

วัสดุตรวจวัดเอทานอลในอากาศด้วยวิธีทางสี



บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2559
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

TEST MATERIAL FOR ETHANOL IN GAS PHASE BASED ON COLORIMETRIC METHOD

Miss Methika Leeparikhon



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Chemical Engineering

Department of Chemical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2016

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

วัสดุตรวจวัดเอทานอลในอากาศด้วยวิธีทางสี

โดย

นางสาวเมทิกา ลีปริคณห์

สาขาวิชา

วิศวกรรมเคมี

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ ดร.สีรุ้ง ปรีชานนท์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.เหมือนเดือน พิศาลพงศ์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์ ดร.สีรุ้ง ปรีชานนท์)

.....กรรมการ

(ศาสตราจารย์ ดร.บรรเจิด จงสมจิตร)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ดร.อมิตา บุญศิริ)

เมทริก้า ลีปริคณห์ : วัสดุตรวจวัดเอทานอลในอากาศด้วยวิธีทางสี (TEST MATERIAL FOR ETHANOL IN GAS PHASE BASED ON COLORIMETRIC METHOD) อ.ที่ ปรีกษา วิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร.สีรุ่ง ปรีชานนท์, 110 หน้า.

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาวัสดุตรวจวัดเอทานอลในอากาศช่วงระดับความเข้มข้น 0-1,000 พีพีเอ็ม ด้วยวิธีทางสี โดยเอทานอลทำหน้าที่เป็นตัวรีดิวซ์สารประกอบโลหะทรานซิชัน เพื่อหาชนิดของวัสดุรองรับ (กระดาษไนลอน แผ่นซิลิกาเจล และอนุภาคซิลิกอนไดออกไซด์) และชนิดของสารเคมี (โปแทสเซียมไดโครเมต และ โปแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต) ภายใต้สภาวะต่าง ๆ (4 ± 2 , 28 ± 3 และ 28 ± 3 องศาเซลเซียสที่ความชื้นอิ่มตัว) สำหรับการทำให้ปฏิกิริยาเพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสี จากการทดลองพบว่าโปแทสเซียมไดโครเมตที่เคลือบฝังบนอนุภาคซิลิกอนไดออกไซด์นั้นเป็นสารเคมีและวัสดุรองรับที่เหมาะสมที่สุด ในอัตราส่วนปริมาตรของโปแทสเซียมไดโครเมตความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ต่อกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 98 เปอร์เซ็นต์เท่ากับ 3 ต่อ 0.5 สำหรับตรวจวัดเอทานอลในช่วงความเข้มข้น 0-1,000 พีพีเอ็ม อัตราการลดลงของเอทานอลในระบบตรวจวัดในแต่ละวันคือ 15.22-37.68 เปอร์เซ็นต์โดยความเข้มข้นต่อชั่วโมง มีค่ามากกว่าอัตราการรั่วไหลของเอทานอลออกจากระบบ (1.3 เปอร์เซ็นต์ต่อชั่วโมง) อิทธิพลของสิ่งแวดล้อมที่มีผลต่อระบบตรวจวัดพบว่าระบบที่มีอุณหภูมิสูงจะมีอัตราการทำให้ปฏิกิริยาเร็วเร็วกว่าระบบที่มีอุณหภูมิต่ำ และระบบที่มีความชื้นสูงจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงสีของวัสดุตรวจวัดเอทานอลให้มีสีเข้มขึ้น ผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของวัสดุตรวจวัดเอทานอลภายใต้สภาวะอุณหภูมิห้อง อุณหภูมิต่ำและอุณหภูมิห้องที่ความชื้นอิ่มตัวเมื่อตรวจวัดในวันที่ 7 ของการทดสอบ มีช่วงความเป็นเส้นตรงของความเข้มข้นเอทานอลในช่วง 200-600, 200-400 และ 200-800 พีพีเอ็ม มีความว่องไวต่อการตอบสนองคือ -1.39×10^{-6} ($R^2 = 0.9971$), -1.75×10^{-6} ($R^2 = 0.9971$) และ -9.04×10^{-7} พีพีเอ็ม⁻¹ ($R^2 = 0.9849$) และความเข้มข้นของก๊าซเอทานอลต่ำสุดที่สามารถวัดได้ 160, 50 และ 90 พีพีเอ็มตามลำดับ มีเปอร์เซ็นต์ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานการผลิตซ้ำ 10 ครั้ง เท่ากับ 0.82 และการจัดเก็บวัสดุตรวจวัดพบว่าการจัดเก็บในโหลแก้วจะรักษาเสถียรภาพของวัสดุตรวจวัดได้ดีกว่าการจัดเก็บในพลาสติกพอลิเอทิลีน และพบว่าพลาสติกชนิดพอลิเอทิลีนนั้นมีความเหมาะสมที่สุดสำหรับการทดสอบวัสดุห่อหุ้ม (พอลิโพรพิลีน พอลิเอทิลีน และพอลิไวนิลคลอไรด์) กับเม็ดตรวจวัด

ภาควิชา วิศวกรรมเคมี

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ปีการศึกษา 2559

5770451921 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEYWORDS: COLORIMETRIC / ETHANOL / OXIDIZING REAGENT

METHIKA LEEPARIKHON: TEST MATERIAL FOR ETHANOL IN GAS PHASE BASED ON COLORIMETRIC METHOD. ADVISOR: ASSOC. PROF. SEEROONG PRICHANONT, Ph.D., 110 pp.

The aim of this research was to develop a test material for determination of gaseous ethanol in the concentration range 0-1,000 ppm using colorimetric method. In this study, ethanol acted as a reducer for a transition metal compound which changed its color due to the reaction. In this research, types of support (nylon paper, silica gel plate, and silicon dioxide particles) and types of chemical reagents (K_2CrO_7 and $KMnO_7$) were investigated under different conditions (4 ± 2 , 28 ± 3 and 28 ± 3 °C under saturated moisture). It was found that K_2CrO_7 -impregnated silicon dioxide particles showed the best combination of reagent and support. The suitable volumetric ratio of K_2CrO_7 (0.1M) to sulfuric acid (98%) solutions was 3:0.5 for sensing ethanol in a range of 0-1,000 ppm. The daily reduction rate of ethanol in a closed tested system in all cases was in the range of 15.22-37.68% (by concentration) per hour which was more evident than the leakage rate (1.3% per hour) which emphasized the occurrence of the reaction. Moreover, the higher temperature resulted in the faster rate of reaction. The high humidity system caused the changes of the test material colors to a darker tone. The resulting test material, under temperature room, refrigerator room and temperature room with saturated moisture, performed a linear range from 200-600, 200-400 and 200-800 ppm of the ethanol concentration with sensitivity of -1.39×10^{-6} ($R^2 = 0.9971$), -1.75×10^{-6} ($R^2 = 0.9971$) and -9.04×10^{-7} ppm⁻¹ ($R^2 = 0.9849$) and detection limit of 160, 50 and 90 ppm of the ethanol concentration respectively. The reproducibility of the test material 10 identical material was 0.82% RSD. The closed glass container was better than polyethylene plastic container for test material storage. Moreover, it was found that PE is the most competitive for the testing of wrapping plastic materials (PP, PE and PVC) with the test pellet.

Department: Chemical Engineering Student's Signature

Field of Study: Chemical Engineering Advisor's Signature

Academic Year: 2016

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีด้วยความช่วยเหลือจากบุคคลหลาย ๆ ท่าน ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งยินดีและขอขอบคุณจากใจจริงที่ทุกท่านให้การสนับสนุนมาโดยตลอด โดยเฉพาะอย่างยิ่งรองศาสตราจารย์ ดร. สิริรุ่ง ปรีชานนท์ ที่ให้คำปรึกษาและคำแนะนำไม่เพียงแต่ความรู้ที่มอบให้ ยังให้กำลังใจและเป็นທີ່ปรึกษาตลอดจนตรวจทานและแก้ไขเล่มวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนเสร็จสิ้นสมบูรณ์

อาจารย์ ดร.อภิธา บุญศิริ นักวิจัยเชี่ยวชาญ สังกัดศูนย์เทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว ภาควิชาพืชสวน คณะเกษตรกำแพงแสน ที่ได้ให้ความรู้และคำแนะนำเกี่ยวกับพืชสวนและการเกษตรที่เป็นประโยชน์ยังต้องงานวิจัย

ศ. ดร.บรรเจิด จงสมจิตร ที่ได้ให้ความรู้และคำแนะนำเกี่ยวกับการตรวจวิเคราะห์โดยอาศัยเครื่องวิเคราะห์ก๊าซ ตลอดจนให้ยืมเครื่องวิเคราะห์ก๊าซสำหรับการทำวิจัย

นางสาวอังคณา ผ่องผุด สำหรับการให้คำปรึกษาและแนะนำแนวทางในการวิจัย และให้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์ต่อการวิจัย

เจ้าหน้าที่และบุคลากรภาควิชาเคมี ที่ให้ความช่วยเหลือด้านการจัดเตรียมเอกสารที่ใช้ต่าง ๆ และให้คำปรึกษาการจัดตารางการสอบและจัดยืมสถานที่ใช้สอบวิทยานิพนธ์

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณคุณบิดา มารดา และบุคคลรอบข้างทุกคนที่ห่วงใยและเข้าใจ ในปัญหาและอุปสรรคที่ผู้วิจัยได้พบ และอยู่เป็นกำลังใจคอยช่วยเหลือ สนับสนุนในทุก ๆ เรื่อง ตลอดมาจนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสิ้นสมบูรณ์

สารบัญ

หน้า

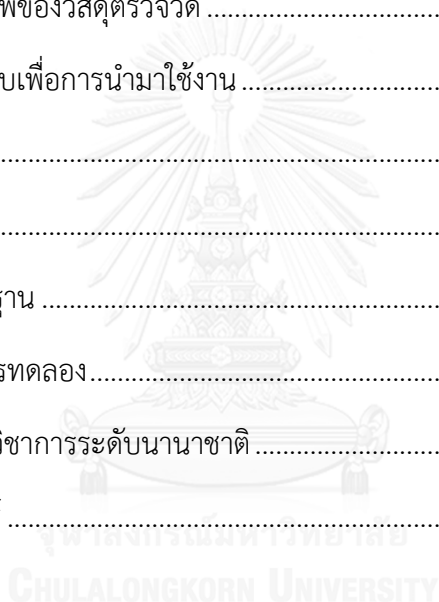
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูปภาพ.....	๗
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	3
1.3.1 คัดเลือกวัสดุรองรับและสารเคมีในอัตราส่วนที่เหมาะสม.....	3
1.3.2 อิทธิพลของสภาพแวดล้อมต่อระบบตรวจวัดเอทานอล.....	3
1.3.3 วิเคราะห์ประสิทธิภาพของวัสดุตรวจวัดเอทานอล.....	4
1.3.4 ออกแบบเพื่อนำมาใช้งาน.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 หลักการและองค์ประกอบของระบบตรวจวัดเอทานอล.....	5
2.1.2 ตัวตรวจจับ (Receptor).....	6
2.1.2.1 โปแทสเซียมไดโครเมต.....	7
2.1.2.2 โปแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต.....	7
2.1.3 ตัวรองรับ (Support).....	8
2.2 ประสิทธิภาพของระบบตรวจวัด.....	9
2.2.1 ช่วงความเป็นเส้นตรง (linear range).....	9

2.2.2 ความไวในการตอบสนอง (sensitivity).....	9
2.2.3 ความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถวัดได้ (detection limit).....	10
2.2.4 การผลิตซ้ำ (reproducibility).....	10
2.2.5 การจัดเก็บ (storage stability).....	10
2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาเคมี	10
2.3.1 ธรรมชาติของสารตั้งต้น ผลิตภัณฑ์ และตัวทำละลาย.....	10
2.3.2 ความเข้มข้นของสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์	10
2.3.3 อุณหภูมิ.....	11
2.3.4 อิทธิพลของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	12
2.3.5 พื้นที่ผิวของสาร.....	12
2.4 ประเภทของผลไม้จากการจำแนกตามอัตราการหายใจ.....	14
2.4.1 ผลไม้ประเภทบ่มสุก (Climacteric fruits).....	14
2.4.2 ผลไม้ประเภทบ่มไม่สุก (Non-climacteric fruits).....	14
2.5 กระบวนการสุกของผลไม้.....	15
2.6 กระบวนการเสื่อมของผลไม้สดตัดแต่งในบรรจุภัณฑ์.....	16
2.7 ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเกิดก๊าซและความเสื่อมในผลไม้.....	17
2.7.1 ธรรมชาติของผลไม้.....	17
2.7.2 ระยะของผลไม้ในช่วงการจัดเก็บผลิตผล.....	18
2.7.3 อุณหภูมิ.....	18
2.7.4 การสะสมของก๊าซในระบบ.....	18
2.7.5 ปัจจัยอื่น ๆ.....	19
2.8 ก๊าซที่มีผลต่อการบ่งชี้คุณภาพของผลไม้.....	19
2.8.1 เอทิลีน.....	19

2.8.2	คาร์บอนไดออกไซด์.....	20
2.8.3	เอทานอล.....	22
2.9	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	23
2.9.1	หลักการและสารเคมีที่ใช้ในการตรวจวัดเอทานอลด้วยวิธีทางสี.....	23
2.9.2	การออกแบบอุปกรณ์สำหรับตรวจวัดเอทานอล.....	25
2.9.3	งานวิจัยการตรวจวัดก๊าซด้วยวิธีทางสีในงานด้านผลไม้.....	27
2.9.4	การออกแบบระบบตรวจจับก๊าซเพื่อใช้ในงานผลไม้.....	29
2.9.5	ช่วงปริมาณก๊าซเอทานอลในผลไม้.....	32
2.9.6	วัสดุรองรับที่ใช้ในงานวิจัยทางสี.....	36
บทที่ 3	วัสดุอุปกรณ์และวิธีการทดลอง.....	37
3.1	วัสดุอุปกรณ์และเคมีภัณฑ์.....	37
3.1.1	วัสดุอุปกรณ์.....	37
3.1.2	เคมีภัณฑ์.....	38
3.2	วิธีการทดลอง.....	39
3.2.1	การเตรียมเอทานอลอิมตัวในอากาศ ที่อุณหภูมิห้อง.....	39
3.2.2	การเตรียมสารละลายเคมีที่ใช้เป็นสารออกซีไดซ์.....	39
3.2.3	การเคลือบฝังสารละลายออกซีไดซ์ลงบนวัสดุรองรับ.....	40
3.2.4	การเตรียมวัสดุตรวจวัดก๊าซเอทานอล.....	40
3.2.5	การเตรียมวัสดุตรวจวัดเอทานอลด้วยการห่อหุ้มพลาสติก.....	41
3.2.6	การเตรียมระบบปิดที่จำลองขึ้นเพื่อตรวจวัดเอทานอล.....	42
3.2.7	การเตรียมระบบการทดลองที่สภาวะต่าง ๆ.....	42
3.2.8	วิธีการวิเคราะห์วัสดุตรวจวัดก๊าซเอทานอลด้วยการถ่ายภาพ.....	43
3.2.9	การวิเคราะห์วัสดุตรวจวัดก๊าซเอทานอลด้วยเครื่องวิเคราะห์การดูดกลืนแสง.....	43

3.2.10 การวิเคราะห์ก๊าซเอทานอลด้วยเครื่องตรวจวัดก๊าซ.....	44
3.2.11 ประสิทธิภาพของวัสดุตรวจวัดก๊าซเอทานอล.....	44
3.2.11.1 ช่วงความเป็นเส้นตรง.....	44
3.2.11.2 ความว่องไวในการตอบสนอง.....	44
3.2.11.3 ความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถวัดได้.....	44
3.2.11.4 การผลิตซ้ำ.....	45
3.2.11.5 การจัดเก็บ.....	45
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์การทดลอง.....	46
4.1 คัดเลือกวัสดุรองรับและสารเคมีออกซิไดซ์ในอัตราส่วนที่เหมาะสม.....	46
4.1.1 อิทธิพลของสารออกซิไดซ์ต่อระบบตรวจวัดเอทานอล.....	46
4.1.2 อิทธิพลของวัสดุรองรับต่อระบบตรวจวัดเอทานอล.....	49
4.1.3 อิทธิพลของอัตราส่วนความเข้มข้นสารออกซิไดซ์และปริมาตรกรดต่อระบบ ตรวจวัดเอทานอล.....	52
4.2 อิทธิพลของสภาพแวดล้อมต่อระบบตรวจวัดเอทานอล.....	53
4.2.1 อิทธิพลของอุณหภูมิต่อระบบตรวจวัดเอทานอล.....	54
4.2.2 อิทธิพลของความชื้นต่อระบบตรวจวัดเอทานอล.....	60
4.3 วิเคราะห์ประสิทธิภาพของวัสดุตรวจวัดเอทานอล.....	64
4.3.1 ช่วงความเป็นเส้นตรง.....	64
4.3.2 ความว่องไวในการตอบสนอง.....	65
4.3.3 ความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถวัดได้.....	65
4.3.4 การผลิตซ้ำ.....	66
4.3.5 การจัดเก็บ.....	67
4.4 การออกแบบเพื่อการนำมาใช้งาน.....	68

4.4.1	อิทธิพลของพลาสติกห่อหุ้มเม็ดตรวจวัดต่อระบบตรวจวัดเอทานอล	68
4.4.2	การออกแบบและการวางตำแหน่งเม็ดตรวจวัดเพื่อใช้งาน	72
บทที่ 5	สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	73
5.1	สรุปผลการทดลอง	73
5.1.1	การคัดเลือกวัสดุรองรับและสารเคมีออกซิไดซ์ในอัตราส่วนที่เหมาะสม.....	73
5.1.2	อิทธิพลของสภาพแวดล้อมต่อระบบการตรวจจับเอทานอล.....	73
5.1.3	ประสิทธิภาพของวัสดุตรวจวัด	74
5.1.4	การออกแบบเพื่อนำมาใช้งาน	74
5.2	ข้อเสนอแนะ	75
	รายการอ้างอิง.....	76
	ภาคผนวก ก กราฟมาตรฐาน	82
	ภาคผนวก ข ข้อมูลผลการทดลอง.....	84
	ภาคผนวก ค การประชุมวิชาการระดับนานาชาติ	101
	ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	110



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติทางเคมีของเอทานอล	6
ตารางที่ 2.2 ประเภทของผลไม้ตามอัตราการหายใจ	14
ตารางที่ 2.3 กระบวนการทางชีวเคมีการสุกของผลไม้	16
ตารางที่ 2.4 ช่วงการผลิตเอทานอลของผลไม้ชนิดต่าง ๆ ในแต่ละอุณหภูมิและเวลา.....	35
ตารางที่ 2.5 คุณสมบัติของวัสดุรองรับชนิดต่าง ๆ ในงานวิจัยด้านการตรวจวัดทางสี	36
ตารางที่ 3.1 สภาวะต่าง ๆ ได้แก่อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ที่วัดได้จากการทดลอง	42
ตารางที่ 4.1 การติดตามการเปลี่ยนแปลงของสีแผ่นตรวจวัดเอทานอลด้วยสารออกซิไดซ์ โปแทสเซียม เปอร์แมงกาเนตบนวัสดุรองรับชนิดต่าง ๆ ในระบบที่ปราศจาก เอทานอล ที่เวลา 0 และ 1 วัน	47
ตารางที่ 4.2 การติดตามการเปลี่ยนแปลงสีแผ่นตรวจวัดเอทานอลด้วยสารออกซิไดซ์ ของแผ่นตรวจวัดของสารออกซิไดซ์โปแทสเซียมไดโครเมตบนวัสดุรองรับ แผ่นซิลิกาเจลในระบบที่ความเข้มข้นเอทานอล 1,000 พีพีเอ็ม ที่เวลา 4 วัน.....	48
ตารางที่ 4.3 การติดตามการเปลี่ยนแปลงของสีแผ่นตรวจวัดเอทานอลด้วยสารออกซิไดซ์ โปแทสเซียมไดโครเมตบนวัสดุรองรับชนิดต่าง ๆ ในระบบที่ปราศจากเอทานอล ในช่วงเวลา 7 วัน และ 14 วัน.....	50
ตารางที่ 4.4 อิทธิพลของวัสดุรองรับชนิดต่าง ๆ ต่อการเปลี่ยนแปลงสีของสารออกซิไดซ์ ในระบบที่ไม่มีเอทานอล	51
ตารางที่ 4.5 อิทธิพลของสัดส่วนความเข้มข้นโปแทสเซียมไดโครเมตและปริมาตรกรดบน วัสดุรองรับซิลิกอนไดออกไซด์ 0.5 กรัม ในเอทานอล 1,000 พีพีเอ็ม ที่อุณหภูมิ 28±3 องศาเซลเซียส ช่วงเวลาการทดลอง 7 วัน.....	52
ตารางที่ 4.6 การติดตามการเปลี่ยนแปลงของสีเม็ดตรวจวัดเอทานอลด้วยสารออกซิไดซ์ โปแทสเซียมไดโครเมต 0.1 โมลาร์ต่อกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 98 เปอร์เซ็นต์ ในสัดส่วนโดยมวล 3 ต่อ 0.5 บนวัสดุซิลิกอนไดออกไซด์ ในระบบเอทานอล 0-1,000 พีพีเอ็ม ช่วงเวลา 7 วัน.....	56

ตารางที่ 4.7 ภาพขยายที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงและกล้องจุลทรรศน์ แบบส่องกราดที่กำลังขยาย 30 และ 50,000 เท่าตามลำดับ	63
ตารางที่ 4.8 คุณสมบัติของพลาสติกชนิดต่าง ๆ.....	68
ตารางที่ 4.9 อิทธิพลของพลาสติกต่อการเปลี่ยนแปลงสีของเม็ดตรวจวัดเอทานอล	69
ตารางที่ 4.10 อิทธิพลของพลาสติกและการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสต่อการเปลี่ยนแปลงสี ของวัสดุตรวจวัดเอทานอล	70
ตารางที่ 4.11 อิทธิพลของปริมาณสารออกซิไดซ์ต่อการเปลี่ยนแปลงสีของเม็ดตรวจวัด เอทานอล	71



สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 องค์ประกอบของแผ่นตรวจวัดเอทานอล.....	8
รูปที่ 2.2 ความไวของเครื่องมือวัด	9
รูปที่ 2.3 อิทธิพลของอุณหภูมิต่อการเกิดปฏิกิริยา.....	11
รูปที่ 2.4 อิทธิพลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการเกิดปฏิกิริยา	12
รูปที่ 2.5 อิทธิพลของพื้นที่ผิวสัมผัสต่อการเกิดปฏิกิริยา.....	13
รูปที่ 2.6 พื้นที่ผิวสัมผัสที่ทำปฏิกิริยาเคมีภายในอนุภาค	13
รูปที่ 2.7 อัตราการหายใจและการผลิตเอทิลีนของผลไม้ประเภทบ่มสุกและบ่มไม่สุก.....	15
รูปที่ 2.8 คาร์บอนไดออกไซด์จากหายใจแบบใช้ออกซิเจน.....	20
รูปที่ 2.9 การหายใจแบบไม่อาศัยออกซิเจน	21
รูปที่ 2.10 ปริมาณเอทานอลในเลือดของผู้ขับขี่ยานยนต์และกฎหมายควบคุม.....	23
รูปที่ 2.11 เครื่องวัดเอทานอลในอากาศด้วยระบบโพโตเซลล์.....	25
รูปที่ 2.12 หลอดตรวจเอทานอลด้วยวิธีทางสี	26
รูปที่ 2.13 ส่วนประกอบของแผ่นตรวจวัดเอทานอลในน้ำลายด้วยวิธีทางสี	26
รูปที่ 2.14 กระดาษตรวจวัดเอทานอลด้วยวิธีทางสีโดยใช้เอนไซม์	27
รูปที่ 2.15 ระบบตรวจวัดคาร์บอนไดออกไซด์	29
รูปที่ 2.16 องค์ประกอบอุปกรณ์ตรวจวัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยวิธีทางสี	29
รูปที่ 2.17 แผ่นตรวจจับก๊าซเอทิลีนด้วยวิธีทางสี	30
รูปที่ 2.18 แผ่นบ่งชี้คุณภาพของผลไม้ด้วยวิธีทางอเล็กทรอนิกส์	31
รูปที่ 2.19 ปริมาณเอทานอลในมะม่วงตัดแต่งสด อุณหภูมิเก็บรักษา 5 องศาเซลเซียส.....	33
รูปที่ 2.20 ปริมาณเอทานอล (พีพีเอ็ม) สัมพันธ์กับคุณภาพของส้มแทนเจอร์น	33
รูปที่ 2.21 ปริมาณเอทานอล (ไมโครลิตรต่อลิตร) และวันที่ทดลองของเกรปฟรุิต และส้มแมนดาริน.....	34

รูปที่ 2.22 ปริมาณเอทานอล (ไม่โครลิตรต่อลิตร) และวันที่ทดลองของผลแอปเปิ้ล.....	34
รูปที่ 3.1 เอทานอลอิมตัวในอากาศ.....	39
รูปที่ 3.2 สารออกซิไดซ์โปแทสเซียมไดโครเมตและโปแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต บนวัสดุรองรับแผ่นซิลิกาเจล	41
รูปที่ 3.3 สารออกซิไดซ์โปแทสเซียมไดโครเมตบนซิลิกอนไดออกไซด์ขึ้นรูปแบบเม็ด ด้วยเครื่องอัด.....	41
รูปที่ 3.4 วัสดุตรวจวัดเอทานอลห่อหุ้มด้วยพลาสติก.....	41
รูปที่ 3.5 ระบบตรวจวัดเอทานอลในสถานะอุณหภูมิห้องที่ความชื้น	43
รูปที่ 4.1 เปอร์เซ็นต์การรั่วไหลของก๊าซเอทานอลจากระบบปิดที่ความเข้มข้นเอทานอล เริ่มต้น 200 และ 1,000 พีพีเอ็ม ที่อุณหภูมิ 28±3 องศาเซลเซียส ในช่วงเวลา 24 ชม.	53
รูปที่ 4.2 ความเข้มข้นของก๊าซเอทานอลในระบบที่มีวัสดุตรวจวัดเอทานอล ตามเวลา 7 วัน	55
รูปที่ 4.3 ค่าการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 200-600 นาโนเมตร ของเม็ดตรวจวัด โปแทสเซียมไดโครเมต 0.1 โมลาร์และกรดซัลฟิวริก 0.5 มล. หลังจาก ทำปฏิกิริยาวันที่ 7 ที่สถานะอุณหภูมิห้องที่ความชื้นอิมตัว	59
รูปที่ 4.4 ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 350 นาโนเมตร ของเม็ดตรวจวัด โปแทสเซียมไดโครเมต 0.1 โมลาร์และกรดซัลฟิวริก 0.5 มล. หลังจาก ทำปฏิกิริยาวันที่ 7 ที่สถานะต่างๆ.....	59
รูปที่ 4.5 การหักเหและการสะท้อนกลับของแสงที่เกิดขึ้นบนวัตถุเปียกชื้น	61
รูปที่ 4.6 การแพร่ของก๊าซในชั้นของเหลว.....	61
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ของค่าการดูดกลืนแสงของวัสดุตรวจวัดเอทานอล หลังจากทำปฏิกิริยาวันที่ 7 และความเข้มข้นของเอทานอลในระบบ	64
รูปที่ 4.8 ค่าการดูดกลืนแสงของสารออกซิไดซ์โปแทสเซียมไดโครเมตเข้มข้น 0.1 โมลาร์ และกรดซัลฟิวริก 98 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราส่วนปริมาตร 3 ต่อ 0.5 ที่ผลิตซ้ำกัน 10 ครั้งตามกระบวนการเดิม.....	66

รูปที่ 4.9 การวัดความเสถียรภาพของวัสดุตรวจวัดเอทานอลด้วยเครื่องดูดกลืนแสง เป็นเวลา 7, 14, 21 และ 28 วัน ที่สภาวะอุณหภูมิห้อง.....	67
รูปที่ 4.10 การออกแบบและวางตำแหน่งวัสดุตรวจวัดสำหรับการใช้งาน	72



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของงานวิจัย

เอทานอลเป็นสารเคมีชนิดหนึ่งที่ถูกใช้อย่างแพร่หลายในภาคอุตสาหกรรมนิยมใช้เป็นตัวทำละลาย สารประกอบในเครื่องสำอาง สารฆ่าเชื้อในทางการแพทย์และเป็นเครื่องดื่มแอลกอฮอล์ อีกทั้งในปัจจุบันเอทานอลยังเป็นแหล่งพลังงานทดแทนสำคัญแห่งหนึ่ง ซึ่งการบริโภค การสูดดม หรือการสัมผัสเอทานอลในปริมาณมากเกินไปจะมีผลกระทบต่อผู้รับ ดังนั้นการตรวจวัดเอทานอลเพื่อให้ทราบถึงปริมาณเอทานอลที่แท้จริงในสินค้าสำหรับการบริโภคและอุปโภคนั้นมีความสำคัญอย่างมากต่อความปลอดภัยของผู้บริโภคและอุปโภค การตรวจวัดเอทานอลมีวิธีที่หลากหลายแต่ละวิธีมีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกัน เช่น การตรวจวัดเอทานอลด้วยเครื่องโครมาโตกราฟสามารถตรวจวัดเอทานอลทั้งสถานะก๊าซและของเหลวนิยมใช้ในงานที่ต้องการความแม่นยำสูง และเหมาะสำหรับสารตัวอย่างที่มีความเข้มข้นต่ำ แต่มีข้อจำกัดคืออุปกรณ์มีขนาดใหญ่ ราคาสูง และอาศัยความชำนาญในการวิเคราะห์ ซึ่งไม่เหมาะกับงานที่ต้องใช้ในภาคสนาม ที่ต้องอาศัยอุปกรณ์พกพา สามารถตรวจวัดได้ในทุกสถานที่ ใช้งานได้ง่ายไม่ต้องใช้ทักษะสูง และสามารถนำมาประยุกต์ใช้เพื่อตรวจปริมาณเอทานอลในผู้ขับขีรถยนต์ เช่นเครื่องตรวจวัดเอทานอลในลมหายใจถูกคิดค้นโดย Dr. Rolla N. Harger และจดสิทธิบัตรเมื่อปี ค.ศ. 1936 โดยใช้หลักการเปลี่ยนสีของสารละลายโปแทสเซียม และต่างทับทิม (Dies, 1983) การใช้สารเคมีเปลี่ยนสี (Borkenstein, 1978; Phillips & Calif, 1988) และการใช้เอนไซม์เพื่อตรวจวัดเอทานอล (Azevedo et al., 2005) รวมถึงการประยุกต์ใช้อุปกรณ์ตรวจวัดเอทานอลของผักผลไม้ที่ปลดปล่อยก๊าซเอทานอลออกมาในสภาวะที่มีการหายใจแบบไม่ใช้ออกซิเจน

โดยทั่วไปผู้บริโภคเลือกซื้อผลไม้สดตัดแต่งโดยพิจารณาข้อมูลวันที่ระบุบนแถบสินค้า บางกรณีวันที่ระบุอาจไม่สามารถบ่งบอกสภาพหรือคุณภาพของผลไม้สดตัดแต่งได้ เนื่องจากหลายสาเหตุ เช่น กระบวนการเก็บเกี่ยว กระบวนการแปรรูป กระบวนการขนส่งที่สภาพแวดล้อมอุณหภูมิและความชื้นเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วไม่เหมาะสมกับการจัดเก็บผลไม้ รวมถึงภาชนะบรรจุ/ห่อที่ใช้พลาสติกไม่เหมาะสม และสารเคลือบผิวสำหรับผลไม้บางประเภท เช่น ส้ม ทำให้อัตราการซึมผ่านของก๊าซที่เข้าและออกในภาชนะบรรจุเสียสมดุล ทำให้เกิดการสะสมของก๊าซและไอน้ำภายในภาชนะ ก๊าซที่เกิดการสะสม เช่น คาร์บอนไดออกไซด์และเอทิลีนมีผลให้เกิดการเสื่อมสภาพของผลไม้เร็ว

ยิ่งขึ้น ประกอบกับผลไม้สดตัดแต่งมีบาดแผลทำให้มีอัตราการหายใจเพิ่มขึ้น และผลิตเอทิลีนสูงขึ้นมากกว่าปกติถึง 5-7 เท่า (เกรียงไกร, 2553) เมื่อเก็บรักษาเป็นเวลานานขึ้น เซลล์พืชเสื่อมสภาพมากขึ้น ทำให้อัตราการหายใจลดลง การสะสมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในผลหรือภายในภาชนะบรรจุเพิ่มมากขึ้น ทำให้เกิดการหายใจแบบไม่ใช้ออกซิเจนและเกิดกระบวนการหมักได้เอทานอลเกิดขึ้น นอกจากนี้กระบวนการหมักยังเกิดจากการทำงานของยีสต์จำพวกแซคคาโรไมซิส ซีรีวิซีอี (*Saccharomyces cerevisiae*) ทำให้เกิดก๊าซเอทานอล (Kudlicki A., 2007; Li et al., 2012) การเกิดเอทานอลสามารถบ่งชี้ว่ามีการเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมีและทางกายภาพ ทำให้เนื้อสัมผัส ความกรอบ ความนุ่ม สี กลิ่น และรสชาติเปลี่ยนไป อีกทั้งบาดแผลของผลไม้เพิ่มอัตราการสูญเสียน้ำ ทำให้เชื้อจุลินทรีย์ต่าง ๆ เข้าไปทำลายเนื้อเยื่อของผลไม้ (Alley, Watada, & Qi, 1999; Jung & Zhao, 2016; Watada, Abe, & Yamuchi, 1990; Willey, 1994; Zhou et al., 2006) ทำให้ผลไม้สดตัดแต่งเสื่อมสภาพ ไม่พึงประสงค์ต่อผู้บริโภคและผู้จำหน่าย เป็นผลให้ผู้บริโภคขาดความมั่นใจในการซื้อและผู้จัดจำหน่ายสูญเสียความน่าเชื่อถือ

จากที่กล่าวข้างต้น พบว่าการอัตราการปลดปล่อยก๊าซเอทิลีน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซเอทานอลจากการผลิตและหายใจของผลไม้มีความสัมพันธ์ต่อการบ่งชี้คุณภาพของผลไม้ มีผู้วิจัยจำนวนหนึ่งศึกษาและพัฒนาแผ่นบ่งชี้การเสื่อมสภาพผลไม้จากก๊าซที่ผลไม้ปลดปล่อยออกได้แก่ แผ่นตรวจวัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ อาศัยหลักการเปลี่ยนแปลงสีย้อมที่สัมพันธ์กับค่าพีเอช โดยค่าพีเอชเปลี่ยนแปลงและเกิดปฏิกิริยาเคมีเมื่อก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สัมผัสกับแผ่นตรวจวัดที่อยู่ในบรรจุภัณฑ์ในพอลิเมอร์ที่ไม่ละลายในน้ำ (Mills et al., 1992; Nakamura & Amao, 2003; Schutting et al., 2013; Weigl et al., 1994) และแผ่นตรวจวัดเอทิลีนสำหรับแอปเปิ้ลด้วยวิธีทางสีอาศัยหลักการเปลี่ยนแปลงเลขออกซิเดชันจากสารละลายโลหะทรานซิชันโมลิบดีนัมที่เคลือบบนแผ่นกระดาษกรองไรโซลูโลสการ ซึ่งได้รับการพัฒนาและจดสิทธิบัตร (Klein et al., 2006; Lang & Hübert, 2011) แผ่นบ่งชี้ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซเอทิลีนมีข้อจำกัดคือสามารถบ่งชี้คุณภาพของผลไม้เฉพาะผลไม้ประเภทบ่มสุก (Climacteric) ไม่เหมาะกับผลไม้ประเภทบ่มไม่สุก (Non-climacteric) (Lang & Hübert, 2011) ดังนั้นการตรวจวัดก๊าซเอทานอลเพื่อบ่งชี้การเสื่อมสภาพของผลไม้จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่ง โดยเมื่อไม่นานนี้ศูนย์วิจัยเทคนิคประเทศฟินแลนด์ได้ศึกษาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ไร้สายตรวจวัดเอทานอลสำหรับผลไม้สดตัดแต่ง (Anoshkin et al., 2013)

งานวิจัยนี้ต้องการศึกษาและพัฒนาวัสดุบ่งชี้ปริมาณเอทานอลในอากาศด้วยวิธีทางสี ในช่วงเอทานอลเข้มข้น 0-1,000 พีพีเอ็มในอากาศ ซึ่งเป็นช่วงที่ผลไม้สดตัดแต่งปลดปล่อยเอทานอลเมื่อเกิดการเน่าเสีย (Dea et al., 2013; Konvipa Silapat, 2013; Pongsri et al., 2007; Rungsinee & Patrati, 2008) และศึกษาการคัดเลือกวัสดุรองรับและสารเคมีในอัตราส่วนที่เหมาะสม รวมถึงศึกษาอิทธิพลของสภาพแวดล้อมที่ส่งผลต่อวัสดุตรวจวัดเอทานอล และวิเคราะห์ประสิทธิภาพของวัสดุตรวจวัดเอทานอล

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

ศึกษาและพัฒนาวัสดุบ่งชี้ปริมาณเอทานอลในอากาศด้วยวิธีทางสี

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

งานวิจัยนี้ต้องการศึกษาและพัฒนาการทำงานของวัสดุตรวจวัดปริมาณเอทานอลในอากาศ โดยใช้ปฏิกิริยาเคมีสำหรับตรวจวัดเอทานอลด้วยวิธีทางสี โดยอาศัยสารออกซิไดซ์ 2 ชนิด ได้แก่ โปแทสเซียมไดโครเมต และโปแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต และใช้กรดซัลฟิวริกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเคมี โดยมีวัสดุรองรับ ได้แก่ กระดาษกรองไนลอน แผ่นซิลิกาเจล และซิลิกอนไดออกไซด์ เพื่อใช้กับระบบปิดที่มีช่วงเอทานอลเข้มข้น 0, 200, 400, 600, 800 และ 1,000 พีพีเอ็มในอากาศ เป็นระยะเวลา 7 วัน

1.3.1 คัดเลือกวัสดุรองรับและสารเคมีในอัตราส่วนที่เหมาะสม

1.3.1.1 อิทธิพลของสารออกซิไดซ์ต่อระบบตรวจวัดเอทานอล

1.3.1.2 อิทธิพลของวัสดุรองรับต่อระบบตรวจวัดเอทานอล

1.3.1.3 อิทธิพลของอัตราส่วนความเข้มข้นสารออกซิไดซ์และปริมาตรกรดต่อระบบตรวจวัดเอทานอล

1.3.2 อิทธิพลของสภาพแวดล้อมต่อระบบตรวจวัดเอทานอล

1.3.2.1 อิทธิพลของอุณหภูมิต่อระบบตรวจวัดเอทานอล

1.3.2.2 อิทธิพลของความชื้นที่ต่อระบบตรวจวัดเอทานอล

1.3.3 วิเคราะห์ประสิทธิภาพของวัสดุตรวจวัดเอทานอล

- 1.3.3.1 ช่วงความเป็นเส้นตรง
- 1.3.3.2 ความว่องไวในการตอบสนอง
- 1.3.3.3 ความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถวัดได้
- 1.3.3.4 การผลิตซ้ำ
- 1.3.3.5 การจัดเก็บ

1.3.4 ออกแบบเพื่อนำมาใช้งาน

- 1.3.4.1 อิทธิพลของพลาสติกห่อหุ้มเม็ดตรวจวัดต่อระบบตรวจวัดเอทานอล
- 1.3.4.2 ออกแบบและวางตำแหน่งเม็ดตรวจวัดเพื่อใช้งาน



บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะเป็นการอธิบายกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการตรวจวัดก๊าซแอลกอฮอล์ด้วยวิธีทางสี หลักการและองค์ประกอบของระบบตรวจวัดเอทานอล ปฏิกริยาทางเคมีของเอทานอล การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบตรวจวัด ปัจจัยที่มีผลต่อจลนพลศาสตร์ของปฏิกริยาเคมี และการประยุกต์ใช้เพื่อตรวจวัดเอทานอลในช่วงที่เหมาะสมกับการตรวจวัดในผลไม้ กระบวนการทางชีวเคมีของผลไม้ กระบวนการและปัจจัยการเสื่อมในผลไม้สดตัดแต่ง ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเกิดก๊าซและความเสื่อมในผลไม้ โดยมีทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องได้แก่หลักการและสารเคมีที่ใช้ในการตรวจวัดเอทานอลด้วยวิธีทางสี งานวิจัยการตรวจวัดก๊าซด้วยวิธีทางสีในงานด้านผลไม้ การออกแบบระบบตรวจจับก๊าซเพื่อใช้ในงานผลไม้ ช่วงปริมาณก๊าซเอทานอลในผลไม้ และการคัดเลือกวัสดุรองรับที่เหมาะสมสำหรับการตรวจวัดก๊าซเอทานอล

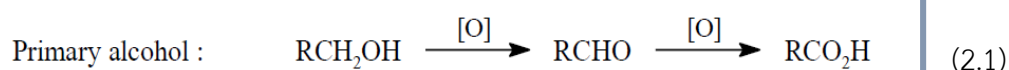
2.1 หลักการและองค์ประกอบของระบบตรวจวัดเอทานอล

เมื่อมีเอทานอลในอากาศในช่วงความเข้มข้นที่ตัวตรวจรับหรือสารเคมีที่จำเพาะต่อเอทานอลวัดได้ ตัวตรวจรับที่ดูดซับอยู่บนวัสดุรองรับจะทำปฏิกริยาเคมีต่อเอทานอล และเปลี่ยนแปลงระดับความเข้มข้นของเอทานอลในรูปแบบของระดับสี โดยการทำงานของระบบตรวจวัดจะทำหน้าที่ร่วมกันของ 3 องค์ประกอบ คือ

2.1.1 สารตัวอย่าง (Analyte)

สารตัวอย่างหรือสารที่ต้องการวิเคราะห์จะเป็นสารที่อยู่ภายในระบบ สำหรับงานวิจัยนี้คือเอทานอลในอากาศที่ความเข้มข้นระดับพีพีเอ็ม การวิเคราะห์ปริมาณเอทานอลสามารถวิเคราะห์ได้หลายวิธี เช่น การวัดจุดเดือด การวัดค่าความถ่วงจำเพาะ การใช้เครื่องวิเคราะห์ก๊าซโครมาโทกราฟี (Li et al., 2012) ซึ่งเป็นวิธีที่สามารถวิเคราะห์ปริมาณเอทานอลได้อย่างแม่นยำและมีประสิทธิภาพ แต่อย่างไรก็ตามเครื่องมือมีราคาสูง มีขนาดใหญ่ทำให้ไม่สะดวกแก่การพกพา และจำเป็นต้องใช้ผู้เชี่ยวชาญจำเพาะในการตรวจวัด

เอทานอลเป็นแอลกอฮอล์ประเภทแอลกอฮอล์ปฐมภูมิ (primary alcohols) เป็นตัวให้อิเล็กตรอนที่ดีหรือเรียกว่าสารรีดิวซ์ (reducing agent) เมื่อทำปฏิกิริยากับสารออกซิไดซ์ จะให้อิเล็กตรอนแก่สารออกซิไดซ์ และเปลี่ยนแปลงเป็นสารประเภทแอลดีไฮด์ (aldehyde) และให้อิเล็กตรอนต่อจนเป็นกรดคาร์บอกซิลิก (carboxylic acid) ดังสมการที่ 2.1 การเกิดปฏิกิริยาเคมีของแอลกอฮอล์ปฐมภูมิกับออกซิไดซิงเอเจนต์



ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติทางเคมีของเอทานอล (Ethanol – Compound Summary)

สูตรโมเลกุล	C ₂ H ₆ O
สถานะ	ของเหลวใส ไม่มีสี ระเหยง่าย และมีกลิ่นเฉพาะตัว
น้ำหนักโมเลกุล	46.07 กรัม/โมล
จุดเยือกแข็ง	-114.1 °C
จุดเดือด	78.32 °C
ความดันวิกฤต	6383.48 กิโลปาสคาล
ความหนาแน่น	0.7893 กรัม/มล.
การละลายน้ำ	ละลายได้ดีมาก
ความหนืด	1.200 mPa·s (cP) at 20.0 °C

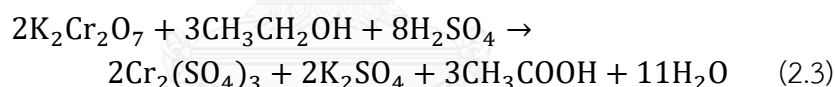
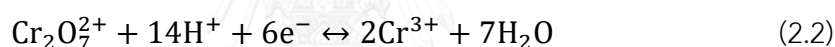
2.1.2 ตัวตรวจจับ (Receptor)

ตัวตรวจจับมีหน้าที่ตรวจจับสารจำเพาะในระบบการวัด โดยจะตรวจจับหรือรับรู้การเปลี่ยนแปลงปริมาณทางกายภาพ เช่น ความร้อน แสง สี เสียง ความดัน และความเข้มข้น งานวิจัยนี้ตรวจวัดปริมาณเอทานอล ดังนั้นตัวตรวจจับต้องเป็นสารที่สามารถทำปฏิกิริยากับเอทานอลที่ต้องการวิเคราะห์อย่างจำเพาะ เช่น สารประกอบเชิงซ้อนโลหะทรานซิชัน (Dies, 1983) หรือ เอนไซม์แอลกอฮอล์ดีไฮโดรจีเนส (Alcohol dehydrogenase) - (Azevedo, Prazeres, Cabral, & Fonseca, 2005) ที่ทำปฏิกิริยาจำเพาะกับเอทานอล

สารเคมีสำหรับตรวจวัดเอทานอลด้วยวิธีทางสีโดยอาศัยสารออกซิไดซ์ (oxidizing agent) เป็นสารที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและตัวมันเองถูกรีดิวซ์ได้รับอิเล็กตรอนจากสารอื่น สารออกซิไดซ์สำหรับปฏิกิริยาตรวจวัดเอทานอลที่ได้รับความนิยม สะดวกและรวดเร็วมี 2 ชนิด ได้แก่ สารละลายของโจนส์หรือสารประกอบโครเมียม และโปแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (Harding, May, & Dick, 1975)

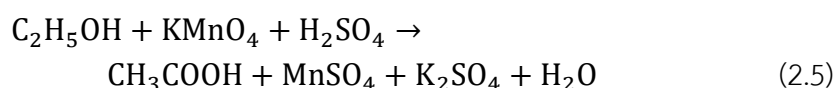
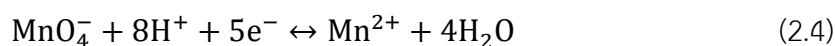
2.1.2.1 โปแทสเซียมไดโครเมต

สารละลายของโจนส์เป็นสารประกอบเชิงซ้อนของโครเมียม (+6) มีลักษณะเป็นสารละลายใสสีเหลืองส้ม สามารถเตรียมจากโครเมียมออกไซด์ (CrO_3) หรือจากสารประกอบโลหะร่วมกับไดโครเมต เช่น โซเดียมไดโครเมต หรือ โปแทสเซียมไดโครเมต โดยโปแทสเซียมไดโครเมตในสารละลายกรดเป็นสารออกซิไดซ์ที่มีความเสถียรมาก โปแทสเซียมไดโครเมตเมื่อถูกรีดิวซ์จะได้โครเมียม (+3) ดังสมการที่ 2.2 ซึ่งเป็นสีเขียวอ่อน-เข้ม ขึ้นกับสภาวะที่ทำการทดลอง โปแทสเซียมไดโครเมตทำปฏิกิริยากับเอทานอลดังสมการที่ 2.3 โดยปฏิกิริยาเคมีนี้สามารถใช้ร่วมกับซิลเวอร์ไนเตรต (AlcoMeters. Breathalyzer Alcohol Tester) เพื่อเร่งปฏิกิริยาให้เร็วยิ่งขึ้นได้

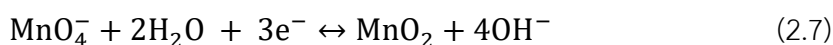
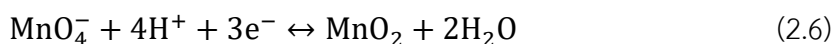


2.1.2.2 โปแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต

โปแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต เป็นสารละลายหรือผลึกแข็งสีม่วงเข้ม สามารถทำปฏิกิริยาร่วมกับเอทานอลโดยใช้กรดซัลฟิวริกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ($\text{pH} < 4$) โดย MnO_4^- (+7) จะถูกรีดิวซ์ให้เป็น Mn^{2+} เปลี่ยนเป็นสีชมพู จึงทำให้สารละลายสีจางลง ดังสมการที่ 2.4 และ 2.5



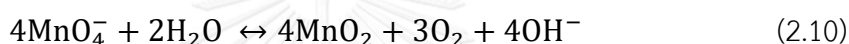
กรณีที่สารละลายมีความเป็นกรดน้อยหรือเป็นกลาง ($7 > \text{pH} > 4$) MnO_4^- (+7) จะถูกรีดิวซ์เป็น MnO_2 (+4) เปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลและสีจะจางลง ดังสมการ 2.6 หรือ 2.7



กรณีสารละลายเป็นเบส (pH > 7) MnO_4^- (+7) จะถูกรีดิวซ์เป็นไอออนแมงกานีส (+6) ดังสมการที่ 2.8

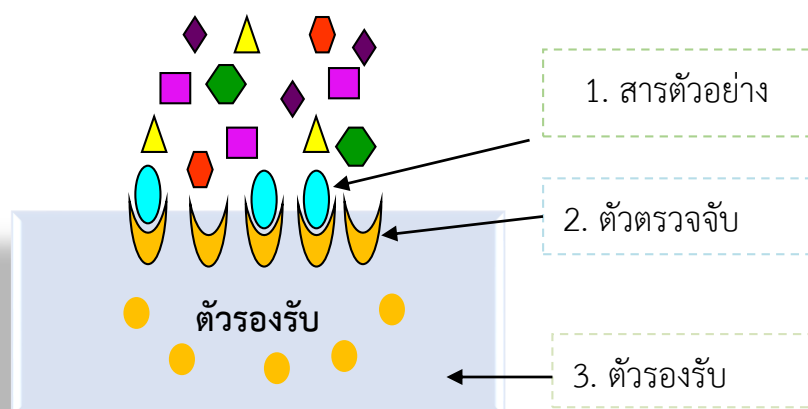


สารละลายโปแทสเซียมเปอร์แมงกานีสเสถียรภาพน้อย สลายตัวได้เมื่อถูกแสง ความร้อน และถูกรีดิวซ์ด้วยกรดหรือเบสเป็น MnO_2 ดังสมการ 2.9 หรือแม้แต่น้ำกลั่นก็ตามจะเกิดการสลายตัวของสารและเกิดเป็น MnO_2 ในปริมาณน้อยแต่ตลอดเวลา ดังสมการที่ 2.10



2.1.3 ตัวรองรับ (Support)

ตัวรองรับมีหน้าที่รองรับสารที่ใช้ในการตรวจวัด สำหรับงานวิจัยทางสีตัวรองรับที่เหมาะสมควรมีสื่ออนเพื่อให้ง่ายต่อการสังเกตการเปลี่ยนแปลงของสี และควรมีพื้นที่ผิวที่มากเพื่อเพิ่มพื้นที่ในปฏิกิริยา และมีความเฉื่อยต่อสารเคมีที่ใช้ในการตรวจวัดได้ ตัวรองรับที่บรรจุสารเคมีจะแปลงความเข้มข้นของเอทานอลมาเป็นระดับสี เพื่อระบุถึงปริมาณสารที่ต้องการวิเคราะห์



รูปที่ 2.1 องค์ประกอบของแผ่นตรวจวัดเอทานอล

2.2 ประสิทธิภาพของระบบตรวจวัด

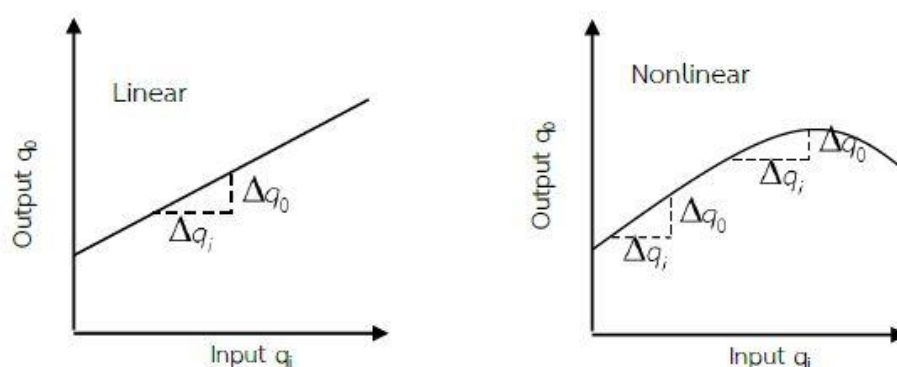
2.2.1 ช่วงความเป็นเส้นตรง (linear range)

ช่วงความเป็นเส้นตรง หมายถึง ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณทางด้านสัญญาณรับเข้าและส่งออกของระบบตรวจวัดที่มีความเป็นเชิงเส้น คือ ความสามารถของวิธีการวิเคราะห์ที่เป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นของสารที่วิเคราะห์ในช่วงความเข้มข้นต่ำสุดและสูงสุด (range) ที่มีความแม่นยำและความเที่ยง (accuracy and precision) อยู่ในระดับที่ยอมรับได้ โดยทั่วไปเรียกช่วงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารที่วิเคราะห์กับความสามารถของวิธีการวิเคราะห์ของแผ่นตรวจวัดที่เป็นเส้นตรงว่า "ช่วงในการปฏิบัติงาน (operating range)"

2.2.2 ความไวในการตอบสนอง (sensitivity)

ความไวในการตอบสนอง หมายถึง อัตราส่วนระหว่างค่าการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณส่งออกต่อค่าการเปลี่ยนแปลงสัญญาณรับเข้า ($\Delta O/\Delta I$) คือค่าที่แสดงถึงความไวต่อการเปลี่ยนแปลงสัญญาณส่งออกเมื่อเครื่องมือวัดได้รับสัญญาณ เช่น ระดับสัญญาณของการเปลี่ยนแปลงสีในวัสดุตรวจวัดเอทานอล (สัญญาณส่งออก) ต่อปริมาณความเข้มข้นเอทานอลในระบบที่เปลี่ยนแปลงในช่วง 100 พีพีเอ็ม (สัญญาณรับเข้า)

เครื่องมือวัดที่มีช่วงตรวจวัดเป็นเส้นตรง (รูป 2.2 ก) และเครื่องมือวัดแบบไม่เป็นเชิงเส้น (รูป 2.2 ข) โดยค่าความไวเปลี่ยนแปลงตามย่านการวัด



รูปที่ 2.2 ความไวของเครื่องมือวัด (ก) แบบเชิงเส้น (ข) แบบไม่เป็นเชิงเส้น
(นวกัทรรา และ ทวีพล, 2555)

2.2.3 ความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถวัดได้ (detection limit)

ความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถวัดได้ คือค่าความเข้มข้นที่ต่ำสุดที่สามารถตรวจวัดได้ใน การวิเคราะห์หาปริมาณของเข้มข้นของสารตัวอย่าง

2.2.4 การผลิตซ้ำ (reproducibility)

การผลิตซ้ำ หมายถึง ความแม่นยำจากการผลิตด้วยวิธีการเดิม และการตรวจวัดภายใต้ สภาวะเดียวกัน ทหาระดับความแม่นยำโดยค่าเปอร์เซ็นต์ของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (%RSD)

2.2.5 การจัดเก็บ (storage stability)

การจัดเก็บ หมายถึง การทดสอบระบบตรวจวัดแล้วให้ประสิทธิภาพของการตรวจวัดที่ เสื่อมสภาพไปตามระยะเวลาในการจัดเก็บระบบตรวจวัด

2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาเคมี

จลนพลศาสตร์คือการศึกษาความเร็วหรืออัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาเคมี ความเร็วของ การเกิดปฏิกิริยาหรืออัตราการเกิดปฏิกิริยาจะมีปัจจัยหลายอย่างมาเกี่ยวข้อง จากการสังเกตปฏิกิริยา หลาย ๆ ชนิด พบว่าบางปฏิกิริยาเกิดเร็วมากและบางปฏิกิริยาเกิดช้าจนเกือบไม่เห็นการเปลี่ยนแปลง

2.3.1 ธรรมชาติของสารตั้งต้น ผลิตภัณฑ์ และตัวทำละลาย

สารเคมีแต่ละชนิดมีความจำเพาะและคุณสมบัติที่แตกต่างกัน ทำให้การเปลี่ยนแปลงทางเคมี และอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่แตกต่างและมีความจำเพาะในแต่ละปฏิกิริยาเคมี ปฏิกิริยาที่เกิดใน สารละลายต้องพิจารณาถึงสมบัติของตัวทำละลายเช่น ความหนืด หรือสมบัติของสารเคมีบางอย่าง อาจส่งผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา

2.3.2 ความเข้มข้นของสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์

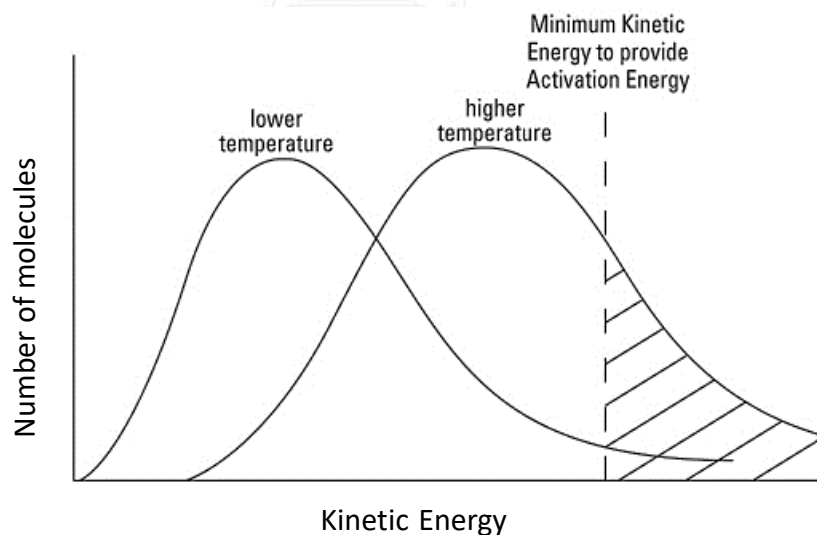
ความเข้มข้นของสารที่มีมากเพิ่มโอกาสในการชนกันของโมเลกุลของสารมากขึ้น ทำให้เกิด อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น บางกรณีสารผลิตภัณฑ์ที่มีความเข้มข้นสูงอาจเป็นตัวยับยั้งการ เกิดปฏิกิริยา ในกรณีการสังเกตการเปลี่ยนแปลงของสีจากสีหนึ่งไปเป็นอีกสีหนึ่ง พบว่าในระบบที่มี สารปริมาณน้อยจะทำปฏิกิริยาและเกิดการเปลี่ยนแปลงจนหมดทำให้สังเกตการเปลี่ยนแปลงของสี รวดเร็วกว่าระบบที่มีสารปริมาณมาก แต่อย่างไรก็ตามปริมาณของสารมีผลต่อระดับความเข้มข้นของสี เช่นกัน

2.3.3 อุณหภูมิ

อุณหภูมิที่สูงขึ้นมีผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นดังรูปที่ 2.3 เนื่องจากโมเลกุลได้รับพลังงานความร้อนและเปลี่ยนแปลงเป็นพลังงานจลน์ ทำให้โมเลกุลที่มีความเร็วมากมีจำนวนเพิ่มขึ้น และโมเลกุลที่มีพลังงานสูงกว่าพลังงานกระตุ้น (Activation Energy; E_a) มีจำนวนเพิ่มขึ้น จะเพิ่มโอกาสในการชนของโมเลกุลทำให้เกิดปฏิกิริยาได้มากขึ้น โดยทั่วไปอุณหภูมิที่สูงขึ้นจะทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีได้เร็วขึ้น ซึ่งสัมพันธ์กับสมการของอาร์เรเนียส (Arrhenius's equation) เป็นสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับค่าคงที่อัตราดังสมการที่ 2.11

$$k = Ae^{-E_a/RT} \quad (2.11)$$

- k = ค่าคงที่อัตรา
 A = อาร์เรเนียสเฟกเตอร์
 E_a = พลังงานก่อกัมมันต์ (จูลต่อโมล)
 R = ค่าคงที่ก๊าซ (8.314 จูลต่อโมลเคลวิน)
 T = อุณหภูมิ (เคลวิน)

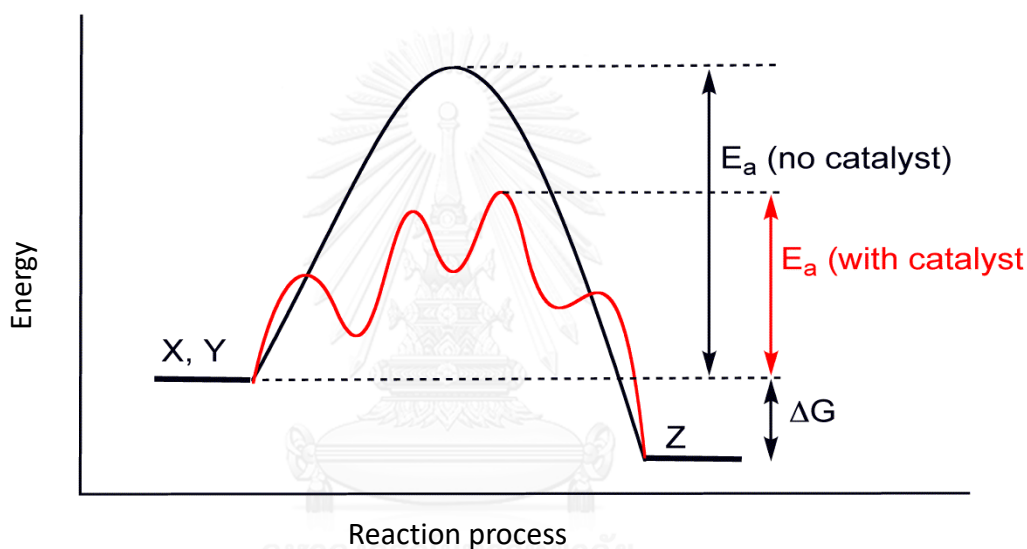


รูปที่ 2.3 อิทธิพลของอุณหภูมิต่อการเกิดปฏิกิริยา

(ที่มา: <http://www.dummies.com/education/science/chemistry/what-factors-affect-the-speed-of-chemical-reactions/>)

2.3.4 อิทธิพลของตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยาจะช่วยทำให้เกิดปฏิกิริยาได้เร็วขึ้นเนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาจะลดพลังงานก่อกัมมันต์ (activation energy, E_a) โดยพลังงานก่อกัมมันต์คือพลังงานที่ต่ำที่สุดที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมี เมื่อพลังงานก่อกัมมันต์ลดลงทำให้โมเลกุลที่มีพลังงานสูงกว่าพลังงานก่อกัมมันต์มีจำนวนมากขึ้น และส่งผลให้ปฏิกิริยาได้ง่ายขึ้นซึ่งเป็นการเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาดังรูปที่ 2.4 โดยตัวเร่งปฏิกิริยาจะไม่เปลี่ยนแปลงทางเคมีอย่างถาวรในปฏิกิริยา และเมื่อปฏิกิริยาสิ้นสุดจะได้ตัวเร่งปฏิกิริยากลับคืนมา โดยปฏิกิริยาที่มีตัวเร่งจะมีกลไกการเกิดปฏิกิริยาที่แตกต่างจากปฏิกิริยาที่ปราศจากตัวเร่งปฏิกิริยา



รูปที่ 2.4 อิทธิพลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการเกิดปฏิกิริยา

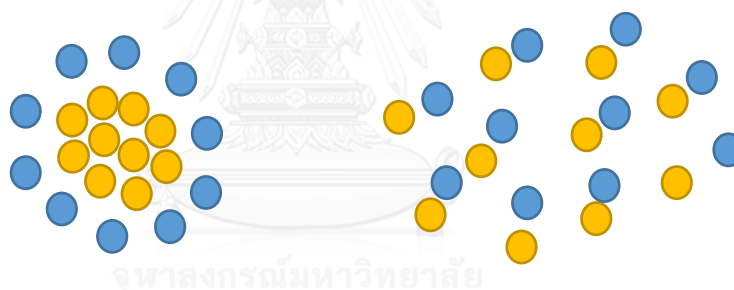
(ที่มา: <https://www.boundless.com/chemistry/textbooks/boundless-chemistry-textbook/chemical-equilibrium-14/factors-that-affect-chemical-equilibrium-106/the-effect-of-a-catalyst-447-3459/>)

2.3.5 พื้นที่ผิวของสาร

สารตั้งต้นที่มีสถานะเป็นของแข็งจะเกิดปฏิกิริยาบนพื้นผิวของสาร ดังนั้นพื้นที่ผิวที่มากจะเพิ่มโอกาสเกิดปฏิกิริยามากขึ้น ทั้งนี้ต้องมีขนาดของรูพรุนที่เหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริยาด้วย รูปทรงที่แตกต่างกันของอนุภาคมีผลต่อพื้นที่ผิวที่สัมผัสและอัตราการเกิดปฏิกิริยา พบว่าหากอนุภาคที่มีปริมาณเท่ากันอนุภาคที่มีการจับตัวกันเป็นก้อน (รูป 2.5 ก) จะมีพื้นที่ผิวสัมผัสที่น้อยกว่าอนุภาคที่

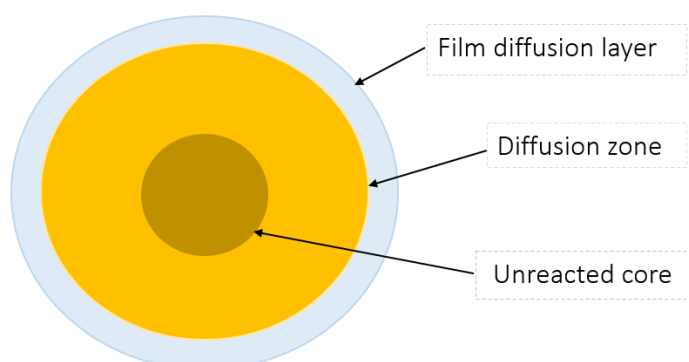
กระจายตัวอยู่แต่ละอนุภาค (รูป 2.5 ข) เนื่องจากอนุภาคที่จับตัวกันเป็นก้อนจะบดบังกันเอง ส่งผลให้โอกาสที่โมเลกุลอื่นที่เข้ามาสัมผัสอนุภาคที่อยู่ภายในเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาได้น้อยลง และโมเลกุลเหล่านั้นจะทำปฏิกิริยาทางเคมีกับอนุภาคระหว่างการแพร่ผ่านไปยังโมเลกุลที่อยู่ภายใน จึงส่งผลอนุภาคที่จับตัวกันเป็นก้อนนั้นมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีช้ากว่าอนุภาคที่กระจายตัว และหากภายในอนุภาคมีรูพรุนก็จะมีพื้นที่ผิวสัมผัสมากกว่าอนุภาคที่มีผิวเรียบและปราศจากรูพรุน โดยสารที่เข้าทำปฏิกิริยาจะทำปฏิกิริยาบริเวณพื้นที่ผิวสัมผัสด้านนอกของโมเลกุลจนหมดก่อนจะแพร่ผ่านและทำปฏิกิริยาภายในรูพรุน ดังนั้นการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสเปรียบเสมือนการเพิ่มโอกาสให้อนุภาคชนกันได้มากขึ้นจึงเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี

ในกรณีที่อนุภาคมีความชื้นจะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาช้าลง เนื่องจากโมเลกุลที่จะแพร่เข้าทำปฏิกิริยากับโมเลกุลในพื้นที่ผิวของแข็งจำเป็นต้องแพร่ผ่านชั้นฟิล์มของเหลวก่อนเข้าทำปฏิกิริยา โดยก๊าซจะต้องละลายเข้าไปในชั้นฟิล์มของเหลวก่อนจากนั้นจึงจะค่อยเข้าทำปฏิกิริยา อนุภาคที่อยู่ด้านในบางส่วนอาจไม่ได้ทำปฏิกิริยาเนื่องจากโมเลกุลที่เข้าทำปฏิกิริยาแพร่เข้าไปไม่ถึง



รูปที่ 2.5 อิทธิพลของพื้นที่ผิวสัมผัสต่อการเกิดปฏิกิริยา

(ก) ก้อนของอนุภาค (ข) อนุภาคที่กระจายตัว



รูปที่ 2.6 พื้นที่ผิวสัมผัสที่ทำปฏิกิริยาเคมีภายในอนุภาค

2.4 ประเภทของผลไม้จากการจำแนกตามอัตราการหายใจ

2.4.1 ผลไม้ประเภทบ่มสุก (Climacteric fruits)

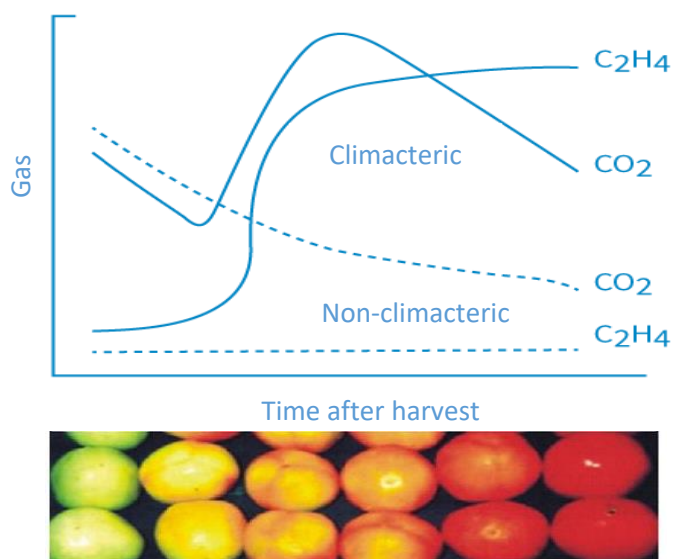
เป็นผลไม้ที่มีอัตราการหายใจเปลี่ยนแปลงตามอายุ จะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจนผลไม้เริ่มสุก ขณะที่ผลสุกเต็มที่就会有อัตราการหายใจมากที่สุด (climacteric peak) จากนั้นอัตราการหายใจจะค่อย ๆ ลดต่ำลง ดังรูปที่ 2.7

2.4.2 ผลไม้ประเภทบ่มไม่สุก (Non-climacteric fruits)

เป็นผลไม้ที่มีอัตราการหายใจค่อย ๆ ลดลงเมื่อมีอายุมากขึ้น เมื่อผลไม้สุกอัตราการหายใจไม่เพิ่มขึ้น ดังนั้นเมื่อเก็บจากต้นจะไม่สุกต่อ จึงควรเก็บเกี่ยวเมื่อสุก และไม่สามารถบ่มให้สุกโดยใช้ก๊าซเอทิลีนได้

ตารางที่ 2.2 ประเภทของผลไม้ตามอัตราการหายใจ (Pereira et al., 2005)

ประเภท	ผลไม้
ผลไม้ประเภทบ่มสุก	แอปเปิ้ล, สาลี่, พลับ, ท้อ, ทูเรียน, อาโวคาโด, กีวี, ฝรั่ง, มะเดื่อ, น้อยหน่า, มะม่วง, มะละกอ, กัลฉวย, มะเขือเทศ, ขนุน, แตงโม และ ละมุด
ผลไม้ประเภทบ่มไม่สุก	พริกหวาน, บลูเบอร์รี่, เชอร์รี่, องุ่น, เงาะ, มังคุด, ลิ้นจี่, ลำไย, มะไฟ, ลองกอง, สับปะรด, สตรอเบอร์รี่ และ ผลไม้ตระกูลส้ม



รูปที่ 2.7 อัตราการหายใจและการผลิตเอทิลีนของผลไม้ประเภทบ่มสุกและบ่มไม่สุก

(ที่มา: <http://www.ozeano.net/en/solutions/>)

2.5 กระบวนการสุกของผลไม้

การเก็บเกี่ยวผลผลิตส่วนมากจะเก็บเกี่ยวในช่วงที่ผลไม้มีการเจริญเติบโตอย่างสมบูรณ์ จะเรียกระยะนี้ว่า ผลไม้ระยะแก่ (Mature) เวลาผ่านไปจะเข้าสู่ระยะสุก (Ripening) และระยะชรา (Senescence) จากนั้นจะเข้าสู่ความเสื่อมหรือเน่าเสีย (Death) โดยผลไม้ส่วนมากจะนิยมรับประทานในช่วงระยะสุก โดยกระบวนการสุกเกิดจากเปลี่ยนแปลงทั้งทางกายภาพ และทางเคมี ผลของผลไม้จะอ่อนนุ่มลง ผิวเปลี่ยนสี มีกลิ่นจำเพาะตามชนิดของผลไม้ การเปลี่ยนแปลงนี้อาศัยพลังงานที่เกิดจากการหายใจของผลไม้

ผลไม้สุกจะสร้างเอทิลีนมากขึ้นและจะเร่งให้มีการหายใจเพิ่มขึ้นและเข้าสู่กระบวนการสุก ดังนั้นเอทิลีนจึงมีความจำเป็นอย่างมากต่อการสุกหรืออาจเรียกว่าเป็นฮอร์โมนเร่งการสุก ผลไม้จะใช้น้ำตาลร่วมกับออกซิเจนในการหายใจ และปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำและพลังงานออกมา ซึ่งก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะเหนี่ยวนำให้เกิดการสร้างเอทิลีนและพลังงานที่ปล่อยออกมา มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงกระบวนการชีวเคมีในผลไม้ ผลจะอ่อนนุ่มน่านำรับประทาน มีกลิ่นจำเพาะของผลไม้ แต่ละชนิด มีรสหวานเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงไปเป็นน้ำตาล กระบวนการสุกนั้นเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วภายในเวลาไม่กี่วัน การสุกจะเกิดขึ้นอย่างปกติเมื่อผลไม้อยู่ในสภาวะที่เหมาะสม มีก๊าซที่จำเป็นในกระบวนการสุกเพียงพอ หากผลไม้อยู่ในสภาวะไม่เหมาะสมเช่นอยู่จัดเก็บในอุณหภูมิที่สูงเกินไปหรือต่ำเกินไป อาจเกิดการสุกที่ไม่สมบูรณ์เป็นผลให้ ความหวานน้อยลง ผลเหี่ยว ผิวไม่เปลี่ยนสี

ตารางที่ 2.3 กระบวนการทางชีวเคมีการสุกของผลไม้ (Koning, 1994)

กระบวนการ	ความเปลี่ยนแปลงของผลไม้
การเปลี่ยนเมธิโอนีนไปเป็นเอทิลีน	เอทิลีนถูกสร้างมากขึ้นและเร่งอัตราการหายใจของผลไม้
การเปลี่ยนแปลงไปเป็นน้ำตาล	ผลไม้มีรสหวานมากขึ้นจากเดิม
การลดปริมาณกรด	ผลไม้มีรสเปรี้ยวน้อยลง
การเปลี่ยนโครงสร้างสารเพกติกในรูปไม่ละลายน้ำเป็นสารละลายน้ำ	ผลไม้มีความอ่อนนุ่มลง
การสังเคราะห์สารระเหย (Volatile substances)	เกิดกลิ่นจำเพาะของผลไม้แต่ละชนิด รวมถึงการเกิดเอทานอลด้วย
การสลายตัวของคลอโรฟิลล์และการสังเคราะห์เม็ดสีอื่นๆ	สีเขียวของเปลือกหายไปเปลี่ยนเป็นสีที่สุกแล้วซึ่งเป็นสีที่จำเพาะของผลไม้แต่ละชนิด
การสลายตัวของแทนนิน (tannin)	ความฝาดลดลง

2.6 กระบวนการเสื่อมของผลไม้สดตัดแต่งในบรรจุภัณฑ์

สาเหตุที่ผลไม้สดตัดแต่งเสื่อมสภาพก่อนวันที่ระบุไว้ในแถบสินค้ามีหลายปัจจัย เช่น ผู้จำหน่ายจัดเก็บผลไม้สดตัดแต่งในสภาวะที่ไม่เหมาะสม เช่น อุณหภูมิต่ำเกินไป ความเย็นจะทำลายเนื้อเยื่อของผลไม้ ผลไม้จึงเกิดความบอบช้ำ เนื้อสัมผัสและรสชาติจึงแตกต่างจากเดิม (Fidler, 1968) หรืออุณหภูมิที่สูงเกินไป ส่งผลให้ผลไม้มีอัตราการหายใจเพิ่มขึ้น และเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเร่งความชราของผลไม้ และ/หรือการเก็บรักษาในสภาพตัดแต่งบรรยากาศ เช่น การบรรจุกล่อง/ถุงพลาสติก การเคลือบผิว มีผลให้อัตราการซึมผ่านน้ำและก๊าซเป็นไปได้ไม่ดี ทำให้ผลไม้เกิดสภาวะเครียด เนื่องจากผลไม้สดที่ได้รับการตัดแต่งจะมีอัตราการหายใจมากกว่าปกติ การหายใจจะใช้ก๊าซออกซิเจนที่อยู่ภายใน และปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำออกมา พลาสติกหรือสารเคลือบผิวที่ไม่เหมาะสมจะทำให้อัตราการถ่ายเทน้ำและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์น้อยกว่าอัตราการสร้าง จึงเกิดการสะสมของน้ำและก๊าซภายในบรรจุภัณฑ์ เมื่อการหายใจใช้ก๊าซออกซิเจนภายในบรรจุภัณฑ์หมดลง ผลไม้จะหายใจแบบไม่อาศัยก๊าซออกซิเจน ซึ่งทำให้เกิดกระบวนการหมักของน้ำตาลในผลไม้ เกิดก๊าซเอทานอลขึ้น และเพิ่มอัตราการเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมี ทำให้เกิดการสูญเสียวิตามิน และเกิดการอ่อนนุ่มของเนื้อเยื่อ ผลไม้จึงมีรสสัมผัส รสชาติและกลิ่นสีที่เปลี่ยนแปลงและแตกต่างกันตามชนิดของผลไม้ เมื่อก๊าซเอทิลีน คาร์บอนไดออกไซด์และเอทานอลสะสมปริมาณมากขึ้น ผลไม้จะเสื่อมสภาพอย่างรวดเร็ว และมีกลิ่นและรสชาติผิดปกติเกิดขึ้น (Agar, Biasi, & Mitcham, 1999;

Doorn, Zagory, & Reid, 1991; Watada et al., 1990) ประกอบกับผลไม้สดที่ได้รับการตัดแต่งจะมีบาดแผล ทำให้ผลไม้มีอัตราการหายใจเพิ่มขึ้นและผลิตเอทิลีนสูงขึ้นมากกว่าปกติถึง 5-7 เท่า (เกรียงไกร, 2553) มีรายงาน bahwa เอทิลีนสามารถกระตุ้นการเจริญเติบโตของแบคทีเรียที่ใช้ออกซิเจนในการหายใจ ยีสต์ และรา บนเนื้อผลไม้สดตัดแต่ง (Zhou et al., 2006) และรอยแผลจากการตัดแต่งนั้นจะเพิ่มอัตราการสูญเสียน้ำ ทำให้เชื้อจุลินทรีย์เข้าไปทำลายเนื้อเยื่อของผลไม้ (Alley et al., 1999; Jung & Zhao, 2016; Watada et al., 1990; Willey, 1994) จึงทำให้ผลไม้สดตัดแต่งเน่าเสียและมีกลิ่นผิดปกติจากการสะสมของเอทานอล และ/หรือแบคทีเรียได้เร็วกว่าผลไม้สด

2.7 ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเกิดก๊าซและความเสื่อมในผลไม้

2.7.1 ธรรมชาติของผลไม้

ธรรมชาติของผลไม้ที่มีผลต่ออัตราการเกิดก๊าซในผลไม้ ได้แก่ ประเภท ชนิด และพันธุ์ของผลไม้ส่งผลต่ออัตราการเกิดก๊าซดังที่กล่าวในหัวข้อ 2.4 ผลไม้แต่ละชนิด แต่ละพันธุ์ ลักษณะการเก็บรักษา เช่น เป็นผล เป็นเนื้อยวง เป็นชิ้นจากการตัดแต่ง จะมีกระบวนการทางชีวเคมีของแต่ละชนิดจำเพาะจึงทำให้เกิด รสชาติ สี กลิ่น รวมถึงอัตราการเกิดก๊าซและความเสื่อมที่แตกต่างกัน

ปิยฉัตร (2542) ศึกษาการเก็บรักษาขนุน 2 พันธุ์ ได้แก่ พันธุ์ทองสุกใจและมาเลเซีย โดยทำการประเมินคุณภาพโดยตรวจวัดปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้ในน้ำ (TSS) ความแน่นเนื้อ และทดสอบรสชาติโดยการชิม พบว่าการเก็บรักษาเนื้อยวงขนุนสดที่อุณหภูมิเดียวกันคือ 5 องศาเซลเซียส มีอายุการเก็บรักษาเท่ากันคือ 9 วัน โดยการหมุดอายุการเก็บรักษานั้นพิจารณาการเน่าเสียบนเนื้อยวง ขณะที่ผลขนุนสุกพันธุ์ทองสุกใจได้นาน 14 วัน และพันธุ์มาเลเซียเก็บรักษารวมทั้งสิ้น 21 วัน

จรรยา (2552) ศึกษารูปแบบการหั่นชิ้นต่อคุณภาพของมะม่วงและสับปะรดระหว่างการเก็บรักษาเปรียบเทียบระหว่างพันธุ์ของผลไม้สดตัดแต่งของมะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้ โชคอนันต์ และมหาชนก พบว่า ผลมะม่วงสุกพันธุ์โชคอนันต์ เหมาะสำหรับการผลิตเป็นเนื้อมะม่วงสุกหั่นชิ้นมากที่สุด เพราะมีความแน่นของเนื้อมะม่วง ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้และปริมาณวิตามินซีมากกว่า แต่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณกรดทั้งหมดที่ไทเทรตได้ และการสูญเสียน้ำหนักน้อยกว่าอีกสองพันธุ์ สำหรับสับปะรดสดตัดแต่งพันธุ์ศรีราชาและภูเก็ต พบว่าสับปะรดพันธุ์ภูเก็ตเป็นพันธุ์ที่เหมาะสมสำหรับผลิตเป็นเนื้อสับปะรดหั่นชิ้นมากที่สุด เนื่องจากไม่พบอาการฉ่ำน้ำ มีปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ และปริมาณวิตามินซีมากกว่า และมีการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ เคมี และสรีรวิทยาระหว่างการเก็บรักษาน้อยกว่าพันธุ์ศรีราชา

2.7.2 ระยะของผลไม้ในช่วงการจัดเก็บผลิตผล

ระยะในการเก็บผลิตผลในผลไม้เหล่านั้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แบบ คือ เก็บผลิตผลในระยะก่อนสุกและ เก็บในระยะสุกแล้ว

ปิยฉัตร ศรีสัตบุตร (2542) รายงานการเก็บรักษาผลขนุนพันธุ์ทองสุตใจที่เก็บผลิตผลในระยะก่อนสุกและ เก็บในระยะสุกแล้ว ที่สภาวะการเก็บรักษาเดียวกัน ที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส พบว่าผลิตผลที่เก็บในระยะก่อนสุกเก็บรักษาได้เป็นระยะเวลา 7 วัน ผลจะเกิดอาการสั้หนาวและเกิดการสุกที่ผิดปกติ ขณะที่ผลิตผลที่เก็บในระยะสุกแล้วเก็บรักษาได้นาน 14 วัน

2.7.3 อุณหภูมิ

อุณหภูมิการเก็บรักษาผลไม้สดตัดแต่งนั้นเป็นปัจจัยที่สำคัญต่ออัตราการเกิดก๊าซในผลไม้ โดยจากหลายงานวิจัยพบว่าที่อุณหภูมิแปรผันกับอัตราการเกิดก๊าซในผลไม้ โดยอุณหภูมิการจัดเก็บที่สูง จะพบอัตราการเกิดก๊าซสูงขึ้น ในทางกลับกันอุณหภูมิการจัดเก็บที่ต่ำ พบอัตราการเกิดก๊าซที่ต่ำ

วรภัทรและอรรณวุทธิ์ (2549) พบว่าที่อุณหภูมิการเก็บรักษามีผลต่ออัตราการหายใจของผลไม้ โดยอุณหภูมิการเก็บรักษาที่ 28 ± 1 องศาเซลเซียส พบว่ามีปริมาณออกซิเจน 2.7 เปอร์เซ็นต์ และมีคาร์บอนไดออกไซด์ 13.4 เปอร์เซ็นต์ ส่วนการเก็บรักษาที่ 10 ± 1 องศาเซลเซียส พบว่ามีปริมาณออกซิเจน 9.8 เปอร์เซ็นต์ และมีคาร์บอนไดออกไซด์ 5.6 เปอร์เซ็นต์ แสดงให้เห็นว่าที่อุณหภูมิการจัดเก็บที่ต่ำจะมีอัตราการหายใจน้อยกว่าผลไม้ที่จัดเก็บในอุณหภูมิสูง

2.7.4 การสะสมของก๊าซในระบบ

วรภัทรและอรรณวุทธิ์ (2549) พบว่าชนิดของพลาสติกในการจัดเก็บผลไม้มีผลต่อการซึมผ่านและสะสมของก๊าซที่สภาวะเดียวกัน ทูเรียนที่จัดเก็บที่อุณหภูมิ 28 ± 1 องศาเซลเซียส ด้วยฟิล์ม P-PlusTM พบว่ามีออกซิเจนสะสมปริมาณ 10.1 เปอร์เซ็นต์ และคาร์บอนไดออกไซด์สะสมปริมาณ 26.2 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่ฟิล์ม PVC มีออกซิเจนสะสมปริมาณ 2.7 เปอร์เซ็นต์ และคาร์บอนไดออกไซด์สะสมปริมาณ 13.4 เปอร์เซ็นต์ จึงสรุปได้ว่าชนิดของฟิล์มมีผลต่อการซึมผ่านและการสะสมก๊าซของผลไม้

สุวิทย์ (2548) ศึกษาและทำการเคลือบผิวผลไม้จำพวกส้มด้วยแว็กซ์เพื่อยืดระยะเวลาการเก็บซึ่งเป็นประโยชน์ในเชิงพาณิชย์ แต่อย่างไรก็ตามส้มที่ถูกเคลือบผิวจะมีการหายใจโดยไม่ใช้ออกซิเจน ทำให้เกิดการหมัก ซึ่งมีผลต่อคุณภาพของผลส้ม โดยเอทานอลเกิดจากการหมักจึงสามารถนำมาใช้บ่งบอกคุณภาพของผลส้มได้ สุวิทย์พบว่าผลส้มเมื่อนำเสียบจะมีปริมาณเอทานอลมากกว่า 50 พีพีเอ็ม

2.7.5 ปัจจัยอื่น ๆ

การลดปริมาณออกซิเจนในบรรยากาศที่เก็บรักษาผลไม้ให้ลดลง ทำให้เกิดการชะลอการผลิตเอทิลีนในผลไม้ เนื่องจากการเกิดเอทิลีนต้องใช้พลังงานจากการหายใจของผลไม้

ค่าอัตราส่วนของก๊าซ เช่น อัตราส่วนของคาร์บอนไดออกไซด์ต่อออกซิเจน สามารถบ่งชี้ว่าการหายใจแบบอาศัยหรือไม่อาศัยออกซิเจน เป็นผลโดยตรงต่อการเกิดเอทานอล

คาร์บอนไดออกไซด์มีผลต่อการหายใจของพืช หากมีคาร์บอนไดออกไซด์มาก การหายใจจะน้อยลงทำให้มีอัตราการสร้างเอทิลีนลดลงด้วย และคาร์บอนไดออกไซด์มีโครงสร้างใกล้เคียงกับเอทิลีน จึงสามารถแทนที่เอทิลีนและเป็นผลต่อการสุกและการเสื่อมของผลไม้

2.8 ก๊าซที่มีผลต่อการบ่งชี้คุณภาพของผลไม้

2.8.1 เอทิลีน

เอทิลีนเป็นก๊าซที่มีความสำคัญต่อกระบวนการสุกของพืชและผลไม้ โดยเอทิลีนได้จากการสังเคราะห์ของพืช เอทิลีนทำหน้าที่คล้ายฮอร์โมนกระตุ้นให้เกิดกระบวนการสุกอมในผลไม้หลายชนิด เช่น กล้วย มะละกอ อัตราการผลิตเอทิลีนที่สูงจะทำให้ผลไม้สุกอมเร็ว ดังนั้นในการขนส่งที่ใช้เวลานาน เช่น การขนส่งทางเรือสินค้า ผู้ประกอบการจะเก็บผลไม้ในอุณหภูมิการจับเก็บต่ำ เพื่อชะลอการหายใจของพืชและมีการกำจัดก๊าซเอทิลีนที่ผลไม้ปล่อยออกมา เพื่อไม่ให้ผลไม้สุกอมเน่าเสียก่อนเวลา การผลิตเอทิลีนอาจเกิดได้ด้วยปัจจัยภายนอกหลายประการ เช่น การเกิดบาดแผล ความเครียดทางสิ่งแวดล้อม และสารเคมี เช่น ออกซิเจนและสารควบคุมการเจริญเติบโตอื่นๆ (Buchanan, Grisseem, & Jones, 2000; Wang, Li, & Ecker, 2002)

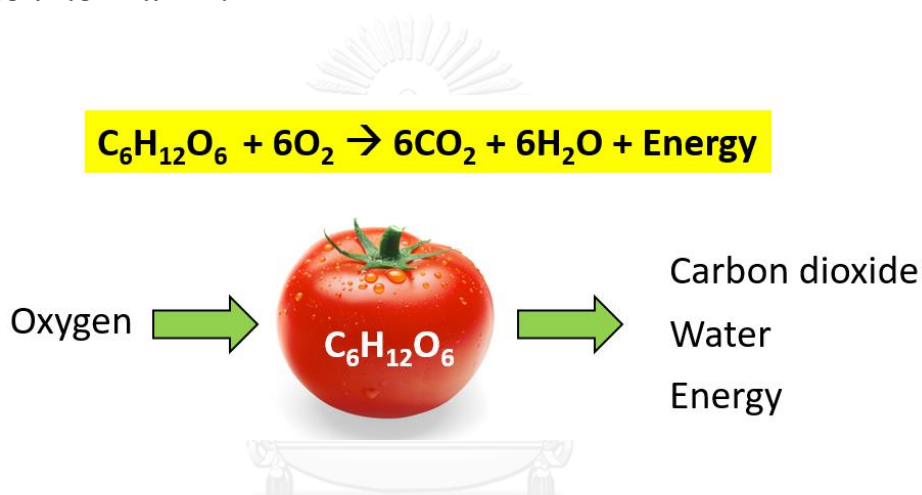
การสร้างเอทิลีนจำเป็นต้องใช้พลังงานมากจากการสลายอาหารด้วยการหายใจแล้วจึงปลดปล่อยพลังงานออกมา ดังนั้นในสภาพที่มีออกซิเจนมาก มีผลให้เกิดการสร้างเอทิลีนมากด้วยการชะลอการผลิตเอทิลีนในผลไม้ทำได้โดยการลดปริมาณออกซิเจนในบรรยากาศที่เก็บรักษาผลไม้ให้ลดลง เช่นหากเก็บกล้วยในออกซิเจน 0.5-5 เปอร์เซ็นต์ จะทำให้ผลสุกช้ากว่าการเก็บรักษาไว้ในอากาศปกติซึ่งมีออกซิเจนประมาณ 21 เปอร์เซ็นต์

2.8.2 คาร์บอนไดออกไซด์

คาร์บอนไดออกไซด์เกิดขึ้นจากการหายใจของพืช โดยการหายใจของพืชนั้นมี 2 ประเภท

ประเภทที่ 1 การหายใจแบบใช้ออกซิเจน

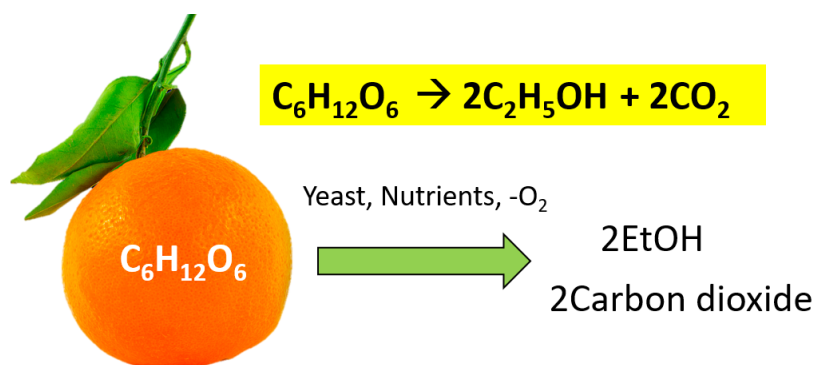
เกิดขึ้นเมื่อผลิตผลมีสภาวะที่มีออกซิเจนเพียงพอ จะเกิดการใช้น้ำตาลในผลไม้ร่วมกับออกซิเจนและปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และพลังงาน โดยพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นจากการหายใจของพืช (Vital heat , Respiration heat) ที่มีอัตราการหายใจสูงจะมีพลังงานออกมา มากกว่าผลไม้ที่มีอัตราการหายใจต่ำ ทำให้เกิดการเสื่อมคุณภาพเร็วกว่า เพราะอัตราการสลายโมเลกุลของสารอาหารมากกว่า



รูปที่ 2.8 คาร์บอนไดออกไซด์จากหายใจแบบใช้ออกซิเจน

ประเภทที่ 2 การหายใจแบบไม่ใช้ออกซิเจน

เกิดขึ้นเมื่อผลผลิตอยู่ในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจนหรือมีออกซิเจนไม่เพียงพอ จะเกิดการหายใจแบบไม่อาศัยออกซิเจน (anaerobic respiration หรือ fermentation) โดยกระบวนการนี้จะทำให้เกิดการสร้างเอทิลแอลกอฮอล์และคาร์บอนไดออกไซด์



รูปที่ 2.9 การหายใจแบบไม่อาศัยออกซิเจน (Gay-Lussac)

สภาพบรรยากาศปกติมีปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์เพียง 0.03 เปอร์เซ็นต์ (Tan, 2010) ทำให้พืชหรือสัตว์มีการหายใจได้ปกติ ถ้ามีคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น มีผลให้เกิดการหายใจน้อยลงอย่างต่อเนื่อง ทำให้มีอัตราการสร้างเอทิลีนลดลงด้วย อีกทั้งคาร์บอนไดออกไซด์และเอทิลีนมีโครงสร้างโมเลกุลคล้ายกัน คาร์บอนไดออกไซด์จึงเข้าไปครอบคลุมแทนเอทิลีนในจุดต่าง ๆ ของผลไม้ ทำให้เอทิลีนไม่สามารถเข้าไปทำหน้าที่ตามปกติได้ จึงสรุปได้ว่าสภาพที่ผลไม้มีปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์สูง ผลไม้จะสุกช้ากว่าปกติและเก็บรักษาไว้ได้นานขึ้น ในทางกลับกันเมื่อพืชได้รับคาร์บอนไดออกไซด์ปริมาณสูงเป็นเวลานานจะทำให้เกิดการหายใจแบบไม่ใช้ออกซิเจน เป็นสาเหตุให้เกิดการหมักได้ ทำให้คุณภาพและรสชาติของผลไม้เปลี่ยนไป

2.8.3 เอทานอล

เอทานอลเกิดจากการหายใจที่ไม่ใช้ออกซิเจนของผลไม้และเชื้อจุลินทรีย์บางชนิด เช่น ยีสต์ในกลุ่มแซคคาโรไมซิส ซีรีวิซีอี (*Saccharomyces cerevisiae*) (Kudlicki A., 2007) สามารถพบในธรรมชาติในส่วนต่าง ๆ ของพืชและแหล่งที่มีน้ำตาลความเข้มข้นสูง เช่น น้ำผลไม้ที่มีรสหวาน ที่มีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนน้ำตาลกลูโคสไปเป็นเอทานอล (Adams, Gallagher, & Donnison, 2009; Bai, Anderson, & Moo-Young, 2008) ผลไม้ที่เสื่อมสภาพเนื่องจากการสร้างเอทานอลจะให้ กลิ่น เนื้อสัมผัส ความกรอบ ความนุ่ม สี และรสชาติเปลี่ยนไปจากเดิม กระบวนการหมักเกิดขึ้นเมื่อมีออกซิเจนไม่เพียงพอ และเนื่องจากออกซิเจนซึ่งเป็นตัวรับอิเล็กตรอนในขั้นตอนสุดท้าย จึงเป็นผลให้การหายใจแบบไม่ใช้ออกซิเจนจึงได้พลังงานน้อยกว่าการหายใจแบบใช้ออกซิเจน

เอทานอลที่สะสมในบรรจุภัณฑ์ของผลไม้สดตัดแต่งมาจาก 2 แหล่ง

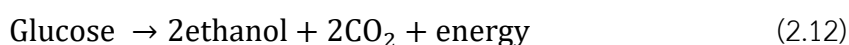
1. การหายใจแบบไม่ใช้ออกซิเจนของผลไม้

การหายใจแบบไม่ใช้ออกซิเจนของผลไม้เกิดจากสภาวะเซลล์ของผลไม้เสื่อมสภาพ ผลไม้จึงลดการหายใจลงและเปลี่ยนแปลงจากการหายใจแบบใช้ออกซิเจนไปเป็นการหายใจแบบไม่ใช้ออกซิเจนเพื่อคงสภาวะของเซลล์ ส่งผลให้เซลล์เนื้อเยื่อของผลไม้ผลิตเอทานอล หรืออีกสาเหตุมาจากค่าอัตราส่วนการหายใจ (respiratory quotient , RQ) คืออัตราส่วนของคาร์บอนไดออกไซด์ต่อออกซิเจน สามารถบ่งชี้ว่าการหายใจแบบใช้ออกซิเจนหรือไม่ใช้ออกซิเจน โดยค่าอัตราส่วนการหายใจของคาร์บอนไดออกไซด์ต่อออกซิเจน ในช่วง 0.7-1.3 เป็นการหายใจแบบอาศัยออกซิเจน (Saltveit, 1997)

2. การหายใจแบบไม่ใช้ออกซิเจนของยีสต์

กระบวนการหมักกัวตุดิบจำพวกแป้ง และน้ำตาลด้วยจุลินทรีย์ (Stanbury, Whittaker, & Hall, 1999) โดยจุลินทรีย์ที่สามารถผลิตเอทานอลได้หลายชนิด เช่น ยีสต์แซคคาโรไมซิส ซีรีวิซีอี และแบคทีเรียไซโมโมแนส โมบิลิส (*Zymomonas mobilis*) (Todhanakasem, Narkmit, Areerat, & Thanonkeo, 2015)

สมการแสดงกระบวนการหมักแอลกอฮอล์ในพืชและยีสต์



2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.9.1 หลักการและสารเคมีที่ใช้ในการตรวจวัดเอทานอลด้วยวิธีทางสี

การตรวจวัดเอทานอลนั้นมีวิธีที่หลากหลาย ซึ่งแต่ละวิธีนั้นมีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกัน เช่นการตรวจวัดเอทานอลด้วยเครื่องโครมาโตกราฟสามารถตรวจวัดเอทานอลได้ทั้งสถานะก๊าซและของเหลว และมีความสามารถในการตรวจวัดที่แม่นยำ เป็นที่ยอมรับและสามารถตรวจวัดได้ดีในสารที่มีความเข้มข้นต่ำ แต่มีข้อจำกัดคืออุปกรณ์มีขนาดใหญ่ ราคาสูง และอาศัยความชำนาญในการวิเคราะห์ ซึ่งเหมาะกับงานที่ต้องการผลวิเคราะห์ที่แม่นยำ และละเอียด ในปัจจุบันมีความจำเป็นที่ต้องตรวจวัดปริมาณความเข้มข้นเอทานอลจากสินค้าและจากบุคคลเพื่อระบุปริมาณเอทานอลตามข้อกำหนดหรือตามกฎหมายต่าง ๆ เช่น การตรวจวัดปริมาณเอทานอลในสินค้า การตรวจวัดเอทานอลในลมหายใจเพื่อบ่งชี้ถึงความสามารถในการขับขี่ยานยนต์ ในกฎหมายประเทศไทยหากผู้ขับขี่มีปริมาณเอทานอลในเลือด (BAC, mg%) เกิน 50 มก. ต่อเลือด 100 มล. หรือค่าความเข้มข้นเอทานอลในอากาศเท่ากับ 131 พีพีเอ็ม (Technologies, 2009) ให้ถือว่าเมาสุรา (กฎกระทรวงฉบับที่ 16 พ.ศ. 2537) ซึ่งการตรวจวัดนั้นต้องอาศัยอุปกรณ์ที่พกพาได้สะดวกรวดเร็ว ใช้งานได้ง่าย ไม่ต้องอาศัยความชำนาญ และสามารถตรวจวัดได้ในทุกสถานที่ จึงมีผู้คิดค้นอุปกรณ์การตรวจวัดปริมาณเอทานอลเพื่อให้เหมาะแก่การใช้งาน เช่นการตรวจวัดด้วยวิธีทางสีและมีเกณฑ์จากแถบสีเพื่อให้ผู้ใช้งานเข้าใจโดยง่าย และเป็นสากล ได้แก่ เครื่องวัดเอทานอลในอากาศด้วยวิธีทางสีโดยใช้ระบบโฟโตเซลล์ หลอดตรวจวัดเอทานอลในอากาศด้วยวิธีทางสี แผ่นตรวจวัดเอทานอลในน้ำลายด้วยเอนไซม์ ดังนั้นการเลือกวิธีเพื่อการตรวจวัดจะขึ้นกับความจำเป็น และความสะดวกของผู้ใช้งาน



รูปที่ 2.10 ปริมาณเอทานอลในเลือดของผู้ขับขี่ยานยนต์และกฎหมายควบคุม

(Technologies, 2009)

ELECHEM CO.,LTD พัฒนาและจดสิทธิบัตรอุปกรณ์วัดระดับเอทานอลในอากาศด้วยวิธีทางสี (Park & Park, 2013) โดยใช้ระบบโฟโตเซลล์ โดยมีหลักการและวิธีการใช้คือภายในมีระบบวิเคราะห์ห่ามหายใจของผู้ทดสอบ ภายในมีขดสารเคมี 2 ขวด และมีระบบโฟโตเซลล์ (system of photocells) เป็นระบบที่มีความไวต่อแสง การตรวจสอบปริมาณเอทานอลอาศัยความแตกต่างของสีในขวดที่เกิดปฏิกิริยาเคมีกับเอทานอลเทียบกับขวดที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลง (blank) เมื่อแสงตกกระทบ จะผลิตกระแสไฟฟ้าขึ้นมา โดยต่อเข้ากับมิเตอร์วัดการเปลี่ยนสี สำหรับการตรวจวัดเอทานอล ผู้ทดสอบต้องเป่าลมหายใจเข้าสู่ตัวอุปกรณ์ ลมหายใจจะผ่านขดสารเคมีเพียงขวดเดียว ภายในมีสารประกอบไดโครเมต (CrO_7^{2-}) และสารเคมีอื่น ๆ เมื่อเอทานอลแพร่สู่สารละลายและทำปฏิกิริยาเคมีได้โครเมียมซัลเฟต โปแทสเซียมซัลเฟต กรดอะซิติก และน้ำ โดยมีซิลเวอร์ไนเตรตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งเป็นสารที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาได้เร็วขึ้น กรดซัลฟิวริกทำให้เกิดสภาพความเป็นกรดซึ่งจำเป็นสำหรับปฏิกิริยานี้ การเกิดปฏิกิริยากับเอทานอลจะมีการเปลี่ยนแปลงของสีจากสีเหลืองส้มไปเป็นสีเขียว จากสารประกอบเชิงซ้อนของโครเมียม (+6) ไปเป็น (+3) ดังรูปที่ 2.11

Borkenstein (1978) พัฒนาและจดสิทธิบัตรหลอดบรรจุตรวจเอทานอลในอากาศด้วยวิธีทางสีด้วยสารประกอบไดโครเมต (ไม่ระบุปริมาณและความเข้มข้น) และกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 50 เปอร์เซ็นต์บนวัสดุรองรับแคลเซียมซัลเฟต (CaSO_4) ปริมาณ 0.5 กรัม มีลักษณะเป็นผลึกใสสีเหลืองสำหรับตรวจวัดแอลกอฮอล์เพื่อบ่งชี้ความสามารถในการขับชี่ยานยนต์ โดยมีวิธีใช้ดังนี้ผู้ตรวจเอทานอลจะเป่าลมหายใจเข้าสู่ถุงที่มาพร้อมตัวอุปกรณ์ ซึ่งเป็นการควบคุมปริมาตรของกำขขนาด 52 มล.ที่เข้าสู่ระบบตรวจวัดเอทานอล จากนั้นจะนำถุงที่มีหัวเชื่อมต่อกับหลอดตรวจด้านสีฟ้า และปล่อยลมเข้าสู่ภายในหลอดที่มีวัสดุรองรับและสารเคมี เมื่อมีเอทานอลจะเกิดการเปลี่ยนแปลงสีจากสีเหลืองไปเป็นสีเขียวของหลอดตรวจวัดเอทานอล โดยระดับตรวจวัดแอลกอฮอล์สังเกตได้จากขีดสีดำ หากมีการเปลี่ยนแปลงเกินขีดสีดำหมายถึงมีปริมาณเอทานอลในเลือด เกิน 50 มก. ต่อเลือด 100 มล. บ่งชี้ว่าผู้ตรวจวัดเมาสุราและไม่ควรขับชี่ยานยนต์ตามระดับที่กฎหมายกำหนด ดังรูปที่ 2.12

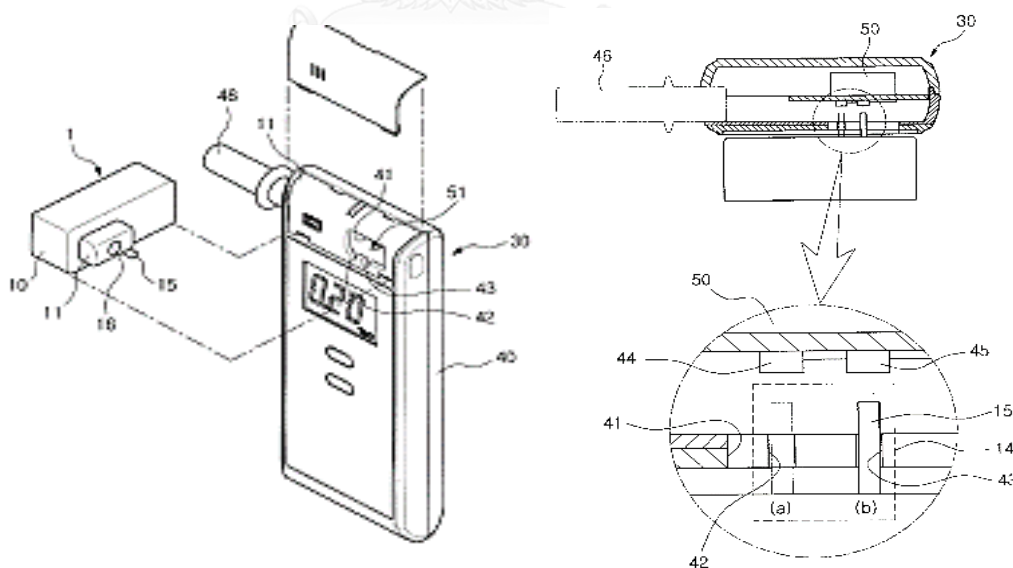
Roger (1988) พัฒนาและจดสิทธิบัตรแผ่นทดสอบระดับเอทานอลในน้ำลาย (Phillips & Calif, 1988) โดยมีหลักการคือเมื่อเอทานอลเข้าสู่ร่างกายแล้ว เอทานอลในร่างกายจะถูกกำจัดโดยตับในอัตราที่คงที่ โดยกลุ่มของเอนไซม์เรียกว่าแอลกอฮอล์ดีไฮโดรจีเนส (Alcohol dehydrogenase) จะเปลี่ยนให้เป็นอะเซตัลดีไฮด์ (acetaldehyde) จากนั้นจะถูกเอนไซม์อะเซตัลดีไฮด์ดีไฮโดรจีเนส (acetaldehyde dehydrogenase) เปลี่ยนให้ไปเป็นรูปของอะเซทิล-โคเอ (Acetyl-CoA) เกิดขึ้นในตับ ซึ่งอัตราการเกิดเป็นแบบอัตราที่คงที่และเป็นสารที่ไม่มีพิษ แผ่นทดสอบระดับเอทานอลในน้ำลาย ซึ่งมีผลในระดับเดียวกับการตรวจในเลือดโดยตรงในสัดส่วน 1 ต่อ 1 และแปลผลเป็นการอ่านสีและ

เทียบค่าสีกับความเข้มข้น สามารถตรวจวัดปริมาณความเข้มข้นเอทานอลในสารละลายตั้งแต่ 0.3 เปอร์เซ็นต์ ดังรูปที่ 2.13

กนกวรรณและยุภาพร (2557) พัฒนาอุปกรณ์ตรวจวัดเอทานอลแบบกระดาษที่ทำงานร่วมกับเอนไซม์ออกซิเดสและเอนไซม์ฮอร์สราดิสเปอร์ออกซิเดส โดย 3,3',5,5'-เตตระเมทิลเบนซิดีน เป็นสารตั้งต้นที่เปลี่ยนสีจากไม่มีสีเป็นสีเขียวปนน้ำเงิน จากการทดสอบพบว่าอุปกรณ์ตรวจวัดมีช่วงความเป็นเส้นตรงในช่วงความเข้มข้น 50-1000 ไมโครโมลาร์ ความเข้มข้นต่ำสุดที่วัดได้คือ 1.50 ไมโครโมลาร์ และความสามารถการวิเคราะห์ผลซ้ำจำนวน 10 ครั้ง ที่ความเข้มข้น 100, 500 และ 1000 ไมโครโมลาร์ มีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ร้อยละ เท่ากับ 1.93, 1.66, 1.24 ตามลำดับ ดังรูปที่ 2.14

2.9.2 การออกแบบอุปกรณ์สำหรับตรวจวัดเอทานอล

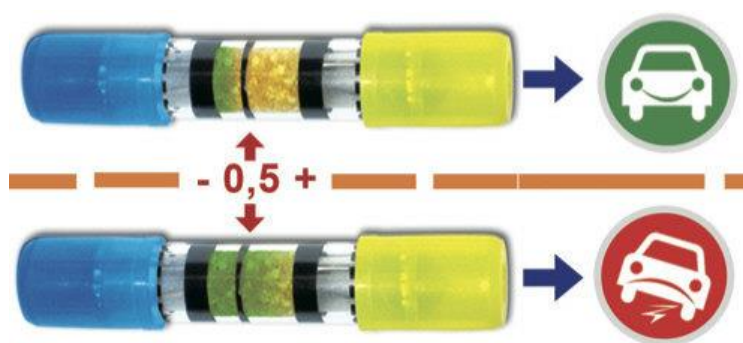
ELECHEM CO., LTD ออกแบบอุปกรณ์วัดระดับเอทานอลในอากาศด้วยวิธีทางสี โดยรูปแบบเล็กกะทัดรัดและเหมาะกับการใช้งานภาคสนาม โดยมีหลอดเป่าที่สามารถถอดเปลี่ยนได้ที่ติดกับเครื่องตรวจวัดเอทานอลและสามารถทราบปริมาณเอทานอลของผู้รับการตรวจวัดจากเลขหน้าจอดิจิทัล



รูปที่ 2.11 เครื่องวัดเอทานอลในอากาศด้วยระบบโฟโตเซลล์ (a) และ (b) คือขั้วที่บรรจุสารเคมี

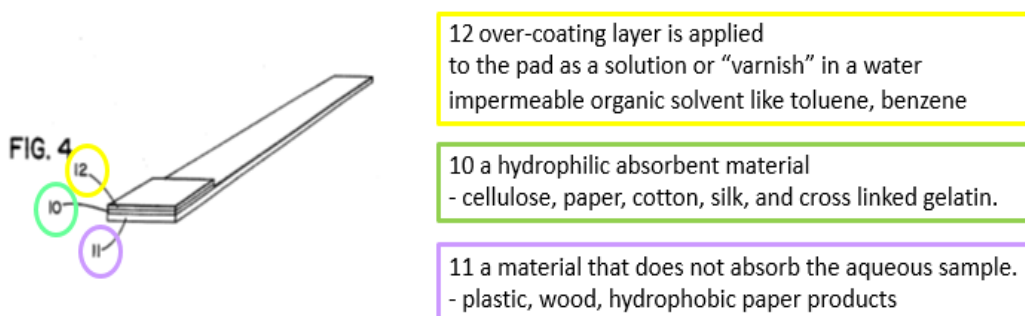
(Park & Park, 2013)

Borkenstein (1978) ออกแบบอุปกรณ์ตรวจเอทานอลด้วยวิธีทางสีในรูปแบบหลอดที่สามารถพกติดตัวได้ โดยหลอดมีลักษณะใสและป้องกันการรั่วซึมของสารละลายได้ สามารถมองเห็นการเปลี่ยนแปลงของสีได้ชัดเจน มีแถบเส้นสีดำเพื่อบอกปริมาณเอทานอลของผู้รับการตรวจวัดที่เป็นเกณฑ์มาตรฐานตามระดับที่กฎหมายกำหนด



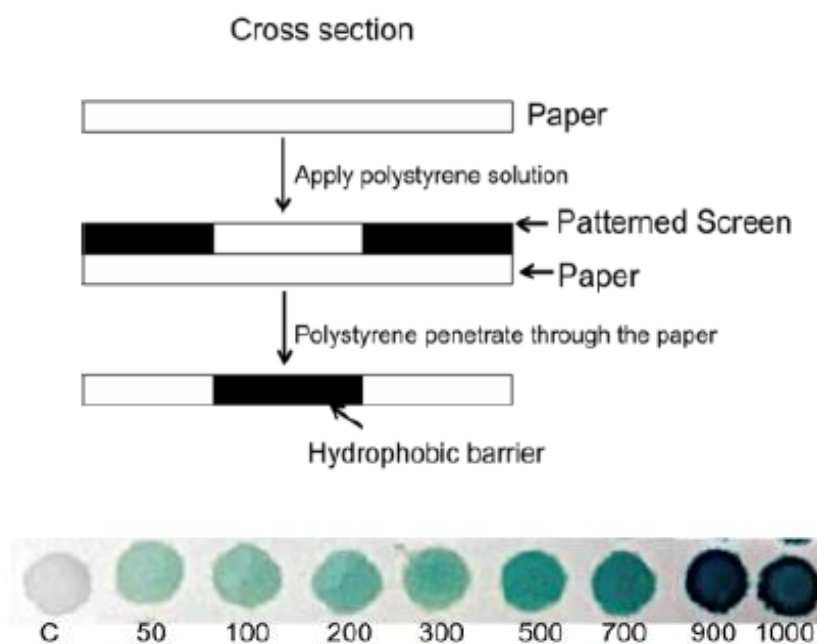
รูปที่ 2.12 หลอดตรวจเอทานอลด้วยวิธีทางสี
(Borkenstein, 1978)

Roger (1988) ออกแบบอุปกรณ์ทดสอบระดับเอทานอลในน้ำลายในลักษณะแผ่น โดยมี ส่วนประกอบ 3 ส่วนดังนี้ ชั้นบนคือชั้นเคลือบสารละลายมีลักษณะเงาใสสามารถมองเห็นการเปลี่ยนแปลงของสีได้ชัดเจนและป้องกันการซึมผ่านของสารละลายออร์แกนิก เช่น โทลูอินและเบนซีน ชั้นตรงกลางคือวัสดุที่ดูดซึมสารละลายที่ละลายน้ำได้เช่นเซลลูโลส กระดาษ ฝ้าย และชั้นที่รองอยู่ด้านล่างของแผ่นตรวจวัดเอทานอลเพื่อป้องกันการรั่วไหลของสารละลายเป็นแผ่นวัสดุที่ไม่ดูดซึมสารละลาย ได้แก่ พลาสติก ไม้ กระดาษที่น้ำไม่ดูดซึม



รูปที่ 2.13 ส่วนประกอบของแผ่นตรวจวัดเอทานอลในน้ำลายด้วยวิธีทางสี
(Phillips & Calif, 1988)

กนกวรรณและยุภาพร (2557) ออกอุปกรณ์ตรวจวัดสารละลายเอทานอลในลักษณะแผ่นกระดาษด้วยวิธีสร้างหลุมที่เป็นบริเวณสำหรับการตรวจวัดเอทานอลโดยพิมพ์ผ่านสกรีนด้วยพอลิสไตรีน (polystyrene) เพื่อสร้างส่วนที่ป้องกันการซึมผ่านของสารละลาย และด้านล่างแผ่นรองรับจะมีเทปใสรองไว้เพื่อป้องกันการรั่วซึมของสารเคมี



รูปที่ 2.14 กระดาษตรวจวัดเอทานอลด้วยวิธีทางสีโดยใช้เอนไซม์
(กนกวรรณและยุภาพร, 2557)

2.9.3 งานวิจัยการตรวจวัดก๊าซด้วยวิธีทางสีในงานด้านผลไม้

ก๊าซที่ผลไม้ปล่อยออกมานั้นสามารถบ่งชี้คุณภาพของผลไม้ในแต่ละสภาวะได้ ได้แก่ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซเอทิลีน และก๊าซเอทานอล โดยปริมาณ และอัตราการปล่อยของก๊าซนั้น ขึ้นกับชนิดของผลไม้และสภาพแวดล้อมในการเก็บรักษา โดยทั่วไปผู้บริโภคผลไม้จะเลือกซื้อผลไม้จากฉลากที่ระบุวันที่ หรือจากลักษณะทางกายภาพของผลไม้เช่น ผิวสัมผัส สี และกลิ่น ซึ่งบางครั้งอาจไม่บ่งชี้สภาวะของผลไม้ได้จริง จึงมีนักวิจัยได้คิดค้นอุปกรณ์การบ่งชี้คุณภาพของผลไม้จากก๊าซที่ผลไม้ปล่อยออกมาที่ความสัมพันธ์กับคุณภาพของผลไม้ที่แท้จริง

Mills และคณะ (1992) พัฒนาแผ่นฟิล์มตรวจวัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยวิธีทางสีในผลไม้ ด้วยเทคนิคการตรวจวัดเป็นแบบแข็ง (solid state) โดยยังคงมีน้ำอยู่ในระบบแต่เป็นรูปของผลึกแทนรูปของสารละลาย อีกทั้งอัตราการแพร่ของก๊าซเข้าสู่เฟสของแข็งเร็วกว่าการแพร่ของก๊าซสู่ของเหลว จึงทำให้การตรวจวัดก๊าซด้วยเทคนิคนี้เร็วกว่าเทคนิคเดิม (Severinghaus & Bradley,

1958) และยังสามารถตรวจวัดก๊าซที่มีปริมาณน้อยกว่า โดยเทคนิคของ Mills เป็นต้นแบบที่นิยมอย่างแพร่หลายในการสังเคราะห์แผ่นฟิล์มตรวจวัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยวิธีทางสี โดยแผ่นฟิล์มตรวจวัดมีองค์ประกอบดังนี้ อินดิเคเตอร์หรือสีย้อม (dye) พอลิเมอร์ไม่ละลายน้ำ (water immiscible polymer) สารเสริมสภาพพลาสติก (plasticizer) และสารที่ช่วยการแลกเปลี่ยนระหว่างเฟส (phase transfer agent)

วรภัทรและอรุณฤทธิ (2549) ได้พัฒนาแผ่นฟิล์มตรวจวัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยใช้หลักการเปลี่ยนสีของสีย้อมร่วมกับโซเดียมไบคาร์บอเนต (NaHCO_3) ที่มีหน้าที่เป็นอินดิเคเตอร์ โดยจะมีการเปลี่ยนแปลงสีจากปฏิกิริยาเคมีเมื่อมีค่าความเป็นกรดต่างที่เปลี่ยนแปลง

สำหรับแผ่นตรวจวัดปริมาณก๊าซเอทิลีนบนผลไม้มีรายงานว่าโมลิบดีนัมออกไซด์ร่วมกับพลาตตินั่มคลอไรด์โดยใช้วัสดุรองรับเป็นกระดาษกรองไรเซลลูโลสเพื่อตรวจวัดก๊าซเอทิลีนหรือที่รู้จักกันในชื่อ Kitagawa tubes แต่วิธีนี้เหมาะสำหรับการตรวจวัดก๊าซเอทิลีนที่มีปริมาณมาก จึงไม่เหมาะสมกับการนำมาติดตามผลไม้ที่มีการปล่อยก๊าซเอทิลีนปริมาณน้อย

Klein et al. (2006) ได้พัฒนาและจดสิทธิบัตรแผ่นตรวจวัดปริมาณก๊าซเอทิลีนบนแอปเปิ้ล โดยใช้โมลิบดีนัมออกไซด์ร่วมกับพลาตตินั่มซัลเฟต เพื่อใช้ในการติดตามกระบวนการสุกของแอปเปิ้ล พบว่าสามารถตรวจเอทิลีนในช่วงปริมาณที่ต่ำกว่าวิธี Kitagawa ได้

Lang, C. and T. Hübert (2011) ได้พัฒนาโมลิบดีนัมออกไซด์ที่ทำปฏิกิริยากับเอทิลีน สีที่เปลี่ยนแปลงจากสีขาว/เหลืองอ่อน ไปเป็นสีน้ำเงิน ขึ้นกับอัตราส่วนของโมลิบดีนัมและน้ำ ($\text{Mo}/\text{H}_2\text{O}$) และค่าพีเอชของสารละลาย (Pope, 1983) ซึ่งพบว่ามีเสถียรภาพที่ดี

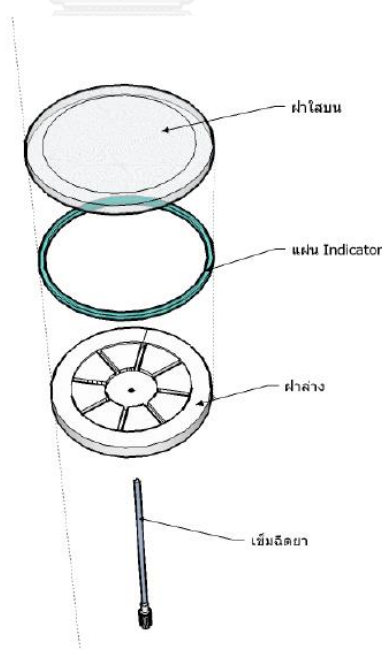
บริษัทวีทีทีในประเทศฟินแลนด์ (VTT Technical Research Centre of Finland Ltd; (Anoshkin et al., 2013) ศึกษาและพัฒนาแผ่นอิเล็กทรอนิกส์สำหรับตรวจวัดก๊าซเอทานอลและคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศเพื่อบ่งชี้คุณภาพของผลไม้สดตัดแต่ง โดยส่วนของแผ่นตรวจวัดเป็นส่วนหนึ่งของแผ่นที่ระบุคลื่นวิทยุ ทำงานแบบไร้สาย และประยุกต์ใช้งานเข้าร่วมกับโทรศัพท์มือถือที่สามารถสแกนป้ายที่ติดบนผลิตภัณฑ์และแสดงคุณภาพของผลไม้ในขณะนั้น โดยเทคโนโลยีนี้อยู่ในขั้นตอนการจดสิทธิบัตร

2.9.4 การออกแบบระบบตรวจจับก๊าซเพื่อใช้ในงานผลไม้

วรภัทรและอรรณฤทธิ์ (2549) ออกแบบโดยการนำวัสดุตรวจจับก๊าซไว้ด้านบนของกล่อง และไม่สัมผัสกับเนื้อทุเรียน โดยสารเคมีตรวจวัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะอยู่ในวัสดุที่ได้รับการออกแบบเพื่อป้องกันการซึมผ่านของสารเคมี มีเพียงก๊าซที่สามารถซึมผ่านเข้ามาได้ และด้านบนเป็นพลาสติกใส (ฟิล์ม P-Plus™) มีไว้เพื่อให้ง่ายต่อการสังเกตการเปลี่ยนแปลงสี



รูปที่ 2.15 ระบบตรวจวัดคาร์บอนไดออกไซด์
วรภัทรและอรรณฤทธิ์ (2549)

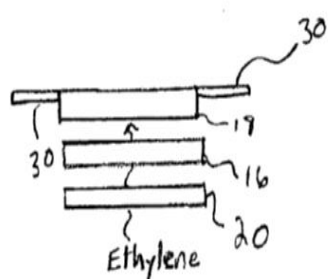
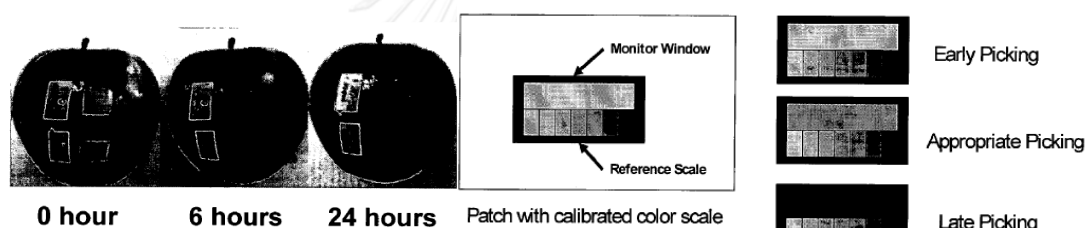


รูปที่ 2.16 องค์ประกอบอุปกรณ์ตรวจวัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยวิธีทางสี
(วรภัทรและอรรณฤทธิ์, 2549)

Klein et al. (2006) ออกแบบแผ่นตรวจจับก๊าซเอทิลีนโดยเป็นแผ่นกาวติดเข้ากับแอปเปิ้ลที่มีเปลือก (รูปที่ 2.17 ก) เมื่อแอปเปิ้ลเริ่มสุกจะปล่อยสารระเหยออกมาและซึมผ่านวัสดุรองรับเข้าสู่สารเคมี สารเคมีจะเปลี่ยนสีเมื่อตรวจจับเอทิลีนได้ โดยเปลี่ยนสีจากสีขาว/เหลืองอ่อนไปเป็นสีน้ำเงิน และมีแถบสีควบคุมเพื่อบ่งชี้สภาพของผลไม้ สีขาว/เหลืองอ่อนบ่งชี้ว่าผลไม้ยังไม่สุกดี สีฟ้าบ่งชี้ว่าผลไม้สุกเหมาะแก่การเก็บไปบริโภค และสีฟ้าเข้มหมายถึงผลไม้สุกจนเกินไป

องค์ประกอบของแผ่นตรวจจับก๊าซเอทิลีน มี 4 องค์ประกอบ (รูปที่ 2.17 ข)

1. สารเคมีที่ตรวจจับเอทิลีนโดยวิธีทางสี คือ สารประกอบโมลลิบดีนัมร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา
2. วัสดุรองรับในงานวิจัยใช้กระดาษกรองที่ไม่ดูดซึมสารละลาย มีเพียงก๊าซที่ซึมผ่านได้
3. วัสดุโปร่งใสบนสารเคมี
4. แผ่นกาวที่อยู่ด้านบนสุดสำหรับยึดติดแผ่นตรวจจับก๊าซกับผลไม้



30 = adhesive flaps
 18 = transparent or translucent
 16 = calorimetric reagent
 20 = does not absorb the aqueous sample

รูปที่ 2.17 แผ่นตรวจจับก๊าซเอทิลีนด้วยวิธีทางสี

(ก) การใช้งานกับผลไม้ (ข) องค์ประกอบแผ่นตรวจจับก๊าซเอทิลีน

(Klein et al., 2006)

บริษัทวีทีทีที่ออกแบบแผ่นตรวจจับก๊าซเอทานอลเพื่อใช้บ่งชี้คุณภาพของผลไม้สดตัดแต่ง ออกแบบโดยติดแผ่นตรวจจับไว้ด้านบนของกล่องและประยุกต์เข้ากับเทคโนโลยีระบบระบุวัสดุด้วย คลื่นความถี่วิทยุ (Radio-frequency identification ,RFID) โดยแผ่นตรวจจับด้านนอกเป็นแบบ เปลือยเพื่อให้ง่ายต่อการใช้งานเข้ากับโทรศัพท์มือถือ



รูปที่ 2.18 แผ่นบ่งชี้คุณภาพของผลไม้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์
(ที่มา: <http://www.vttresearch.com/media/news/vtt-sensor-detects-spoilage-of-food>)

2.9.5 ช่วงปริมาณก๊าซเอทานอลในผลไม้

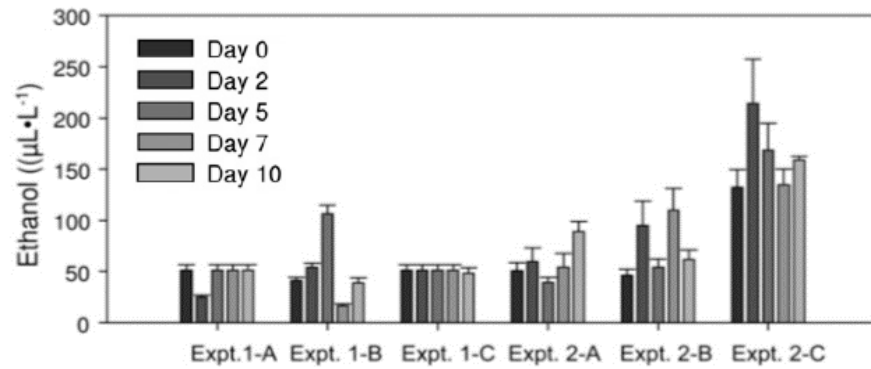
Sharon Dea et al. (2013) พบว่ามะม่วงสดตัดแต่งเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส ในช่วงวันที่ 0 ถึง 10 มีช่วงเอทานอลอยู่ที่ 25-250 ไมโครลิตรต่อลิตร (พีพีเอ็ม) จากการทดลองที่ 1A, 1B, 1C, 2A, 2B และ 2C จะเริ่มมีความผิดปกติของกลิ่น รสชาติ และเนื้อผิวผลไม้ ในการทดลองที่ 2C พบช่วงเอทานอล 150-250 ไมโครลิตรต่อลิตรดังรูปที่ 2.19

Pongsri et al. (2007) ตรวจสอบคุณภาพของส้มแทนเจอร์นที่ถูกเคลือบผิวด้วยแว็กซ์เพื่อยืดเวลาการเก็บรักษา ที่สภาวะอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส สารเคลือบผิวจะชะลอการสูญเสียและลดอัตราแลกเปลี่ยนก๊าซ ทำให้เกิดการหายใจแบบไม่ใช้ออกซิเจนและเกิดเอทานอลขึ้น พบว่า แอลกอฮอล์ในผลส้มมีความสัมพันธ์กับคุณภาพส้ม ส้มจะเข้าสู่สภาพเน่าเสียถ้ามีปริมาณเอทานอลวัดจากน้ำส้มและผิวส้มในช่วง 58-400 พีพีเอ็มในอากาศ และ 50-225 พีพีเอ็มในอากาศตามลำดับ และจะมีกลิ่นผิดปกติมากที่สุดที่ความเข้มข้นเอทานอล 75 พีพีเอ็มในอากาศ ดังรูปที่ 2.20

J.X. Shi et al. (2005) ได้ศึกษาการเก็บรักษาผลไม้เกรปฟรุ้ตและส้มแมนดารินภายใต้สภาวะการหายใจแบบไม่อาศัยออกซิเจน ที่สภาวะอุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส โดยทดสอบการตอบสนองด้วย รสชาติ คุณภาพ และก๊าซที่ผลไม้ปล่อยออกมา พบว่าส้มแมนดารินจะเน่าเสียที่เวลา 48 ชม. ส่วนเกรปฟรุ้ตจะเก็บรักษาได้นานกว่าและเริ่มเน่าเสียที่เวลา 72 ชม. พบเอทานอลที่ปล่อยจากส้มแมนดาริน 450 และ 700 ไมโครลิตรต่อลิตร (พีพีเอ็ม) เกรปฟรุ้ต 250 และ 300 ไมโครลิตรต่อลิตร (พีพีเอ็ม) ที่เวลา 48 และ 72 ชม.ตามลำดับ ดังรูปที่ 2.21

Ke et al. (1991) ศึกษาการเก็บรักษาผลแอปเปิ้ลและลูกพลัมในสภาวะที่มีออกซิเจนต่ำ 0.25 และ 0.02 เปอร์เซ็นต์ที่อุณหภูมิ 0 และ 5 องศาเซลเซียสตามลำดับ ซึ่งก่อให้เกิดการหายใจแบบไม่ใช้ออกซิเจน ทำให้ผลไม้เกิดกลิ่นเอทานอลและมีกลิ่นที่ผิดปกติ โดยงานวิจัยนี้จะตรวจวัดผลไม้ในวันที่ 7, 14, 29 และ 40 โดยปริมาณเอทานอลที่ก่อให้เกิดกลิ่นผิดปกติเล็กน้อย ในวันที่ 29 ที่สภาวะออกซิเจน 0.02 เปอร์เซ็นต์ (สภาวะออกซิเจนต่ำ) อยู่ในช่วง 1,500 และ 3,000 ไมโครลิตรต่อลิตร (พีพีเอ็ม) ตามลำดับ ดังรูปที่ 2.22 หากปริมาณความเข้มข้นเอทานอลมากกว่านี้จะไม่เป็นที่ยอมรับ

จากที่กล่าวถึงในข้างต้นช่วงความเข้มข้นของเอทานอลที่พบในผลไม้สด, ผลไม้สดตัดแต่งและผลไม้เคลือบผิวด้วยแว็กซ์ พบว่าช่วงเอทานอล (ในหน่วยพีพีเอ็มในอากาศ) เริ่มต้นของการเสื่อมสภาพและการเน่าเสียของผลไม้ในช่วง 50-1,500 พีพีเอ็ม โดยประเภทส้มอยู่ในช่วงเอทานอล 50-400 พีพีเอ็ม ผลไม้ประเภทอื่น ๆ ในช่วงความเข้มข้นของเอทานอลตั้งแต่ 200-1,500 พีพีเอ็มเป็นต้นไป



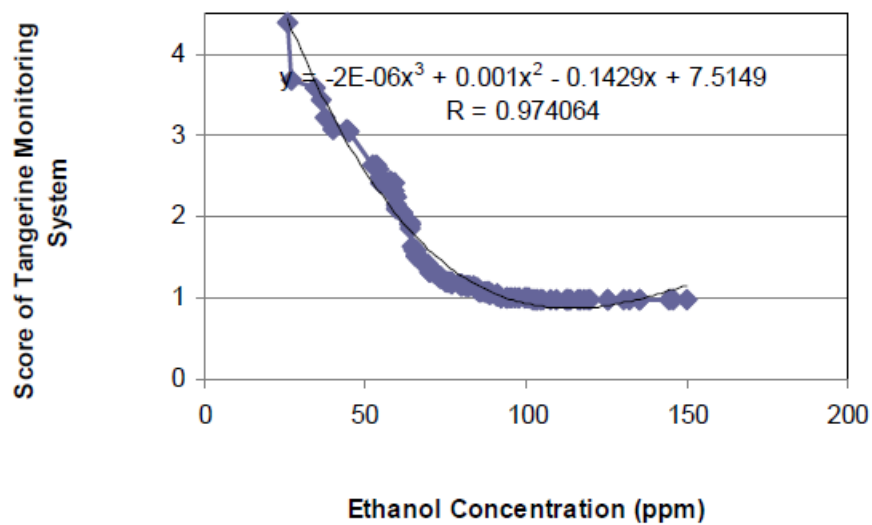
Expt.	Ripeness stage	Firmness (N) ^z	SSC (%) ^y	Hue angle (h°) ^y
Expt. 1	A	36.13 a ^x	15.81 a	92.26 a
	B	30.39 b	14.37 b	90.94 b
	C	25.02 c	14.12 b	90.40 b
Expt. 2	A	35.49 a	18.18 a	90.47ab
	B	30.30 b	18.00 a	90.69 a
	C	25.01 c	17.44 a	89.21 b

^z1 N = 0.2248 lbf.

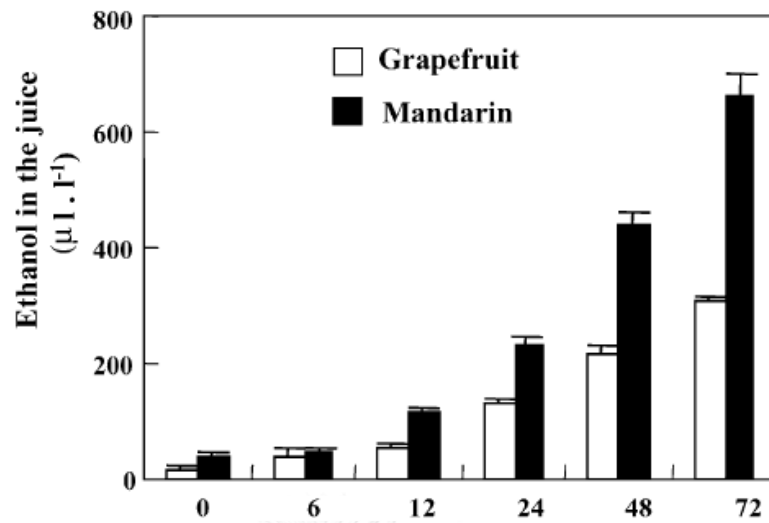
^ySignificant difference between the experiments ($P < 0.01$) according to analysis of variance using the general linear model.

^xRipeness stages sharing letters within an attribute and within an experiment were not significantly different from each other ($P < 0.05$) according to least significant difference test.

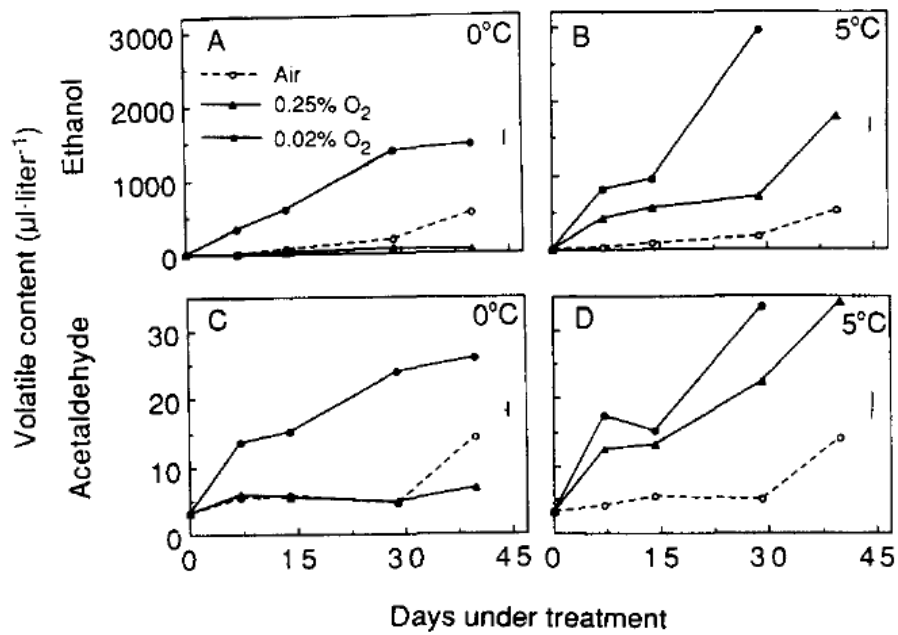
รูปที่ 2.19 ปริมาณเอทานอลในมะม่วงตัดแต่งสด อุณหภูมิเก็บรักษา 5 องศาเซลเซียส (Dea et al., 2013)



รูปที่ 2.20 ปริมาณเอทานอล (พีพีเอ็ม) สัมพันธ์กับคุณภาพของส้มแทนเจอร์น (Pongsri et al., 2007)



รูปที่ 2.21 ปริมาณเอทานอล (ไมโครลิตรต่อลิตร) และวันที่ทดลองของเกรปฟรุตและส้มแมนดาริน (J.X. Shi et al., 2005)



รูปที่ 2.22 ปริมาณเอทานอล (ไมโครลิตรต่อลิตร) และวันที่ทดลองของผลแอปเปิ้ล (Ke et al., 1991)

ตารางที่ 2.4 ช่วงการผลิตเอทานอลของผลไม้ชนิดต่าง ๆ ในแต่ละอุณหภูมิและเวลา

ผลไม้ (ชนิด)	เอทานอลในอากาศ (พีพีเอ็ม)	สถานะ ของผลไม้	อุณหภูมิ (เซลเซียส)	ระยะเวลา (วัน)	งานวิจัย (ปี)
มะม่วง สดตัดแต่ง	150-250	กลั่น และ/ หรือ รสชาติ ผิดปกติ	5	7	Dea et al. (2013)
ส้มแทนเจอร์รีน เคลือบผิว ด้วยแว็กซ์	<75	กลั่นผิดปกติ มาก	30	-	Pongsri et al. (2007)
ส้มแมนดาริน	450	กลั่น และ/ หรือ รสชาติ	20	2	J.X. Shi et al. (2005)
เกรปฟรุ้ต	250	ผิดปกติ	20	3	
ผลแอปเปิ้ล และลูกพลับ	Air = 200	กลั่นผิดปกติ		29	*Ke et al. (1991)
	0.25%O ₂ = 700	กลั่นผิดปกติ	5	29	
	0.02%O ₂ = 3,000	กลั่นผิดปกติ		29	
	Air = 500	ปกติ		40	
	0.25%O ₂ = 100	ปกติ	0	40	
	0.02%O ₂ = 1,500	กลั่นผิดปกติ		29	

หมายเหตุ: * คือเวลาและปริมาณเอทานอลที่ผลไม้มีกลิ่นผิดปกติอาจคลาดเคลื่อนเนื่องจากการวิจัยนี้
วัดเอทานอลในวันที่ 7, 14, 29 และ 40

2.9.6 วัสดุรองรับที่ใช้ในงานวิจัยทางสี

วัสดุรองรับที่ดี จะต้องเหมาะสมกับวัตถุประสงค์การใช้งาน คือต้องไม่ทำปฏิกิริยากับสารเคมีที่ใช้ทดสอบหรือเรียกว่าวัสดุเฉื่อย มีพื้นที่ผิวจำเพาะมากเพียงพอต่อการแพร่ของโมเลกุลก๊าซ เป้าหมายสู่สารเคมีบนวัสดุรองรับ และควรมีขนาดรูพรุนที่เหมาะสมกับปฏิกิริยา คือไม่เล็กจนเกินไปจนสารไม่สามารถแพร่เข้าไปได้ หรือไม่ใหญ่จนเกินไปจนทำให้ตำแหน่งที่ว่างไว้ในกาเกิดปฏิกิริยามีน้อย ในการทำวิจัยนี้เป็นการตรวจวัดก๊าซด้วยวิธีทางสี ดังนั้นวัสดุรองรับควรมีสีที่อ่อนเพื่อให้ง่ายต่อการสังเกตการเปลี่ยนแปลงของสี สามารถทนต่อสารเคมีที่ใช้ทำปฏิกิริยา ตัวอย่างของวัสดุรองรับที่ใช้ในงานด้านการตรวจวัดปริมาณก๊าซ ได้แก่ แผ่นกรองเส้นไรเซลลูโลส (Lang & Hübert, 2011; Phillips & Calif, 1988) ซิลิกาเจล (Blanco, 1998; Kuswandi et al., 2011) และโลหะออกไซด์จำพวก SiO_2 , SnO_2 , ZnO , WO_3 (Cabanillas-Galán et al., 2008) เป็นต้น

โดยวัสดุรองรับจากงานวิจัยทางสีที่ได้ผลตอบรับที่ดีได้แก่ กระดาษกรองไนลอน ซิลิกอนไดออกไซด์ และแผ่นซิลิกาเจล (Blanco, 1998; Kuswandi et al., 2011)

ตารางที่ 2.5 คุณสมบัติของวัสดุรองรับชนิดต่าง ๆ ในงานวิจัยด้านการตรวจวัดทางสี

(ที่มา: <http://www.sterlitech.com>)

วัสดุรองรับ	คุณสมบัติ
กระดาษกรองไรเซลลูโลส (cellulose free fiber) (Lang & Hübert, 2011; Phillips & Calif, 1988)	ไนลอน ซิมซึบน้ำได้ ไม่ทนต่อสภาวะกรด
	พอลิเตตระฟลูออโรเอทีลีน ไม่ซิมซึบน้ำ ทนต่อสภาวะกรด
	พอลิโพรพิลีน ไม่ซิมซึบน้ำ ทนต่อสภาวะกรด
	ใยแก้ว ดูดความชื้นต่ำ ทนต่อสภาวะกรด
ซิลิกอนไดออกไซด์ (Cabanillas-Galán et al., 2008)	อนุภาคสีขาวขนาดเล็ก ทนกรด ดูดความชื้นสูง และมีความเสถียรในตัวสูงมีความเฉื่อย
แผ่นซิลิกาเจล (TLC) (Klein et al., 2006) (Kuswandi et al., 2011)	กระดาษอลูมิเนียมฉาบด้วยซิลิกาเจล มีรูพรุนขนาดเล็ก ทนต่อสภาวะกรด ดูดความชื้นสูง และป้องกันการเสื่อมสภาพ
ซีโอไลต์-ZSM5 (Kuswandi et al., 2011)	อนุภาคสีขาวขนาดเล็ก ทนต่อสภาวะกรด
อลูมินาไดออกไซด์ (Turney et al., 1991)	อนุภาคสีขาวขนาดเล็ก ทนต่อสภาวะกรด

บทที่ 3

วัสดุอุปกรณ์และวิธีการทดลอง

3.1 วัสดุอุปกรณ์และเคมีภัณฑ์

3.1.1 วัสดุอุปกรณ์

1. เครื่องวิเคราะห์ก๊าซ (Gas Chromatography), SHIMADZU รุ่น GC-14B/MM-FID-01 ประเทศญี่ปุ่น สำหรับตรวจวิเคราะห์เอทานอล
2. เครื่องวิเคราะห์ก๊าซ (Gas Chromatography), SHIMADZU รุ่น GC-8A/MM-TCD-01 ประเทศญี่ปุ่น สำหรับตรวจวิเคราะห์อากาศ
3. เครื่องวัดความชื้นในอากาศ (Digital Hygro-Thermometer) รุ่น DHT-1 ประเทศเกาหลี
4. เครื่องวิเคราะห์การดูดกลืนแสง (UV-visible spectrophotometer), SHIMADZU รุ่น UV-2450 ประเทศญี่ปุ่น
5. กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning electron microscopy), HITACHI รุ่น S-4800 ประเทศญี่ปุ่น
6. กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Light microscopy), รุ่น SMZ-161
7. เครื่องปั่นหมุนวน (Vertex-Genie 2), Scientific Industries รุ่น G-560E ประเทศสหรัฐอเมริกา
8. เครื่องหมุนเหวี่ยง (Centrifuge), BOECO รุ่น U-320 ประเทศเยอรมนี
9. ตู้อบร้อน SNOL รุ่น SNOL 58/350 ประเทศลิทัวเนีย
10. ตู้เย็น MITSUBISHI ELECTRIC รุ่น MR-V46H
11. กล้องจากโทรศัพท์พกพา ASUS รุ่น Zenfone max

3.1.2 เคมีภัณฑ์

1. เอทานอล 99.9 เปอร์เซ็นต์, QRëC (Absolute Denatured) Grade AR
2. โปแทสเซียมไดโครเมต, Ajax Finechem Pty Ltd. B/No.1411181883
3. โปแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต, UNIVAR 414-500G
4. กรดซัลฟิวริก 98 เปอร์เซ็นต์, QRëC Grade AR
5. ผงซิลิกอนไดออกไซด์, Aldrich 637238-50G
6. กระดาษกรองไนลอน, Whatman Cat. No. 7404-004
7. กระดาษกรองแยกเฟส, Whatman Cat. No. 2200-090
8. แผ่นซิลิกาเจล, TLP-R10011B-323
9. ควอชขนาด 10 มล., Starna Scientific Ltd.
10. กล่องสุญญากาศ ขนาด 400 มล. (Borosilicate glass container),
Finaldek LHB-HR-400
11. กาวยางซิลิโคน, X'traseal
12. เข็มสำหรับก๊าซขนาด 5 มล. (Gastight Syringe) EXMIRE MICROSYPHINGE
รุ่น ITOMSGAN500
13. จุกยางสำหรับทางเข้าออกก๊าซ
14. พลาสติกพอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC) หนา 0.01 มม. ยี่ห้อ KITCHEN Neat
15. พลาสติกพอลิโพรพิลีน (PP) หนา 0.025 มม. ยี่ห้อแฮปปี้บาท
16. พลาสติกพอลิเอทิลีน (PE) หนา 0.0425 มม. ถุงซิปยี่ห้อทานตะวัน
17. ขวดดูแรนขนาด 5 ลิตร จุกยางและสายยาง

3.2 วิธีการทดลอง

3.2.1 การเตรียมเอทานอลอิมัตว์ในอากาศ ที่อุณหภูมิห้อง

การเตรียมเอทานอลอิมัตว์ในอากาศที่อุณหภูมิห้องโดยใช้ขวดดูแรนขนาด 5 ลิตร พร้อมจุกยางและหลอดแก้วงอที่เชื่อมติดกับสายยางเพื่อเป็นทางนำก๊าซออก เติมนเอทานอลเหลว 99.9 เปอร์เซ็นต์ ประมาณ 2 ลิตร ลงไปจากนั้นปิดด้วยจุกยาง รอให้ระบบเข้าสู่สมดุล (ความเข้มข้นของก๊าซเอทานอลที่ระเหย ณ สมดุลจะขึ้นกับอุณหภูมิและความดันในห้องที่ทำการทดลอง มีอุณหภูมิประมาณ 28 ± 3 องศาเซลเซียส และความดันบรรยากาศ จากนั้นวัดปริมาณก๊าซเอทานอลโดยเครื่องวิเคราะห์ก๊าซเพื่อหาปริมาณของเอทานอล โดยได้จากการคำนวณ เพื่อนำมาใช้สำหรับเจือจางก๊าซเอทานอลในระบบที่ทำการทดลอง (0-1,000 พีพีเอ็ม) การคำนวณได้จากภาคผนวก ข.1 และ ข.2



รูปที่ 3.1 เอทานอลอิมัตว์ในอากาศ

3.2.2 การเตรียมสารละลายเคมีที่ใช้เป็นสารออกซิไดซ์

การเตรียมสารละลายเคมีที่ใช้เป็นสารออกซิไดซ์ สำหรับการเตรียมสารละลายโปแทสเซียมไดโครเมตสำหรับตรวจวัดเอทานอลเตรียมโดยละลายผงโปแทสเซียมไดโครเมตโดยใช้น้ำปราศจากไอออนเป็นตัวทำละลายตามความเข้มข้น 0.1, 0.3 และ 0.5 โมลลาร์ จากนั้นเติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 98 เปอร์เซ็นต์โดยมวลหรือเท่ากับ 18 โมลลาร์ ปริมาตร 0.1 (หรือ 0.3 หรือ 0.5) มล.ลงในสารละลายโปแทสเซียมไดโครเมต การเตรียมสารละลายโปแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตจัดเตรียมเหมือนสารละลายโปแทสเซียมไดโครเมต แตกต่างกันเฉพาะปริมาณกรดซัลฟิวริกเข้มข้นที่เติมลงในสารละลายปริมาตร 0.05 (หรือ 0.1 หรือ 0.15) มล.

3.2.3 การเคลือบฝังสารละลายออกซิไดซ์ลงบนวัสดุรองรับ

สำหรับวัสดุรองรับที่เป็นแผ่น

กระดาษกรองไนลอนและแผ่นซิลิกาเจล เตรียมได้โดยนำวัสดุมาตัดให้ได้แผ่นที่มีขนาด 1×1 ตร.ซม. จากนั้นนำแผ่นวัสดุมาชุบด้วยสารละลายออกซิไดซ์ในหัวข้อ 3.2.2 แล้วตากให้แห้งด้วยอุณหภูมิห้อง

สำหรับอนุภาคซิลิกอนไดออกไซด์

อนุภาคซิลิกอนไดออกไซด์เตรียมโดยนำผงมาอบข้ามคืนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส จากนั้นชั่งผงซิลิกอนไดออกไซด์หนัก 0.3 กรัม และเติมสารละลายออกซิไดซ์ในหัวข้อ 3.2.2 ปริมาตร 0.85-1 มล. เข้าด้วยกัน สำหรับตัวรองรับที่ถูกเคลือบฝังด้วยสารละลายโปแทสเซียมไดโครเมตจะนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 15 ถึง 20 นาที เพื่อไล่ความชื้นออกจากอนุภาคซิลิกอนไดออกไซด์ ขณะที่ตัวรองรับที่ถูกเคลือบฝังด้วยสารละลายโปแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตจะปล่อยให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง เพื่อป้องกันสารออกซิไดซ์จากความร้อน และจัดเก็บในขวดแก้วที่อุณหภูมิห้อง

3.2.4 การเตรียมวัสดุตรวจวัดก๊าซเอทานอล

สำหรับวัสดุรองรับที่เป็นแผ่น

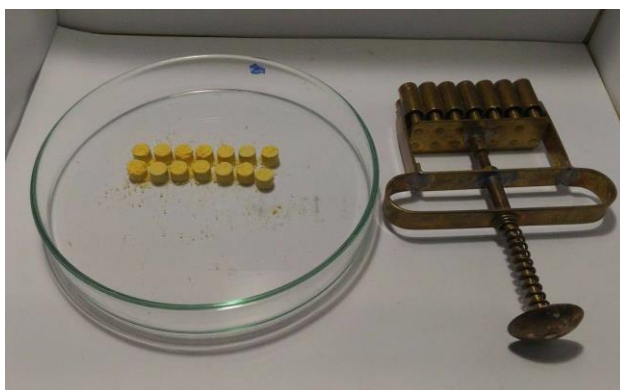
แผ่นตรวจวัดก๊าซเอทานอลเตรียมได้โดยนำแผ่นที่ถูกชุบด้วยสารละลายออกซิไดซ์จากหัวข้อ 3.2.3 มาติดลงบนกระดาษกรองเพื่อยึดติดกับกระดาษกรองแยกเฟสที่มีคุณสมบัติไม่ดูดซึมน้ำ (hydrophobic) ให้อากาศซึมผ่านได้แต่น้ำไม่สามารถซึมผ่าน ในแต่ละแผ่นจะติดตามความเข้มข้นของสารออกซิไดซ์ และภายในแผ่นกระดาษกรองแยกเฟสจะจัดเรียงแผ่นตรวจวัดตามปริมาตรของกรดซัลฟิวริกจากไม่มีกรดซัลฟิวริกไปจนปริมาตรต่ำสุดถึงปริมาตรสูงสุดดังรูปที่ 3.2

สำหรับอนุภาคซิลิกอนไดออกไซด์

เม็ตรวจวัดก๊าซเอทานอลเตรียมโดยใช้อนุภาคซิลิกอนไดออกไซด์ที่ถูกเคลือบฝังด้วยสารละลายออกซิไดซ์จากหัวข้อที่ 3.2.3 โดยใช้เครื่องอัดเม็ดและควบคุมปริมาณสารโดยการชั่งน้ำหนักดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.2 สารออกซิไดซ์โปแทสเซียมไดโครเมตและโปแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตบนวัสดุรองรับแผ่นซิลิกาเจล



รูปที่ 3.3 สารออกซิไดซ์โปแทสเซียมไดโครเมตบนซิลิกอนไดออกไซด์ขึ้นรูปแบบเม็ดด้วยเครื่องอัด

3.2.5 การเตรียมวัสดุตรวจวัดเอทานอลด้วยการห่อหุ้มพลาสติก

เตรียมโดยนำวัสดุตรวจวัดใส่ในถุงพลาสติกขนาด 4×6 ตร.ซม. และทำการปิดให้แน่นสำหรับบางการทดลองที่มีการเจาะรูเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสในการเกิดปฏิกิริยานั้นจะทำการเจาะช่องสี่เหลี่ยมขนาด 1×1 ตร.ซม. บนพลาสติก แล้วใช้กระดาษกรองแยกเฟสปิดทับเพื่อป้องกันการรั่วซึมของสารเคมีดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 วัสดุตรวจวัดเอทานอลห่อหุ้มด้วยพลาสติก

3.2.6 การเตรียมระบบปิดที่จำลองขึ้นเพื่อตรวจวัดเอทานอล

การเตรียมระบบปิดเพื่อบรรจุวัสดุตรวจวัดเตรียมโดยนำกล่องสุญญากาศมาวัดปริมาตรที่แน่นอนโดยใช้น้ำ พบว่ากล่องสุญญากาศมีปริมาตร 435 มล. จากนั้นนำฝากล่องมาเจาะรูขนาด 20 มล. เพื่อเป็นทางผ่านของก๊าซโดยใช้สว่านและใส่จุกยางโดยทากาวซิลิโคนป้องกันการรั่วไหลของก๊าซ จากนั้นทำการทดสอบหาปริมาณการรั่วไหลของก๊าซด้วยเครื่องวิเคราะห์ก๊าซ

การศึกษาการรั่วไหลของระบบปิดโดยจะทำการฉีดก๊าซเอทานอลที่ความเข้มข้น 200 และ 1,000 พีพีเอ็มในระบบปิด จากนั้นจะทำการตรวจวัดเอทานอลทุก ๆ 6 ชม. จนครบ 24 ชม. โดยใช้เครื่องวิเคราะห์ก๊าซ (GC-14B SHIMADZU, Japan) โดยแต่ละความเข้มข้นจะตรวจวัดทั้งสิ้น 3 ครั้ง โดยกำหนดให้เอทานอลเริ่มต้นคือ 100 เปอร์เซ็นต์และจากนั้นจะคำนวณเอทานอลที่รั่วไหลไปโดยใช้สมการ

$$\text{เปอร์เซ็นต์เอทานอลที่คงเหลือ} = \frac{\text{ความเข้มข้นเอทานอลที่เวลาใดใด}}{\text{ความเข้มข้นเอทานอลที่เริ่มต้น}} \times 100\% \quad (3.1)$$

3.2.7 การเตรียมระบบการทดลองที่สภาวะต่าง ๆ

ระบบการทดลองที่สภาวะต่าง ๆ มีทั้งสิ้น 3 สภาวะ ได้แก่ สภาวะในช่องเย็นที่อุณหภูมิ 4 ± 2 องศาเซลเซียส สภาวะในอุณหภูมิห้องที่ 28 ± 3 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิห้องที่ความชื้นอิ่มตัว โดยบรรจุน้ำในขวดชาขนาดเล็กรวมปริมาตร 10 เปอร์เซ็นต์ของปริมาตรระบบดังรูปที่ 3.5 ในช่วงความเข้มข้นของก๊าซเอทานอล 0, 200, 400, 600, 800 และ 1,000 พีพีเอ็ม

ตารางที่ 3.1 สภาวะต่าง ๆ ได้แก่อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ที่วัดได้จากการทดลอง

สภาวะต่าง ๆ	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ความชื้นสัมพัทธ์ (เปอร์เซ็นต์)
อุณหภูมิช่องเย็น	2.6-6.6	10-46
อุณหภูมิห้อง	24.9-30.5	61-74
อุณหภูมิห้องที่ความชื้น	25.1-31.4	58-97



รูปที่ 3.5 ระบบตรวจวัดเอทานอลในสภาวะอุณหภูมิห้องที่ความชื้น

3.2.8 วิธีการวิเคราะห์วัสดุตรวจวัดก๊าซเอทานอลด้วยการถ่ายภาพ

การติดตามผลด้วยภาพถ่ายเตรียมโดยการถ่ายภาพด้วยกล้องเดิมตลอดการทดลอง ภายใต้หลอดฟลูออเรสเซนต์ในห้องปิดที่ไม่มีผลจากแสงภายนอก และถ่ายภาพที่ตำแหน่งเดิมทุกครั้ง โดยจะกำหนดระยะห่างระหว่างกล้องและระบบวิเคราะห์เอทานอล โดยจะติดตามผลการเปลี่ยนแปลงสีระยะเวลา 7 วัน ติดตามทุก 24 ชม.

3.2.9 การวิเคราะห์วัสดุตรวจวัดก๊าซเอทานอลด้วยเครื่องวิเคราะห์การดูดกลืนแสง

การติดตามผลด้วยเครื่องวิเคราะห์การดูดกลืนแสงเตรียมได้จากน้ำเม็ดตรวจวัดที่วิเคราะห์ก๊าซเอทานอลจนครบ 7 วัน นำมาบดเป็นผงและชั่งน้ำหนัก 0.01 กรัมละลายในน้ำปราศจากไอออนปริมาตร 5 มล. จากนั้นนำไปปั่นด้วยเครื่องปั่นหมุนวน 1 นาที และเครื่องหมุนเหวี่ยงที่ 3,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 3 นาที (Ahmad, Bashammakh, Al-Sibaai, Alwael, & El-Shahawi, 2016) นำส่วนที่เป็นสารละลายใสมาวัดค่าการดูดกลืนในช่วงความยาวคลื่น 200 ถึง 600 นาโนเมตร หรือหาจากยอดพีคโดยสารประกอบโครเมต (+6) ที่ตำแหน่ง 350 นาโนเมตร และสารประกอบโครเมต (+3) ที่ตำแหน่ง 550 นาโนเมตร (Smirnova et al., 2013) โดยใช้น้ำปราศจากไอออนเป็นสารละลายที่ไร้สารตัวอย่าง (blank solution)

3.2.10 การวิเคราะห์ก๊าซเอทานอลด้วยเครื่องตรวจวัดก๊าซ

ก๊าซเอทานอลในระบบปิดจำลองจะถูกตรวจวัดด้วยเครื่องวิเคราะห์ก๊าซ SHIMADZU รุ่น GC-14B/MM-FID-01 ตรวจวัดโดยเครื่องตรวจวัดแบบเปลวไอออนไนเซชัน (FID, Flame ionization detector) ร่วมกับคอลัมน์แคพิลลารี (capillary column) ชนิด DB-5 ซึ่งภายในบรรจุด้วยซิลิกาหลอมละลาย (fused silica) โดยมีก๊าซพา (carrier gas) คือ ไนโตรเจน 99 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร และก๊าซไฮโดรเจน 99 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร

โดยใช้สภาวะในการตรวจวัดดังนี้

1. อุณหภูมิคอลัมน์ (Column temperature): เริ่มต้น 40 องศาเซลเซียส / สิ้นสุด 40 องศาเซลเซียส
2. อุณหภูมิช่วงหัวฉีด (Injector temperature): 150 องศาเซลเซียส
3. อุณหภูมิของเครื่องตรวจวัด (Detector temperature): 150 องศาเซลเซียส
4. เวลาในการวิเคราะห์: 6 นาที

3.2.11 ประสิทธิภาพของวัสดุตรวจวัดก๊าซเอทานอล

3.2.11.1 ช่วงความเป็นเส้นตรง

การหาค่าความเป็นเส้นตรงจากการทดสอบวัสดุตรวจวัดที่ความเข้มข้นของสารออกซิไดซ์และปริมาณกรดเท่ากัน สภาพแวดล้อมเดียวกันและปริมาณเอทานอลในระบบแตกต่างกันเพื่อศึกษาหาช่วงความเข้มข้นของเอทานอลใดที่มีความเป็นเส้นตรงและน่าเชื่อถือ ทำการทดสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์การดูดกลืนแสงและวิธีการทดสอบดังหัวข้อที่ 3.2.8

3.2.11.2 ความว่องไวในการตอบสนอง

ความว่องไวในการตอบสนองสามารถวัดได้จากการทดสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์การดูดกลืนแสง โดยวัดความชันของการเปลี่ยนแปลงของค่าการดูดกลืนต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของเอทานอลในช่วงความเป็นเส้นตรง

3.2.11.3 ความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถวัดได้

ความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถวัดได้จากการทดสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์การดูดกลืนแสงสามารถคำนวณหาได้จาก $3SD/m$ โดย SD คือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ความเข้มข้นต่ำสุดของช่วงความเป็นเส้นตรงและ m คือค่าความชันของค่าความว่องไวต่อการตอบสนอง

3.2.11.4 การผลิตซ้ำ

การผลิตวัสดุตรวจวัดเอทานอลแบบเดียวกันขึ้นมาใหม่ตามกระบวนการเดิมที่ได้ทำการผลิต โดยผลิตซ้ำกันจำนวน 5 ครั้ง โดยจัดเตรียมสารละลายออกซิไดซ์ใหม่ทุกครั้ง และตรวจวัดด้วยเครื่อง การดูดกลืนแสง โดยนำผงที่ถูกเคลือบฝังด้วยสารออกซิไดซ์ มาละลายในน้ำปราศจากไอออน โดยมี ขั้นตอนตามหัวข้อที่ 3.2.9 จากนั้นคำนวณส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน สัมพัทธ์ (%RSD)

$$\text{ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน} = \sqrt{\frac{\sum(x-\bar{x})^2}{N}} \quad (3.2)$$

$$\text{ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์} = \frac{SD}{\bar{x}} \times 100\% \quad (3.3)$$

3.2.11.5 การจัดเก็บ

การทดสอบเพื่อดูความมีเสถียรภาพของวัสดุตรวจวัดที่มีการเสื่อมสภาพไปตามระยะเวลา โดยวิธีแรกจะนำสารออกซิไดซ์อบแห้งด้วยเตาอบและการจัดเก็บในขวดแก้วสุญญากาศ และวิธีที่สอง นำสารออกซิไดซ์อบแห้งด้วยเตาอบและการจัดเก็บในถุงพลาสติกพอลิเอทิลีน โดยทั้งสองวิธีจัดเก็บ ภายใต้สภาวะเดียวกันที่อุณหภูมิห้อง 28 ± 3 องศาเซลเซียส ทำการทดสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์ การดูดกลืนแสง โดยมีขั้นตอนตามหัวข้อที่ 3.2.9 และนำผลวิเคราะห์มาประมวลผลจากการติดตามผล การจัดเก็บเป็นเวลา 0, 7, 14, 21 และ 28 วัน โดยกำหนดวันที่ 0 มีประสิทธิภาพเป็น 100 เปอร์เซ็นต์ จากนั้นคำนวณความมีเสถียรภาพของวัสดุตรวจวัดดังสมการ

$$\text{ความมีเสถียรภาพของวัสดุตรวจวัด} = \frac{\text{ค่าการดูดกลืนแสงที่เวลาใดใด}}{\text{ค่าการดูดกลืนแสงเริ่มต้น}} \times 100\% \quad (3.4)$$

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์การทดลอง

เนื้อหารายงานในบทนี้เป็นการศึกษาและพัฒนาวัสดุตรวจวัดสำหรับเอทานอลในอากาศ โดยแบ่งออกเป็น 4 ส่วน ในส่วนแรกคือการคัดเลือกสารออกซิไดซ์ (โปแทสเซียมไดโครเมตและโปแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต) ตัวรองรับ (กระดาษกรองไนลอน แผ่นซิลิกาเจล และซิลิกอนไดออกไซด์) และกรดซัลฟิวริกที่ทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในอัตราส่วนที่เหมาะสมเพื่อใช้กับระบบปิดที่มีช่วงความเข้มข้นของเอทานอลในอากาศ 0 ถึง 1,000 พีพีเอ็ม และติดตามการเปลี่ยนแปลงสีของแผ่น (test strip) หรือเม็ด (pellet) ตรวจวัดหลังการฉีดเอทานอลเข้าสู่ระบบ ส่วนที่สองศึกษาอิทธิพลของสภาพแวดล้อมต่อระบบตรวจวัด เช่น ความเข้มข้นของเอทานอล (0, 200, 400, 600, 800 และ 1,000 พีพีเอ็ม) อุณหภูมิและความชื้นที่แตกต่างกันจะส่งผลอย่างไรต่อการเปลี่ยนแปลงของวัสดุตรวจวัดเอทานอล โดยการควบคุมความเข้มข้นของเอทานอลในระบบให้ได้ความเข้มข้นตามช่วงเอทานอลที่ต้องการและควบคุมปริมาณความเข้มข้นของเอทานอลในระบบใหม่ ทุก 24 ชม.เป็นเวลา 7 วัน ส่วนที่สามคือการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของวัสดุตรวจวัด ได้แก่ ความแม่นยำ ความไวในการตอบสนอง ความเข้มข้นเอทานอลต่ำสุดที่สามารถวัดได้ การผลิตซ้ำ รวมถึงการจัดเก็บ และส่วนสุดท้ายคือการออกแบบเพื่อการใช้งาน

4.1 คัดเลือกวัสดุรองรับและสารเคมีออกซิไดซ์ในอัตราส่วนที่เหมาะสม

4.1.1 อิทธิพลของสารออกซิไดซ์ต่อระบบตรวจวัดเอทานอล

ในการทดลองมีสารออกซิไดซ์ 2 ชนิด ได้แก่ โปแทสเซียมไดโครเมต และโปแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ภายในระบบปิดที่ปราศจากเอทานอลและระบบปิดที่มีเอทานอล 1,000 พีพีเอ็ม เป็นเวลา 7 วันหรือจนกว่าจะไม่มี การเปลี่ยนแปลงของสี การเปลี่ยนแปลงของวัสดุตรวจวัดเอทานอลของโปแทสเซียมไดโครเมตจะเปลี่ยนแปลงจากสีเหลืองเป็นสีเขียว ดังปฏิกิริยาแสดงในสมการ (2.3) และโปแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตจะเปลี่ยนแปลงจากสีม่วงเป็นขาว/น้ำตาลดังสมการ (2.5), (2.6) และ (2.7) พบว่าสารออกซิไดซ์โปแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตไม่เหมาะในการนำมาตรวจวัดเอทานอล เนื่องจากสารเกิดการเปลี่ยนแปลงสีอย่างรวดเร็วภายใน 1 วันหลังจากทำการชุบหรือเคลือบฝังลงบนวัสดุรองรับที่ทำการศึกษาได้แก่ กระดาษกรองไนลอน แผ่นซิลิกาเจลที่ฉาบลงบนแผ่นอลูมิเนียม และอนุภาคซิลิกอนไดออกไซด์ แม้ในระบบที่ปราศจากเอทานอล โดยเปลี่ยนแปลงสีจากม่วงเป็นน้ำตาล

และสีขาว ดังตารางที่ 4.1 แต่ในกรณีที่ใช้ซิลิกอนไดออกไซด์เป็นตัวรองรับสีจะเกิดการเปลี่ยนแปลงเข้าสู่สีเมื่อเทียบกับกระดาษไนลอนและแผ่นซิลิกาเจล การเปลี่ยนแปลงสีเกี่ยวข้องกับวัสดุรองรับและปริมาณการเติมกรดซัลฟิวริกที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยซึ่งจะอธิบายในหัวข้อต่อไป ดังนั้นสรุปได้ว่าโปแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตเป็นสารที่มีความเสถียรภาพต่ำ ง่ายต่อการถูกออกซิไดซ์ด้วยอากาศ แสง และสารเจือปนอื่น ๆ (Index, 1983; Osol, 1980) จึงไม่เหมาะสมที่นำมาใช้ในการติดตามผลแบบระยะยาว อย่างไรก็ตามมีงานสิทธิบัตร EP 0 532 613 B1 (Turney, Christie, Hardin, & Corrigan, 1991) ได้ทำการปรับปรุงโปแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตให้มีความเสถียรภาพเพิ่มขึ้น แต่ต้องใช้สารเคมีอื่นอีกหลายชนิด ในขณะที่สารออกซิไดซ์โปแทสเซียมไดโครเมตมีเสถียรภาพมากกว่า ทั้งในสภาวะสารละลายและหลังการเคลือบฝังลงบนซิลิกอนไดออกไซด์ ทั้งนี้ขึ้นกับปัจจัยในการเลือกวัสดุรองรับที่จะอธิบายในหัวข้อต่อไป

ตารางที่ 4.1 การติดตามการเปลี่ยนแปลงของสีแผ่นตรวจวัดเอทานอลด้วยสารออกซิไดซ์โปแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตบนวัสดุรองรับชนิดต่าง ๆ ในระบบที่ปราศจากเอทานอล ที่เวลา 0 และ 1 วัน













เวลา	วัสดุรองรับ	กระดาษไนลอน			แผ่นซิลิกาเจล			ซิลิกอนไดออกไซด์		
	KMnO ₄ (โมลาร์)	0.1	0.3	0.5	0.1	0.3	0.5	0.1	0.3	0.5
0 ชม.	ไม่เติม H ₂ SO ₄									
	H ₂ SO ₄ 0.05 มล.									
	H ₂ SO ₄ 0.10 มล.									
	H ₂ SO ₄ 0.15 มล.									
24 ชม.	ไม่เติม H ₂ SO ₄									
	H ₂ SO ₄ 0.05 มล.									
	H ₂ SO ₄ 0.10 มล.									
	H ₂ SO ₄ 0.15 มล.									

จากการติดตามการเปลี่ยนแปลงสีของระบบตรวจวัดเอทานอลพบว่าความเข้มข้นของสารออกซิไดซ์มีผลอย่างชัดเจนต่อการเปลี่ยนแปลงสี โดยระบบที่มีปริมาณสารออกซิไดซ์น้อย จะสังเกตการเปลี่ยนแปลงสีได้ชัดเจนกว่าระบบที่มีสารออกซิไดซ์มาก เนื่องจากปริมาตรของสารละลายออกซิไดซ์ที่ใช้ในการชุบหรือเคลือบฝังลงบนวัสดุมีปริมาตรเท่ากันแต่แตกต่างกันที่ความเข้มข้น

ดังนั้นสารละลายออกซิไดซ์ที่มีความเข้มข้นมากกว่าจะมีปริมาณสารที่เคลือบฝังบนผิวของวัสดุได้มากกว่า เมื่อเอทานอลเข้าสู่ระบบสารออกซิไดซ์ซึ่งเป็นโลหะทรานซิชันจะชิงอิเล็กตรอนจากเอทานอลและเกิดการเปลี่ยนแปลงเลขออกซิเดชันของสารประกอบออกซิไดซ์ ซึ่งเป็นสาเหตุของการเปลี่ยนแปลงสีในระบบที่มีปริมาณเอทานอลเท่ากันพบว่าสารออกซิไดซ์จะทำปฏิกิริยากับเอทานอลในปริมาณที่เท่ากัน ดังนั้นเมื่อติดตามระบบที่สารละลายออกซิไดซ์ความเข้มข้นต่ำการเปลี่ยนแปลงสีจึงสังเกตได้รวดเร็วกว่าระบบที่มีปริมาณสารออกซิไดซ์มาก

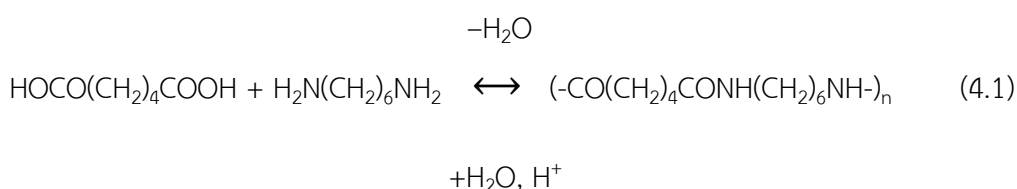
ตารางที่ 4.2 แสดงแผ่นรองรับที่ประกอบด้วยโปแทสเซียมไดโครเมตที่มีความเข้มข้น 0.1, 0.3 และ 0.5 โมลาร์ และกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 98 เปอร์เซ็นต์โดยมวลที่ปริมาตร 0.1 (หรือ 0.3 หรือ 0.5) พบว่าแผ่นรองรับที่มีโปแทสเซียมไดโครเมตที่มีความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ จะเห็นการเปลี่ยนแปลงของสีรวดเร็วกว่าที่ความเข้มข้น 0.3 และ 0.5 โมลาร์ตามลำดับในทุก ๆ อัตราส่วนการเติมปริมาตรของซัลฟิวริก โดยสีจะเปลี่ยนจากสีเหลืองไปเป็นสีเขียว/ฟ้า ดังนั้นอิทธิพลของปริมาณสารออกซิไดซ์และปริมาตรกรดซัลฟิวริกจึงมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสีอย่างชัดเจน ซึ่งเป็นข้อดีอย่างหนึ่งในงานวิจัยเนื่องจากการเพิ่มหรือลดปริมาณความเข้มข้นของสารละลายออกซิไดซ์ที่ใช้ในการชุบหรือเคลือบฝังตัวรองรับสามารถปรับเปลี่ยนให้เป็นที่ไปตามความเหมาะสมตามปริมาณเอทานอลที่เราต้องการตรวจวัดในระบบนั้น ๆ ได้ อย่างไรก็ตามปริมาณกรดซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาก็มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาเช่นกัน วัสดุรองรับที่ชุบหรือเคลือบฝังด้วยสารละลายออกซิไดซ์ที่มีปริมาณกรดมากจะเกิดการเปลี่ยนแปลงสีได้รวดเร็วกว่าแผ่นรองรับที่มีปริมาณกรदन้อย ซึ่งเป็นผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี

ตารางที่ 4.2 การติดตามการเปลี่ยนแปลงสีแผ่นตรวจวัดเอทานอลด้วยสารออกซิไดซ์ของแผ่นตรวจวัดของสารออกซิไดซ์โปแทสเซียมไดโครเมตบนวัสดุรองรับแผ่นซิลิกาเจลในระบบที่ความเข้มข้นเอทานอล 1,000 พีพีเอ็ม ที่เวลา 4 วัน

$K_2Cr_2O_7$ (โมลาร์)	0.1	0.3	0.5
ไม่เติม H_2SO_4			
H_2SO_4 0.1 มล.			
H_2SO_4 0.3 มล.			
H_2SO_4 0.5 มล.			

4.1.2 อิทธิพลของวัสดุรองรับต่อระบบตรวจวัดเอทานอล

เพื่อคัดเลือกวัสดุรองรับที่เหมาะสมงานวิจัยนี้ได้เลือกศึกษาวัสดุ 3 ชนิด ได้แก่ กระดาษไนลอน แผ่นซิลิกาเจล และอนุภาคซิลิกอนไดออกไซด์ โดยใช้กระดาษกรองแยกเฟส (Phase separator) ที่มีคุณสมบัติป้องกันการซึมผ่านของเหลวรองรับอีกชั้นหนึ่งและยึดเข้าด้วยกันโดยใช้เทปกาว 2 หน้าดังวิธีเตรียมวัสดุรองรับที่เป็นแผ่นในหัวข้อ 3.2.4 รูปที่ 3.2 จากการติดตามผลการเปลี่ยนแปลงสีในระยะเวลา 7 วันพบว่าแผ่นรองรับทั้ง 3 ชนิดที่มีลักษณะแผ่น ไม่เหมาะสมที่จะนำมาตรวจวัดเอทานอลเนื่องจากเกิดการเปลี่ยนแปลงของสีอย่างชัดเจนแม้ในระบบที่ปราศจากเอทานอล ในขณะที่สารละลายออกซิไดซ์ที่ไม่เติมกรดซัลฟิวริกจะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงสี จึงคาดว่าสาเหตุการเปลี่ยนแปลงสีในระบบที่ไม่มีเอทานอลเกิดจากกรดที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทำลายแผ่นรองรับ ทำให้เกิดความเสียหายของวัสดุรองรับ เนื่องจากการทำปฏิกิริยากับกรดอาจมีสารเคมีบางตัวรีดิวซ์โลหะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสี (Muller, 1999-2016; Wiley & Sons, 1978) ซึ่งสังเกตในตารางที่ 4.3 (ก) พบว่าตัวรองรับกระดาษไนลอนและแผ่นซิลิกาเจลเกิดการเปลี่ยนแปลงสีอย่างรวดเร็วตามลำดับ ขณะที่อนุภาคซิลิกอนไดออกไซด์เกิดการเปลี่ยนแปลงสีได้ช้าที่สุด ซึ่งตรงกับคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุคือกระดาษไนลอนและกระดาษกรองแยกเฟสมีความทนต่อกรดได้น้อยกว่า แผ่นซิลิกาเจลและซิลิกอนไดออกไซด์ หลังจากการติดตามการเปลี่ยนแปลงวัสดุรองรับเป็นเวลา 7 วัน ได้นำวัสดุรองรับทั้งหมดเก็บไว้ที่สภาวะอุณหภูมิห้องเพื่อดูการเสื่อมของวัสดุรองรับ ตารางที่ 4.3 (ข) พบว่าในวันที่ 14 อนุภาคซิลิกอนไดออกไซด์ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมที่เวลา 7 วัน แต่แผ่นซิลิกาเจลนั้นจะเกิดความเสียหายเพิ่มขึ้นและกระดาษไนลอนนั้นพบผลึกสีม่วง ซึ่งคาดว่าป็นเป็นมอนอเมอร์ของไนลอน เป็นผลมาจากปฏิกิริยาเคมีของกรดซัลฟิวริกและไนลอนดังสมการที่ 4.1 ไนลอนเป็นสารพอลิเอไมด์ (polyamide) ที่เกิดจากปฏิกิริยาควบนั่นของกรดอะดิพิค (adipic acid) และเฮกซะเมทิลีนไดเอมีน (hexamethylene diamide) ซึ่งสามารถเกิดปฏิกิริยาผันกลับได้หากมีกรดและน้ำ (Flinn Scientific, 2016)



จากที่กล่าวมาข้างต้นจึงสรุปได้ว่ากระดาษไนลอน แผ่นซิลิกาเจล และอนุภาคซิลิกอนไดออกไซด์ที่รองรับด้วยกระดาษกรองแยกเฟสจะเกิดการเปลี่ยนแปลงสีทั้งหมดแม้ในระบบที่ไม่มีเอทานอล

ตารางที่ 4.3 การติดตามการเปลี่ยนแปลงของสีแผ่นตรวจวัดเอทานอลด้วยสารออกซิไดซ์โปแทสเซียมไดโครเมตบนวัสดุรองรับชนิดต่าง ๆ ในระบบที่ปราศจากเอทานอล ในช่วงเวลา 7 วัน และ 14 วัน

ก) แผ่นตรวจวัดเอทานอลด้วยสารออกซิไดซ์โปแทสเซียมไดโครเมต 0.3 โมลาร์ ที่ไม่เติมและเติมกรดซัลฟิวริก 0.1 (หรือ 0.3 หรือ 0.5) มล. ในช่วงเวลา 7 วัน

วัสดุรองรับ	กระดาษไนลอน				แผ่นซิลิกาเจล				ซิลิกอนไดออกไซด์			
	การทดลองวันที่											
$K_2Cr_2O_7$ 0.3 โมลาร์	0	1	3	7	0	1	3	7	0	1	3	7
ไม่เติม H_2SO_4												
H_2SO_4 0.1 มล.												
H_2SO_4 0.3 มล.												
H_2SO_4 0.5 มล.												

ข) แผ่นตรวจวัดเอทานอลด้วยสารออกซิไดซ์โปแทสเซียมไดโครเมต 0.3 โมลาร์ และกรดซัลฟิวริก 0.5 มล. ที่เวลา 14 วัน

วัสดุรองรับ	กระดาษไนลอน			แผ่นซิลิกาเจล			ซิลิกอนไดออกไซด์		
	การทดลองวันที่ 14								
$K_2Cr_2O_7$ 0.3 โมลาร์ H_2SO_4 0.5 มล.									

เพื่อเป็นการยืนยันว่าวัสดุรองรับชนิดใดมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของสีแผ่นตรวจวัดเอทานอลในระบบปิดที่ไม่มีเอทานอล จึงได้ทดลองโดยการติดตามผลการเปลี่ยนแปลงของสีบนวัสดุรองรับทั้ง 5 ชนิด ได้แก่ แผ่นกระดาษไนลอน แผ่นซิลิกาเจล อนุภาคซิลิกอนไดออกไซด์ กระดาษกรองแยกเฟส และกระดาษกาวสองหน้า ดังตารางที่ 4.4 พบว่าวัสดุรองรับแบบแผ่นที่มีสารออกซิไดซ์และกรด ได้แก่ แผ่นกระดาษไนลอน แผ่นซิลิกาเจลและกระดาษกรองแยกเฟสยังคงเปลี่ยนสีอย่างชัดเจน แม้ไม่รองด้วยกระดาษกาวสองหน้าและกระดาษกรองแยกเฟสก็ตาม แผ่นกระดาษ

ไนลอนและแผ่นซิลิกาเจลยังคงเกิดความเสียหาย สันนิษฐานว่าตัวรองรับดังกล่าวทำปฏิกิริยากับกรด เช่นที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น ในขณะที่ผงซิลิกอนไดออกไซด์ที่ไม่มีวัสดุใดรองรับรองจะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงสี แต่เมื่อรองด้วยกระดาษกรองแยกเฟสและกระดาษกรองหน้าพบว่าอนุภาคซิลิกอนไดออกไซด์บางส่วนเป็นสีเขียว โดยกระดาษกรองหน้าจะเห็นผลการเปลี่ยนแปลงของสีได้ชัดเจนกว่า จึงสรุปได้ว่าอนุภาคซิลิกอนไดออกไซด์ที่ไม่มีกระดาษกรองแยกเฟสและ/หรือกระดาษกรองหน้ารองเป็นวัสดุเพียงชนิดเดียวที่มีความคงทนต่อสารออกซิไดซ์และกรด จะไม่เกิดการเปลี่ยนสีอย่างชัดเจนในระบบที่ไม่มีเอทานอล เป็นวัสดุเฉื่อยต่อปฏิกิริยาเคมีกับกรดซัลฟิวริก อนุภาคซิลิกอนไดออกไซด์จึงเหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นวัสดุรองรับสารออกซิไดซ์ และเพื่อให้ง่ายต่อการติดตามการเปลี่ยนแปลงสีของวัสดุตรวจวัดก๊าซเอทานอล จึงนำอนุภาคซิลิกอนไดออกไซด์มาอัดเม็ดขึ้นรูปดังรูปที่ 3.3 หัวข้อที่ 3.2.4 ส่วนวัสดุรองรับทุกชนิดทั้งแบบแผ่นและแบบอนุภาคที่มีเพียงสารออกซิไดซ์และไม่เติมกรดซัลฟิวริกพบว่าไม่มีการเปลี่ยนสีของแผ่นและอนุภาคไปเป็นสีเขียวอย่างชัดเจน

ตารางที่ 4.4 อิทธิพลของวัสดุรองรับชนิดต่าง ๆ ต่อการเปลี่ยนแปลงสีของสารออกซิไดซ์ในระบบที่ไม่มีเอทานอล

วัสดุรองรับ แบบแผ่น	กระดาษไนลอน				แผ่นซิลิกาเจล				กระดาษกรองแยกเฟส			
	$K_2Cr_2O_7$ 0.1 โมลาร์	0	1	3	7	0	1	3	7	0	1	3
ไม่เติม H_2SO_4												
H_2SO_4 0.5 มล.												
วัสดุรองรับ แบบอนุภาค	ซิลิกอนไดออกไซด์				ซิลิกอนไดออกไซด์ บนกระดาษกรอง แยกเฟส				ซิลิกอนไดออกไซด์ บนกระดาษกรอง หน้า			
	$K_2Cr_2O_7$ 0.1 โมลาร์	0	1	3	7	0	1	3	7	0	1	3
ไม่เติม H_2SO_4												
H_2SO_4 0.5 มล.												

4.1.3 อิทธิพลของอัตราส่วนความเข้มข้นสารออกซิไดซ์และปริมาตรกรดต่อระบบตรวจวัดเอทานอล

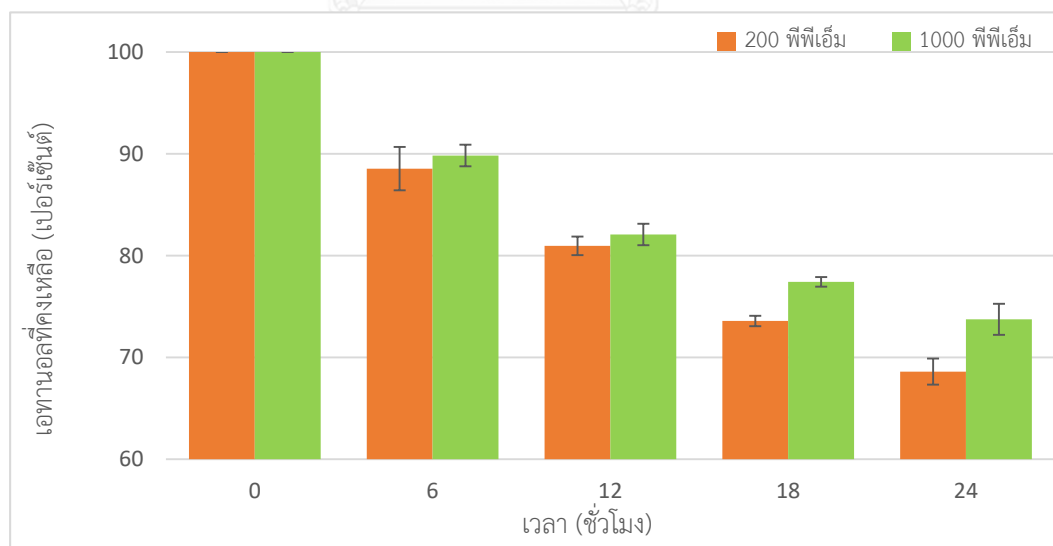
เพื่อหาอัตราส่วนปริมาตรที่เหมาะสมของความเข้มข้นสารออกซิไดซ์โปแทสเซียมไดโครเมตและปริมาตรกรดซัลฟิวริกบนวัสดุรองรับซิลิกอนไดออกไซด์แบบเม็ดที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสี การเลือกความเข้มข้นของสารออกซิไดซ์จะพิจารณาพร้อมกับการเลือกปริมาตรที่เหมาะสมของกรด เพื่อให้ได้อัตราส่วนที่เหมาะสมกับช่วงเอทานอลที่ต้องการตรวจวัด จากการทดลองในหัวข้อ 4.1.1 และ 4.1.2 โดยเติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 98 เปอร์เซ็นต์โดยมวล 0.1 (หรือ 0.3 หรือ 0.5) มล. ลงในสารละลายออกซิไดซ์โปแทสเซียมไดโครเมตปริมาตร 3 มล. ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ 0.1 (0.3 หรือ 0.5) โมลาร์ พบว่าปริมาตรของกรดที่เหมาะสมที่สุดคือ 0.5 มล. เนื่องจากกรดซัลฟิวริกทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาหากมีความเข้มข้นมากจะเกิดปฏิกิริยาอว่องไวและมีสีที่เข้มเด่นชัดกว่าระบบที่มีปริมาณความเข้มข้นกรดน้อย ดังนั้นจึงเลือกกำหนดปริมาตรของกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 98 เปอร์เซ็นต์ที่ 0.5 มล. จากนั้นจะหาความเข้มข้นของโปแทสเซียมไดโครเมตที่เหมาะสมที่สุดสำหรับระบบตรวจวัดเอทานอล ในช่วง 0 ถึง 1,000 พีพีเอ็ม ในช่วงเวลา 7 วัน โดยช่วงความเข้มข้นของเอทานอลที่ต้องการตรวจวัดนั้นอ้างอิงจากช่วงเอทานอลที่ผลไม่ปล่อยออกมาเมื่อเกิดการเนาเสียและเสื่อมสภาพดังตารางที่ 2.5 จากการติดตามสีของเม็ดตรวจวัดเอทานอลจากตารางที่ 4.5 พบว่าความเข้มข้นของสารละลายโปแทสเซียมไดโครเมต 0.1 โมลาร์เป็นความเข้มข้นที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากเห็นการเปลี่ยนแปลงได้ชัดเจนในช่วงเอทานอลที่ต้องการ

ตารางที่ 4.5 อิทธิพลของสัดส่วนความเข้มข้นโปแทสเซียมไดโครเมตและปริมาตรกรดบนวัสดุรองรับซิลิกอนไดออกไซด์ 0.5 กรัม ในเอทานอล 1,000 พีพีเอ็ม ที่อุณหภูมิ 28 ± 3 องศาเซลเซียส ช่วงเวลาการทดลอง 7 วัน

K ₂ Cr ₂ O ₇ (โมลาร์)	H ₂ SO ₄ 98% (มล.)	การทดลองวันที่									
		0	1	2	3	4	5	6	7		
3 มล.	(มล.)										
0.1	0.5										
0.3	0.5										
0.5	0.5										

4.2 อิทธิพลของสภาพแวดล้อมต่อระบบตรวจวัดเอทานอล

เพื่อศึกษาหาอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีด้วยเครื่องวิเคราะห์ก๊าซภายในระบบปิดที่ประกอบด้วยวัสดุตรวจวัดเอทานอลของโปแทสเซียมไดโครเมตบนซิลิกอนไดออกไซด์น้ำหนัก 0.5 กรัม และควบคุมระบบให้มีความเข้มข้นของเอทานอลในอากาศใกล้เคียงกับความเข้มข้นของระบบที่ต้องการได้แก่ 200, 400, 600, 800 และ 1000 พีพีเอ็ม และวัดปริมาณเอทานอลจากเครื่องวิเคราะห์ก๊าซหลังจากฉีดก๊าซเอทานอลเข้าสู่ระบบและภายหลังฉีดก๊าซเอทานอลเข้าสู่ระบบเป็นเวลา 24 ชม. โดยปริมาณเอทานอลที่หายไประหว่างการทดลองคาดว่าเกิดจากการทำปฏิกิริยาเคมีจากเม็ดตรวจวัดกับเอทานอลและปริมาณของเอทานอลที่รั่วไหล ดังนั้นจึงต้องหาอัตราการรั่วไหลของก๊าซในระบบปิดเพื่อเป็นการยืนยันว่าเกิดในระบบนั้นเกิดปฏิกิริยาเคมีกับเอทานอลหรือไม่ ทดลองโดยจำลองระบบปิดที่ปราศจากเม็ดตรวจวัดเอทานอลและควบคุมเอทานอลให้อยู่ในช่วงที่ต้องการ และตรวจวัดปริมาณเอทานอลในระบบทุก ๆ 6 ชม. เป็นเวลา 24 ชม. ดังรูปที่ 4.1 พบว่าอัตราการลดลงของเอทานอลในระบบปิดทุกช่วงปริมาณความเข้มข้นของเอทานอลไม่แตกต่างกันอย่างชัดเจนอยู่ในช่วง 1.1-1.3 เปอร์เซ็นต์ของความเข้มข้นเอทานอลต่อชม. หลังจากผ่านไป 24 ชม.พบปริมาณเอทานอลที่คงเหลือในระบบประมาณ 68.2-73.7 เปอร์เซ็นต์ของความเข้มข้นเริ่มต้น จึงเป็นสาเหตุที่ต้องฉีดก๊าซเอทานอลเข้าสู่ระบบทุก ๆ วัน เพื่อคงความเข้มข้นเอทานอลในระบบให้เป็นไปตามช่วงที่ต้องการในระหว่างการทดลอง

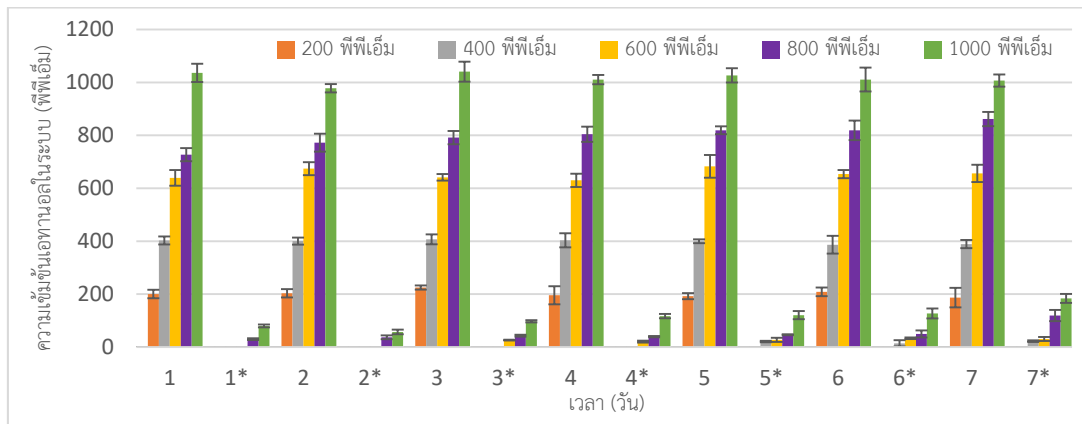


รูปที่ 4.1 เปอร์เซ็นต์การรั่วไหลของก๊าซเอทานอลจากระบบปิดที่ความเข้มข้นเอทานอลเริ่มต้น 200 และ 1,000 พีพีเอ็ม ที่อุณหภูมิ 28 ± 3 องศาเซลเซียส ในช่วงเวลา 24 ชม.

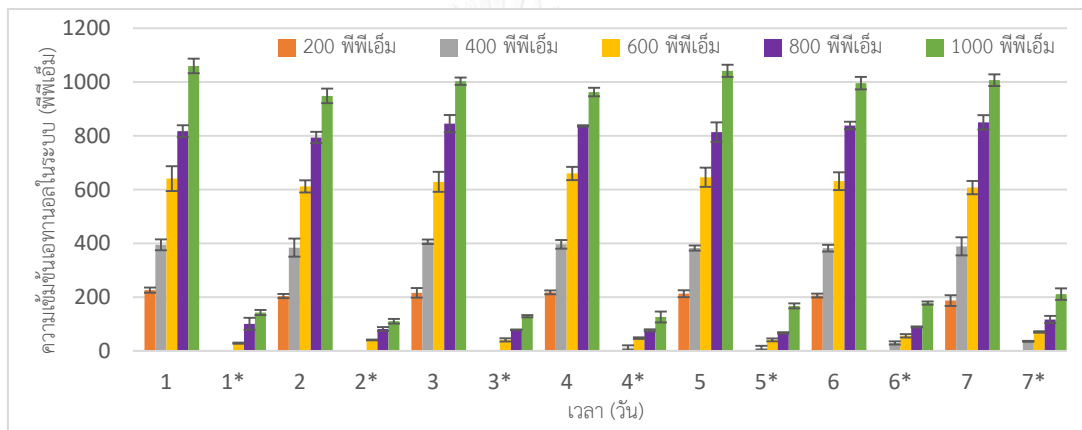
4.2.1 อิทธิพลของอุณหภูมิต่อระบบตรวจวัดเอทานอล

การศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิที่แตกต่างกันในช่วงอุณหภูมิห้อง (28 ± 3 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ 61-74 เปอร์เซ็นต์) และอุณหภูมิต่ำในช่องเย็น (4 ± 2 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ 10-46 เปอร์เซ็นต์) ที่ส่งผลต่อระบบการตรวจวัดเอทานอล โดยทั้งสองช่วงอุณหภูมินั้นเป็นช่วงอุณหภูมิการจับตัวของผลไม้น้ำ จากการติดตามความเข้มข้นของเอทานอลในระบบด้วยเครื่องวิเคราะห์ก๊าซเป็นเวลา 7 วัน ดังรูปที่ 4.2 (ก) และ 4.2 (ข) พบว่าในระบบความเข้มข้นเอทานอล 200 พีพีเอ็มจะไม่พบปริมาณเอทานอลคงเหลือหลังฉีด 24 ชม. ตลอดช่วงการทดลองทั้ง 7 วัน เพราะปริมาณเอทานอลนั้นระเหยและถูกทำปฏิกิริยาไปจนหมด ซึ่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะถูกจำกัดโดยการถ่ายโอนมวลสาร (mass transfer limitation) ซึ่งแตกต่างจากระบบความเข้มข้นเอทานอลในอากาศ 400, 600, 800 และ 1,000 พีพีเอ็ม อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะถูกจำกัดโดยจลนศาสตร์ (kinetic limitation) ซึ่งไม่ควรนำค่าอัตราการลดลงของเอทานอลมาเปรียบเทียบกัน ดังนั้นอัตราการลดลงของเอทานอลที่ถูกจำกัดโดยจลนศาสตร์ในช่วงอุณหภูมิห้องและช่วงอุณหภูมิต่ำในระบบความเข้มข้นเอทานอลในอากาศ 400, 600, 800 และ 1,000 พีพีเอ็ม คือ 15.5, 26.4, 31.1, 37.7 และ 15.2, 24.4, 30.9, 35.4 เปอร์เซ็นต์ต่อชม. ตามลำดับ โดยทั้งสองสภาวะมีอัตราการลดลงของเอทานอลมากกว่าอัตราการระเหยของก๊าซในระบบที่วัดได้ 1.1-1.3 เปอร์เซ็นต์ต่อชม.มาก ซึ่งยืนยันได้ว่าอัตราการลดลงของเอทานอลที่วัดได้นั้นเกิดจากการทำปฏิกิริยากับสารออกซิไดซ์ในระบบ และเมื่อนำค่าอัตราการลดลงของเอทานอลทั้งสองสภาวะมาเปรียบเทียบกันจะพบว่าที่สภาวะในอุณหภูมิห้องจะมีอัตราการลดลงที่สูงกว่า ทั้งนี้เนื่องจากอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นมีผลในการเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี และเมื่อเวลาผ่านไปพบว่าอัตราการลดลงของเอทานอลจะต่ำลง เนื่องจากช่วงเวลาเริ่มต้นการทดลองสารออกซิไดซ์ที่เป็นสารตั้งต้นนั้นถูกเอทานอลรีดิวซ์ไปจนหมดในบริเวณพื้นที่ผิวสัมผัสภายนอก เอทานอลที่เหลืออยู่ในระบบจะค่อย ๆ แทรกซึมเข้าไปทำปฏิกิริยากับสารออกซิไดซ์ภายในช่องว่างของเม็ดอนุภาคปฏิกิริยาเคมีจึงเกิดได้ช้าลงเพราะถูกควบคุมโดยการถ่ายโอนมวลสาร (mass transfer limitation) (Nakajima, 2011)

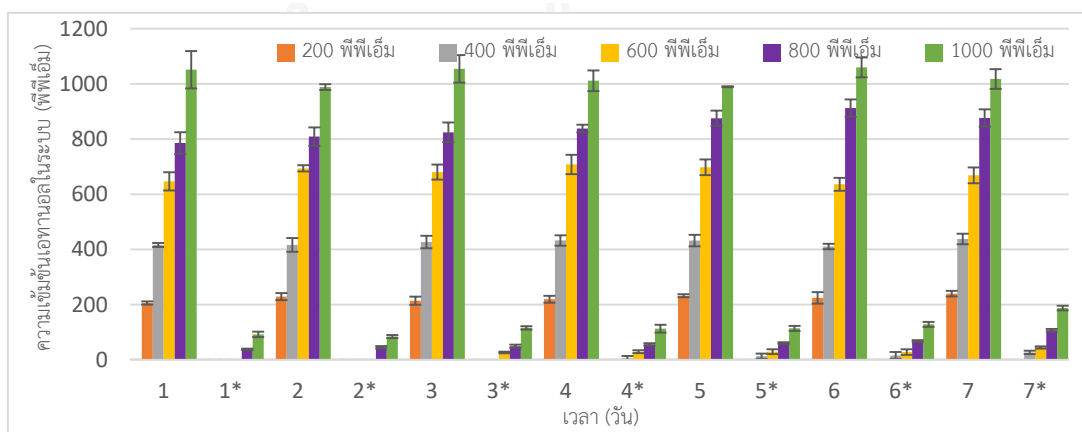
ก) สภาวะอุณหภูมิต้อง (28±3 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ 61-74 เปอร์เซ็นต์)



ข) สภาวะอุณหภูมิต้องเย็น (4±2 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ 10-46 เปอร์เซ็นต์)



ค) สภาวะอุณหภูมิต้องที่ความชื้นอิ่มตัว (28±3 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ 58-97 เปอร์เซ็นต์)



รูปที่ 4.2 ความเข้มข้นของก๊าซเอทานอลในระบบที่มีวัสดุตรวจวัดเอทานอล ตามเวลา 7 วัน
หมายเหตุ: * คือความเข้มข้นของก๊าซเอทานอลในระบบหลังการฉีดเข้าระบบเป็นเวลา 24 ชม.


จากตารางที่ 4.6 (ก) และ 4.6 (ข) แสดงการเปลี่ยนแปลงสีของเม็ดตรวจวัดที่สภาวะอุณหภูมิห้องและอุณหภูมิต่ำตามลำดับ พบว่าเม็ดตรวจวัดทั้งสองสภาวะในช่วงความเข้มข้นเอทานอล 0 พีพีเอ็ม ไม่พบการเปลี่ยนแปลงของสีตลอดระยะเวลาการทดลอง ส่วนในช่วงความเข้มข้นเอทานอล 200-1,000 พีพีเอ็ม พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงสีอย่างชัดเจน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงความเข้มข้นเอทานอลที่สูงขึ้น และเมื่อนำเม็ดสีของทั้งสองสภาวะมาเปรียบเทียบกันในช่วงความเข้มข้นของเอทานอลในระบบที่เท่ากันจะพบว่าสภาวะอุณหภูมิที่สูงกว่าจะมีการเปลี่ยนแปลงสีที่รวดเร็วกว่าดังเช่นเม็ดตรวจวัดในช่วงความเข้มข้น 1,000 พีพีเอ็ม ที่สภาวะอุณหภูมิห้องจะมีการเปลี่ยนแปลงสีจากสีเหลืองไปเป็นสีเขียว/ฟ้าทั้งเม็ดในช่วงวันที่ 4 ขณะที่สภาวะอุณหภูมิต่ำเม็ดสีจะเปลี่ยนแปลงทั้งหมดในวันที่ 6 สาเหตุมาจากอุณหภูมิที่สูงจะเกิดปฏิกิริยาเคมีได้รวดเร็วกว่าอุณหภูมิต่ำซึ่งผลที่ได้สอดคล้องไปกับอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีทดสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์หิวเคราะห์ก๊าซที่ได้กล่าวไปก่อนหน้านี้ และพบว่าสีที่ได้จะแตกต่างกันเล็กน้อยซึ่งเป็นผลมาจากความชื้นของเม็ดตรวจวัดในระบบที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ โดยอิทธิพลของความชื้นต่อระบบตรวจวัดเอทานอลจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

ตารางที่ 4.6 การติดตามการเปลี่ยนแปลงของสีเม็ดตรวจวัดเอทานอลด้วยสารออกซิไดซ์โปแทสเซียม







ไดโครเมต 0.1 โมลาร์ต่อกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 98 เปอร์เซ็นต์ในสัดส่วนโดยมวล 3 ต่อ 0.5

บิวต์ซิลิกอนไดออกไซด์ ในระบบเอทานอล 0-1,000 พีพีเอ็ม ช่วงเวลา 7 วัน







ก) สภาวะอุณหภูมิห้อง (28 ± 3 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ 61-74 เปอร์เซ็นต์)

เอทานอล (พีพีเอ็ม)	น้ำหนัก (กรัม)	การทดลองวันที่							
		0	1	2	3	4	5	6	7
0	0.4804								
	0.4972								
200	0.5021								
	0.5028								
400	0.4811								
	0.4977								
600	0.4871								
	0.4914								

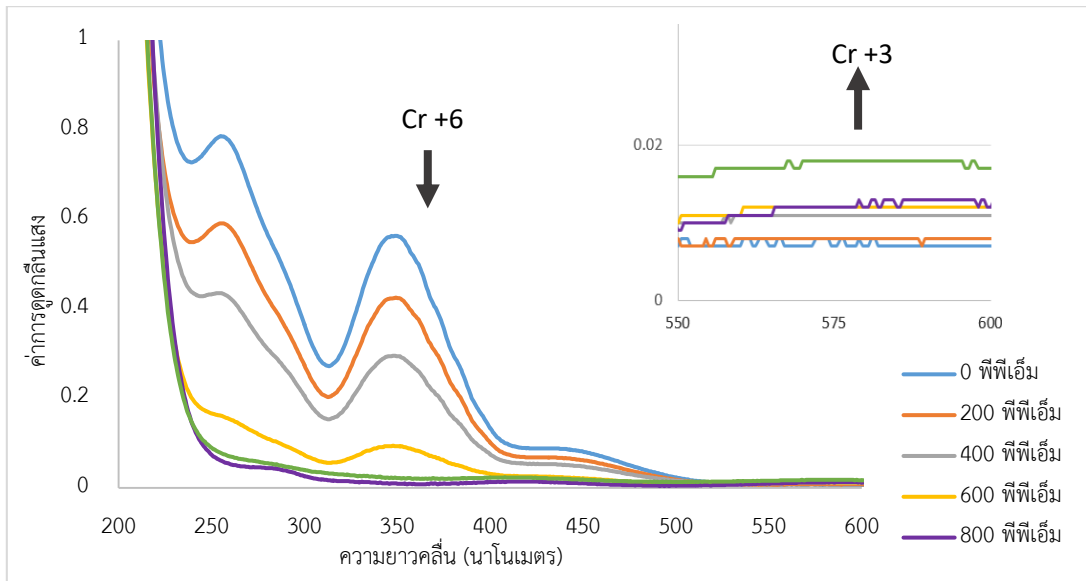
ข) สภาวะอุณหภูมิห้องเย็น (4 ± 2 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ 10-46 เปอร์เซ็นต์)

เอทานอล (พีพีเอ็ม)	น้ำหนัก (กรัม)	การทดลองวันที่							
		0	1	2	3	4	5	6	7
0	0.4762								
200	0.4678								
400	0.4762								
600	0.4467								
800	0.4556								
1000	0.4651								

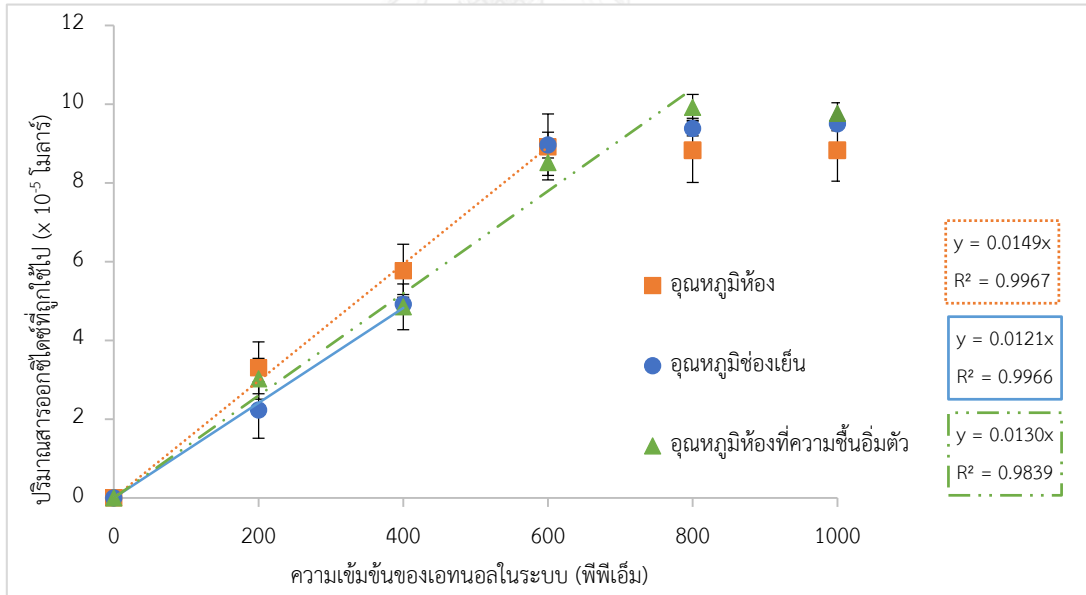
ค) สภาวะอุณหภูมิห้องที่ความชื้นอิ่มตัว (28 ± 3 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ 58-97 เปอร์เซ็นต์)

เอทานอล (พีพีเอ็ม)	น้ำหนัก (กรัม)	การทดลองวันที่							
		0	1	2	3	4	5	6	7
0	0.5016								
200	0.4792								
400	0.4862								
600	0.4915								
800	0.4653								
1000	0.4798								

เพื่อวิเคราะห์ปริมาณสารออกซิไดซ์ที่คงเหลือบนเม็ดตรวจวัดเอทานอลหลังการทดลองในระบบเป็นเวลา 7 วัน ทดสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์การดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 200-600 นาโนเมตร พบว่าเม็ดตรวจวัดเอทานอลในระบบทั้ง 3 สภาวะได้แก่ สภาวะอุณหภูมิห้อง สภาวะอุณหภูมิต่ำ และสภาวะอุณหภูมิห้องที่ความชื้นอิ่มตัว จะมีการเปลี่ยนแปลงในรูปแบบที่เหมือนกัน ดังรูปที่ 4.3 ปริมาณสารออกซิไดซ์ที่ลดลงแปรผันตามปริมาณของความเข้มข้นเอทานอลในระบบ ในระบบที่ความเข้มข้นเอทานอลในอากาศต่ำจะมีปริมาณสารออกซิไดซ์ลดลงน้อยกว่าระบบที่ความเข้มข้นเอทานอลในอากาศสูง ซึ่งเป็นการยืนยันว่าสารออกซิไดซ์ที่ลดลงเกิดปฏิกิริยากับเอทานอลในระบบ เมื่อพิจารณาการดูดกลืนแสงที่สูงสุดที่ความยาวคลื่น 350 และ 550 นาโนเมตรที่แสดงถึงสารประกอบโครเมียม +6 และ +3 ตามลำดับ (Smirnova et al., 2013) ดังรูปที่ 4.4 เมื่อเปรียบเทียบ 2 สภาวะระหว่าง อุณหภูมิห้อง 28 ± 3 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิช่องเย็น 4 ± 2 องศาเซลเซียส พบว่าปริมาณสารออกซิไดซ์ในช่วงสภาวะอุณหภูมิต่ำสูงกว่าถูกใช้ไปมากกว่าเนื่องจากมีอัตราการทำปฏิกิริยาสูงกว่าที่สภาวะอุณหภูมิที่ต่ำกว่า ซึ่งแสดงให้เห็นจากค่าความชันของสภาวะอุณหภูมิต่ำ 0.0149 ซึ่งมากกว่าสภาวะอุณหภูมิช่องเย็น 0.0121 และมีความเป็นเส้นตรงในช่วงความเข้มข้นเอทานอลตั้งแต่ 0-600 และ 0-400 พีพีเอ็มตามลำดับ และในช่วงความเข้มข้นเอทานอล 800-1,000 พีพีเอ็ม พบว่าอัตราของปริมาณสารที่ถูกใช้คงที่เนื่องจากสารออกซิไดซ์ซึ่งเป็นสารตั้งต้นนั้นถูกรีดิวซ์ไปจนหมดและเกิดปฏิกิริยาผันกลับเล็กน้อย (Weckhuysen, Wachs, & Schoonheydt, 1996)



รูปที่ 4.3 ค่าการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 200-600 นาโนเมตร ของเม็ดตรวจวัดโปแทสเซียมไดโครเมต 0.1 โมลาร์และกรดซัลฟิวริก 0.5 มล. หลังจากทำปฏิกิริยารวม 7 ที่สภาวะอุณหภูมิห้องที่ความเข้มข้นอิ่มตัว



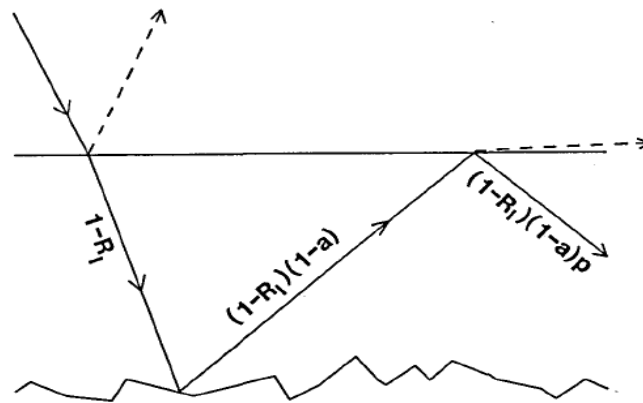
รูปที่ 4.4 ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 350 นาโนเมตร ของเม็ดตรวจวัดโปแทสเซียมไดโครเมต 0.1 โมลาร์และกรดซัลฟิวริก 0.5 มล. หลังจากทำปฏิกิริยารวม 7 ที่สภาวะต่างๆ

4.2.2 อิทธิพลของความชื้นต่อระบบตรวจวัดเอทานอล

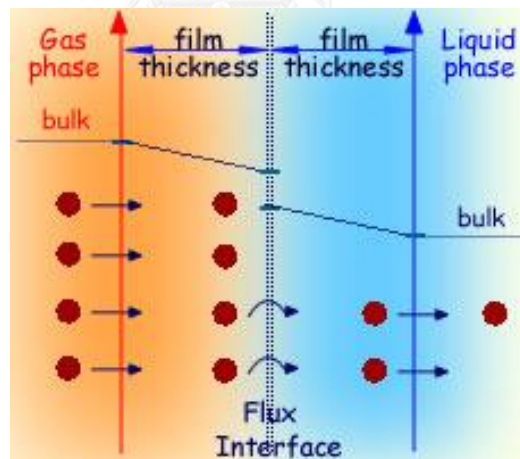
เพื่อศึกษาอิทธิพลของความชื้นที่แตกต่างกันที่อุณหภูมิห้องปกติ (ความชื้นสัมพัทธ์ 61-74 เปอร์เซ็นต์) และที่อุณหภูมิห้องที่ความชื้นอิ่มตัวจากการเติมน้ำ 10 เปอร์เซ็นต์ของปริมาตรระบบทั้งหมด (ความชื้นสัมพัทธ์ 58-97 เปอร์เซ็นต์) ที่ส่งผลต่อระบบการตรวจวัดเอทานอล สาเหตุที่พิจารณาสถานะที่มีความชื้นอิ่มตัวเนื่องจากผลไม่มีความชื้นในผลมากกว่าความชื้นในอากาศและเพื่อระบายความร้อนจากการหายใจ ผลไม้จึงคายน้ำอยู่ตลอดเวลาทำให้ระบบที่จัดเก็บผลไม่มีความชื้นสูงกว่าบรรยากาศปกติ จากการติดตามความเข้มข้นของเอทานอลในระบบด้วยเครื่องวิเคราะห์ก๊าซเป็นเวลา 7 วัน ดังรูปที่ 4.2 (ก) และ 4.2 (ค) ในระบบทั้งสองพบว่าอัตราการลดลงของเอทานอลในอุณหภูมิห้องและอุณหภูมิห้องที่ความชื้นอิ่มตัวในระบบความเข้มข้นเอทานอลในอากาศ 400, 600, 800 และ 1,000 พีพีเอ็ม คือ 15.5, 26.4, 31.1, 37.7 และ 17.2, 26.9, 33.4, 36.8 เปอร์เซ็นต์ต่อชม.ตามลำดับ พบว่าในอุณหภูมิห้องที่ความชื้นอิ่มตัวจะมีอัตราการลดลงของเอทานอลสูงกว่าสถานะในอุณหภูมิห้อง ซึ่งเป็นผลจากก๊าซเอทานอลนั้นมีคุณสมบัติในการแพร่ผ่านน้ำได้ดีเนื่องจากสภาพความเป็นขั้วสูง จึงคาดว่าปริมาณเอทานอลที่เหลือจากทำปฏิกิริยาแพร่ลงไปยังชั้นฟิล์มของน้ำ แต่อย่างไรก็ตามอัตราการลดลงของเอทานอลในทั้งสองสถานะยังคงมีค่ามากกว่าอัตราการรั่วไหลของก๊าซในระบบที่วัดได้ ซึ่งแสดงถึงอัตราการลดลงของเอทานอลทั้งสองระบบมาจากการเกิดปฏิกิริยาเคมี

จากตารางที่ 4.6 (ก) และ 4.6 (ค) เป็นการติดตามการเปลี่ยนแปลงสีของเม็ดตรวจวัดด้วยภาพถ่ายที่สถานะอุณหภูมิห้องและอุณหภูมิห้องที่ความชื้นอิ่มตัวตามลำดับ พบว่าเม็ดตรวจวัดทั้งสองสถานะความเข้มข้นเอทานอล 0 พีพีเอ็ม ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของสีอย่างชัดเจน และช่วงความเข้มข้นเอทานอล 200-1,000 พีพีเอ็ม พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงสีอย่างชัดเจน โดยช่วงความเข้มข้นเอทานอลที่สูงขึ้นจะพบการเปลี่ยนแปลงสีได้ชัดเจนยิ่งขึ้น และเมื่อนำเม็ดสีของทั้งสองสถานะมาเปรียบเทียบกัน พบว่าเม็ดสีตรวจวัดที่อยู่ในสถานะความชื้นอิ่มตัวจะมีสีที่เข้มเด่นชัดกว่าเม็ดตรวจวัดที่สถานะอุณหภูมิห้อง สาเหตุมาจากเม็ดตรวจวัดที่มีความชื้นจะมีชั้นฟิล์มของเหลวเห็นได้ดังรูปในตารางที่ 4.6 (ค) และ 4.7 ชั้นฟิล์มของเหลวทำให้แสงเกิดปรากฏการณ์การหักเหระหว่างตัวกลางคือของเหลวไปอากาศ ส่งผลให้ทิศทางการเดินทางของแสงเบนออกไปตามกฎของสเนล (Snell's law) อีกทั้งแสงยังสะท้อนกลับระหว่างรอยต่อของของเหลวและอากาศ แสงที่สะท้อนออกมาจึงสูญเสียความสว่างของแสงทำให้เรามองเห็นสีเป็นโทนที่เข้มกว่าปกติ (Lekner & Dorf, 1988) ดังรูปที่ 4.5 ส่วนวัสดุที่แห้งเมื่อแสงตกกระทบวัสดุแสงส่วนหนึ่งถูกวัสดุดูดกลืนไว้และบางส่วนการสะท้อนกลับ เมื่อเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงสีของเม็ดตรวจวัดเอทานอลในช่วงความเข้มข้นของเอทานอลในระบบที่เท่ากันพบว่าสถานะอุณหภูมิห้องจะมีการเปลี่ยนแปลงสีที่รวดเร็วกว่าสถานะอุณหภูมิห้องที่ความชื้นอิ่มตัว ทั้งนี้เป็นเพราะชั้นฟิล์มของเหลวเป็นอุปสรรคในการทำปฏิกิริยาของ

สารออกซิไดซ์และเอทานอล เนื่องจากก๊าซเอทานอลจะต้องแพร่ผ่านชั้นฟิล์มของเหลวก่อนเข้าทำปฏิกิริยากับสารออกซิไดซ์ที่อยู่บนซิลิกอนไดออกไซด์ในสถานะของแข็งดังรูปที่ 4.6 ดังนั้นสีของเม็ดตรวจวัดจึงเกิดการเปลี่ยนแปลงช้ากว่าเม็ดตรวจวัดในสถานะความชื้นที่ต่ำกว่า



รูปที่ 4.5 การหักเหและการสะท้อนกลับของแสงที่เกิดขึ้นบนวัตถุเปียกชื้น
(Lekner & Dorf, 1988)



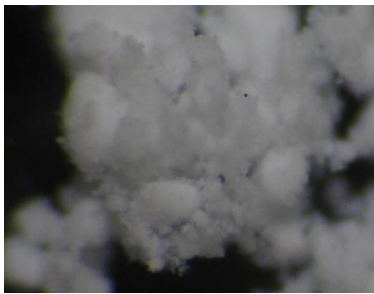
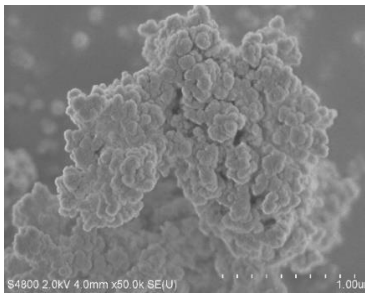
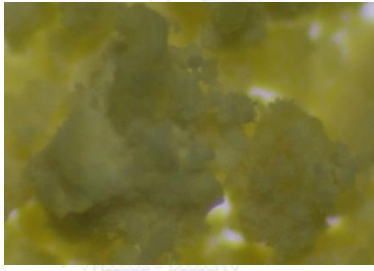
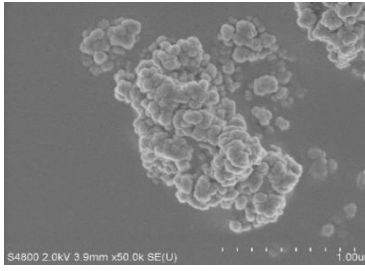

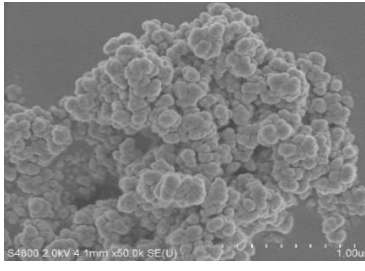

รูปที่ 4.6 การแพร่ของก๊าซในชั้นของเหลว

(ที่มา: <http://www.hyper-tvt.ethz.ch/fundamentals-masstransfer-filmmodel.php>)

รูปที่ 4.4 เพื่อวิเคราะห์ปริมาณสารออกซิไดซ์ที่คงเหลือบนเม็ดตรวจวัดเอทานอลหลังจากการทดลอง 7 วัน ทดสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์การดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 350 นาโนเมตร พบว่าที่สภาวะอุณหภูมิห้องจะมีปริมาณของสารออกซิไดซ์ที่ถูกใช้ทำปฏิกิริยามากกว่าสภาวะอุณหภูมิห้องที่ความชื้นอิ่มตัว แม้ว่าการตรวจวัดปริมาณเอทานอลด้วยเครื่องวิเคราะห์ก๊าซจะพบว่าที่สภาวะอุณหภูมิห้องที่ความชื้นอิ่มตัวจะมีอัตราการลดลงของเอทานอลสูงกว่าสภาวะในอุณหภูมิห้องก็ตาม สันนิษฐานว่าเป็นเพราะมีก๊าซเอทานอลบางส่วนแพร่ลงสู่ของเหลวในระบบ โดยเม็ดตรวจวัดในสภาวะอุณหภูมิห้องปกติและอุณหภูมิห้องที่ความชื้นอิ่มตัวจะมีความเป็นเส้นตรงในช่วงความเข้มข้นเอทานอลตั้งแต่ 0-600 และ 0-800 พีพีเอ็ม ตามลำดับ เนื่องจากที่สภาวะอุณหภูมิห้องที่ความชื้นอิ่มตัวจะมีฟิล์มของเหลวทำให้เกิดการทำปฏิกิริยาได้ช้าลงจึงมีช่วงความเป็นเส้นตรงที่กว้างกว่าสภาวะอุณหภูมิห้องที่ใช้มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่สูงกว่า

จากตารางที่ 4.7 ภาพถ่ายขยายพื้นผิวของวัสดุซิลิกอนไดออกไซด์ก่อนและหลังการเติมสารออกซิไดซ์ และการทำปฏิกิริยาที่สภาวะต่าง ๆ ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (light microscope) ที่กำลังขยาย 30 เท่า พบว่าอนุภาคซิลิกอนไดออกไซด์ที่ถูกเคลือบฝังด้วยสารออกซิไดซ์ไปแทสเซียมไดโครเมตจะมีสีเปลี่ยนจากสีขาวไปเป็นสีเหลืองของสารออกซิไดซ์และมีการจับตัวของก้อนอนุภาคเนื่องจากการดูดซึมสารละลายทำให้ผงซิลิกอนไดออกไซด์มีความชื้นมากขึ้นและจับตัวกันเป็นก้อนได้ง่าย และเมื่อทำปฏิกิริยากับเอทานอล พบว่าเม็ดตรวจวัดซิลิกอนไดออกไซด์จะเปลี่ยนสีจากสีเหลืองไปเป็นสีเขียว/สีฟ้าจากการเปลี่ยนแปลงของเลขออกซิเดชันบนโลหะทรานซิชัน แต่เมื่อทำปฏิกิริยากับเอทานอลในสภาวะความชื้นอิ่มตัวพบว่าจะมีการจับตัวกันของก้อนอนุภาคมากขึ้นและสังเกตเห็นฟิล์มของเหลวได้ชัดเจน ซึ่งชั้นฟิล์มเป็นอุปสรรคการทำปฏิกิริยาเคมีจากที่ได้อธิบายไปข้างต้น เพื่อยืนยันว่าอนุภาคซิลิกอนไดออกไซด์นั้นเป็นตัวรองรับที่เฉื่อยซึ่งจะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงบนพื้นผิวของอนุภาคจากปฏิกิริยาระหว่างสารออกซิไดซ์กับเอทานอล จึงทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM) ที่กำลังขยาย 50,000 เท่า พบว่าพื้นผิวของซิลิกอนไดออกไซด์มีขนาดและรูปร่างคงเดิม ไม่พบความแตกต่างกันอย่างชัดเจน และไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงแม้จะถูกเคลือบฝังด้วยสารละลายออกซิไดซ์และกรดทั้งก่อนและหลังการทำปฏิกิริยาเคมีกับเอทานอล

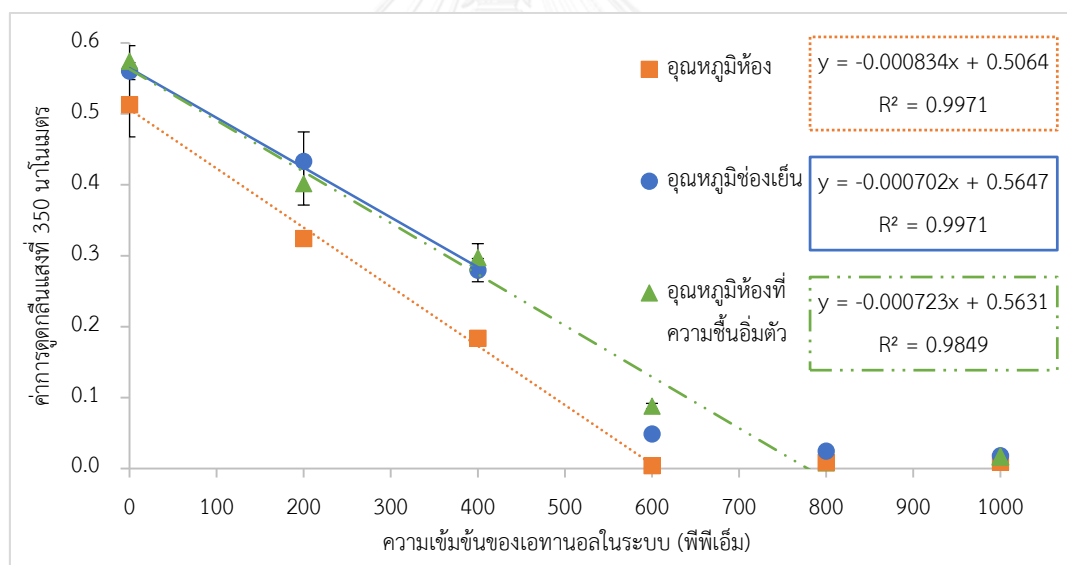
ตารางที่ 4.7 ภาพขยายที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงและกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดที่ กำลังขยาย 30 และ 50,000 เท่าตามลำดับ

วัสดุ	กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (x30)	กล้องจุลทรรศน์แบบส่อง กราด (x50k)
ซิลิกอนไดออกไซด์		
โปแทสเซียมไดโครเมต บนซิลิกอนไดออกไซด์		
โปแทสเซียมไดโครเมต บนซิลิกอนไดออกไซด์หลัง ทำปฏิกิริยากับเอทานอล ที่สภาวะอุณหภูมิห้อง		
โปแทสเซียมไดโครเมต บนซิลิกอนไดออกไซด์หลัง ทำปฏิกิริยากับเอทานอล ที่สภาวะอุณหภูมิห้องที่ ความชื้นอิ่มตัว		ไม่สามารถถ่ายภาพได้ หากวัสดุมีความชื้น

4.3 วิเคราะห์ประสิทธิภาพของวัสดุตรวจวัดเอทานอล

4.3.1 ช่วงความเป็นเส้นตรง

เพื่อหาช่วงความเป็นเส้นตรงของเม็ตรวดวัดโปแทสเซียมไดโครเมต 0.1 โมลาร์ต่อกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 98 เปอร์เซ็นต์ในสัดส่วนมวล 3 ต่อ 0.5 หลังจากทำปฏิกิริยาวันที่ 7 ในระบบความเข้มข้นเอทานอลในอากาศช่วง 0, 200, 400, 600, 800 และ 1,000 พีพีเอ็ม ทดสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์การดูดกลืนแสงที่มีความยาวคลื่น 350 นาโนเมตร จากรูปที่ 4.4 และ 4.6 พบว่าช่วงความเป็นเส้นตรงจะจำเพาะกับสภาวะของระบบแต่ละระบบ โดยสภาวะอุณหภูมิห้องปกติ อุณหภูมิห้องเย็น และอุณหภูมิห้องที่ความชื้นอิ่มตัว มีความเป็นเส้นตรงในช่วง 0-600, 0-400 และ 0-800 พีพีเอ็มของความเข้มข้นเอทานอลตามลำดับ โดยพบว่าสภาวะอุณหภูมิห้องที่ความชื้นอิ่มตัวจะมีช่วงความเป็นเส้นตรงที่กว้างกว่าสภาวะอื่นๆ สามารถระบุช่วงความแตกต่างของความเข้มข้นเอทานอลได้ดีกว่าสภาวะอื่น ๆ เนื่องจากมีฟิล์มของเหลวเป็นอุปสรรคขวางกั้นทำให้การทำปฏิกิริยาเคมีช้ากว่าทั้งสภาวะอุณหภูมิห้องปกติและอุณหภูมิห้องเย็นที่สารออกซิไดซ์ทำปฏิกิริยาจนหมด



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ของค่าการดูดกลืนแสงของวัสดุตรวจวัดเอทานอล หลังจากทำปฏิกิริยาวันที่ 7 และความเข้มข้นของเอทานอลในระบบ

4.3.2 ความว่องไวในการตอบสนอง

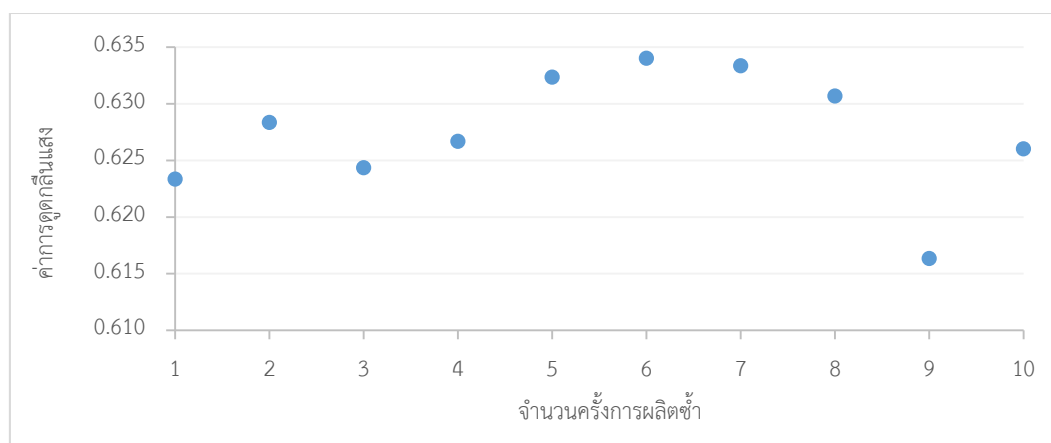
เพื่อหาความว่องไวในการตอบสนองของเม็ตรวดวัดโปแทสเซียมไดโครเมต 0.1 โมลาร์ต่อกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 98 เปอร์เซ็นต์ในสัดส่วนมวล 3 ต่อ 0.5 หลังจากทำปฏิกิริยาวันที่ 7 ในระบบความเข้มข้นเอทานอลในอากาศช่วง 0-1,000 พีพีเอ็ม ทดสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์การดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 350 นาโนเมตร โดยวัดจากความชันของการเปลี่ยนแปลงของค่าการดูดกลืนต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของเอทานอลในช่วงความเป็นเส้นตรง จากรูปที่ 4.7 พบว่าความว่องไวต่อการตอบสนองแต่ละสภาวะ ได้แก่ อุณหภูมิห้อง อุณหภูมิช่องเย็น และอุณหภูมิห้องที่ความชื้นอิ่มตัวมีค่า -1.39×10^{-6} พีพีเอ็ม⁻¹ ($R^2 = 0.9971$), -1.75×10^{-6} พีพีเอ็ม⁻¹ ($R^2 = 0.9971$) และ -9.04×10^{-7} พีพีเอ็ม⁻¹ ($R^2 = 0.9849$) ตามลำดับ โดยมีค่าติดลบเนื่องจากใช้ค่าการดูดกลืนแสงของสารออกซิไดซ์ซึ่งเป็นสารตั้งต้นของปฏิกิริยา และพบว่าที่สภาวะอุณหภูมิห้องที่ความชื้นอิ่มตัวจะมีการตอบสนองที่ช้าที่สุดทั้งนี้ เป็นผลจากแผ่นฟิล์มของเหลวที่เป็นอุปสรรคขวางกั้นการทำปฏิกิริยาเคมี สภาวะอุณหภูมิห้องและสภาวะอุณหภูมิห้องที่มีการตอบสนองใกล้เคียงกัน

4.3.3 ความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถวัดได้

เพื่อหาค่าความเข้มข้นต่ำสุดของเอทานอลในระบบที่สามารถวัดได้จากเม็ตรวดวัดโปแทสเซียมไดโครเมต 0.1 โมลาร์ต่อกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 98 เปอร์เซ็นต์ในสัดส่วนมวล 3 : 0.5 หลังจากทำปฏิกิริยาวันที่ 7 ในระบบความเข้มข้นเอทานอลในอากาศช่วง 0-1,000 พีพีเอ็ม ทดสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์การดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 350 นาโนเมตร สามารถคำนวณหาได้จาก $3S_d/m$ โดย S_d คือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ความเข้มข้นต่ำสุดของช่วงความเป็นเส้นตรงและ m คือค่าความชันของค่าความว่องไวต่อการตอบสนอง โดยใช้ค่าความชันและค่าเบี่ยงเบนจากรูปที่ 4.4 ที่มีการแปลงค่าในแกน y เป็นปริมาณการใช้สารออกซิไดซ์ซึ่งจะทำให้ความชันมีค่าเป็นบวกแทนการใช้ค่าจากรูปที่ 4.7 ที่มีค่าความชันเป็นลบซึ่งไม่สามารถหาค่าความเข้มข้นต่ำสุดได้ พบว่าค่าความเข้มข้นเอทานอลในระบบต่ำสุดที่สามารถวัดในแต่ละสภาวะนั้นมีค่าที่แตกต่างกัน โดยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ใช้คำนวณมาจากค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเข้มข้นเอทานอลในระบบที่ 0 พีพีเอ็ม ในแต่ละสภาวะพบว่าความเข้มข้นต่ำสุดของเอทานอลในระบบที่สามารถวัดได้คือ 160, 50 และ 90 พีพีเอ็ม ในสภาวะอุณหภูมิห้อง อุณหภูมิช่องเย็นและอุณหภูมิห้องที่ความชื้นอิ่มตัวตามลำดับ แต่อย่างไรก็ตามค่าความสามารถในการตรวจวัดความเข้มข้นต่ำสุดของวัสดุตรวจวัดเอทานอลนี้เป็นของเครื่องวิเคราะห์การดูดกลืนแสง ไม่ใช่ค่าความเข้มข้นต่ำสุดที่ได้จากการตรวจวัดเอทานอลด้วยวิธีทางสีโดยการใส่สายตาเปล่า

4.3.4 การผลิตซ้ำ

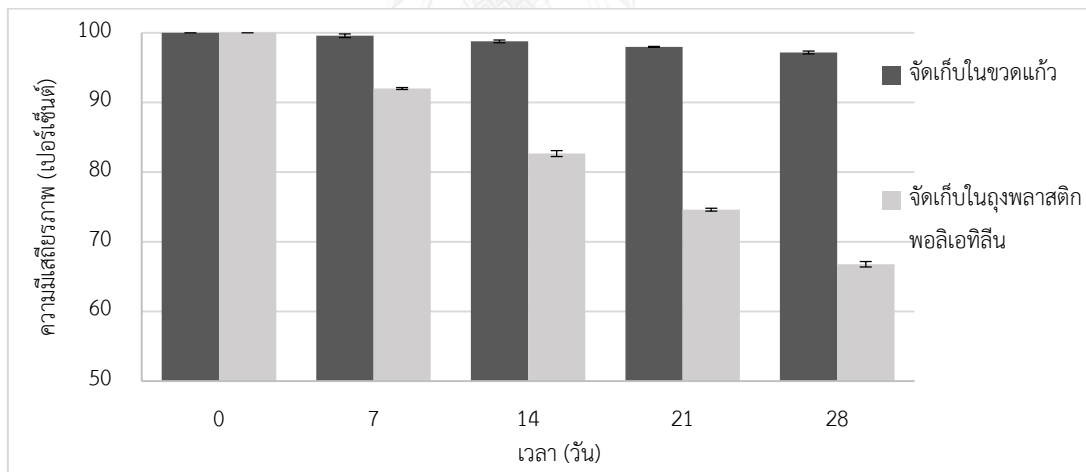
เพื่อทดสอบความสามารถในการผลิตซ้ำของเม็ดยาเม็ดตรวจวัดเอทานอลมีระดับความแม่นยำมากน้อยเพียงใดจากค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (%RSD) ทดสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์การดูดกลืนแสงจากค่าการดูดกลืนของเม็ดยาเม็ดตรวจวัดเอทานอลที่ผลิตซ้ำกัน 10 ครั้ง ตามกระบวนการเดิมตั้งรูปที่ 4.8 พบว่ามีค่าการดูดกลืนใกล้เคียงกัน และมีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์เท่ากับ 0.82 ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.3



รูปที่ 4.8 ค่าการดูดกลืนแสงของสารออกซิไดซ์โปแทสเซียมไดโครเมตเข้มข้น 0.1 โมลาร์ และกรดซัลฟิวริก 98 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราส่วนปริมาตร 3 ต่อ 0.5 ที่ผลิตซ้ำกัน 10 ครั้งตามกระบวนการเดิม

4.3.5 การจัดเก็บ

เพื่อทดสอบเสถียรภาพของวัสดุตรวจวัดที่มีการเสื่อมสภาพไปตามระยะเวลาจากการจัดเก็บในวัสดุที่แตกต่างกัน ได้แก่ ขวดแก้ว และถุงพลาสติกพอลิเอทิลีน โดยทั้งสองวิธีจัดเก็บภายใต้สภาวะเดียวกันที่อุณหภูมิห้อง 28 ± 3 องศาเซลเซียส และติดตามผลการจัดเก็บเป็นเวลา 7, 14, 21 และ 28 วัน ทดสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์การดูดกลืนแสง พบว่ามีปริมาณสารออกซิไดซ์คงเหลือ 99.6, 98.8, 98.0 และ 97.2 เปอร์เซ็นต์จากการวัดครั้งแรก สำหรับการจัดเก็บสารออกซิไดซ์ในขวดแก้ว ซึ่งสามารถรักษาเสถียรภาพของวัสดุตรวจวัดได้มากกว่าการจัดเก็บในถุงพลาสติกพอลิเอทิลีนที่มีปริมาณสารออกซิไดซ์คงเหลือ 92.0, 82.7, 74.6 และ 66.8 เปอร์เซ็นต์ ดังรูปที่ 4.9 เนื่องจากถุงพอลิเอทิลีนนั้นมีอัตราการซึมผ่านอากาศและความชื้นสูงกว่าขวดแก้ว ทำให้สารออกซิไดซ์ดูดซึมความชื้นมากกว่า ทำให้มีชั้นฟิล์มของน้ำบนอนุภาควัสดุตรวจวัดเอทานอลซึ่งขัดขวางการทำปฏิกิริยากับก๊าซเอทานอล เนื่องจากเกิดความต้านทานการถ่ายเทมวลสารระหว่างเฟสของน้ำและก๊าซ (mass transfer resistance) จึงส่งผลต่อความเสถียรภาพของวัสดุตรวจวัดเอทานอล ดังนั้นจึงควรเก็บวัสดุตรวจวัดในวัสดุที่มีอัตราการซึมผ่านของอากาศและความชื้นต่ำ รวมทั้งควรเก็บในที่แห้ง อุณหภูมิต่ำเพื่อควบคุมความชื้นและคงเสถียรภาพของวัสดุตรวจวัดก่อนการใช้งาน



รูปที่ 4.9 การวัดความเสถียรภาพของวัสดุตรวจวัดเอทานอลด้วยเครื่องดูดกลืนแสง เป็นเวลา 7, 14, 21 และ 28 วัน ที่สภาวะอุณหภูมิห้อง

4.4 การออกแบบเพื่อการนำมาใช้งาน

การออกแบบเม็ดตรวจวัดเอทานอล และการจัดวางตำแหน่งของเม็ดตรวจวัดในภาชนะบรรจุผลไม้และอาหารสำหรับการใช้งานในช่วงความเข้มข้นของเอทานอลในอากาศ 0-1,000 พีพีเอ็ม ในช่วงเวลา 7 วัน โดยคำนึงถึงความปลอดภัยและการใช้งานที่สะดวกสามารถสังเกตการเปลี่ยนแปลงของสีในเม็ดตรวจวัดได้ชัดเจน จึงเลือกวัสดุที่โปร่งใส และทนต่อสารเคมีและไม่รั่วซึม ได้แก่ วัสดุจำพวกพลาสติก


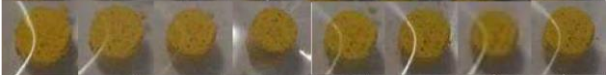

4.4.1 อิทธิพลของพลาสติกห่อหุ้มเม็ดตรวจวัดต่อระบบตรวจวัดเอทานอล

พลาสติกที่ทำการทดลองมี 3 ชนิดด้วยกันได้แก่ โพลีโพรพิลีน (polypropylene, PP) โพลีเอทิลีน (polyethylene, PE) และพอลิไวนิลคลอไรด์ (Polyvinylchloride, PVC) ซึ่งมีลักษณะทางกายภาพเป็นพอลิเมอร์ใสโปร่งแสง และพบว่าพลาสติกชนิดพอลิเอทิลีนมีค่าการซึมผ่านของก๊าซไนโตรเจน ออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์สูงที่สุดเปรียบเทียบกับพลาสติกชนิดพอลิโพรพิลีน และพอลิไวนิลคลอไรด์ตามลำดับ ดังคุณสมบัติตามตารางที่ 4.8 ซึ่งสันนิษฐานว่าพลาสติกทั้ง 3 ชนิดจะมีค่าการซึมผ่านของก๊าซเอทานอลตามแนวโน้มเดียวกัน โดยจะทดสอบการทำปฏิกิริยาเคมีของเม็ดตรวจวัดเมื่อมีพลาสติกเป็นอุปสรรคการซึมผ่านของก๊าซเอทานอล พบว่าเม็ดตรวจวัดสารออกไซด์ซีไบแทสเซียมไดโครเมตที่ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ และเติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 98 เปอร์เซ็นต์สัดส่วนโดยมวล ในอัตราส่วนปริมาตร 3 ต่อ 0.5 ที่มีพลาสติกห่อหุ้มจะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงสีอย่างชัดเจนในการทดสอบพลาสติกทุกชนิด ดังตารางที่ 4.9 เป็นเพราะพลาสติกเป็นอุปสรรคต่อการซึมผ่านของก๊าซเอทานอลกับเม็ดตรวจวัด แม้ว่าก๊าซเอทานอลจะสามารถซึมผ่านพลาสติกได้แต่ก็มีปริมาณการซึมผ่านไม่เพียงพอที่จะเกิดปฏิกิริยาจนสังเกตการเปลี่ยนแปลงสีของเม็ดตรวจวัดอย่างชัดเจน

ตารางที่ 4.8 คุณสมบัติของพลาสติกชนิดต่าง ๆ (Brydson, 1966)

พอลิเมอร์	ความดัน ((cm ³ mm)/(s cm ² cm Hg))			ลักษณะทางกายภาพ
	ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส			
	N ₂	O ₂	CO ₂	
พอลิโพรพิลีน	-	23	92	โปร่งแสง
พอลิเอทิลีน	19	55	352	โปร่งแสง
พอลิไวนิลคลอไรด์	0.4	1.2	10	โปร่งแสง

ตารางที่ 4.9 อิทธิพลของพลาสติกต่อการเปลี่ยนแปลงสีของเมล็ดตรวจวัดเอทานอล

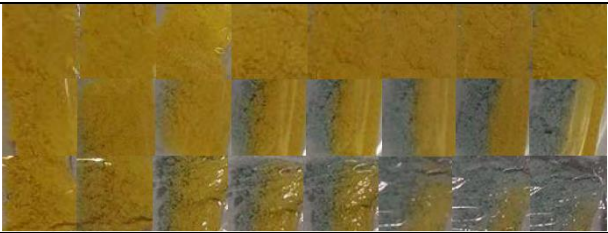
พอลิเมอร์	น้ำหนัก (กรัม)	การทดลองวันที่									
		0	1	2	3	4	5	6	7		
พอลิโพรพิลีน	0.5003										
พอลิเอทิลีน	0.4627										
พอลิไวนิลคลอไรด์	0.4816										

เพื่อแก้ไขปัญหาปริมาณก๊าซเอทานอลที่ไม่เพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมีของเมล็ดตรวจวัดจากการซึมผ่านพลาสติก จึงเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสโดยใช้อุณหภูมิซิลิกอนไดออกไซด์แทนการอัดเม็ดตรวจวัด หรือการเจาะรูบนพลาสติกขนาด 1 ตร.ซม. เพื่อเพิ่มช่องทางการซึมผ่านของก๊าซและใช้กระดาษกรองแยกเฟสปิดทับเพื่อป้องกันการรั่วไหลของสารเคมีดังรูปที่ 3.4 ในหัวข้อ 3.2.5 การเตรียมวัสดุตรวจวัดเอทานอล จากตารางที่ 4.10 (ก) และ 4.10 (ข) พบว่าพลาสติกชนิดพอลิเอทิลีนและพอลิไวนิลคลอไรด์สามารถสังเกตการณ์เปลี่ยนแปลงของสีได้ทั้งสองวิธี ส่วนพอลิโพรพิลีนเห็นการเปลี่ยนแปลงสีได้เพียงวิธีที่เจาะรูเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัส ทั้งนี้เนื่องจากพอลิโพรพิลีนมีอัตราการซึมผ่านของก๊าซน้อยกว่าพลาสติกชนิดพอลิเอทิลีน แต่มากกว่าพอลิไวนิลคลอไรด์ อย่างไรก็ตามความหนาของแผ่นพลาสติกนั้นไม่เท่ากัน พลาสติกพอลิไวนิลคลอไรด์มีความหนาเพียง 0.01 มม. ขณะที่พอลิเอทิลีนและพอลิโพรพิลีนมีความหนา 0.0425 และ 0.025 มม. ตามลำดับ ประกอบกับพอลิไวนิลคลอไรด์มีการจัดรูปทรงได้ยากและพลาสติกจะติดรวมกันทำให้ปริมาตรภายในระบบน้อยกว่าระบบที่ห่อหุ้มด้วยพลาสติกชนิดอื่น ๆ เป็นผลให้สีเปลี่ยนแปลงเฉพาะส่วนสัมผัสกับก๊าซเอทานอล ทำให้ส่วนมีสีชัดเจนกว่าส่วนอื่น ๆ แม้ความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซต่ำกว่าพลาสติกชนิดอื่นก็ตาม ดังคุณสมบัติพลาสติกในตารางที่ 4.8 จากผลการทดสอบจึงเลือกพลาสติกห่อหุ้มชนิดพอลิเอทิลีนเพื่อทำการทดสอบขั้นต่อไป แต่อย่างไรก็ตามวิธีเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสเพื่อให้วัสดุตรวจวัดเกิดปฏิกิริยาเคมีกับเอทานอลได้ง่ายขึ้น ยังคงมีอุปสรรคด้านการใช้งานอยู่คือการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างก๊าซเอทานอลและวัสดุตรวจวัด จะเพิ่มโอกาสการรั่วไหลของสารเคมีด้วย

ตารางที่ 4.10 อิทธิพลของพลาสติกและการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสต่อการเปลี่ยนแปลงสีของวัสดุตรวจวัด

เอทานอล

ก) การเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสโดยการใช้อนุภาคแทนการอัดเม็ดวัสดุตรวจวัด

พอลิเมอร์	น้ำหนัก (กรัม)	การทดลองวันที่								
		0	1	2	3	4	5	6	7	
พอลิโพรพิลีน	0.5027									
พอลิเอทิลีน	0.5014									
พอลิไวนิลคลอไรด์	0.4997									







ข) การเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสโดยการเจาะรูสี่เหลี่ยมบนพลาสติกพอลิเอทิลีน ขนาด 1 ตร.ซม.

พอลิเมอร์	น้ำหนัก (กรัม)	การทดลองวันที่								
		0	1	2	3	4	5	6	7	
พอลิโพรพิลีน	0.4821									
พอลิเอทิลีน	0.5078									
พอลิไวนิลคลอไรด์	0.5120									







เพื่อแก้ไขปัญหาคอนแทกต์เอทานอลซึมผ่านพลาสติกได้น้อย จึงแก้ไขโดยการลดปริมาณสารออกซิไดซ์ลงแต่ยังคงปริมาณของกรดเพื่อให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีคงเดิม โดยลดความเข้มข้นของสารออกซิไดซ์และลดปริมาณสารสำหรับการอัดเม็ดลงเพื่อให้สารออกซิไดซ์ที่ลดลงทำปฏิกิริยาพอดีกับปริมาณก๊าซเอทานอลที่ซึมผ่านพลาสติกพอลิเอทิลีน ดังตารางที่ 4.11 (ก) และ 4.11 (ข) พบว่าการลดปริมาณสารที่ใช้อัดเม็ดตรวจวัดเอทานอลจาก 0.45-0.50 ไปเป็น 0.30-0.35 กรัม และการลดความเข้มข้นสารออกซิไดซ์จาก 0.1 เป็น 0.02 และ 0.0075 โมลาร์ เหมาะสมสำหรับสภาวะอุณหภูมิห้องและสภาวะช่วงอุณหภูมิต่ำตามลำดับ

ตารางที่ 4.11 อิทธิพลของปริมาณสารออกซิไดซ์ต่อการเปลี่ยนแปลงสีของเม็ดตรวจวัดเอทานอล

- ก) การติดตามการเปลี่ยนแปลงสีของเม็ดตรวจวัดเอทานอลด้วยสารออกซิไดซ์โปแทสเซียม ไดโครเมต 0.02 โมลาร์ ปริมาณ 0.30-0.35 กรัม ในช่วงเวลา 7 วัน สภาวะอุณหภูมิห้อง (28 ± 3 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ 61-74 เปอร์เซ็นต์)

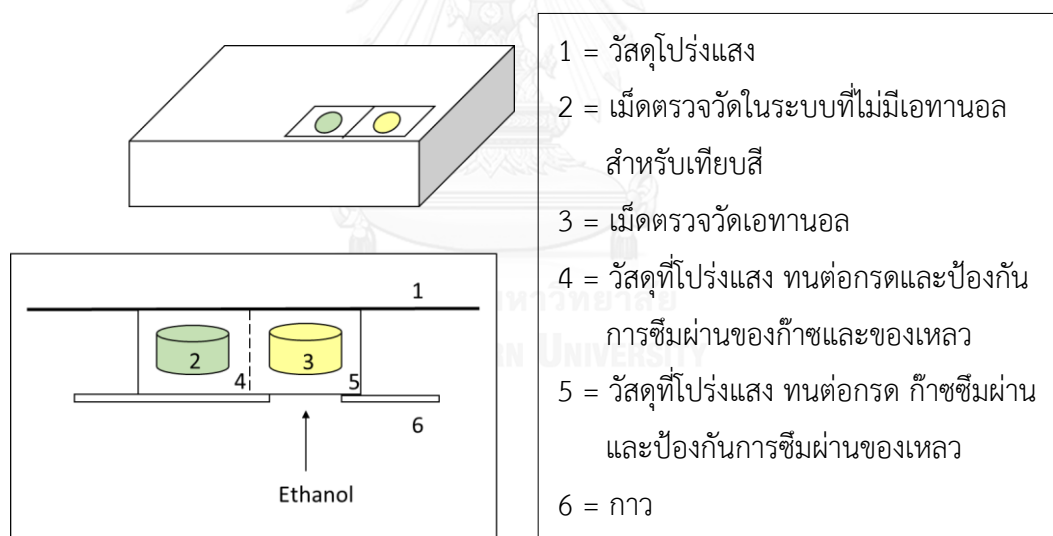
เอทานอล (พีพีเอ็ม)	น้ำหนัก (กรัม)	การทดลองวันที่								
		0	1	2	3	4	5	6	7	
0	0.3082									
200	0.3291									
400	0.3165									
600	0.3169									
800	0.3105									
1000	0.3351									

- ข) การติดตามการเปลี่ยนแปลงสีของเม็ดตรวจวัดเอทานอลด้วยสารออกซิไดซ์โปแทสเซียม ไดโครเมต 0.0075 โมลาร์ ปริมาณ 0.30-0.35 กรัม ในช่วงเวลา 7 วัน สภาวะอุณหภูมิห้อง (4 ± 2 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ 10-46 เปอร์เซ็นต์)

เอทานอล (พีพีเอ็ม)	น้ำหนัก (กรัม)	การทดลองวันที่								
		0	1	2	3	4	5	6	7	
0	0.3662									
200	0.3604									
400	0.3472									
600	0.3211									
800	0.3419									
1000	0.3794									

4.4.2 การออกแบบและการวางตำแหน่งเม็ดตรวจวัดเพื่อใช้งาน

การออกแบบการวางตำแหน่งเม็ดตรวจวัดเพื่อใช้งานภายในภาชนะบรรจุสินค้า โดยการคำนึงถึงความปลอดภัยและสามารถมองเห็นการเปลี่ยนแปลงสีของเม็ดตรวจวัดได้ชัดเจน สำหรับงานวิจัยวัสดุตรวจวัดก๊าซในงานด้านผลไม้จะมีการออกแบบการใช้งานโดยติดแผ่นตรวจวัดก๊าซเข้ากับตัวผลไม้ (Klein et al., 2006), (Lang & Hübert, 2011) และมีทั้งติดบนกล่องบรรจุภัณฑ์ (วรภัทรและอรรณฤทธิ์, 2549) เพื่อความปลอดภัยจากการรั่วไหลของสารเคมี งานวิจัยนี้จะออกแบบโดยหลีกเลี่ยงการสัมผัสระหว่างวัสดุตรวจวัดเอทานอลกับผลไม้ และติดบนกล่องสินค้าเพื่อความสะดวกในการมองเห็นการเปลี่ยนแปลงของสีวัสดุตรวจวัด โดยวัสดุตรวจวัดสามารถออกแบบให้มีความหลากหลายและเข้ากับการใช้งาน เช่น จัดทำวัสดุตรวจวัดในรูปแบบอัดเม็ดหรือแบบผง ที่อัตราส่วนเดียวหรือหลายอัตราส่วนของสารเคมีเพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสีที่แตกต่างขึ้นกับความเข้มข้นของเอทานอลในระบบ หรือออกแบบให้มีวัสดุเทียบสีคู่กับวัสดุตรวจวัดเอทานอลเพื่อให้ง่ายต่อการแยกสีที่แตกต่าง ดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 การออกแบบและวางตำแหน่งวัสดุตรวจวัดสำหรับการใช้งาน

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1 การคัดเลือกวัสดุรองรับและสารเคมีออกซิไดซ์ในอัตราส่วนที่เหมาะสม

1. สารออกซิไดซ์ที่เหมาะสมกับระบบตรวจวัดเอทานอลในช่วงความเข้มข้น 0-1,000 พีพีเอ็ม ระยะเวลา 7 วัน คือสารออกซิไดซ์โปแทสเซียมไดโครเมต

2. วัสดุรองรับที่เหมาะสมและไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงสีอย่างชัดเจนในระบบที่ปราศจากเอทานอลหลังจากเคลือบฝังด้วยสารออกซิไดซ์โปแทสเซียมไดโครเมต คือผงซิลิกอนไดออกไซด์อัดในรูปแบบเม็ดและปราศจากวัสดุรองรับที่ไม่ทนต่อสภาวะกรด เช่น กระดาษกรองแยกเฟส และกระดาษกาวสองหน้า

3. อัตราส่วนปริมาตรของสารละลายออกซิไดซ์ที่เหมาะสมคือสารออกซิไดซ์โปแทสเซียมไดโครเมต 0.1 โมลาร์กับกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 98 เปอร์เซ็นต์โดยมวลเท่ากับ 3 ต่อ 0.5 และอัตราส่วนของสารละลายออกซิไดซ์ต่อวัสดุรองรับซิลิกอนไดออกไซด์คือ 0.85-1 มล. ต่อ 0.3 กรัม โดยกำหนดให้ปริมาณเม็ดตรวจวัดคือ 0.5 กรัม

5.1.2 อิทธิพลของสภาพแวดล้อมต่อระบบการตรวจจับเอทานอล

1. อิทธิพลของอุณหภูมิต่อระบบการตรวจวัดเอทานอลโดยอุณหภูมิที่สูงจะเกิดปฏิกิริยาเคมีได้รวดเร็วกว่าและพบอัตราการลดลงของปริมาณเอทานอลมากกว่าระบบที่มีอุณหภูมิต่ำ

2. อิทธิพลของความชื้นต่อระบบการตรวจจับเอทานอลโดยความชื้นที่มากส่งผลให้เม็ดตรวจวัดเอทานอลมีสีที่เข้มขึ้น และความชื้นจากระบบทำให้เกิดแผ่นฟิล์มรอบ ๆ เม็ดตรวจวัดซึ่งเป็นอุปสรรคต่อการซึมผ่านระหว่างวัฏภาคทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีได้ช้ากว่าและอัตราการลดลงของปริมาณเอทานอลน้อยกว่าระบบที่มีความชื้นต่ำ

5.1.3 ประสิทธิภาพของวัสดุตรวจวัด

1. ช่วงความสามารถในการตรวจวัดที่เป็นเส้นตรงมีค่าในช่วงความเข้มข้นของเอทานอลระหว่าง 0-600, 0-400 และ 0-800 พีพีเอ็ม ในสภาวะอุณหภูมิห้อง อุณหภูมิห้องเย็น และอุณหภูมิห้องที่ความชื้นอิ่มตัว ตามลำดับ

2. ความไวในการตอบสนองมีค่า -1.39×10^{-6} พีพีเอ็ม⁻¹ ($R^2 = 0.9971$), -1.75×10^{-6} พีพีเอ็ม⁻¹ ($R^2 = 0.9971$) และ -9.04×10^{-7} พีพีเอ็ม⁻¹ ($R^2 = 0.9849$) ตามสภาวะของระบบได้แก่อุณหภูมิห้อง อุณหภูมิห้องเย็น และอุณหภูมิห้องที่ความชื้นอิ่มตัวตามลำดับ เมื่อตรวจวัดในวันที่ 7 ของการทดสอบ

3. ความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถวัดได้มีค่า 160, 50 และ 90 พีพีเอ็ม ในสภาวะอุณหภูมิห้อง อุณหภูมิห้องเย็น และอุณหภูมิห้องที่ความชื้นอิ่มตัวตามลำดับ เมื่อตรวจวัดในวันที่ 7 ของการทดสอบ

4. การผลิตวัสดุตรวจวัดเอทานอลซ้ำ ด้วยกระบวนการเดิมจำนวน 10 ครั้ง มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (%RSD) เท่ากับ 0.82

5. การจัดเก็บเม็ดตรวจวัดและวัดความมีเสถียรภาพด้วยเครื่องวัดการดูดกลืนแสงในวันที่ 7, 14, 21 และ 28 วัน ในโหลแก้วพบว่าประสิทธิภาพลดลงเหลือ 99.6, 98.8, 98.0 และ 97.2 เปอร์เซ็นต์ และในพลาสติกพอลิเอทิลีนประสิทธิภาพลดลงเหลือ 92.0, 82.7, 74.6 และ 66.8 เปอร์เซ็นต์จากการวัดครั้งแรก ซึ่งพบว่ามีเสถียรภาพต่ำกว่าการจัดเก็บในแก้ว เนื่องจากอากาศและความชื้นสามารถซึมผ่านพลาสติกพอลิเอทิลีน จึงทำให้ประสิทธิภาพของสารออกซิไดซ์เสื่อมสภาพลง

5.1.4 การออกแบบเพื่อการนำมาใช้งาน

1. ออกแบบโดยใช้พลาสติกพอลิเอทิลีนห่อหุ้มเม็ดตรวจวัด ซึ่งส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีช้าลง จึงลดความเข้มข้นสารออกซิไดซ์จาก 0.1 โมลาร์เป็น 0.02 โมลาร์ โดยคงปริมาณกรด และลดปริมาณสาร จาก 0.45-0.50 กรัม ไปเป็น 0.30-0.35 กรัม สำหรับเม็ดตรวจวัดที่สภาวะอุณหภูมิห้อง และลดความเข้มข้นสารออกซิไดซ์เป็น 0.0075 โมลาร์ โดยคงปริมาณกรด และลดปริมาณสารเป็น 0.30-0.35 กรัม สำหรับเม็ดตรวจวัดที่สภาวะอุณหภูมิต่ำ

2. การออกแบบการวางตำแหน่งเม็ดตรวจวัดเพื่อใช้งานภายในระบบปิดโดยหลีกเลี่ยงการสัมผัสระหว่างวัสดุตรวจวัดกับผลไม้ และวัสดุตรวจวัดเป็นรูปแบบเม็ดหรือแบบผงที่อัตราส่วนเดียวหรือหลายอัตราส่วนของสารเคมีในลักษณะแถบสีเพื่อให้ง่ายต่อการสังเกตการเปลี่ยนแปลง และห่อหุ้มด้วยวัสดุที่ใสและสามารถป้องกันการรั่วซึมของสารเคมี

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. การทดลองยังขาดการนำไปใช้กับผลไม้ แม้ว่าจะมีการจำลองความเข้มข้นที่เกิดขึ้นในผลไม้แล้วก็ตาม แต่ในผลไม้เหล่านั้นยังมีปัจจัยต่าง ๆ อีกมาก เช่นความนุ่มของเนื้อผลไม้ ปริมาณน้ำตาลในผลไม้แต่ละชนิด อุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการจัดเก็บผลไม้ในแต่ละชนิด รวมถึงความชื้นของผลไม้แต่ละชนิด ดังนั้นจึงควรทดลองร่วมกับผลไม้แต่ละชนิด และจัดทำแผ่นเทียบสีเพื่อให้เหมาะสมต่อผลไม้ชนิดนั้น ๆ

2. การจำลองระบบความเข้มข้นเอทานอลของผลไม้ไม่สามารถคงระดับความเข้มข้นของเอทานอลได้ตลอดการทดลอง ดังนั้นอาจจะเกิดความคลาดเคลื่อนของผลการทดลอง

3. การออกแบบวัสดุห่อหุ้มเพื่อการใช้งานควรศึกษาเพิ่มเติม เพื่อให้ได้วัสดุที่มีประสิทธิภาพที่ดียิ่งขึ้น โดยต้องการวัสดุที่มีคุณสมบัติ ได้แก่ มีค่าอัตราการซึมผ่านของก๊าซได้ดี คงทนต่อสภาวะกรดและสามารถป้องกันการซึมผ่านของสารเคมีได้

4. สำหรับเมล็ดตรวจวัดเอทานอลควรอัดเม็ดให้มีความหนาแน่นที่สุดเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสในการทำปฏิกิริยากับเอทานอลและเพื่อความสะดวกต่อการใช้งาน

รายการอ้างอิง

- Adams, J. M., Gallagher, J. A., & Donnison, I. S. (2009). Fermentation study on *Saccharina latissima* for bioethanol production considering variable pre-treatments. *Appl. Phycol.*, 21.
- Agar, T., Biasi, W. V., & Mitcham, E. J. (1999). Exogenous ethylene accelerates ripening responses in Bartlett pears regardless of maturity or growing region. *Postharvest Biology and Technology*, 17, 67-78.
- Ahmad, W., Bashammakh, A. S., Al-Sibaai, A. A., Alwael, H., & El-Shahawi, M. S. (2016). Trace determination of Cr(III) and Cr(VI) species in water samples via dispersive liquid-liquid microextraction and microvolume UV-Vis spectrometry. Thermodynamics, speciation study. *Journal of Molecular Liquids*, 224 1242-1248.
- AlcoMeters. Breathalyzer Alcohol Tester. Retrieved March 19, 2016, from (<http://www.breathalyzeralcoholtester.com/how-breathalyzer-works>)
- Alley, Watada, & Qi, L. (1999). Quality of fresh-cut produce. *Postharvest Biology and Technology*, 15(3), 201-205.
- Anoshkin, I. V., Nasibulin, A. G., Mudimela, P. R., He, M., Ermolov, V., & Kauppinen, E. I. (2013). Single-walled carbon nanotube networks for ethanol vapor sensing applications. *Nano Research*, 6(2), 77-86.
- Azevedo, A. M., Prazeres, D. M. F., Cabral, J. M. S., & Fonseca, L. P. (2005). Ethanol biosensors based on alcohol oxidase. *Biosens Bioelectron*, 21(2), 235-247. doi: 10.1016/j.bios.2004.09.030
- Bai, F. W., Anderson, W. A., & Moo-Young, M. (2008). Ethanol fermentation technologies from sugar and starch feedstocks. *Biotechnol. Adv*, 26, 89-105.
- Blanco, A. J. a. G. P. A. (1998). European No. 0255491 A2.
- Borkenstein, R. F. (1978). United States Patent No. U.S. Patent 4,080,170.
- Brydson, J. A. (1966). *Plastics Materials*. Iliffe, London.
- Buchanan, B., Gruissem, W., & Jones, R. (2000). Biochemistry and Molecula Biology of plants. *Am SoC Plant Phys (Rockville)*.

- Cabanillas-Galán, P., Farmer, L., Hagan, T., Nieuwenhuyzen, M., James, S. L., & Lagunas, M. C. (2008). A New Approach for the Detection of Ethylene Using Silica-Supported Palladium Complexes. *Inorganic Chemistry*, 47(19).
- Dea, S., Brecht, J. K., Nunes, M. C. d. N., & Baldwin, E. A. (2013). Optimal Ripeness Stage for Processing 'Kent' Mangoes into Fresh-cut Slices. *HortTechnology*, 23(1), 12-23.
- Dies, R. N. H. (1983, August 10). Invented Drunkometer *Associated Press in the New York Times*.
- Doorn, W. G. V., Zagory, D., & Reid, M. S. (1991). Role of ethylene and bacteria in vascular blockage of cut fronds from the fern *Adiantum raddianum*. 46. *Ethanol – Compound Summary*. The PubChem Project. USA: National Center for Biotechnology Information.
- Fidler, J. C. (1968). Low Temperature Injury to Fruits and Vegetables. *Low Temperature Biology of Foodstuffs*, 271-283.
- Flinn Scientific, I. (2016). Sulfuric Acid and Nylon, Start with Safety — Safety Demonstrations.
- Harding, K. E., May, L. M., & Dick, K. F. (1975). *Selective oxidation of allylic alcohols with chromic acid (Org. Chem.)*.
- Index, T. M. (1983). (10 ed.). Rahway, New Jersey: Merck Co., Inc.
- Jung, J., & Zhao, Y. (2016). Antimicrobial Packaging for Fresh and Minimally Processed Fruits and Vegetables. 243-256. doi: 10.1016/b978-0-12-800723-5.00018-8
- Ke, D., Rodriguez-Sinobas, L., & Kader, A. A. (1991). Physiology and prediction of fruit tolerance to low oxygen atmospheres. *Am. Soc. Hortic. Sci.*, 116, 253-260.
- Klein, R. A., NM, A., Riley, M. R., Tucson, A., DeCianne, D. M., & Srinavakul, N. (2006). United States Patent No. US 20060127543A1.
- Koning, R. E. (1994). Ethylene. Plant Physiology Information. from http://plantphys.info/plant_physiology/ethylene.shtml.
- Konvipa Silapat, D. C., Pasinee Yuwanbun, Pramote Khuwijitjaru, Busarakorn Mahayothee. (2013). Internal Quality Evaluation of Tangerine cv. Sainamphung after Coating by Near Infrared Spectroscopy. *Agricultural Sci.*, 44(3), 406-409.
- Kudlicki A., R. M., Otwinowski Z. (2007). Cell cycle and metabolic cycle regulated gene expression in yeast *Bioinformatics*, 23, 1559-1561.

- Kuswandi, B., Wicaksono, Y., Jayus, AbdullahLee, A., Heng, Y., & Ahmad, M. (2011). Smart packaging: sensors for monitoring of food quality and safety. *Sens. & Instrumen. Food Qual.*, 5, 137-146.
- Lang, C., & Hübert, T. (2011). A Colour Ripeness Indicator for Apples. *Food and Bioprocess Technology*, 5(8), 3244-3249. doi: 10.1007/s11947-011-0694-4
- Lekner, J., & Dorf, M. C. (1988). Why some things are darker when wet. *Applied Optics*, 27(7), 1278-1280.
- Li, H., Maa, M.-L., Luoa, S., Zhanga, R.-M., Hana, P., & Hub, W. (2012). Metabolic responses to ethanol in *Saccharomyces cerevisiae* using a gas chromatography tandem mass spectrometry-based metabolomics approach. *The International Journal of Biochemistry & Cell Biology*, 44(7), 1087-1096. doi: 10.1016/j.biocel.2012.03.017
- Mills, A., Chang, Q., & McMurray, N. (1992). Equilibrium studies on colorimetric plastic film sensors for carbon dioxide. *Anal. Chem.*, 64, 1383-1389.
- Muller, T. (1999-2016). *Sulfuric Acid and Sulfur Trioxide*. *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology*. New York, NY.
- Nakajima, D. H. (2011). *Mass Transfer - Advanced Aspects*: InTech.
- Nakamura, N., & Amao, Y. (2003). An optical sensor for CO₂ using thymol blue and europium(III) complex composite film. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 92(1-2), 98-101. doi: 10.1016/s0925-4005(03)00098-4
- Osol, A. (1980). *Remington's Pharmaceutical Sciences* (16 ed.). Easton, Pennsylvania: Mack Publishing Co.
- Park, K. H., & Park, I. H. (2013). ELECHEM CO., LTD. 391-16 Cheongcheon-dong, Bupyeong-gu, Incheon 403-030 (KR) Patent No. WO/2013/111926.
- Pereira, L. F. P., Galvão, R. M., Kobayashi, A. K., Cação, S. M. B., & Vieira, L. G. E. (2005). Ethylene production and acc oxidase gene expression during fruit ripening of *Coffea arabica* L. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 17(3).
- Phillips, R. C., & Calif, P. A. (1988). US 4734360 A.
- Pongsri, M., Suwit, W., Meechai, T., Weerayut, W., Wilawan, K., Supab, C., & Nikorn, M. (2007). Monitoring tangerine quality by non-destructive technique. *Agricultural Sci. J.*, 38(5), 21-24.

- Pope, M. T. (1983). *Heteropoly and oxometalates*. New York: Springer Verlag.
- Rungsinee, S., & Patratip, R. (2008). Effect of a mango film on quality of whole and minimally processed mangoes. *Postharvest Biology and Technology*, 47, 407–415.
- Saltveit, M. E. (1997). Respiratory Metabolism (pp. 1-12). Department of Vegetable Crops, University of California, Davis, CA.
- Schutting, S., Borisov, S. M., & Klimant, I. (2013). Diketo-pyrrolo-pyrrole dyes as new colorimetric and fluorescent pH indicators for optical carbon dioxide sensors. *Anal Chem*, 85(6), 3271-3279. doi: 10.1021/ac303595v
- Severinghaus, J. W., & Bradley, A. F. (1958). *J. Appl. Phys.*, 13, 515-520.
- Shi, J. X., Porat, R., Goren, R., & Goldschmidt, E. E. (2005). Physiological responses of ‘Murcott’ mandarins and ‘Star Ruby’ grapefruit to anaerobic stress conditions and their relation to fruit taste, quality and emission of off-flavor volatiles. *Postharvest Biology and Technology*, 38, 99-105.
- Smirnova, N., Gnatyuk, Y., Vityuk, N., Linnik, O., Eremenko, A., Vorobets, V., & Kolbasov, G. (2013). Nanosized TiO₂- Based Mixed Oxide Films: Sol-gel Synthesis, Structure, Electrochemical Characteristics and Photocatalytic Activity. *International Journal of Materials Engineering*, 3(6), 124-135.
- Stanbury, P. F., Whittaker, A., & Hall, S. J. (1999). *Principles of Fermentation Technology* (2 ed.). Butterworth-Heinemann. มหาวิทยาลัย
- Tan, K. H. (2010). *Principles of Soil Chemistry* (4 ed.). University of Georgia, Athens, Georgia, USA.
- Technologies, e. v. (2009). APPLICATION - BREATHALYSER, MiCS Application Note 4 Using MiCS Sensors for Alcohol Detection-A1A-MICS_AN4 Version 1 (pp. 1-8). © e2v technologies (uk) limited.
- Todhanakasem, T., Narkmit, T., Areerat, K., & Thanonkeo, P. (2015). Fermentation of rice bran hydrolysate to ethanol using *Zymomonas mobilis* biofilm immobilization on DEAE-cellulose. *Electronic Journal of Biotechnology*, 18(3), 196-201. doi: 10.1016/j.ejbt.2015.03.007
- Turney, T. W., Christie, G. B. Y., Hardin, S. G., & Corrigan, P. A. (1991). European Patent No. EP 0 532 613 B1.

- Wang, K., Li, H., & Ecker, J. R. (2002). Ethylene Biosynthesis and Signalling Networks. *Plant Cell (Supplement)*, s131-s151.
- Watada, A., Abe, K., & Yamuchi, N. (1990). Physiological activities of partially processed fruits and vegetables. *Food Technol*, 44(5), 116-122.
- Weckhuysen, B. M., Wachs, I. E., & Schoonheydt, R. A. (1996). Surface Chemistry and Spectroscopy of Chromium in Inorganic Oxides. *Chem. Rev.*, 96, 3327-3349.
- Weigl, B. H., Holobar, A., Trettnak, W., Klimant, I., Kraus, H., O'Leary, P., & Wolfbeis, O. (1994). Optical triple sensor for measuring oxygen and carbon dioxide. *Journal of Biotechnology*, 32, 127-138.
- Wiley, J., & Sons. (1978). 1(365), 1978-1984.
- Wiley, R. C. (1994). *Minimally Processed Refrigerated Fruits and Vegetables*. London, UK.
- Zhou, B., McEvoy, J. L., Luo, Y., Saftner, R. A., Feng, H., & Beltran, T. (2006). 1-Methylcyclopropane counteracts ethylene-induced microbial growth on fresh-cut watermelon. *Food Microbiology and safety*, 71, M180-184.
- กนกวรรณ พิสันเทียะ และยุภาพร สมิน้อย. อุปกรณ์แบบกระดาษสำหรับวิเคราะห์แอลกอฮอล์โดยอาศัยการตรวจวัดทางเอนไซม์. Paper presented at the การประชุมวิชาการระดับชาติ วิทยาศาสตร์วิจัย, ครั้งที่ 6.
- เกรียงไกร มีถาวร. (2553, 7-8 ธันวาคม). การหายใจและการผลิตเอทิลีนของมะพร้าวอ่อน. ประชุมวิชาการมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์วิทยาเขตกำแพงแสน ครั้งที่ 7.
- จรรยา สมแก้ว. (2552). รูปแบบการหั่นชิ้นต่อคุณภาพของมะม่วงและสับปะรดระหว่างการเก็บรักษา. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่).
- นวกัทร และ ทวีพล. (2555). การวัดและเครื่องมือวัด ประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร.
- ปิยฉัตร ศรีสัตบุตร. (2542). การเก็บรักษาขนุนทั้งผลและยวงขนุนสดภายใต้อุณหภูมิต่ำ. (วิทยานิพนธ์หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต), มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- วรภัทร ลัคนทินวงศ์ และอรรณฤทธิ์ รื่นเรใจ. (2549). รายงานการพัฒนาแถบสีบ่งชี้อายุการเก็บรักษา ผักผลไม้สดตัดแต่งพร้อมบริโภคในเชิงพาณิชย์. กรุงเทพฯ: สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย.
- สุวิทย์ วงศ์ศิลา. (2548). การวัดปริมาณแอลกอฮอล์เพื่อการตรวจสอบคุณภาพของส้ม. งานสัมมนาวิชาการ วิทยาการหลังการเก็บเกี่ยว / หลังการผลิตแห่งชาติ ครั้งที่ 3 โรงแรมทิพย์วิมานรีสอร์ท หาดชะอำ จ.เพชรบุรี.



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

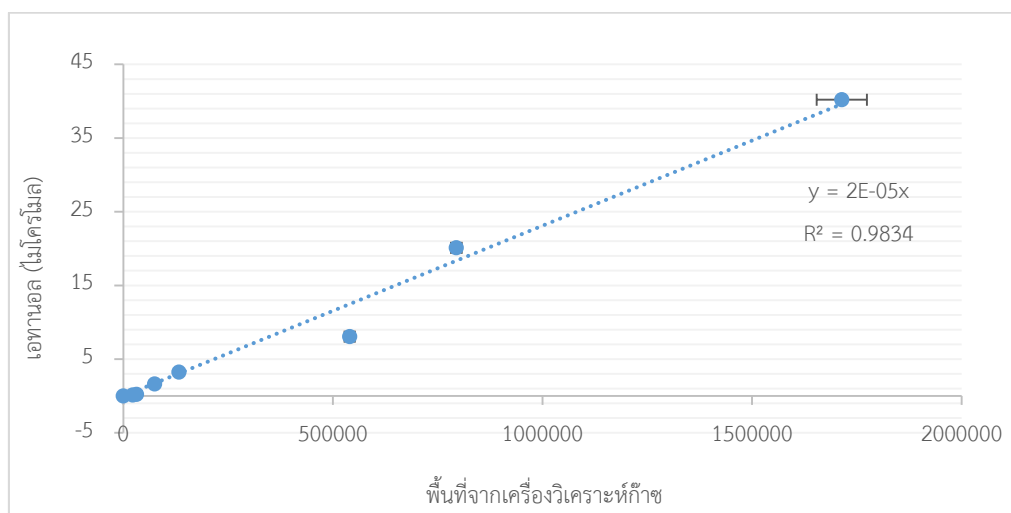
ภาคผนวก ก
กราฟมาตรฐาน

ก.1 ปริมาณเอทานอลที่สัมพันธ์กับพื้นที่จากการทดสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์ก๊าซ

ตารางที่ ก.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารมาตรฐานเอทานอลและโมลของเอทานอล โดยเทียบกับพื้นที่ที่ได้จากเครื่องตรวจวัดก๊าซ

ปริมาตร (ไมโคร ลิตร)	พื้นที่จากเครื่องวิเคราะห์ก๊าซ				เฉลี่ย	SD	เอทานอล (ไมโคร โมล)
1000	1621904	1702759	1753051	1778966	1714170	59903	*40.20
500	778393	795264	809697		794451	12793	20.10
200	526680	540137	534079	559296	540048	12092	8.04
80	134547	130752	132524		132650	1898	3.22
40	79036	70406	75413		74721	4315	1.61
5	30210	33972	34484	28635	31825	2473	0.20
3	22107	22390	21877	23070	22361	448	0.12
0	0	0	0	0	0	0	0.00

* $n = PV/RT = (1 \text{ atm})(1000 \mu\text{l}) / (0.0821 \text{ atm}\cdot\text{L}/\text{mol}\cdot\text{K})(303 \text{ K}) = 40.20 \mu\text{mol}$

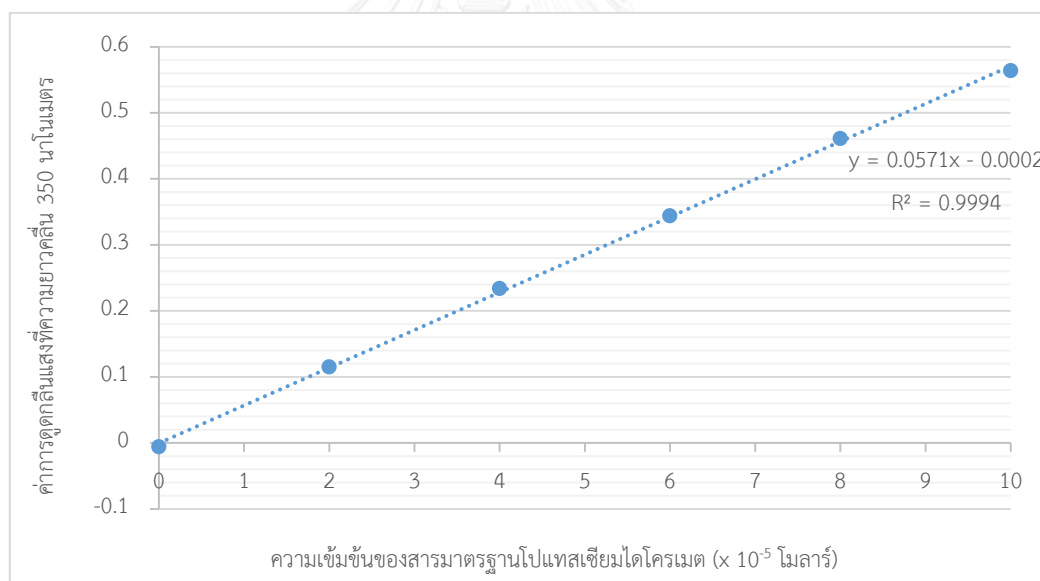


รูปที่ ก.1 ความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่วัดได้จากเครื่องวิเคราะห์ก๊าซและปริมาณเอทานอล

ก.2 ค่าการดูดกลืนแสงที่สัมพันธ์กับความเข้มข้นของสารออกซิไดซ์โปแทสเซียมไดโครเมต

ตารางที่ ก.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 350 นาโนเมตรและความเข้มข้นของสารมาตรฐานโปแทสเซียมไดโครเมต

ความเข้มข้นสารมาตรฐาน ($\times 10^{-5}$ โมลาร์)	ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาว คลื่น 350 นาโนเมตร			ค่าเฉลี่ย	SD
0	0.006	-0.006	-0.006	-0.006	0.0000
2	0.114	0.115	0.115	0.115	0.0005
4	0.234	0.234	0.234	0.234	0.0000
6	0.345	0.345	0.344	0.345	0.0005
8	0.460	0.460	0.461	0.460	0.0005
10	0.563	0.563	0.564	0.563	0.0005



รูปที่ ก.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงความยาวคลื่น 350 นาโนเมตร
กับความเข้มข้นของสารมาตรฐานโปแทสเซียมไดโครเมต

ภาคผนวก ข
ข้อมูลผลการทดลอง

ข.1 การหาปริมาณเอทานอล (โมล) และการคำนวณหาสัดส่วนใน 1 มล.ของเอทานอลที่อิมตัวในอากาศ ที่สภาวะอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ความดัน 1 บรรยากาศ

ตารางที่ ข.1 ปริมาณเอทานอล (โมล) จากการเตรียมก๊าซเอทานอลที่สมดุลในอากาศ ที่สภาวะอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บรรยากาศ ด้วยเครื่องวิเคราะห์ก๊าซเพื่อหาปริมาณเอทานอล (โมล)

ครั้งที่	เวลา (นาทีก)	พื้นที่ (1.0 มล.)	เอทานอล (ไมโครโมล)
1	4.452	167526	3.35
2	4.459	163492	3.27
3	4.458	171474	3.43
4	4.462	178094	3.56
ค่าเฉลี่ย	4.457	170147	3.40
SD	0.004	5387	0.11

ดังนั้นใน 1 มล.ของก๊าซเอทานอลอิมตัวที่สมดุลในอากาศ ที่สภาวะอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บรรยากาศมีค่าเฉลี่ยคือ 3.40 ไมโครโมลของเอทานอล โดยเทียบจากกราฟมาตรฐานภาคผนวก ก.1

ในทางทฤษฎีเอทานอลที่สมดุลในอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียสและ ความดัน 1 บรรยากาศ จะมีสัดส่วนเอทานอลในอากาศเท่ากับ 0.103

หาได้จาก $Y_{\text{EtOH}}P_{\text{total}} = X_{\text{EtOH}}P_{\text{sat}}$

โดย Y_{EtOH} = ปริมาณเอทานอลที่อิมตัว

X_{EtOH} = สัดส่วนของเอทานอลในสถานะของเหลว

P_{total} = ความดันที่สภาวะก๊าซ

P_{sat} = ความดันอิมตัวของเอทานอล หาได้จาก Antoine Equation Parameters มีค่า *0.102762

(*ที่มา: <http://ddbonline.ddbst.de/AntoineCalculation/AntoineCalculationCGI.exe>)

ในทางปฏิบัติก๊าซเอทานอลที่สมดุลในอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียสและ ความดัน 1 บรรยากาศ จะวิเคราะห์โดยเครื่องวิเคราะห์ก๊าซซึ่งจะแสดงให้เห็นเฉพาะพีคองค์ประกอบของอากาศ แต่ไม่ปรากฏพีคของเอทานอล ดังตารางที่ ข.2 และสามารถคำนวณสัดส่วนของเอทานอลในอากาศที่ สภาวะอิมิต์วที่ได้เท่ากับ 0.0925 ของเอทานอลในอากาศ

ตารางที่ ข.2 สัดส่วนของอากาศโดยเครื่องวิเคราะห์ก๊าซ

ครั้งที่	สารที่ฉีด	เวลา (นาที)	พื้นที่	พื้นที่ทั้งหมด	ความเข้มข้น	สัดส่วน เอทานอล/อากาศ
1	เอทานอล	1.938	716478	3352149	21.3737	0.095
	ในอากาศ	2.601	2635672		78.6263	
	อากาศ	1.9205	794810	3702990	21.7550	
		2.5945	2908180		78.5771	
2	เอทานอล	1.276	452204	2139806	21.133	0.090
	ในอากาศ	1.745	1687601		78.867	
	อากาศ	1.409	494926	2351994	21.0428	
		1.936	1857068		78.9572	

ข.2 การเตรียมก๊าซเอทานอลความเข้มข้น 0-1,000 พีพีเอ็ม ในระบบปิดขนาด 435 มล.

1. ก๊าซเอทานอลที่เตรียม 1 มล. มี 3.40 ไมโครโมล จากค่าเฉลี่ยที่ได้จากตารางที่ ข.1 และมีอัตราส่วน 0.0925 เอทานอลในอากาศ จากค่าเฉลี่ยที่ได้จากตารางที่ ข.2

2. โหลแก้วสุญญากาศขนาด 435 มล. มีปริมาณก๊าซทั้งหมด 0.0175 โมล

$$n = PV/RT = (1 \text{ atm})(435/1,000\text{L}) / (0.0821 \text{ atm.L/mol.K})(303 \text{ K})$$

3. ปริมาณเอทานอลที่ใช้เพื่อนำเข้าสู่ระบบปิดขนาด 435 มล. ในช่วงความเข้มข้นของเอทานอล 0-1,000 พีพีเอ็ม

ตัวอย่างการคำนวณที่ระบบปิดเอทานอล 1,000 พีพีเอ็ม

กำหนดให้ A = เอทานอลและอากาศ (โมล)

$$\text{EtOH}/(\text{EtOH}+\text{Air}) = 1,000/1,000,000 = (0.0925A \text{ (mol)})/(0.0175+A \text{ (mol)})$$

การคำนวณปริมาณเอทานอลที่ต้องฉีดเข้าสู่ระบบ

1. ปริมาณเอทานอลและอากาศรวมกัน 1.91×10^{-4} โมล

2. คิดเป็นเอทานอล $1.91 \times 10^{-4} \times 0.0925 = 1.77 \times 10^{-5}$ โมล

3. *ต้องใช้ฉีดเอทานอลเข้าสู่ระบบ 1.77×10^{-5} โมล \times (1 มล./ 3.40×10^{-6} โมล) = 5.2 มล.

เพื่อให้ได้เอทานอล 1,000 พีพีเอ็ม ในระบบปิดขนาด 435 มล.

ตารางที่ ข.3 ปริมาณก๊าซเอทานอล (มล.) เพื่อเตรียมความเข้มข้นของเอทานอลในระบบปิด ช่วงความเข้มข้น 0-1,000 พีพีเอ็ม

เอทานอลในระบบ (พีพีเอ็ม)	เอทานอลและอากาศ (โมล)	เอทานอล (โมล)	เอทานอล (มล.)	พท.โดยประมาณจาก เครื่องวิเคราะห์ก๊าซ
0	0	0	0	0
200	3.79×10^{-5}	3.51×10^{-6}	1.1	430
400	7.60×10^{-5}	7.03×10^{-6}	2.1	801
600	1.14×10^{-4}	1.06×10^{-5}	3.2	1,252
800	1.53×10^{-4}	1.41×10^{-5}	4.2	1,643
1,000	1.91×10^{-4}	1.77×10^{-5}	*5.2	2,034

ข.3 การรั่วไหลของโพลีแกวสุญญากาศ

ความเข้มข้นของเอทานอลในระบบ (พีพีเอ็ม) หาจาก

$$= (\text{พื้นที่ใต้กราฟ/ปริมาตรที่ฉีดเข้าเครื่องวิเคราะห์ก๊าซ}) \times ((\text{ไมโครโมลเอทานอล/พื้นที่ใต้กราฟ}) \text{ จากภาคผนวก ก.1}) \times ((\text{ปริมาตร/โมล}) \text{ ในระบบ})$$

$$= (\text{พื้นที่ใต้กราฟ/ปริมาตรที่ฉีดเข้าเครื่องวิเคราะห์ก๊าซ}) \times (2 \times 10^{-5} \text{ ไมโครโมลเอทานอล/พื้นที่ใต้กราฟ}) \times (435 \text{ มล./} 0.0175 \text{ โมล ในระบบ})$$

$$\text{เอทานอลที่คงเหลือ (เปอร์เซ็นต์)} = \frac{\text{ความเข้มข้นเอทานอลที่เวลาใดใด}}{\text{ความเข้มข้นเอทานอลที่เริ่มต้น}} \times 100\%$$

ตารางที่ ข.4 เปอร์เซ็นต์เอทานอลที่คงเหลือที่ตรวจวัดในระบบในทุก ๆ 6 ชม. ใน 1 วัน

เวลา (ชม.)	เอทานอลที่คงเหลือในระบบ 200 พีพีเอ็ม (เปอร์เซ็นต์)				
	1	2	3	เฉลี่ย	SD
0	100.00	100.00	100.00	100.00	0.00
6	87.93	91.82	85.89	88.55	2.13
12	80.30	82.24	80.35	80.96	0.90
18	73.15	74.30	73.30	73.58	0.51
24	67.24	70.33	68.26	68.61	1.28
เวลา (ชม.)	เอทานอลที่คงเหลือในระบบ 1,000 พีพีเอ็ม (เปอร์เซ็นต์)				
	1	2	3	เฉลี่ย	SD
0	100.00	100.00	100.00	100.00	0.00
6	90.42	90.75	88.35	89.84	1.06
12	82.10	83.35	80.77	82.07	1.05
18	77.36	78.04	76.88	77.43	0.48
24	74.54	71.62	75.08	73.75	1.52

ข.4 ปริมาณเอทานอลในระบบปิดแต่ละสภาวะเป็นเวลา 7 วัน ที่สภาวะต่าง ๆ

ตารางที่ ข.5-1 ความเข้มข้นของเอทานอลที่ทดสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์ก๊าซในระบบ ในช่วงเวลา 7 วัน ที่สภาวะอุณหภูมิห้อง (28 ± 3 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ 61-74 เปอร์เซ็นต์)

เวลา (วัน)	ความเข้มข้นเอทานอลในระบบ 0 พีพีเอ็ม			เฉลี่ย	SD	ความเข้มข้นเอทานอลในระบบ 200 พีพีเอ็ม			เฉลี่ย	SD
1	0	0	0	0	0	216	207	178	200	16
1*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	196	225	188	203	16
2*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	233	228	214	225	8
3*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	227	211	148	196	34
4*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	192	178	206	192	12
5*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	231	201	193	209	16
6*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	237	175	148	187	37
7*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

* หมายถึงความเข้มข้นของเอทานอลในระบบหลังจากฉีดเอทานอลเข้าระบบเป็นเวลา 24 ชม.

ความเข้มข้นของเอทานอล (พีพีเอ็ม)

$$= (\text{พื้นที่ใต้กราฟ/ปริมาตรที่ฉีดเข้าเครื่องวิเคราะห์ก๊าซ}) \times (2 \times 10^{-5} \text{ ไมโครโมลเอทานอล/พื้นที่ใต้กราฟ}) \times (435 \text{ มล./}0.0175 \text{ โมล ในระบบ})$$

เวลา (วัน)	ความเข้มข้นเอทานอล ในระบบ 400 พีพีเอ็ม			เฉลี่ย	SD	ความเข้มข้นเอทานอล ในระบบ 600 พีพีเอ็ม			เฉลี่ย	SD
1	389	424	395	403	15	601	672	645	639	30
1*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	404	382	415	400	13	658	656	708	674	24
2*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	392	395	434	407	19	630	635	659	641	13
3*	0	0	0	0	0	26	24	28	26	2
4	368	410	432	403	26	654	596	641	630	25
4*	0	0	0	0	0	24	15	21	20	4
5	404	389	406	400	7	721	704	623	683	43
5*	21	17	24	21	3	36	29	17	27	8
6	426	390	344	387	33	640	675	645	654	15
6*	29	12	0	14	12	30	37	32	33	3
7	383	410	374	389	15	702	626	641	656	33
7*	23	26	18	22	3	41	26	24	30	7

* หมายถึงความเข้มข้นของเอทานอลในระบบหลังจากฉีดเอทานอลเข้าระบบเป็นเวลา 24 ชม.

ความเข้มข้นของเอทานอล (พีพีเอ็ม)

$$= (\text{พื้นที่ใต้กราฟ/ปริมาตรที่ฉีดเข้าเครื่องวิเคราะห์ก๊าซ}) \times (2 \times 10^{-5} \text{ ไมโครโมลเอทานอล/พื้นที่ใต้กราฟ}) \times (435 \text{ มล./}0.0175 \text{ โมล ในระบบ})$$

เวลา (วัน)	ความเข้มข้นเอทานอล ในระบบ 800 พีพีเอ็ม			เฉลี่ย	SD	ความเข้มข้นเอทานอล ในระบบ 1,000 พีพีเอ็ม			เฉลี่ย	SD
1	697	727	758	727	25	1084	1003	1021	1036	35
1*	29	26	34	29	3	87	75	78	80	6
2	727	783	808	772	34	985	956	993	978	16
2*	31	47	32	37	7	46	58	67	57	9
3	760	793	821	792	25	1073	1061	988	1041	38
3*	39	41	48	43	4	102	97	91	97	4
4	789	844	780	804	29	987	1028	1018	1011	18
4*	39	42	36	39	2	118	126	106	117	8
5	811	807	840	819	15	993	1059	1028	1027	27
5*	45	45	49	46	2	108	142	111	120	15
6	794	792	871	819	37	983	975	1074	1011	45
6*	41	39	68	49	13	102	130	148	127	19
7	873	887	825	862	27	1002	982	1038	1007	23
7*	123	142	91	119	21	204	163	183	184	17

* หมายถึงความเข้มข้นของเอทานอลในระบบหลังจากฉีดเอทานอลเข้าระบบเป็นเวลา 24 ชม.

ความเข้มข้นของเอทานอล (พีพีเอ็ม)

$$= (\text{พื้นที่ใต้กราฟ/ปริมาตรที่ฉีดเข้าเครื่องวิเคราะห์ก๊าซ}) \times (2 \times 10^{-5} \text{ ไมโครโมลเอทานอล/พื้นที่ใต้กราฟ}) \times (435 \text{ มล./}0.0175 \text{ โมล ในระบบ})$$

ตารางที่ ข.5-2 ความเข้มข้นของเอทานอลที่ทดสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์ก๊าซในระบบ ในช่วงเวลา 7 วัน ที่สภาวะอุณหภูมิห้องเย็น (4 ± 2 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ 10-46 เปอร์เซ็นต์)

เวลา (วัน)	ความเข้มข้นเอทานอลในระบบ 0 พีพีเอ็ม			เฉลี่ย	SD	ความเข้มข้นเอทานอลในระบบ 200 พีพีเอ็ม			เฉลี่ย	SD
1	0	0	0	0	0	233	213	233	226	9
1*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	193	207	212	204	8
2*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	213	196	240	216	18
3*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	228	212	214	218	7
4*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	212	198	229	213	13
5*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	215	207	197	206	7
6*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	163	188	212	188	20
7*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

* หมายถึงความเข้มข้นของเอทานอลในระบบหลังจากฉีดเอทานอลเข้าระบบเป็นเวลา 24 ชม.

ความเข้มข้นของเอทานอล (พีพีเอ็ม)

$$= (\text{พื้นที่ใต้กราฟ/ปริมาตรที่ฉีดเข้าเครื่องวิเคราะห์ก๊าซ}) \times (2 \times 10^{-5} \text{ ไมโครโมลเอทานอล/พื้นที่ใต้กราฟ}) \times (435 \text{ มล./}0.0175 \text{ โมล ในระบบ})$$

เวลา (วัน)	ความเข้มข้นเอทานอลใน ระบบ 400 พีพีเอ็ม			เฉลี่ย	SD	ความเข้มข้นเอทานอล ในระบบ 600 พีพีเอ็ม			เฉลี่ย	SD
1	378	424	382	395	20	576	672	675	641	46
1*	0	0	0	0	0	27	32	29	29	2
2	406	337	410	384	33	580	624	631	612	23
2*	0	0	0	0	0	40	43	39	41	1
3	411	413	395	406	8	638	670	579	629	37
3*	0	0	0	0	0	43	47	33	41	6
4	410	374	406	397	16	625	680	674	660	24
4*	21	0	16	12	9	48	51	44	48	3
5	388	369	391	383	10	670	596	672	646	36
5*	19	0	14	11	8	47	34	43	41	5
6	389	393	365	382	12	631	672	591	631	33
6*	32	36	22	30	6	59	62	48	57	6
7	347	430	390	389	34	575	634	614	608	25
7*	34	38	37	36	2	71	68	74	71	2

* หมายถึงความเข้มข้นของเอทานอลในระบบหลังจากฉีดเอทานอลเข้าระบบเป็นเวลา 24 ชม.

ความเข้มข้นของเอทานอล (พีพีเอ็ม)

$$= (\text{พื้นที่ใต้กราฟ/ปริมาตรที่ฉีดเข้าเครื่องวิเคราะห์ก๊าซ}) \times (2 \times 10^{-5} \text{ ไมโครโมลเอทานอล/พื้นที่ใต้กราฟ}) \times (435 \text{ มล./} 0.0175 \text{ โมล ในระบบ})$$

เวลา (วัน)	ความเข้มข้นเอทานอลใน ระบบ 800 พีพีเอ็ม			เฉลี่ย	SD	ความเข้มข้นเอทานอล ในระบบ 1,000 พีพีเอ็ม			เฉลี่ย	SD
1	787	824	840	817	22	1068	1087	1023	1060	27
1*	132	82	88	101	22	155	143	131	143	10
2	770	789	821	793	21	933	987	926	948	27
2*	79	76	92	82	7	116	117	98	111	9
3	809	839	887	845	32	987	1001	1021	1003	14
3*	78	81	79	79	1	133	132	123	129	4
4	834	840	836	837	2	977	970	941	963	16
4*	71	79	81	77	4	145	137	98	127	20
5	858	769	814	814	36	1071	1018	1036	1042	22
5*	64	71	67	67	3	165	158	180	168	9
6	838	821	856	838	14	1029	978	980	996	23
6*	87	92	87	89	2	181	170	183	178	6
7	887	839	824	850	27	1037	996	987	1007	22
7*	128	125	98	117	13	241	202	192	212	21

* หมายถึงความเข้มข้นของเอทานอลในระบบหลังจากฉีดเอทานอลเข้าระบบเป็นเวลา 24 ชม.

ความเข้มข้นของเอทานอล (พีพีเอ็ม)

$$= (\text{พื้นที่ใต้กราฟ/ปริมาตรที่ฉีดเข้าเครื่องวิเคราะห์ก๊าซ}) \times (2 \times 10^{-5} \text{ ไมโครโมลเอทานอล/พื้นที่ใต้กราฟ}) \times (435 \text{ มล./}0.0175 \text{ โมล ในระบบ})$$

ตารางที่ ข.5-3 ความเข้มข้นของเอทานอลที่ทดสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์ก๊าซในระบบ ในช่วงเวลา 7 วัน ที่สภาวะอุณหภูมิห้องที่ความชื้นอิ่มตัว (28 ± 3 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ 58-97 เปอร์เซ็นต์)

เวลา (วัน)	ความเข้มข้นเอทานอลในระบบ 0 พีพีเอ็ม			เฉลี่ย	SD	ความเข้มข้นเอทานอลในระบบ 200 พีพีเอ็ม			เฉลี่ย	SD
1	0	0	0	0	0	212	208	198	206	6
1*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	241	211	235	229	13
2*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	194	230	218	214	15
3*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	204	220	235	220	12
4*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	225	233	239	232	6
5*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	196	230	247	224	21
6*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	254	233	232	240	10
7*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

* หมายถึงความเข้มข้นของเอทานอลในระบบหลังจากฉีดเอทานอลเข้าระบบเป็นเวลา 24 ชม.

ความเข้มข้นของเอทานอล (พีพีเอ็ม)

$$= (\text{พื้นที่ใต้กราฟ/ปริมาตรที่ฉีดเข้าเครื่องวิเคราะห์ก๊าซ}) \times (2 \times 10^{-5} \text{ ไมโครโมลเอทานอล/พื้นที่ใต้กราฟ}) \times (435 \text{ มล./}0.0175 \text{ โมล ในระบบ})$$

เวลา (วัน)	ความเข้มข้นเอทานอล ในระบบ 400 พีพีเอ็ม			เฉลี่ย	SD	ความเข้มข้นเอทานอล ในระบบ 600 พีพีเอ็ม			เฉลี่ย	SD
1	424	419	406	416	7	602	659	680	647	33
1*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	430	438	382	417	25	707	680	695	694	11
2*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	450	434	397	427	22	645	684	712	680	27
3*	0	0	0	0	0	24	26	30	27	3
4	459	415	424	433	19	758	686	681	708	35
4*	17	0	0	6	8	31	35	22	30	5
5	435	456	406	432	21	738	676	680	698	29
5*	0	22	17	13	10	41	28	20	29	9
6	409	424	399	411	10	659	645	604	636	23
6*	17	30	0	16	12	42	26	17	28	10
7	429	421	464	438	19	709	643	654	669	29
7*	34	19	28	27	6	47	48	39	45	4

* หมายถึงความเข้มข้นของเอทานอลในระบบหลังจากฉีดเอทานอลเข้าระบบเป็นเวลา 24 ชม.

ความเข้มข้นของเอทานอล (พีพีเอ็ม)

$$= (\text{พื้นที่ใต้กราฟ/ปริมาตรที่ฉีดเข้าเครื่องวิเคราะห์ก๊าซ}) \times (2 \times 10^{-5} \text{ ไมโครโมลเอทานอล/พื้นที่ใต้กราฟ}) \times (435 \text{ มล./}0.0175 \text{ โมล ในระบบ})$$

เวลา (วัน)	ความเข้มข้นเอทานอลใน ระบบ 800 พีพีเอ็ม			เฉลี่ย	SD	ความเข้มข้นเอทานอล ในระบบ 1,000 พีพีเอ็ม			เฉลี่ย	SD
1	743	777	838	786	39	1145	1023	987	1052	68
1*	35	41	39	38	2	106	87	84	92	10
2	764	821	843	809	33	988	1001	976	988	10
2*	40	46	50	46	4	78	86	90	85	5
3	874	808	791	824	36	1077	1101	985	1054	50
3*	57	49	43	50	6	115	123	109	116	6
4	836	857	822	838	14	1003	1061	970	1012	37
4*	51	62	56	56	4	101	133	104	113	14
5	841	876	909	875	28	987	991	991	990	2
5*	57	62	64	61	3	102	117	123	114	9
6	877	907	953	912	31	1109	1023	1048	1060	36
6*	66	64	73	67	4	131	117	138	129	9
7	851	921	858	876	31	1010	1065	978	1018	36
7*	102	113	106	107	5	196	191	176	188	9

* หมายถึงความเข้มข้นของเอทานอลในระบบหลังจากฉีดเอทานอลเข้าระบบเป็นเวลา 24 ชม.

ความเข้มข้นของเอทานอล (พีพีเอ็ม)

$$= (\text{พื้นที่ใต้กราฟ/ปริมาตรที่ฉีดเข้าเครื่องวิเคราะห์ก๊าซ}) \times (2 \times 10^{-5} \text{ ไมโครโมลเอทานอล/พื้นที่ใต้กราฟ}) \times (435 \text{ มล./}0.0175 \text{ โมล ในระบบ})$$

ข.5 ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 350 นาโนเมตร จากเม็ดตรวจวัดเอทานอลในวันที่ 7 ของการตรวจวัดในแต่ละสภาวะ ของเม็ดตรวจวัดโปแทสเซียมไดโครเมตบน 0.1 โมลาร์ต่อกรด ซัลฟิวริก 98 เปอร์เซ็นต์ในสัดส่วนปริมาตร 3 : 0.5 บนวัสดุซิลิกอนไดออกไซด์ 0.5 กรัม

หาปริมาณสารออกซิไดซ์จากค่าการดูดกลืนแสงได้จากกราฟมาตรฐาน ภาคผนวก ก.2

ปริมาณสารออกซิไดซ์ที่ถูกใช้ = ปริมาณสารออกซิไดซ์เริ่มต้น - ปริมาณสารออกซิไดซ์ที่คงเหลือ

ตารางที่ ข.6-1 ค่าการดูดกลืนแสงที่วัดจากเม็ดตรวจวัดเอทานอล ในสภาวะอุณหภูมิห้อง (28 ± 3 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ 61-74 เปอร์เซ็นต์)

เอทานอลในระบบ (พีพีเอ็ม)	ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 350 นาโนเมตร			เฉลี่ย	SD
0	0.568	0.457	0.514	0.513	0.045
200	0.330	0.310	0.333	0.324	0.010
400	0.193	0.176	0.182	0.184	0.007
600	-0.002	0.004	0.010	0.004	0.005
800	0.005	0.008	0.014	0.009	0.004
1000	0.007	0.005	0.015	0.009	0.004

ตารางที่ ข.6-2 ค่าการดูดกลืนแสงที่วัดจากเม็ดตรวจวัดเอทานอล ในสภาวะอุณหภูมิห้องเย็น (4 ± 2 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ 10-46 เปอร์เซ็นต์)

เอทานอลในระบบ (พีพีเอ็ม)	ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 350 นาโนเมตร			เฉลี่ย	SD
0	0.544	0.565	0.572	0.560	0.012
200	0.435	0.381	0.483	0.433	0.042
400	0.263	0.302	0.274	0.280	0.016
600	0.058	0.046	0.042	0.049	0.007
800	0.009	0.016	0.049	0.025	0.017
1000	0.006	0.032	0.016	0.018	0.011

ตารางที่ ข.6-3 ค่าการดูดกลืนแสงที่วัดจากเม็ดตรวจวัดเอทานอล ในสภาวะอุณหภูมิห้องที่ความชื้นอิ่มตัว (28±3 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ 58-97 เปอร์เซ็นต์)

เอทานอลในระบบ (พีพีเอ็ม)	ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 350 นาโนเมตร			เฉลี่ย	SD
0	0.555	0.605	0.563	0.574	0.022
200	0.422	0.424	0.359	0.402	0.030
400	0.323	0.294	0.275	0.297	0.020
600	0.087	0.093	0.084	0.088	0.004
800	0.003	0.012	0.009	0.008	0.004
1000	0.001	0.027	0.022	0.017	0.011

ข.6 การผลิตเม็ดตรวจวัดซ้ำโดยวิธีการเดิม จำนวน 10 ครั้ง สามารถวิเคราะห์จากค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 350 นาโนเมตร

ตารางที่ ข.7 ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 350 นาโนเมตร ของการผลิตเม็ดตรวจวัด 10 ครั้ง

ครั้งที่	ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 350 นาโนเมตร			เฉลี่ย
1	0.621	0.623	0.626	0.623
2	0.628	0.629	0.628	0.628
3	0.624	0.626	0.623	0.624
4	0.628	0.627	0.625	0.627
5	0.630	0.633	0.634	0.632
6	0.636	0.634	0.632	0.634
7	0.635	0.632	0.633	0.633
8	0.633	0.628	0.631	0.631
9	0.617	0.619	0.613	0.616
10	0.628	0.626	0.624	0.626
			\bar{x}	0.627
			SD	0.00515
			RSD (%)	0.8209

ข.7 การจัดเก็บโดยวัดการเสื่อมสภาพของวัสดุตรวจวัดเอทานอลด้วยเครื่องดูดกลืนแสงเป็นเวลา 7, 14, 21 และ 28 วัน ของการจัดเก็บในวัสดุแก้วและพลาสติกพอลิเอทิลีนที่อุณหภูมิห้อง (28 ± 3 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ 61-74 เปอร์เซ็นต์)

เสถียรภาพของวัสดุตรวจวัด = (ค่าการดูดกลืนแสงที่เวลาใดใด)/(ค่าการดูดกลืนแสงเริ่มต้น) \times 100%

ตารางที่ ข.8-1 ค่าการดูดกลืนแสงเพื่อวัดความเสื่อมสภาพของเม็ตรวจวัดที่สภาวะจัดเก็บในแก้ว

เวลา (วัน)	ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 350 นาโนเมตร			ค่าเฉลี่ย	SD
0	0.625	0.626	0.624	0.625	0.001
7	0.620	0.623	0.624	0.622	0.002
14	0.617	0.619	0.616	0.617	0.001
21	0.612	0.613	0.612	0.612	0.000
28	0.606	0.607	0.609	0.607	0.001

ตารางที่ ข.8-2 ค่าการดูดกลืนแสงเพื่อวัดความเสื่อมสภาพของเม็ตรวจวัดที่สภาวะจัดเก็บในพลาสติกพอลิเอทิลีน

เวลา (วัน)	ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 350 นาโนเมตร			ค่าเฉลี่ย	SD
0	0.625	0.626	0.624	0.625	0.001
7	0.576	0.574	0.575	0.575	0.001
14	0.513	0.518	0.519	0.517	0.003
21	0.465	0.466	0.468	0.466	0.001
28	0.414	0.418	0.420	0.417	0.002

ข.8 ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 350 นาโนเมตร จากเม็ดตรวจวัดเอทานอล 0.02 และ 0.0075 โมลาร์ต่อกรดซัลฟิวริก 98 เปอร์เซ็นต์ในสัดส่วนปริมาตร 3 : 0.5 บนวัสดุซิลิกอนไดออกไซด์ 0.3-0.35 กรัม ในวันสุดท้ายของการตรวจวัดใน ที่สภาวะอุณหภูมิห้องและอุณหภูมิต่ำตามลำดับ

หาปริมาณสารออกซิไดซ์จากค่าการดูดกลืนแสงได้จากกราฟมาตรฐาน ภาคผนวก ก.2

ปริมาณสารออกซิไดซ์ที่ถูกใช้ = ปริมาณสารออกซิไดซ์เริ่มต้น - ปริมาณสารออกซิไดซ์ที่คงเหลือ

ตารางที่ ข.9-1 ค่าการดูดกลืนแสงที่วัดจากเม็ดตรวจวัดเอทานอล ในสภาวะอุณหภูมิห้อง (28 ± 3 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ 61-74 เปอร์เซ็นต์)

เอทานอลในระบบ (พีพีเอ็ม)	ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 350 นาโนเมตร			เฉลี่ย	SD
0	0.078	0.081	0.085	0.081	0.003
200	0.027	0.027	0.029	0.028	0.001
400	0.007	0.01	0.015	0.011	0.003
600	0.011	0.007	0.005	0.008	0.002
800	0.009	0.006	0.005	0.007	0.002
1000	0.006	0.008	0.007	0.007	0.001

ตารางที่ ข.9-2 ค่าการดูดกลืนแสงที่วัดจากเม็ดตรวจวัดเอทานอล ในสภาวะอุณหภูมิห้องเย็น (4 ± 2 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ 10-46 เปอร์เซ็นต์)

เอทานอลในระบบ (พีพีเอ็ม)	ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 350 นาโนเมตร			เฉลี่ย	SD
0	0.034	0.033	0.029	0.032	0.002
200	0.022	0.024	0.027	0.024	0.002
400	0.023	0.021	0.023	0.022	0.001
600	0.019	0.022	0.022	0.021	0.001
800	0.011	0.012	0.013	0.012	0.001
1000	0.006	0.008	0.011	0.008	0.002

ภาคผนวก ค
การประชุมวิชาการระดับนานาชาติ

Methika Leeparikhon, Apita Bunsiri, Seeroong Prichanont. "COLORIMETRIC METHOD FOR DETERMINATION OF ETHANOL IN GAS PHASE" Pure and Applied Chemistry International Conference 2017 (PACCON 2017) under the theme "Green Convergence on Chemical Frontiers", on February 2-3, 2017 at Centra Government Complex Hotel & Convention Centre.



GREEN CONVERGENCE ON CHEMICAL FRONTIERS



February 2-3, 2017

Centra Government Complex
Hotel & Convention Centre
Chaeng Watthana, Bangkok,
Thailand



Conference Proceedings



Hemp stem-derived activated carbon for tar adsorption in cigarette filter <u>Bunrita Kong-gij</u> , Sataporn Kunapisitkul, Pichaya Wadsungmoan, Pawan Boonyoung, Pasmetch Troewwanuwat and Khanin Nusangnoraj	EN-P-033	275-278
A study of photocatalytic activity for F-TiO₂/AC on dye wastewater in a dynamic reactor <u>Sayan Pudwat*</u> , Piyawat Kaewjaijong, Likit Akkanit and Khanita Hathaisamit	EN-P-035	279-282

Sustainable Food and Agricultural Chemistry (FA)

Comparison of amylose and starch contents between Awn seed and Awnless seed of upland rice (<i>Oryza sativa</i> L. var. Pae Taw Gaw Bi) at Prachuap Khiri Khan Province <u>Aumaree Duanchai*</u> , Taweesak Techakriengkrai, Puntipa Na Chiangmai, Yupa Pootseng-on, Chanika Chantasa, Amporn Jampol, Poratip Pasukamonset, Kansuda Wunjunthuk, Mana Kanjanamaneesathian and Saowapak Khiamngam	FA-O-001	283-287
Rapid pre-purification of bacteriocin-like inhibitory substance from <i>Pediococcus acidilactici</i> TISTR 2309 <u>Kittipon Chantawongasatorn</u> , Savitri Vatanyoopaisarn* and Suriya Rutatip	FA-O-002	288-296
Application of high electric field pulses for plant cell disintegration <u>Tulakorn Manakhajornvej</u> , Mohammad Naghi Eshtiaghi and Nuttawan Yorwathana*	FA-O-004	297-301
Free radical scavenging properties and DNA damage protecting of peptide hydrolysate derived from edible mushroom <i>Astraeus hygrometricus</i> <u>Natpatorn Tunyataratana</u> , Ounrapak Reamtong, Papatana Sangtanoo, Tanatorn Saisavooy and Aphichart Kamchanatit*	FA-O-005	302-307
The optimum conditions for extraction of fatty acids from Mon Thong durian seed kernel and analysis by gas chromatography-flame ionization detector <u>Sirirat Chauvaivit*</u> and Sasinsaporn Hangpai	FA-P-001	308-313
Arsenic, cadmium and lead contents in polished rice samples <u>Wansee Sriamtrakul*</u> , Vorapot Permnamtip and Satoshi Yoshida	FA-P-002	314-319
Content of copper, lead and cadmium in some local vegetable samples from the South of Thailand <u>Mayoon Lamnuh*</u> , Orasa Choola-Aied, Nisanan Damnin and Saowapa Southimuang	FA-P-003	320-325
Proximate analysis and anthocyanin content of alternative dog snack supplemented with <i>Saccharomyces cerevisiae</i> and Mao berry Pomace <u>Thachawech Kimprasit*</u> , Sirapan Sukontasing, Thippayarat Chahomchuan, Kamidrawee Techauay and Srivada Sirilaphaisan	FA-P-004	326-330
Colorimetric method for determination of ethanol in gas phase <u>Methika Leeparikhon</u> , Apita Bunsiri and Seerong Prichanon*	FA-P-005	331-336
Chemical constituents and antioxidant activity of <i>Camellia sinensis</i> var. <i>assamica</i> <u>Pasinee Chaichana</u> , Sunanta Wangkarn and Nuchnipa Nuntawong*	FA-P-011	337-342



Colorimetric method for determination of ethanol in gas phase

Methika Leeparikhon¹, Apita Bunsiri² and Seeroong Prichanont^{1*}

¹Chemical Engineering Research Unit for Value Adding of Bioresources,
Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University,
Phayathai Rd., Pathumwan, Bangkok, 10330, Thailand

² Postharvest Technology Center, RDI-KPS, Kasetsart University Kamphaensaen Campus,
Nakhon Pathom 73140, Thailand

*e-mail: Seeroong.p@chula.ac.th

Abstract: The aim of this research was to develop a test strip for determination of gas phase ethanol using colorimetric method for indicating the deterioration of fruits. The test strip comprised of a chemical reagent that was specific to ethanol and its support. In this study, ethanol acted as a reducer for a transition metal compound which changed its color due to the reaction. Therefore, the amount of ethanol could be monitored through the changes of the test strip colors. In this research, the ethanol concentration (0-1,000 ppm), types of support (nylon paper, silica plate, and ceramic particles), types of chemical reagents (Transition metal I, Transition metal II) were investigated. It was found that Transition metal I could be easily reduced by other contaminated compounds, thus the transition metal II was chosen due to its higher stability. Transition metal II-impregnated ceramic particles were suitable for further development into a test strip. The suitable volumetric ratio of transition metal II (0.1M) to acid (98%) solutions for sensing ethanol at a range of 0-1,000 ppm was 3:0.5. To confirm that the changes of color of the transition metal was due to the reaction involving ethanol, GC and UV-Visible spectrometry were applied.

Keywords: Fresh-cut fruits; Ethanol; Colorimetric

1. Introduction

Thailand is among one of the leading exporters of tropical fruits in the world. In 2014, China, Vietnam and Hong Kong were respectively the top three destination countries for Thai exported fruits.¹ Before reaching the final destination, fruits are exposed to various types of transportation and different environmental conditions such as temperature and relative humidity, which directly affect their metabolism and ripening. Evaluation of fruit quality (firmness, sugar content, aroma, and flavor) using their physical appearances, however, does not always reflect the true quality of fruits. Therefore, many researchers emphasize on developing colorimetric gas sensors as fruit ripening indicators. These gases include ethylene,

carbon dioxide, and ethanol, which are emitted directly due to fruit metabolism during the ripening processes. For ethylene, the colorimetric gas sensors were mainly developed based on the partial reduction of Mo(VI) to Mo(V) by ethylene.^{2,3} The aqueous indicator solution was impregnated on a cellulose-free fiber filter.³ In the case of carbon dioxide, the dye-sensing element was entrapped in a water-immiscible polymer and the color was changed with pH once in contact with target gas.⁴⁻⁶

Ethanol is evolved by fruits in anaerobic metabolisms due to insufficient amount of O₂ and emitted as a product from the metabolism of microorganisms which attack the fruits.⁷⁻⁹ This chemical causes unacceptable off-flavor products, thus



monitoring ethanol evolution can be used as a fruit spoilage indicator. Therefore, detection of ethanol gas in fruit packaging is advantageous. Unfortunately, there is hardly any revealed technology for detection of ethanol gas in fruit packaging. Recently, VTT Technical Research Centre of Finland announced the success in inventing a wireless sensor that detect ethanol emitted from the spoilage of fresh-cut fruits.¹⁰ Other than that determination of ethanol gas can be achieved using conventional analytical methodologies such as chromatographic, chemical^{11, 12} and enzymatic methods.¹³ Nonetheless, these techniques require laboratory equipment which are not practically applied in fruit packaging and cannot be attached directly to the fruit packages.

The aim of this research was to develop a colorimetric system for determination of gas phase ethanol. The range of ethanol concentration studied was 0-1,000 ppm,¹⁴⁻¹⁶ which was aligned with emitted gas by many fresh-cut fruits. This article demonstrates the selection of suitable detection system from various reagents and supports. Moreover, effects of temperature and reagent concentrations were studied.

2. Materials and Methods

2.1 Reagents and materials

Chemicals used in this work were supplied in analytical grade unless specified. They were transition metal I (TMI), transition metal II (TMII), conc. acid 98% (QR&C), absolute ethanol (99.9%; QR&C), nylon paper (Whatman; Cat. No. 7404-004), TLC plate (TLP-R10011B-323), ceramic particles, filter paper (Whatman Cat. No. 2200-090), vacuum box (borosilicate glass container 430mL Finaldek), rubber, pellet pusher.

2.2 Preparation of active solutions

The active TMI/acid solution was prepared by dissolving TMI in distilled water to the final concentrations of 0.1, 0.3, and 0.5 M. Next, 0.1 (or 0.3, or 0.5) mL of the concentrated acid was added to 3 mL of the prepared solution. Active TMII solution was arranged in the same way as TMI /acid solution except that the amounts of concentrated acid used were 0.05, 0.1, and 0.15 mL in 3 mL solutions.

2.3 Impregnation of supports

Nylon paper and TLC plate were cut to a 1cm×1cm size, while ceramic particles were dried overnight at 80°C. Nylon paper and TLC plate were dipped in the active solutions as prepared in Section 2.2 and dried under room temperature. For the case of ceramic particles, 0.3 g support was impregnated with 0.85 mL active solutions and oven-dried at 50°C for 15-20 min.

2.4 Preparation of test strips

Impregnated Nylon paper and TLC plate were then attached on a filter paper using double-sided adhesive tape.

2.5 Preparation of test pellets

Impregnated ceramic particles were weighed to 0.45-0.50 g and formed into pellets using a pellet pusher.

2.6 Experimental systems

Experimental measurements of ethanol were performed in a closed system containing test strips or pellets at a room temperature and 1 atm. The closed systems were achieved by sealing 430 mL glass containers with tight lids. Ethanol gas was injected to the corresponding final concentrations of 200, 400, 600, 800, 1,000 ppm. Injection of the gas was done every 24 hours to the original final



amounts to maintain the relatively similar concentrations throughout the experiments.

2.7 Analytical methods for test pellets

The color changes of tested pellets were monitored daily for 7 days by eyes and the observed color changes were photographed in same surrounding. The colors observed in the photographs were reported as color shades according to Image J color index.

To monitor ethanol concentration, Gas chromatography with a flame ionization detector (GC-14B SHIMADZU, Japan) was used.

The residual amount of ethanol gas was determined as:

$$\text{Residual ethanol concentration (\%)} = \frac{\text{ethanol concentration at a specific time}}{\text{The initial concentration of ethanol gas}} \times 100\%$$

To monitor the progress of the reaction, 0.01 g of tested pellets were dissolved in 5 mL deionized water. The suspension was then centrifuged at 300 rpm for 3.0 min.¹⁷ The supernatant was used to measure the absorbance vs. deionized blank water for determination of a partial reduction of oxidizing reagent by the UV-Vis spectrometer (UV-2450 SHIMADZU, Japan) with a path width 10 mm quartz cell (Starna Scientific Ltd).

3. Results & Discussion

3.1 Selection of reagent and support

Amongst the two types of oxidizing reagents (TMI and TMII) and three types of supports (Nylon paper, TLC plate, and ceramic particles) tested, ceramic particles contained TMI was found to be the best detection system. This was because it was highly stable without interferences from oxygen and sun light. The changes of colors could be clearly

observed. Moreover, the prepared active ceramic particles showed a long storage life of at least 2 months in a closed container at room temperature. On the other hand, TMII contained systems were very reactive and the changes of colors were observed even without ethanol in their environment. This was because TMII solution was unstable in air and light.¹⁷ Considering different support materials, nylon paper and TLC plate were found to change from yellow to green (with incorporation of TMI) without ethanol. We postulated that this phenomena occurred due to the high acidity condition which degraded the fragile support materials, and might cause undesired chemical reactions. Hence, TMI-impregnated ceramic particles were selected as a suitable detection system instead of a fragile test trips.

3.2 Selectivity and sensitivity of indicator

Table 1 shows effects of stock TMI concentrations on the test pellet's colors with time under the atmosphere of 1,000 ppm ethanol. The results revealed that the appropriate concentration of TMI stock was 0.1M due to the clear change in indicator's color from yellow to green/blue within seven days. While the higher concentrations of TMI solutions showed only slight changes of color. The slower changes were due to the higher amounts of TMI in ~0.5 g silica pellets that only small fractions of the transition metal was reduced.

Table 1. The effect of TMI concentration on the change of tested pellet colors with time (days) in the atmosphere of 1,000 ppm ethanol gas. (D = day)

TMI	Acid	D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7
0.1M	0.5 mL								
0.3M	0.5 mL								
0.5M	0.5 mL								



Table 2. Daily concentrations of ethanol in the experimental systems before (24 hr) and after (0 hr) ethanol addition (except D0).

Ethanol concentration (ppm)	0 hour							24 hour						
	D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7
200 (avg)	230	191	221	225	210	212	161	0	0	0	0	0	0	0
400	374	401	406	405	384	384	343	0	0	21	24	19	31	33
600	569	573	631	618	662	624	568	27	40	43	47	46	58	70
800	778	761	800	825	848	828	877	131	78	77	70	63	86	127
1,000	1056	922	975	966	1059	1017	1025	153	115	132	143	163	179	238

In order to identify the capability to retain ethanol gas of the experimental systems, the gas compositions of the blank systems each containing 200, 400, 600, 800, and 1,000 ppm ethanol were monitored every 6 hours. The residual amounts of ethanol gas were approximately reduced at the rate of 1.6% per hour in all cases. This indicated that initial ethanol concentration did not clearly affect the residual amounts with time. After 24 hours, the residual amounts of ethanol were in the range of 69-74% of their initial concentrations. Therefore, ethanol gas was daily injected to the experimental system to offset the leakage and maintain ethanol concentration at the initial interested value.

The selected detection system with 0.1 M TMI stock solution was then tested under different concentrations of ethanol gas (0, 200, 400, 600, 800, 1,000 ppm) and the changes of colors were daily observed for 7 days at the room temperature ($30 \pm 3^\circ\text{C}$). In parallel, ethanol concentrations in the systems were also sampling and analyzed daily by GC. The results shown in the table 2 demonstrate remarkable daily reduction of ethanol which was more evident (reduction rates between 6.7-37.6% residual amount per hour) than the leakage rate identified above. This could be due to both the consumption in the reaction and the leakage from the systems. In addition, the amount of residual ethanol progressively increased with reaction time.

Table 3. Effects of ethanol and reaction time on the changes of pellet color at room temperature.

Ethanol (ppm)	Weight (g)	Room temperature							
		D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7
0	0.4804								
	0.4972								
200	0.5021								
	0.5028								
400	0.4811								
600	0.4977								
800	0.4871								
1000	0.4914								

* the appropriate volumetric ratio of TMI (0.1M) to conc. acid was 3:0.5

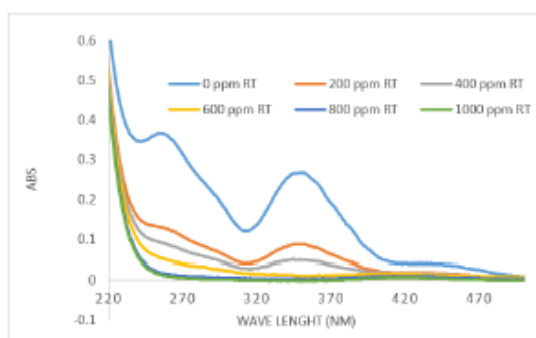


Figure 1. Effect of ethanol concentrations on absorption spectra of supernatants in the UV/Vis region after 7 days of reaction at room temperature.

The indicators' color change were daily monitored as shown in table 2. The color of tested pellets at 0 ppm of ethanol concentration were not significantly changed which indicated that there was no other undesired reactions. For 200-1,000 ppm of ethanol concentration, the changes of indicator colors were faster with ethanol concentration due to the faster reaction rate from higher reactant concentrations. In the case of 1,000 ppm ethanol, the color changes were observed only in the first three days of storage which indicated insufficient amounts of the transition metal for the reaction.

Spectrophotometric method was next applied to confirm the effect of ethanol concentration on the reaction after 7 days of initiation. The tested pellets from each experimental conditions were dissolved in deionized water and centrifuged. The absorbing spectra of the supernatant solutions in the UV/Vis regions from the wavelength of 220-500 nm are demonstrated in Fig. 1. The absorption peaks at 250 and 350 nm represent the transition metal reactant. Without ethanol, remarkable absorption peaks are observed, while the peak heights are decrease with increasing ethanol concentrations which

indicate the degree of reduction of the transition metal by ethanol. This results confirm that the color changes were due to the reaction involving ethanol, our compound of interest.

4. Conclusion

The suitable colorimetric system for ethanol gas detection was TMI impregnated-ceramic particles. The appropriate ratio of reagent was 3 mL of TMI (0.1M) to 0.5 mL of concentrated acid for detecting ethanol in the range 0-1,000 ppm in 7 days. It was found that the color of pellets was obviously changed from yellow to green/blue because of a partial reduction of reactant transition metal by ethanol. The reactions were confirmed by UV-Visible spectrometer where the peaks of transition metal reactant diminished with increasing ethanol concentrations.

Acknowledgements

The authors are grateful for the financial support of this work from the graduate school thesis grant No.1 Fiscal Year 2016 (GCUGR1225601021M No.021) of Chulalongkorn University.



References

1. EastAsiaWatch [homepage on the Internet]. Thai exported fruits, Online Resources, 2015, May 6. [cited 2017 Jan 10]. Available from: <http://www.eastasiawatch.in.th/th/articles/politics-and-economy/302/#01>.
2. Klein *et al.*, 2006. Non-invasive colorimetric ripeness indicator. US Patent No. US2006/0127543 A1.
3. C. Lang and T. Hübert, A Colour Ripeness Indicator for Apples, *Food and Bioprocess Technology*, 2011, 5, 3244-3249.
4. A. Mills, Q. Chang, N. McMurray, Equilibrium studies on colorimetric plastic film sensors for carbon dioxide, *Anal. Chem.*, 1992, 64, 1383-1389.
5. Bernhard H. Weigk *et al.*, Optical triple sensor for measuring oxygen and carbon dioxide, *Journal of Biotechnology*, 1994, 32, 127-138.
6. Naoki Nakamura and Yutaka Amao, An optical sensor for CO₂ using thymol blue and europium(III) complex composite film, *Sensors and Actuators B*, 2003, 92, 98-101.
7. Hao Li *et al.*, Metabolic responses to ethanol in *Saccharomyces cerevisiae* using a gas chromatography tandem mass spectrometry-based metabolomics approach, *The International Journal of Biochemistry & Cell Biology*, 2012, 44, 1087-1096.
8. A. E. Watada, K. Abe, N. Yamuchi, Physiological activities of partially processed fruits and vegetables. *Food Technol*, 1990, 44, 116-122.
9. J. Jung and Y. Zhao, Antimicrobial Packaging for Fresh and Minimally Processed Fruits and Vegetables, 2016, 243-256.
10. Ilya V. Anoshkin *et al.*, Single-walled carbon nanotube networks for ethanol vapor sensing applications, *Nano Research*, 2013, Vol. 6, Issue 2, 77-86.
11. R. F. Borkenstein, Alcoholretainer Cartridge And Method For Using Same, Patent Number: 4,734,360, Date of Patent: Mar. 29, 1988.
12. Roger C- Phillips *et al.*, Cartridge provided with standard alcohol gas for breathalyzer, elechem co., ltd. 391-16 Cheongcheon-dong, Bupyeong-gu, Incheon 403-030 (KR) Patent WO/2013/111926, 2013.
13. Ana M. *et al.*, Ethanol biosensors based on alcohol oxidase, *Biosensors and Bioelectronics*, 2005, 21, 235-247.
14. Sharon Dea *et al.*, Optimal Ripeness Stage for Processing 'Kent' Mangoes into Fresh-cut Slices, *Article in HortTechnology*, 2013.
15. R. Sothornvit and P. Rodsamran, Effect of a mango film on quality of whole and minimally processed mangoes, *Postharvest Biology and Technology*, 2008, 47, 407-415.
16. Konvipa Silapat *et al.*, Internal Quality Evaluation of Tangerine cv. Sainamphung after Coating by Near Infrared Spectroscopy, *Agricultural Sci. J.*, 2013, 44 : 3 (Suppl.) : 406-409.
17. Osol, A. (ed.). Remington's Pharmaceutical Sciences. 16th ed. Easton, Pennsylvania: Mack Publishing Co., 1980., p. 1111

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวเมธิกา ลีปริคณห์ เกิดวันที่ 16 มกราคม พ.ศ.2534 จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาแผนการเรียนวิทย์-คณิตที่โรงเรียนพระหฤทัยคอนแวนต์ และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต (วท.บ.) สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2552 และสำเร็จการศึกษาในปีการศึกษา 2555 หลังจากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วศ.ม.) ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2557 และสำเร็จการศึกษาในปีการศึกษา 2559

