

การพัฒนาแผ่นไม้อัดจากผักตบชวา
DEVELOPMENT OF VENEER FROM WATER HYACINTH



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2564

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DEVELOPMENT OF VENEER FROM WATER HYACINTH

MR. APIWIT KITTIARUNPAN

MS. ALEENA SUKOLWONG

MS. ITSARIYAPORN JEERAYA

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING IN INDUSTRIAL ENGINEERING
SCHOOL OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2021

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองปริญญาานิพนธ์

หัวข้อปริญญาานิพนธ์

การพัฒนาแผ่นไม้อัดจากผักตบชวา

DEVELOPMENT OF VENEER FROM WATER HYACINTH

นักศึกษา

นายอภิวิชญ์ กิตติอรุณพันธ์ รหัสประจำตัว 61011204


นางสาวอลีนา ศุกลงค์ รหัสประจำตัว 61011218

นางสาวอิศริยาพร จีระยา รหัสประจำตัว 61011243

หลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญาานิพนธ์


(รศ.ดร.กรรณชัย กัลยาศิริ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์

การพัฒนาแผ่นไม้อัดจากผักตบชวา

นักศึกษา

นายอภิวิชญ์ กิตติอรุณพันธ์

นางสาวอลิษา ศุกวงศ์

นางสาวอิศริยาพร จิระยา

หลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา

2564

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญานิพนธ์

รศ.ดร.กรรณชัย กัลยาศิริ

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาแผ่นไม้อัดจากผักตบชวา โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาส่วนผสมที่เหมาะสมระหว่างผักตบชวา และพลาสติกชีวภาพ Polylactic Acid (PLA) ที่ส่งผลต่อคุณสมบัติของวัสดุเชิงประกอบ โดยทำการศึกษาอัตราส่วนระหว่าง PLA ต่อผักตบชวาที่ 100:0, 98:2, 95:5 และ 92:8 wt% ตามลำดับ จากนั้นทำการทดสอบความต้านทานแรงดึง ปริมาณความชื้น และศึกษาลักษณะสัญญาณวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ของวัสดุที่พัฒนาขึ้นภายใต้มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก.966-2547 จากการศึกษาพบว่า อัตราส่วนผสมที่เหมาะสม คือ PLA 98 wt% กับ ผักตบชวา 2 wt% โดยได้ค่าเฉลี่ยของความต้านทานแรงดึงเท่ากับ 5.3 MPa ค่าเฉลี่ยยังมอดุลัสเท่ากับ 3.2 GPa ซึ่งผ่านเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดให้ค่ายังมอดุลัสไม่น้อยกว่า 2.7 GPa การทดสอบปริมาณความชื้น ทุกอัตราส่วนมีค่าเฉลี่ยร้อยละ ปริมาณความชื้นที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดทั้งหมด และจากการศึกษาสัญญาณวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ไม่พบรอยแยกระหว่าง PLA และผักตบชวา แสดงถึงการเกิดการยึดเกาะที่ดี โดยที่การใช้ผักตบชวา 2 wt% จะมีการกระจายตัวของเส้นใยอย่างสม่ำเสมอ และเมื่อผักตบชวาเพิ่มขึ้นเป็น 5 wt% และ 8 wt% จะมีการรวมเป็นกลุ่มก้อนของเส้นใยมากขึ้นตามลำดับ

Thesis Title	Development of Veneer from Water Hyacinth
Student	Mr. Apiwit Kittiarunpan Ms. Aleena Sukolwong Ms. Itsariyaporn Jeeraya
Degree	Bachelor of Engineering in Industrial Engineering King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Academic Year	2021
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr. Kannachai Kanlayasiri

ABSTRACT

This research was to develop a composite veneer from water hyacinth and polylactic acid (PLA) plastic and to find an optimal mixing ratio of the two materials. The veneers with mixing ratio of PLA to water hyacinth at 100:0, 98:2, 95:5 and 92:8 wt% were fabricated in order to study effects of the mixing ratio on mechanical properties, moisture absorption, and morphology. The industrial product standard TIS 966-2004 was used as the guideline for the tests. The optimal mixing ratio was found at PLA of 98 wt% and water hyacinth of 2 wt% with the average tensile strength of 5.2787 MPa and the average Young's modulus of 3.1896 GPa meeting the specified Young's modulus of 2.7 GPa in the standard. The veneer with any mixing ratio passed the moisture content standard. By using an electron scanning microscope to study the morphology of the veneer, the water hyacinth provided a good bonding with PLA. Uniform distribution was found in the veneer with 2 wt% of water hyacinths, but with the higher ratios, clusters of the fiber were observed.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์เรื่อง “การพัฒนาแผ่นไม้อัดจากผักตบชวา” สามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณผู้มีส่วนเกี่ยวข้องที่กรุณาให้ความรู้ คำแนะนำ และตรวจทานแก้ไขข้อบกพร่อง กระทั่งโครงการฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ มุลนิธิทาคาฮาชิ ที่ให้ทุนสนับสนุนการทำวิจัย และพัฒนางานวิจัยด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.กรรณชัย กัลยาศิริ อาจารย์ที่ปรึกษา ที่กรุณาในการแนะนำ และเสนอแนวทางแก้ไขข้อบกพร่องระหว่างการศึกษาวิจัยด้วยความเอาใจใส่เป็นอย่างดี ทำให้โครงการฉบับนี้มีความถูกต้อง และสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณอย่างสูง

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

ขอขอบพระคุณ คณะอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ที่ได้ถ่ายทอดความรู้ และประสบการณ์แก่ข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณ เจ้าของหนังสือ ตำรา เอกสาร และงานวิจัยอ้างอิงต่าง ๆ ที่เขียนเรียบเรียงรวบรวมข้อมูลและความรู้ต่าง ๆ ไว้เป็นอย่างดี ทำให้เป็นประโยชน์ต่อการศึกษาวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ นางมณีรัตน์ อังชสวัสดิ์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ผักตบชวา สำหรับการศึกษาวิจัยในครั้งนี้

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัวของข้าพเจ้าที่คอยอบรมสั่งสอน และเพื่อนทุกคนที่เป็นกำลังใจ และให้การสนับสนุนในทุกเรื่อง

นางสาวอลิษา ศุกลวงศ์

นายอภิวิชญ์ กิตติอรุณพันธ์

นางสาวอิศริยาพร จีระยา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ซ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 ขอบเขตของปริญญาานิพนธ์.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.5 แผนการดำเนินงาน.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	
2.1 ผักตบชวา.....	4
2.1.1 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของผักตบชวา.....	4
2.1.2 คุณสมบัติของเส้นใยผักตบชวา.....	5
2.2 พอลิแลคติกแอซิด (Polylactic Acid, PLA).....	6
2.2.1 สมบัติโดยทั่วไปของ Polylactic Acid.....	7
2.3 เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (Twin Screw Extruder).....	8
2.4 เครื่องอบชนิดลมร้อน.....	8
2.4.1 หลักการทำงานเครื่องอบชนิดลมร้อน.....	10
2.5 เครื่องอัดขึ้นรูป.....	10
2.5.1 กระบวนการขึ้นรูปแบบกดอัดด้วยความร้อน (Compression molding).....	11
2.5.2 หลักการทำงานของเครื่องอัดขึ้นรูป.....	12
2.6 เครื่องทดสอบแรงดึง.....	12
2.6.1 หลักการทำงานเครื่องทดสอบแรงดึง.....	13

สารบัญ

	หน้า
2.7 สมบัติทางกลและการทดสอบ	13
2.7.1 สมบัติทางกล	13
2.7.2 การทดสอบแรงดึง.....	15
2.8 สมบัติทางกายภาพและการทดสอบ	16
2.9 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก.966-2547	17
2.9.1 ขนาดและเกณฑ์ความคลาดเคลื่อน	17
2.9.2 คุณลักษณะที่ต้องการ	17
2.10 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)	18
2.10.1 การทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM).....	19
2.10.2 การเตรียมตัวอย่างทางวัสดุศาสตร์สำหรับการวิเคราะห์	20
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน	
3.1 การสร้างชิ้นงานต้นแบบ	22
3.1.1 วัสดุและเครื่องมือ	22
3.1.2 ขั้นตอนการเตรียมเส้นใยผักตบชวา.....	23
3.1.3 การออกแบบการทดลอง.....	25
3.1.4 ขั้นตอนผสมเส้นใยผักตบชวากับ Polylactic acid (PLA)	25
3.1.5 ขั้นตอนการอัดขึ้นรูปชิ้นงานต้นแบบ	26
3.2 การทดสอบเชิงกล.....	27
3.3 การทดสอบเชิงกายภาพ	28
3.4 การตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)	28
บทที่ 4 ผลการดำเนินงาน	
4.1 ผลการสร้างชิ้นงานต้นแบบ.....	30
4.1.1 ผลการผสมเส้นใยผักตบชวา กับ Polylactic acid (PLA)	30
4.1.2 ผลศึกษาลักษณะของชิ้นงานต้นแบบที่ได้จากการอัดขึ้นรูปชิ้นงาน	33
4.2 ผลการทดสอบเชิงกล	34
4.2.1 ผลการทดสอบแรงดึงสูตรที่ 1	34
4.2.2 ผลการทดสอบแรงดึงสูตรที่ 2	35

สารบัญ

	หน้า
4.2.3 ผลการทดสอบแรงดึงสูตรที่ 3	36
4.2.4 ผลการทดสอบแรงดึงสูตรที่ 4	37
4.3 ผลการทดสอบเชิงกายภาพ.....	40
4.4 ผลการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค SEM	41
4.5 อภิปรายผล.....	46
บทที่ 5 สรุปผลการดำเนินงานวิจัยและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการดำเนินงาน	47
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	48
เอกสารอ้างอิง	49
ภาคผนวก	51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1 ตารางการดำเนินงาน.....	3
ตารางที่ 2.1 สมบัติโดยทั่วไปของ PLA (Nature work, 2005 : Biomer, 2006)	7
ตารางที่ 2.2 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของความกว้าง ความยาว และความหนา หน่วยเป็นมิลลิเมตร	17
ตารางที่ 2.3 คุณลักษณะที่ต้องการอื่น ๆ	18
ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนของสารผสมที่ใช้ในการทดลอง.....	25
ตารางที่ 4.1 ตารางผลการศึกษาลักษณะโดยทั่วไปของชิ้นงาน.....	33
ตารางที่ 4.2 ค่าการทดสอบเชิงกลจากการทดสอบแรงดึงในสูตรที่ 1	34
ตารางที่ 4.3 ค่าการทดสอบเชิงกลจากการทดสอบแรงดึงในสูตรที่ 2	35
ตารางที่ 4.4 ค่าการทดสอบเชิงกลจากการทดสอบแรงดึงในสูตรที่ 3	36
ตารางที่ 4.5 ค่าการทดสอบเชิงกลจากการทดสอบแรงดึงในสูตรที่ 4	37
ตารางที่ 4.6 ร้อยละค่าปริมาณความชื้นของชิ้นงานทั้ง 4 สูตร	40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบของผักตบชวา.....	5
รูปที่ 2.2 โครงสร้างโมเลกุล D และ L ของ Lactic acid.....	7
รูปที่ 2.3 เครื่อง Co – rotating twin – screw extruder รุ่น XINDA SHJ-20.....	8
รูปที่ 2.4 ตู้อบลมร้อนยี่ห้อ MEMMERT UF110 รุ่น UN SERIES.....	9
รูปที่ 2.5 องค์ประกอบพื้นฐานของเครื่องอบชนิดลมร้อน.....	10
รูปที่ 2.6 เครื่องอัดขึ้นรูป.....	10
รูปที่ 2.7 กระบวนการขึ้นรูป PLA ด้วยกระบวนการอัดด้วยความร้อน.....	11
รูปที่ 2.8 เครื่องทดสอบแรงดึง AG-X SERIES Shimadzu Precision Universal tester.....	12
รูปที่ 2.9 การเกิดคอคอดของขึ้นทดสอบจากวัสดุเหนียวทั่วไป.....	15
รูปที่ 2.10 เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM).....	19
รูปที่ 2.11 การทำงานของ SEM.....	19
รูปที่ 3.1 ผักตบชวาที่ผ่านการตัดรากและใบ.....	23
รูปที่ 3.2 ผักตบชวาขนาด 0.5-1 นิ้ว.....	23
รูปที่ 3.3 ปั่นผักตบชวาด้วยเครื่องปั่นละเอียด.....	24
รูปที่ 3.4 การตากผักตบชวาที่ละเอียด.....	24
รูปที่ 3.5 การอบผักตบชวา.....	24
รูปที่ 3.6 ผักตบชวาแห้ง.....	25
รูปที่ 3.7 การใส่ส่วนผสมในแม่พิมพ์.....	26
รูปที่ 3.8 การนำแม่พิมพ์เข้าเครื่องกดอัดความร้อน.....	26
รูปที่ 3.9 ชิ้นงานต้นแบบ.....	27
รูปที่ 3.10 การทดสอบความต้านทานแรงดึง.....	27
รูปที่ 3.11 การอบชิ้นงานเพื่อหาปริมาณความชื้น.....	28
รูปที่ 3.12 การวางชิ้นงานบนแท่น Stub ด้วยเทปกาว.....	28
รูปที่ 3.13 การฉาบเคลือบทองในเครื่อง Sputter Coater.....	29
รูปที่ 3.14 การนำชิ้นงานเข้าเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	29
รูปที่ 3.15 ภาพที่ได้จากการส่องด้วยเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	29
รูปที่ 4.1 การไหลของพลาสติก PLA ผ่านหัว Die.....	30

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 4.2 พลาสติก PLA ที่ถูกตัดย่อย.....	31
รูปที่ 4.3 ผลจากการผสมเส้นใยผักตบชวากับ PLA ที่อัตราส่วนเส้นใย 2 wt%.....	31
รูปที่ 4.4 ผลจากการผสมเส้นใยผักตบชวากับ PLA ที่อัตราส่วนเส้นใย 5 wt%.....	32
รูปที่ 4.5 ผลจากการผสมเส้นใยผักตบชวากับ PLA ที่อัตราส่วนเส้นใย 8 wt%.....	32
รูปที่ 4.6 กราฟผลการทดสอบที่ได้จากเครื่องทดสอบแรงดึงในสูตรที่ 1	34
รูปที่ 4.7 กราฟผลการทดสอบที่ได้จากเครื่องทดสอบแรงดึงในสูตรที่ 2	35
รูปที่ 4.8 กราฟผลการทดสอบที่ได้จากเครื่องทดสอบแรงดึงในสูตรที่ 3	36
รูปที่ 4.9 กราฟผลการทดสอบที่ได้จากเครื่องทดสอบแรงดึงในสูตรที่ 4	37
รูปที่ 4.10 กราฟเปรียบเทียบค่าเฉลี่ย Tensile Strength ของชิ้นงานทั้ง 4 สูตร พร้อมแสดง ERROR BAR จากค่า SD ของชิ้นงานทั้ง 4 สูตร	38
รูปที่ 4.11 กราฟเปรียบเทียบค่าเฉลี่ย Elongation at break (%) ของชิ้นงานทั้ง 4 สูตร พร้อมแสดง ERROR BAR จากค่า SD ของชิ้นงานทั้ง 4 สูตร.....	38
รูปที่ 4.12 กราฟเปรียบเทียบค่าเฉลี่ย Young's Modulus ของชิ้นงานทั้ง 4 สูตร พร้อมแสดง ERROR BAR จากค่า SD ของชิ้นงานทั้ง 4 สูตร	39
รูปที่ 4.13 กราฟการเปรียบเทียบร้อยละความชื้นของชิ้นงานต้นแบบทั้ง 4 สูตร	41
รูปที่ 4.14 ลักษณะสัณฐานวิทยา PLA 100 wt%.....	42
รูปที่ 4.15 ลักษณะสัณฐานวิทยา PLA 98 wt% และเส้นใยผักตบชวา 2 wt%	43
รูปที่ 4.16 ลักษณะสัณฐานวิทยา PLA 95 wt% และเส้นใยผักตบชวา 5 wt%	44
รูปที่ 4.17 ลักษณะสัณฐานวิทยา PLA 92 wt% และเส้นใยผักตบชวา 8 wt%	45

บทที่ 1

บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญในการทำปฏิญยานิพนธ์ฉบับนี้ โดยผู้วิจัย ได้บรรยายถึงข้อมูลทั่วไป และปัญหาที่เกิดขึ้นของงานวิจัยเรื่อง การพัฒนาแผ่นไม้อัดจากผักตบชวา โดยมีรายละเอียดดังแสดงในหัวข้อต่อไปนี้

1. ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา
2. วัตถุประสงค์ของการศึกษา
3. ขอบเขตของปฏิญยานิพนธ์
4. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ
5. แผนการดำเนินงาน

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

น้ำ คือ ปัจจัยสำคัญในการดำรงชีวิตของคนและสิ่งมีชีวิตเป็นแหล่งกำเนิดของสัตว์น้ำและพืชหลากหลายชนิด นอกจากนั้นน้ำยังมีประโยชน์ในด้านเกษตรกรรม อุตสาหกรรม และทำให้เกิดความอุดมสมบูรณ์แก่สิ่งมีชีวิต ในอดีตมนุษย์สามารถนำทรัพยากรน้ำจากแหล่งน้ำตามธรรมชาติมาใช้ประโยชน์ได้ต่างจากปัจจุบันที่เกิดปัญหาด้านคุณภาพของน้ำ หรือเกิดมลพิษทางน้ำจนไม่สามารถนำน้ำจากแหล่งน้ำตามธรรมชาติมาใช้ได้ ซึ่งปัญหาเหล่านี้เกิดขึ้นได้จากสาเหตุหลัก [1] คือ แหล่งน้ำตามธรรมชาติเกิดการเน่าเสียเนื่องจากอยู่ในภาวะที่ขาดออกซิเจน โดยส่วนมากการขาดออกซิเจนเกิดจากการเพิ่มจำนวนอย่างรวดเร็วของแพลงก์ตอน และพีชลอยน้ำต่างๆ [2] ซึ่งพีชลอยน้ำที่พบเห็นโดยทั่วไปและมีปริมาณมากในแหล่งน้ำธรรมชาติคือ ผักตบชวา

ผักตบชวาเป็นวัชพืชที่ขยายพันธุ์ไวที่สุดชนิดหนึ่ง ซึ่งผักตบชวา 1 ต้นนั้น มีเมล็ดถึง 5,000 เมล็ดที่พร้อมขยายพันธุ์ โดยใช้เวลาไม่ถึง 30 วัน เมล็ดพันธุ์ผักตบชวาก็จะเติบโตและพร้อมขยายพันธุ์ได้ถึง 1,000 ต้นเลยทีเดียว เมื่อผักตบชวามีจำนวนมากจนปกคลุมพื้นผิวน้ำ จะเป็นการทำลายระบบนิเวศส่งผลให้น้ำขาดออกซิเจนเพราะอากาศในน้ำไม่สามารถถ่ายเทได้ สุดท้ายจึงเกิดเป็นน้ำเน่าเสียในที่สุด [3] ด้วยเหตุนี้ผลกระทบจากการแพร่กระจายของผักตบชวาในแหล่งน้ำและแม่น้ำต่าง ๆ ทำให้เกิดผลเสียทางเศรษฐกิจ สังคม และสิ่งแวดล้อม ทั้งด้านการชลประทาน และด้านการผลิตไฟฟ้า [4]

ในปัจจุบันอุตสาหกรรมไม้อัดมีความต้องการใช้ไม้เป็นอย่างมาก เนื่องจากวัตถุดิบหลักในกระบวนการผลิตส่งผลให้การผลิตไม้จากทั้งธรรมชาติและที่มนุษย์ได้สร้างขึ้นไม่ทันต่อความต้องการของตลาด อีกทั้งสภาพการณ์ที่ป่าไม้ลดลงเรื่อย ๆ ในปัจจุบันและมีการปลูกป่าทดแทนในจำนวนที่น้อยมาก [5] จึงจำเป็นต้องหาวัสดุทดแทนไม้ธรรมชาติมาใช้ในอุตสาหกรรมไม้อัด

จากปัญหาที่เกิดขึ้นผู้วิจัยเห็นว่าการนำผักตบชวาที่ส่งผลเสียต่อสภาพแวดล้อมมาสร้างประโยชน์ให้แก่สิ่งแวดล้อม ด้วยคุณสมบัติของผักตบชวาที่แห้งนั้น มีคุณสมบัติที่เหนียวและทนมาก จึงเหมาะสมแก่การนำมาขึ้นรูปเป็นวัสดุเชิงประกอบ โดยมีแนวคิดในการนำผักตบชวา มาใช้เป็นวัสดุทดแทนไม้ธรรมชาติในการผลิตแผ่นไม้อัดและใช้พลาสติกชีวภาพที่สามารถย่อยสลายได้ คือ Polylactic acid (PLA) เป็นตัวประสาน นอกจากนี้ยังศึกษาคุณสมบัติเชิงกลและคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุต้นแบบ โดยวัสดุต้นแบบนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นวัสดุในการผลิตพาเลทที่ใช้ในอุตสาหกรรมการขนส่งได้ ซึ่งเป็นทางเลือกที่ช่วยลดปัญหาในด้านสิ่งแวดล้อมรวมถึงปัญหามลพิษทางน้ำที่เกิดจากผักตบชวาได้

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อพัฒนาแผ่นไม้อัดจากผักตบชวา
2. เพื่อศึกษาส่วนผสมที่เหมาะสมระหว่างผักตบชวาและพลาสติกชีวภาพ

1.3 ขอบเขตของปริญญาบัตร

1. เส้นใยผักตบชวาแห้งประสานกับตัวประสานจากพลาสติกชีวภาพชนิด Polylactic acid (PLA)
2. ศึกษาแผ่นไม้อัดจากผักตบชวาที่มีสมบัติเชิงกายภาพ และเชิงกล ที่มีคุณสมบัติต้านทานแรงดึง และดูดซึมน้ำ ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก.966-2547

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถพัฒนาไม้อัดจากผักตบชวาที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม
2. ทราบชนิดและปริมาณของตัวประสานจากวัสดุธรรมชาติที่มีผลต่อกากใยผักตบชวา ในการขึ้นรูปเป็นวัสดุเชิงประกอบ
3. ลดปริมาณผักตบชวาและเพิ่มคุณค่าให้กับผักตบชวาได้

1.5 แผนการดำเนินงาน

ตารางที่ 1.1 ตารางการดำเนินงาน

รายการ	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
1. ศึกษาข้อมูลและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องของผักตบชวา ตัวประสาน การขึ้นรูป และการทดสอบ	→									
2. ทดลองหาอัตราส่วนของตัวประสานที่สามารถขึ้นรูปได้			→							
3. ศึกษาและลงมือทำแม่แบบของชิ้นงานต้นแบบและทำการขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดความร้อน					→					
4. ทดสอบคุณสมบัติทางกลและคุณสมบัติทางกายภาพของชิ้นงานต้นแบบ							→			
5. วิเคราะห์หาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสม								→		
6. รวบรวมเนื้อหาและทฤษฎีทำรูปเล่มปริยญาณิพนธ์									→	

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงลักษณะของวัสดุ ตัวประสาน เครื่องมือและอุปกรณ์ รวมถึงหลักการ และทฤษฎีต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ซึ่งประกอบด้วยหัวข้อดังนี้

1. ผักตบชวา
2. พอลิแลคติกแอซิด (Polylactic Acid, PLA)
3. เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (Twin Screw Extruder)
4. เครื่องอบชนิดลมร้อน
5. เครื่องอัดขึ้นรูป
6. เครื่องทดสอบแรงดึง
7. สมบัติทางกล และการทดสอบ
8. สมบัติทางกายภาพ และการทดสอบ
9. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก.966-2547
10. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

2.1 ผักตบชวา

ผักตบชวาเป็นพืชน้ำล้มลุก มีถิ่นกำเนิดอยู่ในประเทศบราซิล ทวีปอเมริกาใต้ แถบลุ่มแม่น้ำแอมะซอน ผักตบชวาได้รับการค้นพบครั้งแรกในปี พ.ศ. 2367 โดย Kari Von Matius นักพฤกษศาสตร์ชาวเยอรมัน และมีการขยายพันธุ์อย่างกว้างขวางไปในประเทศเขตร้อนและกึ่งเขตร้อนทั่วโลก สำหรับประเทศไทยผักตบชวาถูกนำเข้ามาจากประเทศอินโดนีเซีย ในปี พ.ศ. 2444 โดยนำมาปลูกครั้งแรกที่วังสระปทุม และได้แพร่กระจายออกไปตามแหล่งน้ำต่าง ๆ ทั่วประเทศ คนไทยเรียกชื่อผักตบชวาแตกต่างกันไปตามท้องถิ่น โดยภาคกลางใช้ชื่อ ผักปอด ผักตบปอง และผักสวะ ภาคใต้ใช้ชื่อ ผักตบ ภาคเหนือใช้ชื่อ ผักบัวลอย และภาคตะวันออกเฉียงเหนือใช้ชื่อ ผักโป่ง ผักบ่ง และผักปอง [6]

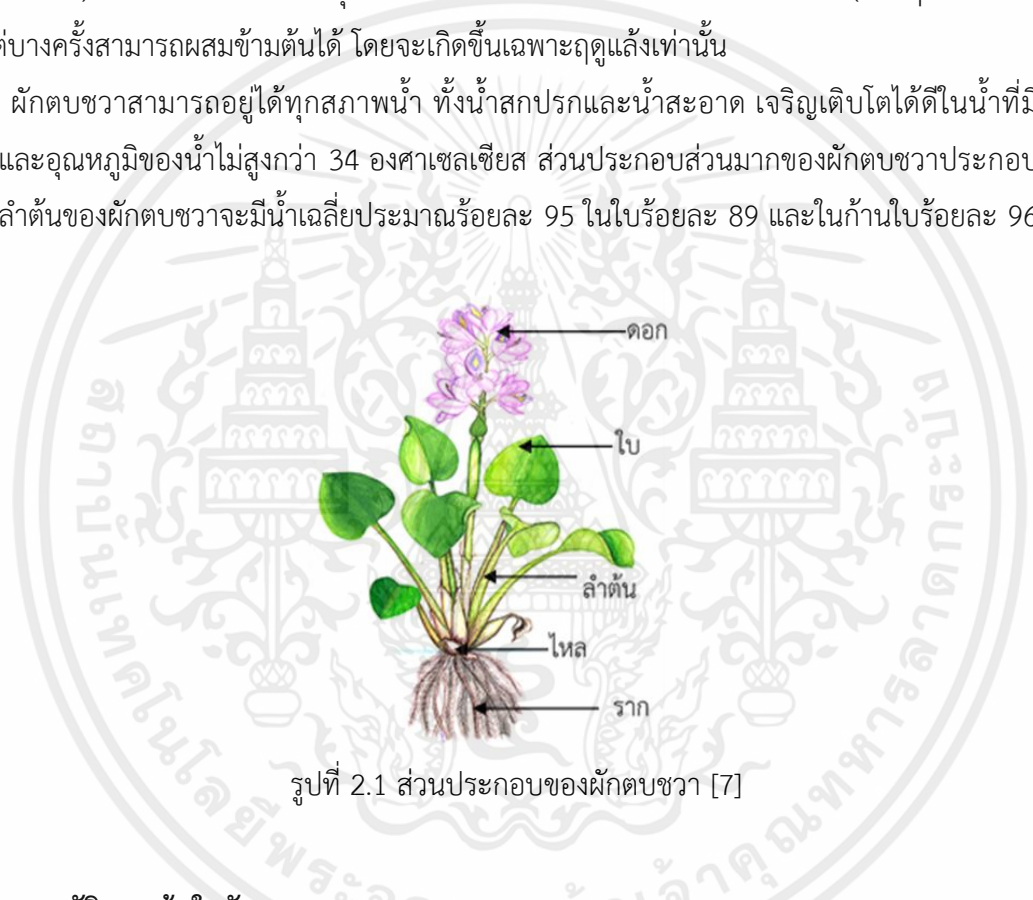
2.1.1 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของผักตบชวา

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 มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลำต้นประมาณ 5 – 6 เซนติเมตร และยาวประมาณ 30 เซนติเมตร ผิวลำต้นเรียบ มีสีเขียวอ่อนและเข้ม กลุ่มใบเรียง

กันเป็นกลีบชั้น (Rosettes) ใบเป็นใบเดี่ยวรูปไข่หรือเกือบกลม ก้านใบกลมอวบน้ำ ตรงกลางพองออก ภายในเป็นรูปพวง ช่วยพยุงลำต้นให้ลอยน้ำได้ มีไหลเกิดตามซอกใบ ซึ่งไหลจะเจริญเติบโตเป็นต้นอ่อน มีดอกสีม่วงอ่อนเป็นช่อ ซึ่งดอกมีดอกย่อย 3 - 25 ดอก มีกลีบดอก 6 ผักตบชวามีระบบรากเป็นรากฝอย โดยแตกออกจากข้อบนของลำต้น มีความยาวตั้งแต่ 10 - 90 เซนติเมตร และมีสีม่วงดำ ถ้าน้ำตื้นผักตบชวาจะหยั่งรากลงดิน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซึมธาตุอาหารต่าง ๆ

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

ผักตบชวาสามารถอยู่ได้ทุกสภาพน้ำ ทั้งน้ำสกปรกและน้ำสะอาด เจริญเติบโตได้ดีในน้ำที่มีค่า pH 4 - 10 และอุณหภูมิของน้ำไม่สูงกว่า 34 องศาเซลเซียส ส่วนประกอบส่วนมากของผักตบชวาประกอบไปด้วยน้ำ โดยลำต้นของผักตบชวาจะมีน้ำเฉลี่ยประมาณร้อยละ 95 ในใบร้อยละ 89 และในก้านใบร้อยละ 96 [7][8]



รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบของผักตบชวา [7]

2.1.2 คุณสมบัติของเส้นใยผักตบชวา

เส้นใยจากผักตบชวาเป็นเส้นใยธรรมชาติประเภทเส้นใยเซลลูโลส ลักษณะของเส้นใยจะค่อนข้างหยาบ ในตัวเส้นใยจะประกอบด้วยเส้นใยกลวงเล็ก ๆ เกาะติดกัน โดยส่วนที่พบว่ามีปริมาณเส้นใยค่อนข้างมากจะเป็นในส่วนของลำต้น [9]

โดยต้นผักตบชวา 100 กิโลกรัม หลังจากตากให้แห้งแล้ว น้ำหนักจะเหลือประมาณ 5 กิโลกรัม คิดเป็นน้ำหนักอบแห้งเฉลี่ยร้อยละ 5 ของน้ำหนักทั้งหมด จากการวิเคราะห์องค์ประกอบของเส้นใยผักตบชวา พบว่า เส้นใยจากผักตบชวาประกอบไปด้วยองค์ประกอบ ทางเคมี 3 ชนิด คือ เซลลูโลส (Cellulose), เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) และลิกนิน (Lignin) ซึ่งสมบัติขององค์ประกอบทั้ง 3 ชนิด สะท้อนไปยังคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ที่นำเส้นใยนี้ไปใช้ อธิบายได้ดังนี้

1. เซลลูโลส (Cellulose) มีลักษณะเป็นสารประกอบอินทรีย์ โดยมีสูตรโมเลกุล คือ $(C_6H_{10}O_5)_n$ บนผิวของเซลลูโลสจะเต็มไปด้วยหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl Group; OH) ซึ่งเป็นจุดที่เกิดพันธะไฮโดรเจน (Hydrogen Bonds)

2. เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) ประกอบด้วยมอนอเมอร์หลายชนิด ทำให้ผิวของเฮมิเซลลูโลสเต็มไปด้วยหมู่ไฮดรอกซิลอิสระ ซึ่งเป็นจุดที่น้ำและตัวประสานต่าง ๆ สามารถเข้ามาจับและเกิดพันธะกับเนื้อไม้หรือเส้นใย

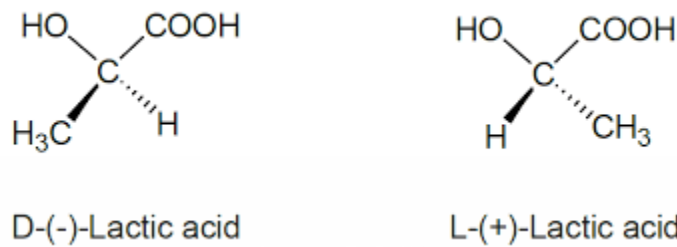
3. ลิกนิน (Lignin) ไม่ละลายในตัวทำละลายเกือบทุกชนิด มีจุดหลอมเหลวประมาณ 150 - 180 องศาเซลเซียส เนื่องจากมีสมบัติความเป็นเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) ทำให้สามารถแปรรูปเส้นใยในรูปแบบต่าง ๆ ได้โดยอาศัยคุณสมบัติดังกล่าว เช่น การเกิดพันธะการยึดติด ของเส้นใยภายในแผ่นใยไม้อัด ที่มีความหนาแน่นสูง เป็นต้น ซึ่งสารประกอบเหล่านี้ ส่งผลถึงคุณสมบัติในการยึดติดของตัวประสานต่าง ๆ ด้วย [10]

2.2 พอลิแลคติกแอซิด (Polylactic Acid, PLA)

PLA จัดเป็น Aliphatic polyester เป็นพอลิเอสเตอร์แบบกิ่งผลึกที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ผลิตจากกรดแลคติก (Lactic acid) บางครั้งจึงถูกเรียกว่า พอลิแลกเตต (Polylactate) หรือพอลิแลคไทด์ (Polylactide) กรดแลคติกเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสังเคราะห์ทางเคมี หรือกระบวนการหมักผลผลิตทางการเกษตรที่มีแป้งและน้ำตาลเป็นองค์ประกอบหลัก เช่น อ้อย ข้าวโพด ข้าวสาลี และหัวบีท โดยใช้จุลินทรีย์ในการเปลี่ยนน้ำตาลให้เป็นกรดแลคติก เมื่อนำมาแยกให้บริสุทธิ์แล้ว จึงนำมาผ่านกระบวนการสังเคราะห์เป็น PLA ซึ่งมีอยู่ด้วยกันหลายวิธี เช่น การสังเคราะห์โดยผ่านกระบวนการควบแน่น ได้ PLA ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ไม่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ จนกว่าจะใช้สารเคมีเชื่อมโยง (Coupling agent) เพื่อเพิ่มน้ำหนักโมเลกุล แต่กระบวนการที่นิยมใช้ คือ กระบวนการสังเคราะห์แบบเปิดวงแหวนแลคไทด์ (Lactide) โดยมีคะตะลิสต์เร่งปฏิกิริยา ได้ PLA ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงกว่า 100,000 และมีสมบัติที่ดี สามารถนำไปใช้งานด้านต่าง ๆ ได้ [11]

อะตอมของคาร์บอนบนโมเลกุลของกรดแลคติกมีสมบัติไครัล (Chiral) กรดแลคติกจึงมีการจัดโมเลกุล 2 แบบ คือ แบบแอล (L-lactic, $HOOC-C(OH)(H)(CH_3)$) และแบบดี (D - lactic, $HOOC-C(OH)(CH_3)H$) โครงสร้างโมเลกุล D และ L ของพอลิแลคติก ดังรูปที่ 2.2 เมื่อนำมาสังเคราะห์พอลิแลคติกแอซิด จะได้พอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างที่แตกต่างกัน 3 แบบ คือ แบบแอล (Poly-L-lactide, PLLA) แบบดี (Poly-D-lactide, PDLA) และแบบแอลดี (Poly-LD-lactide, PLDLA) ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่ได้จากมอนอเมอร์แบบแอล แบบดี และมอนอเมอร์ผสม ตามลำดับ พอลิเมอร์สองแบบแรกมีสมบัติทางเคมี และสมบัติทางกายภาพเหมือนกัน คือ เป็นพอลิเมอร์กิ่งผลึกที่มีความเป็นผลึกอยู่ประมาณ 37% มีอุณหภูมิกลาสทรานสิชัน 50 - 80 องศาเซลเซียส มีจุดหลอมเหลว 173 - 278 องศาเซลเซียส ในขณะที่พอลิแลคติกที่สังเคราะห์จากมอนอเมอร์ผสม มีสมบัติเป็นพอลิเมอร์อสัณฐาน โดย อัตราส่วน L/D ส่งผลโดยตรงต่อสมบัติ

ของพอลิเมอร์ด้วย กรณีที่อัตราส่วน L/D = 1 พอลิเมอร์จะมีสมบัติเชิงกลต่ำ และเมื่อ L/D เพิ่มขึ้น ความเป็นผลึก และจุดหลอมเหลวของพอลิเมอร์จะเพิ่มขึ้น [11]



รูปที่ 2.2 โครงสร้างโมเลกุล D และ L ของ Lactic acid [11]

2.2.1 สมบัติโดยทั่วไปของ Polylactic Acid

สมบัติของ PLA มีลักษณะใสมีความแวววาวสูง ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของสารเติมแต่งที่ใช้ PLA มีสมบัติทางกลและสามารถนำไปใช้งานได้ เช่นเดียวกับพอลิเมอร์พื้นฐานทั่วไปที่มีสมบัติเป็นเทอร์โมพลาสติก PLA สามารถกักเก็บกลิ่น และรสชาติได้ดี มีความต้านทานต่อน้ำมัน และไขมัน สูงในขณะที่ยก้าออกซิเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำสามารถแพร่ผ่านได้ดี มีความคงทนต่อการกระแทกต่ำ PLA มีความยืดหยุ่นใกล้เคียงกับ PET นอกจากนี้ PLA ยังมีสมบัติใกล้เคียงกับ Polystyrene, PS และสามารถนำไปดัดแปรให้มีสมบัติใกล้เคียงกับ Polyethylene, PE หรือ Polypropylene, PP ดังนั้น PLA จึงสามารถนำไปปรับปรุงสมบัติพื้นฐานทางด้านการขึ้นรูป และการใช้งานได้ เช่นเดียวกับพลาสติกโอเลฟินที่ผลิตจากระบวนการทางปิโตรเคมี โดยสมบัติของ PLA ที่ใช้ในการศึกษานี้คณะผู้จัดทำได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สมบัติโดยทั่วไปของ PLA (Nature work,2005 : Biomer, 2006) [12]

Properties	Nature work®PLA	Biomer® L9000
Density (g/ml)	1.24	1.25
Tg (°C)	56.7 – 57.9	n/a
Tm (°C)	140- 152	n/a
HDT (°C)	40-45 amorphus, 135 crystalline	n/a
Tensile strength (MPa)	53	70
Elongation (%)	6	2.4
Flexural Modulus (MPa)	350-450	3600

2.3 เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (Twin Screw Extruder)

เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ หรือ Twin Screw Extruder เป็นเครื่องอัดรีดที่เป็นที่นิยมและแพร่หลายมากที่สุด โดยมีจำนวน 2 สกรู ซึ่งจะใช้สกรูในการหมุนเพื่อส่งผ่านพอลิเมอร์หลอมด้วยความดันที่เพียงพอไปยังหัวอัดรีด (Die) นอกจากจะทำหน้าที่ในการอัดรีดพอลิเมอร์ออกไปยังหัวอัดรีดแล้ว จะยังมีหน้าที่ในการช่วยให้พอลิเมอร์หลอมเป็นเนื้อเดียวกันด้วยการหมุนของสกรูทำให้เกิดแรงเฉือน แล้วเกิดความร้อนจากการเฉือนทำให้พอลิเมอร์หลอม [13] ในการศึกษาครั้งนี้คณะผู้จัดทำใช้เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ คือ Co – rotating twin – screw extruder รุ่น XINDA SHJ-20 ดังรูปที่ 2.3 และมีรายละเอียดของเครื่อง ดังนี้

1. ความจุอยู่ที่ 5-15 กิโลกรัมต่อชั่วโมง
2. กำลังมอเตอร์ 4 กิโลวัตต์
3. ขนาดสกรู 22 มิลลิเมตร และ อัตราส่วนความยาวสกรูต่อความกว้างสกรูอยู่ที่ 40
4. ความเร็วสกรู 500 รอบต่อนาที



รูปที่ 2.3 เครื่อง Co – rotating twin – screw extruder รุ่น XINDA SHJ-20

2.4 เครื่องอบชนิดลมร้อน

ตู้อบลมร้อนเป็นเครื่องมือพื้นฐานชนิดหนึ่งที่มีพบในห้องปฏิบัติการวิทยาศาสตร์ทั่วไป ใช้ในกรณีต่าง ๆ อาทิเช่น ใช้สำหรับการอบวัสดุและอุปกรณ์ต่าง ๆ ให้แห้ง ใช้รักษาอุณหภูมิของปฏิกิริยาในการตรวจวิเคราะห์ทางห้องปฏิบัติการบางชนิดให้คงที่ ใช้อบฆ่าทำลายเชื้อโรค ใช้อบเพาะเชื้อจุลชีพ ใช้เผาตัวอย่างให้เป็นเถ้า (Ashing) เพื่อนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องวัดการดูดกลืนแสงของอะตอม และใช้หาความชื้นในตัวอย่าง ใช้เผากากกัมมันตรังสี เป็นต้น [14]

ในการศึกษานี้คณะผู้จัดทำใช้เครื่องอบลมร้อนแบบมีพัดลม ยี่ห้อ MEMMERT UF110 รุ่น UN Series ดังรูปที่ 2.4 และมีรายละเอียดของเครื่อง ดังนี้



รูปที่ 2.4 ตู้อบลมร้อนยี่ห้อ MEMMERT UF110 รุ่น UN Series

รายละเอียด ได้แก่

1. ความจุ 108 ลิตร
2. ทำอุณหภูมิได้สูงสุด 300 องศาเซลเซียส
3. ตั้งเวลาการทำงานได้ 1 นาที ถึง 99 วัน หรือทำงานต่อเนื่อง
4. ควบคุมการทำงานด้วยระบบไมโครโปรเซสเซอร์ (Microprocessor) หรือซีพียู (CPU)
5. จอแสดงค่าอุณหภูมิเป็นแบบเรืองแสง (Color display)
6. มีระบบจ่ายความร้อนแบบการพาความร้อนแบบบังคับ (Forced convection)
7. ปรับอุณหภูมิได้ 2 หน่วย คือ องศาเซลเซียส และ องศาฟาเรนไฮต์
8. ควบคุมคำสั่งการทำงานด้วยระบบสัมผัส (Touchscreen)
9. สามารถปรับความแรงของพัดลมได้ (Fan speed)
10. ภายในและภายนอกตู้ทำด้วยสแตนเลส
11. มีชั้นวางของ 2 ชั้น
12. เลือกใช้ภาษาได้ 4 ภาษา คือ ภาษาเยอรมัน ภาษาอังกฤษ ภาษาสเปน และภาษาฝรั่งเศส
13. มีพัดลมภายในตู้
14. ภายในตู้ มีขนาด 560 (กว้าง) x 480 (สูง) x 400 (ลึก) mm
15. ภายนอกตู้ มีขนาด 745 (กว้าง) x 867 (สูง) x 584 (ลึก) mm

รายละเอียด

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

2.5.1 กระบวนการขึ้นรูปแบบกดอัดด้วยความร้อน (Compression molding)

กระบวนการขึ้นรูปแบบกดอัดด้วยความร้อนของ PLA มีกระบวนการขึ้นรูปเหมือนเทอร์โมพลาสติกทั่วไป แตกต่างกันในสภาวะที่ใช้ทดสอบ โดยการขึ้นรูปด้วยกระบวนการกดอัดด้วยความร้อนเมื่อเม็ดพอลิเมอร์ได้รับความร้อนผ่านแม่พิมพ์จะทำให้สายโซ่ภายในโมเลกุลเริ่มขยับ ส่งผลให้เกิดการคลายตัวของสายโซ่จึงเกิดการหลอม จากนั้นเมื่ออัดด้วยความร้อนจะทำให้พอลิเมอร์เชิงประกอบมีจัดเรียงตัวใหม่ เมื่อทำให้ชิ้นงานเย็นตัวลง พอลิเมอร์จะเกิดการจัดเรียงตัวในส่วนของผลึกของพอลิเมอร์ทำให้สายโซ่เรียงชิดติดกัน ซึ่งอาจส่งผลให้เกิดการหดตัวของพอลิเมอร์เชิงประกอบดังรูปที่ 2.7 [16]



รูปที่ 2.7 กระบวนการขึ้นรูป PLA ด้วยกระบวนการอัดด้วยความร้อน [16]

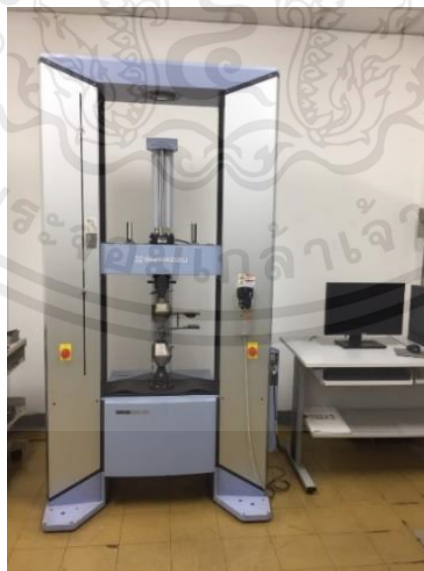
2.5.2 หลักการทำงานของเครื่องอัดขึ้นรูป

เครื่องจะใช้หลักการให้ความร้อนและการให้แรงดัน โดยเริ่มต้นจะทำการอุ่นแม่พิมพ์โดยใส่ในช่องว่าง ซึ่งแทนที่วางแม่พิมพ์จะมีการปล่อยความร้อนออกมาทำให้ความร้อนถ่ายไปยังแม่พิมพ์ จากนั้นเมื่อต้องการทำการกดอัดขึ้นรูปแม่พิมพ์ถูกปิดด้วยแรงดันบน โดยแทนที่วางแม่พิมพ์จะเคลื่อนที่มาประกบกัน และกดอัดแม่พิมพ์ แรงดันถูกใช้เพื่อบังคับให้วัสดุสัมผัสกับบริเวณแม่พิมพ์ทั้งหมด และรักษาความร้อนและแรงดันไว้จนกว่าวัสดุแข็งเป็นรูปร่างตามแม่พิมพ์ [17]

2.6 เครื่องทดสอบแรงดึง

เครื่องทดสอบแรงดึง เป็นเครื่องมือที่ใช้การทดสอบเนื้อสัมผัส (Texture analysis) โดยใช้แรงดึง (Tensile force) ดึงวัสดุอย่างช้า ๆ ทำให้วัสดุยืดยาวขึ้น โดยเพิ่มแรงดึงขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งขึ้นทดสอบขาด ในการศึกษาครั้งนี้คณะผู้จัดทำใช้เครื่องทดสอบแรงดึง คือ AG-X Series Shimadzu Precision Universal Tester (100 kN, 5 kN) ดังรูปที่ 2.8 และมีรายละเอียดของเครื่อง ดังนี้

1. ความสามารถของเครื่อง (capacity) เท่ากับ 10 N – 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 ให้เคลื่อนที่ถูกทิศทาง ไม่เกินระยะที่กำหนดไว้ และมีปุ่มการเคลื่อนที่กลับ (Return)



รูปที่ 2.8 เครื่องทดสอบแรงดึง AG-X Series Shimadzu Precision Universal tester

2.6.1 หลักการทำงานของเครื่องทดสอบแรงดึง

เมื่อติดตั้งชิ้นงานเข้าที่จับชิ้นงานแล้ว จึงเริ่มสั่งโปรแกรมให้ทำงาน โดยโปรแกรมจะให้แรงดึงกับชิ้นทดสอบด้วยอัตราเร็วในการดึงคงที่ และบันทึกค่าแรงดึง (Tension force) ที่เปลี่ยนแปลงไปตามระยะการยืดตัว (Deformation) ของวัสดุ โดยขณะขึ้นทดสอบยืดออกจะมีแรงต้าน ซึ่งแรงต้านของชิ้นงานทดสอบนี้ มีผลทำให้ตัววัดแรงสามารถวัดแรงออกมาได้ แรงที่วัดออกมามีหน่วยเป็นกิโลกรัม (kg) หรือนิวตัน (N) ในการทดสอบจะต้องดึงชิ้นทดสอบจนกระทั่งขึ้นทดสอบขาดออกจากกัน ซึ่งแรงต้านสูงสุดของชิ้นทดสอบเป็นผลที่ได้จากการวัดแรง ดังนั้นชิ้นงานทดสอบสามารถทนแรงดึงสูงสุดเท่ากับแรงต้านของชิ้นงานที่ทนได้ก่อนขาดจากกัน ลักษณะของผลที่ได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น (Stress) กับความเครียด (Strain) ซึ่งการบันทึกค่าต่าง ๆ จะบันทึกลงในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ [18][19]

2.7 สมบัติทางกลและการทดสอบ

2.7.1 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 โดยที่ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างมากนักจนทำให้เครื่องจักรหรือโครงสร้างเสียความสามารถในการปฏิบัติหน้าที่ตามวัตถุประสงค์การออกแบบ [21]

2.7.1.1 การเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (Deformation)

เมื่อมีแรงภายนอกมากระทำกับวัสดุ จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง หรือการเสียรูปขึ้น สำหรับวัสดุพอลิเมอร์สามารถแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ การเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบยืดหยุ่น (Elastic deformation) และการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบถาวร (Plastic deformation) ซึ่งในการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบยืดหยุ่นจะเกิดขึ้นกับวัสดุ ที่เมื่อให้แรงกระทำจนวัสดุนั้นเปลี่ยนแปลงรูปร่างหรือเสียรูปไป แต่จากนั้นเมื่อปล่อยแรงกระทำดังกล่าว วัสดุจะกลับสู่สภาพเดิมเหมือนก่อนที่จะมีแรงมากระทำ เช่น พฤติกรรมของยางวงเมื่อให้แรงและปล่อยแรงกระทำในทางตรงกันข้ามกัน การเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบถาวร (Plastic deformation) จะเกิดขึ้นกับวัสดุเมื่อมีแรงมากระทำจนเปลี่ยนแปลงรูปร่างไปจากเดิมแล้ว แต่เมื่อปล่อยแรงกระทำดังกล่าวออก วัสดุนั้นจะไม่กลับสู่สภาพเดิม หรือกลับสู่สภาพเดิมไม่ครบ 100 เปอร์เซ็นต์ เช่น การงอหรือดัดลวดโลหะเป็นรูปร่างต่าง ๆ [21]

2.7.1.2 ความเค้น (Stress)

แรงต้านทานภายในเนื้อวัสดุที่พยายามต้านทานแรงภายนอกที่มากระทำ เพื่อไม่ให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างไปจากเดิม โดยแรงที่มากระทำจะถูกกระจายไปอย่างสม่ำเสมอตลอดพื้นที่หน้าตัดของวัสดุ

หากแบ่งตามลักษณะของแรงที่มากระทำกับวัสดุแล้ว สามารถแบ่งออกได้เป็น 5 แบบ คือ ความเค้นดึง (Tensile stress) ความเค้นอัด (Compressive stress) ความเค้นเฉือน (Shear stress) ความเค้นบิด (Torsion stress) และความเค้นดัดโค้ง (Flexural stress)

จากลักษณะของแรงดึงและแรงอัดที่มากระทำกับวัสดุ สามารถหาค่าความเค้นที่เกิดขึ้นได้จากความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำต่อพื้นที่หน้าตัด ดังแสดงในสมการที่ 2.1

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (2.1)$$

เมื่อ σ = ความเค้นทางวิศวกรรม (N/m²)

F = แรงกระทำตั้งฉากกับพื้นที่หน้าตัด (N)

A_0 = พื้นที่หน้าตัด (m²)

สำหรับกรณีที่ได้รับแรงเฉือน ความเค้นที่เกิดขึ้นจะหาได้จากแรงที่กระทำต่อพื้นที่หน้าตัดที่ขนานกับแนวแรง ดังแสดงในสมการที่ 2.2

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

เมื่อ τ = ความเค้นเฉือน (N/m²)

F = แรงกระทำขนานกับพื้นที่หน้าตัด (N)

2.7.1.3 ความเครียด (Strain)

หมายถึง การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุเมื่อมีแรงมากระทำ แบ่งออกเป็นความเครียดแบบยืดหยุ่น (Elastic strain) และความเครียดแบบถาวร (Plastic strain) ซึ่งความเครียดแบบยืดหยุ่นเป็นการเปลี่ยนแปลงรูปร่างในลักษณะที่ เมื่อลดแรงกระทำแล้ววัสดุจะกลับสู่สภาพเดิมเหมือนก่อนที่จะรับแรงกระทำ ส่วนความเครียดแบบถาวรจะเป็นลักษณะที่เมื่อปล่อยแรงกระทำแล้ววัสดุไม่กลับสู่ขนาดเดิม [21]

การหาความเครียดทางวิศวกรรม (Engineering strain) หากจากอัตราส่วนของขนาดที่เปลี่ยนแปลงไปต่อขนาดเดิม ซึ่งความเครียดเชิงเส้น (Linear strain) จะเกิดขึ้นเมื่อวัสดุรับแรงดึง หรือแรงอัด โดยสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 2.3

$$\varepsilon = \frac{l-l_0}{l_0} \quad (2.3)$$

- เมื่อ ϵ = ความเครียดเชิงเส้น (mm/mm)
 l_0 = ความยาวเริ่มต้นหรือความยาวเกจของวัสดุ (mm)
 l = ความยาวสุดท้ายเมื่อได้รับแรงกระทำ (mm)

สำหรับกรณีที่วัสดุได้รับแรงเฉือนมากระทำ สามารถคำนวณหาความเครียดเฉือนได้ตามสมการที่ 2.4

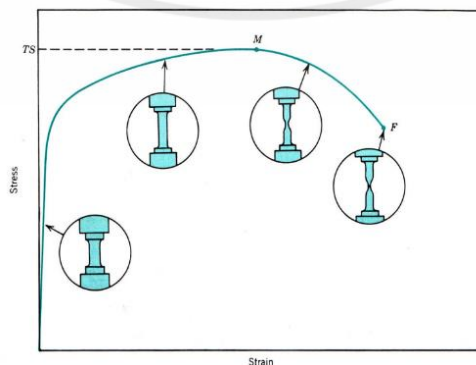
$$\gamma = \tan\theta \quad (2.4)$$

- เมื่อ γ = ความเครียดเฉือน (radian)
 θ = มุมที่เปลี่ยนไป (radian) [20]

2.7.2 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 ดังนั้นเพื่อความถูกต้องและน่าเชื่อถือของการทดสอบจึงจำเป็นต้องมีการระบุรายละเอียดที่เกี่ยวข้องกับชิ้นทดสอบ และสถานะต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดสอบ ซึ่งวิธีการทดสอบสมบัติการดึงของวัสดุนั้นสามารถทำได้หลายวิธีขึ้นกับมาตรฐานที่เลือกใช้ [21]

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 [21]



รูปที่ 2.9 การเกิดคอคอดของชิ้นทดสอบจากวัสดุเหนียวทั่วไป [21]

โดยค่าการต้านทานแรงดึงสูงสุดสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.5

$$\sigma_M = \frac{F_M}{A_0} \quad (2.5)$$

เมื่อ σ_M = การต้านทานแรงดึงสูงสุด (N/mm²)

F_M = แรงกระทำสูงสุด (N)

ในการศึกษาพฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุในช่วงยืดหยุ่นนั้น จะพิจารณาที่ค่า โมดูลัสของความยืดหยุ่น (Modulus of elasticity, E) หรือโมดูลัสของยัง (Young's modulus) ซึ่งหาได้จากความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด ในช่วงยืดหยุ่นเป็นไปตามกฎของฮุก (Hooke's law) อาจกล่าวได้ว่าการเปลี่ยนแปลงขนาดและความเค้นของวัสดุในช่วงที่มีสภาวะยืดหยุ่นจะเป็นสัดส่วนโดยตรงต่อกัน แสดงดังสมการที่ 2.6

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (2.6)$$

เมื่อ E = โมดูลัสของความยืดหยุ่นหรือโมดูลัสของยัง (MPa)

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

$$\%EL = \frac{l_f - l_0}{l_0} \times 100 \quad (2.8)$$

เมื่อ %EL = เปอร์เซ็นต์การยืดตัวของชิ้นทดสอบ (%)

l_f = ความยาวเริ่มต้นของระยะทดสอบ (mm)

l_0 = ความยาวของชิ้นทดสอบหลังแตกหัก (mm)

2.8 สมบัติทางกายภาพและการทดสอบ

สมบัติทางกายภาพ (Physical properties) หมายถึง สมบัติของชิ้นทดสอบที่สามารถสังเกตได้จากลักษณะภายนอก หรือจากการตรวจสอบด้วยเครื่องมือวัดที่ไม่เกี่ยวข้องกับการเกิดปฏิกิริยาเคมี เช่น ขนาด รูปร่าง พื้นที่ผิว สี ความหนาแน่น ความพรุน การดูดความชื้น และการดูดซึมน้ำ เป็นต้น [21]

2.9 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก.966-2547

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม หมายถึง ข้อกำหนดทางวิชาการที่สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (สมอ.) ได้กำหนดขึ้น เพื่อเป็นแนวทางแก่ผู้ผลิตในการผลิตสินค้าให้มีคุณภาพในระดับที่เหมาะสมกับการใช้งานมากที่สุด โดยจัดทำออกมาเป็นเอกสารและจัดพิมพ์เป็นเล่ม โดยภายใน มอก. แต่ละเล่มประกอบไปด้วยเนื้อหาที่เกี่ยวข้องกับการผลิตผลิตภัณฑ์นั้น ๆ เช่น เกณฑ์ทางเทคนิค คุณสมบัติที่สำคัญ ประสิทธิภาพของการนำไปใช้งาน คุณภาพของวัสดุที่นำมาผลิต และวิธีการทดสอบ เป็นต้น [22]

ในการศึกษานี้คณะผู้จัดทำ ได้ทำการขึ้นรูปชิ้นงานที่เป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก.966-2547 หรือ มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมแผ่นใยอัดความหนาแน่นปานกลาง โดยทำการทดสอบแรงดึง และปริมาณความชื้น ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

2.9.1 ขนาดและเกณฑ์ความคลาดเคลื่อน

1. ความกว้าง ความยาว และความหนา ให้เป็นไปตามที่ระบุไว้ที่ฉลาก โดยมีเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนได้ไม่เกินที่กำหนดในตารางที่ 2.2

2. ความแตกต่างของเส้นทแยงมุมทั้ง 2 เส้น จะมีได้ไม่เกิน 0.25%

3. ความตรงของขอบแต่ละด้านจะคลาดเคลื่อนไปจากแนวตรงได้ไม่เกิน 3.0 mm [23]

ตารางที่ 2.2 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของความกว้าง ความยาว และความหนา หน่วยเป็นมิลลิเมตร [23]

ความหนา	เกณฑ์ความคลาดเคลื่อน		
	ความกว้างและ ความยาว	ความหนา	
		SAN	UNS
น้อยกว่า 7	± 5.0	± 0.3	± 0.5
7 ถึง 15			± 1.0
มากกว่า 15			± 1.5

2.9.2 คุณสมบัติที่ต้องการ

1. ลักษณะทั่วไป: แผ่นเอ็มดีเอฟต้องมีความเรียบสม่ำเสมอทั้งแผ่นขอบต้องตั้งได้ฉากกับระนาบผิว การทดสอบให้ทำโดยการตรวจพินิจ

2. ความหนาแน่น (Density): ความหนาแน่นเฉลี่ยของแผ่นเอ็มดีเอฟต้องอยู่ในช่วง 400 mg/m³ ถึง 800 mg/m³ และความหนาแน่นของแผ่นเอ็มดีเอฟแต่ละแผ่นจะคลาดเคลื่อนจากค่าความหนาแน่นเฉลี่ยได้ไม่เกิน 10%

3. ปริมาณความชื้น (moisture content): ปริมาณความชื้นเฉลี่ยต้องอยู่ในช่วง 4% ถึง 13% โดยสมการในการคำนวณหาปริมาณความชื้นแสดงดังสมการที่ 2.9

$$\text{ปริมาณความชื้น (ร้อยละ)} = \frac{m_1 - m_2}{m_2} \times 100 \quad (2.9)$$

เมื่อ m_1 = มวลของชิ้นทดสอบก่อนอบ (g)

m_2 = มวลของชิ้นทดสอบหลังอบ (g)

4. คุณลักษณะที่ต้องการอื่นๆ ให้เป็นไปตามตารางที่ 3 [23]

ตารางที่ 2.3 คุณลักษณะที่ต้องการอื่น ๆ [23]

รายการที่	คุณลักษณะ	เกณฑ์ที่กำหนด									วิธีทดสอบตาม
		ความหนา mm									
		1.8 ถึง 2.5	เกิน 2.5 ถึง 4.0	เกิน 4.0 ถึง 6.0	เกิน 6.0 ถึง 9.0	เกิน 9.0 ถึง 12.0	เกิน 12.0 ถึง 19.0	เกิน 19.0 ถึง 30.0	เกิน 30.0 ถึง 45.0	เกิน 45.0	
1	การพองตัวตามความหนา % ไม่เกิน	45	35	30	17	15	12	10	8	5	ข้อ 3.7
2	ความต้านแรงดัด MPa* ไม่น้อยกว่า	23	23	23	23	22	20	18	17	15	ข้อ 3.8
3	มอดุลลีสถิตหยุ่น MPa ไม่น้อยกว่า	2700	2700	2700	2700	2500	2200	2100	1900	1700	ข้อ 3.8
4	ความต้านแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้า MPa ไม่น้อยกว่า	0.65	0.65	0.65	0.65	0.60	0.55	0.55	0.50	0.50	ข้อ 3.9

หมายเหตุ * 1 Mpa เท่ากับ 1 N/mm²

2.10 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)

Scanning Electron Microscope (SEM) เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่ถูกพัฒนามาจากเครื่อง TEM แต่มีกำลังขยายไม่สูงเท่ากับเครื่อง TEM (เครื่อง SEM มีกำลังขยายสูงสุดประมาณ 10 nm) การเตรียมตัวอย่างเพื่อที่จะดูด้วยเครื่อง SEM นี้ไม่จำเป็นที่ตัวอย่างจะต้องมีขนาดบางเท่ากับการดูด้วยเครื่อง TEM ก็ได้ (เพราะไม่ได้ตรวจวัดจากการที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ทะลุผ่านตัวอย่าง) การสร้างภาพทำได้โดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่สะท้อนจากพื้นผิวหน้าของตัวอย่างที่ทำการสำรวจ ซึ่งภาพที่ได้จากเครื่อง SEM นี้จะเป็น

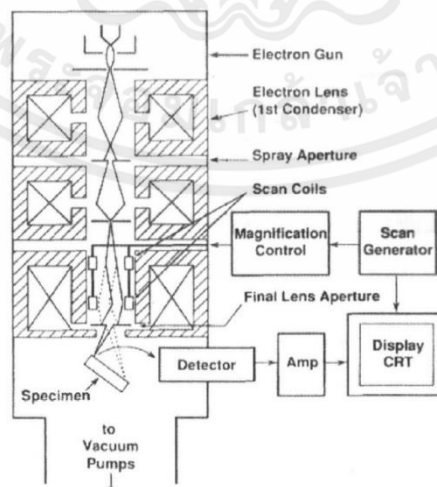
ภาพลักษณะของ 3 มิติ ดังนั้นเครื่อง SEM จึงถูกนำมาใช้ในการศึกษาสัณฐานและรายละเอียดของลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง เช่น ลักษณะพื้นผิวด้านนอกของเนื้อเยื่อและเซลล์หน้าตัดของโลหะและวัสดุ เป็นต้น แสดงเครื่อง SEM ดังรูปที่ 2.10 [24]



รูปที่ 2.10 เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) [24]

2.10.1 การทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

ส่วนประกอบและหลักการทำงานโดยสังเขปของ SEM ส่วนบนสุดแสดงในภาพที่ 4 เป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน ที่เรียกว่า ปืนอิเล็กตรอน (electron gun) อิเล็กตรอนจากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งให้เคลื่อนที่ลงมาตาม คอลัมน์ซึ่งมีสภาพสุญญากาศ ด้วยความต่างศักย์เร่ง (Accelerating Voltage) ในช่วง 0 – 30 kV (บางเครื่องอาจทำได้สูงถึง 50 kV) โดยทิศทางการเคลื่อนที่ จะถูกควบคุมด้วยเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic lens) 2 ชุดหรือมากกว่า และปริมาณของอิเล็กตรอนจะถูกควบคุมโดยแอมเพอร์เจอร์ (aperture) หรือช่องเปิดซึ่งมีขนาดต่าง ๆ กัน ตามลักษณะการใช้งาน



รูปที่ 2.11 การทำงานของ SEM [25]

เลนส์แม่เหล็กไฟฟ้าชุดแรก ที่เรียกว่า เลนส์คอนเดนเซอร์ (Condenser lens) นับว่าเป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญที่สุดต่อการควบคุมทัศนศาสตร์อิเล็กตรอน (electron optics) เพราะเป็นเลนส์ที่ทำหน้าที่บีบอิเล็กตรอนที่วิ่งลงมาจากแหล่งกำเนิดให้เป็นลำที่มีขนาดพื้นที่หน้าตัดเล็กลง ส่วนเลนส์วัตถุ (Objective lens) ซึ่งเป็นเลนส์ชุดสุดท้าย จะทำหน้าที่โฟกัส ลำอิเล็กตรอน (electron beam) ให้ไปตกบนผิวของตัวอย่าง โดยมีสแกนคอยล์ (scan coil) ทำหน้าที่กวาดลำอิเล็กตรอนให้ไปบนผิวของตัวอย่างภายในกรอบพื้นที่สี่เหลี่ยมเล็กๆ ซึ่งพื้นที่ผิวของตัวอย่างบริเวณที่ถูกยิงด้วยลำอิเล็กตรอนนี้ จะเกิดสัญญาณ (Signal) ต่างๆ ขึ้นหลายชนิดในเวลาเดียวกัน และ SEM จะมีอุปกรณ์สำหรับตรวจจับสัญญาณ (Detector) ชนิดต่างๆ เหล่านี้แล้วส่งไปประมวลผลเป็นภาพแสดงบนจอภาพต่อไป ตัวอย่างสัญญาณที่เกิดขึ้นนั้น ได้แก่

1. อิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electrons, SE) สัญญาณชนิดนี้จะให้ข้อมูลเกี่ยวกับลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง เป็นสัญญาณที่ถูกนำมาใช้ในการสร้างภาพมากที่สุด ภาพที่ได้จากสัญญาณชนิดนี้ เรียกว่า ภาพอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electron Image , SEI)

2. อิเล็กตรอนกระเจิงกลับ (Back Scattered Electrons, BSE) ให้ข้อมูลเกี่ยวกับส่วนประกอบทางเคมีบนผิวของตัวอย่าง และแสดงให้เห็นลักษณะความสูงต่ำของพื้นผิวนอกเหนือจากสัญญาณเหล่านี้แล้ว ยังมีสัญญาณอีกหลายชนิดที่เกิดขึ้น เช่น เอกซเรย์ (X-Ray), คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic wave), โอเจอิเล็กตรอน (Auger electron) เป็นต้น ซึ่งสัญญาณแต่ละชนิดจะให้ข้อมูลของตัวอย่างแตกต่างกันไป [25]

2.10.2 การเตรียมตัวอย่างทางวัสดุศาสตร์สำหรับการวิเคราะห์

2.10.2.1 การเตรียมตัวอย่างให้แห้ง

ก่อนที่จะศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (FE-SEM) จำเป็นที่จะต้องลดความชื้นของตัวอย่างให้น้อยกว่า 6% เพื่อลดการสะสมประจุ (Charging effect) ที่ผิวของชิ้นงาน ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อการบันทึกภาพ และต้องเก็บรักษาชิ้นงานในตู้ดูดความชื้น (Desiccator) หรือกล่องที่มีการบรรจุซิลิกาเจล (Silica gel) ก่อนที่จะนำชิ้นงานมาติดตั้งบนแท่นติดตัวอย่างต่อไป

2.10.2.2 การติดตัวอย่างบนแท่นติดตัวอย่าง

1. ตัวอย่างที่เป็นผง

วิธีโดยตรง ในกรณีที่ตัวอย่างเป็นผงสามารถนำไปติดบนแท่นติดตัวอย่างได้ โดยนำตัวอย่างที่เป็นผงกระจายอย่างสม่ำเสมอลงบนแท่น ติดตัวอย่างที่มีเทปคาร์บอน (Carbon tape) เพื่อเพิ่มการนำไฟฟ้า และใช้ที่เป่าลม (Blower) เป่าผงส่วนเกินออกเพื่อป้องกันการปนเปื้อนภายในกล้องจุลทรรศน์ฯ

วิธีเตรียมบนสารแขวนลอย ในกรณีที่ตัวอย่างมีขนาดเล็กกว่า 10 ไมโครเมตร การเตรียมโดยวิธีการโดยตรงนั้นอาจทำให้ตัวอย่างมีการเกาะกลุ่มกัน ทำให้เกิดการเคลือบผิวไม่ทั่วถึง และเกิดการสะสมของประจุไม่ก่อเกิดสัญญาณเข้าสู่หัววัด ดังนั้นวิธีการแก้ปัญหาทำได้โดยการทำให้ผงตัวอย่างเป็นสารแขวนลอย โดยนำตัวอย่างไปกระจายตัวในตัวทำละลายที่เหมาะสมเช่น เมทานอล (Methanol) หรืออะซิโตน (Acetone) แล้วนำไปเขย่าในเครื่องปั่นเหวี่ยงชนิดความเร็วสูง (Ultrasonic) แล้วนำหลอดหยด ดูดสารละลายหยดลงบนกระจกขนาดเล็กทิ้งไว้ให้แห้ง หรือนำใส่ตู้ดูดความชื้นแล้วติดตั้งบนแท่นติดตัวอย่างต่อไป

2. ชั้นตัวอย่างขนาดใหญ่

ศึกษาบริเวณพื้นผิวของตัวอย่าง สามารถนำตัวอย่างที่ต้องการศึกษา ตัดให้มีขนาดเล็กกว่าแท่นติดตัวอย่าง และสามารถติดลงบนเทปกาวคาร์บอนได้ทันที

ศึกษาโครงสร้างภายใน, การกระจายตัวของสารตัวเติมในวัสดุเชิงประกอบ หรือพื้นที่หน้าตัดของตัวอย่าง ทำได้โดยนำชั้นตัวอย่างจุ่มในไนโตรเจนเหลว (อุณหภูมิ = -192 องศาเซลเซียส) ทำการหักตัวอย่างก่อนที่จะนำตัวอย่างมาติดบนแท่นตัวอย่างต่อไป

2.10.2.3 การฉาบผิวตัวอย่าง

การฉาบผิวตัวอย่างเพื่อให้ตัวอย่างนำไฟฟ้าที่สภาวะความสูญญากาศสูงและลดความเสียหายจากความร้อนของลำอิเล็กตรอนที่กระทบกับตัวอย่าง โดยโลหะที่นิยมนำมาใช้ในการฉาบผิวได้แก่ (Au) มีขนาด Gain size เท่ากับ 5-10 นาโนเมตร หรือแพลตทินัม (Pt) ที่มีขนาด Gain size เท่ากับ 2-3 นาโนเมตร สำหรับงานที่ต้องการความละเอียดและจำเป็นต้องใช้กำลังขยายสูง โดยการเคลือบผิวตัวอย่างนั้นไม่ควรมีความหนาหรือบางจนเกินไป โดยควรมีความหนาอยู่ที่ประมาณ 10 ถึง 20 นาโนเมตรเพราะอาจจะไม่เห็นรายละเอียดของตัวอย่างที่ต้องการศึกษา จากนั้นนำตัวอย่างเข้าศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดต่อไป [26]

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงาน

ในการศึกษางานวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึงการผลิตชิ้นงานต้นแบบวัสดุเชิงประกอบจากผักตบชวา ด้วยกระบวนการขึ้นรูปด้วยความร้อน ซึ่งบทนี้จะกล่าวถึงกระบวนการสร้างชิ้นงานต้นแบบ การทดสอบเชิงกล การทดสอบเชิงกายภาพ และการตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) โดยมีขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานดังนี้

1. การสร้างชิ้นงานต้นแบบ
2. การทดสอบเชิงกล
3. การทดสอบเชิงกายภาพ
4. การตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

3.1 การสร้างชิ้นงานต้นแบบ

3.1.1 วัสดุและเครื่องมือ

3.1.1.1 ลำต้นผักตบชวา

ผักตบชวาที่ใช้ในการศึกษาได้มาจากบริเวณริมแม่น้ำ ลำคลอง ภายในสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

3.1.1.2 วัสดุประสาน

วัสดุประสาน Polylactic Acid (PLA) เกรด 2003D จากบริษัท บี ซี พอลิเมอร์ มาร์เก็ตติ้ง จำกัด

3.1.1.3 อุปกรณ์

1. เครื่องปั่นละเอียด
2. ไมโครมิเตอร์
3. เครื่องชั่งละเอียด

3.1.1.4 แม่พิมพ์โลหะ

แม่พิมพ์ที่ใช้ในการศึกษาคือแม่พิมพ์โลหะ ขนาด 20 x 150 x 3 mm

3.1.1.5 ตู้อบความร้อน

ตู้อบความร้อนหรือตู้อบแห้ง ใช้สำหรับการอบวัสดุ ในการศึกษาใช้ตู้อบความร้อนแบบมีพัดลมยี่ห้อ MEMMERT UF110 รุ่น UN Series

3.1.1.6 เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่

เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (Twin Screw Extruder) ยี่ห้อ Co – rotating twin – screw extruder รุ่น XINDA SHJ-20

3.1.1.7 เครื่องอัดขึ้นรูป

เครื่องอัดขึ้นรูป (Compression Molding Machines) หรือเครื่องกดไฮดรอลิก ใช้สำหรับการกดขึ้นรูปชิ้นงานตามแม่แบบโดยทั่วไป

3.1.1.8 เครื่องทดสอบแรงดัดโค้ง

เครื่องทดสอบแรงดัดโค้ง เป็นเครื่องทดสอบที่มีฟังก์ชันการใช้งานหลากหลาย สามารถทดสอบแรงดึงแรงดัดโค้ง การกด ในการศึกษานี้ใช้เครื่องทดสอบแรงดัดโค้ง คือ AG-X Series Shimadzu Precision Universal Tester

3.1.1.9 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

3.1.2 ขั้นตอนการเตรียมเส้นใยผักตบชวา

1. นำผักตบชวาที่ได้มาตัดส่วนรากและส่วนใบทิ้งให้เหลือเฉพาะส่วนของลำต้น แล้วล้างทำความสะอาดด้วยน้ำสะอาด ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ผักตบชวาที่ผ่านการตัดรากและใบ

2. หั่นผักตบชวาเป็นชิ้นเล็กๆขนาด 0.5 - 1 นิ้ว ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ผักตบชวาขนาด 0.5 - 1 นิ้ว

3. นำผักตบชวาที่หั่นเสร็จแล้วมาปั่นในเครื่องปั่นละเอียด ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ปั่นผักตบชวาด้วยเครื่องปั่นละเอียด

4. ตากผักตบชวาที่ปั่นละเอียดแล้วด้วยแสงแดดธรรมชาติเป็นเวลา 2 - 3 ชั่วโมง เพื่อระเหยความชื้นเบื้องต้น ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 การตากผักตบชวาที่ละเอียด

5. นำผักตบชวาที่ผ่านการระเหยความชื้นเบื้องต้นแล้ว อบด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 การอบผักตบชวา

6. ทิ้งให้เย็นตัว แล้วเก็บเส้นใยผักตบชวาแห้งในถุงซีพีสติก และใส่สารป้องกันความชื้น ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 ผักตบชวาแห้ง

3.1.3 การออกแบบการทดลอง

ทดลองสูตรการผลิตชิ้นงานต้นแบบวัสดุเชิงประกอบจากผักตบชวาและตัวประสาน Polyactic Acid (PLA) กำหนดให้ปริมาณอัตราส่วนของเส้นใยที่ 0 wt%, 2 wt%, 5 wt% และ 8 wt% ตามลำดับโดยผลจากการทดลองอัตราส่วนมีดังนี้

ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนของสารผสมที่ใช้ในการทดลอง

สูตรที่	อัตราส่วนของสารผสม (wt%)	
	PLA	เส้นใยผักตบชวา
1	100	0
2	98	2
3	95	5
4	92	8

3.1.4 ขั้นตอนผสมเส้นใยผักตบชวากับ Polyactic acid (PLA)

การผสมเส้นใยของผักตบชวากับตัวประสาน Polyactic Acid (PLA) ด้วยเครื่อง twin - screw extruder โดยตั้งค่าอัตราเร็วสกรูอยู่ที่ 300-400 rpm ตั้งอุณหภูมิ Melting zone ที่ 170 องศาเซลเซียส และหัว Die ที่ 160 องศาเซลเซียส ในทุกอัตราส่วนการทดลอง จากนั้นนำเข้าเครื่องบดละเอียดให้ส่วนผสมที่ได้มีขนาดเล็ก เพื่อเตรียมนำส่วนผสมที่ได้ไปอัดขึ้นรูปต่อไป

3.1.5 ขั้นตอนการอัดขึ้นรูปชิ้นงานต้นแบบ

ในการขึ้นรูปชิ้นงานจะทำการอัดขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์ขนาด 20 x 150 mm และความหนาเท่ากับ 3 mm โดยในแต่ละสูตรจะนำไปอัดขึ้นรูปสูตรละ 5 แผ่น

1. นำส่วนผสมตามอัตราส่วนต่าง ๆ ที่ได้เตรียมไว้ทั้ง 4 สูตร ใส่ในแม่พิมพ์ โดยน้ำหนักที่ใช้มีค่าประมาณ 11.25 กรัม



รูปที่ 3.7 การใส่ส่วนผสมในแม่พิมพ์

2. นำแม่พิมพ์เข้าเครื่องกดอัดความร้อน (Heat compress) ดังรูปที่ 3.8 โดยควบคุมอุณหภูมิ ความดัน เวลาในการกดอัด เท่ากับ 170-180 องศาเซลเซียส 10 บาร์ เป็นเวลา 7 นาที

3. ทำการหล่อเย็นชิ้นงาน โดยตั้งค่าอุณหภูมิหล่อเย็นที่ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที



รูปที่ 3.8 การนำแม่พิมพ์เข้าเครื่องกดอัดความร้อน

4. เมื่อครบเวลาที่กำหนด นำชิ้นงานออกมาพักให้เย็นตัวสนิท จากนั้นจึงเปิดแม่พิมพ์ และนำชิ้นงานออกมา ดังรูปที่ 3.9 และเก็บชิ้นงานทดสอบที่ได้ไว้ในถุงซิปล็อค



รูปที่ 3.9 ชิ้นงานต้นแบบ

3.2 การทดสอบเชิงกล

ในการทดสอบเชิงกล คณะผู้จัดทำได้ทำการทดสอบความต้านทานแรงดึง (Tensile Test) โดยกำหนดระยะ Gauge length อยู่ที่ 90 mm ความเร็วในการดึงชิ้นงานเท่ากับ 2 mm/min ดังรูปที่ 3.10 จากนั้นทำการหาค่า Tensile Strength และ Young's Modulus โดยคิดเป็นค่าเฉลี่ยของชิ้นงานแต่ละสูตร เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมแผ่นใยไม้อัดความหนาแน่นปานกลาง (มอก.966-2547) ที่กำหนดให้ค่า Young's Modulus เฉลี่ยของชิ้นงาน มีค่าไม่น้อยกว่า 2.7 GPa ที่ความหนาชิ้นงาน 3-6 mm [23]



รูปที่ 3.10 การทดสอบความต้านทานแรงดึง

3.3 การทดสอบเชิงกายภาพ

ในการทดสอบเชิงกล คณะผู้จัดทำได้ทำการทดสอบปริมาณความชื้น โดยการชั่งน้ำหนักชิ้นงานก่อนอบ แล้วนำชิ้นงานอบที่อุณหภูมิ 103 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ดังรูปที่ 3.11 จากนั้นชั่งน้ำหนักชิ้นงานหลังอบ นำน้ำหนักที่ได้จากการชั่งก่อนและหลังอบ คำนวณหาปริมาณร้อยละเฉลี่ยของชิ้นงานทั้ง 4 สูตร จากสมการที่ 2.9 เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมแผ่นใยไม้อัดความหนาแน่นปานกลาง ที่กำหนดให้ค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมควรอยู่ในช่วงร้อยละ 4 - 13 [23]

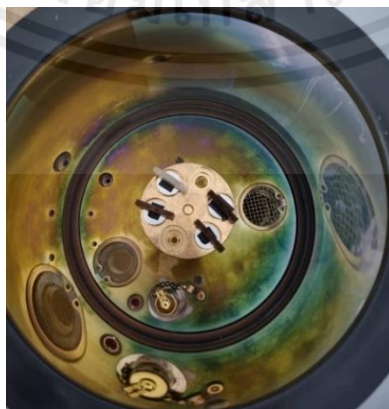


รูปที่ 3.11 การอบชิ้นงานเพื่อหาปริมาณความชื้น

3.4 การตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

คณะผู้จัดทำ ได้ทำการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาบริเวณรอยแตกของชิ้นงานหลังจากทำการทดสอบความต้านทานแรงดึง มีรายละเอียด ดังนี้

1. หลังจากทำการทดสอบความต้านทานแรงดึงของชิ้นงานทั้ง 4 สูตรเรียบร้อยแล้ว นำชิ้นงานมาตัดเป็นชิ้นขนาดเล็กแล้ววางบนแท่น ที่เรียกว่า Stub ด้วยเทปกาว ดังรูปที่ 3.12



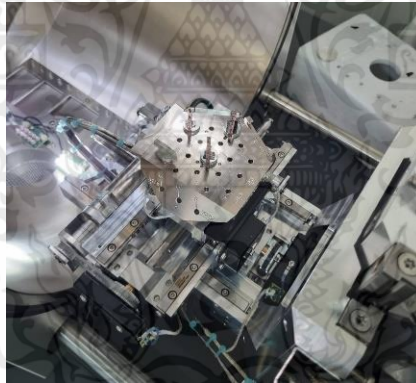
รูปที่ 3.12 การวางชิ้นงานบนแท่น Stub ด้วยเทปกาว

2. ทำการฉาบเคลือบชิ้นงานด้วยทอง ในเครื่อง Sputter Coater ดังรูปที่ 3.13

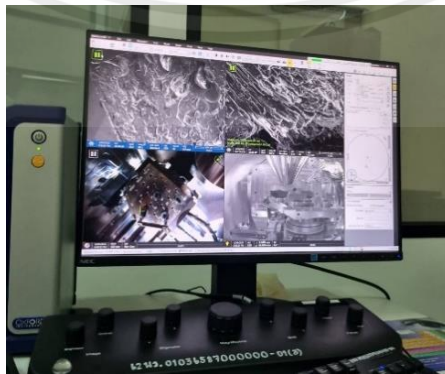


รูปที่ 3.13 การฉาบเคลือบทองในเครื่อง Sputter Coater

3. นำเข้าเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ดังรูปที่ 3.14 และนำภาพที่ได้จากการตรวจสอบไปวิเคราะห์ผลต่อไป



รูปที่ 3.14 การนำชิ้นงานเข้าเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



รูปที่ 3.15 ภาพที่ได้จากการส่องด้วยเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการดำเนินงาน

หลังจากทำการขึ้นรูปชิ้นงานต้นแบบทั้งหมด 4 สูตร ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดลองทั้งหมดที่ได้ศึกษาในงานวิจัย ด้วยการศึกษาลักษณะโดยทั่วไปของชิ้นงานต้นแบบ ศึกษาคุณสมบัติของวัสดุเชิงประกอบ รวมถึงศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค SEM โดยผลการทดลองดังกล่าว มีรายละเอียดดังนี้

1. ผลการสร้างชิ้นงานต้นแบบ
2. ผลการทดสอบเชิงกล
3. ผลการทดสอบเชิงกายภาพ
4. ผลการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค SEM
5. อภิปรายผล

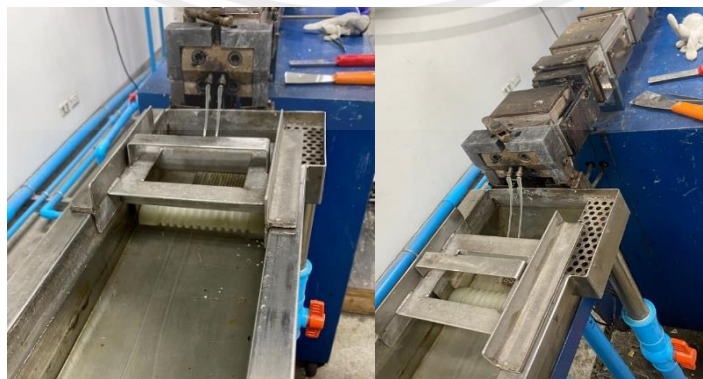
4.1 ผลการสร้างชิ้นงานต้นแบบ

4.1.1 ผลการผสมเส้นใยผักตบชวา กับ Polylactic acid (PLA)

จากการผสมเส้นใยของผักตบชวากับตัวประสาน Polylactic Acid (PLA) ด้วยเครื่อง Twin - Screw Extruder จากทุกอัตราส่วนการทดลอง ได้ผลดังนี้

4.1.1.1 ผลการทดลองสูตรที่ 1

จากการทดลองในสูตรที่ 1 ที่อัตราส่วนระหว่าง PLA 100 wt% และเส้นใยผักตบชวา 0 wt% พบว่าพลาสติก PLA เกิดการหลอมที่สมบูรณ์จากการตั้งค่าเครื่องตามที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น เมื่อใส่ PLA ลงใน Feed hopper จะถูกลำเลียงผ่าน Screw และไหลผ่านหัว Die ออกมา ดังรูปที่ 4.1 จากนั้นเข้าเครื่องตัดออกมาในรูปแบบพลาสติก PLA ละเอียด ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.1 การไหลของพลาสติก PLA ผ่านหัว Die



รูปที่ 4.2 พลาสติก PLA ที่ถูกตัดย่อย

4.1.1.2 ผลการทดลองสูตรที่ 2

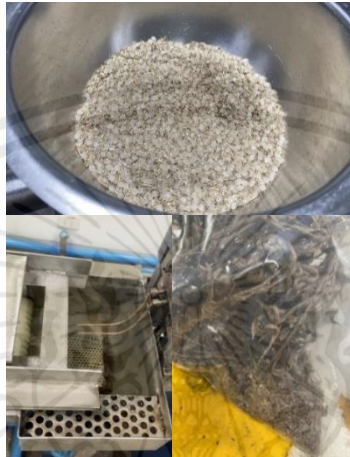
จากการทดลองในสูตรที่ 2 ที่อัตราส่วนระหว่าง PLA 98 wt% และ เส้นใยผักตบชวา 2 wt% พบว่า ที่การใช้เส้นใยผักตบชวาเท่ากับ 2 wt% นั้นทำให้ได้สารผสมที่หลอมเหลวสมบูรณ์ รวมเข้าเป็นเนื้อเดียวกัน อย่างดี สามารถผ่านหัว Die และเข้าเครื่องตัดได้อย่างสมบูรณ์ ดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ผลจากการผสมเส้นใยผักตบชวากับ PLA ที่อัตราส่วนเส้นใย 2 wt%

4.1.1.3 ผลการทดลองสูตรที่ 3

จากการทดลองในสูตรที่ 3 ที่อัตราส่วนระหว่าง PLA 95 wt% และเส้นใยผักตบชวา 5 wt% พบว่า ที่การใช้เส้นใยผักตบชวาเท่ากับ 5 wt% นั้นยังคงสามารถหลอมเหลวรวมเข้าเป็นเนื้อเดียวกัน และสามารถผ่านหัว Die ได้ แต่เข้าเครื่องตัดได้บางส่วนเนื่องจากปริมาณเส้นใยผักตบชวาที่เพิ่มขึ้นทำให้เส้นสารผสมขาดเป็นช่วงๆ ทำให้ต้องนำเข้าเครื่องบดบางส่วน ดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 ผลจากการผสมเส้นใยผักตบชวากับ PLA ที่อัตราส่วนเส้นใย 5 wt%

4.1.1.4 ผลการทดลองสูตรที่ 4

จากการทดลองในสูตรที่ 4 ที่อัตราส่วนระหว่าง PLA 92 wt% และเส้นใยผักตบชวา 8 wt% พบว่า ที่การใช้เส้นใยผักตบชวาเท่ากับ 8 wt% ยังคงสามารถหลอมเหลวรวมเข้าเป็นเนื้อเดียวกันได้ สามารถผ่านหัว Die ออกมาได้ แต่เนื่องจากปริมาณเส้นใยผักตบชวาที่เพิ่มขึ้นทำให้ไม่สามารถได้สารผสมเป็นเส้นที่ต่อเนื่องกันได้ มีการจับตัวกันเป็นก้อนจำนวนมาก ดังรูปที่ 4.5 จึงไม่สามารถโยงเข้าเครื่องตัดได้ต้องนำไปเข้าเครื่องบดทั้งหมด







รูปที่ 4.5 ผลจากการผสมเส้นใยผักตบชวากับ PLA ที่อัตราส่วนเส้นใย 8 wt%

4.1.2 ผลศึกษาลักษณะของชิ้นงานต้นแบบที่ได้จากการอัดขึ้นรูปชิ้นงาน

ผลการศึกษาลักษณะโดยทั่วไปของชิ้นงานต้นแบบ จากการขึ้นรูปชิ้นงานต้นแบบทั้งหมด 4 สูตร ได้ลักษณะชิ้นงานต้นแบบ แสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ตารางผลการศึกษาลักษณะโดยทั่วไปของชิ้นงาน

สูตรที่	รูปชิ้นงานต้นแบบ	อัตราส่วน		ลักษณะโดยทั่วไปของชิ้นงานต้นแบบ
		PLA (wt%)	เส้นใยผักตบชวา (wt%)	
1		100	0	เป็นแผ่นใสที่ขุ่นเล็กน้อย, โปรงแสง, มีฟองอากาศด้านในที่สังเกตเห็นได้ชัดเจน และผิวหน้าเรียบทั้งสองด้าน
2		98	2	เป็นแผ่นสีน้ำตาลอ่อน, โปรงแสง, สังเกตเห็นฟองอากาศได้เล็กน้อย, สามารถเห็นเส้นใยที่แทรกอยู่ได้ และผิวหน้าเรียบทั้งสองด้าน
3		95	5	เป็นแผ่นสีน้ำตาลเข้ม, สังเกตเห็นฟองอากาศได้เล็กน้อย, สามารถเห็นเส้นใยที่แทรกอยู่ได้เมื่อส่องกับแสงไฟ และผิวหน้าเรียบทั้งสองด้าน
4		92	8	เป็นแผ่นสีน้ำตาลเข้มจนเกือบดำ, สังเกตเห็นฟองอากาศได้เล็กน้อย, ไม่สามารถเห็นเส้นใยที่แทรกอยู่ได้ และผิวหน้าเรียบทั้งสองด้าน

จากตารางที่ 4.1 พบว่า ในทุกสูตรของการขึ้นรูปชิ้นงานต้นแบบ จะมีผิวหน้าที่เรียบทั้งสองด้านและมีฟองอากาศเกิดขึ้น อีกทั้งเมื่อมีการเพิ่มอัตราส่วนของเส้นใยมากขึ้น จะทำให้สีของชิ้นงานต้นแบบนั้นเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลที่เข้มขึ้น และมีความโปรงแสงน้อยลง

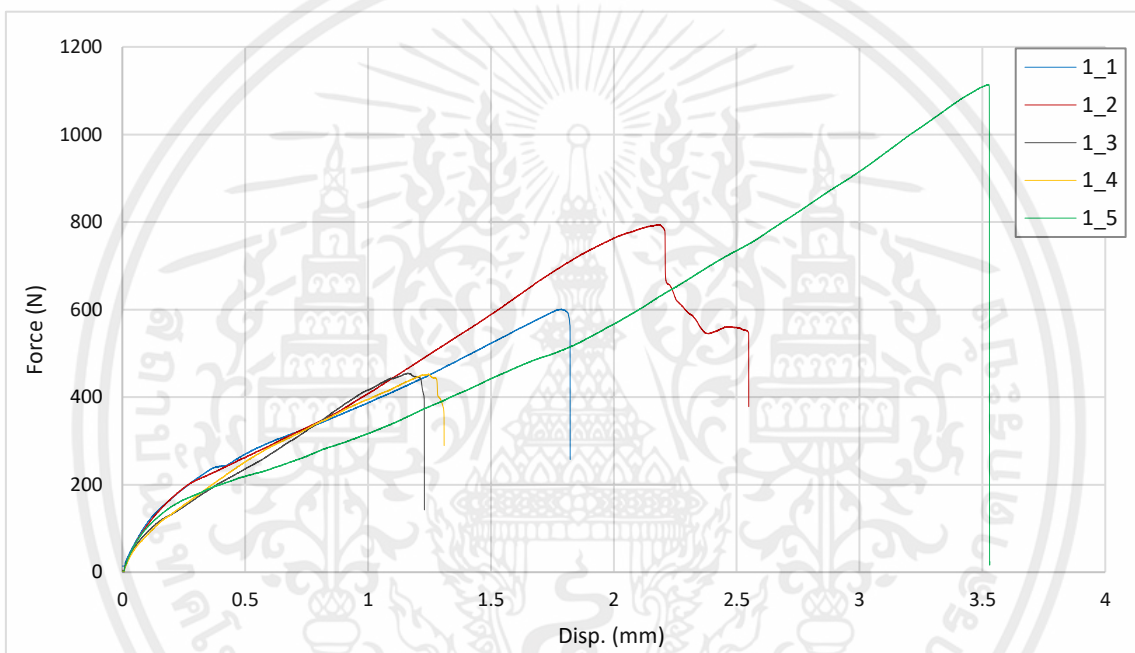
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ผลการทดสอบเชิงกล

จากการขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบจากเส้นใยผักตบชวา กับตัวประสาน Poly lactic Acid (PLA) ที่ได้จากการทดลองทั้งหมด 4 สูตร แบ่งออกเป็นสูตรละ 5 ชิ้น ในพื้นที่หน้าตัด 60 mm² เมื่อนำไปทดสอบคุณสมบัติทางกล คือ การทดสอบแรงดึง (Tensile test) ที่เป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก.966-2547 ได้ผลดังต่อไปนี้

4.2.1 ผลการทดสอบแรงดึงสูตรที่ 1

ชิ้นงานต้นแบบที่มีอัตราส่วนผสมของ Poly lactic Acid (PLA) 100 wt% ไม่มีเส้นใยผักตบชวาผสม แสดงผลทดสอบ ดังตารางที่ 4.2



รูปที่ 4.6 กราฟผลการทดสอบที่ได้จากเครื่องทดสอบแรงดึงในสูตรที่ 1

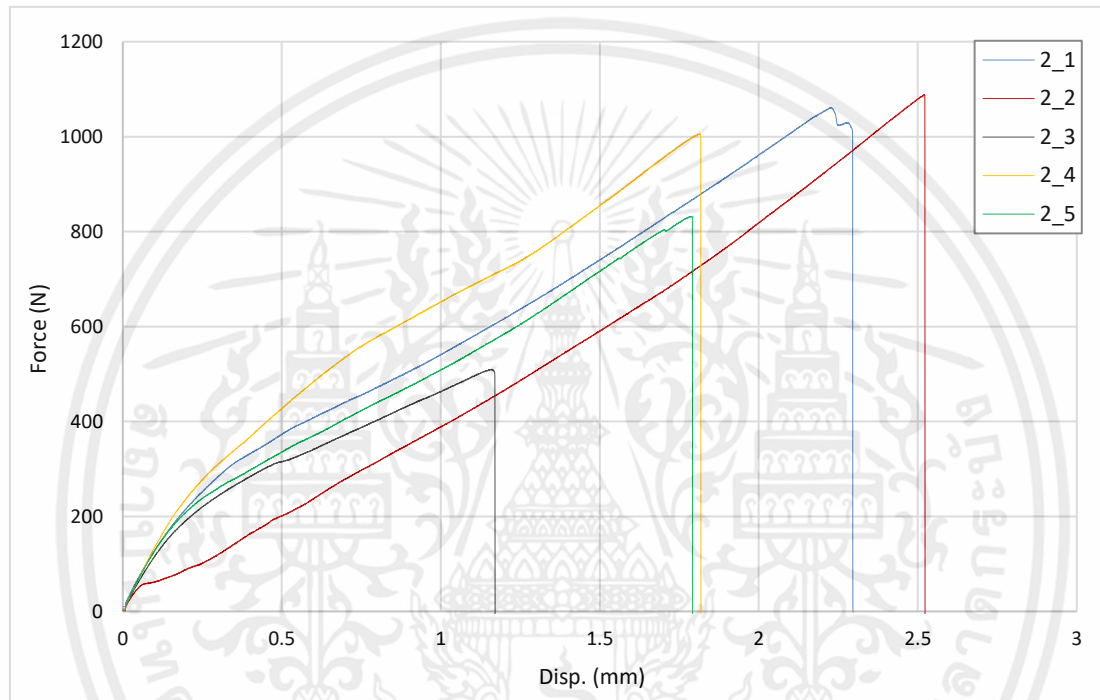
ตารางที่ 4.2 ค่าการทดสอบเชิงกลจากการทดสอบแรงดึงในสูตรที่ 1

ชิ้นงานต้นแบบ	Max Force (N)	Yield Strength At 0.2% offset	Tensile Strength (MPa)	Young's Modulus (GPa)	Elongation at Break (%)
1	601.3711	4.0409	10.0229	2.5931	1.2150
2	794.4584	3.9972	13.2410	2.7707	1.6995
3	454.9026	3.9752	7.58171	2.8360	0.8195
4	453.1384	4.8399	7.55231	2.5766	0.8731
5	1114.8130	3.3032	18.5802	2.7862	2.3536
Average	683.7367	4.0313	11.3956	2.7125	1.3921
Std.dev.	278.5726	0.5451	4.6429	0.1192	0.6418

ผลการทดสอบแรงดึงชิ้นงานต้นแบบในสูตรที่ 1 แสดงให้เห็นว่าค่าความทนต่อแรงดึงและค่ามอดูลัสยืดหยุ่นที่อัตราส่วนผสมของ Polylactic Acid (PLA) 100 wt% ไม่มีเส้นใยผักตบชวาผสม มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 11.3956 MPa และ 2.7125 GPa ตามลำดับ

4.2.2 ผลการทดสอบแรงดึงสูตรที่ 2

ชิ้นงานต้นแบบที่มีอัตราส่วนผสมระหว่าง Polylactic Acid (PLA) 98 wt% และเส้นใยผักตบชวา 2 wt% แสดงผลทดสอบ ดังตารางที่ 4.3



รูปที่ 4.7 กราฟผลการทดสอบที่ได้จากเครื่องทดสอบแรงดึงในสูตรที่ 2

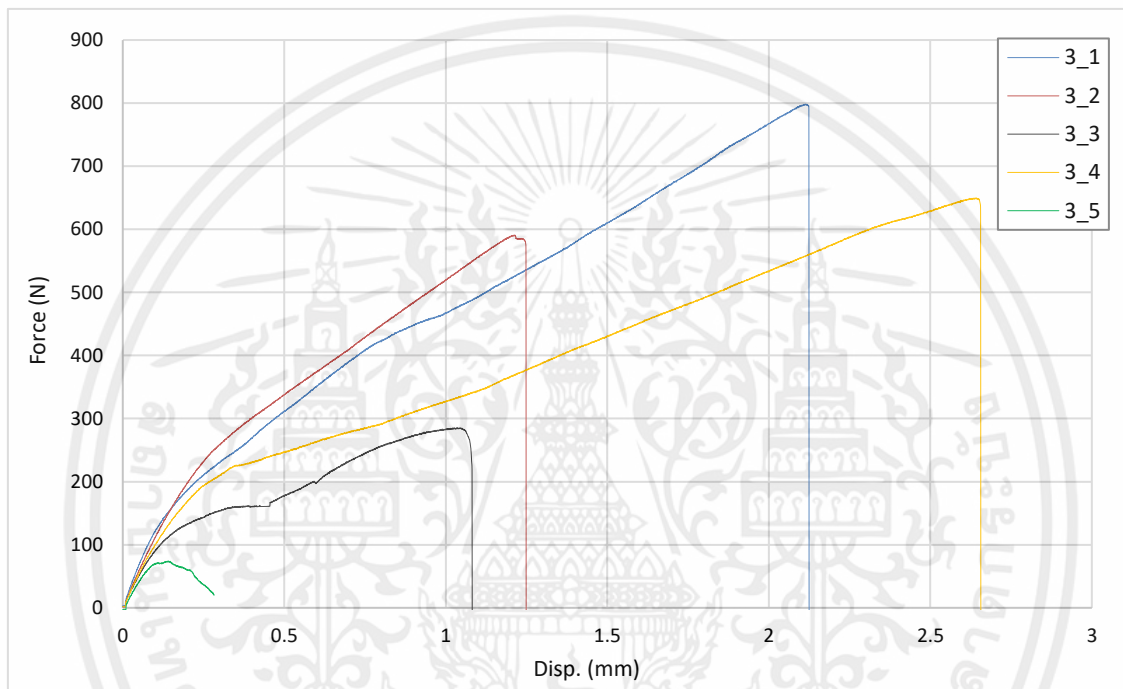
ตารางที่ 4.3 ค่าการทดสอบเชิงกลจากการทดสอบแรงดึงในสูตรที่ 2

ชิ้นงานต้นแบบ	Max Force (N)	Yield Strength at 0.2% offset	Tensile Strength (MPa)	Young's Modulus (GPa)	Elongation at Break (%)
1	1061.3440	5.9930	17.6891	3.0586	1.5313
2	1088.0630	3.2581	18.1344	3.0792	1.6827
3	510.3111	5.0015	8.50519	3.3577	0.7812
4	1006.0470	7.0580	16.7675	3.2654	1.2129
5	832.2716	5.0831	13.8712	3.1873	1.1954
Average	899.6073	5.2787	14.9935	3.1896	1.2807
Std.dev.	239.3164	1.4030	3.9886	0.1259	0.3485

ผลการทดสอบแรงดึงชิ้นงานต้นแบบในสูตรที่ 2 แสดงให้เห็นว่าค่าความทนต่อแรงดึงและค่ามอดูลัสยืดหยุ่นที่อัตราส่วนผสมระหว่าง Polylactic Acid (PLA) 98 wt% และเส้นใยผักตบชวา 2 wt% มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 14.9935 MPa และ 3.1873 GPa ตามลำดับ

4.2.3 ผลการทดสอบแรงดึงสูตรที่ 3

ชิ้นงานต้นแบบที่มีอัตราส่วนผสมระหว่าง Polylactic Acid (PLA) 95 wt% และเส้นใยผักตบชวา 5 wt% แสดงผลทดสอบ ดังตารางที่ 4.4



รูปที่ 4.8 กราฟผลการทดสอบที่ได้จากเครื่องทดสอบแรงดึงในสูตรที่ 3

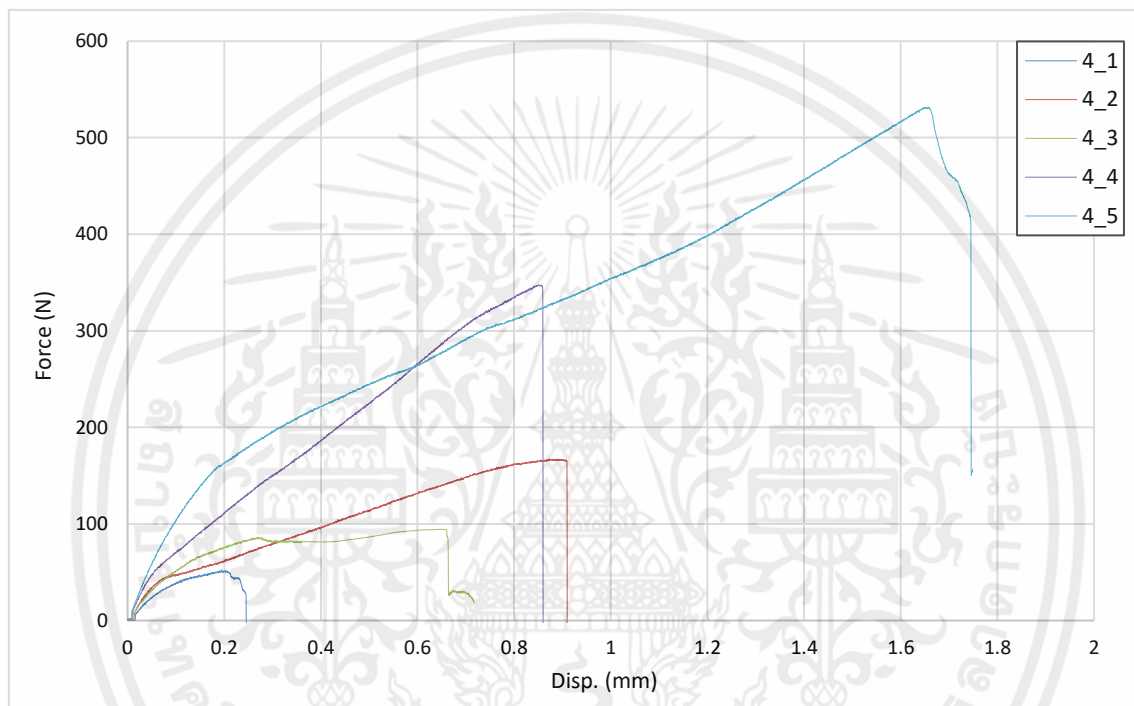
ตารางที่ 4.4 ค่าการทดสอบเชิงกลจากการทดสอบแรงดึงในสูตรที่ 3

ชิ้นงานต้นแบบ	Max Force (N)	Yield Strength at 0.2% offset	Tensile Strength (MPa)	Young's Modulus (GPa)	Elongation at Break (%)
1	798.6390	4.4754	13.3106	3.1189	1.4172
2	590.7850	5.5303	9.8464	2.7266	0.8331
3	285.4510	2.6594	4.7575	2.4841	0.7218
4	649.9770	3.9013	10.8330	2.5647	1.7714
5	74.1641	-	1.2361	2.3029	0.1887
Average	479.8032	4.1416	7.9967	2.6394	0.9864
Std.dev.	293.7891	1.1964	4.8965	0.3084	0.6188

ผลการทดสอบแรงดึงชิ้นงานต้นแบบในสูตรที่ 3 แสดงให้เห็นว่าค่าความทนต่อแรงดึงและค่ามอดูลัสยืดหยุ่นที่อัตราส่วนผสมระหว่าง Polylactic Acid (PLA) 95 wt% และเส้นใยผักตบชวา 5 wt% มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 7.9967 MPa และ 2.6394 GPa ตามลำดับ

4.2.4 ผลการทดสอบแรงดึงสูตรที่ 4

ชิ้นงานต้นแบบที่มีอัตราส่วนผสมระหว่าง Polylactic Acid (PLA) 92 wt% และเส้นใยผักตบชวา 8 wt% แสดงผลทดสอบ ดังตารางที่ 4.5



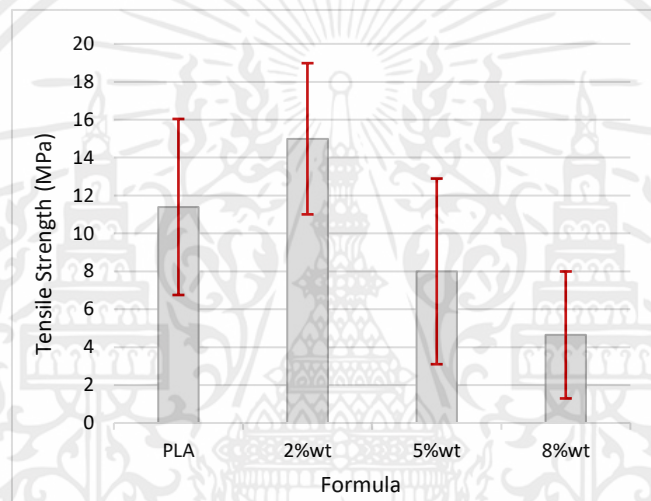
รูปที่ 4.9 กราฟผลการทดสอบที่ได้จากเครื่องทดสอบแรงดึงในสูตรที่ 4

ตารางที่ 4.5 ค่าการทดสอบเชิงกลจากการทดสอบแรงดึงในสูตรที่ 4

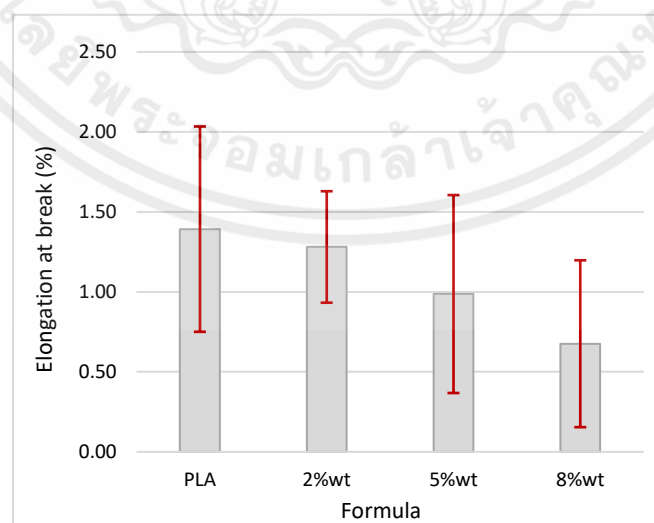
ชิ้นงานต้นแบบ	Max Force (N)	Yield Strength at 0.2% offset	Tensile Strength (MPa)	Young's Modulus (GPa)	Elongation at Break (%)
1	52.5474	-	0.8758	1.1228	0.1643
2	367.1791	2.0652	6.1196	1.6977	0.6072
3	94.3978	1.3587	1.5733	1.6099	0.4783
4	347.5348	4.3686	5.7922	2.4128	0.5738
5	531.4509	3.7079	8.8575	2.8334	1.5549
Average	278.6220	2.8751	4.6437	1.9353	0.6757
Std.dev.	200.9739	1.3400	3.3495	0.6814	0.5217

ผลการทดสอบแรงดึงชิ้นงานต้นแบบในสูตรที่ 4 แสดงให้เห็นว่าค่าความทนต่อแรงดึงและค่ามอดุลัสยืดหยุ่นที่อัตราส่วนผสมระหว่าง Polylactic Acid (PLA) 92 wt% และเส้นใยผักตบชวา 8 wt% มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 4.6437 MPa และ 1.9353 GPa ตามลำดับ

จากการทดสอบแรงดึงของชิ้นงานต้นแบบพบว่าค่า Tensile strength หรือความแข็งแรงของวัสดุ คือค่าความเค้นสูงสุดที่วัสดุสามารถต้านทานได้ก่อนการแตกหัก ซึ่งได้รับอิทธิพลหลักจากการยึดติดระหว่างเฟส (Interfacial adhesion) โดยแรงที่ให้แก่เมทริกซ์ที่พื้นผิวของวัสดุเชิงประกอบ จะถูกส่งไปยังเส้นใยเสริมแรงที่อยู่ใกล้กับพื้นผิววัสดุเชิงประกอบมากที่สุด จากนั้นจะถ่ายโอนความเค้นจากเส้นใยสู่เส้นใย (Fiber to fiber) ผ่านทางเมทริกซ์และรอยต่อ [27] ดังนั้นการยึดติดระหว่างเฟสที่แข็งแรงของเมทริกซ์กับเส้นใย และการถ่ายโอนความเค้นที่ติระหว่างเมทริกซ์และเส้นใย จึงนำไปสู่ค่า Tensile strength ที่สูง

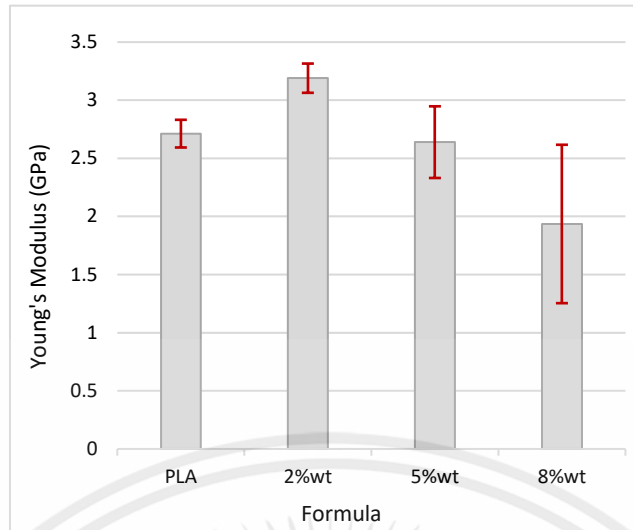


รูปที่ 4.10 กราฟเปรียบเทียบค่าเฉลี่ย Tensile Strength พร้อมแสดง error bar จากค่า SD ของชิ้นงานทั้ง 4 สูตร



รูปที่ 4.11 กราฟเปรียบเทียบค่าเฉลี่ย Elongation at break (%) พร้อมแสดง error bar จากค่า SD

ของชิ้นงานทั้ง 4 สูตร



รูปที่ 4.12 กราฟเปรียบเทียบค่าเฉลี่ย Young's Modulus พร้อมแสดง error bar จากค่า SD ของชิ้นงานทั้ง 4 สูตร

โดยผลการทดสอบพบว่าชิ้นงานต้นแบบในสูตรที่ 2 ที่มีอัตราส่วนผสมระหว่าง Polylactic Acid (PLA) 98 wt% และเส้นใยผักตบชวา 2 wt% แสดงตามรูปที่ 8 มีค่า Tensile strength เฉลี่ยสูงที่สุดอยู่ที่ 14.9935 MPa และเห็นได้ว่าการเพิ่มปริมาณเส้นใยมากขึ้น ส่งผลให้ค่า Tensile strength ต่ำลง ซึ่งอาจเป็นผลเนื่องมาจากการเกาะกลุ่มของเส้นใยในปริมาณที่มากขึ้น ทำให้การยึดติดระหว่างเนื้อเมทริกซ์พอลิเมอร์ (Interfacial adhesion) และเส้นใยลดลง การรับและกระจายแรงจึงเกิดได้ลดลง ส่งผลให้ค่า Tensile strength ลดลงไปด้วย

จากการวิเคราะห์ % Elongation at break ของ PLA และวัสดุเชิงประกอบในอัตราส่วนเส้นใยต่าง ๆ พบว่า PLA บริสุทธิ์มีเปอร์เซ็นต์การดึงยืดที่ดีกว่าวัสดุเชิงประกอบเนื่องจากการเติมเส้นใยลงไปเนื้อพอลิเมอร์จะทำให้วัสดุเมื่อได้รับแรงดึงยืด เส้นใยจะขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่พอลิเมอร์ไปตามทิศของการรับแรง ส่งผลให้ค่า % Elongation at break ของวัสดุเสริมองค์ประกอบมีค่าลดลง ซึ่งบริเวณการเกิดรอยแตกและเริ่มขาดออกจากกัน เกิดขึ้นบริเวณระหว่างรอยต่อผิวเส้นใยและพอลิเมอร์ส่งผลให้มีค่า % Elongation at break ลดลง

และจากการวิเคราะห์ค่า Young's modulus ที่แสดงถึงความสามารถของวัสดุในการทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเมื่อได้รับแรงกระทำ ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 966-2547 ที่กำหนดให้ค่า Young's modulus ไม่น้อยกว่า 2.7 GPa พบว่าชิ้นงานต้นแบบในสูตรที่ 2 ที่อัตราส่วนผสมระหว่าง Polylactic Acid (PLA) 98 wt% และเส้นใยผักตบชวา 2 wt% มีค่า Young's modulus เฉลี่ยสูงที่สุดจากทั้งหมด 4 สูตร โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 3.1896 GPa และเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยมากขึ้น ส่งผลให้ค่า Young's modulus ต่ำลง ซึ่งสอดคล้องกับผลค่า Tensile strength แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มปริมาณเส้นใยที่ 2 wt% ทำให้คุณสมบัติทางกลของชิ้นงานเพิ่มมากขึ้นเมื่อเทียบกับ PLA 100% และเป็นเพียงสูตรเดียวที่มีค่า Young's modulus ที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนด

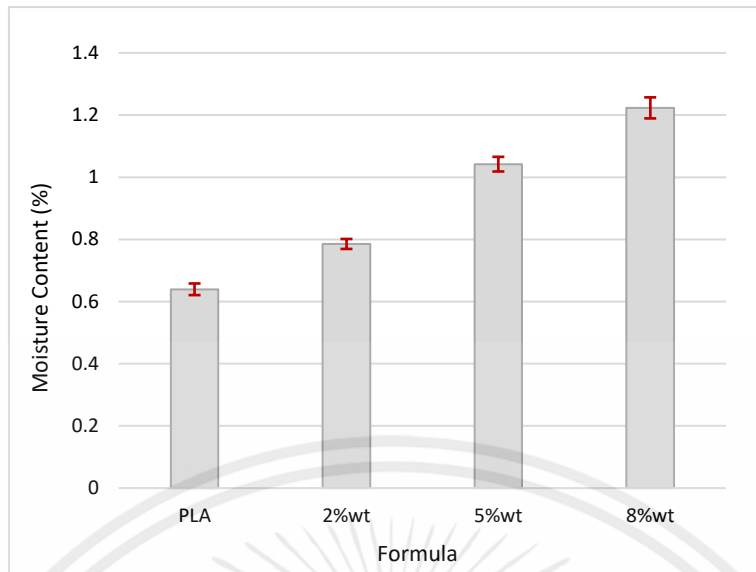
4.3 ผลการทดสอบเชิงกายภาพ

จากการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ คือ การทดสอบความชื้น ที่เป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก.966-2547

โดยผลการทดสอบปริมาณความชื้นของชิ้นงานทั้งหมด 4 สูตร โดยวัดน้ำหนักของชิ้นงานก่อนและหลังอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 103 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง แล้วนำไปคำนวณหาค่าปริมาณความชื้นตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก.966-2547 จากสมการที่ 2.9 ได้ผลแสดงดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ร้อยละค่าปริมาณความชื้นของชิ้นงานทั้ง 4 สูตร

สูตรที่	ชิ้นงาน	น้ำหนักก่อนอบ (g)	น้ำหนักหลังอบ (g)	ค่าปริมาณความชื้น (ร้อยละ)
1	1	9.7412	9.6777	0.6561
	2	10.1143	10.049	0.6498
	3	9.6759	9.6138	0.6459
	4	9.8288	9.7665	0.6379
	5	9.5597	9.5019	0.6083
2	1	10.0521	9.9745	0.7780
	2	9.7317	9.6541	0.8038
	3	9.9812	9.9020	0.7998
	4	9.7261	9.6508	0.7802
	5	9.7976	9.7232	0.7652
3	1	9.7375	9.6353	1.0607
	2	9.6971	9.5959	1.0546
	3	9.1832	9.0867	1.0620
	4	9.7304	9.6322	1.0195
	5	9.4267	9.3321	1.0137
4	1	7.796	7.6988	1.2625
	2	8.6410	8.5339	1.2550
	3	7.6976	7.6064	1.1990
	4	9.0406	8.9323	1.2125
	5	9.2680	9.1593	1.1868



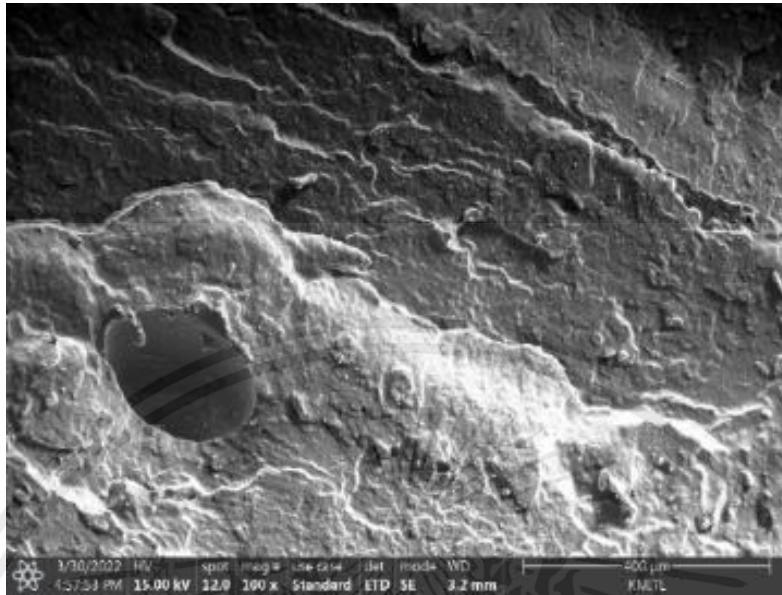
รูปที่ 4.13 กราฟการเปรียบเทียบร้อยละความชื้นของชิ้นงานต้นแบบทั้ง 4 สูตร

จากการทดสอบเพื่อหาค่าปริมาณความชื้นของชิ้นงานต้นแบบ ได้ผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 4.6 สำหรับการทดสอบปริมาณความชื้นของชิ้นงานต้นแบบตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 966-2547 กำหนดให้ค่าปริมาณความชื้นเฉลี่ยที่เหมาะสมควรอยู่ในช่วง ร้อยละ 4 ถึง 13

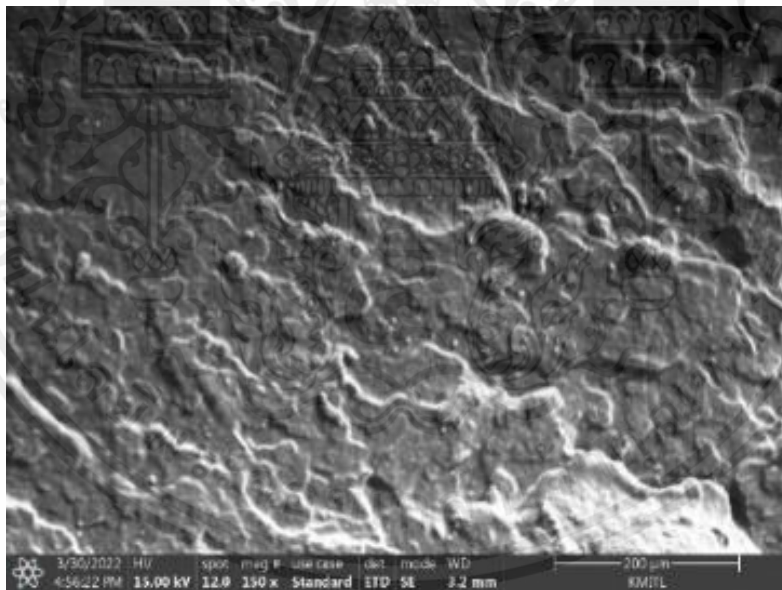
พบว่าเมื่อมีการเพิ่มปริมาณเส้นใยผักตบชวามากขึ้น ส่งผลให้ค่าปริมาณความชื้นของชิ้นงานต้นแบบเพิ่มขึ้นด้วย ดังการแสดงผลแนวโน้มของปริมาณความชื้นที่เพิ่มขึ้นตามรูปที่ 4.13 โดยมีค่าเฉลี่ยร้อยละปริมาณความชื้นที่ใช้เส้นใย 0 wt%, 2 wt%, 5 wt% และ 8 wt% เป็น 0.64, 0.78, 1.04 และ 1.22 ตามลำดับ ซึ่งชิ้นงานต้นแบบทั้ง 4 สูตร มีค่าปริมาณความชื้นที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 966-2547 ทั้งหมด

4.4 ผลการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค SEM

จากการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของชิ้นงานต้นแบบ Polylactic Acid (PLA) กับเส้นใยผักตบชวาที่ผ่านการทดสอบการดัดยัดที่ปริมาณเส้นใย 0, 2, 5 และ 8 wt% พบว่ารูปที่ 4.14 PLA บริสุทธิ์เห็นความสม่ำเสมอเป็นเนื้อเดียวกันของพอลิเมอร์ แต่เมื่อมีการเติมเส้นใยตามปริมาณจะเห็นถึงความขรุขระบนพื้นผิวของชิ้นงานต้นแบบเพิ่มขึ้น รูปที่ 4.15 และ รูปที่ 4.16 ไม่พบรอยแยกระหว่าง PLA และเส้นใยผักตบชวา แสดงถึงความเข้ากันได้ อีกทั้งยังพบเส้นใยที่กระจายตัวอยู่ในชิ้นงานอย่างสม่ำเสมอ รูปที่ 4.17 พบว่ามีการกระจายตัวของเส้นใยค่อนข้างสม่ำเสมอ แต่พบการรวมเป็นกลุ่มของเส้นใยในบางจุด เนื่องจากปริมาณเส้นใยเพิ่มมากขึ้น อย่างไรก็ตามที่ปริมาณเส้นใย 5 wt% มีการกระจายตัวได้ดีกว่าเนื่องจากมีปริมาณเส้นใยที่น้อยกว่า



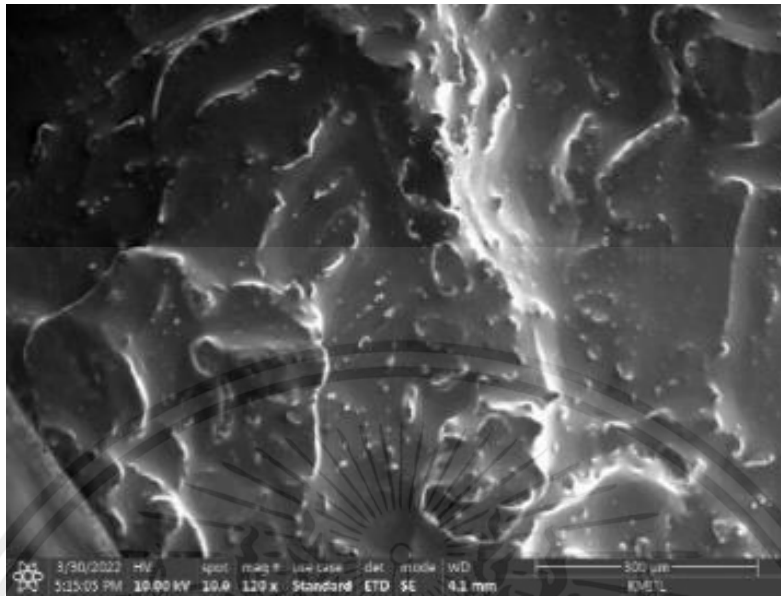
(a)



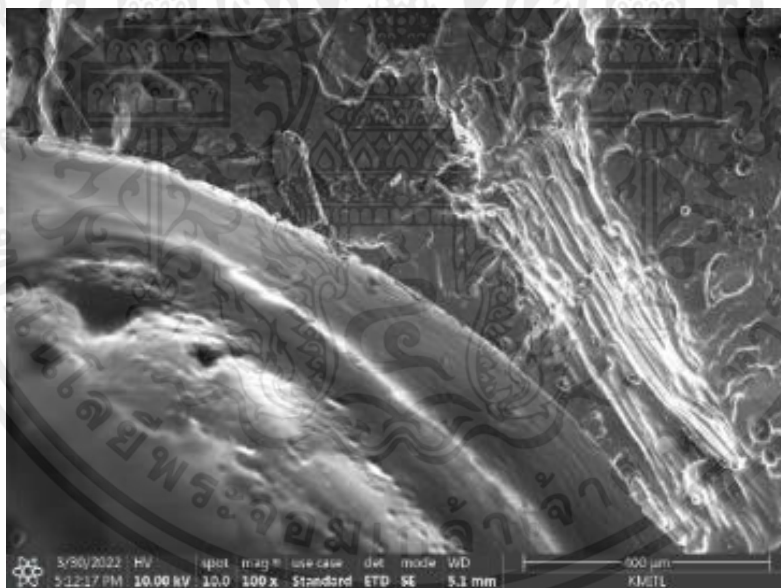
(b)

รูปที่ 4.14 ลักษณะสัณฐานวิทยา PLA 100 wt%

(a) ภาพกำลังขยายที่ 100x (b) ภาพกำลังขยายที่ 350x



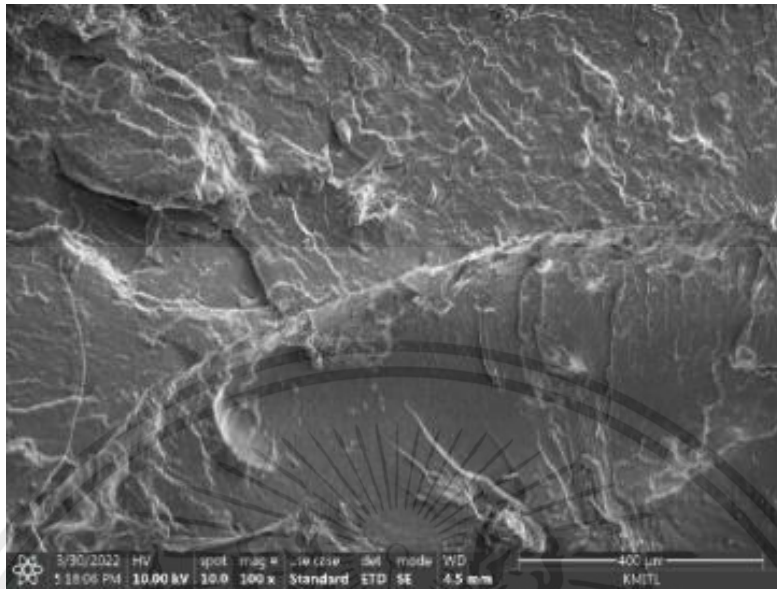
(a)



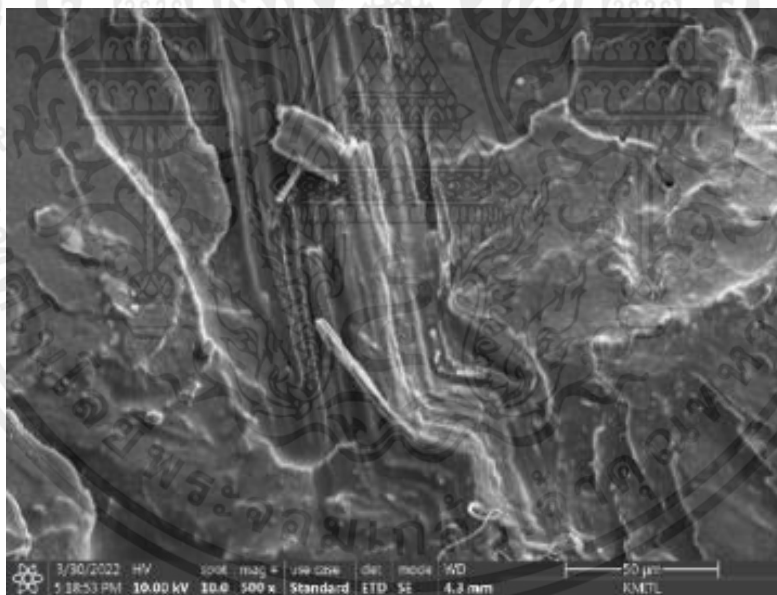
(b)

รูปที่ 4.15 ลักษณะสัณฐานวิทยา PLA 98 wt% และเส้นใยผักตบชวา 2 wt%

(a) ภาพกำลังขยายที่ 120x (b) ภาพกำลังขยายที่ 100x



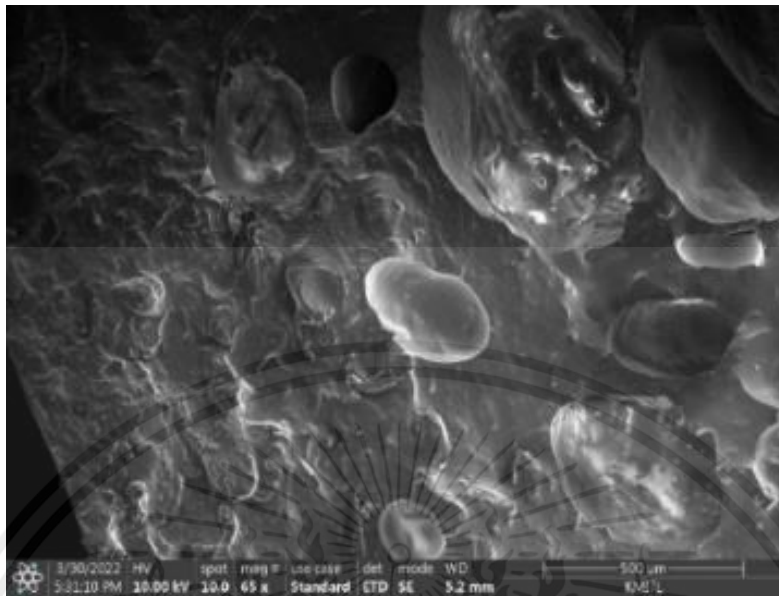
(a)



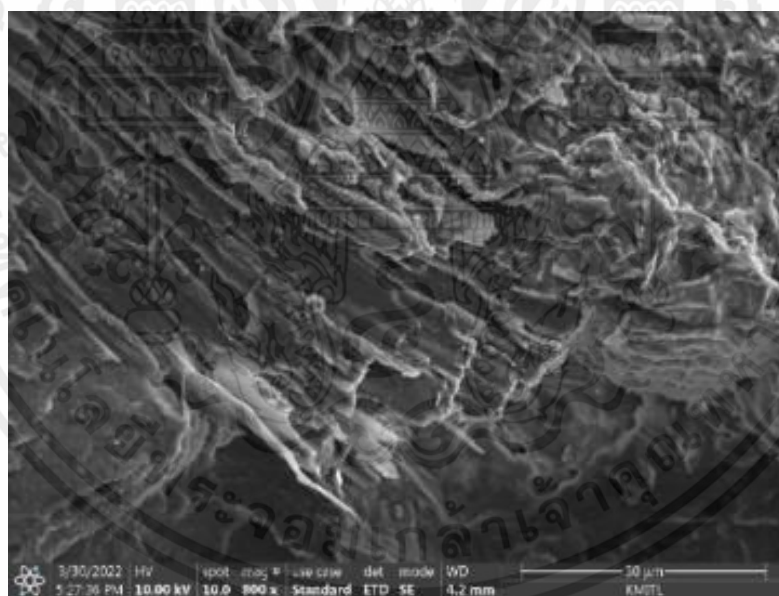
(b)

รูปที่ 4.16 ลักษณะสัณฐานวิทยา PLA 95 wt% และเส้นใยผักตบชวา 5 wt%

(a) ภาพกำลังขยายที่ 100x (b) ภาพกำลังขยายที่ 500x



(a)



(b)

รูปที่ 4.17 ลักษณะสัณฐานวิทยา PLA 92 wt% และเส้นใยฝักตบซาว 8 wt%

(a) ภาพกำลังขยายที่ 65x (b) ภาพกำลังขยายที่ 800x

4.5 อภิปรายผล

จากการศึกษาการพัฒนาแผ่นไม้อัดจากผักตบชวาโดยการอัดขึ้นรูปด้วยความร้อน แสดงให้เห็นว่าการใช้ Polylactic Acid (PLA) ที่มีคุณสมบัติแข็งแต่เปราะเป็นตัวประสาน และเส้นใยผักตบชวาที่มีคุณสมบัติของเส้นใยที่ประกอบไปด้วย เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน มีความเข้ากันได้ค่อนข้างดี สังเกตได้จากการนำไปผสมในเครื่อง Twin – Screw Extruder เป็นผลจากการเกิดพันธะการยึดติดของเส้นใยภายในแผ่นไม้อัดกับตัวประสาน Polylactic Acid (PLA) เมื่อนำไปวิเคราะห์และหาอัตราส่วนที่เหมาะสม พบว่า การขึ้นรูปขึ้นงานในสูตรที่ 1 หรือ ที่ปริมาณ Polylactic Acid (PLA) 100 wt% ได้ค่า Tensile strength สูงสุดอยู่ที่ 18.5802 MPa ซึ่งต่ำกว่าค่าสมบัติของ PLA ที่มีค่า Tensile strength อยู่ที่ 53 MPa อาจเป็นผลมาจากวิธีการขึ้นรูป เนื่องจากในงานวิจัยได้ทำการอัดขึ้นรูป แต่ค่าที่แสดงสมบัติของ PLA เป็นผลมาจากการฉีดขึ้นรูป และที่ปริมาณเส้นใยผักตบชวา 2 wt% เป็นเพียงอัตราส่วนเดียวที่ให้ผลการทดสอบที่เหมาะสม เนื่องจากเส้นใยมีการกระจายตัวอยู่ภายในเนื้อพลาสติกอย่างสม่ำเสมอ มีการยึดติดระหว่างเฟสที่ดี ทำให้สามารถถ่ายโอนความเค้นจากเส้นใยสู่เส้นใยผ่านทางเมทริกซ์ และรอยต่อได้ ดังนั้นการถ่ายโอนความเค้นที่ระหว่างเมทริกซ์และเส้นใย จึงนำไปสู่ค่า Tensile strength ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความแข็งแรงที่มากขึ้น

โดยในงานวิจัยนี้ยังมีอีกหลายปัจจัยที่ต้องทำการควบคุมเพิ่มเติม ทั้งในเรื่องของการคัดขนาดของเส้นใยผักตบชวา การควบคุมปริมาณความชื้นก่อนการอัดขึ้นรูป รวมถึงพารามิเตอร์ที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปที่อาจต้องศึกษาเพื่อหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสม

บทที่ 5

สรุปผลการดำเนินงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

ในบทนี้จะกล่าวถึงการสรุป และอภิปรายผลของการดำเนินงาน การวิเคราะห์ผลการทดลอง รวมไปถึงข้อเสนอแนะของงานวิจัยนี้ โดยประกอบด้วยสรุปผลดังนี้

1. สรุปผลการดำเนินงาน
2. ข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการดำเนินงาน

จากการศึกษาส่วนผสมที่เหมาะสมระหว่างผักตบชวาและตัวประสานจากพลาสติกชีวภาพ หรือ Polylactic Acid (PLA) ที่ส่งผลต่อคุณสมบัติของวัสดุเชิงประกอบ ซึ่งการเลือกใช้ผักตบชวาเป็นวัสดุหลัก เนื่องจากคุณสมบัติของเส้นใย และลิกนินในผักตบชวานั้นสามารถเสริมแรงในการทำวัสดุเชิงประกอบได้ และเลือกใช้ตัวประสานจากพลาสติกชีวภาพ เนื่องจาก Polylactic Acid (PLA) เป็นพลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ ไม่เป็นอันตราย และไม่ส่งผลเสียต่อสิ่งแวดล้อม

เมื่อทำการขึ้นรูปและทำการทดสอบคุณสมบัติทางกล และทางกายภาพ แล้วนำมาวิเคราะห์ผลการทดสอบ พบว่าค่า Tensile strength และ ค่า Young's modulus มีการเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางเดียวกัน โดยเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยจะทำให้ค่า Tensile strength และ ค่า Young's modulus เพิ่มขึ้น โดยปริมาณเส้นใยที่ทำให้ค่าการทดสอบสูงสุด อยู่ที่การใช้ปริมาณเส้นใยที่ 2 wt% แต่หากเพิ่มปริมาณเส้นใยไปที่ 5 wt% และ 8 wt% จะทำให้ค่า Tensile strength และ ค่า Young's modulus นั้นลดลง นอกจากนี้ปริมาณเส้นใยที่เพิ่มขึ้นยังส่งผลให้ปริมาณความชื้นของชิ้นงานเพิ่มขึ้นด้วย

ดังนั้น อัตราส่วนที่ปริมาณเส้นใยผักตบชวาเท่ากับ 2%wt เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดในการขึ้นรูปไม้อัด โดยมีค่า Tensile strength เฉลี่ยเท่ากับ 14.9935 Mpa, ค่า Young's modulus เฉลี่ยเท่ากับ 3.1896 Gpa และค่าปริมาณความชื้นเฉลี่ยเท่ากับ 0.78% ซึ่งเป็นเพียงสูตรเดียวที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก.966-2547

5.2 ข้อเสนอแนะ

การดำเนินการครั้งนี้มีข้อจำกัดเรื่องของเวลา ซึ่งหากมีการพัฒนาในครั้งต่อไปควรแก้ไขปรับปรุงปัญหาเหล่านี้เพื่อให้งานมีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น ได้แก่

1. การศึกษาครั้งนี้ไม่ได้มีการเลือกใช้ขนาดของเส้นใยผักตบชวา ดังนั้นควรมีการศึกษาเส้นใยที่ขนาดต่างๆ เนื่องจากขนาดของเส้นใยอาจส่งผลกระทบต่อความแข็งแรงและการยึดเกาะกันระหว่างเส้นใยและวัสดุตัวประสาน

2. ก่อนการขึ้นรูปด้วยเครื่อง Molding Machine ควรทำการอบวัสดุเชิงประกอบทุกครั้งเป็นเวลา 2 ชั่วโมงเพื่อลดความชื้น ซึ่งอาจก่อให้เกิดปัญหาฟองอากาศภายในชิ้นงาน

3. การศึกษาครั้งนี้ไม่ได้มีการทดสอบระยะเวลาย่อยสลายของวัสดุเชิงประกอบ ดังนั้นควรมีการทดสอบระยะเวลาการย่อยสลายของวัสดุเชิงประกอบเพื่อเป็นข้อมูลยืนยันว่าวัสดุเชิงประกอบดังกล่าวย่อยสลายได้จริงและสามารถนำวัสดุเชิงประกอบนี้ไปใช้เป็นวัสดุทดแทนได้จริง



เอกสารอ้างอิง

- [1] บริษัทลูทซ์ รอยัล (ประเทศไทย) จำกัด. “สาเหตุและผลกระทบ จากมลพิษทางน้ำ”. [Online]. สืบค้นจาก : https://lux.co.th/cpt_blog/cause-and-impact-of-water-pollution/
- [2] ัญญาภัก. 2561. ผลกระทบของมลพิษทางน้ำ. [Online]. สืบค้นจาก : <http://www.rmuti.ac.th/user/thanyaphak/>
- [3] สารระนำรู้จากสิงห์อาสา. 2562. “ความน่ากลัวของผักตบชวา”. [Online]. สืบค้นจาก : <https://www.singha-r-sa.org/>
- [4] นพพล เกตุประสาท. “ผักตบชวา”. [Online]. สืบค้นจาก : <http://clgc.agri.kps.ku.ac.th/resources/weed/eichornia.html>
- [5] Seub Nakhasathien Foundation, Forest Situation in Thailand (2016-2017), Nonthaburi: Seub Nakhasathien Foundation, 2017. (In Thai)
- [6] สำนักงานสิ่งแวดล้อมภาคที่ 5. 2554. คู่มือการจัดการผักตบชวา. [Online]. สืบค้นจาก: <http://lib.mnre.go.th/book/paktob.pdf>
- [7] ศูนย์ปฏิบัติการวิจัยเรือนปลูกพืชและทดลองมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 2562. ผักตบชวา. [Online]. สืบค้นจาก:<http://clgc.agri.kps.ku.ac.th/resources/weed/eichornia.html>
- [8] กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. 2562. ผักตบชวา. [Online]. สืบค้นจาก: <https://www.mhesi.go.th/main/th/492-library/genius-of-king/>
- [9] ดำรงค์ ก้องเกียรติไกร และ สาธิต. การพัฒนาผลิตภัณฑ์จากเส้นใยผักตบชวา. [Online]. สืบค้นจาก :<https://sites.google.com/a/thaitextile.org/textile-transformation-service/senyi-phak-tb-chwa>
- [10] พรศิริ นิธิเศรษฐ์. 2562. การศึกษาสมบัติแผ่นฉนวนกันความร้อนที่ผลิตจากผักตบชวา. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- [11] ธนวิ ลี้จากภัย. พลาสติกย่อยสลายได้เพื่อสิ่งแวดล้อม. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 2549.
- [12] Nature Work. Biopolymer 2003D Technical Data Sheet. [Online]. สืบค้นจาก : https://www.natureworksllc.com/~media/Files/NatureWorks/Technical-Documents/Technical-Data-Sheets/TechnicalDataSheet_2003D_FFP-FSW_pdf.pdf?la=en
- [13] PTI WISSEN TEAMS. 2562. กระบวนการผลิต : การหลอมอัดรีด (EXTRUSION). [Online]. สืบค้นจาก : <https://ptiwissen.com/กระบวนการผลิต-การหลอมอ-2/>

- [14] เมเซอร์ วัน. 2562. เตอบลมร้อน. [Online].สืบค้นจาก:<https://www.measure1shop.com/product/เครื่องมือห้องแลป-lab/ตู้อบลมร้อน-oven/oven-แบบมีพัดลม/memmert-uf110-ตู้อบลมร้อน-ตู้อบแห้ง-oven/>
- [15] รศ.ชูชาติ อารีจิตรานุสรณ์. 2562. หลักการทำงานของเตอบลมร้อน. [Online].สืบค้นจาก:<https://home.kku.ac.th/chuare/12/hotairoven.pdf>
- [16] Nguyen S., Perez C., Desimone M., Pastor J., Tomba J., Carella J., “Adhesion control for injection overmolding of elastomeric propylene copolymers on polypropylene. Effects of block and random microstructures.” International Journal of Adhesion and Adhesives 46 (2013): 44-55.
- [17] เครื่องอัดขึ้นรูป. [Online].สืบค้นจาก:<http://www.chareontut.com/Default>.
- [18] J. S. TESTING SERVICE LIMITED PARTNERSHIP. 2562. เครื่องทดสอบแรงดึง. [Online]. สืบค้นจาก:<https://www.jstesting.com/15709907/universal-testing-machine>
- [19] ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 2562. หลักการทำงานของเครื่องทดสอบแรงดึง. [Online].สืบค้นจาก:<http://mic.eng.ku.ac.th/facilities-detail>.
- [20] John Cornley, “Design of Experiments: useful statistical tool in assay development or vendor disconnect”, Drug Discovery World, Winter2009/2010.
- [21] นที ฐานมั่น, 2556. การพัฒนาภาชนะย่อยสลายได้ทางชีวภาพจากต้นมันสำปะหลัง. วิทยานิพนธ์ สาขาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- [22] ความหมายของมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.). [ออนไลน์]. สืบค้นจาก : http://ait.nsrut.ac.th/alumni_ait/News/infor_20160615161857.pdf
- [23] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. การทดสอบคุณสมบัติแผ่นไม้อัดความหนาแน่นปานกลางตามมอก.มาตรา 966-254. [Online]. สืบค้นจาก : <http://research.rid.go.th/vijais/moa/fulltext/TIS966-2547.pdf>
- [24] กนกวรรณ โพธิ์ทอง. กล้อง SEM วิทยาศาสตร์น่ารู้กับครูแจจ. [Online]. สืบค้นจาก: <https://kanokwan09.wordpress.com/nano/sem/>
- [25] ดนัย กิจชัยนุกูล. 2547. เรื่องน่ารู้ของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด. โครงการฟิสิกส์และวิศวกรรม, ฟิสิกส์ราชชมงคล.
- [26] ดลฤดี โตเย็น. การเตรียมตัวอย่างทางวัสดุศาสตร์สำหรับการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด. [Online]. สืบค้นจาก: http://www3.rdi.ku.ac.th/cl/knowledge/2563/material_prep.pdf
- [27] ณัฐณี โล่ห์พัฒนานนท์, พอลิเมอร์เชิงประกอบ, คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์,2552



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Typical Material & Application Properties ⁽¹⁾		
Physical Properties	Ingeo 2003D	ASTM Method
Specific Gravity	1.24	D792
MFR, g/10 min (210°C, 2.16kg)	6	D1238
Clarity	Transparent	
Mechanical Properties		
Tensile Strength @ Break, psi (MPa)	7,700 (53)	D882
Tensile Yield Strength, psi (MPa)	8,700 (60)	D882
Tensile Modulus, kpsi (GPa)	500 (3.5)	D882
Tensile Elongation, %	6.0	D882
Notched Izod Impact, ft-lb/in (J/m)	0.3 (16)	D256
Shrinkage is similar to PET ⁽²⁾		
Heat Distortion Temperature (°C)	55	E2092

(1) Typical properties; not to be construed as specifications.

(2) Refer to Ingeo biopolymer Sheet Extrusion Processing Guide

รูปที่ ๗1 ตารางคุณสมบัติ Polylactic Acid (PLA) เกรด 2003D

ตารางที่ ผ1 ค่าผลการทดสอบชิ้นงานในสูตรที่ 1

1_1			1_2			1_3			1_4			1_5		
Time	Force	Stroke	Time	Force	Stroke	Time	Force	Stroke	Time	Force	Stroke	Time	Force	Stroke
(sec)	(N)	(mm)	(sec)	(N)	(mm)	(sec)	(N)	(mm)	(sec)	(N)	(mm)	(sec)	(N)	(mm)
0	14.03491	0	0	4.355113	0	0	0.842412	0	0	1.923243	0	0	2.845128	0
0.01	14.03491	0	0.01	4.355113	0	0.01	0.842412	0	0.01	1.923243	0	0.01	2.845128	0
0.02	14.03491	2.08E-05	0.02	4.355113	2.08E-05	0.02	0.842412	2.08E-05	0.02	1.923243	2.08E-05	0.02	2.845128	2.08E-05
0.03	14.03491	8.33E-05	0.03	4.355113	0.000104	0.03	0.842412	8.33E-05	0.03	1.923243	0.000104	0.03	2.845128	8.33E-05
0.04	14.03491	0.00025	0.04	4.355113	0.00025	0.04	0.842412	0.00025	0.04	1.923243	0.00025	0.04	2.845128	0.00025
0.05	14.03491	0.000521	0.05	4.355113	0.000542	0.05	0.842412	0.0005	0.05	1.923243	0.000521	0.05	2.845128	0.000521
0.06	14.01901	0.000833	0.06	4.355113	0.000875	0.06	0.842412	0.000833	0.06	1.923243	0.000854	0.06	2.845128	0.000854
0.07	13.98722	0.001167	0.07	4.355113	0.001188	0.07	0.842412	0.001167	0.07	1.923243	0.001188	0.07	2.845128	0.001146
0.08	14.03491	0.0015	0.08	4.355113	0.001521	0.08	0.842412	0.001438	0.08	1.923243	0.001479	0.08	2.845128	0.001438
0.09	14.03491	0.001854	0.09	4.355113	0.001833	0.09	0.842412	0.001729	0.09	1.923243	0.00175	0.09	2.845128	0.001729
0.1	14.03491	0.002188	0.1	4.355113	0.002104	0.1	0.842412	0.002042	0.1	1.923243	0.002063	0.1	2.845128	0.002063
0.11	14.03491	0.002521	0.11	4.402796	0.002396	0.11	0.842412	0.002396	0.11	1.923243	0.002396	0.11	2.845128	0.002417
0.12	14.03491	0.002854	0.12	4.402796	0.002708	0.12	0.842412	0.00275	0.12	1.923243	0.002729	0.12	2.845128	0.00275
0.13	14.00312	0.003188	0.13	4.402796	0.003042	0.13	0.842412	0.003083	0.13	1.923243	0.003083	0.13	2.845128	0.003104
0.14	13.98722	0.003521	0.14	4.402796	0.003396	0.14	0.842412	0.003438	0.14	1.923243	0.003438	0.14	2.845128	0.003458
0.15	14.00312	0.003854	0.15	4.402796	0.00375	0.15	0.842412	0.003792	0.15	1.923243	0.003792	0.15	2.845128	0.003792
0.16	14.03491	0.004188	0.16	4.402796	0.004104	0.16	0.890096	0.004146	0.16	1.923243	0.004146	0.16	2.845128	0.004146
0.17	14.03491	0.004521	0.17	4.402796	0.004458	0.17	0.890096	0.004458	0.17	1.923243	0.004479	0.17	2.845128	0.004479
0.18	14.03491	0.004792	0.18	4.402796	0.00475	0.18	0.890096	0.004771	0.18	1.923243	0.004771	0.18	2.876918	0.004771
0.19	14.03491	0.005063	0.19	4.402796	0.005042	0.19	0.890096	0.005042	0.19	1.923243	0.005063	0.19	2.892812	0.005063
0.2	14.03491	0.005292	0.2	4.402796	0.005333	0.2	0.890096	0.005354	0.2	1.907349	0.005354	0.2	2.892812	0.005354
0.21	14.03491	0.005563	0.21	4.402796	0.005667	0.21	0.890096	0.005688	0.21	1.891454	0.005667	0.21	2.892812	0.005688
0.22	14.03491	0.005854	0.22	4.402796	0.006021	0.22	0.890096	0.006021	0.22	1.891454	0.006021	0.22	2.892812	0.006042
0.23	14.03491	0.006208	0.23	4.402796	0.006375	0.23	0.890096	0.006396	0.23	1.891454	0.006396	0.23	2.892812	0.006396

0.24	14.03491	0.006563	0.24	4.402796	0.006729	0.24	0.890096	0.00675	0.24	1.891454	0.00675	0.24	2.892812	0.00675
0.25	14.03491	0.006958	0.25	4.402796	0.007104	0.25	0.890096	0.007104	0.25	1.923243	0.007104	0.25	2.924601	0.007125
0.26	14.03491	0.007333	0.26	4.402796	0.007458	0.26	0.890096	0.007458	0.26	1.923243	0.007479	0.26	2.924601	0.007479
0.27	14.03491	0.007708	0.27	4.402796	0.007813	0.27	0.890096	0.007813	0.27	1.923243	0.007833	0.27	2.924601	0.007833
0.28	14.03491	0.008083	0.28	4.402796	0.008167	0.28	0.905991	0.008167	0.28	1.923243	0.008167	0.28	3.687541	0.008167
0.29	14.03491	0.008438	0.29	4.402796	0.008521	0.29	0.921885	0.008521	0.29	1.923243	0.008521	0.29	9.775162	0.008521
0.3	14.03491	0.008792	0.3	4.402796	0.008854	0.3	5.547205	0.008854	0.3	1.923243	0.008875	0.3	10.37916	0.008854
0.31	14.03491	0.009146	0.31	8.55128	0.009208	0.31	8.51949	0.009208	0.31	6.930033	0.009208	0.31	10.42684	0.009208
0.32	14.03491	0.0095	0.32	11.7143	0.009542	0.32	8.710225	0.009542	0.32	8.535385	0.009542	0.32	10.99904	0.009542
0.33	14.03491	0.009854	0.33	11.80967	0.009896	0.33	9.330113	0.009875	0.33	9.187062	0.009896	0.33	10.554	0.009875
0.34	14.03491	0.010188	0.34	13.36734	0.010229	0.34	9.393692	0.010229	0.34	9.695689	0.010229	0.34	11.50767	0.010229
0.35	14.03491	0.010542	0.35	13.65344	0.010563	0.35	10.58578	0.010563	0.35	10.07716	0.010563	0.35	12.57261	0.010563
0.36	16.32372	0.010875	0.36	13.87596	0.010917	0.36	11.31694	0.010896	0.36	9.950002	0.010917	0.36	13.36734	0.010917
0.37	20.24969	0.011229	0.37	13.89186	0.01125	0.37	11.4123	0.01125	0.37	10.63347	0.01125	0.37	13.84417	0.01125
0.38	21.47357	0.011563	0.38	15.529	0.011583	0.38	12.06398	0.011583	0.38	10.85599	0.011583	0.38	14.38459	0.011583
0.39	21.23515	0.011917	0.39	16.08531	0.011917	0.39	12.74745	0.011917	0.39	11.7143	0.011917	0.39	15.43363	0.011917
0.4	22.60208	0.01225	0.4	16.62572	0.01225	0.4	13.30376	0.01225	0.4	12.49313	0.01225	0.4	15.83099	0.01225
0.41	22.72924	0.012583	0.41	17.32508	0.012583	0.41	14.28922	0.012583	0.41	13.7647	0.012583	0.41	16.22836	0.012583
0.42	22.50671	0.012917	0.42	17.24561	0.012917	0.42	14.6548	0.012917	0.42	14.36869	0.012917	0.42	16.21246	0.012917
0.43	23.25376	0.01325	0.43	17.61119	0.01325	0.43	14.17796	0.01325	0.43	13.74881	0.01325	0.43	17.26151	0.01325
0.44	24.42996	0.013583	0.44	18.27876	0.013583	0.44	14.71837	0.013583	0.44	14.13027	0.013583	0.44	17.59529	0.013583
0.45	24.98627	0.013917	0.45	18.02444	0.013917	0.45	15.37005	0.013917	0.45	14.24154	0.013917	0.45	17.37277	0.013917
0.46	24.65248	0.01425	0.46	18.27876	0.01425	0.46	15.60847	0.01425	0.46	13.74881	0.014271	0.46	18.53307	0.01425
0.47	25.177	0.014583	0.47	19.58211	0.014583	0.47	16.53036	0.014583	0.47	14.46406	0.014583	0.47	19.64569	0.014583
0.48	26.11478	0.014917	0.48	20.29737	0.014917	0.48	17.16614	0.014917	0.48	15.00448	0.014917	0.48	20.09074	0.014917
0.49	26.08299	0.01525	0.49	21.17157	0.01525	0.49	17.59529	0.01525	0.49	16.00583	0.01525	0.49	19.74106	0.01525
0.5	26.67109	0.015583	0.5	20.56758	0.015583	0.5	18.19929	0.015583	0.5	17.18203	0.015583	0.5	18.89865	0.015583

0.51	27.27509	0.015917	0.51	20.31326	0.015917	0.51	18.89865	0.015917	0.51	17.94497	0.015917	0.51	19.43906	0.015917
0.52	27.37045	0.01625	0.52	21.23515	0.01625	0.52	18.94633	0.01625	0.52	17.65887	0.01625	0.52	20.69473	0.01625
0.53	28.26055	0.016583	0.53	21.88683	0.016583	0.53	19.00991	0.016583	0.53	17.64297	0.016583	0.53	21.88683	0.016583
0.54	29.00759	0.016917	0.54	22.12524	0.016917	0.54	19.55032	0.016917	0.54	18.46949	0.016917	0.54	22.33187	0.016917
0.55	29.11886	0.01725	0.55	22.88818	0.01725	0.55	20.58347	0.01725	0.55	18.1675	0.01725	0.55	22.33187	0.01725
0.56	29.69106	0.017583	0.56	22.77692	0.017583	0.56	20.96494	0.017583	0.56	18.81917	0.017583	0.56	23.34913	0.017583
0.57	30.04074	0.017917	0.57	23.69881	0.017917	0.57	21.13978	0.017917	0.57	19.39138	0.017917	0.57	24.19154	0.017917
0.58	29.59569	0.018229	0.58	24.44585	0.01825	0.58	21.3623	0.01825	0.58	19.28012	0.01825	0.58	23.44449	0.01825
0.59	30.02485	0.018563	0.59	24.74785	0.018583	0.59	21.98219	0.018563	0.59	20.05895	0.018583	0.59	23.81007	0.018563
0.6	30.34274	0.018896	0.6	25.44721	0.018917	0.6	22.96766	0.018896	0.6	21.44178	0.018896	0.6	24.57301	0.018896
0.61	29.99306	0.019229	0.61	25.36774	0.01925	0.61	23.11071	0.019229	0.61	20.53579	0.019229	0.61	25.11342	0.019229
0.62	31.10568	0.019563	0.62	25.60616	0.019563	0.62	23.30144	0.019563	0.62	20.55168	0.019563	0.62	25.84457	0.019563
0.63	31.59841	0.019896	0.63	27.05256	0.019896	0.63	24.0008	0.019896	0.63	21.50536	0.019896	0.63	26.52804	0.019896
0.64	32.86998	0.020229	0.64	26.70288	0.020229	0.64	25.1929	0.020229	0.64	22.34777	0.020229	0.64	27.35456	0.020229
0.65	33.98259	0.020563	0.65	27.10024	0.020563	0.65	25.01806	0.020563	0.65	22.82461	0.020563	0.65	27.27509	0.020563
0.66	33.48986	0.020896	0.66	27.08435	0.020896	0.66	25.65384	0.020896	0.66	23.09481	0.020896	0.66	28.16518	0.020896
0.67	34.12564	0.021229	0.67	27.70424	0.021229	0.67	25.27237	0.021229	0.67	22.93587	0.021229	0.67	28.22876	0.021229
0.68	34.60248	0.021563	0.68	28.14929	0.021563	0.68	25.28826	0.021563	0.68	24.20743	0.021563	0.68	28.46718	0.021563
0.69	35.03164	0.021896	0.69	28.76917	0.021896	0.69	25.41542	0.021896	0.69	24.82732	0.021896	0.69	29.40496	0.021896
0.7	35.98531	0.022229	0.7	29.37317	0.022229	0.7	26.48036	0.022229	0.7	24.76374	0.022229	0.7	29.43675	0.022229
0.71	35.731	0.022563	0.71	29.94537	0.022563	0.71	26.6552	0.022563	0.71	24.82732	0.022563	0.71	29.46854	0.022563
0.72	36.52573	0.022896	0.72	30.34274	0.022896	0.72	27.21151	0.022896	0.72	25.39953	0.022896	0.72	30.12021	0.022896
0.73	36.78004	0.023229	0.73	30.54937	0.023229	0.73	28.46718	0.023229	0.73	25.25648	0.023229	0.73	30.88315	0.023229
0.74	36.85951	0.023563	0.74	30.21558	0.023563	0.74	28.92812	0.023563	0.74	25.55847	0.023563	0.74	30.70831	0.023563
0.75	37.1774	0.023896	0.75	30.86726	0.023896	0.75	29.24601	0.023896	0.75	26.95719	0.023896	0.75	30.83547	0.023896
0.76	37.1933	0.024229	0.76	31.42357	0.024229	0.76	29.89769	0.024229	0.76	27.67245	0.024229	0.76	31.40767	0.024229
0.77	37.7655	0.024563	0.77	32.01167	0.024563	0.77	30.77189	0.024563	0.77	27.8314	0.024563	0.77	32.86998	0.024563

0.78	38.68739	0.024896	0.78	32.64745	0.024896	0.78	30.99442	0.024896	0.78	28.27644	0.024896	0.78	33.47397	0.024896
0.79	38.70328	0.025229	0.79	32.90176	0.025229	0.79	31.6143	0.025229	0.79	28.92812	0.025229	0.79	34.04617	0.025229
0.8	39.11654	0.025563	0.8	33.6806	0.025563	0.8	31.9163	0.025563	0.8	29.10296	0.025563	0.8	34.28459	0.025563
0.81	39.57748	0.025896	0.81	34.14154	0.025896	0.81	31.85272	0.025896	0.81	29.40496	0.025896	0.81	34.5548	0.025896
0.82	40.00664	0.026229	0.82	33.48986	0.026229	0.82	31.55072	0.026229	0.82	29.02349	0.026229	0.82	35.04753	0.026229
0.83	39.86359	0.026563	0.83	34.03028	0.026563	0.83	32.23419	0.026542	0.83	29.34138	0.026563	0.83	34.8568	0.026563
0.84	40.84905	0.026875	0.84	34.76143	0.026896	0.84	32.7905	0.026875	0.84	30.19969	0.026896	0.84	34.69785	0.026896
0.85	41.21463	0.027208	0.85	35.81047	0.027229	0.85	33.06071	0.027208	0.85	30.66063	0.027229	0.85	35.36542	0.027229
0.86	41.62788	0.027542	0.86	36.58931	0.027542	0.86	34.12564	0.027542	0.86	30.454	0.027542	0.86	36.19194	0.027542
0.87	42.18419	0.027875	0.87	36.27141	0.027875	0.87	34.72964	0.027875	0.87	30.72421	0.027875	0.87	36.82772	0.027875
0.88	42.05704	0.028208	0.88	36.12836	0.028208	0.88	35.04753	0.028208	0.88	31.16926	0.028208	0.88	37.55887	0.028208
0.89	43.23323	0.028542	0.89	36.9072	0.028542	0.89	34.95216	0.028542	0.89	31.82093	0.028542	0.89	37.52708	0.028542
0.9	43.83723	0.028875	0.9	37.11383	0.028896	0.9	34.82501	0.028875	0.9	32.37724	0.028896	0.9	38.19466	0.028896
0.91	44.42533	0.029208	0.91	37.90855	0.029229	0.91	35.36542	0.029229	0.91	32.86998	0.029229	0.91	38.89402	0.029229
0.92	44.48891	0.029563	0.92	38.6556	0.029563	0.92	35.76279	0.029563	0.92	32.5044	0.029563	0.92	38.51255	0.029563
0.93	44.02797	0.029896	0.93	39.38675	0.029896	0.93	36.20784	0.029896	0.93	33.44218	0.029896	0.93	39.60927	0.029896
0.94	45.04522	0.030229	0.94	39.46622	0.030229	0.94	37.00256	0.030229	0.94	34.79322	0.030229	0.94	39.75232	0.030229
0.95	46.12605	0.030563	0.95	39.99074	0.030563	0.95	37.74961	0.030563	0.95	34.44354	0.030563	0.95	39.97485	0.030563
0.96	45.72868	0.030896	0.96	39.25959	0.030896	0.96	38.33771	0.030896	0.96	34.39585	0.030896	0.96	40.07022	0.030896

ตารางที่ ๒2 ค่าผลการทดสอบชิ้นงานในสูตรที่ 2

2_1			2_2			2_3			2_4			2_5		
Time	Force	Stroke	Time	Force	Stroke	Time	Force	Stroke	Time	Force	Stroke	Time	Force	Stroke
(sec)	(N)	(mm)	(sec)	(N)	(mm)	(sec)	(N)	(mm)	(sec)	(N)	(mm)	(sec)	(N)	(mm)
0	9.997685	0	0	1.160304	0	0	4.482269	0	0	3.989538	0	0	4.514059	0
0.01	9.997685	0	0.01	1.160304	0	0.01	4.482269	0	0.01	3.989538	0	0.01	4.514059	0
0.02	9.997685	2.08E-05	0.02	1.160304	2.08E-05	0.02	4.482269	2.08E-05	0.02	3.989538	2.08E-05	0.02	4.514059	2.08E-05
0.03	9.997685	8.33E-05	0.03	1.160304	8.33E-05	0.03	4.482269	8.33E-05	0.03	3.989538	8.33E-05	0.03	4.514059	8.33E-05
0.04	9.997685	0.00025	0.04	1.160304	0.000229	0.04	4.482269	0.000208	0.04	3.989538	0.000208	0.04	4.514059	0.000208
0.05	10.01358	0.000479	0.05	1.160304	0.000438	0.05	4.482269	0.000438	0.05	4.037221	0.000438	0.05	4.514059	0.000438
0.06	10.02948	0.000771	0.06	1.160304	0.000729	0.06	4.482269	0.000729	0.06	4.037221	0.000729	0.06	4.561742	0.000729
0.07	10.02948	0.001042	0.07	1.160304	0.001042	0.07	4.514059	0.001063	0.07	4.037221	0.001042	0.07	4.561742	0.001063
0.08	10.02948	0.001354	0.08	1.160304	0.001396	0.08	4.514059	0.001396	0.08	4.037221	0.001375	0.08	4.561742	0.001396
0.09	10.02948	0.001708	0.09	1.160304	0.00175	0.09	4.514059	0.00175	0.09	4.037221	0.001729	0.09	4.561742	0.00175
0.1	10.02948	0.002063	0.1	1.160304	0.002083	0.1	4.514059	0.002083	0.1	4.037221	0.002083	0.1	4.561742	0.002104
0.11	10.02948	0.002417	0.11	1.160304	0.002438	0.11	4.514059	0.002438	0.11	4.037221	0.002438	0.11	4.561742	0.002458
0.12	10.04537	0.002771	0.12	1.160304	0.002792	0.12	4.514059	0.002792	0.12	4.037221	0.002771	0.12	4.561742	0.002792
0.13	10.07716	0.003104	0.13	1.160304	0.003125	0.13	4.514059	0.003125	0.13	4.037221	0.003125	0.13	4.577637	0.003146
0.14	10.07716	0.003458	0.14	1.160304	0.003479	0.14	4.514059	0.003479	0.14	4.037221	0.003479	0.14	4.593531	0.003479
0.15	10.07716	0.003813	0.15	1.160304	0.003833	0.15	4.514059	0.003813	0.15	4.037221	0.003813	0.15	4.593531	0.003833
0.16	10.07716	0.004146	0.16	1.192093	0.004167	0.16	4.514059	0.004167	0.16	4.037221	0.004167	0.16	4.593531	0.004167
0.17	10.07716	0.004479	0.17	1.207987	0.004479	0.17	4.514059	0.0045	0.17	4.06901	0.004479	0.17	4.593531	0.0045
0.18	10.07716	0.004771	0.18	1.207987	0.004771	0.18	4.514059	0.004792	0.18	4.06901	0.004771	0.18	4.593531	0.004792
0.19	10.07716	0.005063	0.19	1.207987	0.005063	0.19	4.514059	0.005063	0.19	4.06901	0.005063	0.19	4.593531	0.005063
0.2	10.07716	0.005354	0.2	1.207987	0.005354	0.2	4.514059	0.005375	0.2	4.06901	0.005354	0.2	4.609426	0.005375
0.21	10.07716	0.005667	0.21	1.207987	0.005688	0.21	4.529953	0.005708	0.21	4.06901	0.005688	0.21	4.641215	0.005708
0.22	10.07716	0.006	0.22	1.207987	0.006042	0.22	4.561742	0.006042	0.22	4.06901	0.006021	0.22	4.641215	0.006063
0.23	10.07716	0.006375	0.23	1.207987	0.006396	0.23	4.561742	0.006417	0.23	4.06901	0.006396	0.23	4.641215	0.006417
0.24	10.07716	0.006729	0.24	1.207987	0.00675	0.24	4.561742	0.006771	0.24	4.06901	0.00675	0.24	4.641215	0.006771

0.25	10.10895	0.007104	0.25	1.207987	0.007125	0.25	4.561742	0.007125	0.25	4.06901	0.007104	0.25	4.641215	0.007125
0.26	10.10895	0.007458	0.26	1.239777	0.007479	0.26	4.561742	0.007479	0.26	4.084905	0.007479	0.26	4.641215	0.007479
0.27	10.10895	0.007813	0.27	1.239777	0.007833	0.27	4.561742	0.007813	0.27	4.116694	0.007833	0.27	4.641215	0.007833
0.28	10.10895	0.008167	0.28	1.239777	0.008188	0.28	4.561742	0.008167	0.28	8.217494	0.008167	0.28	5.499522	0.008167
0.29	12.71566	0.008521	0.29	3.751119	0.008521	0.29	5.324682	0.008521	0.29	11.06262	0.008521	0.29	11.84146	0.008521
0.3	17.80192	0.008854	0.3	8.408229	0.008875	0.3	11.4282	0.008854	0.3	11.66662	0.008875	0.3	12.8905	0.008854
0.31	17.42045	0.009208	0.31	8.424123	0.009208	0.31	12.04809	0.009208	0.31	10.8242	0.009208	0.31	13.43091	0.009208
0.32	17.67476	0.009542	0.32	9.743373	0.009542	0.32	12.38187	0.009542	0.32	11.84146	0.009542	0.32	13.95543	0.009542
0.33	18.89865	0.009875	0.33	10.554	0.009896	0.33	13.38323	0.009875	0.33	13.14481	0.009896	0.33	14.00312	0.009875
0.34	19.47085	0.010229	0.34	10.68115	0.010229	0.34	13.58986	0.010229	0.34	14.0508	0.010229	0.34	14.52764	0.010229
0.35	20.24969	0.010563	0.35	10.93547	0.010583	0.35	14.16206	0.010563	0.35	14.13027	0.010583	0.35	14.84553	0.010563
0.36	21.33051	0.010917	0.36	11.36462	0.010917	0.36	14.73427	0.010896	0.36	14.84553	0.010917	0.36	14.98858	0.010896
0.37	20.71063	0.01125	0.37	11.82556	0.01125	0.37	14.86142	0.011229	0.37	15.29058	0.01125	0.37	16.73698	0.01125
0.38	20.80599	0.011583	0.38	12.09577	0.011583	0.38	15.19521	0.011583	0.38	15.91047	0.011583	0.38	17.73834	0.011583
0.39	21.88683	0.011917	0.39	12.57261	0.011917	0.39	15.56079	0.011917	0.39	16.6893	0.011917	0.39	17.02309	0.011917
0.4	22.85639	0.01225	0.4	13.28786	0.01225	0.4	16.18067	0.01225	0.4	16.70519	0.01225	0.4	16.95951	0.01225
0.41	22.47492	0.012583	0.41	14.00312	0.012583	0.41	16.48267	0.012583	0.41	16.60983	0.012583	0.41	17.5794	0.012583
0.42	22.96766	0.012917	0.42	14.32101	0.012917	0.42	17.18203	0.012917	0.42	17.5794	0.012917	0.42	17.70655	0.012917
0.43	23.53986	0.01325	0.43	14.3528	0.01325	0.43	17.38866	0.01325	0.43	18.24697	0.01325	0.43	18.75559	0.01325
0.44	24.39817	0.013583	0.44	15.19521	0.013604	0.44	17.77013	0.013583	0.44	18.89865	0.013583	0.44	19.93179	0.013583
0.45	24.17564	0.013917	0.45	15.48131	0.013938	0.45	17.96087	0.013917	0.45	19.23243	0.013917	0.45	20.42452	0.013917
0.46	25.12932	0.01425	0.46	15.62436	0.014271	0.46	19.23243	0.01425	0.46	20.15432	0.01425	0.46	20.67884	0.01425
0.47	25.43131	0.014583	0.47	16.46678	0.014604	0.47	19.74106	0.014583	0.47	20.39274	0.014583	0.47	20.17021	0.014583
0.48	25.73331	0.014917	0.48	16.89593	0.014938	0.48	20.32916	0.014917	0.48	20.36095	0.014917	0.48	21.52125	0.014917
0.49	26.98898	0.01525	0.49	16.91183	0.015271	0.49	20.23379	0.01525	0.49	20.504	0.01525	0.49	22.47492	0.01525
0.5	26.84593	0.015583	0.5	17.24561	0.015583	0.5	21.15568	0.015583	0.5	21.01262	0.015583	0.5	22.8405	0.015583
0.51	27.49761	0.015917	0.51	17.70655	0.015917	0.51	21.40999	0.015917	0.51	22.2524	0.015917	0.51	22.93587	0.015917
0.52	28.7056	0.01625	0.52	18.26286	0.01625	0.52	22.39545	0.01625	0.52	22.99944	0.01625	0.52	23.96902	0.01625
0.53	29.24601	0.016583	0.53	19.58211	0.016583	0.53	22.22061	0.016583	0.53	23.61933	0.016583	0.53	24.14385	0.016583

0.54	29.40496	0.016917	0.54	19.83643	0.016917	0.54	22.80871	0.016917	0.54	23.65112	0.016917	0.54	24.17564	0.016917
0.55	29.07117	0.01725	0.55	20.23379	0.01725	0.55	22.31598	0.01725	0.55	24.17564	0.01725	0.55	24.74785	0.01725
0.56	29.45264	0.017583	0.56	21.06031	0.017583	0.56	22.95176	0.017583	0.56	24.3187	0.017583	0.56	25.52668	0.017583
0.57	30.32684	0.017917	0.57	20.75831	0.017917	0.57	23.88954	0.017917	0.57	24.77964	0.017917	0.57	26.13068	0.017917
0.58	30.91494	0.01825	0.58	21.47357	0.01825	0.58	25.03395	0.01825	0.58	26.01941	0.01825	0.58	26.28962	0.01825
0.59	31.08978	0.018583	0.59	21.80735	0.018583	0.59	25.24058	0.018563	0.59	26.54394	0.018563	0.59	26.59162	0.018583
0.6	31.6143	0.018917	0.6	22.12524	0.018917	0.6	25.43131	0.018896	0.6	27.00488	0.018896	0.6	27.70424	0.018917
0.61	32.28188	0.019229	0.61	22.61798	0.01925	0.61	25.36774	0.019229	0.61	27.5135	0.019229	0.61	28.65791	0.01925
0.62	33.04482	0.019563	0.62	22.45903	0.019563	0.62	26.98898	0.019563	0.62	26.57572	0.019563	0.62	28.53076	0.019563
0.63	33.28323	0.019896	0.63	22.71334	0.019896	0.63	26.9413	0.019896	0.63	26.90951	0.019896	0.63	28.34002	0.019896
0.64	33.58523	0.020229	0.64	22.91997	0.020229	0.64	26.62341	0.020229	0.64	28.61023	0.020229	0.64	29.02349	0.020229
0.65	33.6806	0.020563	0.65	23.36502	0.020563	0.65	27.44993	0.020563	0.65	29.65927	0.020563	0.65	30.12021	0.020563
0.66	34.03028	0.020896	0.66	24.39817	0.020896	0.66	27.73603	0.020896	0.66	29.81822	0.020896	0.66	30.37453	0.020896
0.67	34.12564	0.021229	0.67	24.52532	0.021229	0.67	27.95855	0.021229	0.67	30.24737	0.021229	0.67	30.50168	0.021229
0.68	34.36406	0.021563	0.68	23.98491	0.021563	0.68	28.88044	0.021563	0.68	30.66063	0.021563	0.68	30.66063	0.021563
0.69	36.27141	0.021896	0.69	24.36638	0.021896	0.69	28.76917	0.021896	0.69	30.91494	0.021896	0.69	31.85272	0.021896
0.7	36.9072	0.022229	0.7	25.68563	0.022229	0.7	29.81822	0.022229	0.7	31.78914	0.022229	0.7	33.06071	0.022229
0.71	37.24098	0.022563	0.71	25.49489	0.022563	0.71	29.80232	0.022563	0.71	32.44082	0.022563	0.71	32.44082	0.022563
0.72	37.16151	0.022896	0.72	26.17836	0.022896	0.72	29.43675	0.022896	0.72	32.8064	0.022896	0.72	32.48851	0.022896
0.73	37.20919	0.023229	0.73	26.6393	0.023229	0.73	30.21558	0.023229	0.73	32.96534	0.023229	0.73	32.82229	0.023229
0.74	37.4953	0.023563	0.74	26.55983	0.023563	0.74	30.66063	0.023563	0.74	32.96534	0.023563	0.74	33.74417	0.023563
0.75	38.63971	0.023896	0.75	27.57708	0.023896	0.75	31.16926	0.023896	0.75	33.91902	0.023896	0.75	34.37996	0.023896
0.76	39.32317	0.024229	0.76	27.62477	0.024229	0.76	31.45536	0.024229	0.76	34.30049	0.024229	0.76	35.20648	0.024229
0.77	39.21191	0.024563	0.77	27.21151	0.024563	0.77	31.51894	0.024563	0.77	34.45943	0.024563	0.77	35.09521	0.024563
0.78	39.18012	0.024896	0.78	27.60887	0.024896	0.78	32.83818	0.024896	0.78	35.23827	0.024896	0.78	35.30185	0.024896
0.79	39.49801	0.025229	0.79	28.83275	0.025229	0.79	33.47397	0.025229	0.79	35.36542	0.025229	0.79	36.33499	0.025229
0.8	40.65831	0.025563	0.8	28.81686	0.025563	0.8	33.93491	0.025563	0.8	35.25416	0.025563	0.8	36.49394	0.025563
0.81	41.18283	0.025896	0.81	28.57844	0.025896	0.81	33.64881	0.025896	0.81	36.36678	0.025896	0.81	37.86087	0.025896
0.82	41.85041	0.026229	0.82	29.15064	0.026229	0.82	34.36406	0.026229	0.82	37.43172	0.026229	0.82	37.35225	0.026229

0.83	42.05704	0.026563	0.83	29.19833	0.026563	0.83	34.10975	0.026563	0.83	37.39993	0.026563	0.83	37.35225	0.026563
0.84	42.23188	0.026896	0.84	29.5639	0.026896	0.84	34.50711	0.026875	0.84	38.0675	0.026896	0.84	38.21055	0.026896
0.85	41.81862	0.027208	0.85	30.39042	0.027229	0.85	36.03299	0.027208	0.85	37.90855	0.027208	0.85	38.05161	0.027229
0.86	42.72461	0.027542	0.86	31.05799	0.027542	0.86	36.87541	0.027542	0.86	38.75097	0.027542	0.86	39.10065	0.027563
0.87	43.53523	0.027875	0.87	31.83683	0.027896	0.87	36.98667	0.027875	0.87	39.76822	0.027875	0.87	39.97485	0.027896
0.88	43.83723	0.028208	0.88	32.25009	0.028208	0.88	37.97213	0.028208	0.88	39.92717	0.028208	0.88	40.45169	0.028229
0.89	44.31407	0.028542	0.89	31.96399	0.028563	0.89	37.51119	0.028542	0.89	40.56295	0.028542	0.89	41.10336	0.028563
0.9	44.93396	0.028875	0.9	31.99577	0.028896	0.9	38.3695	0.028875	0.9	40.54705	0.028875	0.9	41.42125	0.028896
0.91	46.63467	0.029208	0.91	32.94945	0.029229	0.91	38.67149	0.029229	0.91	40.76958	0.029229	0.91	42.56566	0.029229
0.92	46.80951	0.029542	0.92	33.71239	0.029563	0.92	38.3695	0.029563	0.92	40.91263	0.029563	0.92	42.37493	0.029563
0.93	46.90488	0.029896	0.93	33.64881	0.029896	0.93	38.9576	0.029896	0.93	42.02525	0.029896	0.93	42.18419	0.029896
0.94	47.15919	0.030229	0.94	34.50711	0.030229	0.94	39.29138	0.030229	0.94	43.0584	0.030229	0.94	43.31271	0.030229
0.95	46.96846	0.030563	0.95	34.37996	0.030563	0.95	40.4199	0.030563	0.95	43.37629	0.030563	0.95	44.02797	0.030563
0.96	47.50888	0.030896	0.96	34.23691	0.030896	0.96	40.49937	0.030896	0.96	43.77365	0.030896	0.96	44.32996	0.030896



ตารางที่ ผ3 ค่าผลการทดสอบชิ้นงานในสูตรที่ 3

3_1			3_2			3_3			3_4			3_5		
Time	Force	Stroke	Time	Force	Stroke	Time	Force	Stroke	Time	Force	Stroke	Time	Force	Stroke
(sec)	(N)	(mm)	(sec)	(N)	(mm)	(sec)	(N)	(mm)	(sec)	(N)	(mm)	(sec)	(N)	(mm)
0	3.369649	0	0	1.11262	0	0	2.209346	0	0	1.796087	0	0	-2.74976	0
0.01	3.369649	0	0.01	1.11262	0	0.01	2.209346	0	0.01	1.796087	0	0.01	-2.74976	0
0.02	3.369649	2.08E-05	0.02	1.11262	2.08E-05	0.02	2.209346	2.08E-05	0.02	1.796087	2.08E-05	0.02	-2.78155	2.08E-05
0.03	3.385544	8.33E-05	0.03	1.11262	8.33E-05	0.03	2.209346	8.33E-05	0.03	1.796087	8.33E-05	0.03	-2.79745	8.33E-05
0.04	3.417333	0.000208	0.04	1.11262	0.000208	0.04	2.209346	0.000208	0.04	1.796087	0.000208	0.04	-2.79745	0.000208
0.05	3.417333	0.000438	0.05	1.11262	0.000438	0.05	2.209346	0.000438	0.05	1.796087	0.000438	0.05	-2.79745	0.000417
0.06	3.417333	0.000729	0.06	1.11262	0.000729	0.06	2.209346	0.000708	0.06	1.796087	0.000729	0.06	-2.79745	0.000708
0.07	3.417333	0.001063	0.07	1.11262	0.001063	0.07	2.257029	0.001042	0.07	1.796087	0.001063	0.07	-2.79745	0.001042
0.08	3.417333	0.001396	0.08	1.11262	0.001396	0.08	2.257029	0.001375	0.08	1.796087	0.001396	0.08	-2.79745	0.001375
0.09	3.417333	0.00175	0.09	1.11262	0.00175	0.09	2.257029	0.001729	0.09	1.796087	0.00175	0.09	-2.79745	0.001729
0.1	3.417333	0.002104	0.1	1.11262	0.002104	0.1	2.257029	0.002083	0.1	1.796087	0.002083	0.1	-2.79745	0.002083
0.11	3.417333	0.002438	0.11	1.11262	0.002438	0.11	2.257029	0.002438	0.11	1.827876	0.002438	0.11	-2.79745	0.002438
0.12	3.417333	0.002792	0.12	1.11262	0.002792	0.12	2.257029	0.002792	0.12	1.827876	0.002792	0.12	-2.79745	0.002792
0.13	3.417333	0.003146	0.13	1.11262	0.003146	0.13	2.257029	0.003125	0.13	1.827876	0.003125	0.13	-2.79745	0.003146
0.14	3.417333	0.003479	0.14	1.11262	0.003479	0.14	2.257029	0.003479	0.14	1.827876	0.003479	0.14	-2.79745	0.003479
0.15	3.417333	0.003833	0.15	1.128515	0.003833	0.15	2.257029	0.003813	0.15	1.827876	0.003833	0.15	-2.79745	0.003833
0.16	3.417333	0.004167	0.16	1.160304	0.004167	0.16	2.257029	0.004167	0.16	1.827876	0.004167	0.16	-2.82923	0.004167
0.17	3.417333	0.0045	0.17	1.160304	0.0045	0.17	2.257029	0.0045	0.17	1.827876	0.0045	0.17	-2.82923	0.0045
0.18	3.417333	0.004792	0.18	1.160304	0.004771	0.18	2.257029	0.004792	0.18	1.827876	0.004792	0.18	-2.82923	0.004792
0.19	3.417333	0.005063	0.19	1.160304	0.005063	0.19	2.257029	0.005063	0.19	1.827876	0.005063	0.19	-2.82923	0.005063
0.2	3.417333	0.005375	0.2	1.160304	0.005375	0.2	2.257029	0.005354	0.2	1.827876	0.005375	0.2	-2.82923	0.005375
0.21	3.417333	0.005708	0.21	1.160304	0.005688	0.21	2.257029	0.005688	0.21	1.827876	0.005688	0.21	-2.82923	0.005688
0.22	3.417333	0.006063	0.22	1.160304	0.006042	0.22	2.257029	0.006021	0.22	1.827876	0.006042	0.22	-2.82923	0.006042
0.23	3.417333	0.006417	0.23	1.160304	0.006396	0.23	2.272924	0.006396	0.23	1.827876	0.006396	0.23	-2.82923	0.006396
0.24	3.417333	0.006771	0.24	1.160304	0.006771	0.24	2.288818	0.00675	0.24	1.827876	0.006771	0.24	-2.82923	0.00675

0.25	3.417333	0.007125	0.25	1.160304	0.007125	0.25	2.288818	0.007125	0.25	1.827876	0.007125	0.25	-2.82923	0.007125
0.26	3.433228	0.007479	0.26	1.160304	0.007479	0.26	2.288818	0.007479	0.26	1.827876	0.007479	0.26	-2.82923	0.007458
0.27	3.449122	0.007833	0.27	1.160304	0.007833	0.27	2.288818	0.007833	0.27	1.875559	0.007833	0.27	-2.82923	0.007813
0.28	9.791057	0.008167	0.28	1.160304	0.008167	0.28	2.288818	0.008167	0.28	1.875559	0.008167	0.28	-2.82923	0.008167
0.29	10.60168	0.008521	0.29	7.104874	0.008521	0.29	2.288818	0.008521	0.29	1.875559	0.008521	0.29	-2.82923	0.0085
0.3	11.65072	0.008854	0.3	7.375082	0.008854	0.3	2.288818	0.008854	0.3	4.45048	0.008854	0.3	-2.82923	0.008854
0.31	11.96861	0.009208	0.31	7.979075	0.009208	0.31	2.288818	0.009208	0.31	9.139379	0.009208	0.31	-2.82923	0.009188
0.32	11.85735	0.009542	0.32	9.123485	0.009542	0.32	8.646647	0.009542	0.32	9.711583	0.009542	0.32	-2.82923	0.009542
0.33	12.74745	0.009875	0.33	9.568532	0.009875	0.33	9.695689	0.009896	0.33	9.632111	0.009896	0.33	-2.82923	0.009875
0.34	13.1766	0.010229	0.34	10.06126	0.010229	0.34	10.14074	0.010229	0.34	9.409587	0.010229	0.34	2.765656	0.010229
0.35	14.47995	0.010563	0.35	10.01358	0.010563	0.35	10.42684	0.010583	0.35	10.06126	0.010563	0.35	4.148483	0.010563
0.36	15.83099	0.010896	0.36	11.34872	0.010917	0.36	10.37916	0.010917	0.36	10.60168	0.010917	0.36	4.545847	0.010896
0.37	15.227	0.01125	0.37	12.65208	0.01125	0.37	10.14074	0.01125	0.37	11.25336	0.01125	0.37	5.102158	0.011229
0.38	15.43363	0.011583	0.38	13.27197	0.011583	0.38	10.91957	0.011583	0.38	11.57125	0.011583	0.38	6.437302	0.011583
0.39	15.86278	0.011917	0.39	12.46134	0.011917	0.39	11.88914	0.011917	0.39	11.58714	0.011917	0.39	6.532669	0.011917
0.4	16.75288	0.01225	0.4	13.14481	0.01225	0.4	12.81102	0.01225	0.4	12.0163	0.01225	0.4	6.739298	0.01225
0.41	18.24697	0.012583	0.41	13.33555	0.012583	0.41	13.1766	0.012583	0.41	12.95408	0.012583	0.41	6.945928	0.012583
0.42	17.78603	0.012917	0.42	14.32101	0.012917	0.42	13.51039	0.012917	0.42	13.63754	0.012917	0.42	6.230672	0.012917
0.43	18.02444	0.01325	0.43	14.86142	0.01325	0.43	13.27197	0.01325	0.43	13.65344	0.01325	0.43	6.564458	0.01325
0.44	18.97812	0.013583	0.44	15.33826	0.013583	0.44	14.20975	0.013583	0.44	13.14481	0.013583	0.44	8.265178	0.013583
0.45	20.12253	0.013917	0.45	15.227	0.013917	0.45	14.86142	0.013917	0.45	13.30376	0.013917	0.45	8.662541	0.013917
0.46	19.83643	0.01425	0.46	16.24425	0.01425	0.46	14.76606	0.01425	0.46	14.47995	0.01425	0.46	8.630753	0.01425
0.47	19.29601	0.014583	0.47	16.60983	0.014583	0.47	15.44952	0.014583	0.47	14.78195	0.014583	0.47	8.789699	0.014583
0.48	20.61526	0.014917	0.48	17.45224	0.014917	0.48	16.1012	0.014917	0.48	15.06805	0.014917	0.48	8.821487	0.014917
0.49	21.26694	0.01525	0.49	18.08802	0.01525	0.49	16.3873	0.01525	0.49	16.05352	0.01525	0.49	9.632111	0.01525
0.5	21.87093	0.015583	0.5	17.94497	0.015583	0.5	16.9754	0.015583	0.5	16.1012	0.015583	0.5	9.393692	0.015583
0.51	22.23651	0.015917	0.51	18.32644	0.015917	0.51	17.73834	0.015917	0.51	16.80056	0.015917	0.51	9.854634	0.015917
0.52	22.50671	0.01625	0.52	18.26286	0.01625	0.52	17.69066	0.01625	0.52	17.02309	0.01625	0.52	10.80831	0.01625
0.53	23.7147	0.016583	0.53	18.75559	0.016583	0.53	18.64433	0.016583	0.53	17.2774	0.016583	0.53	11.18978	0.016583

0.54	23.92133	0.016917	0.54	19.39138	0.016917	0.54	18.83507	0.016917	0.54	17.96087	0.016917	0.54	11.1262	0.016917
0.55	23.87365	0.01725	0.55	20.09074	0.01725	0.55	17.8655	0.01725	0.55	18.93044	0.01725	0.55	12.04809	0.01725
0.56	25.01806	0.017583	0.56	20.53579	0.017583	0.56	18.10392	0.017583	0.56	19.12117	0.017583	0.56	12.14345	0.017583
0.57	26.0512	0.017917	0.57	21.25104	0.017917	0.57	18.81917	0.017917	0.57	18.80328	0.017917	0.57	12.74745	0.017917
0.58	26.67109	0.01825	0.58	20.83778	0.01825	0.58	19.39138	0.01825	0.58	18.77149	0.01825	0.58	13.44681	0.01825
0.59	27.13203	0.018583	0.59	21.58483	0.018583	0.59	19.21654	0.018583	0.59	19.53443	0.018583	0.59	13.35144	0.018583
0.6	26.86183	0.018917	0.6	21.83914	0.018896	0.6	19.88411	0.018917	0.6	19.85232	0.018896	0.6	13.60575	0.018896
0.61	27.06846	0.01925	0.61	21.93451	0.019229	0.61	20.42452	0.019229	0.61	19.69337	0.019229	0.61	13.43091	0.019229
0.62	27.8155	0.019563	0.62	23.07892	0.019563	0.62	21.31462	0.019563	0.62	20.15432	0.019563	0.62	13.55807	0.019563
0.63	28.1016	0.019896	0.63	23.52397	0.019896	0.63	22.09345	0.019896	0.63	20.72652	0.019896	0.63	14.70248	0.019896
0.64	29.35728	0.020229	0.64	23.09481	0.020229	0.64	22.57029	0.020229	0.64	21.6643	0.020229	0.64	14.86142	0.020229
0.65	29.35728	0.020563	0.65	23.33323	0.020563	0.65	22.18882	0.020563	0.65	22.63387	0.020563	0.65	14.57532	0.020563
0.66	29.69106	0.020896	0.66	23.26965	0.020896	0.66	22.76103	0.020896	0.66	22.74513	0.020896	0.66	14.75016	0.020896
0.67	30.58116	0.021229	0.67	24.68427	0.021229	0.67	22.96766	0.021229	0.67	23.1266	0.021229	0.67	15.62436	0.021229
0.68	31.64609	0.021563	0.68	25.12932	0.021563	0.68	22.64977	0.021563	0.68	22.68155	0.021563	0.68	15.84689	0.021563
0.69	30.80368	0.021896	0.69	25.63795	0.021896	0.69	23.76238	0.021896	0.69	22.74513	0.021896	0.69	16.9754	0.021896
0.7	31.53483	0.022229	0.7	26.27373	0.022229	0.7	24.41406	0.022229	0.7	24.0008	0.022229	0.7	17.91318	0.022229
0.71	31.48715	0.022563	0.71	27.65656	0.022563	0.71	24.36638	0.022563	0.71	24.8909	0.022563	0.71	17.43635	0.022563
0.72	31.45536	0.022896	0.72	27.13203	0.022896	0.72	25.03395	0.022896	0.72	24.47764	0.022896	0.72	17.30919	0.022896
0.73	32.17061	0.023229	0.73	26.71877	0.023229	0.73	25.03395	0.023229	0.73	24.36638	0.023229	0.73	18.1516	0.023229
0.74	33.69649	0.023563	0.74	27.8155	0.023563	0.74	25.01806	0.023563	0.74	25.12932	0.023563	0.74	18.32644	0.023563
0.75	34.57069	0.023896	0.75	28.32413	0.023896	0.75	25.38363	0.023896	0.75	25.93994	0.023896	0.75	18.04034	0.023896
0.76	34.58659	0.024229	0.76	27.89497	0.024229	0.76	25.09753	0.024229	0.76	26.16247	0.024229	0.76	18.34234	0.024229
0.77	34.5548	0.024563	0.77	28.54665	0.024563	0.77	25.7651	0.024563	0.77	25.62205	0.024563	0.77	19.00991	0.024563
0.78	35.20648	0.024896	0.78	29.05528	0.024896	0.78	27.35456	0.024896	0.78	26.40088	0.024896	0.78	19.21654	0.024896
0.79	34.99985	0.025229	0.79	29.91358	0.025229	0.79	27.8155	0.025229	0.79	27.44993	0.025229	0.79	19.12117	0.025229
0.8	35.82637	0.025563	0.8	30.93084	0.025563	0.8	27.8314	0.025563	0.8	28.59434	0.025563	0.8	19.42317	0.025563
0.81	36.81183	0.025896	0.81	30.53347	0.025896	0.81	28.05392	0.025896	0.81	28.72149	0.025896	0.81	19.66158	0.025896
0.82	36.97078	0.026229	0.82	30.7401	0.026208	0.82	28.29234	0.026229	0.82	28.76917	0.026208	0.82	20.69473	0.026229

0.83	37.67014	0.026563	0.83	31.01031	0.026542	0.83	28.53076	0.026563	0.83	28.19697	0.026542	0.83	20.13842	0.026563
0.84	37.89266	0.026896	0.84	31.90041	0.026875	0.84	29.16654	0.026896	0.84	28.78507	0.026875	0.84	20.07484	0.026896
0.85	38.3536	0.027208	0.85	32.94945	0.027208	0.85	29.46854	0.027229	0.85	30.08842	0.027208	0.85	21.18746	0.027229
0.86	38.92581	0.027542	0.86	32.47261	0.027542	0.86	30.32684	0.027542	0.86	29.99306	0.027542	0.86	21.6802	0.027563
0.87	39.33907	0.027875	0.87	32.86998	0.027875	0.87	29.96127	0.027875	0.87	30.21558	0.027875	0.87	22.02988	0.027896
0.88	39.70464	0.028229	0.88	33.18787	0.028208	0.88	29.80232	0.028229	0.88	30.29505	0.028208	0.88	22.66566	0.028208
0.89	39.46622	0.028563	0.89	34.31638	0.028542	0.89	30.58116	0.028563	0.89	31.16926	0.028542	0.89	23.26965	0.028542
0.9	40.76958	0.028896	0.9	33.9667	0.028875	0.9	31.47125	0.028875	0.9	31.64609	0.028896	0.9	23.79417	0.028875
0.91	42.00935	0.029229	0.91	34.36406	0.029208	0.91	31.85272	0.029229	0.91	32.07524	0.029229	0.91	24.06438	0.029229
0.92	41.19873	0.029563	0.92	35.22237	0.029563	0.92	31.43946	0.029563	0.92	32.58387	0.029563	0.92	23.47628	0.029563
0.93	42.32724	0.029896	0.93	35.92173	0.029896	0.93	32.2024	0.029896	0.93	32.37724	0.029896	0.93	22.52261	0.029896
0.94	43.07429	0.030229	0.94	36.3032	0.030229	0.94	32.91766	0.030229	0.94	33.04482	0.030229	0.94	23.81007	0.030229
0.95	43.02661	0.030563	0.95	36.68467	0.030563	0.95	32.86998	0.030563	0.95	33.63292	0.030563	0.95	25.11342	0.030563
0.96	43.42397	0.030896	0.96	37.25688	0.030896	0.96	32.48851	0.030896	0.96	33.56934	0.030896	0.96	24.93858	0.030896



ตารางที่ ๗4 ค่าผลการทดสอบชิ้นงานในสูตรที่ 4

4_1			4_2			4_3			4_4			4_5		
Time	Force	Stroke	Time	Force	Stroke	Time	Force	Stroke	Time	Force	Stroke	Time	Force	Stroke
(sec)	(N)	(mm)	(sec)	(N)	(mm)	(sec)	(N)	(mm)	(sec)	(N)	(mm)	(sec)	(N)	(mm)
0	0.317891	0	0	0.317891	0	0	0.508626	0	0	0.715256	0	0	1.970927	0
0.01	0.317891	0	0.01	0.317891	0	0.01	0.508626	0	0.01	0.715256	0	0.01	1.970927	0
0.02	0.317891	2.08E-05	0.02	0.317891	2.08E-05	0.02	0.508626	2.08E-05	0.02	0.715256	2.08E-05	0.02	1.970927	2.08E-05
0.03	0.317891	8.33E-05	0.03	0.317891	8.33E-05	0.03	0.524521	8.33E-05	0.03	0.715256	8.33E-05	0.03	1.970927	8.33E-05
0.04	0.317891	0.00025	0.04	0.317891	0.000229	0.04	0.540416	0.000208	0.04	0.715256	0.000208	0.04	1.970927	0.000208
0.05	0.317891	0.000521	0.05	0.317891	0.0005	0.05	0.540416	0.000438	0.05	0.715256	0.000438	0.05	1.970927	0.000438
0.06	0.317891	0.000854	0.06	0.317891	0.000833	0.06	0.540416	0.000729	0.06	0.715256	0.00075	0.06	1.970927	0.000729
0.07	0.317891	0.001188	0.07	0.333786	0.001167	0.07	0.540416	0.001063	0.07	0.715256	0.001083	0.07	1.970927	0.001042
0.08	0.317891	0.001521	0.08	0.365575	0.0015	0.08	0.540416	0.001396	0.08	0.715256	0.001417	0.08	1.986821	0.001396
0.09	0.317891	0.001833	0.09	0.365575	0.001833	0.09	0.540416	0.00175	0.09	0.715256	0.00175	0.09	2.002716	0.00175
0.1	0.317891	0.002188	0.1	0.365575	0.002167	0.1	0.540416	0.002104	0.1	0.715256	0.002104	0.1	2.002716	0.002083
0.11	0.317891	0.002521	0.11	0.365575	0.002521	0.11	0.540416	0.002438	0.11	0.715256	0.002458	0.11	2.002716	0.002438
0.12	0.317891	0.002854	0.12	0.365575	0.002854	0.12	0.540416	0.002792	0.12	0.715256	0.002792	0.12	2.002716	0.002792
0.13	0.317891	0.003188	0.13	0.317891	0.003188	0.13	0.540416	0.003146	0.13	0.715256	0.003146	0.13	2.002716	0.003146
0.14	0.317891	0.003521	0.14	0.317891	0.003521	0.14	0.540416	0.003479	0.14	0.715256	0.0035	0.14	2.002716	0.003479
0.15	0.317891	0.003854	0.15	0.317891	0.003854	0.15	0.540416	0.003833	0.15	0.715256	0.003833	0.15	2.002716	0.003833
0.16	0.317891	0.004188	0.16	0.317891	0.004188	0.16	0.540416	0.004167	0.16	0.715256	0.004167	0.16	2.018611	0.004167
0.17	0.317891	0.004521	0.17	0.317891	0.004521	0.17	0.540416	0.0045	0.17	0.715256	0.0045	0.17	2.0504	0.0045
0.18	0.317891	0.004813	0.18	0.317891	0.004813	0.18	0.540416	0.004792	0.18	0.715256	0.004792	0.18	2.0504	0.004792
0.19	0.317891	0.005083	0.19	0.317891	0.005104	0.19	0.540416	0.005063	0.19	0.715256	0.005083	0.19	2.0504	0.005063
0.2	0.317891	0.005375	0.2	0.317891	0.005396	0.2	0.540416	0.005375	0.2	0.715256	0.005375	0.2	2.0504	0.005375
0.21	0.317891	0.005708	0.21	0.317891	0.005729	0.21	0.540416	0.005688	0.21	0.715256	0.005708	0.21	2.0504	0.005688
0.22	0.317891	0.006042	0.22	0.317891	0.006063	0.22	0.540416	0.006042	0.22	0.715256	0.006063	0.22	2.0504	0.006042
0.23	0.317891	0.006354	0.23	0.317891	0.006417	0.23	0.540416	0.006396	0.23	0.715256	0.006417	0.23	2.0504	0.006396
0.24	0.317891	0.006667	0.24	0.317891	0.006708	0.24	0.540416	0.006771	0.24	0.715256	0.006771	0.24	2.082189	0.00675

0.25	0.317891	0.007	0.25	0.317891	0.007042	0.25	0.55631	0.007125	0.25	0.715256	0.007125	0.25	2.082189	0.007104
0.26	0.333786	0.007354	0.26	0.317891	0.007375	0.26	0.588099	0.007479	0.26	0.715256	0.007479	0.26	2.082189	0.007458
0.27	0.365575	0.007708	0.27	0.317891	0.007708	0.27	0.588099	0.007833	0.27	0.715256	0.007833	0.27	2.082189	0.007813
0.28	0.365575	0.008063	0.28	0.317891	0.008083	0.28	0.588099	0.008167	0.28	0.715256	0.008167	0.28	2.082189	0.008167
0.29	0.365575	0.008438	0.29	0.317891	0.008438	0.29	0.588099	0.008521	0.29	0.715256	0.008521	0.29	2.082189	0.008521
0.3	0.365575	0.008792	0.3	0.317891	0.008792	0.3	0.588099	0.008854	0.3	3.306071	0.008854	0.3	8.55128	0.008854
0.31	0.365575	0.009146	0.31	0.317891	0.009146	0.31	0.588099	0.009208	0.31	7.470449	0.009208	0.31	9.616216	0.009188
0.32	0.365575	0.0095	0.32	0.317891	0.0095	0.32	0.588099	0.009542	0.32	7.152557	0.009542	0.32	10.72884	0.009542
0.33	0.365575	0.009833	0.33	0.317891	0.009833	0.33	0.588099	0.009896	0.33	8.16981	0.009875	0.33	10.39505	0.009875
0.34	0.365575	0.010188	0.34	0.317891	0.010188	0.34	0.588099	0.010229	0.34	8.471807	0.010229	0.34	11.17388	0.010229
0.35	0.365575	0.010542	0.35	0.317891	0.010542	0.35	0.588099	0.010563	0.35	9.536743	0.010563	0.35	10.77652	0.010563
0.36	0.365575	0.010875	0.36	0.317891	0.010875	0.36	3.035863	0.010917	0.36	9.632111	0.010896	0.36	10.88778	0.010896
0.37	0.365575	0.011208	0.37	0.365575	0.011208	0.37	6.564458	0.01125	0.37	9.997685	0.01125	0.37	11.57125	0.01125
0.38	0.365575	0.011563	0.38	0.365575	0.011563	0.38	6.771088	0.011583	0.38	10.90368	0.011583	0.38	12.66797	0.011583
0.39	0.365575	0.011896	0.39	0.365575	0.011896	0.39	6.961823	0.011917	0.39	10.87189	0.011917	0.39	12.79513	0.011917
0.4	0.365575	0.01225	0.4	0.365575	0.01225	0.4	7.025401	0.01225	0.4	11.55535	0.01225	0.4	12.98587	0.01225
0.41	0.365575	0.012583	0.41	0.365575	0.012583	0.41	7.216136	0.012583	0.41	12.27061	0.012583	0.41	13.98722	0.012583
0.42	0.365575	0.012917	0.42	0.365575	0.012917	0.42	8.360545	0.012917	0.42	12.17524	0.012917	0.42	14.44817	0.012917
0.43	0.365575	0.01325	0.43	2.765656	0.01325	0.43	8.106232	0.01325	0.43	12.2865	0.01325	0.43	15.40184	0.01325
0.44	0.365575	0.013583	0.44	7.422765	0.013583	0.44	7.756551	0.013583	0.44	12.63618	0.013583	0.44	15.73563	0.013583
0.45	0.365575	0.013917	0.45	7.454554	0.013917	0.45	8.424123	0.013917	0.45	13.82828	0.013917	0.45	15.75152	0.013917
0.46	0.365575	0.01425	0.46	7.756551	0.01425	0.46	8.853276	0.01425	0.46	13.82828	0.01425	0.46	16.84825	0.01425
0.47	0.365575	0.014583	0.47	7.915497	0.014583	0.47	8.996327	0.014583	0.47	13.7647	0.014583	0.47	17.07077	0.014583
0.48	0.397364	0.014917	0.48	8.376439	0.014917	0.48	9.425481	0.014917	0.48	14.89321	0.014917	0.48	17.10256	0.014917
0.49	0.397364	0.01525	0.49	8.821487	0.01525	0.49	9.059906	0.01525	0.49	15.19521	0.01525	0.49	17.96087	0.01525
0.5	0.397364	0.015583	0.5	8.996327	0.015583	0.5	9.854634	0.015583	0.5	15.227	0.015583	0.5	18.4536	0.015583
0.51	1.128515	0.015917	0.51	8.964539	0.015917	0.51	10.2361	0.015917	0.51	15.35416	0.015917	0.51	18.18339	0.015917
0.52	6.612142	0.01625	0.52	9.616216	0.01625	0.52	9.83874	0.01625	0.52	16.05352	0.01625	0.52	18.32644	0.01625
0.53	6.024043	0.016583	0.53	9.489059	0.016583	0.53	10.37916	0.016583	0.53	16.18067	0.016583	0.53	18.42181	0.016583

0.54	6.850561	0.016917	0.54	9.679794	0.016917	0.54	10.36326	0.016917	0.54	16.4032	0.016917	0.54	19.55032	0.016917
0.55	7.216136	0.01725	0.55	10.85599	0.01725	0.55	10.91957	0.01725	0.55	16.9913	0.01725	0.55	20.58347	0.01725
0.56	7.104874	0.017583	0.56	10.96725	0.017583	0.56	11.73019	0.017583	0.56	17.16614	0.017583	0.56	21.10799	0.017583
0.57	7.168452	0.017917	0.57	11.22157	0.017917	0.57	12.0004	0.017917	0.57	17.19793	0.017917	0.57	21.74377	0.017917
0.58	7.629395	0.01825	0.58	11.26925	0.01825	0.58	12.03219	0.01825	0.58	18.54897	0.01825	0.58	21.55304	0.01825
0.59	7.78834	0.018563	0.59	11.31694	0.018583	0.59	12.15935	0.018583	0.59	18.93044	0.018583	0.59	21.83914	0.018583
0.6	8.201599	0.018896	0.6	12.14345	0.018896	0.6	12.47724	0.018917	0.6	18.89865	0.018896	0.6	21.71198	0.018917
0.61	7.772446	0.019229	0.61	13.11302	0.019229	0.61	12.69976	0.019229	0.61	19.28012	0.019229	0.61	22.42724	0.019229
0.62	8.201599	0.019563	0.62	13.09713	0.019563	0.62	13.12892	0.019563	0.62	20.18611	0.019563	0.62	23.1266	0.019563
0.63	8.55128	0.019896	0.63	13.70112	0.019896	0.63	13.62165	0.019896	0.63	20.12253	0.019896	0.63	23.79417	0.019896
0.64	8.710225	0.020229	0.64	14.71837	0.020229	0.64	14.19385	0.020229	0.64	20.69473	0.020229	0.64	24.0167	0.020229
0.65	8.964539	0.020563	0.65	13.24018	0.020563	0.65	14.19385	0.020563	0.65	21.18746	0.020563	0.65	24.28691	0.020563
0.66	8.51949	0.020896	0.66	13.00176	0.020896	0.66	13.79649	0.020896	0.66	22.14114	0.020896	0.66	24.97037	0.020896
0.67	8.980433	0.021229	0.67	13.54218	0.021229	0.67	14.30511	0.021229	0.67	21.82325	0.021229	0.67	25.63795	0.021229
0.68	9.059906	0.021563	0.68	14.25743	0.021563	0.68	13.7647	0.021563	0.68	22.23651	0.021563	0.68	26.27373	0.021563
0.69	10.34737	0.021896	0.69	15.49721	0.021896	0.69	13.97133	0.021896	0.69	22.02988	0.021896	0.69	26.16247	0.021896
0.7	10.10895	0.022229	0.7	15.24289	0.022229	0.7	14.73427	0.022229	0.7	22.15703	0.022229	0.7	26.87772	0.022229
0.71	9.950002	0.022563	0.71	15.91047	0.022563	0.71	14.76606	0.022563	0.71	22.28419	0.022563	0.71	26.78235	0.022563
0.72	10.36326	0.022896	0.72	16.19657	0.022896	0.72	14.79785	0.022896	0.72	23.53986	0.022896	0.72	27.32277	0.022896
0.73	11.11031	0.023229	0.73	16.81646	0.023229	0.73	14.73427	0.023229	0.73	24.50943	0.023229	0.73	28.4036	0.023229
0.74	11.15799	0.023563	0.74	16.35551	0.023563	0.74	15.68794	0.023563	0.74	24.39817	0.023563	0.74	28.29234	0.023563
0.75	11.20567	0.023896	0.75	16.78467	0.023896	0.75	15.64026	0.023896	0.75	24.11207	0.023896	0.75	28.9917	0.023896
0.76	11.28515	0.024229	0.76	17.5635	0.024229	0.76	16.08531	0.024229	0.76	24.77964	0.024229	0.76	29.5639	0.024229
0.77	11.7143	0.024563	0.77	17.5635	0.024563	0.77	16.65751	0.024563	0.77	25.03395	0.024563	0.77	29.53211	0.024563
0.78	11.76198	0.024896	0.78	18.08802	0.024896	0.78	16.54625	0.024896	0.78	25.20879	0.024896	0.78	29.46854	0.024896
0.79	11.84146	0.025229	0.79	18.21518	0.025229	0.79	16.95951	0.025229	0.79	25.74921	0.025229	0.79	30.13611	0.025229
0.8	12.23882	0.025563	0.8	17.53171	0.025563	0.8	17.70655	0.025563	0.8	26.28962	0.025563	0.8	30.39042	0.025563
0.81	12.36598	0.025896	0.81	18.13571	0.025896	0.81	17.8496	0.025896	0.81	26.51215	0.025896	0.81	31.29641	0.025896
0.82	12.12756	0.026208	0.82	18.64433	0.026229	0.82	18.61254	0.026229	0.82	26.75056	0.026229	0.82	31.77325	0.026229

0.83	11.65072	0.026542	0.83	18.46949	0.026563	0.83	17.72245	0.026563	0.83	27.44993	0.026563	0.83	32.66335	0.026563
0.84	11.44409	0.026875	0.84	19.15296	0.026875	0.84	17.5635	0.026896	0.84	27.79961	0.026896	0.84	32.64745	0.026896
0.85	12.69976	0.027208	0.85	19.3278	0.027208	0.85	17.94497	0.027229	0.85	28.1175	0.027229	0.85	31.88451	0.027229
0.86	13.65344	0.027542	0.86	19.07349	0.027542	0.86	18.58076	0.027563	0.86	28.18108	0.027563	0.86	32.53619	0.027563
0.87	13.92365	0.027875	0.87	19.9	0.027875	0.87	19.16885	0.027896	0.87	28.06981	0.027875	0.87	33.50576	0.027896
0.88	13.71702	0.028208	0.88	20.72652	0.028208	0.88	18.69202	0.028229	0.88	28.02213	0.028229	0.88	34.22101	0.028208
0.89	14.13027	0.028542	0.89	20.94905	0.028542	0.89	18.78738	0.028563	0.89	28.95991	0.028563	0.89	35.03164	0.028563
0.9	12.85871	0.028875	0.9	20.32916	0.028896	0.9	18.97812	0.028896	0.9	29.35728	0.028896	0.9	34.87269	0.028896
0.91	13.09713	0.029229	0.91	20.98083	0.029229	0.91	19.42317	0.029229	0.91	29.94537	0.029229	0.91	35.20648	0.029229
0.92	14.32101	0.029563	0.92	21.9663	0.029563	0.92	19.39138	0.029563	0.92	30.64474	0.029563	0.92	35.79457	0.029563
0.93	14.49585	0.029896	0.93	22.31598	0.029896	0.93	19.51853	0.029896	0.93	30.83547	0.029896	0.93	35.90584	0.029896
0.94	14.70248	0.030229	0.94	22.45903	0.030229	0.94	20.31326	0.030229	0.94	30.86726	0.030229	0.94	35.22237	0.030229
0.95	14.98858	0.030563	0.95	21.6643	0.030563	0.95	20.31326	0.030563	0.95	30.77189	0.030563	0.95	36.38268	0.030563
0.96	14.89321	0.030896	0.96	21.3623	0.030896	0.96	20.83778	0.030896	0.96	31.82093	0.030896	0.96	37.01846	0.030896

