

การพัฒนาวัสดุประกอบไคโตซาน/นาโนซิงค์ออกไซด์-  
มอนต์มอริลโลไนต์สำหรับการเคลือบผิวกระดาษกราฟท์

DEVELOPMENT OF CHITOSAN/ZINC OXIDE-  
MONTMORILLONITE NANOCOMPOSITE  
FOR KRAFT PAPER COATING



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)  
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2565

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DEVELOPMENT OF CHITOSAN/ZINC OXIDE-  
MONTMORILLONITE NANOCOMPOSITE  
FOR KRAFT PAPER COATING



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF  
THE REQUIREMENT FOR  
THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE (INDUSTRIAL CHEMISTRY)  
DEPARTMENT OF CHEMISTRY, SCHOOL OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ACADEMIC YEAR 2022  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



หัวข้อโครงการพิเศษ	การพัฒนาวัสดุประกอบโคโตซาน/นาโนซิงค์ออกไซด์-มอนต์มอริลโลไนต์ สำหรับการเคลือบผิวกระดาษกราฟ
ชื่อนักศึกษา	นางสาว ศศิธร สังวาลย์เล็ก รหัสนักศึกษา 62050332 นางสาว อัญชิสรา ธนฤทธิมนมัย รหัสนักศึกษา 62050360
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)
ภาควิชา	เคมี
คณะ	วิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)
ปีการศึกษา	2565
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร.ปยุตมา ศิริพันธ์โนน

### บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้ศึกษาการสังเคราะห์สารตัวเติมระดับนาโนจากมอนต์มอริลโลไนต์และซิงค์ออกไซด์ (ZnO-MMT) โดยการดัดแปรโครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์ด้วยสารละลายซิงค์ไนเตรต-เฮกซะไฮเดรต ( $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) เข้มข้น 0.1 และ 0.3 M โดยใช้เทคนิคอัลตราโซนิกร่วมกับการทำปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มอลในแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 30 นาที พบว่าเมื่อใช้  $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  เข้มข้น 0.1 M สารตัวเติมที่สังเคราะห์ได้จะมี ZnO แทรกสอดอยู่ในช่องว่างระหว่างชั้นโครงสร้าง MMT เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลาย  $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  เป็น 0.3 M จะมี ZnO ที่มากเกินไป จึงมีการเกิดผลึก ZnO ภายนอก MMT ในขั้นการเตรียมฟิล์มวัสดุประกอบโคโตซานนาโนมอนต์มอริลโลไนต์แทรกสอดซิงค์ออกไซด์ (CS/ZnO-MMT) จึงเลือกใช้ ZnO-MMT ที่เตรียมโดยใช้  $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  เข้มข้น 0.1 M โดยผสมสารละลายโคโตซานเข้มข้น 1%v/v ในสารละลายกรดแอสติกกับสารตัวเติม ZnO-MMT ในปริมาณ 3, 6 และ 12% โดยน้ำหนักเทียบกับโคโตซาน จากนั้นขึ้นรูปด้วยเทคนิคการหล่อแบบและอบที่อุณหภูมิ 50 °C จนแห้ง ฟิล์ม CS/ZnO-MMT ที่เตรียมได้มีโคโตซานบางส่วนสามารถแทรกตัวอยู่ระหว่างชั้นโครงสร้าง MMT จึงมีอุณหภูมิการสลายตัวสูงขึ้น เมื่อนำสารผสมที่เตรียมตามสูตรฟิล์ม CS/ZnO-MMT ข้างต้นนำมาเคลือบบนกระดาษกราฟด้วยเทคนิคจุ่มเคลือบ โดยใช้ระยะเวลาการจุ่มเคลือบ 10 นาที แล้วทิ้งให้แห้งอุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำกระดาษกราฟที่เคลือบ CS/ZnO-MMT ไปทดสอบสมบัติความไม่ชอบน้ำด้วยการวัดค่ามุมสัมผัสน้ำ (Water Contact Angle) พบว่ากระดาษกราฟที่เคลือบ CS/ZnO-MMT มีค่ามุมสัมผัสน้ำเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ และกระดาษเคลือบทุกสูตรมีค่ามุมสัมผัสน้ำมากกว่า 90° แสดงถึงสมบัติความต้านทานน้ำที่ดี

**คำสำคัญ :** โคโตซาน ซิงค์ออกไซด์ มอนต์มอริลโลไนต์ อัลตราโซนิก ไฮโดรเทอร์มอล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>Title</b>	Development of chitosan/zinc oxide-montmorillonite nanocomposite for kraft paper coating	
<b>Students</b>	Miss Sasithorn Sangwanlek	Student ID 62050332
	Miss Aunchisa Thanarittthimanomai	Student ID 62050360
<b>Degree</b>	Bachelor of Science (Industrial Chemistry)	
<b>Department</b>	Chemistry	
<b>School</b>	Science	
<b>University</b>	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)	
<b>Academic Year</b>	2022	
<b>Advisor</b>	Assoc. Prof. Dr. Punnama Siriphannon	

### Abstract

This special project studied the synthesis of nanoscale fillers from montmorillonite and zinc oxide (ZnO-MMT). The modification of montmorillonite with zinc nitrate hexahydrate solution ( $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) was performed at concentrations of 0.1 and 0.3 M by combining the ultrasonic technique and hydrothermal reaction in ammonium hydroxide at 100 °C for 30 min. It was found that when using a 0.1 M of  $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ , the as-synthesized filler was ZnO intercalated in the basal spacing of MMT layer. When the concentration of  $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  was increased to 0.3 M, an excess of ZnO was obtained, leading to the formation of ZnO particles outside the MMT structure. In the preparation of the nanocomposite film of chitosan and ZnO-MMT nanofillers (CS/ZnO-MMT), the ZnO-MMT prepared using 0.1M  $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  was used to mix with 1%v/v chitosan solution in acetic acid solution. The amount of ZnO-MMT nanofiller was varied at 3, 6 and 12% by weight of chitosan. The mixture was then molded using a casting technique and dried at 50 °C. The chitosan matrix could partially intercalated within the montmorillonite basal spacing, leading to the higher decomposition temperatures. When the mixtures of CS/ZnO-MMT according to the abovementioned formulation were prepared and coated onto Kraft paper using the dip-coating technique. The coating process was carried out for 10 minutes, followed by allowing it to dry at room temperature for 24 hours. The CS/ZnO-MMT coated Kraft papers were next evaluated for water repellency by measuring the water Contact angle. The water Contact angle value of Kraft paper coated with CS/ZnO-MMT was significantly increased. All coated Kraft paper had a water Contact angle greater than 90°, suggesting good water repellency performance.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่าจะ **Keywords:** Chitosan, Hydrothermal, Montmorillonite, Ultrasonic, Zinc oxide ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.ปณณมา ศิริพันธ์โนน อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ ที่ให้คำปรึกษา แนะนำความรู้ และอบรมให้ทำงานอย่างเป็นระเบียบรอบคอบ พร้อมทั้งให้ความช่วยเหลือและ ตรวจทานการดำเนินงานวิจัยนี้ ทำให้การจัดทำโครงการพิเศษเล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.ภัทราวุธ มนต์วิเศษ และ ผศ.ดร.สุภารัตน์ รักชลธิ อาจารย์ที่มาเป็น คณะกรรมการตรวจสอบโครงการพิเศษ ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการตรวจทานและเสนอแนะ ข้อคิดเห็นเพื่อแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ในโครงการพิเศษเล่มนี้ให้มีความถูกต้องและครบถ้วนสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้เงินทุนสนับสนุนในการศึกษาจนโครงการพิเศษเล่มนี้เสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือฯ และเจ้าหน้าที่ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยี พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือ ในการวิเคราะห์งานต่างๆ การใช้อุปกรณ์และสารเคมีจนโครงการพิเศษเล่มนี้เสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ ครอบครัว เพื่อนๆ ที่คอยเป็นกำลังใจในการทำงาน และขอขอบพระคุณพี่ ปริญญาเอกและปริญญาโท ภาควิชาเคมี สำหรับการให้คำปรึกษา คอยช่วยเหลือเมื่อเกิดปัญหาและ คอยเป็นกำลังใจ ทำให้โครงการพิเศษเล่มนี้ประสบผลสำเร็จไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ประโยชน์และความรู้อันพึงมีจากโครงการพิเศษเล่มนี้ขอมอบแต่ ครอบครัว ผู้มี พระคุณ และคณะอาจารย์ทุกท่าน หากมีข้อผิดพลาดประการใด ผู้ศึกษาขอน้อมรับและขออภัยมา ณ ที่นี้ด้วย

ศศิธร สัจจาลย์เล็ก

อัญชิสรา ธนฤทธิมนมัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	ข
กิตติกรรมประกาศ .....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป .....	ซ
คำย่อ/สัญลักษณ์ .....	ญ
<b>บทที่ 1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	4
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....</b>	<b>5</b>
2.1 फिल्मและสารเคลือบบรรจุภัณฑ์.....	5
2.1.1 फिल्मลามิเนต (Laminate films).....	5
2.1.2 फिल्मที่ได้จากธรรมชาติ .....	7
2.1.3 การเคลือบกระดาษ.....	7
2.2 ดินเหนียว (Clay).....	9
2.2.1 โครงสร้างและชนิดของแร่ดินเหนียว.....	9
2.2.2 มอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite, MMT).....	12
2.2.3 สมบัติของแร่ดินเหนียว.....	12
2.3 ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide) .....	14
2.3.1 ข้อมูลเกี่ยวกับซิงค์ออกไซด์.....	14
2.3.2 การสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์.....	17
2.3.3 สมบัติความไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) .....	19
2.4 ไคตินและไคโตซาน (Chitin and chitosan).....	21
2.4.1 การผลิตไคตินและไคโตซาน .....	22
2.4.2 สมบัติทางเคมีกายภาพของไคโตซาน.....	24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.3 การใช้ประโยชน์จากโคโตซาน .....	25
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	27
<b>บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....</b>	<b>33</b>
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	33
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	33
3.3 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	34
3.3.1 การเตรียมสารตั้งต้น .....	34
3.3.2 การสังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์ (ZnO).....	34
3.3.3 การสังเคราะห์สารตัวเติมระดับนาโนมอนต์มอริลโลไนต์ .....	35
แทรกสอดซิงค์ออกไซด์ (Nanofiller: ZnO-MMT)	
3.3.4 การเตรียมฟิล์มและสารเคลือบวัสดุประกอบโคโตซานนาโน .....	35
มอนต์มอริลโลไนต์แทรกสอดซิงค์ออกไซด์ (CS/ZnO-MMT)	
3.3.5 การเคลือบกระดาษด้วยวัสดุประกอบโคโตซานนาโน .....	36
มอนต์มอริลโลไนต์แทรกสอดซิงค์ออกไซด์ (CS/ZnO-MMT)	
3.4 การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ของสารตัวเติม (Nanofiller: ZnO-MMT) .....	36
และทดสอบแผ่นฟิล์มวัสดุประกอบโคโตซานนาโนมอนต์มอริลโลไนต์	
แทรกสอดซิงค์ออกไซด์ (CS/ZnO-MMT)	
3.4.1 การศึกษาโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิค XRD.....	36
3.4.2 การศึกษาองค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค XRF.....	36
3.4.3 ศึกษาหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FT-IR .....	36
3.4.4 ศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค FESEM .....	36
3.4.5 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของสารตัวอย่างด้วยเทคนิค TGA .....	37
3.4.6 การทดสอบมุมสัมผัส (Contact angle).....	37
<b>บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล .....</b>	<b>42</b>
4.1 การพิสูจน์เอกลักษณ์ของสารตัวเติมระดับนาโนมอนต์มอริลโลไนต์.....	42
แทรกสอดซิงค์ออกไซด์ (Nanofiller: ZnO-MMT)	
4.1.1 เทคนิค XRF .....	42
4.1.2 เทคนิค XRD .....	43
4.2 การพิสูจน์เอกลักษณ์ของแผ่นฟิล์มวัสดุประกอบโคโตซานนาโน.....	46
มอนต์มอริลโลไนต์แทรกสอดซิงค์ออกไซด์ (CS/ZnO-MMT)	
4.2.1 เทคนิค XRD .....	46
4.2.2 เทคนิค SEM .....	47
4.2.3 เทคนิค TGA .....	48

4.2.4 เทคนิค FT-IR .....	49
4.3 สมบัติของกระดาษกราฟที่เคลือบด้วยวัสดุประกอบโคโตซานนาโน มอนต์มอริลโลไนต์แทรกสอดซิงค์ออกไซด์ (P-CS/ZnO-MMT)	51
4.3.1 การทดสอบมุมสัมผัสน้ำ (Water contact angle) .....	51
4.4 การพิสูจน์เอกลักษณ์ของวัสดุประกอบนาโนมอนต์มอริลโลไนต์ แทรกสอดซิงค์ออกไซด์ (CS/ZnO-MMT) เมื่อเคลือบลงบนกระดาษกราฟ	55
4.4.1 เทคนิค SEM .....	55
<b>บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ</b> .....	<b>56</b>
5.1 สรุปผลการวิจัย .....	56
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	57
เอกสารอ้างอิง .....	59
ภาคผนวก .....	66
ภาคผนวก ก .....	67
ภาคผนวก ข .....	68
ภาคผนวก ค .....	69
ภาคผนวก ง .....	70
ภาคผนวก จ .....	71
ภาคผนวก ฉ .....	72
ภาคผนวก ช .....	77
ภาคผนวก ซ .....	79

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 สมบัติต่าง ๆ ของแร่ดินเหนียวที่สำคัญ 3 ชนิด.....	13
2.2 ข้อมูลและสมบัติทางกายภาพของซิงค์ออกไซด์ .....	14
2.3 ข้อมูลและสมบัติทางกายภาพของซิงค์ออกไซด์ (ต่อ).....	15
2.4 ค่ามุมสัมผัสน้ำของซิงค์ออกไซด์รูปแบบต่างๆ.....	21
3.1 การสังเคราะห์ ZnO และ Nanofiller: ZnO-MMT .....	41
3.2 การเตรียมฟิล์มและสารเคลือบวัสดุประกอบ CS/ZnO-MMT .....	41
3.3 การเคลือบกระดาษด้วยสารเคลือบวัสดุประกอบ CS/ZnO-MMT .....	41
4.1 องค์ประกอบทางเคมีของ MMT เริ่มต้น และ Nanofiller: ZnO-MMT .....	42
4.2 ค่า $2\theta$ และ $d_{001}$ ของ MMT เริ่มต้น และ Nanofiller: ZnO-MMT ที่สังเคราะห์ได้ .....	44
4.3 ปริมาณการสลายตัวขององค์ประกอบในฟิล์มไคโตซาน และฟิล์ม CS/ZnO-MMT .....	49
จากเทคนิค TGA ภายใต้บรรยากาศออกซิเจน	
4.4 ตำแหน่งเลขคลื่นที่สำคัญของฟิล์ม CS และฟิล์ม CS/ZnO-MMT ที่สังเคราะห์ได้ .....	50
4.5 ลักษณะหยดน้ำบนกระดาษที่มีสูตรเคลือบต่างกันที่เวลา 0 และ 300 วินาที .....	54
ง.1 ปริมาณการสลายตัวขององค์ประกอบในฟิล์มไคโตซาน และฟิล์ม CS/ZnO-MMT .....	70
จากเทคนิค TGA ภายใต้บรรยากาศออกซิเจน	
ฉ.1 ค่ามุมสัมผัสน้ำของกระดาษที่มีสูตรเคลือบต่างกันเมื่อทดสอบด้วยน้ำปราศจากไอออนที่ .....	72
เวลา 0-300 วินาที (0-5 นาที)	
ฉ.2 ค่ามุมสัมผัสน้ำของกระดาษที่มีสูตรเคลือบต่างกันเมื่อทดสอบด้วยน้ำปราศจากไอออนที่ .....	73
เวลา 0-300 วินาที (0-5 นาที) (ต่อ)	
ฉ.3 ค่ามุมสัมผัสน้ำของกระดาษสูตรต่างๆ.....	74
ฉ.4 ค่ามุมสัมผัสน้ำของกระดาษสูตรต่างๆ (ต่อ) .....	75
ฉ.5 ค่ามุมสัมผัสน้ำของกระดาษสูตรต่างๆ (ต่อ) .....	76

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ลักษณะการเคลือบกระดาษ .....	8
2.2 โครงสร้างของแร่ดินเหนียว.....	9
2.3 โครงสร้างแร่ดินเหนียวชนิด 1:1 .....	10
2.4 โครงสร้างแร่ดินเหนียวชนิด 2:1 .....	11
2.5 โครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์.....	12
2.6 โครงสร้างเวอร์ทไซต์ (Wurtzite) ของซิงค์ออกไซด์และฟิวด์เตตระไฮดรอลของ $Zn^{2+} O^{2-}$ ...	16
2.7 แ่งนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ปลูกบนกระจกสไลด์ด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอล.....	18
2.8 การกระจายตัวของหยดน้ำบนพื้นผิวชอบน้ำ พื้นผิวไม่ชอบน้ำ .....	20
และพื้นผิวไม่ชอบน้ำยิ่งยวด ตามลำดับ	
2.9 โครงสร้างการจัดเรียงตัวของไคติน 3 รูปแบบ .....	22
3.1 แผนภาพการสังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) และสารตัวเติมระดับนาโน .....	38
มอนต์มอริลโลไนต์แทรกสอดซิงค์ออกไซด์ (Nanofiller: ZnO-MMT)	
3.2 แผนภาพการเตรียมฟิล์มและสารเคลือบวัสดุประกอบไคโตซานนาโน.....	39
มอนต์มอริลโลไนต์แทรกสอดซิงค์ออกไซด์ (CS/ZnO-MMT)	
3.3 แผนภาพการเคลือบกระดาษด้วยสารเคลือบวัสดุประกอบไคโตซานนาโน .....	40
มอนต์มอริลโลไนต์แทรกสอดซิงค์ออกไซด์ (CS/ZnO-MMT) ด้วยวิธีการจุ่ม	
4.1 แผนภาพการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของ ZnO.....	43
4.2 แผนภาพการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของ 0.1Z MMT เริ่มต้น และ ZnO-MMT.....	44
4.3 แผนภาพการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของ 0.1ZM และฟิล์ม CS/ZnO-MMT.....	46
4.4 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของวัสดุประกอบนาโน CS3F .....	47
4.5 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของวัสดุประกอบนาโน CS6F .....	48
4.6 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของวัสดุประกอบนาโน CS12F.....	48
4.7 อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์ม CS และ CS/ZnO-MMT .....	49
4.8 แบบจำลองการแทรกตัวของไคโตซานบริเวณระหว่างชั้นของ MMT.....	51
4.9 ค่ามุมสัมผัสน้ำของกระดาษที่มีสูตรเคลือบต่างกัน.....	51
เมื่อทดสอบด้วยน้ำปราศจากไอออนที่เวลา 0-300 วินาที (0-5 นาที)	
4.10 ค่ามุมสัมผัสน้ำของกระดาษที่มีสูตรเคลือบต่างกัน.....	52
เมื่อทดสอบด้วยน้ำปราศจากไอออนที่เวลา 300 วินาที (5 นาที)	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.11	ค่ามัมสัมผัสของกระดาษเคลือบสูตร PCS6ZH01 และ PCS6F ..... 53
	เมื่อทดสอบด้วยน้ำปราศจากไอออนที่เวลา 0-300 วินาที (0-5 นาที)
4.12	ค่ามัมสัมผัสของกระดาษเคลือบสูตร PCS6ZH01 และ PCS6F ..... 53
	เมื่อทดสอบด้วยน้ำปราศจากไอออนที่เวลา 300 วินาที (5 นาที)
4.13	ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของวัสดุประกอบนาโน PCS6F..... 55
4.14	ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของวัสดุประกอบนาโน PCS6F..... 56
ก.1	ลักษณะทางกายภาพของ ZnO..... 67
ก.2	ลักษณะทางกายภาพของ Nanofiller: ZnO-MMT..... 67
ข.1	ลักษณะทางกายภาพของฟิล์ม CS/ZnO-MMT..... 68
ค.1	ลักษณะพื้นผิวที่กำลังขยาย 15000 เท่าของฟิล์ม CS/ZnO-MMT..... 69
ง.1	เทอร์โมแกรมจากเทคนิค TGA ของฟิล์ม CS/ZnO-MMT ภายใต้บรรยากาศออกซิเจน..... 70
ช.1	ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของวัสดุประกอบนาโน PCS6F..... 79



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## คำย่อ/สัญลักษณ์

คำย่อ/สัญลักษณ์	คำอธิบาย
MMT	มอนต์มอริลโลไนต์
ZnO	ซิงค์ออกไซด์
CS	ไคโตซาน
Nanofiller: ZnO-MMT	สารตัวเติมระดับนาโนมอนต์มอริลโลไนต์แทรกสอดซิงค์ออกไซด์
CS/ZnO-MMT	วัสดุประกอบไคโตซานนาโนมอนต์มอริลโลไนต์แทรกสอดซิงค์ออกไซด์
P-CS/ZnO-MMT	กระดาษกราฟที่เคลือบด้วยวัสดุประกอบไคโตซานนาโน มอนต์มอริลโลไนต์แทรกสอดซิงค์ออกไซด์
XRD	เทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์
XRF	เทคนิคการคายรังสีเอกซ์
TGA	เทคนิควิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสาร โดยอาศัยสมบัติทางความร้อน
FT-IR	เทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี
FE-SEM	เทคนิควิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ชนิดฟิลด์อิมิชชัน
EDS	เทคนิคการวิเคราะห์ธาตุด้วยการคายแสงรังสีเอกซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การเติบโตของธุรกิจออนไลน์และธุรกิจขนส่งสินค้า ส่งผลให้ความต้องการใช้บรรจุภัณฑ์เพิ่มสูงขึ้นโดยเฉพาะธุรกิจรับส่งอาหาร หรือ Food delivery ที่ได้รับความนิยมมากในผู้บริโภคยุคใหม่ เนื่องจากมีความสะดวกสบายและรวดเร็ว การเพิ่มขึ้นของบรรจุภัณฑ์ทำให้เกิดขยะที่มากขึ้นด้วย TDRi ประเมินว่า ต่อ 1 ยอดการสั่งซื้อจะมีขยะพลาสติกเฉลี่ย 7 ชิ้น ซึ่งส่วนใหญ่เป็นบรรจุภัณฑ์พลาสติกแบบใช้ครั้งเดียวแล้วทิ้ง (Single-use plastics) เช่น ถ้วยใส่อาหาร ถ้วยหิ้ว แก้วพลาสติก รวมไปถึงกล่องพลาสติกบรรจุอาหาร ซึ่งมีอายุการใช้งานสั้น แต่กลับต้องใช้เวลาในการย่อยสลายนานถึง 450 ปี [1] รวมไปถึงการที่พลาสติกแตกตัวออกเป็นชิ้นส่วนเล็กๆ ไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า หรือ ไมโครพลาสติก (มักหมายถึงเศษพลาสติกที่มีขนาดเล็กกว่า 5 mm) ปนเปื้อนอยู่ในระบบนิเวศและห่วงโซ่อาหารในท้องทะเลซึ่งเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต รวมไปถึงสภาวะโลกรวนที่เกิดขึ้นจากการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ในกระบวนการผลิตและทำลายพลาสติก ผลของวิกฤตสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นทำให้เกิดกระแสอนุรักษ์ธรรมชาติและผลการผลักดันให้ลดการใช้พลาสติกแบบใช้ครั้งเดียวแล้วทิ้งอย่างจริงจังจากภาครัฐ เช่น มาตรการงดการแจกถุงพลาสติก [2] และลดการใช้พลาสติกโดยการเลือกใช้บรรจุภัณฑ์ที่ผลิตจากวัสดุธรรมชาติและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

บรรจุภัณฑ์กระดาษเป็นทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจและนิยมใช้เป็นจำนวนมาก เพราะเป็นวัสดุที่ได้จากธรรมชาติ มีการหมุนเวียนและไม่เป็นพิษ แต่ข้อจำกัดของการใช้กระดาษ คือ ความต้านทานจุลชีพต่ำ มีรูพรุน ความชื้นและไอน้ำสามารถซึมผ่านได้ เนื่องจากกระดาษมีองค์ประกอบหลักคือ เซลลูโลส ซึ่งมีสมบัติชอบน้ำจึงทำให้กระดาษสูญเสียความแข็งแรงและรูปร่างเมื่ออยู่ในสภาวะที่มีความชื้นสูง [3] ดังนั้นจึงต้องมีการปรับปรุงสมบัติก่อนนำไปใช้งาน โดยการเคลือบฟิล์มพลาสติกและโลหะ ในอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์จะมีการเคลือบด้วยฟิล์มลามิเนตหรือการเคลือบฟิล์มพลาสติกเข้ากับวัสดุอื่นๆ เช่น กระดาษหรือพอลิโพรพิลีนและทำให้ยึดติดกันด้วยความร้อน ซึ่งจำนวนชั้นของฟิล์มจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความต้องการของผู้ผลิตหรือลักษณะการนำไปใช้งาน [4] โดยทั่วไปจะมีการใช้พลาสติกหรือพอลิเมอร์สังเคราะห์จากปิโตรเลียม เช่น พอลิเอทิลีน พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต และพอลิไวนิล เป็นต้น เพื่อเพิ่มสมบัติการกั้นการซึมผ่านของไอน้ำและก๊าซก่อนนำไปใช้งานด้านบรรจุภัณฑ์ [5] อย่างไรก็ตามพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่ได้จากปิโตรเลียมไม่สามารถย่อยสลายได้และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของชั้นพลาสติกหลังการใช้งานสูง สามารถแยกได้ยากและนำกลับปรีไซเคิลได้เพียงบางส่วน เท่านั้น ดังนั้นการนำพอลิเมอร์ชีวภาพ (Biopolymer) มาเคลือบบนกระดาษแทนการใช้พอลิเมอร์ จากปิโตรเลียมจึงเป็นทางเลือกที่ได้รับความสนใจเป็นอย่างมากเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว โดยพอลิเมอร์ ที่น่าสนใจ ได้แก่ แป้ง เซลลูโลส และไคโตซาน เนื่องจากเป็นพอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายได้ใน ธรรมชาติ [5]

กลุ่มผู้วิจัยจึงมีความสนใจที่จะนำไคโตซาน ซึ่งมีสมบัติย่อยสลายในธรรมชาติ มีความเข้ากัน ได้ทางชีวภาพและไม่เป็นพิษ มาเตรียมเป็นฟิล์มและสารเคลือบบนกระดาษกราฟท์ โดยไคโตซาน เป็นอนุพันธ์หนึ่งของไคตินที่ได้จากการกำจัดหมู่อะซิติล (Deacetylation) ของไคติน มีโครงสร้าง ที่พร้อมจะทำปฏิกิริยาต่อได้อย่างรวดเร็ว เนื่องจากหมู่เอมีน ( $-NH_2$ ) กลายเป็นประจุบวก ( $-NH_3^+$ ) [6] ทำให้ไคโตซานมีความสามารถในการจับกับสารประจุลบ เช่น สีย้อม โปรตีน และโลหะหนักได้ นอกจากนี้ยังมีความสามารถในการต้านจุลชีพ [7-8] และสามารถขึ้นรูปฟิล์มได้ดี อย่างไรก็ตาม ไคโตซานยังมีข้อจำกัดเมื่อนำมาใช้ในงานในสภาวะที่มีความชื้นสูง เนื่องจากโครงสร้างมีความชอบน้ำ มีสมบัติเชิงกลและความสามารถในการกั้นการซึมผ่านของก๊าซและอากาศต่ำ [50-51] เพื่อเพิ่ม ความสามารถในการกั้นการซึมผ่านของก๊าซและอากาศ กลุ่มผู้วิจัยจึงมีความสนใจที่จะนำอนุภาค ระดับนาโนเมตร จากวัสดุธรรมชาติ ใส่เข้าไปในพอลิเมอร์เพื่อให้เกิดเป็นวัสดุเชิงประกอบที่มีสมบัติ ดีขึ้น โดยวัสดุที่เลือกใช้ ได้แก่ มอนต์มอริลโลไนต์ แร่ดินเหนียวธรรมชาติ กลุ่มสเมกไทต์ ซึ่งมีแหล่งวัตถุดิบในประเทศไทย และมีราคาถูก อีกทั้งมีลักษณะเป็นแผ่นเรียงซ้อนทับ กันเป็นชั้น ๆ สามารถขยายตัวได้และมีพื้นที่ผิวสูง จึงมีการนำไปใช้เป็นสารตัวเติมเพื่อช่วยใน การเสริมแรงและป้องกันการซึมผ่านก๊าซของพอลิเมอร์ [10] จากงานวิจัยที่ผ่านมา มีรายงานว่า การเติมมอนต์มอริลโลไนต์ในไคโตซาน สามารถช่วยเพิ่มสมบัติเชิงกลและความสามารถในการกั้นการซึมผ่าน ของก๊าซและอากาศให้สูงขึ้น [50-51] นอกจากนี้เพื่อเพิ่มสมบัติความไม่ชอบน้ำและความสามารถในการต้านเชื้อจุลชีพ กลุ่มผู้วิจัยได้เลือกใช้ซิงค์ออกไซด์ เป็นสารตัวเติมระดับนาโน เนื่องจากมีต้นทุน ต่ำและสามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียแกรมบวก (*S. aureus*) และแกรมลบ (*E. coli*) [11] ซึ่งเป็นจุลินทรีย์สำคัญที่ก่อโรคทางเดินอาหารของมนุษย์ทำให้มีอาการท้องเสียถ่ายอุจจาระเป็น น้ำ [12] จากงานวิจัยที่ผ่านมา มีรายงานว่า การเติมซิงค์ออกไซด์ในไคโตซานสามารถเพิ่มสมบัติ การต้านเชื้อจุลชีพและเพิ่มสมบัติความไม่ชอบน้ำให้แก่พอลิเมอร์ได้ [52-54,58] จากสมบัติดังกล่าว ของมอนต์มอริลโลไนต์และซิงค์ออกไซด์ที่กล่าวมาจึงเหมาะที่จะนำมาประยุกต์ใช้เป็นสารตัวเติม เพื่อพัฒนาฟิล์มและสารเคลือบวัสดุประกอบชีวภาพสำหรับบรรจุภัณฑ์

ในงานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะศึกษาและพัฒนากระบวนการสังเคราะห์สารตัวเติมที่มีโครงสร้าง เอกสารนี้ระดับนาโน (Nanofiller) โดยการดัดแปรโครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์ด้วยสารละลายซิงค์ในเตรตา- ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เฮกซะไฮเดรต  $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$  หรือ  $Zn^{2+}$  ที่ความเข้มข้นต่างๆ ซึ่ง  $Zn^{2+}$  จะเข้าไปแทรกตัวอยู่ในชั้นเคลือบและเกิดการแลกเปลี่ยนประจุบวกภายใน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนจึงใช้เทคนิคอัลตราโซนิกเพื่อช่วยให้  $Zn^{2+}$  สามารถแทรกตัวเป็นอนุภาคนาโนและเข้าไปอยู่ในชั้นเคลือบได้มากขึ้น หลังจากนั้นนำไปไฮโดรเทอร์มอลเพื่อให้  $Zn^{2+}$  เปลี่ยนเป็น ZnO ภายในโครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์ จึงได้สารตัวเติมที่มีโครงสร้างระดับนาโน (Nanofiller) ที่ได้ผสมเข้ากับโคโตะซานเพื่อขึ้นฟิล์มและสารเคลือบวัสดุประกอบบนกระดาษกราฟท์ และทำการพิสูจน์เอกลักษณ์สารตัวเติม แผ่นฟิล์มวัสดุประกอบและศึกษาสมบัติของกระดาษกราฟท์ที่ถูกเคลือบ ได้แก่ ศึกษาโครงสร้างผลึก ลักษณะสัณฐาน โครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมี เสถียรต่อความร้อนของวัสดุ และสมบัติความไม่ชอบน้ำของกระดาษเคลือบวัสดุประกอบ

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษากระบวนการที่เหมาะสมในการสังเคราะห์สารตัวเติมระดับนาโน (Nanofiller: ZnO-MMT) จากมอนต์มอริลโลไนต์และซิงค์ออกไซด์และตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ที่สังเคราะห์ได้

1.2.2 เพื่อศึกษากระบวนการที่เหมาะสมในการเตรียมฟิล์มวัสดุประกอบโคโตะซานนาโนมอนต์มอริลโลไนต์แทรกสอดซิงค์ออกไซด์ (CS/ZnO-MMT) และทดสอบสมบัติของฟิล์มที่สังเคราะห์ได้

1.2.3 เพื่อศึกษาการเคลือบกระดาษด้วยสารเคลือบวัสดุประกอบโคโตะซานนาโนมอนต์มอริลโลไนต์แทรกสอดซิงค์ออกไซด์ (CS/ZnO-MMT)

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 ศึกษากระบวนการสังเคราะห์สารตัวเติมระดับนาโน (Nanofiller: ZnO-MMT) จากมอนต์มอริลโลไนต์และซิงค์ออกไซด์ โดยมีปัจจัยศึกษา ดังนี้

1) ความเข้มข้นของสารละลาย  $Zn^{2+}$  ที่ใช้ ได้แก่ 0.1 และ 0.3 M

2) การใช้เทคนิคอัลตราโซนิกร่วมกับการทำปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มอล ที่ 100 °C โดยใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที

3) ตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์สารตัวเติมระดับนาโน (Nanofiller: ZnO-MMT) ที่สังเคราะห์ได้ ดังนี้

3.1) ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีด้วย XRF

3.2) ศึกษาโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิค XRD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3.2 ศึกษากระบวนการที่เหมาะสมในการเตรียมแผ่นฟิล์มวัสดุประกอบโคโตซานนาโนมอนต์มอริลโลไนต์แทรกสอดซิงค์ออกไซด์ (CS/ZnO-MMT) พิสูจน์เอกลักษณ์และทดสอบสมบัติของฟิล์มที่เตรียมได้ โดยมีปัจจัยศึกษา ดังนี้

1) ปริมาณของ Nanofiller: ZnO-MMT ที่ใช้ ได้แก่ 3 6 และ 12 %wt เทียบกับน้ำหนักของโคโตซาน

2) พิสูจน์เอกลักษณ์และทดสอบสมบัติฟิล์มวัสดุประกอบที่เตรียมได้ ดังนี้

2.1) ศึกษาโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิค XRD

2.2) ศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค SEM

2.3) ศึกษาเสถียรต่อความร้อนเทคนิค TGA

2.4) ศึกษาหมู่ฟังก์ชันด้วย FT-IR

1.3.3 ศึกษาการเคลือบกระดาษด้วยสารเคลือบวัสดุประกอบโคโตซานนาโนมอนต์มอริลโลไนต์แทรกสอดซิงค์ออกไซด์ (CS/ZnO-MMT) โดยมีปัจจัยศึกษา ดังนี้

1) เทคนิคที่ใช้ในการเคลือบ ได้แก่ เทคนิคการเคลือบแบบจุ่ม

2) ทดสอบสมบัติการเคลือบกระดาษด้วยสารเคลือบวัสดุประกอบดังนี้

2.1) ศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค SEM

2.2) ศึกษาสมบัติความไม่ชอบน้ำด้วยเทคนิค Contact angle

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1) ได้องค์ความรู้และเข้าใจถึงกระบวนการสังเคราะห์สารตัวเติมระดับนาโน (Nanofiller) จากมอนต์มอริลโลไนต์และซิงค์ออกไซด์ รวมไปถึงกระบวนการเตรียมฟิล์มวัสดุประกอบโคโตซานนาโนมอนต์มอริลโลไนต์แทรกสอดซิงค์ออกไซด์ และสามารถนำความรู้ที่ได้ไปประยุกต์ใช้และพัฒนาต่อยอดเป็นผลิตภัณฑ์ที่สามารถนำไปใช้ได้จริงในอุตสาหกรรม

2) ได้กระบวนการสังเคราะห์สารตัวเติมระดับนาโน (Nanofiller) จากวัตถุดิบธรรมชาติ รวมไปถึงกระบวนการเตรียมฟิล์มและสารเคลือบที่ง่าย เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เพื่อทดแทนกระบวนการผลิตฟิล์มพลาสติกที่ได้จากปิโตรเลียมอันเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดการปลดปล่อยคาร์บอนสู่บรรยากาศ

3) สามารถผลิตฟิล์มและสารเคลือบที่มีสมบัติเหมาะสมแก่การนำไปใช้งานด้านบรรจุภัณฑ์ที่ได้จากวัตถุดิบธรรมชาติได้ในประเทศ ช่วยลดค่าใช้จ่ายในกระบวนการแยกชิ้นส่วนของชั้นพลาสติกหลังการใช้งานและสามารถนำกลับมารีไซเคิลได้ง่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 พลาสติกและสารเคลือบบรรจุภัณฑ์

ฟิล์มและสารเคลือบเป็นวัสดุบรรจุภัณฑ์ประเภทหนึ่งที่มีการใช้งานในอุตสาหกรรมอาหารอย่างแพร่หลาย เพื่อปรับปรุงสมบัติบางประการให้สามารถป้องกันการเสื่อมสภาพและยืดอายุการเก็บรักษาของอาหารภายในบรรจุภัณฑ์ได้ เช่น การเคลือบบรรจุภัณฑ์กระดาษ เพื่อช่วยป้องกันการซึมผ่านของไอน้ำและก๊าซ เนื่องจากกระดาษมีสมบัติดูดความชื้น ความชื้น มีอัตราการแพร่ของไอน้ำและก๊าซออกซิเจนสูง เพราะในโครงสร้างมีหมู่ไฮดรอกซิลจำนวนมากและมีพื้นผิวที่เป็นรูพรุน

ดังนั้นจึงนิยมใช้เป็นบรรจุภัณฑ์แบบใช้ครั้งเดียวแล้วทิ้ง หากต้องการนำไปบรรจุอาหารประเภทที่มีความชื้นหรือไขมันสูงจะต้องทำการปรับปรุงสมบัติของบรรจุภัณฑ์ด้วยฟิล์มและสารเคลือบ [13] โดยฟิล์มพลาสติกที่ได้รับความนิยมที่นำมาใช้ในการผลิตบรรจุภัณฑ์ในปัจจุบัน เช่น ฟิล์มยืด ฟิล์มหด และฟิล์มลามิเนต เป็นต้น

#### 2.1.1 ฟิล์มลามิเนต (Laminate films) [4]

ฟิล์มลามิเนต เป็นแผ่นฟิล์มพลาสติกที่ผ่านกระบวนการทำให้เป็นแผ่นบางๆ โดยการนำฟิล์มพลาสติกหลายๆชั้น มาเคลือบเข้าด้วยกันให้เป็นฟิล์มแผ่นเดียว หรือเป็นการนำฟิล์มพลาสติกมาเคลือบเข้ากับวัสดุอื่นๆ เช่น พอลิโพรพิลีน หรือกระดาษ เป็นต้น จากนั้นทำการยึดติดระหว่างชั้นฟิล์มด้วยการใช้กาวหรือการความร้อน โดยจำนวนชั้นของฟิล์มลามิเนตขึ้นอยู่กับความต้องการที่จะนำไปใช้งานและเพื่อให้มีคุณภาพที่สามารถตอบสนองความต้องการของตลาดได้ ฟิล์มที่ใช้สำหรับการทำลามิเนตมีให้เลือกนำมาใช้ได้หลายประเภทขึ้นอยู่กับสมบัติที่ต้องการนำมาใช้งาน ประเภทของฟิล์มและวัสดุที่นิยมนำมาผลิตฟิล์มลามิเนตสำหรับบรรจุภัณฑ์มี ดังนี้

ฟิล์มพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (Polyethylene terephthalate, PET) สามารถผลิตได้จากปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน ซึ่งเกิดจากการนำเอทิลีนไกลคอลมาทำปฏิกิริยากับกรดเทเรฟทาเลต PET เป็นเทอร์โมพลาสติกที่ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีสมบัติการต้านทานแรงดึงสูง ทนทาน ต่อสารเคมี น้ำหนักเบา [14] ฟิล์ม PET ที่ใช้ในการลามิเนต คือ ฟิล์ม BOPET (Biaxially-oriented polyethylene terephthalate) จะมีผิวที่เงา เรียบ มีความใส ทนต่อการฉีกขาด คงรูปได้ดี ในอุณหภูมิที่ระดับต่างๆ ทนต่อความร้อนสูง ความชื้น สารเคมีและตัวทำละลายได้หลากหลาย

สามารถนำไปใช้งานกับไมโครเวฟได้ ป้องกันการซึมผ่านของก๊าซต่างๆได้ดี นอกจากนี้ยังมีไม่ว่าความสามารถในการถนอมอาหารและรักษากลิ่นของอาหารอีกด้วย [4] เอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฟิล์มพอลิเอทิลีน (Polyethylene, PE) ส่วนใหญ่ใช้ฟิล์ม LDPE (Low density polyethylene) และ LLDPE (Linear low density polyethylene) ซึ่ง LDPE มีความเป็นผลึกอยู่ในช่วงระหว่าง 55-70% มีความโปร่งแสงเล็กน้อย มีความเหนียว ทนต่อแรงกระแทก แรงดึงและป้องกันน้ำได้ดี สมบัติที่ดีอีกอย่างหนึ่งคือ ความสามารถในการเชื่อมประสานเข้ากับตัวมันเอง ทำให้ได้ฟิล์มที่ดีและเหนียว ของเหลวไม่สามารถซึมผ่านได้ ทนทานต่อสารเคมีได้ดี โดยเฉพาะกรด เบส และสารละลายอินทรีย์ แต่การป้องกันก๊าซอาจจะไม่ดีมาก [14]

ฟิล์มพอลิโพรพิลีน (Polypropylene, PP) เป็นพอลิเมอร์เชิงเส้นที่มีความไม่อมตัวเล็กน้อย หรือไม่มีขึ้นอยู่กับชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่ง PP มีความหนาแน่นประมาณ 900 kg/m<sup>2</sup> และมีจุดอ่อนตัวสูงอยู่ที่ 140-150 °C การส่งผ่านไอน้ำต่ำ การซึมผ่านก๊าซปานกลาง ทนทานต่อสารเคมีดี ทนการขีดถูได้ดี มีความมันเงา [14] ซึ่งฟิล์ม PP ที่ใช้ในการลามิเนต คือ ฟิล์ม BOPP (Biaxially oriented polypropylene) และฟิล์ม CPP (Cast polypropylene) ทั้งสองชนิดมีผิวที่มัน มีความใส เหนียว ทนต่อแรงดึง สามารถกันน้ำได้ดี โดยส่วนมากฟิล์มทั้งสองชนิดนี้มักมีการใช้ควบคู่กัน โดยฟิล์ม CPP ทำหน้าที่เป็นชั้นเคลือบเพื่อป้องกันสีที่อาจจะมีการสัมผัสกับอาหาร ซึ่งสีที่เกิดขึ้นนั้นมาจากการพิมพ์ลงบนชั้นฟิล์ม BOPP [4]

ฟิล์มพอลิเอไมด์ (Polyamide, PA) หรือ ไนลอน (Nylon) เป็นเทอร์โมพลาสติกเชิงเส้นเกิดจากมอนอเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันเอมีนและกรดคาร์บอกซิลิก ทำให้เกิดการเชื่อมโยงในสายโซ่พอลิเมอร์หลักที่ส่งผลต่อความแข็งแรงทางกลและสมบัติการกันการซึมผ่าน [14] ฟิล์ม PA ที่ใช้ในการลามิเนต คือ ฟิล์ม BOPA (Biaxially oriented polyamide) ซึ่งมีสมบัติในการต้านการซึมผ่านได้ดี ทนต่ออุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงทั้งร้อนและเย็น มีความเหนียวพิเศษ เหมาะที่จะนำมาผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์อาหารแบบสุญญากาศ [4]

ฟิล์มเมทัลไลซ์ (Metalized) เป็นฟิล์มพลาสติกที่ผ่านกระบวนการฉาบด้วยโลหะอะลูมิเนียม ทำให้ซองบรรจุภัณฑ์มีสีมันดูแวววาว มีสมบัติกันการซึมผ่านของก๊าซได้ดี ช่วยยืดอายุสินค้าภายในฟิล์มชนิดนี้จึงเหมาะที่จะนำไปใช้งานในด้านบรรจุภัณฑ์เป็นอย่างมาก [4]

พอยล์อะลูมิเนียม มีสมบัติที่เหมาะสมสำหรับการนำไปผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์ได้ดีที่สุด เมื่อเทียบกับฟิล์มพลาสติกชนิดอื่นๆ เพราะ มีสมบัติในการป้องกันทั้งการซึมผ่านของก๊าซ น้ำและน้ำมัน รวมทั้งป้องกันการผ่านของแสง ทำให้สามารถปกป้องและถนอมผลิตภัณฑ์ที่บรรจุอยู่ภายในได้นานกว่าฟิล์มชนิดอื่นๆ ผิวของพอยล์อะลูมิเนียมมีความมันวาวเหมือนกับฟิล์ม Metalized แต่ข้อเสีย คือ มีราคาแพง [4]

ฟิล์มลามิเนต เป็นแผ่นฟิล์มพลาสติกที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมการเคลือบ เนื่องจากมีสมบัติกันการซึมผ่านของไอน้ำและก๊าซได้ดี อย่างไรก็ตามฟิล์มที่นำมาใช้ในการทำลามิเนต เป็นพลาสติกหรือพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่ได้จากปิโตรเลียมไม่สามารถย่อยสลายได้ในธรรมชาติ ดังนั้นจึงมีการผลิตฟิล์มและสารเคลือบที่ได้จากวัสดุธรรมชาติ เพื่อทดแทนพอลิเมอร์สังเคราะห์จากปิโตรเลียม

## 2.1.2 พิล์มที่ได้จากธรรมชาติ [5]

แป้ง เป็นพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ มีต้นทุนต่ำ สามารถเคลือบบนกระดาษ เพื่อเพิ่มสมบัติให้ดีขึ้นได้ เนื่องจากเป็นลักษณะกึ่งผลึก พิล์มจึงเปราะ แต่มีความยืดหยุ่นเพียงพอที่ใช้ ในด้านการห่อสิ่งของ แป้งยังมีความสามารถในการขึ้นรูปฟิล์มได้ดีมาก จึงสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุ เคลือบผิวได้ เมื่อนำแป้งมาผสมกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVOH) แล้วเคลือบลงบนกระดาษ จะสามารถป้องกันความชื้นได้ดีขึ้นและการผสมแป้งกับไคโตซานจะทำให้กระดาษสามารถกันน้ำมันได้ดี

เซลลูโลส เป็นพอลิแซคคาไรด์เชิงเส้นที่มีอยู่มากที่สุดในโลก ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ชีวภาพสามารถ ย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติ ในอุตสาหกรรมกระดาษเส้นใยเซลลูโลสจัดเป็นวัตถุดิบหลักที่ใช้ ในการผลิตกระดาษและอนุพันธ์ของเส้นใยเซลลูโลสสามารถใช้เป็นวัสดุเคลือบสำหรับงานทางด้าน บรรจุภัณฑ์ได้ แต่เซลลูโลสมีสมบัติบางอย่างที่ไม่เหมาะกับการใช้เป็นวัสดุเคลือบผิว เช่น มีสมบัติชอบ น้ำและก่อตัวเป็นฟิล์มได้ไม่ดี จึงมีการพัฒนาเป็นเซลลูโลสนาโนไฟบริล (CNF) ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ ที่ย่อยสลายได้และสามารถเคลือบบนกระดาษได้ ส่งผลทำให้มีความสามารถในการกันน้ำและออกซิเจน

ไคโตซาน เป็นพอลิแซคคาไรด์ที่มีอยู่ตามธรรมชาติและสามารถย่อยสลายได้ พบว่ากระดาษ ที่เคลือบด้วยไคโตซานมีอัตราการส่งผ่านไอน้ำ (WVTR) ค่าการดูดซับน้ำของกระดาษกราฟท์และ ความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำ (WVP) ลดลง

## 2.1.3 การเคลือบกระดาษ [5]

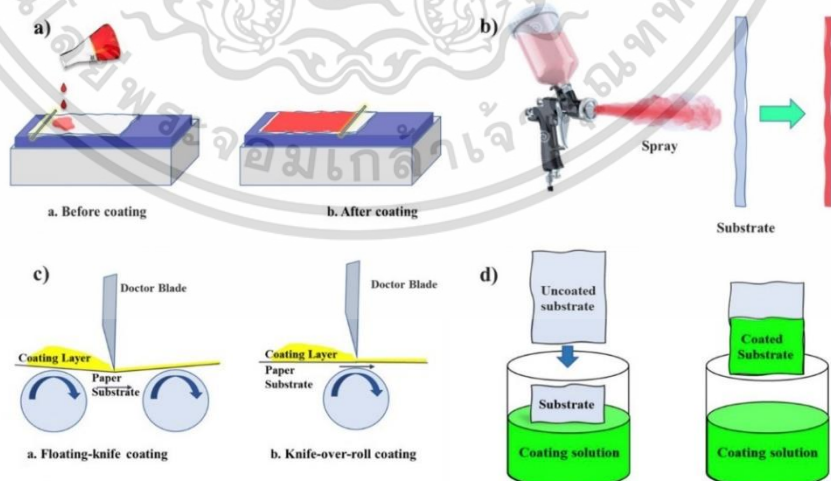
การเคลือบแบบแท่งหรือแบบเมเยอร์บาร์ (Bar coating/Rod coating/Mayer bar coating) เป็นวิธีการเคลือบกระดาษที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่ายและมีต้นทุนต่ำเมื่อเทียบกับ วิธีอื่นๆ ในการเคลือบแบบใช้แท่งสามารถหาความหนาของชั้นเคลือบที่ต้องการได้อย่างรวดเร็ว ไม่มี ความยุ่งยากซับซ้อน จะเป็นวิธีที่ใช้แท่งที่พันด้วยเส้นลวดที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางแตกต่างกัน ทำให้เกิด ลักษณะเป็นร่อง ๆ ที่จะช่วยทำให้สามารถควบคุมความหนาของชั้นที่เคลือบบนพื้นผิวได้ ความเร็ว ของแท่งกับเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดที่พันอยู่กับแท่ง เป็นตัวแปรที่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ เพื่อให้ได้ ความหนาของชั้นเคลือบที่ต้องการที่มีความเหมาะสมและจำเพาะเจาะจง ความหนาของชั้นเคลือบ ควบคุมได้อย่างแม่นยำโดยปกติจะอยู่ในช่วง 3-160  $\mu\text{m}$

การเคลือบแบบใช้มีดปาด (Knife coating) เป็นวิธีที่ใช้สำหรับเคลือบบนวัสดุแผ่นเรียบ ต่อเนื่อง เช่น กระดาษ ในการเคลือบแบบใช้มีดปาด สารเคลือบส่วนเกินจะยึดเกาะบนพื้นผิวของวัสดุ ที่ต้องการเคลือบและความหนาชั้นเคลือบสามารถควบคุมได้ด้วยมีดหรือใบมีด ในวิธีการนี้จะนำวัสดุ ที่ต้องการเคลือบมาเลื่อนผ่านลูกกลิ้ง โดยที่ด้านบนวัสดุจะใบมีดอยู่ ซึ่งจะทำการกดลงบนพื้นผิวของ วัสดุ จะทำให้สารละลายที่เคลือบเกาะติดอยู่บนพื้นผิววัสดุ ซึ่งแรงกดที่มีดใช้และความตึงของพื้นผิว ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นส่วนที่จะควบคุมความหนาของชั้นเคลือบได้ และยังมีตัวแปรอีกหลายตัวที่สามารถกำหนดความหนาของชั้นเคลือบ ได้แก่ รูปร่างใบมีด มุม สมบัติการไหลของสารละลายที่ใช้เคลือบ

การเคลือบด้วยการจุ่ม (Dip coating) ส่วนใหญ่จะใช้ในการวิจัยระดับห้องปฏิบัติการ เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่าย ไม่ต้องใช้อุปกรณ์ที่ซับซ้อน ต้นทุนต่ำ และวิธีนี้สามารถปรับความหนาของชั้นเคลือบได้ง่าย แต่ไม่เหมาะสำหรับใช้ในงานด้านอุตสาหกรรม ในวิธีการนี้เป็นการนำวัสดุที่ต้องการเคลือบมาจุ่มลงในสารละลายที่เตรียมไว้ (สารละลายที่ใช้เคลือบ) จากนั้นทำการดึงวัสดุที่จุ่มเคลือบขึ้นมาจากสารละลาย สารเคลือบจะเกาะตัวอยู่บนพื้นผิวของวัสดุ ต่อมาจะเป็นขั้นตอนของการระเหย เป็นชั้นที่ทำให้สารละลายที่เคลือบที่เกาะติดอยู่บนพื้นผิววัสดุ มีลักษณะคล้ายกับเจล เนื่องจากมีการระเหยสารบางส่วนออกไป และจากนั้นจะเป็นขั้นตอนการกำจัดสารละลายส่วนเกินออกไป โดยการปล่อยให้สารส่วนเกินไหลออกจากผิววัสดุ จะทำให้สารละลายที่เคลือบผิววัสดุมีความบางมากขึ้น ซึ่งตัวแปรที่มีผลต่อความหนาของชั้นเคลือบ ได้แก่ เวลาในการแช่ ความเร็วในการดึงวัสดุที่จุ่ม ความหนาแน่นและความหนืดของสารละลายที่ใช้เคลือบ พื้นผิวของวัสดุที่จะนำมาเคลือบ เป็นต้น ข้อได้เปรียบของการเคลือบด้วยการจุ่ม คือ สามารถเคลือบชั้นเดียวได้ ส่วนข้อเสีย คือ ใช้เวลานาน

การเคลือบด้วยสเปรย์ (Spray coating) เป็นการทำให้ฟิล์มเคลือบบาง ๆ บนพื้นผิว เป็นวิธีที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในการเคลือบในงานด้านต่าง ๆ เช่น ใช้ในอุตสาหกรรม ใช้ทางศิลปะ ภาพวาด โดยการพ่นสารละลายที่จะเคลือบลงบนพื้นผิวของวัสดุโดยตรง การเคลือบแบบสเปรย์สามารถเคลือบลงบนวัสดุที่มีรูปร่างไม่สม่ำเสมอได้ แต่การควบคุมความหนาของชั้นเคลือบให้มีความสม่ำเสมอทำได้ยาก ไม่สามารถควบคุมความหนาของชั้นเคลือบได้อย่างแม่นยำและเป็นวิธีที่มีราคาแพง



**รูปที่ 2.1** ลักษณะการเคลือบกระดาษ (a) การเคลือบแบบแท่งหรือแบบเมเยอร์บาร์ (b) การเคลือบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารด้วยสเปรย์ (c) การเคลือบแบบใช้มีดปาด และ (d) การเคลือบด้วยการจุ่ม [5] โยชนด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 ดินเหนียว (Clay)

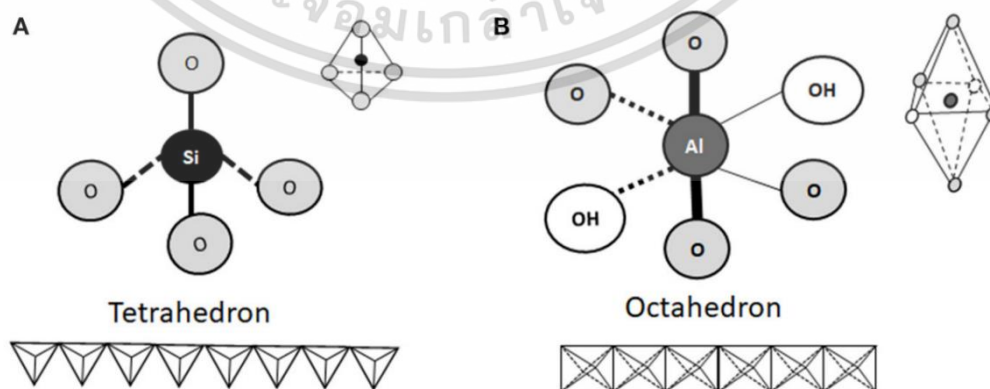
ดินเหนียว (Clay) เป็นวัสดุที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ มีเนื้อละเอียด ยึดเกาะกันอย่างอิสระมีเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 0.005 mm โดยทั่วไปแล้วในดินเหนียวจะประกอบด้วยสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ คือ แร่ดินชนิดต่างๆ คำจำกัดความมาตรฐานแรกกล่าวว่า แร่ดินเกิดจากการผุพังของหินพื้นผิวดิน จัดเป็นวัสดุอนินทรีย์ ดินเหนียวจะแสดงสมบัติความเป็นพลาสติกหรือมีความเหนียวเมื่อเปียกขึ้นรูปง่ายมีความคงรูป และจะสูญเสียความเป็นพลาสติกเมื่อแห้งหรือได้รับความร้อน [15]

### 2.2.1 โครงสร้างและชนิดของแร่ดินเหนียว [15]

แร่ดินเหนียว หมายถึง กลุ่มอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 0.002 mm [16] เป็นแร่ทุติยภูมิที่เกิดขึ้นจากการผุพังของหิน แร่ดินเหนียวที่พบมากจัดเป็นสารประกอบจำพวกไฮดรอกไซด์อะลูมิเนียมซิลิเกต (hydrous aluminosilicate) หรือไฮดรอกไซด์อะลูมิเนียมฟิลาซิลิเกต (hydrous aluminum phyllosilicate) มีลักษณะเป็นแผ่นเรียงเป็นชั้นซ้อนทับกัน โดยโครงสร้างประกอบด้วยชั้นซิลิกาและชั้นอะลูมินา

ชั้นซิลิกา (Silica tetrahedral unit) ประกอบด้วยธาตุซิลิคอน 1 อะตอมตรงกลางถูกล้อมรอบด้วยธาตุออกซิเจน 4 อะตอมลักษณะพีระมิดฐานสามเหลี่ยม ออกซิเจนที่ฐาน 3 ตัวนำมาสร้างพันธะร่วมกับหน่วยข้างเคียงต่อกันเป็นแผ่น โดยไม่มีการใช้ออกซิเจนด้านบน เมื่อมองโครงสร้างจากด้านบนจะเห็นเป็นลักษณะร่างแหช่องว่างหกเหลี่ยมและชั้นนี้จะมีประจุลบเมื่อเกิดการแทนที่ของซิลิคอน ( $\text{Si}^{4+}$ ) ด้วยอะลูมิเนียม ( $\text{Al}^{3+}$ )

ชั้นอะลูมินา (Alumina octahedral unit) ประกอบด้วยธาตุอะลูมิเนียม 1 อะตอมตรงกลางถูกล้อมรอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล 6 หมู่ ( $\text{Al}(\text{OH})_6^{3-}$ ) แต่ละหน่วยเชื่อมต่อกันโดยใช้หมู่ไฮดรอกซิลร่วมกันเกิดเป็นรูปแปดด้านที่มีอะลูมิเนียมอยู่ตรงกลางและมีออกซิเจนอยู่ตามมุม เกาะเชื่อมกันเป็นแผ่นในแนวราบ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับครูผู้ทรงคุณวุฒิของโรงเรียนที่นำไปปรับใช้ในการจัดการเรียนการสอนด้านการค้า  
รูปที่ 2.2 โครงสร้างของแร่ดินเหนียว (A) ชั้นซิลิกา และ (B) ชั้นอะลูมินา [59]  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การจำแนกดินเหนียวสามารถแบ่งได้จากการจัดเรียงตัวของชั้นซิลิเกต (Layer Silicate) ที่มีการจัดเรียงตัวแตกต่างกัน ทำให้มีสมบัติของแร่แต่ละชนิดแตกต่างกัน ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่

**แร่ดินเหนียวประเภท 1:1** ประกอบด้วยชั้นซิลิกา 1 แผ่นเชื่อมกับชั้นอะลูมินา 1 แผ่นรวมกันเป็น 1 หน่วย เชื่อมยึดติดกันด้วยการใช้ออกซิเจนด้านบนของโครงสร้างเตตระฮีดรอลเข้าไปแทนที่หมู่ไฮดรอกซิลของโครงสร้างออกตะฮีดรอล 1 หมู่ เมื่อชั้นต่างๆซ้อนทับกันจะเกิดพันธะไฮโดรเจนที่ค่อนข้างแข็งแรง ทำให้การขยายตัวหรือพองตัวเป็นไปได้ยากและไม่หดตัวเมื่อแห้ง มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกได้น้อย กลุ่มแร่ที่พบ ได้แก่ กลุ่มเคโอลิไนต์ (Kaolinite) และกลุ่มฮาลลอยไซต์ (Halloysite)

กลุ่มเคโอลิไนต์ (Kaolinite) มีสูตรทั่วไป คือ  $\text{Si}_4\text{Al}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$  เป็นแร่ดินเหนียวที่พบมากที่สุด แต่ละชั้นมีความหนาประมาณ 7 Å

กลุ่มฮาลลอยไซต์ (Halloysite) มีสูตรทั่วไป คือ  $\text{Si}_2\text{Al}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  โดยโมเลกุลของน้ำจะอยู่ระหว่างชั้นแบบ  $\text{TO} : \text{H}_2\text{O} : \text{TO}$  ที่อุณหภูมิ 60 °C โมเลกุลของน้ำจะถูกกำจัดออกกลายเป็น meta-halloysite ที่มีลักษณะคล้ายกับกลุ่มเคโอลิไนต์ (Kaolinite)



รูปที่ 2.3 โครงสร้างแร่ดินเหนียวชนิด 1:1 [59]

**แร่ดินเหนียวประเภท 2:1** ประกอบด้วยชั้นซิลิกา 2 แผ่นและชั้นอะลูมินา 1 แผ่นตรงกลาง มีการเชื่อมยึดระหว่างชั้นโดยใช้ออกซิเจนด้านบนของโครงสร้างเตตระฮีดรอลเข้าไปแทนที่หมู่ไฮดรอกซิลของโครงสร้างออกตะฮีดรอลรวมกันเป็น 1 หน่วย การซ้อนทับกันระหว่างหน่วยจะมีการยึดติดด้วยแรงแวนเดอร์วาล เนื่องจากมีการเชื่อมต่อระหว่างชั้นทำให้ด้านบนและล่างของแต่ละหน่วยเป็นออกซิเจนทั้งหมด ทำให้โมเลกุลของน้ำสามารถแทรกตัวเข้าไปได้ กลุ่มแร่ที่พบคือ อิลไลต์หรือไฮดรรัสไมกา (Illite หรือ Hydrous mica), เวอมิคูไลต์ (Vermiculite), สเมกไทต์ (Smectites)

กลุ่มอิลไลต์หรือไฮดรรัสไมกา (Illite หรือ Hydrous mica) สูตรเคมีทั่วไป คือ  $(\text{K}, \text{H}_3\text{O})(\text{Al}, \text{Mg}, \text{Fe})_2(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}[(\text{OH})_2(\text{H}_2\text{O})]$  [17] แร่กลุ่มนี้ส่วนใหญ่ประกอบไปด้วยไมกาหรือ

พบมากในหินตะกอน มักมีการแทนที่ของซิลิคอนด้วยอะลูมิเนียมที่โครงสร้างเตตระฮีดรอลทำให้

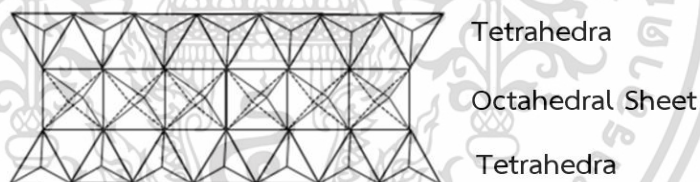
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า มีประจุลบเกินหนึ่งประจุต่อสูตร [18] จึงมีการดุลประจุด้วยไอออนของโพแทสเซียมแทรกอยู่ระหว่าง

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน่วยทำหน้าที่เชื่อมยึดเกาะระหว่างหน่วยและป้องกันการขยายตัวจึงทำให้มีความหนาแน่นระหว่างชั้นเพียง 10 Å จึงมีความสามารถในการพองตัว การดูดซับ และการแลกเปลี่ยนไอออนต่ำ ซึ่งสามารถแลกเปลี่ยนไอออนได้น้อยกว่ากลุ่มสมกไทต์ (Smectites) แต่สูงกว่ากลุ่มเคลโอไลต์ (Kaolinite)

กลุ่มเวมิคูไลต์ (Vermiculite) มักมีการแทนที่ของซิลิคอนด้วยอะลูมิเนียมทำให้มีประจุลบเกินหนึ่งประจุเช่นเดียวกับแร่ไมกา แต่จะมีดุลประจุด้วยไอออนแมกนีเซียมแทนไอออนของโพแทสเซียมที่จะแทรกอยู่ระหว่างหน่วย ซึ่งไอออนแมกนีเซียมมีขนาดที่ใหญ่กว่าโพแทสเซียมจึงทำให้ช่องว่างระหว่างชั้นเพิ่มขึ้น ทำให้สามารถขยายตัวหรือพองตัวในน้ำได้มากกว่าแบบไมกามีค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนสูงกว่าแบบไมกา

กลุ่มสมกไทต์ (Smectites) มีสูตรเคมีทั่วไป คือ  $(Ca,Na,H)(Al,Mg,Fe,Zn)_2(Si,Al)_4O_{10}(OH)_2 \cdot XH_2O$  เป็นกลุ่มแร่ดินเหนียวที่สามารถขยายตัวได้เมื่อมีการแทนที่ซิลิคอน ( $Si^{4+}$ ) โดยอะลูมิเนียม ( $Al^{3+}$ ) ที่แผ่นซิลิกาและแทนที่อะลูมิเนียม ( $Al^{3+}$ ) โดยแมกนีเซียม ( $Mg^{2+}$ ) ที่แผ่นอะลูมินาทำให้มีประจุลบเกินบนชั้นโครงสร้างจำนวนมากที่สามารถดูดซับไอออนบวก ส่วนมากจะเป็นไอออนของเหล็ก แคลเซียม แมกนีเซียม และโซเดียม เพื่อทำหน้าที่ดุลประจุในโครงสร้าง การมีอยู่ของประจุบวกเหล่านี้ทำให้แร่กลุ่มนี้มีความสามารถในการบวมน้ำหรือสมบัติพิเศษในการกักเก็บน้ำ แร่ที่พบในกลุ่มนี้คือ มอนต์-มอริลโลไนต์ (Montmorillonite), เบเดิลไลต์ (Beidellite), นอนโตรไนต์ (Nontronite) และซาโปไนต์ (Saponite)



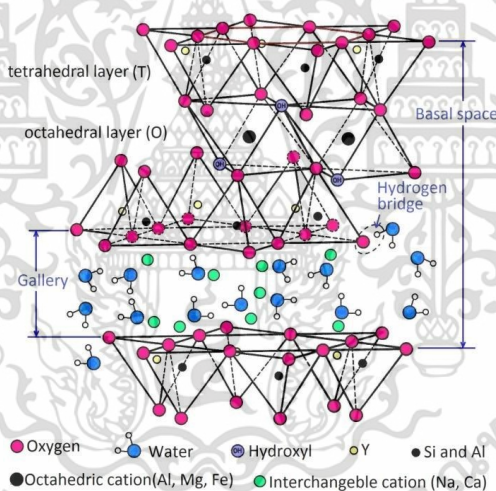
รูปที่ 2.4 โครงสร้างแร่ดินเหนียวชนิด 2:1 [59]

**แร่ดินเหนียวประเภท 2:1:1** แร่ที่พบมากในกลุ่มนี้คือ กลุ่มคลอไรต์ (Chlorites) มีการจัดเรียงตัวคล้ายกับแบบแร่ดินเหนียวประเภท 2:1 คือ มีการแทนที่ของซิลิคอนด้วยอะลูมิเนียมที่โครงสร้างเตตระฮีดรอลทำให้มีประจุลบเกิน แต่ที่แตกต่างกัน คือ แร่กลุ่มนี้จะมีการดุลประจุด้วยชั้นไฮดรอกไซด์หรือชั้นบรูไซต์ (Brucite,  $Mg(OH)_2$ ) ยึดติดกันด้วยพันธะไฮโดรเจนและแรงอิเล็คโตรสตาติก ทำให้การยึดติดมีความแข็งแรงมากจนไม่สามารถขยายตัวหรือหดตัวได้ แร่กลุ่มนี้พบได้ยากและไม่พบการใช้งานในอุตสาหกรรม [19]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2.2 มอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite, MMT)

มอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite, MMT) เป็นแร่ดินเหนียวไฟโรซิลิเกต (Phyllosilicate) ประเภท 2:1 มีสูตรเคมีทั่วไป คือ  $\text{Na}_{0.2}\text{Ca}_{0.1}\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2(\text{H}_2\text{O})_{10}$  [9] จัดอยู่ในกลุ่มกลุ่มสมกไทต์ (Smectites) เป็นกลุ่มแร่ดินเหนียวที่สามารถขยายตัวได้หรือพองตัวได้อย่างรวดเร็วเมื่ออยู่ในน้ำแร่ดิน MMT มีลักษณะการจัดเรียงตัวเป็นชั้นๆ ซึ่งแต่ละชั้นมีความหนาเพียง 1 nm [5] และมีความกว้างหรือความยาวประมาณ 50-500 nm [9] โดยทั่วไป 1 g ของนาโนเคลย์มีพื้นที่ผิวประมาณ 750  $\text{cm}^2$  หรือเทียบเท่ากับสนามฟุตบอลเก้าสนาม [20] ประกอบด้วยชั้นซิลิกา 2 แผ่นและชั้นอะลูมินา 1 แผ่น ตรงกลาง ลักษณะคล้ายแซนวิช จากการแทนที่ของซิลิคอน ( $\text{Si}^{4+}$ ) โดยอะลูมิเนียม ( $\text{Al}^{3+}$ ) ที่แผ่นซิลิกา และแทนที่อะลูมิเนียม ( $\text{Al}^{3+}$ ) โดยแมกนีเซียม ( $\text{Mg}^{2+}$ ) ที่แผ่นอะลูมินาทำให้มีประจุลบทำให้มีแรงผลักระหว่างชั้น เกิดเป็นช่องว่างขยายกว้างขึ้น เรียกว่า แกลลอรี่ (Gallery) หรือ interlayer ในช่องว่างนี้จะมีไอออนประจุบวกของโลหะ เช่น ไอออนแคลเซียม ไอออนโซเดียมและน้ำแทรกอยู่ระหว่างชั้น เพื่อดุลประจุและยึดแต่ละชั้นเข้าไว้ด้วยกัน แร่ชนิดนี้แลกเปลี่ยนประจุบวกได้มาก



รูปที่ 2.5 โครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์ [60]

## 2.2.3 สมบัติของแร่ดินเหนียว

### 1) ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนประจุบวก (Cation – exchange capacity, CEC)

หมายถึงปริมาณของแคตไอออนหรือประจุบวกทั้งหมดที่ดินสามารถแลกเปลี่ยนหรือดูดซับไว้ได้ วิเคราะห์ได้จากการใช้  $\text{NH}_4^+$  และ  $\text{Ba}^{2+}$  เข้าไปไล่และแทนที่ประจุบวกเดิมที่ถูกยึดอยู่ภายในดินทั้งหมด จากนั้นจึงทำการหาปริมาณของ  $\text{NH}_4^+$  และ  $\text{Ba}^{2+}$  ที่ถูกดูดซับไว้และจะรายงานในหน่วย เซนติโมลของประจูดอกิโลกรัมของดินแห้ง หรือมิลลิวาเลนต์ (Milli-equivalent, meq)

ต่อน้ำหนัก 100 g ของดินแห้ง โดยทั่วไปดินจะมีประจุลบ ซึ่งจะดูดซับประจุบวกหรือแคตไอออนจากสารละลายในดิน เพื่อดุลประจุในโครงสร้าง ซึ่งไอออนเหล่านี้เรียกว่าไอออนที่เกิดการแลกเปลี่ยนได้

(Exchangeable ions) ซึ่งสามารถเรียงตามลำดับความแรงของแคตไอออนที่ถูกดูดซับและแคตไอออนเข้าแทนที่ได้ดังนี้  $Al^{3+}$ ,  $H^+$  >  $NH_4^+$  >  $Ca^{2+}$  >  $Mg^{2+}$  >  $K^+$  >  $Na^+$  >  $Li^+$  และการที่มอนต์มอริลโลไนต์มีพื้นผิวสูงมาก ทำให้สามารถแลกเปลี่ยนไอออนได้มาก ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนประจุบวก (CEC) จึงมีค่าสูงตามมีค่าอยู่ที่ 80-150  $cmol\ kg^{-1}$  ของดินแห้ง [21]

2) **พื้นที่ผิวจำเพาะ** หมายถึง พื้นที่ผิวของวัสดุต่อหนึ่งหน่วยมวล มีหน่วยเป็น  $m^2/g$  หรือ  $m^2/m^3$  ซึ่งจะมีค่าแตกต่างกันขึ้นอยู่กับขนาดและรูปร่างของวัสดุ อนุภาคที่มีน้ำหนักร่วมกัน อนุภาคที่มีลักษณะเป็นทรงกลมจะมีพื้นที่ผิวที่น้อยกว่าอนุภาคที่มีลักษณะแบนหรือเป็นแผ่น [16] สำหรับอนุภาคของดินเหนียวที่มีลักษณะเป็นแผ่นแบนทำให้มีพื้นที่ผิวจำเพาะมาก นอกจากนั้นยังขึ้นอยู่กับ การขยายตัวของแร่ดินเหนียวโดยพื้นที่ผิวที่เพิ่มขึ้นเป็นพื้นที่ผิวภายในที่ได้จากการขยายตัว แร่ดินเหนียวที่มีการขยายตัวได้มาก เช่น มอนต์มอริลโลไนต์ และ เวอมิคูไลต์ จะมีพื้นที่ผิวมากกว่าเคลโอลิไนต์ ชนิดแร่ที่ไม่มีการขยายตัว [15]

3) **ความเชื่อมแน่น (Cohesion) และสภาพพลาสติก (Plasticity)** แร่ดินเหนียว มีสมบัติความเชื่อมแน่นและสภาพพลาสติกแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของแร่ดินเหนียว คำว่าความเชื่อมแน่น (Cohesion) หมายถึง ความสามารถการเกาะยึดกันได้ของอนุภาคดินเหนียว แร่ดินเหนียวชนิดที่มีพื้นที่ผิวมากจะมีความเชื่อมแน่นสูงเนื่องจากมีน้ำที่ยึดเกาะบนผิวมากจึงช่วยในการยึดเกาะอนุภาคของดินไว้แน่น มีสภาพเหนียวจับตัวกันเป็นก้อน และเมื่อมีความชื้นที่เหมาะสมจะสามารถปั้นหรือขึ้นรูปและคงสภาพอยู่ได้ สมบัตินี้เรียกว่าสภาพพลาสติก (Plasticity) ส่วนแร่ดินเหนียวชนิดที่มีพื้นที่ผิวน้อย จะมีสภาพร่วน ไม่เกาะตัวกัน สภาพพลาสติกจึงต่ำไปด้วย [16]

ตารางที่ 2.1 สมบัติต่างๆของแร่ดินเหนียวที่สำคัญ 3 ชนิด [16,22]

สมบัติ		ชนิดของแร่ดินเหนียว		
		เมกไทต์	อิลไลต์	เคลโอลิไนต์
ขนาดของผลึก ( $\mu m$ )		< 1.0	0.1 – 2.0	0.1 – 5.0
พื้นที่ผิว	ภายนอก	70 - 150	50 - 100	10 - 50
	ภายใน	500 - 700	5 - 100	-
ระยะห่างระหว่างชั้น		1.0 – 2.0	1.0	0.7
การขยายตัว		สูง	ปานกลาง	ต่ำ
ความเชื่อมแน่นและสภาพพลาสติก		สูง	ปานกลาง	ต่ำ
ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนประจุบวก		80 – 100	15 – 40	3 -15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.3 ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide)

### 2.3.1 ข้อมูลเกี่ยวกับซิงค์ออกไซด์

#### 1) สมบัติพื้นฐานของซิงค์ออกไซด์

ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide) เป็นสารประกอบระหว่างธาตุซิงค์ (Zn) และธาตุออกซิเจน (O) ลักษณะเป็นของแข็งผงละเอียดสีขาว ไม่มีกลิ่น ซึ่งมีสูตรทางเคมีคือ ZnO มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบเฮกซะโกนอล โดยซิงค์ออกไซด์จะพบอยู่ในรูปของผลึกเฮกซะโกนอลหรือในรูปของผงแป้งสีขาวที่รู้จักกันในชื่อว่า Zinc white สีของซิงค์ออกไซด์จะมีสีขาวและจะเปลี่ยนเป็นสีเหลืองเมื่อถูกให้ความร้อนและสามารถกลับเป็นสีขาวตามเดิมเมื่ออุณหภูมิลดลง ซิงค์ออกไซด์เป็นสารกึ่งตัวนำ ดังนั้นจึงมีค่าพลังงานของแถบพลังงานมากกว่า 3.3 eV ขึ้นไป [23] ซิงค์ออกไซด์เป็นสารกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างแถบตรง (Directed band gap) มีค่าแถบพลังงาน 3.37 eV ที่อุณหภูมิห้องมีค่ามวลยังผลพาหะ (Carrier effective mass) ของโฮลกับอิเล็กตรอน คือ 0.59  $m_0$  และ 0.24  $m_0$  ตามลำดับ การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน (Electron mobility) ที่ผลึกเชิงเดี่ยวซิงค์ออกไซด์ระหว่าง 100 ถึง 200  $\text{cm}^2/\text{V}$  และมีค่าสภาพคล่องของการเคลื่อนที่ของโฮล (Hole mobility) ประมาณ 180  $\text{cm}^2/\text{V}$  [24] นอกจากนี้ซิงค์ออกไซด์ยังมีสมบัติเป็นสารที่ใช้ในการยับยั้งการแบ่งเซลล์ของแบคทีเรีย (Anti-bacteria) และไม่เป็นพิษต่อร่างกาย

ตารางที่ 2.2 ข้อมูลและสมบัติทางกายภาพของซิงค์ออกไซด์ [25]

ข้อมูลและสมบัติทางกายภาพ	ค่า
สูตรโมเลกุล	ZnO
มวลโมเลกุล	81.4084 g/mol
ลักษณะ	ของแข็งเป็นผง มีสีขาวหรือสีขาวออกเหลือง
กลิ่น	ไม่มีกลิ่น
ความหนาแน่น	5.606 g/cm <sup>3</sup>
จุดเดือด	2360 °C
จุดหลอมเหลว	1975 °C
การละลายน้ำ	0.16 mg 100 mL
โครงสร้างผลึกที่เสถียร	โครงสร้างเวอร์ทไซต์
ดัชนีการหักเห	2.0041

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

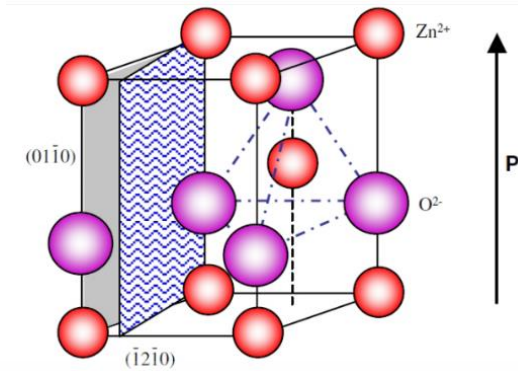
ตารางที่ 2.3 ข้อมูลและสมบัติทางกายภาพของซิงค์ออกไซด์ [25] (ต่อ)

ข้อมูลและสมบัติทางกายภาพ	ค่า
ค่าคงที่แลตทิซ	$a_0 = 0.32469 \text{ \AA}$ $C_0 = 0.52069 \text{ \AA}$
ค่าคงที่ได้อิเล็กทริกสัมพัทธ์	8.66
ช่องว่างพลังงาน	3.37 eV
พลังงานยึดเหนี่ยวอิเล็กตรอน	60 meV
มวลอิเล็กตรอนที่มีประสิทธิภาพ	$0.24 m_0$
การเคลื่อนตัวของอิเล็กตรอน (ที่ 300 K) ชนิดเอ็น	$200 \text{ cm}^2/\text{V s}$
การเคลื่อนตัวของอิเล็กตรอน (ที่ 300 K) ชนิดพี	$5\text{-}50 \text{ cm}^2/\text{V s}$

## 2) โครงสร้างผลึกของซิงค์ออกไซด์

ซิงค์ออกไซด์มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบเฮกซะโกนอล (Hexagonal) หรือแบบเวอร์ทไซต์ (Wurtzite) ซึ่งโครงสร้างเวอร์ทไซต์มีความเสถียรที่สุดและพบได้มากที่สุด โครงสร้างผลึกแบบนี้มีการจัดเรียงอะตอมเหมือนกับโครงสร้างผลึกแบบคิวบิกแต่จะแตกต่างกันที่การจัดเรียงระนาบของอะตอมในชั้นที่สองขึ้นไปซึ่งประกอบด้วย ซิงค์ไอออน ( $\text{Zn}^{2+}$ ) และ ออกซิเจนไอออน ( $\text{O}^{2-}$ ) ที่มีลักษณะการจัดเรียงเป็นพีระมิดฐานสามเหลี่ยมทรงสี่หน้า (Tetrahedral arrangement) [24] ซึ่งโครงสร้างเวอร์ทไซต์มีปริมาณสัมพัทธ์ (Stoichiometry) เป็น MX โดยให้ M แทนไอออนบวกคือ  $\text{Zn}^{2+}$  และ X แทนไอออนลบคือ  $\text{O}^{2-}$  การจัดเรียงตัวของไอออนลบเป็นแบบ Hexagonal close packing (HCP) โดยมีไอออนบวกครองอยู่ครึ่งหนึ่งของตำแหน่งเตตระฮีดรอล (Tetrahedral) ทั้งไอออนบวกและไอออนลบจะมีไอออนชนิดตรงข้ามล้อมรอบอยู่ 4 ไอออน ตัวอย่างสารประกอบที่มีโครงสร้างแบบเวอร์ทไซต์ คือ ZnO, ZnS, CdS และ BeO เป็นต้น โครงสร้างเวอร์ทไซต์มีค่าคงที่แลตทิซเป็น  $a = 0.32469$  และ  $c = 0.52069$  โครงสร้างของซิงค์ออกไซด์ประกอบด้วยระนาบของเตตระฮีดรอลที่เชื่อมระหว่าง  $\text{Zn}^{2+}$   $\text{O}^{2-}$  เรียงเป็นชั้น ๆ ตามแนวแกน c เตตระฮีดรอลที่ประกอบไปด้วย  $\text{Zn}^{2+}$   $\text{O}^{2-}$  ในโครงสร้างผลึกของซิงค์ออกไซด์นี้เป็นโครงสร้างแบบไม่สมมาตร จึงเหมาะกับการนำไปใช้งานด้านเพียโซอิเล็กทริกและไพโรอิเล็กทริก [26]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 โครงสร้างเวอร์ทไซต์ (Wurtzite) ของซิงค์ออกไซด์ และพิกัดเตตระฮีดรอลของ  $Zn^{2+}$   $O^{2-}$  [26]

### 3) การประยุกต์ใช้ซิงค์ออกไซด์

ซิงค์ออกไซด์เป็นวัสดุที่ได้รับความนิยม เนื่องจากมีสมบัติในช่วงกว้าง สามารถใช้วิธีเติมสารเจือปนเพื่อปรับโครงสร้างได้และโครงสร้างแถบพลังงานให้ได้สมบัติตามต้องการ สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆได้ ดังต่อไปนี้

ด้านไฟฟ้า ซิงค์ออกไซด์มีช่องว่างพลังงานโดยตรง (3.37 eV) มีค่ามวลยังผลพาหะ (Carrier effective mass) ของโฮลกับอิเล็กตรอน คือ  $0.59 m_0$  และ  $0.24 m_0$  ตามลำดับ การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน (Electron mobility) ที่ผลึกซิงค์ออกไซด์เชิงเดี่ยว ระหว่าง 100 ถึง 200  $cm^2/V$  และมีค่าสภาพคล่องของการเคลื่อนที่ของโฮล (Hole mobility) ประมาณ 180  $cm^2/V$  มีการนำไปประยุกต์การใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพในอุปกรณ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ เช่น ไดโอดเลเซอร์ และเซนเซอร์ ข้อดีคือมีช่องว่างระหว่างพลังงานขนาดใหญ่รวมถึงค่าของเบรกดาวนที่สูงสามารถลดสัญญาณรบกวนจากอุปกรณ์ไฟฟ้าได้ [24]

ด้านแสง ซิงค์ออกไซด์มีสมบัติทางแสงที่ดี เนื่องจากเป็นสารกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างพลังงานที่แสดงสมบัติเรืองแสงใกล้ช่วงอัลตราไวโอเล็ตและช่วงที่สามารถมองเห็นได้ มีสมบัติการดูดกลืนแสงหรือการเปล่งแสงในย่านความยาวคลื่นสั้น เนื่องจากมีช่องว่างแถบพลังงานที่กว้างจึงทำให้เปล่งแสงสีน้ำเงิน ซิงค์ออกไซด์จึงนิยมนำไปสร้างอุปกรณ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ เช่น ตัวเปล่งแสงย่านสีน้ำเงินและตัวตรวจวัดแสงย่านอัลตราไวโอเล็ต มีประโยชน์มากในการทำเลเซอร์พลังงานสูงหรือไปประยุกต์ใช้กับการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง โดยจะขึ้นอยู่กับวิธีการสังเคราะห์ของซิงค์ออกไซด์ที่มีผลต่อการเกิดข้อบกพร่องทางพื้นผิว [25]

ด้านเภสัชกรรม ซิงค์ออกไซด์เป็นสารที่สามารถเติมในอาหารได้และมีความปลอดภัยสูง สามารถใช้ได้ทั้งในอาหารคนและสัตว์ เนื่องจากซิงค์หรือสังกะสีเป็นธาตุที่มีความจำเป็นต่อร่างกาย เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า โดยปกติร่างกายผู้ใหญ่ต้องการสังกะสีวันละ 15 mg และจะเพิ่มขึ้นเป็น 25 mg ในสตรีที่ให้นมบุตร ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซิงค์ออกไซด์เป็นยาสมานแผล ลดการอักเสบและยับยั้งแบคทีเรียได้ดี โดยนำมาใช้เป็นยาสมานผิวและรักษาโรคติดเชื้อที่ผิวหนังบางชนิด เช่น โรคกลากเกลื้อนและโรคผิวหนังเป็นตุ่มพุพองจากแบคทีเรีย เป็นต้น ซึ่งเส้นผ่านศูนย์กลางของซิงค์ออกไซด์ที่ใช้จะอยู่ประมาณ 10-20 nm จากการสังเกตภายใต้กล้องกำลังขยายสูง พบว่ามีลักษณะเป็นผงอนุภาคละเอียด มีความบริสุทธิ์สูง มีสีขาวและไม่เปลี่ยนสี [27]

ด้านอุตสาหกรรมสี ซิงค์ออกไซด์เป็นสารป้องกันไฟฟ้าสถิตตัวใหม่ ซึ่งมีความสามารถเป็นสารกึ่งตัวนำ การเติมซิงค์ออกไซด์ในเรซินจะสามารถนำใช้ป้องกันไฟฟ้าสถิตได้ ทั้งสามารถผลิตสีป้องกันรังสี UV สีที่สามารถทำความสะอาดตัวเองได้ นอกจากนี้ปกติในอุตสาหกรรมเซรามิกจะใช้ซิงค์ออกไซด์ในการให้เป็นสีขาว จากการใช้นาโนซิงค์ออกไซด์พบว่าสามารถช่วยลดอุณหภูมิการเผาเซรามิกให้เหลือเพียง 400-600 °C โดยหลังการเผาพบว่าผิวของเซรามิกที่ได้มีความมันวาวราวกับกระจก [24]

ด้านอุตสาหกรรมสิ่งทอและอุตสาหกรรมเคมีอื่น ๆ ซิงค์ออกไซด์มีความสามารถในการช่วยระงับกลิ่นอันไม่พึงประสงค์ เนื่องจากสามารถทำปฏิกิริยากับสารที่เป็นกรดและเบสได้ โดยจะทำปฏิกิริยาอย่างรวดเร็วกับโมเลกุลของแอมโมเนียที่มาจากร่างกายหรือจากสิ่งแวดล้อม หรือทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของไทออล ซึ่งเป็นสาเหตุของกลิ่นเหม็น แล้วจะกลายเป็นซิงค์ซัลไฟด์ที่ไม่มีกลิ่นและช่วยป้องกันการหมักของโปรตีนที่เป็นสาเหตุของกลิ่นที่ไม่พึงประสงค์ ซึ่งซิงค์ออกไซด์ใช้ผลิตสิ่งทอเพื่อป้องกันแบคทีเรียและเชื้อรา ใช้กำจัดกลิ่นของเสื้อผ้า เสื้อผ้าทำความสะอาดตัวเอง ผลิตเส้นใยและสิ่งทอที่สามารถป้องกันรังสีอัลตราไวโอเล็ตได้ [27]

### 2.3.2 การสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์

ช่วงเวลาไม่กี่ปีที่ผ่านมา มีการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ให้มีโครงสร้างที่หลากหลาย เช่น แผงเส้นลวดนาโนที่มีความเป็นระเบียบ (Highly ordered arrays) แท่งนาโน (Nanorods) สปริงนาโน (Nanosprings) และวงแหวนนาโน (Nanorings) โครงสร้างเหล่านี้สามารถเลือกและควบคุมได้ด้วยการวิธีสังเคราะห์แบบต่างๆ

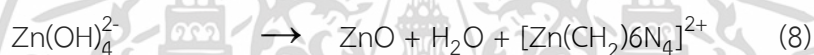
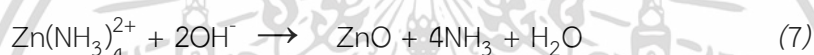
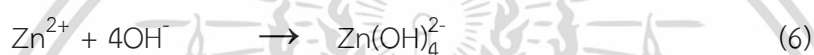
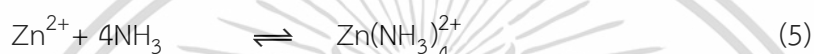
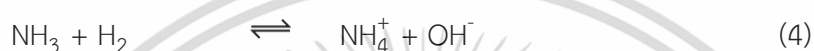
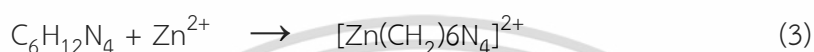
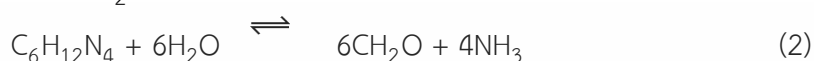
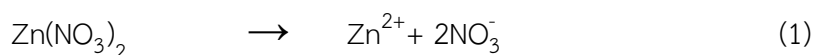
#### 1) การสังเคราะห์ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล

กระบวนการไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal process) เป็นกระบวนการสังเคราะห์ผลึกของวัสดุ เนื้อสารภายใต้การเกิดปฏิกิริยาของสารละลายในน้ำ ซึ่งการจะเกิดปฏิกิริยาเคมีได้นั้น กระบวนการดังกล่าวต้องเกิดขึ้นภายใต้ความดันและอุณหภูมิที่เหมาะสม จากนั้นจะเกิดการสร้างผลึกของวัสดุขึ้นมาซึ่งจะขึ้นอยู่กับสมบัติเฉพาะตัวหรือสมบัติทางโครงสร้างและพฤติกรรมของวัสดุเหล่านั้น โดยกระบวนการนี้จะดำเนินอย่างต่อเนื่องด้วยการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีของสารละลายภายใต้ภาวะปิด

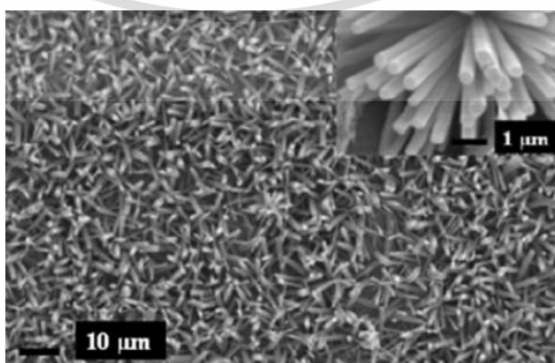
ที่อุณหภูมิและความดันสูงตามสภาวะการปลูกที่เหมาะสม ปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล ได้แก่ ความเข้มข้นของสารละลาย อุณหภูมิที่ใช้ในการปลูก เวลาในการปลูก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าความเป็นกรดเบสของสารละลาย เป็นต้น [23] และต่อมา Mustafa, M. K. และคณะ ได้ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารตั้งต้นต่อโครงสร้างและลักษณะทางสัณฐานวิทยาของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ลงบนผิวทองคำด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอล โดยใช้ซิงค์ไนเตรตเฮกซะไฮเดรต  $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$  และเฮกซะเมทิลลีนเตตระมีน ( $C_6H_{12}N_4$ ) ที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน เป็นสารตั้งต้น ซึ่งการฟอร์มตัวของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์เกิดจากปฏิกิริยาเคมีดังต่อไปนี้ [35]



โดยเริ่มแรกซิงค์ไนเตรตเฮกซะไฮเดรตและเฮกซะเมทิลลีนเตตระมีนจะแตกตัวเป็นซิงค์ไอออน ( $Zn^{2+}$ ), ฟอร์มัลดีไฮด์ ( $CH_2O$ ) และแอมโมเนีย ( $NH_3$ ) ดังสมการ (1) และ (2) ซึ่งแอมโมเนีย ( $NH_3$ ) แตกตัวให้ไฮดรอกซิลไอออน ( $OH^-$ ) ดังสมการที่ (4) และให้ไฮดรอกซิลไอออน ( $OH^-$ ) จะทำปฏิกิริยากับซิงค์ไอออน ( $Zn^{2+}$ ) ได้เป็น  $Zn(OH)_4^{2-}$  ตามสมการที่ (6) ในกระบวนการเติบโตของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ ความเข้มข้นของไฮดรอกซิลไอออน ( $OH^-$ ) เป็นปัจจัยหลัก ดังนั้นเฮกซะเมทิลลีนเตตระมีน ( $C_6H_{12}N_4$ ) ที่ให้ไฮดรอกซิลไอออน ( $OH^-$ ) จึงมีความสำคัญต่อการเติบโตของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ ซึ่งซิงค์ออกไซด์ที่ได้เกิดจากการเอาน้ำออกของ  $Zn(NH_3)_4^{2+}$  และ  $Zn(OH)_4^{2-}$  ดังสมการที่ (7) และ (8) [61]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
รูปที่ 2.7 แท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ปลูกบนกระจกใสด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอล [33]

### 2.3.3 สมบัติความไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic)

นักพฤกษศาสตร์ชื่อ Barthlott และ Neinhuis ศึกษาโครงสร้างใบพืชหลากหลายชนิดรวมถึงลักษณะทางกายภาพและทางเคมีที่เกี่ยวข้องกับพื้นผิวที่มีลักษณะมันเหมือนแว็กซ์ โดยเฉพาะในใบบัว ในปี ค.ศ.1970 Barthlott เริ่มทำการศึกษาพื้นผิวของใบบัวโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope) พบว่าพื้นผิวประกอบไปด้วยความขรุขระระดับไมโครเมตรเป็นปุ่มแท่งเล็กๆ (Micropapillar) โดยที่แท่งเหล่านี้ถูกปกคลุมด้วยโครงสร้างแตกกิ่งแบบละเอียดระดับนาโนเมตรโดยมีเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยประมาณ 125 nm ทำให้พื้นผิวมีลักษณะที่สังเกตด้วยตาเปล่าเหมือนแว็กซ์ และทำให้เกิดการค้นพบปรากฏการณ์ที่เรียกว่า Lotus effect หรือน้ำกลิ้งบนใบบัว เนื่องจากเกิดการไม่เกาะติดของน้ำที่ผิวใบและเกิดการกลิ้งของหยดน้ำไปตามใบ ซึ่งมุมสัมผัส (Contact angle) กับน้ำมีค่ามากกว่า  $150^\circ$  จะทำให้เกิดลักษณะที่เรียกว่า ความไม่ชอบน้ำยิ่งยวด (Super hydrophobic) และต่อมา Barthlott ได้คิดว่าถ้าพื้นผิวใดๆ สามารถสังเคราะห์ให้เกิดปรากฏการณ์น้ำกลิ้งบนใบบัวได้ จะสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับงานได้หลากหลาย [28]

#### 1) ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับสมบัติความไม่ชอบน้ำ

แนวคิดของ Young ได้อธิบายไว้ว่า เมื่อหยดของเหลวลงบนพื้นของแข็งเรียบและมีองค์ประกอบทางเคมีเป็นเนื้อเดียวกันตลอด มุมที่หยดของเหลวกระทำกับของแข็งจะเข้าสู่สมดุลด้วยมุมสัมผัสค่าหนึ่ง เรียกว่า มุมสัมผัสของยัง (Young Contact angle) เมื่อพิจารณาเส้นแนวรอยต่อระหว่างภูมิภาคของแข็ง ของเหลว และอากาศ ซึ่งมีแรงตึงผิว 3 ประเภท คือ แรงตึงผิวระหว่างของเหลวกับอากาศ, แรงตึงผิวระหว่างของเหลวกับของแข็ง และแรงตึงผิวระหว่างของแข็งกับอากาศ [29]

$$\cos \theta_0 = \frac{Y_{SV} - Y_{SL}}{Y_{LV}}$$

เมื่อ  $Y_{SV}$  คือ แรงตึงผิวระหว่างของแข็งกับอากาศ

$Y_{SL}$  คือ แรงตึงผิวระหว่างของแข็งกับของเหลว

$Y_{LV}$  คือ แรงตึงผิวระหว่างของเหลวกับอากาศ

เมื่ออยู่บนผิวของของแข็งมุมสัมผัส ที่มีค่าน้อยจะนำมาซึ่งหยดน้ำที่แบนราบและเกาะพื้นผิวของแข็ง หรือเรียกว่ามีการเปียกผิวที่ดี ในทางกลับกันมุมสัมผัสที่มีค่ามากจะส่งผลถึงพื้นผิวร่วระหว่างของเหลวกับของแข็งที่น้อยและการเปียกผิบบนพื้นผิวของแข็งที่ไม่ดี [28] ซึ่งสมการของ Young สามารถใช้ ได้เฉพาะกับพื้นผิวในอุดมคติ คือ พื้นผิวที่มีลักษณะเป็นพื้นผิวเฉื่อย ผิวราบ

ผิวเรียบ มีองค์ประกอบทางเคมีเป็นเนื้อเดียวกันตลอด ซึ่งพื้นผิวแบบนี้จะทำให้ค่ามุมสัมผัสเสถียรและมีเพียงค่าเดียว [29]

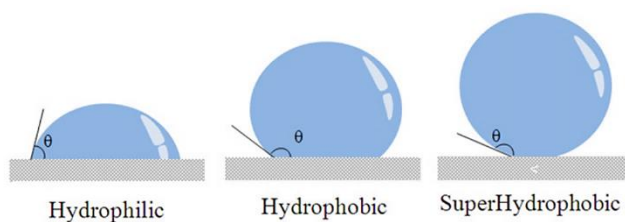
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แนวคิดของ Wenzel ได้อธิบายไว้ว่า หยดของเหลวจะแทรกซึมลงไปในพื้นที่ผิวขรุขระ พื้นผิวที่มีความขรุขระระดับไมโครเมตรหรือนาโนเมตร จะทำให้ค่ามุมสัมผัสระหว่างหยดของเหลวและพื้นผิวมีค่าเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้มุมสัมผัสของหยดของเหลวมีขนาดใหญ่ขึ้น [30]

แนวคิดของ Cassie-Baxter ได้อธิบายไว้ว่า หยดของเหลวที่อยู่บนพื้นผิวขรุขระจะไม่แทรกซึมลงไปร่องพื้นผิวขรุขระ แต่จะตั้งอยู่บนพื้นผิวที่มีความขรุขระ และมีอากาศเข้าไปแทรกตัวอยู่ในร่องของพื้นผิวที่ขรุขระแทน ดังนั้น พื้นผิวที่มีความขรุขระระดับไมโครเมตรหรือนาโนเมตร จะกักขังฟองอากาศเอาไว้ภายในเป็นจำนวนมาก หยดของเหลวจะตั้งอยู่บนพื้นผิวร่วมกันระหว่างอากาศและพื้นผิวขรุขระ ซึ่งทำให้พลังงานพื้นผิวรวมมีค่าลดลง ส่งผลให้มุมสัมผัสของหยดของเหลวมีค่าสูงขึ้น ดังนั้น แนวคิดของ Cassie-Baxter จึงให้ค่ามุมสัมผัสที่ใหญ่กว่าของ Wenzel และหยดของเหลวจะสัมผัสพื้นผิวได้น้อยกว่า เนื่องจากมีฟองอากาศเข้าไปอยู่แทนที่เป็นจำนวนมาก ซึ่งจะทำให้พื้นผิวเกิดสมบัติความไม่ชอบน้ำยิ่งยวด [30]

## 2) สมบัติความชอบน้ำและไม่ชอบน้ำโดยใช้นุมสัมผัส

เมื่อหยดน้ำอยู่บนพื้นผิวของของแข็งและไม่เกิดการแพร่ของหยดน้ำ ลักษณะของหยดน้ำคงรูปและทำมุม  $\theta$  กับพื้นผิวของของแข็งซึ่งเรียกว่ามุมสัมผัส (Contact angle : CA) มุมสัมผัสที่สมดุลจะเป็นตัววัดความสามารถในการเปียกของของแข็งโดยของเหลว เรียกว่า การโค้งงอของผิวของเหลว [24] เมื่อผิวของของเหลวกับพื้นผิวของของแข็งที่มีค่ามุมสัมผัสที่น้อย ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง  $10 - 90^\circ$  จะทำให้หยดน้ำแบนราบ มีการกระจายตัวของของเหลวเป็นบริเวณกว้างและเกิดการเกาะพื้นผิวของของแข็ง ทำให้บนพื้นผิวของของแข็งเปียก แสดงว่าเป็นพื้นผิวแบบชอบน้ำ (Hydrophilic) เป็นพื้นผิวที่มีขี้และมีการเกิดพันธะไฮโดรเจนกับน้ำ ทำให้เกิดการเปียกผิวที่ดี ในทางกลับกันมุมสัมผัสที่มีค่ามาก ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง  $90 - 150^\circ$  จะทำให้ของเหลวสัมผัสกับพื้นผิวเพียงเล็กน้อย ทำให้หยดน้ำเป็นทรงกลมและไม่เปียกบนพื้นผิวของแข็ง แสดงว่าเป็นพื้นผิวแบบไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) ซึ่งเป็นพื้นผิวที่ไม่มีขี้และเกิดการเปียกผิวที่แย่มากกว่า กล่าวคือเมื่อมุมสัมผัสมีค่าน้อยกว่า  $10^\circ$  จะเกิดสถานการณ์ที่เรียกว่า ความชอบน้ำยิ่งยวด (Super hydrophilic) หรือเมื่อมุมสัมผัสเข้าใกล้  $150^\circ$  จะเกิดสถานการณ์ที่เรียกว่า ความไม่ชอบน้ำยิ่งยวด (Super hydrophobic) [28]



รูปที่ 2.8 การกระจายตัวของหยดน้ำบนพื้นผิวชอบน้ำ พื้นผิวไม่ชอบน้ำและพื้นผิวไม่ชอบน้ำยิ่งยวด  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ ห้ามนำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ยกเว้นให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3) ซิงค์ออกไซด์กับสมบัติความไม่ชอบน้ำ

ซิงค์ออกไซด์ มีพื้นฐานวิทยาที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งานที่ต้องการสมบัติความไม่ชอบน้ำ เนื่องจากมีโครงสร้างผลึก ความหนาแน่นที่สามารถควบคุมได้ ความเข้ากันได้ และสามารถเปลี่ยนแปลงลักษณะพื้นผิวได้ โครงสร้างผลึกของซิงค์ออกไซด์ มีทิศทางการก่อตัวของผลึกอย่างรวดเร็วได้ในทุกระนาบ ทั้งระนาบ *c* ระนาบ *m* และระนาบ *a* เนื่องจากโครงสร้างพื้นผิวที่แตกต่างกัน ซึ่งสามารถทำการปรับเปลี่ยนโครงสร้างของซิงค์ออกไซด์ เพื่อให้ได้สมบัติความชอบน้ำหรือสมบัติความไม่ชอบน้ำตามต้องการได้ [32]

ตารางที่ 2.4 ค่ามุมสัมผัสน้ำของซิงค์ออกไซด์รูปแบบต่างๆ [32]

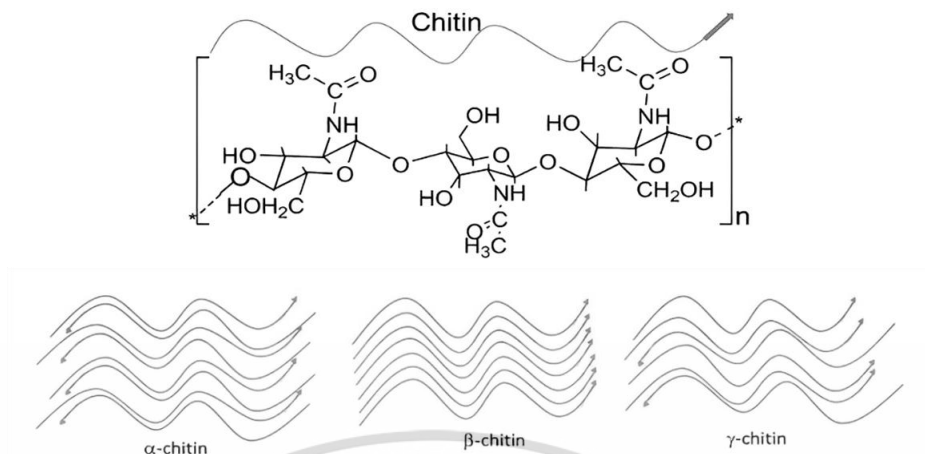
ZnO structure and surface		orientation	water CA, °
ZnO elongated nanograins	nonpolar	<i>m</i> -, <i>a</i> -plane coexisting ZnO	110.1
ZnO elongated nanograins	polar and nonpolar coexisting	<i>c</i> -, <i>m</i> -plane coexisting ZnO	105.49
ZnO elongated nanograins	polar	pure <i>c</i> -axis ZnO	113.66
ZnO nanorods	nonpolar	not specified	from 112 to 139.6
ZnO nanorods	polar	not specified	~0 (after daily measurements ~90)
ZnO nanoparticles	polar	<i>c</i> -axis: zinc-terminated [0001]-Zn	29 ± 2
ZnO nanoparticles	polar	<i>c</i> -axis: oxygen-terminated [0001]-O	33 ± 2
ZnO nanorods	polar	<i>c</i> -axis	74 (after enhanced roughness 131.2)
ZnO nanorods	polar	<i>c</i> -axis	9.6 ± 0.8

## 2.4 ไคตินและไคโตซาน (Chitin and Chitosan)

ไคติน เป็นพอลิแซ็กคาไรด์ที่พบมากที่สุดเป็นอันดับสองรองจากเซลลูโลส ถูกค้นพบครั้งแรกเมื่อปี ค.ศ.1811 โดยศาสตราจารย์ Braconnot ในเห็ด และในปี ค.ศ. 1823 ถูกเรียกว่า ไคติน (Chitin) ที่มาจากภาษากรีก แปลว่าเกาะหุ้ม [34] ไคติน ประกอบด้วย N-acetyl-D-glucosamine และ D-glucosamine เชื่อมด้วยพันธะ  $\beta$ -1,4-glycosidic ถ้ามีสัดส่วนปริมาณของ N-acetyl-D-glucosamine ที่มากกว่าพอลิเมอร์จะแสดงสมบัติเด่นของไคติน [6] ซึ่งสามารถพบได้ในเปลือกแข็งของสัตว์จำพวกปู กุ้ง และแกนหมึก

ไคตินมีโครงสร้างเป็นผลึกที่แข็งแรง เนื่องจากการเชื่อมกันระหว่างโมเลกุลด้วยพันธะไฮโดรเจนและมีการจัดเรียงตัวเป็นแผ่นซ้อนทับกัน โดยมีโครงสร้างทางกายภาพแตกต่างกัน 3 รูปแบบ คือ  $\alpha$ ,  $\beta$  และ  $\gamma$  รูปแบบ  $\alpha$  (แอลฟา) เป็นรูปแบบที่มีการจัดเรียงตัวของสายโซ่พอลิเมอร์แบบสลับ (Antiparallel) พันธะไฮโดรเจนที่มีการเชื่อมต่อบนนี้จึงมีความแข็งแรงมาก รูปแบบ  $\beta$  (เบต้า) เป็นรูปแบบที่มีการจัดเรียงตัวของสายโซ่พอลิเมอร์แบบทิศทางเดียวหรือขนาน (Parallel) มีพันธะไฮโดรเจนที่ไม่แข็งแรง รูปแบบ  $\gamma$  (แกมมา) เป็นรูปแบบที่เกิดการจัดเรียงตัวแบบ  $\alpha$  และ  $\beta$  ผสมกันแบบสลับกันไป [36]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 โครงสร้างการจัดเรียงตัวของไคติน 3 รูปแบบ [36]

ไคโตซาน เป็นพอลิอะมิโนแซคคาไรด์เชิงเส้น ประกอบด้วย D-glucosamine และ N-acetylglucosamine เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ  $\beta$ -1,4-glycosidic [37] หรือมีชื่อทางเคมีว่า Poly- $\beta$ (1,4)-2-amino-2-deoxy-D-glucose มีสูตรทั่วไปคือ  $(C_6H_{11}NO_4)_n$  โดยที่ n คือ จำนวนหน่วยซ้ำ (number of repeating unit) [38] มีลักษณะเป็นแผ่นสีขาวหรือสีครีม ไม่มีกลิ่น อาจอยู่ในรูปผงหรือเส้นใย สกัดได้จากแมลง ยีสต์ เห็ด ผนังของเซลล์เชื้อรา รวมทั้งเปลือกแข็งของสัตว์จำพวกปู กุ้ง และแกนหมึก [6]

ไคโตซาน เป็นอนุพันธ์หนึ่งของไคตินที่ได้จากปฏิกิริยาการกำจัดหมู่อะซิติล (Deacetylation) ของไคติน ทำให้โครงสร้างของไคตินเปลี่ยนแปลงจากหมู่อะซิติล (-NHCOCH<sub>3</sub>) เป็นหมู่อะมิโนหรือหมู่อะมิโน (-NH<sub>2</sub>) ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 2 จากการหายไปของหมู่อะซิติล ทำให้ไคโตซานเป็นโมเลกุลที่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยา เนื่องจากมีหมู่ฟังก์ชันที่สำคัญหลายหมู่ ได้แก่ หมู่อะมิโนหรือหมู่อะมิโน (-NH<sub>2</sub>) ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 2 และหมู่ไฮดรอกซิลที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 3 (Secondary alcohol, -CHOH) และ 6 (Primary alcohol, -CH<sub>2</sub>OH) [39] ซึ่งมีประโยชน์ในการใช้งานอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมต่างๆ [6] รวมทั้งมีการเข้ากันได้ทางชีวภาพ ย่อยสลายง่าย ไม่มีความเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมและสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม ราคาไม่แพง ทำให้มีการประยุกต์ใช้ประโยชน์ในหลาย ๆ ด้าน เช่น เป็นสารเติมแต่งในอุตสาหกรรมอาหาร สารให้ความชุ่มชื้นในเครื่องสำอาง เป็นสารต้านจุลชีพในยา [40] ใช้เป็นสารดูดซับสีย้อมดักคราบไขมันและกำจัดโลหะหนักจากโรงงานอุตสาหกรรมได้ [37] หรือเป็นสารเคลือบบรรจุภัณฑ์กระดาษสำหรับอาหาร [41]

#### 2.4.1 การผลิตไคตินและไคโตซาน

กระบวนการผลิตไคตินและไคโตซาน สามารถทำได้ทั้งวิธีทางเคมีและวิธีทางชีวภาพ แต่ทางชีวภาพโดยใช้เอนไซม์ในการดึงหมู่อะซิติลออกจากไคตินยังอยู่ในระดับห้องปฏิบัติการ

ส่วนทางอุตสาหกรรมจะนิยมใช้วิธีทางเคมีในการผลิต ซึ่งการผลิตโคตินมีขั้นตอนพื้นฐานอยู่ 3 ขั้นตอน โดยขั้นตอนที่ 1 กระบวนการแยกแร่ธาตุ (Demineralization) และขั้นตอนที่ 2 กระบวนการแยกโปรตีน (Deproteinization) โดยสามารถสลับขั้นที่ ตอน1 และ 2 ก่อนและหลังได้ ส่วนขั้นตอนที่ 3 คือ กระบวนการแยกเม็ดสี (Decoloration)

**1) กระบวนการแยกแร่ธาตุ (Demineralization)** การกำจัดแร่ธาตุโดยทั่วไปทำได้โดยการใช้กรด เช่น กรดไนตริก กรดซัลฟิวริก กรดแอสติก หรือกรดฟอร์มิก (มากกว่า 10%) กรดที่นิยมใช้กันทั่วไปคือกรดไฮโดรคลอริกที่มีความเข้มข้น 0.2–2 M ที่อุณหภูมิตั้ง 0-100 °C เป็นเวลา 1–48 ชั่วโมงและใช้เวลา 1-3 ชั่วโมง โดยการใช้กรดไฮโดรคลอริกเจือจาง (1-8%) [6] เพื่อไปละลายแคลเซียมคาร์บอเนตในวัตถุดิบให้เปลี่ยนเป็นเกลือแคลเซียมคลอไรด์ที่ละลายน้ำ และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งแสดงสมการได้ดังนี้



ของแข็งที่ได้สามารถแยกออกได้ด้วยการกรองหลังจากนั้นล้างของแข็งด้วยน้ำกลั่นจนกระทั่งมีพีเอชเป็นกลางนำไปทำให้แห้งด้วยเตาอบอุณหภูมิประมาณ 60 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ซึ่งการแยกแร่ธาตุในแต่ละครั้งอาจมีการใช้อุณหภูมิ ความเข้มข้นของกรด และเวลาที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบตั้งต้น การใช้อุณหภูมิ ความเข้มข้นของกรด และเวลาที่มากเกินไปจะส่งผลต่อสมบัติของโคตินได้ [42]

**2) กระบวนการแยกโปรตีน (Deproteinization)** โปรตีนจะถูกแยกออกหลังจากการแยกแร่ธาตุด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์หรือโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิ 65-100 °C อัตราส่วนของวัตถุดิบ (เปลือกหอย) ต่อเบสอยู่ที่ 1:4 เป็นระยะเวลาตั้งแต่ 1-12 ชั่วโมงและจะมีการปั่นกววนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการลดโปรตีน หลังจากนั้นโปรตีนจะถูกกำจัดออกด้วยการแยกของแข็งออกจากสารละลายโดยการกรอง [6] จากนั้นล้างของแข็งด้วยน้ำกลั่นจนกระทั่งมีพีเอชเป็นกลางนำไปทำให้แห้งด้วยการอบที่อุณหภูมิประมาณ 60 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมงเช่นเดียวกับการแยกแร่ธาตุ ซึ่งในระหว่างกระบวนการแยกจะเกิดการแตกพันธะของโคตินและโปรตีน สภาวะของการแยกโปรตีนขึ้นอยู่กับชนิดและแหล่งที่มาของวัตถุดิบ กระบวนการนี้จะทำให้เกิดปฏิกิริยาการกำจัดหมู่อะซีทิล (Deacetylation) ของโคตินและดีพอลิเมอร์ไรเซชัน (Depolymerization) ซึ่งทำให้มีน้ำหนักโมเลกุลลดลง [42]

**3) กระบวนการแยกเม็ดสี (Decoloration)** หรือการฟอกสีโคตินให้ได้สีขาวครีม เพื่อให้เป็นที่ยอมรับในเชิงพาณิชย์ สามารถสกัดได้โดยการใช้ตัวออกซิไดซ์ เช่น ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ หรือโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต หรือสกัดด้วยการใช้ตัวทำละลายอะซิโตน เอทานอล และคลอโรฟอร์ม จากนั้นล้างของแข็งด้วยน้ำจนกระทั่งมีค่าพีเอชเป็นกลางและนำไปทำให้แห้ง [43]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสกัดไคโตซาน ไคโตซาน เกิดจากปฏิกิริยาการกำจัดหมู่อะซีทิล (Deacetylation) ของไคตินทำให้ N-acetyl-D-glucosamine ถูกเปลี่ยนเป็น D-glucosamine ซึ่งเป็นการเพิ่มขึ้น หมู่อะมิโนหรือหมู่เอมีน (-NH<sub>2</sub>) ที่มีความสามารถในการรับโปรตอนจากสารละลาย และทำให้ ความสามารถในการละลายดีขึ้นเพราะมีสมบัติประจุบวก สามารถทำการสกัดได้โดยใช้สารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์หรือโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น (40-60% ) ที่อุณหภูมิ 80–140 °C เป็น เวลา 30 นาทีหรือนานกว่านั้น โดยใช้อัตราส่วนของแข็งต่อตัวทำละลาย 1:10 %w/v [6]

## 2.4.2 สมบัติทางเคมีกายภาพของไคโตซาน

### 1) ระดับการกำจัดหมู่อะซีทิล (Degree of deacetylation, %DD)

เป็นสมบัติที่บ่งบอกความเป็นไคโตซานและไคติน เนื่องจากไคโตซานและไคตินเป็นพอลิเมอร์ร่วม ระหว่าง N-acetyl-D-glucosamine และ D-glucosamine หากมีปริมาณสัดส่วนของ D-glucosamine ที่ มากกว่า N-acetyl-D-glucosamine แสดงว่ามีระดับการกำจัดหมู่อะซีทิลสูงหรือมีระดับการกำจัดหมู่ อะซีทิลมากกว่า 50% ขึ้นไป [44] พอลิเมอร์นั้นจะแสดงสมบัติเด่นของไคโตซาน [39] สำหรับการหา ระดับการกำจัดหมู่อะซีทิล สามารถหาได้จากหลายวิธี เช่น สเปกโทรสโกปี (อินฟรา อัลตราไวโอเลต) การไทเทรต การวัดค่าการนำไฟฟ้า การวัดศักย์ไฟฟ้า และการทำโครมาโทกราฟี [6]

### 2) น้ำหนักโมเลกุล (Molecular weight)

น้ำหนักโมเลกุลเป็นสมบัติที่สำคัญที่บ่งบอกสมบัติทั้งทางเคมี และทางกายภาพของ ไคโตซาน โดยน้ำหนักโมเลกุลขึ้นกับปริมาณการกำจัดหมู่อะซีทิล (Deacetylation) ของไคติน ในขั้นตอนการผลิต ซึ่งสามารถหาได้หลายวิธี เช่น โครมาโทกราฟี การกระเจิงของแสง และ การวัดความหนืดซึ่งเป็นวิธีที่ง่ายที่สุดและนิยมที่สุดในการหาน้ำหนักโมเลกุล โดยทั่วไปไคโตรซาน ในธรรมชาติจะมีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ที่  $5 \times 10^4 - 2 \times 10^6$  Da ส่วนที่มีจำหน่ายโดยทั่วไปมีน้ำหนักโมเลกุล อยู่ที่  $1 \times 10^4 - 1 \times 10^6$  Da [6]

### 3) ความสามารถในการละลาย (Solubility)

ไคโตซานมีความเป็นเบสอ่อน ไม่ละลายในน้ำ สารละลายต่างและตัวทำละลายอินทรีย์ แต่ไคโตซานสามารถทำละลายได้ในสารละลายที่เป็นกรดอินทรีย์ที่มีค่าพีเอชน้อยกว่า 6 โดย ตัวทำละลายที่นิยมใช้ คือ 1% กรดแอสติกที่มีค่าพีเอชประมาณ 4.0 และกรดฟอร์มิก ส่วนกรดอินทรีย์ บางชนิด เช่น 1% กรดไฮโดรคลอริก และกรดไนตริกเจือจาง [34] ไม่สามารถละลายได้ใน กรดซัลฟิวริกและกรดฟอสริก แต่สามารถละลายได้ภายใต้การปั่นกววนและมีการให้ความร้อน [39] โดยหมู่อะมิโนหรือหมู่เอมีน (-NH<sub>2</sub>) จะถูกโปรโทเนต (Protonated) กลายเป็นประจุบวก (NH<sub>3</sub><sup>+</sup>) ซึ่ง ช่วยให้การละลายดีขึ้น นอกจากนั้นความสามารถในการละลายของไคโตซานยังขึ้นอยู่กับปริมาณการ กำจัดหมู่อะซีทิล (Deacetylation) ปริมาณการกำจัดหมู่อะซีทิลที่มาก แสดงถึงความสามารถใน

การละลายที่สูงขึ้น เนื่องจากการเกิดพันธะไฮโดรเจนที่น้อยลงความแข็งแรงของพันธะจึงน้อยลงด้วย ทำให้สามารถละลายน้ำได้มากขึ้น [6] ดังนั้นการละลายของโคโตซานจึงขึ้นอยู่กับปริมาณการกำจัด หมูอะซีติล ค่าพีเอชและอุณหภูมิ

#### 4) ความหนืด (Viscosity)

สารละลายโคโตซานเป็นสารละลายหนืดที่มีความเหนียวใส มีพฤติกรรมเป็นของไหลแบบ นอนนิวตันเนียน (Non-Newtonian fluid) [39] ความหนืดของสารละลายโคโตซานขึ้นอยู่กับปัจจัย หลายอย่าง เช่น ระดับการกำจัดหมูอะซีติล (%DD) น้ำหนักโมเลกุล อุณหภูมิ และค่าพีเอช โดยทั่วไป เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้ความหนืดของโคโตซานลดลง ส่วนชนิดของกรดที่ใช้ในการละลายรวมไป ถึงการเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอช ส่งผลให้ความหนืดของสารละลายโคโตซานแตกต่างกันไป เช่น เมื่อ ค่าพีเอชของสารละลายกรดแอสิติกลดลงความหนืดของโคโตซานที่ละลายในสารละลายนั้นจะมีค่า เพิ่มขึ้น ในขณะที่เมื่อค่าพีเอชของสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเพิ่มขึ้นความหนืดของโคโตซาน ที่ละลายในสารละลายก็จะเพิ่มขึ้นด้วย [38]

#### 5) การจับตัว (Coagulating ability)

โคโตซานเป็นตัวสร้างตะกอนและตัวตะกอน (Coagulating agent and flocculant) ที่ดี เนื่องจากมีปริมาณของหมู่อะมิโนหรือหมู่อะมิโน (-NH<sub>2</sub>) ที่หนาแน่นและแตกตัวกลายเป็นประจุบวก (NH<sub>3</sub><sup>+</sup>) ทำให้มีความสามารถในการดักจับสารที่มีประจุลบได้ เช่น โปรตีน สีย้อม หรือพอลิเมอร์อื่นๆ นอกจากนี้ยังสามารถจับกับโลหะหนักได้ โดยไนโตรเจนในหมู่อะมิโนของโคโตซานจะทำหน้าที่เป็น ตัวให้อิเล็กตรอน (Electron donor) เพื่อสร้างพันธะเชิงซ้อนกับไอออนของโลหะ หมู่อะมิโน มีประสิทธิภาพในการจับกับไอออนของโลหะได้ดีกว่าหมู่อะซีติลในโคติน ดังนั้นโคโตซานที่มีระดับ การกำจัดหมู่อะซีติลสูงๆ จะมีความสามารถในการจับไอออนของโลหะสูงด้วย [7]

### 2.4.3 การใช้ประโยชน์จากโคโตซาน

โคโตซาน เป็นพอลิเมอร์จากธรรมชาติที่ย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ มีความปลอดภัย ไม่เป็น พิษต่อผู้ใช้งาน นอกจากนี้ยังมีสมบัติที่โดดเด่นเฉพาะตัว ทำให้มีการประยุกต์ใช้ประโยชน์ในด้าน ต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

#### 1) ด้านอุตสาหกรรมการผลิตกระดาษ

Muzzarelli พบว่า การปรับปรุงสมบัติของกระดาษด้วยการเติม 1% ของสารละลาย โคโตซานลงในเยื่อกระดาษจะช่วยเพิ่มความแข็งแรงและความทนทานของกระดาษ โดยไม่ทำให้ ความสว่างของกระดาษลดลง จากการพัฒนาเทคโนโลยีแบบใหม่ เช่น กระดาษคัดลอกสี จึงทำให้ ต้องใช้กระดาษและเส้นใยประเภทต่างๆเพื่อให้ได้คุณภาพที่ดีขึ้น ในอุตสาหกรรมเส้นใยจึงมีการบำบัด เส้นใยด้วย 0.5% ของสารละลายโคโตซานในการช่วยปรับปรุงความคงทนของสีของเส้นใยเพื่อให้

กระดาษที่ได้มีคุณภาพที่ดีขึ้น นอกจากนั้น Aizawa and Noda ยังพบว่า การวางชั้นโคโตซานบนกระดาษภาพถ่ายช่วยเพิ่มสมบัติป้องกันไฟฟ้าสถิตย์ เนื่องจากการคายประจุอาจจะทำให้คุณภาพของภาพลดลงอย่างมาก [7] นอกจากนั้นยังใช้โคโตซานเพื่อกำจัดลิกนิน สี และสิ่งปนเปื้อนต่าง ๆ ที่ไม่ต้องการที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิต [45]

จากงานวิจัยของ Zakaria และคณะ พบว่ากระดาษที่เคลือบด้วยโคโตซานมีสมบัติเชิงกลหรือความแข็งแรงของกระดาษเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับกระดาษที่ไม่เคลือบ นอกจากนี้เมื่อนำกระดาษไปบำบัดด้วยกรดแอสติค จะส่งผลทำให้โคโตซานมีฤทธิ์ต้านแบคทีเรียได้ทั้งแกรมลบ (*E. coli*) และแกรมบวก (*Lactobacillus sp.*) [46]

## 2) ด้านอุตสาหกรรมอาหาร

โคโตซานใช้เป็นสารเติมแต่งในอาหารประเภทเนื้อสัตว์เพื่อควบคุมการสูญเสียรสชาติ ควบคุมการเติบโตของจุลินทรีย์ การยับยั้งการเกิดออกซิเดชันหรือการเสื่อมสภาพเนื่องจากฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ เพื่อยืดอายุการเก็บรักษาอาหารให้ยาวนานขึ้น นิยมใช้ทำเป็นฟิล์มเคลือบอาหารแช่แข็งที่ต้องนำมาอุ่นก่อนรับประทาน และมีรายงานว่ามีการใช้ฟิล์ม Chitosan-lysozyme (CL) เพื่อป้องกันการเจริญเติบโตของเชื้อ *Listeria monocytogenes*, *Escherichia coli*, หรือ *Pseudomonas fluorescens* ในมอสซาเรลล่าชีส [6]

การใช้โคโตซานสำหรับการถนอมอาหาร โคโตซานเป็นฟิล์มที่เหนียว มีความยืดหยุ่นสามารถใช้เป็นฟิล์มห่ออาหารที่สามารถรับประทานได้ เพื่อป้องกันความชื้นและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ซึมผ่านเข้าออกจากผิวของอาหาร ป้องกันการสูญเสียน้ำหรือกลิ่นของอาหารที่เป็นสารระเหยง่าย ทำให้อาหารคงความสด มีลักษณะและรสชาติคงเดิม นอกจากนั้นยังมีสมบัติยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ที่อาจก่อให้เกิดอันตรายแก่ผู้รับประทานอีกด้วย

การใช้โคโตซานเป็นอาหารเสริมเพื่อลดคอเลสเตอรอลและช่วยในการควบคุมน้ำหนัก เนื่องจากโคโตซานมีสมบัติเป็นสารประจุบวก ซึ่งมีความสามารถดูดสารที่เป็นประจุลบจำพวกไขมันได้

การใช้โคโตซานสำหรับขจัดสีย้อมในน้ำผลไม้ เช่น น้ำส้ม เนื่องจากโคโตซานมีความสามารถในการคีเลต (Chelating) สูงหรือจับตัวเป็นก้อนได้ดี ทำให้เกิดเป็นของแข็งและกำจัดออกได้ง่าย [7]

## 3) ด้านการบำบัดน้ำ

เนื่องจากโคโตซานมีสมบัติในการคีเลต (Chelating) สูงจึงสามารถจับกับไอออนของโลหะของ สารประกอบฟีนอล สีย้อมและสารกัมมันตภาพรังสี ซึ่งก่อให้เกิดมลพิษทางน้ำที่เกิดจากการปล่อยลงสู่สิ่งแวดล้อมผ่านทางอุตสาหกรรมต่าง ๆ โคโตซานมีประสิทธิภาพในการใช้เป็น

สารตกตะกอนชีวภาพ ในการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมอาหาร สามารถลดความขุ่น ปริมาณเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ต่กอนแขวนลอย รวมทั้งค่า BOD และ COD ลงได้ ทำให้น้ำมีคุณภาพที่ดีขึ้น [47] การใช้โคโตซานไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีเม็ดที่แตกและต้องอย่างองลงเงาของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำใบใช้

ในการบำบัดน้ำ เพื่อกำจัดตะกั่ว ทองแดง และแคดเมียมจากน้ำดื่มเนื่องจากการสร้างพันธะเชิงซ้อนระหว่างหมู่อะมิโนกับโลหะหนัก [6]

#### 4) ด้านอุตสาหกรรมยาและใช้เพื่อทางการแพทย์

ไคโตซานมีสมบัติด้านเชื้อจุลินทรีย์โดยหมู่อะมิโนหรือหมู่เอมีน ( $-NH_2$ ) เมื่อถูกโปรตอนเตต (Protonated) จะกลายเป็นประจุบวก ( $NH_3^+$ ) ขณะเกิดการโปรตอนเตตจะเกิดแรงทางไฟฟ้าระหว่างผนังเซลล์จุลินทรีย์กับพอลิแคตไอออนิก ไคโตซาน (Polycationic Chitosan) เกิดอันตรกิริยากับผนังจุลินทรีย์ที่มีสภาพเป็นประจุลบจนทำให้ผนังเซลล์เสียสภาพ เกิดการรั่วไหลของสารภายในเซลล์และสูญเสียโปรตีนและไม่สามารถสร้างโปรตีนขึ้นใหม่ได้จนทำให้เซลล์ตายในที่สุด [48]

ไคโตซานใช้เป็นสารเพื่อควบคุมการปลดปล่อยและนำส่งยาไปยังเป้าหมาย เนื่องจากไคโตซานไม่ละลายน้ำจึงเป็นพอลิเมอร์ที่ใช้ห่อหุ้มสารหรือตัวยาที่ละลายน้ำให้ไปถึงยังเป้าหมายเพื่อการนำส่งยาอย่างมีประสิทธิภาพจะใช้ไคโตซานในรูปแบบของไมโครสเฟียร์หรือไมโครพาร์ทิเคิลภายในจะบรรจุสารจำพวกแอนติบอดี สารลดความดันโลหิต สารต้านมะเร็ง และวัคซีน [6]

ไคโตซานเป็นสารสมานแผล เนื่องจากไคโตซานมีสมบัติยับยั้งแบคทีเรียและเชื้อราและเป็นสารธรรมชาติที่มีความเข้ากันได้กับเนื้อเยื่อและเซลล์ของร่างกาย ใช้ในวัสดุทดแทนกระดูกเป็นสารป้องกันการจับตัวเป็นก้อนของเลือด (Blood Anticoagulant) และสารห้ามเลือด (Hemostatic) จึงนิยมใช้เป็นวัสดุปิดบาดแผลเพื่อห้ามเลือด ป้องกันการติดเชื้อและกระตุ้นการสร้างเซลล์ใหม่จึงทำให้แผลหายได้เร็วขึ้น แต่ออนุพันธ์บางชนิด เช่น ซัลเฟตไคโตซาน (Sulfated chitosan) จะเป็นสารต้านการแข็งตัวของเลือด ซึ่งใช้สำหรับการทำเส้นเลือดเทียมเพื่อต้านการเกิดลิ่มเลือด [7]

#### 5) ด้านอุตสาหกรรมเส้นใยและสิ่งทอ

ไคโตซานสามารถนำไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ได้หลากหลาย เช่น ผ้าปิดแผลไหมละลาย ผ่านอนุพวน ซึ่งในกระบวนการขึ้นรูปต้องมีการละลายด้วยตัวทำละลายที่เหมาะสมแล้วปั่นเส้นใยผ่านหัวรีดรูเล็ก ๆ หรือ Spinneret ลงในอ่างสารเคมีที่ทำให้เกิดการแข็งตัว (Coagulation bath) จะเรียกกระบวนการนี้ว่า การปั่นเส้นใยแบบเปียก (Wet spinning) ซึ่งการผลิตเส้นใยมีหลายลักษณะด้วยกัน เช่น การผลิตเส้นใยจากไคโตซานโดยตรง การผลิตโดยปั่นเป็นเส้นใยร่วมกับพอลิเมอร์ชนิดอื่นๆ [47]

### 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Siriphannon P. และ Monvisade P. (2009) [54] ได้ทำการศึกษาการเตรียมมอนต์มอริลโลไนต์ที่มีการแทรกสอดด้วยไคโตซาน (Chi-MMT) และนำมาประยุกต์ใช้ในการดูดซับสีย้อมประจุบวกในการสังเคราะห์เริ่มจากการละลายไคโตซาน 4 g ในกรดแอสติกเข้มข้น 2 %v/v แล้วปรับค่าพีเอชด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ ให้มีค่าเป็น 4.9 และทำการเตรียมสารแขวนลอยโซเดียมมอนต์มอริลโลไนต์ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Na<sup>+</sup>- MMT) ซึ่งได้จากการนำ Na<sup>+</sup>-MMT 2.5 g ใส่ลงในน้ำกลั่น ปริมาตร 100 mL ทำให้กระจายตัวด้วยอ่างอัลตราโซนิก (Ultrasonic bath) เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นนำสารละลายโคโตซานที่เตรียมได้หยดลงในสารแขวนลอย Na<sup>+</sup>-MMT ด้วย Peristaltic pump โดยใช้อัตราการไหล 50 mL/h ภายใต้การปั่นกวน ที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อให้เกิด Chi-MMT จากนั้นทำการล้างด้วยน้ำกลั่นเพื่อทำให้ค่าพีเอชเป็นกลางและนำไปหมุนเหวี่ยงเพื่อแยกตะกอนที่ 3500 rpm เป็นเวลา 10 นาที ทำให้แห้งที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง เมื่อนำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD พบว่า Na<sup>+</sup>-MMT มีระยะห่างที่ตำแหน่ง  $d_{001}$  1.23 nm และ Chi-MMT มีระยะห่างที่ตำแหน่ง  $d_{001}$  1.36 และ 2.25 nm แสดงว่ามีโคโตซานแทรกสอดอยู่ภายใน Na<sup>+</sup>- MMT และเมื่อนำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRF พบว่า Na<sup>+</sup>-MMT อัตราส่วนโดยโมลของ Na/Al มีค่าเท่ากับ 0.23 แต่ Chi-MMT ไม่พบ Na<sup>+</sup> เนื่องจากเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่าง Na<sup>+</sup> ของ MMT กับโมเลกุลของโคโตซานที่มีประจุบวก เมื่อ Chi-MMT ไปทดสอบการดูดซับสีย้อมประจุบวก 3 ชนิด ได้แก่ Basic blue 9 (BB9) Basic blue 66 (BB66) และ Basic yellow 1 (BY1) พบว่า ความสามารถในการดูดซับสีย้อมของ Chi-MMT อยู่ในช่วง 46-49 mg/g เมื่อใช้ความเข้มข้นของสีย้อมเริ่มต้นคือ 500 mg/L ซึ่งเทียบเท่า 92-99 %wt ของการกำจัดสีย้อม จากการศึกษาข้างานวิจัยนี้ แสดงให้เห็นว่าความสามารถในการดูดซับสีย้อมของ Chi-MMT เพิ่มขึ้นเป็นผลมาจากโคโตซานเข้าไป Intercalated ทำให้โครงสร้างรูพรุนของ Na<sup>+</sup>- MMT เกิดการขยายตัว จึงสามารถดูดซับสีย้อมได้เพิ่มมากขึ้น

Siriphannon P. และ Tepmatee P. (2013) [56] ได้ทำการศึกษาการเตรียมมอนต์มอริลโลไนต์อะลูมิเนียมฟิลลาร์ (Alpill-MMTs) ด้วยวิธีที่แตกต่างกัน คือ การทำให้เกิดการแทรกสอด (Intercalation) ด้วยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออนแบบธรรมดาและใช้อัลตราโซนิกช่วยให้เกิด Intercalation เพื่อศึกษาผลของวิธีการเตรียมที่มีต่อโครงสร้างและความสามารถในการดูดซับเริ่มจากการเตรียมสารละลาย  $[AlO_4Al_{12}(OH)_{24}(OH_2)_{12}]_7^+$ ,  $Al_{137}^+$  ผสมเข้ากับสารแขวนลอยโซเดียมมอนต์มอริลโลไนต์ (Na<sup>+</sup>-MMT) เป็นเวลา 24 ชั่วโมงด้วยการปั่นกวนอย่างแรง ส่งผลให้เกิดการแลกเปลี่ยนไอออนบวกระหว่าง  $Al_{137}^+$  และ Na<sup>+</sup> และเกิดการสมดุลในชั้นของ MMT สำหรับวิธีการใช้อัลตราโซนิกกำลังสูงเข้ามาช่วยเกิด Intercalation จะผสมสารละลายข้างต้นแล้วทำการผสมโดยใช้อัลตราโซนิกเป็นเวลา 20 นาที ซึ่งในวิธีการนี้ไม่เพียงแต่จะใช้เวลาในการ Intercalation สั้นลงแต่ยังเพิ่มปริมาณของ  $Al_{137}^+$  ใน MMT และทำให้โครงสร้าง Alpill-MMTs มีรูพรุนหลายขนาดตั้งแต่ 3 ถึง 30 nm ดังนั้น Alpill-MMTs ที่เตรียมได้ จึงมีความเฉพาะเจาะจง มีโครงสร้างที่มีรูพรุน และมีพื้นที่ผิวมากกว่า Alpill-MMTs ที่เตรียมด้วยวิธีธรรมดาหรือที่ได้จากการปั่นกวน และมีความสามารถในการดูดซับสีย้อมสูงสุด 95% โดยน้ำหนัก ผลลัพธ์เหล่านี้บ่งชี้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อาจลดทอนให้มาใช้ในเชิงพาณิชย์ด้านการค้า  
 หมายความว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Mohammed H.(2015) [57] ได้ทำการศึกษาการเตรียมวัสดุไฮบริดซิงค์ออกไซด์ (ZnO) กับมอนต์มอริลโลไนต์ (MMT) ที่สังเคราะห์ได้จากการผสม MMT 15 g ลงในสารละลายซิงค์คลอไรด์อิมตัว 100 mL พร้อมด้วยการปั่นกวนอย่างต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อให้ Zn<sup>2+</sup> แทรกสอดอยู่ภายในชั้นโครงสร้างของ MMT จากนั้นแยกผลิตภัณฑ์ด้วยการหมุนเหวี่ยงและล้างด้วยน้ำปราศจากไอออนจำนวนหลายครั้ง ทำให้แห้งที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำไปเผาที่อุณหภูมิ 900 °C เพื่อให้ Zn<sup>2+</sup> ที่แทรกสอดแทรกอยู่ภายใน MMT เปลี่ยนเป็น ZnO จากการวิเคราะห์ด้วย XRD และ FT-IR พบว่าโครงสร้างมีการก่อตัวของ ZnO เกิดขึ้นและจากภาพ SEM จะพบว่า ZnO ที่เกิดขึ้นมีโครงสร้างผลึกเป็นรูปดอกไม้ที่สมบูรณ์

Al-Naamani L. และคณะ (2016) [58] ได้ทำการศึกษาสมบัติของสารเคลือบวัสดุประกอบระหว่างไคโตซาน-อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์บนฟิล์มพอลิเอทิลีน (PE) เพื่อใช้สำหรับบรรจุภัณฑ์อาหาร สามารถเตรียมสารเคลือบวัสดุประกอบได้โดยการนำนาโนซิงค์ออกไซด์ 0.1% ผสมกับสารละลายไคโตซาน 2% ที่เตรียมได้จากละลายไคโตซาน 2 g ในสารละลายแอสติค 0.5% เคลือบลงบนฟิล์ม PE ที่ผ่านการปรับปรุงสภาพพื้นผิวด้วยเครื่องพลาสมาให้มีสมบัติที่ชอบน้ำมากขึ้น เพื่อให้เกิดการยึดเกาะกับไคโตซานได้ดีขึ้น จากภาพ SEM พบว่าสารเคลือบวัสดุประกอบมีการกระจายตัวที่สม่ำเสมอบนฟิล์ม PE การรวมตัวของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์และไคโตซานทำให้ความสามารถในการละลายเพิ่มขึ้น 42% และการบวมตัวลดลง 80% ในขณะที่มุมสัมผัสน้ำมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 60° เป็น 95° เมื่อเทียบกับการเคลือบฟิล์ม PE เพียงไคโตซานเท่านั้น นอกจากนี้ยังสามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียแกรมลบ 2 ชนิด ได้แก่ *S. enterica* และ *E. coli* และแบคทีเรียแกรมบวก ได้แก่ *S. aureus* ได้

Yi J. และ Shanhui W. (2017) [51] ได้ทำการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อสมบัติการก่อดัวและการกั้นการซึมผ่านของฟิล์มนาโนวัสดุประกอบระหว่างมอนต์มอริลโลไนต์ (MMT) และไคโตซาน (CS) ที่เคลือบบนกระดาษคราฟท์ โดยเริ่มการเตรียมสารละลายไคโตซาน 200 g เพื่อเตรียมสารละลายไคโตซานเข้มข้น 1.5 %wt ในกรดแอสติค 1:0.5 จากนั้นทำการเติม MMT ในปริมาณที่ต่างกัน คือ 2% 5% และ 3% โดยน้ำหนักเทียบกับไคโตซาน จากการศึกษาปัจจัยแรก พบว่าฟิล์ม MMT/CS มีรูปแบบการก่อดัวของฟิล์มบนกระดาษที่ต่ำกว่าการเคลือบด้วยฟิล์ม CS คือทำให้กระดาษมีความเรียบและการยึดตัวที่น้อยกว่า โดยการเติมที่ 2% 5% และ 3% จะมีความเรียบอยู่ที่ 28.5 26.5 และ 23.0s ตามลำดับและมีค่าการยึดตัวของกระดาษอยู่ที่ 1.81% 1.78% และ 1.73% ตามลำดับ ในขณะที่ฟิล์ม CS มีค่าความเรียบและการยึดตัวอยู่ที่ 29.0s และ 1.83% ตามลำดับ จะเห็นได้ว่า

ปริมาณของ MMT ที่มากขึ้นส่งผลให้ความเรียบและการยึดตัวของกระดาษลดลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับฟิล์ม CS แต่มีสมบัติในการกั้นการซึมผ่านของไอน้ำที่ดีกว่า เนื่องจาก MMT มีโครงสร้างเป็นชั้นๆ ซึ่งมี

พื้นที่ผิวสูง และการเติมในปริมาณที่น้อยจะมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในโคโตะซาน ทำให้ไอน้ำสามารถซึมผ่านไปได้ง่ายขึ้น แต่การเติมในปริมาณที่มากเกินไปจะเกิดการกระจายตัวที่ไม่ดี ส่งผลให้ความเรียบของกระดาษ การยึดตัวของกระดาษและสมบัติการกั้นการซึมผ่านลดลง ปัจจัยถัดมาเป็นการศึกษาความเร็วที่ใช้ในการผสม โดยใช้ความเร็วที่ต่างกัน คือ 1200 1500 และ 1800 rpm พบว่าการใช้ความเร็วที่เพิ่มขึ้นทำให้ MMT เกิดการกระจายตัวได้ดี มีค่าความเรียบสูงขึ้น คือ 24.0 26.5 และ 30.0s ตามลำดับและค่าการยึดตัวของกระดาษอยู่ที่ 1.76% 1.78% และ 1.85% ตามลำดับ และจากการศึกษาปัจจัยสุดท้าย คือ การเติมโซเดียมพอลิอะคริเลต (Sodium polyacrylate) หรือสารช่วยเพิ่มการกระจายตัวในปริมาณที่ต่างกัน คือ 0.5 และ 0.9 %wt โดยน้ำหนักเทียบกับ MMT พบว่าการเติมสารช่วยเพิ่มการกระจายในปริมาณที่มากขึ้น ส่งผลให้ MMT เกิดการกระจายตัวได้ดีขึ้น โดยมีค่าความเรียบอยู่ที่ 26.5 27.0 และ 28.5 ตามลำดับ และมีค่าการยึดตัวของกระดาษอยู่ที่ 1.78% 1.80% และ 1.84% ตามลำดับ จากการศึกษาในครั้งนี้สามารถสรุปได้ว่า การเติมปริมาณ MMT ที่ต่ำและเพิ่มความเร็วในการผสม รวมไปถึงใช้สารช่วยเพิ่มการกระจายตัวที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ฟิล์มเกิดการก่อตัวที่ดี ทำให้พื้นผิวของกระดาษเรียบขึ้น และส่งผลให้สมบัติการกั้นการซึมผ่านน้ำดีขึ้นด้วย

Vrubic B.(2017) [55] ได้ทำการปรับปรุงสมบัติของสารเคลือบชีวภาพที่เตรียมได้จากโคโตะซานผสมกับแป้งข้าวสาลีโดยใช้อัลตราโซนิก เพื่อเพิ่มสมบัติด้านต่างๆ ให้เหมาะสมแก่การนำไปใช้งานด้านบรรจุภัณฑ์ สารเคลือบเตรียมได้โดยใช้ 2% สารละลายแป้งข้าวสาลีปริมาตร 100 mL ผสมกับ 2% สารละลายโคโตะซานในกรดมาลิกปริมาตร 100 mL หลังจากนั้นจึงนำสารละลายที่ได้ใส่ลงในอ่างอัลตราโซนิก (Ultrasonic bath) เป็นเวลา 15 นาที โดยใช้ความถี่ที่ 35 kHz เมื่อเสร็จสิ้นให้ทำการทิ้งสารละลายไว้ในอ่างต่อเป็นเวลา 15 นาที กรองสารละลายที่ได้ผ่านตะแกรงพอลิเอสเตอร์ (ตะแกรงเบอร์ 140 ช่องเปิดตาข่าย 160  $\mu\text{m}$ ) เพื่อกำจัดเศษตะกอนเล็กๆ จากนั้นนำสารละลายที่ได้เคลือบลงบนกระดาษกราฟที่ใช้ใบมีดปาดขนาด 120  $\mu\text{m}$  และทำให้แห้งที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นนำมาทดสอบการดูดซึมน้ำที่ด้วยวิธี Cobb60 พบว่าการเคลือบด้วยสารเคลือบชีวภาพและสารเคลือบชีวภาพที่ผ่านการผสมโดยใช้อัลตราโซนิก มีค่าการดูดซึมน้ำลดลงจาก 16.26% และ 36.48% และมีค่าการซึมผ่านของไอน้ำ (WVP) ลดลง 17.1% และ 65.0% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับกระดาษที่ไม่ถูกเคลือบ นอกจากนี้สารเคลือบชีวภาพที่ผ่านการบำบัดโดยอัลตราโซนิกยังมีค่าแรงดึงและค่าการยึดตัวเมื่อขาดสูงกว่าการเคลือบด้วยสารเคลือบชีวภาพที่ไม่ผ่านการบำบัดโดยอัลตราโซนิก ดังนั้นการใช้อัลตราโซนิก ในการบำบัดสารเคลือบชีวภาพจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งซึ่งเป็นกระบวนการที่มีราคา ไม่แพงและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม แต่มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Kansal, D. และคณะ (2020) [41] ได้ทำการเตรียมสารเคลือบกระดาษกระดาษกราฟที่มีความสามารถในการกันน้ำและน้ำมันแบบสองชั้นโดยใช้สารละลายไคโตซานความเข้มข้น 2 %w/v และสารละลายเซอีน (Zein) 20 %w/v ที่ได้จากข้าวโพดซึ่งเป็นผลพลอยได้ในระหว่างการผลิตไบโอเอทานอล จากการทดลองพบว่าสารเคลือบด้วยสารละลายไคโตซานซานที่มีสมบัติ Oleophobic หรือสมบัติไม่ชอบสารประเภทไขมันและน้ำมันเป็นชั้นแรกตามด้วยการเคลือบสารละลาย เซอีน ที่มีสมบัติไม่ชอบน้ำไว้ด้านนอกเป็นชั้นที่สองช่วยเพิ่มความสามารถในการต้านทานการซึมผ่านของความชื้นและน้ำมันได้ดีเนื่องจากมีพื้นที่ผิวที่เรียบขึ้นช่องว่างของรูพรุนลดลงซึ่งมากกว่าการเคลือบด้วยสารละลายไคโตซานและสารละลายเซอีนเพียงชั้นเดียว นอกจากนี้การเคลือบลักษณะนี้ยังช่วยทำให้การนำเยื่อกระดาษกลับมาใช้ใหม่ได้ง่ายขึ้น โดยล้างเยื่อกระดาษด้วยน้ำกลั่นและสารละลายแอสติก 2 %v/v เพื่อละลายไคโตซานและตกตะกอนเซอีน หลังจากนั้นใช้สารละลายเอทานอลเพื่อล้างตะกอนของเซอีน จึงได้เยื่อกระดาษที่สามารถนำมาใช้ใหม่ได้อีกครั้ง

Constantinos S. และคณะ (2020) [52] ได้ทำการศึกษาฟิล์มนาโนวัสดุประกอบระหว่างพอลิไวนิลแอลกอฮอล์โดยการเติมวัสดุนาโนไฮบริดซิงค์ออกไซด์และมอนต์มอริลโลไนต์ (MMT) เริ่มจากการสังเคราะห์วัสดุนาโนไฮบริด โดยการเติมมอนต์มอริลโลไนต์ปริมาณที่ต่างกัน คือ 0.0 0.5 1.0 2.0 3.0 4.0 และ 5.0 g ลงในสารละลายซิงค์อะซิเตตไดไฮเดรต ( $Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O$ ) 4.525 g ในน้ำปราศจากไอออน 50 mL ต่อมาเติมสารละลายแอมโมเนียเข้มข้น 25 %wt โดยการหยดพร้อมทั้งปั่นกวนอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งสารละลายทั้งหมดมีค่าพีเอชเท่ากับ 11 ทำการปั่นกวนไปอีก 2 ชั่วโมงและนำสารละลายที่ได้ไปรีฟลักซ์เป็นเวลา 1 ชั่วโมงทำการล้างตะกอนด้วยน้ำปราศจากไอออนและอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จึงจะได้วัสดุนาโนไฮบริด ZnO/NaMt ที่มีการเติมมอนต์มอริลโลไนต์ปริมาณที่ต่างกัน ซึ่งแต่ละชนิดที่ได้จากการสังเคราะห์จะถูกนำไปเติมในฟิล์มพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ในปริมาณที่เท่ากัน คือ 3 %wt การผสมระหว่าง PVOH/ZnO/NaMt ถูกเตรียมในเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ในระดับห้องปฏิบัติการ โดยใช้อุณหภูมิ 190 °C เป็นเวลา 10 นาที ความเร็ว 100 rpm ส่วนผสมที่ได้จากกระบวนการนี้จะถูกอัดรีดร้อนกลายเป็นฟิล์มภายใต้ ความดันคงที่ 2 MPa โดยใช้เครื่องอัดไฮดรอลิกพร้อมแผ่นความร้อน พบว่าฟิล์มที่มีการเติมวัสดุนาโนไฮบริด 0.5 g มีสมบัติในฆ่าเชื้อ *Escherichia coli* ได้ถึง 97% ซึ่งมากกว่าฟิล์มพอลิไวนิล-แอลกอฮอล์หรือฟิล์มมอนต์มอริลโลไนต์เพียงอย่างเดียว นอกจากนี้ยังมีสมบัติเชิงกลและความสามารถในการต้านทานการซึมผ่านของน้ำและออกซิเจนที่มากขึ้น

Mohan และคณะ (2020) [53] ได้ทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดอนุภาคซิงค์ออกไซด์ด้วยวิธีการไฮโดรเทอร์มอล เริ่มจากการเตรียมสารละลายซิงค์ไนเตรตเข้มข้น 0.5 M ในน้ำกลั่น 30 mL พร้อมทั้งมีการปั่นกวน และเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 5 M 30 mL ด้วยวิธี

เดียวกัน จากนั้นทำการหยดสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ลงในสารละลายซิงค์ในเตรตที่เตรียมได้ ภายใต้การปั่นกวอย่างต่อเนือง นำสารละลายที่ได้ไปทำการไฮโดรเทอร์มอล โดยทำการศึกษาปัจจัยที่หนึ่ง ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ได้แก่ 100 °C 125 °C และ 150 °C เมื่อใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาเท่ากัน คือ 2 ชั่วโมง โดยกำหนดชื่อตัวอย่างว่า HTZNP1, HTZNP2 และ HTZNP3 ตามลำดับ และทำการศึกษาปัจจัยที่สอง เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ได้แก่ 1, 3 และ 5 ชั่วโมง โดยให้อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาเท่ากันที่ 120 °C โดยกำหนดชื่อตัวอย่างว่า HTZNP4, HTZNP5 และ HTZNP6 จากการวิเคราะห์ XRD ของสารตัวอย่างทั้งหมดพบพีคที่ 2 $\theta$  คือ 31.52, 34.15, 35.95, 47.28, 56.28, 62.52, 66.11, 67.68, 68.83, 72.22 และ 76.84 ซึ่งบ่งชี้โครงสร้าง Wurtzite ซึ่งอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์มีลักษณะเป็นหกเหลี่ยม ในปัจจัยการศึกษาแรกพบว่าเมื่ออุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นส่งผลให้อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์มีขนาดเกรน (Grain size) ที่เล็กลง และปัจจัยที่สองพบว่าเมื่อใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ส่งผลให้อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์มีให้ขนาดเกรน (Grain size) ที่ใหญ่ขึ้น และจากภาพ SEM แสดงให้เห็นว่า HTZNP1 และ HTZNP2 มีลักษณะโครงสร้างนาโนแบบ 2 มิติ รูปร่างคล้ายดอกไม้โดยเฉพาะ HTZNP2 ซึ่งเห็นได้ชัด ส่วนตัวอย่าง HTZNP3 มีลักษณะโครงสร้างนาโนแบบ 0 มิติ รูปร่างเป็นเม็ดทรงกลม และตัวอย่าง HTZNP4, HTZNP5 และ HTZNP6 มีลักษณะโครงสร้างนาโนแบบ 1 มิติ รูปร่างเป็นแท่ง จากผลข้างต้นจึงสรุปได้ว่าอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา มีผลต่อการเกิดอนุภาค ทั้งขนาดและรูปร่างของซิงค์ออกไซด์ด้วยวิธีการไฮโดรเทอร์มอล

Kaipeng W. และคณะ (2021) [50] ได้ทำการศึกษาผลของการเติมมอนตม์อริลโลไนต์ (MMT) ลงในสารละลายโคโตะซานในการเตรียมสารเคลือบตัวอย่างกระดาษกราฟขนาด 11x11 cm<sup>2</sup> เพื่อดูประสิทธิภาพในการต้านทานน้ำและน้ำมัน โดยศึกษาผลของความเข้มข้นของโคโตะซานและการเติม MMT ที่แตกต่างกัน พบว่าการใช้โคโตะซาน 2.5 %w/v และ 3 %w/v โดยไม่มีการเติม MMT มีน้ำหนักในการเคลือบ 3.76 และ 3.99 g/m<sup>2</sup> ตามลำดับ สำหรับตัวอย่างที่มีการเติม MMT 0.1 %wt ลงในสารละลายโคโตะซาน 2 %w/v พบว่าน้ำหนักในการเคลือบกลับลดลงเหลือเพียง 3.65 g/m<sup>2</sup> แต่กลับมีความสามารถในการต้านทานการซึมผ่านของน้ำมันจาระบี และน้ำที่สูงขึ้น มีค่าการซึมผ่านของอากาศที่ลดลง เนื่องจากการเติม MMT ลงในสารละลายโคโตะซานเข้าไปเติมเต็มช่องว่างของรูพรุนทำให้พื้นผิวเรียบขึ้น และก่อตัวเป็นฟิล์มบางๆต่อเนื่องกันบนพื้นผิวของกระดาษ นอกจากนั้นยังช่วยเพิ่มสมบัติเชิงกลซึ่งมีความต้านทานการฉีกขาดสูงกว่ากระดาษที่ไม่เคลือบ 5.2% และ 6.6% ในทิศทางเดียวและแนวขวางของเครื่องตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

# วิธีการดำเนินการวิจัย

### 3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

- 1) มอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite, MMT) Mac gel บริษัท ไทยนิปปอน จำกัด
- 2) ไคโตซาน (Chitosan, CS) เกรดการค้า บริษัทไปโอ 21
- 3) ซิงค์ไนเตรต เฮกซะไฮเดรต (Zinc nitrate hexahydrate :  $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ ) เกรดวิเคราะห์ บริษัท QRèC™
- 4) สารละลายแอมโมเนีย (Ammonia solution) 30% เกรดวิเคราะห์ บริษัท CARLO ERBA
- 5) กรดกลacialแอซีติก (Acetic acid glacial) บริษัท CARLO ERBA
- 6) น้ำกลั่น (Distilled water)

### 3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

- 1) เครื่อง X-ray diffractometer (XRD) บริษัท Rigaku รุ่น SmartLab
- 2) เครื่อง X-ray fluorescence (XRF) บริษัท Rigaku รุ่น ZSX Primus IV
- 3) เครื่อง Thermogravimetric analysis (TGA) บริษัท Mettler toledo รุ่น TGA/DSC3+ HT
- 4) เครื่อง Contact angle analyzer บริษัท DATAPHYSICS รุ่น OCA20
- 5) เครื่อง Field emission scanning electron microscopy (FESEM)
- 6) เครื่อง Fourier transform infrared spectrometer (FT-IR) บริษัท Shimadzu รุ่น IRTracer-100
- 7) เครื่องอัลตราโซนิก บริษัท Vibra cell หัวโพรบ รุ่น cv334
- 8) เครื่องชั่งน้ำหนักอย่างละเอียด 4 ตำแหน่ง บริษัท Denver instrument รุ่น SI-234
- 9) เครื่องกวนสารพร้อมให้ความร้อน (Hotplate magnetic stirrers) บริษัท IKA
- 10) Germany รุ่น C-MAG HS 7
- 11) เครื่องหมุนเหวี่ยง (Centrifuge) บริษัท Hettich รุ่น Universal 320
- 12) ตู้ดูดควัน (Fume hood)
- 13) ตู้อบ (Oven) บริษัท Memmert รุ่น UF110
- 14) ปีกเกอร์ (Beaker) ขนาด 50, 100, 150 mL

เอกสารนี้เป็นเอกสาร 15) ขวดวัดปริมาตร (Volumetric flask) ขนาด 50, 100 mL ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 16) ปิเปต (Pipette) ขนาด 1 mL
- 17) กระจกตวงขนาด (Cylinder) 100 mL
- 18) จานเพาะเชื้อ (Petri dish)
- 19) โกร่งบดยาและลูกโกร่งบดยา (Pestle and mortar)
- 20) ช้อนตักสารสแตนเลส (Spatula stainless)
- 21) หลอดเซนติฟิว (Centrifuge tube)
- 22) แท่งแม่เหล็กปั่นกวน (Magnetic bar)
- 23) ยูนิเวอร์ซัลอินดิเคเตอร์ (Universal indicator)
- 24) ขวดแก้วและฝาปิด
- 25) กระดาษคราฟท์ (Kraft paper)

### 3.3 ขั้นตอนการดำเนินงาน

#### 3.3.1 การเตรียมสารตั้งต้น

- 1) เตรียมสารละลายซิงค์ไนเตรตที่ความเข้มข้น 0.1 และ 0.3 M โดยการชั่งซิงค์ไนเตรต-เฮกซะไฮเดรต 1.49 และ 4.46 ตามลำดับ นำไปละลายในน้ำกลั่น 50 mL
- 2) เตรียมสารละลายแอมโมเนีย 30 % ที่อัตราส่วนความเข้มข้นสารละลายแอมโมเนียต่อสารละลายซิงค์ไนเตรต 2:1 โดยโมล
- 3) เตรียมสารละลายกรดแอสติก ความเข้มข้น 1 %v/v โดยการตวงกรดแอสติก 0.5 mL ละลายในน้ำกลั่น 50 mL

#### 3.3.2 การสังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์ (ZnO)

- 1) นำสารละลายซิงค์ไนเตรตที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ที่เตรียมได้จากในข้อ 3.3.1) ทำการโซนิคฮอว์นที่แอมพลิจูด 40% เป็นเวลา 10 นาที
- 2) หยดสารละลายแอมโมเนียที่เตรียมได้จากข้อ 3.3.1) ลงสารละลายข้อที่ 1) อย่างช้า ๆ ภายใต้การปั่นกวน
- 3) นำสารละลายผสมใส่ขวดแก้วและปิดฝาให้สนิท ทำการไฮโดรเทอร์มอลที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นทิ้งสารละลายผสมให้เย็นลง
- 4) นำสารละลายผสมเข้าเครื่องหมุนเหวี่ยงด้วยความเร็ว 5000 รอบ/นาที เพื่อแยกตะกอน ZnO
- 5) นำตะกอนที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมงหรือจนกว่าตะกอนจะแห้ง
- 6) นำ ZnO ที่สังเคราะห์ได้ไปตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค XRD XRF ดังที่แสดงใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
รูปที่ 3.1  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.3 การสังเคราะห์สารตัวเติมระดับนาโนมอนต์มอริลโลไนต์แทรกสอดซิงค์ออกไซด์ (Nanofiller: ZnO-MMT)

- 1) ชั่ง MMT 1 g ผสมกับสารละลายซิงค์ไนเตรดที่ความเข้มข้นต่าง ๆ เตรียมได้จากในข้อ 3.3.1) จากนั้นทำการโซนิคฮอว์นที่แอมพลิจูด 40% เป็นเวลา 10 นาที
- 2) นำสารแขวนลอย MMT เข้าเครื่องหมุนเหวี่ยงด้วยความเร็ว 5000 รอบ/นาทีเป็นเวลา 3 นาที เพื่อแยกตะกอน  $Zn^{2+}$ -MMT
- 3) หยดสารละลายแอมโมเนียที่เตรียมได้จากข้อ 3.3.1) ลงสารละลายข้อที่ 1) อย่างช้า ๆ ภายใต้การปั่นกววน
- 4) นำสารละลายผสมใส่ขวดแก้วและปิดฝาให้สนิท ทำการไฮโดรเทอร์มอลที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 30 นาที ตามลำดับ จากนั้นทิ้งสารละลายผสมให้เย็นลง
- 5) นำสารละลายผสมเข้าเครื่องหมุนเหวี่ยงด้วยความเร็ว 5000 รอบ/นาทีเป็นเวลา 3 นาที เพื่อแยกตะกอน Nanofiller: ZnO-MMT
- 6) นำตะกอนที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมงหรือจนกว่าตะกอนจะแห้ง
- 7) นำ Nanofiller: ZnO-MMT ที่สังเคราะห์ได้ไปตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค XRD XRF ดังที่แสดงในรูปที่ 3.1

### 3.3.4 การเตรียมฟิล์มและสารเคลือบวัสดุประกอบโคโตะซานนาโนมอนต์มอริลโลไนต์แทรกสอดซิงค์ออกไซด์ (CS/ZnO-MMT)

- 1) ละลายโคโตะซาน 0.5 g ด้วยสารละลายกรดแอสซิติคความเข้มข้น 1 %v/v ภายใต้การปั่นกววนพร้อมทั้งให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 40 นาที
- 2) ค่อย ๆ ใส่ Nanofiller: ZnO-MMT ที่สังเคราะห์ได้ปริมาณ 3 6 และ 12 (%wt เทียบน้ำหนักโคโตะซาน) ลงในสารละลายโคโตะซาน ภายใต้การปั่นกววนพร้อมทั้งให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 70 °C ต่ออีก 10 นาที
- 3) นำสารละลายไปทำการโซนิคฮอว์นต่อที่แอมพลิจูด 40% เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นทิ้งสารละลายผสมให้เย็นลงที่อุณหภูมิห้อง
- 4) ขึ้นรูปฟิล์มด้วยวิธีการหล่อขึ้นรูปโดยใช้สารละลาย 15 mL ใส่ลงในจานเพาะเชื้อและนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 50 °C จนกระทั่งแห้ง
- 5) นำแผ่นฟิล์มที่ได้ไปวิเคราะห์และทดสอบ XRD SEM TGA และ FT-IR ดังที่แสดงในรูปที่ 3.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.5 การเคลือบกระดาษด้วยวัสดุประกอบไคโตซานนาโนมอนต์มอริลโลไนต์แทรกสอดซิงค์ออกไซด์ (CS/ZnO-MMT)

ใช้เทคนิคการเคลือบแบบจุ่ม

- 1) นำกระดาษกราฟท์ขนาด  $2 \times 2 \text{ cm}^2$  จุ่มลงในภาชนะที่มีสารเคลือบ 20 mL เป็นเวลา 10 นาที
- 2) จากนั้นทิ้งไว้ให้แห้งที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- 3) นำกระดาษที่ผ่านการเคลือบไปวิเคราะห์ SEM และทดสอบสมบัติความไม่ชอบน้ำด้วย

Contact angle ดังที่แสดงในรูปที่ 3.3

### 3.4 การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ของสารตัวเติม (Nanofiller: ZnO-MMT) และทดสอบแผ่นฟิล์มวัสดุประกอบไคโตซานนาโนมอนต์มอริลโลไนต์แทรกสอดซิงค์ออกไซด์ (CS/ZnO-MMT)

#### 3.4.1 การศึกษาโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิค X-ray diffractometer (XRD)

โดยใช้สภาวะในการวิเคราะห์ ดังนี้ $2\theta$ เริ่มต้น-สิ้นสุด	$5^\circ - 60^\circ$
Step size	$0.4^\circ$
Time/step	1 s

#### 3.4.2 การศึกษาองค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค X-ray fluorescence (XRF)

โดยมีสภาวะในการวิเคราะห์ ดังนี้ ปริมาณสารตัวอย่างประมาณ 0.5000 g  
ปริมาณกรดบอริกประมาณ 4.5000 g

บดผสมสารตัวอย่างและกรดบอริกด้วยเครื่องบดเป็นเวลา 1 นาที แล้วนำไปอัดขึ้นรูปเป็นก้อนตัวอย่าง

#### 3.4.3 ศึกษาหมู่ฟังก์ชันของสารตัวเติม (Nanofiller) MMT/ZnO และฟิล์มวัสดุประกอบด้วยเทคนิค Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR)

โดยมีสภาวะในการวิเคราะห์ดังนี้ ความยาวคลื่นที่ใช้ในการวิเคราะห์  $400 - 4000 \text{ cm}^{-1}$

โหมดที่ใช้ในการวิเคราะห์ Transmission

#### 3.4.4 ศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค Field emission scanning electron microscopy (FESEM)

โดยมีสภาวะในการวิเคราะห์ดังนี้

ลักษณะทางสัณฐานของวัสดุประกอบนาโน CS-ZnO-MMT ที่กำลังขยาย 500 10000 และ 15000 เท่า

วิเคราะห์ธาตุ Al และ Si ด้วยการคายแสงรังสีเอกซ์แบบ EDS ที่กำลังขยาย 1000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4.5 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของสารตัวอย่างด้วยเทคนิค Thermogravimetric analysis (TGA)

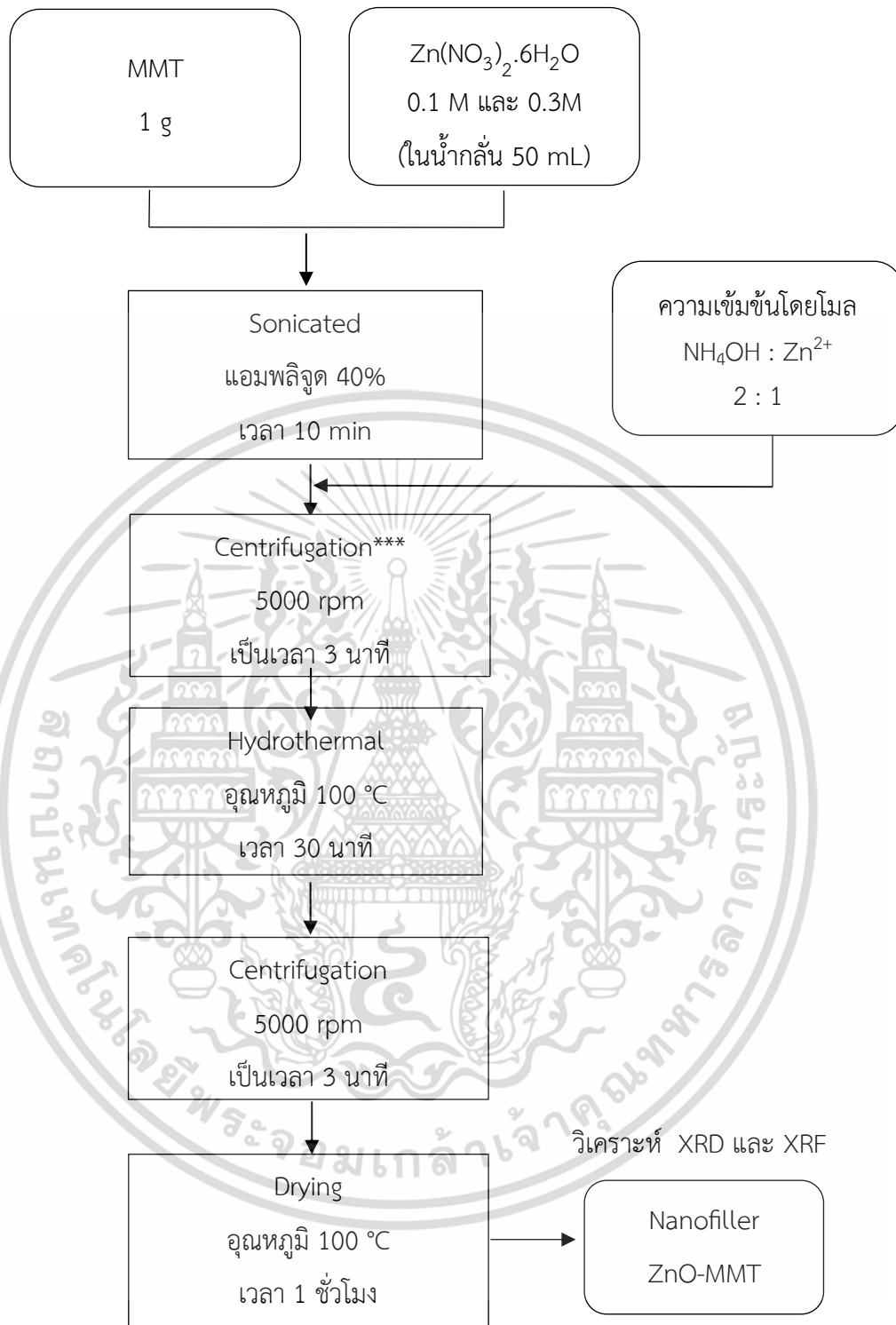
โดยมีสภาวะในการวิเคราะห์ ดังนี้	ช่วงอุณหภูมิที่ใช้ในการวิเคราะห์	50-600 °C
	อัตราการให้ความร้อน	10 °C/min
	อัตราการไหลก๊าซออกซิเจน	40 mL/min
	ปริมาณสารตัวอย่าง	5 – 10 mg
	บรรยากาศที่ใช้ในการวิเคราะห์	ออกซิเจน

### 3.4.6 การทดสอบมุมสัมผัส (Contact angle)

ทดสอบสมบัติความไม่ชอบน้ำด้วยเครื่อง Contact angle analyzer โดยใช้น้ำปราศจากไอออน (Deionized water, DI) อัตราการหยด 1  $\mu$ /s และปริมาตรที่ใช้ 5  $\mu$ /s

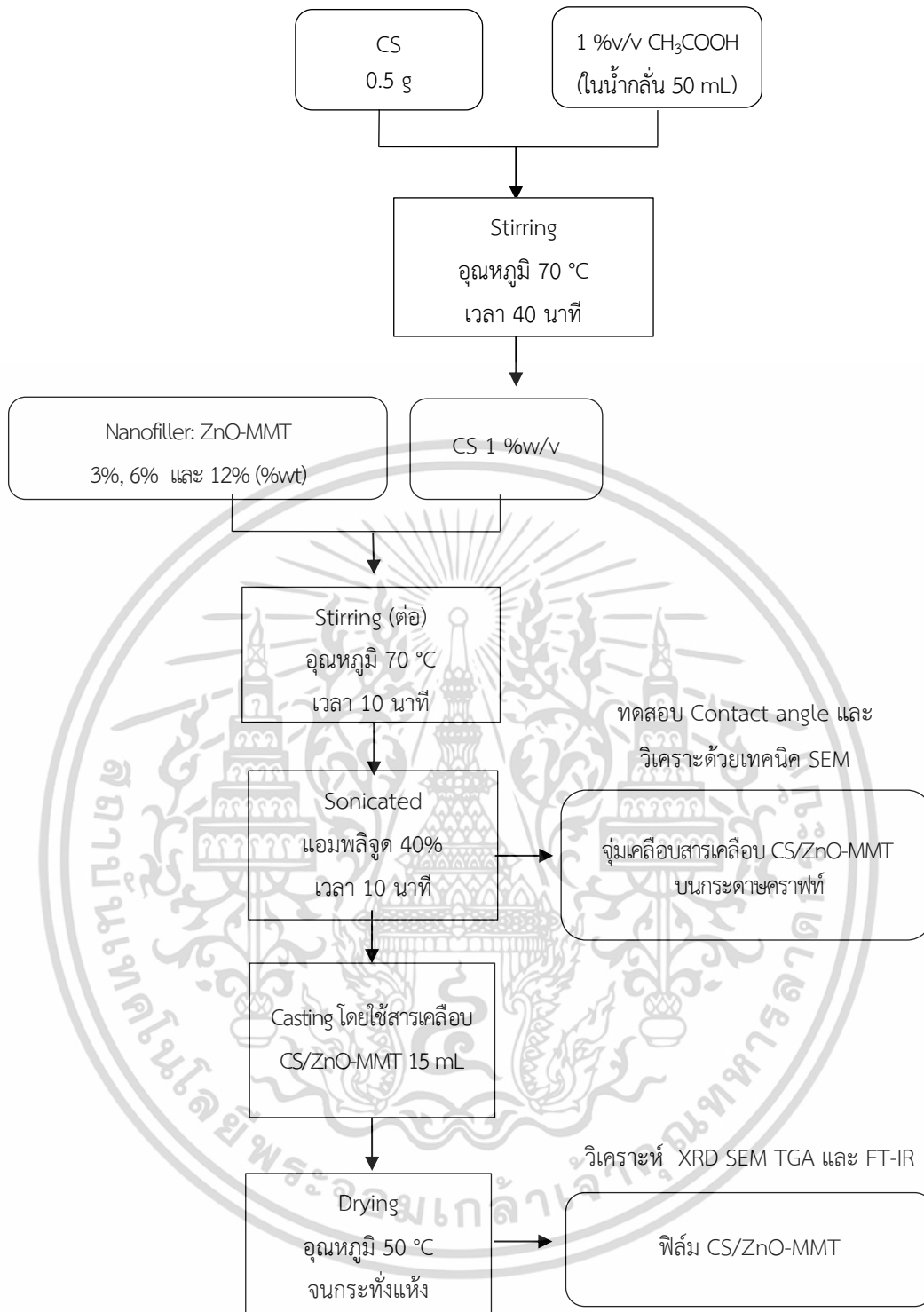


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



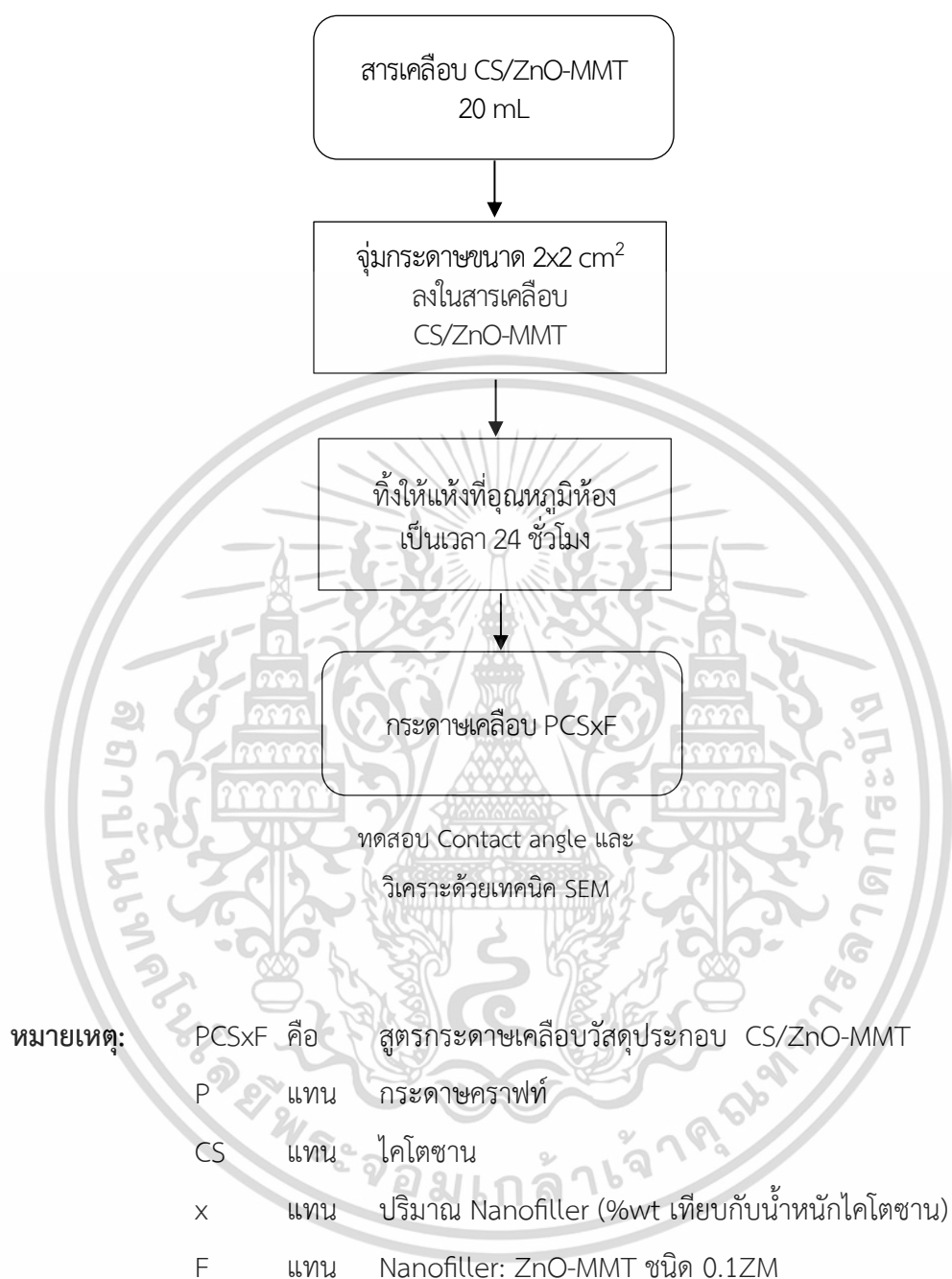
หมายเหตุ : \*\*\* ไม่ต้องทำขั้นตอนนี้ในกระบวนการสังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์ (ZnO)

**รูปที่ 3.1** แผนภาพการสังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) และสารตัวเติมระดับนาโนมอนต์มอริลโลไนต์ เอกสารนี้แทรกสอดซิงค์ออกไซด์ (Nanofiller: ZnO-MMT) เช่นเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



หมายเหตุ: CSx F คือ สูตรฟิล์มและสารเคลือบวัสดุประกอบ CS/ZnO-MMT  
 CS แทน ไคโตซาน  
 x แทน ปริมาณ Nanofiller (%wt เทียบกับน้ำหนักไคโตซาน)  
 F แทน Nanofiller: ZnO-MMT ชนิด 0.1ZM

รูปที่ 3.2 แผนภาพการเตรียมฟิล์มและสารเคลือบวัสดุประกอบไคโตซานนาโนมอนต์มอริลไลต์  
 เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 แทรกสอดซิงค์ออกไซด์ (CS/ZnO-MMT)  
 ไม่ว่าจะในรูปแบบใด ๆ ทั้งสิ้น ยกเว้นที่มิได้มีเหตุอันสมควรและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 แผ่นภาพการเคลือบกระดาษด้วยสารเคลือบวัสดุประกอบไคโตซานนาโนมอนต์มอริลโลไนต์ แทรกสอดซิงค์ออกไซด์ (CS/ZnO-MMT) ด้วยวิธีการจุ่ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 การสังเคราะห์ ZnO และ Nanofiller: ZnO-MMT

สารตัวอย่าง	ความเข้มข้นของ Zn <sup>2+</sup> (M)	MMT (g)	โซนิคเออร์น (min)	ไฮโดรเทอร์มอล (min)
0.1 Z	0.1	-	10	30
0.3 Z	0.3	-		
0.1ZM	0.1	1		
0.3ZM	0.3	1		

ตารางที่ 3.2 การเตรียมฟิล์มและสารเคลือบวัสดุประกอบ CS/ZnO-MMT

สารตัวอย่าง	ชนิดของ Nanofiller: ZnO-MMT	ปริมาณ Nanofiller: ZnO-MMT (%wt เทียบกับน้ำหนักไคโตซาน)	ปริมาณไคโตซาน (g)
CS	-	-	0.5
CS3F	0.1ZM	3	
CS6F		6	
CS12F		12	

ตารางที่ 3.3 การเคลือบกระดาษด้วยสารเคลือบวัสดุประกอบ CS/ZnO-MMT

สารตัวอย่าง	สูตรสารเคลือบวัสดุประกอบ CS/ZnO-MMT
PCS	CS
PCS3F	CS3F
PCS6F	CS6F
PCS12F	CS12F

หมายเหตุ: CSxF คือ สูตรฟิล์มและสารเคลือบวัสดุประกอบ CS/ZnO-MMT

PCSxF คือ สูตรกระดาษเคลือบวัสดุประกอบ CS/ZnO-MMT

CS แทน ไคโตซาน

P แทน กระดาษกราฟท์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ยืมให้หนังสือเวียนแจ้งคืนการดำเนินการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

#### 4.1 การพิสูจน์เอกลักษณ์ของสารตัวเติมระดับนาโนมอนต์มอริลโลไนต์แทรกสอดซิงค์ออกไซด์ (Nanofiller: ZnO-MMT)

##### 4.1.1 เทคนิค XRF

เมื่อนำ MMT เริ่มต้นและ Nanofiller: ZnO-MMT ที่สังเคราะห์ได้จากการดัดแปรโครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์ด้วยสารละลายซิงค์ไนเตรตเฮกซะไฮเดรต ( $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ ) ความเข้มข้น 0.1 และ 0.3 M โดยการใช้เทคนิคอัลตราโซนิกพร้อมกับการทำปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มอลที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 30 นาที ไปวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีโดยใช้เทคนิค XRF แสดงผลดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของ MMT เริ่มต้นและ Nanofiller: ZnO-MMT

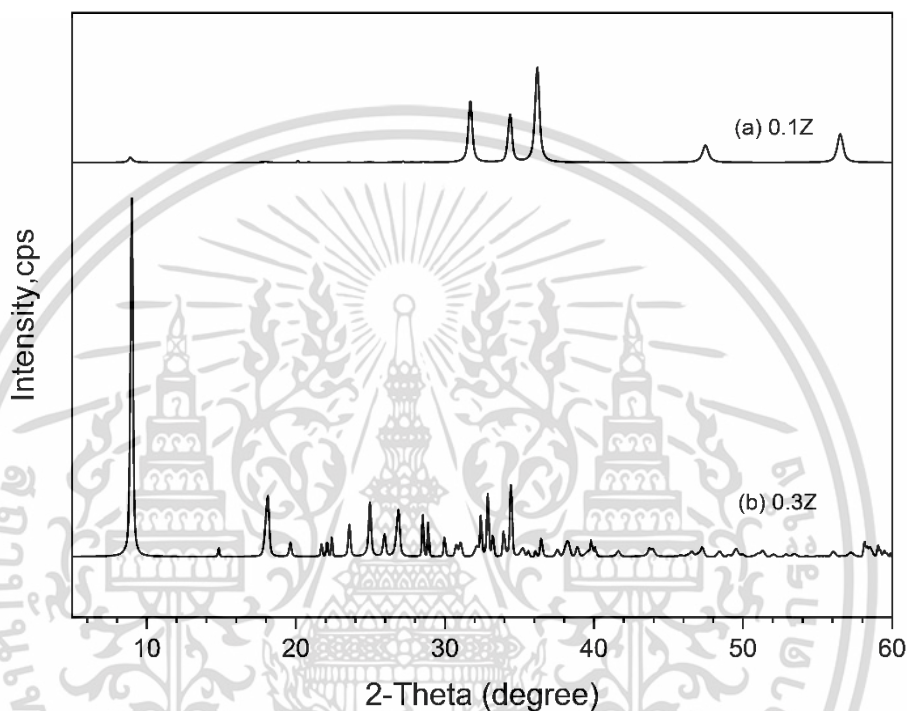
สารตัวอย่าง	ธาตุองค์ประกอบ					
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%wt)	SiO <sub>2</sub> (%wt)	Na <sub>2</sub> O (%wt)	ZnO (%wt)	อัตราส่วน โดยโมลของ Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /SiO <sub>2</sub>	อัตราส่วน โดยโมลของ ZnO/SiO <sub>2</sub>
MMT	17.60	72.40	0.72	0.00	0.14	0.00
0.1ZM	13.20	55.40	0.89	24.60	0.14	0.33
0.3ZM	4.54	20.50	0.00	72.40	0.13	2.62

เนื่องจาก MMT มีองค์ประกอบหลัก คือ Al และ Si จึงสามารถวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีของ ZnO-MMT ที่สังเคราะห์ได้จากค่าอัตราส่วนโดยโมลของ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub> และ ZnO/SiO<sub>2</sub> จากตารางที่ 4.1 พบว่า ZnO-MMT ที่สังเคราะห์ได้จากการดัดแปรโครงสร้าง MMT ด้วยสารละลาย Zn<sup>2+</sup> โดยการใช้เทคนิคอัลตราโซนิกพร้อมกับการทำปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มอลที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 30 นาที มีค่าอัตราส่วนโดยโมลของ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub> ใกล้เคียงกับ MMT เริ่มต้น แสดงให้เห็นว่าการสังเคราะห์ ZnO-MMT ด้วยวิธีดังกล่าวไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีของ MMT

เมื่อทำการศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลาย Zn<sup>2+</sup> ที่ใช้ในการเตรียม Nanofiller: ZnO-MMT โดยเปลี่ยนความเข้มข้นเริ่มต้นจาก 0.1 เป็น 0.3 M พบว่ามีอัตราส่วนโดยโมลไม่ต่ำกว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของ ZnO/SiO<sub>2</sub> เท่ากับ 0.33 และ 2.62 ตามลำดับ แสดงว่ามีปริมาณของ ZnO ในโครงสร้างเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลาย Zn<sup>2+</sup> จากผลดังกล่าวสันนิษฐานได้ว่าการเพิ่มขึ้นของสารละลาย Zn<sup>2+</sup> ส่งผลให้มีปริมาณของไอออน Zn<sup>2+</sup> ที่จะสามารถเกิดเป็น ZnO ได้เพิ่มขึ้น

#### 4.1.2 เทคนิค XRD

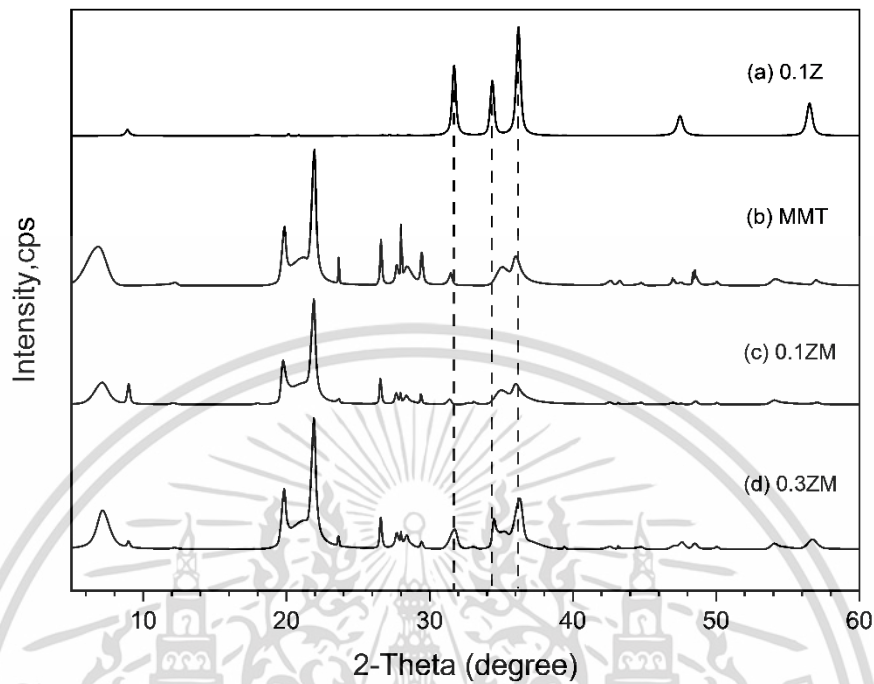


รูปที่ 4.1 แผนภาพการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของ ZnO (a) 0.1Z และ (b) 0.3Z

รูปที่ 4.1 แสดงแผนภาพ XRD ของสารตัวอย่าง ZnO สังเคราะห์จากสารละลาย Zn(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O โดยใช้เทคนิคอัลตราโซนิกพร้อมกับการทำปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มอลที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 30 นาที ซึ่งเป็นสภาวะเดียวกับการสังเคราะห์ ZnO-MMT พบว่าเมื่อใช้ความเข้มข้นของสารละลาย Zn<sup>2+</sup> เป็น 0.1 M แผนภาพ XRD ในรูปที่ 4.1 (a) ปรากฏพีกที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 31.72° 34.36° และ 36.20° ของระนาบ 100 002 และ 101 ตามลำดับ ซึ่งเป็นพีกเอกลักษณ์ของ ZnO ที่มีโครงสร้างแบบ Wurtzite (JCPDS card number 36-1451) นอกจากนี้ยังพบว่าการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลาย Zn<sup>2+</sup> ส่งผลต่อรูปแบบแผนภาพ XRD ในรูปที่ 4.1 (b) โดยพบพีกปรากฏที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 9.00° 18.12° 23.57° 25.00° 25.96° และ 26.88° ซึ่งเป็นพีกเอกลักษณ์ของ Pentazinc octahydroxide bis(nitrate(V))- dihydrate) (PDF-2 2021: DB Card Number 01-072-0627) จากผลดังกล่าวสันนิษฐานได้ว่าเวลาและอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ยืมได้พิมพ์ไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไฮโดรเทอร์มอลอาจไม่เพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยาทำให้ผลิตภัณฑ์สารตัวกลางไม่สามารถทำปฏิกิริยาต่อจนเกิดเป็น ZnO ที่สมบูรณ์ได้ [62]



รูปที่ 4.2 แผนภาพการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของ (a) 0.1Z เริ่มต้น (b) MMT เริ่มต้น และ ZnO-MMT; (c) 0.1ZM และ (d) 0.3ZM

เมื่อนำ MMT เริ่มต้นและ ZnO-MMT ที่สังเคราะห์ได้ไปตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์เพื่อดูโครงสร้างผลึกได้แผนภาพ XRD ดังแสดงผลในรูปที่ 4.2

จากรูปที่ 4.2 สามารถสรุปค่า  $2\theta$  และ  $d_{001}$  ของ MMT เริ่มต้นและ ZnO-MMT ที่สังเคราะห์ได้แสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ค่า  $2\theta$  และ  $d_{001}$  ของ MMT เริ่มต้นและ Nanofiller: ZnO-MMT ที่สังเคราะห์ได้

สารตัวอย่าง	$2\theta_{d_{001}}$	$d_{001}$ (Å)
MMT	6.85	12.90
0.1ZM	7.10	12.44
0.3ZM	7.16	12.33

จากรูปที่ 4.2 (b) และตารางที่ 4.2 พบว่า MMT เริ่มต้นมีพีคของระนาบ 001 ปรากฏที่ตำแหน่ง  $2\theta$  เท่ากับ  $6.85^\circ$  เมื่อนำไปคำนวณหาระยะห่างระหว่างระนาบ 001 จากสมการของแบรกก์  $n\lambda = 2d\sin\theta$  (เมื่อ  $\lambda = 1.54$  Å) พบว่ามีระยะห่างระหว่างระนาบ 001 ( $d_{001}$ ) เท่ากับ 12.90 Å ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้ยังพบพีกปรากฏที่ตำแหน่ง  $2\theta$  เท่ากับ  $19.87^\circ$  ซึ่งเป็นพีกของระนาบ 020 ตำแหน่ง  $2\theta$  เท่ากับ  $21.81^\circ$  พีกของระนาบ 111 และที่ตำแหน่ง  $2\theta$  เท่ากับ  $36^\circ$  ซึ่งเป็นพีกเอกลักษณ์ของ MMT (PDF-2 2021: DB Card Number 00-058-2038)

เมื่อทำการดัดแปรโครงสร้างของ MMT ด้วยสารละลาย  $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$  โดยใช้เทคนิคอัลตรา-โซนิคร่วมกับการทำปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มอล พบว่าพีกปรากฏที่ตำแหน่ง  $2\theta$  เท่ากับ  $23.45^\circ$   $29.43^\circ$  และ  $35.50^\circ$  ซึ่งเป็นพีกของระนาบ 004 005 และ 006 ของ ZnO-MMT ที่สังเคราะห์ได้มีความเข้มลดลงเมื่อเทียบกับแผนภาพ XRD ของ MMT เริ่มต้น แสดงในรูปที่ 4.2 (c,d) ซึ่งเป็นระนาบที่มีความสัมพันธ์กับระนาบ 001 ของ MMT สันนิษฐานว่าความเข้มของพีกที่ลดลงเกิดจากขยับหรือเคลื่อนที่ของชั้น MMT เมื่อมี ZnO เข้าไปแทรกสอดอยู่ในช่องว่างโครงสร้างของ MMT

แผนภาพ XRD รูปที่ 4.2 (c) พบว่าเมื่อใช้สารละลาย  $Zn^{2+}$  ความเข้มข้น 0.1 M พีกที่ตำแหน่ง  $2\theta$  เท่ากับ  $31.64^\circ$   $34.53^\circ$  และ  $36.28^\circ$  มีค่าความเข้มลดลง จากผลดังกล่าวสันนิษฐานได้ว่าเมื่อใช้สารละลาย  $Zn^{2+}$  ความเข้มข้น 0.1 M ไอออน  $Zn^{2+}$  จะแทรกตัวและเกิดเป็น ZnO อยู่ในช่องว่างระหว่างชั้นโครงสร้างของ MMT ดังนั้นอาจถูกบดบังด้วยสัญญาณของ MMT รวมไปถึงโอกาสในการเข้าทำปฏิกิริยากับเบสที่ยากขึ้นเนื่องจากการบดบังของชั้น MMT จึงทำให้ค่าความเข้มที่วัดได้ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับการใช้สารละลาย  $Zn^{2+}$  ความเข้มข้น 0.3 M นอกจากนี้ยังพบพีกปรากฏที่ตำแหน่ง  $2\theta$  เท่ากับ  $9.00^\circ$  ซึ่งเป็นพีกหลักของผลิตภัณฑ์สารตัวกลาง สันนิษฐานได้ว่าเนื่องจากโอกาสในการเข้าทำปฏิกิริยาที่ยากขึ้นของสารละลาย  $Zn^{2+}$  ความเข้มข้น 0.1 M ทำให้มีไอออน  $Zn^{2+}$  บางส่วนที่อยู่ภายในไม่สามารถทำปฏิกิริยากับเบสและเกิดเป็น ZnO ที่สมบูรณ์ได้

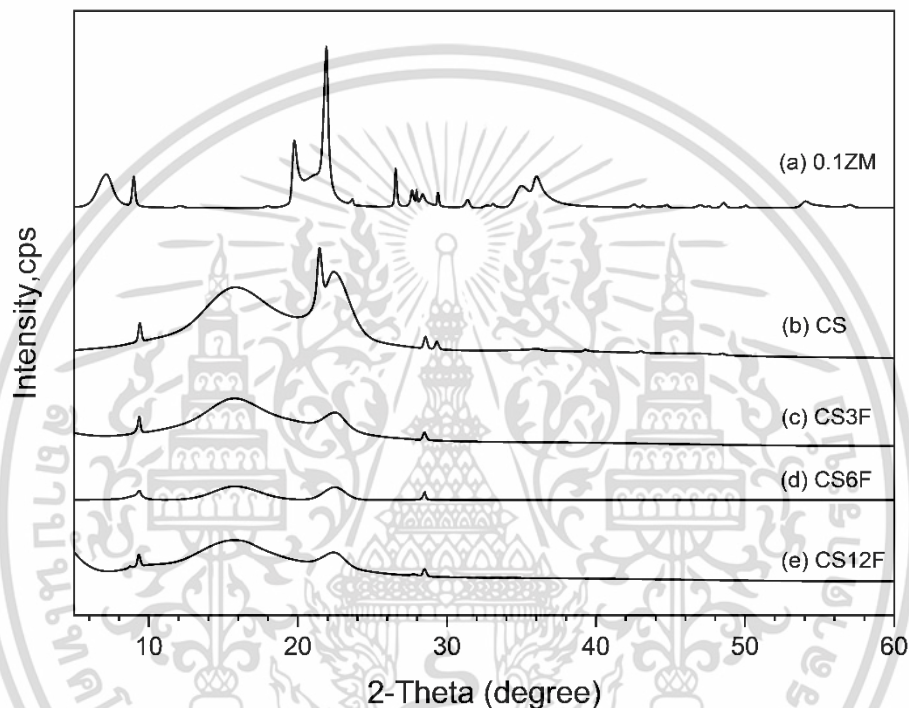
จากรูปที่ 4.2 (d) พบว่าพีกที่ตำแหน่ง  $2\theta$  เท่ากับ  $31.64^\circ$   $34.53^\circ$  และ  $36.28^\circ$  มีค่าความเข้มสูงขึ้น จากผลดังกล่าวสันนิษฐานได้ว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลาย  $Zn^{2+}$  จาก 0.1 M เป็น 0.3 M ทำให้ มีไอออน  $Zn^{2+}$  มากขึ้น จึงมีโอกาสที่ไอออนจะแทรกตัวอยู่ในช่องว่างระหว่างชั้นและมีบางส่วนอยู่ภายนอกชั้นโครงสร้าง MMT ดังนั้นจึงสามารถเกิดปฏิกิริยาได้เป็น ZnO อยู่ภายนอกชั้นได้มากขึ้น นอกจากนี้พีกที่ตำแหน่ง  $2\theta$  เท่ากับ  $9.00^\circ$  ซึ่งเป็นพีกหลักของผลิตภัณฑ์สารตัวกลางยังมีค่าความเข้มต่ำลงด้วย จากที่กล่าวมาข้างต้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ ZnO-MMT ความเข้มข้น 0.1 M ในการพัฒนาวัสดุประกอบโคโตะซานนาโนมอนต์มอริลโลไนต์ แทรกสอดซิงค์ออกไซด์ (CS/ZnO-MMT) ในหัวข้อถัดไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2 การพิสูจน์เอกลักษณ์ของแผ่นฟิล์มวัสดุประกอบไคโตซานนาโนมอนต์มอริลโลไนต์ แทรกสอดซิงค์ออกไซด์ (CS/ZnO-MMT)

### 4.2.1 เทคนิค XRD

เมื่อนำฟิล์มไคโตซานเริ่มต้นและฟิล์ม CS/ZnO-MMT ที่สังเคราะห์ที่ได้ไปตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์เพื่อดูโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) โดยทำการทดสอบในช่วงมุม  $5^{\circ}$  ถึง  $60^{\circ}$  ได้แผนภาพ XRD แสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 แผนภาพการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของ (a) 0.1ZM และฟิล์ม CS/ZnO-MMT; (b) CS (c) CS3F (d) CS6F และ (e) CS12F

จากรูปที่ 4.3 (b) พบพีกเอกลักษณ์ของไคโตซานที่ตำแหน่ง  $2\theta$  ประมาณ  $10^{\circ}$   $13^{\circ}$   $20^{\circ}$  และ  $22^{\circ}$  [49,66] ซึ่งแสดงถึงโครงสร้างส่วนใหญ่ที่เป็นอสัณฐานและมีผลึกผสมอยู่ด้วย เมื่อทำการเติม Nanofiller: ZnO-MMT สูตร 0.1ZM ลงในฟิล์ม CS/ZnO-MMT พบว่าพีกเอกลักษณ์ในส่วนที่เป็นผลึกของไคโตซานมีความเข้มที่ลดลง สันนิษฐานว่าการเติม Nanofiller: ZnO-MMT ลงในฟิล์ม CS/ZnO-MMT จะเข้าไปขัดขวางการเกิดผลึกของไคโตซาน ทำให้มีส่วนที่เป็นอสัณฐานเพิ่มมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.3 (c, d, e) นอกจากนี้ยังพบว่าพีกเอกลักษณ์ของ MMT ที่ตำแหน่ง  $2\theta$  เท่ากับ  $7.10^{\circ}$  ดังแสดงในรูปที่ 4.3 (a) มีการเลื่อนตำแหน่งต่ำลง หรือหายไป สันนิษฐานว่าการเติม ZnO-MMT ปริมาณ 3% 6% และ 12%wt เทียบกับน้ำหนักไคโตซาน เป็นปริมาณที่น้อยมากจึงอาจทำให้ไม่เห็นสัญญาณของพีกเอกลักษณ์ของ MMT

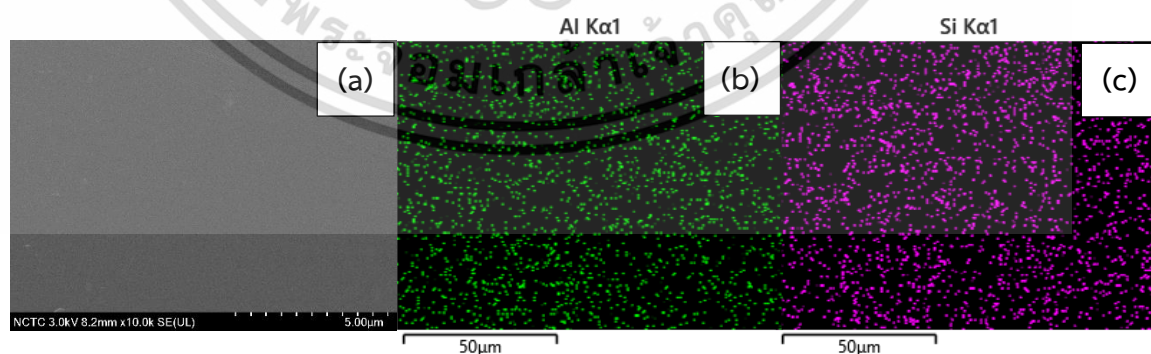
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.2 เทคนิค SEM

การวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานของวัสดุประกอบนาโนฟิล์ม CS/ZnO-MMT และการกระจายตัวของ ZnO-MMT ที่มีการเติมลงใน CS/ZnO-MMT ในปริมาณที่ต่างกัน ได้แก่ 3% 6% และ 12%wt เทียบกับน้ำหนักรวมของโพลีเมอร์ โดยกำหนดสูตรตัวอย่างเป็น CS3F CS6F และ CS12F ตามลำดับ สามารถวิเคราะห์ได้โดยใช้เทคนิค Field Emission Scanning Electron Microscopy (FESEM) ร่วมกับการวิเคราะห์ธาตุด้วยการคายแสงรังสีเอกซ์แบบ EDS โดยการวิเคราะห์ตำแหน่ง Al และ Si ที่กระจายตัวอยู่บนพื้นผิวของตัวอย่างที่นำไปวิเคราะห์ เนื่องจาก ZnO-MMT ที่สังเคราะห์ได้มีองค์ประกอบหลัก คือ MMT ซึ่งเป็นแร่ดินเหนียวที่ประกอบด้วยแผ่น ซิลิกาและแผ่นอะลูมินา ดังนั้นจึงสามารถดูลักษณะการกระจายตัวของ ZnO-MMT ได้จากการกระจายตัวของธาตุ Al และ Si

จากผลการวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานบริเวณพื้นผิวของฟิล์ม CS/ZnO-MMT ที่กำลังขยาย 10000 เท่า ในรูปที่ 4.4 (a) CS3F และ 4.5 (a) CS6F พบว่าฟิล์ม CS3F และ CS6F มีลักษณะพื้นผิวเรียบ แสดงให้เห็นว่าองค์ประกอบภายใน CS/ZnO-MMT มีความเข้ากันได้และเป็นเนื้อเดียวกัน และจากรูปที่ 4.6 (a) CS12F พบว่าฟิล์ม CS12F มีพื้นผิวของตัวอย่างมีลักษณะขรุขระเล็กน้อย สันนิษฐานว่าการเติม ZnO-MMT ในปริมาณ 12%wt อาจเป็นปริมาณที่มากเกินไปเมื่อเติมลงในโพลีเมอร์ที่มีพื้นที่ว่างในการกระจายตัวจำกัด จึงทำให้อนุภาคของ Nanofiller: ZnO-MMT เกิดการกลับมารวมตัวกัน

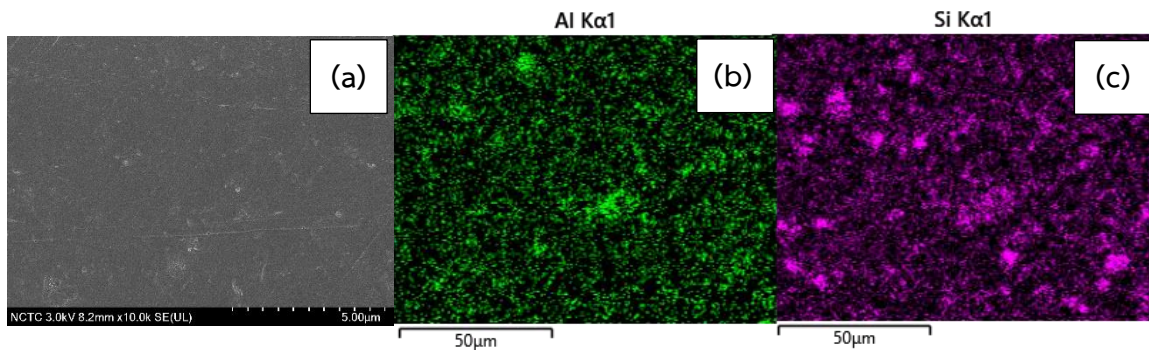
จากรูปที่ 4.4 – 4.6 (b) และ (c) แสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวของธาตุ Al และ Si ซึ่งเป็นตัวแทนของของ ZnO-MMT พบว่าทั้งสามสูตรมีการกระจายตัวของ Al และ Si อยู่ทั่วทั้งพื้นผิวตัวอย่างที่นำไปวิเคราะห์ และมีความหนาแน่นของ Al และ Si เพิ่มขึ้น เมื่อมีปริมาณของ ZnO-MMT ในฟิล์ม CS/ZnO-MMT เพิ่มขึ้น



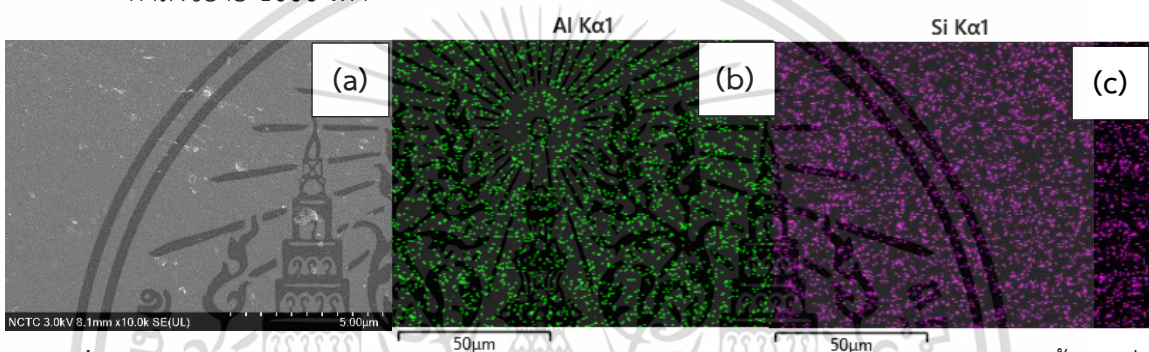
รูปที่ 4.4 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของวัสดุประกอบนาโน CS3F; (a) รูปลักษณะพื้นผิวที่กำลังขยาย

10000 เท่า (b) รูปการกระจายตัวของธาตุ Al และ (c) รูปการกระจายตัวของธาตุ Si ที่กำลังขยาย 1000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้พิมพ์เห็นประโยชน์ในการศึกษาไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ยินยอมให้พิมพ์และเผยแพร่โดยไม่คิดค่าและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของวัสดุประกอบนาโน CS6F; (a) รูปลักษณะพื้นผิวที่กำลังขยาย 10000 เท่า (b) รูปการกระจายตัวของธาตุ Al และ (c) รูปการกระจายตัวของธาตุ Si ที่กำลังขยาย 1000 เท่า



รูปที่ 4.6 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของวัสดุประกอบนาโน CS12F; (a) รูปลักษณะพื้นผิวที่กำลังขยาย 10000 เท่า (b) รูปการกระจายตัวของธาตุ Al และ (c) รูปการกระจายตัวของธาตุ Si ที่กำลังขยาย 1000 เท่า

#### 4.2.3 เทคนิค TGA

เมื่อนำฟิล์มไคโตซานและฟิล์ม CS/ZnO-MMT ไปตรวจวิเคราะห์หาปริมาณการสลายตัวขององค์ประกอบด้วยเทคนิค TGA โดยทำการทดสอบในช่วงอุณหภูมิ 50-600 °C และมีอัตราการให้ความร้อนที่ 10 °C/min ภายใต้บรรยากาศออกซิเจน ได้ผลการวิเคราะห์ แสดงดังตารางที่ 4.3

จากตารางที่ 4.3 พบการสลายตัวในสามช่วงอุณหภูมิ โดยน้ำหนักที่สลายตัวไปในช่วงแรก (1) ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 130 °C เกิดจากการระเหยของความชื้นในฟิล์มไคโตซานและ CS/ZnO-MMT ในส่วนที่ (2) และ (3) พบว่าเป็นการสลายตัวของไคโตซานและสารอินทรีย์ที่อยู่ภายนอกและแทรกตัวอยู่ใน MMT ตามลำดับ [50,66] ซึ่งแสดงให้เห็นว่าที่อุณหภูมิ 600 °C ฟิล์มไคโตซานสามารถสลายตัวได้เกือบ 100% ส่วนน้ำหนักที่เหลือจากการสลายตัวของฟิล์ม CS/ZnO-MMT คือ ส่วนของสารอินทรีย์ที่ไม่สลายตัวในช่วงอุณหภูมิ 50-600 °C ซึ่งสันนิษฐานว่า คือ องค์ประกอบของ ZnO-MMT

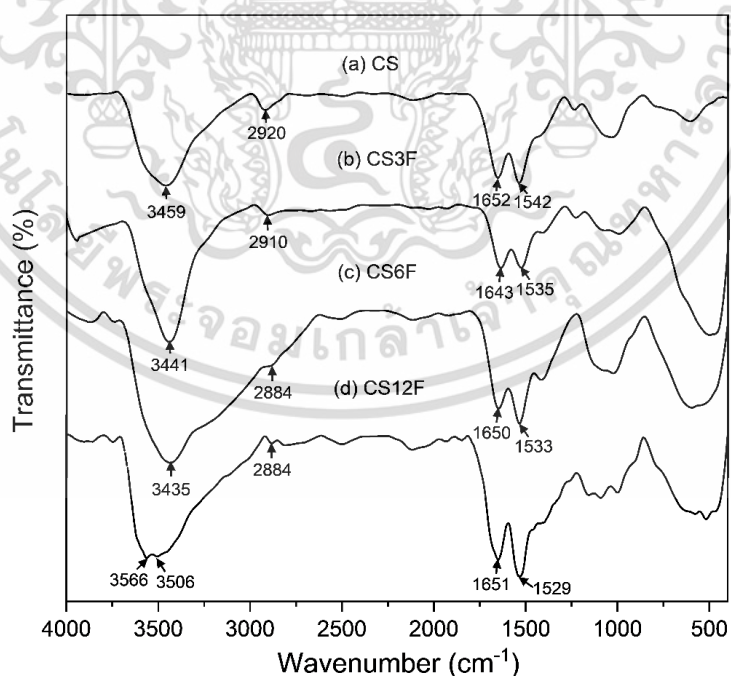
ที่มีการเติมลงไป ใน CS/ZnO-MMT ในปริมาณที่ต่างกัน ได้แก่ 3% 6% และ 12%wt เทียบกับน้ำหนักของไคโตซาน แต่จากผลการวิเคราะห์พบน้ำหนักคงเหลือมากกว่าปริมาณ ZnO-MMT ที่เติมลงในฟิล์ม

ในตอนแรก สันนิษฐานว่านอกจากน้ำหนักของสารอนินทรีย์ที่ไม่สลายตัวในช่วงอุณหภูมิ 50-600 °C แล้วอาจเป็นน้ำหนักของโคโคซานบางส่วนที่แทรกตัวอยู่ระหว่างชั้นของ MMT อย่างหนาแน่น ทำให้ไม่สามารถสลายตัวได้ ดังนั้นจึงพบน้ำหนักคงเหลือสุดท้ายมากกว่าปริมาณ ZnO-MMT ที่เติมลงในฟิล์มวัสดุประกอบในตอนแรก

**ตารางที่ 4.3** ปริมาณการสลายตัวขององค์ประกอบในฟิล์มโคโคซาน และฟิล์ม CS/ZnO-MMT จากเทคนิค TGA ภายใต้บรรยากาศออกซิเจน

ตัวอย่าง	น้ำหนักที่สูญเสียไปในแต่ละช่วงอุณหภูมิ (%)			น้ำหนักคงเหลือ(%)
	(1) 50 -130 °C	(2) 230-380°C	(3) 380-600°C	
0.1ZM	7.42	-	-	92.58
CS	11.44	48.26	37.94	2.35
CS3F	10.90	47.57	34.12	7.41
CS6F	13.57	41.84	35.60	9.00
CS12F	7.40	42.23	33.73	16.65

#### 4.2.4 เทคนิค FT-IR



**รูปที่ 4.7** อินฟราเรดสเปกตรัมของ (a) CS และฟิล์ม CS/ZnO-MMT; (b) CS3F (c) CS6F และ (d) CS12F เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำฟิล์มไคโตซานและฟิล์ม CS/ZnO-MMT ไปวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FT-IR โดยใช้โหมด Transmission ในช่วงความยาวคลื่น 400–4000  $\text{cm}^{-1}$  ผลวิเคราะห์แสดงดังรูปที่ 4.7 และตารางที่ 4.4

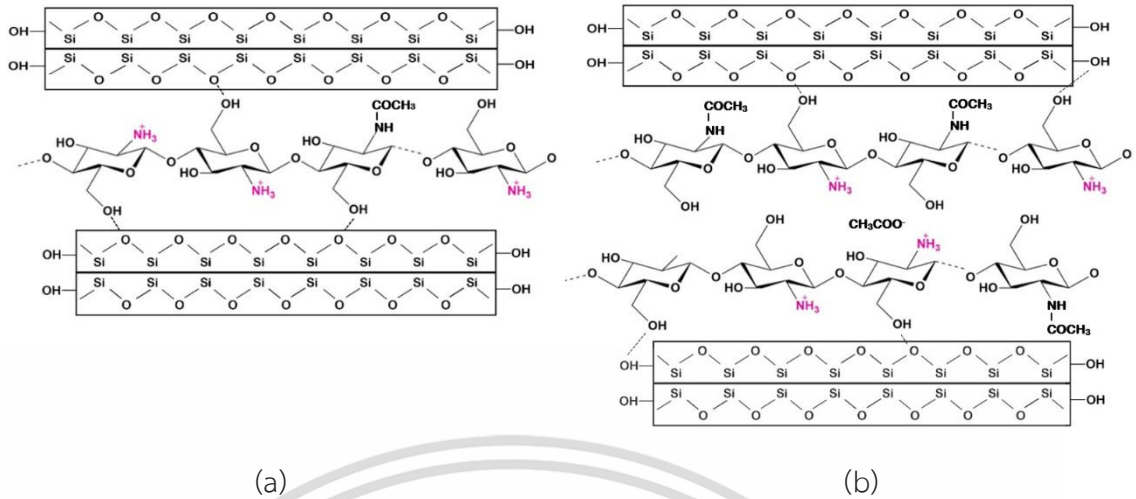
จากการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FT-IR ของฟิล์มไคโตซานและ CS/ZnO-MMT พบพีกตำแหน่งเลขคลื่นประมาณ 3200-3550  $\text{cm}^{-1}$  ซึ่งแสดงถึงการสั่นของหมู่ฟังก์ชันของ O-H stretching และ N-H stretching ที่ซ้อนทับกัน เลขคลื่น 2800-2900 แสดงถึง C-H aliphatic นอกจากนี้ยังมีพีกที่สำคัญอีก คือ ที่เลขคลื่นประมาณ 1652 แสดงถึง N-H bending และที่เลขคลื่นประมาณ 1542 แสดงถึง N-H protonated amine แสดงดังรูปที่ 4.7

ตารางที่ 4.4 ตำแหน่งเลขคลื่นที่สำคัญของฟิล์ม CS และฟิล์ม CS/ZnO-MMT ที่สังเคราะห์ได้

ชื่อตัวอย่าง	เลขคลื่น ( $\text{cm}^{-1}$ )			
	C-H aliphatic	N-H stretching	N-H bending	N-H protonated amine
CS	2920.65	3459.76	1652.60	1542.95
CS3F	2910.59	3441.10	1643.53	1535.65
CS6F	2884.05	3435.52	1650.97	1533.85
CS12F	2884.05	3506.28	1651.78	1529.78

เมื่อเติม ZnO-MMT ลงในฟิล์มไคโตซาน พบว่ามีการเลื่อนตำแหน่งของพีก N-H protonated amine ภายในไคโตซาน ไปในตำแหน่งเลขคลื่นต่ำกว่า แสดงค่าดังตารางที่ 4.4 จากผลดังกล่าวสันนิษฐานได้ว่า ไคโตซานสามารถแทรกเข้าไปอยู่ระหว่างชั้นของ MMT โดยมีแบบจำลองการแทรกตัวแสดงดังรูปที่ 4.8 (a) แบบชั้นเดียว มีการสร้างพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของไคโตซานและหมู่ไฮดรอกซิลของแผ่นซิลิกา และ (b) แบบสองชั้น นอกจากจะมีการสร้างพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของไคโตซานและหมู่ไฮดรอกซิลของแผ่นซิลิกา ยังมีการสร้างพันธะระหว่างหมู่อะมิโนและหมู่ไฮดรอกซิลของไคโตซานด้วยกันเองภายในโครงสร้าง โดยมีหมู่อะซิเตท ( $\text{CH}_3\text{COO}^-$ ) เป็นไอออนดุลประจุ ซึ่งมีผลที่สอดคล้องกับการทดสอบเสถียรภาพทางความร้อนด้วย TGA ที่พบปริมาณของน้ำหนักสุดท้ายมากกว่าปริมาณของ ZnO-MMT ที่เติมลงไปในตอนแรก

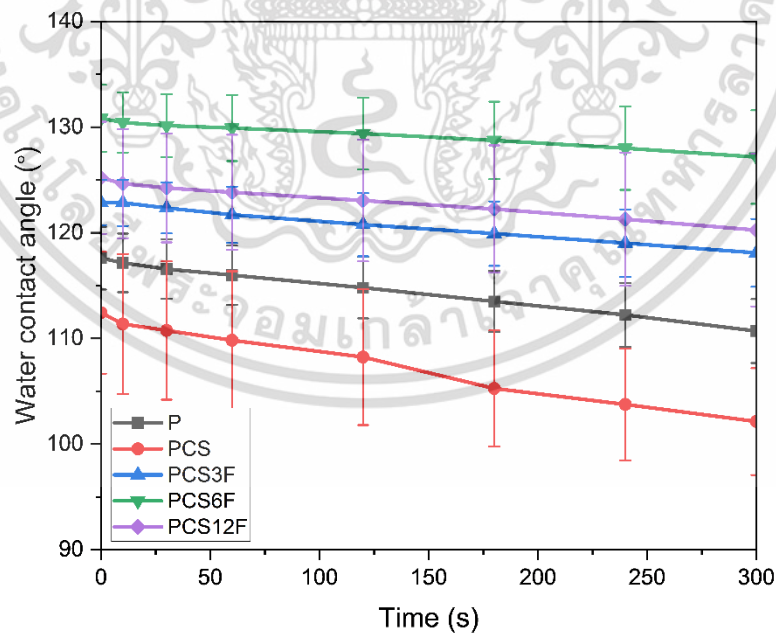
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



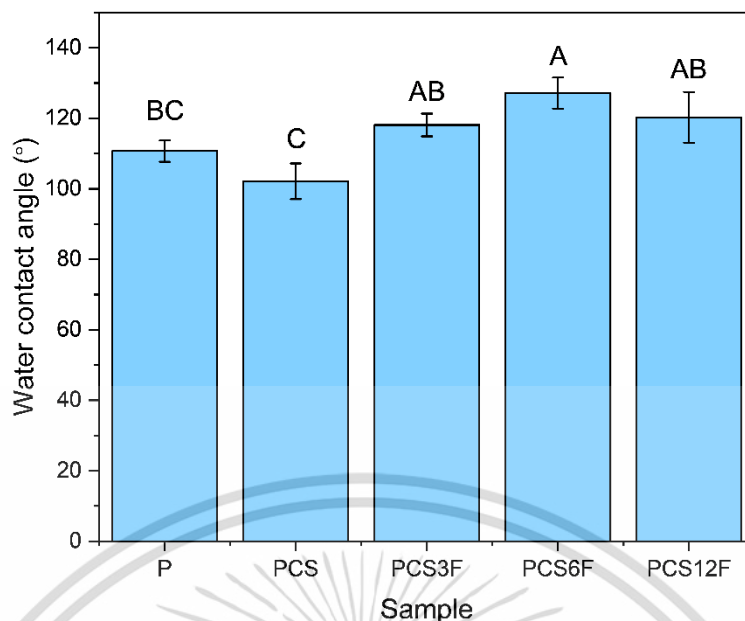
รูปที่ 4.8 แบบจำลองการแทรกตัวของโคไคซานบริเวณระหว่างชั้นของ MMT (a) แบบชั้นเดียว (b) แบบสองชั้น [66]

### 4.3 สมบัติของกระดาษกราฟที่เคลือบด้วยวัสดุประกอบโคไคซานนาโนมอนต์มอริล-โพลีไนด์แทรกสอดซิงค์ออกไซด์ (P-CS/ZnO-MMT)

#### 4.3.1 การทดสอบมุมสัมผัสน้ำ (Water contact angle)



รูปที่ 4.9 ค่ามุมสัมผัสน้ำของกระดาษที่มีสูตรเคลือบต่างกันเมื่อทดสอบด้วยน้ำปราศจากเอนกสารนี้เป็นเวลา 0-300 วินาที (0-5 นาที) เท่านั้น ไม่นิยามให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



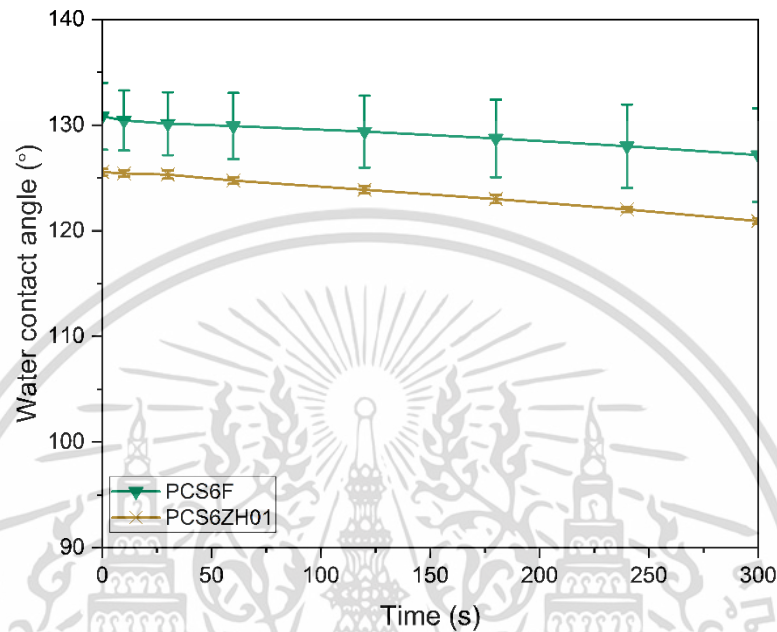
รูปที่ 4.10 ค่ามุมสัมผัสผิวน้ำของกระดาษที่มีสูตรเคลือบต่างกันเมื่อทดสอบด้วยน้ำปราศจากไอออน ที่เวลา 300 วินาที (5 นาที)

จากรูปที่ 4.9 เมื่อพิจารณาค่ามุมสัมผัสที่ทำการทดสอบด้วยน้ำปราศจากไอออน พบว่ากระดาษกราฟที่ถูกละเลาะด้วยสารเคลือบ CS/ZnO-MMT (PCSxF) สามารถวัดค่ามุมสัมผัสได้สูงกว่ากระดาษที่ไม่ผ่านการเคลือบด้วยสารเคลือบ (P) และกระดาษกราฟที่เคลือบเพียงไคโตซาน (PCS)

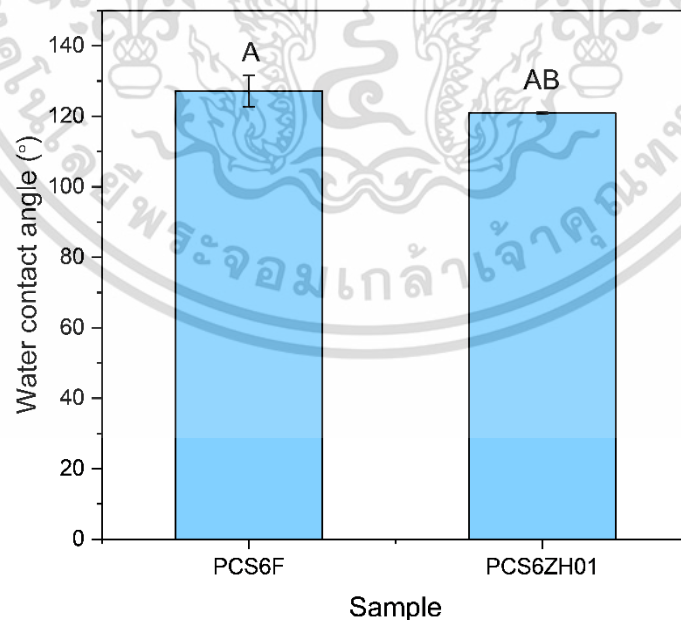
จากรูปที่ 4.9-4.10 เมื่อเปรียบเทียบสูตรสารเคลือบ CS/ZnO-MMT (PCSxF) ที่มีการเติม ZnO-MMT พบว่าค่ามุมสัมผัสที่เพิ่มขึ้นไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ที่ 0 วินาที กระดาษสูตร PCS6F ให้ค่ามุมสัมผัสน้ำที่สูงที่สุด รองลงมาคือ PCS12F และ PCS3F มีค่าอยู่ที่ 130.8° 125.2° และ 122.9° ตามลำดับ และมียุทธศาสตร์สัมผัสที่ลดลงเมื่อเวลาผ่านไป เนื่องจากแรงเชื่อมแน่นระหว่างโมเลกุลเดียวกันของของเหลว (Cohesive force) จะมีค่าลดลงและน้อยกว่าแรงยึดติด (Adhesive force) ระหว่างโมเลกุลต่างชนิดกันนั่นก็คือของเหลวและกระดาษ โดยที่กระดาษสูตร PCS6F ยังคงมีค่าสัมผัสสูงที่สุดเมื่อเทียบกับสูตรอื่นๆ แต่เมื่อทำการเปรียบเทียบกระดาษกราฟที่ไม่ผ่านการเคลือบด้วยสารเคลือบ (P) และกระดาษกราฟที่เคลือบเพียงไคโตซาน (PCS) กับที่กระดาษถูกละเลาะด้วยสารเคลือบ CS/ZnO-MMT (PCSxF) พบว่ามีค่ามุมสัมผัสที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ

จากผลดังกล่าวสันนิษฐานว่าการเติม Nanofiller: ZnO-MMT มีองค์ประกอบของ ZnO อยู่ ทำให้มีสมบัติความไม่ชอบน้ำ ซึ่ง Nanofiller: ZnO-MMT มีการกระจายตัวอยู่ทั่วทั้งพื้นผิวของสารเคลือบวัสดุประกอบ CS/ZnO-MMT รวมไปถึงเข้าไปแทรกในรูพรุนรูพรุนภายในโครงสร้างกระดาษเอกซอสานนี้จึงทำให้เมื่อหยดน้ำลงบนกระดาษกราฟที่เคลือบด้วยวัสดุประกอบ หยดน้ำจะอยู่บนพื้นผิวของไม่ว่า Nanofiller: ZnO-MMT และมีอากาศเข้าไปแทรกตัวอยู่ภายในช่องว่าง ทำให้กักขังอากาศเอาไว้

ภายในเป็นจำนวนมาก หยดน้ำจึงสามารถตั้งอยู่บนพื้นผิวของกระดาษได้ จึงทำให้กระดาษที่เคลือบด้วยวัสดุประกอบ CS/ZnO-MMT ทั้ง 3 สูตร มีค่ามุมสัมผัสน้ำที่สูงกว่ากระดาษกราฟที่ไม่ผ่านการเคลือบ จากผลการทดสอบหาค่ามุมสัมผัสด้วยน้ำสามารถวัดค่ามุมสัมผัสได้นานถึง 5 นาทีและมีค่ามากกว่า  $90^{\circ}$  แสดงว่ากระดาษเคลือบทุกสูตรมีสมบัติความไม่ชอบน้ำหรือมีความต้านทานน้ำที่ดี



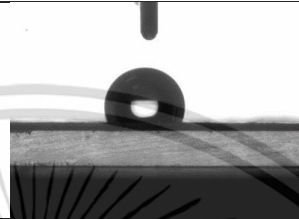
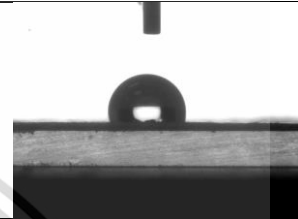







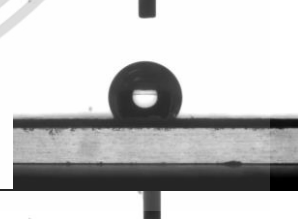
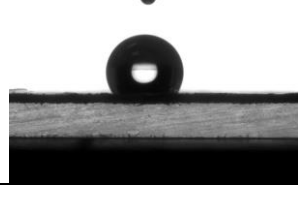
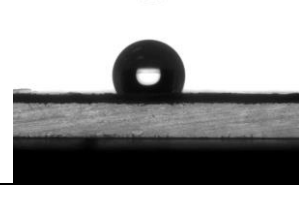
รูปที่ 4.11 ค่ามุมสัมผัสของกระดาษเคลือบสูตร PCS6ZH01 และ PCS6F เมื่อทดสอบด้วยน้ำปราศจากไอออนที่เวลา 0-300 วินาที (0-5 นาที)



รูปที่ 4.12 ค่ามุมสัมผัสของกระดาษเคลือบสูตร PCS6ZH01 และ PCS6F เมื่อทดสอบด้วยน้ำ  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ปราศจากไอออน ที่เวลา 300 วินาที (5 นาที)  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.11-4.12 เมื่อเปรียบเทียบกระดาษเคลือบสูตร PCS6F ที่มีค่ามุมสัมผัสสูงที่สุดกับสารเคลือบโคโตนานที่มีการเติมเพียง ZnO ในปริมาณ 6% (PCS6ZH01) พบว่ากระดาษเคลือบสูตร PCS6F มีค่ามุมสัมผัสที่สูงกว่า PCS6ZH01 ซึ่งไม่ต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ 4.5 ลักษณะหยดน้ำบนกระดาษที่มีสูตรเคลือบต่างกันที่เวลา 0 และ 300 วินาที

สูตร	มุมสัมผัสน้ำที่เวลาต่างๆ (วินาที)	
	0	300
P		
PCS		
PCS3F		
PCS6F		
PCS12F		
PCS6ZH01		

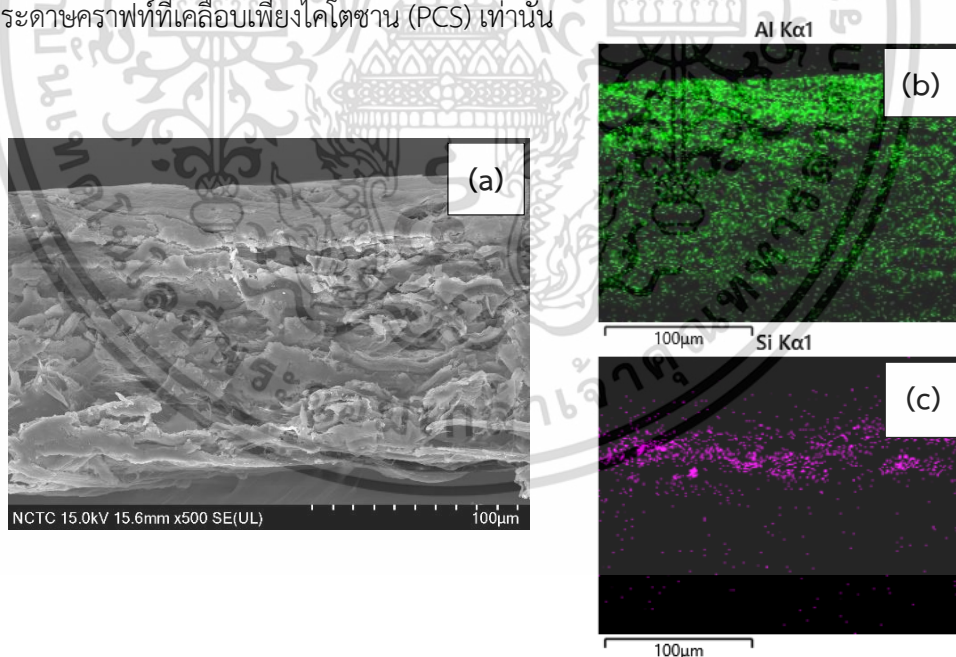
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4 การพิสูจน์เอกลักษณ์ของวัสดุประกอบนาโนมอนต์มอริลโลไนต์แทรกสอดซิงค์ออกไซด์ (CS/ZnO-MMT) เมื่อเคลือบลงบนกระดาษกราฟท์

##### 4.4.1 เทคนิค SEM

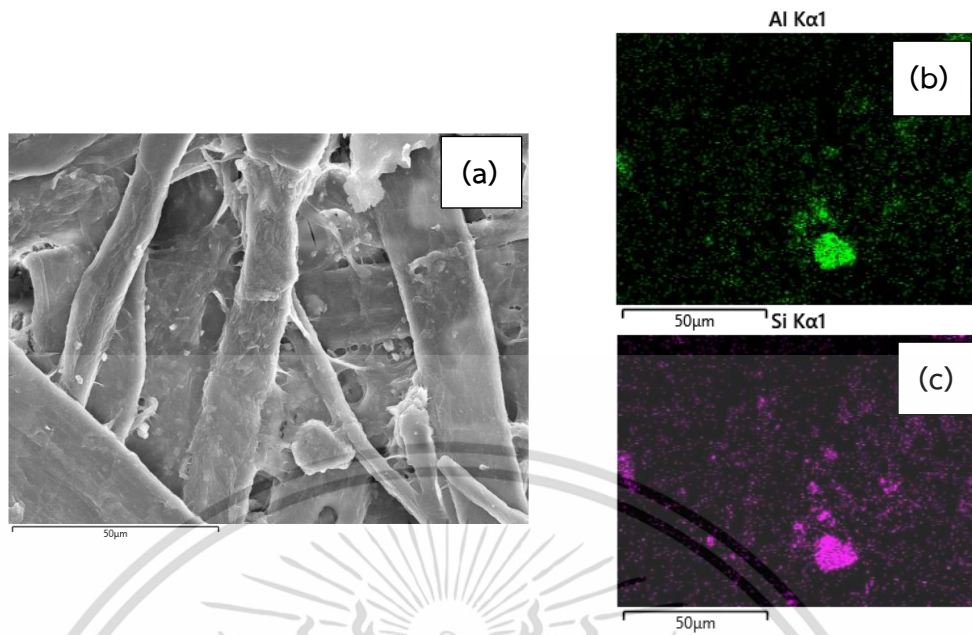
เมื่อนำกระดาษที่เคลือบด้วย CS/ZnO-MMT 6%wt เทียบน้ำหนักโคโตนาน สสูตร PCS6F ซึ่งมีความสามารถในการต้านทานน้ำมากที่สุดจากผลการทดสอบมุมสัมผัสในหัวข้อที่ 4.3 ไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Field emission scanning electron microscopy (FESEM) กำลังขยาย 500 และ 1000 เท่า เพื่อดูการกระจายตัวของ Nanofiller บนพื้นผิวของกระดาษกราฟท์ แสดงดังรูปที่ 4.13-4.14

จากรูปที่ 4.13 รูปภาคตัดขวางของกระดาษสูตร PCS6F แสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวของธาตุ Al และ Si ของ ZnO-MMT ที่พบมากบริเวณพื้นผิวด้านบน และจากรูปที่ 4.14 พบการกระจายตัวของ Al และ Si อยู่บนพื้นผิวทั่วชิ้นงานตัวอย่าง แต่อาจมีบางบริเวณที่มีความหนาแน่นของ Al และ Si มากเนื่องจากกระดาษกราฟท์มีบริเวณที่เป็นรูพรุน ซึ่ง CS/ZnO-MMT จะสามารถแทรกเข้าไปอยู่ในรูพรุนและช่วยปรับสภาพพื้นผิวของกระดาษให้เรียบขึ้น ดังนั้นกระดาษกราฟท์ที่เคลือบด้วย CS/ZnO-MMT จึงมีความสามารถในการต้านทานน้ำที่ดีขึ้น เมื่อเทียบกับกระดาษที่ไม่ผ่านการเคลือบด้วยสารเคลือบ (P) และกระดาษกราฟท์ที่เคลือบเพียงโคโตนาน (PCS) เท่านั้น



รูปที่ 4.13 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของวัสดุประกอบนาโน PCS6F; (a) รูปภาคตัดขวางที่กำลังขยาย 500 เท่า (b) รูปการกระจายตัวของธาตุ Al และ (c) รูปการกระจายตัวของธาตุ Si ที่กำลังขยาย 500 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของวัสดุประกอบนาโน PCS6F; (a) รูปลักษณะพื้นผิวที่กำลังขยาย 1000 เท่า (b) รูปการกระจายตัวของธาตุ Al และ (c) รูปการกระจายตัวของธาตุ Si ที่กำลังขยาย 1000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

# สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการวิจัย

#### 1. ผลของการสังเคราะห์สารตัวเติมระดับนาโนมอนต์มอริลโลไนต์แทรกสอดซิงค์ออกไซด์ (Nanofiller: ZnO-MMT)

งานวิจัยนี้สามารถสังเคราะห์สารตัวเติมระดับนาโนมอนต์มอริลโลไนต์แทรกสอดซิงค์ออกไซด์ (Nanofiller: ZnO-MMT) โดยใช้เทคนิคอัลตราโซนิคร่วมกับการทำปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มอล โดย  $Zn^{2+}$  จากสารละลายจะเข้าไปแทรกตัวและเกิดเป็น ZnO ภายในโครงสร้างรวมไปถึงบนพื้นผิวของ MMT ความเข้มข้นของสารละลาย  $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$  ที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ ZnO ในกระบวนการนี้ คือ 0.1 M โดย ZnO ที่เกิดขึ้นมีโครงสร้างเป็น Wurtzite

#### 2. ผลของการเตรียมและทดสอบฟิล์มวัสดุประกอบนาโนมอนต์มอริลโลไนต์แทรกสอดซิงค์ออกไซด์ในไคโตซาน (CS/ZnO-MMT)

เมื่อนำ ZnO-MMT ที่สังเคราะห์ได้เติมลงในฟิล์ม CS/ZnO-MMT ปริมาณ 3% 6% และ 12% (%wt) เทียบกับน้ำหนักของไคโตซาน เมื่อมีการเติม ZnO-MMT ในปริมาณ 3%wt และ 6%wt พบว่าฟิล์ม CS/ZnO-MMT มีลักษณะพื้นผิวที่เรียบ แต่เมื่อมีการเติม ZnO-MMT ในปริมาณ 12 %wt พื้นผิวมีลักษณะที่ขรุขระ ไม่สม่ำเสมอ เนื่องจาก ZnO-MMT เกิดการรวมตัวกันและกระจายตัวได้ไม่ดี นอกจากนี้ยังพบว่าไคโตซานบางส่วนสามารถเข้าไปแทรกตัวอยู่ระหว่างชั้นและอาจจะยึดเกาะกันด้วยพันธะไฮโดรเจนที่แข็งแรง ทำให้พบน้ำหนักของสารอนินทรีย์ที่ไม่สลายตัว (%) สุดท้ายมากกว่าปริมาณ ZnO-MMT ที่เติมลงในฟิล์มไคโตซานในตอนแรก

#### 3. ผลของการทดสอบสมบัติของกระดาษกราฟที่เคลือบด้วยวัสดุประกอบนาโนมอนต์มอริลโลไนต์แทรกสอดซิงค์ออกไซด์ในไคโตซาน (CS/ZnO-MMT)

เมื่อนำสารเคลือบ CS/ZnO-MMT ที่มีการเติม ZnO-MMT ปริมาณ 3% 6% และ 12 %wt เทียบกับน้ำหนักของไคโตซาน ไปเคลือบลงบนกระดาษกราฟ ทำให้กระดาษมีค่ามุมสัมผัสน้ำเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ และกระดาษเคลือบทุกสูตรมีค่ามุมสัมผัสน้ำมากกว่า  $90^\circ$  แสดงถึงสมบัติความไม่ชอบน้ำหรือมีความต้านทานน้ำที่ดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาปัจจัยที่มีผลในการสังเคราะห์ ZnO เพิ่มเติม เช่น อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มอล รวมไปถึงความเข้มข้นของสารละลาย  $Zn^{2+}$  ซึ่งอาจมีผลต่อปริมาณและรูปแบบการเกิด ZnO
2. ศึกษาอิทธิพลของเวลาที่ใช้ในการโซนิคเออร์นในขั้นตอนการสังเคราะห์ Nanofiller เพิ่มเติม ซึ่งอาจมีผลต่อการแลกเปลี่ยนไอออน  $Zn^{2+}$  ที่เข้าไปในชั้นของ MMT
3. ควรศึกษาสภาพพื้นผิวของฟิล์มและกระดาษกราฟท์ที่เคลือบด้วยวัสดุประกอบด้วยเทคนิคเพิ่มเติม เช่น เทคนิค AFM (Atomic force microscopy) เพื่อดูความขรุขระบนพื้นผิว
4. ควรศึกษาสมบัติของกระดาษกราฟท์ที่เคลือบด้วยวัสดุประกอบเพิ่มเติม เช่น การซึมผ่านก๊าซ และสมบัติการต้านเชื้อแบคทีเรีย เป็นต้น
5. ศึกษาวัตถุดิบจากธรรมชาติอื่น ๆ แทนการใช้ไคโตซานในการเตรียมวัสดุประกอบเพิ่มเติม เช่น แป้งข้าวเจ้าและแป้งข้าวโพด เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] ศูนย์วิจัยกสิกรไทย. 2562. มาตรการลดใช้พลาสติกกระทบธุรกิจ SME อย่างไร. [online]. Available: <https://www.kasikornresearch.com/SiteCollectionDocuments/analysis/k-social-media/sme/PlasticSME/PlasticSME.pdf>
- [2] สำนักงานกองทุนสนับสนุนการสร้างเสริมสุขภาพ. 2563. “เมื่อขยะพลาสติก กำลังกลับมา.” Thaihealth Watch 2021 จับตาทิศทางสุขภาพคนไทยปี 2564.
- [3] Li, Q., Wang, S., Jin, X., Huang, C., and Xiang, Z. 2020. “The application of polysaccharides and their derivatives in pigment, barrier, and functional paper coatings.” *Polymers*. 12(8) : 1837.
- [4] สถาบันปิโตรเลียมแห่งประเทศไทย. 2553. “รู้จักฟิล์มลามิเนต (Laminated Film).” *Plastics Intelligence Update*. 1(2) : 1-9
- [5] Kunam, P. K., Ramakanth, D., Akhila, K., and Gaikwad, K. K. 2022. “Bio-based materials for barrier coatings on paper packaging.” *Biomass Conversion and Biorefinery*. 1-16.
- [6] Chawla, S.P., Kanatt, S.R., Sharma, A.K. 2015. “Chitosan.” *Polysaccharides*. 219-246.
- [7] Li, Q., Dunn, E. T., Grandmaison, E. W., and Goosen, M. F. 1992. “Applications and properties of chitosan.” *Bioactive and compatible polymer*. 370-397
- [8] สิริพันธ์ วิริยะสุนทร และปานิสรา ทองลิ้ม. 2565. “การยับยั้งแบคทีเรียของผ้าฝ้ายเคลือบด้วยวัสดุประกอบไคโตซานและมอนต์-มอริลโลไนต์.” *วารสาร มทร.อีสาน*. 15(1) : 86-95
- [9] Medina, L. 2019. “High Clay Content Cellulose Nanocomposites for Mechanical Performance and Fire Retardancy” (Doctoral dissertation, KTH Royal Institute of Technology).
- [10] Nath, D., Santhosh, R., Pal, K., and Sarkar, P. 2022. “Nanoclay-based active food packaging systems: A review.” *Food Packaging and Shelf Life*. 31 : 100803.
- [11] Kim, I., Viswanathan, K., Kasi, G., Thanakkasaranee, S., Sadeghi, K., and Seo, J. 2022. “ZnO nanostructures in active antibacterial food packaging: preparation methods, antimicrobial mechanisms, safety issues, future prospects, and challenges.” *Food Reviews International*. 38(4) : 537-565.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [12] สายใจ แก้วอ่อน. 2559. “การยับยั้งแบคทีเรียก่อโรคในอาหารของ *Bacillus spp.*” วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มรย. 1(1) : 53-64.
- [13] ระพีพรรณ สายแวว. 2563. เทคนิคการเลือกบรรจุภัณฑ์สำหรับผลิตภัณฑ์สัตว์น้ำพื้นเมือง. [online]. Available: [https://www4.fisheries.go.th/local/file\\_document/20200501105337\\_1\\_file.pdf](https://www4.fisheries.go.th/local/file_document/20200501105337_1_file.pdf)
- [14] Robertson, G. L. 2013. Food Packaging Principles and Practice. 3<sup>rd</sup>. Florida : Taylor & Francis Group.
- [15] Kumari, N., and Mohan, C. 2021. “Basics of clay minerals and their characteristic properties.” Clay and Clay Minerals. 24 : 1-29.
- [16] ศิริรัตน์ รัตนจันทร์. 2545. การศึกษาสมบัติดินในจังหวัดนครราชสีมาเพื่อใช้ในงานด้านเซรามิก. [online]. Available: <http://sutir.sut.ac.th:8080/sutir/bitstream/123456789/879/1/bib287.pdf>
- [17] Usmani, M. A., Khan, I., Ahmad, N., Bhat, A. H., Sharma, D. K., Rather, J. A., and Hassan, S. I. 2016. “Modification of nanoclay systems: an approach to explore various applications.” Nanoclay Reinforced Polymer Composites: Nanocomposites and Bionanocomposites. 57-83.
- [18] Bergaya, F., and Lagaly, G. 2006. “General introduction: clays, clay minerals, and clay science.” Developments in clay science. 1 : 1-18.
- [19] ประภาพร ลิมเรื่องธรรม. 2551. “การเตรียมอะลูมิเนียมฟิลาเคลย์ด้วยเทคนิคอัลตรา-โซลนิกและการดูดซับสีย้อมอินทรีย์.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมี, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [20] Faheem, U. 2018. “Montmorillonite: An introduction to properties and utilization.” Current Topics in the Utilization of Clay in Industrial and Medical Applications.
- [21] รัตน์ชาติ บุศรินทร์. 2562. คู่มือการวิเคราะห์ดินทางเคมีเพื่อประเมินความสมบูรณ์ของดิน. [online]. Available: <http://e-library.ldd.go.th/library/flip/bib10134f/bib10134f.html#p=70>
- [22] Kampeerappun, P., Srikulkit, K., and Pentrakoon, D. 2003. “Preparation of cassava starch/montmorillonite nanocomposite film.” M.Sc. Thesis of Chulalongkorn University.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [23] สுகนธ์ กาละสังข์. 2558. “ศึกษาการเตรียมและการวิเคราะห์คุณลักษณะเฉพาะของโครงสร้างแท่งนาโนซิงค์ ออกไซด์ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลสำหรับการประยุกต์ใช้ในพื้นที่ผิวขยายสัญญาณการกระเจิงแบบรามาน.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- [24] ธงชัย พันธุ์ธาดาพร. 2564. “การสังเคราะห์และการตรวจสอบคุณลักษณะของโครงสร้างนาโนของซิงค์-ออกไซด์จากฟิล์มซิงค์ด้วยวิธีออกซิเดชันทางความร้อน.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- [25] Singh, A. K., and Kishan, R. 2011. “Comparative Study of Zinc Oxide Nanostructures Synthesized by Oxidization of Zinc Foil and Zinc Powder.” Ph.D. dissertation, Rourkela National Institute of Technology.
- [26] ศุภมาส ตำนานวิทยากุล. 2556. “ซิงค์ออกไซด์วัสดุอนุภาคประสมงค์.” วารสารเทคโนโลยีวัสดุ. 13-15
- [27] ณัฐภูมิ เนียมจันทร์. 2553. “ผลของซิงค์ออกไซด์อนุภาคนาโนรูปทรงต่างๆที่อยู่บนผิวผ้าฝ้ายด้วยเทคนิคการปั่นด้วยไฟฟ้าเพื่อสมบัติต้านทานแสงยูวีและต้านทานแบคทีเรีย.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์, มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- [28] ภัทร์ สุขแสน. 2554. “พื้นผิวอัจฉริยะด้วยนาโนเทคโนโลยี.” วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา. 16(1), 124-130.
- [29] สำเร็จ ลำเจียก. 2561. “สมบัติความไม่ชอบน้ำยิ่งยวดของฟิล์มบางพอลิเตตระฟลูออโรเอ-ทีลินที่เคลือบบนฟิล์มอะลูมิเนียมผิวขรุขระ.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์, มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.
- [30] สุกฤษฏ์ ทองรมย์. 2561. “การสังเคราะห์พื้นผิวไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดที่มีความใสและคงทนโดยเทคนิคการเคลือบไอเคมีโดยอาศัยไมโครเวฟพลาสมา.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- [31] Ciasca, G., Papi, M., Businaro, L., Campi, G., Ortolani, M., Palmieri, V., and De Spirito, M. 2016. “Recent advances in superhydrophobic surfaces and their relevance to biology and medicine.” *Bioinspiration & biomimetics*, 11(1) : 011001.
- [32] Mardosaite, R., Jurkeviciute, A., and Rackauskas, S. 2021. “Superhydrophobic ZnO nanowires: Wettability mechanisms and functional applications.” *Crystal Growth & Design*, 21(8) : 4765-4779.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [33] Baruah, S., and Dutta, J. 2009. “Hydrothermal growth of ZnO nanostructures.” Science and technology of advanced materials.
- [34] Ahmed, S., and Ikram, S. (Eds.). 2017. Chitosan: derivatives, composites and applications. USA : Wiley Global Headquarters.
- [35] Mustafa, M. K., Iqbal, Y., Majeed, U., and Sahdan, M. Z. 2017. “Effect of precursor’s concentration on structure and morphology of ZnO nanorods synthesized through hydrothermal method on gold surface.” In AIP Conference Proceedings 1788(1) : 030120.
- [36] Roy, J. C., Salaün, F., Giraud, S., Ferri, A., Chen, G., & Guan, J. 2017. “Solubility of chitin: solvents, solution behaviors and their related mechanisms.” Solubility of polysaccharides. 3 : 20-60.
- [37] Reshad, R. A. I., Jishan, T. A., & Chowdhury, N. N. 2021. “Chitosan and its broad applications: A brief review.” Clinical and experimental investigations. 12(4)
- [38] จีราพร โรจน์ทินกร และอรุณ คงดี. 2555. การเตรียมอนุภาคนาโนไคโตซาน-สมุนไพรรเพื่อการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ [online]. Available : [http://webpac.library.mju.ac.th:8080/mm/fulltext/research/2556/jiraporn\\_rojtinnakorn\\_2555/fulltext.pdf](http://webpac.library.mju.ac.th:8080/mm/fulltext/research/2556/jiraporn_rojtinnakorn_2555/fulltext.pdf).
- [39] กัณฑ์วัฒน์ หมดสุเรน. 2555. “การเตรียมและการทดสอบของฟิล์มนาโนวัสดุประกอบชีวภาพจากไคโตซานและไฮดรอกซีอะพาไทต์.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์, มหาวิทยาลัย ศิลปากร.
- [40] Sandeep, A., Sangameshwar, K., Mukesh, G., Chandrakant, R., and Avinash, D. 2013. “A brief overview on chitosan applications.” Indo Am J Pharmaceutical Re. 13(2) : 1564-1574.
- [41] Kansal, D., Hamdani, S. S., Ping, R., Sirinakbumrung, N., and Rabnawaz, M. 2020. “Food-safe chitosan–zein dual-layer coating for water-and oil-repellent paper substrates.” ACS Sustainable Chemistry & Engineering. 8(17) : 6887-6897.
- [42] Thomas, S., Pius, A., and Gopi, S. (Eds.). 2020. Handbook of Chitin and Chitosan: Volume 1: Preparation and Properties. United Kingdom : Elsevier
- [43] Broek, L. A., Boeriu, C. G., and Stevens, C. V. 2019. “Chitin and chitosan: properties and applications.” Wiley series in renewable resources.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [44] Pellis, A., Guebitz, G. M., and Nyanhongo, G. S. 2022. "Chitosan: sources, processing and modification techniques." *Gels*. 8(7) : 393.
- [45] Morin-Crini, N., Lichtfouse, E., Torri, G., and Crini, G. 2019. "Applications of chitosan in food, pharmaceuticals, medicine, cosmetics, agriculture, textiles, pulp and paper, biotechnology, and environmental chemistry." *Environmental Chemistry Letters*. 17(4) : 1667-1692.
- [46] Zakaria, S. A. R. A. N. I., Chia, C. H., Ahmad, W. W., Kaco, H. A. T. I. K. A., Chook, S. W., and Chan, C. H. 2015. "Mechanical and antibacterial properties of paper coated with chitosan." *Sains Malays*. 44(6) : 905-911.
- [47] สุธิดา คงทอง. 2552. "ไคติน-ไคโตซาน." *วารสารวิชาการอุตสาหกรรมศึกษา*. 3(1) : 1-7.
- [48] Wiryasontorn, S., and Thongluem, P. 2022. "Antibacterial Activity of Coated Cotton Fabrics with Chitosan-Montmorillonite Composites." *RMUTI JOURNAL Science and Technology*. 15(1) : 86-95.
- [49] Biswas, S., Rashid, T. U., Debnath, T., Haque, P. and Rahman, M. M. 2020. "Application of chitosan-clay biocomposite beads for removal of heavy metal and dye from industrial effluent." *Journal of Composites Science*. 4(1) : 16.
- [50] Wang, K., Zhao, L., and He, B. 2021. "Chitosan/Montmorillonite coatings for the fabrication of food-safe greaseproof paper." *Polymers*. 13(10) : 1607.
- [51] Wang, S., and Jing, Y. 2017. "Effects of formation and penetration properties of biodegradable montmorillonite/chitosan nanocomposite film on the barrier of package paper." *Applied Clay Science*. 138 : 74-80.
- [52] Salmas, C., Giannakas, A., Katapodis, P., Leontiou, A., Moschovas, D., and Karydis-Messinis, A. 2020. "Development of ZnO/ Na- montmorillonite hybrid nanostructures used for PVOH/ZnO/Na-montmorillonite active packaging films preparation via a melt-extrusion process." *Nanomaterials*. 10(6) : 1079.
- [53] Mohan, S., Vellakkat, M., Aravind, A., and Reka, U. 2020. "Hydrothermal synthesis and characterization of Zinc Oxide nanoparticles of various shapes under different reaction conditions." *Nano Express*. 1(3) : 030028.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [54] Monvisade, P., and Siriphannon, P. 2009. "Chitosan intercalated montmorillonite: Preparation, characterization and cationic dye adsorption." *Applied Clay Science*. 42(3-4) : 427-431.
- [55] Brodnjak, U. V. 2017. "Influence of ultrasonic treatment on properties of bio-based coated paper." *Progress in organic coatings*. 103 : 93-100.
- [56] Tepmatee, P., and Siriphannon, P. 2013. "Effect of preparation method on structure and adsorption capacity of aluminum pillared montmorillonite." *Materials Research Bulletin*. 48(11) : 4856-4866.
- [57] Latif, M. H. A., and Square, A. D. 2015. "Preparation and Characterization for a New ZnO-Montmorillonite Hybrid from Iraqi (Traifawi) Clay Minerals." *Journal of Chemistry and Materials Research*. 7(5).
- [58] Al-Naamani, L., Dobretsov, S., and Dutta, J. 2016. "Chitosan-zinc oxide nanoparticle composite coating for active food packaging applications." *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 38 : 231-237.
- [59] Damato, A., Vianello, F., Novelli, E., Balzan, S., Giancesella, M., Giaretta, E., and Gabai, G. 2022. "Comprehensive review on the interactions of clay minerals with animal physiology and production." *Frontiers in Veterinary Science*. 571.
- [60] Gutiérrez, G. G. 2010. "Oxydation of Clay Nanoreinforced Polyolefins." Ph.D. dissertation, Arts et Métiers ParisTech.
- [61] Sabouni, R., and Gomaa, H. 2019. "Photocatalytic degradation of pharmaceutical micro-pollutants using ZnO." *Environmental Science and Pollution Research*. 26 : 5372-5380.
- [62] Mrad, M., Chouchene, B., & Chaabane, T. B. 2018. "Effects of zinc precursor, basicity and temperature on the aqueous synthesis of ZnO nanocrystals." *South African journal of chemistry*. 71 : 103-110.
- [63] Patel, H. A., Somani, R. S., Bajaj, H. C., and Jasra, R. V. 2006. "Nanoclays for polymer nanocomposites, paints, inks, greases and cosmetics formulations, drug delivery vehicle and waste water treatment." *Bulletin of Materials Science*. 29 : 133-145.
- [64] Khaorapapong, N., Khumchoo, N., and Ogawa, M. 2011. "Preparation of zinc oxide-montmorillonite hybrids." *Materials Letters*. 65(4) : 657-660.

เอกสารนี้เป็นเอกสารของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [65] Yasmeen, S., Kabiraz, M. K., Saha, B., Qadir, M. D., Gafur, M. D., and Masum, S. 2016. "Chromium (VI) ions removal from tannery effluent using chitosan-microcrystalline cellulose composite as adsorbent." *Int. Res. J. Pure Appl. Chem.* 10(4) : 1-14.
- [66] Wang, S. F., Shen, L., Tong, Y. J., Chen, L., Phang, I. Y., Lim, P. Q. and Liu, T. X. 2005. "Biopolymer chitosan/ montmorillonite nanocomposites: preparation and characterization." *Polymer Degradation and Stability.* 90(1) : 123-131.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

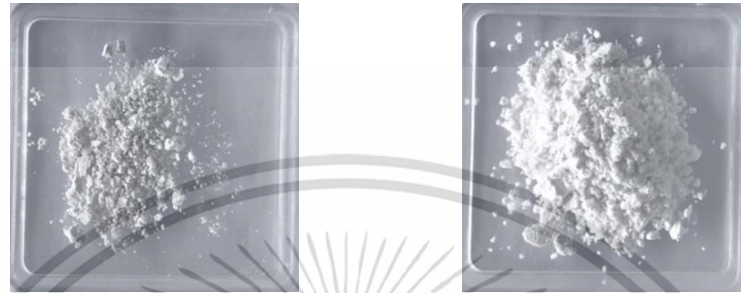


## ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก

ลักษณะทางกายภาพของซิงค์ออกไซด์ (ZnO) และสารตัวเติมระดับนาโน  
มอนต์มอริลโลไนต์แทรกสอดซิงค์ออกไซด์ (Nanofiller: ZnO-MMT)



(a)

(b)

รูปที่ ก.1 ลักษณะทางกายภาพของ ZnO (a) 0.1Z และ (b) 0.3Z



(a)

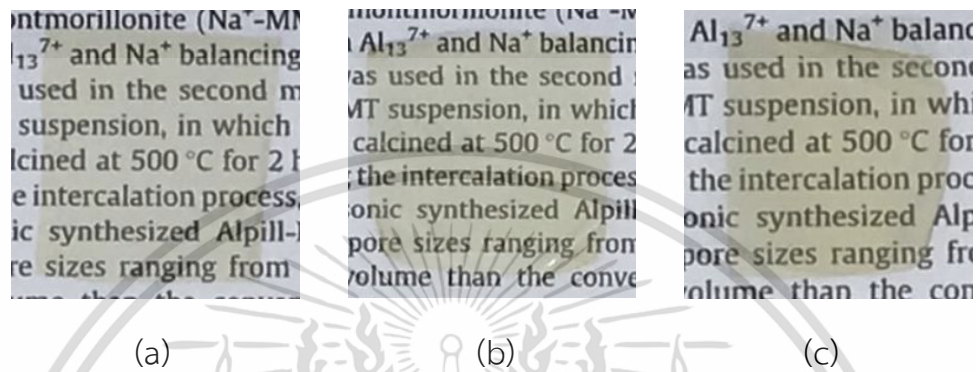
(b)

รูปที่ ก.2 ลักษณะทางกายภาพของ (a) 0.1ZM และ (b) 0.3ZM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข

### ลักษณะทางกายภาพของแผ่นฟิล์มวัสดุประกอบโคโตซานนาโน มอนต์มอริลโลไนต์แทรกสอดซิงค์ออกไซด์ (CS/ZnO-MMT)

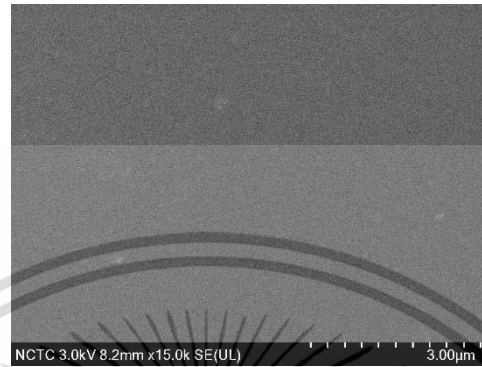


รูปที่ ข.1 ลักษณะทางกายภาพของฟิล์ม CS/ZnO-MMT; (a) CS3F (b) CS6F และ (c) CS12F

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ค

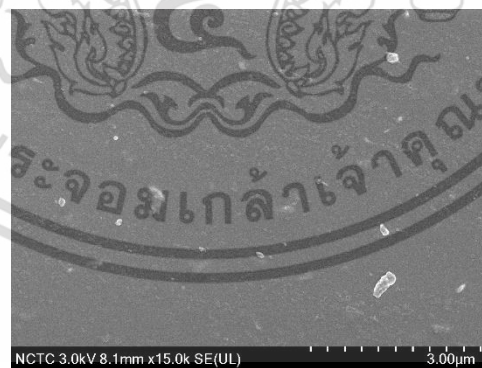
### ลักษณะทางสัณฐานของวัสดุประกอบนาโนฟิล์ม CS/ZnO-MMT



(a)



(b)



(c)

รูปที่ ค.1 ลักษณะพื้นผิวที่กำลังขยาย 15000 เท่าของฟิล์ม CS/ZnO-MMT; a) CS3F (b) CS6F และ (c) CS12F

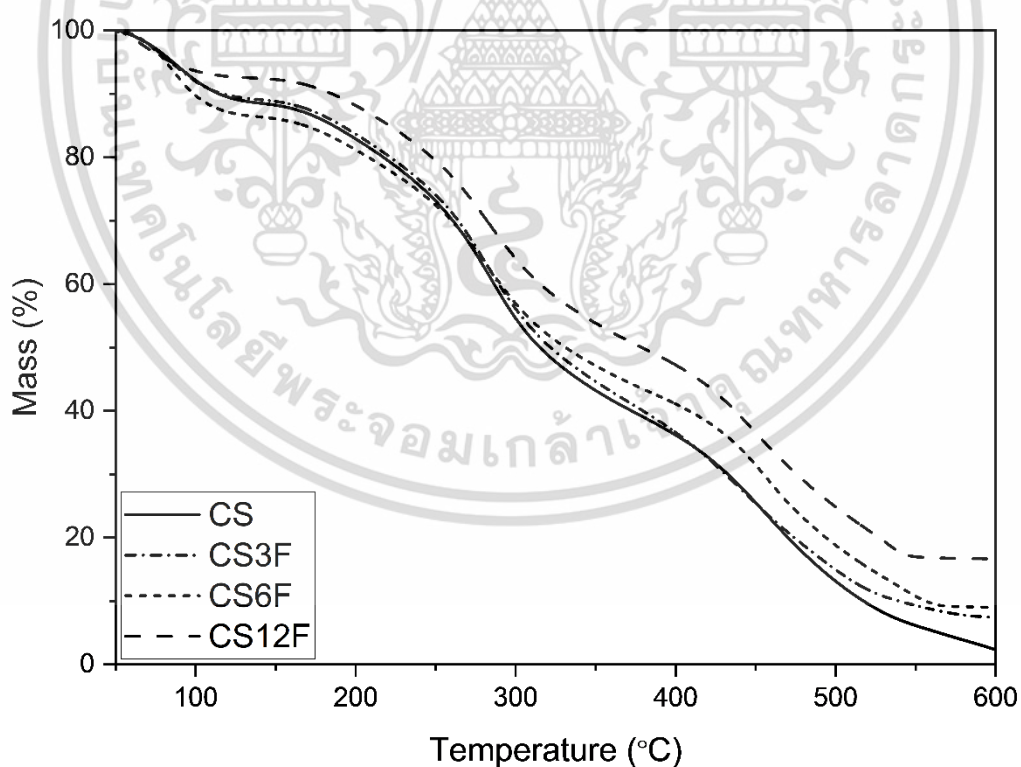
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ง

### การสลายตัวขององค์ประกอบในฟิล์มไคโตซานและฟิล์ม CS/ZnO-MMT

ตารางที่ ง.1 ปริมาณการสลายตัวขององค์ประกอบในฟิล์มไคโตซาน และฟิล์ม CS/ZnO-MMT จากเทคนิค TGA ภายใต้บรรยากาศออกซิเจน

ตัวอย่าง	น้ำหนักของ Nanofiller แรกเริ่ม (%)	น้ำหนักคงเหลือ (%)	น้ำหนักของ สารอินทรีย์ ที่ไม่สลายตัว (%)	น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นจากการเติม Nanofiller ในตอนแรก (%)
0.1ZM	-	92.58	-	-
CS	-	2.35	-	-
CS3F	3.00	7.41	5.06	2.06
CS6F	6.00	9.00	6.65	0.65
CS12F	12.00	16.65	14.3	2.30



เอกสารนี้เป็นรูปที่ ๑.1 เฟอร์มิแกรมจากเทคนิค TGA ของฟิล์ม CS/ZnO-MMT ภายใต้บรรยากาศออกซิเจน  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก จ

### การคำนวณค่าร้อยละน้ำหนักขององค์ประกอบในฟิล์ม CS/ZnO-MMT

#### การคำนวณค่าร้อยละน้ำหนักของสารอนินทรีย์ที่ไม่สลายตัวในฟิล์ม CS/ZnO-MMT

$$\text{น้ำหนักของสารอนินทรีย์ที่ไม่สลายตัว (\%)} = \text{น้ำหนักของเคลือบ (\%)} - \text{น้ำหนักของเคลือบของโคโตนาน (\%)}$$

ตัวอย่างการคำนวณ ค่าร้อยละน้ำหนักของสารอนินทรีย์ที่ไม่สลายตัวเมื่อเติม Nanofiller:

ZnO-MMT ปริมาณ 3% เมื่อเทียบกับน้ำหนักโคโตนานลงในฟิล์ม CS/ZnO-MMT

จากข้อมูลในตารางที่ ง.1 สูตรตัวอย่าง CS3F

น้ำหนักของเคลือบของ CS3F	=	7.41	%
น้ำหนักของเคลือบของโคโตนาน (CS)	=	2.35	%
น้ำหนักของสารอนินทรีย์ที่ไม่สลายตัว	=	7.41 - 2.35	
	=	5.06	%

#### การคำนวณค่าร้อยละน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นจากการเติม Nanofiller ในตอนแรก (%)

$$\text{น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นจากการเติม Nanofiller ในตอนแรก (\%)} = \text{น้ำหนักของสารอนินทรีย์ที่ไม่สลายตัว (\%)} - \text{น้ำหนักของ Nanofiller แรกเริ่ม (\%)}$$

ตัวอย่างการคำนวณ ค่าร้อยละน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นจากการเติม Nanofiller ในตอนแรก เมื่อเติม

Nanofiller: ZnO-MMT ปริมาณ 3% เมื่อเทียบกับน้ำหนักโคโตนานลงในฟิล์ม CS/ZnO-MMT

จากข้อมูลในตารางที่ ง.1 สูตรตัวอย่าง CS3F

น้ำหนักของสารอนินทรีย์ที่ไม่สลายตัว	=	5.06	%
น้ำหนักของ Nanofiller แรกเริ่ม	=	3.00	%
น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นจากการเติม Nanofiller ในตอนแรก	=	5.06 - 3.00	
	=	2.06	%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ฉ

### การทดสอบมุมสัมผัสพื้นน้ำ (Water contact angle) ของ P-CS/ZnO-MMT

ตารางที่ ฉ.1 ค่ามุมสัมผัสพื้นน้ำของกระดาษที่มีสูตรเคลือบต่างกันเมื่อทดสอบด้วยน้ำปราศจากไอออนที่ เวลา 0-300 วินาที (0-5 นาที)

ตัวอย่าง	เวลา (s)	มุมสัมผัสพื้นน้ำ (Water contact angle) (°)			ค่าเฉลี่ย	SD
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
P	0	119.0	119.7	114.2	117.6	3.0
	10	118.8	118.8	114.0	117.2	2.8
	30	118.1	118.3	113.3	116.6	2.8
	60	117.6	117.7	112.8	116.0	2.8
	120	116.4	116.6	111.5	114.8	2.9
	180	115.2	115.2	110.2	113.5	2.9
	240	114.0	114.0	108.8	112.2	3.0
	300	112.6	112.4	107.2	110.7	3.0
PCS	0	118.0	112.9	106.5	112.4	5.8
	10	117.3	112.7	104.2	111.4	6.6
	30	116.5	112.2	103.6	110.8	6.5
	60	115.3	111.7	102.6	109.8	6.5
	120	113.3	110.4	101.0	108.2	6.4
	180	108.1	108.8	99.0	105.3	5.5
	240	106.1	107.5	97.7	103.8	5.3
	300	104.1	106.0	96.4	102.1	5.1
PCS3F	0	122.6	120.9	125.2	122.9	2.1
	10	122.6	120.8	125.2	122.8	2.2
	30	121.9	120.2	125.0	122.4	2.4
	60	121.2	119.4	124.6	121.7	2.7
	120	120.2	118.1	124.0	120.8	3.0
	180	119.3	117.3	123.3	119.9	3.1
	240	118.4	116.2	122.5	119.0	3.2
	300	117.4	115.3	121.6	118.1	3.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีข้อตกลงเงื่อนไขและข้อควรระวังถึงเจ้าของเอกสารที่ผู้ทำการศึกษาไปใช้

ตารางที่ ๑.2 ค่ามุมสัมผัสน้ำของกระดาษที่มีสูตรเคลือบต่างกันเมื่อทดสอบด้วยน้ำปราศจากไอออนที่ เวลา 0-300 วินาที (0-5 นาที) (ต่อ)

ตัวอย่าง	เวลา (s)	มุมสัมผัสน้ำ (Water contact angle) (°)			ค่าเฉลี่ย	SD
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
PCS6F	0	127.4	133.7	131.5	130.8	3.2
	10	127.4	133.1	130.9	130.4	2.8
	30	127.2	133.1	130.2	130.1	3.0
	60	126.8	133.0	130.0	129.9	3.1
	120	125.9	132.7	129.6	129.4	3.4
	180	124.9	132.2	129.1	128.7	3.7
	240	123.9	131.7	128.5	128.0	3.9
	300	122.4	131.2	128.0	127.2	4.4
PCS12F	0	127.2	129.3	119.2	125.2	5.3
	10	126.6	128.6	118.8	124.7	5.2
	30	126.5	127.9	118.4	124.2	5.1
	60	126.3	127.7	117.6	123.8	5.4
	120	125.7	127.1	116.5	123.1	5.8
	180	125.0	126.5	115.4	122.3	6.0
	240	124.2	125.7	114.1	121.3	6.3
	300	123.4	125.4	112.0	120.3	7.2
PCS6ZH01	0	125.3	125.6	125.9	125.6	0.3
	10	125.1	125.5	125.7	125.4	0.3
	30	124.9	125.4	125.7	125.3	0.4
	60	124.5	125.1	124.7	124.8	0.3
	120	123.6	124.3	123.8	123.9	0.3
	180	122.8	123.5	122.8	123.0	0.4
	240	122.2	122.1	121.8	122.0	0.2
	300	121.1	121.1	120.6	120.9	0.3

หมายเหตุ: PCSxF คือ สูตรกระดาษเคลือบวัสดุประกอบ CS/ZnO-MMT

P แทน กระดาษกราฟท์

x แทน ปริมาณ Nanofiller (%wt)

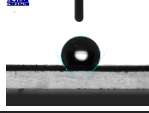
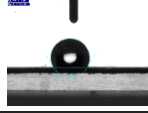
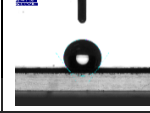
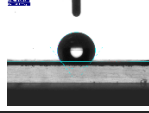
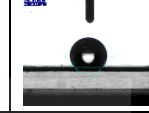
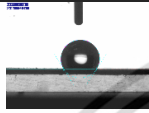
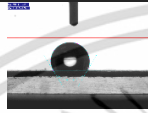
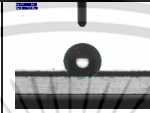
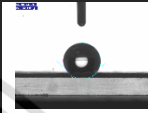
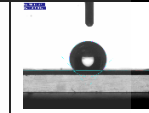
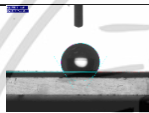
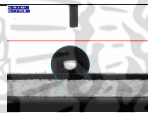
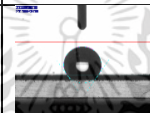
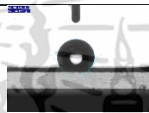
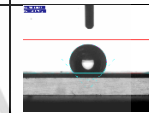

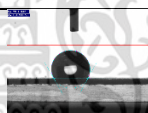
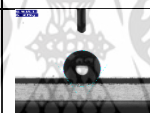
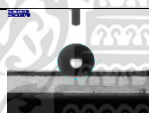
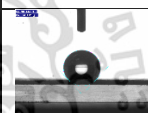
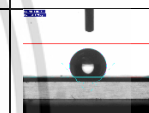
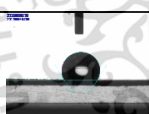
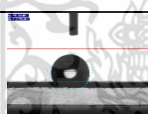
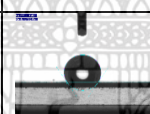
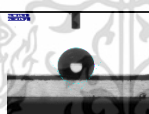

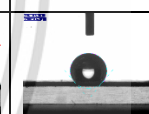
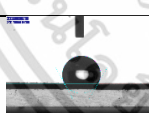
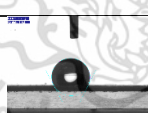
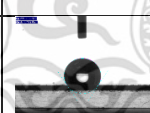
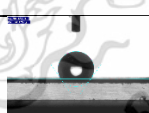
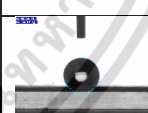
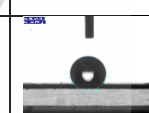
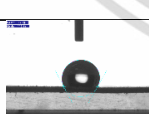
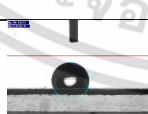
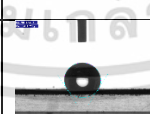
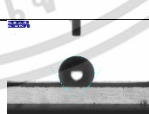
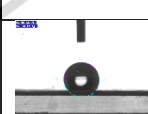
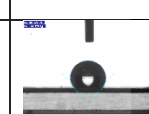

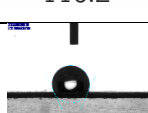
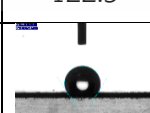
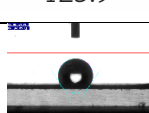
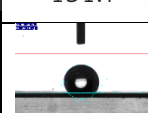
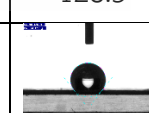
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ระบุเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ๓.3 ค่ามุมสัมผัสด้วยน้ำของกระดาษสูตรต่างๆ

เวลา (วินาที)	สูตร					
	Paper			PCS		
	ตำแหน่ง			ตำแหน่ง		
	1	2	3	1	2	3
0						
	119.0	119.7	114.2	118.0	112.9	106.5
10						
	118.8	118.8	114.0	117.3	112.7	104.2
30						
	118.1	118.3	113.3	116.5	112.2	103.6
60						
	117.6	117.7	112.8	115.3	111.7	102.6
120						
	116.4	116.6	111.5	113.3	110.4	101.0
180						
	115.2	115.2	110.2	108.1	108.8	99.0
240						
	114.0	114.0	108.8	106.1	107.5	97.7
300						
	112.6	112.4	107.2	104.1	106.0	96.4

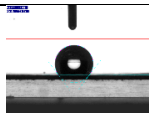
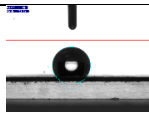
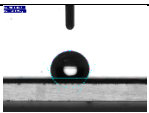
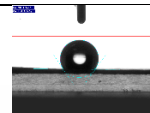
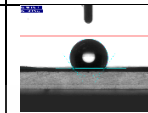
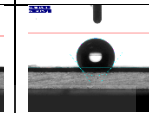
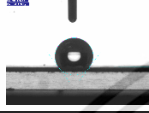
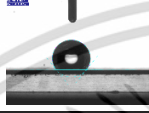
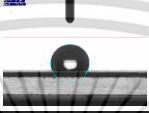
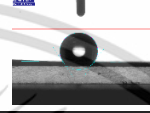
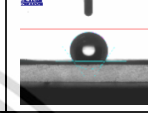
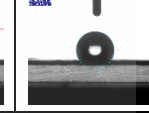
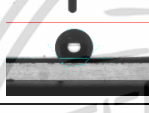
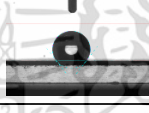

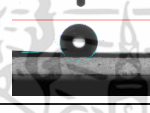
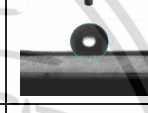
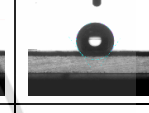

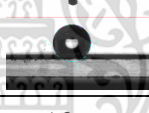



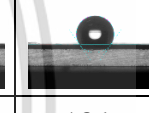


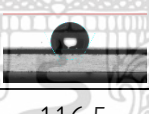
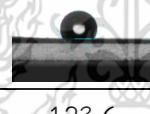

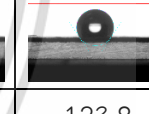

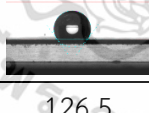

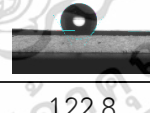

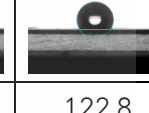
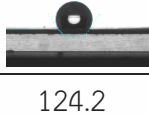
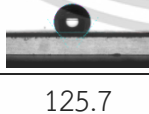
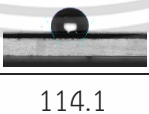
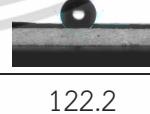
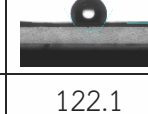
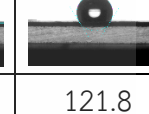
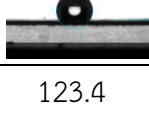
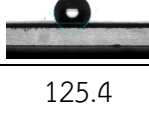
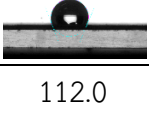
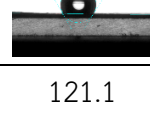
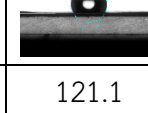
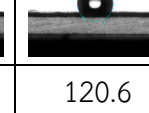
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ๑.4 ค่ามุมสัมผัสด้วยน้ำของกระดาษสุตรต่างๆ (ต่อ)

เวลา (วินาที)	สูตร					
	PCS3F			PCS6F		
	ตำแหน่ง			ตำแหน่ง		
	1	2	3	1	2	3
0						
	122.6	120.9	125.2	127.4	133.7	131.5
10						
	122.6	120.8	125.2	127.4	133.1	130.9
30						
	121.9	120.2	125.0	127.2	133.1	130.2
60						
	121.2	119.4	124.6	126.8	133.0	130.0
120						
	120.2	118.1	124.0	125.9	132.7	129.6
180						
	119.3	117.3	123.3	124.9	132.2	129.1
240						
	118.4	116.2	122.5	123.9	131.7	128.5
300						
	117.4	115.3	121.6	122.4	131.2	128.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ๑.5 ค่ามุมสัมผัสด้วยน้ำของกระดาษสุตรต่างๆ (ต่อ)

เวลา (วินาที)	สูตร					
	PCS12F			PCS6ZH01		
	ตำแหน่ง			ตำแหน่ง		
	1	2	3	1	2	3
0						
	127.2	129.3	119.2	125.3	125.6	125.9
10						
	126.6	128.6	118.8	125.1	125.5	125.7
30						
	126.5	127.9	118.4	124.9	125.4	125.7
60						
	126.3	127.7	117.6	124.5	125.1	124.7
120						
	125.7	127.1	116.5	123.6	124.3	123.8
180						
	125.0	126.5	115.4	122.8	123.5	122.8
240						
	124.2	125.7	114.1	122.2	122.1	121.8
300						
	123.4	125.4	112.0	121.1	121.1	120.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข

### การวิเคราะห์ค่ามุมสัมผัสน้ำ (Water contact angle) ของ P-CS/ZnO-MMT

#### One-way ANOVA: PCS, PCS3F, PCS6F, PCS12F, PCS6ZH01, P

##### Method

Null hypothesis All means are equal

Alternative hypothesis Not all means are equal

Significance level  $\alpha = 0.05$

*Equal variances were assumed for the analysis.*

##### Factor Information

###### Factor Levels Values

Factor 6 PCS, PCS3F, PCS6F, PCS12F, PCS6ZH01, P

##### Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Factor	5	1169.8	233.96	12.03	0.000
Error	12	233.4	19.45		
Total	17	1403.2			

##### Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
4.41055	83.36%	76.43%	62.57%

##### Means

Factor	N	Mean	StDev	95% CI
PCS	3	102.13	5.06	(96.59, 107.68)
PCS3F	3	118.10	3.21	(112.55, 123.65)
PCS6F	3	127.17	4.43	(121.62, 132.71)
PCS12F	3	120.25	7.21	(114.70, 125.80)
PCS6ZH01	3	120.917	0.275	(115.368, 126.465)
P	3	110.70	3.03	(105.15, 116.25)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
*Pooled StDev = 4.41055*  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Tukey Pairwise Comparisons

### Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

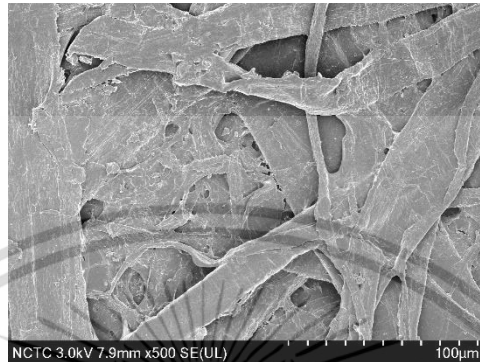
Factor	N	Mean	Grouping
PCS6F	3	127.17	A
PCS6ZH01	3	120.917	A B
PCS12F	3	120.25	A B
PCS3F	3	118.10	A B
PA	3	110.70	B C
PCS/AC	3	102.13	C



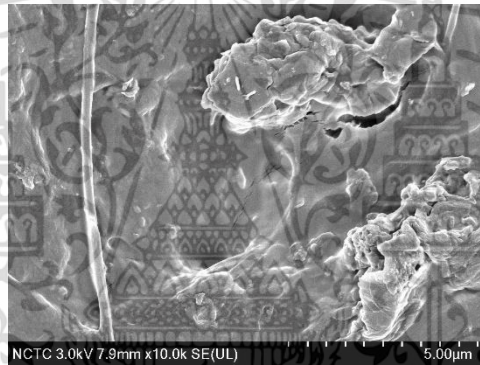
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ซ

### ลักษณะทางสัณฐานของ P-CS/ZnO-MMT



(a)



(b)

รูปที่ ซ.1 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของวัสดุประกอบนาโน PCS6F; (a) รูปลักษณะพื้นผิวที่กำลังขยาย 500 เท่า และ (b) รูปลักษณะพื้นผิวที่กำลังขยาย 10000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



งานทะเบียนคณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
คำรับรองเล่มโครงการพิเศษ

วันที่ 13 เดือน มิถุนายน พ.ศ.2566

ข้าพเจ้า นางสาวศศิธร สัจจวาลย์เล็ก

รหัสประจำตัว 62050332

นางสาวอัญชิสา ธนฤทธิมนมัย

รหัสประจำตัว 62050360

นักศึกษาหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชา เคมีอุตสาหกรรม ภาควิชาเคมี ขอรับรองว่า  
โครงการพิเศษ เรื่อง

การพัฒนาวัสดุประกอบไคโตซาน/นาโนซิงค์ออกไซด์-มอนต์มอริลโลไนต์สำหรับการเคลือบผิวกระดาษกราฟท์  
Development of chitosan/zinc oxide-montmorillonite nanocomposite for kraft paper  
coating

ปีการศึกษา 2565

เป็นผลงานวิจัยที่มีได้คัดลอกหรือละเมิดลิขสิทธิ์ของผู้อื่นและได้ผ่านการตรวจสอบความซ้ำซ้อน  
เรียบร้อยแล้ว และได้แนบเอกสารการตรวจสอบการลอกเลียนงานวรรณกรรมที่ตรวจสอบจากเล่ม  
โครงการพิเศษฉบับสมบูรณ์แล้ว  
โปรแกรมอักษรวิสูทธิ์ 2.15%

ลงชื่อ...ศศิธร สัจจวาลย์เล็ก.....

(นางสาวศศิธร สัจจวาลย์เล็ก)

นักศึกษา

ลงชื่อ...อัญชิสา ธนฤทธิมนมัย.....

(นางสาวอัญชิสา ธนฤทธิมนมัย)

นักศึกษา

ข้าพเจ้า รศ.ดร.ปุณณมา ศิริพันธ์โนน อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ ได้ตรวจสอบโครงการ  
พิเศษของนักศึกษาข้างต้น แล้ว ขอรับรองว่าเป็นผลงานวิจัยของนักศึกษาจริงและมีเนื้อหาสมบูรณ์  
จึงลงชื่อไว้เป็นหลักฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้ง  
ลงชื่อ...[ลายเซ็น].....  
อาจารย์ที่ปรึกษา