



การเตรียมและตรวจวัดวัสดุดูดซับเอทิลีน
จากซีโอไลต์/โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตสำหรับกระบวนการขนส่ง
กล้วยหอมทอง (*Musa acuminata*) หลังการเก็บเกี่ยว

โดย

นายสร้อย ยิ้มมงคล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (นวัตกรรมและเทคโนโลยีวัสดุ)
สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุและสิ่งทอ
คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ปีการศึกษา 2561
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

การเตรียมและตรวจวัดวัสดุดูดซับเอทิลีน
จากซีโอไลต์/โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตสำหรับกระบวนการขนส่ง
กล้วยหอมทอง (*Musa acuminata*) หลังการเก็บเกี่ยว

โดย

นายสร้อย ยิ้มมงคล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (นวัตกรรมและเทคโนโลยีวัสดุ)
สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุและสิ่งทอ
คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ปีการศึกษา 2561
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

PREPARATION AND EVALUATION OF ETHYLENE ABSORBER FROM
ZEOLITE A/ KMnO_4 COMPOSITE FOR MONITORING OF
HOM THONG BANANA (*Musa acuminata*) HARVESTING

By

MR.SARAL YIMMONGKOL

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIRMENTS
FOR THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE
(MATERILAS INNOVATION AND TECHNOLOGY)
DEPARTMENT OF MATERIALS AND TEXTILE TECHNOLOGY
FACULTY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY
THAMMASAT UNIVERSITY
ACADEMIC YEAR 2018
COPYRIGHT OF THAMMASAT UNIVERSITY

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

วิทยานิพนธ์

ของ

นายสร้อย ยิ้มมงคล

เรื่อง

การเตรียมและตรวจวัดวัสดุดูดซับเอทิลีนจากซีโอไลต์/โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตสำหรับ
กระบวนการขนส่งกล้วยหอมทอง (*Musa acuminata*) หลังการเก็บเกี่ยว

ได้รับการตรวจสอบและอนุมัติ ให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (นวัตกรรมและเทคโนโลยีวัสดุ)

เมื่อ วันที่

เดือน

พ.ศ.2562

ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมยศ คงคำรัตน์)

กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชีราวุฒิ เพชรเย็น)

กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุภกร บุญเย็น)

กรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(อาจารย์ ดร. สุรเชษฐ์ ตุ่มมี)

คณบดี

(รองศาสตราจารย์ ปกรณ์ เสริมสุข)

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเตรียมและตรวจวัดวัสดุดูดซับเอทิลีนจากซีโอไลต์/ โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต สำหรับกระบวนการขนส่ง กล้วยหอมทอง (<i>Musa acuminata</i>) หลังการเก็บเกี่ยว
ชื่อผู้เขียน	นายสรล ยิ้มมงคล
ชื่อปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (นวัตกรรมและเทคโนโลยีวัสดุ)
สาขาวิชา/คณะ/มหาวิทยาลัย	สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุและสิ่งทอ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริวดี เพชรเย็น
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุภกร บุญเย็น
ปีการศึกษา	2561

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเตรียมและการวิเคราะห์วัสดุฐานซีโอไลต์จากการกระตุ้นด้วยสารละลายเบส (โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ และ โซเดียมไฮดรอกไซด์) ที่ความเข้มข้น 1, 2 และ 3 โมลาร์ เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง ผ่านกระบวนการดูดซับสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตเป็นระยะเวลา 5 ชั่วโมง และกระบวนการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง โดยเปรียบเทียบกับวัสดุฐานซีโอไลต์ที่ไม่ผ่านการกระตุ้น พบว่า วัสดุฐานซีโอไลต์ที่ผ่านการกระตุ้นจะมีการกระจายตัวของผลึกบนพื้นผิวดีกว่าซีโอไลต์ที่ไม่ผ่านการกระตุ้น นอกจากนี้การศึกษากายการยืดอายุและชะลอการสุกของกล้วยหอมทอง (*Musa acuminata*) เป็นระยะเวลา 5 วัน โดยทำการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลง สีของเปลือกกล้วย (L, a^* และ b^*) และปริมาณความหวานภายในเนื้อผล พบว่าวัสดุฐานซีโอไลต์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยสารละลายเบสโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 1 โมลาร์ สามารถชะลอการสุกของกล้วยหอมทองได้ถึง 5 วัน เนื่องจากสีเปลือกของกล้วยหอมทองและปริมาณความหวานของเนื้อผลมีการเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับชุดควบคุม

คำสำคัญ: ซีโอไลต์, โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต, ตัวดูดซับเอทิลีน, เซนเซอร์เปลี่ยนแปลงสี, เทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว

Thesis Title	Preparation and evaluation of ethylene absorber from zeolite A/KMnO ₄ composite for monitoring of Hom Thong banana (<i>Musa acuminata</i>) harvesting
Author	Mr.Saral Yimmongkol
Degree	Master of Science (Materials Innovation and Technology)
Department/Faculty/University	Materials and Textile Technology Faculty of Science and Technology Thammasat University
Thesis Advisor	Assistant Professor Chiravoot Pechyen , Ph.D.
Thesis Co-Advisor	Assistant Professor Supakorn Boonyuen , Ph.D.
Academic Year	2018

ABSTRACT

The objective of this research is to study the preparation and analysis of materials base on zeolite activation with alkaline solution (KOH and NaOH) at concentrations of 1, 2 and 3M. Activated zeolites were soaked in a 5 w/v% solution of KMnO₄ for 5 hours, with powder collected after 24 hours of freeze-drying, By comparison base on zeolite material with non-activated. It was found that activated zeolite with strong bases solution can induce KMnO₄ to coat on the zeolite surface. In addition, we was the study also extended the maturation and delayed ripening of Hom Thong banana (*Musa acuminata*) for 5 days. With the physical and chemical changes were investigated by the color of the banana peels (L, a *, b *) and the amount of sweetness. Contrarily, Hom Thong bananas with zeolite-KMnO₄ tablets activated with 1 M KOH and NaOH solution delayed the development of the yellow color of banana peel for 5 days and total sugar content slowly increased after 5 days.

Keywords: Zeolite, Potassium permanganate, Ethylene absorber, Color changing sensor, Postharvest technology

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยการเตรียมและตรวจวัดวัสดุดูดซับเอทิลีนจากซีโอไลต์/โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต สำหรับกระบวนการขนส่งกล้วยหอมทอง (*Musa acuminata*) หลังการเก็บเกี่ยว คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ สนับสนุนการวิจัยจากกองทุนวิจัยมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ภายใต้ “ทุนวิจัยเพื่อพัฒนาสิ่งประดิษฐ์” ตามสัญญาเลขที่ 5/2560 และได้รับทุนอุดหนุนการทำกิจกรรมส่งเสริมและสนับสนุนการวิจัยประเภททุนบัณฑิตศึกษาจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ประจำปี 2561

ขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการวิจัย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชिरาวุฒิ เพชรเย็น (สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุและสิ่งทอ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์) ที่ให้คำปรึกษาและแนะนำเกี่ยวกับโครงการวิจัยด้วยดีตลอดมา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุภกร บุญยืน (สาขาวิชาเคมี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์) ที่ให้คำปรึกษา อำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือการทำให้แห้งแบบแช่แข็ง และให้คำแนะนำในระหว่างการดำเนินโครงการวิจัยให้สำเร็จไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณ นาย พรพงษ์ ศิริรัตน์สกุล และ นางสาว พิชญ์สินี นิลประพันธ์ (นักศึกษาปริญญาตรี สาขาเทคโนโลยีวัสดุและสิ่งทอ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์) ที่ช่วยเหลือในการทำงานวิจัยให้สำเร็จอย่างลุล่วง

ขอขอบคุณสาขาวิชาฟิสิกส์ สาขาวิชาเคมี สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสิ่งทอ สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร และศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือทดสอบ ไม่ว่าจะเป็นแก๊สโครมาโทกราฟีแบบใช้แสง เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ เครื่องวัดสี เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ในช่วงคลื่นอัลตราไวโอเลต เครื่องวัดดัชนีหักเหด้วยมือ และเครื่องวัดขนาดของอนุภาค สำหรับวิเคราะห์ทดสอบผลิตภัณฑ์ตลอดการศึกษาและดำเนินโครงการวิจัย

นายสรวิศ ยิ้มมงคล

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	(1)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	(2)
กิตติกรรมประกาศ	(3)
สารบัญภาพ	(6)
สารบัญตาราง	(8)
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย	2
บทที่ 2 วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 เซนเซอร์	3
2.2 ไบโอสเซนเซอร์	5
2.3 ไบโอฟอติเมอร์	7
2.4 สรีรวิทยาการสุกของผลไม้	10
2.5 รูปแบบการหายใจ	13
2.6 เอทิลีน	16
2.7 โฟลโอสเซียมเปอร์แมงกาเนต	18
2.8 กล้วยหอมทอง	19
2.9 ซีไอไลต์	22

2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	33
บทที่ 3 วิธีการวิจัย	38
3.1 สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย	38
3.2 วิธีการทดลอง	38
3.3 การทดสอบสมบัติต่างๆของผงซีโอไลต์อิมมัลชันด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต	40
3.4 การดำเนินการวิจัย	41
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล	44
4.1 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคและลักษณะพื้นผิวของสารดูดซับ	44
4.2 การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มมไโครสเปกโทรสโกปี	51
4.3 ประสิทธิภาพการยัดอายุกล้วยหอมทองของวัสดุฐานซีโอไลต์	55
4.4 การวิเคราะห์ลักษณะการเปลี่ยนแปลงทางสี	74
บทที่ 5 สรุป วิเคราะห์ผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	78
5.1 สรุปผลการทดลอง	78
5.2 วิเคราะห์ผลการทดลอง	79
5.3 ข้อเสนอแนะ	80
รายการอ้างอิง	81
ประวัติผู้เขียน	85

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 องค์ประกอบของไบโอเซนเซอร์	6
2.2 การหายใจแบบ Climateric กับ Nonclimateric และการตอบสนองต่อการใช้ออกซิเจน	15
2.3 โครงสร้างของเอทีลิน	16
2.4 การสังเคราะห์เอทีลิน	17
2.5 ลักษณะของโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต	18
2.6 โครงสร้างของโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต	19
2.7 ลักษณะทางกายภาพของต้น(ข้าว) และ ผล(ข้าว) ของกล้วยหอมทอง	20
2.8 หน่วยโครงสร้างปฐมภูมิของซีโอไลต์	23
2.9 หน่วยโครงสร้างทุติยภูมิของซีโอไลต์	23
2.10 โครงสร้างของซีโอไลต์แบบ Sodalite cage และ Cancrinite cage	24
2.11 ซีโอไลต์ธรรมชาติชนิด Clinoptilolite	25
2.12 ซีโอไลต์ชนิด Y (FAU)	25
2.13 ซีโอไลต์ชนิด Mordenite (MOR)	26
2.14 ซีโอไลต์ชนิด Beta (BEA)	26
2.15 ขนาดของรูพรุนต่อประสิทธิภาพการดูดซับแก๊สของซีโอไลต์	30
3.1 ผังวิธีการทดลอง	42
4.1 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและการกระจายตัวของซีโอไลต์	44
4.2 โครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 50 เท่าของซีโอไลต์	47
4.3 โครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 50 เท่าของซีโอไลต์ที่ไม่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารละลายเบส และมีการดูดซับโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต	47
4.4 ลักษณะปรากฏทางกายภาพโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และ การวิเคราะห์ธาตุ	50
4.5 สเปกตรัมของ Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR) ของอนุภาคซีโอไลต์ที่ไม่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวและผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารละลายเบสโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นที่ต่างกัน	51

- 4.6 สเปกตรัมของ Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR) ของอนุภาคซีโอไลต์ที่ไม่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารละลายเบสและผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารละลายเบสโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นที่ต่างกัน 52
- 4.7 สเปกตรัมของ Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR) ของอนุภาคซีโอไลต์ที่นำไปแช่ในสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตโดยไม่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว , ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารละลายเบสโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 3 โมลาร์ และ ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารละลายเบสโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 3 โมลาร์แล้วนำไปแช่ในสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต 53
- 4.8 การเปลี่ยนแปลงค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต-โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 75
- 4.9 การเปลี่ยนแปลงค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต-โซเดียมไฮดรอกไซด์ 75

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 รูปแบบของไบโอเซนเซอร์ที่จำแนกตามวัสดุยึดเกาะ	6
2.2 การจำแนกผลไม้บางชนิดตามการหายใจ	12
2.3 ตัวอย่างผลไม้กลุ่ม Climacteric และ Non-climacteric บางชนิด	13
2.4 ความแตกต่างระหว่างผล แบบ Climacteric กับ Nonclimacteric ในการสังเคราะห์เอทิลีนและการตอบสนองต่อการได้รับเอทิลีน	15
2.5 กลุ่มของผลไม้ตามอัตราการผลิตก๊าซเอทิลีน	18
2.6 ปริมาณสารอาหารในกล้วยหอมทองน้ำหนัก 100 กรัม	21
2.7 อัตราส่วนซิลิกอนต่ออลูมิเนียมต่อความเข้มข้นของซีโอไลต์	31
3.1 ขั้นตอนและเวลาที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัย	43
4.1 ขนาดอนุภาคจากเครื่องวัดขนาดด้วยเลเซอร์	45
4.2 โครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 50 เท่าของซีโอไลต์ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารละลายเบสและสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต	46
4.3 ข้อมูล FTIR ของซีโอไลต์และซีโอไลต์ที่ผ่านการปรับปรุง	53
4.4 ค่า L, a* และ b* และสีของวัสดุฐานซีโอไลต์ที่มีการดูดซับโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตก่อนการดูดซับเอทิลีน	55
4.5 ค่า L, a* และ b* และสีของวัสดุฐานซีโอไลต์ที่ผ่านกระบวนการกระตุ้นด้วยสารละลายเบสโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 1M และ 2M	57
4.6 ค่า L, a* และ b* และสีของวัสดุฐานซีโอไลต์ที่ผ่านกระบวนการกระตุ้นด้วยสารละลายเบสโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 3M	58
4.7 ค่า L, a* และ b* และสีของวัสดุฐานซีโอไลต์ที่ผ่านกระบวนการกระตุ้นด้วยสารละลายเบสโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 1M และ 2M	59
4.8 ค่า L, a* และ b* และสีของวัสดุฐานซีโอไลต์ที่ผ่านกระบวนการกระตุ้นด้วยสารละลายเบสโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 3M และ ไม่ผ่านกระบวนการกระตุ้น	60
4.9 ค่าเฉลี่ยของค่า L, a*, b* และสีของวัสดุฐานซีโอไลต์ที่ผ่านกระบวนการกระตุ้นด้วยสารละลายเบสแตกต่างกัน	62
4.10 ค่า L, a* และ b* และสีของกล้วยหอมทองก่อนการเก็บรักษา (วันที่ 0)	64

- 4.11 ค่า L , a^* และ b^* และสีของเปลือกกล้วยหอมทอง เมื่อใช้วัสดุฐานซีโอไลต์ที่เป็นตัวดูดซับก๊าซ
เอทิลีนที่ถูกปลดปล่อยออกมา 66
- 4.12 ค่า L , a^* และ b^* และสีของเปลือกกล้วยหอมทอง เมื่อใช้วัสดุฐานซีโอไลต์เป็นตัวดูดซับก๊าซ
เอทิลีนที่ถูกปลดปล่อยออกมา (ต่อ) 67
- 4.13 ค่า L , a^* และ b^* และสีของเปลือกกล้วยหอมทอง เมื่อใช้วัสดุฐานซีโอไลต์เป็นตัวดูดซับก๊าซ
เอทิลีนที่ถูกปลดปล่อยออกมา (ต่อ) 68
- 4.14 ค่า L , a^* และ b^* และสีของเปลือกกล้วยหอมทอง เมื่อใช้วัสดุฐานซีโอไลต์เป็นตัวดูดซับก๊าซ
เอทิลีนที่ถูกปลดปล่อยออกมา (ต่อ) 69
- 4.15 ค่า L , a^* และ b^* และสีของเปลือกกล้วยหอมทอง โดยไม่มีวัสดุฐานซีโอไลต์เป็นตัวดูดซับก๊าซ
เอทิลีนที่ถูกปลดปล่อยออกมา (ชุดควบคุม) 70
- 4.16 แสดงค่าเฉลี่ยของค่า L , a^* และ b^* และสีของเปลือกกล้วยหอมทอง เป็นระยะเวลา 5 วัน
โดยมีและไม่มีวัสดุฐานซีโอไลต์เป็นตัวดูดซับ 71
- 4.17 ค่าของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ของเนื้อมีกล้วยหอมทองที่วัสดุฐานซีโอไลต์ที่ผ่านการปรับปรุง
ต่างๆบรรจุอยู่ในบรรจุภัณฑ์ 73

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ในการดำรงชีวิตของมนุษย์ไม่ว่าจะอยู่ในช่วงอายุใดก็ตาม ล้วนแต่ต้องอาศัยปัจจัยสี่ทั้งนั้น แต่ปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญที่มนุษย์ขาดไม่ได้ คือ อาหาร เนื่องจาก เป็นสิ่งจำเป็นพื้นฐานสำหรับการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิต เพราะคนเราต้องการอาหารทุกวัน เพื่อใช้ในการเจริญเติบโตของร่างกายในวัยเด็ก และใช้ในการซ่อมแซมส่วนที่สึกหรอ ในวัยผู้ใหญ่ สิ่งที่เราต้องการจากอาหารคือ สารอาหาร (Nutrient) ซึ่งแบ่งออกเป็นกลุ่ม หรือหมู่ได้ 5 หมู่ คือ โปรตีน คาร์โบไฮเดรต ไขมัน แร่ธาตุ และวิตามิน นอกจากนี้ ยังต้องการน้ำ และใยอาหารด้วย ซึ่งสารอาหารต่างๆ เหล่านี้ จะทำให้ร่างกายได้รับพลังงาน ความอบอุ่น เสริมสร้างการเจริญเติบโต และช่วยรักษาสมดุลต่างๆ ของร่างกายให้เป็นปกติ ให้สามารถดำรงชีวิตอยู่ได้

ซึ่งไม่ว่าจะอยู่ในช่วงวัยใดก็ตามจะต้องได้รับสารอาหารให้ครบทั้ง 5 หมู่ แต่ในคนทุกช่วงวัย นั้นควรที่จะต้องได้รับสารอาหารในกลุ่มของแร่ธาตุและวิตามินที่ซึ่งจะอยู่ในจำพวกผลไม้ที่ควรรับประทานเป็นประจำ เพราะ ในผลไม้มีกากใยอาหารและวิตามิน เกือบครึ่งที่มีประโยชน์ต่อร่างกายอยู่มากมาย อีกทั้ง น้ำและกากใย (Fiber) ในผลไม้ช่วยในการขับถ่ายของเสียออกจากร่างกาย จึงทำให้ระบบการย่อยและระบบขับถ่ายทำงานได้อย่างปกติ นอกจากนั้นยังลดโอกาสเสี่ยงต่อการเกิดโรคบางชนิดและยังสามารถช่วยลดน้ำหนักได้อีกด้วย

กล้วยหอมทองเป็นผลไม้ชนิดหนึ่งในตระกูลกล้วย เป็นพืชเขตร้อน สามารถปลูกได้ทุกภาคของไทย โดยเฉพาะจังหวัดปทุมธานี เพชรบุรี ชุมพร หนองคาย และ สระบุรี กล้วยหอมทองนี้ถือเป็นหนึ่งในพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศ เนื่องจาก เป็นผลไม้ที่ได้รับความนิยมในหมู่ผู้บริโภคทั้งในประเทศกว่า 120,000 ต้นต่อปี มียอดการส่งออกกว่า 1,500 ต้นในปี 2556 และเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่า ในปี 2558 ซึ่งทำให้มีรายได้เข้าสู่ประเทศได้ถึงประมาณ 100 ล้านบาท (สำนักงานเศรษฐกิจเกษตร; 2558) ด้วยรูปร่างของกล้วยหอมทองนั้นมีสีเหลืองอร่าม ขนาดพอเหมาะ เนื้อแน่น รสชาติหวาน เปลือกบาง กลิ่นหอมและมีคุณค่าทางโภชนาการสูง (Simmonds and Preedy; 2016) ซึ่งปัจจุบันมีการส่งออกกล้วยหอมทองไปจำหน่ายยังต่างประเทศมากขึ้นทุกปี ตลาดที่สำคัญ คือ ญี่ปุ่น ฮองกง และจีน

เนื่องจากกล้วยหอมทองเป็นผลไม้ที่สามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงหลังการเก็บเกี่ยวได้ง่าย เพราะ เอทิลีนซึ่งเป็นสารที่ผลของกล้วยหอมทองผลิตขึ้นเพื่อกระตุ้นให้ผลกล้วยเกิดการสุกและมีสีเหลืองสม่ำเสมอทั่วทั้งผล ปริมาณเอทิลีนที่เพิ่มขึ้นในระหว่างการขนส่งกล้วยนี้เป็นสาเหตุให้กล้วยบางส่วนเกิดการสุกและเน่าเสียก่อนการขนส่งไปยังที่หมาย จึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้ที่ต้องการชะลอการสุกของกล้วยหอมทองในระหว่างการขนส่ง รวมถึงสามารถตรวจวัดความสุกของกล้วยหอมทองโดยไม่ต้องเปิดบรรจุภัณฑ์ที่ใช้ขนส่งกล้วยหอมทอง เพื่อยืดอายุและรักษาคุณภาพของกล้วยหอมทองให้สามารถขนส่งได้ในระยะทางที่ไกลขึ้น ระยะเวลานานขึ้น โดยใช้ซีโอดีที่ผ่านการการดัดแปรสมบัติและปรับปรุงพื้นผิวด้วย

เบสและโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตเพื่อเปลี่ยนสมบัติของซีโอไลต์ให้มีหน้าที่เปรียบเสมือนเป็นตัวดูดซับแก๊สเอทิลีนที่ปล่อยออกมาจากกล้วยหอมทอง และอาศัยการเปลี่ยนแปลงสีต่างๆของโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตเป็นตัวบ่งชี้ระดับการสุกของกล้วย

1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 ศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการปรับปรุงพื้นผิวของซีโอไลต์ด้วยเบสและโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต เพื่อประยุกต์ใช้เป็นวัสดุดูดซับแก๊สเอทิลีน
- 1.2.2 ศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับแก๊สเอทิลีนของซีโอไลต์ที่ผ่านการดัดแปลงและปรับปรุงพื้นผิวด้วยเบสและโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต
- 1.2.3 ศึกษาประสิทธิภาพในการชะลอการสุกและยืดอายุการเก็บรักษาของกล้วยหอมทองโดยซีโอไลต์ที่ผ่านการดัดแปลงและปรับปรุงพื้นผิวด้วยเบสและโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

- 1.3.1 ศึกษาการเตรียมและอิทธิพลของชนิดของเบสในการดัดแปลงและปรับปรุงพื้นผิวของซีโอไลต์ที่เหมาะสมต่อการปรับปรุงพื้นผิวต่อด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตและการดูดซับแก๊สเอทิลีน
- 1.3.2 ทดสอบสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางเคมี และประสิทธิภาพในการดูดซับแก๊สเอทิลีนของซีโอไลต์ที่ผ่านการดัดแปลงและปรับปรุงพื้นผิวด้วยเบสและโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต
- 1.3.3 ทดสอบประสิทธิภาพในการชะลอการสุกและยืดอายุการเก็บรักษาโดยซีโอไลต์ที่ผ่านการดัดแปลงและปรับปรุงพื้นผิวด้วยเบสและโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต

บทที่ 2

วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 เซนเซอร์ (Sensor)

เซนเซอร์ คือ ตัวอุปกรณ์ตรวจรู้ตัวแรกในระบบการวัด ซึ่งใช้ตรวจจับหรือรับรู้การเปลี่ยนแปลง ปริมาณทางกายภาพของตัวแปรต่างๆ เช่น ความร้อน แสง สีเสียง ระยะทาง การเคลื่อนที่ ความดัน การไหล เป็นต้น แล้วเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของสัญญาณหรือข้อมูลที่สอดคล้องและเหมาะสมกับส่วนของการกำหนดเงื่อนไขทางสัญญาณ และยังเป็นตัวแปรสัญญาณ (Transducer) ชนิดหนึ่ง ที่สามารถให้สัญญาณออกมาได้หลากหลายชนิด แต่โดยทั่วไปจะใช้สัญญาณไฟฟ้าหรือสัญญาณแสง เช่น คู่ควความร้อน (Thermocouple) จะแปลงค่าอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมให้เป็นแรงดันไฟฟ้าที่สอดคล้องกัน ในทำนองเดียวกัน เทอร์โมมิเตอร์แบบปรอทจะเปลี่ยนอุณหภูมิที่วัดได้ให้อยู่ในรูปของการขยายตัวหรือการหดตัวของของเหลว ซึ่งเซนเซอร์ทุกชนิดจะต้องทดสอบเทียบกับค่ามาตรฐานที่เป็นที่ยอมรับ (Calibrate) โดยการแยกประเภทของเซนเซอร์นั้นสามารถแยกออกได้เป็นหลายประเภท

2.1.1 เซนเซอร์สามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภท ตามลักษณะของเซนเซอร์ ได้แก่

- 2.1.1.1 เซนเซอร์ธรรมชาติ เป็นอวัยวะต่างๆของสิ่งมีชีวิตที่สามารถรับรู้การเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อม
- 2.1.1.2 เซนเซอร์เคมี เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ที่สามารถให้ข้อมูลเกี่ยวกับองค์ประกอบทางเคมีของสภาพแวดล้อมที่เป็นของเหลวหรือก๊าซ
- 2.1.1.3 ไบโอสเซนเซอร์ เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดทางชีวภาพที่ใช้ในการตรวจวิเคราะห์สารตัวอย่างได้อย่างเฉพาะเจาะจงและหลากหลายชนิด

2.1.2 เซนเซอร์สามารถแบ่งออกเป็น 8 ประเภท ตามลักษณะการนำไปใช้งาน ได้แก่

- 2.1.2.1 เซนเซอร์แบบแสง เป็นอุปกรณ์ที่นิยมใช้ในเครื่องพิมพ์
- 2.1.2.2 เซนเซอร์แบบอุณหภูมิ หรือ RTD เป็นอุปกรณ์ตรวจจับอุณหภูมิ
- 2.1.2.3 เซนเซอร์การไหลของน้ำหรือลม
- 2.1.2.4 เซนเซอร์รูปภาพ เป็นอุปกรณ์ที่แปลงภาพที่เห็นด้วยตาเป็นสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์
- 2.1.2.5 เซนเซอร์เสียง เป็นอุปกรณ์ที่เปลี่ยนความถี่เสียงให้เป็นสัญญาณทางไฟฟ้า
- 2.1.2.6 เซนเซอร์สัมผัส เป็นอุปกรณ์ที่เปลี่ยนการสัมผัสให้เป็นสัญญาณทางไฟฟ้า

2.1.2.7 เซนเซอร์สนามแม่เหล็ก

2.1.2.8 เซนเซอร์วัดความเร็ว

2.1.3 เซนเซอร์สามารถแบ่งออกเป็น 6 ประเภท ตามชนิดของทรานสดิวเซอร์

2.1.3.1 แบ่งตามความต้องการพลังงาน

(1) แบบแอคทีฟ (Active sensors) เป็นทรานสดิวเซอร์ที่สามารถปล่อยพลังงานเองได้ เช่น เทอร์โมคัปเปิ้ลเพียโซเซลล์แสงอาทิตย์ ออปโตไดโอด เป็นต้น อุปกรณ์เหล่านี้ไม่ต้องมีแหล่งจ่ายกำลังจากภายนอกให้ก็สามารถให้สัญญาณแรงดันหรือกระแสที่แปรตามตัวแปร

(2) แบบพาสซีฟ (Passive sensors) จะต้องใช้แหล่งจ่ายจากภายนอก จึงจะทำการตรวจรู้ เช่น เซนเซอร์ที่ใช้หลักการเปลี่ยนค่าความต้านทาน ค่าความจุ ค่าความเหนี่ยวนำ

2.1.3.2 แบ่งตามลักษณะกลไกในการทำงาน

- (1) เปลี่ยนแปลงค่าความจุ (Variable capacitance transducer)
- (2) เปลี่ยนแปลงค่าความเหนี่ยวนำ (Variable inductance transducer)
- (3) เปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน (Variable resistance transducer)

2.1.3.3 แบ่งตามชนิดของการเปลี่ยนแปลงพลังงาน

- (1) เปลี่ยนพลังงานกลเป็นไฟฟ้า
- (2) เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล
- (3) เปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า
- (4) เปลี่ยนพลังงานความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้า

2.1.3.4 แบ่งตามชนิดของสัญญาณที่ใช้

- (1) แบบอนาล็อก ให้สัญญาณเป็นแบบต่อเนื่อง
- (2) แบบไบนารี ให้สัญญาณแบบเปิด-ปิด (On-Off)
- (3) แบบดิจิตอล ให้สัญญาณเป็นแบบดิจิตอล

2.1.3.5 แบ่งตามตำแหน่งที่ใช้ในระบบ

(1) ทรานสดิวเซอร์ด้านเข้า (Input transducer) อยู่ทางด้านเข้าของระบบเครื่องมือ เช่น ไมโครโฟน เป็นต้น

(2) ทรานสดิวเซอร์ด้านออก (Output transducers) เช่น ลำโพงของเครื่องขยายเสียง

2.1.3.6 แบ่งตามข้อมูลหรือวัตถุประสงค์ในการวัด

- (1) ทรานสดิวเซอร์วัดการเคลื่อนที่
- (2) วัดอุณหภูมิ
- (3) วัดความดัน
- (4) วัดอัตราการไหล

2.2 ไบโอเซนเซอร์ (Biosensor)

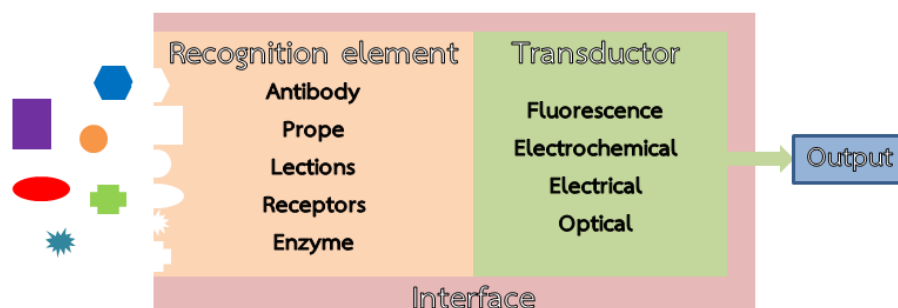
ประวัติความเป็นมาเริ่มต้นที่แพทยศาสตร์ผู้เป็นแรงผลักดันให้เกิดไบโอเซนเซอร์ทางการค้าเครื่องแรก คือ เครื่องวิเคราะห์กลูโคสสำหรับห้องปฏิบัติการ ที่ผลิตโดย Yellow Springs Instrument (USA.) ในปี ค.ศ. 1975 หลังจากนั้นในปี ค.ศ. 1987 Medisense (USA.) ได้วางจำหน่าย Biosensor ขนาดพกพาสำหรับผู้ป่วยโรคเบาหวาน ซึ่งเป็นต้นกำเนิดให้มีการพัฒนาต่ออย่างมากมาย อาทิเช่น Boehringer (Mannheim, Germany) เป็นต้น ในปัจจุบันมีการตรวจสอบวิเคราะห์ทางชีวภาพที่มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น จึงจำเป็นที่จะต้องใช้เครื่องมือที่มีประสิทธิภาพและมีความแม่นยำสูงในการตรวจสอบ นักวิทยาศาสตร์จึงได้มีการพัฒนา ไบโอเซนเซอร์เพื่อใช้เป็นเครื่องมือในการตรวจวิเคราะห์ตัวอย่างทางชีวภาพ โดยอาศัยหลักการจับกันอย่างจำเพาะของโมเลกุล ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้แม้ตัวอย่างที่ใช้ในการวิเคราะห์มีปริมาณน้อย มีความแม่นยำสูง มีความไวสูง ต้นทุนในการผลิตต่ำ สามารถพกพาไปใช้ภาคสนามและใช้ระยะเวลาในการตรวจสอบน้อย เป็นต้น

ไบโอเซนเซอร์ ประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วน ส่วนแรก คือ ส่วนของตัวตรวจจับสารชีวภาพ (Recognition element) เป็นส่วนที่สามารถจับกับสารตัวอย่างได้อย่างจำเพาะ และอีกส่วนหนึ่งจะเป็นตัววัดสัญญาณ (Transducer) ทำหน้าที่ในการรับสัญญาณจากตัวตรวจจับสารชีวภาพเพื่อนำไปวิเคราะห์ข้อมูลและแสดงผลในรูปแบบต่างๆ เช่น ค่าทางไฟฟ้า ค่าทางเคมี เป็นต้น ดังภาพที่ 2.1 และในการออกแบบไบโอเซนเซอร์ นอกจากการจะเลือกระบบของตัวตรวจจับสารชีวภาพและตัววัดสัญญาณที่ต้องเหมาะสมกับคุณสมบัติของตัวอย่างทางชีวภาพที่จะทำการตรวจวิเคราะห์แล้ว ยังมีส่วนที่สำคัญอีกส่วนหนึ่งคือ วัสดุยึดเกาะ (Interface) สำหรับตัวตรวจจับและตัววัดสัญญาณ ทั้งนี้การจำแนกชนิดของไบโอเซนเซอร์สามารถจำแนกได้หลายแบบทั้งชนิดของตัวตรวจจับ ตัววัดสัญญาณและรูปแบบของวัสดุที่ใช้เป็นไบโอเซนเซอร์

ตารางที่ 2.1 รูปแบบของไบโอเซนเซอร์ที่จำแนกตามวัสดุยึดเกาะ

รูปแบบไบโอเซนเซอร์	หลักการทำงาน	ข้อดี	ข้อเสีย
ชิป (chip-based biosensor)	ใช้ป๊ิมเป็นตัวควบคุมการไหลของสารเข้า-ออกเพื่อทำปฏิกิริยาภายในชิปที่ออกแบบมาเฉพาะกับการใช้งาน	<ul style="list-style-type: none"> - ใช้สารตัวอย่างปริมาณน้อย - ผลการวิเคราะห์แม่นยำ - รวดเร็ว 	<ul style="list-style-type: none"> - ผลิตได้ยาก - ต้นทุนสูง
กระดาษ (paper-based biosensor)	อาศัยแรงยกตัวของของเหลวหลักให้สารละลายไหลไปตามรูพรุนของเยื่อเซลลูโลส	<ul style="list-style-type: none"> - ตรวจสอบวิเคราะห์ผลได้ทั้งเชิงคุณภาพและปริมาณ - ใช้งานง่าย - ใช้สารตัวอย่างปริมาณน้อย 	<ul style="list-style-type: none"> - ไม่คงทน - บางกรณีต้องสร้างแนวการไหลของสาร

ที่มา Hansen and Quake (2003) และ Pelton (2009)



ภาพที่ 2.1 องค์ประกอบของไบโอเซนเซอร์

2.2.1 คุณลักษณะของไบโอเซนเซอร์มีดังนี้

- 2.2.1.1 ความสามารถในการคัดเลือก (Selectivity) เป็นค่าที่แสดงให้เห็นถึงความสามารถของไบโอเซนเซอร์ในการจับสับสเตรท (Substrate) ที่แตกต่างกัน โดยการจับกันนั้นจะขึ้นกับธรรมชาติของสารชีวภาพที่ใช้จะต้องมีความจำเพาะเจาะจงระหว่างกัน
- 2.2.1.2 ความไวในการวิเคราะห์การตรวจวัด (Sensitivity) เป็นค่าที่แสดงถึงขีดความสามารถของไบโอเซนเซอร์ในการตรวจวัด การเพิ่มความไวในการ

วิเคราะห์ของไบโอเซนเซอร์ส่วนมากทำได้หลายวิธี เช่น การเพิ่มปริมาณสารชีวภาพ

2.2.1.3 เวลาในการตอบสนอง (Response time) ขึ้นกับวิธีที่ใช้การตรึงสารชีวภาพ

ถ้ามีการตรึงสารชีวภาพบนตัวตรวจวัด จะทำให้เวลาในการตอบสนองเร็วขึ้น

2.2.1.4 อายุการใช้งาน (Working lifetime) ขึ้นกับความคงตัวของสารชีวภาพ

2.2.1.5 ความสามารถในการวัดซ้ำ (Reproducibility) ขึ้นกับคุณภาพในการตรึงสารชีวภาพ วิธีการตรึงสารชีวภาพ และอื่นๆ เป็นต้น

2.2.2 ประโยชน์ของไบโอเซนเซอร์ได้ถูกนำมาใช้ในงานหลัก 3 ประเภท ได้แก่

2.2.2.1 ด้านการแพทย์ เช่น การตรวจวัดกลูโคสในผู้ป่วยโรคเบาหวาน เชื้อโรคต่างๆ (ไวรัสไข้เลือดออก) ฮอรโมน และสารเสพติดในปัสสาวะ

2.2.2.2 ด้านอุตสาหกรรม เช่น การตรวจวัดสารปนเปื้อนหรือสารพิษในวัตถุดิบ สารปรุงแต่งในอาหาร รวมทั้งสามารถตรวจวัดชนิดและปริมาณของจุลินทรีย์ในอุตสาหกรรมการหมักได้

2.2.2.3 ด้านสิ่งแวดล้อม เช่น การใช้ตรวจวัดปริมาณไนโตรเจน/ไนเตรท ในกระบวนการบำบัดน้ำเสีย และยังมีการนำไปใช้ในการตรวจวัดค่าบีโอดี (BOD) ของน้ำ การตรวจวัดสารพิษที่ปนเปื้อนในสภาพแวดล้อม เช่น สารกำจัดศัตรูพืช เป็นต้น

2.3 ไบโอฟอลิเมอร์ (Biopolymer)

ไบโอฟอลิเมอร์หรือพอลิเมอร์ชีวภาพ เป็นพอลิเมอร์ที่ผลิตโดยจุลินทรีย์ เช่น แบคทีเรีย แอคติโนมัยซิส และรา เป็นต้น ภายใต้สภาวะที่เหมาะสม มีลักษณะที่ซับซ้อนและมีน้ำหนักโมเลกุลสูง โดยพอลิเมอร์เหล่านี้มีคุณสมบัติทางกายภาพ ทางเคมีและทางชีวภาพรวมถึงองค์ประกอบทางเคมีที่ต่างกัน โดยใช้ปฏิกิริยาพอลิเมอร์ควบแน่น (Condensation polymerization) ซึ่งในการเกิดปฏิกิริยาจะทำให้โมเลกุลเล็กๆ ที่อยู่ในโครงสร้างของโมโนเมอร์ เช่น H_2O HCl และ CH_3OH ขาดหายไป เมื่อเปรียบเทียบกับหน่วยที่ซ้ำๆ กันในโครงสร้างของพอลิเมอร์กับโมโนเมอร์ที่ใช้สังเคราะห์ชนิดนั้นในการเชื่อมต่อหน่วยย่อยหรือโมโนเมอร์เข้าด้วยกัน

2.3.1 ประเภทของไบโอพอลิเมอร์มีทั้งหมด 3 ประเภท ได้แก่

2.3.1.1 โปรตีน (Protein)

เป็นสารประกอบที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่ เกิดจากโมเลกุลของกรดอะมิโน (Amino acid) จำนวนมากมาสร้างพันธะเชื่อมต่อกันจนเกิดเป็นสายยาว โดยกรดอะมิโน มีลักษณะเป็นสารชีวโมเลกุลซึ่งประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันทั้งที่เป็นหมู่อะมิโน ($-NH_2$) มีสมบัติเป็นเบสและหมู่คาร์บอกซิล ($-COOH$) ซึ่งมีสมบัติเป็นกรดกรดอะมิโนต่างๆ จะมีการสร้างพันธะเชื่อมต่อกันเป็นสายยาวจนเกิดเป็นโมเลกุลของกรดอะมิโนต่างๆ เรียกว่า พันธะเพปไทด์ (Peptide bond) ซึ่งเป็นพันธะที่เกิดขึ้นระหว่างหมู่คาร์บอกซิลและหมู่อะมิโนของกรดอะมิโนแต่ละโมเลกุล เนื่องจากโปรตีนเกิดจากกรดอะมิโนจำนวนมากมาเชื่อมต่อกัน ดังนั้นสมบัติของโปรตีนจึงมีความสัมพันธ์กับชนิดของกรดอะมิโนที่เป็นองค์ประกอบสัดส่วนของกรดอะมิโนแต่ละชนิด และลำดับการเรียงตัวของกรด ซึ่งโปรตีนในธรรมชาติมีกรดอะมิโนอยู่ 20 ชนิด ดังนั้นจึงสามารถเกิดเป็นโปรตีนชนิดต่างๆ มากมาย โดยโปรตีนที่แตกต่างกันก็จะมีคุณสมบัติและบทบาทต่อร่างกายที่แตกต่างกัน

2.3.1.2 พอลิแซ็กคาไรด์ (Polysaccharide)

เป็นคาร์โบไฮเดรตที่ประกอบด้วยมอนอแซ็กคาไรด์หลายๆ โมเลกุลรวมกัน โดยเกิดพันธะระหว่างกันและกัน โดยมอนอแซ็กคาไรด์เป็นมอนอเมอร์ (Monomer) และเรียกกระบวนการที่มอนอเมอร์ (สารโมเลกุลเล็กๆ) รวมตัวกันเป็นพอลิเมอร์แซ็กคาไรด์ซึ่งในกระบวนการนี้มีน้ำเกิดขึ้นด้วย จึงเรียกกระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชันของการเกิดพอลิแซ็กคาไรด์ ว่ากระบวนการคอนเดนเซชันพอลิเมอร์ไรเซชัน (Condensation Polymerization) พอลิแซ็กคาไรด์ที่รู้จักกันดี ได้แก่ แป้ง (Starch) ไกลโคเจน (Glycogen) และเซลลูโลส (Cellulose) ซึ่งทั้งแป้ง ไกลโคเจนและเซลลูโลสต่างก็เป็นพอลิเมอร์ที่เกิดจากกลูโคส (มอนอเมอร์) หลายๆ โมเลกุลมารวมตัวกัน มีสูตรทั่วไปคือ $(C_6H_{10}O_5)_n$ โดยพอลิแซ็กคาไรด์มีด้วยกันหลายประเภท

ประเภทของพอลิแซ็กคาไรด์ โดยแบ่งตามหน้าที่ มี 2 ประเภท ได้แก่

(1) พอลิแซ็กคาไรด์สะสม ทำหน้าที่สะสมอาหาร ได้แก่

(1.1) แป้ง (Starch) เป็นสารโมเลกุลใหญ่ที่ประกอบด้วยพอลิแซ็กคาไรด์ 2 ชนิด คือ อะไมโลส (Amylose) ซึ่งเป็นพอลิแซ็กคาไรด์แบบโซ่ตรงและอะไมโลเพกติน (Amylopectin) ซึ่งเป็นพอลิแซ็กคาไรด์แบบโซ่กิ่ง โดยทั่วไปแป้งประกอบด้วย อะไมโลส ประมาณร้อยละ 20

และอะไมโลเพกติน ประมาณร้อยละ 80 ซึ่งพืชจะสะสมกลูโคสในรูปของแป้งซึ่งพบแป้งมากในข้าว มันฝรั่ง ถั่ว และธัญพืช

(1.2) ไกลโคเจน (Glycogen) เป็นพอลิแซ็กคาไรด์ที่พบได้ในตับและกล้ามเนื้อสัตว์ ไกลโคเจนมีสูตรโครงสร้างคล้ายอะไมโลเพกติน แต่มีกิ่งมากกว่าและสายโมเลกุลสั้นกว่า ละลายน้ำได้น้อย ซึ่งเกิดจากกลูโคสที่ได้จากการย่อยอาหารสร้างพันธะต่อกัน แหล่งที่พบไกลโคเจน คือ ในกล้ามเนื้อและในตับ ไกลโคเจนมีความสำคัญต่อการรักษาระดับน้ำตาลในเลือดให้คงที่

(2) พอลิแซ็กคาไรด์โครงสร้าง ทำหน้าที่เป็นโครงสร้างของพืชและสัตว์

(2.1) เซลลูโลส (Cellulose) ประกอบด้วยกลูโคสเชื่อมต่อกันเป็นพอลิเมอร์ เช่นเดียวกับอะไมโลส แต่ลักษณะการเชื่อมต่อของกลูโคสต่างกัน

(2.2) ไคติน (Chitin) พบมากในเปลือกนอกของสัตว์ที่ไม่มีกระดูกสันหลัง หรือผิวที่ห่อหุ้มแมลง เช่น กระจงปู เปลือกกุ้ง ประกอบด้วยอะเซทิลกลูโคซามีน (N-acetyl-D-glucosamine) โดยไคติน ประกอบด้วยหน่วยย่อยของ N-acetyl-D-glucosamine ที่เชื่อมด้วยพันธะ ไกลโคซิดิก (Glycosidic Linkage)

ประเภทของพอลิแซ็กคาไรด์ โดยแบ่งตามองค์ประกอบทางเคมี มี 2 ประเภท ได้แก่

(1) โฮโมพอลิแซ็กคาไรด์ (Homopolysaccharide) คือ พอลิแซ็กคาไรด์ที่โมเลกุล ประกอบด้วยมอนแซ็กคาไรด์ชนิดเดียวกันทั้งหมด เช่น สตาร์ช (Starch) ไกลโคเจน (Glycogen) และ เซลลูโลส (Cellulose) ซึ่งในโมเลกุลจะประกอบด้วยน้ำตาลกลูโคสเท่านั้นและอินูลิน (Inulin) เป็นพอลิแซ็กคาไรด์ที่โมเลกุลประกอบด้วยน้ำตาลฟรักโทสเท่านั้น

(2) เฮเทอโรพอลิแซ็กคาไรด์ (Heteropolysaccharide) คือ พอลิแซ็กคาไรด์ที่โมเลกุลประกอบด้วยมอนแซ็กคาไรด์มากกว่าหนึ่งชนิด เช่น เฮมิเซลลูโลส กรดไฮยาลูโรนิก (Hyaluronic acid) เป็นต้น

2.3.1.3 กรดนิวคลีอิก (Nucleic Acid)

เป็นสารชีวโมเลกุลขนาดใหญ่และยังเป็นสารพอลิเมอร์ธรรมชาติที่ประกอบด้วยหน่วยซ้ำๆกันของนิวคลีโอไทด์ (Nucleotide) ดังนั้น กรดนิวคลีอิกเป็นพอลินิวคลีโอไทด์ (Polynucleotide) จำนวนหน่วยของนิวคลีโอไทด์แตกต่างกันออกไปตามชนิดของกรดนิวคลีอิก โดยกรดนิวคลีอิกแบ่งเป็น 2 กลุ่ม ดังนี้

(1) กรดดีออกซีไรโบนิวคลีอิก (Deoxyribonucleic acid; DNA) มีหน้าที่เก็บข้อมูลทางพันธุกรรมของสิ่งมีชีวิต และถ่ายทอดข้อมูลทางพันธุกรรมจากรุ่นพ่อแม่ไปสู่รุ่นลูก

(2) กรดไรโบนิวคลีอิก (Ribonucleic acid; RNA) มีหน้าที่ในการสังเคราะห์โปรตีนต่างๆ องค์ประกอบและโครงสร้างของกรดนิวคลีอิก ประกอบด้วยโมเลกุลย่อยๆ ที่เรียกว่า นิวคลีโอไทด์ จำนวนมากมายสร้างพันธะโคเวเลนต์ (Covalent bond) ต่อกัน เป็นสายยาว โดยโมเลกุลนิวคลีโอไทด์จะประกอบด้วย 3 หน่วยย่อย ดังนี้

(2.1) น้ำตาลเพนโทส (Pentose) เป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว ประกอบด้วยคาร์บอน 5 อะตอม มี 2 ชนิด คือ น้ำตาลไรโบส (Ribose) ซึ่งเป็นองค์ประกอบของอาร์เอ็นเอและดีออกซีไรโบส (Deoxyribose) ซึ่งเป็นองค์ประกอบของดีเอ็นเอ

(2.2) ไนโตรเจนเบส (Nitrogenous Base) มี 5 ชนิด คือ อะดีนีน (Adenin : A) กวานีน (Guanine : G) ไซโทซีน (Cytosine : C) ยูเรซิล (Uracil : U) และไทมีน (Thymine : T) ซึ่งส่วนของไนโตรเจนเบสจะเป็นส่วนที่กำหนดความแตกต่างของโมเลกุลนิวคลีโอไทด์

(2.3) หมู่ฟอสเฟต เป็นบริเวณที่สามารถสร้างพันธะกับน้ำตาลเพนโทสของนิวคลีโอไทด์อีกโมเลกุล ทำให้โมเลกุลของนิวคลีโอไทด์แต่ละโมเลกุลสามารถเชื่อมต่อกันได้ ดังนั้น ถ้านิวคลีโอไทด์ จำนวนแสนจนถึงล้านโมเลกุลขึ้นไปมาเชื่อมต่อกันด้วยพันธะเคมีจนเป็นสายยาวของดีเอ็นเอหรืออาร์เอ็นเอ โดยโครงสร้างของดีเอ็นเอจะมีลักษณะเป็นสายนิวคลีโอไทด์ 2 สายอยู่เป็นคู่กัน พันบิดเป็นเกลียวโดยมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างกันด้วยพันธะไฮโดรเจน ขณะที่อาร์เอ็นเอจะมีลักษณะเป็นสาย นิวคลีโอไทด์เพียงสายเดียวที่มีการบิดม้วนเป็นเกลียว

2.4 สรีรวิทยาการสุกของผลไม้ (Physiology of fruit ripening)

เมื่อผลไม้เจริญเติบโตและพัฒนาจนถึงที่สุดแล้วจะเข้าสู่ระยะการพัฒนาขั้นต่อไป คือ การชราและการตาย ซึ่งในทางการเกษตรจึงจะต้องมีการเก็บเกี่ยวในระยะที่แก่ (Mature) เพียงพอจะพัฒนาต่อไปเป็นผลสุก (Ripe) ผลงอม (Over ripe) ซึ่งเป็นระยะชรา (Senescence) และเสื่อมสลายหรือสิ้นสุดการใช้งาน (Death) แต่ถ้าผลที่เก็บเกี่ยวในระยะอ่อนหรือแก่ไม่พอ (Immature) ผลจะเสื่อมสภาพไปโดยไม่สุก หรือมีการสุกที่ผิดปกติ

ความแก่ของผลไม้ (Mature) เป็นสภาวะที่การเจริญเติบโตและการพัฒนาการของผลสิ้นสุด จากนั้นจะเข้าสู่ระยะสุก (Ripening) และระยะชรา (Senescence) ในระยะที่ผลไม้แก่จะเป็นระยะที่มีความเหมาะสมในการบริโภคและเก็บรักษาสูงสุด แต่ทั้งนี้ความแก่ของผลผลิตแต่ละชนิดจะขึ้นกับการ

นำไปบริโภคหรือการนำไปใช้ประโยชน์ ความแก่ของผลไม้แบ่งออกได้เป็น 2 ลักษณะ ได้แก่ ความแก่ทางสรีรวิทยา (Physiological maturity) และ ความแก่ทางการค้า (Commercial maturity)

เมื่อผลไม้ถูกเก็บเกี่ยวจะเกิดความเครียดขึ้นภายในผล เนื่องจากผลไม้ยังคงมีชีวิต แต่ถูกตัดขาดจากแหล่งอาหารและน้ำ จึงต้องมีการนำเอาอาหารและน้ำที่สะสมอยู่มาใช้ในกระบวนการพัฒนา มีการสลายของสารประกอบบางชนิด พร้อมทั้ง การสร้างสารประกอบชนิดต่าง ๆ เพื่อจะเร่งให้การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในผลที่เก็บเกี่ยว ได้แก่

2.4.1 การหายใจ (Respiration) เป็นกระบวนการทำลายสารอินทรีย์ที่พืชสะสมไว้ (Catabolic) เปลี่ยนให้เป็นสารประกอบที่มีโครงสร้างไม่ซับซ้อน พร้อมกับมีการปลดปล่อยพลังงานออกมากระบวนการนี้มีการใช้ออกซิเจน (Oxidation) และมีการสร้างคาร์บอนไดออกไซด์ การหายใจ ทำให้เกิดการสูญเสียของอาหารที่สะสมในเนื้อเยื่อทำให้ผลสูญเสียคุณค่าทางอาหาร ตลอดจนพลังงานที่ผู้บริโภคควรจะได้รับ นอกจากนี้ยังเกิดการสูญเสียน้ำหนักแห้งและอาจทำให้ผลมีรสชาติเปลี่ยนไป ผลไม้สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทตามรูปแบบการหายใจ คือ ผลไม้กลุ่ม climacteric fruit คือ ผลไม้ที่มีอัตราการหายใจเปลี่ยนแปลงตามอายุ นับจากที่ผลไม้แก่จัดอัตราการหายใจจะเพิ่มสูงขึ้นจนถึงจุดสูงสุด จากนั้นอัตราการหายใจจะค่อยๆ ลดลง เมื่อผลไม้เริ่มสุกจะมีการเปลี่ยนแปลงสภาพภายใน เช่น มีการเปลี่ยนสีของเปลือก การเปลี่ยนแป้งให้เป็นน้ำตาล ทำให้ผลไม้สุกมีรสหวาน เนื้อนุ่ม กลิ่นหอมมากกว่าผลไม้ดิบ และ ผลไม้กลุ่ม Non-climacteric fruit คือ ผลไม้ที่มีอัตราการหายใจค่อยๆ ลดลงเมื่อผลไม้อายุมากขึ้น และเมื่อผลไม้สุกอัตราการหายใจจะไม่เพิ่มขึ้น เมื่อเก็บเกี่ยวมาจากต้นแล้วจะไม่สุกต่อ และไม่สามารถบ่มให้สุกได้

ตารางที่ 2.2 การจำแนกผลไม้บางชนิดตามการหายใจ

ระดับ	ปริมาณการหายใจที่ 5°C (mg CO ₂ /KgHr)	ชนิดของพืช
ต่ำมาก	น้อยกว่า 5	แตงโม Honey Dew พริกกล้วยเปลือกแข็ง
ต่ำ	5-10	ส้ม องุ่น มะเขือเทศ แตงกวา พริก แอปเปิล กีวี แคนตาลูป
ปานกลาง	10-20	กล้วย มะเขือ มะเดื่อฝรั่ง ท้อ สาลี่ แอปริคอต เชอร์รี่ พลัม
สูง	20-40	เสาวรส
สูงมาก	มากกว่า 40	ถั่วเมล็ดกลม ข้าวโพดหวาน

ที่มา : ดัดแปลงมาจาก Kader (1987)

การหายใจของผลไม้จะเกิดขึ้นได้ล้วนจะต้องอาศัยปัจจัยดังต่อไปนี้ เพื่อให้มีการจัดการที่มีผลต่อการหายใจให้เหมาะสม ซึ่งจะช่วยให้อายุการเก็บรักษาได้

2.4.1.1 อุณหภูมิ มีอิทธิพลอย่างมากต่ออัตราเมตาโบลิซึมของผล เมื่ออุณหภูมิของผลสูงขึ้น อัตราของการเกิดปฏิกิริยาที่สูงขึ้นตามไปด้วย แต่การเพิ่มอัตราของปฏิกิริยาในเนื้อเยื่ออาจไม่เท่ากัน การเพิ่มของอุณหภูมิต้องอยู่ในระดับที่เหมาะสม อุณหภูมิที่สูงเกินไปจะไปลดการเกิดปฏิกิริยา

2.4.1.2 องค์ประกอบของสภาพบรรยากาศ องค์ประกอบของสภาพบรรยากาศที่ผลไม้หลังเก็บเกี่ยวได้รับจะมีอิทธิพลต่อทั้งอัตราการหายใจ และอัตราการเกิดกิจกรรมทางเมตาโบลิซึม ออกซิเจน คาร์บอนไดออกไซด์และเอทิลีนมีอิทธิพลอย่างมากต่อการหายใจ

2.4.1.3 ความชื้นของผล ปริมาณความชื้นภายในผลมีอิทธิพลต่ออัตราการหายใจของผลเป็นอย่างมาก อัตราการหายใจและอัตรากิจกรรมทางเมตาโบลิซึมจะลดลง เมื่อความชื้นภายในผลลดลง แต่ก็ขึ้นอยู่กับชนิดและพันธุ์พืช องค์ประกอบและชนิดของเนื้อเยื่อและสภาพแวดล้อมที่ได้รับทั้งก่อนเก็บเกี่ยวและหลังเก็บเกี่ยว

2.4.1.4 บาดแผล เซลล์ที่ได้รับบาดเจ็บสามารถกระตุ้นให้เนื้อเยื่อมีอัตราการหายใจสูงขึ้นได้ การเพิ่มขึ้นของอัตราการหายใจเนื่องมาจากบาดแผล

2.4.1.5 ระยะของการเจริญและพัฒนา มีอิทธิพลอย่างมากต่ออัตราการหายใจและอัตราการเกิดกิจกรรมทางเมตาโบลิซึมภายหลังเก็บเกี่ยว โดยทั่วไปเซลล์ที่อายุอ่อนและกำลังเจริญเติบโตจะมีอัตราการหายใจสูงกว่า เซลล์ที่แก่กว่า

2.4.1.6 ชนิดของพืช มีความแตกต่างกันมากในเรื่องอัตราการหายใจ

ตารางที่ 2.3 ตัวอย่างผลไม้กลุ่ม Climacteric และ Non-climacteric บางชนิด

Climacteric	Non-climacteric
กล้วย ท้อ สาลี่ มะละกอ สาเก พลับ ฝรั่ง พลัม	ส้ม พริก ผลมะม่วงหิมพานต์ สับปะรด ลำไย
น้อยหน่า ขนุน มะเขือเทศ มะเดื่อฝรั่ง ละมุด	แตงกวา มะเขือ ส้มเขียวหวาน องุ่น มะนาว
กีวี แตงโม มะม่วง แอปเปิล แอปริคอต อะโวคา	ลิ้นจี่ มะกอก เชอร์รี่ สตอเบอร์รี่ ราสป์เบอร์รี่
โต เสาวรส แตงลาย บลูเบอร์รี่	เกรฟฟรุต แบลคเบอร์รี่ โกโก้ พุทรา

ที่มา : ดัดแปลงมาจาก Kader (1985) และ Wills et. al. (1981)

2.4.2 การสูญเสียน้ำ (Transpiration) ทำให้น้ำหนักของผลลดลงและพื้นผิวของผลเหี่ยวยุบลงเป็นผลให้คุณภาพของผลลดลง ทั้งในด้านน้ำหนักของผลดั้งเดิมที่ควรจะได้รับและมูลค่าต่อหน่วยผลที่ลดลง

2.4.3 การเปลี่ยนแปลงในด้านสีของผล (Color change) จากสีเขียวของคลอโรฟิลล์ มีการเกิดสีประจำตัวของผลนั้นแทน ทำให้สีเขียวลดความเด่นลง

2.4.4 การสลายตัวขององค์ประกอบในผนังเซลล์ของผล ทำให้ผลนิ่มลง (Softening)

2.4.5 การเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบเคมีที่สะสม เช่น แป้ง กรดอินทรีย์ ไขมัน

2.4.6 การสูญเสียวิตามิน

2.4.7 การสร้างกลิ่นเฉพาะตัวของผล

2.5 รูปแบบการหายใจ (Respiratory pattern)

ผลไม้ชนิดต่าง ๆ จะมีวิธีและกระบวนการหายใจที่เหมือนกัน แต่อัตราและรูปแบบของการหายใจของผลไม้หลังเก็บเกี่ยว จะมีความแตกต่างกัน ผลไม้บางชนิดอาจถูกเก็บเกี่ยวมาตั้งแต่ยังไม่สุก และเมื่อเก็บเกี่ยวมาแล้ว สามารถทำให้ผลไม้สุกหรือมีพัฒนาการขั้นต่อไปที่ปกติได้ เช่น มะม่วง กล้วยทุเรียน เป็นต้น แต่ผลไม้บางอย่างเช่น ส้ม ลิ้นจี่ ลำไย จำเป็นต้องเก็บเกี่ยวเมื่อผลไม้เหล่านั้นมีการสุกตั้งแต่ยังอยู่บนต้น หากเก็บเกี่ยวมาก่อน ผลไม้เหล่านั้นอาจมีพัฒนาการที่ผิดปกติไป จากลักษณะการสุกของผลไม้ จึงทำให้สามารถแบ่งผลไม้ตามรูปแบบของการหายใจ ออกได้เป็น 2 กลุ่ม คือ

2.5.1 ผลไม้ที่มีอัตราการหายใจแบบเปลี่ยนแปลงตามอายุนับจากที่ผลไม้แก่จัดหรือผล

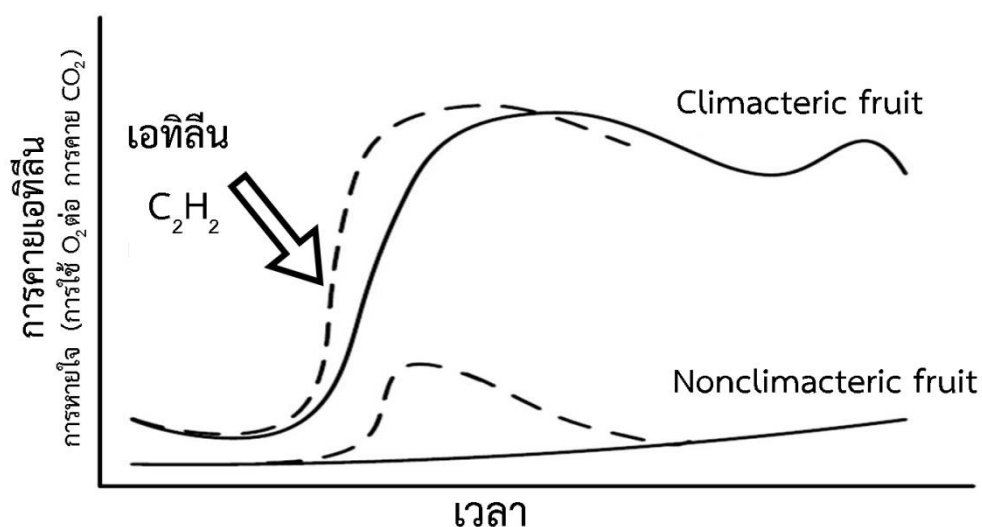
บริบูรณ์ (maturity) หรือผลไม้ที่บ่มให้สุกได้ เรียกว่า Climacteric fruit

เมื่อถูกเก็บเกี่ยวมาแล้วและเข้าสู่ระยะของการสุกจะมีการเพิ่มของอัตราการหายใจให้สูงขึ้นในช่วงที่อัตราการหายใจเริ่มเพิ่มสูงขึ้นเรียกว่า ระยะ Climacteric Rise ซึ่งในระยะนี้จะตรงกับการเข้าสู่ระยะชรา (Senescence) การเพิ่มอัตราการหายใจของผลจะสูงขึ้นจนถึงจุดสูงสุด เมื่อผลไม้นั้นสุกเต็มที่ (Ripening) เรียกว่า Climacteric Peak หลังจากนั้นอัตราการหายใจจะลดลง ซึ่งจะเป็นการเข้าสู่ระยะสุกงอม (Over Ripening) และตาย โดยผลไม้ผลไม้ที่บ่มให้สุกได้ มักเป็นผลไม้ที่มีการเก็บสะสมอาหารในรูปของแป้งหรือไขมันและผลไม้เหล่านี้เมื่อเก็บเกี่ยวมาแล้วนำมาทิ้งไว้ให้สุกได้ เนื่องจากในระหว่างการสุกผลของการหายใจจะเกิดการสร้างก๊าซ เอทิลีน (Ethylene) ขึ้นภายในเนื้อเยื่อ ก๊าซเอทิลีนในเนื้อเยื่อที่ถูกสร้างขึ้นจะกระตุ้นให้ผลไม้มีการสุกนอกจากนี้ผลไม้เหล่านี้สามารถบ่มให้สุกได้โดยการใช้ก๊าซเอทิลีนจากภายนอก เมื่อได้รับการกระตุ้นโดยการใช้ก๊าซเอทิลีนในระดับความเข้มข้นที่เหมาะสมจะสามารถเพิ่มอัตราหรือปริมาณการสร้างเอทิลีนภายในเนื้อเยื่อให้สูงขึ้นไปอีกและการสร้างก๊าซเอทิลีนภายในจะดำเนินต่อไปได้เอง เรียกว่า Autocatalytic system

2.5.2 ผลไม้ที่มีอัตราการหายใจค่อยๆลดลงเมื่อผลไม้อายุมากขึ้นและเมื่อมีการสุกอัตรา

การหายใจจะไม่เพิ่มขึ้น หรือผลไม้ที่ไม่สามารถบ่มให้สุกได้ เรียกว่า Nonclimacteric fruit

เมื่อถูกเก็บเกี่ยวมาแล้วจะมีอัตราการหายใจค่อนข้างต่ำและคงที่ ตั้งแต่เริ่มเข้าสู่ระยะการสุกไปจนกระทั่งผลไม้นั้นชราและตายไป โดยผลไม้เหล่านี้อาจมีการเก็บสะสมอาหารในรูปของน้ำตาลหรือกรดอินทรีย์ ผลไม้พวกนี้ไม่สามารถนำมาทิ้งไว้ให้สุกได้ ดังนั้น จึงจำเป็นต้องเก็บเกี่ยวเมื่อสุกแล้วเท่านั้น ผลไม้ที่ไม่สามารถบ่มให้สุกได้ อาจมีการสร้างก๊าซเอทิลีนภายในเนื้อเยื่อในอัตราหรือปริมาณที่ต่ำทำให้กระบวนการสุกเกิดอย่างช้าๆ นอกจากนี้การใช้ก๊าซเอทิลีนจากภายนอกกระตุ้นให้มีการสุกของผลไม้เหล่านี้จะตอบสนองโดยมีอัตราการหายใจสูงขึ้นได้ตลอดระยะเวลาที่มีก๊าซเอทิลีน เมื่อหยุดการใช้ก๊าซเอทิลีน อัตราการหายใจของผลไม้ที่ไม่สามารถบ่มให้สุกได้ก็จะกลับเข้าสู่ระดับเดิมอีก โดยไม่มีการเพิ่มอัตราการหายใจให้สูงขึ้นเหมือนกับพวกผลไม้ที่สามารถบ่มให้สุกได้ ดังนั้นพวกผลไม้ที่ไม่สามารถบ่มให้สุกได้อาจไม่มีระบบ Autocatalytic system ก็ได้



ภาพที่ 2.2 รูปแบบการหายใจ (เส้นทึบ) แบบ Climacteric กับ Nonclimacteric และการตอบสนองต่อการใช้อเอทิลีน (เส้นประ)

ที่มา : ดัดแปลงมาจาก Kader (1985) Kay (1991) และ Wills et. al. (1981)

ตารางที่ 2.4 ความแตกต่างระหว่างผล แบบ Climacteric กับ Nonclimacteric ในการสังเคราะห์เอทิลีน และการตอบสนองต่อการได้รับเอทิลีน

เกณฑ์	Climacteric	Non-climacteric
การตอบสนองต่อการใช้อเอทิลีน	กระตุ้นเพียงครั้งเดียว	ต้องกระตุ้นตลอดระยะ
ในการเพิ่มการหายใจ		หลังการเก็บเกี่ยว
อิทธิพลของเอทิลีน	ขึ้นกับความเข้มข้น	ไม่ขึ้นกับความเข้มข้น
ในการเพิ่มการหายใจ		
การย้อนกิจกรรมกลับ	ไม่ย้อนกลับ การเพิ่มการหายใจ	ย้อนกลับ การเพิ่มการ
ในการเพิ่มการหายใจโดยเอทิลีน	เกิดขึ้นต่อไป	หายใจเกิดขึ้นต่อไป เมื่อ
		ยังคงมีการใช้อเอทิลีนอยู่
การสร้างเอทิลีนต่อเนื่อง	มีการสร้าง	ไม่มีการสร้าง
ความเข้มข้นของเอทิลีนภายใน	แปรปรวน	ความเข้มข้นต่ำ

ที่มา : ดัดแปลงมาจาก Kay (1991)

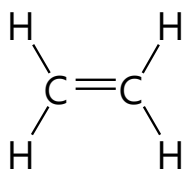
2.6 เอทิลีน (Ethylene)

เป็นฮอร์โมนพืชที่มีสภาพเป็นก๊าซซึ่งเป็นที่รู้จักมานาน ในปี ค.ศ. 1901 นักศึกษาชาวรัสเซียพบว่าเอทิลีนเป็นหนึ่งในแก๊สที่เกิดจากการเผาไหม้ของถ่านหินที่ใช้เป็นแหล่งแสงสว่างตามท้องถนนในช่วงต้นศตวรรษที่ 19 หลังจากนั้นได้มีการพิสูจน์ให้เห็นว่าเอทิลีนเป็นแก๊สที่พืชสังเคราะห์ขึ้นได้ในปริมาณน้อย และสามารถเร่งกระบวนการสุกของผลไม้บางชนิดได้ จึงจัดเอทิลีนเป็นฮอร์โมนพืชที่สำคัญทางด้านสรีรวิทยาหลังเก็บเกี่ยว และพบว่าเอทิลีนเป็นก๊าซที่สังเคราะห์ขึ้นโดยพืช ทำหน้าที่ควบคุมกระบวนการเติบโตที่เกี่ยวข้องกับความชรา การหลุดร่วงของใบ ดอก ผล และควบคุมการเจริญของพืชเมื่ออยู่ในสภาวะที่ไม่เหมาะสม ซึ่งก๊าซนี้จะเกิดขึ้นในกระบวนการเมแทบอลิซึมของพืช โดยเฉพาะในช่วงที่ผลไม้สุก จะมีก๊าซแพร่ออกมาจำนวนมาก ทำให้ผลไม้ที่อยู่ข้างๆ สุกตามไปด้วย

ในกรณีที่พืชได้รับเอทิลีนมากเกินไปในบางช่วงที่เจริญเติบโตจะทำให้ใบร่วงมากกว่าปกติหรือไปเร่งให้ผลสุกเร็วกว่าความต้องการ จึงไม่สามารถเก็บรักษาไว้ได้นาน ทำให้เกิดผลเสียมากกว่าผลดี ซึ่งกรณีที่ส่งออกผลไม้ไปขายจะต้องหาทางกำจัดเอทิลีนที่เกิดขึ้นในช่วงขนส่ง เพื่อเก็บรักษาผลไม้ให้คงอยู่ในสภาพเดิมได้นานโดยไม่สุกหรือเน่าในระหว่างทำการขนส่ง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในผลไม้ที่มีอัตราการหายใจสูง เช่น กล้วย มะม่วง เป็นต้น

2.6.1 โครงสร้างของเอทิลีน

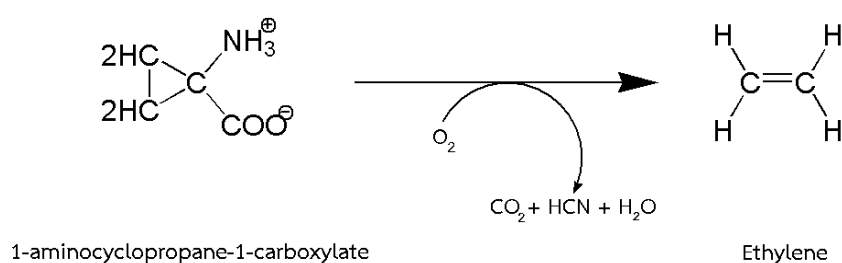
เอทิลีนมีสูตรโครงสร้างคือ C_2H_4 มีน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 28 สารตั้งต้นที่ใช้ในการสร้างเอทิลีนคือ กรดอะมิโนชนิด Methionine โดย Shang Fa Yang เป็นผู้ค้นพบวัฏจักรการสังเคราะห์เอทิลีนที่สมบูรณ์ เรียกว่า วัฏจักร Yang เนื่องจากคุณสมบัติของเอทิลีนที่เป็นแก๊สทำให้สามารถแพร่ผ่านเนื้อเยื่อพืชได้ง่าย



ภาพที่ 2.3 โครงสร้างของเอทิลีน

2.6.2 การสังเคราะห์เอทิลีน

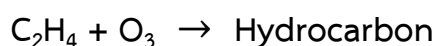
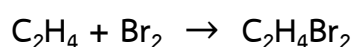
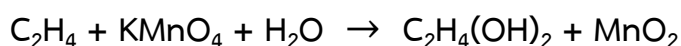
เอทิลีนผลิตจากเมทไทโอนีน (Methionine) ซึ่งเป็นกรดอะมิโนชนิดหนึ่งที่เปลี่ยนเป็น SAM, (S-adenosyl-L-methionine) ด้วยเอนไซม์ MetAdenosyltransferase โดย SAM จะถูกเปลี่ยนเป็น ACC (1-aminocyclopropane-1-carboxylic-acid) แล้วเปลี่ยนเป็นเอทิลีน โดยที่คาร์บอนอะตอมที่ 3 และ 4 ของเมทไทโอนีนจะกลายเป็นคาร์บอนของเอทิลีน ซึ่งในการสังเคราะห์จะให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาด้วย กระบวนการสังเคราะห์เอทิลีนจะสิ้นสุดเมื่อในปฏิกิริยาขาด O_2 (Rocklin et al., 2004)



ภาพที่ 2.4 การสังเคราะห์เอทิลีน

ที่มา : Buchanan (2000)

การสังเคราะห์เอทิลีนสามารถเกิดขึ้นได้กับทุกเซลล์ เนื่องจาก เอทิลีนมีสภาพเป็นก๊าซที่สามารถซึมผ่านได้ การจัดการหลังเก็บเกี่ยวจึงต้องพยายามควบคุมการสังเคราะห์ และการแพร่ของเอทิลีน โดยใช้สภาพอุณหภูมิต่ำ (Refrigerated condition) สภาพควบคุมองค์ประกอบของอากาศ (Controlled atmosphere) หรือมีองค์ประกอบของอากาศที่ผิดไปจากปกติ (Modified atmosphere) เพื่อควบคุมการสังเคราะห์เอทิลีนในเนื้อเยื่อ การใช้สภาพความกดอากาศต่ำ (Hypobaric condition) เพื่อให้ก๊าซเอทิลีนถูกสร้างขึ้นแพร่ออกจากเนื้อเยื่อเร็วขึ้นและมีการระบายอากาศเพื่อไม่ให้เกิดการสะสมเอทิลีน และมีการกำจัดเอทิลีน โดยใช้ต่างทับทิม (Potassium permanganate) โบรมีน (Bromine) เป็นสารดูดซับเอทิลีน (Ethylene absorber) หรือทำให้เอทิลีนเปลี่ยนสภาพไป โดยใช้ก๊าซโอโซนหรือแสงอัลตราไวโอเลต



ที่มา : Organic chemistry (2015)

ตารางที่ 2.5 กลุ่มของผลไม้ตามอัตราการผลิตก๊าซเอทิลีน

กลุ่ม	ช่วงการผลิตที่ 20°C ($\mu \text{C}_2\text{H}_4 \text{ KgHr}^{-1}$)	ชนิดของผลไม้
ต่ำมาก	ต่ำกว่า 0.1	ส้ม องุ่น พุทรา ทับทิม เซอร์รี สตอเบอร์รี
ต่ำ	0.1-1.0	แตงกวา มะเขือ กระเจี๊ยบ โอลีฟ พลับ สับปะรด ฟักทอง แตงโม ราสป์เบอร์รี บลูเบอร์รี พริก
ปานกลาง	1.0-10.0	กล้วย มะเดื่อฝรั่ง ฝรั่ง มะม่วง มะเขือเทศ
สูง	10.0-100.0	มะละกอ สาลี่ ท้อ แอปเปิล แอปริคอต อะโวคาโด แคนตาลูป กีวี พลัม
สูงมาก	มากกว่า 100.0	น้อยหน่า ละมุด เสาวรส

ที่มา : ดัดแปลงมาจาก Kader (1985)

2.7 โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต



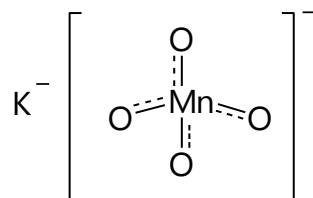
ภาพที่ 2.5 ลักษณะของโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต

โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตหรือต่างทับทิม เป็นสารเคมีประเภทอนินทรีย์ (Inorganic) ชนิดหนึ่งซึ่งประกอบไปด้วยธาตุโพแทสเซียม ธาตุแมงกานีสและธาตุออกซิเจนในอัตราส่วน 1:1:4 ที่มีน้ำหนักมวลโมเลกุลอยู่ที่ 158.03 กรัมต่อโมล จุดหลอมเหลว 240 องศาเซลเซียส โดยมีลักษณะเป็นผลึกหรือเกล็ดสีม่วง สามารถละลายน้ำได้ดี โดยแตกตัวเป็นโพแทสเซียมไอออน (K^+) และเปอร์แมงกาเนตไอออน (MnO_4^-) นอกจากนี้เมื่อละลายน้ำแล้วจะได้สารละลายสีม่วงหรือสีชมพูอมม่วง ทั้งนี้ก็ขึ้นอยู่กับปริมาณและความเข้มข้น ซึ่งโดยทางเคมีแล้วยังจัดว่าต่างทับทิมเป็นเกลือชนิดหนึ่ง ซึ่งมีฤทธิ์เป็นต่างอ่อนๆ

และมีคุณสมบัติเป็นสารออกซิเดชัน (Oxidation) อย่างแรง โดยปัจจุบันมีการนำมาใช้ประโยชน์ในครัวเรือนหรือในอุตสาหกรรมต่างๆ ไม่ว่าจะเป็น อุตสาหกรรมพอกย้อมสิ่งทอ หรือในฐานะของยาฆ่าเชื้อโรคที่สามารถฆ่าเชื้อแบคทีเรียและเชื้อราได้ดี นิยมนำมาล้างและแช่ผัก ผลไม้ เนื้อสัตว์ประเภทต่างๆ ซึ่งไม่เพียงแต่ฆ่าเชื้อโรคเท่านั้น แต่ยังสามารถล้างสารเคมีตกค้างในผักและผลไม้ด้วย นอกจากนี้ยังนิยมนำมาใช้ฆ่าเชื้อโรคในตู้ปลาเพื่อกำจัดเชื้อราและแบคทีเรีย โดยโครงสร้างโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต มีรูปแบบเป็นผลึกคริสตัล ที่มีค่าคงที่: $A=910.5 \text{ pm}$, $B=572.0 \text{ pm}$, $C=742.5 \text{ pm}$ ซึ่งมีลักษณะเด่นโดยรวมจะคล้ายกับแบเรียมซัลเฟต ที่อยู่รูปแบบของสารละลายของแข็ง

การผลิตโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตในอุตสาหกรรมจะเริ่มจากแมงกานีสไดออกไซด์ ซึ่งอยู่ในรูปแบบเป็นแร่ pyrolusite : MnO_2 ผสมกับโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และให้ความร้อนในบรรยากาศหรือแหล่งที่มีออกซิเจนอื่นๆ เช่น โพแทสเซียมไนเตรตหรือโพแทสเซียมคลอเรต กระบวนการนี้จะได้โพแทสเซียมแมงกาเนตเป็นผลิตภัณฑ์ จากนั้นโพแทสเซียมแมงกาเนตจะถูกเปลี่ยนเป็นโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต โดยการเกิดออกซิเดชันไฟฟ้า (Electrolytic oxidation) ในสถานะที่เป็นเบส

การผลิตโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตด้วยวิธีการอื่นๆ แม้ว่าจะไม่มีความสำคัญในเชิงพาณิชย์แต่โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตสามารถออกซิไดซ์โดยคลอรีน ผ่านปฏิกิริยา Disproportionation ภายใต้สภาวะที่เป็นกรด เช่น กรดไฮโดรคลอริก หรือ กรดคาร์บอนิก



ภาพที่ 2.6 โครงสร้างของโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนส

2.8 กล้วยหอมทอง (Cavendish Banana)

2.8.1 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของกล้วยหอมทอง

กล้วยหอมทอง เป็นผลไม้เมืองร้อนที่มีลำต้นอยู่ใต้ดินเป็นหนึ่งในสายพันธุ์ตระกูลกล้วยที่แตกเหล่าแตกออกมาจากต้นสกุลที่เรียกว่า กล้วย ชื่อทางพฤกษศาสตร์ว่า *Musa acuminata* จัดอยู่ในวงศ์ Cavendish สายพันธุ์กล้วยได้รับการจัดกลุ่มบนพื้นฐานของจำนวนโครโมโซม “กล้วยหอมทอง” จัดอยู่ในกลุ่ม AAA เป็น Triploid มีโครโมโซม 3 ชุดเป็นตัวจำแนกพันธุ์กล้วยตามพันธุ์กรรม โดยใช้จีโนมของกล้วยเป็นตัวกำหนดในการแยกพันธุ์

กล้วยหอมทองที่ปลูกในประเทศไทย ลักษณะทั่วไปจะมีลำต้นสูงประมาณ 3 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 20 เซนติเมตร กาบลำต้นด้านนอกและด้านในสีเขียวอ่อน มีลายเส้นสีชมพู ก้านใบมีร่องค่อนข้างกว้าง เส้นกลางใบสีเขียว ส่วนของดอก ก้านเครือมีขน ปลีรูปไข่ค่อนข้างยาว ปลายแหลม ด้านบนมีสีแดงอมม่วง กล้วยเครือหนึ่งมี 4-6 หวี หวีหนึ่งมี 12-16 ผล ปลายผลมีจุดเห็นชัด เปลือกบาง เมื่อสุกเปลี่ยนเป็นสีเหลืองทอง เนื้อสีเหลืองเข้ม กลิ่นหอมรสหวานน่ารับประทาน (สำนักงานสหกรณ์จังหวัดเพชรบุรี; 2557)



ภาพที่ 2.7 ลักษณะทางกายภาพของต้น(ซ้าย) และ ผล(ขวา) ของกล้วยหอมทอง
ที่มา : สำนักงานสหกรณ์จังหวัดเพชรบุรี (2557)

2.8.2 คุณค่าทางโภชนาการของกล้วยหอมทอง

ในกล้วยหอมทอง ประกอบด้วยสารอาหารดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 ปริมาณสารอาหารในกล้วยหอมทองน้ำหนัก 100 กรัม

สารอาหาร	ปริมาณ	หน่วย
พลังงาน	89	กิโลแคลอรี
น้ำ	74.91	กรัม
โปรตีน	1.09	กรัม
ไขมัน	0.33	กรัม
คาร์โบไฮเดรต	22.84	กรัม
ไฟเบอร์	2.6	กรัม
น้ำตาล	12.23	กรัม
แคลเซียม	5	มิลลิกรัม
เหล็ก	0.26	มิลลิกรัม
แมกนีเซียม	27	มิลลิกรัม
ฟอสฟอรัส	22	มิลลิกรัม
โพแทสเซียม	358	มิลลิกรัม
โซเดียม	1	มิลลิกรัม
สังกะสี	0.15	มิลลิกรัม
วิตามินซี	8.7	มิลลิกรัม
ไทอามิน	0.031	มิลลิกรัม
ไรโบฟลาวิน	0.073	มิลลิกรัม
ไนอาซิน	0.665	มิลลิกรัม
วิตามิน บี6	0.367	มิลลิกรัม
โฟเลต	20	ไมโครกรัม
วิตามินเอ	3	ไมโครกรัม
วิตามินอี	0.1	ไมโครกรัม
วิตามินเค	0.3	ไมโครกรัม

ที่มา : Simmonds and Preedy (2016)

2.9 ซีโอไลต์ (Zeolite)

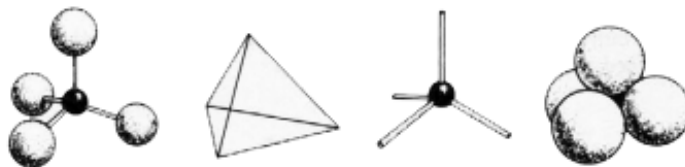
ซีโอไลต์ธรรมชาติเป็นแร่อะลูมิโนซิลิเกต (Aluminosilicates) ค้นพบโดยนักแร่วิทยาชาวสวีเดนชื่อ A.F. Crostedt เมื่อปี ค.ศ.1789 รากศัพท์เดิมมาจากภาษากรีก 2 คำ คือคำว่า ZeO ที่แปลว่า เตือด และคำว่า Lithos ที่แปลว่า หิน โดยพบว่าเมื่อเขาให้ความร้อนแก่ซีโอไลต์ธรรมชาติ จะเกิดการคายน้ำเป็นไอ ปูดขึ้นมาคล้ายกับว่าแร่เตือดได้

ในปี ค.ศ.1845 เวย์ (Way) พบว่า ดินบางชนิดมีแร่ซีโอไลต์ธรรมชาติเป็นส่วนประกอบจึงสามารถดูดแอมโมเนียได้ เนื่องจาก มีองค์ประกอบของซิลิเกตที่มีน้ำอยู่ในโครงสร้างของดิน จึงสามารถดูดซับแอมโมเนีย ในลักษณะการแลกเปลี่ยนไอออนกับเกลือแอมโมเนียมได้ ต่อมาในปี ค.ศ.1925 ไวน์เกลและสไตน์โฮฟ (Weigel and Steinhoff) ได้ศึกษาทดลองเกี่ยวกับสมบัติในการเลือกจับโมเลกุลของสารอินทรีย์ของซีโอไลต์ชนิดซาบาไซด์ (Chabazite) จนถึงปี ค.ศ.1940-1960 บาร์เรอร์ (Barrer) จึงได้ริเริ่มการสังเคราะห์ซีโอไลต์และศึกษาสมบัติการแลกเปลี่ยนไอออนของซีโอไลต์ จนมาถึงปี ค.ศ.1980 เป็นต้นมา เราจึงสามารถสังเคราะห์ซีโอไลต์ในรูปของปรากฏในธรรมชาติรูปแบบใหม่มากมาย โดยสมบัติเด่นของซีโอไลต์ คือ ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนและการเลือกสรรการดูดซับโมเลกุลของสารบางชนิด ขึ้นกับขนาดและหรือรูปร่างของโมเลกุลของสารนั้น นอกจากนั้นยังนำไปใช้เป็นสารลดความกระด้างของน้ำในอุตสาหกรรมผงซักฟอก และยังใช้เป็นตัวกำจัดโลหะหนักจากน้ำเสีย ดังนั้นซีโอไลต์จึงมีบทบาทและความสำคัญอย่างยิ่งต่ออุตสาหกรรม และภาคการผลิต ซึ่งในชีวิตประจำวันของเราต้องพบเจอและใช้ประโยชน์จากสิ่งที่เกี่ยวข้องกับซีโอไลต์

2.9.1 หน่วยโครงสร้างปฐมภูมิ

ซีโอไลต์ คือ สารประกอบจำพวกอะลูมิโนซิลิเกต (Aluminosilicate) มีลักษณะเป็นรูปพรุน ซึ่งประกอบไปด้วย tetrahedral ของซิลิเกต (SiO_4)⁴⁻ และอะลูมินา (AlO_4)⁵⁻ ซึ่งอะตอมของโลหะที่เป็นโครงสร้างหลักนี้รวมเรียกว่า T อะตอม (T-Atom) ส่วนโครงสร้าง tetrahedral ของซิลิกาและอะลูมินา นี้ เรียกว่า หน่วยโครงสร้างปฐมภูมิ (Primary building units) ซึ่งสามารถเกิดการจัดเรียงตัว โดยการเชื่อมต่อผ่านอะตอมออกซิเจนที่มุมทั้งสี่ของหน่วยโครงสร้างปฐมภูมิ ซึ่งเรียกว่า Oxygen bridge เกิดเป็นโครงสร้าง 3 มิติแตกต่างกันขึ้นกับการจัดเรียงตัวของหน่วยโครงสร้างปฐมภูมิ โดยปกติอะตอมของอะลูมิเนียมในผลึกออกไซด์มักมีโครงสร้างแบบ octahedral จึงไม่สามารถรับอิเล็กตรอนได้ แต่โครงสร้างนี้อะลูมิเนียมมีโครงสร้างแบบ tetrahedral ดังนั้นจึงทำให้ orbital ของอะลูมิเนียมรับอิเล็กตรอนจาก

ออกซิเจนได้แล้วเกิดประจุลบขึ้น ซึ่งเราเรียกว่า Negative framework charge และต้องมีไอออนบวกมาดุลประจุลบ เรียกว่า Charge balancing cation

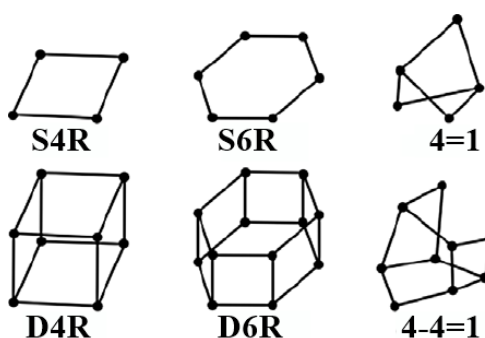


ภาพที่ 2.8 หน่วยโครงสร้างปฐมภูมิของซีโอไลต์

ที่มา : D. W.Breck (1974)

2.9.2 หน่วยโครงสร้างทุติยภูมิ

โครงสร้างทุติยภูมิ (Secondary building units) เกิดจากการเชื่อมต่อกันผ่านอะตอมของออกซิเจนของซิลิกาหรืออลูมินา แล้วเกิดเป็นโครงสร้างขนาดใหญ่ที่ซับซ้อนเกิดขึ้น โดยจะมีการจัดเรียงตัวของโครงสร้างปฐมภูมิอย่างเป็นรูปแบบ มีลักษณะเฉพาะ

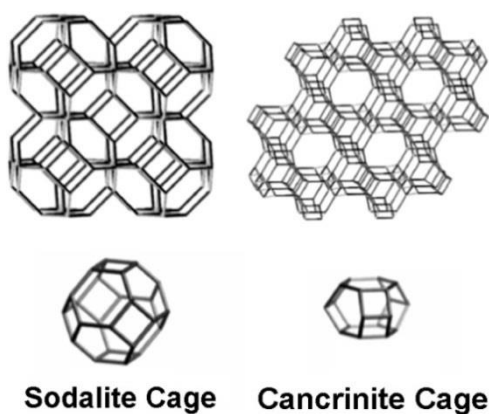


ภาพที่ 2.9 หน่วยโครงสร้างทุติยภูมิของซีโอไลต์

ที่มา : Wlodzimierz Mozgawa *et.al.* (2011)

2.9.3 หน่วยโครงสร้างที่ใหญ่กว่าโครงสร้างทุติยภูมิ

โครงสร้างทุติยภูมิ หรือ SBUs นี้สามารถจัดเรียงตัวเชื่อมต่อกันเป็นโครงสร้างที่มีขนาดใหญ่โตขึ้น มี เหลี่ยม มีมุม มีมิติคล้ายลูกเต๋าก้อน ซึ่งเราเรียกโครงสร้างนี้ว่า พอลิฮีดรา (Polyhedra) โดยที่ SBUs ชนิดเดียวกัน อาจทำให้ได้ พอลิฮีดราที่แตกต่างกันได้ เช่น Sodalite cage และ Cancrinite ซึ่งเกิดจากการจัดเรียงตัวของ S6R และ S4R ในลักษณะที่ต่างกัน



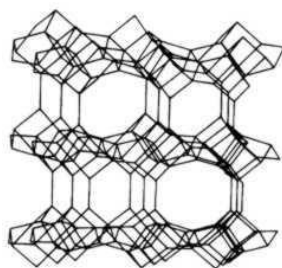
ภาพที่ 2.10 โครงสร้างของซีโอไลต์แบบ Sodalite cage และ Cancrinite cage
ที่มา : Carlos Alberto *et. al.* (2013)

2.9.4 ประเภทของซีโอไลต์

The International Zeolite Association (IZA) ซึ่งเป็นองค์การนานาชาติในเครือข่ายของ IUPAC ในส่วนที่เกี่ยวข้องกับสารประกอบประเภทซีโอไลต์ ได้จัดแบ่งซีโอไลต์และสารที่มีรูพรุนจุลภาคที่เกี่ยวข้องทั้งหมด ตามลักษณะโครงสร้างที่แตกต่างกันได้มากกว่า 160 ชนิด ซึ่งสามารถแบ่งซีโอไลต์เป็นกลุ่มใหญ่ๆ ตามปัจจัยที่แตกต่างกัน ดังนี้

2.9.4.1 การแบ่งชนิดของซีโอไลต์ตามลักษณะการเกิด

(1) ซีโอไลต์ที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ (Mineral zeolites or naturally occurring zeolites) ซึ่งส่วนมากค้นพบจากการทำเหมืองแร่ เป็นกลุ่มของผลึกอะลูมิโนซิลิเกตของโมโนหรือไดวาเลนต์เบส (Mono and divalent bases) อาจมีการสูญเสียน้ำผลึกบางส่วน หรือทั้งหมด โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง เช่น Faujasite Erionite Offretite Chabazite Clinoptilolite เป็นต้น ซีโอไลต์ธรรมชาติเดิม นำมาใช้ประโยชน์ในการก่อสร้าง ในทางอุตสาหกรรมใช้เป็น filter ในอุตสาหกรรมกระดาษ หลังจากได้ค้นพบคุณสมบัติการเป็น Molecular sieves และ Ion exchange จึงได้นำมาใช้เป็น Molecular sieves adsorbent ในอุตสาหกรรมแยกแก๊สธรรมชาติและแยกแอมโมเนียในขบวนการกำจัดน้ำทิ้ง



ภาพที่ 2.11 ซีโอไลต์ธรรมชาติชนิด Clinoptilolite

ที่มา : Gadepalle V.P (2007)

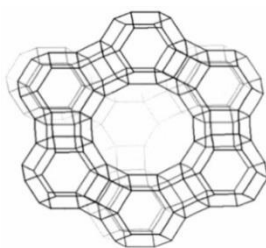
(2) ซีโอไลต์ที่เกิดจากการสังเคราะห์ทางเคมี (Synthetic Zeolite)

เกิดจากการ ทำปฏิกิริยาเบสิกออกไซด์ต่างๆ เช่น Al_2O_3 SiO_2 Na_2O และ K_2O ในระบบที่มีน้ำเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ของซีโอไลต์ที่มีน้ำผลึก และการสังเคราะห์สามารถทำให้เกิดได้ตั้งแต่เป็นเจล (Gelatin) จนถึงรูที่เป็นรูพรุน (Porous) และลักษณะคล้ายเม็ดทราย ได้แก่ Zeolite A Zeolite Y Zeolite F Zeolite M เป็นต้น

2.9.4.2 การแบ่งซีโอไลต์ตามอัตราส่วนซิลิกอนต่ออะลูมิเนียม

(1) ซีโอไลต์ที่มีอัตราส่วนซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมต่ำ

ซีโอไลต์ที่มี Si/Al ในช่วง 1-3 จะมีอะลูมิเนียมเป็นองค์ประกอบสูงจึงมี Negative Framework Charge และ Charge Balancing Cation จำนวนมาก จึงทำให้รูพรุนภายในโครงสร้างมีสภาพขั้วสูง จึงดูดซับความชื้นได้ดีมาก มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนได้ดี โดยเฉพาะไอออนบวกที่มีความหนาแน่นประจุ (Charge Density) สูง หรือ Hard Cation ซึ่งพบได้ทั้งประเภท Monovalent Cation เช่น Na^+ K^+ Cs^+ และ Divalent Cation เช่น Mg^{2+} Ca^{2+} Sr^{2+} เป็นต้น ซีโอไลต์ประเภทนี้ส่วนมากพบได้ตามธรรมชาติ ได้แก่ Clinoptilolite (MTT), Chabasite (CHA) และ Faujasite (FAU) ส่วนที่ได้จากการสังเคราะห์ ได้แก่ Zeolite Y (FAU) Zeolite Rho (RHO) และ Zeolite A (LTA) เป็นต้น

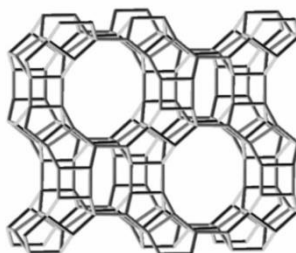


ภาพที่ 2.12 ซีโอไลต์ชนิด Y (FAU)

ที่มา : (Xu, X. และคณะ, 2006)

(2) ซีโอไลต์ที่มีอัตราส่วนซิลิกอนต่ออลูมิเนียมปานกลาง

ซีโอไลต์ที่มี Si/Al ในช่วง 3-7 จะมีอะลูมิเนียมเป็นองค์ประกอบปานกลาง จึงทำให้ซีโอไลต์กลุ่มนี้จะมี Negative Framework Charge ที่ห่างกัน ดังนั้นทำให้ Charge Balancing Cation ที่พบส่วนใหญ่จึงเป็นแบบ Monovalent Cation เช่น Na^+ K^+ และ Cs^+ ซึ่งเป็นไอออนที่มีขนาดใหญ่ มีความหนาแน่นประจุค่อนข้างต่ำ หรือเรียกได้ว่าเป็น “Soft Cation” ซึ่งจะมี interaction ที่ดีกับ “Soft Framework” ดังเช่น ซีโอไลต์ Rho (RHO) Ferrite (FER) และ Mordenite (MOR) เป็นต้น

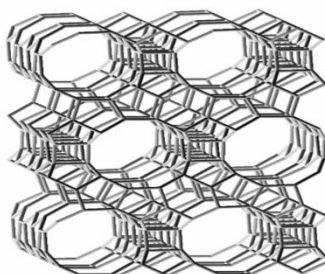


ภาพที่ 2.13 ซีโอไลต์ชนิด Mordenite (MOR)

ที่มา : Noreña L. *et.al.* (2012)

(3) ซีโอไลต์ที่มีอัตราส่วนซิลิกอนต่ออลูมิเนียมสูง

ซีโอไลต์ที่มี Si/Al ในช่วงมากกว่า 7 จะมีอะลูมิเนียมเป็นองค์ประกอบต่ำ ส่วนใหญ่เตรียมได้จากการสังเคราะห์ ดังนั้น Charge Balancing Cation ที่พบในโครงสร้างจึงขึ้นอยู่กับชนิดของ Cation ที่ใช้ในการสังเคราะห์ ซึ่งส่วนใหญ่เป็น Na^+ และ quaternary ammonium cation ซีโอไลต์ประเภทนี้มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนน้อยมากทำให้มีความมีขั้วต่ำ ดูดซับความชื้นได้น้อย แต่สามารถดูดซับสารอินทรีย์และสารไฮโดรคาร์บอนได้ดี จึงนิยมใช้เป็นสารดูดซับและตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น ZSM-5 (MFI) ZSM-11 (MEL) และ Beta (BEA) เป็นต้น



ภาพที่ 2.14 ซีโอไลต์ชนิด Beta (BEA)

ที่มา : Yu, K. *et.al.* (2014)

2.9.4.3 การแบ่งซีโอไลต์ตามชนิดรูพรุน สามารถแบ่งได้เป็น 2 ลักษณะ คือ

(1) โครงสร้างรูพรุนที่มีลักษณะเป็นช่องว่างทรงกลมเชื่อมต่อกันที่เรียกว่า โครงสร้างแบบกรง (Cage structure)

(2) โครงสร้างรูพรุนที่มีลักษณะเป็นท่อกลางเรียงตัวต่อกันเป็นแนวที่เรียกว่า โครงสร้างแบบท่อ (Channel Structure) ได้แก่

(2.1) โครงสร้างแบบกรง คือ มีรูพรุนเป็นโพรง โดยช่องเปิดหรือหน้าต่าง (Window) ของโพรงจะมีขนาดเล็กกว่าช่องว่างภายใน (Cavity) ขนาดของโพรงนี้จะขึ้นกับขนาดและจำนวนของ window ซีโอไลต์ที่มีรูพรุนแบบกรง มักประกอบขึ้นจาก SBU's แบบ S4R D4R S6R D6R S8R และ D8R จึงมีอะลูมิเนียมเป็นองค์ประกอบค่อนข้างสูง

(2.2) โครงสร้างแบบช่อง คือ มีรูพรุนเป็นโพรง โดยมีช่องเปิดขนาดเท่ากับขนาดโพรงมีลักษณะคล้ายท่อยาวจากด้านหนึ่งไปสู่อีกด้านหนึ่งของโครงผลึก ทั้งนี้หากรูพรุนที่มีเชื่อมต่อกันในลักษณะของท่อจัดวางตัวในแนวด้านใดด้านหนึ่งเพียงด้านเดียว เราเรียกว่าเป็นโครงสร้างแบบช่อง 1 มิติ (One dimensional channel) เช่น ซีโอไลต์ Mordenite หากมีการจัดเรียงตัวและเชื่อมต่อกันใน 2 หรือ 3 ทิศทาง เรียกว่าโครงสร้างแบบช่อง 2 หรือ 3 มิติ (Two/Three dimensional channel) เช่น ซีโอไลต์ ZSM-5 และซีโอไลต์ Beta เป็นต้น นอกจากนี้ยังสามารถพบได้ทั้งซีโอไลต์ที่มี Si/Al สูงและต่ำ

2.9.4.4 การแบ่งซีโอไลต์ตามขนาดหน้าต่างรูพรุน (Window) โดยทั่วไปเราจะแบ่งรูพรุนของวัสดุเป็น 3 ประเภท คือ

(1) รูพรุนจุลภาค (Microporous) มีขนาดรูพรุน 0.2-2 นาโนเมตร สามารถบรรจุโมเลกุลขนาดเล็ก โดยโมเลกุลที่อยู่ในรูพรุนจุลภาคจะมีอันตรกิริยากับผนังรูพรุน

(2) รูพรุนมัธยภาค (Mesoporous) มีขนาดรูพรุน 2-50 นาโนเมตร สามารถบรรจุโมเลกุลขนาดใหญ่ โดยโมเลกุลของแก๊สที่มีอยู่ในรูพรุนมัธยภาคจะมีอันตรกิริยาต่อกันและอาจเกิดการควบแน่นในหลอดรูเล็ก (Capillary Condensation) ได้ที่อุณหภูมิสูงกว่าจุดเดือดในสภาวะปกติได้

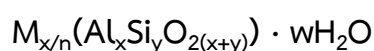
(3) รูพรุนมหภาค (Macroporous) มีขนาดรูพรุนมากกว่า 50 นาโนเมตรเป็นรูพรุนที่สังเกตได้ทางกายภาพ โมเลกุลที่อยู่ในรูพรุนมหภาค จะไม่มีความแตกต่างจากโมเลกุลที่ดูดซับบนผิวชั้นนอกของวัสดุ

ดังนั้นซีโอไลต์จัดเป็นสารประกอบที่มีรูพรุนจุลภาค โดยมีขนาดหน้าต่างรูพรุน 0.2-0.8 นาโนเมตร แต่สารประกอบที่มีโครงสร้างและสมบัติคล้ายซีโอไลต์บางชนิด อาจมีหน้าต่างรูพรุนมากกว่า 1.5

นาโนเมตร ทั้งนี้เราจะต้องพิจารณาขนาดของหน้าตาของรูพรุนเป็นหลัก แต่ขนาดของโพรงขึ้นกับลักษณะโครงสร้าง

2.9.5 องค์ประกอบของซีโอไลต์

ซีโอไลต์ใน 1 หน่วยเซลล์ (Unit cell) จะประกอบไปด้วยซิลิกอน อะลูมิเนียม และออกซิเจน เป็นหลักนอกจากนั้น Charge balancing cation และน้ำ ก็นับเป็นองค์ประกอบของโครงผลึกซีโอไลต์ด้วยเช่นกัน 1หน่วยเซลล์ของซีโอไลต์มีองค์ประกอบอย่างง่ายดังนี้



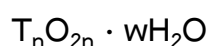
โดย

M คือ ไอออนบวกที่มีประจุ n

W คือ โมเลกุลของน้ำในผลึก

X+Y คือ จำนวนทรงสี่หน้าทั้งหมดในหน่วยเซลล์

จะเห็นได้ว่า Charge balancing cation (M) ขึ้นกับปริมาณอะลูมิเนียม (X) จากองค์ประกอบของหน่วยเซลล์ เราอาจจะพิจารณาองค์ประกอบอย่างง่ายของซีโอไลต์เป็นดังนี้



โดย

T คือ T-Atom ซึ่งเป็นผลรวมของจำนวนซิลิกอนกับอะลูมิเนียมซึ่งมีจำนวน n อะตอม และมีจำนวนออกซิเจน เป็น 2 เท่าของ T-Atom เสมอ

W คือ จำนวนโมเลกุลของน้ำในรูพรุน ซึ่งโดยปกติจะมีปริมาณ 20-30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของผลึกทั้งหมดโดยปริมาณและตำแหน่งของน้ำในโครงผลึกของซีโอไลต์จะขึ้นอยู่กับขนาดและรูปร่างของรูพรุน รวมทั้งความมีขั้วของซีโอไลต์

2.9.6 การสังเคราะห์ซีโอไลต์ (Zeolite synthesis)

การสังเคราะห์ซีโอไลต์ทำโดยการปรับปรุงคุณภาพด้วยความร้อนที่อ้อมด้วยไอน้ำ (Hydrothermal Treatment) โดยทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูงถึง 200 องศาเซลเซียส และความดันสูง การทำปฏิกิริยานี้จะถูกทิ้งไว้ตามระยะเวลา ความดัน และอุณหภูมิที่กำหนดภายใต้ปริมาณที่มีมากเกินไป นอกจากนี้ ยังมีวิธีการใหม่ๆ ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ที่อุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิน้ำเดือด

การสังเคราะห์ซีโอไลต์ด้วยวิธีการไฮดรותרมอลจะทำให้ซิลิกา อะลูมินา และโลหะ แลคาไลน์รวมตัวกันเป็นเจลที่มีลักษณะไม่เป็นเนื้อเดียวกัน แต่จะก่อตัวขึ้นเป็นผลึกอย่างช้าๆ ภายในช่วงเวลาที่เกิดปฏิกิริยา อุณหภูมิการเกิดผลึกจะอยู่ในช่วง 150 องศาเซลเซียส หรือสูงกว่านั้นที่ความดัน เท่ากับความดันของไอน้ำอ้อมตัวในขณะนั้น ในบางครั้งอาจเกิดเป็นผลึกซีโอไลต์ได้มากกว่าหนึ่งชนิด ผลิตภัณฑ์ที่ได้ท้ายสุดจะขึ้นกับความสัมพันธ์หลายปัจจัย เช่น อัตราส่วนของ $\text{SiO}_2/\text{AlO}_2$ ของสารตั้งต้น อุณหภูมิ ค่าความเป็นกรด-ด่าง ปริมาณที่เติม ช่วงเวลาปฏิกิริยา อัตราเร็วในการกวน และปริมาณแคตไอออนของสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ที่ปะปนอยู่ โดยปกติการก่อตัวขึ้นของซีโอไลต์มีความสลับซับซ้อนมาก แต่แนวความคิดหลักอยู่ที่ว่าแคตไอออนที่มีอยู่จะช่วยทำให้เกิดแรงกระทำต่อ Templating Action ได้ดีขนาดไหน ซึ่งเป็นการนำสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์มาใช้เป็นแม่แบบเพื่อให้อะตอมของสารที่ต้องการเกิดผลึกเข้ามาเกาะ ทำให้โครงสร้างของผลึกที่เกิดขึ้นมีลักษณะโครงสร้างคล้ายของแม่แบบ แล้วสารที่นำมาเป็นแม่แบบจะถูกกำจัดออกไปในขั้นสุดท้ายของการสังเคราะห์ เหลือแต่โครงสร้างผลึกของสารที่ต้องการเท่านั้น

2.9.7 การประยุกต์ใช้ซีโอไลต์ (Applications of zeolite)

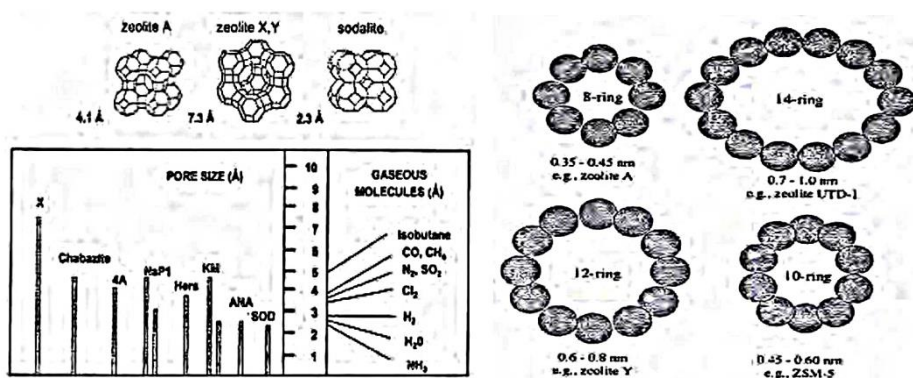
ซีโอไลต์สังเคราะห์มีประโยชน์ และถูกนำมาใช้มากกว่าซีโอไลต์ธรรมชาติเนื่องจากซีโอไลต์สังเคราะห์มีองค์ประกอบที่สม่ำเสมอ มีโครงสร้างแน่นอน และค่อนข้างบริสุทธิ์ มีสารปนเปื้อนน้อย ปัจจุบันซีโอไลต์มีประโยชน์ และบทบาทในอุตสาหกรรมหลายด้านดังต่อไปนี้

2.9.7.1 ใช้เป็นสารเร่งปฏิกิริยาในอุตสาหกรรม เช่น ใช้เป็น Cracking Catalyst ในอุตสาหกรรมน้ำมัน ใช้เป็นสารเร่งปฏิกิริยาการเปลี่ยนเมทานอล (Methanol) เป็นแก๊สโซลีน (Gasoline) และใช้เป็นสารเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการผลิตโพลีเอทิลีน (Polyethylene) ให้มีสมบัติเจาะจงมากขึ้น

2.9.7.2 ใช้เป็นส่วนในผงซักฟอก เนื่องจากซีโอไลต์มีคุณสมบัติที่เหมาะสมสำหรับทำผงซักฟอก (Detergentbuilders) คือ มีความจุ (Capacity) และจลศาสตร์ (Kinetics) มากทำให้การแลกเปลี่ยนแคตไอออนเกิดขึ้นได้มากและเร็ว นอกจากนี้ซีโอไลต์สามารถใช้แทนฟอสเฟตได้ ซึ่งฟอสเฟตที่ผสมในผงซักฟอกถ้าใช้ในปริมาณที่มากเกินไปจะทำให้เกิดปัญหามลพิษได้ คือ ฟอสเฟตจะทำให้พืชน้ำหรือแพลงก์ตอนพืชเหล่านี้ตายลง และทับถมกันมากเข้าจะทำให้แม่น้ำเน่าเสีย และยังทำให้ปริมาณสัตว์ลดลงได้เนื่องจากขาดออกซิเจน

2.9.7.3 ใช้เป็นสารลดความกระด้างของน้ำ (Water softener) ได้เนื่องจากซีโอไลต์สามารถแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออน และแมกนีเซียมไอออนที่ละลายอยู่ในน้ำกระด้าง

2.9.7.4 ใช้เป็นสารดูดซับ ซึ่งใช้ในการแยก และทำให้บริสุทธิ์ในกระบวนการอุตสาหกรรมทางเคมี เช่น กระบวนการ Drying ของแก๊สธรรมชาติ ซึ่งแยก CO_2 และสารประกอบซัลเฟอร์ ที่มาจากธรรมชาติ ตลอดจนแยกแก๊สที่อาจก่อให้เกิดมลพิษ เช่น SO_2 NO_2 และ O_2 จากอากาศ เป็นต้น เนื่องจากโมเลกุลของซีโอไลต์มีความพรุนมาก จึงสามารถดูดซับโมเลกุลอื่นได้ดี โดยอาศัยความแตกต่างของขนาด และรูปร่างโมเลกุล ในการแยกสารต่างๆ ออกจากกัน สำหรับการดูดซับแก๊ส และไอน้ำ เมื่อทำการไล่น้ำออกจากโมเลกุลของซีโอไลต์โดยให้ความร้อนที่ 350 ถึง 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ถึง 3 ชั่วโมง รูพรุนในโมเลกุลของซีโอไลต์จะว่างเปล่า และสามารถดูดซับโมเลกุลอื่นๆ ได้ จากคุณสมบัตินี้จึงมีการนำไปใช้ในการแยกสารบางอย่างออกจากกันโดยอาศัยความแตกต่างของขนาดและรูปร่างโมเลกุล



ภาพที่ 2.15 ขนาดของรูพรุนต่อประสิทธิภาพการดูดซับแก๊สของซีโอไลต์
ที่มา : Szostak (1999)

2.9.8 สมบัติของซีโอไลต์

2.9.8.1 ความมีขั้ว

โดยปกติความเป็นขั้วของสารสามารถพิจารณาได้จาก ความแตกต่างของ Electron density ในโมเลกุลของสารนั้น หากมีการกระจายตัวในสัดส่วนหนึ่งของโมเลกุล สารนั้นจะแสดงว่า Dipole moment เช่น น้ำ มี Dipole moment ไปตามทิศทางของออกซิเจน หากสารที่มีการกระจายตัวของ Electron density ที่แตกต่างกัน แต่ไม่มีทิศทางที่ชัดเจน จะพิจารณาจาก Quadrupole moment ที่จะแสดงความมีขั้วเมื่อถูกทำให้มีขั้ว เช่น Dipole moment ของน้ำ การวัดค่าของ Dipole หรือ Quadrupole moment นั้นทำได้ยาก ในทางปฏิบัติจะพิจารณาความมีขั้วจากค่าคงที่คู่ทางไฟฟ้า ซึ่งวัดได้จากการทดลอง ส่วนความมีขั้วของซีโอไลต์จะขึ้นกับสนามไฟฟ้าสถิตย์ภายในรูพรุนที่เกิดจากแรงกระทำระหว่างประจุโดยเราสามารถพิจารณาระดับความมีขั้วของซีโอไลต์ จาก Si/Al ที่แตกต่างกัน ดังตาราง

ตารางที่ 2.7 อัตราส่วนซิลิกอนต่ออลูมิเนียมต่อความมีขั้วของซีโอไลต์

อัตราส่วนระหว่าง Si/Al	ความมีขั้ว
1 ถึง 3	มีขั้วมาก
4 ถึง 7	มีขั้วปานกลาง
8 ถึง 15	มีขั้วต่ำ
มากกว่า 15	ไม่มีขั้ว

ที่มา : D. W.Breck (1974)

สารที่มีขั้วจะดูดซับได้ดีด้วยวิโอไลต์ที่มีขั้ว ในขณะที่สารที่ไม่มีขั้วจะถูกดูดซับได้ดีในสารที่ไม่มีขั้ว Site Proximity (ระยะห่างระหว่างตำแหน่งที่มีการแลกเปลี่ยนไอออน) ของซีโอไลต์เป็นอีกปัจจัยที่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับ โดยเฉพาะสำหรับสารที่มีขั้วอันเนื่องมาจาก Quadrupole Moment หากการกระจายตัวของ Electron density ในโมเลกุลของสารที่มีความเหมาะสมกับ Site Proximity ในรูพรุน จะทำให้การดูดซับเกิดขึ้นได้ดี โดยที่การดูดซับจะแบ่งออกเป็น 2 ชนิด

(1) การดูดซับทางเคมี (Chemisorption) จะเกิดขึ้นเพียงชั้นที่ติดกับผิวเท่านั้น ความสามารถในการดูดซับจะขึ้นอยู่กับอันตรกิริยาของสารนั้นกับระยะห่าง (Site) เป็นหลัก ลักษณะขนาดไอออนใกล้เคียง Site จะมีผลอย่างมาก ส่วนขนาดและปริมาณรูพรุนจะมีผลน้อยมาก

(2) การดูดซับทางกายภาพ (Physisorption) อาจเกิดขึ้นได้เป็นหลายชั้น ความแข็งแรงในการดูดซับจะต่ำกว่า Chemisorption โดยความสามารถในการดูดซับทางกายภาพจะขึ้นกับขนาดและปริมาตรของรูพรุนเป็นหลัก อย่างไรก็ตามการดูดซับทางเคมี สามารถเหนี่ยวนำให้เกิดการดูดซับทางกายภาพ ในชั้นการดูดซับถัดมาได้ กล่าวคือ ใน รูพรุนขนาดเล็กที่สารสามารถดูดซับได้เพียง Monolayer จะมี Absorption strength ที่แข็งแรงกว่าอย่างมาก และในรูพรุนขนาดใหญ่ขึ้น Absorption strength จะลดลงอย่างมาก เนื่องจากสัดส่วนของสารที่ถูกดูดซับทางกายภาพเพิ่มขึ้นมากกว่าแบบทางเคมี

เมื่อประกอบกับความสามารถในการคัดสรร การแยกด้วยขนาด สามารถที่เลือกใช้ซีโอไลต์ที่มีขนาดรูพรุน และความมีขั้วที่เหมาะสมในการแยกสารได้อย่างมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น และปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ คือ อุณหภูมิ โดยทั่วไปแล้วการดูดซับจะเกิดได้ดีที่อุณหภูมิต่ำ เนื่องจากมีสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ เป็นแบบการคายความร้อน (Exothermic) เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น จะทำให้อัตราการดูดซับลดลง แต่การคายสารที่ดูดซับจะเพิ่มมากขึ้น การแพร่ (Diffusion) มีความสำคัญอย่างมากต่อการดูดซับภายในรูพรุนจุลภาค การดูดซับจะเกิดขึ้นได้ไม่ดี หากโมเลกุลที่ดูดซับอยู่ก่อนไม่แพร่เข้าไปในรูพรุนด้านใน การแพร่จึงเปรียบเสมือนการคายซับออกจากตำแหน่งหนึ่งไปดูดซับอีกตำแหน่งหนึ่งภายในรูพรุน

โมเลกุลของสารก่อนถูกดูดซับจะมีพลังงานศักย์ที่สูงอยู่ค่าหนึ่ง เมื่อเกิดการดูดซับทำให้สารมีพลังงานลดลงอย่างมาก พลังงานที่คายออกมาเรียกว่า พลังงานการดูดซับ (Adsorption energy) โดยโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับจะมีความเสถียรมากขึ้น การที่โมเลกุลของสารถัดไปจะเข้ามาดูดซับได้โมเลกุลของสารจำเป็นต้องเคลื่อนที่เข้าไปในรูพรุนของซีโอไลต์ส่วนที่ลึกเข้าไปเพื่อที่จะเกิดที่ว่างให้สารโมเลกุลอื่นสามารถดูดซับได้ ซึ่งจำเป็นต้องให้พลังงานค่าหนึ่ง ที่ต้องมียิ่งกว่าค่าพลังงานการดูดซับ ณ ตำแหน่งนั้น จึงสามารถทำให้โมเลกุลอื่นของสารเคลื่อนที่ต่อไปพลังงานที่ใช้ในการคายซับภายในรูพรุนเพื่อให้เกิดการแพร่ผ่านภายในรูพรุนเพื่อให้เกิดการแพร่นี้ว่า พลังงานกระตุ้นของการแพร่ (Activation energy of diffusion) และพบว่า เมื่อมีอุณหภูมิสูงขึ้น การแพร่ผ่านภายในรูพรุนจะสูงขึ้นเนื่องจากมีสัดส่วนของโมเลกุลที่พลังงานจลน์ (Kinetic energy) มากกว่าพลังงานกระตุ้นของการแพร่ อย่างไรก็ตาม ความสามารถในการดูดซับของโมเลกุลในซีโอไลต์ก็จะลดลง เนื่องจากมีการแข่งขันระหว่าง

การดูดซับ และการคายซับ เรียกกลไกการแพร่นี้ว่า การแพร่แบบดูดซับ (Adsorption diffusion) ซึ่งอุณหภูมิจะมีผลอย่างมากต่อ Adsorption selectivity โดยจะมีอุณหภูมิที่เหมาะสมในช่วงแคบๆเท่านั้น ที่ทำให้เกิดการคัดสรรการดูดซับที่ดี

นอกจากนี้การแพร่ในรูพรุนแล้ว การแพร่ระหว่างอนุภาคของซีโอไลต์ก็มีผลต่อการดูดซับเช่นกัน เนื่องจากซีโอไลต์มีอนุภาคขนาดเล็ก 0.5-10 ไมโครเมตร จึงไม่สามารถใช้งานได้ในลักษณะอนุภาคเดี่ยว ดังนั้นการแพร่ในช่องว่างนี้จะมีผลต่ออัตราการดูดซับ โดยการแพร่ที่ดีจะช่วยให้การดูดซับเกิดได้เร็วขึ้น แต่จะไม่มีผลต่อการคัดสรรการดูดซับกล่าวคือ การแพร่จะดีขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และโมเลกุลขนาดเล็กจะแพร่ได้ดีกว่าโมเลกุลขนาดใหญ่ จะเห็นได้ว่าทั้งขนาด รูปร่างโมเลกุลของสารขนาดรูพรุนของซีโอไลต์ และอุณหภูมิที่ใช้ในการดูดซับ และการคัดสรรการดูดซับ ซึ่งจะต้องพิจารณาเป็นกรณีร่วมกับผลการทดลอง ซึ่งแสดงในลักษณะของสมดุลการดูดซับที่อุณหภูมิคงที่ ที่เราเรียกว่า ไอโซเทอร์มของการดูดซับ (Adsorption isotherm)

2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

R.B.H. Wills และ M.A. Warton (2004) ศึกษาความสามารถของโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่ดูดซับและคายซับแก๊สเอทิลีนในระดับต่ำจากบรรยากาศ ในการทดลองการดูดซับของโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตของเม็ดอะลูมินา โดยการจุ่มลงสารละลายอิมัลชันมาก คือ 2 กรัมต่อ 100 กรัม เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส และ 4 กรัมต่อ 100 กรัม เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส พบว่าเม็ดอะลูมินาที่ประกอบด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต 4 กรัมต่อ 100 กรัม มีความเข้มข้นในการดูดซับเอทิลีนลดลงเมื่อเทียบกับอีกตัว แต่การนำไปใช้ทางการค้าพบว่า เม็ดอะลูมินาพบ่าสามารถดูดซับโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตได้ถึง 2.7 ถึง 6.0 กรัมต่อ 100 กรัม ในอุณหภูมิสูง

Zhen-Xue Liu และคณะ (2006) ได้ทำการศึกษาการกำจัดเอทิลีนด้วยสารโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตกับอะลูมินาและซิลิกา โดยได้ทำการสังเคราะห์วัสดุแบบใหม่โดยใช้โซเดียมเมตาซิลิเกตผสมกับ โซเดียมอะลูมิเนต ในการเกิดพาหะซิลิกาและอะลูมินา แล้วทำการเติมกรดซัลฟิวริกจนสารละลาย pH เป็นกลาง หลังจากนั้นกรองและทำให้แห้งด้วยการเผาแบบ Calcining ที่ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง หลังจากนั้นเติมสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตแล้วระเหยน้ำออก ในขณะที่กวนจะได้รับผงตัวอย่างด้วย ซึ่งตัวอย่าง 4 ตัวอย่างที่ผลิตจะแตกต่างกันที่อัตราส่วนระหว่างซิลิกาและอะลูมินา และวิธีการในการผลิตที่แตกต่างกัน ผลที่ได้จากการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพของการกำจัดเอทิลีนของ

สารโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ได้รับผลกระทบอย่างมาก เมื่อมีการใช้วิธีและกระบวนการผลิตที่แตกต่างกันและอัตราส่วนระหว่าง ซิลิกา กับอะลูมิเนียมในการดูดซับเอทิลีน แต่ไม่สัมพันธ์กับปริมาณของ สารโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ดังนั้นในทั้งหมด 4 ตัวอย่าง ตัวอย่างที่มีอัตราส่วนระหว่าง ซิลิกา กับอะลูมิน่า เป็น 1:5 ทำให้แห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส แต่ไม่นำไปเผาแบบแคลไซน์ (Calcinig) ทำให้มีปริมาณสารโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตถึงร้อยละ 18.2 และมีประสิทธิภาพในการกำจัดเอทิลีน มากที่สุดถึงร้อยละ 97.8 ของปริมาณเอทิลีนในบรรยากาศ

พรชัย ราชตะนະพันธุ์ และคณะ (2006) ได้ทำการทดลองกระบวนการผลิตสารดูดซับเอทิลีน โดยใช้โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตและดินสอพองเป็นส่วนประกอบ ซึ่งจากผลการทดลอง พบว่า อัตราส่วนของน้ำหนักดินสอพองต่อน้ำที่ 2:1 มีความหนืดสูงที่สุด และเมื่อนำไปผสมกับสารละลาย โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่มีความเข้มข้นร้อยละ 1, 3, 5 และ 7 โดยน้ำหนัก ซึ่งเหมาะสมต่อการที่ นำไปผลิตสารดูดซับเอทิลีน แล้วนำไปอบด้วยตู้อบลมร้อนและเครื่องอบแบบสุญญากาศที่อุณหภูมิ 150 170 และ 200 องศาเซลเซียส พบว่า ตัวอย่างที่อบด้วยตู้อบลมร้อนจะใช้ระยะเวลาในการอบสั้นกว่า เครื่องอบแบบสุญญากาศ แต่มีอัตราการดูดซับเอทิลีนที่น้อยกว่า และเมื่อนำไปทดสอบการดูดซับเอทิลีน เปรียบเทียบกับสารดูดซับ เอทิลีนที่ขายตามท้องตลาด พบว่า ตัวอย่างที่ผสมโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต 3% โดยน้ำหนักมีอัตราการดูดซับที่ใกล้เคียงสารดูดซับเอทิลีนที่ขายตามท้องตลาดทั่วไป

วุฒิรัตน์ พัฒนินุญ (2008) ได้ทดลองผลิตสารดูดซับเอทิลีนโดยใช้ดินสอพองต่อต่างทับทิม ในอัตราส่วน 2:1 โดยน้ำหนัก สารละลายมีความเข้มข้นร้อยละ 1, 3, 5 และ 7 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร อบด้วยตู้อบลมร้อนที่ อุณหภูมิ 150 175 และ 200 องศาเซลเซียส และเครื่องอบแบบสุญญากาศ พบว่าที่ ความเข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรของสารละลายต่างทับทิมให้ผลใกล้เคียงสารดูดซับเอทิลีนที่ จำหน่ายในท้องตลาด การอบแบบลมร้อนใช้เวลาในการอบแห้งเร็วกว่าสุญญากาศและที่อุณหภูมิสูงกว่าจะ แห้งเร็วกว่า เมื่อนำสารดูดซับเอทิลีนที่ผสมจากดินสอพองกับสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ความเข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรนี้ บรรจุในซองกระดาษ 3 ชนิด ได้แก่ กระดาษสาแบบบาง กระดาษพรูฟและกระดาษทำโคม แล้วทดสอบการวัดการดูดกลืนเอทิลีน พบว่าการบรรจุร้อยละ 3 ต่าง ทับทิม ดินสอพองในกระดาษพรูฟ สามารถดูดซับเอทิลีนได้ดีกว่าการบรรจุในซองกระดาษทำโคมและซอง กระดาษสาแบบบาง

Burcu Erdogan และคณะ (2008) ศึกษาลักษณะเฉพาะและการดูดซับเอทิลีนตาม ธรรมชาติและการปรับปรุงสมบัติของไคโนพติโลไลต์ (Clinoptilolite) โดยได้ทำการบัดหินซีโอไลต์ให้มี

ลักษณะเป็นผงแล้วนำไปคัสดขนาดให้มีขนาดน้อยกว่า 125 ไมโครเมตรให้ได้ปริมาณ 5 กรัม นำมากระตุ้นโดยการล้างด้วยสารละลายไฮดรอกซิด ความเข้มข้น 1 โมลาร์ ปริมาณ 100 มิลลิลิตร หลังจากนั้นล้างด้วยน้ำปราศจากไอออน ทำการกรองไอออนของคลอไรด์ออกและทำให้แห้งโดยปล่อยให้อุณหภูมิห้องและเปลี่ยนตัวล้างด้วยสารละลายที่ต่างกันอีก 3 ตัวได้แก่ สารละลายโซเดียมคลอไรด์ สารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์และสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ แต่ใช้วิธีการเตรียมเช่นเดียวกัน เพื่อให้ได้ ไคนอพติโลไลต์ ที่มีการปรับปรุงด้วยไอออน ได้แก่ Na^+ K^+ และ Ca^{2+} ผลการทดลองพบว่า ลักษณะของตัวอย่างไคนอพติโลไลต์ ที่มีการปรับปรุงด้วยสารละลายไม่ได้นำไปสู่การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างอย่างมีนัยสำคัญ และประสิทธิภาพของตัวอย่างในการดูดซับเอทิลีน ได้แก่ที่อุณหภูมิ 227 เคลวินและ 293 เคลวิน ในช่วงความดัน 0.004-28 กิโลปาสคาล พบว่า ไคนอพติโลไลต์ ที่ปรับปรุงด้วยโพแทสเซียมไอออน (K^+) มีปริมาณในการดูดซับเอทิลีนมากที่สุด รองลงมาเป็น ไคนอพติโลไลต์ ที่ปรับปรุงด้วยแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) และอันดับสุดท้ายเป็น ไคนอพติโลไลต์ ที่ปรับปรุงด้วยโซเดียมไอออน (Na^+) ตามลำดับ แต่อย่างไรก็ตามสรุปได้ว่า ไคนอพติโลไลต์ ที่มีการปรับปรุงด้วยสารละลายสามารถที่จะดูดซับเอทิลีนได้

Siti Mariana Widayanti และคณะ (2015) ศึกษาผลกระทบของขนาดของอนุภาคซีโอไลต์ธรรมชาติที่ลดลงต่อสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางเคมีและการดูดซับโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต โดยได้นำซีโอไลต์ไปบดด้วยเครื่อง Planetary Ball-Mill ด้วยเวลาที่แตกต่างกันซึ่งได้แก่ 10, 20, 30, 40, 50 และ 60 วินาที ด้วยความเร็วหมุนเวียน 300 รอบต่อนาที และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโถ 10 มิลลิเมตร หลังจากนั้นนำไปเผาที่อุณหภูมิ 200, 300 , 400, 600 และ 800 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 4 ชั่วโมงแล้วนำไปแช่ในสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 1 N เป็นเวลา 2, 12, 24 และ 48 ชั่วโมง แล้วจึงนำไปแช่ในสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตความเข้มข้นร้อยละ 6.4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร อิมัตว์โดยทำการสังเกตทุกๆ 30 นาทีจนครบ 5 ชั่วโมง ผลการทดลองพบว่า ระยะเวลาในการบดจะส่งผลกระทบต่อขนาดของอนุภาคซีโอไลต์ เมื่อระยะเวลาในการบดนานจะทำให้ซีโอไลต์ขนาดอนุภาคจะมีขนาดเล็กเช่นเดียวกับส่วนความผลึกจะลดลง แต่ผลที่ได้คือตรงกันข้ามคือ การเพิ่มปริมาณรูพรุนและพื้นที่ผิว การกระตุ้นทางกายภาพและเคมีโดยการเผาแบบแคลไซน์ 4 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสและการกระตุ้นทางเคมีโดยการแช่ซีโอไลต์ในสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 N อาจเพิ่มสัดส่วนความเป็นผลึกในซีโอไลต์นี้ ซึ่งสามารถเห็นได้จากความเร็วในการดูดซับโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต เวลา 60 นาทีและถูกกระตุ้นเป็นเวลา 48 ชั่วโมง ที่มีความสามารถในการดูดซับได้เร็วขึ้นร้อยละ 85 และซีโอไลต์ที่บดเป็นเวลา 60 นาที โดยความเร็ว 300 รอบต่อนาที ทำให้ซีโอไลต์ที่มีขนาดอนุภาค 422.5 นาโนเมตรเผาที่ 400 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 4 ชั่วโมง และกระตุ้นด้วยสารโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 N เวลา 48 ชั่วโมง สามารถผลิตซีโอไลต์ที่เหมาะสมกับการดูดซับโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต

Masoumeh Emadpour และคณะ (2015) ศึกษาผลกระทบของการกำจัดเอทิลีนทั้งโดยใช้โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตเคลือบบนนาโนซีโอไลต์ จากการจัดเก็บข้อมูลของลักษณะคุณภาพและอายุการเก็บรักษาของผลพีชและเนกเตอริน โดยเม็ดแกรนูลโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตเคลือบบนซีโอไลต์ที่มีขนาดนาโนถูกนำมาใช้ในการทดสอบในเครื่อง ETH 1500 ซึ่งติดอยู่ปลายสุดภายในตู้เย็น

หลังจากนั้นมีการนำลูกพีช 2 สายพันธุ์และเนกเตอริน 3 สายพันธุ์ นำมาทดลองเพื่อศึกษาผลกระทบต่อลักษณะทางการค้าทางการตลาดและอายุการเก็บรักษาของลูกพีชและเนกเตอริน เช่น ค่า pH เนื้อสัมผัส รูปร่าง ปริมาณกรดและรายละเอียดยภายใน และสุดท้ายการลดลงของน้ำหนักโดยวัดที่จุดเริ่มต้นจาก 0 12 24 และ 36 วันหลังการเก็บรักษา จากผลการทดลองนี้หลังจากการประยุกต์ใช้เม็ดแกรนูลพบว่า ค่าความหนาแน่นของเนื้อผลสูงสุดของเนกเตอริน (24.09) และลูกพีช (19.80) ค่า pH ต่ำสุดในเนกเตอริน (5.42) และลูกพีช (6.14) การสูญเสียน้ำหนักที่หายไปต่ำสุดในเนกเตอริน (ร้อยละ 4.12) และลูกพีช (ร้อยละ 5.94) และการประเมินรูปร่างผลปรากฏที่ดีที่สุดใน เนกเตอรินและลูกพีช เมื่อเปรียบเทียบกับเงื่อนไขควบคุม (ไม่มีการดูดซับเอทิลีน) สุดท้ายการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าการประยุกต์ใช้นาโนซีโอไลต์เคลือบด้วยต่างทับทิมในเครื่องการไหลเวียนอากาศที่มีเอทิลีนประกอบเพื่อป้องกันการสูญเสียน้ำหนักและการลดลงของความหนาแน่นเนื้อผล นอกจากนี้ยังช่วยยืดอายุการเก็บรักษาและคุณภาพของการจัดเก็บของลูกพีชและเนกเตอรินได้

Fereshteh Khosravi และคณะ (2015) ทำการศึกษาผลกระทบของ นาโนซีโอไลต์และโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตในการยืดอายุการเก็บรักษาและคุณภาพของแอปเปิ้ลแดง โดยได้ทำการตรวจสอบในเรื่องของทั้งปริมาณกรด ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลาย ค่า pH และน้ำหนักปรากฏที่หายไป ในระหว่างการเก็บรักษาผลไม้ ผลการศึกษาพบว่า ทั้งค่า pH ปริมาณของแข็งที่ละลายและน้ำหนักของผลไม้ที่หายไปเพิ่มขึ้นในระหว่างการเก็บรักษา แต่ปริมาณกรดของผลไม้ เมื่อมีการเก็บพร้อมซีโอไลต์ลดลงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตและการเจริญเติบโตของเชื้อราในผลไม้ที่เก็บรักษาไว้มีการเจริญเติบโตน้อยมากเมื่อเก็บพร้อมซีโอไลต์หลังจาก 45 วันผ่านไปเมื่อเทียบกับโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ดังนั้น จึงกล่าวได้ว่าทั้งนาโนซีโอไลต์และโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตสามารถยืดอายุของแอปเปิ้ลแดงได้ทั้งคู่ แต่นาโนซีโอไลต์จะมีประสิทธิภาพที่ช่วยในการยืดอายุการเก็บรักษาและคงคุณภาพไว้ได้ดีกว่าโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต อาจจะเป็นเพราะ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงการหายใจและอาจจะขึ้นกับการผลิตเอทิลีนที่เกิดขึ้นเต็มที่

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องข้างต้นจะเห็นได้ว่า ทุกงานวิจัยพยายามที่จะศึกษาคิดค้นวัสดุที่จะสามารถดูดซับก๊าซเอทิลีนที่ปลดปล่อยออกมาจากผลไม้ โดยใช้วัสดุฐานแตกต่างกันออกไปที่สามารถให้สารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตสามารถที่จะยึดเกาะอยู่ภายในโครงสร้างได้หรือถูกดูดซับเข้าไป เช่น ดินสอพอง ไคลน็อพติโลไลท์ อะลูมินา ซิลิกา หรือแม้กระทั่งซีโอไลต์เองก็ตาม ซึ่งวัสดุฐานเหล่านี้ที่จะนำมาผลิตเป็นสารดูดซับนั้นจะมีลักษณะโครงสร้างที่แตกต่างกัน จึงทำให้ต้องผ่านกรรมวิธีในการเตรียมที่แตกต่างกันกับตัวของวัสดุฐานที่นำมาใช้ส่งผลให้มีประสิทธิภาพในการดูดซับก๊าซเอทิลีนที่ไม่เท่ากัน แต่งานวิจัยส่วนใหญ่จะเลือกใช้วัสดุฐานเป็นซีโอไลต์ เนื่องจาก โครงสร้างประกอบไปด้วยรูพรุนจำนวนมาก จึงทำให้สามารถดูดซับก๊าซเอทิลีนได้ดี และมีหลากหลายชนิดขนาดให้เลือก จึงเป็นที่มางานวิจัยนี้จึงนำเอาซีโอไลต์ที่มีสมบัติเป็นตัวดูดซับมาผ่านกระบวนการกระตุ้นด้วยสารละลายเบส 2 ชนิด และมีความเข้มข้นที่แตกต่างกัน แล้วนำไปแช่ในสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ซึ่งโดยส่วนใหญ่เมื่อนำวัสดุฐานไปแช่ในสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต และจะทำให้แห้งด้วยวิธีการการอบให้แห้งหรือนำไปตากแดด ซึ่งบางครั้งวิธีการเหล่านี้มีความร้อนเกิดขึ้นส่งผลต่อสารดูดซับบางส่วนที่เตรียมได้นั้นเกิดการเปลี่ยนแปลงสีก่อนนำไปใช้งาน เนื่องจาก โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตจะว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาออกซิไดซ์ ด้วยเหตุนี้จึงมีแนวคิดในการประยุกต์วิธีการทำให้แห้งแบบแช่เยือกแข็ง แทนวิธีการดังกล่าว ก่อนที่นำไปประยุกต์ใช้เป็นสารดูดซับก๊าซเอทิลีนจากผลไม้

บทที่ 3

วิธีการวิจัย

3.1 สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

3.1.1 วัสดุอุปกรณ์

3.1.1.1 วัสดุและสารเคมี

- (1) สารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (KMnO_4)
- (2) สารซีโอไลต์ ขนาดรุกรุ่น 5 อังสตรอม
- (3) สารโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH)
- (4) สารโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)
- (5) น้ำปราศจากไอออน
- (6) กล้วยหอมทอง (*Musa acuminata*)
- (7) น้ำตาลซูโครส

3.1.1.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

- (1) เครื่องชั่งน้ำหนัก
- (2) หลอดทดลองขนาดต่างๆ
- (3) ปีกเกอร์
- (4) ซ้อนตักสารเคมี
- (5) ตู้อบ
- (6) โถดูดความชื้น กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง
- (7) เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์
- (8) เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ในช่วงคลื่นอัลตราไวโอเลต
- (9) เครื่องวัดสี
- (10) เครื่องวัดดัชนีหักเหด้วยมือ
- (11) เครื่องวัดขนาดของอนุภาค กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดต่อ
พ่วงอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน

3.2 วิธีการทดลอง

3.2.1 การปรับปรุงสมบัติทางเคมีของซีโอไลต์ด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์

- 3.2.1.1 ชั่งซีโอไลต์ที่มีขนาดอนุภาคน้อยกว่า 10 ไมโครเมตร ปริมาณ 5 กรัม
- 3.2.1.2 แخل่งในสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 1 2 และ 3 โมลาร์
- 3.2.1.3 ผสมด้วยแท่งแม่เหล็กบนเครื่องกวนสาร (Magnetic stirrer) เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
- 3.2.1.4 กรองผงซีโอไลต์ออกจากสารละลายด้วยชุดเครื่องกรองสุญญากาศ
- 3.2.1.5 ล้างซีโอไลต์ด้วยน้ำปราศจากไอออน จน pH ของน้ำปราศจากไอออนมีค่าคงที่
- 3.2.1.6 นำผงซีโอไลต์ที่ได้ไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- 3.2.2 การปรับปรุงสมบัติทางเคมีของซีโอไลต์ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์
 - 3.2.2.1 นำซีโอไลต์ที่มีขนาดอนุภาคน้อยกว่า 10 ไมโครเมตร ปริมาณ 5 กรัม
 - 3.2.2.2 แخل่งในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 1, 2 และ 3 โมลาร์
 - 3.2.2.3 ผสมด้วยแท่งแม่เหล็กบนเครื่องกวนสาร เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
 - 3.2.2.4 กรองผงซีโอไลต์ออกจากสารละลายด้วยชุดเครื่องกรองสุญญากาศ
 - 3.2.2.5 ล้างซีโอไลต์ด้วยน้ำปราศจากไอออน จน pH ของน้ำปราศจากไอออนมีค่าคงที่
 - 3.2.2.6 นำผงซีโอไลต์ที่ได้ไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- 3.2.3 วิธีการเตรียมผงซีโอไลต์ที่อิมัลส์ด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตและการขึ้นรูปเพื่อทดสอบ
 - 3.2.3.1 นำผงซีโอไลต์ที่เตรียมได้จากข้อ 3.2.1 และ 3.2.2 นำมาاخل่งในสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก เป็นเวลา 5 ชั่วโมง และผสมด้วยแท่งแม่เหล็กบนเครื่องกวนสาร
 - 3.2.3.2 นำของผสมที่ได้เข้าสู่กระบวนการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง
 - 3.2.3.3 บรรจุผงซีโอไลต์ที่อิมัลส์ด้วยสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตลงในขวดทึบแสงปิดสนิทพร้อมทั้งใส่ช่องกันความชื้น

3.3 การทดสอบสมบัติต่างๆของผงซีโอไลต์อัดตัวด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต

3.3.1 การทดสอบสมบัติเชิงกายภาพ

3.3.1.1 วิเคราะห์ขนาดของอนุภาคซีโอไลต์ ก่อนเข้าสู่กระบวนการกระตุ้นด้วย

สารละลายเบสและแช่สารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตด้วยเครื่องวัด

ขนาดของอนุภาค

3.3.1.2 วิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของซีโอไลต์ ก่อนและหลังแช่สารละลาย

เบสและหลังแช่โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง

และ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดต่อพ่วงอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุ

เชิงพลังงาน (SEM/EDS)

3.3.1.3 วิเคราะห์ลักษณะสีของซีโอไลต์ หลังแช่โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ก่อน

และหลังทดสอบการดูดซับแก๊สเอทิลีน โดยการขึ้นรูปซีโอไลต์ที่ผ่าน

กระบวนการแล้ว 0.2 กรัม ด้วยวิธีการอัดด้วยแรงอัด 1 ตัน เป็นแผ่นกลมเส้น

ผ่านศูนย์กลางขนาด 1 เซนติเมตร ก่อนนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องวัดสี ร่วมกับ

สีของเปลือกกล้วย

3.3.2 การทดสอบสมบัติเชิงเคมี

3.3.2.1 ตรวจสอบและวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของซีโอไลต์ ก่อนและหลังแช่สารละลาย

เบสและหลังแช่โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตด้วยเครื่อง FTIR

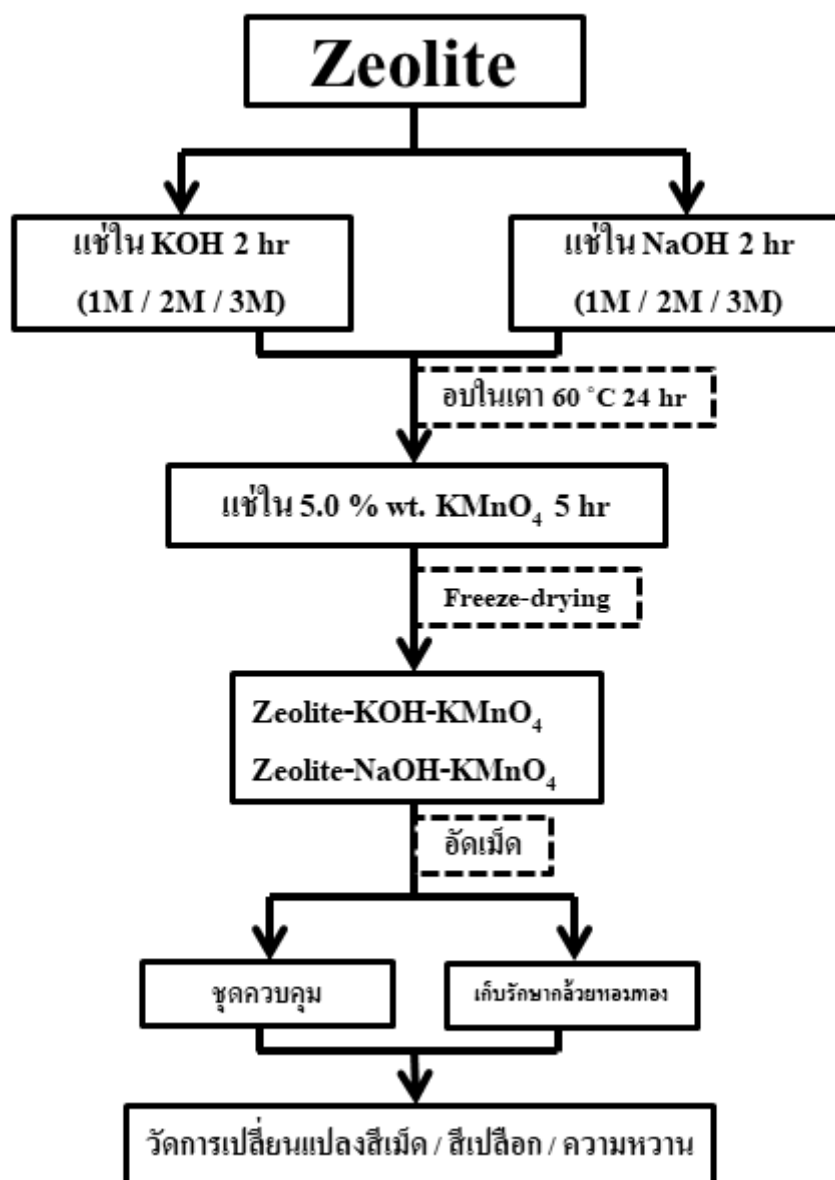
3.3.2.2 ตรวจสอบและวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางสีของสารละลายโพแทสเซียม

เปอร์แมงกาเนตผสมเบสพร้อมเพิ่มปริมาณน้ำตาลในแต่ละครั้งโดยปริมาณ

เท่าๆกันด้วยเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ในช่วงคลื่นอัลตราไวโอเลต

3.4 การดำเนินการวิจัย

- 3.4.1 ศึกษาค้นหาข้อมูลและรวบรวมงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- 3.4.2 เตรียมวัสดุ อุปกรณ์ และสารเคมีและสถานที่ที่ใช้ในการทดลอง
- 3.4.3 ศึกษาชนิดและปริมาณของสารเคมีที่ใช้การทดลอง
- 3.4.4 เตรียมปรับปรุงสมบัติผงซีโอไลต์ด้วยสารละลายเบส 2 ชนิด
 - 3.4.4.1 แห่สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์
 - 3.4.4.2 แห่สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์
- 3.4.5 ทดสอบลักษณะเบื้องต้นของซีโอไลต์
- 3.4.6 ผงซีโอไลต์อิมัลชันด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตทดสอบไปวิเคราะห์ทดสอบสมบัติทางด้านกายภาพ
- 3.4.7 ผงซีโอไลต์อิมัลชันด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตทดสอบไปวิเคราะห์ทดสอบสมบัติทางด้านเคมี
- 3.4.8 ประยุกต์ใช้ผงซีโอไลต์อิมัลชันด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต เพื่อการใช้งานด้านการดูดซับแก๊สเอทิลีนจากกล้วยหอมทอง
- 3.4.9 ทดสอบการเปลี่ยนแปลงสีของสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต เมื่อเติมน้ำตาลในปริมาณมากขึ้น
- 3.4.10 จัดรวบรวมข้อมูลและวิเคราะห์ผลทางสถิติ
- 3.4.11 วิเคราะห์ สรุปผลการทดลอง และจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์



ภาพที่ 3.1 ผังวิธีการทดลอง

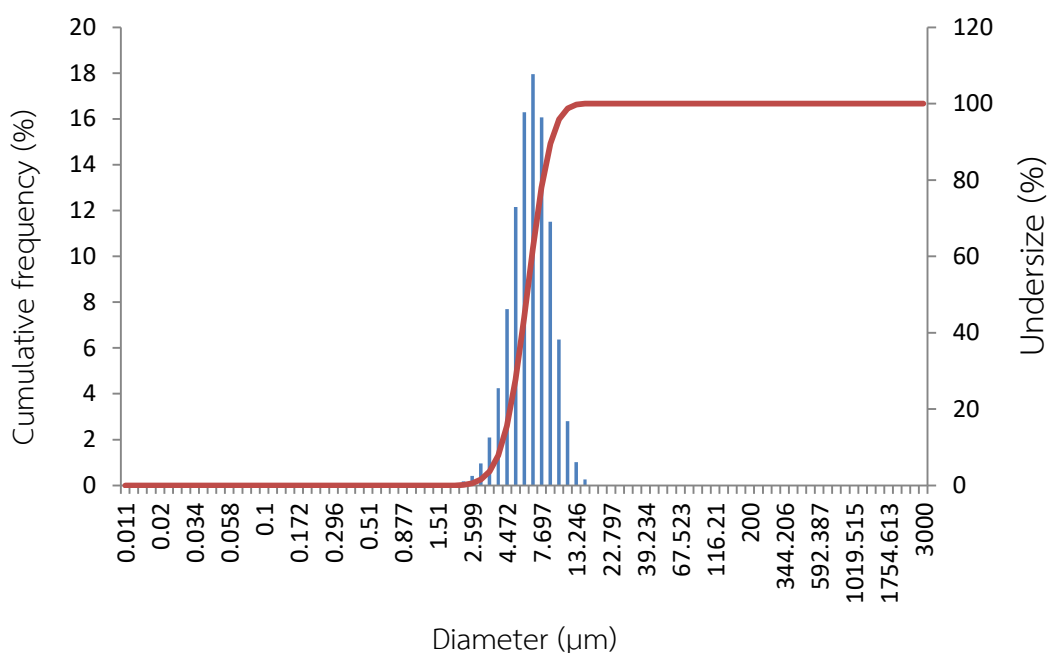
บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

งานวิจัยนี้ศึกษากระบวนการผลิตสารดูดซับและประสิทธิภาพการดูดซับก๊าซเอทิลีนที่ปลดปล่อยออกมาจากกล้วยหอมทอง โดยใช้วัสดุที่มีโครงสร้างเป็นแบบรูพรุน คือ ซีโอไลต์ เป็นวัตถุดิบหลัก เพื่อใช้เป็นโครงสร้างหลักในการให้โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตยึดเกาะอยู่ได้ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ดำเนินการศึกษาปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับดังกล่าว ได้แก่ สารละลายเบส ความเข้มข้นของสารละลายเบส และระดับความเข้มข้นของก่อนและหลังกระบวนการดูดซับ โดยผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลองแบ่งออกเป็น 3 ส่วนด้วยกันคือ ส่วนที่ 1 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคและลักษณะพื้นผิวของสารดูดซับ ส่วนที่ 2 การวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบทางเคมีภายในโครงสร้างสารดูดซับ ส่วนที่ 3 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสีของสารดูดซับ เพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดที่ใช้ในการดูดซับก๊าซเอทิลีน

4.1 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคและลักษณะพื้นผิวของสารดูดซับ

4.1.1 การวิเคราะห์ขนาดอนุภาคของซีโอไลต์



ภาพที่ 4.1 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและการกระจายตัวของซีโอไลต์

จากการนำตัวอย่างของผงซีโอไลต์ซึ่งไม่ทราบขนาดของผงอนุภาค ที่มีลักษณะทางกายภาพเป็นผงสีขาวละเอียดคล้ายกับผงแป้ง ไปทำการวิเคราะห์ขนาดของอนุภาคด้วยเทคนิค Laser Scattering

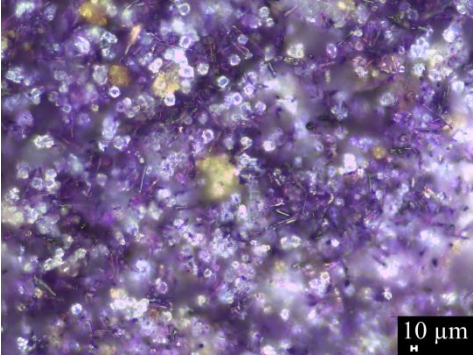
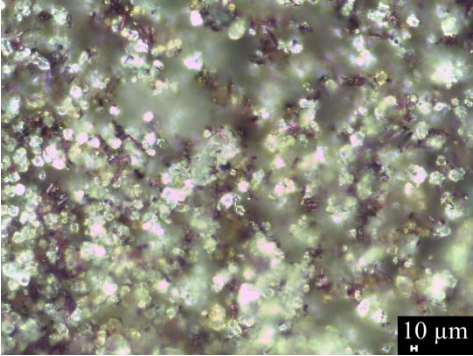
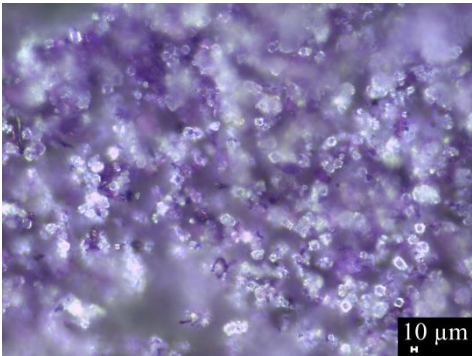
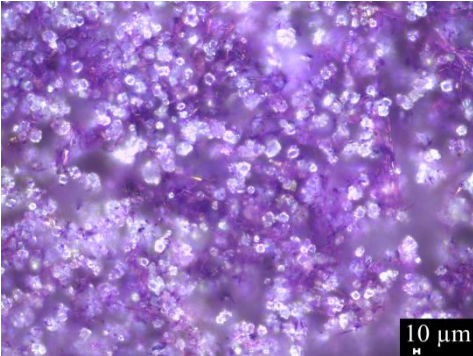
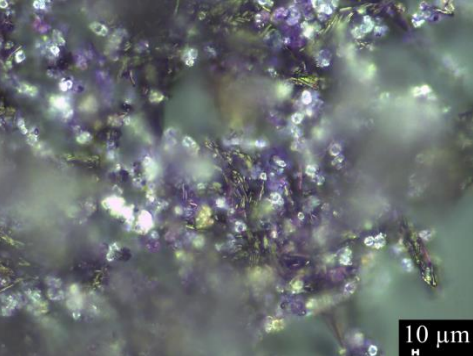
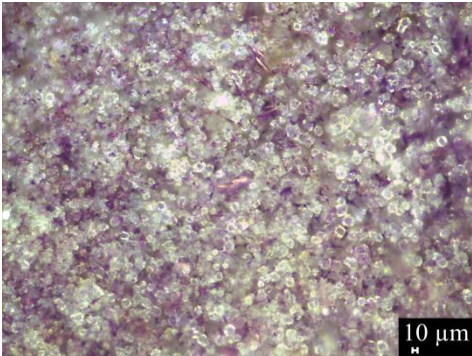
Particle Size Distribution Analyzer ยี่ห้อเครื่อง HORIBA รุ่น LA-950 ซึ่งผลที่ได้จากกราฟแสดงให้เห็นว่า ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของผงซีโอไลต์อยู่ในช่วงประมาณ 2.269-15.172 ไมโครเมตร โดยมีขนาดเฉลี่ยส่วนใหญ่จะอยู่ที่ 6.72 ไมโครเมตร หรือมีขนาดเฉลี่ยเทียบเท่า 6,720 นาโนเมตร ซึ่งผลจากการวัดขนาดและการกระจายตัวที่ได้ดังกล่าวสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.1 และยังมีความสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ของ Charki และคณะ (2010) ที่ได้ทำการศึกษาการลดขนาดและการปรับปรุงโครงสร้างของซีโอไลต์ให้อยู่ในระดับนาโนเมตร โดยพบว่า อนุภาคที่มีขนาดเล็กจะใช้เวลาการดูดซับก๊าซเอทิลีนน้อยกว่าอนุภาคขนาดใหญ่ เนื่องจาก อนุภาคขนาดเล็กจะมีพื้นที่ผิวในการดูดซับที่มากกว่า จึงช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับก๊าซเอทิลีนได้ดีกว่า

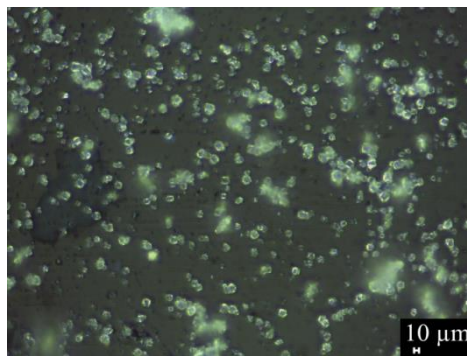
ตารางที่ 4.1 ขนาดอนุภาคจากเครื่องวัดขนาดด้วยเลเซอร์

สมบัติของผงซีโอไลต์	ขนาดอนุภาค (ไมโครเมตร)
ค่าเฉลี่ย (Mean)	6.36
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD)	1.93
มัธยฐาน (Median)	6.72

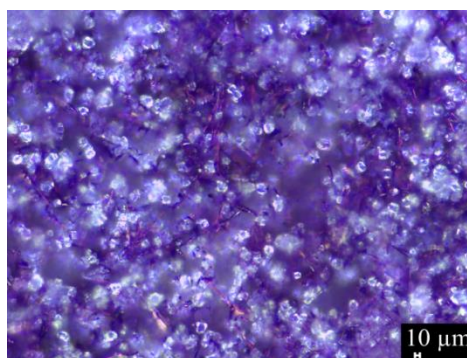
4.1.2 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของซีโอไลต์

ตารางที่ 4.2 โครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 50 เท่าของซีโอไลต์ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารละลายเบสและสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต

ความเข้มข้นของสารละลายเบส			
	1M	2M	3M
NaOH	 10 μ m	 10 μ m	 10 μ m
KOH	 10 μ m	 10 μ m	 10 μ m



ภาพที่ 4.2 โครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 50 เท่าของซิลิกา



ภาพที่ 4.3 โครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 50 เท่าของซิลิกาที่ไม่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารละลายเบส และมีการดูดซับโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต

จากแผนภาพที่แสดงถึงโครงสร้างทางจุลภาคที่ดูผ่านกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงกำลังขยาย 50 เท่าของซิลิกาทั้ง 2 แบบ คือแบบที่ไม่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารละลายเบสและสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต และแบบไม่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารละลายเบส แต่ผ่านการแช่ในสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต นอกจากนี้ยังมีแบบผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารละลายเบสและผ่านการแช่ในสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต จะสังเกตเห็นได้ว่า ภาพโครงสร้างทางจุลภาคของซิลิกาในแบบต่างๆมีลักษณะที่แตกต่างกัน โดยที่ซิลิกาแบบทั้งที่ไม่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารละลายเบสและสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต จะมีลักษณะเป็นผลึกสีขาวขนาดใหญ่ แฉววาว รูปร่างคล้ายกับเพชร เมื่อนำซิลิกาไปผ่านการแช่สารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต โดยไม่ผ่านการปรับปรุงด้วยสารละลายเบส สังเกตเห็นได้จากภาพว่า ซิลิกายังคงมีโครงสร้างที่เป็นผลึกเหมือนเดิม แต่มีสีขาวบางส่วนและบางส่วนเปลี่ยนเป็นสีม่วง เนื่องจากซิลิกาที่มีการดูดซับสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตเข้าไปในโครงสร้างจึงทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสีเกิดขึ้น นอกจากนี้ผลึกของซิลิกายังมีการจัดเรียงตัวแบบรวมกันเป็นกลุ่มก้อน หลังจากนั้นนำซิลิกาไปผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารละลายเบสที่แตกต่างกัน ซึ่งได้แก่ สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) และ สารละลาย

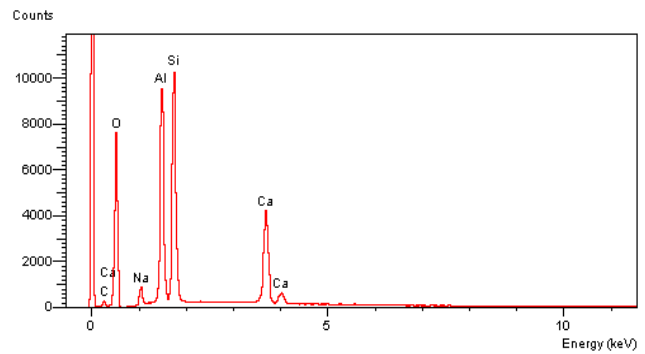
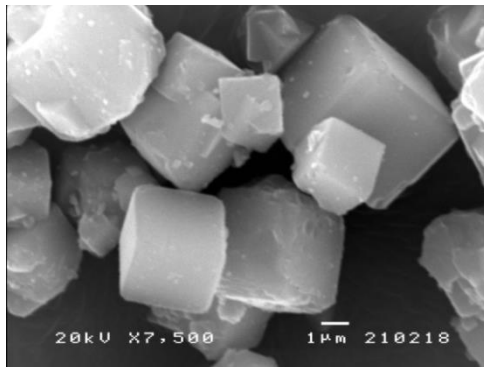
โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และผ่านการแช่ในสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต จากภาพจะสังเกตเห็นได้ว่า อนุภาคของซีโอไลต์มีขนาดเล็กลงจากเดิมและมีการกระจายตัวที่ดีขึ้น นอกจากนี้ยังมีสีม่วงเป็นบริเวณกว้างทั่วพื้นผิวของซีโอไลต์มากกว่า แต่ก็ยังมีบางส่วนที่ยังคงสีขาวอยู่เมื่อเทียบกับแบบไม่ผ่านการแช่ในสารละลายเบส และในภาพจะเห็นผลึกรูปเข็มบางส่วนแรกอยู่ระหว่างผลึกซีโอไลต์ ซึ่งเป็นผลึกของโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่ผลึกซีโอไลต์ไม่มีการดูดซับเข้าไป จากที่กล่าวนั้นพอจะสรุปได้ว่าการนำซีโอไลต์ไปแช่ในสารละลายเบสทำให้การดูดซับสีภายในโครงสร้างดีขึ้น อนุภาคมีขนาดเล็กลงและกระจายตัวดีขึ้น ซึ่งเป็นไปตามงานวิจัยของ Lestari (2010) ที่กล่าวว่า การนำซีโอไลต์ไปแช่ในเบส ถือว่าเป็นการกระตุ้นของซีโอไลต์ เรียกว่า Zeolite Activation ซึ่งสารละลายเบสจะไปทำความสะอาดของพื้นผิวรูพรุน กำจัดสิ่งสกปรกและปรับปรุงโครงสร้างที่เสียหายของซีโอไลต์

ภาพพื้นผิวของซีโอไลต์ที่ผ่านการปรับปรุงด้วยสารละลายเบสและสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่ถ่ายโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) แสดงดังภาพที่ 4.4 (ก-ข) (ซ้าย) ผลึกของซีโอไลต์จะมีลักษณะเป็นลูกบาศก์อยู่ร่วมกับผลึกรูปแท่งของโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต โดยมีขนาดอยู่ในช่วง 2 ถึง 8 ไมโครเมตร ผลึกของซีโอไลต์จะมีพื้นผิวที่เรียบ เห็นสันขอบผลึกชัดเจน และมีขนาดใหญ่ หลังจากแช่ซีโอไลต์ในสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (ภาพที่ 4.4 ข) ผลึกของซีโอไลต์จะเกาะติดกับผลึกรูปเข็มของโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต แต่ยังมีพื้นผิวที่เรียบเช่นเดียวกับซีโอไลต์ที่ยังไม่ผ่านการแช่สารละลาย ในขณะที่ผลึกของซีโอไลต์ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารละลายเบสและผ่านการแช่ในสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตแล้ว จะพบว่าผลึกของซีโอไลต์จะมีขนาดเล็กลงและมีพื้นผิวที่หยาบขึ้นตามความเข้มข้นของสารละลายเบสที่เพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ ผลึกของโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตยังมีขนาดลดลงจนแทบไม่พบผลึกขนาดใหญ่ของโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตเกาะอยู่กับซีโอไลต์ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารละลายเบสที่ความเข้มข้นสูงสุดเลย (3 โมลาร์) แสดงให้เห็นว่าการปรับปรุงพื้นผิวของซีโอไลต์ด้วยสารละลายเบส จะช่วยเพิ่มอันตรกิริยาระหว่างผิวของซีโอไลต์และโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ซึ่งเหนี่ยวนำให้โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตเกาะบนพื้นผิวของซีโอไลต์มากขึ้นจนไม่พบผลึกขนาดใหญ่ของโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตอีก

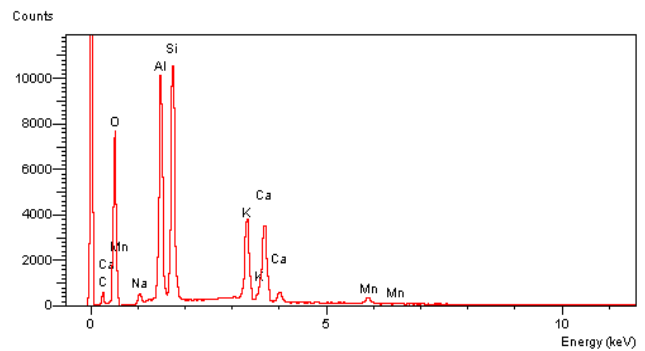
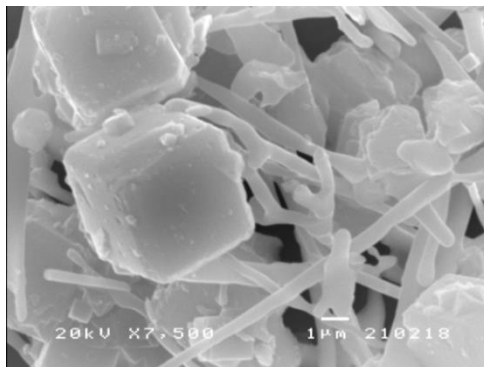
การวิเคราะห์ชนิดธาตุบนพื้นผิวด้วยเทคนิค Energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS) แสดงดังภาพที่ 4.4 (ก-ข) (ขวา) สามารถระบุชนิดของธาตุบนพื้นผิวของผลึกในบริเวณที่กำหนดได้ ซึ่งธาตุหลักที่ตรวจพบบนตัวอย่างคือ ออกซิเจน (O) อะลูมิเนียม (Al) ซิลิกอน (Si) แคลเซียม (Ca) โซเดียม (Na) และ โพแทสเซียม (K) สเปกตรัมของ EDS จากการวิเคราะห์ผิวของซีโอไลต์ที่ยังไม่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว พบสัญญาณของอะลูมิเนียม, ซิลิกอน และแคลเซียม อย่างชัดเจน และ สัญญาณของโซเดียมเล็กน้อย หลังจากแช่ซีโอไลต์ลงในสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตแล้ว พบสัญญาณของโพแทสเซียมและแมงกานีสเพิ่มขึ้นมาบนพื้นผิวของซีโอไลต์ เมื่อเปรียบเทียบกับซีโอไลต์ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารละลายเบสก่อนนำไปแช่ในสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต จะพบว่าสัญญาณของ

โพแทสเซียมและแมงกานีสนั้นเพิ่มสูงกว่าซีโอไลต์ที่ไม่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยเบส ซึ่งสามารถยืนยันได้ว่าการปรับปรุงพื้นผิวของซีโอไลต์ด้วยสารละลายเบสจะช่วยให้โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตสามารถเกาะบนพื้นผิวของซีโอไลต์มากขึ้นจริง

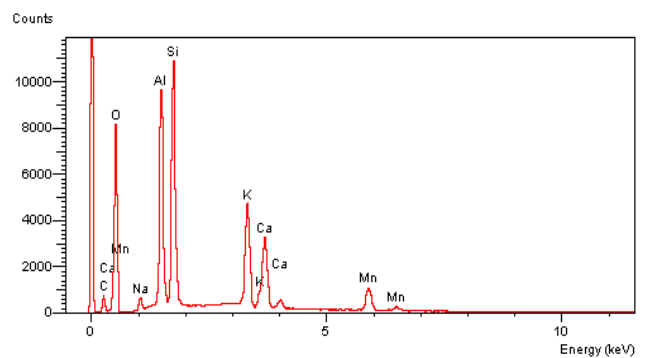
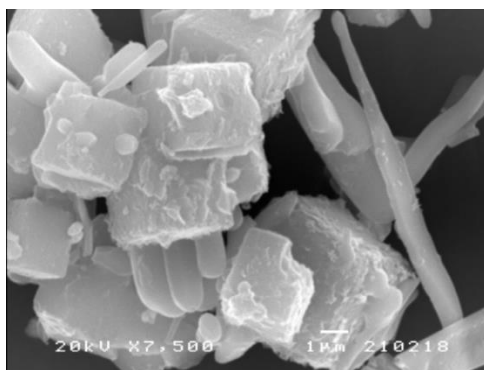
(ก)



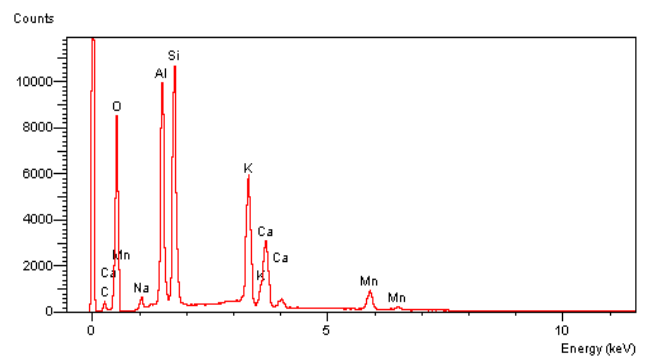
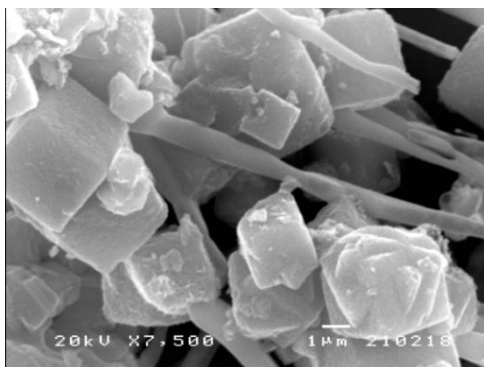
(ข)

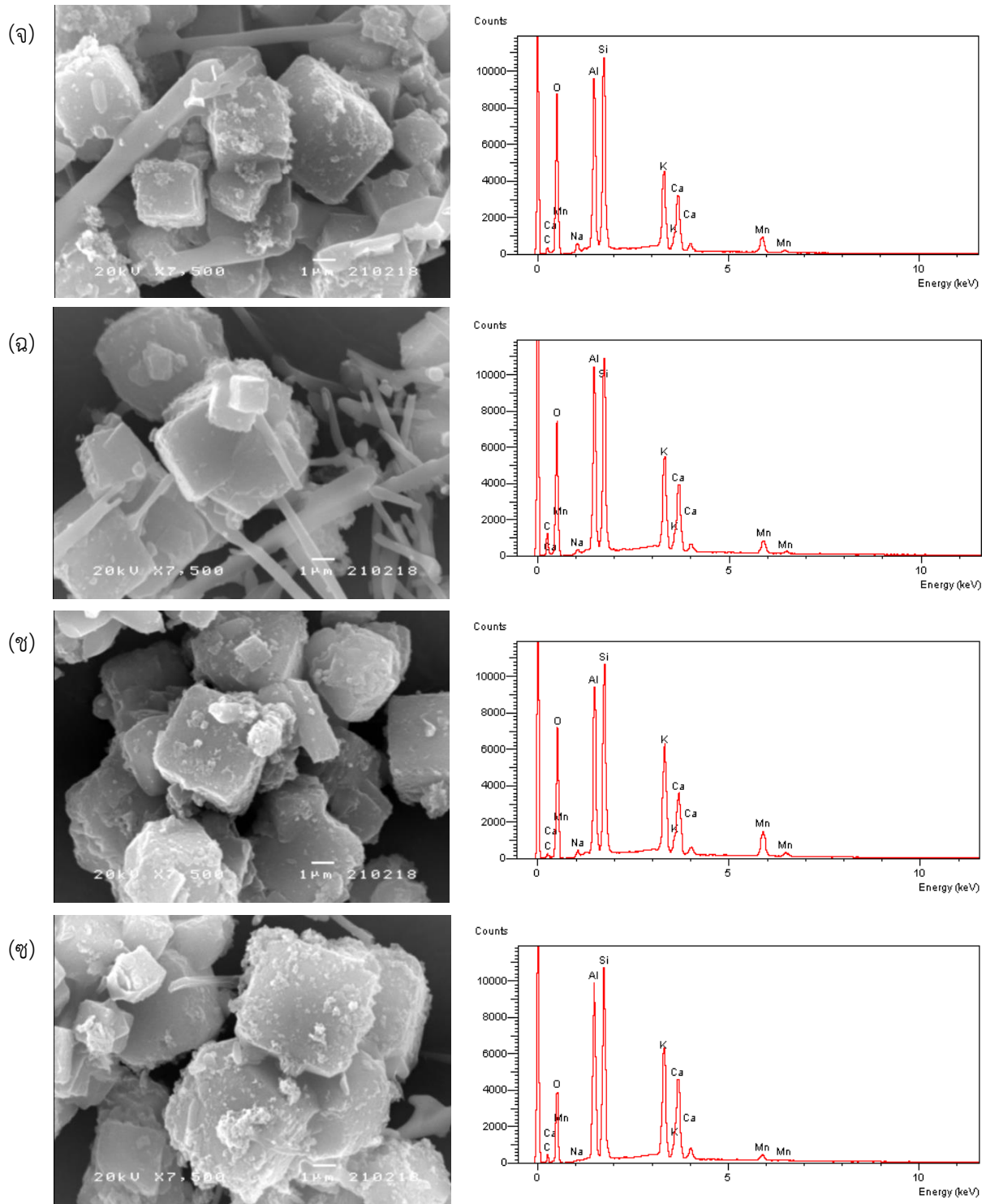


(ค)



(ง)

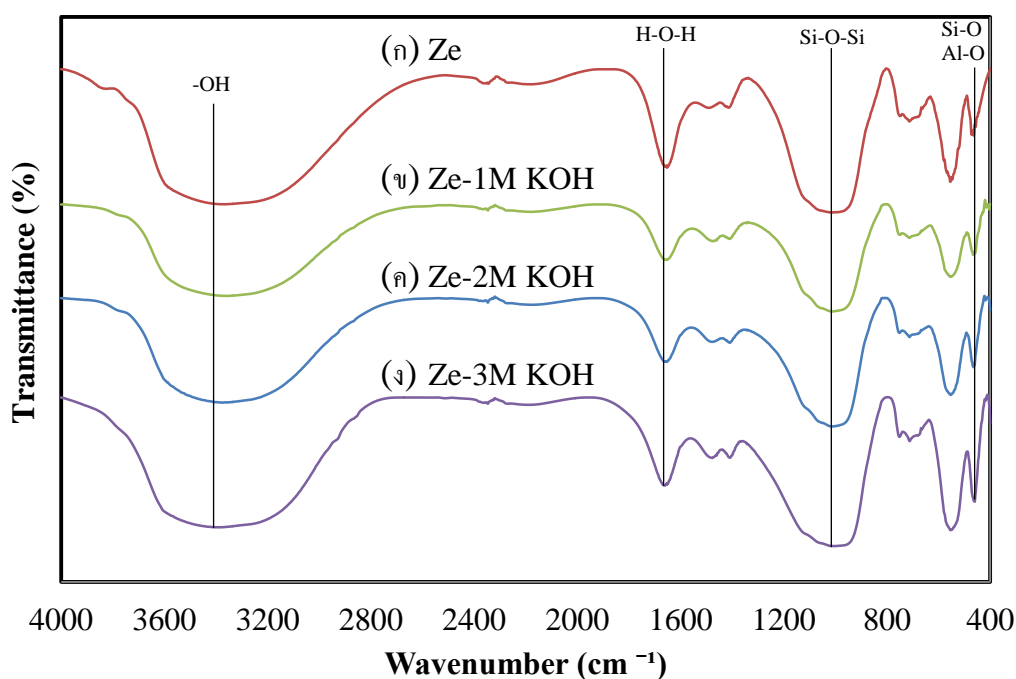




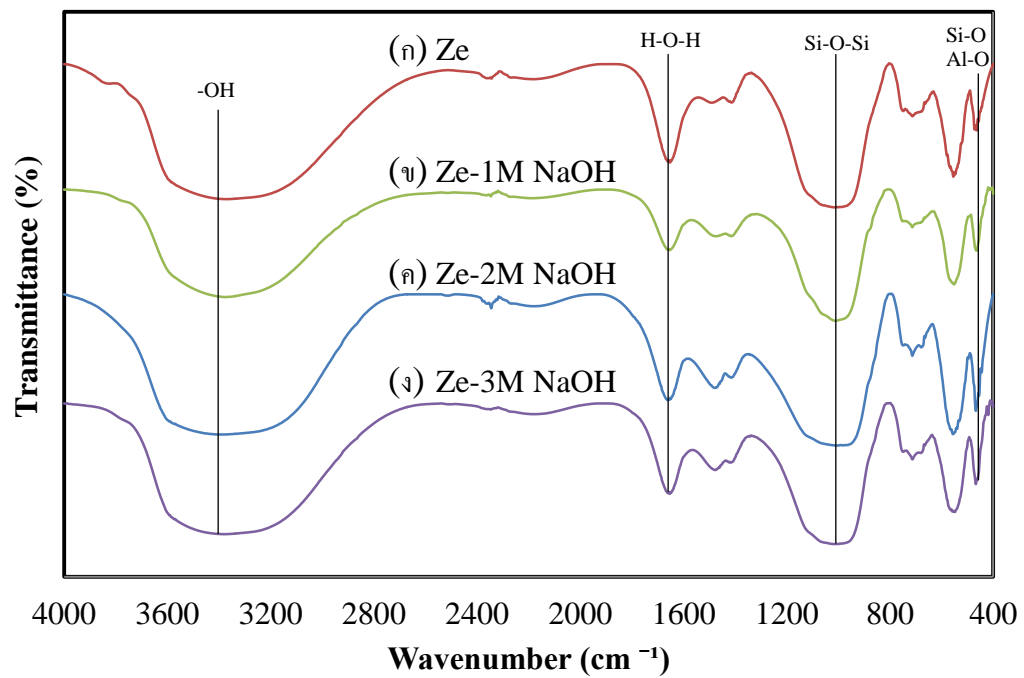
ภาพที่ 4.4 ลักษณะปรากฏทางกายภาพโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (ซ้าย) และ การวิเคราะห์ธาตุ (ขวา) ของ (ก) ซีโอไลต์, (ข) ซีโอไลต์ที่ผ่านการแช่ในสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต และ ซีโอไลต์ที่ผ่านการแช่ในสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตหลังจากการปรับปรุงด้วยสารละลายเบส (ค) 1M NaOH, (ง) 2M NaOH, (จ) 3M NaOH, (ฉ) 1M KOH, (ช) 2M KOH และ (ซ) 3M KOH

4.2 การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ด้วยเทคนิค Transmission Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR)

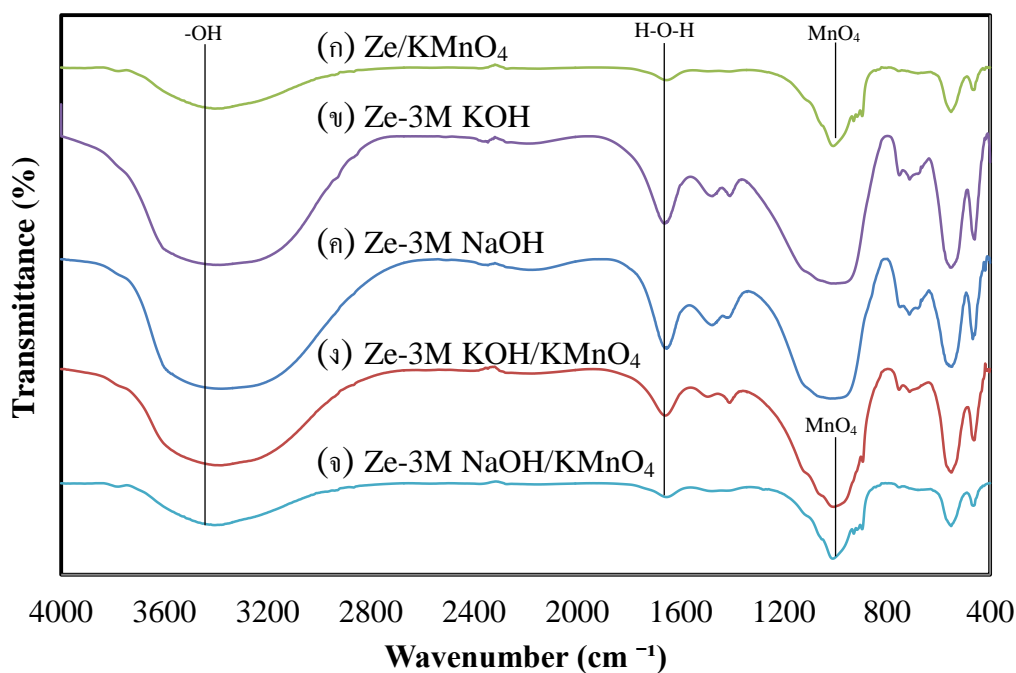
ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ทางองค์ประกอบอินทรีย์ในบริเวณของพื้นผิวหรือหมู่ฟังก์ชัน (Functional group) ในช่วงคลื่น 4000 ถึง 400 cm^{-1} ของอนุภาคซีโอไลต์ที่ไม่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารละลายเบส ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารละลายเบสความเข้มข้นที่ต่างกันและผ่านการแช่ในสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นที่ต่างกัน จากการวิเคราะห์แล้วพบว่า มีการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีของอนุภาคซีโอไลต์ที่ผ่านกระบวนการต่าง ๆ ดังกล่าว ดังแสดงในภาพที่ 4.5, 4.6 และ 4.7



ภาพที่ 4.5 สเปกตรัมของ Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR) ของอนุภาคซีโอไลต์ที่ไม่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารละลายเบสและผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารละลายเบสโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นที่ต่างกัน ก.) Zeolite ข.) Zeolite/1M KOH ค.) Zeolite/2M KOH และ ง.) Zeolite/3M KOH



ภาพที่ 4.6 สเปกตรัมของ Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR) ของอนุภาคซีโอไลต์ที่ไม่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารละลายเบสและผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารละลายเบสโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นที่ต่างกัน ก.) Zeolite ข.) Zeolite/1M NaOH ค.) Zeolite/2M NaOH และ ง.) Zeolite/3M NaOH



ภาพที่ 4.7 สเปกตรัมของ Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR) ของอนุภาคซีโอไลต์ที่นำไปแช่ในสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตโดยไม่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว (ก.), ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารละลายเบสโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 3 โมลาร์ (ข.) ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารละลายเบสโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 3 โมลาร์ (ค.) ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารละลายเบสโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 3 โมลาร์แล้วนำไปแช่ในสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (ง.) และ ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารละลายเบสโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 3 โมลาร์แล้วนำไปแช่ในสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (จ.)

ตารางที่ 4.3 ข้อมูล FTIR ของซีโอไลต์และซีโอไลต์ที่ผ่านการปรับปรุง

หมู่ฟังก์ชัน	เลขคลื่น (cm^{-1})	อ้างอิง
Si-OH , -OH	3700 – 3000	(Akimkhan et al., 2012)
H-O-H	1650	(Li, 2005)
MnO ₄	1110	(Dong et al., 2002)
Si-O-Si	1100 – 1050	
Si-O , Al-O	465	(Bendahou et al., 2015)







จากการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของอนุภาคซีโอไลต์ทั้งที่ไม่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวในสารละลายเบส พบตำแหน่งเลขคลื่นและหมู่ฟังก์ชันหลายตำแหน่งดังแสดงในตารางที่ 4.3 ดังต่อไปนี้ ตำแหน่งเลขคลื่น 3600 ถึง 3700 cm^{-1} แสดงถึง หมู่ซิลานอล (Si-OH) ซึ่งพบในโครงสร้างของพื้นผิวภายนอก และหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิล (Li et al., 2005) ตำแหน่งเลขคลื่น 1650 cm^{-1} แสดง การยืดหดและการงอของหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิล ซึ่งเกิดจากหมู่ฟังก์ชันของความชื้น (Ozmihci et al., 2001) ตำแหน่งเลขคลื่น 1100 ถึง 1050 cm^{-1} แสดงถึง การยืดหดแบบไม่สมมาตรของหมู่ Si-O-Si (Yaneira et al., 2013) ตำแหน่งเลขคลื่น 465 cm^{-1} แสดงถึง การสั่นแบบงอของพันธะ TO ใน TO_4 tetrahedra เมื่อ T=Si หรือ Al และตำแหน่งเลขคลื่น 550 cm^{-1} แสดงถึง การสั่นของหน่วยโครงสร้างทุติยภูมิ DSR (John R et al., 1985) และเมื่อนำอนุภาคซีโอไลต์ไปผ่านกระบวนการปรับปรุงพื้นผิวในสารละลายเบสทั้ง 2 ชนิดเป็นเวลา 2 ชั่วโมง พบว่าเมื่อมีการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์พบ หมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิลที่ตำแหน่งเลขคลื่น 3610-3780 cm^{-1} และเกิดช่องว่างของอะตอมอะลูมิเนียมที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1540 cm^{-1} นอกจากนี้เกิดการแลกเปลี่ยนของไอออนลบภายในรูพรุน เนื่องจากสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จะแตกตัวได้ Na^+ กับ OH^- โดยที่โซเดียมไอออนบวกจะเข้าไปดูลไอออนลบของอะลูมินาที่เป็นองค์ประกอบที่ตำแหน่งเลขคลื่น 600 ถึง 800 cm^{-1} ขณะที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์พบหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิลที่ตำแหน่งเลขคลื่น 3450 cm^{-1} และที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1053, 785 cm^{-1} เกิดการยืดตัวแบบไม่สมมาตรของโครงสร้างอนุภาคซีโอไลต์และการยืดหดตัวแบบสมมาตรของ โครงสร้าง Al-O ตามลำดับ เนื่องจากบางส่วนเกิดการไปแทนที่ของโพแทสเซียมไอออนบวกในไอออนลบ นอกจากนี้ยังมีการนำอนุภาคซีโอไลต์แบบผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารละลายเบสแล้วนำไปแช่ในสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตเป็นเวลา 5 ชั่วโมงและแบบไม่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารละลายเบส แต่นำไปแช่ในสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตเป็นเวลา 5 ชั่วโมงโดยตรงไปทำการวิเคราะห์พบว่า เกิดพีคที่ตำแหน่งเลขคลื่น 3450 และ 1633 cm^{-1} เนื่องจากเกิดการสั่นและการงอของโมเลกุลน้ำที่เกี่ยวข้องกับโซเดียมและแคลเซียมในช่องของซีโอไลต์ที่ตำแหน่งเลขคลื่น 799 และ 471 cm^{-1} เกิดการสั่นแบบยืดหดของ O-T-O เมื่อ T=Si หรือ Al , การสั่นแบบงอของ T-O ตามลำดับ และเกิดพีคที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1110 cm^{-1} ซึ่งเกิดจากการยืดหดของโครงสร้าง MnO_4^- ซึ่งบ่งบอกหมู่ฟังก์ชันของโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (Susai Rajendran., 2010)

4.3 ประสิทธิภาพการย้อมด้วยกลิ่นหอมของวัสดุฐานซีโอไลต์

4.3.1 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสีของวัสดุฐานซีโอไลต์



























































































การวัดการเปลี่ยนแปลงสีของสารดูดซับตัวอย่าง สามารถวัดและแสดงออกมาในรูปแบบค่า L^* และ b^* โดยใช้เครื่อง Color Spectrophotometer ซึ่งแต่ละค่านั้นแสดงความหมายของสีที่แตกต่างกัน ค่า L^* นั้นแสดงถึงค่าความสว่าง มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 100 โดยค่า 0 คือ สีดำ และ ค่า 100 คือ มีความสว่างที่สุด ค่า a^* นั้นแสดงค่าความเป็นสีเขียว-แดง เมื่อเป็นค่าลบจะแสดงเป็นสีเขียว และเมื่อเป็นค่าบวกจะแสดงเป็นสีแดง หากค่าเป็น 0 จะแสดงเป็นสีเทา และค่า b^* แสดงค่าความเป็นสีน้ำเงิน-เหลือง โดยจะแสดงค่าความเป็นสีเหลืองเมื่อมีค่าบวก และเมื่อค่าเป็นลบจะแสดงเป็นสีน้ำเงิน หากมีค่าเป็น 0 จะแสดงสีเทา โดยค่า a^* และ b^* จะมีค่าตั้งแต่ -128 ถึง 128 (Javad et al.,2010)

ตารางที่ 4.4 ค่า L^* , a^* และ b^* และสีของวัสดุฐานซีโอไลต์ที่มีการดูดซับโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตก่อนการดูดซับเอทิลีน

Sample	Measurement	Color	Sample	Measurement	Color		
Zeolite/ 1M NaOH/ KMnO ₄	L a* b*	32.83 11.31 -4.52		Zeolite/ 1M KOH/ KMnO ₄	L a* b*	33.92 13.22 -5.50	
Zeolite/ 2M NaOH/ KMnO ₄	L a* b*	37.89 3.27 3.14		Zeolite/ 2M KOH/ KMnO ₄	L a* b*	34.07 7.80 0.29	
Zeolite/ 3M NaOH/ KMnO ₄	L a* b*	36.08 12.11 -4.95		Zeolite/ 3M KOH/ KMnO ₄	L a* b*	40.34 13.14 -3.63	

จากการวิเคราะห์สเปกตรัมของวัสดุฐานซีโอไลต์ที่มีการดูดซับโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ก่อนการดูดซับก๊าซเอทิลีน โดยการนำสารตัวอย่างที่ขึ้นรูปด้วยวิธีการอัด หลังจากนั้นนำไปเข้าเครื่องวัด การเปลี่ยนแปลงสี พบว่า ค่า L ที่ได้นั้นมีค่าความสว่างอยู่ในช่วง 32.19 ถึง 40.34 ค่าความเป็นสีเขียว-แดง (a^*) อยู่ในช่วง 3.27 ถึง 13.22 ซึ่งเป็นค่าที่อยู่ในช่วงบวก จะแสดงแนวโน้มเป็นสีแดง และค่าความเป็นสีน้ำเงิน-เหลือง (b^*) อยู่ในช่วง -6.16 ถึง 3.14 โดยค่าที่ได้ส่วนใหญ่ของสารตัวอย่างไปในทิศทางลบ จึงมีแนวโน้มเป็นสีน้ำเงิน แต่มีบางส่วนที่แสดงค่าไปในทิศทางบวก ซึ่งแสดงแนวโน้มความเป็นสีเหลือง จึงทำให้มีลักษณะสีที่แตกต่างไปจากสารตัวอย่างอื่นที่มีลักษณะสีเป็นสีม่วง ซึ่งโดยปกติแล้วสีม่วงจะเกิดจากการผสมกันของของแม่สีแดงและแม่สีน้ำเงินในระบบแม่สีและซีโอไลต์ก็มีการดูดซับสารละลาย โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตเข้าไปในโครงสร้างและนอกจากนี้ยังพบพิกที่แสดงลักษณะของโพแทสเซียม เปอร์แมงกาเนตบนวัสดุฐาน-ซีโอไลต์ด้วย ดังนั้นจึงเหตุผลที่วัสดุฐานซีโอไลต์มีลักษณะของสีดังกล่าว



























































































ตารางที่ 4.5 ค่า L, a* และ b* และสีของวัสดุฐานซีโอไลต์ที่ผ่านกระบวนการกระตุ้นด้วยสารละลายเบสโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 1M และ 2M

Pellet of Based Zeolite																	
Sample		DAY 1			Color	DAY 2		Color	DAY 3		Color	DAY 4		Color	DAY 5		Color
Zeolite/ 1M NaOH/ KMnO ₄	1	L	30.65		L	31.51		L	28.85		L	27.16		L	27.35		
		a*	4.41		a*	3.99		a*	2.92		a*	3.40		a*	3.15		
		b*	-2.67		b*	0.55		b*	-0.87		b*	1.57		b*	0.86		
	2	L	30.51		L	32.02		L	28.00		L	28.12		L	25.75		
		a*	3.46		a*	2.98		a*	1.47		a*	1.68		a*	1.79		
		b*	-4.24		b*	-3.31		b*	-2.10		b*	-1.11		b*	-0.50		
	3	L	29.48		L	30.85		L	27.09		L	25.83		L	25.61		
		a*	4.75		a*	4.72		a*	3.77		a*	2.41		a*	3.53		
		b*	-5.22		b*	-4.65		b*	-1.75		b*	-1.82		b*	-0.66		
Zeolite/ 2M NaOH/ KMnO ₄	1	L	37.61		L	39.29		L	36.86		L	36.56		L	37.54		
		a*	3.66		a*	3.30		a*	3.71		a*	3.58		a*	3.67		
		b*	4.75		b*	4.82		b*	4.78		b*	4.07		b*	4.38		
	2	L	36.39		L	37.15		L	34.19		L	33.41		L	32.93		
		a*	3.01		a*	3.18		a*	3.10		a*	3.12		a*	2.97		
		b*	3.07		b*	4.12		b*	3.13		b*	2.82		b*	2.47		
	3	L	37.15		L	37.96		L	36.48		L	35.20		L	36.15		
		a*	2.91		a*	3.00		a*	3.23		a*	3.50		a*	3.66		
		b*	3.45		b*	4.19		b*	3.30		b*	3.08		b*	3.07		




































ตารางที่ 4.6 ค่า L, a* และ b* และสีของวัสดุฐานซีโอไลต์ที่ผ่านกระบวนการกระตุ้นด้วยสารละลายเบสโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 3M

Sample		Pellet of Based Zeolite														
		DAY 1			DAY 2			DAY 3			DAY 4			DAY 5		
		L	a*	Color	L	a*	Color	L	a*	Color	L	a*	Color	L	a*	Color
Zeolite/ 3M NaOH/ KMnO ₄	1	33.65			33.52			29.97			28.10			26.61		
		5.95			3.63			3.82			3.32			2.18		
		-4.22			-3.90			-1.17			0.46			1.17		
	2	33.45			33.94			30.70			29.75			30.15		
		7.65			5.04			3.83			3.36			3.66		
		1.55			-0.53			-1.06			-0.64			-1.22		
	3	29.81			35.64			34.58			32.76			35.11		
		5.00			7.39			7.52			6.82			7.42		
		0.16			1.01			0.68			0.10			0.35		

ตารางที่ 4.7 ค่า L, a* และ b* และสีของวัสดุฐานซีโอไลต์ที่ผ่านกระบวนการกระตุ้นด้วยสารละลายเบสโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 1M และ 2M















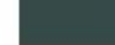

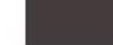

























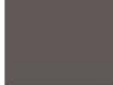
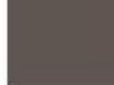




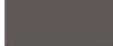
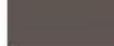
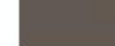
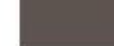
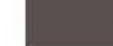
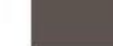













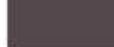
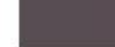
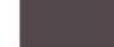
















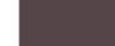

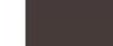
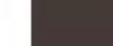






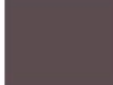





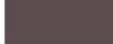




















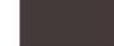
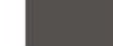
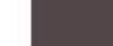
Pellet of Based Zeolite																
Sample		DAY 1		Color	DAY 2		Color	DAY 3		Color	DAY 4		Color	DAY 5		Color
Zeolite/ 1M KOH/ KMnO ₄	1	L	33.42		L	34.26		L	26.77		L	29.54		L	28.83	
		a*	9.67		a*	9.37		a*	1.16		a*	5.62		a*	3.99	
		b*	-0.01		b*	-0.90		b*	-4.93		b*	-0.05		b*	4.12	
	2	L	29.02		L	30.02		L	27.53		L	24.51		L	22.42	
		a*	8.76		a*	7.46		a*	1.05		a*	6.06		a*	3.36	
		b*	-0.45		b*	1.15		b*	-6.22		b*	0.72		b*	4.23	
	3	L	30.84		L	29.45		L	24.22		L	24.79		L	22.52	
		a*	7.92		a*	6.33		a*	3.99		a*	3.13		a*	3.60	
		b*	-0.44		b*	0.20		b*	3.49		b*	4.80		b*	4.39	
Zeolite/ 2M KOH/ KMnO ₄	1	L	28.84		L	33.53		L	29.31		L	28.85		L	30.06	
		a*	3.23		a*	4.42		a*	2.54		a*	3.30		a*	3.16	
		b*	-5.25		b*	-1.53		b*	-4.7		b*	-2.28		b*	-3.65	
	2	L	29.17		L	26.65		L	30.32		L	36.68		L	36.29	
		a*	3.27		a*	1.55		a*	0.8		a*	-0.65		a*	0.60	
		b*	-4.47		b*	-0.18		b*	-1.49		b*	1.02		b*	1.06	
	3	L	31.63		L	32.60		L	29.59		L	25.74		L	37.14	
		a*	3.47		a*	5.24		a*	2.01		a*	1.74		a*	-1.08	
		b*	-5.07		b*	-2.23		b*	-4.64		b*	-0.51		b*	-5.02	

ตารางที่ 4.8 ค่า L, a* และ b* และสีของวัสดุฐานซีโอไลต์ที่ผ่านกระบวนการกระตุ้นด้วยสารละลายเบสโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 3 M และ ไม่ผ่านกระบวนการกระตุ้น

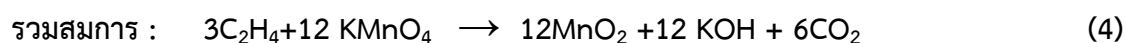
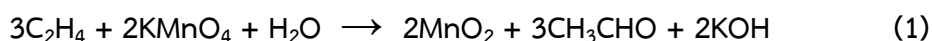
Pellet of Based Zeolite																
Sample		DAY 1	Color		DAY 2	Color		DAY 3	Color		DAY 4	Color		DAY 5	Color	
Zeolite/ 3M KOH/ KMnO ₄	1	L	34.68		L	33.26		L	23.56		L	42.46		L	38.55	
		a*	10.59		a*	9.28		a*	4.04		a*	-1.06		a*	0.50	
		b*	0.94		b*	-0.43		b*	0.91		b*	-1.69		b*	3.37	
	2	L	34.78		L	33.31		L	24.70		L	38.78		L	32.16	
		a*	10.03		a*	7.34		a*	2.58		a*	-1.48		a*	8.64	
		b*	1.13		b*	2.23		b*	2.53		b*	-3.83		b*	-0.91	
	3	L	34.73		L	31.12		L	25.92		L	23.40		L	22.79	
		a*	9.95		a*	8.29		a*	4.27		a*	6.32		a*	7.71	
		b*	2.96		b*	-0.44		b*	1.51		b*	-2.57		b*	-3.17	
Zeolite/ KMnO ₄	1	L	29.44		L	29.59		L	26.04		L	24.90		L	25.23	
		a*	5.21		a*	5.03		a*	3.21		a*	3.26		a*	2.93	
		b*	-3.64		b*	0.05		b*	-0.26		b*	0.57		b*	3.37	
	2	L	28.75		L	27.95		L	25.62		L	25.44		L	26.20	
		a*	2.68		a*	1.77		a*	1.43		a*	1.45		a*	2.35	
		b*	-5.93		b*	-2.27		b*	-1.04		b*	-1.95		b*	-1.87	
	3	L	31.76		L	32.52		L	28.72		L	27.64		L	26.64	
		a*	7.28		a*	5.53		a*	4.04		a*	3.62		a*	1.72	
		b*	-4.24		b*	-1.93		b*	-3.20		b*	-2.04		b*	0.74	

จากตารางที่ 4.4 ถึง 4.8 ที่แสดงลักษณะการเปลี่ยนแปลงสีของวัสดุฐานซีโอไลต์ที่มีการดูดซับก๊าซเอทิลีนจากกล้วยหอมทองที่ปลดปล่อยออกมา โดยได้ทำการทดลอง 3 ซ้ำ เก็บผลการทดลองในแต่ละวัน เป็นเวลา 5 วัน และนำค่าที่ได้มาคำนวณหาค่าเฉลี่ยของค่า L , a^* และ b^* ในแต่ละวัน พบว่า วัสดุฐานซีโอไลต์ที่ดูดซับโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตและผ่านกระบวนการกระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน โดยค่าเฉลี่ยของค่า L , a^* และ b^* ที่คำนวณได้แสดงในตาราง 4.9

ตารางที่ 4.9 ค่าเฉลี่ยของค่า L, a*, b* และสีของวัสดุฐานซีโอไลต์ที่ผ่านกระบวนการกระตุ้นด้วยสารละลายเบสแตกต่างกัน

Color value		Day 0	DAY 1		DAY 2		DAY 3		DAY 4		DAY 5		
Ze/KMnO ₄	L	32.19		29.98		30.02		26.79		25.99		26.02	
	a*	13.09		5.06		-8.30		2.89		2.78		2.33	
	b*	-6.16		-4.60		-1.38		-1.50		-1.14		0.75	
Ze/1MNaOH /KMnO ₄	L	32.83		30.21		31.46		27.98		27.04		26.24	
	a*	11.31		4.21		3.90		2.72		2.50		2.82	
	b*	-4.52		-5.22		-2.47		-1.57		-0.45		-0.1	
Ze/2MNaOH /KMnO ₄	L	37.89		37.05		38.13		35.84		35.06		35.54	
	a*	3.27		3.19		3.16		3.35		3.40		3.43	
	b*	3.14		3.76		4.38		3.74		3.32		3.31	
Ze/3MNaOH /KMnO ₄	L	36.08		32.3		34.37		31.75		30.2		30.62	
	a*	12.11		6.20		5.35		5.06		4.50		4.42	
	b*	-4.95		-0.84		-1.14		-0.52		-0.03		0.10	
Ze/1MKOH /KMnO ₄	L	33.92		31.09		31.24		26.17		26.28		24.59	
	a*	13.22		7.22		7.72		2.07		4.94		3.65	
	b*	-5.5		-0.30		0.15		-2.55		-2.55		4.25	
Ze/2MKOH /KMnO ₄	L	34.07		29.88		30.93		29.74		30.42		34.5	
	a*	7.8		3.32		3.74		1.78		1.46		0.89	
	b*	0.29		-4.93		-1.31		-3.61		-0.59		-2.54	
Ze/3MKOH /KMnO ₄	L	40.34		34.73		32.56		24.73		34.88		31.17	
	a*	13.14		10.19		8.30		3.63		1.26		5.62	
	b*	-3.63		0.15		0.45		1.65		-2.70		-0.24	

จากการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยของค่า L , a^* และ b^* ซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกถึงลักษณะของสี ในตารางที่ 4.9 ที่วัสดุฐานซีโอไลต์มีการดูดซับเอทิลีนจากกล้วยหอมทองในแต่ละวัน เปรียบเทียบกับค่า L , a^* และ b^* ในตารางที่ 4.4 ที่วัสดุฐานซีโอไลต์ยังไม่มีมีการดูดซับเอทิลีน (ชุดควบคุม) พบว่า ค่า L , a^* และ b^* ของวัสดุฐานซีโอไลต์ที่ผ่านการดูดซับก๊าซเอทิลีนจากกล้วยหอมทอง โดยค่า L (บ่งบอกถึงความสว่าง) ส่วนใหญ่มีแนวโน้มลดลง จึงส่งผลให้วัสดุฐานซีโอไลต์มีความสว่างลดลงและมีลักษณะสีปรากฏที่เข้มข้นขึ้นขณะที่ค่า a^* (บ่งบอกความเป็นสีเขียว-แดง) ในทุกชุดการทดลองจะอยู่ในช่วงค่าอยู่ในช่วงที่เป็นบวกเช่นเดิม ซึ่งบ่งบอกได้ว่ามีองค์ประกอบของสีแดงเหมือนกับชุดควบคุม แต่ค่า b^* (บ่งบอกความเป็นสีเหลือง-น้ำเงิน) จะมีค่าที่แตกต่างกันในแต่ละชุดการทดลอง จึงทำให้ลักษณะสีปรากฏของวัสดุฐานซีโอไลต์เปลี่ยนแปลงไปจากเดิม โดยที่บางชุดการทดลองจะได้ค่า b^* จะมีค่าเป็นบวก ซึ่งบ่งบอกความเป็นสีเหลือง บางชุดการทดลองมีค่าเป็นลบ จะบ่งบอกความเป็นสีน้ำเงิน ดังนั้นเมื่อนำค่าสี L , a^* และ b^* มารวมกันจึงทำให้ลักษณะสีปรากฏแตกต่างกันออกไป และการที่ค่าสี L , a^* และ b^* แตกต่างไปจากชุดควบคุมเนื่องจากมาเกิดการทำปฏิกิริยากันของโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตในโครงสร้างกับก๊าซเอทิลีนที่ปลดปล่อยออกมาจากกล้วยหอมทอง ทำให้เลขออกซิเดชันของแมงกานีสที่ในโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตถูกออกซิไดซ์เปลี่ยนแปลงไปจากเดิม ตามสมการต่อไปนี้ (Gordon L., 2006)






นอกจากนี้จากชุดการทดลองทั้งหมดที่มีการนำไปดูดซับก๊าซเอทิลีนที่ปลดปล่อยออกมาจากกล้วยหอมทองเป็นเวลา 5 วันเทียบกับชุดที่ยังไม่มีการดูดซับก๊าซเอทิลีน พบว่า ชุดการทดลองที่วัสดุฐานซีโอไลต์ผ่านการกระตุ้นด้วยสารละลายเบสโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 3M และผ่านการกระตุ้นด้วยสารละลายเบสโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 1M มีการดูดซับก๊าซเอทิลีนดีที่สุด เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของสีปรากฏแตกต่างจากชุดควบคุมมากที่สุดของแต่ละเงื่อนไข

4.3.2 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสีของเปลือกกล้วยหอมทอง

ศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงสีของเปลือกกล้วยหอมทอง ตั้งแต่ก่อนการเก็บรักษา (วันที่ 0) จนถึงมีการเปลี่ยนแปลงสีของเปลือกเป็นเวลา 5 วันของการเก็บรักษา โดยทำการวัดการเปลี่ยนแปลงสีในแต่ละวันและทำการทดลอง 3 ซ้ำ ทั้งนี้การทดลองโดยทำการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงสีของเปลือกกล้วยหอมทองตามธรรมชาติ ไม่มีการบรรจุวัสดุฐานซีโอไลต์อยู่ในบรรจุภัณฑ์ (ชุดควบคุม) กับการเปลี่ยนแปลงสีของเปลือกกล้วยหอมทองที่มีวัสดุฐานซีโอไลต์อยู่ในบรรจุภัณฑ์ โดยการทดลองนั้นได้ทำการคัดเลือกกล้วยหอมทองที่มีน้ำหนักใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 153 ± 10 กรัม หลังจากนั้นทำการวัดการเปลี่ยนแปลงสีของเปลือกกล้วยหอมทองด้วยเครื่อง Color Spectrophotometer โดยเครื่องจะแสดงออกมาในรูปแบบค่า L, a* และ b* ตามลำดับ



























































































ตารางที่ 4.10 ค่า L, a* และ b* และสีของกล้วยหอมทองก่อนการเก็บรักษา (วันที่ 0)

Sample	Measurement		Color
1	L	61.06	
	a*	-10.42	
	b*	31.43	
2	L	58.53	
	a*	-10.26	
	b*	30.37	
3	L	60.15	
	a*	-10.23	
	b*	31.05	














































จากตารางที่ 4.10 แสดงค่า L (บ่งบอกถึงความสว่าง), a* (บ่งบอกความเป็นสีเขียว-แดง) และ b* (บ่งบอกความเป็นสีเหลือง-น้ำเงิน) ของเปลือกกล้วยหอมทองก่อนการเก็บรักษา (ชุดควบคุม) ซึ่งได้ทำการทดลองสุ่มวัดสีเปลือกกล้วยหอมทอง 3 ตัวอย่าง พบว่า ค่า L แสดงค่าอยู่ในช่วง 58.53 ถึง 61.06 ค่า a* แสดงค่าอยู่ในช่วง -10.23 ถึง -10.42 และค่า b* แสดงค่าอยู่ในช่วง 30.37 ถึง 31.43 จึงต้องนำค่า L, a* และ b* ที่ได้มาคำนวณเป็นค่าเฉลี่ยซึ่งพบว่า ค่าเฉลี่ยของค่า L มีค่า 59.91 ค่าเฉลี่ยของค่า a* มีค่า -10.30 ซึ่งจะแสดงความเป็นสีเขียว เนื่องจากค่าที่ได้นั้นมีค่าเป็นลบ และค่าเฉลี่ยของค่า b* มีค่า 30.95 ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะสีของเปลือกกล้วยหอมทองที่ปรากฏให้เห็นเป็นสีเขียว

เนื่องจากปกติของเปลือกของผลไม้ที่อยู่ในระยะอ่อนหรือยังดิบจะมีการสร้าง รงควัตถุสีเขียวหรือคลอโรฟิลล์ (Chlorophyll) ขึ้นมา จึงทำให้สีปรากฏให้เห็นเป็นเช่นนั้น (สังคม เตชะวงศ์เสถียร, 2547)



























































































ตารางที่ 4.11 ค่า L, a* และ b* และสีของเปลือกกล้วยหอมทอง เมื่อใช้วัสดุฐานซีโอไลต์ที่เป็นตัวดูดซับก๊าซเอทิลีนที่ถูกปลดปล่อยออกมา

Peel of Bananas																
Sample		DAY 1		Color	DAY 2		Color	DAY 3		Color	DAY 4		Color	DAY 5		Color
Zeolite/ 1M NaOH/ KMnO ₄	1	L	64.12		L	67.30		L	65.09		L	65.48		L	65.85	
		a*	-9.16		a*	-5.92		a*	-6.75		a*	-6.87		a*	-8.11	
		b*	30.66		b*	27.78		b*	29.73		b*	28.68		b*	31.75	
	2	L	63.62		L	56.24		L	61.27		L	64.63		L	66.65	
		a*	-9.30		a*	-8.81		a*	-8.59		a*	-6.32		a*	-8.59	
		b*	30.32		b*	28.95		b*	29.76		b*	31.16		b*	31.14	
	3	L	65.69		L	67.51		L	64.16		L	55.59		L	54.15	
		a*	-8.94		a*	-5.38		a*	-5.74		a*	-7.33		a*	-7.74	
		b*	31.50		b*	30.27		b*	28.60		b*	26.42		b*	28.92	
Zeolite/ 2M NaOH/ KMnO ₄	1	L	60.82		L	66.11		L	63.63		L	63.33		L	64.61	
		a*	-7.82		a*	-7.95		a*	-7.09		a*	-5.82		a*	-7.76	
		b*	28.50		b*	29.78		b*	28.88		b*	29.85		b*	32.03	
	2	L	64.67		L	69.06		L	64.79		L	65.63		L	66.03	
		a*	-8.57		a*	-7.76		a*	-6.69		a*	-4.71		a*	-5.59	
		b*	32.19		b*	32.05		b*	30.38		b*	27.58		b*	30.37	
	3	L	62.66		L	63.54		L	59.86		L	61.24		L	61.82	
		a*	-7.43		a*	-7.37		a*	-6.21		a*	-6.79		a*	-7.73	
		b*	30.65		b*	29.91		b*	25.84		b*	26.50		b*	29.96	



























































































ตารางที่ 4.12 ค่า L, a* และ b* และสีของเปลือกกล้วยหอมทอง เมื่อใช้วัสดุฐานซีโอไลต์เป็นตัวดูดซับก๊าซเอทิลีนที่ถูกปลดปล่อยออกมา (ต่อ)

Peel of Bananas																
Sample		DAY 1		Color	DAY 2		Color	DAY 3		Color	DAY 4		Color	DAY 5		Color
Zeolite/ 3M NaOH/ KMnO ₄	1	L	63.94		L	65.98		L	63.49		L	60.43		L	70.12	
		a*	-8.83		a*	-9.35		a*	-7.93		a*	-8.34		a*	3.95	
		b*	32.11		b*	33.49		b*	31.47		b*	34.21		b*	35.65	
	2	L	69.19		L	70.00		L	67.35		L	68.95		L	70.40	
		a*	-6.92		a*	-6.83		a*	-7.03		a*	-7.35		a*	2.03	
		b*	26.80		b*	29.51		b*	27.47		b*	29.05		b*	38.97	
	3	L	54.02		L	58.65		L	65.06		L	65.32		L	68.09	
		a*	-10.33		a*	-8.25		a*	-6.98		a*	-8.29		a*	-5.57	
		b*	33.11		b*	29.23		b*	27.99		b*	29.89		b*	27.20	














































ตารางที่ 4.13 ค่า L, a* และ b* และสีของเปลือกกล้วยหอมทอง เมื่อใช้วัสดุฐานซีโอไลต์เป็นตัวดูดซับก๊าซเอทิลีนที่ถูกปลดปล่อยออกมา (ต่อ)

Peel of Bananas																
Sample		DAY 1	Color		DAY 2	Color		DAY 3	Color		DAY 4	Color		DAY 5	Color	
Zeolite/ 1M KOH/ KMnO ₄	1	L	63.52		L	71.06		L	61.92		L	68.50		L	67.02	
		a*	-7.22		a*	-7.06		a*	-6.87		a*	-6.40		a*	-6.32	
		b*	27.86		b*	31.29		b*	27.68		b*	27.72		b*	29.92	
	2	L	63.71		L	70.12		L	66.24		L	61.56		L	71.35	
		a*	-3.09		a*	-7.73		a*	-6.85		a*	-3.28		a*	-4.58	
		b*	29.79		b*	31.80		b*	29.31		b*	29.04		b*	32.44	
	3	L	66.06		L	67.47		L	69.16		L	64.60		L	69.44	
		a*	-9.28		a*	-9.14		a*	-4.45		a*	-4.71		a*	-6.30	
		b*	31.27		b*	31.57		b*	26.24		b*	26.43		b*	28.51	
Zeolite/ 2M KOH/ KMnO ₄	1	L	65.90		L	69.69		L	62.11		L	61.73		L	65.44	
		a*	-9.23		a*	-7.95		a*	-5.92		a*	-6.15		a*	-7.27	
		b*	31.73		b*	31.77		b*	28.51		b*	27.97		b*	31.39	
	2	L	64.43		L	71.23		L	71.53		L	64.69		L	74.74	
		a*	-9.29		a*	-4.72		a*	4.21		a*	7.68		a*	6.37	
		b*	31.55		b*	38.48		b*	37.25		b*	36.34		b*	42.47	
	3	L	64.47		L	69.05		L	64.00		L	60.39		L	70.95	
		a*	-7.90		a*	-8.52		a*	-5.39		a*	0.26		a*	5.63	
		b*	30.75		b*	32.38		b*	30.14		b*	31.11		b*	37.67	



















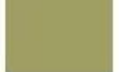
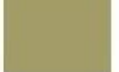



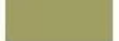

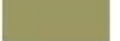






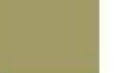































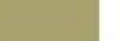































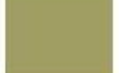

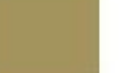
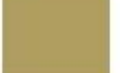





ตารางที่ 4.14 ค่า L, a* และ b* และสีของเปลือกกล้วยหอมทอง เมื่อใช้วัสดุฐานซีโอไลต์เป็นตัวดูดซับก๊าซเอทิลีนที่ถูกปลดปล่อยออกมา (ต่อ)

Peel of Bananas																
Sample		DAY 1		Color	DAY 2		Color	DAY 3		Color	DAY 4		Color	DAY 5		Color
Zeolite/ 3M KOH/ KMnO ₄	1	L	60.60		L	62.85		L	68.99		L	63.20		L	70.16	
		a*	-9.84		a*	-8.90		a*	0.12		a*	-7.44		a*	5.22	
		b*	31.12		b*	32.37		b*	37.09		b*	31.79		b*	36.65	
	2	L	60.33		L	60.98		L	63.76		L	66.59		L	74.56	
		a*	-9.79		a*	-8.33		a*	-6.06		a*	-4.00		a*	5.27	
		b*	31.9		b*	31.52		b*	34.60		b*	25.91		b*	44.50	
	3	L	66.17		L	70.19		L	65.34		L	62.05		L	65.88	
		a*	-9.22		a*	-8.86		a*	-7.55		a*	-7.83		a*	-8.44	
		b*	30.69		b*	30.87		b*	27.95		b*	30.73		b*	29.08	
Zeolite/ KMnO ₄	1	L	61.22		L	68.59		L	63.44		L	63.26		L	62.13	
		a*	-8.15		a*	-8.35		a*	-7.80		a*	-6.92		a*	-6.85	
		b*	30.21		b*	30.66		b*	29.38		b*	28.13		b*	29.17	
	2	L	60.23		L	67.02		L	62.93		L	62.11		L	61.73	
		a*	-9.39		a*	-8.19		a*	-7.85		a*	-7.83		a*	-8.62	
		b*	31.78		b*	30.79		b*	31.11		b*	30.69		b*	30.67	
	3	L	58.07		L	68.14		L	63.99		L	66.04		L	70.15	
		a*	-4.51		a*	-8.35		a*	-6.44		a*	-4.70		a*	4.54	
		b*	26.74		b*	31.96		b*	29.04		b*	30.37		b*	31.41	

ตารางที่ 4.15 ค่า L, a* และ b* และสีของเปลือกกล้วยหอมทอง โดยไม่มีวัสดุฐานซีโอไลต์เป็นตัวดูดซับก๊าซเอทิลีนที่ถูกปลดปล่อยออกมา (ชุดควบคุม)

Sample		DAY 1	Color		DAY 2	Color		DAY 3	Color		DAY 4	Color		DAY 5	Color
1	L	64.87		L	66.45		L	61.13		L	64.01		L	64.77	
	a*	-7.97		a*	-8.62		a*	-6.71		a*	-6.36		a*	-5.09	
	b*	28.81		b*	30.45		b*	29.27		b*	29.86		b*	29.97	
2	L	61.64		L	68.40		L	61.78		L	70.03		L	72.18	
	a*	-5.85		a*	-0.74		a*	5.73		a*	7.10		a*	7.31	
	b*	32.92		b*	41.85		b*	36.05		b*	44.03		b*	44.10	
3	L	63.98		L	66.39		L	61.87		L	61.97		L	64.48	
	a*	-9.73		a*	-8.33		a*	-8.53		a*	-8.60		a*	-5.93	
	b*	31.77		b*	31.67		b*	29.72		b*	29.20		b*	29.21	

ตารางที่ 4.16 แสดงค่าเฉลี่ยของค่า L, a* และ b* และสีของเปลือกกล้วยหอมทอง เป็นระยะเวลา 5 วัน โดยมีและไม่มีวัสดุฐานซีโอไลต์เป็นตัวดูดซับ

		color value	DAY 1	DAY 2	DAY 3	DAY 4	DAY 5				
Ze/KMnO ₄	L	59.84		67.92		63.45		63.8		64.67	
	a*	-7.35		-8.3		-7.36		-6.48		-3.64	
	b*	29.58		31.14		29.84		29.73		30.42	
Ze/1MNaOH /KMnO ₄	L	64.48		63.68		63.51		61.9		62.22	
	a*	-9.13		-6.7		-7.03		-6.84		-8.15	
	b*	30.83		29		29.36		28.75		30.6	
Ze/2MNaOH /KMnO ₄	L	62.72		66.24		62.76		63.4		64.15	
	a*	-7.94		-7.69		-6.66		-5.77		-7.03	
	b*	30.45		30.58		28.37		27.98		30.79	
Ze/3MNaOH /KMnO ₄	L	62.38		64.88		65.3		64.9		69.54	
	a*	-8.69		-8.14		-7.31		-7.99		0.14	
	b*	30.67		30.74		28.98		31.05		33.94	
Ze/1MKOH /KMnO ₄	L	64.43		69.55		65.77		64.89		69.27	
	a*	-6.53		-7.97		-6.06		-4.8		-5.73	
	b*	29.64		31.55		27.74		27.73		30.29	
Ze/2MKOH /KMnO ₄	L	64.93		69.99		65.88		62.27		70.38	
	a*	-8.81		-7.06		-2.37		0.6		1.58	
	b*	31.34		34.21		31.97		31.81		37.18	
Ze/3MKOH /KMnO ₄	L	62.37		64.67		66.03		63.95		70.2	
	a*	-9.62		-8.7		-4.5		-6.42		0.68	
	b*	31.24		31.59		33.21		29.48		36.74	
Without absorber	L	63.50		67.08		61.59		65.34		67.14	
	a*	-7.85		-5.90		-3.17		-2.62		-1.24	
	b*	31.17		34.66		31.68		34.36		34.43	

จากการวิเคราะห์ตารางที่ 4.11 ถึง 4.15 การเปลี่ยนแปลงสีของกล้วยหอมทอง ซึ่งบ่งบอกได้โดยอาศัยค่าเฉลี่ยของค่า L , a^* และ b^* ที่มีระยะเวลาในการเก็บรักษาเป็นเวลา 5 วันพร้อมบรรจุวัสดุฐานซีโอโลต์ภายในบรรจุภัณฑ์ เพื่อศึกษาการยืดอายุของกล้วยหอมทองและทำการเทียบกับตารางที่ 4.9 และ 4.16 ที่แสดงสีของกล้วยหอมทองก่อนนำมาเก็บรักษา พบว่า ค่า L , a^* และ b^* เปลี่ยนแปลงไปจากเดิมโดยที่ค่า L มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อนำมาเก็บรักษา ขณะที่ค่า a^* มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเช่นกันและยังอยู่ในช่วงค่าที่ยังเป็นลบและค่า b^* ยังคงอยู่ในช่วงค่าที่เป็นบวกเช่นเดิม ดังนั้นจึงทำให้ลักษณะปรากฏของสีเปลือกกล้วยหอมทองมีการเปลี่ยนแปลงไปตั้งแต่สีเขียว เขียวอ่อน เหลือง จนกระทั่งเหลืองและมีจุดสีดำเกิดขึ้น (ระยะสุกงอม) ซึ่งโดยปกติผลไม้จะมีการสร้างเม็ดสีเขียวย้อนมา แต่เมื่อระยะเวลาในการเก็บรักษาเพิ่มขึ้นจะมีการสร้างเม็ดสีอื่นขึ้นมาทดแทน เช่น คาโรทีนอยด์ (Carotenoids) เป็นรงควัตถุที่มีสีเหลือง ส้ม แดงและน้ำตาล ซึ่งจะเป็นการไปกระตุ้นการทำลายคลอโรฟิลล์อีกด้วย ด้วยเหตุนี้จึงมีการเปลี่ยนแปลงจากสีเขียวไปเป็นสีเหลือง (दनय बुणยเกียรติ, 2540) และเมื่อเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงสีของเปลือกกล้วยหอมทองระหว่างชุดควบคุมกับการใช้วัสดุฐานซีโอโลต์ดูดซับก๊าซเอทิลีนพบว่า เมื่อมีการบรรจุวัสดุฐานซีโอโลต์ที่ผ่านกระบวนการกระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 1 M ในบรรจุภัณฑ์การเก็บรักษากล้วยหอมทอง จะช่วยชะลอการสุกของกล้วยหอมทองได้ดีที่สุดของแต่ละสารละลายเบส เนื่องจาก เปลือกของกล้วยหอมทองยังคงมีสีเขียวและค่าสีของ L , a^* และ b^* ยังคงมีค่าใกล้เคียงกับค่าสีของเปลือกกล้วยก่อนนำมาทำการเก็บรักษา

4.3.3 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความหวาน (Sweetness) ของกล้วยหอมทอง

ทำการทดลองโดยชั่งน้ำหนักของเนื้อกล้วยหอมทอง 1 กรัมผสมกับน้ำปราศจากไอออน (DI Water) ปริมาณ 5 มิลลิลิตร หลังจากนั้นคนให้เข้ากัน แล้วหยดลงบนมาตรวัดดัชนีหักเหด้วยมือ (Hand Held Refractometer) ซึ่งจะวัดค่าดัชนีหักเหของสารละลาย โดยจะวัดเป็นปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ (Total Soluble Solids) ซึ่งจะบันทึกค่าการทดสอบความหวานในหน่วยองศาบริกซ์ ($^{\circ}$ Brix) โดย 1 องศาบริกซ์ จะมีค่าความเข้มข้นเทียบเท่าร้อยละ 1 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรของของแข็งในสารละลาย

ตารางที่ 4.17 ค่าของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ของเนื้อกล้วยหอมทองที่มีวัสดุฐานซีโอไลต์ที่ผ่านการปรับปรุงต่างๆบรรจุอยู่ในบรรจุภัณฑ์

วันที่	0	1	2	3	4	5	6	7
ไม่มีตัวดูดซับ	1.15	1.00	1.30	1.20	1.50	4.50	4.60	4.60
มีตัวดูดซับ	Ze/KMnO ₄	1.15	0.90	1.00	0.80	3.20	1.80	3.80
	Ze-1M KOH/KMnO ₄	1.15	1.00	1.10	1.10	1.20	1.70	3.00
	Ze-2M KOH/KMnO ₄	1.15	0.90	1.20	0.80	1.00	1.80	2.50
	Ze-3M KOH/KMnO ₄	1.15	1.00	1.30	0.60	1.20	1.50	1.80
	Ze-1M NaOH/KMnO ₄	1.15	1.00	1.10	1.00	1.20	1.60	1.80
	Ze-2M NaOH/KMnO ₄	1.15	0.80	1.00	0.80	1.50	1.50	2.00
	Ze-3M NaOH/KMnO ₄	1.15	1.00	1.30	0.90	1.10	1.60	2.00

จากการศึกษาความหวานของเนื้อกล้วยหอมทองในทุกชุดการทดลองหลังเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ดังตารางที่ 4.17 พบว่า ค่าความหวานมีแนวโน้มที่สูงขึ้นในทุกชุดการทดลองเมื่อเวลาในการเก็บรักษาผ่านไป โดยเห็นการเปลี่ยนแปลงได้อย่างชัดเจนที่การทดลองชุดควบคุม โดยค่าความหวานนั้นเป็นสัดส่วนระหว่างของแข็งที่ละลายน้ำได้ต่อปริมาณกรดในเนื้อผลไม้ (Camargo et al., 2007) และเมื่อเวลาในการเก็บรักษาของกล้วยเพิ่มขึ้น จะมีการเพิ่มของปริมาณน้ำตาล เนื่องจากมาจากการย่อยสลายอาหารสะสมพวกแป้งหรือคาร์โบไฮเดรตภายในเนื้อเยื่อที่มากขึ้น (दन्य बुन्येयर्त्ति, 2547) ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับบรรจุภัณฑ์ที่มีวัสดุฐานซีโอไลต์บรรจุอยู่ พบว่า ค่าความหวานของกล้วยหอมทองนั้นมีค่าเพิ่มขึ้นช้าลงและค่าต่ำกว่าในทุกชุดการทดลอง นอกจากนี้ยังพบว่ากล้วยหอมทองที่มีวัสดุฐานซีโอไลต์แบบผ่านการกระตุ้นด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 1M และ

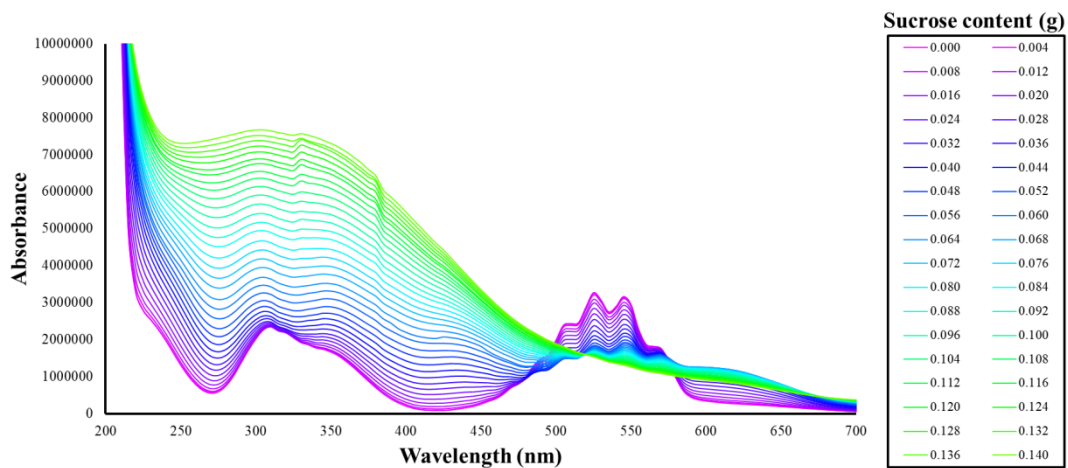
แบบผ่านการกระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 1M บรรจุอยู่ใน จะแสดงค่าความหวานต่ำที่สุดในแต่ละเงื่อนไขสารละลายเบสอยู่ที่ 1.8 และ 1.9 องศาบริกซ์ ตามลำดับตลอดระยะเวลาการทดสอบเมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุมที่ให้ค่าความหวานในช่วง 1.15 ถึง 4.60 องศาบริกซ์ และเมื่อนำวัสดุฐานซีโอไลต์แบบผ่านการกระตุ้นด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และแบบผ่านการกระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ให้ค่าความเข้มข้น 1M ยังให้ค่าความหวานในช่วง 1.15 ถึง 1.18 องศาบริกซ์และในช่วง 1.15 ถึง 1.19 องศาบริกซ์ ซึ่งต่ำกว่า วัสดุฐานซีโอไลต์แบบไม่ผ่านการกระตุ้นด้วยสารละลายเบสในช่วง 1.15 ถึง 3.80 องศาบริกซ์

4.4 การวิเคราะห์ลักษณะการเปลี่ยนแปลงทางสี

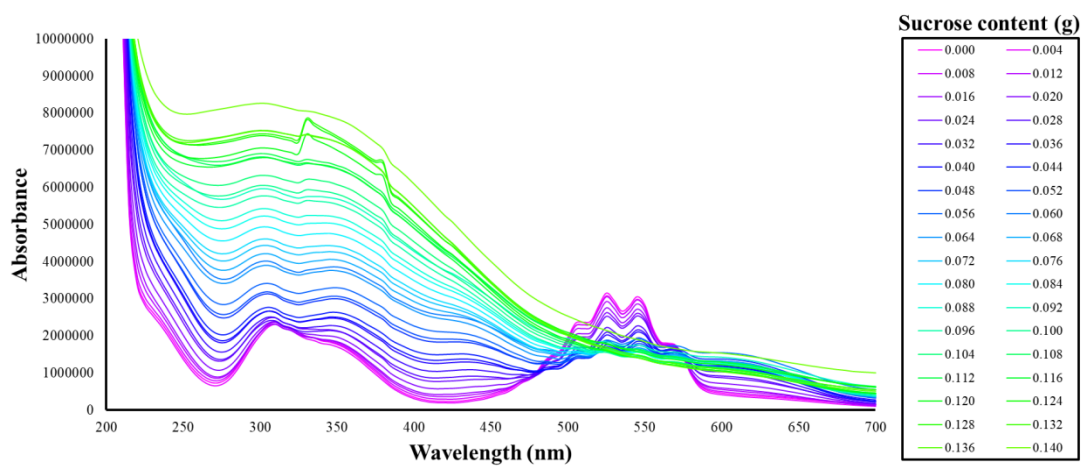
4.4.1 การศึกษาหาค่าความยาวคลื่นที่ให้ค่าการดูดกลืนแสง ที่เกิดการเปลี่ยนแปลงในแต่ละสีโดยเครื่องอัลตราไวโอเลตสเปกโตรโตโฟโตมิเตอร์ โดยทำการวัดที่ความยาวคลื่น 200-700 นาโนเมตร (nm)

4.4.1.1การทดลองแบบที่ 1 สารละลายที่เกิดจากโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต 0.01 กรัมผสมลงในน้ำปราศจากไอออน 200 มิลลิลิตร หลังจากนั้นเติมเติมสารละลายเบสโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.015 โมลาร์ และเติมน้ำตาลปริมาณ 0.004 กรัมในแต่ละครั้ง

4.4.1.2การทดลองแบบที่ 2 สารละลายที่เกิดจากโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต 0.01 กรัม ผสมลงในน้ำปราศจากไอออน 200 มิลลิลิตร หลังจากนั้นเติมเติมสารละลายเบสโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.015 โมลาร์ และเติมน้ำตาลปริมาณ 0.004 กรัมในแต่ละครั้ง



ภาพที่ 4.8 การเปลี่ยนแปลงค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต-โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์



ภาพที่ 4.9 การเปลี่ยนแปลงค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต-โซเดียมไฮดรอกไซด์

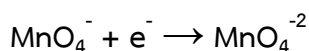
จากภาพที่ 4.8 จะพบว่า แบบที่ 1 เมื่อมีการเติมน้ำตาลในปริมาณที่มากขึ้นจะทำให้สารละลายเกิดการเปลี่ยนแปลงสีจาก สีม่วง ไป สีนํ้าเงิน สีฟ้า สีเขียวและสีเหลือง ตามลำดับ โดยเริ่มต้นจาก สีม่วงจะมีค่าการดูดกลืนแสง 520 ถึง 550 นาโนเมตร และหลังจากนั้นค่าการดูดกลืนแสงเปลี่ยนไปที่ 550 ถึง 580 นาโนเมตร ซึ่งจะปรากฏสีนํ้าเงิน ต่อมาเปลี่ยนเป็นสีฟ้า เพราะค่าการดูดกลืนแสงในช่วง 590 ถึง 620 นาโนเมตร หลังจากนั้นเปลี่ยนเป็นสีเขียว มีค่าการดูดกลืนแสงช่วงที่ 630 ถึง 700 นาโนเมตรและสีเหลืองที่มีค่าการดูดกลืนแสงในช่วง 420 ถึง 490 นาโนเมตร ตามลำดับ ขณะที่แบบที่ 2 จะพบการเปลี่ยนแปลงสีเกิดแบบเดียวกับแบบที่ 1 คือ จากสีม่วง ไป สีนํ้าเงิน สีฟ้า สีเขียวและสีเหลือง เนื่องจากเกิดฟิคและมีค่าการดูดกลืนแสงในช่วงของสีนั้นเช่นเดียวกัน แต่ลักษณะการเปลี่ยนแปลงสีจะไม่ชัดเจนเท่ากับแบบที่ 1 สังเกตได้จากภาพที่ 4.9 ที่มีลักษณะของเส้นกราฟที่มีการเปลี่ยนแปลงแบบไม่เป็นระเบียบ บางส่วนหายไป บางส่วนเกิดการซ้อนทับกัน เนื่องจาก ความเป็นเบสของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่ำกว่าโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ และแตกตัวในน้ำได้น้อยกว่า นอกจากนี้ โซเดียมไฮดรอกไซด์ เมื่อแตกตัวในน้ำแล้วจะได้เป็นโซเดียมไอออนบวก ซึ่งจะจับเข้าคู่กับเปอร์แมงกาเนตแต่ไม่มีการแลกเปลี่ยนไอออนกัน ซึ่งเรียกว่า Counter ion ซึ่งการเข้าคู่ที่เกิดขึ้นนั้นไอออนภายในสารละลายจะมีความแตกต่างจากโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต จึงทำให้ค่าการดูดกลืนแสงของเปอร์แมงกาเนตไม่เสถียร ซึ่งแตกต่างจากสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เมื่อละลายน้ำแล้วจะแตกตัวเป็นเกิดโพแทสเซียมไอออนบวกและจับเข้าคู่กับเปอร์แมงกาเนต ซึ่งทำให้เกิด Counter ion ในสารละลายเป็นชนิดเดียวกันโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ค่าการดูดกลืนของแสงจึงมีความเสถียรมากกว่า จึงเป็นที่มาของสารละลายที่ผสมโซเดียมไฮดรอกไซด์เมื่อเติมนํ้าตาลในปริมาณมากขึ้น แล้วเกิดการซ้อนทับกันของฟิคและเส้นกราฟดังกล่าว ดังนั้น สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เติมลงไปจะทำให้ปฏิกิริยาของสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต จะมีการเกิดการเปลี่ยนแปลงสีที่ไม่ชัดเจนเท่าสารละลายที่มีโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ผสมอยู่ (Guang-Xia Li., 2012)

4.4.2 การศึกษาปริมาณน้ำตาลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสี

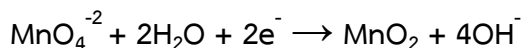
จากที่กล่าวมาในหัวข้อที่ 4.4.1 การเติมปริมาณน้ำตาลครั้งละ 0.004 กรัมเข้าไปในสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตผสมสารละลายเบสแต่ละชนิด จะเกิดการเปลี่ยนแปลงสีของสารละลายที่เหมือนกันซึ่งเริ่มต้นจากสีม่วง สีนํ้าเงิน สีฟ้า สีเขียวและสีเหลือง ตามลำดับ แต่ ปริมาณน้ำตาลจะต้องพอเพียงที่ก่อให้เกิดปฏิกิริยาด้วย โดยการเปลี่ยนแปลงสีที่เกิดขึ้นนั้น เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนเลขออกซิเดชันของแมงกานีสภายในปฏิกิริยารีดอกซ์ (Redox) ระหว่าง สารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตและน้ำตาล ภายใต้งานต้องมีสารละลายเบสเข้าไปผสม ซึ่ง โพแทสเซียมเปอร์แมงกา

เนตเมื่อละลายน้ำ จะเกิดการแตกตัวและแลกเปลี่ยนไอออนกัน เรียกว่า ตัวถูกรีดิวซ์หรือตัวออกซิไดซ์ ทำหน้าที่รับอิเล็กตรอน ขณะที่น้ำตาลหรือซูโครสที่เข้าทำปฏิกิริยาด้วย มีสูตรทางเคมีคือ $C_{12}H_{22}O_{11}$ และจัดเป็นตัวถูกออกซิไดซ์หรือตัวรีดิวซ์ จะทำหน้าที่จ่ายอิเล็กตรอน โดยในการเกิดปฏิกิริยาจะเกิด 2 ขั้นตอน (George W. Luther., 2016)

ขั้นที่ 1 เปอร์แมงกาเนตไอออน (MnO_4^-) ของโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตจะถูกรีดิวซ์ให้เป็นแมงกาเนตไอออน (MnO_4^{2-}) จากเลขออกซิเดชัน +7 (สีม่วงแดง) ไปเป็น +6 (สีเขียว) แต่ภายในสารละลายยังเกิดการผสมกันของสี จึงทำให้เห็นสารละลายปรากฏสีน้ำเงินและสีฟ้าดังกล่าวด้วยตามสมการต่อไปนี้



ขั้นที่ 2 แมงกาเนตไอออน (MnO_4^{2-}) ถูกรีดิวซ์อีกครั้งกลายเป็นแมงกานีสไดออกไซด์ (MnO_2) จากเลขออกซิเดชัน +6 (สีเขียว) ไปเป็น +4 (สีน้ำตาล) แต่เนื่องจากแมงกานีสไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นเป็นอนุภาคนาขนาดเล็กและตกตะกอนภายในสารละลาย จึงทำให้เห็นสารละลายปรากฏสีเหลืองตามสมการต่อไปนี้



บทที่ 5

สรุป วิจารณ์ผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการทดลอง

6.1.1 การศึกษาโครงสร้างจุลภาคของอนุภาคซีโอไลต์ที่ไม่ผ่านกระบวนการกระตุ้นด้วยสารละลายเบสและผ่านการกระตุ้นด้วยสารละลายเบส (โซเดียมไฮดรอกไซด์และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์) พบว่า โครงสร้างจุลภาคของอนุภาคซีโอไลต์ที่ผ่านกระบวนการกระตุ้นด้วยเบส ส่งผลให้มีขนาดผลึกที่เล็กลงจากเดิมและมีการกระจายตัวที่ดีขึ้น ไม่จัดเรียงตัวแบบรวมกันเป็นกลุ่มก้อน นอกจากนี้เมื่อนำอนุภาคซีโอไลต์ไปแช่ในสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตแล้ว พบว่า อนุภาคซีโอไลต์ที่ผ่านกระตุ้นด้วยสารละลายเบสนั้นมีการดูดซับสีม่วงของโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตเข้าไปภายในโครงสร้างได้ดีขึ้นเช่นกัน

6.1.2 การศึกษาการยืดยาวการเก็บรักษาของกล้วยหอมทองด้วยวัสดุฐานซีโอไลต์ที่ไม่ผ่านกระบวนการกระตุ้นด้วยสารละลายเบสและผ่านการกระตุ้นด้วยสารละลายเบส (โซเดียมไฮดรอกไซด์และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์) ความเข้มข้นที่แตกต่างกัน และบรรจุอยู่ในบรรจุภัณฑ์เป็นระยะเวลา 5 วัน พบว่า วัสดุฐานซีโอไลต์แบบที่ผ่านการกระตุ้นด้วยสารละลายเบสโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 3 โมลาร์ และแบบที่ผ่านการกระตุ้นด้วยสารละลายเบสโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 1 โมลาร์ สามารถดูดซับก๊าซเอทิลีนที่ปลดปล่อยออกมาจากกล้วยหอมทองได้ดีที่สุด เนื่องจาก ปรากฏสีให้เห็นที่มีเกิดการเปลี่ยนแปลงสีอย่างชัดเจนมากที่สุดจากสีม่วงไปเป็นสีน้ำตาลและเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุฐานซีโอไลต์ที่ไม่ได้มีการดูดซับก๊าซเอทิลีน (ชุดควบคุม) ในแต่ละภาวะเบสที่แตกต่างกัน และวัสดุฐานซีโอไลต์แบบที่ไม่ผ่านกระบวนการกระตุ้นด้วยสารละลายเบส เกิดการเปลี่ยนแปลงสีปรากฏแต่ยังไม่ชัดเจนเท่ากับแบบที่ผ่านกระบวนการกระตุ้นด้วยเบส

6.1.3 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงสีเปลือกของกล้วยหอมทองและปริมาณน้ำตาลที่เปลี่ยนแปลงไป ด้วยบรรจุภัณฑ์ที่มีวัสดุฐานซีโอไลต์บรรจุอยู่ในเปรียบเทียบกับไม่ได้บรรจุวัสดุฐานซีโอไลต์อยู่ในกล่องให้สุกตามธรรมชาติ พบว่า สีเปลือกของกล้วยหอมทอง มีแนวโน้มความสว่างค่า (L) เพิ่มขึ้นจากการสุกของกล้วยหอมทองและหลังจากนั้นจะมีค่าลดลงเล็กน้อย ขณะที่ค่าความเป็นสีเขียว-แดง (a^*) มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเช่นกันและยังอยู่ในช่วงค่าที่ยังเป็นลบ เนื่องจากการสร้างเม็ดสีเหลืองแดงของแคโรทีนอยด์ และค่าความเป็นสีน้ำเงิน-เหลือง (b^*) มีค่าสูงขึ้นและยังคงอยู่ในช่วงค่าที่เป็นบวกเช่นเดิม มาจากการทำลายคลอโรฟิลล์ในเปลือกของกล้วยหอมทอง นอกจากนี้ความหวานของกล้วยมี

แนวโน้มที่สูงขึ้นเช่นเดียวกัน เมื่อเวลาในการเก็บรักษาเพิ่มขึ้น มากไปกว่านั้นเมื่อเทียบกับบรรจุภัณฑ์ที่มีวัสดุฐานซีโอไลต์ พบว่า วัสดุฐานซีโอไลต์ที่ผ่านกระบวนการกระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 1 โมลาร์ ในบรรจุภัณฑ์การเก็บรักษากล้วยหอมทอง จะช่วยชะลอการสุกของกล้วยหอมทองได้ดีที่สุดของแต่ละสภาวะของสารละลายเบสเพราะ ค่า L , a^* และ b^* ของเปลือกกล้วยมีค่าใกล้เคียงกับค่าสีของเปลือกกล้วยก่อนเก็บรักษา นอกจากนี้ยังช่วยให้ค่าความหวานมีค่าต่ำกว่าอยู่ที่ 1.8 และ 1.9 เปอร์เซ็นต์บริกซ์ ตามลำดับ เมื่อเทียบกับชุดควบคุมที่มีค่าความหวานถึง 4.60 เปอร์เซ็นต์บริกซ์ จึงเป็นอีกเหตุผลยืนยันว่าวัสดุฐานซีโอไลต์ดังกล่าวที่ช่วยชะลอการสุกของ กล้วยหอมทอง

6.1.4 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางสีของสารโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตในสภาวะที่เป็นเบส เมื่อมีการเพิ่มปริมาณน้ำตาล พบว่า การเปลี่ยนแปลงสีของสารละลายนั้นมีการเปลี่ยนแปลงสีม่วง ไปสีน้ำเงิน สีฟ้า สีเขียวและสีเหลือง ตามลำดับ เมื่อปริมาณน้ำตาลเพิ่มมากขึ้น และยังคงสีเดิมนั้นอยู่ถ้าปริมาณน้ำตาลยังไม่ถึงจุดที่เกิดปฏิกิริยาของการเปลี่ยนแปลงสีต่อไป ซึ่งสีที่เกิดขึ้นบางสีน้ำไม่ใช่เกิดจาก สีที่มาตามลำดับเลขออกซิเดชันของแมงกานีส แต่เกิดขึ้นจากการผสมสีกันภายในสารละลายจึงทำให้เห็นสีปรากฏเป็นสีนั้น

6.2 วิจารณ์ผลการทดลอง

ในการทดลองการดูดซับก๊าซเอทิลีนจากกล้วยหอมทองด้วยวัสดุฐานซีโอไลต์ที่ถูกบรรจุไว้ในบรรจุภัณฑ์และไม่ได้ถูกบรรจุภายในบรรจุภัณฑ์ ให้ผลที่แตกต่างกันมากไปหรือไม่ชัดเจนในบางชุดของการทดลอง เช่น การเกิดการเปลี่ยนแปลงสีปรากฏ (ค่า L , a^* และ b^*) ของวัสดุดูดซับเอทิลีน ที่อาจจะเกิดการผิดเพี้ยนไปในบางค่าของการคำนวณ จึงไม่สามารถนำมาใช้วิเคราะห์ได้โดยตรง ดังนั้น จึงต้องมีการทดลองซ้ำหลายครั้งแล้วนำค่าที่ได้มาหาค่าเฉลี่ยของชุดค่าการทดลองนั้น แล้วนำค่าเฉลี่ยที่ได้มาใช้ในการวิเคราะห์แทน เช่นเดียวกับสีของเปลือกกล้วยหอมทอง ที่สีบางบริเวณผิวเปลือกจะไม่เท่ากันเนื่องจากบางส่วนเริ่มเกิดการสุกขึ้น ดังนั้นในการวัดจึงต้องทำการวัดเป็น 3 ส่วน ซึ่งได้แก่ ส่วนปลายทั้ง 2 ข้างและส่วนตรงกลาง แล้วนำค่าที่ได้มาคำนวณหาค่าเฉลี่ยเช่นกัน ดังนั้น จึงจะต้องคัดเลือกกล้วยหอมทองที่มีขนาด น้ำหนักและสีเปลือกก่อนนำมาเก็บรักษาให้มีลักษณะใกล้เคียงกัน เพื่อให้สามารถทดลองแล้วเกิดค่าความผิดพลาดน้อยที่สุด นอกจากนี้การวัดปริมาณน้ำตาลของเนื้อกล้วยหอมทอง ไม่สามารถวัดจากเนื้อผลได้โดยตรง เนื่องจากเนื้อกล้วยหอมทองมีน้ำเป็นองค์ประกอบน้อย จึงต้องทำการนำเนื้อปริมาณที่เท่ากันมาบดผสมน้ำ แล้วจึงทำการวัดและกล้วยหอมทองที่นำมาใช้ในการวัดปริมาณน้ำตาลจะ

เป็นการวัดแบบ 1 วันต่อ 1 ลูก ไม่สามารถนำมาใช้ซ้ำได้เนื่องจาก เนื้อกล้วยเมื่อสัมผัสกับอากาศแล้วจะเกิดผิวสีดำที่เนื้อ ถ้านำไปวัดแล้วค่าที่ได้จะเกิดการผิดพลาดขึ้นได้

6.3 ข้อเสนอแนะ

6.3.1 ในกระบวนการกระตุ้นของอนุภาคของซีโอไลต์เพื่อเตรียมวัสดุฐานซีโอไลต์ดูดซับเอทิลีนสามารถทำได้หลายกรณี นอกจากวิธีการกระตุ้นทางเคมีด้วยเบส ยังมีวิธีการกระตุ้นทางเคมีที่เป็นกรดหรือเกลือ เช่น กรดไฮโดรคลอริก เกลือโซเดียมคลอไรด์ และการกระตุ้นทางกายภาพ โดยการนำไปอบแล้วให้ความร้อนเป็นเวลาที่เหมาะสม ควรทำการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบกัน เพื่อให้ทราบถึงสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมวัสดุฐานดังกล่าว

6.3.2 ศึกษาเปรียบเทียบกับผลไม้ชนิดอื่นในการทดลองเพิ่มเติม เพื่อทดสอบประสิทธิภาพการยืดอายุด้วยวัสดุฐานซีโอไลต์ดังกล่าว

6.3.3 ศึกษารูปแบบการนำวัสดุฐานซีโอไลต์เพื่อการดูดซับก๊าซเอทิลีนไปใช้งานในรูปแบบอื่นๆ เช่น เจลอัดเม็ด เป็นต้น เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพในการดูดซับที่ดีขึ้น

รายการอ้างอิง

1. Charkhi , K.Hossein , K. Mohammad. Powder Technology 203, 389-396 (2010)
2. Akimkhan, A. M., 2012. Ion Exchange Technologies: Structural and Ion-Exchange Properties of Natural Zeolite. Intech.
3. Bendahou, D., Bendahou, A., Grohens, Y., Kaddami, H., 2015. New nanocomposite design from zeolite and poly(lactic acid). Industrial Crops and Products 72, 107–118.
4. Breck, D. W. 1974. Zeolite Molecular Sieves:Structure, Chemistry and Use, Wiley and Sons, London
5. Buchanan, B. B., Gruissem, W. and Jones, R. L. 2000. Biochemistry and Molecular Biology of Plants, Rockville, MD: American Society of Plant Physiologists : 337-352
6. Burcu Erdogan , Meryem Sakizci and Ertugrul Yorukogullari. Characterization and ethylene adsorption of natural and modified clinoptilolites. Applied Surface Science 254 (2008) 2450-2457
7. Carlos Alberto Ríos ReyesI, Craig WilliamsII; Oscar Mauricio Castellanos AlarcónII. 2013. Nucleation and growth process of sodalite and cancrinite from kaolinite-rich clay under low-temperature hydrothermal conditions.
8. Comyns, A.E., 1999. Molecular Sieves: Principles of Synthesis and Identification. R. Szostak. Applied Organometallic Chemistry, 13(3) : 209-210.
9. Cristina N. Butterfield. 2013. Mn(II,III) oxidation and MnO₂ mineralization by an expressed bacterial multicopper oxidase. vol. 110 no. 29
10. Dong, J., Wang, Y., Zhou, M., 2002.The vibrational spectrum of the MnO₂⁻ and MnO₄⁻anions in solid argon.Chemical Physics Letters 364, 511–516.
11. Emadpour, M., Rezaei Kalaj, Y., Omrani, A., Ghareyazie, B. and Mohammadi, Gh., 2009. Effect of ethylene absorption using nano-particles on the storage and quality characteristics of apricot. Agricultural Scientific Information and Documentation Centre, Agricultural Research and Education Organization
12. Fereshteh Khosravi , Mahdyeh khosravi and Elnaz Pourseyedi (2015). Investigation on the effect of nano zeolite and potassium permanganate on the shelf life wxtending and quality of red delicious apple.

13. Gadepalle, V.P., Ouki, S.K., Herwijnen, R.V. and Hutchings, T. 2007. Immobilization of heavy metals in soil using natural and waste materials for vegetation establishment on contaminated sites. *Soil & Sediment Contamination*, 16(2) : 233-251.
14. George W. Luther. 2016. *Inorganic Chemistry for Geochemistry and Environmental Sciences. Fundamentals and Applications.*
15. Gordon L. Robertson. 2006. *Food Packaging: Principles and Practice*, Second Edition.
16. Guang-Xia Li , Yao-Hui Huaug , Teng-Chien Chen , Yu-Jen Shih and Hui Zhang . 2012. Reduction and Immobilization of Potassium Permanganate on Iron Oxide Catalyst by Fluidized-Bed Crystallization Technology. *Appl. Sci.* 2, 166-174
17. Hansen, C., Quake, S. R. (2003). Microfluidics in structural biology: smaller, faster better. *Current Opinion in Structural Biology* 13(5) : 538-544
18. John R. Ferraro, Louis J. Basile . 2015. *Fourier Transform Infrared Spectra: Applications to Chemical Systems. Volume 4 . ACADAMIC PRESS, INC.*
19. Kader, A.A. 1985. *Modified Atmospheres and Low-pressure Systems during Transport and Storage* : 58-64.
20. Kader, A.A. 1987. *Respiration and Gas Exchange of Vegetables. Postharvest Physiology of Vegetables* : 25-43.
21. Kader, A.A., R.F. Kasmire, F.G. Mitchell, M.S. Reid, N.F. Sommer and J.F. Thompson. 1985. *Postharvest Biology and Technology: An Over. Postharvest Technology of Horticultural Crops* : 3- 7.
22. Kays, S.J. 1991. *Postharvest Physiology of Perishable Plant Products. An AVI Book. Van Nostrand Reinhold. New York* : 532.
23. Li, G. 2005. FTIR studies zeolite materials: characterization and environmental applications. Ph.D. diss., University of Iowa
24. Li, G., 2005. FT-IR studies of zeolite materials: characterization and environmental applications. Iowa Research Online, University of Iowa.
25. M. Simmonds and V. Preedy. 2016. *Nutritional Composition of Fruit Cultivars : Chapter 3 - Nutritional and Biochemical Composition of Banana (Musa spp.) Cultivars . ISBN: 978-0-12-408117-8*
26. Masoumeh Emadpour, Behzad Ghareyazie, Yousef Rezaei Kalaj, Mehrnaz Entesari and Naser Bouzari. 2015. *Effect of the Potassium Permanganate Coated Zeolite*

Nanoparticles on the Quality Characteristic and Shelf Life of Peach and Nectarine. International Journal of Agricultural Technology 2015 Vol.11(5):1263-1273.

27. Noreña, L., Aguilar, J., Torres, M., Gutiérrez, M. and Mugica, V., 2012. Materials and Methods for the Chemical Catalytic Cracking of Plastic Waste. INTECH Open Access Publisher.

28. Ozmichi, F., D. Balkose and S. Ulku. 2001. Natural zeolite polypropylene composite film preparation and characterization. Journal of Applied Polymer Science, 82, 2913-2921.

29. Pelton, R. (2009). Bioactive paper provides a low-cost platform for diagnostics. TrAC Trends in Analytical Chemistry 28(8) : 925-942.

30. R.B.H. Wills and M.A. Warton. 2004. Efficacy of Potassium Permanganate Impregnated into Alumina Beads to Reduce Atmospheric Ethylene. Journal of the American Society for Horticultural Science

31. S.Agnesia Kanimozhi and S.Rajendran. 2010. Aluminum inhibition by potassiumpermanganate and Zn^{2+} . Corrosion Research Centre & Department of Chemistry.

32. Siti Mariana Widayanti¹, Khaswar Syamsu¹, Endang Warsikil and Sri Yuliani. 2016. Effect of natural Bayah zeolite particle size reduction to physico-chemical properties and absorption against potassium permanganate (KMnO₄). AIP Conference Proceedings 1710, 030029 (2016); doi : <http://dx.doi.org/10.1063/1.4941495>

33. Wills, R.H.H., T.H. Lee, D. Graham, W.B. McGlasson and E.G. Hall. 1981. Postharvest : An Introduction to the Physiology and Handling of Fruits and Vegetables. New South Wales University Press Limited, Kensington, N.S.W. Australia : 161

34. Włodzimierz MOZGAWA, Magdalena KRÓL and Katarzyna BARCZYK. 2011. Faculty of Materials Science and Ceramics, AGH University of Science and Technology : FT-IR studies of zeolites from different structural groups : 667-674

35. Xu, X., Wang, J. and Long, Y., 2006. Zeolite-based materials for gas sensors. Sensors, 6(12) : 1751-1764.

36. Y.D. Lestari. Kajian modifikasi dan karakterisasi zeolite alam dari berbagai negara. Prosiding Seminar Nasional Kimia dan Pendidikan Kimia. Jogjakarta. 2010

37. Yaneira Petit de Peña, Wendy Rondón. 2013. Linde Type a Zeolite and Type Y Faujasite as a Solid-Phase for Lead, Cadmium, Nickel and Cobalt Preconcentration and

Determination Using a Flow Injection System Coupled to Flame Atomic Absorption Spectrometry. American Journal of Analytical Chemistry. Vol.4 No.8

38. Yu, K., Kumar, N., Roine, J., Pesonen, M. and Ivaska, A., 2014. Synthesis and characterization of polypyrrole/H-Beta zeolite nanocomposites. RSC Advances, 4(62) : 33120-33126.
39. Zhen-Xue Liu, Min-Whee Cho, Jin-Ook Baeg and Chul Wee Lee. 2006. Removal of Ethylene over $\text{KMnO}_4/\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$. Bull. Korean Chem. Soc. 2006, Vol. 27, No. 12.
40. เบญจมาศ ศิลาชัย, ฉลองชัย แบบประเสริฐ และกัลยาณี สุวิทวัส, 2551. กล้วยหอมทอง เกษตรศาสตร์ 2 คู่มือการปลูกและการดูแล.
41. ดนัย บุญเกียรติ. 2540 . สรีรวิทยาหลังการเก็บเกี่ยวพืชสวน , คณะเกษตรศาสตร์
42. ทะนุพงศ์ กุสุมา ณ อรุยา , 2559. นิตยสารเทคโนโลยีชาวบ้าน
43. พรชัย ราชตะนันท์ และคณะ (2006). การศึกษาเบื้องต้นของการผลิตสารดูดซับเอทิลีน. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. วารสารวิทยาศาสตร์ ฉบับที่5 (พิเศษ) กันยายน-ตุลาคม 2549 หน้า 55.
44. ภัทรสุดา รักทอง และ รินา ภัทรมานนท์. 2013. การพัฒนาไบโอเซนเซอร์แบบกระดาษสู่ระบบการวินิจฉัยโรคใกล้ชิดผู้ป่วย. มหาวิทยาลัยขอนแก่น. 875.
- 44.1.1. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 226 หน้า.
45. สังคม เตชะวงศ์เสถียร. 2536. การปฏิบัติหลังการเก็บเกี่ยวของพืชสวน. ภาควิชาพืชสวน คณะเกษตรศาสตร์มหาวิทยาลัยขอนแก่น : 157
46. สำนักงานเศรษฐกิจเกษตร. 2558. สารสนเทศเศรษฐกิจการเกษตรรายสินค้า ปี 2558. สำนักงานเศรษฐกิจเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. เอกสารสถิติการเกษตรเลขที่ 402.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นาย สรล ยิ้มมงคล
วันเดือนปีเกิด	10 มีนาคม พ.ศ. 2537
วุฒิการศึกษา	ปีการศึกษา 2559: ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมี) เกียรตินิยมอันดับสอง มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ทุนการศึกษา	<div> <div>2556</div> <div>ทุนการศึกษา สหกรณ์ออมทรัพย์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ จำกัด โครงการแลกเปลี่ยนนิสิตระหว่างมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และ Tokyo University of Agriculture (KU-TUA 2013)</div> </div> <div> <div>2557</div> <div>ทุนการศึกษา สหกรณ์ออมทรัพย์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ จำกัด</div> </div> <div> <div>2558</div> <div>ทุนการศึกษา สหกรณ์ออมทรัพย์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ จำกัด</div> </div> <div> <div>2560</div> <div>ทุนวิจัยเพื่อพัฒนาสิ่งประดิษฐ์ จากเงินกองทุนวิจัย มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ตามสัญญาเลขที่ 5/2560</div> </div> <div> <div>2561</div> <div>ทุนสนับสนุนอุดหนุนการวิจัย แผนพัฒนาศักยภาพบัณฑิตรุ่นใหม่ ประจำปี 2561 ระดับปริญญาโท จากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.)</div> </div>
ผลงานทางวิชาการ	<div> <div>2561</div> <div>นำเสนอผลงานวิจัยแบบบรรยายด้วยปากเปล่าหัวข้อ “Preparation and evaluation of ethylene absorber from zeolite A/KMnO₄ composite for monitoring of silk banana (<i>Musa sapientum</i> L.) harvesting” ในงาน The First Materials Research Society of Thailand International Conference 2017 จังหวัดเชียงใหม่</div> </div>

ประเทศไทย และได้รับเลือกให้ตีพิมพ์ลงในวารสาร Chiang
Mai Journal of science.

ชื่อผลงานทางวิชาการ (ลงรายการอ้างอิง)

Yimmongkol, S., P. Pratumpong, S. Boonyuen and C
Pechyen. 2018. Preparation and evaluation of
ethylene absorbers from zeolite A/KMnO₄
composite for monitoring of Silk banana (*Musa
sapientum* L.) ripening. Chiang Mai J. Sci. 2018; 45(x)
: 1-16.