

การศึกษาการออกแบบวัสดุเสริมแรงของซังข้าวโพด

ร่วมกับท่อนานโนคาร์บอน

DESIGN OF A REINFORCING MATERIAL COMPOSED OF  
CORNCOBS WITH MULTI-WALLED CARBON NANOTUBES



นายรัชชัย ตั้งสุขสันต์

MR. TAWATCHAI TANGSUKSAN

นางสาวนิจ ชลบุญญาเดช

MS. NIJ CHONBOONYADEJ

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมออกแบบการผลิตและวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2564

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# DESIGN OF A REINFORCING MATERIAL COMPOSED OF CORNCOBS WITH MULTI-WALLED CARBON NANOTUBES

MR. TAWATCHAI TANGSUKSAN

MS. NIJ CHONBOONYADEJ

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
BACHELOR OF ENGINEERING IN  
PRODUCTION DESIGN AND MATERIALS 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

การศึกษาการออกแบบวัสดุเสริมแรงของซิงซ์ข้าวโพด  
ร่วมกับท่อนาโนคาร์บอน  
DESIGN OF A REINFORCING MATERIAL COMPOSED OF  
CORNCOBS WITH MULTI-WALLED CARBON NANOTUBES

นักศึกษา

นายธวัชชัย ตั้งสุขสันต์ รหัสประจำตัว 61010488  
นางสาวนิจ ชลบุญญาเดช รหัสประจำตัว 61010581

หลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมออกแบบการผลิตและวัสดุ

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญาานิพนธ์



(ผศ.ดร.ยลพัทธ์ อารีรบ)

หัวข้อปริญญานิพนธ์	การศึกษาการออกแบบวัสดุเสริมแรงของซังข้าวโพดร่วมกับ ท่อนานคาร์บอน
นักศึกษา	นายธวัชชัย ตั้งสุขสันต์ นางสาวนิจ ชลบุญญาเดช
หลักสูตร	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมออกแบบการผลิตและวัสดุ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา	2564
อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญานิพนธ์	ผศ.ดร.ยลพัทธ์ อารีรบ

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้มีการศึกษาลักษณะโครงสร้างทางจุลภาค โครงสร้างมหภาค รวมไปถึงสมบัติเชิงกายภาพ และสมบัติเชิงกลของวัสดุเสริมแรงจากซังข้าวโพดร่วมกับท่อนานคาร์บอน นอกจากนี้ทางที่วิจัยยังได้ศึกษาถึงปัจจัยที่ส่งผลต่อความแข็งแรง และส่วนผสมที่เหมาะสมของวัสดุเสริมแรงจากซังข้าวโพดร่วมกับท่อนานคาร์บอน เพื่อให้เหมาะสมต่อการผลิตและเพิ่มประสิทธิภาพของวัสดุ โดยผลการวิจัยพบว่า จากการปรับสภาพทางเคมีของซังข้าวโพดด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่ใช้ความเข้มข้นต่ำจะทำให้การปรับสภาพทางเคมีมีประสิทธิภาพมากกว่าการใช้ความเข้มข้นสูง โดยพบว่าลักษณะของพื้นผิวซังข้าวโพดที่มีความขรุขระ ไม่สม่ำเสมอ และมีความเป็นรูพรุนสูงเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสของซังข้าวโพดร่วมกับท่อนานคาร์บอนซึ่งมีผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพด้านความแข็งแรงให้กับแผ่นอัดซังข้าวโพดในทุกสภาวะ แต่อย่างไรก็ตามอัตราส่วนปริมาณท่อนานคาร์บอนที่เพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้ความแข็งแรงของแผ่นไม้อัดลดลง โดยในงานวิจัยนี้ยังพบอีกว่าทุกสภาวะเงื่อนไขของการทดสอบผ่านเกณฑ์ค่าปริมาณความชื้นเมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐาน มอก. 876-2547 จากการวิจัยการพัฒนาแผ่นไม้อัดจากซังข้าวโพดสภาวะที่เหมาะสมในงานวิจัยนี้คือ ซังข้าวโพดที่ถูกปรับสภาพทางเคมีด้วยสารละลาย NaOH ความเข้มข้น 0.25 โมลาร์ ระยะเวลาในการบำบัด 72 ชั่วโมง โดยผสมร่วมกับท่อนานคาร์บอนในอัตราส่วน 100:1 ซึ่งส่งผลให้มีค่าต้านทานแรงดัดสูงสุดที่ 9.71758 เมกะปาสคาล และค่าปริมาณความชื้นตามมาตรฐานอยู่ที่ร้อยละ 9.43

<b>Thesis Title</b>	Design of a Reinforcing Material Composed of Corncobs with Multi-Walled Carbon Nanotubes
<b>Student</b>	Mr. Tawatchai Tangsuksan Ms. Nij Chonboonyadej
<b>Degree</b>	Bachelor of Engineering in Production Design and Materials Engineering King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
<b>Academic Year</b>	2021
<b>Thesis Advisor</b>	Asst.Prof.Dr. Yonrapach Areerob

## ABSTRACT

In this study, the microstructure, macrostructure, physical and mechanical properties of corncob reinforced material with Multi-Walled Carbon Nanotubes (MWCNTs) were studied. In addition, the research team also studied factors that affect the strength and a suitable combination of corncob reinforcing material with MWCNTs for material production and optimization. The results showed that from the chemical pretreatment of corncobs with a low concentration of sodium hydroxide solution. This will make the chemical pretreatment more effective than using a high base concentration. The surface of the corncob is rough and the unevenness of the surface increases in some conditions, porosity occurs, which increases the contact surface area samples mixed with MWCNTs were studied, demonstrating good adhesion of carbon nanotubes to corncob fibers in all conditions and ratios. MWCNTs were also found to have a performance-enhancing effect strength on corncob compressed sheets. On the other hand, the increased volume ratio of carbon nanotubes will reduce the strength of the plywood sheet. All conditions passed the moisture content criteria when compared to the TIS 876-2547 standard. It was found that from the research, the development of corncob veneer suitable for this research came from corncobs that were chemically treated with NaOH solution at a concentration of 0.25 molar, 72 h applied with 100:1 carbon nanotube, the maximum flexural strength was 9.71758 MPa and the standard moisture content was 9.43 percent.

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์เรื่องการศึกษาการออกแบบวัสดุเสริมแรงของซังข้าวโพดร่วมกับท่อนานาโนคาร์บอนนี้ เป็นส่วนหนึ่งของหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ซึ่งสามารถสำเร็จล่วงหน้าได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลือจากบุคคลผู้มีส่วนเกี่ยวข้อง คณะผู้จัดทำ ขอขอบพระคุณทุกท่านที่มีส่วนเกี่ยวข้องส่งผลให้ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ยลพัทธ์ อารีรบ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์ คณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงที่ได้สละเวลาสำหรับการให้คำแนะนำในการดำเนินงาน ความเอาใจใส่ และแก้ไขข้อบกพร่องระหว่างการศึกษาปฏิบัติงาน ตลอดจนการจัดทำปริญญานิพนธ์ฉบับนี้จนสามารถสำเร็จล่วงหน้าได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.กรรณชัย กัลยาศิริ และ ผศ.ดร.พชรพล ตันทวีรุฬห์ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการและกรรมการสอบปริญญานิพนธ์ สำหรับความรู้และคำแนะนำในการดำเนินการปริญญานิพนธ์และคำชี้แนะในทุก ๆ ด้าน

ขอขอบพระคุณ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ที่ให้ความอนุเคราะห์ในส่วนของสถานที่และห้องปฏิบัติการ รวมทั้งค่าใช้จ่ายในการดำเนินการ ขอขอบพระคุณ นายกำธร สุขพิมาย และบุคลากรท่านอื่น ๆ ที่ไม่ได้กล่าวถึง ณ ที่นี้ ผู้ซึ่งคอยช่วยเหลือ ให้ความอนุเคราะห์ให้ข้อมูลในการปฏิบัติงานเป็นอย่างดี จึงปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จล่วงหน้าได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณครอบครัวที่คอยสนับสนุน และให้การช่วยเหลือ อีกทั้งเพื่อน ๆ ที่ให้กำลังใจและความช่วยเหลือในเรื่องต่าง ๆ จึงขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้ด้วย คณะผู้จัดทำหวังว่า ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นประโยชน์ต่อวงการการศึกษาและผู้สนใจศึกษาต่อไป

นายรัชชัย ตั้งสุขสันต์

นางสาวนิจ ชลบุญญาเดช

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ซ
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตปริญญาานิพนธ์.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.5 แผนการดำเนินงาน.....	3
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง</b>	
2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับข้าวโพด.....	5
2.1.1 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของข้าวโพด.....	6
2.1.2 ชนิดของข้าวโพด.....	6
2.1.3 ซังข้าวโพดและการใช้ประโยชน์.....	8
2.2 องค์ประกอบของวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรประเภทลิกโนเซลลูโลส.....	8
2.2.1 เซลลูโลส (Cellulose).....	10
2.2.2 เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose).....	10
2.2.3 ลิกนิน (Lignin).....	11
2.3 กระบวนการปรับสภาพ (Pretreatment).....	12
2.3.1 วิธีการทางเคมี (Chemical Pretreatment).....	12
2.4 ท่อนานคาร์บอน (Carbon Nanotubes).....	14
2.4.1 โครงสร้างของท่อนานคาร์บอน.....	15
2.4.2 สมบัติของท่อนานคาร์บอน.....	16
2.5 กระบวนการขึ้นรูปแบบกดอัด (Compression Molding).....	17

## สารบัญ

	หน้า
2.5.1 กระบวนการอัดด้วยความร้อน.....	17
2.6 การศึกษาโครงสร้างวัสดุ.....	18
2.6.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM).....	18
2.6.2 เทคนิคการวัดการกระจายพลังงานของรังสีเอ็กซ์ (EDS).....	19
2.6.3 เทคนิควิเคราะห์ขนาดพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุน (BET).....	20
2.6.4 เทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD).....	20
2.7 การทดสอบสมบัติของวัสดุ.....	21
2.7.1 การทดสอบความต้านทานแรงดัดโค้ง (Bending Test).....	21
2.7.2 การทดสอบหาค่าปริมาณความชื้น (Moisture Content Measurement).....	22
<b>บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย</b>	
3.1 วัตถุประสงค์และอุปกรณ์.....	23
3.2 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	24
3.2.1 ออกแบบขั้นตอนการดำเนินโครงการ.....	24
3.2.2 การเตรียมชิ้นงานสำหรับการทดลอง.....	25
3.2.3 ศึกษาค่าความเข้มข้นและเวลาในการปรับสภาพทางเคมีของซังข้าวโพด.....	26
3.2.4 ศึกษาอัตราส่วนการผสมซังข้าวโพดร่วมกับท่อนานคาร์บอนและเทคนิควิเคราะห์.....	28
3.2.5 ศึกษาอัตราส่วนผสมของซังข้าวโพดร่วมกับท่อนานคาร์บอนในการอัดขึ้นรูป.....	29
3.2.6 การทดสอบคุณสมบัติเชิงกล.....	32
3.3 สถานที่ทำการทดลอง.....	33
3.4 ระยะเวลาทำการวิจัย.....	33
<b>บทที่ 4 ผลการดำเนินการวิจัย</b>	
4.1 ผลการศึกษาซังข้าวโพดที่ผ่านการปรับสภาพทางเคมีโดยใช้เทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Field Emission Scanning Electron Microscope: FE-SEM).....	35
4.2 ผลการศึกษาซังข้าวโพดที่ผ่านการปรับสภาพทางเคมีผสมร่วมกับท่อนานคาร์บอนในอัตราส่วนต่าง ๆ ด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด FE-SEM.....	37

## สารบัญ

### หน้า

4.3 ผลการศึกษาซังข้าวโพดที่ผ่านการปรับสภาพทางเคมีผสมกับท่อนาโนคาร์บอนในอัตราส่วนต่าง ๆ ด้วยเทคนิคการวัดการกระจายพลังงานของรังสีเอ็กซ์ (Energy Dispersive X-Ray Spectrometer: EDS).....	40
4.4 ผลการศึกษาซังข้าวโพดที่ผ่านการปรับสภาพทางเคมีผสมกับท่อนาโนคาร์บอนในอัตราส่วนต่าง ๆ ด้วยเทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffractometer: XRD) .....	41
4.5 ผลการศึกษาซังข้าวโพดที่ผ่านการปรับสภาพทางเคมีผสมกับท่อนาโนคาร์บอนในอัตราส่วนต่าง ๆ ด้วยเทคนิคเครื่องวิเคราะห์ขนาดพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุน (Surface Area and Pore Size Analyzer: BET).....	42
4.6 ผลการคัดเลือกสถานะที่เหมาะสมเพื่อนำไปอัดขึ้นรูป .....	44
4.7 การศึกษาลักษณะทั่วไปของแผ่นอัดซังข้าวโพด.....	44
4.8 การศึกษาความต้านทานแรงดัดของแผ่นอัดซังข้าวโพด.....	46
4.9 การศึกษาค่าปริมาณความชื้นของแผ่นอัดซังข้าวโพด .....	50
4.10 การประดิษฐ์กล่องอเนกประสงค์จำลองจากซังข้าวโพดร่วมกับท่อนาโนคาร์บอน .....	53
<b>บทที่ 5 สรุปผลการดำเนินวิจัยและข้อเสนอแนะ</b>	
5.1 สรุปผลการดำเนินการ.....	55
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	56
<b>เอกสารอ้างอิง .....</b>	<b>57</b>
<b>ภาคผนวก ก มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 876-2547 .....</b>	<b>61</b>
<b>ภาคผนวก ข บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์ .....</b>	<b>70</b>

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงานของโครงการวิจัย.....	4
ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบของเซลล์โอส เฮมิเซลล์โอส และลิกนินในวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร.....	9
ตารางที่ 3.1 ค่าความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และเวลาในการปรับสภาพ.....	26
ตารางที่ 3.2 อัตราส่วนการผสมซึ่งข้าวโพดร่วมกับท่อนานาโนคาร์บอนและเทคนิคในการวิเคราะห์ .....	29
ตารางที่ 3.3 อัตราส่วนส่วนผสมซึ่งข้าวโพด:ท่อนานาโนคาร์บอน:กาวพลาสติกเรซิน:น้ำ.....	30
ตารางที่ 4.1 ผลการศึกษาลักษณะทั่วไปแผ่นอัดซึ่งข้าวโพดร่วมกับท่อนานาโนคาร์บอน .....	45
ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบความต้านแรงดัดของชิ้นงานทดสอบเงื่อนไขที่ 1.....	46
ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบความต้านแรงดัดของชิ้นงานทดสอบเงื่อนไขที่ 2.....	47
ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบความต้านแรงดัดของชิ้นงานทดสอบเงื่อนไขที่ 3.....	48
ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบความต้านแรงดัดของชิ้นงานทดสอบเงื่อนไขที่ 4.....	49
ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบค่าปริมาณความชื้นของชิ้นงานทดสอบเงื่อนไขที่ 1 .....	51
ตารางที่ 4.7 ผลการทดสอบค่าปริมาณความชื้นของชิ้นงานทดสอบเงื่อนไขที่ 2.....	51
ตารางที่ 4.8 ผลการทดสอบค่าปริมาณความชื้นของชิ้นงานทดสอบเงื่อนไขที่ 3.....	52
ตารางที่ 4.9 ผลการทดสอบค่าปริมาณความชื้นของชิ้นงานทดสอบเงื่อนไขที่ 4.....	52

## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 ฝักข้าวโพดชนิดต่างๆ (จากซ้ายไปขวา) ข้าวโพดหัวแข็ง ข้าวโพดหัวบุบ ข้าวโพดหวาน ข้าวโพดแป้ง ข้าวโพดข้าวเหนียว และข้าวโพดคั่ว .....	7
รูปที่ 2.2 ชั่งข้าวโพดและเศษชั่งข้าวโพด .....	8
รูปที่ 2.3 โครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรประเภทลิกโนเซลลูโลส .....	9
รูปที่ 2.4 โครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลสที่ประกอบโมเลกุลของกลูโคสที่เชื่อมต่อกัน .....	10
รูปที่ 2.5 โครงสร้างโมเลกุลของไซแลน .....	11
รูปที่ 2.6 ลิกนิน เฮมิเซลลูโลส และเซลลูโลสที่เป็นองค์ประกอบภายในผนังเซลล์.....	11
รูปที่ 2.7 โครงสร้างของ (a) Tran-P-Coumaryl Alcohol (b) Trans-Coniferyl Alcohol (c) Trans-P-Sinapyl Alcohol.....	12
รูปที่ 2.8 อัญรูปของคาร์บอน ซึ่งเป็นธาตุเดียวกันแต่โครงสร้างต่างกัน .....	14
รูปที่ 2.9 การจัดเรียงตัวในรูปแบบต่าง ๆ ของวงแหวนหกเหลี่ยมคาร์บอน .....	15
รูปที่ 2.10 โครงสร้างของท่อนานคาร์บอนแบบผนังชั้นเดียว .....	15
รูปที่ 2.11 โครงสร้างของท่อนานคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น.....	16
รูปที่ 2.12 ขั้นตอนการอัดจนครบรอบการทำงาน .....	18
รูปที่ 2.13 ส่วนประกอบและการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด .....	19
รูปที่ 2.14 การดูดซับโมเลกุลของแก๊สไนโตรเจนของวัสดุเป็นชั้น ๆ.....	20
รูปที่ 2.15 การทดสอบความต้านทานแรงดัดและมอดูลัสยืดหยุ่น.....	22
รูปที่ 3.1 แผนภาพขั้นตอนการทดลองตลอดทั้งโครงการ.....	24
รูปที่ 3.2 แผนภูมิของขั้นตอนและเงื่อนไขการเตรียมตัวอย่างในการศึกษาชั่งข้าวโพดที่ถูกปรับสภาพ.....	25
รูปที่ 3.3 ชั่งข้าวโพดที่ได้จากการเตรียม.....	26
รูปที่ 3.4 แช่ชั่งข้าวโพดในน้ำสะอาด 24 ชั่วโมง และหั่นชั่งข้าวโพดเป็นชิ้นเล็ก ๆ .....	27
รูปที่ 3.5 สารเคมีโซเดียมไฮดรอกไซด์ (ซ้าย), ตัวอย่างการแช่ปรับสภาพทางเคมีชั่งข้าวโพด (ขวา) .....	27
รูปที่ 3.6 เตาอบยี่ห้อ Memmert (ซ้าย), ชั่งข้าวโพดหลังผ่านการอบแห้ง (ขวา).....	28
รูปที่ 3.7 ผงชั่งข้าวโพดหลังการบดป่น .....	28
รูปที่ 3.8 สิ่งทดลองหลังการผสมผงชั่งข้าวโพดและท่อนานคาร์บอนเข้าด้วยกันตามอัตราส่วน ๆ .....	29
รูปที่ 3.9 ชั่งข้าวโพดสับหยาบ .....	30
รูปที่ 3.10 การผสมชั่งข้าวโพดและท่อนานคาร์บอนร่วมกับกาวพลาสติกเรซิน โดยชั่งข้าวโพดผสม กับท่อนานคาร์บอนในโถรงบด (ซ้าย), การผสมชั่งข้าวโพดกับกาวพลาสติกเรซิน (ขวา) .....	31

## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 3.11 การเตรียมอัดแผ่นซังข้าวโพด โดยการใส่ส่วนผสมซังข้าวโพดลงในแม่พิมพ์ (ซ้าย), ซังข้าวโพดอัดแผ่นทั้งหมด 4 สูตร (ขวา).....	32
รูปที่ 3.12 เครื่องอัดร้อนขึ้นรูป.....	32
รูปที่ 3.13 เครื่องทดสอบอเนกประสงค์.....	33
รูปที่ 4.1 แผนผังแสดงความหลากหลายในการปรับสภาพทางเคมีของซังข้าวโพดด้วยสารละลาย NaOH....	35
รูปที่ 4.2 ซังข้าวโพดที่ไม่ผ่านการปรับสภาพด้วยสารละลาย NaOH.....	35
รูปที่ 4.3 ซังข้าวโพดที่ปรับสภาพด้วย NaOH ความเข้มข้น 0.25 โมลาร์, 0.50 โมลาร์ และ 0.75 โมลาร์ ตามลำดับ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง.....	36
รูปที่ 4.4 ซังข้าวโพดที่ปรับสภาพด้วย NaOH ความเข้มข้น 0.25 โมลาร์, 0.50 โมลาร์ และ 0.75 โมลาร์ ตามลำดับ เป็นเวลา 48 ชั่วโมง.....	36
รูปที่ 4.5 ซังข้าวโพดที่ปรับสภาพด้วย NaOH ความเข้มข้น 0.25 โมลาร์, 0.50 โมลาร์ และ 0.75 โมลาร์ ตามลำดับ เป็นเวลา 72 ชั่วโมง.....	36
รูปที่ 4.6 แผนผังแสดงความหลากหลายของอัตราส่วนผสมของซังข้าวโพดร่วมกับท่อนานโนคาร์บอน และเทคนิคในการวิเคราะห์สิ่งทดลอง.....	37
รูปที่ 4.7 ซังข้าวโพดที่ไม่ถูกการปรับสภาพทางเคมีด้วยสารละลาย NaOH (ซ้าย), ท่อนานโนคาร์บอน กำลังขยาย 200 เท่า (กลาง) และกำลังขยาย 2000 เท่า (ขวา).....	38
รูปที่ 4.8 ซังข้าวโพดที่ปรับสภาพด้วยสารละลาย NaOH ความเข้มข้น 0.25 โมลาร์ เป็นเวลา 72 ชั่วโมง ที่ไม่ผสมผงท่อนานโนคาร์บอน (บนซ้าย) และผสมในอัตราส่วน 50:1 (บนขวา), 75:1 (ล่างซ้าย) และ 100:1 (ล่างขวา).....	38
รูปที่ 4.9 ซังข้าวโพดที่ปรับสภาพด้วยสารละลาย NaOH ความเข้มข้น 0.50 โมลาร์ เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ที่ไม่ผสมผงท่อนานโนคาร์บอน (บนซ้าย) และผสมในอัตราส่วน 50:1 (บนขวา), 75:1 (ล่างซ้าย) และ 100:1 (ล่างขวา).....	39
รูปที่ 4.10 ซังข้าวโพดที่ปรับสภาพด้วยสารละลาย NaOH ความเข้มข้น 0.75 โมลาร์ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่ไม่ผสมผงท่อนานโนคาร์บอน (บนซ้าย) และผสมในอัตราส่วน 50:1 (บนขวา), 75:1 (ล่างซ้าย) และ 100:1 (ล่างขวา).....	39
รูปที่ 4.11 รูปทางสัณฐานวิทยาจาก FE-SEM ของสารตัวอย่าง (ซ้าย) และผลเทคนิค EDS แสดงชนิด และปริมาณธาตุที่อยู่บนชิ้นงานตัวอย่าง (ขวา).....	40
รูปที่ 4.12 ภาพ Mapping ระบุว่าตำแหน่งสารแต่ละชนิดบนชิ้นงานตัวอย่าง.....	40

## สารบัญรูป

### หน้า

รูปที่ 4.13	ผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) ของซังข้าวโพดที่ถูกปรับสภาพทางเคมีด้วย NaOH ซึ่งมีความเข้มข้นที่ต่างกัน.....	42
รูปที่ 4.14	ซังข้าวโพดที่ปรับสภาพด้วยสารละลาย NaOH ความเข้มข้น 0.75 โมลาร์ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง อัตราส่วนผสมผงซังข้าวโพดกับผงท่อนาโนคาร์บอน 50:1 .....	43
รูปที่ 4.15	ซังข้าวโพดที่ปรับสภาพด้วยสารละลาย NaOH ความเข้มข้น 0.75 โมลาร์ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง อัตราส่วนผสมผงซังข้าวโพดกับผงท่อนาโนคาร์บอน 75:1 .....	43
รูปที่ 4.16	ซังข้าวโพดที่ปรับสภาพด้วยสารละลาย NaOH ความเข้มข้น 0.75 โมลาร์ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง อัตราส่วนผสมผงซังข้าวโพดกับผงท่อนาโนคาร์บอน 100:1 .....	44
รูปที่ 4.17	ผลการทดสอบที่ได้จากเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ของชิ้นงานทดสอบเงื่อนไขที่ 1.....	46
รูปที่ 4.18	ผลการทดสอบที่ได้จากเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ของชิ้นงานทดสอบเงื่อนไขที่ 2.....	47
รูปที่ 4.19	ผลการทดสอบที่ได้จากเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ของชิ้นงานทดสอบเงื่อนไขที่ 3.....	48
รูปที่ 4.20	ผลการทดสอบที่ได้จากเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ของชิ้นงานทดสอบเงื่อนไขที่ 4.....	49
รูปที่ 4.21	ค่าความต้านทานแรงดัดของแผ่นอัดซังข้าวโพด .....	50
รูปที่ 4.22	ค่าปริมาณความชื้นของแผ่นอัดซังข้าวโพด .....	53
รูปที่ 4.23	กระบวนการประกอบกล่องอเนกประสงค์ .....	54

# บทที่ 1

## บทนำ

ในบทนี้เป็นการกล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ และขอบเขตการศึกษา ของปริญญาานิพนธ์ เรื่อง การศึกษาการออกแบบวัสดุเสริมแรงของซังข้าวโพดร่วมกับท่อนานโนคาร์บอน ดัง แสดงในหัวข้อต่อไปนี้

- 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา
- 1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา
- 1.3 ขอบเขตปริญญาานิพนธ์
- 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ
- 1.5 แผนการดำเนินงาน

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ประเทศไทยได้ขึ้นชื่อว่าเป็นประเทศเกษตรกรรมซึ่งมีการเพาะปลูกพืชผลทางการเกษตรหลายชนิด ซึ่งผลผลิตที่ได้ไม่เพียงแต่นำมาบริโภคทั้งภายในและภายนอกประเทศเท่านั้น ยังมีการนำพืชผลเหล่านี้ไปแปรรูปเป็นเชื้อเพลิงชีวภาพ บัณฑิตชีวภาพ และผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ต่าง ๆ อีกมากมาย ซึ่งหากนำเศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรมาจัดการอย่างถูกต้องและเหมาะสม โดยการประยุกต์เข้ากับนวัตกรรมและเทคโนโลยีสมัยใหม่ จะทำให้การเพิ่มมูลค่าทางการเกษตรและช่วยลดปริมาณขยะจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรได้มากยิ่งขึ้น โดยในปัจจุบันคนไทยมากกว่า 69 ล้านคนสามารถสร้างขยะได้มากถึง 27 ล้านตันต่อปี ซึ่งพบว่า “ขยะเหลือใช้ทางการเกษตร” มีปริมาณมากเป็นอันดับต้น ๆ ของปริมาณขยะจากทุกประเภท แต่อย่างไรก็ตาม ความสามารถในการจัดการขยะได้อย่างถูกต้องและมีประสิทธิภาพยังไม่เพียงพอต่อการลดปริมาณขยะที่เกิดขึ้น จึงทำให้เกิดปริมาณขยะมูลฝอยตกค้างตามสถานที่ต่าง ๆ อยู่ในปริมาณมาก นอกจากนั้นยังพบว่า การกำจัดขยะส่วนใหญ่เป็นการกำจัดด้วยวิธีการเผาและฝังกลบ ซึ่งพบว่าวิธีเหล่านี้ก่อให้เกิดผลเสียอย่างมากต่อสิ่งแวดล้อม เช่น เกิดก๊าซพิษ และปรากฏการณ์ของภาวะโลกร้อน [1]

ข้าวโพดนับเป็นพืชเศรษฐกิจของโลก และเป็นพืชที่เกษตรกรไทยนิยมปลูกเป็นอันดับต้น ๆ เนื่องจากได้ผลผลิตที่ดีตรงความต้องการของตลาด ใช้ระยะเวลาในการเพาะปลูกสั้น ซึ่งส่งผลให้มีวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรเป็นจำนวนมาก แต่มีการนำมาแปรรูปใช้ในปริมาณน้อย ทำให้การกำจัดขยะเหลือทิ้งจากข้าวโพดส่วนใหญ่ของเกษตรกรคือการฝังกลบและการเผา ซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดปัญหาหมอกพิษทางสิ่งแวดล้อมตามมา แต่เมื่อไม่นานมานี้พบว่า ซังข้าวโพด (ส่วนหนึ่งของข้าวโพดที่เหลือหลังจากการสีเมล็ดออกไป) ถูกนำมาประยุกต์ใช้เพื่อเสริมแรงคอนกรีตในงานก่อสร้างสำหรับเป็นที่อยู่อาศัย การทำเครื่องใช้ รวมไปถึงผลิตภัณฑ์

ด้านต่าง ๆ ที่ต้องการความแข็งแรง เนื่องจากมีข้อดีอยู่หลายประการ เช่น มีราคาถูก น้ำหนักเบา มีความยืดหยุ่นสูง มีความแข็งแรงสูงและไม่นำไฟฟ้า ทำให้ซังข้าวโพดเป็นที่สนใจอย่างมากในภาครัฐและภาคอุตสาหกรรมในการประยุกต์ใช้เพื่อเป็นวัสดุทางเลือกสำหรับการเสริมแรงในงานด้านต่าง ๆ [2]

นอกจากนั้นทางทีมวิจัยได้ศึกษาเกี่ยวกับท่อนาโนคาร์บอน (Carbon Nanotubes) ซึ่งเป็นโครงสร้างนาโนที่เป็นวัสดุทางวิศวกรรมที่ได้รับความนิยมในอุตสาหกรรมอย่างแพร่หลาย เช่น อุตสาหกรรมการบิน ทางทหาร การแพทย์ และด้านอื่น ๆ เนื่องจากมีคุณสมบัติที่โดดเด่นหลายประการ เช่น มีความแข็งแรงสูง ต้านทานแรงดึงสูง มีความยืดหยุ่นอย่างมาก มีน้ำหนักเบา ทนต่อการกัดกร่อน ทนต่อความล้า และคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่โดดเด่น คือสามารถเป็นได้ทั้งสารกึ่งตัวนำ และเป็นตัวนำไฟฟ้าได้ โดยคุณสมบัติดังกล่าวขึ้นอยู่กับกระบวนการสังเคราะห์ [3] ทำให้ความต้องการท่อนาโนคาร์บอนเพิ่มขึ้นอย่างมาก เพราะท่อนาโนคาร์บอนมีผลโดยตรงกับคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุผสม โดยเฉพาะด้านความแข็งแรง ซึ่งมักจะใช้ร่วมกับวัสดุอื่น ๆ ในรูปแบบสารผสม (Composites) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้กับวัสดุนั้น เช่น ใช้ในวัสดุโครงสร้าง อุปกรณ์เก็บพลังงาน ฉนวนกันความร้อน อุปกรณ์กีฬา โครงสร้างของเครื่องบิน รถยนต์ ใช้เป็นชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์หรือเครื่องใช้ไฟฟ้า และอุปกรณ์ทางการแพทย์ เป็นต้น [4]

จากที่กล่าวมาข้างต้นทางผู้วิจัยเห็นถึงปัญหาจากขยะเหลือใช้ทางการเกษตร และคุณสมบัติที่น่าสนใจของซังข้าวโพดมาปรับปรุงคุณสมบัติ และเพิ่มประสิทธิภาพด้วยท่อนาโนคาร์บอนจะสามารถช่วยลดปริมาณขยะ และเพิ่มมูลค่าให้กับขยะมูลฝอยทางการเกษตรได้ ในการศึกษาครั้งนี้ยังมีการนำซังข้าวโพดมาบำบัดด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เพื่อกำจัดเชื้อราและปรับปรุงพื้นผิวของเส้นใยในซังข้าวโพดในการเพิ่มประสิทธิภาพร่วมกับท่อนาโนคาร์บอน และศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อความแข็งแรง และส่วนผสมที่เหมาะสมของวัสดุเสริมแรงจากซังข้าวโพดร่วมกับท่อนาโนคาร์บอน นอกจากนั้นทางทีมวิจัยยังได้ศึกษาลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคและโครงสร้างมหภาคของวัสดุประกอบ (Composite Material) ซึ่งเป็นตัวแปรสำคัญในการหาประสิทธิภาพที่ดีที่สุดของวัสดุ เช่น ด้านความแข็งแรง และความเหมาะสมต่อการใช้งานให้กับวัสดุอื่น ๆ ในอุตสาหกรรมต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์

- 1) เพื่อศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อความแข็งแรง และส่วนผสมที่เหมาะสมของวัสดุเสริมแรงจากซังข้าวโพดร่วมกับท่อนาโนคาร์บอน
- 2) เพื่อศึกษาลักษณะของโครงสร้างจุลภาคของวัสดุเสริมแรงจากซังข้าวโพดที่ผ่านกระบวนการร่วมกับท่อนาโนคาร์บอน
- 3) เพื่อหาสภาวะในด้านปัจจัยต่าง ๆ ที่เหมาะสมสำหรับการผลิตและเพิ่มประสิทธิภาพของวัสดุ

### 1.3 ขอบเขตปริญญานิพนธ์

- 1) ศึกษาหาสภาวะของปัจจัยของการผลิตซังข้าวโพดพันธุ์หวานที่มีอายุ 3 เดือนร่วมกับท่อนาโนคาร์บอน เช่น อัตราส่วนของซังข้าวโพดและท่อนาโนคาร์บอน ความเข้มข้นของสารละลายเบส NaOH และระยะเวลาของการปรับสภาพ
- 2) ศึกษาลักษณะทางโครงสร้างของวัสดุผสมด้วยเทคนิคที่ต่างกัน
- 3) ศึกษาคุณสมบัติเชิงกลเพื่อหาประสิทธิภาพที่สูงที่สุดสำหรับการใช้งาน

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) สามารถลดปริมาณขยะและสามารถเพิ่มมูลค่าของวัสดุทางการเกษตรได้
- 2) ทราบถึงปัจจัยที่มีผลต่อความแข็งแรงของสารเสริมแรงจากซังข้าวโพดร่วมกับท่อนาโนคาร์บอน
- 3) ทราบถึงลักษณะโครงสร้างทางจุลภาค โครงสร้างมหภาค และคุณสมบัติเชิงกลของสารเสริมแรงซังข้าวโพดร่วมกับท่อนาโนคาร์บอน
- 4) สามารถนำไปพัฒนาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพความแข็งแรงให้กับวัสดุอื่นในภาคอุตสาหกรรม

### 1.5 แผนการดำเนินงาน

การดำเนินโครงการวิจัยนี้มีระยะในการดำเนินงาน โดยเริ่มจากเดือนสิงหาคม พ.ศ. 2564 และจะสิ้นสุดในเดือนพฤษภาคม พ.ศ. 2565 ซึ่งมีรายละเอียด และขั้นตอนในการดำเนินงาน ดังแผนการดำเนินงานจะเรียงตามลำดับขั้นตอนที่แสดงในตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงานของโครงการวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินงานของโครงการ	พ.ศ. 2564					พ.ศ. 2565				
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
1. ศึกษาและระบุหัวข้องานวิจัย ที่มาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ขอบเขต และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ										
2. ศึกษาค้นคว้าข้อมูล ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 1) ศึกษาเกี่ยวกับการกำจัดเชื้อราในข้าวโพด 2) ศึกษาเกี่ยวกับวัสดุเสริมแรง 3) ศึกษาเกี่ยวกับกระบวนการขึ้นรูป 4) ศึกษาเกี่ยวกับเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย										
3. ออกแบบการทดลองในการศึกษาวัสดุเสริมแรงจากซังข้าวโพดร่วมกับท่อนานคาร์บอน										
4. เก็บตัวอย่างการทดลอง และเตรียมชิ้นงานสำหรับการทดลอง										
5. ศึกษาโครงสร้างของตัวอย่างการทดลอง ความสัมพันธ์ของโครงสร้างจุลภาค รวมถึงทดสอบประสิทธิภาพของสารเสริมแรง และวิเคราะห์ผล										
6. ออกแบบการขึ้นรูปร่วมกับสารเสริมแรง										
7. ขึ้นรูปวัสดุที่มีสารเสริมแรงเป็นส่วนประกอบจากซังข้าวโพดและท่อนานคาร์บอน										
8. ทดสอบประสิทธิภาพของชิ้นงานที่ได้จากการขึ้นรูป										
9. สรุปผลการทดลอง และจัดทำเล่มปริญาานิพนธ์										

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงแนวคิด ทฤษฎี และเอกสารต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย การศึกษาการออกแบบวัสดุเสริมแรงของซังข้าวโพดร่วมกับท่อนาโนคาร์บอน โดยจะกล่าวถึงการศึกษาวัดซังข้าวโพด ท่อนาโนคาร์บอน การศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคและโครงสร้างมหภาคของวัสดุ ซึ่งมีทฤษฎีที่เกี่ยวข้องแสดงดังต่อไปนี้

- 2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับข้าวโพด
- 2.2 องค์ประกอบของวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรประเภทลิกโนเซลลูโลส
- 2.3 กระบวนการปรับสภาพ (Pretreatment)
- 2.4 ท่อนาโนคาร์บอน (Carbon Nanotubes)
- 2.5 กระบวนการขึ้นรูปแบบกดอัด (Compression Molding)
- 2.6 การศึกษาโครงสร้างวัสดุ
- 2.7 การทดสอบสมบัติของวัสดุ

#### 2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับข้าวโพด

ข้าวโพดจัดเป็นไม้ล้มลุกจำพวกหญ้า มีถิ่นกำเนิดในทวีปอเมริกาใต้ ในปัจจุบันมีการปลูกทั่วไปในเขตร้อนและเขตอบอุ่นทั่วโลก ลำต้นนั้นมีลักษณะอวบกลมและตั้งตรงแข็งแรง มีความสูงของต้นประมาณ 1-4 เมตร ผิวต้นเรียบ ขยายพันธุ์ด้วยวิธีการเพาะเมล็ด [5] โดยพบอีกว่าข้าวโพดเป็นธัญพืชที่มีความสำคัญเป็นอันดับสามของโลก รองมาจากข้าวสาลี และข้าว โดยแหล่งปลูกมักกระจายอยู่ตามภูมิภาคต่าง ๆ ของโลก ได้แก่ ประเทศสหรัฐอเมริกา บราซิล เม็กซิโก จีน รวมทั้งในทวีปแอฟริกาใต้ [6] สำหรับประเทศไทยข้าวโพดถือเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญ เนื่องจากมีพื้นที่เพาะปลูกครอบคลุมอยู่ทั่วทุกภาค ทำให้สามารถสร้างรายได้เป็นจำนวนมากให้กับประเทศ ข้าวโพดที่ปลูกในประเทศไทยแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ ๆ คือ ข้าวโพดฝักสด และข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ โดยข้าวโพดฝักสดปลูกเพื่อใช้สำหรับบริโภคเป็นอาหารและส่งออก ส่วนข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เป็นพืชที่มีความสำคัญต่ออุตสาหกรรมอาหารสัตว์ โดยจังหวัดที่เป็นแหล่งปลูกข้าวโพดที่สำคัญของประเทศไทย ได้แก่ จังหวัดเพชรบูรณ์ นครราชสีมา เลย ลพบุรี และนครสวรรค์ [7] ซึ่งข้าวโพดมีประโยชน์หลายประการ เช่น ใช้เป็นอาหารของมนุษย์และสัตว์ และยังสามารถนำมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์จากข้าวโพดได้หลายชนิด ทั้งในระดับครัวเรือนและในระดับอุตสาหกรรม ทำให้เพิ่มมูลค่าให้กับผลผลิตทางการเกษตรและส่งเสริมการใช้ทรัพยากรธรรมชาติอย่างคุ้มค่า รวมทั้งสามารถลดปัญหาเรื่องขยะจากเศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรได้เป็นอย่างดีอีกด้วย

### 2.1.1 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของข้าวโพด

ข้าวโพดเป็นพืชล้มลุกจำพวกหญ้า ปลูกง่าย อายุสั้น สามารถเจริญเติบโตได้ดีในทุกภาคของประเทศ ไทย จัดอยู่ในวงศ์ Gramineae มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Zea mays* L. และมีชื่อสามัญว่า Corn หรือ Maize โดยลักษณะทางพฤกษศาสตร์ที่สำคัญมีดังนี้ [6]

1) ราก รากแรกที่ออกมาจากคัพพะ (Embryo) เป็นรากชั่วคราวเรียกว่า ไพรมารี (Primary) หรือ เซมินัล (Seminal) หลังจากข้าวโพดเจริญเติบโตได้ประมาณ 7-10 วัน รากถาวรจะงอกขึ้นในระดับใต้พื้นดิน ประมาณ 1-2 นิ้ว รากถาวรนี้เมื่อเจริญเติบโตเต็มที่ก็จะแผ่ออกไปโดยรอบประมาณ 100 เซนติเมตร และแทงลึก ลงไปในดินแนวตั้งยาวมากซึ่งอาจยาวถึง 300 เซนติเมตร นอกจากรากที่อยู่ใต้ดินแล้ว ยังมีรากยึดเหนี่ยว (Bracer Root) ซึ่งเกิดขึ้นรอบ ๆ ข้อที่อยู่ใกล้ผิวดิน

2) ลำต้น ข้าวโพดมีลำต้นแข็ง ใสน้ำหนักไม่กลวง มีความยาวตั้งแต่ 30 เซนติเมตร จนถึง 8 เมตร แล้วแต่ ชนิดของพันธุ์ ตามลำต้นมีข้อ (Node) และปล้อง (Internode) ปล้องที่อยู่ในดิน และใกล้ผิวดินสั้น และจะค่อย ๆ ยาวขึ้นไปทางด้านปลาย ปล้องเหนือพื้นดินจะมีจำนวนประมาณ 8-20 ปล้อง พันธุ์ข้าวโพดส่วนมากลำต้นสด มีสีเขียว

3) ใบ ข้าวโพดมีใบลักษณะยาวรี คล้ายพืชตระกูลหญ้าทั่วไป ประกอบด้วยตัวใบ กาบใบ และเขี้ยวใบ ลักษณะของใบรวมทั้งสีของใบแตกต่างกันไป แล้วแต่ชนิดของพันธุ์ บางพันธุ์ใบสีเขียว บางพันธุ์ใบสีม่วง และ บางพันธุ์ใบลายจำนวนใบก็เช่นเดียวกันอาจมีตั้งแต่ 8-48 ใบ

4) ดอก ข้าวโพดจัดเป็นพวกโมโนอิกเซียส (Monoecious) คือ มีดอกตัวผู้ และดอกตัวเมียแยกอยู่ในต้น เดียวกัน ข้อดอกตัวผู้ (Tassel) อยู่ตอนบนสุดของลำต้น ดอกตัวผู้ดอกหนึ่งจะมีอับเกสร (Anther) 3 อับ แต่ละ อับจะมีเรณูเกสร (Pollen Grain) ประมาณ 2,500 เม็ด ดังนั้นข้าวโพดต้นหนึ่ง จึงมีเรณูเกสรอยู่เป็นจำนวน หลายล้าน และสามารถปลิวไปได้ไกลกว่า 2,000 เมตร ส่วนดอกตัวเมียอยู่รวมกันเป็นช่อ เกิดขึ้นตอนช่อกลาง ๆ ลำต้น ต้นหนึ่งอาจมีหลายช่อแล้วแต่ชนิดพันธุ์ [8]

### 2.1.2 ชนิดของข้าวโพด

ข้าวโพดจำแนกทางพฤกษศาสตร์ โดยแยกตามลักษณะภายนอกของเมล็ดและลักษณะของแป้ง โดย แบ่งได้ 7 ชนิดดังนี้ [9]

1) ข้าวโพดไร่ชนิดหัวบุบ (Dent Corn) มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Zea mays indentata* เมล็ดตอนบนจะมีรอยบุบสีขาว เนื่องจากตอนบนเป็นแป้งชนิดอ่อน ส่วนด้านข้างเป็นแป้งชนิดแข็ง เมื่อนำมาตากแห้งจึงเกิดการยุบตัว

2) ข้าวโพดไร่ชนิดหัวแข็ง (Flint Corn) มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Zea mays indurata* เป็นชนิดที่มี ลักษณะของเมล็ดค่อนข้างแข็งแรง กลม เรียบ หัวไม่บุบ ด้านนอกถูกห่อหุ้มไปด้วยแป้งชนิดแข็ง เมื่อนำมาตากแห้งจึงไม่หดตัวหรือยุบตัว โดยมีขนาดของฝักและจำนวนแถวของเมล็ดน้อยกว่าชนิดหัวบุบ

3) ข้าวโพดหวาน (Sweet Corn) มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Zea mays saccharata* ชนิดนี้เป็นข้าวโพด ที่ใช้ปลูกเพื่อรับประทานฝักสดโดยเฉพาะ เมล็ดมีลักษณะอ่อนใสและโปร่งแสง มีรสหวานอร่อย เนื่องจากมี น้ำตาลมาก เมื่อเมล็ดแก่จะเกิดการหดตัวและเหี่ยวยุบ

4) ข้าวโพดคั่ว (Pop Corn) มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Zea mays everta* เมล็ดมีขนาดค่อนข้างเล็ก มีแป้งแข็งอยู่ภายใน ภายในนอกห่อหุ้มไปด้วยสารที่ค่อนข้างเหนียวและยึดตัวได้ ภายในเมล็ดมีความชื้นอยู่พอสมควร เมื่อถูกความร้อนจะทำให้เกิดแรงดันภายในเมล็ด เมื่อร้อนถึงขีดสุดก็จะระเบิดออกมา ซึ่งโดยทั่วไปอาจแบ่งตามรูปร่างของเมล็ดได้เป็น 2 จำพวก คือ พวกหัวแหลม (Rice Pop Corn) และพวกเมล็ดกลม (Pearl Pop Corn) โดยเมล็ดจะมีสีต่างกันออกไป เช่น ขาว เหลือง ส้ม ม่วง เป็นต้น ส่วนฝักก็มีขนาดต่าง ๆ กัน ตั้งแต่ 5-10 เซนติเมตร

5) ข้าวโพดข้าวเหนียว หรือ ข้าวโพดเทียน (Waxy Corn) มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Zea mays ceratina* ลักษณะของเมล็ดมีความเหนียวคล้ายขี้ผึ้ง แป้งที่ได้จะมีลักษณะคล้ายกับแป้งมันสำปะหลัง ใช้ปลูกเพื่อทำเป็นแป้งที่มีคุณภาพคล้ายกับแป้งมัน นิยมใช้ปลูกเพื่อรับประทานฝักสดคล้ายกับข้าวโพดหวาน แม้รสจะไม่หวานเท่า แต่เมล็ดนิ่ม มีรสอร่อย โดยเมล็ดจะมีสีต่าง ๆ กัน เช่น ขาว เหลือง ส้ม ม่วง หรือมีหลายสีในฝักเดียวกัน

6) ข้าวโพดแป้ง (Flour Corn) มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Zea mays amylacea* เมล็ดจะประกอบไปด้วยแป้งชนิดอ่อนปริมาณมาก ลักษณะของเมล็ดคล้ายกับเมล็ดข้าวโพดไร่ชนิดหัวแข็ง โดยชนิดนี้จะมีเมล็ดประมาณ 8-12 แถว ชาวอินเดียนแดงใช้ทั้งฝักสดและฝักแก่เป็นอาหาร

7) ข้าวโพดป่า (Pod Corn) มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Zea mays tunicate* มีลักษณะใกล้เคียงข้าวโพดพันธุ์ป่า มีลำต้นและฝักเล็กกว่าข้าวโพดธรรมดา ขนาดเมล็ดค่อนข้างเล็กเท่า ๆ กับเมล็ดข้าวโพดมีขี้เปลือกหุ้มทุกเมล็ด และยังมีเปลือกหุ้มฝักอีกชั้นหนึ่งเหมือนข้าวโพดธรรมดาทั่ว ๆ ไป เมล็ดมีลักษณะต่าง ๆ กัน ข้าวโพดชนิดนี้ไม่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจ ปลูกไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น

การจำแนกตามวัตถุประสงค์ของการปลูกอาจจำแนกออกได้เป็น 4 ชนิดได้แก่ ข้าวโพดใช้เมล็ด (Grain Corn) ปลูกเพื่อเก็บเมล็ดแก่ใช้เป็นอาหารสัตว์ และมนุษย์หรือทำอุตสาหกรรม ข้าวโพดหมัก (Silage Corn) ปลูกเพื่อตัดต้นสดมาหมักใช้เป็นอาหารสัตว์ ข้าวโพดอาหารสัตว์ (Fodder Corn) ปลูกเพื่อตัดต้นสดไปใช้เลี้ยงสัตว์ และข้าวโพดฝักอ่อน (Baby Corn) ในประเทศไทยนิยมปลูกเพื่อเก็บฝักอ่อนไปใช้ในการประกอบอาหาร [9] ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ฝักข้าวโพดชนิดต่างๆ (จากซ้ายไปขวา) ข้าวโพดหัวแข็ง ข้าวโพดหัวบุบ ข้าวโพดหวาน ข้าวโพดแป้ง ข้าวโพดข้าวเหนียว และข้าวโพดคั่ว

### 2.1.3 ชังข้าวโพดและการใช้ประโยชน์

ชังข้าวโพดเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตรซึ่งเกิดขึ้นหลังจากกระบวนการสีเพื่อเอาเมล็ดออกจากฝัก ซึ่งจะทำให้เกิดเศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร 2 ชนิดคือ ชังข้าวโพด และเศษชังข้าวโพด การใช้ประโยชน์จากชังข้าวโพดสามารถจำแนกออกเป็น 3 ประเภทดังนี้

1) ประโยชน์ทางการเกษตรและปศุสัตว์ ซึ่งใช้เป็นวัสดุในการเพาะเห็ด เช่น เห็ดนางรม เห็ดมะม่วง เป็นต้น ซึ่งกองวิจัยโรคพืชและจุลินทรีย์ กรมวิชาการเกษตร ได้ทำการทดลองแล้วพบว่า ชังข้าวโพดมีเฮมิเซลลูโลสเป็นจำนวนมากซึ่งเหมาะแก่การเจริญเติบโตของเห็ด และสามารถนำมาผสมเป็นอาหารสัตว์เคี้ยวเอื้องได้ เช่น วัว ควาย

2) ประโยชน์ทางเภสัชกรรม ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตไซลิทอลในชังข้าวโพดจะมีไซแลน หรือพวกแป้งด้วย เมื่อถูกไฮโดรไลสจะได้สารไซโลส และไซลิทอล ซึ่งมีรสหวาน และเป็นสารที่มีความสำคัญในกิจกรรมทันตกรรม และเป็นส่วนผสมในการผลิตยาหลายชนิดโดยเฉพาะยาที่เกี่ยวข้องกับโรคผิวหนัง เช่น ยาแก้คัน กำจัดสิว ฆ่าเชื้อแบคทีเรีย เป็นต้น

3) ประโยชน์ทางอุตสาหกรรมและพลังงาน เป็นส่วนผสมในอุตสาหกรรมการทำไม้อัด ใช้ในการก่อสร้าง เช่น ทำฝ้าเพดานบอร์ด โดยนำส่วนประกอบพวกเฮลลูโลสที่ปรากฏในชังข้าวโพดมาเป็นตัวเชื่อมความแข็งแรงและทนทาน เป็นส่วนผสมในการผลิตคอนกรีตเบา ซึ่งเป็นวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้าง ทำให้แข็งแรงและมีน้ำหนักเบา ช่วยป้องกันความร้อนและเสียง และยังช่วยปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตให้สามารถทนไฟได้ดี โดยชังข้าวโพดและเศษชังข้าวโพดแสดง ดังรูปที่ 2.2 [10]

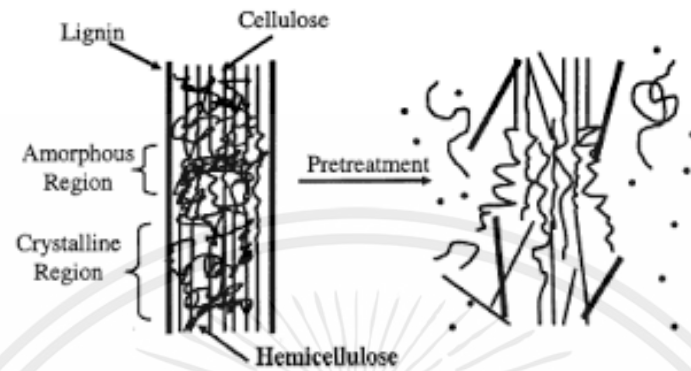


รูปที่ 2.2 ชังข้าวโพดและเศษชังข้าวโพด

## 2.2 องค์ประกอบของวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรประเภทลิกโนเซลลูโลส

ลิกโนเซลลูโลส (Lignocellulose) หมายถึง ซิวมวลอินทรีย์ที่ประกอบด้วย เซลลูโลส (Cellulose) เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) และลิกนิน (Lignin) ดังรูปที่ 2.3 พบมากในผนังเซลล์ของพืชได้แก่ เศษวัสดุเหลือทิ้งจากไม้ทั้งไม้เนื้อแข็งและไม้เนื้ออ่อน เศษวัสดุจากการเกษตร เช่น ชังข้าวโพด เส้นใยข้าวโพด ชานอ้อย

แกลบ และพวกฟางข้าว ขยะจากกระบวนการแปรรูปอาหารและจากบ้านเรือน รวมถึงมูลสัตว์ต่าง ๆ โดยทั่วไป องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรตรวจพบเซลลูโลสมากถึงร้อยละ 40-60 เฮมิเซลลูโลส ร้อยละ 20-30 และลิกนินร้อยละ 15-30 ดังตารางที่ 2.1 [11]



รูปที่ 2.3 โครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรประเภทลิกโนเซลลูโลส

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินในวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร

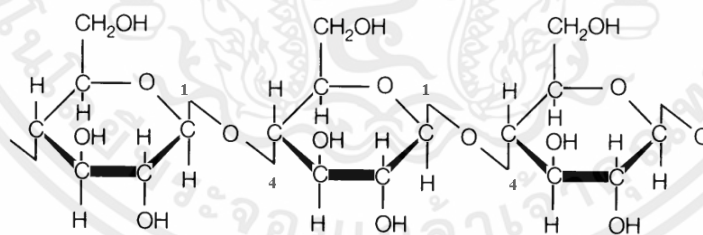
วัสดุลิกโนเซลลูโลส	ส่วนประกอบของลิกโนเซลลูโลส (%)		
	เซลลูโลส	เฮมิเซลลูโลส	ลิกนิน
ไม้เนื้อแข็ง	40-50	24-40	18-25
ไม้เนื้ออ่อน	45-50	25-35	25-35
เปลือกถั่ว	25-30	25-30	30-40
ฟางข้าว	32.1	24	12.5
ฟางข้าวสาลี	30	50	15
ชานอ้อย	33.4	30	18.9
ซังข้าวโพด	45	35	15
ต้นปาล์ม	37.14	30.59	22.32
ต้นมันสำปะหลัง	32.2	13.85	26.96
ใบไม้	15-20	80-85	0
ใยเมล็ดฝ้าย	80-95	5-20	0
กระดาษหนังสือพิมพ์	40-55	25-40	18-30
มูลวัว ควาย ปศุสัตว์	1.6-4.7	1.4-3.3	2.7-5.7
หญ้า	25-40	35-50	10-30
หญ้าคอสทอล เบอมีวดา	25	35.7	6.4
หญ้าสวิตซ์	45	31.4	12.0

## 2.2.1 เซลลูโลส (Cellulose)

เซลลูโลสเป็นองค์ประกอบที่พบมากในวัสดุประเภทลิกโนเซลลูโลส โดยพบในส่วนของผนังเซลล์ของพืช อยู่ร่วมกับเฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ปริมาณที่พบแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับชนิดและส่วนของพืช เช่น เนื้อไม้พบประมาณร้อยละ 40-50 และเส้นใยฝ้ายพบประมาณร้อยละ 98

เซลลูโลสเป็นโพลิเมอร์มีลักษณะเป็นเส้นตรง ไม่มีกิ่งก้าน ประกอบด้วยหน่วยย่อยคือ เบต้า-D-กลูโคไพราโนส ( $\beta$ -D-Glucopyranose) เชื่อมต่อกันด้วยพันธะเบต้า 1,4-ไกลโคซิดิก ( $\beta$ -1,4-Glycosidic Bond) เกิดเป็นโพลิเมอร์กลูแคน (Glucan) มีความยาวตามธรรมชาติประมาณ 10,000 หน่วย ยึดเหนี่ยวกันด้วยพันธะไฮโดรเจน โดยทั่วไปในธรรมชาติพบเซลลูโลส 2 แบบ คือ Crystalline Cellulose และ Amorphous Cellulose โดยส่วนของ Crystalline Cellulose จะถูกย่อยสลายด้วยเอนไซม์ยากกว่า Amorphous Cellulose สำหรับโครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส [11] แสดงดังรูปที่ 2.4

เซลลูโลสเป็นองค์ประกอบที่สามารถพบได้ในเซลล์พืชและแบคทีเรีย สำหรับผนังเซลล์พืช (Plant Cell Wall Structure) เช่น ฝัก ผลไม้ เมล็ดธัญพืช หรือเส้นใยพืช (Vegetable Fibers) จะประกอบด้วยโครงสร้าง พอลิเมอร์ 3 ชนิดคือ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลสและลิกนิน หรือที่เรียกว่าลิกโนเซลลูโลส (Lignocellulose) โดยปริมาณเซลลูโลสในพืชนอกจากจะขึ้นอยู่กับการเจริญเติบโตและสายพันธุ์ของพืชแล้วยังขึ้นอยู่กับชนิดพืช เช่น ฟางข้าว ชานอ้อย ชังข้าวโพด ต้นมันสำปะหลัง ล้วนมีปริมาณของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลสและลิกนินที่แตกต่างกัน แสดงดังตารางที่ 2.1 โดยเซลลูโลสมักอยู่ร่วมกับเฮมิเซลลูโลสและเพกทินเพื่อทำหน้าที่เสริมสร้างโครงสร้าง ของลำต้นและกิ่งก้านพืชให้มีความแข็งแรงมากขึ้น นอกจากนี้เซลลูโลสจัดเป็นเส้นใยอาหาร (Dietary Fiber) ชนิดที่ไม่ละลายในน้ำ และไม่สามารถย่อยได้ด้วยเอนไซม์ในระบบทางเดินอาหารของมนุษย์และสัตว์กระเพาะเดี่ยว [12]



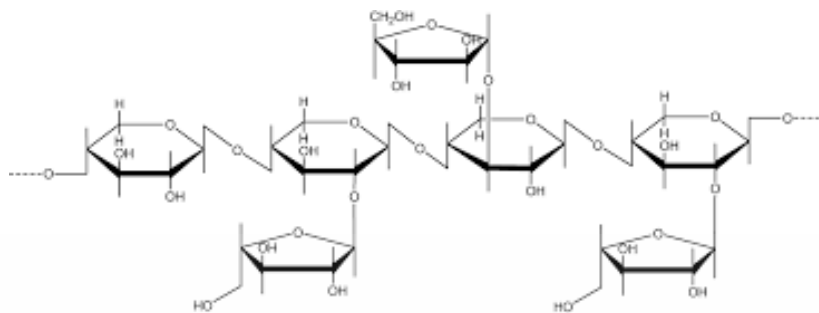
รูปที่ 2.4 โครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลสที่ประกอบด้วยโมเลกุลของกลูโคสที่เชื่อมต่อกัน

## 2.2.2 เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose)

เฮมิเซลลูโลสซึ่งเป็นองค์ประกอบชนิดหนึ่งในวัสดุประเภทลิกโนเซลลูโลส เป็นเฮเทอโรโพลิเมอร์ของน้ำตาลชนิดต่าง ๆ หลายชนิดผสมกัน เช่น กลูโคส แมนโนส ไชโลส และอะราบิโนส ซึ่งพบอยู่ในรูปโพลิเมอร์ไซแลน แมนแนน กาแลกแตน และอะราบิแนน มีความยาวเฉลี่ยประมาณ 200 หน่วย โดยในพอลิเมอร์ไวแลน ดี-ไชโลสมีปริมาณมากที่สุดคือ ร้อยละ 85-93 ส่วนองค์ประกอบอื่น เช่น กลูโคส กรดกลูควโรนิก กรดกาแลกตุโรนิก จะพบปริมาณน้อย โดยไชโลสที่พบจะเชื่อมด้วยพันธะเบตา 1,4 ไกลโคซิดิก สำหรับโครงสร้างทาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

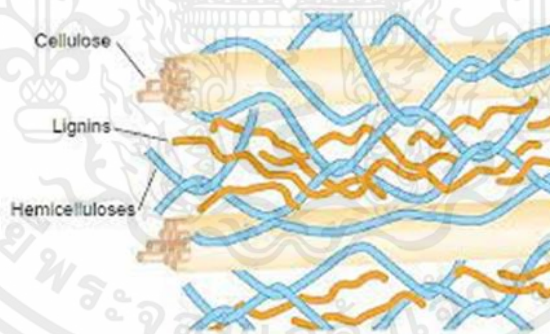
เคมีของไซแลน [11] แสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 โครงสร้างโมเลกุลของไซแลน

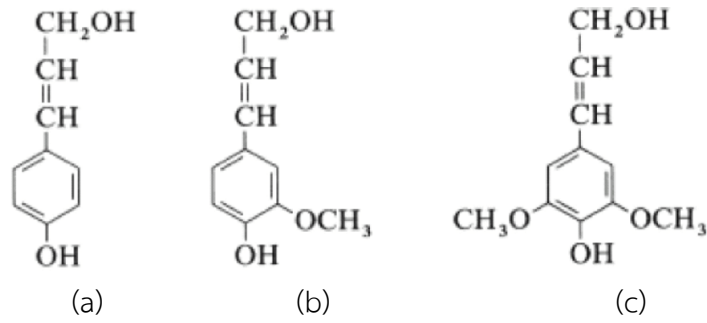
### 2.2.3 ลิกนิน (Lignin)

ลิกนินเป็นสารประกอบที่มีอยู่ในเซลล์พืชประมาณ 20-30 % ซึ่งมีปริมาณรองลงมาจากเฮมิเซลลูโลส และเซลลูโลส โดยส่วนใหญ่สามารถพบลิกนินบริเวณผนังชั้นที่สองของผนังเซลล์และระหว่างชั้นเส้นใย (Middle Lamella) ดังรูปที่ 2.6 ซึ่งนอกจากลิกนินจะมีหน้าที่เชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลของเฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลสให้ติดกันเพื่อเพิ่มความแข็งแรงแล้ว ยังช่วยลดการระเหยของน้ำที่อยู่ระหว่างเนื้อเยื่อไซเลมและผนังเซลล์ นอกจากนี้ลิกนินยังเป็นองค์ประกอบที่สำคัญในเนื้อไม้ โดยเฉพาะไม้ยืนต้น ซึ่งจะช่วยให้ต้นไม้มีความแข็งแรง ทำให้ผนังเซลล์กันน้ำ และมีสมบัติป้องกันโรคได้ [13]



รูปที่ 2.6 ลิกนิน เฮมิเซลลูโลส และเซลลูโลสที่เป็นองค์ประกอบภายในผนังเซลล์

ลิกนินเป็นเฮเทอโรพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างแบบ 3 มิติ ที่ประกอบด้วย สารประกอบอะโรมาติก 3 ชนิด ประกอบด้วย Tran-P-Coumaryl Alcohol, Trans-Coniferyl Alcohol และ Trans-P-Sinapyl Alcohol นอกจากนี้ โมเลกุลของลิกนินยังเชื่อมต่อกับสารประกอบอะโรมาติกอื่น ๆ อีกมากมาย เช่น Vanillin และ Syringaldehyde สูตรโครงสร้างของ Tran-P-Coumaryl Alcohol, Trans-Coniferyl Alcohol และ Trans-P-Sinapyl Alcohol แสดงดังรูปที่ 2.7 [11]



รูปที่ 2.7 โครงสร้างของ (a) Tran-P-Coumaryl Alcohol (b) Trans-Coniferyl Alcohol  
(c) Trans-P-Sinapyl Alcohol

### 2.3 กระบวนการปรับสภาพ (Pretreatment)

การปรับสภาพวัตถุดิบมีวัตถุประสงค์เพื่อกำจัดลิกนินซึ่งมีคุณสมบัติในการทอหุ้มหรือเคลือบโครงสร้างของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส ลิกนินจึงเป็นเสมือนผนังป้องกันไม่ให้จุลินทรีย์เข้าไปย่อยสลายเซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลส นอกจากนี้ยังมีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มขนาดรูพรุนของตัววัตถุดิบ และลดการเกิดผลึกของเซลลูโลส (Cellulose Crystallinity) ทำให้เอนไซม์สามารถเข้าถึงวัตถุดิบได้ง่ายขึ้น อีกทั้งยังช่วยลดค่าใช้จ่ายสำหรับใช้เอนไซม์ในการย่อยเซลลูโลส เนื่องจากหากใช้เอนไซม์ในการย่อยเพียงอย่างเดียวโดยไม่มีกระบวนการปรับสภาพวัตถุดิบก่อน จะทำให้มีค่าใช้จ่ายสำหรับเอนไซม์ถึง 25 % ของต้นทุนการผลิตเอทานอลทั้งหมด กระบวนการปรับสภาพวัตถุดิบสามารถแบ่งออกเป็น 4 รูปแบบ ได้แก่ การปรับสภาพทางกายภาพ การปรับสภาพทางชีวภาพ การปรับสภาพทางเคมี และการปรับสภาพทางกายภาพร่วมกับเคมี ซึ่งแต่ละรูปแบบส่งผลกระทบต่อกระบวนการปรับสภาพต่อองค์ประกอบทางเคมีและโครงสร้างของวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรประเภทลิกโนเซลลูโลสแตกต่างกัน

#### 2.3.1 วิธีการทางเคมี (Chemical Pretreatment)

##### 1) การทำปฏิกิริยากับโอโซน (Ozonolysis)

โอโซนเป็นตัวออกซิแดนต์ที่มีประสิทธิภาพ และสามารถทำให้เกิดการแตกตัวของลิกนินและเฮมิเซลลูโลสในวัสดุพวกฟางข้าวได้ วิธีนี้มีจุดเด่นคือ เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการเอาลิกนินออกได้ดี ไม่มีสารพิษที่จะไปยับยั้งการทำปฏิกิริยาในส่วนต่าง ๆ กระบวนการนี้สามารถทำได้ที่อุณหภูมิห้อง แต่ผลเสียของวิธีนี้คือค่าใช้จ่ายที่สูงมาก

##### 2) การทำปฏิกิริยาด้วยการใช้ด่าง (Alkali Pretreatment)

การใช้ด่างในกระบวนการปรับสภาพวัตถุดิบมีผลต่อวัสดุจำพวกลิกโนเซลลูโลส และผลของด่างที่ใช้ในกระบวนการแปลงสภาพจะขึ้นอยู่กับปริมาณของลิกนินที่มีอยู่ในวัสดุนั้นด้วย โดยกลไกการทำงานของด่างนั้นคือการเข้าไปเพิ่มการพองตัวของโมเลกุลภายในต่อสายพันธะภายในของไซแลนในเฮมิเซลลูโลส ความพรุนของวัสดุจะเพิ่มขึ้นได้เมื่อทำการกำจัดสายโซ่ที่เชื่อมต่อกัน การใช้ด่างเจือจางในวัสดุลิกโนเซลลูโลสมีผลทำให้เกิดการบวมภายในเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสในการทำปฏิกิริยาทำให้วัสดุมีความพรุนเพิ่มขึ้นได้ ลดความ

เป็นโครงสร้างผลึกของเซลลูโลส ลดระดับความเป็นพอลิเมอร์ขนาดใหญ่ และสามารถแยกสายโครงสร้างระหว่างลิกนินและคาร์โบไฮเดรต และเป็นการแยกองค์ประกอบหรือทำลายโครงสร้างของลิกนิน อย่างไรก็ตามการใช้ต่างเพื่อปรับสภาพมักจะไม่มีผลต่อวัสดุพวกไม้เนื้ออ่อนเท่าไม้เนื้อแข็ง ต่างที่นิยมใช้ในการแยกลิกนินได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์ และแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ Kim et al. (2008) ได้ศึกษาการปรับสภาพข้าวบาร์เลย์ด้วยแอมโมเนียพบว่าแอมโมเนียที่ความเข้มข้นร้อยละ 15 อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส เวลา 24-72 ชั่วโมง สามารถสกัดแยกเอาส่วนของลิกนินออกร้อยละ 50-66 [14] นันทิกา และคณะ (2554) รายงานว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์จะทำให้ปริมาณของเซลลูโลสเพิ่มขึ้นในขณะที่ปริมาณเอมิเซลลูโลสและลิกนินลดลง [15] นอกจากนี้ Chen และคณะ (2012) พบว่า 70% ของเอมิเซลลูโลสถูกกำจัดภายใน 4 สัปดาห์ ภายใต้การปรับสภาพด้วยต่างที่สภาวะอุณหภูมิห้อง และการใช้เอนไซม์ชนิดผสมหลังจากการปรับสภาพวัตถุดิบด้วยต่างแล้วสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการย่อยสลายชีวมวลได้อย่างมีนัยสำคัญ [16]

### 3) การทำปฏิกิริยาด้วยการใช้กรด (Acid Pretreatment)

กระบวนการปรับสภาพโดยใช้กรดนั้นมีจุดประสงค์คือ เพื่อให้ได้น้ำตาลในปริมาณที่สูงจากวัสดุชีวมวล ชนิดของกรดที่นำมาปรับสภาพมีมากมายหลายประเภทได้แก่ กรดซัลฟิวริก กรดไฮโดรคลอริก กรดไนตริก หรือกรดฟอสฟอริก ในกระบวนการแปลงสภาพสามารถใช้ได้ทั้งกรดเข้มข้นและเจือจางเพื่อเพิ่มการทำงานของกระบวนการไฮโดรไลซิส ในกระบวนการปรับสภาพวัตถุดิบ การใช้กรดเจือจางเป็นวิธีหนึ่งที่ได้รับ ความสนใจศึกษากันมากและแพร่หลายที่สุด การใช้กรดเจือจางเพื่อปรับสภาพวัสดุที่อุณหภูมิที่เหมาะสมโดยใช้ กรดซัลฟิวริกหรือกรดฟอสฟอริกมักจะถูกใช้สำหรับการเปลี่ยนวัสดุพวกลิกโนเซลลูโลส ซึ่งประกอบไปด้วยส่วน ที่เป็นเอมิเซลลูโลส ไปเป็นน้ำตาลที่ละลายได้ตามด้วยการใช้เอนไซม์เป็นตัวเร่งในปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส เพื่อให้เกิดเป็นกลูโคส ในการใช้กรดเจือจางจะมีอยู่ 2 รูปแบบที่ใช้คือ (1) ปริมาณสารตั้งต้นน้อย (ร้อยละ 5-10 โดย น้ำหนัก) ที่อุณหภูมิสูง ( $T > 433$  องศาเซลวิน) และ (2) ปริมาณสารตั้งต้นมาก (ร้อยละ 10-40 โดยน้ำหนัก) ที่ อุณหภูมิต่ำ ( $T < 433$  องศาเซลวิน)

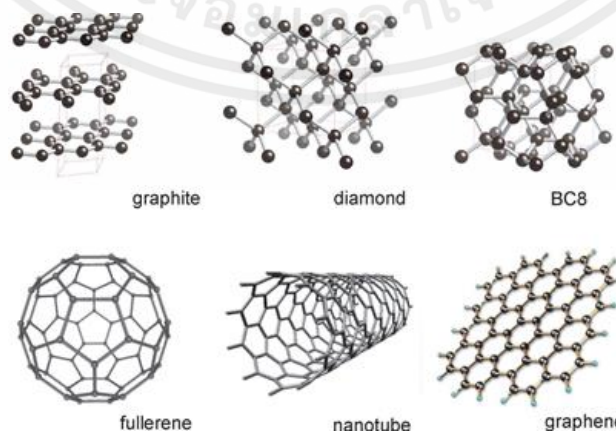
โดยทั่วไปแล้วพบว่าเมื่อทำการปรับสภาพที่อุณหภูมิสูงและเวลาที่ใช้น้อยกว่าจะมีผลทำให้พบปริมาณ ไฮโดรลีสสูง และการทำงานของเอนไซม์สามารถทำงานได้ดีกว่า ที่อุณหภูมิสูงการใช้กรดเจือจางพบว่ามีผลต่อการ เพิ่มการย่อยเซลลูโลส ซึ่งจะขึ้นอยู่กับชนิดของสารตั้งต้นและความเข้มข้นที่ใช้โดยส่วนใหญ่ร้อยละ 80 และ 95 ของน้ำตาลในเอมิเซลลูโลสสามารถได้คืนมาโดยการใช้กรดเจือจางในการปรับสภาพจากการใช้วัสดุลิกโน เซลลูโลสเป็นสารตั้งต้น นอกจากนั้นความเข้มข้นของกรดและอุณหภูมิที่ใช้เป็นปัจจัยที่สำคัญต่อการเกิดสารที่เป็นพิษ อุณหภูมิที่เหมาะสม ( $< 160$  องศาเซลเซียส) ได้มีการพิสูจน์ว่าเพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ของเอมิเซลลูโลส ในอีกด้านหนึ่งเมื่อใช้อุณหภูมิที่สูงกว่า 160 องศาเซลเซียส จะมีผลต่อเซลลูโลสมากกว่าซึ่ง พบว่าจะมีการเกิดปริมาณน้ำตาลที่สูงและมีการสลายส่วนประกอบของลิกนิน การทำงานของกรดเจือจางใน การแปลงสภาพจะมีผลไปยังกระบวนการไฮโดรไลซิสขององค์ประกอบของเอมิเซลลูโลสที่สามารถผลิตเป็น น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว การมีอยู่ของเซลลูโลส เพื่อให้เกิดการทำปฏิกิริยาโดยเอนไซม์โดยที่มีการกำจัดเอมิ เซลลูโลสและส่วนที่เป็นลิกนิน โดยทั่วไปแล้วการใช้กรดเจือจางผสมกับวัสดุชีวมวลและทำที่อุณหภูมิสูงที่ 160- 220 องศาเซลเซียส ในช่วงเวลาสั้นๆไปไฮโดรไลซ์เอมิเซลลูโลสให้เป็นไฮโดรลีสและน้ำตาลตัวอื่นและจากนั้นจะมี

การทำลายโซโลสให้เป็นเฟอฟูรัล กระบวนการไฮโดรไลซิสโดยไม่ผ่านการปรับสภาพวัตถุดิบก่อนพบว่าผลผลิตที่ได้มีค่าน้อยกว่าร้อยละ 20 ในขณะที่เมื่อผ่านกระบวนการปรับสภาพแล้วได้ผลผลิตมากกว่าร้อยละ 90

## 2.4 ท่อนาโนคาร์บอน (Carbon Nanotubes)

คาร์บอน (Carbon) มาจากคำว่า “Charbone” เป็นภาษาฝรั่งเศส ซึ่งเป็นธาตุในหมู่ที่ 4 ตามตารางธาตุ คาร์บอนถือเป็นธาตุที่พบมากที่สุดในสิ่งมีชีวิต และมีความพิเศษอีกอย่างคือ สามารถเกิดพันธะได้หลายรูปแบบ เช่น พันธะเดี่ยว พันธะคู่ และพันธะสาม จึงทำให้ธาตุคาร์บอนด้วยตัวเองสามารถจับตัวกัน และเกิดเป็นโครงสร้างได้หลายรูปแบบ ได้แก่ เพชร แกรไฟต์ ฟูลเลอร์รีน และท่อนาโนคาร์บอน เป็นต้น ดังรูปที่ 2.8

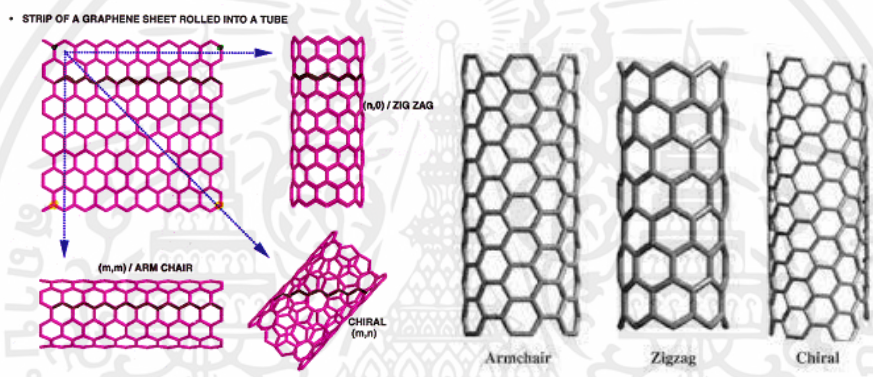
การสังเคราะห์เส้นใยคาร์บอนที่มีขนาดในระดับนาโนเมตรได้ถูกค้นพบขึ้นในปี ค.ศ. 1976 โดยโมริโนบุ เอนโดะ (Morinobu Endo) หลังจากนั้น ในปี ค.ศ. 1985 นักวิทยาศาสตร์รางวัลโนเบล 3 ท่าน ได้แก่ ริชาร์ดสมอลลีย์ (Richard Smalley), แฮร์รี โครโต (Harold Kroto) และโรเบิร์ต เคิร์ล (Robert Curl) (ได้รับรางวัล Nobel สาขาเคมี ในปี ค.ศ. 1996) ได้ค้นพบโครงสร้างของคาร์บอนที่มีขนาดเล็กและเรียกมันว่า Fullerene ซึ่งมีรูปร่างหลายแบบ เช่น ทรงกลม (Bucky Balls) และท่อ (Nanotubes) เป็นต้น [18] ในปี ค.ศ. 1991 มีการรายงานในวารสาร Nature เป็นครั้งแรกว่า นักฟิสิกส์ชาวญี่ปุ่น สุมิโอะ อิจิมา (Sumio Iijima) เขาได้ใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายสูงมากตรวจสอบเขม่าสีดำลักษณะคล้ายกับรากไม้ เป็นเส้นยาวจับกันเป็นกลุ่ม โดยมีโครงสร้างของอะตอมที่เป็นระเบียบและสมมาตรกันโดยให้ชื่อว่า ท่อนาโนคาร์บอน (Carbon Nanotubes) ซึ่งจากการค้นพบนั้น คือ ท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น (Multi-Walled Carbon Nanotubes: MWCNTs) จากนั้นในปี ค.ศ. 1993 อิจิมาและคณะสามารถสร้างท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังชั้นเดียว (Single-Walled Carbon Nanotubes: SWCNTs) ขึ้นมาได้ หลังจากนั้นเป็นต้นมาท่อนาโนคาร์บอนก็ได้รับความสนใจจากนักวิจัยทั่วโลก รวมทั้งการนำท่อนาโนคาร์บอนไปประยุกต์ใช้ในงานต่าง ๆ เช่น การนำไปใช้เป็นสารเสริมความแข็งแรงในวัสดุคอมโพสิต อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ใส์ดินสอด วัสดุกรอง วัสดุหล่อลื่น วัสดุแยกสารในคอลัมน์ของเครื่องโครมาโทกราฟี สารเติมแต่งเพื่อเพิ่มความแข็งแรงในโลหะ และเครื่องประดับ เป็นต้น [17, 18]



รูปที่ 2.8 อัญรูปของคาร์บอน ซึ่งเป็นธาตุเดียวกันแต่โครงสร้างต่างกัน

### 2.4.1 โครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอน

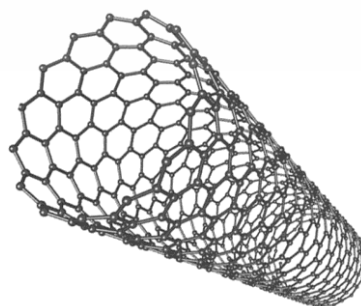
ท่อนาโนคาร์บอนเกิดจากการเรียงตัวกันของอะตอมคาร์บอนเป็นแบบวงอะโรมาติกหกเหลี่ยมต่อกัน คล้ายแผ่นแกรไฟต์ (Graphite) ม้วนเชื่อมติดกันเป็นรูปทรงกระบอก (Cylindrical Shape) ดังรูปที่ 2.9 ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางระดับนาโนเมตร ( $10^{-9}$  เมตร) ความยาวของท่อยาวถึงระดับไมโครเมตร ( $10^{-6}$  เมตร) หรือมากกว่านั้น ท่อนาโนคาร์บอนมีสมบัติที่แข็งแรงและเหนียวกว่าเหล็กกล้า ความยืดหยุ่นสูง มีขนาดเล็ก แต่พื้นที่ผิวสัมผัสที่มากกว่าวัสดุทั่วไป สามารถนำไฟฟ้าหรือกลายเป็นฉนวนได้ ขึ้นอยู่กับทิศทางของแนวการจัดเรียงตัวของอะตอมคาร์บอน ซึ่งมี 3 ลักษณะ คือ Armchair, Zig-Zag และ Chiral โดย Armchair เกิดจากวงอะโรมาติกต่อกันตามแนวสมมาตรแกนตั้ง แบบ Zig-Zag เกิดจากวงอะโรมาติกต่อกันตามแนวสมมาตรแกนนอน และแบบ Chiral เกิดจากวงอะโรมาติกด้วยมุมบิดอื่นที่ต่างจาก 2 แบบแรกดังรูปที่ 2.9 อีกทั้งยังมีน้ำหนักเบา ทำให้สามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้อย่างกว้างขวางในหลายอุตสาหกรรม



รูปที่ 2.9 การจัดเรียงตัวในรูปแบบต่าง ๆ ของวงแหวนหกเหลี่ยมคาร์บอน

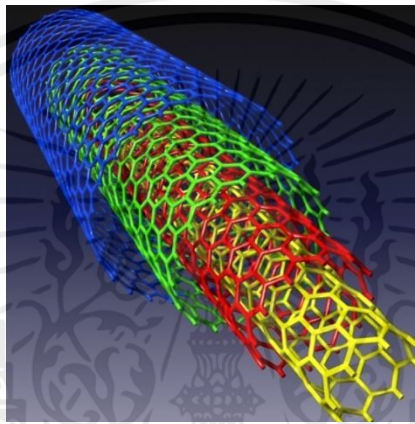
ท่อนาโนคาร์บอนสามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิดตามจำนวนชั้นของผนังท่อได้ ดังนี้

1) ท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังชั้นเดียว (Single-Walled Carbon Nanotubes: SWCNTs) มีลักษณะเป็นท่อกลอง มีผนังชั้นเดียวหรือเป็นท่อเดี่ยว ซึ่งเกิดจากการม้วนของแผ่นแกรไฟต์บาง ๆ เพียงแผ่นเดียวให้เป็นทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลางมีขนาด 0.4-2 นาโนเมตร ดังรูปที่ 2.10 โดยมีสมบัติที่โดดเด่นคือความสามารถในการนำไฟฟ้าที่ดีมาก



รูปที่ 2.10 โครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังชั้นเดียว

2) ท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น (Multi-Walled Carbon Nanotubes: MWCNTs) มีผนังซ้อนกัน 2 ชั้นขึ้นไป ประกอบด้วยแผ่นแกรไฟต์หลาย ๆ แผ่นม้วนกันเป็นทรงกระบอกกลวง แต่ละชั้นห่างกันประมาณ 0.34-0.36 นาโนเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายในมีขนาดประมาณ 1.5-15 นาโนเมตร ส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกมีขนาดประมาณ 2.5-30 นาโนเมตร ซึ่งมีคุณสมบัติคือ มีความแข็งแรง ทนต่อสารเคมี มีความยืดหยุ่นมาก และมีน้ำหนักเบา จึงสามารถนำมาเป็นวัสดุเสริมแรงในผลิตภัณฑ์หลากหลายชนิด เช่น อุปกรณ์กีฬา โครงสร้างของเครื่องบิน รถยนต์ ใช้เป็นชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์หรือเครื่องใช้ไฟฟ้า และอุปกรณ์ทางการแพทย์ เป็นต้น ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 โครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น

#### 2.4.2 สมบัติของท่อนาโนคาร์บอน

ท่อนาโนคาร์บอนถือได้ว่าเป็นสารที่ได้รับความสนใจอย่างมากเนื่องจากมีสมบัติในหลาย ๆ ด้าน ดังนี้

##### 1) สมบัติทางกายภาพ (Physical Properties)

ท่อนาโนคาร์บอนเป็นโมเลกุลที่มีรูปร่างคล้ายท่อตาข่ายขนาดเล็กเกิดจากการจัดเรียงตัวของอะตอมคาร์บอน มีเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในระดับนาโนเมตรประมาณ 1-15 นาโนเมตร และมีความยาวประมาณ 10 ไมโครเมตร จึงมีอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางหลายพันเท่า รวมทั้งยังมีความหนาแน่นเพียง  $1.80 \text{ g/cm}^3$  และมีพื้นที่ผิวมากถึง  $1,250 \text{ cm}^2/\text{g}$  ซึ่งเป็นสมบัติที่พิเศษของท่อนาโนคาร์บอน [19, 20]

##### 2) สมบัติทางไฟฟ้า (Electrical Properties)

ท่อนาโนคาร์บอนเป็นส่วนประกอบในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีขนาดเล็กถึงในระดับนาโนเมตร เช่น ไดโอด ทรานซิสเตอร์ เป็นต้น เนื่องจากท่อนาโนคาร์บอนมีความสามารถด้านการนำไฟฟ้าได้ดีกว่าทองแดง โดยท่อนาโนคาร์บอนหนึ่งท่อสามารถนำไฟฟ้าได้ถึง  $10^9 \text{ A/cm}^2$  ขณะที่ทองแดงนำไฟฟ้าได้สูงสุดเพียง  $10^6 \text{ A/cm}^2$  [21]

##### 3) สมบัติเชิงกล (Mechanical Properties)

ท่อนาโนคาร์บอนมีค่าโมดูลัสของยังสูงมากถึง  $1.2 \text{ TPa}$  (Tera Pascal;  $10^{12} \text{ N/m}^2$ ) มากกว่าเหล็ก 5 เท่า และมีค่าความแข็งแรงต่อการดึง (Tensile Strength) เท่ากับ  $200 \text{ GPa}$  (Giga Pascal;  $10^9 \text{ N/m}^2$ )

มากกว่าเหล็ก 120 เท่า แต่มีน้ำหนักเบากว่าประมาณ 6 เท่า และมีสมบัติในการนำความร้อนถึง 2,000 W/m/K มากกว่าเหล็ก 10 เท่า [19]

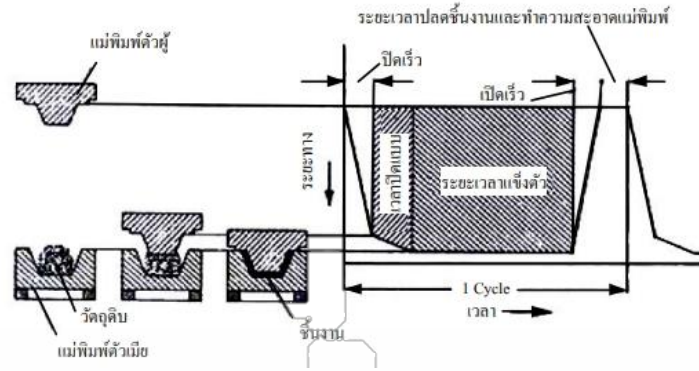
## 2.5 กระบวนการขึ้นรูปแบบกดอัด (Compression Molding)

กระบวนการขึ้นรูปแบบกดอัดเป็นเทคนิคการแปรรูปที่เก่าแก่อีกเทคนิคหนึ่ง ซึ่งมีความง่ายและไม่ซับซ้อนที่สุด ถึงแม้ว่าจะใช้เวลานาน ในปี ค.ศ.1908 มีการสังเคราะห์ฟีนอลฟอร์มัลดีไฮด์เรซินด้วยเทคนิคนี้เป็นครั้งแรก โดย Bakeland ในปัจจุบันยังคงมีการใช้เทคนิคนี้ในการแปรรูปพลาสติกอย่างแพร่หลายโดยเฉพาะอย่างยิ่งการแปรรูปยางและพลาสติกประเภทเทอร์โมเซต เช่น ฟีนอลิกเรซิน อีพอกซีเรซิน เมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์เรซิน และยูเรียฟอร์มัลดีไฮด์เรซิน เป็นต้น และยังมีการปรับใช้กับการแปรรูปเทอร์โมพลาสติกที่แปรรูปด้วยเทคนิคอื่นยาก กระบวนการอัดเป็นเทคนิคนี้ไม่ซับซ้อน โดยหลักการคือ นำเม็ดหรือผงพลาสติกมาอัดในแม่แบบ (Mold) โดยมีความดันและอุณหภูมิที่ตั้งค่าไว้ตามความเหมาะสม เพื่อให้พลาสติกหลอมและไหลเข้าสู่ช่องว่างภายในแม่แบบ (Cavity) ส่วนประกอบหลักของเครื่องอัด (Compression Molding Machine) คือ แผ่นเหล็กอัดจำนวนสองชุด ซึ่งแผ่นหนึ่งสามารถเคลื่อนที่ขึ้นลงได้ อีกแผ่นหนึ่งจะถูกยึดติดกับที่ แม่แบบทั้งตัวและผู้และตัวเมียจะถูกยึดติดกับแผ่นเหล็กอัดทั้งสองแผ่น

### 2.5.1 กระบวนการอัดด้วยความร้อน

กระบวนการอัดเริ่มจากการยึดแม่แบบติดกับแผ่นเหล็กอัดทั้งสองแผ่น แล้วทำการให้ความร้อนแม่แบบตามชนิดของพลาสติก โดยทั่วไปการกดอัดพลาสติกเทอร์โมเซตจะเกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยงสายโซ่โมเลกุลซึ่งอยู่ระหว่าง 100-200 องศาเซลเซียส ขึ้นอยู่กับชนิดพลาสติกที่เลือกใช้ หลังจากนั้นเติมวัตถุดิบในแม่แบบเปิดอาจอยู่ในรูป เม็ด ผง หรือพลาสติกคอมปาวด์ โดยปริมาณขึ้นอยู่กับขนาดผลิตภัณฑ์และควรจะต้องมีความพอดี ถ้าน้อยเกินไปชิ้นงานที่ได้อาจไม่เต็มมีส่วนที่เปราะอยู่ หากปริมาณมากเกินไปชิ้นงานที่ได้จะเกิดครีบ (Flash) ส่วนที่เหลื่อมมากต้องทำการตัดแต่งเพิ่มเติมอีก จากนั้นปิดแม่แบบโดยเคลื่อนแผ่นเหล็กอัดลงด้วยความดันพร้อมทั้งให้ความร้อนที่เหมาะสม จะเกิดการหลอมและไหลของพลาสติกเข้าสู่ช่องว่างของแม่แบบ สำหรับพลาสติกเทอร์โมเซตต้องปล่อยให้ผลิตภัณฑ์อยู่ภายใต้ความดัน และอุณหภูมินี้ระยะเวลาหนึ่งตามเวลาการเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงเกิดอย่างสมบูรณ์ หลังจากนั้นความดันภายในแม่แบบจะลดลงในขณะที่ทำการหล่อเย็น ในรูปที่ 2.12 แสดงขั้นตอนการทำงานของเครื่องอัดจนครบรอบการทำงาน

ทางที่ผู้วิจัยจึงใช้เครื่องอัดร้อนในการอัดขึ้นรูปแผ่นอัดซังข้าวโพด เนื่องจากมีวัสดุประสานหรือกาวที่เป็นพลาสติกเทอร์โมเซตจำพวกยูเรียฟอร์มัลดีไฮด์เรซิน ซึ่งต้องอาศัยความร้อนเป็นตัวทำละลายเพื่อให้เกิดการยึดติดและแข็งตัวเป็นแผ่นอัด [22]



รูปที่ 2.12 ขั้นตอนการอัดจนครบรอบการทำงาน

## 2.6 การศึกษาโครงสร้างวัสดุ

### 2.6.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

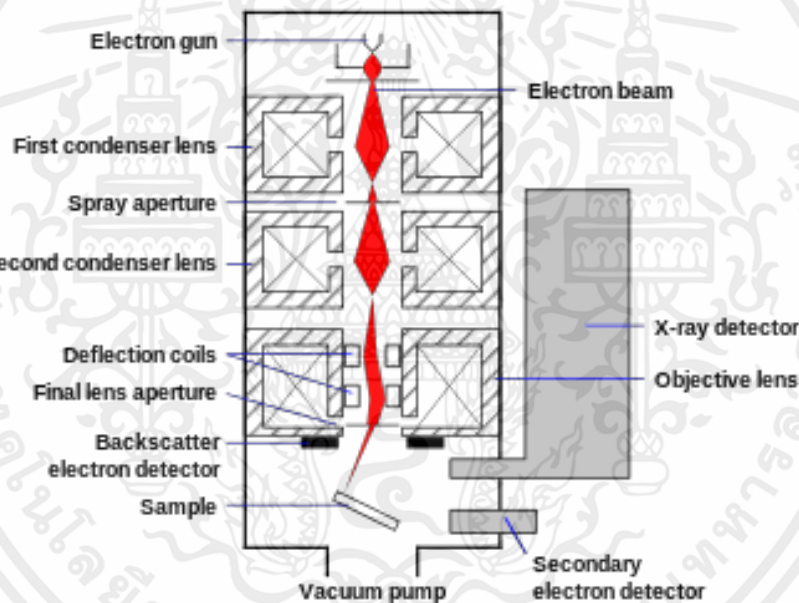
กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่ใช้สำหรับการถ่ายภาพชิ้นงาน โดยอาศัยหลักการกราดไปบนพื้นผิวตัวอย่างด้วยลำอิเล็กตรอนที่มีพลังงานสูงที่ถูกปล่อยจากแหล่งกำเนิด (Electron Gun) เมื่ออิเล็กตรอนดังกล่าวกระทบกับผิวชิ้นงานที่ประกอบไปด้วยอะตอมต่าง ๆ จะปล่อยสัญญาณที่สามารถนำไปประมวลผล และให้ข้อมูลเป็นภาพพื้นผิวของวัตถุ องค์ประกอบของพื้นผิว และคุณสมบัติอื่น ๆ เช่น คุณสมบัติการนำไฟฟ้า เป็นต้น

ในรูปที่ 2.13 แสดงส่วนประกอบของ SEM ซึ่งประกอบไปด้วยส่วนบนสุดเป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน เรียกว่า ปืนอิเล็กตรอน (Electron Gun) อิเล็กตรอนจากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งให้เคลื่อนที่ลงมาตามคอลัมน์ ซึ่งมีสภาพสุญญากาศด้วยความต่างศักย์เร่ง (Accelerating Voltage) ในช่วง 0-30 kV โดยทิศทางการเคลื่อนที่จะถูกควบคุมด้วยเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Lens) 2 ชุดหรือมากกว่า และปริมาณของอิเล็กตรอนจะถูกควบคุมด้วย แอปเพเจอร์ (Aperture) หรือช่องเปิดที่มีลักษณะต่าง ๆ กันตามลักษณะการใช้งาน

เลนส์แม่เหล็กไฟฟ้าชุดแรก เรียกว่า เลนส์คอนเดนเซอร์ (Condenser Lens) นับว่าเป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญที่สุดต่อการควบคุมทัศนศาสตร์อิเล็กตรอน (Electron Optics) เพราะเป็นเลนส์ที่ทำหน้าที่บีบอิเล็กตรอนที่วิ่งลงมาจากแหล่งกำเนิดให้เป็นลำที่มีขนาดพื้นที่หน้าตัดเล็กลง ส่วนเลนส์วัตถุ (Objective Lens) ซึ่งเป็นเลนส์ชุดสุดท้าย จะทำหน้าที่โฟกัสลำอิเล็กตรอน (Electron Beam) ให้ไปตกบนผิวของตัวอย่าง โดยมีสแกนคอยล์ (Scan Coil) ทำหน้าที่กราดลำอิเล็กตรอนให้ไปบนผิวของตัวอย่างภายในกรอบพื้นที่สี่เหลี่ยมเล็ก ๆ ซึ่งพื้นที่ผิวของตัวอย่างบริเวณที่ถูกยิงด้วยลำอิเล็กตรอนนี้จะเกิดสัญญาณ (Signal) ต่าง ๆ ขึ้นหลายชนิดในเวลาเดียวกัน และ SEM จะมีอุปกรณ์สำหรับตรวจจับสัญญาณ (Detector) ชนิดต่าง ๆ เหล่านั้น แล้วส่งไปประมวลผล เป็นภาพแสดงบนจอภาพต่อไปตัวอย่างสัญญาณที่เกิดขึ้นนั้น ได้แก่

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

2) อิเล็กตรอนกระเจิงกลับ (Back Scattered Electrons: BSE) ให้ข้อมูลเกี่ยวกับส่วนประกอบทางเคมีบนผิวของตัวอย่าง และแสดงให้เห็นลักษณะความสูงต่ำของพื้นผิว นอกเหนือจากสัญญาณเหล่านี้แล้วยังมีสัญญาณอีกหลายชนิดที่เกิดขึ้น เช่น เอ็กซ์เรย์ (X-Ray) คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Wave) โอเจอร์อิเล็กตรอน (Auger Electron) เป็นต้น ซึ่งสัญญาณแต่ละชนิดจะให้ข้อมูลของตัวอย่างแตกต่างกันไป ซึ่งจุดเด่นของ SEM คือ มีระยะชัดลึก และมีอำนาจแยกแยะเชิงระยะ (Spatial Resolution) สูง เนื่องจาก SEM ใช้คุณสมบัติคลื่นของอิเล็กตรอน ซึ่งมีความยาวคลื่นที่สั้น ทำให้ SEM มีอำนาจแยกแยะเชิงระยะได้มากถึง 0.2 นาโนเมตร และด้วยความสามารถในการบีบลำอิเล็กตรอนให้เป็นมุมแคบ ๆ ได้ ทำให้ได้ภาพที่มีความชัดลึกสูง [25]



รูปที่ 2.13 ส่วนประกอบและการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

## 2.6.2 เทคนิคการวัดการกระจายพลังงานของรังสีเอ็กซ์ (EDS)

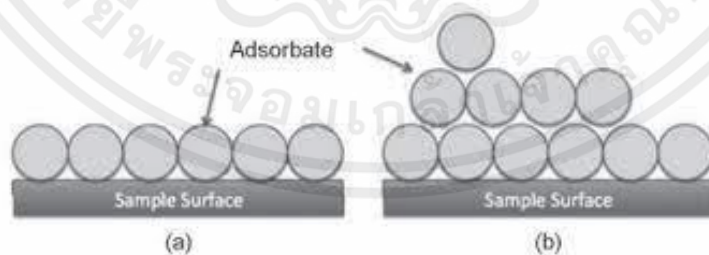
Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (EDS/EDX) หรือเครื่องมือวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงานเป็นการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยสเปกโทรเมตรีรังสีเอ็กซ์แบบกระจายพลังงานที่ใช้ร่วมกับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ซึ่งมีบทบาทสำคัญในปัจจุบันในการวิเคราะห์ธาตุทั้งทางด้านวัสดุศาสตร์ ด้านชีวภาพ ภายภาพ และอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ที่มีชิ้นส่วนขนาดเล็ก โดยหลักการของ EDS เมื่อตัวอย่างที่ต้องการศึกษาถูกชนด้วยลำอิเล็กตรอนทำให้สามารถเกิดการแตก ตัวเป็นไอออน (Ionization) ด้วยการผลักรังสีอิเล็กตรอนของตัวอย่างให้หลุดออกจากอะตอม ดังนั้นเพื่อเป็นการ รักษาเสถียรภาพอิเล็กตรอนที่

อยู่วงโคจรชั้นถัดไปจะลงเข้ามาแทนที่ และปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปร่างรังสี เอ็กซ์ (X-Ray) ซึ่งเรียกว่า รังสี เอ็กซ์แบบแคแรกเทอริสติก (Characteristic X-Ray) โดยพลังงานของรังสีเอ็กซ์ ชนิดนี้มีค่าเฉพาะตามชนิดของ ธาตุ จากนั้นเมื่อรังสีเอ็กซ์เข้าสู่หัววัดชนิด (Silicon Drift Detectors: SSD) หัววัดจะสร้างสัญญาณไฟฟ้าซึ่งเป็นสัดส่วนโดยตรงกับพลังงานของรังสีที่ตกกระทบ และจะนำสัญญาณที่ได้ มาวิเคราะห์หาความสูงของสัญญาณ ส่งไปยังระบบคอมพิวเตอร์เพื่อประเมินและรายงานผลเป็นค่าสเปกตรัมรังสีเอ็กซ์ต่อไป สำหรับการวิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีเอ็กซ์แบบ EDS สามารถวิเคราะห์ได้ 3 วิธี ดังนี้คือ

- 1) Point Analysis เป็นการวิเคราะห์ที่ให้ค่าของอิเล็กตรอนกระทบอยู่นิ่งบนพื้นผิวของตัวอย่างตรงจุดที่ต้องการวิเคราะห์เพื่อวัดค่าปริมาณรังสีเอ็กซ์เฉพาะจุดที่ต้องการ
- 2) Line Scan Analysis เป็นการวิเคราะห์โดยใช้ลำอิเล็กตรอนส่องกราดตามแนวบนตัวอย่างตรงตำแหน่งที่สนใจ ซึ่งนิยมใช้ในกรณีหาของเขตของรอยต่อหรือเฟสของโครงสร้าง
- 3) Mapping Analysis ซึ่งเป็นการวิเคราะห์โดยใช้ลำอิเล็กตรอนส่องกราดบนพื้นผิวตัวอย่าง ซึ่งภาพที่ได้จากการวิเคราะห์จะเป็นภาพแสดงลักษณะการกระจายของธาตุนั้น ๆ [23, 24, 25]

### 2.6.3 เทคนิควิเคราะห์ขนาดพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุน (BET)

Surface Area and Pore Size Analyzer (BET) มาจากชื่อย่อของคน 3 คนคือ Stephen Brunauer, Paul Hugh Emmett และ Edward Teller ที่ได้เสนอแบบจำลองการดูดซับของแก๊สบนพื้นผิวของแข็งในปี ค.ศ.1938 ทฤษฎีของ BET มีหลักการวิเคราะห์การหาพื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific Surface Area) และการกระจายขนาดของรูพรุน (Pore Size Distribution) รวมถึงปริมาตรรูพรุนทั้งหมด (Total Pore Volume) โดยได้ศึกษาการดูดซับแก๊สไนโตรเจนทั้งบนผิวหน้าและภายในรูพรุนของวัสดุ พบว่าแก๊สไนโตรเจนที่ถูกดูดซับนั้นจะมีส่วนหนึ่งที่เคลือบบนผิวของวัสดุในลักษณะที่เป็นโมเลกุลชั้นเดียวจนเต็มพื้นที่ผิวก่อน จากนั้นแก๊สไนโตรเจนที่เหลือแพร่กระจายไปเคลือบบนผิวของวัสดุในลักษณะที่เป็นโมเลกุลหลายชั้น ดังแสดงในรูปที่ 2.14 [26]



รูปที่ 2.14 การดูดซับโมเลกุลของแก๊สไนโตรเจนของวัสดุเป็นชั้น ๆ

### 2.6.4 เทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD)

X-Ray Diffractometer (XRD) หรือเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ เป็นเทคนิคที่นำรังสีเอ็กซ์ (X-Ray) มาใช้วิเคราะห์และระบุชนิดสารประกอบ โครงสร้างผลึกของสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง

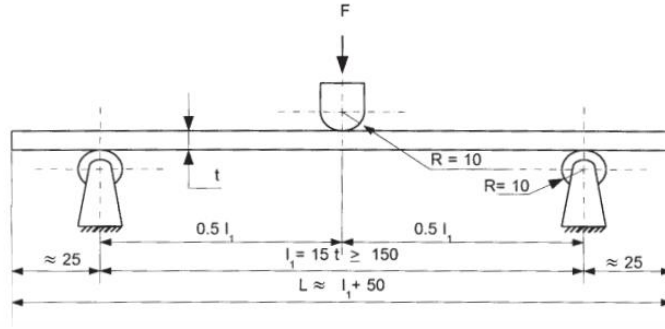
ทั้งในเชิงคุณภาพ (Qualitative) และเชิงปริมาณ (Quantitative) ซึ่งเทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) อาศัยหลักการของการยิงรังสีเอ็กซ์ไปกระทบที่ชิ้นงาน ทำให้เกิดการเลี้ยวเบน และสะท้อนออกมาที่มุมต่างๆกันโดยมีหัววัดสัญญาณ (Detector) เป็นตัวรับข้อมูล องค์ประกอบและโครงสร้างของสารจะมีองค์ประกอบในการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ ในมุมที่แตกต่างกันออกไปขึ้นกับองค์ประกอบ รูปร่าง และลักษณะผลึกซึ่งผลที่ได้จึงสามารถบ่งชี้ชนิดของสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง และสามารถนำมาใช้ใช้ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างของผลึกของสารตัวอย่างนั้น ๆ ได้นอกจากนั้นแล้วยังสามารถศึกษาและวิเคราะห์ ปริมาณความเป็นผลึก ขนาดของผลึก ความสมบูรณ์ของผลึก และความเค้นของสารประกอบในสารตัวอย่าง [27]

## 2.7 การทดสอบสมบัติของวัสดุ

### 2.7.1 การทดสอบความต้านทานแรงดัดโค้ง (Bending Test)

การทดสอบแรงดัดโค้งเป็นการทดสอบสมบัติทางกลที่นิยมใช้กับวัสดุพอลิเมอร์ต่าง ๆ เช่น พลาสติก ทั้งแบบเสริมแรงและไม่เสริมแรง รวมไปถึงวัสดุคอมโพสิตโมดูลัสสูงด้วย ซึ่งขึ้นทดสอบอาจจะขึ้นรูปจากแม่พิมพ์รูปสี่เหลี่ยมโดยตรง หรือตัดชิ้นงานที่เป็นแผ่น หรือมีรูปร่างต่าง ๆ ก็ได้ อาจมีหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมหรือวงกลมก็ได้ตามแต่ละมาตรฐานที่ใช้ การทดสอบแรงดัดโค้งเป็นอีกวิธีหนึ่งสำหรับการทดสอบแบบอัตราเร็วคงที่อย่างช้า ๆ จนกระทั่งอัตราการให้แรงกระทำไม่มีผลต่อการทดสอบ ในบางกรณีอาจใช้เป็นวิธีประมาณค่าความต้านทานแรงดึงสำหรับวัสดุเปราะ เช่น คอนกรีต เนื่องจากวิธีนี้จะไม่ค่อยมีปัญหาซึ่งเกิดจากการเยื้องศูนย์ระหว่างชิ้นงานและเครื่องทดสอบเหมือนการทดสอบแรงดึง นอกจากนี้การกระจายตัวของแนวแรงยังถูกจำกัดอยู่แต่ในบริเวณที่จะเสียหายอีกด้วย อย่างไรก็ตามสภาพของแรงที่เกิดขึ้นทั้งสองประเภทนี้แตกต่างกันในการทดสอบแรงดึงนั้น ชิ้นทดสอบจะได้รับแรงที่เท่ากันตลอดพื้นที่หน้าตัด (Uniform Tension) แต่ในการทดสอบแรงดัดโค้ง ชิ้นทดสอบจะได้รับแรงที่ไม่สม่ำเสมอตลอดพื้นที่หน้าตัด เนื่องจากในสถานะที่ชิ้นงานถูกดัดโค้งนั้นชิ้นงานทดสอบจะได้รับแรงสูงสุดบนผิว ๆ หนึ่ง และได้รับแรงอัดบนผิวตรงกันข้าม

การทดสอบการดัดโค้งแบบ 3 จุด (Three-Pointed Bending) การทดสอบแบบนี้เป็นการให้แรงกระทำที่จุดกึ่งกลางของชิ้นงานทดสอบและจุดรับรองในทิศทางตรงกันข้ามบริเวณปลายทั้งสองด้านที่มีระยะห่างจากจุดกึ่งกลางเท่ากัน เหมาะสำหรับการทดสอบพลาสติกที่เปลี่ยนแปลงรูปร่างได้น้อย ดังรูปที่ 2.15 หัวกดที่ใช้ให้แรงกระทำและชุดรองรับมีลักษณะเป็นใบมีดมน (Round Knife Edges) เพื่อลดความเข้มข้นของความเค้น (Stress Concentration) ที่อาจเกิดขึ้นบริเวณจุดสัมผัสดังกล่าว และอาจทำให้ชิ้นงานเกิดการแตกหักบริเวณจุดสัมผัสนั้น ซึ่งรัศมีของหัวกดและชุดให้แรงกระทำต้องมีรัศมีอย่างน้อย 3.2 มิลลิเมตร และมีรัศมีสูงสุดไม่เกิน 4 เท่าของความหนาชิ้นงานทดสอบสำหรับหัวกด และ 1.5 เท่าของความหนาชิ้นทดสอบสำหรับชุดรองรับ ตามมาตรฐาน ASTM D790-10 สามารถหาระยะห่างแทนวางชิ้นทดสอบ (Support Span Length) ได้จากอัตราส่วนของระยะห่างแทนวางชิ้นทดสอบต่อความหนาของชิ้นทดสอบ (Support Span-to-Depth Ratio) โดยมีค่าตั้งแต่ 16:1 ไปจนถึง 60:1 ขึ้นอยู่กับประเภทและความแข็งแรงของชิ้นทดสอบ สำหรับค่าการต้านทานแรงดัดโค้ง (Flexural Strength,  $f_m$ ) ที่ได้จากการทดสอบจะเป็นค่าความเค้นแรงดัดโค้งสูงสุด (Maximum Flexural Stress) ของชิ้นทดสอบในขณะเสียหาย [28]



รูปที่ 2.15 การทดสอบความต้านทานแรงดัดและมอดูลัสยืดหยุ่น

ความต้านทานแรงดัด สามารถหาค่าความต้านทานแรงดัดแสดงได้ดังสมการที่ 2.1 [29]

$$f_m = \frac{3 F_{max} l_1}{2bt^2} \quad (2.1)$$

- เมื่อ  $f_m$  คือ ความต้านทานแรงดัด เป็น เมกะปาสคัล  
 $F_{max}$  คือ แรงกดสูงสุดที่ขึ้นทดสอบรับได้ เป็น นิวตัน  
 $l_1$  คือ ระยะห่างของแท่งรองรับ เป็น มิลลิเมตร  
 $b$  คือ ความกว้างที่จุดกึ่งกลางด้านยาวของชิ้นทดสอบ เป็น มิลลิเมตร  
 $t$  คือ ความหนาที่จุดกึ่งกลางของชิ้นทดสอบ เป็น มิลลิเมตร

### 2.7.2 การทดสอบหาค่าปริมาณความชื้น (Moisture Content Measurement)

ปริมาณความชื้นจะส่งผลต่อความสามารถในการแปรรูป อายุการเก็บรักษา ความสามารถในการใช้งาน และคุณภาพของผลิตภัณฑ์ การระบุปริมาณความชื้นที่แม่นยำจึงมีบทบาทสำคัญต่อการประกันคุณภาพสำหรับอุตสาหกรรมต่าง ๆ นอกจากนี้ยังมีกฎหมายควบคุมปริมาณความชื้นสูงสุดที่อนุญาตสำหรับผลิตภัณฑ์บางชนิด ระบุปริมาณความชื้นทั่วไปมักใช้วิธีการวัดการสูญเสียน้ำหนักเมื่อได้รับความร้อน กล่าวคือ วัดจากการสูญเสียน้ำหนักจากการทำให้แห้ง โดยการให้ความร้อนกับตัวอย่างและบันทึกการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการระเหยของความชื้น ดังนั้นการทดสอบหาปริมาณความชื้นในวัสดุเป็นสิ่งที่สำคัญ เนื่องจากความชื้นมีอิทธิพลอย่างมากต่อคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ [30]

สามารถหาค่าปริมาณความชื้นแสดงได้ดังสมการที่ 2.2 [29]

$$\text{ปริมาณความชื้น ร้อยละ} = \frac{m_1 - m_2}{m_2} \times 100 \quad (2.2)$$

- เมื่อ  $m_1$  คือ มวลของชิ้นทดสอบก่อนอบ เป็น กรัม  
 $m_2$  คือ มวลของชิ้นทดสอบหลังอบ เป็น กรัม

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการและขั้นตอนต่าง ๆ ในการดำเนินงานของงานวิจัย การศึกษาการออกแบบวัสดุเสริมแรงของซังข้าวโพดร่วมกับท่อนาโนคาร์บอน ดังแสดงในหัวข้อต่อไปนี้

- 3.1 วัตถุประสงค์และอุปกรณ์
- 3.2 วิธีการดำเนินการวิจัย
- 3.3 สถานที่ทำการทดลอง
- 3.4 ระยะเวลาทำการวิจัย

#### 3.1 วัตถุประสงค์และอุปกรณ์

##### 3.1.1 วัตถุประสงค์

- 3.1.1.1 ซังข้าวโพด พันธุ์หวาน ตำบลวังขนาย อำเภอท่าม่วง จังหวัดกาญจนบุรี
- 3.1.1.2 ท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้น (Multi-Walled Carbon Nanotubes: MWCNTs)

##### 3.1.2 สารเคมี

- 3.1.2.1 สารเคมีโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium Hydroxide Pellets: NaOH)
- 3.1.2.2 สารละลายเอทิลแอลกอฮอล์ (Ethyl Alcohol Absolute Denatured)
- 3.1.2.3 กาว Plastic Resin (กาวผง)

##### 3.1.3 อุปกรณ์

- 3.1.3.1 อุปกรณ์ในการปรับสภาพทางเคมี
  - 1) มีดและเขียง
  - 2) กะละมังสำหรับแช่ซังข้าวโพด
  - 3) ปีกเกอร์
  - 4) ซ้อนตักสารเคมี
  - 5) เครื่องชั่ง (Sartorius รุ่น BSA Series)
  - 6) เครื่องอบลมร้อน (Mettler รุ่น UN30)
- 3.1.3.2 อุปกรณ์ในการอัดขึ้นรูปซังข้าวโพดสำหรับใช้เป็นชิ้นงานทดสอบ
  - 1) เครื่องปั่น (Anitech รุ่น SCP300)
  - 2) โกร่งบดสาร
  - 3) เครื่องอัดขึ้นรูป (Compression Molding Machine, CHAREONTUT)

4) แม่พิมพ์ขึ้นรูปขนาด 20 × 150 มิลลิเมตรหนา 3 มิลลิเมตร

### 3.1.3.3 อุปกรณ์ในการวิเคราะห์โครงสร้างของวัสดุ

- 1) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (FE-SEM)
- 2) เครื่องวิเคราะห์การวัดการกระจายพลังงานของรังสีเอ็กซ์ (EDS)
- 3) เครื่องวิเคราะห์ขนาดพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุน (BET)
- 4) เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD)

### 3.1.3.4 อุปกรณ์ในการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุ

- 1) เครื่องทดสอบแรงกดแรงดึง เพื่อทดสอบแรงดัดโค้ง (Shimadzu รุ่น AG-100kNX)

## 3.2 วิธีการดำเนินการวิจัย

### 3.2.1 ออกแบบขั้นตอนการดำเนินโครงการ

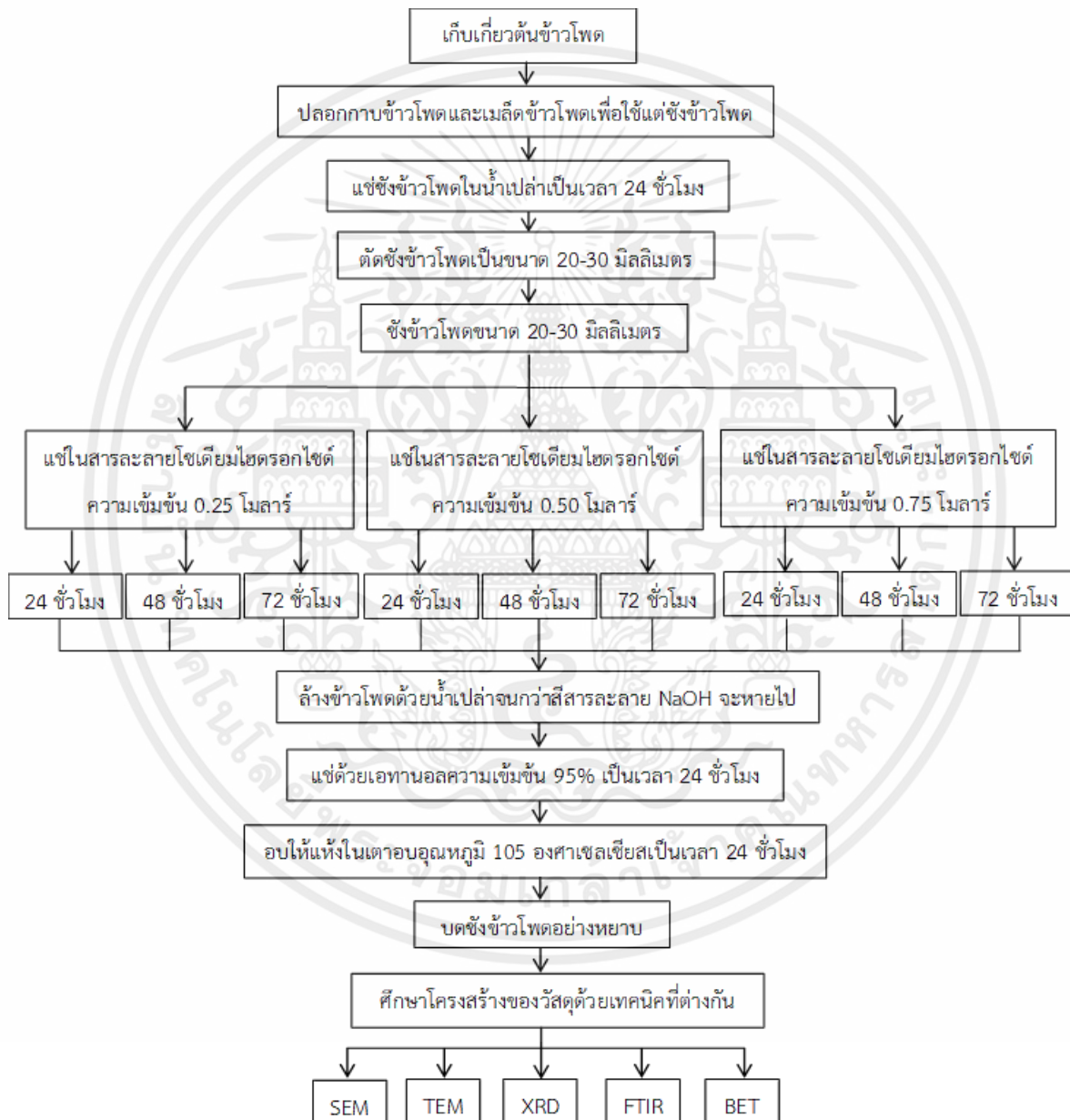
ทางคณะผู้วิจัยได้ออกแบบการทดลองการศึกษาวัสดุเสริมแรงจากขังข้าวโพดร่วมกับท่อนานาโนคาร์บอน โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อความแข็งแรง และส่วนผสมที่เหมาะสมของวัสดุเสริมแรงจากขังข้าวโพดร่วมกับท่อนานาโนคาร์บอน โดยมีการกำหนดขั้นตอนการทดลองแสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนภาพขั้นตอนการทดลองตลอดทั้งโครงการ

### 3.2.2 การเตรียมชิ้นงานสำหรับการทดลอง

ทางผู้วิจัยได้ทำการเตรียมชิ้นงานในการศึกษาวัสดุเสริมแรงจากซังข้าวโพดร่วมกับท่อนานาโนคาร์บอน ซึ่งเตรียมซังข้าวโพดโดยการปรับสภาพด้วยสารละลาย NaOH ทำให้ไขมัน น้ำมัน และส่วนประกอบออสัญฐาน เช่น เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน หลุดออกจากพื้นผิว ซึ่งเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัส และปรับปรุงความขรุขระของผิวท่อนานาโนคาร์บอนให้ดีขึ้น [31] โดยมีการกำหนดขั้นตอนและเงื่อนไขการทดลองหาเงื่อนไขในการปรับสภาพที่ดีโดยมีความหลากหลายของความเข้มข้นสารละลาย และเวลาปรับสภาพต่าง ๆ ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แผนภูมิของขั้นตอนและเงื่อนไขการเตรียมตัวอย่างในการศึกษาซังข้าวโพดที่ถูกปรับสภาพ

### 3.2.3 ศึกษาค่าความเข้มข้นและเวลาในการปรับสภาพทางเคมีของซังข้าวโพด

นำซังข้าวโพดที่หั่นเตรียมไว้แบ่งมาแช่สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน และระยะเวลาในการแช่ต่าง ๆ แบ่งการวิเคราะห์เป็น 2 ปัจจัย คือ ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH 3 ความเข้มข้น ได้แก่ 0.25, 0.50 และ 0.75 โมลาร์ เวลาการแช่เพื่อปรับสภาพ 3 ระดับ ได้แก่ 24, 48 และ 72 ชั่วโมง วางแผนการทดลองจะได้สภาวะการทดสอบทั้งหมด 9 เงื่อนไข ดังแสดงในตารางที่ 3.1 ทั้งนี้เป็นการวิเคราะห์ก่อนคัดเลือกนำไปผสมร่วมกับท่อนาโนคาร์บอนในอัตราส่วนต่าง ๆ

ตารางที่ 3.1 ค่าความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และเวลาในการปรับสภาพ

สิ่งทดลอง	ความเข้มข้นสารละลาย NaOH (โมลาร์)	ระยะเวลา (ชั่วโมง)	วิเคราะห์ SEM
1	0.25	24	✓
2	0.25	48	✓
3	0.25	72	✓
4	0.50	24	✓
5	0.50	48	✓
6	0.50	72	✓
7	0.75	24	✓
8	0.75	48	✓
9	0.75	72	✓

#### 3.2.3.1 วิธีการเตรียมผงซังข้าวโพด

1) เก็บซังข้าวโพดจากเกษตรกรที่เป็นขยะเหลือทิ้งทางการเกษตร มาทำความสะอาด และปอกเพื่อใช้เพียงซังข้าวโพด (ส่วนหนึ่งของซังข้าวโพดที่เหลือหลังจากการสีเมล็ดออกไป) ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ซังข้าวโพดที่ได้จากการเตรียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) แช่ซังข้าวโพดทิ้งไว้ในน้ำสะอาดเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำมาหั่นออกเป็นชิ้นเล็กให้มีขนาด 20-30 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 แช่ซังข้าวโพดในน้ำสะอาด 24 ชั่วโมง และหั่นซังข้าวโพดเป็นชิ้นเล็ก ๆ

3) แบ่งซังข้าวโพดที่หั่นแล้ว เพื่อนำไปปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ตามเงื่อนไขดังตารางที่ 3.1 ที่มีความหลากหลายในเรื่องความเข้มข้นและเวลาในการปรับสภาพ แสดงตัวอย่างการปรับสภาพดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 สารเคมีโซเดียมไฮดรอกไซด์ (ซำย), ตัวอย่างการแช่ปรับสภาพทางเคมีซังข้าวโพด (ขวา)

4) เมื่อครบตามระยะเวลาแช่ในแต่ละเงื่อนไขซังข้าวโพดมาล้างด้วยน้ำเปล่า และแช่ด้วยสารละลายเอทานอลความเข้มข้น 95% เพื่อกำจัดไขมันอีกครั้งเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อครบกำหนดเวลานำออกมาอบแห้งด้วยเตาอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลาอีก 24 ชั่วโมง ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 เตาอบยี่ห้อ Memmert (ซ้าย), ซังข้าวโพดหลังผ่านการอบแห้ง (ขวา)

5) บดปนซังข้าวโพดที่อบแห้งด้วยเครื่องบดให้ได้ผงซังข้าวโพด ดังรูปที่ 3.7 แล้วใช้ตะแกรงกรองให้ซังข้าวโพดที่ออกมามีขนาดเล็ก เพื่อนำไปวิเคราะห์โครงสร้างด้วยเทคนิคที่แตกต่างกัน



รูปที่ 3.7 ผงซังข้าวโพดหลังการบดปน

### 3.2.4 ศึกษาอัตราส่วนการผสมซังข้าวโพดร่วมกับท่อนาโนคาร์บอนและเทคนิควิเคราะห์

นำซังข้าวโพดที่ผ่านการปรับสภาพและถูกวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์ FE-SEM จากหัวข้อที่ 3.2.3 มาคัดเลือกให้เหลือเพียง 3 เงื่อนไข เพื่อทำการผสมร่วมกับท่อนาโนคาร์บอนในอัตราส่วนต่าง ๆ 3 อัตราส่วน ได้แก่ 50:1, 75:1 และ 100:1 จากนั้นวางแผนการทดลองจะได้สิ่งทดลองขึ้นมาอีกทั้งหมด 9 เงื่อนไขและทำการวิเคราะห์สิ่งทดลองด้วยเทคนิคต่าง ๆ บางเทคนิคจำเป็นต้องคัดเลือกบางเงื่อนไขไปศึกษาตามความเหมาะสม เพื่อให้อยู่ในขอบเขตการศึกษา และระยะเวลาของการวิจัย ดังแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 อัตราส่วนการผสมซังข้าวโพดร่วมกับท่อนานคาร์บอนและเทคนิคในการวิเคราะห์

สิ่งทดลอง	เงื่อนไขจาก การคัดเลือก	อัตราส่วนการผสม		เทคนิคในการวิเคราะห์			
		ซังข้าวโพด	MWCNTs	SEM	EDS	BET	XRD
A		50	1	✓	✓	-	-
B	1	75	1	✓	✓	-	-
C		100	1	✓	✓	-	✓
D		50	1	✓	✓	-	-
E	2	75	1	✓	✓	-	-
F		100	1	✓	✓	-	✓
G		50	1	✓	✓	✓	-
H	3	75	1	✓	✓	✓	-
I		100	1	✓	✓	✓	✓

### 3.2.4.1 วิธีการเตรียมผงซังข้าวโพดผสมร่วมกับท่อนานคาร์บอน

นำผงซังข้าวโพดที่ผ่านการบดป่นและกรองละเอียดแล้วตามหัวข้อที่ 3.2.3.1 มาผสมกับผงท่อนานคาร์บอนตามอัตราส่วนดังตารางที่ 3.2 ด้วยการบดในโถรงบดให้ละเอียดจนเป็นเนื้อเดียว ดังรูปที่ 3.8 เพื่อนำไปวิเคราะห์สิ่งทดลองด้วยเทคนิค SEM, EDS, BET และ XRD ต่อไป



รูปที่ 3.8 สิ่งทดลองหลังการผสมผงซังข้าวโพดและท่อนานคาร์บอนเข้าด้วยกันตามอัตราส่วน ๆ

### 3.2.5 ศึกษาอัตราส่วนผสมของซังข้าวโพดร่วมกับท่อนานคาร์บอนในการอัดขึ้นรูป

เลือกซังข้าวโพดที่เหมาะสมเพียง 1 เงื่อนไขจากการศึกษาลักษณะโครงสร้างด้วยเทคนิคต่าง ๆ เช่น SEM, EDS, BET และ XRD จากหัวข้อที่ 3.2.4 มาทำการศึกษาสมบัติทางกายภาพหลังจากผ่านกระบวนการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัดขึ้นรูป โดยแบ่งเงื่อนไขการผสมในอัตราส่วนซังข้าวโพดกับท่อนานโนคาร์บอนเป็นดังนี้ คือ ไม่ผสมกับท่อนานโนคาร์บอนเพื่อเป็นตัวควบคุม (Control Sample), 50:1, 75:1 และ 100:1 จะได้เงื่อนไขในการทดสอบทั้งหมด 4 เงื่อนไข โดยจะผสมเข้ากับกาวในอัตราส่วนกาวเรซินต่อซังข้าวโพดสับหยาบ 1:3 และกาวต่อน้ำในอัตราส่วน 2:1 ในทุกเงื่อนไข ดังแสดงในตารางที่ 3.3 [32]

ตารางที่ 3.3 อัตราส่วนส่วนผสมซังข้าวโพด:ท่อนานโนคาร์บอน:กาวพลาสติกเรซิน:น้ำ

เงื่อนไขที่	อัตราส่วนผสม CC:MWCNTs	ซังข้าวโพด (กรัม)	ท่อนานโนคาร์บอน (กรัม)	กาวพลาสติกเรซิน (กรัม)	น้ำ (มิลลิลิตร)
1	50:1	6	0.12	2	1
2	75:1	6	0.08	2	1
3	100:1	6	0.06	2	1
4	-	6	0	2	1

### 3.2.5.1 วิธีการเตรียมซังข้าวโพดและการผสมท่อนานโนคาร์บอนร่วมกับกาวพลาสติกเรซิน

1) นำซังข้าวโพดที่ผ่านการปรับสภาพทางเคมีด้วย NaOH เข้าเครื่องบดละเอียด จากนั้นใช้ตะแกรงมากรองให้มีขนาดที่เท่า ๆ กัน ดังแสดงในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 ซังข้าวโพดสับหยาบ

2) นำซังข้าวโพดที่เตรียมไว้ใส่ในโถรงบดใส่ท่อนานโนคาร์บอนตามอัตราส่วนแต่ละเงื่อนไข จากนั้นทำการผสมให้เป็นเนื้อเดียวกัน แล้วใส่ผงกาวพลาสติกเรซินและน้ำ ตามอัตราส่วนดังตารางที่ 3.3 โดยคลุกให้เข้ากันจนเป็นเนื้อเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 3.10

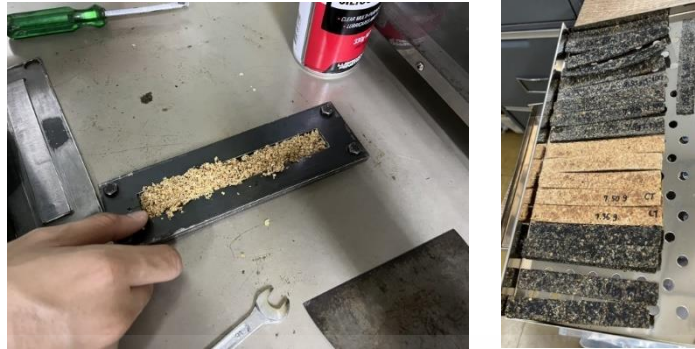


รูปที่ 3.10 การผสมซังข้าวโพดและท่อนาโนคาร์บอนร่วมกับกาวพลาสติกเรซิน โดยซังข้าวโพดผสมกับท่อนาโนคาร์บอนในโถรงบด (ซ้าย), การผสมซังข้าวโพดกับกาวพลาสติกเรซิน (ขวา)

### 3.2.5.2 วิธีการอัดขึ้นรูป [33]

นำซังข้าวโพดที่ผสมร่วมกับท่อนาโนคาร์บอนและกาวพลาสติกเรซินเรียบร้อยแล้วมาทำการขึ้นรูปดังนี้

- 1) ใส่ส่วนผสมซังข้าวโพดเงื่อนไขต่าง ๆ ลงในแม่พิมพ์ขนาด 20×150 มิลลิเมตร หน้า 3 มิลลิเมตร
- 2) เคลี่ยส่วนผสมซังข้าวโพดให้เรียบเสมอจนเต็มแผ่นแม่พิมพ์ดังรูปที่ 3.11
- 3) วางแม่พิมพ์ปิดด้านบนให้ตรงตำแหน่งแม่พิมพ์ด้านล่าง
- 4) ใส่แม่พิมพ์เข้าเครื่องอัดร้อนขึ้นรูปอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ความดัน 25 บาร์ เป็นเวลา 2 นาที ดังรูปที่ 3.12
- 5) ใส่แม่พิมพ์ที่ช่องหล่อเย็นของเครื่องอัดร้อนขึ้นรูปอีก 5 นาที
- 6) แกะแผ่นซังข้าวโพดออกจากแม่พิมพ์
- 7) ขัดส่วนเกินครีบของชิ้นงานด้วยตะไบละเอียด
- 8) อัดซังข้าวโพดตามอัตราส่วนตั้งแต่ขั้นตอนที่ 1-7 ทั้ง 4 เงื่อนไข
- 9) บ่มชิ้นงานไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 72 ชั่วโมง



รูปที่ 3.11 การเตรียมอัดแผ่นซังข้าวโพด โดยการใส่ส่วนผสมซังข้าวโพดลงในแม่พิมพ์ (ซ้าย), ซังข้าวโพดอัดแผ่นทั้งหมด 4 สูตร (ขวา)



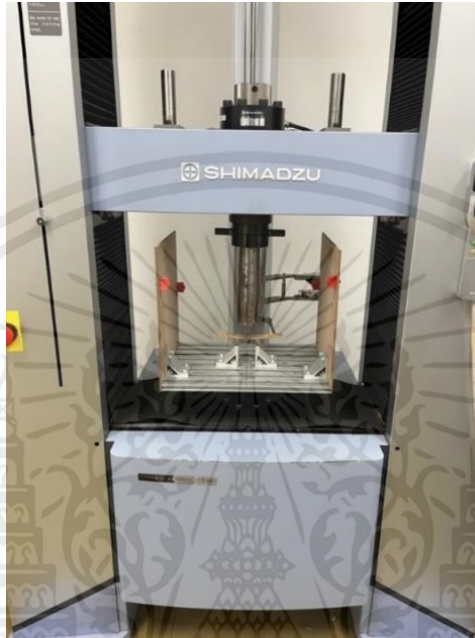
รูปที่ 3.12 เครื่องอัดร้อนขึ้นรูป

### 3.2.6 การทดสอบคุณสมบัติเชิงกล

นำแผ่นซังข้าวโพดทั้ง 4 สูตรขนาด 20×150 มม 3 มิลลิเมตร ตามแม่พิมพ์ที่ขึ้นรูปเพื่อทดสอบความต้านทานแรงดัด และความชื้น โดยทำการทดสอบซ้ำทั้งหมด 3 ครั้ง มีรายการทดสอบดังนี้

3.2.6.1 การทดสอบความต้านทานแรงดัด ด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ ดังรูปที่ 3.13 ทำการทดสอบแรงดัดโค้งแบบจุดรองรับ 3 จุด (Three-Point Bending) กำหนดระยะห่างแท่นวางขึ้นทดสอบ (Support Span Length) เท่ากับ 48 มิลลิเมตร ความเร็วในการกดขึ้นงาน (Crosshead Speed) เท่ากับ 1.3 มิลลิเมตรต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง แล้วทดสอบหาค่าความต้านทานแรงดัดโค้งโดยทำการหาค่าเฉลี่ยจากตัวอย่างทั้ง 3 ชิ้น แล้วเปรียบเทียบค่าตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมแผ่นขึ้นไม้อัดชนิดราบ (มอก. 876-2547) [29]

3.2.6.2 การทดสอบปริมาณความชื้น ทำการทดสอบปริมาณความชื้นโดยชั่งน้ำหนักขึ้นทดสอบให้ได้มวลของขึ้นทดสอบก่อนอบ และทำการอบขึ้นทดสอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 4 ชั่วโมง โดยชั่งขึ้นทดสอบหลังอบแห้งจะได้ค่าปริมาณความชื้นเฉลี่ยร้อยละของขึ้นงานทั้ง 3 ครั้ง แล้วเปรียบเทียบค่าตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมแผ่นขึ้นไม้อัดชนิดรียบ (มอก. 876-2547) [29]



รูปที่ 3.13 เครื่องทดสอบอบเนกประสงค์

### 3.3 สถานที่ทำการทดลอง

ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

### 3.4 ระยะเวลาทำการวิจัย

ในการดำเนินงานวิจัยเรื่องนี้ เริ่มดำเนินการตั้งแต่เดือน สิงหาคม พ.ศ. 2564 - พฤษภาคม พ.ศ. 2565

## บทที่ 4

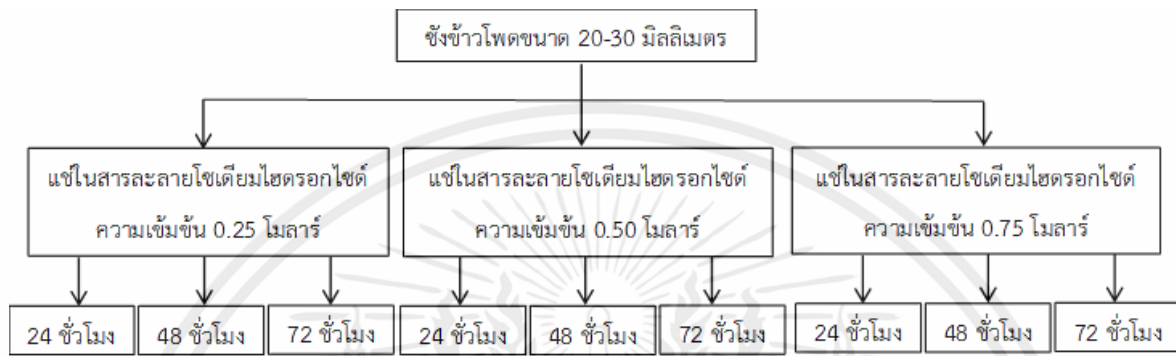
### ผลการดำเนินการวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการดำเนินการทดลองทั้งหมดที่ได้ศึกษาในงานวิจัย การศึกษาการออกแบบวัสดุเสริมแรงของซังข้าวโพดร่วมกับท่อนาโนคาร์บอน ได้ทำการศึกษาและวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคและโครงสร้างมหภาคของซังข้าวโพดที่ผ่านการปรับสภาพทางเคมี และซังข้าวโพดที่ผสมร่วมกับท่อนาโนคาร์บอน อีกทั้งทดสอบสมบัติทางกายภาพของแผ่นอัดซังข้าวโพดหลังการอัดขึ้นรูป โดยผลการทดลองแสดงดังหัวข้อต่อไปนี้

- 4.1 ผลการศึกษาซังข้าวโพดที่ผ่านการปรับสภาพทางเคมีโดยใช้เทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Field Emission Scanning Electron Microscope: FE-SEM)
- 4.2 ผลการศึกษาซังข้าวโพดที่ผ่านการปรับสภาพทางเคมีผสมร่วมกับท่อนาโนคาร์บอนในอัตราส่วนต่าง ๆ ด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Field Emission Scanning Electron Microscope: FE-SEM)
- 4.3 ผลการศึกษาซังข้าวโพดที่ผ่านการปรับสภาพทางเคมีผสมร่วมกับท่อนาโนคาร์บอนในอัตราส่วนต่าง ๆ ด้วยเทคนิคการวัดการกระจายพลังงานของรังสีเอ็กซ์ (Energy Dispersive X-Ray Spectrometer: EDS)
- 4.4 ผลการศึกษาซังข้าวโพดที่ผ่านการปรับสภาพทางเคมีผสมร่วมกับท่อนาโนคาร์บอนในอัตราส่วนต่าง ๆ ด้วยเทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffractometer: XRD)
- 4.5 ผลการศึกษาซังข้าวโพดที่ผ่านการปรับสภาพทางเคมีผสมร่วมกับท่อนาโนคาร์บอนในอัตราส่วนต่าง ๆ ด้วยเทคนิคเครื่องวิเคราะห์ขนาดพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุน (Surface Area and Pore Size Analyzer: BET)
- 4.6 ผลการคัดเลือกสถานะที่เหมาะสมเพื่อนำไปอัดขึ้นรูป
- 4.7 ผลการศึกษาลักษณะทั่วไปของแผ่นอัดซังข้าวโพด
- 4.8 ผลการศึกษาความต้านทานแรงดัดของแผ่นอัดซังข้าวโพด
- 4.9 ผลการศึกษาค่าปริมาณความชื้นของแผ่นอัดซังข้าวโพด
- 4.10 การประดิษฐ์กล่องอเนกประสงค์จำลองจากซังข้าวโพดร่วมกับท่อนาโนคาร์บอน

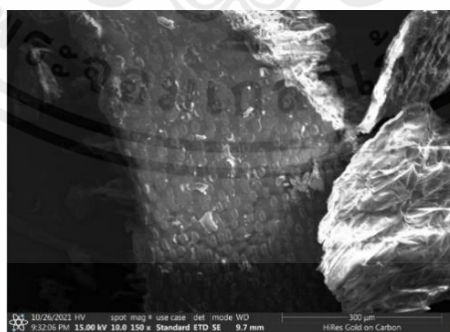
#### 4.1 ผลการศึกษาซังข้าวโพดที่ผ่านการปรับสภาพทางเคมีโดยใช้เทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Field Emission Scanning Electron Microscope: FE-SEM)

จากตารางที่ 3.1 ได้เงื่อนไขสิ่งทดลองทั้งหมด 9 เงื่อนไขของซังข้าวโพดที่ปรับสภาพทางเคมีด้วยสารละลาย NaOH ด้วยความเข้มข้นและเวลาต่าง ๆ ดังรูปที่ 4.1 แล้วนำไปศึกษาสิ่งทดลองด้วยเทคนิค FE-SEM เพื่อศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของวัสดุ

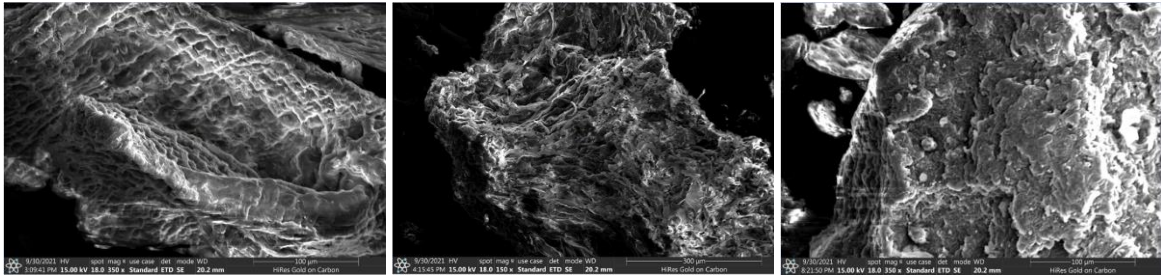


รูปที่ 4.1 แผนผังแสดงความหลากหลายในการปรับสภาพทางเคมีของซังข้าวโพดด้วยสารละลาย NaOH

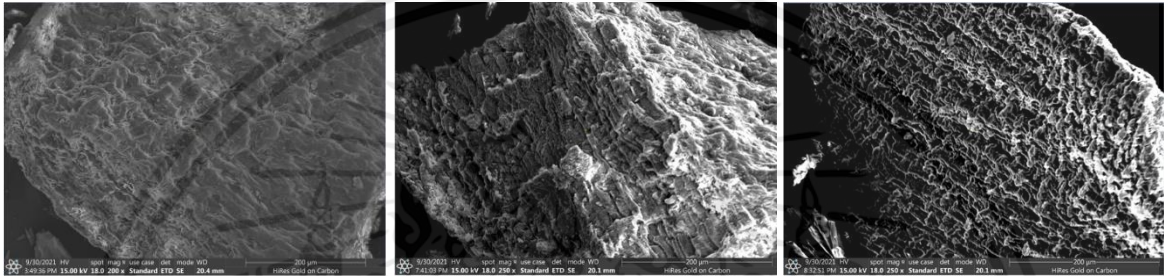
จากผลการศึกษาทุกสภาวะที่ผ่านการปรับสภาพทางเคมีมีข้อมูลหรือลักษณะพื้นผิวทางกายภาพที่ใกล้เคียงกัน แต่มีสภาพผิวทางกายภาพที่แตกต่างจากซังข้าวโพดที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ (Control) ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.2 โดยจากการระบุเอกลักษณ์โครงสร้างของวัสดุโดยผ่านกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดพบว่าลักษณะพื้นผิวของวัสดุก่อนการปรับสภาพทางเคมีค่อนข้างเรียบ ในขณะที่พื้นผิวหลังปรับสภาพมีความขรุขระ ไม่สม่ำเสมอ และบางตำแหน่งมีรูพรุนเกิดขึ้น ทั้งนี้เกิดจากการปรับสภาพมีผลทำให้ไขมันหรือส่วนประกอบออสซิลฐานบางชนิด เช่น เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน หลุดออกจากพื้นผิว ซึ่งส่งผลให้เกิดการเพิ่มขึ้นของพื้นที่ผิวสัมผัส และเพิ่มความขรุขระของพื้นที่ผิวบางตำแหน่งมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.3-4.5



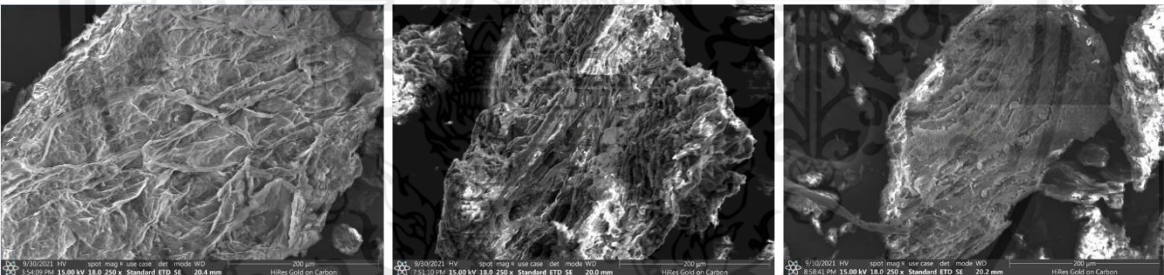
รูปที่ 4.2 ซังข้าวโพดที่ไม่ผ่านการปรับสภาพด้วยสารละลาย NaOH



รูปที่ 4.3 ซังข้าวโพดที่ปรับสภาพด้วย NaOH ความเข้มข้น 0.25 โมลาร์, 0.50 โมลาร์ และ 0.75 โมลาร์ ตามลำดับ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง



รูปที่ 4.4 ซังข้าวโพดที่ปรับสภาพด้วย NaOH ความเข้มข้น 0.25 โมลาร์, 0.50 โมลาร์ และ 0.75 โมลาร์ ตามลำดับ เป็นเวลา 48 ชั่วโมง



รูปที่ 4.5 ซังข้าวโพดที่ปรับสภาพด้วย NaOH ความเข้มข้น 0.25 โมลาร์, 0.50 โมลาร์ และ 0.75 โมลาร์ ตามลำดับ เป็นเวลา 72 ชั่วโมง

จากการระบุเอกลักษณ์ทางโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์นี้ ทำให้คณะผู้วิจัยเลือกสภาวะการวิจัยออกมาเพียง 3 สภาวะคือ

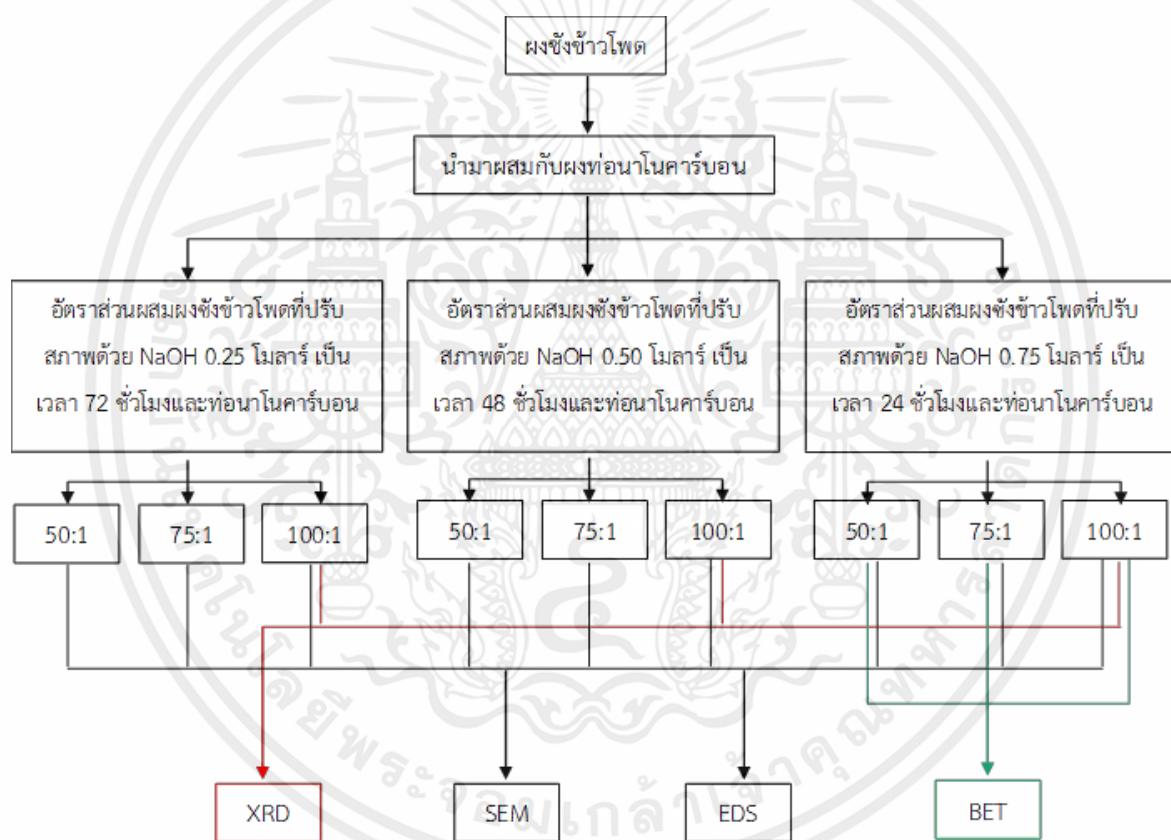
- 1) ปรับสภาพด้วย NaOH ความเข้มข้น 0.25 โมลาร์ เป็นเวลา 72 ชั่วโมง
- 2) ปรับสภาพด้วย NaOH ความเข้มข้น 0.50 โมลาร์ เป็นเวลา 48 ชั่วโมง
- 3) ปรับสภาพด้วย NaOH ความเข้มข้น 0.75 โมลาร์ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

เนื่องจากทั้ง 3 สภาวะนี้มีความสัมพันธ์ของความเข้มข้นสารละลาย NaOH และระยะเวลาในการแช่ปรับสภาพที่สอดคล้องกัน โดยจะเห็นได้ว่า เมื่อความเข้มข้นของ NaOH สูงขึ้นจะสามารถทำให้การปรับสภาพ

หรือการสกัดสิ่งเจือปน และสารออสัณฐานได้มากขึ้นด้วยในระยะเวลาที่สั้นลง แต่อย่างไรก็ตาม ถ้าต้องการลดต้นทุนของสารละลายโดยใช้ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH น้อยลง จะส่งผลให้การแช่หรือการปรับสภาพของวัสดุในระยะเวลาสั้นขึ้นเพื่อช่วยให้สกัดสารออสัณฐานหรือสิ่งเจือปนออกได้

#### 4.2 ผลการศึกษาซังข้าวโพดที่ผ่านการปรับสภาพทางเคมีผสมร่วมกับท่อนานคาร์บอนในอัตราส่วนต่าง ๆ ด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด FE-SEM

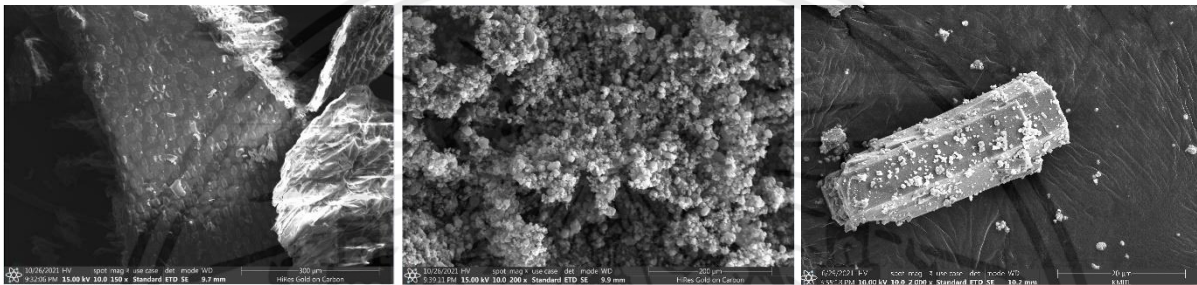
นำผงซังข้าวโพดที่ถูกคัดเลือกตามผลข้อที่ 4.1 มาผสมกับผงท่อนานคาร์บอนในอัตราส่วนต่าง ๆ ได้ออกมาทั้งหมด 9 เงื่อนไข แล้วมาศึกษาลักษณะโครงสร้างของวัสดุ เพื่อศึกษาหาปัจจัยที่ดีที่สุดของสภาวะการผลิตขึ้นรูปหรือการนำไปประยุกต์เป็นสารเสริมแรงด้วยเทคนิคต่าง ๆ ดังรูปที่ 4.6



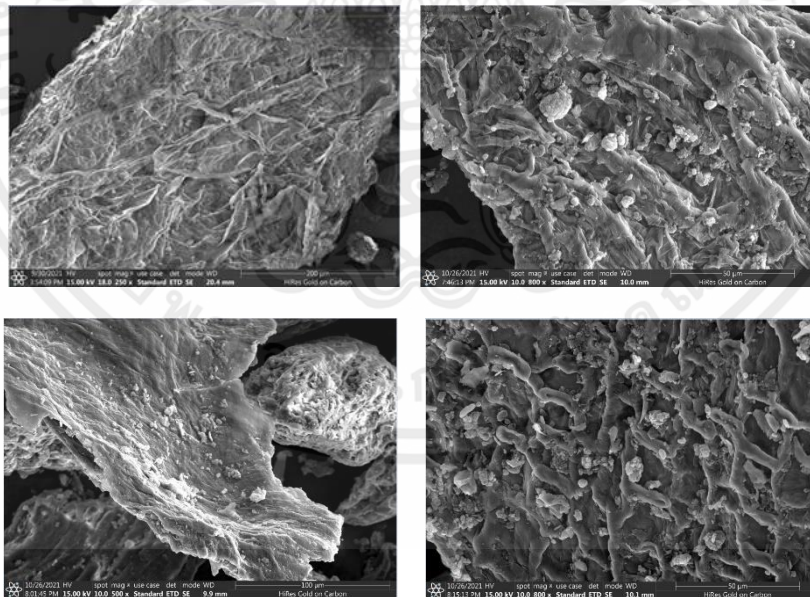
รูปที่ 4.6 แผนผังแสดงความหลากหลายของอัตราส่วนผสมของซังข้าวโพดร่วมกับท่อนานคาร์บอน และเทคนิคในการวิเคราะห์สิ่งทดลอง

จากการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของโครงสร้างวัสดุ และการศึกษาพื้นผิวของตัวอย่างซังข้าวโพดที่ไม่ถูกปรับสภาพ ซังข้าวโพดก่อนนำผงซังข้าวโพดที่ผ่านการปรับสภาพมาผสมท่อนานคาร์บอน และหลังการผสมมาศึกษา แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของพื้นผิวของเส้นใยซังข้าวโพดที่ถูกปรับสภาพทางเคมีด้วยสารละลาย NaOH โดยพบว่าก่อนการปรับสภาพค่อนข้างมีความเรียบ มีเกล็ดนูนต่ำบริเวณพื้นผิวดังรูปที่

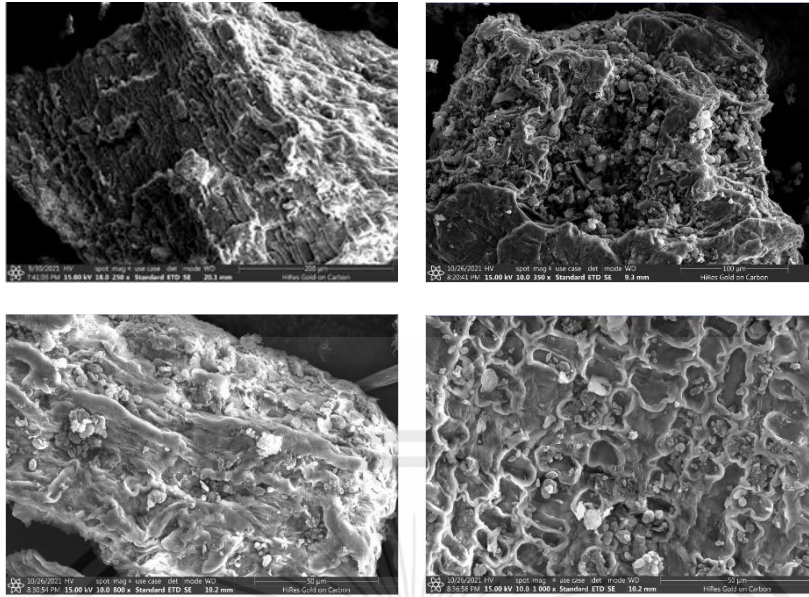
4.7 แต่อย่างไรก็ตามพบว่า พื้นผิวของวัสดุหลังปรับสภาพทางเคมีด้วย NaOH มีความขรุขระ และไม่สม่ำเสมอเพิ่มมากขึ้น บางสภาวะมีรูพรุนเกิดขึ้น ทั้งนี้เกิดจากการปรับสภาพทำให้ไขมัน และส่วนประกอบอสังฐาน เช่น เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน หลุดออกจากพื้นผิว ซึ่งเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัส และความขรุขระของผิวที่ดีขึ้นให้กับเส้นใย โดยส่งผลให้มีการสร้างพันธะให้แข็งแรงขึ้นและมีคุณสมบัติในการเป็นวัสดุเสริมแรงที่ดีขึ้น [31] นอกจากนี้จากพื้นผิวของวัสดุบางตำแหน่ง จะเห็นเส้นใยออกมาเป็นเส้นเล็ก ๆ เนื่องจากมีการประสานรวมตัวกันของตัวประสานทางธรรมชาตินั้นคือ เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน และเมื่อศึกษาตัวอย่างที่ผสมร่วมกับท่อนานาโนคาร์บอนแล้วแสดงให้เห็นถึงการยึดเกาะได้ดีกับเส้นใยซึ่งข่าวโพดในทุก ๆ สภาวะ ทุก ๆ อัตราส่วน แสดงดังรูปที่ 4.8-4.10



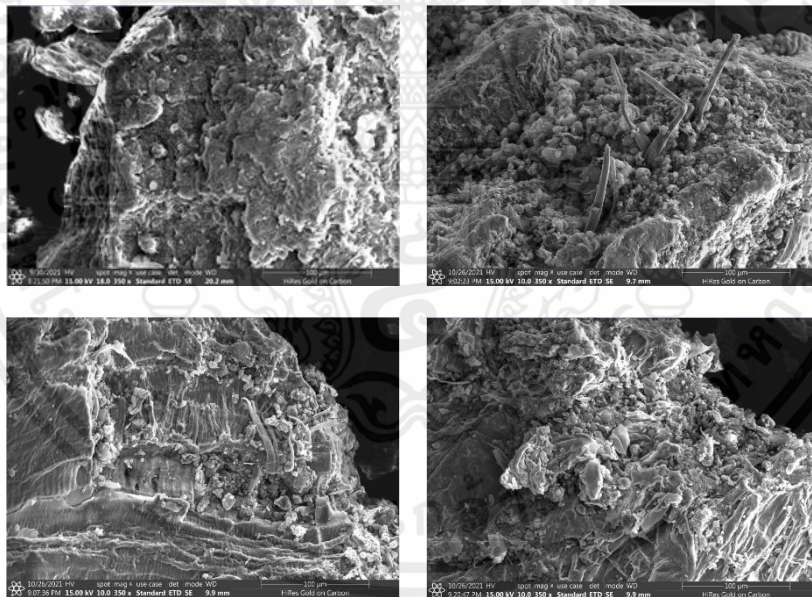
รูปที่ 4.7 ซังข้าวโพดที่ไม่ถูกการปรับสภาพทางเคมีด้วยสารละลาย NaOH (ซ้าย), ท่อนานาโนคาร์บอน กำลังขยาย 200 เท่า (กลาง) และกำลังขยาย 2000 เท่า (ขวา)



รูปที่ 4.8 ซังข้าวโพดที่ปรับสภาพด้วยสารละลาย NaOH ความเข้มข้น 0.25 โมลาร์ เป็นเวลา 72 ชั่วโมง ที่ไม่ผสมผงท่อนานาโนคาร์บอน (บนซ้าย) และผสมในอัตราส่วน 50:1 (บนขวา), 75:1 (ล่างซ้าย) และ 100:1 (ล่างขวา)



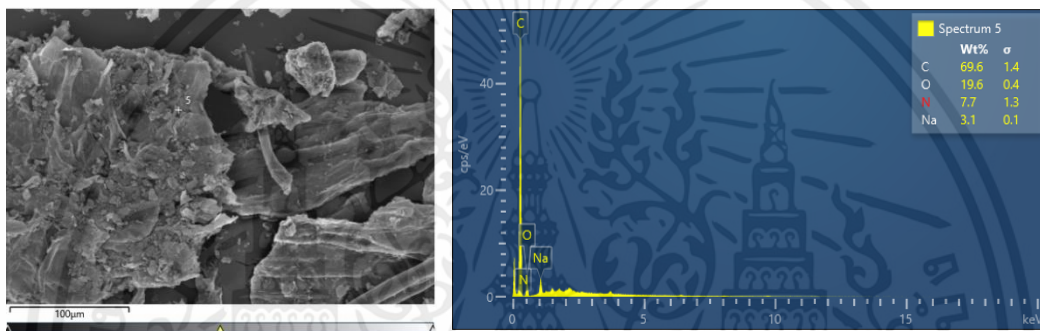
รูปที่ 4.9 ชั่งข้าวโพดที่ปรับสภาพด้วยสารละลาย NaOH ความเข้มข้น 0.50 โมลาร์ เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ที่ไม่ผสมผงท่อนานาโนคาร์บอน (บนซ้าย) และผสมในอัตราส่วน 50:1 (บนขวา), 75:1 (ล่างซ้าย) และ 100:1 (ล่างขวา)



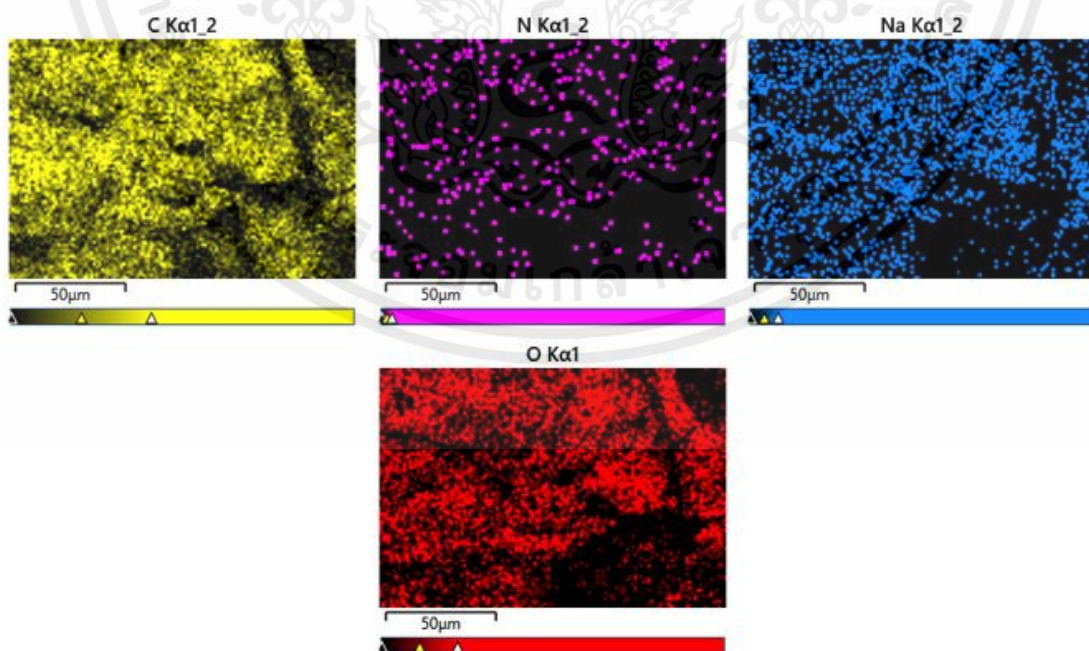
รูปที่ 4.10 ชั่งข้าวโพดที่ปรับสภาพด้วยสารละลาย NaOH ความเข้มข้น 0.75 โมลาร์ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่ไม่ผสมผงท่อนานาโนคาร์บอน (บนซ้าย) และผสมในอัตราส่วน 50:1 (บนขวา), 75:1 (ล่างซ้าย) และ 100:1 (ล่างขวา)

#### 4.3 ผลการศึกษาซังข้าวโพดที่ผ่านการปรับสภาพทางเคมีผสมกับท่อนาโนคาร์บอนในอัตราส่วนต่าง ๆ ด้วยเทคนิคการวัดการกระจายพลังงานของรังสีเอ็กซ์ (Energy Dispersive X-Ray Spectrometer: EDS)

จากผลการทดสอบพบว่า การทดลองของตัวอย่างทั้ง 9 เจ็อนไซ ที่เป็นสารประกอบระหว่างผงซังข้าวโพดที่ผ่านการปรับสภาพมาแล้วร่วมกับท่อนาโนคาร์บอนในอัตราส่วนต่าง ๆ มีผลออกมาคล้ายกัน แต่แตกต่างกันที่ปริมาณของธาตุแต่ละชนิด พบว่าเป็นผลจากการปรับสภาพทางเคมีที่ใช้ความเข้มข้นของ NaOH การใช้เวลาในการปรับสภาพ และอัตราส่วนการผสมซังข้าวโพดกับท่อนาโนคาร์บอนที่แตกต่างกัน ทางคณะผู้วิจัยจึงนำผลของตัวอย่างอัตราส่วนของท่อนาโนคาร์บอนและผงซังข้าวโพดที่ปรับสภาพด้วยสารละลาย NaOH ความเข้มข้น 0.25 โมลาร์ เป็นเวลา 72 ชั่วโมง 50:1 มานำเสนอ เป็นตัวแทนของข้อมูลอีก 8 ตัวอย่าง



รูปที่ 4.11 รูปทางสัณฐานวิทยาจาก FE-SEM ของสารตัวอย่าง (ซัง) และผลเทคนิค EDS แสดงชนิด และ ปริมาณธาตุที่อยู่บนชิ้นงานตัวอย่าง (ขวา)



รูปที่ 4.12 ภาพ Mapping ระบุว่าตำแหน่งสารแต่ละชนิดบนชิ้นงานตัวอย่าง

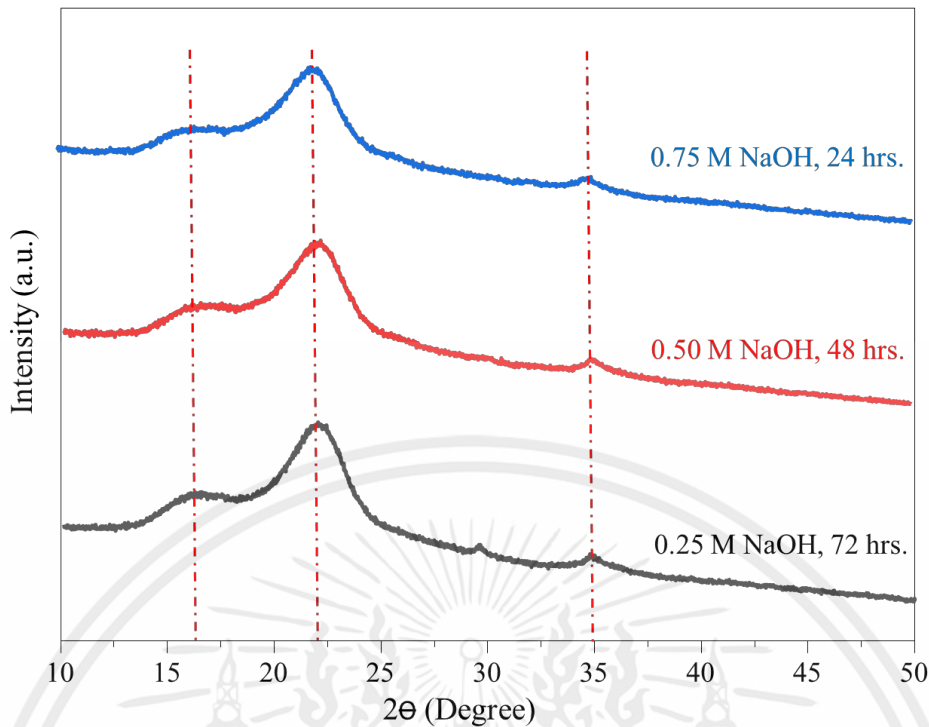
จากรูปที่ 4.11 ผลทางเทคนิค EDS ของวัสดุตัวอย่างนี้ พบว่ามีธาตุหรือสารในวัสดุตัวอย่างประกอบไปด้วย C 69.6 wt%, O 19.6, wt%, N 7.7 wt% และ Na 3.1 wt% ในทำนองเดียวกันกับตัวอย่างอื่นอีกทั้ง 8 ชนิด โดยธาตุที่มีปริมาณมากที่สุด คือ คาร์บอน (C) สามารถสังเกตได้จากรูปที่ 4.12 ซึ่งคาร์บอนมาจากที่เป็นส่วนประกอบของเส้นใยเซลลูโลส และท่อนานคาร์บอนที่นำมาผสมเข้ารวมกัน แต่จะแตกต่างในปริมาณของธาตุที่เกิดจากความหลากหลายของความเข้มข้นของสารละลาย NaOH และความหลากหลายของอัตราส่วนการผสมสารประกอบ

#### 4.4 ผลการศึกษาซังข้าวโพดที่ผ่านการปรับสภาพทางเคมีผสมกับท่อนานคาร์บอนในอัตราส่วนต่าง ๆ ด้วยเทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffractometer: XRD)

เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์อาศัยหลักการการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ เมื่อรังสีถูกฉายลงบนสารตัวอย่างแล้วจะเกิดการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ โดยจะทำการวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่มุมต่าง ๆ ซึ่งขึ้นอยู่กับความเป็นระเบียบของสารตัวอย่าง ข้อมูลที่ตรวจวัดได้จะบ่งบอกถึงโครงสร้างผลึก ชนิดของผลึก และความเป็นผลึกของสารตัวอย่าง ดังนั้นทางคณะผู้จัดทำจึงได้เลือกสารตัวอย่างเพื่อไปศึกษาเทคนิค XRD เพียง 3 ตัวอย่าง จากเงื่อนไขทั้งหมด 9 เงื่อนไข คือ ซังข้าวโพดที่ผสมร่วมกับท่อนานคาร์บอนในอัตราส่วน 100:1 โดยซังข้าวโพดถูกปรับสภาพในความเข้มข้นต่างกัน เพื่อศึกษาความเป็นผลึกของซังข้าวโพดที่มีการปรับสภาพในความเข้มข้น และเวลาต่างกัน ได้แก่

- 1) ปรับสภาพด้วย NaOH ความเข้มข้น 0.25 โมลาร์ เป็นเวลา 72 ชั่วโมง
- 2) ปรับสภาพด้วย NaOH ความเข้มข้น 0.50 โมลาร์ เป็นเวลา 48 ชั่วโมง
- 3) ปรับสภาพด้วย NaOH ความเข้มข้น 0.75 โมลาร์ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

จากผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) ของซังข้าวโพดที่ถูกปรับสภาพด้วยสารเคมี NaOH ในรูปที่ 4.13 แสดงให้เห็นได้ว่ามีจุดสูงสุดของพีคอยู่ที่  $2\theta$  เท่ากับ  $16^\circ$ ,  $22.2^\circ$  และ  $35^\circ$  สำหรับตัวอย่างทั้งสามสถานะ โดยตำแหน่ง  $2\theta$  ที่  $16^\circ$  และ  $22.2^\circ$  แสดงถึงคุณลักษณะของผลึกเซลลูโลส และจุดสูงสุดที่  $35^\circ$  แสดงถึงคุณลักษณะของลิกโนเซลลูโลส [34] จะเห็นได้ว่าทั้งสามตัวอย่างมีลักษณะของพีคใกล้เคียงกัน นอกจากนั้นยังพบอีกว่าตัวอย่างซังข้าวโพดที่ถูกปรับสภาพด้วยสารเคมี NaOH ที่ระดับความเข้มข้น 0.25 โมลาร์ เป็นระยะเวลา 72 ชั่วโมง มีความเข้มแสง (Intensity) ของกราฟสูงกว่าตัวอย่างที่ถูกปรับสภาพด้วย NaOH ที่ความเข้มข้น 0.50 โมลาร์ และ 0.75 โมลาร์ เนื่องจากมีลักษณะอสัณฐานของไขมันที่ถูกกำจัดออกไป และมีความเป็นผลึกเซลลูโลสที่เพิ่มมากขึ้น ซึ่งจะช่วยส่งเสริมและส่งผลให้ความแข็งแรงของวัสดุเพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 4.13 ผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) ของซังข้าวโพดที่ถูกปรับสภาพทางเคมีด้วย NaOH ซึ่งมีความเข้มข้นที่ต่างกัน

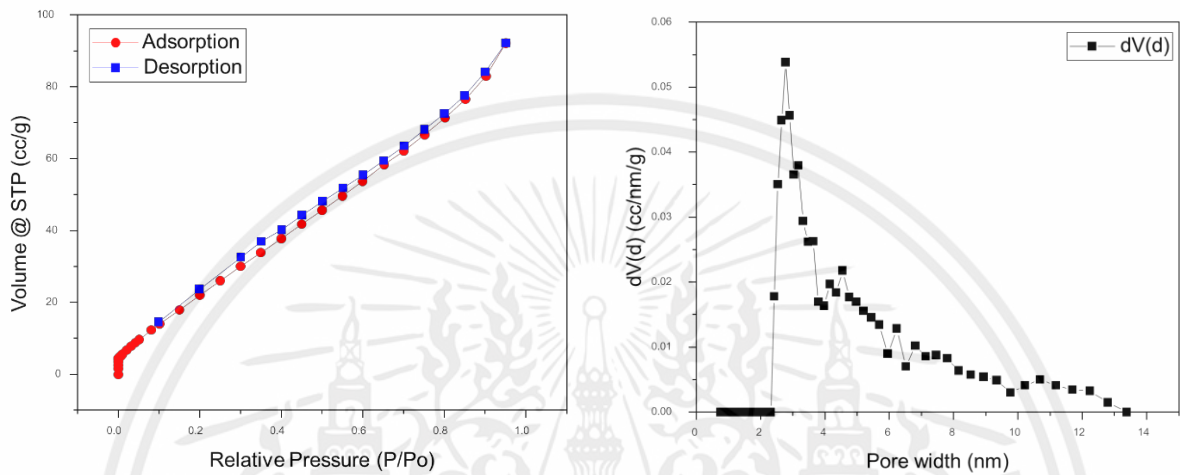
#### 4.5 ผลการศึกษาซังข้าวโพดที่ผ่านการปรับสภาพทางเคมีผสมกับท่อนาโนคาร์บอนในอัตราส่วนต่าง ๆ ด้วยเทคนิคเครื่องวิเคราะห์ขนาดพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุน (Surface Area and Pore Size Analyzer: BET)

ทางคณะผู้วิจัยได้เลือกสารตัวอย่างเพื่อไปศึกษาเทคนิค BET เพียง 3 ตัวอย่าง จากเงื่อนไขทั้งหมด 9 เงื่อนไข ผลการวิเคราะห์ BET นั้นเป็นการวิเคราะห์พื้นที่ผิว ขนาด และปริมาตรของรูพรุนที่มาจากวัสดุประเภทเดียวกัน แตกต่างกันเพียงความเข้มข้นของ NaOH และระยะเวลาในการปรับสภาพทางเคมี โดยจากการตั้งสมมติฐานพบว่าลักษณะหรือขนาดของรูพรุน หรือพื้นที่ผิวจะไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ทางคณะผู้วิจัยจึงได้เลือกเพียง 1 สภาวะของความเข้มข้นของการปรับสภาพทางเคมี โดยมี 3 อัตราส่วนผสมระหว่างผงท่อนาโนคาร์บอนและผงซังข้าวโพด โดย 3 ตัวอย่างที่คณะผู้วิจัยเลือก คือ ซังข้าวโพดที่ถูกปรับสภาพด้วย NaOH ความเข้มข้น 0.75 โมลาร์ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

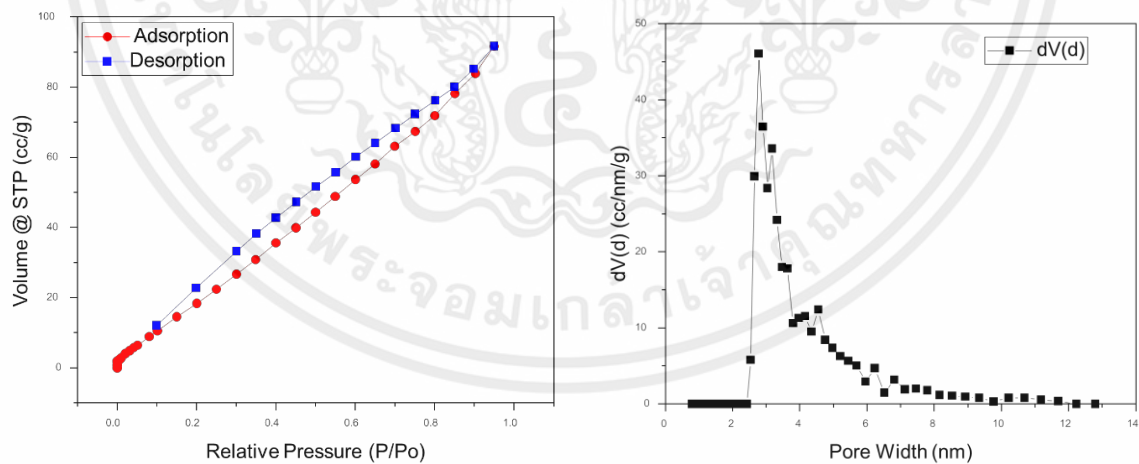
- 1) อัตราส่วนผสมผงซังข้าวโพดกับผงท่อนาโนคาร์บอน 50:1
- 2) อัตราส่วนผสมผงซังข้าวโพดกับผงท่อนาโนคาร์บอน 75:1
- 3) อัตราส่วนผสมผงซังข้าวโพดกับผงท่อนาโนคาร์บอน 100:1

โดยผลจากการวิเคราะห์โดยพิจารณาจาก Nitrogen Absorption Isotherm ของวัสดุทั้ง 3 ชนิด พบว่า ไอโซเทอมของการดูดซับเป็นแบบ Type II ของ IUPAC Classification ดังแสดงในรูปที่ 4.14-4.16 โดยตอนเริ่มต้นของไอโซเทอมการดูดซับที่ Relative Pressure มีค่าต่ำ จะทำให้เกิดการดูดซับไนโตรเจนได้

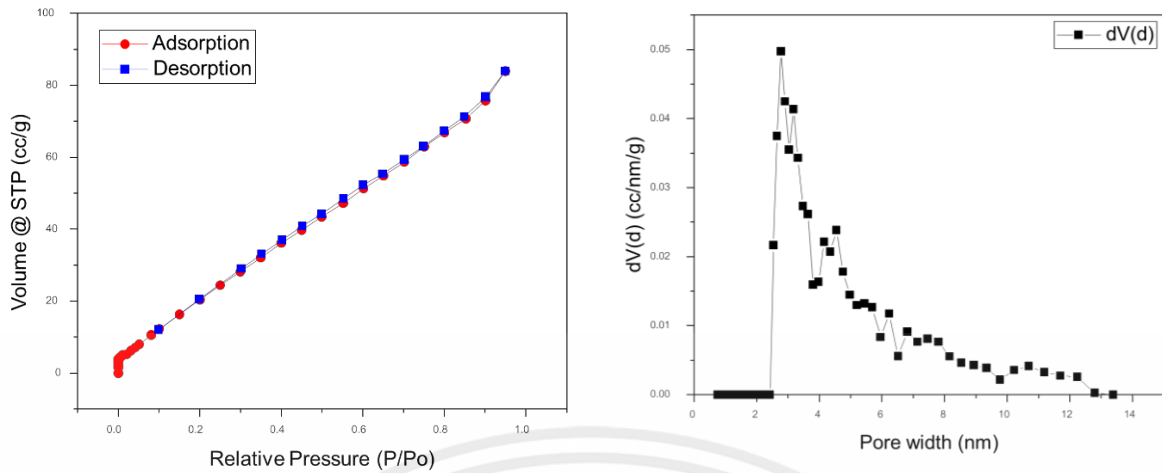
อย่างรวดเร็ว และเมื่อค่า Relative Pressure เพิ่มขึ้น จะทำให้กราฟมีความชันลดน้อยลง เนื่องจากการดูดซับหลายชั้นมากขึ้นของวัสดุแบบ Mesopore นอกจากนี้ขนาดรูพรุนของวัสดุ 3 ชนิดมีค่าใกล้เคียงกัน (Pore Size) อยู่ในช่วง 2-50 นาโนเมตร ดังนั้นทางที่วิจัยจึงสามารถสรุปได้ว่า รูพรุนที่มีขนาดเล็ก จะทำให้สามารถเพิ่มพื้นที่ผิวบนวัสดุตัวอย่างหรือซังข้าวโพดได้ ทำให้สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับหรือปริมาณคาร์บอนได้มากขึ้น ซึ่งจะช่วยส่งเสริมและส่งผลให้ความแข็งแรงของวัสดุเพิ่มมากขึ้นเช่นเดียวกัน



รูปที่ 4.14 ซังข้าวโพดที่ปรับสภาพด้วยสารละลาย NaOH ความเข้มข้น 0.75 โมลาร์ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง อัตราส่วนผสมผงซังข้าวโพดกับผงท่อนานาโนคาร์บอน 50:1



รูปที่ 4.15 ซังข้าวโพดที่ปรับสภาพด้วยสารละลาย NaOH ความเข้มข้น 0.75 โมลาร์ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง อัตราส่วนผสมผงซังข้าวโพดกับผงท่อนานาโนคาร์บอน 75:1



รูปที่ 4.16 ซังข้าวโพดที่ปรับสภาพด้วยสารละลาย NaOH ความเข้มข้น 0.75 โมลาร์ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง อัตราส่วนผสมซังข้าวโพดกับผงท่อนานโนคาร์บอน 100:1

#### 4.6 ผลการคัดเลือกสภาวะที่เหมาะสมเพื่อนำไปอัดขึ้นรูป

เนื่องจากผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) ทำให้เห็นว่าเมื่อแช่ซังข้าวโพดเป็นระยะเวลาที่นานกว่า การหลุดออกของสารออสซิลลิน และการเพิ่มความเป็นผลึกของเซลลูโลสมีมากขึ้น ดังนั้นทางคณะผู้วิจัยจึงเลือกสภาวะที่ปรับสภาพทางเคมีด้วย NaOH ความเข้มข้น 0.25 โมลาร์ เป็นระยะเวลา 72 ชั่วโมงมาเป็นตัวควบคุมในการอัดขึ้นรูป เพื่อการลดต้นทุนในการใช้สารละลาย NaOH ปรับสภาพทางเคมี จากการวิเคราะห์ผล BET โดยพิจารณาจาก Nitrogen Adsorption Isotherm ของวัสดุทั้ง 3 อัตราส่วนของผงซังข้าวโพดผสมร่วมกับท่อนานโนคาร์บอน คือ 50:1, 75:1 และ 100:1 สรุปได้ว่าขนาดรูพรุนของวัสดุทั้ง 3 ชนิดมีค่าใกล้เคียงกัน (Pore Size) อยู่ในช่วง 2-50 นาโนเมตร รูพรุนที่มีขนาดเล็ก จะทำให้สามารถเพิ่มพื้นที่ผิวบนวัสดุตัวอย่างหรือซังข้าวโพดได้ และทำให้สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับหรือปริมาณคาร์บอนได้มากขึ้น ทำให้ทางคณะผู้วิจัยสนใจที่จะนำทั้ง 3 อัตราส่วนมาทำการอัดขึ้นรูป และวิเคราะห์ผลทางสมบัติทางกายภาพของแผ่นอัดซังข้าวโพดที่ผสมท่อนานโนคาร์บอนต่างอัตราส่วน

#### 4.7 การศึกษาลักษณะทั่วไปของแผ่นอัดซังข้าวโพด

ผลการศึกษาชิ้นงานทดสอบที่ได้หลังจากอัดขึ้นรูปของแผ่นอัดซังข้าวโพดที่ไม่มีการผสมร่วมกับท่อนานโนคาร์บอน (Control Sample) และที่มีอัตราส่วนผสมร่วมกับท่อนานโนคาร์บอน (MWCNTs) รวมกันทั้งหมด 4 เงื่อนไขดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการศึกษาลักษณะทั่วไปแผ่นอัดซึ่งข้าวโพดร่วมกับท่อนาโนคาร์บอน

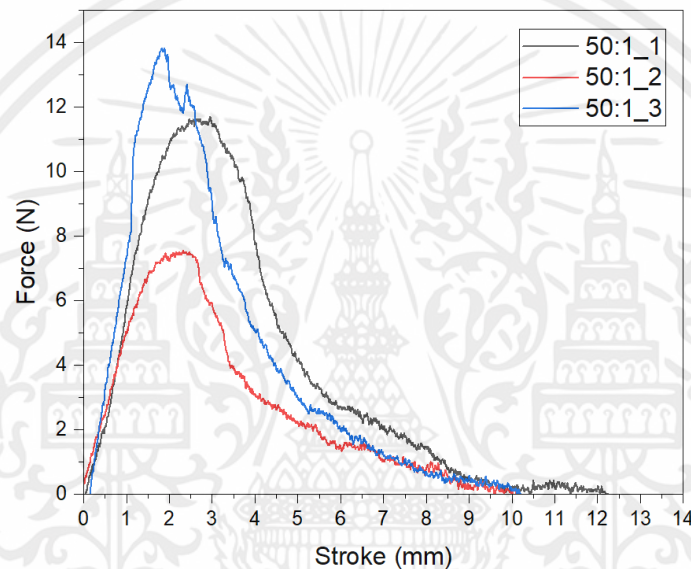
เงื่อนไข	อัตรา ส่วนผสม CC:MWCNT	หน่วย กรัม (g)				รูปแผ่นอัดขึ้นงาน ทดสอบ	ลักษณะแผ่นอัดขึ้นงาน ทดสอบ
		ซึ่งข้าวโพด (CC)	ท่อนาโน คาร์บอน (MWCNTs)	กาว พลาสติก เรซิน	น้ำ (มิลลิลิตร)		
1	50:1	60	0.12	2	1		สีดำเป็นส่วนใหญ่ แทรกด้วยสี น้ำตาลเล็กน้อย ผิวสัมผัสเรียบ ทั้ง 2 ด้าน ผิวขอบมีเศษซึ่ง ข้าวโพดหลุดเล็กน้อย
2	75:1	60	0.08	2	1		สีดำและสีน้ำตาลแซมแทรกกัน เท่า ๆ กัน ผิวสัมผัสเรียบทั้ง 2 ด้าน
3	100:1	60	0.06	2	1		สีดำ และมีสีน้ำตาลกระจาย แน่นทั่วแผ่น ผิวสัมผัสเรียบทั้ง 2 ด้าน
4	-	60	0	2	1		สีน้ำตาลเข้มออกเหลือง ผิวสัมผัสเรียบทั้ง 2 ด้าน

จากตารางที่ 3.1 ผลการศึกษาแต่ละเงื่อนไขแผ่นอัดซึ่งข้าวโพดร่วมกับท่อนานาโนคาร์บอน พบว่า ผิวน้ำตาลมีความเรียบทั้ง 2 ด้าน มีสีน้ำตาลเข้มออกเหลืองจากซึ่งข้าวโพด แต่เมื่อมีการผสมร่วมกับท่อนานาโนคาร์บอนสีของแผ่นอัดจะเปลี่ยนเป็นสีดำทั่วทั้งแผ่น แต่ยังสามารถเห็นสีน้ำตาลของซึ่งข้าวโพดกระจายอยู่

#### 4.8 การศึกษาความต้านทานแรงดัดของแผ่นอัดซึ่งข้าวโพด

ผลการทดสอบที่ได้จากเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ของชิ้นงานทดสอบแต่ละเงื่อนไขมีดังต่อไปนี้

1) แผ่นอัดซึ่งข้าวโพดที่ซึ่งข้าวโพดถูกปรับสภาพทางเคมีด้วย NaOH ที่ความเข้มข้น 0.25 โมลาร์ เป็นระยะเวลา 72 ชั่วโมง ผสมร่วมกับท่อนานาโนคาร์บอนในอัตราส่วน 50:1 มีผลดังรูปที่ 4.17 และตารางที่ 4.2



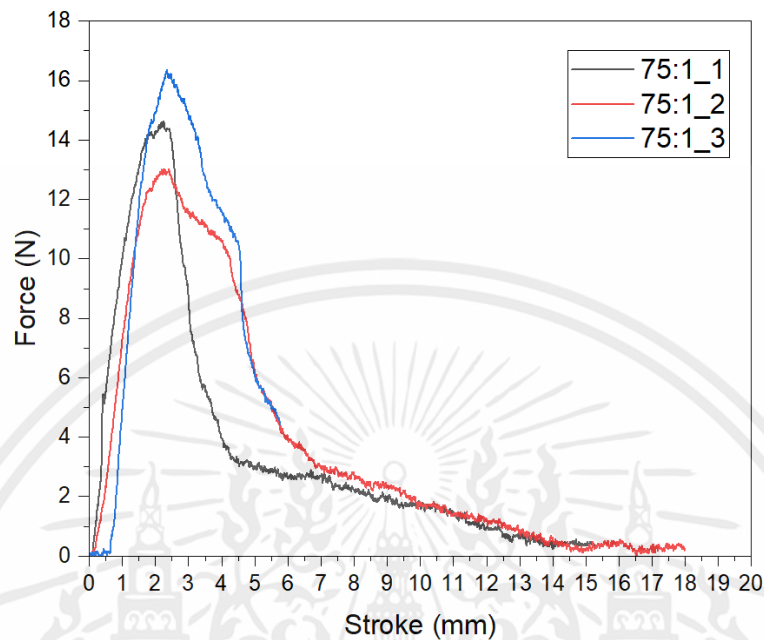
รูปที่ 4.17 ผลการทดสอบที่ได้จากเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ของชิ้นงานทดสอบเงื่อนไขที่ 1

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบความต้านทานแรงดัดของชิ้นงานทดสอบเงื่อนไขที่ 1

ลำดับชิ้นงานทดสอบ	Max Force (นิวตัน)	Max Stroke (มิลลิเมตร)	Max Stress (นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร หรือ เมกะปาสคาล)
1	11.6984	2.95956	6.23915
2	7.54992	2.32602	4.02663
3	13.8124	1.88858	7.36660
เฉลี่ย	11.0202	2.39139	5.87746

พบว่า ค่าความต้านทานแรงดัดของแผ่นอัดซึ่งข้าวโพดที่ผ่านการปรับสภาพ และมีการผสมร่วมกับท่อนานาโนคาร์บอนในอัตราส่วน 50:1 มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 5.87746 เมกะปาสคาล

2) แผ่นอัดซังข้าวโพดที่ซังข้าวโพดถูกปรับสภาพทางเคมีด้วย NaOH ที่ความเข้มข้น 0.25 โมลาร์ เป็นระยะเวลา 72 ชั่วโมง ผสมร่วมกับท่อนานาโนคาร์บอนในอัตราส่วน 75:1 มีผลดังรูปที่ 4.18 และตารางที่ 4.3



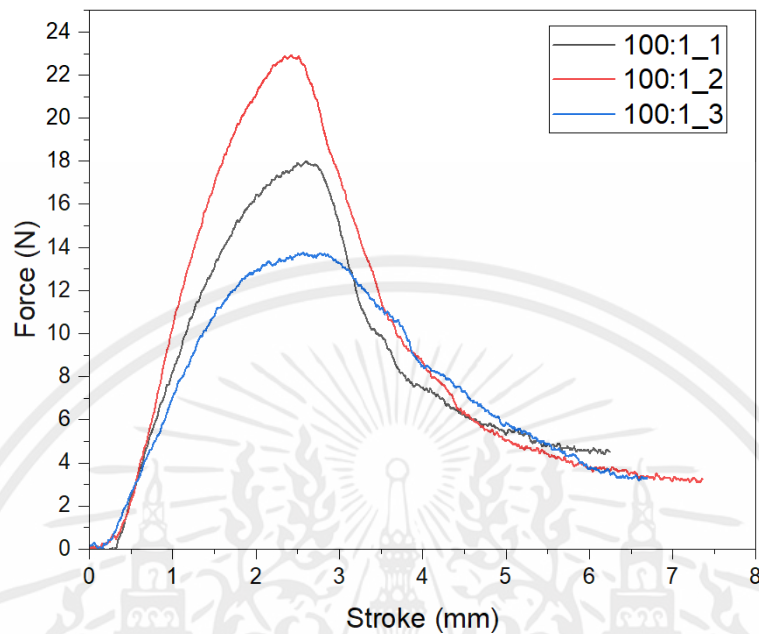
รูปที่ 4.18 ผลการทดสอบที่ได้จากเครื่องทดสอบบอเนกประสงค์ของชิ้นงานทดสอบเงื่อนไขที่ 2

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบความต้านแรงตัดของชิ้นงานทดสอบเงื่อนไขที่ 2

ลำดับชิ้นงานทดสอบ	Max Force (นิวตัน)	Max Stroke (มิลลิเมตร)	Max Stress (นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร หรือ เมกะปาสคาล)
1	14.6230	2.25390	7.79894
2	13.0018	2.41421	6.93427
3	16.3555	2.34683	8.72294
เฉลี่ย	14.6601	2.33831	7.81872

พบว่า ค่าความต้านทานแรงตัดของแผ่นอัดซังข้าวโพดที่ผ่านการปรับสภาพ และมีการผสมร่วมกับท่อนานาโนคาร์บอนในอัตราส่วน 75:1 มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 7.81872 เมกะปาสคาล

3) แผ่นอัดซังข้าวโพดที่ซังข้าวโพดถูกปรับสภาพทางเคมีด้วย NaOH ความเข้มข้น 0.25 โมลาร์ เป็นระยะเวลา 72 ชั่วโมง ผสมร่วมกับท่อนานาโนคาร์บอนในอัตราส่วน 100:1 มีผลดังรูปที่ 4.19 และตารางที่ 4.4



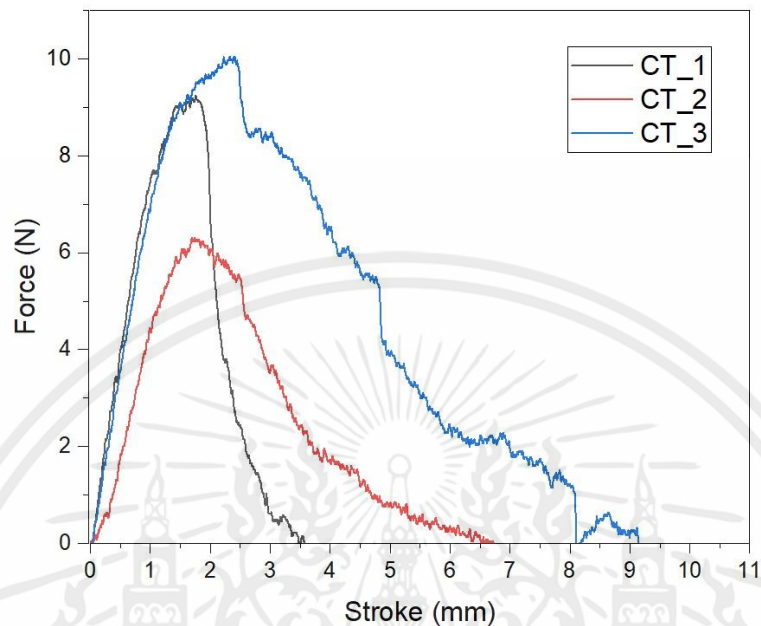
รูปที่ 4.19 ผลการทดสอบที่ได้จากเครื่องทดสอบบอเนกประสงค์ของชิ้นงานทดสอบเงื่อนไขที่ 3

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบความต้านแรงตัดของชิ้นงานทดสอบเงื่อนไขที่ 3

ลำดับชิ้นงาน ทดสอบ	Max Force (นิวตัน)	Max Stroke (มิลลิเมตร)	Max Stress (นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร หรือ เมกะปาสคาล)
1	17.9927	2.60813	9.59608
2	22.9041	2.43242	12.2155
3	13.7647	2.56631	7.34117
เฉลี่ย	18.2205	2.53562	9.71758

พบว่า ค่าความต้านทานแรงตัดของแผ่นอัดซังข้าวโพดที่ผ่านการปรับสภาพ และมีการผสมร่วมกับท่อนานาโนคาร์บอนในอัตราส่วน 100:1 มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 9.71758 เมกะปาสคาล

4) แผ่นอัดซังข้าวโพดที่ซังข้าวโพดถูกปรับสภาพทางเคมีด้วย NaOH ที่ความเข้มข้น 0.25 โมลาร์ เป็นระยะเวลา 72 ชั่วโมง ไม่มีการผสมร่วมกับท่อนานคาร์บอนซึ่งมีผลดังรูปที่ 4.20 และตารางที่ 4.5



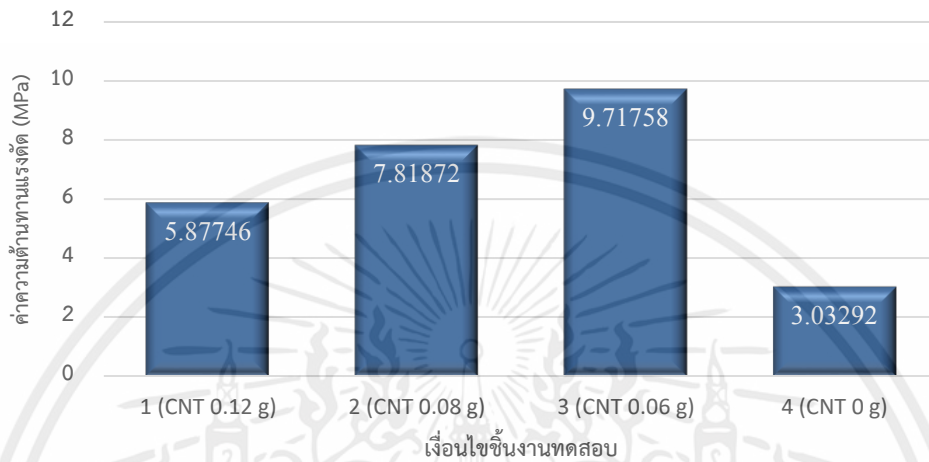
รูปที่ 4.20 ผลการทดสอบที่ได้จากเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ของชิ้นงานทดสอบเงื่อนไขที่ 4

ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบความต้านแรงดัดของชิ้นงานทดสอบเงื่อนไขที่ 4

ลำดับชิ้นงาน ทดสอบ	Max Force (นิวตัน)	Max Stroke (มิลลิเมตร)	Max Stress (นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร หรือ เมกะปาสคาล)
1	9.23475	1.76617	3.28347
2	6.31015	1.74190	2.24361
3	10.0454	2.41096	3.57170
เฉลี่ย	8.53010	1.97301	3.03292

พบว่า ค่าความต้านทานแรงดัดของแผ่นอัดซังข้าวโพดที่ผ่านการปรับสภาพ แต่ไม่มีการผสมร่วมกับท่อนานคาร์บอนมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 3.03292 เมกะปาสคาล

ค่าความต้านทานแรงดัดเป็นค่าที่แสดงถึงความสามารถในการต้านทานการแตกหัก หรือความแข็งแรงของชิ้นงานทดสอบ โดยนำค่าเฉลี่ยที่ได้ไปเปรียบเทียบกับมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม แผ่นขึ้นไม้อัดชนิดอัดเรียบ (มอก. 876-2547) ซึ่งมีเกณฑ์ที่กำหนดของแผ่นไม้อัดที่มีความหนา 3.0-6.0 มิลลิเมตร ต้องมีความต้านทานแรงดัดไม่น้อยกว่า 15 เมกะปาสคาล [33]



รูปที่ 4.21 ค่าความต้านทานแรงดัดของแผ่นอัดซึ่งข้าวโพด

จากรูปที่ 4.21 ผลการทดสอบค่าความต้านทานแรงดัดของแผ่นอัดซึ่งข้าวโพด พบว่าแผ่นอัดซึ่งข้าวโพดในเงื่อนไขที่ 3 มีค่าความต้านทานแรงดัดมากที่สุด รองลงมาคือ แผ่นอัดซึ่งข้าวโพดในเงื่อนไขที่ 2 ส่วนเงื่อนไขที่ 4 มีค่าความต้านทานแรงดัดน้อยที่สุด แสดงให้เห็นว่าท่อนานาโนคาร์บอนมีผลในการเป็นตัวช่วยเสริมแรงให้กับแผ่นอัดซึ่งข้าวโพดได้ แต่เมื่ออัตราส่วนผสมที่มีปริมาณท่อนานาโนคาร์บอนเพิ่มขึ้น พบว่าความแข็งแรงของแผ่นอัดซึ่งข้าวโพดลดลงและเปราะแตกหักง่าย นอกจากนี้ยังพบอีกว่าเมื่อแผ่นอัดที่มีอัตราส่วนผสมปริมาณท่อนานาโนคาร์บอนลดลง พบว่าแผ่นอัดมีความแข็งแรงเพิ่มและมีความเหนียวแน่นขึ้น

#### 4.9 การศึกษาค่าปริมาณความชื้นของแผ่นอัดซึ่งข้าวโพด

ผลการทดสอบชิ้นงานทดสอบแต่ละเงื่อนไขมีดังต่อไปนี้

1) แผ่นอัดซึ่งข้าวโพดที่ซึ่งข้าวโพดถูกปรับสภาพทางเคมีด้วย NaOH ที่ความเข้มข้น 0.25 โมลาร์ เป็นระยะเวลา 72 ชั่วโมง ผสมร่วมกับท่อนานาโนคาร์บอนในอัตราส่วน 50:1 มีผลทดสอบ ดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบค่าปริมาณความชื้นของชิ้นงานทดสอบเงื่อนไขที่ 1

ครั้งที่	มวลชิ้นงานก่อนอบ (กรัม)	มวลชิ้นงานหลังอบ (กรัม)	ปริมาณความชื้น (ร้อยละ)
1	7.8600	7.0745	11.10
2	7.7562	7.0555	9.93
3	7.5620	7.0420	7.38
เฉลี่ย	7.7261	7.0573	9.47

พบว่า ค่าปริมาณความชื้นของแผ่นอัดซึ่งข้าวโพดที่ผ่านการปรับสภาพ และมีการผสมร่วมกับท่อนานโนคาร์บอนในอัตราส่วน 50:1 มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ร้อยละ 9.47

2) แผ่นอัดซึ่งข้าวโพดที่ซึ่งข้าวโพดถูกปรับสภาพทางเคมีด้วย NaOH ความเข้มข้น 0.25 โมลาร์ เป็นระยะเวลา 72 ชั่วโมง ผสมร่วมกับท่อนานโนคาร์บอนในอัตราส่วน 75:1 มีผลทดสอบ ดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ผลการทดสอบค่าปริมาณความชื้นของชิ้นงานทดสอบเงื่อนไขที่ 2

ครั้งที่	มวลชิ้นงานก่อนอบ (กรัม)	มวลชิ้นงานหลังอบ (กรัม)	ปริมาณความชื้น (ร้อยละ)
1	7.7003	6.9327	11.07
2	7.5948	6.9151	9.83
3	7.4024	6.8977	7.32
เฉลี่ย	7.5658	6.9152	9.41

พบว่า ค่าปริมาณความชื้นของแผ่นอัดซึ่งข้าวโพดที่ผ่านการปรับสภาพ และมีการผสมร่วมกับท่อนานโนคาร์บอนในอัตราส่วน 75:1 มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ร้อยละ 9.41

3) แผ่นอัดซึ่งข้าวโพดที่ซึ่งข้าวโพดถูกปรับสภาพทางเคมีด้วย NaOH ความเข้มข้น 0.25 โมลาร์ เป็นระยะเวลา 72 ชั่วโมง ผสมร่วมกับท่อนานโนคาร์บอนในอัตราส่วน 100:1 มีผลทดสอบ ดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 ผลการทดสอบค่าปริมาณความชื้นของชิ้นงานทดสอบเงื่อนไขที่ 3

ครั้งที่	มวลชิ้นงานก่อนอบ (กรัม)	มวลชิ้นงานหลังอบ (กรัม)	ปริมาณความชื้น (ร้อยละ)
1	7.4315	6.7213	10.57
2	7.3650	6.7042	9.86
3	7.2129	6.6875	7.86
เฉลี่ย	7.3365	6.7043	9.43

พบว่า ค่าปริมาณความชื้นของแผ่นอัดซึ่งข้าวโพดที่ผ่านการปรับสภาพ และมีการผสมร่วมกับท่อนาโนคาร์บอนในอัตราส่วน 100:1 มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ร้อยละ 9.43

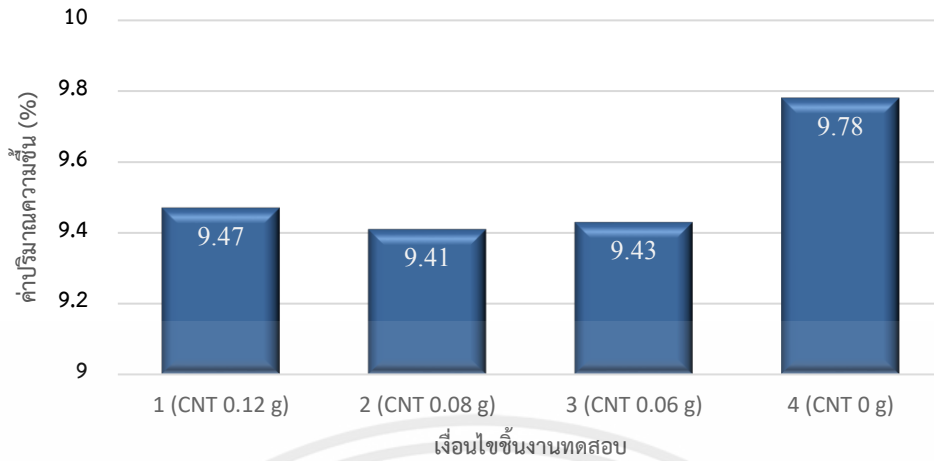
4) แผ่นอัดซึ่งข้าวโพดที่ซึ่งข้าวโพดถูกปรับสภาพทางเคมีด้วย NaOH ที่ความเข้มข้น 0.25 โมลาร์ เป็นระยะเวลา 72 ชั่วโมง ไม่มีการผสมร่วมกับท่อนาโนคาร์บอน มีผลทดสอบ ดังตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 ผลการทดสอบค่าปริมาณความชื้นของชิ้นงานทดสอบเงื่อนไขที่ 4

ครั้งที่	มวลชิ้นงานก่อนอบ (กรัม)	มวลชิ้นงานหลังอบ (กรัม)	ปริมาณความชื้น (ร้อยละ)
1	7.6090	6.8251	11.48
2	7.5003	6.7939	10.40
3	7.2891	6.7828	7.46
เฉลี่ย	7.4661	6.8006	9.78

พบว่า ค่าปริมาณความชื้นของแผ่นอัดซึ่งข้าวโพดที่ผ่านการปรับสภาพ แต่ไม่มีการผสมร่วมกับท่อนาโนคาร์บอนมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ร้อยละ 9.78

จากการทดสอบพบว่า ไม้จะมีการปรับความชื้นในตัวเองให้มีความสมดุลกับความชื้นในบรรยากาศอยู่เสมอ โดยความชื้นสมดุลจะแปรผันตามความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิของบรรยากาศ ซึ่งความชื้นสัมพัทธ์ของบรรยากาศแต่ละที่ก็มีความแตกต่างกัน หากมีปริมาณความชื้นมากจะส่งผลให้คุณสมบัติของไม้มีการเปลี่ยนแปลง เช่น ความแข็งแรงลดลง เปราะแตกหักง่าย และค่าความเป็นฉนวนไฟฟ้าของไม้ลดลง เป็นต้น ทางคณะผู้จัดทำจึงนำค่าเฉลี่ยที่ได้ไปเปรียบเทียบกับมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม แผ่นขึ้นไม้อัดชนิดอัดเรียบ (มอก. 876-2547) ซึ่ง ต้องมีปริมาณความชื้นเฉลี่ยอยู่ในช่วงร้อยละ 4 ถึง 13 [33]



รูปที่ 4.22 ค่าปริมาณความชื้นของแผ่นอัดซึ่งข้าวโพด

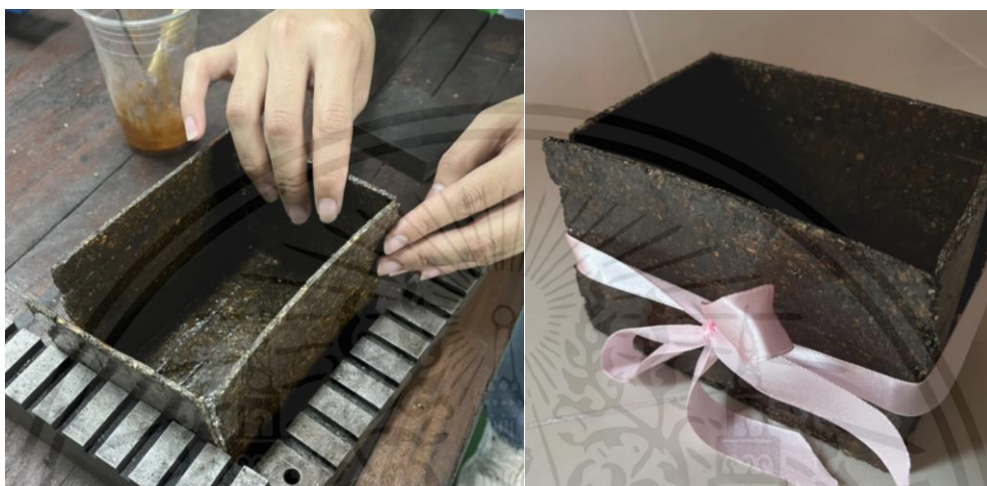
จากรูปที่ 4.22 ผลการทดสอบค่าปริมาณความชื้นของแผ่นอัดซึ่งข้าวโพด พบว่า แผ่นอัดซึ่งข้าวโพดเงื่อนไขที่ 4 มีปริมาณความชื้นมากที่สุด แผ่นอัดซึ่งข้าวโพดเงื่อนไขที่ 1, 2 และ 3 มีปริมาณความชื้นที่ใกล้เคียงกัน และน้อยกว่าเงื่อนไขที่ 4 เพียงเล็กน้อย โดยแผ่นอัดซึ่งข้าวโพดทั้ง 4 เงื่อนไขผ่านเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก. 876-2547) ที่กำหนดทั้งหมด แสดงว่าในเรื่องปริมาณความชื้นที่เหมาะสม ซึ่งข้าวโพดสามารถนำมาขึ้นรูปได้ และเมื่อผสมกับท่อนานโนคาร์บอนช่วยให้ปริมาณความชื้นในไม้อัดลดลง แต่ปริมาณของท่อนานโนคาร์บอนไม่ได้ส่งผลต่อการลดลงของปริมาณความชื้น

#### 4.10 การประดิษฐ์กล่องอเนกประสงค์จำลองจากซึ่งข้าวโพดร่วมกับท่อนานโนคาร์บอน

จากการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคและทางมหภาค รวมถึงการทดสอบสมบัติเชิงกลตลอดทั้งงานวิจัยนี้ ทางทีมผู้จัดทำจึงได้ตัดสินใจคัดเลือกเพียง 1 เงื่อนไขที่เหมาะสมเพื่อประดิษฐ์ผลิตภัณฑ์กล่องอเนกประสงค์จำลอง (Organic Box) ให้การผลิตมีทั้งประสิทธิภาพและประสิทธิผลควบคู่กัน เงื่อนไขนั้นคือ ซึ่งข้าวโพดที่ถูกปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.25 โมลาร์ เป็นเวลา 72 ชั่วโมง ผสมร่วมกับท่อนานโนคาร์บอนในอัตราส่วน 100:1 ซึ่งมีวิธีการประดิษฐ์ดังนี้

- 1) นำซึ่งข้าวโพดไปปรับสภาพทางเคมีให้เรียบร้อย แล้วนำไปอบและบดให้เป็นผง
- 2) นำผงซึ่งข้าวโพดที่ได้ผสมร่วมกับท่อนานโนคาร์บอน ผงกาวพลาสติกเรซิน และน้ำ ในอัตราส่วน 6:0.06:2:1 กรัม ต่อ การอัดขึ้นรูป 1 ครั้ง
- 3) อัดขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดร้อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 นาที โดยมีแม่พิมพ์ขนาด 20×150 มิลลิเมตร หนา 3 มิลลิเมตร อัดทั้งหมดจำนวน 25 แผ่น
- 4) ต่อซึ่งข้าวโพดติดกันเป็นแผ่นใหญ่ด้วยแผ่นอัดซึ่งข้าวโพด 5 ชั้น ต่อ 1 แผ่น โดยใช้กาวพลาสติกเรซินเป็นตัวยึดติด จะได้แผ่นอัดซึ่งข้าวโพด 5 แผ่นใหญ่
- 5) ขัดแผ่นอัดซึ่งข้าวโพดใหญ่ด้วยกระดาษทรายแบบหยาบ และละเอียด

- 6) ตัดแผ่นอัดซึ่งข้าวโพดขนาด 130×145 มิลลิเมตร จำนวน 1 แผ่น ขนาด 100×124 มิลลิเมตร จำนวน 2 แผ่น และขนาด 100×145 มิลลิเมตร จำนวน 2 แผ่น
- 7) ประกอบแผ่นอัดซึ่งข้าวโพดโดยใช้แผ่นขนาด 130×145 มิลลิเมตร เป็นพื้น และแผ่นอื่น ๆ ประกอบเป็นผนังกล่องบนแผ่นพื้นตามความกว้างของพื้นกล่อง ทำให้กล่องมีความสูงประมาณ 105 มิลลิเมตร ใช้กาวพลาสติกเรซินเป็นตัวยึดติด ดังรูปที่ 4.23



รูปที่ 4.23 กระบวนการประกอบกล่องอเนกประสงค์

## บทที่ 5

### สรุปผลการดำเนินการวิจัยและข้อเสนอแนะ

การวิจัยเรื่อง การศึกษาการออกแบบวัสดุเสริมแรงของซังข้าวโพดร่วมกับท่อนานคาร์บอน มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อความแข็งแรง และส่วนผสมที่เหมาะสมของวัสดุเสริมแรงซังข้าวโพดร่วมกับท่อนานคาร์บอน ศึกษาลักษณะโครงสร้างจุลภาคของวัสดุที่ผ่านการปรับสภาพ และหาสภาวะและปัจจัยต่าง ๆ ที่เหมาะสมสำหรับการผลิตและเพิ่มประสิทธิภาพของวัสดุ สามารถสรุปผลการดำเนินการวิจัย และบ่งชี้ข้อเสนอแนะในการปรับปรุงพัฒนาต่อไปในอนาคต โดยมีเนื้อหา ดังนี้

#### 5.1 สรุปผลการดำเนินการ

#### 5.2 ข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการดำเนินการ

ในการปรับสภาพทางเคมีของซังข้าวโพดด้วยสารละลาย NaOH ในความเข้มข้น 0.25, 0.50 และ 0.75 โมลาร์ ซึ่งแต่ละความเข้มข้นปรับสภาพเป็นระยะเวลา 24, 48 และ 72 ชั่วโมงตามลำดับ จากการวิเคราะห์ผลด้วยเทคนิค SEM, EDS, XRD และ BET ทำให้เห็นถึงการสกัดสิ่งเจือปน และสารออสัญฐานด้วยความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้นน้อย เพื่อเป็นการลดต้นทุน และลดความรุนแรงของการใช้สารเคมีด้วยระยะเวลาการปรับสภาพที่เพิ่มมากขึ้น เมื่อทำการปรับสภาพ แล้วทำการระบุเอกลักษณ์ของวัสดุด้วยเทคนิคต่าง ๆ ทำให้เห็นถึงการหลุดออกของไขมันและส่วนประกอบออสัญฐาน เช่น เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน จากพื้นผิวของวัสดุ ซึ่งเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัส และความขรุขระของผิวที่ติดขึ้นให้กับท่อนานคาร์บอน สำหรับการนำไปใช้เป็นวัสดุเสริมแรง จากการศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของซังข้าวโพดร่วมกับท่อนานคาร์บอน หลังการอัดขึ้นรูป พบว่าท่อนานคาร์บอนมีผลให้ความต้านทานแรงดัดหรือความแข็งแรงของแผ่นอัดซังข้าวโพดเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มอัตราส่วนปริมาณท่อนานคาร์บอนสูงขึ้นทำให้ความต้านทานแรงดัดลดลงอย่างเห็นได้ชัด ทั้งนี้อัตราส่วนผสมของซังข้าวโพดต่อท่อนานคาร์บอนที่มีความต้านทานแรงดัดได้สูงที่สุด คือ 100:1 ซึ่งได้ค่าความต้านทานแรงดัดเท่ากับ 9.71758 เมกะปาสคาล และท่อนานคาร์บอนยังส่งผลให้ค่าปริมาณความชื้นในซังข้าวโพดลดลง ซึ่งในงานวิจัยนี้แผ่นอัดซังข้าวโพดทุกเงื่อนไขผ่านเกณฑ์ค่าปริมาณความชื้นของมาตรฐาน มอก. 876-2547 ทั้งหมด

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1) การศึกษาวิจัยครั้งนี้ได้ศึกษาการปรับสภาพของวัสดุประเภทลิกโนเซลลูโลสหรือซังข้าวโพดด้วยเบสโซเดียมไฮดรอกไซด์ สำหรับงานวิจัยครั้งต่อไป ควรมีการศึกษาปรับสภาพด้วยวิธีต่าง ๆ เพิ่มเติมเพื่อปรับปรุงและเพิ่มประสิทธิภาพของวัสดุในการใช้เป็นวัสดุเสริมแรง

2) การศึกษาวิจัยครั้งนี้ศึกษาวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาค และโครงสร้างมหภาคบางสภาวะ เนื่องด้วยปัญหาสถานการณ์การแพร่ระบาดของไวรัสโควิด-19 ทำให้มีข้อจำกัดในด้านเวลา สำหรับการศึกษาครั้งต่อไป จะทำการศึกษาในทุกสภาวะด้วยเทคนิคต่าง ๆ ให้ชัดเจนเพื่อผลการทดลองที่มีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น

3) การศึกษาวิจัยครั้งนี้ได้มีการศึกษาสมบัติของแผ่นไม้อัดเพียง 2 การทดสอบคือ การทดสอบแรงดัดโค้ง และการทดสอบหาค่าปริมาณความชื้น สำหรับการศึกษาครั้งต่อไปควรทำการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุด้วยเทคนิคอื่นเพิ่มเติมและให้เหมาะสมกับการพัฒนาวัสดุในอนาคต

4) การศึกษาวิจัยครั้งนี้จากผลการทดสอบสมบัติในด้านความต้านทานแรงดัดโค้ง พบว่า ท่อนานโนคาร์บอนมีส่วนช่วยในการเพิ่มความต้านทานแรงดัดหรือทำให้วัสดุมีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้น แต่ปริมาณอัตราส่วนของท่อนานโนคาร์บอนเพิ่มขึ้น ทำให้ความแข็งแรงลดลง ปริมาณอัตราส่วนของท่อนานโนคาร์บอนน้อยลง ทำให้ความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ดังนั้นสำหรับการศึกษาครั้งต่อไปจะทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของท่อนานโนคาร์บอนและความแข็งแรงของวัสดุโดยใช้เทคนิคทางสถิติในการช่วยวิเคราะห์ผลการทดสอบ

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Arphawan Sopontammarak. (2558). **เปลี่ยนขยะข้าวโพด เป็นเห็ดฟางปลอดสารพิษ**. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: <https://www.thaihealth.or.th/Content/29404-เปลี่ยนขยะข้าวโพด%20เป็นเห็ดฟางปลอดสารพิษ.html>.
- [2] ณคนัท รักษารักษ์, ธเนศ รัตนวิไล และชัยณรงค์ ศรีวะบุตร. (2562). **ผลของเส้นใยเหลือใช้จากเศษวัสดุทางการเกษตรต่อสมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ และสมบัติทางความร้อนของวัสดุไม้ผสมพลาสติกจากพอลิโพรพิลีน**. วารสารวิจัยและพัฒนา มจร. ปีที่ 42.
- [3] สถาบันนวัตกรรมและพัฒนาระบบการเรียนรู้ มหาวิทยาลัยมหิดล. **ท่อนาโนคาร์บอน**. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: <https://il.mahidol.ac.th/e-media/nano/Page/Unit3-8.html>.
- [4] บุญทวี เลิศปัญญาพรชัย. (2554). **ท่อนาโนคาร์บอน (Carbon Nanotube)**. ก้าวทันโลกวิทยาศาสตร์ ปีที่ 11 (1).
- [5] เม็ดไทย. (2560). **ข้าวโพด สรรพคุณและประโยชน์ของข้าวโพดหวาน 44 ข้อ**. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก: <https://medthai.com/ข้าวโพด>.
- [6] คณาจารย์ภาควิชาพืชไร่ฯ ภาควิชาพืชไร่ฯ คณะเกษตร กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน. (2547). **พืชเศรษฐกิจ**. (พิมพ์ครั้งที่ 2). กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. (633 ก 58 2547).
- [7] โชคชัย เอกทัศนาวรรณ และเกตุอร ทองเครือ. (2561). **การปลูกข้าวโพด**. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: [http://www.eto.ku.ac.th/neweto/e-book/plant/herb\\_gar/corn2.pdf](http://www.eto.ku.ac.th/neweto/e-book/plant/herb_gar/corn2.pdf).
- [8] พันทิพา พงษ์เพียงจันทร์. (2543). **หลักการอาหารสัตว์**. พิมพ์ครั้งที่ 2 ปีที่ 2543. กรุงเทพมหานคร: โอเดียร์สโตร์.
- [9] สุทัศน์ ศรีวัฒนพงษ์. **สารานุกรมไทยสำหรับเยาวชน**. เล่มที่ 3 กรุงเทพมหานคร: โดยพระราชประสงค์ในพระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัว.
- [10] ภัทราภรณ์ ศิริเพชร. (2550). **แผ่นดูดซับเสียงจากขังข้าวโพด**. การศึกษาค้นคว้าอิสระ, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพ.
- [11] รัชพล พะวงศรีรัตน์. (2558). **กระบวนการปรับสภาพเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตเอทานอลจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรประเภทลิกโนเซลลูโลส**. Veridian E-Journal, Science and Technology Silpakorn University, ISSN 2408 – 1248.

- [12] โครงการเพิ่มศักยภาพฐานข้อมูลอุตสาหกรรมฐานชีวภาพ. บทที่ 32 รายละเอียดข้อมูลสารเคมีชีวภาพประเภทเซลลูโลส (Cellulose). มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.  
[ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก:  
[http://asp.plastics.or.th:8001/files/article\\_file/20181016080809u.pdf](http://asp.plastics.or.th:8001/files/article_file/20181016080809u.pdf).
- [13] โครงการเพิ่มศักยภาพฐานข้อมูลอุตสาหกรรมฐานชีวภาพ. บทที่ 33 รายละเอียดข้อมูลสารเคมีชีวภาพประเภทลิกนิน (Lignin). มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.  
[ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก:  
[http://asp.plastics.or.th:8001/files/article\\_file/20181016080809u.pdf](http://asp.plastics.or.th:8001/files/article_file/20181016080809u.pdf).
- [14] Kim, T.H., F. Taylor and K.B. Hicks. (2008). **Bioethanol Production from Barley Hull Using SSA (Soaking in Aqueous Ammonia) Pretreatment**. *Bioresource Technology*. 99:5694-5702.
- [15] นันทิกา คล้ายชม, เพ็ญจิตร ศรีนพคุณ และอนุสิษฐ์ ธนะพิมพ์เมธา. (2554). **การผลิตน้ำตาลรีดิวส์จากขางข้าวฟางหวานโดยกระบวนการไฮโดรไลซิสด้วยกรด**. *วิศวกรรมสาร มก.* 24: 91-102.
- [16] Chen, B.Y., Chen, S.W. and Wang, H.T. (2012). **Use of different alkaline pretreatments and enzyme models to improve low-cost cellulosic biomass conversion**. *Biom. Bioen.* 39: 182-191.
- [17] ญัฐพงษ์ ศรีเมือง. (2560). **Carbon nanotubes วัสดุแห่งอนาคต**. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก:  
<https://www.scimath.org/article-chemistry/item/7391-carbon-nanotubes>.
- [18] Yang, Kai. Et al. (2009). **Effect of carbon nanotube functionalization on the mechanical and thermal properties of epoxy composites**. *Carbon*. 47. 1723-1737.
- [19] Teng, Ao. (2010). **Physical Properties of Carbon Nanotubes**. *Solid State II. Physics, Tennessee University*.
- [20] Peng-cheng Ma. et al. (2010). **Dispersion and functionalization of carbon nanotubes for polymer-based nanocomposites : A review**. *Composites: Part A*. 41. 1345-1367.
- [21] Fischer, John E, and Alan T Johnson. (1999). **Electronic properties of carbon nanotubes**. *Solid State & Materials Science*. 4. 28-33.

- [22] ดร.ชเนิ พัทธวรการ. (2556). **เทคโนโลยีกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์**. เอกสารประกอบการสอน, ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม, คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- [23] นวลฉวี รุ่งธนเกียรติ. (2545). **วิทยาศาสตร์นิวเคลียร์**. พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- [24] นวลฉวี รุ่งธนเกียรติ. (2547). **พลังงานนิวเคลียร์เพื่อมนุษยชาติ**. พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- [25] Joseph I. Goldstein. (1992). **Scanning Electron Microscopy and X-ray Microanalysis**. 2nd ed. New York: Plenum Press.
- [26] สุพะไชย์ จินดาวุฒิกุล. (2555). **การวัดพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนของวัสดุดูดซับ**. วารสารกรมวิทยาศาสตร์บริการ ปีที่ 60 ฉบับที่ 189 หน้า 22-24.
- [27] สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน). **X-Ray Diffractometer (XRD) หรือเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์**. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก: <https://www.sri.or.th/bdd/th/22-บริการเครื่องมือวิทยาศาสตร์/71-x-ray-diffractometer-xrd.html>.
- [28] ASTM D790-10. (2010). **Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials**. In Annual Book of ASTM Standards.
- [29] มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. **แผ่นไม้อัดชนิดอัดราบ มอก. 876-2547**. สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม.
- [30] METTLER TOLEDO. **การระบุปริมาณความชื้น**. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก: [https://www.mt.com/th/th/home/applications/Laboratory\\_weighing/moisture-content-determination.html](https://www.mt.com/th/th/home/applications/Laboratory_weighing/moisture-content-determination.html).
- [31] Chinh Van Nguyen and P.S. Mangat. (2020). **Properties of rice straw reinforced alkali activated cementitious composites**. Construction and Building Materials 261, 120536.
- [32] อนินท์ มีมนต์. (2552). **การผลิตไม้อัดจากขังข้าวโพด สำหรับเป็นผนังฉนวนความร้อนในอาคาร**. สาขา วิศวกรรมศาสตร์และอุตสาหกรรมวิจัย มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.
- [33] สุภิญญา ธาราดล. (2559). **การพัฒนาผลิตภัณฑ์ขัง ข้าวโพดอัดขึ้นรูปเพื่องานประดิษฐ์**. สาขาวิชา เทคโนโลยีคหกรรมศาสตร์ คณะเทคโนโลยีคหกรรม ศาสตร์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.

- [34] Diego B. Menezes and Osiris A. V. Brazil. (2017). **Prospecting fungal ligninases using corncob lignocellulosic fractions**. Springer Science, Cellulose, Vol. 24, pp. 4355-4365.





เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม

THAI INDUSTRIAL STANDARD

มอก. 876– 2547

แผ่นชั้นไม้อัดชนิดอัดราบ

FLATPRESSED PARTICLEBOARDS

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม

กระทรวงอุตสาหกรรม

ICS 79.060.20

ISBN 974-687-210-9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4. ขนาดและเกณฑ์ความคลาดเคลื่อน

- 4.1 ความกว้างและความยาว ให้เป็นไปตามที่ระบุไว้ที่ด้านล่าง โดยมีเกณฑ์ความคลาดเคลื่อน  $\pm 5$  mm การวัดให้ปฏิบัติตามข้อ 9.3.1
- 4.2 ความหนา ให้เป็นไปตามที่ระบุไว้ที่ด้านล่าง แต่ต้องไม่น้อยกว่า 3 mm และไม่เกิน 50 mm โดยมีเกณฑ์ความคลาดเคลื่อน  $\pm 0.3$  mm การวัดให้ปฏิบัติตามข้อ 9.3.2
- 4.3 ความแตกต่างของเส้นทแยงมุมทั้ง 2 เส้น จะมีได้ไม่เกิน 0.25 % ของเส้นสั้น การวัดให้ปฏิบัติตามข้อ 9.3.3
- 4.4 ความตรงของขอบแต่ละด้านจะคลาดเคลื่อนไปจากแนวตรงได้ไม่เกิน 3.0 mm การวัดให้ปฏิบัติตามข้อ 9.3.4

#### 5. ส่วนประกอบและการทำ

- 5.1 ส่วนประกอบ
  - 5.1.1 ใยไม้ หรือวัสดุลิกไนต์เซลลูโลสสำหรับทำแผ่นชั้นไม้อัด
  - 5.1.2 กาว
- 5.2 การทำ
  - 5.2.1 ย่อยวัสดุที่จะทำเป็นชั้นไม้ตามลักษณะที่ต้องการ แล้วอบจนได้ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมด้วยเครื่องอบแยกชั้นไม้ออกเป็นขนาดต่างๆ ตามที่ต้องการ แล้วนำไปคลุกกับกาวตามอัตราส่วนที่เหมาะสมด้วยเครื่องจักร โดยผสมสารเติมแต่งลงไปด้วยก็ได้ และต้องควบคุมให้ปริมาณความชื้นของชั้นไม้ หลังจากผสมกาวและสารเติมแต่งแล้ว อยู่ในระดับที่เหมาะสม นำชั้นไม้ไปทำเป็นแผ่นชั้นไม้ (particle mat) ด้วยเครื่องทำแผ่น แล้วนำแผ่นชั้นไม้ไปอัดด้วยเครื่องอัดร้อนในแนวราบทั้งนี้ต้องมีการควบคุมอุณหภูมิแรงอัด และระยะเวลาอัดร้อน
  - 5.2.2 ในกรณีที่เป็นแผ่นชั้นไม้อัดสามชั้น ต้องทำให้เกิดโครงสร้างที่สมดุล หากเป็นแผ่นชั้นไม้อัดชั้นเดียวต้องโยยชั้นไม้ที่มีขนาดแตกต่างกันอย่างสม่ำเสมอ

#### 6. คุณลักษณะที่ต้องการ

- 6.1 ลักษณะทั่วไป  
แผ่นชั้นไม้อัดต้องมีความเรียบสม่ำเสมอตลอดทั้งแผ่น ชอบดัดโค้งได้จากกับระนาบผิว การทดสอบให้ทำโดยการตรวจพินิจ
- 6.2 ความหนาแน่น  
ความหนาแน่นเฉลี่ยต้องอยู่ในช่วง  $400 \text{ mg/m}^3$  ถึง  $900 \text{ mg/m}^3$  และความหนาแน่นของแผ่นชั้นไม้อัดแต่ละแผ่นจะคลาดเคลื่อนจากค่าความหนาแน่นเฉลี่ยได้ไม่เกิน 10% การทดสอบให้ปฏิบัติตามข้อ 9.4

มอก. 876-2547

- 6.3 ปริมาณความชื้น (moisture content)  
ปริมาณความชื้นเฉลี่ยต้องอยู่ในช่วง 4 % ถึง 13 %  
การทดสอบให้ปฏิบัติตามข้อ 9.5
- 6.4 ปริมาณฟอร์มาลดีไฮด์
  - 6.4.1 แผ่นชั้นไม้อัดชั้นคุณภาพ 1  
ปริมาณฟอร์มาลดีไฮด์ ไม่มากกว่า 8 mg/100 g
  - 6.4.2 แผ่นชั้นไม้อัดชั้นคุณภาพ 2  
ปริมาณฟอร์มาลดีไฮด์ มากกว่า 8 mg/100 g ถึง 30 mg/100 g  
การทดสอบให้ปฏิบัติตามข้อ 9.6
- 6.5 คุณลักษณะที่ต้องการอื่น ๆ  
ให้เป็นไปตามตารางที่ 1



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

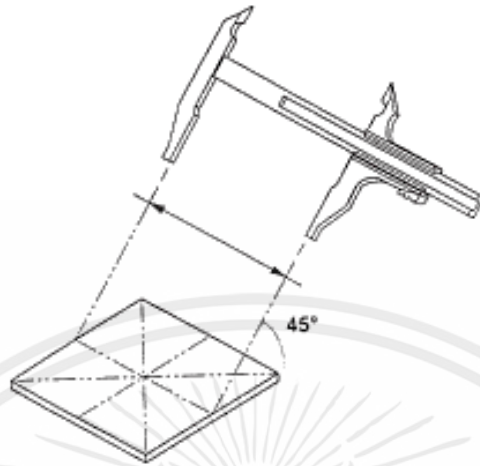
ตารางที่ 1 คุณสมบัติที่ต่อจากอื่นๆ  
(ข้อ 6.5)

ลำดับที่	คุณสมบัติจะ	เกณฑ์ที่กำหนด										วิธีทดสอบตาม	
		ความหนา มิลลิเมตร											
		3.0 ถึง 6.0	เกิน 6.0 ถึง 13.0	12	เกิน 13.0 ถึง 20.0	12	เกิน 20.0 ถึง 25.0	12	เกิน 25.0 ถึง 32.0	12	เกิน 32.0 ถึง 40.0		12
1	การพองตัวตามความหนา % ไม่เกิน	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	ข้อ 9.7
2	ความต้านแรงตัด MPa* ไม่น้อยกว่า	15	14	13	13	11.5	10	8.5	7	7	7	7	ข้อ 9.8
3	มอดูลียืดหยุ่น MPa* ไม่น้อยกว่า	1 950	1 800	1 600	1 500	1 350	1 200	1 050	1 050	1 050	1 050	1 050	ข้อ 9.8
4	ความต้านแรงดึงจากกึ่งผิวหน้า MPa* ไม่น้อยกว่า	0.45	0.40	0.35	0.30	0.25	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	ข้อ 9.9
5	ความต้านแรงดึงของผิวหน้า MPa* ไม่น้อยกว่า	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	EN 311
6	ความยืดหยุ่นของอะลูมิเนียม N ไม่น้อยกว่า	-	-	360**	360**	360	360	360	360	360	360	360	ข้อ 9.10
	- ด้านผิว	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	- ด้านขอบ	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

หมายเหตุ \* 1 MPa เท่ากับ 1 N/mm<sup>2</sup>

\*\* หมายถึง ทดสอบเฉพาะที่ความหนา 15.0 มม ถึง 20.0 มม

- หมายถึง ไม่ทดสอบ



รูปที่ 4 แสดงวิธีวัดความกว้างและความยาวของชิ้นทดสอบ  
(ข้อ 9.4.2.3)

9.4.3 วิธีคำนวณ

หาค่าความหนาแน่นจากสูตร

$$\text{ความหนาแน่น กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร} = \frac{m}{V} \times 10^6$$

เมื่อ  $m$  คือ มวลของชิ้นทดสอบ เป็น กรัม

$V$  คือ ปริมาตรของชิ้นทดสอบ เป็น ลูกบาศก์มิลลิเมตร

9.4.4 การรายงานผล

รายงานค่าความหนาแน่นและความหนาแน่นเฉลี่ย

9.5 ปริมาณความชื้น

9.5.1 เครื่องมือ

- (1) เครื่องชั่ง ที่ชั่งได้ละเอียดถึง 0.01 g
- (2) ตู้อบ ที่สามารถควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ที่  $(103 \pm 2)^\circ\text{C}$
- (3) เตาซีเคเลเตอร์

9.5.2 วิธีทดสอบ

- 9.5.2.1 ชั่งชิ้นทดสอบซึ่งผ่านการทดสอบตามข้อ 9.4 แล้ว ให้ได้มวลที่แน่นอน ถึง 0.01 g เป็นมวลของชิ้นทดสอบก่อนอบ
- 9.5.2.2 อบชิ้นทดสอบในตู้อบที่อุณหภูมิ  $(103 \pm 2)^\circ\text{C}$  จนได้มวลคงที่ คือมวลของชิ้นทดสอบ เมื่อชั่ง 2 ครั้งเป็นเวลาห่างกัน 6 h ต้องไม่แตกต่างกันเกิน 0.1 % ของมวลของชิ้นทดสอบ

- 9.5.2.3 นำภาสิในเคซิเคเตอร์ปล้อยไว้ให้เย็น  
 9.5.2.4 ชั่งชั่งทดสอบ เป็นมวลของชั่งทดสอบหลังอบแห้ง

- 9.5.3 วิธีคำนวณ  
 หาค่าปริมาณความชื้นจากสูตร

$$\text{ปริมาณความชื้น ร้อยละ} = \frac{m_1 - m_2}{m_2} \times 100$$

เมื่อ  $m_1$  คือ มวลของชั่งทดสอบก่อนอบ เป็น กรัม

$m_2$  คือ มวลของชั่งทดสอบหลังอบแห้ง เป็น กรัม

- 9.5.4 การรายงานผล  
 รายงานค่าเฉลี่ยของปริมาณความชื้น

## 9.6 ปริมาณฟอร์มัลดีไฮด์

- 9.6.1 การเตรียมชั่งทดสอบ  
 ตัดตัวอย่างเป็นชั่งทดสอบกว้าง 25 มม ยาว 25 มม ให้ได้มวลประมาณ 500 g

- 9.6.2 วิธีทดสอบ  
 ให้ปฏิบัติตาม BS EN 120

หมายเหตุ การทดสอบปริมาณฟอร์มัลดีไฮด์ ให้ใช้วิธีอื่นที่เทียบเท่าได้ โดยใช้เกณฑ์กำหนดและวิธีทดสอบ (รวมทั้งการเตรียมชั่งทดสอบ) ต้องสอดคล้องกันดังในภาคผนวก ข. ในกรณีที่มีข้อโต้แย้งให้ใช้วิธีตาม BS EN 120 เป็นวิธีตัดสิน

## 9.7 การพองตัวตามความหนา

- 9.7.1 เครื่องมือ

ไมโครมิเตอร์หรือเครื่องมือวัดความหนาที่เทียบเท่า ที่วัดได้ละเอียดถึง 0.05 mm ซึ่งมีส่วนของแป้นวัดเรียบและขนานกัน และมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 mm ถึง 20 mm

- 9.7.2 วิธีทดสอบ

- 9.7.2.1 ทำเครื่องหมายตำแหน่งที่วัดความหนาตามรูปที่ 3 วัดความหนาของชิ้นทดสอบ เป็นความหนาที่ก่อนแช่น้ำ
- 9.7.2.2 แช่ชิ้นทดสอบในน้ำสะอาดที่อุณหภูมิ  $(20 \pm 2) ^\circ\text{C}$  โดยตั้งชิ้นทดสอบให้ได้ฉากกับระดับผิวน้ำให้ขอบบนอยู่ได้ระดับผิวน้ำ ประมาณ 25 mm แต่ระยะชิ้นต้องห่างจากกัน และต้องห่างจากผนังและก้นภาชนะที่ใส ไม่น้อยกว่า 10 mm
- 9.7.2.3 เมื่อแช่ชิ้นทดสอบครบ 1 h แล้ว รีบนำชิ้นทดสอบขึ้นมาซับน้ำที่ผิวออกให้หมดด้วยผ้าหมาด แล้วปล้อยไว้ที่อุณหภูมิห้อง โดยวางให้ขอบด้านใดด้านหนึ่งอยู่บนแผ่นวัสดุที่ไม่ดูดซึมน้ำ เช่น พลาสติก กระดาษ
- 9.7.2.4 ปล้อยชิ้นทดสอบไว้อีก 1 h แล้วนำชิ้นทดสอบขึ้นมาวัดความหนาตามตำแหน่งเดิม เป็นความหนาหลังแช่น้ำ

9.7.3 วิธีคำนวณ

หาค่าการพองตัวตามความหนา จากสูตร

$$\text{การพองตัวตามความหนา ร้อยละ} = \frac{t_2 - t_1}{t_1} \times 100$$

เมื่อ  $t_1$  คือ ความหนาของชิ้นทดสอบก่อนแช่น้ำ เป็น มิลลิเมตร

$t_2$  คือ ความหนาของชิ้นทดสอบหลังแช่น้ำ เป็น มิลลิเมตร

9.7.4 การรายงานผล

รายงานค่าเฉลี่ยของการพองตัวตามความหนา เป็นร้อยละ

9.8 ความต้านแรงค้ำและมอดูลัสยืดหยุ่น

9.8.1 เครื่องมือ

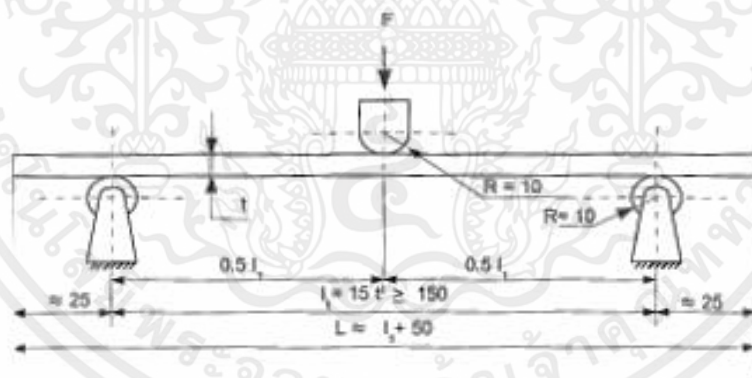
9.8.1.1 เครื่องกด ซึ่งวัดแรงกดได้ละเอียดถึง 5 N หรือ 5 % ของแรงกดสูงสุดที่ชิ้นทดสอบรับได้ แห่งกด ต้องมีปลายส่วนที่ใช้อัดเป็นรูปครึ่งวงกลม มีรัศมีประมาณ 10 mm และมีความยาวของแห่งกด ไม่น้อยกว่าความกว้างของชิ้นทดสอบ

9.8.1.2 แท่งรองรับ ต้องมีลักษณะหน้าตัดเป็นรูปวงกลม หรือรูปครึ่งวงกลม มีรัศมีประมาณ 10 mm และมีความยาวของแห่งรองรับ ไม่น้อยกว่าความกว้างของชิ้นทดสอบ

9.8.1.3 เครื่องวัดการแฉกตัว ซึ่งอ่านค่าได้ละเอียดถึง 0.1 mm

9.8.2 วิธีทดสอบ

9.8.2.1 วางชิ้นทดสอบบนแท่งรองรับซึ่งมีระยะห่างกัน 15 เท่าของความหนาของชิ้นทดสอบ (ตัวเลขที่ได้ให้ปิดเป็นเลขจำนวนเต็ม ของ 10 mm) แต่ต้องไม่น้อยกว่า 150 mm ตามรูปที่ 5 ให้ปลายชิ้นทดสอบยื่นออกไปจากจุดที่รองรับข้างละประมาณ 25 mm



หน่วยเป็นมิลลิเมตร

รูปที่ 5 การทดสอบความต้านแรงค้ำและมอดูลัสยืดหยุ่น (ข้อ 9.8.2.1)

- 9.8.2.2 ให้แรงกดลงที่จุดกึ่งกลางของชิ้นทดสอบ โดยมีอัตราการเพิ่มแรงกดอย่างสม่ำเสมอ เวลาที่ใช้ตั้งแต่เริ่มกด จนกระทั่งชิ้นทดสอบหักต้องไม่น้อยกว่า 30 s แต่ไม่มากกว่า 90 s (ความเร็วในการกด ประมาณ 10 mm/min)
- 9.8.2.3 เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ ระหว่างแรงกดกับการแ่นตัว ดังรูปที่ 6
- 9.8.3 วิธีคำนวณ
- 9.8.3.1 ความต้านแรงตัด

หาค่าความต้านแรงตัด จากสูตร

$$f_m = \frac{3 F_{max} l_1}{2 b t^2}$$

เมื่อ  $f_m$  คือ ความต้านแรงตัด เป็น เมกะพาสคัล

$F_{max}$  คือ แแรงกดสูงสุดที่ชิ้นทดสอบรับได้ เป็น นิวตัน

$l_1$  คือ ระยะห่างของแท่งรองรับ เป็น มิลลิเมตร

$b$  คือ ความกว้างที่จุดกึ่งกลางด้านยาวของชิ้นทดสอบ เป็น มิลลิเมตร

$t$  คือ ความหนาที่จุดกึ่งกลางของชิ้นทดสอบ เป็น มิลลิเมตร

- 9.8.3.2 มอดูลัสยืดหยุ่น

หาค่ามอดูลัสยืดหยุ่น จากสูตร

$$E_m = \frac{l_1^3 (F_2 - F_1)}{4 b t^3 (a_2 - a_1)}$$

เมื่อ  $E_m$  คือ มอดูลัสยืดหยุ่น เป็น เมกะพาสคัล

$l_1$  คือ ระยะห่างของแท่งรองรับ เป็น มิลลิเมตร

$F_2 - F_1$  คือ แแรงกดที่เพิ่มขึ้น ในช่วงที่เส้นกราฟเป็นเส้นตรง ตามรูปที่ 6 เป็น นิวตัน

$b$  คือ ความกว้างที่จุดกึ่งกลางด้านยาวของชิ้นทดสอบ เป็น มิลลิเมตร

$t$  คือ ความหนาที่จุดกึ่งกลางของชิ้นทดสอบ เป็น มิลลิเมตร

$a_2 - a_1$  คือ ระยะแ่นตัวที่เพิ่มขึ้นในช่วงที่เส้นกราฟเป็นเส้นตรงตามรูปที่ 6 เป็น มิลลิเมตร



ภาคผนวก ข

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

ธวัชชัย ตั้งสุขสันต์, นิจ ชลบุญญาเดช และ ผศ.ดร.ยลพัทธ์ อารีรบ. (2564). การศึกษาการออกแบบวัสดุเสริมแรงของซังข้าวโพดร่วมกับท่อนาโนคาร์บอน. การประชุมวิชาการระดับชาติด้านการพัฒนาการดำเนินงานทางอุตสาหกรรม ครั้งที่ 13 (CIOD 2022).

20 พฤษภาคม 2565 คณะบริหารธุรกิจ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร กรุงเทพฯ



การประชุมวิชาการระดับชาติด้านการพัฒนาการดำเนินงานทางอุตสาหกรรม ครั้งที่ 13 (CIOD 2022)  
The 13th National Conference of Industrial Operations Development 2022  
20 พฤษภาคม 2565 คณะบริหารธุรกิจ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร กรุงเทพฯ

### การศึกษาการออกแบบวัสดุเสริมแรงของซังข้าวโพดร่วมกับท่อนาโนคาร์บอน Design of a Reinforcing Material Composed of Corncobs with Multi Walled Carbon Nanotubes

ธวัชชัย ตั้งสุขสันต์<sup>1</sup>, นิจ ชลบุญญาเดช<sup>1</sup> และ ผศ.ดร.ยลพัทธ์ อารีรบ<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520  
E-mail: yonrapachan@kmitl.ac.th

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้มีการศึกษาลักษณะโครงสร้างจุลภาค มหภาค รวมถึงสมบัติเชิงกลและสมบัติเชิงกลของวัสดุเสริมแรงจากซังข้าวโพดร่วมกับท่อนาโนคาร์บอน นอกจากนี้ยังได้ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อความแข็งแรง และส่วนผสมที่เหมาะสมของวัสดุเสริมแรงจากซังข้าวโพดร่วมกับท่อนาโนคาร์บอนสำหรับการผลิตและเพิ่มประสิทธิภาพของวัสดุ โดยผลการวิจัยพบว่า จากการปรับสภาพเคมีของซังข้าวโพดด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ความเข้มข้นต่ำจะทำให้การปรับสภาพทางเคมีมีประสิทธิภาพมากกว่าการใช้ความเข้มข้นของเบสสูง โดยที่ผิวของซังข้าวโพดจะมีความขรุขระ และไม่สม่ำเสมอของพื้นผิวเพิ่มมากขึ้น บางสภาวะมีรูพรุนเกิดขึ้น ซึ่งเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัส เมื่อศึกษาตัวอย่างที่ผสมร่วมกับท่อนาโนคาร์บอนแล้วแสดงให้เห็นถึงการยึดเกาะของท่อนาโนคาร์บอนกับเส้นใยซังข้าวโพดได้ในทุกสภาวะ และทุกอัตราส่วน และยังพบอีกว่าท่อนาโนคาร์บอนมีผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพด้านความแข็งแรงให้กับแผ่นอัดซังข้าวโพด แต่ในทางกลับกันอัตราส่วนปริมาณท่อนาโนคาร์บอนที่เพิ่มมากขึ้นจะทำให้ความแข็งแรงของแผ่นไม่ลดลง โดยทุกเงื่อนไขผ่านเกณฑ์ค่าปริมาตรความชื้นเมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐาน มอก. 867-2547 โดยพบว่าจากการวิจัยการพัฒนาแผ่นอัดจากซังข้าวโพดที่เหมาะสมในงานวิจัยนี้มาจากซังข้าวโพดที่ถูกรับสภาพทางเคมีด้วยสารละลาย NaOH ความเข้มข้น 0.25 โมลาร์ ใช้ระยะเวลา 72 ชั่วโมง ผสมร่วมกับท่อนาโนคาร์บอนในอัตราส่วน 100:1 มีค่าต้านทานแรงดึงสูงสุดที่ 9.71758 MPa และค่าปริมาตรความชื้นตามมาตรฐานอยู่ที่ร้อยละ 9.43

คำสำคัญ : ซังข้าวโพด ท่อนาโนคาร์บอน การปรับสภาพทางเคมี วัสดุเสริมแรง

#### Abstract

In this study, the microstructure, macrostructure, physical and mechanical properties of corncob reinforced material with Multi-Walled Carbon Nanotubes (MWCNTs) were studied. In addition, the research team also studied factors that affect the strength and a suitable combination of corncob reinforcing material with MWCNTs for material production and optimization. The results showed that from the chemical pretreatment of corncobs with a low concentration of sodium hydroxide solution. This will make the chemical pretreatment

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้