

แผ่นฟิล์มพอลิเมอร์ที่มีคุณสมบัติพิเศษสำหรับบรรจุภัณฑ์อาหาร



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2559

แผ่นฟิล์มพอลิเมอร์ที่มีคุณสมบัติพิเศษสำหรับบรรจุภัณฑ์อาหาร



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# Functional Film for Food Packaging



A REPORT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS  
FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF CHEMICAL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
2016

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์เรื่อง  
โดย  
อาจารย์ที่ปรึกษา

แผ่นฟิล์มพอลิเมอร์ที่มีคุณสมบัติพิเศษสำหรับบรรจุภัณฑ์อาหาร  
นางสาวพิมพ์ชนก นาคช่วย  
ผศ.ดร.ธีรพร สุธีวงศ์  
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปริญญานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะกรรมการตรวจสอบปริญญานิพนธ์

ธีรพร สุธีวงศ์

(ผศ.ดร.ธีรพร สุธีวงศ์)

ประธานกรรมการ

ดร. ณัฐ

(รศ.ดร.ดวงกมล ณ ระนอง)

กรรมการ

ดร. อภินันท์

(ผศ.ดร.อภินันท์ นัมคณิสสรณ์)

กรรมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์เรื่อง แผ่นฟิล์มพอลิเมอร์ที่มีคุณสมบัติพิเศษสำหรับบรรจุภัณฑ์อาหาร  
โดย นางสาวพิมพ์ชนก นาคช่วย  
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี  
ปีการศึกษา 2559  
อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.ธีรพร สุธีวงศ์

## บทคัดย่อ

บรรจุภัณฑ์แอคทีฟ (Active packaging) เป็นบรรจุภัณฑ์สำหรับบรรจุอาหารและผลผลิตทางการเกษตรที่ได้รับการพัฒนาเพื่อป้องกันความเสียหายและยืดอายุอาหารและผลผลิตทางการเกษตรให้คงอยู่สภาพเดิมได้นานกว่าการใช้บรรจุภัณฑ์แบบเดิม พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinyl alcohol; PVA) เป็นหนึ่งในพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่นิยมนำมาใช้ในการทำแผ่นฟิล์มบรรจุภัณฑ์อาหาร เนื่องจากยืดหยุ่นได้ดี ไม่เป็นพิษ อีกทั้งเป็นพอลิเมอร์ที่สามารถละลายน้ำและย่อยสลายทางชีวภาพได้ งานวิจัยนี้สนใจที่จะพัฒนาแผ่นฟิล์ม PVA ให้มีสมบัติหลากหลาย (Multifunctional composite film) กล่าวคือ สามารถกำจัดก๊าซเอทิลีน มีความยืดหยุ่นดีขึ้นและไม่เป็นพิษเพื่อใช้เป็นฟิล์มบรรจุภัณฑ์แอคทีฟสำหรับบรรจุผลผลิตทางการเกษตร ด้วยการทำเป็นแผ่นฟิล์มคอมโพสิต (Nanocomposite film) ระหว่าง PVA กับอนุภาคนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$  Nanoparticles) ที่ผ่านการปรับแต่งพื้นผิวของอนุภาคด้วยกรดสเตียริก (Stearic acid) และใช้เทคนิคการหล่อแบบสารละลาย (Solution casting) ในการเตรียมแผ่นฟิล์ม โดยศึกษาผลของปริมาณ  $\text{TiO}_2$  ที่ผ่านการปรับผิวที่มีต่อสมบัติของแผ่นฟิล์มคอมโพสิต อาทิ ความใส ความหนา สมบัติทางกล และความสามารถในการกำจัดก๊าซเอทิลีน เทียบกับแผ่นฟิล์ม PVA ที่ไม่มีการผสมกับอนุภาคนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ จากผลการทดลอง พบว่า กรดสเตียริกช่วยเพิ่มการกระจายตัวของ  $\text{TiO}_2$  ใน PVA เมทริกซ์ และแผ่นฟิล์มคอมโพสิตสามารถกำจัดก๊าซเอทิลีนเพื่อยืดอายุการเก็บรักษาผลไม้ได้ นอกจากนี้ แผ่นฟิล์มคอมโพสิตยังมีสมบัติทางกล อาทิ ความยืดหยุ่นดีขึ้น โดยปริมาณของ  $\text{TiO}_2$  ร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักเป็นค่าที่เหมาะสมที่สุดที่มีผลต่อสมบัติทางกลและการกำจัดก๊าซเอทิลีนของแผ่นฟิล์มคอมโพสิต

Report Title	Functional Film for Food Packaging
By	Miss Pimchanok Nakchuai
Degree	Bachelor of Engineering
Program	Chemical Engineering
Year	2016
Advisor	Asst.Prof.Dr.Teeraporn Suteewong

### Abstract

Active packaging is defined as an intelligent or smart packaging system that has been developed in order to prevent and to prolong shelf life of produce and food. Polyvinyl alcohol (PVA) is a synthetic polymer that has been widely used as food packaging films, due to its flexibility, water solubility, non-toxicity and biodegradability. In this work, we aim to further improve properties of PVA film, such as ethylene scavenger and cytotoxicity in order to be used as active film for agricultural products. This multifunctional PVA film was prepared by integrating stearic acid-modified titanium dioxide nanoparticles (TiO<sub>2</sub> NPs) and PVA matrix. Then, solution casting technique was used to fabricate the nanocomposite film. Effects of amount of modified TiO<sub>2</sub> nanoparticles on physical property, mechanical property and ethylene scavenger are investigated comparing to pure PVA film. The results showed that stearic acid helps to promote the dispersion of TiO<sub>2</sub> in PVA matrix. PVA film incorporating with modified TiO<sub>2</sub> can delay the ripening of banana and chili. Furthermore, composite film has higher elongation at break than pure PVA. The optimum modified TiO<sub>2</sub> content was 0.5 wt%. The developed film has a good potential to be used as food packaging film.

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จไปด้วยดีด้วยความช่วยเหลือจาก ผศ.ดร.ธีรพร สุธีวงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์ ซึ่งท่านได้ให้คำปรึกษา แนะนำ คำสอน และให้ข้อคิดเห็นอันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการทำปริญญานิพนธ์ อีกทั้งท่านยังมีส่วนช่วยในการแก้ไขปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างการดำเนินงาน

ขอขอบคุณเพื่อนร่วมอาจารย์ที่ปรึกษา และขอขอบคุณเพื่อนร่วมภาควิชาวิศวกรรมเคมีทุกท่านที่ได้ให้การช่วยเหลือ และให้กำลังใจเสมอมา

ขอขอบพระคุณอาจารย์และเจ้าหน้าที่ทุกท่านในภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง สำหรับความอนุเคราะห์ด้านเครื่องมือสถานที่ ความรู้ คำแนะนำตลอดการทำปริญญานิพนธ์ และสุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดามารดาและครอบครัวที่สนับสนุนทางด้านการศึกษามาโดยตลอด คอยอยู่เคียงข้างเป็นกำลังใจที่สำคัญที่ทำให้ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จไปได้ด้วยดี

พิมพ์ชนก นาคช่วย

# สารบัญ

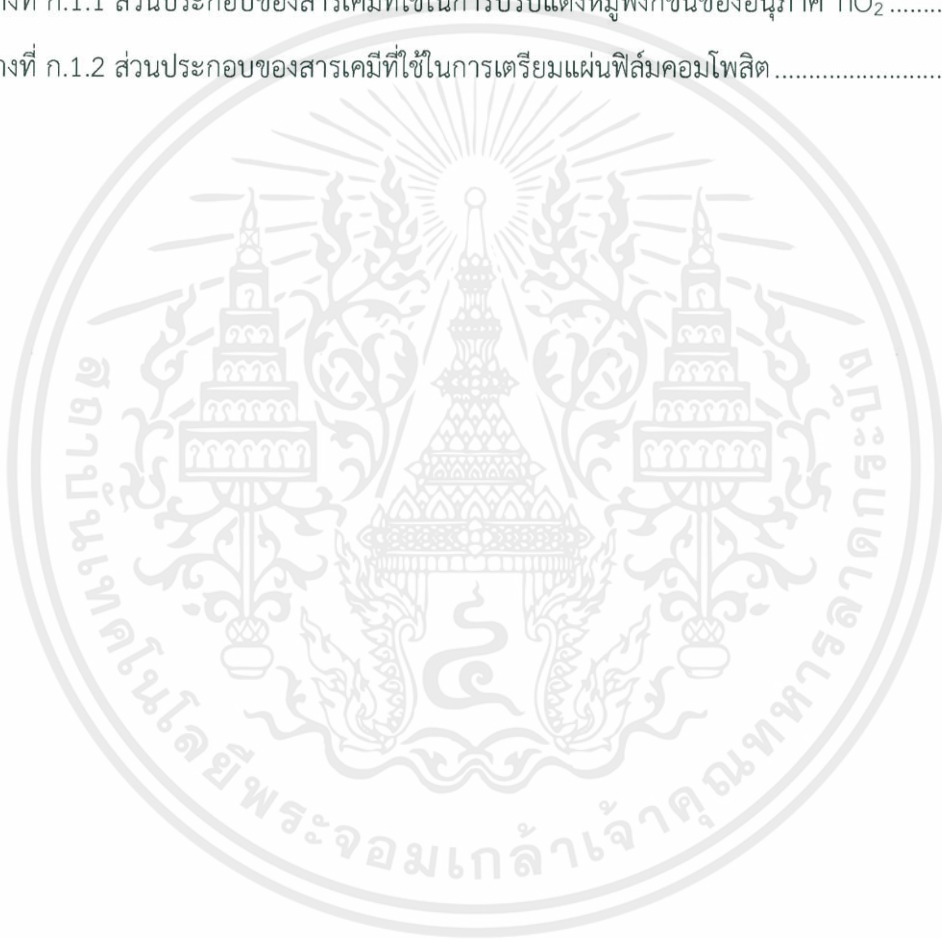
บทคัดย่อ.....	I
Abstract.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	3
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO <sub>2</sub> ).....	5
2.1.1 ประโยชน์ของไทเทเนียมไดออกไซด์.....	5
2.1.2 ปฏิริยาการกระตุ้นด้วยแสงของไทเทเนียมไดออกไซด์.....	6
2.2 พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA).....	7
2.3 พอลิเมอร์คอมโพสิต (Polymer composite).....	7
2.4 เทคโนโลยีด้านบรรจุภัณฑ์แอคทีฟ (Active Packaging).....	8
2.5 กรดสเตียริก (Stearic acid).....	8
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	9
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน.....	11
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	11
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	11
3.3 การปรับพื้นผิวของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยกรดสเตียริก.....	12
3.4 การวิเคราะห์และตรวจสอบสมบัติของอนุภาค TiO <sub>2</sub> ที่ผ่านการปรับพื้นผิว.....	12

## สารบัญ (ต่อ)

3.5 การเตรียมแผ่นฟิล์มคอมโพสิตระหว่าง PVA กับ $\text{TiO}_2$ ที่ผ่านการปรับผิว .....	13
3.6 การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของแผ่นฟิล์ม .....	13
3.7 การทดสอบสมบัติทางกลของแผ่นฟิล์ม .....	13
3.8 การทดสอบการกำจัดก๊าซเอทิลีนของแผ่นฟิล์ม .....	14
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล .....	15
4.1 ผลการปรับพื้นผิวของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยกรดสเตียริก .....	15
4.2 ผลการการวิเคราะห์และตรวจสอบลักษณะทางกายภาพของแผ่นฟิล์มคอมโพสิต .....	20
4.3 ผลการทดสอบสมบัติทางกลของแผ่นฟิล์มคอมโพสิต .....	21
4.4 ผลการทดสอบการกำจัดก๊าซเอทิลีนของแผ่นฟิล์มคอมโพสิต .....	22
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง .....	25
5.1 สรุปผลการทดลอง .....	25
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	25
บรรณานุกรม .....	26
ภาคผนวก ก .....	29
ภาคผนวก ข .....	34

## สารบัญตาราง

ตารางที่ 4.1 ภาพแผ่นฟิล์ม PVA/TiO <sub>2</sub> และ PVA/STA-TiO <sub>2</sub> ที่ความเข้มข้นต่างๆ .....	20
ตารางที่ 4.2 ค่าดัชนีการดูดซับน้ำของแผ่นฟิล์ม PVA/TiO <sub>2</sub> และ PVA/STA-TiO <sub>2</sub> .....	21
ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบการสุกของกล้วยของแผ่นฟิล์ม PVA/TiO <sub>2</sub> และ PVA/STA-TiO <sub>2</sub> .....	23
ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบการสุกของพริกของแผ่นฟิล์ม PVA/TiO <sub>2</sub> และ PVA/STA-TiO <sub>2</sub> .....	23
ตารางที่ ก.1.1 ส่วนประกอบของสารเคมีที่ใช้ในการปรับแต่งหมู่ฟังก์ชันของอนุภาค TiO <sub>2</sub> .....	30
ตารางที่ ก.1.2 ส่วนประกอบของสารเคมีที่ใช้ในการเตรียมแผ่นฟิล์มคอมโพสิต .....	30



## สารบัญรูปภาพ

รูปที่ 2.1 โครงสร้างผลึกของ $\text{TiO}_2$ .....	5
รูปที่ 2.2 แผนภาพปฏิกิริยาการกระตุ้นด้วยแสงของ $\text{TiO}_2$ .....	6
รูปที่ 2.3 สูตรโครงสร้างโมเลกุลของ PVA .....	7
รูปที่ 2.4 สูตรโครงสร้างโมเลกุลของกรดสเตียริก.....	8
รูปที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์ XRD ของอนุภาค $\text{TiO}_2$ และ STA- $\text{TiO}_2$ .....	16
รูปที่ 4.2 ผล FTIR ของอนุภาค $\text{TiO}_2$ อนุภาค STA- $\text{TiO}_2$ และกรดสเตียริก .....	17
รูปที่ 4.3 ผล TGA ของอนุภาค STA- $\text{TiO}_2$ .....	18
รูปที่ 4.4 ภาพ TEM ของอนุภาค $\text{TiO}_2$ และ STA- $\text{TiO}_2$ ที่กำลังขยาย 135,000X.....	18
รูปที่ 4.5 ภาพการตกตะกอนของอนุภาค $\text{TiO}_2$ และ STA- $\text{TiO}_2$ .....	19
รูปที่ 4.6 ค่า Tensile strength และ Percentage of Elongation at Break ของแผ่นฟิล์ม .....	22
รูปที่ ก.3.1 ผลการวิเคราะห์ XRD ของอนุภาค $\text{TiO}_2$ .....	31
รูปที่ ก.3.2 ผลการวิเคราะห์ XRD ของอนุภาค STA- $\text{TiO}_2$ .....	31
รูปที่ ก.4.1 กราฟ FTIR ของกรดสเตียริก .....	32
รูปที่ ก.4.2 กราฟ FTIR ของอนุภาค $\text{TiO}_2$ .....	32
รูปที่ ก.4.3 กราฟ FTIR ของอนุภาค STA- $\text{TiO}_2$ .....	33
รูปที่ ก.4.4 กราฟ TGA ของอนุภาค STA- $\text{TiO}_2$ .....	33

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

หน้าที่หลักของบรรจุภัณฑ์สำหรับบรรจุอาหาร (Food packaging) นอกจากห่อหุ้มและปกป้องอาหารแล้ว ยังมีส่วนในการถนอมและยืดอายุอาหาร ความก้าวหน้าทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีนำไปสู่การพัฒนาารูปแบบและคุณสมบัติของบรรจุภัณฑ์ใหม่ๆ เช่น บรรจุภัณฑ์แอคทีฟ (Active Packaging) โดยบรรจุภัณฑ์แอคทีฟเป็นบรรจุภัณฑ์หรือวัสดุสำหรับบรรจุอาหารและผลิตผลทางการเกษตรที่ได้รับการศึกษาพัฒนาเพื่อป้องกันผลผลิตและอาหารไม่ให้เกิดความเสียหาย ยืดอายุและรักษาคุณภาพของผลผลิตให้คงอยู่สภาพเดิมได้นานกว่าการใช้บรรจุภัณฑ์แบบเดิม โดยระยะเวลาที่เกี่ยวข้องกับการทำให้เน่าเสียหรือลักษณะการเน่าเสียของอาหารและผลผลิต ส่งผลต่อลักษณะและสภาพการขนส่งและการเก็บรักษาอาหารนั้นๆ ถ้าอาหารเสียหายง่ายจะต้องใช้ต้นทุนในการขนส่งและเก็บรักษาแพง นอกจากนี้ ในแง่ของตลาดการส่งออก หากผู้บริโภคได้รับอาหารที่ไม่สดหรือเน่าเสียจะส่งผลต่อการส่งออกอาหารและผลผลิตทางการเกษตรของประเทศได้ ซึ่งเป็นปัญหาสำคัญที่ทำให้เกิดการสูญเสียทางเศรษฐกิจ ดังนั้น การพัฒนาสมบัติของบรรจุภัณฑ์แอคทีฟจะมีส่วนสำคัญในการลดปัญหาดังกล่าว สมบัติที่ต้องการมีหลากหลาย เช่น สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียและเชื้อรา มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ ป้องกันการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน คาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ และกำจัดก๊าซเอทิลีน เป็นต้น [1,2] โดยขึ้นกับลักษณะการนำไปใช้งาน ลักษณะของอาหาร ตลอดจนกระบวนการที่เกี่ยวข้อง นอกเหนือจากสมบัติที่ต้องการแล้ว สิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงถึง คือราคาและความปลอดภัยต่อผู้บริโภค

บรรจุภัณฑ์แอคทีฟที่มีสมบัติในการกำจัดก๊าซเอทิลีนเพื่อยืดอายุการเก็บรักษาอาหารสดมีความสำคัญ โดยเฉพาะอย่างยิ่งประเทศในแถบร้อนขึ้นอย่างประเทศไทย เนื่องจากสภาพอากาศดังกล่าวไม่เอื้อต่อการเก็บอาหารสดเป็นเวลานาน ทำให้อาหารสดหรือผลผลิตทางการเกษตรมีอายุและคุณภาพที่เหมาะสมสำหรับการบริโภคเป็นระยะเวลาสั้นๆ หลังจากผลิตหรือเก็บเกี่ยว ก่อนจะเริ่มมีกลิ่นเหม็นและเน่าเสียในที่สุด [2] โดยบรรจุภัณฑ์ดังกล่าวสามารถทำได้หลายรูปแบบ เช่น การเคลือบสารดูดซับเอทิลีน (Ethylene absorbers) บนพื้นผิวของพอลิเมอร์ (Coating) และการผสมสารดูดซับเอทิลีนลงในพอลิเมอร์ (Blending) [3-6] เป็นต้น วิธีการแรกมีการสัมผัสโดยตรงระหว่างอาหารกับสารดูดซับเอทิลีน จึงสามารถดูดซับและย่อยสลายเอทิลีนได้ดี แต่อาจมีปัญหาเรื่องการปนเปื้อนของสารในอาหาร ตลอดจนอาจทำให้กลิ่นและรสของอาหารเปลี่ยนไป (Off-odor and off-flavor) [1] จึงมักทำการเคลือบทับซ้อนสารดูดซับด้วยแผ่นฟิล์มพอลิเมอร์ ส่วนการผสมสารดูดซับเอทิลีนลงในพอลิเมอร์เป็นวิธีที่ง่าย ปลอดภัยและพอลิเมอร์มีสมบัติตามที่ต้องการ แต่ต้องคำนึงถึงความเข้ากันได้ระหว่างสารดูดซับเอทิลีนกับพอลิเมอร์ที่ใช้เป็นเมทริกซ์ (Matrix) โดยสารดูดซับเอทิลีน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีหลายประเภท เช่น โอโซน ( $O_3$ ) โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (Potassium permanganate,  $KMnO_4$ ) และอนุภาคอินทรีย์ เช่น อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide,  $TiO_2$ ) [6-9]

พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinyl alcohol; PVA) เป็นหนึ่งในพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่นิยมนำมาใช้ในการทำแผ่นฟิล์มบรรจุภัณฑ์อาหาร เนื่องจากยืดหยุ่นได้ดี ไม่เป็นพิษ อีกทั้งเป็นพอลิเมอร์ที่สามารถละลายน้ำและย่อยสลายทางชีวภาพได้ [10-11] การเติมสารที่มีฤทธิ์ดูดซับเอทิลีนลงไปจะช่วยให้เพิ่มสมบัติดังกล่าวให้กับพอลิเมอร์ได้ จากงานวิจัยที่ผ่านมา มีการผสมสารดูดซับเอทิลีนลงในพอลิเมอร์เพื่อใช้ในงานด้านบรรจุภัณฑ์อาหาร โดยเฉพาะการใช้ โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ( $KMnO_4$ ) เนื่องจากมีความสามารถในการดูดซับเอทิลีนที่สูง [6, 7] แต่หากคำนึงถึงความปลอดภัยในการใช้งานด้านอาหาร  $KMnO_4$  สามารถออกซิไดซ์โมเลกุลของเอทิลีนทำให้เกิดเอทิลีนไกลคอล ซึ่งเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตได้ [1, 8] จากข้อจำกัดดังกล่าว จึงนำไปสู่การพัฒนาวัสดุที่สามารถดูดซับก๊าซเอทิลีนด้วยสารหรืออนุภาคชนิดอื่น อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ ( $TiO_2$ ) สามารถกำจัดก๊าซเอทิลีนที่เกิดขึ้นจากกระบวนการสุกของผักหรือผลไม้ในระหว่างเก็บรักษา ซึ่งช่วยชะลอการสุกและยืดอายุการนำเสี้ออกไปได้ โดยสมบัตินี้เป็นผลมาจากปฏิกิริยาการกระตุ้นด้วยแสงของ  $TiO_2$  และแสงอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet) [8-9] เนื่องจาก  $TiO_2$  เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง (Catalysts reaction) ที่มีราคาไม่แพง ไม่เป็นพิษ ได้รับการรับรองจากสำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา (Food and Drug Administration) หาได้ง่าย มีความเสถียรสูง และสามารถใช้งานได้ในระยะยาว [8-9, 12-15] แต่ยังไม่มีการศึกษาสมบัติการกำจัดก๊าซเอทิลีนเมื่อนำอนุภาค  $TiO_2$  มาผสมกับพอลิเมอร์เป็นแผ่นฟิล์มคอมโพสิต ซึ่งเป็นข้อมูลที่สำคัญ อย่างไรก็ตาม อนุภาค  $TiO_2$  มีขนาดเล็ก มีพลังงานพื้นผิว (Surface energy) ที่สูง จึงทำให้อนุภาค  $TiO_2$  จับตัวเป็นก้อนและกระจายตัวไม่สม่ำเสมอในคอมโพสิต ส่งผลต่อสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของคอมโพสิตที่เตรียมได้ ซึ่งวิธีหนึ่งในการแก้ปัญหาดังกล่าว คือ การปรับแต่งพื้นผิวของอนุภาค  $TiO_2$  ด้วยสารเพิ่มความเสถียร [13-15] Shadpour และ Marzieh ได้ศึกษาการกระจายตัวของอนุภาค  $TiO_2$  ในพอลิไวนิลแอลกอฮอล์โดยปรับพื้นผิวอนุภาค  $TiO_2$  ด้วยวิตามิน  $B_1$  และศึกษาสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางกลและสมบัติทางความร้อนของคอมโพสิต พบว่าอนุภาค  $TiO_2$  ที่ผ่านการปรับผิวด้วยวิตามิน  $B_1$  มีการกระจายตัวที่ดีกว่าอนุภาคที่ไม่ผ่านการปรับผิว และแผ่นฟิล์มคอมโพสิตพอลิไวนิลแอลกอฮอล์มีความเสถียรทางความร้อนและสมบัติทางกล เช่น การยืด ณ จุดขาด (Elongation at break) ดีขึ้น [13]

Yongquan และคณะ ได้พัฒนาพื้นผิวคอมโพสิตระหว่าง  $TiO_2$  และพอลิไดเมทิลซิลอกเซน (Polydimethylsiloxane, PDMS) ที่มีสมบัติไม่ชอบน้ำยิ่งยวดและทนต่อการกัดกร่อนบนผิววัสดุทองแดง (Cu substrate) โดยปรับพื้นผิวอนุภาค  $TiO_2$  ด้วยกรดสเตียริก (Stearic acid) และสารประกอบของซิลเลน Heptadecafluoro-1,1,2,2-tetradecyl trimethoxysilane, FAS) พบว่ากรดสเตียริกและ FAS ช่วยให้อนุภาค  $TiO_2$  กระจายตัวดีขึ้น และพื้นผิวคอมโพสิตที่เตรียมได้มีสมบัติไม่ชอบน้ำยิ่งยวดและทนต่อการกัดกร่อน [14] นอกจากนี้ Jalili และคณะ ได้ศึกษาการปรับพื้นผิวด้วยกรดสเตียริกและกรดโอเลอิก (Oleic acid) เพื่อเพิ่มการกระจายตัวของอนุภาค  $TiO_2$  ในสาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวกลาง [15] แต่จากงานวิจัยข้างต้น ยังไม่มีการศึกษาสมบัติดังกล่าวเมื่อนำมาทำเป็นฟิล์มคอมโพสิต รวมถึงสมบัติเชิงกลและการกำจัดก๊าซเอทิลีน ซึ่งเป็นข้อมูลที่น่าสนใจ เนื่องจากกรดสเตียริก เป็นผลิตภัณฑ์ธรรมชาติ ไม่เป็นพิษ อีกทั้งเป็นสารที่ใช้ในการถนอมอาหาร (Food preservation) [16] ซึ่งการทำบรรจุภัณฑ์ที่มีการสัมผัสกับอาหารโดยตรงนี้ สิ่งสำคัญคือความปลอดภัยต่อสิ่งแวดล้อมและผู้บริโภค ส่วนประกอบในบรรจุภัณฑ์จึงมีความสำคัญ งานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการปรับพื้นผิว  $\text{TiO}_2$  เพื่อเพิ่มการกระจายตัวในพอลิเมอร์ทั้งเกี่ยวและไม่เกี่ยวข้องกับบรรจุภัณฑ์ แต่ไม่มีการคำนึงถึงการใช้สารจากธรรมชาติและศึกษาสมบัติโดยรวมของคอมโพสิต อาทิ สมบัติเชิงกล และการกำจัดก๊าซเอทิลีน เพื่อยืดอายุการเก็บรักษาอาหาร

งานวิจัยนี้สนใจที่จะพัฒนาแผ่นฟิล์มพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ให้มีสมบัติที่หลากหลาย (Multifunctional composite films) กล่าวคือ สามารถกำจัดก๊าซเอทิลีนเพื่อยืดอายุการเก็บรักษาอาหาร และมีความความยืดหยุ่นดีขึ้น โดยเตรียมได้ง่ายและไม่เป็นพิษ เพื่อใช้งานในด้านบรรจุภัณฑ์สำหรับบรรจุผลผลิตทางการเกษตรด้วยการทำแผ่นฟิล์มคอมโพสิตระหว่าง PVA กับอนุภาค  $\text{TiO}_2$  ที่ผ่านการปรับแต่งพื้นผิวด้วยกรดสเตียริก

## 1.2 วัตถุประสงค์

ศึกษาและพัฒนาแผ่นฟิล์มคอมโพสิตระหว่างพอลิไวนิลแอลกอฮอล์กับอนุภาค  $\text{TiO}_2$  ที่ผ่านการปรับแต่งพื้นผิวด้วยกรดสเตียริกที่มีสมบัติในการกำจัดก๊าซเอทิลีน มีความยืดหยุ่นดีขึ้น และไม่เป็พิษเพื่อใช้งานในด้านบรรจุภัณฑ์สำหรับบรรจุผลผลิตทางการเกษตร

## 1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1. ศึกษาการปรับพื้นผิวของอนุภาค  $\text{TiO}_2$  ด้วยกรดสเตียริก (Stearic acid) เพื่อเพิ่มการกระจายตัวของอนุภาค  $\text{TiO}_2$
2. พัฒนาแผ่นฟิล์มคอมโพสิตระหว่างพอลิไวนิลแอลกอฮอล์กับอนุภาค  $\text{TiO}_2$  ที่ผ่านการปรับแต่งพื้นผิวด้วยกรดสเตียริก โดยศึกษาลักษณะของแผ่นฟิล์มและสมบัติเชิงกล ได้แก่ การทนต่อแรงดึง (Tensile strength) และร้อยละการยืด ณ จุดขาด (Percentage of Elongation at Break) ของแผ่นฟิล์มคอมโพสิต และหาปริมาณของอนุภาค  $\text{TiO}_2$  ที่เหมาะสม
3. ศึกษาและทดสอบการกำจัดก๊าซเอทิลีนเพื่อยืดอายุการเก็บรักษาผลไม้ของแผ่นฟิล์มคอมโพสิต และหาปริมาณของอนุภาค  $\text{TiO}_2$  ที่เหมาะสม

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถพัฒนาแผ่นฟิล์มคอมโพสิตของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ให้มีความสามารถในการกำจัดก๊าซเอทิลีน และมีความยืดหยุ่นดีขึ้นโดยเตรียมได้ง่ายและราคาไม่แพง เพื่อใช้งานในด้านบรรจุภัณฑ์สำหรับบรรจุผลผลิตทางการเกษตร

2. สามารถวิจัยต่อยอด เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในงานด้านอื่นๆ เช่น อุตสาหกรรมยา การปศุสัตว์ เป็นต้น



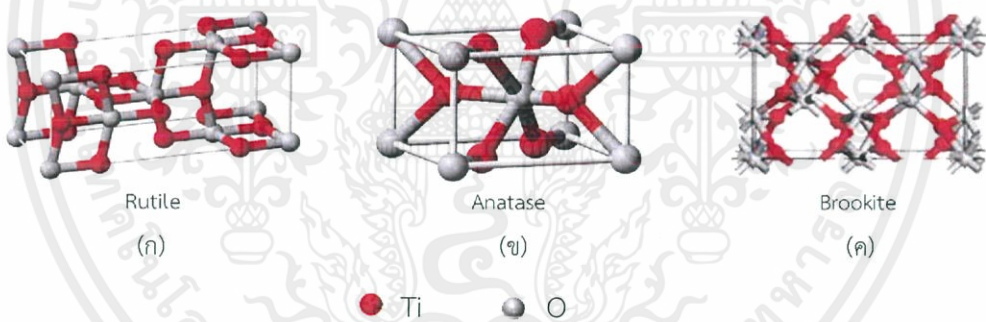
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide) [17]

ไทเทเนียมไดออกไซด์หรือไททาเนีย (Titania,  $TiO_2$ ) เป็นสารประกอบออกไซด์ของโลหะที่ถูกนำมาใช้มากในอุตสาหกรรมต่างๆ เนื่องจากมีความเสถียรสูง ไม่เป็นพิษ และราคาถูก มีลักษณะเป็นของแข็งสีขาว มีสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำ สามารถแบ่งชนิดของ  $TiO_2$  ตามโครงสร้างของผลึกได้ 3 รูปแบบ โดยเรียงตามปริมาณที่พบในธรรมชาติ ได้แก่ รูไทล์ (Rutile) มีโครงสร้างผลึกแบบเทตระโกนัล (Tetragonal) เป็นชนิดที่พบมากที่สุดที่สุดในธรรมชาติ มีความคงทนและเสถียรต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างที่อุณหภูมิสูง อนาเทส (Anatase) มีโครงสร้างผลึกแบบเทตระโกนัล (Tetragonal) เป็นชนิดที่พบในธรรมชาติปานกลาง หากให้ความร้อนสูงกว่า 915 องศาเซลเซียสจะเปลี่ยนโครงสร้างผลึกเป็นแบบรูไทล์ สูดท่าย บรูคไคท์ (Brookite) มีโครงสร้างผลึกแบบออร์โธรอมบิก (Orthorhombic) เป็นชนิดที่พบได้น้อยในธรรมชาติ มีความเสถียรต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างที่อุณหภูมิต่ำ หากได้รับความร้อนมากกว่า 750 องศาเซลเซียส จะเปลี่ยนโครงสร้างผลึกเป็นแบบรูไทล์



รูปที่ 2.1 โครงสร้างผลึกของ  $TiO_2$  [17]

(ก) รูไทล์ (Rutile) (ข) อนาเทส (Anatase) และ (ค) บรูคไคท์ (Brookite)

#### 2.1.1 ประโยชน์ของไทเทเนียมไดออกไซด์

$TiO_2$  สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย ขึ้นกับชนิดของผลึก ขนาดของอนุภาครวมถึงความบริสุทธิ์ โดยทั่วไป 80 เปอร์เซ็นต์ของการนำ  $TiO_2$  ไปใช้งาน คือ ใช้เป็นส่วนผสมในสีและสารเคลือบกระดาษและพลาสติก นอกจากนี้ยังเป็นส่วนประกอบในการทำหมึกพิมพ์ ไฟเบอร์ ยาง ผลิตภัณฑ์เครื่องสำอางและอาหาร ในสัดส่วนประมาณ 8 เปอร์เซ็นต์ และส่วนที่เหลือจะนำไปผลิตเป็นไทเทเนียมบริสุทธิ์ เช่น แก้ว เซรามิก ตัวเร่งปฏิกิริยา ตัวนำไฟฟ้า และตัวกลางทางเคมี [18]

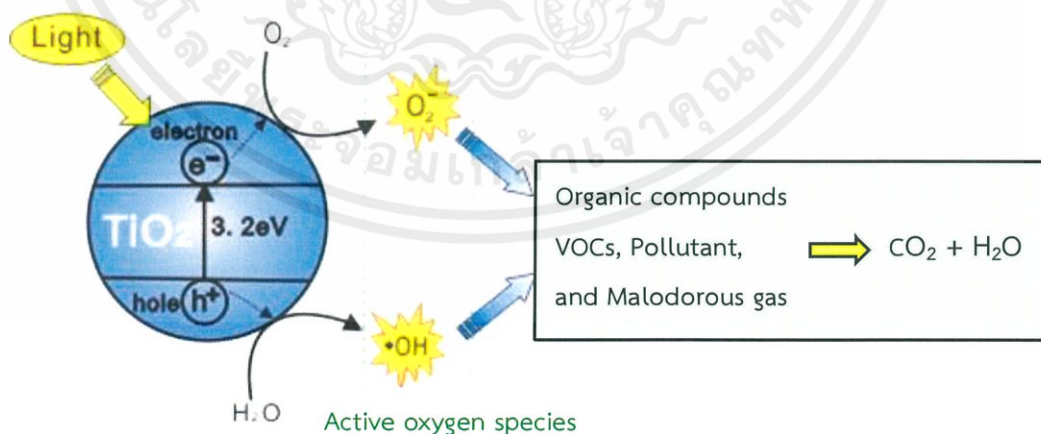
อนุภาคระดับนาโนของ  $TiO_2$  เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการเปลี่ยนแปลงขนาดอนุภาคของ  $TiO_2$  ให้มีขนาดเล็กลง อยู่ในระดับ 5-300 นาโนเมตร ซึ่งอนุภาคที่เล็กลงส่งผลให้สมบัติต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดีขึ้น ไม่ว่าจะเป็ นสมบัติทางเคมี ทางกายภาพหรือทางชีวภาพ มีการนำอนุภาคระดับนาโนของ  $\text{TiO}_2$  มาใช้ในการฟอกอากาศ กำจัดเชื้อแบคทีเรียและป้องกันคราบยัดเกาะบนพื้นผิว โดยอนุภาคไม่เสื่อมสภาพหลังการใช้งาน ทำความสะอาดง่าย ไม่ทิ้งสารตกค้างที่เป็นอันตรายต่อชีวิตและสิ่งแวดล้อม จากสมบัติดังกล่าว อนุภาคระดับนาโนของอนุภาค  $\text{TiO}_2$  จึงได้รับความนิยมเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และถูกนำไปใช้ในสินค้าต่างๆ ทั้งสินค้าสุขภาพ เสื้อผ้า เครื่องสำอางและเครื่องดื่ม ตลอดจนสินค้าเกี่ยวกับบ้านและสวน [19]

### 2.1.2 ปฏิกริยาการกระตุ้นด้วยแสงของไทเทเนียมไดออกไซด์ (Photocatalytic reaction of $\text{TiO}_2$ ) [20]

$\text{TiO}_2$  เป็นสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) ประเภท n-Type ที่มีคุณสมบัติเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสง (Photocatalyst) เมื่อฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต (UV) ไปยังอนุภาค  $\text{TiO}_2$  จะเกิดปฏิกิริยาการกระตุ้นด้วยแสง (Photocatalytic) โดยปฏิกิริยาการกระตุ้นด้วยแสง คือ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจากการใช้แสงไปกระตุ้นสารให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมี โดยที่  $\text{TiO}_2$  จะไม่สลายหรือหายไปเมื่อปฏิกิริยานั้นเสร็จสิ้นลง การฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตจากดวงอาทิตย์หรือจากหลอดฟลูออเรสเซนต์ไปยังอนุภาค  $\text{TiO}_2$  จะทำให้เปลี่ยนเป็นไฮดรอกซิลเรดิคัล (Hydroxyl radical,  $\cdot\text{OH}$ ) ซึ่งเป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรง เกิดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide,  $\text{H}_2\text{O}_2$ ) และประจุลบของซูเปอร์ออกไซด์ (Superoxide anions,  $\text{O}_2^-$ ) ซึ่งไฮดรอกซิลเรดิคัลและโมเลกุลของออกซิเจนจะทำปฏิกิริยาการกระตุ้นด้วยแสงของ  $\text{TiO}_2$  กับสารประกอบอินทรีย์แล้วได้เป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ในที่สุด นำไปสู่การประยุกต์ใช้งานเพื่อป้องกันการกักคร่อน หรือมีความสามารถในการทำความสะอาดตัวเองได้



รูปที่ 2.2 แผนภาพปฏิกิริยาการกระตุ้นด้วยแสงของ  $\text{TiO}_2$  [21]

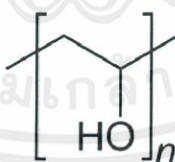
ปฏิกิริยาการกระตุ้นด้วยแสงส่งผลให้  $\text{TiO}_2$  มีคุณสมบัติพิเศษที่หลากหลาย โดยเฉพาะคุณสมบัติในการย่อยสลายสารอินทรีย์ต่างๆ โดยสามารถกำจัดก๊าซเอทิลีนที่เป็นตัวแปรสำคัญในการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สุกของผักและผลไม้ และสามารถยับยั้งการเจริญเติบโตและชีวเคมีของแบคทีเรีย และเชื้อรา (Antimicrobial activities) เมื่อจุลินทรีย์สัมผัสพื้นผิวของอนุภาค  $\text{TiO}_2$  ภายใต้แสงอัลตราไวโอเล็ต จะเกิดปฏิกิริยาการกระตุ้นด้วยแสงและย่อยสลายสารประกอบอินทรีย์ ทำให้เซลล์ถูกทำลายและตาย ในที่สุด โดยอนุภาค  $\text{TiO}_2$  จะไม่เกิดการเสื่อมประสิทธิภาพหลังจากที่ทำลายจุลินทรีย์ ทำให้มี ประสิทธิภาพในการใช้งานที่ยาวนาน นอกจากนี้ ยังมีคุณสมบัติในการกำจัดโมเลกุลของสารอินทรีย์ที่ ระเหยอยู่ในอากาศ (Volatile Organic Compounds หรือ VOCs) อันเป็นสาเหตุของกลิ่นไม่พึง ประสงค์ได้ โดยการทำลายพันธะระหว่างโมเลกุลของสารเหล่านั้น [21]

## 2.2 พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinyl alcohol, PVA)

พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinyl alcohol, PVA) เป็นพลาสติกสังเคราะห์ประเภทเทอร์โม- พลาสติก (Thermoplastic) ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ิฟิเคชัน (Esterification) ของ พอลิไวนิลอะซิเตดกับเอทานอล โดยเป็นพอลิเมอร์ที่ไม่มีพิษ ไม่มีกลิ่นและละลายน้ำได้ PVA มีสมบัติ การก่อฟิล์มที่ดี มีความเหนียว ความเค้นแรงดึงและความยืดหยุ่นสูง รวมถึงป้องกันการระเหยของ กลิ่นและน้ำมันได้ โดยสมบัติพื้นฐานของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ขึ้นอยู่กับระดับการไฮโดรไลซิสและ มวลโมเลกุลของพอลิเมอร์ เมื่อความชื้นสูงขึ้น น้ำจะทำหน้าที่เป็นสารเพิ่มความยืดหยุ่นของฟิล์ม (พลาสติกไซเซอร์) และทำให้ความเค้นแรงดึงลดลง นอกจากนี้ พอลิไวนิลแอลกอฮอล์สามารถย่อย สลายได้อย่างสมบูรณ์และสามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ โดยมีจุดหลอมละลายที่  $230\text{ }^{\circ}\text{C}$  และที่  $180\text{-}190\text{ }^{\circ}\text{C}$  สำหรับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ได้จากการไฮโดรไลซิสอย่างสมบูรณ์และที่ได้จากการ ไฮโดรไลซิสเป็นบางส่วน ตามลำดับ พอลิไวนิลแอลกอฮอล์นิยมนำไปใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น สาร เคลือบกระดาษ และผลิตเป็นแผ่นฟิล์มบรรจุภัณฑ์ต่างๆ หนึ่งในนั้น คือ ฟิล์มสำหรับบรรจุอาหารและ นอกจากการใช้เป็นบรรจุภัณฑ์หีบห่อทั่วไปแล้ว ยังนำไปใช้ในงานด้านอื่นๆ เช่น ด้านการแพทย์ ด้าน สิ่งทอ และด้านเกษตรกรรม เป็นต้น [10-11, 13]



รูปที่ 2.3 สูตรโครงสร้างโมเลกุลของ PVA

## 2.3 พอลิเมอร์คอมโพสิต (Polymer composite) [22]

คอมโพสิตเป็นวัสดุที่ประกอบด้วยการรวมวัสดุมากกว่า 2 ประเภทเข้าด้วยกัน โดยทั่วไป ประกอบด้วยวัสดุที่เป็นเนื้อหลัก (matrix) และสารเติมแต่ง (Additive) ที่กระจายตัวอยู่ในเนื้อหลัก นั้น วัสดุที่เป็นเนื้อหลักจะรองรับวัสดุเสริมแรงให้อยู่ในรูปร่างที่กำหนด ขณะที่วัสดุเสริมแรงจะช่วย เพิ่มหรือปรับปรุงสมบัติเชิงกลของวัสดุเนื้อหลักให้สูงขึ้น ซึ่งวัสดุเสริมแรงอาจมีลักษณะเป็นเส้น เกล็ด

หรืออนุภาคก็ได้ กระจายตัวแทรกอยู่ในวัสดุเนื้อหลัก (base materials) อย่างโลหะ เซรามิกส์หรือพอลิเมอร์ ตัวอย่างผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์คอมโพสิต (polymer matrix composites, PMC) ที่พบเห็นได้ง่าย คือ ผลิตภัณฑ์ที่ทำจากไฟเบอร์กลาสต่างๆ พอลิเมอร์คอมโพสิตมีพอลิเมอร์ซึ่งอาจจะเป็นพลาสติกหรือยางเป็นเนื้อหลัก และใช้สารเติมแต่งได้หลายชนิด เช่น เส้นใย อนุภาคของโลหะ เป็นต้น

## 2.4 เทคโนโลยีด้านบรรจุภัณฑ์แอคทีฟ (Active Packaging)

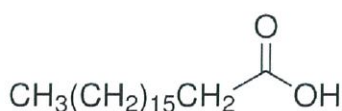
บรรจุภัณฑ์แอคทีฟ (Active Packaging) เป็นบรรจุภัณฑ์หรือวัสดุสำหรับบรรจุอาหารและผลิตผลทางการเกษตรที่ได้รับการศึกษาพัฒนาเพื่อป้องกันผลผลิตและอาหารไม่ให้เกิดความเสียหาย ยืดอายุและรักษาคุณภาพของผลผลิตให้คงอยู่สภาพเดิมได้นาน สมบัติของบรรจุภัณฑ์แอคทีฟที่ต้องการมีหลากหลาย เช่น สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียและเชื้อรา มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ ป้องกันการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและน้ำ ป้องกันการเปลี่ยนรสและกลิ่น และกำจัดก๊าซเอทิลีน เป็นต้น [1,2]

บรรจุภัณฑ์แอคทีฟที่มีคุณสมบัติในการกำจัดก๊าซเอทิลีนสามารถทำได้หลายรูปแบบ ได้แก่ การเคลือบสารดูดซับก๊าซเอทิลีน (Ethylene absorbers) บนพื้นผิวของพอลิเมอร์ (Coating) การผสมสารดูดซับเอทิลีนลงในพอลิเมอร์ (Blending/Incorporation) และการเพิ่มถุงที่บรรจุสารดูดซับเอทิลีนไปในบรรจุภัณฑ์ (Sachets/Pads) [3-6] โดยสารดูดซับเอทิลีนที่ใช้มีหลายประเภท เช่น โอโซน (O<sub>3</sub>) โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (Potassium permanganate, KMnO<sub>4</sub>) และอนุภาคอนินทรีย์ [6-9]

## 2.5 กรดสเตียริก (Stearic acid)

กรดสเตียริก มีสูตรโมเลกุล คือ C<sub>18</sub>H<sub>36</sub>O<sub>2</sub> เป็นสารที่พบได้ในไขมันและน้ำมันจากพืชและสัตว์ จึงมีความปลอดภัย มีคุณสมบัติช่วยสร้างความนุ่มนวล มักใช้เป็นส่วนผสมในผลิตภัณฑ์ระงับกลิ่นกาย โลชั่น ครีมรองพื้นและสบู่ นอกจากนี้ ยังใช้เป็นสารช่วยการกระจายตัวและเป็นสารเร่งหรือกระตุ้นปฏิกิริยาในยางคอมพาวด์หรือพอลิเมอร์ โดยกรดสเตียริกมีส่วนช่วยในการกระจายตัวของสารเติมแต่งหรือเม็ดสีต่างๆ อีกทั้งยังช่วยพัฒนากระบวนการผลิต เนื่องจากทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่นที่ช่วยเพิ่มความสามารถในการไหล และช่วยให้การอัดขึ้นรูปเป็นไปได้ง่ายขึ้นด้วย [23]

กรดสเตียริกเป็นสารยับยั้งแบคทีเรีย (Antibacterials) ประเภทหนึ่งที่ป้องกันไม่ให้อาหารเน่าเสีย มักใช้ผสมในวัสดุฟิล์มคอมโพสิต และยังเป็นสารที่ใช้ในการถนอมอาหาร (Food preservation) ได้อีกด้วย [16]



รูปที่ 2.4 สูตรโครงสร้างโมเลกุลของกรดสเตียริก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บรรจุภัณฑ์แอคทิฟได้รับการศึกษาและพัฒนาอย่างต่อเนื่องเพื่อเพิ่มคุณสมบัติและขีดความสามารถที่หลากหลายให้กับบรรจุภัณฑ์ สำหรับบรรจุภัณฑ์อาหารและผลผลิตทางการเกษตรที่มีสมบัติในการกำจัดก๊าซเอทิลีนเพื่อยืดอายุการเก็บรักษาอาหารสดมักอยู่ในรูปแบบของแผ่นฟิล์มที่ใส สารดูดซับเอทิลีนเคลือบหรือผสมลงในพอลิเมอร์ โดยในยุคแรกนิยมใช้โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ( $\text{KMnO}_4$ ) เป็นสารดูดซับเอทิลีน โดย Lidster และคณะ ได้ศึกษาการกำจัดก๊าซเอทิลีนในการเก็บรักษาแอปเปิ้ลโดยใช้  $\text{KMnO}_4$  เป็นสารดูดซับเอทิลีน พบว่า  $\text{KMnO}_4$  สามารถออกซิไดส์ก๊าซเอทิลีนและกำจัดก๊าซเอทิลีนได้ [6-7] อย่างไรก็ตาม ถึงแม้ว่า  $\text{KMnO}_4$  มีความสามารถในการกำจัดก๊าซเอทิลีนที่สูง แต่หากคำนึงถึงความปลอดภัยในการใช้งานด้านอาหาร  $\text{KMnO}_4$  สามารถออกซิไดซ์เอทิลีนทำให้เกิดเอทิลีนไกลคอล ซึ่งเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตได้ [1, 8]

จากข้อจำกัดดังกล่าว จึงนำไปสู่การพัฒนาวัสดุที่สามารถกำจัดก๊าซเอทิลีนชนิดอื่นที่ไม่เป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อม และมีราคาถูก อาทิ อนุภาคของ  $\text{TiO}_2$  ซึ่งจัดเป็นสารดูดซับเอทิลีนประเภทหนึ่งที่ได้รับความสนใจและมีการศึกษาเพิ่มมากขึ้นในปัจจุบัน โดยมีงานวิจัยเกี่ยวกับปฏิกิริยาการกระตุ้นด้วยแสงของ  $\text{TiO}_2$  ที่สามารถใช้อนุภาคของ  $\text{TiO}_2$  หรือสารแขวนลอยของอนุภาคของ  $\text{TiO}_2$  ในการกำจัดก๊าซเอทิลีนที่เกิดจากกระบวนการสุกของผักหรือผลไม้ในระหว่างเก็บรักษา ซึ่งสามารถช่วยชะลอการสุกได้ โดย Maneerat และคณะ ได้ศึกษาปฏิกิริยาการกระตุ้นด้วยแสงของ  $\text{TiO}_2$  ที่สามารถกำจัดก๊าซเอทิลีนในระหว่างการเก็บรักษาผักและผลไม้ พบว่า เม็ดแก้ว (Glass beads) ที่เคลือบด้วยอนุภาคของ  $\text{TiO}_2$  ภายใต้การฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตสามารถกำจัดก๊าซเอทิลีนได้ [8]

Park และคณะ ได้ศึกษาปฏิกิริยาการกระตุ้นด้วยแสงของ  $\text{TiO}_2$  ในการกำจัดก๊าซเอทิลีน พบว่า อนุภาค  $\text{TiO}_2$  เกิดปฏิกิริยาการกระตุ้นด้วยแสงภายใต้การฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตที่มีน้ำและก๊าซออกซิเจนสามารถออกซิไดส์เอทิลีนให้กลายเป็น  $\text{CO}_2$  และ  $\text{H}_2\text{O}$  ได้ [9] อย่างไรก็ตาม ถึงแม้ว่าอนุภาคของ  $\text{TiO}_2$  มีคุณสมบัติที่เหมาะสมกับการนำมาใช้งานด้านบรรจุภัณฑ์แอคทิฟ แต่อนุภาคของ  $\text{TiO}_2$  มีพลังงานพื้นผิวสูงและความไม่เข้ากันของอนุภาคของ  $\text{TiO}_2$  กับพอลิเมอร์ จึงทำให้อนุภาคของ  $\text{TiO}_2$  จับตัวเป็นก้อนในคอมโพสิต

จากข้อจำกัดดังกล่าว ได้มีนักวิจัยหลายคนพยายามศึกษาค้นคว้าเพื่อหาวิธีป้องกันการจับตัวเป็นก้อนของอนุภาคของ  $\text{TiO}_2$  เช่น การปรับแต่งพื้นผิวของอนุภาค  $\text{TiO}_2$  ด้วยสารเพิ่มความเสถียร โดย Shadpour และ Marzieh ได้ศึกษาการกระจายตัวของอนุภาค  $\text{TiO}_2$  ที่ผ่านการปรับพื้นผิวด้วยวิตามิน  $\text{B}_1$  และศึกษาสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางกลและสมบัติทางความร้อนของคอมโพสิตระหว่างพอลิไวนิลแอลกอฮอล์และ  $\text{TiO}_2$  พบว่า อนุภาค  $\text{TiO}_2$  ที่ผ่านการปรับผิวด้วยวิตามิน  $\text{B}_1$  มีการกระจายตัวที่ดีกว่าอนุภาคที่ไม่ผ่านการปรับผิว และแผ่นฟิล์มคอมโพสิตพอลิไวนิลแอลกอฮอล์มีความเสถียรทางความร้อนและสมบัติทางกล เช่น การยืด ณ จุดขาด (Elongation at break) และค่าโมดูลัส (Young's modulus) มากกว่าแผ่นฟิล์มพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ไม่มี  $\text{TiO}_2$  [13]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Yongquan และคณะ ได้พัฒนาพื้นผิวคอมโพสิตระหว่าง  $\text{TiO}_2$  และพอลิไดเมทิลไซลอกเซน (Polydimethylsiloxane, PDMS) ที่มีสมบัติไม่ชอบน้ำยิ่งยวดและทนต่อการกัดกร่อนบนผิววัสดุทองแดง (Cu substrate) โดยปรับพื้นผิวอนุภาค  $\text{TiO}_2$  ด้วยกรดสเตียริก (Stearic acid) และสารประกอบของไซเลน Heptadecafluoro-1,1,2,2-tetradecyl trimethoxysilane, FAS) พบว่ากรดสเตียริกและ FAS ช่วยให้อนุภาค  $\text{TiO}_2$  กระจายตัวดีขึ้น และพื้นผิวคอมโพสิตที่เตรียมได้มีสมบัติไม่ชอบน้ำยิ่งยวดและทนต่อการกัดกร่อน [14]

Jalili และคณะ ได้ศึกษาการกระจายตัวของอนุภาค  $\text{TiO}_2$  ที่ผ่านการปรับพื้นผิวด้วยกรดสเตียริก (Stearic acid) และกรดโอเลอิก (Oleic acid) ในสารละลายตัวกลาง พบว่า อนุภาคของ  $\text{TiO}_2$  ที่ผ่านการปรับผิวมีการกระจายตัวที่ดีกว่าอนุภาคที่ไม่ผ่านการปรับผิว โดยกรดสเตียริกมีประสิทธิภาพต่อการกระจายตัวของอนุภาค  $\text{TiO}_2$  ดีกว่ากรดโอเลอิก [15] จากข้อมูลดังกล่าวยังไม่มีการศึกษาเมื่อนำมาทำเป็นฟิล์มคอมโพสิต รวมถึงสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางกลและการกำจัดก๊าซเอทิลีน จึงเป็นข้อมูลที่น่าสนใจในการพัฒนาบรรจุภัณฑ์แอคทีฟ



## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงาน

งานวิจัยนี้สนใจที่จะพัฒนาแผ่นฟิล์มคอมโพสิตระหว่างพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) กับอนุภาค  $\text{TiO}_2$  ที่มีสมบัติหลากหลาย (Multifunctional composite film) ที่สามารถกำจัดก๊าซเอทิลีน และมีความยืดหยุ่นดีขึ้นเพื่อใช้งานในด้านบรรจุภัณฑ์สำหรับบรรจุผลผลิตทางการเกษตร ที่สามารถเตรียมได้ง่ายและราคาไม่แพง เริ่มต้นจากการปรับพื้นผิวอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ชนิดอนาเทสด้วยกรดสเตียริก ตรวจสอบการกระจายตัวของอนุภาค  $\text{TiO}_2$  แล้วผสมลงในพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ เพื่อเตรียมเป็นแผ่นฟิล์มคอมโพสิต จากนั้นศึกษาปริมาณของ  $\text{TiO}_2$  ที่เหมาะสมในการเตรียมแผ่นฟิล์มคอมโพสิต โดยศึกษาลักษณะ สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางกล และความสามารถในการกำจัดก๊าซเอทิลีนของแผ่นฟิล์มคอมโพสิตที่เตรียมได้

#### 3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. เม็ดพลาสติกพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinyl alcohol, PVA); MW 85,000-124,000
2. ไทเทเนียมไดออกไซด์ ชนิดอนาเทส (Anatase) ขนาด 10 นาโนเมตร
3. กรดสเตียริก (Stearic acid)
4. เฮกเซน (n-Hexane)
5. น้ำกลั่น (Deionized water)

#### 3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1. บีกเกอร์ (Beaker)
2. กระบอกลวด (Cylinder)
3. ขวดรูปชมพู่ (Erlenmeyer flask)
4. ขวดก้นกลม (Round bottom flask) และเซปตัม (Septum)
5. ขวดโหลแก้ว (Glass bottom) และฝาปิด (Screw cap)
6. ช้อนตักสาร (Spatula)
7. จานเพาะเชื้อ (Petri dish)
8. ปิเปต (Pipette)
9. เครื่องกวนสารละลายพร้อมให้ความร้อน (Temperature-controlled Magnetic stirrer) และแท่งกวนแม่เหล็ก (Magnetic bar)
10. ขาตั้งและตัวหนีบจับ (Stand and clamp)
11. ถาด (Tray)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

12. เครื่องหมุนเหวี่ยง (Centrifuge) และหลอดหมุนเหวี่ยง (Centrifuge tube)
13. เครื่องสั่นความถี่สูง (Sonicator)
14. ตู้อบ (Oven)
15. เครื่องควบแน่น (Condenser)
16. เครื่องชั่งน้ำหนัก (Analytical balance)
17. ตู้ดูดความชื้น (Desiccator)
18. ไมโครมิเตอร์ (Micrometer)
19. อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (Water bath)
20. อ่างน้ำมันควบคุมอุณหภูมิ (Oil bath)

### 3.3 การปรับพื้นผิวของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยกรดสเตียริก [15]

1. เตรียมขวดก้นกลมที่มีเฮกเซน ปริมาตร 50 มิลลิลิตร
2. ใส่กรดสเตียริก 0.125 กรัม ลงในเฮกเซนที่เตรียมไว้ แล้วกวนด้วยเครื่องกวนสารละลายที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที
3. ใส่ไทเทเนียมไดออกไซด์ชนิดอนาเทส 0.5 กรัม ลงในสารละลายที่เตรียมได้ในข้อ 2) แล้วกวนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง
4. นำสารละลายที่ได้ใส่หลอดหมุนเหวี่ยงแล้วนำไปแยกโดยใช้เครื่องหมุนเหวี่ยง ความเร็วรอบ 4,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที
5. ล้างสารที่ได้ในข้อ 4) ด้วยเฮกเซนหลายครั้ง
6. นำสารที่ได้ไปแยกจากสารละลายใส่จานเพาะเชื้อ แล้วนำไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นเก็บอนุภาคที่ได้ในตู้ดูดความชื้นก่อนนำไปทดสอบต่อไป

### 3.4 การวิเคราะห์และตรวจสอบสมบัติของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการปรับพื้นผิวด้วยกรดสเตียริก

ตรวจสอบสมบัติของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการปรับพื้นผิวอนุภาคด้วยกรดสเตียริก โดยการตรวจสอบโครงสร้างผลึกของอนุภาค  $\text{TiO}_2$  ด้วยเทคนิคเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน (X-ray Diffraction, XRD) วิเคราะห์โครงสร้างของอนุภาค  $\text{TiO}_2$  ด้วยเทคนิคการดูดกลืนรังสีในช่วงอินฟราเรด (Fourier Transform Infrared Spectrometer, FTIR) หาปริมาณกรดที่ใช้ในการปรับแต่งผิวของอนุภาคด้วยเครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อน (Thermo gravimetric Analysis, TGA) ดูขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่าน (Transmission Electron Microscope, TEM) และวิเคราะห์ความเสถียรในการกระจายตัวของอนุภาคด้วยการทดสอบความเสถียรในการกระจายตัวในน้ำ (Dispersion stability test)

### 3.5 การเตรียมแผ่นฟิล์มคอมโพสิตระหว่างพอลิไวนิลแอลกอฮอล์กับไทเทเนียม-ไดออกไซด์ที่ผ่านการปรับพื้นผิวอนุภาคด้วยกรดสเตียริก [13]

1. เตรียมขวดโหลแก้วที่มีน้ำกลั่น ปริมาตร 50 มิลลิลิตร
2. ใส่เม็ดพลาสติกพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ปริมาณ 2.25 กรัมลงในน้ำกลั่นที่เตรียมไว้เพื่อละลายเม็ดพลาสติก แล้วกวนด้วยเครื่องกวนสารละลายที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
3. ใส่ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการปรับพื้นผิวอนุภาคด้วยกรดสเตียริกแล้วที่ความเข้มข้น 0.1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของสารทั้งหมดลงในหลอดหมุนเหวี่ยงที่มีน้ำกลั่น 25 มิลลิลิตร แล้วใช้เครื่องสั่นความถี่สูงกระจายอนุภาค เป็นเวลา 10 นาที
4. ใส่สารแขวนลอย  $\text{TiO}_2$  ที่ได้ในข้อ 3) ลงในขวดแก้วที่มีพลาสติกหลอมที่ได้ในข้อ 2) แล้วกวนด้วยเครื่องกวนสารละลายที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
5. เทสารในข้อ 4) ใส่บนถาด แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง จากนั้นเก็บที่อุณหภูมิห้อง
6. การเตรียมแผ่นฟิล์ม PVA บริสุทธิ์ ทำตามข้อ 1-2) โดยเปลี่ยนปริมาตรน้ำกลั่นที่ใช้เป็น 75 มิลลิลิตร จากนั้นเทสารที่ได้ใส่บนถาด แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง และเก็บที่อุณหภูมิห้อง
7. ทำซ้ำข้อ 1-5) โดยเปลี่ยนปริมาณ  $\text{TiO}_2$  ในข้อ 3) เป็น 0.5 และ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของสารทั้งหมด ตามลำดับ

### 3.6 การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของแผ่นฟิล์ม

วิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพ เช่น ความใส ความหนา ลักษณะและสีของการกระจายตัวของแผ่นฟิล์ม โดยวัดความหนาของแผ่นฟิล์มที่ได้ด้วยไมโครมิเตอร์ และทดสอบการดูดซับน้ำของแผ่นฟิล์มคอมโพสิต (Swelling test) [24]

### 3.7 การทดสอบสมบัติทางกลของแผ่นฟิล์ม

ตัดแผ่นฟิล์ม PVA บริสุทธิ์ แผ่นฟิล์ม PVA ที่ผสมอนุภาคที่ไม่ผ่านการปรับผิวและแผ่นฟิล์ม PVA ที่ผสมอนุภาคที่ผ่านการปรับผิวที่ความเข้มข้นต่างๆ ให้มีขนาด  $0.6 \times 10$  เซนติเมตร เพื่อทดสอบการทนต่อแรงดึง (Tensile test) และการยืด ณ จุดขาด (Elongation at Break) ตามมาตรฐาน ASTM638

### 3.8 การทดสอบการกำจัดก๊าซเอทิลีนของแผ่นฟิล์ม [8]

การทดสอบการกำจัดก๊าซเอทิลีนสามารถทำได้โดยการทดสอบการสุกของผลไม้ (Fruit ripening test) โดยนำผลไม้ที่ต้องการทดสอบ ได้แก่ กกล้วยและพริกเก็บในกล่องพลาสติกสีขาวขุ่นที่มีลักษณะเหมือนกันและมีแผ่นฟิล์ม PVA บริสุทธิ์ PVA ที่ผสมอนุภาคที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับผิวด้วยกรดสเตียริกที่ความเข้มข้นต่างๆ ห่อหุ้มอยู่ด้านบน จากนั้นดูลักษณะและการเปลี่ยนสีของผลไม้และเก็บบันทึกข้อมูล ตลอดระยะเวลา 2 สัปดาห์



## บทที่ 4

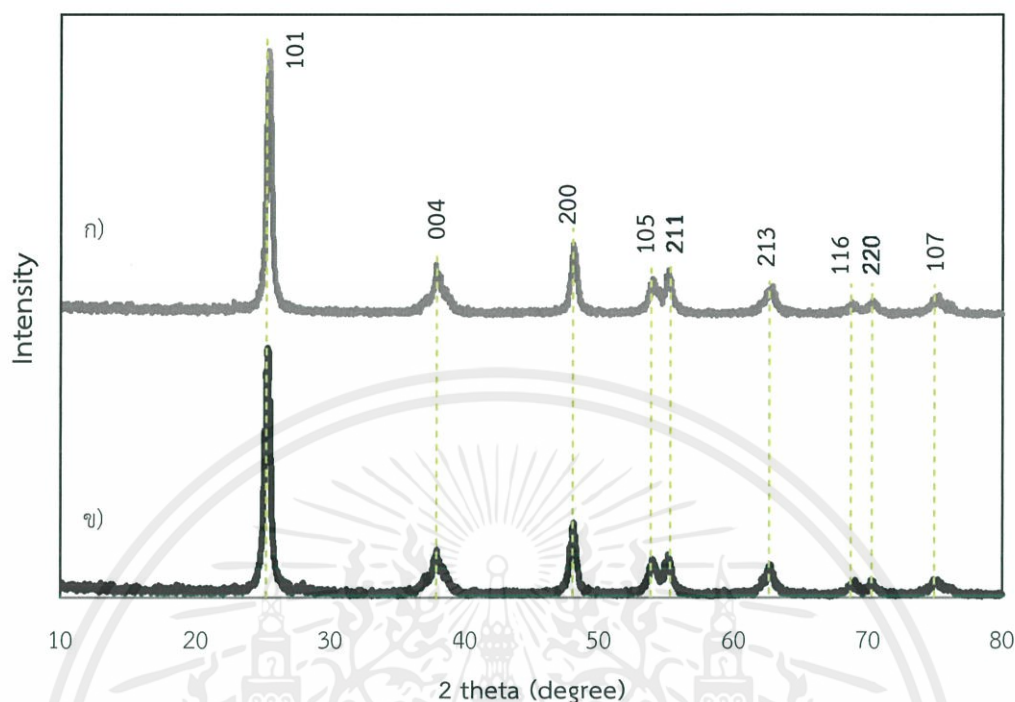
### ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

งานวิจัยนี้ศึกษาการปรับพื้นผิวของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ ) ด้วยกรดสเตียริก โดยใช้เทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (X-ray Diffraction, XRD) ในการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของอนุภาค  $\text{TiO}_2$  เทคนิควิเคราะห์การดูดกลืนรังสีในช่วงอินฟราเรด (Fourier Transform Infrared Spectrometer, FTIR) ในการตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันของอนุภาค  $\text{TiO}_2$  เทคนิควิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อน (Thermo gravimetric Analysis, TGA) เพื่อหาปริมาณกรดที่ใช้ในการปรับแต่งผิวของอนุภาค  $\text{TiO}_2$  กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่าน (Transmission Electron Microscope, TEM) ในการดูขนาดและการกระจายตัวของอนุภาค  $\text{TiO}_2$  และทดสอบความเสถียรในการกระจายตัวในน้ำ (Dispersion stability test) ในการวิเคราะห์ความเสถียรในการกระจายตัวของอนุภาค  $\text{TiO}_2$  จากนั้น เตรียมแผ่นฟิล์มคอมโพสิตระหว่างพอลิไวนิลแอลกอฮอล์กับอนุภาค  $\text{TiO}_2$  ทั้งที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับผิว และศึกษาลักษณะทางกายภาพ สมบัติเชิงกล และความสามารถในการกำจัดก๊าซเอทิลีนของแผ่นฟิล์มคอมโพสิต

#### ตอนที่ 1

##### 4.1 การปรับพื้นผิวของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยกรดสเตียริก

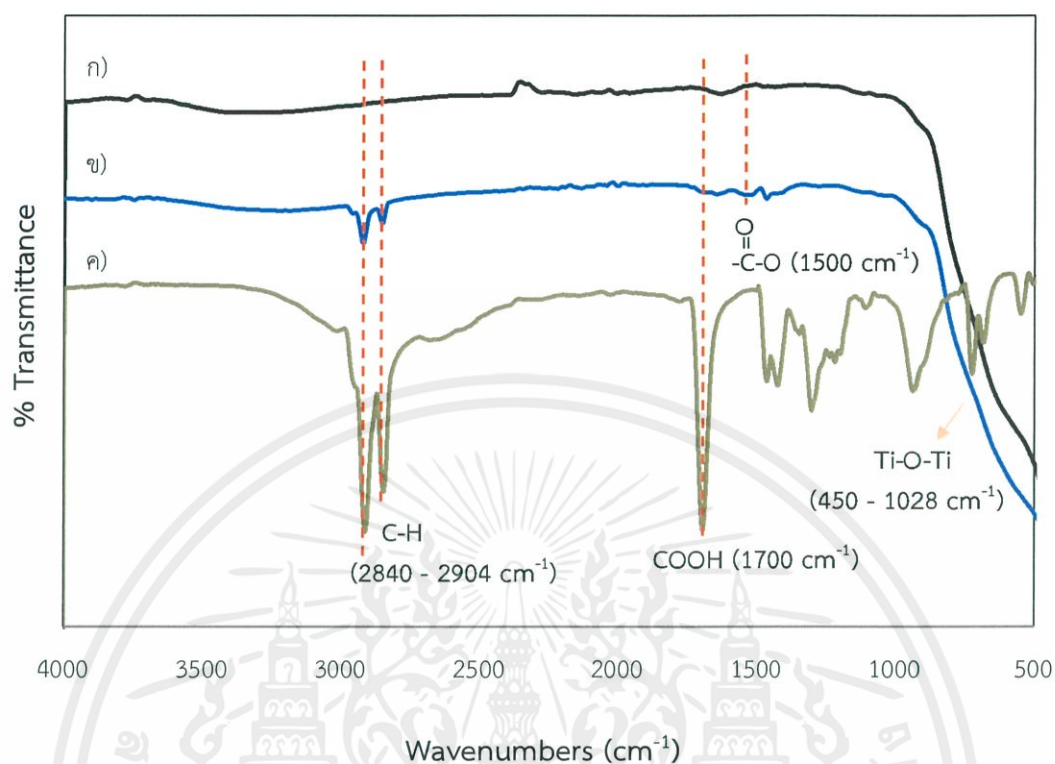
การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพเพื่อตรวจสอบโครงสร้างผลึกของอนุภาค  $\text{TiO}_2$  ชนิดอนาเทส และอนุภาค  $\text{TiO}_2$  ที่ผ่านการปรับพื้นผิวด้วยกรดสเตียริก (STA- $\text{TiO}_2$ ) โดยใช้เทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (X-ray Diffractometer, XRD) พบว่า พีค XRD ของอนุภาค  $\text{TiO}_2$  ก่อนและหลังการปรับหมู่ฟังก์ชันด้วยกรดสเตียริกตรงกับพีคอ้างอิงของโครงสร้างผลึกของอนุภาค  $\text{TiO}_2$  ชนิดอนาเทส โดยมีพีคอยู่ที่ 25.32 37.80 48.05 53.89 55.06 62.12 68.76 70.31 และ 74.03° ตามเลขระนาบ (101) (004) (200) (105) (211) (213) (116) (220) และ (107) ตามลำดับ บ่งชี้ว่าอนุภาค  $\text{TiO}_2$  ทั้ง 2 ตัวอย่างมีโครงสร้างผลึกชนิดอนาเทสเหมือนกัน แสดงว่าสภาวะที่ใช้ในการปรับผิวของอนุภาคไม่ทำให้โครงสร้างผลึกของอนุภาค  $\text{TiO}_2$  เปลี่ยนไป



รูปที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์ XRD ของอนุภาค STA-TiO<sub>2</sub> (ก) และ TiO<sub>2</sub> (ข)

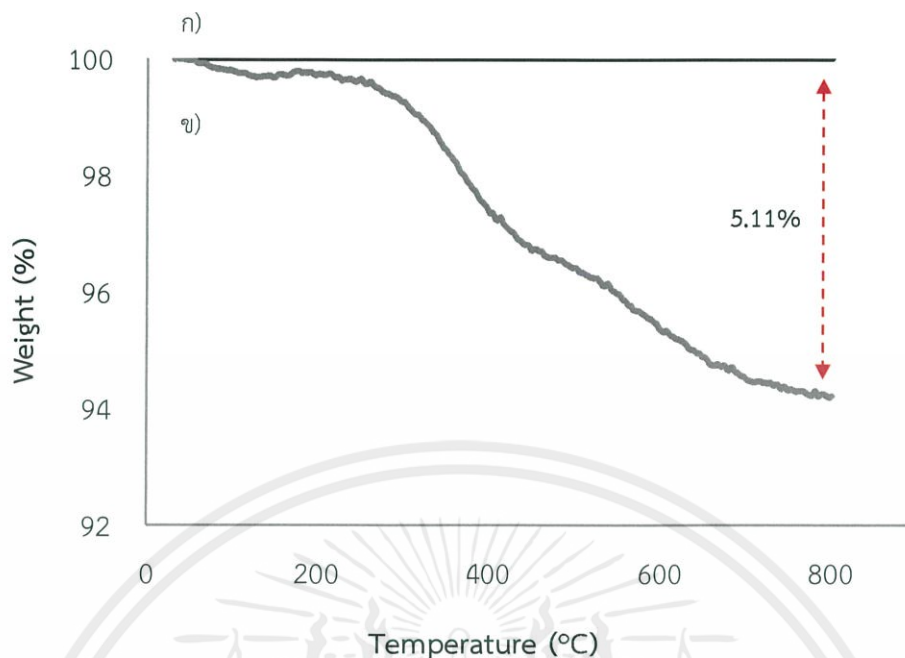
หลังจากนั้น วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันที่ผิวของอนุภาค TiO<sub>2</sub> และ TiO<sub>2</sub> ที่ผ่านการปรับผิวด้วยกรดสเตียริก (STA-TiO<sub>2</sub>) โดยการดูดกลืนรังสีในช่วงอินฟราเรด (Fourier Transform Infrared Spectrometer, FTIR) และวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อน (Thermo gravimetric Analysis, TGA) เพื่อหาปริมาณกรดที่ติดบนพื้นผิวของอนุภาค TiO<sub>2</sub>

จากกราฟ FTIR ในรูปที่ 4.2 อนุภาค TiO<sub>2</sub> ที่ผ่านการปรับผิวด้วยกรดสเตียริกแสดงพีกที่เป็นลักษณะของทั้งกรดสเตียริกและอนุภาค TiO<sub>2</sub> คือ พีกของพันธะ Ti-O-Ti พีก Stretching vibration ของพันธะ C-H ในหมู่ Methylene groups และพีกของพันธะ C=O ซึ่งเป็นการยืนยันว่ามีกรดสเตียริกติดอยู่บนผิวของอนุภาค TiO<sub>2</sub>



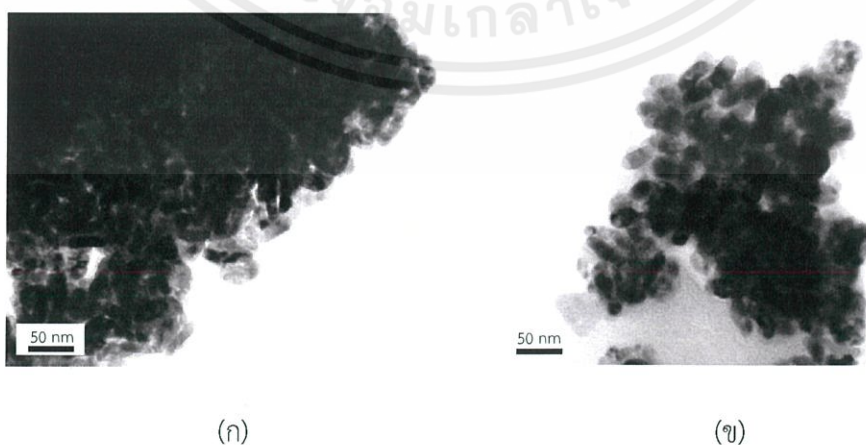
รูปที่ 4.2 ผล FTIR ของอนุภาค TiO<sub>2</sub> (ก) อนุภาค STA-TiO<sub>2</sub> (ข) และกรดสเตรียริก (ค)

เมื่อทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค TGA จากรูปที่ 4.3 พบว่า อนุภาค STA-TiO<sub>2</sub> มีน้ำหนักรวมลดลงประมาณ 5.11 เปอร์เซ็นต์ โดยมีการลดลงของน้ำหนักตั้งแต่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียสถึง 800 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิที่กรดสเตรียริกเริ่มมีการย่อยสลาย และผลจากการควบแน่นของหมู่ -OH ที่มีอยู่ โดยที่อนุภาคของ TiO<sub>2</sub> ที่ไม่ผ่านการปรับแต่งผิวไม่มีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งผลที่ได้จากเทคนิค TGA และ FTIR ช่วยยืนยันการมีโมเลกุลของกรดสเตรียริกบนผิวอนุภาค TiO<sub>2</sub>



รูปที่ 4.3 ผล TGA ของอนุภาค TiO<sub>2</sub> (ก) และ STA-TiO<sub>2</sub> (ข)

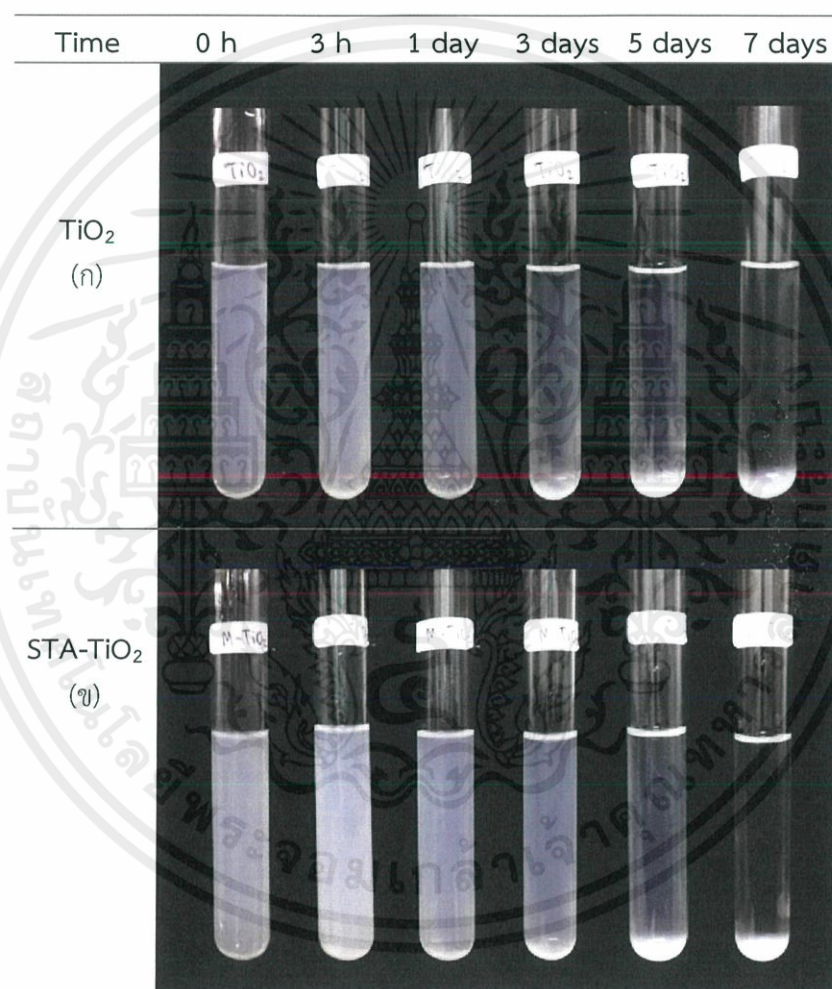
หลังจากนั้น นำอนุภาค TiO<sub>2</sub> ทั้งที่ผ่านการปรับผิวและไม่ผ่านการปรับผิวไปหาขนาดเฉลี่ย และดูการกระจายตัวของอนุภาค TiO<sub>2</sub> ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่าน (Transmission Electron Microscope, TEM) พบว่า ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของอนุภาคอยู่ที่ประมาณ 10 นาโนเมตร โดยการปรับหมู่ฟังก์ชันไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะและขนาดของอนุภาค และพบว่า อนุภาค TiO<sub>2</sub> ที่ผ่านการปรับผิวด้วยกรดสเตียริก (STA-TiO<sub>2</sub>) มีการจับตัวเป็นก้อนน้อยกว่า อนุภาค TiO<sub>2</sub> ที่ไม่ผ่านการปรับผิว เนื่องจากผลของกรดสเตียริก และความมีขี้ผึ้งที่ลดลงเนื่องจาก โมเลกุลของกรดสเตียริกบนผิวอนุภาค แต่ทั้งนี้ปริมาณกรดสเตียริกอาจยังไม่เพียงพอ จึงยังพบการจับตัวของอนุภาคหลงเหลืออยู่



รูปที่ 4.4 ภาพ TEM ของอนุภาค TiO<sub>2</sub> (ก) และ STA-TiO<sub>2</sub> (ข) ที่กำลังขยาย 135,000X

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลที่ได้จากการสังเกตการกระจายตัวของอนุภาคด้วยกล้อง TEM นั้นสอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดสอบความเสถียรในการกระจายตัว (Dispersion stability test) ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ความเสถียรในการกระจายตัวของอนุภาค  $\text{TiO}_2$  และ STA- $\text{TiO}_2$  จากการแขวนลอยในน้ำเป็นระยะเวลา 7 วัน พบว่า อนุภาค STA- $\text{TiO}_2$  มีการตกตะกอนเร็วกว่ากับอนุภาค  $\text{TiO}_2$  เพียงเล็กน้อย เนื่องจากความไม่มีขี้ (Hydrophobic) ของอนุภาค แสดงให้เห็นถึงความเสถียรในการกระจายตัวของอนุภาคในสารตัวกลาง ซึ่งถือเป็นการยืนยันความสำเร็จในการปรับแต่งพื้นผิวของอนุภาค  $\text{TiO}_2$  ด้วยกรดสเตียริก



รูปที่ 4.5 ภาพการตกตะกอนของอนุภาค  $\text{TiO}_2$  (ก) และ STA- $\text{TiO}_2$  (ข)

## ตอนที่ 2

### 4.2 การวิเคราะห์และตรวจสอบลักษณะทางกายภาพของแผ่นฟิล์มคอมโพสิต

การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพ ได้แก่ ความใส ความหนา ลักษณะและสีของการกระจายตัวของอนุภาค  $\text{TiO}_2$  ในแผ่นฟิล์ม โดยวัดความหนาของแผ่นฟิล์มที่ได้ด้วยไมโครมิเตอร์ พบว่าแผ่นฟิล์มคอมโพสิตมีความหนาเฉลี่ย 0.4-0.5 มิลลิเมตร และเมื่อวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของแผ่นฟิล์มเปรียบเทียบระหว่างแผ่นฟิล์ม PVA ล้วน (Control) แผ่นฟิล์มคอมโพสิต PVA/ $\text{TiO}_2$  และแผ่นฟิล์มคอมโพสิต PVA/STA- $\text{TiO}_2$  จากตารางที่ 4.1 พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณของอนุภาค  $\text{TiO}_2$  ทั้งที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับหมู่ฟังก์ชันลงใน PVA เมทริกซ์ แผ่นฟิล์มคอมโพสิตจะมีสีขาวขุ่นเพิ่มขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบสีของการกระจายตัวของแผ่นฟิล์ม พบว่า แผ่นฟิล์มคอมโพสิต PVA/ $\text{TiO}_2$  มีลักษณะและสีของการกระจายตัวไม่สม่ำเสมอ แต่แผ่นฟิล์มคอมโพสิต PVA/STA- $\text{TiO}_2$  มีความเรียบและสม่ำเสมอเป็นเนื้อเดียวกันมากกว่า จึงอาจกล่าวได้ว่ากรดสเตียริกที่ใช้ในการปรับผิวอนุภาคช่วยเพิ่มการกระจายตัวของ  $\text{TiO}_2$  ใน PVA เมทริกซ์

ตารางที่ 4.1 ภาพแผ่นฟิล์ม PVA/ $\text{TiO}_2$  และ PVA/STA- $\text{TiO}_2$  ที่ความเข้มข้นร้อยละ 0 0.1 0.5 และ 1 โดยน้ำหนัก

$\text{TiO}_2$ contents (wt%)	PVA/ $\text{TiO}_2$		PVA/STA- $\text{TiO}_2$	
0 (Pure)				
0.1				
0.5				
1 wt%				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

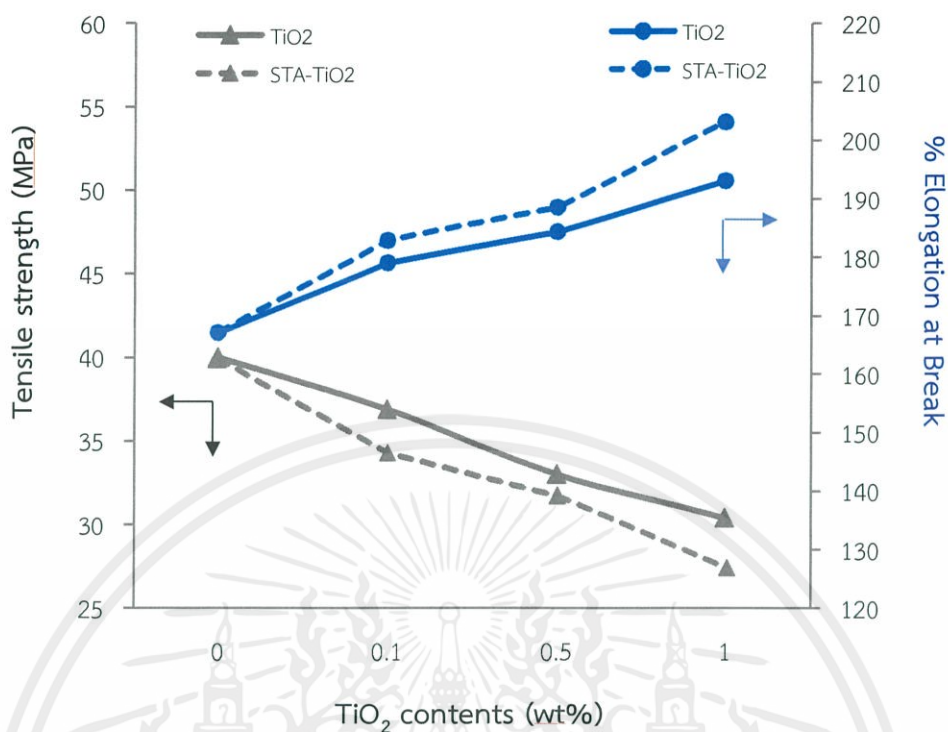
ตารางที่ 4.2 ค่าดัชนีการดูดซับน้ำ (%Swelling index) ของแผ่นฟิล์ม PVA/ TiO<sub>2</sub> และ PVA/STA-TiO<sub>2</sub> ที่ความเข้มข้นร้อยละ 0 0.1 0.5 และ 1 โดยน้ำหนัก

PVA film	TiO <sub>2</sub> contents (wt%)	%Swelling index
Pure PVA	0	50.32
PVA/TiO <sub>2</sub>	0.1	46.32
	0.5	44.29
	1	41.26
PVA/STA-TiO <sub>2</sub>	0.1	38.67
	0.5	35.62
	1	32.85

จากตารางที่ 4.2 พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณของอนุภาค TiO<sub>2</sub> ใน PVA จะส่งผลให้การดูดซับน้ำของแผ่นฟิล์มคอมโพสิตลดลง โดยแผ่นฟิล์มคอมโพสิต PVA/STA-TiO<sub>2</sub> มีการดูดซับน้ำน้อยกว่าแผ่นฟิล์ม PVA/TiO<sub>2</sub> อาจเป็นผลมาจากอนุภาค STA-TiO<sub>2</sub> มีพื้นที่ผิวต่อปริมาตรและความไม่มีขั้วสูง จึงทำหน้าที่เสมือนเป็นตัวกั้นความชื้นของแผ่นฟิล์ม ทำให้ดูดซับน้ำและให้น้ำซึมผ่านได้น้อยลง ซึ่งเป็นสมบัติที่ต้องการของแผ่นฟิล์มบรรจุภัณฑ์

#### 4.3 การทดสอบสมบัติทางกลของแผ่นฟิล์มคอมโพสิต

การทดสอบการทนต่อแรงดึง (Tensile strength) และร้อยละการยืด ณ จุดขาด (Elongation at Break) โดยเปรียบเทียบแผ่นฟิล์ม PVA ที่ผสมอนุภาคทั้งที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับผิวด้วยกรดสเตียริกที่ความเข้มข้นร้อยละ 0 (Pure) 0.1 0.5 และ 1 โดยน้ำหนัก จาก รูปที่ 4.6 พบว่า Tensile strength ของแผ่นฟิล์ม PVA/STA-TiO<sub>2</sub> มีค่าต่ำกว่าแผ่นฟิล์ม PVA/TiO<sub>2</sub> และ PVA ล้วน (Pure) ตามลำดับ แต่ค่า Elongation at Break สูงกว่า อาจเป็นผลมาจากอนุภาค STA/TiO<sub>2</sub> ที่มากขึ้นทำให้ STA-TiO<sub>2</sub> สอดแทรกอยู่ระหว่างสายโซ่ของ PVA เกิดการเปลี่ยนสภาพโครงสร้างที่จับตัวกันของ PVA ทำให้ Tensile strength ลดลง นอกจากนี้ ค่า Elongation at Break ที่เพิ่มขึ้นอาจเป็นผลมาจากอนุภาค STA-TiO<sub>2</sub> เป็นตัวเชื่อมโครงสร้างใน PVA ทำให้มีโครงสร้างที่พันกันซับซ้อนมากขึ้น โดยค่า Elongation at Break ที่เพิ่มขึ้นทำให้แผ่นฟิล์มมีความยืดหยุ่นมากขึ้น [13] ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าแผ่นฟิล์มคอมโพสิตมีสมบัติทางกล อาทิ Elongation at Break และความยืดหยุ่นดีขึ้น ถือเป็นลักษณะที่สำคัญของแผ่นฟิล์มบรรจุภัณฑ์



รูปที่ 4.6 ค่า Tensile strength (ซ้าย) และ Percentage of Elongation at Break (ขวา) ของแผ่นฟิล์ม PVA/TiO<sub>2</sub> (เส้นทึบ) และ PVA/STA-TiO<sub>2</sub> (เส้นประ) ที่มี TiO<sub>2</sub> ร้อยละ 0 0.1 0.5 และ 1 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาค่า Tensile strength และค่า Percentage of Elongation at Break ของแผ่นฟิล์ม PVA แผ่นฟิล์ม PVA/TiO<sub>2</sub> และแผ่นฟิล์ม PVA/STA-TiO<sub>2</sub> เปรียบเทียบกันเพื่อหาปริมาณ TiO<sub>2</sub> ที่เหมาะสมที่สุด พบว่า ปริมาณ TiO<sub>2</sub> ร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักเป็นค่าที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากแผ่นฟิล์มคอมโพสิตที่ความเข้มข้นดังกล่าวมีค่า Percentage Elongation at Break สูง ในขณะที่ค่า Tensile strength ไม่ต่ำเกินไป

#### 4.4 การทดสอบการกำจัดก๊าซเอทิลีนของแผ่นฟิล์มคอมโพสิต

การทดสอบการกำจัดก๊าซเอทิลีนผ่านการทดสอบการสุกของผลไม้ (Fruit ripening test) มีผักและผลไม้ที่ต้องการทดสอบ คือ ก้อยและพริก โดยนำตัวอย่างเก็บในกล่องพลาสติกสีขาวขุ่นที่ไม่มีแผ่นฟิล์ม มีแผ่นฟิล์ม PVA บริสุทธิ์ PVA ที่ผสมอนุภาคที่ไม่ผ่านและผ่านการปรับผิวด้วยกรดเตตระอิกที่ความเข้มข้นต่างๆ ห่อหุ้มอยู่ด้านบน โดยเก็บที่อุณหภูมิห้อง เป็นระยะเวลา 12 และ 10 วันสำหรับทดสอบก้อยและพริก ตามลำดับ แล้วถ่ายรูปติดตามผลการเปลี่ยนแปลงดังตารางที่ 4.3 และ 4.4 พบว่า ก้อยและพริกที่ห่อหุ้มด้วยแผ่นฟิล์ม PVA/STA-TiO<sub>2</sub> มีการเปลี่ยนสีที่บ่งบอกถึงการสุกช้ากว่า ก้อยและพริกที่ห่อหุ้มด้วยแผ่นฟิล์ม PVA บริสุทธิ์ แผ่นฟิล์ม PVA/TiO<sub>2</sub> และที่ไม่ห่อหุ้มด้วยฟิล์มแต่ปิด

ด้วยฟลักล่อง ซึ่งเป็นผลมาจากการเกิดปฏิกิริยาการกระตุ้นด้วยแสงของ  $\text{TiO}_2$  ที่สามารถย่อยสลาย ก๊าซเอทิลีนซึ่งเป็นสารประกอบอินทรีย์ได้ เป็นการยืนยันว่าแผ่นฟิล์มคอมโพสิต  $\text{PVA/TiO}_2$  สามารถย่อยสลายก๊าซเอทิลีนเพื่อยืดอายุการสุกและเก็บรักษาผลไม้ได้

ตารางที่ 4.3 การทดสอบการสุกของผลไม้โดยดูการเปลี่ยนสีของกล้วยที่ไม่ปิดและปิดด้วยแผ่นฟิล์ม  $\text{PVA/TiO}_2$  และ  $\text{PVA/STA-TiO}_2$  ที่ความเข้มข้นร้อยละ 0 0.1 0.5 และ 1 โดยน้ำหนัก

Time	Pure PVA	$\text{PVA/TiO}_2$			$\text{PVA/STA-TiO}_2$			No film
		0.1%	0.5%	1%	0.1%	0.5%	1%	
0 h								
7 days								
10 days								
12 days								

ตารางที่ 4.4 การทดสอบการสุกของผลไม้โดยดูการเปลี่ยนสีของพริกที่ไม่ปิดและปิดด้วยแผ่นฟิล์ม  $\text{PVA/TiO}_2$  และ  $\text{PVA/STA-TiO}_2$  ที่ความเข้มข้นร้อยละ 0 0.1 0.5 และ 1 โดยน้ำหนัก

Time	Pure PVA	$\text{PVA/TiO}_2$			$\text{PVA/STA-TiO}_2$			No film
		0.1%	0.5%	1%	0.1%	0.5%	1%	
0 h								
5 days								
10 days								

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อเปรียบเทียบกล้วยและพริกที่ไม่ห่อและห่อหุ้มด้วยแผ่นฟิล์ม PVA แผ่นฟิล์ม PVA/TiO<sub>2</sub> และแผ่นฟิล์ม PVA/STA-TiO<sub>2</sub> เพื่อหาปริมาณ TiO<sub>2</sub> ที่เหมาะสมที่สุด พบว่า แผ่นฟิล์มคอมโพสิตที่มีปริมาณ TiO<sub>2</sub> ร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก มีการเปลี่ยนสีของกล้วยและพริกที่ช้ากว่า และลักษณะของกล้วยและพริกยังคงอยู่ในสภาพที่ดีกว่า ซึ่งสอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดสอบสมบัติทางกล



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

# สรุปผลการทดลอง

### 5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ศึกษาและพัฒนาแผ่นฟิล์มคอมโพสิตระหว่างพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) กับอนุภาค  $\text{TiO}_2$  ที่มีสมบัติหลากหลายที่สามารถกำจัดก๊าซเอทิลีนเพื่อยืดอายุของผักและผลไม้ และมีความยืดหยุ่นดีขึ้นเพื่อใช้งานในด้านบรรจุภัณฑ์สำหรับบรรจุผลผลิตทางการเกษตรที่สามารถเตรียมได้ง่ายและราคาไม่แพง โดยตรวจสอบโครงสร้าง ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาค  $\text{TiO}_2$  ที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับพื้นผิวอนุภาคด้วยกรดสเตียริก และศึกษาปริมาณของ  $\text{TiO}_2$  ที่เหมาะสมในการเตรียมแผ่นฟิล์มคอมโพสิต โดยศึกษาลักษณะ สมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล ความสามารถในการกำจัดก๊าซเอทิลีนของแผ่นฟิล์มคอมโพสิต

จากผลการทดลอง พบว่า อนุภาค  $\text{TiO}_2$  ชนิดอนาเทสและมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 10 นาโนเมตร ที่ผ่านการปรับผิวด้วยกรดสเตียริก (STA- $\text{TiO}_2$ ) มีการกระจายตัวดีกว่าอนุภาค  $\text{TiO}_2$  ที่ไม่ผ่านการปรับผิว และเมื่อวิเคราะห์และทดสอบสมบัติต่างๆ ของแผ่นฟิล์มคอมโพสิต พบว่าแผ่นฟิล์มคอมโพสิตมีความหนาเฉลี่ย 0.4-0.5 มิลลิเมตร และมีสมบัติทางกลที่ดีขึ้นโดยมีความยืดหยุ่นดีขึ้นซึ่งเป็นลักษณะที่สำคัญของแผ่นฟิล์มบรรจุภัณฑ์ นอกจากนี้ ยังมีความสามารถในการกำจัดก๊าซเอทิลีนเพื่อยืดอายุการเก็บรักษาผลไม้ได้ โดยปริมาณของ  $\text{TiO}_2$  ร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักเป็นค่าที่เหมาะสมที่สุดที่มีผลต่อสมบัติทางกลและการกำจัดก๊าซเอทิลีนของแผ่นฟิล์มคอมโพสิต

### 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาและเปรียบเทียบผลของปริมาณของกรดสเตียริกที่ใช้ในการปรับแต่งพื้นผิวของอนุภาค  $\text{TiO}_2$
2. ศึกษาผลของการปรับแต่งพื้นผิวของอนุภาค  $\text{TiO}_2$  ด้วยกรดจากสารธรรมชาติชนิดอื่น
3. ศึกษาและเปรียบเทียบผลของชนิดโครงสร้างและขนาดของอนุภาค  $\text{TiO}_2$  ต่อสมบัติต่างๆ ของแผ่นฟิล์มคอมโพสิต
4. ศึกษาสมบัติอื่นๆ ของแผ่นฟิล์มคอมโพสิตสำหรับงานบรรจุภัณฑ์ เช่น ความสามารถในการยับยั้งแบคทีเรียและเชื้อราในผักและผลไม้ หรือการต้านอนุมูลอิสระ (Antioxidant)

## บรรณานุกรม

- [1] Vermeiren, L. ; Devlieghere, F. ; Beest, M. V. ; Kruijf, N. D. ; Debevere, J. Developments in the active packaging of foods. *Trends in Food Science & Technology* **1999**, 10, 77-86.
- [2] Ozdemir, M. and J. D. Floros. Active food packaging technologies. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* **2004**, 44, 185-193.
- [3] Appendini, P. and J. H. Hotchkiss. Review of antimicrobial food packaging. *Innovative Food Science & Emerging Technologies* **2002**, 3, 113-126.
- [4] Galdi, M. R. and L. Incarnato. Design and production of active films for food packaging applications. *Packaging Technology and Science* **2008**.
- [5] Blidi, A. E. ; Rigal, L. ; Mulmary, G. ; Molinier, J. ; Torres, L. Ethylene removal for long term conservation of fruits and vegetables. *Food Quality and Preference* **1993**, 4, 119-126.
- [6] Hui, Y. H. and E. O. Evranuz. Handbook of Vegetable Preservation and processing, second edition. *Food Science and Technology* **2015**.
- [7] Lidster, P. D. ; Lawrence, R. A. ; Blanpied, G. D. ; Macrae, K. B. Laboratory evaluation of potassium permanganate for ethylene removal from CA apple storages. *American Society of Agricultural Engineers* **1985**, 331-339.
- [8] Maneerat, C. ; Hayata, Y. ; Egashira, N. ; Sakamoto, K. ; Hamai, Z. ; Kuroyanagi, M. Photocatalytic reaction of TiO<sub>2</sub> to decompose ethylene in fruit and vegetable storage. *American Society of Agricultural Engineers* **2002**, 46(3), 725-730.
- [9] Park, D. R. ; Zhang, J. ; Ikeue, K. ; Yamashita, H. ; Anpo, M. Photocatalytic oxidation of ethylene to CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O on ultrafine powdered TiO<sub>2</sub> photocatalysts in the presence of O<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O. *Catalysts* **1999**, 185, 114-119.
- [10] Bin, L. ; Han, X. ; Huiying, Z. ; Wei, L. ; Liyun, Z. ; Yuan, L. Preparation and characterization of intelligent starch/PVA films for simultaneous colorimetric indication and antimicrobial activity for food packaging applications. *Carbohydrate Polymers* **2017**, 157, 842-849.
- [11] Sazena, S. K. Polyvinyl alcohol. *Chemical and Technical Assessment* **2004**, 1-3.

- [12] Gumiero, M.; Peressini, D.; Pizzariello, A.; Sensidoni, A.; Iacumin, L.; Comi, G.; Toniolo, R. Effect of TiO<sub>2</sub> photocatalytic activity in a HDPE-based food packaging on the structural and microbiological stability of a short-ripened cheese. *Food Chemistry* **2013**, *138*, 1633-1640.
- [13] Mallakpour, S. and M. A. Sadaty. Preparation and characterization of nanocomposites based on poly (vinyl alcohol) and vitamin B<sub>1</sub>-modified TiO<sub>2</sub> and evaluation of the optical, mechanical, and thermal properties. *Colloid Polymer Science* **2016**.
- [14] Yongquan, Q.; Chuanning, Y.; Youzheng, S.; Yansheng, Z.; Xudong, W.; Yan, Shang.; Linshan, W.; Changsheng, L. Facile fabrication of superhydrophobic surfaces with corrosion resistance by nanocomposite coating of TiO<sub>2</sub> and polydimethylsiloxane. *Colloids and Surfaces A: Physicochem* **2015**, 1-13.
- [15] Jalili, M. M.; Davoudi, K.; Sedigh, E. Z.; Farrokhpay, S. Surface treatment of TiO<sub>2</sub> nanoparticles to improve dispersion in non-polar solvents. *Advanced Powder Technology* **2016**, *27*, 2168-2174.
- [16] Joeger, R. D. Antimicrobial films for food applications: A quantitative analysis of their effectiveness. *Packaging Technology and Science* **2007**, *20*, 231-273.
- [17] Ceresana. Market Study: Titanium dioxide. Retrieved 21 May 2013.
- [18] Kumar, N.; Hazarika, S. N.; Limbu, S.; Boruah, R.; Deb, P.; Namsa, N. D.; Das, S. K. Hydrothermal synthesis of anatase titanium dioxide mesoporous microspheres and their antimicrobial activity. *Microporous and Mesoporous Materials* **2015**, *213*, 181-187.
- [19] สวรรค์ จิตไคร์ครวญ. “การทำความสะอาดโดยตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสงด้วยไททาเนียมไดออกไซด์.” วารสารกรมวิทยาศาสตร์บริการ **2552**, *57*, 179, 21-24.
- [20] Siamchemi. “ไทเทเนียมไดออกไซด์/TiO<sub>2</sub>”. [Online]. Available: <https://www.siamchemi.com>. [Accessed: 10 October 2016].
- [21] Frontway. TiO<sub>2</sub> Photocatalyst. [Online]. Available: <http://www.supesolar.com>. [Accessed: 15 October 2016].
- [22] หฤพักต์ กิรติเสวี, ฉัตรชัย วีระนิติสกุล และอภิรัตน์ เล่าห์บุตรี. “An Overview of Composite Materials.” วารสารวิศวกรรม มก. ฉบับที่ 70, 2553.
- [23] World Chemical Co., Ltd. Stearic acid. [Online]. Available: <http://www.worldchemical.co.th>. [Accessed: 1 November 2016].

- [24] Valdir, A. P. J.; Iza, N. Q. D. A.; Ricardo, S. Active chitosan/PVA films with Antocyanin from *Brassica oleraceae* (Red cabbage) as Time-Temperature Indicators for Application in Intelligent Food Packaging. *Food Hydrocolloids* 2014.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ก

ข้อมูลผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ก.1 การปรับแต่งพื้นผิวของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยกรดสเตียริก

ตารางที่ ก.1.1 ส่วนประกอบของสารเคมีที่ใช้ในการปรับแต่งหมู่ฟังก์ชันของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยกรดสเตียริก

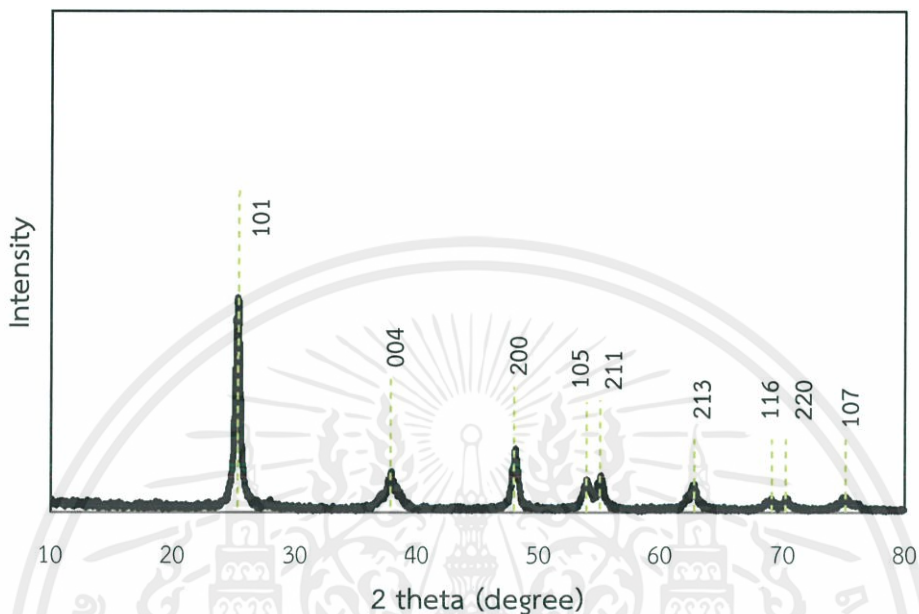
ชนิดอนุภาค	TiO <sub>2</sub> (g)	Distilled water (ml)	Stearic acid (g)
STA-TiO <sub>2</sub>	0.5	50	0.125

### ก.2 การเตรียมแผ่นฟิล์มคอมโพสิตระหว่างพอลิไวนิลแอลกอฮอล์กับไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการปรับพื้นผิวอนุภาคด้วยกรดสเตียริก

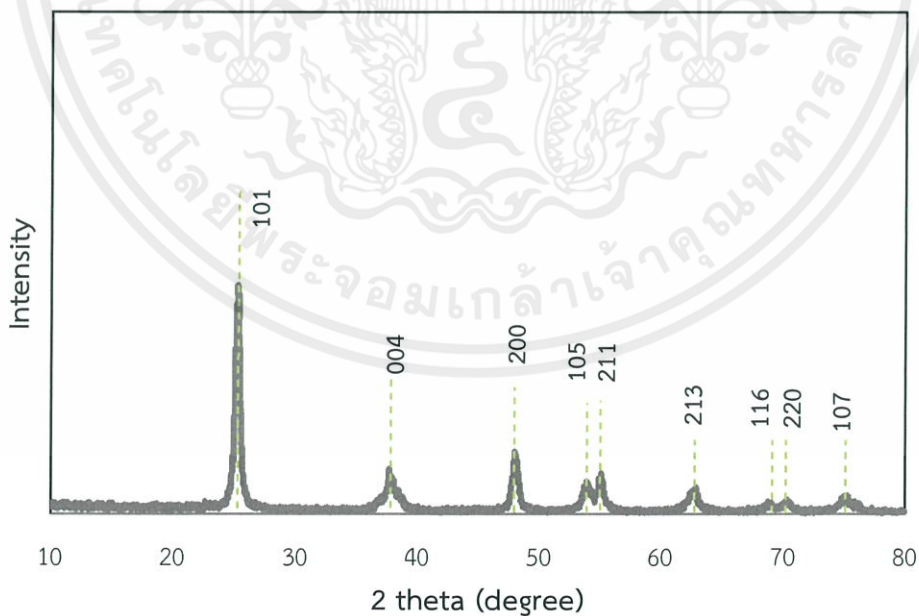
ตารางที่ ก.2.1 ส่วนประกอบของสารเคมีที่ใช้ในการเตรียมแผ่นฟิล์มคอมโพสิตของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการปรับผิวด้วยกรดสเตียริก

ชนิดอนุภาค	PVA (g)	Distilled water (ml)	TiO <sub>2</sub> (g)
Pure PVA	2.25	75	0
PVA/TiO <sub>2</sub> 0.1 wt%	2.25	75	0.00225
PVA/TiO <sub>2</sub> 0.5 wt%	2.25	75	0.01125
PVA/TiO <sub>2</sub> 1 wt%	2.25	75	0.0225
PVA/STA-TiO <sub>2</sub> 0.1 wt%	2.25	75	0.00225
PVA/STA-TiO <sub>2</sub> 0.5 wt%	2.25	75	0.01125
PVA/STA-TiO <sub>2</sub> 1 wt%	2.25	75	0.0225

ก.3 การวิเคราะห์โครงสร้างของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรคชัน (X-ray Diffraction, XRD)

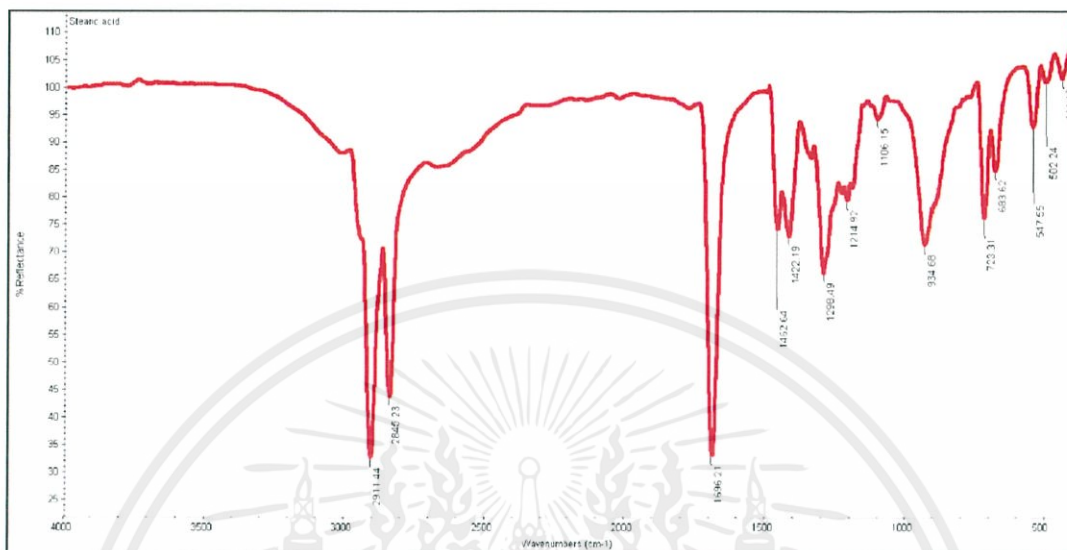


รูปที่ ก.3.1 ผลการวิเคราะห์ XRD ของอนุภาค TiO<sub>2</sub>

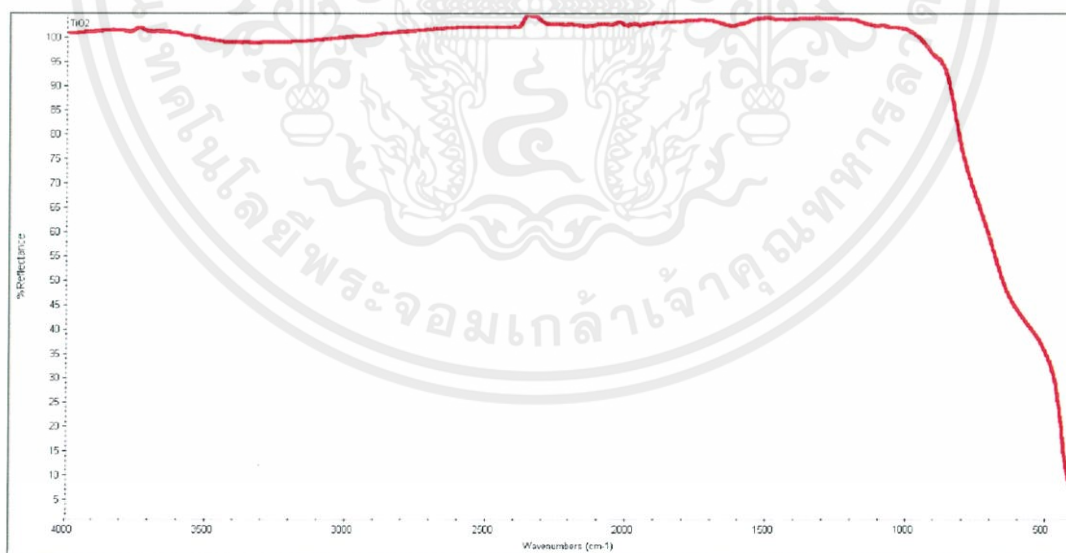


รูปที่ ก.3.2 ผลการวิเคราะห์ XRD ของอนุภาค STA-TiO<sub>2</sub>

#### ก.4 กราฟอินฟราเรดสเปกตรัมจากเครื่องวิเคราะห์สารด้วยอินฟราเรด (FTIR)

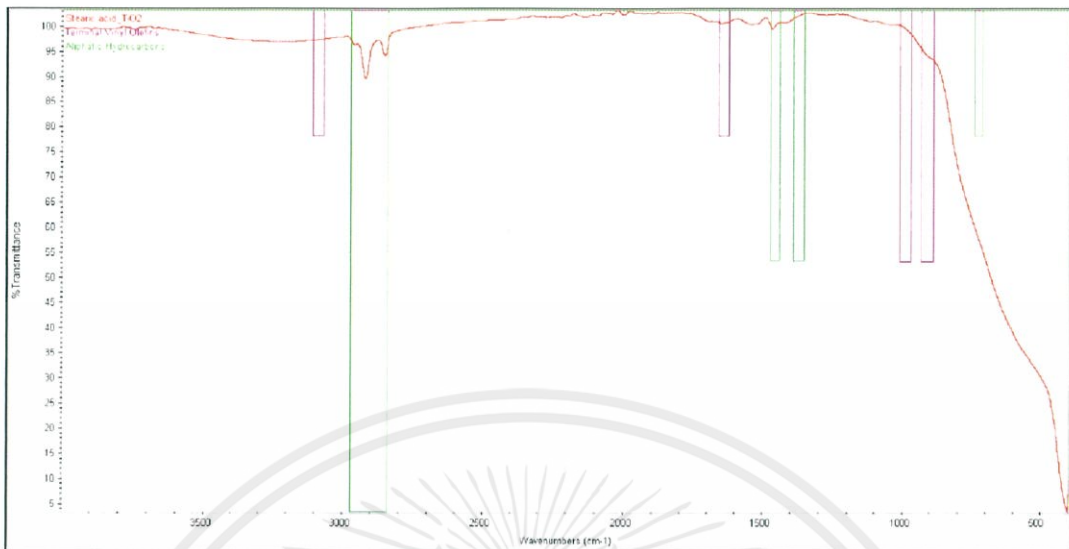


รูปที่ ก.4.1 กราฟ FTIR ของกรดสเตียริก

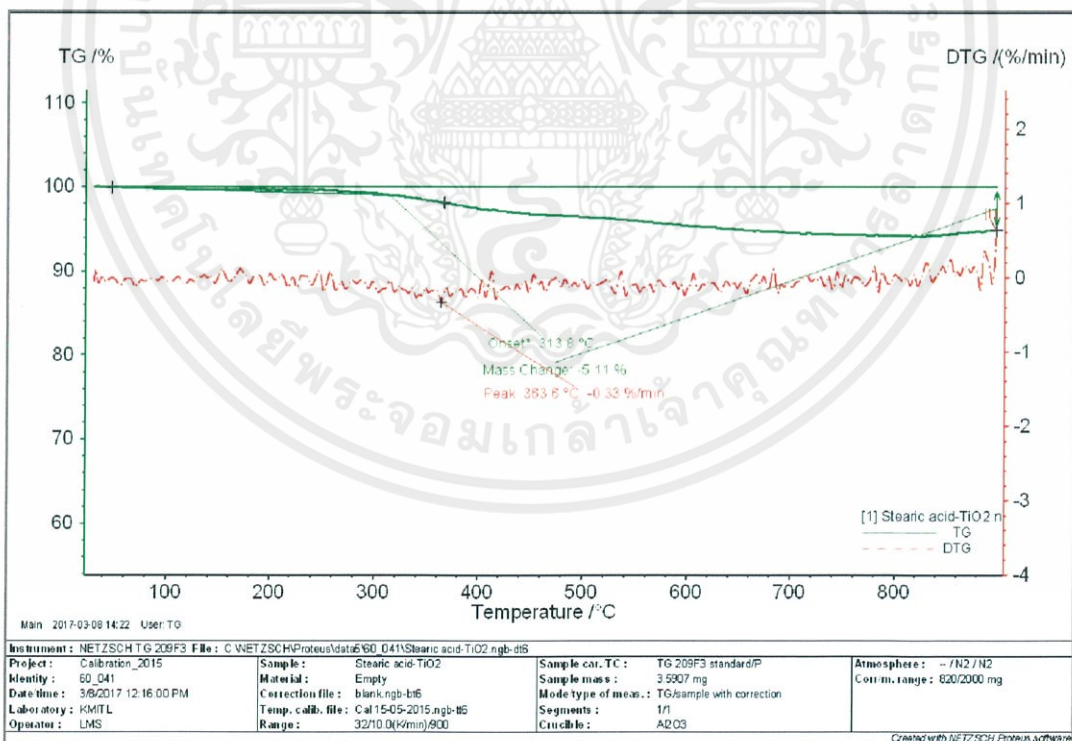


รูปที่ ก.4.2 กราฟ FTIR ของอนุภาค TiO<sub>2</sub>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.4.3 กราฟ FTIR ของอนุภาค STA-TiO<sub>2</sub>



รูปที่ ก.4.4 กราฟ TGA ของอนุภาค STA-TiO<sub>2</sub>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ข.1 การคำนวณการทดสอบการดูดซับน้ำของแผ่นฟิล์ม (%Swelling test)

การทดสอบการดูดซับน้ำของแผ่นฟิล์ม ทำได้โดยตัดแผ่นฟิล์ม PVA บริสุทธิ์ แผ่นฟิล์ม PVA ที่ผสมอนุภาคที่ไม่ผ่านการปรับผิวและแผ่นฟิล์ม PVA ที่ผสมอนุภาคที่ผ่านการปรับผิวที่ความเข้มข้นต่างๆ ให้มีขนาด 4x5 เซนติเมตร แล้วนำไปแช่ในจานเพาะเชื้อที่มีน้ำกลั่น โดยชั่งน้ำหนักของฟิล์มก่อนและหลังแช่น้ำ และคำนวณหาค่าดัชนีการดูดซับน้ำ ตามสมการ ดังนี้

$$\%SI = \frac{\text{Final weight} - \text{Initial weight}}{\text{Initial weight}} \times 100$$

ตัวอย่าง การคำนวณค่าดัชนีการดูดซับน้ำของแผ่นฟิล์ม PVA บริสุทธิ์

เมื่อ Initial weight เท่ากับ 0.155 กรัม

Final weight เท่ากับ 0.233 กรัม

$$\%SI = \frac{0.233 - 0.155}{0.155} \times 100$$

$$\%SI = 50.32\%$$