



## รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การพัฒนาฟิล์มถนอมอาหารด้วยอนุภาคโลหะออกไซด์ขนาดนาโน  
(Active Packaging Development by Metal Oxide Nanoparticle)

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ไพสิน เกาตระการวิวัฒน์

โครงการวิจัยประเภทงบประมาณเงินรายได้  
จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน)  
ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2558  
มหาวิทยาลัยบูรพา

รหัสโครงการ 2558A10802282

สัญญาเลขที่ 120/2558

## รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การพัฒนาฟิล์มถนอมอาหารด้วยอนุภาคโลหะออกไซด์ขนาดนาโน  
(Active Packaging Development by Metal Oxide Nanoparticle)

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ไพสิน เกาตระการวิวัฒน์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

กันยายน พ.ศ. 2560

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการ “การพัฒนาฟิล์มถนอมอาหารด้วยอนุภาคโลหะออกไซด์ขนาดนาโน” (Active Packaging Development by Metal Oxide Nanoparticle) ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้จากเงินอุดหนุนรัฐบาล ผ่านสำนักคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ เลขที่สัญญา 120/2558

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ที่ให้ความอนุเคราะห์ด้านสถานที่ เครื่องมือ อุปกรณ์ ในการทำวิจัยในโครงการฯ จนแล้วเสร็จ เป็นอย่างดี

## บทสรุปสำหรับผู้บริหาร

### (Executive Summary)

ข้าพเจ้า ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ไพโรจน์ เกาตรการวิวัฒน์ ได้รับทุนสนับสนุนโครงการวิจัยจาก มหาวิทยาลัยบูรพา ประเภทงบประมาณเงินรายได้ จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน) มหาวิทยาลัยบูรพา โครงการวิจัยเรื่อง การพัฒนาฟิล์มถนอมอาหารด้วยอนุภาคโลหะออกไซด์ขนาดนาโน (Active Packaging Development by Metal Oxide Nanoparticle) รหัสโครงการ 2558A10802282 สัญญาเลขที่ 120/2558 ได้รับงบประมาณรวมทั้งสิ้น 690,000 บาท (หกแสนเก้าหมื่นบาทถ้วน) ระยะเวลาดำเนินการ ตุลาคม 2557- กันยายน 2560

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาฟิล์มพลาสติกความหนาแน่นต่ำที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์ เพื่อการยืดอายุการเก็บรักษามะม่วง โดยเน้นศึกษาผลกระทบของปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ในฟิล์ม ที่มีต่อความสามารถในการกำจัดเอทิลีนและออกซิเจนในบรรจุภัณฑ์ และการชะลอการสุกของมะม่วง มีการทดลอง 4 ส่วน ส่วนแรก การศึกษาวิธีการเตรียมฟิล์มพลาสติกร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ พบว่า การเตรียมฟิล์มด้วยวิธีคอมปาวด์ (Compounding) และวิธีการผสม (Mixing) มีการกระจายตัวของไทเทเนียมไดออกไซด์ไม่ดี ซึ่งมีค่าเฉลี่ยที่  $5.8 \pm 1.9$  wt% และ  $7.4 \pm 4.7$  wt% ตามลำดับ เนื่องจากเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว มีแรงเฉือนน้อยจึงทำให้เกิดการผสมได้ไม่ดี ในขณะที่การเตรียมฟิล์มเคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ (Dip-coating) สามารถปรับปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีอยู่บนฟิล์มได้ง่าย และการทดลองนี้ปรับค่าเท่ากับ 0.03 และ 0.06 mg/cm<sup>2</sup> ส่วนที่สอง การทดสอบประสิทธิภาพในการกำจัดออกซิเจนด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติกของฟิล์มพอลิเอทิลีน พบว่าฟิล์มที่เตรียมจากวิธีคอมปาวด์และวิธีการผสม สามารถดูดซับออกซิเจนได้ดีกว่าฟิล์มพอลิเอทิลีนที่ไม่มีไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยที่อัตราการดูดซับออกซิเจนจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์และความเข้มข้นของออกซิเจนเริ่มต้น อย่างไรก็ตาม ฟิล์มทั้งสองไม่พบปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติกชัดเจนอาจเป็นเพราะไทเทเนียมไดออกไซด์ไม่สัมผัสออกซิเจนได้ดี อัตราการไหลของก๊าซและความเข้มข้นเริ่มต้นสูง ส่วนที่สาม การนำฟิล์มเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ทดสอบประสิทธิภาพในการกำจัดเอทิลีนด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติก ภายใต้แสงอัลตราไวโอเล็ต (UVA) ความเข้มแสง 37  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$  พบว่าฟิล์มสามารถกำจัดเอทิลีนที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 35 ppm ได้ด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติก โดยที่ไทเทเนียมไดออกไซด์ 3.8 mg (0.06 mg/cm<sup>2</sup>) สามารถกำจัดเอทิลีนได้ 12.1 ppm/mmol.hr ซึ่งคิดเป็น 5.5 เท่า ของฟิล์มที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์ 1.9 mg (0.03 mg/cm<sup>2</sup>) ในกรณีที่เพิ่มความเข้มแสงในช่วง 37-44  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$  อัตราการกำจัดเอทิลีนมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มแสงมีค่าสูงขึ้นมากกว่า 44  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$  การกำจัดเอทิลีนเพียงเล็กน้อย อาจเป็นเพราะการแย่งเกิดปฏิกิริยาของ C<sub>3</sub>H<sub>4</sub> ซึ่งเกิดขึ้นจากการสลายตัวของฟิล์มบรรจุภัณฑ์ภายใต้การฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต ส่วนสุดท้ายการทดสอบประสิทธิภาพในการยืดอายุมะม่วงน้ำดอกไม้ในบรรจุภัณฑ์ที่มีฟิล์มเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ 1.9 mg (0.03 mg/cm<sup>2</sup>) พร้อมกับอัดอากาศปริมาตร 300 ml ฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตที่มีความเข้มแสง 37  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$  ที่

อุณหภูมิ 24 °C พบว่า มะม่วงที่เก็บรักษาไว้ในบรรจุภัณฑ์ที่มีฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์จะสุกในวันที่ 8 ซึ่งสามารถชะลอการสุกได้เมื่อเปรียบเทียบกับมะม่วงที่อยู่ในบรรจุภัณฑ์เปรียบเทียบ อันเนื่องจากการกำจัดเอทิลีนที่เกิดขึ้นจากการหายใจของมะม่วงได้ และลักษณะเปลือกและเนื้อของมะม่วงที่เก็บรักษาไว้ในบรรจุภัณฑ์ที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์จะเริ่มสังเกตเห็นการเน่าเสียในวันที่ 10 ในขณะที่มะม่วงที่เก็บในบรรจุภัณฑ์เปรียบเทียบจะเริ่มเห็นการเน่าเสียในวันที่ 8

**คำสำคัญ:** การยืดอายุมะม่วง, ไทเทเนียมไดออกไซด์, ฟิล์มพลาสติกความหนาแน่นต่ำ, ปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลติก

## ผลผลิต (Output)

ได้ตอบรับให้ไปนำเสนอผลงานวิจัยในงานประชุมวิชาการทางวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 27 (TiChE2017) ซึ่งจะจัดในวันที่ 18-20 ตุลาคม 2560 ณ โรงแรมแชงกรีล่า กรุงเทพฯ และจะได้ตีพิมพ์ผลงานวิจัยดังกล่าวในวารสารสืบเนื่องงานประชุมวิชาการ (Proceedings)

## ข้อเสนอแนะ

การยืดอายุการเก็บรักษามะม่วงจำเป็นต้องใช้แสงอัลตราไวโอเล็ตเพื่อกำจัดเอทิลีน หากพัฒนาฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับโลหะออกไซด์ที่เหมาะสม จะทำให้การกำจัดเอทิลีนสามารถเกิดขึ้นได้อย่างต่อเนื่อง ภายหลังจากได้รับแสงอัลตราไวโอเล็ต อีกทั้งน่าจะสามารถช่วยให้ปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลติก เกิดขึ้นได้ดี เนื่องจากการเกิด Charge separation

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาฟิล์มพลาสติกความหนาแน่นต่ำที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์ เพื่อการยืดอายุการเก็บรักษามะม่วง โดยเน้นศึกษาผลกระทบของปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ในฟิล์ม ที่มีต่อความสามารถกำจัดเอทิลีนและออกซิเจนในบรรจุภัณฑ์ และการชะลอการสุกของมะม่วง มีการทดลอง 4 ส่วน ส่วนแรกการศึกษาวิธีการเตรียมฟิล์มพลาสติกร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ พบว่า การเตรียมฟิล์มด้วยวิธีคอมปาวด์ (Compounding) และวิธีการผสม (Mixing) มีการกระจายตัวของไทเทเนียมไดออกไซด์ไม่ดี ซึ่งมีค่าเฉลี่ยที่  $5.8 \pm 1.9$  wt% และ  $7.4 \pm 4.7$  wt% ตามลำดับ เนื่องจากเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว มีแรงเฉือนน้อยจึงทำให้เกิดการผสมได้ไม่ดี ในขณะที่การเตรียมฟิล์มเคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ (Dip-coating) สามารถปรับปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีอยู่บนฟิล์มได้ง่าย และการทดลองนี้ปรับค่าเท่ากับ  $0.03$  และ  $0.06$  mg/cm<sup>2</sup> ส่วนที่สอง การทดสอบประสิทธิภาพในการกำจัดออกซิเจนด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติกของฟิล์มพอลิเอทิลีน พบว่าฟิล์มที่เตรียมจากวิธีคอมปาวด์และวิธีการผสมสามารถดูดซับออกซิเจนได้ดีกว่าฟิล์มพอลิเอทิลีนที่ไม่มีไทเทเนียม ไดออกไซด์ โดยที่อัตราการดูดซับออกซิเจนจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์และความเข้มข้นของออกซิเจนเริ่มต้น อย่างไรก็ตาม ฟิล์มทั้งสองไม่พบปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติกชัดเจนอาจเป็นเพราะไทเทเนียมไดออกไซด์ไม่สัมผัสออกซิเจนได้ดี อัตราการไหลของก๊าซและความเข้มข้นเริ่มต้นสูง ส่วนที่สาม การนำฟิล์มเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ทดสอบประสิทธิภาพในการกำจัดเอทิลีนด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติก ภายใต้แสงอัลตราไวโอเล็ต (UVA) ความเข้มแสง  $37$   $\mu$ W/cm<sup>2</sup> พบว่าฟิล์มสามารถกำจัดเอทิลีนที่ความเข้มข้นเริ่มต้น  $35$  ppm ได้ด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติก โดยที่ไทเทเนียมไดออกไซด์  $3.8$  mg ( $0.06$  mg/cm<sup>2</sup>) สามารถกำจัดเอทิลีนได้  $12.1$  ppm/mmol.hr ซึ่งคิดเป็น  $5.5$  เท่า ของฟิล์มที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์  $1.9$  mg ( $0.03$  mg/cm<sup>2</sup>) ในกรณีที่เพิ่มความเข้มแสงในช่วง  $37-44$   $\mu$ W/cm<sup>2</sup> อัตราการกำจัดเอทิลีนมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มแสงมีค่าสูงขึ้นมากกว่า  $44$   $\mu$ W/cm<sup>2</sup> การกำจัดเอทิลีนเพียงเล็กน้อย อาจเป็นเพราะการแย่งเกิดปฏิกิริยาของ C<sub>3</sub>H<sub>4</sub> ซึ่งเกิดขึ้นจากการสลายตัวของฟิล์มบรรจุภัณฑ์ภายใต้การฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต ส่วนสุดท้ายการทดสอบประสิทธิภาพในการยืดอายุมะม่วงน้ำดอกไม้ในบรรจุภัณฑ์ที่มีฟิล์มเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์  $1.9$  mg ( $0.03$  mg/cm<sup>2</sup>) พร้อมกับอัดอากาศปริมาตร  $300$  ml ฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตที่มีความเข้มแสง  $37$   $\mu$ W/cm<sup>2</sup> ที่อุณหภูมิ  $24$  °C พบว่า มะม่วงที่เก็บรักษาไว้ในบรรจุภัณฑ์ที่มีฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์จะสุกในวันที่  $8$  ซึ่งสามารถชะลอการสุกได้เมื่อเปรียบเทียบกับมะม่วงที่อยู่ในบรรจุภัณฑ์เปรียบเทียบ อันเนื่องจากการกำจัดเอทิลีนที่เกิดขึ้นจากการหายใจของมะม่วงได้ และลักษณะเปลือกและเนื้อของมะม่วงที่เก็บรักษาไว้ในบรรจุภัณฑ์ที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์จะเริ่มสังเกตเห็นการเน่าเสียในวันที่  $10$  ในขณะที่มะม่วงที่เก็บในบรรจุภัณฑ์เปรียบเทียบจะเริ่มเห็นการเน่าเสียในวันที่  $8$

**คำสำคัญ:** การยืดอายุมะม่วง, ไทเทเนียมไดออกไซด์, ฟิล์มพลาสติกความหนาแน่นต่ำ, ปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติก

## Abstract

This research aims to develop physicochemical properties of low density polyethylene (PE) by additional titanium dioxide powder ( $\text{TiO}_2$ ). The various amounts of titanium dioxide were investigated to optimize a suitable value for prolonging a ripen period of mango for transportation of export. The titanium dioxide can effect on the elimination of ethylene and oxygen existing in PE package. The experiment was designated to 4 parts i.e. i) film preparation, ii) elimination of oxygen by photocatalytic reaction of  $\text{TiO}_2$  modified PE films, iii) elimination of ethylene by photocatalytic reaction of  $\text{TiO}_2$  modified PE films and iv) prolonging a ripen period of Num-Dogmai mango. The three methods of preparation gave the best preparation of  $\text{TiO}_2$  dip-coating film since  $\text{TiO}_2$  contents were comfortably tunable at 0.03 and 0.06  $\text{mg}/\text{cm}^2$ , while as compounding and mixing methods gave poor distribution of  $\text{TiO}_2$  powder approximately at  $5.8 \pm 1.9$  wt% and  $7.4 \pm 4.7$  wt%, respectively and it was unexpected for modelation according to mixing limitation of twin screw extruder. The  $\text{TiO}_2$  modified PE films prepared from compounding and mixing routes gave higher amount of oxygen absorption in comparison with pure PE films. The ability of oxygen absorption increased, the more amount of  $\text{TiO}_2$  added. No photocatalytic result was clearly found for both films possibly because of miserable exposure of  $\text{TiO}_2$  powder and oxygen. The  $\text{TiO}_2$  dip-coated films apparently gave photocatalytic results. The photocatalytic activities increased arising from higher intensity of UV irradiation from 37 to 44  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ . The ethylene elimination was the highest at 12.1 ppm/mmol.hr for dip-coated films consisting of  $\text{TiO}_2$  0.06  $\text{mg}/\text{cm}^2$  under UV irradiation at 37  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ . The ethylene elimination decreased under UV irradiation  $> 44$   $\mu\text{W}/\text{cm}^2$  since photocatalytic decompositions of polyethylene films can coincidentally occur at higher UV intensity and gave a trace of propane. The  $\text{TiO}_2$  dip-coated package at 0.03  $\text{mg}/\text{cm}^2$  can prolong the ripen period of Num-Dogmai mango for 2-days lasting longer under UV irradiation at 37  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$  and 24 °C. The mango will be rotten after 10-days packing.

**Keywords:** Mango prolonging,  $\text{TiO}_2$ , LDPE film, Photocatalytic reactions

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ.....	ii
Abstract.....	iii
กิตติกรรมประกาศ.....	iv
สารบัญ.....	v
สารบัญรูป.....	vii
สารบัญตาราง.....	viii
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตของการทำวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 มะม่วง.....	4
2.2 สาเหตุของการสูญเสียมะม่วงน้ำดอกไม้ภายหลังการเก็บเกี่ยว.....	6
2.3 การเปลี่ยนแปลงคุณภาพระหว่างการสุกของผลมะม่วง .....	6
2.4 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการสุกและการเน่าของผลไม้เขตฤดูร้อน .....	8
2.5 การชะลอการสุก .....	9
2.6 การเก็บรักษาและการยืดอายุผลไม้.....	11
2.7 การยืดอายุด้วยฟิล์มบรรจุภัณฑ์แอคทีฟ .....	13
2.8 ปฏิกริยาโฟโตแคตตาไลติก.....	14
2.9 กระบวนการผลิตฟิล์มพลาสติก.....	16



## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง.....	19
3.1 วัสดุดิบ.....	19
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์.....	19
3.3 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	20
3.4 วิธีการดำเนินการทดลอง.....	20
บทที่ 4 ผลการทดลองและการอภิปรายผลการทดลอง.....	27
4.1 การศึกษาวิธีการเตรียมฟิล์มพลาสติกร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์.....	27
4.2 การทดสอบประสิทธิภาพในการกำจัดออกซิเจนด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติก .....	30
4.3 การทดสอบประสิทธิภาพในการกำจัดเอทิลีนด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติก .....	35
4.4 การทดสอบประสิทธิภาพในการยืดอายุมะม่วงน้ำดอกไม้ด้วยฟิล์มเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์.....	42
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	45
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	45
5.2 ข้อเสนอแนะ และผลผลิต (Output).....	46
เอกสารอ้างอิง.....	47

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	7
2.2	13
3.1	23
4.1	28
4.2	29
4.3	29
4.4	30
4.5	31
4.6	32
4.7	34
4.8	35
4.9	36
4.10	37
4.11	38
4.12	39
4.13	40
4.14	41
4.15	42
4.16	44

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ปริมาณและมูลค่าการส่งออกผลไม้ของประเทศไทย ปี 2556 - 2558.....	5
2.2 การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับผลมะม่วงดิบ สุก และเสื่อมตามอายุ.....	6
2.3 สีของผลตามระยะเวลาความสุกของมะม่วงและปริมาณของแข็งที่ละลายได้ในน้ำทั้งหมด	7
2.4 คุณสมบัติของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ.....	17
3.1 อัตราส่วนการเตรียมไทเทเนียมไดออกไซด์และเม็ดพลาสติก เข้มข้นร้อยละ 1 และ 5.....	22
3.2 การเตรียมก๊าซออกซิเจนและฮีเลียมที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 250 และ 500 ppm โดย มีอัตราการไหลโดยรวม เท่ากับ 10 มิลลิลิตรต่อนาที.....	23

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความสำคัญและที่มา

การส่งออกสินค้าเกษตรและผลิตภัณฑ์ของไทยนับเป็นแหล่งรายได้สำคัญ คิดเป็นร้อยละ 20 ของมูลค่าการส่งออกทั้งหมดในปีพ.ศ. 2554 โดยผลไม้และผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าการส่งออกเพียงร้อยละ 5.6 ของมูลค่าการส่งออกสินค้าเกษตรและผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (ศูนย์สารสนเทศการเกษตร, 2555) เนื่องจากการส่งออกประสบปัญหาการเน่าเสียที่เกิดขึ้นระหว่างการขนส่งคิดเป็นร้อยละ 25 ของมูลค่าการส่งออก (ศูนย์นวัตกรรมเทคโนโลยีหลังเก็บเกี่ยว, 2548) ทำให้การส่งออกผลไม้และผลิตภัณฑ์ ยังมีมูลค่าไม่สูงนัก

การส่งออกมะม่วงสดมีแนวโน้มสูงขึ้น และมีมูลค่าการส่งออกสูงถึง 2.6 พันล้านบาท ในปีพ.ศ. 2556 (กรมศุลกากร, 2556) โดยมะม่วงที่ได้รับความนิยมและส่งออกมากที่สุด คือ มะม่วงน้ำดอกไม้ ซึ่งนิยมบริโภคสดและมีระยะเวลาที่เหมาะสมในการบริโภคอยู่ในช่วง 3-7 วัน ภายหลังจากเก็บเกี่ยว เนื่องจากผลไม้อาจเกิดการเน่าเสีย ซึ่งมีสาเหตุจากการหายใจของผลไม้โดยใช้ออกซิเจน แล้วปลดปล่อยเอทิลีนซึ่งเป็นสารเร่งให้ผลไม้สุก (Ripening) การมีเอทิลีนในปริมาณเพียง 0.1 ppm ทำให้แนวโน้มการเก็บรักษาผลไม้ลดลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งมะม่วงจะมีการผลิตเอทิลีนในอัตราสูงถึง 1-10  $\mu\text{L}/\text{kg}\cdot\text{hr}$  ที่อุณหภูมิ 20°C (อภิธา, 2552) นอกจากนี้ การคายน้ำของมะม่วง ส่งผลให้ผิวของมะม่วงเหี่ยวแห้งไม่มารับประทาน และไอน้ำที่สะสมอยู่ในบรรจุภัณฑ์ส่งผลให้ผลไม้เน่าเสียได้เช่นกัน จึงกล่าวได้ว่า ออกซิเจน เอทิลีน และไอน้ำเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้ผลผลิตทางการเกษตรเกิดการเน่าเสีย ดังนั้น การพัฒนาเทคโนโลยีการเก็บผลไม้ ภายหลังจากเก็บเกี่ยวเพื่อป้องกันการสูญเสียคุณภาพ การปนเปื้อนจากเชื้อจุลินทรีย์ต่างๆ ที่อาจจะเกิดขึ้นระหว่างการขนส่ง และทำให้ผลไม้ไม่มีความสดใหม่จนถึงมือผู้บริโภค จึงเป็นการส่งเสริมการส่งออกผลผลิตทางการเกษตร

ปัจจุบันมีการพัฒนาบรรจุภัณฑ์แอคทีฟ (Active packaging) เพื่อควบคุมสถานะในบรรจุภัณฑ์ เพื่อให้สามารถยืดอายุการเก็บรักษาผลผลิต เช่น การผลิตฟิล์มถนอมอาหารที่มีส่วนประกอบของสารเติมแต่ง (Additives) ประเภทสารดูดซับออกซิเจน (Oxygen scavenger) ได้แก่ เอนไซม์ Glucose oxidase ซึ่งมีความสามารถในการดูดซับออกซิเจนและน้ำได้ดี แต่ประสิทธิภาพการทำงานของเอนไซม์ขึ้นกับสถานะแวดล้อม (Restuccia, et. al., 2010) ประเภทสารดูดซับเอทิลีน (Ethylene scavenger) ได้แก่ ซีโอไลต์ (Zeolite) ทำให้ฟิล์มมีลักษณะขุ่น และความสามารถในการดูดซับเอทิลีนลดลง เมื่อผสมลงในโพลีเอทิลีน (Polyethylene) (Zagory, 1995) ประเภทสารดูดความชื้น เช่น ผงเหล็กบรรจุในซองดูดความชื้น ซึ่งอาจเกิดการรั่วไหลและเกิดการปนเปื้อนต่อผลผลิตทางการเกษตร ประเภทสารป้องกันแสงอัลตราไวโอเล็ต (UV blocking additive) จากที่กล่าวมาแล้วข้างต้น การผลิตฟิล์มพลาสติกที่มีการเติมสารเติมแต่งเฉพาะด้านจำนวนมาก ทำให้ต้นทุนการผลิตสูงขึ้น อีกทั้งอาจเกิดปฏิกิริยาระหว่างสารเติมแต่งชนิดต่างๆ และอาจต้องมีขั้นตอนการเตรียมฟิล์มที่ซับซ้อนยิ่งขึ้น

ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO<sub>2</sub>) เป็นสารที่มีความเสถียรทางเคมีและชีวภาพสูง ไม่เป็นพิษ ราคาไม่แพง มีความสามารถในการดูดกลืนแสงอัลตราไวโอเล็ตได้ดี ส่งผลให้เกิดคู่อิเล็กตรอนและโฮลที่สามารถกำจัดเอทิลีนได้อย่างสมบูรณ์ด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลติก (Photocatalytic reactions) บนพื้นผิวของ TiO<sub>2</sub> (Fujishima, et. al., 2008) โดยพบว่า มะเขือเทศที่วางร่วมกับวัสดุที่เคลือบ TiO<sub>2</sub> ในบรรจุภัณฑ์จะถูกชะลอกการสุกให้เกิดช้าลง (Maneerat, et. al., 2003) และพลาสติกฟิล์ม (oriented-polypropylene film) ที่เคลือบด้วย TiO<sub>2</sub> สามารถชะลอกการสุกของมะเขือเทศได้ดีเช่นกัน (Maneerat, et. al., 2008) ยิ่งไปกว่านั้น ไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถทำปฏิกิริยากับออกซิเจนเกิดเป็นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) ซึ่งเป็นสารออกซิไดส์รุนแรง โดยฟิล์มโพลิเอทิลีนผสมอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถกำจัด E. Coli และ S. Aureus ได้ดี (Xinga, et. al., 2012) จะเห็นได้ว่าการเลือกใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ทดแทนสารเติมแต่งไม่เพียงเป็นการกำจัดออกซิเจนและเอทิลีนในบรรจุภัณฑ์ ยังสามารถปกป้องผลไม้จากแสงอัลตราไวโอเล็ตและทำให้บรรจุภัณฑ์ปลอดภัยได้อีกด้วย

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการพัฒนาฟิล์มพลาสติกผสมอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ เพื่อศึกษาสมบัติทางกายภาพ ความสามารถในการกำจัดเอทิลีนและออกซิเจนที่มีอยู่ในบรรจุภัณฑ์ อีกทั้งสมบัติทางชีวภาพในการยืดอายุ และคุณภาพของมะม่วงสด

## 1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาผลกระทบของปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ในฟิล์ม ที่มีต่อสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางเคมี และสมบัติทางชีวภาพ เพื่อเป็นการยืดอายุของมะม่วง

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P-25)
2. ฟิล์มโพลิเอทิลีน-ไทเทเนียมไดออกไซด์ เตรียมจาก 2 วิธี
  - 1) เตรียม Masterbatch ไทเทเนียมไดออกไซด์และโพลิเอทิลีนด้วยเครื่อง extrusion และขึ้นรูปแผ่นฟิล์มด้วยเทคนิค Film blowing
  - 2) เตรียมโพลิเอทิลีนด้วยเทคนิค Film blowing แล้วเคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธีการเคลือบ (Dip-coating)
3. การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ: ทดสอบการกระจายตัวของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์บนฟิล์มโพลิเอทิลีน ด้วยเทคนิค TGA
4. การวิเคราะห์สมบัติทางเคมี: ความสามารถในการกำจัดออกซิเจนและเอทิลีน ด้วยเครื่อง Gas Chromatography ในกรณีที่มีการศึกษาผลของปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลติก จะใช้หลอดไฟ UV-A เพื่อเป็นแหล่งกำเนิดแสงอัลตราไวโอเล็ต
5. การวิเคราะห์สมบัติทางชีวภาพ: ปริมาณน้ำตาลของมะม่วงโดยเครื่อง Refractometer และลักษณะที่ปรากฏของมะม่วง
6. การเก็บรักษามะม่วงน้ำดอกไม้ที่อุณหภูมิ 25 ± 2 องศาเซลเซียส

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. พัฒนาเทคโนโลยีบรรจุภัณฑ์แอคทีฟเพื่อยืดอายุการเก็บรักษามะม่วงน้ำดอกไม้
2. บรรจุภัณฑ์แอคทีฟสามารถแก้ปัญหาความล่าช้าของระยะเวลาการส่งออกและนำเข้าผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรได้
3. เพิ่มศักยภาพในการแข่งขันกับกลุ่มประเทศ AEC ซึ่งเป็นผู้ผลิตทางการเกษตรและประยุกต์ใช้กับผลผลิตทางการเกษตรชนิดอื่นๆ ได้ด้วย

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 มะม่วง

มะม่วงมีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Mangifera indica* L. จัดอยู่ในวงศ์มะม่วง *Anacardiaceae* เป็นผลไม้เขตร้อนที่มีถิ่นกำเนิดในอินเดียและพม่า จัดอยู่ในกลุ่มประเภท ผลไม้ที่บ่มให้สุกได้ (Climacteric fruit) มะม่วงสามารถปรับตัวเข้ากับสภาพภูมิอากาศของประเทศไทยได้ดี เป็นไม้ผลที่มีผู้นิยมปลูกและรับประทานมากเป็นอันดับหนึ่งของประเทศ (กรมส่งเสริมการเกษตร, 2555) ซึ่งมีมากมายหลายสายพันธุ์ โดยสายพันธุ์ที่นิยมปลูกมี 6 สายพันธุ์ ดังนี้ พันธุ์น้ำดอกไม้ พันธุ์แรด พันธุ์เขียวเสวย พันธุ์ฟ้าลั่น พันธุ์แก้ว และพันธุ์หนองแขง (ชุมพล, 2554) สำหรับพันธุ์มะม่วงที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจคือ มะม่วงน้ำดอกไม้ ซึ่งจัดเป็นมะม่วงรับประทานสุก มีรสชาติดี เป็นที่ต้องการของตลาด จึงมีราคาจำหน่ายที่แพงกว่าพันธุ์อื่น แต่ประสบปัญหาในเรื่องของอายุการเก็บรักษาที่สั้น มีโรคหลังการเก็บเกี่ยวเข้าทำลาย โดยเฉพาะโรคแอนแทรกโนส ทำให้ผลิตผลสูญเสียคุณภาพอย่างรวดเร็วและเป็นข้อจำกัดในการขนส่งระยะทางไกล (อนุวัฒน์, 2545)

มะม่วงน้ำดอกไม้ที่มีคุณภาพ คือ มีรสชาติหวานสม่ำเสมอ (>17 องศาบริกซ์) มีความสุกพอดี เนื้อสัมผัสดี สีผลสวยงาม รูปทรงของผลสมบูรณ์ไม่มีตำหนิ ปลอดภัยจากศัตรูพืช ไม่พบโรค และสารพิษทางการเกษตร มีขนาดผล 250-500 g ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ (Soluble solids) อยู่ระหว่าง 15-17 องศาบริกซ์ อัตราส่วนของปริมาณของแข็งที่ละลายได้ต่อปริมาณกรด (Brix acid ratio) มีค่าตั้งแต่ 20-45 มีค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) โดยเฉลี่ย 4.35 และมีวิตามินแร่ธาตุหลายชนิด ดังนั้นมะม่วงจึงเป็นสินค้าทางการเกษตรที่ได้รับความนิยมและมีปริมาณการส่งออกค่อนข้างสูงทั้งในรูปแบบผลสดและแปรรูป

#### 2.1.1 มะม่วงน้ำดอกไม้

มะม่วงน้ำดอกไม้ (*Mangifera indica* Linn. cv. 'Nam Dokmai') เป็นพันธุ์ที่ออกดอกง่าย สามารถผลิตนอกฤดูได้ผลดี ตอบสนองต่อการใช้สารกระตุ้นให้ออกดอก นิยมรับประทานสุก มีรูปทรงไข่แบน น้ำหนักผล 300-500 g ฤดูกาลผลผลิตอยู่ระหว่างปลายเดือนมีนาคม-มิถุนายน มะม่วงน้ำดอกไม้ที่ได้รับความนิยมมี 2 ชนิด คือ มะม่วงน้ำดอกไม้สีทองและมะม่วงน้ำดอกไม้เบอร์ 4 โดยมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองมีผลสีเขียวเมื่อดิบ และจะเปลี่ยนเป็นสีเหลืองเมื่อสุก ส่วนมะม่วงน้ำดอกไม้เบอร์ 4 นั้น ผลดิบจะมีสีผิวเป็นสีเหลืองอ่อนคล้ายมะม่วงสุกและมีรสเปรี้ยว ผลแก่จะมีรสมันเนื้อกรอบ มีความหวานประมาณ 17-19 %Brix เนื้อไม่มีเสี้ยน มีสีเหลือง เมล็ดบาง และมีน้ำหนักต่อผลประมาณ 300-400 g อีกทั้งมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองมีผิวที่หนากว่ามะม่วงน้ำดอกไม้เบอร์ 4 ส่งผลให้มีการป้องกันการช้ำและต้านทานโรคแอนแทรกโนสได้ดีกว่า และเมื่อผลสุกจะเก็บรักษาได้นานกว่า ขณะที่มะม่วงน้ำดอกไม้เบอร์ 4 จะมีเปลือกบางส่งผลให้เป็นโรคแอนแทรกโนสได้ง่าย จึงทำให้มะม่วงน้ำดอกไม้สีทองเป็นที่ต้องการของตลาดโลก

### 2.1.2 การส่งออกมะม่วง

มะม่วงเป็นผลไม้ที่มีการปลูกอย่างกว้างขวางทั้งในประเทศเขตร้อนและกึ่งร้อน โดยแหล่งที่ปลูกมะม่วงมากที่สุดอยู่ในทวีปเอเชีย และประเทศที่ส่งออกมะม่วงมากที่สุด ได้แก่ ประเทศฟิลิปปินส์และไทย โดยตลาดมะม่วงสดของประเทศฟิลิปปินส์ คือ ประเทศฮ่องกง ส่วนตลาดมะม่วงสดของประเทศไทย ได้แก่ สิงคโปร์ ญี่ปุ่น มาเลเซียและอินเดีย ซึ่งประเทศไทยถือว่าเป็นผู้ส่งออกรายใหญ่ที่สุดในโลก และมีตลาดมะม่วงสดอยู่ในกลุ่มประเทศยุโรป เช่น อังกฤษและเยอรมัน เป็นต้น ดังตารางที่ 2.1 (พรพรรณ, 2554)

ตารางที่ 2.1 ปริมาณและมูลค่าการส่งออกผลไม้ของประเทศไทย ปี 2556 - 2558  
(สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตรกระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 2558)

ผลิตผล	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	12,436	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



## 2.2 สาเหตุของการสูญเสียมะม่วงน้ำดอกไม้ภายหลังการเก็บเกี่ยว

หลังการเก็บเกี่ยว การเปลี่ยนแปลงทางสรีระวิทยาของมะม่วง ได้แก่ การหายใจ การสูญเสียน้ำ การเปลี่ยนรูปขององค์ประกอบภายใน การสุก การเหี่ยว และอาจเกิดบาดแผลได้ เช่น เกิดรอยขีดข่วน และชอกช้ำ ซึ่งมีสาเหตุของการสูญเสียมะม่วงได้

นอกจากนี้อาจเกิดโรคหลังการเก็บเกี่ยว เช่น โรคขั้วผลเน่าจากเชื้อรา *Lasiodiplodia theobromae* ที่ติดมาบนเปลือกและขั้วผล เชื้อราจะเจริญและเข้าทำลายทางแผลรอยตัดขั้วผลและบาดแผลบนผล ทำให้มะม่วงเน่ามีสีน้ำตาลลุกลามจากรอยตัดขั้วผลไปยังก้นผล จากเชื้อรา *Dothiorella dominicana* มะม่วงที่กำลังจะสุกแสดงอาการจุดเน่าบนผลเป็นแผลสีน้ำตาลจางขาวและขอบแผลไม่ชัดเจน เนื้อเยื่อจะเน่ายุบตัวลง จากเชื้อรา *Phomopsis mangiferae* Ahmed ทำให้มะม่วงเน่าจากขั้ว เป็นสีช็อคโกแลต โดยแสดงอาการอย่างช้าๆและเนื้อเยื่อที่เป็นโรคจะเริ่มเหี่ยว และเชื้อรา *Colletotrichum gloeosporioides* Penz. ซึ่งเป็นเชื้อราที่เป็นสาเหตุของโรคที่สำคัญที่สุดของมะม่วงในประเทศไทย ซึ่งจะทำลายมะม่วงตั้งแต่ผลมีขนาดเล็กและสีเขียว แต่อาการจะแสดงออกมาให้เห็นได้ชัดเจนเมื่อผลเริ่มสุก (นิพนธ์, 2542)

## 2.3 การเปลี่ยนแปลงคุณภาพระหว่างการสุกของผลมะม่วง

มะม่วงที่เก็บเกี่ยวมาแล้วจะเข้าสู่กระบวนการสุกและเสื่อมตามอายุ โดยมีการเปลี่ยนแปลงต่างๆ เช่น การหายใจ การคายน้ำ การผลิตเอทิลีน การเปลี่ยนแปลงสารประกอบอินทรีย์ ความแน่นเนื้อ การเปลี่ยนแปลงสีเปลือกและสีเนื้อ การเกิดกลิ่นและรสชาติที่ต่างไปจากขณะที่ผลดิบ ดังตารางที่ 2.2

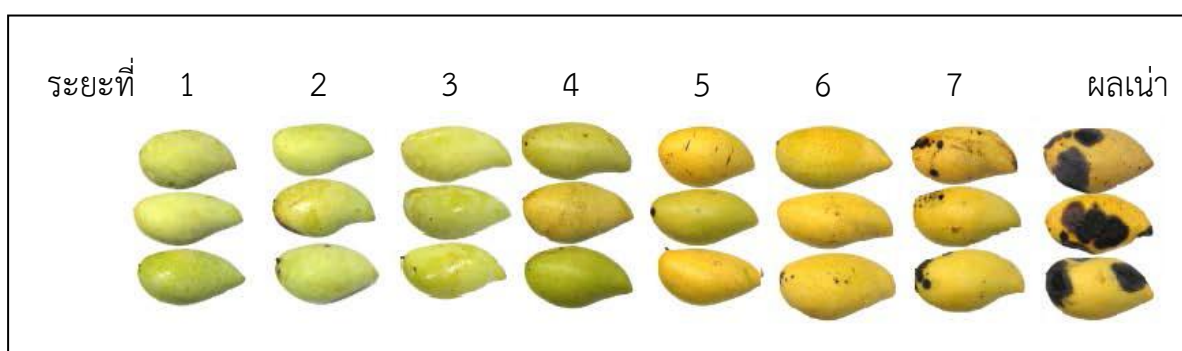
ตารางที่ 2.2 การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับผลมะม่วงดิบ สุก และเสื่อมตามอายุ (วิลาวลัย, 2553)

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	ระบากรุนแรง
เนื้อสัมผัส	แข็ง	อ่อนนุ่ม	เละ

นอกจากนี้ค่าของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้ (Total soluble solid, TSS) เป็นอีกวิธีหนึ่ง ที่ใช้บ่งบอกปริมาณของแข็งที่ละลายได้ในน้ำทั้งหมด โดยของแข็งที่ละลายได้ เช่น น้ำตาล กรดอินทรีย์ และแร่ธาตุต่างๆ สามารถใช้เป็นดัชนีวัดความแก่อ่อน (Maturity index) ของผลไม้ ซึ่งสามารถวัดค่าด้วย Refractometer มีหน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์น้ำหนักต่อปริมาตร หากเป็นสารละลายน้ำตาล จะมีหน่วยเป็นองศาบริกซ์ ( $^{\circ}$ Brix) ดังตารางที่ 2.3 จะเห็นได้ว่าค่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้ในน้ำทั้งหมดของมะม่วง จะแปรเปลี่ยนไปตามความสุกและสีผลของมะม่วงด้วยเช่นกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.1

ตารางที่ 2.3 สีของผลตามระยะเวลาความสุกของมะม่วงและปริมาณของแข็งที่ละลายได้ในน้ำทั้งหมด (นุชนาถ, 2547)

ระยะที่	สีของเปลือก	ระยะความสุก	องศาบริกซ์
1	เขียวทั้งผล(Green)	ดิบ	7.6
2	สีเหลืองที่ขั้ว (Trace of yellow stemend)	ค่อนข้างห้าม	10
3	เขียวมากกว่าเหลือง เหลืองไม่ถึงครึ่งของผล (More green than yellow)	ห้าม	เกินกว่า 10
4	เหลืองมากกว่าเขียว เหลืองเกินกว่าครึ่งผล เหลืองประมาณ $\frac{3}{4}$ ของผล (More yellow than green)	ค่อนข้างสุก	เกินกว่า 10
5	เขียวเล็กน้อยตรงปลายผล (Trace of green apex)	สุก	11-13
6	เหลืองทั้งหมด (Full yellow)	สุกมาก	เกินกว่า 14
7	เริ่มมีสีน้ำตาล (Partial brown)	เริ่มเน่า	ลดลง



รูปที่ 2.1 ระยะการสุกของมะม่วง (นุชนาถ, 2547)

## 2.4 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการสุกและการเน่าของผลไม้เขตฤดูร้อน (วิลาวัลย์, 2553)

การสุก (Ripening) เป็นกระบวนการที่ผลไม้เข้าสู่การแก่ (Aging) โดยผลไม้จะเกิดการเปลี่ยนแปลง เช่น ผลจะอ่อนนุ่ม เกิดกลิ่นตามชนิดของผลไม้ นั้น แป้งจะเปลี่ยนเป็นน้ำตาล ปริมาณกรดลดลง ผิวเปลี่ยนสี ซึ่งปัจจัยที่ส่งผลต่อการสุกมีดังนี้

### 1. การหายใจ (Respiration) โดยใช้ออกซิเจน

การหายใจโดยใช้ออกซิเจนเป็นการหายใจของพืชหลังการเก็บเกี่ยว โดยการหายใจนี้เกิดจากเซลล์รับเอาออกซิเจนเข้าไปสลายโมเลกุลของกลูโคสให้มีขนาดเล็กลงและปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ ความชื้น และเอทิลีนออกมา โดยพบว่า มะม่วงจะมีการสูญเสียกลูโคสและน้ำ จากกระบวนการหายใจ และการคายน้ำ ดังนั้นการคงความสดของผลผลิต จึงขึ้นอยู่กับปริมาณสารอาหารที่สะสมไว้และอัตราการหายใจของผลไม้

อัตราการหายใจของผลผลิตหลังการเก็บเกี่ยวขึ้นอยู่กับชนิดของผลไม้ โดยเมื่อเก็บผลไม้มาจากต้นแล้วอัตราการหายใจของเซลล์จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ พร้อมกับการสุก เนื่องจากการปลดปล่อยเอทิลีน ซึ่งจัดเป็นฮอร์โมนธรรมชาติช่วยกระตุ้นให้มะม่วงเกิดการสุก การจำแนกผลไม้ตามปริมาณการปลดปล่อยเอทิลีน แบ่งเป็น 2 ชนิด คือ ผลไม้ที่มีการปลดปล่อยเอทิลีนสูง ในขณะที่เกิดการสุก เรียก Climacteric fruit ในขณะที่ผลไม้ที่มีการปลดปล่อยเอทิลีนต่ำ เรียก Non-climacteric fruit ผลไม้เหล่านี้ เมื่อเก็บเกี่ยวแล้ว จะมีการเปลี่ยนแปลงภายในผลเกิดขึ้นน้อยมาก รสชาติของผลไม้จะเหมือนเดิม ตั้งแต่เก็บเกี่ยวจนกระทั่งหมดอายุ Non-climacteric fruit จะบ่มไม่ได้หรือบ่มไม่สุก ต้องรอให้แก่จัดเท่านั้นจึงค่อยเก็บเกี่ยว จึงจะได้รสชาติที่ดี ซึ่งต่างจากผลไม้พวก Climacteric fruit เก็บเกี่ยวในขณะที่ผลไม้อย่างดิบอยู่ จะมีรสเปรี้ยวและมีแป้งมาก แต่เมื่อทิ้งไว้จะมีการสุกเกิดขึ้น และรสชาติจะเปลี่ยนแปลงไปอย่างมาก

นอกจากนี้ยังพบว่าอัตราการหายใจของผลไม้จะรักษาระดับไว้ค่อนข้างต่ำ หากผลผลิตอยู่ในสภาพที่ไม่มีออกซิเจนหรือมีออกซิเจนไม่เพียงพอจะเกิดการหายใจแบบไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic respiration หรือ Fermentation) ซึ่งเรียกว่ากระบวนการหมัก ทำให้เกิดกาสร้างเอทิลแอลกอฮอล์ (Ethyl alcohol) ส่งผลทำให้มะม่วงมีรสชาติไม่ดีและเกิดการเน่า

### 2. อัตราการคายน้ำหรือการสูญเสียน้ำ

มะม่วงมีการสูญเสียน้ำจากกระบวนการหายใจ ซึ่งการคายน้ำเป็นอีกสาเหตุหนึ่งส่งผลให้ผิวของผลผลิตเกิดการเหี่ยวแห้ง ปัจจัยที่ส่งผลต่อการคายน้ำ ได้แก่ ขนาดของผลผลิต (พื้นที่ผิว) ลักษณะของผลผลิต อุณหภูมิ ความชื้นในบรรยากาศ การเคลื่อนไหวของอากาศ เป็นต้น

### 3. การปลดปล่อยเอทิลีนของมะม่วง (Ethylene production rate)

เอทิลีน( $C_2H_4$ ) เป็นฮอร์โมนพืชชนิดหนึ่งที่มีบทบาทสำคัญในกระบวนการสุกและการเสื่อมสภาพ (Senescence) เนื่องจากเอทิลีนสามารถกระตุ้นเนื้อเยื่อให้มีอัตราการหายใจสูงขึ้นได้ เช่น กระตุ้นให้เกิดการเสื่อมสลายตัวของคลอโรฟิลล์ทำให้ผลผลิตเกิดการเปลี่ยนแปลงสีเป็นสีเหลือง หรือกระตุ้นให้ผลไม้เกิดการสุกได้เร็วขึ้น จากการศึกษาพบว่าเอทิลีนปริมาณ 0.1 ppm จะส่งผลเร่งอัตราการสุกเร็วขึ้น ทำให้ระยะเวลาการเก็บรักษาของผลผลิตลดลง (บัณฑิต, 2555)

การสร้างเอทิลีนใน Climacteric fruit เกิดจากการกระบวนการหายใจ เมื่อหายใจมากก็จะปลดปล่อยเอทิลีนมากตามไปด้วย เอทิลีนที่ถูกสร้างขึ้นนี้จะกระตุ้นการหายใจให้สูงขึ้น กล่าวได้ว่า การหายใจและการปลดปล่อยเอทิลีนในผลไม้เป็นกระบวนการส่งเสริมการสุกซึ่งกันและกัน ส่งผลให้ผลไม้เน่าเสียเร็วยิ่งขึ้น สำหรับมะม่วง ซึ่งเป็นผลไม้ที่มีการผลิตเอทิลีนอยู่ในระดับปานกลาง โดยมีค่าระหว่าง 1-10  $\mu L/kg.hr$  ที่อุณหภูมิ 20°C และมีค่าระหว่าง 0.2-1.0  $\mu L/kg.hr$  ที่อุณหภูมิ 13 °C (Kader, 2000) ปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตและการทำงานของเอทิลีน ได้แก่ ชนิดหรือพันธุ์ อายุทางสรีรวิทยาเมื่อเก็บเกี่ยว อุณหภูมิ ปริมาณออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศ ดังนั้น หากต้องการทำให้ผลไม้สุกจะต้องเร่งการหายใจและเร่งการสร้างเอทิลีน แต่หากต้องการชะลอการสุก จะต้องยับยั้งการสร้างเอทิลีน

### 2.5 การชะลอการสุก (Delaying) (พรพรรณ, 2554)

เอทิลีนเป็นปัจจัยสำคัญที่กระตุ้นให้ผลไม้เกิดการสุก ดังนั้น การลดอัตราการปลดปล่อยจะมีผลชะลอการสุกได้ ปัจจัยที่มีผลในการชะลอการปลดปล่อยเอทิลีนในผลผลิต ได้แก่

#### 1. อุณหภูมิ

จากการศึกษาพบว่า การเพิ่มอุณหภูมิในการเก็บผลไม้สูงขึ้นจาก 0 เป็น 25°C พบว่า การปลดปล่อย เอทิลีนในผลไม้จะเพิ่มสูงขึ้นเช่นกัน แต่เมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 30°C จะทำให้การปลดปล่อยเอทิลีนลดลง ในทางกลับกัน ที่อุณหภูมิต่ำอาจทำให้ผลไม้ในเขตร้อนเกิดอาการสะท้านหนาว (Chilling injury) ทำให้เกิดการปลดปล่อยเอทิลีนสูงขึ้นได้ อย่างไรก็ตาม วิธีที่ใช้ในการยืดอายุการเก็บรักษาผลผลิตได้อย่างมีประสิทธิภาพมากวิธีหนึ่ง คือ การใช้อุณหภูมิต่ำในการเก็บรักษา โดยอุณหภูมิต่ำจะส่งผลให้มีการชะลอการหายใจของผลไม้ นำไปสู่การชะลอการสุกได้ สำหรับผลมะม่วงโดยทั่วไปจะเก็บที่อุณหภูมิประมาณ 10 -13 °C

#### 2. ปริมาณออกซิเจนในบรรยากาศ

การสร้างเอทิลีนต้องอาศัยพลังงาน ซึ่งได้มาจากการสลายอาหารที่สะสมอยู่ในผลไม้ด้วยการหายใจ ดังนั้นในสถานะที่มีออกซิเจนมากจึงทำให้เกิดการสร้างเอทิลีนมากด้วย การชะลอการสร้างเอทิลีนจึงทำได้โดยการลดปริมาณออกซิเจนในบรรยากาศที่เก็บรักษาผลไม้ให้ต่ำลง

### 3. การเกิดบาดแผลหรือชอกช้ำ

ผลไม้เกิดบาดแผลจากการเก็บเกี่ยวหรือระหว่างการขนส่ง จะทำให้ผลไม้ที่สร้างขึ้นเอทิลีนขึ้นมา มากกว่าปกติ เอทิลีนที่เกิดในสภาวะนี้เรียกว่า เอทิลีนในสภาวะเครียด (Stress-induced ethylene) เอทิลีนที่เกิดในกรณีเช่นนี้เป็นเอทิลีนชนิดเดียวกันกับที่พืชสร้างขึ้นในสภาวะปกติ และส่งผลต่อพืชเช่นเดียวกัน แต่ปริมาณที่สร้างขึ้นจะสูงกว่าระดับปกติ ดังนั้นผลไม้ที่เกิดบาดแผลหรือเกิดการชอกช้ำ จึงมีอายุการเก็บรักษาสั้นลง และสุกเร็วกว่าปกติ

### 4. การเข้าทำลายของโรคและแมลง

ผลไม้ที่เป็นโรคหรือแมลงเข้าทำลายจะเกิดบาดแผลขึ้น ก่อให้เกิดการสร้างเอทิลีนในสภาวะเครียดขึ้นมาเช่นเดียวกัน นอกจากนี้เชื้อบางชนิดยังสามารถสร้างเอทิลีนขึ้นมาได้ด้วย จึงเป็นการเพิ่มปริมาณเอทิลีนในสภาพบรรยากาศที่เก็บรักษาผลไม้ ทำให้อายุการเก็บรักษาสั้นลงเช่นเดียวกัน

### 5. คาร์บอนไดออกไซด์

คาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) ในบรรยากาศปกติมีเพียง 0.03% เท่านั้น แต่หากคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มมากขึ้นจะทำให้การหายใจลดลง ส่งผลให้ลดอัตราการสร้างเอทิลีนด้วย นอกจากนี้คาร์บอนไดออกไซด์มีโครงสร้างของโมเลกุลคล้ายกับเอทิลีน จึงเข้าไปครอบคลุมจุดต่างๆ ในผลไม้ ทำให้เอทิลีนไม่สามารถเข้าไปทำหน้าที่ได้ตามปกติ ดังนั้นการมีคาร์บอนไดออกไซด์อยู่จึงทำให้ผลไม้สุกช้ากว่าปกติและเก็บรักษาไว้ได้นานขึ้น อย่างไรก็ตาม หากผลไม้ได้รับคาร์บอนไดออกไซด์ปริมาณสูงเป็นเวลานาน อาจทำให้เกิดการหายใจแบบไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic respiration) หรือเกิดการหมัก (Fermentation) ทำให้คุณภาพและรสชาติผลไม้เสียไป

นอกจากนี้ ยังพบว่าคาร์บอนไดออกไซด์ยังสามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์บางชนิด จึงเรียกคาร์บอนไดออกไซด์ว่าเป็น Bacteriostatic หรือ Fungistatic agent คือ สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตแต่ไม่ได้ทำลายหรือฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ โดยทั่วไปคาร์บอนไดออกไซด์ต้องมีความเข้มข้นอย่างน้อย 20 เปอร์เซ็นต์ จึงจะสามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ได้ดี โดยจะทำให้ช่วงเวลาการเตรียมพร้อมเพื่อแบ่งตัว (Lag phase) ของจุลินทรีย์เป็นไปได้ช้า อีกทั้งคาร์บอนไดออกไซด์จะส่งผลมากยิ่งขึ้น เมื่ออุณหภูมิลดลงหรือเมื่อความดันบรรยากาศเพิ่มขึ้น (ปิยะวรรณ, 2548)

## 2.6 การเก็บรักษาและการยืดอายุผลไม้

### 1. การใช้สารดูดซับเอทิลีน (Ethylene absorbent)

ถ่านกัมมันต์ (Activated charcoal) ถูกนำมาศึกษาเปรียบเทียบกับความสามารถดูดซับเอทิลีนกับสารดูดซับเอทิลีน (Ethylene absorber) ทางการค้า และ 1-Methylcyclopropene (1-MCP) เพื่อเก็บรักษามะม่วงน้ำดอกไม้ที่อุณหภูมิ  $27 \pm 1$  °C พบว่า ถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการศึกษานี้สามารถชะลอการสุกได้ต่ำกว่าสารดูดซับเอทิลีนที่ใช้ทางการค้า และ 1-MCP ที่ชะลอการสุกของมะม่วงน้ำดอกไม้ได้ (ศักยะ, 2555)

นอกจากนี้ ด่างทับทิม (Potassium permanganate:  $\text{KMnO}_4$ ) เป็นสารออกซิไดส์ที่รุนแรงสามารถทำปฏิกิริยาทางเคมีกับเอทิลีน แล้วสลายเป็น Acetaldehyde และเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องเกิดเป็น Acetic acid จนกระทั่งกลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์กับน้ำ ส่วนสารดูดซับเอทิลีนทางการค้าอีกหลายชนิดพบว่าจะมีปัญหาในการทำลาย และไม่สามารถใช้ได้อย่างต่อเนื่อง อีกทั้งสารเหล่านี้สามารถป้องกันการผลิตเอทิลีนจากภายในเท่านั้น แต่ไม่มีผลในการยับยั้งเอทิลีนจากภายนอกซึ่งสามารถเกิดได้ระหว่างการขนส่งและการวางจำหน่าย ในขณะที่การใช้ 1-MCP มีข้อจำกัดที่จะต้องใช้ในอุณหภูมิที่ไม่ต่ำเกินไป (Chiara, et. al., 2015)

### 2. การใช้โอโซน

ผลของโอโซนที่มีต่อการควบคุมปริมาณเอทิลีนของมะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้สีทอง พบว่า ในสภาวะที่มีเอทิลีนเข้มข้น 99.5 ppm มาทดสอบกับโอโซนความเข้มข้น 200 ppm เป็นเวลา 1, 3, 5 และ 10 นาที พบว่ามะม่วงที่รมโอโซนนาน 10 นาที จะลดปริมาณเอทิลีนได้สูงสุด โดยโอโซนไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ อีกทั้ง มะม่วงที่นำมารมด้วยโอโซนแบบวันเว้นวัน เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25 °C พบว่าการให้โอโซนแบบวันเว้นวัน สามารถยืดอายุการเก็บรักษามะม่วงน้ำดอกไม้สีทองได้นานขึ้น อย่างไรก็ตาม การใช้โอโซนมีข้อจำกัดคือ เครื่องกำเนิดโอโซนซึ่งมีค่าใช้จ่ายสูง และต้องหาวิธีกำจัดโอโซนที่เหลืออยู่ด้วย (พรพรรณ, 2554)

### 3. การควบคุมบรรยากาศ (Controlled atmosphere, CA)

การศึกษาสารยับยั้งการเกิดสีน้ำตาลบนผิวมะม่วงด้วยแคลเซียมคลอไรด์ ต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของมะม่วงตัดแต่งพันธุ์น้ำดอกไม้ที่บรรจุในฟิล์มพลาสติก ภายใต้สภาวะบรรยากาศดัดแปลงและอุณหภูมิในการเก็บรักษา พบว่ากรดแอสคอร์บิกเข้มข้น 0.5% สามารถยับยั้งการเกิดสีน้ำตาลได้ดีที่สุดในขณะที่แคลเซียมคลอไรด์ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของความแน่นเนื้อ จากนั้นบรรจุมะม่วงตัดแต่งซึ่งแช่ในกรดแอสคอร์บิกที่ความเข้มข้น 0.5% นาน 30 วินาที ในถุงที่ทำจากฟิล์มพลาสติก 3 ชนิด (LLDPE PP และ OPP) ภายใต้สภาวะบรรยากาศปกติและสภาวะบรรยากาศดัดแปลง ที่มีสัดส่วนของออกซิเจนต่อคาร์บอนไดออกไซด์เท่ากับ 5:5 และ 5:10 และเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 5 และ 10°C พบว่า

การใช้ฟิล์มพลาสติกที่สามารถให้ก๊าซแพร่ผ่านได้ร่วมกับสภาวะดัดแปลงบรรยากาศที่เหมาะสม ช่วยรักษาคุณภาพและเพิ่มอายุการเก็บรักษาของมะม่วงตัดแต่ง โดยเฉพาะอย่างยิ่งมะม่วงตัดแต่งบรรจุในถุงพลาสติก OPP ภายใต้สภาวะบรรยากาศดัดแปลงที่มีสัดส่วนของออกซิเจนต่อก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็น 5:10 เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5°C สามารถการเก็บรักษาได้สูงสุด 13 วัน (โศภษา และ วาณี, 2548)

#### 4. การใช้สารเคลือบผิว (Coating)

การเปรียบเทียบผลของสารเคลือบผิวมะม่วงน้ำดอกไม้ด้วยโคโตซานร้อยละ 1 กับ Sucrose palmitic acid ester เข้มข้นร้อยละ 2 ก่อนนำไปเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 13°C ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 90-95 พบว่า ผลมะม่วงที่เคลือบผิวด้วยโคโตซานสามารถชะลอการเปลี่ยนแปลงความแน่นเนื้อ สีเปลือก และอัตราการหายใจได้ดีกว่ามะม่วงที่เคลือบผิวด้วย Sucrose palmitic acid ester และชุดควบคุม โดยมีอายุการเก็บรักษานาน 32, 28 และ 16 วันตามลำดับ (นวรรรัตน์, 2544)

#### 5. การใช้ฟิล์มบรรจุภัณฑ์

ฟิล์มที่เหมาะสมในการยืดอายุผลิตผล จะต้องมีความสมบัติสามารถดัดแปลงสภาพบรรยากาศภายในบรรจุภัณฑ์ให้เป็นสภาวะสมดุล (Equilibrium modified atmosphere / EMA) ซึ่งเป็นหลักการหนึ่งของเทคโนโลยีบรรจุภัณฑ์ที่ได้รับการยอมรับว่าเป็นเทคโนโลยีการรักษาความสด และถนอมอาหาร โดยฟิล์มที่เหมาะสมต้องสามารถชะลอการหายใจ การคายน้ำ และการเสื่อมสภาพของผลิตผล ทำให้ยืดอายุการเก็บรักษาได้นานกว่าเดิม 2-5 เท่า โดยรสชาติ กลิ่นและคุณค่าทางโภชนาการไม่เปลี่ยนแปลง

#### 6. การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลติก

ในกระบวนการนี้จะเป็นการใช้แสงร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยากิ่งตัวนำ เกิดปฏิกิริยาทางเคมีได้เป็นสารออกซิไดส์ที่รุนแรง ซึ่งสามารถออกซิไดส์สารอินทรีย์ เช่น จุลินทรีย์ต่างๆ เอทิลีน เป็นต้น เปลี่ยนไปเป็นน้ำกับคาร์บอนไดออกไซด์ โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้ เช่น อนุภาคนาโนซิลเวอร์(Ag) ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO<sub>2</sub>) และซิงค์ออกไซด์ (ZnO) (บัณฑิต, 2555)

## 2.7 การยืดอายุด้วยฟิล์มบรรจุภัณฑ์แอคทีฟ

บรรจุภัณฑ์แอคทีฟ (Active Packaging) จัดเป็นหนึ่งในนวัตกรรมบรรจุภัณฑ์อาหารเพื่อตอบสนองต่อความต้องการของผู้บริโภค โดยการควบคุมองค์ประกอบของบรรยากาศภายในบรรจุภัณฑ์ โดยบรรจุภัณฑ์แอคทีฟจะยอมหรือสกัดกั้นการแพร่ของก๊าซต่างๆ ที่ผ่านเข้าออกจากภาชนะบรรจุให้มีความเหมาะสม เพื่อยืดอายุและรักษาคุณภาพ

หลักการการทำงานของบรรจุภัณฑ์แอคทีฟ จะใช้สารเคมีที่มีคุณสมบัติในการดูดซับ(Adsorb) ซึ่งสามารถเกิดปฏิกิริสัมพันธ์กับก๊าซภายในบรรจุภัณฑ์ ทำให้สามารถควบคุมบรรยากาศภายในบรรจุภัณฑ์ได้อย่างต่อเนื่อง สารดูดซับ ได้แก่ ออกซิเจน เอทิลีน คาร์บอนไดออกไซด์ ความชื้นและกลิ่นรส หรืออาจใช้สารคายซับ (Desorber) ซึ่งเป็นสารเคมีที่ให้แก๊สที่ต้องการในภาชนะบรรจุ (Vermeiren, et. al., 1999)

### ประเภทของบรรจุภัณฑ์แอคทีฟ

การพัฒนาบรรจุภัณฑ์แอคทีฟสามารถแบ่งตามลักษณะเทคโนโลยีได้เป็น 2 กลุ่ม คือ

1. Sachet-based technology คือ การใช้สารดูดหรือคายก๊าซ โดยบรรจุในซองเล็กๆ (packet หรือ sachet) และ sachet จะถูกใส่เพิ่มในภาชนะบรรจุหลักของอาหาร ซึ่งใช้งานแพร่หลายในอาหารอบแห้งต่าง ๆ ขนมเค้กหรือเนยแข็ง

2. Integrated concepts หรือ Plastic packaging as media มีหลักการสำคัญ คือ การนำสารเคมีผสมลงในโพลีเมอร์ที่จะใช้ในผลิตพลาสติกหรือฟิล์มที่ใช้ทำบรรจุภัณฑ์โดยตรงเพื่อให้มีคุณสมบัติเพิ่มเติม เช่น ควบคุมความชื้น ดูดหรือลดปริมาณออกซิเจน เพิ่มปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์และอื่นๆ



รูปที่ 2.2 บรรจุภัณฑ์ Sachet-based technology กับ Plastic packaging as media

บรรจุภัณฑ์ถุงพลาสติก เช่น low density polyethylene (LDPE) นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในการเก็บผักและผลไม้สด โดยถุงพลาสติกจะมีการผ่านเข้าออกของออกซิเจน คาร์บอนไดออกไซด์ และไอน้ำที่ไม่เหมาะสม อาจก่อให้เกิดอาการ CO<sub>2</sub> injury ขึ้นกับผลผลิต ก่อให้เกิดกลิ่น และรสชาติผิดปกติ อีกทั้งทำให้เกิดการเน่าเสียเพิ่มมากขึ้น หากภายในถุงพลาสติกมีน้ำเกิดขึ้นจำนวนมาก ดังนั้นการพัฒนาฟิล์มบรรจุภัณฑ์เพื่อบรรจุผักและผลไม้สด จำเป็นต้องควบคุมให้ออกซิเจน คาร์บอนไดออกไซด์ และไอน้ำผ่านเข้าออกอย่างเหมาะสม โดยที่ผักและผลไม้ แต่ละชนิดที่มีอัตราการหายใจและการผลิตก๊าซเอทิลีนที่แตกต่างกันไป โดยอาจมีการเติมอนุภาคบางอย่าง เช่น ซีโอโลต์ หรืออนุภาคดินเหนียว (Nanoclay) ผสม

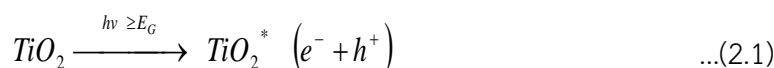


กับฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ และนิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์ (อภิตา, 2552)

## 2.8 ปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลติก

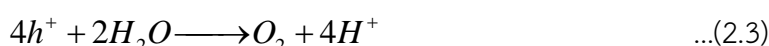
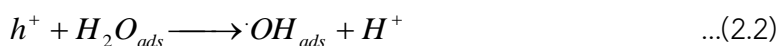
ไทเทเนียมไดออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ ) (Fujishima, et. al., 2008) ถูกนำมาประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลาย เช่น ในระบบบำบัดน้ำ-อากาศเสีย โดยสารแอคทีฟ (Active species:  $\cdot\text{OH}$ ,  $\cdot\text{O}$ ) ซึ่งเกิดขึ้นจากปฏิกิริยารีดักชันของออกซิเจน (Oxygen reduction) และจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำ (Water Oxidation) ซึ่งสารแอคทีฟดังกล่าว มีความสามารถออกซิไดซ์สารอินทรีย์ได้ดี นอกจากนี้ อาจเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องเกิดเป็นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์  $\text{H}_2\text{O}_2$  ซึ่งสามารถกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ได้

ปฏิกิริยาของ  $\text{TiO}_2$  เริ่มขึ้นเมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสงที่มีความยาวคลื่นเหมาะสมหรือกระตุ้นด้วยโฟตอน (Photons) ที่มีพลังงานเท่ากับหรือมากกว่าพลังงานแบนแกป (Energy band gap;  $E_{bg}$ ) ( $h\nu \geq E_{bg}$ ) โดยที่พลังงานแบนแกปของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างแบบอนาเทสและรูไทล์ เท่ากับ 3.2 และ 3.02 eV ตามลำดับ การดูดกลืนโฟตอนนำไปสู่การเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล (ดังสมการ 2.1) ซึ่งจะแยกตัวออกเป็นอิเล็กตรอนที่ในแถบการนำ (Conduction band) และโฮล (hole) ในแถบวาเลนซ์ (Valence band)



ตัวดูดซับ (Adsorbate) ที่อยู่ในวัฏภาคของไหล (ก๊าซหรือของเหลว) จะถูกดูดซับบนพื้นผิวของ  $\text{TiO}_2$  จากนั้นอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นด้วยแสงจะเคลื่อนที่ไปให้อิเล็กตรอนแก่ตัวรับอิเล็กตรอน (Acceptor molecule) ในขณะเดียวกันโฮลที่ถูกกระตุ้นด้วยแสงจะเคลื่อนที่ไปรับอิเล็กตรอนจากตัวให้อิเล็กตรอน (Donor molecule) โดยมีปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้อง ดังนี้

โฮลที่เกิดขึ้นสามารถออกซิไดซ์น้ำที่ดูดซับอยู่บนพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ เกิดเป็นไฮดรอกซิลแรดดิคัล (Hydroxyl radical) (ดังสมการ 2.2) และโฮลยังสามารถออกซิไดซ์น้ำเกิดเป็นออกซิเจน (ดังสมการ 2.3)



ไฮดรอกซิลแรดดิคัล ( $\cdot\text{OH}_{ads}$ ) ที่เกิดขึ้น เป็นตัวการสำคัญในการออกซิไดซ์สารอินทรีย์ ( $\text{RH}_2$ ) สมการ 2.4



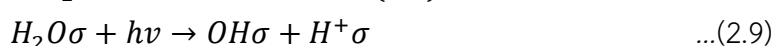
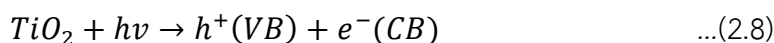
$\cdot RH$  แรดิคัลจะทำปฏิกิริยาต่อเนื่อง ในที่สุดสารอินทรีย์ทั้งหมดจะถูกย่อยสลายกลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ และสารอนินทรีย์ประจุลบ (Inorganic anion) ที่ไม่เป็นอันตราย

อิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนได้ง่าย เกิดเป็นซูเปอร์ออกไซด์แรดิคัล (ดังสมการ 2.5) และเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องดังสมการ 2.6 และ 2.7 เกิดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $H_2O_2$ ) และไฮดรอกซิลแรดิคัล ซึ่งทั้งสองสามารถออกซิไดซ์สารอินทรีย์ ตลอดจนกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ได้เช่นกัน



การกำจัดเอทิลีนด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์มีการศึกษากันอย่างกว้างขวาง เนื่องจากเอทิลีนเป็นฮอร์โมนของผักผลไม้ ซึ่งอาจเป็นเหตุให้เกิดการเสื่อมคุณภาพของอาหารสด และจัดเป็นสิ่งปนเปื้อนสำคัญในการบรรจุหีบห่อและการเก็บภายใต้สภาวะปกติ ดังนั้น การกำจัดเอทิลีนจึงเป็นการรักษาคุณภาพของอาหารภายหลังการเก็บเกี่ยว

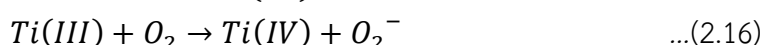
การศึกษากำจัดเอทิลีนด้วย  $TiO_2$  เคลือบบน glass ring บรรจุใน tubular reactor พบว่าสามารถกำจัด เอทิลีน  $> 80\%$  conversion (ความเข้มข้นเริ่มต้น 1055 ppm, 60 %RH, ปริมาณ  $TiO_2$  8.8 mg, อัตราการไหลของเอทิลีน 10-90 ml/min) (Sililuk, et. al., 1999) อีกทั้งมีการศึกษากลไกการกำจัดเอทิลีนด้วย  $TiO_2$  pellet ใน packed bed reactor (Yamazaki, et.al., 1999) (ดังสมการ 2.8-2.11) พบว่าปฏิกิริยาการกำจัดเอทิลีน (ความเข้มข้นเริ่มต้น 500 ppm) เกิดได้มากกว่า 95% conversion เมื่ออัตราส่วนของน้ำหนักของ  $TiO_2$  ต่ออัตราการไหลเชิงโมลของเอทิลีน  $4 \times 10^7$  g.s/mol



และพบว่า การกำจัดเอทิลีนลดลงเมื่อปริมาณน้ำในสายป้อนมากขึ้น เนื่องจากการดูดซับน้ำ (water adsorption) บนพื้นผิวของ  $TiO_2$  เป็นบริเวณเดียวกันกับพื้นผิวที่ใช้ในการดูดซับเอทิลีน (ดังสมการ 2.12, 2.13) ในขณะที่การดูดซับออกซิเจนจะเกิดบนพื้นผิวที่แตกต่างกัน (ดังสมการที่ 2.14)



ซึ่งพื้นผิวดังกล่าวคือ พื้นผิว Ti (IV) และพื้นผิว Ti (III) ตามลำดับ (ดังสมการ 2.15, 2.16)



ยิ่งไปกว่านั้น การเคลือบ  $\text{TiO}_2$  โดยการสังเคราะห์จากวิธีโซล-เจล บนวัสดุทรงกลมที่ทำจากแก้ว ในบรรจุภัณฑ์ที่มีมะเขือเทศวางอยู่ พบว่า มะเขือเทศวัสดุที่เคลือบ  $\text{TiO}_2$  ในบรรจุภัณฑ์จะถูกชะลอการสุกให้เกิดช้าลง (Maneerat, 2003) และพลาสติกฟิล์ม (oriented-polypropylene film) ที่เคลือบด้วย  $\text{TiO}_2$  สามารถชะลอการสุกของมะเขือเทศได้ดีเช่นกัน (Maneerat, 2008)

นอกจากนั้น การศึกษาผลของกระบวนการโฟโตแคตตาไลติกของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีต่อการลด การเกิดโรคแอนแทรกคโนสบนผลมะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้ โดยการเพาะเชื้อ *Collectotrichum gloeosporioides* บนผลมะม่วงด้วย 2 วิธีการ คือ การฉีดพ่นด้วยสปอร์แขวนลอยของเชื้อราและเพาะเชื้อด้วยการวางชิ้นเชื้อ (Culture disc) บนผลมะม่วงและบ่มไว้ที่อุณหภูมิ  $29^\circ\text{C}$  ในกล่องที่มีเก็บรักษาแตกต่างกัน คือ กรรมวิธีที่ 1 ใช้พัดลมร่วมกับ UV-A, กรรมวิธีที่ 2 ใช้พัดลมร่วมกับ UV-A และแผ่น  $\text{TiO}_2$  เคลือบ, กรรมวิธีที่ 3 ใช้หลอด UV เคลือบด้วย  $\text{TiO}_2$  พบว่าประสิทธิภาพของกล่องปฏิภิกิริยาโฟโตแคตตาไลติกที่มีหลอด UV และ  $\text{TiO}_2$  สามารถลดการเกิดโรคแอนแทรกคโนส แตกต่างกันไปตามความหนาของการเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์และตำแหน่งของแผ่นไทเทเนียมไดออกไซด์และหลอด UV ส่วนการใช้แสง UV-A และ  $\text{TiO}_2$  ไม่มีผลต่อการยับยั้งเชื้อก่อโรคที่เจริญแบบแผ่น แต่สามารถช่วยชะลอการเกิดโรคบนผลมะม่วงระหว่างการเก็บรักษา (Chantrasri, et. al., 2012)

การศึกษาการสลายเอทิลีนจากผลไม้เก็บที่อุณหภูมิ  $3^\circ\text{C}$  ด้วยปฏิภิกิริยาโฟโตแคตตาไลติกของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีอนุภาคขนาดนาโน เปรียบเทียบกับไทเทเนียมไดออกไซด์ทางการค้า (Degussa P 25) เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการทำงานของไฮดรอกซิลแรดดิคัล (Hydroxyl radical) โดยพบว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีอนุภาคขนาดนาโน ไทเทเนียมไดออกไซด์ทางการค้า มีองค์ประกอบของเฟสอานาเทสกับรูไทล์ (Anatase-rutile) ที่ 80-20 และ 70-30 ตามลำดับ ซึ่งพบว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีอนุภาคขนาดนาโนสามารถกำจัดเอทิลีนและน้ำได้ดีกว่า เพราะไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีอนุภาคขนาดนาโนสามารถผลิตไฮดรอกซิลแรดดิคัลได้สูงกว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ทางการค้า ส่งผลให้เกิดการทำปฏิภิกิริยากับน้ำแล้วเปลี่ยนไปเป็นอนุมูลไฮดรอกซิลแรดดิคัล ซึ่งจะไปออกซิไดส์เอทิลีนให้มีปริมาณต่ำลง (Hussain, et. al., 2011)

## 2.9 กระบวนการผลิตฟิล์มพลาสติก (กัลยา, 2537)

การผลิตฟิล์มพลาสติกมีการผลิตขึ้นจากเม็ดพลาสติกที่นิยมนำมาผลิต ได้แก่ พอลิเอทิลีน เนื่องจากความสามารถในการป้องกันสารเคมีได้เป็นอย่างดี ความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำต่ำ ความสามารถในการดูดซึมน้ำต่ำ และง่ายต่อกระบวนการขึ้นรูป มีสีขาวขุ่น โปร่งแสง มีความลื่น เป็นฉนวนไฟฟ้า เมื่อความหนาแน่นเพิ่มสูงขึ้น จะทำให้มีความแข็งและความเหนียวเพิ่มมากขึ้น ชนิดของพอลิเอทิลีนที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้ได้แก่ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ Low Density Polyethylene (LDPE) เป็นพลาสติกที่นิยมใช้มาก มีความนิ่มและเหนียว ใส ทนทาน มักใช้ทำฟิล์มห่ออาหารและห่อของ เพราะมีการยึดตัวได้ดี ทนต่อการฉีกขาด และทนต่อการทิ่มทะลุ ทนความเย็นได้ดีแต่ไม่ค่อยทนต่อความร้อน โดยคุณสมบัติของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ แสดงดังตารางที่ 2-4

ตารางที่ 2.4 คุณสมบัติของพอลิเอทีลีนความหนาแน่นต่ำ  
(Encyclopedia of Polymer Science, 1986)

คุณสมบัติ	LDPE
ความหนาแน่น (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)	0.91-0.94
ความเป็นผลึก (ร้อยละ)	50-60
อุณหภูมิการหลอม (องศาเซลเซียส)	98-120
ความสามารถในการทนต่อแรงดึง (จิกะปาสคาล)	4.1-16
Young's Modulus (จิกะปาสคาล)	0.1-0.26
การยืดที่จุดขาด (ร้อยละ)	0.1-0.26
Impact strength (จูลต่อเมตร)	ไม่แตก
อุณหภูมิภายใต้แรงกดตัน 445 กิโลปาสคาล	38-49

### 1. การเตรียมพลาสติกเพื่อการแปรรูป

เป็นขั้นตอนที่จำเป็นในการเตรียมพลาสติก(วัตถุดิบ) ให้พร้อมเพื่อผลิตเป็นชิ้นงาน โดยทั่วไปพลาสติกที่ใช้ในกระบวนการแปรรูปจะต้องมีการผสม สารเติมแต่ง (Additives) หลายชนิด เพื่อปรับปรุงสมบัติของชิ้นงานและปรับปรุงความสามารถในการแปรรูปพลาสติกเพื่อให้แปรรูปได้ง่ายขึ้น แบ่งได้ 2 วิธีคือ

#### 1) การผสม

การผสม (Mixing) เป็นการนำวัสดุต่างชนิดกันมารวมเข้าด้วยกัน ได้แก่ การผสมสารเติมแต่งกับพลาสติก ซึ่งเป็นการผสมของแข็งกับของแข็ง หรือ ของแข็งกับของเหลวเข้าด้วยกัน โดยใช้เครื่องผสมทำให้วัสดุเกิดการเคลื่อนที่ กระทบ เสียตสี และคลุกเคล้ากัน จนได้สภาพการผสมที่ต้องการ ทำให้เกิดการกระจายตัวของวัสดุอย่างทั่วถึง เครื่องผสมที่ใช้ในการผสมมีลักษณะเป็นแบบกะ เกิดจากการผสมโดยการทำให้วัสดุเกิดการเคลื่อนที่คลุกเคล้ากัน โดยไม่ให้พลาสติกได้รับแรงเฉือนมากนัก

#### 2) การคอมปาวด์

การคอมปาวด์ (Compounding) เป็นการผสมสารเติมแต่งกับพลาสติก โดยพลาสติกจะถูกให้ความร้อนจนหลอมเหลว และถูกผสมให้เป็นเนื้อเดียวกัน ตัวอย่างของเครื่องผสมแบบได้แก่ เครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง (Two rolls mill) เป็นเทคนิคการคอมปาวด์พลาสติกแบบกะ (Batch compounding) เครื่องผสมแบบนี้ประกอบด้วยลูกกลิ้งสองลูก ซึ่งทำจากเหล็กหล่อที่มีการเคลือบผิวให้มีความแข็งและลื่นวางขนานกัน และหมุนสวนทางกันด้วยความเร็วแตกต่างกันเล็กน้อย ระหว่างการผสมจะมีการให้ความร้อนแก่พลาสติกผ่านผิวลูกกลิ้ง โดยความร้อนของลูกกลิ้งมาจากชุดให้ความร้อนไฟฟ้า หรือการไหลเวียนของน้ำร้อน หรือน้ำมันผ่านภายในลูกกลิ้ง ข้อดีของเครื่องผสมแบบนี้ คือ สามารถมองเห็นลักษณะและระดับการผสมได้ สามารถผสมในปริมาณที่แตกต่างกันได้ สะดวกในการทำความสะอาดสำหรับข้อเสียของเครื่องผสมแบบนี้ คือ ผู้ปฏิบัติต้องมีทักษะในการใช้เครื่องและมีความรู้เกี่ยวกับการคอมปาวด์สูง ต้องมีการช่วยผสมโดยการปาดพลาสติกให้เข้าไปอยู่ตรงกลางระหว่างลูกกลิ้งเสมอ ความ

สม่ำเสมอในการผสมในแต่ละครั้งค่อนข้างต่ำ เกิดการสูญเสียสารเคมี และการปนเปื้อนได้ง่ายเนื่องจากเป็นการผสมในระบบเปิด

## 2. การขึ้นฟิล์มพลาสติกด้วยวิธีการเป่าขึ้นรูปฟิล์ม

การเป่าขึ้นรูปฟิล์ม (Blown film extrusion) จะใช้เครื่องอัดรีด ซึ่งประกอบด้วยสกรูที่หมุนอยู่ภายในกระบอกอัดรีด การหมุนของสกรูทำให้เกิดแรงเฉือนและการเคลื่อนตัวไปทุกทิศทางของส่วนผสม ทำให้การผสมเกิดขึ้นในระดับที่ละเอียด มักจะใช้เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่เป็นหลัก เนื่องจากแรงเฉือนที่เกิดขึ้นจากการหมุนของสกรูคู่สูงกว่า ส่วนเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว (Single screw extruder) ใช้ในกรณีที่ไม่ต้องการความพิถีพิถันมากนัก เนื่องจากการหมุนของสกรูธรรมดานี้ไม่สามารถก่อให้เกิดแรงเฉือนได้มากพอที่จะทำให้สารเติมแต่งต่างๆเกิดการกระจายตัวได้ดีถึงระดับโมเลกุล ดังนั้น การใช้เครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยวในการคอมพาวด์พลาสติก จึงต้องปรับปรุงลักษณะของสกรูโดยการเพิ่มส่วนที่เพิ่มแรงเฉือนของสกรู

บรรจุภัณฑ์พลาสติกประเภทฟิล์มพลาสติก จะต้องผ่านกระบวนการผลิตจากเครื่องเป่าขึ้นรูปฟิล์มเป็นเทคโนโลยีที่ใช้ในการผลิตฟิล์มพลาสติก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์กระบวนการเป่าขึ้นรูปฟิล์ม

## บทที่ 3

### วัสดุอุปกรณ์และวิธีการทดลอง

#### 3.1 วัตถุดิบ

มะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้ที่ใช้ศึกษาเก็บเกี่ยวมาจากสวนเกษตรกร ในอำเภอสรีราชา จังหวัดชลบุรี ในช่วงเดือนมีนาคม พ.ศ. 2560 เป็นผลมะม่วงที่มีระยะแก่ทางการค้า โดยผลมีระยะความแก่ประมาณ 80-90% (112 วันหลังดอกบาน) น้ำหนักผลอยู่ในช่วง 300-350g โดยคัดเลือกผลให้มีขนาดใกล้เคียงกันและไม่มีตำหนิหรือไม่ถูกทำลายจากโรคและแมลง

#### 3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง

1. เครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง (Two-rolls mill)
2. เครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว (Single screw extruder)
3. เครื่องดึงฟิล์ม (Dip coating)
4. เครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อน (Thermal gravimetric analysis, TGA)
5. เครื่องก๊าซโครมาโตกราฟ (Gas Chromatograph, GC)
6. ชุดอุปกรณ์ทดสอบปฏิกิริยา (Reaction line)
7. หลอดอัลตราไวโอเลตชนิดเอ (Ultraviolet A; UV-A) ชนิด PL-S ขนาด 7 วัตต์
8. เครื่อง Spectrophotometer for color
9. เครื่อง Brix refractometer
10. เครื่องวัดกรด-เบส (pH meter)
11. เครื่องวัดความชื้น
12. เครื่องชั่งน้ำหนัก ทศนิยม 4 ตำแหน่ง
13. เครื่องกวนสาร (Hot plate stirrer)
14. เครื่องเป่าลมแห้ง
15. เทอร์โมมิเตอร์ (Thermometer)
16. นาฬิกาจับเวลา
17. เครื่องซีลปากถุง รุ่น PFS-300
18. ฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (Low density polyethylene; LDPE) 1 ชั้น
19. ฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ 3 ชั้น
20. ถุงเมมเบรน
21. ชุดเครื่องแก้ว เช่น แท่งกวนสาร แท่งแก้วอ ปีกเกอร์ บิวเรต ขวดรูปชมพู่ ขวดปรับปริมาตร ปิเปต หลอดทดลอง ฯลฯ

### 3.3 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. ไทเทเนียมไดออกไซด์ทางการค้า (Titanium dioxide: Degussa P25)
2. พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (Low density polyethylene, LDPE ) จากบริษัท ไทยโพลีเอทิลีน จำกัด (Thai Polyethylene CO.,Ltd)
3. ก๊าซเอทิลีน (Ethylene gas; C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>) บริษัท TSG
4. ก๊าซออกซิเจน 5000 ppm ในฮีเลียม
5. ก๊าซฮีเลียมบริสุทธิ์
6. ก๊าซไฮโดรเจน
7. อากาศบริสุทธิ์
8. พอลิเอทิลีนไกลคอล (Polyethylene glycol; PEG)
9. กรดไนตริก (Nitric acid: HNO<sub>3</sub> 65%)
10. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)
11. น้ำปราศจากไอออน (Deionized water; DI)
12. Triton X

### 3.4 วิธีการดำเนินการทดลอง

การวิจัยครั้งนี้แบ่งการทดลองเป็น 4 ขั้นตอน ดังนี้

1. การศึกษาวิธีการเตรียมฟิล์มพลาสติกร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ ได้แก่ การเตรียมฟิล์มด้วยวิธีการคอมปาวด์ (Compounding) การเตรียมฟิล์มด้วยวิธีการผสม (Mixing) และการเตรียมฟิล์มเคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ (Dip-coating)
2. ทดสอบประสิทธิภาพในการกำจัดออกซิเจนด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติกของฟิล์มพอลิเอทิลีน-ไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยการเตรียมฟิล์มด้วยวิธีการคอมปาวด์ (Compounding) การเตรียมฟิล์มด้วยวิธีการผสม (Mixing)
3. ทดสอบประสิทธิภาพในการกำจัดเอทิลีนด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติกของฟิล์มพอลิเอทิลีน-ไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยการเตรียมฟิล์มเคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ (Dip-coating)
4. ทดสอบประสิทธิภาพในการยืดอายุมะม่วงน้ำดอกไม้ด้วยฟิล์มเคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์

## ขั้นตอนที่ 1 การศึกษาวิธีการเตรียมฟิล์มพลาสติกร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์

การเตรียมฟิล์มด้วยวิธีการคอมปาวด์ (Compounding) และการเตรียมฟิล์มด้วยวิธีการผสม (Mixing) และศึกษาการกระจายตัวของไทเทเนียมไดออกไซด์ มีวิธีการทดลอง ดังนี้

### 1. การเตรียมฟิล์มด้วยวิธีการคอมปาวด์ (Compounding)

ประกอบด้วย 2 ขั้นตอน ดังนี้

#### 1) การเตรียมมาสเตอร์แบทช์ (Master batch)

1. เม็ดพลาสติกพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ 50 g และไทเทเนียมไดออกไซด์ 6 g
2. นำเม็ดพลาสติกพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำและไทเทเนียมไดออกไซด์ ผสมกันด้วยเครื่องอัดรีดแบบสองลูกกลิ้ง โดยการเติมเม็ดพลาสติก 50 g จากนั้นค่อยๆ เติมไทเทเนียมไดออกไซด์ลงไปจนหมด จากนั้นนำของผสมเข้าเครื่องอัดรีด จนได้เป็นแผ่นพลาสติก
3. นำแผ่นพลาสติกที่ได้มาตัดเป็นชิ้นเล็กๆ และสุ่มตัวอย่างไปทดสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อน(TGA) เพื่อศึกษาการกระจายตัวของไทเทเนียมไดออกไซด์ในมาสเตอร์แบทช์
4. นำมาสเตอร์แบทช์ที่ได้ไปขึ้นรูปฟิล์มในขั้นตอนต่อไป

#### 2) การขึ้นรูปฟิล์มพลาสติกด้วยวิธีการเป่าขึ้นรูปฟิล์ม (Blow film extrusion)

การขึ้นรูปฟิล์มผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ เข้มข้นร้อยละ 5 จากมาสเตอร์แบทช์

1. เตรียมมาสเตอร์แบทช์ 250 g และเม็ดพลาสติกพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ 250 g
2. นำของผสมดังกล่าวเข้าเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว ซึ่งต่อกับหัวเป่าฟิล์มและทำการเป่าขึ้นรูปฟิล์ม
3. นำฟิล์มผสมที่ได้ ตัดเป็นชิ้นเล็กๆ สุ่มตัวอย่างไปทดสอบด้วยเครื่อง TGA เพื่อศึกษาการกระจายตัวของไทเทเนียมไดออกไซด์ในฟิล์มพลาสติก

### 2. การเตรียมฟิล์มด้วยวิธีการผสม (Mixing)

การขึ้นรูปฟิล์มผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ เข้มข้นร้อยละ 1 และ 5 จากของผสมระหว่างเม็ดพลาสติกพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำและไทเทเนียมไดออกไซด์

1. เตรียมเม็ดพลาสติกและไทเทเนียมไดออกไซด์ตามอัตราส่วน ดังตารางที่ 3.1
2. นำเม็ดพลาสติกและไทเทเนียมไดออกไซด์ ผสมด้วยการเขย่าจนเข้ากัน แล้วนำเข้าเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว ซึ่งต่อกับหัวเป่าฟิล์ม และทำการเป่าขึ้นรูปฟิล์ม
3. นำฟิล์มผสมที่ได้ตัดเป็นชิ้นเล็กๆ สุ่มตัวอย่างไปทดสอบด้วยเครื่อง TGA เพื่อศึกษาการกระจายตัวของไทเทเนียมไดออกไซด์ในฟิล์มพลาสติก



ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนการเตรียมไทเทเนียมไดออกไซด์และเม็ดพลาสติก เข้มข้นร้อยละ 1 และ 5

ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ (ร้อยละ)	ไทเทเนียมไดออกไซด์ (กรัม)	เม็ดพลาสติก LDPE (กรัม)
1	5	495
5	15	285

### 3. การทดสอบการกระจายตัวของไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยเครื่อง TGA

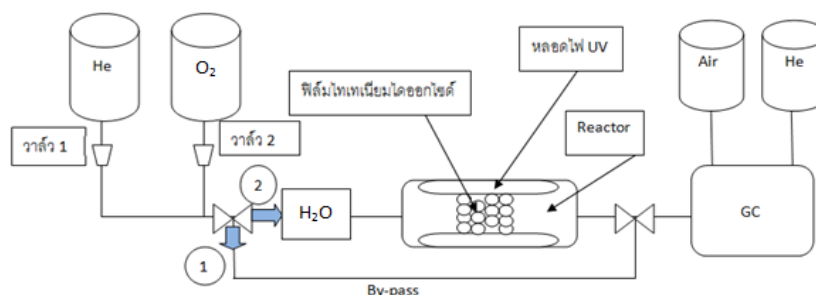
- นำตัวอย่างฟิล์มที่ได้จากการเตรียมด้วยวิธีการคอมปาวด์ (Compounding) และการเตรียมฟิล์มด้วยวิธีการผสม (Mixing) ตัดเป็นชิ้นสี่เหลี่ยมเล็กๆ ปริมาณไม่เกิน 10 mg บรรจุลงใน Crucible
- ให้ความร้อนภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน อัตราการไหลของไนโตรเจน 30 ml/min โดยกำหนดอุณหภูมิเริ่มต้นที่ 30 °C อุณหภูมิสุดท้ายที่ 600 °C ด้วยอัตราให้ความร้อน 10 °C/min

### ขั้นตอนที่ 2 การทดสอบประสิทธิภาพในการกำจัดออกซิเจนด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติกของฟิล์ม

#### พอลิเอทิลีน-ไทเทเนียมไดออกไซด์

การทดสอบทำโดยใช้ฟิล์มที่เตรียมด้วยวิธีการคอมปาวด์ (Compounding) และฟิล์มที่เตรียมด้วยวิธีการผสม (Mixing)

- ปรับความดันฮีเลียมบริสุทธิ์ (Carrier Gas) เท่ากับ 80 psi
- ปรับความดันของ Air Injector เท่ากับ 60 psi
- ปรับอุณหภูมิ Injector เท่ากับ 200°C อุณหภูมิ Oven เท่ากับ 160°C
- เลือกการตรวจวัดแบบ Thermal conductivity detector (TCD) และปรับอุณหภูมิของ Detector เท่ากับ 130°C
- ต่อ Line reactor ดังรูปที่ 3-1 โดยที่มีเครื่องปฏิกรณ์ลักษณะเป็นหลอดแก้ว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.7 cm มีความยาว 20 cm ให้ก๊าซผสมระหว่างออกซิเจนและฮีเลียมไหลผ่านน้ำ เพื่อให้ก๊าซมีความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 45 ส่วนเครื่องปฏิกรณ์จะหุ้มด้วยกล่องที่บสีดำที่ภายในมีหลอดไฟอัลตราไวโอเล็ตติดล้อมรอบจำนวน 3 หลอด โดยมีความเข้มแสง เท่ากับ 0.082 mW/cm<sup>2</sup>



รูปที่ 3.1 แผนผังแสดงส่วนประกอบของชุดทดสอบปฏิกิริยา

6. ป้อนฮีเลียมเข้าสู่ชุดทดสอบปฏิกิริยา เพื่อไล่ออกซิเจนที่อาจหลงเหลืออยู่ภายในชุดทดสอบปฏิกิริยา จนกระทั่งไม่การวิเคราะห์ด้วยเครื่องตรวจก๊าซโครมาโตกราฟไม่พบออกซิเจน
7. ปรับความเข้มข้นของออกซิเจนด้วยเครื่องวัดอัตราการไหลดังที่ตาราง 3-2 ตามเส้นทาง By-pass และทดสอบความเข้มข้นของออกซิเจนด้วยเครื่องตรวจวัดก๊าซโครมาโตกราฟ
8. สวิตช์วาล์วเส้น By-Pass (หมายเลข 1) ไปที่ Line Reactor (หมายเลข 2) และป้อนก๊าซผสมระหว่างออกซิเจนและฮีเลียมจากข้อที่ 7 ผ่านน้ำที่อุณหภูมิห้อง เข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ ที่ยังไม่ได้บรรจุฟิล์มพลาสติก ก๊าซที่ออกจากเครื่องปฏิกรณ์จะถูกวิเคราะห์และบันทึกค่าเป็นพื้นที่พีคของออกซิเจนทุกๆ 5 นาที เมื่อพีคของออกซิเจนคงที่ จากนั้นทำการฉายแสงอัลตราไวโอเลตที่ความเข้มแสง  $0.082 \text{ mW/cm}^2$  ให้กับเครื่องปฏิกรณ์ และวิเคราะห์ก๊าซออกซิเจนที่ออกจากเครื่องปฏิกรณ์ บันทึกค่าเป็นพื้นที่พีคของออกซิเจนทุกๆ 5 นาที จนกระทั่งพีคของออกซิเจนคงที่จึงหยุดการฉายแสง

ตารางที่ 3.2 การเตรียมก๊าซออกซิเจนและฮีเลียมที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 250 และ 500 ppm โดยมีอัตราการไหลโดยรวม เท่ากับ 10 มิลลิลิตรต่อนาที

ความเข้มข้นของออกซิเจนเริ่มต้น (ppm)	อัตราการไหลของออกซิเจนในวาล์วที่ 1 (มิลลิลิตรต่อนาที)	อัตราการไหลของฮีเลียมในวาล์วที่ 2 (มิลลิลิตรต่อนาที)	อัตราการไหลรวมของก๊าซ (มิลลิลิตรต่อนาที)
250	0.5	9.5	10
500	1	9	10

9. บรรจุตัวอย่างฟิล์มพลาสติกไทเทเนียมไดออกไซด์ ตัดเป็นชิ้นสี่เหลี่ยมเล็กๆเข้าไปในเครื่องปฏิกรณ์ โดยการบรรจุแบบหลวมตลอดความยาว 10 เซนติเมตร และทำซ้ำข้อ 6 และข้อ 7

10. สวิตท์วาล์วเส้น By-Pass ไปที่ Line Reactor และป้อนก๊าซผ่านน้ำที่อุณหภูมิห้องเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ เพื่อศึกษาการดูดซับออกซิเจน (Oxygen Adsorption) ของฟิล์มพลาสติก ก๊าซที่ออกจากเครื่องปฏิกรณ์จะถูกระบายด้วยเครื่องตรวจวัดก๊าซโครมาโตกราฟ และบันทึกค่าเป็นพื้นที่ฟิคของออกซิเจนทุกๆ 5 นาที จนกระทั่งค่าพื้นที่ฟิคของออกซิเจนคงที่
11. ฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตที่ความเข้มแสง  $0.082 \text{ mW/cm}^2$  ให้กับเครื่องปฏิกรณ์ เพื่อศึกษาปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลติก และทำการวิเคราะห์ก๊าซออกซิเจนที่ออกจากเครื่องปฏิกรณ์ด้วยเครื่องตรวจวัดก๊าซโครมาโตกราฟ และบันทึกค่าเป็นพื้นที่ฟิคของออกซิเจนทุกๆ 5 นาที จนกระทั่งฟิคของออกซิเจนเริ่มคงที่
12. ทำซ้ำข้อ 9 ถึงข้อ 12 โดยเปลี่ยนตัวอย่างเป็นฟิล์มผสมไทเทเนียมไดออกไซด์

### ขั้นตอนที่ 3 การทดสอบประสิทธิภาพในการกำจัดเอทิลีนด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลติกของฟิล์ม

#### พอลิเอทิลีน-ไทเทเนียมไดออกไซด์

การทดสอบทำโดยใช้ฟิล์มที่เตรียมโดยการเคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ (Dip-coating) บนฟิล์ม มีวิธีทำการทดลอง ดังนี้

#### 1. การเตรียมฟิล์มพอลิเอทิลีนเคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ (Dip-coating)

1. การเตรียมถุงพลาสติกจากพอลิเอทิลีนโพลีเอทิลีน  
นำเม็ดพลาสติกชนิดพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (LDPE) ใส่เข้าไปในเครื่อง Blown film extrusion เมื่อเม็ดพลาสติกถูกหลอมจะไหลออกทางหัวตายนี้ในลักษณะท่อ จากนั้นทำการดึงท่อพลาสติกและใช้ลมเป่าท่อพลาสติก พลาสติกจะเกิดการพองตัวเป็นลูกโป่งฟิล์ม ลูกโป่งฟิล์มที่ร้อนจะถูกหล่อเย็นด้วยลมเป่าที่ผิวด้านนอกของลูกโป่ง ปรับขนาดให้ได้ตามที่ต้องการ รวบลูกโป่งฟิล์มโดยป้อนให้ลูกโป่งให้เคลื่อนที่ผ่านโลหะหุ้มกัมมะหยี่ที่ตีบเข้า จากนั้นป้อนลูกโป่งฟิล์มเข้าในช่องว่างระหว่างลูกกลิ้งสองตัว จะได้ลูกโป่งฟิล์มที่แบนและนำฟิล์มไปลามิเนตกับไนลอน จะได้ถุงฟิล์มพลาสติกพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (LDPE)
2. การเตรียมสารเคลือบทำจากไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P-25)  
ผสมผง  $\text{TiO}_2$  (Degussa P-25) 400 mg ในน้ำปราศจากไอออน 5 ml เขย่าให้ละลายเป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นผสมกับผง PEG 25 mg ในน้ำปราศจากไอออน 1 ml แล้วนำไปอุลตราโซนิกเป็นเวลา 15 นาที ผสมสารละลายทั้งสองเข้าด้วยกันโดยหยด Triton X ซึ่งเป็น surfactant ลงไป 12 เพื่อช่วย  $\text{TiO}_2$  กระจายตัวบนแผ่นฟิล์มพลาสติกในขบวนการขึ้นฟิล์ม
3. การเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์บนฟิล์ม  
นำละลายสาร  $\text{TiO}_2$  ที่เตรียมได้เคลือบลงบนฟิล์มพลาสติกพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (LDPE) ด้วยวิธีจุ่ม (dipping) โดยนำฟิล์มพลาสติก LDPE มาตัดเป็นแผ่นฟิล์มขนาด  $7 \times 9 \text{ cm}$  ก่อนการเคลือบต้องทำความสะอาดแผ่นฟิล์ม โดยล้างกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 0.1 M นาน 30 นาที แล้วล้างน้ำ 2-3 ครั้ง เพื่อขจัดสารที่เคลือบติดอยู่ที่ผิวของพลาสติกให้หลุดออกไปและนำไปตากให้แห้ง จากนั้นนำ

แผ่นฟิล์มที่ได้จุ่มในสารละลาย  $\text{TiO}_2$  ด้วยเครื่องดึงฟิล์มที่อัตราเร็ว 1 cm/min ขณะที่เคลือบ สารจะถูกทำให้มีความเข้มข้นอย่างสม่ำเสมอด้วยเครื่องกวนสาร เมื่อทำการเคลือบเสร็จนำมาทิ้งไว้ให้แห้ง เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จากนั้นซึ่งน้ำหนักจะพบว่าจะมีปริมาณ  $\text{TiO}_2$  บนแผ่นฟิล์มอยู่ที่ประมาณ 1.9 mg

## 2. การทดสอบประสิทธิภาพในการกำจัดเอทิลีนด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติก

### 1. การเตรียมถุงพลาสติกจากพอลิเอทิลีนโพลิเอทิลีนบรจุก๊าซ

บรรจุฟิล์มเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ ลงในถุงพลาสติก LDPE เคลือบสามชั้น โดยที่ในถุงมีสถานะเป็นสุญญากาศ จากนั้นฉีดก๊าซเอทิลีนเข้มข้น 35 ppm ในอากาศที่มีปริมาตร 300 ml เข้าไปในถุงพลาสติกจำนวน 5 ถุงต่อชุดการทดลอง จากนั้นนำถุงปิดที่เตรียมแล้วมาเก็บที่สถานะที่มีมืด และสถานะภายใต้การฉายแสง UV-A ที่ความเข้มแสงต่างๆ แล้ววิเคราะห์ปริมาณเอทิลีน ออกซิเจน และคาร์บอนไดออกไซด์ที่เปลี่ยนแปลงไป โดยติดตามตัวอย่างที่เปลี่ยนแปลงทุก 2 วัน เป็นเวลา 8 วัน

### 2. การวิเคราะห์ก๊าซที่มีอยู่ในถุงพลาสติก

นำก๊าซที่ได้ไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องก๊าซโครมาโตกราฟ ใช้ชุดตรวจจับ (Detector) ชนิด Flame ionization detector (FID) สำหรับวิเคราะห์ก๊าซเอทิลีน และใช้ชุดตรวจจับ ชนิด Thermal conductivity detector (TCD) สำหรับวิเคราะห์ก๊าซออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ โดยควบคุมอุณหภูมิของตู้อบ (Oven temperature) คือ  $150^\circ\text{C}$  ส่วนอุณหภูมิชุดตรวจจับชนิด TCD และ FID คือ  $250^\circ\text{C}$  และ  $300^\circ\text{C}$  ตามลำดับ ซึ่งจะใช้ก๊าซฮีเลียมเป็นก๊าซตัวพา (Carrier gas) นำพื้นที่ใต้กราฟที่อ่านได้จากเครื่องก๊าซโครมาโตกราฟมาคำนวณหาปริมาณก๊าซเอทิลีน โดยเทียบกราฟ Calibration curve ของก๊าซ เอทิลีนมาตรฐาน มีหน่วยเป็นส่วนในล้านส่วน (Part per million; ppm) ส่วนการหาปริมาณก๊าซออกซิเจน และคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศมีหน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์

## ขั้นตอนที่ 4. ทดสอบประสิทธิภาพการยืดอายุมะม่วงน้ำดอกไม้ด้วยฟิล์มเคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์

นำบรรจุภัณฑ์ที่เตรียมได้มาทดสอบการเก็บรักษามะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้ โดยเลือกใช้มะม่วงที่เก็บเกี่ยวเมื่อผลแก่ที่มีอายุประมาณ 112 วันหลังดอกบาน คัดเลือกที่มีสี ขนาด รูปร่างเสมอกันและน้ำหนักผลเฉลี่ยประมาณ 300-350 g มากำจัดอย่างล้างทำความสะอาด หลังจากนั้นนำมะม่วงไปแช่น้ำร้อนที่อุณหภูมิ  $55^\circ\text{C}$  นาน 5 นาที และแช่ผิวมะม่วงด้วยแอลกอฮอล์ ไปเก็บรักษาที่อุณหภูมิ  $25 \pm 2^\circ\text{C}$  โดยนำผลมะม่วงมาวิเคราะห์ 2 วิธี ดังนี้

1. ลักษณะภายนอกที่ปรากฏ

2. วิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลในมะม่วงด้วย Brix refractometer

    ปอกเปลือกผลมะม่วงและนำเนื้อมะม่วงมาปั่นละเอียด เอาเนื้อส่วนที่ละเอียดคั้นด้วยผ้าขาวบางแล้วกรองน้ำคั้นกระชอนละเอียดอีกครั้งหนึ่ง นำน้ำคั้นที่ได้มาวัดด้วยเครื่อง Brix Refractometer (บริษัท ATAGO Co.,Ltd รุ่น PAL-1)

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและการอภิปรายผลการทดลอง

งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการพัฒนาฟิล์มพลาสติกผสมอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ เพื่อศึกษาสมบัติทางกายภาพ ความสามารถในการกำจัดเอทิลีนและออกซิเจนที่มีอยู่ในบรรจุภัณฑ์ อีกทั้งสมบัติทางชีวภาพในการยืดอายุและคุณภาพของมะม่วงสด โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 4 ตอน

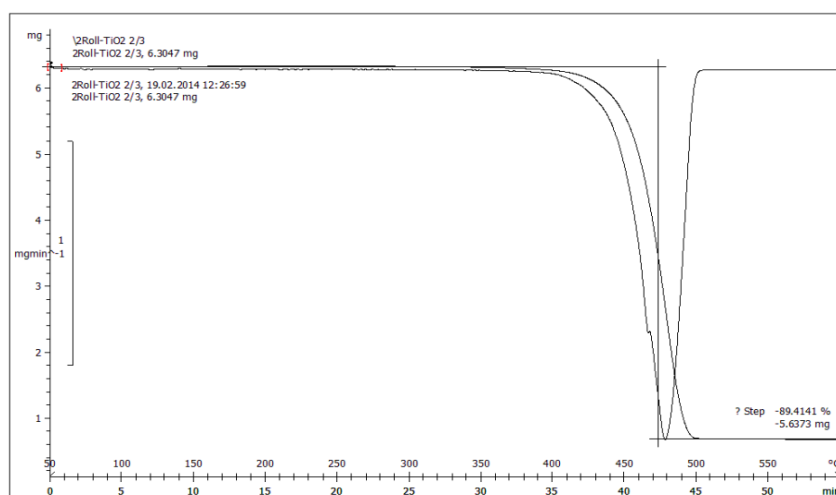
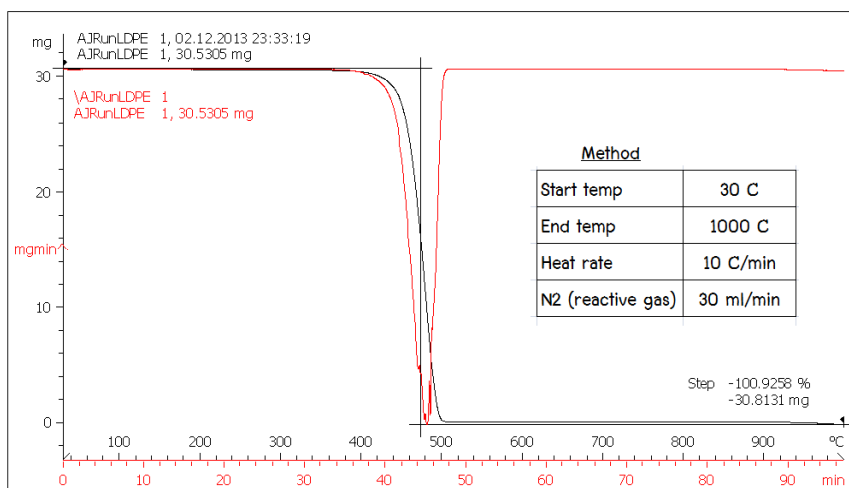
1. การศึกษาวิธีการเตรียมฟิล์มพลาสติกร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ ได้แก่ การเตรียมฟิล์มด้วยวิธีการคอมปาวด์ (Compounding) การเตรียมฟิล์มด้วยวิธีการผสม (Mixing) และการเตรียมฟิล์มเคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ (Dip-coating)
2. ทดสอบประสิทธิภาพในการกำจัดออกซิเจนด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติกของฟิล์มพอลิเอทิลีน-ไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยการเตรียมฟิล์มด้วยวิธีการคอมปาวด์ (Compounding) และการเตรียมฟิล์มด้วยวิธีการผสม (Mixing)
3. ทดสอบประสิทธิภาพในการกำจัดเอทิลีนด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติกของฟิล์มพอลิเอทิลีน-ไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยการเตรียมฟิล์มเคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ (Dip-coating)
4. ทดสอบประสิทธิภาพในการยืดอายุมะม่วงน้ำดอกไม้ด้วยฟิล์มเคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์

#### 4.1 การศึกษาวิธีการเตรียมฟิล์มพลาสติกร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์

##### 4.1.1 การเตรียมฟิล์มด้วยวิธีการคอมปาวด์ (Compounding)

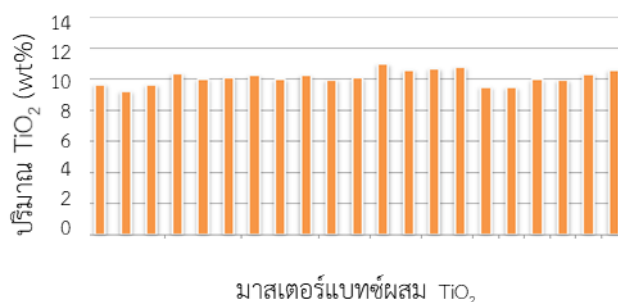
เป็นการผสมสารเติมแต่งกับพลาสติก ด้วยการให้ความร้อนจนพลาสติกหลอมเหลว และผสมให้สารเติมแต่งและพลาสติกเป็นเนื้อเดียวกัน เรียก มาสเตอร์แบทช์ (Masterbatch) ซึ่งในการทดลองนี้จะเตรียมมาสเตอร์แบทช์ระหว่างเม็ดพลาสติกพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ และอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ เพื่อให้ไทเทเนียมไดออกไซด์กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในพลาสติก ก่อนที่จะนำมาใส่ขั้นตอนการขึ้นรูปฟิล์มต่อไป ดังนั้น เพื่อทดสอบการกระจายตัวของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ จึงใช้การทดสอบด้วยเทคนิค วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อน ด้วยเครื่อง Thermal gravimetric analysis (TGA) ผลการทดลองดังรูปที่ 4.1

จากผลการทดลองวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อนของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ โดยมีการให้ความร้อนที่อัตรา  $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$  ปรับอุณหภูมิจากอุณหภูมิห้อง จนถึง  $1,000\text{ }^{\circ}\text{C}$  ภายใต้สภาวะที่มีไนโตรเจน พบว่า พอลิเอทิลีนจะเริ่มมีการสลายตัวที่อุณหภูมิ  $400\text{ }^{\circ}\text{C}$  โดยมีอุณหภูมิสลายตัวที่  $450\text{ }^{\circ}\text{C}$  และสลายตัวจนหมดที่อุณหภูมิ  $500\text{ }^{\circ}\text{C}$  ดังรูปที่ 4.1(ก) ในขณะที่มาตรฐานแบทช์ที่เตรียมจากพอลิเอทิลีนผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ร้อยละ 10 และนำไปทดสอบสมบัติทางความร้อนในช่วง  $25\text{--}600\text{ }^{\circ}\text{C}$  ดังรูปที่ 4.1(ข) พบว่ามีการสลายตัวที่อุณหภูมิ  $500\text{ }^{\circ}\text{C}$  คิดเป็นปริมาณร้อยละ 89.41 และเหลือสารร้อยละ 10.59 ที่อุณหภูมิ  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$  ซึ่งคาดว่าน้ำหนักที่เหลืออยู่จะเป็นไทเทเนียมไดออกไซด์ เนื่องจากพอลิเอทิลีนสลายตัวหมดที่อุณหภูมิ  $500\text{ }^{\circ}\text{C}$



รูปที่ 4.1 การวิเคราะห์ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีอยู่ในฟิล์มด้วยเทคนิค TGA

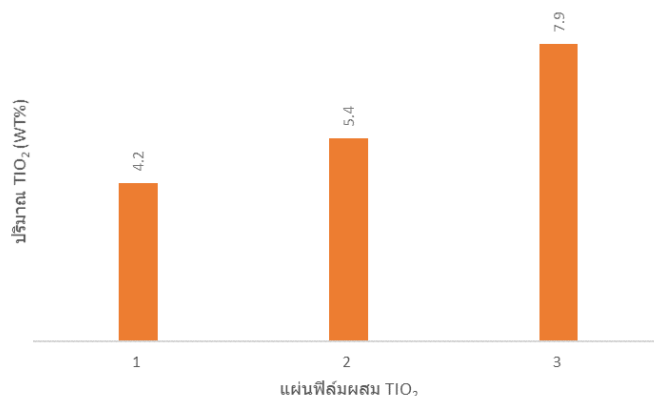
ในการเตรียมมาตรฐานแบทช์ด้วยเครื่องอัดรีดสองลูกกลิ้ง จะนำแผ่นมาตรฐานแบทช์ที่ได้ในแต่ละครั้ง ไปตัดเป็นชิ้นเล็กๆ และวิเคราะห์ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีอยู่ในพอลิเอทิลีน ดังรูปที่ 4.2 พบว่า การกระจายตัวของไทเทเนียมไดออกไซด์มีค่าสม่ำเสมอ โดยมีค่าเฉลี่ยการกระจายตัวของไทเทเนียมไดออกไซด์อยู่ที่ร้อยละ  $10.05\pm 0.5\text{ wt}\%$



รูปที่ 4.2 ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ในมาสเตอร์แบทช์ เตรียมด้วยเครื่องอัดรีดสองแบบลูกกลิ้ง

แม้ว่าการกระจายตัวของไทเทเนียมไดออกไซด์ในมาสเตอร์แบทช์ ถือว่าอยู่ในเกณฑ์ดี อย่างไรก็ตาม ลักษณะของมาสเตอร์แบทช์ที่ได้มีสีน้ำตาลขุ่น อาจเป็นเพราะเวลาในการผสมพอลิเอทิลีน ความหนาแน่นต่ำกับผงไทเทเนียมไดออกไซด์ใช้ระยะเวลา มาก จึงทำให้พลาสติกได้รับความร้อนเป็นเวลานาน

จากนั้น นำมาสเตอร์แบทช์ที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์เข้มข้นร้อยละ 10 มาทำการผสมกับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำแล้วทำการเป่าขึ้นรูปฟิล์ม พบว่า การกระจายตัวของไทเทเนียมไดออกไซด์ในฟิล์มที่เตรียมได้ในแต่ละครั้งมีความแตกต่างกัน โดยมีค่าเฉลี่ยที่ร้อยละ  $5.8 \pm 1.9$  wt% แม้ว่ามาสเตอร์แบทช์ที่นำมาเตรียมฟิล์มจะมีการกระจายตัวที่ดี ที่เป็นเช่นนี้อาจเป็นเพราะ ในงานวิจัยนี้ใช้เครื่องอัดรีดแบบสกรูเดียวในการเป่าขึ้นรูปฟิล์ม ซึ่งเครื่องอัดรีดแบบนี้ทำให้เกิดแรงเฉือนน้อย จึงทำให้เกิดการผสมได้ไม่ดี ส่งผลให้ความการกระจายตัวของไทเทเนียมไดออกไซด์ไม่ดี นอกจากนี้ ฟิล์มที่ได้อาจมีลักษณะเป็นสีน้ำตาลอันเนื่องมาจากสีของมาสเตอร์แบทช์อีกด้วย



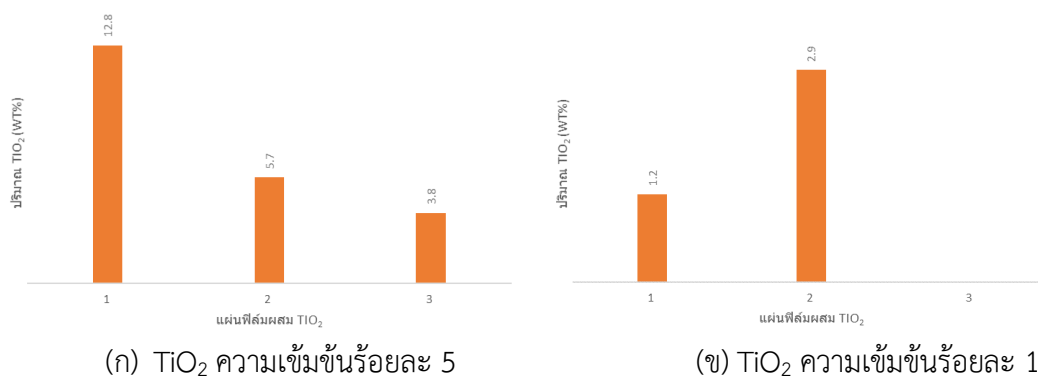
รูปที่ 4.3 ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ในฟิล์มผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ เตรียมจากมาสเตอร์แบทช์

#### 4.1.2 การเตรียมฟิล์มด้วยวิธีการผสม (Mixing)

เพื่อป้องกันปัญหาฟิล์มผสมไทเทเนียมไดออกไซด์มีสีน้ำตาล เนื่องจากความร้อนในขั้นตอนการเตรียมมาสเตอร์แบทช์ จึงทดลองเตรียมฟิล์มด้วยวิธีการผสม พอลิเอทิลีนกับผงไทเทเนียมไดออกไซด์โดยการเขย่าสารทั้งสองให้เข้ากัน แล้วจึงนำเข้าเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดียวในการเป่าขึ้นรูปฟิล์ม โดยปรับปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ในฟิล์มที่ร้อยละ 1 และร้อยละ 5 แล้วนำฟิล์มผสมที่เตรียมได้ไปทดสอบการกระจายตัวของไทเทเนียมไดออกไซด์ ดังรูปที่ 4.4 พบว่า มีการกระจายของไทเทเนียม



ไดออกไซด์ในฟิล์มผสมที่ร้อยละ 1 และร้อยละ 5 มีค่ากระจายตัวเฉลี่ย  $2.1 \pm 1.2$  wt% และ  $7.4 \pm 4.7$  wt% ตามลำดับ จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่า การกระจายตัวของไทเทเนียมไดออกไซด์บนฟิล์มที่เตรียมด้วยวิธีนี้มีความแตกต่างกันมาก นอกจากนี้ ยังพบ ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ติดอยู่ตามสกรูของเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว จึงเป็นสาเหตุให้ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ในแผ่นฟิล์มผสมมีค่าไม่สม่ำเสมอ อีกทั้งลักษณะของฟิล์มผสมที่ได้ยังมีลักษณะเป็นสีขาวขุ่น ซึ่งน่าจะเกิดจากอนุภาคของไทเทเนียมไดออกไซด์เข้าไปแทรกตัวอยู่ในพลาสติก จึงทำให้สามารถสรุปได้ว่า การใช้เครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว ไม่เหมาะสมในการขึ้นรูปฟิล์มผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ทั้งวิธีการเตรียมจากมาสเตอร์แบทช์และวิธีการผสม



รูปที่ 4.4 ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ในฟิล์มผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ เตรียมจากการผสม

#### 4.2 การทดสอบประสิทธิภาพในการกำจัดออกซิเจนด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติก

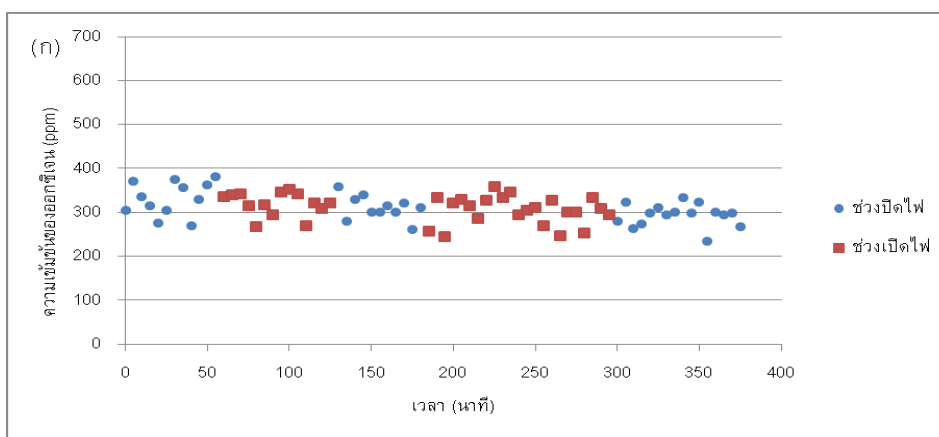
แม้ว่าฟิล์มผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมได้จากสองวิธีข้างต้น จะมีการกระจายตัวของไทเทเนียมไดออกไซด์ไม่สม่ำเสมอ แต่จะทำการทดสอบความเป็นไปได้ในการกำจัดออกซิเจนด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติกก่อน แล้วจึงทดลองปรับวิธีการเตรียมฟิล์มต่อไป โดยเริ่มจากการศึกษาผลกระทบของแสงอัลตราไวโอเล็ตที่ความเข้มแสง  $0.082 \text{ mW/cm}^2$  ที่มีผลต่อการกำจัดออกซิเจน ทำการทดลองโดยปรับความเข้มข้นของออกซิเจนเริ่มต้นเท่ากับ 250 และ 500 ppm ที่ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 45 โดยมีอัตราการไหลรวมเป็น  $10 \text{ ml/min}$  ไหลผ่านเครื่องปฏิกรณ์ที่ไม่ได้บรรจุฟิล์ม ติดตามการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของออกซิเจนภายใต้การฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต ด้วยเครื่องก๊าซโครมาโตกราฟ ผลการทดลองดังรูปที่ 4.5

เมื่อป้อนออกซิเจนความเข้มข้นเริ่มต้น 250 ppm (รูปที่ 4.5 (ก)) เข้าไปในเครื่องปฏิกรณ์ที่ไม่ได้บรรจุฟิล์มพลาสติก พบว่า ความเข้มข้นเฉลี่ยของออกซิเจนก่อนการฉายแสงเท่ากับ  $331.74 \pm 38.15$  ppm และหลังจากการฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต ความเข้มข้นเฉลี่ยของออกซิเจนเท่ากับ  $319.50 \pm 27.15$  ppm เกิดการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของออกซิเจนเนื่องจากแสงอัลตราไวโอเล็ตเพียงร้อยละ 3.69 ของความเข้มข้นเฉลี่ยของออกซิเจนก่อนการฉายแสง

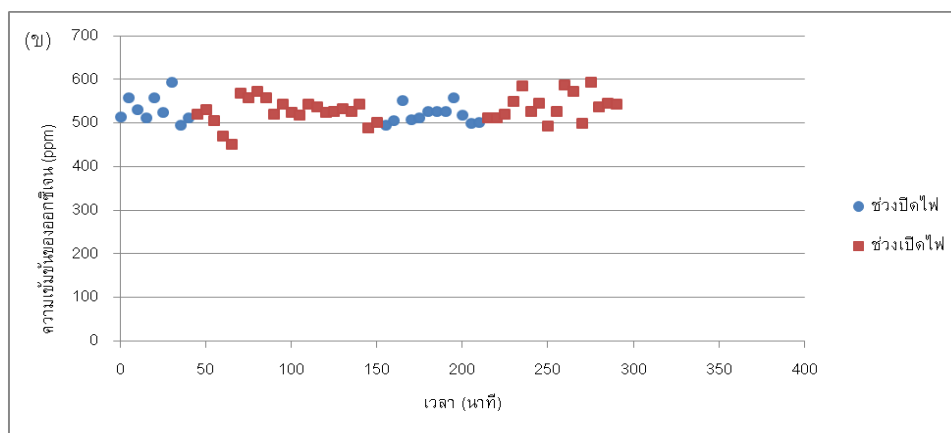
ในขณะที่ เมื่อป้อนออกซิเจนความเข้มข้นเริ่มต้น 500 ppm (รูปที่ 4.5 (ข)) เข้าไปในเครื่องปฏิกรณ์ที่ไม่ได้บรรจุฟิล์มพลาสติก พบว่า ความเข้มข้นเฉลี่ยของออกซิเจนก่อนการฉายแสงเท่ากับ  $533.98 \pm 31.28$  ppm และหลังจากฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตมีความเข้มข้นเฉลี่ยของออกซิเจน

เท่ากับ  $525.54 \pm 29.59$  ppm เกิดการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของออกซิเจนที่เปลี่ยนแปลงไป เนื่องจากแสงอัลตราไวโอเล็ตเพียงร้อยละ 1.40 ของความเข้มข้นเฉลี่ยของออกซิเจนก่อนการฉายแสง

จากผลการทดลองข้างต้น แสงอัลตราไวโอเล็ตส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของออกซิเจนน้อยมาก ( $< 3.69$  ของความเข้มข้นเริ่มต้น) จึงอาจสรุปได้ว่าแสงอัลตราไวโอเล็ตไม่สามารถกำจัดออกซิเจนได้



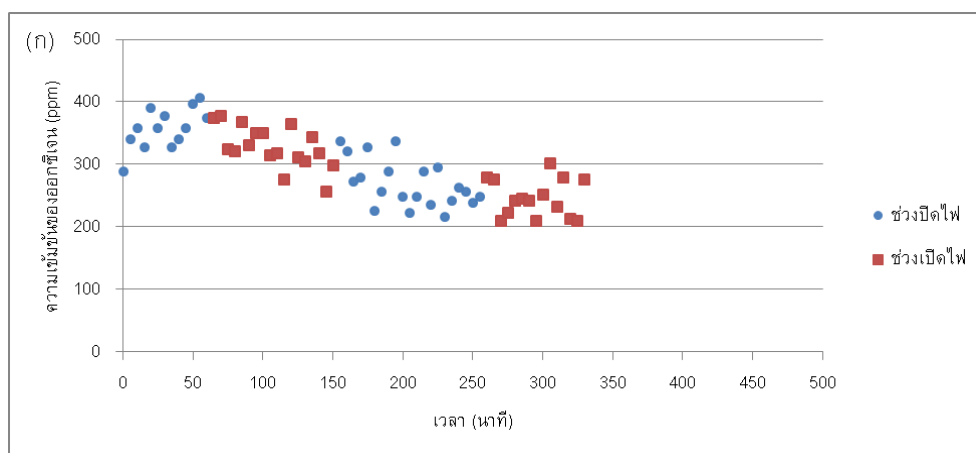
(ก) ความเข้มข้นของออกซิเจน 250 ppm



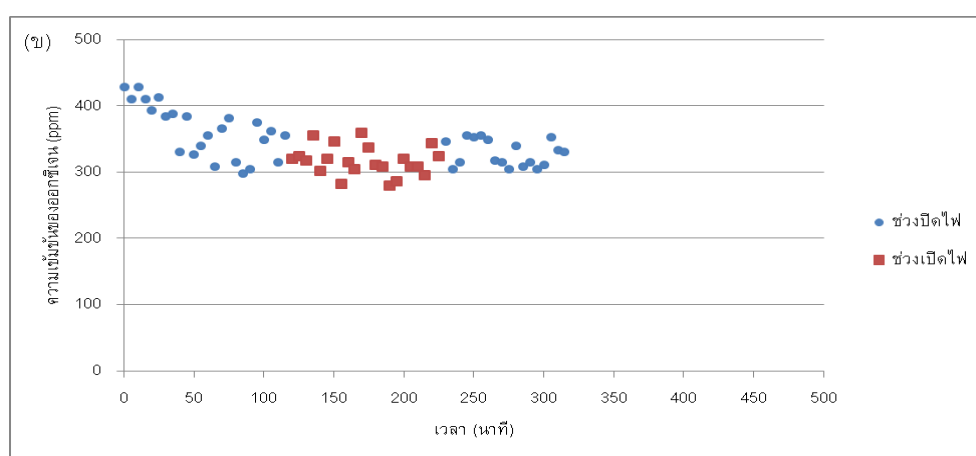
(ข) ความเข้มข้นของออกซิเจนเริ่มต้น 500 ppm

รูปที่ 4.5 ผลกระทบของแสงอัลตราไวโอเล็ตที่ส่งผลต่อออกซิเจนในเครื่องปฏิกรณ์ที่ไม่มีการบรรจุฟิล์ม

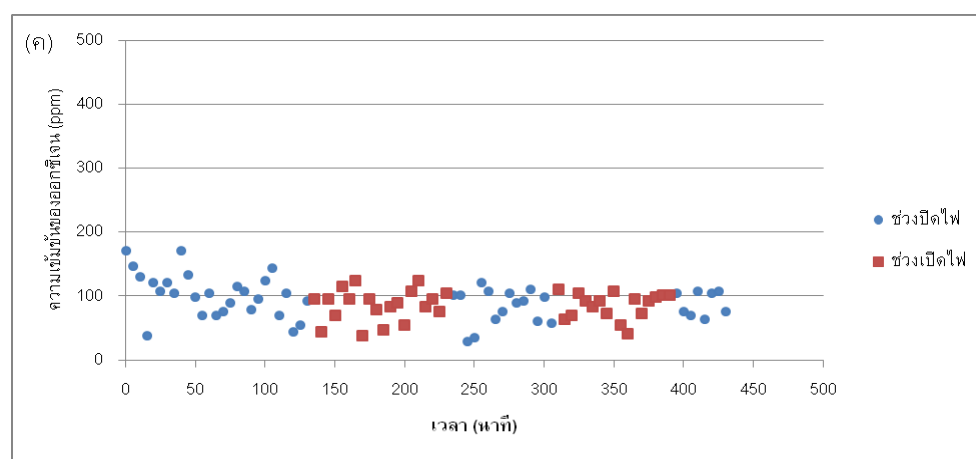
การศึกษาการกำจัดออกซิเจนจากปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติภายในเครื่องปฏิกรณ์ที่บรรจุฟิล์มพลาสติก ยาว 10 cm ภายใต้สภาวะการปิด-เปิดแสงอัลตราไวโอเล็ต โดยป้อนออกซิเจนที่มีความเข้มข้นสัมพัทธ์ร้อยละ 45 ความเข้มข้นเริ่มต้น 250 ppm เข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ และทำการตรวจสอบความเข้มข้นของออกซิเจนที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาด้วยเครื่องวัดก๊าซโครมาโตกราฟ ผลการทดลองดังรูป 4.6



(ก) फिल्मพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ



(ข) फिल्मผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 1 จากการเตรียมแบบผสม



(ค) फिल्मผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 5 จากมาสเตอร์แบทช์

รูปที่ 4.6 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของออกซิเจน ที่ป้อนออกซิเจนเริ่มต้น 250 ppm ภายในเครื่องปฏิกรณ์ที่บรรจุฟิล์มพลาสติก ภายใต้สภาวะการปิด-เปิดแสงอัลตราไวโอเล็ต

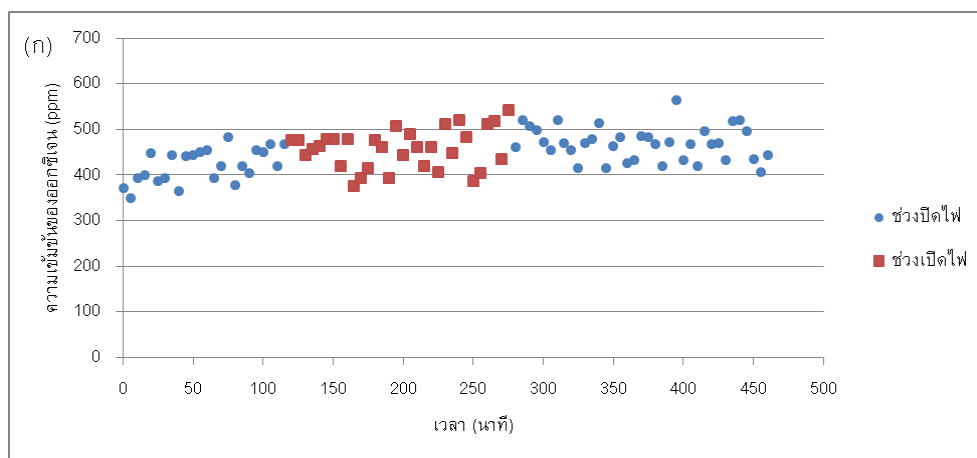
พบว่า พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (รูปที่ 4.6 (ก)) และฟิล์มผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ ความเข้มข้นร้อยละ 1 จากการเตรียมแบบผสม (รูปที่ 4.6 (ข)) มีค่าความเข้มข้นเฉลี่ยของออกซิเจน ในช่วงก่อนการฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตใกล้เคียงกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่า พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ และฟิล์มผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 1 จากการเตรียมแบบผสม มีการดูดซับออกซิเจน ได้น้อย ในขณะที่ผสมฟิล์มผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 5 จากมาสเตอร์แบทช์ (รูปที่ 4.6 (ค)) หลังจากป้อนออกซิเจนความเข้มข้นเริ่มต้น 250 ppm เข้าไปในเครื่องปฏิกรณ์ พบว่า ความเข้มข้นเฉลี่ยของออกซิเจนก่อนการฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตมีค่าลดลงเท่ากับ  $103.00 \pm 34.37$  ppm ซึ่งต่ำกว่า ความเข้มข้นเฉลี่ยของออกซิเจนของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำที่ไม่มีการผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ อย่างชัดเจน คิดเป็นร้อยละความแตกต่างอยู่ที่ 68.95 ของความเข้มข้นเฉลี่ยของออกซิเจนของฟิล์ม พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจาก ไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถดูดซับออกซิเจนได้ดี ส่งผลให้ความเข้มข้นของออกซิเจนเริ่มต้นต่ำลง อย่างไรก็ตาม แนวโน้มของความเข้มข้นออกซิเจนในฟิล์ม แต่ละชนิดมีแนวโน้มลดลงตามระยะเวลา ซึ่งฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำแสดงให้เห็นว่าระบบยังไม่ เข้าสู่สภาวะสมดุล (Steady state) เนื่องจาก กลไกการดูดซับออกซิเจนเป็นไปอย่างช้าๆ ซึ่งแตกต่างจาก ฟิล์มผสมไทเทเนียมไดออกไซด์

การกำจัดออกซิเจนของฟิล์มผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ภายใต้การฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต ไม่สามารถเห็นการเปลี่ยนแปลงปริมาณออกซิเจนจากปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติกได้อย่างชัดเจน อาจ เนื่องจากอัตราการเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติกของไทเทเนียมไดออกไซด์เกิดต่ำ เพราะมีปริมาณ ไทเทเนียมบนฟิล์มน้อย เมื่ออัตราการไหลของออกซิเจนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ที่สูง อาจทำให้ไม่เกิดการ เปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นออกซิเจน สำหรับฟิล์มผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 1 จากการเตรียมแบบผสม (รูปที่ 4.6 (ข)) ในขณะที่ฟิล์มผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 5 จากมาสเตอร์แบทช์ (รูปที่ 4.6 (ค)) แม้จะมีปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์มากขึ้น แต่ไม่พบการเปลี่ยน เปลี่ยนความเข้มข้นออกซิเจน อาจเป็นเพราะอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ที่อยู่ภายในฟิล์มอาจไม่สัมผัส กับออกซิเจนและน้ำ จึงไม่เกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติก

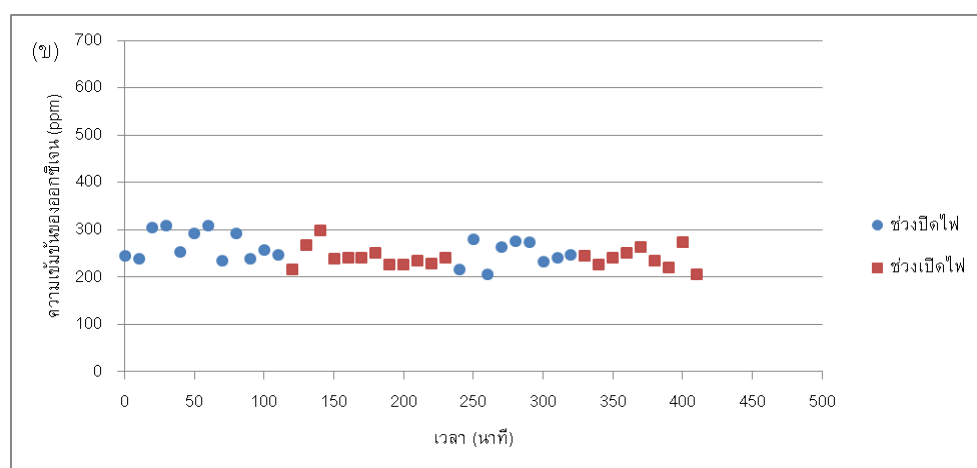
เมื่อปรับความเข้มข้นออกซิเจนเริ่มต้นเป็น 500 ppm ซึ่งมีความเข้มข้นสัมพัทธ์ร้อยละ 45 เข้าเครื่อง ปฏิกรณ์ที่บรรจุฟิล์มพลาสติกความยาว 10 cm อัตราการไหลโดยรวม 10 ml/min ภายใต้สภาวะการ ปิด-เปิดแสงอัลตราไวโอเล็ต และทำการตรวจสอบความเข้มข้นของออกซิเจนที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาด้วย เครื่องวัดก๊าซโครมาโตกราฟ ผลการทดลองดังรูป 4.7 พบว่า ความเข้มข้นเฉลี่ยของออกซิเจนก่อนฉาย แสงอัลตราไวโอเล็ตของฟิล์มผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 5 (รูปที่ 4.7 (ก)) สามารถดูดซับ ออกซิเจนได้ดีกว่าฟิล์มผสมความเข้มข้นร้อยละ 1 (รูปที่ 4.7 (ข)) เนื่องจากปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ มากขึ้น ทำให้การดูดซับออกซิเจนมากขึ้น

หากเปรียบเทียบการดูดซับออกซิเจนของฟิล์มผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 1 จากการเตรียมแบบผสมที่มีการป้อนออกซิเจนความเข้มข้นเริ่มต้น 250 ppm (รูปที่ 4.6 (ข)) และ 500 ppm (รูปที่ 4.7 (ก)) พบว่า การป้อนออกซิเจนความเข้มข้นเริ่มต้น 500 ppm มีการดูดซับออกซิเจนได้ มากกว่า เนื่องจากความเข้มข้นของออกซิเจนที่เพิ่มขึ้น ทำให้โอกาสที่โมเลกุลของออกซิเจนจะชนกับ

ไทเทเนียมไดออกไซด์มากขึ้น จึงทำให้การดูดซับเกิดได้ดี และพบปรากฏการณ์เช่นเดียวกันในฟิล์มผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 5 จากการเตรียมจากมาสเตอร์แบทช์



(ก) ฟิล์มผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 1 จากการเตรียมแบบผสม



(ข) ฟิล์มผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 5 จากมาสเตอร์แบทช์

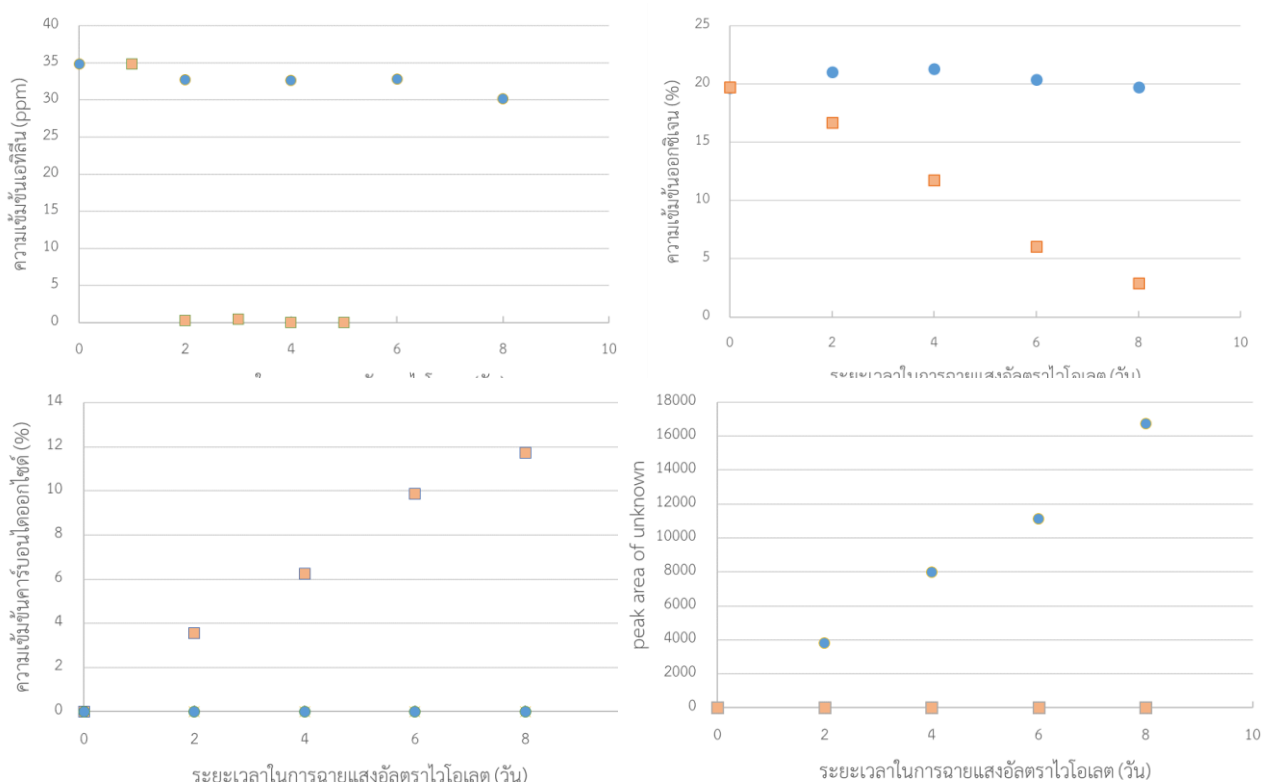
รูปที่ 4.7 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของออกซิเจน ที่ป้อนออกซิเจนเริ่มต้น 500 ppm ภายในเครื่องปฏิกรณ์ที่บรรจุฟิล์มพลาสติก ภายใต้สภาวะการปิด-เปิดแสงอัลตราไวโอเล็ต

อย่างไรก็ตาม ฟิล์มผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลติก ภายใต้การฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต ไม่สามารถกำจัดออกซิเจนได้ แสดงให้เห็นว่าการเตรียมฟิล์มด้วยวิธีดังกล่าวอาจไม่เหมาะสม จึงทำการเปลี่ยนวิธีการเตรียมฟิล์มเป็นแบบการเตรียมฟิล์มเคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ (Dip-coating) และเปลี่ยนสภาวะการทดลองเป็นเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ (Batch reactor) ต่อไป

### 4.3 การทดสอบประสิทธิภาพในการกำจัดเอทิลีนด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลติก

การเตรียมฟิล์มเคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ (Dip-coating) ทำโดยการนำฟิล์มพลาสติกพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (LDPE) ขนาด 7x9 cm จุ่มในสารแขวนลอย  $\text{TiO}_2$  ซึ่งประกอบด้วยอนุภาค  $\text{TiO}_2$  (Degussa P-25) มาแขวนลอยในน้ำ ที่มีสารเคลือบ (Polyethylene glycol) และ Triton X โดยขณะที่เคลือบ สารจะถูก ทำให้มีความเข้มข้นอย่างสม่ำเสมอด้วยเครื่องกวนสาร เมื่อเคลือบเสร็จ พบว่าจะมีปริมาณ  $\text{TiO}_2$  บนแผ่นฟิล์มอยู่ที่ประมาณ 1.9 mg

บรรจุภัณฑ์ถุงพลาสติก LDPE สามชั้นที่เคลือบชั้นนอกด้วยไนลอน (อากาศไม่สามารถแพร่ผ่านได้) ขนาด 10 x18 cm ซีลปิดผนึกลงในสภาวะสุญญากาศ จากนั้นอัดก๊าซที่สภาวะต่างๆ ในบรรจุภัณฑ์ที่มี  $\text{C}_2\text{H}_4$  ความเข้มข้น 35 ppm ผสมกับอากาศ ปริมาตรรวม 300 ml และบรรจุภัณฑ์ใส่ฟิล์มเคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่มี  $\text{C}_2\text{H}_4$  ความเข้มข้น 35 ppm ผสมกับอากาศ ปริมาตรรวม 300 ml นำบรรจุภัณฑ์ ทั้งสองมาฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต UVA (ความยาวคลื่น 350 nm) ที่ความเข้มแสงเท่ากับ  $59 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  และทำการวิเคราะห์ปริมาณก๊าซต่างๆ ในถุงด้วยเครื่องก๊าซโครมาโตกราฟี (Gas chromatograph) ทุกๆ 2 วัน เป็นเวลา 8 วัน ผลการทดลองดังรูปที่ 4.8

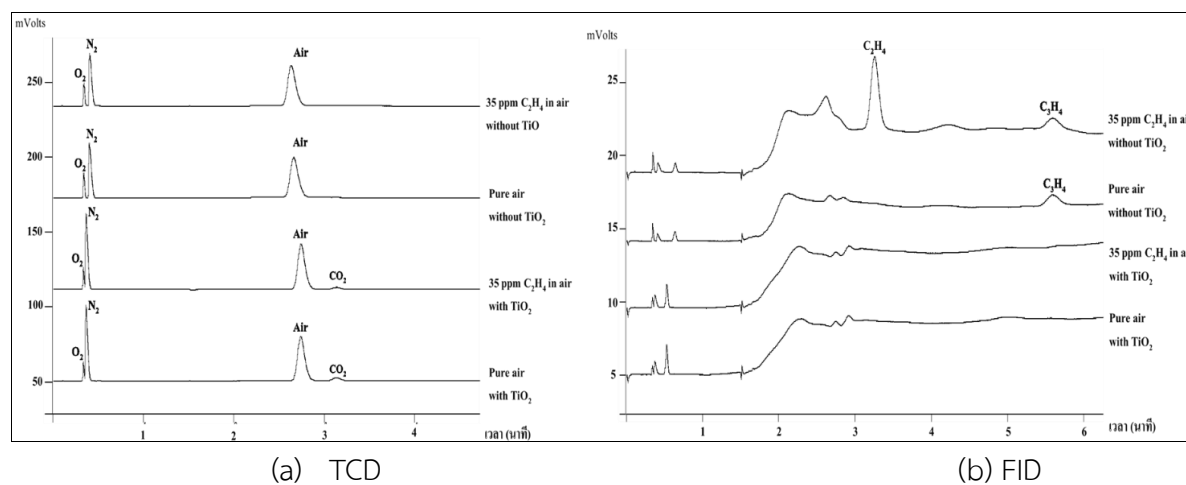


รูปที่ 4.8 ปริมาณก๊าซต่างๆ ในบรรจุภัณฑ์ที่มี ● การบรรจุเอทิลีน ■ การบรรจุเอทิลีน และมีการใส่ฟิล์มผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ ภายใต้การฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต

บรรจุภัณฑ์ที่มีเอทิลีน พบว่าความเข้มข้นของเอทิลีนลดลงเล็กน้อย ( $\approx 8.5\%$ ) ไม่พบการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นออกซิเจน ไม่พบคาร์บอนไดออกไซด์เกิดขึ้น และพบก๊าซ unknown เกิดขึ้น ในขณะที่บรรจุภัณฑ์ที่มีฟิล์มที่เคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์บรรจุเอทิลีน จะเห็นได้ว่า เอทิลีนเกิดการสลายตัวจนหมดเมื่อผ่านไป 2 วัน พร้อมกับ กับการลดลงของออกซิเจน เกิดคาร์บอนไดออกไซด์ และไม่พบก๊าซ unknown ในขณะที่บรรจุภัณฑ์ที่มีฟิล์มที่เคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์บรรจุเอทิลีนเช่นเดียวกัน แต่ไม่มีการฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต ไม่พบการเปลี่ยนแปลงของเอทิลีนและออกซิเจน อีกทั้งไม่พบคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซ unknown แสดงให้เห็นว่า ไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถกำจัดเอทิลีน และก๊าซ unknown ได้ด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติก ภายใต้สภาวะการฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต จึงกล่าวได้ว่าแสงอัลตราไวโอเล็ตเป็นปัจจัยสำคัญในการกำจัดเอทิลีนอีกด้วย

เพื่อศึกษาแหล่งการเกิดก๊าซ unknown จึงได้ทำการทดลองบรรจุภัณฑ์ใส่ก๊าซที่สภาวะต่างๆ

1) อากาศปริมาตร 300 ml 2) อากาศปริมาตร 300 ml ใส่ฟิล์มเคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์  
3)  $C_2H_4$  ความเข้มข้น 35 ppm ผสมกับอากาศ ปริมาตรรวม 300 ml 4)  $C_2H_4$  ความเข้มข้น 35 ppm ผสมกับอากาศ ปริมาตรรวม 300 ml ใส่ฟิล์มเคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ แล้วนำก๊าซที่ได้จากบรรจุภัณฑ์ภายหลังการฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต 4 วันมาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง GC ซึ่งจะใช้ตัวตรวจจับ 2 แบบ คือ Thermal conductivity detector (TCD) และ Flame ionization detector (FID) ผลการทดลองดังรูปที่ 4.9

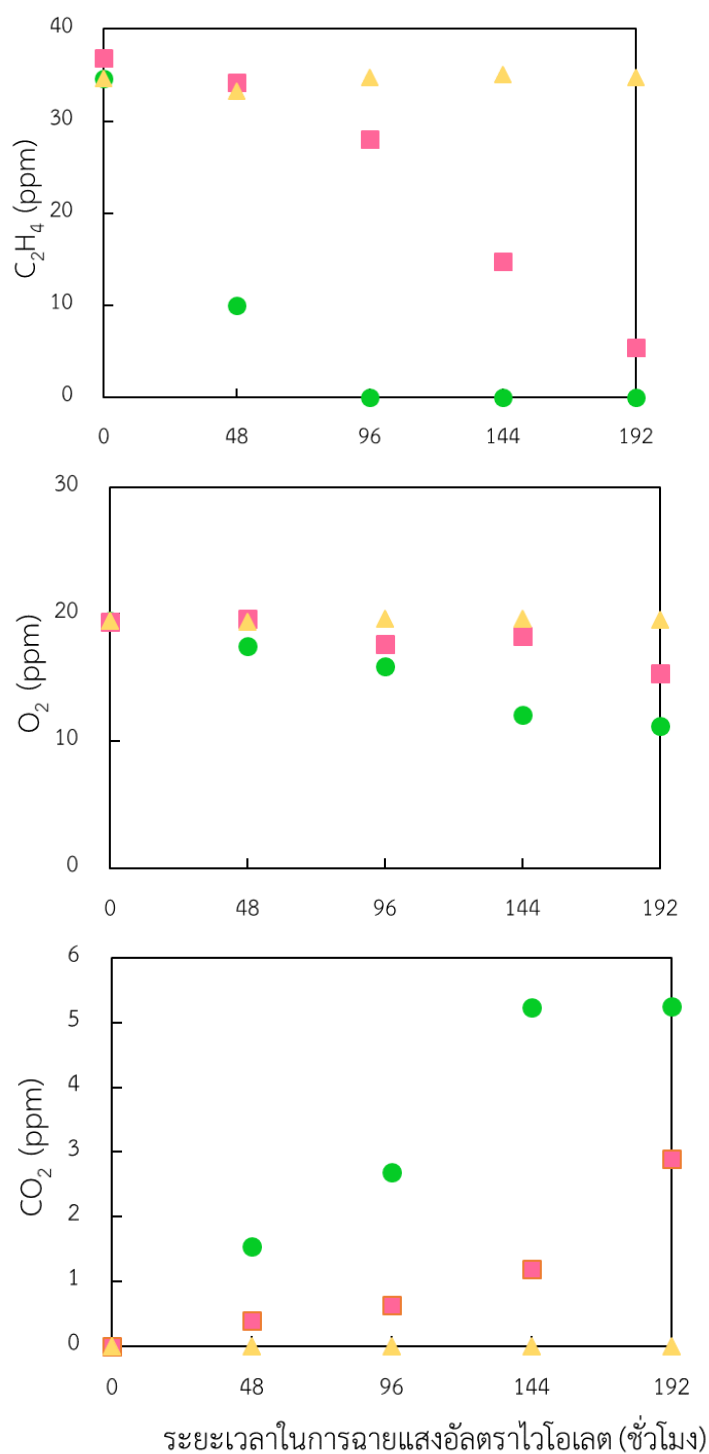


รูปที่ 4.9 โครมาโตแกรมของก๊าซที่วิเคราะห์จากบรรจุภัณฑ์ซึ่งบรรจุก๊าซสภาวะต่างๆ ภายหลังการฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตเป็นเวลา 4 วัน

จะเห็นได้ว่าบรรจุภัณฑ์ที่ไม่มีการบรรจุฟิล์มเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ ไม่ว่าจะก๊าซในบรรจุภัณฑ์จะเป็นอากาศหรือเอทิลีน จะพบพีคของก๊าซ unknown แสดงให้เห็นว่าก๊าซ unknown เกิดขึ้นจากการสลายตัวของบรรจุภัณฑ์ ในขณะที่บรรจุภัณฑ์ที่มีฟิล์มเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ จะไม่พบพีคก๊าซ unknown และพบคาร์บอนไดออกไซด์เกิดขึ้น แสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติกสามารถกำจัดทั้ง  $C_2H_4$  และ ก๊าซ unknown ได้ อีกทั้งได้นำก๊าซ unknown ไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง GC-MS พบว่าก๊าซดังกล่าวน่าจะเป็น  $C_3H_4$  ซึ่งอาจเกิดขึ้นจากการสลายตัวของถุงพลาสติก LDPE

#### 4.3.1 ผลกระทบของปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ในบรรจุภัณฑ์

การศึกษาผลกระทบของปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีต่อการกำจัดเอทิลีน ทำโดยการบรรจุฟิล์มเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ในปริมาณ 0, 1.9 mg และ 3.8 mg ลงในบรรจุภัณฑ์ที่มี  $C_2H_4$  เข้มข้น 35 ppm และมีการฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตที่  $37 \mu W/cm^2$  ผลการทดลองดังรูปที่ 4.10



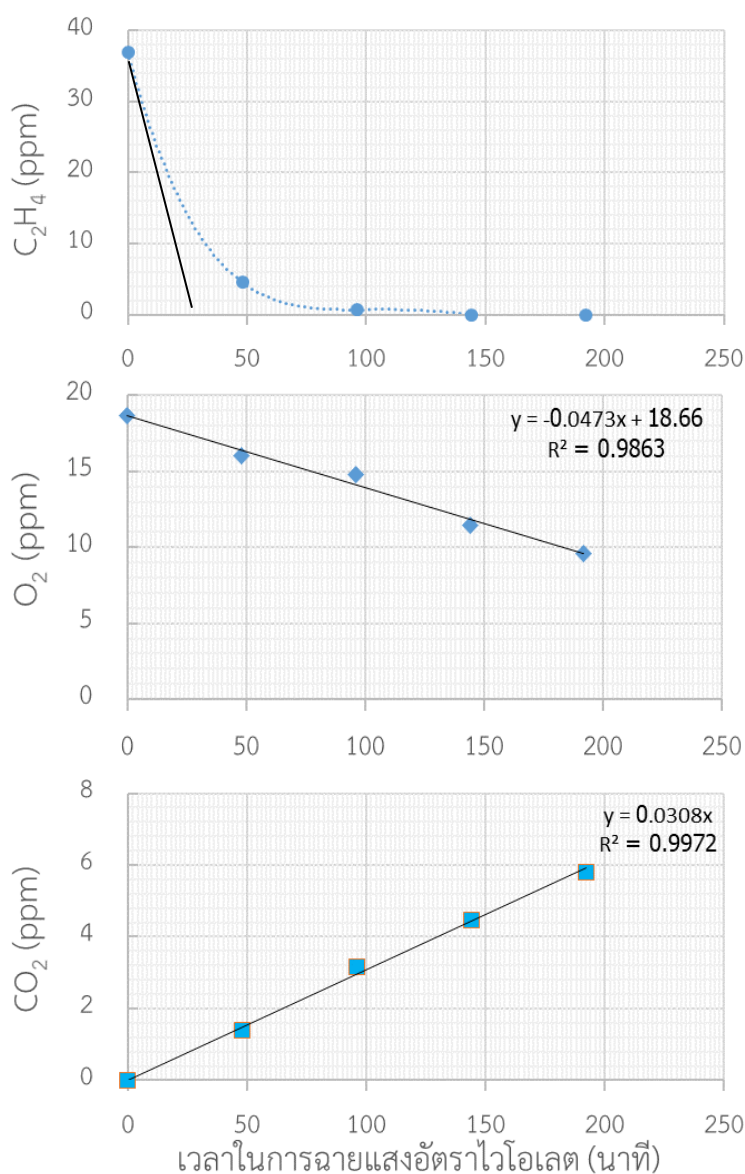
รูปที่ 4.10 ปริมาณก๊าซต่างๆ ในบรรจุภัณฑ์ที่มีการใส่ฟิล์มผสมไทเทเนียมไดออกไซด์

▲ 0 mg ■ 1.9 mg ● 3.8 mg ภายใต้การฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต  $37 \mu W/cm^2$



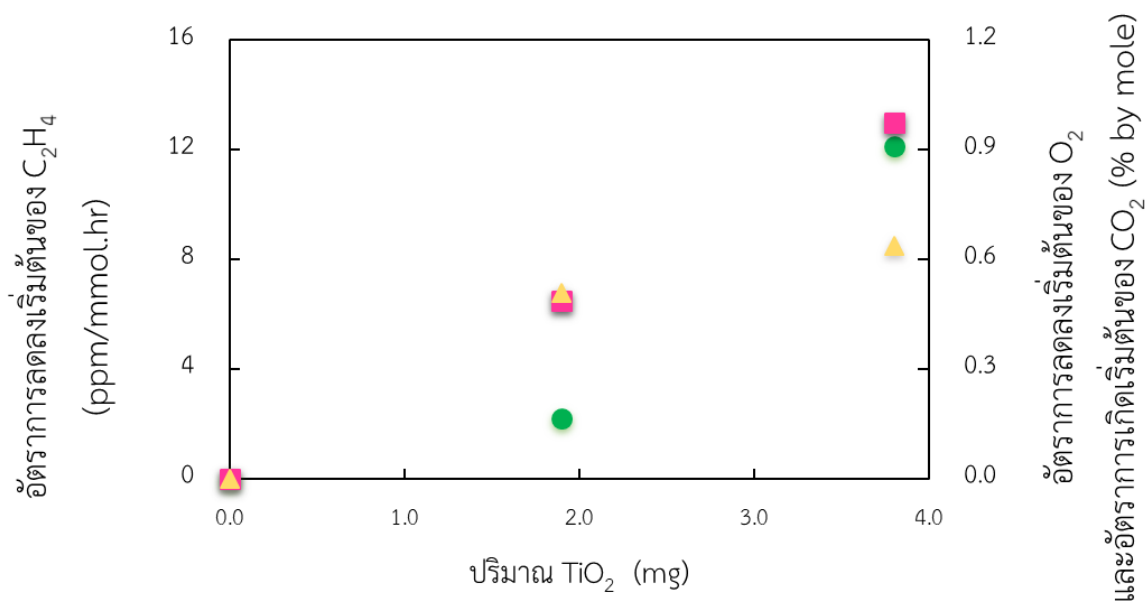
พบว่า บรรจุภัณฑ์ที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์ปริมาณ 3.8 mg สามารถกำจัด  $C_2H_4$  ได้หมดภายใน 96 ชั่วโมง ในขณะที่บรรจุภัณฑ์ที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์ 1.9 mg สามารถกำจัด  $C_2H_4$  ได้เพียง 8.9 ppm การลดลงของ  $C_2H_4$  เกิดขึ้นพร้อมๆ กับการลดลงของ  $O_2$  และพร้อมๆ กับการเกิดขึ้นของ  $CO_2$  เป็นที่น่าสังเกตว่า ถึงแม้บรรจุภัณฑ์ที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์ 3.8 mg จะกำจัด  $C_2H_4$  ด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลติกจนหมดแล้วก็ตาม แต่ปริมาณของ  $O_2$  ยังคงลดลงอย่างต่อเนื่องและ  $CO_2$  ยังมีปริมาณเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน ทำให้ทราบว่ายังมีการเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลติก อย่างต่อเนื่อง ทั้งนี้เป็นเพราะเกิดการสลายตัวของ  $C_3H_4$  ที่เกิดขึ้นจากการสลายตัวของบรรจุภัณฑ์พลาสติกภายใต้แสง UVA ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น

การศึกษาอัตราการเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลติกของไทเทเนียมไดออกไซด์ คิดจากอัตราการหายไปของเอทิลีนเริ่มต้น (Initial rate) อัตราการหายไปของออกซิเจนเริ่มต้น และอัตราการเกิดขึ้นของคาร์บอนไดออกไซด์เริ่มต้น โดยอัตราการเกิดปฏิกิริยาสามารถหาได้จากความชัน ดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 อัตราการเกิดปฏิกิริยาเริ่มต้นของปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลติกของฟิล์มเคลือบ  $TiO_2$

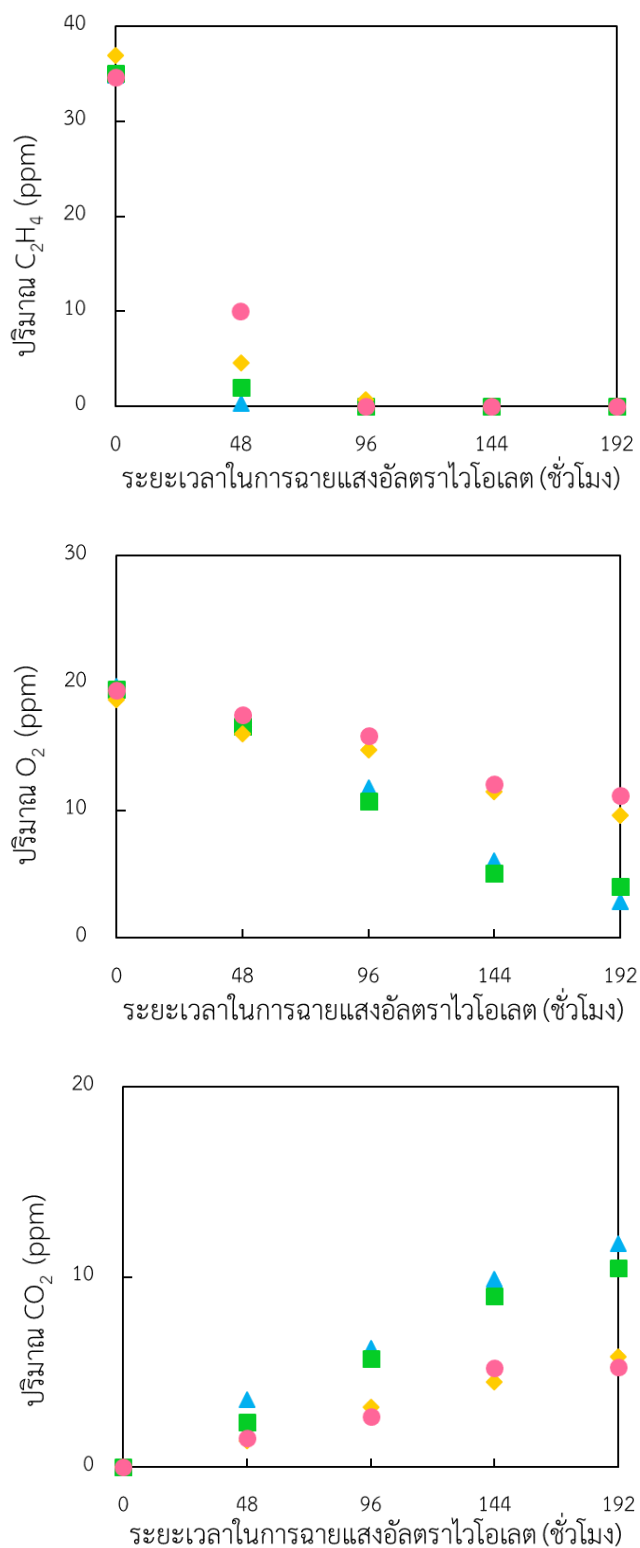
อัตราการเกิดปฏิกิริยาเริ่มต้นของปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลติกของไทเทเนียมไดออกไซด์ในฟิล์ม ดังแสดงในรูปที่ 4.12 พบว่าบรรจุภัณฑ์ที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์ปริมาณ 0, 1.9 และ 3.8 mg จะมีอัตราการลดลงเริ่มต้นของ  $C_2H_4$  เป็น 0, 2.2 และ 12.1 ppm/mmol·hr ตามลำดับ การเพิ่มปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นสองเท่า ส่งผลให้อัตราเริ่มต้นของการสลายตัวของ  $C_2H_4$  เพิ่มสูงขึ้นถึง 5.5 เท่า แสดงให้เห็นว่าปริมาณของ  $TiO_2$  เป็นปัจจัยสำคัญต่อปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลติก ส่งผลให้อัตราการลดลงของ  $O_2$  และอัตราการเกิดขึ้นของ  $CO_2$  สูงขึ้นด้วย โดยมีอัตราการลดลงเริ่มต้นของ  $O_2$  สูงขึ้นเป็น 2 เท่า ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.97 %/mmol.hr และอัตราการเกิดเริ่มต้นของ  $CO_2$  สูงขึ้น 1.25 เท่า ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.64 %/mmol.hr



รูปที่ 4.12 ผลกระทบของปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ในบรรจุภัณฑ์ที่มีต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาการลดลง เริ่มต้นของเอทิลีน (●)และออกซิเจน (■)และอัตราการเกิดของคาร์บอนไดออกไซด์เริ่มต้น (▲)

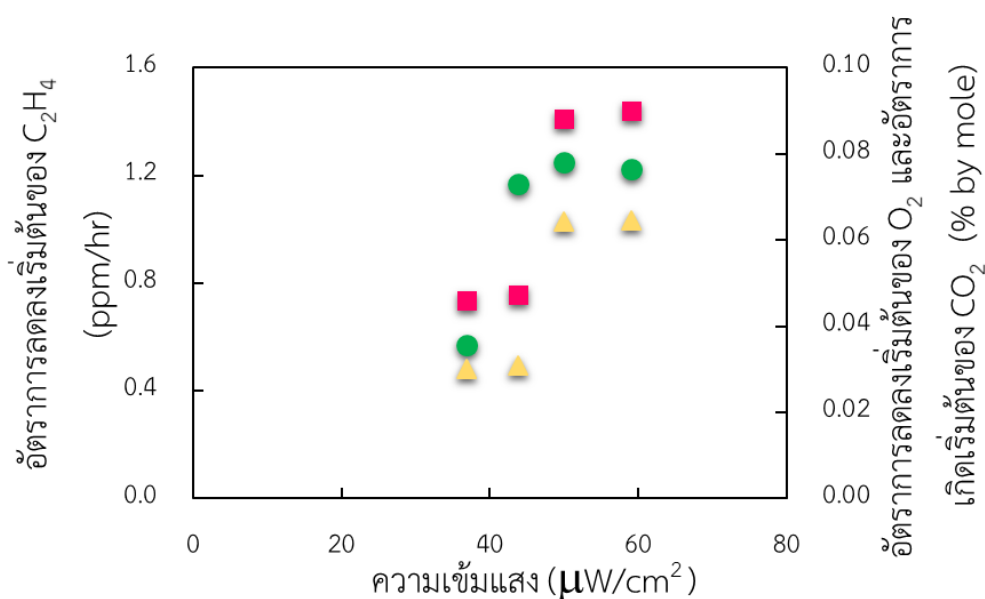
#### 4.3.2 ผลกระทบของความเข้มแสงอัลตราไวโอเล็ต

การศึกษาผลกระทบของความเข้มแสงอัลตราไวโอเล็ตที่มีต่อการกำจัดเอทิลีนด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลติก ทำโดยการบรรจุฟิล์มเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ 3.8 mg ในบรรจุภัณฑ์ที่มีเอทิลีนเข้มข้น 35 ppm และทำการฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตที่ความเข้มแสง 37, 44, 50 และ 59  $\mu W/cm^2$  ผลการวิเคราะห์ความเข้มข้นของก๊าซเอทิลีน ออกซิเจน และคาร์บอนไดออกไซด์ ดังรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 ปริมาณก๊าซต่างๆ ในบรรจุภัณฑ์ที่มีการใส่ฟิล์มผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ 3.8 mg ภายใต้การฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตความเข้มแสง  $\blacklozenge$  37  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ ,  $\bullet$  44  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ ,  $\blacksquare$  50  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$  และ  $\blacktriangle$  59  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$

พบว่า เมื่อความเข้มแสงอัลตราไวโอเล็ตสูงขึ้น ปริมาณ  $C_2H_4$  และ  $O_2$  ในบรรจุภัณฑ์มีค่าลดลง ในขณะที่ ปริมาณ  $CO_2$  ในบรรจุภัณฑ์เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ที่ความเข้มแสงที่  $59 \mu W/cm^2$  สามารถกำจัด  $C_2H_4$  ได้หมดในเวลา 48 ชั่วโมง ขณะที่ความเข้มแสงที่ 37, 44 และ  $50 \mu W/cm^2$  ยังคงมี  $C_2H_4$  เหลืออยู่เพียง 10, 4.6 และ 2 ppm ตามลำดับ และจะถูกกำจัดหมดในเวลา 96 ชั่วโมง เช่นเดียวกับการทดลองผลกระทบของปริมาณ  $TiO_2$  ในรูปที่ 4.10 ถึงแม้ว่า  $C_2H_4$  จะสลายตัวจนหมดแล้ว แต่ปริมาณ  $O_2$  ยังคงลดลงอย่างต่อเนื่อง และปริมาณ  $CO_2$  ยังคงเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเช่นกัน



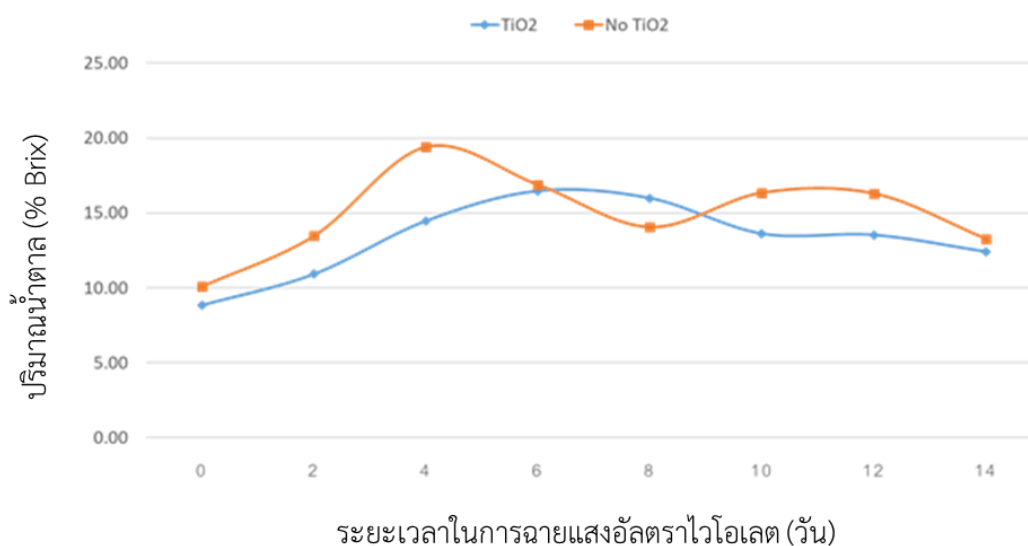
รูปที่ 4.14 ผลกระทบของความเข้มแสงอัลตราไวโอเล็ตบนบรรจุภัณฑ์ที่มีฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ 3.8 mg ต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาการลดลงเริ่มต้นของเอทิลีน (●)และออกซิเจน (■)และอัตราการเกิดของคาร์บอนไดออกไซด์เริ่มต้น (▲)

เมื่อพิจารณาอัตราการเกิดปฏิกิริยาเริ่มต้นของก๊าซชนิดต่างๆ ในบรรจุภัณฑ์ดังแสดงในรูปที่ 4.14 พบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มแสงอัลตราไวโอเล็ตจาก 37 เป็น  $44 \mu W/cm^2$  ทำให้อัตราการลดลงเริ่มต้นของ  $C_2H_4$  เพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่า ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $1.17 ppm/hr$  และอัตราการลดลงเริ่มต้นของ  $O_2$  และอัตราการเกิดเริ่มต้นของ  $CO_2$  มีค่าใกล้เคียงกัน มีค่าเป็น 0.05 และ 0.03 %/hr แต่ในช่วงความเข้มแสงในช่วง  $50-59 \mu W/cm^2$  พบว่า อัตราการกำจัด  $C_2H_4$  มีค่าใกล้เคียงเดิม นั่นอาจเป็นเพราะปริมาณ  $C_3H_4$  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 แม้ว่าจากผลการทดลองพบว่าเกิด  $C_3H_4$  ภายในบรรจุภัณฑ์ แต่  $C_3H_4$  เป็นสารไฮโดรคาร์บอนพันธะสาม ซึ่งน่าจะมีความสามารถในการดูดซับบน  $TiO_2$  ได้ดีกว่า  $C_3H_6$  ซึ่งเป็นสารไฮโดรคาร์บอนพันธะคู่ จึงทำให้  $C_3H_4$  ที่เกิดจากการสลายตัวของถุงพลาสติกได้อย่างต่อเนื่อง เกิดการสลายตัว ทำให้  $O_2$  ภายในถุงลดลงและ  $CO_2$  เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง

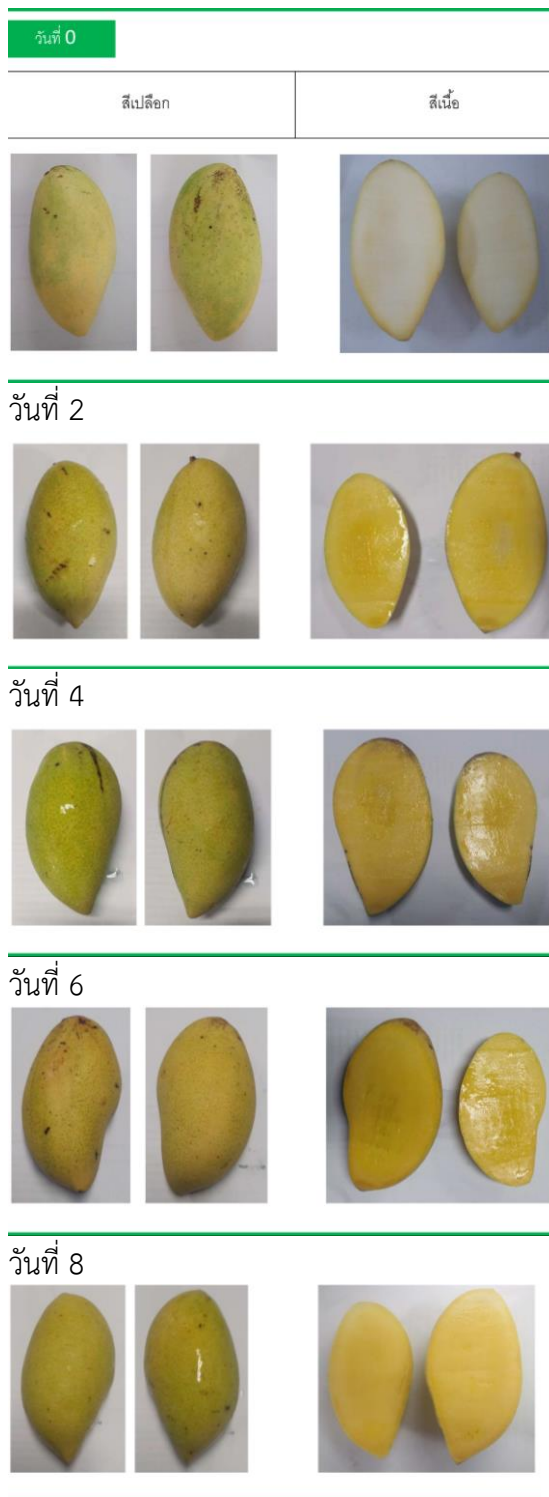
#### 4.4 การทดสอบประสิทธิภาพในการยืดอายุมะม่วงน้ำดอกไม้ด้วยฟิล์มเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์

การทดสอบการยืดอายุมะม่วงน้ำดอกไม้ ทำโดยการตัดมะม่วงน้ำหนักประมาณ 300-350 g โดยมะม่วงที่เลือกใช้จะเป็นมะม่วงระยะห้าม ซึ่งทดสอบได้จากการที่มะม่วงกึ่งลอยน้ำกึ่งจม จากนั้นนำมะม่วงมาตัดขั้วออก ล้างทำความสะอาดและเช็ดผิวมะม่วงด้วยแอลกอฮอล์ เพื่อฆ่าเชื้อ นำมะม่วงน้ำดอกไม้ 1 ลูก ที่เตรียมได้บรรจุในถุง LDPE 1 ชั้น ยาว 45 cm กว้าง 17 cm และใส่ฟิล์มเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ ปริมาณ 1.9 mg พร้อมกับอัดอากาศปริมาตร 300 ml อยู่ในสภาวะฉายแสงอัลตราไวโอเลตมีความเข้มแสง  $37 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  ซึ่งอุณหภูมิในการทดลองประมาณ  $24 \text{ }^{\circ}\text{C}$  จากนั้นทำการวิเคราะห์ลักษณะของมะม่วง โดยการดูสีเปลือกและสีเนื้อมะม่วง (ดังรูปที่ 4.16) รวมถึงทำการวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลในมะม่วง โดยการนำเนื้อมะม่วงมาปั่นละเอียด และคั้นน้ำมาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Brix refractometer ผลการทดลองดังรูปที่ 4.15

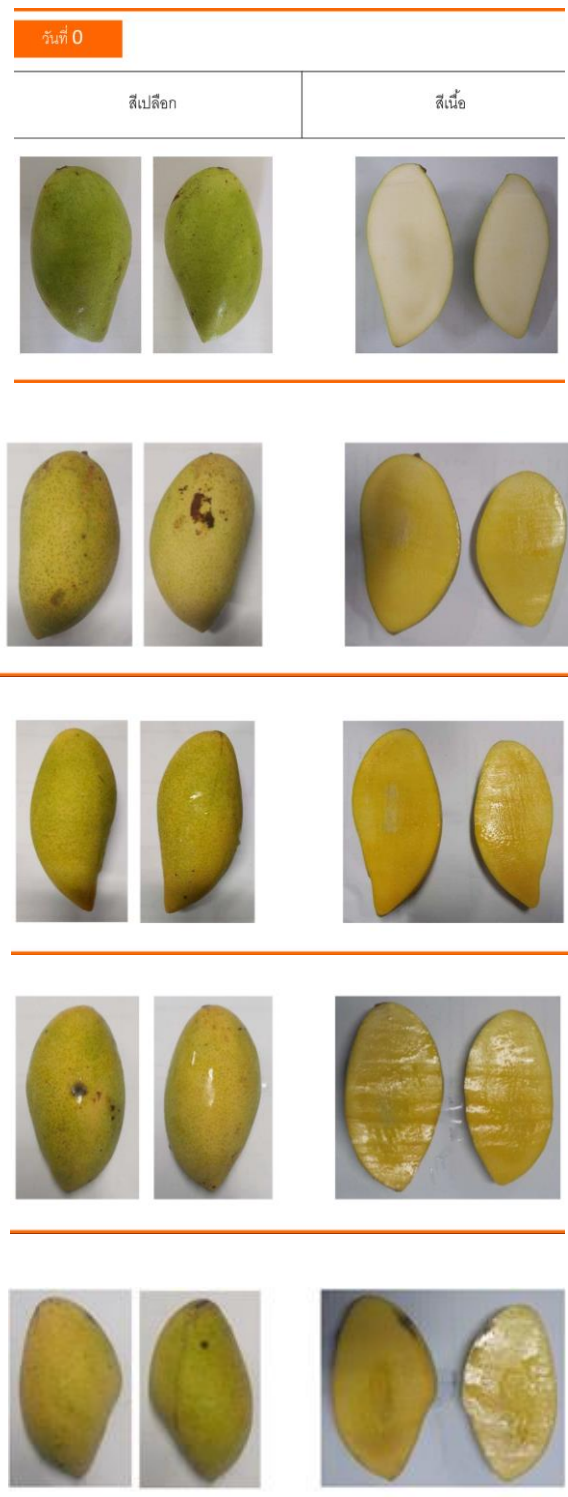
พบว่า มะม่วงที่เก็บรักษาไว้ในบรรจุภัณฑ์ที่มีฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์จะมีปริมาณน้ำตาลในผลมะม่วงเพิ่มขึ้นในช่วงวันที่ 1-6 และเริ่มมีปริมาณน้ำตาลลดลงตั้งแต่วันที่ 8 ในขณะที่มะม่วงที่เก็บไว้ในบรรจุภัณฑ์เปรียบเทียบ จะมีปริมาณน้ำตาลเพิ่มขึ้นในช่วงวันที่ 1-4 และเริ่มมีปริมาณน้ำตาลลดลงตั้งแต่วันที่ 6 การที่ปริมาณน้ำตาลเพิ่มขึ้นในช่วงแรกเกิดจากการที่มะม่วงเริ่มสุกมีการเปลี่ยนแปลงเป็นน้ำตาล และหลังจากนั้นเมื่อมะม่วงสุกเต็มที่ จะเกิดการหายใจโดยใช้น้ำตาลจึงทำให้ปริมาณน้ำตาลลดลง ทำให้มะม่วงเกิดการเน่าเสีย จะเห็นได้ว่าบรรจุภัณฑ์ที่มีฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถชะลอการสุกได้ดี เนื่องจากสามารถกำจัดเอทิลีนที่เกิดขึ้นจากการหายใจของมะม่วงได้ และหากพิจารณาลักษณะเปลือกและเนื้อของมะม่วงที่เก็บรักษาไว้ในบรรจุภัณฑ์ที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์ จะเริ่มสังเกตเห็นการเน่าเสียในวันที่ 10 ในขณะที่มะม่วงที่เก็บในบรรจุภัณฑ์เปรียบเทียบจะเริ่มเห็นการเน่าเสียในวันที่ 8

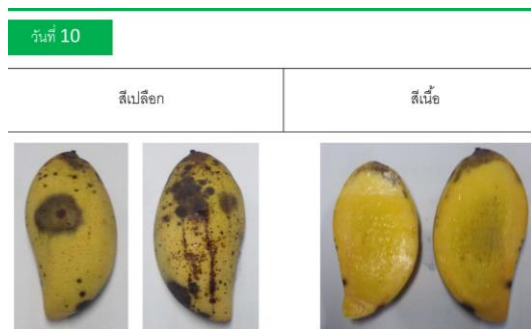


รูปที่ 4.15 ความหวานของมะม่วงน้ำดอกไม้ในบรรจุภัณฑ์ที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์ 1.9 mg ภายใต้การฉายแสงอัลตราไวโอเลต  $37 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  อุณหภูมิในการทดลอง  $24 \text{ }^{\circ}\text{C}$

มะม่วงในบรรจุภัณฑ์ที่มี TiO<sub>2</sub>

## มะม่วงในบรรจุภัณฑ์

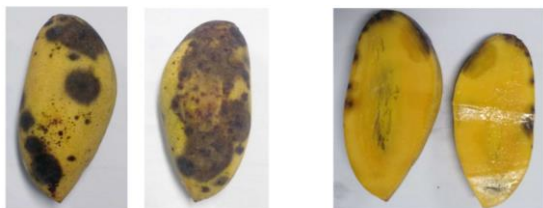


มะม่วงในบรรจุภัณฑ์ที่มี TiO<sub>2</sub>

## มะม่วงในบรรจุภัณฑ์



วันที่ 12



วันที่ 14



รูปที่ 4.16 การยืดอายุมะม่วงน้ำดอกไม้ในบรรจุภัณฑ์ที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์ 1.9 mg ภายใต้การฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต 37  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$  อุณหภูมิในการทดลอง 24 °C

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาฟิล์มพลาสติกผสมอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยเน้นศึกษาผลกระทบของปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ในฟิล์ม ที่มีต่อสมบัติทางกายภาพ ความสามารถในการกำจัดเอทิลีนและออกซิเจนในบรรจุภัณฑ์ อีกทั้งศึกษาการยึดอายุการเก็บรักษามะม่วงสด โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 4 ตอน

1. การศึกษาวิธีการเตรียมฟิล์มพลาสติกร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ พบว่า การเตรียมด้วยวิธีคอมปาวด์ (Compounding) จะพบการกระจายตัวของไทเทเนียมไดออกไซด์ในมาสเตอร์แบทช์ที่เฉลี่ยที่  $10.05 \pm 0.5$  wt% และเมื่อนำมาสเตอร์แบทช์มาผสมกับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำแล้วทำการเป่าขึ้นรูปฟิล์ม พบว่าการกระจายตัวของไทเทเนียมไดออกไซด์ในฟิล์มที่เตรียมได้ในแต่ละครั้งมีความแตกต่างกัน โดยมีค่าเฉลี่ยที่  $5.8 \pm 1.9$  wt% เนื่องจากการเป่าขึ้นรูปฟิล์มทำโดยเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว ซึ่งเกิดแรงเฉือนน้อย จึงทำให้เกิดการผสมได้ไม่ดี นอกจากนี้ ฟิล์มที่ได้ยังมีลักษณะเป็นสีน้ำตาล เนื่องจากการให้ความร้อนเป็นระยะเวลานานในช่วงเตรียมมาสเตอร์แบทช์ ในขณะที่การเตรียมฟิล์มด้วยวิธีการผสม (Mixing) มีการกระจายของไทเทเนียมไดออกไซด์ในฟิล์มผสมที่ร้อยละ 1 และร้อยละ 5 มีค่ากระจายตัวเฉลี่ย  $2.1 \pm 1.2$  wt% และ  $7.4 \pm 4.7$  wt% ตามลำดับ ซึ่งมีการกระจายตัวที่ไม่ดี และการเตรียมฟิล์มเคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ (Dip-coating) นั้น สามารถปรับปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีอยู่บนฟิล์มได้ง่าย โดยการทดลองจะเตรียมไทเทเนียมไดออกไซด์บนฟิล์มเท่ากับ  $0.03$  และ  $0.06$  mg/cm<sup>2</sup>

2. การทดสอบประสิทธิภาพในการกำจัดออกซิเจนด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติกของฟิล์มพอลิเอทิลีนผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ร้อยละ 1 และ 5 โดยการเตรียมฟิล์มด้วยวิธีการคอมปาวด์ และวิธีการผสม พบว่าฟิล์มผสมนี้มีความสามารถในการดูดซับออกซิเจนได้ดีกว่าฟิล์มพอลิเอทิลีน และการดูดซับออกซิเจนจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์และความเข้มข้นของออกซิเจนเริ่มต้น อย่างไรก็ตาม ปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติก ของไทเทเนียมไดออกไซด์ไม่สามารถเห็นได้อย่างชัดเจน เนื่องจาก ฟิล์มผสมไทเทเนียมไดออกไซด์มีอัตราการดูดซับออกซิเจนที่ต่ำและในการทดลองมีอัตราการไหลของก๊าซที่สูง

3. การทดสอบประสิทธิภาพในการกำจัดเอทิลีนด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติกของฟิล์มพอลิเอทิลีนเคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ (Dip-coating) ภายใต้การฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต (UVA) พบว่าฟิล์มเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถกำจัดเอทิลีนที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 35 ppm ได้ด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติก โดยพบปริมาณออกซิเจนในบรรจุภัณฑ์ลดลง และปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรจุภัณฑ์เพิ่มขึ้นด้วย และเมื่อทดลองปรับความเข้มแสง พบว่า ความเข้มแสงต่ำๆ ( $37$   $\mu$ W/cm<sup>2</sup>) ปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นปัจจัยหลักต่อการกำจัดเอทิลีน โดยการเพิ่มปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นสองเท่า ส่งผลให้อัตราการลดลงเริ่มต้นของเอทิลีนเพิ่มถึง 5.5 เท่า และเมื่อมีการเพิ่มความเข้มแสงในช่วง  $37-44$   $\mu$ W/cm<sup>2</sup> อัตราการลดลงเริ่มต้นของการกำจัดเอทิลีนมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ที่ความเข้มแสงมีค่า



สูงชันมากกว่า  $44 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  จะส่งผลต่ออัตราการลดลงเริ่มต้นของการกำจัดเอทิลีนเพียงเล็กน้อย อาจเป็นเพราะ การแย่งเกิดปฏิกิริยาของ  $\text{C}_3\text{H}_4$  ซึ่งเกิดขึ้นจากการสลายตัวของฟิล์มบรรจุภัณฑ์ภายใต้การฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต

4. การทดสอบประสิทธิภาพในการยืดอายุมะม่วงน้ำดอกไม้ในบรรจุภัณฑ์ ที่มีฟิล์มเคลือบไทเทเนียม ไดออกไซด์  $1.9 \text{ mg}$  ( $0.03 \text{ mg}/\text{cm}^2$ ) พร้อมกับอัดอากาศปริมาตร  $300 \text{ ml}$  อยู่ในสภาวะฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตที่มีความเข้มแสง  $37 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  ที่อุณหภูมิ  $24^\circ\text{C}$  พบว่า มะม่วงที่เก็บรักษาไว้ในบรรจุภัณฑ์ที่มีฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์จะสุกในวันที่ 8 ซึ่งสามารถชะลอการสุกได้เมื่อเปรียบเทียบกับมะม่วงที่อยู่ในบรรจุภัณฑ์เปรียบเทียบ อันเนื่องจากการกำจัดเอทิลีนที่เกิดขึ้นจากการหายใจของมะม่วงได้ และลักษณะเปลือกและเนื้อของมะม่วงที่เก็บรักษาไว้ในบรรจุภัณฑ์ที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์ จะเริ่มสังเกตเห็นการเน่าเสียในวันที่ 10 ในขณะที่มะม่วงที่เก็บในบรรจุภัณฑ์เปรียบเทียบจะเริ่มเห็นการเน่าเสียในวันที่ 8

#### ข้อเสนอแนะ

1. การยืดอายุการเก็บรักษามะม่วงจำเป็นต้องใช้แสงอัลตราไวโอเล็ตเพื่อกำจัดเอทิลีน หากพัฒนาฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับโลหะออกไซด์ที่เหมาะสม จะทำให้การกำจัดเอทิลีนสามารถเกิดขึ้นได้อย่างต่อเนื่องภายหลังจากได้รับแสงอัลตราไวโอเล็ต อีกทั้งน่าจะสามารถช่วยให้ปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติก เกิดขึ้นได้ดี เนื่องจากการเกิด Charge separation

#### ผลผลิต (Output)

ได้ตอบรับให้ไปนำเสนอผลงานวิจัยในงานประชุมวิชาการทางวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 27 (TiChE2017) ซึ่งจะจัดในวันที่ 18-20 ตุลาคม 2560 ณ โรงแรมแชงกรีล่า กรุงเทพฯ และจะได้ตีพิมพ์ผลงานวิจัยดังกล่าวในวารสารสืบเนื่องงานประชุมวิชาการ (Proceedings)

## เอกสารอ้างอิง

- กรมศุลกากร. สถิติการค้าสินค้าเกษตรไทยกับต่างประเทศ ปี 2556. ศูนย์สารสนเทศการเกษตร สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ ISSN: 0858-2327.
- กลุ่มสื่อส่งเสริมการเกษตร ส่วนส่งเสริมและเผยแพร่ สำนักพัฒนาการถ่ายทอดเทคโนโลยี กรมส่งเสริมการเกษตร.2555. เอกสารคำแนะนำการปลูกมะม่วง. โรงพิมพ์สำนักพัฒนาการถ่ายทอดเทคโนโลยี. 24 หน้า
- กัลยา อุบลทิพย์, “การผลิตถุงพลาสติก,” ครอบคลุมอุตสาหกรรมบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2537.
- ชุมพล บัวขจร. 2554. การวิเคราะห์แนวโน้มการส่งออกมะม่วงของไทย. คณะเศรษฐศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. 79 หน้า
- นิพนธ์ วิสารทานนท์. 2542. โรคไม้ผลเขตร้อนและการป้องกันกำจัด. บริษัท เจ फिल्म โปรเซส, กรุงเทพฯ. 172 หน้า.
- นุชนาถ จิตโสภณและคณะ. 2547. ผลิตภัณฑ์มะม่วง. กลุ่มงานส่งเสริมและพัฒนาผลิตภัณฑ์เกษตร ส่วนส่งเสริมวิสาหกิจเกษตรชุมชน สำนักพัฒนาเกษตรกร กรมส่งเสริมการเกษตร. โรงพิมพ์ชุมนุมสหกรณ์การเกษตรแห่งประเทศไทย จำกัด. 41 หน้า
- นวรรตน์ พัฒนศิริ. 2544. ผลของการใช้สารเคลือบผิวที่รับประทานได้ต่ออายุการเก็บรักษาของมะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้. สาขาเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- บัณฑิต เจริญทรัพย์. 2555. การศึกษาพารามิเตอร์ของการเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยแสงโดยไทเทเนียมไดออกไซด์ต่อการสลายตัวของเอทิลีนและการยืดอายุการเก็บรักษาของผลมะม่วงน้ำดอกไม้. สาขาวิชาวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยว คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- ปิยะวรรณ พระวิเศษ.2548. การยืดอายุการเก็บรักษาฝรั่งโดยการใช้ก๊าซบรรจุก๊าซ CO<sub>2</sub>: O<sub>2</sub> ร่วมกับปริมาณสารดูดซับเอทิลีน.สาขาวิชาพืชสวน, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- พรพรรณ จำปา. 2554. ผลของโอโซนต่อการควบคุมเอทิลีนเพื่อยืดอายุการเก็บรักษามะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้สีทอง. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. 84 หน้า
- ศูนย์สารสนเทศการเกษตร สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ (2555). สถิติการค้าสินค้าเกษตรไทยกับต่างประเทศปี ๒๕๕๔ . เข้าถึงได้จาก <http://www.oae.go.th/download/journal/trade-eco54.pdf>
- ศูนย์นวัตกรรมเทคโนโลยีหลังเก็บเกี่ยว.บรรจุภัณฑ์ผักผลไม้.เข้าถึงได้จาก <http://www.phtnet.org/article/view-article.asp?aID=23>
- ศักยะ สมบัติไพรวิน. 2555. การศึกษาการชะลอการสุกของมะม่วงน้ำดอกไม้ด้วยถ่านกัมมันต์. สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตรและอาหาร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. 180 หน้า

- โศภษา อภิชาติวรศิลป์ และ วาณี ชนเห็นชอบ. ผลของฟิล์มพลาสติกและการบรรจุภายใต้บรรยากาศ  
ดัดแปลงต่อคุณภาพมะม่วงตัดแต่ง การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่  
43 : สาขาสัตว สาขาอุตสาหกรรมเกษตร, 2548, 521-527.
- วิลาวัลย์ คำปวน. 2553. การจัดการหลังการเก็บเกี่ยวมะม่วง. หน้า 139-148. ใน: ธวัชชัย รัตน์ชเลิศ  
และรุ่งทิพย์ อุทุมพันธ์ (ผู้รวบรวม), พัฒนามะม่วงไทยก้าวไกลสู่มะม่วงโลก. พิมพ์ครั้งที่ 1. วนิดา  
การพิมพ์, เชียงใหม่.
- วิลาวัลย์ คำปวน และจ่านงค์ อุทัยบุตร. 2552. การศึกษาและถ่ายทอดเทคโนโลยีการใช้สภาพ  
ดัดแปลงบรรยากาศเพื่อขยายเวลาในการจำหน่ายผลมะม่วงสด. รายงานผลการวิจัยฉบับสมบูรณ์.  
โครงการสนับสนุนการพัฒนาเทคโนโลยีของอุตสาหกรรมไทย เครือข่าย มจร. สำนักงานพัฒนา  
วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ, กรุงเทพฯ. 26 หน้า.
- สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตรกระทรวงเกษตรและสหกรณ์ ปี 2558 เอกสารเกษตรสถิติ เลขที่ 402.  
สารสนเทศเศรษฐกิจการเกษตรรายสินค้า, เข้าถึงได้จาก <http://www.oae.go.th>
- อนุวัฒน์ จรัสรัตน์ไพบูลย์. 2545. ผลของสารสกัดหยาบจากข่าต่อโรคแอนแทรคโนส และการ  
เจริญเติบโตของมะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้. วิทยาสตรมหาบัณฑิต (เกษตรศาสตร์) สาขาวิชาพืชสวน  
, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- อภิธา บุญศิริ. 2552. การใช้ฟิล์มบรรจุภัณฑ์พอลิเมอร์คอมพอสิตในการรักษาคุณภาพและยืดอายุการ  
เก็บรักษาผักและผลไม้ไทย. ศูนย์เทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว สถาบันวิจัยและพัฒนากำแพงแสน  
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 165 หน้า
- A. Fujishima, X. Zhang, D. A. Tryk. TiO<sub>2</sub> Photocatalysis and Related Surface Phenomena.  
*Surface Science Reports*, 63 (2008) 515-582.
- A. Kader. 2000. Postharvest Biology and Technology: An Overview. In: A. A. Kader (ed.),  
Postharvest Technology of Horticultural Crops. 3th ed. University of California,  
California. 39-48.
- A. Sirisuk, C. G. Hill Jr, M. A. Anderson. Photocatalytic degradation of ethylene over  
thin films of titania supported on glass rings. *Catalysis Today*, 54 (1999) 159-164.
- C. Maneerat, Y. Hayata, N. Egashira, K. Sakamoto, Z. Hamai, M. Kuroyanagi. Photocatalytic  
reaction of TiO<sub>2</sub> to decompose ethylene in fruit and vegetable storage. *American  
Society of Agricultural Engineers*, 46(3) (2003) 725-730.
- C. Maneerat, Y. Hayata. Gas-phase photocatalytic oxidation of ethylene with TiO<sub>2</sub>-coated  
packaging film for horticultural products. *American Society of Agricultural and  
biological Engineers*, 51(1) (2008) 163-168.
- D. Restuccia, U. G. Spizzirri, O. I. Parisi, G. Cirillo, M. Curcio, F. Iemma, F. Puoci, G. Vinci,  
N. Picci. New EU regulation aspects and global market of active and intelligent  
packaging for food industry applications. *Food Control*, 21 (2010) 1425-1435.
- De Chiara, M., Pal, S., Licciulli, A., Amodio, M., & Colelli, G. Photocatalytic degradation  
of ethylene on mesoporous TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> nanocomposites: Effects on the ripening of  
mature green tomatoes. *Biosystems Engineering*, 132 (2015) 61-70.

- Encyclopedic of Polymer Science, second ed. vol 6, Mike, Bikales, Overberger, Menges and Kroschwitz, Eds. Wiley Interscience, 1986.
- L. Vermeiren, F. Devlieghere, M. van Beest, N. de Kruijf, J. Debevere. Developments in the active packaging of foods. *Trends in Food Science & Technology*, 3 (1999) 77-86.
- M. Hussain, S. Bensaid, F. Geobaldo, G. Saracco, N. Russo, Photocatalytic degradation of ethylene emitted by fruits with TiO<sub>2</sub> nanoparticles. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 50 (2011) 2536–2543.
- M. Hussain, R. Ceccarelli, D. L. Marchisio, D. Fino, N. Russo, F. Geobaldo, Synthesis, characterization, and photocatalytic application of novel TiO<sub>2</sub> nanoparticles. *Chemical Engineering Journal*, 157 (2010) 45-51.
- P. Chantrasri, B. Charernsup, W. Kumpoun. Using of titanium dioxide photocatalytic reaction for reducing of anthracnose disease infection during storage of ‘Nam Dork Mai’ mango fruit. *Thai Journal of Agricultural Science*, 43 (2012) 596-599.
- S. Yamazaki, S. Tanaka, H. Tsukamoto. Kinetic studies of oxidation of ethylene over a TiO<sub>2</sub> photocatalyst. *J. Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 121 (1999) 55-61.
- Y. Xinga, X. Li, L. Zhangb, Q. Xua, Z. Chea, W. Li, Y. Baia, K. Li. Effect of TiO<sub>2</sub> nanoparticles on the antibacterial and physical properties of polyethylene-based film. *Progress in Organic Coatings*, 73 (2012) 219– 224.
- Zagory, D. (1995) Ethylene-removing packaging in active packaging. Rooney & M.L. (Eds), (pp-38-54), London, Blackie Academic and Professional