัดเพชรบุรี ประเทศไทย

3.1.3 เส้นใยมะพร้าว (Coir Fiber, CF)

เส้นใยมะพร้าว ได้รับความอนุเคราะห์โดยบริษัท TT&G Fiber อำเภอบางละมุง จังหวัดชลบุรี ประเทศไทย โดยใช้เส้นใยมะพร้าวจากเปลือกชั้นใน

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

3.2.1 กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM), Merlin compact, ZEISS

3.2.2 เครื่องทดสอบแรงดึง (Tensile testing machine), A6-X, Shimadzu

3.2.3 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical microscope), Axiolab, ZEISS

3.2.4 เครื่องตู้อบสมร้อน (Universal oven), UNIVERSAL OVEN U, Memmert

3.2.5 เครื่องขัด (Polishing machine), LaboPol-1, Struers

3.2.6 เครื่องชั่งแบบละเอียด, BSA series, Sartorius

3.3.7 เครื่องผสมแบบปิด (Internal mixer), MX75, Chareon

3.3.8 เครื่องทำรอยบากอัตโนมัติ (Specimen notcher)

3.3.9 เครื่องอัดขึ้นรูป (Compression machine), PR2DW300L350-PM-WCL-HMI, Chareon

3.3.10 เครื่องบดเม็ดพลาสติก (Plastic crusher machine), BG 3035, Bosco

3.3.11 เครื่องทดสอบแรงกระแทก (Impact machine), Cometech

3.3 วิธีการทดลอง

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์ในการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตวัสดุคอมโพสิตพอลิแลคติกแอซิดที่เสริมแรงด้วยการผสมเส้นใยป่านศรนารายณ์และเส้นใยมะพร้าว โดยทำการแบ่งขั้นตอนการทดลองเป็น 2 ส่วนใหญ่คือ การศึกษาสมบัติของเส้นใยธรรมชาติในการนำมาเสริมแรงในวัสดุเชิงประกอบ และการศึกษาระดับของแต่ละปัจจัยของวัสดุเชิงประกอบผสมเสริมแรงด้วยเส้นใยป่านศรนารายณ์และเส้นใยมะพร้าวที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลและสมบัติการดูดซึมน้ำ

3.3.1 การศึกษาสมบัติของเส้นใยธรรมชาติ

3.3.1.1 การวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างพื้นฐานวิทยาของเส้นใยเสริมแรง

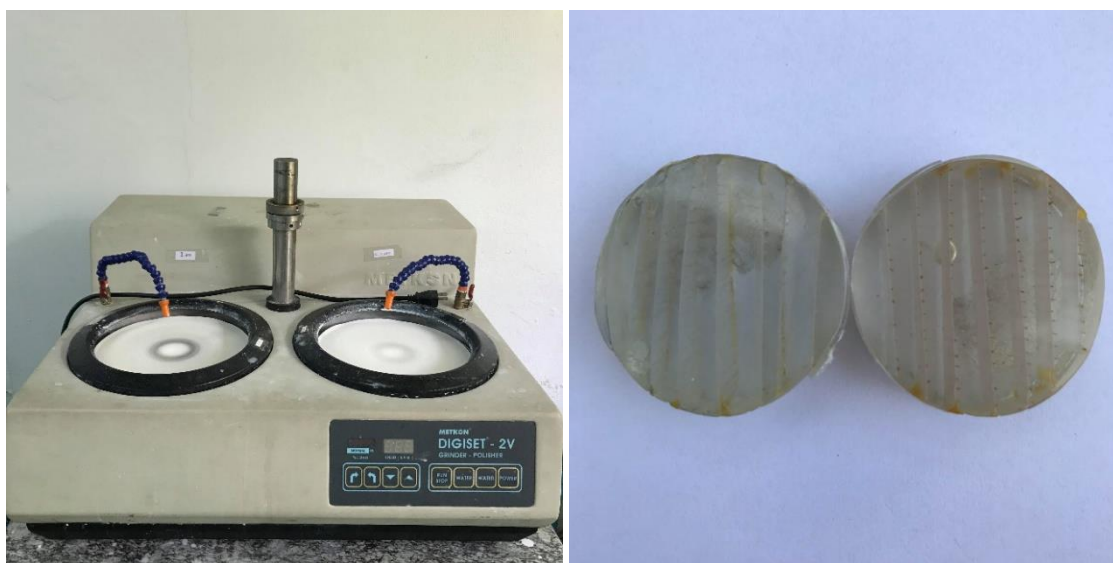
ในการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างพื้นฐานวิทยาของเส้นใยเสริมแรง ใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และใช้เทคนิคการเคลือบเส้นใยด้วยทอง (Gold coater) ก่อนนำไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด ทำการส่องแนวตัดขวางและตามยาวของเส้นใยเสริมแรง



รูปที่ 3.2 กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด

3.3.1.2 การวิเคราะห์เส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยเสริมแรง

ในการวิเคราะห์เส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยเสริมแรง ใช้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง โดยขึ้นรูปตัวเรือนเส้นใยด้วยการหล่อเรซิน และขัดผิวหน้าด้วยกระดาษทรายที่มีความละเอียดตั้งแต่เบอร์ 100 300 600 1000 2000 และ 4000 ตามลำดับ ด้วยเครื่องขัด (LaboPol-1, Struers) แสดงดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 เครื่องขัดชิ้นงานและตัวเรือนการหล่อเรซินเส้นใยเสริมแรง

จากนั้นนำชิ้นงานไปถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง ซึ่งมีกำลังขยายสูงสุด 500 เท่า แสดงดังรูปที่ 3.4 เพื่อตรวจสอบเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยเสริมแรงทั้งสองชนิด จากนั้นทำการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยเสริมแรงด้วยโปรแกรม SemAfore5.21 โดยทำการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางทั้งหมด 100 เส้นใย สำหรับหาค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยเสริมแรง



รูปที่ 3.4 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง

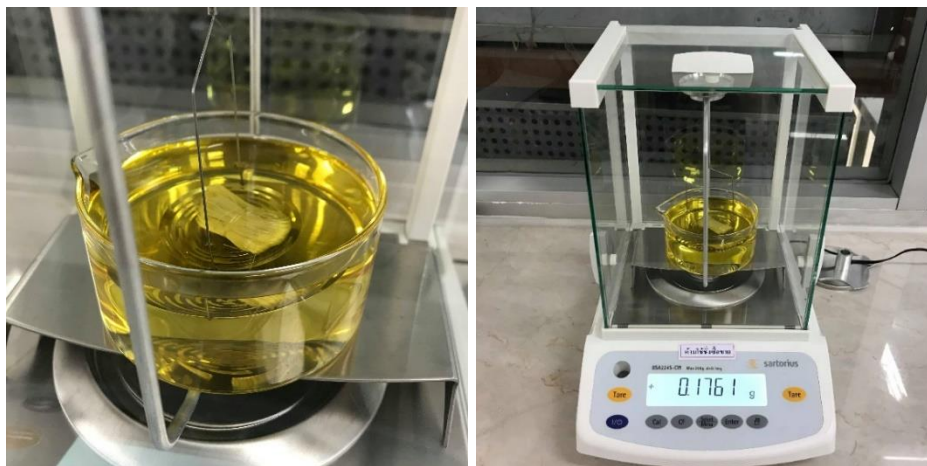
3.3.1.3 การทดสอบสมบัติความหนาแน่นของเส้นใยเสริมแรง

ในการทดสอบสมบัติความหนาแน่นของเส้นใยเสริมแรง ใช้เครื่องชั่งแบบละเอียดที่ทำการติดตั้งชุดเครื่องชั่งแบบแขวน โดยใช้หลักการหาน้ำหนักของเส้นใยในอากาศ และหาน้ำหนักของเส้นใยในของเหลวที่ทราบความหนาแน่นสัมพัทธ์ที่แน่นอน ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้ของเหลวเป็นน้ำมันที่มีความหนาแน่นเท่ากับ 0.9 g/cm^3 และรอให้ค่าน้ำหนักคงที่ที่ 10 นาที เนื่องจากน้ำมันให้ค่าความหนาแน่นที่แม่นยำและคงที่กว่าน้ำกลั่น[32] แสดงดังรูปที่ 3.5 จากนั้นหาความแตกต่างของน้ำหนักที่ชั่งในอากาศและของเหลว การคำนวณหาความหนาแน่นใช้สมการดังนี้

$$\text{Density} = \frac{M_{\text{air}}}{M_{\text{air}} - M_{\text{submerged}}} \times \rho_{\text{fluid}} \text{ g/cm}^3 \quad (3.1)$$

โดย

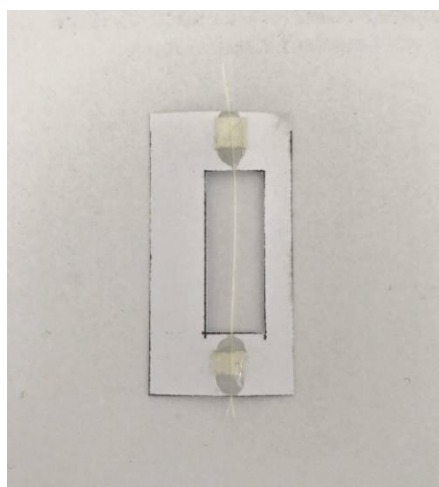
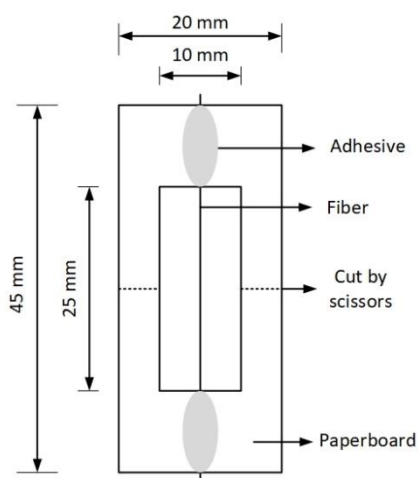
M_{air}	คือ	น้ำหนักของเส้นใยในอากาศ
$M_{\text{submerged}}$	คือ	น้ำหนักของเส้นใยในของเหลว
ρ_{fluid}	คือ	ความหนาแน่นของของเหลว



รูปที่ 3.5 การทดสอบสมบัติความหนาแน่นของเส้นใยเสริมแรง

3.3.1.4 การทดสอบสมบัติความทนต่อแรงดึงของเส้นใยเสริมแรง

ในการทดสอบสมบัติความทนต่อแรงดึงของเส้นใยเสริมแรง ได้ทำตามมาตรฐานการทดสอบสมบัติความทนต่อแรงดึงของเส้นใยเดี่ยว ASTM D3379 โดยใช้การติดเส้นใยเสริมแรงด้วยกาวร้อนลงบนกระดาษที่ตัดให้มีความยาวของระยะทดสอบเท่ากับ 25 mm แสดงดังรูปที่ 3.6 ทำการตรวจสอบให้เส้นใยเสริมแรงติดกับกระดาษอย่างสมบูรณ์ จากนั้นนำเส้นใยเสริมแรงที่ผ่านการติดกับกระดาษเรียบร้อยแล้วไปทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง โดยใช้ส่วนวัดแรง (Load cell) ขนาด 10 kN อัตราเร็ว (Cross head speed) เท่ากับ 1 mm/min ทำการทดสอบซ้ำ 20 ครั้ง เพื่อหาค่าเฉลี่ยของค่าความทนต่อแรงดึง (Tensile strength) และค่าระยะยืด ณ จุดขาด (Elongation at break)



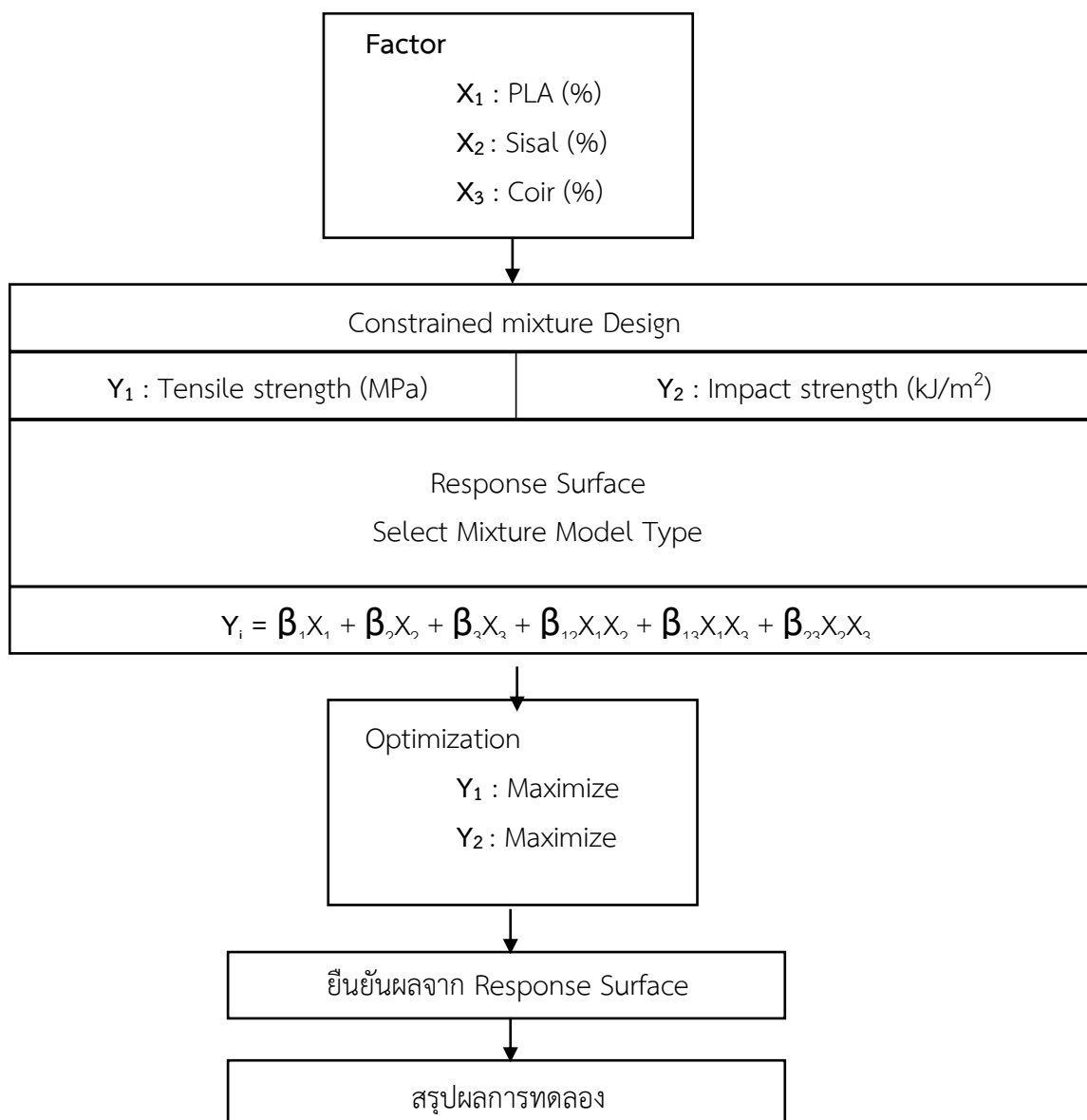
รูปที่ 3.6 การติดเส้นใยเสริมแรงลงในกระดาษเพื่อใช้ในการทดสอบความทนต่อแรงดึงของเส้นใยเสริมแรง



รูปที่ 3.7 การทดสอบความทนต่อแรงดึงของเส้นใยเสริมแรง

3.3.2 การออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลองในงานวิจัยนี้ ใช้การออกแบบการทดลองแบบผสม (Mixture design) เนื่องจากส่วนผสมของวัสดุเชิงประกอบผสมมีทั้งหมด 3 ส่วนผสมหรือ 3 ปัจจัยได้แก่ พอลิแลคติกแอซิด (PLA, X_1), เส้นใยป่านศรนารายณ์ (Sisal, X_2) และเส้นใยมะพร้าว (Coir, X_3) และใช้การออกแบบการทดลองแบบผสมแบบมีข้อจำกัด (Constrained mixture design) เนื่องจากต้องการศึกษาวัสดุเชิงประกอบผสมชีวภาพจึงไม่สามารถให้ปัจจัยที่เป็นเส้นใยเสริมแรงเป็น 100% ได้ เพื่อศึกษาอิทธิพลของแต่ละระดับปัจจัย ที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อตัวแปรตอบสนอง โดยการออกแบบทดลองนี้จะมีจำนวนการทดลองที่ไม่มาก ใช้เวลาและต้นทุนในการทดลองต่ำกว่าแผนการทดลองแฟคทอเรียล (Full Factorial Experiment) โดยขั้นตอนการออกแบบการทดลองแสดงดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 ขั้นตอนการออกแบบการทดลอง

3.3.2.1 การเลือกระดับของปัจจัย

การเลือกระดับของปัจจัยในการออกแบบการทดลอง จำเป็นต้องสอดคล้องกับคุณสมบัติของวัสดุที่ต้องการศึกษา ซึ่งในงานวิจัยนี้ต้องการศึกษาวัสดุเชิงประกอบผสมพอลิแลคติกแอซิด เสริมแรงด้วยเส้นใยป่านครนารายณ์และเส้นใยมะพร้าว จึงไม่สามารถกำหนดให้ปัจจัยที่เป็นเส้นใยเสริมแรงเป็น 100% หรือเส้นใยชนิดใดชนิดหนึ่งเป็น 100 % และไม่ต้องการให้ร้อยละของเส้นใยเสริมแรงทั้งสองชนิดเกิน 5% เนื่องจากจะทำให้ปริมาณของเส้นใยเสริมแรงต่อพอลิแลคติกแอซิดมากเกินไป ดังนั้นระดับของปัจจัยแสดงดังตารางที่ 3.2 โดยที่ $X_1+X_2+X_3 = 100\%$

ตารางที่ 3.2 ปัจจัยและข้อจำกัดของการออกแบบการทดลอง

ปัจจัย	ระดับของปัจจัย		ข้อจำกัด
	ระดับต่ำ	ระดับสูง	
PLA (X_1)	95	99	$95 \leq X_1 \leq 99$
Sisal (X_2)	0.2	4	$X_2 + X_3 \leq 0.5$
Coir (X_3)	0.2	4	-

3.3.2.2 การกำหนดตัวแปรตอบสนอง

ในงานวิจัยนี้ได้กำหนดตัวแปรตอบสนอง 2 ตัวแปร ที่ใช้เป็นตัวแปรชี้วัดคุณสมบัติของวัสดุเชิงประกอบผสมเสริมแรงด้วยเส้นใยป่านครนารายณ์และเส้นใยมะพร้าวได้แก่

1. Y_1 : ค่าความทนต่อแรงดึง (Tensile strength, MPa)
2. Y_2 : ค่าความทนต่อแรงกระแทก (Impact strength, kJ/m²)

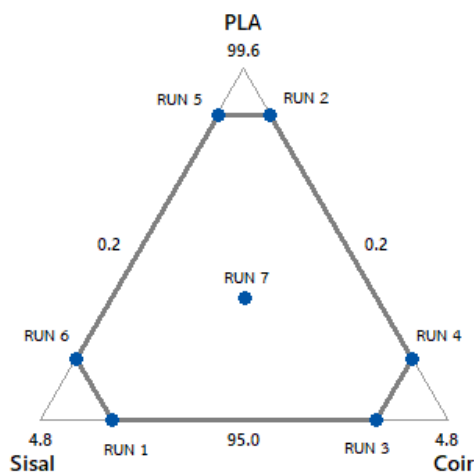
3.3.2.3 การออกแบบการทดลองแบบผสมแบบมีข้อจำกัด (Constrained mixture design)

จากการออกแบบการทดลองแบบผสม ในงานวิจัยนี้ได้เลือกการออกแบบการทดลองแบบผสมแบบมีข้อจำกัดในการออกแบบการทดลอง สำหรับศึกษาอิทธิพลของแต่ละปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบผสม สำหรับเก็บข้อมูลเพื่อนำไปวิเคราะห์พื้นที่ผิวตอบ และหาระดับของปัจจัยที่เหมาะสม โดยเงื่อนไขการศึกษาเป็นไปตามการเลือกระดับของปัจจัย จากการออกแบบการทดลองโดยใช้โปรแกรม Minitab ได้การทดลองทั้งหมด 7 การทดลอง แสดงดังตารางที่ 3.3 และรูปที่ 3.9

ตารางที่ 3.3 การออกแบบการทดลองแบบผสมแบบมีข้อจำกัด

Replicate	Run order	Factor			Response	
		PLA, X ₁ (%)	Sisal, X ₂ (%)	Coir, X ₃ (%)	Tensile strength, Y ₁ (MPa)	Impact strength, Y ₂ (kJ/m ²)
1	1	95.0	4.0	1.0		
	2	99.0	0.2	0.8		
	3	95.0	1.0	4.0		
	4	95.8	0.2	4.0		
	5	99.0	0.8	0.2		
	6	95.8	4.0	0.2		
	7	96.6	1.7	1.7		
2	8	95.0	4.0	1.0		
	9	99.0	0.2	0.8		
	10	95.0	1.0	4.0		
	11	95.8	0.2	4.0		
	12	99.0	0.8	0.2		
	13	95.8	4.0	0.2		
	14	96.6	1.7	1.7		
3	15	95.0	4.0	1.0		
	16	99.0	0.2	0.8		
	17	95.0	1.0	4.0		
	18	95.8	0.2	4.0		
	19	99.0	0.8	0.2		
	20	95.8	4.0	0.2		
	21	96.6	1.7	1.7		

Simplex Design Plot in Amounts



รูปที่ 3.9 แผนการทดลองแบบผสมแบบมีข้อจำกัด

3.3.2.4 การวิเคราะห์พื้นผิวตอบ (Response surface)

ใช้วิธีการวิเคราะห์พื้นผิวตอบ (Response surface) และการวิเคราะห์ผลตอบที่เหมาะสม (Response Optimization) มาวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดลองด้วยโปรแกรม Minitab สำหรับการหาระดับของปัจจัยที่เหมาะสมที่สุด โดยกำหนดที่ค่าความทนต่อแรงดึงและค่าความทนต่อแรงกระแทกมากที่สุด เมื่อสามารถหาระดับของแต่ละปัจจัยที่เหมาะสมจากการวิเคราะห์ จึงนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้มาทำการทดลองเพื่อยืนยันผลและเปรียบเทียบผลการทดลอง

3.3.2.5 การยืนยันผลการทดลองและการสรุปผลการทดลอง

ทำการทดสอบเพื่อยืนยันผลจากการวิเคราะห์พื้นที่ผิวตอบที่เหมาะสม โดยทำการเปรียบเทียบความแตกต่างของตัวแปรตอบสนองที่ได้จากการวิเคราะห์พื้นที่ผิวตอบที่เหมาะสมและจากการทดสอบจริง จากนั้นทำการสรุปผลงานวิจัย

3.3.3 การเตรียมเส้นใย

ทำการเตรียมเส้นใยเบื้องต้น โดยนำเส้นใยป่านครนารายณ์ที่มีความยาวประมาณ 2 เมตรและเส้นใยมะพร้าวที่มีความยาวประมาณ 15-20 เซนติเมตร นำมาล้างทำความสะอาดด้วยน้ำเปล่า และทำให้แห้งโดยตู้อบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นตัดให้มีความยาว 3 ± 1 มิลลิเมตร เนื่องจากที่ความยาวเส้นใยมากกว่า 2 mm ขึ้นไป ให้ค่าสมบัติเชิงกลที่สูงขึ้นตามความยาวของเส้นใย[48] แต่ด้วยข้อจำกัดในการเตรียมวัสดุเชิงประกอบผสมด้านเครื่องมือ ถ้าเส้นใยมีความยาวมากเกินไปอาจทำให้เครื่องผสมเกิดการเสียหายได้ และถ้าพิจารณาจากอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง

(Aspect ratio) ที่สามารถจำแนกประเภทของเส้นใย โดยอัตราส่วนมากกว่า 1,000 เป็นเส้นใยยาว (Long fiber) และอัตราส่วนน้อยกว่า 1,000 เป็นเส้นใยสั้น (Short fiber) [49] โดยสามารถหาอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยป่านศรนารายณ์และเส้นใยมะพร้าวได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\text{Aspect ratio ของเส้นใยป่านศรนารายณ์} = \frac{3\text{mm}}{127 \times 10^{-3} \text{mm}} = 23.62 \quad (3.2)$$

$$\text{Aspect ratio ของเส้นใยมะพร้าว} = \frac{3\text{mm}}{213 \times 10^{-3} \text{mm}} = 14.08 \quad (3.3)$$

ดังนั้นเส้นใยทั้งสองชนิดที่ผ่านขั้นตอนการเตรียมจึงเป็นเส้นใยรูปแบบเส้นใยเสริมแรงสั้น แสดงดังรูปที่ 3.10 และเก็บในภาชนะป้องกันอากาศเข้า



รูปที่ 3.10 (a) เส้นใยป่านศรนารายณ์สั้นและ (b) เส้นใยมะพร้าวสั้น



รูปที่ 3.11 ตู้อบ

3.3.4 การเตรียมวัสดุเชิงประกอบผสมชีวภาพ

ทำการอบไล่ความชื้นเม็ดพลาสติกพอลิแลคติกแอซิดที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง เก็บในถุงซิปป้องกันไม่ให้อากาศเข้า จากนั้นทำการคอมพาวด์ (Compound) พอลิแลคติกแอซิดกับเส้นใยปานครนายณ์และเส้นใยมะพร้าวเส้น ตามร้อยละจากการออกแบบการทดลองแบบผสม โดยใช้เครื่องผสมแบบปิด (Internal mixer) ที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส และรอบหมุน 40 รอบต่อนาที โดยกำหนดลำดับการคอมพาวด์คือ หลอมเหลวพอลิแลคติกแอซิดเป็นเวลา 5 นาที จากนั้นใส่เส้นใยปานครนายณ์และเส้นใยมะพร้าวตามลำดับ ทำให้เป็นเม็ดโดยใช้เครื่องบดเม็ดพลาสติก (Plastic crusher machine) แสดงดังรูปที่ 3.12 จะได้เป็นวัสดุเชิงประกอบผสมเสริมแรงด้วยเส้นใยสั้นที่มีการเรียงตัวแบบสุ่ม (Randomly oriented discontinuous fiber reinforced hybrid composite) เนื่องจากการกระจายตัวของของเส้นใยเป็นการจัดเรียงแบบสุ่ม ไม่มีทิศทางในการจัดเรียงตัวทางใดทางหนึ่ง จึงทำให้วัสดุเชิงประกอบผสมมีสมบัติที่เท่ากันทุกทิศทาง (Isotropy)

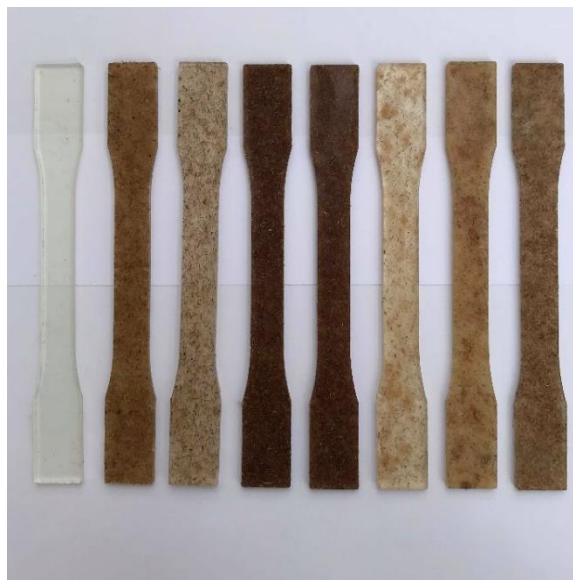
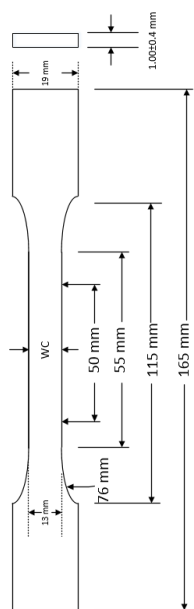


รูปที่ 3.12 (a) เครื่องผสมแบบปิดและ (b) เครื่องบดเม็ดพลาสติก

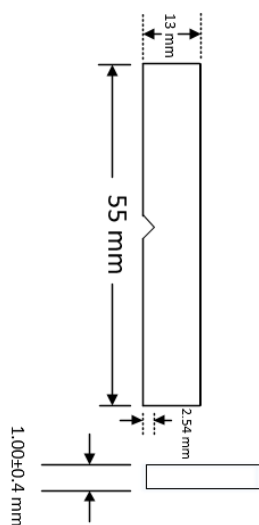
3.3.5 การเตรียมชิ้นงานทดสอบ

การเตรียมชิ้นงานทดสอบสมบัติเชิงกลสำหรับวัสดุเชิงประกอบผสม ใช้วิธีขึ้นรูปโดยวิธีการอัดขึ้นรูป ใช้แม่พิมพ์สำหรับทดสอบความทนต่อแรงดึง ประเภทที่ 1 (The type I tensile specimens) ตามมาตรฐาน ASTM D638 แสดงดังรูปที่ 3.13 และแม่พิมพ์สำหรับทดสอบความทนต่อแรงกระแทก โดยใช้วิธี Izod แสดงดังรูปที่ 3.14 ทำรอยบากตามมาตรฐาน ASTM D256 โดยใช้เครื่องทำรอยบากแบบอัตโนมัติ (Specimen notcher) โดยใช้ความลึกของรอยบากที่ 2.54 มิลลิเมตร ก่อนทำการขึ้นรูปชิ้นงานทำการอบไล่ความชื้นโดยเตาอบด้วยอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ทำการชั่งเม็ดพลาสติกปริมาณ 11 กรัมและ 6 กรัม สำหรับชิ้นงานทดสอบความทนต่อแรงดึงและความทนต่อแรงกระแทกตามลำดับ ทำการตั้งค่าพารามิเตอร์ในการอัดขึ้นรูป โดยใช้ความร้อนที่อุณหภูมิ 190 องศา

เซลล์ียสสำหรับขั้นตอน preheat เป็นเวลา 1 นาทีและขั้นตอนกดอัดเป็นเวลา 3 นาที จากนั้นใช้เวลา 10 นาทีในขั้นตอน cooling



รูปที่ 3.13 (a) ขนาดของชิ้นงาน Type I ในการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D638 (b) ชิ้นงานทดสอบ PLA และชิ้นงานทดสอบตามอัตราส่วนจากการออกแบบการทดสอบ RUN1-RUN7 ตามลำดับ



รูปที่ 3.14 (a) ขนาดของชิ้นงาน Izod Type ในการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D256 (b) ชิ้นงานทดสอบ PLA และชิ้นงานทดสอบตามอัตราส่วนจากการออกแบบการทดสอบ RUN1-RUN7 ตามลำดับ



รูปที่ 3.15 เครื่องทำรอยบากแบบอัตโนมัติ

3.3.6 การศึกษาสมบัติของวัสดุเชิงประกอบผสมชีวภาพ

3.3.6.1 การทดสอบความทนต่อแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบผสมชีวภาพ

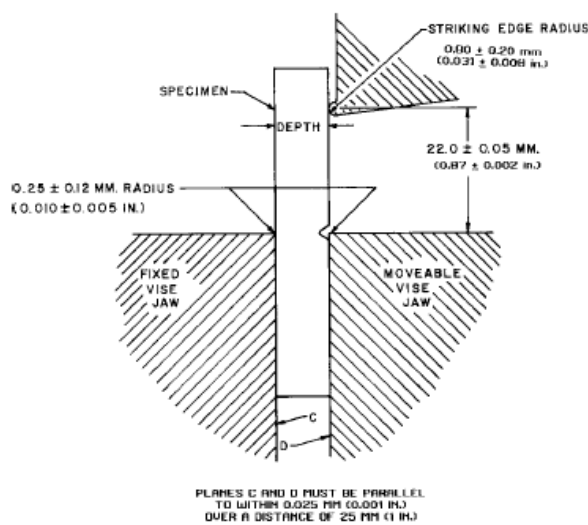
ในการทดสอบสมบัติความทนต่อแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบผสมชีวภาพ ได้ทำตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM D628 โดยใช้เครื่องทดสอบแรงดึง และติดอุปกรณ์ในการวัดระยะยืด (Extensometer) สำหรับการวัดระยะยืดของชิ้นงาน แสดงดังรูปที่ 3.16 มีส่วนวัดแรง 50 kN อัตราเร็วในการดึง 50 mm/min และระยะจับชิ้นงานทดสอบที่ 50 mm ทำการทดสอบซ้ำ 3 ครั้ง เพื่อหาค่าเฉลี่ยของค่าความทนต่อแรงดึง (Tensile strength)



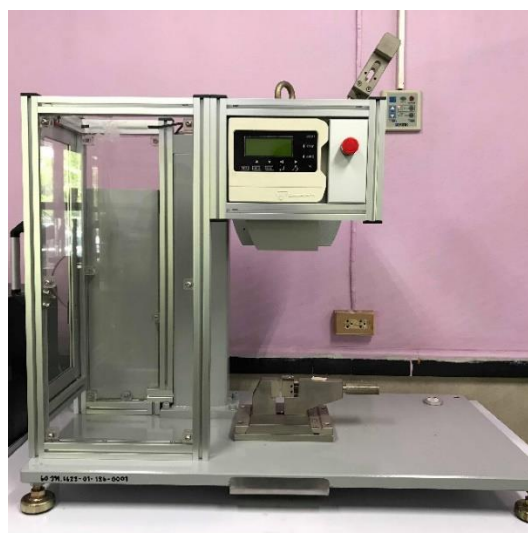
รูปที่ 3.16 เครื่องทดสอบแรงดึงและการติดตั้งชิ้นงานทดสอบ

3.3.6.2 การทดสอบความทนต่อแรงกระแทกของวัสดุเชิงประกอบผสมซีวภาพ

ในการทดสอบสมบัติความทนต่อแรงกระแทกของวัสดุเชิงประกอบผสมซีวภาพ ได้ทำตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM D256 แบบไอซอด (Izod type) Test method E แสดงดังรูปที่ 3.17 โดยใช้เครื่องทดสอบแรงกระแทก (Impact machine) แสดงดังรูปที่ 3.18 โดยใช้ลูกตุ้ม (Pendulum impact) ขนาดน้ำหนัก 5 จูล ทำการทดสอบซ้ำ 3 ครั้ง เพื่อหาค่าเฉลี่ยของค่าความทนต่อแรงกระแทก (Impact strength)



รูปที่ 3.17 การทดสอบสมบัติความทนต่อแรงกระแทกแบบไอซอด (Izod type) Test method E ตามมาตรฐาน ASTM



รูปที่ 3.18 เครื่องทดสอบแรงกระแทก

3.3.6.3 การทดสอบการดูดซึมน้ำ

ในการทดสอบสมบัติการดูดซึมน้ำของวัสดุเชิงประกอบผสมชีวภาพ ได้ทำตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM D570 โดยนำชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบผสมชีวภาพไปใส่ความชื้นที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อชิ้นงานเย็นตัวนำชิ้นงานไปชั่งน้ำหนักได้เป็นน้ำหนักชิ้นงานก่อนทดสอบการดูดซึมน้ำ (W_D) จากนั้นทำการแช่ชิ้นงานในน้ำ โดยทำการชั่งชิ้นงานจนถึงสถานะสมดุลได้เป็นน้ำหนักชิ้นงานหลังการทดสอบการดูดซึมน้ำ (W_W) คำนวณเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำจากสมการ

$$\text{Water absorption (\%)} = \frac{W_W - W_D}{W_D} \times 100\%$$

3.3.6.4. การศึกษาสัญญาณวิทยาของเส้นใยเสริมแรงและวัสดุเชิงประกอบผสมโดยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด

ในการศึกษาสัญญาณวิทยาของวัสดุเชิงประกอบผสม โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด ในส่วนของการศึกษาสัญญาณวิทยาของวัสดุเชิงประกอบได้ทำการศึกษาพื้นผิวชิ้นงานบริเวณรอยแตกหักของชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบความทนต่อแรงกระแทก

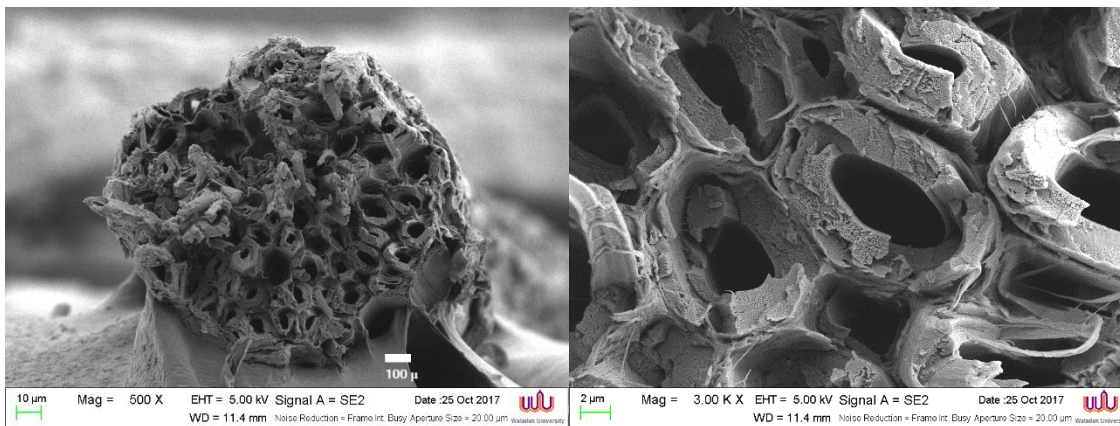
บทที่ 4

ผลการทดลอง

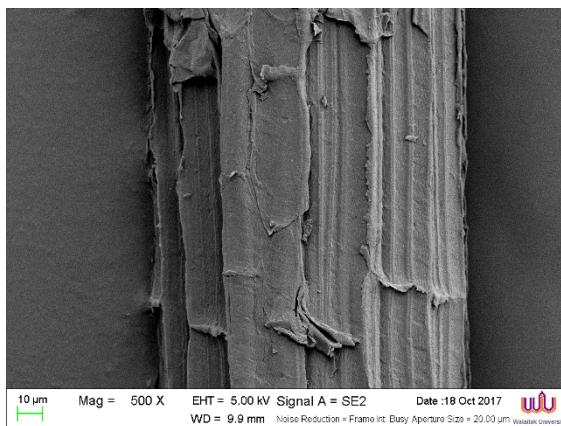
4.1 การศึกษาสมบัติของเส้นใยธรรมชาติ

4.1.1 การวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างพื้นฐานวิทยาของเส้นใยเสริมแรง

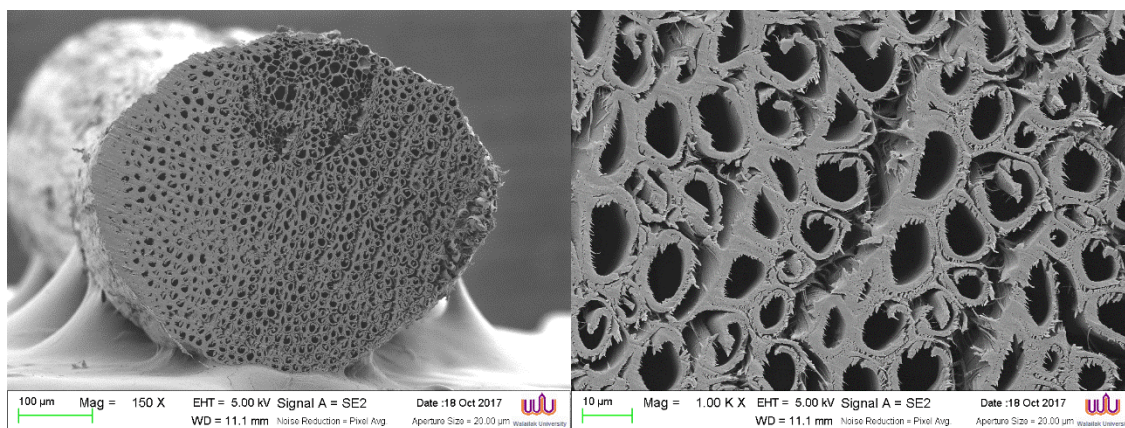
ลักษณะโครงสร้างพื้นฐานวิทยาของเส้นใยป่านศรนารายณ์ โดยการศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด แสดงดังรูปที่ 4.1 และรูปที่ 4.2 จากภาพถ่ายตัดขวางของเส้นใยป่านศรนารายณ์ พบว่าเส้นใยมีลูเมน (Lumen) ที่เป็นวงรี มีปริมาณมากและมีผนังเซลล์ (Cell wall) ค่อนข้างบาง จากภาพถ่ายตัดขวางของเส้นใยมะพร้าว แสดงดังรูปที่ 4.3 และรูปที่ 4.4 พบว่าเส้นใยมีลูเมนขนาดเล็กสม่ำเสมอ และมีผนังเซลล์ค่อนข้างหนา จากภาพถ่ายพื้นผิวของเส้นใยป่านศรนารายณ์และเส้นใยมะพร้าว พบว่าทั้งสองเส้นใยมีลักษณะพื้นผิวที่ไม่สม่ำเสมอหรือที่เรียกว่าคิวทิเคิล (Cuticle) ซึ่งช่วยการยึดเกาะกับเมตริกซ์ และช่วยให้วัสดุเชิงประกอบมีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น[38] จะเห็นได้ว่าพื้นผิวของเส้นใยยังคงมีลิกนินและเฮมิเซลลูโลสที่เป็นसानเชื่อมประสานคือบอยู่บนเส้นใยทั้งสองชนิด



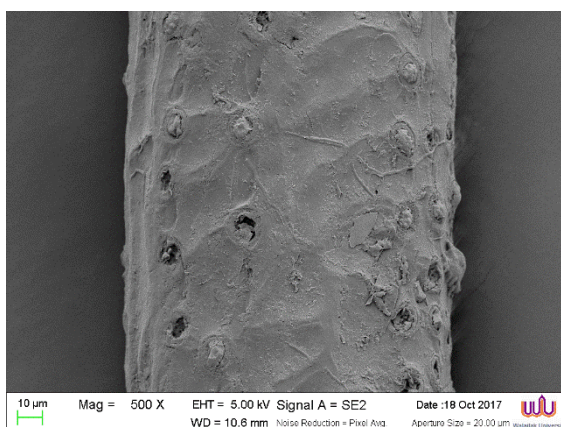
รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายตัดขวางของเส้นใยป่านศรนารายณ์



รูปที่ 4.2 ภาพถ่ายพื้นผิวของเส้นใยป่านศรนารายณ์



รูปที่ 4.3 ภาพตัดขวางของเส้นใยมะพร้าว



รูปที่ 4.4 ภาพถ่ายพื้นผิวของเส้นใยมะพร้าว

4.1.2 การวิเคราะห์เส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยเสริมแรง

จากผลการวิเคราะห์หาเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยป่านศรนารายณ์และเส้นใยมะพร้าวด้วยโปรแกรม SemAfore5.21 แสดงดังตารางที่ 4.1 พบว่าเส้นใยมะพร้าวมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่าเส้นใยป่านศรนารายณ์

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยป่านศรนารายณ์และเส้นใยมะพร้าว

เส้นใย	ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นใย (μm)
เส้นใยป่านศรนารายณ์	127 \pm 30
เส้นใยมะพร้าว	213 \pm 56

4.1.3 การทดสอบสมบัติความหนาแน่นของเส้นใยเสริมแรง

จากการทดสอบสมบัติความหนาแน่นของเส้นใยป่านศรนารายณ์และเส้นใยมะพร้าว โดยหลักการหาน้ำหนักของเส้นใยในของเหลว แสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบความหนาแน่นของเส้นใยป่านศรนารายณ์และเส้นใยมะพร้าว

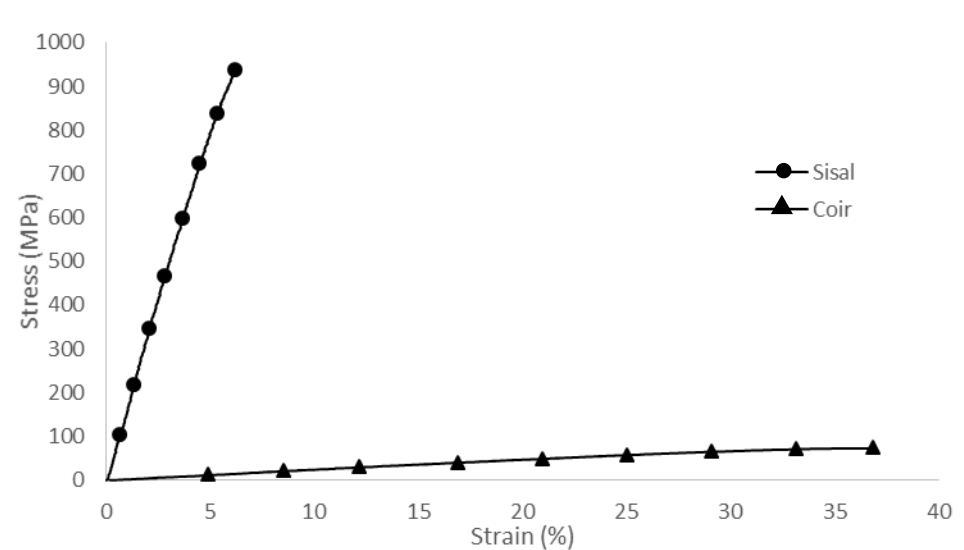
เส้นใย	ความหนาแน่น (g/cm^3)
เส้นใยป่านศรนารายณ์	1.0617 \pm 0.03
เส้นใยมะพร้าว	1.3937 \pm 0.02

4.1.4 การทดสอบสมบัติความทนต่อแรงดึงของเส้นใยเสริมแรง

จากการทดสอบสมบัติความทนต่อแรงดึงของเส้นใยป่านศรนารายณ์และเส้นใยมะพร้าว ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.3 และความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นและค่าความเครียดแสดงดังรูปที่ 4.5

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบความทนต่อแรงดึงของเส้นใยป่านศรนารายณ์และเส้นใยมะพร้าว

เส้นใย	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Young's modulus (GPa)
เส้นใยป่านศรนารายณ์	765-1095	5.5-6.6	136-170
เส้นใยมะพร้าว	54-80	27-43	2-3



รูปที่ 4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นและค่าความเครียดของเส้นใยป่านศรนารายณ์และเส้นใยมะพร้าว

พบว่าความทนต่อแรงดึงของเส้นใยป่านศรนารายณ์มีค่ามากกว่าเส้นใยมะพร้าวค่อนข้างมาก ซึ่งสอดคล้องกับการวิเคราะห์ด้วยกล้อง SEM ที่พบว่าเส้นใยป่านศรนารายณ์มีปริมาณเส้นใยเดี่ยวมาก และสอดคล้องกับปริมาณของเส้นใยเซลลูโลสที่มีความเป็นผลึกในเส้นใยป่านศรนารายณ์ที่สูงกว่าเส้นใยมะพร้าว[27] ส่งผลให้ต้องใช้แรงดึงที่สูง[30] แต่เส้นใยมะพร้าวมีค่า Elongation at break หรือค่าระยะยืด ณ จุดขาดมากกว่าเส้นใยป่านศรนารายณ์ ซึ่งสอดคล้องกับการวิเคราะห์ด้วยกล้อง SEM ที่พบว่าเส้นใยมะพร้าวมีผนังเซลล์ที่ค่อนข้างหนา และสอดคล้องกับปริมาณของเอมิเซลลูโลสและลิกนินที่มีโครงสร้างแบบอสัณฐานในเส้นใยมะพร้าวที่สูงกว่าเส้นใยป่านศรนารายณ์[27] ส่งผลให้เส้นใยมะพร้าวมีคุณสมบัติการยืดตัวได้มากกว่าเส้นใยป่านศรนารายณ์ เมื่อพิจารณาค่า Young's Modulus ของเส้นใยทั้งสองชนิดพบว่าค่า Young's Modulus ของเส้นใยป่านศรนารายณ์มีค่าที่สูงกว่า แสดงว่าเส้นใยป่านศรนารายณ์สามารถทนต่อแรงกระทำและเสียรูปร่างเดิมได้ยากกว่า และค่า Young's Modulus ของเส้นใยมะพร้าวมีค่าที่ต่ำ แสดงว่าเส้นใยมะพร้าวสามารถทนต่อแรงกระทำที่ต่ำ และมีสมบัติยืดหยุ่นได้ดี

เส้นใยป่านศรนารายณ์จะถูกใช้ในการเสริมแรงพอลิแลคติกแอซิด เนื่องจากสมบัติความทนต่อแรงดึงที่สูงของเส้นใยป่านศรนารายณ์ และเส้นใยมะพร้าวจะถูกนำมาเสริมแรงร่วมกับเส้นใยป่านศรนารายณ์ เนื่องจากคุณสมบัติในการยืดหยุ่นของเส้นใยมะพร้าว ซึ่งสมบัติเชิงกลของเส้นใยป่านศรนารายณ์และเส้นใยมะพร้าว ในงานวิจัยนี้มีสมบัติเชิงกลที่แตกต่างจากงานวิจัยของ Ahmad และคณะ [27] เนื่องจากมีสายพันธุ์ และสภาพการเพาะปลูกที่ต่างกัน

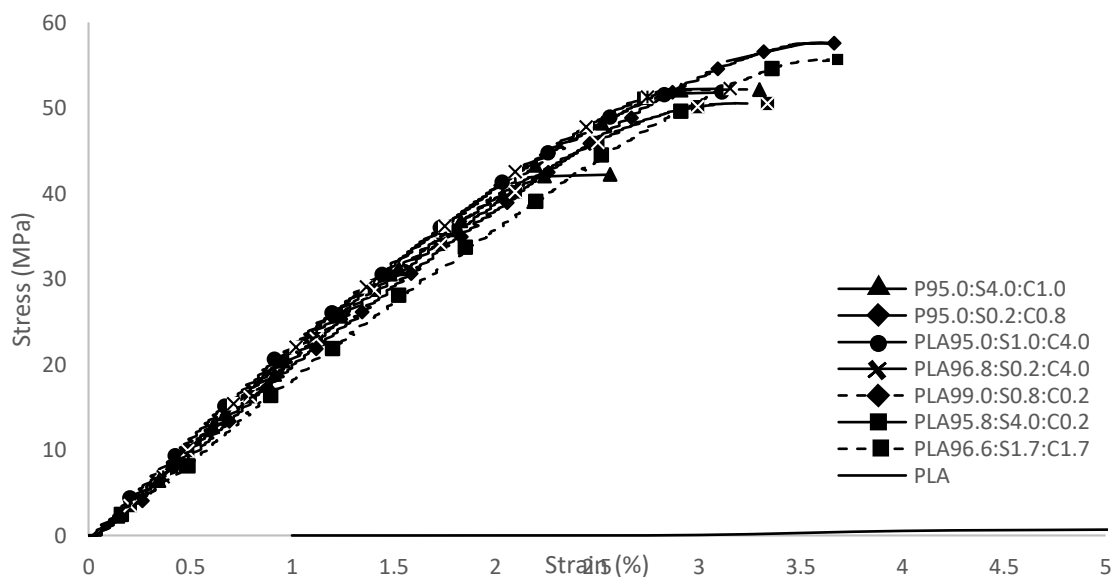
4.2 การออกแบบการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้การออกแบบการทดลองแบบผสมในการศึกษาวัสดุเชิงประกอบผสมเสริมแรงด้วยเส้นใยธรรมชาติ 2 ชนิด จากอัตราส่วนผสมพอลิแลคติกแอซิด เส้นใยป่านครนารายณ์และเส้นใยมะพร้าว โดยที่สำนักงานวิทยาและสมบัติเชิงกลของเส้นใยเสริมแรงทั้งสองชนิดแตกต่างกัน จึงเป็นไปได้ว่าเส้นใยป่านครนารายณ์และเส้นใยมะพร้าวจะส่งอิทธิพลต่อผลตอบสนองที่แตกต่างกันในระดับของอัตราส่วนผสมที่ต่างกัน จากการทดลองตามอัตราส่วนผสมของการออกแบบการทดลองแบบผสมทั้งหมด 7 การทดลอง ได้ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ผลการทดลองจากการออกแบบการทดลองแบบผสม

Run order	PLA, X ₁ (%)	Sisal, X ₂ (%)	Coir, X ₃ (%)	Tensile strength, Y ₁ (MPa)	Impact strength, Y ₂ (kJ/m ²)
1	95.0	4.0	1.0	43.99±2.22	24.69±3.70
2	99.0	0.2	0.8	57.24±0.62	4.79±0.26
3	95.0	1.0	4.0	51.10±1.64	29.96±2.48
4	95.8	0.2	4.0	52.16±1.61	17.65±0.64
5	99.0	0.8	0.2	56.74±1.03	8.32±1.28
6	95.8	4.0	0.2	50.97±0.84	15.52±0.49
7	96.6	1.7	1.7	52.87±0.84	11.83±1.40

จากการทดลองความทนต่อแรงดึงสามารถพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นและค่าความเครียด แสดงดังรูปที่ 4.6 และค่าระยะยืด ณ จุดขาด และค่ายังมอดุลัสของวัสดุเชิงประกอบผสมที่อัตราส่วนผสมของการออกแบบการทดลองแบบผสมทั้งหมด 7 การทดลอง และ PLA แสดงดังตารางที่ 4.5 พบว่าการเสริมแรงพอลิแลคติกแอซิดด้วยเส้นใยป่านครนารายณ์และเส้นใยมะพร้าว ส่งผลให้ค่าระยะยืด ณ จุดขาดสูงขึ้น แสดงให้เห็นว่าวัสดุเชิงประกอบผสมมีคุณสมบัติยืดหยุ่นมากขึ้น เนื่องจากการเสริมแรงด้วยเส้นใยทั้งสองชนิด และเมื่อพิจารณาค่ายังมอดุลัส พบว่าการเสริมแรงด้วยเส้นใยป่านครนารายณ์และเส้นใยมะพร้าว ส่งผลให้ค่ายังมอดุลัสสูงขึ้น แสดงให้เห็นว่าวัสดุเชิงประกอบผสมมีความทนต่อแรงกระทำได้มากและเสียรูปได้ยากขึ้น เนื่องจากเส้นใยมีส่วนช่วยในการรับและกระจายแรง[50]



รูปที่ 4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นและค่าความเครียดของวัสดุเชิงประกอบผสมที่อัตราส่วนผสมของการออกแบบการทดลองแบบผสมทั้งหมด 7 การทดลอง และ PLA



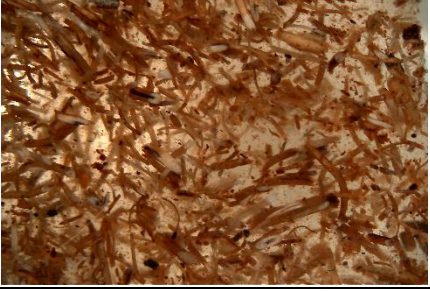
ตารางที่ 4.5 ค่าระยะยืด ณ จุดขาด และค่า Young's modulus ของวัสดุเชิงประกอบผสมที่อัตราส่วนผสมของการออกแบบการทดลองแบบผสมทั้งหมด 7 การทดลอง และ PLA

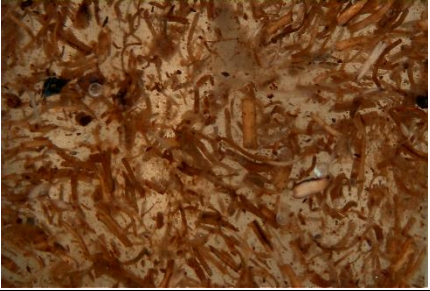


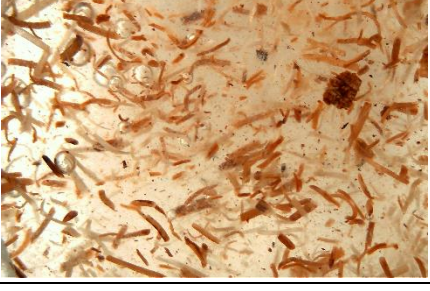
Run order	PLA, X_1 (%)	Sisal, X_2 (%)	Coir, X_3 (%)	Elongation at break (%)	Young's modulus (GPa)
PLA	100	0	0	2.06±0.07	19.95±0.45
1	95.0	4.0	1.0	2.59±0.04	16.97±0.89
2	99.0	0.2	0.8	3.51±0.09	16.31±0.45
3	95.0	1.0	4.0	2.87±0.06	17.84±0.86
4	95.8	0.2	4.0	2.81±0.07	18.57±0.58
5	99.0	0.8	0.2	3.55±0.06	15.98±0.41
6	95.8	4.0	0.2	3.36±0.12	15.17±0.73
7	96.6	1.7	1.7	3.37±0.07	15.70±0.38

4.2.1 การวิเคราะห์การกระจายตัวและการจัดเรียงตัวของเส้นใยเสริมแรงในวัสดุเชิงประกอบผสมพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใยป่านศรนารายณ์และเส้นใยมะพร้าว

การวิเคราะห์การกระจายตัวและการจัดเรียงตัวของเส้นใยเสริมแรงในวัสดุเชิงประกอบผสมพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใยป่านศรนารายณ์และเส้นใยมะพร้าวแสดงดังตารางที่ 4.6 พบว่าการกระจายตัวของเส้นใยเสริมแรงมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ (Uniform Distribution) และการเรียงตัวของเส้นใยเสริมแรงมีการเรียงตัวแบบสุ่ม (Randomly oriented) ทำให้วัสดุเชิงประกอบผสมมีสมบัติที่เท่ากับทุกทิศทาง (Isotropy) ดังนั้นการจัดเรียงตัวของเส้นใยเสริมแรงจะไม่ส่งผลต่อการศึกษาสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบผสมเสริมแรงด้วยเส้นใยป่านศรนารายณ์และเส้นใยมะพร้าว

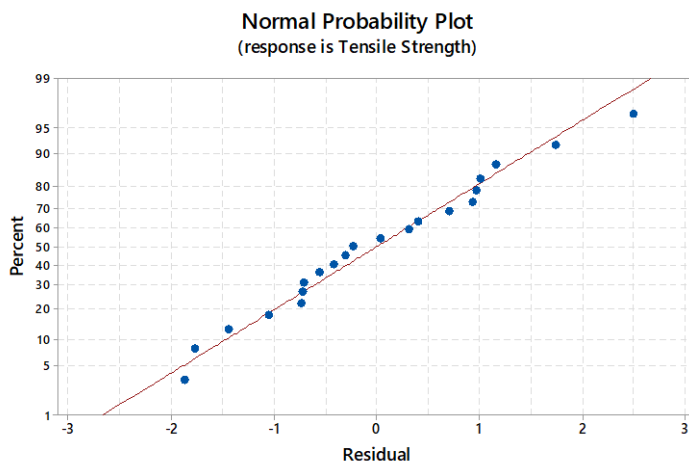
ตารางที่ 4.6 การกระจายตัวและการจัดเรียงตัวของเส้นใยเสริมแรงในวัสดุเชิงประกอบผสมพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใยป่านศรนารายณ์และเส้นใยมะพร้าว

Run Order	อัตราส่วนผสม (%)		ลักษณะการกระจายตัว
1	PLA	95.0	
	Coir	4.0	
	Sisal	1.0	
2	PLA	99.0	
	Coir	0.2	
	Sisal	0.8	
3	PLA	95.0	
	Coir	1.0	
	Sisal	4.0	

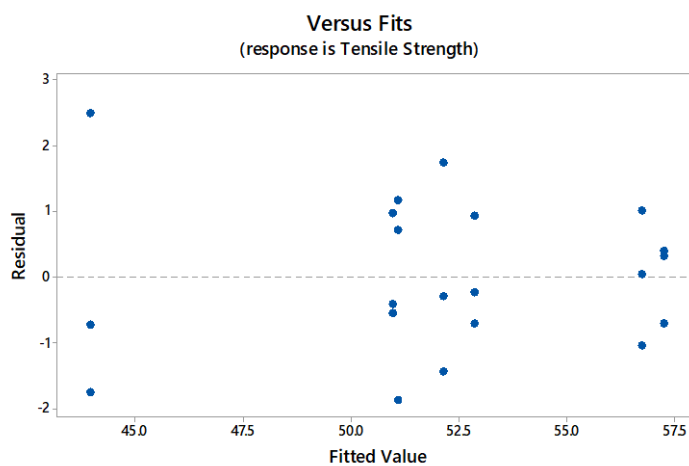
4	PLA Coir Sisal	95.8 0.2 4.0	
5	PLA Coir Sisal	99.0 0.8 0.2	
6	PLA Coir Sisal	95.8 4.0 0.2	
7	PLA Coir Sisal	96.6 1.7 1.7	

4.2.2 ผลการทดลองของตัวแปรตอบสนองความทนต่อแรงดึง (Tensile Strength)

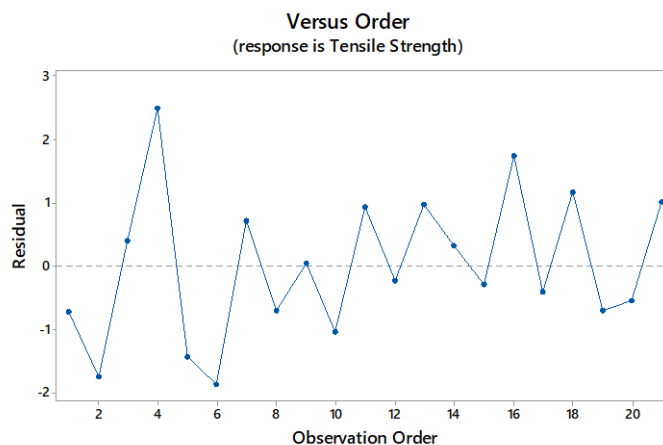
การวิเคราะห์ความถูกต้องของข้อมูลจาก Residual Plot ของค่าความทนต่อแรงดึง แสดงดังรูปที่ 4.7 ถึงรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.7 Normal Probability Plot ของค่าความทนต่อแรงดึง



รูปที่ 4.8 Versus Fits ของค่าความทนต่อแรงดึง



รูปที่ 4.9 Versus Order ของค่าความทนต่อแรงดึง

จากการวิเคราะห์ความถูกต้องของข้อมูลค่าความทนต่อแรงดึง จากรูปที่ 4.7 ถึงรูปที่ 4.9 พบว่าไม่มีสิ่งผิดปกติของ ค่าความคลาดเคลื่อน เนื่องจากข้อมูลมีการกระจายตัวเข้าสู่เส้น Ideal Normal และ ค่าความคลาดเคลื่อนมีการกระจายตัวแบบปกติหรือ Normal ($iid \sim N(0, \sigma^2)$) จาก Versus Fit และ Versus Order พบว่าข้อมูลไม่มีรูปแบบของข้อมูลซึ่งแสดงว่าข้อมูลมีความเป็นอิสระต่อกัน และมีเสถียรภาพขอค่าความแปรปรวน ดังนั้นข้อมูลค่าความทนต่อแรงดึงสามารถนำไปวิเคราะห์ความแปรปรวนได้

การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA) ของแบบจำลองสมการถดถอยของตัวแปรตอบสนองค่าความทนต่อแรงดึงโดยใช้โปรแกรม Minitab ในการวิเคราะห์ โดยทำการเลือกตัวแปรในแบบจำลองสมการถดถอย ใช้ค่าสถิติเป็นเกณฑ์ในการเลือกตัวแปร ได้ผลการวิเคราะห์แสดงตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA) ของแบบจำลองสมการถดถอยของตัวแปรตอบสนองความทนต่อแรงดึง

Source	df	Sums of Squares	Mean Squares	F-Statistic	p-Value
Regression	4	348.73	87.18	51.62	<0.001
Linear	2	63.23	31.62	18.72	<0.001
Special Quartic	2	52.36	26.18	15.50	<0.001
PLA*PLA*Sisal*Coir	1	8.70	8.70	5.15	0.037
PLA*Sisal*Sisal*Coir	1	42.83	42.83	25.36	<0.001
Residual Error	16	27.03	1.69		
Lack-of-Fit	2	0.89	0.45	0.24	0.791
Pure Error	14	26.13	1.87		
Total	20				

การวิเคราะห์หารูปแบบของสมการที่เหมาะสม สำหรับการออกแบบการทดลองแบบผสมแบบมีข้อจำกัดในการทดลองนี้ ได้ทำการวิเคราะห์หารูปแบบสมการที่เหมาะสม พบว่าแบบจำลองการถดถอยที่มีความเหมาะสมในการเป็นแบบจำลองการถดถอยของตัวแปรตอบสนองความทนต่อแรงดึงคือแบบจำลองการถดถอยกำลังสองพิเศษ (Special Quartic) โดยสมมติฐานสำหรับทดสอบแบบจำลองแสดงดังต่อไปนี้

สมมติฐานสำหรับทดสอบแบบจำลองการถดถอยกำลังสองพิเศษ (Special Quartic)

$$H_0 : \beta_i \beta_j \beta_{ij} \beta_i^2 \beta_j^2 \text{ และ } \beta_{ij}^2 = 0$$

$$H_1 ; \beta_i \beta_j \beta_{ij} \beta_i^2 \beta_j^2 \text{ และ } \beta_{ij}^2 \neq 0 \text{ ไม่น้อยกว่า 1 คู่}$$

$$\text{โดยที่ } i = \text{ปัจจัยที่ 1, 2 และ 3}$$

จากตารางที่ 4.7 พบว่าแบบจำลองถดถอยกำลังสองพิเศษ (Special Quartic) มีตัวแปรถดถอยอย่างน้อยหนึ่งตัวที่มีผลต่อค่าความทนต่อแรงดึงที่ระดับนัยสำคัญ (Significance Level) เท่ากับ 0.05 (กำหนด $\alpha = 0.05$) โดยค่า P-value < 0.05 จึงสามารถปฏิเสธสมมติฐานหลัก ทำให้มีหลักฐานเพียงพอที่สรุปได้ว่าแบบจำลองถดถอยกำลังสองพิเศษ (Special Quartic) ยอมรับได้ในการใช้เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับตัวแปรตอบสนองค่าความทนต่อแรงดึง ดังนั้นแบบจำลองการถดถอยที่มีความเหมาะสมในการเป็นแบบจำลองการถดถอยของตัวแปรตอบสนองความทนต่อแรงดึงคือ แบบจำลองการ

ถดถอยกำลังสองพิเศษ (Special Quartic) และพบว่าปฏิกริยาร่วมระหว่างพอลิแลคติกแอซิด เส้นใยป่าน ทรนารายณ์และเส้นใยมะพร้าวมีผลกระทบต่อค่าความทนต่อแรงดึงที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

การวิเคราะห์เพื่อหาแบบจำลองถดถอย โดยใช้รูปแบบของแบบจำลองการถดถอยกำลังสองพิเศษ (Special Quartic) ซึ่งได้จากการวิเคราะห์หารูปแบบของสมการที่เหมาะสม แสดงดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 ผลการวิเคราะห์หาแบบจำลองสมการถดถอยของตัวแปรตอบสนองความทนต่อแรงดึง

Term	Coefficient Estimate
X ₁ : PLA	0.58
X ₂ : Sisal	-0.88
X ₃ : Coir	-1.10
X ₁ *X ₁ *X ₂ *X ₃ : PLA*PLA*Sisal*Coir	9.94*10 ⁵
X ₁ *X ₂ *X ₂ *X ₃ : PLA*Sisal*Sisal*Coir	1.05

จากตารางที่ 4.8 สามารถเขียนแบบจำลองสมการถดถอยของแต่ละปัจจัยที่มีผลต่อค่าความทนต่อแรงดึงได้สมการดังนี้

$$\text{Tensile Strength (Y}_1\text{)} = 0.58X_1 - 0.88X_2 - 1.10X_3 + 9.94*10^5 X_1X_1X_2X_3 + 1.05X_1X_2X_2X_3$$

โดยที่สมการข้างต้นสามารถหาอัตราส่วนผสมของวัสดุเชิงประกอบผสมเสริมแรงด้วยเส้นใยป่าน ทรนารายณ์และเส้นใยมะพร้าวที่เหมาะสมสำหรับตัวแปรตอบสนองค่าความทนต่อแรงดึงได้ ซึ่งจะเห็นว่าค่า Coefficient Estimate ของปัจจัยเส้นใยทั้งสองชนิดมีความสัมพันธ์กับค่าความทนต่อแรงดึงแบบแปรผกผัน ทำให้ค่าความทนต่อแรงดึงลดลง ที่เกิดจากการยึดเกาะระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและเส้นใยเสริมแรงที่ไม่ดี ส่งผลให้เกิดจลุมรวมความเค้น (Stress concentration) บริเวณยึดเกาะระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและเส้นใยเสริมแรง การรับและกระจายแรงจึงน้อยลง ทำให้ค่าความทนต่อแรงกระทำลดลง[50] เมื่อมีปริมาณของเส้นใยที่น้อยไปหรือมากเกินไป ซึ่งสอดคล้องกับคาร์ระยะยึด ณ จุดขาดที่เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มเสริมแรงด้วยเส้นใย ทำให้ใช้แรงที่กระทำลดลง แต่อย่างไรก็ตามจะเห็นว่าค่า Coefficient Estimate ที่บ่งบอกถึงความสัมพันธ์ระหว่างทั้งปัจจัยพอลิแลคติกแอซิดและปัจจัยเส้นใยป่านทรนารายณ์ที่มีผลต่อค่าความทนต่อแรงดึงจะไม่เท่ากันในแต่ละระดับของปัจจัยเส้นใยมะพร้าว มีความสัมพันธ์แบบแปรผันตรงแสดงว่าปฏิกริยาร่วมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับเส้นใยป่านทรนารายณ์ ทำให้ค่าความทนต่อแรงดึงเพิ่มขึ้น ที่ระดับของปัจจัยเส้นใยมะพร้าวที่ต่างกัน โดยถ้ระดับของปัจจัยเส้นใยมะพร้าวลดลงจะส่งผลให้ค่าความทนต่อแรงดึงเพิ่มขึ้น เนื่องจากเส้นใยมะพร้าวมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่าเส้นใยมะพร้าวทำให้มีการประสานกับพอลิแลคติกแอซิดได้ไม่ดี[54]

การวิเคราะห์ Lack-of-Fit เป็นการตรวจสอบเบื้องต้นของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เลือกเป็นแบบจำลองที่เหมาะสมหรือไม่ โดยสมมติฐานสำหรับทดสอบแสดงดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} H_0 & : \text{แบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีความเหมาะสม} \\ H_1 & : \text{แบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีความไม่เหมาะสม} \end{aligned}$$

พบว่าแบบจำลองสมการถดถอยของตัวแปรตอบสนองความทนต่อแรงกระแทกยังไม่มี ความเหมาะสมที่ระดับนัยสำคัญ (Significance Level) เท่ากับ 0.05 (กำหนด $\alpha = 0.05$) โดยค่า P-value > 0.05 จึงไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานหลัก ทำให้มีหลักฐานเพียงพอที่สรุปได้ว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ มีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้ประมวลผลได้

การวิเคราะห์ผลทางสถิติของแบบจำลองสมการถดถอยเป็นการตรวจสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้ค่าทางสถิติที่สามารถอธิบายความผันแปรของตัวแปรตอบสนองได้หรือไม่ แสดงดังตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 ผลทางสถิติของแบบจำลองการถดถอยของตัวแปรตอบสนองความทนต่อแรงดึง

ผลทางสถิติของแบบจำลอง	
Standard Division	2.02
R-Squared	0.8154
Adjusted R-Squared	0.7828
Predicted R-Squared	0.7054

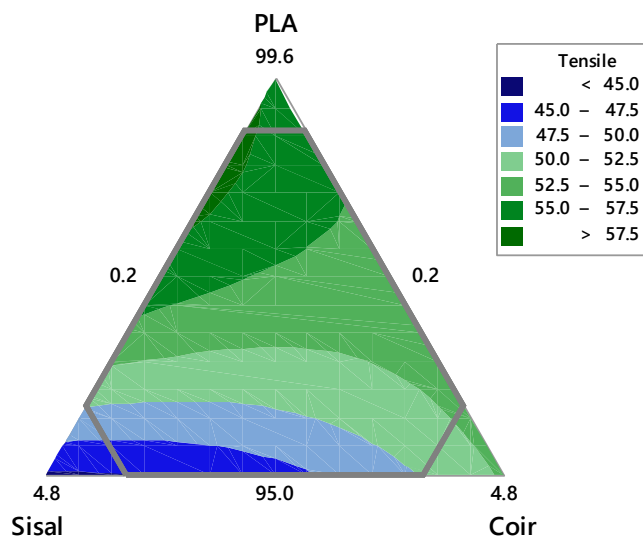
พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ตัวกำหนด (Coefficient of Determination, R^2) มีค่ามาก โดยมีค่าเท่ากับ 0.8154 โดยมีค่าปรับแก้เป็นค่าสัมประสิทธิ์ตัวกำหนดปรับแล้ว (Adjusted Coefficient of Determination) เนื่องจากข้อมูลที่นำมาวิเคราะห์มีจำนวนข้อมูลน้อยกว่า 30 ข้อมูล มีค่าเท่ากับ 0.7828 แสดงว่าแบบจำลองสมการถดถอยที่ได้สามารถอธิบายความผันแปรของค่าความทนต่อแรงดึงได้ดี

การวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบสนอง โดยใช้การพล็อตเส้นโครงร่าง (Contour Plot) ของพื้นผิวตอบสนอง ซึ่งเป็นการหาอัตราส่วนผสมวัสดุเชิงประกอบผสมเสริมแรงด้วยเส้นใยป่านศรนารายณ์และเส้นใยมะพร้าวที่ให้ค่าความทนต่อแรงดึงสูงสุดและวัดค่าความพึงพอใจโดยรวมของผลลัพธ์ (Composite Desirability : D) โดยใช้ Response Optimizer แสดงดังรูปที่ 4.8 และตารางที่ 4.8

ในงานวิจัยนี้เลือกกำหนดค่าเป้าหมายของค่าความทนต่อแรงดึง (Goal) เป็นค่ามากที่สุดของผลตอบสนอง (Maximize) โดยค่าระดับต่ำของผลตอบ (Lower) = 45 MPa เนื่องจากไม่ต้องการให้ค่าความทนต่อแรงดึงมีค่าน้อยกว่า 45 MPa ที่เป็นค่าที่น้อยที่สุดจากการทดสอบความทนต่อแรงดึงที่อัตรา

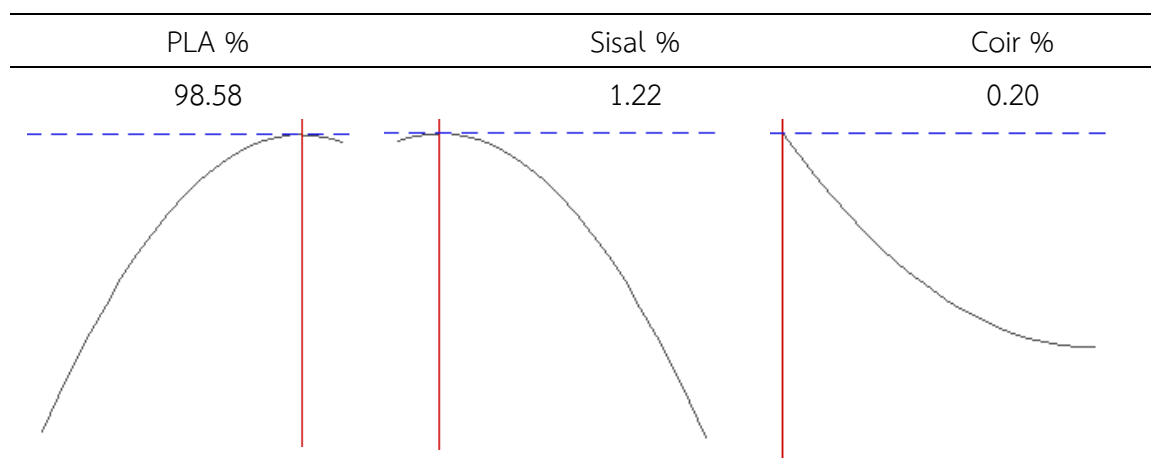
ส่วนผสมจากการออกแบบการทดลอง และค่ากำหนดเป้าหมาย (Target) = 60 MPa เนื่องจากเป็นค่าที่มากที่สุดจากการทดสอบความทนต่อแรงดึงที่อัตราส่วนผสมจากการออกแบบการทดลอง

Mixture Contour Plot of Tensile Strength
(component amounts)



รูปที่ 4.10 Mixture Contour Plot ของความทนต่อแรงดึง

ตารางที่ 4.10 ผลการวิเคราะห์ Optimization Plot ของค่าความทนต่อแรงดึง

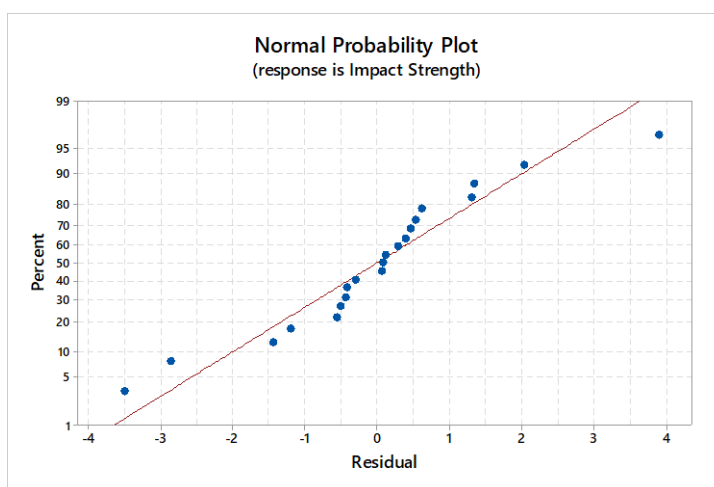


จาก Contour Plot พบว่าการเสริมแรงด้วยเส้นใยป่านศรนารายณ์และเส้นใยมะพร้าวส่งผลให้ค่าความทนต่อแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบผสมเพิ่มขึ้น แต่จะลดลงเมื่ออัตราร้อยละของเส้นใยเสริมแรงมากกว่า 2 % ซึ่งสัมพันธ์กับค่า Coefficient ของเส้นใยป่านศรนารายณ์และเส้นใยมะพร้าวในแบบจำลอง

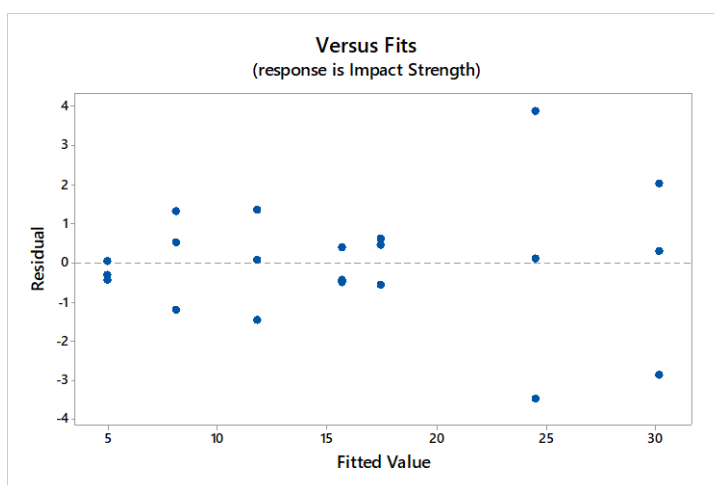
สมการถดถอย และจากการวิเคราะห์ด้วย Response Optimizer อัตราส่วนผสมที่ให้ค่าความทนต่อแรงดึงสูงสุดเท่ากับ 58.09 MPa อยู่ที่ระดับส่วนผสม PLA ร้อยละ 98.58 เส้นใยปานครนารายณ์ร้อยละ 1.22 และเส้นใยมะพร้าวร้อยละ 0.20 ที่ความพึงพอใจโดยรวม (Composite Desirability : D) $D = 1$ แสดงว่าผลตอบอยู่ในขอบเขตของการยอมรับอย่างสมบูรณ์

4.2.3 ผลการทดลองของตัวแปรตอบสนองความทนต่อแรงกระแทก (Impact Strength)

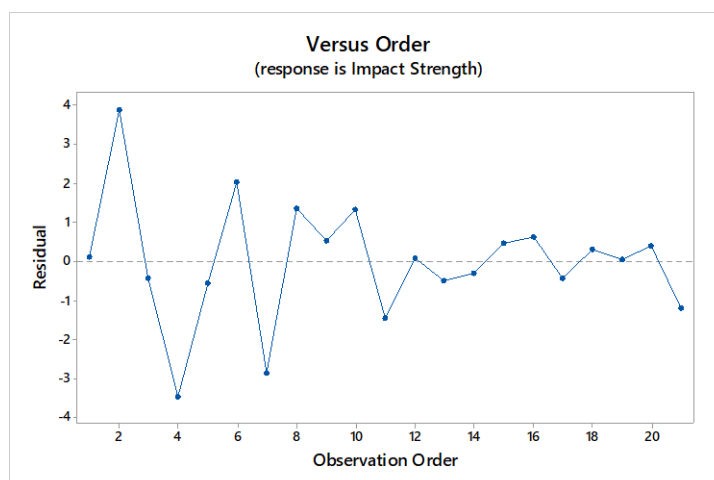
การวิเคราะห์ความถูกต้องของข้อมูลจาก Residual Plot ของค่าความทนต่อแรงกระแทกแสดงดังรูปที่ 4.11 ถึง รูปที่ 4.13



รูปที่ 4.11 Normal Probability Plot ของค่าความทนต่อแรงกระแทก



รูปที่ 4.12 Versus Fits ของค่าความทนต่อแรงกระแทก



รูปที่ 4.13 Versus Order ของค่าความทนต่อแรงกระแทก

จากการวิเคราะห์ความถูกต้องของข้อมูลค่าความทนต่อแรงกระแทก จากรูปที่ 4.10 ถึงรูปที่ 4.13 พบว่าไม่มีสิ่งผิดปกติของค่าความคลาดเคลื่อน เนื่องจากข้อมูลมีการกระจายตัวเข้าสู่เส้น Ideal Normal และค่าความคลาดเคลื่อนมีการกระจายตัวแบบปกติหรือ Normal ($iid \sim N(0, \sigma^2)$) จาก Versus Fit และ Versus Order พบว่าข้อมูลไม่มีรูปแบบของข้อมูลซึ่งแสดงว่าข้อมูลมีความเป็นอิสระต่อกัน และมีเสถียรภาพขอค่าความแปรปรวน ดังนั้นข้อมูลค่าความทนต่อแรงกระแทกสามารถนำไปวิเคราะห์ความแปรปรวนได้

การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA) ของแบบจำลองสมการถดถอยของตัวแปรตอบสนองค่าความทนต่อแรงกระแทกโดยใช้โปรแกรม Minitab ในการวิเคราะห์ โดยทำการเลือกตัวแปรในแบบจำลองสมการถดถอย ใช้ค่าสถิติเป็นเกณฑ์ในการเลือกตัวแปร ได้ผลการวิเคราะห์แสดงตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของแบบจำลองการถดถอยเชิงเส้นของตัวแปรตอบสนองความทนต่อแรงกระแทก

Source	df	Sums of Squares	Mean Squares	F-Statistic	p-Value
Regression	4	1416.16	354.04	97.19	<0.001
Linear	2	1170.05	128.11	35.17	<0.001
Quadratic	2	246.11	123.05	33.78	<0.001
PLA*Sisal	1	34.49	36.55	10.03	0.006
PLA*Coir	1	211.62	211.61	58.09	<0.001
Residual Error	16	58.28	3.64		
Lack-of-Fit	2	10.05	5.02	1.46	0.266
Pure Error	14	48.24	3.45		
Total	20	1474.44			

การวิเคราะห์หารูปแบบของสมการที่เหมาะสม สำหรับการออกแบบการทดลองแบบผสมแบบมีข้อจำกัดในการทดลองนี้ ได้ทำการวิเคราะห์หารูปแบบสมการที่เหมาะสมในรูปแบบเชิงเส้น (Linear) และกำลังสองหรือควอดราติก (Quadratic) โดยสมมติฐานสำหรับทดสอบแบบจำลองแสดงดังต่อไปนี้

สมมติฐานสำหรับทดสอบแบบจำลองการถดถอยเชิงเส้น (Linear)

$$H_0 : \beta_i = 0$$

$$H_1 ; \beta_i \neq 0 \text{ ไม่น้อยกว่า } 1 \text{ คู่}$$

$$\text{โดยที่ } i = 1, 2 \text{ และ } 3$$

สมมติฐานสำหรับทดสอบแบบจำลองการถดถอยกำลังสอง (Quadratic)

$$H_0 : \beta_{ij} = 0$$

$$H_1 ; \beta_{ij} \neq 0 \text{ ไม่น้อยกว่า } 1 \text{ คู่}$$

$$\text{โดยที่ } i = 1, 2 \text{ และ } 3$$

$$j = 1, 2 \text{ และ } 3$$

พบว่าแบบจำลองสมการถดถอยกำลังสอง (Quadratic) มีตัวแปรถดถอยอย่างน้อยหนึ่งตัวที่มีผลต่อค่าความทนต่อแรงดึงที่ระดับนัยสำคัญ (Significance Level) เท่ากับ 0.05 (กำหนด $\alpha = 0.05$) โดย

ค่า P-value < 0.05 จึงสามารถปฏิเสธสมมติฐานหลัก ทำให้มีหลักฐานเพียงพอที่สรุปได้ว่าแบบจำลองสมการถดถอยกำลังสองยอมรับได้ในการใช้เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับตัวแปรตอบสนองค่าความทนต่อแรงกระแทก (Impact Strength) โดยที่ค่า P-value ของแบบจำลองสมการถดถอยกำลังสองมีค่าประมาณแบบจำลองสมการถดถอยเชิงเส้น แต่พบว่าปฏิกริยาร่วมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับเส้นใยป่านศรนารายณ์และปฏิกริยาร่วมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับเส้นใยมะพร้าวมีผลกระทบต่อค่าความทนต่อแรงกระแทกที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังนั้นจึงเลือกใช้แบบจำลองสมการถดถอยกำลังสองเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับตัวแปรตอบสนองค่าความทนต่อแรงกระแทก

การวิเคราะห์เพื่อหาแบบจำลองสมการถดถอย โดยใช้รูปแบบของแบบจำลองสมการถดถอยกำลังสอง ซึ่งได้จากการวิเคราะห์หารูปแบบของสมการที่เหมาะสม แสดงดังตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.12 ผลการวิเคราะห์หาแบบจำลองสมการถดถอยของตัวแปรตอบสนองความทนต่อแรงกระแทก

Term	Coefficient Estimate
X ₁ : PLA	0.12
X ₂ : Sisal	120.75
X ₃ : Coir	289.43
X ₁ *X ₂ : PLA*Sisal	-1.24
X ₁ *X ₃ : PLA*Coir	-3.00

จากตารางที่ 4.12 สามารถเขียนแบบจำลองสมการถดถอยของแต่ละปัจจัยที่มีผลต่อค่าความทนต่อแรงกระแทกได้สมการดังนี้

$$\text{Impact Strength (Y}_1\text{)} = 0.12X_1 + 120.75X_2 + 289.43X_3 - 1.24X_1X_2 - 3.00X_1X_3$$

โดยที่สมการข้างต้นสามารถหาอัตราส่วนผสมของวัสดุเชิงประกอบผสมเสริมแรงด้วยเส้นใยป่านศรนารายณ์และเส้นใยมะพร้าวที่เหมาะสมสำหรับตัวแปรตอบสนองค่าความทนต่อแรงกระแทกได้ ซึ่งจะเห็นว่าค่า Coefficient Estimate ของปัจจัยเส้นใยทั้งสองชนิดมีความสัมพันธ์กับค่าความทนต่อแรงกระแทกแบบผันตรง ทำให้ค่าความทนต่อแรงกระแทกเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณของเส้นใยเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าสามารถปรับปรุงพอลิแลคติกแอซิด ซึ่งเป็นพอลิเมอร์แข็งเปราะให้มีความสามารถในการรองรับแรงกระแทกเพิ่มขึ้นได้โดยการเสริมแรงด้วยเส้นใยทั้งสองชนิด โดยปัจจัยเส้นใยมะพร้าวมีค่า Coefficient Estimate สูงที่สุด แสดงให้เห็นว่าเส้นใยมะพร้าวในวัสดุเชิงประกอบผสมสามารถช่วยลดกลิ่นพลังงานในระหว่างการกระแทกที่กระทำต่อวัสดุ[51] ได้มากกว่าเส้นใยป่านศรนารายณ์ เนื่องจากมีขนาดของเส้นใยที่ใหญ่กว่า และมีสมบัติความยืดหยุ่นที่ดีกว่า

การวิเคราะห์ Lack-of-Fit เป็นการตรวจสอบเบื้องต้นของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เลือกเป็นแบบจำลองที่เหมาะสมหรือไม่ โดยสมมติฐานสำหรับทดสอบแสดงดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} H_0 & : \text{แบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีความเหมาะสม} \\ H_1 & : \text{แบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีความไม่เหมาะสม} \end{aligned}$$

พบว่าแบบจำลองสมการถดถอยของตัวแปรตอบสนองความทนต่อแรงกระแทกมีความเหมาะสมที่ระดับนัยสำคัญ (Significance Level) เท่ากับ 0.05 (กำหนด $\alpha = 0.05$) โดยค่า P-value > 0.05 จึงไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานหลัก ทำให้มีหลักฐานเพียงพอที่สรุปได้ว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้ประมวลผลได้

การวิเคราะห์ผลทางสถิติของแบบจำลองสมการถดถอยเป็นการตรวจสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้ค่าทางสถิติที่สามารถอธิบายความผันแปรของตัวแปรตอบสนองได้หรือไม่ แสดงดังตารางที่ 4.13

ตารางที่ 4.13 ผลทางสถิติของแบบจำลองถดถอยเชิงเส้นของตัวแปรตอบสนองความทนต่อแรงกระแทก

ผลทางสถิติของแบบจำลอง	
Standard Division	1.81
R-Squared	0.9668
Adjusted R-Squared	0.9558
Predicted R-Squared	0.9345

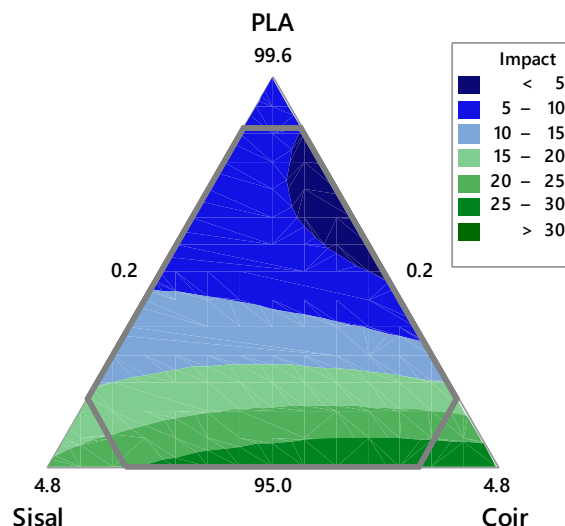
พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ตัวกำหนด (Coefficient of Determination, R^2) มีค่ามาก โดยมีค่าเท่ากับ 0.9668 โดยมีการปรับแก้เป็นค่าสัมประสิทธิ์ตัวกำหนดปรับแล้ว (Adjusted Coefficient of Determination) เนื่องจากข้อมูลที่นำมาวิเคราะห์มีจำนวนข้อมูลน้อยกว่า 30 ข้อมูล มีค่าเท่ากับ 0.9558 แสดงว่าแบบจำลองสมการถดถอยที่ได้สามารถอธิบายความผันแปรของค่าความทนต่อแรงกระแทกได้ดี

การวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบสนอง โดยใช้การพล็อตเส้นโครงร่าง (Contour Plot) ของพื้นผิวตอบสนอง ซึ่งเป็นการหาอัตราส่วนผสมวัสดุเชิงประกอบผสมเสริมแรงด้วยเส้นใยป่านศรนารายณ์และเส้นใยมะพร้าวที่ให้ค่าความทนต่อแรงกระแทกสูงสุดและวัดค่าความพึงพอใจโดยรวมของผลลัพธ์ (Composite Desirability : D) โดยใช้ Response Optimizer แสดงดังรูปที่ 4.14 และตารางที่ 4.14

ในงานวิจัยนี้เลือกกำหนดค่าเป้าหมายของค่าความทนต่อแรงกระแทก (Goal) เป็นค่ามากที่สุดของผลตอบสนอง (Maximize) โดยค่าระดับต่ำของผลตอบ (Lower) = 5 kJ/m² เนื่องจากไม่ต้องการให้ค่าความทนต่อแรงกระแทกมีค่าน้อยกว่า 5 kJ/m² ที่เป็นค่าน้อยที่สุดจากการทดสอบความทนต่อแรงกระแทกที่อัตราส่วนผสมจากการออกแบบการทดลอง และค่ากำหนดเป้าหมาย (Target) = 35 MPa

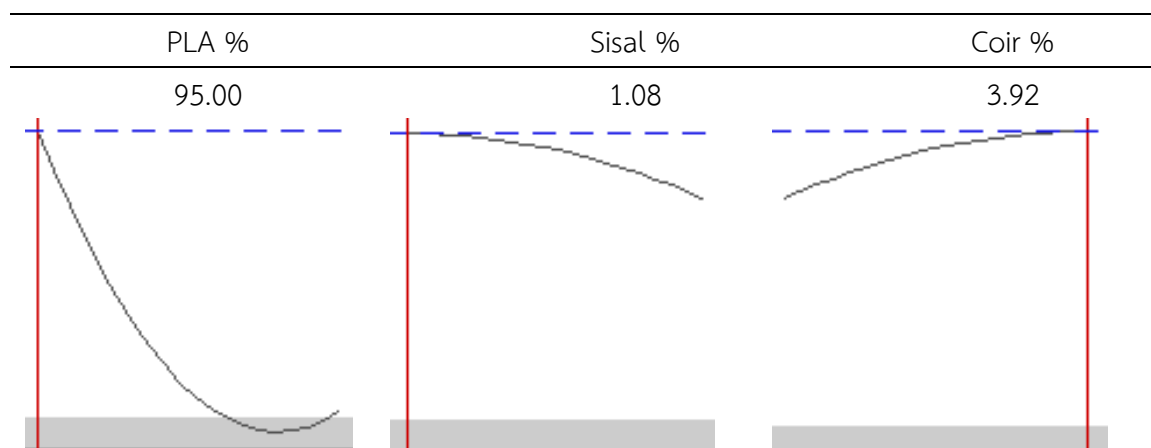
เนื่องจากเป็นค่าที่มากที่สุดจากการทดสอบความทนต่อแรงกระแทกที่อัตราส่วนผสมจากการออกแบบการทดลอง

**Mixture Contour Plot of Impact Strength
(component amounts)**



รูปที่ 4.14 Mixture Contour Plot ของความทนต่อแรงกระแทก

ตารางที่ 4.14 ผลการวิเคราะห์ Optimization Plot ของค่าความทนต่อแรงกระแทก



จาก Contour Plot พบว่าการเสริมแรงด้วยเส้นใยป่านศรนารายณ์และเส้นใยมะพร้าวส่งผลให้ค่าความทนต่อแรงกระแทกของวัสดุเชิงประกอบผสมเพิ่มขึ้น และพบว่าปัจจัยเส้นใยมะพร้าวมีผลต่อค่าความทนต่อแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบผสมเสริมแรงด้วยเส้นใยป่านศรนารายณ์และเส้นใยมะพร้าว

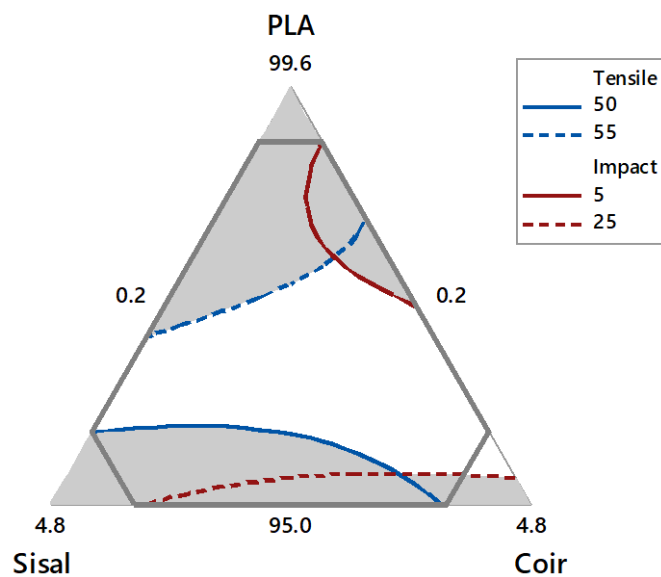
มากกว่าเส้นใยปาสทรีนารายณ์ โดยค่าความทนต่อแรงกระแทกเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเส้นใยมะพร้าวเพิ่มขึ้น ซึ่งสัมพันธ์กับค่า Coefficient ของเส้นใยมะพร้าวในแบบจำลองสมการถดถอยและค่าความทนต่อแรงกระแทกของเส้นใยมะพร้าวที่มีค่ามากกว่าเส้นใยปาสทรีนารายณ์ และจากการวิเคราะห์ด้วย Response Optimizer อัตราส่วนผสมที่ให้ค่าความทนต่อแรงกระแทกสูงสุดเท่ากับ 30.14 kJ/m^2 อยู่ที่ระดับส่วนผสม PLA ร้อยละ 95.00 เส้นใยปาสทรีนารายณ์ร้อยละ 1.08 และเส้นใยมะพร้าวร้อยละ 3.92 ที่ความพึงพอใจโดยรวม (Composite Desirability : D) $D = 0.55$ แสดงว่าผลตอบที่ได้นั้นอยู่ในขอบเขตของการยอมรับแต่ยังไม่สมบูรณ์

4.2.4 ผลรวมการวิเคราะห์ของตัวแปรตอบสนองความทนต่อแรงดึงและความทนต่อแรงกระแทก

การวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบสนองมะพร้าว โดยคำนึงถึงตัวแปรตอบสนองความทนต่อแรงดึงและความทนต่อแรงกระแทกร่วมกันจะทำการพล็อตเส้นโครงร่างแบบรวมตัวแปรตอบสนอง (Overlaid Contour plot) ซึ่งกำหนดช่วงขอบเขตของตัวแปรตอบสนองให้แสดงใน Overlaid Contour plot ที่ค่าความทนต่อแรงดึง 50-55 MPa และค่าความทนต่อแรงกระแทก 5-25 kJ/m^2 โดยพิจารณาจาก Contour plot ของค่าความทนต่อแรงดึงและค่าความทนต่อแรงกระแทก และในการหาอัตราส่วนผสมวัสดุเชิงประกอบผสมเสริมแรงด้วยเส้นใยปาสทรีนารายณ์และเส้นใยมะพร้าว โดยคำนึงถึงตัวแปรตอบสนองความทนต่อแรงดึงและความทนต่อแรงกระแทกร่วมกันจะต้องทำการหาผลรวมการวิเคราะห์ของตัวแปรตอบสนองความทนต่อแรงดึงและความทนต่อแรงกระแทก และวัดค่าความพึงพอใจโดยรวมของผลลัพธ์ (Composite Desirability : D) โดยใช้ Response Optimizer แสดงดังรูปที่ 4.15 และตารางที่ 4.15

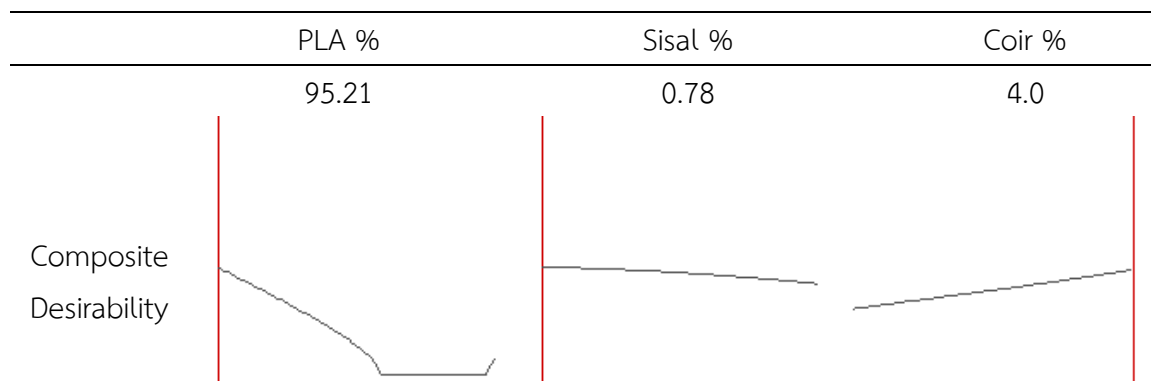
ในงานวิจัยนี้เลือกกำหนดค่าเป้าหมายของค่าความทนต่อแรงดึงและค่าความทนต่อแรงกระแทก (Goal) เป็นค่ามากที่สุดของผลตอบสนอง (Maximize) โดยค่าระดับต่ำของผลตอบสนองค่าความทนต่อแรงกระแทก (Lower) = 45 MPa และค่ากำหนดเป้าหมาย (Target) = 60 MPa และค่าระดับต่ำของผลตอบสนองค่าความทนต่อแรงกระแทก (Lower) = 5 kJ/m^2 และค่ากำหนดเป้าหมาย (Target) = 35 kJ/m^2

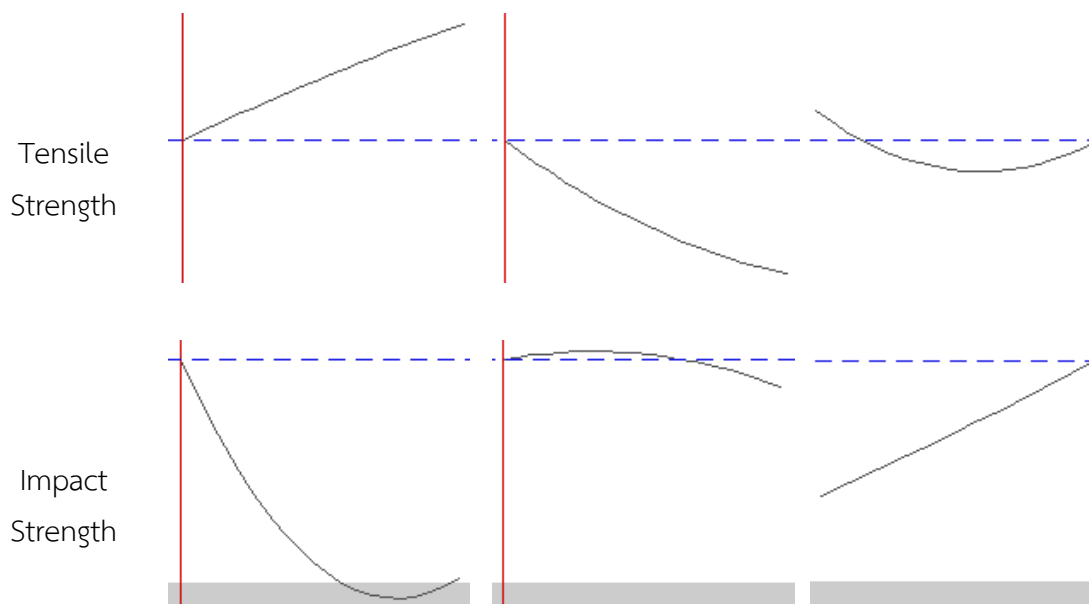
Contour Plot of Tensile, Impact Strength (component amounts)



รูปที่ 4.15 Overlaid Contour Plot ของความทนต่อแรงดึงและความทนต่อแรงกระแทก

ตารางที่ 4.15 ผลการวิเคราะห์ Optimization Overlaid Plot ของค่าความทนต่อแรงดึงและความทนต่อแรงกระแทก





จาก Overlaid Contour Plot จะเห็นได้ชัดว่าปัจจัยเส้นใยปานครนารายณ์ส่งผลต่อค่าความทนต่อแรงดึงมากกว่าปัจจัยเส้นใยมะพร้าว แต่เมื่ออัตราของเส้นใยปานครนารายณ์เกิน 2% จะทำให้ค่าความทนต่อแรงดึงลดลงที่สังเกตได้จากเส้นที่บสีฟ้าของรูปที่ 4.15 และปัจจัยเส้นใยมะพร้าวส่งผลต่อค่าความทนต่อแรงกระแทกมากกว่าปัจจัยเส้นใยปานครนารายณ์ โดยที่เมื่ออัตราของเส้นใยมะพร้าวเพิ่มขึ้นค่าความทนต่อแรงกระแทกจะเพิ่มขึ้นด้วยที่สังเกตได้จากเส้นปะสีแดงของรูปที่ 4.15 จากการวิเคราะห์ด้วย Overlaid Response Optimizer อัตราส่วนผสมที่ให้ค่าความทนต่อแรงดึงและค่าความทนต่อแรงกระแทกสูงสุดเท่ากับ 51.08 MPA ลำดับ ที่ความพึงพอใจโดยรวม (Composite Desirability : D) $D = 0.41$ แสดงว่าผลตอบที่ได้นั้นอยู่ในขอบเขตของการยอมรับแต่ยังไม่สมบูรณ์ และ 26.59 KJ/m² ที่ความพึงพอใจโดยรวม (Composite Desirability : D) $D = 0.71$ แสดงว่าผลตอบที่ได้นั้นอยู่ในขอบเขตของการยอมรับแต่ยังไม่สมบูรณ์ ตามลำดับ อยู่ที่อัตราส่วนผสม PLA ร้อยละ 95.22 เส้นใยปานครนารายณ์ ร้อยละ 0.78 และเส้นใยมะพร้าว ร้อยละ 4.00

4.2.5 ผลการทดสอบยืนยันผลจากการวิเคราะห์ด้วย Overlaid Response Optimizer

จากการวิเคราะห์ด้วย Overlaid Response Optimizer ได้ทำการขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบที่อัตราส่วนผสมของวัสดุเชิงประกอบผสมเสริมแรงด้วยเส้นใยปานครนารายณ์และเส้นใยมะพร้าวที่อัตราส่วนผสม PLA ร้อยละ 95.22 เส้นใยปานครนารายณ์ ร้อยละ 0.78 และเส้นใยมะพร้าว ร้อยละ 4.00 สำหรับทำการยืนยันผลการทดสอบความทนต่อแรงดึงและความทนต่อแรงกระแทก จากการวิเคราะห์ด้วย Overlaid Response Optimizer และทำการทดสอบสมมติฐานแบบการทดสอบที (T-test) เพื่อ

เปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยความทนต่อแรงดึงและความทนต่อแรงกระแทกที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย Overlaid Response Optimizer และค่าความทนต่อแรงดึงและความทนต่อแรงกระแทกที่ได้จากการยืนยันผลการทดสอบ โดยผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 4.16

ตารางที่ 4.16 ผลการทดสอบความทนต่อแรงดึงและความทนต่อแรงกระแทกในการยืนยันผลจากการวิเคราะห์ด้วย Overlaid Response Optimizer

ครั้งที่	Tensile Strength (MPa)	Impact Strength (kJ/m ²)
1	53.20	26.95
2	52.48	24.86
3	51.05	24.39
4	53.84	26.04
5	50.44	25.74
ค่าเฉลี่ย	52.20	25.60

การเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยความทนต่อแรงดึง โดยสมมติฐานสำหรับทดสอบแสดงดังต่อไปนี้

$$H_0 : \mu = 51.08$$

$$H_1 : \mu \neq 51.08$$

ผลการทดสอบทางสถิติโดยใช้โปรแกรม Minitab แสดงดังตารางที่ 4.15

ตารางที่ 4.17 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติการเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยความทนต่อแรงดึง

One-Sample T-test : Tensile Strength	
N	5
Mean	52.02
Standard Deviation	1.431
95% CI	(50.43 , 53.98)
T	1.75
P-Value	0.154

จากผลการวิเคราะห์ทางสถิติข้างต้นพบว่า ที่ระดับนัยสำคัญ (Significance Level) เท่ากับ 0.05 (กำหนด $\alpha = 0.05$) โดยค่า P-value > 0.05 จึงไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานหลัก ทำให้มีหลักฐาน

เพียงพอที่สรุปได้ว่า ไม่มีความแตกต่างกันของค่าเฉลี่ยความทนต่อแรงดึงที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย Overlaid Response Optimizer และค่าความทนต่อแรงดึงที่ได้จากการยืนยันผลการทดสอบ

การเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยความทนต่อแรงกระแทก โดยสมมติฐานสำหรับทดสอบแสดงดังต่อไปนี้

$$H_0 : \mu = 26.59$$

$$H_1 : \mu \neq 26.59$$

ผลการทดสอบทางสถิติโดยใช้โปรแกรม Minitab แสดงดังตารางที่ 4.18

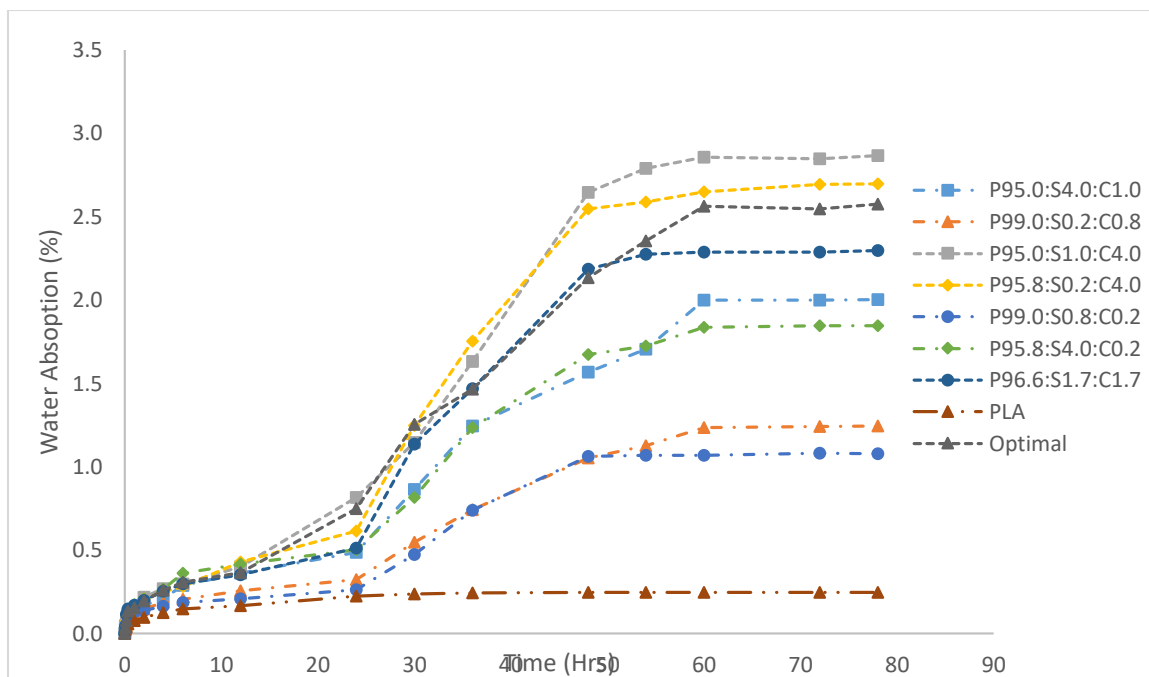
ตารางที่ 4.18 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติการเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยความทนต่อแรงกระแทก

One-Sample T-test : Impact Strength	
N	5
Mean	25.60
Standard Deviation	1.006
95% CI	(24.35 , 26.85)
T	-2.21
P-Value	0.092

จากผลการวิเคราะห์ทางสถิติข้างต้นพบว่า ที่ระดับนัยสำคัญ (Significance Level) เท่ากับ 0.05 (กำหนด $\alpha = 0.05$) โดยค่า P-value > 0.05 จึงไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานหลัก ทำให้มีหลักฐานเพียงพอที่สรุปได้ว่า ไม่มีความแตกต่างกันของค่าเฉลี่ยความทนต่อแรงกระแทกที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย Overlaid Response Optimizer และค่าความทนต่อแรงกระแทกที่ได้จากการยืนยันผลการทดสอบ

4.2.6 ผลการทดลองสมบัติการดูดซับน้ำของวัสดุเชิงประกอบผสมเสริมแรงด้วยเส้นใยป่านศรนารายณ์และเส้นใยมะพร้าว

จากการทดลองสมบัติการดูดซับน้ำของวัสดุเชิงประกอบผสมเสริมแรงด้วยเส้นใยป่านศรนารายณ์และเส้นใยมะพร้าว แสดงดังรูปที่ 4.16



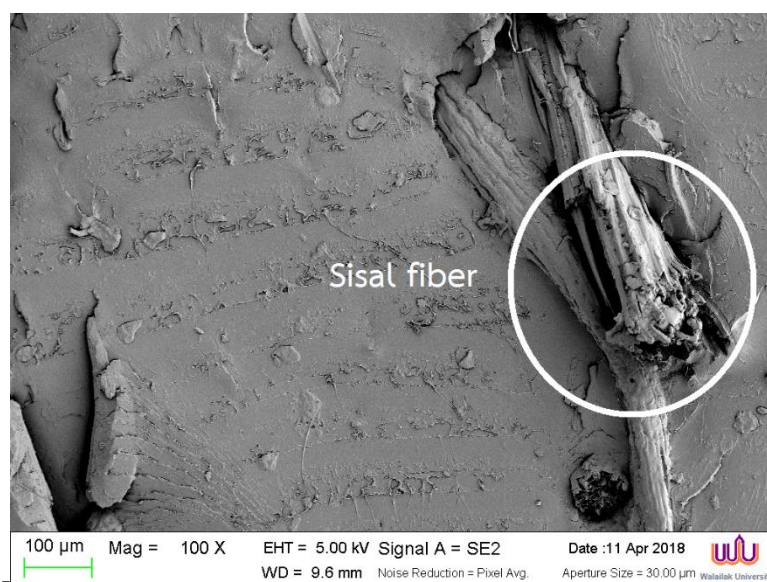
รูปที่ 4.16 การทดลองสมบัติการดูดซับน้ำของวัสดุเชิงประกอบผสมเสริมแรงด้วยเส้นใยป่านศรนารายณ์ และเส้นใยมะพร้าว

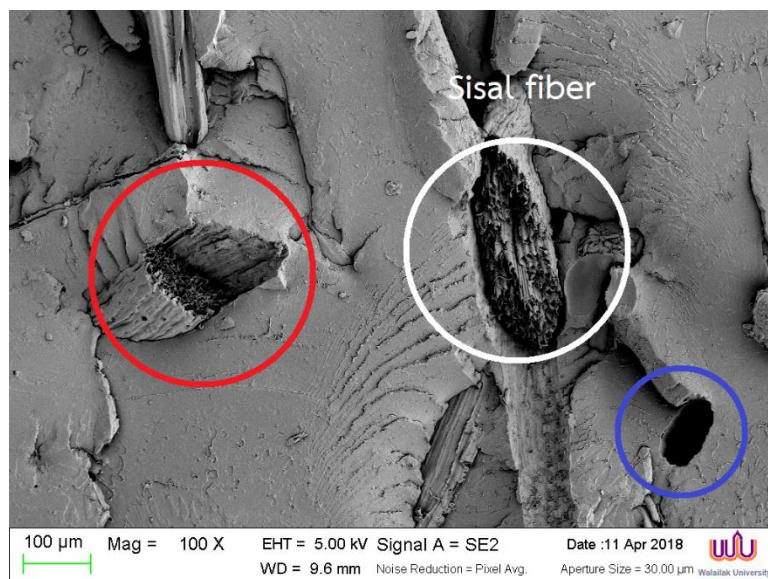
พบว่าหลังการทดสอบเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ค่าการดูดซับน้ำของพอลิแลคติกแอซิดเริ่มเข้าสู่สมดุล และมีค่าสูงสุดอยู่ที่ 0.25% ซึ่งค่าการดูดซับน้ำของวัสดุเชิงประกอบผสมทุกอัตราส่วนผสมเริ่มเข้าสู่สมดุล เมื่อทำการทดสอบเป็นเวลา 60 ชั่วโมงและมีค่าการดูดซับน้ำที่สูงกว่าพอลิแลคติกแอซิด โดยวัสดุเชิงประกอบผสม RUN 3 อัตราส่วนผสม PLA ร้อยละ 95.00 เส้นใยป่านศรนารายณ์ร้อยละ 1.0 และเส้นใยมะพร้าวร้อยละ 4.0 มีค่าการดูดซับน้ำสูงสุดที่ 2.87% และวัสดุเชิงประกอบผสม RUN 4 อัตราส่วนผสม PLA ร้อยละ 95.8 เส้นใยป่านศรนารายณ์ร้อยละ 0.2 และเส้นใยมะพร้าวร้อยละ 4.0 มีค่าการดูดซับน้ำที่ 2.70% ตามลำดับ จากผลดังกล่าวสามารถสรุปได้ว่าเมื่อทำการเสริมแรงพอลิแลคติกแอซิดด้วยเส้นใยป่านศรนารายณ์และเส้นใยมะพร้าวทำให้ค่าการดูดซับน้ำเพิ่มมากขึ้นหรือทำให้มีลักษณะชอบน้ำ เนื่องจากหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ของเส้นใยธรรมชาติที่มีมาก และเมื่อทำการเปรียบเทียบวัสดุเชิงประกอบผสม RUN 3 กับวัสดุเชิงประกอบผสม RUN 1 อัตราส่วนผสม PLA ร้อยละ 95.00 เส้นใยป่านศรนารายณ์ร้อยละ 4.0 และเส้นใยมะพร้าวร้อยละ 1.0 และ วัสดุเชิงประกอบผสม RUN 4 กับวัสดุเชิงประกอบผสม RUN 6 อัตราส่วนผสม PLA ร้อยละ 95.8 เส้นใยป่านศรนารายณ์ร้อยละ 4.0 และเส้นใยมะพร้าวร้อยละ 0.2 พบว่าเส้นใยมะพร้าวมีผลต่อค่าการดูดซับน้ำมากกว่าเส้นใยป่านศรนารายณ์ โดยเมื่ออัตราของเส้นใยมะพร้าวมากจะทำให้ค่าการดูดซับน้ำมากขึ้นด้วย และจะเห็นได้ว่าลักษณะของการดูดซับน้ำของวัสดุเชิงประกอบผสมทุกอัตราส่วนมีการดูดซับน้ำที่ต่ำในช่วง 24 ชั่วโมงแรก เนื่องจากความชื้นจะแทรกซึมผ่าน

พอลิแลคติกแอซิดที่พื้นผิวนอกเป็นลำดับแรก[52] ซึ่งจะใช้เวลาประมาณการเข้าสู่สมดุลของพอลิแลคติกแอซิด หลังจากนั้นเมื่อความชื้นแทรกซึมจนถึงเส้นใยที่มีรูพรุนและมีสมบัติชอบน้ำ ทำการดูดซึมน้ำของวัสดุเชิงประกอบผสมเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เมื่อเทียบกับช่วงแรกของการทดสอบจนถึงจุดที่เข้าสู่สมดุล

4.2.7 ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบผสมพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใยป่านศรนารายณ์และเส้นใยมะพร้าว

จากการวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาบริเวณรอยแตกหักของวัสดุเชิงประกอบผสมพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใยป่านศรนารายณ์และเส้นใยมะพร้าวที่อัตราส่วนจากการวิเคราะห์ Overlaid Response Optimizer โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยาย 100 เท่า แสดงดังรูปที่ 4.17



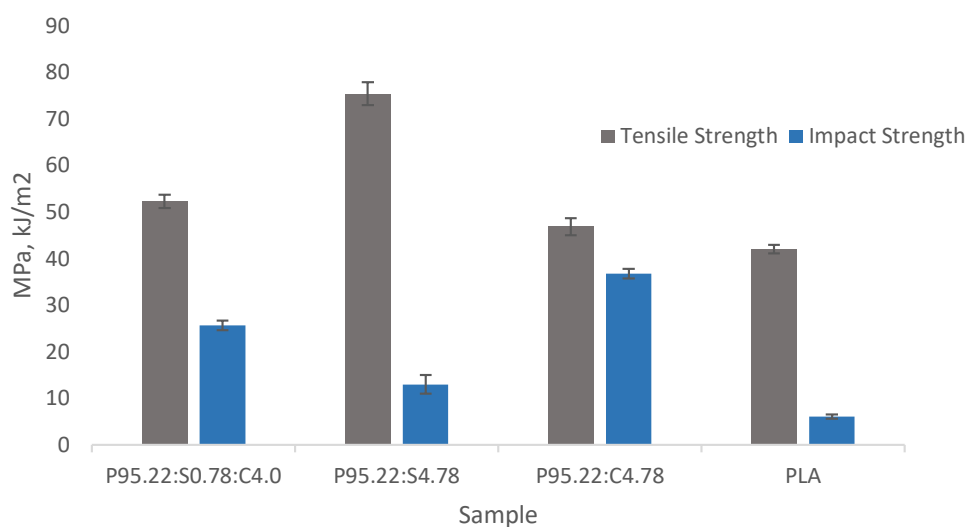


รูปที่ 4.17 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาบริเวณรอยแตกหักของวัสดุเชิงประกอบผสมพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใยป่านศรนารายณ์และเส้นใยมะพร้าว

พบลักษณะของเส้นใยมีการฉีกขาดของเส้นใยเมื่อถูกแรงกระแทกจากการทดสอบ สังเกตจากวงกลมสีแดง ซึ่งเป็นรอยการยึดเกาะกันระหว่างเมทริกซ์พอลิแลคติกแอซิดกับผิวของเส้นใยเสริมแรงที่หลุดออกจากกันและเกิดการขาดของเส้นใยเสริมแรง ที่สามารถบ่งบอกได้ว่าวัสดุเชิงประกอบผสมเสริมแรงด้วยเส้นใยป่านศรนารายณ์และเส้นใยมะพร้าวมีสมบัติเชิงกลที่สูงขึ้น เนื่องจากการถ่ายโอนแรงกระทำจากเมทริกซ์ไปยังเส้นใยเสริมแรง[53] และยังพบว่ามีการหลุดของเส้นใยเสริมแรงเมื่อได้รับแรงกระแทกจากการทดสอบ เนื่องจากการยึดเกาะที่ไม่สมบูรณ์ระหว่างเมทริกซ์พอลิแลคติกแอซิดและเส้นใยเสริมแรงเกิดเป็นรูขึ้น โดยสังเกตได้จากวงกลมสีน้ำเงิน

4.2.8 ผลการเปรียบเทียบการเสริมแรงด้วยเส้นใยธรรมชาติสองชนิดและการเสริมแรงด้วยเส้นใยธรรมชาติชนิดเดียวของวัสดุเชิงประกอบพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใยธรรมชาติ

จากผลการทดสอบความทนต่อแรงดึงและความทนต่อแรงกระแทกของวัสดุเชิงประกอบผสมพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใยป่านศรนารายณ์และเส้นใยมะพร้าว (P95.22 : S0.78 : C4.0) เทียบกับวัสดุเชิงประกอบพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใยป่านศรนารายณ์ (P95.22 : S4.78) และวัสดุเชิงประกอบพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใยมะพร้าว (P95.22 : S4.78) ที่อัตราเท่ากับอัตราเส้นใยเสริมแรงทั้งสองชนิดที่ได้จากการวิเคราะห์ Overlaid Response Optimizer หรือที่อัตราเส้นใยเสริมแรง 4.78% แสดงดังรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18 ผลทดสอบความทนต่อแรงดึงและความทนต่อแรงกระแทกของ P95.22 : S0.78 : C4.0, P95.22 : S4.78, P95.22 : S4.78 และ PLA

พบว่าอัตราส่วนผสมที่ดีที่สุดจากการวิเคราะห์ด้วย Overlaid Response Optimizer แสดงสมบัติเชิงกลที่สอดคล้องกับคุณสมบัติของวัสดุเชิงประกอบผสมที่มีการเสริมคุณสมบัติซึ่งกันและกันของเส้นใยเสริมแรงสองชนิด โดยที่พอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใยปานศรนารายณ์ให้ค่าความทนต่อแรงดึงมากที่สุดที่ 75.36 MPa แต่ให้ค่าความทนต่อแรงกระแทกต่ำที่ 12.94 kJ/m² ซึ่งจะเห็นได้ว่าที่ปริมาณเส้นใยปานศรนารายณ์นี้ทำให้ค่าความทนต่อแรงดึงเพิ่มขึ้นต่างจากผลการวิเคราะห์ค่า Coefficient ของผลตอบสนองความทนต่อแรงดึง เนื่องจากปริมาณเส้นใยที่มากขึ้นทำให้มีการยึดเกาะกับพอลิแลคติกแอซิดได้ดี ทำให้มีการรับและกระจายแรงได้ดีขึ้น[50] แต่ในทางกลับกันพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใยมะพร้าวให้ค่าความทนต่อแรงกระแทกมากที่สุดที่ 36.71 kJ/m² แต่ให้ค่าความทนต่อแรงดึงต่ำที่ 46.78 MPa จากผลการทดลองสามารถยืนยันได้ว่าการเสริมแรงวัสดุเชิงประกอบพอลิแลคติกแอซิดด้วยเส้นใยเสริมแรงชนิดเดียว จะให้สมบัติเชิงกลเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดในสมบัติเชิงกลเดี่ยวเท่านั้น โดยเสริมแรงวัสดุเชิงประกอบพอลิแลคติกแอซิดด้วยเส้นใยปานศรนารายณ์จะให้ค่าความทนต่อแรงดึงที่สูง แต่ไม่ได้ส่งผลให้ค่าความทนต่อแรงกระแทกเพิ่มขึ้นมาก และการเสริมแรงด้วยเส้นใยมะพร้าวจะให้ค่าความทนต่อแรงกระแทกที่สูง แต่ไม่ได้ส่งผลให้ค่าความทนต่อแรงดึงเพิ่มขึ้นมาก ซึ่งเมื่อทำการเสริมแรงพอลิแลคติกแอซิดด้วยเส้นใยปานศรนารายณ์และเส้นใยมะพร้าวทำให้มีการเสริมสมบัติเชิงกลซึ่งกันและกัน โดยที่ค่าความทนต่อแรงดึงและค่าความทนต่อแรงกระแทกสูงขึ้น เมื่อเทียบกับพอลิแลคติกแอซิด

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาอัตราส่วนผสมของวัสดุเชิงประกอบผสมเสริมแรงด้วยเส้นใยป่าน ทรนารายณ์และเส้นใยมะพร้าวที่เหมาะสม โดยประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองแบบผสม (Mixture design) สำหรับการออกแบบอัตราส่วนผสมของวัสดุเชิงประกอบผสมเสริมแรงด้วยเส้นใยป่าน ทรนารายณ์ และเส้นใยมะพร้าว และวิเคราะห์อิทธิพลของปัจจัย ร่วมกับการวิเคราะห์พื้นผิวตอบ (Response Surface) และการวิเคราะห์ผลตอบที่เหมาะสม (Response Optimization) โดยทำการยืนยันผลและการเปรียบเทียบผลการทดลองด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA) ซึ่งโปรแกรมการออกแบบการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลองได้แก่ Minitab

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองพบว่า การประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองแบบผสม สำหรับการออกแบบอัตราส่วนผสมของวัสดุเชิงประกอบผสมเสริมแรงด้วยเส้นใยป่าน ทรนารายณ์และเส้นใยมะพร้าว สามารถวิเคราะห์อิทธิพลของแต่ละปัจจัยที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลได้แก่ ค่าความทนต่อแรงดึง และค่าความทนต่อแรงกระแทก และสามารถวิเคราะห์หาระดับของแต่ละปัจจัยที่เหมาะสมที่ให้ค่าความทนต่อแรงดึง และค่าความทนต่อแรงกระแทกสูงสุด

ผลการวิเคราะห์ความทนต่อแรงดึงสูงสุดของวัสดุเชิงประกอบพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใยป่าน ทรนารายณ์และเส้นใยมะพร้าวด้วยโปรแกรม Minitab จะได้ค่าความทนต่อแรงดึงเท่ากับ 58.09 MPa ที่อัตราส่วนผสม PLA ร้อยละ 98.58 เส้นใยป่าน ทรนารายณ์ร้อยละ 1.22 และเส้นใยมะพร้าว ร้อยละ 0.20

ผลการวิเคราะห์ความทนต่อแรงกระแทกสูงสุดของวัสดุเชิงประกอบผสมเสริมแรงด้วยเส้นใยป่าน ทรนารายณ์และเส้นใยมะพร้าวจะได้ค่าความทนต่อแรงกระแทกเท่ากับ 30.14 kJ/m² ที่อัตราส่วนผสม PLA ร้อยละ 95.00 เส้นใยป่าน ทรนารายณ์ร้อยละ 1.08 และเส้นใยมะพร้าวร้อยละ 3.92

ผลการวิเคราะห์ผลรวมความทนต่อแรงดึงและความทนต่อแรงกระแทกสูงสุดของวัสดุเชิงประกอบพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใยป่าน ทรนารายณ์และเส้นใยมะพร้าว จะได้ค่าความทนต่อแรงดึงเท่ากับ 51.08 MPa และค่าความทนต่อแรงดึงเท่ากับ 26.59 kJ/m² ที่อัตราส่วนผสม PLA ร้อยละ 95.22 เส้นใยป่าน ทรนารายณ์ร้อยละ 0.78 และเส้นใยป่าน ทรนารายณ์ร้อยละ 4.00

เมื่อนำอัตราส่วนผสมที่ได้จากการวิเคราะห์ข้างต้นมาขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบผสมพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใยป่าน ทรนารายณ์และเส้นใยมะพร้าว พบว่าได้ค่าความทนต่อแรงดึงและค่าความทนต่อแรงกระแทกไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์หรือ $\alpha = 0.05$

ผลการทดลองสมบัติการดูดซับน้ำของวัสดุเชิงประกอบผสมเสริมแรงด้วยเส้นใยป่านครนารายณ์ และเส้นใยมะพร้าว พบว่าการเสริมแรงด้วยเส้นใยธรรมชาติส่งผลให้ค่าการดูดซึมน้ำเพิ่มมากขึ้น โดยที่เสริมแรงด้วยเส้นใยมะพร้าวให้สมบัติการดูดซึมน้ำที่มากกว่าเส้นใยป่านครนารายณ์ และวัสดุเชิงประกอบผสมทุกอัตราส่วนเข้าสู่สมดุลเมื่อเวลา 60 ชั่วโมง

ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบผสมพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใยป่านครนารายณ์และเส้นใยมะพร้าว พบว่าวัสดุเชิงประกอบผสมเชิงแรงด้วยเส้นใยป่านครนารายณ์และเส้นใยมะพร้าวมีสมบัติเชิงกลที่สูงขึ้น เนื่องจากการถ่ายโอนแรงกระทำจากเมทริกซ์ไปยังเส้นใยเสริมแรง[53]

ผลการเปรียบเทียบการเสริมแรงด้วยเส้นใยธรรมชาติสองชนิดและการเสริมแรงด้วยเส้นใยธรรมชาติชนิดเดียวของวัสดุเชิงประกอบพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใยธรรมชาติ พบว่าเมื่อทำการเสริมแรงพอลิแลคติกแอซิดด้วยเส้นใยป่านครนารายณ์และเส้นใยมะพร้าวทำให้มีการเสริมสมบัติเชิงกลซึ่งกันและกัน โดยที่ค่าความทนต่อแรงดึงสูงขึ้น เนื่องจากการเสริมแรงด้วยเส้นใยป่านครนารายณ์และค่าความทนต่อแรงกระทำสูงขึ้น เนื่องจากการเสริมแรงด้วยเส้นใยมะพร้าว

เอกสารอ้างอิง

- [1] Lima L.-T., Aurasb R. and Rubinob M., “Processing technologies for poly(lactic acid)” **Journal of Progress in Polymer Science**, Vol. 33, 2008. Pp. 820-852
- [2] Huda M.S., Drzal L.T., Misra M. and Mohanty A.K., “Wood-Fiber-Reinforced Poly(lactic acid) Composites: Evaluation of the Physicomechanical and Morphological Properties” **Journal of Applied Polymer Science**, Vol. 102, 2006. Pp. 4856-4869
- [3] Lunt J., “Large-scale production, properties and commercial applications of polylactic acid polymers” **Journal of Polymer Degradation and Stability**, Vol. 59, 1998. Pp. 145-152
- [4] Mirbagheri J., Tajvidi M., Hermanson J.C. and Ghasemi Ismaeil I., “Tensile Properties of Wood Flour/Kenaf Fiber Polypropylene Hybrid Composites” **Journal of Applied Polymer Science**, Vol. 105, 2007. Pp. 3054-3059
- [5] Lee S.G., Choi S.S., Park W.H. and Cho D., “Characterization of surface modified flax fibers and their biocomposites with PHB” **Journal of Macromol. Symp.**, Vol. 197, 2003. Pp. 89-99
- [6] Bravo A., Toubal L., Koffi D. and Erchiqui F., “Development of novel green and biocomposite materials: Tensile and flexural properties and damage analysis using acoustic emission” **Journal of Materials and Design**, Vol. 66, 2015. Pp. 16-28
- [7] Stuarda T., Liub Q., Hughesb M., McCalla R.D., Sharmaa H.S.S. and Nortonb A. “Structural biocomposites from flax—Part I: Effect of bio-technical fibre modification on composite properties” **Journal of Composites: Part A**, Vol. 37, 2006. Pp. 393-404
- [8] Li Y., Hu C. and Yu Y., “Interfacial studies of sisal fiber reinforced high density polyethylene (HDPE) composites” **Journal of Composites: Part A**, Vol. 39, 2008. Pp. 570-578

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [9] Liu W., Misra M., Askeland P., Drzal L.T. and Mohanty A.K., “‘Green’ composites from soy based plastic and pineapple leaf fiber: fabrication and properties evaluation” **Journal of Polymer**, Vol. 46, 2005. Pp. 2710-2721
- [10] Haque M.M., Hasan M., Islam M.S. and Ali M.E., “Physico-mechanical properties of chemically treated palm and coir fiber reinforced polypropylene composites” **Journal of Bioresource Technology**, Vol. 100, 2009. Pp. 4903-4906
- [11] Keller A., “Compounding and mechanical properties of biodegradable hemp fibre composites” **Journal of Composites Science and Technology**, Vol. 63, 2003. Pp. 1307-1316
- [12] Kim S., Moon J., Kim G. and Ha. C., “Mechanical properties of polypropylene/natural fiber composites: Comparison of wood fiber and cotton fiber” **Journal of Polymer Testing**, Vol. 27, 2008. Pp. 801-806
- [13] Olubanwo A.O. and Karadelis J.N., “Applied mixture optimization techniques for paste design of bonded roller-compacted fibre reinforced polymer modified concrete (BRCFRPMC) overlays” **Journal of Materials and Structures**, Vol. 48, 2015. Pp. 2023-2042
- [14] Sha C., Kin-tak L., Tao L., Yongqing Z., Pou-Man L. and Yansheng Y., “Mechanical and thermal properties of chicken feather fiber/PLA green composites” **Journal of Composite: Part B**, Vol. 40, 2009. Pp. 650-654
- [15] Bax B. and Mussig J., “Impact and tensile properties of PLA/Cordenka and PLA/flax composites” **Journal of Composites Science and Technology**, Vol. 68, 2008. Pp. 1601-1607
- [16] Oksmana K., Skrifvarsb M. and Selinc J.-F., “Natural fibres as reinforcement in polylactic acid (PLA) composites” **Journal of Composites Science and Technology**, Vol. 63, 2003. Pp. 1317-1324

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [17] Silva R.V., Spinelli D., Bose Filho W.W., Claro Neto S., Chierice G.O. and Tarpani J.R., “Fracture toughness of natural fibers/castor oil polyurethane composites” **Journal of Composites Science and Technology**, Vol. 66, 2006. Pp. 1328-1335
- [18] Alavudeen A., Rajini N., Karthikeyan S., Thiruchitrambalam M. and Venkateshwaren N., “Mechanical properties of banana/kenaf fiber-reinforced hybrid polyester composites: Effect of woven fabric and random orientation” **Journal of Materials and Design**, Vol. 66, 2015. Pp. 246-257
- [19] Yusoffa R. B., Takagib H. and NakagaitobaGraduate A. N., “Tensile and flexural properties of polylactic acid-based hybrid greencomposites reinforced by kenaf, bamboo and coir” **Journal of Industrial Crops and Products**, Vol. 94, 2016. Pp. 562-573
- [20] Shanmugam D. and Thiruchitrambalam M., “Static and dynamic mechanical properties of alkali treated unidirectional continuous Palmyra Palm Leaf Stalk Fiber/jute fiber reinforced hybrid polyester composites” **Journal of Materials and Design**, Vol. 50, 2013. Pp. 533-542
- [21] Milanese A. C., Hilario Cioffi M. O. and Cornelis Voorwald H. J., “Mechanical behavior of natural fiber composites” **Journal of Procedia Engineering**, Vol. 10, 2011. Pp. 2022-2027
- [22] Venkateshwaran N., ElayaPerumal A., Alavudeen A. and Thiruchitrambalam M., “Mechanical and water absorption behaviour of banana/sisal reinforced hybrid composites” **Journal of Materials and Design**, Vol. 32, 2011. Pp. 4017-4021
- [23] Ochi S., “Mechanical properties of kenaf fibers and kenaf/PLA composites” **Journal of Mechanics of Materials**, Vol. 40, 2018. Pp. 446-452
- [24] Memona A. and Nakaib A., “Fabrication and Mechanical Properties of Jute Spun Yarn/PLA Unidirection Composite by Compression Molding” **Journal of Energy Procedia**, Vol. 34, 2013. Pp. 830-838

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [25] Mohanty A. K., Misra M., and Drzal L. T., “Sustainable Bio-Composites from Renewable Resources: Opportunities and Challenges in the Green Materials World” **Journal of Polymers and the Environment**, Vol. 10, 2012. Pp. 19-26
- [26] Gupta B., Revagadea N. and Hilborn J., “Poly(lactic acid) fiber: An overview” **Journal of Progress In Polymer Science**, Vol. 32, 2007. Pp. 455-482
- [27] Ahmad F., Choi H. S. and Park M. K., “A Review: Natural Fiber Composites Selection in View of Mechanical, Light Weight, and Economic Properties” **Journal of Macromolecular Materials and Engineering**, Vol. 300, 2015. Pp. 10-24
- [28] Thakura V. K. and Thakurb M. K., “Processing and characterization of natural cellulose fibers/thermoset polymer composites” **Journal of Carbohydrate Polymers**, Vol. 109, 2014. Pp. 102-117
- [29] Kabir M.M., Wang H., Lau K.T. and Cardona F., “Chemical treatments on plant-based natural fibre reinforced polymer composites: An overview” **Journal of Composites: Part B**, Vol. 43, 2012. Pp. 2883-2892
- [30] Mukhopadhyay S., Figueiro R., Arpac Y. and Sentürk U., “Banana Fibers – Variability and Fracture Behaviour” **Journal of Engineered Fibers and Fabrics**, Vol. 3, 2008. Pp. 39-45
- [31] Li Y., Mai Y.W. and Ye L., “Sisal fibre and its composites: a review of recent developments” **Journal of Composites Science and Technology**, Vol. 60, 2000. Pp. 2037-2055
- [32] Amiri A., Triplett Z., Moreira A., Brezinka N. and Alcock M. “Standard density measurement method development for flax fiber” **Journal of Industrial Crops and Products**, Vol. 96, 2017. Pp. 196-202
- [33] Khan M.A., Ganster J. and Fink H.P., “Hybrid composites of jute and man-made cellulose fibers with polypropylene by injection moulding” **Journal of Composites: Part A**, Vol. 40, 2009. Pp. 846-851

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [34] “Shaping Processes for Plastics” [Online]. Available :
<https://slideplayer.com/slide/7103990/>. 2018
- [35] “Tensile Testing” [Online]. Available :
<https://www.pinterest.com/pin/303570831112676115/?lp=true>. 2018
- [36] “IMPACT TESTING AND DUCTILE-BRITTLE TRANSITION” [Online]. Available :
<http://polymerdatabase.com/polymer%20physics/ImpactTest.html>. 2018
- [37] Shi F., Wang Z. and Zhang X., “Combining a layer-by-layer assembling technique with electrochemical deposition of gold aggregates to mimic the legs of water striders” **Journal of Advanced Materials**, Vol. 17, 2005.
Pp. 1005-1009
- [38] Shah A.A., Hasan F., Hameed A. and Ahmed S., “Biological degradation of plastics: A comprehensive review” **Journal of Biotechnology Advances**, Vol. 26, 2008. Pp. 246-265
- [39] “Coconut: History and Cultivation of Coconut” [Online]. Available :
<https://www.pinterest.com/pin/303570831112676115/?lp=true>. 2018
- [40] Bezerra M.A., Santelli R.E., Oliveira E.P., Villar L.S. and Escalera L.A., “Response surface methodology (RSM) as a tool for optimization in analytical chemistry” **Journal of Talanta**, Vol. 76, 2008. Pp. 965-977
- [41] Sanin Y.B., Burnak N. and Demirtas E., “Mixture Design: A Review of Recent Applications in the Food Industry” **Journal of Pamukkale Univ Muh Bilim Derg**, Vol. 22, 2016. Pp. 297-304
- [42] “What are individual desirability and composite desirability?” [Online]. Available :
<https://support.minitab.com/en-us/minitab/18/help-and-how-to/modeling-statistics/using-fitted-models/supporting-topics/response-optimization/what-are-individual-desirability-and-composite-desirability/>. 2018
- [43] “Stress-Strain Curves in Simulation” [Online]. Available :
[://www.gsc-3d.com/articles/2017/06/stress-strain-curves-simulation](http://www.gsc-3d.com/articles/2017/06/stress-strain-curves-simulation). 2017

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [44] ASTM International. 2015. **Standard Test Methods for Determining the Izod Pendulum Impact Resistance of Plastics**. West Conshohocken
- [45] “MICROSCOPE DIAGRAM LABELED UNLABELED AND BLANK PARTS OF A” [Online]. Available : <https://www.gsc-3d.com/articles/2017/06/stress-strain-curves-simulation>. 2018
- [46] “Knowledge Optical Microscopes” [Online]. Available : <https://www.olympus-ims.com/sv/microscope/terms/feature10/>. 2016
- [47] “Field Emission Scanning Electron Microscope, FESEM” [Online]. Available : <http://onlineresize.club/pixie-club.html>. 2017
- [48] Rezaei F., Yunus R., Ibrahim N.A. and Mahdi E.S., “Development of Short-Carbon-Fiber-Reinforced Polypropylene Composite for Car Bonnet” **Journal of Polymer-Plastics Technology and Engineering**, Vol. 47, 2008. Pp. 351-357
- [49] Bader M.G. “The Composites Market” in in **Comprehensive Composite Materials**, A. Kelly and C. Zweben, Eds. Amsterdam: Elsevier, 2000, pp. 1-13.
- [50] จิรัชญา ปรีดาสกุล. 2557. “การศึกษาสมบัติเชิงความร้อนเชิงกลและทางกายภาพของวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลกติกแอซิด เสริมแรงด้วยเส้นใยธูปฤาษี.” วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ ภาควิชา วิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- [51] อาติละย์ ศิริวัลลภ. 2558. “วัสดุเชิงประกอบของโพลีพอลิสไตรีนรีไซเคิลและเส้นใยธรรมชาติ.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- [52] ชาตรี หอมเขียว. 2558. “ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมการดูดซับน้ำของวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้.” **วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม**. 11(2) : 94-111.
- [53] รังสิมา ชลคุป, รัตนา ตันทเทอดธรรม และ สุชาติ อูซชิน. 2553. “การศึกษาสมบัติเชิงกลของคอมโพสิตของเส้นใยสับปะรดกับเอทิลีนไวไนลอะซิเตต.” หน้า 1-9. ใน **การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 48**. กรุงเทพฯ : สาขาอุตสาหกรรมเกษตร, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์



iceast 2018

The 4th International Conference on Engineering,
Applied Sciences and Technology

Submission Deadline: February 28, 2018

July 4-7, 2018

**Swissôtel Resort Phuket Patong Beach
Phuket, Thailand**

iceast2018@kmitl.ac.th
www.iceast.org

CALL FOR PAPERS

**1 Industrial
Materials
Manufacturing
Engineering**

**2 Mechanical
Mechatronics
Civil
Engineering**

**3 Food
Chemical
Agricultural
Engineering**

**4 Telecommunications
Computer Science
Instrumentation and Control
Electrical
Electronic
Engineering**

MATEC Web of Conference
(Indexed by Scopus)

Proceedings Volume in
IEEE Xplore Digital Library
(Indexed by EI Compindex and Scopus)



Poly(lactic acid) hybrid natural fiber composites reinforced with sisal and coir

Ariya Praemettha¹ and Wipoo sriseubsai^{1*}

¹Industrial Engineering Department, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand

Abstract. The hybrid natural fiber composites were prepared by using polylactic acid (PLA) as a matrix. sisal and coir were reinforcement. The combinations of composite material were designed based on the mixture design to investigate the mechanical properties: tensile strength, impact strength, and water absorption. The water absorption were performed to investigate the microstructures of composites. The results showed that the proportion of sisal and coir fiber in composites caused the decreasing tensile strength, in contrast increasing the impact strength and the water absorption. The acceptable combination of 95% (PLA), 1.08 % (sisal) and 3.92% (coir) by volume was the optimum proportion of the mixture in this study.

1 Introduction

The plastic is a polymer derived from the chemical synthesis of the substrate from the petrochemical industry, cause the plastic difficult to decompose. The growing environmental problem. Thus, the development of biodegradable plastics that based on natural resources. Polylactic acid (PLA) is a biodegradable plastic which is beginning to be produced from fermentation of corn to lactic acid and subsequent chemical polymerization. However, PLA has many disadvantages such as poor commercial availability and processability, low toughness and moisture stability and high price.[1, 2] Many results have shown that PLA is suitable as a matrix for the inserting of fibers in composites. Natural fibers have more advantages than synthetic fibers such as low weight biodegradable, high strength and stiffness. Most studies on single natural fiber reinforced composites have been reported extensively, though providing much variability in strength properties such as flax[1], but reports on the combination of different kind of natural fibers reinforced composites. Hybrid fiber composites are defined as composites produced by incorporation of more than one type of fibers in the same matrix offer some advantage over the use single natural fiber. Venkateshwaran et.al [3] studied the mechanical and water absorption of raw sisal and banana fiber reinforced epoxy hybrid composites, results show that the mechanical properties are increase and the water absorption is decreased.

Mixture experiments are used for response surface experiments in which the product under analysis is made up of several components of a mixture and the components are independent of all components. The fact that the proportions of the components must sum to 100%. In these techniques, the primary approach is to

optimize a mixture whose properties depend on the proportions of the component materials. Adegoke and John[4] applied mixture design for proportioning and designing the paste component of a bonded roller compacted fiber reinforced polymer modified concrete.

In this work, developed hybrid composites of short sisal and coir reinforcement fibers in a PLA matrix by compression molding. This study is to investigate the effect of sisal and coir fibers content on the mechanical and water absorption of hybrid fiber composites. The proportions among the components of the composites were optimized by using a constrained mixture design.

2 Material and methodology

2.1. Material

2.1.1 Polymer polylactic acid

PLA 4043D from NatureWorks by the company BC POLYMER MARKETING was used as the matrix composite material. The physical properties have a specific gravity of 1.24 g/cm³, a melt temperature of 210 °C and a glass transition temperature of 55-60 °C. The mechanical property has a tensile yield strength of 60 MPa, a tensile strength at break of 53 MPa, a tensile modulus of 3.6 GPa and a tensile elongation of 6%.

2.1.2 Reinforcement fiber

The Sisal cultivated in Phetchaburi, Thailand. Sisal fibers with an average diameter of 127 μm and density of 1.16 g/cm³. Coir fibers were obtained from TT&G fiber Co., Ltd. Thailand with an average diameter of 213 μm and density of 1.39 g/cm³.

2.2 Methodology

2.2.1 Measurement of properties of reinforcement fiber

The cross-section area of fibers was observed using a digital microscope (Axialab, ZEISS). The cross-section area was estimated with the captured area and recorded by SemAfore5.21 software. The density of fibers was the measurement by using an electronic densimeter (BSA series, Scientific Promotion Co., Ltd.) following the Archimedes method. The weight of the fiber in the air was recorded as M_{air} . Then the fiber was placed in the weighing basket and the submerged weight was recorded as $M_{submerged}$. With the known density of the fluid, ρ_{fluid} . The density of fiber, ρ_{fiber} was represented as following[5]:

$$\text{The density of fiber} = \frac{M_{air}}{M_{air} - M_{submerged}} \times \rho_{fluid}$$

2.2.2 Reinforcement fiber tensile test

The single fiber tensile testing prepared according to ASTM D3379. The fibers tensile test were determined using a universal testing machine (A6-X, SHIMADZU) with a 10 kN load-cell, the gauge length was 25 mm by a crosshead speed of 1 mm/min. A number of 25 specimens were tested.

2.2.3 Experimental design and statistical analysis

In this paper, the constrained mixture design was used to evaluate the effect of the amount of PLA (X_1 ,%), sisal (X_2 ,%) and coir (X_3 ,%) by volume on the responses tensile strength, Impact strength and water absorption. Mixture constrained is the total of the component of the mixture is 100%. The factors and levels of the constrained mixture design were outlined in Table 1. Design was generated by using Minitab 17 software. The 7-run of the constrained mixture design is shown in Table. 2 and Fig. 1 Analysis of variance (ANOVA) and statistical analysis was performed using Minitab 17.

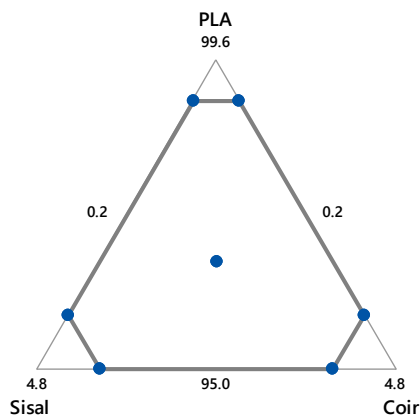


Fig. 1. The constrained mixture design plot in proportions of PLA, sisal, and coir

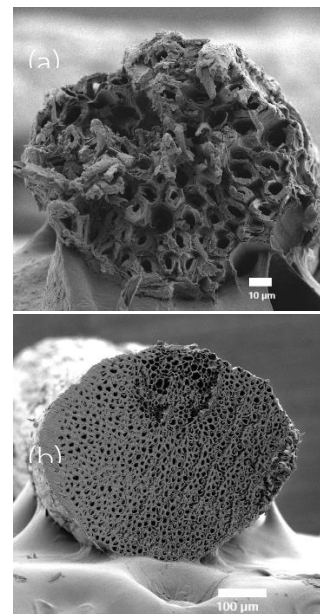


Fig. 2 Cross-sectional view of (a) sisal and (b) coir

Table. 1 Component bounds specified in amount.

Component	Lower	Upper	Constraints
PLA (X_1)	95	99	$95 \leq X_1 \leq 99$
Sisal (X_2)	0.2	4	$X_2 + X_3 \leq 0.5$
Coir (X_3)	0.2	4	

2.2.4 Preparation of composite

PLA and short fibers were dried in an oven at 60 °C for 6 hr. Compounding of the composites was using an internal mixer (MX75, Chareon TNT co., LTD.) at 190 °C for 5 min, 40 rpm and cut into pieces using plastic crusher machine. Composites pellets were dried in the oven at 100 °C for 2 hr. Samples of the composites were compression molded in a compression machine (PR2D-W300L350-PM-WCL-HMI, Chareon TNT co., LTD.). The procedure of hot pressing used preheating a 190 °C for 1 min followed by compressing for 3 min at same temperature, and subsequent cooling under pressure for 10 min.

2.2.4 Mechanical testing

The tensile testing prepared according to ASTM D628 were using a universal testing machine (A6-X, SHIMADZU). The crosshead speed used was of 50 mm/min, and the tests were performed at room temperature. A number of 5 specimens were tested. The izod impact strength according to ASTM D256 were using a impact machine (QC-639G, COMETECH TESTING MACHINES). A number of 5 specimens were

Table. 2 Experimental Runs of Mixture design and responses.

Run order	PLA	Sisal	Coir	Tensile strength (MPa)	Impact strength (KJ/m ²)	Water absorption (%)
1	95.0	4.0	1.0	43.99 ± 5.52	24.69 ± 4.18	0.39 ± 0.20
2	99.0	0.2	0.8	57.24 ± 1.55	4.79 ± 0.64	0.32 ± 0.04
3	95.0	1.0	4.0	51.10 ± 4.07	29.96 ± 6.15	0.62 ± 0.09
4	95.8	0.2	4.0	52.16 ± 3.99	17.65 ± 1.59	0.54 ± 0.07
5	99.0	0.8	0.2	56.74 ± 2.55	8.32 ± 3.19	0.26 ± 0.06
6	95.8	4.0	0.2	50.97 ± 2.09	15.52 ± 1.22	0.50 ± 0.16
7	96.6	1.7	1.7	52.87 ± 2.10	11.83 ± 3.47	0.51 ± 0.13

tested. Water absorptions prepared according to ASTM D570. The dried specimens were immerse in distilled water and maintained at 25 °C for 24 hour. A number of 3 specimens were tested. The water absorption of composites was determined represented as following[6]:

$$\text{Water absorption} = \frac{\text{Wet weight} - \text{Dry weight}}{\text{Dry weight}} \times 100$$

3 Results

3.1 Physical properties of reinforcement fibers

The physical properties of sisal fiber were tensile strength 765-1095 MPa, elongation at break 5.5-6.6 %. The physical properties of coir fiber were tensile strength 54-80 MPa, elongation at break 27-43 %. The sisal and coir fibers have high specific strength and stiffness that can be used as a reinforcing material in polymeric resin matrices to make useful structural composite materials. The SEM micrographs of densified and porous structures of sisal and coir fibers are shown in Fig. 2

3.2 Statistical analysis of models

The experimental data of tensile strength, Impact strength and water absorption are presented in Table 2. All data were fitted to quadratic models. The results of ANOVA that analysis from tensile strength, Impact strength and water absorption are presented in Table 3 and 4 The P-values associated with regression models in each response is less than 0.05, indicating that the quadratic models are highly significant.

Table. 3 ANOVA for tensile strength

Source	DF	Adj SS	Adj MS	P-value
Regression	5	331.39	66.28	< 0.000
Linear	2	25.97	12.99	0.032
Quadratic	3	35.02	11.67	0.029

3.3 Tensile strength of hybrid composites

The mixture contour plot of tensile strength showed that sisal and coir fibers had the smallest effect on

tensile strength compared to PLA (Fig. 3). The tensile strength slowly decreased with the increase of sisal

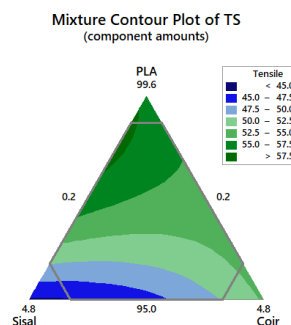
Table. 4 ANOVA for Impact strength

Source	DF	Adj SS	Adj MS	P-value
Regression	5	1425.55	285.11	< 0.000
Linear	2	193.36	96.68	< 0.000
Quadratic	3	255.49	85.16	< 0.000

and coir fibers content. This may be due to poor interfacial adhesion between the polymer matrix and sisal and coir fibers. This is a general spectacle in incompatible composites with different characteristics of hydrophobicity of the polymer matrix and hydrophilicity of the sisal and coir fibers[7]. The hybrid composites with the highest tensile strength values 58.09 MPa were obtained at a combination of PLA:sisal:coir(% by volume) = 98.58:1.22:0.20.

3.4 Impact strength of hybrid composites

In terms of impact strength sisal and coir had the greatest effect on impact strength values in the hybrid composites (Fig. 4). It can be suggested that increasing sisal and coir fibers content in the mixture would result in improved impact strength values for hybrid composites. The relative impact strength shows an increment with respect to that of the matrix. The hybrid composites with the highest impact strength values 30.14 KJ/m² were obtained at a combination of PLA: sisal:coir(%) = 95.00:1.08:3.92.

**Fig. 3** Mixture contour plot of tensile strength

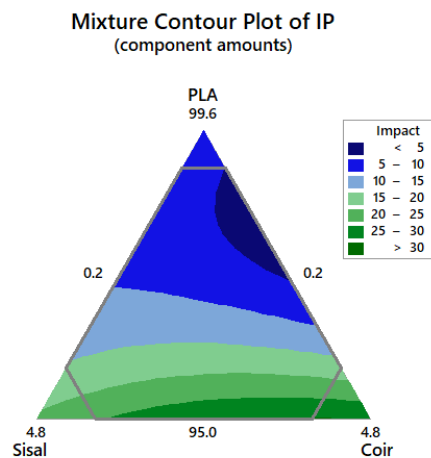


Fig. 4 Mixture contour plot of Impact strength

3.5 Water absorption of hybrid composites

The percentage of water absorption is presented in Table 2. The hybrid composite of run order 5 has the lowest water uptake and permeability coefficient. This is attributed to the hydrophilic character of sisal and coir fibers. A high amount of sisal and coir fibers in the hybrid composites shows a high uptake of water.

3.6 Optimization of hybrid composites

The overlaid contour plot of tensile strength and impact strength is presented in Fig. 5. The component proportions required to produce the optimum hybrid composite was determined to be a mixture of PLA:sisal:coir(% by volume) = 95.22:0.78:4.0.

4 Discussion

The hybrid composites were developed using a constrained mixture design. Mixture design is a useful statistical tool in the investigation and determination of optimizing conditions for proportional mixing of components to obtain desirable hybrid composites. The results showed that the properties of hybrid composites were improved by combining PLA, sisal and coir. The hybrid composites with the highest tensile strength value 58.09 MPa were obtained using an ingredient combination of PLA:sisal:coir(% by volume) = 98.58:1.22:0.20. The sisal and coir fibers had the smallest effect on tensile strength compared to PLA. The sisal and coir had the greatest effect on impact strength values in hybrid composites. The experimental optimum solution composition ratio for ingredients assessed was determined to be PLA:sisal:coir(% by volume) = 95.22:0.78:4.0. The water absorption of hybrid composites shows the minimum water uptake is by run order 5 hybrid composite for ingredients assessed was determined to be PLA:sisal:coir(% by volume) = 99.0:0.8:0.2.

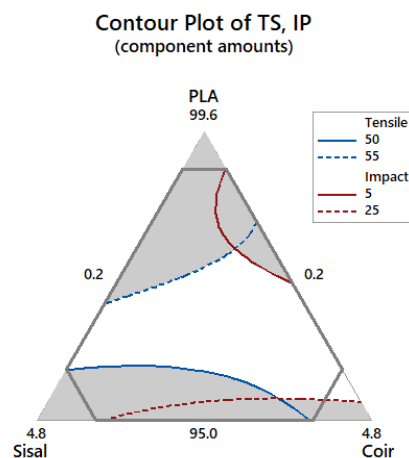


Fig. 5 Overlaid contour plot of tensile strength and Impact strength

References

1. Oksman K, Skrifvars M, Selin JF (2003) Natural fibres as reinforcement in polylactic acid (PLA) composites. *Compos Sci Technol* 63:1317–1324
2. Lim LT, Auras R, Rubino M (2008) Processing technologies for poly(lactic acid). *Prog Polym Sci* 33:820–852
3. Venkateshwaran N, ElayaPerumal A, Alavudeen A, Thiruchitrabalam M (2011) Mechanical and water absorption behaviour of banana/sisal reinforced hybrid composites. *Mater Des* 32:4017–4021
4. Olubanwo AO, Karadelis JN (2015) Applied mixture optimization techniques for paste design of bonded roller-compacted fibre reinforced polymer modified concrete (BRCFRPMC) overlays. *Mater Struct Constr* 48:2023–2042
5. Amiri A, Triplett Z, Moreira A, et al (2017) Standard density measurement method development for flax fiber. *Ind Crops Prod* 96:196–202
6. K. M. Faridul Hasan1,* MI, Shamim Al Azad 2, Mohammad Irfan Iqbal1 and J-HW (2016) Dynamic Mechanical Behavior & Analysis of the Jute-Glass Fiber Reinforced Polyester Hybrid Composites. *Am J Appl Phys* 1:1–12
7. Zhang F, Endo T, Qiu W, et al (2002) Preparation and mechanical properties of composite of fibrous cellulose and maleated polyethylene. *J Appl Polym Sci* 84:1971–1980

ภาคผนวก ข
เอกสารรับรองพลาสติก



Ingeo™ Biopolymer 4043D Technical Data Sheet

3D Printing Monofilament – General Purpose Grade

Monofilament Applications

Ingeo 4043D can be converted into 3D printer monofilament. This multi-purpose extrusion grade results in 3D printing monofilament with excellent printability characteristics such as precise detail, good adhesion to build plates (no heating needed), less warping or curling, and low odor (no strong, greasy, or oily smell while printing). These properties make this grade well-suited for 3D printing using many different types of printers and for a broad range of printing applications.

Processing Information

Ingeo 4043D biopolymer is available in pellet form. Drying prior to processing is essential. The polymer is stable in the molten state, provided that the extrusion and drying procedures are followed.

Machine Configuration

Ingeo biopolymers will process on conventional extruders using general purpose screws with L/D ratios from 24:1 to 30:1 and compression ratio of 2.5:1 to 3:1. Smooth barrels are recommended. Optimization to your specific equipment may require NatureWorks technical support.

Process Details

Startup and Shutdown

Ingeo 4043D is not compatible with a wide variety of resins, and special purging sequences should be followed:

1. Clean extruder and bring temperatures to steady state with low-viscosity, general-purpose polystyrene or high MFR polypropylene.
2. Vacuum out hopper system to avoid contamination.
3. Introduce Ingeo polymer into the extruder at the operating conditions used in Step 1.

Typical Material Properties ⁽¹⁾

Physical Properties	Ingeo Resin	ASTM Method
Specific Gravity, g/cc	1.24	D792
MFR, g/10 min ⁽²⁾	6	D1238
Relative Viscosity ⁽³⁾	4.0	D5225
Clarity	Transparent	-
Peak Melt Temperature, °C	145-160	D3418
Glass Transition Temperature, °C	55-60	D3418
Mechanical Property		
Tensile Yield Strength, psi (MPa)	8700 (60)	D882
Tensile Strength at Break, psi (MPa)	7700 (53)	D882
Tensile Modulus, psi (MPa)	524,000 (3.6)	D882
Tensile Elongation, %	6	D882
Notched Izod Impact, ft-lb/in (J/m)	0.3 (16)	D256
Flexural Strength, psi (MPa)	12,000 (83)	D790
Flexural Modulus, psi (MPa)	555,000 (3.8)	D790
Heat Distortion Temperature, °C 66 psi (0.45 MPa)	55	E2092

(1) Typical properties for injection molded amorphous bars; not to be construed as specifications.

(2) 210 °C/2.16 kg

(3) RV measured at 1.0 g/dL in chloroform at 30°C

4. Once Ingeo biopolymer has purged, reduce barrel temperatures to desired set points.
5. At shutdown, purge machine with high-viscosity polystyrene or polypropylene.

Processing Temperature Profile ⁽⁴⁾

Melt Temp.	410°F	210°C
Feed Throat	113°F	45°C
Feed Temp.	355°F	180°C
Compression Section	375°F	190°C
Metering Section	390°F	200°C
Adapter	390°F	200°C
Die	390°F	200°C
Screw Speed	20-100 rpm	
Filament Diameter Inspection (on-line)	Essential for quality monofilament (+/- 3% max. deviation)	
3D Printing Temp.	190-230°C	
Print Bed Temp.	None needed. (or 50-70°C if applicable)	

(4) Starting points only, and may need to be optimized depending on your system.

Drying

In-line drying is required. A moisture content of less than 0.025% (250ppm) is recommended to prevent viscosity degradation. Typical drying conditions are 4 hours at 175°F (80°C) or to a dew point of -30°F (-35°C), with an airflow rate greater than 0.5 cfm/lb of resin throughput. The resin should not be exposed to atmospheric conditions after drying. Keep the package sealed until ready to use and promptly reseal any unused material.



Ingeo Biopolymer 4043D Technical Data Sheet

Food Packaging Status

U.S. Status

On January 3, 2002 FCN 000178 submitted by NatureWorks LLC to FDA became effective. This effective notification is part of list currently maintained on FDA's website at

<http://www.fda.gov/food/ingredientspackaginglabeling/packagingfcs/notifications/default.htm>

This grade of Ingeo biopolymer may therefore be used in food packaging materials and, as such, is a permitted component of such materials pursuant to section 201(s) of the Federal, Drug, and Cosmetic Act, and Parts 182, 184, and 186 of the Food Additive Regulations. All additives and adjuncts contained in the referenced Ingeo biopolymer formulation meet the applicable sections of the Federal Food, Drug, and Cosmetic Act. The finished polymer is approved for all food types and B-H use conditions. We urge all of our customers to perform GMP (Good Manufacturing Procedures) when constructing a package so that it is suitable for the end use.

European Status

This grade of Ingeo biopolymer complies with Plastics Regulation 10/2011 as amended. No SML's for the above referenced grade exist in Plastics Regulation 10/2011 as amended. NatureWorks LLC would like to draw your attention to the fact that the EU- Plastics Regulation 10/2011, which applies to all EU-Member States, includes a limit of 10 mg/dm² of the overall migration from finished plastic articles into food. In accordance with Plastics Regulation 10/2011 the migration should be measured on finished articles placed into contact with the foodstuff or appropriate food simulants for a period and at a temperature which are chosen by reference to the contact conditions in actual use, according to the rules laid down in Plastics Regulation 10/2011.

Please note that it is the responsibility of both the manufacturers of finished food contact articles as well as the industrial food packers to make sure that these articles in their actual use are in compliance with the imposed specific and overall migration requirements.

This grade as supplied meets European Parliament and Council Directive 94/62/EC of 20 December 1994 on packaging and packaging waste heavy metal content as described in Article 11.

Should you need further clarification, contact NatureWorks LLC.

Bulk Storage Recommendations

The resin silos recommended and used by NatureWorks LLC are designed to maintain dry air in the silo and to be isolated from the outside air. This design would be in contrast to an open, vented to atmosphere system that we understand to be a typical polystyrene resin silo. Key features that are added to a typical (example: polystyrene) resin silo to achieve this objective include a cyclone and rotary valve loading system and some pressure vessel relief valves. The dry air put to the system is sized to the resin flow rate out of the silo. Not too much dry air would be needed and there may be excess instrument air (-30°F dew point) available in the plant to meet the needs for dry air. Our estimate is 10 scfm for a 20,000 lb/hr rate resin usage. Typically, resin manufacturers specify aluminum or stainless steel silos for their own use and avoid epoxy-lined steel.



Ingeo Biopolymer 4043D Technical Data Sheet

Safety and Handling Considerations

Safety Data Sheets (SDS) for Ingeo biopolymers are available from NatureWorks. SDS's are provided to help customers satisfy their own handling, safety, and disposal needs, and those that may be required by locally applicable health and safety regulations. SDS's are updated regularly; therefore, please request and review the most current SDS's before handling or using any product.

The following comments apply only to Ingeo biopolymers; additives and processing aids used in fabrication and other materials used in finishing steps have their own safe-use profile and must be investigated separately.

Hazards and Handling Precautions

Ingeo biopolymers have a very low degree of toxicity and, under normal conditions of use, should pose no unusual problems from incidental ingestion or eye and skin contact. However, caution is advised when handling, storing, using, or disposing of these resins, and good housekeeping and controlling of dusts are necessary for safe handling of product. Pellets or beads may present a slipping hazard.

No other precautions other than clean, body-covering clothing should be needed for handling Ingeo biopolymers. Use gloves with insulation for thermal protection when exposure to the melt is localized. Workers should be protected from the possibility of contact with molten resin during fabrication.

Handling and fabrication of resins can result in the generation of vapors and dusts that may cause irritation to eyes and the upper respiratory tract. In dusty atmospheres, use an approved dust respirator.

Good general ventilation of the polymer processing area is recommended. At temperatures exceeding the polymer melt temperature (typically 175°C), polymer can release fumes, which may contain fragments of the polymer, creating a potential to irritate eyes and mucous membranes. Good general ventilation should be sufficient for most conditions. Local exhaust ventilation is recommended for melt operations. Use safety glasses (or goggles) to prevent exposure to particles, which could cause mechanical injury to the eye. If vapor exposure causes eye discomfort, improve localized fume exhausting methods or use a full-face respirator.

The primary thermal decomposition product of PLA is acetaldehyde, a material also produced during the thermal degradation of PET. Thermal decomposition products also include carbon monoxide and hexanal, all of which exist as gases at normal room conditions. These species are highly flammable, easily ignited by spark or flame, and can also auto ignite. For polyesters such as PLA, thermal

decomposition producing flammable vapors containing acetaldehyde and carbon monoxide can occur in almost any process equipment maintaining PLA at high temperature over longer residence times than typically experienced in extruders, fiber spinning lines, injection molding machines, accumulators, pipe lines and adapters. As a rough guideline based upon some practical experience, significant decomposition of PLA will occur if polymer residues are held at temperatures above the melting point for prolonged periods, e.g., in excess of 24 hours at 175°C, although this will vary significantly with temperature.

Combustibility

Ingeo biopolymers will burn. Clear to white smoke is produced when product burns. Toxic fumes are released under conditions of incomplete combustion. Do not permit dust to accumulate. Dust layers can be ignited by spontaneous combustion or other ignition sources. When suspended in air, dust can pose an explosion hazard. Firefighters should wear positive-pressure, self-contained breathing apparatuses and full protective equipment. Water or water fog is the preferred extinguishing medium. Foam, alcohol-resistant foam, carbon dioxide or dry chemicals may also be used. Soak thoroughly with water to cool and prevent re-ignition.

Disposal

DO NOT DUMP INTO ANY SEWERS, ON THE GROUND, OR INTO ANY BODY OF WATER. For unused or uncontaminated material, the preferred option is to recycle into the process otherwise, send to an incinerator or other thermal destruction device. For used or contaminated material, the disposal options remain the same, although additional evaluation is required. Disposal must be in compliance with Federal, State/Provincial, and local laws and regulations.

Environmental Concerns

Generally speaking, lost pellets, while undesirable, are benign in terms of their physical environmental impact, but if ingested by wildlife, they may mechanically cause adverse effects. Spills should be minimized, and they should be cleaned up when they happen. Plastics should not be discarded into the environment.

Product Stewardship

NatureWorks has a fundamental duty to all those that use our products, and for the environment in which we live. This duty is the basis for our Product Stewardship philosophy, by which we assess the health and environmental information on our products and their intended use, and then take appropriate steps to protect the environment and the health of our employees and the public.



Ingeo Biopolymer 4043D Technical Data Sheet

Customer Notice

NatureWorks encourages its customers and potential users of its products to review their applications from the standpoint of human health and environmental quality. To help ensure our products are not used in ways for which they

were not intended or tested, our personnel will assist customers in dealing with ecological and product safety considerations. Your sales representative can arrange the proper contacts. NatureWorks literature should be consulted prior to the use of the company's products.

NOTICE:

No freedom from infringement of any patent owned by NatureWorks LLC or others is to be inferred. No information in this publication can be considered a suggestion to infringe patents.

The technical information, recommendations and other statements contained in this document are based upon tests or experience that NatureWorks believes are reliable, but the accuracy or completeness of such information is not guaranteed. Many factors beyond NatureWorks control can affect the use and performance of a NatureWorks product in a particular application, including the conditions under which the product is used and the time and environmental conditions in which the product is expected to perform. Since these factors are uniquely within the user's knowledge or control, it is essential that the user evaluate the NatureWorks product to determine whether it is fit for a particular purpose and suitable for the user's method of application. In addition, because use conditions are outside of NatureWorks control and applicable laws may differ from one location to another and may change with time, Customer is solely responsible for determining whether products and the information in this document are appropriate for Customer's use and for ensuring that Customer's workplace, use and disposal practices are in compliance with applicable laws and regulations. NatureWorks LLC assumes no obligation or liability for the information in this document.

NATUREWORKS MAKES NO WARRANTY, EXPRESS OR IMPLIED, REGARDING THE INFORMATION CONTAINED HEREIN OR ITS PRODUCTS, INCLUDING BUT NOT LIMITED TO ANY WARRANTY AS TO ACCURACY OR COMPLETENESS OF INFORMATION, OR ANY IMPLIED WARRANTY OF MERCHANTABILITY OR FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE.

NOTICE REGARDING PROHIBITED USE RESTRICTIONS: Unless specifically agreed to in writing by NatureWorks, NatureWorks LLC will not knowingly sell or sample any product into any of the following commercial or developmental applications (i) components of or packaging for tobacco products, (ii) components of products intended for human or animal consumption, (iii) any application that is intended for any internal contact with human body fluids or body tissues, (iv) as a critical component in any medical device that supports or sustains human life, (v) in any product that is designed specifically for ingestion or internal use by pregnant women, (vi) in any application designed specifically to promote or interfere with human reproduction, (vii) in microbeads, including those used in personal care/cosmetic applications, or (viii) to manufacture bottles or bottle pre-forms in North America.

For additional information please contact NatureWorks via our [website](#) on the tab called [FAQ's](#) or by clicking [here](#).



15305 Minnetonka Blvd., Minnetonka, MN 55345



ภาคผนวก ค

ค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยเสริมแรง

ตารางที่ ค.1 ผลการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยมะพร้าว

เส้นใยที่	ค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (μm)	เส้นใยที่	ค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (μm)
1	234	31	218
2	348	32	183
3	108	33	125
4	307	34	251
5	215	35	170
6	203	36	245
7	174	37	233
8	241	38	339
9	149	39	169
10	192	40	239
11	263	41	223
12	138	42	177
13	160	43	167
14	165	44	235
15	276	45	190
16	237	46	146
17	157	47	240
18	202	48	280
19	180	49	139
20	183	50	251
21	148	51	199
22	176	52	307
23	322	53	217
24	187	54	240
25	156	55	177
26	208	56	220
27	139	57	139
28	157	58	303
29	200	59	183
30	198	60	115

ตารางที่ ค.2 ผลการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยมะพร้าว (ต่อ)

เส้นใยที่	ค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (μm)	เส้นใยที่	ค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (μm)
61	274	91	305
62	208	92	270
63	158	93	198
64	211	94	301
65	173	95	304
66	315	96	152
67	208	97	165
68	134	98	133
69	229	99	225
70	193	100	154
71	197	ค่าเฉลี่ย(μm)	213 \pm 56
72	215		
73	202		
74	231		
75	250		
76	289		
77	232		
78	305		
79	187		
80	236		
81	222		
82	136		
83	349		
84	235		
85	210		
86	206		
87	266		
88	238		
89	140		
90	268		

ตารางที่ ค.3 ผลการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยป่านครนารายณ์

เส้นใยที่	ค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (μm)	เส้นใยที่	ค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (μm)
1	155	31	113
2	188	32	115
3	153	33	113
4	196	34	110
5	131	35	119
6	186	36	89
7	175	37	126
8	134	38	92
9	126	39	131
10	134	40	115
11	129	41	120
12	124	42	95
13	116	43	115
14	100	44	114
15	74	45	98
16	118	46	130
17	129	47	112
18	133	48	116
19	137	49	119
20	131	50	125
21	105	51	110
22	101	52	137
23	118	53	128
24	128	54	124
25	102	55	74
26	118	56	145
27	123	57	53
28	126	58	157
29	141	59	127
30	146	60	115

ตารางที่ ค.4 ผลการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยป่านศรนารายณ์ (ต่อ)

เส้นใยที่	ค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (μm)	เส้นใยที่	ค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (μm)
61	131	91	108
62	74	92	99
63	128	93	109
64	133	94	118
65	113	95	137
66	157	96	199
67	102	97	146
68	111	98	100
69	105	99	152
70	108	100	85
71	200	ค่าเฉลี่ย(μm)	127 \pm 30
72	78		
73	188		
74	151		
75	124		
76	129		
77	122		
78	99		
79	183		
80	190		
81	177		
82	209		
83	112		
84	139		
85	107		
86	94		
87	146		
88	159		
89	128		
90	91		

ภาคผนวก ง

ค่าความหนาแน่นของเส้นใยเสริมแรง

ตารางที่ ง.1 ค่าความหนาแน่นของเส้นใยป่านครนารายณ์

ครั้งที่	น้ำหนักเส้นใยในอากาศ (g)	น้ำหนักเส้นใยในน้ำมัน (g)	ค่าความหนาแน่น (g/cm ³)
1	1.9051	0.3352	1.1006
2	1.5385	0.1768	1.0247
3	1.8151	0.2384	1.0441
4	1.9314	0.2937	1.0696
5	1.9314	0.2937	1.0696
ค่าเฉลี่ย (g/cm ³)			1.0617±0.03

ตารางที่ ง.2 ค่าความหนาแน่นของเส้นใยมะพร้าว

ครั้งที่	น้ำหนักเส้นใยในอากาศ (g)	น้ำหนักเส้นใยในน้ำมัน (g)	ค่าความหนาแน่น (g/cm ³)
1	0.9472	0.3400	1.4148
2	0.8116	0.2841	1.3954
3	1.2132	0.4216	1.3900
4	1.1002	0.3706	1.3676
5	1.3561	0.4781	1.4008
ค่าเฉลี่ย (g/cm ³)			1.3937±0.02

ภาคผนวก จ

ค่าความทนต่อแรงดึงของเส้นใยเสริมแรง

ตารางที่ จ.1 ค่าความทนต่อแรงดึงของเส้นใยป่านศรนารายณ์

ครั้งที่	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)
1	997.85	5.55
2	848.65	5.25
3	551.03	6.00
4	1177.06	6.54
5	638.26	4.98
6	1093.77	6.63
7	1221.66	6.89
8	441.30	3.51
9	1126.93	6.99
10	1089.82	6.91
11	1498.75	6.47
12	461.82	4.11
13	874.31	5.73
14	1365.34	7.58
15	890.09	6.45
16	1276.13	7.21
17	324.85	4.68
18	404.59	4.57
19	1043.64	8.03
20	1284.03	6.83

ตารางที่ จ.2 ค่าความทนต่อแรงดึงของเส้นใยมะพร้าว

ครั้งที่	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)
1	79.73	45.14
2	35.52	49.54
3	36.18	3.54
4	126.97	33.48
5	55.26	34.37
6	90.79	41.88
7	58.84	50.94
8	47.89	33.09
9	76.71	42.40
10	70.39	46.02
11	35.92	9.28
12	124.73	37.81
13	67.23	41.24
14	53.29	32.44
15	38.16	14.40
16	46.31	21.36
17	40.13	2.75
18	107.23	49.59
19	83.68	44.40
20	72.37	25.71

ภาคผนวก จ

ค่าการทดสอบความทนต่อแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบผสมพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรง
ด้วยเส้นใยป่านครนารายณ์และเส้นใยมะพร้าว

ตารางที่ ฉ.1 ค่าความทนต่อแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบผสมพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใยปาน
ศรนารายณ์และเส้นใยมะพร้าว

Run Order	ครั้งที่	ค่าความทนต่อแรงดึง (MPa)
1	1	42.23
	2	46.49
	3	43.26
	ค่าเฉลี่ย	43.99±5.52
2	1	56.52
	2	57.64
	3	57.56
	ค่าเฉลี่ย	57.24±1.55
3	1	51.81
	2	49.23
	3	52.27
	ค่าเฉลี่ย	51.10±4.07
4	1	53.90
	2	50.73
	3	51.86
	ค่าเฉลี่ย	52.16±3.99
5	1	55.70
	2	57.75
	3	56.78
	ค่าเฉลี่ย	56.74±2.55
6	1	50.42
	2	50.56
	3	51.94
	ค่าเฉลี่ย	50.97±2.09
7	1	52.17
	2	53.81
	3	52.64
	ค่าเฉลี่ย	52.87±2.10

ตารางที่ ฉ.2 ค่าระยะยืด ณ จุดขาดของวัสดุเชิงประกอบผสมพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใยปาน
ศรนา rayon และเส้นใยมะพร้าว

Run Order	ครั้งที่	ค่าความทนต่อแรงดึง (MPa)
1	1	3.52
	2	3.59
	3	3.42
	ค่าเฉลี่ย	3.51±0.09
2	1	2.81
	2	2.74
	3	2.88
	ค่าเฉลี่ย	2.81±0.07
3	1	3.33
	2	3.49
	3	3.26
	ค่าเฉลี่ย	3.36±0.12
4	1	3.59
	2	3.59
	3	3.48
	ค่าเฉลี่ย	3.55±0.06
5	1	2.56
	2	2.58
	3	2.63
	ค่าเฉลี่ย	2.59±0.04
6	1	2.90
	2	2.97
	3	2.85
	ค่าเฉลี่ย	2.87±0.06
7	1	3.33
	2	3.36
	3	3.45
	ค่าเฉลี่ย	3.37±0.07

ตารางที่ ๓.3 ค่ายังมอดูลัสของวัสดุเชิงประกอบผสมพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใยปาน
ศรนา rayon และเส้นใยมะพร้าว

Run Order	ครั้งที่	ค่าความทนต่อแรงดึง (MPa)
1	1	11.98
	2	12.95
	3	12.65
	ค่าเฉลี่ย	12.53±0.49
2	1	20.11
	2	21.01
	3	20.01
	ค่าเฉลี่ย	20.38±0.055
3	1	15.52
	2	14.11
	3	16.03
	ค่าเฉลี่ย	15.22±1.00
4	1	15.03
	2	14.14
	3	14.91
	ค่าเฉลี่ย	14.69±0.49
5	1	21.72
	2	22.57
	3	21.57
	ค่าเฉลี่ย	21.88±0.41
6	1	17.39
	2	17.43
	3	18.55
	ค่าเฉลี่ย	17.79±0.66
7	1	15.81
	2	16.01
	3	15.28
	ค่าเฉลี่ย	15.70±0.38

ภาคผนวก ข

ค่าความทนต่อแรงกระแทกของวัสดุเชิงประกอบผสมพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้น
ใยป่านศรนารายณ์และเส้นใยมะพร้าว

ตารางที่ ข.1 ค่าความทนต่อแรงกระแทกของวัสดุเชิงประกอบผสมพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใย
ป่านศรนารายณ์และเส้นใยมะพร้าว

Run Order	ครั้งที่	ค่าความทนต่อแรงดึง (MPa)
1	1	28.42
	2	21.03
	3	24.63
	ค่าเฉลี่ย	24.69±4.18
2	1	5.07
	2	4.57
	3	4.72
	ค่าเฉลี่ย	4.79±0.64
3	1	27.28
	2	32.17
	3	30.43
	ค่าเฉลี่ย	29.96±6.15
4	1	18.10
	2	16.92
	3	17.94
	ค่าเฉลี่ย	17.65±1.59
5	1	9.42
	2	6.91
	3	8.63
	ค่าเฉลี่ย	8.32±3.19
6	1	16.09
	2	15.28
	3	15.20
	ค่าเฉลี่ย	15.52±1.22
7	1	13.18
	2	10.39
	3	11.92
	ค่าเฉลี่ย	11.83±3.47

ภาคผนวก ซ

ข้อมูลการวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยโปรแกรม Minitab

ตารางที่ ข.1 ข้อมูลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA) ของแบบจำลองการถดถอยเชิงเส้นของตัวแปรตอบสนองความทนต่อแรงดึง

Regression for Mixtures: Tensile versus PLA, Sisal, Coir						
Estimated Regression Coefficients for Tensile (component proportions)						
Term	Coef	SE Coef	T	P	VIF	
PLA	59	1	*	*	5.652	
Sisal	-88	32	*	*	6.632	
Coir	-110	30	*	*	5.698	
PLA*PLA*Sisal*Coir	9937	4378	2.27	0.037	11.733	
PLA*Sisal*Sisal*Coir	-693209	137664	-5.04	0.000	9.339	
S = 1.29965 PRESS = 52.6907						
R-Sq = 92.81% R-Sq(pred) = 85.98% R-Sq(adj) = 91.01%						
Analysis of Variance for Tensile (component proportions)						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	4	348.733	348.7330	87.1833	51.62	0.000
Linear	2	296.374	63.2339	31.6170	18.72	0.000
Special Quartic	2	52.360	52.3595	26.1798	15.50	0.000
PLA*PLA*Sisal*Coir	1	9.530	8.7020	8.7020	5.15	0.037
PLA*Sisal*Sisal*Coir	1	42.829	42.8290	42.8290	25.36	0.000
Residual Error	16	27.025	27.0255	1.6891		
Lack-of-Fit	2	0.891	0.8907	0.4453	0.24	0.791
Pure Error	14	26.135	26.1348	1.8668		
Total	20	375.759				
Estimated Regression Coefficients for Tensile (component amounts)						
Term	Coef					
PLA	0.585314					
Sisal	-0.877649					
Coir	-1.09903					
PLA*PLA*Sisal*Coir	9.93731E-05					
PLA*Sisal*Sisal*Coir	-0.00693209					

ตารางที่ ข.2 ข้อมูลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA) ของแบบจำลองการถดถอยเชิงเส้นของตัวแปรตอบสนองความทนต่อแรงกระแทก

Regression for Mixtures: Impact versus PLA, Sisal, Coir

Estimated Regression Coefficients for Impact (component proportions)

Term	Coef	SE Coef	T	P	VIF
PLA	12	1.83	*	*	18.0
Sisal	12075	3741.06	*	*	42197.2
Coir	28942	3741.06	*	*	42197.2
PLA*Sisal	-12485	3941.59	-3.17	0.006	42769.3
PLA*Coir	-30042	3941.59	-7.62	0.000	42769.3

S = 1.90859 PRESS = 105.256
 R-Sq = 96.05% R-Sq(pred) = 92.86% R-Sq(adj) = 95.06%

Analysis of Variance for Impact (component proportions)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	4	1416.16	1416.16	354.040	97.19	0.000
Linear	2	1170.05	256.23	128.114	35.17	0.000
Quadratic	2	246.11	246.11	123.054	33.78	0.000
PLA*Sisal	1	34.49	36.55	36.546	10.03	0.006
PLA*Coir	1	211.62	211.62	211.616	58.09	0.000
Residual Error	16	58.28	58.28	3.643		
Lack-of-Fit	2	10.05	10.05	5.023	1.46	0.266
Pure Error	14	48.24	48.24	3.445		
Total	20	1474.44				

Estimated Regression Coefficients for Impact (component amounts)

Term	Coef
PLA	0.121528
Sisal	120.754
Coir	289.425
PLA*Sisal	-1.24847
PLA*Coir	-3.00423

ภาคผนวก ฅ

การดูดซับน้ำของวัสดุเชิงประกอบผสมเสริมแรงด้วยเส้นใยปานครนารายณ์และ
เส้นใยมะพร้าว

ตารางที่ ฅ.1 การคูดซับน้ำของวัสดุเชิงประกอบผสมเสริมแรงด้วยเส้นใยปานศรณารายณ์และเส้นใยมะพร้าว

เวลา (ชั่วโมง)	ครั้งที่	Run Order			
		1	2	3	4
0.05	1	0.0388	0.0167	0.0479	0.0326
	2	0.0384	0.0162	0.0483	0.0331
	3	0.0374	0.0164	0.0489	0.0321
	ค่าเฉลี่ย (%)	0.0382±0.0007	0.0164±0.0003	0.0484±0.0005	0.0326±0.0005
0.15	1	0.0680	0.0479	0.0864	0.0753
	2	0.0672	0.0487	0.0873	0.0761
	3	0.0683	0.0471	0.0868	0.0757
	ค่าเฉลี่ย (%)	0.0678±0.0006	0.0479±0.0008	0.0868±0.0005	0.0757±0.0004
0.3	1	0.1169	0.0853	0.1119	0.1269
	2	0.1174	0.0862	0.1128	0.1275
	3	0.1161	0.0858	0.1113	0.1262
	ค่าเฉลี่ย (%)	0.1168±0.0007	0.0858±0.0004	0.1120±0.0008	0.1269±0.0007
1	1	0.1265	0.1156	0.1443	0.1538
	2	0.1262	0.1159	0.1438	0.1547
	3	0.1257	0.1147	0.1428	0.1525
	ค่าเฉลี่ย (%)	0.1261±0.0004	0.1154±0.0006	0.1436±0.0008	0.1537±0.0011
2	1	0.1710	0.1486	0.2189	0.2065
	2	0.1727	0.1493	0.2192	0.2058
	3	0.1717	0.1483	0.2184	0.2053
	ค่าเฉลี่ย (%)	0.1718±0.0009	0.1487±0.0009	0.2188±0.0004	0.2059±0.0006
4	1	0.2072	0.1864	0.2679	0.2484
	2	0.2081	0.1872	0.2684	0.2482
	3	0.2072	0.1881	0.2671	0.2491
	ค่าเฉลี่ย (%)	0.2075±0.0005	0.1872±0.0009	0.2678±0.0005	0.2486±0.0005

ตารางที่ ฅ.2 การดูดซับน้ำของวัสดุเชิงประกอบผสมเสริมแรงด้วยเส้นใยปานศรณารายณ์และเส้นใยมะพร้าว (ต่อ)

เวลา (ชั่วโมง)	ครั้งที่	Run Order			
		1	2	3	4
6	1	0.2864	0.2063	0.2968	0.2806
	2	0.2872	0.2075	0.2960	0.2810
	3	0.2869	0.2061	0.2971	0.2827
	ค่าเฉลี่ย (%)	0.2868±0.0004	0.2066±0.0008	0.2966±0.0006	0.2814±0.0011
12	1	0.3631	0.2568	0.3986	0.4289
	2	0.3646	0.2574	0.3990	0.4284
	3	0.3641	0.2437	0.3980	0.4295
	ค่าเฉลี่ย (%)	0.3639±0.0008	0.2526±0.0077	0.3985±0.0005	0.4289±0.0006
24	1	0.4878	0.3226	0.8162	0.6139
	2	0.4861	0.3219	0.8179	0.6141
	3	0.4870	0.3242	0.8182	0.6152
	ค่าเฉลี่ย (%)	0.4870±0.0008	0.3229±0.0012	0.8174±0.0011	0.6144±0.0007
30	1	0.8648	0.5478	1.1469	1.2467
	2	0.8658	0.5471	1.1470	1.2561
	3	0.8641	0.5481	1.1461	1.2520
	ค่าเฉลี่ย (%)	0.8649±0.0008	0.5477±0.0005	1.1467±0.0005	1.2516±0.0047
36	1	1.2456	0.7426	1.6326	1.7543
	2	1.2466	0.7239	1.6328	1.7550
	3	1.2450	0.7422	1.6339	1.7570
	ค่าเฉลี่ย (%)	1.2457±0.0008	0.7429±0.0009	1.6331±0.0007	1.7554±0.0014
48	1	1.5664	1.0532	2.6460	2.5468
	2	1.5678	1.0548	2.6466	2.5475
	3	1.5661	1.0535	2.6458	2.5470
	ค่าเฉลี่ย (%)	1.5668±0.0009	1.0538±0.0009	2.6461±0.0004	2.5471±0.0004

ตารางที่ ฅ.3 การดูดซับน้ำของวัสดุเชิงประกอบผสมเสริมแรงด้วยเส้นใยปานศรณารายณ์และเส้นใยมะพร้าว (ต่อ)

เวลา (ชั่วโมง)	ครั้งที่	Run Order			
		1	2	3	4
54	1	1.7062	1.1268	2.7890	2.5888
	2	1.7068	1.1274	2.7883	2.5889
	3	1.7054	1.1260	2.7893	2.5892
	ค่าเฉลี่ย (%)	1.7061±0.0007	1.1267±0.0007	2.7889±0.0005	2.5890±0.0002
60	1	1.9996	1.2364	2.8489	2.6519
	2	1.9983	1.2352	2.8482	2.6506
	3	1.9993	1.2251	2.8492	2.6503
	ค่าเฉลี่ย (%)	1.9991±0.0007	1.2322±0.0062	2.8488±0.0005	2.6509±0.0009
72	1	2.0008	1.2429	2.8480	2.6943
	2	2.0013	1.2433	2.8492	2.6931
	3	2.0000	1.2420	2.8482	2.6946
	ค่าเฉลี่ย (%)	2.0007±0.0007	1.2427±0.0007	2.8485±0.0007	2.6940±0.0008
78	1	2.0044	1.2459	2.8654	2.6986
	2	2.0058	1.2467	2.8662	2.6996
	3	2.0041	1.2461	2.8658	2.698
	ค่าเฉลี่ย (%)	2.0048±0.0009	1.2462±0.0004	2.8658±0.0004	2.6987±0.0008

ตารางที่ ๓.๔ การดูดซับน้ำของวัสดุเชิงประกอบผสมเสริมแรงด้วยเส้นใยป่านศรนารายณ์และเส้นใยมะพร้าว

เวลา (ชั่วโมง)	ครั้งที่	Run Order				
		5	6	7	PLA	OP
0.05	1	0.0148	0.0352	0.0427	0.0256	0.0345
	2	0.0141	0.0341	0.0434	0.0264	0.0353
	3	0.0137	0.0357	0.0421	0.025	0.0349
	ค่าเฉลี่ย (%)	0.0142±0.0006	0.0350±0.0008	0.0427±0.0007	0.0257±0.0007	0.0349±0.0004
0.15	1	0.0580	0.0521	0.1148	0.0378	0.0783
	2	0.0574	0.0539	0.1152	0.0384	0.0781
	3	0.0584	0.0526	0.1159	0.0372	0.0775
	ค่าเฉลี่ย (%)	0.0579±0.0005	0.0529±0.0009	0.1153±0.0006	0.0378±0.0006	0.0780±0.0004
0.3	1	0.1125	0.1169	0.1468	0.0578	0.1335
	2	0.1124	0.1173	0.1472	0.0583	0.1349
	3	0.1117	0.1161	0.1461	0.0570	0.1330
	ค่าเฉลี่ย (%)	0.1122±0.0004	0.1168±0.0006	0.1467±0.0006	0.0577±0.0007	0.1338±0.0010
1	1	0.1279	0.1742	0.1690	0.0756	0.1534
	2	0.1271	0.1738	0.1681	0.0764	0.1545
	3	0.1260	0.1732	0.1679	0.0751	0.1547
	ค่าเฉลี่ย (%)	0.1270±0.0009	0.1737±0.0005	0.1683±0.0006	0.0757±0.0007	0.1542±0.0007
2	1	0.1370	0.2072	0.1975	0.0956	0.1943
	2	0.1371	0.2082	0.1981	0.0968	0.1957
	3	0.1384	0.2069	0.1972	0.0970	0.1944
	ค่าเฉลี่ย (%)	0.1375±0.0008	0.2074±0.0007	0.1976±0.0005	0.0965±0.0008	0.1948±0.0008
4	1	0.1648	0.2644	0.2538	0.1258	0.2597
	2	0.1659	0.2650	0.2548	0.1267	0.2612
	3	0.1649	0.2647	0.2530	0.1259	0.2604
	ค่าเฉลี่ย (%)	0.1652±0.0006	0.2647±0.0003	0.2539±0.0009	0.1261±0.0005	0.2604±0.0007
6	1	0.1863	0.3631	0.2984	0.1458	0.3075
	2	0.1871	0.3649	0.2992	0.1467	0.3071
	3	0.1869	0.3638	0.2995	0.1462	0.3066
	ค่าเฉลี่ย (%)	0.1868±0.0004	0.3639±0.0009	0.2990±0.0006	0.1462±0.0005	0.3071±0.0005

ตารางที่ ๓.5 การดูดซับน้ำของวัสดุเชิงประกอบผสมเสริมแรงด้วยเส้นใยป่านศรนารายณ์และเส้นใยมะพร้าว

เวลา (ชั่วโมง)	ครั้งที่	Run Order				
		5	6	7	PLA	OP
12	1	0.2073	0.4168	0.3529	0.1664	0.3653
	2	0.2074	0.4170	0.3538	0.1668	0.3647
	3	0.2081	0.4161	0.3521	0.1653	0.3640
	ค่าเฉลี่ย (%)	0.2076±0.0004	0.4166±0.0005	0.3529±0.0009	0.1662±0.0008	0.3647±0.0007
24	1	0.2619	0.5019	0.5123	0.2255	0.7480
	2	0.2622	0.5023	0.5134	0.2247	0.7473
	3	0.2610	0.5029	0.5128	0.2263	0.7478
	ค่าเฉลี่ย (%)	0.2617±0.0006	0.5024±0.0005	0.5128±0.0006	0.2255±0.0008	0.7477±0.0004
30	1	0.4742	0.8145	1.1368	0.2356	1.2555
	2	0.4753	0.8150	1.1378	0.2348	1.2546
	3	0.4761	0.8139	1.1361	0.2342	1.2560
	ค่าเฉลี่ย (%)	0.4752±0.0010	0.8145±0.0006	1.1369±0.0009	0.2349±0.0007	1.2554±0.0007
36	1	0.7379	1.2356	1.4680	0.2448	1.4670
	2	0.7370	1.2363	1.4672	0.2456	1.4666
	3	0.7362	1.2369	1.4684	0.2451	1.4676
	ค่าเฉลี่ย (%)	0.7370±0.0009	1.2363±0.0007	1.4679±0.0006	0.2452±0.0004	1.4671±0.0005
48	1	1.0638	1.6727	2.1866	0.2457	2.1357
	2	1.0645	1.6738	2.1861	0.2465	2.1364
	3	1.0630	1.6720	2.1853	0.2452	2.1354
	ค่าเฉลี่ย (%)	1.0638±0.0008	1.6728±0.0009	2.1860±0.0007	0.2458±0.0007	2.1358±0.0005
54	1	1.0699	1.7257	2.2752	0.2458	2.3560
	2	1.0711	1.7246	2.2749	0.2467	2.3552
	3	1.0705	1.7251	2.2755	0.2454	2.3567
	ค่าเฉลี่ย (%)	1.0705±0.0006	1.7251±0.0006	2.2752±0.0003	0.2460±0.0007	2.3560±0.0008
60	1	1.0840	1.8384	2.2844	0.2464	2.5640
	2	1.0852	1.8393	2.2849	0.2460	2.5658
	3	1.0852	1.8381	2.2832	0.2452	2.5640
	ค่าเฉลี่ย (%)	1.0848±0.0007	1.8386±0.0006	2.2842±0.0009	0.2459±0.0006	2.5646±0.0010

ตารางที่ ๓.6 การดูดซับน้ำของวัสดุเชิงประกอบผสมเสริมแรงด้วยเส้นใยป่านศรนารายณ์และเส้นใยมะพร้าว

เวลา (ชั่วโมง)	ครั้งที่	Run Order				
		5	6	7	PLA	OP
72	1	1.0802	1.8462	2.2869	0.2463	2.5476
	2	1.0800	1.8469	2.2873	0.2476	2.5469
	3	1.0816	1.8453	2.2875	0.2475	2.5464
	ค่าเฉลี่ย (%)	1.0806±0.0009	1.8461±0.0008	2.2872±0.0003	0.2471±0.0007	2.5470±0.0006
78	1	1.0785	1.8470	2.2970	0.2465	2.5756
	2	1.0778	1.848	2.2976	0.2459	2.5768
	3	1.0783	1.8475	2.2962	0.2462	2.576
	ค่าเฉลี่ย (%)	1.0782±0.0004	1.8475±0.0005	2.2969±0.0007	0.2462±0.0003	2.5761±0.0006

ภาคผนวก ญ

ผลการเปรียบเทียบการเสริมแรงด้วยเส้นใยธรรมชาติสองชนิดและการเสริมแรงด้วยเส้นใยธรรมชาติชนิดเดียวของวัสดุเชิงประกอบพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใยธรรมชาติ

ตารางที่ ญ.1 ค่าความทนต่อแรงดึงของการเปรียบเทียบการเสริมแรงด้วยเส้นใยธรรมชาติสองชนิดและการเสริมแรงด้วยเส้นใยธรรมชาติชนิดเดียวของวัสดุเชิงประกอบพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใยธรรมชาติ

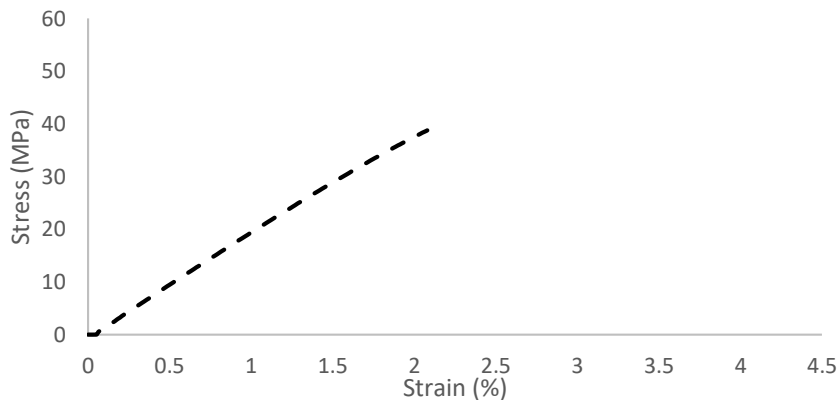
ครั้งที่	P95.22 : S0.78 : C4.0	P95.22 : S4.78	P95.22 : S4.78	PLA
1	53.20	73.75	48.54	40.9
2	52.48	78.35	45.73	42.56
3	51.05	72.43	44.37	43.24
4	53.84	77.32	48.63	41.43
5	50.44	74.93	46.63	42.04
ค่าเฉลี่ย (MPa)	52.20±1.43	75.36±2.46	46.78±1.83	42.034±0.92

ตารางที่ ญ.2 ค่าความทนต่อแรงกระแทกของการเปรียบเทียบการเสริมแรงด้วยเส้นใยธรรมชาติสองชนิดและการเสริมแรงด้วยเส้นใยธรรมชาติชนิดเดียวของวัสดุเชิงประกอบพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใยธรรมชาติ

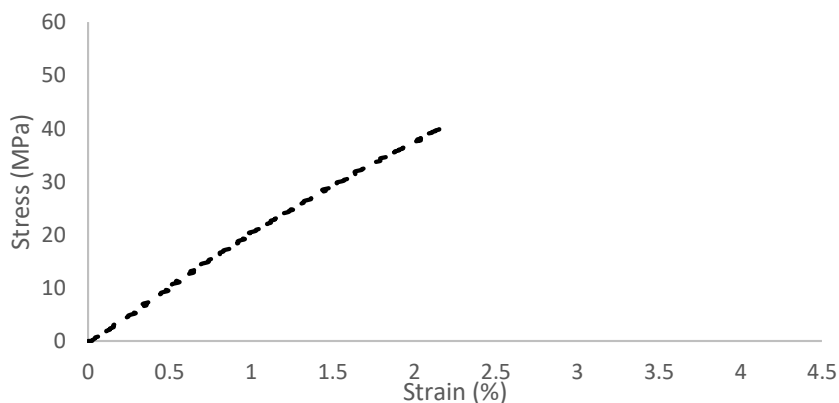
ครั้งที่	P95.22 : S0.78 : C4.0	P95.22 : S4.78	P95.22 : S4.78	PLA
1	26.95	10.57	36.64	5.71
2	24.86	12.74	35.6	6.19
3	24.39	15.58	37.38	5.43
4	26.04	11.53	35.83	6.74
5	25.74	14.28	38.1	6.02
ค่าเฉลี่ย (kJ/m ²)	25.60±1.01	12.94±2.03	36.71±1.05	6.02±0.50

ภาคผนวก ก

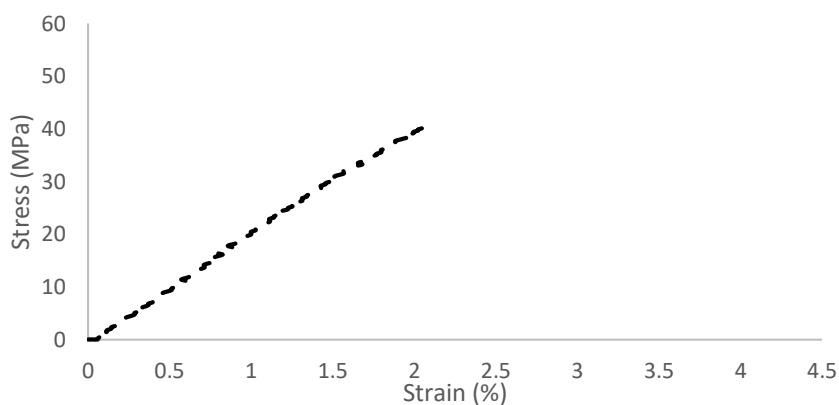
กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นและค่าความเครียดของวัสดุเชิงประกอบผสม
เสริมแรงด้วยเส้นใยปานครนารายณ์และเส้นใยมะพร้าว



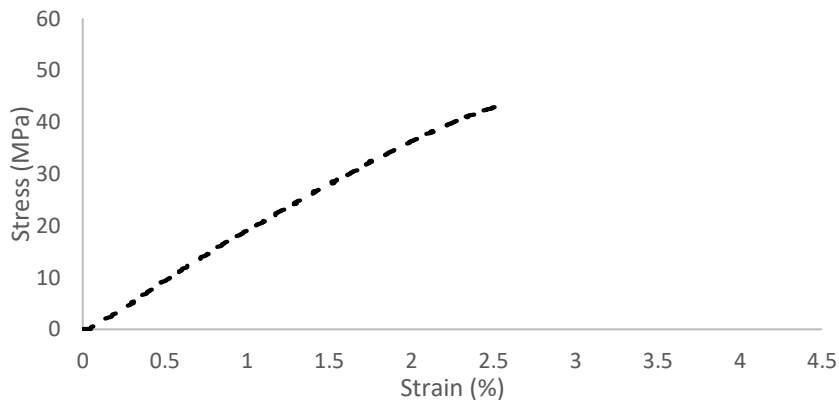
รูปที่ ๓.๑ กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นและค่าความเครียดของพอลิแลคติกแอซิดของ การทดสอบ ครั้งที่ 1



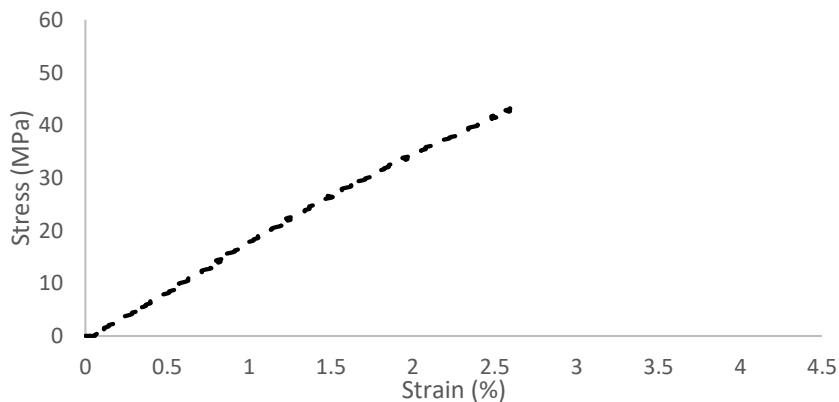
รูปที่ ๓.๒ กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นและค่าความเครียดของพอลิแลคติกแอซิดของ การทดสอบ ครั้งที่ 2



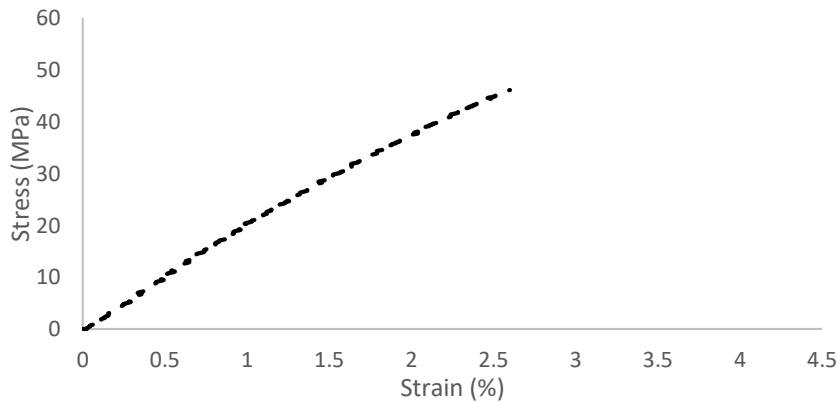
รูปที่ ๓.๓ กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นและค่าความเครียดของพอลิแลคติกแอซิดของ การทดสอบ ครั้งที่ 2



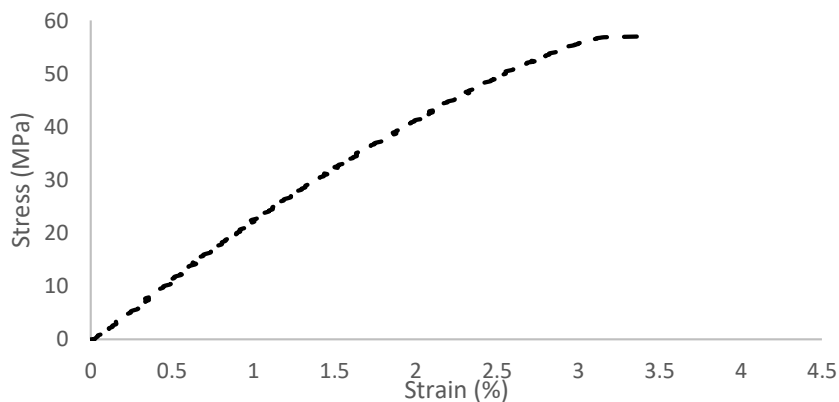
รูปที่ ๔.๔ กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นและค่าความเครียดของวัสดุเชิงประกอบผสมที่อัตราส่วน PLA 95.0 : Sisal 4.0 : Coir 1.0 ของการทดสอบ ครั้งที่ 1



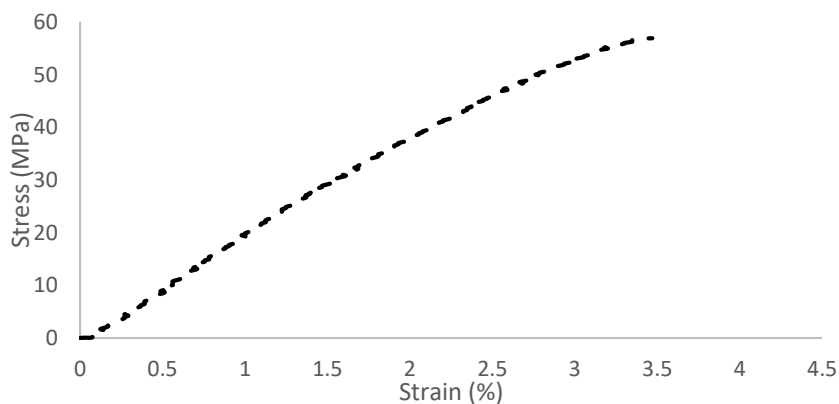
รูปที่ ๕.๕ กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นและค่าความเครียดของวัสดุเชิงประกอบผสมที่อัตราส่วน PLA 95.0 : Sisal 4.0 : Coir 1.0 ของการทดสอบ ครั้งที่ 2



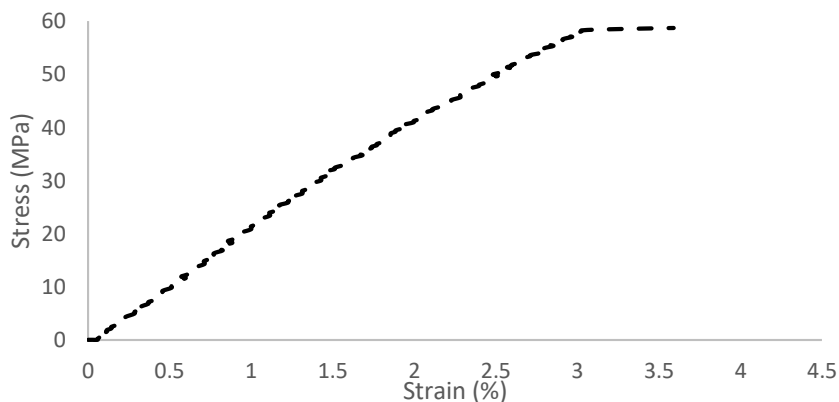
รูปที่ ๕.๖ กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นและค่าความเครียดของวัสดุเชิงประกอบผสมที่อัตราส่วน PLA 95.0 : Sisal 4.0 : Coir 1.0 ของการทดสอบ ครั้งที่ 3



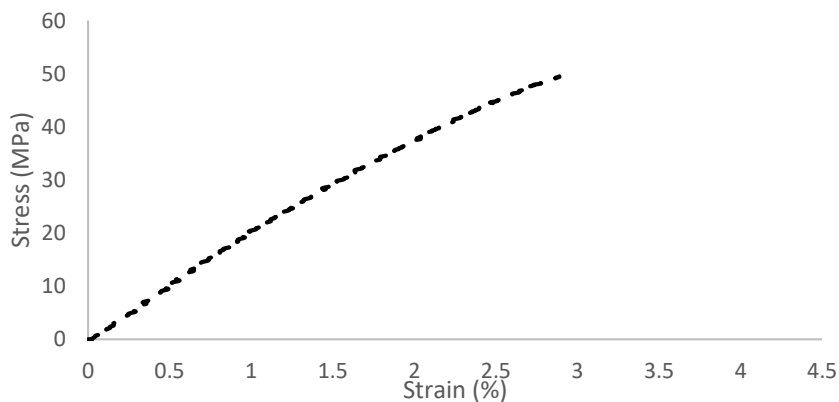
รูปที่ ๗.๑ กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นและค่าความเครียดของวัสดุเชิงประกอบผสมที่อัตราส่วน PLA 99.0 : Sisal 0.2 : Coir 0.8 ของการทดสอบ ครั้งที่ 1



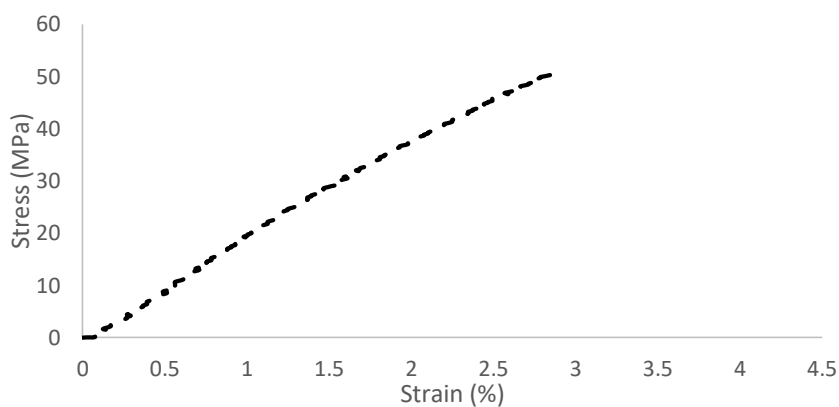
รูปที่ ๗.๒ กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นและค่าความเครียดของวัสดุเชิงประกอบผสมที่อัตราส่วน PLA 99.0 : Sisal 0.2 : Coir 0.8 ของการทดสอบ ครั้งที่ 2



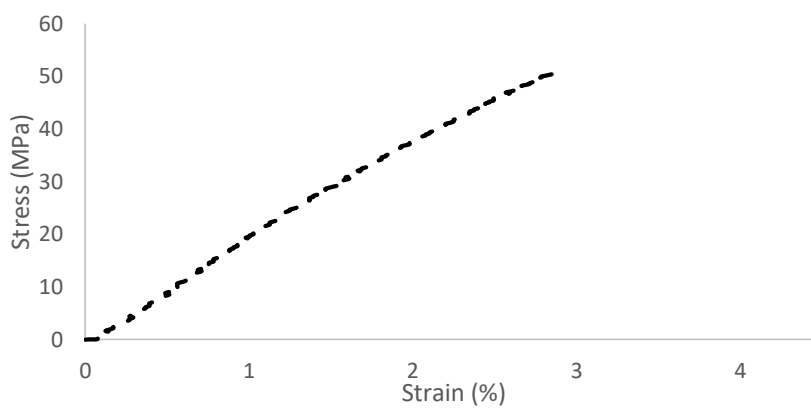
รูปที่ ๗.๓ กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นและค่าความเครียดของวัสดุเชิงประกอบผสมที่อัตราส่วน PLA 99.0 : Sisal 0.2 : Coir 0.8 ของการทดสอบ ครั้งที่ 3



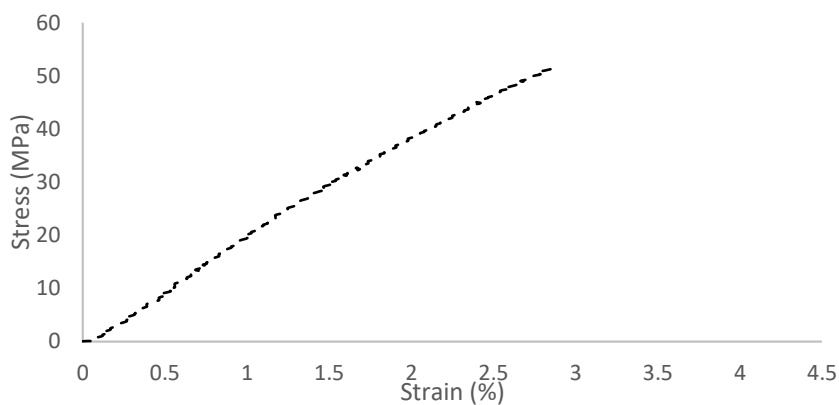
รูปที่ ๓.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นและค่าความเครียดของวัสดุเชิงประกอบผสมที่อัตราส่วน PLA 95.0 : Sisal 1.0: Coir 4.0 ของการทดสอบ ครั้งที่ 1



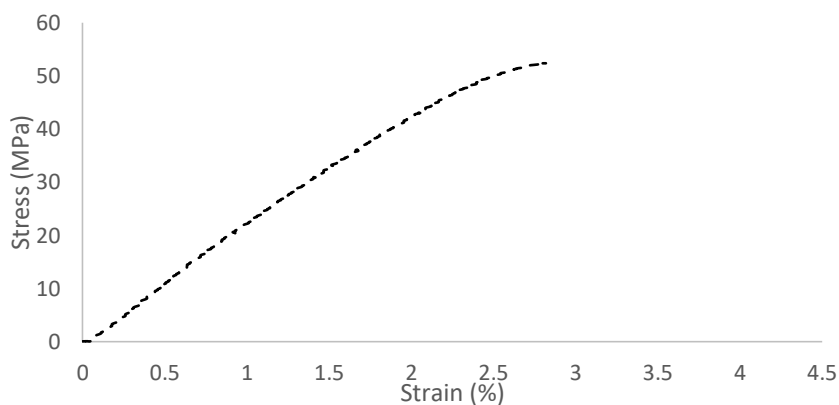
รูปที่ ๓.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นและค่าความเครียดของวัสดุเชิงประกอบผสมที่อัตราส่วน PLA 95.0 : Sisal 1.0: Coir 4.0 ของการทดสอบ ครั้งที่ 2



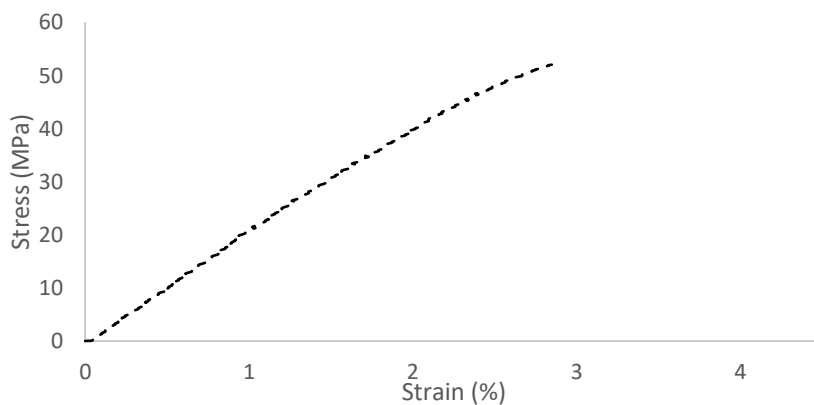
รูปที่ ๓.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นและค่าความเครียดของวัสดุเชิงประกอบผสมที่อัตราส่วน PLA 95.0 : Sisal 1.0: Coir 4.0 ของการทดสอบ ครั้งที่ 3



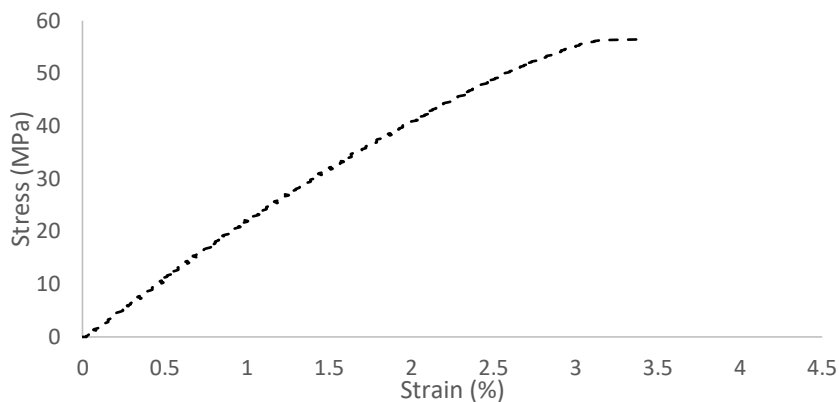
รูปที่ ๑๓.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นและค่าความเครียดของวัสดุเชิงประกอบผสมที่อัตราส่วน PLA 95.8 : Sisal 2.0 : Coir 4.0 ของการทดสอบ ครั้งที่ 1



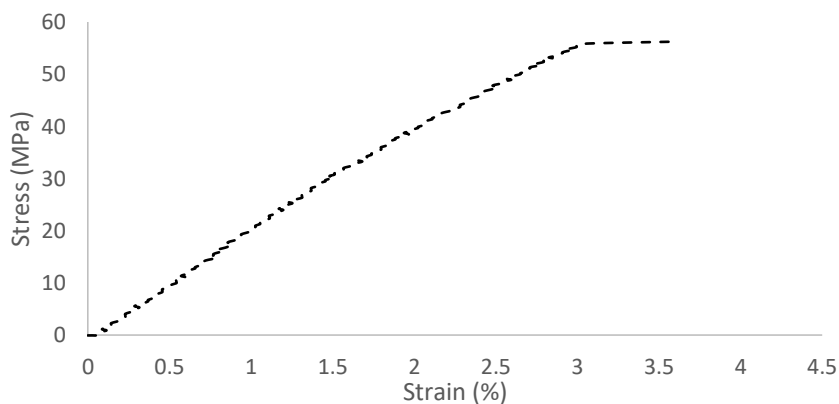
รูปที่ ๑๓.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นและค่าความเครียดของวัสดุเชิงประกอบผสมที่อัตราส่วน PLA 95.8 : Sisal 2.0 : Coir 4.0 ของการทดสอบ ครั้งที่ 2



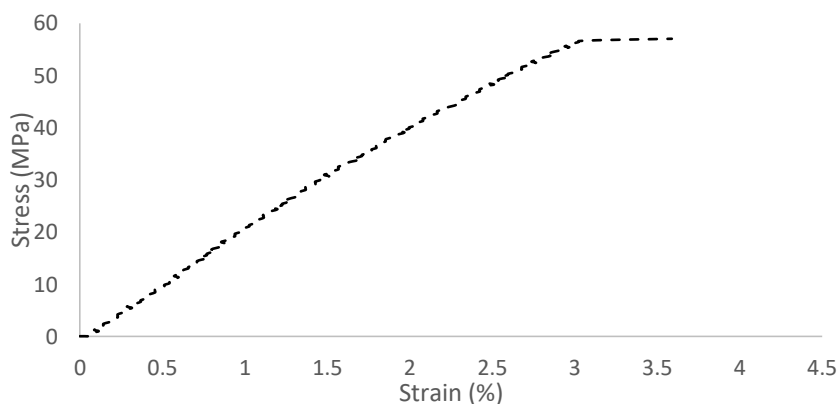
รูปที่ ๑๓.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นและค่าความเครียดของวัสดุเชิงประกอบผสมที่อัตราส่วน PLA 95.8 : Sisal 2.0 : Coir 4.0 ของการทดสอบ ครั้งที่ 3



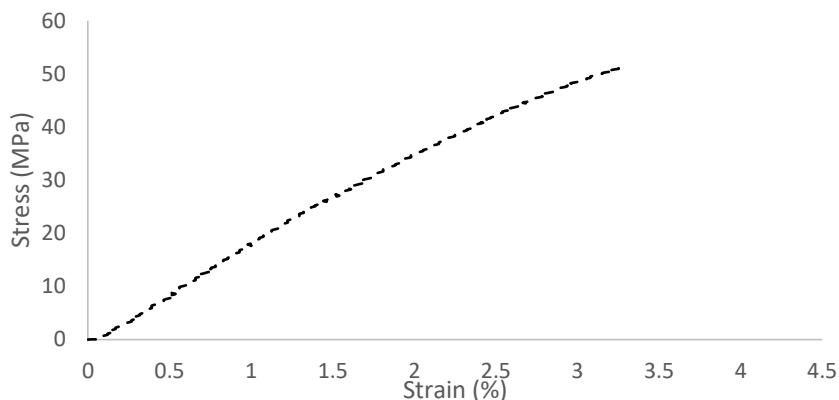
รูปที่ ๑๖.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นและค่าความเครียดของวัสดุเชิงประกอบผสมที่อัตราส่วน PLA 99.0 : Sisal 0.8 : Coir 0.2 ของการทดสอบ ครั้งที่ 1



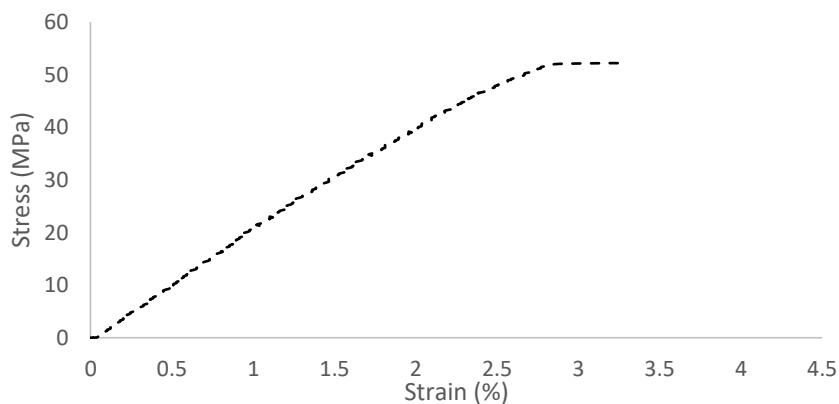
รูปที่ ๑๖.17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นและค่าความเครียดของวัสดุเชิงประกอบผสมที่อัตราส่วน PLA 99.0 : Sisal 0.8 : Coir 0.2 การทดสอบ ครั้งที่ 2



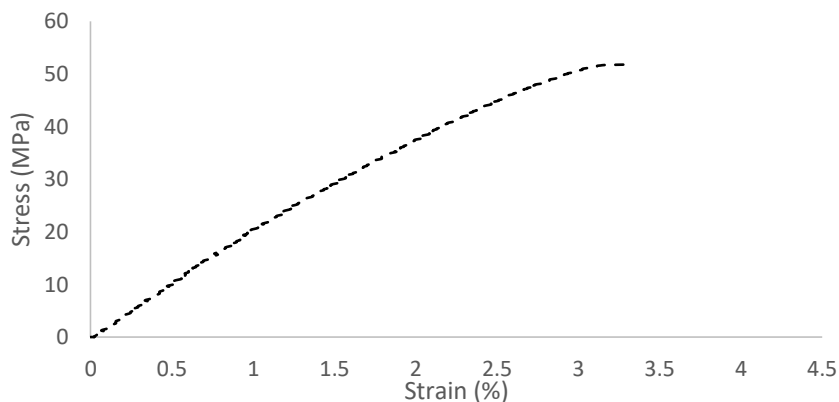
รูปที่ ๑๖.18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นและค่าความเครียดของวัสดุเชิงประกอบผสมที่อัตราส่วน PLA 99.0 : Sisal 0.8 : Coir 0.2 ของการทดสอบ ครั้งที่ 3



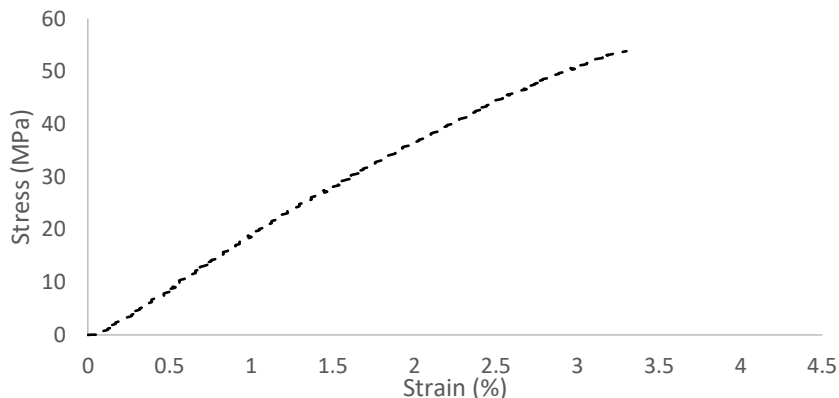
รูปที่ ๑๙.19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นและค่าความเครียดของวัสดุเชิงประกอบผสมที่อัตราส่วน PLA 95.8 : Sisal 4.0 : Coir 0.2 ของการทดสอบ ครั้งที่ 1



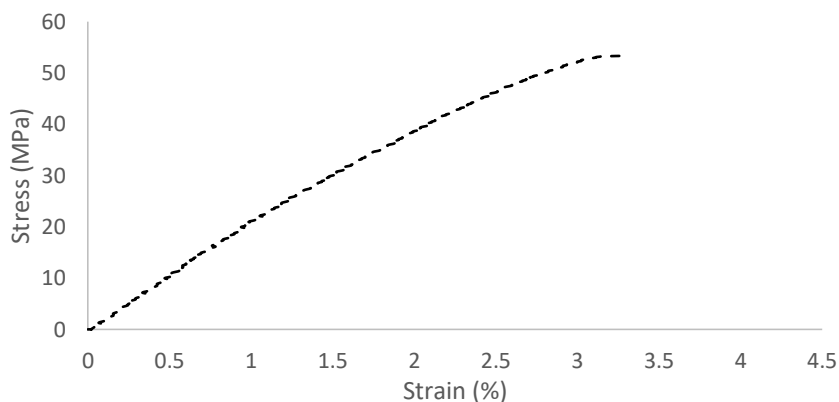
รูปที่ ๑๙.20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นและค่าความเครียดของวัสดุเชิงประกอบผสมที่อัตราส่วน PLA 95.8 : Sisal 4.0 : Coir 0.2 ของการทดสอบ ครั้งที่ 2



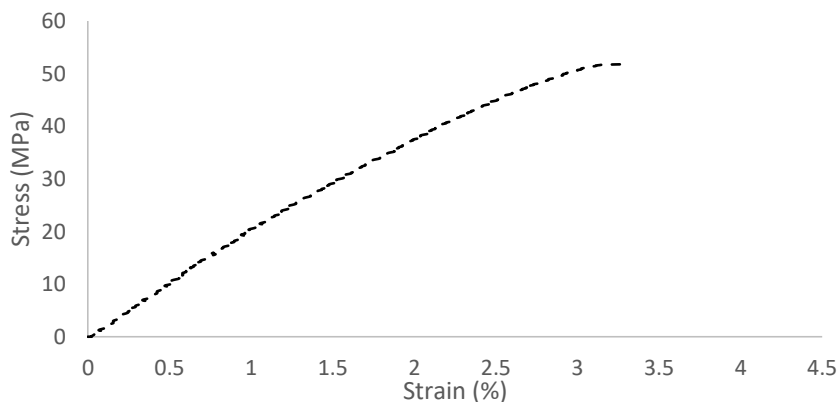
รูปที่ ๑๙.21 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นและค่าความเครียดของวัสดุเชิงประกอบผสมที่อัตราส่วน PLA 95.8 : Sisal 4.0 : Coir 0.2 ของการทดสอบ ครั้งที่ 3



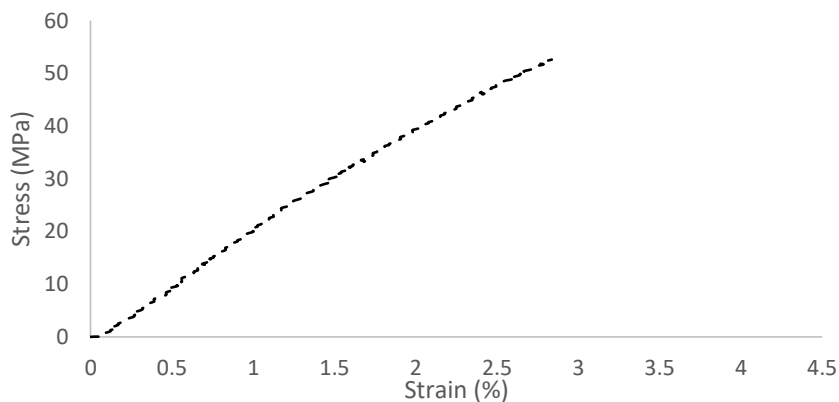
รูปที่ ๒๒.22 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นและค่าความเครียดของวัสดุเชิงประกอบผสมที่อัตราส่วน PLA 96.6 : Sisal 1.7 : Coir 1.7 ของการทดสอบ ครั้งที่ 1



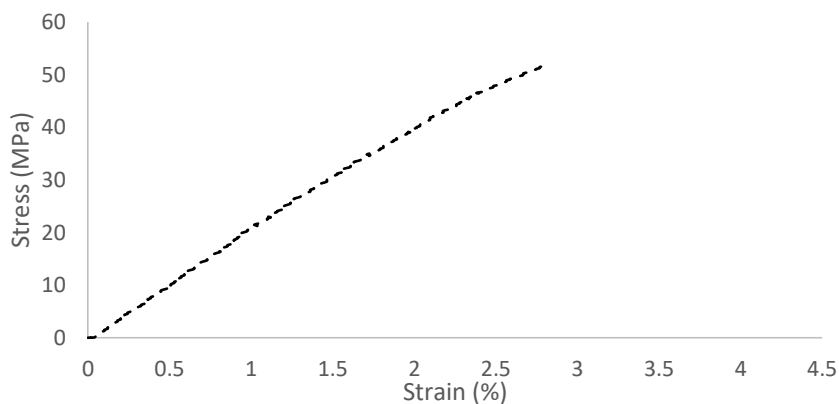
รูปที่ ๒๒.๒๓ กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นและค่าความเครียดของวัสดุเชิงประกอบผสมที่อัตราส่วน PLA 96.6 : Sisal 1.7 : Coir 1.7 ของการทดสอบ ครั้งที่ 2



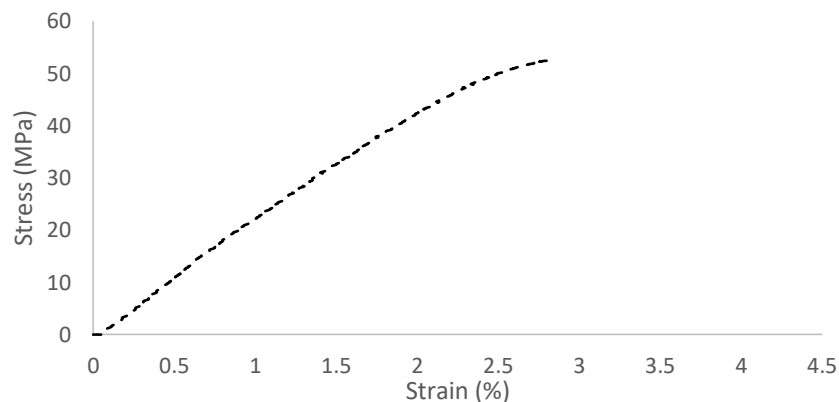
รูปที่ ๒๒.๒๔ กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นและค่าความเครียดของวัสดุเชิงประกอบผสมที่อัตราส่วน PLA 96.6 : Sisal 1.7 : Coir 1.7 ของการทดสอบ ครั้งที่ 3



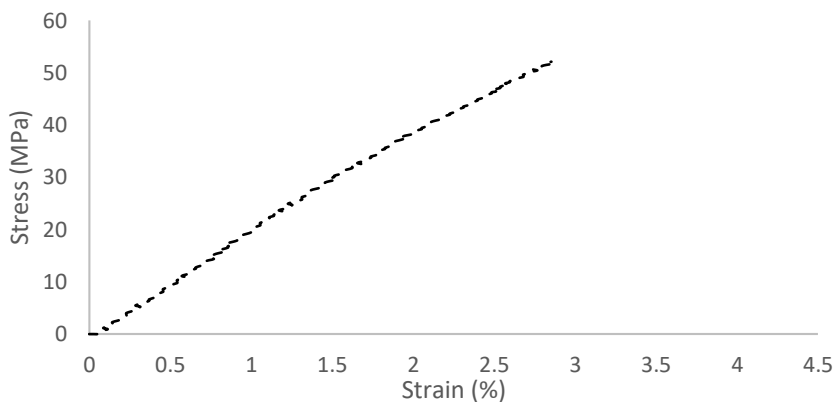
รูปที่ ๒๕.25 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นและค่าความเครียดของวัสดุเชิงประกอบผสมที่อัตราส่วน PLA 95.22 : Sisal 0.78 : Coir 4.0 ของการทดสอบ ครั้งที่ 1



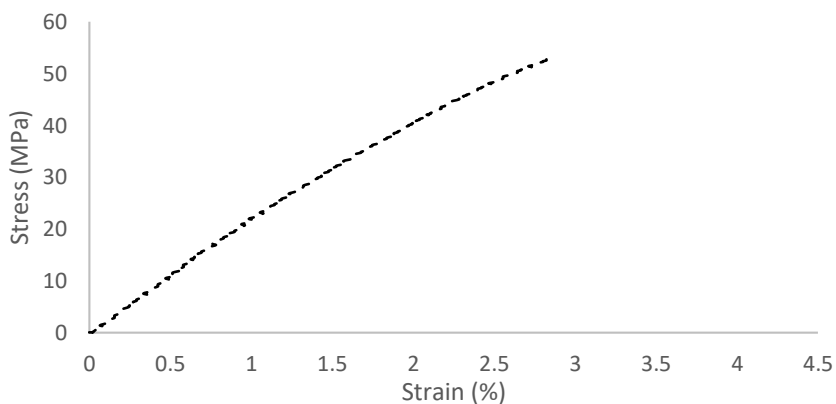
รูปที่ ๒๕.๒๖ กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นและค่าความเครียดของวัสดุเชิงประกอบผสมที่อัตราส่วน PLA 95.22 : Sisal 0.78 : Coir 4.0 ของการทดสอบ ครั้งที่ 2



รูปที่ ๒๕.๒๗ กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นและค่าความเครียดของวัสดุเชิงประกอบผสมที่อัตราส่วน PLA 95.22 : Sisal 0.78 : Coir 4.0 ของการทดสอบ ครั้งที่ 3



รูปที่ ๓.๒๘ กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นและค่าความเครียดของวัสดุเชิงประกอบผสมที่อัตราส่วน PLA 95.22 : Sisal 0.78 : Coir 4.0 ของการทดสอบ ครั้งที่ 4



รูปที่ ๓.๒๙ กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นและค่าความเครียดของวัสดุเชิงประกอบผสมที่อัตราส่วน PLA 95.22 : Sisal 0.78 : Coir 4.0 ของการทดสอบ ครั้งที่ 5

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นางสาวอารียา
นามสกุล	แพร์เมตตา
วัน เดือน ปี เกิด	27 พฤษภาคม พ.ศ. 2537
ประวัติการศึกษา	ระดับมัธยมศึกษา แผนการเรียน : คณิตศาสตร์ – วิทยาศาสตร์ สถานศึกษา : โรงเรียนบ้านบึง “อุตสาหกรรมนุเคราะห์” ปีที่สำเร็จการศึกษา : 2555 ระดับปริญญาตรี ภาควิชา : เคมี คณะ : วิทยาศาสตร์ สถานศึกษา : มหาวิทยาลัยบูรพา ปีที่สำเร็จการศึกษา : 2559

ผลงานทางวิชาการ

Praemettha A. and Sriseubsai W. 2018. “Poly(lactic Acid) hybrid natural fiber composites reinforced with sisal and coir” In **The 4th international Conference on Engineering, Applied Sciences and Technology**, July, 2018. Pp. 991-994