

การศึกษาส่วนผสมที่เหมาะสมของวัสดุเชิงประกอบจากผักตบชวา  
OPTIMIZATION OF COMPOSITE MATERIALS USING  
WATER HYACINTH



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2562

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# OPTIMIZATION OF COMPOSITE MATERIALS USING WATER HYACINTH



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
BACHELOR OF ENGINEERING IN INDUSTRIAL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
ACADEMIC YEAR 2019

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้


คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองปริญญาโท

หัวข้อปริญญาโท การศึกษาส่วนผสมที่เหมาะสมของวัสดุเชิงประกอบจากผักตบชวา  
OPTIMIZATION OF COMPOSITE MATERIALS USING WATER  
HYACINTH

นักศึกษา นางสาวพิมพ์ไทย สุภาวิมล รหัสประจำตัว 59010973  
นางสาวยุวดี จอกสูงเนิน รหัสประจำตัว 59011109

หลักสูตร วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญาโท

  
( รศ.ดร.กรรณชัย กัลยาศิริ )

  
( ดร.พชรพล ตันwirุเษฐ์ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์	การศึกษาส่วนผสมที่เหมาะสมของวัสดุเชิงประกอบจาก ผักตบชวา
นักศึกษา	นางสาวพิมพ์ไทย สุภาวิมล นางสาวยุวดี จอกสูงเนิน
หลักสูตร	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2562
ปีการศึกษา	
อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญานิพนธ์	รศ.ดร.กรรณชัย กัลยาศิริ ดร.เพชรพล ตันทวิรุพงษ์

### บทคัดย่อ

โครงการนี้เป็นการพัฒนาวัสดุเชิงประกอบจากผักตบชวา โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษา ส่วนผสมที่เหมาะสมระหว่างผักตบชวาและยางพาราที่ส่งผลต่อคุณสมบัติเชิงกล และคุณสมบัติทาง กายภาพ เนื่องจากผักตบชวาสร้างปัญหาให้กับแหล่งน้ำมากมาย ทั้งกีดขวางการคมนาคมทางน้ำ ทำ ให้น้ำเน่าเสีย และเกิดมลพิษทางน้ำ อีกทั้งยังสูญเสียสมดุลของระบบนิเวศใต้น้ำ ประกอบกับปัจจุบัน เกิดปัญหาเกี่ยวกับขยะพลาสติกมากขึ้น ส่งผลให้ผู้คนสนใจกลับมาใช้วัสดุที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม มากขึ้น ผู้วิจัยจึงนำผักตบชวามาเป็นวัตถุดิบหลักในการขึ้นรูปวัสดุต้นแบบ และใช้น้ำยางพาราเป็น วัสดุตัวประสาน โดยมีการผันแปรปริมาณของผักตบชวาและตัวประสาน และได้ศึกษาความสามารถ การดึงและการดูดซึมน้ำของวัสดุต้นแบบ จากการศึกษาพบว่าอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมของ ผักตบชวาและน้ำยางพาราที่ส่งผลต่อผลการตอบสนอง คือ ผักตบชวาแห้ง 29.15 เปอร์เซ็นต์และน้ำ ยางพารา 70.85 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และวัสดุต้นแบบนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นวัสดุในการ ผลิตบรรจุภัณฑ์ทางการเกษตรได้ เช่น ถังเพาะชำ กระจาดต้นไม้ เป็นต้น ซึ่งเป็นทางเลือกที่มีคุณค่า ต่อสิ่งแวดล้อม อีกทั้งยังเป็นการลดปริมาณขยะพลาสติกและการเผาขยะที่ก่อให้เกิดมลภาวะเป็นพิษ ต่อสิ่งแวดล้อม

<b>Thesis Title</b>	Optimization of Composite Materials using Water Hyacinth
<b>Student</b>	Miss Pimthai Supawimol Miss Yuwadee Choksungnoen
<b>Degree</b>	Bachelor of Engineering in Industrial Engineering King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
<b>Academic Year</b>	2019
<b>Thesis Advisors</b>	Assoc.Prof.Dr.Kannachai Kanlayasiri Dr.Phacharaphon Tunthawiroon

### ABSTRACT

This project is the development of mixture green composites using water hyacinth, intending to study a suitable mixture between water hyacinth and natural rubber that affects the mechanical properties and the physical properties. Due to a large number of water resource problems caused by water hyacinth, including transportation obstacles, water pollution, the loss of water system and the pollution of plastic waste have attracted people to pay attention to use more environmentally friendly materials. Therefore, we choose water hyacinth as a filler and select natural rubber as a binder for forming prototype materials, with variations in the number of water hyacinths and binders as appropriate then analyze the tensile strength and water absorption. According to the study, the optimal ratio of water hyacinth and natural rubber for the tensile strength and water absorption is 25.75 percent of dried water hyacinth and 74.25 percent of natural rubber by weight. Besides, this composite can be applied as materials for agricultural packaging production, such as nursery bags and plant pots which is precious to the environment and also reduces the amount of plastic waste and incineration of waste causing pollution.

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์เรื่อง “การศึกษาส่วนผสมที่เหมาะสมของวัสดุเชิงประกอบจากผักตบชวา” สามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณผู้มีส่วนเกี่ยวข้องที่กรุณาให้ความรู้ คำแนะนำ และตรวจทานแก้ไขข้อบกพร่อง กระทั่งโครงการฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.กรรณชัย กัลยาศิริ และดร.พชรพล ตันทวีรุฬห์ อาจารย์ที่ปรึกษา ที่กรุณาในการแนะนำและเสนอแนวทางแก้ไขข้อบกพร่องระหว่างการศึกษาวิจัยด้วยความเอาใจใส่ อย่างดียิ่ง ทำให้โครงการฉบับนี้มีความถูกต้อง และสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ นายกำธร สุขพิมาย และนายสิทธิชัย บุญกิจ ผู้ดูแลอาคารปฏิบัติการทางวิศวกรรม ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ที่ให้ความรู้ คำแนะนำ ดูแลช่วยเหลือ และแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้น ในการใช้เครื่องมืออุปกรณ์การทดลองและการทดสอบต่าง ๆ ระหว่างการศึกษาวิจัยจนกระทั่งสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ คณะอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ที่ได้ถ่ายทอดความรู้และประสบการณ์แก่ข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณ เจ้าของหนังสือ ตำรา เอกสาร และงานวิจัยอ้างอิงต่าง ๆ ที่เขียนเรียบเรียงรวบรวมข้อมูลและความรู้ต่าง ๆ ไว้เป็นอย่างดี ทำให้เป็นประโยชน์ต่อการศึกษาวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ บริษัท ไทยรับเบอร์ลาเท็กซ์กรุ๊ป จำกัด (มหาชน) และ โรงงานน้ำยางสดคุณพยอม อ.เมืองระยอง จ.ระยอง ที่ให้ความอนุเคราะห์น้ำยางพารา สำหรับการศึกษาวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องแยกาคัดขนาดแบบตะแกรง (Sieve Shaker) พร้อมตะแกรง 4 ขนาด และอุปกรณ์ต่าง ๆ สำหรับการคัดขนาดผักตบชวา แห่งในการศึกษาวิจัยครั้งนี้

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัวของข้าพเจ้าที่คอยอบรมสั่งสอน และเพื่อนทุกคนที่เป็นกำลังใจ และให้การสนับสนุนในทุกเรื่อง

นางสาวพิมพ์ไทย สุภาวิมล

นางสาวยุวดี จอกสูงเนิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ณ
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	3
1.3 ขอบเขตของปริญญานิพนธ์.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.5 แผนการดำเนินงาน.....	3
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง</b>	
2.1 ผักตบชวา.....	4
2.1.1 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของผักตบชวา.....	5
2.1.2 วัสดุฟิลเลอร์จากผักตบชวา.....	6
2.2 แป้งมันสำปะหลัง.....	6
2.2.1 ลักษณะและคุณสมบัติของแป้งมันสำปะหลัง.....	7
2.3 ผงซัน.....	7
2.3.1 การเกิดขึ้นและการทำผงซัน.....	7
2.4 กาวลาเท็กซ์.....	8
2.4.1 พอลิไวนิลอะซิเตต.....	8
2.4.2 คุณสมบัติ.....	8
2.4.3 กาวลาเท็กซ์ ยี่ห้อ ทีโอเอ รุ่นแอลเอ 22 เอส.....	8
2.5 ยางพารา.....	9
2.5.1 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของยางพารา.....	9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

	หน้า
2.5.2 คุณสมบัติของยางพารา .....	11
2.6 เครื่องอบชนิดลมร้อน .....	11
2.6.1 หลักการทำงานของเครื่องอบชนิดลมร้อน .....	12
2.7 เครื่องทดสอบแรงดึง.....	13
2.7.1 หลักการทำงานของเครื่องทดสอบแรงดึง .....	14
2.8 เครื่องกวนสาร .....	14
2.8.1 หลักการทำงานของเครื่องกวนสาร.....	15
2.9 เครื่องเขย่าคัดขนาดแบบตะแกรง.....	15
2.9.1 หลักการทำงานของเครื่องเขย่าคัดขนาดแบบตะแกรง .....	16
2.10 เครื่องอัดขึ้นรูป.....	16
2.10.1 หลักการทำงานของเครื่องอัดขึ้นรูป .....	17
2.11 การออกแบบการทดลอง .....	17
2.11.1 การออกแบบการทดลองแบบส่วนผสม .....	18
2.12 โปรแกรม Design Expert .....	19
2.12.1 หลักการทำงานของโปรแกรม Design Expert.....	20
2.13 สมบัติทางกลและการทดสอบ .....	20
2.13.1 สมบัติทางกล.....	20
2.13.2 การทดสอบแรงดึง.....	22
2.13.3 มาตรฐานการทดสอบแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบ .....	24
2.14 สมบัติทางกายภาพและการทดสอบ .....	24
2.14.1 การทดสอบการดูดซึมน้ำ.....	25
2.14.2 มาตรฐานการทดสอบการดูดซึมน้ำของกระดาษและบอร์ด .....	25
2.15 การวิเคราะห์ทางสถิติ.....	25
2.15.1 การใช้ P-value ในการทดสอบสมมติฐาน.....	26
2.15.2 การวิเคราะห์ถดถอย .....	26
2.15.3 การวิเคราะห์การแพร่กระจายของข้อมูล .....	27

## สารบัญ

หน้า

### บทที่ 3 วิธีการดำเนินการ

3.1 การสร้างชิ้นงานต้นแบบ.....	29
3.1.1 วัสดุและอุปกรณ์.....	29
3.1.2 วิธีการทำชิ้นงานต้นแบบเพื่อค้นหาตัวประสานที่เหมาะสม.....	30
3.1.3 การออกแบบการทดลอง.....	35
3.1.4 การสร้างชิ้นงานต้นแบบจากการทดลองอัตราส่วนผสมที่เหมาะสม.....	36
3.2 การทดสอบแรงดึง.....	38
3.2.1 วัสดุและอุปกรณ์.....	38
3.2.2 วิธีการทดลอง.....	38
3.3 การทดสอบการดูดซึมน้ำ.....	39
3.3.1 วัสดุและอุปกรณ์.....	39
3.3.2 วิธีการทดลอง.....	39

### บทที่ 4 ผลการดำเนินการ

4.1 ผลการทดลองการหาตัวประสานที่เหมาะสม.....	41
4.1.1 ผลการทดลองชิ้นงานที่ 1 รูปแบบตัวประสานแป้งมันสำปะหลังและผงชั้น.....	41
4.1.2 ผลการทดลองชิ้นงานที่ 2 รูปแบบตัวประสานแป้งมันสำปะหลังและ กาวลาเท็กซ์.....	42
4.1.3 ผลการทดลองชิ้นงานที่ 3 รูปแบบตัวประสานกาวลาเท็กซ์.....	42
4.1.4 ผลการทดลองชิ้นงานที่ 4 รูปแบบตัวประสานน้ำยาพารา.....	43
4.2 ผลการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุเชิงประกอบ.....	43
4.2.1 ผลการทดสอบความสามารถการดึง.....	43
4.2.2 ผลการทดสอบการดูดซึมน้ำ.....	43
4.3 ผลการวิเคราะห์การออกแบบการทดลองที่เหมาะสม.....	46
4.3.1 ผลการวิเคราะห์ถดถอยทางสถิติ.....	46
4.3.2 ผลการวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนของข้อมูล.....	50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลการดำเนินการและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการดำเนินการ .....	52
5.2 อภิปรายผล.....	53
5.3 ข้อเสนอแนะ .....	53
เอกสารอ้างอิง .....	55
ภาคผนวก .....	ผ1



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงาน.....	3
ตารางที่ 2.1 สูตรกาวลาเท็กซ์ ชนิดโพลีไวนิลอะซิเตด อิมัลชัน.....	9
ตารางที่ 4.1 ค่าแรงดึงที่มากที่สุดจากการทดสอบแรงดึงและค่าความเค้นแรงดึง.....	44
ตารางที่ 4.2 ค่าการดูดซึมน้ำโดยวัดจากน้ำหนักก่อนและหลังแช่น้ำ.....	45
ตารางที่ 4.3 การวิเคราะห์รูปแบบทางสถิติสำหรับการทดลองแบบผสมของ ความสามารถการดึงและ การดูดซึมน้ำ.....	46
ตารางที่ 4.4 การวิเคราะห์ LACK OF FIT สำหรับการทดลองแบบผสมของ ความสามารถการดึงและ การดูดซึมน้ำ.....	46
ตารางที่ 4.5 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของแต่ละส่วนผสมที่กำหนด.....	50
ตารางที่ 4.6 การกำหนดรูปแบบความพึงพอใจของการแพร่กระจายความคลาดเคลื่อน ทั้ง 2 ผลการ ตอบสนอง.....	50
ตารางที่ 4.7 ผลการวิเคราะห์การแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนและความพึงพอใจในผลการตอบ สอนง.....	51
ตารางที่ 4.8 ส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดจากการกำหนดค่าปัจจัยของแบบจำลอง ที่มีค่าความพึง ปรารถนาสูงสุด.....	51

## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบของผักตบชวา.....	5
รูปที่ 2.2 แผนภูมิเปอร์เซ็นต์ขององค์ประกอบในผักตบชวา.....	6
รูปที่ 2.3 ชั้นแก่.....	7
รูปที่ 2.4 ชั้นอ่อน.....	7
รูปที่ 2.5 โครงสร้าง POLYVINYL ACETATE.....	8
รูปที่ 2.6 ส่วนประกอบของต้นยางพารา.....	10
รูปที่ 2.7 ตู้อบลมร้อนยี่ห้อ MEMMERT UF110 รุ่น UN SERIES.....	12
รูปที่ 2.8 องค์ประกอบพื้นฐานของเครื่องอบชนิดลมร้อน.....	13
รูปที่ 2.9 เครื่องทดสอบแรงดึง AG-X SERIES SHIMADZU PRECISION UNIVERSAL TESTER.....	14
รูปที่ 2.10 เครื่องกวนสาร OTPLATE MAGNETIC STIRRER HTS-1003.....	15
รูปที่ 2.11 เครื่องเขย่าคัดขนาดแบบตะแกรงพร้อมตะแกรง 4 ขนาด.....	16
รูปที่ 2.12 เครื่องอัดขึ้นรูป.....	17
รูปที่ 2.13 แผนภาพจำลองการทดลองแบบซิมเพิล็กซ์แอกเซียล.....	19
รูปที่ 2.14 การเกิดคอคอดของขึ้นทดสอบจากวัสดุเหนียวทั่วไป.....	23
รูปที่ 2.15 รูปร่างและขนาดชิ้นงานทดสอบแรงดึง.....	24
รูปที่ 3.1 ผักตบชวาส่วนลำต้นที่ล้างแล้ว.....	30
รูปที่ 3.2 ผักตบชวาขนาด 0.5 – 1 นิ้ว.....	30
รูปที่ 3.3 ปั่นละเอียดด้วยเครื่องปั่น.....	31
รูปที่ 3.4 ผักตบชวาละเอียด.....	31
รูปที่ 3.5 ตากผักตบชวาที่ละเอียด.....	31
รูปที่ 3.6 อบผักตบชวา.....	32
รูปที่ 3.7 ผักตบชวาแห้งละเอียด.....	32
รูปที่ 3.8 คัดขนาดผักตบชวาด้วยเครื่องเขย่าคัดขนาดแบบตะแกรง (SIEVE SHAKER).....	33
รูปที่ 3.9 กัดทับชิ้นงาน.....	35
รูปที่ 3.10 เครื่องกัดชิ้นงาน.....	35
รูปที่ 3.11 ผลการทดลองสุ่มหาจำนวนของการทดลองในโปรแกรม DESIGN EXPERT.....	36

## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 3.12 แม่พิมพ์ที่เสร็จสมบูรณ์.....	37
รูปที่ 3.13 นำส่วนผสมใส่ในแม่พิมพ์ .....	37
รูปที่ 3.14 นำแม่พิมพ์เข้าเครื่องกดอัดความร้อน .....	38
รูปที่ 3.15 ชิ้นงานต้นแบบ .....	38
รูปที่ 3.16 การทดสอบแรงดึงด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง .....	39
รูปที่ 3.17 การทดสอบการดูดซึมน้ำ .....	39
รูปที่ 4.1 ชิ้นงานต้นแบบที่ประสานด้วยแป้งมันสำปะหลังและผงซัน (ก) ก่อนออกแรงหัก (ข) หลัง ออกแรงหัก.....	41
รูปที่ 4.2 ชิ้นงานต้นแบบที่ประสานด้วยแป้งมันสำปะหลังและกาวลาเท็กซ์ (ก) ก่อนออกแรงหัก (ข) หลังออกแรงหัก.....	42
รูปที่ 4.3 ชิ้นงานต้นแบบที่ประสานด้วยกาวลาเท็กซ์ (ก) ก่อนออกแรงหัก (ข) หลังออกแรงหัก.....	42
รูปที่ 4.4 ชิ้นงานต้นแบบที่ประสานด้วยน้ำยางพารา (ก) ก่อนออกแรงหัก (ข) หลังออกแรงหัก.....	43
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานแรงดึงและส่วนผสมของวัสดุเชิง ประกอบ.....	44
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซึมน้ำและส่วนผสมของวัสดุเชิง ประกอบ.....	45
รูปที่ 4.7 กราฟเปรียบเทียบสมการถดถอยและข้อมูลที่สังเกตได้ของค่าความต้านทานแรงดึง .....	47
รูปที่ 4.8 กราฟเปรียบเทียบสมการถดถอยและข้อมูลที่สังเกตได้ของค่าการดูดซึมน้ำ .....	47
รูปที่ 4.9 แผนภาพเศษเหลือ (RESIDUAL PLOT).....	48
รูปที่ 4.10 กราฟแสดงรูปแบบการจำลองการถดถอยของความสามารถการดึงในตัวแปรส่วน ประกอบเทียม .....	49
รูปที่ 4.11 กราฟแสดงรูปแบบการจำลองการถดถอยของการดูดซึมน้ำในตัวแปรส่วนประกอบ เทียม .....	49

# บทที่ 1

## บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดของงานวิจัย เรื่องการศึกษาส่วนผสมที่เหมาะสมของวัสดุเชิงประกอบจากผักตบชวา ดังแสดงในหัวข้อต่อไปนี้

1. ที่มาและความสำคัญ
2. วัตถุประสงค์
3. ขอบเขตของปริญญาานิพนธ์
4. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ
5. แผนการดำเนินงาน

### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

ทั่วโลกประสบปัญหาหมอกภาวะเป็นพิษและส่งผลกระทบรุนแรงขึ้นเรื่อย ๆ รวมถึงประเทศไทยที่ได้รับผลกระทบดังกล่าวเช่นกัน หนึ่งในมลภาวะเหล่านั้น คือ มลพิษทางน้ำ ซึ่งน้ำเป็นแหล่งกำเนิดของสัตว์น้ำและพืชหลากหลายชนิด นอกจากนั้นคุณสมบัติของน้ำที่เป็นประโยชน์สำหรับมนุษย์และสิ่งมีชีวิตมากที่สุดก็คือ น้ำบริสุทธิ์ สะอาด ปราศจากเชื้อโรคและสารพิษเจือปน ในอดีตมนุษย์สามารถนำทรัพยากรน้ำจากแหล่งน้ำตามธรรมชาติมาใช้ประโยชน์ได้ ต่างจากปัจจุบันที่เกิดปัญหาด้านคุณภาพของน้ำ หรือเกิดมลพิษทางน้ำจนไม่สามารถนำน้ำจากแหล่งน้ำตามธรรมชาติมาใช้ได้ [1] ซึ่งปัญหาเหล่านี้เกิดขึ้นได้จากหลายสาเหตุ หนึ่งในสาเหตุหลักคือ แหล่งน้ำตามธรรมชาติเกิดการเน่าเสียเนื่องจากอยู่ในภาวะที่ขาดออกซิเจน โดยส่วนมากรขาดออกซิเจนเกิดจากการเพิ่มจำนวนอย่างรวดเร็วของแพลงก์ตอน และพืชลอยน้ำต่าง ๆ จากการตายลงพร้อม ๆ กันของแพลงก์ตอน เมื่อจุลินทรีย์ทำการย่อยสลายซากแพลงก์ตอน ทำให้ออกซิเจนในน้ำถูกนำไปใช้มากจนเกิดการขาดแคลนส่งผลให้น้ำในแม่น้ำลำคลองเน่าเสีย [2] ซึ่งพืชลอยน้ำที่พบเห็นโดยทั่วไปและมีปริมาณมากในแหล่งน้ำธรรมชาติ คือ ผักตบชวา

ผักตบชวาถือเป็นวัชพืชที่มีอัตราการเจริญเติบโตสูง ทนทานต่อสภาพแวดล้อม อยู่ได้ทั้งในน้ำนิ่งและน้ำไหล มีการขยายพันธุ์อย่างรวดเร็วทั้งทางเมล็ดและการแตกหน่อ ดังนั้นจึงทำให้มีการแพร่ระบาดอย่างรุนแรง ก่อให้เกิดปัญหาต่อแหล่งน้ำหลายพื้นที่ทั่วประเทศ และสร้างปัญหาต่อระบบนิเวศในหลายประเทศทั่วโลก ทำให้ส่งผลเสียต่อเศรษฐกิจ สังคม และสิ่งแวดล้อม [3] ปัจจุบันยังไม่มีแนวทางที่จะกำจัดได้อย่างเด็ดขาด เนื่องจากเป็นพืชที่สามารถปรับตัวได้ในทุกสภาพน้ำและฤดูกาล

โดยผักตบชวา 1 ต้น มีเมล็ดถึง 5,000 เมล็ด เมล็ดผักตบชวาเมื่ออยู่ในแหล่งน้ำจะมีชีวิตได้นานถึง 15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
1  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปี และใน 1 เดือนผักตบชวา 1 ต้นอาจขยายพันธุ์ได้มากถึง 1,000 ต้น อีกทั้งผักตบชวาสามารถแพร่กระจายเพิ่มปริมาณเป็น 1 ล้านต้น ภายในระยะเวลาเพียง 1 ปี ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ผักตบชวาแพร่ระบาดอย่างรุนแรงในแถบที่ราบลุ่มภาคกลาง โดยเฉพาะในที่ราบลุ่มแม่น้ำเจ้าพระยาและแม่น้ำท่าจีน นอกจากนี้การเกิดมลภาวะทางเกษตรกรรม น้ำเสียจากชุมชน และอุตสาหกรรม ทำให้ในน้ำมีธาตุอาหารพืชสูง ส่งผลให้ผักตบชวาเติบโต และแพร่ระบาดอย่างรวดเร็ว ผลกระทบจากการแพร่กระจายของผักตบชวาในแหล่งน้ำและแม่น้ำต่าง ๆ ทำให้เกิดผลเสียทางเศรษฐกิจ สังคม และสิ่งแวดล้อม ทั้งด้านการชลประทาน และด้านการผลิตไฟฟ้า [4][5]

ตามพระราชบัญญัติสำหรับกำจัดผักตบชวา ผู้ที่อยู่ริมน้ำควรจะช่วยกันนำผักตบชวาชั้นไปเผาเพื่อไม่ให้สามารถกระจายพันธุ์ในที่อื่น ๆ ได้ต่อไป แต่เนื่องจากการเผาอาจก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศ และส่งผลเสียต่อสิ่งแวดล้อม ปัจจุบันภาครัฐบาลและเอกชนมีแนวทางในการกำจัดผักตบชวา โดยนำผักตบชวามาประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์ เช่น เป็นอาหารสัตว์ ผลิตภัณฑ์ชีวภาพ เครื่องจักรสาน เสื้อผ้า ภาชนะ ผลิตภัณฑ์ รวมถึงใช้เป็นวัสดุในการเพาะเห็ดฟาง หรือเพาะชำต้นไม้ [6]

เนื่องจากในยุคปัจจุบันมีการใช้พลาสติกอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรม มีการผลิตซ้ำในปริมาณมากเพื่ออำนวยความสะดวกให้กับชีวิตของผู้คน ซึ่งขยะพลาสติกมีมากถึง 8.3 พันล้านตัน ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เกิดภาวะโลกร้อนจากการกำจัดขยะด้วยการเผาแล้วปล่อยสารเคมีสู่อากาศ [7] โดยประเทศไทยประสบปัญหาปริมาณขยะพลาสติกจำนวนมากจากภาคการเกษตร เนื่องจากการเพาะปลูกพืชจำนวนมาก เกษตรกรนำเอาพลาสติกมาใช้เป็นถุงเพาะต้นกล้าหรือถุงเพาะชำพืช เมื่อนำต้นกล้าไปปลูกลงดิน ถุงเพาะต้นกล้าที่ทำจากพลาสติกไม่สามารถย่อยสลายในดินได้ จึงจำเป็นต้องนำถุงเพาะต้นกล้าออกก่อนนำลงดิน ซึ่งการกระทำดังกล่าวส่งผลทำให้รากของต้นกล้าเสียหาย อีกทั้งเศษถุงเพาะต้นกล้าก็เป็นปัญหาต่อสิ่งแวดล้อม หากนำไปกำจัดโดยการเผาหรือการฝังกลบ จะทำให้เกิดเป็นมลภาวะทางอากาศและทางดินได้

จากปัญหาที่เกิดขึ้นผู้วิจัยเห็นว่าการนำผักตบชวาที่ส่งผลเสียต่อสภาพแวดล้อม มาสร้างประโยชน์ให้แก่สิ่งแวดล้อม ด้วยคุณสมบัติของผักตบชวาที่ทนความร้อน และคุณสมบัติทางเคมีที่สามารถเพิ่มแร่ธาตุให้แก่ดินได้ [8] จึงเหมาะสมแก่การนำมาขึ้นรูปเป็นวัสดุเชิงประกอบ การวิจัยนี้จะนำผักตบชวามาเป็นวัตถุดิบหลักในการขึ้นรูปวัสดุต้นแบบ และใช้วัสดุจากธรรมชาติเป็นตัวประสาน โดยมีการผันแปรชนิดและปริมาณของผักตบชวาและตัวประสานด้วยการวิเคราะห์ทางสถิติ นอกจากนี้ยังศึกษาคุณสมบัติเชิงกลและคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุต้นแบบ โดยวัสดุต้นแบบนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นวัสดุในการผลิตบรรจุภัณฑ์ทางการเกษตรได้ เช่น ถุงเพาะชำ กระจาด ต้นไม้ เป็นต้น ซึ่งเป็นทางเลือกที่มีคุณค่าต่อสิ่งแวดล้อม อีกทั้งยังเป็นการลดปริมาณขยะพลาสติก และการเผาขยะที่ก่อให้เกิดมลภาวะเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม

## 1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาส่วนผสมที่เหมาะสมระหว่างผักตบชวาและน้ำยางพารา ที่ส่งผลต่อคุณสมบัติของวัสดุเชิงประกอบ

## 1.3 ขอบเขตของปริญญาานิพนธ์

1. ผักตบชวาแห้งประสานกับตัวประสานจากวัสดุธรรมชาติ คือ น้ำยางพารา
2. วัสดุเชิงประกอบจากผักตบชวาที่มีคุณสมบัติต้านทานแรงดึงและดูดซึมน้ำ

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบชนิดและปริมาณของตัวประสานจากวัสดุธรรมชาติที่มีผลต่อกายภาพผักตบชวา ในการขึ้นรูปเป็นวัสดุเชิงประกอบ
2. วัสดุเชิงประกอบที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม
3. ลดปริมาณผักตบชวาและปริมาณขยะพลาสติกให้มีปริมาณน้อยลง

## 1.5 แผนการดำเนินงาน

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงาน

รายการ	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
1. ศึกษาข้อมูล และทฤษฎีที่เกี่ยวข้องของ ผักตบชวา ตัวประสาน การขึ้นรูป และการทดสอบ	→	→								
2. ทดลองอัตราส่วนผสมของตัวประสาน เครื่องมือ และการขึ้นรูปชิ้นงานต้นแบบ			→	→						
3. ออกแบบการทดลองด้วย Mixture Design					→					
4. ศึกษาและลงมือทำแม่แบบของชิ้นงานต้นแบบ และขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดความร้อน						→	→			
5. ทดสอบคุณสมบัติทางกลและคุณสมบัติทางกายภาพของชิ้นงานต้นแบบ							→	→		
6. วิเคราะห์ทางสถิติ หาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสม								→		
7. รวบรวมเนื้อหาและทฤษฎีทำรูปเล่มปริญญา นิพนธ์									→	→

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงลักษณะของวัสดุ สารประกอบ เครื่องมือและอุปกรณ์ โปรแกรมในการออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง และทฤษฎีต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ซึ่งประกอบด้วยหัวข้อดังนี้

1. ผักตบชวา
2. มันสำปะหลัง
3. ผงซัน
4. กาวลาเท็กซ์
5. ยางพารา
6. เครื่องอบชนิดลมร้อน
7. เครื่องทดสอบแรงดึง
8. เครื่องกวนสาร
9. เครื่องคัดแยกขนาด
10. เครื่องอัดขึ้นรูปความร้อน
11. การออกแบบการทดลอง
12. โปรแกรม Design Expert
13. สมบัติทางกล และการทดสอบ
14. สมบัติทางกายภาพ และการทดสอบ
15. การวิเคราะห์ทางสถิติ

#### 2.1 ผักตบชวา

ผักตบชวาเป็นพืชน้ำล้มลุก มีถิ่นกำเนิดอยู่ในประเทศบราซิล ทวีปอเมริกาใต้ แถบลุ่มแม่น้ำแอมะซอน ผักตบชวาได้รับการค้นพบครั้งแรกในปี พ.ศ.2367 โดย Kari Von Matius นักพฤกษศาสตร์ชาวเยอรมัน และมีการขยายพันธุ์อย่างกว้างขวางไปในประเทศเขตร้อนและกึ่งเขตร้อนทั่วโลก สำหรับประเทศไทยผักตบชวาถูกนำเข้ามาจากประเทศอินโดนีเซีย ในปี พ.ศ. 2444 โดยนำมาปลูกครั้งแรกที่วังสระปทุมและได้แพร่กระจายออกไปตามแหล่งน้ำต่าง ๆ ทั่วประเทศ

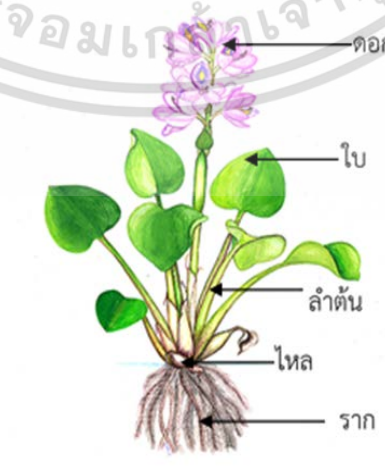
คนไทยมีชื่อผักตบชวาแตกต่างกันไปตามท้องถิ่น โดยภาคกลางใช้ชื่อ ผักปอด ผักตบปอง และผักสวะ ภาคใต้ใช้ชื่อ ผักตบ ภาคเหนือใช้ชื่อ ผักบัวลอย และภาคตะวันออกเฉียงเหนือใช้ชื่อ ผักโป่ง ผักบ่ง และผักปอง [9]

### 2.1.1 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของผักตบชวา

ผักตบชวา มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms และ มีชื่อสามัญว่า Lilac devil หรือ Water hyacinth เป็นพืชน้ำล้มลุก อยู่ในวงศ์ Pontederiaceae โดยมีส่วนประกอบ ดังรูปที่ 2.1 ประกอบด้วย ลำต้นที่มีหัวราก (Rhizomatous system) ลักษณะอวบน้ำ มีขนาด เส้นผ่านศูนย์กลางลำต้นประมาณ 5 – 6 เซนติเมตร และยาวประมาณ 30 เซนติเมตร ผิวลำต้นเรียบ มีสีเขียวอ่อนและเข้ม กลุ่มใบเรียงกันเป็นกลีบชั้น (Rosettes) ใบเป็นใบเดี่ยวรูปไข่หรือเกือบกลม ก้านใบกลมอวบน้ำ ตรงกลางพองออก ภายในเป็นรูพรุน ช่วยพยุงลำต้นให้ลอยน้ำได้ มีไหลเกิดตาม ซอกใบ ซึ่งไหลจะเจริญเติบโตเป็นต้นอ่อน มีดอกสีม่วงอ่อนเป็นช่อ ซึ่งดอกมีดอกย่อย 3 - 25 ดอก มีกลีบดอก 6 ผักตบชวามีระบบรากเป็นรากฝอย โดยแตกออกจากข้อบนของลำต้น มีความยาวตั้งแต่ 10 - 90 เซนติเมตร และมีสีม่วงดำ ถ้าน้ำตื้นผักตบชวาจะหยั่งรากลงดิน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการ ดูดซึมธาตุอาหารต่าง ๆ

ผักตบชวาเป็นพืชน้ำที่เจริญเติบโตได้รวดเร็ว โดยสามารถขยายพันธุ์ได้ทั้งแบบใช้เพศ (Sexual reproduction) และไม่ใช้เพศ (Vegetative propagation) แต่โดยทั่วไปนิยมขยายพันธุ์โดยการแตกหน่อ(แบบไม่ใช้เพศ) สำหรับการขยายพันธุ์แบบใช้เพศ พบการผสมเกสรภายในตนเอง (Self-pollination) เป็นหลัก แต่บางครั้งสามารถผสมข้ามต้นได้ โดยจะเกิดขึ้นเฉพาะฤดูแล้งเท่านั้น

ผักตบชวาสามารถอยู่ได้ทุกสภาพน้ำ ทั้งน้ำสกปรกและน้ำสะอาด เจริญเติบโตได้ดีในน้ำที่มี ค่า pH 4 - 10 และอุณหภูมิของน้ำไม่สูงกว่า 34 องศาเซลเซียส ส่วนประกอบส่วนมากของผักตบชวา ประกอบไปด้วยน้ำ โดยลำต้นของผักตบชวาจะมีน้ำเฉลี่ยประมาณร้อยละ 95 ใบร้อยละ 89 และใน ก้านใบร้อยละ 96 [10][11]

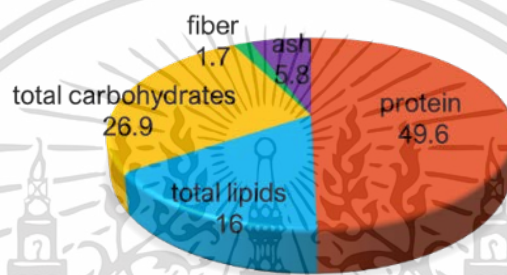


รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบของผักตบชวา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.1.2 วัสดุฟิลเลอร์จากผักตบชวา

เส้นใยธรรมชาติ ได้จากอินทรีย์วัตถุที่หาได้ง่ายตามธรรมชาติ ทั้งจากพืชและสัตว์ รวมไปถึง สัตว์ต่าง ๆ เพราะมีปริมาณมาก สามารถเกิดขึ้นใหม่ได้ มีราคาถูกกว่า เส้นใยสังเคราะห์ มีการนำ เส้นใยธรรมชาติจากพืชมาใช้ในการเสริมความแข็งแรงให้กับวัสดุผสมหรือวัสดุคอมโพสิต (Composite) มากมาย อาทิเช่น เส้นใยปอ เส้นใยสับปะรด เส้นใยปาล์ม เส้นใยมะพร้าว และ ผักตบชวา ซึ่งเป็นหนึ่งในเส้นใยธรรมชาติจากพืชที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ เนื่องจากผักตบชวามี องค์ประกอบที่สำคัญ ได้แก่ โปรตีน คาร์โบไฮเดรต ไขมัน เส้นใย และแร่ธาตุอื่น ๆ โดยแสดงร้อยละของ องค์ประกอบต่าง ๆ ในผักตบชวา ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แผนภูมิเปอร์เซ็นต์ขององค์ประกอบในผักตบชวา

ซึ่งในการนำเส้นใยธรรมชาติจากพืชมาใช้ในการเสริมความแข็งแรงให้กับวัสดุผสมหรือวัสดุคอมโพสิต (Composite) มักใช้พืชที่มีองค์ประกอบของเส้นใย จากองค์ประกอบของผักตบชวานั้นจะ เห็นได้ว่าในผักตบชวามีเส้นใย (Fiber) อยู่ประมาณ 1.7 เปอร์เซ็นต์ ถึงแม้ว่าจะมีอยู่ในปริมาณที่ไม่ มาก แต่ก็สามารถทำการเสริมสร้างความแข็งแรงได้ เนื่องจากในเส้นใยประกอบไปด้วยองค์ประกอบ ทางเคมี 3 ชนิด คือ เซลลูโลส (Cellulose), เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) และลิกนิน (Lignin) โดยในผักตบชวามีปริมาณลิกนินสูง ซึ่งลิกนินในผักตบชวานี้มีคุณสมบัติในการยึดติดเป็นสารเชื่อมติด ที่ดี ผักตบชวาจึงเหมาะสมสำหรับเป็นฟิลเลอร์ในการสร้างชิ้นงานต้นแบบ

## 2.2 แป้งมันสำปะหลัง

แป้ง (Starch) เป็นพอลิเมอร์ที่ได้จากธรรมชาติ เกิดจากโมโนแซคคาไรด์ (Monosaccharide) หลาย ๆ หน่วยมาต่อกัน สามารถย่อยสลายได้ง่าย มีลักษณะเป็นเม็ดเล็ก ๆ สีขาว ไม่มีรส ไม่มีกลิ่น และไม่ละลายในน้ำเย็นที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเจลาติไนซ์ (Gelatinization temperature) แต่เมื่อ ละลายในน้ำที่อุณหภูมิเกินแล้ว แป้งจะกลายเป็นเด็กซ์ตริน (Dextrin) ซึ่งเป็นสารที่มีรสหวานเล็กน้อย และเหนียวแบบกาว แป้งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากวัตถุดิบทางการเกษตร เช่น ข้าวโพด ข้าวสาลี ข้าว มันฝรั่ง และมันสำปะหลัง [12]

## 2.2.1 ลักษณะและคุณสมบัติของแป้งมันสำปะหลัง

แป้งมันสำปะหลัง คือ แป้งที่ได้จากหัวมันสำปะหลัง ลักษณะของแป้งมีสีขาว เนื้อแป้งเนียน ลื่นเป็นมัน โดยแป้งมันสำปะหลังประกอบด้วยเม็ดแป้งตั้งแต่ 2 - 8 เม็ดมารวมตัวกัน แต่ละเม็ดจะมีความยาวตั้งแต่ 5 - 35 ไมครอน โดยเม็ดแป้งมีลักษณะเป็นรูปไข่

คุณสมบัติพิเศษของแป้งมันสำปะหลัง คือ เมื่อถูกความร้อนหรือถูกสารเคมีจะมีความเหนียวเหน็ดขึ้นขึ้น และมีคุณสมบัติสามารถรักษาสภาพความเหนียวได้เหมือนเดิม ไม่มีการคืนตัวมี เนื่องจากมีคุณสมบัติเป็นสารยึดเกาะ จึงนิยมใช้ในอุตสาหกรรมกาว [13]

## 2.3 ผงชัน

ผงชันเป็นของป่าชนิดหนึ่งที่เป็นของเหลว ไหลออกมาจากส่วนต่างของต้นไม้ เช่น เปลือกไม้ หรือเนื้อไม้ ชันและยางไม้เกิดจากน้ำมันหอมระเหย (Voltaic oil หรือ Essential oil) ซึ่งมีกลิ่นและรสเฉพาะตัว เมื่อระเหยออกไปกระทบกับอากาศ สารเหลวที่เป็นยางไม้นี้จะค่อย ๆ แข็งตัวเป็นก้อนหรือแท่ง เรียกว่า ชัน (Hard resin) [14]

### 2.3.1 การเกิดชันและการทำผงชัน

ชันเกิดจากพืชตระกูลยาง เมื่อลำต้นถูกทำลายให้เกิดรอยแผลเป็นรูยาวลึกเข้าไปภายในลำต้น จะเกิดกระบวนการหลังยาแก้พิษหรือน้ำยางออกมา เพื่อรักษาแผล และหุ้มเนื้อเยื่อที่ถูกทำลาย น้ำยางเหลวเมื่อกระทบอากาศจะเหนียวข้นและแข็งตัวทันทีกลายเป็นน้ำยางแข็งหรือชัน (ชันอ่อน) พอกติดกับต้นไม้ ดังรูปที่ 2.3 และเมื่อกระบวนการปล่อยน้ำยางออกมารักษาแผลยังไม่สิ้นสุดจะมีการปล่อยน้ำยางออกมาเรื่อย ๆ โดยน้ำยางรุ่นต่อไปจะไหลออกมาพอกน้ำยางเดิมจนแข็งเพิ่มมากขึ้น (ชันแก่) ทำให้เกิดเป็นแท่งแหลมยื่นออกมาจากต้นไม้ ดังรูปที่ 2.4

การทำผงชันนั้นจะนำชันที่ได้จากธรรมชาติ ไปเข้ากระบวนการบดให้กลายเป็นผงละเอียด ก่อน จึงจะสามารถนำผงชันไปใช้ได้ ผงชันที่ได้จากธรรมชาติจะมีคุณสมบัติป้องกันน้ำ เนื่องจากมีส่วนผสมของยางต้นไม้ ซึ่งยางมีคุณสมบัติที่ป้องกันการซึมผ่านของน้ำได้ดี และชันมีกลิ่นฉุนที่เกิดจากยางไม้จึงสามารถป้องกันแมลงได้ [14]



รูปที่ 2.4 ชันอ่อน



รูปที่ 2.3 ชันแก่

## 2.4 กาวลาเท็กซ์

กาวลาเท็กซ์หรือวัสดุที่ใช้ประสานในรูปแบบน้ำเหนียวข้น คือ ส่วนผสมของของเหลวหรือวัสดุแข็งของเหลวที่สามารถเชื่อมติด หรือประสานวัสดุสองชิ้นหรือหลายๆชิ้นเข้าด้วยกัน กาวมีอยู่หลากหลายรูปแบบมีทั้งมาจากธรรมชาติหรือสารเคมีสังเคราะห์ ซึ่งการใช้งานกาวลาเท็กซ์ มักจะขึ้นอยู่กับวัสดุที่จะนำมาติดกัน ส่วนใหญ่ผลิตมาจากสารไฮโดรคาร์บอน ที่เรียกว่า Polyvinyl Acetate [15]

### 2.4.1 พอลิไวนิลอะซิเตต

พอลิไวนิลอะซิเตต (Polyvinyl Acetate : PVA) เป็นพอลิเมอร์ที่มีแขนงหนาแน่นมากกว่าชนิดอื่น ๆ มีลักษณะโมเลกุลแบบอะแทกติก (Atactic) ไม่มีความเป็นผลึก จึงมีลักษณะอ่อนนิ่มมาก เมื่อเทียบกับพอลิเมอร์ชนิดอื่น จนทำให้เป็นของเหลวข้นหนืด มีสีขุ่นขาวเมื่อแห้งจะใสมาก เนื่องจากความอ่อนนิ่ม จึงไม่สามารถนำมาหล่อขึ้นรูปด้วยวิธีแม่พิมพ์ใด ๆ [16]



รูปที่ 2.5 โครงสร้าง Polyvinyl Acetate

### 2.4.2 คุณสมบัติ

คุณสมบัติที่สำคัญ คือ ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น และไม่เป็นพิษ ทนต่อปฏิกิริยาออกซิเดชัน และเฉื่อยต่อรังสีอัลตราไวโอเล็ต (UV) ทนทานต่อจารบี ไขมัน และน้ำมันได้เป็นอย่างดี ใช้ทำกาวลาเท็กซ์ สีน้ำ พลาสติก ฟิล์มเคลือบผิวรูปถ่าย เคลือบพื้น นอกจากนี้ยังสามารถนำไปเตรียมเป็นโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinyl alcohol) และโพลีไวนิลอะซิเตต (Polyvinyl acetal) ได้ [17]

### 2.4.3 กาวลาเท็กซ์ ยี่ห้อ ทีโอเอ รุ่นแอลเอ 22 เอส

กาวลาเท็กซ์ ยี่ห้อ ทีโอเอ รุ่นแอลเอ 22 เอส (TOA No.LA-22S) เป็นกาวลาเท็กซ์ชนิดโพลีไวนิลอะซิเตต อิมัลชัน สูตรพิเศษที่ยืดเกาะดี ผสมสารป้องกันเชื้อรา ไม่มีสารปรอทและตะกั่ว ไม่เป็นอันตราย และยังมีคุณสมบัติการจับติดเป็นเนื้อเดียวกับชิ้นงาน โดยที่ไม่ทำลายพื้นผิว ไม่เกิดรอยต่าง และไม่ทิ้งคราบสกปรกเมื่อแห้ง เหมาะสำหรับยึดติดวัสดุประเภทกระดาษ ผ้า วอลเปเปอร์

และพลาสติก เป็นต้น [18] ซึ่งกาวลาเท็กซ์ ชนิดโพลีไวนิลอะซิเตต อิมัลชัน มีหลายสูตร โดยนำมา ยกตัวอย่าง 3 สูตร ดังตารางที่ 2.1 [19]

ตารางที่ 2.1 สูตรกาวลาเท็กซ์ ชนิดโพลีไวนิลอะซิเตต อิมัลชัน

ส่วนประกอบ	น้ำหนัก (กรัม)		
	สูตรที่ 1	สูตรที่ 2	สูตรที่ 3
vinyl acetate	75.0	75.0	40.0
acrylic acid	75.0	75.0	60.0
ethyl hydroxyethyl cellulose	75.0	52.0	30.0
cellulose powder	15.0	21.0	35.0
sodium bicarbonate	3.0	2.0	4.0
emulsifier	20.0	20.0	20.0
ammonium persulfate	2.25	1.13	1.13
sodium pyrosulfate	1.8	0.90	0.90
sodium acetate	5.0	5.0	5.0
acetic acid	2.6	2.6	2.6
water	580.0	740.0	740.0

## 2.5 ยางพารา

ยางพารา เป็นไม้ยืนต้น มีถิ่นกำเนิดอยู่ในประเทศบราซิล และประเทศเปรู บริเวณลุ่มแม่น้ำแอมะซอน ทวีปอเมริกาใต้ โดยชาวพื้นเมืองเรียกว่า เกาซู (Cao tchu) [20] ซึ่งเป็นพืชเศรษฐกิจที่ปลูกกันมายาวนานตั้งแต่อดีต สำหรับประเทศไทยได้เริ่มมีการปลูกยางพาราตั้งแต่ปี พ.ศ. 2445 โดยเริ่มต้นปลูกมากในเขตพื้นที่ภาคใต้ และกระจายการปลูกสู่ทุกภูมิภาคต่าง ๆ ทั่วประเทศในปัจจุบัน

### 2.5.1 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของยางพารา

ยางพารา มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ ว่า *Hevea brasiliensis* Mull-Arg. และมีชื่อสามัญว่า Para rubber เป็นไม้ยืนต้นในวงศ์ Euphorbiacea ซึ่งยางพารามีส่วนประกอบต่าง ๆ ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ส่วนประกอบของต้นยางพารา

มีรายละเอียดของส่วนประกอบ ดังนี้

1. **ราก** ระบบของต้นยางพาราเป็นรากแก้ว (Tap root system) เมื่ออายุ 3 ปี รากแก้วจะหยั่งลงดิน ยาวประมาณ 1 เมตร และมีรากแขนงที่แผ่ไปทางด้านข้าง ยาว 7 - 10 เมตร
2. **ลำต้น** มีลักษณะเป็นทรงกระบอก ความสูง 30 - 40 เมตร ต้นอ่อนเจริญเร็วมากทำให้เกิดช่วงปล้องยาว เมื่ออายุน้อยเปลือกเป็นสีเขียว แต่เมื่ออายุมากขึ้นสีของเปลือกเปลี่ยนเป็นสีเทาอ่อน เทาดำ หรือน้ำตาล เปลือกของลำต้นยางพาราแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วน คือ Cork เป็นส่วนที่เป็นเปลือกแข็งชั้นนอกสุด ชั้นถัดเข้ามาเป็น Hard bark ประกอบด้วย Parenchyma cell และ Disorganized sieve tube มีท่อน้ำยาง (Latex vessel) และ Soft bark เป็นส่วนในสุดของเปลือกที่อยู่ติดกับเนื้อเยื่อแคมเบียม (Cambium) ประกอบด้วย Parenchyma cell และ Sieve tube มีท่อน้ำยางซึ่งเวียนขึ้นจากซ้ายไปขวาทำมุม 30 - 35 องศากับแนวตั้ง ดังนั้นในการกรีดเอาน้ำยาง จึงต้องกรีดลงจากซ้ายไปขวาเพื่อตัดท่อน้ำยางให้ได้จำนวนมากที่สุด เปลือกของลำต้นที่ให้น้ำยาง คือ Hard bark และ Soft bark มีความหนารวมกัน 10 - 11 มิลลิเมตร น้ำยางที่ได้เป็นไซโทพลาสซึม (Cytoplasm) ที่อยู่ในท่อ หลังจากกรีดแล้วเปลือกจะเจริญได้เหมือนเดิมโดยใช้เวลา 7 - 8 ปี
3. **ใบ** เป็นใบประกอบ มีใบย่อย 3 ใบ มีต่อมน้ำหวานที่โคนก้านใบ แต่ละใบมีรูปร่างแบบโอเวท (Ovate) หรือเอลลิปติกอล (Elliptical) โดยยางพาราจะผลัดใบในช่วงต้นฤดูแล้ง ในประเทศไทยภาคใต้จะผลัดใบในเดือนมีนาคมถึงเดือนพฤษภาคม ส่วนภาคตะวันออกเฉียงเหนือจะผลัดใบในเดือนกุมภาพันธ์ถึงเดือนเมษายน
4. **ช่อดอกและดอก** มีช่อดอกเกิดตามปลายกิ่ง เป็นแบบพานิคิล (Panicle) มีกิ่งแขนงมาก ช่อดอกเกิดขึ้นพร้อมๆกับใบใหม่ที่ผลัดหลังจากผลัดใบ มีดอกตัวผู้และดอกตัวเมียแยกกันแต่อยู่บนช่อเดียวกัน

5. **ผลและเมล็ด** ผลเป็นแบบแคปซูล โดยทั่วไปมี 3 เมล็ด เมื่อแก่ผลจะแตกออก เกิดเสียงดัง เปลือกหุ้มเมล็ดจะมีลาย เมล็ดมีทั้งส่วนของเอนโดสเปิร์มและไบเลียง ไบเลียงมีโปรตีนประมาณร้อยละ 18 และมีน้ำมันสูงถึงร้อยละ 40 [21]

## 2.5.2 คุณสมบัติของยางพารา

ยางธรรมชาติ (NR) หรือยางพารา ได้จากการกรีดยางต้นยางพารา ลักษณะของน้ำยางที่ได้เป็นสีขาวขุ่น มีโครงสร้างการจัดเรียงตัวของโมเลกุลแบบอสัณฐาน (Amorphous) แต่ในบางสภาวะโมเลกุลของยางสามารถจัดเรียงตัวค่อนข้างเป็นระเบียบที่อุณหภูมิต่ำหรือเมื่อถูกยืด มันจึงสามารถเกิดผลึก (Crystallize) ได้ การเกิดผลึกเนื่องจากอุณหภูมิต่ำ (Low temperature crystallization) จะทำให้อย่างแข็งมากขึ้น แต่ถ้าอุณหภูมิสูงมากกว่า 50 องศาเซลเซียส (120 องศาฟาเรนไฮต์) ยางจะอ่อนลง และกลับสู่สภาพเดิมในขณะที่การเกิดผลึก เนื่องจากการยืดตัว (Strain induced crystallization) ทำให้อย่างมีสมบัติเชิงกลดี คือ มีความทนทานต่อแรงดึง (Tensile strength) มีความต้านทานต่อการฉีกตัวสูง มีความทนทานต่อการฉีกขาด (Tear resistance) สูงมากทั้งในอุณหภูมิห้องและอุณหภูมิสูง มีความทนทานต่อการขัดสี (Abrasion resistance) สูง มีความเป็นฉนวนไฟฟ้าสูงมาก และสามารถละลายได้ดีในตัวทำละลายที่ไม่มีขี้ เช่น เบนซีน เฮกเซน และโทลูอีน เนื่องจากตัวยางดิบไม่มีขี้ และไม่ทนต่อน้ำมันปิโตรเลียม แต่จะทนต่อของเหลวที่มีขี้ เช่น อะซิโตน หรืออัลกอฮอล์ นอกจากนี้ยังทนต่อกรดและด่างอ่อน แต่จะไม่ทนต่อกรดและด่างเข้มข้น ไวต่อการทำปฏิกิริยากับออกซิเจน แต่ไม่ทนต่อโอโซน อุณหภูมิการใช้งานตั้งแต่ -55 - 70 องศาเซลเซียส หากเก็บไว้นาน ๆ จะทำให้อย่างสูญเสียความยืดหยุ่นลง [22][23]

## 2.6 เครื่องอบชนิดลมร้อน

ตู้อบลมร้อนเป็นเครื่องมือพื้นฐานชนิดหนึ่งที่พบในห้องปฏิบัติการวิทยาศาสตร์ทั่วไป ใช้ในกรณีต่าง ๆ อาทิเช่น ใช้สำหรับการอบวัสดุและอุปกรณ์ต่าง ๆ ให้แห้ง ใช้รักษาอุณหภูมิของปฏิกิริยาในการตรวจวิเคราะห์ทางห้องปฏิบัติการบางชนิดให้คงที่ ใช้อบฆ่าทำลายเชื้อโรค ใช้อบเพาะเชื้อจุลินทรีย์ ใช้เผาตัวอย่างให้เป็นเถ้า (Ashing) เพื่อการนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องวัดการดูดกลืนแสงของอะตอม และใช้หาความชื้นในตัวอย่างใช้เผากากกัมมันตรังสี เป็นต้น [24]

ในการศึกษานี้ใช้เครื่องอบลมร้อนแบบมีพัดลม ยี่ห้อ MEMMERT UF110 รุ่น UN Series ดังรูปที่ 2.7 และมีรายละเอียดของเครื่อง ดังนี้



รูปที่ 2.7 ตู้บ่มร่อนยี่ห้อม MEMMERT UF110 รุ่น UN Series

รายละเอียด ได้แก่

1. ความจุ 108 ลิตร
2. ทำอุณหภูมิได้สูงสุด 300 องศาเซลเซียส
3. ตั้งเวลาการทำงานได้ 1 นาที ถึง 99 วัน หรือทำงานต่อเนื่อง
4. ควบคุมการทำงานด้วยระบบไมโครโพรเซสเซอร์ (Microprocessor) หรือซีพียู (CPU)
5. จอแสดงค่าอุณหภูมิเป็นแบบเรืองแสง (Color display)
6. มีระบบถ่ายความร้อนแบบการพาความร้อนแบบบังคับ (Forced convection)
7. ปรับอุณหภูมิได้ 2 หน่วย คือ องศาเซลเซียส ( $^{\circ}\text{C}$ ) และ องศาฟาเรนไฮต์ ( $^{\circ}\text{F}$ )
8. ควบคุมคำสั่งการทำงานด้วยระบบสัมผัส (Touchscreen)
9. สามารถปรับความแรงของพัดลมได้ (Fan speed)
10. ภายในและภายนอกตู้ทำด้วยสแตนเลส
11. มีชั้นวางของ 2 ชั้น
12. เลือกใช้ภาษาได้ 4 ภาษา คือ ภาษาเยอรมัน ภาษาอังกฤษ ภาษาสเปน และภาษา

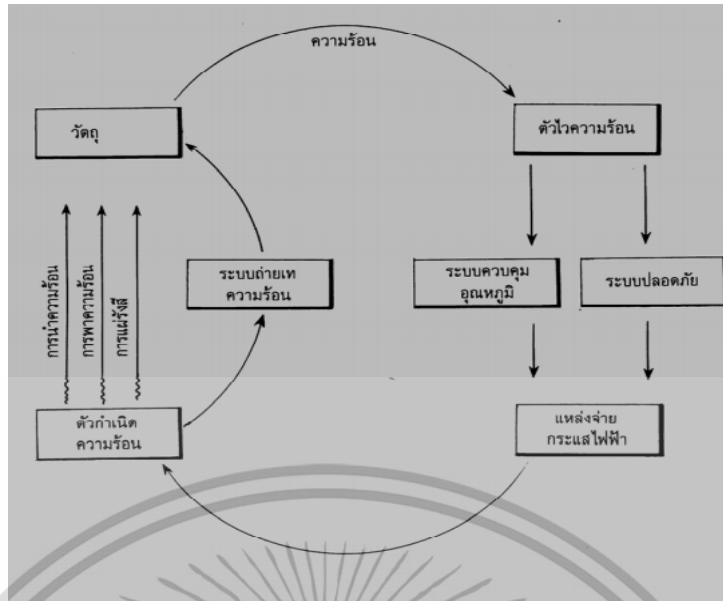
ฝรั่งเศส

13. มีพัดลมภายในตู้
14. ภายในตู้ มีขนาด 560 (กว้าง)  $\times$  480 (สูง)  $\times$  400 (ลึก) มิลลิเมตร
15. ภายนอกตู้ มีขนาด 745 (กว้าง)  $\times$  867 (สูง)  $\times$  584 (ลึก) มิลลิเมตร

### 2.6.1 หลักการทำงานเครื่องอบชนิดลมร้อน

ความร้อนจากแหล่งกำเนิดความร้อนถูกถ่ายเทให้วัตถุ โดยกระบวนการนำความร้อน (Conduction) การพาความร้อน (Convection) และการแผ่รังสี (Radiation) ความร้อนที่ถูกควบคุมอย่างเหมาะสมด้วยตัวไวความร้อนและระบบควบคุมอุณหภูมิ ทำให้วัตถุเกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะจากของแข็งเป็นของเหลว จากของเหลวเป็นไอ หรือจากของแข็งเป็นไอ ดังรูปที่ 2.8 [25]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 องค์ประกอบพื้นฐานของเครื่องอบชนิดลมร้อน

## 2.7 เครื่องทดสอบแรงดึง

เครื่องทดสอบแรงดึง เป็นเครื่องมือที่ใช้การทดสอบเนื้อสัมผัส (Texture analysis) โดยใช้แรงดึง (Tensile force) ดึงวัสดุอย่างช้า ๆ ทำให้วัสดุยืดยาวขึ้น โดยเพิ่มแรงดึงขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งชิ้นทดสอบขาด ในการศึกษานี้คณะผู้จัดทำใช้เครื่องทดสอบแรงดึง คือ AG-X Series Shimadzu Precision Universal Tester (100 kN, 5 kN) ดังรูปที่ 2.9 และมีรายละเอียดของเครื่อง ดังนี้

1. ความสามารถของเครื่อง (capacity) เท่ากับ 10N – 50 kN (Table top type)
2. ผลการทดสอบมีคุณภาพสูง มีช่วงความละเอียดสูง 1/1000 เท่าของโหลดเซลล์
3. เรียงค่าผลการทำงานอย่างต่อเนื่อง
4. แสดงผลด้วยค่าแรง และระยะการเคลื่อนที่
6. มีระบบ Over-stroke limit และ Emergency-stop switch ให้เคลื่อนที่ถูกต้องทางไม่เกินระยะที่กำหนดไว้ และมีปุ่มการเคลื่อนที่กลับ (Return)



รูปที่ 2.9 เครื่องทดสอบแรงดึง AG-X Series Shimadzu Precision Universal tester

### 2.7.1 หลักการทำงานของเครื่องทดสอบแรงดึง

เมื่อติดตั้งชิ้นงานเข้าที่จับชิ้นงานแล้ว จึงเริ่มสั่งโปรแกรมให้ทำงาน โดยโปรแกรมจะให้แรงดึงกับชิ้นทดสอบด้วยอัตราเร็วในการดึงคงที่ และบันทึกค่าค่าแรงดึง (Tension force) ที่เปลี่ยนไปตามระยะการยืดตัว (Deformation) ของวัสดุ โดยขณะชิ้นทดสอบยืดออกจะมีแรงต้าน ซึ่งแรงต้านของชิ้นงานทดสอบนี้ มีผลทำให้ตัววัดแรงสามารถวัดแรงออกมาได้ แรงที่วัดออกมามีหน่วยเป็นกิโลกรัม (kg) หรือนิวตัน (N) ในการทดสอบจะต้องดึงชิ้นทดสอบจนกระทั่งชิ้นทดสอบขาดออกจากกัน ซึ่งแรงต้านสูงสุดของชิ้นทดสอบเป็นผลที่ได้จากการวัดแรง ดังนั้นชิ้นงานทดสอบสามารถทนแรงดึงสูงสุดเท่ากับแรงต้านของชิ้นงานที่ทนได้ก่อนขาดจากกัน ลักษณะของผลที่ได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น (Stress) กับความเครียด (Strain) ซึ่งการบันทึกค่าต่าง ๆ จะบันทึกลงในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ [26][27]

### 2.8 เครื่องกวนสาร

เครื่องกวนสาร (Hot plate stirrer) เป็นอุปกรณ์ในห้องปฏิบัติการ ใช้สำหรับให้ความร้อน ในการศึกษาวิเคราะห์ผู้จัดทำใช้เครื่อง OTPLATE MAGNETIC STIRRER HTS-1003 ดังรูปที่ 2.10 และมีรายละเอียดของเครื่อง ดังนี้



รูปที่ 2.10 เครื่องกวนสาร HOTPLATE MAGNETIC STIRRER HTP-1002

รายละเอียด

1. ขนาด 20.5 x 26 x 11 เซนติเมตร
2. ขนาดเพลทความร้อน 19 x 19 เซนติเมตร
3. แรงดันไฟฟ้า 220 โวลต์ 50/60 เฮิรตซ์
4. กำลังไฟฟ้า 800 วัตต์
5. อุณหภูมิที่ใช้งานระหว่าง 60 - 420 องศาเซลเซียส

### 2.8.1 หลักการทำงานของเครื่องกวนสาร

เครื่องกวนสารมีหลักการทำงาน คือ สนามแม่เหล็กเกิดหมุนที่ความเร็วรอบ 60 - 1500 รอบต่อนาที เนื่องจากการเสียบปลั๊กเครื่องทำให้เกิดความร้อน และความร้อนที่เกิดขึ้นจะส่งไปยังแผ่นให้ความร้อนของเครื่องด้านบนที่ทำด้วยเหล็กแอสแตนเลสเคลือบเซรามิคหรือเพทให้ความร้อน ทำให้เครื่องมีความร้อน และเมื่อนำวัตถุที่ต้องการให้ความร้อนไปวางบนเพทให้ความร้อน จะเกิดการถ่ายโอนความร้อนทำให้วัตถุนั้นได้รับความร้อนด้วย [28]

### 2.9 เครื่องเขย่าคัดขนาดแบบตะแกรง

เครื่องเขย่าคัดขนาดแบบตะแกรง (Sieve shaker) เป็นเครื่องทดสอบเพื่อวิเคราะห์หาขนาดตัวอย่างวัตถุ ใช้ร่วมกับตะแกรงร่อนโดยการเขย่าตามมาตรฐาน AASHTO T27 โดยในงานวิจัยครั้งนี้ใช้ตะแกรงทั้งหมด 4 ขนาด คือ 850, 600, 450 และ 250 ไมครอน ดังรูปที่ 2.11 และมีรายละเอียดของเครื่อง ดังนี้



รูปที่ 2.11 เครื่องเขย่าคัดขนาดแบบตะแกรงพร้อมตะแกรง 4 ขนาด

#### รายละเอียด

1. เครื่องเขย่าคัดแยกขนาดแบบตะแกรง (Sieve Shaker) สามารถใช้กับตะแกรงที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 นิ้ว สูง 2 นิ้ว ใส่ตะแกรงได้สูงสุด 8 ชั้น
2. มีชุดขับเคลื่อนการสั่นสะเทือนอยู่ภายในแท่นฐานของเครื่อง มีระบบล๊อคตะแกรงอย่างแน่นหนา ใช้ไฟ 220 โวลต์
3. มีสวิตช์เปิด - ปิดเครื่อง และปุ่มตั้งค่าการทำงานของตัวเครื่อง [29]

#### 2.9.1 หลักการทำงานของเครื่องเขย่าคัดขนาดแบบตะแกรง

เมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่านเข้าเครื่อง ไฟฟ้าจะทำให้มอเตอร์เครื่องเกิดการสั่น เมื่อมอเตอร์สั่นทำให้บนฐานวางตะแกรง และตะแกรงที่วางซ้อนกันเกิดการสั่น ทำให้วัสดุภายในตะแกรงเกิดการเคลื่อนที่ผ่านรูตะแกรงชั้นต่าง ๆ

#### 2.10 เครื่องอัดขึ้นรูป

เครื่องอัดขึ้นรูป (Compression molding machines) หรือเครื่องกดไฮดรอลิก ใช้สำหรับการกดขึ้นรูปชิ้นงานตามแม่แบบโดยทั่วไป ดังรูปที่ 2.12 และมีรายละเอียดของเครื่อง ดังนี้



รูปที่ 2.12 เครื่องอัดขึ้นรูป

รายละเอียด

1. ใช้สวิตซ์ในการปรับความดันด้วยแรงดันไฟฟ้า
2. วาล์วไฟฟ้าเพื่อควบคุมทิศทางขึ้น - ลงของแผ่นอัด
3. สามารถเข้าถึงส่วนประกอบไฮดรอลิกได้ง่าย สะดวกต่อการบำรุงรักษา
4. แผ่นกั้นระหว่างตัวกดกับผู้ใช้เพื่อความปลอดภัย
5. วาล์วนิรภัยสำหรับการป้องกันแรงดันเกิน
6. ระบบปล่อยแรงดันในกรณีของไฟฟ้าขัดข้อง
7. ระบบแรงดันที่ประหยัดพลังงาน และเพิ่มอายุการใช้งาน
8. ยกเลิกการบีบอัดอัตโนมัติจากการตั้งเวลา
9. ระบบป้องกันอากาศอัดอัตโนมัติ
10. แผ่นทำความเย็นสำหรับพลาสติกที่มีความแข็ง

### 2.10.1 หลักการทำงานของเครื่องอัดขึ้นรูป

เครื่องจะใช้หลักการให้ความร้อนและการให้แรงดัน โดยเริ่มต้นจะทำการอุ่นแม่พิมพ์โดยใส่ในช่องว่าง ซึ่งแทนที่วางแม่พิมพ์จะมีการปล่อยความร้อนออกมาทำให้ความร้อนถ่ายไปยังแม่พิมพ์ จากนั้นเมื่อต้องการทำการกดอัดขึ้นรูปแม่พิมพ์ถูกปิดด้วยแรงดันบน โดยแทนที่วางแม่พิมพ์จะเคลื่อนที่มาประกบกัน และกดอัดแม่พิมพ์ แรงดันถูกใช้เพื่อบังคับให้วัสดุสัมผัสกับบริเวณแม่พิมพ์ทั้งหมด และรักษาความร้อนและแรงดันไว้จนกว่าวัสดุแข็งเป็นรูปร่างตามแม่พิมพ์ [30]

### 2.11 การออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment : DOE) เป็นการออกแบบเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความเหมาะสม โดยการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimization) ซึ่งอาศัยแบบจำลองหรือสมการทางคณิตศาสตร์มาอธิบายความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์

สามารถศึกษาผลของหลาย ๆ ปัจจัยพร้อมกันในเวลาเดียวกันด้วยวิธีใช้จำนวนการทดลองน้อยกว่า การศึกษาที่ละปัจจัย การออกแบบการทดลองจึงเป็นวิธีการเก็บข้อมูลที่มีประสิทธิภาพโดยการ เปลี่ยนแปลงหรือปรับค่าของปัจจัย (Factors) อย่างมีจุดมุ่งหมายที่จะสังเกตการเปลี่ยนแปลงของ ผลตอบ (Response) ที่เกิดขึ้นกระบวนการที่มีปัจจัย หรือผลตอบสนอง (Response : X1, X2, X3, X4) ต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อค่า Y ซึ่งเป็นคุณลักษณะด้านคุณภาพ (Quality characteristic) ของ กระบวนการ ในการออกแบบการทดลองต้องทำการทดลองอย่างเป็นระบบเพื่อหาความสัมพันธ์ เชิงสถิติของ Y และ X อื่น ๆ โดยที่พยายามใช้ทรัพยากรในการทดลองให้มีประสิทธิภาพมากที่สุด ความสัมพันธ์เชิงสถิติทำให้มีความรู้เกี่ยวกับกระบวนการ (Process knowledge) เพื่อนำไปปรับปรุง กระบวนการต่อไป [31]

### 2.11.1 การออกแบบการทดลองแบบส่วนผสม

การออกแบบการทดลองแบบส่วนผสม (Mixture design) เป็นการออกแบบการทดลองเพื่อ หาสัดส่วนที่เหมาะสมของปัจจัยเชิงปริมาณตั้งแต่ 2 ปัจจัยขึ้นไป โดยยึดหลักว่าผลรวมปริมาณของ ปัจจัยทั้งหมดจะต้องเป็น 1.0 (หรือ 100 เปอร์เซ็นต์) เสมอ ซึ่งมีวัตถุประสงค์ คือ สรรวจผลตอบสนอง เพื่อประมาณค่าพารามิเตอร์ของแต่ละส่วนประกอบที่จะทำให้ผลตอบสนองมีค่าที่ดีที่สุด หรือเป็นไป ตามที่ผู้ทดลองต้องการ จะแตกต่างจากการทดลองที่ไม่ใช่แบบผสม ที่ตัวแปรแต่ละตัวเป็น อิสระจากกันในการออกแบบการทดลอง [31] การออกแบบการทดลองแบบส่วนผสม แบ่งเป็น 4 แบบ ดังนี้

1. แบบเซฟเฟอิมเพล็กซ์แลตทิซ (Scheffe' Simplex-Lattice) เป็นการออกแบบสำหรับการ ทดลองที่มีส่วนผสมตั้งแต่ 2 ถึง 30 ส่วนผสม ซึ่งส่วนผสมทั้งหมดจะต้องมีสัดส่วนที่เท่ากันทุก ปัจจัย โดยจำนวนของการทดลองสามารถคำนวณได้ดังนี้

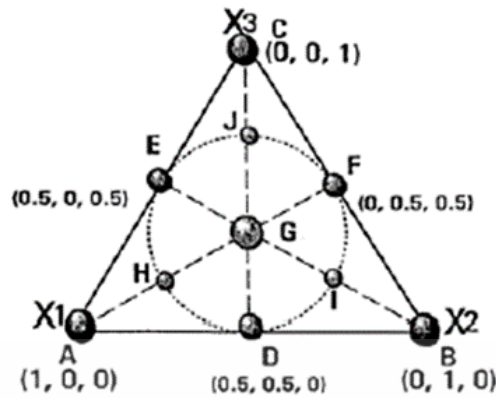
$$x_i = 0, \frac{1}{m}, \frac{2}{m}, \dots, 1 \quad (2.1)$$

โดยที่  $i = 1, 2, 3, \dots, n$

$m =$  เป็นสัดส่วนของแต่ละปัจจัยจาก 0 - 1 (0 - 100 เปอร์เซ็นต์)

2. แบบเซฟเฟอิมเพล็กซ์เซนทรอยด์ (Scheffe' Simplex-Centroid) เป็นการออกแบบ สำหรับการทดลองที่มีส่วนผสมตั้งแต่ 3 ถึง 8 ส่วนผสม ซึ่งส่วนผสมทั้งหมดต้องมีสัดส่วนที่เท่ากัน ทุกปัจจัย และไม่มีข้อจำกัดในเรื่องของปัจจัย

3. แบบซิมเพล็กซ์แอกเซียล (Simplex-Axial) หรือ Screening design เป็นการออกแบบ ส่วนผสมที่ใช้ในการประมาณแบบจำลองเชิงเส้น โดยเน้นจุดที่เป็นส่วนประกอบต่าง ๆ ของทุกปัจจัย ยกตัวอย่างเช่น จากรูปที่ 2.13 ให้จุดทรงกลมแทนปัจจัยในการทดลอง



รูปที่ 2.13 แผนภาพจำลองการทดลองแบบซิมเพล็กซ์แอกเซียล

สังเกตจากจุดเอช (H) ไอ (I) และเจ (J) โดย จุดทั้ง 3 มาจากจุดกึ่งกลางของแต่ละส่วนย่อย หากพิจารณาจุดเอ (A) ดี (D) และอี (E) จะมีลักษณะเป็นสามเหลี่ยมย่อย โดยมีจุดเอช (H) เป็นจุดกึ่งกลางสามเหลี่ยมดังกล่าว ซึ่งเป็นเช่นเดียวกับจุดไอ (I) และเจ (J) ซึ่งหมายความว่าสามารถศึกษาการออกแบบจากด้านใดก็ได้เพราะมีค่าเท่ากัน เนื่องจากการศึกษาและให้ความสนใจในจุดที่เป็นส่วนประกอบต่าง ๆ ของทุกปัจจัย

4. แบบเอ็กซ์ทรีมเวอร์ทีส (Extreme Vertices) หรือ Optimal (custom) designs เป็นการออกแบบการทดลองแบบที่มีข้อจำกัด คือ การทดลองนี้ระดับของปัจจัยในแต่ละปัจจัยไม่จำเป็นต้องเป็น 0 – 100 เปอร์เซ็นต์ อาจเป็น 30 – 40 เปอร์เซ็นต์ หรือ 15 – 25 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากความจำเป็นโดยพื้นฐานในการทดสอบบางอย่างที่อาจมีความแตกต่างกัน ซึ่งการออกแบบดังกล่าวนี้จะใช้เมื่อกระบวนการนั้น ต้องการปรับเปลี่ยนปัจจัยการทดสอบที่มี ความแตกต่างระหว่างค่าสูงต่ำขององค์ประกอบส่วนผสมทั้งหมด ในส่วนของจำนวนการทดลอง (Run) ในการออกแบบที่ดีที่สุด ขึ้นอยู่กับจำนวนเงื่อนไขในโมเดลและจำนวนบล็อกในโมเดล [31]

## 2.12 โปรแกรม Design Expert

โปรแกรม Design Expert เป็นซอฟต์แวร์ที่ออกแบบมาสำหรับ Microsoft Windows การออกแบบเวอร์ชัน 7.0 โดยมีภาพ 3 มิติเพิ่มเพื่อวิเคราะห์พื้นผิวสำหรับปัจจัยต่าง ๆ และค่าของผลกระทบโดยใช้แผนภูมิพาเรโต (Pareto chart) ในการเพิ่มเติมการทำงานอื่น ๆ รวมถึงความสามารถในการพิมพ์ จำกัดตัวแปรโดยตรงกับการออกแบบในรูปแบบอัตราส่วน ต่อมาได้พัฒนาการแยกรูปแบบการออกแบบ เช่น การทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ (Full factorial) การทดลองแบบเศษส่วนแฟกทอเรียล (Fractional factorial) และการทดลองแบบผสม (Mixture design) เป็นต้น โดยในงานวิจัยนี้ นำ Design Expert เวอร์ชัน 11.0 มาใช้ในการออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง [32][33][34]

### 2.12.1 หลักการทำงานของโปรแกรม Design Expert

โปรแกรม Design Expert ใช้ในการปรับปรุงผลิตภัณฑ์และกระบวนการด้วยซอฟต์แวร์การออกแบบผู้เชี่ยวชาญ ซึ่งจะคัดกรององค์ประกอบต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการทดลอง เช่น ปัจจัยและส่วนประกอบที่สำคัญ ลักษณะการโต้ตอบ การตั้งค่ากระบวนการที่ดีที่สุด และสูตรผลิตภัณฑ์ที่เหมาะสม โดยการตั้งค่าสถานะและสำรวจรูปทรงบนกราฟ 2 มิติ แต่สามารถเห็นภาพพื้นผิวการตอบสนอง (Response surface) จากทุกมุมมองด้วยการแปลงรูปทรงบนกราฟเป็นกราฟ 3 มิติ แบบหมุนได้ เพื่อบรรลุวัตถุประสงค์ในคำตอบที่ต้องการสามารถดูได้จากจุดที่ครอบคลุมทุกปัจจัยที่กำหนด (Sweet spot) ซึ่งจะตอบสนองทุกข้อกำหนด ทั้งหมดนี้แสดงให้เห็นว่า Design Expert เหมาะสำหรับเป็นเครื่องมือทดสอบของการทดลองหลายปัจจัย [35]

เป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพในการออกแบบการทดลองในอุดมคติ กระบวนการผสมหรือการรวมกันของปัจจัยและส่วนประกอบต่าง ๆ ซึ่งแก้ปัญหาค่าที่ผู้ใช้สร้างขึ้นด้วยการคำนวณแบบอินไลน์ (In-line power) การเพิ่มบล็อก และการเพิ่มจุดกึ่งกลาง ที่เป็นการออกแบบตัวช่วยของโปรแกรมนี้ และทำให้เค้าโครงใช้งานง่ายขึ้น เช่น การกำหนดค่าในการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล 2 ตัวแปร (Two-level factorials) หรือการออกแบบการทดลองแบบผสม (Mixture design) เป็นต้น โดยหลังจากวิเคราะห์ข้อมูลจะแสดงผลการวิเคราะห์เป็นความสำคัญทางสถิติ วิธีการจำลองผลลัพธ์และกราฟที่หลากหลายเพื่อเป็นตัวช่วยในการระบุผลกระทบและการแสดงผลลัพธ์

โดยรวมแล้ว Design Expert เป็นซอฟต์แวร์ทางสถิติจากสถิติที่ง่าย โดยมีจุดมุ่งหมายในดำเนินการออกแบบการทดลอง (DOE) โดยใน Design Expert มีการทดสอบเปรียบเทียบการตรวจคัดกรองลักษณะการเพิ่มประสิทธิภาพการออกแบบพารามิเตอร์ที่แข็งแกร่ง การออกแบบส่วนผสม และการออกแบบรวม ซึ่งในการออกแบบโดยผู้เชี่ยวชาญสำหรับการคัดกรองมีถึง 50 ปัจจัยนัยสำคัญทางสถิติของปัจจัยเหล่านี้จะจัดตั้งขึ้นโดยมีการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) และมีเครื่องมือแบบกราฟิกช่วยในการระบุผลกระทบของแต่ละปัจจัยในผลลัพธ์ที่ต้องการ เพื่อเผยให้เห็นความผิดปกติในข้อมูล [36][37]

## 2.13 สมบัติทางกลและการทดสอบ

### 2.13.1 สมบัติทางกล

สมบัติทางกล หมายถึง พฤติกรรมที่วัสดุแสดงออกมาเมื่อมีแรงภายนอกมากระทำ เช่น ความแข็งแรง ความแข็ง ความยืดหยุ่น และความเหนียว เป็นต้น ซึ่งสมบัติทางกลนั้นเป็นสมบัติที่มีความสำคัญที่สุดในการเลือกใช้วัสดุในงานวิศวกรรม หากออกแบบเครื่องจักร หรือโครงสร้างใด ๆ ต้องเลือกใช้วัสดุที่มีความแข็งแรง (Strength) ที่สามารถต้านทานต่อแรงกระทำ (Load) ต่าง ๆ ได้โดยไม่เกิดการเสียหาย (Failure) เช่น ไม่เกิดการแตกร้าวของโครงสร้าง เป็นต้น นอกจากนี้เครื่องจักรหรือโครงสร้างที่ออกแบบจะต้องมีความแกร่ง (Stiffness) ที่เพียงพอภายใต้แรงกระทำ โดยที่ไม่เกิด

การเปลี่ยนแปลงรูปร่างมากนักจนทำให้เครื่องจักรหรือโครงสร้างเสียความสามารถในการปฏิบัติหน้าที่ตามวัตถุประสงค์การออกแบบ [38]

2.13.1.1 การเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (Deformation) เมื่อมีแรงภายนอกกระทำกับวัสดุ จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง หรือการเสียรูปขึ้น สำหรับวัสดุพอลิเมอร์สามารถแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ การเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบยืดหยุ่น (Elastic deformation) และการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบถาวร (Plastic deformation) ซึ่งในการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบยืดหยุ่น จะเกิดขึ้นกับวัสดุที่เมื่อให้แรงกระทำจนวัสดุนั้นเปลี่ยนแปลงรูปร่างหรือเสียรูปไป แต่จากนั้นเมื่อปล่อยแรงกระทำดังกล่าว วัสดุจะกลับสู่สภาพเดิมเหมือนก่อนที่จะมีแรงมากระทำ เช่น พฤติกรรมของยางวงเมื่อให้แรง และปล่อยแรงกระทำในทางตรงกัน ข้ามกัน การเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบถาวร (Plastic deformation) จะเกิดขึ้นกับวัสดุเมื่อมีแรงมากระทำจนเปลี่ยนแปลงรูปร่างไปจากเดิมแล้ว แต่เมื่อปล่อยแรงกระทำดังกล่าวออก วัสดุนั้นจะไม่กลับสู่สภาพเดิม หรือกลับสู่สภาพเดิมไม่ครบ 100 เปอร์เซ็นต์ เช่น การงอหรือตัดลวดโลหะเป็นรูปร่างต่าง ๆ [38]

2.13.1.2 ความเค้น (Stress) แรงต้านทานภายในเนื้อวัสดุที่พยายามต้านทานแรงภายนอกที่มากระทำ เพื่อไม่ให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างไปจากเดิม แรงที่มากระทำจะถูกกระจายไปอย่างสม่ำเสมอตลอดพื้นที่หน้าตัดของวัสดุ หากแบ่งตามลักษณะของแรงที่มากระทำกับวัสดุแล้ว สามารถแบ่งออกได้เป็น 5 แบบ คือ ความเค้นดึง (Tensile stress) ความเค้นอัด (Compressive stress) ความเค้นเฉือน (Shear stress) ความเค้นบิด (Torsion stress) และความเค้นดัดโค้ง (Flexural stress)

จากลักษณะของแรงดึงและแรงอัดที่มากระทำกับวัสดุ สามารถหาค่าความเค้นที่เกิดขึ้นได้จากความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำต่อพื้นที่หน้าตัด ดังแสดงในสมการที่ 2.2

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (2.2)$$

เมื่อ  $\sigma$  = ความเค้นทางวิศวกรรม (N/m<sup>2</sup>)  
 $F$  = แรงกระทำตั้งฉากกับพื้นที่หน้าตัด (N)  
 $A_0$  = พื้นที่หน้าตัด (m<sup>2</sup>)

สำหรับกรณีที่ได้รับแรงเฉือน ความเค้นที่เกิดขึ้นจะหาได้จากแรงที่กระทำต่อพื้นที่หน้าตัดที่ขนานกับแนวแรง ดังแสดงในสมการที่ 2.3

$$\tau = \frac{F}{A_0} \quad (2.3)$$

เมื่อ  $\tau$  = ความเค้นเฉือน ( $N/m^2$ )

$F$  = แรงกระทำขนานกับพื้นที่หน้าตัด ( $N$ )

2.13.1.3 ความเครียด (Strain) หมายถึง การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุเมื่อมีแรงกระทำ แบ่งออกเป็นความเครียดแบบยืดหยุ่น (Elastic strain) และความเครียดแบบถาวร (Plastic strain) ซึ่งความเครียดแบบยืดหยุ่นเป็นการเปลี่ยนแปลงรูปร่างในลักษณะที่เมื่อลดแรงกระทำแล้ววัสดุจะกลับสู่สภาพเดิมเหมือนก่อนที่จะรับแรงกระทำ ส่วนความเครียดแบบถาวรจะเป็นลักษณะที่เมื่อปล่อยแรงกระทำแล้ววัสดุไม่กลับสู่ขนาดเดิม [38]

การหาความเครียดทางวิศวกรรม (Engineering strain) หาจากอัตราส่วนของขนาดที่เปลี่ยนแปลงไปต่อขนาดเดิม ซึ่งความเครียดเชิงเส้น (Linear strain) จะเกิดขึ้นเมื่อวัสดุรับแรงดึง หรือแรงอัด โดยสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 2.4

$$\epsilon = \frac{l-l_0}{l_0} \quad (2.4)$$

เมื่อ  $\epsilon$  = ความเครียดเชิงเส้น (mm/mm)

$l_0$  = ความยาวเริ่มต้นหรือความยาวเกจของวัสดุ (mm)

$l$  = ความยาวสุดท้ายเมื่อได้รับแรงกระทำ (mm)

สำหรับกรณีที่วัสดุได้รับแรงเฉือนมากกระทำ สามารถคำนวณหาความเครียดเฉือนได้ตามสมการที่ 2.5

$$\gamma = \tan\theta \quad (2.5)$$

เมื่อ  $\gamma$  = ความเครียดเฉือน (radian)

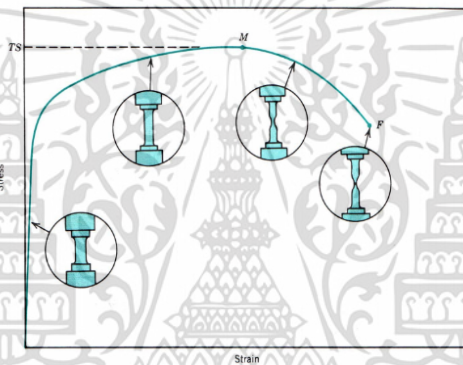
$\theta$  = มุมที่เปลี่ยนไป (radian) [37]

### 2.13.2 การทดสอบแรงดึง

การทดสอบแรงดึง (Tensile test) เป็นการทดสอบสมบัติทางกลที่สำคัญอย่างหนึ่ง ซึ่งมีประโยชน์ในการเลือกวัสดุสำหรับนำไปใช้งาน รวมทั้งการออกแบบเครื่องจักรและโครงสร้างในงานวิศวกรรม โดยทั่วไปสมบัติการดึงจะทำได้โดยการวัดแรงกระทำ หรือความเค้นที่เกิดขึ้นเมื่อดึงวัสดุด้วยความเร็วคงที่ (Constant speed) หรืออัตราความเครียดคงที่ (Constant strain rate) ซึ่งวัสดุที่ต่างกันจะแสดงสมบัติการดึงที่ต่างกัน ทั้งนี้สมบัติการดึงของวัสดุจะขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่น ๆ เช่น ลักษณะของชิ้นทดสอบ วิธีการเตรียมชิ้นทดสอบ อุณหภูมิ ความชื้น และความเร็วของการดึง เป็นต้น ดังนั้นเพื่อความถูกต้องและน่าเชื่อถือของการทดสอบจึงจำเป็นต้องมีการระบุรายละเอียดที่เกี่ยวข้องกับ

ขั้นตอนทดสอบ และสภาวะต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดสอบ ซึ่งวิธีการทดสอบสมบัติการดึงของวัสดุนั้นสามารถทำได้หลายวิธีขึ้นกับมาตรฐานที่เลือกใช้ [38]

สมบัติที่ได้จากการทดสอบแรงดึงที่สำคัญ คือ การต้านทานแรงดึง (Tensile strength) ซึ่งเป็นค่าความเค้นสูงสุดที่วัสดุรับได้ ในการทดสอบหาความแข็งแรงของวัสดุนั้น จะสามารถกระทำได้โดยค่อย ๆ เพิ่มแรงกระทำต่อวัสดุไปจนกระทั่งวัสดุนั้นเกิดการแตกหัก พิจารณาจากรูปที่ 2.14 จุดที่มีแรงกระทำต่อชิ้นทดสอบสูงสุด คือ ความเค้นสูงสุด หรือการต้านทานแรงดึงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength, UTS) ซึ่งในจุดนี้สำหรับชิ้นทดสอบจากวัสดุเหนียวทั่วไปนั้นจะเริ่มเกิดคอคอด (Necking) ขึ้นที่บริเวณระยะทดสอบของชิ้นทดสอบ และหลังจากจุดนี้ชิ้นทดสอบจะมีพื้นที่หน้าตัดลดลงเรื่อย ๆ จนกระทั่งเกิดการแตกหัก [38]



รูปที่ 2.14 การเกิดคอคอดของชิ้นทดสอบจากวัสดุเหนียวทั่วไป

โดยค่าการต้านทานแรงดึงสูงสุดสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.6

$$\sigma_M = \frac{F_M}{A_0} \quad (2.6)$$

เมื่อ  $\sigma_M$  = การต้านทานแรงดึงสูงสุด (N/mm<sup>2</sup>)

$F_M$  = แรงกระทำสูงสุด (N)

ในการศึกษาพฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุในช่วงยืดหยุ่นนั้น จะพิจารณาที่ค่ามอดูลัสของความยืดหยุ่น (Modulus of elasticity, E) หรือมอดูลัสของยัง (Young's modulus) ซึ่งหาได้จากความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด ในช่วงยืดหยุ่นเป็นไปตามกฎของฮุก (Hooke's law) อาจกล่าวได้ว่าการเปลี่ยนแปลงขนาดและความเค้นของวัสดุในช่วงที่มีสภาวะยืดหยุ่นจะเป็นสัดส่วนโดยตรงต่อกัน แสดงดังสมการที่ 2.7

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (2.7)$$

เมื่อ  $E$  = โมดูลัสของความยืดหยุ่นหรือโมดูลัสของยัง (MPa)

สำหรับการวัดความเหนียว (Ductility) ของวัสดุ เป็นการวัดขนาดของการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุเมื่อมีแรงมากระทำ จะพิจารณาที่ค่าความเครียดของวัสดุที่จุดแตกหัก โดยวัสดุที่เปลี่ยนแปลงรูปร่างได้มาก สามารถบ่งชี้ได้ว่าวัสดุนั้นมีความเหนียวมาก ซึ่งค่าความเหนียวของวัสดุที่นิยมใช้จากการทดสอบแรงดึง คือ ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว (%Elongation, %EL) คำนวณได้จากสมการที่ 2.8

$$\%EL = \frac{l_f - l_o}{l_o} \times 100 \quad (2.8)$$

เมื่อ %EL = เปอร์เซนต์การยืดตัวของชิ้นทดสอบ (%)

$l_f$  = ความยาวเริ่มต้นของระยะทดสอบ (mm)

$l_o$  = ความยาวของชิ้นทดสอบหลังแตกหัก (mm)

### 2.13.3 มาตรฐานการทดสอบแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบ

การทดสอบแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบเส้นใยสั้น ตามมาตรฐานมาตรฐานการทดสอบแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบ ASTM D3039 รูปร่างของชิ้นงานทดสอบหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า มีขนาดเท่ากับ 25 x 250 x 3 มิลลิเมตร [39][40] ดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 รูปร่างและขนาดชิ้นงานทดสอบแรงดึง

### 2.14 สมบัติทางกายภาพและการทดสอบ

สมบัติทางกายภาพ (Physical properties) หมายถึง สมบัติของชิ้นทดสอบที่สามารถสังเกตได้จากลักษณะภายนอก หรือจากการตรวจสอบด้วยเครื่องมือวัดที่ไม่เกี่ยวข้องกับการเกิดปฏิกิริยาเคมี เช่น ขนาด รูปร่าง พื้นที่ผิว สี ความหนาแน่น ความพรุน และการดูดซึมน้ำ เป็นต้น [38]

### 2.14.1 การทดสอบการดูดซึมน้ำ

การดูดซึม หมายถึง ปรากฏการณ์หรือกระบวนการที่พลังงานหรือมวลปริมาณหนึ่งๆ เข้าแทรกหรือละลายเข้าไปอยู่ภายในปริมาตรของพลังงานหรือมวลในอีกปริมาณหนึ่ง โดยสสารที่ถูกดูดซึมไปจะเรียกว่า สารถูกดูดซึม (Absorbate) ส่วนสสารที่ทำหน้าที่เป็นตัวดูดซึมจะเรียกว่า สารดูดซึม (Absorbent) เช่น การดูดซึมน้ำของกระดาษชำระ การละลายคลอรีนในน้ำ เป็นต้น สำหรับภาชนะที่ผลิตจากแป้งเป็นหลัก (Bio-based materials) จะมีข้อด้อยที่สำคัญ คือ สามารถดูดซึมน้ำจากสิ่งแวดล้อมได้เป็นจำนวนมาก ซึ่งจะส่งผลให้สมบัติทางกลลดลง จึงจำเป็นต้องศึกษาการดูดซึมน้ำของวัสดุและพัฒนาต่อไป โดยค่าปริมาณการดูดซึมน้ำสามารถ คำนวณได้จากมวลของน้ำหนักที่ขึ้นทดสอบดูดซึมไว้หารด้วยน้ำหนักของชิ้นทดสอบก่อนแช่น้ำ ตามมาตรฐาน ISO 535 (1991) ค่าปริมาณการดูดซึมน้ำคำนวณได้ตามสมการที่ 2.9 [38]

$$\text{Water absorption} = \frac{W_1 - W_0}{W_0} \quad (2.9)$$

เมื่อ Water absorption = ค่าการดูดซึมของน้ำ (gH<sub>2</sub>O/g)

$W_0$  = น้ำหนักชิ้นงานทดสอบก่อนแช่น้ำ (g)

$W_1$  = น้ำหนักชิ้นงานทดสอบหลังแช่น้ำ (g)

### 2.14.2 มาตรฐานการทดสอบการดูดซึมน้ำของกระดาษและบอร์ด

มาตรฐานการทดสอบการดูดซึมน้ำของกระดาษและบอร์ด (ISO 535) ปี 2014 และ 2019 มาตรฐานวิธีการทดสอบการดูดซึมน้ำของกระดาษและกระดาษแข็ง ด้วยวิธีคอปป์ (Cobb) ซึ่งเป็นมาตรฐานที่กำหนดวิธีการทดสอบการดูดซึมน้ำของกระดาษและกระดาษแข็งที่มีการเติมสารป้องกันการดูดซึมน้ำ รวมถึงกระดาษลูกฟูกภายใต้สภาวะที่กำหนด ซึ่งไม่เหมาะกับการทดสอบกับกระดาษที่มีน้ำหนักมาตรฐานน้อยกว่า 50 กรัมต่อตารางเมตร หรือกระดาษที่มีการบีบูน และยังไม่เหมาะสำหรับทดสอบกับกระดาษที่มีรูพรุน มาตรฐานการทดสอบนี้ไม่ใช่วิธีการประเมินคุณสมบัติด้านการเขียนของกระดาษ ถึงแม้ว่าจะมีการระบุได้ว่าเหมาะกับการนำไปใช้งานกับหมึกพิมพ์ โดยขนาดชิ้นงานทดสอบ เท่ากับ 25 x 50 x 3 มิลลิเมตร และเวลาการทดสอบ 60 วินาที [41][42]

### 2.15 การวิเคราะห์ทางสถิติ

วิธีทางสถิติเป็นเครื่องมือที่สำคัญและนิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในงานวิจัย โดยวิธีการทางสถิติจะประกอบไปด้วย การรวบรวมข้อมูล การวิเคราะห์ข้อมูล และการสรุปข้อมูลเพื่อนำไปตัดสินใจใช้ในด้านต่าง ๆ ซึ่งสามารถใช้วิธีทางสถิติสรุปลักษณะที่สำคัญของกลุ่มตัวอย่าง เช่น การหาค่าเฉลี่ย การหาค่ากลาง การหาค่าความแปรปรวน การหาค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน รวมไปถึงการสร้างกราฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

25

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่าง ๆ เป็นต้น นอกจากนี้ยังสามารถใช้วิธีทางสถิติต่าง ๆ เช่น การวิเคราะห์ความถดถอย (Regression) การวิเคราะห์การแพร่กระจายของข้อมูล (Propagation of Error : POE) เป็นต้น

### 2.15.1 การใช้ P-value ในการทดสอบสมมติฐาน

หนึ่งในการรายงานผลของการทดสอบสมมติฐาน คือ การแสดงว่าสมมติฐานหลักจะถูกปฏิเสธหรือไม่ที่ระดับความเชื่อมั่น หรือระดับนัยสำคัญที่กำหนด ( $\alpha$ ) โดยค่า P-value จะแสดงถึงน้ำหนักของหลักฐานที่จะใช้ในการปฏิเสธสมมติฐานหลักที่ว่าค่าเฉลี่ยของข้อมูลมีค่าเท่ากันในทุกกรณี แม้จะเปลี่ยนแปลงตัวแปรต้นก็ตาม ( $H_0 : \mu_1 = \mu_2$ ) นอกจากนี้ยังสามารถนิยามค่า P-value เป็นค่าที่น้อยที่สุดของระดับนัยสำคัญซึ่งนำไปสู่การปฏิเสธสมมติฐานหลัก ( $H_0$ ) ก็ได้ โดยปกติจะสามารถบอกได้ว่าค่าการทดสอบทางสถิตินั้นมีนัยสำคัญต่อเมื่อสมมติฐานหลักถูกปฏิเสธ กล่าวได้ว่าอาจจะพิจารณาค่า P-value ว่าเป็นค่า  $\alpha$  ที่น้อยที่สุดซึ่งทำให้ชุดข้อมูลนั้นมีนัยสำคัญ [43]

### 2.15.2 การวิเคราะห์ถดถอย

การวิเคราะห์ถดถอย (Regression analysis) การทำนายค่าของตัวแปรหนึ่งซึ่งเป็นตัวแปรตามจากตัวแปรอิสระอื่น การวิเคราะห์ถดถอยสามารถให้คำตอบได้ ผลของการวิเคราะห์ถดถอยจะออกมาในรูปของสมการที่สามารถอธิบายข้อมูลได้ดีที่สุด ซึ่งนำไปใช้ในการหาสมการทำนายและการวิเคราะห์ถดถอยเพื่อค้นหาปัจจัยหรือตัวแปรอิสระที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรตามของสมมติฐานที่ทดสอบ หากในกรณีที่มีตัวแปรอิสระ 1 ตัว จะมีสมมติฐานที่ทดสอบ ดังสมการที่ 2.10 และ 2.11

$$H_0 : \beta = 0 \quad (2.10)$$

$$H_0 : \beta \neq 0 \quad (2.11)$$

$$y = \beta_0 + \beta_1 x \quad (2.12)$$

โดยสมการที่ 2.12 คือ รูปสมการมาตรฐาน ซึ่งในที่นี้  $\beta_1$  เรียกว่า สัมประสิทธิ์ถดถอย (Regression coefficient) ถ้านำไปสร้างกราฟจะพบว่า  $\beta_1$  คือ ค่าความชัน (Slope) และ  $\beta_0$  คือ จุดตัดแกน y (Intercept) ของเส้นตรงที่แทนในสมการ กรณีที่มีตัวแปรอิสระตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไป ซึ่งเรียกว่า การวิเคราะห์ถดถอยเชิงพหุ (Multiple regression analysis) โดยสมมติฐานที่ทดสอบจะเป็นดังสมการที่ 2.13 และ 2.14

$$H_0 : \beta_1 = 0, \beta_2 = 0, \dots, \beta_i = 0 \quad (2.13)$$

$$H_1 : \beta_1 \neq 0, \beta_2 = 0, \dots, \beta_i \neq 0 \quad (2.14)$$

ในทางปฏิบัติการเลือกตัวแปรที่จะนำเข้ามาวิเคราะห์ถดถอยเชิงพหุนั้นต้องผ่านการวิเคราะห์แบบข้อมูลตัวแปรเดียว (Univariate data) ก่อน โดยตัวแปรอิสระที่สนใจต้องมีความสัมพันธ์กับตัวแปรตาม จึงนำตัวแปรนั้นไปวิเคราะห์ในการวิเคราะห์ถดถอยเชิงพหุ ซึ่งจะต้องการข้อมูลเช่นเดียวกับกรณีของตัวแปรตั้งแต่ 2 ตัวแปรขึ้นไป (Correlation) ในการแปลผลการวิเคราะห์ โดยค่าที่ใช้ในการรายงานผล คือ ค่า R-squared ( $R^2$ ) และค่า Adjusted  $R^2$  ซึ่งจะบอกความสามารถของสมการถดถอยในการอธิบายความแปรปรวนของข้อมูล เช่น  $R^2 = 0.45$  แสดงว่าอธิบายความแปรปรวนได้ 45% [43]

### 2.15.3 การวิเคราะห์การแพร่กระจายของข้อมูล

การวิเคราะห์การแพร่กระจายความคลาดเคลื่อน (Propagation of Errors : POE) เมื่อต้องการคำนวณข้อมูล หรือตัวเลข หรือปริมาณฟิสิกส์ที่มีความคลาดเคลื่อนอยู่ด้วย จะใช้วิธีการเดียวกับการคำนวณเลขนัยสำคัญ ความคลาดเคลื่อนของคำตอบสามารถคำนวณได้จากหลักแคลคูลัสหลายตัวแปร ดังนี้ [45]

ถ้ากำหนด  $x \pm \delta x$ ,  $y \pm \delta y$  และ  $z \pm \delta z$  เป็นปริมาณฟิสิกส์ที่ได้จากการทดลองและผ่านการวิเคราะห์ทางสถิติแล้ว กำหนด  $w(x, y, z)$  เป็นฟังก์ชันแสดงความสัมพันธ์ของปริมาณ  $x$ ,  $y$  และ  $z$  ตามสมการที่ 2.15

$$w(x, y, z) = f(x, y, z) \quad (2.15)$$

กำหนด  $\delta w$  เป็นความคลาดเคลื่อนของ  $w(x, y, z)$  ซึ่งหาจากหลักแคลคูลัสหลายตัวแปร ดังสมการที่ 2.16

$$dw = \frac{\partial f}{\partial x} dx + \frac{\partial f}{\partial y} dy + \frac{\partial f}{\partial z} dz \quad (2.16)$$

จากการหาอนุพันธ์ทำให้ สมการที่ 2.17 สามารถประมาณค่าให้เป็นความคลาดเคลื่อนของ  $\delta w$  ได้ว่า

$$\delta w = \frac{\delta f}{\delta x} \delta x + \frac{\delta f}{\delta y} \delta y + \frac{\delta f}{\delta z} \delta z \quad (2.17)$$

กรณีที่  $\delta x$ ,  $\delta y$  และ  $\delta z$  เป็นความคลาดเคลื่อนลักษณะสุ่ม โดยการใช้ทฤษฎีเชิงสถิติ ความคลาดเคลื่อนผลลัพธ์ ( $\delta w$ ) จะเท่ากับรากที่สองของผลบวกกำลังสองของแต่ละเทอมในสมการที่ 2.17 ดังสมการที่ 2.18

$$\delta w = (\delta w) = \sqrt{\left(\frac{\delta f}{\delta x} \delta x\right)^2 + \left(\frac{\delta f}{\delta y} \delta y\right)^2 + \left(\frac{\delta f}{\delta z} \delta z\right)^2} \quad (2.18)$$

อย่างไรก็ตาม ถ้า  $w(x, y, z) = ax + by + cz$  โดยที่  $a, b$  และ  $c$  เป็นค่าคงที่บวกหรือลบ ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนเป็น  $\delta x, \delta y$  และ  $\delta z$  ตามลำดับ จะได้  $\frac{\partial w}{\partial x} = a, \frac{\partial w}{\partial y} = b$  และ  $\frac{\partial w}{\partial z} = c$  เมื่อนำไปแทนค่าในสมการที่ 2.18 จะได้

$$\delta w = w \sqrt{(a\delta x)^2 + (b\delta y)^2 + (c\delta z)^2} \quad (2.19)$$

และถ้า  $w(x, y, z) = kx^a y^b z^c$  โดยที่  $k, a, b$  และ  $c$  เป็นค่าคงที่บวกหรือลบ ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนเป็น  $\delta x, \delta y$  และ  $\delta z$  ตามลำดับ จะได้

$$\delta w = w \sqrt{\left(\frac{a\delta x}{x}\right)^2 + \left(\frac{b\delta y}{y}\right)^2 + \left(\frac{c\delta z}{z}\right)^2} \quad (2.20)$$

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินการ

ในงานศึกษานี้มุ่งเน้นการผลิตชิ้นงานต้นแบบวัสดุเชิงประกอบจากผักตบชวาด้วยกระบวนการกดขึ้นรูปด้วยความร้อน ซึ่งบทนี้จะกล่าวถึงกระบวนการดำเนินงาน การสร้างชิ้นงานต้นแบบ การทดสอบแรงดึง และการทดสอบการดูดซึมน้ำ โดยมีขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานดังนี้

1. การสร้างชิ้นงานต้นแบบ
2. การทดสอบแรงดึง
3. การทดสอบการดูดซึมน้ำ

#### 3.1 การสร้างชิ้นงานต้นแบบ

จากการศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับวัสดุของฟิลเลอร์ และวัสดุของตัวประสาน จึงแบ่งการทดลองเป็น 2 ส่วน ส่วนที่ 1 การทดลองหาตัวประสานที่เหมาะสมโดยต้องการทดลองการผสมระหว่างผักตบชวาและตัวประสานชนิดต่าง ๆ ว่าสามารถประสานกันได้จริง โดยทำการขึ้นรูปผักตบชวาที่ผสมกับตัวประสานต่าง ๆ เป็นวัสดุต้นแบบที่มีลักษณะเป็นแผ่นสี่เหลี่ยมและวิเคราะห์ชิ้นงานที่ได้เพื่อเลือกตัวประสานที่เหมาะสม ส่วนที่ 2 การทดลองสร้างชิ้นงานต้นแบบโดยนำตัวประสานที่เหมาะสมจากการทดลองในส่วนที่ 1 มาทำการขึ้นรูปชิ้นงานต้นแบบ โดยมีวิธีการทดลองการสร้างชิ้นงานต้นแบบดังนี้

##### 3.1.1 วัสดุและอุปกรณ์

1. ผักตบชวาส่วนลำต้น
2. วัสดุประสาน (แป้งมันสำปะหลัง กาวลาเท็กซ์ และน้ำยางพารา)
3. สารธรรมชาติป้องกันน้ำ (ชันสน)
4. ปีกเกอร์และแท่งแก้วคนสาร
5. เครื่องปั่นสำหรับผักผลไม้
6. อุปกรณ์การหั่น (มีด และเขียง)
7. เตาอบชนิดอบลมร้อน
8. ถุงซิปล็อค
9. เครื่องกวนสาร (Hot plate stirrer)
10. เครื่องกดอัดความร้อน (Compression machine)

11. เครื่องเย้าคัดขนาดแบบตะแกรง (Sieve shaker) และตะแกรง 4 ขนาด (850, 600, 450, และ 250 ไมครอน)
12. แผ่นเหล็กรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาด 90 x 90 mm จำนวน 2 แผ่น
13. แม่แบบขึ้นงานต้นแบบตามมาตรฐาน ASTM D3039

### 3.1.2 วิธีการทำชิ้นงานต้นแบบเพื่อค้นหาตัวประสานที่เหมาะสม

#### 3.1.2.1 การเตรียมฟิลเลอร์

1. ล้างผักตบชวาแล้วตัดส่วนรากและใบทิ้ง ใช้เฉพาะส่วนลำต้น ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ผักตบชวาส่วนลำต้นที่ล้างแล้ว

2. หั่นผักตบชวาขนาด 0.5 – 1 นิ้ว ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ผักตบชวาขนาด 0.5 – 1 นิ้ว

3. ปั่นผักตบชวาที่หั่นแล้วด้วยเครื่องปั่น เวลา 1 นาที ดังรูปที่ 3.3 และ 3.4



รูปที่ 3.3 ปั่นละเอียดด้วยเครื่องปั่น



รูปที่ 3.4 ผักตบชวาละเอียด

4. ตากผักตบชวาที่ปั่นแล้วที่แสงธรรมชาติ อุณหภูมิเฉลี่ย 36.5 องศาเซลเซียส เพื่อระเหยความชื้นเบื้องต้น เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ดังรูปที่ 3.5

5. อบผักตบชวาที่ผ่านการระเหยความชื้นเบื้องต้นแล้วด้วยเครื่องอบลมร้อน ที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ดังรูปที่ 3.6

6. ทิ้งไว้ให้เย็นตัว และเก็บผักตบชวาแห้งละเอียดในถุงซิปล็อคเพื่อป้องกันความชื้น ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.5 ตากผักตบชวาที่ละเอียด



รูปที่ 3.6 อบผัดบขวา



รูปที่ 3.7 ผักตบขวาแห้งละเอียด

7. นำผักตบขวามาคัดขนาดด้วยเครื่องเขย่าคัดขนาดแบบตะแกรง (Sieve shaker) โดยใช้ตะแกรง 4 ขนาด คือ 850, 600, 450 และ 250 ไมครอน ดังรูปที่ 3.8 จากนั้นชั่งน้ำหนักของแต่ละขนาด พบว่าผักตบขวาแห้งละเอียดขนาด 850 ไมครอน มีปริมาณมากที่สุด จึงเลือกใช้เป็นฟิลเลอร์ในการสร้างชิ้นงานทดสอบ



รูปที่ 3.8 คัดขนาดผักตบชวาด้วยเครื่องเขย่าคัดขนาดแบบตะแกรง (Sieve shaker)

### 3.1.2.2 การเตรียมตัวประสาน

การเตรียมตัวประสานจะแบ่งตัวประสานเป็น 4 รูปแบบ ซึ่งในแต่ละรูปแบบมีอัตราส่วนผสมและวิธีการเตรียมตัวประสาน ดังต่อไปนี้

รูปแบบที่ 1 : ตัวประสานแป้งมันสำปะหลังผสมผงซัน  
อัตราส่วนผสม

1. แป้งมันสำปะหลัง 50.37 กรัม
2. น้ำ 125 มิลลิลิตร
3. ผงซัน 12.5 กรัม

วิธีการเตรียม

1. ตั้งบีกเกอร์ที่ใส่น้ำ 125 ml บนเครื่องกวนสาร (Hot plate stirrer) อุณหภูมิประมาณ 60 องศาเซลเซียส

2. ผสมผงแป้งและผงซันเข้าด้วยกัน แล้วเทลงในน้ำ
3. คนให้เป็นเนื้อเดียวกัน
4. ได้ตัวประสานแป้งมันสำปะหลังผสมผงซัน

รูปแบบที่ 2 : ตัวประสานแป้งมันสำปะหลังและกาวลาเท็กซ์ ยี่ห้อ ทีโอเอ รุ่น แอลเอ 22 เอส  
อัตราส่วนผสม

1. แป้งมันสำปะหลัง 25 กรัม
2. น้ำ 125 มิลลิลิตร
3. กาวลาเท็กซ์ 12.45 กรัม

### วิธีการเตรียม

1. ตั้งปีกเกอร์ที่ใส่น้ำ 125 ml บนเครื่องกวนสาร (Hot plate stirrer) อุณหภูมิประมาณ 60 องศาเซลเซียส

2. ผสมผงแป้งและผงขี้ผึ้งเข้าด้วยกัน แล้วเทลงในน้ำ

3. เติมกาวลาเท็กซ์ แล้วคนให้เป็นเนื้อเดียวกัน

4. ได้ตัวประสานแป้งมันสำปะหลังผสมผงขี้ผึ้ง

รูปแบบที่ 3 : ตัวประสานกาวลาเท็กซ์ ยี่ห้อ ทีโอเอ รุ่น แอลเอ 22 เอส

### อัตราส่วนผสม

1. กาวลาเท็กซ์ 10.71 กรัม

2. น้ำ 24.93 มิลลิลิตร

### วิธีการเตรียม

1. นำกาวลาเท็กซ์ผสมกับน้ำพอประมาณ

2. คนให้เข้ากัน

3. ได้ตัวประสานกาว

รูปแบบที่ 4 : ตัวประสานน้ำยางพารา

### อัตราส่วนผสม

1. น้ำยางพารา 20.7 กรัม

### วิธีการเตรียม

1. น้ำยางพาราแอมโมเนียความเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์

### 3.1.2.3 การผสมฟิลเลอร์กับตัวประสาน

ในทุกุรูปแบบจะทำการผสมด้วยอัตราส่วนและวิธีเดียวกันทั้งหมด ดังนี้

1. ผสมฟิลเลอร์และตัวประสาน ในอัตราส่วน 70:30 [38] เฉพาะรูปแบบที่ 1 - 3 และรูปแบบที่ 4 ใช้อัตราส่วน 20:80

1.1 ใช้ฝักตบชวา 25 กรัม และแป้งมันสำปะหลัง 50 กรัม

1.2 ใช้ฝักตบชวา 25.17 กรัม และแป้งมันสำปะหลังและกาวลาเท็กซ์ 39.45 กรัม

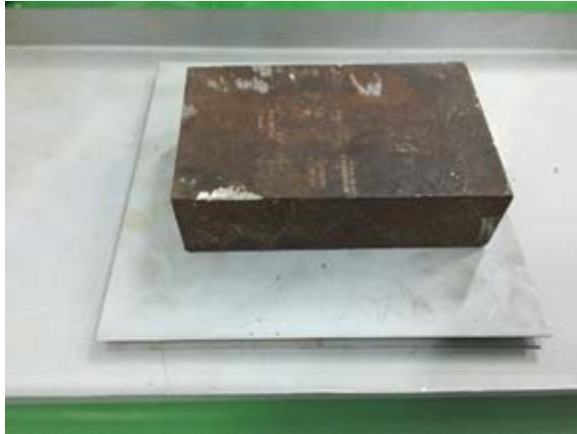
1.3 ใช้ฝักตบชวา 25 กรัม และกาวลาเท็กซ์ 10.71 กรัม

1.4 ใช้ฝักตบชวา 5.73 กรัม และน้ำยางพารา 20.7 กรัม

2. ผสมให้ส่วนผสมเข้ากัน

### 3.1.2.4 การขึ้นรูปชิ้นงานต้นแบบและบันทึกลักษณะของชิ้นงานต้นแบบ

1. นำส่วนผสมที่เตรียมวางระหว่างแผ่นเหล็ก 2 แผ่น แล้วกดด้วยก้อนเหล็กเพื่อเพิ่มน้ำหนักการกด ดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 กดทับชิ้นงาน

2. นำชิ้นงานเข้าเตาอบลมร้อน ที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เวลา 20 นาที
3. ชิ้นงานที่ 4 ที่ตัวประสานเป็นน้ำยาอาหารา เมื่อผสมแล้วจะกดชิ้นงานด้วยเครื่องกดไฮดรอลิก ดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 เครื่องกดชิ้นงาน

4. ให้ชิ้นงานเย็นตัว และบันทึกลักษณะของชิ้นต้นแบบ

### 3.1.3 การออกแบบการทดลอง

เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลทางสถิติ โดยใช้โปรแกรม Design Expert 11 ในการออกแบบการทดลองแบบผสม (Mixture design) และการคำนวณเพื่อหาค่าที่เหมาะสมของการทดลอง (Optimization)

จาก 3.1.2 ในการหาตัวประสานที่เหมาะสม เมื่อทราบตัวประสานที่เหมาะสมแล้วจึงหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมของฟิลเลอร์และตัวประสานดังกล่าว โดยออกแบบการทดลองแบบสุ่ม ดังนี้

1. นำค่าสูงสุดและต่ำของฝักตบชวา (Filler) และน้ำยางพารา (Binder) คำนวณแบบสุ่มหาจำนวนของการทดลองในโปรแกรม Design Expert ด้วยวิธีการออกแบบการทดลองแบบผสม (Mixture design) แบบ Optimal (custom) designs โดยปริมาตรของชิ้นงานต้นแบบ เท่ากับ 17.4375 กรัม กำหนดค่าสูงสุดและต่ำสุดของตัวประสาน เท่ากับ 13.95 และ 12.2063 กรัม ตามลำดับ และค่าสูงสุดและต่ำสุดของฟิลเลอร์ เท่ากับ 5.23125 และ 3.4875 กรัม ตามลำดับ จึงได้ การทดลอง (Run) เป็นจำนวน 13 การทดลอง ดังรูปที่ 3.11

Run	Component 1 A:Binder gram	Component 2 B:Filler gram	Response 1 TS kPa	Response 2 Water gH <sub>2</sub> O/g
1	13.95	3.4875		
2	12.2063	5.23125		
3	12.2063	5.23125		
4	13.95	3.4875		
5	13.0781	4.35938		
6	12.7875	4.65		
7	13.95	3.4875		
8	13.0781	4.35938		
9	13.5141	3.92344		
10	13.0781	4.35938		
11	13.3688	4.06875		
12	12.6422	4.79531		
13	12.2063	5.23125		

รูปที่ 3.11 ผลการทดลองสุ่มหาจำนวนของการทดลองในโปรแกรม Design Expert

จากนั้นนำอัตราส่วนผสมที่ได้จากโปรแกรม มาทำการทดลองสร้างชิ้นงานต้นแบบ และทดลองซ้ำตามจำนวนของการทดลอง

### 3.1.4 การสร้างชิ้นงานต้นแบบจากการทดลองอัตราส่วนผสมที่เหมาะสม

1. ออกแบบและจัดทำแม่แบบโดยในการทดลองทำชิ้นงานต้นแบบ ควบคุมขนาดของชิ้นงานให้เป็นไปตามมาตรฐานการทดสอบวัสดุเชิงประกอบชนิดเส้นใยสั้น โดยใช้มาตรฐาน ASTM-D3039 ซึ่งกำหนดให้ชิ้นงานเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาดเท่ากับ 25 x 250 mm และความหนาเท่ากับ 3 mm ซึ่งได้มีการออกแบบแม่พิมพ์ของชิ้นงานและได้แม่พิมพ์ที่เสร็จสมบูรณ์ ดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 แม่พิมพ์ที่เสร็จสมบูรณ์

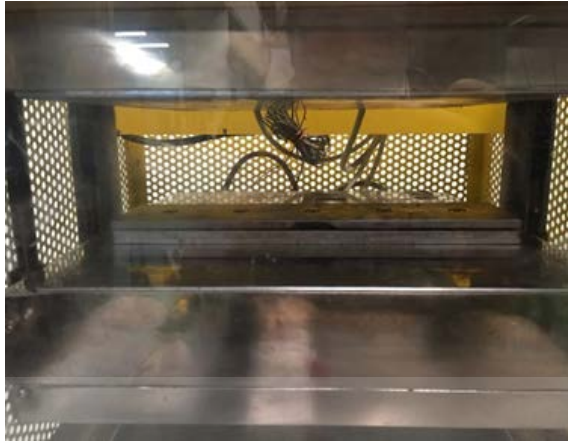
2. ผสมผักตบชวาและน้ำยางพาราตามอัตราส่วนผสมที่ได้จากโปรแกรม จากนั้นนำส่วนผสมใส่ในแม่พิมพ์ ดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 นำส่วนผสมใส่ในแม่พิมพ์

3. นำแม่พิมพ์เข้าเครื่องกดอัดความร้อน (Heat compress) ดังรูปที่ 3.14 โดยควบคุมอุณหภูมิ ความดัน และเวลาในการกดอัด เท่ากับ 150 องศาเซลเซียส 55 บาร์ และ 15 นาที

4. เมื่อครบเวลา 15 นาที นำแม่พิมพ์ออกจากเครื่องแล้วทิ้งไว้ 10 นาทีเพื่อให้ชิ้นงานเย็นตัว จากนั้นจึงเปิดแม่พิมพ์และนำชิ้นงานออกมา ดังรูปที่ 3.15 และเก็บชิ้นงานทดสอบที่ได้ไว้ในถุงซิปล็อค



รูปที่ 3.14 นำแม่พิมพ์เข้าเครื่องกีดอัดความร้อน



รูปที่ 3.15 ชิ้นงานต้นแบบ

### 3.2 การทดสอบแรงดึง

#### 3.2.1 วัสดุและอุปกรณ์

1. เครื่องทดสอบแรงดึง

2. ชิ้นงานขนาดเท่ากับ  $25 \times 25$  mm และ ความหนาเท่ากับ 3 mm ตามมาตรฐานการ

ทดสอบวัสดุเชิงประกอบชนิดเส้นใยสั้น โดยใช้มาตรฐาน ASTM-D3039

#### 3.2.2 วิธีการทดลอง

1. นำชิ้นแต่ละชิ้นไปทดสอบแรงดึง ดังรูปที่ 3.16 และบันทึกค่าแรงดึงเพื่อนำไปวิเคราะห์ทางสถิติ



รูปที่ 3.16 การทดสอบแรงดึงด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง

### 3.3 การทดสอบการดูดซึมน้ำ

#### 3.3.1 วัสดุและอุปกรณ์

1. เครื่องทดสอบแรงดึง
2. ชิ้นงานขนาดเท่ากับ  $25 \times 50$  mm และ ความหนาเท่ากับ 3 mm ตามมาตรฐานการทดสอบการดูดซึมน้ำกระดาษและบอร์ด ISO 535
3. น้ำดีไอ (Deionized water)
4. เครื่องชั่ง

#### 3.3.2 วิธีการทดลอง

1. ชั่งน้ำหนักชิ้นงานทดสอบก่อนแช่น้ำแล้วบันทึกผล
2. นำชิ้นงานทดสอบแช่ในน้ำดีไอ เป็นเวลา 60 วินาที ดังรูปที่ 3.17
3. ชั่งน้ำหนักชิ้นงานทดสอบหลังแช่น้ำแล้วบันทึกผล
4. คำนวณหาค่าการดูดซึมน้ำ จากสูตรค่าปริมาณการดูดซึมน้ำ ในสมการที่ 2.9



รูปที่ 3.17 การทดสอบการดูดซึมน้ำ

เมื่อทำการทดสอบแรงดึงและการดูดซึมน้ำแล้วจึงนำผลการทดสอบไปวิเคราะห์หาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดระหว่างฟิลเลอร์และตัวประสานด้วยวิธีการทางสถิติ โดยใช้โปรแกรม Design Expert 11 [44]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการดำเนินการ

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดลองทั้งหมดที่ได้ศึกษาในงานวิจัยนี้ ด้วยการทดลองหาตัวประสานที่เหมาะสม การทดสอบคุณสมบัติของวัสดุเชิงประกอบ และการวิเคราะห์การออกแบบการทดลองที่เหมาะสม โดยผลการทดลองดังกล่าว มีรายละเอียดดังนี้

1. ผลการทดลองการหาตัวประสานที่เหมาะสม
2. ผลการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุเชิงประกอบ
3. ผลการวิเคราะห์การออกแบบการทดลองที่เหมาะสม

#### 4.1 ผลการทดลองการหาตัวประสานที่เหมาะสม

จากการทดลองขึ้นรูปชิ้นงานต้นแบบด้วยรูปแบบของตัวประสานที่แตกต่างกัน ได้แก่ รูปแบบที่ 1 คือ ตัวประสานแป้งมันสำปะหลังและผงซัน รูปแบบที่ 2 คือ ตัวประสานแป้งมันสำปะหลังและกาวลาเท็กซ์ รูปแบบที่ 3 คือ ตัวประสานกาวลาเท็กซ์ และรูปแบบที่ 4 คือ ตัวประสานน้ำยาพารา ซึ่งได้ลักษณะชิ้นงานต้นแบบ ดังต่อไปนี้

##### 4.1.1 ผลการทดลองชิ้นงานที่ 1 รูปแบบตัวประสานแป้งมันสำปะหลังและผงซัน

จากการทดลองผสมผักตบชวาและแป้งมันสำปะหลังและผงซัน หลังการกดและอบชิ้นงานพบว่า ชิ้นงานต้นแบบที่ได้จับตัวกันเป็นแผ่น มีความแข็งแรง ดังรูปที่ 4.1 ก และเมื่อออกแรงหักชิ้นงานต้นแบบ พบว่าชิ้นงานมีความเปราะแตกหักง่าย เป็นผงที่มีความร่วน ดังรูปที่ 4.1 ข



(ก)

(ข)

รูปที่ 4.1 ชิ้นงานต้นแบบที่ประสานด้วยแป้งมันสำปะหลังและผงซัน

(ก) ก่อนออกแรงหัก และ (ข) หลังออกแรงหัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.2 ผลการทดลองชิ้นงานที่ 2 รูปแบบตัวประสานแป้งมันสำปะหลังและกาวลาเท็กซ์

จากการทดลองผสมผักตบชวากับตัวประสานแป้งมันสำปะหลังและกาวลาเท็กซ์ หลังการกดและอบชิ้นงาน พบว่าชิ้นงานต้นแบบที่ได้จับตัวกันเป็นแผ่น มีความแข็ง ไม่กรอบ ดังรูปที่ 4.2 ก และเมื่อออกแรงหักชิ้นงานต้นแบบ พบว่าชิ้นงานมีความเหนียวเพิ่มขึ้น เพราะแตกหักได้ยากกว่าชิ้นงานชิ้นที่ 1 และไม่เป็นผงที่มีความร่วน ดังรูปที่ 4.2 ข



(ก)

(ข)

รูปที่ 4.2 ชิ้นงานต้นแบบที่ประสานด้วยแป้งมันสำปะหลังและกาวลาเท็กซ์

(ก) ก่อนออกแรงหัก และ (ข) หลังออกแรงหัก

จากการทดลองผสมผักตบชวาและตัวประสานกาวลาเท็กซ์ หลังการกดและอบชิ้นงาน พบว่าชิ้นงานต้นแบบที่ได้มีลักษณะนิ่ม จับตัวกันเป็นแผ่นได้บ้างเล็กน้อย มีความร่วนของชิ้นงาน ดังรูปที่ 4.3 ก และเมื่อออกแรงหักชิ้นงาน ชิ้นงานแตกร่วน ดังรูปที่ 4.3 ข



(ก)

(ข)

รูปที่ 4.3 ชิ้นงานต้นแบบที่ประสานด้วยกาวลาเท็กซ์

(ก) ก่อนออกแรงหัก และ (ข) หลังออกแรงหัก

#### 4.1.4 ผลการทดลองชิ้นงานที่ 4 รูปแบบตัวประสานน้ำยางพารา

จากการทดลองผสมผักตบชวากับตัวประสานน้ำยางพารา หลังการกดและอบชิ้นงาน พบว่าชิ้นงานต้นแบบที่ได้จับตัวกันเป็นแผ่น มีความแข็งแรงและเหนียว ไม่กรอบและเปราะแตกง่าย ดังรูปที่ 4.4 ก และเมื่อออกแรงหักชิ้นงานต้นแบบ พบว่าชิ้นงานมีความเหนียว ยืดหยุ่น ไม่แตกหัก และสามารถคืนตัวกลับไปสภาพเดิมที่เป็นแผ่นได้ ดังรูปที่ 4.4 ข



(ก)

(ข)

รูปที่ 4.4 ชิ้นงานต้นแบบที่ประสานด้วยน้ำยางพารา

(ก) ก่อนออกแรงหัก และ (ข) หลังออกแรงหัก

#### 4.2 ผลการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุเชิงประกอบ

จากการขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบจากผักตบชวาและตัวประสานยางพารา ที่ได้จากการทดลองหาตัวประสานที่เหมาะสมดังหัวข้อที่ 4.1 เมื่อนำไปทดสอบคุณสมบัติทางกล คือ การทดสอบแรงดึง (Tensile test) และทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ คือ การทดสอบการดูดซึมน้ำ แสดงให้เห็นค่าความสามารถการดึงที่มากที่สุด และค่าการดูดซึมน้ำที่น้อยที่สุด

##### 4.2.1 ผลการทดสอบความสามารถการดึง

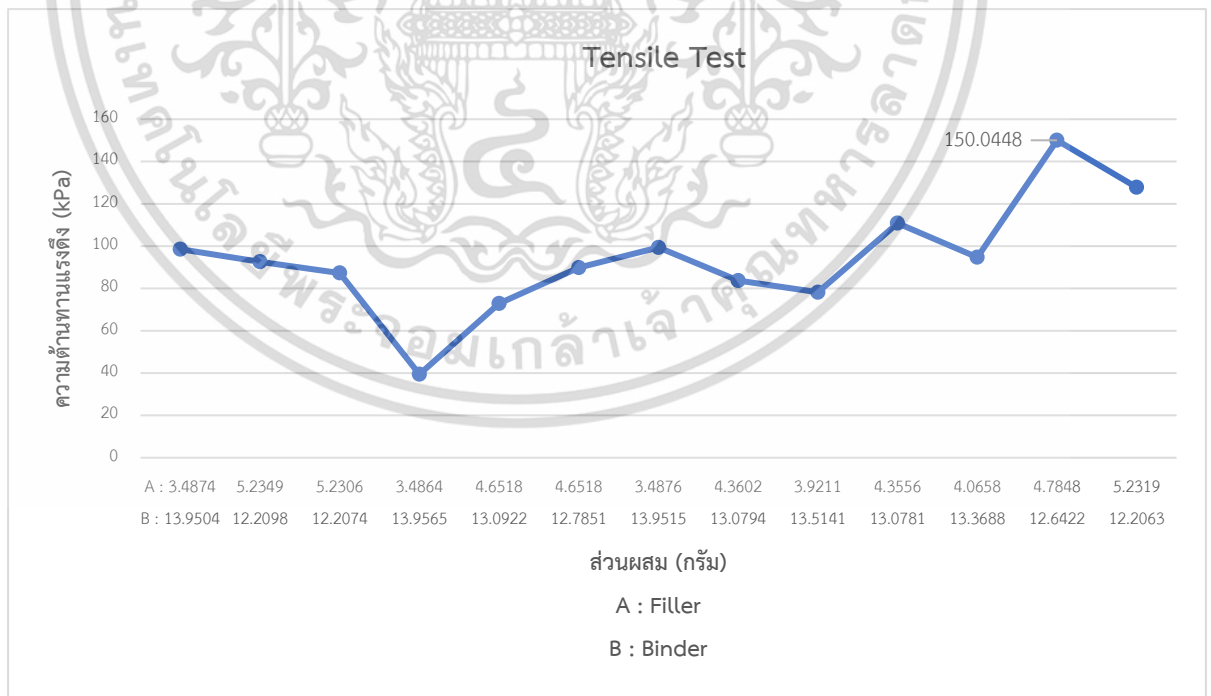
ค่าการทดสอบแรงดึงจากชิ้นงานต้นแบบ 13 ชิ้นงาน พบว่าแรงดึงที่มากที่สุดในแต่ละชิ้นงาน และค่าความเค้นแรงดึง ในพื้นที่หน้าตัด  $75 \text{ mm}^2$  ตามขนาดชิ้นงานของมาตรฐาน ASTM-D3039 ดังตารางที่ 4.1 โดยจากกราฟความสามารถแรงดึงแสดงให้เห็นว่าชิ้นงานที่ 8 มีค่าความเค้นแรงดึงมากที่สุด คือ  $150.045 \text{ kPa}$  ดังรูปที่ 4.5

##### 4.2.2 ผลการทดสอบการดูดซึมน้ำ

ค่าการทดสอบการดูดซึมน้ำในชิ้นงานต้นแบบทั้ง 13 ชิ้นงาน จากการทดสอบตามมาตรฐาน ISO 535 โดยวัดค่าเฉลี่ยของน้ำหนักก่อนและหลังแช่น้ำ ซึ่งทำการทดสอบซ้ำ 3 ครั้ง แล้วนำไปคำนวณตามสมการค่าการดูดซึมน้ำในแต่ละชิ้นงาน แสดงดังตารางที่ 4.2 พบว่าชิ้นงานที่ 9 มีปริมาณการดูดซึมน้ำ เท่ากับ  $0.1763 \text{ gH}_2\text{O/g}$  ซึ่งมีค่าน้อยที่สุด ดังรูปที่ 4.6

ตารางที่ 4.1 ค่าแรงดึงที่มากที่สุดจากการทดสอบแรงดึงและค่าความเค้นแรงดึง

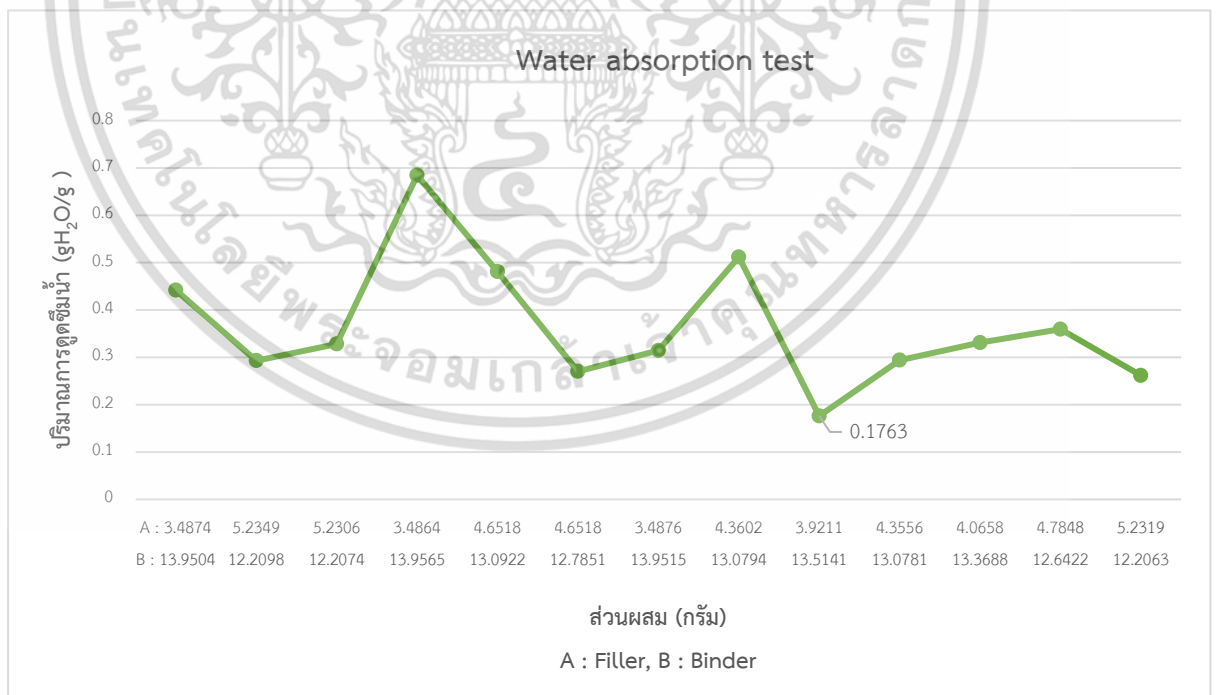
ชิ้นงานต้นแบบ	ส่วนผสม (g)		Maximum Force (N)	Area (mm <sup>2</sup> )	Stress (kPa)
	Filler	Binder			
1	3.4874	13.9504	6.945928	75	92.612
2	5.2349	12.2098	6.548563	75	87.314
3	5.2306	12.2074	6.739298	75	89.857
4	3.4864	13.9565	7.454554	75	99.394
5	4.6518	13.0922	6.278356	75	83.711
6	4.6518	12.7851	5.865097	75	78.201
7	3.4876	13.9515	8.312861	75	110.838
8	4.3602	13.0794	11.25336	75	150.045
9	3.9211	13.5141	9.584427	75	127.792
10	4.3556	13.0781	7.390976	75	98.546
11	4.0658	13.3688	7.104874	75	94.732
12	4.7848	12.6422	2.95639	75	39.419
13	5.2319	12.2063	5.467733	75	72.903



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานแรงดึงและส่วนผสมของวัสดุเชิงประกอบ

ตารางที่ 4.2 ค่าการดูดซึมน้ำโดยวัดจากน้ำหนักก่อนและหลังแช่น้ำ

ชิ้นงาน ต้นแบบ	ส่วนผสม (g)		น้ำหนักก่อน แช่น้ำเฉลี่ย (g)	น้ำหนักหลังแช่ น้ำเฉลี่ย (g)	ค่าการดูดซึมน้ำ ( gH <sub>2</sub> O/g )	เปอร์เซ็นต์
	Filler	Binder				
1	3.4874	13.9504	1.4157	2.0413	0.4419	44.19
2	5.2349	12.2098	1.5713	2.0317	0.2930	29.30
3	5.2306	12.2074	1.6902	2.2449	0.3282	32.82
4	3.4864	13.9565	1.2842	2.1632	0.6844	68.44
5	4.6518	13.0922	1.4750	2.1844	0.4810	48.10
6	4.6518	12.7851	1.6005	2.0331	0.2703	27.03
7	3.4876	13.9515	1.4696	1.9317	0.3144	31.44
8	4.3602	13.0794	1.4869	2.2479	0.5118	51.18
9	3.9211	13.5141	1.4809	1.7419	0.1763	17.63
10	4.3556	13.0781	1.5532	2.0097	0.2940	29.40
11	4.0658	13.3688	1.5025	1.9999	0.3310	33.10
12	4.7848	12.6422	1.5476	2.1038	0.3594	35.94
13	5.2319	12.2063	1.6786	2.1180	0.2618	26.18



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซึมน้ำและส่วนผสมของวัสดุเชิงประกอบ

### 4.3 ผลการวิเคราะห์การออกแบบการทดลองที่เหมาะสม

จากการทดลองหาตัวแปรที่เหมาะสม พบว่าตัวแปรสารรูปแบบที่ 4 คือ ตัวแปรสารน้ำยางพารา ซึ่งมีคุณสมบัติเหมาะสมที่สุด จึงนำตัวแปรสารดังกล่าว ตามหัวข้อที่ 4.1 มาออกแบบการทดลองแบบผสม (Mixture design) แบบ Optimal (custom) designs เพื่อได้สัดส่วนที่เหมาะสม [44][45][46] ซึ่งกำหนดอัตราส่วนผสมของผักตบชวาและน้ำยางพาราที่เลือกสำหรับการทดลอง ส่งผลให้มีขนาดการทดลองทั้งหมด 13 การทดลอง

#### 4.3.1 ผลการวิเคราะห์ถดถอยทางสถิติ

เมื่อวิเคราะห์การถดถอยทางสถิติของความสามารถการดึง (Tensile strength) และความสามารถการดูดซึมน้ำของชิ้นงาน พบว่ารูปแบบของความสามารถการดึงมีรูปแบบเชิงเส้นตรง (Linear) และความสามารถในการดูดซึมน้ำมีรูปแบบเชิงสมการกำลังสี่ (Quartic) จากการพิจารณาที่ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation) ที่ต่ำ และค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ ( $R^2$ ) ที่สูง จึงสามารถยอมรับได้ โดยจะมุ่งเน้นไปที่รูปแบบที่มีค่า Adjusted  $R^2$  และค่า Predicted  $R^2$  ที่มากที่สุดเป็นหลักในการพิจารณาเลือกรูปแบบ [47] ดังตารางที่ 4.3 หากวิเคราะห์จากค่า P-value ที่ต้องมีค่าน้อยกว่า 0.05 จึงมีนัยสำคัญทางสถิติและมีความสำคัญต่อรูปแบบ [48] ซึ่งในการทดลองนี้มีค่า P-value มากกว่า 0.05 แสดงให้เห็นว่าไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ส่วนใน Lack of fit มีค่ามากกว่า 0.05 แสดงให้เห็นว่าไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ [49] ดังตารางที่ 4.4 เมื่อเทียบกับข้อผิดพลาดจริง (Pure error) ความสามารถในการดึง และการดูดซึมน้ำมีโอกาส 58.73 เปอร์เซ็นต์ และ 62.31 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับที่จะเกิดขึ้นจากความคลาดเคลื่อน

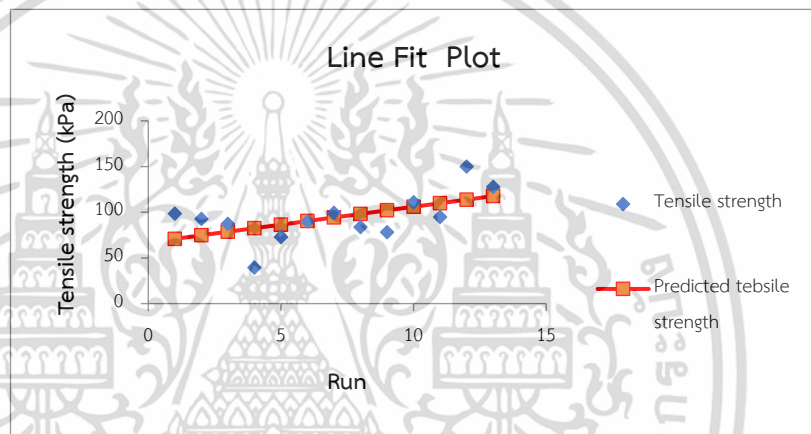
ตารางที่ 4.3 การวิเคราะห์รูปแบบทางสถิติสำหรับการทดลองแบบผสมของ  
ความสามารถการดึงและการดูดซึมน้ำ

ผลการทดลอง	model	Std. Dev.	$R^2$	Adjusted $R^2$	P-value	F-value
ความสามารถการดึง	Linear	0.0249	0.1926	0.1192	0.1335	2.62
การดูดซึมน้ำ	Quartic	0.1214	0.4481	0.1721	0.2591	1.62

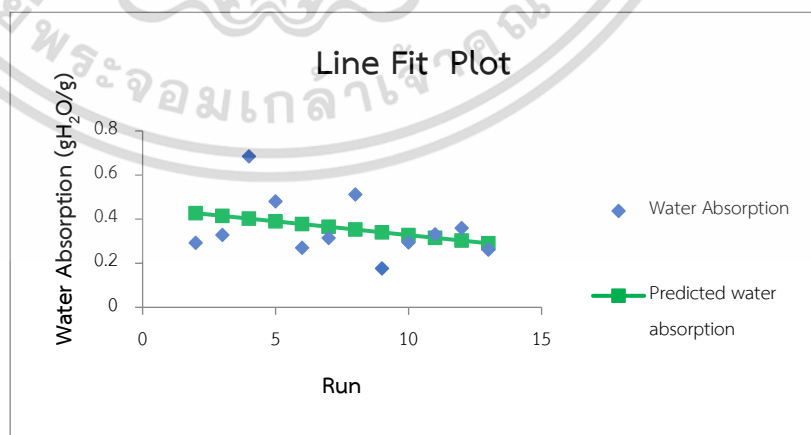
ตารางที่ 4.4 การวิเคราะห์ Lack of Fit สำหรับการทดลองแบบผสมของ  
ความสามารถการดึงและการดูดซึมน้ำ

ผลการทดลอง	model	P-value	F-value
ความสามารถการดึง	Linear	0.5873	0.8007
การดูดซึมน้ำ	Quartic	0.6231	0.5123

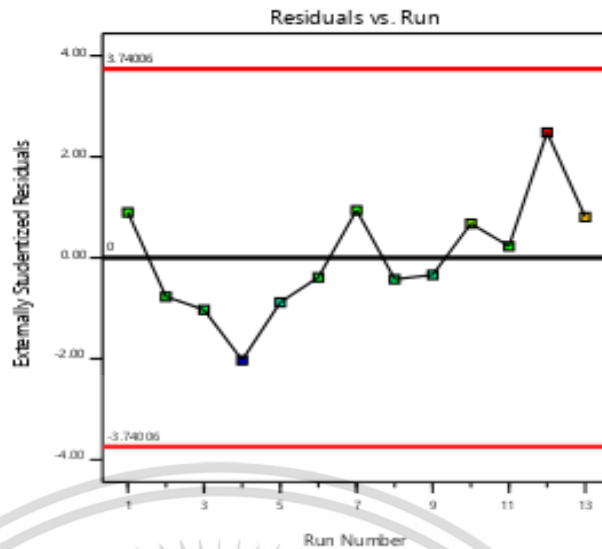
ค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ (Coefficient of determination) ( $R^2$ ) ที่แสดงในตารางที่ 4.3 มีค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจของความสามารถดึงและการดูดซึมน้ำ เท่ากับ 19.26 เปอร์เซ็นต์ และ 44.81 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งค่อนข้างต่ำ แสดงให้เห็นว่าตัวแบบมีความเหมาะสมกับข้อมูลน้อย รูปแบบการถดถอยจึงไม่เป็นที่ยอมรับ และเมื่อเปรียบเทียบกราฟของสมการถดถอยกับข้อมูลที่สังเกตได้ ดังรูปที่ 4.7 และ 4.8 จะสามารถบอกได้ถึงความเบี่ยงเบน (Bias) ในแต่ละช่วงของเส้นโค้ง เนื่องจากความแตกต่างของค่าที่สังเกตได้กับค่าที่คำนวณตามสมการมาก ข้อมูลจึงไม่สมรूपกับตัวแบบเชิงเส้น และหากพิจารณาที่แผนภาพเศษเหลือ (Residual plot) ดังรูปที่ 4.9 จะเห็นได้ว่าในแผนภาพเศษเหลือแสดงรูปแบบอิสระของข้อมูล ไม่มีความเอนเอียง ซึ่งเป็นตัวบ่งบอกว่าตัวแบบนั้นเหมาะสม



รูปที่ 4.7 กราฟเปรียบเทียบสมการถดถอยและข้อมูลที่สังเกตได้ของค่าความต้านทานแรงดึง



รูปที่ 4.8 กราฟเปรียบเทียบสมการถดถอยและข้อมูลที่สังเกตได้ของค่าการดูดซึมน้ำ



รูปที่ 4.9 แผนภาพเศษเหลือ (Residual plot)

แต่ในการวิเคราะห์ความเหมาะสมของตัวแบบสมการเชิงเส้นกับข้อมูล โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ ต้องพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจร่วมกับการวิเคราะห์แผนภาพเศษเหลือ จึงส่งผลให้ตัวแบบกับข้อมูลจึงไม่มีความสมรูปทางสถิติ และไม่มี ความแม่นยำเท่าที่ควร จึงควรเลือกใช้ตัวแบบสมการถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้น เพราะว่าข้อมูลไม่สมรูปกับตัวแบบเชิงเส้น และใช้ค่า Adjusted R<sup>2</sup> และค่า Predicted R<sup>2</sup> ในการพิจารณาเลือกรูปแบบที่ไม่สามารถวิเคราะห์ด้วยค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจได้ [47]

จากการวิเคราะห์ การถดถอยจึงนำมาสร้างรูปแบบการจำลองการถดถอยของผลการตอบสนองในตัวแปรส่วนประกอบเทียม (Pseudo component) ได้แก่ ความสามารถในการดึง (Tensile strength) และความสามารถการดูดซึมน้ำ (Water absorption) ซึ่งแสดงดังสมการที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ

$$\text{Tensile strength} = 0.0787A + 0.1098B \quad (4.1)$$

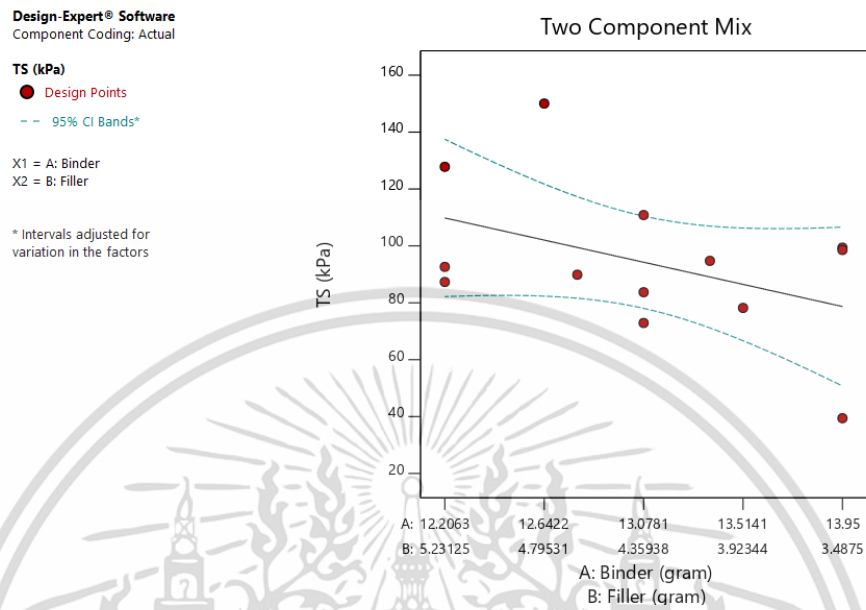
$$\text{Water absorption} = 0.4501A + 0.3054B - 0.1040AB \quad (4.2)$$

เมื่อ A คือ ร้อยละของน้ำยางพารา

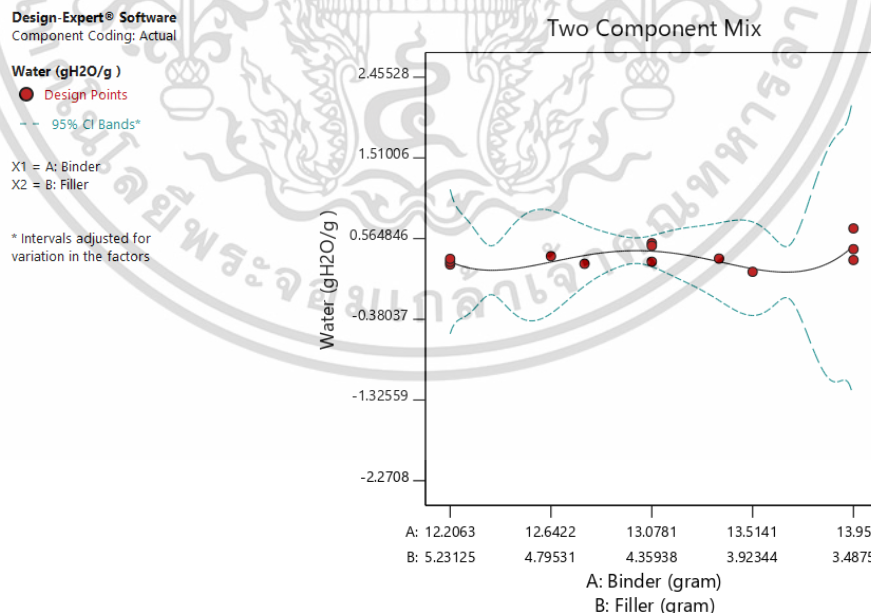
B คือ ร้อยละของผักตบชวา

จากสมการถดถอยที่ 4.1 และ 4.2 ถูกนำมาสร้างเป็นกราฟของความสามารถในการดึง และความสามารถการดูดซึมน้ำ ดังรูปที่ 4.10 และ 4.11 ตามลำดับ วิเคราะห์แล้วพบว่าเมื่อมีอัตราส่วนผสมน้ำยางพารา (A) และผักตบชวา (B) แปรผันตรงกับความความสามารถในการดึง (Tensile strength) ในขณะที่ความสามารถการดูดซึมน้ำของน้ำเมื่อเทียบกับอัตราส่วนผสมของน้ำยางพาราและ

ผักตบชวาในวัสดุเชิงประกอบ พบว่าปริมาณของส่วนผสมทั้ง 2 ส่งผลให้ค่าการดูดซึมน้ำไม่แตกต่างกันมาก



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงรูปแบบการจำลองการถดถอยของความสามารถการดึงในตัวแปร ส่วนประกอบเทียม



รูปที่ 4.11 กราฟแสดงรูปแบบการจำลองการถดถอยของการดูดซึมน้ำในตัวแปร ส่วนประกอบเทียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.3.2 ผลการวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนของข้อมูล

การวิเคราะห์ของการแพร่กระจายของข้อมูล (Propagation of Error : POE) ส่งผลให้ได้ส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของผลตอบสนองมีค่าน้อยที่สุด [45] โดยวิเคราะห์จากความผันแปรของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation) ของแต่ละส่วนผสมและค่าผลตอบสนองต่าง ๆ โดยกำหนดค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของแต่ละส่วนผสม A และ B เป็น 0.6526 แสดงดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของแต่ละส่วนผสมที่กำหนด

Name	Units	Type	Std. Dev.	Low	High
Binder	gram	Component	0.6526	12.2063	13.95
Filler	gram	Component	0.6526	3.4875	5.23125

การวิเคราะห์การแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนให้มีค่าความคลาดเคลื่อนต่ำสุด กำหนดให้ค่าการแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนของการทดสอบแรงดึงมีค่ามากที่สุด และการดูดซึมน้ำมีค่าน้อยสุด ดังตารางที่ 4.6 ผลจากการกำหนดส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานแต่ละส่วนผสมทำให้ได้ค่าความคลาดเคลื่อนของความสามารถการดึง และความสามารถการดูดซึมน้ำอยู่ภายในช่วงที่กำหนด

ตารางที่ 4.6 การกำหนดรูปแบบความพึงพอใจของการแพร่กระจายความคลาดเคลื่อน  
ทั้ง 2 ผลการตอบสนอง

Responses	Goal	Lower Limit	Upper Limit
Tensile Strength	maximize	39.4185	150.045
POE (Tensile Strength)	In range	26.4513	26.7067
Water Absorption	minimize	0.1763	0.6844
POE (Water absorption)	In range	0.145012	1.35094

จากการวิเคราะห์การแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนที่น้อยที่สุด แสดงให้เห็นข้อผิดพลาดที่ส่งไปยังการตอบสนองทำให้การเปลี่ยนแปลงมีความแปรผันน้อยที่สุด และสะท้อนถึงการตั้งค่าปัจจัยหรือการทำการตอบสนองสำหรับวิธีแก้ปัญหา โดยวิธีการแก้ปัญหาถูกคัดเลือกออกมาแต่วิธีที่มีความ

ความคลาดเคลื่อนอยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสม จากจุดความพึงปรารถนา (Desirability) ที่สามารถรักษาเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระดับความปรารถนาไว้ได้ในระดับสูงสุดตลอดช่วงสารประกอบ ดังนั้นวิธีที่มีค่าความคลาดเคลื่อนต่ำ และอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ คือ วัสดุเชิงประกอบที่มีน้ำยาฆ่าเชื้อและผักตบชวา เท่ากับ 12.357 และ 5.081 ตามลำดับ โดยมีความสามารถในการดึง เท่ากับ 107 kPa และความสามารถการดูดซึมน้ำ เท่ากับ 0.197 gH<sub>2</sub>O/g ตามลำดับ ดังตารางที่ 4.7 และ 4.8

ตารางที่ 4.7 ผลการวิเคราะห์การแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนและความพึงพอใจในผลการตอบสนอง

Number	Binder	Filler	TS	POE (TS)	Water	POE (Water)	Desirability	
1	12.357	5.081	107.14	26.47	0.197	0.145	0.766	Selected
2	12.425	5.012	105.92	26.48	0.198	0.145	0.759	
3	13.613	3.824	84.70	26.65	0.177	0.161	0.639	
4	13.688	3.749	83.36	26.66	0.175	0.145	0.630	

ตารางที่ 4.8 ส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดจากการกำหนดค่าปัจจัยของแบบจำลอง ที่มีค่าความพึงปรารถนาสูงสุด

Component	Name	Level	Low Level	High Level	Std. Dev.	Coding
A	Binder	12.36	12.21	13.95	0.6526	Actual
B	Filler	5.08	3.49	5.23	0.6526	Actual
	Total =	17.44				

การทดสอบที่ได้รับการยืนยัน (Confirmation test) ก็ต่อเมื่อเปรียบเทียบช่วงการทำนายของแบบจำลองกับค่าเฉลี่ยของตัวอย่างที่นำมาทดสอบ ถ้าค่าเฉลี่ยของตัวอย่างอยู่ในช่วงการทำนายรูปแบบจึงได้รับการยืนยัน โดยปกติการยืนยันจะใกล้เคียงกับการตั้งค่าปัจจัยที่ได้รับการเสนอแนะจากขั้นตอนการเพิ่มประสิทธิภาพเชิงตัวเลข (Numerical optimization) แต่เนื่องจากในการทดลองนี้มีค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ ( $R^2$ ) และค่า Adjusted  $R^2$  ต่ำ และเมื่อพิจารณาจากค่า P-value แต่ละรูปแบบที่มีค่ามากกว่า 0.05 จึงไม่มีความสำคัญต่อรูปแบบ การวิเคราะห์รูปแบบเชิงลำดับเส้นของความสามารถในการดึง และการดูดซึมน้ำ จึงไม่เป็นดังรูปแบบที่กำหนด ดังนั้นรูปแบบการถดถอยจึงยังไม่เหมาะสมกับข้อมูลและไม่สามารถยอมรับรูปแบบการถดถอยนั้นได้ ที่จะใช้การโปรแกรมเชิงเส้น (Linear programming) เพื่อคำนวณหาต้นทุนส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุด

## บทที่ 5

### สรุปผลการดำเนินการและข้อเสนอแนะ

ในบทนี้จะกล่าวถึงการสรุปและอภิปรายผลของการดำเนินการ การวิเคราะห์ผลการทดลอง และการวิเคราะห์ผลทางสถิติ รวมไปถึงข้อเสนอแนะของงานวิจัยนี้ โดยประกอบด้วยการสรุปผลดังนี้

1. สรุปผลการดำเนินการ
2. อภิปรายผล
3. ข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการดำเนินการ

การศึกษาส่วนผสมที่เหมาะสมของวัสดุเชิงประกอบจากผักตบชวา โดยหาตัวประสานที่มีความเหมาะสมในด้านคุณสมบัติเชิงกลและคุณสมบัติทางกายภาพกับฟิลเลอร์หรือผักตบชวา เพื่อนำไปกดขึ้นรูปเป็นวัสดุเชิงประกอบ จากการเปรียบเทียบตัวประสานทั้ง 4 ตัวประสาน พบว่าตัวประสานยางพาราที่มีความเหมาะสมในการนำมาผสมกับผักตบชวามากที่สุด เนื่องจากมีทั้งความแข็งแรงและความยืดหยุ่น

เมื่อได้ส่วนผสมของวัสดุเชิงประกอบที่เหมาะสม จึงนำไปออกแบบการทดลองโดยการสุ่มด้วยการออกแบบการทดลองแบบผสม (Mixture design) แบบ Optimal (custom) designs ทำให้ได้รูปแบบการทดลองทั้งหมด 13 การทดลอง เพื่อนำไปทดลองหาค่าตอบสนองดังที่กำหนด นั่นก็คือความสามารถแรงดึง (Tensile strength) และการดูดซึมน้ำ แล้วนำผลที่ได้ไปวิเคราะห์การถดถอยทางสถิติ ซึ่งแสดงให้เห็นว่ารูปแบบจำลองไม่มีความสำคัญต่อการทดลองจากการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ แสดงการตัดสินใจสำหรับการทดลองแบบผสมของความสามารถการดึงและการดูดซึมน้ำ และเมื่อพิจารณารูปแสดงความสัมพันธ์ระหว่างวัสดุเชิงประกอบของน้ำยางพาราและผักตบชวากับความสามารถการดึงและการดูดซึมน้ำ พบว่าอัตราส่วนผสมน้ำยางพาราและผักตบชวาแปรผันตรงกับความสามารถในการดึง (Tensile strength) แต่ไม่ส่งผลต่อการดูดซึมน้ำ

จากการวิเคราะห์การแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนของข้อมูล แสดงให้เห็นว่าส่วนผสมที่มีค่าความคลาดเคลื่อนต่ำและอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ คือ วัสดุเชิงประกอบที่มีน้ำยางพาราและผักตบชวา เท่ากับ 70.85 และ 29.15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ซึ่งทำให้ค่าความสามารถการดึงเท่ากับ 107 kPa และค่าการดูดซึมน้ำ เท่ากับ 0.197 gH<sub>2</sub>O/g

## 5.2 อภิปรายผล

จากการศึกษาส่วนผสมที่เหมาะสมของวัสดุเชิงประกอบของฟิลเลอร์และตัวประสานจากธรรมชาติโดยนำมาอัดขึ้นรูปด้วยความร้อน ซึ่งการเลือกใช้ฝักตบชวาเป็นฟิลเลอร์ทำให้วัสดุเชิงประกอบมีความแข็งแรงเนื่องจากคุณสมบัติของกากใยและลิกนินในฝักตบชวา และเลือกใช้ตัวประสานน้ำยางพาราเนื่องจากมีความเหนียว ยืดหยุ่น ไม่แตกหัก และสามารถคืนตัวเป็นรูปร่างเดิม จึงนำไปวิเคราะห์การออกแบบการทดลองแบบส่วนผสม พบว่าส่วนผสมของน้ำยางพาราและฝักตบชวาในอัตราส่วนประมาณ 70 : 30 โดยน้ำหนัก และนำไปทดสอบแรงดึงและการดูดซึมน้ำ โดยผลการทดสอบมีค่าความสามารถการดึง และการดูดซึมน้ำที่ร้อยละ 1.07 และ 19.7 ตามลำดับ เมื่อไปวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าอัตราส่วนผสมน้ำยางพาราและฝักตบชวาแปรผันตรงกับความสามารถในการดึง แต่ไม่ส่งผลต่อการดูดซึมน้ำ เนื่องจากคุณสมบัติของน้ำยางพาราที่สามารถยึดเกาะวัสดุเชิงประกอบเป็นเนื้อเดียวกันและสามารถเพิ่มความยืดหยุ่นให้กับชิ้นงาน อีกทั้งอนุภาคภายในชิ้นงานมีช่องว่างมากกว่าขนาดของฟิลเลอร์ส่งผลทำให้การดูดซึมน้ำต่ำ หากถูกนำไปใช้งานในลักษณะที่สามารถระบายอากาศได้ดีจึงเหมาะในการนำไปประยุกต์ใช้ ซึ่งในการทดลองนี้สังเกตเห็นว่าสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นถุงเพาะชำ หรือกระถางต้นไม้ได้ นอกจากจะลดจำนวนฝักตบชวาในแหล่งน้ำแล้วยังสามารถลดจำนวนขยะพลาสติกจากถุงเพาะชำหรือกระถางพลาสติกที่อาจถูกฝังไว้ใต้ดินอีกด้วย เพราะฉะนั้นการเลือกใช้วัสดุและอัตราส่วนผสมในวัสดุเชิงประกอบนี้อาจปรับเปลี่ยนปริมาณตามความเหมาะสมที่ใช้ในกระบวนการผลิตจริง และพิจารณาการนำไปประยุกต์ใช้งานจริงตามความเหมาะสม

โดยในการวิจัยครั้งนี้อาจมีความคลาดเคลื่อนอันเนื่องจากการชั่งตวงน้ำหนักของฟิลเลอร์ที่มีขนาดเล็กและน้ำหนักเบา รวมถึงอุณหภูมิในการทดลองที่ไม่คงที่ จึงอาจส่งผลต่อวัสดุเชิงประกอบที่นำมาวิเคราะห์ในรูปของชิ้นงานต้นแบบได้

## 5.3 ข้อเสนอแนะ

การดำเนินการครั้งนี้มีข้อจำกัดเรื่องของเวลา ซึ่งหากมีการพัฒนาในครั้งต่อไปควรมีการแก้ไข ปัญหาเหล่านี้ เพื่องานที่สมบูรณ์ยิ่งขึ้น ได้แก่

1. การศึกษาครั้งนี้เลือกใช้ขนาดของฝักตบชวาเพียงแค่ขนาด 850 ไมครอน เพียงขนาดเดียว ซึ่งอาจจะไม่ได้มีความแข็งแรงและการยึดเกาะกันของสารประกอบที่ดีที่สุด ดังนั้นควรมีการศึกษาเปรียบเทียบฟิลเลอร์ขนาดต่าง ๆ
2. การศึกษาครั้งนี้ไม่ได้มีการทดสอบระยะเวลาการย่อยสลายของวัสดุเชิงประกอบ ดังนั้นควรมีการทดสอบระยะเวลาการย่อยสลายของวัสดุเชิงประกอบเพิ่มเติมเพื่อเป็นข้อมูลยืนยันว่าวัสดุเชิงประกอบดังกล่าวย่อยสลายได้จริงและสามารถนำวัสดุเชิงประกอบนี้ไปใช้เป็นวัสดุทดแทนได้จริง

3. การศึกษาครั้งนี้ทำการทดลองขึ้นรูปชิ้นงานเป็นแผ่นวัสดุต้นแบบเพียงเท่านั้นไม่ได้ทำการ  
กดขึ้นรูปเป็นบรรจุภัณฑ์จริง ซึ่งการศึกษาครั้งนี้สามารถพัฒนาโดยนำอัตราส่วนผสมของวัสดุเชิง  
ประกอบไปขึ้นรูปเป็นบรรจุภัณฑ์ต่อไปได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] ลูกซ์.2561.สิ่งแวดล้อม.[Online].สืบค้นจาก:[https://www.lux.co.th/cpt\\_blog/cause-and-impact-of-water-pollution](https://www.lux.co.th/cpt_blog/cause-and-impact-of-water-pollution)
- [2] ธีัญญาภัก . 2 5 6 1 . ผลกระทบของมลพิษทางน้ำ . [Online].สืบค้นจาก : <http://www.rmuti.ac.th/user/thanyaphak/>
- [3] MGR.2562.การใช้ประโยชน์จากวัชพืชผักตบชวา . [Online].สืบค้นจาก : <https://mgronline.com /local/detail/9620000056752>
- [4] ศูนย์ปฏิบัติการวิจัยเรือนปลูกพืชและทดลองมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.2562.ผักตบชวา. สืบค้นจาก:<http://clgc.agri.kps.ku.ac.th/resources/weed/eichornia.html>
- [5] วัชพืชผักตบชวา.2562. [Online].สืบค้นจาก:<https://www.amarintv.com/news-update/news-20606/393490>
- [6] ศูนย์กสน.อำเภอภาชี จังหวัดพระนครศรีอยุธยา.2562.จามรักซ์โลกจากผักตบชวา. [Online].สืบค้นจาก:<https://www.mixmaya.com/1560419167>
- [7] TCDC.2562.ผลกระทบจากขยะและปัญหาสิ่งแวดล้อม.[Online].สืบค้นจาก: <https://web.tcdc.or.th/en/Articles/Detail/>
- [8] กรมพัฒนาที่ดิน.2561.ประโยชน์จากผักตบชวา. [Online].สืบค้นจาก: [http://www.ddd.go.th/EFiles \\_project/article/article02.html/](http://www.ddd.go.th/EFiles _project/article/article02.html/)
- [9] สำนักงานสิ่งแวดล้อมภาคที่5.2554.คู่มือการจัดการผักตบชวา.[Online].สืบค้นจาก: <http://lib.mnre.go.th/book/paktob.pdf>
- [10] ศูนย์ปฏิบัติการวิจัยเรือนปลูกพืชและทดลองมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.2562.ผักตบชวา. [Online].สืบค้นจาก:<http://clgc.agri.kps.ku.ac.th/resources/weed/eichornia.html>
- [11] กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี . 2562.ผักตบชวา. [Online].สืบค้นจาก: <https://www.mhesi.go.th/main/th/492-library/genius-of-king/>
- [12] พรทิพย์ ทูลจินดา และอังศุมา บุญไชยสุริยา, 2554.การผลิตโคมย่อยสลายได้ทางชีวภาพจาก แป้งมันสำปะหลังเสริมแรงด้วยเส้นใยปาล์มน้ำมัน.วิทยานิพนธ์ สาขาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- [13] โสภิตา บุญอเนกทรัพย์.2562.การสกัดแป้งจากหัวมันสำปะหลัง.[Online].สืบค้นจาก: <https://www.kmutt.ac.th/rippc/prog17t.htm>
- [14] บุญดี.2562.ชนธรรมชาติ.[Online].สืบค้นจาก:<http://www.bdcountrylife.com/>

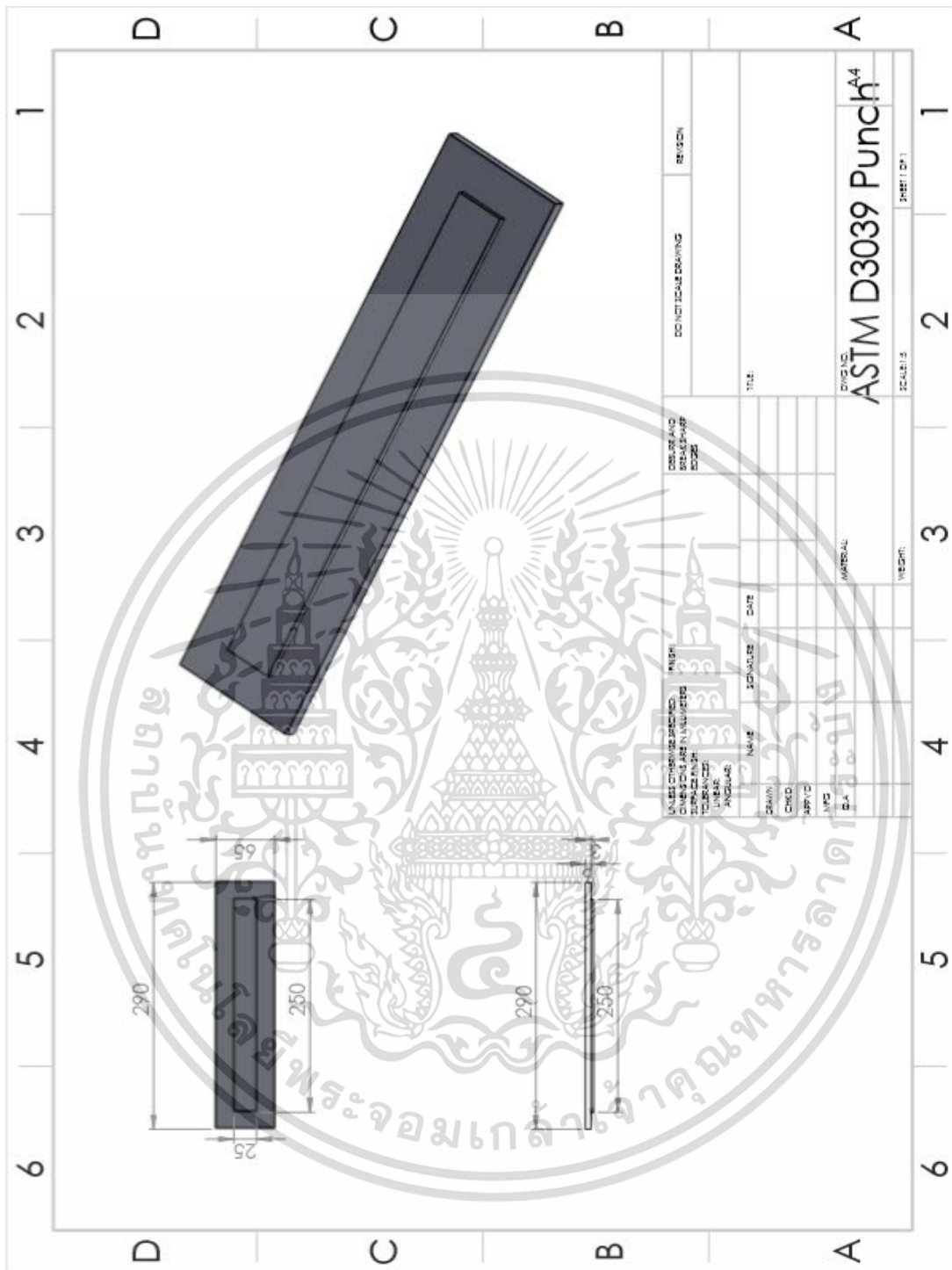
- [15] เอสซี เปเปอร์แพ็ค.2563.กาวลาเท็กซ์.[Online].สืบค้นจาก:[http://scpaperbox.blogspot.com/2013/10/blog-post\\_1584.html](http://scpaperbox.blogspot.com/2013/10/blog-post_1584.html)
- [16] Metallic Zone.2563.พอลิไวนิลแอซีเตต.[Online].สืบค้นจาก:<http://siammetalliczone.com/>
- [17] uniontoy.2563.คุณสมบัติพอลิไวนิลแอซีเตต.[Online].สืบค้นจาก:<http://www.uniontoy.com/index>
- [18] I-Market(Thailand) Co., Ltd.กาวลาเท็กซ์ TOA รุ่น LA 22S.2563.[Online].สืบค้นจาก:<https://www.imarketthailand.com/shops/la-22s/>
- [19] กรมวิทยาศาสตร์บริการ.กาวลาเท็กซ์ชนิดโพลีไวนิลอะซีเตต.2563. [Online].สืบค้นจาก:[http://lib3.dss.go.th/fulltext/dss\\_j/2528\\_109\\_16.pdf](http://lib3.dss.go.th/fulltext/dss_j/2528_109_16.pdf)
- [20] สารานุกรมไทยเล่มที่3.2563.ยางพารา.[Online].สืบค้นจาก:<http://saranukromthai.or.th/sub/book/book.php?book=3&chap=4&page=t3-4-infodetail03.html>
- [21] สำนักงานการพัฒนวิจัยการเกษตร.2562.พฤษศาสตร์ของยางพารา.[Online].สืบค้นจาก:<http://www.arda.or.th/kasetinfo/south/para/controller/index.php>
- [22] Manlika.2562.ชนิดของยางพารา.[Online].สืบค้นจาก:<https://sites.google.com/site/manlikasaetem/chnid-khxng-yangphara>
- [23] Neo Plastomer.2562.ยางพารา.[Online].สืบค้นจาก:<https://www.neoplast.biz/>
- [24] เมเชอร์ วัน.2562.เตาอบลมร้อน.[Online].สืบค้นจาก:<https://www.measure1shop.com/product/เครื่องมือห้องแลป-lab/ตู้อบลมร้อน-oven/oven-แบบมีพัดลม/memmert-uf110-ตู้อบลมร้อน-ตู้อบแห้ง-oven/>
- [25] รศ.ชูชาติ อารีจิตรานุสรณ์.2562.หลักการทำงานของเตาอบลมร้อน.[Online].สืบค้นจาก:<https://home.kku.ac.th/chuare/12/hotairoven.pdf>
- [26] J. S. TESTING SERVICE LIMITED PARTNERSHIP.2562.เครื่องทดสอบแรงดึง.[Online].สืบค้นจาก:<https://www.jstesting-service.com/15709907/universal-testing-machine>
- [27] ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.2562.หลักการทำงานของเครื่องทดสอบแรงดึง.[Online].สืบค้นจาก:<http://mic.eng.ku.ac.th/facilities-detail>.
- [28] Ponpe.2562.เครื่องกวนสาร.[Online].สืบค้นจาก:<https://www.ponpe.com/hotplate-stirrer/hotplate-magnetic-stirrer-hts-1003-detail.html>
- [29] เครื่องคัดแยกขนาด. [Online].สืบค้นจาก:<https://www.cst.co.th/-SIEVE-SHAKER.html>
- [30] เครื่องอัดขึ้นรูป.[Online].สืบค้นจาก:<http://www.chareontut.com/Default>.

- [31] มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.2562.การออกแบบการทดลอง.[Online].สืบค้นจาก:[http://archive.lib.cmu.ac.th/full/T/2553/enin20453as\\_ch2.pdf](http://archive.lib.cmu.ac.th/full/T/2553/enin20453as_ch2.pdf)
- [32] Li He, "Design of Experiments Software, DOE software", The Chemical Information Network, July 17, 2003.
- [33] Felix Grant, "A More User-Friendly Design Expert," Quality Digest, November 2000.
- [34] Design Expert Software Versión 9, herramienta de diseño de experimentos y simulación más avanzada Archived 2014-12-18 at the Wayback Machine," InfoWeek Online, December 4, 2014.
- [35] Stat-Ease, Inc.2020.Design Expert.[Online].สืบค้นจาก:<https://www.statease.com/software/design-expert/>
- [36] Martin Tanco, Elisabeth Viles, Laura Itzarbe and Maria Jesus Alvarez, "Dissecting DoE Software," Six Sigma Forum Magazine, May 2008.
- [37] John Cornley, "Design of Experiments: useful statistical tool in assay development or vendor disconnect!", Drug Discovery World, Winter2009/2010.
- [38] นที ฐานมั่น, 2556.การพัฒนาภาชนะย่อยสลายได้ทางชีวภาพจากต้นมันสำปะหลัง.วิทยานิพนธ์ สาขาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- [39] ASTM D3039.Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Material1.
- [40] มาตรฐานการทดสอบแรงดึง. [Online].สืบค้นจาก:<https://www.intertek.com/polymers/tensile-testing/matrix-composite/>
- [41] ASTM D3039. Study on fatigue life and fracture behaviour of fibreglass reinforced Composites
- [42] มาตรฐานการทดสอบการดูดซึมน้ำ.[Online].สืบค้นจาก:[https://packaging.oie.go.th/new/admin\\_control\\_new/html-demo/file/1940267835.pdf](https://packaging.oie.go.th/new/admin_control_new/html-demo/file/1940267835.pdf)
- [43] การวิเคราะห์ทางสถิติ. [Online].สืบค้นจาก:[http://www.elfhs.ssr.u.ac.th/pennapa\\_pa/file.php/1/002.pdf](http://www.elfhs.ssr.u.ac.th/pennapa_pa/file.php/1/002.pdf)
- [44] Mixture Design. [Online].สืบค้นจาก:<https://www.statease.com/docs/v11/contents/mixture-designs/mixture-designs/>
- [45] การวิเคราะห์การแพร่กระจายของข้อมูล.[Online].สืบค้นจาก: <http://www.chanthaburi.buu.ac.th/~physics/documents/AD.pdf>

- [46] Montgomery, DC., “Design and Analysis of Experiments”, 6th ed. John Wiley&Son Inc., New York, 2000.
- [47] Regression Analysis. [Online].สืบค้นจาก:<https://blog.minitab.com/blog/advent-ures-in-statistics-2/regression-analysis-how-do-i-interpret-r-squared-and-assess-the-goodness-of-fit>
- [48] Anderson-Darling Test for Normality. [Online].สืบค้นจาก:<https://www.spcfo-rexcel.com/knowledge/basic-statistics/anderson-darling-test-for-normality>
- [49] The Lack of Fit F-test.[Online].สืบค้นจาก:<https://online.stat.psu.edu/stat501/lesson/2/2.11>







รูปที่ ๗2 แบบแม่พิมพ์ตัวผู้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และหรืออ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Run	Component 1 A:Binder gram	Component 2 B:Filler gram	Response 1 TS kPa	Response 2 Water gH <sub>2</sub> O/g
1	13.95	3.4875	98.5463	0.4419
2	12.2063	5.23125	92.6124	0.293
3	12.2063	5.23125	87.3142	0.3282
4	13.95	3.4875	39.4185	0.6844
5	13.0781	4.35938	72.9031	0.481
6	12.7875	4.65	89.8573	0.2703
7	13.95	3.4875	99.3941	0.3144
8	13.0781	4.35938	83.7114	0.5118
9	13.5141	3.92344	78.2013	0.1763
10	13.0781	4.35938	110.838	0.294
11	13.3688	4.06875	94.7317	0.331
12	12.6422	4.79531	150.045	0.3594
13	12.2063	5.23125	127.792	0.2618

รูปที่ ผ3 อัตราส่วนผสมการทดลองสำหรับการออกแบบการทดลองแบบผสม ชนิด Optimal (custom) designs

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ ผ3 อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ๗1 การทดสอบการดูดซึมน้ำและค่าการดูดซึมน้ำ

Specimen	น้ำหนักก่อน (g.)			น้ำหนักเฉลี่ย (g.)	น้ำหนักหลัง (g.)			น้ำหนักเฉลี่ย (g.)	ค่าการดูดซึมน้ำ (gH <sub>2</sub> O/g)	เปอร์เซ็นต์
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
1	1.4235	1.5067	1.3170	1.4157	1.8790	1.8965	2.3485	2.0413	0.4419	44.19
2	1.4867	1.5824	1.6449	1.5713	1.9830	1.8267	2.2853	2.0317	0.2930	29.30
3	1.6246	1.6555	1.7904	1.6902	2.0256	2.2129	2.4961	2.2449	0.3282	32.82
4	1.2647	1.3047	1.2832	1.2842	2.7231	2.1464	1.6200	2.1632	0.6844	68.44
5	1.4728	1.4909	1.4612	1.4750	2.2998	2.1753	2.0782	2.1844	0.4810	48.10
6	1.4203	1.8423	1.5388	1.6005	1.6928	2.2371	2.1693	2.0331	0.2703	27.03
7	1.4822	1.4751	1.4516	1.4696	1.7253	2.0262	2.0437	1.9317	0.3144	31.44
8	1.3221	1.6441	1.4945	1.4869	2.0835	2.2433	2.4170	2.2479	0.5118	51.18
9	1.6007	1.4014	1.4405	1.4809	1.7815	1.5980	1.8463	1.7419	0.1763	17.63
10	1.5088	1.5721	1.5786	1.5532	1.9359	2.0083	2.085	2.0097	0.2940	29.40
11	1.4846	1.5147	1.5082	1.5025	1.8648	2.2922	1.8427	1.9999	0.3310	33.10
12	1.6932	1.4299	1.5198	1.5476	2.2458	1.9984	2.0673	2.1038	0.3594	35.94
13	1.5040	1.7332	1.7985	1.6786	1.9492	2.1353	2.2695	2.1180	0.2618	26.18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ผ2 ตารางวิเคราะห์แบบจำลองทางสถิติของความสามารถการตั้ง

Model Summary Statistics

Source	Std. Dev.	R <sup>2</sup>	Adjusted R <sup>2</sup>	Predicted R <sup>2</sup>	PRESS	
Linear	24.92	0.1926	0.1192	-0.1804	9985.32	Suggested
Quadratic	26.05	0.1979	0.0375	-0.4104	11931.06	
Cubic	26.06	0.2776	0.0368	-0.6182	13688.96	
Quartic	25.86	0.3677	0.0515	-0.9338	16359.10	

Lack of Fit Tests

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value	
Linear	2733.39	5	546.68	0.8007	0.5873	Suggested
Quadratic	2688.30	4	672.07	0.9843	0.4817	
Cubic	2014.36	3	671.45	0.9834	0.4610	
Quartic	1252.60	2	626.30	0.9173	0.4492	
Pure Error	4096.58	6	682.76			

Response 1: TS

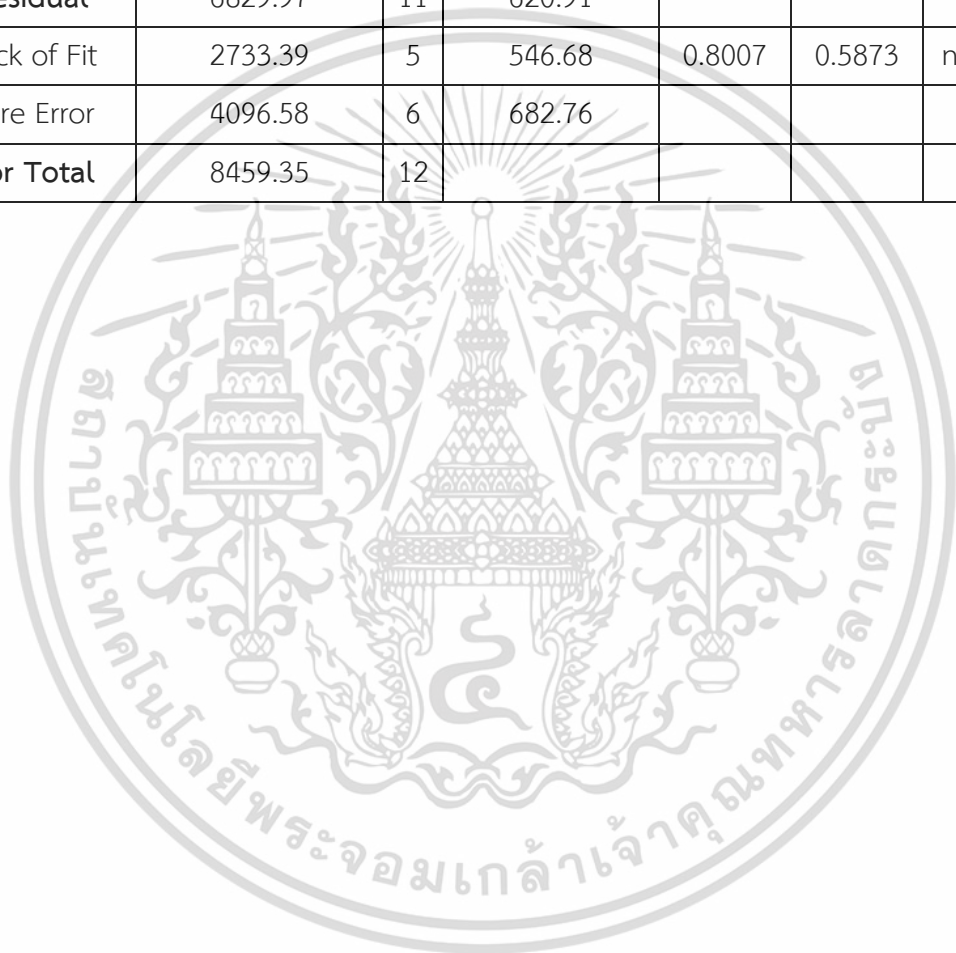
Mixture Component Coding is L\_Pseudo.

Source	Sequential p-value	Lack of Fit p-value	Adjusted R <sup>2</sup>	Predicted R <sup>2</sup>	
Linear	0.1335	0.5873	0.1192	-0.1804	Suggested
Quadratic	0.8018	0.4817	0.0375	-0.4104	
Cubic	0.3452	0.4610	0.0368	-0.6182	
Quartic	0.3170	0.4492	0.0515	-0.9338	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และพึงอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ANOVA for Linear model

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	P-value	
<b>Model</b>	1629.38	1	1629.38	2.62	0.1335	not significant
Linear Mixture	1629.38	1	1629.38	2.62	0.1335	
<b>Residual</b>	6829.97	11	620.91			
Lack of Fit	2733.39	5	546.68	0.8007	0.5873	not significant
Pure Error	4096.58	6	682.76			
<b>Cor Total</b>	8459.35	12				



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และฟ้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ๗3 ตารางวิเคราะห์แบบจำลองทางสถิติของความสามารถการดูดซึมน้ำ

Model Summary Statistics

Source	Std. Dev.	R <sup>2</sup>	Adjusted R <sup>2</sup>	Predicted R <sup>2</sup>	PRESS	
Linear	0.1273	0.1648	0.0889	-0.1875	0.2535	
Quadratic	0.1328	0.1733	0.0080	-0.4188	0.3029	
Cubic	0.1315	0.2707	0.0276	-0.5337	0.3274	
Quartic	0.1214	0.4481	0.1721	-0.4933	0.3188	Suggested

Lack of Fit Tests

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	P-value	
Linear	0.0777	5	0.0155	0.9258	0.5237	
Quadratic	0.0758	4	0.0190	1.13	0.4245	
Cubic	0.0551	3	0.0184	1.09	0.4211	
Quartic	0.0172	2	0.0086	0.5123	0.6231	Suggested
Pure Error	0.1006	6	0.0168			

Response 2: Water Absorption

Mixture Component Coding is L\_Pseudo.

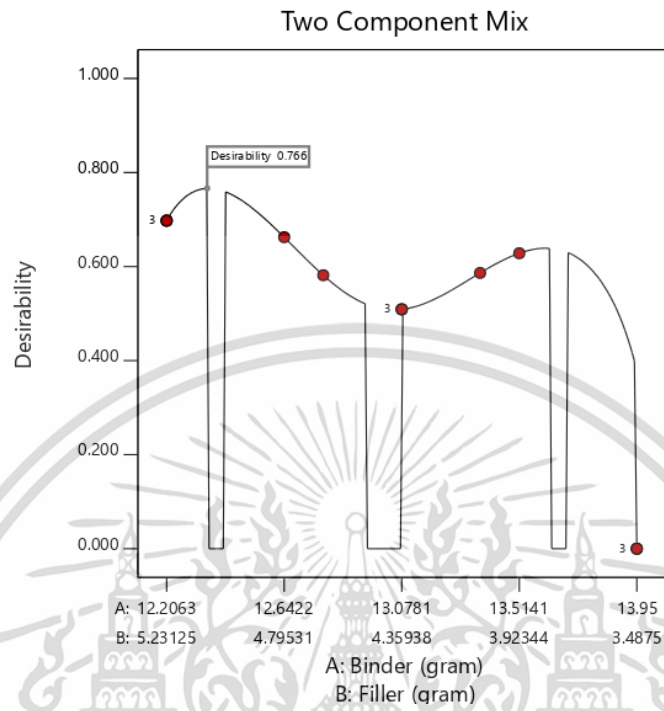
Source	Sequential p-value	Lack of Fit p-value	Adjusted R <sup>2</sup>	Predicted R <sup>2</sup>	
Linear	0.1687	0.5237	0.0889	-0.1875	
Quadratic	0.7555	0.4245	0.0080	-0.4188	
Cubic	0.3015	0.4211	0.0276	-0.5337	
Quartic	0.1475	0.6231	0.1721	-0.4933	Suggested

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ANOVA for Quartic model

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	P-value	
<b>Model</b>	0.0957	4	0.0239	1.62	0.2591	not significant
Linear	0.0352	1	0.0352	2.39	0.1608	
Mixture						
AB	0.0021	1	0.0021	0.1445	0.7138	
AB(A-B)	0.0208	1	0.0208	1.41	0.2689	
AB(A-B) <sup>2</sup>	0.0379	1	0.0379	2.57	0.1475	
<b>Residual</b>	0.1178	8	0.0147			
Lack of Fit	0.0172	2	0.0086	0.5123	0.6231	not significant
Pure Error	0.1006	6	0.0168			
<b>Cor Total</b>	0.2135	12				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ๗4 จุดพึงปรารถนา (Desirability) บนกราฟการเพิ่มประสิทธิภาพ (Optimization graphs)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และหวังอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้