

การพัฒนาฟิล์มถนอมอาหารด้วยอนุภาคโลหะออกไซด์ขนาดนาโน

ชลิตา นิ่มนวล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมีและสิ่งแวดล้อม

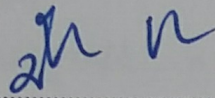
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

กรกฎาคม 2561

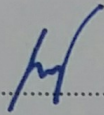
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยบูรพา

คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์และคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณา
วิทยานิพนธ์ของ ชลิตา นิ่มนวล ฉบับนี้แล้ว เห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตาม
หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมีและสิ่งแวดล้อม ของมหาวิทยาลัย
บูรพาได้

คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์

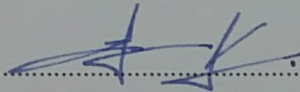


..... อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร. ปิยฉัตร วัฒนชัย)

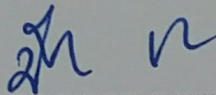


..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ไพติน เกาตระการวิวัฒน์)

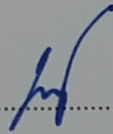
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



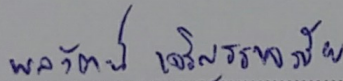
..... ประธาน
(รองศาสตราจารย์ ดร. วิษณุ มีอยู่)



..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ปิยฉัตร วัฒนชัย)

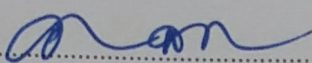


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ไพติน เกาตระการวิวัฒน์)



..... กรรมการ
(ดร. พลวัฒน์ เจริญชรขจรชัย)

คณะวิศวกรรมศาสตร์อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมีและสิ่งแวดล้อม ของ
มหาวิทยาลัยบูรพา

.....  คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ดร. อาณัติ ดีพัฒนา)

วันที่ 24 เดือน กรกฎาคม พ.ศ. 2561

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความกรุณาของ รองศาสตราจารย์ ดร.ปิยฉัตร วัฒนชัย ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาหลัก และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ไพฑิณี เกตระการวิวัฒน์ซึ่งเป็น อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่กรุณาให้คำปรึกษาและแนะแนวทางที่ถูกต้อง อีกทั้งช่วยเหลือแก้ไข ข้อบกพร่องต่าง ๆ ด้วยความละเอียดถี่ถ้วนและเอาใจใส่ด้วยดีเสมอมา ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งเป็นอย่างยิ่ง จึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

เนื่องจกงานวิจัยครั้งนี้ส่วนหนึ่งได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้ จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2558 มหาวิทยาลัยบูรพา ผ่านสำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติจึงขอขอบพระคุณ ณ ที่นี้ด้วย

ขอกราบขอบพระคุณ คุณแม่สมวงศ์ คุณย่าแอ้ว นิ่มนวน คุณยายทองสุข ชุ่นไต้ คุณลุง นิสิต อินทประสาท คุณสุภโชค สถิตเสถียร คุณคำรณ คล้ายสารภูมิ อีกทั้งญาติพี่น้อง เพื่อนสนิท ตลอดจนผู้มีพระคุณทุกท่านที่คอยให้กำลังใจ ให้ความช่วยเหลือและสนับสนุนวิจัยเป็นอย่างดีเสมอมา

คุณค่าและประโยชน์ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบเป็นกตัญญูแด่เวทิตาแต่ บิดา มารดา ครูอาจารย์ และผู้มีพระคุณทุกท่านทั้งในอดีตและปัจจุบัน ที่ทำให้ข้าพเจ้าเป็นผู้มีการศึกษา และประสบความสำเร็จมาจนตราบเท่าทุกวันนี้ นอกจากนี้ข้าพเจ้ายังได้รับความกรุณาจากห้องแลป คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ที่สนับสนุนด้านวัสดุคืบ เครื่องมือ และอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ ใช้ในงานวิจัยนี้ ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

ชลิตา นิ่มนวน

57910221: สาขาวิชา: วิศวกรรมเคมีและสิ่งแวดล้อม; วศ.ม. (วิศวกรรมเคมีและสิ่งแวดล้อม)

คำสำคัญ: กระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง/ โฟโตเนียมไดออกไซด์/ เอทิลีน/

ทั้งสแตนไดรออกไซด์

ชลิตา นิ่มนวล: การพัฒนาฟิล์มถนอมอาหารด้วยอนุภาคโลหะออกไซด์ขนาดนาโน

(ACTIVE PACKAGING DEVELOPMENT BY METAL OXIDE NANOPARTICLES)

คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์: ปิยฉัตร วัฒนชัย, Ph.D., ไพลิน เกาตระการวิวัฒน์ Ph.D.

91 หน้า. ปี พ.ศ. 2561.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาบรรจุภัณฑ์แอคทีฟเคลือบอนุภาคโลหะออกไซด์เพื่อยืดอายุมะม่วงน้ำดอกไม้ โดยสลายเอทิลีน (C_2H_4) ด้วยการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง ซึ่งประกอบด้วย 2 การทดสอบ คือ การทดสอบประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง ได้แก่ ผลกระทบของความเข้มแสง UVA ผลกระทบของปริมาณ TiO_2 และประสิทธิภาพในการสลาย C_2H_4 ของฟิล์ม TiO_2 ฟิล์ม WO_3 และฟิล์ม TiO_2/WO_3 และนำฟิล์มที่มีประสิทธิภาพที่ดีมาทดสอบการยืดอายุของมะม่วงน้ำดอกไม้ ซึ่งเป็นการทดลองส่วนที่สอง จากการศึกษาของ TiO_2 และ WO_3 พบว่าสามารถกำจัด C_2H_4 ได้ทั้งในสภาวะมืดและฉายแสง UVA แต่ผง TiO_2 สามารถกำจัดเอทิลีนในสภาวะฉายแสงได้ชัดเจนกว่าผง WO_3 ดังนั้นจึงเลือก TiO_2 เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการสลาย C_2H_4 โดยสภาวะความเข้มแสง พบว่าเมื่อใช้ฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเคลือบ TiO_2 3.8 mg ภายใต้การฉายแสง UVA ที่ช่วงความเข้มแสง $37-59 \mu w/cm^2$ ในการสลาย C_2H_4 ที่ความเข้มข้น 35 ppm พบว่าความเข้มแสงที่เพิ่มขึ้นจาก 37 เป็น $44 \mu w/cm^2$ มีอัตราการลดลงเริ่มต้นของ C_2H_4 เพิ่มขึ้น ซึ่งความเข้มแสงที่เหมาะสม คือ $37 \mu w/cm^2$ เนื่องจากสามารถสังเกตการเปลี่ยนแปลงปริมาณ C_2H_4 ได้ จึงใช้ความเข้มแสงนี้ศึกษาผลกระทบปริมาณของ TiO_2 ที่ปริมาณ 0 1.9 และ 3.8 mg พบว่าปริมาณ TiO_2 เป็นปัจจัยหลักต่อการสลาย C_2H_4 เมื่อใช้ความเข้มแสงต่ำ ๆ ปริมาณของ TiO_2 ที่เหมาะสม คือ 1.9 mg ในการเปรียบเทียบความสามารถในการสลาย C_2H_4 กับฟิล์ม WO_3 และฟิล์ม TiO_2/WO_3 พบว่าฟิล์มเคลือบ TiO_2 มีประสิทธิภาพสูงสุดในการเกิดกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง ขณะที่ฟิล์มเคลือบ WO_3 มีประสิทธิภาพสูงในการดูดซับ C_2H_4 เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2/WO_3 ด้วยวิธีการเคลือบแบบ 2 ชั้น พบว่าประสิทธิภาพในการสลาย C_2H_4 สูงกว่าฟิล์ม WO_3 แต่มีประสิทธิภาพต่ำกว่าฟิล์ม TiO_2 ซึ่งเป็นผลจากความสามารถในการดูดซับและการเกิดกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงลดลง จากการศึกษาที่กล่าวมาพบว่าฟิล์ม TiO_2 มีประสิทธิภาพในการสลาย C_2H_4 ได้ดีที่สุด เมื่อนำมาใช้เป็นบรรจุภัณฑ์แอคทีฟ สามารถชะลอการเปลี่ยนแปลงเคมีและลดการเน่าเสียของมะม่วงน้ำดอกไม้ โดยการยืดอายุของมะม่วงน้ำดอกไม้ได้ดีกว่าสภาวะควบคุมที่ไม่ใช้ฟิล์ม TiO_2

57910221: MAJOR: CHEMICAL AND ENVIRONMENTAL ENGINEERING; M. Eng.
(CHEMICAL AND ENVIRONMENTAL ENGINEERING)

KEYWORDS: PHOTOCATALYTIC REACTIONS/ TITANIUM DIOXIDE/ ETHYLENE/
TUNGSTENTRIOXIDE

CHALITA NIMNUAL: ACTIVE PACKAGING DEVELOPMENT BY METAL
OXIDE NANOPARTICLES. ADVISORY COMMITTEE: PIYACHAT WATTANACHAI,
Ph.D., PAILIN NGAOTRAKANWIWAT, Ph.D. 91 P. 2018.

The aim of this research was to develop the active packaging metal oxide nanoparticles coatings for extending mango shelf life by degradation of C_2H_4 gas using photo catalytic reaction. The film coated with titanium dioxide catalysts (TiO_2 Degussa P-25) and tungsten trioxide (WO_3) catalyst under UVA were used, namely TiO_2 film, WO_3 film and composite of TiO_2 and WO_3 (TiO_2/WO_3) films. This research can be divided into two sections. Firstly, to investigate the photo catalytic activity, the effects of UVA intensity and TiO_2 content were studied. Next, the appropriate film from the first section was selected to extend shelf life of Nam Dok Mai mango. Based on the ethylene degradation, the result revealed that both of TiO_2 and WO_3 powders were possible to elimination of C_2H_4 gas in dark and UVA light conditions. However, TiO_2 powder was able to eliminate the ethylene in light conditions more obviously than WO_3 powders. Thus, it was chosen to optimize the condition for ethylene degradation. The low density polyethylene (LDPE) coated with 3.8 mg TiO_2 under UVA intensity of 37-59 $\mu W/cm^2$ was studied. The initial C_2H_4 gas concentration was 35 ppm. The results showed that the initial reduction of C_2H_4 decreased with increasing intensity of UVA from 37 to 44 $\mu W/cm^2$. The proper intensity was 37 $\mu W/cm^2$ due to the change in C_2H_4 content could be observed. The amount of TiO_2 in this study was 0 1.9 and 3.8 mg, respectively. The result was found that the amount of TiO_2 was the main factor of C_2H_4 degradation. The 1.9 mg of TiO_2 was selected to measure the C_2H_4 degradation efficiency. As can be seen, TiO_2 film exhibited the most effective as photo catalytic catalyst, while WO_3 film showed highly effective in C_2H_4 adsorption. The composite film of TiO_2/WO_3 has lower C_2H_4 degradation than that of TiO_2 film, but it has higher C_2H_4 degradation efficiency than WO_3 film. Therefore, TiO_2 films revealed the best C_2H_4 decomposition efficiency when it used an active packaging.

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ซ
สารบัญภาพ.....	ฅ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	4
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
ขอบเขตของงานวิจัย.....	4
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
มะม่วง.....	5
การเปลี่ยนแปลงคุณภาพระหว่างการสุกของผลมะม่วง	7
ปัจจัยที่ส่งผลต่อการสุกและการเน่าของผลไม้เขตฤดูร้อน.....	8
การชะลอการสุก.....	10
รูปแบบของการเก็บรักษาและการยืดอายุ.....	12
การยืดอายุผักและผลไม้ด้วยบรรจุภัณฑ์แอคทีฟ.....	14
กระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของไทเทเนียมไดออกไซด์.....	15
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	20
3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	22
วัสดุดิบ.....	22
อุปกรณ์และสารเคมี.....	22
วิธีการทดลอง.....	24
การเตรียมผงโลหะออกไซด์และฟิล์มพอลิเอทิลีนเคลือบด้วยอนุภาคโลหะออกไซด์.....	26

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
การทดสอบประสิทธิภาพกระบวนการเร่งปฏิกิริยาดำแสงของผงโลหะออกไซด์ และฟิล์มพอลิเอทิลีนเคลือบด้วยอนุภาคโลหะออกไซด์ต่อการกำจัดเอทิลีน.....	28
การทดสอบประสิทธิภาพในการยืดอายุมะม่วงน้ำดอกไม้ด้วยบรรจุภัณฑ์แอคทีฟ เคลือบด้วยอนุภาคโลหะออกไซด์ที่มีผลต่อสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของ มะม่วงภายใต้กระบวนการเร่งปฏิกิริยาดำแสง.....	29
4 ผลการทดลองและอภิปรายผล.....	31
การทดสอบประสิทธิภาพกระบวนการเร่งปฏิกิริยาดำแสงของฟิล์มพอลิเอทิลีน เคลือบด้วยอนุภาคโลหะออกไซด์ต่อการกำจัดเอทิลีน.....	31
การทดสอบประสิทธิภาพในการยืดอายุมะม่วงน้ำดอกไม้ด้วยบรรจุภัณฑ์แอคทีฟ เคลือบด้วยอนุภาคโลหะออกไซด์ที่มีผลต่อสมบัติทางเคมีและทางกายภาพ.....	51
5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	55
สรุปผลการทดลอง.....	55
ข้อเสนอแนะ.....	56
บรรณานุกรม.....	57
ภาคผนวก.....	62
ภาคผนวก ก.....	63
ภาคผนวก ข.....	75
ภาคผนวก ค.....	78
ภาคผนวก ง.....	87
ประวัติย่อของผู้วิจัย.....	91

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2-1 ปริมาณและมูลค่าการส่งออกผลไม้ของประเทศไทย ปี 2556-2558	6
2-2 การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับผลมะม่วงดิบ สุก และเสื่อมตามอายุ	7
2-3 สีของผลตามระยะเวลาความสุกของมะม่วงและปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด....	8
2-4 กระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง.....	17
3-1 โลหะออกไซด์ที่บรรจุลงในถุงพลาสติก LDPE สามชั้น.....	29
4-1 การเปลี่ยนแปลงของบรรจุภัณฑ์ที่มี C ₂ H ₄ 35 ppm บรรจุฟิล์ม TiO ₂ 1.9 mg.....	40
4-2 การเปลี่ยนแปลงของอากาศในบรรจุภัณฑ์ที่มีฟิล์มไม่เคลือบโลหะออกไซด์.....	40

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2-1 ระยะการสุกของมะม่วง	8
2-2 บรรจุภัณฑ์แอคทีฟ	15
2-3 กลไกการทำงานของกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงไทเทเนียมไดออกไซด์	16
2-4 กลไกการถ่ายโอนประจุระหว่าง WO_3 กับ TiO_2	19
3-1 แผนภาพวิธีดำเนินการ.....	25
4-1 ปริมาณก๊าซต่าง ๆ ในบรรจุภัณฑ์ภายใต้กระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของผง TiO_2 และ WO_3 ที่สภาวะฉายแสง UVA และสภาวะมืด.....	32
4-2 อัตราการลดลงเริ่มต้นของการเปลี่ยนแปลงปริมาณก๊าซภายในบรรจุภัณฑ์ด้วยผง TiO_2 และผง WO_3 ที่สภาวะฉายแสงและสภาวะมืด.....	33
4-3 ปริมาณก๊าซต่าง ๆ ในบรรจุภัณฑ์ภายใต้กระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงที่ความเข้มแสงต่าง ๆ.....	35
4-4 อัตราเริ่มต้นของการเปลี่ยนแปลงปริมาณก๊าซภายในบรรจุภัณฑ์ที่ความเข้มแสงต่าง ๆ....	36
4-5 ปริมาณก๊าซต่าง ๆ ในบรรจุภัณฑ์ภายใต้กระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงที่ปริมาณ TiO_2 ต่าง ๆ.....	37
4-6 อัตราเริ่มต้นของการเปลี่ยนแปลงปริมาณก๊าซภายในบรรจุภัณฑ์ที่ปริมาณ TiO_2 ต่าง ๆ...	38
4-7 โครมาโตแกรมของก๊าซ FID	41
4-8 โครมาโตแกรมของก๊าซ TCD และ FID	42
4-9 ร้อยละการลดลงของ C_2H_4 และ O_2 ด้วยฟิล์ม TiO_2 และ WO_3 ในสภาวะต่าง ๆ.....	44
4-10 ปริมาณก๊าซ C_2H_4 ในบรรจุภัณฑ์ภายใต้กระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของฟิล์ม TiO_2/WO_3	45
4-11 การเปลี่ยนแปลงปริมาณก๊าซต่าง ๆ ในบรรจุภัณฑ์ด้วยฟิล์ม TiO_2 WO_3 และ TiO_2/WO_3	46
4-12 การเปลี่ยนแปลงปริมาณก๊าซ C_3H_4 ในบรรจุภัณฑ์.....	47
4-13 อัตราเริ่มต้นของการเปลี่ยนแปลงปริมาณก๊าซต่าง ๆ ภายในบรรจุภัณฑ์	50
4-14 การเปลี่ยนแปลงปริมาณก๊าซ C_2H_4 ในบรรจุภัณฑ์ที่บรรจุผลมะม่วงน้ำดอกไม้ภายใต้การฉายแสง UVA ที่ไม่ใช้และใช้ฟิล์ม TiO_2	52
4-15 การเปลี่ยนแปลงปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ของผลมะม่วงน้ำดอกไม้ที่บรรจุในบรรจุภัณฑ์ที่ไม่ใช้ฟิล์ม TiO_2 และใช้ฟิล์ม TiO_2	52

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4-16 ผลมะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้ที่บรรจุในบรรจุภัณฑ์ที่ไม่ใช้ฟิล์ม TiO ₂ และใช้ฟิล์ม TiO ₂ วัน เริ่มต้น.....	54
4-17 ผลมะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้ที่บรรจุในบรรจุภัณฑ์ที่ไม่ใช้ฟิล์ม TiO ₂ และใช้ฟิล์ม TiO ₂ วันที่ 6.....	54
4-18 ผลมะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้ที่บรรจุในบรรจุภัณฑ์ที่ไม่ใช้ฟิล์ม TiO ₂ และใช้ฟิล์ม TiO ₂ วันที่ 8.....	54

บทที่ 1

บทนำ

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันบรรจุภัณฑ์แอคทีฟ (Active packaging) กำลังเป็นที่นิยมในการใช้ยืดอายุอาหาร โดยการควบคุมบรรยากาศภายในบรรจุภัณฑ์ให้มีความเหมาะสมตามความต้องการของอาหาร ซึ่งการควบคุมบรรยากาศสามารถทำได้โดยการเติมสารเติมแต่ง (Additive) ได้แก่ สารดูดซับออกซิเจน (Oxygen scavenger) เช่น ผงเหล็กออกไซด์ (Iron oxide) พบว่า สามารถดูดซับก๊าซออกซิเจนและความชื้นได้ดี เมื่อผสมในฟิล์มส่งผลให้ฟิล์มมีความชุ่มเพิ่มขึ้น ความแข็งแรงของฟิล์มลดลง (พิมลพร เวชภูววัฒน์ และชัยวัฒน์ ไคลม, 2557) สารดูดซับเอทิลีน (Ethylene scavenger) เช่น การใช้โอโซนรมควัน สามารถควบคุมปริมาณเอทิลีนได้ดีและยืดอายุการเก็บรักษา แต่การใช้โอโซนจะต้องมีเครื่องกำเนิดโอโซน ซึ่งมีค่าใช้จ่ายสูงและต้องหาวิธีกำจัดโอโซนที่เหลืออยู่ด้วย (พรพรรณ จำปา, 2554) สารดูดซับความชื้น เช่น ซิลิกาเจลบรรจุในซอง สามารถดูดซับความชื้นได้ดีมาก เนื่องจากมีรูพรุนสูง แต่พบว่ายังมีข้อจำกัดไม่สามารถประยุกต์ใช้ดูดซับสารอื่น ๆ ได้และเป็นอันตรายเมื่อปนเปื้อนกับอาหาร สารยับยั้งจุลินทรีย์ เช่น ไคโตซาน ซึ่งใช้เป็นสารเคลือบผิวอาหารที่สามารถรับประทานได้ สังเคราะห์ได้จากเปลือกกุ้ง โดยในงานวิจัย พบว่า ไคโตซานช่วยลดอัตราการหายใจ การผลิตเอทิลีน ความชื้นและลดการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ ทำให้ผลิตภัณฑ์อายุการเก็บรักษาที่นานขึ้น (Kader, 2000) ซึ่งวิธีที่ได้กล่าวมานี้ พบว่า ยังมีข้อจำกัดบางประการเมื่อนำไปใช้จริง มีค่าใช้จ่ายสูง มีสารตกค้างหลงเหลืออยู่และอาจเกิดปฏิกิริยาระหว่างสารเติมแต่งชนิดต่าง ๆ จึงทำให้ยังมียังงานวิจัยในด้านการพัฒนาบรรจุภัณฑ์แอคทีฟอยู่อย่างต่อเนื่อง

สารไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide, TiO_2) เป็นสารกึ่งตัวนำที่นิยมใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาดำแสง (Photocatalyst) เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการสลายสารประกอบอินทรีย์เมื่ออยู่ภายใต้การฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตที่เป็นองค์ประกอบของแสงอาทิตย์ จึงนิยมนำมาใช้ในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาดำแสง (Photocatalytic reactions) โดย TiO_2 เมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสงที่มีพลังงานเหมาะสม จะมีการผลิตอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลเรดิคัล ($\cdot OH$) และอนุมูลอิสระซูเปอร์ออกไซด์ ($O_2\cdot^-$) ที่ได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำด้วยช่องว่างของอิเล็กตรอนและปฏิกิริยารีดักชันของออกซิเจนด้วยอิเล็กตรอน ซึ่งสารอนุมูลอิสระทั้งสองนี้สามารถออกซิไดส์เอทิลีนเปลี่ยนไปเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ดังนั้นหากนำ TiO_2 มาใช้ในการกำจัดเอทิลีนซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่กระตุ้นกระบวนการสุกของผลไม้อาจสามารถที่จะชะลอกระบวนการสุก

ได้โดยการนำ TiO_2 มาประยุกต์ใช้ทำเป็นบรรจุภัณฑ์แอคทีฟเพื่อเก็บผักผลไม้ ซึ่งเห็นได้จากการศึกษาของ Maneerat et al. (2003) มีการใช้ปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยแสง โดยใช้ TiO_2 เพื่อเก็บรักษาผลมะเขือเทศด้วยการดัดแปลงบรรยากาศ (Modified atmosphere condition) ที่ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 90-95 พบว่า สามารถชะลอการสุกของมะเขือเทศโดยการเปลี่ยนสีจากสีเขียวเป็นสีแดงของผลมะเขือเทศได้ ทั้งนี้ไม่พบก๊าซเอทิลีนภายในห้องเก็บตลอดระยะเวลาในการเก็บรักษา ต่อมา Nishizawa et al. (2006) ได้ทำการศึกษาการกำจัดเอทิลีนจากผลกล้วยหอมพันธุ์ Cavendish ซึ่งใช้การเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยแสงโดย TiO_2 และไม่มีการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง ที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส จากการศึกษา พบว่า การใช้ TiO_2 สามารถกำจัดเอทิลีนได้มากกว่าการไม่ใช้ TiO_2 ถึงร้อยละ 52.14 เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Chawengkijwanich and Hayata (2008) ได้ทำการศึกษาการเก็บรักษามะเขือเทศที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส โดยใช้ฟิล์ม oriented-polypropylene เป็นบรรจุภัณฑ์เคลือบด้วย TiO_2 ฉายแสงด้วยหลอด UVA พบว่าบรรจุภัณฑ์เคลือบด้วย TiO_2 สามารถกำจัดเอทิลีนลดลงร้อยละ 70-80 เมื่อเทียบกับบรรจุภัณฑ์ที่ไม่เคลือบ

จากการศึกษาที่ผ่านมาได้มีการพัฒนาบรรจุภัณฑ์แอคทีฟร่วมกับ TiO_2 อย่างต่อเนื่องเพื่อยืดอายุการเก็บรักษาผักผลไม้ด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง อย่างไรก็ตาม พบว่า การใช้ TiO_2 ในปฏิกิริยาดังกล่าวยังคงมีข้อด้อย เนื่องจากการเกิดกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงด้วย TiO_2 จะต้องได้รับพลังงานแสงหรือพลังงานโฟตอนที่มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับช่องว่างแถบพลังงานหลักการทำงาน คือ เมื่อ TiO_2 ได้รับพลังงานโฟตอนที่เหมาะสมจะทำให้อิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์ถูกกระตุ้นและเคลื่อนที่ไปยังแถบการนำ ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยารีดักชันกับออกซิเจน ในขณะที่ช่องว่างของอิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับน้ำ หากอิเล็กตรอนและช่องว่างของอิเล็กตรอนไม่ได้ถูกใช้ไปในปฏิกิริยาจะส่งผลให้เกิดการรวมตัวกันใหม่ของคู่อิเล็กตรอนและช่องว่างของอิเล็กตรอน (Electron-hole recombination) จึงทำให้เกิดกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง เกิดขึ้นเพียงช่วงสั้น ๆ ซึ่งมีประสิทธิภาพต่ำ ดังนั้นการลดอัตราการรวมตัวของอิเล็กตรอนและช่องว่างของอิเล็กตรอนจึงเป็นปัจจัยสำคัญต่อกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง ต่อมาจึงมีการพัฒนาวิธีการเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง ในปัจจุบันที่เป็นที่นิยมคือ การใช้สารกึ่งตัวนำร่วม โดยสารที่ใช้ควบคู่กับ TiO_2 จะทำหน้าที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอนจากแถบการนำของ TiO_2 มาไว้ที่ผิว ซึ่งต้องมีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำที่มีระดับพลังงานต่ำกว่า TiO_2 ซึ่งจะช่วยให้ระยะเวลาของประจุในการเกิดปฏิกิริยารีดักชัน โดยแยกอิเล็กตรอนและช่องว่างของอิเล็กตรอนไม่ให้มารวมตัวกันหรือหน่วงการรวมกันใหม่ของอิเล็กตรอนกับช่องว่างของอิเล็กตรอน เรียกกระบวนการนี้ว่า Charge Separation ตัวอย่างของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบร่วมกับ TiO_2 ได้แก่ ทั้งสเดนไดรออกไซด์ (WO_3) (Bojinova et al., 2017) ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) (Zhang et al.,

2010) แคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) (Qian et al., 2011) และทินออกไซด์ (SnO₂) (Hou et al., 2007) เป็นต้น ในการเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง

จากงานวิจัยดังกล่าวได้มีการประยุกต์ใช้ WO₃ ร่วมกับ TiO₂ พบว่า สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการเกิดกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงได้ เมื่ออิเล็กตรอนบางส่วนของแถบการนำของ TiO₂ ที่ไม่ได้ใช้ในปฏิกิริยารีดักชันกับออกซิเจนจะเคลื่อนที่มายังแถบการนำของ WO₃ ขณะเดียวกันช่องว่างของอิเล็กตรอนที่อยู่ในแถบวาเลนซ์ของ WO₃ จะเคลื่อนที่ไปยังแถบวาเลนซ์ของ TiO₂ เนื่องจากแถบการนำของ WO₃ มีค่าต่ำกว่า TiO₂ ดังนั้น WO₃ จึงสามารถดักจับอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นไว้ไม่ให้กลับมารวมตัวกับช่องว่างของอิเล็กตรอน จึงเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง

มะม่วงเป็นผลไม้เขตร้อนที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจชนิดหนึ่งของประเทศไทยและมีศักยภาพในการส่งออกสูง สร้างรายได้การส่งออก 2.64 พันล้านบาท ในปี 2556 ซึ่งส่งออกเป็นอันดับที่ 5 ของผลไม้ไทยทั้งหมด (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 2556) เนื่องจากมีพื้นที่ปลูกมากเป็นอันดับ 4 ของโลกรองจากประเทศอินเดีย เม็กซิโกและจีน ทั้งยังสามารถปรับตัวเข้ากับสภาพภูมิอากาศของประเทศไทยได้ดี ปลูกได้เกือบทั่วทั้งประเทศ (พรพรรณ จำปา, 2554) สำหรับพันธุ์มะม่วงที่ได้รับความนิยมและส่งออกมากที่สุด ได้แก่ มะม่วงน้ำดอกไม้ ซึ่งเป็นมะม่วงรับประทานสุกที่ได้รับความนิยมจากในประเทศและต่างประเทศ เนื่องจากมีรสชาติดีเป็นที่ยอมรับและเป็นที่ต้องการของตลาด จึงมีราคาจำหน่ายในตลาดสูงกว่าพันธุ์อื่น ๆ ระยะเวลาที่เหมาะสมในการบริโภคอยู่ในช่วง 3-7 วันหลังจากการเก็บเกี่ยว จึงส่งผลให้การส่งออกมีอัตราการสูญเสียทั้งก่อนและระหว่างการขนส่งมากถึงร้อยละ 40 คิดเป็นมูลค่ากว่าหนึ่งพันล้านบาท ซึ่งเป็นการสูญเสียที่สูงมาก (เนตรนภา ลามอ, อนงค์นาฏ สมหวังธนโรจน์และอภิธา บุญศิริ, 2551) สาเหตุจากการสูญเสียของมะม่วงระหว่างการขนส่ง เป็นเพราะมะม่วงเป็นผลไม้ที่มีการหายใจและมีอัตราการผลิตเอทิลีนสูง ซึ่งเอทิลีนเป็นสาเหตุหลักที่กระตุ้นให้ผลไม้มีความว่องไวในกระบวนการสุกได้เร็วขึ้น โดยพบว่า การมีเอทิลีนเพียง 20 ส่วนในล้านส่วนโดยปริมาตร (Parts per million by volume : ppmv) ภายในห้องเก็บรักษาเพียงพอที่จะกระตุ้นกระบวนการสุกของผลไม้ประเภทสามารถบ่มให้สุกได้ (Climacteric fruits) ทำให้คุณภาพในการส่งออกต่ำลง (Scariot, Paradiso, Rogers, & Pascale, 2014) จากสาเหตุดังกล่าวงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการพัฒนาบรรจุภัณฑ์แอคทีฟ โดยใช้นาโนภาค TiO₂ และ TiO₂ ร่วมกับ WO₃ เพื่อยืดอายุการเก็บรักษาของมะม่วงน้ำดอกไม้ภายใต้กระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง

วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาผลกระทบของความเข้มแสง ปริมาณ TiO_2 และการใช้ TiO_2 ร่วมกับ WO_3 ต่อกระบวนการเร่งปฏิกิริยาดำเนินการในสลายตัวของเอทิลีน
2. เพื่อศึกษาการยึดอายุการเก็บรักษาของมะม่วงน้ำดอกไม้ โดยใช้บรรจุภัณฑ์เคลือบโลหะออกไซด์ภายใต้กระบวนการเร่งปฏิกิริยาดำเนินการ

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เพื่อทราบถึงผลกระทบของกระบวนการเร่งปฏิกิริยาดำเนินการของโลหะออกไซด์ต่อการสลายก๊าซเอทิลีนในบรรจุภัณฑ์มะม่วงน้ำดอกไม้
2. พัฒนาเทคโนโลยีบรรจุภัณฑ์แอคทีฟเพื่อยึดอายุการเก็บรักษามะม่วงน้ำดอกไม้
3. เพิ่มศักยภาพในการแข่งขันกับกลุ่มประเทศ AEC ซึ่งเป็นผู้ผลิตทางการเกษตรและประยุกต์ใช้กับผลผลิตทางการเกษตรชนิดอื่น ๆ ได้ด้วย

ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษาการเกิดกระบวนการเร่งปฏิกิริยาดำเนินการของ TiO_2 และ WO_3 แบบผง
2. ศึกษาผลกระทบของปริมาณอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ทางการค้า (Degussa P-25) จากบริษัท Titanos Industry Co., Ltd. ขนาด 20 นาโนเมตร โดยปรับปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์เคลือบฟิล์มเป็น 0 1.9 และ 3.8 มิลลิกรัม ที่ความเข้มแสง 37 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร
3. ศึกษาผลกระทบของความเข้มแสง UVA ที่ความเข้มแสง 37 44 50 และ 59 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร โดยใช้ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ TiO_2 ที่ปริมาณ 3.8 มิลลิกรัม
4. เตรียมฟิล์มเคลือบ TiO_2 ร่วมกับ WO_3 ที่สังเคราะห์ด้วยเทคนิคโซล-เจล แบบผสมในอัตราส่วน 20 : 1 โดยโมล และแบบสองชั้นในอัตราส่วน 40 : 1 โดยโมล

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

มะม่วง

มะม่วงมีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Mangifera indica* Linn. จัดอยู่ในวงศ์มะม่วง Anacardiaceae เป็นผลไม้เขตร้อน (Tropical fruit) เป็นพืชที่มีถิ่นกำเนิดในอินเดียและพม่า จัดอยู่ในกลุ่มประเภทผลไม้ที่บ่มให้สุกได้ (Climacteric fruit) เป็นพืชผลเดี่ยว มะม่วงสามารถปรับตัวเข้ากับสภาพภูมิอากาศของประเทศไทยได้ดี ปลูกได้เกือบทั่วประเทศ เป็นไม้ผลที่มีผู้นิยมปลูกและรับประทานมากเป็นอันดับหนึ่งของประเทศ (กลุ่มส่งเสริมการเกษตร ส่วนส่งเสริมและเผยแพร่ สำนักพัฒนาการถ่ายทอดเทคโนโลยี กรมส่งเสริมการเกษตร, 2555) ซึ่งมีมากมายหลายสายพันธุ์ แต่ที่นิยมปลูกมากในไทยมีอยู่ 6 สายพันธุ์ ดังนี้ พันธุ์น้ำดอกไม้ พันธุ์แรด พันธุ์เขียวเสวย พันธุ์ฟ้าลั่น พันธุ์แก้วและพันธุ์หนองแซง (ชุมพล บัวขจร, 2554) สำหรับพันธุ์มะม่วงที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจและเป็นที่รู้จักโดยทั่วไป ได้แก่ มะม่วงน้ำดอกไม้ ซึ่งจัดเป็นมะม่วงรับประทานสุกที่ได้รับความนิยมทั้งในและต่างประเทศ เนื่องจากมีรสชาติดีเป็นที่ยอมรับและเป็นที่ต้องการของตลาด จึงมีราคาจำหน่ายที่สูงกว่าพันธุ์อื่น แต่มักประสบปัญหาในเรื่องของอายุการเก็บรักษาที่มีอายุการวางจำหน่ายสั้น มีโรคหลังการเก็บเกี่ยวเข้าทำลาย ทำให้ผลิตผลสูญเสียคุณภาพอย่างรวดเร็วและเป็นข้อจำกัดในการขนส่งระยะทางไกล (อนุวัฒน์ จรัสรัตนไพฑูรย์, 2545)

มะม่วงน้ำดอกไม้ (*Mangifera indica* cv. Nam Dok Mai) เป็นพันธุ์ที่ออกดอกง่าย ผลิตนอกฤดูได้ผลดี ตอบสนองต่อการใช้สารกระตุ้นให้ออกดอก นิยมรับประทานสุก มีรูปทรงไข่แบน น้ำหนักผล 300-500 กรัม โดยเฉลี่ยอายุจากดอกบานเก็บผลแก่อยู่ระหว่าง 90-115 วัน ฤดูกาลผลผลิตอยู่ระหว่างปลายเดือนมีนาคม-เดือนมิถุนายน (กลุ่มงานส่งเสริมและพัฒนาผลิตภัณฑ์การเกษตร ส่วนส่งเสริมวิสาหกิจชุมชน สำนักพัฒนาเกษตรกร กรมส่งเสริมการเกษตร, 2547) เจริญเติบโตเร็ว ใบเป็นคลื่น ดอกคกแต่ติดผลปานกลาง ลักษณะผลเรียวยาว เนื้อมาก เมล็ดดิบเล็ก ผิวบาง เมื่อดิบจะมีรสเปรี้ยว ผิวสีเขียวนวล เนื้อแน่น ผลสุกจะมีผิวเหลืองนวล กลิ่นหอม เนื้อละเอียด เสียน้อย มีรสหวาน มีเบต้าแคโรทีนสูง มะม่วงน้ำดอกไม้ที่ได้รับความนิยมมีสองชนิด คือ มะม่วงน้ำดอกไม้สีทอง และมะม่วงน้ำดอกไม้เบอร์สี่ (พรรณนีย์ วิชชาชู, 2556) สำหรับมะม่วงน้ำดอกไม้ที่มีคุณภาพ คือ มีรสชาติหวานสม่ำเสมอ มีความสุกพอดีไม่แก่เกินไปและไม่ดิบเกินไป เนื้อสัมผัสดี ไม่นิ่ม สีสวยงาม รูปทรงของผลสมบูรณ์ ไม่มีตำหนิ ปลอดภัยจากศัตรูพืช ไม่พบโรคแมลง วัชพืชและสารพิษทางการเกษตร มีขนาดผล 250-500 กรัมต่อผล ปริมาณของแข็ง

ที่ละลายได้ (soluble solids) อยู่ระหว่าง 15 ถึง 17 องศาบริกซ์ และมีวิตามินและแร่ธาตุหลากหลายชนิด (ธวัชชัย รัตน์ชเลศ, 2555) ดังนั้นมะม่วงจึงเป็นสินค้าทางการเกษตรที่ได้รับความนิยมและมีปริมาณการส่งออกค่อนข้างสูงทั้งในรูปผลมะม่วงสดและแปรรูป แหล่งที่ปลูกมะม่วงมากที่สุดอยู่ในทวีปเอเชีย และประเทศที่ส่งออكمะม่วงมากที่สุดอยู่ในทวีปเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ได้แก่ ประเทศฟิลิปปินส์และประเทศไทย โดยตลาดมะม่วงสดของประเทศฟิลิปปินส์ คือ ประเทศฮ่องกง ส่วนตลาดมะม่วงสดของประเทศไทย ได้แก่ ประเทศสิงคโปร์ ญี่ปุ่น มาเลเซียและอินเดีย ซึ่งประเทศไทยถือว่าเป็นผู้ส่งออกรายใหญ่ที่สุดในโลกและมีตลาดมะม่วงสดอยู่ในกลุ่มประเทศยุโรป เช่น อังกฤษและเยอรมัน เป็นต้น (พรพรรณ จำปา, 2554) ในตารางที่ 2-1 แสดงปริมาณและมูลค่าการส่งออกผลไม้ของประเทศไทย ปี 2556-2558 (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 2558) ซึ่งจะเห็นได้ว่ามะม่วงมีปริมาณและมูลค่าการส่งออกของผลไม้เป็นอันดับที่ 5 ของประเทศไทย

ตารางที่ 2-1 ปริมาณและมูลค่าการส่งออกผลไม้ของประเทศไทย ปี 2556-2558

ชนิดผลิตภัณฑ์	ปี 2556		ปี 2557		ปี 2558	
	ปริมาณ (ตัน)	มูลค่า (ล้านบาท)	ปริมาณ (ตัน)	มูลค่า (ล้านบาท)	ปริมาณ (ตัน)	มูลค่า (ล้านบาท)
ทุเรียน	367,057	7,345	369,602	12,437	358,192	13,246
ลำไย	413,400	8,503	357,185	7,934	431,121	9,753
มังคุด	215,182	4,251	195,108	4,781	178,384	4,331
มะพร้าว	50,884	869	60,797	1,347	82,818	2,008
มะม่วง	33,035	853	45,544	1,270	26,907	1,268
กล้วยไข่	16,936	149.7	26,235	317.1	27,166	290.5,
ส้มโอ	14,338	226.5	12,523	227.9	12,180	271.6
เงาะ	4,222	147.8	3,882	119.6	6,943	182.6
ลิ้นจี่	8,138	58	4,260	137	4,932	58
กล้วยหอม	1,531	46	1,475	45	3,297	95
ลองกอง	4,932	100.1	695	15.6	1,445	25.8

การเปลี่ยนแปลงคุณภาพระหว่างการสุกของผลมะม่วง

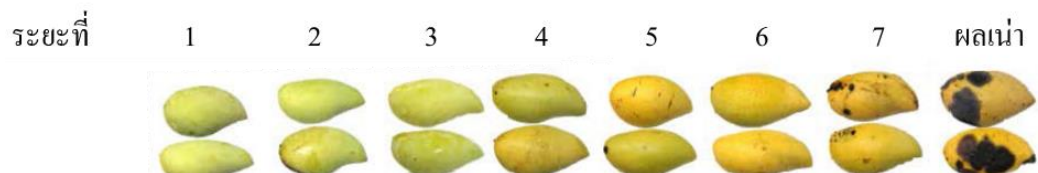
การเปลี่ยนแปลงของมะม่วงเป็นปัจจัยสำคัญอย่างหนึ่งที่ส่งผลต่อคุณภาพของมะม่วง เพราะผลมะม่วงที่เก็บเกี่ยวมาแล้วจะเข้าสู่กระบวนการสุกและเสื่อมตามอายุ โดยมีการเปลี่ยนแปลงต่าง ๆ เช่น การหายใจ การคายน้ำ การผลิตเอทิลีน การเปลี่ยนแปลงสารประกอบอินทรีย์ ความแน่นเนื้อ การเปลี่ยนแปลงสีเปลือกและสีเนื้อ การเกิดกลิ่นและรสชาติที่ต่างไปจากขณะที่ผลดิบ (สุรพงษ์ โกลิยะจินดา, 2529; วิลาวลัย คำปวน, 2553) ดังตารางที่ 2-2 นอกจากนี้ค่าของแข็งที่ละลายได้ (Total soluble solid; TSS) เป็นอีกวิธีหนึ่งที่ใช้บ่งบอกปริมาณของแข็งที่ละลายได้ในน้ำทั้งหมดของแข็งที่ละลายได้ เช่น น้ำตาลชนิดต่าง ๆ กรดอินทรีย์และแร่ธาตุต่าง ๆ สามารถใช้เป็นดัชนีวัดความแก่อ่อน (Maturity index) ของผักผลไม้ซึ่งสามารถวัดค่าด้วยเครื่องวัดค่าความหนาแน่น (Density meter) ซึ่งมีหน่วยเป็นองศาบริกซ์ ($^{\circ}$ Brix) หรือ คิดเป็นร้อยละน้ำหนักต่อน้ำหนัก จากตารางที่ 2-3 จะเห็นได้ว่าค่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้ในน้ำทั้งหมดของมะม่วงจะแปรเปลี่ยนไปตามความสุกและสีผลของมะม่วง (กลุ่มงานส่งเสริมและพัฒนาผลิตภัณฑ์การเกษตร ส่วนส่งเสริมวิสาหกิจชุมชน สำนักพัฒนาเกษตรกรรมส่งเสริมการเกษตร, 2547) ด้วยเช่นกัน ดังภาพที่ 2-1

ตารางที่ 2-2 การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับผลมะม่วงดิบ สุก และเสื่อมตามอายุ

การเปลี่ยนแปลง	ผลดิบ	ผลสุก	ผลเสื่อมตามอายุ
สารประกอบคาร์โบไฮเดรต	แป้ง	น้ำตาล	น้ำตาลแดง
สีเปลือก	เขียว	เหลือง	เหลืองเข้ม
สีเนื้อ	ขาว	เหลือง	เหลืองเข้ม
อัตราการหายใจ	ต่ำ	สูงขึ้น	ลดลง
อัตราการผลิตเอทิลีน	ต่ำ	สูงขึ้น	ลดลง
ปริมาณกรด	สูง	ต่ำ	ต่ำลง
กลิ่น	ไม่มีกลิ่น	กลิ่นหอม	กลิ่นผิดปกติ
การเข้าทำลายของโรค	มี	เริ่มแสดงอาการ	ระบาดรุนแรง
เนื้อสัมผัส	แข็ง	อ่อนนุ่ม	เละ

ตารางที่ 2-3 สีของผลตามระยะเวลาความสุกของมะม่วงและปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด

ระยะที่	สีของเปลือก	ระยะความสุก	องศาบริกซ์
1	เขียวทั้งผล	ดิบ	7.6
2	สีเหลืองที่ขั้ว	ค่อนข้างห้าม	10
3	เขียวมากกว่าเหลือง เหลืองไม่ถึงครึ่งของผล	ห้าม	เกินกว่า 10
4	เหลืองมากกว่าเขียว เหลืองเกินกว่าครึ่งผล เหลืองประมาณ $\frac{3}{4}$ ของผล	ค่อนข้างสุก	เกินกว่า 10
5	เขียวเล็กน้อยตรงปลายผล	สุก	11-13
6	เหลืองทั้งหมด	สุกมาก	เกินกว่า 14
7	เริ่มมีสีน้ำตาล	เริ่มเน่า	ลดลง



ภาพที่ 2-1 ระยะการสุกของมะม่วง (ประกอบคำอธิบายจากตารางที่ 2-3) (ศักยะ สมบัติไพรวรรณ, 2555)

ปัจจัยที่ส่งผลต่อการสุกและการเน่าของผลไม้เขตร้อน

การสุก (Ripening) เป็นกระบวนการที่ผลไม้เข้าสู่ระยะชราภาพหรือการแก่ (Aging) โดยจะทำให้ผลไม้มีการเปลี่ยนแปลงทางสรีระวิทยา เช่น ผลจะอ่อนนุ่ม เกิดกลิ่นตามชนิดของผลไม้ นั้น แป้งจะเปลี่ยนเป็นน้ำตาลเกิดรสหวาน ปริมาณกรดลดลง ผิวเปลี่ยนเป็นสีแดงเหลืองหรือสีอื่น ๆ ตามชนิดของผลไม้ และเมื่อการสุกเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์แล้ว ผลไม้ก็จะเริ่มเน่าในที่สุด โดยการเปลี่ยนแปลงของการสุก มีปัจจัยดังนี้

1. การหายใจโดยใช้ออกซิเจน (Respiration) ของมะม่วงจัดเป็นพืชที่มีการหายใจหลังการเก็บเกี่ยว โดยกระบวนการการหายใจนี้เกิดจากเซลล์มะม่วงรับเอาก๊าซออกซิเจนเข้าไปสลาย

โมเลกุลของกลูโคสให้มีขนาดเล็กลงและปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ความชื้นและเอทิลีนออกมา โดยพบว่ามะม่วงจะมีการสูญเสียกลูโคสและน้ำจากกระบวนการหายใจและการคายน้ำ ดังนั้นผลผลิตจะคงความสดได้นานเพียงใดนั้นจึงขึ้นอยู่กับปริมาณสารอาหารที่สะสมไว้และอัตราการหายใจของผลไม้ นั้น ๆ หากแต่เพียงผลิตผลอยู่ในสภาพที่ไม่มีออกซิเจนหรือมีออกซิเจนไม่เพียงพอจะเกิดการหายใจแบบไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic respiration หรือ Fermentation) ซึ่งเรียกว่า กระบวนการหมัก ทำให้เกิดกาสร้างเอทิลแอลกอฮอล์ (Ethyl alcohol) ส่งผลทำให้รสชาติของมะม่วงเสียและเกิดการเน่า

สำหรับอัตราการหายใจของผลิตผลหลังการเก็บเกี่ยวนั้นจะขึ้นอยู่กับชนิดของผลไม้ โดยพบว่า เมื่อเก็บผลไม้มาจากต้นแล้วอัตราการหายใจของเซลล์จะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องพร้อมกับการสุก ผลไม้ประเภทนี้จัดเป็นผลไม้ประเภท climacteric fruit สาเหตุหลักมาจากการคายเอทิลีน ซึ่งจัดเป็นฮอร์โมนพืชที่กระตุ้นให้มะม่วงมีความอ่อนไหวในการเปลี่ยนสภาพจากผลดิบเป็นสุกมากยิ่งขึ้น ในระหว่างที่ผลไม้เกิดการสุกนั้น อัตราการหายใจของผลไม้ที่สูงมากขึ้นจะส่งผลให้มีการผลิตเอทิลีนสูงขึ้นตามไปด้วย ซึ่งเห็นได้จากการเก็บเกี่ยวผลที่แก่จัดแต่ยังดิบอยู่ ผลไม้จะมีรสเปรี้ยวและมีแข็งมาก แต่เมื่อทิ้งไว้จะมีการสุกเกิดขึ้นและรสชาติจะเปลี่ยนแปลงไปอย่างมาก เช่น กัลย มะละกอ มะม่วง ทูเรียน ขนุนและฝรั่ง เป็นต้น ส่วนผลไม้ประเภทหนึ่ง พบว่า หลังการเก็บเกี่ยวแล้วไม่มีกระบวนการสุกเกิดขึ้น เนื่องจากอัตราการหายใจอยู่ในระดับต่ำ ซึ่งจัดเป็นผลไม้ประเภท non-climacteric fruit ได้แก่ ส้ม สับปะรด แดงโม ลำไยและองุ่น เป็นต้น ผลไม้ประเภทนี้เมื่อเก็บเกี่ยวมาแล้วจะมีการเปลี่ยนแปลงภายในผลเกิดขึ้นน้อยมาก รสชาติของผลมักจะคงที่ตั้งแต่เก็บเกี่ยวจนกระทั่งหมดอายุ และไม่สามารถบ่มให้สุกได้ เนื่องจากไม่มีการสุกเกิดขึ้น ดังนั้น เวลาเก็บเกี่ยวผลไม้ประเภทนี้ ต้องรอให้แก่จัดเท่านั้นจึงจะได้รสชาติที่ดี

2. อัตราการคายน้ำหรือการสูญเสียน้ำ หลังจากการเก็บเกี่ยว พบว่า มะม่วงยังมีการสูญเสียน้ำจากกระบวนการหายใจอยู่ จึงมีการคายน้ำจากผลิตผลเพื่อระบายความร้อน ซึ่งการคายน้ำเป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่ส่งผลให้ผิวของผลิตผลเกิดการเหี่ยวแห้งและมีไอน้ำหลุดออกมา ส่งผลให้ผลิตผลนั้นเน่าเสีย นอกจากนี้อัตราการคายน้ำยังขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ ได้แก่ ขนาดของผลิตผล (พื้นที่ผิว) ลักษณะของผลิตผลและเปลือกชั้นนอก อุณหภูมิ ความชื้นในบรรยากาศและการเคลื่อนไหวของอากาศ เป็นต้น (วรภัทร ลัคนทินวงศ์, 2549)

3. อัตราการผลิตเอทิลีน (Ethylene production rate) เอทิลีนมีสูตรทางเคมี คือ C_2H_4 จัดเป็นฮอร์โมนพืชชนิดหนึ่งที่มีบทบาทสำคัญในกระบวนการสุกและการเสื่อมสภาพ (Senescence) โดยเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงทางเคมีทำให้คุณภาพผลไม้เปลี่ยนไป ทั้งนี้เพราะเอทิลีนสามารถกระตุ้นเนื้อเยื่อทุกชนิดให้มีอัตราการหายใจสูงขึ้นได้ เช่น กระตุ้นให้เกิดการเสื่อมสลายตัวของ

คลอโรฟิลล์ทำให้ผลิตผลเกิดการเปลี่ยนแปลงสีเป็นสีเหลืองหรือสีส้ม ดังนั้นในส่วนของผลไม้ เอทิลีนจะกระตุ้นให้เกิดการสุกได้เร็วขึ้น จากการศึกษาผลไม้พบว่า กระบวนการสุกจะเกิดขึ้นไม่ได้ หากไม่มีเอทิลีนและระหว่างการสุกจำเป็นต้องมีเอทิลีน มิฉะนั้นแล้วการสุกจะเกิดขึ้นได้ไม่สมบูรณ์ (จิ่งแท้ ศิริพานิช, 2538) ความเข้มข้นเอทิลีนเพียง 20 ppmv ภายในห้องเก็บรักษาสามารถเร่งอัตราการสุกของผลไม้ให้เกิดเร็วขึ้น ทำให้ระยะเวลาการเก็บรักษาของผลผลิตลดลง (Scariot et al., 2014)

การสร้างเอทิลีนในผลไม้ประเภท climacteric fruit เกิดมาจากระบวนการหายใจ เมื่อมีการหายใจมากก็จะมีการสร้างเอทิลีนมากตามไปด้วย อีกทั้งเอทิลีนที่ถูกสร้างขึ้นยังมีผลกระตุ้นกระบวนการหายใจให้สูงขึ้นอีกด้วย เรียกได้ว่าทั้งการหายใจและการสร้างเอทิลีนในผลไม้เป็นกระบวนการส่งเสริมการสุกซึ่งกันและกัน ส่งผลให้ผลไม้เน่าเสียไวยิ่งขึ้น โดยทั่วไปมะม่วงจัดเป็นผลไม้ที่มีการผลิตเอทิลีนอยู่ในระดับปานกลาง โดยมีค่าระหว่าง 1-10 ไมโครลิตรต่อกิโลกรัมต่อชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส (Kader, 1985) และมีค่าระหว่าง 0.2-1.0 ไมโครลิตรต่อกิโลกรัมต่อชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 13 องศาเซลเซียส (Kader, 2000) ทั้งนี้อัตราการผลิตเอทิลีนยังขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ของผลมะม่วงด้วย โดยในพันธุ์น้ำดอกไม้ที่แก่จัดเมื่อนำมาวางไว้ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส เพื่อให้เกิดการสุก พบว่ามีการผลิตเอทิลีนสูงที่สุดในวันที่ 4 หลังจากการเก็บเกี่ยว ซึ่งเป็นวันที่ผลเริ่มสุก (Ketsa, Phakawatmongkol, & Subhadrabhandhu, 1999) อัตราการเพิ่มขึ้นของการผลิตเอทิลีนในผล พบว่า เกิดขึ้นก่อนการเพิ่มขึ้นของอัตราการหายใจ (สายชล เกตุษา, 2528) ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการผลิตและการทำงานของเอทิลีน มีหลายปัจจัย ได้แก่ ชนิดหรือพันธุ์ อายุทางสรีรวิทยาเมื่อเก็บเกี่ยว อุณหภูมิ ปริมาณออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศ

การชะลอการสุก (Delaying)

เอทิลีนเป็นตัวการสำคัญที่กระตุ้นให้ผลไม้เกิดการสุก ดังนั้นวิธีการที่มีผลต่อการลดอัตราการสร้างหรือยับยั้งการทำงานของเอทิลีนในพืชจึงสามารถชะลอการสุกของผลไม้ได้ ปัจจัยที่มีผลในการชะลอเอทิลีนในผลไม้ได้แก่

1. อุณหภูมิ เป็นปัจจัยที่สำคัญปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อการผลิตเอทิลีนในผลไม้ จากการศึกษา พบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการเก็บรักษาผลไม้สูงขึ้นจาก 0 เป็น 25 องศาเซลเซียส การผลิตเอทิลีนในผลไม้ก็จะเพิ่มสูงขึ้นตามเช่นกัน แต่ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส หรือสูงกว่าจะทำให้การสร้างเอทิลีนชะงักลงได้ ในทางตรงกันข้ามที่อุณหภูมิต่ำอาจทำให้ผลไม้ในเขตร้อนเป็นอันตราย ที่เรียกว่า อาการสะท้านหนาว (Chilling injury) และก่อให้เกิดการผลิตเอทิลีนสูงขึ้นได้ โดยทั่วไปวิธีที่ใช้ในการยืดอายุการเก็บรักษาผลผลิตได้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุดวิธีหนึ่ง คือ การใช้อุณหภูมิต่ำก่อนข้างดำเนินการเก็บรักษา โดยอุณหภูมิต่ำที่ใช้มีผลชะลอการหายใจของผลไม้และ

ชะลอการสุกได้ ซึ่งการเก็บรักษาผลมะม่วงโดยทั่วไปจะเก็บที่อุณหภูมิประมาณ 10-13 องศาเซลเซียส (พรพรรณ จำปา, 2554)

2. ปริมาณออกซิเจนในบรรยากาศ เป็นสาเหตุหลักที่ทำให้ผลไม้เกิดการสุก เนื่องจากมีการสลายอาหารที่สะสมอยู่ในผลไม้ด้วยการหายใจ โดยใช้ก๊าซออกซิเจนแล้วจึงปล่อยเอทิลีนออกมา ดังนั้นในสภาพที่มีออกซิเจนมากจึงทำให้เกิดการสร้างเอทิลีนมากด้วย การชะลอการสร้างเอทิลีนจึงทำได้โดยการลดปริมาณออกซิเจนในบรรยากาศที่เก็บรักษาผลไม้ให้ต่ำลง เช่น การเก็บกล้วยไว้ในสภาพที่มีออกซิเจนประมาณร้อยละ 0.5-5 จะทำให้ผลสุกช้ากว่าการเก็บรักษาไว้ในสภาพอากาศปกติซึ่งมีออกซิเจนประมาณร้อยละ 21 (Imahori, Yamamoto, Tanaka, & Bai, 2013; รัชพร อินทรพรหม และพันธิตรา เปลี่ยนไธสง, 2558)

3. ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในสภาพบรรยากาศปกติมีเพียงร้อยละ 0.03 เท่านั้น ซึ่งพืชหรือสัตว์มีการหายใจได้ปกติ แต่ถ้ามีการเพิ่มคาร์บอนไดออกไซด์ให้มากขึ้น จะทำให้เกิดการหายใจน้อยลง ซึ่งมีผลทางอ้อมในการลดอัตราการสร้างเอทิลีนด้วย นอกจากนี้คาร์บอนไดออกไซด์มีโครงสร้างของโมเลกุลคล้ายกับเอทิลีนจึงเข้าไปครอบคลุมจุดต่าง ๆ ในผลไม้ทำให้เอทิลีนไม่สามารถเข้าไปทำหน้าที่ได้ตามปกติ ดังนั้นในสภาพที่มีคาร์บอนไดออกไซด์สูงจึงทำให้ผลไม้สุกช้ากว่าปกติและเก็บรักษาไว้ได้นานขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม ถ้าพืชได้รับคาร์บอนไดออกไซด์ปริมาณสูงเป็นเวลานานจะทำให้เกิดการหายใจแบบไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic respiration) หรือเกิดการหมัก (Fermentation) ทำให้คุณภาพและรสชาติของผลไม้เสียไป (จริงแท้ สิริพานิช, 2542)

4. การเกิดบาดแผลหรือซ้ำ ในกรณีที่ผลไม้เกิดบาดแผลอันเนื่องมาจากการเก็บเกี่ยวหรือระหว่างการขนส่ง จะทำให้ผลไม้สร้างเอทิลีนขึ้นมามากกว่าปกติ เอทิลีนที่เกิดในสภาวะนี้ เรียกว่าเอทิลีนในสภาวะเครียด (Stress-induced ethylene) เอทิลีนที่เกิดในกรณีเช่นนี้เป็นเอทิลีนชนิดเดียวกันกับที่พืชสร้างขึ้นในสภาวะปกติ และมีผลต่อพืชเช่นเดียวกัน แต่ปริมาณที่สร้างขึ้นจะสูงกว่าระดับปกติ ดังนั้นผลไม้ที่เกิดบาดแผลหรือเกิดการซ้ำ จึงมีอายุการเก็บรักษาสั้นลงและสุกเร็วกว่าปกติ

5. การเข้าทำลายของโรคและแมลง เมื่อผลไม้ถูกโรคหรือแมลงเข้าทำลายจะเกิดบาดแผลขึ้นและเกิดการสร้างเอทิลีนในสภาวะเครียดขึ้นมาเช่นเดียวกับการเกิดบาดแผลทั่ว ๆ ไป นอกจากนี้เชื้อที่ทำให้เกิดโรคในผลผลิต เช่น เชื้อรา แบคทีเรียบางชนิดยังสามารถสร้างเอทิลีนขึ้นมาได้ด้วย จึงเป็นการเพิ่มปริมาณเอทิลีนในสภาพบรรยากาศที่เก็บรักษาผลไม้ ซึ่งมีผลทำให้อายุการเก็บรักษาสั้นลงเช่นเดียวกัน เนื่องจากผลไม้หรือใบไม้ก็ตามถ้าถูกโรคเข้าทำลายหรือแมลงกัด

กินจะเกิดการเหลืองและร่วงเร็วกว่าปกติ ทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจากเอทิลีนที่ถูกสร้างขึ้นอย่างมาก ผิดปกติเป็นตัวกระตุ้นการหลุดร่วงดังกล่าว

รูปแบบของการเก็บรักษาและการยืดอายุ

แนวทางที่ดีที่สุดในการจัดการผักและผลไม้หลังการเก็บเกี่ยวให้สดและคงคุณภาพในการเก็บรักษาให้นานยิ่งขึ้นนั้น คือ การหลีกเลี่ยงการสัมผัสเอทิลีนและลดอัตราการผลิตเอทิลีนในผักผลไม้ ส่งผลให้ลดการสูญเสียรายได้จากการเน่าเสียระหว่างการขนส่งและเพิ่มระยะเวลาในการวางจำหน่ายได้นานมากขึ้น ดังนั้นวิธีการควบคุมปริมาณเอทิลีนจึงเป็นปัจจัยที่สำคัญในการยืดอายุของผักผลไม้ ซึ่งการควบคุมเอทิลีนนั้นแบ่งได้เป็น 3 วิธีด้วยกัน ดังนี้

1. การดัดแปลงพันธุกรรม (Genetic strategies) สามารถทำได้โดยการควบคุมการสังเคราะห์เอทิลีนและลดความไวในการตอบสนองต่อเอทิลีน (Ethylene sensitive) เช่น การควบคุมการแสดงออกของยีนในการสังเคราะห์ 1-aminocyclopropane-1-carboxylate synthase (ACCS) และ 1-aminocyclopropane-1-carboxylate oxidase (ACO) ซึ่งเป็นเอนไซม์ที่เร่งปฏิกิริยาในการสังเคราะห์เอทิลีน นอกจากนี้ยังมีการตัดต่อยีนเพื่อยับยั้งการเกิดไวรัสบนผักผลไม้และการก่อกลายพันธุ์ให้ผักผลไม้มีการตอบสนองต่อเอทิลีนน้อยลง รวมถึงการดัดแปลงพันธุกรรมทำให้ผักผลไม้มีความทนต่อสภาวะเครียดของบรรยากาศมากขึ้น ซึ่งเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพมากและประสบความสำเร็จ แต่ยังคงมีค่าใช้จ่ายสูง (Zhang, Ren, Clifton, & Schofield, 2004)

2. การควบคุมทางเคมี ทำได้โดยใช้สารเคมีเพื่อยับยั้งกระบวนการสังเคราะห์เอทิลีนในพืช เช่น aminooxyacetic acid (AOA), aminoethoxyvinylglycine (AVG) และ methoxyvinylglycine (MVG), ไอออนของโคบอลต์ (Co_2^+) เป็นต้น (Scariot et al., 2014) จากการทดลองพบว่า มีการใช้ AOA และ AVG ทดลองกับพืชบางชนิดเท่านั้น เช่น การพ่น AVG ในแอปเปิ้ลก่อนการเก็บเกี่ยวนั้นสามารถชะลอการสุกได้ และยังสามารถใช้ชะลอการสุกในสาเล่และของดอกไม้ตัดแต่งบางชนิดด้วย นอกจากนี้การใช้ไอออนโคบอลต์ยังใช้ยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ ACO ได้เช่นเดียวกับการตัดต่อยีน (บัณฑิต เจริญทรัพย์, 2555) แต่พบว่า สารส่วนใหญ่ที่ใช้นั้นเสี่ยงต่อความเป็นพิษ ราคาแพง และยากต่อการสังเคราะห์ จึงไม่เป็นที่นิยม

3. การควบคุมสภาวะการเก็บรักษา

- 3.1 การควบคุมบรรยากาศ (Controlled atmosphere, CA) ได้แก่ การระบายอากาศในห้องที่เก็บรักษาผักผลไม้ โดยการเปลี่ยนถ่ายอากาศเก่าออกไป เพื่อให้อากาศใหม่เข้ามาแทนที่ แต่อย่างไรก็ตามขั้นตอนนี้ไม่สามารถทำได้ในสภาพแวดล้อมที่ถูกปิด เช่น ห้องเก็บรักษาผักผลไม้

แบบปิด ภาชนะและบรรจุภัณฑ์ต่าง ๆ เป็นต้น นอกจากนี้การลดสภาวะเครียดของผักผลไม้ โดยการหลีกเลี่ยงสภาวะที่มีอุณหภูมิสูงและความชื้นต่ำนั้น ช่วยชะลอการเน่าเสียได้

3.2 การใช้สารดูดซับเอทิลีน (Ethylene absorbent) จากการศึกษาการชะลอการสุกของมะม่วงน้ำดอกไม้ โดยใช้ถ่านกัมมันต์และทำการเปรียบเทียบกับสารดูดซับเอทิลีน (Ethylene absorber) ทางการค้า ซึ่งก็คือ 1-Methylcyclopropene (1-MCP) โดยเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 13 ± 1 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 95 ± 2 เป็นเวลา 37 วัน ทำการทดสอบค่าความแน่นเนื้อผ่านเปลือก ค่าสีเปลือก ค่า pH และค่า TSS พบว่า ถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการศึกษานี้ไม่สามารถชะลอการสุก แต่สารดูดซับเอทิลีนที่ใช้ทางการค้า 1-MCP สามารถชะลอการสุกได้ (ศักยะ สมบัติไพรวรรณ, 2555) และจากการนำ 1-MCP มาใช้เก็บรักษากล้วย พบว่า สามารถลดอัตราการผลิตเอทิลีน ยับยั้งการเติบโตของจุลินทรีย์ และชะลอการเปลี่ยนสีของเปลือกกล้วยได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Golding, 1998) นอกจากนี้มีสารดูดซับเอทิลีนอีกชนิดหนึ่งซึ่งเป็นที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรม คือ ด่างทับทิม (Potassium permanganate, KMnO_4) เนื่องจากเป็นสารออกซิไดซ์รุนแรงสามารถทำปฏิกิริยาทางเคมีกับเอทิลีนแล้วสลายเอทิลีนไปเป็น acetaldehyde จากนั้นจะเปลี่ยนกลับเป็น acetic acid อีกครั้งซึ่งสามารถออกซิไดซ์กลายเป็นคาร์บอน ไดออกไซด์กับน้ำ และไม่สามารถเปลี่ยนกลับไปเป็นเอทิลีนได้อีก (Chiara et al., 2015)

3.3 การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในการศึกษาผลของการใช้โอโซนต่อการควบคุมปริมาณเอทิลีนของผลมะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้สีทอง โดยนำเอทิลีนมาตรฐานความเข้มข้นร้อยละ 99.5 มาทดสอบกับก๊าซโอโซนความเข้มข้น 200 ppmv เป็นเวลา 1 3 5 10 และ 15 นาที ที่อุณหภูมิ 13 และ 25 องศาเซลเซียส โดยชุดที่รมโอโซนนาน 10 นาที จะให้ผลดีที่สุดในการลดปริมาณเอทิลีน และเมื่อนำผลมะม่วงมารมด้วยก๊าซโอโซนแบบวันเว้นวันอย่างต่อเนื่อง พบว่า การให้โอโซนแบบวันเว้นวัน สามารถทำให้ผลมีความแน่นเนื้อมากกว่าชุดควบคุมและชะลอการเพิ่มขึ้นของอัตราการหายใจ ส่งผลให้การเก็บรักษาของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองนานขึ้น แต่ข้อเสียของการใช้เครื่องกำเนิดโอโซนนั้น คือ มีค่าใช้จ่ายสูงและต้องหาวิธีกำจัด โอโซนที่เหลือ (พรพรรณ จำปา, 2554)

3.4 การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาดำแสง ซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) เมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสงสามารถเกิดกระบวนการเร่งปฏิกิริยาดำแสง ได้เป็นสารออกซิไดซ์และสามารถออกซิไดซ์สารอินทรีย์ เปลี่ยนไปเป็นน้ำกับคาร์บอนไดออกไซด์ โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้ เช่น อนุภาคนาโนซิลเวอร์ (Ag) (Scariot et al., 2014) ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) (Hussain, Ceccarelli, Marchisio, Fino, Russo & Geobaldo, 2010) และซิงค์ออกไซด์ (ZnO) (Fujishima, Zhang & Tryk, 2008) เป็นต้น ในปัจจุบันตัวเร่งปฏิกิริยาถูกนำมาประยุกต์ใช้กับบรรจุภัณฑ์แอคทีฟ

เพื่อรักษาคุณภาพผลไม้ ทั้งยังกำจัดจุลินทรีย์ในผักผลไม้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากปฏิกิริยาสามารถเกิดได้อย่างต่อเนื่อง

การยืดอายุผักและผลไม้ด้วยบรรจุภัณฑ์แอคทีฟ (Active and Intelligent Packaging)

Vermeiren, Devlieghere, van Beest, de Kruijf and Debevere (1999) ได้ให้คำจำกัดความบรรจุภัณฑ์แอคทีฟว่าเป็นหนึ่งในแนวคิดนวัตกรรมบรรจุภัณฑ์อาหารเพื่อตอบสนองการเปลี่ยนแปลงความต้องการของผู้บริโภคในปัจจุบันและแนวโน้มของตลาด โดยการควบคุมองค์ประกอบของบรรยากาศภายในบรรจุภัณฑ์ ซึ่งบรรจุภัณฑ์แอคทีฟจะทำหน้าที่ปกป้องอาหารและขณะเดียวกันก็สามารถควบคุมสภาพบรรยากาศภายในบรรจุภัณฑ์โดยการยอมหรือสกัดกั้นการแพร่ของก๊าซต่าง ๆ ที่ผ่านเข้าออกจากภาชนะบรรจุให้มีความเหมาะสมตามความต้องการของอาหาร เพื่อยืดอายุและรักษาคุณภาพ โดยเทคนิคของบรรจุภัณฑ์แอคทีฟนั้นจะใช้สารประกอบทางเคมีที่มีคุณสมบัติในการดูด-คายซับ ซึ่งสามารถดูดซับก๊าซภายในบรรจุภัณฑ์ที่ส่งผลเสียต่ออาหารหรือคายก๊าซเพื่อรักษาคุณภาพอาหาร และยังสามารถปรับสภาพบรรยากาศภายในได้อย่างต่อเนื่อง สารดูดซับ (Absorbent) ที่สามารถดูดซับสารต่าง ๆ ได้ดี ได้แก่ ออกซิเจน เอทิลีน คาร์บอนไดออกไซด์ ความชื้น กลิ่นและรส สารคายซับ (Desorbent) สามารถปล่อยสารออกมาได้แก่ คาร์บอนไดออกไซด์ สารยับยั้งจุลินทรีย์ สารต้านอนุมูลอิสระและสารเปลี่ยนกลิ่น รส ซึ่งส่วนใหญ่จะบรรจุสารเคมีชนิดที่ให้ก๊าซที่ต้องการหรือชนิดที่ดูดกลับก๊าซที่ไม่ต้องการออกไปจากบรรยากาศที่ล้อมรอบผลิตภัณฑ์ภายในภาชนะบรรจุ (Floros, Dock & Han, 1997) ซึ่งจะนำมาประยุกต์ใช้บรรจุภัณฑ์แบบแอคทีฟกับอาหารประเภทต่าง ๆ

การพัฒนาบรรจุภัณฑ์แอคทีฟสามารถแบ่งตามลักษณะเทคโนโลยีได้เป็น 2 กลุ่ม คือ

1. Sachet-based technology คือ การใช้สารดูดหรือคายก๊าซ โดยบรรจุในซองเล็ก ๆ (packet หรือ sachet) และ sachet จะถูกใส่เพิ่มในภาชนะบรรจุหลักของอาหาร ซึ่งใช้งานแพร่หลายในอาหารอบแห้งต่าง ๆ ขนมหักหรือเนยแข็ง ดังภาพที่ 2-2 (ก)

2. Integrated concepts หรือ Plastic packaging as media เป็นวิธีใหม่ที่มีการคิดค้นพัฒนาขึ้น โดยมีหลักการสำคัญ คือ การผสมสารดูดหรือคายก๊าซในพลาสติกหรือฟิล์มที่เป็นบรรจุภัณฑ์โดยตรง ได้แก่ ฟิล์มที่มีสารผสมเพื่อยับยั้งหรือทำลายเชื้อจุลินทรีย์ ลดปริมาณเอทิลีน ควบคุมความชื้น ดูดหรือลดปริมาณออกซิเจน เพิ่มปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์และอื่น ๆ ปัจจุบันนิยมใช้กันแพร่หลายในสหรัฐอเมริกา ญี่ปุ่น ออสเตรเลีย และประเทศในแถบยุโรป ดังภาพที่ 2-2 (ข) โดยพลาสติกที่นิยมนำมาผลิตบรรจุภัณฑ์แอคทีฟ ได้แก่ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ

(Low density polyethylene) พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นปานกลาง (Medium density polyethylene) โพรพิลีน (Propylene) ซึ่งมีการผลิตขึ้นมาใช้กันอย่างแพร่หลายกับผักและผลไม้สด



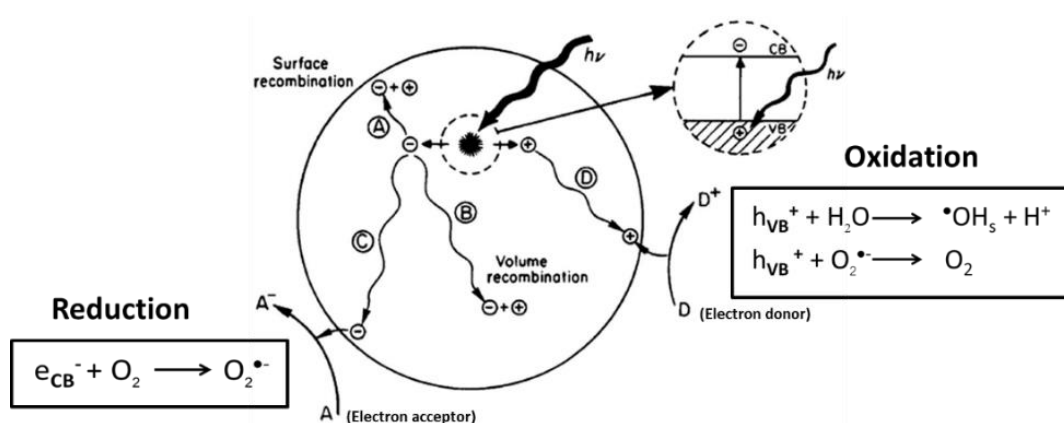
ภาพที่ 2-2 บรรจุภัณฑ์แอคทีฟ (ก) Sachet-based technology และ (ข) Plastic packaging as media (บริษัท พีพีอี ปรีนติ้ง แอนด์ แพคเกจจิ้ง จำกัด)

กระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO₂ Photocatalytic)

ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO₂) เป็นสารกึ่งตัวนำที่นิยมนำมาใช้งานในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง (Photocatalysis) เนื่องจากมีราคาถูก ไม่เป็นพิษมีความเสถียรทางเคมีในช่วง pH ที่กว้าง และเป็นแหล่งผลิตสารออกซิไดซ์ที่รุนแรง เมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสง จะเกิดสารอนุมูลอิสระจากปฏิกิริยาเคมี (Reactive oxygen species; ROS) ด้วยคู่อิเล็กตรอน-ช่องว่างของอิเล็กตรอน (Electron-hole pair) ซึ่งประกอบด้วย ไฮดรอกซิลเรดิคัล (Hydroxyl Radicals; •OH) และ ซูเปอร์ออกไซด์ (Superoxide; O₂⁻) โดยสารอนุมูลอิสระนี้สามารถย่อยสลายพันธะสารอินทรีย์และพันธะไฮโดรคาร์บอนได้ดี แล้วเปลี่ยนไปเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ซึ่งนิยมนำมาใช้ในการบำบัดมลพิษที่มีสารอินทรีย์ปนเปื้อนทั้งในอากาศและน้ำ (Simonsen, 2014)

กลไกการทำงานของ TiO₂ เริ่มต้นขึ้นเมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสงหรือพลังงานโฟตอน (Photons) ที่มีพลังงานสูงกว่าหรือเท่ากับช่องว่างแถบพลังงานหรือแบนด์แกป (Energy band gap ; E_{bg}) ($h\nu \geq E_{bg}$) โดยที่แถบพลังงานของ TiO₂ ที่มีโครงสร้างแบบอนาเทส (Anatase) และรูไทล์ (Rutile) มีค่าเท่ากับ 3.2 และ 3.02 eV ตามลำดับ จะทำให้อิเล็กตรอนที่อยู่ในแถบวาเลนซ์ (Valence Band; VB) ถูกกระตุ้นให้เคลื่อนที่ไปยังแถบการนำ (Conduction Band; CB) ทำให้เกิดสภาวะขาดแคลนอิเล็กตรอนที่แถบวาเลนซ์หรือช่องว่างของอิเล็กตรอน เรียกว่า ช่องว่างของอิเล็กตรอน (Hole) แทนด้วยสัญลักษณ์ h_{VB}^+ ส่วนอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นไปยังแถบการนำแทนด้วยสัญลักษณ์ e_{CB}^- (Electron) ทำให้เกิดอิเล็กตรอนและช่องว่างของอิเล็กตรอนวิ่งกระจายอยู่ทั่วอนุภาค ซึ่งอิเล็กตรอน

และช่องว่างของอิเล็กตรอนอาจมารวมตัวกันได้ทั้งที่พื้นผิวและภายในอนุภาคของสารกึ่งตัวนำจึงปล่อยความร้อนออกมา ดังภาพที่ 2-3 (A) และ (B) ตามลำดับ โดยอิเล็กตรอนในแถบการนำ จะเป็นตัวรีดิวซ์หรือตัวให้อิเล็กตรอนที่ดีจะเคลื่อนที่ไปให้อิเล็กตรอนแก่ตัวรับอิเล็กตรอน (Electron acceptor) เกิดปฏิกิริยารีดักชันของออกซิเจน (Oxygen reduction) โดยอิเล็กตรอน ดังภาพที่ 2-3 (C) และช่องว่างของอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นในแถบวาเลนซ์จะเป็นตัวออกซิไดซ์หรือตัวรับอิเล็กตรอนที่ดี (Strong oxidant) จะเคลื่อนที่ไปรับอิเล็กตรอนจากตัวให้อิเล็กตรอน (Electron donor) เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำ (Water oxidation) โดยช่องว่างของอิเล็กตรอน ดังภาพที่ 2-3 (D) และ (Fujishima, Zhang & Tryk, 2008)



ภาพที่ 2-3 กลไกการทำงานของกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ (Simonsen, 2014)

ตารางที่ 2-4 กระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง

ลำดับปฏิกิริยา	สมการปฏิกิริยา
กระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของไทเทเนียมไดออกไซด์	
R1	$\text{TiO}_2 \xrightarrow{h\nu \geq E_G} e^-_{\text{CB}} + h^+_{\text{VB}}$
R2	$e^-_{\text{CB}} + h^+_{\text{VB}} \longrightarrow \text{heat}$
R3	$h^+_{\text{VB}} + \text{H}_2\text{O} \longrightarrow \cdot\text{OH} + \text{H}^+$
R4	$e^-_{\text{CB}} + \text{O}_2 \longrightarrow \text{O}_2^{\cdot-}$
R5	$\text{Ti}^{4+} + e^-_{\text{CB}} \longrightarrow \text{Ti}^{3+}$
R6	$\text{Ti}^{3+} + \text{O}_2 \longrightarrow \text{Ti}^{4+} + \text{O}_2^{\cdot-}$
ลำดับปฏิกิริยา	สมการปฏิกิริยา
กระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงในการสลายเอทิลีน	
R7	$\text{O}_2 + \text{Ti}^{3+} \longleftrightarrow \text{O}_2\sigma'$
R8	$\text{C}_2\text{H}_4 + \text{Ti}^{4+} \longleftrightarrow \text{C}_2\text{H}_4\sigma$
R9	$\text{H}_2\text{O} + \text{Ti}^{4+} \longleftrightarrow \text{H}_2\text{O}\sigma$
R10	$h^+ + \text{H}_2\text{O}\sigma \longrightarrow \cdot\text{OH}\sigma + \text{H}^+$
R11	$\cdot\text{OH}\sigma + \text{C}_2\text{H}_4\sigma \longleftrightarrow \text{C}_2\text{H}_4\text{OH}\sigma$
R12	$\text{C}_2\text{H}_4\text{OH}\sigma + \sigma'\text{O}_2 \longrightarrow \text{mineralization to CO}_2$

หมายเหตุ: Ti^{3+} คือ บริเวณเร่งของออกซิเจน แทนสัญลักษณ์ด้วย σ'

Ti^{4+} คือ บริเวณเร่งของน้ำและเอทิลีน แทนสัญลักษณ์ด้วย σ

จากตารางที่ 2-4 แสดงถึงกระบวนการเกิดกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง ซึ่งประกอบด้วยการเกิดกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) และกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงในการสลายเอทิลีน (C_2H_4) โดยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของ TiO_2 เกิดขึ้นเมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสงที่มีพลังงานมากพอ จะมีการก่อตัวของคู่อิเล็กตรอนและช่องว่างของอิเล็กตรอนขึ้นที่พื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ ดังสมการ R1 หากอิเล็กตรอนและช่องว่างของอิเล็กตรอนไม่เกิดปฏิกิริยาเคมีกับบริเวณเร่ง (Active site) อื่น ๆ ก็จะกลับมารวมตัวอีกครั้ง (Recombination of electron-hole) ทำให้เกิดการคายความร้อน ส่งผลให้ประสิทธิภาพของกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงลดลง ดังสมการ R2 แต่ถ้าไม่เกิดการรวมตัวกัน ช่องว่างของอิเล็กตรอนสามารถเกิดปฏิกิริยากับน้ำ (H_2O) เกิดเป็นไฮดรอกซิลแรดดิคัล ($\cdot\text{OH}$) ส่วนอิเล็กตรอน

จะทำปฏิกิริยากับออกซิเจน (O_2) เกิดเป็นซูเปอร์ออกไซด์ (O_2^-) ดังสมการ R3 และ R4 ตามลำดับ (Sobczynski & Dobosz, 2001) นอกจากนี้อิเล็กตรอนยังสามารถเกิดปฏิกิริยาบนพื้นผิวของ Ti^{4+} เกิดเป็น Ti^{3+} ดังสมการ R5 ซึ่งเป็นบริเวณเร่งของออกซิเจน (σ') ดังสมการ R6 และออกซิเจนจะถูกรีดิวซ์ด้วย Ti^{3+} เปลี่ยนไปเป็น Ti^{4+} ดังสมการ R4 ที่เป็นบริเวณเร่งของน้ำและเอทิลีน (σ) ดังสมการ R8 และ R9

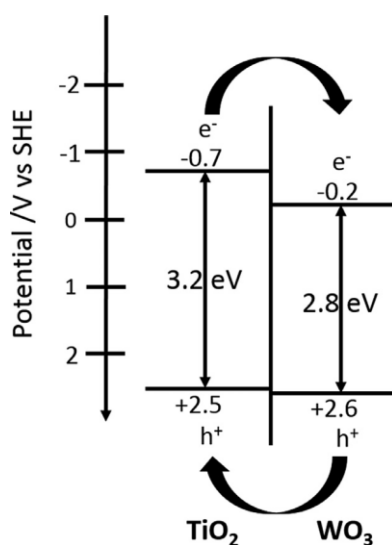
การสลายตัวของเอทิลีนด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงเริ่มขึ้นเมื่อช่องว่างของอิเล็กตรอนทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับน้ำ ($H_2O\sigma$) ซึ่งจะถูกออกซิไดซ์เกิดเป็นไฮดรอกซิลเรดิคัล ($\cdot OH\sigma$) ดังสมการ R10 จากนั้นไฮดรอกซิลเรดิคัลที่เกิดขึ้นนี้จะเป็นตัวการสำคัญในการออกซิไดซ์ก๊าซเอทิลีน ($C_2H_4\sigma$) เกิดเป็นสารตัวกลาง (Intermediates) ($C_2H_4OH\sigma$) ซึ่งอยู่บนบริเวณเร่งเดียวกัน ดังสมการ R11 เมื่อรวมตัวกับออกซิเจน ($\sigma'O_2$) จะสลายตัวเปลี่ยนไปเป็นน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์ ดังสมการ R12 (Yamazaki, Tanaka & Tsukamoto, 1999)

จากปฏิกิริยาดังกล่าวสอดคล้องกับการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการกำจัดเอทิลีนด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของ N-doped TiO_2 เคลือบบน glass plate บรรจุใน photoreactor พบว่า อัตราการกำจัดเอทิลีนจะขึ้นอยู่กับการป้อนสารขาเข้า (ความเข้มข้นเริ่มต้นของเอทิลีน ไอ้ น้ำ และออกซิเจน) โดยพบว่า ปฏิกิริยาการกำจัดเอทิลีนที่ความเข้มข้น 100-900 ppmv เป็นช่วงที่สามารถกำจัดเอทิลีนได้สูงที่สุด อยู่ในช่วง 0.365-0.711 ไมโครโมลต่อตารางเซนติเมตรต่อชั่วโมง และเศษส่วน โมลของออกซิเจนมากกว่าร้อยละ 5 ส่งผลให้อัตราการกำจัดเอทิลีนมีค่าเพิ่มสูงที่สุด และคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงที่ 0.6 ไมโครโมลต่อตารางเซนติเมตรต่อชั่วโมง แต่หากมีออกซิเจนน้อยกว่าร้อยละ 5 โดยโมล พบว่า อัตราการเกิดปฏิกิริยาก่อนข้างต่ำ ดังนั้นจึงพบว่า ปริมาณออกซิเจนเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของเอทิลีน แต่หากมีมากเกินไปไม่ส่งผลต่อการลดอัตราการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งตรงกันข้ามกับปริมาณไอ้ น้ำในการเกิดปฏิกิริยาเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงกับเอทิลีน พบว่า ปริมาณไอ้ น้ำที่เพิ่มสูงถึง 1,561 ppmv สามารถเพิ่มประสิทธิภาพอัตราการเกิดปฏิกิริยาในการกำจัดเอทิลีนได้ แต่อัตราในการกำจัดเอทิลีนจะลดลงเมื่อปริมาณไอ้ น้ำมีค่ามากกว่า 1,561 ppmv ทำให้ทราบว่าไอ้ น้ำเป็นปัจจัยที่สำคัญในการเกิดกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง แต่หากมีปริมาณไอ้ น้ำที่มากจะส่งผลให้การกำจัดเอทิลีนลดลง เนื่องจากการดูดซับไอ้ น้ำ (Water adsorption) บนบริเวณเร่ง (Active site) ของ TiO_2 เป็นบริเวณเดียวกันกับบริเวณเร่งที่ใช้ในการดูดซับเอทิลีน (σ) ในขณะที่การดูดซับออกซิเจนจะเกิดบนบริเวณเร่งที่แตกต่างกัน (σ') (Lin et al., 2014)

ถึงแม้ TiO_2 จะถูกนำมาใช้ในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงอย่างกว้างขวาง แต่พบว่า TiO_2 ยังคงมีข้อจำกัดคือ สามารถเกิดการรวมตัวของอิเล็กตรอนและช่องว่างของอิเล็กตรอน ดังนั้น

การใช้สารกึ่งตัวนำร่วมกับ TiO_2 จึงถูกคิดค้นขึ้นเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการทำงานของ TiO_2 โดยหลักการทำงาน คือ เมื่อสารกึ่งตัวนำทั้งสองเชื่อมต่อกันแล้ว ระดับพลังงานศักย์ของอิเล็กตรอน จะมีแนวโน้มปรับระดับให้สมดุล โดยสร้างกำแพงศักย์ (Barrier) ขึ้นที่ผิวบริเวณรอยต่อทั้งสอง เพื่อแยกอิเล็กตรอนในแถบการนำไม่ให้เคลื่อนที่กลับมาที่แถบเวเลนซ์ มีผลให้ช่องว่างของอิเล็กตรอนที่แถบวาเลนซ์ของ TiO_2 สามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและมีประสิทธิภาพสูงขึ้น เรียกกระบวนการนี้ว่า Charge separation ซึ่งสามารถลดการรวมตัวของคู่อิเล็กตรอนและช่องว่างของอิเล็กตรอน นอกจากนี้ยังช่วยเพิ่มระยะเวลาของประจุในการเกิดปฏิกิริยารีดักชันกับออกซิเจน

WO_3 เป็นสารกึ่งตัวนำที่มีคุณสมบัติทางแสงและทางไฟฟ้า มีความเสถียรเมื่อนำมาใช้ร่วมกับสารอื่น ๆ และตอบสนองต่อแสงในช่วงที่ตามองเห็น (Visible light) จึงนิยมนำ WO_3 มาประยุกต์ใช้ร่วมกับ TiO_2 เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง โดยการลดการรวมตัวของคู่อิเล็กตรอนกับช่องว่างของอิเล็กตรอน (Electron-hole recombination) กลไกการรับอิเล็กตรอนของ WO_3 ร่วมกับ TiO_2 แสดงภาพประกอบ ดังภาพที่ 2-4 เมื่อ TiO_2 และ WO_3 ถูกกระตุ้นด้วยพลังงานแสงที่เหมาะสม อิเล็กตรอนที่อยู่ในแถบเวเลนซ์ของ TiO_2 จะเคลื่อนที่ไปยังแถบการนำและเกิดปฏิกิริยารีดักชันกับออกซิเจน ขณะเดียวกันอิเล็กตรอนในแถบการนำที่เหลือที่ไม่ได้เกิดปฏิกิริยารีดักชันจะถูกถ่ายโอนไปยัง WO_3 เนื่องจากแถบการนำของ WO_3 อยู่ต่ำกว่าแถบการนำของ TiO_2 ในขณะที่ WO_3 รับอิเล็กตรอนนั้น ช่องว่างของอิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์บางส่วนที่ไม่ได้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันก็จะถูกถ่ายโอนไปยังแถบวาเลนซ์ของ TiO_2 เช่นกัน



ภาพที่ 2-4 กลไกการถ่ายโอนประจุระหว่าง TiO_2 กับ WO_3 (Chen et al., 2016)

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปัจจุบันได้มีการนำไทเทเนียมไดออกไซด์มา ประยุกต์สำหรับการใช้งานด้านต่าง ๆ เนื่องจากมีความเสถียรต่อสารเคมีไม่มีความเป็นพิษ ราคาไม่แพงมาก และสมบัติพิเศษที่เป็นประโยชน์ที่ดีอีกหลายอย่าง โดยเฉพาะอย่างยิ่งไทเทเนียมไดออกไซด์มีการศึกษา กระบวนการเร่งปฏิกิริยาดำเนินการของไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) อย่างกว้างขวาง Manerat and Hayata (2008) ได้ศึกษาการสลายตัวของเอทิลีนด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาดำเนินการเพื่อชะลอการสุกของมะเขือเทศที่สภาวะอุณหภูมิห้อง โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 ที่เตรียมเป็นสารแขวนลอยเคลือบบนฟิล์ม Oriented - polypropylene (OPP) แล้วนำฟิล์มไปเคลือบ TiO_2 เพื่อใช้เป็นบรรจุภัณฑ์แอคทีฟ จากผลการทดลองพบว่าฟิล์มดังกล่าวสามารถสลายเอทิลีนภายใต้แสงยูวีเหลือเพียง 3 ppmv เมื่อเปรียบเทียบกับบรรจุภัณฑ์ที่ไม่มีฟิล์มเคลือบ TiO_2 ดังนั้นการใช้ฟิล์ม TiO_2 ในบรรจุภัณฑ์แอคทีฟสามารถลดปริมาณเอทิลีนในบรรยากาศของบรรจุภัณฑ์ได้ถึงร้อยละ 88±6 และส่งผลให้ชะลอการเปลี่ยนแปลงสีเปลือกของมะเขือเทศจากสีเขียวเป็นสีแดงได้

จากการสลายเอทิลีนด้วย TiO_2 Lin et al., (2014) ได้ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการกำจัดเอทิลีนในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาดำเนินการด้วยการโด๊ปไนโตรเจนร่วมกับ TiO_2 (N-doped TiO_2) พบว่า ปัจจัยที่ส่งผลต่ออัตราการกำจัดเอทิลีนนั้นขึ้นอยู่กับความเข้มข้นเริ่มต้นของเอทิลีน ออกซิเจนและไอน้ำ อุณหภูมิที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยา และความเข้มแสง โดยความเข้มข้นเอทิลีนเริ่มต้นในช่วง 100-900 ppmv พบว่า มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาได้สูงที่สุดจาก 0.365 เป็น 0.711 $\mu\text{mol}/\text{cm}^2 \cdot \text{hr}$ และคงที่ ทั้งนี้เมื่อทดสอบสัดส่วนเชิงโมลเศษส่วนโมลของออกซิเจนที่ส่งผลต่อสภาวะในการเกิดกระบวนการเร่งปฏิกิริยาดำเนินการ พบว่า ออกซิเจนมากกว่าร้อยละ 5 เป็นช่วงที่มีอัตราการกำจัดเอทิลีนได้สูงสุด เท่ากับ 0.6 $\mu\text{mol}/\text{cm}^2 \cdot \text{hr}$ และคงที่ไม่เปลี่ยนแปลง ส่วนความเข้มข้นของปริมาณไอน้ำ พบว่า ความเข้มข้นของไอน้ำที่ไม่เกิน 1,561 ppmv เป็นช่วงที่มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาในการกำจัดเอทิลีนได้ดีและเป็นสภาวะที่เหมาะสมในการกระบวนการเร่งปฏิกิริยาดำเนินการ อย่างไรก็ตามการกำจัดเอทิลีนที่เพิ่มขึ้นสูงในระดับหนึ่งก่อนที่จะคงที่นั้น ทั้งนี้เนื่องมาจากปริมาณที่จำกัดของบริเวณเร่งบนพื้นที่ผิว N-doped TiO_2 ที่ดูดซับเอทิลีนไว้จนอิ่มตัวก่อนที่จะเกิดการสลายตัวของเอทิลีนจนหมด

จากปัจจัยของสภาวะดังกล่าว ยังพบว่า การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมเป็นอีกวิธีหนึ่งในการเพิ่มประสิทธิภาพในการสลายเอทิลีน โดย Chiara et al., (2015) ศึกษาการสลายเอทิลีน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมระหว่าง TiO_2 กับ SiO_2 โดยวิธีโซล-เจล ที่สภาวะ hydrothermal โดยมีอัตราส่วนการผสมร้อยละ โดยโมลของ $\text{TiO}_2 : \text{SiO}_2$ เป็นดังนี้ 100 : 0 92 : 8 84 : 16 76 : 24 และ 0 : 100 ตามลำดับ จากนั้นนำตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมมาทดสอบสลายตัวของเอทิลีนที่ความเข้มข้นเริ่มต้น

2-8 ppmv ใน glass chamber ภายใต้สภาวะการฉายแสง UVA และสภาวะมืด เป็นเวลา 420 นาที พบว่าร้อยละโดยโมลของ TiO_2 : SiO_2 ที่อัตราส่วน 84 : 16 มีประสิทธิภาพในการสลายเอทิลีนได้สูงที่สุดในสภาวะที่มีแสง คิดเป็นร้อยละ 80 ส่วนในสภาวะมืดสามารถกำจัดเอทิลีนได้ร้อยละ 50 ซึ่งจัดอยู่ในกระบวนการดูดซับของ SiO_2 ส่วนร้อยละ 30 จะเกิดในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง ทั้งนี้เมื่อนำตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวมาทดสอบกับมะเขือเทศสดสีเขียว พบว่า ผลของการกำจัดเอทิลีนสามารถชะลอการเปลี่ยนสีของมะเขือเทศได้ดีกว่าแบบไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการสลายเอทิลีนด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง Bojinova et al. (2017) ได้ศึกษาการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมระหว่างผง TiO_2 ขนาดนาโนและ WO_3 ซึ่งใช้เป็นสารโด๊ปที่เตรียมด้วยวิธี Solid-state และเคลือบลงบนพื้นผิวซิลิกาเจลด้วยเทคนิคโครมาโตกราฟีแบบเยื่อบาง (Thin layer chromatography, TLC) โดยทำการโด๊ป WO_3 ที่ปริมาณ 0.2 0.7 1.8 2.5 3.7 และ 25.6 ร้อยละโดยโมล จากการทดลองพบว่า การเคลือบ WO_3 ร้อยละ 1.8 โดยโมล สามารถกำจัดเอทิลีนได้สูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับ การเคลือบ TiO_2 เพียงอย่างเดียว ทั้งนี้เนื่องจากข้อดีของการนำสารกึ่งตัวนำทั้งสองมารวมกัน ส่งผลให้อัตราการกลับมารวมตัวกันใหม่ของอิเล็กตรอนกับช่องว่างของอิเล็กตรอนภายในอนุภาคลดลง ส่งผลให้ประสิทธิภาพกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงเพิ่มขึ้น ถึงอย่างไรก็ตาม ข้อสรุปนี้ยังไม่สามารถสรุปได้ในกรณีเดียว เนื่องจากพบว่า TiO_2/WO_3 มีอัตราการดูดซับเอทิลีนได้ในสภาวะมืด เพราะการรวม TiO_2/WO_3 มีประจุบวกหรือช่องว่างของอิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์มากกว่า TiO_2 บริสุทธิ์เพียงอย่างเดียว จึงทำให้ช่องว่างของอิเล็กตรอนที่อยู่ในแถบวาเลนซ์ WO_3 ถ่ายเทไปยังแถบวาเลนซ์ของ TiO_2 ดังนั้นพื้นผิวของ WO_3 จึงมีประจุเป็นลบ การแยกประจุออกจากกันจึงส่งผลให้พื้นที่ผิวของ WO_3 และ TiO_2 เพิ่มขึ้นและสามารถดูดซับสารไฮโดรคาร์บอนได้มากยิ่งขึ้นตามไปด้วย นอกจากนี้ Ramos-Delgado et al. (2013) ได้มีการนำตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมระหว่าง TiO_2 และ WO_3 เพื่อใช้กำจัดสารกำจัดศัตรูพืช (Malathion pesticide) และอินทรีย์คาร์บอนรวม (Total organic carbon; TOC) โดยใช้ปริมาณ WO_3 ที่ร้อยละ 0.7 โดยโมล ($0.7\% \text{WO}_3/\text{TiO}_2$) ซึ่งเตรียมโดยใช้วิธีโซล-เจล และทำการทดลองภายใต้แสงอาทิตย์ (Visible light) พบว่า $0.7\% \text{WO}_3/\text{TiO}_2$ สามารถลดขนาดอนุภาคผลึกของ TiO_2 และเพิ่มพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ส่งผลให้แบนด์แกบแคบลง และเพิ่มความสามารถในการตอบสนองความยาวคลื่นที่กว้างมากขึ้น ส่งผลให้ลดการรวมตัวของคู่อิเล็กตรอน-ช่องว่างของอิเล็กตรอนบนพื้นผิว TiO_2 และเพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายเทอิเล็กตรอนระหว่าง TiO_2 และ WO_3 ได้มากขึ้น ดังนั้นการใช้ปริมาณ WO_3 ร้อยละ 0.7 จึงมีสมบัติในการเร่งปฏิกิริยาที่ดีกว่า TiO_2 เพียงอย่างเดียวและทำให้เกิดการสลายตัวของสารกำจัดศัตรูพืชสมบูรณ์หลังจากผ่านไป 2 ชั่วโมงขณะที่การลดของ TOC ลดลงร้อยละ 63

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

วัตถุดิบ

มะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้ที่ใช้ศึกษาเก็บเกี่ยวมาจากสวนเกษตรกร ในอำเภอหนองคล้า จังหวัดฉะเชิงเทรา ในช่วงเดือนเมษายน พ.ศ. 2560 โดยผลมีระยะความแก่ประมาณร้อยละ 80-90 (112 วันหลังดอกบาน) น้ำหนักผลอยู่ในช่วง 400-450 กรัม อยู่ในระยะที่ 2 ค่อนข้างห้าม ตามภาพที่ 2-1 โดยคัดเลือกผลให้มีขนาดใกล้เคียงกันไม่มีตำหนิหรือไม่ถูกทำลายจากโรคและแมลง

อุปกรณ์และสารเคมี

1. อุปกรณ์

1.1 ฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (Low density polyethylene; LDPE) 1 ชั้น ขึ้นรูปด้วยเครื่อง Blown film extruder ความหนา 36 ไมโครเมตร ผลิตโดยบริษัท สีตัน 56 จำกัด

1.2 บรรจุภัณฑ์พลาสติกพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (LDPE) สามชั้น เคลือบชั้นนอกด้วย O-nylon ความหนา 65 ไมโครเมตร ผลิตโดยบริษัท Prepack Thailand Co., Ltd.

1.3 เครื่องชั่งน้ำหนัก ทศนิยม 5 ตำแหน่ง (Analytical balance)

1.4 เครื่องชั่งน้ำหนัก ทศนิยม 4 ตำแหน่ง (Analytical balance)

1.5 เครื่องเป่าลมแห้ง (Dry air blower)

1.6 เครื่องกวนสาร (Stirrer)

1.7 เทอร์โมมิเตอร์ (Thermometer)

1.8 หลอดอัลตราไวโอเลตเอ (UVA lamp) 40 วัตต์ ความยาวคลื่น 365 นาโนเมตร

1.9 เข็มฉีดยา (Syringe)

1.10 ชุดเครื่องมือ เช่น แท่งกวนสาร หลอดหยด บีกเกอร์ ปิเปต ขวดวัดปริมาตร กระจกบอกลง งานเพาะเชื้อ ฯลฯ

1.11 เครื่องซีลปากถุง รุ่น PFS-300

1.12 เครื่องปั่น

1.13 ผ้าขาวบาง

1.14 เครื่องเคลือบแบบจุ่ม (Dip Coating)

1.15 ตู้อบสุญญากาศ

1.16 เครื่องวัดค่าความหนาแน่น (Density meter) ยี่ห้อ METTER TOLEDO รุ่น DM40 ประเทศสหรัฐอเมริกา

1.17 เครื่องก๊าซโครมาโตกราฟี (Gas Chromatography; GC) ยี่ห้อ Varian Chrompack รุ่น CP-3800 ประเทศอิตาลี

2. สารเคมี

2.1 ไททาเนียมไดออกไซด์ทางการค้า (Titanium dioxide; TiO_2 Degussa P-25) Rutile:Anatase /85:15, 99.9%, ขนาด 20 นาโนเมตร บริษัท Titanos Industry Co., Ltd. ประเทศจีน

2.2 โซเดียมทังสเตต (Sodium tungstate; $Na_2WO_4 \cdot 2H_2O$)

Lab grade บริษัท Molbase (Shanghai) Biotechnology Co., Ltd. ประเทศจีน

2.3 พอลิเอทิลีนไกลคอลทางการค้า (Poly Ethylene Glycol; PEG)

มวลโมเลกุล 2,000 g/mol บริษัท Alfa Chemistry Ltd. ประเทศสหรัฐอเมริกา

2.4 พอลิเอทิลีนไกลคอลทางการค้า (Poly Ethylene Glycol; PEG)

มวลโมเลกุล 10,000 g/mol บริษัท Alfa Chemistry Ltd. ประเทศสหรัฐอเมริกา

2.5 กรดไนตริก (Nitric acid; HNO_3 65%)

Analytical reagent grade บริษัท Merck Co., Ltd. ประเทศไทย

2.6 ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide; H_2O_2 30%)

Analytical reagent grade บริษัท Ajax Finechem Pty., Ltd. ประเทศนิวซีแลนด์

2.7 เอทิลแอลกอฮอล์ทางการค้า (Ethyl alcohol; C_2H_5OH 95%)

บริษัท SSCV Corporation Co., Ltd. ประเทศไทย

2.8 น้ำปราศจากไอออน (De-ionize water; DI 18.2 M Ω)

2.9 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide; NaOH)

Analytical reagent grade บริษัท Daejung Chemicals & Metals Co., Ltd. ประเทศเกาหลี

เกาหลี

2.10 ก๊าซเอทิลีน (Ethylene; C_2H_4 50 ppm ผสมใน N_2)

บริษัท Thai Special Gas Co., Ltd. ประเทศไทย

2.11 Triton X-100 ทางการค้า

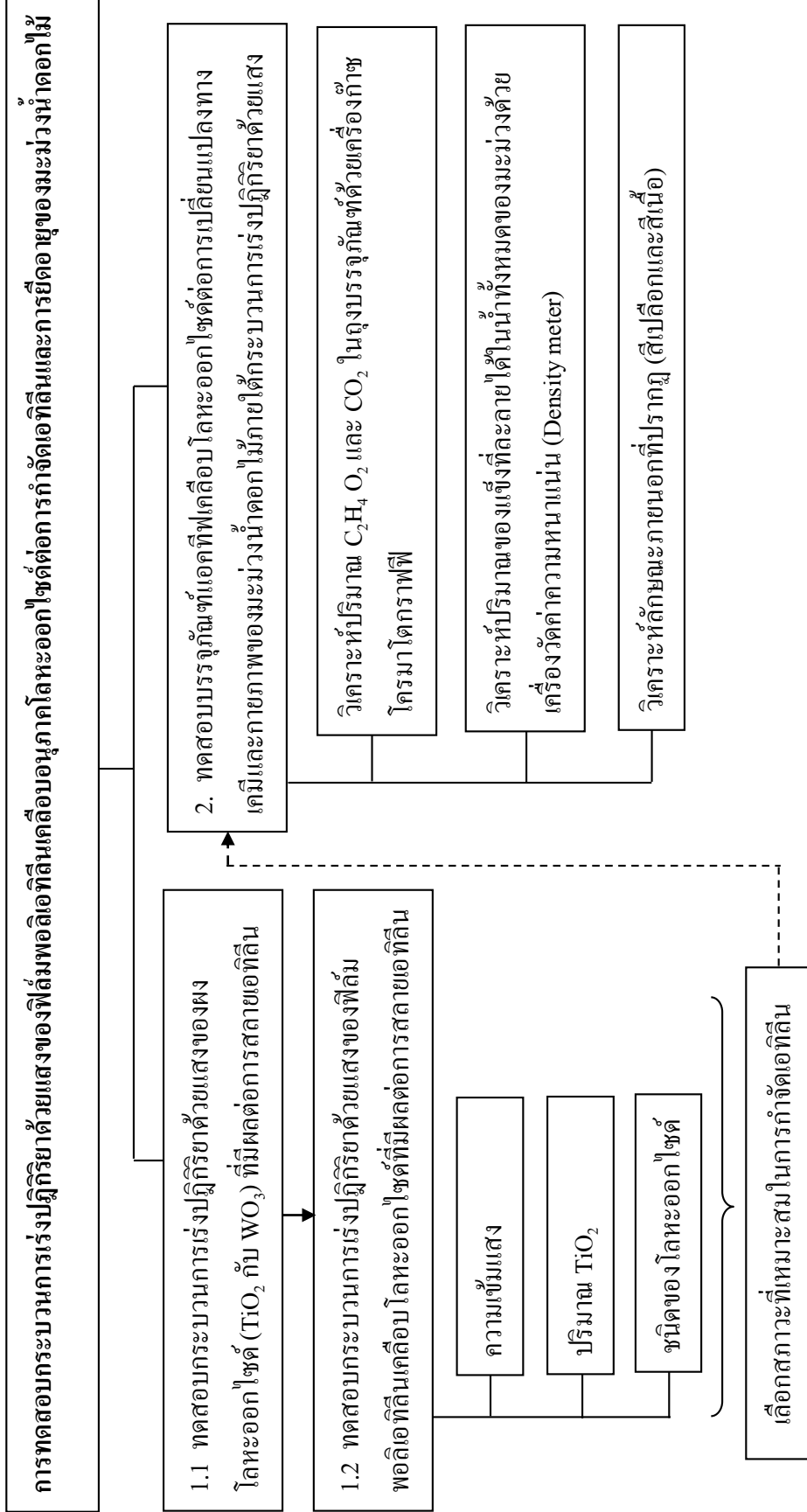
บริษัท Dow Chemical Thailand Ltd. ประเทศไทย

วิธีการทดลอง

การวิจัยครั้งนี้ได้ทำการศึกษาการกำจัดเอทิลีนโดยใช้บรรจุภัณฑ์แอคทีฟที่มีโลหะออกไซด์ (TiO_2 และ WO_3) ด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง โดยเริ่มทดลองความเป็นไปได้ในการใช้ผงโลหะออกไซด์ จากนั้นนำผงโลหะออกไซด์เคลือบลงบนฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมและประสิทธิภาพของโลหะออกไซด์ต่อการกำจัดเอทิลีนด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง และนำโลหะออกไซด์ใช้ร่วมกับบรรจุภัณฑ์แอคทีฟ โดยขั้นตอนการทดลองถูกแบ่งออกเป็น 2 การทดลอง ดังภาพที่ 3-1

1. การทดสอบประสิทธิภาพในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของฟิล์มพอลิเอทิลีนเคลือบโลหะออกไซด์ที่มีผลต่อการสลายก๊าซเอทิลีน

2. การทดสอบประสิทธิภาพในการยืดอายุมะม่วงน้ำดอกไม้ด้วยบรรจุภัณฑ์แอคทีฟเคลือบด้วยอนุภาคโลหะออกไซด์ที่เลือกมาจากการทดลอง 1 โดยศึกษาคุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของมะม่วงน้ำดอกไม้ภายใต้กระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง



ภาพที่ 3-1 แผนภาพวิธีดำเนินการ

การเตรียมผงโลหะออกไซด์และฟิล์มพอลิเอทิลีนเคลือบด้วยอนุภาคโลหะออกไซด์

1. การเตรียมผง WO_3

1.1 ชั่งโซเดียมทังสเตต 1.0 กรัม ละลายในน้ำกลั่นปรับปริมาตรเป็น 10 มิลลิลิตร คนสารให้ละลายจนหมดเทสารละลายโซเดียมทังสเตตที่เตรียมไว้ลงในบีกเกอร์

1.2 หยดกรดไนตริกเข้มข้นร้อยละ 65 ที่หยดลงในสารละลาย ปริมาณ 20 มิลลิลิตร

1.3 ล้างตะกอนด้วยน้ำปราศจากไอออนประมาณ 10 ครั้ง

1.4 เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 2 มิลลิลิตร แล้วนำไปกวนบนเครื่องกวนสารเป็นเวลา 2 ชั่วโมง จะได้โซลทั้งสแตนด์ตรออกไซด์

1.5 เติมแอลกอฮอล์ 30 มิลลิลิตร และพอลิเอทิลีนไกลคอล 0.25 กรัม ใส่ในโซลทั้งสแตนด์ตรออกไซด์ (จากข้อ 1.4)

1.6 นำโซลทั้งสแตนด์ตรออกไซด์ (จากข้อ 1.5) ไปอบด้วยตู้อบสุญญากาศที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ได้เป็นผงทั้งสแตนด์ตรออกไซด์

2. การเตรียมฟิล์ม

นำฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (LDPE) ที่มีความหนา 36 ไมโครเมตร มาตัดเป็นแผ่นขนาด 7 x 9 เซนติเมตร ก่อนการเคลือบต้องทำความสะอาดถุงพลาสติก โดยล้างกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ นาน 30 นาที แล้วล้างด้วยน้ำปราศจากไอออน 2-3 ครั้ง เพื่อขจัดสารที่เคลือบติดอยู่ที่ผิวของฟิล์มให้หลุดออกไปและผึ่งให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง

3. การเตรียมสารละลาย TiO_2 -PEG

3.1 ผสมผง TiO_2 (Degussa P-25) 400 มิลลิกรัม ในน้ำปราศจากไอออน 5 มิลลิลิตร คนให้เข้ากันในบีกเกอร์ขนาด 500 มิลลิลิตร

3.2 นำ Polyethylene glycol (PEG) 25 มิลลิกรัม ผสมกับน้ำปราศจากไอออน 1 มิลลิลิตร ในบีกเกอร์ขนาด 50 มิลลิลิตร แล้วนำไปอัลตราโซนิกเป็นเวลา 15 นาที ให้เข้ากัน

3.3 นำสารที่เตรียมได้ในข้อ 2.1 กับ 2.2 มาผสมกัน และหยดสารลดแรงตึงผิว Triton X ลงไป 12 หยด เพื่อช่วยให้ TiO_2 กระจายตัวอยู่ในสารแขวนลอยได้ดีขึ้น

4. การสังเคราะห์ WO_3 ด้วยวิธีโซล-เจล

4.1 ชั่งโซเดียมทังสเตต 1.0 กรัม ละลายในน้ำกลั่นปรับปริมาตรเป็น 10 มิลลิลิตร คนสารให้ละลายจนหมดเทสารละลายโซเดียมทังสเตตที่เตรียมไว้ลงในบีกเกอร์

4.2 หยดกรดไนตริกเข้มข้นร้อยละ 65 ที่ละหยดลงในสารละลาย ปริมาณ 20 มิลลิลิตร

4.3 ล้างตะกอนด้วยน้ำปราศจากไอออนประมาณ 10 ครั้ง

4.4 เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 2 มิลลิลิตร แล้วนำไปกวนบนเครื่องกวนสารเป็นเวลา 2 ชั่วโมง จะได้โซลทั้งสเดนไตรออกไซด์

4.5 เติมแอลกอฮอล์ 30 มิลลิลิตร และพอลิเอทิลีนไกลคอล 0.25 กรัม ใส่ในโซลทั้งสเดนไตรออกไซด์ (จากข้อ 3.4)

4.6 หยดสารลดแรงตึงผิว Triton X ลงไป 12 หยด

5. การเตรียมสาร TiO_2 ร่วมกับ WO_3 แบบผสม

5.1 นำผง TiO_2 (Degussa P-25) 12.2 กรัม ผสมกับ โซลทั้งสเดนไตรออกไซด์ 0.5 ลิตร (จากข้อ 3) ในอัตราส่วน 20 : 1 โดยโมล คนให้เข้ากันในบีกเกอร์ขนาด 500 มิลลิลิตร

5.2 หยดสารลดแรงตึงผิว Triton X ลงไป 12 หยด

6. การเคลือบสารโลหะออกไซด์บนฟิล์มพอลิเอทิลีน

นำสารที่เตรียมได้ (จากข้อ 2 และ 3) เคลือบบนฟิล์มพอลิเอทิลีนด้วยวิธีการแบบจุ่ม (Dip-coating) โดยใช้เครื่องดึงฟิล์มที่มีอัตราเร็วในการเคลือบหรือดึงฟิล์มที่ความเร็ว 1 เซนติเมตร ต่อนาที ทั้งนี้สารละลาย TiO_2 -PEG ที่เตรียมไว้ในข้อ 2 จะเกิดการตกตะกอนได้ง่ายในขณะที่เคลือบฟิล์มจึงมีการกวนด้วยเครื่องกวนสารตลอดเวลา จากนั้นจึงนำฟิล์ม TiO_2 และฟิล์ม WO_3 ที่เคลือบเสร็จทิ้งไว้ให้แห้งเป็นเวลา 4 และ 8 ชั่วโมง ตามลำดับ ในส่วนของฟิล์ม TiO_2 ร่วมกับ WO_3 จะถูกเตรียมด้วย 2 วิธีการ คือ การเคลือบแบบผสมและการเคลือบแบบ 2 ชั้น การเคลือบแบบผสมทำโดยการผสมผง TiO_2 และสารละลาย WO_3 (จากข้อ 3) ผสมกันได้เป็นสาร TiO_2 และ WO_3 แบบผสม ดังข้อ 4 และจะต้องกวนสารตลอดเวลาเพื่อป้องกันการตกตะกอน เมื่อเคลือบเสร็จ ทิ้งไว้ให้แห้งเป็นเวลา 8 ชั่วโมง ส่วนการเคลือบแบบ 2 ชั้น จะทำการเคลือบ WO_3 (จากข้อ 3) เป็นชั้นที่หนึ่ง ทิ้งไว้ให้แห้งเป็นเวลา 8 ชั่วโมง ต่อมานำมาเคลือบทับด้วยสารละลาย TiO_2 -PEG (จากข้อ 2) ที่มีการกวนสารตลอดเวลา เป็นชั้นที่สอง จากนั้นทิ้งไว้ให้แห้งเป็นเวลา 4 ชั่วโมง

การทดสอบประสิทธิภาพกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของผงโลหะออกไซด์และฟิล์มพอลิเอทิลีนเคลือบด้วยอนุภาคโลหะออกไซด์ต่อการกำจัดเอทิลีน

บรรจุโลหะออกไซด์แบบผง (ผง TiO_2 Degussa P-25 และผง WO_3 ในหัวข้อที่ 1.6) ลงในงานเพาะเชื้อและแบบเคลือบฟิล์มลงในบรรจุภัณฑ์ LDPE เคลือบสามชั้นที่เคลือบชั้นนอกด้วยไนลอน (อากาศไม่สามารถแพร่ผ่านได้) ขนาด 10 x 18 เซนติเมตร ดังตารางที่ 3-1 ซึ่ลปิดผนึกถุงในสถานะสุญญากาศ หลังจากนั้นอัดอากาศที่มีก๊าซเอทิลีนมาตรฐานที่ความเข้มข้น 35 ppmv ปริมาตร 300 มิลลิลิตร โดยมีความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 40-45 เข้าไปในถุงพลาสติกจำนวน 8 ถุงต่อหนึ่งการทดลอง จากนั้นนำมาทดลองกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง โดยใช้แสง UVA (ความยาวคลื่น 365 นาโนเมตร) ที่อุณหภูมิห้อง (ความเข้มแสงที่ใช้ทดสอบ คือ 37 44 50 และ 59 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร) นำตัวอย่างแบบเคลือบฟิล์มมาตรวจปริมาณก๊าซต่าง ๆ ในถุงด้วยเครื่องก๊าซโครมาโตกราฟฟีทุก ๆ 2 วัน ครั้งละ 1 ถุงจนครบตามจำนวน และแบบผงตรวจทุก ๆ 1 ชั่วโมง ครั้งละ 1 ถุงจนครบตามจำนวน

ในการวิเคราะห์หาปริมาณก๊าซต่าง ๆ ด้วยเครื่องก๊าซโครมาโตกราฟฟี ใช้ชุดตรวจจับแบบ Flame ionization detector (FID) สำหรับก๊าซเอทิลีนและใช้ชุดตรวจจับ Thermal conductivity detector (TCD) สำหรับวิเคราะห์ก๊าซออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ โดยใช้อุณหภูมิของตู้อบ (oven temperature) ที่ 60 องศาเซลเซียส ในช่วง 30 วินาทีแรก จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิเป็น 150 องศาเซลเซียส โดยมีอัตราการเพิ่มอุณหภูมิที่ 50 องศาเซลเซียสต่อนาที และอยู่ที่อุณหภูมิสุดท้ายนี้เป็นเวลา 7 นาที ส่วนอุณหภูมิที่ใช้สำหรับชุดตรวจจับ (Detector) ชนิด TCD และ FID เท่ากับ 250 และ 300 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ซึ่งระบบการทำงานเป็นระบบที่ใช้ก๊าซฮีเลียมเป็นตัวนำพา (Carrier gas) โดยจะพาเอาก๊าซตัวอย่างไหลผ่าน capillary column ซึ่งสารที่แยกจากคอลัมน์นี้จะถูกตรวจวัดเป็นสัญญาณไฟฟ้าโดยชุดตรวจวัดและพื้นที่ใต้กราฟ และเทียบผลกับกราฟสอบเทียบ (Calibration curve) (แสดงการหากราฟสอบเทียบ ดังภาคผนวก ข) เพื่อเปลี่ยนพื้นที่ใต้กราฟเป็นความเข้มข้นของก๊าซต่าง ๆ

ตารางที่ 3-1 โลหะออกไซด์ที่บรรจุลงในบรรจุภัณฑ์ LDPE สามชั้น

โลหะออกไซด์	สถานะ
1. ไมใส่ฟิล์ม (ถุงเปล่า)	ฉายแสง UVA
2. ฟิล์มเปล่า 2 และ 5 แผ่น	ฉายแสง UVA
3. ฟิล์ม TiO ₂ 1 และ 2 แผ่น	ฉายแสง UVA/มีด
4. ฟิล์ม WO ₃ 5 แผ่น	ฉายแสง UVA/มีด
5. ผง TiO ₂ 0.5 กรัม	ฉายแสง UVA/มีด
6. ผง WO ₃ 0.25 กรัม	ฉายแสง UVA/มีด
7. ฟิล์ม TiO ₂ ร่วมกับ WO ₃ แบบผสม 2 แผ่น	ฉายแสง UVA
8. ฟิล์ม TiO ₂ ร่วมกับ WO ₃ แบบสองชั้น 5 แผ่น	ฉายแสง UVA

การทดสอบประสิทธิภาพในการยืดอายุมะม่วงน้ำดอกไม้ด้วยบรรจุภัณฑ์แอคทีฟเคลือบด้วยอนุภาคโลหะออกไซด์ที่มีผลต่อสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของมะม่วงภายใต้กระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง

นำแผ่นฟิล์มเคลือบโลหะออกไซด์ที่มีประสิทธิภาพดีที่สุดในการทดลอง 1 บรรจุลงในถุงฟิล์มพอลิเอทิลีนได้เป็นบรรจุภัณฑ์แอคทีฟ (Active packaging) จากนั้นนำผลมะม่วงน้ำดอกไม้มาจัดวางและล้างทำความสะอาดด้วยแอลกอฮอล์ร้อยละ 95 ผึ่งลมให้แห้ง และบรรจุผลมะม่วงลงในบรรจุภัณฑ์แอคทีฟเคลือบโลหะออกไซด์และในถุงบรรจุภัณฑ์ที่ไม่ใส่ฟิล์มเคลือบอนุภาคโลหะออกไซด์ ซึ่งเป็นสถานะควบคุม เพื่อเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของมะม่วงน้ำดอกไม้ จากนั้นนำบรรจุภัณฑ์ที่เตรียมไว้เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25±2 องศาเซลเซียส ที่มีความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 80-85 วิเคราะห์ก๊าซเอทิลีน ออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์และวิเคราะห์คุณภาพทางเคมีและทางกายภาพ ทำการตรวจสอบทุก ๆ 2 วัน ครั้งละ 1 ถุงจนครบตามจำนวน จนกระทั่งผลสุกเต็มที่หรือพบอาการเน่าเสีย โดยแบ่งทำการวิเคราะห์ ดังนี้

1. วิเคราะห์ปริมาณก๊าซเอทิลีน ออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ในถุงบรรจุภัณฑ์ตรวจตัวอย่างก๊าซในบรรจุภัณฑ์แอคทีฟโดยฉีดเข้าเครื่องก๊าซโครมาโตกราฟี นำผลที่ได้เป็นพื้นที่ใต้กราฟมาคำนวณหาปริมาณเอทิลีนในหน่วย ppm และหาปริมาณร้อยละของออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์

2. วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางเคมีและทางกายภาพของมะม่วงน้ำดอกไม้

2.1 การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของมะม่วงน้ำดอกไม้ สังเกตการเปลี่ยนแปลงลักษณะภายนอกที่ปรากฏ จากการเปลี่ยนแปลงสีเปลือกและเนื้อของมะม่วง โดยเทียบกับตารางที่ 2-3

2.2 การเปลี่ยนแปลงทางเคมี วิเคราะห์ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ในน้ำทั้งหมดของมะม่วงน้ำดอกไม้ ด้วยเครื่องวัดค่าความหนาแน่น โดยนำมะม่วงมาปอกเปลือกและนำเนื้อมาปั่นให้ละเอียด คั้นน้ำมะม่วงด้วยผ้าขาวบางแล้วกรองน้ำคั้นผ่านกระชอนอีกครั้งหนึ่ง นำน้ำคั้นที่ได้ทิ้งให้ตกตะกอนเป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นนำน้ำมะม่วงที่ผ่านการตกตะกอนแล้วมาเจือจางกับน้ำปราศจากไอออนเป็นร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก และนำไปทดสอบปริมาณของแข็งที่ละลายได้ในน้ำทั้งหมดด้วยเครื่องวัดค่าความหนาแน่นจะได้ค่าเป็นองศาบริกซ์

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผล

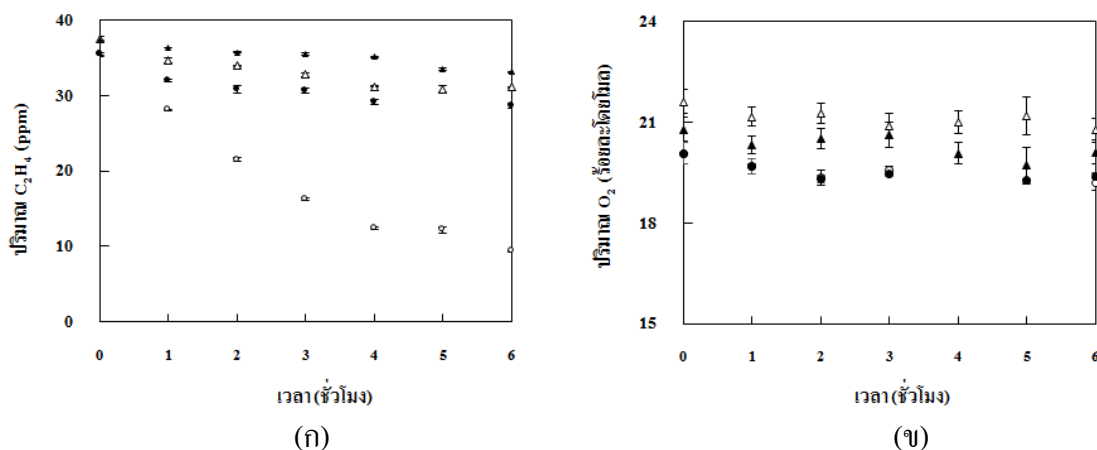
งานวิจัยนี้ศึกษาการกำจัดเอทิลีน โดยใช้บรรจุภัณฑ์แอคทีฟที่มีโลหะออกไซด์ (TiO_2 และ WO_3) ด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง โดยเริ่มทำการทดลองความเป็นไปได้จากการใช้ผงโลหะออกไซด์ จากนั้นนำผงโลหะออกไซด์เคลือบลงบนฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 2 การทดลอง ดังนี้ การทดลอง 1 เป็นการทดสอบประสิทธิภาพกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของฟิล์มพอลิเอทิลีนเคลือบด้วยอนุภาคโลหะออกไซด์ต่อการกำจัดเอทิลีน โดยปัจจัยที่ทำการศึกษา ได้แก่ ผลกระทบของความเข้มแสง UVA ผลกระทบของปริมาณ TiO_2 และประสิทธิภาพในการกำจัดเอทิลีนของฟิล์ม TiO_2 , WO_3 และ TiO_2 ร่วมกับ WO_3 และการทดลอง 2 ศึกษาประสิทธิภาพการยืดอายุของมะม่วงน้ำดอกไม้ด้วยบรรจุภัณฑ์แอคทีฟเคลือบด้วยอนุภาคโลหะออกไซด์

การทดสอบประสิทธิภาพกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของฟิล์มพอลิเอทิลีนเคลือบด้วยอนุภาคโลหะออกไซด์ต่อการกำจัดเอทิลีน

1. การศึกษาความเป็นไปได้ในการกำจัดเอทิลีนด้วยผงโลหะออกไซด์

งานวิจัยนี้ศึกษาความเป็นไปได้ในการกำจัด C_2H_4 ด้วยโลหะออกไซด์ TiO_2 และ WO_3 โดยนำผงโลหะออกไซด์ดังกล่าว 0.5 และ 0.25 g ตามลำดับ (การคำนวณปริมาณผง WO_3 ดังภาคผนวก ก) บรรจุลงในบรรจุภัณฑ์ที่มี C_2H_4 35 ppm ในอากาศและทำการทดลองในสภาวะมืดและสภาวะฉายแสง UVA ที่ความเข้มแสง $37 \mu\text{w}/\text{cm}^2$ ผลการทดลอง ดังภาพที่ 4-1 (ก-ข) พบว่าภายในเวลา 6 ชั่วโมง ผง TiO_2 และ WO_3 ในสภาวะมืด สามารถกำจัด C_2H_4 ได้เพียง 13.8 และ 16.8 ppm/g ตามลำดับ ขณะที่สภาวะฉายแสง UVA พบว่า ผง TiO_2 และ WO_3 สามารถกำจัด C_2H_4 ได้สูงถึง 52.3 และ 26.0 ppm/g ตามลำดับ ดังภาพที่ 4-1 (ก) แสดงให้เห็นว่าในสภาวะฉายแสง UVA ผง TiO_2 และ WO_3 สามารถกำจัด C_2H_4 ได้ดีกว่าในสภาวะมืดถึง 3.8 และ 1.55 เท่า ในขณะที่ C_2H_4 ลดลงนั้น พบว่า มีการลดลงของ O_2 ด้วย ดังภาพที่ 4-1 (ข) โดยผง TiO_2 และ WO_3 ในสภาวะมืด มีการลดลงของ O_2 เท่ากันร้อยละ 0.68 ขณะที่สภาวะฉายแสง UVA พบว่า ผง TiO_2 และ WO_3 มีการลดลงของ O_2 มากขึ้นเล็กน้อย เท่ากับร้อยละ 0.87 และ 0.84 ตามลำดับ จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการลดลงของปริมาณ C_2H_4 และ O_2 ในบรรจุภัณฑ์ นั้นเกิดมาจาก 2 กระบวนการ คือ กระบวนการการดูดซับของผง TiO_2 และ WO_3 ในสภาวะมืด และกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง

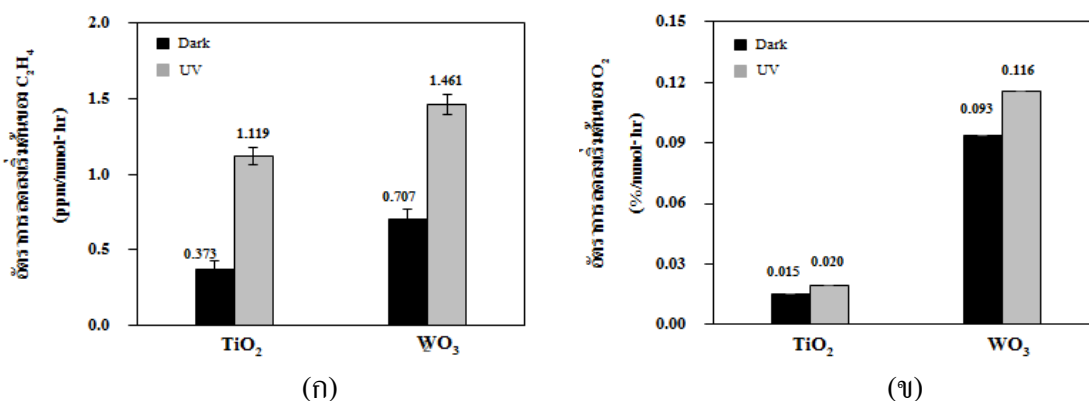
จากการทดลองในสภาวะฉายแสง UVA โดยเห็นได้ว่ากระบวนการเร่งปฏิกิริยาคด้วยแสง มีประสิทธิภาพในการลด C_2H_4 ได้ดีกว่ากระบวนการดูดซับ โดยเฉพาะในกรณี TiO_2 ซึ่งสามารถลด C_2H_4 ได้ดีกว่า WO_3 ถึง 2.01 เท่า ในขณะที่ประสิทธิภาพในการดูดซับของ WO_3 สูงกว่า TiO_2 เป็น 1.22 เท่า



ภาพที่ 4-1 ปริมาณก๊าซต่างๆ ในบรรจุภัณฑ์ภายใต้กระบวนการเร่งปฏิกิริยาคด้วยแสงของผง TiO_2 และ WO_3 ที่สภาวะฉายแสง UVA และสภาวะมืด (ก) C_2H_4 และ (ข) O_2 (สภาวะ \circ : TiO_2 -UV \bullet : TiO_2 -Dark Δ : WO_3 -UV \blacktriangle : WO_3 -Dark)

เมื่อพิจารณาอัตราการลดลงเริ่มต้นของ C_2H_4 ดังภาพที่ 4-2 (ก) พบว่า ในสภาวะฉายแสง UVA และสภาวะมืด ผง TiO_2 มีอัตราการลดลงเริ่มต้นของ C_2H_4 เป็น 1.119 และ 0.373 ppm/mmol·hr ตามลำดับ และผง WO_3 มีอัตราการลดลงเริ่มต้นของ C_2H_4 เท่ากับ 1.461 และ 0.707 ppm/mmol·hr ตามลำดับ และจากภาพที่ 4-2 (ข) แสดงอัตราการลดลงเริ่มต้นของ O_2 พบว่า ในสภาวะฉายแสง UVA และสภาวะมืดของผง TiO_2 อัตราการลดลงเริ่มต้นของ O_2 มีค่าเท่ากับ 0.020 และ 0.015 %/mmol·hr ตามลำดับ ขณะที่ผง WO_3 มีอัตราการลดลงเริ่มต้นของ O_2 เท่ากับ 0.116 และ 0.093 %/mmol·hr ตามลำดับ จากผลดังกล่าวพบว่า อัตราการลดลงเริ่มต้นของ C_2H_4 และ O_2 ด้วยผง TiO_2 ในสภาวะฉายแสง UVA มีค่าสูงกว่าในสภาวะมืดถึง 3.00 และ 1.33 เท่า ซึ่งคิดเป็นร้อยละของอัตราการลดลงเริ่มต้นของ C_2H_4 และ O_2 ด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาคด้วยแสง เท่ากับ 66.67 และ 25.00 และคิดเป็นร้อยละของอัตราการลดลงเริ่มต้นของ C_2H_4 และ O_2 ด้วยการดูดซับเท่ากับ 33.33 และ 75.00 ตามลำดับ (การคำนวณร้อยละของอัตราการลดลงเริ่มต้นดังกล่าวจาก ค) ขณะที่ผง WO_3 มีอัตราการลดลงเริ่มต้นของ C_2H_4 และ O_2 สูงกว่าในสภาวะมืดเป็น 2.07 และ 1.25 เท่า โดยคิด

เป็นร้อยละของอัตราการลดลงเริ่มต้นของ C_2H_4 และ O_2 ด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง เท่ากับ 51.61 และ 19.83 และคิดเป็นร้อยละของอัตราการลดลงเริ่มต้นของ C_2H_4 และ O_2 ด้วยการดูดซับเท่ากับ 48.39 และ 80.17 อัตราการลดลงเริ่มต้นนี้ ยืนยันผลสรุปที่ว่า WO_3 มีอัตราการลดลงเริ่มต้นของ C_2H_4 และ O_2 ด้วยการดูดซับได้สูงกว่า ผง TiO_2 แต่มีอัตราการลดลงเริ่มต้นของ C_2H_4 และ O_2 ด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง ได้ต่ำกว่า ผง TiO_2 จากการทดลองดังกล่าว สอดคล้องกับงานวิจัยของ Lin et al. (2008) ที่ TiO_2 สามารถกำจัด 4-chlorophenol (4-CP) และ สารอินทรีย์คาร์บอนรวม (TOC) ได้สูงกว่า WO_3 ภายใต้กระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง เนื่องจาก TiO_2 มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงกว่า WO_3 ถึง 54 เท่า อาจส่งผลให้ TiO_2 มีบริเวณเร่งในการเกิดกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงต่อการกำจัด C_2H_4 ได้สูงกว่า WO_3 ส่วนในกระบวนการดูดซับนั้น สาเหตุที่ WO_3 มีความสามารถในการดูดซับ C_2H_4 มากกว่า TiO_2 นั้นเนื่องจาก WO_3 มีศักย์ไฟฟ้าเชิงพื้นผิวในสภาพกรดมากกว่า ทำให้ WO_3 มีสภาพขั้วเป็นบวกมาก ซึ่งจะช่วยให้การดูดซับมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Sun et al. (2015); Bojinova et al. (2017)



ภาพที่ 4-2 อัตราการลดลงเริ่มต้นของการเปลี่ยนแปลงปริมาณก๊าซภายในบรรจุภัณฑ์ด้วยผง TiO_2 และผง WO_3 ที่สภาวะฉายแสงและสภาวะมืด (ก) C_2H_4 และ (ข) O_2

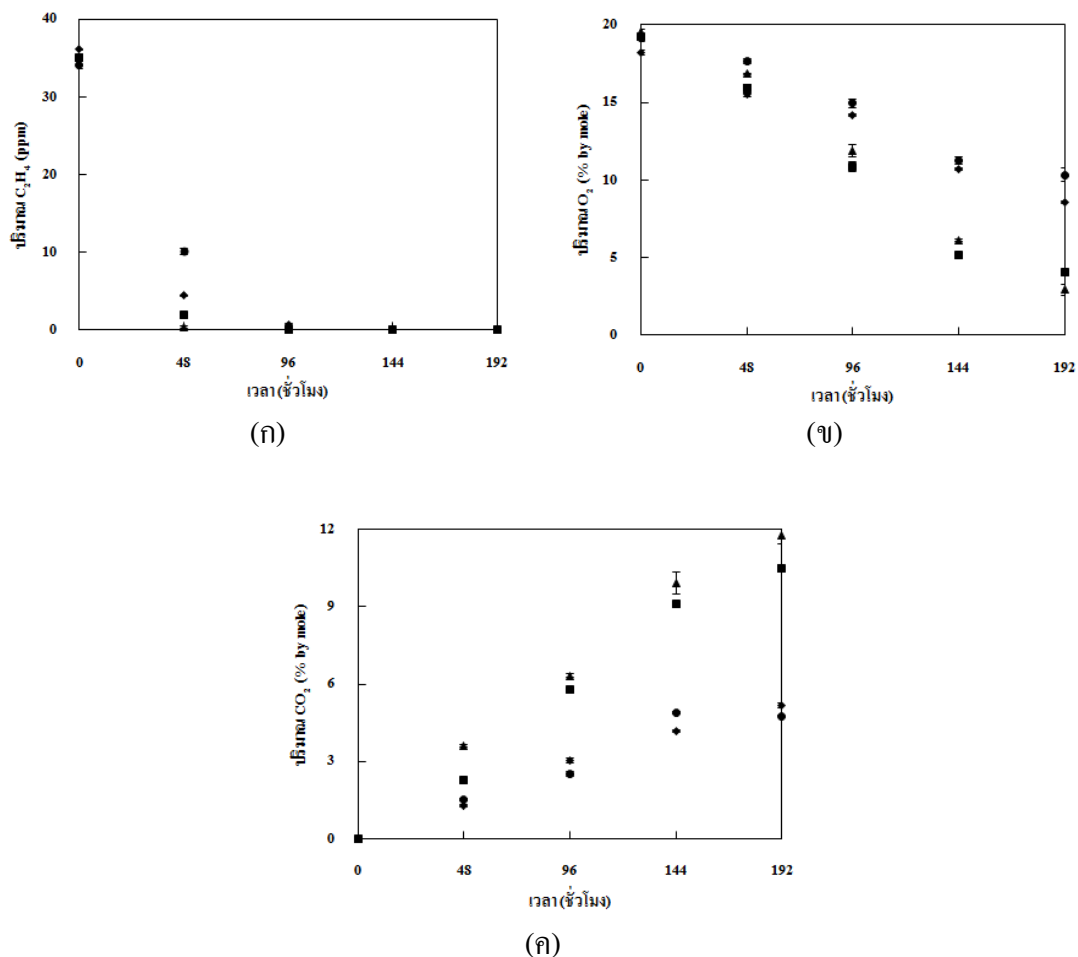
จากการทดลองผง TiO_2 และ WO_3 ในสภาวะฉายแสง UVA และสภาวะมืด พบว่า ผง TiO_2 มีการกำจัด C_2H_4 และ O_2 ในสภาวะฉายแสง UVA เท่ากับ 26.1 ppm และร้อยละ 0.87 ตามลำดับ และในสภาวะมืด C_2H_4 และ O_2 ลดลงเท่ากับ 6.9 ppm และร้อยละ 0.68 ซึ่งคิดเป็นการลดลงด้วยกระบวนการดูดซับ ดังนั้น C_2H_4 และ O_2 ที่ลดลงด้วยปฏิกิริยาเกิดกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง ในบรรจุภัณฑ์จึงคิดเป็น 19.2 ppm และร้อยละ 0.19 จากการเกิดกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง พบว่า หาก C_2H_4 มีการสลายตัว 19.2 ppm จะต้องใช้ O_2 ในการเกิดปฏิกิริยา 38.4 ppm และเกิดเป็น CO_2 38.4 ppm หรือคิดเทียบในหน่วยร้อยละ พบว่า O_2 ควรลดลงเพียงร้อยละ 0.0038 และเกิดเป็น CO_2 ร้อยละ 0.0038 แต่พบว่า O_2 ที่ลดลงในการทดลองมีค่าสูงถึงร้อยละ 0.16 หรือลดลงมากกว่าที่ต้องลดจริงถึง 50 เท่า ส่วน CO_2 ในการทดลองตรวจไม่พบหรือเกิดในปริมาณน้อยมาก ทั้งนี้เป็นเพราะเครื่องตรวจสอบก๊าซ CO_2 สามารถตรวจ CO_2 พบได้ที่มีความเข้มข้นต่ำสุดเพียงร้อยละ 0.5 เท่านั้น ส่งผลให้ CO_2 ที่ควรเกิดขึ้นร้อยละ 0.0038 ตรวจไม่พบในบรรจุภัณฑ์ ดังนั้นจึงสันนิษฐานได้ว่าปริมาณ O_2 ที่ลดลงมากนั้นอาจเกิดปฏิกิริยาอื่น ๆ ได้ ซึ่งจะอธิบายต่อไปในหัวข้อที่ 3

จากการศึกษาความเป็นไปได้ในการกำจัด C_2H_4 ด้วยโลหะออกไซด์ของผง TiO_2 และผง WO_3 ในสภาวะฉายแสง UVA และสภาวะมืด ในหัวข้อที่ 1 พบว่า ผง TiO_2 และ WO_3 ต่างก็สามารถเกิดกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงในการกำจัด C_2H_4 ได้ แต่ผง TiO_2 เกิดกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงได้ดีกว่าผง WO_3 และเกิดชัดเจนกว่า เพราะผง TiO_2 สามารถกำจัด C_2H_4 ได้สูงกว่า WO_3 ถึง 2.01 เท่า จึงเลือกโลหะออกไซด์ TiO_2 มาทำการทดลอง เพื่อศึกษาสภาวะที่มีประสิทธิภาพในการเกิดกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง โดยทำการศึกษาผลกระทบของความเข้มแสง UVA ในหัวข้อที่ 2 และผลกระทบของปริมาณ TiO_2 ในรูปแบบฟิล์ม ในหัวข้อที่ 3

2. ผลกระทบของความเข้มแสงที่ส่งผลต่อการกำจัดเอทิลีนของกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง

ผลของความเข้มแสงต่อกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของฟิล์ม TiO_2 ที่ปริมาณ 3.8 mg ดังภาพที่ 4-3 (ก-ค) พบว่า เมื่อความเข้มแสงสูงขึ้น ปริมาณ C_2H_4 และ O_2 ในบรรจุภัณฑ์มีค่าลดลง ดังภาพที่ 4-3 (ก) และ 4-3 (ข) ตามลำดับ ในขณะที่ CO_2 เพิ่มขึ้น ดังภาพที่ 4-3 (ค) โดยความเข้มแสงที่ $59 \mu\text{w}/\text{cm}^2$ สามารถกำจัด C_2H_4 ได้หมดในเวลา 48 ชั่วโมง ขณะที่ความเข้มแสงที่ 37 44 และ $50 \mu\text{w}/\text{cm}^2$ ยังคงมี C_2H_4 เหลืออยู่เพียง 10.1 4.4 และ 2 ppm ตามลำดับ และจะถูกกำจัดหมดในเวลา 96 ชั่วโมง ถึงแม้ว่าที่ความเข้มแสง $59 \mu\text{w}/\text{cm}^2$ จะกำจัด C_2H_4 ด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง จนหมดแล้วก็ตาม แต่ปริมาณของ O_2 ยังคงมีการลดลงอย่างต่อเนื่องและ CO_2 นั้นยังมีปริมาณเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน ทำให้ทราบว่ายังมีการเกิดกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง

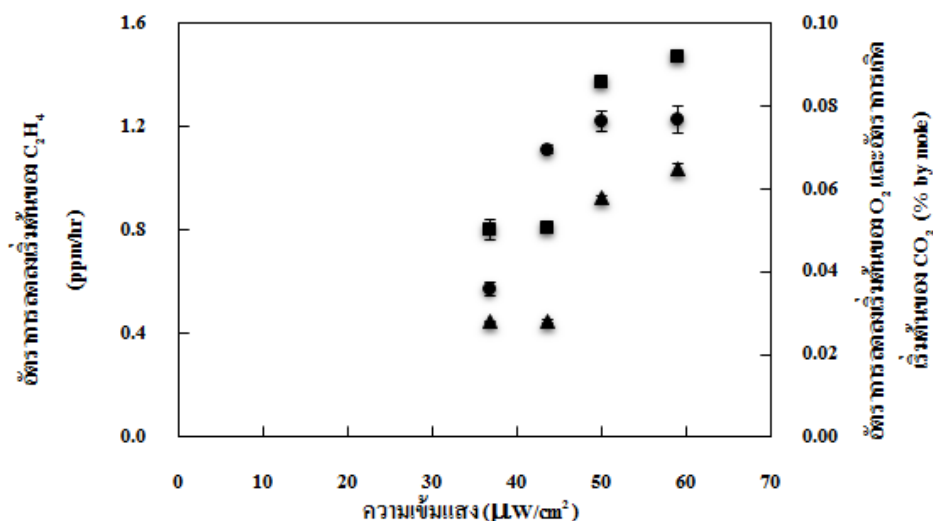
อย่างต่อเนื่อง ทั้งนี้เป็นเพราะเกิดการสลายตัวของบรรจุภัณฑ์ภายใต้แสง UVA ซึ่งจะกล่าวถึงต่อไป
ในหัวข้อ 3



ภาพที่ 4-3 ปริมาณก๊าซต่างๆ ในบรรจุภัณฑ์ภายใต้กระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงที่ความเข้มแสงต่าง ๆ (ก) C_2H_4 (ข) O_2 และ (ค) CO_2
(ความเข้มแสง \blacklozenge : $37 \mu w/cm^2$ \bullet : $44 \mu w/cm^2$ \blacksquare : $50 \mu w/cm^2$ \blacktriangle : $59 \mu w/cm^2$)

เมื่อพิจารณาอัตราเริ่มต้นของการเปลี่ยนแปลงก๊าซชนิดต่าง ๆ ในบรรจุภัณฑ์ ดังภาพที่ 4-4 พบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มแสงจาก 37 เป็น $44 \mu w/cm^2$ อัตราการลดลงเริ่มต้นของ C_2H_4 มีค่าเพิ่มสูงขึ้น 1.94 เท่า ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.11 ppm/hr นอกจากนี้อัตราการลดลงเริ่มต้นของ O_2 และอัตราการเกิดเริ่มต้นของ CO_2 มีค่าใกล้เคียงกัน มีค่าเป็น 0.05 และ 0.03 %/hr แต่ในช่วงความเข้มแสงที่สูงกว่านี้อัตราการลดลงเริ่มต้นของ C_2H_4 มีค่าใกล้เคียงเดิม (การหาอัตราเริ่มต้นดังกล่าวพบที่ ก)

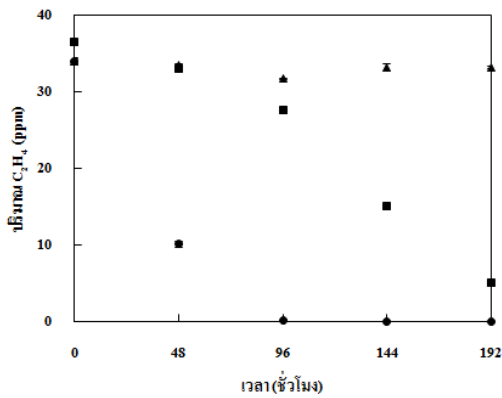
จากผลการทดลอง พบว่า ในการศึกษาผลกระทบของความเข้มแสงที่ความเข้มแสง สูง ๆ ประสิทธิภาพในการกำจัด C_2H_4 สามารถกำจัดได้ดี จึงไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงของ C_2H_4 ดังนั้นในการศึกษาจึงจะเลือกใช้ความเข้มแสงต่ำ ๆ ที่ความเข้มแสง $37 \mu W/cm^2$ เพื่อที่จะสามารถศึกษาและสังเกตการเปลี่ยนแปลงปริมาณของ C_2H_4 ภายในบรรจุภัณฑ์ในการทดลองต่อไป



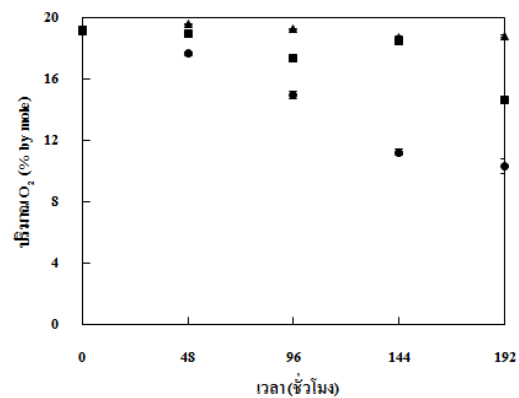
ภาพที่ 4-4 อัตราเริ่มต้นของการเปลี่ยนแปลงปริมาณก๊าซภายในบรรจุภัณฑ์ที่ความเข้มแสงต่าง ๆ (ก๊าซ \blacktriangle : CO_2 \blacksquare : O_2 \bullet : C_2H_4)

3. ผลกระทบของปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ส่งผลต่อการกำจัดเอทิลีนของกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง

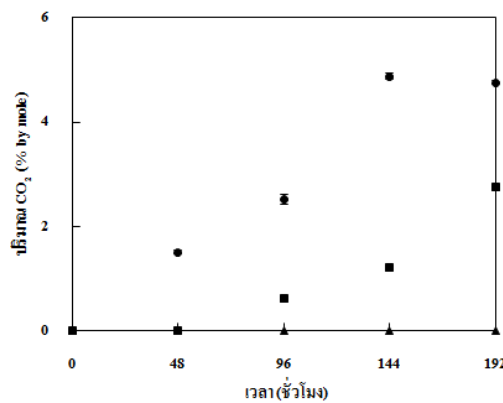
ภาพที่ 4-5 (ก-ค) แสดงปริมาณ C_2H_4 , O_2 และ CO_2 ที่เวลาต่าง ๆ ภายใต้กระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าในบรรจุภัณฑ์ที่ไม่มีการใส่แผ่นฟิล์มเคลือบ TiO_2 จะไม่มีการกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง โดยสังเกตได้จากปริมาณ C_2H_4 และ O_2 ยังคงเท่าเดิม โดยที่ไม่มี CO_2 เกิดขึ้น กระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงสัมพันธ์กับปริมาณ TiO_2 โดยพบว่า TiO_2 ปริมาณ 3.8 mg สามารถกำจัด C_2H_4 ได้หมดภายในชั่วโมงที่ 96 และ TiO_2 ปริมาณ 1.9 mg สามารถกำจัด C_2H_4 ได้เพียง 8.9 ppm ในขณะที่ C_2H_4 ลดลงนั้นพบว่า O_2 มีการลดลงและเกิดเป็น CO_2 ขึ้น เช่นเดียวกับการทดลองผลกระทบของความเข้มแสง ในภาพที่ 4-3 (ข) และ 4-3 (ค) ถึงแม้ว่า C_2H_4 จะสลายตัวหมดแล้ว แต่ O_2 ยังคงลดลงอย่างต่อเนื่องและ CO_2 ยังคงเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เช่นเดียวกับที่พบในการทดลองในหัวข้อ 2



(ก)



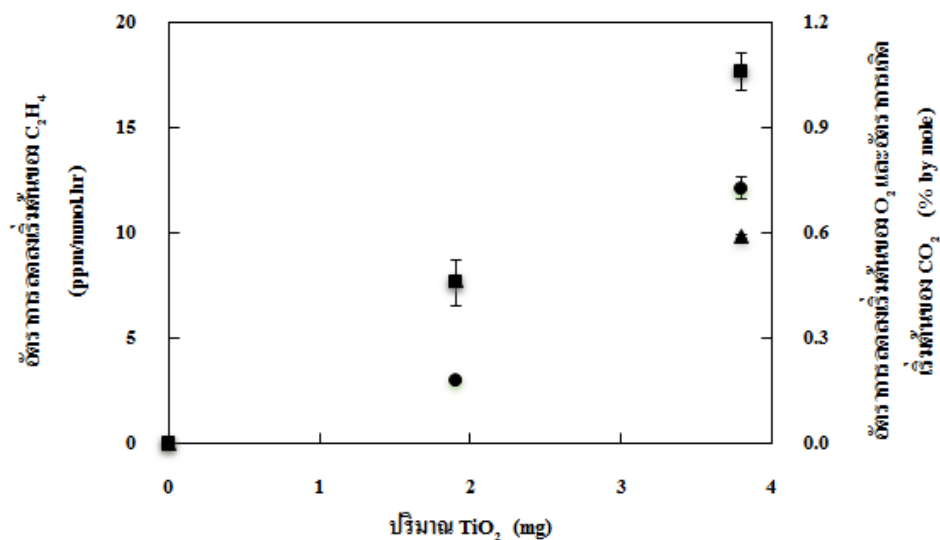
(ข)



(ค)

ภาพที่ 4-5 ปริมาณก๊าซต่าง ๆ ในบรรจุภัณฑ์ภายใต้กระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงที่ปริมาณ TiO₂ ต่าง ๆ (ก) C₂H₄ (ข) O₂ และ (ค) CO₂ (ปริมาณ TiO₂ ▲ : 0 mg ■ : 1.9 mg ● : 3.8 mg)

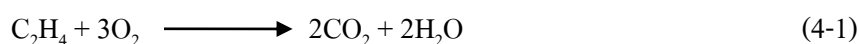
อัตราเริ่มต้นของการเปลี่ยนแปลงของปริมาณก๊าซต่าง ๆ ในบรรจุภัณฑ์ที่บรรจุ TiO₂ ในปริมาณต่าง ๆ ดังภาพที่ 4-6 พบว่า TiO₂ ที่ปริมาณ 0 1.9 และ 3.8 mg มีอัตราการลดลงเริ่มต้นของ C₂H₄ เป็น 0 3.0 และ 12.1 ppm/mmole·hr ตามลำดับ โดยพบว่า การเพิ่มปริมาณ TiO₂ เป็นสองเท่า นั้น ส่งผลให้อัตราเริ่มต้นของการสลายตัวของ C₂H₄ เพิ่มสูงขึ้นถึง 4.0 เท่า แสดงให้เห็นว่าปริมาณของ TiO₂ เป็นปัจจัยสำคัญต่อกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง ส่งผลให้อัตราการลดลงของ O₂ และอัตราการเกิดขึ้นของ CO₂ สูงขึ้นด้วย โดยมีอัตราการลดลงเริ่มต้นของ O₂ สูงขึ้นเป็น 2.3 เท่า มีค่าเท่ากับ 1.1 %/mmole·hr และอัตราการเกิดขึ้นเริ่มต้นของ CO₂ สูงขึ้น 1.3 เท่า มีค่าเท่ากับ 0.6 %/mmole·hr



ภาพที่ 4-6 อัตราเริ่มต้นของการเปลี่ยนแปลงปริมาณก๊าซภายในบรรจุภัณฑ์ที่ปริมาณ TiO_2 ต่าง ๆ (ก๊าซ ▲ : CO_2 ■ : O_2 ● : C_2H_4)

จากการศึกษาการกำจัด C_2H_4 ด้วยโลหะออกไซด์ TiO_2 และ WO_3 ในสภาวะฉายแสง UVA และสภาวะมืด ผลกระทบของปริมาณ TiO_2 และความเข้มแสงต่อกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง ในหัวข้อที่ผ่านมา (โดยยกตัวอย่างการเกิดกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงเพียง TiO_2 เนื่องจากสามารถตรวจพบปริมาณของ CO_2 ที่เกิดขึ้นได้) พบว่า เมื่อ C_2H_4 ถูกกำจัดด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงในบรรจุภัณฑ์ O_2 จะถูกใช้ไปในปฏิกิริยาและเกิด CO_2 ดังสมการ 4-1 แต่จากผลการทดลองที่ผ่านมาพบว่า ปริมาณ C_2H_4 ที่ถูกกำจัดนั้น ไม่สัมพันธ์กับปริมาณ O_2 ที่ลดลงและ CO_2 ที่เกิดขึ้น เนื่องจากปริมาณ O_2 ที่ลดลงและปริมาณ CO_2 ที่เกิดขึ้นนั้นมีปริมาณสูงกว่า C_2H_4 ที่ถูกกำจัดด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง จากผลการทดลองดังกล่าว จึงสันนิษฐานได้ว่า ยังคงมีกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง จากตารางที่ 4-1 พบว่า บรรจุภัณฑ์ที่มี C_2H_4 35 ppm ในอากาศ โดยบรรจุฟิล์ม TiO_2 1.9 mg ในสภาวะฉายแสง UVA ที่ความเข้มแสง $37 \mu\text{w}/\text{cm}^2$ และในสภาวะมืด ทั้งไว้เป็นเวลา 192 ชั่วโมง พบว่า มี C_2H_4 ลดลงเท่ากับ 30.3 และ 0.9 ppm โดยคิดเป็น C_2H_4 ที่ถูกกำจัดด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง 29.4 ppm และ O_2 ลดลงในสภาวะฉายแสง UVA และในสภาวะมืดเท่ากับร้อยละ 4.0 และ 1.2 โดยคิดเป็น O_2 ที่ถูกกำจัดด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงร้อยละ 2.8 จากการลดลงของ C_2H_4 29.4 ppm ซึ่งจะเกิดกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงกับ O_2 ส่งผลให้ O_2 ลดลงและเกิดเป็น CO_2 58.8 ppm หรือคิดเป็นร้อยละ 0.0059 จากผลการทดลองพบว่า O_2 มีการลดลงถึงร้อยละ 2.8 และเกิดเป็น CO_2 ถึงร้อยละ 2.8 ซึ่งไม่สอดคล้องกับการลดลงของ C_2H_4

จากผลการทดลองของ O_2 ที่ไม่เป็นไปตามทฤษฎีดังกล่าว จึงได้ทำการทดลองเพื่อให้ทราบถึงปัจจัยที่ส่งผลต่อปริมาณ O_2 และ CO_2 ในบรรจุภัณฑ์ โดยทำการทดลองนำอากาศบรรจุลงในบรรจุภัณฑ์ LDPE ที่มีฟิล์มไม่เคลือบโลหะออกไซด์ ทำการทดลองในสถานะฉายแสง UVA ที่ความเข้มแสง $37 \mu\text{w}/\text{cm}^2$ เป็นเวลา 192 ชั่วโมง แสดงผลการทดลองดังตารางที่ 4-2 พบว่า เมื่อนำบรรจุภัณฑ์ที่มีอากาศฉายแสง UVA พบว่า น้ำหนักของบรรจุภัณฑ์ลดลงหรือสลายไป 4.57 mg และเมื่อตรวจ สอบก๊าซภายในบรรจุภัณฑ์ พบก๊าซไฮโดรคาร์บอนบางชนิดขึ้น ซึ่งมีพื้นที่ใต้กราฟในโครมาโตแกรมของ FID เป็น 11,319 ดังภาพที่ 4-7 และไม่พบการเปลี่ยนแปลงของปริมาณ O_2 จากการลดลงของน้ำหนักบรรจุภัณฑ์ดังกล่าว จึงสันนิษฐานได้ว่าก๊าซไฮโดรคาร์บอนชนิดใหม่ที่เกิดขึ้นนี้ เกิดมาจากการสลายตัวของบรรจุภัณฑ์ นอกจากนี้ยังพบว่า ฟิล์มในบรรจุภัณฑ์มีการสลายตัวด้วย จากการคำนวณ (ดังภาคผนวก ก) พบว่า หากบรรจุภัณฑ์ LDPE ที่บรรจุฟิล์มมีการสลายตัว 4.57 mg (โดยคิดเทียบน้ำหนักบรรจุภัณฑ์ LDPE ที่สลายตัวมีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักเพียงอย่างเดียว) พบว่า น้ำหนักบรรจุภัณฑ์ LDPE ที่สลายตัวจะเปลี่ยนเป็นก๊าซที่มีองค์ประกอบของคาร์บอนประมาณ 0.38 mmol ในบรรจุภัณฑ์ หากเกิดกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงสมบูรณ์จะต้องใช้ O_2 ในการเกิดปฏิกิริยาและเกิดเป็น CO_2 ประมาณ 0.38 mmol และจากผลการเกิดกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงฟิล์ม TiO_2 1.9 mg พบว่า มีการลดลงของ O_2 และการเกิดขึ้นของ CO_2 ร้อยละ 2.8 ซึ่งคิดเป็น O_2 ที่ลดลงและ CO_2 ที่เกิดขึ้นด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง 0.34 mmol ในบรรจุภัณฑ์ จากผลดังกล่าวทำให้ทราบว่าน้ำหนักบรรจุภัณฑ์ที่สลายตัวไปสอดคล้องกับปริมาณ O_2 ที่ลดลงและ CO_2 ที่เกิดขึ้นในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าสาเหตุที่ปริมาณ O_2 ที่ลดลงและ CO_2 ที่เกิดขึ้นในบรรจุภัณฑ์สูงกว่าการเกิดกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง กับ C_2H_4 เป็นเพราะเกิดกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงกับก๊าซที่เกิดจากการสลายตัวของบรรจุภัณฑ์

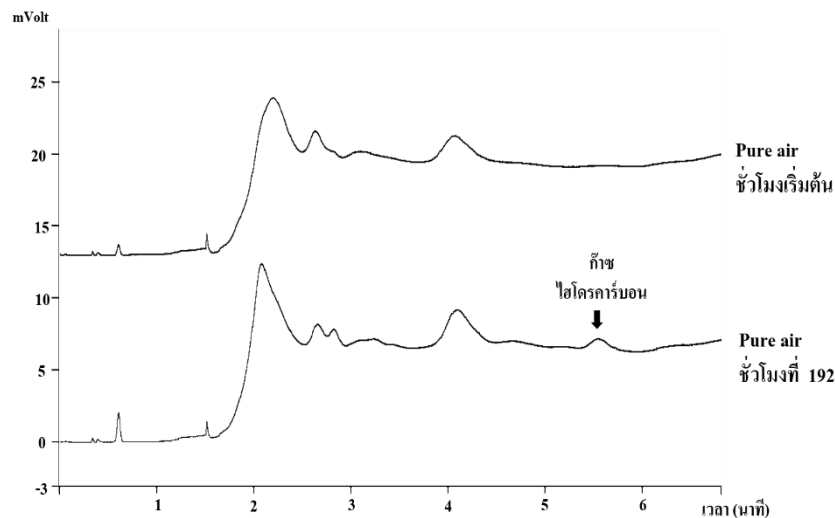


ตารางที่ 4-1 การเปลี่ยนแปลงของบรรจุภัณฑ์ที่มี C₂H₄ 35 ppm บรรจุฟิล์ม TiO₂ 1.9 mg

สถานะของบรรจุภัณฑ์	ร้อยละ C ₂ H ₄	ร้อยละ O ₂	ร้อยละ CO ₂	พื้นที่ได้กราฟของพีคก๊าซ ไฮโดรคาร์บอนบางชนิด
ชั่วโมงเริ่มต้น	35.5	18.7	0.0	0.0
หลังฉายแสง UVA 192 ชั่วโมง	5.2	14.7	2.8	0.0
การเปลี่ยนแปลงสุทธิ	-30.3	-4.0	+2.8	0.0
ชั่วโมงเริ่มต้น	38.2	20.9	0.0	0.0
หลังฉายแสง UVA 192 ชั่วโมง	37.3	19.7	0.0	0.0
การเปลี่ยนแปลงสุทธิ	-0.9	-1.2	0.0	0.0

ตารางที่ 4-2 การเปลี่ยนแปลงของอากาศในบรรจุภัณฑ์ที่มีฟิล์มไม่เคลือบโลหะออกไซด์

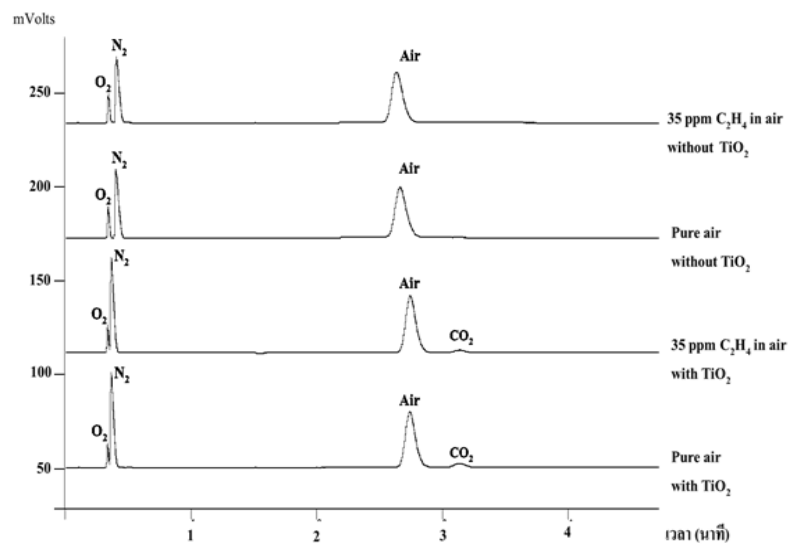
สถานะของบรรจุภัณฑ์	น้ำหนักถ่วง (g)	ร้อยละ O ₂	ร้อยละ CO ₂	พื้นที่ได้กราฟของพีคก๊าซ ไฮโดรคาร์บอนบางชนิด
ชั่วโมงเริ่มต้น	4.50444	20.5	0.0	0.0
หลังฉายแสง UVA 192 ชั่วโมง	4.49987	20.6	0.0	11319
การเปลี่ยนแปลงสุทธิ	-0.00457	+0.1	0.0	+11319



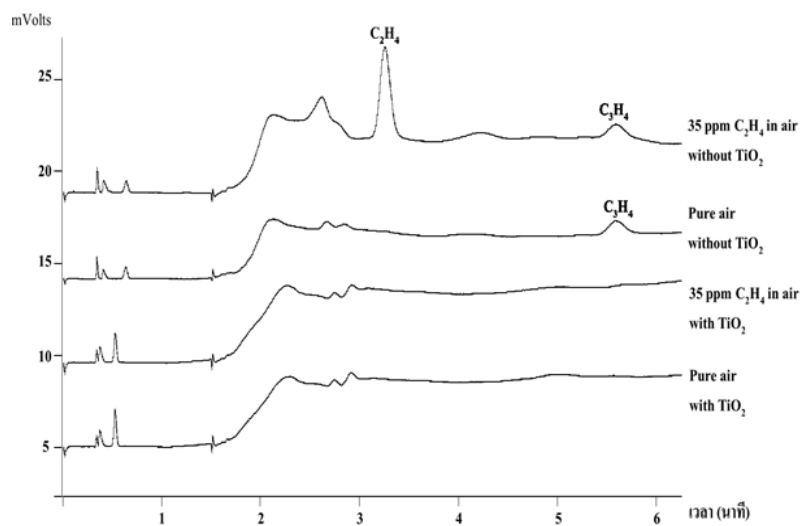
ภาพที่ 4-7 โครมาโตแกรมของก๊าซ FID

จากการศึกษาผลกระทบของปริมาณ TiO_2 และความเข้มแสงต่อกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง พบว่า เมื่อ C_2H_4 กับ O_2 เกิดกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง จะได้ผลิตภัณฑ์เป็น CO_2 และน้ำ แต่เมื่อ C_2H_4 ถูกกำจัดจนหมดพบว่า O_2 ยังมีการลดลงอย่างต่อเนื่องและเปลี่ยนเป็น CO_2 ซึ่งเพิ่มขึ้นตลอดการทดลอง ทำให้ทราบว่ายังมีกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง เกิดขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจากการสลายตัวของบรรจุภัณฑ์และฟิล์มที่เคลือบโลหะออกไซด์ภายใต้แสง UVA ดังภาพที่ 4-8 (ก) แสดงผลโครมาโตแกรม TCD ของกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง ภายหลังจากฉายแสง UVA ที่ความเข้มแสง $50 \mu\text{w}/\text{cm}^2$ เป็นเวลา 6 วัน พบว่า ในสภาวะที่บรรจุก๊าซ C_2H_4 35 ppm ผสมอากาศกับสภาวะที่บรรจุอากาศเพียงอย่างเดียว โดยไม่ใส่ฟิล์ม TiO_2 มีการเกิดขึ้นของพีค C_3H_4 ในโครมาโตแกรมของ FID ดังภาพที่ 4-8 (ข) และเมื่อทำการทดลองใส่แผ่น TiO_2 ลงไปในถุงที่สภาวะบรรจุก๊าซ C_2H_4 35 ppm ผสมอากาศกับสภาวะที่บรรจุอากาศเช่นเดิม พบว่า ไม่เกิดพีคของ C_3H_4 ดังนั้น จึงสรุปได้ว่า TiO_2 สามารถกำจัด C_3H_4 ได้ด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง นั่นอาจเป็นเหตุให้อัตราการลดลงเริ่มต้นของ C_2H_4 มีค่าคงที่ที่ความเข้มแสงในช่วง $50\text{-}59 \mu\text{w}/\text{cm}^2$ เนื่องจากปริมาณ C_3H_4 ที่เกิดมากขึ้นจากการสลายตัวของบรรจุภัณฑ์ที่เพิ่มมากขึ้นภายใต้สภาวะความเข้มแสงที่สูงขึ้น ทำให้ C_2H_4 มีโอกาสเกิดปฏิกิริยาลดลง และไม่พบ C_3H_4 เหลือในบรรจุภัณฑ์ ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยของ Hussain et al. (2010) ที่ TiO_2 มีอัตราการกำจัด C_3H_6 ที่สูงกว่า C_2H_4 เนื่องจาก C_3H_6 สามารถถูกดูดซับบน TiO_2 ได้ดีกว่า แม้ว่าจากผลการทดลองพบว่า เกิด C_3H_4 ภายในบรรจุภัณฑ์ แต่ C_3H_4 เป็นสารไฮโดรคาร์บอนพันธะสาม ซึ่งน่าจะมีความสามารถในการดูดซับบน TiO_2 ได้ดีกว่า C_3H_6 ซึ่งเป็นสารไฮโดรคาร์บอนพันธะคู่ จึงทำให้ C_3H_4 ที่เกิดจากการสลายตัว

ของถุงพลาสติกได้อย่างต่อเนื่อง เกิดการสลายตัว ทำให้ O_2 ภายในถุงลดลงและ CO_2 เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง



(ก)



(ข)

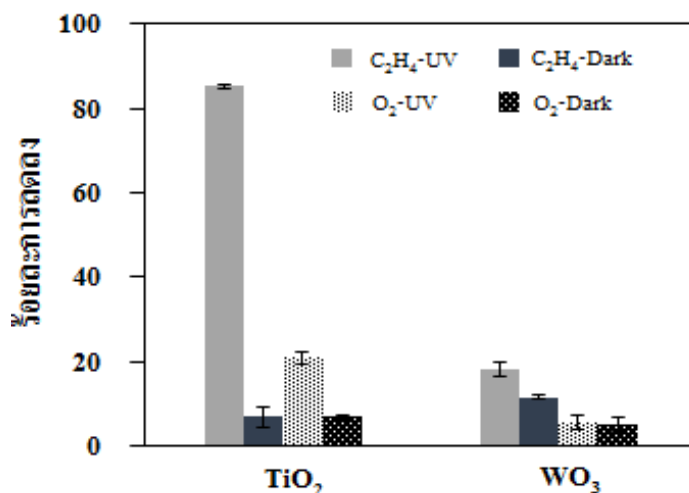
ภาพที่ 4-8 โครมาโตแกรมของก๊าซ (ก) TCD และ (ข) FID

4. ศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัด C_2H_4 ของฟิล์ม TiO_2 ฟิล์ม WO_3 และฟิล์ม TiO_2 ร่วมกับ WO_3

ในการศึกษานี้ได้ทำการเตรียมฟิล์ม TiO_2 และฟิล์ม WO_3 เพื่อศึกษาความแตกต่างในการทำงานของโลหะออกไซด์ภายใต้กระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง เนื่องจากโลหะออกไซด์ทั้งสองสามารถเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแบบใช้แสงได้ทั้งคู่ โดยใช้ปริมาณ TiO_2 บนฟิล์ม เท่ากับ 1.9 mg (0.024 mmol) และฟิล์ม WO_3 ปริมาณ 0.7 mg (0.003 mmol) (วิเคราะห์ปริมาณสารที่ติดบนฟิล์ม ดังภาคผนวก ก) สาเหตุที่ใช้ปริมาณสารทั้งสองไม่เท่ากัน ทั้งนี้เพราะ WO_3 ที่เตรียมด้วยวิธีโซล-เจล มีองค์ประกอบของ WO_3 ในปริมาณน้อย (ความเข้มข้นของ WO_3 คิดเป็นร้อยละ 0.48 โดยน้ำหนัก) จึงส่งผลให้ปริมาณ WO_3 ที่เคลือบติดบนแผ่นฟิล์มนั้นมีปริมาณน้อยตามไปด้วย

จากการศึกษาลักษณะการทำงานของ TiO_2 และ WO_3 เพื่อศึกษาความแตกต่างการทำงานของโลหะออกไซด์ทั้งสองและเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัด C_2H_4 ที่สภาวะฉายแสงและสภาวะมืดจากภาพที่ 4-9 แสดงร้อยละการลดลงของ C_2H_4 และ O_2 ด้วยฟิล์ม TiO_2 และฟิล์ม WO_3 ภายใต้การฉายแสง UVA ที่ความเข้มแสง $37 \mu W/cm^2$ และในสภาวะมืด ในเวลา 192 ชั่วโมง จากการทดลองพบว่า ในสภาวะการฉายแสง UVA และในสภาวะมืดของฟิล์ม TiO_2 มีร้อยละการลดลงของ C_2H_4 เท่ากับ 85.4 และ 7.0 ตามลำดับ และมีร้อยละการลดลงของ O_2 เป็น 21.07 และ 6.95 ตามลำดับ จากนั้นเมื่อทำการทดลองกับฟิล์ม WO_3 พบว่า มีร้อยละการลดลงของ C_2H_4 เท่ากับ 18.33 และ 11.65 ตามลำดับ และมีร้อยละการลดลงของ O_2 เป็น 5.72 และ 5.28 ตามลำดับ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการลดลงของปริมาณ C_2H_4 และ O_2 ที่หายไปนั้น เกิดมาจาก 2 กระบวนการ คือ กระบวนการการดูดซับจากการทดลองในสภาวะมืดและกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยการทดลองในสภาวะฉายแสง UVA โดยมีการลดลงของ C_2H_4 และ O_2 ด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของฟิล์ม TiO_2 ร้อยละ 78.45 และ 14.11 ตามลำดับ ทั้งนี้คิดเป็นร้อยละของการลดลงมีค่าเท่ากับ 91.8 และ 67.0 ตามลำดับ ขณะที่ฟิล์ม WO_3 มีการลดลงของ C_2H_4 และ O_2 ด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง เพียงร้อยละ 6.68 และ 0.44 ตามลำดับ โดยคิดเป็นร้อยละของการลดลงเท่ากับ 36.4 และ 7.6 ตามลำดับ ในส่วนของกระบวนการดูดซับ พบว่า ฟิล์ม TiO_2 มีการลดลงด้วยการดูดซับ C_2H_4 และ O_2 ร้อยละ 7.00 และ 6.95 ตามลำดับ โดยคิดเป็นร้อยละของการลดลงเท่ากับ 8.2 และ 33.0 ตามลำดับ ขณะที่ฟิล์ม WO_3 มีการลดลงด้วยการดูดซับ C_2H_4 และ O_2 ร้อยละ 11.65 และ 5.28 ตามลำดับ โดยคิดเป็นร้อยละของการลดลงเท่ากับ 63.6 และ 92.4 ตามลำดับ จากที่ได้กล่าวมาจะเห็นว่าฟิล์ม TiO_2 มีการลดลงของ C_2H_4 และ O_2 ด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงได้สูงกว่าฟิล์ม WO_3 เท่ากับร้อยละ 55.4 และ 59.3 ในขณะที่ฟิล์ม WO_3 มีการลดลงด้วยการดูดซับ C_2H_4 และ

O₂ ได้สูงกว่าฟิล์ม TiO₂ ร้อยละ 55.4 และ 59.3 จากการทดลองฟิล์ม TiO₂ และ WO₃ ดังกล่าวพบว่า สอดคล้องกับผลการทดลองของผง TiO₂ และ WO₃ ในหัวข้อที่ 1

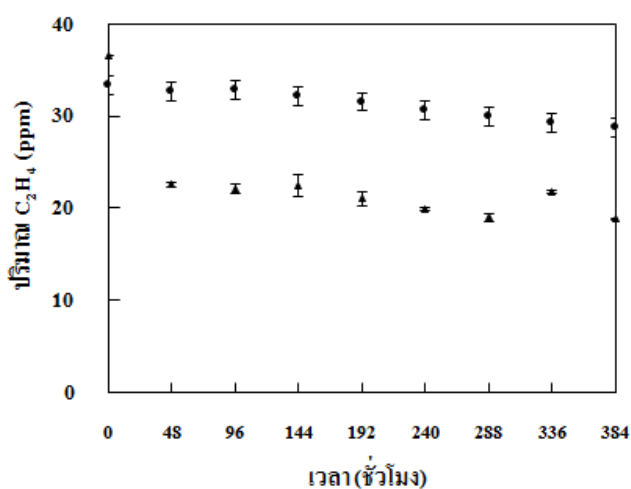


ภาพที่ 4-9 ร้อยละการลดลงของ C₂H₄ และ O₂ ด้วยฟิล์ม TiO₂ และ WO₃ ในสถานะต่าง ๆ

ก่อนทำการศึกษาฟิล์ม TiO₂/WO₃ จะศึกษาการเตรียมฟิล์ม TiO₂ ร่วมกับ WO₃ ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 วิธี ดังนี้ วิธีแรกนั้นเป็นการเตรียมฟิล์ม TiO₂ ร่วมกับ WO₃ ที่เคลือบสารจากการนำผง TiO₂ ผสมกับโซล WO₃ ในอัตราส่วนโดยโมล 20 : 1 โดยมีปริมาณ TiO₂ ที่คิดบนแผ่นฟิล์ม 1.6 mg (0.02 mmol) และ WO₃ 0.2 mg (0.001 mmol) เรียกว่า วิธีแบบผสม เมื่อนำฟิล์ม TiO₂ ร่วมกับ WO₃ แบบผสมทดสอบกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงต่อการกำจัด C₂H₄ ดังภาพที่ 4-6 พบว่าฟิล์มแบบผสมนั้นสามารถกำจัด C₂H₄ ได้เพียง 4.3 ppm ในเวลา 384 ชั่วโมง คิดเป็นอัตราการลดลงเริ่มต้น 0.3 ppm/mmol.hr จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าฟิล์มแบบผสมนั้นมีประสิทธิภาพในการกำจัด C₂H₄ ต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์ม TiO₂ พบว่า ฟิล์มแบบผสมมีอัตราการลดลงเริ่มต้นของ C₂H₄ ต่ำกว่าถึง 8.1 เท่า ถึงแม้ว่าจะมีปริมาณ TiO₂ ต่างกันเพียง 0.3 mg ก็ตาม ดังนั้นการเคลือบฟิล์ม TiO₂ กับ WO₃ แบบผสมในอัตราส่วน 20 : 1 ส่งผลให้กระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงมีประสิทธิภาพลดลง เนื่องจากการผสม TiO₂ กับ WO₃ แล้วเคลือบอาจจะส่งผลให้ WO₃ บดบังการทำงานของ TiO₂ จึงทำการเพิ่มปริมาณ TiO₂ ขึ้น โดยเปลี่ยนอัตราส่วนโดยโมลของผง TiO₂ : WO₃ เป็น 40 : 1 แต่พบว่าการเคลือบสารผสมระหว่างผง TiO₂ กับ WO₃ ในอัตราส่วนดังกล่าว ส่งผลให้ผง TiO₂ ที่อยู่ในรูปสารแขวนลอยตกตะกอน จึงเปลี่ยนวิธีในการเคลือบฟิล์ม TiO₂ ร่วมกับ WO₃ เป็นวิธีการเคลือบแบบ 2 ชั้น โดยเคลือบโซล WO₃ เป็นชั้นที่ 1 มีปริมาณ WO₃ บนแผ่นฟิล์ม 0.7 mg (0.003 mmol) และ

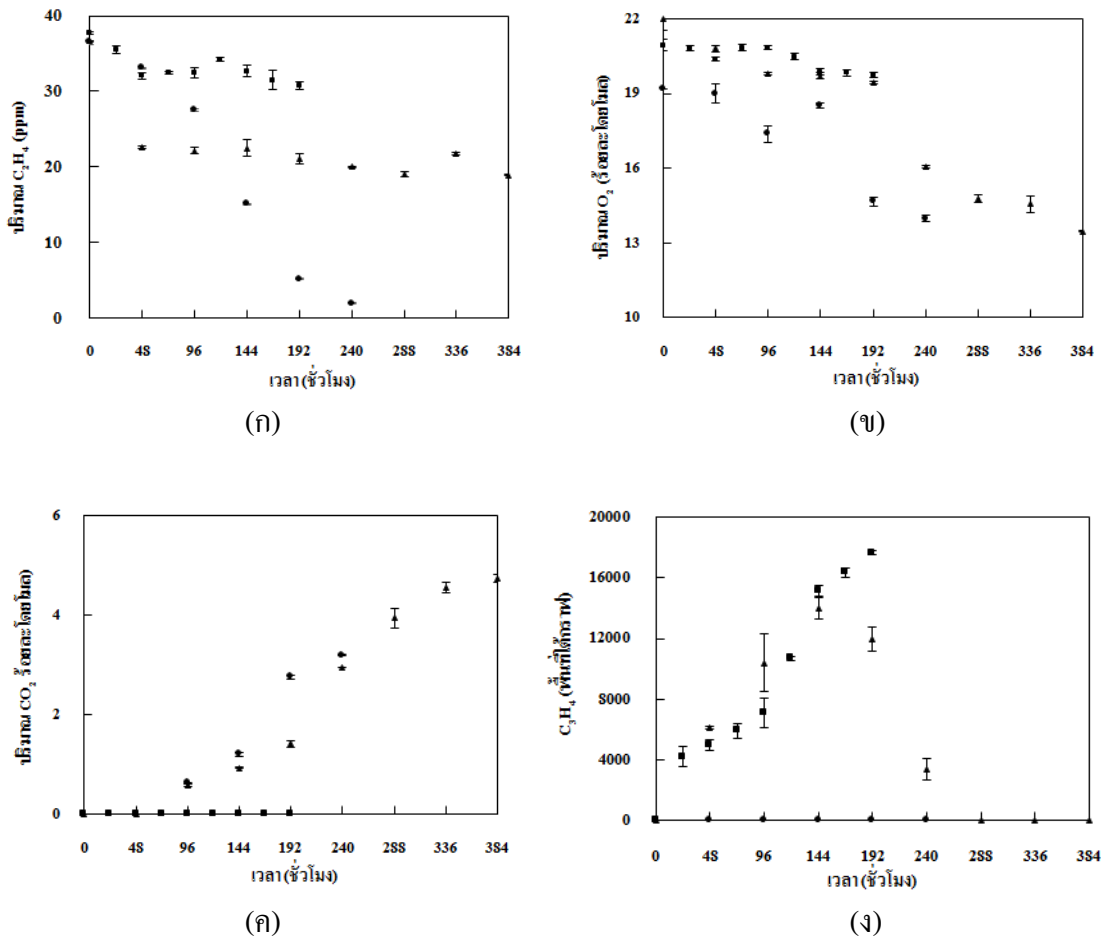
เคลือบ TiO_2 ทับเป็นชั้นที่ 2 มีปริมาณ TiO_2 บนแผ่นฟิล์ม 9.9 mg (0.124 mmol) จึงมีอัตราส่วน $\text{TiO}_2 : \text{WO}_3$ เป็น 41 : 1

จากการทดลองของฟิล์ม TiO_2 ร่วมกับ WO_3 ต่อการกำจัด C_2H_4 แบบ 2 ชั้น ดังภาพที่ 4-10 พบว่า สามารถเกิดกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงในการกำจัด C_2H_4 ได้สูงกว่าฟิล์มแบบผสม ซึ่งมีค่าการลดลงของ C_2H_4 เป็น 17.8 ppm ในเวลา 384 ชั่วโมง และคิดเป็นอัตราการลดลงเริ่มต้นของ C_2H_4 เท่ากับ 2.6 ppm/mmol.hr ซึ่งจะเห็นได้ว่าฟิล์มแบบ 2 ชั้นนี้มีอัตราการลดลงเริ่มต้นสูงกว่าฟิล์มแบบผสมถึง 6.7 เท่า ดังนั้นในการทดลองนี้จึงเลือกศึกษาการทำงานของฟิล์ม TiO_2 ร่วมกับ WO_3 ในวิธีแบบเคลือบ 2 ชั้น (TiO_2/WO_3)



ภาพที่ 4-10 ปริมาณก๊าซ C_2H_4 ในบรรจุภัณฑ์ภายใต้กระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของฟิล์ม TiO_2/WO_3 (ฟิล์ม ● : แบบผสม ▲ : แบบ 2 ชั้น)

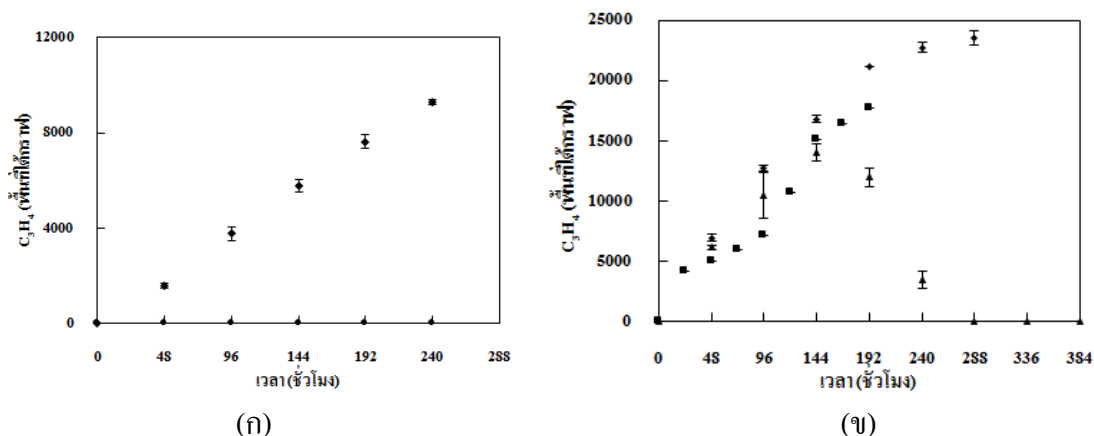
จากผลการศึกษาประสิทธิภาพการเกิดกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงในการกำจัด C_2H_4 ของฟิล์ม TiO_2 ฟิล์ม WO_3 และฟิล์ม TiO_2 ร่วมกับ WO_3 จึงเลือกฟิล์ม TiO_2 1.9 mg ฟิล์ม WO_3 0.7 mg และฟิล์ม TiO_2 ร่วมกับ WO_3 แบบ 2 ชั้น เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการเกิดกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงในสถานะฉายแสง UVA โดยศึกษาการเปลี่ยนแปลงและอัตราเริ่มต้นของก๊าซต่าง ๆ ในบรรจุภัณฑ์และเลือกฟิล์มที่มีประสิทธิภาพดีที่สุดในกำจัด C_2H_4 เป็นบรรจุภัณฑ์แอกทีฟในการทดลองที่ 2 ซึ่งการเปลี่ยนแปลงก๊าซต่าง ๆ ด้วยฟิล์มทั้ง 3 แบบในสถานะฉายแสง UVA ดังภาพที่ 4-11 (ก-ง)



ภาพที่ 4-11 การเปลี่ยนแปลงปริมาณก๊าซต่าง ๆ ในบรรจุภัณฑ์ (ก) C_2H_4 (ข) O_2 (ค) CO_2 และ (ง) C_3H_4 ด้วยฟิล์ม TiO_2 WO_3 และ TiO_2/WO_3 (ฟิล์ม ● : TiO_2 ■ : WO_3 ▲ : TiO_2/WO_3)

การกำจัด C_2H_4 ด้วยฟิล์ม TiO_2 ฟิล์ม WO_3 และฟิล์ม TiO_2/WO_3 ภายใต้กระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง ดังภาพที่ 4-11 (ก) พบว่า ฟิล์ม TiO_2 สามารถเกิดกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง ในการกำจัด C_2H_4 ได้ดีกว่าฟิล์ม WO_3 และฟิล์ม TiO_2/WO_3 ขณะที่ฟิล์ม TiO_2 สามารถกำจัด C_2H_4 ได้ถึง 34.6 ppm หดภายในชั่วโมงที่ 240 โดยเปรียบเทียบได้จากในเวลาเดียวกันที่ชั่วโมง 192 พบว่า ฟิล์ม TiO_2 สามารถกำจัด C_2H_4 ได้ถึง 31.3 ppm และฟิล์ม WO_3 และฟิล์ม TiO_2/WO_3 สามารถกำจัด C_2H_4 ได้เพียง 6.9 และ 15.6 ppm เท่านั้น ขณะที่ปริมาณของ C_2H_4 ในฟิล์ม TiO_2 ลดลงนั้นส่งผลให้ปริมาณ O_2 ลดลงร้อยละ 4.5 เกิดเป็น CO_2 ร้อยละ 2.8 ดังภาพที่ 4-11 (ข) และ (ค) แสดงได้ว่าการเกิดกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง เกิดขึ้น และยังคงพบว่า ปริมาณของ O_2 และ CO_2 ยังคงมีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง แม้ว่าฟิล์ม TiO_2 จะกำจัด C_2H_4 ไปหมดแล้วก็ตาม สาเหตุมาจากการสลายตัวของบรรจุภัณฑ์และฟิล์มที่มีการสลายตัวเมื่อถูกฉายแสงจึงเกิดเป็น C_3H_4 ดังที่กล่าว

ไว้แล้วข้างต้น จากการทดลองที่ได้กล่าวมาจะเห็นได้ว่าฟิล์ม TiO_2 สามารถที่จะกำจัด C_3H_4 ได้ดีกว่า C_2H_4 เพราะไม่พบ C_3H_4 ปรากฏในบรรจุภัณฑ์ตั้งแต่วันเริ่มต้นจนถึงวันสุดท้ายของการทดลองดังภาพที่ 4-11 (ง) แต่เมื่อไม่ใส่ฟิล์ม TiO_2 ปริมาณพื้นที่ใต้กราฟของ C_3H_4 มีการเกิดสะสมในบรรจุภัณฑ์ เพิ่มขึ้นเป็น 9,294 ในชั่วโมงที่ 240 แสดงการกราฟเปรียบเทียบดังภาพที่ 4-12 (ก)



ภาพที่ 4-12 การเปลี่ยนแปลงปริมาณก๊าซ C_3H_4 ในบรรจุภัณฑ์ (ก) ฟิล์ม TiO_2 และ (ข) ฟิล์ม WO_3 กับ TiO_2/WO_3 (ฟิล์ม \blacklozenge : ไม่เคลือบ \bullet : TiO_2 \blacksquare : WO_3 \blacktriangle : TiO_2/WO_3)

ผลของการกำจัด C_2H_4 ในฟิล์ม WO_3 พบว่า มีปริมาณ C_2H_4 ลดลงเท่ากับ 5.2 ppm ใน 72 ชั่วโมงแรก และหลังจากนั้นปริมาณ C_2H_4 มีการเปลี่ยนแปลงน้อยจนถึงสิ้นสุดการทดลอง ส่งผลให้ปริมาณของ O_2 ลดลงเพียงร้อยละ 1.2 และ CO_2 มีการเกิดขึ้นน้อยมาก ซึ่งไม่สามารถตรวจสอบหาปริมาณ CO_2 ได้ จากสาเหตุดังกล่าวทำให้ทราบว่าฟิล์ม WO_3 มีกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของฟิล์ม WO_3 เกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น เพราะเมื่อพิจารณาปริมาณ C_2H_4 ที่มีการลดลงอย่างชัดเจน ใน 72 ชั่วโมงแรกนั้น เป็นผลมาจากความสามารถในการดูดซับของฟิล์ม WO_3 นอกจากนี้ยังพบว่า ฟิล์ม WO_3 ยังสามารถดูดซับ C_3H_4 ที่เกิดจากการสลายตัวของบรรจุภัณฑ์ ซึ่งเห็นจากตั้งแต่วันเริ่มต้นจนถึงชั่วโมงที่ 96 พื้นที่ใต้กราฟของ C_3H_4 มีการสะสมในปริมาณต่ำ แต่หลังจากชั่วโมงที่ 96 ไปแล้ว พบว่า พื้นที่ใต้กราฟของ C_3H_4 มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญดังภาพที่ 4-12 (ข)

สำหรับผลการทดลองของฟิล์ม TiO_2/WO_3 พบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัด C_2H_4 สูงกว่าฟิล์ม WO_3 เป็น 2.3 เท่า แต่ต่ำกว่าฟิล์ม TiO_2 2.2 เท่า ที่เวลา 192 ชั่วโมง โดยจะเห็นได้ว่าปริมาณ C_2H_4 มีการลดลงอย่างมากในช่วง 48 ชั่วโมงแรกถึง 14.0 ppm จาก 36.6 เหลือเพียง 22.6 ppm ส่งผลให้มีการลดลงของ O_2 ร้อยละ 1.0 เกิดเป็น CO_2 ในปริมาณน้อยมาก จึงไม่สามารถตรวจสอบได้ แต่หลังจากชั่วโมงที่ 48 ฟิล์ม TiO_2/WO_3 มีการกำจัด C_2H_4 ทั้งหมดเพียง 3.7 ppm โดยมีปริมาณ C_2H_4

เหลืออยู่ 18.9 ppm จนกระทั่งสิ้นสุดการทดลองในช่วงเวลาที่ 384 แต่ปริมาณของ O_2 มีการลดลงร้อยละ 7.1 ส่งผลให้ปริมาณ CO_2 เกิดขึ้นเป็นร้อยละ 4.7 เนื่องจากมีการเกิดกระบวนการเร่งปฏิกิริยาคู่ด้วยแสงกับ C_3H_4 เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง

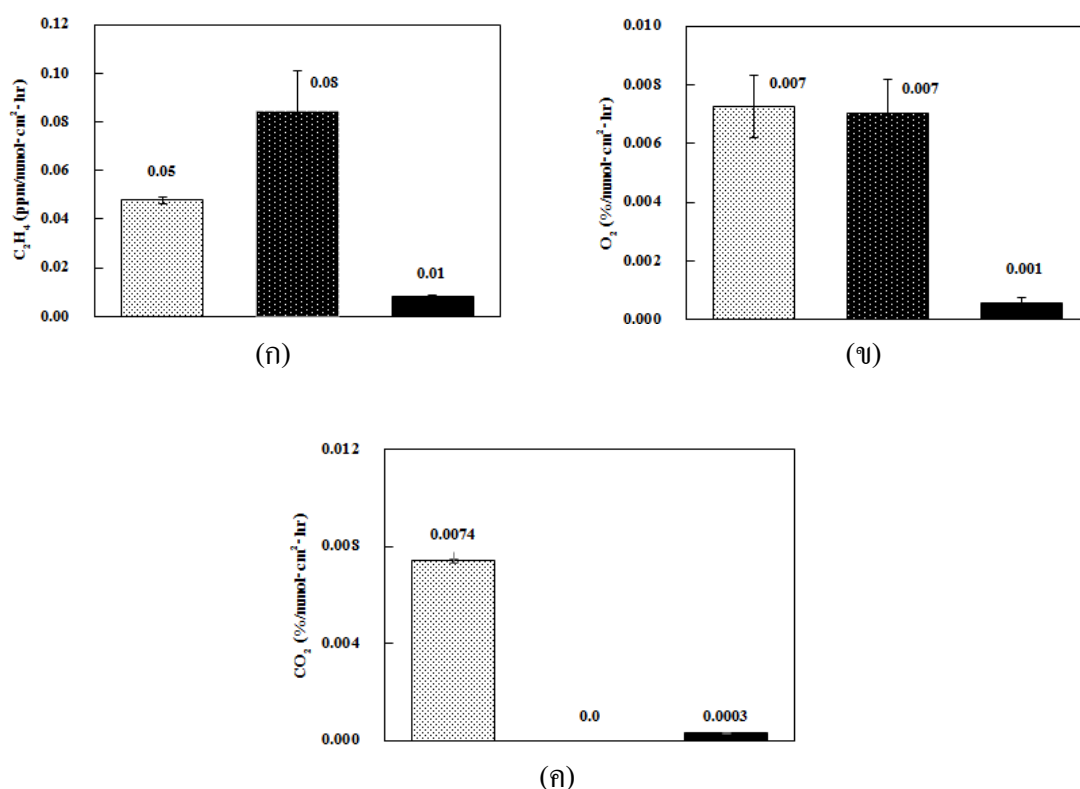
จากผลการทดลองจึงพบว่า กระบวนการเร่งปฏิกิริยาคู่ด้วยแสงของฟิล์ม TiO_2/WO_3 มีการทำงานแบ่งออกเป็น 2 ช่วง โดยในช่วงแรก ตั้งแต่ช่วงเวลาที่เริ่มต้นจนถึงช่วงเวลาที่ 48 ที่มีการลดลงของ C_2H_4 สูงนั้นอาจเนื่องมาจากการทำงานของ TiO_2/WO_3 ที่มีการดูดซับ C_2H_4 ไว้ โดยที่ WO_3 สามารถดูดซับ C_2H_4 ไว้ได้มากกว่า TiO_2 และในระหว่างที่เกิดการดูดซับนั้นก็ยังสามารถเกิดกระบวนการเร่งปฏิกิริยาคู่ด้วยแสงควบคู่ไปด้วย โดยสันนิษฐานได้จากการลดลงของ O_2 และการเกิดขึ้นของ CO_2 เพียงเล็กน้อย ดังนั้นในช่วงแรกการหายไปของ C_2H_4 น่าจะเกิดจากการดูดซับมากกว่ากระบวนการเร่งปฏิกิริยาคู่ด้วยแสง นอกจากนี้ยังเห็นได้ว่าการสลายตัวของบรรจุภัณฑ์ที่ไม่เคลือบโลหะออกไซด์เกิดเป็น C_3H_4 ภายใต้การฉายแสง พบว่า มีพื้นที่ใต้กราฟของ C_3H_4 เท่ากับ 6,908 เกิดขึ้นในช่วง 48 ชั่วโมงแรก แต่เมื่อบรรจุฟิล์ม TiO_2/WO_3 พบว่า พื้นที่ใต้กราฟลดลงเหลือ 6,113 ดังภาพที่ 4-12 (ข) ทำให้ทราบว่าฟิล์ม TiO_2/WO_3 ถูกดูดซับและเกิดกระบวนการเร่งปฏิกิริยาคู่ด้วยแสงด้วยเช่นกัน หลังจากช่วงเวลาที่ 48 เป็นต้นไป เมื่อฟิล์ม TiO_2/WO_3 มีการดูดซับจนอิ่มตัวแล้วพบว่า มีกระบวนการเร่งปฏิกิริยาคู่ด้วยแสงเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยสังเกตได้จากการลดลงของ O_2 และการเกิดของ CO_2 ที่มีนัยสำคัญ แต่พบว่า ปริมาณของ C_2H_4 กลับถูกกำจัดได้น้อยมาก เนื่องจากการเกิด C_3H_4 จากสลายตัวของบรรจุภัณฑ์ส่งผลให้ในบรรจุภัณฑ์ที่มีปริมาณของ C_3H_4 มากกว่า C_2H_4 จึงเป็นสาเหตุให้ TiO_2 กระบวนการเร่งปฏิกิริยาคู่ด้วยแสงกับ C_3H_4 ได้ดีกว่า C_2H_4 อีกทั้ง TiO_2 ยังเลือกเกิดกระบวนการเร่งปฏิกิริยาคู่ด้วยแสงกับ C_3H_4 ได้ดีกว่า C_2H_4 เช่นเดียวกัน ดังที่ได้กล่าวในหัวข้อที่ 3

ในภาพที่ 4-13 (ก-ค) แสดงอัตราเริ่มต้นของการเปลี่ยนแปลงปริมาณ C_2H_4 O_2 และ CO_2 ในบรรจุภัณฑ์ด้วยฟิล์ม TiO_2 ฟิล์ม WO_3 และฟิล์ม TiO_2/WO_3 ภายใต้กระบวนการเร่งปฏิกิริยาคู่ด้วยแสง จะเห็นได้ว่าอัตราการลดลงเริ่มต้นของ C_2H_4 ด้วยฟิล์ม TiO_2 ฟิล์ม WO_3 และฟิล์ม TiO_2/WO_3 มีค่าเท่ากับ 0.05 0.09 และ 0.01 ppm/mmol·cm²·hr ตามลำดับ โดยพบว่า ฟิล์ม WO_3 มีอัตราการลดลงเริ่มต้นของ C_2H_4 สูงที่สุด เนื่องมาจากฟิล์ม WO_3 มีความสามารถในการดูดซับ C_2H_4 และ O_2 ได้ดีแม้ในสภาวะมืด ซึ่งได้กล่าวมาแล้ว จึงส่งผลให้อัตราการลดลงเริ่มต้นของ O_2 สูงตามไปด้วย ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.008 %/mmol·cm²·hr แต่พบว่า การกำจัด C_2H_4 และ O_2 ภายใต้กระบวนการเร่งปฏิกิริยาคู่ด้วยแสงนั้นมีประสิทธิภาพต่ำกว่าการดูดซับ ทำให้ไม่พบการเกิดขึ้นของ CO_2 จึงไม่มีอัตราการเกิดเริ่มต้นของ CO_2

เมื่อพิจารณาความสามารถในการดูดซับของฟิล์ม TiO_2/WO_3 เมื่อเคลือบ TiO_2 เป็นชั้นที่ 2 พบว่า อัตราการลดลงเริ่มต้นของ C_2H_4 มีประสิทธิภาพในการกำจัด C_2H_4 ได้น้อยกว่าฟิล์ม WO_3 ถึง 8.1 เท่า สาเหตุมาจากการเคลือบ WO_3 ที่อยู่ด้านล่างของ TiO_2 ส่งผลให้ WO_3 โคนบดบังการทำงาน ทำให้พื้นที่ผิวของ WO_3 ในการดูดซับ C_2H_4 ในช่วงเริ่มต้นมีประสิทธิภาพลดลง ในขณะที่เดียวกัน TiO_2 ที่เคลือบในชั้นที่ 2 สามารถทำหน้าที่ในการกำจัด C_2H_4 ได้ดีกว่าการดูดซับด้วย WO_3 เนื่องจาก TiO_2 มีความสามารถในการเกิดกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงภายใต้การฉายแสงได้สูง ส่งผลให้อัตราการลดลงเริ่มต้นของ O_2 และอัตราการเกิดขึ้นของ CO_2 มีค่าเป็น 0.0005 และ 0.0003 $\%/\text{mmol}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{hr}$ ตามลำดับ

ในอัตราการลดลงเริ่มต้นของ C_2H_4 ระหว่างฟิล์ม TiO_2 และฟิล์ม TiO_2/WO_3 พบว่า ฟิล์ม TiO_2/WO_3 มีค่าต่ำกว่าฟิล์ม TiO_2 ถึง 5 เท่า แม้ว่าฟิล์ม TiO_2/WO_3 จะมีปริมาณ TiO_2 มากกว่าฟิล์ม TiO_2 ถึง 5.3 เท่าก็ตาม ทั้งนี้อาจเป็นเพราะการมีอยู่ของ WO_3 ในฟิล์ม TiO_2/WO_3 ส่งผลให้ TiO_2 ที่สามารถผลิตคู่อิเล็กตรอน-ช่องว่างของอิเล็กตรอนในสภาวะการฉายแสงไม่สามารถเกิดกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงได้ เนื่องจากอิเล็กตรอนที่ทำหน้าที่ในการเกิดปฏิกิริยารีดักชันกับ O_2 ถูกส่งมาเก็บไว้ใน WO_3 ส่งผลให้ฟิล์ม TiO_2/WO_3 มีประสิทธิภาพในการเกิดกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงลดลง สาเหตุที่อิเล็กตรอนถูกเก็บไว้ใน WO_3 เนื่องจากอิเล็กตรอนในแถบการนำที่เหลือที่ไม่ได้เกิดปฏิกิริยารีดักชันจะถูกถ่ายโอนไปยัง WO_3 เพราะแถบการนำของ WO_3 อยู่ต่ำกว่าแถบการนำของ TiO_2 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่พบว่า การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 ร่วมกับ WO_3 มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารไฮโดรคาร์บอนต่ำกว่าการใช้ TiO_2 เพียงอย่างเดียว Serpone et al. (1995) พบว่า TiO_2 สามารถกำจัด phenol ได้สูงกว่าการใช้ TiO_2 ร่วมกับ WO_3 ที่ความยาวคลื่นแสง 355 nm Tada et al. (2004) พบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 ร่วมกับ WO_3 กำจัด CH_3CHO ในเฟสก๊าซ และ 2-naphthol ในเฟสของเหลวลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับ TiO_2 ที่ความยาวคลื่นแสง 320-400 nm Lin et al. (2008) พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 ร่วมกับ WO_3 กำจัด 4-chlorophenol (4-CP) และสารอินทรีย์คาร์บอนรวม (TOC) ได้ต่ำกว่า TiO_2 ภายใต้ความยาวคลื่นแสง 369 nm ในเวลา 180 นาที แต่พบว่า ที่ความยาวคลื่นแสง 435 nm การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 ร่วมกับ WO_3 เกิดกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงได้สูงกว่า TiO_2 ทั้งนี้เป็นเพราะความยาวคลื่นแสงที่เหมาะสมในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 ร่วมกับ WO_3 มีค่าเท่ากับ 475 nm ดังนั้นการใช้ความยาวคลื่นแสงที่ 369 nm ซึ่งอยู่ในช่วงเดียวกับงานวิจัยนี้ที่ใช้ความยาวคลื่นแสง 365 nm เป็นช่วงความยาวคลื่นแสงที่ไม่เหมาะสมส่งผลตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมมีประสิทธิภาพในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ TiO_2 เพียงอย่างเดียว (ความยาวคลื่นแสงที่เหมาะสมอยู่ที่ 388 nm) เนื่องจากอัตราการถ่ายโอนอิเล็กตรอนจากตัวเร่งปฏิกิริยาไปยัง O_2 มี

ประสิทธิภาพลดลง ทำให้เกิดการสะสมอิเล็กตรอนอยู่ที่แถบการนำของ WO_3 จึงเป็นสาเหตุให้ประสิทธิภาพของกระบวนการเร่งปฏิกิริยาดำเนินการด้วยแสงลดลง ส่วนฟิล์ม TiO_2 ที่ไม่มี WO_3 อยู่ด้านล่างอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นจึงมีโอกาสในการเกิดปฏิกิริยารีดักชันได้สูงกว่า ทำให้การเกิดกระบวนการเร่งปฏิกิริยาดำเนินการด้วยแสงมีประสิทธิภาพสูงกว่าฟิล์ม TiO_2/WO_3 ดังนั้นฟิล์ม TiO_2 จึงมีอัตราการลดลงเริ่มต้นของ O_2 และอัตราการเกิดขึ้นของ CO_2 เกิดขึ้นเท่ากันเป็น $0.007 \text{ \%}/\text{mmol}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{hr}$



ภาพที่ 4-13 อัตราเริ่มต้นของการเปลี่ยนแปลงปริมาณก๊าซต่าง ๆ ภายในบรรจุภัณฑ์

(ก) C_2H_4 (ข) O_2 และ (ค) CO_2 ด้วยฟิล์ม TiO_2 ฟิล์ม WO_3 และฟิล์ม TiO_2/WO_3

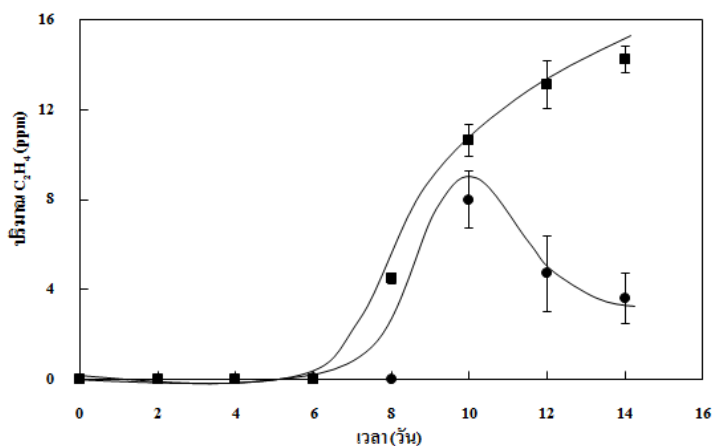
(ฟิล์ม \square : TiO_2 \blacksquare : WO_3 \blacksquare : TiO_2/WO_3)

การทดสอบประสิทธิภาพในการยืดอายุมะม่วงน้ำดอกไม้ด้วยบรรจุภัณฑ์แอคทีฟเคลือบด้วยอนุภาคโลหะออกไซด์ที่มีผลต่อสมบัติทางเคมีและทางกายภาพ

1. ศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณ C_2H_4 , O_2 และ CO_2 ของมะม่วงน้ำดอกไม้ในบรรจุภัณฑ์แอคทีฟภายใต้การฉายแสง UVA

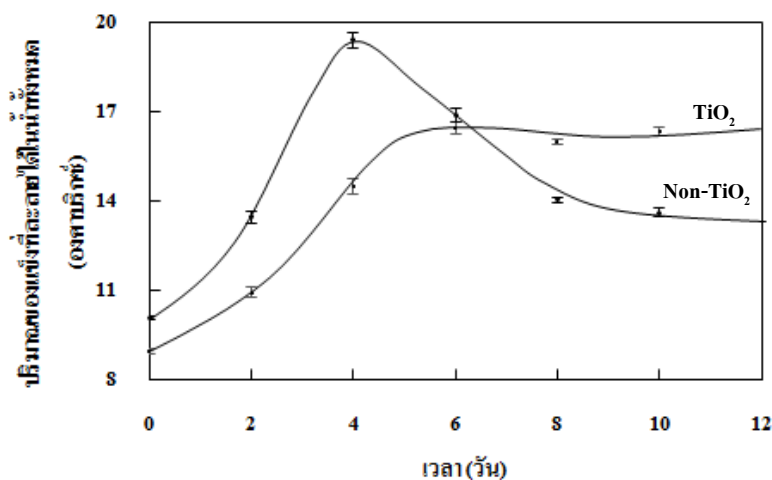
ในการศึกษาประสิทธิภาพของกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงในการกำจัด C_2H_4 ด้วยฟิล์มโลหะออกไซด์จากการทดลองที่ 1 จึงเลือกฟิล์มที่มีประสิทธิภาพที่ดีที่สุดในการกำจัด C_2H_4 โดยเลือกใช้ฟิล์ม TiO_2 ปริมาณ 1.9 mg เป็นบรรจุภัณฑ์แอคทีฟ เพื่อยืดอายุของมะม่วงน้ำดอกไม้ โดยเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 24 ± 2 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 80-85 เป็นเวลา 14 วัน ภาพที่ 4-14 แสดงการเปลี่ยนแปลงปริมาณ C_2H_4 ในระหว่างการเก็บรักษาภายใต้แสง UVA ที่ความเข้มแสง $37 \mu w/cm^2$ ในบรรจุภัณฑ์ที่ไม่ใช้และใช้ฟิล์ม TiO_2 โดยบรรจุภัณฑ์ที่ไม่ใช้ฟิล์ม TiO_2 พบว่า มีแนวโน้มของการสะสม C_2H_4 จากการปลดปล่อยของผลมะม่วงในปริมาณต่ำจากวันเริ่มต้นจนถึงวันที่ 6 เมื่อเข้าสู่วันที่ 8 พบว่า C_2H_4 มีค่าเพิ่มขึ้นสูงเป็นวันแรกเท่ากับ 4.5 ppm และมีการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในบรรจุภัณฑ์จนถึงวันที่ 14 ซึ่งมีค่าสูงสุดเท่ากับ 14.2 ppm ในขณะที่เดียวกันเมื่อใช้ฟิล์ม TiO_2 ในบรรจุภัณฑ์ พบว่า แนวโน้มการสะสม C_2H_4 อยู่ในปริมาณต่ำจากวันเริ่มต้นจนถึงวันที่ 8 และเพิ่มสูงขึ้นเป็นวันแรกและมีค่าสูงที่สุดเท่ากับ 8.0 ppm ในวันที่ 10 จากนั้นเมื่อเข้าสู่วันที่ 12 พบว่า ปริมาณ C_2H_4 มีค่าแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องจนถึงวันที่ 14 ซึ่งพบปริมาณ C_2H_4 สุดท้ายเหลือในบรรจุภัณฑ์เพียง 3.6 ppm ดังนั้น จากผลดังกล่าวทำให้ทราบว่า การใช้ฟิล์ม TiO_2 ในบรรจุภัณฑ์ที่บรรจุมะม่วงน้ำดอกไม้สามารถที่จะกำจัด C_2H_4 ที่เกิดจากการปลดปล่อยของมะม่วงได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งสามารถชะลอการสุกของมะม่วงได้ เนื่องจากการมีปริมาณ C_2H_4 สูงนั้นเป็นตัวกระตุ้นกระบวนการสุกของมะม่วง

จากการทดลองพบว่า ปริมาณ O_2 และ CO_2 ภายในบรรจุภัณฑ์ที่บรรจุผลมะม่วงน้ำดอกไม้ ทั้งในบรรจุภัณฑ์ที่ไม่ใช้ฟิล์ม TiO_2 และใช้ฟิล์ม TiO_2 มีแนวโน้มใกล้เคียงกันและเป็นไปในทิศทางเดียวกัน เนื่องจาก O_2 ที่ลดลงนั้น พบว่า ถูกใช้ไปในกระบวนการหายใจของมะม่วงในปริมาณที่มากกว่าใช้ในการเกิดกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงเพื่อกำจัด C_2H_4 ซึ่งพบเพียงประมาณ 8 ppm ดังนั้นปริมาณ O_2 ที่ถูกใช้ในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงจึงมีค่าน้อยมาก ซึ่งไม่สามารถที่จะสังเกตการเปลี่ยนแปลงของ O_2 ที่ลดลงจากกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงได้ ขณะที่มะม่วงมีการหายใจโดยใช้ O_2 ในปริมาณมากนั้น ส่งผลให้มีการคาย CO_2 ออกมาในปริมาณมากเช่นกัน ดังนั้นนัยสำคัญของปริมาณ CO_2 ที่เกิดจากกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงในการกำจัด C_2H_4 ของฟิล์ม TiO_2 จึงเกิดได้น้อยมากเมื่อเทียบกับบรรจุภัณฑ์ที่บรรจุมะม่วงโดยไม่ใส่ฟิล์ม TiO_2 ซึ่งพบว่า ปริมาณ CO_2 เกิดสูงอยู่แล้ว



ภาพที่ 4-14 การเปลี่ยนแปลงปริมาณก๊าซ C_2H_4 ในบรรจุภัณฑ์ที่บรรจุผลมะม่วงน้ำดอกไม้ภายใต้การฉายแสง UVA ที่ไม่ใช้และใช้ฟิล์ม TiO_2 (■: ไม่ใช้ฟิล์ม TiO_2 ●: ใช้ฟิล์ม TiO_2)

2. การเปลี่ยนแปลงทางเคมีของมะม่วงน้ำดอกไม้



ภาพที่ 4-15 การเปลี่ยนแปลงปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ของผลมะม่วงน้ำดอกไม้ที่บรรจุในบรรจุภัณฑ์ที่ไม่ใช้ฟิล์ม TiO_2 และใช้ฟิล์ม TiO_2 (■: ไม่ใช้ฟิล์ม TiO_2 ●: ใช้ฟิล์ม TiO_2)

จากภาพที่ 4-15 แสดงแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ (TSS) ของผลมะม่วงน้ำดอกไม้ หลังจากเก็บรักษาในบรรจุภัณฑ์ที่ใช้ฟิล์ม TiO_2 เปรียบเทียบกับไม่ใช้ฟิล์ม TiO_2 จากการทดลองพบว่า บรรจุภัณฑ์ที่ไม่ใช้ฟิล์ม TiO_2 และใช้ฟิล์ม TiO_2 มีค่า TSS ในวัน

เริ่มต้นเท่ากับ 10.0 และ 9.0 อนุภาคปริมาตร ซึ่งค่า TSS จัดอยู่ในระยะค่อนข้างห้าม (อ้างอิงจากตารางที่ 2-3) ซึ่งจะเห็นได้ว่ามะม่วงมีลักษณะเหลืองที่ขั้ว ดังภาพที่ 4-16 (ก-ข) สำหรับบรรจุภัณฑ์ที่ไม่ใช้ฟิล์ม TiO_2 พบว่า มีแนวโน้มของค่า TSS เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องและเพิ่มสูงสุดเป็น 19.4 อนุภาคปริมาตร ในวันที่ 4 ซึ่งอยู่ในระยะสุกมาก จากนั้นพบว่า ค่า TSS เริ่มลดลงและมีแนวโน้มการลดลงอย่างต่อเนื่องจนถึงวันที่ 10 เหลือเพียง 13.6 อนุภาคปริมาตร สำหรับในสภาวะที่ใช้ฟิล์ม TiO_2 ยังคงมีค่า TSS เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องและมีค่าสูงที่สุดในวันที่ 6 เท่ากับ 16.5 อนุภาคปริมาตร ซึ่งเพิ่มขึ้นช้ากว่าสภาวะที่ไม่ใช้ฟิล์ม TiO_2 และมีแนวโน้มค่อนข้างคงที่จนถึงวันที่ 10 ซึ่งแตกต่างจากบรรจุภัณฑ์ที่ไม่ใช้ฟิล์ม TiO_2 พบว่า ค่า TSS มีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่อง ตั้งแต่วันที่ 4 จนถึงวันที่ 10 จากผลการทดลองทำให้ทราบว่าบรรจุภัณฑ์ที่ใช้ฟิล์ม TiO_2 สามารถชะลอการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของมะม่วงน้ำดอกไม้ได้ในช่วงเริ่มต้น ส่งผลให้กระบวนการสุกเกิดขึ้นในช่วงวันที่ 4-6 และเมื่อมะม่วงสุกเต็มที่ในวันที่ 6 ยังคงชะลอความสดของมะม่วงไว้ได้ต่อเนื่องจากวันที่ 6 ถึง 10 โดยสังเกตจากค่า TSS ที่ยังคงที่ และยังมีค่าอยู่ในช่วง 15-17 อนุภาคปริมาตร (มะม่วงน้ำดอกไม้ยังคงคุณภาพได้ดี) ดังภาพที่ 4-18 (ข) ของมะม่วงน้ำดอกไม้ในวันที่ 8 ขณะที่สภาวะที่ไม่ใช้ฟิล์ม TiO_2 พบว่า ค่า TSS เริ่มลดลงตั้งแต่วันที่ 4 จนกระทั่งสิ้นสุดการทดลอง แสดงให้เห็นว่าวันที่ 4 มะม่วงเริ่มมีการเน่าเสีย ดังภาพที่ 4-18 (ก) ในวันที่ 8 ของมะม่วงน้ำดอกไม้

3. การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของมะม่วงน้ำดอกไม้

พิจารณาสภาพของผลมะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้ที่บรรจุในบรรจุภัณฑ์ที่ไม่ใช้ฟิล์ม TiO_2 เปรียบเทียบกับวิธีที่ใช้ฟิล์ม TiO_2 (แสดงภาพการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของมะม่วงเพิ่มเติม ดังภาคผนวก ง) โดยใช้เกณฑ์พิจารณาจากลักษณะภายนอกที่ปรากฏโรค ได้แก่ การเปลี่ยนแปลงสีเปลือกและสีเนื้อและการเข้าทำลายของโรคและแมลง จากการทดลองพบว่า ผลมะม่วงในวันที่เริ่มต้นของบรรจุภัณฑ์ที่ไม่ใช้ฟิล์ม TiO_2 และใช้ฟิล์ม TiO_2 สีเนื้อของมะม่วงมีลักษณะแข็งและมีสีขาว ขั้วมีสีเหลือง อยู่ในระยะค่อนข้างห้าม ดังภาพที่ 4-16 (ก-ข) และเมื่อเข้าสู่วันที่ 6 และ 8 ดังภาพที่ 4-17 (ก) และ 4-18 (ก) พบว่า ผลมะม่วงในบรรจุภัณฑ์ที่ไม่ใช้ฟิล์ม TiO_2 มีการเปลี่ยนแปลงของเปลือกเป็นสีเหลืองทั้งลูกและเริ่มมีการเน่าเสียเป็นจุดสีน้ำตาล สีเนื้อเปลี่ยนจากขาวไปเป็นสีเหลืองเข้มอย่างชัดเจน ลักษณะของเนื้ออ่อนนุ่มและมีน้ำซึมออกมา ขณะที่สภาวะที่ใช้ฟิล์ม TiO_2 ในวันที่ 6 และ 8 ดังภาพที่ 4-17 (ข) และ 4-18 (ข) ลักษณะของเปลือกยังไม่พบร่องรอยการเน่าเสีย ส่วนเนื้อมีลักษณะมีสีเหลืองจาง และยังคงสภาพความสดได้ดีไม่เน่าเสีย จากผลการทดลองดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าการใช้ฟิล์ม TiO_2 ปริมาณ 1.9 mg เป็นบรรจุภัณฑ์แอคทีฟสามารถยืดอายุของมะม่วงได้ 8 วัน



(ก)



(ข)

ภาพที่ 4-16 ผลมะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้ในบรรจุภัณฑ์ (ก) ไม่ใช้ฟิล์ม TiO_2 และ (ข) ใช้ฟิล์ม TiO_2 วันเริ่มต้น



(ก)



(ข)

ภาพที่ 4-17 ผลมะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้ในบรรจุภัณฑ์ (ก) ไม่ใช้ฟิล์ม TiO_2 และ (ข) ใช้ฟิล์ม TiO_2 ในวันที่ 6



(ก)



(ข)

ภาพที่ 4-18 ผลมะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้ในบรรจุภัณฑ์ (ก) ไม่ใช้ฟิล์ม TiO_2 และ (ข) ใช้ฟิล์ม TiO_2 ในวันที่ 8

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาความเป็นไปได้ในการกำจัด C_2H_4 ด้วยโลหะออกไซด์ TiO_2 และ WO_3 แบบผง พบว่า ผง TiO_2 มีประสิทธิภาพในการกำจัด C_2H_4 ด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงได้ดีกว่าผง WO_3 จึงเลือกศึกษา TiO_2 ในรูปแบบฟิล์ม โดยศึกษาผลกระทบความเข้มแสงและปริมาณ TiO_2 ต่อกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงภายใต้แสง UVA ในการสลาย C_2H_4 พบว่า การเพิ่มความเข้มแสงในช่วง $37-59 \mu w/cm^2$ ส่งผลให้เกิดกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงมีประสิทธิภาพสูงขึ้น โดยการเพิ่มความเข้มแสงในช่วง $37-44 \mu w/cm^2$ พบว่า อัตราการลดลงเริ่มต้นของ C_2H_4 มีค่าเพิ่มขึ้น แต่ที่ความเข้มแสงที่มีค่าสูงขึ้นมากกว่า $44 \mu w/cm^2$ จะส่งผลต่ออัตราการลดลงเริ่มต้นของ C_2H_4 เพียงเล็กน้อย ซึ่งเป็นผลมาจากบรรจุภัณฑ์และฟิล์มที่ถูกเคลือบภายใต้แสง UVA เกิดการสลายตัวเป็น C_3H_4 และเลือกที่จะกำจัด C_3H_4 มากกว่า C_2H_4 เมื่อใช้ความเข้มแสงต่ำ ๆ ($37 \mu w/cm^2$) พบว่า ปริมาณของ TiO_2 เป็นปัจจัยหลักต่อการสลาย C_2H_4 และการเพิ่มปริมาณ TiO_2 เป็นสองเท่า ส่งผลให้อัตราการลดลงเริ่มต้นของ C_2H_4 เพิ่มขึ้นถึง 4.0 เท่า ทำให้อัตราการลดลงเริ่มต้นของ O_2 และอัตราการเกิดเริ่มต้นของ CO_2 เพิ่มขึ้นเช่นกัน ดังนั้นการใช้ความเข้มแสงและปริมาณ TiO_2 ที่เหมาะสมสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการเกิดการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงได้ดียิ่งขึ้น

การศึกษาประสิทธิภาพการสลาย C_2H_4 ด้วยฟิล์ม TiO_2 ฟิล์ม WO_3 และฟิล์ม TiO_2 ร่วมกับ WO_3 ภายใต้กระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงที่ความเข้มแสงที่ $37 \mu w/cm^2$ พบว่า ฟิล์มทั้ง 3 ชนิดสามารถกำจัด C_2H_4 ได้ทั้งการเกิดการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงภายใต้การฉายแสงและการดูดซับในสถานะมืด แต่พบว่า ฟิล์ม TiO_2 มีประสิทธิภาพสูงในการเกิดกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงและเกิดได้ดีกว่าฟิล์ม WO_3 ขณะที่ฟิล์ม WO_3 มีประสิทธิภาพสูงในการดูดซับ C_2H_4 และดูดซับได้ดีกว่าฟิล์ม TiO_2 เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมระหว่าง TiO_2 และ WO_3 (TiO_2/WO_3) ด้วยวิธีการเคลือบแบบ 2 ชั้น พบว่า ประสิทธิภาพในการสลาย C_2H_4 สูงกว่าฟิล์ม WO_3 แต่มีประสิทธิภาพต่ำกว่าฟิล์ม TiO_2 ซึ่งเป็นผลมาจากความสามารถในการดูดซับและการเกิดกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงลง เพราะการเคลือบ TiO_2 บน WO_3 ส่งผลให้อิเล็กตรอนที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยารีดักชันที่แถบการนำถูกนำมาเก็บไว้ใน WO_3 จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพในการเกิดกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงลดลง และความสามารถในการดูดซับของ WO_3 ก็ลดลง เนื่องจาก TiO_2 บดบังพื้นที่ในการดูดซับของ WO_3 ดังนั้น จากการศึกษาที่กล่าวมาจึงพบว่า ฟิล์ม TiO_2 มีความสามารถในการสลาย C_2H_4 ได้ดีที่สุด

จากผลการทดลองดังกล่าวจึงเลือกฟิล์ม TiO_2 เป็นบรรจุภัณฑ์แอคทีฟสำหรับสลาย C_2H_4 เพื่อยืดอายุของมะม่วงน้ำดอกไม้ โดยเปรียบเทียบกับสถานะควบคุมที่ไม่เคลือบ TiO_2 พบว่า การใช้ฟิล์ม TiO_2 ในบรรจุภัณฑ์ที่บรรจุมะม่วงน้ำดอกไม้สามารถลดปริมาณ C_2H_4 ที่เกิดจากการปลดปล่อยของมะม่วงได้ ส่งผลให้การเปลี่ยนแปลงปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายในน้ำมีการเปลี่ยนแปลงช้าลงและลักษณะเปลือกและเนื้อของมะม่วงในสถานะที่ใช้ฟิล์ม TiO_2 พบว่า ช่วยลดการเน่าเสียและยังคงคุณภาพความสดได้ดีกว่าสถานะควบคุม ซึ่งสามารถยืดอายุมะม่วงน้ำดอกไม้ได้ถึง 8 วัน จากผลการศึกษาจึงสามารถประยุกต์ใช้ TiO_2 ในการสลาย C_2H_4 เพื่อพัฒนาบรรจุภัณฑ์แอคทีฟในการยืดอายุมะม่วงน้ำดอกไม้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ข้อเสนอแนะ

1. ควรศึกษาเทคนิคในการเพิ่มปริมาณ WO_3 บนฟิล์ม เพราะ WO_3 ที่เตรียมด้วยวิธี โซล-เจล มีองค์ประกอบของ WO_3 ในปริมาณน้อย
2. ควรศึกษาความสามารถในการสลาย C_2H_4 ของฟิล์ม TiO_2 กับผักผลไม้ชนิดอื่นที่บ่มให้สุกได้

บรรณานุกรม

- กลุ่มงานส่งเสริมและพัฒนาผลิตภัณฑ์การเกษตร ส่วนส่งเสริมวิสาหกิจชุมชน สำนักพัฒนา
เกษตรกร กรมส่งเสริมการเกษตร. (2547). *ผลิตภัณฑ์มะม่วง 2547 สำนักพัฒนาเกษตรกร
กรมส่งเสริมการเกษตร*. วันที่ค้นข้อมูล 18 มิถุนายน 2561, เข้าถึงได้จาก
<http://www.arda.or.th/datas/file/1473755018.pdf>
- กลุ่มสื่อส่งเสริมการเกษตร ส่วนส่งเสริมและเผยแพร่ สำนักพัฒนาการถ่ายทอดเทคโนโลยี
กรมส่งเสริมการเกษตร. (2555). *มะม่วง*. วันที่ค้นข้อมูล 18 มิถุนายน 2561 เข้าถึงได้จาก
<https://chantrabook.files.wordpress.com/2015/11/000237.pdf>
- จริงแท้ ศิริพานิช. (2538). *สรีรวิทยาและเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยวผักและผลไม้*. นครปฐม:
ภาควิชาพืชสวน คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน. 396.
- จริงแท้ ศิริพานิช. (2542). *สรีรวิทยาและเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยวผักและผลไม้*. (ครั้งที่พิมพ์ 3).
กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 396.
- ชุมพล บัวจอร์. (2554). *การวิเคราะห์แนวโน้มการส่งออกมะม่วงของไทย*. เชียงใหม่: คณะ
เศรษฐศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. รายงานประกอบการเรียน
- ธวัชชัย รัตน์ชเลศ. (2555). *เทคนิคการผลิตมะม่วงคุณภาพ*. วันที่ค้นข้อมูล 15 พฤศจิกายน 2560,
เข้าถึงได้จาก [https://knowledge.kasetbay.com/35-มะม่วง/149--เทคนิคการผลิตมะม่วง
คุณภาพ](https://knowledge.kasetbay.com/35-มะม่วง/149--เทคนิคการผลิตมะม่วงคุณภาพ)
- ธัญพร อินทรพรรณ และพันจิตรา เปลี่ยนไธสง. (2558). *อิทธิพลของสภาวะบรรยากาศและ
อุณหภูมิต่อการยืดอายุกล้วยหอมในบรรจุภัณฑ์แอกทีฟ*. ปรินญาวิศวกรรรมศาสตร์
บัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี, วิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยบูรพา.
- บริษัท พีพีอี ปรีนติ้ง แอนด์ แพคเกจจิ้ง จำกัด. (ม.ป.ป.). *ซองพลาสติกบรรจุภัณฑ์ลามิเนตและวัตถุ
ดูดซับออกซิเจนแบบซอง*. เข้าถึงได้จาก <https://www.helpsave.in.th>
- เนตรนภา ลามอ, อนงค์นาฏ สมหวังชน โรจน์ และอภิธา บุญศิริ. (2551). การพัฒนาฟิล์มบรรจุภัณฑ์
พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ-ซีโอไลต์เพื่อยืดอายุการเก็บรักษามะนาว. ใน *การ
ประชุมวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 47: สาขาสถาปัตยกรรมและ
วิศวกรรมศาสตร์*, (หน้า 175-18) นครปฐม: สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่ง
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน.

- บัณฑิต เจริญทรัพย์. (2555). การศึกษาพารามิเตอร์ของการเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยแสงโดยไทเทเนียมไดออกไซด์ต่อการสลายตัวของเอทิลีนและการยืดอายุการเก็บรักษาของผลมะม่วงน้ำดอกไม้. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยว, คณะเกษตรศาสตร์, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- พิมลพร เวชภูวัฒน์ และชัยวัฒน์ ไคลมี. (2557). การยืดอายุอาหารด้วยฟิล์มถนอมอาหาร. ปริญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี, วิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยบูรพา.
- พรพรรณ จำปา. (2554). ผลของไอโซนต่อการควบคุมเอทิลีนเพื่อยืดอายุการเก็บรักษามะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้สีทอง. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เกษตรศาสตร์), สาขาวิชาวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยว, คณะเกษตรศาสตร์, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- พรณีย์ วิชชาชู. (2556). มะม่วงน้ำดอกไม้ส่งออก. ใน การประชุมนานาชาติ “ไม้ผลเขตหนาวในเขตร้อนและกึ่งร้อน ครั้งที่ 5” (หน้า 64-70). เชียงใหม่: กรมวิชาการเกษตร.
- วรภัทร ลั่นทินวงศ์. (2549). บทปฏิบัติการเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว (ครั้งที่พิมพ์ 3). กรุงเทพฯ: บริษัทเพชรเกษมพรีนติ้ง กรุ๊ป จำกัด, 139.
- วิลาวัลย์ คำปวน. (2553). การจัดการหลังการเก็บเกี่ยวมะม่วง, 139-148. ใน: ธวัชชัย รัตนชเลศ และรุ่งทิพย์ อุทุมพันธ์ (ผู้รวบรวม), พัฒนามะม่วงไทยก้าวไกลสู่มะม่วงโลก. (ครั้งที่พิมพ์ 1). เชียงใหม่: วนิดาการพิมพ์.
- ศักยะ สมบัติไพรวัน. (2555). การศึกษาการชะลอการสุกของมะม่วงน้ำดอกไม้ด้วยถ่านกัมมันต์. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตรและอาหาร, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. (2558). สารสนเทศเศรษฐกิจการเกษตรรายสินค้า ปี 2558. วันที่ค้นข้อมูล 18 มิถุนายน 2561, เข้าถึงได้จาก http://oldweb.oae.go.th/download/download_journal/2559/commodity58.pdf
- สายชล เกตุษา. (2528). สรีรวิทยาและเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยวผักและผลไม้. นครปฐม: โรงพิมพ์ศูนย์ส่งเสริมและฝึกอบรมการเกษตรแห่งชาติ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน, 365.
- สุรพงษ์ โกสิยะจินดา. (2529). วิทยาหลังการเก็บเกี่ยวและภายหลังการเก็บเกี่ยวของมะม่วง. เอกสารประกอบการฝึกอบรมหลักสูตร “มะม่วง”. กรุงเทพฯ: ฝ่ายฝึกอบรม สถาบันวิจัยพืชสวน กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. เอกสารประกอบการฝึกอบรมหลักสูตรมะม่วง.

- อนุวัฒน์ จรัสรัตน์ไพบุลย์. (2545). ผลของสารสกัดหยาบจากข่าต่อโรคแอนแทรกคโนส และการเจริญเติบโตของมะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เกษตรศาสตร์), สาขาวิชาพืชสวน, คณะเกษตรศาสตร์, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- Bojinova, A., Kaneva, N., Papazova, K., Elias, A., Stoyanova-Elias, E. & Dimitrovi, D. (2017). Green synthesis of UV and visible light active TiO₂/WO₃ powders and films for malachite green and ethylene photodegradation. *Reaction Kinetic Mechanism Catalyst*, 120, 821-832.
- Chawengkijwanich, C. & Hayata, Y. (2008). Performance of TiO₂ powder coated packaging film in ethylene removal. *Acta Horticulturae*, 804, 541-546.
- Chen, H.-K., Chen, W.-F., Koshy, P., Adabifiroozjaei, E., Liu, R., Sheppard, L. R. & Sorrell, C. C. (2016). Effect of tungsten-doping on the properties and photocatalytic performance of titania thin films on glass substrates. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 67, 202-210.
- Chiara, M .D., Pal, S., Licciulli, A., Amodio, M., & Colelli, G. (2015). Photocatalytic degradation of ethylene on mesoporous TiO₂/SiO₂ nanocomposites: Effects on the ripening of mature green tomatoes. *Biosystems Engineering*, 132, 61-70.
- Floros, J., Dock, L. & Han, J. (1997). Active packaging technologies and applications. *Food Cosmetics and Drug Packaging*, 20, 10-17.
- Fujishima, A., Zhang, X. & Tryk, D. (2008). TiO₂ Photocatalysis and relate surface phenomena. *Surface science reports*, 63, 515-82.
- Golding, J. (1998) .Application of 1-MCP and propylene to identify ethylene-dependent ripening processes in mature banana fruit. *Postharvest Biology and Technology*, 14, 87-98.
- Hou, L. R., Yuan, C. Z., & Peng, Y. (2007). Synthesis and photocatalytic property of SnO₂/TiO₂ nanotubes composites. *Journal of Hazardous Materials*, 139, 310-315.
- Hussain, M., Bensaid, S., Geobaldo, F. Saracco, G. & Russo, N. (2011). Photocatalytic Degradation of Ethylene Emitted by Fruits with TiO₂ Nanoparticles. *Industrial & Engineering Chemistry Research, American Chemical Society*, 50, 2536-43.
- Hussain, M., Ceccarelli, R., Marchisio, D. L., Fino, D., Russo, N. & Geobaldo, F. (2010). Synthesis, characterization, and photocatalytic application of novel TiO₂ nanoparticles. *Chemical Engineering Journal*, 157, 45-51.

- Imahori, Y., Yamamoto K., Tanaka H., & Bai J. (2013). Residual effects of low oxygen storage of mature green fruit on ripening processes and ester biosynthesis during ripening in bananas. *Postharvest Biology and Technology*, 77, 19-27.
- Kader, A. A. (1985). Ethylene-induced senescence and physiological disorders in harvested horticultural crops. *Hort Science*, 1, 54-57.
- Kader, A. A. (2000). Postharvest Biology and Technology: An Overview. *Postharvest Technology of Horticultural Crops (University of California)*, 3, 39-48.
- Ketsa, S., Phakawatmongkol, W. & Subhadrabhandhu, S. (1999). Peel enzymatic activity and colour changes in ripening mango fruit. *Plant Physiology*, 154, 363-366.
- Lin, C., Wu, C. & Onn, Z. (2008). Degradation of 4-chlorophenol in TiO₂, WO₃, SnO₂, TiO₂/WO₃ and TiO₂/SnO₂ systems. *Journal of Hazardous Materials*, 154, 1033-1039.
- Lin, Y. T., Weng, C. H., Hsu, H. J., Huang, J. W., Srivastav, A. L., & Shiesh, C. C. (2014). Effect of oxygen, moisture, and temperature on the photo oxidation of ethylene N-doped TiO₂ catalyst. *Separation and Purification Technology*, 134, 117-25.
- Maneerat, C. & Hayata, Y. (2008). Gas-Phase Photocatalytic Oxidation of Ethylene with TiO₂-Coated Packaging Film for Horticultural Products. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 51(1), 163-168.
- Maneerat, C., Hayata, Y., Egashira, N., Sakamoto, K., Hamai, Z. & Kuroyanagi, M. (2003). Photocatalytic reaction of TiO₂ to decompose ethylene in fruit and vegetable storage. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 46, 725-730.
- Nishizawa, T., Aikawa, T. & Takahashi, M. (2006). Storage of horticultural products in closed rooms with TiO₂ photocatalyst: changes in room atmosphere and quality of fruits and cut flowers. *Acta Horticulturae*, 712, 261-268.
- Qian, S., Wang, C., Liu, W., Zhu, Y., Yao, W. & Lu, X. (2011) An enhanced CdS/TiO₂ photocatalyst with high stability and activity: Effect of mesoporous substrate and bifunctional linking molecule. *Journal of Materials Chemistry*, 21(13), 4945-4952.
- Ramos-Delgado, N. A., Hinojosa-Reyes, L., Guzman-Mar, I. L., Gracia-Pinilla, M. A. & Hernández-Ramírez, A. (2013). Synthesis by sol-gel of WO₃/TiO₂ for solar photocatalytic degradation of malathion pesticide. *Catalysis Today*, 209, 35-40.

- Scariot, V., Paradiso, R., Rogers, H., & Pascale, S. D. (2014). Ethylene control in cut flowers: Classical and innovative approaches. *Postharvest Biology and Technology*, *97*, 83-92.
- Serpone, N., Maruthamuthu, P., Pichat, P., Pelizzetti, E. & Hidaka, H. (1995). Exploiting the interparticle electron-transfer process in the photocatalyzed oxidation of phenol, 2-chlorophenol and pentachlorophenol-chemical evidence for electron and hole transfer between coupled semiconductors, *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, *85*, 247-255.
- Simonsen, M. E. (2014). Chapter 4: Heterogeneous Photocatalysis. *Chemistry of Advanced Environmental Purification Processes of Water*.
- Sobczynski, A. & Dobosz A. (2001). Water Purification by Photocatalysis on Semiconductors. *Polish Journal of Environmental Studies*, *10*, 195-205.
- Sun, H., Dong, B., Su G., Gao, R., Liu, W., Song, L. & Cao, L. (2015). Modification of TiO₂ nanotubes by WO₃ species for improving their photocatalytic activity. *Applied Surface Science*, *343*, 181-187.
- Tada, H., Kokrubu, A., Iwasaki, M. & Ito, S. (2004). Deactivation of TiO₂ photocatalyst by coupling with WO₃ and the electrochemically assisted high photocatalytic activity of WO₃. *Langmuir*, *20*, 4665-4670.
- Vermeiren, L., Devlieghere, F., van Beest M., de Kruijf N. & Debevere J. (1999). Developments in the active packaging of foods. *Trends in Food Science & Technology*, *10*, 77-86.
- Yamazaki, S., Tanaka, S. & Tsukamoto, H. (1999). Kinetic studies of oxidation of ethylene over a TiO₂ photocatalyst. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, *121*, 55-61.
- Zhang, M., An, T., Liu, X., Hu, X., Sheng, G. & Fu, J. (2010). Preparation of a high-activity ZnO/TiO₂ photocatalyst via homogeneous hydrolysis method with low temperature crystallization. *Materials Letters*, *64*(17), 1883-1886.
- Zhang, Z., Ren, J.-S., Clifton I. J. & Schofield, C. J. (2004). Crystal Structure and Mechanistic Implications of 1-Aminocyclopropane-1-Carboxylic Acid Oxidase-The Ethylene-Forming Enzyme. *Chemistry & Biology*, *11*, 1383-1394.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
ข้อมูลการทดลอง

**การทดลอง 1 การทดสอบประสิทธิภาพกระบวนการเร่งปฏิกิริยาดำเนินการด้วยแสงของฟิล์ม
พอลิเอทิลีนเคลือบด้วยอนุภาคโลหะออกไซด์ต่อการสลายเอทิลีน**

1. การศึกษาความเป็นไปได้ในการกำจัดเอทิลีนด้วยผงโลหะออกไซด์

ข้อมูลพื้นที่ใต้กราฟที่อ่านได้จากเครื่องก๊าซโครมาโตกราฟี ในสภาวะการฉายแสง UVA ที่ความเข้มแสง $37 \mu\text{w}/\text{cm}^2$ และในสภาวะมีดของผง TiO_2 และ WO_3 ปริมาณ 0.5 และ 0.25 g ตามลำดับ ดังตารางภาคผนวก ก-1 ก-2 ก-3 และ ก-4

ตารางภาคผนวก ก-1 พื้นที่ใต้กราฟของผง TiO_2 0.5 กรัม ในสภาวะการฉายแสง UVA

เวลาหลังการฉาย (ชั่วโมง)	พื้นที่ใต้กราฟ			
	O_2	CO_2	C_2H_4	C_3H_4
0	14757.8	0	56721.6	0
1	14474.3	0	44856.3	0
2	14219.2	0	34366.6	0
3	14381.1	0	25986.4	0
4	14568.5	0	19857.0	0
5	14412.4	0	19491.0	0
6	14116.1	0	14909.9	0

ตารางภาคผนวก ก-2 พื้นที่ใต้กราฟของผง WO_3 0.25 กรัม ในสภาวะการฉายแสง UVA

เวลาหลังการฉาย (ชั่วโมง)	พื้นที่ใต้กราฟ			
	O_2	CO_2	C_2H_4	C_3H_4
0	15884	0	59944	0
1	15549	0	55434	0
2	15632	0	54220	0
3	15350	0	52393	0
4	15437	0	49930	0
5	15571	0	55439	0

ตารางภาคผนวก ก-2 (ต่อ)

เวลาหลังการฉาย (ชั่วโมง)	พื้นที่ได้กราฟ			
	O ₂	CO ₂	C ₂ H ₄	C ₃ H ₄
6	15268	0	49721	0

ตารางภาคผนวก ก-3 พื้นที่ได้กราฟของผง TiO₂ 0.5 กรัม ในสภาวะมืด

เวลาหลังการฉาย (ชั่วโมง)	พื้นที่ได้กราฟ			
	O ₂	CO ₂	C ₂ H ₄	C ₃ H ₄
0	14757.8	0	56721.6	0
1	14471.3	0	51056.3	0
2	14195.6	0	49270.6	0
3	14304.5	0	49062.6	0
4	14401.7	0	46549.8	0
5	14156.4	0	49386.4	0
6	14255.5	0	45716.8	0

ตารางภาคผนวก ก-4 พื้นที่ได้กราฟของผง WO₃ 0.25 กรัม ในสภาวะมืด

เวลาหลังการฉาย (ชั่วโมง)	พื้นที่ได้กราฟ			
	O ₂	CO ₂	C ₂ H ₄	C ₃ H ₄
0	15274	0	59580	0
1	14940	0	58132	0
2	15074	0	57146	0
3	15169	0	56740	0
4	14756	0	56163	0
5	14484	0	53616	0
6	14774	0	52974	0

2. ผลกระทบของความเข้มแสงที่ส่งผลต่อการสลาย C_2H_4 ของกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง

ข้อมูลพื้นที่ใต้กราฟที่อ่านได้จากเครื่องก๊าซโครมาโตกราฟี ภายใต้การฉายแสงที่ความเข้มแสงต่าง ๆ ของฟิล์ม TiO_2 ปริมาณ 3.8 มิลลิกรัม ที่เวลาต่าง ๆ ดังตารางภาคผนวก ก-5 ก-6 ก-7 และ ก-8

ตารางภาคผนวก ก-5 พื้นที่ใต้กราฟของฟิล์ม TiO_2 ภายใต้ความเข้มแสง $37 \mu w/cm^2$ ที่เวลาต่าง ๆ

เวลาหลังการฉาย (ชั่วโมง)	พื้นที่ใต้กราฟ			
	O_2	CO_2	C_2H_4	C_3H_4
0	16838	0	35711	0
48	15543	2783	10598	0
96	13167	4666	134	0
144	9892	9012	0	0
192	9093	8794	0	0

ตารางภาคผนวก ก-6 พื้นที่ใต้กราฟของฟิล์ม TiO_2 ภายใต้ความเข้มแสง $44 \mu w/cm^2$ ที่เวลาต่าง ๆ

เวลาหลังการฉาย (ชั่วโมง)	พื้นที่ใต้กราฟ			
	O_2	CO_2	C_2H_4	C_3H_4
0	16055	0	37831	0
48	13634	2335	4612	0
96	12496	5598	704	0
144	9429	7711	0	0
192	7528	9524	0	0

ตารางภาคผนวก ก-7 พื้นที่ได้กราฟของฟิล์ม TiO₂ ภายใต้ความเข้มแสง 50 $\mu\text{w}/\text{cm}^2$ ที่เวลาต่าง ๆ

เวลาหลังการฉาย (ชั่วโมง)	พื้นที่ได้กราฟ			
	O ₂	CO ₂	C ₂ H ₄	C ₃ H ₄
0	16939	0	20336	0
48	13978	4210	1147	0
96	9559	10681	0	0
144	4558	16848	0	0
192	3575	19367	0	0

ตารางภาคผนวก ก-8 พื้นที่ได้กราฟของฟิล์ม TiO₂ ภายใต้ความเข้มแสง 59 $\mu\text{w}/\text{cm}^2$ ที่เวลาต่าง ๆ

เวลาหลังการฉาย (ชั่วโมง)	พื้นที่ได้กราฟ			
	O ₂	CO ₂	C ₂ H ₄	C ₃ H ₄
0	17195	0	20297	0
48	14828	6629	193	0
96	10482	11687	0	0
144	5355	18341	0	0
192	2549	21774	24	0

3. ผลกระทบของปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ส่งผลต่อการสลาย C_2H_4 ของ

กระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง

ข้อมูลพื้นที่ได้กราฟที่อ่านได้จากเครื่องก๊าซโครมาโตกราฟีของฟิล์ม TiO_2 ภายใต้การฉายแสงที่ความเข้มแสง $37 \mu w/cm^2$ ที่ปริมาณ TiO_2 0 1.9 และ 3.8 มิลลิกรัม ดังตารางภาคผนวก ก-9 ก-10 และ ก-5

ตารางภาคผนวก ก-9 พื้นที่ได้กราฟของฟิล์ม TiO_2 ที่ปริมาณ 0 mg

เวลาหลังการฉาย (ชั่วโมง)	พื้นที่ได้กราฟ			
	O_2	CO_2	C_2H_4	C_3H_4
0	16838	0	35711	0
48	17236	0	35159	1580
96	16944	0	33271	3767
144	16499	0	34845	5757
192	16568	0	34880	7622

ตารางภาคผนวก ก-10 พื้นที่ได้กราฟของฟิล์ม TiO_2 ที่ปริมาณ 1.9 mg

เวลาหลังการฉาย (ชั่วโมง)	พื้นที่ได้กราฟ			
	O_2	CO_2	C_2H_4	C_3H_4
0	16889	0	38276	0
48	16725	0	34730	0
96	15290	1145	28953	0
144	15843	2170	15323	0
192	12915	5088	5396	0
240	12305	5903	1953	0

4. ประสิทธิภาพในการสลาย C_2H_4 ของฟิล์ม TiO_2 , WO_3 และ TiO_2/WO_3 ของ

กระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง

ข้อมูลพื้นที่ได้กราฟที่อ่านได้จากเครื่องก๊าซโครมาโตกราฟีในสภาวะการฉายแสง UVA ที่ความเข้มแสง $37 \mu W/cm^2$ ได้แก่ ฟิล์มเปล่า 5 แผ่น TiO_2 1.9 มิลลิกรัม WO_3 0.67 มิลลิกรัม และฟิล์ม TiO_2/WO_3 แบบผสมและแบบ 2 ชั้น ดังตารางภาคผนวก ก-11 ก-10 ก-12 ก-13 และ ก-14 และการทดลองในสภาวะมืด ได้แก่ ฟิล์ม TiO_2 1.9 มิลลิกรัมและ WO_3 0.67 มิลลิกรัม ดังตารางภาคผนวก ก-15 และ ก-16

ตารางภาคผนวก ก-11 พื้นที่ได้กราฟของฟิล์มเปล่า 5 แผ่น (ไม่เคลือบ) ในสภาวะฉายแสง UVA

เวลาหลังการฉาย (ชั่วโมง)	พื้นที่ได้กราฟ			
	O_2	CO_2	C_2H_4	C_3H_4
0	15125	0	60147	0
48	15608	0	60241	6908
96	15286	0	62856	12718
144	15297	0	62535	16764
192	15515	0	61892	21165
240	15058	0	60932	22744
288	15274	0	61087	23526

ตารางภาคผนวก ก-12 พื้นที่ได้กราฟของฟิล์ม WO_3 ปริมาณ 0.67 มิลลิกรัม ในสภาวะฉายแสง UVA

เวลาหลังการฉาย (ชั่วโมง)	พื้นที่ได้กราฟ			
	O_2	CO_2	C_2H_4	C_3H_4
0	15381	0	39499	0
24	15303	0	37235	4194
48	14970	0	33628	4977
72	15312	0	34043	5906

ตารางภาคผนวก ก-12 (ต่อ)

เวลาหลังการฉาย (ชั่วโมง)	พื้นที่ได้กราฟ			
	O ₂	CO ₂	C ₂ H ₄	C ₃ H ₄
96	14997	0	35976	7101
120	15044	0	35842	10695
144	14600	0	34287	15130
168	14570	0	33046	16345
192	14502	0	32259	17935

ตารางภาคผนวก ก-13 พื้นที่ได้กราฟของฟิล์ม TiO₂/WO₃ แบบผสม ในสถานะฉายแสง UVA

เวลาหลังการฉาย (ชั่วโมง)	พื้นที่ได้กราฟ			
	O ₂	CO ₂	C ₂ H ₄	C ₃ H ₄
0	14373	0	32847	0
48	13788	0	32162	3014
96	14111	0	32373	2743
144	13567	1025	31663	4973
192	13607	1245	31103	6429
240	13742	1532	30235	9440
288	13160	1836	29473	8834
336	13388	2329	28785	11610
384	13312	3002	28356	13256

ตารางภาคผนวก ก-14 พื้นที่ได้กราฟของฟิล์ม TiO_2/WO_3 แบบ 2 ชั้น ในสภาวะฉายแสง UVA

เวลาหลังการฉาย (ชั่วโมง)	พื้นที่ได้กราฟ			
	O_2	CO_2	C_2H_4	C_3H_4
0	16160	0	38432	0
48	15286	0	23714	6113
96	14550	1210	23230	10410
144	14483	1961	23590	13993
192	14293	2965	22058	11975
240	11800	6212	20937	3394
288	10847	8314	19915	0
336	10691	9590	22840	0
384	9888	9992	19795	0

ตารางภาคผนวก ก-15 พื้นที่ได้กราฟของฟิล์ม TiO_2 ที่ปริมาณ 1.9 มิลลิกรัม ในสภาวะมืด

เวลาหลังการฉาย (ชั่วโมง)	พื้นที่ได้กราฟ			
	O_2	CO_2	C_2H_4	C_3H_4
0	15318	0	61135	0
24	14957	0	57740	0
48	14881	0	58294	0
72	14194	0	57363	0
96	14634	0	57208	0
120	14594	0	57182	0
144	14488	0	56338	0
168	14378	0	57289	0
192	14452	0	56854	0

ตารางภาคผนวก ก-16 พื้นที่ได้กราฟของฟิล์ม WO_3 ที่ปริมาณ 0.67 มิลลิกรัม ในสภาวะมืด

เวลาหลังการฉาย (ชั่วโมง)	พื้นที่ได้กราฟ			
	O_2	CO_2	C_2H_4	C_3H_4
0	15214	0	62815	0
24	14876	0	59162	0
48	14517	0	56468	0
72	14172	0	55874	0
96	14412	0	56230	0
120	14418	0	56501	0
144	14386	0	54789	0
168	14201	0	55340	0
192	14337	0	55495	0

2. การทดสอบประสิทธิภาพในการยึดอายุมะม่วงน้ำดอกไม้ด้วยบรรจุภัณฑ์แอคทีฟเคลือบด้วยอนุภาคโลหะออกไซด์ที่มีผลต่อสมบัติทางเคมีและทางกายภาพ

1. ศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณ C_2H_4 , O_2 และ CO_2 ของมะม่วงน้ำดอกไม้ในบรรจุภัณฑ์แอคทีฟภายใต้การฉายแสง UVA

ตารางภาคผนวก ก-17 พื้นที่ได้กราฟของก๊าซในบรรจุภัณฑ์ที่บรรจุผลมะม่วงน้ำดอกไม้ที่ไม่ใช้ฟิล์ม TiO_2

เวลาหลังการฉาย (ชั่วโมง)	พื้นที่ได้กราฟของก๊าซ C_2H_4	
	ใช้ฟิล์ม TiO_2	ไม่ใช้ฟิล์ม TiO_2
0	0	0
48	0	0
96	0	0
144	63	0
192	0	4705

ตารางภาคผนวก ก-17 (ต่อ)

เวลาหลังการฉาย (ชั่วโมง)	พื้นที่ใต้กราฟของก๊าซ C ₂ H ₄	
	ใช้ฟิล์ม TiO ₂	ไม่ใช้ฟิล์ม TiO ₂
240	8389	11141
288	4921	13782
336	3792	14941

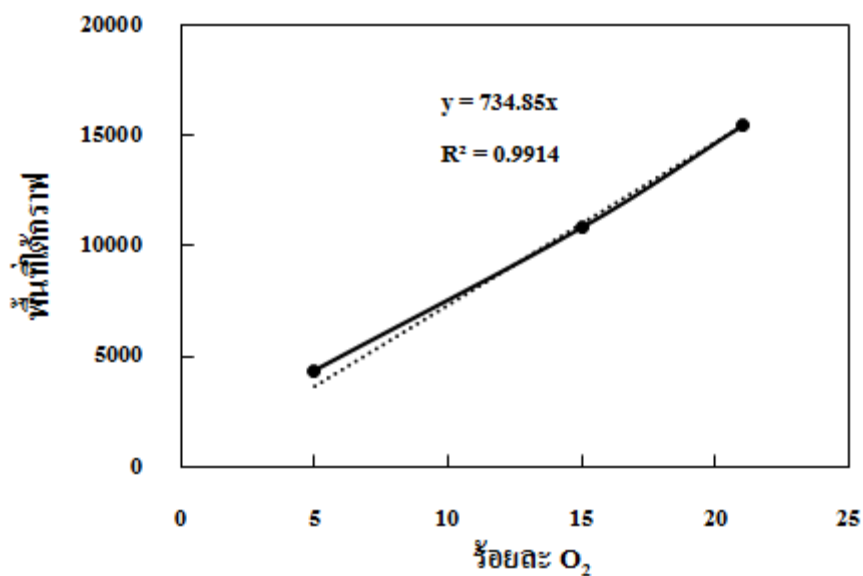
ตารางภาคผนวก ก-18 ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ (องศาบริกซ์) ของผลมะม่วง
น้ำดอกไม้ที่บรรจุในบรรจุภัณฑ์ที่ไม่ใช้ฟิล์ม TiO₂

เวลาหลังการฉาย (วัน)	องศาบริกซ์		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
0	10.00	10.16	10.04
2	13.24	13.55	13.58
4	19.35	19.70	19.20
6	17.05	16.65	16.95
8	14.00	14.15	14.00
10	13.70	13.70	13.45

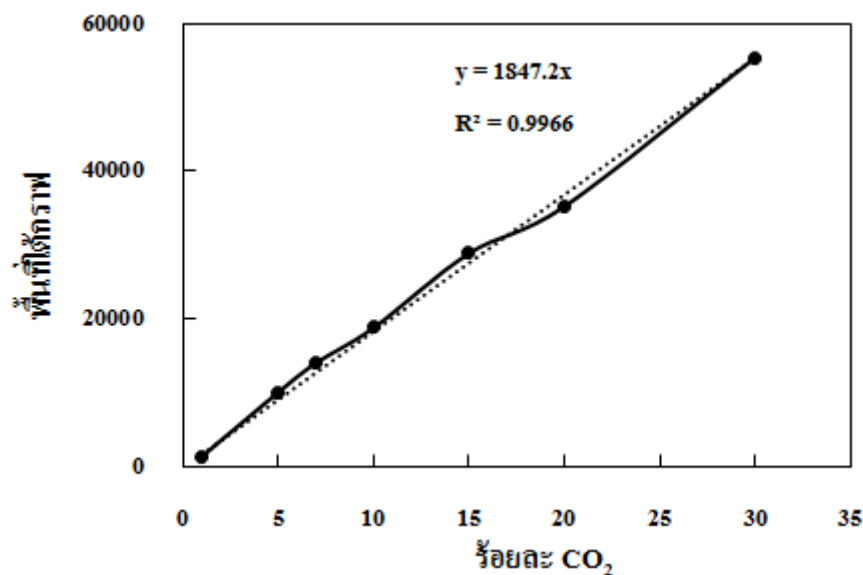
ตารางภาคผนวก ก-19 ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ (องศาบริกซ์) ของผลมะม่วง
น้ำดอกไม้ที่บรรจุในบรรจุภัณฑ์ที่ใช้ฟิล์ม TiO_2

เวลาหลังการฉาย (วัน)	องศาบริกซ์		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
0	8.76	8.72	9.36
2	10.88	11.00	10.88
4	14.50	14.40	14.50
6	16.40	16.50	16.50
8	15.80	16.00	16.15
10	16.25	16.40	16.40

ภาคผนวก ข
กราฟสอบเทียบ

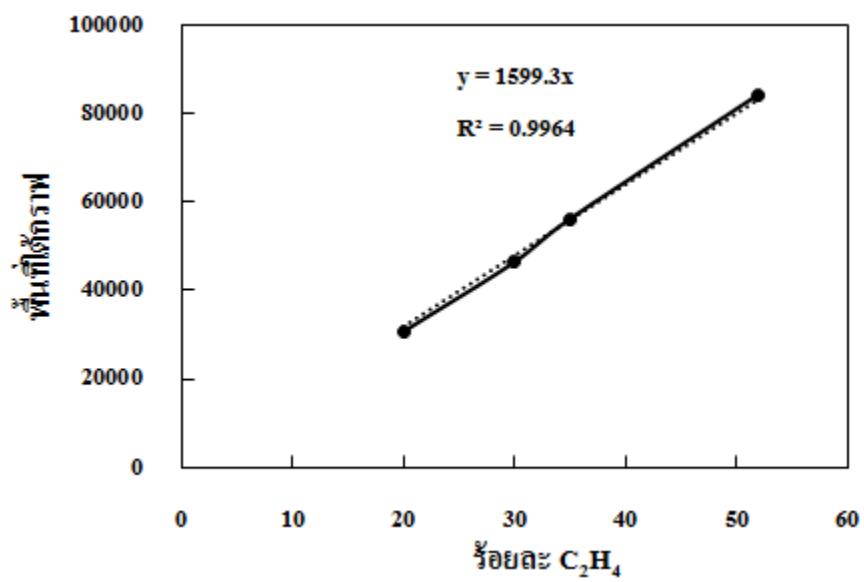


ภาพภาคผนวก ข-1 กราฟสอบเทียบ (Calibration curve) ความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ใต้กราฟกับ O₂



หมายเหตุ: พื้นที่ใต้กราฟของ CO₂ สามารถตรวจสอบได้ต่ำที่สุดที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.5

ภาพภาคผนวก ข-2 กราฟสอบเทียบ (Calibration curve) ความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ใต้กราฟกับ CO₂



ภาพภาคผนวก ข-3 กราฟสอบเทียบ (Calibration curve) ความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ใต้กราฟกับ C_2H_4

ภาคผนวก ค
วิธีการคำนวณ

การคำนวณร้อยละของอัตราการลดลงเริ่มต้น

สมการคำนวณ

$$\%R_{\text{REACTION}} = \frac{R_{UV} - R_D}{R_{UV}} \times 100$$

$$\%R_{\text{ADSORPTION}} = \frac{R_D}{R_{UV}} \times 100$$

กำหนดให้

$\%R_{\text{REACTION}}$ = ร้อยละของอัตราการลดลงเริ่มต้นด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง

$\%R_{\text{ADSORPTION}}$ = ร้อยละของอัตราการลดลงเริ่มต้นด้วยกระบวนการดูดซับ

R_{UV} = อัตราการลดลงเริ่มต้นในสภาวะฉายแสง UVA

R_D = อัตราการลดลงเริ่มต้นในสภาวะมืด

ตัวอย่างการคำนวณ $\%R_{\text{REACTION OF ETHYLENE}}$ ด้วย TiO_2

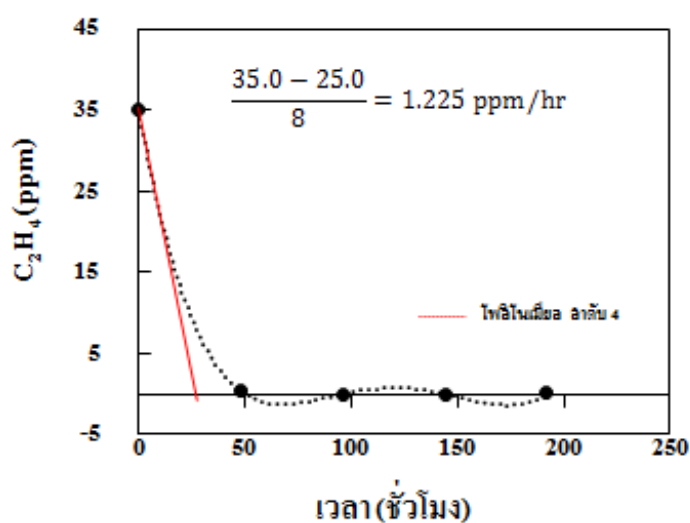
$$\%R_{\text{REACTION OF ETHYLENE}} = \frac{1.119 - 0.373}{1.119} \times 100$$

$$\%R_{\text{REACTION OF ETHYLENE}} = 66.67$$

การคำนวณอัตราการลดลงเริ่มต้น

1. การคำนวณอัตราการลดลงเริ่มต้นของ C_2H_4

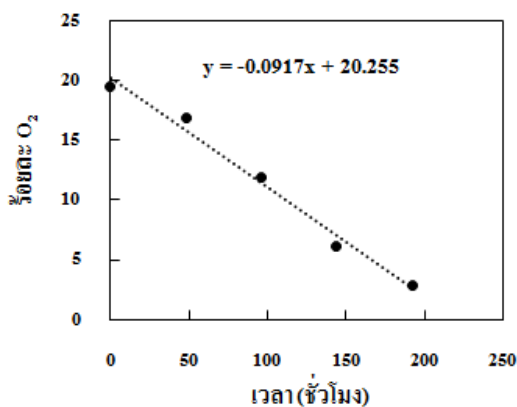
การหาอัตราการลดลงเริ่มต้นของ C_2H_4 ทำโดยการพล็อตกราฟการเปลี่ยนแปลงปริมาณ C_2H_4 ในหน่วย ppm ต่อเวลา สร้างเส้นแนวโน้มโพลิโนเมียล ลำดับ 4 จากนั้นลากเส้นตรงผ่านเส้นสัมผัสเส้นแนวโน้มในช่วงเริ่มต้นเพื่อหาค่าความชันในหน่วย ppm/hr ดังภาพภาคผนวก ค-1 นำหน่วยที่ได้หารด้วยปริมาณสารของโลหะออกไซด์ที่ใช้ในการเกิดกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง ในหน่วยโมล จะได้อัตราการเริ่มต้นในหน่วย ppm/mmol·hr หากต้องการคิดต่อพื้นที่ในการเกิดปฏิกิริยาให้นำมาหารด้วยพื้นที่ฟิล์มที่เคลือบ



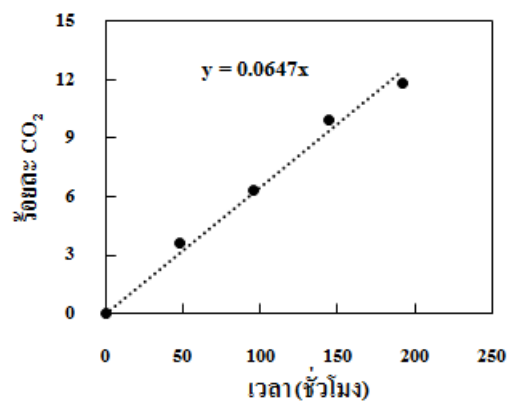
ภาพภาคผนวก ค-1 การหาอัตราการลดลงเริ่มต้นของ C_2H_4 ในบรรจุภัณฑ์ภายใต้กระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง ของฟิล์ม TiO_2 ร่วมกับ WO_3 แบบ 2 ชั้น

2. การคำนวณอัตราการลดลงเริ่มต้นของ O_2 และ CO_2

พล็อตกราฟการเปลี่ยนแปลงปริมาณ O_2 และ CO_2 ในหน่วยร้อยละต่อเวลาเป็นกราฟเชิงเส้น ใช้ความชันที่ได้คือหน่วย %/hr จากภาพภาคผนวก ค-2 (ก) ความชันของ O_2 มีค่าเท่ากับ 0.0917 %/hr และภาพภาคผนวก ค-2 (ข) ความชันของ CO_2 มีค่าเท่ากับ 0.09647 %/hr นำค่าความชันที่ได้หารด้วยปริมาณสารของโลหะออกไซด์ที่ใช้ในการเกิดกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงในหน่วยโมล จะได้อัตราการเริ่มต้นในหน่วย %/mmol·hr หากต้องการคิดต่อพื้นที่ในการเกิดปฏิกิริยาให้นำมาหารด้วยพื้นที่ของฟิล์มที่เคลือบ



(ก)



(ข)

ภาพภาคผนวก ค-2 (ก) การหาอัตราการลดลงเริ่มต้นของ O_2 และ (ข) อัตราการเกิดเริ่มต้นของ CO_2 ของฟิล์ม TiO_2 3.8 มิลลิกรัม ที่ความเข้มแสง 59 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร

การคำนวณการสลายตัวของบรรจุภัณฑ์

$$\text{โมล (คาร์บอน)} = \frac{g_c}{Mw_c} = \frac{4.57 \text{ mg}}{12 \text{ g/mol}} = 0.38 \text{ mmol}$$

ตารางภาคผนวก ค-1 การสลายตัวของบรรจุภัณฑ์กับ CO_2 ที่ควรจะเกิด

การสลายตัว	น้ำหนัก (mg)	CO_2 ที่ควรจะเกิดจากน้ำหนัก บรรจุภัณฑ์สลายตัว (mmol)
บรรจุภัณฑ์ LDPE	1.56	0.13
บรรจุภัณฑ์ LDPE และฟิล์ม	4.57	0.38

หาโมลรวมในบรรจุภัณฑ์ จากสูตร $PV = n_T RT$

$$n_T = \frac{PV}{RT}$$

$$n_T = \frac{1 \text{ atm} \cdot 300 \text{ mL}}{0.082 \frac{\text{atm} \cdot \text{L}}{\text{mol} \cdot \text{K}} \cdot 298 \text{ K}}$$

$$n_T = 0.0123 \text{ mol}$$

บรรจุภัณฑ์ที่มี C_2H_4 35 ppm บรรจุฟิล์ม TiO_2 1.9 mg CO_2 ทำการทดลองในสภาวะฉายแสง UVA ที่ความเข้มแสง $37 \mu W/cm^2$ เป็นเวลา 192 ชั่วโมง มี CO_2 เกิดขึ้นร้อยละ 2.8 คิดเป็นโมล CO_2 ที่เกิดในบรรจุภัณฑ์ $= \frac{2.8}{100} \times 0.0123 \text{ mol} = 0.344 \text{ mmol}$

ดังนั้น CO_2 ที่ควรจะเกิดจากน้ำหนักบรรจุภัณฑ์สลายตัวมีค่าเท่ากับ 0.38 mmol และ CO_2 ที่เกิดจากการทดลองด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงมีค่าเท่ากับเท่ากับ 0.344 mmol

การคำนวณวิเคราะห์ปริมาณสารที่ติดบนฟิล์ม

ตารางภาคผนวก ค-2 น้ำหนักฟิล์มโลหะออกไซด์ที่เคลือบบนแผ่นฟิล์มพลาสติก

ฟิล์มพลาสติกเคลือบ	น้ำหนักสารที่ติด/แผ่น (mg)	น้ำหนัก TiO_2 (mg)	น้ำหนัก WO_3 (mg)	น้ำหนัก PEG (mg)
TiO_2	2.0	1.9	-	0.1
WO_3	0.8	-	0.13	0.67
TiO_2/WO_3 แบบผสม	1.5	0.79	0.12	0.59
TiO_2/WO_3 แบบ 2 ชั้น	2.9	1.98	0.13	0.79

1. องค์ประกอบของฟิล์มเคลือบ TiO_2 ผสม PEG

พื้นที่ฟิล์มพลาสติก 1 แผ่น กว้าง 7 cm ยาว 9 cm คิดเป็นพื้นที่ 63 cm^2

มวลโมเลกุล TiO_2 79.87 g/mol มวลโมเลกุล PEG 10,000 g/mol

ปริมาณสารที่ติดบนแผ่นฟิล์ม

สารแขวนลอยของ TiO_2 ผสม PEG ประกอบด้วย TiO_2 32 g, PEG 2 g และน้ำ 480 ml

TiO_2 ผสม PEG น้ำหนักรวม 34 g จะมี TiO_2 อยู่ 32 g

แผ่นฟิล์มเคลือบสารติด 2 mg จะมี TiO_2 เท่ากับ $\frac{2 \text{ mg} \times 32 \text{ g}}{34 \text{ g}} = 1.88 \text{ mg}$

ดังนั้น น้ำหนักของ TiO_2 เท่ากับ 1.88 mg คิดเป็น 0.0235 mmol และ $0.374 \mu\text{mol/cm}^2$

และน้ำหนักของ PEG เท่ากับ $2.0 - 1.88 = 0.12 \text{ mg}$ คิดเป็น $0.012 \mu\text{mol}$ และ $0.00019 \mu\text{mol/cm}^2$

2. องค์ประกอบของฟิล์มเคลือบ WO₃

มวลโมเลกุล WO₃ 231.84 g/mol

มวลโมเลกุล PEG 2,000 g/mol

Sol WO₃ ประกอบด้วย ของเหลว WO₃ และ PEG

จากการวิเคราะห์ TGA

เผา Sol WO₃ 70 μ L มี WO₃ 0.248 mg_{แห้ง}

มี PEG 1.237 mg_{แห้ง}

น้ำหนักรวมของ WO₃ และ PEG เท่ากับ 1.485 mg_{แห้ง}

ปริมาณสารที่ติดบนแผ่นฟิล์ม

น้ำหนักแห้งของ Sol WO₃ 1.485 mg จะมี WO₃ 0.248 mg_{แห้ง}

แผ่นฟิล์มเคลือบสารติด 0.8 mg จะมี WO₃ เท่ากับ $\frac{0.8 \text{ mg} \times 0.248 \text{ mg}}{1.485 \text{ mg}} = 0.1336 \text{ mg}$

ดังนั้น น้ำหนักของ WO₃ เท่ากับ 0.1336 mg คิดเป็น 0.576 μ mol และ 0.00915 μ mol/cm² และน้ำหนักของ PEG เท่ากับ 0.8 - 0.1336 = 0.6664 mg คิดเป็น 333 μ mol, 5.29 μ mol/cm²

3. องค์ประกอบของฟิล์มเคลือบ TiO₂/WO₃ แบบผสม

มวลโมเลกุล TiO₂ 79.87 g/mol

มวลโมเลกุล WO₃ 231.84 g/mol

มวลโมเลกุล PEG 2,000 g/mol

สารแขวนลอย TiO₂ ผสม Sol WO₃ ประกอบด้วย TiO₂ 11.82 g และ Sol WO₃ 0.5 L

จากการวิเคราะห์ TGA

เผา Sol WO₃ 70 μ L มี WO₃ 0.248 mg_{แห้ง}

มี PEG 1.237 mg_{แห้ง}

เตรียม Sol WO₃ 0.5 L จะมี WO₃ $\frac{0.5 \text{ L} \times 0.248 \text{ mg}}{70 \times 10^{-6} \text{ L}} = 1.77 \text{ g}$

จะมี PEG $\frac{0.5 \text{ L} \times 1.237 \text{ mg}}{70 \times 10^{-6} \text{ L}} = 8.836 \text{ g}$

น้ำหนักรวมของ TiO₂ WO₃ และ PEG เท่ากับ 22.43 g

ปริมาณสารที่ติดบนแผ่นฟิล์ม

น้ำหนักของ Sol WO₃ ผสม TiO₂ 22.43 g มี TiO₂ 11.82 g

มี WO₃ 1.77 g

มี PEG 8.836 g

แผ่นฟิล์มเคลือบสารติด 1.5 mg จะมี TiO₂ เท่ากับ $\frac{1.5 \text{ mg} \times 11.82 \text{ g}}{22.43 \text{ g}} = 0.79 \text{ mg}$

จะมี WO₃ เท่ากับ $\frac{1.5 \text{ mg} \times 1.77 \text{ g}}{22.43 \text{ g}} = 0.12 \text{ mg}$

จะมี PEG เท่ากับ $\frac{1.5 \text{ mg} \times 8.836 \text{ g}}{22.43 \text{ g}} = 0.59 \text{ mg}$

ดังนั้น น้ำหนักของ TiO₂ เท่ากับ 0.79 mg คิดเป็น 9.89 μmol และ 0.157 μmol/cm²

น้ำหนักของ WO₃ เท่ากับ 0.12 mg คิดเป็น 0.518 μmol และ 0.00822 μmol/cm²

น้ำหนักของ PEG เท่ากับ 0.59 mg คิดเป็น 0.295 μmol และ 0.00468 μmol/cm²

4. องค์ประกอบของฟิล์มเคลือบ TiO₂/WO₃ แบบ 2 ชั้น

มวลโมเลกุล TiO₂ 79.87 g/mol

มวลโมเลกุล WO₃ 231.84 g/mol

มวลโมเลกุล PEG 2,000 g/mol

มวลโมเลกุล PEG 10,000 g/mol

ปริมาณสารที่ติดบนแผ่นฟิล์ม

เคลือบชั้นที่ 1 Sol WO₃

น้ำหนักแห้งของ Sol WO₃ 1.485 mg จะมี WO₃ 0.248 mg_{แห้ง}

แผ่นฟิล์มเคลือบสารติด 0.8 mg จะมี WO₃ เท่ากับ $\frac{0.8 \text{ mg} \times 0.248 \text{ mg}}{1.485 \text{ mg}} = 0.1336 \text{ mg}$

ดังนั้น น้ำหนักของ WO₃ เท่ากับ 0.1336 mg คิดเป็น 0.576 μmol และ 0.00915

μmol/cm² และน้ำหนักของ PEG เท่ากับ 0.8 - 0.1336 = 0.6664 mg คิดเป็น 333 μmol และ 5.29 μmol/cm²

เคลือบชั้นที่ 2 TiO₂ ผสม PEG

สารแขวนลอย TiO₂ ผสม PEG ประกอบด้วย TiO₂ 32 g น้ำ 480 ml และ PEG 2 g

TiO₂ ผสม PEG น้ำหนักรวม 34 g จะมี TiO₂ อยู่ 32 g

แผ่นฟิล์มเคลือบสารติด 2.3 mg จะมี TiO₂ เท่ากับ $\frac{2.3 \text{ mg} \times 32 \text{ g}}{34 \text{ g}} = 2.16 \text{ mg}$

ดังนั้น น้ำหนักของ TiO_2 เท่ากับ 2.16 mg คิดเป็น 27 μmol และ 0.429 $\mu\text{mol}/\text{cm}^2$ และ น้ำหนักของ PEG เท่ากับ 2.3-2.16 = 0.14 mg คิดเป็น 0.014 μmol และ $2.22 \times 10^{-4} \mu\text{mol}/\text{cm}^2$

5. องค์ประกอบของผง WO_3 ใน Sol WO_3

จากการวิเคราะห์ TGA

เผา Sol WO_3 70 μL จะมี WO_3 0.248 mg_{แห้ง}

$$\text{เตรียม Sol } \text{WO}_3 \text{ 0.8 L จะมี } \text{WO}_3 \frac{0.8 \text{ L} \times 0.248 \text{ mg}}{70 \times 10^{-6} \text{ L}} = 2.8343 \text{ g}$$

จากการอบ Sol WO_3 0.8 L ได้ผง Sol WO_3 ทั้งหมด 5.7642 g

$$\text{ดังนั้น จะมีองค์ประกอบของ } \text{WO}_3 \text{ เหลืออยู่ร้อยละ } \frac{2.8343}{5.6742} \times 100 = 49.17$$

$$\text{หากนำผง Sol } \text{WO}_3 \text{ มา 0.5 g จะมีผง } \text{WO}_3 \text{ อยู่ } 0.5 \times \frac{49.17}{100} = 0.246 \text{ g}$$

คำนวณการอัดอากาศ

ถุงพลาสติก LDPE มีขนาดสูง 18 cm ยาว 9.5 cm เมื่ออัดอากาศถุงพองเต็มที่ มีปริมาตร 350 cm^3 ทำการอัดก๊าซโดยบรรจุ C_2H_4 35 ppm ในอากาศ บรรจุปริมาตรก๊าซลงในถุงทั้งหมด 300 cm^3 โดยทำการบรรจุก๊าซ 3 ชนิดลงในถุง คือ C_2H_4 O_2 และ N_2

ปริมาตรก๊าซที่ต้องบรรจุ

1. C_2H_4 ความเข้มข้น 35 ppm

ปริมาตรก๊าซทั้งหมด 10^6 cm^3 มี C_2H_4 อยู่ 35 cm^3

$$\text{ดังนั้น ปริมาตรก๊าซในถุงทั้งหมด } 300 \text{ cm}^3 \text{ ต้องมี } \text{C}_2\text{H}_4 \text{ อยู่ } \frac{300 \times 35}{10^6} = 0.0105 \text{ cm}^3$$

ความเข้มข้นเริ่มต้นในถังก๊าซ C_2H_4 เท่ากับ 51.9 ppm ผสม N_2

ปริมาตรก๊าซทั้งหมด 10^6 cm^3 มี C_2H_4 อยู่ 51.9 cm^3

$$\text{ดังนั้น ปริมาตรก๊าซทั้งหมด } 1 \text{ cm}^3 \text{ ต้องมี } \text{C}_2\text{H}_4 \frac{1 \times 51.9}{10^6} = 5.19 \times 10^{-5} \text{ cm}^3$$

เมื่ออัดก๊าซ C_2H_4 51.9 ppm ผสม N_2 พบว่ามี C_2H_4 อยู่ $5.19 \times 10^{-5} \text{ cm}^3$ ในปริมาตรก๊าซทั้งหมด 1 cm^3

ดังนั้น หากต้องการ C_2H_4 ทั้งหมด 0.0105 cm^3 จะต้องอัดก๊าซปริมาตรทั้งหมด

$$\frac{0.0105 \times 1}{5.19 \times 10^{-5}} = 202.31 \text{ cm}^3$$

ดังนั้น อัดก๊าซ C_2H_4 51.9 ppm ผสม N_2 ปริมาตรทั้งหมด 202.31 cm^3

คิดเป็น ก๊าซ C_2H_4 0.0105 cm^3 และ ก๊าซ N_2 202.2995 cm^3

ปริมาตรก๊าซรวมในถุงทั้งหมด 300 cm^3

ปริมาตรอากาศเท่ากับ $300 - 0.0105 = 299.9895 \text{ cm}^3$

2. อากาศมีองค์ประกอบของ O_2 ร้อยละ 21 ในถุงจะต้องมี O_2 เท่ากับ $0.21 \times 299.9895 = 62.9978 \text{ cm}^3$

3. อากาศมีองค์ประกอบของ N_2 ร้อยละ 79 ในถุงจะต้องมี O_2 เท่ากับ $0.79 \times 299.99 = 236.9917 \text{ cm}^3$

ดังนั้น อัดก๊าซ N_2 เพิ่ม $236.9917 - 202.2995 = 34.6922 \text{ cm}^3$

การอัดก๊าซใส่ถุง

ปรับอัตราการไหลของก๊าซเป็น $100 \text{ cm}^3/\text{min}$

1. ก๊าซ C_2H_4 เท่ากับ 51.9 ppm ผสม N_2

$$\begin{aligned} \text{เวลาในการบรรจุก๊าซ} &= \frac{\text{ปริมาตรก๊าซ}}{\text{อัตราการไหลของก๊าซ}} \\ &= \frac{202.31 \text{ cm}^3}{100 \text{ cm}^3/\text{min}} \\ &= 2.02 \text{ min} \end{aligned}$$

เวลาที่ใช้จริงในการบรรจุ เท่ากับ 2 นาที 2 วินาที

2. ก๊าซ O_2

$$\begin{aligned} \text{เวลาในการบรรจุก๊าซ} &= \frac{\text{ปริมาตรก๊าซ}}{\text{อัตราการไหลของก๊าซ}} \\ &= \frac{62.9978 \text{ cm}^3}{100 \text{ cm}^3/\text{min}} \\ &= 0.63 \text{ min} \end{aligned}$$

เวลาที่ใช้จริงในการบรรจุ เท่ากับ 38 วินาที

3. ก๊าซ O_2

$$\begin{aligned} \text{เวลาในการบรรจุก๊าซ} &= \frac{\text{ปริมาตรก๊าซ}}{\text{อัตราการไหลของก๊าซ}} \\ &= \frac{34.6922 \text{ cm}^3}{100 \text{ cm}^3/\text{min}} \\ &= 0.347 \text{ min} \end{aligned}$$

เวลาที่ใช้จริงในการบรรจุเท่ากับ 21 วินาที

ภาคผนวก ง
ลักษณะทางกายภาพของมะม่วง



(ก)



(ข)

ภาพภาคผนวก ง-1 ผลมะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้ในบรรจุภัณฑ์ (ก) ไม่ใช้ฟิล์ม TiO_2 และ (ข) ใช้ฟิล์ม TiO_2 ในวันเริ่มต้น



(ก)



(ข)

ภาพภาคผนวก ง-2 ผลมะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้ในบรรจุภัณฑ์ (ก) ไม่ใช้ฟิล์ม TiO_2 และ (ข) ใช้ฟิล์ม TiO_2 ในวันที่ 2



(ก)



(ข)

ภาพภาคผนวก ง-3 ผลมะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้ในบรรจุภัณฑ์ (ก) ไม่ใช้ฟิล์ม TiO_2 และ (ข) ใช้ฟิล์ม TiO_2 ในวันที่ 4



(ก)



(ข)

ภาพภาคผนวก ง-4 ผลมะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้ในบรรจุภัณฑ์ (ก) ไม่ใช้ฟิล์ม TiO_2 และ (ข) ใช้ฟิล์ม TiO_2 ในวันที่ 6



(ก)



(ข)

ภาพภาคผนวก ง-5 ผลมะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้ในบรรจุภัณฑ์ (ก) ไม่ใช้ฟิล์ม TiO_2 และ (ข) ใช้ฟิล์ม TiO_2 ในวันที่ 8



(ก)



(ข)

ภาพภาคผนวก ง-6 ผลมะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้ในบรรจุภัณฑ์ (ก) ไม่ใช้ฟิล์ม TiO_2 และ (ข) ใช้ฟิล์ม TiO_2 ในวันที่ 10



(ก)



(ข)

ภาพภาคผนวก ง-7 ผลมะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้ในบรรจุภัณฑ์ (ก) ไม่ใช้ฟิล์ม TiO_2 และ (ข) ใช้ฟิล์ม TiO_2 ในวันที่ 12



(ก)



(ข)

ภาพภาคผนวก ง-8 ผลมะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้ในบรรจุภัณฑ์ (ก) ไม่ใช้ฟิล์ม TiO_2 และ (ข) ใช้ฟิล์ม TiO_2 ในวันที่ 14