

สมบัติของฟิล์มคอมพอลิธแป้งไฮดรอกซีพรอพิลปรับปรุงด้วยนาโนซิงออกไซด์  
และนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์

PROPERTIES OF HYDROXYPROPYLATED STARCH FILMS MODIFIED BY  
NANO-ZINC OXIDE AND NANO-TITANIUM DIOXIDE



อมิตา สกุดดำรงวิทย์  
AMITA SAKUNDAMRONGWIT

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์  
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2565

KMITL-2022-SC-M-012-067

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PROPERTIES OF HYDROXYPROPYLATED STARCH FILMS MODIFIED BY  
NANO-ZINC OXIDE AND NANO-TITANIUM DIOXIDE



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT FOR THE  
DEGREE OF MASTER IN TECHNOLOGY POLYMER  
DEPARTMENT OF CHEMISTRY SCHOOL OF SCIENCE  
KING MONGUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
2022  
KMITL-2022-SC-M-012-067

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2022

SCHOOL OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	สมบัติของฟิล์มแบง์ไฮดรอกซีพอรอฟิลปรับปรุงด้วยนาโนซิงค์ออกไซด์ และนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์
ชื่อนักศึกษา	นางสาวอมิตา สกุลดำรงวิทย์
รหัสประจำตัว	61605067
ปริญญา	วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (เทคโนโลยีพอลิเมอร์)
ภาควิชา	เคมี
พ.ศ.	2565
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รองศาสตราจารย์ ดร. จุฑารัตน์ ปรีชญารากร

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษสมบัติต่าง ๆ ของฟิล์มแบง์ดัดแปรไฮดรอกซีพอรอฟิลเสริมอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์และไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยศึกษาผลของปริมาณพอรอฟิลีนออกไซด์ (ร้อยละ 0 5 10 15 และ 20 โดยน้ำหนัก) และปริมาณของอนุภาคโลหะออกไซด์ (ร้อยละ 0 2 และ 5 โดยน้ำหนัก) จากผลการทดลองพบว่า FTIR ที่การสั่นตำแหน่ง  $1151\text{ cm}^{-1}$  มีแนวโน้มความเข้มพีกสูงขึ้นซึ่งแสดงการเกิดปฏิกิริยาอีเทอร์รีฟิเคชัน นอกจากนี้การเติมอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์และนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ในปริมาณร้อยละ 0 2 และ 5 โดยน้ำหนักลงในฟิล์มแบง์ดัดแปรด้วยพอรอฟิลีนออกไซด์ แสดงให้เห็นการเกิดพีกใหม่ที่แสดงการสั่นของอนุภาคนาโนโลหะออกไซด์ในช่วง  $570\text{-}575\text{ cm}^{-1}$  จากการศึกษาสัณฐานวิทยา ฟิล์มแบง์ดัดแปรไฮดรอกซีพอรอฟิลมีความเรียบมากกว่าแบง์ที่ไม่ได้ดัดแปร จากผลของปริมาณพอรอฟิลีนออกไซด์ส่งผลให้องค์ความเป็นผลึก และอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนลดลง ในขณะที่การดูดซับความชื้น การซึมผ่านของไอน้ำ และเปอร์เซ็นต์การดั่งยึดมีค่าสูงขึ้น อย่างไรก็ตามฟิล์มทุกตัวอย่างที่ทำการเติมอนุภาคนาโนโลหะออกไซด์ มีเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก การดูดซับความชื้น การซึมผ่านของไอน้ำ ความแข็งแรงดั่ง และมอดุลัสลดลง โดยไม่คำนึงถึงชนิดของโลหะออกไซด์ การเพิ่มปริมาณโลหะออกไซด์ทำให้ค่าความแข็งแรงดั่งและมอดุลัสเพิ่มขึ้น แต่อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนและเปอร์เซ็นต์การดั่งยึดกลับมีแนวโน้มสูงขึ้น สำหรับผลการทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดิน พบว่าชนิดและปริมาณของอนุภาคนาโนโลหะออกไซด์ไม่ส่งผลต่อการย่อยสลายทางชีวภาพของฟิล์มแบง์และฟิล์มแบง์ดัดแปรไฮดรอกซีพอรอฟิล นอกจากนี้ปริมาณนาโนโลหะออกไซด์ที่สูงขึ้นส่งผลให้ค่าดัชนีความขาวของฟิล์มมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมาก และจากการทดสอบความสามารถในการต้านเชื้อแบคทีเรีย พบว่าฟิล์มทุก

ตัวอย่างที่มีการเติมอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ปริมาณร้อยละ 5 มีประสิทธิภาพในการต้านทานเชื้อแบคทีเรีย *S.aureus* มากที่สุด

**คำสำคัญ :** การย่อยสลายทางชีวภาพ ซิงค์ออกไซด์ โทเทเนียมไดออกไซด์ แป้งไฮดรอกซีพราอิล



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>Thesis Title</b>	Properties of hydroxypropylated starch films modified by nano-zinc oxides and nano-titanium dioxide
<b>Student Name</b>	Amita Sakuldamrongwit
<b>Student ID</b>	61605067
<b>Degree</b>	Master of Science (Polymer Technology)
<b>Department</b>	Chemistry
<b>Year</b>	2022
<b>Thesis Advisor</b>	Assoc. Prof. Dr. Jutarat Prachayawarakorn

### Abstract

This research studied on the properties of different hydroxypropylated starch composite films modified by zinc oxide and titanium dioxide nanoparticles. Various contents of propylene oxide (0, 5, 10, 15 and 20 wt%) and different content (0, 2 and 5 wt%) of the metal oxide types were varied. From the experimental results, the FTIR peak position at  $1151\text{ cm}^{-1}$  was observed and showed high peak intensity from the etherification. Also, the addition of nano-zinc oxide and nano-titanium dioxide particles at 0, 2 and 5 wt% into different hydroxypropylated starch films displayed the new IR peak position at  $570\text{-}575\text{ cm}^{-1}$  due to the vibration of nano-metal oxide particles. Moreover, the morphology of the hydroxypropylated starch appeared to be smoother than that of the unmodified starch. In addition, the effect of propylene oxide contents caused the decrease in the percentage of crystallinity and thermal decomposition temperature. On the other hand, the values of water absorption, vapor permeability and elongation were increased. However, when all types of starch films were modified by metal oxide, the reduction of crystallinity, water absorption, vapor permeability, stress at maximum load and modulus were detected, regardless of metal oxide types. The increasing contents of metal oxide caused the increase of stress at maximum load and Young's modulus. Nevertheless, thermal decomposition temperature and elongation of samples were

decreased. Regarding to biodegradation test, the addition of different types and contents of the metal oxide did not affect the biodegradability of both native and hydroxypropylated starch films. Furthermore, higher contents of the nano-metal oxides led to the significant increase in the whiteness index of the films. Finally, all starch films with 5% of zinc oxide exhibited the greatest antibacterial activity against *S.aureus* bacteria.

**Keywords:** Biodegradable, hydroxypropylated starch, Titanium dioxide, Zinc oxide



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้บรรลุผลสำเร็จได้เนื่องจากการได้รับความช่วยเหลือ คำปรึกษา ตลอดจนคำแนะนำจากบุคคลต่างๆ อันเป็นประโยชน์และประสบการณ์ที่ดียิ่งแก่ตัวข้าพเจ้า ดังต่อไปนี้

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร. จุฑารัตน์ ปรีชญาวรากร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้ความช่วยเหลือ คำปรึกษา คำแนะนำ และคอยดูแลเอาใจใส่ข้าพเจ้ามาโดยตลอดในการทำวิทยานิพนธ์นี้

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร. สมศักดิ์ วรมงคลชัย และผศ.ดร. ชิตชนก มีใจเชื้อ คณะกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาสละเวลาให้คำแนะนำ และตรวจทานแก้ไขให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้มีความถูกต้องสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ คุณณัฐพล ไกรธรรม คุณศรัณย์ สมบัติจิราภรณ์ และคุณกัญญา มงคลโภชน นักวิทยาศาสตร์ประจำอาคารปฏิบัติการตึกจุฬารัตน์วลัยลักษณ์ 1 และอาคารสำนักงานคณบดี ตลอดจนเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกเรื่องสารเคมี อุปกรณ์ เครื่องมือ และสถานที่ตลอดระยะเวลาการดำเนินงานวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณบิดา มารดา และขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ และน้องๆ ภาควิชาเคมีทุกคน ที่เป็นกำลังใจสำคัญ คอยช่วยเหลือ และให้คำแนะนำให้งานวิจัยนี้สำเร็จไปได้ด้วยดี

นอกจากนี้ยังมีบุคคลอีกหลายท่านที่มีส่วนร่วมในการช่วยเหลือซึ่งยังมีได้กล่าวถึงอีกมากมาย ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ ที่นี้ด้วย

นางสาวอมิตา สกุลดำรงวิทย์

# สารบัญ

## หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ฎ
<b>บทที่ 1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย .....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	3
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	3
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ .....</b>	<b>4</b>
2.1 พลาสติกย่อยสลายได้ .....	4
2.2 แป้ง (Starch).....	4
2.2.1 องค์ประกอบทางเคมีของแป้ง.....	4
2.2.2 โครงสร้างของเม็ดแป้ง.....	6
2.2.3 สมบัติของแป้ง.....	7
2.3 แป้งดัดแปร (Modified starch).....	8
2.3.1 การดัดแปรทางกายภาพ.....	8
2.3.2 การดัดแปรทางเคมี .....	9
2.4 ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide) .....	10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 ไททาเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide).....	11
2.6 พลาสติไซเซอร์ (Plasticizers).....	12
2.7 กลีเซอรอล (Glycerol).....	13
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	14
<b>บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย</b> .....	<b>18</b>
3.1 สารเคมี.....	18
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	19
3.3 วิธีการทดลอง.....	20
3.3.1 คำโครงการดำเนินงานวิจัย.....	20
3.3.2 การเตรียมแป้งไฮดรอกซีพรอพิลจากแป้งมันสำปะหลัง.....	21
3.3.3 การเตรียมฟิล์มจากแป้งไฮดรอกซีพรอพิล.....	22
3.4 การทดสอบสมบัติต่าง ๆ.....	24
3.4.1. การวิเคราะห์ปริมาณหมู่ไฮดรอกซีพรอพิลและระดับการแทนที่ของแป้งไฮดรอกซีพรอพิล.....	24
3.4.2 การหาโครงสร้างและหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (Fourier transform infrared spectroscopy, FTIR).....	24
3.4.3 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffractometer, XRD).....	24
3.4.4 สัณฐานวิทยา (Morphology).....	25
3.4.5 การหาปริมาณการดูดซับความชื้น (Moisture absorption).....	25
3.4.6 การทดสอบอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ (Rate of water vapor permeability, WVP).....	26
3.4.7 การทดสอบสมบัติเชิงกล (Mechanical properties).....	26
3.4.8 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยสมบัติทางความร้อน (Thermogravimetric analysis, TGA).....	27
3.4.9 การวัดสี (Color Measurement).....	27
3.4.10 การทดสอบประสิทธิภาพการต้านทานต่อเชื้อจุลชีพ (Antimicrobial testing).....	28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.11 การทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดิน (Soil burial test).....	29
<b>บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล .....</b>	<b>30</b>
4.1 การทดสอบหาปริมาณหมู่ไฮดรอกซีพรีพอลิเมอร์และระดับการแทนที่ของแป้งไฮดรอกซีพรีพอลิเมอร์ .....	33
4.2 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน (FT-IR).....	35
4.3 การวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffraction, XRD).....	39
4.4 สัณฐานวิทยา (Morphology) .....	44
4.5 การดูดซับความชื้น (Moisture absorption).....	50
4.6 อัตราการซึมผ่านไอน้ำ (Water vapor permeability).....	53
4.7 การทดสอบสมบัติเชิงกล (Mechanical properties).....	55
4.8 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยสมบัติทางความร้อน .....	57
4.9 การวิเคราะห์ความเปลี่ยนแปลงของสี (Color Measurements) .....	64
4.10 การทดสอบประสิทธิภาพการต้านทานต่อเชื้อจุลินทรีย์ (Antimicrobial testing).....	66
4.11 การทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดิน (Soil burial test).....	69
<b>บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....</b>	<b>71</b>
5.1 สรุปผลวิจัย.....	71
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	73
เอกสารอ้างอิง .....	74
ภาคผนวก.....	80
ภาคผนวก ก.....	81
ภาคผนวก ข.....	90
ภาคผนวก ค.....	92
ภาคผนวก ง .....	101
ประวัติผู้เขียน.....	109

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 องค์ประกอบทางเคมีของแป้งชนิดต่างๆ .....	5
2.2 สมบัติของอะไมโลสและอะไมโลเพคติน.....	6
2.3 สมบัติทั่วไปของซิงค์ออกไซด์.....	11
2.4 สมบัติของไททาเนียมไดออกไซด์ในเฟสของผลึกแบบต่าง ๆ.....	12
2.5 ข้อมูลความปลอดภัยของกลีเซอรอล.....	13
3.1 องค์ประกอบทางเคมีของแป้งมันสำปะหลัง.....	18
3.2 องค์ประกอบทางเคมีของไทเทเนียมไดออกไซด์.....	19
3.3 องค์ประกอบทางเคมีของซิงค์ออกไซด์.....	19
3.4 อัตราส่วนของฟิล์มแป้งไฮดรอกซีพวอฟิล.....	23
4.1 อักษรย่อที่ใช้ในงานวิจัย.....	30
4.2 คำร้อยละและระดับการแทนที่ของหมู่ไฮดรอกซีพวอฟิลที่ปริมาณต่างๆ.....	35
4.3 ลักษณะการสั่นในแต่ละช่วงเลขคลื่นต่างๆ.....	36
4.4 พื้นที่ใต้กราฟของพีคจากการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่อง FTIR ของฟิล์มแป้งสูตรต่างๆ.....	37
4.5 ปริมาณผลึกของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังและฟิล์มแป้งไฮดรอกซีพวอฟิล.....	40
4.6 ปริมาณผลึกของฟิล์มแป้งที่เติมนาโนโลหะออกไซด์ที่ปริมาณต่างๆ กัน.....	43
4.7 ปริมาณโลหะที่ได้จากผลการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS).....	46
4.8 อัตราการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังและฟิล์มแป้งไฮดรอกซีพวอฟิลที่ปริมาณต่างๆ.....	53

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.9	อัตราการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มแข็งโดยเติมอนุภาคนาโนโลหะออกไซด์ที่ปริมาณต่างๆ.....	54
4.10	สมบัติเชิงกลของฟิล์มแข็งสำหรับปะหลัง และฟิล์มแข็งไฮดรอกซีฟรอปิลที่ปริมาณต่างๆ.....	55
4.11	สมบัติเชิงกลของฟิล์มแข็งที่เติมนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ปริมาณต่างๆ กัน.....	56
4.12	สมบัติเชิงกลของฟิล์มแข็งที่เติมนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ปริมาณต่างๆ กัน.....	57
4.13	อุณหภูมิการสลายตัวและเปอร์เซ็นต์น้ำหนักของฟิล์มแข็งสำหรับปะหลังและแข็งไฮดรอกซีฟรอปิล.....	59
4.14	อุณหภูมิการสลายตัวและเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปของฟิล์มแข็งที่เติมนาโนโลหะออกไซด์ที่ปริมาณต่างๆ .....	63
4.15	ค่าการวัดสีของฟิล์มแข็งสำหรับปะหลังและฟิล์มแข็งไฮดรอกซีฟรอปิลที่ปริมาณต่างๆ.....	64
4.16	ค่าการวัดสีของฟิล์มแข็งโดยเติมอนุภาคนาโนโลหะออกไซด์ที่ปริมาณต่างๆ.....	65
4.17	ระยะในการต้านเชื้อแบคทีเรียของชิ้นงานฟิล์มแข็งที่เติมอนุภาคนาโนโลหะออกไซด์ชนิดต่างๆ ภายใต้สภาวะปกติและภายใต้รังสียูวี.....	67
ข.1	เปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของฟิล์มแข็งสำหรับปะหลังและฟิล์มแข็งไฮดรอกซีฟรอปิลที่ปริมาณต่างๆ ภายหลังจากดูดซับความชื้นในระบบปิดเป็นเวลา 7 วัน.....	90
ข.2	เปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของฟิล์มแข็ง NS ที่เติมนาโนโลหะออกไซด์ที่ปริมาณต่างๆ ภายหลังจากดูดซับความชื้นในระบบปิดเป็นเวลา 7 วัน.....	90
ข.3	เปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของฟิล์มแข็ง HPS10 ที่เติมนาโนโลหะออกไซด์ที่ปริมาณต่างๆ ภายหลังจากดูดซับความชื้นในระบบปิดเป็นเวลา 7 วัน.....	91
ข.4	เปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของฟิล์มแข็ง HPS20 ที่เติมนาโนโลหะออกไซด์ที่ปริมาณต่างๆ ภายหลังจากดูดซับความชื้นในระบบปิดเป็นเวลา 7 วัน.....	91

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	โครงสร้างของอะไมโลสและอะไมโลเพคติน.....6
2.2	การจัดเรียงแบบ A และ แบบ B.....7
2.3	การเปลี่ยนแปลงของเม็ดแป้งขณะให้ความร้อน.....8
2.4	การคืนตัวของแป้ง.....8
2.5	โครงสร้างของซิงค์ออกไซด์.....10
2.6	โครงสร้างของไททาเนียมไดออกไซด์.....12
2.7	โครงสร้างของกลีเซอรอล.....13
3.1	แผนการดำเนินงานวิจัย.....21
4.1	การเกิดปฏิกิริยาอีเทอร์ิฟิเคชันระหว่างแป้งกับพรอพิลีนออกไซด์.....31
4.2	อันตรกิริยาระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลกับหมู่ไฮดรอกซีพรอพิลของแป้งดัดแปร.....32
4.3	อันตรกิริยาที่คาดว่าจะเกิดขึ้นระหว่างฟิล์มแป้งและอนุภาคนาโนโลหะออกไซด์.....32
4.4	อันตรกิริยาที่คาดว่าจะเกิดขึ้นระหว่างฟิล์มแป้งไฮดรอกซีพรอพิลและอนุภาคนาโนโลหะออกไซด์.....33
4.5	<sup>1</sup> H NMR spectra ของแป้งไฮดรอกซีพรอพิลที่ใช้ปริมาณต่างๆ.....34
4.6	อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังและฟิล์มแป้งไฮดรอกซีพรอพิลที่ปริมาณต่างๆ กัน.....36
4.7	อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มแป้งที่เติมนาโนโลหะออกไซด์.....38
4.8	อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มแป้งไฮดรอกซีพรอพิลที่เติมนาโนโลหะออกไซด์.....38
4.9	อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มแป้งไฮดรอกซีพรอพิลที่เติมนาโนโลหะออกไซด์.....39

4.10 ดิฟแฟรกโทแกรมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังและฟิล์มแป้งไฮดรอกซีพรอพิลที่ปริมาณต่างๆ....40

4.11 ดิฟแฟรกโทแกรมของฟิล์มแป้ง NS ที่เติมนาโนโลหะออกไซด์ที่ปริมาณต่างๆ กัน.....42

4.12 ดิฟแฟรกโทแกรมของฟิล์มแป้ง HPS10 ที่เติมนาโนโลหะออกไซด์ที่ปริมาณต่างๆ กัน.....42

4.13 ดิฟแฟรกโทแกรมของฟิล์ม HPS20 ที่เติมนาโนโลหะออกไซด์ที่ปริมาณต่างๆ กัน.....43

4.14 ลักษณะสัญญาณวิทยาภาพตัดขวางของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังและฟิล์มแป้งไฮดรอกซีพรอพิลที่ปริมาณ ต่างๆ  
กัน.....44

4.15 ลักษณะสัญญาณวิทยาและผลการวิเคราะห์ธาตุของภาพตัดขวางฟิล์มแป้งที่เติมอนุภาคนาโน-  
โลหะออกไซด์.....47

4.16 ลักษณะสัญญาณวิทยาและผลการวิเคราะห์ธาตุของภาพตัดขวางฟิล์มแป้งไฮดรอกซีพรอพิลที่เติม  
อนุภาคนาโนโลหะออกไซด์.....48

4.17 ลักษณะสัญญาณวิทยาและผลการวิเคราะห์ธาตุของภาพตัดขวางฟิล์มแป้งไฮดรอกซีพรอพิลที่เติม  
อนุภาคนาโนโลหะออกไซด์.....49

4.18 เพอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังและฟิล์มแป้งไฮดรอกซีพรอพิลที่ปริมาณ  
ต่างๆ กัน.....50

4.19 เพอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของฟิล์มแป้ง NS ที่เติมนาโนโลหะออกไซด์ที่ปริมาณต่างๆ กัน..51

4.20 เพอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของฟิล์มแป้ง HPS10 ที่เติมนาโนโลหะออกไซด์ที่ปริมาณต่าง  
ๆกัน.....51

4.21 เพอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของฟิล์มแป้ง HPS20 ที่เติมนาโนโลหะออกไซด์ที่ปริมาณต่าง  
ๆกัน.....52

4.22 เทอร์โมแกรมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังและฟิล์มแป้งไฮดรอกซีพรอพิลที่ปริมาณต่างๆกัน.....58

4.23 เทอร์โมแกรมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เติมนาโนโลหะออกไซด์ที่ปริมาณต่างๆ.....60

4.24 เทอร์โมแกรมของฟิล์มแป้งไฮดรอกซีพรอพิล 10 เพอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักที่เติมนาโนโลหะออกไซด์ที่  
ปริมาณ ต่างๆ.....61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.25	เทอร์โมแกรมของฟิล์มแป้งไฮดรอกซีพรอฟิล 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักที่เติมนานิโลหะออกไซด์ที่ปริมาณ ต่างๆ.....	62
4.26	องค์ประกอบของผนังเซลล์แบคทีเรียแกรมบวกและแกรมลบ.....	68
4.27	ฟิล์มแป้งก่อนการทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดิน.....	69
4.28	ฟิล์มแป้งหลังการทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดิน 20 วัน.....	70
ก.1	อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลัง.....	81
ก.2	อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มแป้งไฮดรอกซีพรอฟิล 5 wt%.....	82
ก.3	อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มแป้งไฮดรอกซีพรอฟิล 10 wt%.....	82
ก.4	อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มแป้งไฮดรอกซีพรอฟิล 15 wt%.....	83
ก.5	อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มแป้งไฮดรอกซีพรอฟิล 20 wt%.....	83
ก.6	อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังและใส่อนุภาคซิงค์ออกไซด์ 2 wt%.....	84
ก.7	อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังและใส่อนุภาคซิงค์ออกไซด์ 5 wt%.....	84
ก.8	อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังและใส่อนุภาคไทเทเนียมออกไซด์ 2 wt%.....	85
ก.9	อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังและใส่อนุภาคไทเทเนียมออกไซด์ 5 wt%.....	85
ก.10	อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มแป้งไฮดรอกซีพรอฟิล 10 wt%และใส่อนุภาคซิงค์ออกไซด์ 2 wt%.....	86
ก.11	อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มแป้งไฮดรอกซีพรอฟิล 10 wt%และใส่อนุภาคซิงค์ออกไซด์ 5 wt%.....	86
ก.12	อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มแป้งไฮดรอกซีพรอฟิล 10 wt%และใส่อนุภาคไทเทเนียมออกไซด์ 2 wt%.....	87
ก.13	อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มแป้งไฮดรอกซีพรอฟิล 10 wt%และใส่อนุภาคไทเทเนียมออกไซด์ 5 wt%.....	87

ก.14	อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มแป้งไฮดรอกซีพอพิล 20 wt%และใส่อนุภาคซิงค์ออกไซด์ 2 wt%.....	88
ก.15	อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มแป้งไฮดรอกซีพอพิล 20 wt%และใส่อนุภาคซิงค์ออกไซด์ 5 wt%.....	88
ก.16	อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มแป้งไฮดรอกซีพอพิล 20 wt%และใส่อนุภาคไทเทเนียมออกไซด์ 2 wt%.....	89
ก.17	อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มแป้งไฮดรอกซีพอพิล 20 wt%และใส่อนุภาคไทเทเนียมออกไซด์ 5 wt%.....	89
ค.1	TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลัง.....	92
ค.2	TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของฟิล์มแป้งไฮดรอกซีพอพิล 5 wt%.....	92
ค.3	TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของฟิล์มแป้งไฮดรอกซีพอพิล 10 wt%.....	93
ค.4	TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของฟิล์มแป้งไฮดรอกซีพอพิล 15 wt%.....	93
ค.5	TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของฟิล์มแป้งไฮดรอกซีพอพิล 20 wt%.....	94
ค.6	TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังและใส่อนุภาคซิงค์ออกไซด์ 2 wt%...94	
ค.7	TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังและใส่อนุภาคซิงค์ออกไซด์ 5 wt%...95	
ค.8	TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังและใส่อนุภาคไทเทเนียมออกไซด์ 2 wt%.....	95
ค.9	TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังและใส่อนุภาคไทเทเนียมออกไซด์ 2 wt%.....	96
ค.10	TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังและใส่อนุภาคไทเทเนียมออกไซด์ 5 wt%.....	96
ค.11	TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของฟิล์มแป้งไฮดรอกซีพอพิล 10 wt% และใส่อนุภาคซิงค์ออกไซด์ 2 wt%.....	97

ค.12	TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของฟิล์มแข็งไฮดรอกซีพรอพิล 10 wt%และใส่อนุภาคซิงค์ออกไซด์ 5 wt%.....	97
ค.13	TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของฟิล์มแข็งไฮดรอกซีพรอพิล 10 wt%และใส่อนุภาคไทเทเนียม-ไดออกไซด์ 5 wt%.....	98
ค.14	TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของฟิล์มแข็งไฮดรอกซีพรอพิล 20 wt%และใส่อนุภาคซิงค์ออกไซด์ 2 wt%.....	98
ค.15	TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของฟิล์มแข็งไฮดรอกซีพรอพิล 20 wt%และใส่อนุภาคซิงค์ออกไซด์ 5 wt%.....	99
ค.16	TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของฟิล์มแข็งไฮดรอกซีพรอพิล 20 wt%และใส่อนุภาคไทเทเนียม-ไดออกไซด์ 2 wt%.....	99
ค.17	TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของฟิล์มแข็งไฮดรอกซีพรอพิล 20 wt%และใส่อนุภาคไทเทเนียมออกไซด์ 5 wt%.....	100
ง.1	ระยะในการต้านเชื้อแบคทีเรียชนิดแกรมบวก <i>Staphylococcus aureus</i> ของชั้นงานฟิล์มแข็งที่เติมอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ออกไซด์.....	101
ง.2	ระยะในการต้านเชื้อแบคทีเรียชนิดแกรมลบ <i>Escherichia coli</i> ของชั้นงานฟิล์มแข็งที่เติมอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ออกไซด์.....	102
ง.3	ระยะในการต้านเชื้อแบคทีเรียชนิดแกรมบวก <i>Staphylococcus aureus</i> ของชั้นงานฟิล์มแข็งที่เติมอนุภาคนาโนไทเทเนียมออกไซด์ออกไซด์.....	103
ง.4	ระยะในการต้านเชื้อแบคทีเรียชนิดแกรมลบ <i>Escherichia coli</i> ของชั้นงานฟิล์มแข็งที่เติมอนุภาคนาโนไทเทเนียมออกไซด์ออกไซด์.....	104
ง.5	ระยะในการต้านเชื้อแบคทีเรียชนิดแกรมบวก <i>Staphylococcus aureus</i> ของชั้นงานฟิล์มแข็งที่เติมอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ออกไซด์ภายใต้รังสียูวี.....	105
ง.6	ระยะในการต้านเชื้อแบคทีเรียชนิดแกรมลบ <i>Escherichia coli</i> ของชั้นงานฟิล์มแข็งที่เติมอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ออกไซด์ภายใต้รังสียูวี.....	106

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ง.7    ระยะในการต้านเชื้อแบคทีเรียชนิดแกรมบวก *Staphylococcus aureus* ของชิ้นงานฟิล์มแบ่งที่  
 เดิมอนุภาคนาโนไทเทเนียมออกไซด์ออกไซด์ภายใต้รังสียูวี.....107
- ง.8    ระยะในการต้านเชื้อแบคทีเรียชนิดแกรมลบ *Escherichia coli* ของชิ้นงานฟิล์มแบ่งที่เดิม  
 อนุภาคนาโนไทเทเนียมออกไซด์ออกไซด์ภายใต้รังสียูวี.....108



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

พลาสติกเป็นวัสดุที่นิยมใช้อย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีสมบัติที่ดีและสามารถผลิตได้เป็นจำนวนมาก ด้วยเหตุนี้จึงทำให้พลาสติกกลายเป็นขยะที่มีปริมาณมากและแพร่หลายอย่างรวดเร็วในปัจจุบัน เพราะพลาสติกเป็นวัสดุที่ไม่สามารถย่อยสลายเนื่องจากเป็นสารสังเคราะห์ ทำให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมต่าง ๆ ได้ ดังนั้นจึงมีการคิดค้นและพัฒนาวัสดุทดแทนที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและสามารถย่อยสลายได้ เพื่อลดปัญหาปริมาณขยะพลาสติกที่เพิ่มขึ้น

พลาสติกชีวภาพ (Bioplastics) หรือพลาสติกชีวภาพย่อยสลายได้ (Biodegradable plastics) เป็นพลาสติกที่ผลิตขึ้นจากวัสดุธรรมชาติส่วนใหญ่เป็นพืช สามารถย่อยสลายได้ในธรรมชาติ (Biodegradable) ช่วยลดปัญหามลพิษในสิ่งแวดล้อม วัสดุธรรมชาติที่สามารถนำมาผลิตเป็นพลาสติกชีวภาพมีหลายชนิด เช่น เซลลูโลส (Cellulose) คอลลาเจน (Collagen) เคซีน (Casein) และแป้ง (Starch) เป็นต้น ในบรรดาวัสดุธรรมชาติทั้งหลาย แป้ง นับว่าเหมาะสมที่สุดเพราะมีจำนวนมากและราคาถูก เนื่องจากสามารถหาได้จากพืชชนิดต่าง ๆ เช่น ข้าวโพด ข้าวสาลี มันฝรั่ง มันเทศ มันสำปะหลัง เป็นต้น [1]

พลาสติกชีวภาพที่ผลิตจากแป้งโดยตรงมีขีดจำกัด เพราะมีสมบัติเชิงกลที่ต่ำ เกิดการพองตัวและเสีรูปร่างเมื่อได้รับความชื้น ซึ่งการแก้ปัญหาดังกล่าวสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การดัดแปรแป้งด้วยกระบวนการทางกายภาพ การดัดแปรแป้งด้วยกระบวนการทางเคมี การผสมสารเติมแต่งหรือการคอมพอลิเมอร์กับพอลิเมอร์อื่น ๆ

แป้งดัดแปร (Modified starch) เป็นแป้งที่ได้รับการปรับปรุงหรือเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง ทำให้สมบัติแตกต่างออกไปจากแป้งธรรมดา ซึ่งการเปลี่ยนแปลงสมบัติของแป้งทางกายภาพหรือทางเคมีทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างโมเลกุลภายในเม็ดแป้ง เป็นเหตุให้สมบัติของแป้งเปลี่ยนแปลงไป เช่น ความหนืด ความคงตัวต่อความร้อน ความชื้น และแรงเฉือน โดยมีกระบวนการหรือวิธีต่าง ๆ ในการดัดแปรหลากหลายวิธี [2]

แป้งไฮดรอกซีพรอพิล (Hydroxypropyl starch) เป็นการดัดแปรแป้งทางเคมีโดยวิธีไฮดรอกซีพรอพิลเลชัน โดยการทำปฏิกิริยาระหว่างพรอพิลีนออกไซด์กับแป้ง โดยธรรมชาติหมู่ไฮดรอกซีพรอพิลเป็นหมู่ที่ชอบน้ำ (Hydrophilic group) ดังนั้นเมื่อเติมหมู่ไฮดรอกซีพรอพิลเข้าสู่ภายในเม็ดแป้งจะทำให้พันธะที่เชื่อมระหว่างโครงสร้างของเม็ดแป้งเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งสมบัติของแป้งจะขึ้นกับองศาการแทนที่ (Degree of substitution, DS) โดยหมู่ไฮดรอกซีพรอพิลจะเกิดการแทนที่ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 2 3 และ 6 ของกลูโคส โดยฟิล์มที่ได้จากแป้งไฮดรอกซีพรอพิลจะมีความใสมากขึ้น ทนต่อกรด เบสและสารออกซิไดซ์ได้อย่างอ่อนได้ [3]

สำหรับการปรับปรุงสมบัติของแป้งโดยวิธีการทางกายภาพ สามารถทำได้โดยการใช้โลหะออกไซด์ เช่น ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide, ZnO) เป็นวัสดุในกลุ่มโลหะออกไซด์ที่มีการนำมาใช้งานในรูปแบบของวัสดุนาโน ตัวอย่างการใช้นาโนซิงค์ออกไซด์ ได้แก่ การใช้งานในกลุ่มของอิเล็กทรอนิกส์หรืออุปกรณ์ตรวจจับก๊าซ ใช้สำหรับการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียในทางทันตกรรม ใช้ในการบำบัดสิ่งแวดล้อม เนื่องจากมีสมบัติที่ดีในด้านการดูดซับแสง และสมบัติด้านการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง นอกจากนี้ซิงค์ออกไซด์ยังสามารถใช้เป็นสารเติมแต่งในพอลิเมอร์ที่ช่วยให้ค่ามอดูลัสและความแข็งแรงดึงเพิ่มขึ้น [4]

ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide,  $TiO_2$ ) เป็นวัสดุในกลุ่มโลหะออกไซด์อีกชนิดหนึ่ง มีลักษณะเป็นผงละเอียดสีขาว ความเป็นพิษต่ำ มีขนาดอนุภาคเล็ก มีความทึบแสงมากกว่าซิงค์ออกไซด์ แต่มีสมบัติบางประการคล้ายคลึงกัน เช่น สมบัติทางความร้อนและสมบัติเชิงกลรวมถึงสมบัติการต้านทานต่อเชื้อจุลินทรีย์ด้วย โดยทั่วไปมักใช้ในอุตสาหกรรมงานเคลือบ สีทาบ้าน เป็นต้น [5]

จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการเตรียมฟิล์มจากแป้งไฮดรอกซีพรอพิล โดยใช้วิธีการเทหล่อ (Solution casting) พบว่าฟิล์มแป้งมีค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด (% Elongation) ที่สูงขึ้นและค่าความทนแรงดึง (Tensile strength) ลดลงเมื่อปริมาณร้อยละของพรอพิลีนออกไซด์เพิ่มขึ้น [6] นอกจากนี้งานวิจัยของกิตติชัย ศรสำแดงและคณะ [7] ได้ทำการศึกษาการเติมโลหะออกไซด์ในแป้งดัดแปรด้วยวิธีการเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก พบว่าโลหะออกไซด์ทำให้ค่าความแข็งแรงดึงเพิ่มขึ้นและการบวมตัวลดลง นอกจากนี้ยังแสดงผลของการต้านเชื้อแบคทีเรียที่ดีด้วยเช่นกัน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาการดัดแปรแป้งไฮดรอกซีพรอพิลจากแป้งมันสำปะหลังโดยใช้โลหะออกไซด์เป็นสารเสริมแรง ซึ่งคาดว่าจะมีผลทำให้สมบัติเชิงกลดีขึ้นนอกจากนี้ยังมีสมบัติในการต้านเชื้อแบคทีเรียและย่อยสลายได้

## 1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อเตรียมแป้งไฮดรอกซีพรอพิลและฟิล์มแป้งไฮดรอกซีพรอพิลโดยใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์

1.2.2 เพื่อปรับปรุงสมบัติของฟิล์มแป้งไฮดรอกซีพรอพิลโดยการใช้นาโนซิงค์ออกไซด์และนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นสารเสริมแรงและต้านเชื้อแบคทีเรีย

1.2.3 เพื่อทดสอบสมบัติต่าง ๆ ของฟิล์มจากแป้งไฮดรอกซีพรอพิลเสริมแรงด้วยนาโนซิงค์ออกไซด์และนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์

## 1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1.3.1 เตรียมแป้งไฮดรอกซีพรอพิลจากแป้งมันสำปะหลังโดยการใช้พรอพิลีนออกไซด์ในปริมาณต่าง ๆ ได้แก่ ร้อยละ 5 10 15 และ 20 โดยน้ำหนัก

1.3.2 ศึกษาผลของปริมาณนาโนซิงค์ออกไซด์และนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีต่อสมบัติต่าง ๆ ที่ร้อยละ 2 และ 5 โดยน้ำหนัก

1.3.3 ศึกษาปริมาณหมู่ไฮดรอกซีพรอพิลและระดับการแทนที่ของแป้งไฮดรอกซีพรอพิล สันฐานวิทยา โครงสร้างผลึก การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน สมบัติการดูดซับน้ำและการซึมผ่านของไอน้ำ สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน สมบัติการต้านเชื้อจุลินทรีย์ และการเปลี่ยนแปลงของสี

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถเตรียมฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังที่มีการเติมหมู่แทนที่ด้วยพรอพิลีนออกไซด์และอนุภาคนาโนโลหะออกไซด์ สามารถใช้ทดแทนฟิล์มพลาสติกจากปิโตรเคมีที่ย่อยสลายได้ยาก และลดปัญหาขยะพลาสติกที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและหลักการ

### 2.1 พลาสติกย่อยสลายได้

พลาสติกชีวภาพ (Bioplastic) หรือพลาสติกชีวภาพที่ย่อยสลายได้ (Biodegradable Plastic) คือ พลาสติกที่ผลิตขึ้นจากวัสดุธรรมชาติซึ่งส่วนใหญ่เป็นพืช เช่น แป้ง ซึ่งมีจำนวนมากและราคาถูก สามารถหาได้จากพืชชนิดต่าง ๆ เช่น ข้าวโพด ข้าวสาลี มันฝรั่ง มันเทศ มันสำปะหลัง ฯลฯ รวมถึงโปรตีน จากถั่ว และข้าวโพด เป็นต้น

พลาสติกชีวภาพมีสมบัติในการใช้งาน เช่นเดียวกับพลาสติกโดยทั่วไป แต่ต่างกันตรงที่สามารถย่อยสลายได้เองในธรรมชาติ คือ เมื่อทิ้งให้กลายเป็นขยะ อยู่ในสภาวะที่เหมาะสม มีแบคทีเรียและเอนไซม์ พลาสติกจากพืชเหล่านี้ก็จะเกิดการย่อยสลายได้เอง ซึ่งเมื่อย่อยสลายหมดแล้วก็จะได้ผลิตภัณฑ์เป็นน้ำ มวลชีวภาพ ก๊าซมีเทน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งล้วนจำเป็นในการเจริญเติบโตและดำรงชีวิตของพืชทั้งสิ้น [8]

### 2.2 แป้ง (Starch)

แป้งได้จากการนำส่วนต่างๆ ของพืช เช่น เมล็ด ราก หัว ฝัก และยังมีส่วนประกอบอื่น เช่น โปรตีน (Protein) ไขมัน (Lipid) รวมอยู่ด้วย หากมีกระบวนการสกัด โปรตีนและ ไขมันออกเหลือแต่ส่วนที่เป็นคาร์โบไฮเดรต มักเรียกว่า สตาร์ช [9]

#### 2.2.1 องค์ประกอบทางเคมีของแป้ง

แป้งจากธัญพืชมีความชื้นประมาณร้อยละ 10 ถึง 12 ในขณะที่แป้งจากพืชหัวมีความชื้นอยู่ที่ร้อยละ 14 ถึง 15 การรักษาระดับความชื้นนี้ไว้และการใช้บรรจุภัณฑ์ในการป้องกันการเปลี่ยนแปลงความชื้นสัมพัทธ์เป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้แป้งเหล่านี้สามารถเก็บรักษาได้นานขึ้น ในส่วนของสารอาหารอื่นๆจะมีปริมาณต่ำกว่าร้อยละ 1.5 ถึง 2 โดยน้ำหนักแป้งดังแสดงในตารางที่ 2.1 แต่ละองค์ประกอบสามารถพบได้ดังนี้

1. ไขมันจากเมล็ดธัญพืชบริเวณชั้นใน ได้แก่ ไลโซฟอสโฟลิปิด (Lysophospholipids) กรดไขมันอิสระ (Free fatty acids) และบริเวณชั้นนอกได้แก่ ไตรกลีเซอไรด์

(Triglycerides) ซึ่งอาจมาจากอะไมโลพลาสต์ (Amyloplast) หรือไขมันจากแป้ง ข้าวโอ๊ตที่อยู่ผสมปนกับอะไมโลส (Amylose)

2. โปรตีนพบได้บนพื้นผิวหรือภายในผนังเซลล์และเอนไซม์ที่ช่วยในการสังเคราะห์และย่อยสลายแป้ง
3. เกลือแร่จะแสดงผลโดยปริมาณของฟอสฟอรัสจากฟอสโฟลิปิด โมโนเอสเทอร์และสารประกอบอินทรีย์ฟอสเฟต [10]

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบทางเคมีของแป้งชนิดต่างๆ [10]

ชนิดแป้ง	% คาร์โบไฮเดรต	% ไขมัน	% โปรตีน	% เถ้า	% ฟอสฟอรัส
ข้าวโพด					
-ปกติ	98.9	0.60	0.35	0.10	0.015
-อะไมโลสสูง	99.4 – 98.7	0.40 – 1.10	-	0.20	0.070
ข้าวสาลี	98.6	0.80	0.40	0.20	0.060
ข้าว	98.3	0.80	0.40	0.50	0.010
มันฝรั่ง	99.5	0.05	0.06	0.40	0.080
มันสำปะหลัง	99.6	0.10	0.10	0.20	0.010

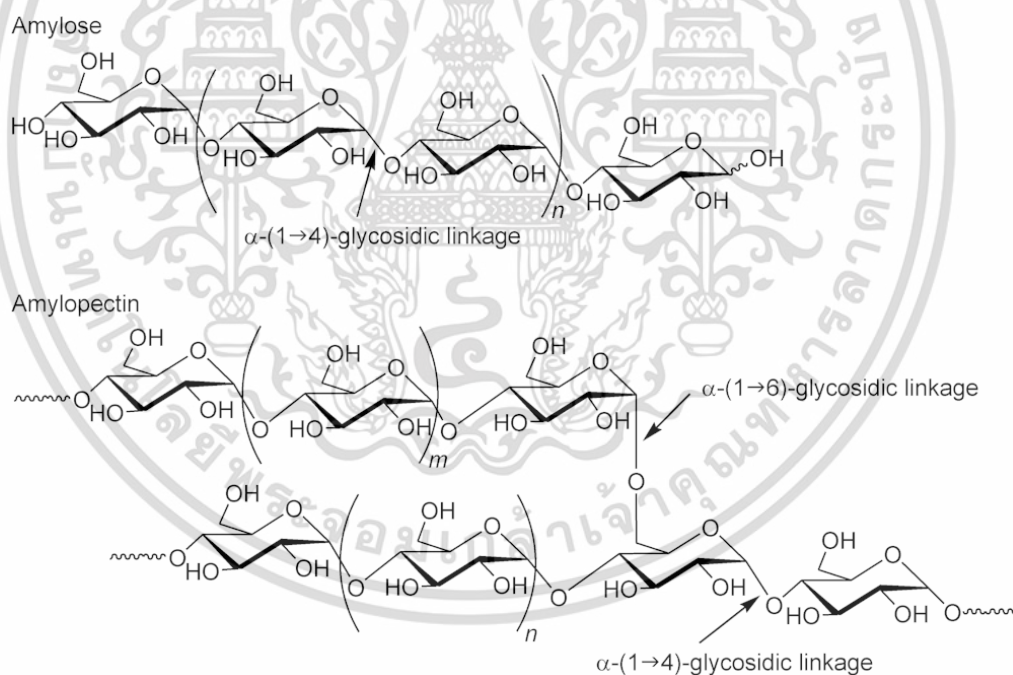
สตาร์ชเกิดจากโมเลกุลของกลูโคสเชื่อมโยงกันด้วยพันธะไกลโคซิดิก โดยที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 1 ของโมเลกุลกลูโคสและคาร์บอนตำแหน่งที่ 4 ของโมเลกุลกลูโคสถัดไปเรียกพันธะนี้ว่า  $\alpha$ -1,4 Glycosidic และที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 1 ของโมเลกุลกลูโคสและคาร์บอนตำแหน่งที่ 6 ของโมเลกุลกลูโคสถัดไปเรียกพันธะนี้ว่า  $\alpha$ -1,6 Glycosidic โดยโครงสร้างจากโมเลกุลของกลูโคสมีด้วยกัน 2 ชนิดคือ อะไมโลส (Amylose) เกิดจากการเชื่อมโยงด้วยพันธะ  $\alpha$ -1,4 Glycosidic เป็นหลักมีพันธะ  $\alpha$ -1,6 Glycosidic ในปริมาณน้อย โครงสร้างเป็นเชิงเส้นและสามารถบิดโครงสร้างเป็นเกลียวได้จึงทำให้อะไมโลส สามารถผสมเข้ากับไขมันได้

อะไมโลเพคติน (Amylopectin) เกิดจากการเชื่อมโยงด้วยพันธะ  $\alpha$ -1,4 Glycosidic เป็นหลักมีพันธะ  $\alpha$ -1,6 Glycosidic ในปริมาณมากทำให้มีโครงสร้างแบบร่างแห สายโซ่ของอะไมโลเพคตินค่อนข้างสั้นเมื่อเทียบกับอะไมโลส

อะไมโลสและอะไมโลเพคตินจะถูกจัดให้อยู่ในโครงสร้างแบบสุ่ม โมเลกุลเหล่านี้มีการเชื่อมโยงกันด้วยพันธะไฮโดรเจน ซึ่งส่งผลต่อสมบัติทางกายภาพ การละลายน้ำและการเกิดเจลดังแสดงในตารางที่ 2.2 [11]

ตารางที่ 2.2 สมบัติของอะไมโลสและอะไมโลเพคติน [11]

สมบัติ	อะไมโลส	อะไมโลเพคติน
น้ำหนักโมเลกุล	$10^5 - 10^6$	$10^7 - 10^8$
Degree of polymerization	1500 - 1600	$3 \times 10^5 - 3 \times 10^6$
สารละลายเจือจาง	ไม่เสถียร	เสถียร
การเกิดเจล	แข็ง	อ่อนนุ่ม
การเปลี่ยนสีของไอโอดีน	สีน้ำเงิน	สีแดงม่วง
โครงสร้าง	ผลึก	อสัณฐาน



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของอะไมโลสและอะไมโลเพคติน [12]

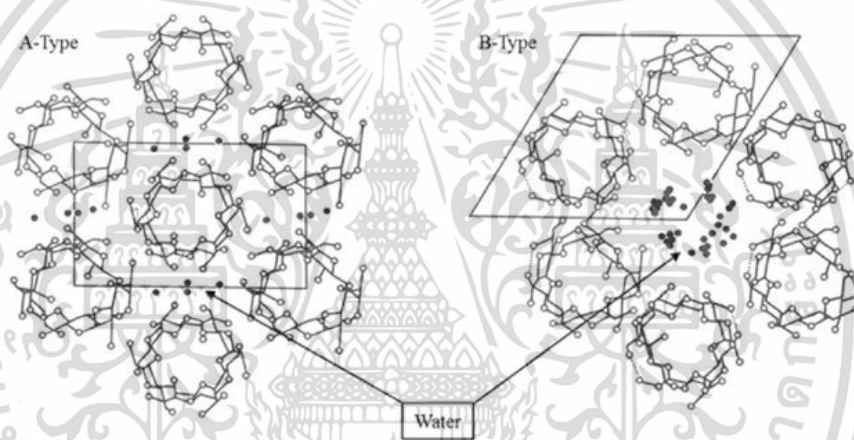
### 2.2.2 โครงสร้างของเม็ดแป้ง

เม็ดแป้งมีโครงสร้างแบบกึ่งผลึก (Semi-crystalline) โดยลักษณะความเป็นผลึก เป็นผลมาจากการจัดเรียงตัวของสายโซ่ในโมเลกุลของอะไมโลเพคตินในแนวรัศมีเป็นชั้น ๆ ในรูปของคลัสเตอร์ (Series

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

of stacked amylopectin clusters) ซึ่งในแต่ละคลัสเตอร์ ประกอบด้วยบริเวณที่เป็นส่วนรวมของจุดที่แตกกิ่งมีลักษณะการจัดเรียงตัวไม่เป็นระเบียบเรียกว่า ชั้นอสัณฐาน (Amorphous lamellar) และบริเวณที่มีสายโซ่กิ่งของอะไมโลเพกตินที่จัดเรียงตัวแบบเกลียวคู่ ที่มีการเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบเรียกบริเวณส่วนนี้ว่า ชั้นผลึก (Crystalline lamellar)

เม็ดแป้งมีลักษณะโครงสร้างผลึก 3 แบบขึ้นอยู่กับลักษณะในการจัดเรียงตัวของเกลียวคู่ ถ้ามีการเรียงตัวหนาแน่นมากและมีปริมาณน้ำต่ำจะจัดเป็นผลึกแบบ A (แป้งจากธัญพืชต่าง ๆ) ถ้ามีการเรียงตัวกันหลวมๆ และมีปริมาณน้ำสูงจะจัดเป็นผลึกแบบ B (แป้งจากพืชหัว) ดังรูปที่ 2.1 ถ้ามีการเรียงตัวทั้งแบบ A และ B รวมกันจัดเป็นผลึกแบบ C (แป้งจากพืชตระกูลถั่ว) สารประกอบเชิงซ้อนของอะมิโลสกับโมเลกุลของสารอินทรีย์ที่มีขั้วมีรูปแบบผลึกเป็นแบบ V [13]



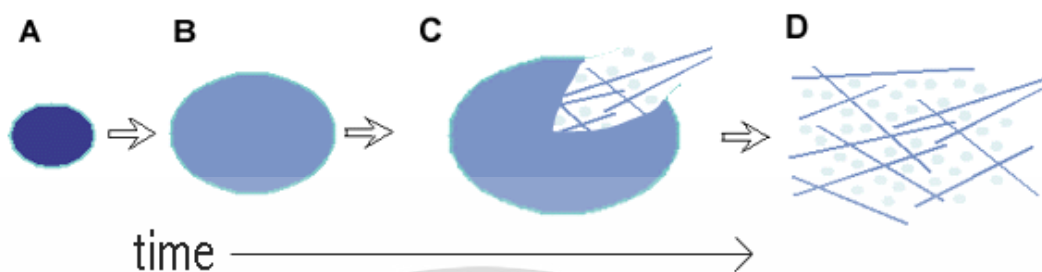
รูปที่ 2.2 การจัดเรียงแบบ A และ แบบ B [13]

### 2.2.3 สมบัติของแป้ง

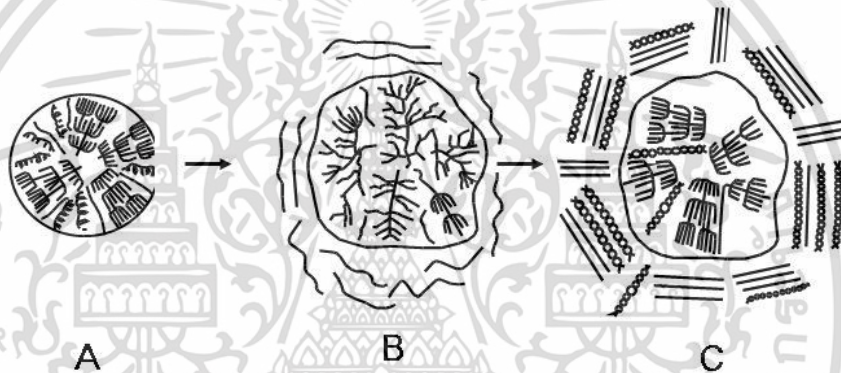
การพองตัว การละลาย การเกิดเจลลาติไนเซชันและการคืนตัวของแป้งสุก (Retrogradation) เป็นสมบัติที่สำคัญต่อการนำแป้งมาประยุกต์ใช้งาน เมื่อนำแป้งใส่ในน้ำแล้วให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงขึ้นเรื่อยๆ จนถึงจุดที่โครงสร้างแป้งถูกทำลายและเกิดการพองตัวขึ้นปรากฏการณ์นี้เรียกว่าการเกิดเจลลาติไนเซชัน ในส่วนของโครงสร้างที่ถูกทำลายนั้นจะเป็นส่วนที่เกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลส่งผลให้สมบัติของแป้งเปลี่ยนแปลงและไม่สามารถเกิดการผันกลับได้ เช่น เกิดการพองตัวของแป้งจากการที่โมเลกุลของน้ำแทรกเข้าไปในโครงสร้างได้ ความเป็นผลึกลดลง การละลายน้ำและความหนืดที่สูงขึ้น

การคืนตัวของแป้งสุก เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเมื่อนำแป้ง ที่ผ่านการเจลาติไนซ์มาแล้ว ปล่อยให้เย็นตัวลง โมเลกุลของอะไมโลสและอะไมโลเพกตินซึ่งเคยรวมตัวกับน้ำแล้วเกิดเป็นเจล จะเคลื่อนที่เข้า

มาใกล้กันและเชื่อมต่อกันเองใหม่ด้วยพันธะไฮโดรเจน จากนั้นจะขับน้ำที่เคยจับอยู่ออกจากโมเลกุล ทำให้เกิดเป็นผลึกใหม่ [14]



รูปที่ 2.3 การเปลี่ยนแปลงของเม็ดแป้งขณะให้ความร้อน [15]



รูปที่ 2.4 การคืนตัวของแป้ง [16]

## 2.3 แป้งดัดแปร (Modified starch)

สมบัติโดยทั่วไปของแป้งไม่เหมาะในการนำมาใช้งานกับอาหารแปรรูปส่วนใหญ่รวมถึงการใช้งานอุตสาหกรรม ดังนั้นโมเลกุลของแป้งจึงถูกนำมาปรับเปลี่ยนทางเคมี ทางกายภาพหรือผสมวิธีอื่นเพื่อปรับปรุงสมบัติให้ดีขึ้นหรือเพื่อลดข้อด้อยดังกล่าว [17]

การดัดแปรแป้งแบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่คือ การดัดแปรทางกายภาพ (Physical modification) และการดัดแปรทางเคมี (Chemical modification) ดังนี้

### 2.3.1 การดัดแปรทางกายภาพ

1. เจลาติไนเซชัน (Gelatinization) เป็นการให้ความร้อนแก่แป้งจนผ่านขั้นตอนของเจลาติไนเซชันแล้วทำให้แห้งทันที เช่น แป้งพรีเจลาติไนซ์ (Pregelatinized starch) สมบัติที่สำคัญคือ จะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกิดเจลในน้ำที่อุณหภูมิห้องหรือต่ำกว่า ดูดซับน้ำได้มากกว่าแป้งดิบ ให้ความหนืดได้ทันที นิยมใช้ในอาหารประเภทพุดดิ้ง น้ำเกรวี่ น้ำวอส ส่วนผสมของซูบ ขนเค้กเพื่อรักษาความชุ่มชื้น เป็นต้น

2. การดัดแปรแป้งโดยวิธีการใช้ความร้อนชื้น (Heat-moisture treatment; HMT) การดัดแปรด้วยวิธีนี้จะควบคุมอุณหภูมิในการดัดแปรให้สูงกว่าอุณหภูมิในการเปลี่ยนสถานะเป็นแก้ว (Glass transition temperature) แต่ต่ำกว่าอุณหภูมิการเกิดเจลาติไนเซชัน ในสภาวะที่แป้งมีความชื้นจำกัด (ต่ำกว่า 35%) แป้งที่ได้จากการดัดแปรด้วยวิธีการใช้ความร้อนชื้นมีความทนทานต่อความร้อนและแรงกระทำจากการกวนสูง

3. การลดขนาดเม็ดแป้งโดยทางกล (Mechanical milling) ทำให้เม็ดแป้งแตกโดยทางกลจะได้เม็ดแป้งขนาดกว่าปกติ แป้งที่ได้จะดูดซับน้ำและฟองตัวได้ดีขึ้น มีความว่องไวต่อการย่อยสลายของเอนไซม์

4. การอบอ่อน (Annealing) เป็นการให้ความร้อนในขณะที่เม็ดแป้งอยู่ในอุณหภูมิที่ต่ำกว่าจุดเจลาติไนซ์

### 2.3.2 การดัดแปรทางเคมี

#### 1. การเกิดอนุพันธ์ (Derivatization)

-การแทนที่สารในโมเลกุลเดี่ยวของแป้ง (Monostarch substitution) โดยปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชัน เช่น แป้งแอสซีเทต ใช้ในอาหารที่ไม่เป็นกรด ใช้เป็นสารยึดติด (Adhesive) ในอุตสาหกรรมสิ่งทอหรือปฏิกิริยาอีเทอร์ริฟิเคชัน เช่น แป้งไฮดรอกซีพโรพิล (Hydroxypropyl starch) เหมาะสำหรับใช้ในอาหารที่ต้องเก็บไว้ในสภาวะที่มีการแช่แข็งและการคินตัว

-การแทนที่โมเลกุลที่มีหมู่ฟังก์ชันมากกว่า 1 หมู่ เช่น แป้งครอสลิง (Cross-linked starch) นำสตาร์ชที่เป็นเอสเทอร์ (Starch ester) มาทำปฏิกิริยากับฟอสฟอรัสออกซีคลอไรด์ (Phosphorus oxychloride) หรือเมแทฟอสเฟต (Metaphosphate) หรืออาจจะนำสตาร์ชในรูปอีเทอร์มาทำปฏิกิริยากับอีพิคลอโรไฮดริน (Epichlorohydrin) ได้สตาร์ชซึ่งมีพันธะเชื่อมระหว่างโมเลกุลขึ้น แป้งที่ได้จะทนต่อกรด ความร้อนและสภาพที่มีแรงเฉือนจากเครื่องจักรที่ใช้ในกระบวนการผลิตอาหาร

2. การลดขนาดโมเลกุลแป้งด้วยกรด (Acid hydrolysis) แป้งชนิดนี้จะเริ่มเกิดเจลที่อุณหภูมิต่ำลงกว่าเดิม เมื่อเกิดการคินตัวจะได้เจลที่แข็งมีความสามารถในการยึดเกาะ สะดวกต่อการเทลงแม่พิมพ์ สามารถนำไปใช้ในผลิตภัณฑ์ลูกกวาดและซ็อกโกแลต

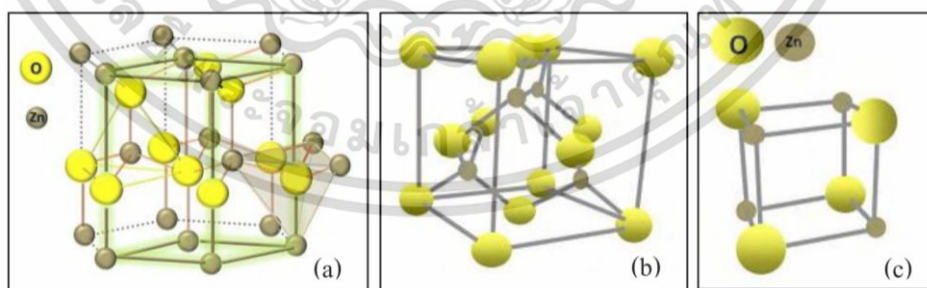
3. เดกซ์ทรีไนเซชัน (Dextrinization) เป็นการลดขนาดหรือเปลี่ยนการจับเกาะของโซ่ข้าง โดยใช้ความร้อนหรือความร้อนร่วมกับกรด เช่น มอลโทเดกซ์ทรีน (Maltodextrin) ทำให้

ความสามารถในการละลายในน้ำเย็นเพิ่มขึ้น มีความหนืดขณะร้อนลดลง พิล์มที่ได้มีสมบัติการเป็นกาวมากกว่าฟิล์มจากแป้งดิบ เพราะสามารถละลายได้ในปริมาณที่สูงกว่าในขณะที่มีความหนืดน้อยกว่า และระเหยน้ำออกได้เร็ว พิล์มจึงแห้งเร็ว นิยมใช้ในผลิตภัณฑ์อาหารพวกครีมเทียมและซูปกึ่งสำเร็จรูป

4. ออกซิเดชัน (Oxidation) เป็นการฟอกสีและลดขนาดของโมเลกุลของเม็ดแป้งโดยใช้ปฏิกิริยาออกซิเดชัน เช่น แป้งออกซิไดซ์ (Oxidized starch) มีสมบัติให้ความหนืดต่ำลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น เป็นเจลที่คงตัวมากกว่าเดิม และมีสมบัติในการไหลเมื่อแห้งดีขึ้น ใช้ในผลิตภัณฑ์พวกผงโรย เช่น หมากฝรั่งเพื่อไม่ให้ติดฟัน แต่ส่วนใหญ่ใช้ในอุตสาหกรรมกระดาษ โดยการเคลือบผิวหน้ากระดาษสำหรับกันหมึกซึม [18]

## 2.4 ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide)

ซิงค์ออกไซด์จัดเป็นสารประกอบที่สามารถพบเห็นได้ในธรรมชาติ และมีความสำคัญในลักษณะที่เป็นวัสดุกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type semiconductor) มีโครงสร้างผลึก 3 โครงสร้างคือ เฮกซะโกนอลเวอร์ตไซต์ (Hexagonal wurtzite) เป็นโครงสร้างที่มักพบในอุณหภูมิและความดันปกติ เนื่องจากมีความเสถียรภาพทางเทอร์โมไดนามิกส์ คิวบิกซิงค์เบลนด์ (Cubic zinc-blende) เป็นโครงสร้างกึ่งเสถียรซึ่งจะมีความเสถียรต่อเมื่อโตบนชั้นเสตรทที่มีโครงสร้างคิวบิกเท่านั้น และคิวบิกร็อกซอลท์ (Cubic rock-salt) จะมีโครงสร้างแบบกึ่งเสถียรที่ความดันสูงกว่า 10 จิกะพาสคาล แสดงดังรูปที่ 2.5 ปัจจุบันมีการใช้งานซิงค์ออกไซด์หลากหลายด้าน เช่น ใช้เป็นฟิสิกเมนต์สีขาวและใช้เป็นเนื้อสีเพื่อผสมกับสีอื่นในอุตสาหกรรมสีและสิ่งย้อม เป็นส่วนผสมในเครื่องสำอางและเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงเพื่อบำบัดสารอินทรีย์ในน้ำเสีย [19]



รูปที่ 2.5 โครงสร้างของซิงค์ออกไซด์ โดย (a) เฮกซะโกนอลเวอร์ตไซต์, (b) คิวบิกซิงค์เบลนด์ และ (c) Cubic rock-salt [19]

ตารางที่ 2.3 สมบัติทั่วไปของซิงค์ออกไซด์ [7]

ชื่อ	- ซิงค์ออกไซด์ (Zinc Oxide) - ซิงค์ (II) ออกไซด์ (Zinc (II) Oxide) - ซิงค์ไวท์ (Zinc white)
สูตรโมเลกุล	ZnO NPs
น้ำหนักโมเลกุล	81.37 g/mol
ลักษณะทางกายภาพ	ผงของแข็งละเอียด สีขาวหรือขาวอมเหลือง ไม่มีกลิ่น
ความหนาแน่น	5.66 g/cm <sup>3</sup>
จุดหลอมเหลว	1975 °C
ความถ่วงจำเพาะ	5.607 ที่ 20 °C
พื้นที่ผิวจำเพาะ	26.22 m <sup>2</sup> /g
ช่องว่างแถบพลังงาน	3.37 อิเล็กตรอนโวลต์

## 2.5 ไททาเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide)

ไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO<sub>2</sub>) เป็นวัสดุกึ่งตัวนำประเภทเซรามิกออกไซด์ชนิดหนึ่งที่สามารถเตรียมให้มีขนาดอนุภาคนาโนเมตรได้ และได้รับความสนใจจากภาคอุตสาหกรรมเป็นอย่างมาก เนื่องจากมีความเสถียรต่อสารเคมี ไม่มีความเป็นพิษสูง ราคาไม่แพงมาก เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม และใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีการใช้พลังงานแสงซึ่งเป็นพลังงานสะอาดกระตุ้นผ่านกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส (Photocatalysis) โดยฉายแสงยูวีไปยังสารกึ่งตัวนำทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน และรีดักชันในการกำจัดสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ โครงสร้างทางผลึกของไททาเนียมไดออกไซด์ จะมีวัฏภาคอยู่ 3 แบบคือ รูไทล์ (Rutile) อนาเทส (Anatase) และ บรูคไท์ (Brookite) แสดงดังรูปที่ 2.6 [20]

จากรูปที่ 2.6 โครงสร้างแบบรูไทล์จะมีความเสถียรมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งส่วนใหญ่จะพบมากในอุตสาหกรรมโรงงาน เช่น โรงงานสี โรงงานทำเครื่องสำอางและโรงงานอาหาร โครงสร้างอนาเทสจะมีความเสถียรสูงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นแต่อุณหภูมิจะไม่สูงเท่าโครงสร้างรูไทล์ ขณะที่ โครงสร้างบรูคไท์เป็นโครงสร้างที่พบได้ในแร่เท่านั้น ดังนั้นโครงสร้างที่นิยมใช้ในการวิจัยคือโครงสร้างรูไทล์และอนาเทส แสดงดังตารางที่ 2.4 [21]

ตาราง 2.4 สมบัติของไททาเนียมไดออกไซด์ในเฟสของผลึกแบบต่าง ๆ [21]

คุณสมบัติ \ โครงสร้าง	รูไทล์	อนาเทส
น้ำหนักโมเลกุล	79.890	79.890
ความหนาแน่น (กรัมต่อลูกบาศก์เมตร)	4.2743	3.895
ช่องว่างแถบพลังงาน	3.0 eV	3.2 eV
จุดหลอมเหลว (องศาเซลเซียส)	1,800 – 1,900	เปลี่ยนเป็นรูไทล์ที่ อุณหภูมิ 800 °C
โครงสร้างผลึก	เตตระโกนอล	เตตระโกนอล



รูปที่ 2.6 โครงสร้างของไททาเนียมไดออกไซด์ (ก) แบบรูไทล์ (ข) แบบอนาเทส และ (ค) แบบบรูคไท์ [21]

## 2.6 พลาสติไซเซอร์ (Plasticizers)

พลาสติไซเซอร์เป็นสารที่ใส่ในพอลิเมอร์ (Polymer) หรือผลิตภัณฑ์พลาสติกเพื่อลดจุดหลอมเหลวที่ทำให้เกิดการไหล (Flexing temperature) ของพลาสติกทำให้เม็ดพลาสติกมีความยืดหยุ่นและอ่อนนุ่มขึ้น สะดวกต่อการดึง รีด ฉาบ หรือหล่อแบบ และยังเป็นตัวรักษาความอ่อนนุ่มไม่ให้เสียไปโดยง่าย อีกทั้งยังมีสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้าทนต่อกรดต่าง น้ำมันและผงซักฟอก โดยจะใส่ประมาณ 20-40% โดยน้ำหนัก พลาสติไซเซอร์จึงมีความสำคัญต่ออุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์พลาสติกอย่างยิ่ง โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมพลาสติกพอลิไวนิลคลอไรด์ (Polyvinyl Chloride, PVC) ซึ่งเป็นพลาสติกที่นำไปทำประโยชน์ได้มากมาย เช่น ภาชนะบรรจุอาหาร ฟิล์มห่ออาหาร เครื่องมือแพทย์ เช่น ถุงบรรจุเลือด น้ำเกลือ สายยางที่ต่อกับเครื่องมือแพทย์ รองเท้า กระเป๋า เสื้อผ้า กระเป๋าเป้ ยางปูพื้น สายไฟ เทปพัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายไฟ ท่อน้ำ แท็งก์เก็บสารเคมีและอื่น ๆ โดยที่มีการใช้พลาสติกไซเซอรในอุตสาหกรรมพลาสติก PVC ถึง 65% ของปริมาณการใช้พลาสติกไซเซอรทั้งหมด

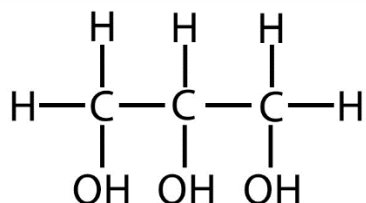
กลไกของพลาสติกไซเซชัน (Mechanism of plasticization) คือ พลาสติกที่ประกอบด้วยโมเลกุลพอลิเมอร์แต่ละโมเลกุลเชื่อมต่อกันด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์พลาสติกไซเซอรจะแทรกตัวเองอยู่ระหว่างโมเลกุลพอลิเมอร์ทำให้แรงแวนเดอร์วาลส์ลดลงโดยจะไม่มีการทำปฏิกิริยากับพอลิเมอร์ [22]

## 2.7 กลีเซอรอล (Glycerol)

กลีเซอรอลหรือกลีเซอริน คือ แอลกอฮอล์ชนิดหนึ่งที่มีคาร์บอน 3 ตัวต่อกันและมีหมู่ไฮดรอกซิล (-OH group) ต่อกับคาร์บอนทั้ง 3 ตัว กลีเซอรอลบริสุทธิ์เป็นของเหลว หนืดใส ไม่มีกลิ่น มีรสหวาน กลีเซอรอลมีจุดเดือดที่ 290 องศาเซลเซียส และจุดหลอมเหลวที่ 18 องศาเซลเซียส ละลายน้ำและแอลกอฮอล์ได้ดี แต่ไม่ละลายในอีเทอร์ เบนซินหรือน้ำมัน [23]

ตารางที่ 2.5 ข้อมูลความปลอดภัยของกลีเซอรอล [23]

ลักษณะของสารเคมี	-สารละลายในน้ำ -ไม่มีส่วนประกอบที่อันตรายตามข้อบังคับ(EC) No. 1907/2006
การปฐมพยาบาล	เมื่อสูดดม: ให้ออกอากาศบริสุทธิ์ ในกรณีสัมผัสกับผิวหนัง: ถอดเสื้อผ้าที่ปนเปื้อนทั้งหมดออกทันทีล้างผิวหนังด้วยน้ำจากฝักบัว เมื่อเข้าตา: ล้างออกด้วยน้ำปริมาณมาก ถอดคอนแทคเลนส์ หลังจากกลืน: ให้ผู้ป่วยดื่มน้ำตามทันทีอย่างน้อยสองแก้วและถ้าหากอาการยังไม่ดีขึ้นให้ปรึกษาแพทย์
ความเป็นอันตรายเฉพาะที่เกิดจากสารหรือสารผสม	-ลูกไหม้ติดไฟได้ -ไอหนักกว่าอากาศและอาจกระจายไปตามพื้น เมื่อผสมกับอากาศ ก่อให้เกิดของผสมที่ระเบิดได้เมื่อได้รับความร้อนสูง -เมื่อเกิดเพลิงไหม้ จะก่อให้เกิดแก๊สหรือไอระเหยที่เป็นอันตราย



รูปที่ 2.7 โครงสร้างของกลีเซอรอล [23]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปนัดดา พวงเกษม [24] ได้ศึกษาการเตรียมฟิล์มบรีโกลด์ได้จากแป้งมันสำปะหลัง และทดสอบสมบัติของฟิล์มที่ผลิตได้เพื่อหาแนวทางการนำไปใช้ประโยชน์ที่สามารถทดแทนการใช้ฟิล์มพลาสติก ฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่มีสมบัติเหมาะสำหรับการนำไปใช้ประโยชน์เตรียมได้จากน้ำแป้งความเข้มข้นร้อยละ 5 และเติมซอร์บิทอลร้อยละ 30 เป็นพลาสติกไซเซอร์ ผลการศึกษาพบว่า แผ่นฟิล์มที่ได้มีลักษณะใส ผิวเรียบ ความหนาเฉลี่ย 0.063 มม. มีค่าการต้านทานแรงดึงขาด 1.77 กก./ตร.มม. การยืดตัวร้อยละ 10.13 และความทนทานต่อการพับ 45 ครั้ง ส่วนสมบัติด้านการซึมผ่านพบว่า มีค่าการซึมผ่านของออกซิเจน 6 มล.มม./ตร.ม./24 ชม./บรรยากาศ การซึมผ่านของไอน้ำ 0.37 ก.มม./ตร.ม./24 ชม./มม.ปรอท และมีสมบัติเด่น คือ ต้านทานน้ำมันได้ 120 วัน ย่อยสลายได้โดยจุลินทรีย์ในธรรมชาติ และผนึกติดได้ด้วยความร้อนจึงสามารถนำมาทำเป็นถุงโดยมีค่าความแข็งแรงของตะเข็บ 19.07 นิวตัน/25 มม. เมื่อบรรจุเครื่องปรุงระเหยก็สำเร็จรูปพร้อมจำหน่าย มีอายุการเก็บรักษานาน 22 เดือนที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียสโดยไม่มีแสงส่องผ่าน และละลายในน้ำต้มเดือดภายใน 5 นาที ส่วนการเคลือบผิวสตรอเบอร์รี่แบบแคโรทและมะเขือเทศด้วยฟิล์มแป้งมันสำปะหลังไม่สามารถลดการสูญเสียน้ำหนักหรือช่วยยืดอายุการเก็บได้

บงกช ชื่นมงคล [3] ได้ศึกษาการดัดแปรแป้งพุทธรักษาภินได้ด้วยวิธีไฮดรอกซีพรอพิลเลชัน โดยทำการศึกษาการดัดแปรแป้งด้วยวิธีไฮดรอกซีพรอพิลเลชันที่อุณหภูมิ 40 °C pH 5.5 พบว่าแป้งดัดแปรที่อุณหภูมิเริ่มเกิดความร้อนลดลงแต่ความหนืดสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้น แป้งดัดแปรที่อุณหภูมิและค่าพลังงานความร้อน ( $\Delta H$ ) ในการเกิดเจลลิตีไนซ์ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับแป้งที่ไม่ผ่านการดัดแปร โดยอุณหภูมิในการเกิดเจลลิตีไนซ์ของแป้งที่ไม่ผ่านการดัดแปร คือ 70 °C และแป้งดัดแปรที่มีค่าอยู่ในช่วง 60-69 °C เจลของแป้งดัดแปรที่มีค่าความแข็ง (Hardness) ลดลง แป้งที่ผ่านการดัดแปรมีความคงตัวต่อการแช่แข็ง-ละลายสูงขึ้น ส่วนความคงตัวต่อแรงเฉือนและสภาพความเป็นกรดต่างมีค่าใกล้เคียงกับแป้งที่ไม่ผ่านการดัดแปร

กิตติชัย ศรีสำแดง [7] ได้ศึกษาการเตรียมและสมบัติต่าง ๆ ของฟิล์มย่อยสลายได้ทางชีวภาพจากแป้งข้าวเจ้าที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริกและเติมอนุภาคโลหะออกไซด์ต่างชนิดโดยศึกษาผลของปริมาณของกรดซิตริกที่ใช้ที่ปริมาณ 0 5 10 15 และ 20% โดยน้ำหนัก พบว่าการเติมกรดซิตริกส่งผลให้เปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก การบวมตัว การดูดซับความชื้นและการซึมผ่านของไอน้ำลดลง แต่ให้เปอร์เซ็นต์การดัดแปรที่มีค่าสูงขึ้นเมื่อปริมาณของกรดเพิ่มขึ้น นอกจากนี้การเติมอนุภาคโลหะออกไซด์ชนิดต่าง ๆ ได้แก่

ซิงค์ออกไซด์ ไทเทเนียมไดออกไซด์ และแคลเซียมออกไซด์ส่งผลให้เปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อน ความแข็งแรงดึงและมอดูลัสเพิ่มสูงขึ้น แต่อย่างไรก็ตามค่าการบวมตัว การซึมผ่านของไอน้ำและเปอร์เซ็นต์การดั่งยัดมีแนวโน้มลดต่ำลง จากการทดลองความสามารถในการต้านทานเชื้อแบคทีเรียต่อ *E.coli* และ *S.aureus* พบว่าตัวอย่างฟิล์มที่มีการเติมอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่ปริมาณ 5% มีประสิทธิภาพในการต้านทานต่อเชื้อมากที่สุด

รัตนา จินดาพรรณ และวิไลลักษณ์ ฝัฒเพช [25] ได้ศึกษาผลของพลาสติกไซเซออร์ต่อสมบัติทางกายภาพของฟิล์มโปรตีนถั่วเขียวและแปรอัตราส่วนปริมาณโปรตีนถั่วเขียวต่อปริมาณพลาสติกไซเซออร์ เป็น 3 ระดับ คือ 70:30 60:40 และ 50:50 โดยใช้พลาสติกไซเซออร์ 3 ชนิด คือ กลีเซอรอล ซอร์บิทอล และพรอลีเอทีลีนไกลคอล พบว่าฟิล์มที่ผลิตโดยใช้พรอลีเอทีลีนไกลคอลไม่สามารถขึ้นรูปได้ทุกอัตราส่วน ฟิล์มมีลักษณะเปราะแตกเป็นชิ้นเล็ก ๆ ขณะที่ฟิล์มซึ่งผลิตโดยใช้กลีเซอรอลและซอร์บิทอล สามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มได้ทุกอัตราส่วน เมื่อนำไปวัดความหนา การต้านแรงดึง การซึมผ่านของน้ำมัน และความสามารถในการละลาย พบว่าฟิล์มมีความหนาไม่แตกต่างกัน ค่าการต้านแรงดึงลดลงเมื่อปริมาณพลาสติกไซเซออร์เพิ่มขึ้นสามารถต้านทานการซึมผ่านของน้ำมันได้มากกว่า 90 วัน และเมื่อใช้พลาสติกไซเซออร์เพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 50 ฟิล์มทั้งสองชนิดมีค่าการต้านแรงดึงใกล้เคียงกัน แต่ฟิล์มกลีเซอรอลสามารถต้านทานการซึมผ่านของน้ำมันได้ดีกว่าฟิล์มซอร์บิทอล

Thewika Wogum และคณะ [6] ได้ศึกษาการเตรียมและสมบัติต่าง ๆ ของฟิล์มย่อยสลายได้ทางชีวภาพจากแป้งข้าวเจ้าด้วยกระบวนการไฮดรอกซีพรอพิเลชัน ที่ใช้พรอพิลีนออกไซด์ร้อยละ 6-12 % อุณหภูมิ 40 °C pH 5.5 พบว่าได้ค่าระดับการแทนที่อยู่ในช่วง 0.022 – 0.033 การเกิดเจลลิตีไนซ์และค่าเอนทาลปีของแป้งดัดแปรที่มีค่าต่ำกว่าแป้งที่ไม่ผ่านการดัดแปรและลดลงเมื่อร้อยละของพรอพิลีนออกไซด์เพิ่มขึ้น สำหรับการเตรียมฟิล์มพบว่าค่าเปอร์เซ็นต์การดั่งยัด การซึมผ่านของไอน้ำ และความโปร่งใสของฟิล์มแป้งดัดแปรสูงกว่าฟิล์มแป้งที่ไม่ผ่านการดัดแปรและเพิ่มขึ้นเมื่อร้อยละของพรอพิลีนออกไซด์เพิ่มขึ้น ในทางตรงกันข้ามความต้านทานแรงดึงและความเป็นผลึกกลับลดลงเมื่อร้อยละของพรอพิลีนออกไซด์เพิ่มขึ้น

Xiuting Hu และคณะ [26] ได้ทำการศึกษาการปรับปรุงสมบัติของฟิล์มแป้งข้าวโพดโดยใช้การดัดแปรคู่โดย การตัดสายโซ่ (Debranching) และการไฮดรอกซีพรอพิเลชัน การตัดสายโซ่ทำได้โดยใช้เอนไซม์พุลูลแลน (Pullulanase) และใช้พรอพิลีนออกไซด์ที่ร้อยละ 12 พบว่าการตัดสายโซ่ส่งผลให้ปริมาณอะไมโลสสูงขึ้นและพันธะระหว่างโซ่แป้งที่มากขึ้น สามารถลดค่าเปอร์เซ็นต์การดั่งยัดและเพิ่ม

ความต้านทานแรงดึงได้ ส่วนการทำไฮดรอกซีพรอพิเลชันให้สมบัติเชิงกลตรงกันข้ามกับฟิล์มแป้งจากการตัดสายโซ่ โดยมีค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืดลดลงจากร้อยละ 39.2 เป็น 8.34 จากการตัดสายโซ่ ส่วนการไฮดรอกซีพรอพิเลชันกลับมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 134.6 ค่าความต้านทานแรงดึงจากการตัดสายโซ่เพิ่มขึ้นจาก 4.82 MPa เป็น 15.52 MPa แต่การไฮดรอกซีพรอพิเลชันมีค่าลดลงเป็นร้อยละ 2.92 MPa หลังจากการตัดแปรรูโดยใช้ทั้ง 2 วิธีทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืดและความต้านทานแรงดึงของฟิล์มเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 57.2 และ 7.35 ตามลำดับ นอกจากนี้ประสิทธิภาพในการซึมผ่านของไอน้ำเรียงจากประสิทธิภาพดีที่ที่สุด คือ ฟิล์มจากการตัดสายโซ่ > ฟิล์มจากการตัดแปรรู > ฟิล์มที่ไม่ผ่านการตัดแปรรู และฟิล์มจากการไฮดรอกซีพรอพิเลชัน จากผลการทดลองฟิล์มจากการตัดแปรรูมีประสิทธิภาพดีที่ที่สุด

**Marium Shaikh และคณะ [27]** ได้ทำการศึกษาสมบัติของฟิล์มแป้งข้าวฟ่างลูกเดียว (Pearl millet starch) จากวิธีอะซิทิเลชัน (Acetylation) และไฮดรอกซีพรอพิเลชันในการนำมาประยุกต์ใช้ในบรรจุภัณฑ์อาหาร โดยฟิล์มขึ้นรูปจากอะซิทิเลชันที่ความเข้มข้นร้อยละ 4 และ 8 และไฮดรอกซีพรอพิเลชันที่ความเข้มข้นร้อยละ 10 และ 30 พบว่าฟิล์มตัดแปรรูทั้ง 2 วิธีมีพื้นผิวที่เรียบเนียนกว่าแป้งที่ไม่ผ่านการตัดแปรรู ฟิล์มตัดแปรรูจากวิธีอะซิทิเลชันมีสมบัติการป้องกันความชื้นที่ดีและการซึมผ่านของไอน้ำกับการละลายน้ำที่ต่ำ ส่วนค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืดและความโปร่งใสของฟิล์มแป้งไฮดรอกซีพรอพิเลชันมีค่าสูงกว่าแป้งที่ไม่ผ่านการตัดแปรรูและเพิ่มขึ้นเมื่อร้อยละของพรอพิลีนออกไซด์เพิ่มขึ้น จากผลดังกล่าวทำให้ฟิล์มตัดแปรรูจากอะซิทิเลชันเหมาะกับบรรจุภัณฑ์อาหารแห้งและฟิล์มแป้งจากวิธีไฮดรอกซีพรอพิเลชันเหมาะกับบรรจุภัณฑ์ประเภทผักสด

**Weiwei Wang และคณะ [28]** ได้ทำการศึกษาการปรับปรุงวิธีการตรวจสอบปริมาณไฮดรอกซีพรอพิลในแป้งที่ผ่านการตัดแปรรูด้วย  $^1\text{H-NMR}$  พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการไฮโดรไลซ์ของแป้งไฮดรอกซีพรอพิล คือ ปริมาณแป้งไฮดรอกซีพรอพิล 200 มิลลิกรัม ปริมาณกรดในสารละลาย 0.2 มิลลิลิตรและใช้ความร้อนที่ 90 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากตัวอย่างแป้งไฮดรอกซีพรอพิล และตัวอย่างแป้งเชื่อมขวาง (แป้งสาธิตเชื่อมขวางเกรดการค้าจาก MGP Ingredients, Inc) พบว่าการเกิดไฮโดรไลซ์ขณะเตรียมสารละลายแป้งดีขึ้นและผลลัพธ์ของปริมาณไฮดรอกซีพรอพิลที่ได้ยังสอดคล้องกับวิธีการไฮโดรไลซ์กับแอนิเมชันเช่นเดียวกัน

**Xia Chen และคณะ [29]** ได้ทำการศึกษาสมบัติของฟิล์ม 2 ชั้นจากแป้งไฮดรอกซีพรอพิลและเซอีน (Zein) ซึ่งเป็นโปรตีนที่พบอยู่ในข้าวโพด โดยผ่านการขึ้นรูปด้วยวิธีการหล่อให้ชั้นเซอีนเคลือบบนฟิล์มแป้งไฮดรอกซีพรอพิล ผลการศึกษาพบว่าฟิล์ม 2 ชั้นมีพื้นผิวที่เรียบขึ้น ค่ามอดุลัส ความแข็งแรงดึงและความโปร่งใสสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มชั้นเดียวของแป้งไฮดรอกซีพรอพิลและเซอีน มี

ประสิทธิภาพในการป้องกันความชื้นที่ดีจากชั้นเคลือบของเซอื่น นอกจากนี้ด้วยสมบัติของเซอื่นยังทำให้ฟิล์มแป้งมีสมบัติการป้องกันรังสียูวีที่ดีช่วยลดการเกิดออกซิเดชันของไขมันเมื่อใช้เป็นบรรจุภัณฑ์

Elham Fouladi และคณะ [30] ได้ทำการศึกษาผลของการไฮโดรไลซิสและไฮดรอกซีพรอพิเลชันที่มีต่อสมบัติของแป้งสาคุ (Sago starch) โดยแป้งสาคุถูกไฮโดรไลซ์ด้วยกรดไฮโดรคลอริก 0.14 M ด้วยเวลา 6 12 18 และ 24 ชั่วโมง ส่วนการไฮดรอกซีพรอพิเลชันใช้ความเข้มข้นของพรอพิลีนออกไซด์ที่ร้อยละ 0 ถึง 30 โดยน้ำหนัก ผลจากไฮโดรไลซิสทำให้น้ำหนักของโมเลกุลแป้งลดลงโดยเฉพาะส่วนของอะไมโลเพคติน แต่การไฮดรอกซีพรอพิเลชันไม่ส่งผลกระทบต่อการกระจายน้ำหนักโมเลกุล ค่าระดับการแทนที่ของแป้งไฮดรอกซีพรอพิลจากการไฮโดรไลซิสอยู่ในช่วง 0.007 ถึง 0.15 โดยค่าองศาการแทนที่สูงกว่า 0.1 สามารถละลายในน้ำเย็นได้อย่างสมบูรณ์โดยที่ไม่เกิดการบวมตัวของตัวแป้ง

Jie Zhu et al. (2021) [31] ได้ทำการศึกษาสมบัติฟิล์มแป้งไฮดรอกซีพรอพิลคอมพอสิตเสริมแรงด้วยนาโนซิงค์ออกไซด์ (Nano-TiO<sub>2</sub>) และนาโนซิลิคอนไดออกไซด์ (Nano-SiO<sub>2</sub>) ที่ความเข้มข้น 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักด้วยวิธีการเป่าขึ้นรูป ผลการศึกษาพบว่า มีการเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างฟิล์มแป้งไฮดรอกซีพรอพิลกับอนุภาคนาโนโลหะออกไซด์ และพบพีคเอกลักษณ์ของ Nano-SiO<sub>2</sub> ที่ 799 cm<sup>-1</sup> และ Nano-TiO<sub>2</sub> ที่ 713 cm<sup>-1</sup> นอกจากนี้ฟิล์มแป้งคอมพอสิตยังมีเสถียรภาพทางความร้อนและความแข็งแรงดึงสูงขึ้น ค่าการซึมผ่านของไอน้ำลดลงและพื้นผิวมีความไม่ชอบน้ำมากขึ้น (Hydrophobicity) จึงสรุปได้ว่า อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์และนาโนซิลิคอนไดออกไซด์สามารถใช้เป็นสารเสริมแรงร่วมกับฟิล์มแป้งไฮดรอกซีพรอพิลในกระบวนการเป่าขึ้นรูปได้

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 สารเคมี

1. แป้งมันสำปะหลัง ตราปลามังกร จากห้างหุ้นส่วนสามัญนิติบุคคล ตงจั้น องค์กรประกอบทางเคมีของแป้งมันสำปะหลังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 องค์กรประกอบทางเคมีของแป้งมันสำปะหลัง

องค์ประกอบ	ปริมาณ (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)
ไขมัน	0.25
ความชื้น	< 13
โปรตีน	6.50 - 7.50
คาร์โบไฮเดรต	87
-อะไมโลส	17
-อะไมโลเพคติน	83
เถ้า	0.23
ขนาด	< 160 ไมโครเมตร
ความเป็นกรด-ด่าง	6 - 7

หมายเหตุ ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

2. กลีเซอรอล (Glycerol) เกรดการค้า จากบริษัท Lab system Co., Ltd.
3. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide, NaOH) จากบริษัท CARLO ERBA Reagent S.A.S
4. โซเดียมซัลเฟต (sodium sulphate, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) จากบริษัท CARLO ERBA Reagent S.A.S
5. พรอพิลีนออกไซด์ (Propylene oxide, C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>O) เกรดวิเคราะห์ จากบริษัท อิตัลมาร์ (ประเทศไทย) จำกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid, HCl) เกรดวิเคราะห์ จากบริษัท สมาร์ท ไฮเอนซ์ จำกัด

7. กรดอะซิติก (Acetic acid, CH<sub>3</sub>COOH) เกรดวิเคราะห์ จากบริษัท อีตัลมาร์ (ประเทศไทย) จำกัด

8. แบเรียมคลอไรด์ (Barium chloride, BaCl<sub>2</sub>) จากบริษัท CARLO ERBA Reagent S.A.S

9. ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide, TiO<sub>2</sub>) เกรดวิเคราะห์ จากบริษัท อีตัลมาร์ (ประเทศไทย) จำกัด องค์ประกอบทางเคมีของไทเทเนียมไดออกไซด์แสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 องค์ประกอบทางเคมีของไทเทเนียมไดออกไซด์

องค์ประกอบ	ปริมาณ (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)
TiO <sub>2</sub>	≥ 99.5
ขนาด	21 นาโนเมตร

10. ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide, ZnO) จากบริษัท Nanomaterials Technology, Co. Ltd. องค์ประกอบทางเคมีของซิงค์ออกไซด์ แสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 องค์ประกอบทางเคมีของซิงค์ออกไซด์

องค์ประกอบ	ปริมาณ (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)
ZnO	99.73
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.03
NiO	0.04
ขนาด	20-40 นาโนเมตร

11. น้ำกลั่น (Distilled water)

### 3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

- อุปกรณ์เครื่องแก้วและบริพันธ์
- เครื่องชั่ง (Digital balance 4 digits)

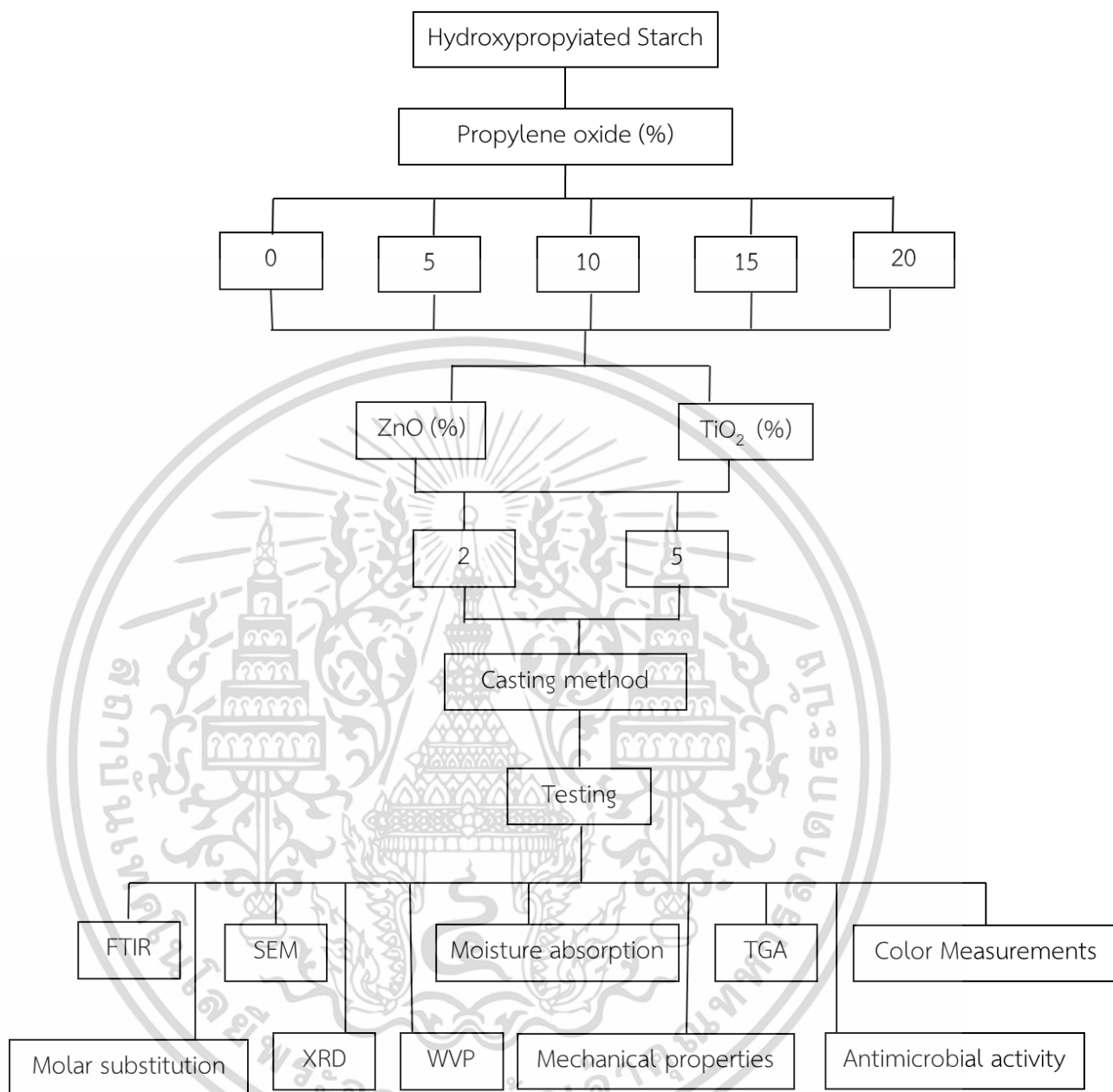
3. เครื่องให้ความร้อน (Hot plate)
4. อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (Water bath shaker)
5. ตู้อบลมร้อน (Hot air oven)
6. ปั๊มสุญญากาศ (Vacuum pump)
7. ถาดพลาสติก (Polypropylene tray) ขนาด 15 X 20 เซนติเมตร
8. เวอร์เนีย (Vernier)
9. เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal testing machine) (Lloyd Instruments, LR5k, ประเทศสหรัฐอเมริกา)
10. เครื่องอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (IR Spectrophotometer) (Perkin Elmer, Spectrum 200 GX spectrometer, ประเทศสหรัฐอเมริกา)
11. เครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffractometer) (Rigaku, SmartLab<sup>®</sup> SE, ประเทศญี่ปุ่น)
12. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) (LEO 1455VP, ZEISS, ประเทศเยอรมนี)
13. เครื่องวัดการเปลี่ยนแปลงทางน้ำหนักเชิงความร้อน (Thermogravimetric analyzer, TGA) (Mettler Toledo, TGA/DSC 3+, ประเทศสหรัฐอเมริกา)
14. เครื่องนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (<sup>1</sup>H-NMR) (Bruker, Advance III HD ความถี่ 500 MHz, ประเทศเยอรมัน)

### 3.3 วิธีการทดลอง

#### 3.3.1 คำโครงการดำเนินงานวิจัย

แผนการดำเนินงานวิจัยแสดงได้ดังรูปที่ 3.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 แผนการดำเนินงานวิจัย

### 3.3.2 การเตรียมแป้งไฮดรอกซีพอลิจากแป้งมันสำปะหลัง

1. ชั่งแป้ง 50 กรัมโดยน้ำหนักแป้งแห้งใส่ในขวดแก้วฝาเกลียวขนาด 100 มิลลิลิตรพร้อมฝาปิด
2. เตรียมสารละลายผสมของโซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมซัลเฟตโดยละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.65 กรัมและสารละลายโซเดียมซัลเฟต 7.5 กรัมในน้ำกลั่น 60 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิห้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ผสมแป้งและสารละลายผสมของโซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมซัลเฟตเข้าด้วยกันจากนั้นเติมพรอพิลีนออกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 5 10 15 และ 20 โดยน้ำหนักต่อปริมาณแป้งแห้งปั่นกวนที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 นาที
4. นำขวดแป้งไปวางไว้ในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่ตั้งอุณหภูมิไว้ 40 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง
5. นำน้ำแป้งมาทำการปรับ pH เป็น 7 ด้วยกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 1 M เพื่อยุติปฏิกิริยาระหว่างแป้งและพรอพิลีนออกไซด์
6. นำแป้งไปกรองด้วยเครื่องปั๊มสุญญากาศ ทำการล้างแป้งโดยใช้น้ำกลั่นกวนให้เข้ากันแล้วกรองน้ำกลั่นที่ใช้ล้างแป้งด้วยเครื่องปั๊มสุญญากาศ
7. ล้างแป้งจนกว่าไม่พบตะกอนสีขาว ทดสอบโดยเติมแบเรียมคลอไรด์ผสมกับน้ำล้างแป้ง ถ้าเกิดตะกอนสีขาวหมายความว่าในแป้งยังคงเหลือซัลเฟตอยู่
8. ทำการกรองและนำแป้งไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสประมาณ 10 ชั่วโมง จากนั้นบดแป้งให้ละเอียด [3]

### 3.3.3 การเตรียมฟิล์มจากแป้งไฮดรอกซีพรอพิล

1. ผสมแป้ง 5 กรัมและกลีเซอรอลร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก ตวงน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร ใส่ตามลงไปนบีกเกอร์ผสมให้เข้ากัน
2. นำบีกเกอร์ของผสมไปวางบนเตาให้ความร้อน ใส่แท่งแม่เหล็กปั่นกวนขนาด 4 เซนติเมตร พร้อมทั้งให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ให้ความร้อนจนกระทั่งแป้งเริ่มเกิดเจลลาทีโนเซชัน
3. เทสารผสมลงในถาด โดยกำหนดให้มีน้ำหนักสารผสมเฉลี่ยประมาณ  $80 \pm 1$  กรัม เพื่อควบคุมความหนาของฟิล์มให้สม่ำเสมอทุก ๆ ตัวอย่าง (ฟิล์มหนาเฉลี่ย  $0.24 \pm 2$  มิลลิเมตร) เกลี่ยสารละลายให้สม่ำเสมอทั่วทั้งถาด
4. จากนั้นนำไปอบที่ตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง
5. เมื่อครบตามเวลาที่กำหนดนำออกจากตู้อบรอให้เย็น แล้วลอกแผ่นฟิล์มออกจากถาด
6. ขึ้นรูปฟิล์มจากแป้งไฮดรอกซีพรอพิลทุกสูตรตามขั้นตอนที่ 1-5 จากนั้นเลือกสูตรมาทำการเติมนาโนซิงค์ออกไซด์และนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์

7. การขึ้นรูปฟิล์มโดยการเติมนาโนซิงค์ออกไซด์และนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ทำได้โดยการผสมนาโนซิงค์ออกไซด์หรือนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ร้อยละ 2 และ 5 โดยน้ำหนักแบ่งกับน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตรจากนั้นนำไปผสมกับแป้งและกลีเซอรอลที่เลือกไว้
8. จากนั้นทำการขึ้นรูปฟิล์มที่ผสมซิงค์ออกไซด์หรือไททาเนียมไดออกไซด์ตามขั้นตอนที่ 2-5
- หมายเหตุ – ได้ทำการศึกษาปริมาณของนาโนโลหะออกไซด์ที่ปริมาณ 10% โดยน้ำหนัก พบว่าฟิล์มมีปริมาณของนาโนโลหะออกไซด์จับตัวกันที่พื้นผิวฟิล์มอย่างไม่สม่ำเสมอ จึงไม่ได้ทำการศึกษาต่อ

ตารางที่ 3.4 อัตราส่วนของฟิล์มแป้งไฮดรอกซีพรอพิล

สูตร	น้ำกลั่น (มิลลิลิตร)	พรอพิลีนออกไซด์ (%)	กลีเซอรอล (%)	TiO <sub>2</sub> /ZnO (%)
NS	100	-	30	-
HPS5	100	5	30	-
HPS10	100	10	30	-
HPS15	100	15	30	-
HPS30	100	30	30	-
NS ZnO2%	100	-	30	2
NS ZnO5%	100	-	30	5
NS TiO <sub>2</sub> 2%	100	-	30	2
NS TiO <sub>2</sub> 5%	100	-	30	5
HPS10ZnO2%	100	10	30	2
HPS10ZnO5%	100	10	30	5
HPS10TiO <sub>2</sub> 2%	100	10	30	2
HPS10TiO <sub>2</sub> 5%	100	10	30	5
HPS20ZnO2%	100	20	30	2
HPS20ZnO5%	100	20	30	5
HPS20TiO <sub>2</sub> 2%	100	20	30	2
HPS20TiO <sub>2</sub> 5%	100	20	30	5

### 3.4 การทดสอบสมบัติต่าง ๆ

#### 3.4.1. การวิเคราะห์ปริมาณหมู่ไฮดรอกซีพอลิและระดับการแทนที่ของแป้งไฮดรอกซีพอลิ

การหาปริมาณหมู่ไฮดรอกซีพอลิและระดับการแทนที่ของแป้งไฮดรอกซีพอลิทำได้ดังขั้นตอนต่อไปนี้ [33]

1. ชั่งแป้ง 12 กรัมใส่ในขวดปรับปริมาตร 25 มิลลิลิตร
2. เติมกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 10% (v/v) ปริมาตร 10 มิลลิลิตรในขวดปรับปริมาตร
3. นำไปให้ความร้อนในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (Boiling water bath) เป็นเวลา 30 นาที
4. เมื่อสารละลายเย็นตัวลงทำการเติมกรดอะซิติกเข้มข้น 10% (v/v) ปริมาณ 2.5 มิลลิลิตร
5. ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจากนั้นนำสารละลายที่ได้มาวิเคราะห์ผลด้วยเทคนิค  $^1\text{H-NMR}$  (Proton nuclear magnetic resonance spectroscopy) โดยใช้  $\text{D}_2\text{O}$  เป็นตัวทำละลาย

#### 3.4.2 การหาโครงสร้างและหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (Fourier transform infrared spectroscopy, FTIR)

วิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันที่อยู่ในสารตัวอย่าง โดยใช้เทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี ทำโดยเตรียมชิ้นงานตัวอย่างนำไปให้ความร้อนจนอ่อนตัวเป็นแผ่นฟิล์มแผ่นบาง จากนั้นนำไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นนำสารตัวอย่าง 2-3 มิลลิกรัมมาบดรวมกับโพแทสเซียมโบรไมด์ที่อบแห้งแล้ว 0.2-0.5 กรัม นำใส่ลงในแม่พิมพ์และนำเข้าเครื่องอัดเม็ดภายใต้ความดัน  $10^{-4}$  kg/cm<sup>2</sup> เป็นเวลา 5 นาที แล้วนำเม็ดออกจากแม่พิมพ์และนำไปวิเคราะห์ในช่วงเลขคลื่นเท่ากับ 400-4000 cm<sup>-1</sup> โดยทำการสแกน 16 ครั้งต่อตัวอย่าง ที่ความละเอียด 4 cm<sup>-1</sup>

#### 3.4.3 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffractometer, XRD)

วิเคราะห์หาปริมาณผลึกของชิ้นงานตัวอย่าง โดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ ตกกระทบหน้าผลึกที่มุมต่าง ๆ ด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffractometer) โดยใช้  $\text{CuK}\alpha$  (ความยาวคลื่นเท่ากับ 1.54 อังสตรอม) และใช้ขนาดของมุมตกกระทบสำหรับการคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกที่พื้นที่ได้พิคทั้งหมด (Net area) คือ  $2\theta = 5-60^\circ$  และสำหรับพื้นที่ที่สนใจ (Raw area) คือ  $2\theta = 10-25^\circ$  ด้วยอัตราเร็ว 1 °C/นาที โดยสามารถคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกได้ ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\% \text{ Crystallinity} = \frac{\text{Raw area}}{\text{Net area}} \times 100$$

#### 3.4.4 สัณฐานวิทยา (Morphology)

ศึกษาลักษณะของภาคตัดขวางของชิ้นงานแป้ง โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) และศึกษาการกระจายตัวของอนุภาคนาโนโลหะออกไซด์ด้วยเทคนิค Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS) ทำการเตรียมตัวอย่าง โดยการนำชิ้นงานมาหักภายใต้ไมโครเจนเทลว จากนั้นเคลือบทองคำก่อนนำเข้าเครื่องทดสอบ เพื่อศึกษาความแตกต่างของลักษณะพื้นผิวชิ้นงานเมื่อมีการเติมวัสดุเสริมแรงชนิดต่าง ๆ และความสามารถในการกระจายตัวของวัสดุนาโน-โลหะออกไซด์ในชิ้นงาน

#### 3.4.5 การหาปริมาณการดูดซับความชื้น (Moisture absorption)

การหาปริมาณการดูดซับความชื้น ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM E104 โดยการตัดชิ้นงานทดสอบให้มีขนาด 2.5 X 2.5 เซนติเมตร จำนวนสุตรละ 2 ชิ้นงาน แล้วนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง หรือจนกระทั่งความชื้นในชิ้นงานหมดไปหรือจนกระทั่งชิ้นงานมีน้ำหนักคงที่ จากนั้นบันทึกค่าน้ำหนักไว้ แล้วจึงนำชิ้นงานไปวางในภาชนะปิดที่ อิ่มตัวด้วยน้ำกลั่น ควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ 100 % เป็นเวลา 20 วัน โดยนำชิ้นงานมาชั่งและบันทึกค่าน้ำหนักทุกวัน ซึ่งปริมาณการดูดซับน้ำสามารถคำนวณได้ ดังนี้

$$W_a (\%) = \frac{W_e - W_0}{W_0} \times 100$$

เมื่อ  $W_a$  คือ ร้อยละการดูดซับน้ำ

$W_e$  คือ น้ำหนักของชิ้นงานหลังการทดลอง

$W_0$  คือ น้ำหนักของชิ้นงานก่อนการทดลอง

### 3.4.6 การทดสอบอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ (Rate of water vapor permeability, WVP)

การหาอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ คืออัตราการซึมผ่านไอน้ำที่ผ่านหนึ่งของพื้นที่หรือความหนาของตัวอย่างต่อเวลา โดยทำการทดสอบด้วยวิธี Desiccant method ตามมาตรฐาน ASTM E 96 เตรียมการทดสอบโดยตัดฟิล์มให้มีขนาดพื้นที่พอในการปิดช่องว่างของถ้วยทดสอบที่บรรจุด้วยซิลิกาเจล 10 กรัม แล้วนำไปวางในเคซิเคเตอร์ที่ควบคุมสถานะความชื้นสัมพัทธ์ประมาณ 75% ที่อุณหภูมิห้อง ชั่งน้ำหนักถ้วยซิลิกาทุกๆ 1 วันเป็นเวลา 1 สัปดาห์ ค่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำสามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$WVP = \frac{W \times X}{A \times t \times \Delta P}$$

เมื่อ W คือ ความแตกต่างของน้ำหนักตัวอย่างก่อนและหลังการซึมผ่านไอน้ำ (กรัม)

T คือ เวลาที่น้ำหนักเกิดการเปลี่ยนแปลง (วัน)

$\Delta P$  คือ ความแตกต่างของความดันไอ (75 MPa)

X คือ ความหนาเฉลี่ยของชั้นงานฟิล์ม (มิลลิเมตร)

A คือ พื้นที่ผิวทั้งหมดของฟิล์ม ( $32.15 \times 10^{-3}$  ตารางเมตร)

WVP คือ อัตราการซึมผ่านของไอน้ำ (กรัม \* มิลลิเมตรต่อตารางเมตร \* วัน \* กิโลปาสกาล)

### 3.4.7 การทดสอบสมบัติเชิงกล (Mechanical properties)

ทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบสมบัติเชิงกล (Universal Testing Machine) โดยทำการทดสอบด้วยมาตรฐาน ASTM D882 พร้อมทั้งใช้โปรแกรม WINDAP ตัดชิ้นงานเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 100 X 15 mm โดยทำการควบคุมสถานะของชิ้นงานที่ใช้ทดสอบที่อุณหภูมิ 23 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 60 % ทดสอบตามสภาวะดังนี้

ความเร็วที่ใช้ดึง (Test speed) 50 mm/min

ระยะทดสอบ (Gauge length) 50 mm

โหลดเซลล์ (Load cell) 100 N

จำนวนตัวอย่างทดสอบ 10 ชิ้นต่อสูตร

ค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) หรือค่าความเค้นสูงสุด (Maximum stress) ของวัสดุ เมื่อได้รับแรงดึง คำนวณได้จาก

$$\text{Tensile strength (MPa)} = \frac{F}{A}$$

เมื่อ  $F$  คือ แรงสูงสุดที่ใช้ในการดึงชิ้นงาน (N)

$A$  คือ พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงาน ( $\text{mm}^2$ )

เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด (%Elongation at break) คำนวณจาก

$$\text{Elongation at break (\%)} = 100 \times \frac{L - L_0}{L_0}$$

เมื่อ  $L$  คือ ความยาวสุดท้ายของชิ้นงาน (mm)

$L_0$  คือ ความยาวเริ่มต้นของชิ้นงาน (mm)

### 3.4.8 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยสมบัติทางความร้อน (Thermogravimetric analysis, TGA)

ในการวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยสมบัติทางความร้อน เตรียมตัวอย่างโดยการบดแบ่งให้เป็นผงละเอียด จากนั้นตักใส่ในพาน (Pan) ที่เชื่อมต่อกับเครื่องชั่งที่มีความไวและละเอียดสูง เริ่มการวิเคราะห์โดยทำการให้ความร้อนตั้งแต่ 30-600 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการให้ความร้อน (Heating rate) 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน

### 3.4.9 การวัดสี (Color Measurement)

การวัดสีของตัวอย่างฟิล์มนั้นทำได้โดยการใช้เครื่องวัดสีตามมาตรฐาน ASTM D-1925 แล้วนำมาเปรียบเทียบกับสีแถบมาตรฐาน 10 จุดเพื่อแสดงการเปลี่ยนแปลงสีของชิ้นงานตามระบบของ Hunter และ CIE ภายใต้แหล่งกำเนิดแสงทั้งแสดนหรือซินอน D 65/10° โดย

L\*: ใช้กำหนดค่าความสว่าง (Lightness)

L =0: perfect black sample

L =100: perfect white sample

a\*: ใช้กำหนดสีแดงหรือสีเขียว (Red Green)

a เป็น + สีจะไปทิศทางของแดง

a เป็น - สีจะไปทิศทางของเขียว

b\*: ใช้กำหนดสีเหลืองหรือน้ำเงิน (Yellow Blue)

b เป็น + สีจะไปทิศทางของเหลือง

b เป็น - สีจะไปทิศทางของน้ำเงิน

C\*: ความสดใสของสี

สามารถคำนวณได้จาก  $C^* = (a^{*2} + b^{*2})^{1/2}$

H°: เป็นตัวเลขระบุองศาของสี มีหน่วยเป็นองศา

สามารถคำนวณได้จาก  $h^\circ = \tan^{-1}[b^*/a^*]$

WI; ค่าดัชนีความขาวที่คล้ายกับสีขาวมาตรฐาน

WI = 100: สีขาวที่คล้ายกับสีขาวมาตรฐาน

สามารถคำนวณได้จาก  $WI = (L^* - 3b^*) + 3a^*$

#### 3.4.10 การทดสอบประสิทธิภาพการต้านทานต่อเชื้อจุลชีพ (Antimicrobial testing)

ทำการทดสอบเชิงปริมาณตามมาตรฐาน ASTM F895 - 11 (Agar diffusion method) โดยทดสอบหาบริเวณยับยั้งเชื้อ (Zone of Inhibition) ของฟิล์มตัวอย่างในอะการ์ที่เตรียมได้ในขนาด 1x1 เซนติเมตร โดยก่อนทำการทดลอง ฟิล์มตัวอย่างจะผ่านการฉายแสงยูวีซีทีที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นใช้ตัวทำละลายไดเมทิลซัลฟอกไซด์ (Dimethyl Sulfoxide, DMSO) ความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เข้มข้น 1% และ เอทานอลความเข้มข้น 95% เป็นสภาวะควบคุม ใส่ชิ้นงานบนกระดาษกรองปราศจากเชื้อแล้วนำไปเพาะเลี้ยงร่วมกับเชื้อในจานเพาะ (Petri dish) โดยเชื้อจุลชีพที่ใช้ คือ ชนิดแกรมบวก *Staphylococcus aureus* (*S.aureus*) ATCC 25923 และแบคทีเรียชนิดแกรมลบ *Escherichia coli* (*E.coli*) ATCC 25922 เพาะเลี้ยงภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจน ที่มีอุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วทำการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของบริเวณที่ยับยั้งที่เกิดขึ้นในหน่วยมิลลิเมตร

#### 3.4.11 การทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดิน (Soil burial test)

ทำการทดสอบโดยการตัดชิ้นงานเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 1.5 x 1.5 นิ้ว ฝังในดินที่มีความลึกประมาณ 5 เซนติเมตร โดยควบคุมความชื้นในดินให้อยู่ในช่วง 5-10 % เป็นระยะเวลา 20 วัน จากนั้นทำการเปรียบเทียบลักษณะชิ้นงานก่อนทำการทดสอบและหลังทำการทดสอบ



## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสมบัติต่างๆของฟิล์มพลาสติกชีวภาพจากแป้งมันสำปะหลังที่ทำปฏิกิริยากับพรอพิลีนออกไซด์ โดยมีกลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์และทำการขึ้นรูปด้วยวิธีการเทหล่อ ในงานวิจัยนี้ได้แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ตอน ได้แก่ ตอนที่ 1 ศึกษาผลของปริมาณพรอพิลีนออกไซด์ที่มีต่อการทำปฏิกิริยาและสมบัติของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังโดยใช้พรอพิลีนออกไซด์ในปริมาณต่างๆ ได้แก่ 0, 5, 10, 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของแป้งมันสำปะหลัง ส่วนตอนที่ 2 เป็นการศึกษาผลของการใส่อนุภาคนาโนโลหะออกไซด์ 2 ชนิด ได้แก่ ซิงค์ออกไซด์และไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ปริมาณ 2 และ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแป้งมันสำปะหลัง โดยทำการเลือกแป้งที่จะนำมาศึกษาผลของอนุภาคนาโนโลหะออกไซด์ จากนั้นนำฟิล์มที่เตรียมได้มาทำการทดสอบสมบัติต่างๆ ดังนี้ การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน การวิเคราะห์ปริมาณและระดับการแทนที่ของหมู่ไฮดรอกซีพรอพิล การวิเคราะห์โครงสร้างผลึก สัณฐานวิทยา การดูดซับความชื้น การซึมผ่านของไอน้ำ สมบัติทางความร้อน สมบัติเชิงกล และประสิทธิภาพในการต้านเชื้อแบคทีเรีย ซึ่งอักษรย่อที่ใช้ในงานวิจัยนี้แสดงดังตารางที่ 4.1

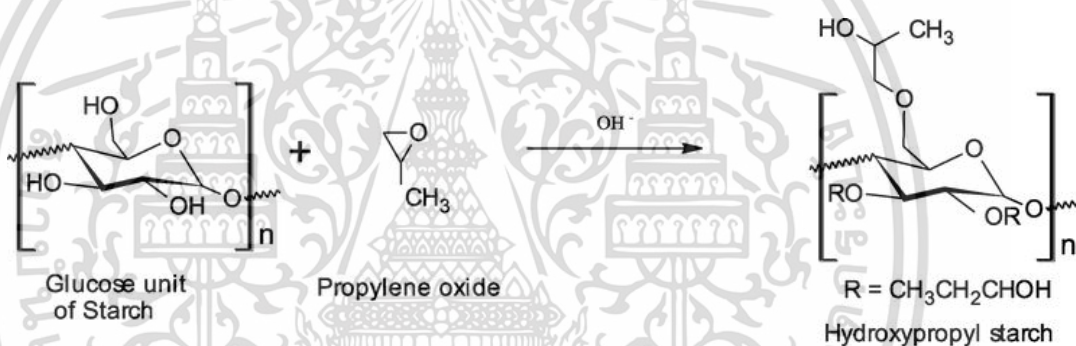
ตารางที่ 4.1 อักษรย่อที่ใช้ในงานวิจัยนี้

ลำดับ	สัญลักษณ์	ความหมาย
1	NS	ฟิล์มแป้งมันสำปะหลัง
2	HPS5	ฟิล์มแป้งไฮดรอกซีพรอพิล 5 wt%
3	HPS10	ฟิล์มแป้งไฮดรอกซีพรอพิล 10 wt%
4	HPS15	ฟิล์มแป้งไฮดรอกซีพรอพิล 15 wt%
5	HPS20	ฟิล์มแป้งไฮดรอกซีพรอพิล 20 wt%
6	NS-ZnO2%	ฟิล์มแป้งมันสำปะหลังและใส่อนุภาคซิงค์ออกไซด์ 2 wt%
7	NS-ZnO5%	ฟิล์มแป้งมันสำปะหลังและใส่อนุภาคซิงค์ออกไซด์ 5 wt%
8	NS-TiO <sub>2</sub> 2%	ฟิล์มแป้งมันสำปะหลังและใส่อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ 2 wt%
9	NS-TiO <sub>2</sub> 5%	ฟิล์มแป้งมันสำปะหลังและใส่อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ 5 wt%
10	HPS10-ZnO2%	ฟิล์มแป้งไฮดรอกซีพรอพิล 10 wt%และใส่อนุภาคซิงค์ออกไซด์ 2 wt%
11	HPS10-ZnO5%	ฟิล์มแป้งไฮดรอกซีพรอพิล10 wt%และใส่อนุภาคซิงค์ออกไซด์ 5 wt%
12	HPS10 TiO <sub>2</sub> 2%	ฟิล์มแป้งไฮดรอกซีพรอพิล 10 wt%และใส่อนุภาคไทเทเนียมออกไซด์ 2wt%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

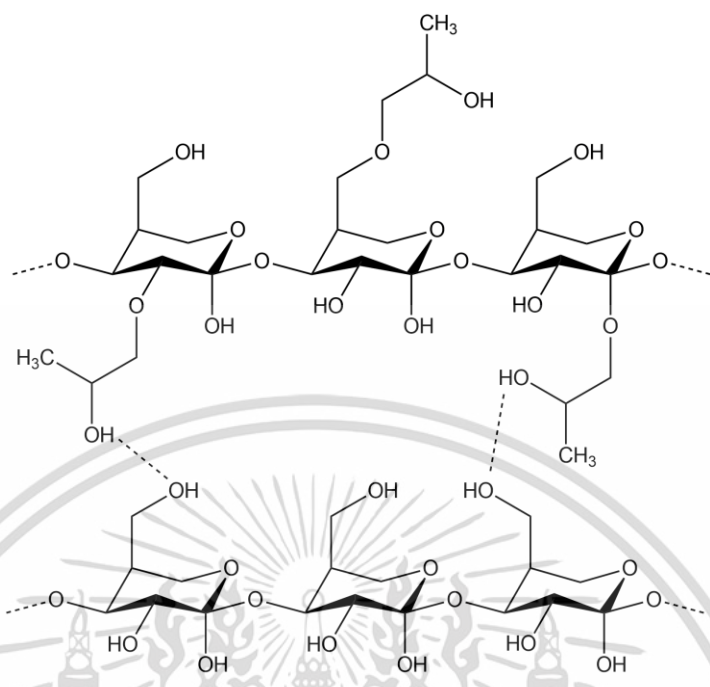
13	HPS10-TiO <sub>2</sub> 5%	ฟิล์มแป้งไฮดรอกซีพรอพิล 10 wt%และใส่อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ 5wt%
14	HPS20-ZnO2%	ฟิล์มแป้งไฮดรอกซีพรอพิล 20 wt%และใส่อนุภาคซิงค์ออกไซด์ 2 wt%
15	HPS20-ZnO5%	ฟิล์มแป้งไฮดรอกซีพรอพิล 20 wt%และใส่อนุภาคซิงค์ออกไซด์ 5 wt%
16	HPS20 TiO <sub>2</sub> 2%	ฟิล์มแป้งไฮดรอกซีพรอพิล 20 wt%และใส่อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ 2wt%
17	HPS20-TiO <sub>2</sub> 5%	ฟิล์มแป้งไฮดรอกซีพรอพิล 20 wt%และใส่อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ 5wt%

แป้งไฮดรอกซีพรอพิลเกิดจาก ปฏิกิริยาระหว่างแป้งกับพรอพิลีนออกไซด์ (Propylene oxide) ซึ่งมีวงแหวนอีพอกไซด์ (Epoxides) ทำให้วงแหวนต่อปฏิกิริยามาก โดยในการดัดแปรแป้งนั้นในขั้นแรกแป้งจะทำปฏิกิริยากับโซเดียมไฮดรอกไซด์ก่อน จากนั้นจึงทำปฏิกิริยากับพรอพิลีนออกไซด์ ดังปฏิกิริยาแสดงในรูปที่ 4.1 นอกจากนี้ยังทำการเติมโซเดียมซัลเฟตเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการพองตัว โดยหมู่ไฮดรอกซิลสามารถถูกแทนที่ได้ 3 ตำแหน่ง ได้แก่ ตำแหน่งคาร์บอนที่ 2 3 และ 6 [3]

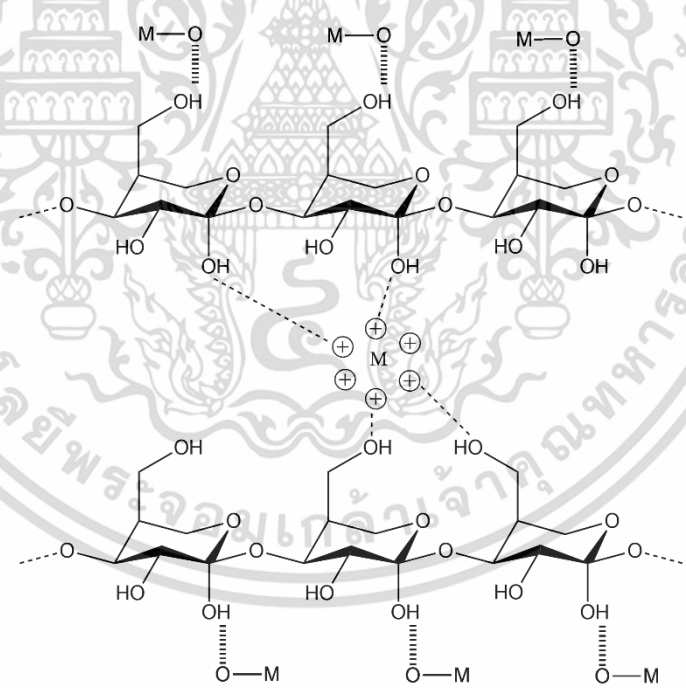


รูปที่ 4.1 การเกิดปฏิกิริยาอีเทอร์ฟิเคชันระหว่างแป้งกับพรอพิลีนออกไซด์ [3]

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการบอกระดับการแทนที่ด้วยค่า Molar substitution (MS) ซึ่งหมายถึงจำนวนโมลของสารเคมีที่เข้าแทนที่ตรงหมู่ไฮดรอกซิลต่อกลูโคสหนึ่งหน่วย[3] นอกจากนี้อันตรกิริยาที่คาดว่าจะเกิดระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของแป้งกับหมู่ไฮดรอกซีพรอพิลของแป้งดัดแปรแสดงดังรูปที่ 4.2 และผลจากการเติมอนุภาคนาโนโลหะออกไซด์ ได้แก่ นาโนซิงค์ออกไซด์และนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ อาจส่งผลให้เกิดอันตรกิริยาระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของแป้งกับอนุภาคนาโน-โลหะออกไซด์ผ่านพันธะไฮโดรเจนและ/หรืออาจเกิดแรงดึงดูดระหว่างประจุด้วย (Electrostatic interaction) [32] ดังแสดงในรูปที่ 4.3-4.4

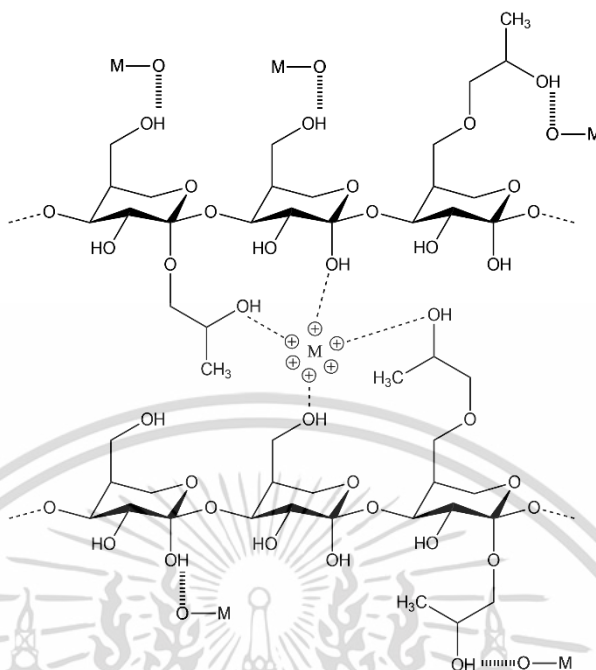


รูปที่ 4.2 อันตรกิริยาระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลกับหมู่ไฮดรอกซีพอลิเมอร์ของแป้งตัดแปรรูป



รูปที่ 4.3 อันตรกิริยาที่คาดว่าจะเกิดขึ้นระหว่างฟิล์มแป้งและอนุภาคนาโนโลหะออกไซด์

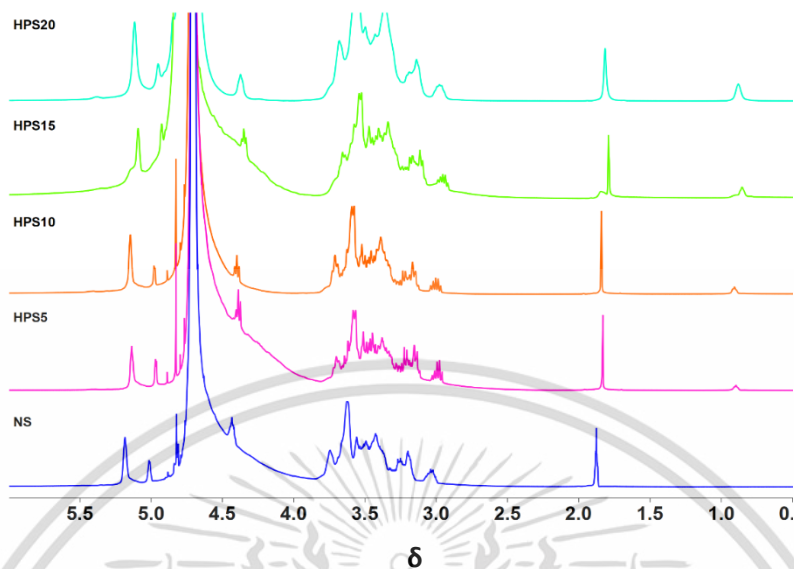
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 อันตรกิริยาที่คาดว่าจะเกิดขึ้นระหว่างฟิล์มแบ่งไฮดรอกซีพรอพิลและอนุภาคนาโนโลหะออกไซด์

#### 4.1 การทดสอบหาปริมาณหมู่ไฮดรอกซีพรอพิลและระดับการแทนที่ของแบ่งไฮดรอกซีพรอพิล

ทำการทดสอบหาปริมาณหมู่ไฮดรอกซีพรอพิลและระดับการแทนที่ของแบ่งไฮดรอกซีพรอพิลด้วยเทคนิค โปรตอน-นิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์ สเปกโตรสโคปี ( $^1\text{H}$  NMR spectroscopy) เพื่อยืนยันการเกิดปฏิกิริยาระหว่างแบ่งและพรอพิลีนออกไซด์ ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.5 และตารางที่ 4.2



รูปที่ 4.5  $^1\text{H}$  NMR spectra ของแป้งไฮดรอกซีพรอพิลที่ใช้ปริมาณต่างๆ

ร้อยละของหมู่ไฮดรอกซีพรอพิล (% Hydroxypropyl groups: %HP) ระดับการแทนที่ (MS) และประสิทธิภาพของการเกิดปฏิกิริยา คำนวณได้จากสมการต่อไปนี้ [33]

$$\begin{aligned} \% \text{ Hydroxypropyl groups; \%HP} &= \frac{0.2623 \times \frac{59.08 \times \text{Intensity at } 1.13 \text{ ppm}}{60.05 \times \text{Intensity at } 2.08 \text{ ppm}}}{12.00 \text{ g starch}} \times 100 \\ &= 2.15 \times \frac{\text{Intensity at } 1.13 \text{ ppm}}{\text{Intensity at } 2.08 \text{ ppm}} \end{aligned}$$

เมื่อ 0.2623 คือ น้ำหนักของกรดอะซิติกในตัวอย่าง

59.08 คือ น้ำหนักโมเลกุลของหมู่ไฮดรอกซีพรอพิล

60.05 คือ น้ำหนักโมเลกุลของกรดอะซิติก

$$MS = \frac{\%HP \times 162.14}{59.08 \times (100 - \%HP)}$$

เมื่อ 162.14 คือ น้ำหนักโมเลกุลของ Anhydroglucose unit [33]

ตารางที่ 4.2 ค่าร้อยละของหมู่ไฮดรอกซีพรอพิลและระดับการแทนที่ของแป้งไฮดรอกซีพรอพิลที่ใช้ปริมาณต่างๆ

ตัวอย่าง	%HP	MS
NS	0	0
HPS5	0.13	0.004
HPS10	0.47	0.013
HPS15	0.65	0.018
HPS20	1.03	0.029

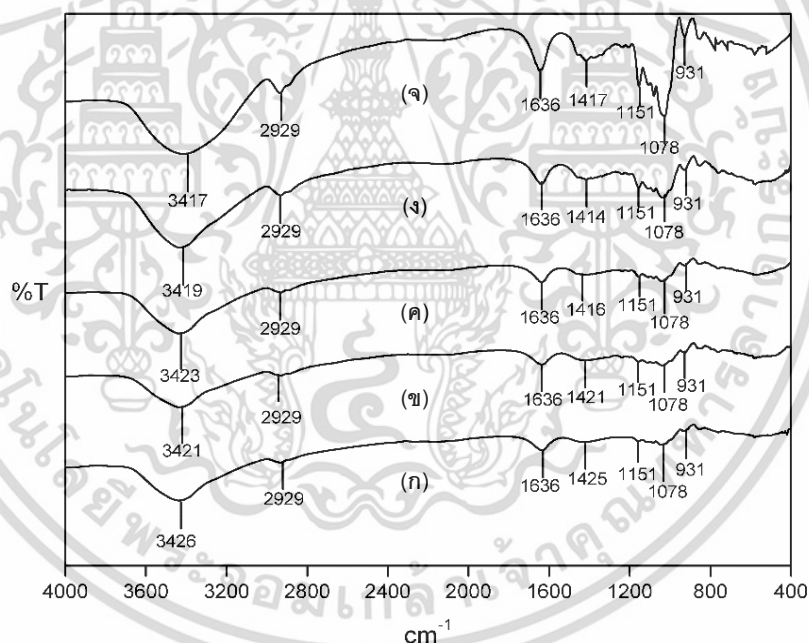
จากผลการศึกษาพบว่าปริมาณหมู่ไฮดรอกซีพรอพิลและระดับการแทนที่ของแป้งไฮดรอกซีพรอพิลมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณพรอพิลีนออกไซด์ที่ใช้ทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ J.A. Gray และคณะที่พบว่าเมื่อความเข้มข้นของพรอพิลีนออกไซด์เพิ่มขึ้น ทำให้การเกิดปฏิกิริยาระหว่างแป้งและพรอพิลีนออกไซด์เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากทำให้เกิดสภาวะความเป็นด่างสูงขึ้น การบวมตัวของแป้งลดลง [34]

#### 4.2 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน (FT-IR)

ทำการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่อง FT-IR (Fourier Transform Infrared Spectrophotometer) โดยทำการศึกษามูฟง์ชันของฟิล์มแป้งมันสำปะหลัง ฟิล์มแป้งไฮดรอกซีพรอพิลและฟิล์มแป้งจากการเติมอนุภาคนาโนโลหะออกไซด์ โดยเลขคลื่นและลักษณะการสั่นต่างๆ แสดงดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ลักษณะการสั่นในแต่ละช่วงเลขคลื่นต่างๆ

เลขคลื่น ( $\text{cm}^{-1}$ )	ลักษณะการสั่น
3200-3600	O-H stretching
2800-3000	Alkane C-H stretching
1730-1750	C=O stretching
1640-1645	Hydrogen bonding
1600-1630	Bounded water
1420-1485	O-H bending
1100-1300	C-O-C stretching
1100-1200	C-O-H bending
900-940	C-H out-of-plane bending



รูปที่ 4.6 อินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิเมอร์บางชนิดและพอลิเมอร์ไฮดรอกซีพอลิเมอร์ที่ปริมาณต่างๆ กัน (ก) NS (ข) HPS5 (ค) HPS10 (ง) HPS15 และ (จ) HPS20

อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มแข็งมันสำปะหลังและฟิล์มแข็งไฮดรอกซีพอลิเมอร์ที่ปริมาณต่างๆ กัน แสดงดังรูปที่ 4.6 พบว่าสเปกตรัมของฟิล์มแข็งทุกๆ ตัวอย่างมีลักษณะคล้ายคลึงกัน ดังนี้ ช่วงความยาวคลื่น  $3200-3600 \text{ cm}^{-1}$  เป็นลักษณะการสั่นของ O-H stretching จากแป้งและกลีเซอรอล ช่วงความยาวคลื่น  $2800-3000 \text{ cm}^{-1}$  เป็นลักษณะการสั่นของ C-H stretching ของ  $\text{CH}_2$  จากแป้ง ส่วน

ลักษณะการสั่นของ O-H bending จากโมเลกุลน้ำในแข็ง พบที่พิคช่วง  $1600-1630\text{ cm}^{-1}$  ลักษณะการสั่นของ O-H bending ของแข็ง พบพิคที่ความยาวคลื่น  $1453-1458\text{ cm}^{-1}$  พิคที่  $800-940\text{ cm}^{-1}$  และพิค  $763\text{ cm}^{-1}$  เป็นลักษณะการสั่นของ C-H bending และ C-H rocking ตามลำดับ [35]

ตารางที่ 4.4 พื้นที่ใต้กราฟของพิคและสัดส่วนของพื้นที่ใต้กราฟของพิคในฟิล์มแข็งสูตรต่างๆ

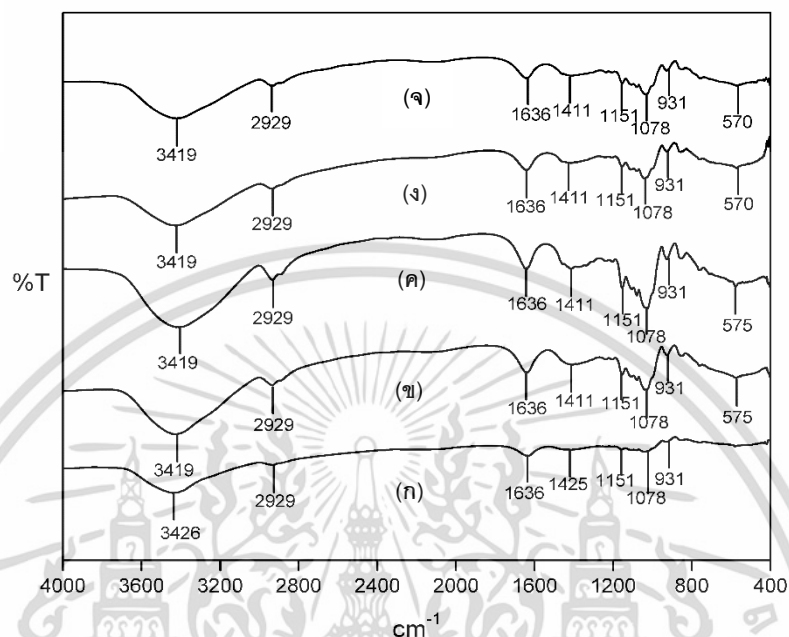
สูตร	พื้นที่ใต้กราฟของพิค ( $\text{A cm}^{-1}$ )		สัดส่วนของพื้นที่ใต้กราฟของพิค*
	$1151\text{cm}^{-1}$	$931\text{cm}^{-1}$	
NS	12.60	24.41	0.33
HPS5	11.02	37.86	0.45
HPS10	19.44	30.64	0.63
HPS15	44.25	68.72	0.64
HPS20	149.95	145.43	0.97

\*หมายเหตุ: สัดส่วนของพื้นที่ใต้กราฟของพิค = พื้นที่ใต้กราฟของพิคที่สนใจ/พื้นที่ใต้กราฟของพิค  $931\text{ cm}^{-1}$  [36]

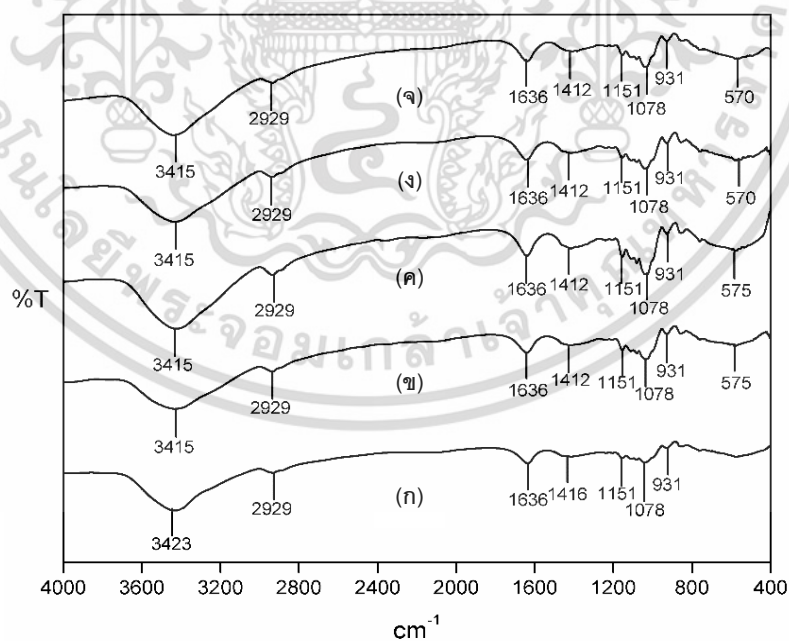
นอกจากนี้ผลจากปริมาณของพรอพิลีนออกไซด์ในการดัดแปรฟิล์มแข็งที่ปริมาณต่างๆ พบว่า พิค  $1151\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นลักษณะการสั่นของ C-O stretching มีแนวโน้มสัดส่วนของพื้นที่ใต้กราฟสูงขึ้นดังตารางที่ 4.4 ตามปริมาณพรอพิลีนออกไซด์ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากปฏิกิริยาอีเทอร์ริฟิเคชันดังแสดงในรูปที่ 4.1 ทำให้เกิดพันธะอีเทอร์ระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของแข็งและหมู่ไฮดรอกซีพรอพิลจากพรอพิลีนออกไซด์เพิ่มขึ้น ในส่วนของพิคที่ช่วง  $3200-3600\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นลักษณะการสั่นของ O-H stretching นั้นมีการเคลื่อนไปยังเลขคลื่นที่ลดลง [36] เป็นผลมาจากการเกิดอันตรกิริยาระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลกับหมู่ไฮดรอกซีพรอพิลของแข็งดัดแปรเกิดเป็นพันธะไฮโดรเจนขึ้นใหม่ ดังแสดงในรูปที่ 4.2

สำหรับฟิล์มแข็งไฮดรอกซีพรอพิลที่เติมโลหะออกไซด์ พบว่า สเปกตรัมของฟิล์มแข็งที่เติมนาโนซิงค์ออกไซด์พบพิคที่  $575\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นลักษณะการสั่นของ Zn-O stretching [37] และฟิล์มแข็งที่เติมนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์พบพิคที่  $570\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นลักษณะการสั่นของ Ti-O stretching [38] นอกจากนี้ที่พิคช่วง  $3200-3600\text{ cm}^{-1}$  เกิดการเคลื่อนไปยังเลขคลื่นที่ลดลง ซึ่งเป็นลักษณะการสั่นของ O-H stretching สอดคล้องกับงานวิจัยของ J.Zhu และคณะที่ทำการศึกษาสมบัติของฟิล์มแข็งไฮดรอกซีพรอพิลคอมพอสิตเสริมอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์และนาโนซิลิกาออกไซด์ด้วยกระบวนการเป่าขึ้นรูป พบว่า พิคช่วง  $3200-3600\text{ cm}^{-1}$  เกิดการเคลื่อนไปยังเลขคลื่นที่ลดลง ซึ่งการเปลี่ยนแปลงนี้บ่งชี้ว่าอนุภาคนาโนโลหะออกไซด์ขัดขวางพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลแข็ง ทำให้สายโซ่ของพอลิเมอร์แข็ง

เคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้น และมีความเป็นไปได้ที่กระตุ้นระไฮโดรเจนระหว่างแป้งและอนุภาคนาโนโลหะออกไซด์ [31]

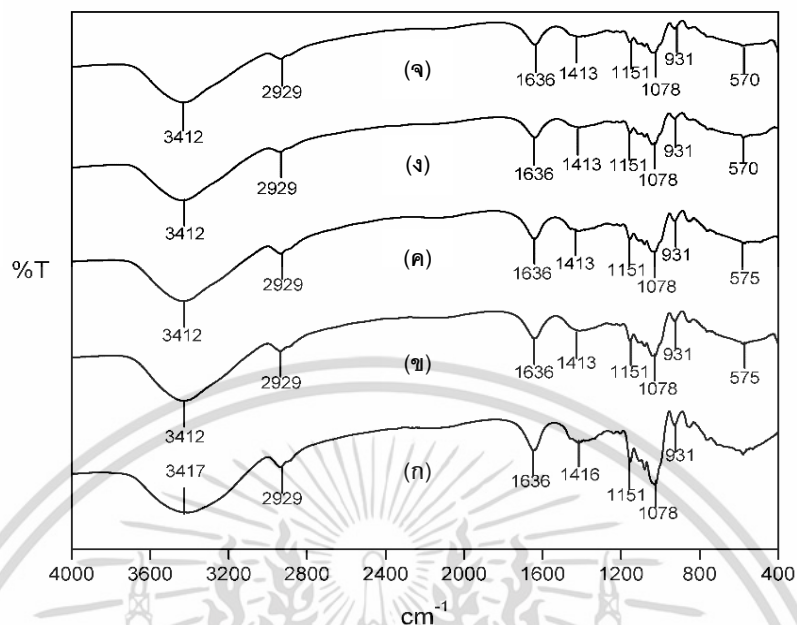


รูปที่ 4.7 อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มแป้งที่เติมนาโนโลหะออกไซด์ (ก) NS (ข) NS-ZnO 2% (ค) NS-ZnO 5% (ง) NS-TiO<sub>2</sub> 2% และ (จ) NS-TiO<sub>2</sub> 5%



รูปที่ 4.8 อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มแป้งไฮดรอกซีพอร์ฟิลที่เติมนาโนโลหะออกไซด์ (ก) HPS10 (ข) HPS10-ZnO 2% (ค) HPS10-ZnO 5% (ง) HPS10-TiO<sub>2</sub> 2% และ (จ) HPS10-TiO<sub>2</sub> 5%

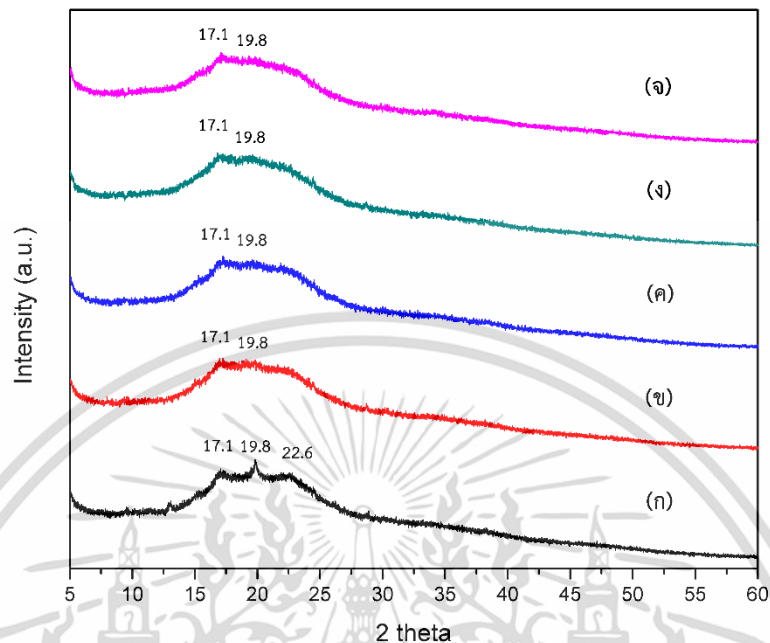
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มแบง์ไฮดรอกซีพวอฟิลที่เติมนาโนโลหะออกไซด์ (ก) HPS20 (ข) HPS20-ZnO2% (ค) HPS20-ZnO5% (ง) HPS20-TiO<sub>2</sub>2% และ (จ) HPS20-TiO<sub>2</sub>5%

#### 4.3 การวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffraction, XRD)

ทำการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกและปริมาณผลึกด้วยเครื่อง X-ray diffractometer โดยดิฟแฟรกโทแกรมของฟิล์มต่างๆ แสดงดังรูปที่ 4.10-4.13 และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกที่คำนวณในช่วง  $2\theta = 10^\circ - 25^\circ$  แสดงในตารางที่ 4.4



รูปที่ 4.10 ดิฟแฟร็กโทแกรมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังและฟิล์มแป้งไฮดรอกซีพวอฟิลที่ปริมาณต่างๆ กัน (ก) NS (ข) HPS5 (ค) HPS10 (ง) HPS15 และ (จ) HPS20

ตารางที่ 4.5 ปริมาณผลึกของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังและฟิล์มแป้งไฮดรอกซีพวอฟิล

ตัวอย่าง	ปริมาณผลึก (%)
NS	16.1
HPS5	15.0
HPS10	14.9
HPS15	14.4
HPS20	13.1

จากรูปที่ 4.10 แสดงดิฟแฟร็กโทแกรมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังและฟิล์มแป้งไฮดรอกซีพวอฟิลที่ปริมาณต่างๆ กัน โดยตำแหน่งที่  $2\theta$  เท่ากับ  $17.1^\circ$  แสดงลักษณะการตกผลึกใหม่ของอะไมโลเพกติน (ผลึกแบบ B type) และที่ตำแหน่งที่  $2\theta$  เท่ากับ  $19.8^\circ$  แสดงลักษณะของผลึกแบบ  $V_H$  type ซึ่งเกิดจากการเกิดผลึกใหม่ของอะไมโลสกับกลีเซอรอล [36] โดยฟิล์มแป้งมันสำปะหลังพบดิฟแฟร็กโทแกรมที่ตำแหน่ง  $2\theta$  เท่ากับ  $17.1^\circ$   $19.8^\circ$  และ  $22.6^\circ$  เป็นการผสมกันระหว่างผลึกแบบ B type และ  $V_H$  type

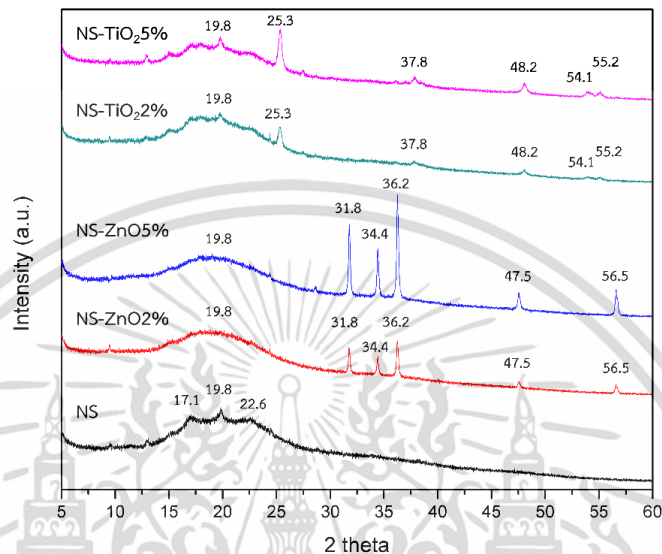
จะเห็นได้ว่าที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 17.1° พิกัดมีความชัดเจน ซึ่งเกิดจากการหลอมของเม็ดแป้งไม่สมบูรณ์ ขณะทำการขึ้นรูป [36]

นอกจากนี้ในรูปที่ 4.10 (ข)-(จ) และตารางที่ 4.4 แสดงดิฟแฟร็กโทแกรมของฟิล์มแป้งไฮดรอกซี-พรอพิลและปริมาณความเป็นผลึกของฟิล์มแต่ละตัวอย่าง โดยฟิล์มแป้งไฮดรอกซีพรอพิลแสดงความเข้มของพีคที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 17.1° และ 19.8° และความเป็นผลึกมีแนวโน้มลดลงเมื่อค่า MS เพิ่มขึ้น เนื่องจากเกิดการแทนที่ของหมู่ไฮดรอกซีพรอพิลขึ้นในโมเลกุลแป้ง ซึ่งเป็นหมู่แทนที่ขนาดใหญ่ ส่งผลให้ไปขัดขวางการเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลแป้ง การจัดเรียงเป็นผลึกยากขึ้น ทำให้ปริมาณของผลึกลดลง [39] พีคที่มุม 2θ เท่ากับ 19.8° มีความเข้มลดลง ซึ่งคาดว่าเกิดจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของฟิล์มแป้งเมื่อเกิดการแทนที่ของหมู่ไฮดรอกซีพรอพิล

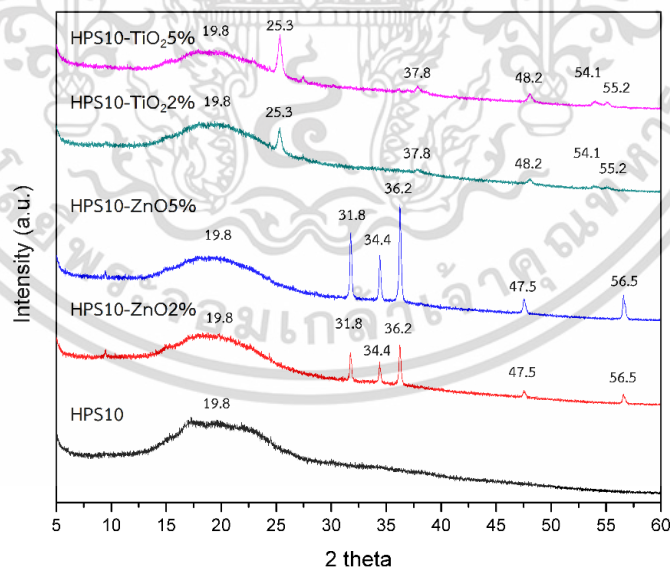
ส่วนฟิล์มแป้งที่เติมโลหะออกไซด์นั้นพบดิฟแฟร็กโทแกรมที่มุม 2θ เท่ากับ 19.8° เช่นเดียวกับฟิล์มแป้งมันสำปะหลังและฟิล์มแป้งดัดแปร นอกจากนี้ดิฟแฟร็กโทแกรมที่บอกเอกลักษณ์ของอนุภาคนาโนโลหะออกไซด์ทั้ง 2 ชนิดดังนี้ ที่มุม 2θ เท่ากับ 31.8°, 34.4°, 36.2°, 47.5° และ 56.5° แสดงความเป็นระนาบความเป็นผลึกของซิงค์ออกไซด์ [40] นอกจากนี้ระนาบความเป็นผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์นั้นพบพีคที่มุม 2θ เท่ากับ 25.3°, 37.8°, 48.2°, 54.1° และ 55.2° [41] นอกจากนี้ความเข้มของพีคเอกลักษณ์ความเป็นผลึกของโลหะออกไซด์มีแนวโน้มสูงขึ้นตามปริมาณของอนุภาคนาโนโลหะออกไซด์ดังแสดงในรูปที่ 4.11-4.13 อย่างไรก็ตามจากตารางที่ 4.5 แสดงปริมาณผลึกของฟิล์มแป้งที่เติมนาโนโลหะออกไซด์ที่ปริมาณต่างๆ กันพบว่า ที่ 2θ เท่ากับ 19.8 ซึ่งเป็นพีคเอกลักษณ์ของแป้ง พบว่ามีความเข้มของพีคลดลงเมื่อปริมาณนาโนออกไซด์ของทั้ง 2 ชนิดเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ I.S. Ghahfarrokhi และคณะได้ทำการศึกษาสมบัติของคีเฟอร์ริน (Kefiran) เสริมนาโนซิงค์ออกไซด์พบว่า เมื่อเติมนาโนซิงค์ออกไซด์ในปริมาณที่มากขึ้นทำให้ปริมาณผลึกลดลง อันเนื่องมาจากเมื่อเติมนาโนโลหะออกไซด์ในปริมาณสูงขึ้นไปอนุภาคนาโนโลหะออกไซด์เกิดการเกาะกลุ่มกัน ส่งผลให้อนุภาคโลหะออกไซด์มีขนาดใหญ่ขึ้นและไปขัดขวางการจัดเรียงตัวของสายโซ่ของแป้ง ทำให้การเกิดผลึกลดลง [42]

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างชนิดของอนุภาคนาโนโลหะออกไซด์พบว่า การเติมอนุภาคนาโนโลหะออกไซด์แต่ละชนิดในปริมาณที่เท่ากันให้ค่าความเป็นผลึกไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญดังแสดงในตารางที่ 4.5 อย่างไรก็ตาม จากรูปที่ 4.11 พบว่าฟิล์มแป้งที่เติมอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ยังคงแสดงพีคที่เป็นเอกลักษณ์ของ ฟิล์มแป้งค่อนข้างชัดเจน คาดว่าขนาดอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์มีขนาดเล็กกว่า (21 nm) และมีการกระจายตัวที่ดีกว่าอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (30-40 nm) ดังนั้นอนุภาคนา-

โนไทเทเนียมไดออกไซด์จึงไม่สามารถจัดเรียงตัวของโมเลกุลแป้งได้มากพอ ส่งผลให้ฟิสิกที่เป็นเอกลักษณ์ของฟิล์มแป้งยังคงปรากฏค่อนข้างชัดเจน

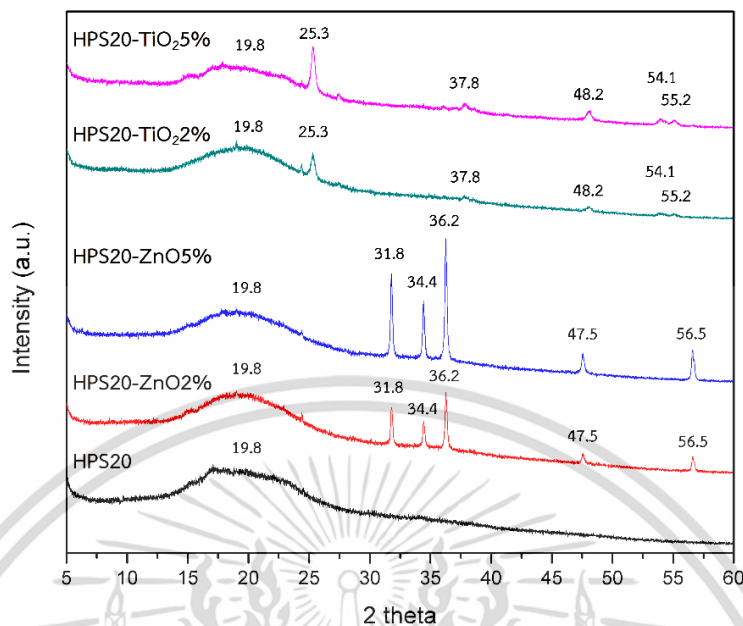


รูปที่ 4.11 ดิฟแฟร็กโตแกรมของฟิล์มแป้ง NS ที่เติมนาโนโลหะออกไซด์ที่ปริมาณต่างๆ กัน



รูปที่ 4.12 ดิฟแฟร็กโตแกรมของฟิล์มแป้ง HPS10 ที่เติมนาโนโลหะออกไซด์ที่ปริมาณต่างๆ กัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



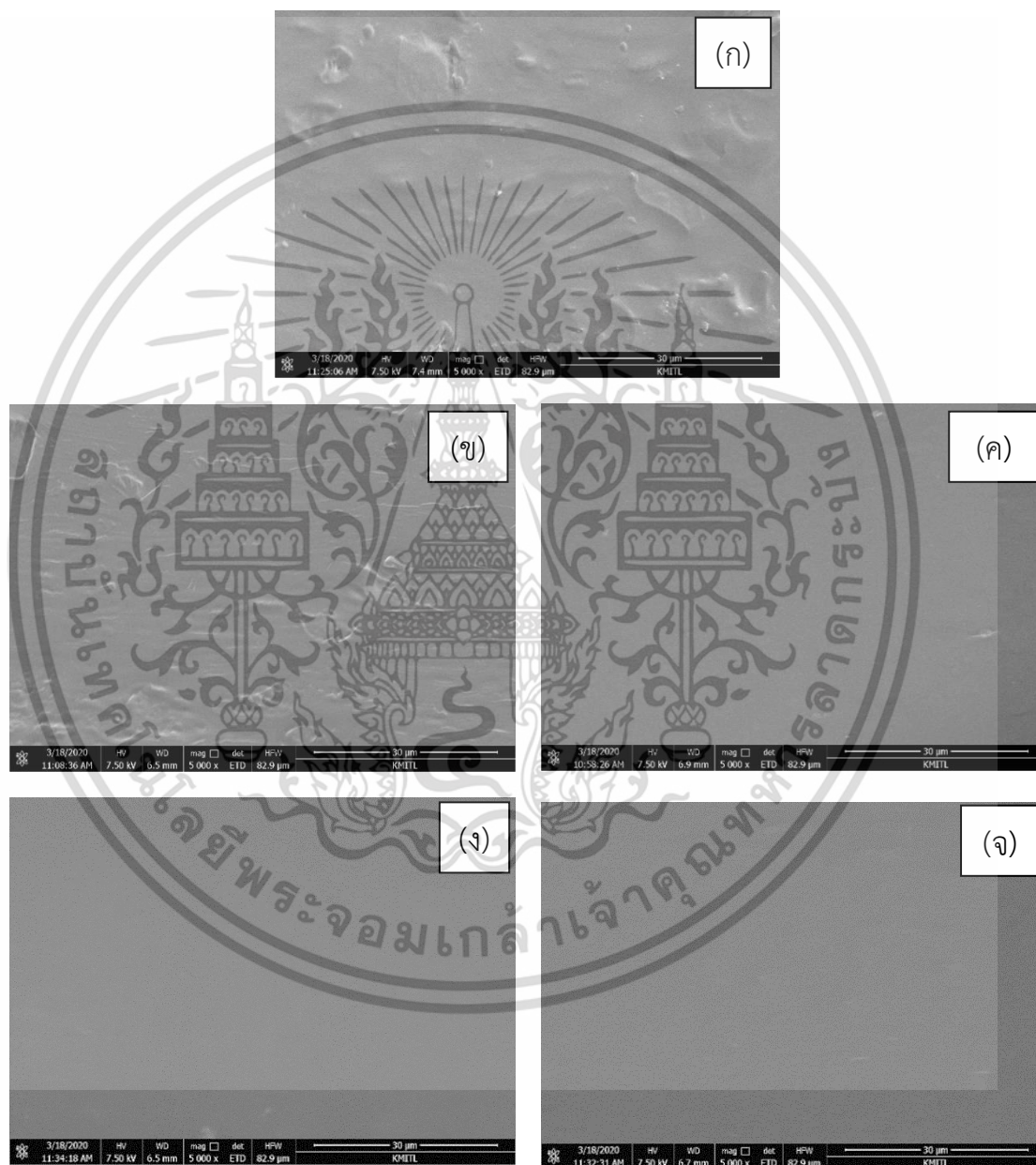
รูปที่ 4.13 ดิฟแฟรกโตแกรมของฟิล์ม HPS20 ที่เติมนาโนโลหะออกไซด์ที่ปริมาณต่างๆ กัน  
ตารางที่ 4.6 ปริมาณผลึกของฟิล์มแบ่งที่เติมนาโนโลหะออกไซด์ที่ปริมาณต่างๆ กัน

ตัวอย่าง	ปริมาณผลึก (%)
NS	16.1
NS-ZnO2%	11.4
NS-ZnO5%	8.5
NS-TiO <sub>2</sub> 2%	10.6
NS-TiO <sub>2</sub> 5%	8.7
HPS10	14.9
HPS10-ZnO2%	9.7
HPS10-ZnO5%	9.6
HPS10 TiO <sub>2</sub> 2%	8.6
HPS10-TiO <sub>2</sub> 5%	7.8
HPS20	13.1
HPS20-ZnO2%	8.8
HPS20-ZnO5%	8.4
HPS20 TiO <sub>2</sub> 2%	8.2
HPS20-TiO <sub>2</sub> 5%	7.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4 สัณฐานวิทยา (Morphology)

ลักษณะสัณฐานวิทยาของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังและฟิล์มแป้งไฮดรอกซีพวอพิลที่ความเข้มข้น 5, 10, 15 และ 20% โดยน้ำหนักแป้ง ได้ทำการศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope) ด้วยกำลังขยาย 5000 เท่า โดยแสดงผลดังนี้



รูปที่ 4.14 ลักษณะสัณฐานวิทยาภาพตัดขวางของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังและฟิล์มแป้งไฮดรอกซีพวอพิลที่ปริมาณต่างๆ กัน (ก) NS (ข) HPS5 (ค) HPS10 (ง) HPS15 และ (จ) HPS20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.14 แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาของภาพตัดขวางฟิล์มแบ่งต่างๆ พบว่า รูปที่ 4.14 (ก) มีพื้นผิวของภาพที่ขรุขระที่สุด เนื่องมาจากเกิดการหลอมไม่สมบูรณ์ของเม็ดแบ่งในขั้นตอนการเตรียมขึ้นรูปฟิล์ม แต่ในรูปที่ 4.14 (ข)-(ง) ซึ่งเป็นตัวอย่างของฟิล์มแบ่งไฮดรอกซีพรีพอล พบว่ามีพื้นผิวที่เรียบขึ้น เนื่องจากโครงสร้างแบ่งตัดแปรไฮดรอกซีพรีพอลมีปริมาณความเป็นผลึกลดลง ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) ที่โครงสร้างของแบ่งมีความเป็นผลึกลดลง เมื่อทำการขึ้นรูปด้วยอุณหภูมิที่เท่ากันจึงทำให้เกิดการเจลาติไนซ์ของแบ่งได้เร็วกว่า นอกจากนี้เมื่อพิจารณาปริมาณพรีพอลิโนออกไซด์ที่มากกว่า 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักพบว่า พื้นผิวทางสัณฐานวิทยามีความเรียบสม่ำเสมอไม่แตกต่างกัน

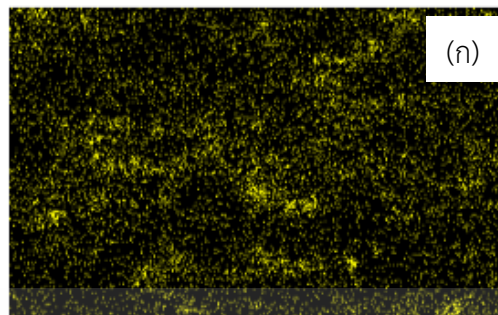
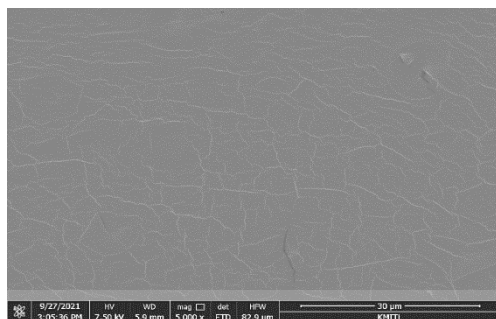
สำหรับฟิล์มแบ่งที่เติมอนุภาคนาโนโลหะออกไซด์พบว่า พื้นผิวทางสัณฐานวิทยามีความเรียบไม่แตกต่างจากฟิล์มแบ่งที่ไม่มีการเติมอนุภาคนาโนโลหะออกไซด์ อันเป็นผลมาจากการเติมอนุภาคนาโนโลหะออกไซด์นั้นทำให้ความเป็นผลึกของตัวแบ่งลดลง ดังแสดงในผลการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่หัวข้อ 4.3 นอกจากนี้ภาพพื้นผิวยังปรากฏเส้นสีขาวที่เชื่อมเป็นตาข่ายเนื่องจากชั้นงานมีความสามารถในการดึงยึดสูง แม้ว่าจะเตรียมชั้นงานที่อุณหภูมิต่ำ ดังรูปที่ 4.13-4.15

สำหรับการกระจายตัวของอนุภาคนาโนโลหะออกไซด์ซึ่งวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS) ดังรูปที่ 4.15 – 4.17 โดยจุดสีเหลืองแทนธาตุสังกะสี (Zn) และจุดสีส้มแทนธาตุไทเทเนียม (Ti) พบว่ามีการกระจายตัวของอนุภาคนาโนโลหะออกไซด์ทั่วพื้นผิวชั้นงาน และเมื่อพิจารณาจากตารางที่ 4.6 ที่ปริมาณอนุภาคนาโนโลหะออกไซด์ 2% โดยน้ำหนักพบว่า wt% ที่ได้จากการวิเคราะห์มีค่าใกล้เคียงกันทั้ง 2 ธาตุ แสดงว่าเกิดการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ อย่างไรก็ตามที่ปริมาณอนุภาคนาโนโลหะออกไซด์ 5% โดยน้ำหนักพบว่า wt% ของสังกะสีที่วิเคราะห์ได้มากกว่า 5% อย่างมีนัยสำคัญโดยที่ค่า wt% ของไทเทเนียมยังคงมีค่าที่ใกล้เคียง 5% โดยน้ำหนัก เนื่องจากอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (30-40 nm) มีขนาดใหญ่กว่าอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ (21 nm) เมื่อปริมาณนาโนซิงค์ออกไซด์เพิ่มขึ้นทำให้การกระจายตัวลดลงและเกิดการเกาะเป็นกลุ่มก้อนได้มากขึ้น ส่วนของการกระจายตัวของอนุภาคนาโนโลหะออกไซด์ในฟิล์มแบ่งชนิดต่างๆ พบว่าค่าร้อยละโดยน้ำหนัก ของธาตุทั้ง 2 ในฟิล์มแบ่ง HPS10 และ HPS20 มีค่าใกล้เคียง wt% ที่ 2% และ 5% มากกว่าฟิล์มแบ่ง NS เนื่องจากฟิล์มแบ่งไฮดรอกซีพรีพอลมีความเป็นผลึกลดลงทำให้เกิดปริมาตรอิสระ (Free volume) เพิ่มขึ้นส่งผลให้อนุภาคนาโนโลหะออกไซด์เกิดการกระจายตัวในโครงสร้างได้ดีกว่าฟิล์มแบ่ง NS ที่มีความเป็นผลึกสูงกว่า

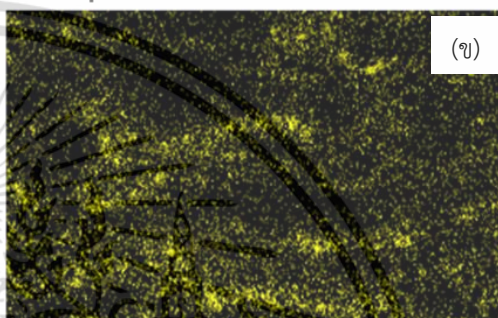
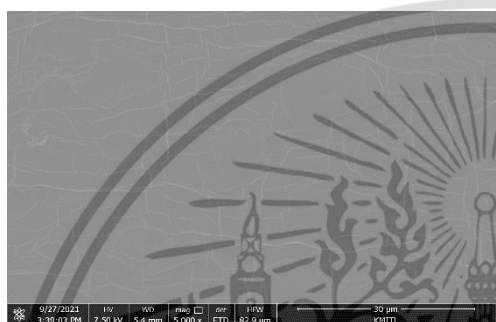
ตารางที่ 4.7 ปริมาณโลหะที่ได้จากผลการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS)

ตัวอย่าง	Zn (wt%)	Ti (wt%)
NS-ZnO2%	3.12	-
NS-ZnO5%	8.08	-
NS-TiO <sub>2</sub> 2%	-	3.65
NS-TiO <sub>2</sub> 5%	-	5.8
HPS10-ZnO2%	2.63	-
HPS10-ZnO5%	7.48	-
HPS10 TiO <sub>2</sub> 2%	-	2.12
HPS10-TiO <sub>2</sub> 5%	-	5.18
HPS20-ZnO2%	2.49	-
HPS20-ZnO5%	7.22	-
HPS20 TiO <sub>2</sub> 2%	-	1.57
HPS20-TiO <sub>2</sub> 5%	-	4.56

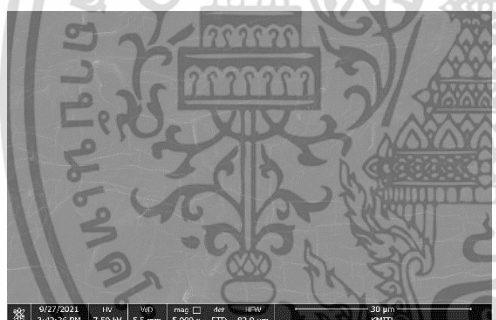
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Zn K $\alpha$ 1Zn K $\alpha$ 1

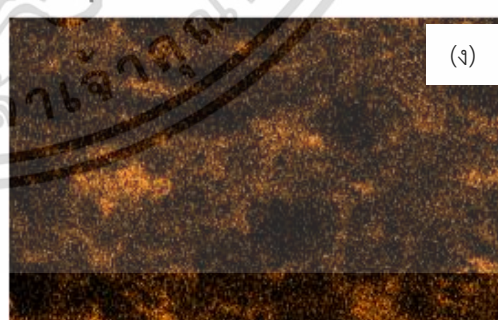
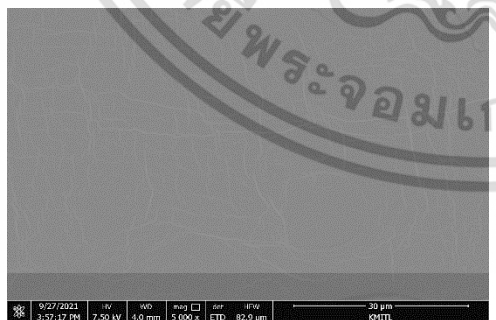
25μm

Ti K $\alpha$ 1

25μm

Ti K $\alpha$ 1

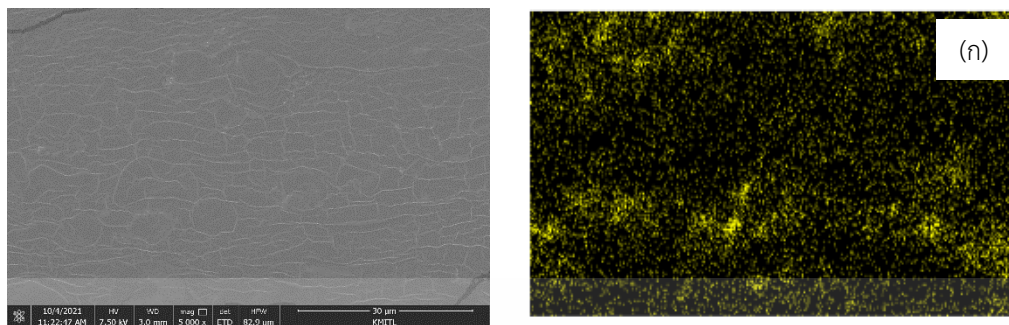
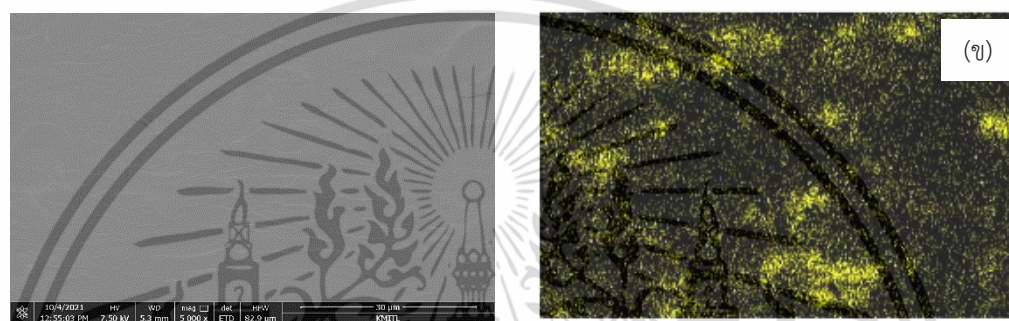
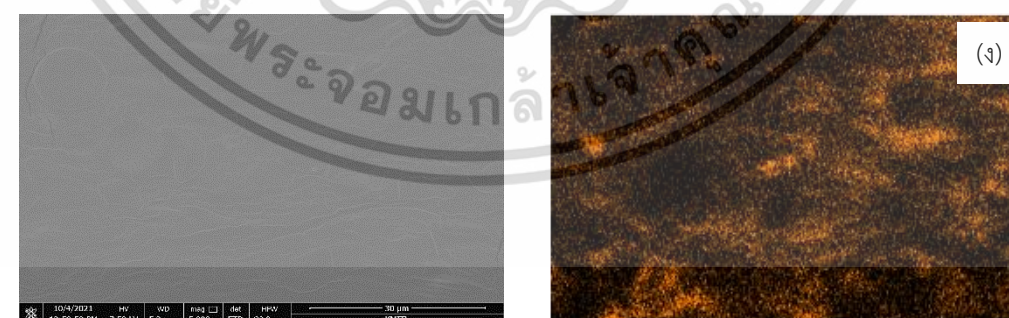
25μm



25μm

รูปที่ 4.15 ลักษณะสัณฐานวิทยาและผลการวิเคราะห์ธาตุของภาพตัดขวางฟิล์มแบง์ที่เติมอนุภาคนาโน-โลหะออกไซด์ (ก) NS-ZnO2% (ข) NS-ZnO5% (ค) NS-TiO<sub>2</sub>2% และ (ง) NS-TiO<sub>2</sub>5%

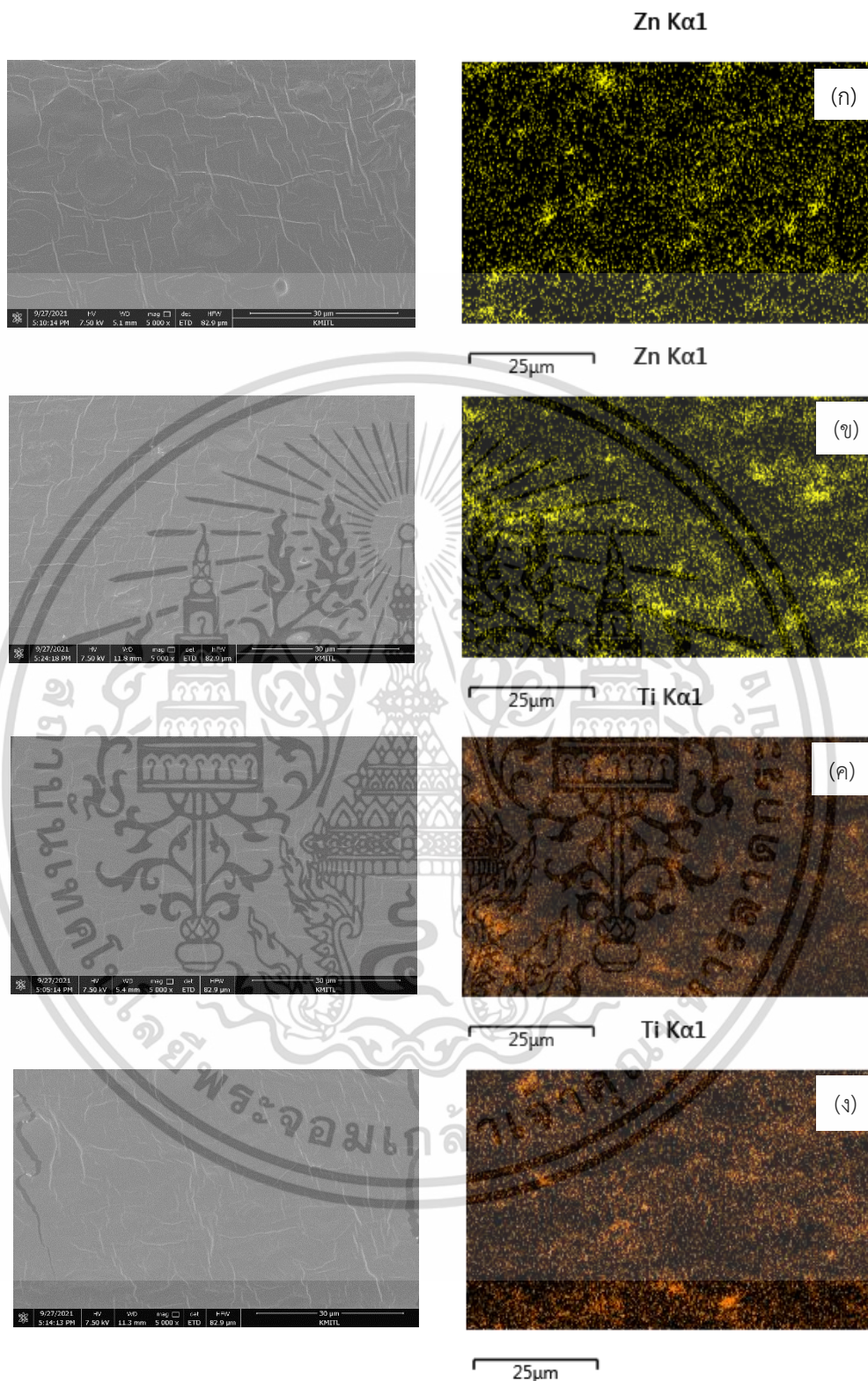
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Zn K $\alpha$ 125μm Zn K $\alpha$ 125μm Ti K $\alpha$ 125μm Ti K $\alpha$ 1

25μm

รูปที่ 4.16 ลักษณะสัณฐานวิทยาและผลการวิเคราะห์ธาตุของภาพตัดขวางฟิล์มแบ่งไฮดรอกซีฟรอฟิลที่เติมอนุภาคนาโนโลหะออกไซด์ (ก) HPS10-ZnO<sub>2</sub>% (ข) HPS10-ZnO<sub>5</sub>% (ค) HPS10 TiO<sub>2</sub>2% และ (ง) HPS10-TiO<sub>2</sub>5%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

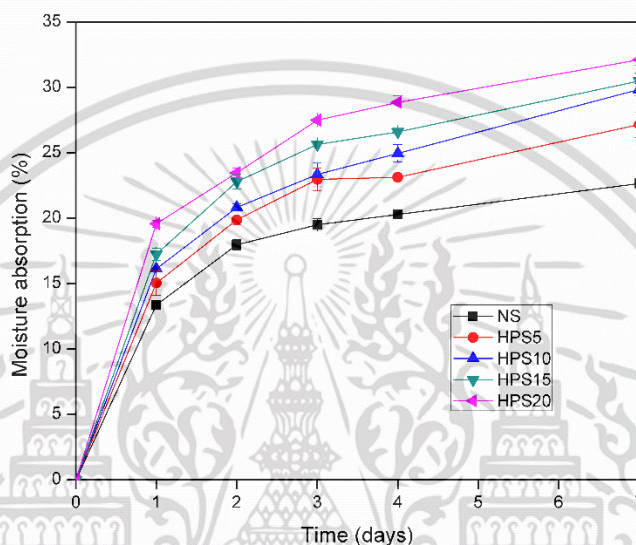


รูปที่ 4.17 ลักษณะสัณฐานวิทยาและผลการวิเคราะห์ธาตุของภาพตัดขวางฟิล์มแข็งไฮดรอกซีพโรฟิลที่เติมอนุภาคนาโนโลหะออกไซด์(ก) HPS20-ZnO<sub>2</sub>% (ข) HPS20-ZnO<sub>5</sub>% (ค) HPS20 TiO<sub>2</sub>2% และ (ง) HPS20-TiO<sub>2</sub>5%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.5 การดูดซับความชื้น (Moisture absorption)

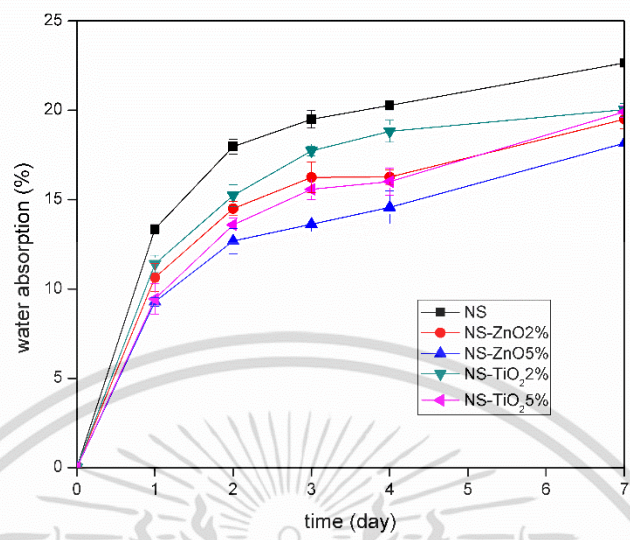
ทดสอบการหาปริมาณการดูดซับความชื้นโดยนำฟิล์มแป้งมันสำปะหลัง แป้งไฮดรอกซีพรอพิล และฟิล์มแป้งที่เติมอนุภาคโลหะออกไซด์ต่างชนิดในปริมาณต่างๆ วางไว้ในบรรยากาศที่อิ่มตัวด้วยน้ำกลั่น และบันทึกน้ำหนักฟิล์มทุกๆ 24 ชั่วโมง ผลจากการคำนวณแสดงดังรูปที่ 4.18



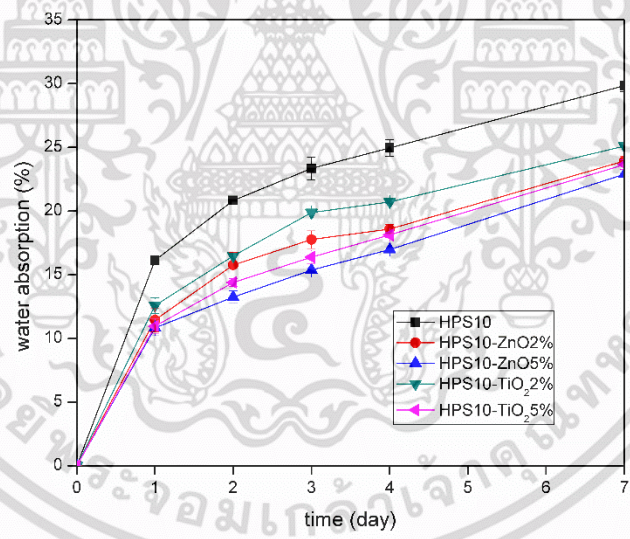
รูปที่ 4.18 เปรียบเทียบการดูดซับความชื้นของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังและฟิล์มแป้งไฮดรอกซีพรอพิลที่ปริมาณต่างๆ กัน

หมายเหตุ - พบเชื้อราบนชิ้นงานฟิล์มแป้งทุกตัวอย่างในการทดลองวันที่ 7 จึงทำการยุติการทดลอง

จากรูปที่ 4.18 แสดงเปรียบเทียบการดูดซับความชื้นของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังและฟิล์มแป้งไฮดรอกซีพรอพิลที่ปริมาณต่างๆ กัน พบว่าชิ้นงานจากฟิล์มแป้งทุกสูตรมีการดูดซับความชื้นสูงขึ้นเมื่อเวลาในการทดสอบนานขึ้น โดยฟิล์มแป้งมันสำปะหลังมีแนวโน้มการดูดซับความชื้นที่ต่ำที่สุดในขณะที่ชิ้นงานฟิล์มแป้งไฮดรอกซีพรอพิลมีการดูดซับความชื้นสูงขึ้นเมื่อค่า MS สูงขึ้น เป็นผลมาจากการเกิดปฏิกิริยาอีเทอร์ริฟิเคชันระหว่างแป้งกับพรอพิลีนออกไซด์ทำให้เกิดหมู่ไฮดรอกซีพรอพิลขึ้น (รูปที่ 4.1) ทำให้ปริมาณผลึกของฟิล์มแป้งไฮดรอกซีพรอพิลลดลง (ตารางที่ 4.4) โครงสร้างแป้งเกิดช่องว่าง (Free volume) เพิ่มขึ้นส่งผลให้โมเลกุลของน้ำแทรกผ่านโครงสร้างได้ง่ายขึ้น ทำให้ค่าการดูดซับความชื้นสูงขึ้น

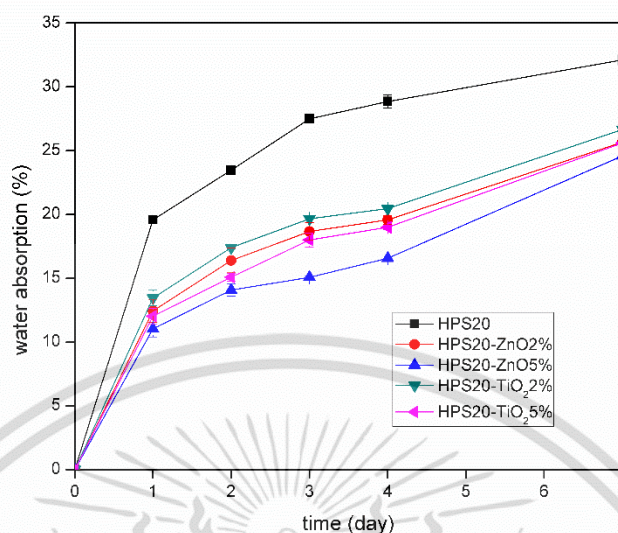


รูปที่ 4.19 เปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของฟิล์มแบง NS ที่เติมนาโนโลหะออกไซด์ที่ปริมาณต่างๆ กัน



รูปที่ 4.20 เปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของฟิล์มแบง HPS10 ที่เติมนาโนโลหะออกไซด์ที่ปริมาณต่าง ๆ กัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.21 เปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของฟิล์มแข็ง HPS20 ที่เติมนาโนโลหะออกไซด์ที่ปริมาณต่าง ๆ กัน

นอกจากนี้เปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของฟิล์มแข็งที่เติมนาโนโลหะออกไซด์ที่ปริมาณต่าง ๆ กัน ดังรูปที่ 4.19-4.21 พบว่าชิ้นงานที่มีการเติมอนุภาคนาโนโลหะออกไซด์มีเปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ไม่มีการเติมอนุภาคนาโนโลหะออกไซด์และมีแนวโน้มที่ปริมาณการดูดซับความชื้นลดลงเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณการเติมอนุภาคนาโนโลหะออกไซด์มากขึ้น เป็นผลมาจากอนุภาคนาโนโลหะออกไซด์เกิดพันธะไฮโดรเจนกับหมู่ไฮดรอกซิลของแข็ง สอดคล้องกับผลของ FT-IR ที่มีการเคลื่อนเลขคลื่นลงของพีคในช่วง  $3200-3600\text{ cm}^{-1}$  ของ O-H stretching ทำให้สมบัติความชอบน้ำ (Hydrophilicity) ลดลง ค่าการดูดซับความชื้นจึงลดลง นอกจากนี้อนุภาคนาโนโลหะออกไซด์ที่แทรกอยู่ในโครงสร้างของแข็งยังส่งผลให้การเข้าแทรกของโมเลกุลน้ำยากขึ้น ส่วนชนิดของอนุภาคนาโนโลหะออกไซด์ พบว่าฟิล์มแข็งทุกสูตรที่เติมอนุภาคนาโนซิงออกไซด์ที่ปริมาณ 5% สามารถลดการดูดซับความชื้นได้ดีที่สุด เนื่องจากนาโนซิงออกไซด์มีขนาดอนุภาคใหญ่กว่า สามารถขัดขวางการแทรกตัวของโมเลกุลน้ำในโครงสร้างได้ดีกว่า ในทางกลับกันฟิล์มแข็งที่สามารถลดการดูดซับความชื้นได้น้อยที่สุดคือฟิล์มแข็งทุกสูตรที่เติมอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ปริมาณ 2 %

#### 4.6 อัตราการซึมผ่านไอน้ำ (Water vapor permeability)

การทดสอบหาอัตราการซึมผ่านไอน้ำด้วยวิธี Desiccant method ทำได้โดยนำฟิล์มแป้งมันสำปะหลัง ฟิล์มแป้งไฮดรอกซีพวอฟิลที่ปริมาณต่างๆ กันและฟิล์มที่มีการเติมอนุภาคนาโนโลหะออกไซด์ ทดสอบที่สภาวะความชื้นสัมพัทธ์  $75 \pm 1$  % ควบคุมโดยใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์และอุณหภูมิที่  $38 \pm 1$  องศาเซลเซียส นำฟิล์มมาชั่งน้ำหนักและนำมาคำนวณหาอัตราการซึมผ่านไอน้ำตามสมการที่ 3.2 ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.8 อัตราการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังและฟิล์มแป้งไฮดรอกซีพวอฟิลที่ปริมาณต่างๆ

ตัวอย่าง	อัตราการซึมผ่านไอน้ำ (กรัม•มิลลิเมตร/ตร.ม.•วัน•กิโลปาสกาล)
NS	3.44
HPS5	3.67
HPS10	3.98
HPS15	3.99
HPS20	4.49

จากตารางที่ 4.7 แสดงอัตราการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังและฟิล์มแป้งไฮดรอกซีพวอฟิลที่ปริมาณต่างๆ พบว่าอัตราการซึมผ่านไอน้ำเพิ่มขึ้นเมื่อ %HP และ MS เพิ่มขึ้น เนื่องจากหมู่ไฮดรอกซิลพวอฟิลที่เพิ่มขึ้นทำให้ฟิล์มแป้งมีสมบัติความชอบน้ำเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ด้วยโครงสร้างที่เป็นผลึก ลดลงทำให้เกิดช่องว่างระหว่างโมเลกุลแป้งเพิ่มขึ้น โมเลกุลของน้ำจึงสามารถแทรกเข้าไปในโครงสร้างแป้งได้ดียิ่งขึ้น โดยผลที่ได้สอดคล้องกับผลการดูดซับความชื้น ซึ่งเปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นเพิ่มขึ้นเมื่อ %HP และ MS เพิ่มขึ้น

ผลจากการทดสอบอัตราการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มแป้งโดยเติมอนุภาคนาโนโลหะออกไซด์ที่ปริมาณต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.8 พบว่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำมีแนวโน้มลดลงเมื่อมีการเติมอนุภาคนาโนโลหะออกไซด์และมีแนวโน้มลดลงมากขึ้นเมื่อปริมาณของอนุภาคนาโนโลหะออกไซด์เพิ่มขึ้น เนื่องจากช่องว่างภายในโครงสร้างของแป้งมีอนุภาคนาโนโลหะออกไซด์แทรกอยู่และมีการเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างสายโซ่แป้งกับอนุภาคนาโนโลหะออกไซด์ขึ้น และคาดว่าจะเกิดแรงดึงดูดระหว่างประจุ ดังแสดงในรูปที่ 4.3-4.4 ทำให้โมเลกุลของน้ำซึมผ่านช่องว่างดังกล่าวได้น้อยลง ทำให้ฟิล์มแป้งที่เติมอนุภาคนาโนโลหะออกไซด์นั้นมีประสิทธิภาพในการป้องกันการซึมผ่านของไอน้ำได้ดีขึ้น

สำหรับชนิดของนาโนโลหะออกไซด์พบว่าสูตรฟิล์มแบ่งที่ทำการเติมอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ปริมาณ 5% มีประสิทธิภาพในการป้องกันการซึมผ่านของไอน้ำที่ดีที่สุดและสูตรฟิล์มแบ่งที่ทำการเติมอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ปริมาณ 2% มีประสิทธิภาพในการป้องกันการซึมผ่านของไอน้ำได้น้อยที่สุดเนื่องจากขนาดอนุภาคของนาโนซิงค์ออกไซด์ (30-40 nm) ใหญ่กว่าขนาดอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ (21 nm) ซึ่งคาดว่าอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่าสามารถขัดขวางการแทรกตัวของโมเลกุลน้ำได้ดีกว่าอนุภาคขนาดเล็กสอดคล้องกับงานวิจัยของ M.R.D. Moura และคณะที่ทำการศึกษาสมบัติของฟิล์มไฮดรอกซีพวอฟิล์มทิลเซลลูโลส (HPMC) ผสมอนุภาคนาโนโคโคซาน พบว่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำลดลงเมื่อเติมอนุภาคนาโนโคโคซาน และพบว่าขนาดอนุภาคโคโคซานที่เพิ่มขึ้นทำให้อัตราการซึมผ่านของไอน้ำลดลง [43]

ตารางที่ 4.9 อัตราการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มแบ่งโดยเติมอนุภาคนาโนโลหะออกไซด์ที่ปริมาณต่างๆ

ตัวอย่าง	อัตราการซึมผ่านไอน้ำ (กรัม•มิลลิเมตร/ตร.ม.•วัน•กิโลปาสกาล)
NS	3.44
NS-ZnO2%	1.56
NS-ZnO5%	1.60
NS-TiO <sub>2</sub> 2%	2.17
NS-TiO <sub>2</sub> 5%	2.15
HPS10	3.98
HPS10-ZnO2%	1.77
HPS10-ZnO5%	1.72
HPS10-TiO <sub>2</sub> 2%	2.36
HPS10-TiO <sub>2</sub> 5%	2.21
HPS20	4.49
HPS20-ZnO2%	1.78
HPS20-ZnO5%	1.75
HPS20-TiO <sub>2</sub> 2%	2.34
HPS20-TiO <sub>2</sub> 5%	2.33

#### 4.7 การทดสอบสมบัติเชิงกล (Mechanical properties)

ศึกษาสมบัติเชิงกลของฟิล์มแข็งมันสำปะหลัง ฟิล์มแข็งไฮดรอกซีพอลิเมอร์และฟิล์มที่มีการเติมอนุภาคนาโนโลหะออกไซด์ที่ปริมาณต่างๆ โดยใช้มาตรฐานการทดสอบ ASTM D882-02 ทำการวิเคราะห์ผลจากค่าความแข็งแรงดึง โมดูลัส และเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.9-4.10

ตารางที่ 4.10 สมบัติเชิงกลของฟิล์มแข็งมันสำปะหลัง และฟิล์มแข็งไฮดรอกซีพอลิเมอร์ที่ปริมาณต่างๆ

ตัวอย่าง	ความแข็งแรงดึง (MPa)	โมดูลัส(MPa)	เปอร์เซ็นต์การดึงยืด (%)
NS	2.4±0.2 <sup>a</sup>	25.3±4.3 <sup>a</sup>	72.6±4.0 <sup>a</sup>
HPS5	2.3±0.2 <sup>a</sup>	25.8±5.0 <sup>a</sup>	69.6±6.5 <sup>a</sup>
HPS10	2.0±0.7 <sup>ab</sup>	14.7±2.6 <sup>b</sup>	74.4±6.7 <sup>a</sup>
HPS15	1.8±0.4 <sup>ab</sup>	14.0±2.4 <sup>b</sup>	79.2±3.6 <sup>a</sup>
HPS20	1.4±0.4 <sup>b</sup>	11.4±1.6 <sup>b</sup>	84.5±12.7 <sup>a</sup>

จากตารางที่ 4.9 แสดงสมบัติเชิงกลของฟิล์มแข็งมันสำปะหลัง และฟิล์มแข็งไฮดรอกซีพอลิเมอร์ที่ปริมาณต่างๆ พบว่าฟิล์มแข็งมันสำปะหลังให้ค่าความแข็งแรงดึงและโมดูลัสมากที่สุด แต่มีเปอร์เซ็นต์การดึงยืดต่ำที่สุด ในทางกลับกันฟิล์มแข็งไฮดรอกซีพอลิเมอร์มีค่าความแข็งแรงดึงและโมดูลัสลดลง และมีค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืดสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากปฏิกิริยาอิมพริเทชัน ดังรูปที่ 4.1 ซึ่งส่งผลให้โครงสร้างและโมเลกุลแข็งมีปริมาตรอิสระ (Free volume) เพิ่มขึ้น ทำให้โมเลกุลแข็งสามารถเคลื่อนที่ได้มากขึ้น มีผลทำให้ค่าความแข็งแรงดึงและ โมดูลัสลดลง และลดต่ำลงมากขึ้นเมื่อปริมาณ MS มากขึ้น สอดคล้องกับผลการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ใน หัวข้อที่ 4.2 ซึ่งพบว่าค่า MS ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความเป็นผลึกของฟิล์มแข็งมีค่าลดลง ความแข็งแรงดึงและ โมดูลัสจึงลดลง ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืดจึงเพิ่มขึ้น

สำหรับสมบัติเชิงกลของฟิล์มแข็งที่เติมนาโนโลหะออกไซด์ที่ปริมาณต่างๆ ในตารางที่ 4.11-4.12 พบว่าค่าความแข็งแรงดึงและโมดูลัสที่ลดลง ในทางตรงกันข้ามเปอร์เซ็นต์การดึงยืดกลับสูงขึ้นเมื่อปริมาณนาโนโลหะออกไซด์เพิ่มขึ้น เป็นผลมาจากความเป็นผลึกที่ลดลง สอดคล้องกับผลการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่หัวข้อ 4.3 และสอดคล้องกับงานวิจัยที่ทำการศึกษาศสมบัติของฟิล์มพอลิเมอร์ชีวภาพ (วันคาราจีแนนและคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส) ผสมนาโนซิงค์ออกไซด์ [44] สมบัติของฟิล์มไคโตซานคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสผสมนาโนซิงค์ออกไซด์ [45] และสมบัติของฟิล์มพลาสติกพีวีซีผสมนาโนกราฟีนและนา-

โนไทเทเนียมไดออกไซด์ [46] คาดว่าจากอันตรกิริยาระหว่างพอลิเมอร์และอนุภาคนาโนโลหะออกไซด์ที่ไม่แข็งแรงทำให้การเคลื่อนที่ของสายโซ่พอลิเมอร์เคลื่อนที่ได้ดีขึ้น

ผลการทดลองที่ได้ตรงกันข้ามกับงานวิจัยที่ทำการศึกษสมบัติของฟิล์มแข็งไฮดรอกซีพอร์ฟิลคอมพอสิตเสริมอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์และนาโนซิลิกาออกไซด์ด้วยกระบวนการเป่าขึ้นรูป [31] สมบัติของคีเฟอร์รัน (Kefiran) เสริมนาโนซิงค์ออกไซด์ [42] และสมบัติของฟิล์มพอลิเมอร์ชีวภาพ (แป้งสาคุและเจลาติน) ผสมแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ [47] พบว่าค่าความแข็งแรงดึงและมอดุลัสสูงขึ้น ในทางตรงกันข้ามเปอร์เซ็นต์การดึงยืดลดลง โดยเป็นผลมาจาก การยึดเกาะกันของพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของแป้งกับอะตอมของออกซิเจนในอนุภาคนาโน ทำให้การเคลื่อนที่ของสายโซ่แป้งลดลง

นอกจากนี้ จากการเติมนาโนโลหะออกไซด์ในปริมาณที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึงและมอดุลัสของฟิล์มแข็งและฟิล์มแข็งไฮดรอกซีพอร์ฟิลมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ในทางกลับกันเปอร์เซ็นต์การดึงยืดมีแนวโน้มลดลง ดังแสดงในตารางที่ 4.11-4.12 เนื่องจากการเติมอนุภาคของแข็งที่มีความแข็งแรงมากกว่าเมทริกซ์ของแป้ง รวมถึงอันตรกิริยาที่คาดว่าจะเกิดได้มากขึ้นจากการเพิ่มปริมาณนาโนโลหะออกไซด์

ตารางที่ 4.11 สมบัติเชิงกลของฟิล์มแข็งที่เติมนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ปริมาณต่างๆ กัน

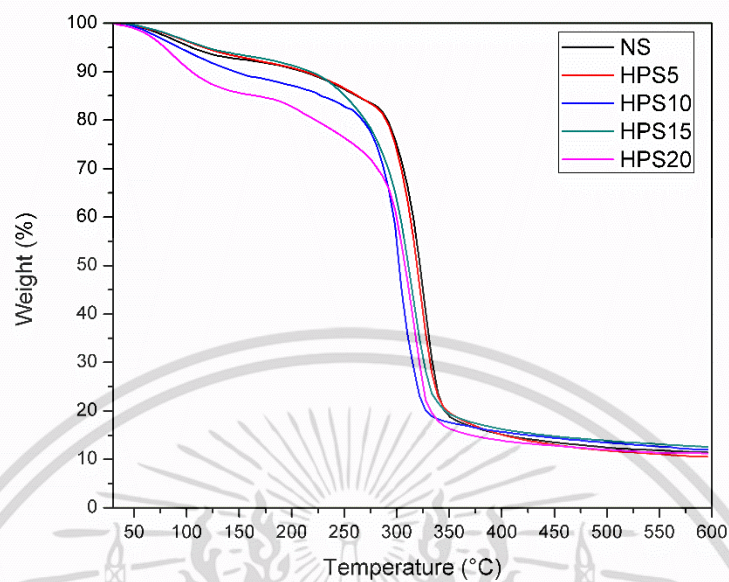
ตัวอย่าง	ความแข็งแรงดึง (MPa)	มอดุลัส (MPa)	เปอร์เซ็นต์การดึงยืด (%)
NS	2.4±0.2 <sup>a</sup>	25.3±4.3 <sup>a</sup>	72.6±4.0 <sup>a</sup>
NS-ZnO2%	1.3±0.2 <sup>b</sup>	6.0±0.5 <sup>b</sup>	125.6±20.4 <sup>b</sup>
NS-ZnO5%	1.5±0.3 <sup>b</sup>	9.8±1.8 <sup>c</sup>	98.7±10.5 <sup>c</sup>
HPS10	2.0±0.7 <sup>a</sup>	14.7±2.6 <sup>a</sup>	74.4±6.7 <sup>a</sup>
HPS10- ZnO 2%	0.7±0.1 <sup>b</sup>	1.5±0.4 <sup>b</sup>	157.8±4.5 <sup>b</sup>
HPS10- ZnO 5%	1.0±0.1 <sup>b</sup>	2.9±1.3 <sup>b</sup>	184.6±3.7 <sup>c</sup>
HPS20	1.4±0.4 <sup>a</sup>	14.7±2.6 <sup>a</sup>	84.5±12.7 <sup>a</sup>
HPS20- ZnO 2%	0.6±0.1 <sup>b</sup>	1.3±0.6 <sup>b</sup>	239.9±16.0 <sup>b</sup>
HPS20- ZnO 5%	0.9±0.3 <sup>b</sup>	2.3±0.7 <sup>b</sup>	148.3±39.7 <sup>c</sup>

ตารางที่ 4.12 สมบัติเชิงกลของฟิล์มแบ่งที่เติมนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ปริมาณต่างๆ กัน

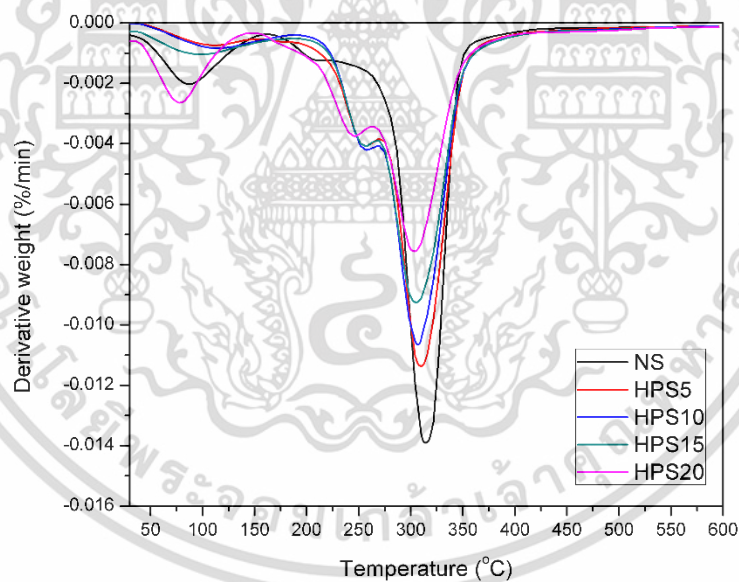
ตัวอย่าง	ความแข็งแรงดึง (MPa)	มอดุลัส (MPa)	เปอร์เซ็นต์การดึงยืด (%)
NS	2.4±0.2 <sup>a</sup>	25.3±4.3 <sup>a</sup>	72.6±4.0 <sup>a</sup>
NS-TiO <sub>2</sub> 2%	1.2±0.2 <sup>b</sup>	2.8±0.4 <sup>b</sup>	167.0±23.0 <sup>b</sup>
NS-TiO <sub>2</sub> 5%	1.4±0.4 <sup>b</sup>	8.6±2.2 <sup>c</sup>	65.2±8.51 <sup>a</sup>
HPS10	2.0±0.7 <sup>a</sup>	14.7±2.6 <sup>a</sup>	74.4±6.7 <sup>a</sup>
HPS10-TiO <sub>2</sub> 2%	0.8±0.3 <sup>b</sup>	1.1±0.6 <sup>b</sup>	168.1±29.3 <sup>b</sup>
HPS10-TiO <sub>2</sub> 5%	1.1±0.3 <sup>b</sup>	3.5±0.4 <sup>c</sup>	152.5±12.2 <sup>b</sup>
HPS20	1.4±0.4 <sup>a</sup>	14.7±2.6 <sup>a</sup>	84.5±12.7 <sup>a</sup>
HPS20-TiO <sub>2</sub> 2%	0.7±0.1 <sup>b</sup>	1.2±0.3 <sup>b</sup>	207.9±32.5 <sup>b</sup>
HPS20-TiO <sub>2</sub> 5%	0.9±0.1 <sup>b</sup>	1.3±0.4 <sup>b</sup>	215.6±18.1 <sup>b</sup>

#### 4.8 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยสมบัติทางความร้อน (Thermogravimetric analysis, TGA)

การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของฟิล์มแบ่งมันสำปะหลัง แบ่งไฮดรอกซีพอร์พิลและฟิล์มแบ่งที่เติมอนุภาคโลหะออกไซด์ต่างชนิดในปริมาณต่างๆ ด้วยเครื่องเทอร์โมกราวิเมตริก แอนาไลเซอร์ (Thermogravimetric analysis, TGA) ที่ช่วงอุณหภูมิ 30 – 600 องศาเซลเซียส และอัตราการให้ความร้อนที่ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.22-4.25 และตารางที่ 4.13-4.14



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.22 เทอร์โมแกรมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังและฟิล์มแป้งไฮดรอกซีพวอฟิลที่ปริมาณต่างๆกัน

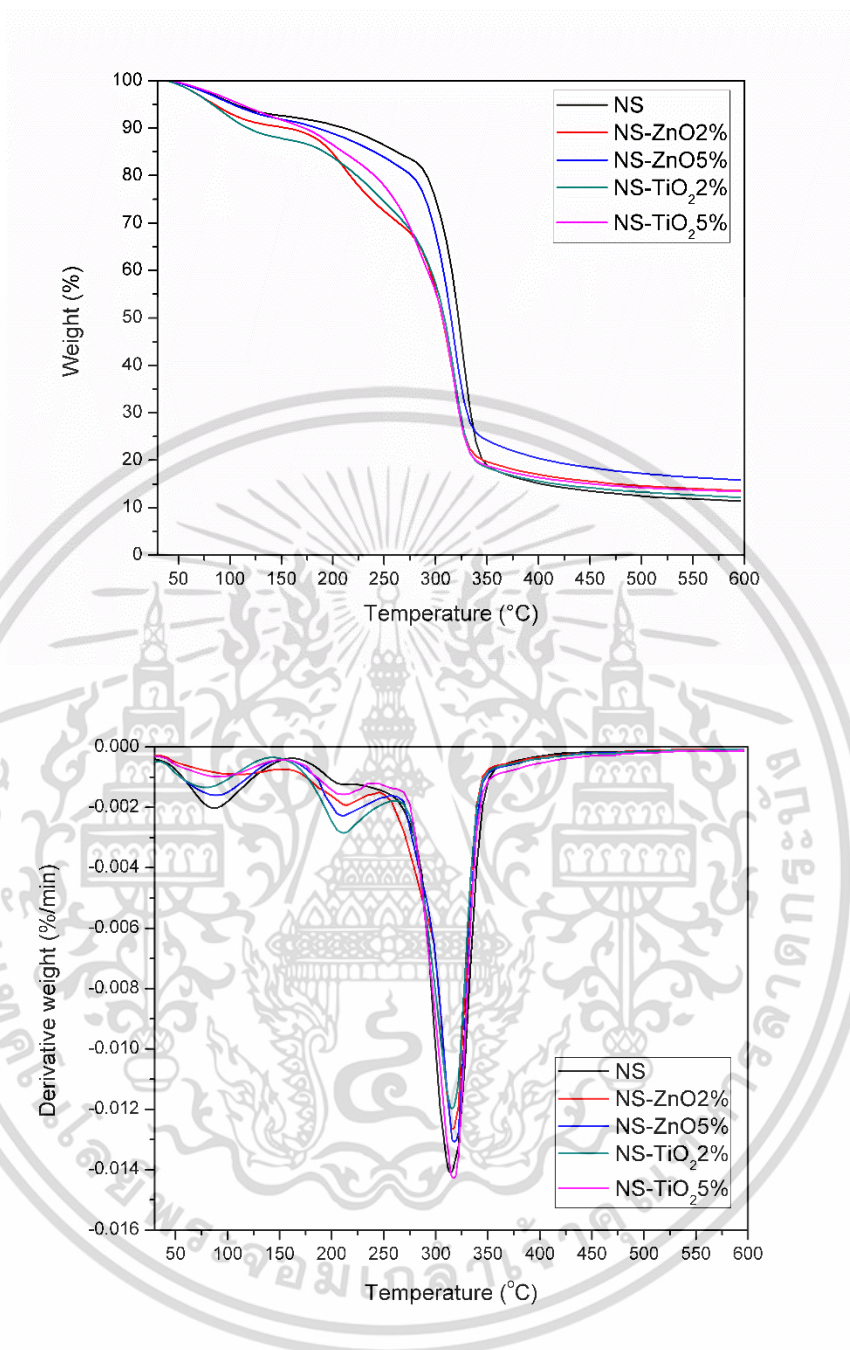
(ก) TGA และ (ข) DTG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.13 อุณหภูมิการสลายตัวและเปอร์เซ็นต์น้ำหนักของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังและแป้งไฮดรอกซีพรอพิล

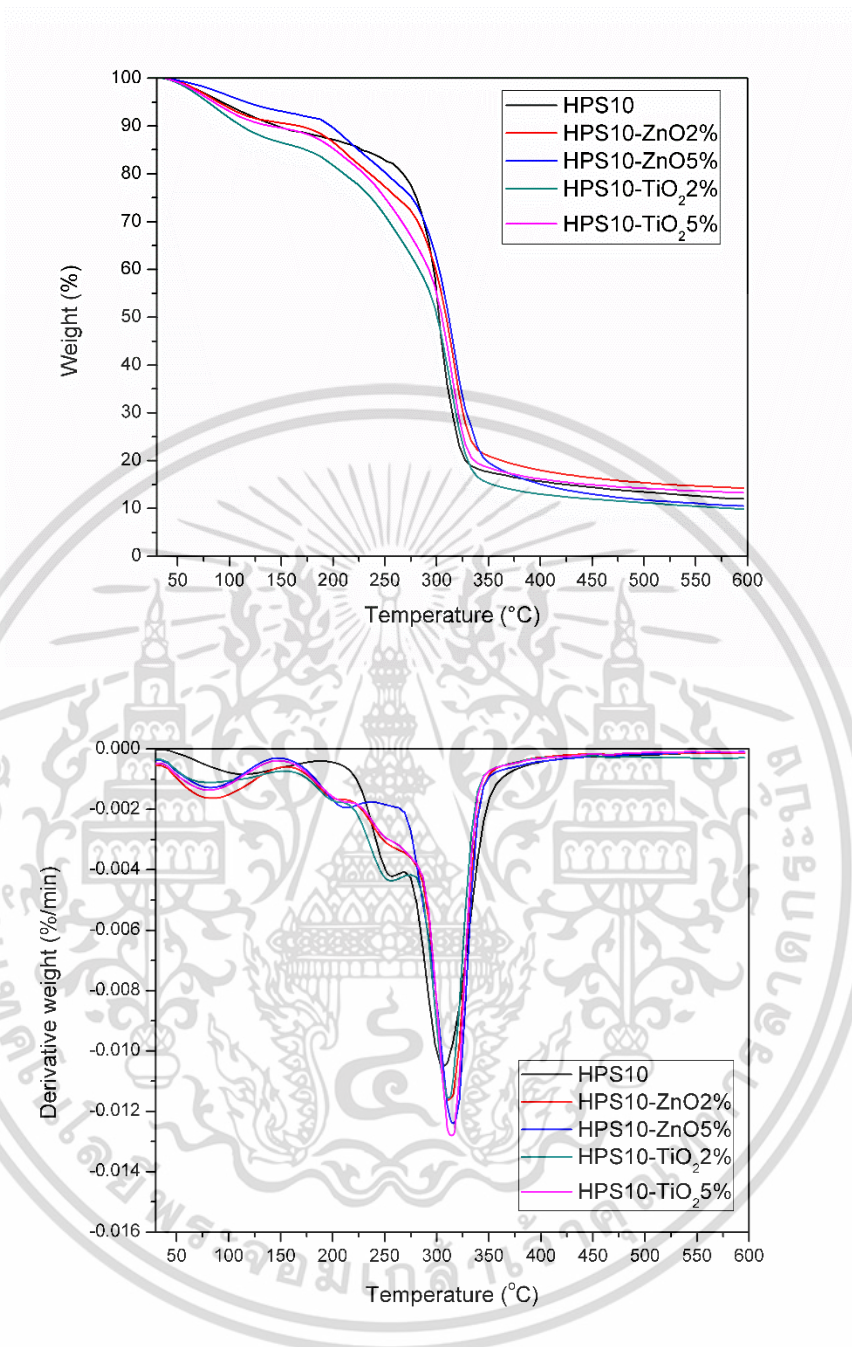
ตัวอย่าง	อุณหภูมิการสลายตัว (°C)			น้ำหนักที่หายไป (%)
	ช่วงที่ 1	ช่วงที่ 2	ช่วงที่ 3	
NS	87.2	205.8	315.8	88.6
HPS5	103.8	251.2	310.5	89.5
HPS10	109.3	250.8	307.5	87.9
HPS15	94.8	250.8	306.3	87.4
HPS20	78.3	242.2	305.0	88.8

จากรูปที่ 4.22 และตารางที่ 4.13 แสดงข้อมูลอุณหภูมิการสลายตัวและเปอร์เซ็นต์น้ำหนักของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังและแป้งไฮดรอกซีพรอพิล 3 ช่วง โดยอุณหภูมิในการสลายตัวช่วงที่ 1 ที่อุณหภูมิ 70-110 องศาเซลเซียสเป็นการสลายตัวของโมเลกุลน้ำ อุณหภูมิในการสลายตัวช่วงที่ 2 ที่อุณหภูมิประมาณ 200 องศาเซลเซียสเป็นการสลายตัวของกลีเซอรอลและอุณหภูมิในการสลายตัวของแป้งในช่วงที่ 3 แสดงค่าในช่วง 305-315 องศาเซลเซียส พบว่าฟิล์มแป้งมันสำปะหลังมีอุณหภูมิการสลายตัวสูงที่สุดที่อุณหภูมิ 315.8 องศาเซลเซียส สำหรับฟิล์มแป้งดัดแปรนั้นมีอุณหภูมิในการสลายตัวที่ลดลงโดยที่ค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เป็นผลมาจากหมู่ไฮดรอกซีพรอพิลที่เพิ่มเข้ามาในโครงสร้างแป้ง ทำให้การจัดเรียงตัวของโมเลกุลแป้งเป็นไปได้ยากขึ้น ความเป็นผลึกจึงลดลง สอดคล้องกับผลการ เลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่หัวข้อ 4.3 ดังนั้นอุณหภูมิที่ใช้ในการสลายตัวจึงลดลงและมีแนวโน้มลดลงมากขึ้น เมื่อค่า MS เพิ่มขึ้น

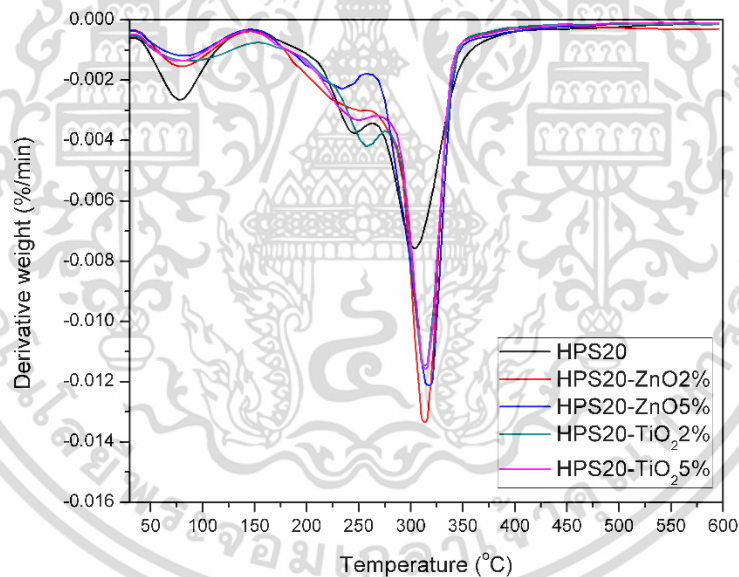
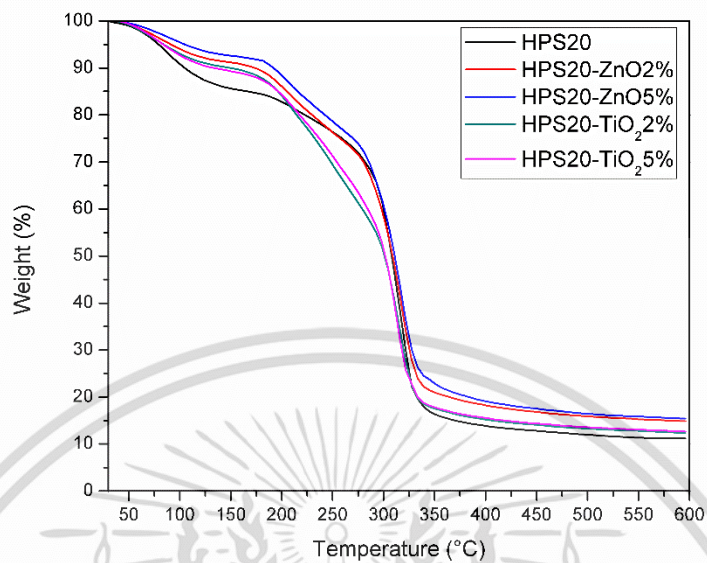


รูปที่ 4.23 เทอร์โมแกรมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เติมนาโนโลหะออกไซด์ที่ปริมาณต่างๆ (ก) TGA และ (ข) DTG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.24 เทอร์โมแกรมของฟิล์มแปงไฮดรอกซีพอพิล 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักที่เติมนาโนโลหะออกไซด์ที่ปริมาณต่างๆ (ก) TGA และ (ข) DTG



รูปที่ 4.25 เทอร์โมแกรมของฟิล์มแบ่งไฮดรอกซีฟรอปิล 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักที่เติมนาโนโลหะออกไซด์ที่ปริมาณต่างๆ (ก) TGA และ (ข) DTG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.14 อุณหภูมิการสลายตัวและเปอร์เซ็นต์น้ำหนักของฟิล์มแบ่งที่เติมนาโนโลหะออกไซด์ที่ปริมาณต่างๆ

ตัวอย่าง	อุณหภูมิการสลายตัว (°C)			น้ำหนักที่หายไป (%)
	ช่วงที่ 1	ช่วงที่ 2	ช่วงที่ 3	
NS	87.2	205.8	315.8	88.6
NS-ZnO2%	92.2	192.5	317.7	86.4
NS-ZnO5%	89.3	200.3	318.3	84.2
NS-TiO <sub>2</sub> 2%	79.2	209.2	316.2	87.9
NS-TiO <sub>2</sub> 5%	89.7	182.0	317.2	86.7
HPS10	109.3	250.8	307.5	87.9
HPS10ZnO2%	83.5	248.5	313.0	85.7
HPS10ZnO5%	83.7	250.8	316.0	85.8
HPS10 TiO <sub>2</sub> 2%	75.5	250.2	311.7	87.2
HPS10-TiO <sub>2</sub> 5%	81.5	247.8	314.5	86.8
HPS20	78.3	242.2	305.0	88.8
HPS20ZnO2%	79.5	247.0	314.0	85.2
HPS20ZnO5%	83.0	202.3	317.0	85.2
HPS20 TiO <sub>2</sub> 2%	83.8	255.2	313.7	87.7
HPS20-TiO <sub>2</sub> 5%	83.0	202.3	317.0	87.7

สำหรับอุณหภูมิในการสลายตัวและเปอร์เซ็นต์น้ำหนักของฟิล์มแบ่งที่เติมนาโนโลหะออกไซด์ที่ปริมาณต่างๆ กันนั้น แสดงดังรูปที่ 4.21-4.23 และตารางที่ 4.14 พบว่าอุณหภูมิการสลายตัวช่วงที่ 1 2 และ 3 เป็นการสลายตัวทางความร้อนเช่นเดียวกันกับฟิล์มแบ่งที่ไม่มีการเติมอนุภาคนาโนโลหะออกไซด์ แต่เมื่อทำการเปรียบเทียบช่วงที่ 3 ซึ่งเป็นอุณหภูมิการสลายตัวของแบ่งนั้นพบว่า อุณหภูมิในการสลายตัวสูงขึ้นโดยที่ค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากอาจเกิดพันธะไฮโดรเจนและแรงดึงดูดระหว่างประจุ (Electrostatic interaction) ระหว่างอนุภาคนาโนโลหะออกไซด์กับหมู่ไฮดรอกซีของแบ่งทำให้ต้องใช้อุณหภูมิในการสลายตัวสูงขึ้น เมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างฟิล์ม

แบ่ง (NS) ที่เติมอนุภาคนาโนโลหะออกไซด์กับฟิล์มแบ่งไฮดรอกซีพอรอฟิล (HPS10,HPS20) เติมอนุภาคนาโนโลหะออกไซด์พบว่า ฟิล์มแบ่งไฮดรอกซีพอรอฟิลมีอุณหภูมิการสลายตัว ทางความร้อนเพิ่มขึ้นสูงกว่าฟิล์มแบ่ง คาดว่าฟิล์มแบ่งไฮดรอกซีพอรอฟิลมีความเป็นอสัณฐานมากกว่า ทำให้อนุภาคนาโนสามารถกระจายตัวได้ดีและเกิดการส่งผ่านความร้อนดีกว่าผลึกสอดคล้องกับผลของการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค EDS ตารางที่ 4.6 นอกจากนี้เสถียรภาพที่ดีของอนุภาคนาโนโลหะออกไซด์ กล่าวคือ มีความหนาแน่นและจุดหลอมเหลวที่สูง สามารถเพิ่มอุณหภูมิการสลายตัวของฟิล์มแบ่งได้ [7] และเมื่อพิจารณาชนิดของนาโนโลหะออกไซด์พบว่า ฟิล์มแบ่งที่เติมนาโนซิงค์ออกไซด์ให้เสถียรภาพทาง ความร้อนที่ดีกว่าฟิล์มแบ่งที่เติมนาโนไทเทเนียมออกไซด์เนื่องจากซิงค์ออกไซด์มีความหนาแน่นและจุด หลอมเหลว (1975°C ) ที่สูงกว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ (1835°C ) จึงสามารถทนต่ออุณหภูมิที่สูงกว่าได้ [19-20] โดยสูตรที่มีเสถียรภาพทางความร้อนที่สุด คือ สูตรฟิล์มแบ่งที่เติมนาโนซิงค์ออกไซด์ 5 wt%

#### 4.9 การวิเคราะห์ความเปลี่ยนแปลงของสี (Color Measurements)

วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสีของฟิล์มแบ่งมันสำปะหลัง แบ่งไฮดรอกซีพอรอฟิลและฟิล์มแบ่งที่เติมอนุภาคนาโนโลหะออกไซด์ต่างชนิดในปริมาณต่างๆ ด้วยเครื่อง Spectrophotometer เพื่อวัดค่า  $L^*$   $a^*$   $b^*$   $C^*$  และ  $h^\circ$  แสดงดังตารางที่ 4.15 - 4.16

ตารางที่ 4.15 ค่าการวัดสีของฟิล์มแบ่งมันสำปะหลังและฟิล์มแบ่งไฮดรอกซีพอรอฟิลที่ปริมาณต่างๆ

ตัวอย่าง	ค่าการเปลี่ยนแปลงของสี					
	$L^*$	$a^*$	$b^*$	$C^*$	$h^\circ$	WI
NS	31.35	-0.25	-1.76	2.35	270.97	12.06
HPS5	30.65	-0.44	-2.23	3.27	269.08	10.78
HPS10	27.93	-0.42	-2.46	3.66	263.84	10.07
HPS15	24.73	-0.73	-2.19	3.79	262.01	8.53
HPS20	24.01	-0.47	-2.61	4.38	259.96	8.39

หมายเหตุ ค่า  $L^*$  กำค่าความสว่าง ค่า  $a^*$  กำหนดสีแดงหรือเขียว โดย  $a^* > 1$  แสดงสีแดง และ  $a^* < 1$  แสดงสีเขียว ค่า  $b^*$  กำหนดสีเหลืองหรือสีน้ำเงิน โดย  $b^* > 1$  แสดงสีเหลือง และ  $b^* < 1$  แสดงสีน้ำเงิน ค่า  $C^*$  แสดงความสดใสของสี ค่า  $h^\circ$  ระบุตำแหน่งของสีเปรียบเทียบกับมาตรฐาน และ WI แสดงค่าดัชนีความขาว

จากตารางที่ 4.15 ค่าการวัดสีของฟิล์มแบ่งมันสำปะหลังและฟิล์มแบ่งไฮดรอกซีพรอพิลที่ปริมาณต่างๆ พบว่าค่าความสว่างและค่าดัชนีความขาวของฟิล์มแบ่ง NS มีค่ามากที่สุดและมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณพรอพิลีนออกไซด์เพิ่มขึ้น เนื่องจากฟิล์มแบ่งมันสำปะหลังมีการจัดเรียงตัวของโมเลกุลแบ่งได้หนาแน่นเป็นผลึกได้ดี จึงทำให้ฟิล์มแบ่งมีความสว่างมากกว่า ในขณะที่ฟิล์มแบ่งไฮดรอกซีพรอพิลมีการเพิ่มขึ้นของหมู่ไฮดรอกซีพรอพิลเข้าไปในโมเลกุลแบ่งทำให้เกิดการขัดขวางการจัดเรียงตัวของโมเลกุลแบ่ง ความเป็นผลึกของโมเลกุลแบ่งจึงลดลง นอกจากนี้ความสว่างให้ผลตรงข้ามกับค่าความสดใส ซึ่งพบว่าค่าความสดใสเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณผลึกลดลงสอดคล้องกับผลการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่หัวข้อ 4.3 ซึ่งพบว่าปริมาณพรอพิลีนออกไซด์ที่เพิ่มขึ้นทำให้ความเป็นผลึกของฟิล์มลดลง และจากค่า  $h^\circ$  ที่สามารถบอกโดยรวมว่าฟิล์มแบ่งมันสำปะหลังมีความขาวมากที่สุดและใส่น้อยที่สุด ในส่วนของค่า  $a^*$  และค่า  $b^*$  ซึ่งแสดงค่าความเป็นสีแดง-เขียว และสีเหลือง-น้ำเงินตามลำดับ พบว่าฟิล์มจากแบ่งไฮดรอกซีพรอพิลไม่ส่งผลต่อค่า  $a^*$  และค่า  $b^*$  อย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ 4.16 ค่าการวัดสีของฟิล์มแบ่งโดยเติมอนุภาคนาโนโลหะออกไซด์ที่ปริมาณต่างๆ

ตัวอย่าง	ค่าการเปลี่ยนแปลงของสี					
	$L^*$	$a^*$	$b^*$	$C^*$	$h^\circ$	WI
NS	31.35	-0.25	-1.76	2.35	270.97	12.06
NS-ZnO2%	65.23	-2.06	-9.03	8.23	251.06	63.12
NS-ZnO5%	73.92	-1.39	-6.97	5.53	249.03	73.42
NS-TiO22%	73.26	-2.30	-2.79	3.41	201.60	56.20
NS-TiO25%	81.26	-1.87	-1.93	2.35	173.96	63.54
HPS10	27.93	-0.42	-2.46	3.66	263.84	10.07
HPS10-ZnO2%	64.44	-2.34	-11.60	10.62	259.55	70.17
HPS10-ZnO5%	73.97	-1.47	-9.08	8.00	255.14	81.93
HPS10 TiO22%	73.45	-1.53	-9.03	7.45	253.65	80.59
HPS10-TiO25%	80.80	-1.44	-7.76	7.60	255.60	92.69
HPS20	24.01	-0.47	-2.61	4.38	259.96	8.39
HPS20-ZnO2%	64.76	-1.73	-11.15	10.13	255.43	69.41
HPS20-ZnO5%	74.02	-1.49	-8.12	7.71	249.61	78.17
HPS20 TiO22%	71.11	-1.97	-8.89	6.71	256.65	74.56
HPS20-TiO25%	80.83	-1.61	-6.20	8.32	251.52	85.57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมายเหตุ ค่า  $L^*$  กำค่าความสว่าง ค่า  $a^*$  กำหนดสีแดงหรือเขียว โดย  $a^* > 1$  แสดงสีแดง และ  $a^* < 1$  แสดงสีเขียว ค่า  $b^*$  กำหนดสีเหลืองหรือสีน้ำเงิน โดย  $b^* > 1$  แสดงสีเหลือง และ  $b^* < 1$  แสดงสีน้ำเงิน ค่า  $C^*$  แสดงความสดใสของสี ค่า  $h^\circ$  ระบุตำแหน่งของสีเปรียบเทียบกับมาตรฐาน และ WI แสดงค่าดัชนีความขาว

จากตารางที่ 4.16 แสดงค่าการวัดสีของฟิล์มแข็งโดยเติมอนุภาคนาโนโลหะออกไซด์ที่ปริมาณต่างๆ พบว่าอนุภาคนาโนโลหะออกไซด์ส่งผลให้ค่าความสว่างและค่าดัชนีความขาวมากขึ้นตรงข้ามกับค่าความสดใสที่ลดลงจากปริมาณนาโนโลหะออกไซด์ที่เพิ่มขึ้น นอกจากปริมาณแล้วชนิดของโลหะออกไซด์มีผลเช่นกัน โดยอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ให้ค่าความสว่างและค่าดัชนีความขาวมากที่สุด เนื่องจากค่าดัชนีการหักเห (Refractive Index) ของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ ( $n=2.6142$ ) มากกว่าอนุภาคซิงค์ออกไซด์ ( $n=2.0034$ ) [15] ส่วนความเป็นสีเขียว-แดงและสีเหลือง-น้ำเงิน ชนิดและปริมาณของอนุภาคนาโนโลหะออกไซด์ไม่แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ และจากค่า  $h^\circ$  สามารถบ่งบอกได้ว่า NS-TiO<sub>2</sub>5% เป็นฟิล์มแข็งที่มีค่าความสว่างและค่าดัชนีความขาวมากที่สุด

#### 4.10 การทดสอบประสิทธิภาพการต้านทานต่อเชื้อจุลชีพ (Antimicrobial testing)

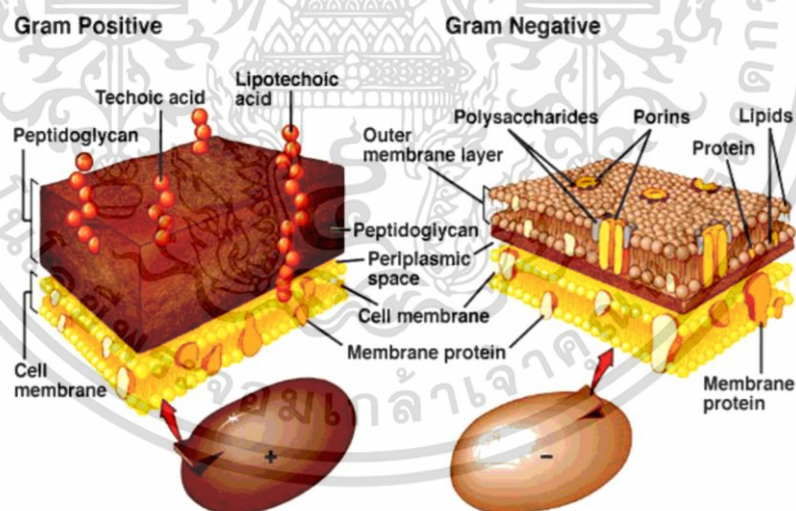
ทำการทดสอบการต้านเชื้อจุลชีพของฟิล์มแข็งที่เติมอนุภาคนาโนโลหะออกไซด์ชนิดต่างๆด้วยวิธี Agar diffusion ทดสอบร่วมกับเชื้อจุลชีพ 2 ชนิดคือ แบคทีเรียชนิดแกรมบวก *Staphylococcus aureus* (*S.aureus*) และชนิดแกรมลบ *Escherichia coli* (*E.coli*) โดยชิ้นงานได้อยู่ในสภาวะปกติและสภาวะฉายแสงยูวีเป็นเวลา 3 ชั่วโมง ให้ผลการทดลองดังนี้

ตารางที่ 4.17 ระยะในการต้านเชื้อแบคทีเรียของชั้นงานฟิล์มแบ่งที่เติมอนุภาคนาโนโลหะออกไซด์ชนิดต่างๆ

ตัวอย่าง	บริเวณการต้านทานเชื้อ(มิลลิเมตร) ภายใต้สภาวะปกติ		บริเวณการต้านทานเชื้อ(มิลลิเมตร) ภายใต้รังสียูวี	
	<i>S.aureus</i>	<i>E. coli</i>	<i>S.aureus</i>	<i>E. coli</i>
ZnO	12.91	11.85	24.41	13.66
TiO <sub>2</sub>	-	-	-	-
NS-ZnO2%	-	-	18.37	-
NS-ZnO5%	-	-	18.75	-
NS-TiO <sub>2</sub> 2%	-	-	-	-
NS-TiO <sub>2</sub> 5%	-	-	-	-
HPS10-ZnO2%	-	-	21.60	-
HPS10-ZnO5%	-	-	21.29	-
HPS10 TiO <sub>2</sub> 2%	-	-	-	-
HPS10-TiO <sub>2</sub> 5%	-	-	-	-
HPS20-ZnO2%	-	-	21.48	-
HPS20-ZnO5%	-	-	23.06	-
HPS20 TiO <sub>2</sub> 2%	-	-	-	-
HPS20-TiO <sub>2</sub> 5%	-	-	-	-

สมบัติการต้านทานต่อเชื้อจุลินทรีย์เป็นผลที่ได้จากสมบัติของนาโนโลหะออกไซด์ โดยจากตารางที่ 4.17 และภาคผนวกรูปที่ ง.1-ง.8 แสดงระยะการต้านเชื้อแบคทีเรียของอนุภาคนาโนโลหะออกไซด์และฟิล์มแบ่งที่เติมอนุภาคนาโนโลหะออกไซด์ พบว่าอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์สามารถต้านทานเชื้อแบคทีเรียได้ทั้งแกรมบวกและแกรมลบ และประสิทธิภาพการต้านเชื้อเพิ่มขึ้นเมื่ออยู่ภายใต้รังสียูวี ในทางกลับกันอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ไม่เกิดการต้านเชื้อแบคทีเรียเมื่ออยู่ภายใต้รังสียูวี ซึ่งผลที่ได้จากงานวิจัยนี้ไม่สอดคล้องกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง [48-50] คาดว่าเกิดขึ้นจาก อิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นให้เคลื่อนที่ไปยังแถบการนำไฟฟ้าไม่สามารถอยู่ในสภาวะดังกล่าวได้นานเพียงพอที่จะเกิดกลไกการย่อยสลายและยับยั้งชีวเคมีของแบคทีเรียได้

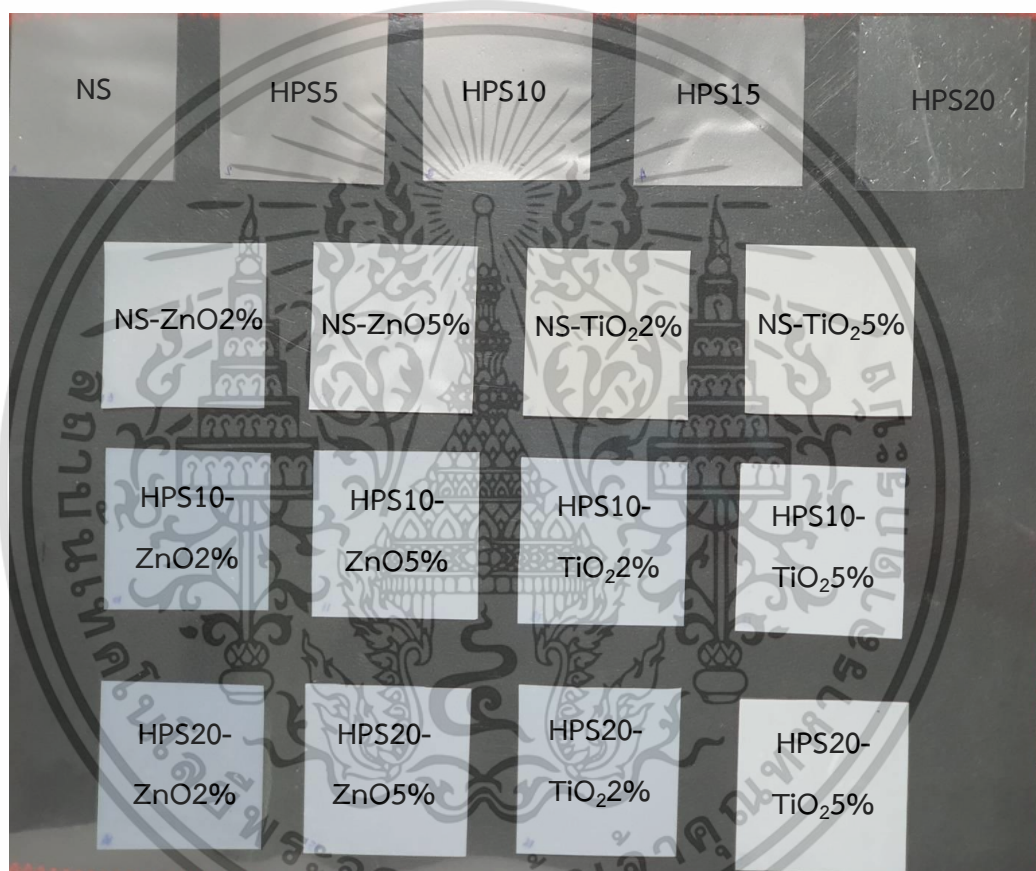
ส่วนฟิล์มแบ่งที่เติมอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ทุกตัวอย่างไม่สามารถต้านเชื้อแบคทีเรียทั้งแกรมบวกและแกรมลบได้ในสภาวะปกติ คาดว่าเกิดจากปริมาณที่เติมอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ไม่มากพอที่จะทำให้เกิดการต้านเชื้อได้ จากนั้นทำการทดสอบอีกครั้งโดยการฉายแสงยูวีบนชิ้นงานเป็นเวลา 3 ชั่วโมง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการต้านเชื้อแบคทีเรียด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง (Photocatalysis process) พบว่า ฟิล์มแบ่งที่เติมอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์สามารถต้านทานเชื้อแบคทีเรียแกรมบวกได้เพียงแกรมเดียว เนื่องจากแบคทีเรียมีเยื่อหุ้มเซลล์ประกอบจากลิปิดแบบ Amphiphilic จัดเรียงตัวเป็นสองชั้น (Lipid bilayer) หนึ่งส่วนไม่ชอบน้ำเข้าหากันและหนึ่งส่วนที่ชอบน้ำออกด้านนอก จึงป้องกันการละลายผ่านเข้าออกจากเซลล์ได้ทั้งสารที่มีและไม่มีขั้ว ซึ่งแบคทีเรียแกรมลบมีเยื่อหุ้มเซลล์ 2 ชั้น ในขณะที่แบคทีเรียแกรมบวกมีเยื่อหุ้มเซลล์เพียงชั้นเดียวดังแสดงในรูปที่ 4.26 ทำให้แบคทีเรียแกรมลบมีความต้านทานต่อสมบัติการต้านเชื้อของนาโนโลหะออกไซด์ได้มากกว่าแบคทีเรียแกรมบวก [51] และเมื่อทำการเปรียบเทียบปริมาณนาโนซิงค์ออกไซด์พบว่าที่ปริมาณนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ 2% และ 5% แสดงบริเวณการต้านทานเชื้อแบคทีเรียแกรมบวกภายใต้รังสียูวีไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ คาดว่าเป็นผลจากปริมาณที่เพิ่มขึ้นทำให้อนุภาคนาโนโลหะออกไซด์เกิดการเกาะกลุ่มกัน พื้นที่ผิวจึงลดลง ส่งผลให้ประสิทธิภาพการต้านทานเชื้อเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย



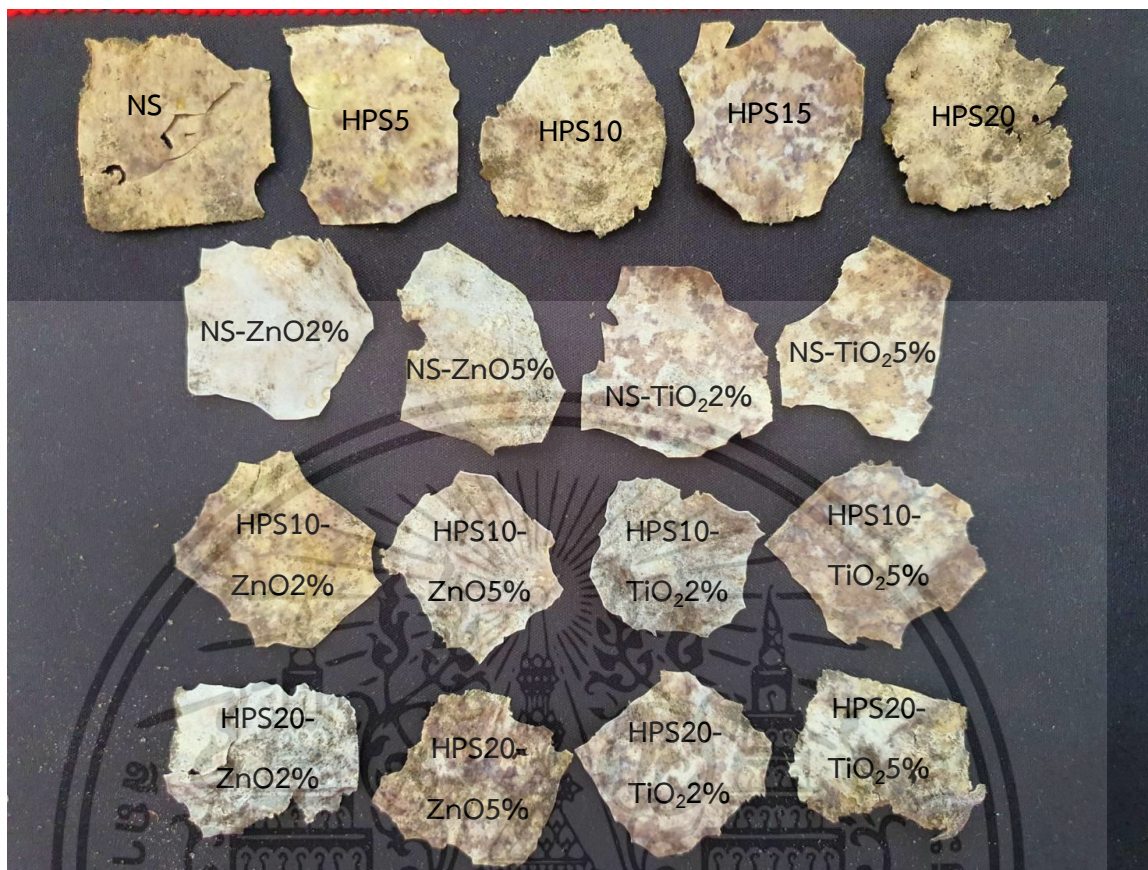
รูปที่ 4.26 องค์ประกอบของผนังเซลล์แบคทีเรียแกรมบวกและแกรมลบ [51]

#### 4.11 การทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดิน (Soil burial test)

การทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดินของฟิล์มแบ่งไฮดรอกซีพอรอฟิลและมีการเติมอนุภาคนาโนโลหะออกไซด์ชนิดต่างๆ ได้แก่ ซิงค์ออกไซด์และไทเทเนียมไดออกไซด์ ทำการทดลองโดยนำฟิล์มแบ่งมาฝังในดินที่มีความลึกประมาณ 5 เซนติเมตร ควบคุมความชื้นในดินให้อยู่ในช่วง 5-10 % เป็นระยะเวลา 20 วัน ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.26-4.27 โดยในงานวิจัยนี้ศึกษาความสามารถในการย่อยสลายได้ของฟิล์ม โดยพิจารณาจากลักษณะรูปร่างฟิล์มที่ได้ก่อนและหลังการฝังดิน



รูปที่ 4.27 ฟิล์มแบ่งก่อนการทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดิน



รูปที่ 4.28 फिल्मแบ่งที่ผ่านการทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดินเป็นเวลา 20 วัน

หมายเหตุ - ระยะเวลาในการฝังดินกำหนดโดยสภาพที่เริ่มเปลี่ยนแปลงของฟิล์มแบ่ง

จากรูปที่ 4.27 และ 4.28 ซึ่งแสดงสภาพชิ้นงานจากการทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดินพบว่า ฟิล์มแบ่งเกิดการขึ้นราและมีลักษณะกรอบแตกอันเนื่องมาจาก ภายในดินนั้นมีความชื้นและสารอินทรีย์เป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งเป็นสภาวะที่เหมาะสมในการเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ต่าง ๆ ประกอบกับฟิล์มแบ่งที่มีองค์ประกอบหลักเป็นสารอินทรีย์ ทำให้เกิดการย่อยสลายทางชีวภาพขึ้น [52] และจากภาพจะเห็นว่าฟิล์มแบ่งที่เติมนาโนโลหะออกไซด์ยังคงเกิดการย่อยสลายได้ โดยผลที่ได้สอดคล้องกับการทดสอบประสิทธิภาพการต้านทานต่อเชื้อจุลินทรีย์ เนื่องจากมีเพียงฟิล์มแบ่งที่ทำการเติมนาโนซิงค์ออกไซด์ภายใต้รังสียูวีเท่านั้นที่สามารถต้านทานต่อเชื้อแบคทีเรียแกรมบวกเท่านั้น ทำให้ฟิล์มแบ่งไม่สามารถต้านทานการสลายตัวทางชีวภาพได้ จึงสามารถสรุปได้ว่านาโนโลหะออกไซด์ในงานวิจัยนี้ไม่มีผลต่อการย่อยสลายของฟิล์มแบ่ง

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสมบัติแปงไฮดรอกซีพอรฟิลที่ปริมาณ 0, 5, 10, 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก และมีการเติมอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์และนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่ปริมาณ 2 และ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ผลจากการวิเคราะห์และทดสอบสมบัติต่างๆ สามารถสรุปผลวิจัยได้ดังนี้

5.1.1 จากการทดสอบหาปริมาณหมู่ไฮดรอกซีพอรฟิลและระดับการแทนที่ (MS) ของแปงไฮดรอกซีพอรฟิลพบว่า ปริมาณพอรฟิลีนออกไซด์ที่ใช้ทำปฏิกิริยาที่เพิ่มขึ้น ระดับการแทนที่ของแปงไฮดรอกซีพอรฟิลภายในโครงสร้างแปงเพิ่มมากขึ้น

5.1.2 จากการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน พบว่าไม่เกิดพีคใหม่จากฟิล์มแปงไฮดรอกซีพอรฟิล อย่างไรก็ตามพีค  $1151\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นลักษณะการสั่นของ C-O stretching มีแนวโน้มความเข้มพีคสูงขึ้นตามปริมาณพอรฟิลีนออกไซด์ที่สูงขึ้น เนื่องจากปฏิกิริยาระหว่างแปงและพอรฟิลีนออกไซด์เป็นปฏิกิริยาอีเทอร์รีฟิเคชัน และผลจากการเติมนาโนโลหะออกไซด์พบพีคเอกลักษณ์ของนาโนซิงค์ออกไซด์ที่  $575\text{ cm}^{-1}$  และนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่  $570\text{ cm}^{-1}$

5.1.3 จากการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ พบว่าฟิล์มแปงไฮดรอกซีพอรฟิลมีปริมาณผลึกลดลงเมื่อปริมาณพอรฟิลีนออกไซด์ที่ใช้ทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น และผลจากการเติมนาโนโลหะออกไซด์ในฟิล์มแปงทำให้ปริมาณผลึกลดลงเช่นกัน

5.1.4 จากการวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยา พบว่าฟิล์มแปงไฮดรอกซีพอรฟิลมีลักษณะเรียบขึ้น นอกจากนี้การเติมนาโนโลหะออกไซด์ยังคงแสดงสภาพพื้นผิวไม่แตกต่างจากฟิล์มแปงที่ไม่มีการเติมนาโนโลหะออกไซด์ และมีการกระจายตัวที่ดีในเมทริกซ์แปงที่มีการเติมอนุภาคนาโนโลหะออกไซด์ที่ปริมาณ 2% และที่ปริมาณ 5% ของการเติมอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์

5.1.5 จากการวิเคราะห์ปริมาณการดูดซับความชื้น พบว่าฟิล์มแปงไฮดรอกซีพอรฟิลมีแนวโน้มในการดูดซับความชื้นเพิ่มมากขึ้น เมื่อปริมาณพอรฟิลีนออกไซด์เพิ่มขึ้น และจากการเติมนาโนโลหะออกไซด์ พบว่าการดูดซับความชื้นมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย

5.1.6 จากการทดสอบการหาอัตราการซึมผ่านไอน้ำ พบว่าฟิล์มแบง์ไฮดรอกซีพอรอฟิลมีแนวโน้มในการซึมผ่านไอน้ำสูงขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณพรอพิลีนออกไซด์ และจากการเติมอนุภาคนาโนโลหะออกไซด์ พบว่าอัตราการซึมผ่านไอน้ำลดลง โดยนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ปริมาณ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักมีประสิทธิภาพในการลดอัตราการซึมผ่านไอน้ำได้ดีที่สุด

5.1.7 จากการทดสอบสมบัติเชิงกล พบว่าฟิล์มแบง์ไฮดรอกซีพอรอฟิลค่าความแข็งแรงดึงและมอดุลัสที่ลดลง และค่าการดึงยืดที่สูงขึ้น เมื่อปริมาณพรอพิลีนออกไซด์เพิ่มขึ้น และจากการเติมอนุภาคนาโนโลหะออกไซด์ พบว่าค่าความแข็งแรงดึงและมอดุลัสลดลง ในขณะที่ค่าการดึงยืดที่สูงขึ้น และการเพิ่มปริมาณโลหะออกไซด์ทำให้ความแข็งแรงดึงและมอดุลัสมีค่าเพิ่มขึ้น

5.1.8 จากการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน พบว่าอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนลดลงเมื่อปริมาณพรอพิลีนออกไซด์เพิ่มขึ้น ในทางกลับกันการเติมอนุภาคนาโนโลหะออกไซด์พบว่า อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนสูงขึ้น โดยฟิล์มแบง์ที่เติมอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ปริมาณ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักมีอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนสูงที่สุด

5.1.9 จากการวิเคราะห์ความเปลี่ยนแปลงของสี พบว่าฟิล์มแบง์ไฮดรอกซีพอรอฟิลให้ค่าความสว่าง และค่าความขาวลดลงในขณะที่ความสดใสเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณพรอพิลีนออกไซด์เพิ่มขึ้น และเมื่อมีการเติมอนุภาคนาโนโลหะออกไซด์ในปริมาณที่เพิ่มขึ้น พบว่าฟิล์มมีความสว่าง และค่าความขาวเพิ่มขึ้น ในขณะที่ความสดใสลดลง ในส่วนของการเปลี่ยนแปลงของสีในโทนแดง/เขียว และเหลือง/น้ำเงินไม่มีการเปลี่ยนแปลงในฟิล์มแบง์ทุกสูตร

5.1.10 จากการทดสอบการต้านเชื้อจุลินทรีย์ของฟิล์มแบง์ พบว่ามีเพียงฟิล์มแบง์ที่ทำการเติมอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ภายใต้รังสียูวี สามารถแสดงระยาะการต้านเชื้อแบคทีเรียแกรมบวก *Staphylococcus aureus* และที่ปริมาณ 5% การระยาะการต้านเชื้อแบคทีเรียได้มากที่สุด

5.1.11 จากผลการทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดิน พบว่าฟิล์มแบง์ที่ทำการเติมอนุภาคนาโนโลหะออกไซด์สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ไม่แตกต่างจากฟิล์มแบง์ที่ไม่มีการเติมอนุภาคนาโนโลหะออกไซด์

จากการทดสอบสมบัติของฟิล์มแบง์ทุกสูตรในงานวิจัยนี้ สามารถสรุปว่า ฟิล์มตัดแปรและฟิล์มตัดแปรเติมนาโนโลหะออกไซด์ให้สมบัติเชิงกลที่ใกล้เคียงกับฟิล์มยึดสำหรับห่ออาหาร โดยฟิล์มแบง์ไฮดรอกซีพอรอฟิลมีสมบัติความยืดหยุ่นที่ดีและมีความโปร่งแสง เหมาะสำหรับการใช้งานที่ต้องการให้เห็นตัว

สินค้าได้ชัดเจน โดยที่สินค้านั้นต้องไม่ว่องไวต่อความชื้น ซึ่งปริมาณพรอพิลีนออกไซด์ที่ปริมาณ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ให้สมบัติดังกล่าวดีที่สุด และเมื่อเติมอนุภาคนาโนโลหะออกไซด์พบว่า สมบัติของฟิล์มมีความยืดหยุ่นเพิ่มมากยิ่งขึ้น อัตราการซึมผ่านของไอน้ำ และการดูดซับความชื้นลดลง ช่วยป้องกันสินค้าจากความชื้นได้ดี เนื่องจากสมบัติเชิงกลของ HPS10 และ HPS20 ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ และฟิล์มที่ทำการเติมนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ 5% ให้สมบัติดังกล่าวดีที่สุดทำให้ฟิล์ม HPS10ZnO5% ให้สมบัติโดยรวมดีที่สุด

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

จากผลการทดลองเพื่อศึกษาสมบัติแป้งไฮดรอกซีพรอพิลเสริมอนุภาคนาโนโลหะออกไซด์สามารถนำไปพัฒนาและปรับปรุงให้ดีขึ้นได้ดังนี้

1. ศึกษาการดัดแปรร่วมกับแป้งดัดแปรอื่นๆ ซึ่งอาจทำให้แป้งที่ได้มีสมบัติเชิงกล (ค่าความแข็งแรงดึง) ที่ดีขึ้น เช่น การดัดแปรแป้งไฮดรอกซีพรอพิลร่วมกับกรดโดยการเชื่อมโยงด้วยบอแรกซ์
2. เพิ่มประสิทธิภาพการต้านทานเชื้อจุลินทรีย์ของนาโนโลหะออกไซด์ทั้ง 2 ชนิดโดยการเจือด้วยโลหะต่าง ๆ เช่น เงิน เหล็ก และดีบุก โดยโลหะเหล่านี้จะป้องกันไม่ให้อิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ไปยังแถบการนำไฟฟ้ากลับสู่สภาพเดิมหรือ รีคอมบิเนชัน (Recombination) ส่งผลให้อิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นสามารถเกิดกระบวนการการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงได้มากขึ้น [53]
3. ศึกษาการใช้สารสกัดจากธรรมชาติที่มีสมบัติในการต้านเชื้อแบคทีเรียร่วมกับฟิล์มแป้งดัดแปรไฮดรอกซีพรอพิลเพื่อช่วยให้สมบัติการต้านเชื้อดีขึ้น เช่น สารสกัดจากอบเชย สารสกัดจากขมิ้น เป็นต้น [52]
4. ควรศึกษาการเพิ่มปริมาณโลหะออกไซด์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการต้านเชื้อแบคทีเรียแกรมบวกและแกรมลบ

## เอกสารอ้างอิง

- [1] พลาสติกชีวภาพ (Bioplastic). [Online]. Available: <http://www.thaigoodvie w.com/node/17034>. สืบค้นข้อมูลวันที่ 9/ธ.ค./62.
- [2] ภัตตรา มณีศรีรัชฎ์. 2542. “การปรับปรุงคุณสมบัติทางการบรรจุของวัสดุขึ้นรูปจากแป้งมันสำปะหลัง.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต คณะวิทยาศาสตร์การอาหาร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [3] บงกช ชื่นมมงคล. 2548. “การตัดแปรแป้งพุดรักษาгинได้ด้วยวิธีไฮดรอกซีพรอพิลเลชัน.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต คณะทรัพยากรชีวภาพและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- [4] Mukesh, A. Andrij, P.Nick, E. Z. Smrati, G. Juergen, P. Frank, S. and Manfred, S. 2007. “Polystyrene-ZnO Composite Particles with Controlled Morphology.” *Chemistry of materials*. 19: 1845-1852.
- [5] Mahmoud, H. and Seid, M. J. 2017. “Inorganic and metal nanoparticles and their antimicrobial activity in food packaging applications.” *Critical Reviews in Microbiology*. 44: 161-181.
- [6] Thewika, W. and Piyarat, S. 2015. “Characteristics and properties of hydroxypropylated rice starch based biodegradable films.” *Food Hydrocolloids*. 50: 54-64.
- [7] กิตติชัย ศรีสำแดง. 2562. “สมบัติของฟิล์มพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพจากแป้งข้าวเจ้าเชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก และใช้อนุภาคโลหะออกไซด์เป็นสารต้านเชื้อแบคทีเรีย.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [8] รู้จัก ‘ไบโอพลาสติก’พลาสติกย่อยสลายได้. [online]. Available: <https://cheechongruay.smartsme.co.th/content/4084>. สืบค้นข้อมูลวันที่ 9/ธ.ค./62.
- [9] Flour / แป้ง. [Online]. Available: <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/0324/flour%E0%B9%81%E0%B8%9B%E0%B9%89%E0%B8%87>. สืบค้นข้อมูลวันที่ 9/ธ.ค./62.

- [10] Tester, R. F. Karkalas, J. and Qi, X. 2004. "Starch-composition, fine structure and architecture." *Journal of Cereal Science*. 39: 151-165.
- [11] Swinkels, J. J. M. 1985. "Sources of starch, its chemistry and physics." *Starch Conversion Technology*. 15-45.
- [12] Bonding between amylopectin and amylose. [Online]. Available: <https://chemistry.stackexchange.com/questions/58080/bonding-between-amylopectin-and-amylose>. สืบค้นข้อมูลวันที่ 9/ธ.ค./62.
- [13] Sarko, A. and Wu, H. C. H. 1978. "The Crystal Structures of A-, B- and C-Polymorphs of Amylose and Starch." *Starch/Stärke*. 30(3): 73-78.
- [14] Romero-Bastida, C. A. Bello-Pérez, L. A. García, M. A. Martino, M. N. Solorza-Feria, J. and Zaritzky, N. E. 2005. "Physicochemical and microstructural characterization of films prepared by thermal and cold gelatinization from non-conventional sources of starches." *Carbohydrate Polymers*. 60(2): 235-244.
- [15] การเปลี่ยนแปลงของเม็ดแป้งขณะให้ความร้อน [Online]. Available: [www.engin.umich.edu/~potato/starch3.htm](http://www.engin.umich.edu/~potato/starch3.htm). สืบค้นข้อมูลวันที่ 9/ธ.ค./62.
- [16] การคืนตัวของแป้ง [Online]. Available: <http://www.nationalstarch.com>. สืบค้นข้อมูลวันที่ 9/ธ.ค./62.
- [17] Chung-wai, C. and Daniel, S. 2009. "Modification of starches." *Starch Chemistry and Technology*. 629-655.
- [18] Wurzburg, O.B. 1995. "Modified starch." *Polymer International*. 21(1): 87-88.
- [19] สรัญญา กลับนวล. 2559. "อิทธิพลของโลหะเจือต่อสมบัติทางแสงและการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของอนุภาคซิงค์ออกไซด์เตรียมด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอล." คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- [20] สิริพร ทองอ่อน. 2559. "การสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์เจือวานาเดียมและไทเทเนียมไดออกไซด์เจือสังกะสีโดยวิธีการโซล-เจล เพื่อสมบัติต้านแบคทีเรีย." คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.

- [21]. สิริพัชร โภยโกโคสววรรค์. 2554. “การสลายสารคาร์บอริลตค่างในน้ำด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะ-ไลซิสโดยใช้แผ่นกรองใยแก้วเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์.” คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [22]. Plasticizer. [Online]. Available: <https://thaipolychemicals.weebly.com/plasticizer.html>. สืบค้นข้อมูลวันที่ 9/ธ.ค./62.
- [23]. Glycerol. [Online]. Available: [http://www.digitalschool.club/digitalschool/science\\_1\\_2\\_2/science2\\_1/more/glycerol\\_2.php](http://www.digitalschool.club/digitalschool/science_1_2_2/science2_1/more/glycerol_2.php). สืบค้นข้อมูลวันที่ 9/ธ.ค./62.
- [24]. ปณิตดา พวงเกษม. 2540. “การเตรียมฟิล์มบริโกลด์จากแป้งมันสำปะหลัง และแนวทางการนำไปใช้ประโยชน์.” คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [25]. รัตนา จินดาพรรณ และ วิไลลักษณ์ ไผ่เพชร. 2549. “อิทธิพลของพลาสติกไซเซอร์ต่อสมบัติทางกายภาพของฟิล์มโปรตีนถั่วเขียว.” วารสารเทคโนโลยีการอาหาร มหาวิทยาลัยสยาม. เล่มที่ 1 หน้า 36-43.
- [26]. Xiuting, H. Zhengyu, J. and Ming, M. 2019. “Improving properties of normal maize starch films using dual-modification: Combination treatment of debranching and hydroxypropylation.” *International Journal of Biological Macromolecules*. 130: 197-202.
- [27]. Marium, S. and Abid, H. 2019 “Physical, thermal, mechanical and barrier properties of pearl millet starch films as affected by levels of acetylation and hydroxypropylation.” *International Journal of Biological Macromolecules*. 124: 209-219.
- [28]. Weiwei, W. Zhenhua, S. and Yong-Cheng, S. 2019. “An improved method to determine the hydroxypropyl content in modified starches by  $^1\text{H}$  NMR.” *Food Chemistry*. 295: 556-562.
- [29]. Xia, C. Feihe, C. Hua, Z. Yichen, Z. Hongsheng, L. and Jie, X. 2019. “Development and characterization of a hydroxypropyl starch/zein bilayer edible film.” *International Journal of Biological Macromolecules*. 141:1175–1182.

- [30] Elham, F. and Abdorreza, M. N. 2014. "Effects of acid-hydrolysis and hydroxypropylation on functional properties of sago starch." *International Journal of Biological Macromolecules*. 68: 251–257.
- [31] Jie, Z. Wei, G. Bin, W. Xuemin, K. Pengfei, L. and Bo, C. 2021. "Preparation and evaluation of starch-based extrusion-blown nanocomposite films incorporated with nano-ZnO and nano-SiO<sub>2</sub>." *International Journal of Biological Macromolecules*. 183:1371-1378.
- [32] Zamiri, R. Zakaria, A. Ahangar, h.A. Darroudi, I. Zakd, A.K. and Drummen Gregor P.C. 2012. "Aqueous starch as a stabilizer in zinc oxide nanoparticle synthesis via laser ablation." *Journal of Alloys and Compounds*. 516:41-48.
- [33] Stahl, H. and McNaught, R. p. 1969. "A Rapid nuclear magnetic resonance method for determining hydroxypropyl group in modified starch." *Cereal chemistry*. 345-350.
- [34] Grey, J. A. and BeMiller, J. N. 2005. "Influence of reaction conditions on the location of reactions in waxy maize starch granules reacted with a propylene oxide analog at low substitution levels." *Carbohydrate Polymers*. 60:147-162.
- [35] Barbara, H. S. 2004. *Infrared Spectroscopy: Fundamentals and Applications*. Sydney: University of Technology.
- [36] พรทิพย์ ก้านสันเทียะ. 2563. "ผลของการตัดแปรแป้งมันสำปะหลังสองขั้นตอนโดยการออกซิเดชัน และการเชื่อมโยงที่มีต่อสมบัติของฟิล์มแป้ง." วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [37] Naradala, J. 2014. "Germination and Growth Characteristics of Mungbean Seeds (*Vigna radiata* L.) affected by Synthesized Zinc Oxide Nanoparticles." *Current Engineering and Technology*. 4:3411-3416.
- [38] Martha, S. J., Mehmet, B. A., Zikri, A. and Ibrahim, O. F. 2017. "Assessment of Crystal Morphology on Uptake, Particle Dissolution, and Toxicity of Nanoscale Titanium Dioxide on *Artemia Salina*." *Nanotoxicology and Nanomedicine*. 2:11-27.

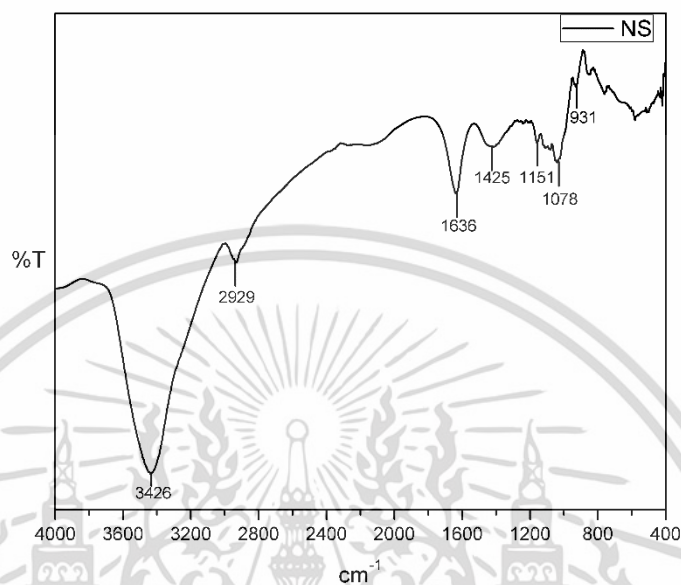
- [39] Thewika, W., Piyarat, S. and Thawien, W. 2015. "Characteristics and properties of hydroxypropylated rice starch based biodegradable films." *Food Hydrocolloids*. 50:54-64.
- [40] Snehal, Y., Chandra, M. and Prakash, M. 2016 "Biosynthesis of Zinc Oxide Nanoparticles Using *Ixora Coccinea* Leaf Extract—A Green Approach." *Synthesis Theory and Applications*. 05:1-14.
- [41] Oleyaei, S.A. Zahedi, Y. Ghanbarzadeh, B. and Moayedi, A.A. 2016. "Modification of physicochemical and thermal properties of starch films by incorporation of TiO<sub>2</sub> nanoparticles." *International Journal of Biological Macromolecules*. 89:256-261.
- [42] Iman, S. G., Faramarz, K., Mohammad, M. and Hossein, Y. 2015. "Preparation of UV-protective kefir/nano-ZnO nanocomposites: Physical and mechanical properties." *International Journal of Biological Macromolecules*. 72:41-46.
- [43] Moura, M. R. D., bustillos, R. J. A., McHugh, T. H., Krochta, J. M. and Mattoso, L. H. C. 2008. "Properties of Novel Hydroxypropyl Methylcellulose Films Containing Chitosan Nanoparticles." *Food Science*. 73:31-37.
- [44] Paulraj, K. and Rhim, J. W. 2014. "Properties and characterization of bionanocomposite films prepared with various biopolymers and ZnO nanoparticles." *Carbohydrate Polymers*. 106:190-199.
- [45] Nooshin, N., Babak, G., Reza, R. M., Mahdi, H. and Véronique, C. 2017. "Preparation and characterization of active emulsified films based on chitosan-carboxymethyl cellulose containing zinc oxide nanoparticles." *International Journal of Biological Macromolecules*. 99:530-538.
- [46] Yan, Z., Tianyi, S., Dashuai, Z., Zaifeng, Shi., Xiaopeng, Z., Chen, L., Lili, W., Junjun, S. and Qiang, L. 2020. "Enhanced photodegradability of PVC plastics film by codoping nano-graphite and TiO<sub>2</sub>." *Polymer Degradation and Stability*. 181:1-8.
- [47] Abdorreza, M. N., Roghayeh, N., Samira, S., Fazilah, A. and Karim, A. A. 2013 "Preparation and characterization of bionanocomposite films filled with nanorod-rich zinc oxide." *Carbohydrate Polymers*. 96:233-239.

- [48] Ximing, W., Ying, Y. H., Yu, K., Brijesh, B. and Michael, R.H. 2016. “Broad-spectrum antimicrobial photocatalysis mediated by titanium dioxide and UVA is potentiated by addition of bromide ion via formation of hypobromite.” *Free Radical Biology and Medicine*. 95:74-81.
- [49] Zhiwei, Z., Huanhuan, C. and Da, W. S. 2018. “Titanium dioxide (TiO<sub>2</sub>) photocatalysis technology for nonthermal inactivation of microorganisms in foods.” *Trends in Food Science & Technology*. 75:23-25.
- [50] เสาวลักษณ์ บุญยอด. 2554. “ปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลติกและพฤติกรรมการฆ่าเชื้อแบคทีเรียของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์บนพอลิเมอร์.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมวัสดุ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- [51] นางลักษณ สุวรรณพินิจ และปรีชา สุวรรณพินิจ. 2541. ลักษณะและโครงสร้างละเอียดของแบคทีเรีย: จุลชีววิทยาทั่วไป. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. จุฬากานต์ บุญมี. 2555. “พลาสติกชีวภาพ (Biodegradable plastics) ทางเลือกที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม.” วารสารสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. เล่มที่ 2 หน้า 15-19.
- [52] Amin, S. A., Pazouki, M. and Hosseinnia, A. (2009). “Synthesis of TiO<sub>2</sub>-Ag nanocomposite with sol-gel method and investigation of its antibacterial activity against *E.Coli*.” *Powder Technology*. 196: 241-245.
- [53] วชิรินทร์ รังสีภาณุรัตน์, พัชรี กัมมารเจษฎากุล และ อิสยา จันทรวิธานุชิตไ 2559. “ฤทธิ์ของสารสกัดสมุนไพรไทย 10 ชนิดต่อการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย *Staphylococcus aureus* ATCC 25923, *Bacillus cereus* และ *Escherichia Coli* ATCC 25922.” วารสารวิชาการ มหาวิทยาลัยหัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ. เล่มที่ 38 หน้า 35-48.

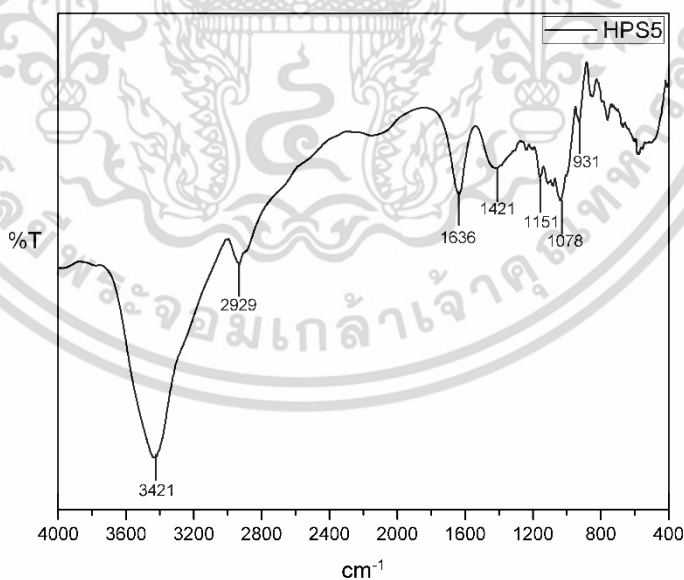


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก

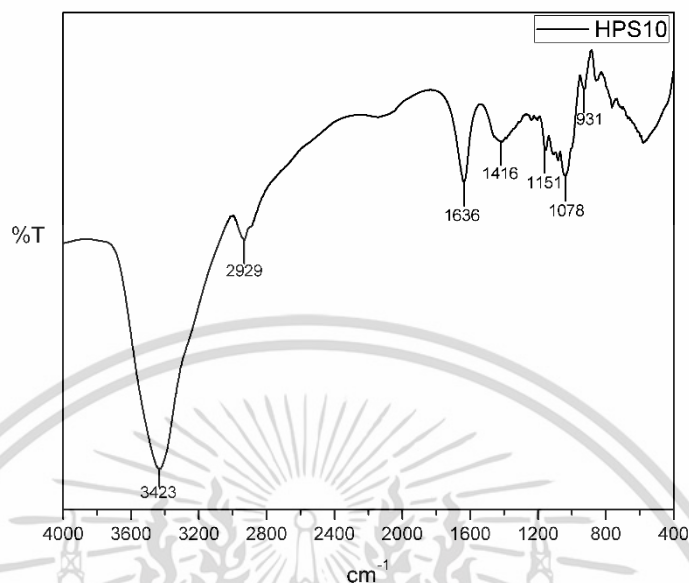


รูปที่ ก.1 อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลัง

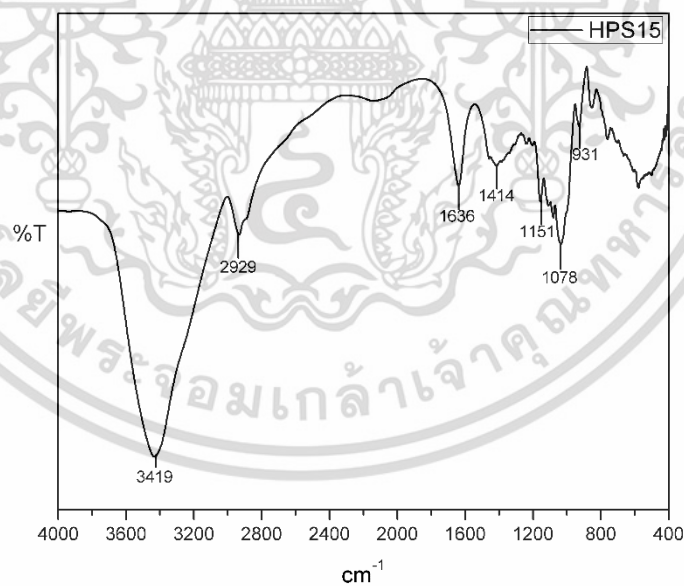


รูปที่ ก.2 อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มแป้งไฮดรอกซีพอฟิล 5 wt%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

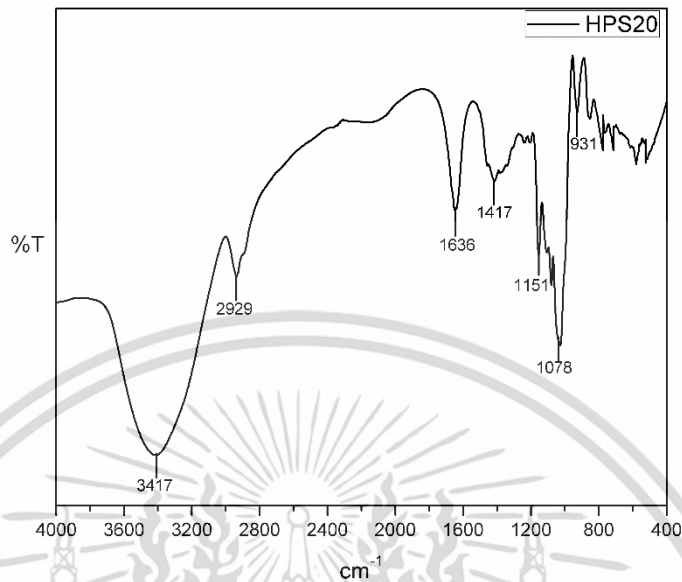


รูปที่ ก.3 อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มแป้งไฮดรอกซีพรอพิล 10 wt%

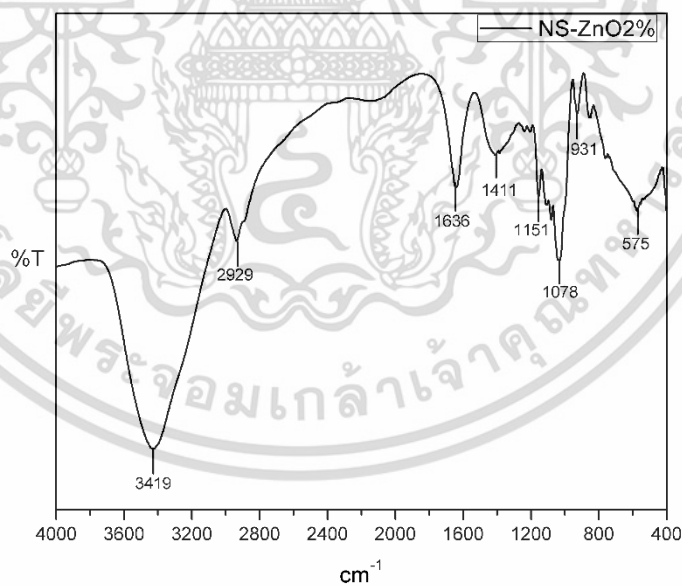


รูปที่ ก.4 อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มแป้งไฮดรอกซีพรอพิล 15 wt%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

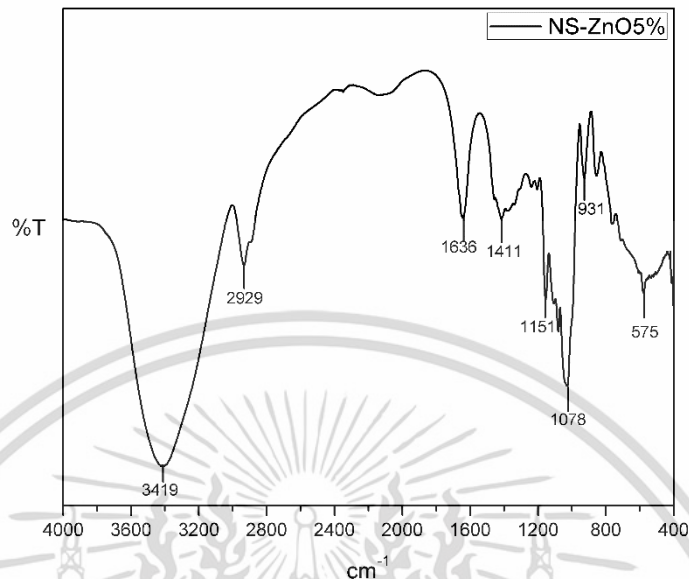


รูปที่ ก.5 อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มแป้งไฮดรอกซีพวอฟิล 20 wt%

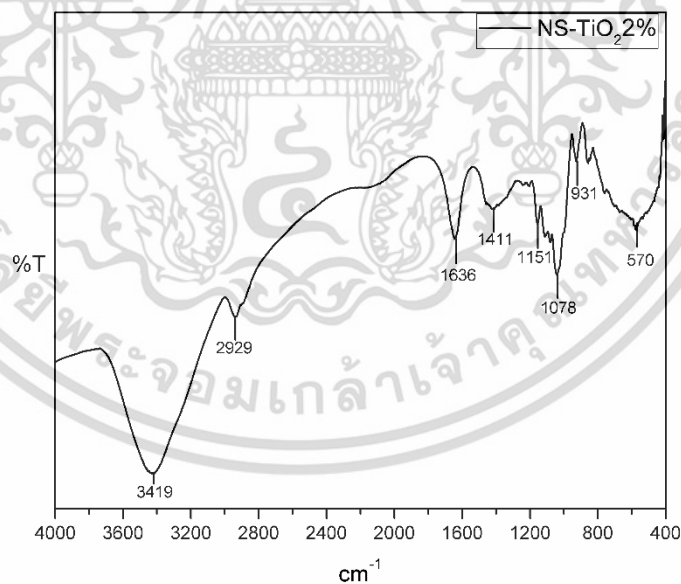


รูปที่ ก.6 อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังและใส่อนุภาคซิงค์ออกไซด์ 2 wt%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

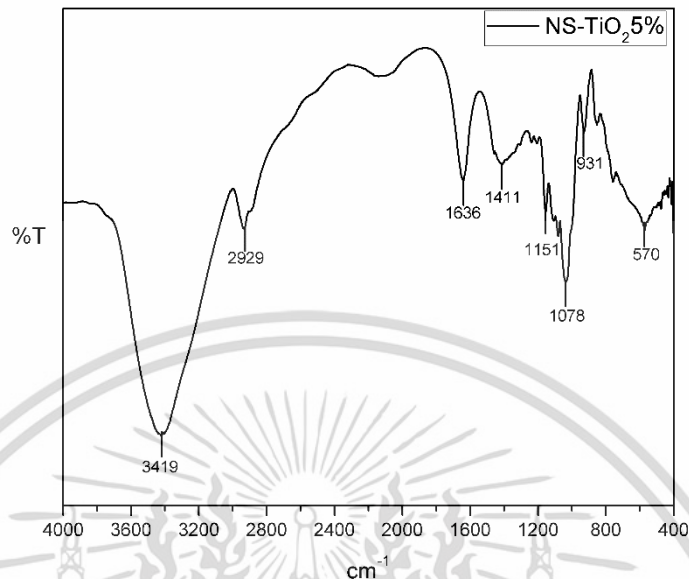


รูปที่ ก.7 อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังและใส่อนุภาคซิงค์ออกไซด์ 5 wt%

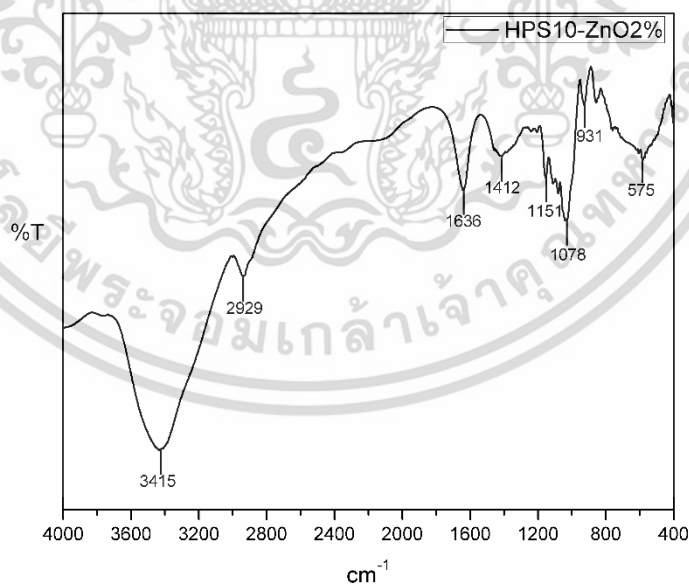


รูปที่ ก.8 อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังและใส่อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ 2 wt%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

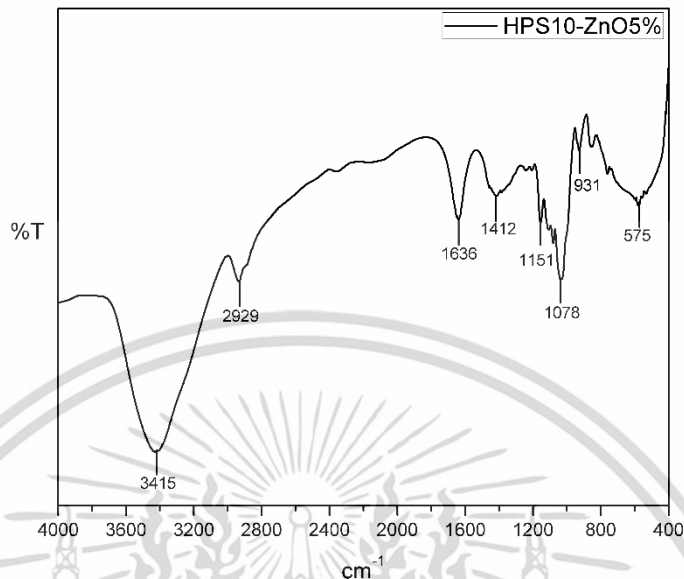


รูปที่ ก.9 อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังและใส่อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ 5 wt%

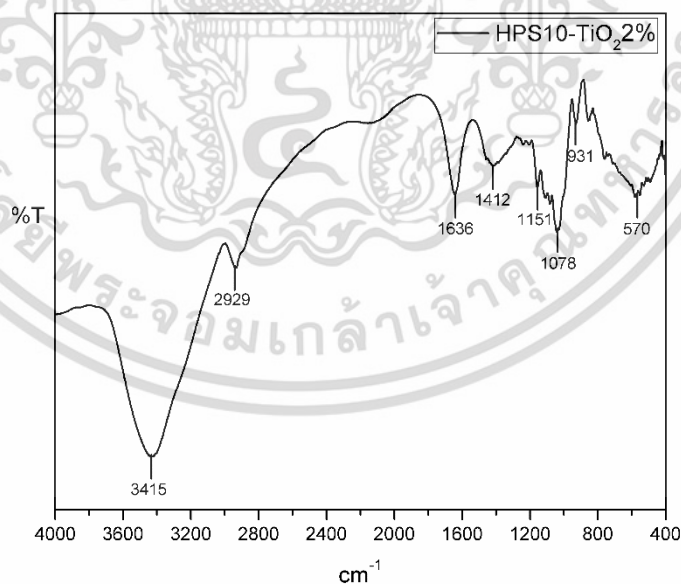


รูปที่ ก.10 อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มแป้งไฮดรอกซีพอฟิล 10 wt%และใส่อนุภาคซิงค์ออกไซด์ 2 wt%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

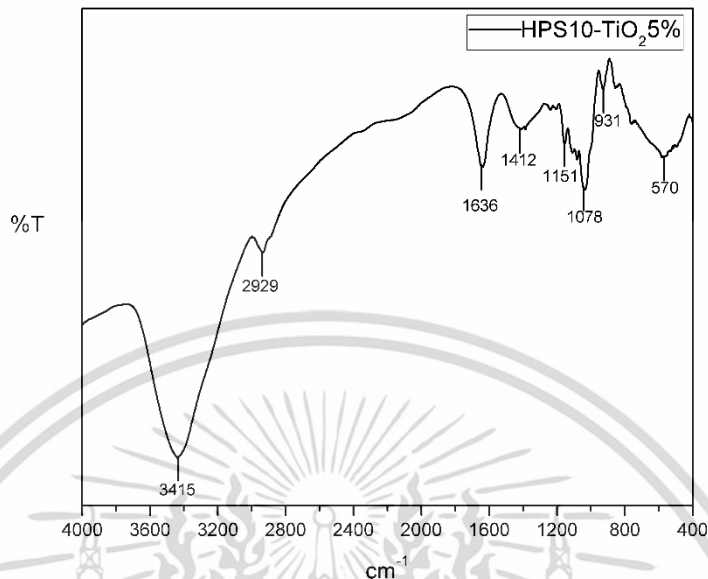


รูปที่ ก.11 อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มแข็งไฮดรอกซีพอรอฟิล 10 wt% และใส่อนุภาคซิงค์ออกไซด์ 5 wt%

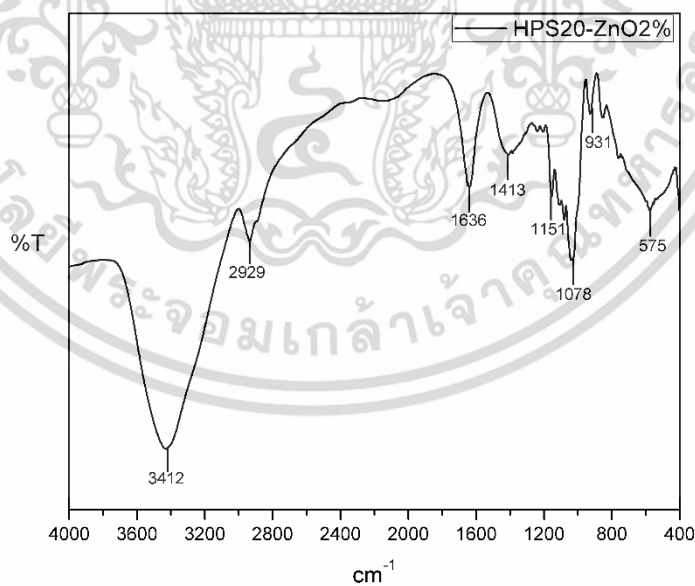


รูปที่ ก.12 อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มแข็งไฮดรอกซีพอรอฟิล 10 wt% และใส่อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ 2 wt%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

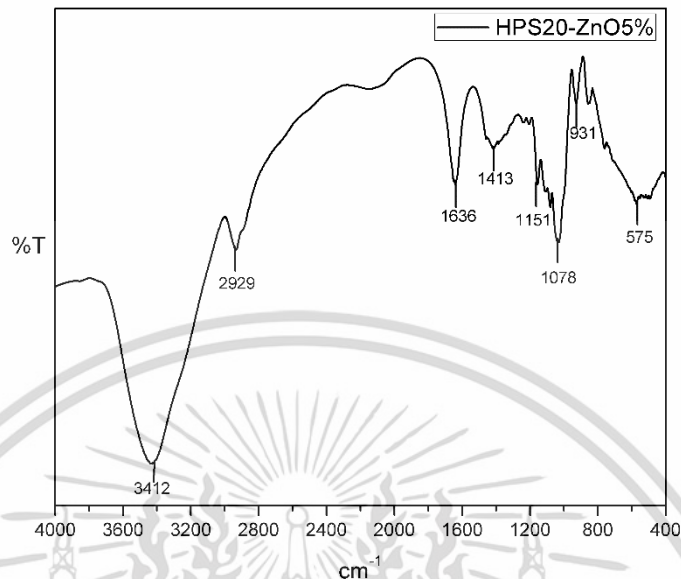


รูปที่ ก.13 อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มแข็งไฮดรอกซีพอรอพิล 10 wt%และใส่อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ 5 wt%

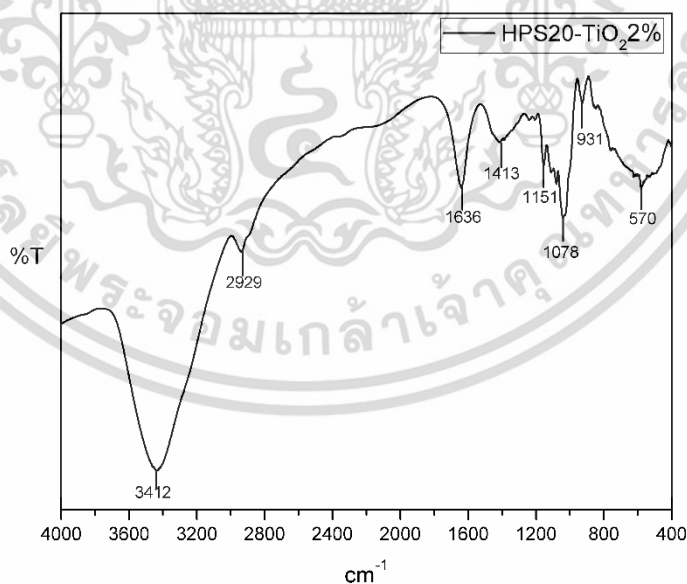


รูปที่ ก.14 อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มแข็งไฮดรอกซีพอรอพิล 20 wt%และใส่อนุภาคซิงค์ออกไซด์ 2 wt%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

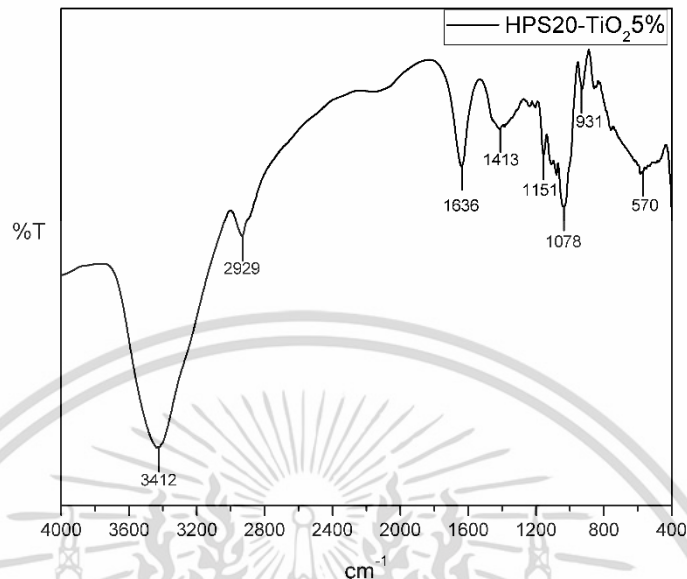


รูปที่ ก.15 อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มแข็งไฮดรอกซีพอรอฟิล 20 wt%และใส่อนุภาคซิงค์ออกไซด์ 5 wt%



รูปที่ ก.16 อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มแข็งไฮดรอกซีพอรอฟิล 20 wt%และใส่อนุภาคไทเทเนียม-ไดออกไซด์ 2 wt%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.17 อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มแข็งไฮดรอกซีฟรอฟิล 20 wt% และใส่อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ 5 wt%

## ภาคผนวก ข

ตารางที่ ข.1 เปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังและฟิล์มแป้งไฮดรอกซีพวอฟิลที่ปริมาณต่างๆ ภายหลังจากการดูดซับความชื้นในระบบปิดเป็นเวลา 7 วัน

วัน	เปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้น				
	NS	HPS5	HPS10	HPS15	HPS20
1	13.36	15.05	16.13	17.25	19.58
2	17.97	19.87	20.83	22.80	23.47
3	19.50	22.97	23.34	25.63	27.50
4	20.29	23.12	24.95	26.59	28.85
7	22.65	27.15	29.84	30.49	32.11

ตารางที่ ข.2 เปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของฟิล์มแป้ง NS ที่เติมนาโนโลหะออกไซด์ที่ปริมาณต่างๆ ภายหลังจากการดูดซับความชื้นในระบบปิดเป็นเวลา 7 วัน

วัน	เปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้น				
	NS	NS-ZnO2%	NS-ZnO5%	NS-TiO <sub>2</sub> 2%	NS-TiO <sub>2</sub> 5%
1	13.36	10.64	9.28	11.40	9.44
2	17.97	14.50	12.68	15.24	13.59
3	19.50	16.25	13.62	17.73	15.58
4	20.29	16.27	14.57	18.83	16.02
7	22.65	19.50	18.17	20.04	19.92

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

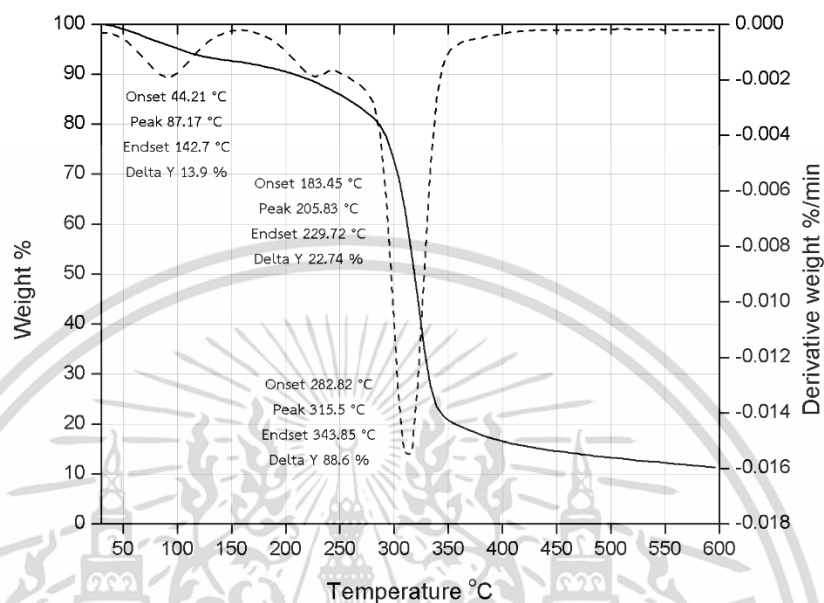
ตารางที่ ข.3 เปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของฟิล์มแบ่ง HPS10 ที่เติมนาโนโลหะออกไซด์ที่ปริมาณต่างๆ ภายหลังจากการดูดซับความชื้นในระบบปิดเป็นเวลา 7 วัน

วัน	เปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้น				
	HPS10	HPS10-ZnO2%	HPS10-ZnO5%	HPS10 TiO <sub>2</sub> 2%	HPS10-TiO <sub>2</sub> 5%
1	16.13	11.44	10.82	12.58	10.96
2	20.83	15.77	13.24	16.47	14.39
3	23.34	17.75	15.36	19.87	16.38
4	24.95	18.59	16.98	20.72	18.12
7	29.84	23.93	22.88761	25.10	23.65

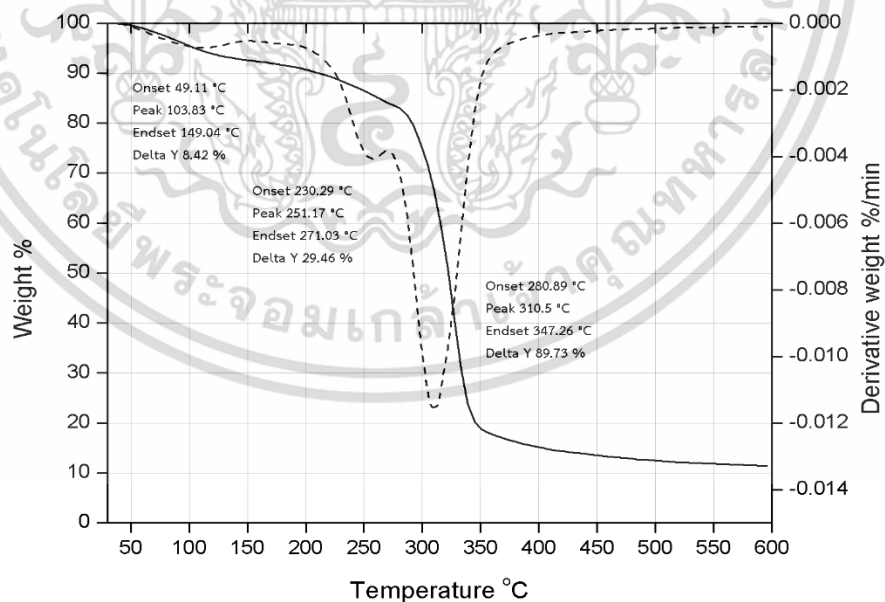
ตารางที่ ข.4 เปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของฟิล์มแบ่ง HPS20 ที่เติมนาโนโลหะออกไซด์ที่ปริมาณต่างๆ ภายหลังจากการดูดซับความชื้นในระบบปิดเป็นเวลา 7 วัน

วัน	เปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้น				
	HPS20	HPS20-ZnO2%	HPS20-ZnO5%	HPS20 TiO <sub>2</sub> 2%	HPS20-TiO <sub>2</sub> 5%
1	19.58	12.44	11.02	13.44	12.02
2	23.47	16.40	14.08	17.40	15.08
3	27.50	18.66	15.06	19.65	18.00
4	28.85	19.57	16.57	20.45	19.00
7	32.11	25.66	24.59	26.66	25.59

## ภาคผนวก ค

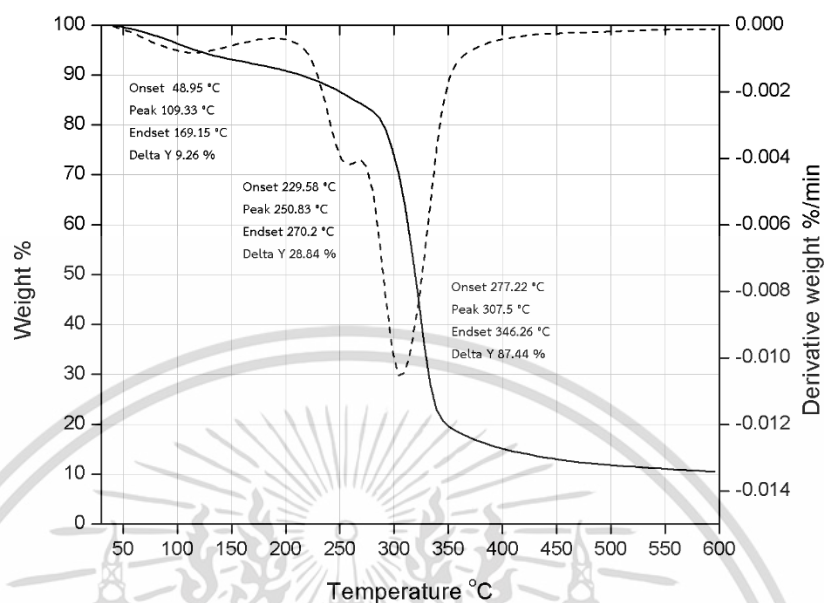


รูปที่ ค.1 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลัง

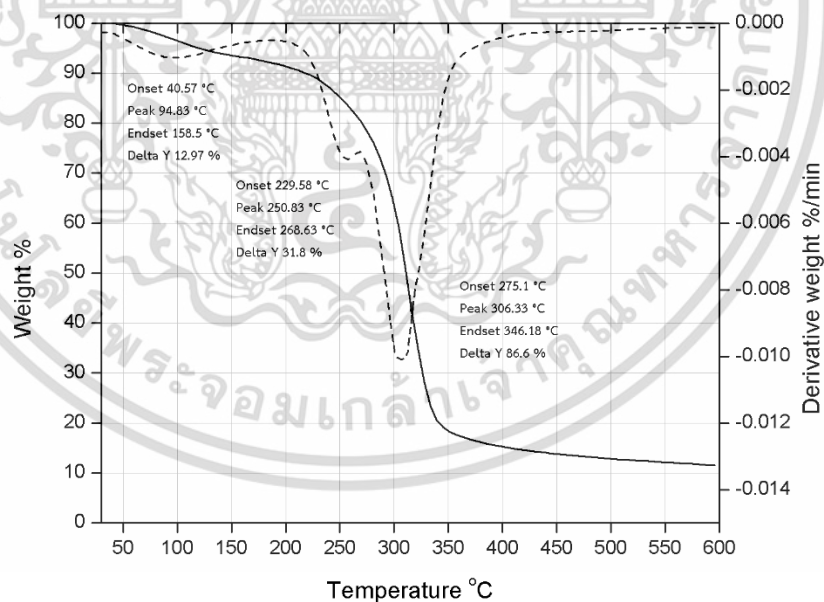


รูปที่ ค.2 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของฟิล์มแป้งไฮดรอกซีพรอพิล 5 wt%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

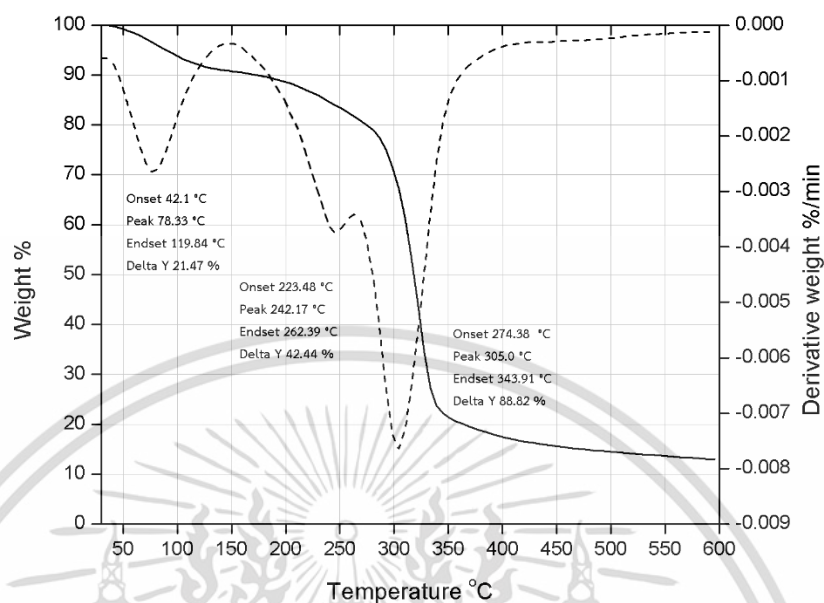


รูปที่ ค.3 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของฟิล์มแบ่งไฮดรอกซีฟอสเฟต 10 wt%

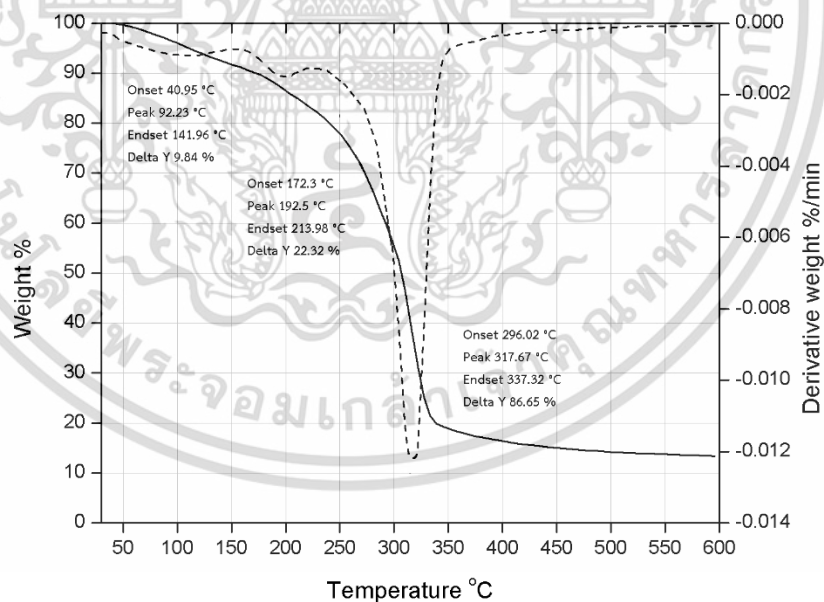


รูปที่ ค.4 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของฟิล์มแบ่งไฮดรอกซีฟอสเฟต 15 wt%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

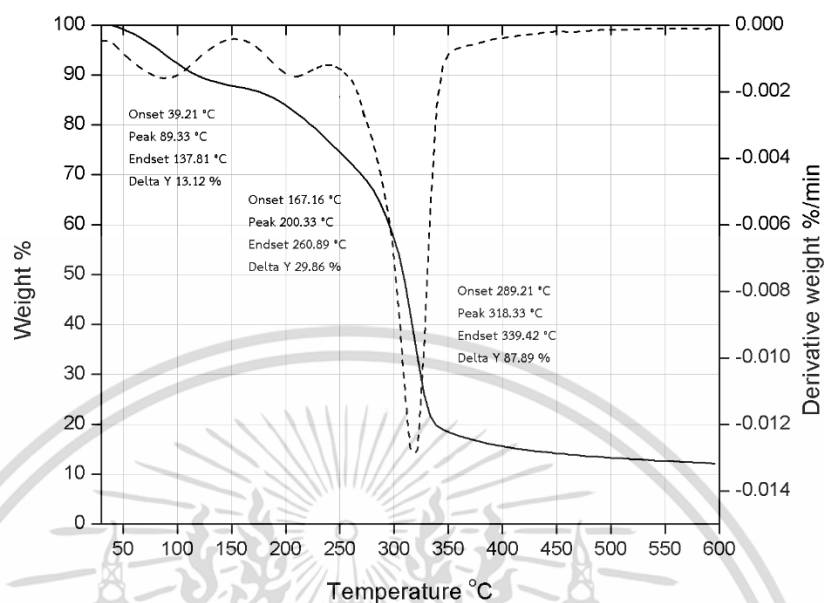


รูปที่ ค.5 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของฟิล์มแป้งไฮดรอกซีพอฟิล 20 wt%

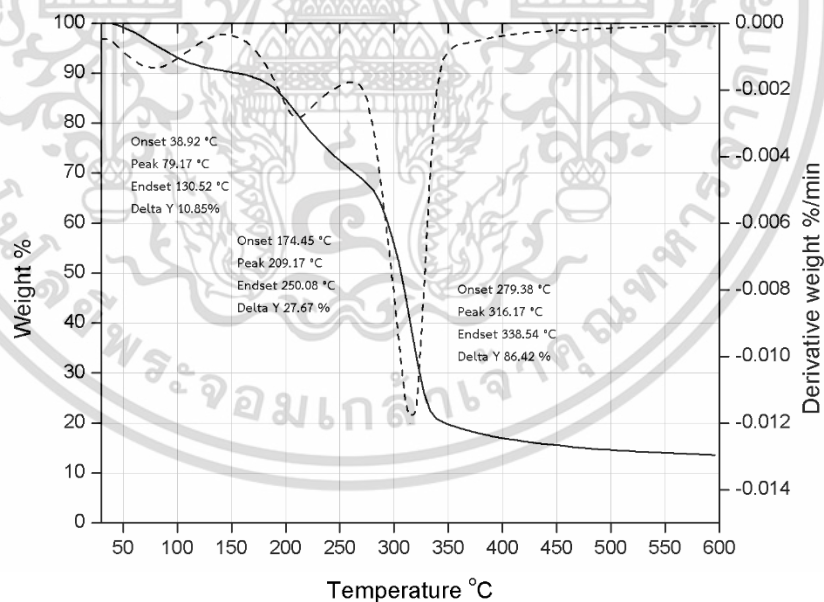


รูปที่ ค.6 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังและใส่อนุภาคซิงค์ออกไซด์ 2 wt%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

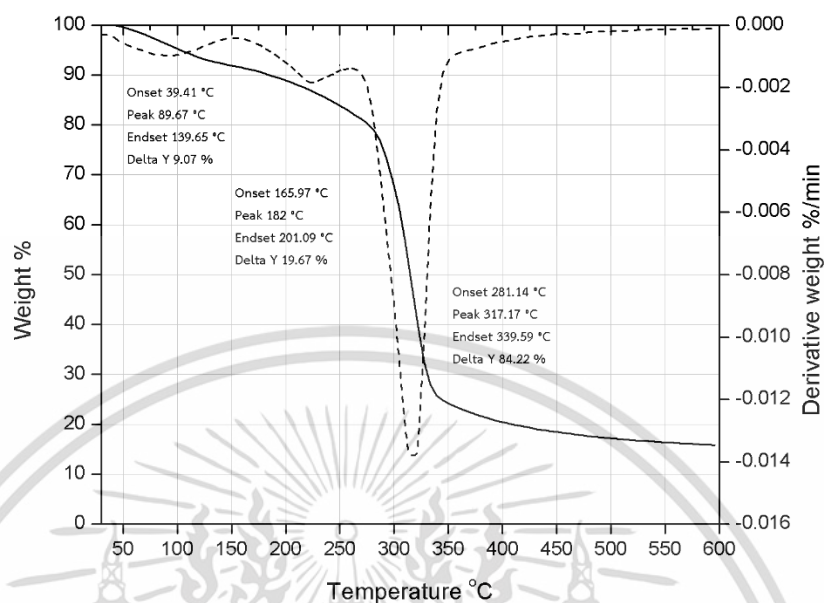


รูปที่ ค.7 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังและใส่อนุภาคซิงค์ออกไซด์ 5 wt%

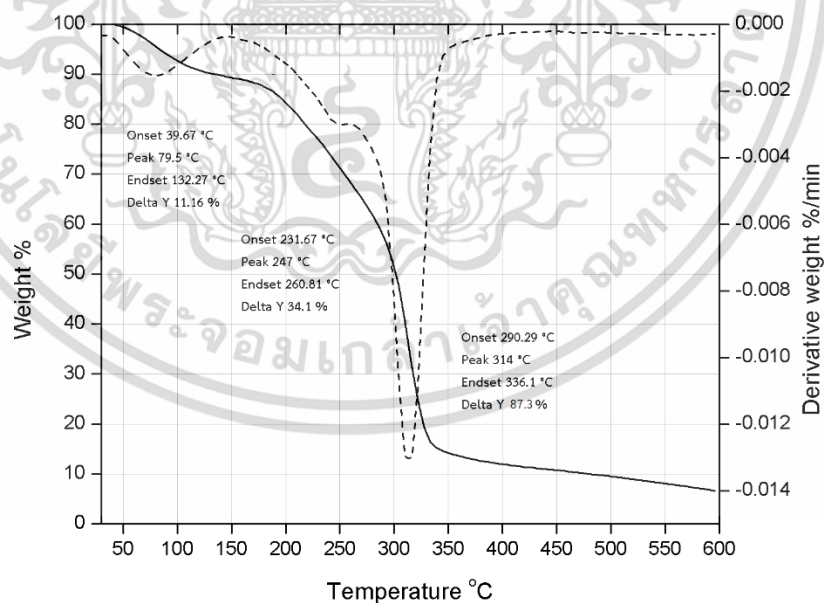


รูปที่ ค.8 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังและใส่อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ 2 wt%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

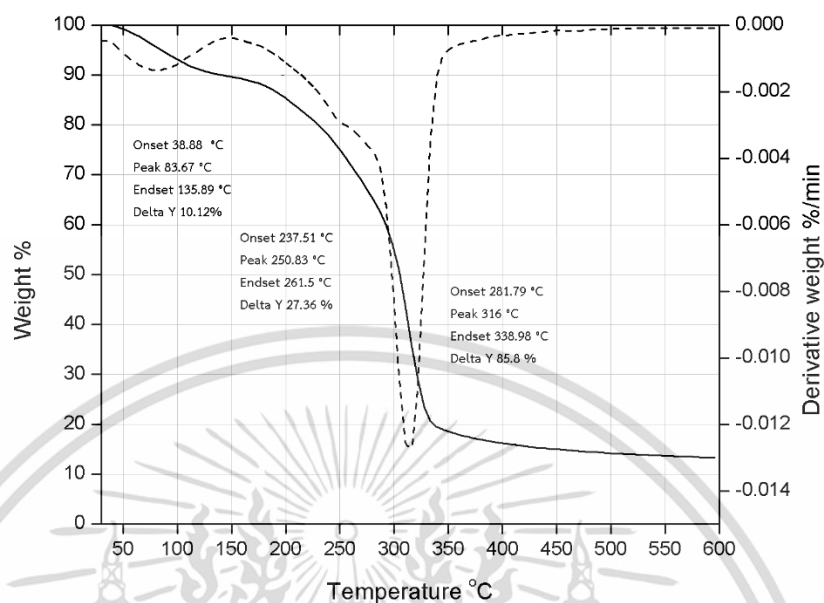


รูปที่ ค.9 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังและใส่อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ 5 wt%

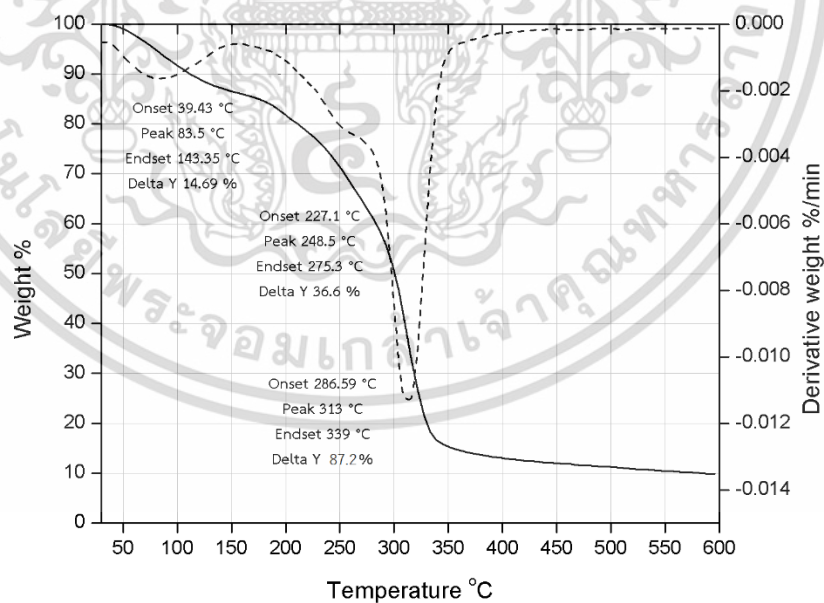


รูปที่ ค.10 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของฟิล์มแป้งไฮดรอกซีพรีอิล 10 wt% และใส่อนุภาคซิงค์-ออกไซด์ 2 wt%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

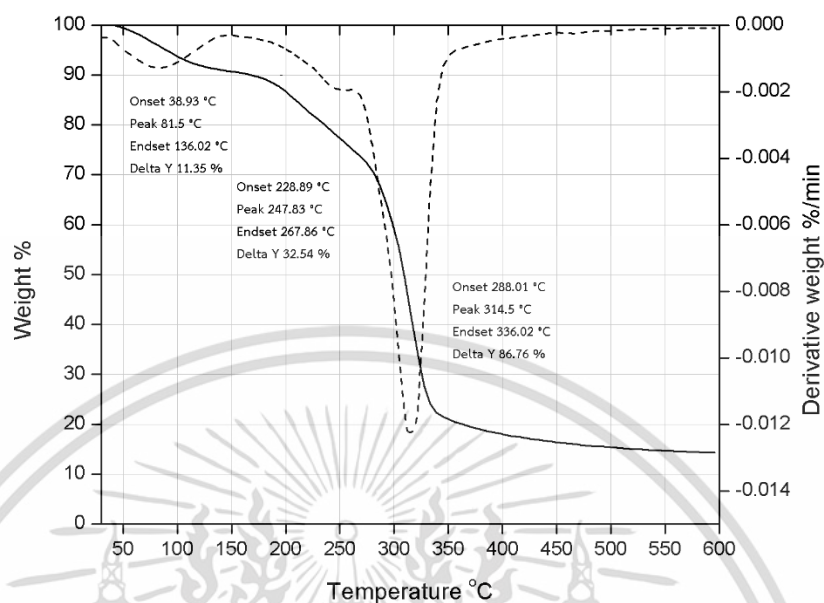


รูปที่ ค.11 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของฟิล์มแข็งไฮดรอกซีพรอพิล 10 wt% และใส่อนุภาคซิงค์ออกไซด์ 5 wt%

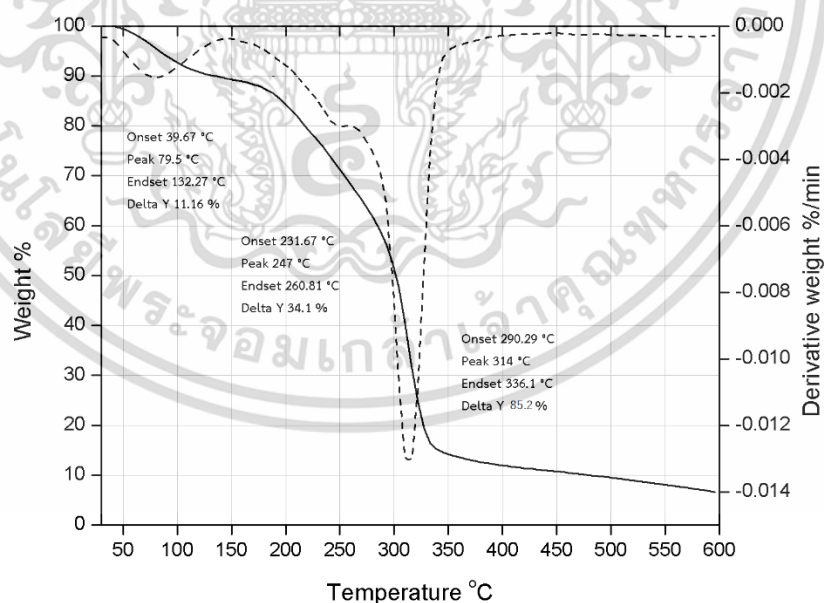


รูปที่ ค.12 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของฟิล์มแข็งไฮดรอกซีพรอพิล 10 wt% และใส่อนุภาคไทเทเนียมออกไซด์ 2 wt%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

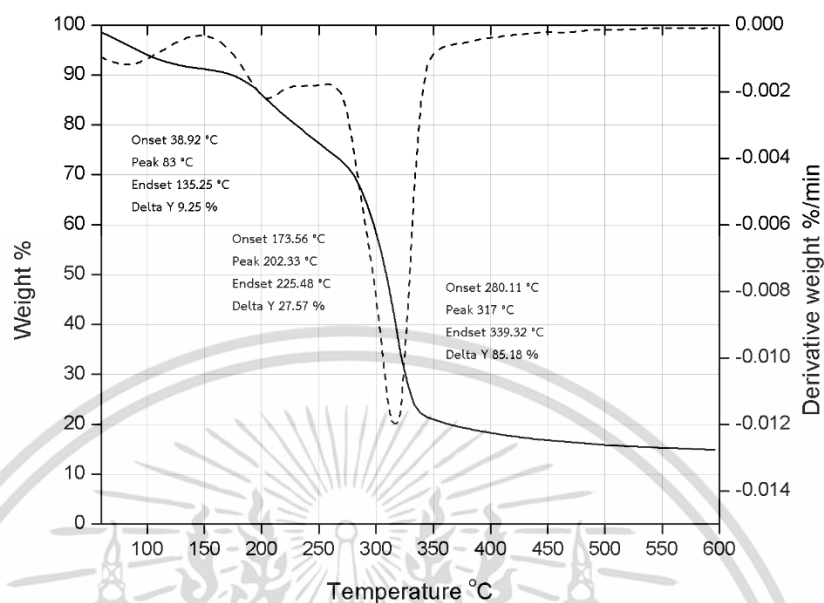


รูปที่ ค.13 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของฟิล์มแบง์ไฮดรอกซีพรอพิล 10 wt%และใส่นูภาคไทเทเนียมออกไซด์ 5 wt%

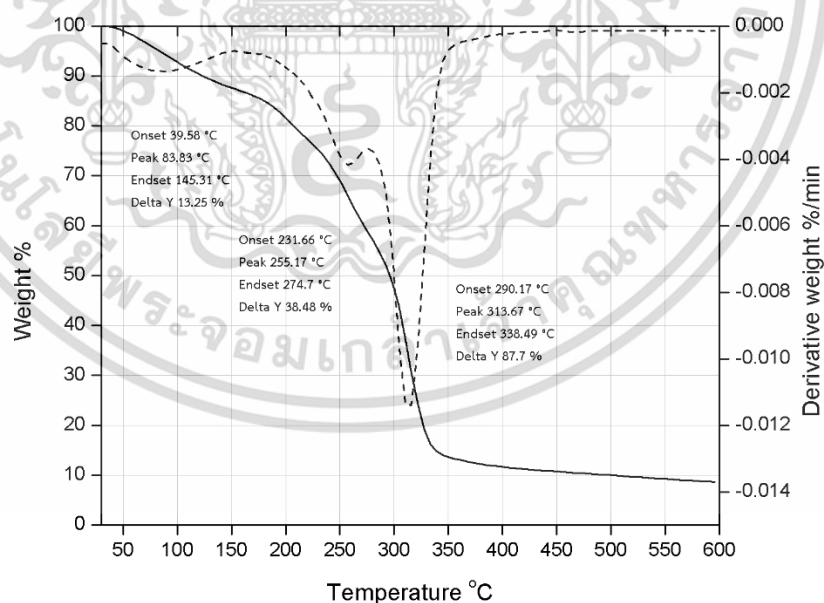


รูปที่ ค.14 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของฟิล์มแบง์ไฮดรอกซีพรอพิล 20 wt%และใส่นูภาคซิงค์ออกไซด์ 2 wt%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

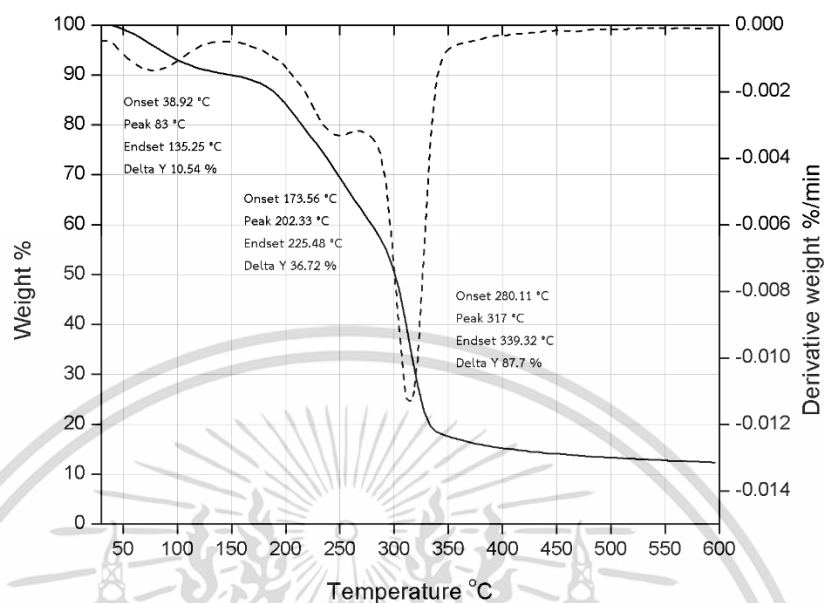


รูปที่ ค.15 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของฟิล์มแป้งไฮดรอกซีพรอพิล 20 wt%และใส่อนุภาคซิงค์-ออกไซด์ 5 wt%



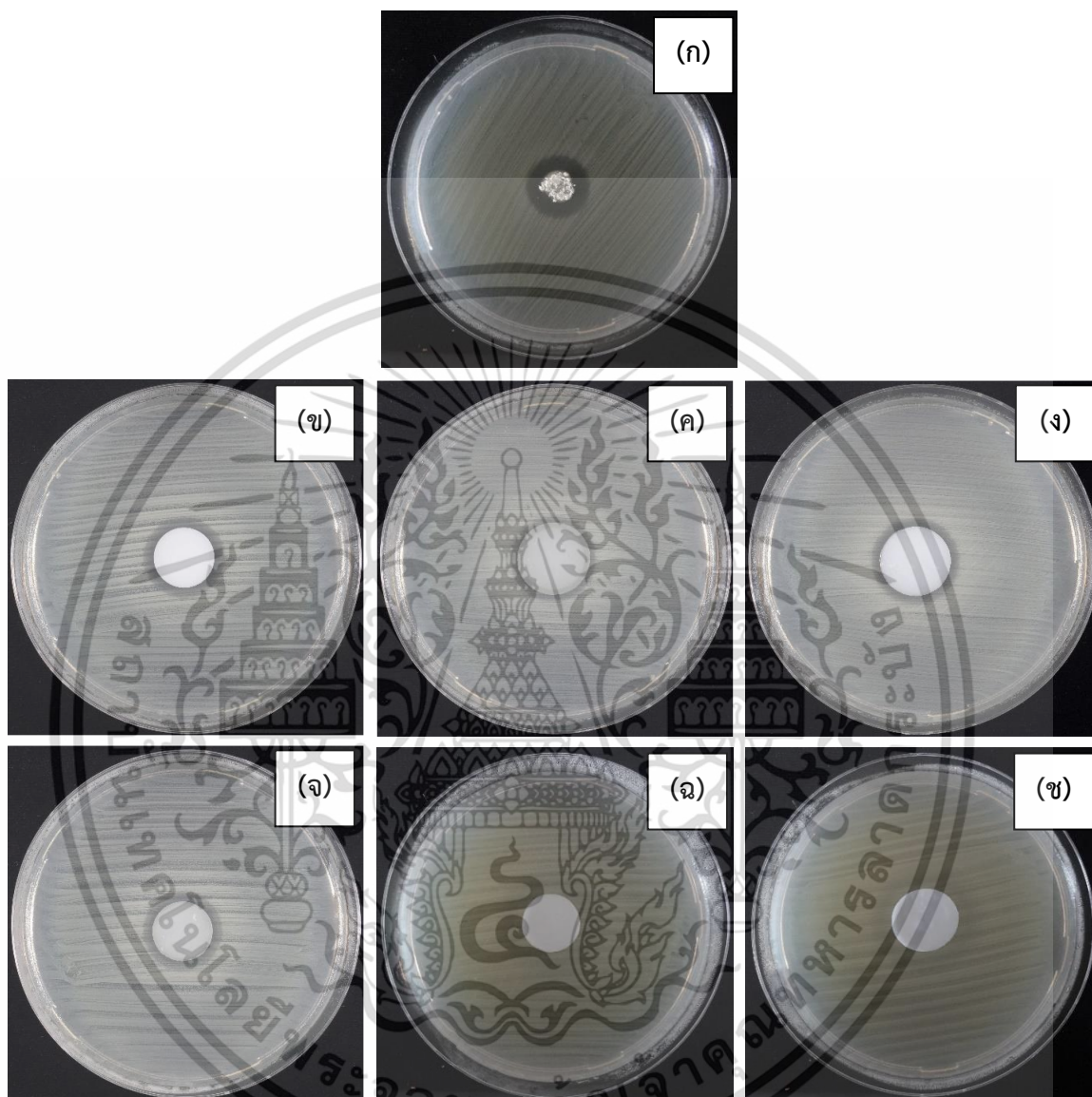
รูปที่ ค.16 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของฟิล์มแป้งไฮดรอกซีพรอพิล 20 wt%และใส่อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ 2 wt%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

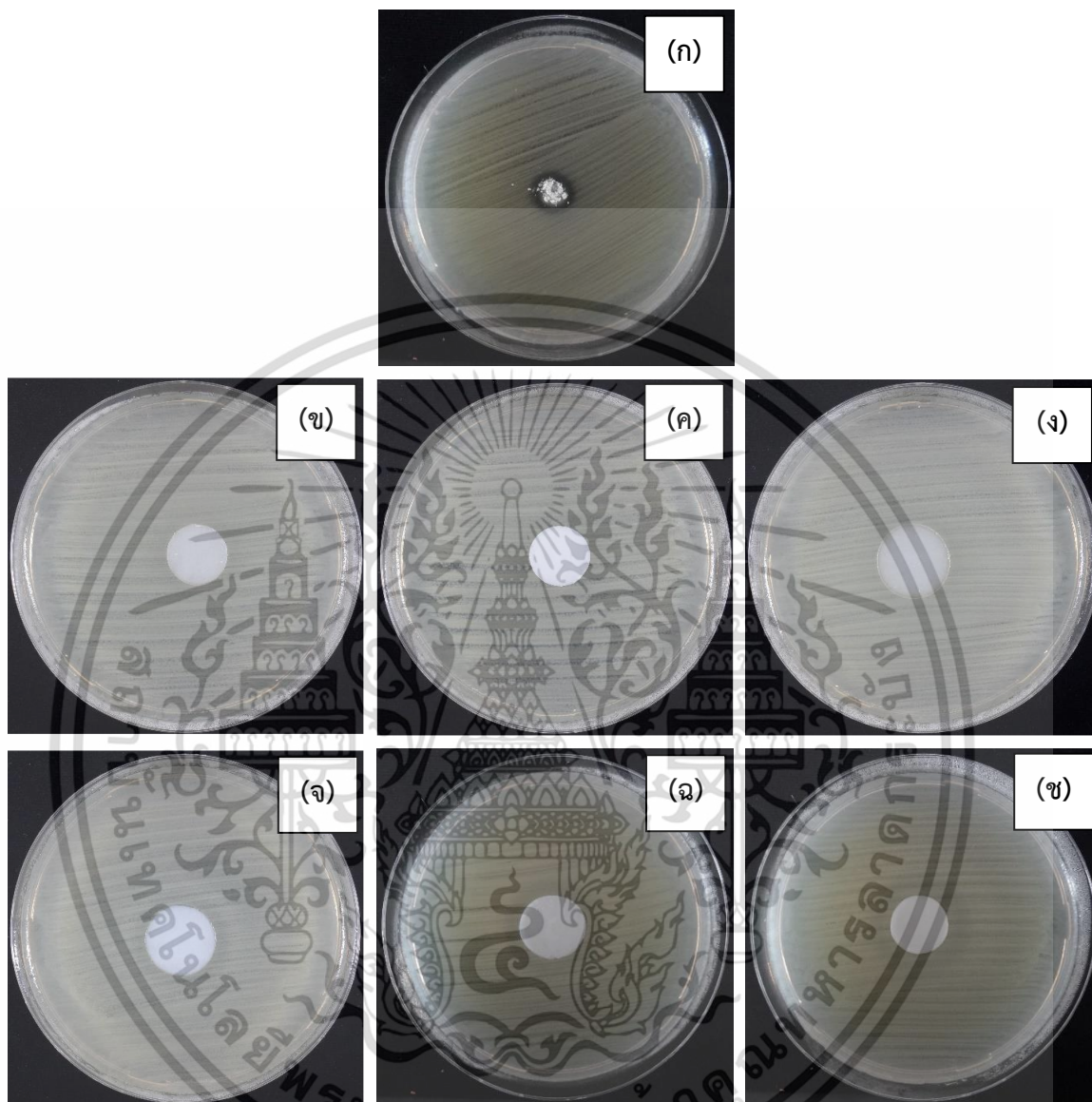


รูปที่ ค.17 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของฟิล์มแข็งไฮดรอกซีพอรอฟิล 20 wt% และใส่อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ 5 wt%

## ภาคผนวก ง

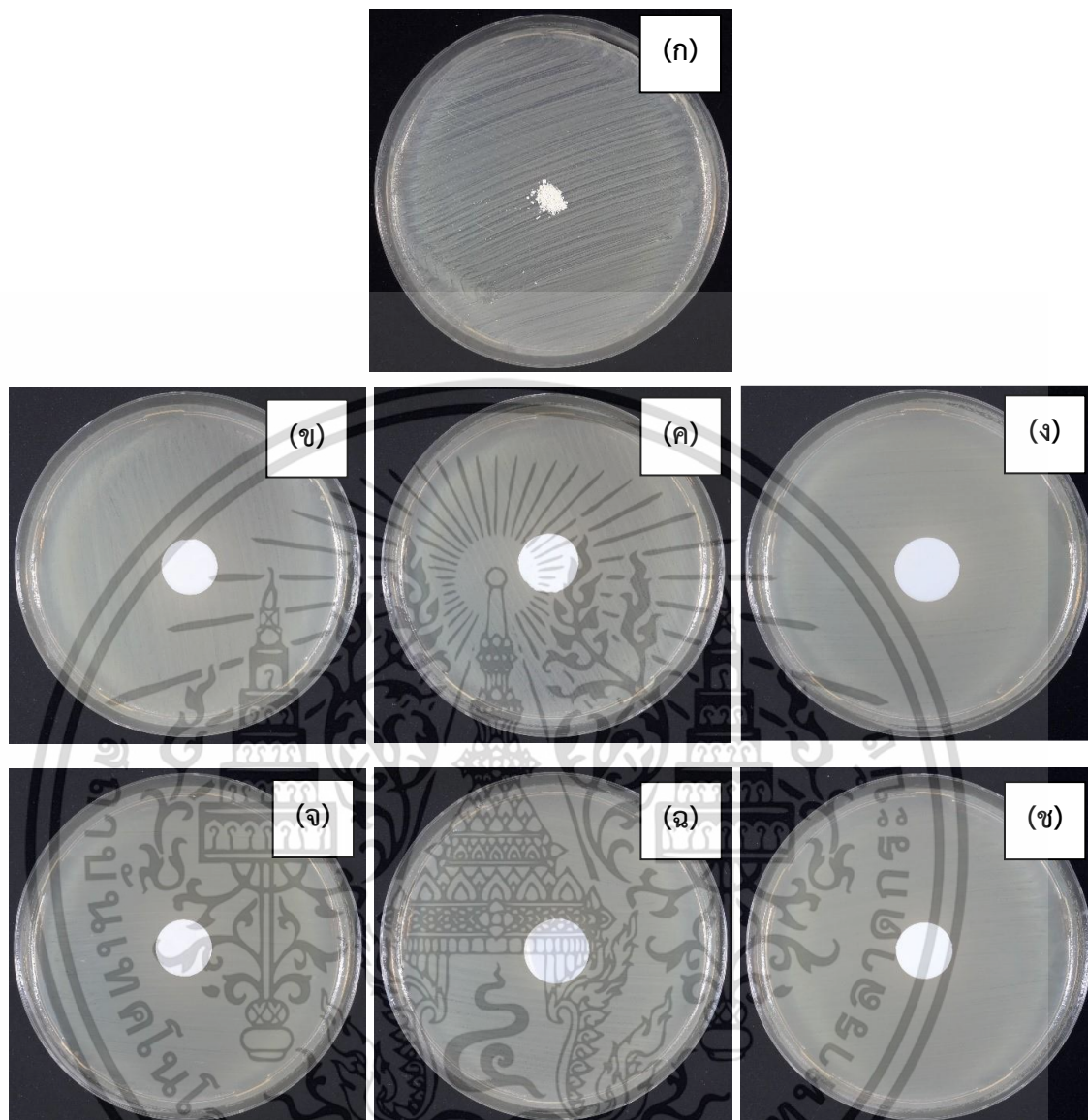


รูปที่ ง.1 ระยะในการต้านเชื้อแบคทีเรียชนิดแกรมบวก *Staphylococcus aureus* ของชิ้นงานฟิล์มแบง์ที่เติมอนุภาคนาโนซิงออกไซด์ (ก) ZnO (ข) NS-ZnO2% (ค) NS-ZnO5% (ง) HPS10-ZnO2% (จ) HPS20-ZnO2% (ฉ) HPS20-ZnO2% และ (ช) HPS20-ZnO5%

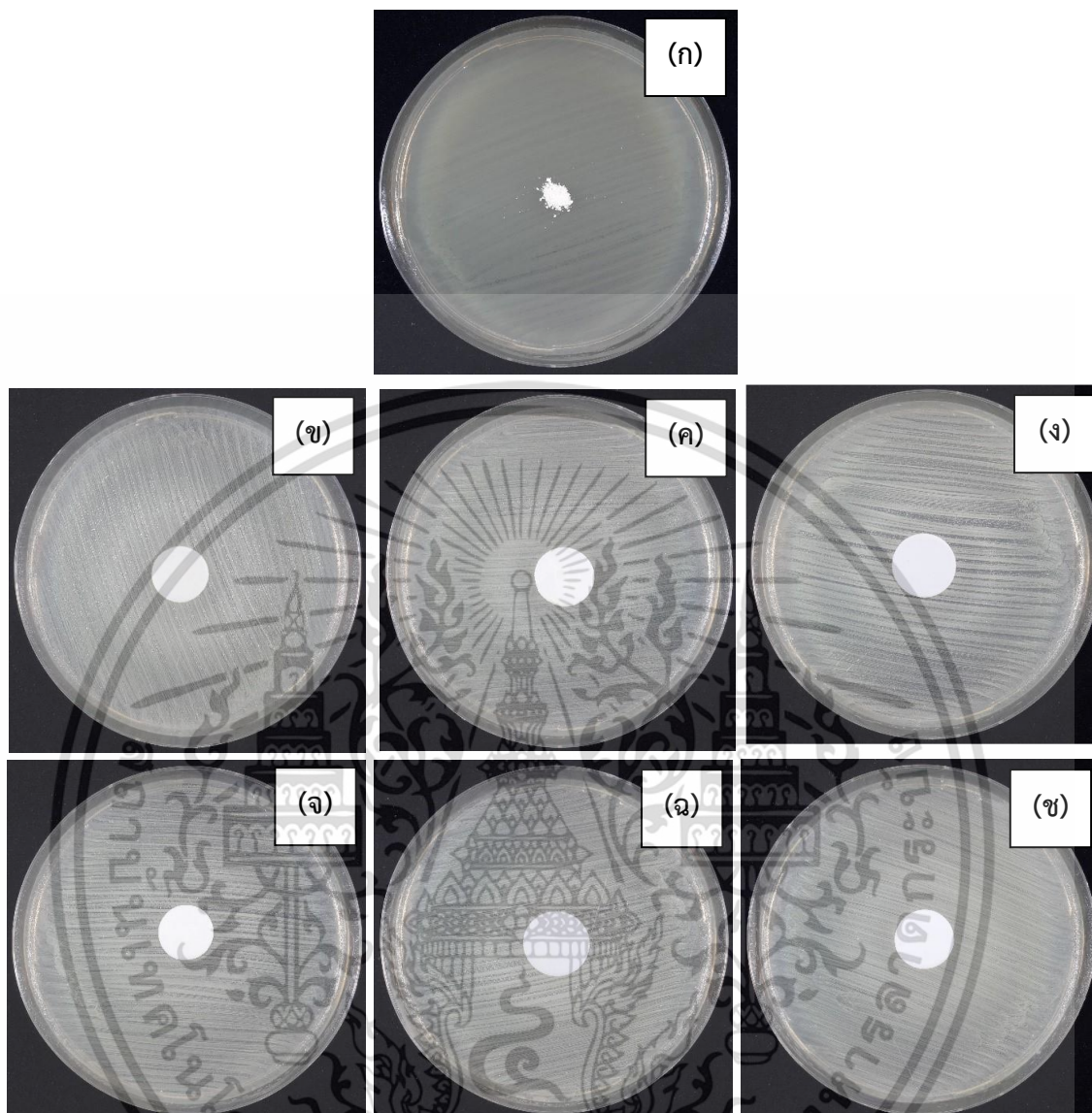


รูปที่ ๒.2.2 ระยะเวลาในการต้านเชื้อแบคทีเรียชนิดแกรมลบ *Escherichia coli* ของชิ้นงานฟิล์มแบง์ที่เติมอนุภาคนาโนซิงออกไซด์ (ก) ZnO (ข) NS-ZnO2% (ค) NS-ZnO5% (ง) HPS10-ZnO2% (จ) HPS20-ZnO2% (ฉ) HPS20-ZnO2% และ (ช) HPS20-ZnO5%

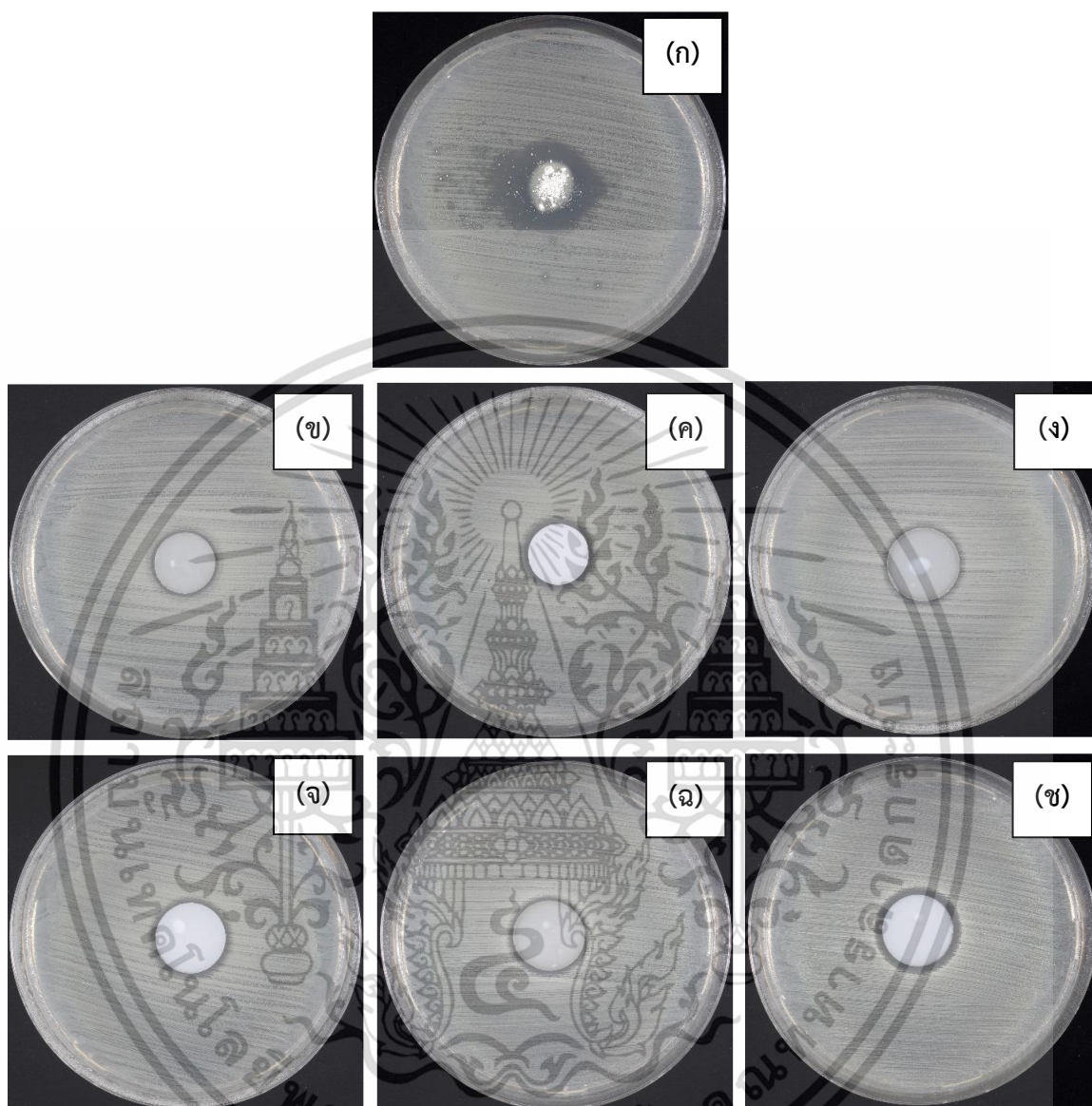
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ๓.3.3 ระยะเวลาในการต้านเชื้อแบคทีเรียชนิดแกรมบวก *Staphylococcus aureus* ของชิ้นงานฟิล์มแบงก์ที่เติมอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ (ก)  $\text{TiO}_2$  (ข) NS-  $\text{TiO}_2$ 2% (ค) NS-  $\text{TiO}_2$ 5% (ง) HPS10-  $\text{TiO}_2$ 2% (จ) HPS20-  $\text{TiO}_2$ 2% (ฉ) HPS20-  $\text{TiO}_2$ 2% และ (ช) HPS20-  $\text{TiO}_2$ 5%

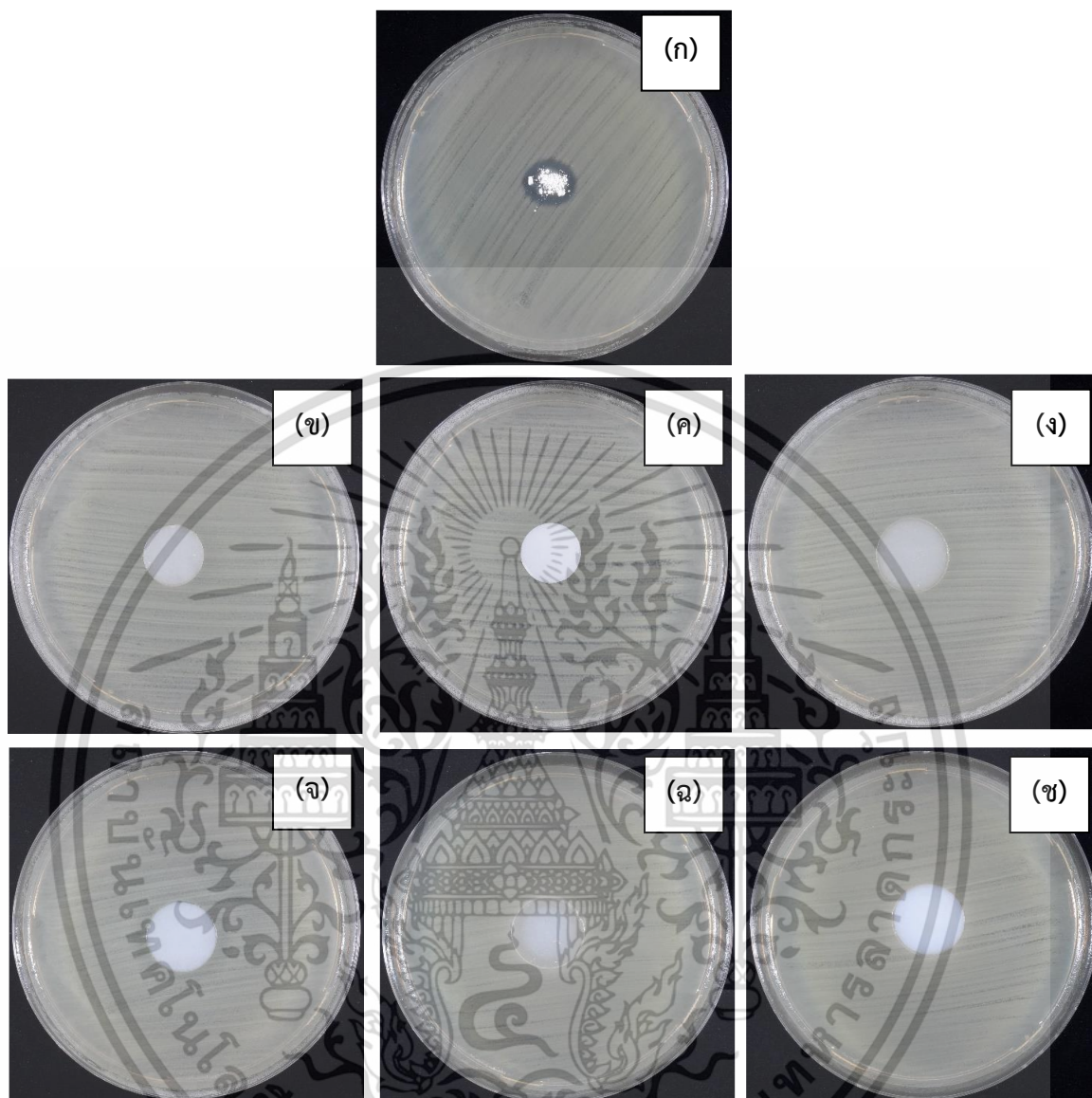


รูปที่ ๔.4 ระยะในการต้านเชื้อแบคทีเรียชนิดแกรมลบ *Escherichia coli* ของชิ้นงานฟิล์มแบ่งที่เติมอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ (ก)  $\text{TiO}_2$  (ข) NS-  $\text{TiO}_2$ 2% (ค) NS-  $\text{TiO}_2$ 5% (ง) HPS10-  $\text{TiO}_2$ 2% (จ) HPS20-  $\text{TiO}_2$ 2% (ฉ) HPS20-  $\text{TiO}_2$ 2% และ (ช) HPS20-  $\text{TiO}_2$ 5%

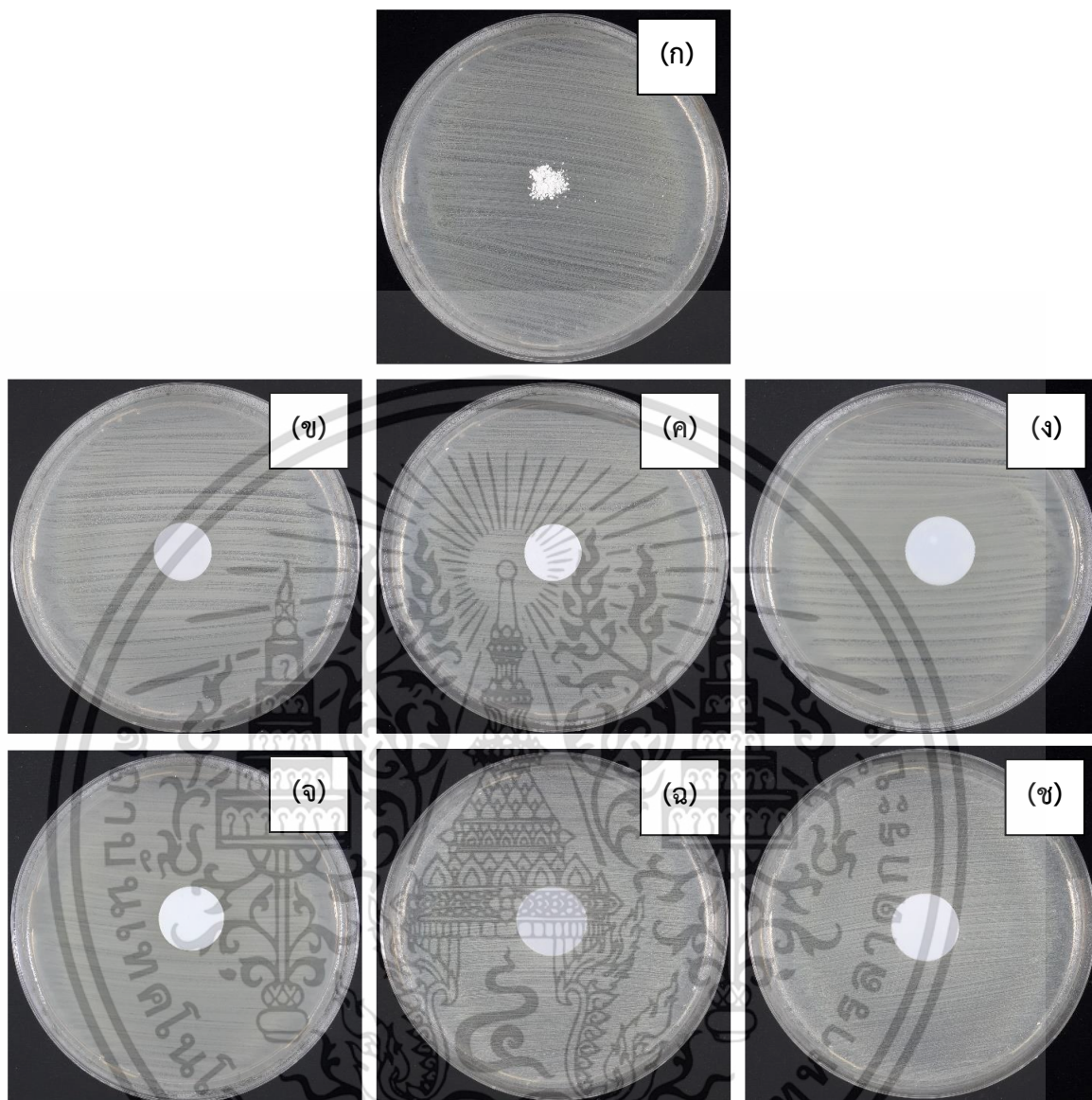


รูปที่ ๕.5 ระยะเวลาในการต้านเชื้อแบคทีเรียชนิดแกรมบวก *Staphylococcus aureus* ของชิ้นงานฟิล์มแป้งที่เติมอนุภาคนาโนซิงออกไซด์ภายใต้แสงยูวี (ก) ZnO (ข) NS-ZnO2% (ค) NS-ZnO5% (ง) HPS10-ZnO2% (จ) HPS20-ZnO2% (ฉ) HPS20-ZnO2% และ (ช) HPS20-ZnO5%

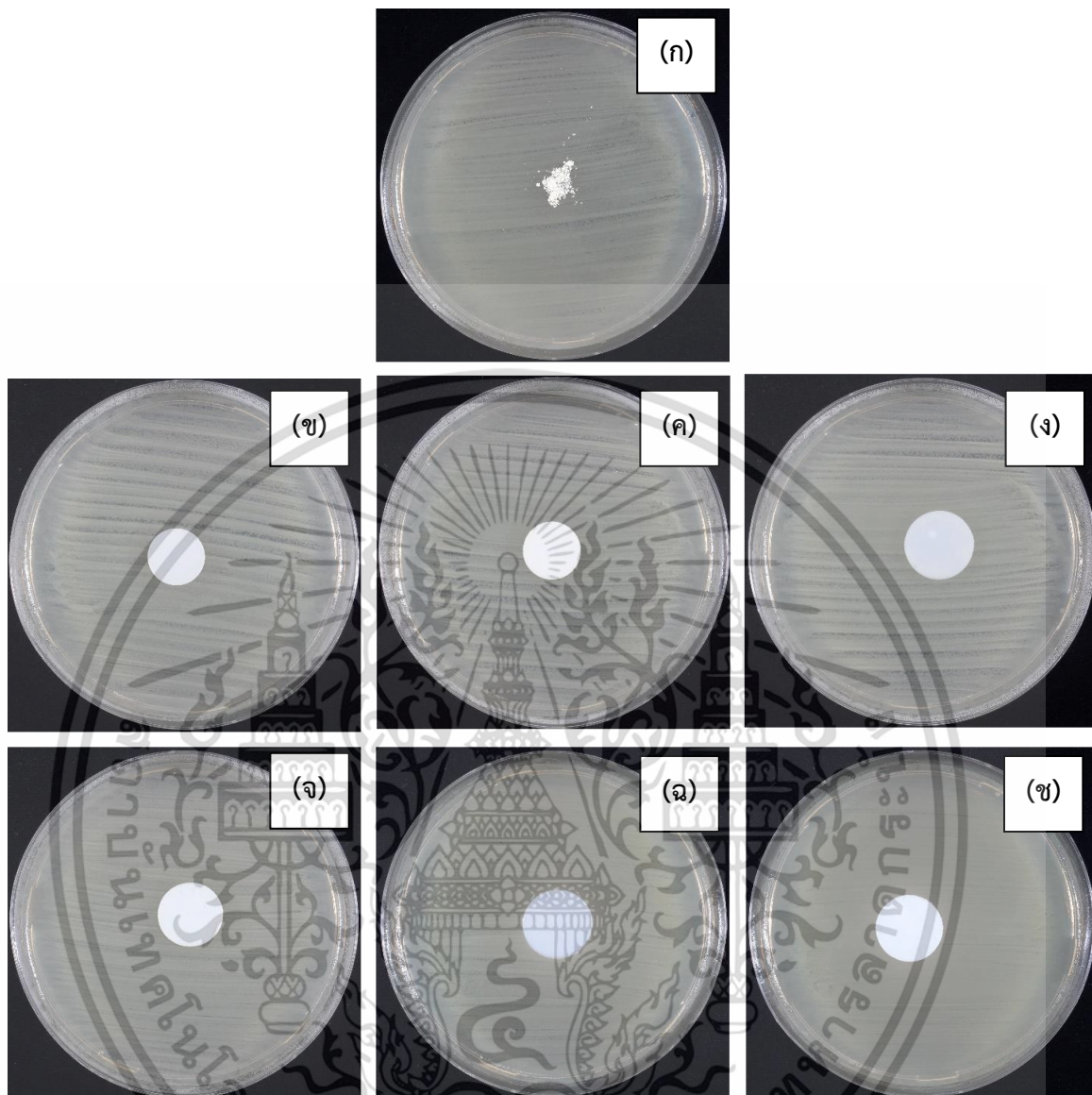
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ๖.6. ระยะในการต้านเชื้อแบคทีเรียชนิดแกรมลบ *Escherichia coli* ของชั้นงานฟิล์มแบ่งที่เติมอนุภาคนาโนซิงออกไซด์ภายใต้แสงยูวี (ก) ZnO (ข) NS-ZnO2% (ค) NS-ZnO5% (ง) HPS10-ZnO2% (จ) HPS20-ZnO2% (ฉ) HPS20-ZnO2% และ (ช) HPS20-ZnO5%



รูปที่ ๗.7.7 ระยะเวลาในการต้านเชื้อแบคทีเรียชนิดแกรมบวก *Staphylococcus aureus* ของชิ้นงานฟิล์มแบงก์ที่เติมอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ภายใต้แสงยูวี (ก)  $\text{TiO}_2$  (ข) NS-  $\text{TiO}_2$ 2% (ค) NS-  $\text{TiO}_2$ 5% (ง) HPS10-  $\text{TiO}_2$ 2% (จ) HPS20-  $\text{TiO}_2$ 2% (ฉ) HPS20-  $\text{TiO}_2$ 2% และ (ช) HPS20-  $\text{TiO}_2$ 5%



รูปที่ ๘.๘ ระยะเวลาในการต้านเชื้อแบคทีเรียชนิดแกรมบวก *Escherichia coli* ของชิ้นงานฟิล์มแบงก์ที่เติมอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ภายใต้แสงยูวี (ก)  $\text{TiO}_2$  (ข) NS-  $\text{TiO}_2$  2% (ค) NS-  $\text{TiO}_2$  5% (ง) HPS10-  $\text{TiO}_2$  2% (จ) HPS20-  $\text{TiO}_2$  2% (ฉ) HPS20-  $\text{TiO}_2$  2% และ (ช) HPS20-  $\text{TiO}_2$  5%

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	อมิตา สกuldดำรงวิทย์
วันเดือน ปีเกิด	13 กันยายน 2538
ภูมิลำเนา	สกลนคร
ที่อยู่ปัจจุบัน	292 ลาดพร้าว 101 ซอย 17 แขวงคลองเจ้าคุณสิงค์ เขตวังทองหลาง กรุงเทพมหานคร
ประวัติการศึกษา	- ระดับมัธยมปลาย โรงเรียนสกลราชวิทยานุกูล จ.สกลนคร - ระดับปริญญาตรี (วท.บ. เคมีอุตสาหกรรม) สาขาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง - ระดับปริญญาโท (วท.ม. เทคโนโลยีพอลิเมอร์) สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผลงานทางวิชาการ	- Sakundamrongwit A. and Prachayawarakorn J. 2020. “Properties of Modified Hydroxypropylated Starch Films” The Proceeding of The International Polymer Conference of Thailand 2020 (PCT-10). 193-196