

แบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างจลนศาสตร์ของการเปลี่ยนแปลงสี  
โดยรวมของผักสดชนิดเดียวกับอัตราการหายใจ

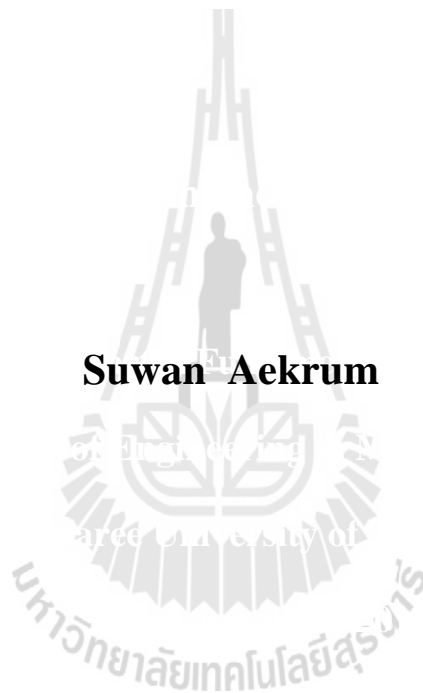


นายสุวรรณ เอกรัมย์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
ปีการศึกษา 2556

**PREDICTIVE MODEL FOR THE RELATION  
BETWEEN KINETIC RATE OF COLOR CHANGE  
AND RESPIRATION RATE  
OF SALAD PLANT**

**Suwan Aekrum**



**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the  
Degree of Master of Engineering in Mechanical Engineering**

**Suranaree University of Technology**

**Academic Year 2013**

แบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างจลนศาสตร์ของการเปลี่ยนแปลงสี  
โดยรวมของผักสลัดชนิดเดียวกับอัตราการหายใจ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

---

(อ. ดร.ธีรทัต คลวิชัย)

ประธานกรรมการ

---

(ผศ. ดร.วีระศักดิ์ เลิศศิริ โยธิน)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

---

(ผศ. ดร.ประเมศวร์ ห่อแก้ว)

กรรมการ

---

(ศ. ดร.ชูกิจ ลิมปิจำนงค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและนวัตกรรมการ

---

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

สุวรรณ เอกรัมย์ : แบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างจลนศาสตร์ของการเปลี่ยนแปลงสี  
โดยรวมของผักสลัดชนิดเดียวกับอัตราการหายใจ (PREDICTIVE MODEL FOR THE  
RELATION BETWEEN KINETIC RATE OF COLOR CHANGE AND RESPIRATION  
RATE OF SALAD PLANT) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีระศักดิ์  
เลิศสิริโยธิน, 140 หน้า.

ผลงานวิจัยเรื่องแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างจลนศาสตร์ของการเปลี่ยนแปลงสี  
โดยรวมของผักสลัดชนิดเดียวกับอัตราการหายใจมีวัตถุประสงค์หลักคือการพัฒนาแบบจำลองทาง  
คณิตศาสตร์ที่สามารถเชื่อมโยงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการหายใจกับอัตราการเปลี่ยนแปลงสี  
โดยรวมของผักสลัดได้ โดยกิจกรรมวิจัยในงานวิจัยนี้แบ่งได้เป็นสามส่วนหลักคือ ส่วนที่หนึ่งเป็น  
การพัฒนาเครื่องมือสำหรับการวิจัยซึ่งประกอบไปด้วยเครื่องมือสองชิ้นคือ ระบบวัดอัตราการ  
หายใจของผักและผลไม้สดและโปรแกรมประมวลผลภาพถ่ายเพื่อวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงค่าสี  
โดยรวมของผักสลัด โดยเครื่องมือทั้งสองมีความสามารถดังต่อไปนี้ ระบบวัดอัตราการหายใจของ  
ผักและผลไม้สดสามารถติดตามอัตราการหายใจของพืชที่ได้รับอิทธิพลจากสัดส่วนผสมของแก๊ส  
ผสมและอุณหภูมิการเก็บรักษาไปพร้อม ๆ กันได้ โดยสามารถทำการวัดอัตราการหายใจได้พร้อม  
กันสามตัวอย่าง ระบบดังกล่าวสามารถติดตามอัตราการหายใจที่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของ  
แก๊สผสมในระดับต่ำมากได้(ต่ำกว่า 5% จากระดับความเข้มข้นตั้งต้น) ทำให้สามารถวัดอัตราการ  
หายใจได้แล้วเสร็จภายในระยะเวลาสั้น ส่งผลให้อัตราการหายใจที่วัดได้ไม่ได้รับอิทธิพลจากอายุ  
การเก็บรักษา รวมถึงสามารถยืนยันได้ว่าอัตราการหายใจที่วัดได้เป็นอัตราการหายใจที่  
ระดับความเข้มข้นของแก๊สที่ต้องการทดสอบ นอกจากนี้ระบบดังกล่าวยังออกแบบให้สามารถ  
ทำงานได้อย่างอัตโนมัติโดยสั่งงานและเก็บผลการทดลองด้วยระบบคอมพิวเตอร์ร่วมกับระบบ  
ควบคุมแบบไมโครคอนโทรลเลอร์ สำหรับโปรแกรมประมวลผลภาพถ่ายเพื่อวิเคราะห์การ  
เปลี่ยนแปลงค่าสีโดยรวมของผักสลัดนั้นถูกพัฒนาโดยใช้หลักการทางการประมวลผลภาพถ่ายซึ่ง  
ทำให้การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงค่าสีของผักสลัดสามารถทำได้อย่างสะดวกและรวดเร็วโดย  
ความสามารถหลักของโปรแกรมดังกล่าวคือสามารถคำนวณพื้นที่การเปลี่ยนแปลงค่าสีโดยรวมของ  
ผักสลัดได้ ซึ่งการวิเคราะห์ค่าสีนั้นได้ใช้ค่า hue angle ( $H^\circ$ ) เป็นดัชนีบ่งชี้ค่าสี โดยงานวิจัยนี้ได้ใช้  
ผักสลัดกรีนโอ๊คเป็นตัวอย่างผักสลัดพบว่าค่า  $H^\circ$  ที่บ่งชี้ว่าผักสลัดกรีนโอ๊คมีคุณภาพปกติมีค่าอยู่  
ในช่วง 80 -135 องศา ส่วน  $H^\circ$  ที่บ่งชี้ว่าผักสลัดกรีนโอ๊คมีคุณภาพผิดปกติจะมีค่าอยู่ในช่วง 35 – 79  
องศา ตามลำดับ กิจกรรมวิจัยในส่วนที่สองคือ การวัดอัตราการหายใจของผักสลัดและการวิเคราะห์  
การเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมของผักสลัด ในส่วนของ การวัดอัตราการหายใจนั้น ได้ทำการศึกษา  
อิทธิพลของสัดส่วนผสมของแก๊สผสมและอิทธิพลของอุณหภูมิการเก็บรักษาที่มีต่ออัตราการหายใจ

ของผักสลัดซึ่งงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษากับผักสลัดกรีน โอ๊ค ผักสลัดบัตเตอร์เฮด ผักกาดหอมและผักสลัดผสม โดยในส่วนของผักสลัดผสมนั้นเป็นการนำผักสลัดทั้งสามชนิดก่อนหน้านี้นี้มาผสมกันในสัดส่วนที่เท่า ๆ กัน ผลการวัดอัตราการหายใจพบว่าทั้งผักสลัดกรีน โอ๊ค ผักสลัดบัตเตอร์เฮด ผักกาดหอม และผักสลัดผสมมีแนวโน้มการหายใจไปในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือ การลดความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนและการลดอุณหภูมิเก็บรักษาสามารถช่วยลดอัตราการหายใจได้ แต่ทั้งนี้พบว่าอุณหภูมิมีอิทธิพลต่อการหายใจมากกว่าสัดส่วนผสมของแก๊สผสม สำหรับการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมของผักสลัดนั้น ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิการเก็บรักษาที่มีผลต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงค่าสีโดยรวม ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ใช้ผักสลัดกรีน โอ๊คเป็นตัวอย่างผักสลัด ผลการวิเคราะห์พบว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าสีโดยรวมเป็นสัดส่วนโดยตรงกับอุณหภูมิการเก็บรักษา กล่าวคือ อุณหภูมิเก็บรักษายิ่งมากอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าสีโดยรวมก็ยิ่งมากตามไปด้วย ซึ่งหมายความว่าผักสลัดจะมีการเสื่อมถอยทางคุณภาพเร็วขึ้นเมื่ออุณหภูมิการเก็บรักษามีค่ามากขึ้น กิจกรรมวิจัยในส่วนที่สามคือการพัฒนาแบบจำลองซึ่งประกอบไปด้วยแบบจำลองอัตราการหายใจที่ได้รับอิทธิพลของสัดส่วนผสมของแก๊สผสม แบบจำลองอัตราการหายใจที่ได้รับอิทธิพลของสัดส่วนผสมของแก๊สผสมและอุณหภูมิ แบบจำลองอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าสีโดยรวมและแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมกับอัตราการหายใจ โดยแบบจำลองอัตราการหายใจที่ได้รับอิทธิพลของสัดส่วนผสมของแก๊สผสมนั้นเป็นไปตามสมการของ Michaelis-Menten แบบ Competitive inhibition ส่วนแบบจำลองอัตราการหายใจที่ได้รับอิทธิพลของสัดส่วนผสมของแก๊สผสมและอุณหภูมิเป็นการรวมกันของสมการของ Michaelis-Menten แบบ Competitive inhibition และแบบสมการความสัมพันธ์ของ Arrhenius สำหรับแบบจำลองอัตราการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมนั้นพบว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าสีโดยรวมของผักสลัดกรีน โอ๊คเป็นไปตามแบบสมการปฏิกิริยาอันดับหนึ่งและค่าคงที่จลนศาสตร์ของการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมนั้นมีค่าเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิการเก็บรักษา สำหรับแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงค่าสีโดยรวมกับอัตราการหายใจนั้นสามารถอธิบายได้โดยใช้ Gamma-variate function ซึ่งทำให้พบว่าสามารถทำนายอายุการเก็บรักษาผักสลัดที่ถูกเก็บรักษาที่สัดส่วนผสมของแก๊สผสมและอุณหภูมิกงที่ค่าหนึ่งได้โดยใช้พื้นฐานความสัมพันธ์ของจลนศาสตร์ของการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมและอัตราการหายใจ

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล

ปีการศึกษา 2556

ลายมือชื่อนักศึกษา \_\_\_\_\_

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา \_\_\_\_\_

SUWAN AEKRUM : PREDICTIVE MODEL FOR THE RELATION  
BETWEEN KINETIC RATE OF COLOR CHANGE AND RESPIRATION  
RATE OF SALAD PLANT. THESIS ADVISOR : ASST. PROF.  
WEERASAK LERTSIRIYOTHIN, Ph.D., 140 PP.

RESPIRATION RATE/IMAGE PROCESSING/MODELLING OF RESPIRATION  
RATE AND COLOR CHANGE

This research focused on developing a mathematical model for predict the relationship between the rate of color change and respiration rate. The studies were divided into three major parts. The first part was to develop two special tools for achieving the research which consisted of the respiration rate measuring system using for fresh vegetables and the image processing program to analyze color changes of the vegetable salad. In summary, the respiration rate measuring system is capable for monitoring the respiration rate of plants under the influence of various ratio of ambient-gas composition and control temperature simultaneously. With high sensitivity oxygen and carbon dioxide sensors and optimum design of the gas sampling procedure, the system is capable to monitor small changes in the concentration of the O<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub> in the gas mixture (less than 5% of the initial concentration), so the measurement course can be completed within a short period. By virtue of these, the respiration rate of fresh vegetable is not influenced by the plant age and the system allowed us to measure the respiration rate of fresh vegetable at any specific modified atmosphere. An image processing program to analyze the color changes of the vegetable salad image was developed. This program can calculate the area of a change in the overall color of vegetable salad image based on the hue angle

(H°) scale. For Green oak salad sample, the H° of normal color was indicated in the range of 80 -135 degrees while the H° of irregular color was appeared in the range of 35 - 79 degrees. The second part was to measure the respiration rate of three individual varieties of salad sample, namely Green oak, Butter head, Lettuce, and a mixed salad, and to analyze for their color change under three levels of storage temperature. In the case of mixed salad is a mix of the three species in equal proportions. The results of respiration rate showed that the all salad sample tend to respire in the similar fashion under the same storage condition. Lowering the concentration of oxygen and storage temperature can reduce the rate of respiration. For the effect of storage temperature on changing overall color of the salad, results showed that the rate of color change was directly proportional to storage temperature. The third part was to develop mathematical relation between the respiration rate and kinetic rate of color change stored under modified atmosphere and control temperature. The effect of modified atmosphere and storage temperature on the respiration rate of the testing salad can be expressed by Michaelis-Menten with a competitive inhibition model coupling with Arrhenius relation. For the kinetic rate of overall color change, the 1<sup>st</sup> -order kinetic rate was determined for Green oak. During the acclimatization time to the new constant modified atmosphere, the kinetic rate of the respiration of vegetable salad appeared in the form of the Gamma-variate function. Shelf life of the vegetable salad stored at any constant modified atmosphere and temperature can be predicted based on the relation obtaining from the kinetic rate of overall color change and the Gamma-variate function of the respiration rate.

School of Mechanical Engineering

Academic Year 2013

Student's Signature \_\_\_\_\_

Advisor's Signature \_\_\_\_\_

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณแหล่งทุนจากแหล่งภายนอกที่ให้ทุนสนับสนุนงานวิจัยและมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่สนับสนุนอุปกรณ์เครื่องมือในการวิจัย ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีระศักดิ์ เลิศสิริ โยธิน อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำปรึกษา ชี้แนะ แนะนำและถ่ายทอดความรู้ตลอดจนควบคุมการศึกษาค้นคว้าจนประสบความสำเร็จด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ นาวาอากาศเอก ดร.วรพจน์ ขำพิศ รองศาสตราจารย์ เรืออากาศเอก ดร.กนต์ธร ชำนิ ประศาสน์ รองศาสตราจารย์ ดร.ทวิช จิตรสมบูรณ์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิระพล ศรีเสริฐผล ที่กรุณาถ่ายทอดความรู้ตลอดระยะเวลาในการศึกษา รวมทั้งบุคคลที่ปรากฏตามเอกสารอ้างอิงที่ผู้ศึกษาใช้อ้างอิงทางวิชาการ

ขอขอบพระคุณสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ที่ให้ทุนอุดหนุนการวิจัย ประเภทบัณฑิตศึกษา และทุนสนับสนุนงานวิจัยจนเสร็จลุล่วงด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.ธีทัต คลวิชัย ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วีระศักดิ์ เลิศสิริ โยธิน และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปรเมศวร์ ห่อแก้ว กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่ให้ข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์ในการเขียนวิทยานิพนธ์เล่มนี้ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ประจำศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี 1 ถึง 6 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่านที่สละเวลาให้ความช่วยเหลือ และอำนวยความสะดวกแก่ผู้วิจัยด้วยดีตลอดมา ขอขอบพระคุณ คุณกรรณิกา ประเสริฐสังข์ เจ้าหน้าที่บริหารงานทั่วไป สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร คุณจริยาพร ศรีวิไลลักษณ์ เจ้าหน้าที่บริหารงานทั่วไป สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล และ คุณอลิษา ศรีคราม เจ้าหน้าที่บริหารงานทั่วไป ส่วนสำนักงานคณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ที่ให้ความช่วยเหลือเรื่องเอกสารต่าง ๆ ที่เกี่ยวเนื่องกับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

และขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และญาติพี่น้องของข้าพเจ้าที่คอยให้กำลังใจและเลี้ยงดูข้าพเจ้าเป็นอย่างดี

ประโยชน์และคุณค่าอันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้ศึกษาวิจัยขอมอบเป็นกตัญญูตามบูชาแด่คุณบิดามารดาและทุกคนในครอบครัว ครูอาจารย์ ตลอดจนผู้มีพระคุณทุกท่าน

สุวรรณ เอกรัมย์



# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย) .....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ) .....	ค
กิตติกรรมประกาศ .....	จ
สารบัญ .....	ฉ
สารบัญตาราง .....	ฎ
สารบัญรูป .....	ฏ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ .....	ถ
<b>บทที่</b>	
<b>1 บทนำ .....</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษาวิจัย .....	3
1.3 สมมุติฐานของงานวิจัย .....	3
1.4 ขอบเขตของการศึกษาวิจัย .....	3
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ .....	4
<b>2 ปรัชญ่วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....</b>	<b>5</b>
2.1 อัตราการหายใจและปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการหายใจของผักสลัด .....	5
2.2 กรรมวิธีการวัดอัตราการหายใจ .....	6
2.2.1 ระบบปิด (the close or static system) .....	6
2.2.2 ระบบที่มีการไหลผ่านของอากาศ (the flowing or flushed system) .....	8
2.2.3 ระบบที่มีการซึมของอากาศ (the permeable system) .....	8
2.3 แบบจำลองอัตราการหายใจ .....	8
2.3.1 แบบสมการจลนศาสตร์เอนไซม์ .....	9

## สารบัญ (ต่อ)

### หน้า

2.3.2	แบบสมการ Transition State .....	11
2.4	คุณภาพและการเปลี่ยนแปลงคุณภาพผักสลัดตัดแต่งพร้อมบริโภค.....	10
2.5	ทฤษฎีเกี่ยวกับการประมวลผลภาพ .....	11
2.5.1	แบบจำลองสี.....	14
2.5.1.1	แบบจำลองสี RGB .....	14
2.5.1.2	แบบจำลองสี HSI (Hue Saturation Intensity) .....	14
2.5.1.3	ระบบสีแบบ CMY(Cyan Magenta Yellow) .....	15
2.5.1.4	ระบบสีแบบ YIQ .....	15
2.5.1.5	ระบบสีแบบ XYZ.....	16
2.5.1.6	ระบบสี CIELAB หรือ ระบบ L*a*b*.....	16
2.6	แบบสมการอัตราการเปลี่ยนแปลงสี.....	16
3	วัสดุและวิธีการทดลอง .....	21
3.1	การพัฒนาเครื่องมือ .....	22
3.1.1	ระบบวัดอัตราการหายใจสำหรับผักและผลไม้สด.....	22
3.1.1.1	เครื่องผสมแก๊ส .....	24
3.1.1.2	เครื่องวิเคราะห์แก๊ส CO <sub>2</sub> .....	24
3.1.1.3	เครื่องวิเคราะห์แก๊ส O <sub>2</sub> .....	25
3.1.1.4	ชุดบรรจุตัวอย่าง.....	25
3.1.1.5	ตู้ควบคุมอุณหภูมิ .....	26
3.1.1.6	ระบบควบคุมการทำงานของระบบวัดอัตราการหายใจสำหรับผัก และผลไม้สด.....	27
3.1.1.7	ระบบเก็บผลการวัดอัตราการหายใจของผักสลัด.....	29
3.1.1.8	ระบบวาล์ว.....	30

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.1.2 การพัฒนาโปรแกรมประมวลผลภาพถ่ายเพื่อวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสี โดยรวมของผักสลัด .....	30
3.2 การเก็บผลการทดลอง .....	31
3.2.1 การวัดปริมาณการดูดซับแก๊สในวัสดุ.....	31
3.2.2 การวัดอัตราการหายใจของผักสลัด .....	32
3.2.2.1 การเตรียมตัวอย่างผักสลัด .....	32
3.2.2.2 การวัดเพื่อศึกษาอิทธิพลของสัดส่วนแก๊สผสมและอุณหภูมิต่ออัตราการ หายใจของผักสลัดชนิดเดียว .....	32
3.2.2.3 การวัดเพื่อศึกษาอิทธิพลของสัดส่วนผสมของแก๊สผสมและอุณหภูมิต่อ อัตราการหายใจของผักสลัดผสมชนิด.....	33
3.2.2.4 การวัดเพื่อศึกษาอิทธิพลของอัตราการหายใจต่อการเปลี่ยนแปลงสี โดยรวมของผักสลัดชนิดเดียว.....	33
3.2.3 การวิเคราะห์ผลการเปลี่ยนแปลงสี โดยรวมของผักสลัด .....	33
3.2.3.1 การถ่ายภาพผักสลัด.....	34
3.2.3.2 การวิเคราะห์ดัชนีค่าสี .....	34
3.2.3.3 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงค่าสี โดยรวมของผักสลัด .....	35
3.2.3.4 การตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรม.....	35
3.3 การพัฒนาแบบจำลองความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงสี โดยรวมกับ อัตราการหายใจของผักสลัด .....	36
3.3.1 การพัฒนาแบบจำลองอัตราการหายใจของผักสลัดที่ขึ้นกับอิทธิพล ของสัดส่วนผสมของแก๊สผสม .....	36
3.3.2 การพัฒนาแบบจำลองอัตราการหายใจของผักสลัดที่ขึ้นกับอิทธิพล ของอุณหภูมิ .....	38

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.3.3	แบบจำลองอัตราการหายใจของฝักสลัดที่ขึ้นกับอิทธิพล ของสัดส่วนผสมของแก๊สผสมและอุณหภูมิ.....	38
3.3.4	แบบจำลองความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวม กับอัตราการหายใจของฝักสลัด.....	39
3.4	สถานที่ทำการวิจัย .....	39
4	ผลการทดลองและวิจารณ์.....	40
4.1	ผลการวัดอัตราการหายใจ.....	40
4.1.1	การวัดปริมาณการดูดซับแก๊สในวัสดุภายในระบบวัดอัตราการหายใจ .....	40
4.1.2	ผลการวัดอัตราการหายใจของฝักสลัดชนิดเดี่ยวและฝักสลัดผสมชนิด ที่ได้รับอิทธิพลของความเข้มข้นของแก๊สผสมและอุณหภูมิ .....	42
4.1.2.1	อัตราการหายใจของฝักสลัดกรีน โอ๊ค .....	42
4.1.2.2	อัตราการหายใจของฝักสลัดบัตเตอร์เฮด.....	44
4.1.2.3	อัตราการหายใจของฝักกาดหอม.....	46
4.1.2.4	อัตราการหายใจของฝักสลัดผสมชนิด .....	49
4.2	ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสี โดยรวมและอัตราการหายใจของ ฝักสลัดชนิดเดี่ยว .....	53
4.2.1	การวิเคราะห์ดัชนีค่าสี โดยรวมของฝักสลัด .....	54
4.2.2	ผลการหาค่ามาตรฐานจำนวนพิกเซลต่อพื้นที่เฉลี่ย .....	55
4.2.3	ผลการตรวจสอบความถูกต้องในการคำนวณพื้นที่ที่ปรากฏใน ภาพถ่ายของโปรแกรมประมวลผลภาพที่พัฒนาขึ้น .....	55
4.2.4	การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมของฝักสลัด.....	58
4.2.5	อัตราการหายใจของฝักสลัดกรีน โอ๊คที่เปลี่ยนแปลงตามอายุการเก็บรักษา.....	67
4.2	การพัฒนาแบบจำลองอัตราการหายใจและแบบจำลองอัตราการเปลี่ยนแปลงสี โดยรวมของฝักสลัด .....	72

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.3.1	แบบจำลองอัตราการหายใจที่ได้รับอิทธิพลจากสัดส่วนผสมของแก๊สผสม ....	72
4.3.2	แบบจำลองอัตราการหายใจที่ได้รับอิทธิพลจากสัดส่วนผสมของแก๊สผสม และอิทธิพลของผสมอนุภูมิ.....	83
4.3.3	แบบจำลองอัตราการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมของผักสลัด .....	93
4.3.4	แบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงสี โดยรวมกับ อัตราการหายใจ .....	96
<b>5</b>	<b>สรุปผลการศึกษาวิจัย .....</b>	<b>102</b>
5.1	งานพัฒนาเครื่องมือวัดอัตราการหายใจและเครื่องมือวิเคราะห์ การเปลี่ยนแปลงสี โดยรวมของผักสลัด .....	102
5.1.1	เครื่องมือวัดอัตราการหายใจ .....	102
5.1.2	เครื่องมือวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสีโดยรวม .....	102
5.2	การพัฒนาแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวม และอัตราการหายใจ .....	103
5.3	การพัฒนาแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงสี โดยรวม และอัตราการหายใจ .....	103
5.3.1	แบบจำลองอัตราการหายใจที่ได้รับอิทธิพลจากสัดส่วนผสมของแก๊สผสม ..	103
5.3.2	แบบจำลองอัตราการหายใจที่ได้รับอิทธิพลจากสัดส่วนผสมของแก๊สผสม และอนุภูมิ.....	104
5.3.3	แบบจำลองการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมของผักสลัดชนิดเดียว.....	104
5.3.4	แบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงสี โดยรวมกับ อัตราการหายใจ.....	104
	<b>รายการอ้างอิง.....</b>	<b>106</b>
	<b>ภาคผนวก</b>	
	ภาคผนวก ก. บทความและสิทธิบัตรที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	108

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก ข. ซอสโค้ดโปรแกรม.....	126
ประวัติผู้เขียน .....	140



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1	สัดส่วนแก๊สผสมที่ใช้ทดสอบวัดอัตราการหายใจของผักสลัดชนิดเขียว และผักสลัดผสมชนิด ..... 33
4.1	ผลการทดสอบการดูดซับแก๊สของวัสดุที่ระดับความเข้มข้น 21 ต่อ 0 ต่อ 79 เปอร์เซ็นต์ โดยปริมาตร (O <sub>2</sub> ต่อ CO <sub>2</sub> ต่อ N <sub>2</sub> ) ..... 41
4.2	ผลการทดสอบการดูดซับแก๊สของวัสดุที่ระดับความเข้มข้น 5 ต่อ 1 ต่อ 94 เปอร์เซ็นต์ โดยปริมาตร (O <sub>2</sub> ต่อ CO <sub>2</sub> ต่อ N <sub>2</sub> ) ..... 41
4.3	ช่วงค่า H <sup>o</sup> ของผักสลัดที่คุณภาพด้านสี โดยรวมผิดปกติและคุณภาพด้านสีโดยรวม ไม่ผิดปกติ ..... 54
4.4	การเปรียบเทียบผลการคำนวณพื้นที่รูปทรงเรขาคณิตโดยใช้โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นกับพื้นที่จริง ..... 57
4.5	ลักษณะการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมของผักสลัดกรีนโอ๊คที่อายุการเก็บรักษา 2 วัน ณ อุณหภูมิ 5°C 10°C และ 15°C ..... 61
4.6	ลักษณะการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมของผักสลัดกรีนโอ๊คที่อายุการเก็บรักษา 3 วัน ณ อุณหภูมิ 5°C 10°C และ 15°C ..... 63
4.7	ลักษณะการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมของผักสลัดกรีนโอ๊คที่อายุการเก็บรักษา 4 วัน ณ อุณหภูมิ 5°C 10°C และ 15°C ..... 65
4.8	ลักษณะการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมของผักสลัดกรีนโอ๊คที่อายุการเก็บรักษา 5 วัน ณ อุณหภูมิ 5°C 10°C และ 15°C ..... 66
4.9	ค่าสัมประสิทธิ์ $\alpha, \phi, \gamma_c$ สำหรับทำนายอัตราการใช้ออกซิเจนตามสมการของ Michaelis-Menten. แบบ Competitive inhibition ..... 73
4.10	ค่าสัมประสิทธิ์ $\alpha, \phi, \gamma_c$ สำหรับทำนายอัตราการสร้างคาร์บอนไดออกไซด์ตามสมการของ Michaelis-Menten. แบบ Competitive inhibition ..... 74
4.11	ค่า activation energy ( $E_a$ ) สำหรับใช้คำนวณค่าอัตราการหายใจตามสมการที่ 4.2 ของผักสลัดชนิดเขียวและผักสลัดผสมชนิด ..... 84

## สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.12 ค่าคงที่จลนศาสตร์ ของการเปลี่ยนแปลงสี โดยรวมของผักสลัดกรีน โอ๊ค ณ อุณหภูมิการเก็บรักษา 5°C 10°C และ 15°C .....	93
4.13 ค่าสัมประสิทธิ์สำหรับสมการ 4.5 .....	98





## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 การแปลงภาพต่อเนื่อง (a) เป็นภาพเชิงตัวเลข (b) ด้วยวิธีการ Digitization .....	12
3.1 ความเชื่อมโยงของกิจกรรมวิจัย .....	21
3.2 แผนผังการติดตั้งระบบวัดอัตราการหายใจสำหรับผักและผลไม้สด .....	23
3.3 ระบบวัดอัตราการหายใจสำหรับผักและผลไม้สด.....	23
3.4 เครื่องผสมแก๊ส.....	24
3.5 เครื่องวิเคราะห์แก๊ส CO <sub>2</sub> .....	25
3.6 เครื่องวิเคราะห์แก๊ส O <sub>2</sub> .....	25
3.7 ชุดบรรจุตัวอย่าง .....	26
3.8 ตู้ควบคุมความอุณหภูมิ .....	27
3.9 โปรแกรมควบคุมการทำงานของระบบวัดอัตราการหายใจส่วนคิดต่อผู้ใช้งาน .....	25
3.10 รูปตัวอย่างโปรแกรมควบคุมการทำงานของระบบวัดอัตราการหายใจส่วนสั่งงาน ไมโครคอนโทรลเลอร์.....	28
3.11 ไมโครคอนโทรลเลอร์และวงจรรีเลย์สวิตช์.....	29
3.12 อุปกรณ์เก็บผลการทดลอง USB Data Acquisition รุ่น NI USB-6009 .....	30
3.13 ส่วนคิดต่อผู้ใช้งานของโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นภายใต้โครงการวิจัยนี้ .....	31
4.1 ผลการทดสอบอัตราการใช้แก๊ส O <sub>2</sub> ของผักสลัดกรีน ไอศที่อุณหภูมิ 5 °C, 10°C และ 15°C และที่ระดับความเข้มข้นของแก๊สผสม 5, 10, 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์ โดยปริมาตรของ O <sub>2</sub> ต่อ 1 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของ CO <sub>2</sub> .....	43
4.2 ผลการทดสอบอัตราการสร้างแก๊ส CO <sub>2</sub> ของผักสลัดกรีน ไอศที่อุณหภูมิ 5 °C, 10°C และ 15°C และที่ระดับความเข้มข้นของแก๊สผสม 5, 10, 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์ โดยปริมาตรของ O <sub>2</sub> ต่อ 1 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของ CO <sub>2</sub> .....	44
4.3 ผลการทดสอบอัตราการใช้แก๊ส O <sub>2</sub> ของผักสลัดบัตเตอร์เฮ็ดที่อุณหภูมิ 5 °C, 10°C และ 15°C และที่ระดับความเข้มข้นของแก๊สผสม 5, 10, 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์ โดยปริมาตรของ O <sub>2</sub> ต่อ 1 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของ CO <sub>2</sub> .....	45

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.4 ผลการทดสอบอัตราการสร้างแก๊ส CO <sub>2</sub> ของผักสลัดบัตเตอร์เฮ็ดที่อุณหภูมิ 5 °C, 10°C และ 15°C และที่ระดับความเข้มข้นของแก๊สผสม 5, 10, 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์ โดยปริมาตรของ O <sub>2</sub> ต่อ 1 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของ CO <sub>2</sub> .....	46
4.5 ผลการทดสอบอัตราการใช้แก๊ส O <sub>2</sub> ของผักกาดหอมที่อุณหภูมิ 5 °C, 10°C และ 15°C และที่ระดับความเข้มข้นของแก๊สผสม 5, 10, 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์ โดยปริมาตรของ O <sub>2</sub> ต่อ 1 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของ CO <sub>2</sub> .....	48
4.6 ผลการทดสอบอัตราการสร้างแก๊ส CO <sub>2</sub> ของผักกาดหอมที่อุณหภูมิ 5 °C, 10°C และ 15°C และที่ระดับความเข้มข้นของแก๊สผสม 5, 10, 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์ โดยปริมาตรของ O <sub>2</sub> ต่อ 1 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของ CO <sub>2</sub> .....	49
4.7 ผลการทดสอบอัตราการใช้แก๊ส O <sub>2</sub> ของผักสลัดผสมชนิดที่อุณหภูมิ 5 °C, 10°C และ 15°C และที่ระดับความเข้มข้นของแก๊สผสม 5, 10, 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์ โดยปริมาตรของ O <sub>2</sub> ต่อ 1 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของ CO <sub>2</sub> .....	50
4.8 ผลการทดสอบอัตราการสร้างแก๊ส CO <sub>2</sub> ของผักสลัดผสมชนิดที่อุณหภูมิ 5 °C, 10°C และ 15°C และที่ระดับความเข้มข้นของแก๊สผสม 5, 10, 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์ โดยปริมาตรของ O <sub>2</sub> ต่อ 1 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของ CO <sub>2</sub> .....	51
4.9 ผลการวัดอัตราการใช้ O <sub>2</sub> ของผักสลัดกรีน โอ๊ค ผักสลัดบัตเตอร์เฮ็ด ผักกาดหอมและผักสลัดผสมชนิดที่อุณหภูมิเก็บรักษา 5°C ที่ระดับความเข้มข้นของแก๊สผสม 5 10 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของ O <sub>2</sub> ต่อ 1 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของ CO <sub>2</sub> .....	52
4.10 ผลการวัดอัตราการสร้าง CO <sub>2</sub> ของผักสลัดกรีน โอ๊ค ผักสลัดบัตเตอร์เฮ็ด ผักกาดหอมและ ผักสลัดผสมชนิดที่อุณหภูมิเก็บรักษา 5°C ที่ระดับความเข้มข้นของแก๊สผสม 5 10 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของ O <sub>2</sub> ต่อ 1 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของ CO <sub>2</sub> .....	53
4.11 ค่า H° ที่ใช้จำแนกคุณภาพของผักสลัด .....	54
4.12 ผลการคำนวณพื้นที่สี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีพื้นที่จริงเท่ากับ 100.00 ตารางเซนติเมตร .....	55
4.13 ผลการคำนวณพื้นที่วงกลมที่มีพื้นที่จริงเท่ากับ 78.54 ตารางเซนติเมตร .....	56
4.14 ผลการคำนวณพื้นที่สามเหลี่ยมที่มีพื้นที่จริงเท่ากับ 25.00 ตารางเซนติเมตร .....	56
4.15 อัลกอริทึมสำหรับการคำนวณพื้นที่ความผิดปกติด้านสีโดยรวม.....	59

## สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.16 เปอร์เซนต์พื้นที่การเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมกับอายุการเก็บรักษา ณ อุณหภูมิ 5°C, 10°C และ 15°C ตามลำดับ.....	60
4.17 อัตราการใช้แก๊ส O <sub>2</sub> ของผักสลัดกรีน โอ๊คตามอายุการเก็บรักษา ที่สภาวะ 20 เปอร์เซนต์โดยปริมาตรของแก๊ส O <sub>2</sub> และ 1 เปอร์เซนต์โดยปริมาตร ของแก๊ส CO <sub>2</sub> อุณหภูมิ 5°C 10°C และ 15°C .....	69
4.18 อัตราการสร้างแก๊ส CO <sub>2</sub> ของผักสลัดกรีน โอ๊คตามอายุการเก็บรักษา ที่สภาวะ 20 เปอร์เซนต์โดยปริมาตรของแก๊ส O <sub>2</sub> และ 1 เปอร์เซนต์ โดยปริมาตรของแก๊ส CO <sub>2</sub> อุณหภูมิ 5°C 10°C และ 15°C .....	70
4.19 ลักษณะผักสลัดกรีน โอ๊คที่เก็บรักษาที่ 15°C ณ อายุการเก็บรักษาวันที่ 6 .....	71
4.20 ลักษณะผักสลัดกรีน โอ๊คที่เก็บรักษาที่ 15°C ณ อายุการเก็บรักษาวันที่ 7 .....	71
4.21 ลักษณะผักสลัดกรีน โอ๊คที่เก็บรักษาที่ 15°C ณ อายุการเก็บรักษาวันที่ 8 .....	72
4.22 ผลการทดสอบแบบจำลองอัตราการใช้ O <sub>2</sub> ของผักสลัดกรีน โอ๊คที่ อุณหภูมิ 5°C 10°C และ 15°C.....	75
4.23 ผลการทดสอบแบบจำลองอัตราการสร้าง CO <sub>2</sub> ของผักสลัดกรีน โอ๊คที่ อุณหภูมิ 5°C 10°C และ 15°C.....	76
4.24 ผลการทดสอบแบบจำลองอัตราการใช้ O <sub>2</sub> ของผักสลัดบัตเตอร์เฮดที่ อุณหภูมิ 5°C 10°C และ 15°C.....	77
4.25 ผลการทดสอบแบบจำลองอัตราการสร้าง CO <sub>2</sub> ของผักสลัดบัตเตอร์เฮดที่ อุณหภูมิ 5°C 10°C และ 15°C.....	78
4.26 ผลการทดสอบแบบจำลองอัตราการใช้ O <sub>2</sub> ของผักกาดหอมที่ อุณหภูมิ 5°C 10°C และ 15°C.....	79
4.27 ผลการทดสอบแบบจำลองอัตราการสร้าง CO <sub>2</sub> ของผักกาดหอมที่ อุณหภูมิ 5°C 10°C และ 15°C.....	80
4.28 ผลการทดสอบแบบจำลองอัตราการใช้ O <sub>2</sub> ของผักสลัดผสมที่ อุณหภูมิ 5°C 10°C และ 15°C.....	81
4.29 ผลการทดสอบแบบจำลองอัตราการสร้าง CO <sub>2</sub> ของผักสลัดผสมชนิดที่ อุณหภูมิ 5°C 10°C และ 15°C.....	82

## สารบัญรูป (ต่อ)

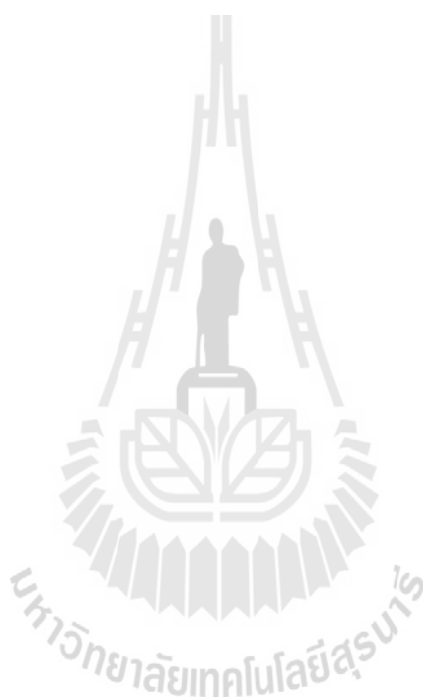
รูปที่	หน้า
4.30 ผลการทดสอบแบบจำลองอัตราการการใช้ $O_2$ ของผักสลัดกรีน โอ๊คที่อุณหภูมิ $5^{\circ}C$ $10^{\circ}C$ และ $15^{\circ}C$ ที่คำนวณได้จากสมการที่ 4.2.....	85
4.31 ผลการทดสอบแบบจำลองอัตราการสร้าง $CO_2$ ของผักสลัดกรีน โอ๊คที่อุณหภูมิ $5^{\circ}C$ $10^{\circ}C$ และ $15^{\circ}C$ ที่คำนวณได้จากสมการที่ 4.2.....	86
4.32 ผลการทดสอบแบบจำลองอัตราการใช้ $O_2$ ของผักสลัดบัตเตอร์เฮดที่อุณหภูมิ $5^{\circ}C$ $10^{\circ}C$ และ $15^{\circ}C$ ที่คำนวณได้จากสมการที่ 4.2 .....	87
4.33 ผลการทดสอบแบบจำลองอัตราการสร้าง $CO_2$ ของผักสลัดบัตเตอร์เฮดที่อุณหภูมิ $5^{\circ}C$ $10^{\circ}C$ และ $15^{\circ}C$ ที่คำนวณได้จากสมการที่ 4.2 .....	88
4.34 ผลการทดสอบแบบจำลองอัตราการใช้ $O_2$ ของผักกาดหอมที่อุณหภูมิ $5^{\circ}C$ $10^{\circ}C$ และ $15^{\circ}C$ ที่คำนวณได้จากสมการที่ 4.2 .....	89
4.35 ผลการทดสอบแบบจำลองอัตราการสร้าง $CO_2$ ของผักกาดหอมที่อุณหภูมิ $5^{\circ}C$ $10^{\circ}C$ และ $15^{\circ}C$ ที่คำนวณได้จากสมการที่ 4.2 .....	90
4.36 ผลการทดสอบแบบจำลองอัตราการใช้ $O_2$ ของผักสลัดผสมชนิดที่อุณหภูมิ $5^{\circ}C$ $10^{\circ}C$ และ $15^{\circ}C$ ที่คำนวณได้จากสมการที่ 4.2 .....	91
4.37 ผลการทดสอบแบบจำลองอัตราการสร้าง $CO_2$ ของผักสลัดผสมชนิดที่อุณหภูมิ $5^{\circ}C$ $10^{\circ}C$ และ $15^{\circ}C$ ที่คำนวณได้จากสมการที่ 4.2 .....	92
4.38 เปรอร์เซ็นต์พื้นที่ที่เหลืออยู่ของคุณภาพที่เป็นปกติด้านสีโดยรวมกับอายุการเก็บรักษา ณ อุณหภูมิ $5^{\circ}C$ $10^{\circ}C$ และ $15^{\circ}C$ ตามลำดับ.....	94
4.39 ผลการประมาณค่าคงที่จลนศาสตร์ของการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวม $k$ ตามความสัมพันธ์ของ Arrhenius .....	95
4.40 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมกับอัตราการหายใจของผักสลัดกรีน โอ๊ค .....	97
4.41 ผลการทดสอบแบบจำลองอัตราการใช้แก๊ส $O_2$ ของผักสลัดกรีน โอ๊คที่อุณหภูมิ $5^{\circ}C$ ที่คำนวณได้จากสมการที่ 4.5 .....	99
4.42 ผลการทดสอบแบบจำลองอัตราการใช้แก๊ส $O_2$ ของผักสลัดกรีน โอ๊คที่อุณหภูมิ $10^{\circ}C$ ที่คำนวณได้จากสมการที่ 4.5 .....	100

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่

หน้า

4.43 ผลการทดสอบแบบจำลองอัตราการใช้แก๊ส O <sub>2</sub> ของผักสลัดกรีน โอ๊คที่อุณหภูมิ 15°C ที่คำนวณได้จากสมการที่ 4.5 .....	100
--	-----



## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

MAP	=	Modified Atmosphere Packaging
$RO_2$	=	อัตราการใช้แก๊ส $O_2$ (ml/kg hr)
$RCO_2$	=	อัตราการสร้างแก๊ส $CO_2$ (ml/kg hr)
$\alpha$	=	อัตราการหายใจสูงสุด (maximal respiration rates) (ml/kg hr)
$y_{O_2}$	=	ความเข้มข้นของแก๊ส $O_2$ (เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร)
$y_{CO_2}$	=	ความเข้มข้นของแก๊ส $CO_2$ (เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร)
$\phi$	=	คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของ Michaelis–Menten ณ ตำแหน่ง $\frac{\alpha}{2}$ (เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร( $O_2$ ))
$\gamma_c$	=	ค่าคงที่ของการยับยั้งการหายใจด้วย $CO_2$ ของสมการแบบ competitive (เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร( $O_2$ ))
$\gamma_u$	=	ค่าคงที่ของการยับยั้งการหายใจด้วย $CO_2$ ของสมการแบบ uncompetitive (เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร( $O_2$ ))
$\gamma_n$	=	ค่าคงที่ของการยับยั้งการหายใจด้วย $CO_2$ ของสมการแบบ noncompetitive (เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร( $O_2$ ))
$R$	=	ค่าคงที่ของแก๊ส มีค่าเท่ากับ 8.314 kJ/kmol.K
$E_a$	=	activation energy (kJ/kmol)
$T$	=	อุณหภูมิเก็บรักษา (K)
$T_{ref}$	=	อุณหภูมิอ้างอิง (K)
$R_{O_2,ref}$	=	อัตราการใช้แก๊สออกซิเจน ณ อุณหภูมิอ้างอิง (ml $[O_2]$ /kg.hr)
$R_{CO_2,ref}$	=	อัตราการสร้างแก๊สคาร์บอนไดออกซิเจน ณ อุณหภูมิอ้างอิง (ml $[CO_2]$ /kg.hr)

# บทที่ 1

## บทนำ

เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงความสำคัญและที่มาของวิทยานิพนธ์ งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง วัตถุประสงค์ ขอบเขตการวิจัย สมมติฐานการวิจัยและประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์นี้ โดยรายละเอียดของแต่ละหัวข้อมีดังต่อไปนี้

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันบรรจุภัณฑ์ปรับแต่งบรรยากาศ (modified atmosphere packaging) หรือที่นิยมเรียก MAP ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลายในภาคอุตสาหกรรมเกษตรรวมถึงอุตสาหกรรมการส่งออกผลผลิตทางการเกษตร เนื่องด้วยบรรจุภัณฑ์ปรับแต่งบรรยากาศมีความสามารถในการยืดอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์สด เช่น ผักหรือผลไม้สดได้ พร้อมกันนั้นบรรจุภัณฑ์ปรับแต่งบรรยากาศยังมีความสามารถในการเก็บรักษาความสด สะอาด และมีอัตราการเสื่อมต่อการปนเปื้อนของจุลินทรีย์ก่อโรคที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพมนุษย์ต่ำ ประกอบกับปัจจุบันเทคโนโลยีด้านวัสดุพอลิเมอร์ซึ่งเป็นวัสดุหลักในการผลิตบรรจุภัณฑ์ปรับแต่งบรรยากาศได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ทำให้ขีดจำกัดด้านวัสดุที่เคยเป็นปัญหาในอดีตได้รับการแก้ไขแล้วในปัจจุบันซึ่งทำให้ความสามารถในการพัฒนาบรรจุภัณฑ์ปรับแต่งบรรยากาศมีแนวโน้มการใช้งานได้หลากหลายขึ้น

ถึงแม้เทคโนโลยีด้านวัสดุจะได้รับการพัฒนาเป็นอย่างมากในปัจจุบันแต่ขีดจำกัดในการพัฒนาบรรจุภัณฑ์ปรับแต่งบรรยากาศมิได้ถูกจำกัดอยู่เฉพาะปัญหาด้านวัสดุเพียงอย่างเดียวเท่านั้น แต่การพัฒนาบรรจุภัณฑ์ปรับแต่งบรรยากาศยังมีปัจจัยอื่น ๆ ร่วมด้วย หนึ่งในปัจจัยสำคัญในการพัฒนาบรรจุภัณฑ์ปรับแต่งบรรยากาศ คือ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้สำหรับคำนวณเพื่อทำนายอัตราการหายใจของผลิตภัณฑ์ที่ถูกบรรจุในบรรจุภัณฑ์ปรับแต่งบรรยากาศ ที่เป็นเช่นนั้น เนื่องด้วยอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ต่างๆขึ้นอยู่กับอัตราการหายใจของผลิตภัณฑ์นั้นๆ ด้วยเหตุนี้จึงได้มีงานวิจัยเพื่อพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ให้มีความถูกต้องสูงมากขึ้น แบบจำลองที่ได้ อาจมีความแตกต่างกันขึ้นกับทฤษฎีพื้นฐานที่นำมาประยุกต์ใช้เพื่อสร้างแบบจำลองนั้นๆ ตัวอย่างแบบจำลองที่ได้รับการยอมรับกันอย่างกว้างขวาง เช่น แบบจำลองที่ได้จากหลักการการหาฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์เหมาะสมกับข้อมูล (Jurin และ Karel, 1963; Hayakawa, et al., 1975) แบบจำลองที่อิงหลักการการเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมีหรือกายภาพ ได้แก่ Michaelis-Mentel type equation (Lee

et al., 1991) และ transition state theory (Makino et al., 1996; Makino et al., 1997) จากความหลากหลายของแบบจำลองประกอบกับความสามารถในการพัฒนาวัสดุพอลิเมอร์ให้มีความหลากหลายมากขึ้นก่อให้เกิดผลดีต่อการพัฒนาบรรจุภัณฑ์ปรับแต่งบรรยากาศเนื่องจากทำให้ผู้ออกแบบมีตัวเลือกทั้งในด้านการใช้แบบจำลองและการเลือกใช้วัสดุในการออกแบบเพื่อให้เกิดความเหมาะสมต่อผลิตภัณฑ์มากที่สุด แต่ความหลากหลายดังกล่าวมิได้มีเพียงผลดีต่อการออกแบบเพียงอย่างเดียวเท่านั้นในทางตรงกันข้ามการมีตัวเลือกที่มากเกินไปในการออกแบบทำให้การหาจุดเหมาะสมในการออกแบบนั้นทำได้ยากขึ้นประกอบกับในปัจจุบันยังไม่มีเครื่องมือในการช่วยออกแบบจึงทำให้การพิสูจน์ผลสัมฤทธิ์ของบรรจุภัณฑ์ปรับแต่งบรรยากาศที่ถูกออกแบบจำเป็นต้องใช้วิธีการทดลองจริงเพื่อพิสูจน์ผลสัมฤทธิ์ดังกล่าวซึ่งการทดลองในแต่ละครั้งมีค่าใช้จ่ายสูงและเสียเวลาในการทดลองมาก จากปัญหาข้างต้นทำให้เกิดการวิจัยและพัฒนาเพื่อสร้างเครื่องมือคำนวณในการช่วยออกแบบบรรจุภัณฑ์ปรับแต่งบรรยากาศ หนึ่งในเครื่องมือที่ใช้ในการออกแบบบรรจุภัณฑ์คือ **MAP Design** ซึ่งพัฒนาขึ้นโดยวีระศักดิ์ เลิศศิริ โยธิน และ นพนิตย์ จรัสสินวิชัย (2548) โดยเป็นซอฟต์แวร์เพื่อช่วยในการออกแบบบรรจุภัณฑ์ปรับแต่งบรรยากาศสำหรับผักสดและผักสดแปรรูปเล็กน้อย

ซอฟต์แวร์ MAP Design สามารถใช้คำนวณกำหนดขนาดของบรรจุภัณฑ์เพื่อให้ได้อายุการเก็บรักษาตามที่ต้องการ โดยการเลือกใช้วัสดุที่มีคุณสมบัติที่ต้องการจากฐานข้อมูล และสามารถใช้คำนวณค่าอัตราการแพร่ผ่านของแก๊ส  $O_2$  และ  $CO_2$  ผ่านบรรจุภัณฑ์ที่วัสดุนั้นควรเป็นเพื่อนำไปใช้เป็นข้อมูลในการพัฒนาวัสดุชนิดใหม่ ถึงแม้ซอฟต์แวร์ที่ได้รับการพัฒนามาแล้วดังกล่าวจะมีความสามารถดังที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น การพัฒนาให้ซอฟต์แวร์มีขีดความสามารถมากขึ้นยังกระทำได้ในหลายประเด็น ได้แก่ การเพิ่มแบบสมการอัตราการหายใจของผักสดซึ่งเป็นหัวใจที่ชี้ความถูกต้องของผลการทำนายอายุผลิตภัณฑ์ การเพิ่มแบบการคำนวณสำหรับบรรจุภัณฑ์ชนิดใหม่ที่มีใช้เชิงพาณิชย์ และโดยเฉพาะการพัฒนาให้มีความสามารถด้านการทำนายอัตราการเปลี่ยนแปลงด้านคุณภาพของผลิตภัณฑ์ เช่น คุณภาพสีโดยรวม คุณภาพด้านสารอาหาร คุณภาพด้านการปนเปื้อนจุลินทรีย์ เป็นต้น หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่าการทำนายอัตราการเปลี่ยนแปลงคุณภาพที่สัมพันธ์กันกับสภาวะการบรรจุและการเก็บรักษาได้จะเป็นประโยชน์โดยตรงต่อการประมาณอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์กับเกณฑ์ด้านคุณลักษณะนั้นๆที่เกินจุดที่ผู้บริโภคยอมรับได้ ซึ่งปัจจัยทางคุณภาพนี้เป็นปัจจัยที่เชื่อมโยงโดยตรงต่อการตัดสินใจของผู้บริโภคต่อการเลือกซื้อผลิตภัณฑ์ที่ถูกบรรจุในบรรจุภัณฑ์ปรับแต่งบรรยากาศ

จากแนวทางการพัฒนาที่เป็นไปได้ดังกล่าวข้างต้นจึงเป็นที่มาของงานศึกษาวิจัยนี้ โดยงานวิจัยนี้เน้นการศึกษาและสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เชื่อมโยงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการหายใจและอัตราการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ งานวิจัยนี้มุ่งเน้นให้ได้



แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สามารถคำนวณเพื่อทำนายอายุการเก็บรักษาโดยพิจารณาจากลักษณะการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมของผักสลัดชนิดเดียวภายใต้สภาวะการบรรจุและการเก็บรักษาต่างๆ นอกจากการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แล้วงานวิจัยนี้ยังครอบคลุมการพัฒนาต่อยอดซอฟต์แวร์ MAP Design ที่ได้รับการพัฒนาสำเร็จลุล่วงแล้วก่อนหน้านี้ โดยปรับปรุงและเพิ่มเติมส่วนการคำนวณเพื่อทำนายลักษณะการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมของผักสลัดชนิดเดียวซึ่งจะเป็นการเพิ่มขีดความสามารถให้กับซอฟต์แวร์ MAP Design ให้สอดคล้องกับความต้องการของการนำไปใช้ในเชิงพาณิชย์ต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษาวิจัย

1.2.1 เพื่อพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ทำนายอัตราการหายใจของผักสลัดชนิดเดียวและผักสลัดผสมชนิด โดยใช้ตัวอย่างผักแตกต่างกันสามชนิด

1.2.2 เพื่อพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ติดตามจลนศาสตร์ของอัตราการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมของผักสลัดชนิดเดียวโดยใช้ตัวอย่างผักสลัดหนึ่งชนิด

1.2.3 เพื่อพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เชื่อมโยงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการหายใจและอัตราการเปลี่ยนแปลงคุณภาพสีโดยรวมของผักสลัดชนิดเดียว

1.2.4 เพื่อเป็นแนวทางสำหรับพัฒนาต่อยอดซอฟต์แวร์ช่วยในการออกแบบบรรจุภัณฑ์ปรับแต่งบรรยากาศสำหรับผักสดและผักสดแปรรูปเล็กน้อย

## 1.3 สมมุติฐานของงานวิจัย

อัตราการหายใจและการแปลงเปลี่ยนสีโดยรวมมีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เชื่อมโยงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการหายใจและอัตราการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมของผักสลัดชนิดเดียวที่คำนึงถึงอิทธิพลจากสภาวะการบรรจุหรืออัตราส่วนของ  $O_2$  ต่อ  $CO_2$  เริ่มต้นและอุณหภูมิการเก็บรักษาสามารถทำนายอายุการเก็บรักษาผักสลัดชนิดเดียวได้ถูกต้อง

## 1.4 ขอบเขตของการศึกษาวิจัย

งานวิจัยนี้เน้นการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายอัตราการหายใจของผักสลัดชนิดเดียวและเน้นพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายอัตราการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมของผักสลัดชนิดเดียวโดยใช้ตัวอย่างผักสลัดหนึ่งชนิด รวมถึงพัฒนาแบบจำลองที่เชื่อมโยงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการหายใจและอัตราการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมของผักสลัดชนิดเดียว

โดยใช้ตัวอย่างผักสลัดหนึ่งชนิด ซึ่งแบบจำลองที่ได้จะถูกนำไปพัฒนาต่อยอดซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์เพื่อช่วยในการออกแบบบรรจุภัณฑ์ปรับแต่งบรรยากาศสำหรับผักสดและผักสดแปรรูปเล็กน้อย

## 1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ

1.5.1 ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายอัตราการหายใจของผักสลัดชนิดเดียว และผักสลัดผสมชนิด

1.5.2 ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการหายใจ และอัตราการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมของผักสลัดชนิดเดียว

1.5.3 ได้แนวทางสำหรับพัฒนาซอฟต์แวร์ออกแบบบรรจุภัณฑ์ปรับแต่งบรรยากาศสำหรับผักสดและผักสดแปรรูปเล็กน้อยที่สามารถทำนายอัตราการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมของผักสลัดชนิดเดียว



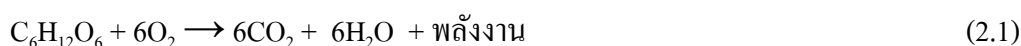
## บทที่ 2

### ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เนื้อหาในบทนี้ผู้วิจัยจะกล่าวถึงอัตราการหายใจและปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการหายใจของผักสลัด กรรมวิธีการวัดอัตราการหายใจของผักและผลไม้สด งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายอัตราการหายใจของผักและผลไม้สด คุณภาพและการเปลี่ยนแปลงคุณภาพด้านสีโดยรวมของผักสลัด รวมถึงทฤษฎีด้านการประมวลผลภาพเนื่องจากงานวิจัยนี้ได้ใช้เทคนิคทางการประมวลผลภาพเพื่อวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงด้านสีของผักสลัด โดยทฤษฎีที่จะกล่าวถึงประกอบไปด้วย ความหมายของภาพดิจิทัล การประมวลผลภาพดิจิทัล ประเภทของภาพ ปริภูมิสีและการแปลงปริภูมิสี เป็นต้น โดยรายละเอียดของแต่ละหัวข้อที่กล่าวมาข้างต้นมีดังต่อไปนี้

#### 2.1 อัตราการหายใจและปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการหายใจของผักสลัด

การหายใจเป็นกระบวนการทางชีวเคมีในสิ่งมีชีวิต โดยจะเปลี่ยนแปลงอาหารให้เป็นพลังงานเพื่อดำรงชีพ กระบวนการนี้เป็นปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชันที่อาหารถูกออกซิไดซ์เป็นคาร์บอนไดออกไซด์ ออกซิเจนถูกใช้ไปในปฏิกิริยาได้เป็นน้ำออกมา ดังเช่นสมการการหายใจโดยใช้กลูโคสเป็น substrate ที่แสดงในสมการที่ 2.1 (จริงแท้, 2549)



โดยปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการหายใจนั้นมีหลายปัจจัยมาก ทั้งปัจจัยที่มาจากพืชเอง อาทิเช่น สายพันธุ์พืช อายุ สภาพแวดล้อมในแหล่งที่ปลูก เป็นต้น ปัจจัยจากการแปรรูป เช่น ปกติผักหั่นแล้วจะมีอัตราการหายใจเพิ่มขึ้นร้อยละ 15 จากผักที่ยังไม่ได้หั่น แต่ถ้ามีดที่ใช้หั่นไม่คมจะมีผลให้ผิวผักไม่สม่ำเสมออัตราการหายใจจะเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่า นอกจากนี้ยังมีปัจจัยภายนอกที่มีผลต่อการหายใจอย่างมาก คือ อุณหภูมิ องค์ประกอบของบรรยากาศ และความเครียดทางกาย ปัจจัยเหล่านี้เป็นสิ่งสำคัญต่อการเก็บรักษาผักเป็นอย่างมาก ซึ่งปัจจัยดังกล่าวนี้เป็นปัจจัยที่สามารถควบคุมให้เหมาะสมกับผลิตผลได้ โดยทั่วไปอัตราการหายใจของพืชจะเพิ่มขึ้นประมาณสองถึงสามเท่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นทุก ๆ 10 องศาเซลเซียส (จริงแท้, 2549) และสถานะที่ความเข้มข้นของ  $O_2$  ต่ำกว่า

ร้อยละ 10 ผักส่วนใหญ่จะมีอัตราการหายใจลดลง ดังนั้นการควบคุมให้มีสภาวะการเก็บรักษาที่เหมาะสมจะทำให้ช่วยลดอัตราการหายใจของผักได้ ซึ่งจะส่งผลให้ผักมีอายุการเก็บรักษานานขึ้น โดยการหาสภาวะที่เหมาะสมนั้นอาจหาได้จากสมการทำนายอัตราการหายใจซึ่งจะได้แสดงถัดไป

## 2.2 กรรมวิธีการวัดอัตราการหายใจ

การวัดอัตราการหายใจของพืชนั้นเป็นการติดตามวัดอัตราการใช้  $O_2$  และ/หรือ วัดอัตราการสร้าง  $CO_2$  ภายใต้สภาวะการเก็บรักษา โดยระบบการวัดที่นิยมใช้นั้นประกอบด้วย 3 ระบบด้วยกัน ดังนี้

### 2.2.1 ระบบปิด (the close or static system)

ระบบปิดเป็นการติดตามปริมาณแก๊สที่เปลี่ยนไปจากปริมาณตั้งต้นอันเนื่องมาจากกระบวนการหายใจของพืชในระบบปิดซึ่งไม่มีการถ่ายโอนมวลอากาศในระบบระหว่างทดสอบ ข้อดีของกรรมวิธีการวัดนี้คือการวัดปริมาณแก๊ส ณ เวลาใด ๆ กระทำได้ง่ายเนื่องจากความแตกต่างของปริมาณแก๊ส ณ เวลาใด ๆ กับเวลาตั้งต้นนั้นค่อนข้างสูงหรืออยู่ในระดับเปอร์เซ็นต์จึงสะดวกต่อการติดตามด้วยเครื่องมือวัดแก๊ส อัตราการสร้าง  $CO_2$  และอัตราการใช้  $O_2$  อันเกิดจากกระบวนการหายใจสามารถคำนวณได้จากสมการ (2.2) และ (2.3) ตามลำดับ (Fonseca, 2002) หรือสามารถคำนวณได้จากสมการสมดุลโมลสารดังสมการที่ (2.4) ถึง (2.8) ตามลำดับ

$$R_{O_2} = \frac{(y_{O_2}^i - y_{O_2}^f)V}{100M(t_f - t_i)} \quad (2.2)$$

$$R_{CO_2} = \frac{(y_{CO_2}^i - y_{CO_2}^f)V}{100M(t_f - t_i)} \quad (2.3)$$

โดย  $R_{O_2}$  คือ อัตราการใช้  $O_2$  (ml/kg.hr),  $R_{CO_2}$  คืออัตราการสร้าง  $CO_2$  (ml/kg.hr),  $y^i$ ,  $y^f$  คือความเข้มข้นของแก๊ส ณ เวลาตั้งต้น และความเข้มข้นของแก๊ส ณ เวลาใดๆ ในหน่วย % v/v(เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) ,  $t_i$ ,  $t_f$  คือเวลาตั้งต้นและเวลาใดๆ ตามลำดับ,  $M$  คือมวลพืช (kg) และ  $V$  คือปริมาตรอากาศในระบบทดสอบ (ml)

$$\{(\dot{n}_{out} + \dot{n}_{res}) - 0\} + \frac{dn}{dt} = 0 \quad (2.4)$$

$$\int_{n_0}^n dn = \int_{t_0}^t -(\dot{n}_{out} + \dot{n}_{res}) dt \quad (2.5)$$

∴

$$n = n_0 - \int_{t_0}^t \dot{n}_{out} dt - \dot{n}_{res} (t - t_0) \quad (2.6)$$

เมื่อทำการสมดุลเฉพาะ  $O_2$  หรือ  $CO_2$  จะได้สมการดังนี้

$$\frac{dn_{O_2}}{dt} + \left(\frac{n_{O_2}}{n}\right) \dot{n}_{out} + \left(\frac{n_{O_2}}{n}\right) \dot{n}_{res} = 0 \quad (2.7)$$

$$\frac{dn_{CO_2}}{dt} + \left(\frac{n_{CO_2}}{n}\right) \dot{n}_{out} + \left(\frac{n_{CO_2}}{n}\right) \dot{n}_{res} = 0 \quad (2.8)$$

ทำการแก้สมการที่ (2.7) และ (2.8) ร่วมกับสมการที่ (2.6) จากนั้นทำการหาค่า  $\dot{n}_{res}$  โดยวิธีการ non-linear regression โดยที่  $n$  คือจำนวนโมลสารของแก๊สผสมทั้งหมดที่มีในระบบ ณ เวลาใด ๆ (mole)  $n_0$  คือจำนวนโมลสารตั้งต้นของแก๊สผสมที่มีในระบบ (mole)  $\dot{n}_{out}$  คืออัตราการไหลเชิงโมลของแก๊สผสมที่ไหลออกจากชุดบรรจุตัวอย่าง (mole/hr)  $\dot{n}_{res}$  คืออัตราการใช้ออกซิเจนหรืออัตราการสร้าง  $CO_2$  (mole/hr)

ข้อเสียของกรรมวิธีการวัดโดยใช้ระบบปิดคือการหาอัตราการหายใจอาจมีความคลาดเคลื่อนจากสถานะอากาศที่พืชปรากฏอยู่ได้เนื่องจากปริมาณออกซิเจนที่ลดลงและคาร์บอนไดออกไซด์ที่เพิ่มขึ้นมากในภาชนะอาจส่งผลให้อัตราการหายใจของพืชเปลี่ยนแปลงไปจากสถานะที่ต้องการทดสอบโดยเฉพาะกับพืชที่มีอัตราการหายใจสูง ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ทำการแก้ปัญหาดังกล่าวโดยได้พัฒนาระบบวัดอัตราการหายใจที่สามารถวัดผลได้โดยที่ระดับความเข้มข้นของแก๊สค่อนข้างคงที่ซึ่งจะได้นำเสนอถัดไป

### 2.2.2 ระบบที่มีการไหลผ่านของอากาศ (the flowing or flushed system)

กระบวนการวัดอัตราการหายใจในระบบนี้ทำได้โดยใส่ตัวอย่างพืชลงในภาชนะที่ทราบปริมาตรแน่นอนและต้องเป็นภาชนะที่แก๊สไม่สามารถซึมผ่านเข้าออกได้ปิดภาชนะให้สนิท จากนั้นปล่อยแก๊สผสมที่ทราบสัดส่วนของแก๊สที่แน่นอนให้ไหลผ่านภาชนะที่บรรจุตัวอย่างด้วยอัตราไหลที่คงที่ วัดความเข้มข้นของ  $\text{CO}_2$  และ/หรือ  $\text{O}_2$  ทั้งก่อนเข้าไปในภาชนะและหลังออกจากภาชนะ ซึ่งความเข้มข้นของแก๊สได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือวิเคราะห์แก๊สโดยสามารถคำนวณอัตราการหายใจได้จากสมการ (2.9) และ (2.10) ตามลำดับ (Fonseca, 2002)

$$R_{\text{O}_2} = \frac{(y_{\text{O}_2}^{t_{\text{in}}} - y_{\text{O}_2}^{t_{\text{out}}})x F}{100xM} \quad (2.9)$$

$$R_{\text{CO}_2} = \frac{(y_{\text{CO}_2}^{t_{\text{in}}} - y_{\text{CO}_2}^{t_{\text{out}}})x F}{100xM} \quad (2.10)$$

$R_{\text{O}_2}$  คือ อัตราการใช้  $\text{O}_2$  (ml/kg.hr),  $R_{\text{CO}_2}$  คืออัตราการสร้าง  $\text{CO}_2$  (ml/kg.hr),  $y^{\text{in}}, y^{\text{out}}$  คือความเข้มข้นของแก๊ส ณ ตำแหน่งทางเข้า และความเข้มข้นของแก๊ส ณ ตำแหน่งทางออกของระบบ ในหน่วย % v/v (เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร)  $M$  คือมวลพืช (kg) และ  $F$  คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตร (ml/hr) ข้อดีของระบบการวัดด้วยระบบซึมผ่านนี้คือการวิเคราะห์ความเข้มข้นของแก๊ส ณ ตำแหน่งทางเข้าและตำแหน่งทางออกนั้นต้องใช้เครื่องมือที่มีความละเอียดสูง ซึ่งจะกระทำได้อย่างมากเมื่อนำไปใช้วัดอัตราการหายใจของพืชที่มีอัตราการหายใจต่ำ

### 2.2.3 ระบบที่มีการซึมของอากาศ (the permeable system)

กระบวนการวัดอัตราการหายใจของพืชในระบบที่มีการซึมผ่านของอากาศเข้าออกในภาชนะบรรจุได้นั้น ก่อนที่จะทำการวัดต้องหาค่าการซึมผ่านของแก๊ส ความหนา และพื้นที่ผิวของภาชนะบรรจุที่ใช้สำหรับบรรจุตัวอย่างพืชก่อน จากนั้นบรรจุตัวอย่างพืชลงในภาชนะปิดผนึกภาชนะให้สนิท แล้วทำการวัดปริมาณความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และออกซิเจนในช่วงเวลาต่างๆ โดยสามารถคำนวณอัตราการหายใจของพืชได้จากสมการที่ (2.11) และ (2.12) ตามลำดับ (Fonseca, 2002)

$$R_{O_2} = \frac{P_{O_2} \times A}{100 \times L \times M} \times (y_{O_2}^e - y_{O_2}) \quad (2.11)$$

$$R_{CO_2} = \frac{P_{CO_2} \times A}{100 \times L \times M} \times (y_{CO_2} - y_{CO_2}^e) \quad (2.12)$$

$R_{O_2}$  คืออัตราการใช้ออกซิเจน ( $O_2$  ml/kg.hr),  $R_{CO_2}$  คืออัตราการสร้างคาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$  ml/kg.hr),  $y, y^e$  คือความเข้มข้นของแก๊สภายในบรรจุภัณฑ์และความเข้มข้นของแก๊สภายนอกบรรจุภัณฑ์ ในหน่วย % v/v (เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร)  $M$  คือมวลพืช (kg)  $P$  คือสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน ( $cm^2/hr$ )  $A$  คือพื้นที่ผิวของบรรจุภัณฑ์ ( $cm^2$ )  $L$  คือความหนาของบรรจุภัณฑ์ (cm)

การวัดโดยระบบที่มีการซึมผ่านของอากาศเป็นวิธีที่มีความแม่นยำน้อยเพราะการวัดมีการแปรปรวนมากซึ่งสาเหตุมาจากมิติของภาชนะบรรจุ เช่น ปริมาตรที่เหลือ พื้นที่ผิว และความหนาวัสดุที่แก๊สสามารถผ่านได้ เป็นต้น

## 2.3 แบบจำลองอัตราการหายใจ

แบบจำลองอัตราการหายใจนั้น ได้มีผู้นำเสนอออกมาหลายทฤษฎี โดยรายละเอียดพอสังเขปของแบบจำลองอัตราการหายใจที่ได้รับความนิยมทั่วไปมีดังต่อไปนี้

### 2.3.1 แบบสมการจลนศาสตร์เอนไซม์

แบบจำลองอัตราการหายใจที่ศึกษาอิทธิพลของสัดส่วนผสมของแก๊สผสมสามารถอธิบายได้โดยอาศัยทฤษฎีจลนศาสตร์ของเอนไซม์ซึ่งที่รู้จักกันในชื่อแบบสมการ Michaelis-Menten. โดยอัตราการใช้ออกซิเจน  $O_2$  และอัตราการสร้างคาร์บอนไดออกไซด์  $CO_2$  สามารถทำนายได้เป็นอิสระจากกัน ซึ่งความสัมพันธ์ดังกล่าวขึ้นกับความเข้มข้นของแก๊ส  $CO_2$  และ  $O_2$  โดยแบบสมการดังกล่าวนี้ประกอบไปด้วยสมการ 4 แบบคือ

สมการแบบ Competitive inhibition

$$R = \frac{\alpha \times y_{O_2}}{\phi \times \left( 1 + \frac{y_{CO_2}}{\gamma_c} \right) + y_{O_2}} \quad (2.13)$$

สมการแบบ Uncompetitive inhibition

$$R = \frac{\alpha \times y_{O_2}}{\phi + y_{O_2} \times \left(1 + \frac{y_{CO_2}}{\gamma_u}\right)} \quad (2.14)$$

สมการแบบ Noncompetitive inhibition

$$R = \frac{\alpha \times y_{O_2}}{(\phi + y_{O_2}) \times \left(1 + \frac{y_{CO_2}}{\gamma_n}\right)} \quad (2.15)$$

สมการแบบ Combination of competitive and uncompetitive inhibition

$$R = \frac{\alpha \times y_{O_2}}{\phi \times \left(1 + \frac{y_{CO_2}}{\gamma_c}\right) + y_{O_2} \times \left(1 + \frac{y_{CO_2}}{\gamma_u}\right)} \quad (2.16)$$

โดยที่	$\alpha$	คือ	อัตราการหายใจสูงสุด (maximal respiration rates) (ml/kg hr)
	$y_{O_2}$	คือ	ความเข้มข้นของแก๊ส $O_2$ (เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร)
	$y_{CO_2}$	คือ	ความเข้มข้นของแก๊ส $CO_2$ (เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร)
	$\phi$	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์ของ Michaelis–Menten ณ ตำแหน่ง $\frac{\alpha}{2}$ (เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ( $O_2$ ))
	$\gamma_c$	คือ	ค่าคงที่ของการยับยั้งการหายใจด้วย $CO_2$ ของสมการแบบ competitive (เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร( $O_2$ ))
	$\gamma_u$	คือ	ค่าคงที่ของการยับยั้งการหายใจด้วย $CO_2$ ของสมการแบบ uncompetitive (เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร( $O_2$ ))
	$\gamma_n$	คือ	ค่าคงที่ของการยับยั้งการหายใจด้วย $CO_2$ ของสมการแบบ noncompetitive (เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร( $O_2$ ))



### 2.3.2 แบบสมการ Transition State

มาคิโนะและคณะได้พัฒนาแบบสมการคำนวณอัตราการหายใจของพืชผลสดที่ขึ้นกับอุณหภูมิโดยใช้ทฤษฎี transition state (Makino et al., 1997) คณะนักวิจัยนี้ได้เสนอแบบสมการทำนายอัตราการใช้ออกซิเจนซึ่งได้พิสูจน์ให้เห็นว่าใช้ทำนายได้ดีกับพืชผลสดหลายชนิด (Makino et al., 1996, 1997(a), 1997(b)) ดังความสัมพันธ์ที่ปรากฏต่อไปนี้

$$R_{O_2} = \frac{abp_{O_2}}{1 + ap_{O_2} + aip_{O_2}p_{CO_2}} \quad (2.17)$$

เมื่อ  $a, i$  คือตัวแปรอัตรา [ $Pa^{-1}$ ],  $b$  คือ จำนวน โมลสูงสุดของการใช้  $O_2$  [ $mol \cdot kg^{-1} \cdot s^{-1}$ ],  $p_{O_2}, p_{CO_2}$  คือ ความดันไอย่อยของ  $O_2$  และ  $CO_2$  ปรากฏโดยรอบพืชผลสด [ $Pa$ ]. ตัวแปร  $a, b$  และ  $i$  เป็นค่าจำเพาะขึ้นกับชนิดของพืชผลและได้มาจากการทดลองตรวจวัดอัตราการหายใจตั้งกรรมวิธีการหาตามที่รายงาน โดยคณะนักวิจัยนี้ ส่วนอัตราการสร้าง  $CO_2$  ประมาณโดยอาศัยค่าอัตราส่วนการหายใจ (respiration quotient) ดังสมการ

$$R_{CO_2} = RQ \times R_{O_2} \quad (2.18)$$

### 2.4 คุณภาพและการเปลี่ยนแปลงคุณภาพผักสลัดตัดแต่งพร้อมบริโภค

คุณภาพของผักอาจแบ่งได้เป็น 2 ลักษณะใหญ่ คือ ลักษณะภายใน และลักษณะภายนอก โดยลักษณะภายนอกนั้น ได้แก่ ลักษณะต่าง ๆ ที่มองเห็นด้วยตา สัมผัสได้ด้วยมือ ซึ่งประกอบด้วย รูปร่าง ขนาด สี สัน ความมันเงา และลักษณะอื่น ๆ ส่วนลักษณะภายใน ได้แก่ ลักษณะที่สัมผัสได้จากการบริโภคด้วยปาก ลิ้น และจมูก ได้แก่ รสชาติ (Taste) เนื้อสัมผัส (Texture) รวมทั้งคุณค่าทางอาหาร (จริงแท้, 2549) สำหรับผักสลัดนั้นเป็นผักที่มีความบอบบางและซ้า่ง่ายซึ่งทำให้มีอายุการเก็บรักษาที่ค่อนข้างสั้น โดยทั่วไปผักตัดแต่งพร้อมบริโภคจะมีอายุการเก็บรักษาประมาณ 4 ถึง 7 วัน (Vhvenainen, 1996)

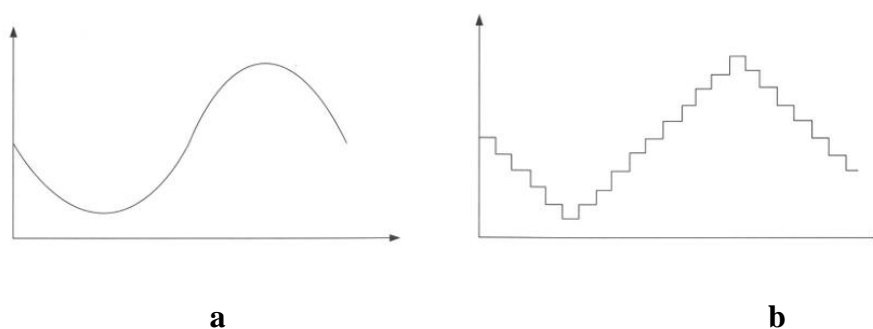
การตัดแต่งผักเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของผักลดลงอย่างรวดเร็วระหว่างการเก็บรักษา (Tavarini, Degl'Innocenti, Pardossi, and Guidi, 2007) การแปรรูปผัก เช่น ล้าง หั่น มีผลให้เนื้อเยื่อผักฉีกขาด ทำให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมี ซึ่งจะมีผลกระทบไปถึงเซลล์พืชที่อยู่ถัดไปจากรอยฉีกขาด การล้างผักหลังจากหั่นแล้วจะขจัดของเหลวที่ออกมาจากเซลล์ และชะลอกการทำงานของเอนไซม์ได้ แต่ไม่สามารถใช้ได้กับผักทุกชนิด เช่น ผักกาดหอม การล้างไม่

ช่วยให้เก็บได้นานขึ้น แต่จะยิ่งทำให้เน่าเสียได้เร็วขึ้น แต่การล้างผักกาดจะช่วยลดปฏิกิริยาที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของเอนไซม์ได้ ซึ่งต้องทำให้แห้งโดยเร็วโดยการปั่นด้วยมือหรือใช้เครื่องสลัดน้ำ (Salad spinner)

การเปลี่ยนแปลงคุณภาพของผักนั้นมีสาเหตุหลัก คือ การเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมี และกายภาพ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพที่แสดงให้เห็นได้ชัดเจนที่สุด คือ การเปลี่ยนแปลงสี เช่น การเกิดสีน้ำตาล โดยสีน้ำตาลเกิดขึ้นในผักนั้น เกิดขึ้นเนื่องจากกระบวนการทำงานของเอนไซม์ เมื่อผักเกิดบาดแผลสารประกอบฟีนอลที่อยู่ในแวคิวโอล (Vacuole) มีโอกาสสัมผัสกับออกซิเจนโดยตรงและออกซิไดซ์ (Oxidize) ได้เป็นควิโนน (Quinone) โดยการทำงานของเอนไซม์พอลิฟีนอลออกซิเดส จากนั้นจึงรวมตัวกันเป็นโมเลกุลใหญ่กลายเป็นสารสีน้ำตาล

## 2.5 ทฤษฎีเกี่ยวกับการประมวลผลภาพ

ภาพที่มนุษย์มองเห็นด้วยสายตาโดยทั่วไปเป็นภาพในลักษณะ 3 มิติ คือมีมิติของความกว้าง ความยาว และความสูงหรือความลึก แต่ภาพที่อยู่ในจอทีวีหรือจอคอมพิวเตอร์เป็นภาพที่ถูกแปลงจากภาพในระบบสามมิติไปเป็นภาพในระบบสองมิติโดยการแปลงสัญญาณไฟฟ้าในรูปแบบอนาล็อก (Analog) เช่น ภาพที่ได้จากกล้องวิดีโอ ภาพที่ได้จากเครื่องสแกน หรือภาพที่ได้จากกล้องถ่ายรูป เป็นต้น ไปเป็นสัญญาณในรูปดิจิทัล (Digital) การแปลงสัญญาณดังกล่าวมีวัตถุประสงค์เพื่อแปลงภาพที่อยู่ในระบบ Analog โดยภาพดังกล่าวเป็นภาพในลักษณะต่อเนื่องซึ่งเป็นภาพที่ยังไม่สามารถนำไปประมวลผลได้ให้เป็นภาพเชิงตัวเลขด้วยวิธีการที่เรียกว่า Digitization ซึ่งวิธีการดังกล่าวเป็นวิธีการแปลงฟังก์ชันต่อเนื่องให้เป็นฟังก์ชันไม่ต่อเนื่องดังแสดงในรูปที่ 2.1 เพื่อให้สามารถนำภาพไปประมวลผลด้วยคอมพิวเตอร์ได้



รูปที่ 2.1 การแปลงภาพต่อเนื่อง (a) เป็นภาพเชิงตัวเลข (b) ด้วยวิธีการ Digitization  
ที่มา: สิทธิโชค (2550)

ภาพดิจิทัล (Digital Image) เป็นฟังก์ชัน 2 มิติ  $f(x, y)$  โดยที่ค่า  $x$  และ  $y$  เป็นพิกัดของภาพ ส่วนแอมพลิจูดของฟังก์ชันในพิกัด  $(x, y)$  ใดๆ คือค่าความเข้มของภาพ (Intensity) ณ ตำแหน่งนั้นๆ โดยที่  $(x, y)$  และแอมพลิจูดของฟังก์ชันเป็นค่าจำกัดแบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete Quantity) ซึ่งถ้ากำหนดให้  $f(x, y)$  มีขนาด  $M$  แถวและ  $N$  หลัก และพิกัดของจุดกำเนิด (Origin) ของภาพอยู่ที่ตำแหน่ง  $(x, y) = (0, 0)$  จะสามารถเขียนฟังก์ชันในรูปของเมทริกซ์ได้ดังนี้

$$f(x, y) = \begin{bmatrix} f(0,0) & f(0,1) & \dots & f(0, N-1) \\ f(1,0) & f(1,1) & \dots & f(1, N-1) \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ f(M-1,0) & f(M-1,1) & \dots & f(M-1, N-1) \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

การประมวลผลภาพ (Image Processing) หมายถึง การเรียกใช้ขั้นตอนหรือกรรมวิธีใดๆ มากระทำกับภาพ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้ได้ภาพใหม่ที่มีคุณสมบัติตามต้องการ เช่น เพื่อเพิ่มความคมชัด หรือการประหยัดพื้นที่ในการเก็บภาพ หรือเพื่อใช้สำหรับการประมวลผลในระดับสูง เช่น การจดจำรูปร่าง ลักษณะ ได้อย่างแม่นยำ โดยทั่วไปวัตถุประสงค์ของ Image Processing คือ

• Image Processing : Image in  $\longrightarrow$  Image out

กระบวนการนี้เป็นกระบวนการประมวลผลภาพดิจิทัลเพื่อให้ได้ภาพใหม่ออกมา เช่น การตกแต่งรูปด้วยโปรแกรม Photoshop เป็นต้น

• Image Analysis : Image in  $\longrightarrow$  Measurement out

กระบวนการนี้เป็นกระบวนการประมวลผลภาพดิจิทัลเพื่อให้ได้ค่าการวัดออกมา

• Image Understanding : Image in  $\longrightarrow$  High level Description out

กระบวนการนี้เป็นกระบวนการประมวลผลภาพดิจิทัลเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ออกมาเป็นความหมาย เช่น การจดจำตัวอักษร การจดจำใบหน้าคน เป็นต้น จากวัตถุประสงค์ของการประมวลผลภาพด้วยคอมพิวเตอร์สามารถแบ่งการประมวลผลออกได้เป็นสองระดับหลักๆ ดังนี้

1. การประมวลผลภาพระดับต่ำ ( Low level Image Processing)
2. การประมวลผลภาพระดับสูง ( High level Image Processing)

การประมวลผลภาพด้วยคอมพิวเตอร์ขั้นแรกสุดจะเป็นการประมวลผลภาพในระดับต่ำ กล่าวคือ ภาพถ่ายที่ได้จากกล้องถ่ายรูปดิจิทัลทั่วไปจะมีองค์ประกอบมากมายรวมถึงสิ่งที่มีฟังก์ชันที่เรียกว่า Noise ซึ่งเป็นสิ่งที่ทำให้ภาพนั้นมีคุณภาพไม่ดี ไม่เหมาะที่จะนำไปประมวลผลทางคอมพิวเตอร์ เพื่อ

กำจัดสิ่งที่ไม่พึงประสงค์ดังกล่าวจำเป็นต้องทำการประมวลผลภาพระดับต่ำก่อน โดยการประมวลผลภาพระดับต่ำนั้นจะเป็นการกำจัดสัญญาณรบกวนหรือสิ่งที่ไม่พึงประสงค์ เช่น การทำให้ภาพชัด (High Pass Filter) การหาขอบ (Edge Detection) การแบ่งแยกรูปร่างวัตถุ (Image Segmentation) เป็นต้น ซึ่งหากมีการจัดการระบบถ่ายภาพได้เหมาะสมจะทำให้ลดขั้นตอนการประมวลผลในขั้นนี้ไปได้มาก สำหรับการประมวลผลภาพระดับสูงนั้นเป็นการสอนให้คอมพิวเตอร์รู้จักและเข้าใจภาพต่างๆ ได้ เช่น การจดจำใบหน้าคน การจดจำตัวอักษร การจดจำลักษณะสีต่างๆ เป็นต้น กรรมวิธีการประมวลผลภาพในระดับสูงเป็นการประมวลผลในรูปแบบสัญลักษณ์โดยสัญลักษณ์ที่ได้จะแสดงถึงสิ่งต่างๆ ที่อยู่ในภาพ และนำตัวแปรที่ได้จากการประมวลผลภาพระดับต่ำมาอธิบายสัญลักษณ์เหล่านั้น การประมวลผลภาพระดับสูงปกติจะอ้างอิงทฤษฎีต่างๆ เข้ามาช่วยในการประมวลผล เช่น Neural Network, Image Texture Analysis เป็นต้น

### 2.5.1 แบบจำลองสี

การประมวลผลภาพสีแท้ที่จริงแล้วก็คือการประมวลผลทางสีนั่นเอง เพราะหากพิจารณาให้ดีแล้วภาพถ่ายก็คือการรวมจุดของสี (pixel) ที่มีสีเหมือนหรือแตกต่างกันหลายจุดหรือหลายล้านจุดไว้ในภาพเดียวกัน ด้วยเหตุนี้พื้นฐานสำคัญของกระบวนการประมวลผลภาพก็คือการเข้าใจหลักการของสี มาตรฐานของสีที่มีใช้ในปัจจุบันนั้นมีหลายระบบด้วยกัน แต่โดยทั่วไปทุกมาตรฐานจะมีหลักการหรือแนวคิดเดียวกันคือ การแทนจุดของสีด้วยจุดที่อยู่ในปริภูมิ 3 มิติ โดยจะมีแกนอ้างอิงสำหรับจุดสีนั้นๆ ในปริภูมิ ซึ่งแกนดังกล่าวจะเป็นอิสระต่อกัน ตัวอย่างมาตรฐานของสีที่ใช้กันในปัจจุบัน มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 2.5.1.1 แบบจำลองสี RGB

เป็นระบบสีที่เกิดจากการรวมกันของแสงสีแดง เขียวและ น้ำเงิน โดยมีการรวมกันแบบ Additive ในสัดส่วนที่แตกต่างกันซึ่งโดยปกติจะนำไปใช้ในจอภาพแบบ CRT (Cathode ray tube) และเนื่องด้วยระบบสี RGB เป็นระบบสีของแสงจึงทำให้ได้ภาพที่สวยงามสมจริง

#### 2.5.1.2 แบบจำลองสี HSI (Hue Saturation Intensity)

แบบจำลองนี้เป็นแบบจำลองที่เหมาะสมและสอดคล้องกับการรับรู้ค่าสีต่างๆ ของมนุษย์มาก โดยแบบจำลองนี้ประกอบไปด้วยค่า H (Hue) S (saturation) I (Intensity) โดยรายละเอียดมีดังนี้

H (Hue) ค่าดังกล่าวนี้คือข้อมูลที่สามารถกำหนดได้จากมุมที่หมุนไปในวงล้อสีมาตรฐาน โดยมีมุมที่หมุนไปมีค่าเท่ากับ  $360^\circ$  โดยวงจสีที่เกิดขึ้นเกิดจากการแยกเฉดสีออกจากแสง ซึ่งเป็นลักษณะเดียวกันกับการเกิดสีของรุ้งกินน้ำ

S (Saturation) ค่าดังกล่าวนี้คือค่าความบริสุทธิ์หรือความอิ่มตัวของสี โดยเป็นค่าที่กำหนดว่าสีใดๆนั้นจะมีสีเทาผสมในปริมาณเท่าใด โดยค่านี้มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 โดยที่ถ้าค่า S มีค่าเท่ากับ 1 สีนั้นๆจะมีความอิ่มตัวมากที่สุด ในทางตรงกันข้ามถ้าค่า S มีค่าเท่ากับ 0 สีดังกล่าวนี้จะไม่มีความผสมอยู่เลยซึ่งผลลัพธ์ที่ได้คือสีดังกล่าวจะเป็นสีดำ

I (Saturation) ค่าดังกล่าวนี้คือค่าความสว่างของสี โดยมีค่าอยู่ในช่วง 0 ถึง 1 โดยถ้าค่า I มีค่าเท่ากับ 1 สีนั้นจะกลายเป็นสีขาว ในทางตรงกันข้ามถ้าค่า I มีค่าเท่ากับ 0 สีนั้นจะกลายเป็นสีดำ

### 2.5.1.3 ระบบสีแบบ CMY(Cyan Magenta Yellow)

เป็นระบบสีที่พัฒนาขึ้นมาใช้สำหรับการพิมพ์ภาพสี โดยมีสีหลักคือสี Cyan Magenta และ Yellow ซึ่งเรียกว่า Subtractive primaries Color ระบบสีแบบ CMY สามารถทำได้โดยการนำเอาสีในระบบ RGB ลบกับสีขาวดังนี้คือ  $C = 1 - R$ ,  $M = 1 - G$ ,  $Y = 1 - B$  ระบบสี CMY จะนำไปใช้สำหรับการพิมพ์ภาพสีแต่ยังไม่ดีเท่าที่ควรเนื่องจากไม่ยังสามารถสร้างสีดำ ได้อย่างถูกต้อง ดังนั้นจึงมีการใช้ระบบ CMYK แทน โดย  $K = \min(C, M, Y)$  โดยที่ K คือ สีที่สีที่แทนด้วยสีดำ ดังนั้นจึงได้ระบบสีใหม่คือ  $C = C - K$ ,  $M = M - K$ ,  $Y = Y - K$

### 2.5.1.4 ระบบสีแบบ YIQ

เป็นระบบที่ใช้ใน TV Broadcasting สำหรับ NTSC ประโยชน์หลักก็เพื่อให้ใช้งานได้ดีกับโทรทัศน์แบบขาวดำ โดยที่ Y คือความสว่างของภาพ ส่วน I และ Q จะเป็นสัญญาณที่เข้ารหัสสีของภาพไว้ดังนั้นสำหรับโทรทัศน์ขาวดำนั้นสามารถใช้ค่า Y ค่าเดียวก็สามารถได้ภาพที่สมบูรณ์

### 2.5.1.5 ระบบสีแบบ XYZ

เป็นระบบสีที่ CIE ได้กำหนดให้มีขึ้นเป็นมาตรฐานเนื่องจากในระบบสี RGB ยังไม่สามารถสร้างสีที่เป็นไปได้ทั้งหมดดังนั้นจึงได้มีตั้งระบบสี XYZ ซึ่งเป็นระบบสีที่สมมุติขึ้นเพื่อให้สามารถแปลงระบบสีจากระบบหนึ่งไปเป็นอีกระบบหนึ่งได้

#### 2.5.1.6.1 ระบบสี CIELAB หรือ ระบบ $L^*a^*b^*$

เป็นค่าสีที่ถูกกำหนดขึ้นโดย CIE เพื่อให้เป็นมาตรฐานการวัดสีทุกรูปแบบครอบคลุมทุกสี ทั้งระบบ RGB และ CMYK และใช้กับสีที่เกิดจากอุปกรณ์ทุกอย่าง ไม่ว่าจะเป็น Monitor, Printer หรือ Scanner โดยที่ค่า L (Luminance) คือ ความสว่าง, a คือ ส่วนประกอบที่แสดงการไล่สีจากสีเขียวไปยังสีแดง, b คือ ส่วนประกอบที่แสดงการไล่สีจากสีน้ำเงินไปยังสีเหลือง

### 2.5.2 แบบสมการอัตราการเปลี่ยนแปลงสี

คุณภาพด้านสีเป็นปัจจัยหลักที่ใช้เป็นเกณฑ์ประเมินผลสัมฤทธิ์ของผลการคำนวณสภาวะการบรรจุและแบบบรรจุภัณฑ์ปรับแต่งบรรยากาศสำหรับผักและผลไม้สดที่มีต่อการยืดอายุการเก็บรักษา คุณภาพด้านสีแบ่ง ออกเป็นคุณลักษณะค่าสีเฉพาะจุด และคุณลักษณะทางสีโดยรวม หากทราบถึงกระบวนการเปลี่ยนแปลงหรืออัตราการเปลี่ยนแปลงสีของผักและผลไม้สดที่บรรจุในบรรจุภัณฑ์ปรับแต่งบรรยากาศแล้วจะเป็นผลคืออย่างยิ่งต่อการวิจัยและพัฒนาบรรจุภัณฑ์ปรับแต่งบรรยากาศ ซึ่งจะทำให้การออกแบบบรรจุภัณฑ์ปรับแต่งบรรยากาศได้ผลสัมฤทธิ์ที่ดีมากขึ้น ด้วยเหตุนี้จึงมีงานศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงสีของผักและผลไม้สดที่บรรจุในบรรจุภัณฑ์ปรับแต่งบรรยากาศเกิดขึ้นมาก ทั้งนี้ยังมีงานวิจัยน้อยมากที่มุ่งหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการหายใจหรืออัตราการแลกเปลี่ยนก๊าซกับอัตราการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะทางคุณภาพ โดยเฉพาะคุณลักษณะการเปลี่ยนแปลงสี

ในปี ค.ศ. 2002 Hertog และคณะได้นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ทำนายอัตราการเปลี่ยนแปลงสีของ “Hass avocado” โดย Hertog และคณะได้ทำการทดลองเก็บ Hass avocado ที่อุณหภูมิ 7°C ภายใต้สภาวะบรรยากาศปรับแต่งที่แตกต่างกัน 32 สภาวะเป็นระยะเวลา 32 วัน ทำการวัดค่าสีที่เปลี่ยนไปในทุกๆ สัปดาห์ด้วยการวัด hue angle (H) โดย chroma meter (model CR200, Minalto, Osaka, Japan) Hertog และคณะได้นำเสนอผลการทดลองในรูปของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ให้ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการแลกเปลี่ยนก๊าซและอัตราการเปลี่ยนแปลงของสีดังปรากฏในสมการที่ (2.20) (2.21) และ (2.22) ตามลำดับ

$$H_t = H_{+\infty} + \frac{H_{-\infty} - H_{+\infty}}{1 + e^{k_H t} \cdot (H_{-\infty} - H_0) / (H_0 - H_{+\infty})} \quad (2.20)$$

เมื่อ

$$H_{-\infty} = (1 + C) \cdot H_0 \quad (2.21)$$

ค่า  $H_{-\infty}$ ,  $H_{+\infty}$  และ  $H_0$  ถูกนำเสนอในหน่วย ( $^{\circ}$ ) โดยค่า  $H_0$  ถูกตั้งให้มีค่าเท่ากับ  $122.2^{\circ}$  ค่าคงที่  $C$  มีค่าประมาณ 0.00194 และค่า  $H_{+\infty}$  มีค่าเท่ากับ  $35^{\circ}$  สำหรับค่า  $k_H$  จะมีค่าแปรผันกับอัตราการแลกเปลี่ยนแก๊สซึ่งถูกนำเสนอไว้ในสมการที่ (2.22) ดังนี้

$$k_H = k_H^{RA} \frac{r_{O_2}^{OX,MA}}{r_{O_2}^{OX,RA}} + \frac{k_H^f}{1 + O_2 / Km_f} \quad (2.22)$$

โดยที่  $r_{O_2}^{OX,MA}$  คือ อัตราการใช้  $O_2$  โดย oxidative phosphorylation ที่สภาวะปรับแต่งบรรยากาศ  $r_{O_2}^{OX,RA}$  คืออัตราการใช้  $O_2$  โดย oxidative phosphorylation ในสภาวะอากาศปกติ ค่า  $k_H^f$  อัตราการเปลี่ยนแปลงสูงสุดภายใต้สภาวะการหายใจที่ไม่ใช้อากาศและค่า  $Km_f$  คือค่าคงที่ของ Michaelis สำหรับการยับยั้งกระบวนการหายใจแบบไม่ใช้อากาศโดยใช้  $O_2$  เป็นตัวยับยั้ง ต่อมาในปี ค.ศ. 2004 Zhou et.al. ได้นำเสนอผลการศึกษาดังกล่าวถึงความสัมพันธ์ระหว่างการยอมรับของผู้บริโภคต่ออายุการเก็บรักษาผักกาดหอมพร้อมบริโภคด้วยการวิเคราะห์ภาพถ่ายดิจิทัล การศึกษาวิจัยดังกล่าวชี้ให้เห็นถึงความสำคัญของสีที่มีอิทธิพลต่อการบริโภคผักสดของผู้บริโภคเป็นอย่างมาก หลังจากนั้นในปี ค.ศ. 2006 Bobelyn และคณะ ได้ศึกษาการเกิดเปลี่ยนแปลงสีในเห็ดซึ่งเป็นผลมาจากอิทธิพลของปฏิกิริยาทางเอ็นไซม์ การทดลองกระทำโดยเก็บเห็ดในห้องเย็นที่มีอุณหภูมิ 4  $^{\circ}C$  และ 18  $^{\circ}C$  ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 90% โดยทำการเก็บรักษาเห็ดในสภาวะอุณหภูมิและระยะเวลาการเก็บรักษาที่แตกต่างกัน 3 ลักษณะต่างๆดังนี้ เก็บที่อุณหภูมิ 18  $^{\circ}C$  เป็นระยะเวลา 2 วัน จากนั้นเก็บรักษาที่ 12  $^{\circ}C$  เป็นระยะเวลา 2 วัน สุดท้ายเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4  $^{\circ}C$  เป็นระยะเวลา 4.5 วัน จากนั้นทำการเปลี่ยนรูปแบบการเก็บรักษาเป็นเก็บรักษาที่ 4  $^{\circ}C$  เป็นระยะเวลา 4 วัน เก็บรักษาที่ 12  $^{\circ}C$  เป็นระยะเวลา 2 วันและเก็บรักษาที่ 18  $^{\circ}C$  เป็นระยะเวลา 3.5 วัน สุดท้ายการเก็บรักษาเป็นเก็บรักษาที่ 18  $^{\circ}C$  เป็นระยะเวลา 2 วัน เก็บรักษาที่ 4  $^{\circ}C$  เป็นระยะเวลา 4 วันและเก็บรักษาที่ 12  $^{\circ}C$  เป็นระยะเวลา

3.5 วัน Bobelyn และคณะ ได้นำเสนอผลการทดลองที่ได้ในรูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเปลี่ยนแปลงสีในรูปของความสว่างของเห็ดต่อเวลาซึ่งมีรายละเอียดดังแสดงในสมการที่ (2.23)

$$\frac{dL^*}{dt} = -k_{brown} L^{*n} \quad (2.23)$$

โดยที่  $n$  คือ ลำดับการเกิดปฏิกิริยา,  $L^*$  คือความสว่างและ  $k_{brown}$  มีค่าแปรผันตามอุณหภูมิ ซึ่งเป็นไปตามสมการของ Arrhenius ดังแสดงในสมการที่ (2.24)

$$k = k_{ref} e^{(E_a/R_{gas})(1/T_{ref}) - (1/T)} \quad (2.24)$$

$k_{ref}$  คือ ค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิอ้างอิงในหน่วย( $day^{-1}$ ),  $T_{ref}$  คืออุณหภูมิอ้างอิงในหน่วย (K),  $E_a$  คือ energy of activation ในหน่วย ( $J mol^{-1}$ ) และ  $R_{gas}$  คือค่าคงที่ของก๊าซมีค่าเท่ากับ  $8.314 J mol^{-1} K^{-1}$

ความพยายามในการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สามารถทำนายอัตราการเปลี่ยนแปลงสีของผักผลไม้ได้มีมาอย่างต่อเนื่อง Belloso และคณะ (2007) ได้นำเสนอแบบจำลองการหายใจและแบบจำลองการเปลี่ยนแปลงสีของแตงโมหั่น โดยแบบจำลองการหายใจได้ประยุกต์ใช้แบบจำลองของ Weibull ดังแสดงในสมการที่ (2.25) ถึง (2.26)

$$n_{O_2(t)} = n_{O_2(i)} \times e^{-\left(\frac{t}{\tau}\right)^\beta} \quad (2.25)$$

$n_{O_2(t)}$  คือ จำนวนโมลของ  $O_2$  ที่อยู่ในบรรจุภัณฑ์ ณ เวลาใดๆ,  $n_{O_2(i)}$  คือ จำนวนโมลของ  $O_2$  ที่อยู่ในบรรจุภัณฑ์ ณ เวลาเริ่มต้น,  $\tau$  scale factor ในหน่วยวันและ  $\beta$  คือค่าคงที่

$$n_{CO_2(t)} = \frac{A_{max}}{1 + e^{[k \times ((t/2) - t) ]}} \quad (2.26)$$

$n_{CO_2(t)}$  คือจำนวนโมลของ  $CO_2$  ที่อยู่ในบรรจุภัณฑ์ ณ เวลาใดๆ,  $A_{max}$  คือจำนวนโมลสูงสุดของ  $CO_2$  ที่อยู่ในบรรจุภัณฑ์,  $k$  คือ ความเร็วในการสะสม  $CO_2$  ในหน่วยวัน,  $t/2$  คือ เวลาที่ใช้ในการทำให้จำนวน โมลของ  $CO_2$  มีปริมาณครึ่งหนึ่งของปริมาณสูงสุด การคำนวณหา



อัตราการหายใจทำได้โดยสมมูลมวลของความเข้มข้นของ  $O_2$  และ  $CO_2$  ในบรรจุภัณฑ์ซึ่งมีสมการดังสมการที่ (2.27) และ (2.28)

$$R_{O_2} = \left[ -\frac{d(n_{O_2(t)})}{dt} + \left[ S \times P_{O_2} \times (y_{O_2}^e - y_{O_2(t)}) \right] \right] / m \quad (2.27)$$

$$R_{CO_2} = \left[ -\frac{d(n_{CO_2(t)})}{dt} + \left[ S \times P_{CO_2} \times (y_{CO_2(t)} - y_{CO_2}^e) \right] \right] / m \quad (2.28)$$

$R_{O_2}$  ( $O_2$  mol  $kg^{-1}$  day $^{-1}$ ) และ  $R_{CO_2}$  ( $CO_2$  mol  $kg^{-1}$  day $^{-1}$ ) คืออัตราการใช้  $O_2$  และอัตราการเกิด  $CO_2$  ตามลำดับ  $S$  คือพื้นที่ผิวของบรรจุภัณฑ์ในหน่วย ( $m^2$ ),  $P_{O_2}$  ( $O_2$  mol  $m^{-2}$  day $^{-1}$  kPa $^{-1}$ ) และ  $P_{CO_2}$  ( $CO_2$  mol  $m^{-2}$  day $^{-1}$  kPa $^{-1}$ ) คือ ค่าการซึมผ่านแผ่นฟิล์มของ  $O_2$  และ  $CO_2$  ตามลำดับ,  $y_{O_2(t)}$  และ  $y_{CO_2(t)}$  คือค่าแรงดันย่อยของ  $O_2$  และ  $CO_2$  ภายในบรรจุภัณฑ์ ณ เวลาใดในหน่วย kPa ตามลำดับ,  $y_{O_2}^e$  และ  $y_{CO_2}^e$  คือค่าแรงดันย่อยของ  $O_2$  และ  $CO_2$  ที่อยู่ภายนอกบรรจุภัณฑ์ในหน่วย kPa ตามลำดับ และ  $m$  คือ มวลของผลิตภัณฑ์

สำหรับแบบจำลองการเปลี่ยนแปลงสี Bellosso et.al. ได้นำเสนอในรูปแบบ whiteness index (WI) ซึ่งแสดงได้ดังนี้

$$WI = 100 - \sqrt{\left[ (100 - L^*)^2 + (a^*)^2 + (b^*)^2 \right]} \quad (2.29)$$

เมื่อตัวปัจจัย ทางสี  $L^*$  (lightness),  $a^*$  (red-green) และ  $b^*$  (yellow-blue) สามารถหาได้จากการสะท้อนของแสง

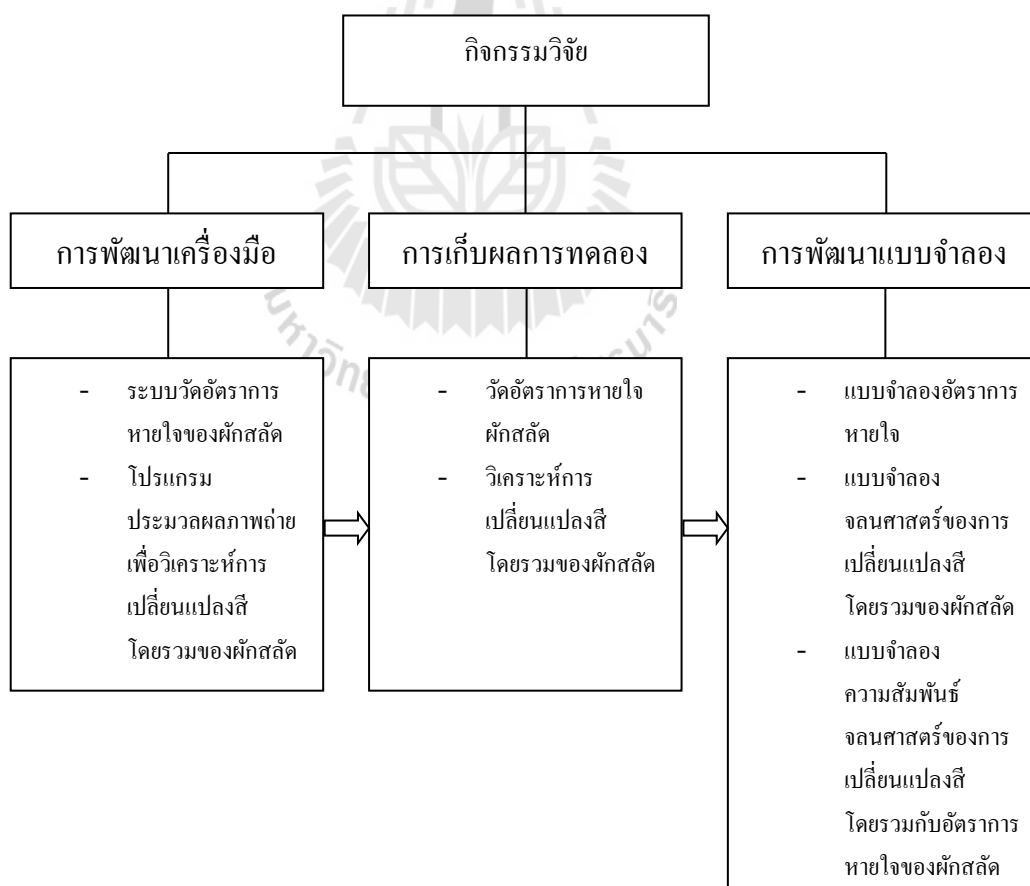
ทั้งนี้ถึงแม้จะมีงานศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการหาอัตราการเปลี่ยนแปลงสีของผักและผลไม้ ออกมาอย่างต่อเนื่อง แต่จากการค้นคว้าข้อมูลพบว่า การเปลี่ยนแปลงสีที่มีการศึกษาวิจัยส่วนใหญ่เป็นการทดลองเฉพาะจุด (spot test) ซึ่งผลที่ได้ทำให้ทราบเพียงว่าผักหรือผลไม้ที่นำมาทดสอบนั้นเป็นสีอะไรเท่านั้น แต่การทดสอบดังกล่าวยังไม่สามารถเชื่อมโยงความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนสีโดยรวมกับการยอมรับหรือไม่ยอมรับผลิตภัณฑ์นั้นๆ ของมนุษย์ได้ นอกจากนี้แล้วงานวิจัยส่วนใหญ่ยังกระทำกับผักหรือผลไม้ชนิดเดียว แต่เนื่องด้วยปัจจุบันการบริโภคผักสดผสมผักหลายชนิดเป็นที่นิยมของผู้บริโภคเป็นอย่างมาก หากสามารถสร้างแบบจำลองที่

สามารถทำนายความสัมพันธ์ของอัตราการหายใจกับอัตราการเปลี่ยนแปลงสี โดยรวมของผักสลัด ผสมผักหลายชนิดได้จะเป็นประโยชน์ต่อการออกแบบบรรจุภัณฑ์ปรับแต่งบรรยากาศสำหรับผักสดและผักสดแปรรูปเล็กน้อยเป็นอย่างมาก



### บทที่ 3 วัสดุและวิธีการทดลอง

การพัฒนาแบบจำลองจลนศาสตร์ความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงสี โดยรวมกับอัตราการหายใจของผักสลัดภายใต้งานวิจัยนี้ประกอบไปด้วยส่วนงาน 3 ส่วนหลักคือ (1) การพัฒนาเครื่องมือสำหรับวัดอัตราการหายใจของผักสลัดและเครื่องมือสำหรับวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมของผักสลัด (2) การเก็บผลการทดลอง (3) การพัฒนาแบบจำลองความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงสี โดยรวมกับอัตราการหายใจของผักสลัด โดยความเชื่อมโยงของงานวิจัยแต่ละส่วนนั้น ได้ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 3.1 สำหรับรายละเอียดของงานในแต่ละส่วนจะถูกแสดงในหัวข้อย่อยถัดไป



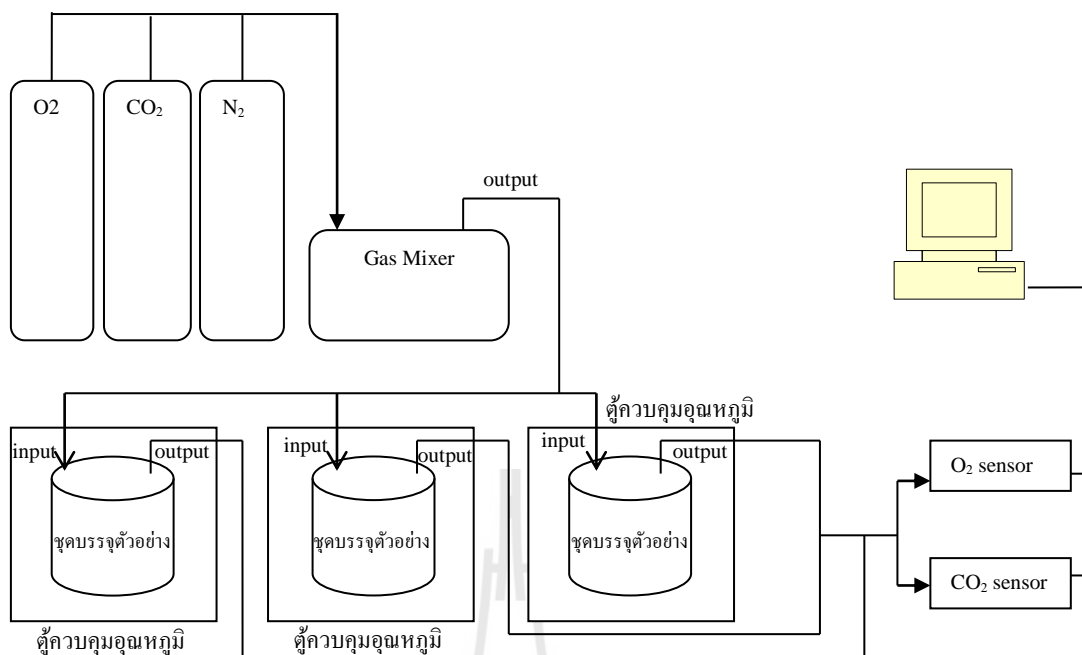
รูปที่ 3.1 ความเชื่อมโยงของกิจกรรมวิจัย

### 3.1 การพัฒนาเครื่องมือ

เครื่องมือหลักที่พัฒนาขึ้นภายใต้งานวิจัยนี้ประกอบไปด้วยเครื่องมือหลักจำนวน 2 ชิ้น คือ (1) ระบบวัดอัตราการหายใจสำหรับฝึกและผลไม้สด (2) โปรแกรมประมวลผลภาพสำหรับวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมของผักสด โดยรายละเอียดของเครื่องมือแต่ละชิ้นมีดังต่อไปนี้

#### 3.1.1 ระบบวัดอัตราการหายใจสำหรับฝึกและผลไม้สด

ระบบวัดอัตราการหายใจสำหรับฝึกสดที่สร้างขึ้นภายใต้งานวิจัยนี้ได้ถูกออกแบบให้สามารถศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิและอิทธิพลของสัดส่วนความเข้มข้นของแก๊สผสมที่มีผลต่ออัตราการหายใจของผักสดได้ เนื่องจากปัจจัยทั้งสองเป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่ออัตราการหายใจของผักสด นอกจากนี้ระบบยังถูกออกแบบให้สามารถทำงานได้โดยอัตโนมัติซึ่งจะทำให้สามารถวัดอัตราการหายใจของผักสดได้สะดวกขึ้น รวมถึงระบบได้ออกแบบให้สามารถวัดอัตราการหายใจได้อย่างรวดเร็วโดยใช้เครื่องวิเคราะห์แก๊สที่มีความละเอียดและความไวในการวิเคราะห์ผลสูง โดยระบบที่พัฒนาขึ้นนี้ประกอบไปด้วยอุปกรณ์หลักคือ เครื่องผสมแก๊ส เครื่องวิเคราะห์แก๊ส CO<sub>2</sub> เครื่องวิเคราะห์แก๊ส O<sub>2</sub> แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สออกซิเจน แก๊สไนโตรเจน ชุดบรรจุตัวอย่าง ตู้ควบคุมอุณหภูมิ คอมพิวเตอร์สำหรับเก็บข้อมูลและควบคุมการทำงาน ระบบวาล์ว และระบบควบคุมการปิดเปิดวาล์วโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งแผนผังการติดตั้งระบบวัดอัตราการหายใจถูกแสดงไว้ในรูปที่ 3.2 ส่วนระบบที่ได้รับการติดตั้งจริงถูกแสดงไว้ในรูปที่ 3.3 สำหรับรายละเอียดและหน้าที่ของอุปกรณ์หลักจะถูกแสดงในหัวข้อย่อยถัดไป



รูปที่ 3.2 แผนผังการติดตั้งระบบวัดอัตราการหายใจสำหรับพืชและผลไม้สด



รูปที่ 3.3 ระบบวัดอัตราการหายใจสำหรับพืชและผลไม้สด

### 3.1.1.1 เครื่องผสมแก๊ส

เครื่องผสมแก๊สทำหน้าที่ผสมแก๊สให้ได้สัดส่วนตามที่ต้องการเพื่อใช้สำหรับศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของแก๊สผสมต่ออัตราการหายใจของผักสลัด โดยงานวิจัยนี้ได้เลือกเครื่องผสมแก๊สของบริษัท WITT-GasTechnik รุ่น KM 300-3M ดังแสดงในรูปที่ 3.4 โดยเครื่องผสมแก๊สดังกล่าวสามารถผสมแก๊สได้ 3 ชนิดคือ แก๊สออกซิเจน แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และแก๊สไนโตรเจน ตามลำดับ



รูปที่ 3.4 เครื่องผสมแก๊ส

### 3.1.1.2 เครื่องวิเคราะห์แก๊ส CO<sub>2</sub>

เครื่องวิเคราะห์ CO<sub>2</sub> ทำหน้าที่วิเคราะห์แก๊ส CO<sub>2</sub> ที่ปรากฏในระบบวัดอัตราการหายใจ ซึ่งโครงการวิจัยนี้เลือกใช้เครื่องวิเคราะห์ CO<sub>2</sub> ของบริษัท Advanced Gasmitter® ประเทศเยอรมันนี รุ่น S-AGM โดยเครื่องมือมีการวัดที่ความเข้มข้น 0 – 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรและสามารถวิเคราะห์ตัวอย่างใหม่ได้ภายใน 5 วินาที รูปเครื่องวิเคราะห์แก๊ส CO<sub>2</sub> ถูกแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 เครื่องวิเคราะห์แก๊ส CO<sub>2</sub>

### 3.1.1.3 เครื่องวิเคราะห์แก๊ส O<sub>2</sub>

เครื่องวิเคราะห์ O<sub>2</sub> ทำหน้าที่วิเคราะห์แก๊ส O<sub>2</sub> ที่ปรากฏในระบบวัดอัตราการหายใจ ซึ่งโครงการวิจัยนี้เลือกใช้เครื่องวิเคราะห์ O<sub>2</sub> ของบริษัท SETNAG ประเทศฝรั่งเศส รุ่น JC48V โดยเครื่องมือมีการวัดที่ความเข้มข้น 0 – 25 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรและสามารถวิเคราะห์ตัวอย่างใหม่ได้ภายใน 1 วินาที รูปเครื่องวิเคราะห์แก๊ส O<sub>2</sub> ถูกแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 เครื่องวิเคราะห์แก๊ส O<sub>2</sub>

### 3.1.1.4 ชุดบรรจุตัวอย่าง

อุปกรณ์สำหรับบรรจุตัวอย่างฝักสลัดเพื่อวัดอัตราการหายใจได้ถูกออกแบบให้มีลักษณะเป็นโหลทรงกระบอกกวดูทำจาก stain steel มีปริมาตร 2.5 ลิตร ดังแสดงในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 ชุดบรรจุตัวอย่าง

#### 3.1.1.5 ตู้ควบคุมอุณหภูมิ

ตู้ควบคุมอุณหภูมิทำหน้าที่ควบคุมอุณหภูมิตามที่ต้องการ โดยถูกใช้เพื่อศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีผลต่ออัตราการหายใจและการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมของผักสลัด โดยงานวิจัยนี้ได้ใช้ตู้ควบคุมอุณหภูมิจำนวน 3 ตู้ ซึ่งตู้ดังกล่าวสามารถปรับตั้งอุณหภูมิได้ในย่าน 3 – 15 องศาเซลเซียสดังแสดงในรูปที่ 3.8





รูปที่ 3.8 ตู้ควบคุมความอุณหภูมิ

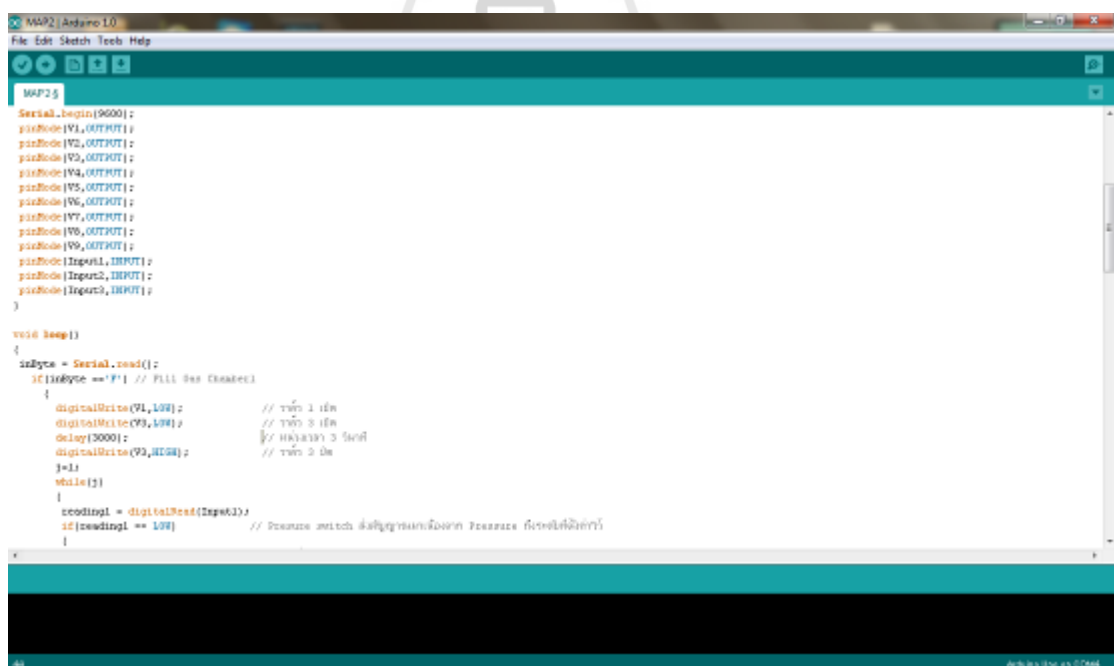
### 3.1.1.6 ระบบควบคุมการทำงานของระบบวัดอัตราการหายใจสำหรับฝึกและผลไม้สด

การควบคุมการทำงานของระบบวัดอัตราการหายใจสำหรับงานวิจัยนี้ได้ใช้ระบบไมโครคอนโทรลเลอร์ร่วมกับรีเลย์สวิตช์เป็นอุปกรณ์สำหรับควบคุมการทำงานของระบบ โดยทำการเขียนโปรแกรมเพื่อให้ระบบสามารถทำงานได้อย่างอัตโนมัติ ซึ่งโปรแกรมควบคุมการทำงานประกอบด้วย 2 ส่วนคือ ส่วนติดต่อกับผู้ใช้งาน (รูปที่ 3.9) พัฒนาโดยภาษา C# และใช้โปรแกรม SharpDevelop เวอร์ชัน 4.3.1 เป็นเครื่องมือสำหรับพัฒนา และส่วนสั่งงานไมโครคอนโทรลเลอร์ (รูปที่ 3.10) โดยงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ของ Arduino

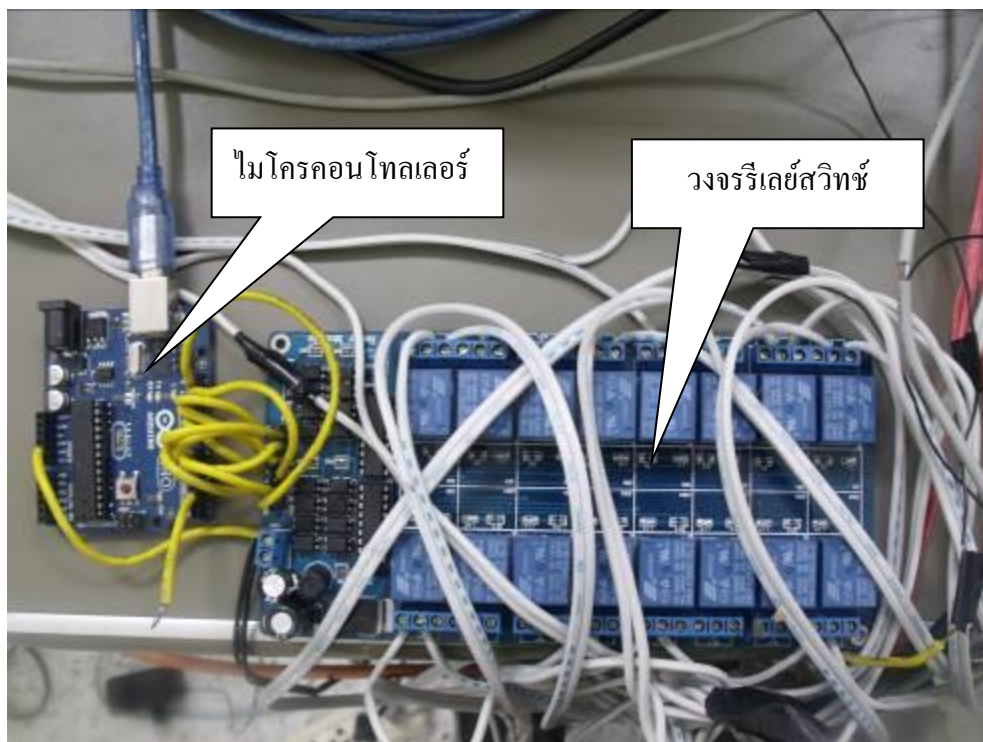
เนื่องจากมีราคาไม่แพงและซอฟต์แวร์สำหรับใช้พัฒนาโปรแกรมควบคุมนั้นเป็นแบบ open source ซึ่งทำให้ลดค่าใช้จ่ายค่าลิขสิทธิ์ซอฟต์แวร์สำหรับพัฒนาโปรแกรม รูปไมโครคอนโทรลเลอร์และรีเลย์สวิตช์แสดงในรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.9 โปรแกรมควบคุมการทำงานของระบบวัดอัตราการหายใจส่วนติดต่อผู้ใช้งาน



รูปที่ 3.10 รูปตัวอย่างโปรแกรมควบคุมการทำงานของระบบวัดอัตราการหายใจส่วนทำงานไมโครคอนโทรลเลอร์



รูปที่ 3.11 ไมโครคอนโทรลเลอร์และวงจรรีเลย์สวิตช์

### 3.1.1.7 ระบบเก็บผลการวัดอัตราการหายใจของผักสลัด

เนื่องจากระบบที่พัฒนาขึ้นภายใต้งานวิจัยนี้เป็นระบบที่สามารถทำงานได้โดยอัตโนมัติ ดังนั้นการเก็บผลการทดลองจำเป็นต้องสามารถเก็บค่าได้อย่างอัตโนมัติด้วยเช่นเดียวกัน งานวิจัยนี้เลือกจึงเลือกใช้อุปกรณ์เก็บค่าของ National Instrument (USB Data Acquisition รุ่น NI USB-6009) ร่วมกับ software Labview Express ในการเก็บข้อมูล (รูปที่ 3.12)



รูปที่ 3.12 อุปกรณ์เก็บผลการทดลอง USB Data Acquisition รุ่น NI USB-6009

### 3.1.1.8 ระบบวาล์ว

ระบบวาล์วสำหรับควบคุมการไหลของแก๊สในงานวิจัยนี้ใช้โซลินอยด์วาล์ว ชนิด 2/2 ปกติปิด วัสดุเป็นทองเหลือง

### 3.1.2 การพัฒนาโปรแกรมประมวลผลภาพถ่ายเพื่อวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมของผักสลัด

โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นภายใต้โครงการวิจัยนี้เป็นโปรแกรมที่ใช้วิเคราะห์หาความผิดปกติเด่นของผักสลัดโดยทำการวิเคราะห์ดัชนีค่าสีที่ได้จากภาพถ่าย โดยใช้โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นภายใต้โครงการวิจัยนี้ได้ใช้ภาษา C# เป็นภาษาทางคอมพิวเตอร์สำหรับการพัฒนาโปรแกรมและใช้โปรแกรม SharpDevelop เวอร์ชัน 4.3.1 เป็นเครื่องมือสำหรับการพัฒนา ซึ่งหน้าตาในส่วนติดต่อกับผู้ใช้งาน โดยสังเขปของโปรแกรมนั้นถูกแสดงไว้ในรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 ส่วนติดต่อผู้ใช้งานของโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นภายใต้โครงการวิจัยนี้

### 3.2 การเก็บผลการทดลอง

งานวิจัยนี้แบ่งการทดลองเป็น 2 ส่วนคือ การวัดอัตราการหายใจของผักสลัดและการวิเคราะห์ผลการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมของผักสลัด โดยรายละเอียดของการทดลองแต่ละส่วนนั้นจะแสดงในหัวข้อย่อยถัดไป

#### 3.2.1 การวัดปริมาณการดูดซับแก๊สในวัสดุ

เนื่องด้วยวัสดุที่นำมาประกอบเป็นระบบวัดอัตราการหายใจ เช่น ระบบท่อ ระบบวาล์ว ชุดบรรจุตัวอย่าง เป็นต้น นั้นมีความสามารถที่จะดูดซับแก๊สเข้าไปในวัสดุนั้น ๆ ได้ โดยเฉพาะวัสดุที่เป็นพอลิเมอร์ ดังนั้นก่อนทำการวัดอัตราการหายใจซึ่งเป็นการวัดระดับความเข้มข้นของแก๊สที่มีภายในระบบต้องให้มั่นใจว่าระดับความเข้มข้นของแก๊สที่จะนำไปวิเคราะห์อัตราการหายใจนั้นเป็นระดับความเข้มข้นของแก๊สที่เกิดจากการหายใจของพืชจริงมิได้เป็นผลมาจากการดูดซับแก๊สของวัสดุร่วมด้วย โดยการทดสอบการดูดซับแก๊สของวัสดุนั้นกระทำดังต่อไปนี้ ทำการปล่อยแก๊สเข้าสู่ระบบที่ระดับความเข้มข้น 21 ต่อ 0 ต่อ 79 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ( $O_2$  ต่อ  $CO_2$  ต่อ  $N_2$ ) และความเข้มข้น 5 ต่อ 1 ต่อ 94 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ( $O_2$  ต่อ  $CO_2$  ต่อ  $N_2$ ) ทำการวัดระดับความเข้มข้นของแก๊ส  $O_2$  และ  $CO_2$  ทุก ๆ 4 ชั่วโมงเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง นำค่าระดับความ

เข้มข้นของแก๊สที่ได้ไปวิเคราะห์หาปริมาณการดูดซับแก๊สของวัสดุ

### 3.2.2 การวัดอัตราการหายใจของผักสลัด

การวัดอัตราการหายใจของผักสลัดในงานวิจัยนี้ประกอบด้วยงาน 2 ส่วนงาน คือ ส่วนที่ 1 การวัดเพื่อศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิและอิทธิพลของสัดส่วนผสมของแก๊สผสมที่มีต่ออัตราการหายใจซึ่งจะทำการวัดทั้งผักสลัดชนิดเดี่ยวและผักสลัดผสมชนิด ผลลัพธ์ที่ได้จากงานส่วนนี้จะถูกใช้เพื่อตอบวัตถุประสงค์งานวิจัยข้อที่ 1 สำหรับงานในส่วนที่ 2 เป็นการวัดเพื่อศึกษาอิทธิพลของอัตราการหายใจต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพด้านสีโดยรวมโดยจะทำการวัดเฉพาะผักสลัดชนิดเดี่ยวจำนวน 1 ชนิด ผลลัพธ์ที่ได้จากงานส่วนนี้ถูกใช้เพื่อตอบวัตถุประสงค์งานวิจัยข้อที่ 2 และ 3 ตามลำดับ ซึ่งรายละเอียดของงานในแต่ละส่วนมีดังต่อไปนี้

#### 3.2.2.1 การเตรียมตัวอย่างผักสลัด

ผักสลัดกรีน โอ๊ค บัตเตอร์เฮด และผักกาดหอมถูกซื้อจากฟาร์มของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ทำการตัดแต่งและคัดแยกส่วนที่เสีย เช่น รอยชำ ใบบเหลือง เป็นต้น ออกจากส่วนอื่น ๆ จากนั้นล้างทำความสะอาดด้วยน้ำสะอาดและสลัดน้ำส่วนเกินออกจากชิ้นส่วน ผักด้วยเครื่อง Salad spinner

#### 3.2.2.2 การวัดเพื่อศึกษาอิทธิพลของสัดส่วนแก๊สผสมและอุณหภูมิต่ออัตราการหายใจของผักสลัดชนิดเดี่ยว

ทำการชั่งผักสลัดกรีน โอ๊คที่ล้างทำความสะอาดแล้วจำนวน 60 กรัม บรรจุตัวอย่างผักลงในชุดบรรจุตัวอย่าง นำชุดบรรจุตัวอย่างใส่ในตู้ควบคุมอุณหภูมิ ตั้งอุณหภูมิของตู้ควบคุมอุณหภูมิที่ 5 10 และ 15 องศาเซลเซียส ตามลำดับ จากนั้นทำการปล่อยแก๊สผสมที่สัดส่วนผสมที่ต้องการทดสอบเข้าสู่ชุดบรรจุตัวอย่างทิ้งไว้เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมงเพื่อให้ผักสลัดปรับสภาพการหายใจที่สภาวะแวดล้อมที่ต้องการทดสอบและเพื่อให้มั่นใจว่าอุณหภูมิภายในชุดทดสอบมีค่าเท่ากับอุณหภูมิที่ตั้งไว้ตอนต้น จากนั้นทำการวัดปริมาณความเข้มข้นของแก๊ส  $O_2$  และแก๊ส  $CO_2$  ที่มีอยู่ในระบบทุก ๆ 1 ชั่วโมงเป็นระยะเวลา 4 ชั่วโมง กระทำเช่นเดียวกันนี้กับแก๊สที่สัดส่วนผสมอื่น ๆ โดยสัดส่วนผสมของแก๊สผสมที่ใช้ทดสอบในงานวิจัยนี้ถูกแสดงไว้ในตารางที่ 3.1 ทำการวัดด้วยวิธีการเดียวกันนี้กับผักสลัดบัตเตอร์เฮดและผักกาดหอม ตามลำดับ

ตารางที่ 3.1 สัดส่วนแก๊สผสมที่ใช้ทดสอบวัดอัตราการหายใจของผักสลัดชนิดเดี่ยวและผักสลัดผสมชนิด

สัดส่วนผสม	O <sub>2</sub> (เปอร์เซ็นต์โดย ปริมาตร)	CO <sub>2</sub> (เปอร์เซ็นต์โดย ปริมาตร)	N <sub>2</sub> (เปอร์เซ็นต์โดย ปริมาตร)
1	20	1	79
2	15	1	84
3	10	1	89
4	5	1	94

### 3.2.2.3 การวัดเพื่อศึกษาอิทธิพลของสัดส่วนผสมของแก๊สผสมและอุณหภูมิต่ออัตราการหายใจของผักสลัดผสมชนิด

ซึ่งผักสลัดกรีน โอ๊ค บัตเตอร์เฮดและผักกาดหอมที่ล้างทำความสะอาดตามวิธีการในหัวข้อ 3.2.2.1 อย่างละ 20 กรัม ผสมผักทั้งสามชนิดลงในชุดบรรจุตัวอย่าง จากนั้นทำการวัดอัตราการหายใจเช่นเดียวกันกับวิธีการในหัวข้อ 3.2.2.2

### 3.2.2.4 การวัดเพื่อศึกษาอิทธิพลของอัตราการหายใจต่อการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมของผักสลัดชนิดเดี่ยว

ในหัวข้อนี้การวัดจะกระทำกับผักสลัดชนิดเดี่ยวโดยเลือกผักสลัดกรีน โอ๊คเป็นตัวอย่างทดสอบและทำการวัดที่สัดส่วนผสมแก๊สผสมสัดส่วนเดี่ยวคือ 20 ต่อ 1 ต่อ 79 (O<sub>2</sub> ต่อ CO<sub>2</sub> ต่อ N<sub>2</sub>) กระบวนการวัดกระทำโดย ซึ่งผักสลัดกรีน โอ๊คจำนวน 20 กรัมบรรจุตัวอย่างผักลงในชุดบรรจุตัวอย่างแล้วนำชุดบรรจุตัวอย่างใส่ในตู้ควบคุมอุณหภูมิ ตั้งอุณหภูมิของตู้ควบคุมอุณหภูมิตั้ง 5 10 และ 15 องศาเซลเซียส ตามลำดับ จากนั้นทำการปล่อยแก๊สผสมที่สัดส่วนผสมที่ต้องการทดสอบเข้าสู่ชุดบรรจุตัวอย่างทิ้งไว้เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมงเพื่อให้ผักสลัดปรับสภาพการหายใจที่สภาวะแวดล้อมที่ต้องการทดสอบและเพื่อให้มั่นใจว่าอุณหภูมิภายในชุดทดสอบมีค่าเท่ากับอุณหภูมิที่ตั้งไว้ตอนต้น จากนั้นทำการวัดปริมาณความเข้มข้นของแก๊ส O<sub>2</sub> และแก๊ส CO<sub>2</sub> ที่ปรากฏในระบบทุกๆ 4 ชั่วโมงเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมงโดยการวัดจะแบ่งเป็นการวัดแบบกลางวัน (light cycle) 12 ชั่วโมงและกลางคืน (dark cycle) 12 ชั่วโมง เมื่อครบ 24 ชั่วโมงแล้วนำตัวอย่างผักออกมาถ่ายรูปเพื่อใช้วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมต่อไป โดยกระบวนการถ่ายรูปจะถูกแสดงในหัวข้อ 3.2.3.1 ซึ่งการวัดจะกระทำเช่นเดียวกันนี้จนกระทั่งคุณภาพด้านสี



โดยรวมของตัวอย่างผ้าจะมีความเสื่อมถอยเกินกว่าจะยอมรับได้

### 3.2.3 การวิเคราะห์ผลการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมของผ้าสแล็ค

กระบวนการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมของผ้าสแล็ค ประกอบไปด้วยขั้นตอนดังนี้คือ การถ่ายรูปผ้า การวิเคราะห์ดัชนีค่าสีของผ้าสแล็ค การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงค่าสีโดยรวมของผ้าสแล็ค และการทดสอบความถูกต้องของโปรแกรมประมวลผลภาพที่พัฒนาขึ้น โดยรายละเอียดของกระบวนการต่าง ๆ นั้นมีดังต่อไปนี้

#### 3.2.3.1 การถ่ายภาพผ้าสแล็ค

ผ้าสแล็คถูกถ่ายภาพที่ความละเอียด 1024 x 786 พิกเซล ด้วยกล้องถ่ายรูปดิจิทัลยี่ห้อ FUJIFILM รุ่น FinePix S1500 ที่ระดับความสูง 20 เซนติเมตร (วัดจากตัวอย่างถึงตัวกล้อง) โดยใช้แสง D65 เป็นแหล่งกำเนิดแสง ทำการจัดเก็บไฟล์ภาพในปริภูมิสี RGB และรูปแบบไฟล์แบบ JPEG

#### 3.2.3.2 การวิเคราะห์ดัชนีค่าสี

การวิเคราะห์ดัชนีค่าสีกระทำโดยทำการแปลงภาพถ่ายผ้าสแล็คทั้งในส่วนที่ผ้ามีคุณภาพปกติและคุณภาพผิดปกติซึ่งถูกจัดเก็บไฟล์ในปริภูมิสีแบบ RGB ไปเป็นปริภูมิสีแบบ HSI ตามสมการ 3.1 ถึง 3.4 จากนั้นให้ผู้ทดสอบที่ได้รับการฝึกฝน เรียนรู้และจดจำคุณลักษณะความผิดปกติเด่นของผ้าสแล็คจนสามารถแยกแยะความผิดปกติดังกล่าวออกจากคุณลักษณะอื่นของผ้าสแล็คได้ทำการคัดแยกและบันทึกค่าสีของผ้าสแล็คที่คุณภาพปกติและคุณภาพผิดปกติเพื่อนำค่าสีที่ได้ไปเป็นดัชนีบ่งชี้ความผิดปกติของคุณภาพด้านสีโดยรวมของผ้าสแล็คต่อไป

$$\theta = \cos^{-1} \left\{ \frac{\frac{1}{2}[(R-G)+(R-B)]}{\left[ \frac{1}{4}[(R-G)^2 + (R-G)(R-B) + (R-B)^2 + (R-G)(G-B) + (R-B)(G-B) + (G-B)^2] \right]^{\frac{1}{2}}} \right\} \quad (3.1)$$

$$H = \begin{cases} \theta & \text{ถ้า } B \leq G \\ 360 - \theta & \text{ถ้า } B > G \end{cases} \quad (3.2)$$



$$S = 1 - \frac{1}{(R+G+B)} [\min(R, G, B)] \quad (3.3)$$

$$I = \frac{1}{3}(R+G+B) \quad (3.4)$$

โดยค่า  $[\min(R, G, B)]$  คือ ค่าต่ำสุดเมื่อเทียบระหว่างค่า R, G และ B

### 3.2.3.3 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงค่าสีโดยรวมของผักสลัด

การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงค่าสีโดยรวมของผักสลัดกระทำโดยทำการนับจำนวนพิกเซลของรูปผักสลัดทั้งในส่วนที่มีคุณภาพปกติและคุณภาพผิดปกติ จากนั้นนำค่าที่ได้ไปหาพื้นที่แล้วทำการคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความผิดปกติทางคุณภาพของผักสลัด ซึ่งการคำนวณพื้นที่ของผักสลัดที่ปรากฏในภาพถ่ายนั้นกระทำโดยทำการหาค่ามาตรฐานจำนวนพิกเซลต่อพื้นที่เฉลี่ยโดยการนับจำนวนพิกเซล ซึ่งค่าดังกล่าวสามารถหาได้โดยทำการถ่ายภาพรูปทรงเรขาคณิตซึ่งรู้พื้นที่แน่นอนในสถานะเดียวกันกับการถ่ายภาพผักสลัด โดยรูปทรงเรขาคณิตที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ รูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า รูปสามเหลี่ยม และรูปวงกลมตามลำดับ จากนั้นทำการนับจำนวนพิกเซลของแต่ละรูปทรง นำจำนวนพิกเซลที่นับได้หารด้วยพื้นที่จริงของรูปทรงนั้นๆ จะทำให้ได้ค่ามาตรฐานจำนวนพิกเซลต่อพื้นที่เฉลี่ย โดยค่าดังกล่าวจะถูกใช้เพื่อหาพื้นที่ของผักสลัดที่ปรากฏในภาพถ่ายต่อไป

### 3.2.3.4 การตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรม

การตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรม กระทำโดยใช้รูปทรงเรขาคณิต ซึ่งทราบพื้นที่แน่นอนในการทดสอบ โดยให้โปรแกรมทำการคำนวณพื้นที่ของรูปทรงเรขาคณิตซึ่งประกอบไปด้วย รูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า รูปสามเหลี่ยม และรูปวงกลม รูปทรงละ 5 รูปตามลำดับ ทำการเปรียบเทียบผลการคำนวณจากโปรแกรมกับพื้นที่จริงของรูปทรงที่นำมาทดสอบ

### 3.3 การพัฒนาแบบจำลองความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมกับอัตราการหายใจของผักสลัด

แบบจำลองที่ได้จากงานวิจัยนี้ประกอบไปด้วยแบบจำลอง 4 แบบด้วยกันคือ (1) แบบจำลองอัตราการหายใจของผักสลัดที่ขึ้นกับอิทธิพลของสัดส่วนผสมของแก๊สผสม (2) แบบจำลองอัตราการหายใจของผักสลัดที่ขึ้นกับอิทธิพลของอุณหภูมิ (3) แบบจำลองอัตราการหายใจของผักสลัดที่ขึ้นกับอิทธิพลของสัดส่วนผสมของแก๊สผสมและอุณหภูมิ โดยแบบจำลองทั้ง 3 แบบนั้นจะถูกพัฒนาให้ทั้งผักสลัดชนิดเดี่ยวและผักสลัดผสมชนิด (4) แบบจำลองความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมกับอัตราการหายใจของผักสลัด โดยแบบจำลองแบบที่ 4 นี้จะพัฒนาให้กับผักสลัดชนิดเดี่ยว 1 ชนิด โดยรายละเอียดการพัฒนาแบบจำลองต่าง ๆ มีดังต่อไปนี้

#### 3.3.1 การพัฒนาแบบจำลองอัตราการหายใจของผักสลัดที่ขึ้นกับอิทธิพลของสัดส่วนผสมของแก๊สผสม

แบบจำลองอัตราการหายใจที่ศึกษาอิทธิพลของสัดส่วนผสมของแก๊สผสมสามารถอธิบายได้โดยอาศัยทฤษฎีจลนศาสตร์ของเอนไซม์ซึ่งที่รู้จักกันในชื่อแบบสมการ Michaelis-Menten. โดยอัตราการใช้  $O_2$  และอัตราการสร้าง  $CO_2$  สามารถทำนายได้เป็นอิสระจากกัน ซึ่งความสัมพันธ์ดังกล่าวขึ้นกับความเข้มข้นของแก๊ส  $CO_2$  และ  $O_2$  โดยแบบสมการดังกล่าวนี้ประกอบไปด้วยสมการ 4 แบบคือ

สมการแบบ Competitive inhibition

$$R = \frac{\alpha \times y_{O_2}}{\phi \times \left( 1 + \frac{y_{CO_2}}{\gamma_c} \right) + y_{O_2}} \quad (3.5)$$

สมการแบบ Uncompetitive inhibition

$$R = \frac{\alpha \times y_{O_2}}{\phi + y_{O_2} \times \left( 1 + \frac{y_{CO_2}}{\gamma_u} \right)} \quad (3.6)$$

สมการแบบ Noncompetitive inhibition

$$R = \frac{\alpha \times y_{O_2}}{(\phi + y_{O_2}) \times \left(1 + \frac{y_{CO_2}}{\gamma_n}\right)} \quad (3.7)$$

สมการแบบ Combination of competitive and uncompetitive inhibition

$$R = \frac{\alpha \times y_{O_2}}{\phi \times \left(1 + \frac{y_{CO_2}}{\gamma_c}\right) + y_{O_2} \times \left(1 + \frac{y_{CO_2}}{\gamma_u}\right)} \quad (3.7)$$

โดยที่	$\alpha$	คือ	อัตราการหายใจสูงสุด (maximal respiration rates) (ml/kg hr)
	$y_{O_2}$	คือ	ความเข้มข้นของแก๊ส $O_2$ (เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร)
	$y_{CO_2}$	คือ	ความเข้มข้นของแก๊ส $CO_2$ (เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร)
	$\phi$	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์ของ Michaelis–Menten ณ ตำแหน่ง $\frac{\alpha}{2}$ (เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ( $O_2$ ))
	$\gamma_c$	คือ	ค่าคงที่ของการยับยั้งการหายใจด้วย $CO_2$ ของสมการแบบ competitive (เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร( $O_2$ ))
	$\gamma_u$	คือ	ค่าคงที่ของการยับยั้งการหายใจด้วย $CO_2$ ของสมการแบบ uncompetitive (เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร( $O_2$ ))
	$\gamma_n$	คือ	ค่าคงที่ของการยับยั้งการหายใจด้วย $CO_2$ ของสมการแบบ noncompetitive (เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร( $O_2$ ))

โดยงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้สมการแบบ Competitive inhibition เป็นแบบในการพัฒนาแบบจำลอง เนื่องจากผลการทดสอบอัตราการหายใจที่สภาวะ  $CO_2$  สูง พบว่า  $CO_2$  สามารถช่วยยับยั้งการใช้  $O_2$  ได้ซึ่งตรงตามหลักการของสมการแบบ Competitive inhibition

**3.3.2 การพัฒนาแบบจำลองอัตราการหายใจของผักสลัดที่ขึ้นกับอิทธิพลของอุณหภูมิ**  
แบบจำลองอัตราการหายใจที่ขึ้นกับอิทธิพลของอุณหภูมินั้นสามารถอธิบายได้โดยสมการความสัมพันธ์ของ Arrhenius ดังสมการที่ 3.8 และ 3.9 ตามลำดับ

$$R_{O_2} = R_{O_2,ref} e^{\left(\frac{-E_a}{R} \times \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}}\right)\right)} \quad (3.8)$$

$$R_{CO_2} = R_{CO_2,ref} e^{\left(\frac{-E_a}{R} \times \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}}\right)\right)} \quad (3.9)$$

โดยที่	$R$	คือ	ค่าคงที่ของแก๊ส มีค่าเท่ากับ 8.314 kJ/kmol.K
	$E_a$	คือ	activation energy (kJ/kmol)
	$T$	คือ	อุณหภูมิเก็บรักษา (K)
	$T_{ref}$	คือ	อุณหภูมิอ้างอิง (K)
	$R_{O_2,ref}$	คือ	อัตราการใช้แก๊สออกซิเจน ณ อุณหภูมิอ้างอิง (ml [O <sub>2</sub> ]/kg.hr)
	$R_{CO_2,ref}$	คือ	อัตราการสร้างแก๊สคาร์บอนไดออกซิเจน ณ อุณหภูมิอ้างอิง (ml [CO <sub>2</sub> ]/kg.hr)

**3.3.3 แบบจำลองอัตราการหายใจของผักสลัดที่ขึ้นกับอิทธิพลของสัดส่วนผสมของแก๊สผสมและอุณหภูมิ**

แบบจำลองอัตราการหายใจของผักสลัดที่ขึ้นกับอิทธิพลของอุณหภูมิและความเข้มข้นของแก๊สผสมนี้เป็นการรวมกันของสมการของ Michaelis–Menten และสมการของ Arrhenius ดังตัวอย่างสมการที่ 3.10 ซึ่งสมการที่ 3.10 นี้เป็นตัวอย่างการรวมสมการของ Michaelis–Menten แบบ competitive กับ สมการของ Arrhenius โดยสมการของ Michaelis–Menten แบบอื่นๆ นั้น ก็สมการรวมสมการได้เช่นเดียวกับสมการที่ 3.10

$$R = \frac{\alpha_{ref} \times y_{O_2}}{\phi_{ref} \times \left(1 + \frac{y_{CO_2}}{\gamma_{c,ref}}\right) + y_{O_2}} \times e^{\left[\frac{-E_a}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}}\right)\right]} \quad (3.10)$$

โดยที่ $\alpha_{ref}$	คือ	อัตราการหายใจสูงสุด ณ อุณหภูมิอ้างอิง (ml/kg hr)
$\phi_{ref}$	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์ของ Michaelis–Menten ณ ตำแหน่ง $\frac{\alpha_{ref}}{2}$ ณ อุณหภูมิอ้างอิง(เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร(O <sub>2</sub> ))
$\gamma_{c,ref}$	คือ	ค่าคงที่ของการยับยั้งการหายใจด้วย CO <sub>2</sub> ของสมการแบบ competitive ณ อุณหภูมิอ้างอิง (เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร(O <sub>2</sub> ))

### 3.3.4 แบบจำลองความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมกับอัตราการหายใจของผักสลัด

การสร้างแบบจำลองความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงสี โดยรวมกับอัตราการหายใจจะกระทำโดยทำการสังเคราะห์ผลการทดลองที่ได้จากหัวข้อ 3.2.2.4 และ 3.2.3.3 เพื่อศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงคุณภาพต่ออัตราการหายใจของผักสลัด โดยพิจารณาถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงคุณภาพที่สามารถนำมาใช้เป็นดัชนีบ่งชี้ถึงความสัมพันธ์กับอัตราการหายใจได้

## 3.4 สถานที่ทำการวิจัย

อาคารศูนย์วิจัยมันสำปะหลัง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์

เนื้อหาในบทนี้แสดงถึงผลการทดลองและวิจารณ์ผลเรื่อง แบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างจลนศาสตร์ของการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมของผักสลัดชนิดเดียวกับอัตราการหายใจ โดยเนื้อหาภายในจะประกอบไปด้วย ผลการศึกษาอิทธิพลของสภาวะบรรยากาศตัดแปร และอุณหภูมิเก็บรักษาที่มีต่ออัตราการหายใจของผักสลัดชนิดเดียว ได้แก่ ผักสลัดกรีน โอ๊ค ผักสลัดบัตเตอร์เฮด ผักกาดหอมและผักสลัดผสมชนิด ซึ่งแสดงไว้ในหัวข้อที่ 4.1 ถัดมาเป็นผลการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิ ณ สภาวะบรรยากาศปกติ ที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมและอัตราการหายใจของผักสลัดชนิดเดียว โดยเนื้อหาในส่วนนี้แสดงไว้ในหัวข้อที่ 4.2 และเนื้อหาในส่วนสุดท้ายเป็นการพัฒนาแบบจำลอง ซึ่งจะประกอบไปด้วยแบบจำลองอัตราการหายใจที่ขึ้นกับสัดส่วนของแก๊สผสมและอุณหภูมิ แบบจำลองอัตราการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวม และแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมกับอัตราการหายใจ ซึ่งรายละเอียดจะถูกแสดงในหัวข้อที่ 4.3 โดยรายละเอียดของแต่ละส่วนมีดังต่อไปนี้

#### 4.1 ผลการวัดอัตราการหายใจของผักสลัด

##### 4.1.1 การวัดปริมาณการดูดซับแก๊สในวัสดุภายในระบบวัดอัตราการหายใจของผักและผลไม้

ผลการทดสอบการดูดซับแก๊สของวัสดุภายในระบบวัดอัตราการหายใจของผักและผลไม้ถูกแสดงไว้ในตารางที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาผลการทดสอบจากตารางดังกล่าวพบว่าระดับความเข้มข้นของแก๊ส ณ เวลาต่าง ๆ นั้นมีค่าคงที่ทั้งในส่วนของแก๊ส  $O_2$  และแก๊ส  $CO_2$  ซึ่งผลดังกล่าวนี้สามารถบ่งชี้ได้ว่าในช่วงระยะเวลาภายใน 24 ชั่วโมงการดูดซับแก๊สของวัสดุภายในระบบวัดอัตราการหายใจมีค่าน้อยมากจนเครื่องมือตรวจวัดความเข้มข้นของแก๊สไม่สามารถตรวจวัดได้ ดังนั้นจึงมั่นใจได้ว่าระดับความเข้มข้นของแก๊สที่เปลี่ยนภายในระบบวัดอัตราการหายใจนั้นมาจากการหายใจของผลิตภัณฑ์ได้เป็นผลจากการดูดซับแก๊สของวัสดุภายในระบบร่วมด้วย เหตุผลที่ทดสอบแค่ 24 ชั่วโมงเนื่องจากการทดลองวัดจริงนั้นกินระยะเวลาไม่เกิน 24 ชั่วโมงต่อ 1 ตัวอย่าง

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบการดูดซับแก๊สของวัสดุที่ระดับความเข้มข้น 21 ต่อ 0 ต่อ 79 เปอร์เซ็นต์ โดยปริมาตร (O<sub>2</sub> ต่อ CO<sub>2</sub> ต่อ N<sub>2</sub>)

Time (hr)	Temperature (°C)					
	5		10		15	
	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>
0	20.87	0.14	20.64	0.27	20.43	0.17
4	20.87	0.14	20.64	0.27	20.43	0.17
8	20.87	0.13	20.64	0.27	20.43	0.17
12	20.87	0.14	20.64	0.27	20.43	0.17
16	20.87	0.14	20.64	0.27	20.43	0.17
20	20.87	0.14	20.64	0.26	20.43	0.17
24	20.87	0.13	20.64	0.27	20.43	0.17
เฉลี่ย	20.87±0.00	0.14±0.00	20.64±0.00	0.27±0.00	20.43±0.00	0.17±0.00

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบการดูดซับแก๊สของวัสดุที่ระดับความเข้มข้น 5 ต่อ 0 ต่อ 95 เปอร์เซ็นต์ โดยปริมาตร (O<sub>2</sub> ต่อ CO<sub>2</sub> ต่อ N<sub>2</sub>)

Time (hr)	Temperature (°C)					
	5		10		15	
	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>
0	4.95	0.36	5.10	0.12	4.88	0.06
4	4.95	0.36	5.10	0.12	4.87	0.06
8	4.95	0.36	5.10	0.12	4.87	0.06
12	4.95	0.36	5.10	0.12	4.87	0.06
16	4.95	0.35	5.11	0.13	4.87	0.06
20	4.95	0.36	5.10	0.12	4.88	0.06
24	4.95	0.36	5.10	0.12	4.88	0.06
เฉลี่ย	4.95±0.00	0.36±0.00	5.10±0.00	0.12±0.00	4.87±0.00	0.06±0.00

#### 4.1.2 ผลการวัดอัตราการหายใจของผักสลัดชนิดเดี่ยวและผักสลัดผสมชนิดที่ได้รับอิทธิพลจากความเข้มข้นของแก๊สผสมและอุณหภูมิ

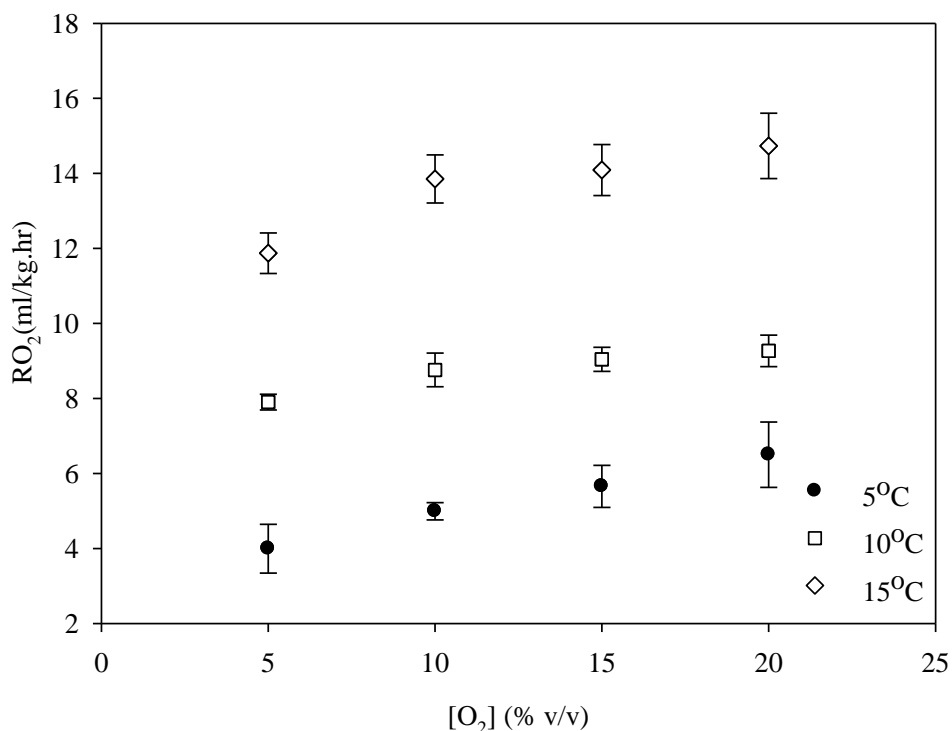
ผักสลัดที่ใช้ในงานวิจัยนี้ประกอบไปด้วยผักสลัดกรีนโอ๊ค บัตเตอร์เฮด ผักกาดหอม และผักสลัดผสมชนิดซึ่งเป็นการนำผักสลัดทั้ง 3 ชนิดที่กล่าวไว้ก่อนหน้ามาผสมกันตามลำดับ ซึ่งผักสลัดทั้งหมดนั้นเป็นผักที่นิยมรับประทานกันทั่วไปของผู้ที่นิยมรับประทานผักสลัด โดยการวัดอัตราการหายใจของผักสลัดนั้นผู้วิจัยได้ศึกษาทั้งอิทธิพลของแก๊สผสมและอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีผลต่ออัตราการหายใจ โดยการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมินั้นกระทำที่ 3 อุณหภูมิที่แตกต่างกัน คือ อุณหภูมิ 5°C 10°C และ 15°C ตามลำดับ สำหรับการศึกษาอิทธิพลของแก๊สผสมนั้นกระทำที่ความเข้มข้นของแก๊สผสมที่แตกต่างกัน 4 ระดับความเข้มข้นคือ 5 10 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของ O<sub>2</sub> ต่อ 1 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของ CO<sub>2</sub> โดยอัตราการหายใจของผักสลัดที่วัดได้ในงานวิจัยนี้เป็นกระบวนการหายใจแบบใช้ O<sub>2</sub> (aerobic process) ซึ่งรายละเอียดของผลการศึกษา มีดังต่อไปนี้

##### 4.1.2.1 อัตราการหายใจของผักสลัดกรีนโอ๊ค

อัตราการใช้แก๊ส O<sub>2</sub> ของผักสลัดกรีนโอ๊ค ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 4.1 โดยอัตราการใช้แก๊ส O<sub>2</sub> ดังกล่าวมีค่าอยู่ในช่วง 3.99 – 14.73 ml/kg.hr จากรูปแสดงให้เห็นว่าทั้งอุณหภูมิและสัดส่วนของแก๊สผสมนั้นมีอิทธิพลต่ออัตราการใช้ O<sub>2</sub> ของผักสลัดกรีนโอ๊ค โดยที่ทุกอุณหภูมิทดสอบเมื่อทำการปรับระดับความเข้มข้นให้ลดต่ำลงพบว่าสามารถลดอัตราการใช้ O<sub>2</sub> ได้ในทำนองเดียวกัน การลดอุณหภูมิเก็บรักษาก็สามารถลดอัตราการหายใจของพืชได้เช่นเดียวกัน และที่สำคัญกลับพบว่าอุณหภูมิการเก็บรักษามีอิทธิพลต่ออัตราการหายใจมากกว่าสัดส่วนของแก๊สผสม (Portela and Cantwell, 2001; Fonseca et al., 2002; Nei et al., 2006; Mahajan et al., 2009) ดังจะเห็นได้จากผลการทดลอง เช่น ที่ระดับความเข้มข้น 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของ O<sub>2</sub> ต่อ 1 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของ CO<sub>2</sub> เมื่อลดอุณหภูมิจาก 15°C ไปเป็น 5°C พบว่าสามารถลดอัตราการใช้แก๊ส O<sub>2</sub> ได้ถึง 55.87 เปอร์เซ็นต์ เป็นต้น ซึ่งเมื่อเทียบกับการลดความเข้มข้นของแก๊ส O<sub>2</sub> จาก 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ไปเป็น 5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร โดยที่ใช้อุณหภูมิการเก็บรักษาที่ 15°C เท่าเดิมพบว่าสามารถลดอัตราการใช้แก๊ส O<sub>2</sub> ได้เพียง 19.40 เปอร์เซ็นต์เท่านั้น ทั้งนี้ยังพบว่าถึงแม้อุณหภูมิการเก็บรักษาจะมีผลต่ออัตราการใช้แก๊ส O<sub>2</sub> มากกว่าระดับความเข้มข้นของแก๊สผสมก็ตาม แต่หากสามารถใช้ปัจจัยทั้งสองร่วมกันได้จะทำให้สามารถลดอัตราการใช้ O<sub>2</sub> ได้มากยิ่งขึ้น ดังเช่นการปรับสภาวะการเก็บรักษาจากระดับความเข้มข้นของแก๊สผสมที่ระดับความเข้มข้น 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของ O<sub>2</sub> ต่อ 1 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของ CO<sub>2</sub> อุณหภูมิ 15°C ไปเป็นสภาวะ

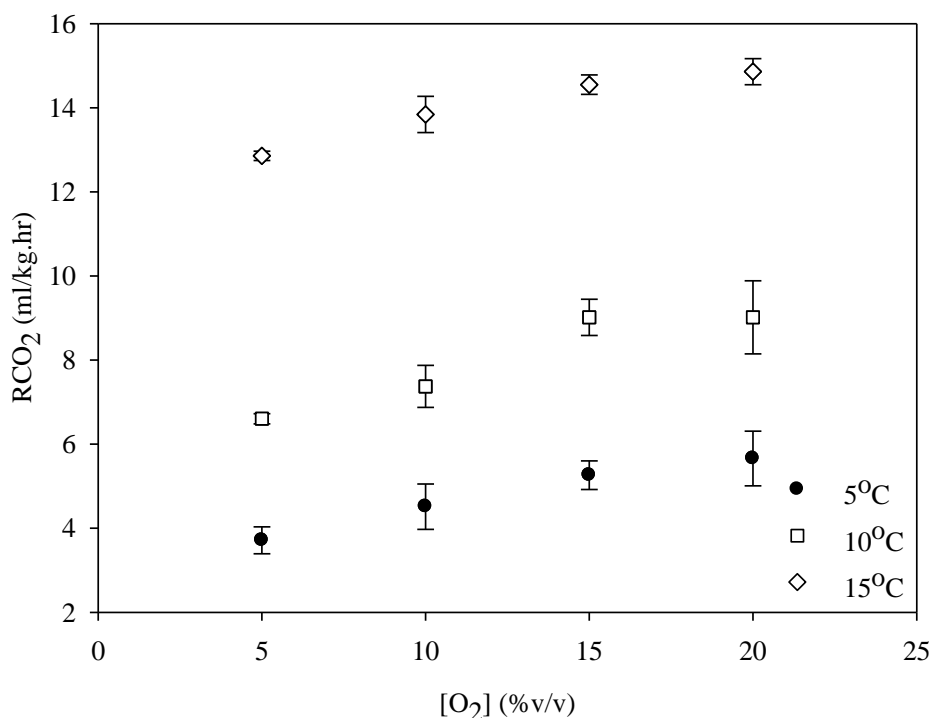


การเก็บรักษาที่ระดับความเข้มข้นของแก๊สผสมที่ 5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของ  $O_2$  ต่อ 1 เปอร์เซ็นต์ โดยปริมาตรของ  $CO_2$  อุณหภูมิ  $5^\circ C$  สามารถลดอัตราการใช้แก๊ส  $O_2$  ได้ถึง 72.89 เปอร์เซ็นต์ เป็นต้น



รูปที่ 4.1 ผลการวัดอัตราการใช้แก๊ส  $O_2$  ของผักสลัดกรีน ไอ้คินี่ที่อุณหภูมิ  $5^\circ C$   $10^\circ C$  และ  $15^\circ C$  และที่ระดับความเข้มข้นของแก๊สผสม 5 10 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของ  $O_2$  ต่อ 1 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของ  $CO_2$

สำหรับอัตราการสร้างแก๊ส  $CO_2$  ของผักสลัดกรีน ไอ้คินี่มีค่าอยู่ในช่วง 3.71 – 14.86 ml/kg.hr และพบว่ามีความสัมพันธ์กันกับอัตราการใช้  $O_2$  (รูปที่ 4.2) ซึ่งเป็นไปตามจำนวนโมลสารสัมพันธ์ของปฏิกิริยาการหายใจที่ใช้น้ำตาลเป็นแหล่งพลังงาน กล่าวคือเมื่อทำการลดความเข้มข้นของ  $O_2$  ลงพบว่าสามารถลดอัตราการสร้าง  $CO_2$  ได้ ในขณะที่การลดอุณหภูมิการเก็บรักษาที่สามารถลดอัตราการสร้าง  $CO_2$  ได้เช่นเดียวกัน

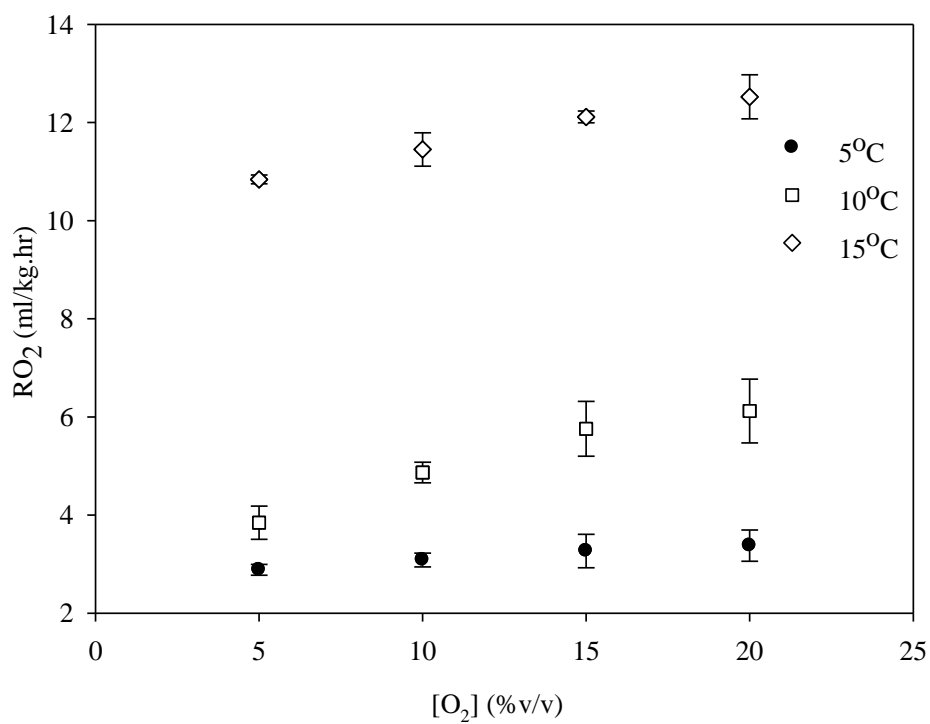


รูปที่ 4.2 ผลการวัดอัตราการสร้างแก๊ส CO<sub>2</sub> ของผักสลัดกรีนโอ๊คที่อุณหภูมิ 5 °C 10°C และ 15°C และที่ระดับความเข้มข้นของแก๊สผสม 5 10 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของ O<sub>2</sub> ต่อ 1 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของ CO<sub>2</sub>

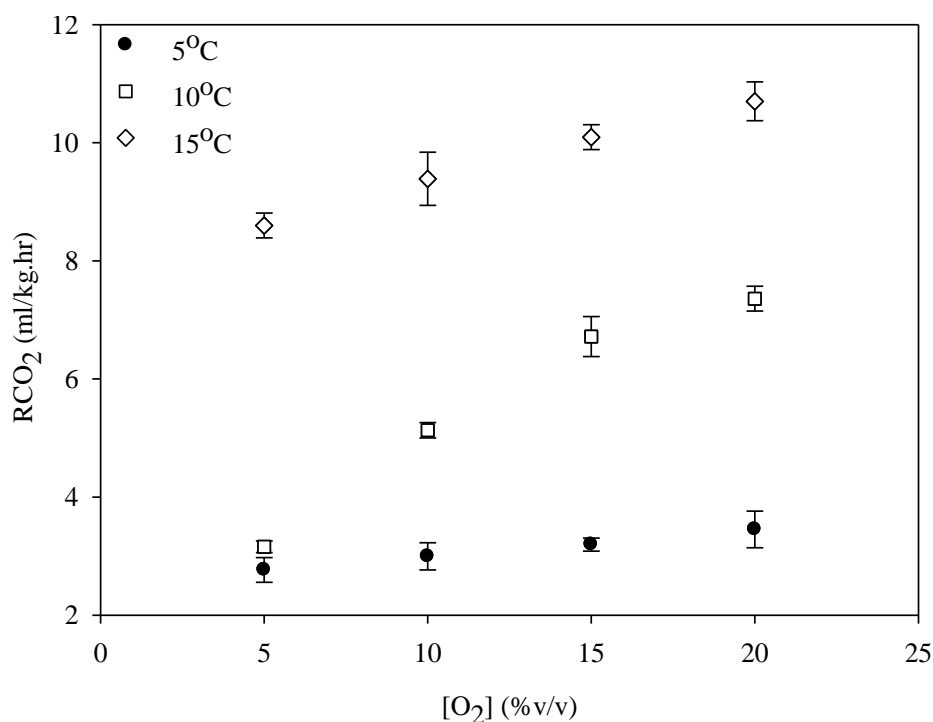
#### 4.1.2.2 อัตราการหายใจของผักสลัดบัตเตอร์เฮด

อัตราการใช้ออกซิเจน O<sub>2</sub> และ อัตราการสร้างแก๊ส CO<sub>2</sub> ของผักสลัดบัตเตอร์เฮดมีค่าอยู่ในช่วง 2.88 -12.52 ml/kg.hr และ 2.77 – 10.70 ml/kg.hr ตามลำดับ โดยผลดังกล่าวถูกแสดงไว้ในรูปที่ 4.3 และ 4.4 ตามลำดับ ซึ่งผลที่ได้มีทิศทางและแนวโน้มเช่นเดียวกับผักสลัดกรีนโอ๊ค กล่าวคือ เมื่อทำการลดความเข้มข้นของแก๊ส O<sub>2</sub> ลงสามารถลดอัตราการใช้ออกซิเจน O<sub>2</sub> และอัตราการสร้างแก๊ส CO<sub>2</sub> ได้ เช่น การลดความเข้มข้นของแก๊ส O<sub>2</sub> จาก 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ไปเป็น 5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ที่อุณหภูมิ 15°C สามารถลดอัตราการใช้ออกซิเจน O<sub>2</sub> ได้ 13.45 เปอร์เซ็นต์ และ ลดอัตราการสร้างแก๊ส CO<sub>2</sub> ได้ 19.65 เปอร์เซ็นต์ เป็นต้น นอกจากนี้ผลการทดลองยังแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิการเก็บรักษามีอิทธิพลต่ออัตราการหายใจมากกว่าระดับความเข้มข้นของแก๊สผสม เช่น ที่ระดับความเข้มข้น 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของ O<sub>2</sub> ต่อ 1 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของ CO<sub>2</sub> เมื่อลดอุณหภูมิจาก 15°C ไปเป็น 5°C พบว่าสามารถลดอัตราการใช้ออกซิเจน O<sub>2</sub>

ได้ถึง 73.04 เปอร์เซ็นต์และสามารถลดอัตราการสร้างแก๊ส CO<sub>2</sub> ได้ถึง 67.74 เปอร์เซ็นต์ เป็นต้น ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับผลที่ได้จากผักสลัดกรีนโอ๊คดั้งที่ได้กล่าวไว้แล้วก่อนหน้านี้



รูปที่ 4.3 ผลการวัดอัตราการใช้แก๊ส O<sub>2</sub> ของผักสลัดบัตเตอร์เฮดที่อุณหภูมิ 5°C 10°C และ 15°C และที่ระดับความเข้มข้นของแก๊สผสม 5 10 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของ O<sub>2</sub> ต่อ 1 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของ CO<sub>2</sub>

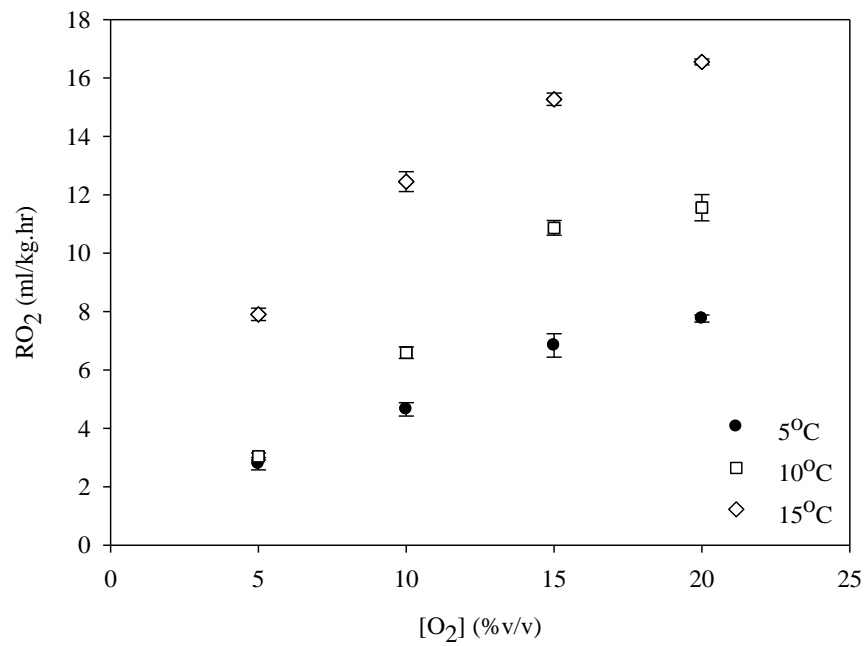


รูปที่ 4.4 ผลการวัดอัตราการสร้างแก๊ส CO<sub>2</sub> ของผักสลัดบัตเตอร์เฮดที่อุณหภูมิ 5°C 10°C และ 15°C และที่ระดับความเข้มข้นของแก๊สผสม 5 10 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของ O<sub>2</sub> ต่อ 1 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของ CO<sub>2</sub>

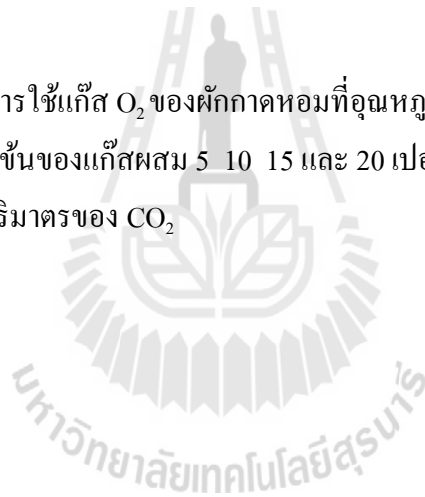
#### 4.1.2.3 อัตราการหายใจของผักกาดหอม

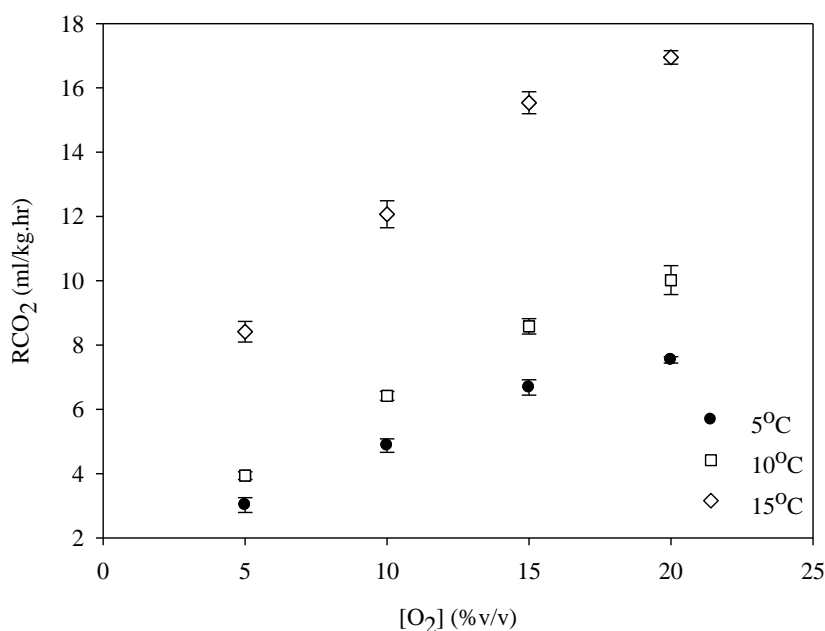
อัตราการสร้างอัตราการใช้แก๊ส O<sub>2</sub> และ อัตราการสร้าง CO<sub>2</sub> ของผักกาดหอมมีค่าอยู่ในช่วง 2.79 – 16.55 ml/kg.hr และ 3.02 – 16.95 ml/kg.hr ตามลำดับ โดยผลดังกล่าวถูกแสดงไว้ในรูปที่ 4.5 และ 4.6 ตามลำดับ ผลที่ได้มีความสอดคล้องกับอัตราการหายใจของผักสลัดกรีนโอ๊คและผักสลัดบัตเตอร์เฮด กล่าวคือ การลดความเข้มข้นของ O<sub>2</sub> และการลดอุณหภูมิการเก็บรักษามีผลต่ออัตราการหายใจและทำนองเดียวกันพบว่าอุณหภูมิการเก็บรักษามีผลต่ออัตราการหายใจมากกว่าสัดส่วนผสมของแก๊สผสม แต่อย่างไรก็ตามหากสามารถไปปัจจัยทั้งสองร่วมกันได้จะสามารถลดอัตราการหายใจของผักสลัดได้ดียิ่งขึ้นดังที่ได้กล่าวไว้แล้วก่อนหน้านี้ ทั้งนี้เมื่อพิจารณาค่าอัตราการหายใจของผักสลัดที่ใช้ในงานวิจัยนี้พบว่าผักกาดหอมจะมีอัตราการหายใจเฉลี่ยสูงที่สุด ตามด้วยผักสลัดกรีนโอ๊คและผักสลัดบัตเตอร์เฮด ตามลำดับ แต่อย่างไรก็ตามถึงแม้ผักกาดหอมจะมีอัตราการหายใจที่สูงเมื่อเทียบกับผักสลัดกรีนโอ๊คและผักสลัดบัตเตอร์เฮด แต่ค่าที่

ได้ถึงว่าไม่แตกต่างกันมาก รวมถึงเมื่อเทียบกับอัตราการหายใจของผักหรือผลไม้ชนิดอื่น ๆ ที่มีรายงานมาก่อนหน้านี้ถือว่ามีค่าอัตราการหายใจในระดับต่ำ เช่น Mahajan et al., (2009) รายงานว่าอัตราการหายใจของแครอทหั่นที่เก็บรักษาในบรรยากาศปกติ ที่อุณหภูมิ 5 - 20°C มีอัตราการใช้ O<sub>2</sub> และอัตราการสร้าง CO<sub>2</sub> เป็น  $7 \pm 2$ – $50 \pm 2$  ml/kg hr และ  $5.2 \pm 0.5$ – $51 \pm 1$  ml/kg.hr ตามลำดับ Fonseca et al., (2002) พบว่าอัตราการหายใจของผักคะน้าหั่นที่เก็บรักษาในบรรยากาศปกติ ที่อุณหภูมิ 1- 20°C อัตราการใช้ O<sub>2</sub> และอัตราการสร้าง CO<sub>2</sub> เป็น  $5.6 \pm 1.6$ – $161 \pm 22$  ml/kg.hr และ  $7.9 \pm 1.1$ – $153 \pm 4$  ml/kg.hr ตามลำดับ Lee et al., (1991) ทำการวัดอัตราการหายใจของ broccoli หั่นที่อุณหภูมิ 24 °C โดยใช้ระดับความเข้มข้นของแก๊ส O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> (เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) แยกกัน 12 สภาวะ (3.4/0.9 3.4/4.6 3.5/7.7 2.6/10.3 8.9/1.1 9.6/4.4 9.6/7.9 9.4/12.1 16.0/1.0 16.5/4.1 16.2/7.3 16.5/11.2). พบว่าอัตราการใช้ O<sub>2</sub> และอัตราการสร้าง CO<sub>2</sub> เป็น 121.4 –199.1 ml/kg.hr และ 140.6 –232.4 ml/kg.hr ตามลำดับ Torrieri et al.,(2009) รายงานว่าอัตราการหายใจของแอปเปิลสไลด์ ที่เก็บรักษาที่ระดับความเข้มข้นของแก๊ส 2 5 10 15 และ 21 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของ O<sub>2</sub> อุณหภูมิ 5 – 20 °C มีอัตราการใช้ O<sub>2</sub> อยู่ในช่วง  $3.0 \pm 0.6$  ถึง  $11 \pm 2$  ml/kg.hr จากตัวอย่างงานวิจัยที่ผ่านมาจะเห็นว่าอัตราการหายใจของผักสลัดที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีอัตราการหายใจที่ต่ำ แต่ถึงกระนั้นระบบวัดอัตราการหายใจที่พัฒนาขึ้นยังสามารถวัดอัตราการหายใจได้ รวมถึงสามารถวัดผลได้แล้วเสร็จภายในระยะเวลาสั้น (4 ชั่วโมงต่อ 1 สัดส่วนแก๊สผสม) ซึ่งการทดลองพบว่าสามารถวัดผลได้แล้วเสร็จภายใน 20 ชั่วโมงต่อการทดลอง 1 ครั้ง (1 ชนิดผัก) ซึ่งระยะเวลาที่ใช้ในการทดลองดังกล่าวนี้ถือได้ว่าการเก็บรักษาของผักที่นำมาทดสอบเป็นอายุเดียวกันทุก ๆ สภาวะทดสอบ ที่ต้องกล่าวถึงอายุการเก็บรักษาเนื่องด้วยมีรายงานวิจัยว่าอายุการเก็บรักษามีผลต่ออัตราการหายใจของพืช (Yang and Chinnnan, 1988; Smyth et al., 1998; Uchino et al., 2004; Mahajan et al., 2008; Caleb et al., 2012) ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบวัดอัตราการหายใจตามเวลาการเก็บรักษาเช่นเดียวกัน ผลที่ได้พบว่าเวลาการเก็บรักษาหรืออายุผักหลังจากตัดแต่งมีผลต่ออัตราการหายใจ ซึ่งผลที่ได้จะถูกแสดงถัดไป ดังนั้นผลการวัดอัตราการหายใจของผักสลัดที่ได้จากงานวิจัยนี้ซึ่งทำการวัดผลเพียง 20 ชั่วโมงต่อหนึ่ง 1 ตัวอย่างนั้น จึงมั่นใจได้ว่าผักยังมีอายุภายในวันเดียวกัน ซึ่งยืนยันได้ว่าอัตราการหายใจที่วัดได้เป็นผลมาจากอิทธิพลของสัดส่วนของแก๊สผสมและอุณหภูมิไม่ได้เป็นผลรวมของอายุตัวอย่างที่มากขึ้นอันเป็นผลจากการเก็บรักษาหรือการวัดอัตราการหายใจที่ใช้เวลานานหลายวัน นอกจากนี้การวัดค่าได้แล้วเสร็จภายใน 4 ชั่วโมงนั้นทำให้ระดับความเข้มข้นของแก๊สที่มีภายในระบบไม่แตกต่างจากสภาวะเริ่มต้นมากนัก จากการทดลองพบว่ามีค่าแตกต่างจากค่าตั้งต้นไม่เกิน 5% ซึ่งมั่นใจได้ว่าอัตราการหายใจที่วัดได้เป็นอัตราการหายใจที่สภาวะแก๊สที่ต้องการทดสอบจริง



รูปที่ 4.5 ผลการวัดอัตราการใช้แก๊ส O<sub>2</sub> ของผักกาดหอมที่อุณหภูมิ 5 °C 10°C และ 15°C และที่ระดับความเข้มข้นของแก๊สผสม 5 10 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของ O<sub>2</sub> ต่อ 1 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของ CO<sub>2</sub>



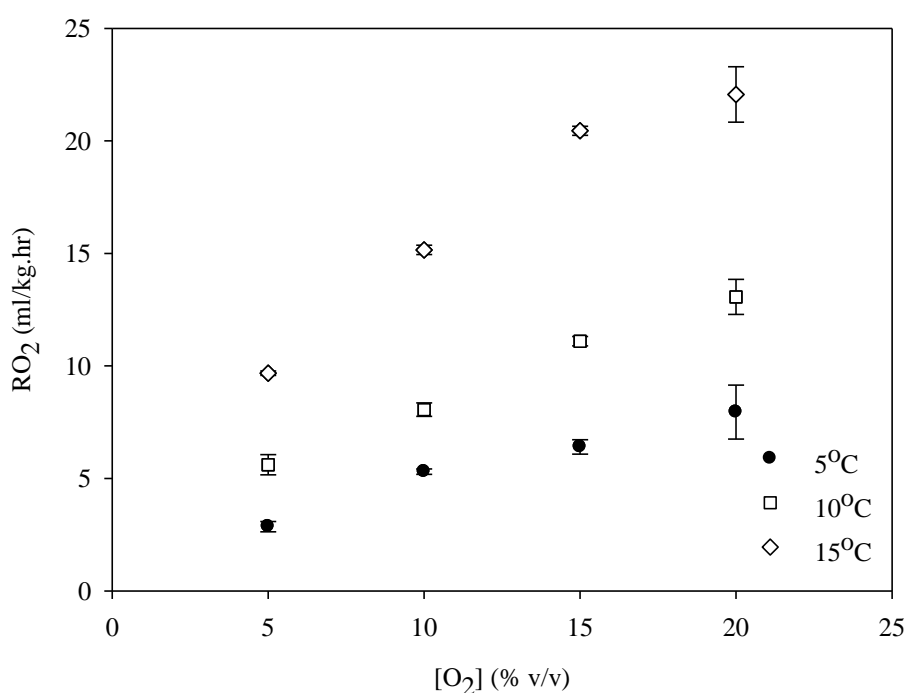


รูปที่ 4.6 ผลการวัดอัตราการสร้างแก๊ส CO<sub>2</sub> ของผักกาดหอมที่อุณหภูมิ 5°C 10°C และ 15°C และที่ระดับความเข้มข้นของแก๊สผสม 5 10 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของ O<sub>2</sub> ต่อ 1 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของ CO<sub>2</sub>

#### 4.1.2.4 อัตราการหายใจของผักสลัดผสมชนิด

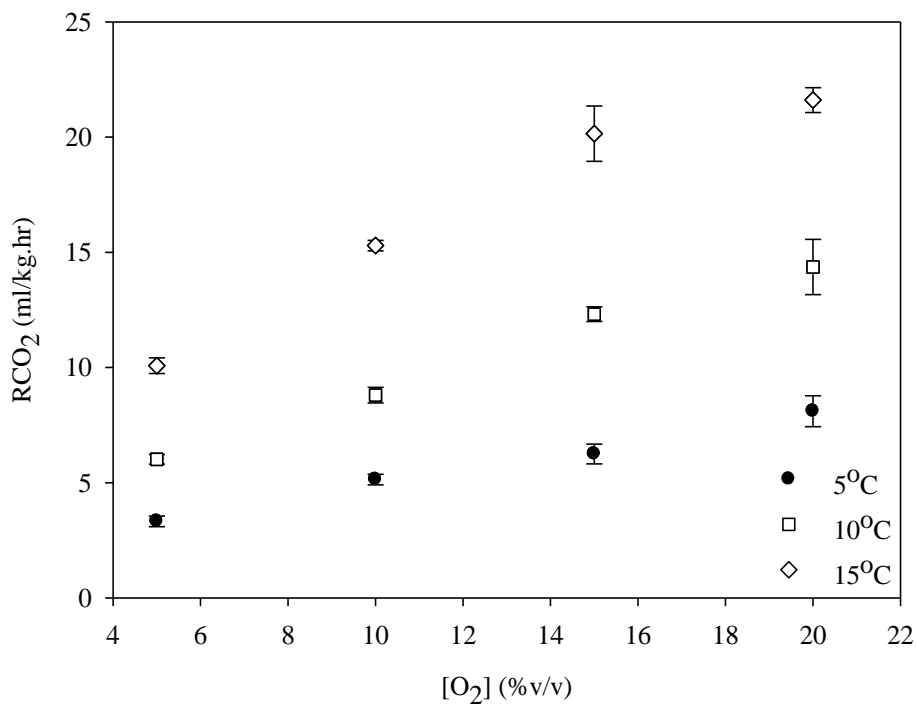
อัตราการสร้างอัตราการสร้าง O<sub>2</sub> และ อัตราการใช้ CO<sub>2</sub> ของผักสลัดผสมชนิดที่ถูกเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 5°C 10°C และ 15°C ตามลำดับที่ระดับความเข้มข้นของแก๊สผสมต่าง ๆ (5 10 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของ O<sub>2</sub> ต่อ 1 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของ CO<sub>2</sub>) มีค่าอยู่ในช่วง 2.68 – 22.06 ml/kg.hr และ 3.32 - 21.61 ml/kg.hr โดยผลดังกล่าวถูกแสดงไว้ในรูปที่ 4.7 และ 4.8 ตามลำดับ ผลที่ได้มีความสอดคล้องกับอัตราการหายใจของผักสลัดชนิดเดียวกันกล่าวคือ การลดความเข้มข้นของ O<sub>2</sub> และการลดอุณหภูมิการเก็บรักษามีผลต่ออัตราการหายใจ และ อุณหภูมิการเก็บรักษามีผลต่ออัตราการหายใจมากกว่าสัดส่วนผสมของแก๊สผสม ทั้งนี้เมื่อพิจารณาอัตราการหายใจของผักสลัดผสมชนิดพบว่าอัตราการหายใจของผักสลัดผสมชนิดนี้มีแนวโน้มใกล้เคียงกับผักกาดหอมซึ่งเป็นผักสลัดที่มีอัตราการหายใจสูงสุดในบรรดาผักที่นำมาทดสอบในงานวิจัยนี้ โดยเมื่อนำข้อมูลอัตราการหายใจทั้งของผักกาดหอมและผักสลัดผสมชนิดที่ไปวิเคราะห์ความแปรปรวน (F-test) พบว่าค่าอัตราการหายใจเฉลี่ยทั้งในส่วนของการใช้แก๊ส O<sub>2</sub> และ อัตราการสร้างแก๊ส CO<sub>2</sub> ของผักสลัดผสมชนิดกับผักกาดหอมที่ทุกอุณหภูมิการเก็บรักษามีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (P>0.05) นอกจากนี้เมื่อนำข้อมูล

อัตราการหายใจของผักสลัดผสมชนิดไปวิเคราะห์ความแปรปรวนเทียบกับผักสลัดอีก 2 ชนิดพบว่า ค่าอัตราการหายใจเฉลี่ยของผักสลัดผสมชนิดกับค่าอัตราการหายใจเฉลี่ยของผักสลัดกรีน ไอซ์ที่ทุก อุณหภูมิการเก็บรักษามีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ( $P>0.05$ ) แต่เมื่อเทียบกับผักสลัดบัตเตอร์เฮดพบว่าค่าอัตราการหายใจเฉลี่ยของผักสลัดผสมชนิดกับ ผักสลัดบัตเตอร์เฮดที่ทุกอุณหภูมิการเก็บรักษามีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ ความเชื่อมั่น 95% ( $P<0.05$ ) ซึ่งจากผลการวิเคราะห์ดังกล่าวบ่งชี้ได้ว่า ผักสลัดผสมชนิดเมื่อใช้ผัก แต่ละชนิดในปริมาณเท่ากัน (มวลเท่ากัน) อัตราการหายใจของผักสลัดผสมจะมีอัตราการหายใจ ใกล้เคียงกับผักสลัดที่หายใจสูงที่สุดในบรรดาผักที่นำมาผสมกับหรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคืออัตราการ หายใจของผักสลัดที่มีอัตราการหายใจสูงจะมีอิทธิพลต่ออัตราการหายใจของผักสลัดผสมชนิดมาก ที่สุด ดังตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 4.9 และ 4.10 ตามลำดับ

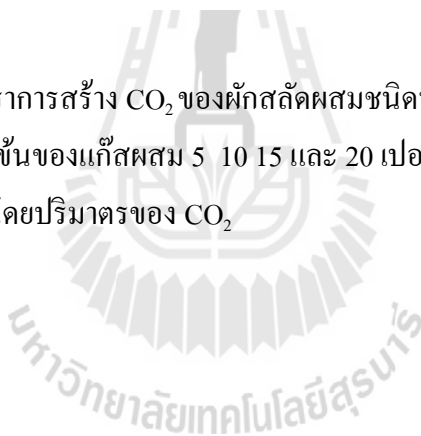


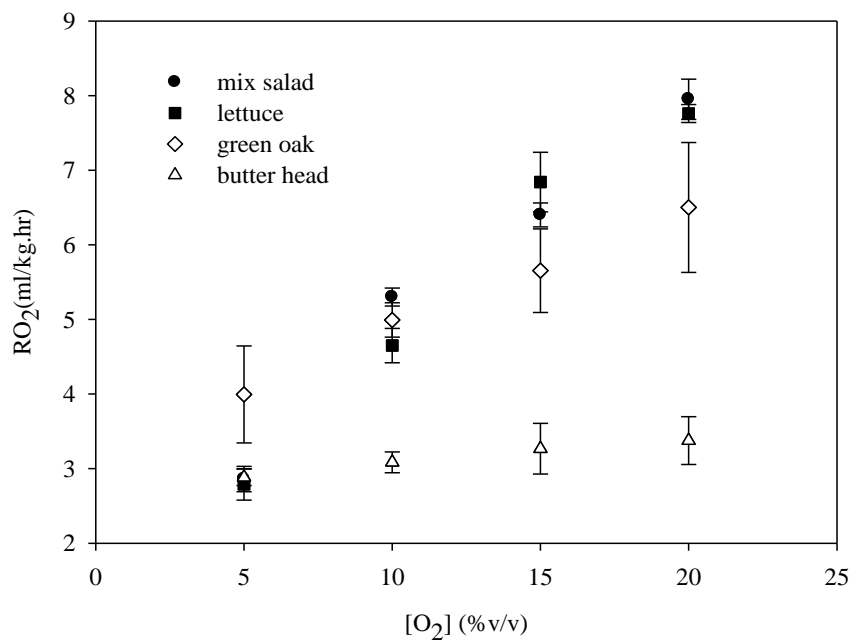
รูปที่ 4.7 ผลการวัดอัตราการใช้ O<sub>2</sub> ของผักสลัดผสมชนิดที่อุณหภูมิ 5°C 10°C และ 15°C ที่ระดับความเข้มข้นของแก๊สผสม 5 10 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของ O<sub>2</sub> ต่อ 1 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของ CO<sub>2</sub>



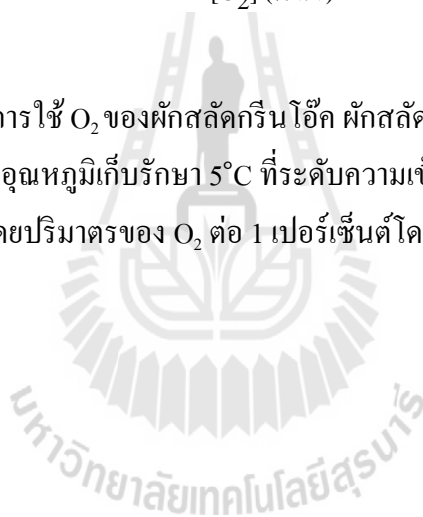


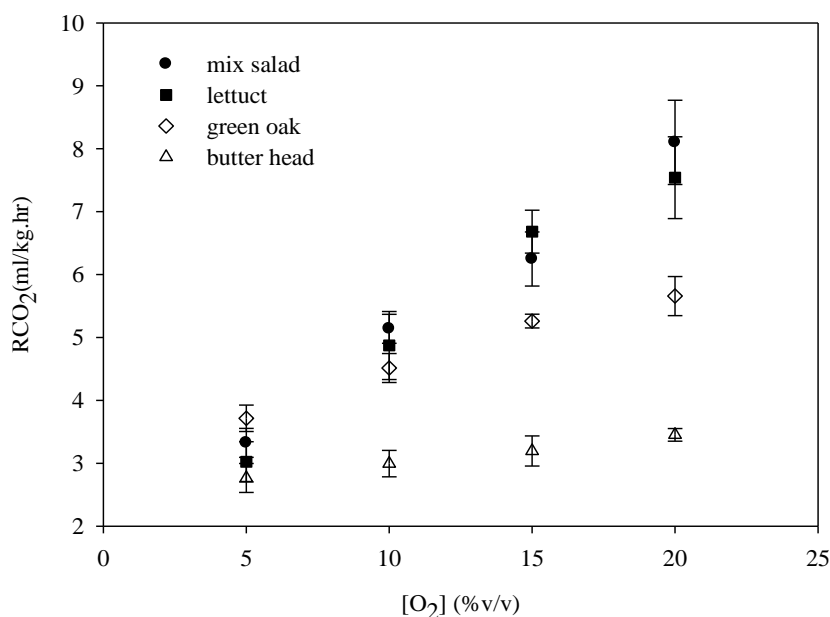
รูปที่ 4.8 ผลการทดวัดอัตราการสร้าง CO<sub>2</sub> ของผักสลัดผสมชนิดที่อุณหภูมิ 5°C 10°C และ 15°C ที่ระดับความเข้มข้นของแก๊สผสม 5 10 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของ O<sub>2</sub> ต่อ 1 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของ CO<sub>2</sub>





รูปที่ 4.9 ผลการวัดอัตราการใช้ O<sub>2</sub> ของผักสลัดกรีนโอ๊ค ผักสลัดบัตเตอร์เฮด ผักกาดหอมและผักสลัดผสมชนิดที่อุณหภูมิเก็บรักษา 5°C ที่ระดับความเข้มข้นของแก๊สผสม 5 10 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของ O<sub>2</sub> ต่อ 1 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของ CO<sub>2</sub>





รูปที่ 4.10 ผลการวัดอัตราการสร้าง CO<sub>2</sub> ของผักสลัดกรีน โอ๊ค ผักสลัดบัตเตอร์เฮด ผักกาดหอมและ ผักสลัดผสมชนิดที่อุณหภูมิเก็บรักษา 5°C ที่ระดับความเข้มข้นของแก๊สผสม 5 10 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของ O<sub>2</sub> ต่อ 1 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของ CO<sub>2</sub>

#### 4.2 ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมและอัตราการหายใจของผักสลัดชนิดเดียว

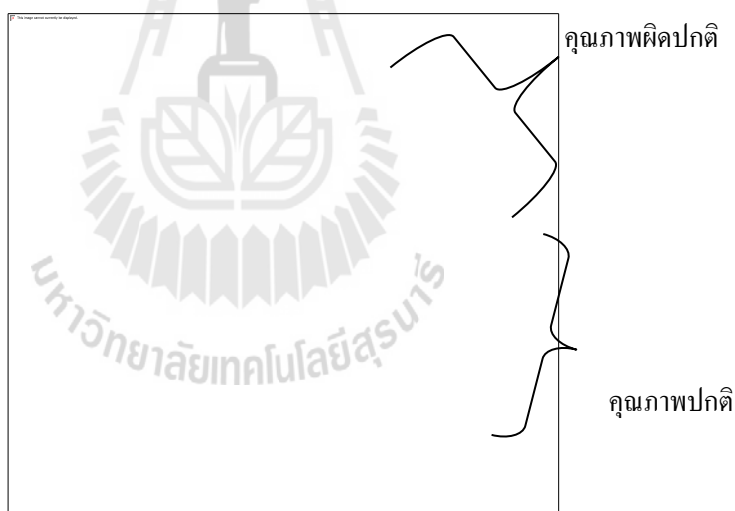
ผักสลัดกรีน โอ๊คที่ถูกเก็บรักษาที่ระดับความเข้มข้นของแก๊ส 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของ O<sub>2</sub> ต่อ 0 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของ CO<sub>2</sub> ที่อุณหภูมิ 5°C 10°C และ 15°C ถูกนำมาวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสีโดยรวม โดยใช้โปรแกรมประมวลผลภาพที่พัฒนาขึ้นภายใต้งานวิจัยนี้ โดยการวิเคราะห์ประกอบไปด้วยการหาดัชนีค่าสีที่สามารถบ่งชี้การเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมของผักสลัดได้ การหาจำนวนค่ามาตรฐานพิกเซลต่อพื้นที่เฉลี่ยซึ่งค่าดังกล่าวนี้จะถูกนำไปใช้เพื่อคำนวณพื้นที่การเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมของผักสลัดต่อไป การตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมในการคำนวณพื้นที่โดยใช้ค่าพิกเซลต่อพื้นที่เฉลี่ยที่คำนวณได้ก่อนหน้า การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมของผักสลัด และอัตราการหายใจของผักสลัดที่เปลี่ยนแปลงตามอายุการเก็บรักษาโดยรายละเอียดแต่ละหัวข้อมีดังต่อไปนี้

#### 4.2.1 การวิเคราะห์ดัชนีค่าสีโดยรวมของผักสลัด

ผลการวิเคราะห์ดัชนีค่าสีโดยรวมของผักสลัดแบ่งออกเป็นสองส่วนคือ ค่าสีโดยรวมของผักสลัดที่คุณภาพปกติและสีโดยรวมของผักสลัดที่คุณภาพผิดปกติ ผลที่ได้ถูกแสดงไว้ในตารางที่ 4.3 ค่าดังกล่าวมีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Zhou et al. (2004) ซึ่งพบว่าค่า  $H^{\circ}$  ที่บ่งชี้สีน้ำตาลที่เกิดขึ้นกับผักกาดหอมมีค่าระหว่าง 35 – 50 องศา โดยลักษณะของเฉดสีของค่าดังกล่าวถูกแสดงไว้ในรูปที่ 4.11

ตารางที่ 4.3 ช่วงค่า  $H^{\circ}$  ของผักสลัดที่คุณภาพด้านสีโดยรวมผิดปกติและคุณภาพด้านสีโดยรวมไม่ผิดปกติ

ลักษณะทางคุณภาพ	ช่วงค่า $H^{\circ}$ (องศา)
คุณภาพปกติ	80 – 135
คุณภาพผิดปกติ	35 – 79



รูปที่ 4.11 ค่า  $H^{\circ}$  ที่ใช้จำแนกคุณภาพของผักสลัด

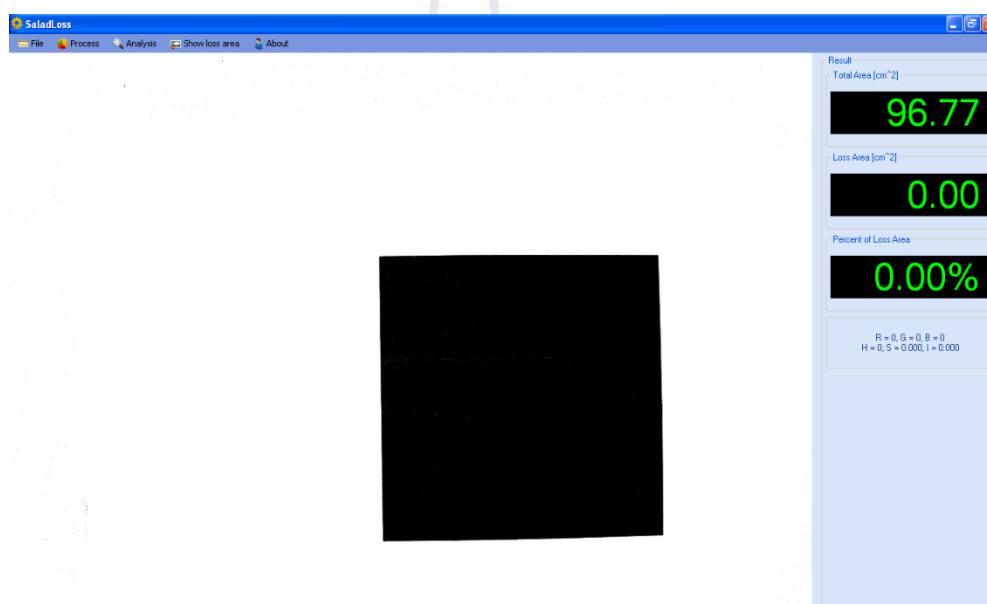
ที่มา <http://www.spotimaging.com/iq/colorspace.html> (www, 2556)

#### 4.2.2 ผลการหาค่ามาตรฐานจำนวนพิกเซลต่อพื้นที่เฉลี่ย

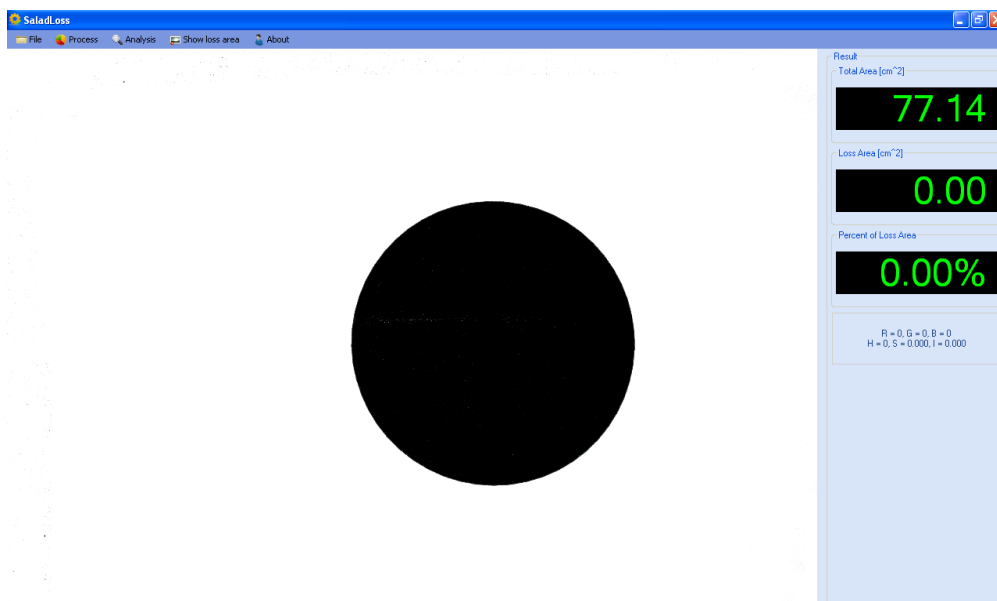
ผลการคำนวณหาค่ามาตรฐานพิกเซลต่อพื้นที่เฉลี่ยโดยใช้รูปทรงเรขาคณิตที่แตกต่างกัน พบว่ารูปถ่ายตามสภาวะที่ผู้วิจัยได้จัดทำขึ้นมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1425 พิกเซลต่อตารางเซนติเมตร ค่าดังกล่าวนี้จะถูกใช้เพื่อคำนวณพื้นที่ของผักสลัดที่ปรากฏบนภาพถ่ายต่อไป

#### 4.2.3 ผลการตรวจสอบความถูกต้องในการคำนวณพื้นที่ที่ปรากฏในภาพถ่ายของโปรแกรมประมวลผลภาพที่พัฒนาขึ้น

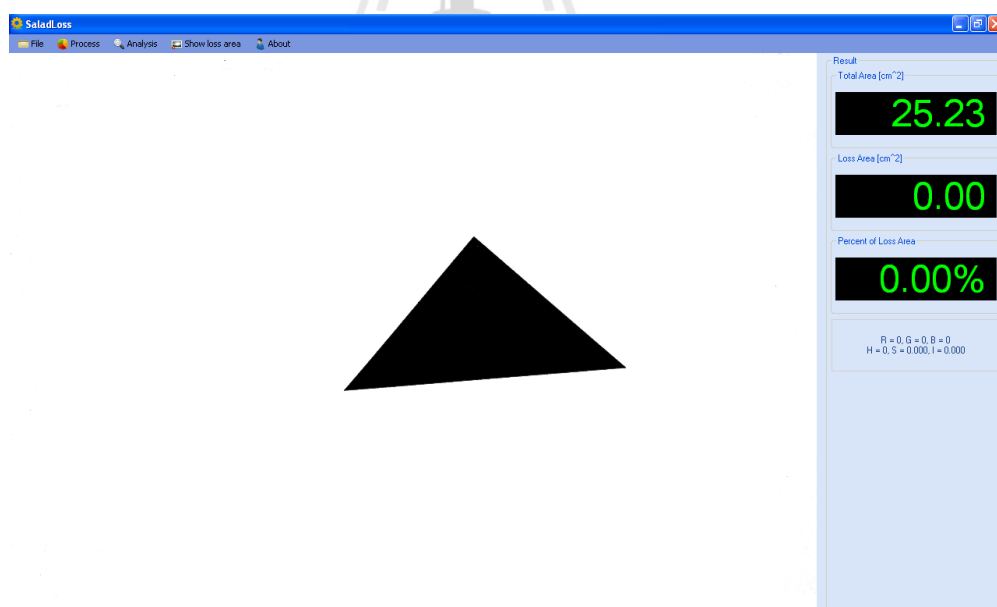
โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นได้รับการตรวจสอบความถูกต้องโดยใช้รูปถ่ายของรูปทรงเรขาคณิตที่แตกต่างกัน ตัวอย่างผลการทดสอบถูกแสดงในไว้รูปที่ 4.12 รูปที่ 4.13 และรูปที่ 4.14 ตามลำดับ สำหรับผลการทดสอบทั้งหมดถูกสรุปไว้ในตารางที่ 4.4



รูปที่ 4.12 ผลการคำนวณพื้นที่สี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีพื้นที่จริงเท่ากับ 100.00 ตารางเซนติเมตร



รูปที่ 4.13 ผลการคำนวณพื้นที่วงกลมที่มีพื้นที่จริงเท่ากับ 78.54 ตารางเซนติเมตร



รูปที่ 4.14 ผลการคำนวณพื้นที่สามเหลี่ยมที่มีพื้นที่จริงเท่ากับ 25.00 ตารางเซนติเมตร

ตารางที่ 4.4 การเปรียบเทียบผลการคำนวณพื้นที่รูปทรงเรขาคณิตโดยใช้โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นกับพื้นที่จริง

รูปทรง	พื้นที่จริง (cm <sup>2</sup> )	พื้นที่ที่คำนวณได้จากโปรแกรม (cm <sup>2</sup> )	% ความคลาดเคลื่อน
สี่เหลี่ยมจัตุรัส	100.00	96.77	3.23
สี่เหลี่ยมจัตุรัส	100.00	99.23	0.77
สี่เหลี่ยมจัตุรัส	100.00	97.16	2.84
สี่เหลี่ยมจัตุรัส	100.00	98.06	1.94
สี่เหลี่ยมจัตุรัส	100.00	100.43	0.43
สี่เหลี่ยมผืนผ้า	50.00	48.11	3.78
สี่เหลี่ยมผืนผ้า	50.00	47.67	4.66
สี่เหลี่ยมผืนผ้า	50.00	47.66	4.68
สี่เหลี่ยมผืนผ้า	50.00	48.95	2.10
สี่เหลี่ยมผืนผ้า	50.00	49.23	1.54
วงกลม	78.54	77.14	1.78
วงกลม	78.54	76.89	2.10
วงกลม	78.54	77.67	1.11
วงกลม	78.54	78.27	0.34
วงกลม	78.54	75.12	4.35
สามเหลี่ยม	25.00	25.23	0.92
สามเหลี่ยม	25.00	26.34	5.36
สามเหลี่ยม	25.00	23.11	7.56
สามเหลี่ยม	25.00	26.09	4.36
สามเหลี่ยม	25.00	26.45	5.80
		เฉลี่ย	±2.98

จากผลการทดสอบพบว่าโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นสามารถคำนวณพื้นที่ของสี่เหลี่ยมที่กำหนดได้อย่างแม่นยำ ดังพิจารณาได้จากเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนที่แสดงในตารางที่ 4.2 ซึ่ง

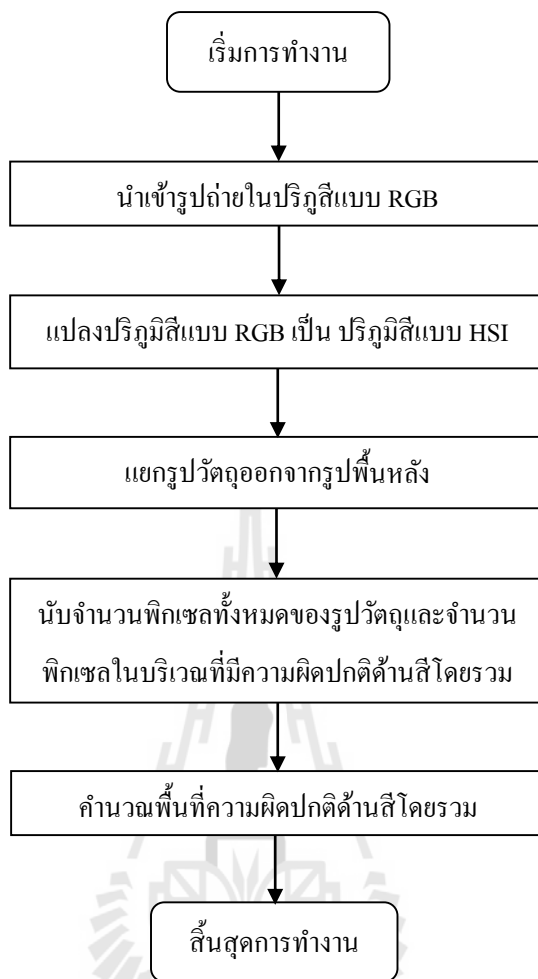
พบว่ามีความต่ำมาก (เฉลี่ย  $\pm 2.98\%$ ) ผลดังกล่าวบ่งชี้ได้ว่าโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นสามารถนำไปใช้คำนวณหาพื้นที่ความผิดปกติของผักสลัดได้

#### 4.2.4 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมของผักสลัด

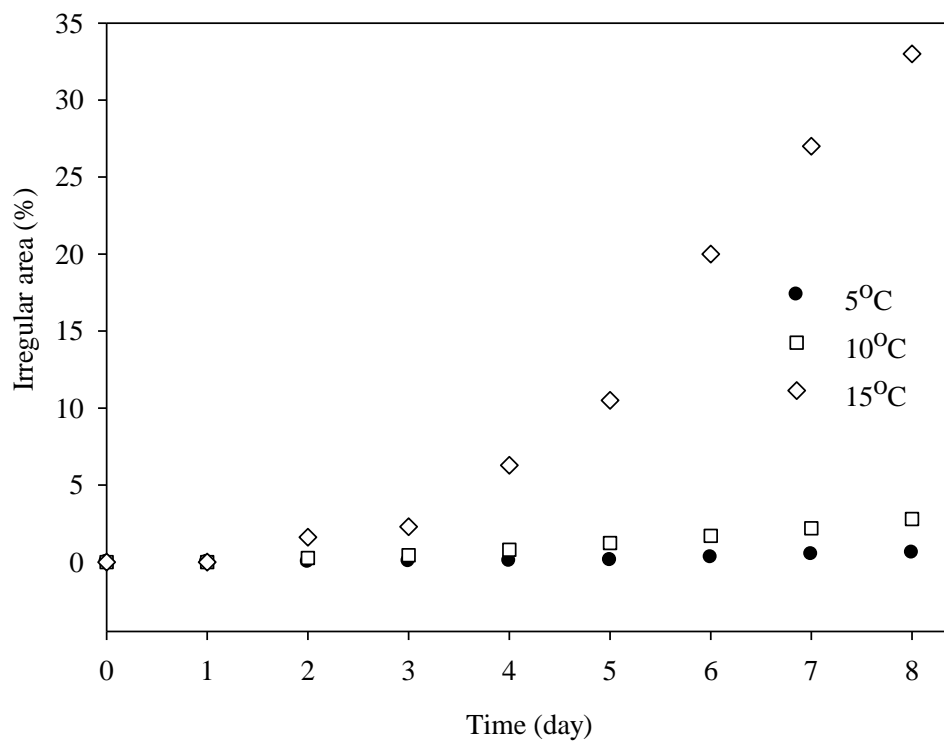
การเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมของผักสลัดตามอายุการเก็บรักษาเป็นหัวใจหลักของงานวิจัยนี้ ซึ่งผลที่ได้จะทำให้ทราบถึงอัตราการเสื่อมคุณภาพที่สภาวะการเก็บรักษาต่าง ๆ รวมถึงสามารถใช้เพื่อทำนายอายุการเก็บรักษาของผักสลัดชนิดนั้น ๆ ได้ ทั้งนี้ผลที่ได้จะถูกนำไปเชื่อมโยงกับอัตราการหายใจเพื่อพัฒนาเป็นแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการหายใจกับอัตราการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมของผักสลัดต่อไป ซึ่งอัลกอริทึมสำหรับการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมนั้นถูกแสดงไว้ในรูปที่ 4.15 โดยผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมของผักสลัดกรีนโอ๊คถูกแสดงไว้ในรูปที่ 4.16 ผลที่ได้แสดงให้เห็นอย่างเด่นชัดว่าอุณหภูมิการเก็บรักษามีผลต่ออัตราการเสื่อมถอยของคุณภาพอย่างมาก ซึ่งที่อุณหภูมิเก็บรักษาที่  $15^{\circ}\text{C}$  เมื่อทำการเก็บรักษาผ่านไปเพียง 2 วันพบว่าคุณภาพเริ่มมีการเสื่อมถอยอย่างเห็นได้ชัด กล่าวคือ มีเปอร์เซ็นต์พื้นที่ของการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมในส่วนของคุณภาพผิดปกติเท่ากับ 1.61 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ผักที่เก็บรักษาที่  $5^{\circ}\text{C}$  และ  $10^{\circ}\text{C}$  ยังไม่พบการเปลี่ยนแปลงคุณภาพด้านสี ดังแสดงให้เห็นในตารางที่ 4.5







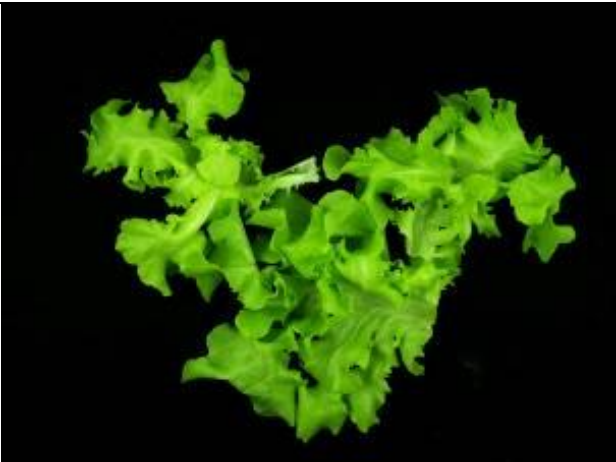


รูปที่ 4.15 อัลกอริทึมสำหรับการคำนวณพื้นที่ความผิดปกติด้านสีโดยรวมของผักสลัด



รูปที่ 4.16 เปอร์เซ็นต์พื้นที่การเปลี่ยนแปลงสี โดยรวมกับอายุการเก็บรักษา ณ อุณหภูมิ 5°C 10°C และ 15°C ตามลำดับ






ตารางที่ 4.5 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมของผักสลัดกรีนโอ๊คที่อายุการเก็บรักษา 2 วัน ณ อุณหภูมิ 5°C 10°C และ 15°C

อายุการเก็บรักษาที่ระยะเวลา 2 วัน	ลักษณะการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมของผักสลัดกรีนโอ๊ค
5°C	
10°C	
15°C	

จากตารางที่ 4.5 แสดงให้เห็นว่าที่อุณหภูมิการเก็บรักษาที่ 15°C ผักสลัดเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงด้านสีโดยรวมอย่างเห็นได้ชัดและเมื่ออายุการเก็บรักษาผ่านไปถึงวันที่ 3 ผักสลัดกรีนโอ๊คที่อุณหภูมิการเก็บรักษาที่ 15°C มีการเสื่อมคุณภาพอย่างรุนแรงขณะที่ผักสลัดที่เก็บรักษาที่ 5°C และ 10°C เริ่มสังเกตพบการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมเช่นเดียวกัน ดังแสดงในตารางที่ 4.6






ตารางที่ 4.6 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมของผักสลัดกรีนโอ๊คที่อายุการเก็บรักษา 3 วัน ณ อุณหภูมิ 5°C 10°C และ 15°C

อายุการเก็บรักษาที่ระยะเวลา 3 วัน	ลักษณะการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมของผักสลัดกรีนโอ๊ค
5°C	
10°C	
15°C	




พิจารณาตารางที่ 4.6 พบว่าผักสลัดกรีน โอ๊คที่เก็บรักษาที่ 15°C มีการเกิดสีน้ำตาลที่บริเวณก้านใบและเริ่มมีการช้ำในบริเวณใบอย่างเห็นได้ชัด ส่วนสลัดกรีน โอ๊คที่ถูกเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 10°C พบว่าบริเวณก้านใบมีการเกิดสีน้ำตาลที่เด่นชัดขึ้นมากกว่าผักที่เก็บรักษาที่อายุการเก็บรักษา 2 วัน สำหรับผักสลัดกรีน โอ๊คที่ถูกเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5°C นั้นพบว่าเริ่มมีการเกิดสีน้ำตาลที่บริเวณก้านใบเช่นเดียวกันแต่ลักษณะยังไม่เด่นชัดเท่ากับผักสลัดกรีน โอ๊คที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 10°C และ 15°C เมื่อทำการเก็บรักษาต่อไปพบว่าผักสลัดกรีน โอ๊คที่เก็บรักษาที่ 15°C มีการเสื่อมถอยทางคุณภาพหรือการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมอย่างรุนแรง แต่ผักสลัดกรีน โอ๊คที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5°C และ 10°C พบว่าการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมจากเดิมไม่มากนักดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.7

จากผลที่แสดงในตารางที่ 4.7 พบว่าผักสลัดกรีน โอ๊คที่เก็บรักษาที่ 15°C มีการเสื่อมถอยทางคุณภาพอย่างรุนแรง เช่น มีการเกิดสีน้ำตาลอย่างเด่นชัดในบริเวณก้านใบ รวมถึงเกิดการช้ำอย่างรุนแรงบริเวณใบ เป็นต้น ซึ่งเมื่อพิจารณาค่าเปอร์เซ็นต์พื้นที่ของการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมที่วิเคราะห์ได้จากโปรแกรมประมวลผลภาพที่พัฒนาขึ้นพบว่ามีค่าเท่ากับ 6.29 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับรายงานวิจัยที่มีมาก่อนหน้าโดยกล่าวไว้ว่าผู้บริโภคจะไม่เลือกซื้อผักที่มีการเสื่อมถอยทางคุณภาพด้านสีโดยรวมมากกว่า 9 เปอร์เซ็นต์ (Zhou et al., 2004) สำหรับผักสลัดกรีน โอ๊คที่ถูกเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5°C และ 10°C พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมเพิ่มขึ้นจากเดิมอย่างสังเกตเห็นได้ เช่น สีน้ำตาลบริเวณก้านใบมีความเข้มของสีมากขึ้น เป็นต้น จากนั้นทำการเก็บรักษาผักสลัดกรีน โอ๊คต่อไปพบว่าที่อุณหภูมิการเก็บรักษาที่ 15°C ผักสลัดกรีน โอ๊คมีการเสื่อมถอยทางคุณภาพอย่างรุนแรงมาก ผักสลัดมีการช้ำและเน่าเสียตรงส่วนบริเวณใบ รวมถึงสีน้ำตาลบริเวณก้านใบได้แผ่กว้างออกไปมากขึ้น ซึ่งเมื่อนำภาพถ่ายไปวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมประมวลผลภาพที่พัฒนาขึ้นพบว่ามีค่าเปอร์เซ็นต์พื้นที่ของการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมมีค่าเท่ากับ 10.5 เปอร์เซ็นต์ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Zhou et al. (2004) ที่กล่าวไว้ก่อนหน้านี้ว่าผู้บริโภคจะไม่เลือกซื้อผักที่มีการเสื่อมถอยทางคุณภาพด้านสีโดยรวมมากกว่า 9 เปอร์เซ็นต์ ผลที่ได้บ่งชี้ให้เห็นว่าโปรแกรมประมวลผลภาพที่พัฒนาขึ้นภายใต้งานวิจัยนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมได้ สำหรับผักสลัดกรีน โอ๊คที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5°C และ 10°C พบว่าการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมเริ่มมีความแตกต่างจากเดิมมากขึ้นอย่างสังเกตเห็นได้ กล่าวคือ สีน้ำตาลบริเวณก้านใบมีลักษณะเข้มขึ้นและแผ่บริเวณออกไปมากขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.7 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมของผักสลัดกรีนโอ๊คที่อายุการเก็บรักษา 4 วัน ณ อุณหภูมิ 5°C 10°C และ 15°C

อายุการเก็บรักษาที่ระยะเวลา 4 วัน	ลักษณะการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมของผักสลัดกรีนโอ๊ค
5°C	
10°C	
15°C	

ตารางที่ 4.8 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมของผักสลัดกรีนโอ๊คที่อายุการเก็บรักษา 5 วัน ณ อุณหภูมิ 5°C 10°C และ 15°C

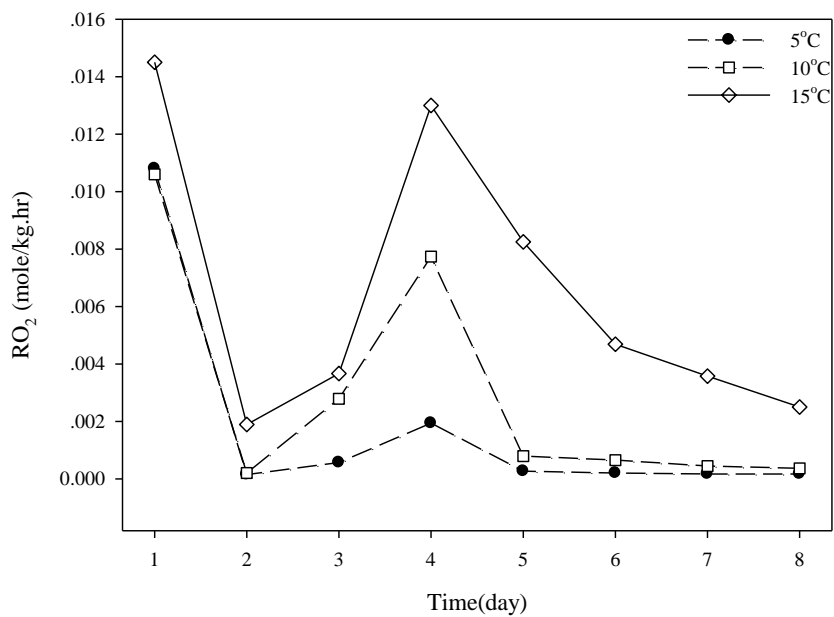
อายุการเก็บรักษาที่ระยะเวลา 5 วัน	ลักษณะการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมของผักสลัดกรีนโอ๊ค
5°C	
10°C	
15°C	



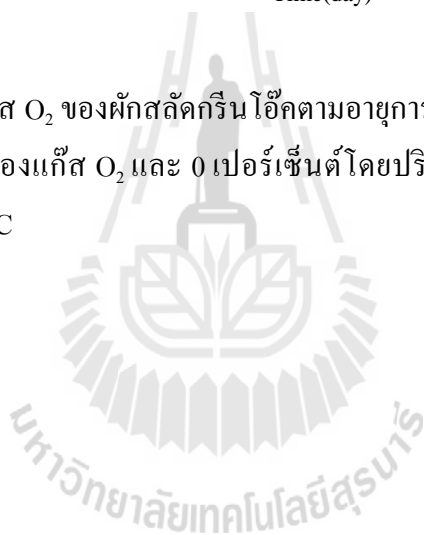
#### 4.2.5 อัตราการหายใจของผักสลัดกรีนโอ๊คที่เปลี่ยนแปลงตามอายุการเก็บรักษา

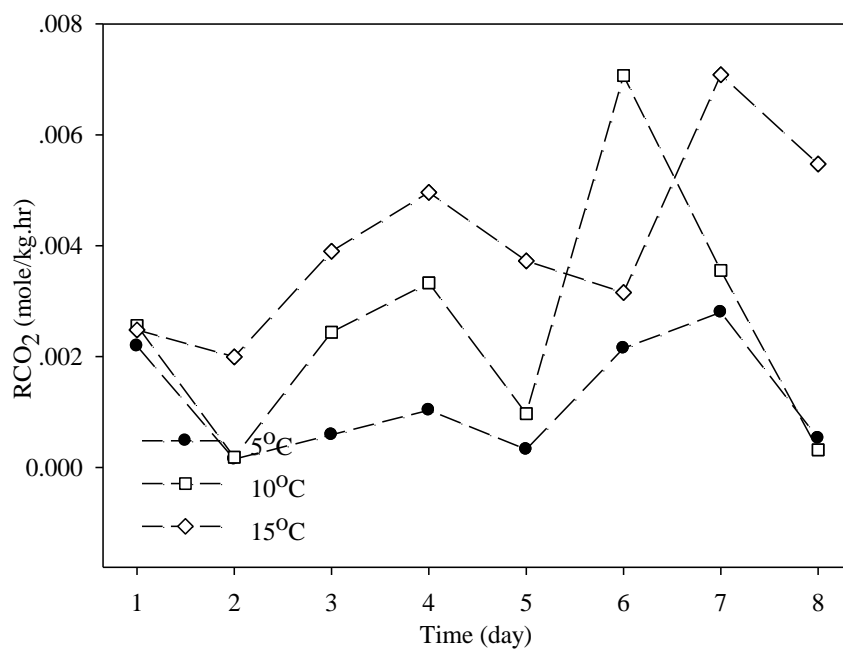
อัตราการใช้แก๊ส  $O_2$  และอัตราการสร้างแก๊ส  $CO_2$  ของผักสลัดกรีนโอ๊คที่ใช้ตัวอย่างเดียวกันกับผักสลัดที่นำมาวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมถูกแสดงไว้ในรูปที่ 4.17 และ 4.18 ตามลำดับ พิจารณารูปที่ 4.17 ซึ่งเป็นอัตราการใช้แก๊ส  $O_2$  ของผักสลัดพบว่าในวันที่ 1 ของการเก็บรักษามีการใช้  $O_2$  สูงมาก อันเนื่องมาจากการตัดแต่งทำให้ผักสลัดเกิดบาดแผล ส่งผลให้ผักสลัดมีการเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยาอย่างฉับพลัน โดยพืชจะปรับสภาพตัวเองเพื่อรักษาบาดแผลที่เกิดขึ้นซึ่งจะส่งผลให้มีการหายใจอย่างรวดเร็วในช่วงเวลาดังกล่าว (Torrieri et al., 2009) หลังจากนั้นพืชจะปรับสภาพการหายใจเข้าสู่ภาวะสมดุลอีกครั้ง (Zhu et al., 2001; Fonseca et al., 2002a) ซึ่งพิจารณาได้จากพืชจะมีอัตราการหายใจที่ใกล้เคียงกัน ดังเช่นอัตราการใช้แก๊ส  $O_2$  ของผักสลัดกรีนโอ๊คที่ใช้ในงานวิจัยนี้พบว่าวันที่ 2 และ วันที่ 3 ของการเก็บรักษาผักสลัดพบว่ามีอัตราการใช้แก๊ส  $O_2$  ใกล้เคียงกันในทุก ๆ อุณหภูมิ ซึ่งการวัดอัตราการหายใจทั่วไปจะทำการวัดที่สภาวะดังกล่าวนี้ เช่น Torrieri et al. ได้ศึกษาระยะเวลาที่ทำให้แอปเปิลสไลด์มีอัตราการหายใจที่สมดุล ซึ่งพบว่าต้องใช้ระยะเวลาถึง 20 ชั่วโมงอัตราการหายใจของแอปเปิลสไลด์ถึงเข้าสู่ภาวะสมดุล และเริ่มทำการวัดอัตราการหายใจจากระยะเวลาดังกล่าว และเป็นที่น่าสังเกตว่าการวัดอัตราการหายใจของนักวิจัยส่วนมากจะกระทำอยู่ในช่วงระยะเวลาที่พืชมีอัตราการหายใจที่สมดุล ซึ่งส่งผลให้แบบจำลองอัตราการหายใจที่พบส่วนมากไม่มีปัจจัยด้านอายุตัวอย่างทดสอบซึ่งเพิ่มตามเวลาการเก็บรักษามาเกี่ยวข้องด้วย แต่จากการสืบค้นงานวิจัยพบว่ามีนักวิจัยที่ทำการศึกษาปัจจัยด้านตัวอย่างทดสอบกับอัตราการหายใจ เช่นงานวิจัยของ Caleb et al. (2012) พบว่าอัตราการหายใจของผลทับทิมที่ถูกเก็บรักษาเป็นระยะเวลา 5 วัน ที่อุณหภูมิเก็บรักษา  $5^{\circ}C$   $10^{\circ}C$  และ  $15^{\circ}C$  ณ สภาวะบรรยากาศปกติไม่ได้คงที่ตามเวลาการเก็บรักษาแต่พบว่าการหายใจมีลักษณะเป็นฟังก์ชันกำลังของอายุการเก็บรักษา สำหรับงานวิจัยนี้พบว่าอัตราการหายใจของผักสลัดกรีนโอ๊คไม่ได้อยู่ในสภาวะสมดุลหรือคงที่ตลอดระยะเวลาการเก็บรักษาเช่นเดียวกันดังแสดงในรูปที่ 4.17 และ 4.18 กล่าวคือ อัตราการหายใจ (อัตราการใช้แก๊ส  $O_2$ ) ในวันที่ 1 จะมีค่าสูงมากเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยาดังที่ได้กล่าวไว้ก่อนหน้านี้ สำหรับวันที่ 2 และวันที่ 3 ผักสลัดมีอัตราการหายใจที่ใกล้เคียงกันบ่งชี้ได้ว่าอายุการเก็บรักษา ณ วันดังกล่าวผักสลัดกรีนโอ๊คมีอัตราการหายใจในสภาวะสมดุล และเมื่อถึงอายุการเก็บรักษาในวันที่ 4 พบว่าอัตราการใช้แก๊ส  $O_2$  กลับมีค่าเพิ่มสูงขึ้นในทุก ๆ อุณหภูมิที่เก็บรักษา และมีค่าลดต่ำลงเรื่อยๆตั้งแต่วันที่ 5 ถึงวันที่ 8 ของการเก็บรักษาซึ่งลักษณะการหายใจดังกล่าวนี้เป็นลักษณะการหายใจของพืชแบบ climacteric โดยในช่วงที่อัตราการหายใจมีค่าเพิ่มสูงขึ้นอย่างเด่นชัดนั้นมีการศึกษาพบว่ามีสาเหตุมาจากทั้งกระบวนการสร้าง (anabolic process) เช่น การสร้างสารสี (pigmentation) เป็นต้น และ/หรือกระบวนการทำลาย (catabolic

process) เช่น กระบวนการเปลี่ยนแปลงแป้งเป็นน้ำตาล เป็นต้น(จริงแท้, 2538) ผลดังกล่าวเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับผลวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมพบว่า ณ อายุการเก็บรักษาวันที่ 4 ผักสลัดเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงด้านสีโดยรวมอย่างชัดเจนและมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วในวันถัดๆ ไป โดยเฉพาะผักสลัดที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 15°C แต่เนื่องด้วยการเสื่อมสภาพทางคุณภาพของผักไม่สามารถถูกยับยั้งได้ทำให้เกิดการเปลี่ยนสีต่อไปส่งผลให้เซลล์พืชมีการเสื่อมสภาพหรือตายมากเกิดขึ้นทำให้มีปริมาณเซลล์ที่นำแก๊ส O<sub>2</sub> ไปใช้เพื่อการหายใจน้อยลงส่งผลให้อัตราการใช้แก๊ส O<sub>2</sub> ลดต่ำลงในทำนองเดียวกันทำให้อัตราการสร้าง CO<sub>2</sub> มีค่าต่ำลงตามไปด้วย ดังนั้นจากผลที่ได้สามารถบ่งชี้ได้ว่าอัตราการหายใจของพืชสามารถนำไปใช้เป็นดัชนีบ่งชี้คุณภาพของผักสลัดกรีนโอ๊คได้ กล่าวคือ เมื่ออัตราการหายใจของพืชเพิ่มขึ้นจากสถานะสมดุลอย่างรุนแรงและลดต่ำลงในวันถัดมา ณ จุดดังกล่าวบ่งชี้ได้ว่าพืชถึงจุดเริ่มต้นการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมอย่างชัดเจนแล้วและพืชจะมีการเปลี่ยนแปลงด้านสีโดยรวมอย่างรุนแรงขึ้นจากวันดังกล่าว นอกจากนี้หากพิจารณาอัตราการสร้าง CO<sub>2</sub> ของผักสลัดที่ถูกเก็บรักษาที่อุณหภูมิที่ 15°C พบว่าเมื่อการเก็บรักษาถึงวันที่ 4 ผักสลัดมีอัตราการสร้าง CO<sub>2</sub> สูงขึ้นเมื่อเทียบกับอายุการเก็บรักษาในวันที่ 3 และลดต่ำลงอีกครั้งในวันที่ 5 ซึ่งสอดคล้องกับผลที่ได้อธิบายไว้แล้วก่อนหน้านี้ แต่ในวันที่ 6 วันที่ 7 และ วันที่ 8 อัตราการสร้าง CO<sub>2</sub> ไม่ได้ลดต่ำลงเหมือนผักที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5°C และ 10°C (รูปที่ 4.16) แต่พบว่ามีอัตราการสร้าง CO<sub>2</sub> สูงขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งผลดังกล่าวเกิดจากผักที่ถูกเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 15°C หลังจากเก็บรักษาไปแล้ว 6 วันผักมีการเน่าเสีย (รูปที่ 4.19 4.20 และ 4.21) ซึ่งกระบวนการหายใจได้เปลี่ยนไปเป็นกระบวนการหายใจแบบไม่ใช้ O<sub>2</sub> (anaerobic respiration) หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือเป็นกระบวนการหมัก(พิจารณาจากค่า RQ ที่มีค่าไม่อยู่ในช่วง 0.7-1.3 ) ซึ่งสิ่งที่ได้ออกมาคือแก๊ส CO<sub>2</sub> ซึ่งผลที่ได้คืออัตราการสร้าง CO<sub>2</sub> จะมีค่าเพิ่มมากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.18

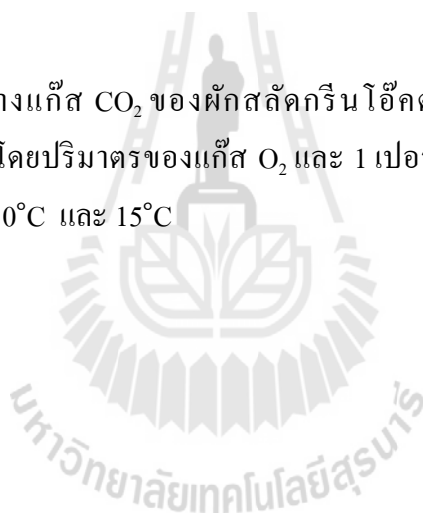


รูปที่ 4.17 อัตราการใช้แก๊ส  $O_2$  ของผักสลัดกรีนโอ๊คตามอายุการเก็บรักษา ที่สภาวะ 20 เปอร์เซ็นต์ โดยปริมาตรของแก๊ส  $O_2$  และ 0 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของแก๊ส  $CO_2$  อุณหภูมิ  $5^\circ C$   $10^\circ C$  และ  $15^\circ C$



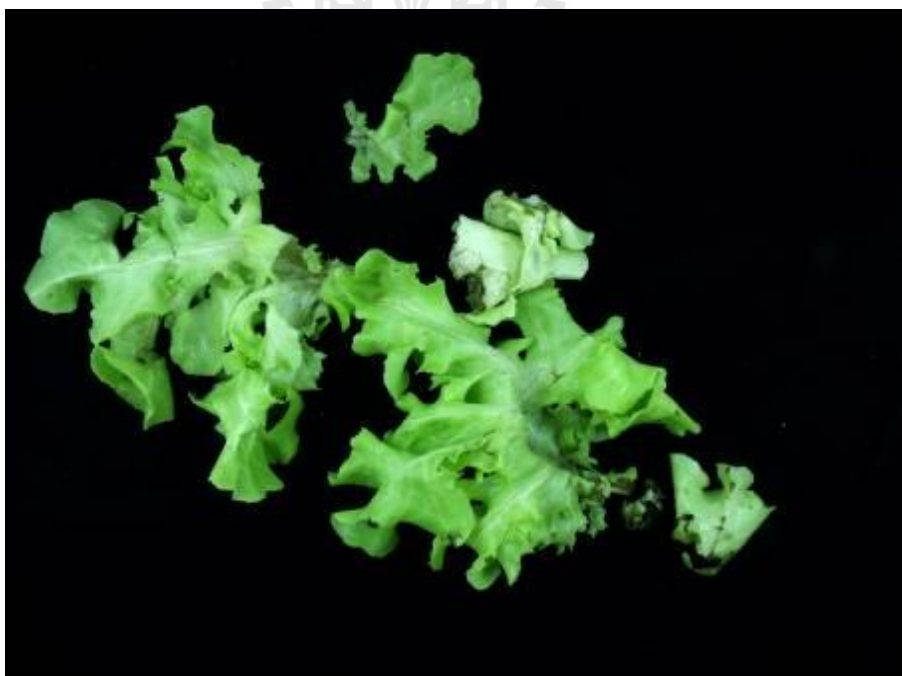


รูปที่ 4.18 อัตราการสร้างแก๊ส CO<sub>2</sub> ของผักสลัดกรีนโอ๊คตามอายุการเก็บรักษา ที่สภาวะ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของแก๊ส O<sub>2</sub> และ 1 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของแก๊ส CO<sub>2</sub> อุณหภูมิ 5°C 10°C และ 15°C





รูปที่ 4.19 ลักษณะผักสลัดกรีน โอ๊คที่เก็บรักษาที่ 15°C ณ อายุการเก็บรักษาวันที่ 6



รูปที่ 4.20 ลักษณะผักสลัดกรีน โอ๊คที่เก็บรักษาที่ 15°C ณ อายุการเก็บรักษาวันที่ 7



รูปที่ 4.21 ลักษณะผักสลัดกรีนโอ๊คที่เก็บรักษาที่ 15°C ณ อายุการเก็บรักษาวันที่ 8

### 4.3 การพัฒนาแบบจำลองอัตราการหายใจและแบบจำลองอัตราการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมของผักสลัด

แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นภายใต้งานวิจัยนี้ประกอบไปด้วย แบบจำลองอัตราการหายใจที่ได้รับอิทธิพลจากสัดส่วนของแก๊สผสม แบบจำลองอัตราการหายใจที่ได้รับอิทธิพลจากสัดส่วนของแก๊สผสมและอิทธิพลจากอุณหภูมิ โดยแบบจำลองทั้ง 2 แบบนั้นจะพัฒนาให้กับผักสลัดชนิดเดียว 3 ชนิดและผักสลัดผสมชนิด แบบจำลองอัตราการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวม และแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมกับอัตราการหายใจ ซึ่งแบบจำลองทั้ง 2 จะพัฒนาให้กับผักสลัดชนิดเดียวซึ่งใช้ผักสลัดกรีนโอ๊คเป็นตัวอย่างผักสลัด โดยรายละเอียดของแบบจำลองต่าง ๆ มีดังต่อไปนี้

#### 4.3.1 แบบจำลองอัตราการหายใจที่ได้รับอิทธิพลจากสัดส่วนผสมของแก๊สผสม

แบบสมการของ Michaelis-Menten แบบ Competitive inhibition ถูกใช้เพื่อพัฒนาแบบจำลองอัตราการหายใจของผักสลัดที่ได้รับอิทธิพลของสัดส่วนผสมของแก๊สผสม ซึ่งแบบสมการดังกล่าวได้พัฒนาให้กับผักสลัดทุกชนิดที่ใช้ในงานวิจัยนี้ (ผักสลัดกรีนโอ๊ค

ผักสลัดบัตเตอร์เฮด ผักกาดหอม และผักสลัดผสมชนิด) โดยสมการของ Michaelis-Menten. แบบ Competitive inhibition เป็นดังสมการที่ 4.1

$$R = \frac{\alpha \times y_{O_2}}{\phi \times \left(1 + \frac{y_{CO_2}}{\gamma_c}\right) + y_{O_2}} \quad (4.1)$$

โดยค่าสัมประสิทธิ์  $\alpha, \phi, \gamma_c$  ของผักสลัดแต่ละชนิดถูกสรุปไว้ในตารางที่ 4.9 และ 4.10 ตามลำดับ ส่วนผลการทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองถูกแสดงไว้ในรูปที่ 4.22 4.23 4.24 4.25 4.26 4.27 4.28 และ 4.29 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.9 ค่าสัมประสิทธิ์  $\alpha, \phi, \gamma_c$  สำหรับทำนายอัตราการใช้แก๊ส  $O_2$  ตามสมการของ Michaelis-Menten. แบบ Competitive inhibition

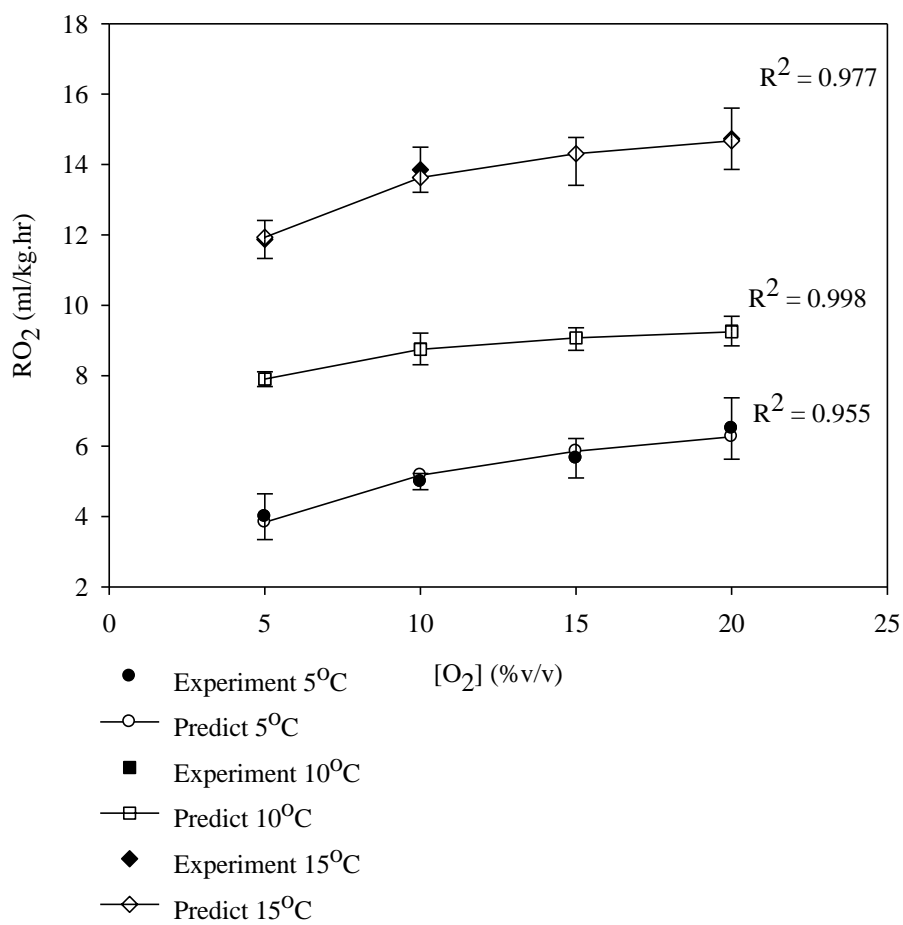
ชนิดผัก	อุณหภูมิ 5°C			อุณหภูมิ 10°C			อุณหภูมิ 15°C		
	$\alpha$	$\phi$	$\gamma_c$	$\alpha$	$\phi$	$\gamma_c$	$\alpha$	$\phi$	$\gamma_c$
กรีน ไอ๊ค	7.944	4.094	3.232	9.801	0.919	3.256	15.890	1.272	3.300
บัตเตอร์เฮด	3.528	0.656	1.254	7.681	3.894	2.915	12.983	0.910	6.240
ผักกาดหอม	20.855	30.136	11.077	54.317	65.021	15.436	26.161	10.169	10.100
ผักสลัดผสมชนิด	17.595	21.871	7.609	26.217	18.732	10.366	40.273	13.703	6.496

ตารางที่ 4.10 ค่าสัมประสิทธิ์  $\alpha, \phi, \gamma_c$  สำหรับทำนายอัตราการสร้าง  $\text{CO}_2$  ตามสมการของ Michaelis-Menten. แบบ Competitive inhibition

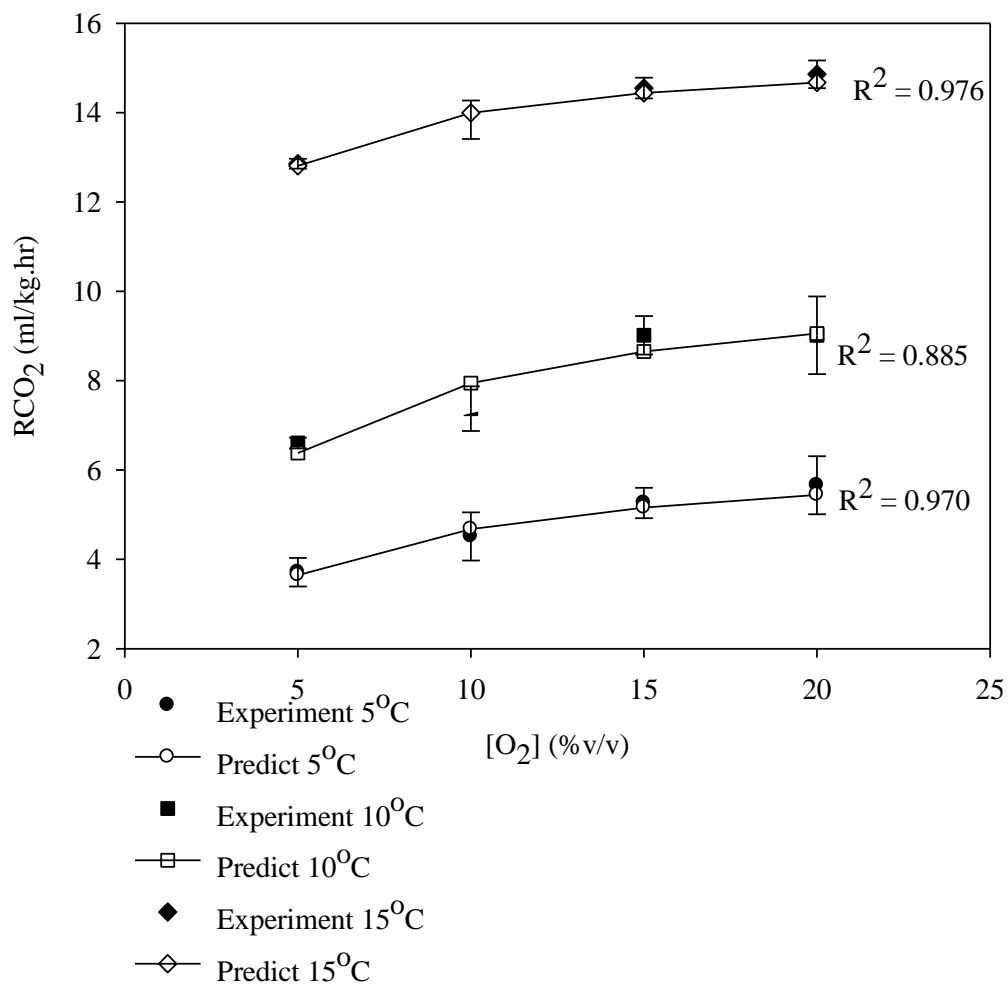
ชนิดผัก	อุณหภูมิ 5°C			อุณหภูมิ 10°C			อุณหภูมิ 15°C		
	$\alpha$	$\phi$	$\gamma_c$	$\alpha$	$\phi$	$\gamma_c$	$\alpha$	$\phi$	$\gamma_c$
กรีนโอ๊ค	6.511	3.048	3.472	10.528	2.544	3.614	15.422	0.781	3.275
บัตเตอร์ เสด	3.414	0.713	1.446	15.707	17.356	6.046	10.878	1.181	6.329
ผักกาด หอม	6.511	3.601	11.087	21.736	21.831	15.562	27.348	10.755	10.208
ผักสลัด ผสมชนิด	11.140	10.400	7.840	28.198	18.361	10.691	41.553	14.192	6.708



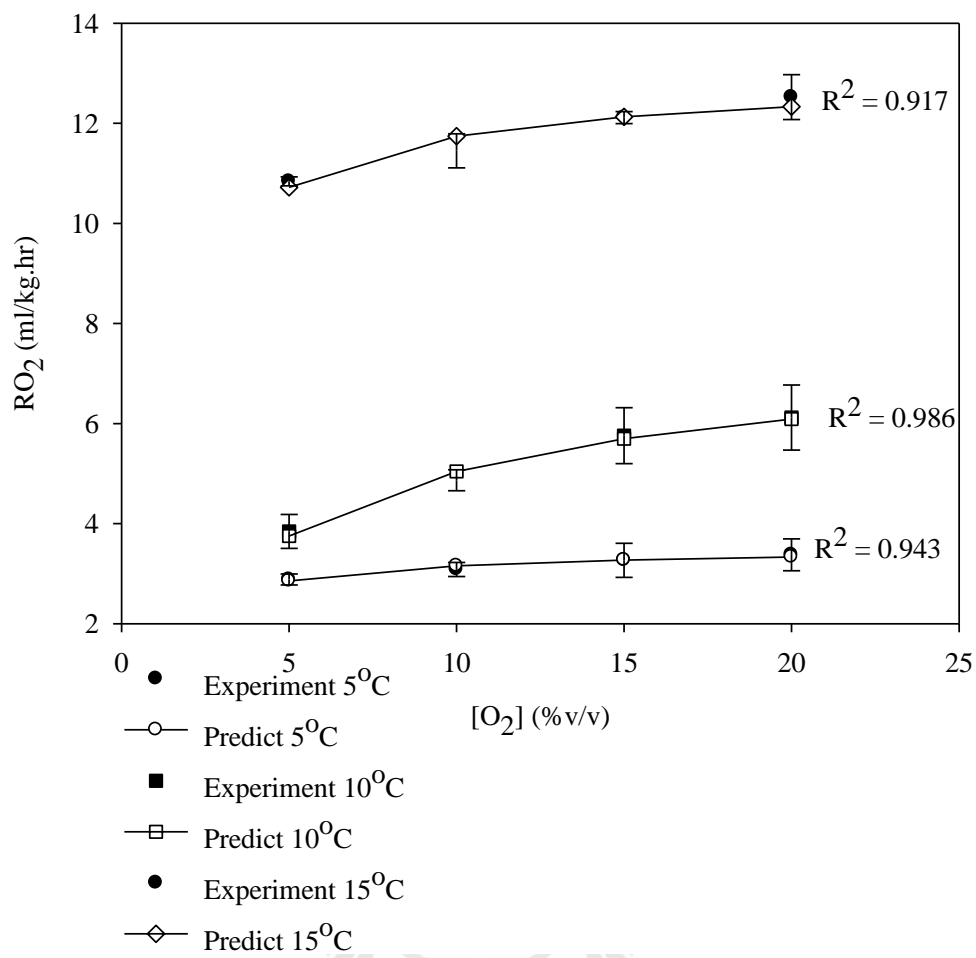




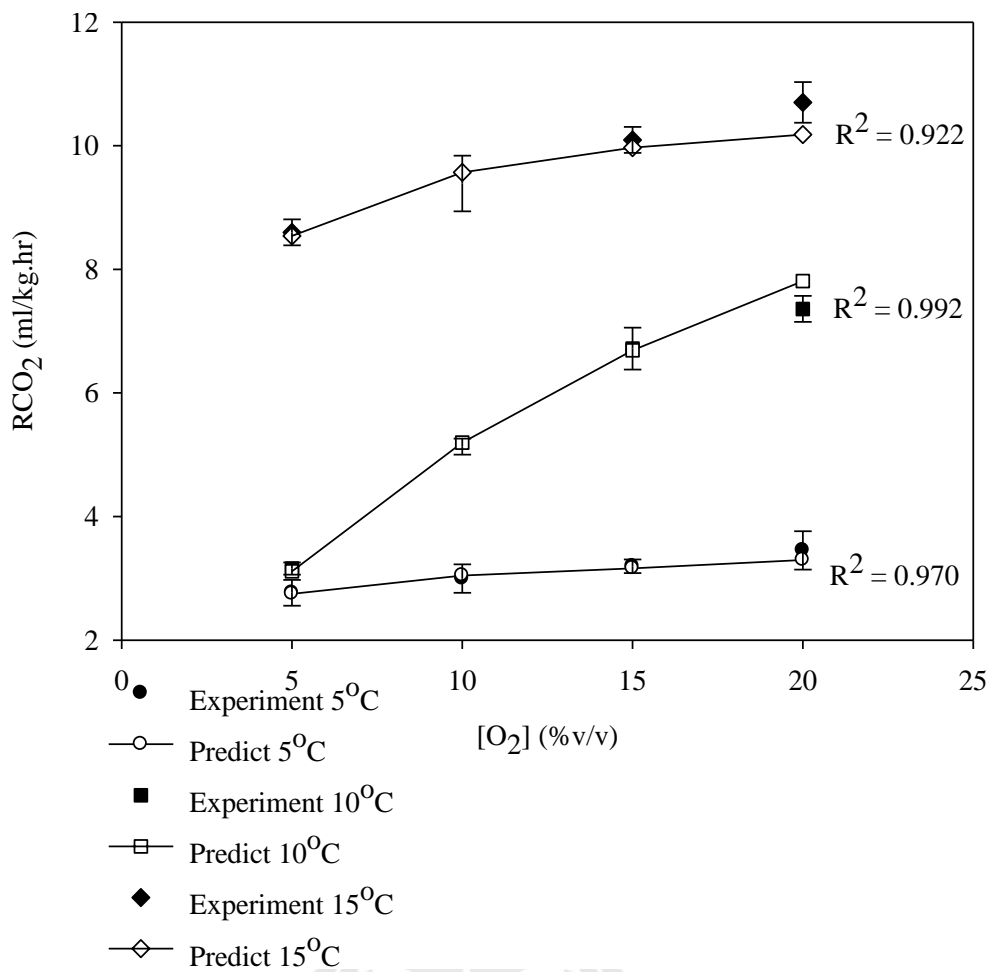
รูปที่ 4.22 ผลการทดสอบแบบจำลองอัตราการใช้แก๊ส O<sub>2</sub> ของผักสลัดกรีนโอ๊คที่อุณหภูมิ 5°C 10°C และ 15°C



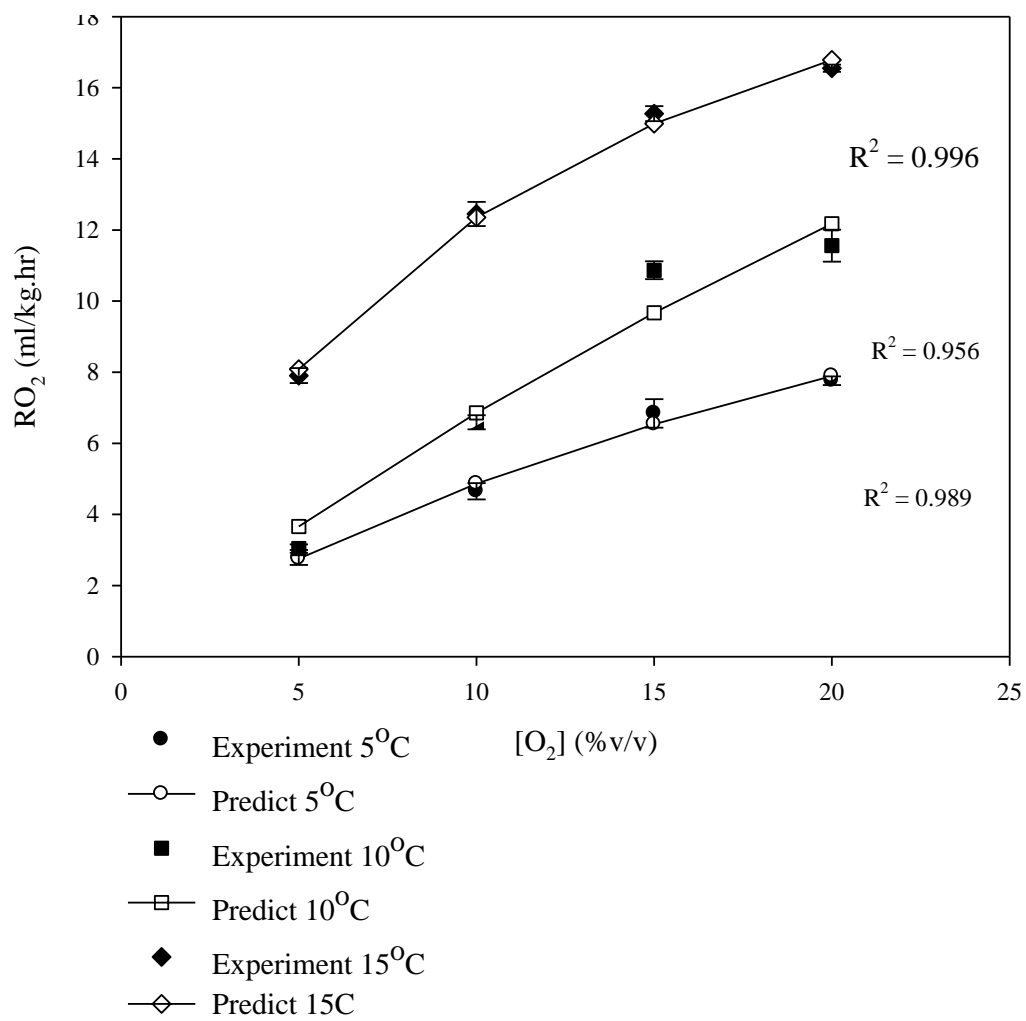
รูปที่ 4.23 ผลการทดสอบแบบจำลองอัตราการสร้างแก๊ส CO<sub>2</sub> ของผักสลัดกรีนโอ๊คที่อุณหภูมิ 5°C 10°C และ 15°C



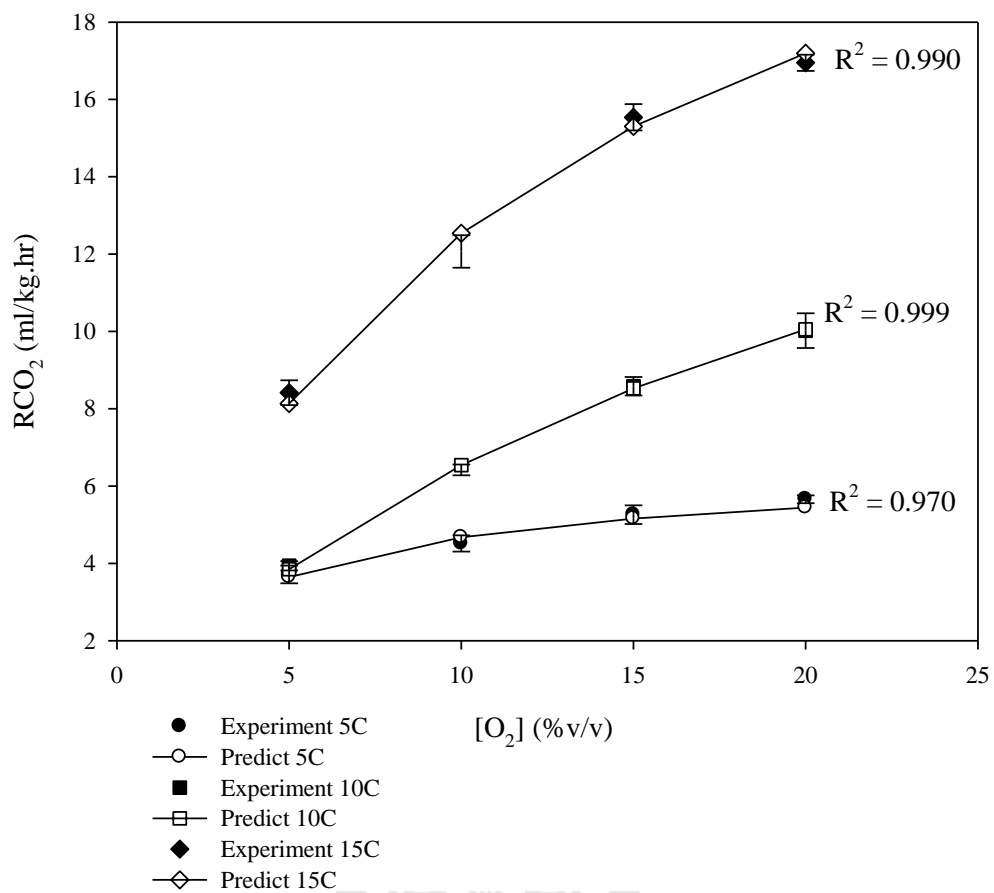
รูปที่ 4.24 ผลการทดสอบแบบจำลองอัตราการใช้ O<sub>2</sub> ของฝักสลัดบัตเตอร์เฮดที่อุณหภูมิ 5°C 10°C และ 15°C



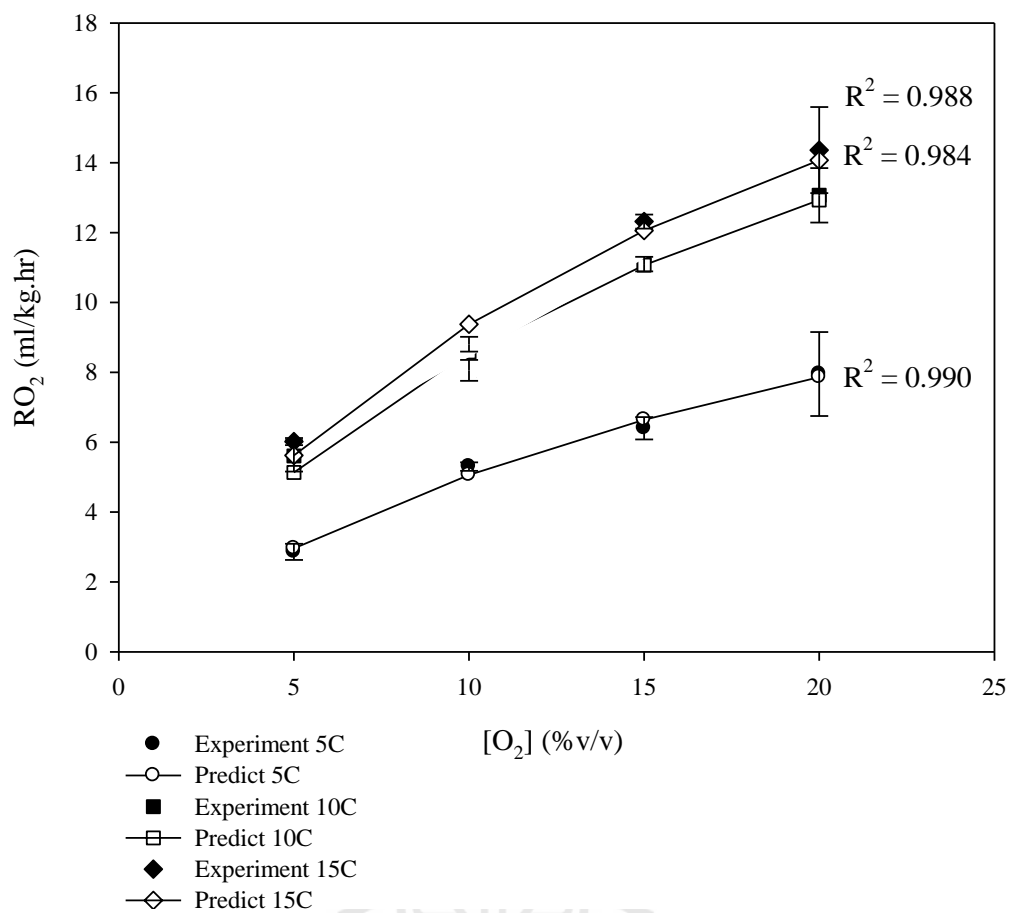
รูปที่ 4.25 ผลการทดสอบแบบจำลองอัตราการสร้าง CO<sub>2</sub> ของผักสลัดบัตเตอร์เฮดที่อุณหภูมิ 5°C 10°C และ 15°C



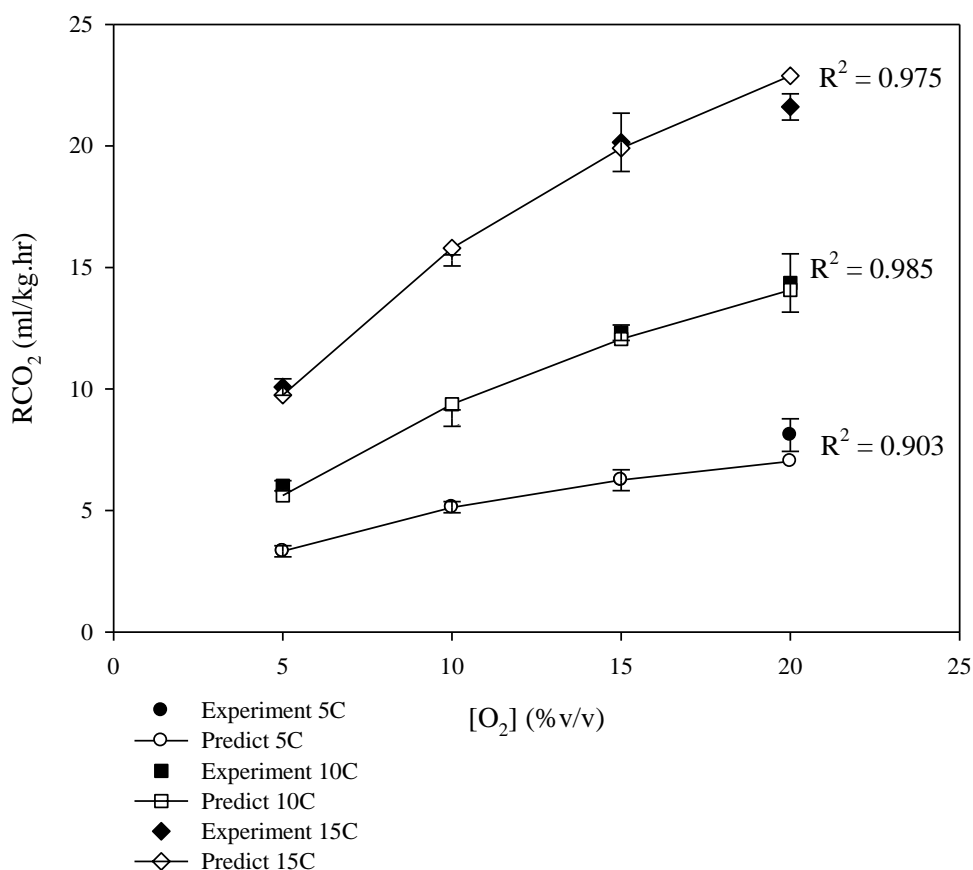
รูปที่ 4.26 ผลการทดสอบแบบจำลองอัตราการใช้  $O_2$  ของผักกาดหอมที่อุณหภูมิ 5°C 10°C และ 15°C



รูปที่ 4.27 ผลการทดสอบแบบจำลองอัตราการสร้าง CO<sub>2</sub> ของผักกาดหอมที่อุณหภูมิ 5°C 10°C และ 15°C



รูปที่ 4.28 ผลการทดสอบแบบจำลองอัตราการใช้ O<sub>2</sub> ของผักสลัดผสมที่อุณหภูมิ 5°C 10°C และ 15°C



รูปที่ 4.29 ผลการทดสอบแบบจำลองอัตราการสร้าง CO<sub>2</sub> ของผักสลัดผสมชนิดที่อุณหภูมิ 5°C 10°C และ 15°C

จากผลการทดสอบแบบจำลองอัตราการหายใจของผักสลัด ดังแสดงในรูปที่ 4.22 ถึง 4.29 พบว่าแบบจำลองที่ได้สามารถอธิบายผลการวัดอัตราการหายใจได้เป็นอย่างดี ซึ่งพิจารณาได้จากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ ) ซึ่งพบว่ามีค่าสูงกว่า 0.9 นั้นแสดงให้เห็นว่าค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดลองจริงมาก นอกจากนี้เมื่อนำค่าอัตราการหายใจที่ได้จากการคำนวณด้วยแบบจำลองและค่าอัตราการหายใจที่ได้จากการทดลอง ไปทดสอบความแปรปรวน (F-test) พบว่าค่าอัตราการหายใจเฉลี่ยที่ได้จากการคำนวณและค่าอัตราการหายใจเฉลี่ยที่ได้จากการวัดจริงในทุก ๆ ตัวอย่างไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ( $P > 0.05$ ) ผลดังกล่าวยืนยันได้ว่าแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นสามารถนำไปใช้ประมาณค่าอัตราการหายใจของผักสลัดที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้



#### 4.3.2 แบบจำลองอัตราการหายใจที่ได้รับอิทธิพลจากสัดส่วนของแก๊สและอิทธิพลของผสมออกฤทธิ์

อิทธิพลเนื่องมาจากสัดส่วนของแก๊สผสมที่มีต่ออัตราการหายใจนั้นได้ใช้สมการของ Michaelis-Menten. แบบ Competitive inhibition ในการอธิบายแล้วในหัวข้อก่อนหน้านี้สำหรับอิทธิพลของออกฤทธิ์ต่ออัตราการหายใจนั้น ผู้วิจัยเลือกใช้สมการความสัมพันธ์ของ Arrhenius เพื่อทำนายอัตราการหายใจที่ได้รับอิทธิพลจากออกฤทธิ์ ซึ่งเมื่อนำแบบสมการทั้งสองรวมเข้าด้วยกันจะสามารถทำนายอัตราการหายใจได้ทั้งอิทธิพลของสัดส่วนผสมของแก๊สผสมและอิทธิพลของออกฤทธิ์ ซึ่งสมการดังกล่าวถูกแสดงไว้ในสมการที่ 4.2

$$R = \frac{\alpha_{ref} \times y_{O_2}}{\phi_{ref} \times \left(1 + \frac{y_{CO_2}}{\gamma_{c,ref}}\right) + y_{O_2}} \times e^{\left[\frac{-E_a}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}}\right)\right]} \quad (4.2)$$

โดยที่

$\alpha_{ref}$	คือ	อัตราการหายใจสูงสุด ณ ออกฤทธิ์อ้างอิง (ml/kg hr)
$\phi_{ref}$	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์ของ Michaelis–Menten ณ ตำแหน่ง $\frac{\alpha_{ref}}{2}$ ณ ออกฤทธิ์อ้างอิง (เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร(O <sub>2</sub> ))
$\gamma_{c,ref}$	คือ	ค่าคงที่ของการยับยั้งการหายใจด้วย CO <sub>2</sub> ของสมการแบบ competitive ณ ออกฤทธิ์อ้างอิง (เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร(O <sub>2</sub> ))
$T_{ref}$	คือ	อุณหภูมิอ้างอิง (K) โดยงานวิจัยนี้เลือกอุณหภูมิ 10°C (283K) เป็นอุณหภูมิอ้างอิง
$R$	คือ	ค่าคงที่ของแก๊ส มีค่าเท่ากับ 8.314 kJ/kmol.K
$E_a$	คือ	activation energy (kJ/kmol)
$T$	คือ	อุณหภูมิเก็บรักษา (K)

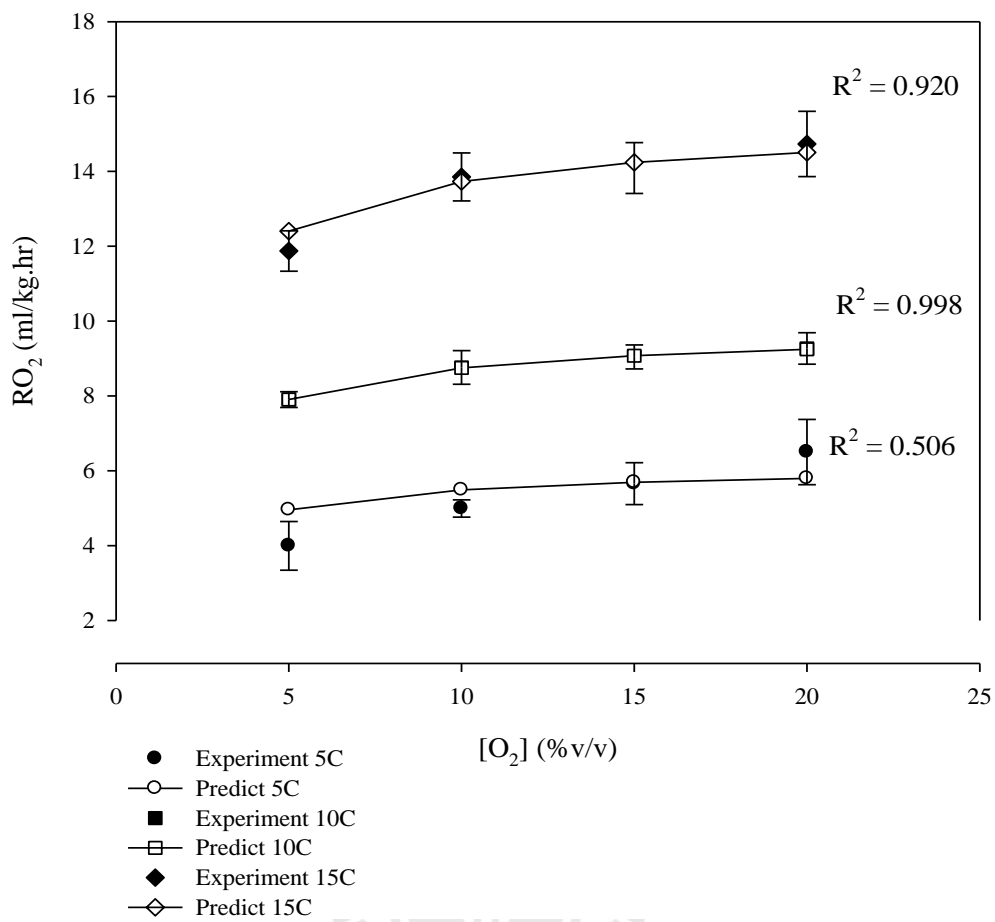
จากสมการที่ 4.2 ค่าสัมประสิทธิ์  $\alpha_{ref}$ ,  $\phi_{ref}$ ,  $\gamma_{c,ref}$  นั้นเป็นค่าที่ได้จากสมการของ Michaelis-Menten. แบบ Competitive inhibition ณ อุณหภูมิ 10°C ซึ่งแสดงไว้ในตารางที่ 4.9 และ 4.10 โดยสมการที่ 4.2 ยังเหลือค่าสัมประสิทธิ์ที่จำเป็นต้องหานั้นคือค่า  $E_a$  โดยค่าดังกล่าวนี้ถูกสรุป

ไว้ในตารางที่ 4.11 ส่วนผลการทดสอบแบบจำลองโดยใช้สมการที่ 4.2 นั้นถูกแสดงไว้ในรูปที่ 4.30, 4.31 4.32 4.33 4.34 4.35 4.36 และ 4.37 ตามลำดับ

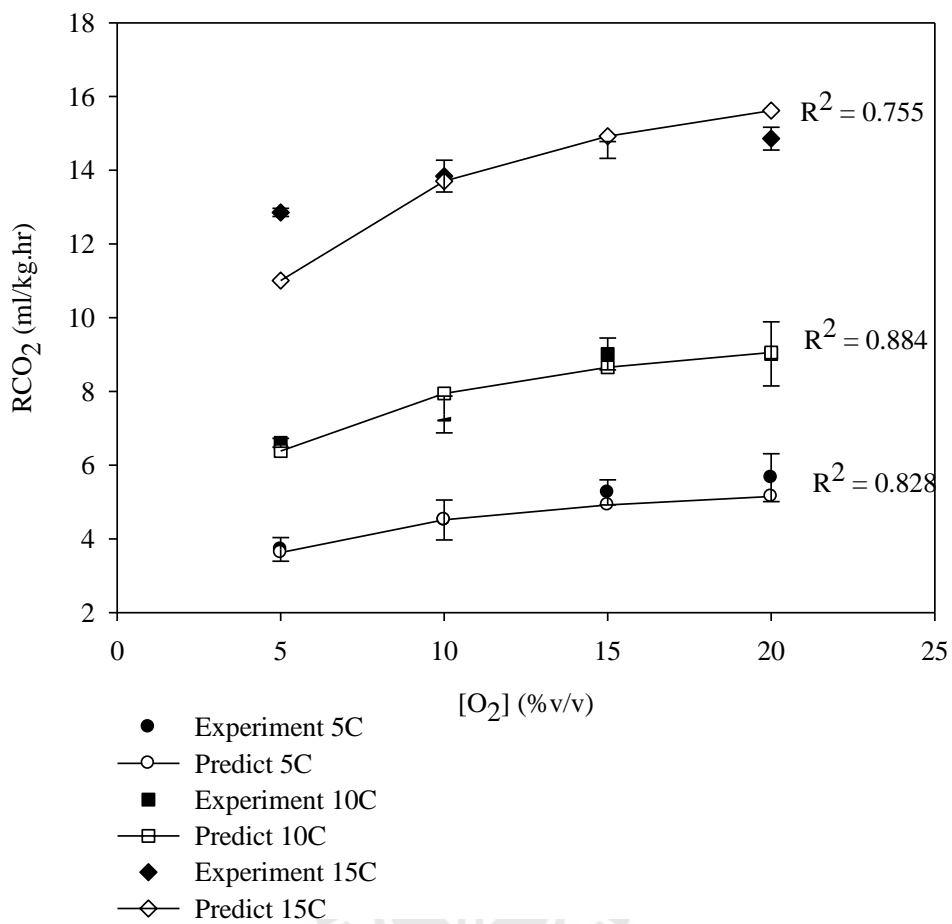
ตารางที่ 4.11 ค่า activation energy ( $E_a$ ) สำหรับใช้คำนวณค่าอัตราการหายใจตามสมการที่ 4.2 ของ ผักสลัดชนิดเดี่ยวและผักสลัดผสมชนิด

ชนิดผักสลัด	Activation energy ( $E_a$ ) (kJ/kmol)	
	อัตราการใช้แก๊ส O <sub>2</sub>	อัตราการใช้สร้างแก๊ส CO <sub>2</sub>
ผักสลัดกรีนโอ๊ค	61061.01	73856.24
ผักสลัดบัตเตอร์เฮด	106944.57	66026.34
ผักกาดหอม	57030.65	71929.07
ผักสลัดผสมชนิด	77244.69	67259.99

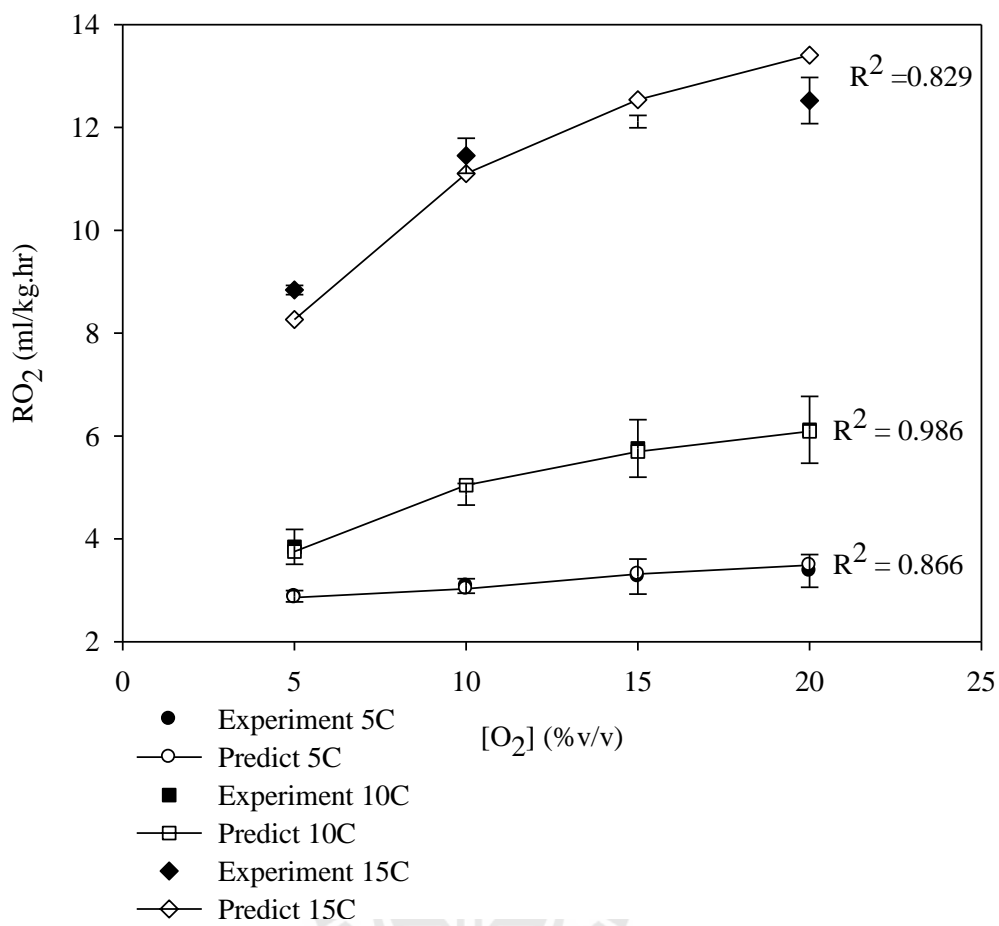




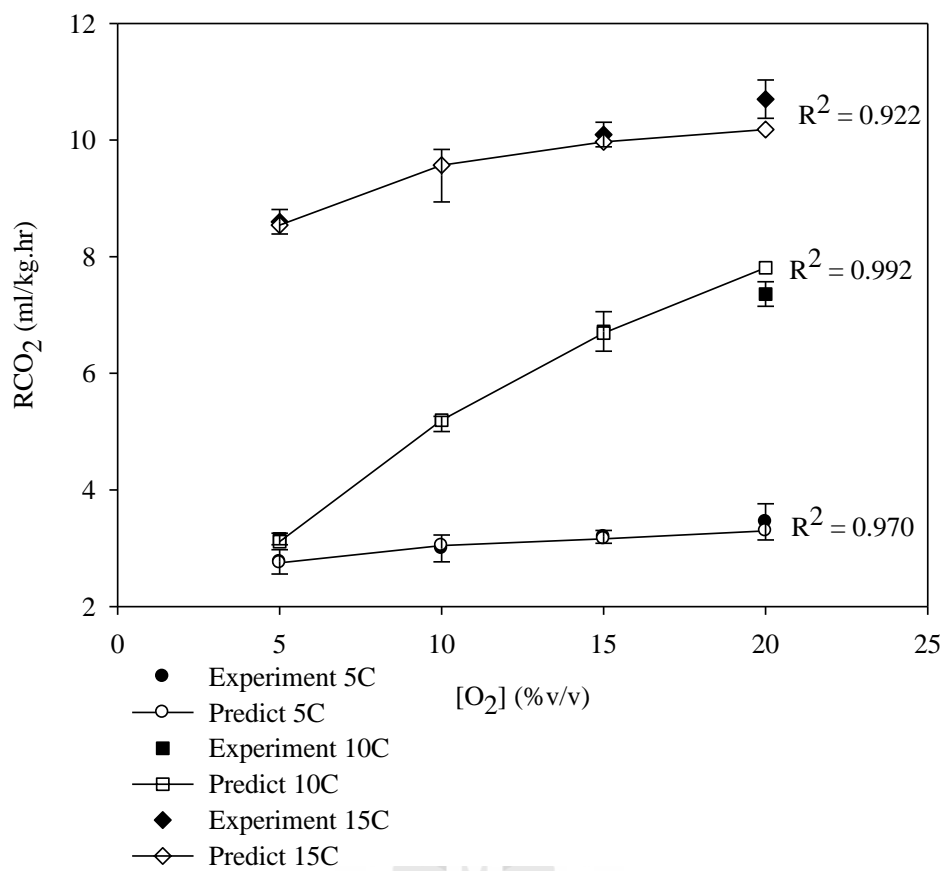
รูปที่ 4.30 ผลการทดสอบแบบจำลองอัตราการใช้  $O_2$  ของผักสลัดกรีนโอ๊คที่อุณหภูมิ 5°C 10°C และ 15°C ที่คำนวณได้จากสมการที่ 4.2



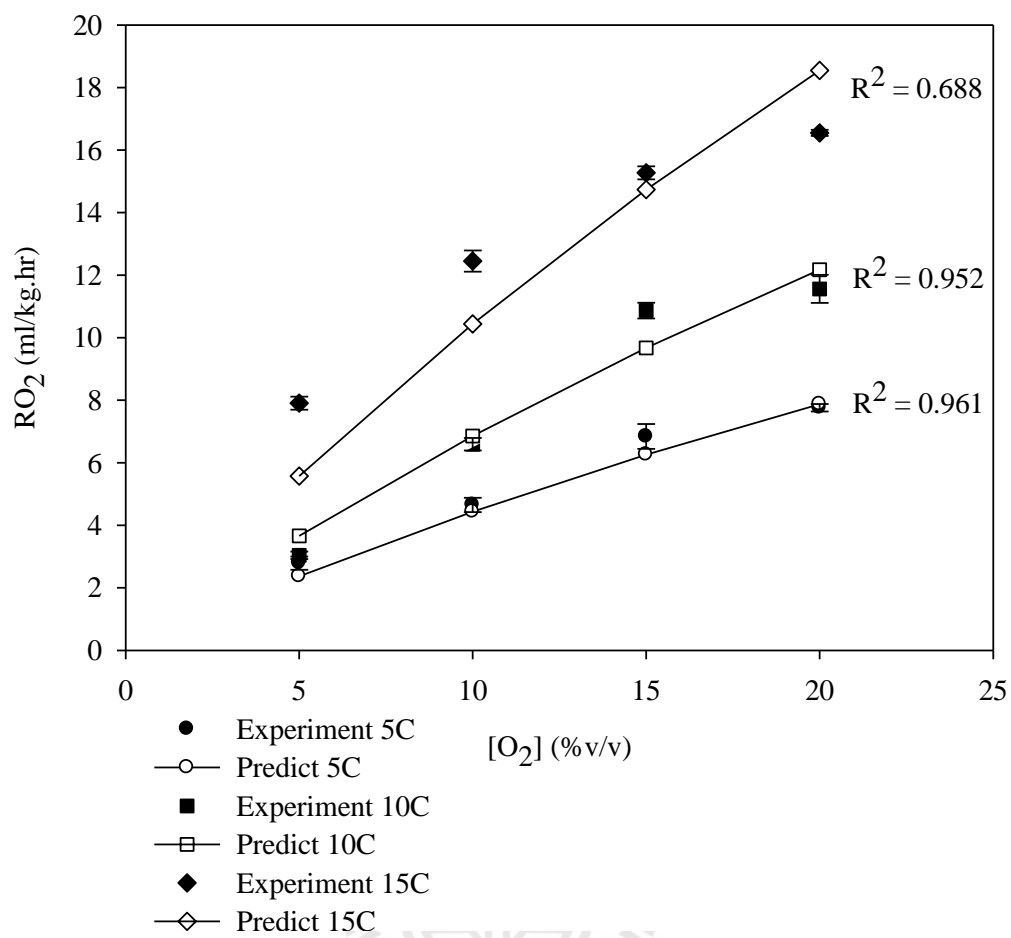
รูปที่ 4.31 ผลการทดสอบแบบจำลองอัตราการสร้าง CO<sub>2</sub> ของผักสลัดกรีนโอ๊คที่อุณหภูมิ 5°C 10°C และ 15°C ที่คำนวณได้จากสมการที่ 4.2



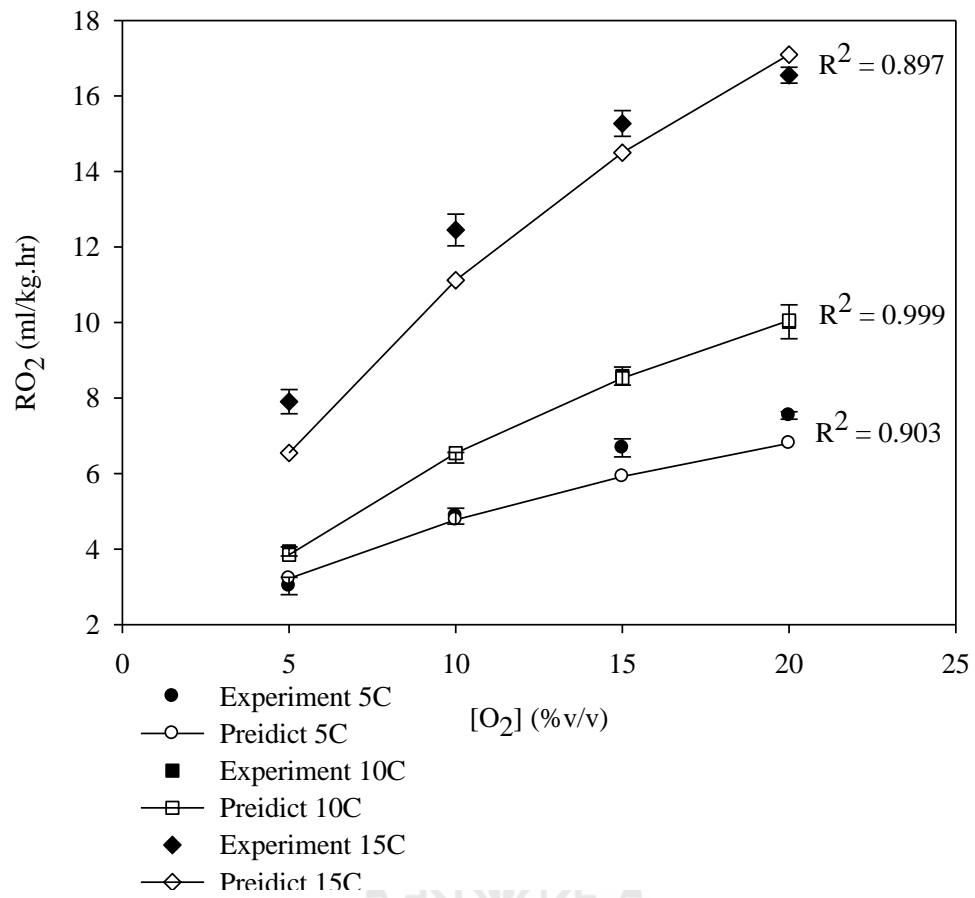
รูปที่ 4.32 ผลการทดสอบแบบจำลองอัตราการใช้  $O_2$  ของฝักสลัดบัตเตอร์เฮดที่อุณหภูมิ 5°C 10°C และ 15°C ที่คำนวณได้จากสมการที่ 4.2



รูปที่ 4.33 ผลการทดสอบแบบจำลองอัตราการสร้าง CO<sub>2</sub> ของผักสลัดแบตเตอรี่เฮดที่อุณหภูมิ 5°C 10°C และ 15°C ที่คำนวณได้จากสมการที่ 4.2

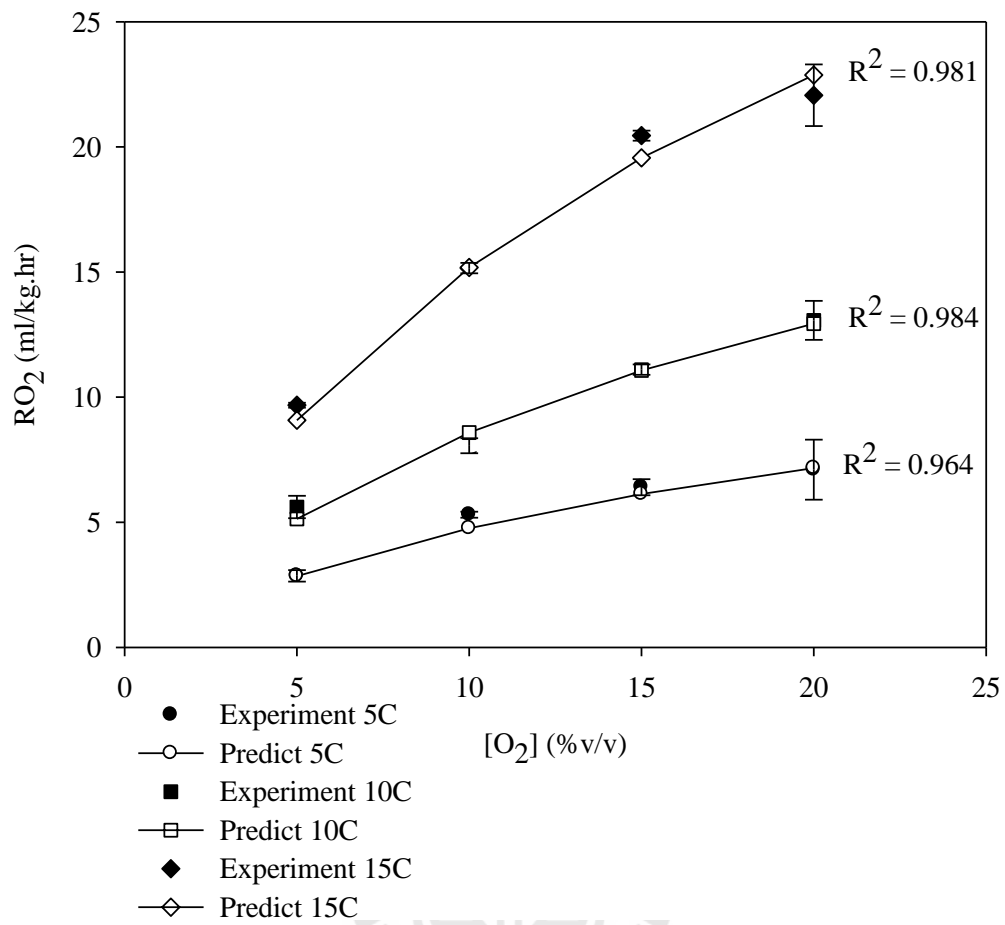


รูปที่ 4.34 ผลการทดสอบแบบจำลองอัตราการใช้ O<sub>2</sub> ของผักกาดหอมที่อุณหภูมิ 5°C 10°C และ 15°C ที่คำนวณได้จากสมการที่ 4.2

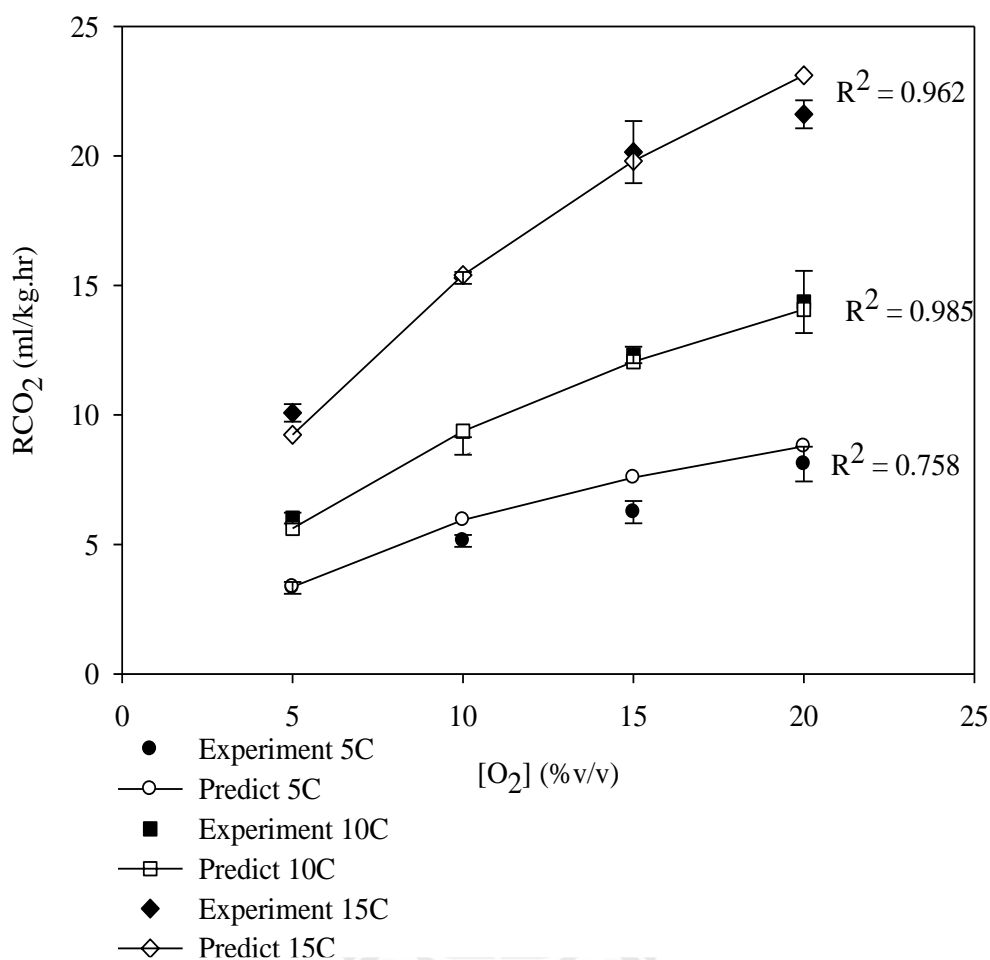


รูปที่ 4.35 ผลการทดสอบแบบจำลองอัตราสร้าง  $CO_2$  ของผักกาดหอมที่อุณหภูมิ 5°C 10°C และ 15°C ที่คำนวณได้จากสมการที่ 4.2





รูปที่ 4.36 ผลการทดสอบแบบจำลองอัตราการใช้  $O_2$  ของผักสลัดผสมชนิดที่อุณหภูมิ 5°C 10°C และ 15°C ที่คำนวณได้จากสมการที่ 4.2



รูปที่ 4.37 ผลการทดสอบแบบจำลองอัตราการสร้าง CO<sub>2</sub> ของผักสลัดผสมชนิดที่อุณหภูมิ 5°C 10°C และ 15°C ที่คำนวณได้จากสมการที่ 4.2

พิจารณาผลการคำนวณค่าอัตราการหายใจ (อัตราการใช้ออกซิเจน O<sub>2</sub> และอัตราการสร้างแก๊ส CO<sub>2</sub>) ที่คำนวณได้จากสมการที่ 4.2 กับผลการวัดจริงดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.30 ถึง รูปที่ 4.37 พบว่าค่าที่คำนวณได้จากสมการที่ 4.2 มีค่าใกล้เคียงกับผลการวัดจริงดังพิจารณาได้จากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R<sup>2</sup>) ซึ่งส่วนมากมีค่าอยู่ในช่วง 0.8 – 0.9 รวมถึงเมื่อนำข้อมูลอัตราการหายใจที่คำนวณได้จากสมการที่ 4.2 กับผลการวัดจริงไปทดสอบแปรปรวน (F-test) พบว่าค่าอัตราการหายใจเฉลี่ยของค่าที่คำนวณได้กับค่าที่วัดได้จริงไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % (P>0.05) ค่าดังกล่าวบ่งชี้ได้ว่าสมการที่ 4.2 นั้นสามารถนำไปทำนายอัตราการหายใจของผักสลัดที่ได้รับอิทธิพลของสัดส่วนผสมของแก๊สผสมและอิทธิพลของอุณหภูมิได้

#### 4.3.3 แบบจำลองอัตราการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมของผักสลัด

หัวใจหลักของงานวิจัยนี้คือการหาจลนศาสตร์ของการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมของผักสลัดซึ่งค่าที่ได้จะถูกนำไปเชื่อมโยงกับอัตราการหายใจเพื่อหาความสัมพันธ์ของทั้งสองปัจจัยโดยทั่วไปแล้วอัตราการเปลี่ยนแปลงสีในพืชนั้นจะเป็นไปตามสมการการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ศูนย์หรือปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่งอย่างใดอย่างหนึ่ง (Labuza, 1982) ซึ่งเมื่อพิจารณารูปที่ 4.38 พบว่าเปอร์เซ็นต์พื้นที่ที่เหลืออยู่ของคุณภาพที่เป็นปกติด้านสีโดยรวม (Remaining area of regular color) มีลักษณะเป็นไปตามสมการการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่ง ดังสมการที่ 4.3

$$A = A_0 e^{-k(t-t_0)} \quad (4.3)$$

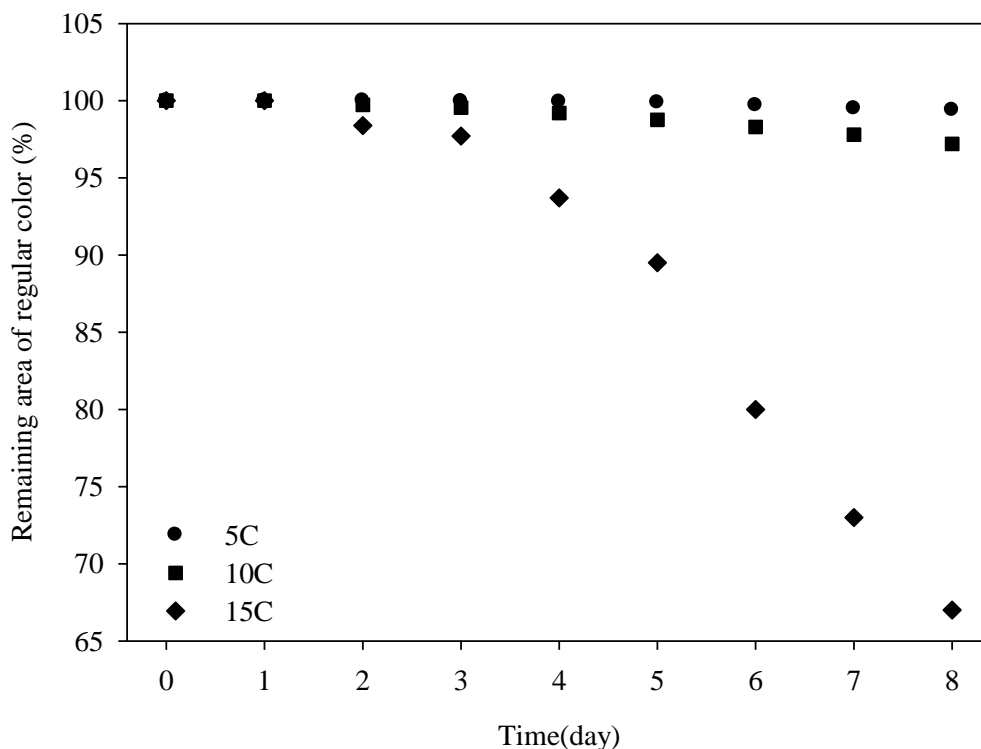
โดยที่

$A$	คือ	Remaining area of regular color (พื้นที่ที่เหลืออยู่ของคุณภาพที่เป็นปกติด้านสีโดยรวม) (%)
$A_0$	คือ	ค่าพื้นที่ตั้งต้นของคุณภาพที่เป็นปกติด้านสีโดยรวมซึ่งมีค่าเท่ากับ 100%
$k$	คือ	ค่าคงที่จลนศาสตร์ ( $\text{day}^{-1}$ )
$t$	คือ	อายุการเก็บรักษา (day)
$t_0$	คือ	อายุการเก็บรักษาเริ่มต้น (day)

การคำนวณค่าคงที่จลนศาสตร์ ( $k$ ) นั้นกระทำได้โดยใช้วิธีการถดถอยแบบไม่เชิงเส้นของสมการที่ 4.3 กับผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีประมวลผลภาพถ่าย โดยค่าคงที่จลนศาสตร์ ( $k$ ) ที่คำนวณได้ถูกแสดงไว้ในตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.12 ค่าคงที่จลนศาสตร์ ของการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมของผักสลัดกรีน ไอ้ค ณ อุณหภูมิ การเก็บรักษา 5°C 10°C และ 15°C

อุณหภูมิเก็บรักษา (°C)	$k$ ( $\text{day}^{-1}$ )	สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ )
5	0.0005	0.746
10	0.0029	0.885
15	0.0354	0.763



รูปที่ 4.38 เปอร์เซนต์พื้นที่ที่เหลืออยู่ของคุณภาพที่เป็นปกติด้านสีโดยรวมกับอายุการเก็บรักษา ณ อุณหภูมิ 5°C 10°C และ 15°C ตามลำดับ

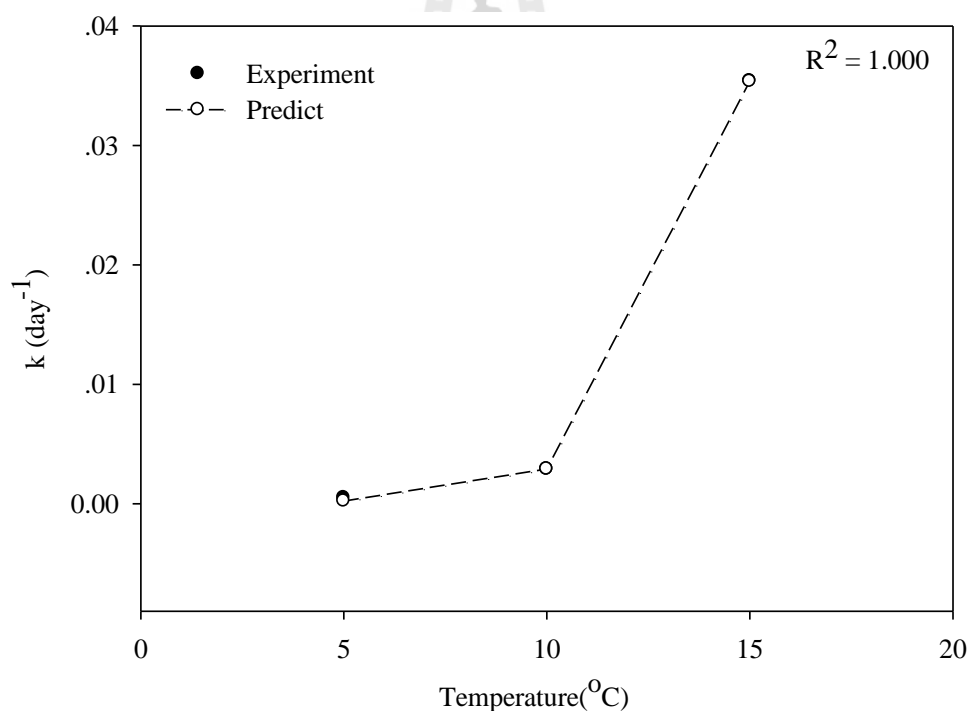
พิจารณาค่า  $k$  ที่คำนวณได้ดังสรุปในตารางที่ 4.12 พบว่าอุณหภูมิการเก็บรักษามีอิทธิพลต่อ  $k$  เมื่ออุณหภูมิการเก็บรักษาเพิ่มขึ้นค่า  $k$  มีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย โดยค่า  $k$  ที่เพิ่มขึ้นนี้บ่งชี้ได้ถึงอัตราการเสื่อมถอยทางคุณภาพ กล่าวคือค่า  $k$  ยิ่งมากอัตราการเสื่อมถอยทางคุณภาพจะมากตามไปด้วยส่งผลให้พื้นที่ที่เหลืออยู่ของคุณภาพที่เป็นปกติด้านสีโดยรวมนั้นมีค่าลดลงตามอัตราการเสื่อมถอยทางคุณภาพที่มีค่ามากขึ้น ดังจะเห็นได้จากรูปที่ 4.38 ทั้งนี้หากพิจารณาค่า  $k$  ที่คำนวณได้กับค่าอุณหภูมิของการเก็บรักษาพบว่าค่าทั้งสองมีความสัมพันธ์กันตามความสัมพันธ์ของ Arrhenius ดังนั้นจึงสามารถประมาณค่า  $k$  ที่แปรตามอุณหภูมิได้ตามความสัมพันธ์ของ Arrhenius ดังสมการที่ 4.4

$$k = k_{ref} e^{\left( \frac{-E_a}{R} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right) \right)} \quad (4.4)$$

โดยที่

$k_{ref}$	คือ	ค่าคงที่จลนศาสตร์ ณ อุณหภูมิอ้างอิง ( $\text{day}^{-1}$ )
$T_{ref}$	คือ	อุณหภูมิอ้างอิง (K) โดยงานวิจัยนี้เลือกใช้อุณหภูมิ $10^{\circ}\text{C}$ เป็นอุณหภูมิอ้างอิง
$R$	คือ	ค่าคงที่ของแก๊ส มีค่าเท่ากับ $8.314 \text{ kJ/kmol.K}$
$E_a$	คือ	activation energy ( $\text{kJ/kmol}$ )
$T$	คือ	อุณหภูมิเก็บรักษา (K)

จากการประมาณค่า  $k$  ที่แปรตามอุณหภูมิตามสมการที่ 4.3 สามารถประมาณ activation energy ( $E_a$ ) ได้ค่าเท่ากับ  $338954.926 \text{ kJ/kmol}$  ซึ่งผลการเปรียบเทียบค่า  $k$  ที่ประมาณได้จากสมการที่ 4.3 กับค่า  $k$  ที่วิเคราะห์ได้ตามตารางที่ 4.12 ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 4.39



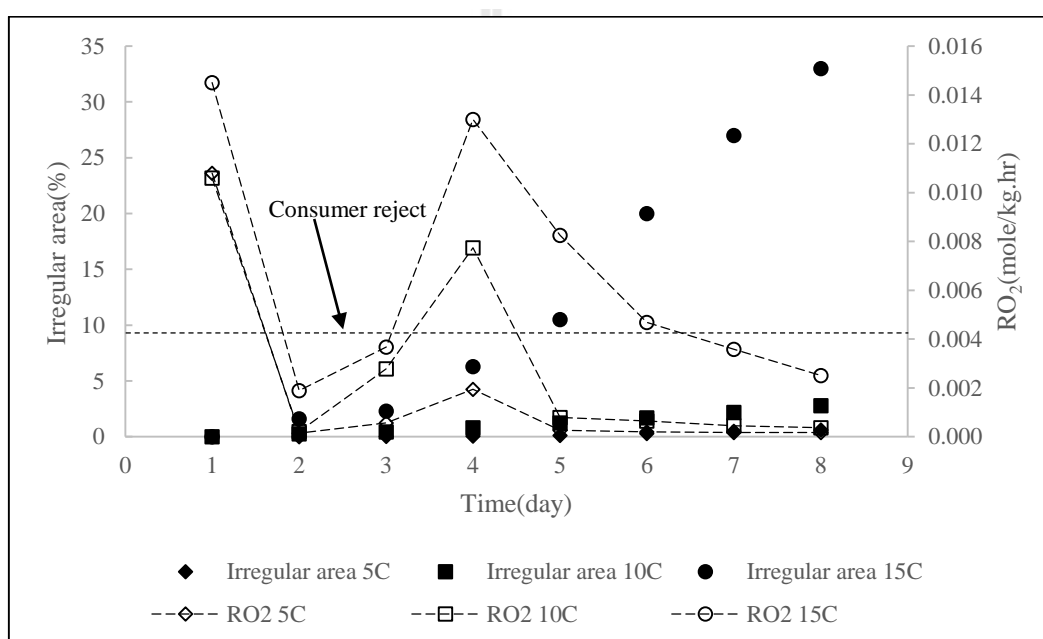
รูปที่ 4.39 ผลการประมาณค่าคงที่จลนศาสตร์ของการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวม  $k$  ตามความสัมพันธ์ของ Arrhenius

#### 4.3.4 แบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมกับอัตราการหายใจ

ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมกับอัตราการหายใจของผักสลัดกรีนโอ๊ค (อัตราการใช้แก๊ส  $O_2$ ) ที่อุณหภูมิ  $5^{\circ}C$   $10^{\circ}C$  และ  $15^{\circ}C$  ที่สภาพบรรยากาศปกติ ณ อายุเก็บรักษา 1 ถึง 8 วัน ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 4.40 จากรูปดังกล่าวพบว่าที่อายุการเก็บรักษา ณ วันที่ 4 อัตราการหายใจของผักสลัดกรีนโอ๊คมีอัตราเพิ่มสูงขึ้นจากวันก่อนหน้าซึ่งมีอัตราการหายใจที่สภาวะสมดุลอย่างมากและมีอัตราลดลง ณ อายุการเก็บรักษาในวันถัด ๆ ไปซึ่งลักษณะดังกล่าวนี้เป็นลักษณะของพีชจำพวก climacteric ดังได้บรรยายไว้แล้วในหัวข้อ 4.2.5 โดย ณ อายุการเก็บรักษาที่มีอัตราการหายใจเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วจากสภาวะสมดุลนี้จะถูกใช้เป็นดัชนีบ่งชี้จุดเริ่มต้นของการเสื่อมถอยทางคุณภาพซึ่งเมื่อนำข้อมูลดังกล่าวไปพิจารณาพร้อมกับอัตราการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมโดยใช้หลักเกณฑ์การตัดสินใจของผู้บริโภคจากงานวิจัยของ Zhuo et al. (2004) ที่พบว่าผู้บริโภคจะไม่ยอมซื้อผลิตภัณฑ์ผักสลัดเมื่อเปอร์เซ็นต์พื้นที่ความผิดปกติทางคุณภาพด้านสีมีค่ามากกว่า 9% โดยพบว่าที่อุณหภูมิเก็บรักษาที่  $15^{\circ}C$  นั้นสามารถเก็บรักษาผักสลัดกรีนโอ๊คจากจุดเริ่มต้นของการเสื่อมถอยทางคุณภาพ (วันที่ 4) ได้อีกเพียง 1 วัน ซึ่งระยะเวลาดังกล่าวนั้นสามารถใช้เป็นดัชนีบ่งชี้อายุการเก็บรักษา (shelf life) ของผักสลัดกรีนโอ๊ค ณ อุณหภูมิเก็บรักษาดังกล่าวได้ แต่ทั้งนี้กลับพบว่าตลอดระยะเวลาเก็บรักษา 8 วันผักสลัดกรีนโอ๊คที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิที่  $5^{\circ}C$  และ  $10^{\circ}C$  นั้นยังไม่พบการเปลี่ยนแปลงด้านสีจนเกินจุดยอมรับได้ของมนุษย์ตามหลักเกณฑ์ของ Zhuo et al. ทั้งนี้ผลดังกล่าวบ่งชี้ได้ว่าหากใช้คุณภาพด้านสีเป็นดัชนีบ่งชี้คุณภาพของผักสลัดเพียงอย่างเดียวนั้นอาจเกิดความผิดพลาดได้ เนื่องจากสภาวะการเก็บรักษาบางสภาวะอาจมีความเหมาะสมกับพีชประเภทนั้น ๆ จนไม่สะท้อนออกมาทางคุณภาพสี เช่น ผักสลัดที่เก็บรักษาที่  $5^{\circ}C$  และ  $10^{\circ}C$  ดังที่พบในงานวิจัยนี้ เป็นต้น แต่ทั้งนี้ลักษณะทางสรีรวิทยาของพืชซึ่งเป็นดัชนีบ่งชี้คุณภาพของพืชนั้นไม่ได้มีเพียงลักษณะทางสีเพียงอย่างเดียวเท่านั้น แต่ยังคงมีลักษณะทางคุณภาพด้านอื่น เช่น ปริมาณสารอาหาร รสชาติที่บ่งชี้ความสดของผักสลัด เป็นต้น ซึ่งลักษณะทางคุณภาพดังกล่าวมาข้างต้นอาจมีการเปลี่ยนแปลงไปแล้วแต่ไม่สะท้อนให้เห็นทางสี แต่สิ่งที่พบคือการเปลี่ยนแปลงคุณภาพดังกล่าวสะท้อนออกมาแล้วทางอัตราการหายใจ ดังนั้นการจะระบุคุณภาพของผักสลัดนั้นอาจไม่สามารถใช้คุณลักษณะทางคุณภาพเพียงด้านเดียวในการระบุได้เนื่องจากอาจมีข้อผิดพลาดเกิดขึ้นจำเป็นต้องใช้ลักษณะทางคุณภาพรวมในการระบุ แต่ทั้งนี้การที่จะศึกษาลักษณะทางคุณภาพได้ครบทุกด้านเพื่อมาระบุคุณภาพของผักสลัดนั้นอาจกระทำได้ยาก แต่อย่างไรก็ตามลักษณะทางคุณภาพด้านต่าง ๆ ที่เปลี่ยนแปลงไปของพืชนั้นได้ถูกสะท้อนออกมาแล้วทางการหายใจของพืช ดังนั้นจึงสามารถกล่าวได้ว่าอัตราการหายใจสามารถใช้ติดตามการเปลี่ยนแปลงคุณภาพหรือสามารถใช้

ทำนายอายุการเก็บรักษาของพีชได้ นอกจากนี้อัตราการหายใจยังสามารถนำไปใช้เพื่อออกแบบหรือเลือกใช้บรรจุภัณฑ์ที่เหมาะสมกับพีชแต่ละชนิดได้

ทั้งนี้ถึงแม้ว่าการเปลี่ยนแปลงด้านสีโดยรวมของผักสลัดที่ 5°C และ 10°C จะยังไม่ดำเนินไปจนถึงจุดที่ยอมรับได้ของผู้บริโภคก็ตามแต่เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงด้านสีกับอัตราการหายใจแล้วพบว่ามีความสัมพันธ์กันคือเมื่ออัตราการหายใจมีค่ามากอัตราการเปลี่ยนแปลงด้านสีโดยรวมมีค่ามากตามไปด้วย ดังแสดงในรูปที่ 4.40 โดยแบบจำลองที่ใช้อธิบายความสัมพันธ์ดังกล่าวนี้จะถูกแสดงถัดไป



รูปที่ 4.40 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมกับอัตราการหายใจของผักสลัดกรีนโอ๊ค

ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมกับอัตราการหายใจ (อัตราการใช้  $O_2$ ) ของผักสลัดกรีนโอ๊คสามารถอธิบายได้โดยใช้ Gamma-variate function ดังสมการที่ 4.5 (Thompson et al., 1964; Keijer et al., 1995)

$$R(t) \begin{cases} R_{\text{equilibrium}}; t < t_{\text{foot}} \\ B(t - t_{\text{foot}})^a e^{[-(t - t_{\text{foot}})/\tau]}; t \geq t_{\text{foot}} \end{cases} \quad (4.5)$$

โดย

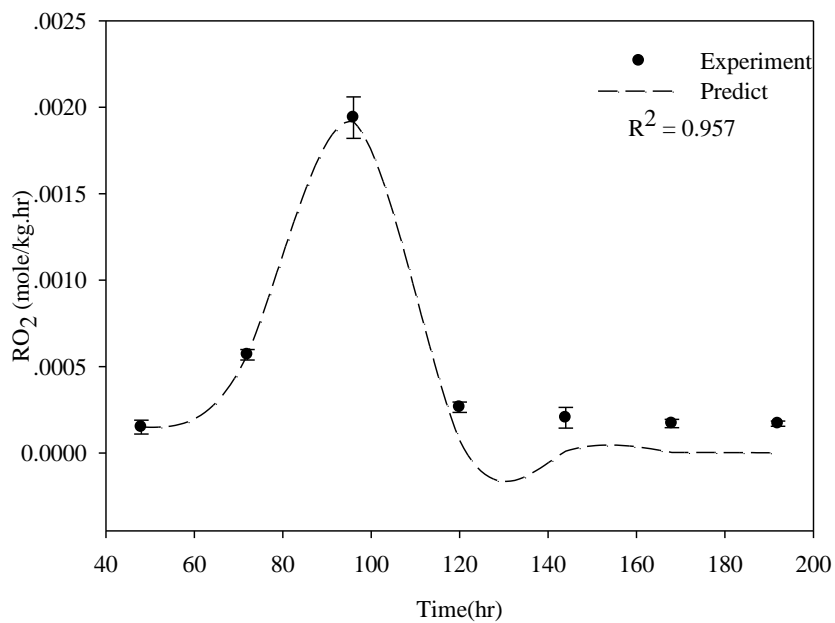
$R_{\text{equilibrium}}$	คือ	อัตราการหายใจที่สภาวะสมดุล (mole/kg.hr)
$t$	คือ	อายุการเก็บรักษา (hr)
$t_{\text{foot}}$	คือ	อายุการเก็บรักษา ณ เวลาที่อัตราการหายใจเริ่มมีสูงขึ้น (hr)
$B$	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์ (mole/kg.hr <sup>a+1</sup> )
$a$	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์
$\tau$	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์ (hr)

จากสมการที่ 4.5 ค่าสัมประสิทธิ์ต่าง ๆ สามารถหาได้จากวิธีการถดถอยแบบไม่เชิงเส้นซึ่งถูกสรุปไว้ในตารางที่ 4.13 สำหรับผลการทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองนั้นได้ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 4.41 4.42 4.43 ตามลำดับ

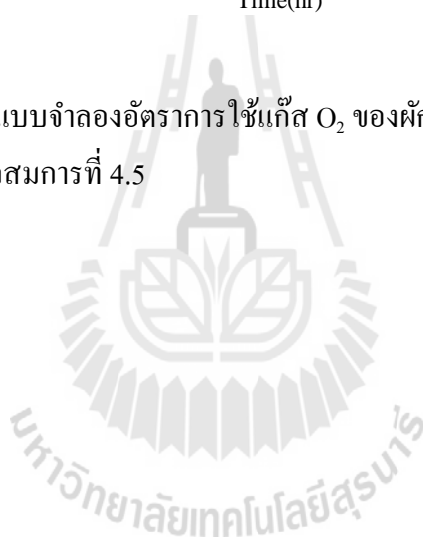
ตารางที่ 4.13 ค่าสัมประสิทธิ์สำหรับสมการ 4.5

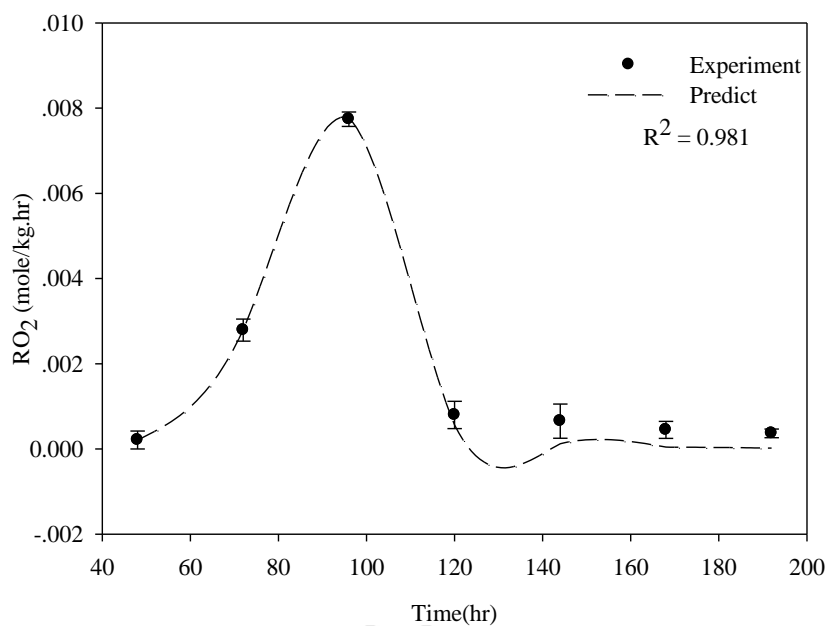
อุณหภูมิเก็บรักษา (°C)	$A$ (mole/kg.hr <sup>a+1</sup> )	$a$	$\tau$ (hr)
5	5532.00	-4.68	9434.00
10	1246.48	-3.77	9434.00
15	555.49	-3.33	9609.04



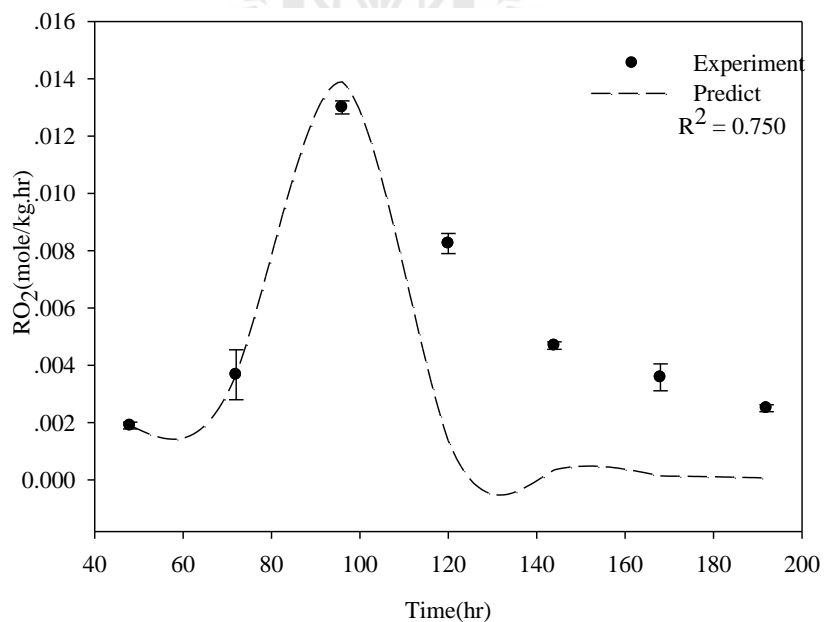


รูปที่ 4.41 ผลการทดสอบแบบจำลองอัตราการใช้ออกซิเจนของผักสลัดกรีน ไอซ์ที่อุณหภูมิ 5°C ที่คำนวณได้จากสมการที่ 4.5





รูปที่ 4.42 ผลการทดสอบแบบจำลองอัตราการใช้แก๊ส  $O_2$  ของผักสลัดกรีน ไอ้คที่อุณหภูมิ  $10^\circ C$  ที่คำนวณได้จากสมการที่ 4.5



รูปที่ 4.43 ผลการทดสอบแบบจำลองอัตราการใช้แก๊ส  $O_2$  ของผักสลัดกรีน ไอ้คที่อุณหภูมิ  $15^\circ C$  ที่คำนวณได้จากสมการที่ 4.5

จากผลการทดสอบความถูกต้องดังแสดงในรูปที่ 4.41 4.42 และ 4.43 พบว่า Gamma-variate function สามารถติดตามการเปลี่ยนแปลงของอัตราการหายใจที่ขึ้นกับอายุการเก็บรักษาได้เป็นอย่างดี จากผลดังกล่าวนี้สามารถบ่งชี้ได้ว่า Gamma-variate function สามารถนำไปประยุกต์ใช้ติดตามการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติโดยรวมกับอัตราการหายใจได้ โดยพิจารณาจากอายุการเก็บรักษา ณ วันที่อัตราการหายใจเพิ่มสูงขึ้นซึ่งจะเป็นวันเดียวกันกับวันที่การเปลี่ยนแปลงสี โดยรวมมีการเปลี่ยนแปลงสีอย่างชัดเจน



## บทที่ 5

### สรุปผลการศึกษาวิจัย

ผลงานวิจัยเรื่องแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างजनศาสตร์ของการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมของผักสลัดชนิดเดียวกับอัตราการหายใจมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาเครื่องมือตรวจวัดอัตราการหายใจของผักและผลไม้สดให้สามารถตรวจวัดได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำ พัฒนาเครื่องมือตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมของผักสลัดที่สามารถคำนวณหาพื้นที่ของการเสื่อมถอยทางคุณภาพด้านสีโดยรวมได้อย่างรวดเร็ว รวมถึงพัฒนาแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมและอัตราการหายใจ โดยแบบจำลองดังกล่าวจะถูกใช้เพื่อทำนายอายุการเก็บรักษาของผักสลัดต่อไป ซึ่งผลงานวิจัยดังกล่าวสามารถสรุปได้ดังนี้

#### 5.1 งานพัฒนาเครื่องมือวัดอัตราการหายใจและเครื่องมือวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมของผักสลัด

##### 5.1.1 เครื่องมือวัดอัตราการหายใจ

เครื่องมือวัดอัตราการหายใจที่พัฒนาขึ้นถูกพัฒนาให้สามารถติดตามอิทธิพลของแก๊สผสมและอุณหภูมิที่มีผลต่ออัตราการหายใจ โดยสามารถวัดค่าได้พร้อมกัน 3 อุณหภูมิ รวมถึงกระบวนการวัดสามารถกระทำได้อย่างอัตโนมัติเนื่องด้วยระบบถูกออกแบบให้ส่งการด้วยระบบคอมพิวเตอร์ร่วมกับระบบควบคุมแบบไมโครคอนโทรลเลอร์ซึ่งจะช่วยให้การวัดอัตราการหายใจของผักและผลไม้ทำได้สะดวกมากขึ้น นอกจากนี้กระบวนการวัดยังสามารถทำได้แล้วเสร็จภายในระยะเวลาสั้นเนื่องด้วยระบบที่พัฒนาขึ้นได้ใช้เครื่องวิเคราะห์แก๊สที่มีความละเอียดและความไวในการวัดสูง โดยสามารถติดตามการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของแก๊สที่แตกต่างกันได้ในระดับ 100 ppm จากผลการทดสอบโดยใช้ตัวอย่างผักสลัดซึ่งเป็นผักที่มีอัตราการหายใจต่ำพบว่าสามารถตรวจวัดได้แล้วเสร็จภายในระยะเวลา 4 ชั่วโมงต่อหนึ่งสัดส่วนแก๊สผสม

##### 5.1.2 เครื่องมือวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสีโดยรวม

เครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมของผักสลัดที่พัฒนาขึ้นภายใต้งานวิจัยนี้ถูกพัฒนาโดยใช้หลักการประมวลผลภาพถ่าย (Image Processing) โดยพัฒนาให้เป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ซึ่งสามารถใช้งานได้ง่ายและรวดเร็ว ซึ่งการวิเคราะห์ค่าสีที่เปลี่ยนแปลงนั้น

ได้ใช้ค่า  $H^\circ$  เป็นดัชนีบ่งชี้การเปลี่ยนแปลงทางคุณภาพของผักสลัด โดยพบว่าผักสลัดที่มีคุณภาพปกติค่า  $H^\circ$  จะมีค่าอยู่ในช่วง 80 -135 องศา ส่วนผักสลัดที่มีคุณภาพผิดปกติจะมีค่า  $H^\circ$  อยู่ในช่วง 35 – 79 องศา นอกจากนี้การหาปริมาณการเสื่อมถอยทางคุณภาพหรือปริมาณการเปลี่ยนแปลงค่าสีโดยรวมของผักสลัดจะกระทำโดยทำการคำนวณหาพื้นที่ของผักสลัดทั้งในส่วนที่มีคุณภาพปกติและคุณภาพผิดปกติแล้วนำไปคำนวณหาเปอร์เซ็นต์พื้นที่ที่มีการเสื่อมถอยทางคุณภาพของผักสลัด ซึ่งการคำนวณหาพื้นที่ของผักสลัดนั้นกระทำโดยทำการนับจำนวนพิกเซลในบริเวณที่เป็นผักสลัดแล้วหารด้วยค่ามาตรฐานพิกเซลต่อพื้นที่เฉลี่ยซึ่งมีค่าเท่ากับ 1425 พิกเซลต่อตารางเซนติเมตร โดยค่าดังกล่าวนี้สามารถใช้ได้เฉพาะสภาวะควบคุมตามงานวิจัยนี้เท่านั้น หากต้องการนำไปใช้ในงานอื่นจำเป็นต้องหาค่ามาตรฐานนี้ใหม่

## 5.2 ผลการวัดอัตราการหายใจของผักสลัดชนิดเดี่ยวและผักสลัดผสมชนิด

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของสัดส่วนผสมของแก๊สผสมและอุณหภูมิต่ออัตราการหายใจของผักสลัด โดยกระทำการวัดทั้งในส่วนของผักสลัดชนิดเดี่ยวโดยใช้ตัวอย่างผักสลัดที่แตกต่างกัน 3 ชนิด (ผักสลัดกรีนโอ๊ค ผักสลัดบัตเตอร์เฮด และผักกาดหอม) และผักสลัดผสมชนิด (ใช้ผักทั้ง 3 ชนิดผสมกัน) ผลที่ได้พบว่าทั้งสัดส่วนผสมของแก๊สผสมและอุณหภูมิมีอิทธิพลต่ออัตราการหายใจ โดยพบว่าการลดความเข้มข้นของแก๊ส  $O_2$  และลดอุณหภูมิการเก็บรักษาสามารถลดอัตราการหายใจของผักสลัดได้ ทั้งนี้ยังพบว่าอิทธิพลของอุณหภูมินั้นมีผลต่ออัตราการหายใจมากกว่าสัดส่วนผสมของแก๊สผสม แต่อย่างไรก็ตามจากผลการทดลองบ่งชี้ได้ว่าหากสามารถใช้ปัจจัยทั้งสอง(สัดส่วนผสมของแก๊สผสมและอุณหภูมิ)ร่วมกันได้จะสามารถลดอัตราการหายใจได้มากยิ่งขึ้น นอกจากนี้ผลการทดสอบวัดอัตราการหายใจของผักสลัดผสมชนิดพบว่าอัตราการหายใจของผักสลัดผสมชนิดจะมีค่าใกล้เคียงกับอัตราการหายใจของผักที่มีอัตราการหายใจสูงที่นำมาผสมกัน ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าผักสลัดที่มีอัตราการหายใจสูงจะมีอิทธิพลต่ออัตราการหายใจของผักสลัดผสมชนิดมากกว่าผักที่มีอัตราการหายใจต่ำ

## 5.3 การพัฒนาแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมและอัตราการหายใจ

### 5.3.1 แบบจำลองอัตราการหายใจที่ได้รับอิทธิพลจากสัดส่วนผสมของแก๊สผสม

แบบสมการที่สามารถติดตามการเปลี่ยนแปลงของอัตราการหายใจเมื่อสัดส่วนผสมของแก๊สผสมเปลี่ยนไปของงานวิจัยนี้พบว่าเป็นไปตามแบบสมการของ Michaelis-Menten, แบบ Competitive inhibition ซึ่งพบว่าสามารถทำนายอัตราการหายใจได้อย่างแม่นยำโดยพิจารณา

จากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ ) พบว่ามีค่าสูงกว่า 0.9 และจากการทดสอบความแปรปรวน (F-test) พบว่าค่าอัตราการหายใจที่ได้จากการคำนวณด้วยแบบจำลองดังกล่าวกับค่าอัตราการหายใจที่ได้จากการทดลอง พบว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ซึ่งทำให้มั่นใจได้ว่าแบบจำลองดังกล่าวนี้สามารถนำไปใช้ทำนายอัตราการหายใจของผักสลัดที่ได้รับอิทธิพลจากสัดส่วนของแก๊สผสมได้

### 5.3.2 แบบจำลองอัตราการหายใจที่ได้รับอิทธิพลจากสัดส่วนผสมของแก๊สผสมและอุณหภูมิ

แบบจำลองอัตราการหายใจที่ได้รับอิทธิพลจากสัดส่วนผสมของแก๊สผสมและอุณหภูมิ เป็นแบบสมการที่รวมกันระหว่าง สมการของ Michaelis-Menten, แบบ Competitive inhibition และแบบสมการของ Arrhenius ซึ่งพบว่าสามารถทำนายอัตราการหายใจได้อย่างแม่นยำ โดยพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ ) พบว่ามีค่าอยู่ในช่วง 0.8 – 0.9 ซึ่งเป็นค่าที่สูง และจากการทดสอบความแปรปรวน (F-test) พบว่าค่าอัตราการหายใจที่ได้จากการคำนวณด้วยแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นกับค่าอัตราการหายใจที่ได้จากการทดลอง พบว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ดังนั้นจึงมั่นใจได้ว่าแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นสามารถใช้อัตราการหายใจที่ได้รับอิทธิพลจากสัดส่วนผสมของแก๊สผสมและอุณหภูมิได้

### 5.3.3 แบบจำลองการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมของผักสลัดชนิดเดียว

การพัฒนาแบบจำลองเพื่อติดตามการเปลี่ยนแปลงค่าสีโดยรวมโดยใช้ผักสลัดกรีนโอ๊คเป็นตัวอย่างทดสอบ พบว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าสีโดยรวมเป็นไปตามสมการปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง โดยสามารถคำนวณค่าคงที่จลนศาสตร์ ( $k$ ) ณ อุณหภูมิการเก็บรักษา 5°C 10°C และ 15°C ได้เท่ากับ 0.0005 day<sup>-1</sup> 0.0029 day<sup>-1</sup> และ 0.0354 day<sup>-1</sup> ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าค่าคงที่จลนศาสตร์ ( $k$ ) มีค่าแปรเปลี่ยนตามอุณหภูมิโดยมีลักษณะเป็นไปตามแบบสมการของ Arrhenius ซึ่งจากการคำนวณสามารถหาค่า activation energy ( $E_a$ ) ได้เท่ากับ 338954.926 kJ/kmol

### 5.3.4 แบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมกับอัตราการหายใจ

ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมกับอัตราการหายใจ (อัตราการใช้ออกซิเจน  $O_2$ ) ของผักสลัดกรีนโอ๊คสามารถอธิบายได้โดยใช้ Gamma-variate function ซึ่งพบว่า Gamma-variate function สามารถติดตามอัตราการหายใจตามอายุการเก็บรักษาได้เป็นอย่างดี โดยสมการดังกล่าวนี้สามารถนำไปคำนวณหาจุดตั้งต้นของการเสื่อมถอยทางคุณภาพได้ ซึ่งพิจารณา

จากอายุการเก็บรักษา ณ วันที่อัตราการหายใจเพิ่มสูงขึ้นซึ่งจะเป็นวันเดียวกันกับวันที่การเปลี่ยนแปลงสี โดยรวมมีการเปลี่ยนแปลงสีอย่างชัดเจน



## เอกสารอ้างอิง

- จิ่งแท้ ศิริพานิช, (2538), ศีร์รวิทยาและเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยวผักและผลไม้. ภาควิชาพืชสวน คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพมหานคร. 141
- Angos et.al., (2007). Control of respiration and color modification on minimally processed potatoes by means of low and high O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> atmospheres. **Journal of Postharvest Biology and technology**. 48 : 422-430.
- Day., (1993). Principles and applications of modified atmosphere packaging of food. **Fruits and Vegetables**. Blackie Academic & Professional, Chapman & Hall: Glasgow, NZ : 114-132.
- Fonseca, S.C., Oliveira, F.A.R., and Brecht J.K. (2002). Modelling respiration rate of fresh fruits and vegetables for modified atmosphere packages: a review. **Journal of Food Engineering**. 52 : 99-119.
- Giannakourou, M.C., and Taoukis, P.S. (2003). Kinetic modeling of vitamin C loss in frozen green vegetables under variable storage condition. **Food Chemistry**. 83(1) : 33-41.
- Hertog, M.L.A.T.M., Nicholson, S.E., and Whitmore, K. (2003). The effect of modified atmospheres on the rate of quality change in 'Hass' avocado. **Postharvest Biology and Technology**. 29 : 41-53.
- Kang, J.S., and Lee, D.S. (1997). A Kinetic Model for Transpiration of Fresh Produce in a Controlled Atmosphere. **Journal of Food Engineering**. 35 : 65-73.
- Keijer JT, Rossum ACV, Eenige MJV (1995), Semiquantitation of regional myocardial blood flow in normal human subjects by firstpass magnetic resonance imaging. **American Heart Journal**. 130 : 893–901.
- Labuza, T. P. (1982). Open shelf life dating of foods. Westport, Conn. **Food and Nutrition Press**



- Lee, D.S., Hagggar, P.E., and Yam, K.L. (1991). Model for fresh produce respiration in modified atmosphere based on principles of enzyme kinetics. **Journal of Food Science**. 56 : 1580-1585.
- Lertsiriyothin, W., Jarussinwichai, N. (2005). Computational Software for the Designing of Modified Atmosphere Packaging Used for Fresh or Precut Vegetables and Fruits (“M.A.P. Design”) , Licensing No. 121623, **Department of Intellectual Property**, Ministry of Commerce. Thailand.
- Makino, Y., Iwasaki, K., and Hirata, T. (1996). A theoretical model for oxygen consumption in fresh produce under an atmosphere with carbon dioxide. **Journal agricultural engineering research**. 65 : 193-203.
- Makino, Y. and Hirata, T. (1997) (a). Modified atmosphere packaging of fresh produce with a biodegradable laminate of chitosane-cellulose and polycaprolactone. **Postharvest Biology and Technology**. 10 : 247-254.
- Quevedo, R., Díaz, O., Ronceros, B., Pedreschi, F., and Aguilera, J.M. (2009). Description of the kinetic enzymatic browning in banana (*Musa cavendish*) slices using non-uniform color information from digital images. **Journal of Research International**. 42 : 1309-1314.
- Rooney M.L. (Ed), Active food packaging. Blackie Academic & Professional, **Chapman & Hall**, Glasgow, NZ : 55-72.
- Thompson HK, Starmer CF, Whalen RE, McIntosh HD (1964). Indicator transit time considered as a gamma variate. **Circulation Research**. 14 : 502–515.



**ภาคผนวก ก**

**บทความและสิทธิบัตรที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่**

## บทความและสิทธิบัตรที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

S. AEKRUM and W. LERTSIRIYOTHIN (2012). PREDICTIVE SHELF LIFE

OF GREEN OAK BY IMAGE ANALYSIS. *Italian Journal of Food Science*, Vol. 24  
Issue 4, p16,

สุวรรณ เอกรัมย์ และ วีระศักดิ์เลิศสิริโยธิน (2554) ระบบวัดอัตราการหายใจความไวสูงสำหรับผัก  
และผลไม้สด ว. วิทย. กษ. 42 : 3 (พิเศษ) หน้า 319-322

สุวรรณ เอกรัมย์ และ วีระศักดิ์เลิศสิริโยธิน (2555) โปรแกรมประมวลผลภาพถ่ายเพื่อระบุพื้นที่  
ความผิดปกติของคุณภาพด้านสีของผักสลัด การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตร  
แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 13 4-5 เมษายน 2555 จังหวัดเชียงใหม่



---

## PREDICTIVE SHELF LIFE OF GREEN OAK BY IMAGE ANALYSIS

S. AEKRUM<sup>1</sup> and W. LERTSIRIYOTHIN<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>School of Mechanical Engineering,  
and <sup>2</sup>School of Agricultural Engineering, Institute of Engineering,  
Suranaree University of Technology, Thailand  
\*E-mail: lsrytw@sut.ac.th

### ABSTRACT

Relationship between rate of gas exchange and rate of quality loss for prediction the shelf life of Green oak has been studied in this research. Green oak was washed, cut, and centrifuged for 1 minute by manual salad spinner to remove excess water and packed in LLDPE plastic bag. Three MAP conditions of O<sub>2</sub>:CO<sub>2</sub>:N<sub>2</sub> equal to 1:5:94, 5:5:90, and 10:5:85 were studied and all packages were stored at temperature of 5°C. The image of Green oak samples was taken 7 times over 20 days and analyzed for area of irregular color appearing on each bag of samples with self-developed image analysis program. The samples on same day were subjected to visual evaluation for scaling the acceptability by trained panellist. Results showed that irregular color area of Green oak greater than 9% was defined as the unacceptable criteria and the color deterioration rate was found to follow the modified 1<sup>st</sup>-order reaction rate. In addition, respiration rates of cut green oak under the three MAP conditions were analyzed from the rate of gas exchange data. All cases of the respiration rate data of Green oak were obeyed the enzyme kinetic rate form proposed by Uchino. The rates of respiration were varied dependently on the initial filling gas compositions. Simplified form of the enzyme kinetic respiration rate was superimposed with the form of modified 1<sup>st</sup>-order reaction rate used for modelling the color deterioration rate, so we proposed that shelf life prediction could be obtained directly by the respiration rate model via the correlation between respiration and color deterioration. Studied results also confirmed that the image analysis program and respiration rate measurement were crucial tools for modelling the shelf life of vegetable salad product.

Key words: Image analysis, kinetic rate, shelf life, color deterioration, vegetable.

## INTRODUCTION

Nowadays, modified atmosphere packaging (MAP) is widely used in fresh vegetable and fruit industry to preserve their freshness and prolong the product shelflife. By means of controlling the respiration rate of fresh products together with cold storage temperature, deterioration rate of the product quality could be delayed effectively in various kinds of veggies and fruits resulting in longer shelf life. However, designing of MAP to prolong the shelf life of each type of veggie products requires the knowledge of its respiration rate, rate of quality deterioration, and packaging material properties. Without the first two factors knowledge, industry practices commonly design the MAP for fresh veggies and fruit based on experimental data only. To accurately predict the product shelf life packed in MAP, mathematical correlation of the respiration rate model and the rate of quality deterioration is indeed a significant information. Even though, various mathematical models for respiration rate and quality deterioration rate of fresh vegetables and fruits were proposed as nicely reviewing by Fonseca *et al.* (2002). Among the respiration models, the Michaelis-Menten type models or enzyme kinetic rate models have been applied to describe the relation between the respiration rate and factors affecting it such as gas compositions and storage time for many vegetable and fruit varieties. Lee *et al.* (1991) applied the Michaelis-Menten-type model to calculate the respiration rate of blueberry effecting by gas composition inside the package while Uchino *et al.* (2004) developed temperature and time dependent respiration models for eggplant, asparagus and broccoli base on enzyme kinetic rate model. The effect of temperature on the respiration rate and quality change could be described by Arrhenius relation.

Since the rates of some quality deterioration such as color change and loss of vitamin are also governed by enzymatic reaction, the correlation, if any, between the respiration rate and rate of quality deterioration of fresh veggies and fruits may definitely be useful for predicting the shelf life. Therefore, the purpose of this study was to predict the shelf life of green oak packed in MAP and to describe the mathematical relation between the kinetic rate of its respiration and the rate of quality loss due to color change.

## MATERIALS AND METHODS

**Sample preparation** Fresh Green oak were bought from a local shop in Suranaree University of Technology, Thailand. Green oak were cut, washed, centrifuged for 1 minute by manual salad spinner to remove excess water and 40 g of shredded green oak were packed in double bags made of linear low density polyethylene (LLDPE). The double bags were used to ensure that the changing of gas concentrations in each set of initial filling composition were not at the same level throughout 20 days, so effect of MAP conditions on the respiration rate and color deterioration was truly justified. All bags were initially filled with a specific gas composition of  $O_2:CO_2:N_2$  and stored at temperature of 5°C. Three sets of  $O_2:CO_2:N_2$  composition were at 1:5:94, 5:5:90, and 10:5:85.

**Image acquisition** In order to determine the deterioration rate of the sample color, green oak samples were photographed 7 times over 20 days at a resolution of 1024 x 786 pixels by digital camera (FUJIFLIM, FinePix S1500) under illumina-

tion of D<sub>65</sub> lamp positioning at 20 cm above the sample and all images were saved in the RGB color space with a file formats of JPEG.

#### *Digital image analysis for determination of color deterioration rate*

Every image was analyzed for irregular-color area by using self-developed computing code that was capable of integrating for the area having specific H<sup>a</sup> values. In this case, the irregular color was assigned by two ranges of H<sup>a</sup> value shown in Table 1.

Table 1 - H<sup>a</sup> ranges of irregular colors from digital image of Green oak samples.

Ranges	H <sup>a</sup>	
	Lower limit	Upper limit
1	35	80
2	95	100

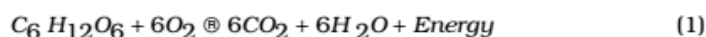
The remaining area of regular color was used for modeling the deterioration rate of sample color. Kinetic model coefficients were obtained by a non-linear regression method using SigmaPlot version 10 (Systat Software, Inc., USA).

**Respiration rate measurement** Gas sample in the headspace of each sample bag was taken every 4 days to analyze for O<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub> concentration using GC-TCD (GC-2010, Shimadzu, Kyoto, Japan). Then, the enzyme kinetic respiration rate as a function of storage time, Eq. 2 was modeled and reported in term of O<sub>2</sub> consumption and CO<sub>2</sub> production rates. Here, the respiration rate was presumed to be governed by the enzyme kinetic rate model similar to the one reported by Uchino (2004) and model coefficients were obtained by non-linear regression method using SigmaPlot version 10 (Systat Software, Inc., USA). Model fitness was indicated by R-square.

**Correlation between the kinetic rates of respiration and color deterioration** The relation between the respiration rate and rate of color deterioration could be described by comparing the kinetic rate constants of both reactions. Transformation of the respiration rate described by Eq. 2, which contains 3 types of kinetic rate constants, to the modified 1<sup>st</sup>-order rate of color deterioration is needed prior to the comparison of the kinetic rate constant. It should be noted here that the enzyme kinetic respiration model in the form of Eq. 2 could be actually written in 3 parameters consisting of only a kinetic rate constant and two reaction constants.

## RESULTS AND CONCLUSION

Fresh fruits and vegetables maintain metabolic activities such as the respiration and photosynthesis after harvest until senescence state. The process of respiration can be represented by a simplified chemical reaction (Lee *et al.*, 1991)



Respiration process may be somehow pictured as an enzyme kinetic governing rate as widely reported for many kinds of fruits and veggies (Andrich *et al.*, 1991; Lee *et al.*, 1991; Peppelenbos and van't Leven, 1996). In general, two mathematical forms of enzyme kinetic respiration rate models were written namely for rates of

CO<sub>2</sub> production and O<sub>2</sub> consumption as a function both gas concentrations inside the package and as a function enzyme-substrate, rate constant, and time. The latter form explicitly indicated that both rates of CO<sub>2</sub> production and O<sub>2</sub> consumption were changed as a function of storage time and remaining O<sub>2</sub> in the package. Therefore, shelf life prediction was easily deduced by this particular form of respiration model. Hence, in modeling the respiration rate, we chose to describe the rates of CO<sub>2</sub> production and O<sub>2</sub> consumption by applying a form of enzyme kinetic respiration rate reported by Uchino *et al.* (2004). The enzyme kinetic respiration rate model can be expressed as follows:

$$R = k \left\{ \frac{k_s}{k} - \left( \frac{k_s}{k_d} - [ES]_0 \right) e^{(-k_d t)} \right\} \quad (2)$$

where R is the respiration rate (% by mol.kg<sup>-1</sup>.day<sup>-1</sup>), k is the rate constant of respiration (day<sup>-1</sup>), t is the time (day), [ES]<sub>0</sub> is the initial enzyme-substrate concentration which is assumed equal to initial concentration of O<sub>2</sub> in the bag (% by mol.kg<sup>-1</sup>) and k<sub>s</sub> and k<sub>d</sub> are rate constants for synthesis and decomposition of enzyme-substrate (% by mol.kg<sup>-1</sup>.day<sup>-1</sup>), (day<sup>-1</sup>), respectively. The Eq. 2, R, was used to predict both the rate of O<sub>2</sub> consumption (R<sub>o</sub>) and rate of CO<sub>2</sub> production (R<sub>c</sub>) for this research. The results are shown in Fig. 1 and all parameters for the R<sub>o</sub> and R<sub>c</sub> models were summarized in Tables 2 and 3, respectively.

In this research, the enzyme kinetic respiration rate models, O<sub>2</sub> consumption rate and CO<sub>2</sub> production rate, in the form of Eq. 2 was transformed to the modified 1<sup>st</sup>-order reaction rate. The model can be expressed as follows:

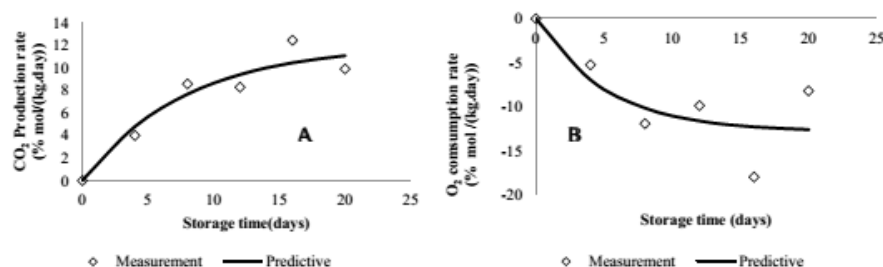


Fig. 1 - Experimental data and predictive model obtained from Eq. 2 of CO<sub>2</sub> production (A) and O<sub>2</sub> consumption (B) of Green oak at MAP condition 1:5:94 (O<sub>2</sub>:CO<sub>2</sub>:N<sub>2</sub>) and at 5°C.

Table 2 - Model parameters of eq.(2) for prediction of O<sub>2</sub> consumption rate of Green oak at 5°C.

MAP condition (O <sub>2</sub> :CO <sub>2</sub> :N <sub>2</sub> ) (% by volume)	k(days <sup>-1</sup> )	k <sub>s</sub> (%mol.kg <sup>-1</sup> .(days <sup>-1</sup> ))	k <sub>d</sub> (%mol.kg <sup>-1</sup> .(days <sup>-1</sup> ))	R <sup>2</sup>
1:5:94	-0.0012	2063.9447	0.1947	0.6719
5:5:90	-0.0120	367.4467	0.3193	0.8307
10:5:85	-0.0040	44076137	1.1131	0.9581

Table 3 - Model parameters of eq.(2) for prediction of CO<sub>2</sub> production rate of Green oak 5°C.

MAP condition (O <sub>2</sub> :CO <sub>2</sub> :N <sub>2</sub> ) (% by volume)	k(days <sup>-1</sup> )	k <sub>s</sub> (%mol.kg <sup>-1</sup> .(days <sup>-1</sup> ))	k <sub>a</sub> (%mol.kg <sup>-1</sup> .(days <sup>-1</sup> ))	R <sup>2</sup>
1:5:94	0.0007	2063.4406	0.1263	0.9194
5:5:90	0.0047	362.0072	0.1499	0.9570
10:5:85	0.0047	362.0072	0.1499	0.9850

$$R_o = a_o e^{(-k_o t)} + b_o \quad (3) \quad R_c = a_c e^{(k_c t)} + b_c \quad (4)$$

where  $R_o$  is O<sub>2</sub> consumption rate at any time (% by mol. kg<sup>-1</sup>.day<sup>-1</sup>),  $R_c$  is CO<sub>2</sub> production rate (% by mol. kg<sup>-1</sup>.day<sup>-1</sup>),  $t$  is the time (day),  $k_o$  is the rate constant of O<sub>2</sub> consumption rate,  $k_c$  is the rate constant of CO<sub>2</sub> production rate (day<sup>-1</sup>),  $a_o$ ,  $b_o$ ,  $a_c$  and  $b_c$  are constants for O<sub>2</sub> consumption rate and CO<sub>2</sub> production rate (% by mol. kg<sup>-1</sup>.day<sup>-1</sup>).

For example, the parameters of O<sub>2</sub> consumption rate and CO<sub>2</sub> production rate for Green oak sample, packed under MAP condition of O<sub>2</sub>:CO<sub>2</sub>:N<sub>2</sub>=1:5:94 and stored at 5°C, were  $k_o = 0.2000$ ,  $a_o = 13.2180$ ,  $b_o = -12.8160$ ,  $k_c = 0.1310$ , and  $b_c = 11.9870$ . The profiles of O<sub>2</sub> consumption rate and CO<sub>2</sub> production rate obtained by Eqs. 3 and 4 were superimposed with the forms of  $R_o$  and  $R_c$  models based on Eq. 2 (profile not shown here). On the other hand, the O<sub>2</sub> consumption rate and CO<sub>2</sub> production rate of other types of vegetables, which are governed by enzyme kinetic respiration rate, may be directly modeled with the modified 1<sup>st</sup>-order reaction rate in order to get one kinetic rate constant.

In addition, we found that the rate of color deterioration (remaining area of regular color) was agreed well with the modified first order reaction rate. The model can be expressed as follows:

$$A = a_A e^{(k_A t)} + b_A \quad (5)$$

where  $A$  is remaining area of regular color (%),  $k_A$  is the rate constant of color change (day<sup>-1</sup>),  $t$  is the time (days),  $a_A$  and  $b_A$  are constants (%). For example, percent remaining area of regular color of Green oak stored under MAP condition of O<sub>2</sub>:CO<sub>2</sub>:N<sub>2</sub>=1:5:94 and at 5°C was presented in Fig. 2, and the parameters for rate of color deterioration was summarized in Table 4.

By comparison of the reaction rate constants (k-value), we found that the rate constant of O<sub>2</sub> consumption rate and the rate constant of CO<sub>2</sub> production of Green oak, stored under MAP condition of O<sub>2</sub>:CO<sub>2</sub>:N<sub>2</sub>=1:5:94 and at 5°C, was higher than the rate constant

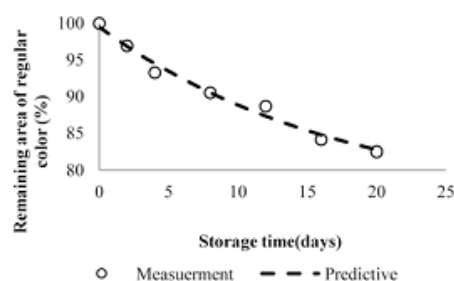
Fig. 2 - Remaining area of regular color of Green oak at MAP condition 1:5:94(O<sub>2</sub>:CO<sub>2</sub>:N<sub>2</sub>).

Table 4 - Model parameter for predicting the remaining area of regular color of Eq. 5.

a <sub>A</sub> (%)	k <sub>A</sub> (days <sup>-1</sup> )	b <sub>A</sub>	R <sup>2</sup>
25.1410	0.0550	74.3090	0.9830



of color (area of regular color) deterioration about 3.6 and 2.4, respectively. Once the ratio of rate constants between quality deterioration rate and respiration rate was defined, shelf life predictive model could be drawn directly from the respiration rate model. Anyhow, this propose concept still needs for further validation since the enzyme kinetic rate governing pathway for each reaction, which are not thoroughly understood, may be much different theoretically. To find a correlation of quality deterioration rate and respiration rate for practical usage was proved possible in this work, further studies were aimed at the effect of temperature, MAP conditions, and varieties of vegetables and fruits.

#### ACKNOWLEDGEMENTS

The authors thank Office of the National Research Council of Thailand (NRCT) for support funding and Suranaree University of Technology for support research facility.

#### REFERENCES

- Andrich, G., Fiorentini, R., Tuci, A., Zinnai, A., Sommovigo, G. 1991. A tentative model to describe respiration of stored apples. *J. Am. Soc. Hort. Sci.* 116: 478-481.
- Fonseca, S.C., Oliveira, F.A.R., Brecht, J.K. 2002. Modeling respiration rate of fresh fruits and vegetables for modified atmosphere packages: a review. *J. Food Eng.* 52: 99-119.
- Lee, D.S., Hagggar, P.E., Lee, J., Yam, K.L. 1991. Model for fresh produce respiration in modified atmospheres based on principles of enzyme kinetics. *J. Food Sci.* 56: 1580-1585
- Peppelenbos, H.W., van't Leven, J. 1996. Evaluation of four types of inhibition for modeling the influence of carbon dioxide on oxygen consumption of fruits and vegetables. *Postharvest Biol. Technol.* 7: 27-40.
- Uchino, T Nei, D., Hu, W., Sorour, H. 2004. Development of a mathematical model for dependence of respiration rate of fresh produce on temperature and time. *Postharvest Biol. Technol.* 34: 285- 293.

Agricultural Sci. J. 42 : 3 (Suppl.) : 319-322 (2011)

ว. วิทย์. กษ. 42 : 3 (พิเศษ) : 319-322 (2554)

ระบบวัดอัตราการหายใจความไวสูงสำหรับผักและผลไม้สด  
High sensitivity respiratory rate measuring system for fresh fruits and vegetables

สุวรรณ เอกรัมย์<sup>1</sup> และ วีระศักดิ์ เลิศศิริโยธิน<sup>2</sup>  
Suwan Aekrum<sup>1</sup> and Weerasak Lertsiriyothin<sup>2</sup>

## Abstract

This research was focused on the development of highly accurate and sensitive respiratory rate measuring system for fresh fruits and vegetables. The measuring system was designed to monitor changes of O<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub> levels in the system while the gas concentration can be maintained near the level of an initial set up point (the difference is less than 1% by volume). Therefore, the system is suitable for studying the respiration rate of vegetables and fruits under the various conditions of O<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub> mixing ratio using in the modified atmosphere packaging. Key elements of the system are gas mixer, micro diaphragm pump to transfer small amount of sampling air, and gas analyzer. The O<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub> analyzers are highly accurate and precise devices in term of capability to measure very low concentration of O<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub> by requiring a small volume of sampling air (volumetric flow rate of 0.45 l/min within 30 s measuring time). The sensitivity limit for the O<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub> analyzers are at 100 ppm (range 1-10%) and 50 ppm (less than 10%) by volume respectively. Other than that, both gas analyzers has the ability to measure a new value in a very short time, thus contributing to track the changes of gas levels with negligible effect on the system equilibrium. In this case, the O<sub>2</sub> analyzer can acquire the new sample in every one second while the CO<sub>2</sub> analyzer can take the new sample in every 5 seconds. This article also presents a measuring procedure for obtaining the optimum data of the changing level of O<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub> needed for modeling the respiration rate of vegetables and fruits at an actual age. Since the system is able to complete the measurement within a relatively short time (less than 2 days), the respiration rate of fresh vegetable and fruit can be considered as the values for fresh product having the same age with the starting time. **Keywords:** respiratory rate measuring system, respiration rate of vegetables and fruits, oxygen and carbon dioxide analyzers

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการพัฒนาการพัฒนาระบบวัดอัตราการหายใจสำหรับผักและผลไม้สดที่มีความถูกต้องและความไวสูง โดยระบบวัดเป็นแบบติดตามการเปลี่ยนแปลงปริมาณแก๊สในระบบที่สามารถรักษาระดับความเข้มข้นของแก๊สได้ใกล้เคียงค่าตั้งต้นของการตรวจวัด (ผลต่างน้อยกว่า 1 % โดยปริมาตร) จึงทำให้ระบบนี้เหมาะสำหรับใช้ศึกษาถึงค่าอัตราการหายใจของผักและผลไม้สดภายใต้สภาวะอัตราส่วนผสมของแก๊ส O<sub>2</sub> และ CO<sub>2</sub> ช่วงค่าต่างๆที่ใช้ในบรรจุภัณฑ์ปรับแต่งบรรยากาศองค์ประกอบสำคัญของระบบนี้คือ เครื่องผสมแก๊ส ปั๊มไดอะแฟรมขนาดไมโครเพื่อการส่งมวลอากาศปริมาณน้อย เครื่องวิเคราะห์แก๊ส O<sub>2</sub> และ CO<sub>2</sub> ที่มีความเสียดและแม่นยำสูงในการอ่านค่าความเข้มข้นของ O<sub>2</sub> และ CO<sub>2</sub> ในย่านความเข้มข้นค่ามากโดยใช้ปริมาตรตัวอย่างค่อนข้างน้อยมากคือ ค่า O<sub>2</sub> ได้ต่ำสุดถึง 100 ppm (ย่านการวัด 1-10%) และค่า CO<sub>2</sub> ได้ต่ำสุดถึง 50 ppm (ย่านการวัดค่าต่ำกว่า 10%) โดยปริมาตรต่ออัตราการไหลของปริมาตรแก๊สตัวอย่าง 0.45 l/min และเครื่องวิเคราะห์แก๊สทั้งสองยังมีความสามารถในการวัดค่าใหม่ได้ในช่วงเวลาสั้นมาก จึงเอื้อต่อการติดตามการเปลี่ยนแปลงปริมาณแก๊สในระบบได้อย่างต่อเนื่องโดยรอบวนสมมูลของระบบน้อยมาก ในกรณีนี้เครื่องวิเคราะห์ O<sub>2</sub> วิเคราะห์ตัวอย่างใหม่ได้ในทุกๆ 1 วินาที และสำหรับเครื่องวิเคราะห์ CO<sub>2</sub> ทำได้ในทุกๆ 5 วินาที บทความนี้ยังแสดงถึงกรรมวิธีในการใช้งานระบบวัดอัตราการหายใจเพื่อให้ได้มาซึ่งข้อมูลอัตราการเปลี่ยนแปลงระดับแก๊ส O<sub>2</sub> และ CO<sub>2</sub> ที่เหมาะสำหรับการสร้างแบบจำลองอัตราการหายใจของผักและผลไม้ที่ขึ้นกับอายุพืชผลสดจริง เนื่องจากระบบที่พัฒนาขึ้นใช้เวลาในการตรวจวัดสั้นโดยรอบวนการวัด

<sup>1</sup>สาขาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี นครราชสีมา 30000

<sup>2</sup>School of Mechanical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology Nakhon Ratchasima 30000.

<sup>3</sup>สาขาวิศวกรรมเกษตร สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี นครราชสีมา 30000

<sup>4</sup>School of Agricultural Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology Nakhon Ratchasima 30000.

อัตราการหายใจสามารถวัดได้เสร็จสิ้นภายในระยะเวลาน้อยกว่า 2 วัน จึงส่งผลให้การวัดอัตราการหายใจมีความใกล้เคียงกับอายุจริงของผักและผลไม้สดที่เริ่มต้นทำการตรวจวัด

**คำสำคัญ:** ระบบวัดอัตราการหายใจ อัตราการหายใจของผักและผลไม้ เครื่องวิเคราะห์ออกซิเจน และคาร์บอนไดออกไซด์

### คำนำ

อัตราการหายใจของผักและผลไม้มีความสำคัญอย่างมากต่อการออกแบบบรรจุภัณฑ์ปรับแต่งบรรยากาศ ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่นิยมใช้เพื่อยืดอายุการเก็บรักษาผักและผลไม้สด แต่ในปัจจุบันระบบวัดอัตราการหายใจยังไม่สามารถติดตามอัตราการหายใจของผักและผลไม้ในระยะเวลาสั้นได้ โดยเฉพาะพืชจำพวกผักสลัดที่มีระดับอัตราการหายใจต่ำโดยการวัดอัตราการหายใจของผักเหล่านี้ต้องใช้ระยะเวลาในการวัดนานหลายวัน สาเหตุเนื่องมาจากขีดจำกัดทางด้านเครื่องมือสำหรับวัดอัตราการหายใจที่มีความละเอียดไม่เพียงพอ ด้วยเหตุดังกล่าวทำให้ผู้วิจัยได้พัฒนาระบบวัดอัตราการหายใจที่สามารถวัดอัตราการหายใจได้ในระยะเวลาสั้นรวมถึงสามารถติดตามอัตราการหายใจในระดับต่ำได้ โดยระบบดังกล่าวได้ใช้เครื่องวิเคราะห์แก๊สที่มีความละเอียดและความไวสูงสำหรับการวิเคราะห์แก๊สซึ่งจะช่วยให้นักวิจัยสามารถติดตามอัตราการหายใจของผักและผลไม้สดที่มีอัตราการหายใจต่ำในระยะเวลาอันสั้นได้

### อุปกรณ์และวิธีการ

ระบบวัดอัตราการหายใจความไวสูงสำหรับผักและผลไม้สดที่สร้างขึ้น ภายใต้โครงการวิจัยนี้ประกอบไปด้วยอุปกรณ์หลักคือ เครื่องผสมแก๊ส (Gas Mixer Model KM 300-3M, WITT-Gasetechnik) เครื่องวิเคราะห์แก๊ส  $\text{CO}_2$  Model S-AGM (Advanced Gasmittler®, Erkrath, Germany) เครื่องวิเคราะห์แก๊ส  $\text{O}_2$  Model JC48V (SETNAG, FRANCE) บีมไดอะแฟรมขนาดไมโคร NMP 05L (KNF, Neuberger, Germany) แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สออกซิเจน แก๊สไนโตรเจน ไหลแก้วปริมาตร 2.5 ลิตรสำหรับบรรจุตัวอย่าง ตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้น คอมพิวเตอร์สำหรับเก็บข้อมูลและควบคุม (Figure 1)

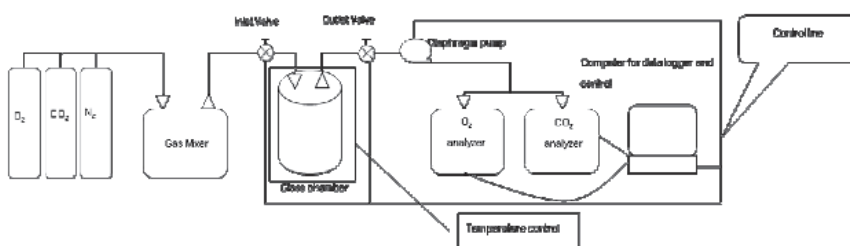


Figure 1 Respiratory rate measuring system for fresh fruits and vegetables

การทานสอบค่าความถูกต้อง และความละเอียดของเครื่องวิเคราะห์แก๊ส  $\text{CO}_2$  และ  $\text{O}_2$  ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ทำโดยการเทียบค่าวัดกับค่าที่วัดด้วยเครื่องวิเคราะห์แก๊ส  $\text{CO}_2$  และ  $\text{O}_2$  (OXYBABY, Witt Gas Controls LP, US) และแก๊สโครมาโตกราฟเทอร์มอลคอนดักทีวิตี (GC-TCD, SHIMADSU GC-2014 JAPAN) สำหรับการออกแบบระบบวัดอัตราการหายใจนั้นผู้วิจัยเลือกใช้วิธีการวัดแบบระบบกึ่งเปิด (semi-open system) ซึ่งเป็นระบบที่สามารถควบคุมอัตราการไหลเข้าออกของแก๊สให้เป็นแบบระบบปิดสนิท ขณะทำการวัดโดยที่สามารถติดตามตรวจวัดอัตราการหายใจของพืชผลได้โดยไม่ทำให้ระบบเสียสมดุลเกินไปจากค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างจากค่าความเข้มข้นตั้งต้นของแก๊สผสมที่ต้องการสังเกตการณ์ ซึ่งได้ทำการกำหนดไว้ล่วงหน้า การทดสอบการทำงานของระบบการวัดอัตราการหายใจของระบบนี้ทำโดยใช้ผักสลัด Green oak จำนวน 70 กรัม ต่อชุดทดสอบเป็นตัวอย่าง สภาวะทดสอบใช้ความเข้มข้นของแก๊สผสม  $\text{O}_2:\text{CO}_2:\text{N}_2$  เป็น 10:5:85 % โดยปริมาตร ที่อุณหภูมิ 22 °C การวิเคราะห์ความเข้มข้นของแก๊ส  $\text{O}_2$  และ  $\text{CO}_2$  ที่มีในไหลแก้วบรรจุตัวอย่าง ผัก ณ ขณะเวลาใด ๆ ทำได้โดยการใช้นีมไดอะแฟรมขนาดไมโครดูดแก๊สในอัตราการไหล 0.45 ลิตรต่อนาทีเป็นระยะเวลา 30 วินาทีจากไหลแก้วตัวอย่าง ส่งไปยังเครื่องวิเคราะห์แก๊สทั้งสองแบบแยกส่วน การวัดทำทุกๆ 1 ชั่วโมงเป็นระยะเวลา 12 ชั่วโมง โดยเมื่อสิ้นสุดการวัดแต่ละครั้งต้องมีการเติมแก๊ส  $\text{N}_2$  100 % โดยปริมาตรกลับเข้าไปในไหลแก้วในปริมาตรเท่ากับปริมาตรแก๊สที่ถูกดูดออกไปเพื่อรักษาสสมดุล

ความดันและมวลของระบบ เทคนิคดังกล่าวนี้จะช่วยลดผลกระทบจากปริมาตรที่หายไปของแก๊สผสมในโหลแก้วที่ทำให้ความเข้มข้นของแก๊ส O<sub>2</sub> และ CO<sub>2</sub> ในระบบเจือจางลงซึ่งมีผลโดยตรงต่อความถูกต้องของผลการวัดอัตราการหายใจได้

**ผล**

การทดสอบความถูกต้องและขีดจำกัดของเครื่องวิเคราะห์แก๊ส ความถูกต้องและขีดจำกัดของเครื่องมือถือได้ว่าเป็นสิ่งสำคัญมากต่อการทดลอง โดยผลการทดสอบความถูกต้องของเครื่องวิเคราะห์แก๊ส CO<sub>2</sub> S-AGM เทียบกับ OXYBABY ถูกแสดงใน Figure 2 ซึ่งผลที่ได้พบว่า เครื่องวิเคราะห์ CO<sub>2</sub> S-AGM มีค่าความเบี่ยงเบนจากค่าเฉลี่ยที่ ± 600 ppm ในขณะที่ OXYBABY ให้ค่าเบี่ยงเบนของแก๊ส CO<sub>2</sub> เป็น ± 1000 ppm ส่วนเครื่องวิเคราะห์แก๊ส O<sub>2</sub> JC48V เทียบกับ OXYBABY พบว่า เครื่องวิเคราะห์ O<sub>2</sub> JC48V มีค่าความเบี่ยงเบนจากค่าเฉลี่ยที่ ± 500 ppm ในขณะที่ OXYBABY ให้ค่าเบี่ยงเบนของแก๊ส O<sub>2</sub> เป็น ± 800 ppm (ผลการทดสอบแก๊ส O<sub>2</sub> ไม่ได้แนบมาเนื่องจากด้วยพื้นที่จำกัด)

**การทดสอบกรรมวิธีการวัด** ระบบวัดอัตราการหายใจแบบใช้วิธีการวัดแบบระบบกึ่งเปิดโดยระบบการวัดใช้การเติม N<sub>2</sub> ปริมาตรเท่าเดิมกับที่ถูกดูดออกจากระบบกลับเข้าไปในโหลแก้วทุกครั้งหลังจากการวิเคราะห์หาปริมาณ O<sub>2</sub> และ CO<sub>2</sub> ที่ปรากฏ ณ ขณะเวลาใดๆ เสร็จจะช่วยลดผลกระทบเรื่องความเจือจางของแก๊สอันเนื่องมาจากปริมาตรแก๊สผสมที่มีอยู่ภายในโหลแก้วลดลง ผลการทดสอบวัดความเข้มข้นของ CO<sub>2</sub> เปรียบเทียบระหว่างการเติม N<sub>2</sub> กับไม่เติม N<sub>2</sub> ลงในโหลแก้ว ดังแสดงใน Figure 3 พบว่าการที่ไม่เติม N<sub>2</sub> กลับเข้าไปในโหลแก้วนั้นความเข้มข้นที่วัดได้มีแนวโน้มลดลงอย่างรวดเร็ว ส่วนผลจากการเติม N<sub>2</sub> กลับเข้าไปในโหลแก้วพบว่าความเข้มข้นมีการลดลงเพียงเล็กน้อยหรือน้อยกว่า 200 ppm ในจำนวนการวัดห้าครั้งต่อเนื่อง

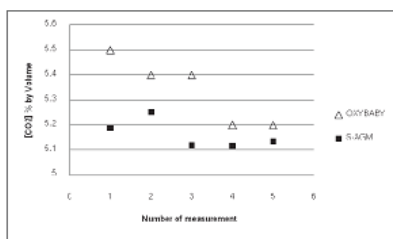


Figure 2 Concentration of CO<sub>2</sub> measured by CO<sub>2</sub> analyzer: S-AGM and OXYBABY

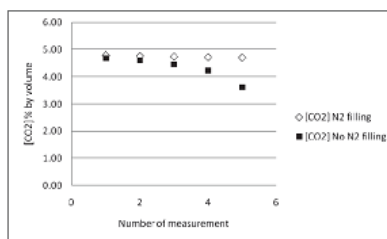


Figure 3 Comparison of the concentration of CO<sub>2</sub> between the N<sub>2</sub> filling and No N<sub>2</sub> filling

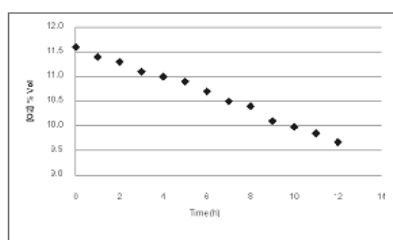


Figure 4 Changing of O<sub>2</sub> concentration inside chamber due to respiration of Green Oak

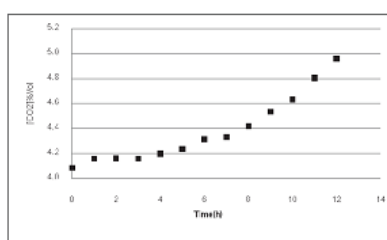


Figure 5 Changing of CO<sub>2</sub> concentration inside chamber due to respiration of Green Oak

**การทดสอบระบบวัดอัตราการหายใจ** ผลการทดสอบระบบวัดอัตราการหายใจโดยใช้ผัก Green oak สำหรับการวัดในช่วงเวลาสั้นพบว่าระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถใช้ติดตามระดับความเข้มข้นของ  $O_2$  และ  $CO_2$  ที่เปลี่ยนแปลงเป็นตามสมการอัตราการหายใจซึ่งมีค่าน้อยมากเนื่องด้วยอัตราการหายใจที่มีค่าค่อนข้างต่ำของผักสลัดสายพันธุ์นี้ ดังจะเห็นได้จากรูป Figure 4 และ Figure 5 ซึ่งมีผลต่างของค่าความเข้มข้นของ  $O_2$  และของ  $CO_2$  ระหว่างชั่วโมงอยู่ในช่วง 1000 – 3000 ppm และ 200 – 1500 ppm ตามลำดับ ค่าอัตราการหายใจที่สอดคล้องกับข้อมูลวัดนี้พบว่าอัตราการลดลงของ  $O_2$  เป็น 0.178 ml/kg.h และอัตราการเพิ่มขึ้นของ  $CO_2$  เป็น 0.145 ml/kg.h โดยมีค่า respiration quotient (RQ) เท่ากับ 0.82

#### วิจารณ์ผล

ระบบวัดอัตราการหายใจและกรรมวิธีการวัดแบบใช้ระบบกึ่งเปิดด้วยการเติม  $N_2$  กลับเข้าไปในระบบช่วยให้ระบบคงอยู่ในสภาวะที่สมดุลได้ใกล้เคียงกับสภาวะอัตราส่วนความเข้มข้นของแก๊ส  $O_2$  และ  $CO_2$  มีความเหมาะสมกับการนำไปใช้วัดอัตราการหายใจกับพืชผลสดที่มีอัตราการหายใจค่อนข้างต่ำ อันเป็นผลมาจากการออกแบบระบบวัดและวิธีการวัดโดยใช้ซีดีจำกัดด้านความละเอียดของเครื่องมือวิเคราะห์อย่างเต็มสมรรถนะ จากผลการทดสอบหาค่าความเบี่ยงเบนจากค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของ  $O_2$  และ  $CO_2$  ที่คำนึงถึงผลของการเติม  $N_2$  เพื่อลดความเจือจางมีค่าเท่ากับ  $\pm 500$  ppm และ  $\pm 200$  ppm ตามลำดับ ยังแสดงให้เห็นถึงความเข้มข้นของแก๊สทั้งสองระหว่างการติดตามอัตราการหายใจในระบบต้องมีค่าสูงกว่าค่าทั้งสองสำหรับแก๊สแต่ละชนิด และในขณะเดียวกันผลดังกล่าวนี้ยังสามารถนำไปใช้พิจารณาเพื่อกำหนดระยะห่างของช่วงเวลาเก็บตัวอย่างแก๊สให้กับการวัดอัตราการหายใจได้อีกด้วย ผลการทดสอบความสามารถของระบบในการใช้สำหรับวัดอัตราการหายใจของตัวอย่างที่มีค่าต่ำมากได้ดังจะเห็นได้จากค่าอัตราการเพิ่มขึ้นของ  $CO_2$  ของผัก Green Oak เป็นเพียง 0.145 ml/kg.h ซึ่งน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับ อัตราการเพิ่มขึ้นของ  $CO_2$  ของแครอทที่มีรายงานว่ามีการวัดอัตราการหายใจด้วยปรากฏค่าอยู่ในช่วง 5.2–51 ml/kg.h ที่อุณหภูมิ 8–20 °C (Iqbala *et al.*, 2009) และของมะเขือเทศช่วงอายุผลเขียว (mature green) มีอัตราการหายใจค่าเฉลี่ย 3.01 ml/kg.h ที่อุณหภูมิ 13°C และความดัน 7atm<sub>abs</sub> (Goyette, 2010) เป็นต้น นอกจากนี้ความสามารถของระบบการวัดอัตราการหายใจที่พัฒนาขึ้นนี้ในการติดตามระดับการเปลี่ยนแปลงปริมาณแก๊สน้อยมากได้ภายในระยะเวลาที่รวดเร็วดังผลการทดสอบในหัวข้อก่อนหน้า(การวัดทำได้แล้วเสร็จภายในเวลา 12 ชั่วโมงสำหรับผักสดที่มีอัตราการหายใจค่อนข้างต่ำ) ยังเอื้อต่อการใช้ศึกษาผลของอายุพืชผลต่ออัตราการหายใจได้โดยเฉพาะกับพืชผลสดที่เน่าเสียเร็ว

#### สรุป

ระบบวัดอัตราการหายใจโดยอิงหลักการแบบระบบกึ่งเปิดที่พัฒนาขึ้นมีความถูกต้องแม่นยำสูง เป็นผลมาจากการออกแบบกรรมวิธีการเก็บตัวอย่างโดยใช้ประโยชน์สูงสุดจากค่าความไวของเครื่องวิเคราะห์แก๊ส  $CO_2$  และ  $O_2$  ที่มีความละเอียดสูง ผลการทดสอบระบบเบื้องต้นกับผักสลัด Green Oak แสดงถึงความสามารถของระบบในการใช้ติดตามอัตราการหายใจของผักและผลไม้สดที่มีอัตราการหายใจต่ำได้โดยไม่ต้องใช้มวลตัวอย่างจำนวนมาก นอกจากนี้ความสามารถในการใช้ติดตามการเปลี่ยนแปลงปริมาณแก๊สน้อยมากได้ภายในระยะเวลาสั้นยังช่วยลดเวลาในการตรวจวัดให้สั้นลงจึงเอื้อต่อการใช้ศึกษาผลของอายุพืชผลต่ออัตราการหายใจได้โดยเฉพาะกับพืชผลสดที่เน่าเสียเร็ว

#### กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี สำหรับการสนับสนุนทุนวิจัยและเครื่องมือวิจัย

#### เอกสารอ้างอิง

- Goyette, B. 2010. Hyperbaric treatment to enhance quality attributes of fresh horticultural produce. Ph.D. (Bioresource Engineering), Department of Bioresource Engineering, McGill University, Montreal, Quebec, Canada
- Iqbala, T., F.A.S. Rodriguesa, P. V. Mahajana and J.P. Kerry. 2009. Mathematical modeling of the influence of temperature and gas composition on the respiration rate of shredded carrots. Journal of Food Engineering 91: 325–332.

การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 13  
4-5 เมษายน 2555 จังหวัดเชียงใหม่

**โปรแกรมประมวลผลภาพถ่ายเพื่อระบุพื้นที่ความผิดปกติของ  
คุณภาพด้านสีของผักสลัด**  
**Image Processing Program for Area Determination of  
the Irregular Color Quality Appearing on Vegetable Salad**

**สุวรรณ เอกรัมย์<sup>1</sup> และ วีระศักดิ์ เลิศสิริโยธิน<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
จ.นครราชสีมา 30000

<sup>2</sup> สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
จ.นครราชสีมา 30000

\* ติดต่อ: โทรศัพท์: 044 224 417, โทรสาร: 044 224 610

E-mail: lsrytw@sut.ac.th

**บทคัดย่อ**

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับระบุพื้นที่ความผิดปกติของคุณภาพด้านสีโดยรวมของผักสลัดใบเขียวโดยใช้กระบวนการประมวลผลภาพถ่าย ผักสลัดจะถูกถ่ายภาพด้วยความละเอียด 1024 x 786 พิกเซล ทำการจัดเก็บไฟล์ภาพในปริภูมิสี RGB และรูปแบบไฟล์แบบ JPEG จากนั้นทำการแปลงปริภูมิสี RGB เป็นปริภูมิสี HSI เพื่อใช้แบ่งแยกรูปผักสลัดออกจากรูปพื้นหลังและใช้แบ่งแยกพื้นที่ที่ผิดปกติด้านสีโดยรวมออกจากรูปผักสลัด จากการทดสอบโดยใช้ตัวอย่างผักสลัด Green oak และผักสลัด Butter head พบว่าพื้นที่ของผักสลัดใบเขียวที่ไม่มีความผิดปกติด้านสีโดยรวมจะมีค่า Hue angle ( $h^\circ$ ) อยู่ในช่วง 80 – 100 องศา และพื้นที่ที่มีความผิดปกติด้านสีโดยรวมของผักสลัดใบเขียวต่อไป สำหรับการคำนวณพื้นที่ที่มีความผิดปกตินั้นกระทำได้โดยการนับจำนวนพิกเซลทั้งหมดที่มีค่า  $h^\circ$  อยู่ในช่วง 35 – 75 องศา ค่า  $h^\circ$  ดังกล่าวจะถูกใช้เพื่อคำนวณพื้นที่ที่มีความผิดปกติด้านสีโดยรวมของผักสลัดใบเขียวต่อไป ซึ่งค่ามาตรฐานนี้ได้จากการทดสอบด้วยภาพถ่ายรูปทรงเรขาคณิตที่สภาวะเดียวกันกับภาพถ่ายผักสลัดพบว่าค่ามาตรฐานจำนวนพิกเซลต่อพื้นที่เฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 1425 พิกเซลต่อตารางเซนติเมตร จากผลการทดสอบความถูกต้องของโปรแกรมในการคำนวณพื้นที่รูปทรงเรขาคณิตที่ต่างกัน ได้มีรูปแบบสี่เหลี่ยมจตุรัส รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า รูปสามเหลี่ยม และรูปวงกลม ตามลำดับ พบว่าโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นสามารถคำนวณพื้นที่ได้ถูกต้องแม่นยำสูงมาก โดยมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับ  $\pm 2\%$  จากผลดังกล่าวยืนยันได้ว่าโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นสามารถนำไปใช้วิเคราะห์ภาพถ่ายเพื่อคำนวณพื้นที่ความผิดปกติของคุณภาพด้านสีโดยรวมของผักสลัดใบเขียวได้ นอกจากนี้โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นยังอนุญาตให้ผู้ใช้งานสามารถระบุช่วงค่า  $h^\circ$  ที่ต้องการวิเคราะห์ได้ด้วยจึงประยุกต์ใช้งานเพื่อระบุพื้นที่ที่สนใจซึ่งปรากฏบนผักสลัดชนิดใดก็ได้ นอกเหนือจากตัวอย่างผักสลัดที่ใช้ในงานวิจัยนี้

**คำหลัก:** สี ผักสลัดใบเขียว โปรแกรมประมวลผลภาพถ่าย พื้นที่ความผิดปกติด้านสีโดยรวม

**Abstract**

This research aims to develop a computing program for area determination of irregular color appearing on the vegetable salad based on image processing technique. The image of vegetable salad were firstly captured at a resolution of 1024 x 786 pixel image and a file was stored in both of the RGB color space and JPEG format. Then, the image was converted from the RGB color space to HSI color space in order to separate the salad leaves from the background picture and to identify the irregularity regions of the salad leaves picture. Experimental testing results using Green Oak and Butter Head showed that the areas of good quality in term of the overall color had the hue angle ( $h^\circ$ ) in the range of 80–100 degrees and the areas of irregular quality had the  $h^\circ$  in the range of 35–75 degrees. To calculate the area of irregular quality, a total number of pixels, showing the  $h^\circ$  in the range of 35–75 degrees, was counted and divided by the standard number of pixels per area equivalent to 1,425 pixels per  $\text{cm}^2$ . The standard value was obtained by averaging the numbers of pixels containing in the image of five different geometric shapes namely a square, a rectangle, a triangle, a circle, and an ellipse. The developed image processing program was found to provide a high accuracy determination of irregular area occurred in vegetable salad with an error of  $\pm 2\%$ . In addition, the program also allows users to specify any value of the hue angle to be evaluated for the corresponding area.

**Keywords:** Color, Green Salad, Image Processing Program, Irregularity Area Appearing on Vegetable Salad

**1. บทนำ**

คุณภาพถือเป็นหัวใจสำคัญของผลิตภัณฑ์ทุกชนิดไม่ว่าแม้แต่ผักสลัดใบเขียวเนื่องจากคุณภาพเป็นดัชนีบ่งชี้การเลือกหรือไม่เลือกของผู้บริโภค หากพิจารณาลักษณะทางคุณภาพแล้วพบว่าสามารถแบ่งแยกลักษณะทางคุณภาพออกเป็นสองกลุ่มหลักๆ ได้แก่ คุณภาพภายในและคุณภาพภายนอก โดยคุณภาพภายในนั้นอาจประกอบไปด้วยลักษณะที่สัมผัสได้ด้วยการบริโภค ได้แก่ รสชาติ เนื้อสัมผัส สารอาหารรวมถึงองค์ประกอบทางเคมีต่างๆ เป็นต้น ส่วนคุณภาพภายนอกนั้นเป็นคุณภาพที่สามารถมองเห็นได้ด้วยตา สัมผัสได้ด้วยมือ เช่น สีสรร ความสด ขนาด รูปร่าง เป็นต้น[2] ซึ่งคุณภาพภายนอกนี้เป็นปัจจัยสำคัญต่อการพิจารณาเลือกหรือไม่เลือกผลิตภัณฑ์นั้นๆ เนื่องจากเป็นปัจจัยที่ผู้บริโภคสามารถรับรู้ได้ง่ายที่สุด แต่ในปัจจุบันเครื่องมือสำหรับตรวจสอบคุณภาพโดยเฉพาะคุณภาพด้านสีโดยรวมนั้นยังมีไม่มากนักส่วนมากผู้วิจัยมักใช้เครื่องวัดเทียบ

สี เช่น เครื่อง chroma meter ซึ่งผลที่ได้จากการวัดนั้นมีความละเอียดเชิงพื้นที่ไม่เพียงพอ รวมถึงไม่สามารถวิเคราะห์เชิงปริมาณได้สะดวกนัก ด้วยเหตุนี้ผู้วิจัยจึงได้พัฒนาเครื่องมือสำหรับตรวจสอบคุณภาพด้านสีโดยรวมซึ่งงานวิจัยนี้ได้มุ่งเน้นพัฒนาเครื่องมือสำหรับการตรวจสอบคุณภาพของผักสลัดใบเขียว โดยเครื่องมือที่พัฒนาขึ้นได้นำเอาเทคโนโลยีทางการประมวลผลภาพถ่ายเข้ามาพัฒนาเนื่องจากเป็นเทคโนโลยีที่ให้ความถูกต้องในการวิเคราะห์สูง การใช้งานสะดวก รวมถึงสามารถพัฒนาเป็นเครื่องมือสำหรับตรวจสอบคุณภาพในลักษณะเชิงอุตสาหกรรมได้

**2. อุปกรณ์และวิธีการ****2.1 การถ่ายภาพผักสลัดใบเขียว**

ผักสลัดใบเขียวถูกถ่ายภาพที่ความละเอียด 1024 x 786 พิกเซล ด้วยกล้องถ่ายรูปดิจิทัลยี่ห้อ FUJIFILM รุ่น FinePix S1500 ที่ระดับความสูง 20 เซนติเมตร (วัดจากตัวอย่างถึงตัวกล้อง) ทำการ

### Abstract

This research aims to develop a computing program for area determination of irregular color appearing on the vegetable salad based on image processing technique. The image of vegetable salad were firstly captured at a resolution of 1024 x 786 pixel image and a file was stored in both of the RGB color space and JPEG format. Then, the image was converted from the RGB color space to HSI color space in order to separate the salad leaves from the background picture and to identify the irregularity regions of the salad leaves picture. Experimental testing results using Green Oak and Butter Head showed that the areas of good quality in term of the overall color had the hue angle ( $h^\circ$ ) in the range of 80–100 degrees and the areas of irregular quality had the  $h^\circ$  in the range of 35–75 degrees. To calculate the area of irregular quality, a total number of pixels, showing the  $h^\circ$  in the range of 35–75 degrees, was counted and divided by the standard number of pixels per area equivalent to 1,425 pixels per  $\text{cm}^2$ . The standard value was obtained by averaging the numbers of pixels containing in the image of five different geometric shapes namely a square, a rectangle, a triangle, a circle, and an ellipse. The developed image processing program was found to provide a high accuracy determination of irregular area occurred in vegetable salad with an error of  $\pm 2\%$ . In addition, the program also allows users to specify any value of the hue angle to be evaluated for the corresponding area.

**Keywords:** Color, Green Salad, Image Processing Program, Irregularity Area Appearing on Vegetable Salad

### 1. บทนำ

คุณภาพถือเป็นหัวใจสำคัญของผลิตภัณฑ์ทุกชนิดไม่ว่าแม้แต่ผักสลัดใบเขียวเนื่องจากคุณภาพเป็นดัชนีบ่งชี้การเลือกหรือไม่เลือกของผู้บริโภค หากพิจารณาลักษณะทางคุณภาพแล้วพบว่าสามารถแบ่งแยกลักษณะทางคุณภาพออกเป็นสองกลุ่มหลักๆ ได้แก่ คุณภาพภายในและคุณภาพภายนอก โดยคุณภาพภายในนั้นอาจประกอบไปด้วยลักษณะที่สัมผัสได้ด้วยการบริโภค ได้แก่ รสชาติ เนื้อสัมผัส สารอาหารรวมถึงองค์ประกอบทางเคมีต่างๆ เป็นต้น ส่วนคุณภาพภายนอกนั้นเป็นคุณภาพที่สามารถมองเห็นได้ด้วยตา สัมผัสได้ด้วยมือ เช่น สีสรร ความสด ขนาด รูปร่าง เป็นต้น[2] ซึ่งคุณภาพภายนอกนี้เป็นปัจจัยสำคัญต่อการพิจารณาเลือกหรือไม่เลือกผลิตภัณฑ์นั้นๆเนื่องจากเป็นปัจจัยที่ผู้บริโภคสามารถรับรู้ได้ง่ายที่สุด แต่ในปัจจุบันเครื่องมือสำหรับตรวจสอบคุณภาพโดยเฉพาะคุณภาพด้านสีโดยรวมนั้นยังมีไม่มากนักส่วนมากผู้วิจัยมักใช้เครื่องวัดเทียบ

สี เช่น เครื่อง chroma meter ซึ่งผลที่ได้จากการวัดนั้นมีความละเอียดเชิงพื้นที่ไม่เพียงพอ รวมถึงไม่สามารถวิเคราะห์เชิงปริมาณได้สะดวกนัก ด้วยเหตุนี้ผู้วิจัยจึงได้พัฒนาเครื่องมือสำหรับตรวจสอบคุณภาพด้านสีโดยรวมซึ่งงานวิจัยนี้ได้มุ่งเน้นพัฒนาเครื่องมือสำหรับการตรวจสอบคุณภาพของผักสลัดใบเขียว โดยเครื่องมือที่พัฒนาขึ้นได้นำเอาเทคโนโลยีทางด้านการประมวลผลภาพถ่ายเข้ามาพัฒนาเนื่องจากเป็นเทคโนโลยีที่ให้ความถูกต้องในการวิเคราะห์สูง การใช้งานสะควกรวมถึงสามารถพัฒนาเป็นเครื่องมือสำหรับตรวจสอบคุณภาพในลักษณะเชิงอุตสาหกรรมได้

### 2. อุปกรณ์และวิธีการ

#### 2.1 การถ่ายภาพผักสลัดใบเขียว

ผักสลัดใบเขียวถูกถ่ายภาพที่ความละเอียด 1024 x 786 พิกเซล ด้วยกล้องถ่ายภาพดิจิทัลยี่ห้อ FUJIFILM รุ่น FinePix S1500 ที่ระดับความสูง 20 เซนติเมตร (วัดจากตัวอย่างถึงตัวกล้อง) ทำการ



จัดเก็บไฟล์ภาพในปริภูมิสี RGB และรูปแบบไฟล์แบบ JPEG

## 2.2 การวิเคราะห์ดัชนีค่าสีของผักสลัดใบเขียว

การวิเคราะห์ดัชนีค่าสีกระทำโดยทำการแปลงภาพถ่ายผักสลัดใบเขียวทั้งในส่วนที่ผักมีคุณภาพปกติและคุณภาพผิดปกติซึ่งถูกจัดเก็บไฟล์ในปริภูมิสีแบบ RGB ไปเป็นปริภูมิสีแบบ HSI จากนั้นให้ผู้ทดสอบที่ได้รับการฝึกฝน เรียนรู้และจดจำคุณลักษณะความผิดปกติเด่นของผักสลัดใบเขียวจนสามารถแยกแยะความผิดปกติดังกล่าวออกจากคุณลักษณะอื่นของผักสลัดใบเขียวได้ทำการคัดแยกและบันทึกค่าสีของผักสลัดใบเขียวที่คุณภาพปกติและคุณภาพผิดปกติเพื่อนำค่าสีที่ได้ไปเป็นดัชนีบ่งชี้ความผิดปกติของคุณภาพด้านสีโดยรวมของผักสลัดใบเขียวต่อไป

## 2.3 การหาค่ามาตรฐานจำนวนพิกเซลต่อพื้นที่เฉลี่ย

ค่ามาตรฐานจำนวนพิกเซลต่อพื้นที่เฉลี่ยเป็นค่าที่ถูกใช้คำนวณหาปริมาณพื้นที่ของสีที่ตรวจพบโดยการนับจำนวนพิกเซล ซึ่งค่าดังกล่าวสามารถหาได้โดยทำการถ่ายภาพรูปทรงเรขาคณิตซึ่งรู้พื้นที่แน่นอนในสภาวะเดียวกันกับการถ่ายภาพผักสลัด โดยรูปทรงเรขาคณิตที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ รูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า รูปสามเหลี่ยม และรูปวงกลมตามลำดับ จากนั้นทำการนับจำนวนพิกเซลของแต่ละรูปทรง นำจำนวนพิกเซลที่นับได้หารด้วยพื้นที่จริงของรูปทรงนั้น ๆ จะทำให้ได้ค่ามาตรฐานจำนวนพิกเซลต่อพื้นที่เฉลี่ย

## 2.4 การพัฒนาโปรแกรม

โปรแกรมสำหรับระบุพื้นที่ความผิดปกติด้านสีโดยรวมของผักสลัดใบเขียวได้รับการพัฒนาด้วยภาษา C# โดยใช้ Microsoft Visual Studio 2008 เป็นเครื่องมือสำหรับการพัฒนา โดยอัลกอริทึมในการคำนวณพื้นที่ความผิดปกติด้านสีโดยรวมถูกแสดงไว้ในรูปที่ 1

## 2.5 การตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรม

การตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมกระทำโดยใช้รูปทรงเรขาคณิตซึ่งทราบพื้นที่แน่นอนในการทดสอบ โดยให้โปรแกรมทำการคำนวณพื้นที่ของรูปทรงเรขาคณิตซึ่งประกอบไปด้วย รูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า รูปสามเหลี่ยม และรูปวงกลม รูปทรงละ 5 รูปตามลำดับ ทำการเปรียบเทียบผลการคำนวณจากโปรแกรมกับพื้นที่จริงของรูปทรงที่นำมาทดสอบ



รูปที่ 1 อัลกอริทึมสำหรับการคำนวณพื้นที่ความผิดปกติด้านสีโดยรวม

การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 13  
4-5 เมษายน 2555 จังหวัดเชียงใหม่

### 3. ผลและวิจารณ์ผล

#### 3.1 ผลการวิเคราะห์ดัชนีค่าสีโดยรวมของผักสลัดใบเขียว

ผลการวิเคราะห์ดัชนีค่าสีโดยรวมของผักสลัดใบเขียวแบ่งออกเป็นสองส่วนคือ สีโดยรวมของผักสลัดที่คุณภาพปกติและสีโดยรวมของผักสลัดที่คุณภาพผิดปกติ ผลที่ได้ถูกแสดงไว้ในตารางที่ 1 ตารางที่ 1 ช่วงค่า  $h^a$  ของผักสลัดที่คุณภาพด้านสีโดยรวมผิดปกติและคุณภาพด้านสีโดยรวมไม่ผิดปกติ

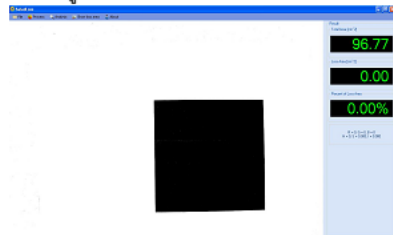
ลักษณะทางคุณภาพ	ช่วงค่า $h^a$ (องศา)
คุณภาพปกติ	80 – 100
คุณภาพผิดปกติ	35 – 75

#### 3.2 ผลการหาค่ามาตรฐานจำนวนพิกเซลต่อพื้นที่เฉลี่ย

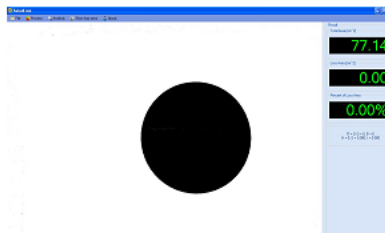
ผลการคำนวณหาค่ามาตรฐานพิกเซลต่อพื้นที่เฉลี่ยโดยใช้รูปทรงเรขาคณิตที่แตกต่างกันพบว่ารูปถ่ายตามสภาวะที่ผู้วิจัยได้จัดทำขึ้นมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1425 พิกเซลต่อตารางเซนติเมตร

#### 3.2 ผลการทดสอบความถูกต้องของโปรแกรม

โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นได้รับการตรวจสอบความถูกต้องโดยใช้รูปถ่ายของรูปทรงเรขาคณิตที่แตกต่างกัน ตัวอย่างผลการทดสอบถูกแสดงไว้ในรูปที่ 2 รูปที่ 3 และรูปที่ 4 ตามลำดับ สำหรับผลการทดสอบถูกแสดงไว้ในตารางที่ 2



#### รูปที่ 2 ผลการคำนวณพื้นที่สี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีพื้นที่จริงเท่ากับ 100.00 ตารางเซนติเมตร



#### รูปที่ 3 ผลการคำนวณพื้นที่วงกลมที่มีพื้นที่จริงเท่ากับ 78.54 ตารางเซนติเมตร



#### รูปที่ 4 ผลการคำนวณพื้นที่สามเหลี่ยมที่มีพื้นที่จริงเท่ากับ 25.00 ตารางเซนติเมตร

จากผลการทดสอบพบว่า โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นสามารถคำนวณพื้นที่ของสี่เหลี่ยมที่กำหนดได้อย่างแม่นยำดังพิจารณาได้จากเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนที่แสดงในตารางที่ 2 ซึ่งพบว่ามีค่าต่ำมาก (เฉลี่ย  $\pm 2\%$ ) ผลดังกล่าวบ่งชี้ได้ว่าโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นสามารถนำไปใช้คำนวณหาพื้นที่ความผิดปกติของผักสลัดใบเขียวได้ ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบการใช้งานโปรแกรมกับผักสลัด Green oak ที่ถูกเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 15 วัน ผลที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Zhou และคณะ[1] ซึ่งใช้ผักสลัด lettuce เป็นตัวอย่างสำหรับการศึกษา ตัวอย่างผลการทดสอบถูกแสดงไว้ในรูปที่ 5

การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 13  
4-5 เมษายน 2555 จังหวัดเชียงใหม่



รูปที่ 5 ผลการคำนวณพื้นที่ความผิดปกติด้านสีโดยรวมโดยใช้ผักสลัด Green Oak เป็นตัวอย่างทดสอบ  
ตารางที่ 2 การเปรียบเทียบผลการคำนวณพื้นที่รูปทรงเรขาคณิตโดยใช้โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นกับพื้นที่จริง

รูปทรง	พื้นที่จริง (cm <sup>2</sup> )	พื้นที่ที่คำนวณได้จากโปรแกรม (cm <sup>2</sup> )	% ความคลาดเคลื่อน
สี่เหลี่ยมจัตุรัส	100.00	96.77	3.23
สี่เหลี่ยมจัตุรัส	100.00	99.23	0.77
สี่เหลี่ยมจัตุรัส	100.00	97.16	2.84
สี่เหลี่ยมจัตุรัส	100.00	98.06	1.94
สี่เหลี่ยมจัตุรัส	100.00	100.43	0.43
สี่เหลี่ยมผืนผ้า	50.00	48.11	3.78
สี่เหลี่ยมผืนผ้า	50.00	47.67	4.66
สี่เหลี่ยมผืนผ้า	50.00	47.66	4.68
สี่เหลี่ยมผืนผ้า	50.00	48.95	2.1
สี่เหลี่ยมผืนผ้า	50.00	49.23	1.54
วงกลม	78.54	77.14	1.78
วงกลม	78.54	76.89	2.10
วงกลม	78.54	77.67	1.11
วงกลม	78.54	78.27	0.34
วงกลม	78.54	75.12	4.35
สามเหลี่ยม	25.00	25.23	0.92
สามเหลี่ยม	25.00	26.34	5.36
สามเหลี่ยม	25.00	23.11	7.56
สามเหลี่ยม	25.00	26.09	4.36
สามเหลี่ยม	25.00	26.45	5.8
		<b>เฉลี่ย</b>	<b>2</b>

#### 4.สรุป

โปรแกรมประมวลผลภาพถ่ายเพื่อระบุพื้นที่ความผิดปกติของคุณภาพด้านสีโดยรวมของผักสลัดที่ได้รับการพัฒนาภายใต้งานวิจัยนี้ให้ผลการคำนวณที่ถูกต้องแม่นยำสูงตั้งพิจารณาได้จากผลการทดสอบความถูกต้องของโปรแกรมซึ่งใช้รูปทรงเรขาคณิตที่หลากหลายรูปทรงเป็นตัวอย่างทดสอบซึ่งผลที่ได้พบว่ามีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนจากพื้นที่จริงเฉลี่ยเพียง  $\pm 2\%$  เท่านั้น จากผลดังกล่าวสามารถยืนยันได้ว่าโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นสามารถนำไปใช้วิเคราะห์ภาพถ่ายเพื่อคำนวณพื้นที่ความผิดปกติของคุณภาพด้านสีโดยรวมของผักสลัดใบเขียวได้ นอกจากนี้โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นยังอนุญาตให้ผู้ใช้งานสามารถระบุช่วงค่า  $h^\circ$  ที่ต้องการวิเคราะห์ได้ด้วย ซึ่งจะช่วยให้นักวิจัยสามารถประยุกต์ใช้งานโปรแกรมนี้เพื่อระบุพื้นที่สีที่สนใจซึ่งปรากฏบนผักสลัดชนิดใดก็ได้ นอกเหนือจากตัวอย่างผักสลัดที่ใช้ในงานวิจัยนี้

#### 5.กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี สำหรับการสนับสนุนทุนวิจัยและเครื่องมือวิจัย

#### 6.เอกสารอ้างอิง

- [1] T.Zhou, A.D.Harrison, R.McKellar, J.C.Young , J.Odumeru, P.Piyasena, X.Lu, D.G.Mercer, S.Karr (2004). Determination of acceptability and shelf life of ready-to-use lettuce By digital image analysis. *Food Research International*. Vol.37. pp 875–881
- [2] จรินทร์ ศิริพานิช (2538). สรีรวิทยาและเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยวผักและผลไม้, ภาควิชาพืชสวน คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพมหานคร.



ภาคผนวก ข

ขอคัด โปรแกรม

## ขอโค้ดโปรแกรมควบคุมระบบวัดอัตราการหายใจ

### ขอโค้ดส่วนติดต่อผู้ใช้งาน

```

using System;
using System.Collections.Generic;
using System.ComponentModel;
using System.Data;
using System.Drawing;
using System.Linq;
using System.Text;
using System.Windows.Forms;

namespace Respiration_rate_measurement_program
{
    public partial class Form1 : Form
    {
        public Form1()
        {
            InitializeComponent();
            //textBox1.Focus();
        }
        int h = 0;
        int m = 0;
        int t = 0;
        int rev = 0;
        int sec = 0;
        int totaltime = 0;
        int hour = 0;
        int min = 0;
        int sec2 = 0;
        private void Form1_Load(object sender, EventArgs e)
        {
            this.CenterToScreen();
            //Properties.FormBorderStyle.FixedSingle;
            FormBorderStyle = FormBorderStyle.FixedSingle;
            comboBox3.Text = "Select port";
            button7.Text = "Start measurement";
            button8.Text = "Chamber1 ";
            button9.Text = "Chamber1 ";
            button3.Text = "Chamber2";
            button4.Text = "Chamber3";
            button5.Text = "Chamber2";
            button6.Text = "Chamber3";
            button1.Text = "Clear";
            button2.Text = "First point measurement";
            comboBox3.Items.Add("Com1");
        }
    }
}

```

```

comboBox3.Items.Add("Com2");
comboBox3.Items.Add("Com3");
comboBox3.Items.Add("Com4");
comboBox3.Items.Add("Com5");
comboBox3.Items.Add("Com6");
comboBox3.Items.Add("Com7");
comboBox3.Items.Add("Com8");
comboBox3.Items.Add("Com9");
comboBox3.Items.Add("Com10");

}

//ส่งข้อมูลเพื่อควบคุมการทำงาน
private void button7_Click(object sender, EventArgs e)
{ // real time measurement
  if (textBox1.Text == "" || textBox2.Text == ""||textBox3.Text=="")
  {
    MessageBox.Show("คุณระบุเวลาสำหรับการวัดไม่ถูกต้อง!! กรุณาระบุเวลาใหม่",
"Error", MessageBoxButtons.OK, MessageBoxIcon.Error);
  }
  else
  {
    h = Convert.ToInt16(textBox1.Text);
    m = Convert.ToInt16(textBox2.Text);
    t = Convert.ToInt16(textBox3.Text);
    totaltime = (h * 3600) + (m * 60);

    if (button7.Text == "Start measurement")
    {
      if (comboBox3.Text == "Select port")
      {
        MessageBox.Show("คุณไม่ได้เลือก port!! กรุณาเลือก port", "Error",
MessageButtons.OK, MessageBoxIcon.Error);
        textBox1.Text = "";
        textBox2.Text = "";
        textBox3.Text = "";
      }

      else if((h==0&&m==0)||t==0)
      {
        MessageBox.Show("ระบุเวลาไม่ถูกต้อง กรุณาระบุเวลาใหม่", "Error",
MessageButtons.OK, MessageBoxIcon.Error);
        textBox1.Text = "";
        textBox2.Text = "";
        textBox3.Text = "";
      }
    }
  }
}

```

```

    }
    else
    {
        serialPort3.PortName = comboBox3.Text;
        serialPort3.BaudRate = 9600;
        serialPort3.DataBits = 8;
        serialPort3.StopBits = System.IO.Ports.StopBits.One;
        serialPort3.Parity = System.IO.Ports.Parity.None;

        serialPort3.Open();
        timer3.Interval = 1000;
        timer3.Start();
        button7.Text = "Stop measument";
        stlabel.Text = "กำลังวัด";
        button8.Enabled= false;
        button9.Enabled= false;
        button1.Enabled= false;
        button2.Enabled = false;
        button3.Enabled = false;
        button4.Enabled = false;
        button5.Enabled = false;
        button6.Enabled = false;
        textBox1.Enabled = false;
        textBox2.Enabled = false;
        textBox3.Enabled = false;
        comboBox3.Enabled = false;
    }
}

else
{
    serialPort3.Close();
    button7.Text = "Start measurement";
    timer3.Stop();
    comboBox3.Text = "Select port";
    textBox1.Enabled = true;
    textBox2.Enabled = true;
    textBox3.Enabled = true;
    textBox1.Text = "";
    textBox2.Text = "";
    textBox3.Text = "";
    stlabel.Text = "None";
    button8.Enabled=true;
    button9.Enabled= true;
    button1.Enabled= true;
    button2.Enabled = true;
}}

```



```
private void timer3_Tick(object sender, EventArgs e)
{
    sec = sec + 1;
    sec2 = sec2 + 1;
    if (sec2 == 60)
    {
        min = min+1;
        sec2 = 0;
    }
    if (min == 60)
    {
        hour = hour + 1;
        min = 0;
    }

    label6.Text = Convert.ToString(hour);
    label7.Text = Convert.ToString(min);
    label8.Text = Convert.ToString(sec2);
    if ((totaltime - sec) == 0)
    {
        serialPort3.Write("M");
        sec = 0;
        rev++;
        label13.Text = Convert.ToString(rev);
    }

    if (t == rev)
    {
        timer3.Stop();
        serialPort3.Close();
        button7.Text = "Start measurement";
        timer3.Stop();
        button6.Enabled = true;
        comboBox3.Enabled = true;
        h = 0;
        m = 0;
        t = 0;
        rev = 0;
        sec = 0;
        sec2 = 0;
        totaltime = 0;
    }
}
```

### ขอโค้ดส่วนควบคุมการทำงาน

```

int V1 = 13;    int V2 = 4;    int V3 = 6;    int V4 = 7;    int V6 = 9;    int V7 = 10;
int V8 = 11;    int V9 = 12;    int inByte=0;  int j=1;
int Input1 = 1; int Input2 = 2; int Input3 = 3; int reading1; int reading2; int reading3;
void setup()
{
  Serial.begin(9600);
  pinMode(V1,OUTPUT);
  pinMode(V2,OUTPUT);
  pinMode(V3,OUTPUT);
  pinMode(V4,OUTPUT);
  pinMode(V5,OUTPUT);
  pinMode(V6,OUTPUT);
  pinMode(V7,OUTPUT);
  pinMode(V8,OUTPUT);
  pinMode(V9,OUTPUT);
  pinMode(Input1,INPUT);
  pinMode(Input2,INPUT);
  pinMode(Input3,INPUT);
}

void loop()
{
  inByte = Serial.read();
  if(inByte == 'F') // Fill Gas Chamber1
  {
    digitalWrite(V1,LOW);    // วาล์ว 1 เปิด
    digitalWrite(V3,LOW);    // วาล์ว 3 เปิด
    delay(3000);             // หน่วงเวลา 3 วินาที
    digitalWrite(V3,HIGH);    // วาล์ว 3 ปิด
    j=1;
    while(j)
    {
      reading1 = digitalRead(Input1);
      if(reading1 == LOW)      // Pressure switch ส่งสัญญาณมาเนื่องจาก Pressure ถึงระดับ
        ที่ตั้งค่าไว้
    {

```

```

digitalWrite(V1,HIGH);    // วาล์ว 1 ปิด
j=0;
}
}
}
else if(inByte == 'A') // Fill Gas Chamber2
{
digitalWrite(V4,LOW);    // วาล์ว 4 เปิด
digitalWrite(V6,LOW);    // วาล์ว 6 เปิด
delay(3000);             // หน่วงเวลา 3 วินาที
digitalWrite(V6,HIGH);   // วาล์ว 6 ปิด
j=1;
while(j)
{
reading2 = digitalRead(Input2);
if(reading2 == LOW)      // Presure switch ส่งสัญญาณมาเนื่องจาก Pressure ถึงระดับ
ที่ต่ำกว่าไว้
{
digitalWrite(V4,HIGH);   // วาล์ว 4 ปิด
j=0;
}
}
}
else if(inByte == 'B') // Fill Gas Chamber3
{
digitalWrite(V7,LOW);    // วาล์ว 7 เปิด
digitalWrite(V9,LOW);    // วาล์ว 9 เปิด
delay(3000);             // หน่วงเวลา 3 วินาที
digitalWrite(V9,HIGH);   // วาล์ว 9 ปิด
j=1;
while(j)
{
reading3 = digitalRead(Input3);
if(reading3 == LOW)      // Presure switch ส่งสัญญาณมาเนื่องจาก Pressure ถึงระดับ
ที่ต่ำกว่าไว้
{
digitalWrite(V7,HIGH);   // วาล์ว 7 ปิด
j=0;
}
}
}

```

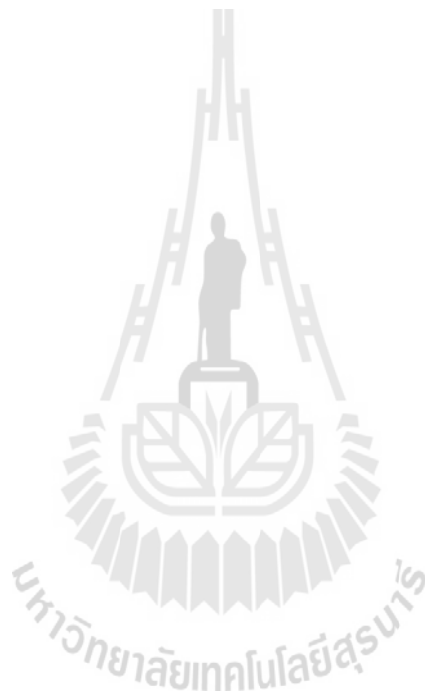
```

    }
  }
  else if(inByte == 'E')// Empty Gas Chamber1
  {
    digitalWrite(V3,LOW);      // วาล์ว 3 เปิด
    delay(10000);              // หน่วงเวลา 10 วินาที
    digitalWrite(V3,HIGH);     // วาล์ว 3 ปิด
  }
  else if(inByte == 'T')// Empty Gas Chamber2
  {
    digitalWrite(V6,LOW);      // วาล์ว 6 เปิด
    delay(10000);              // หน่วงเวลา 10 วินาที
    digitalWrite(V6,HIGH);     // วาล์ว 6 ปิด
  }
  else if(inByte == 'U')// Empty Gas Chamber3
  {
    digitalWrite(V9,LOW);      // วาล์ว 9 เปิด
    delay(10000);              // หน่วงเวลา 10 วินาที
    digitalWrite(V9,HIGH);     // วาล์ว 9 ปิด
  }

  else if(inByte == 'M') // Measurement
  {
    digitalWrite(V2,LOW);      // วาล์ว 2 เปิด Chamber1
    delay(30000);              // หน่วงเวลา 30 วินาที Chamber1
    digitalWrite(V2,HIGH);     // วาล์ว 2 ปิด Chamber1
    delay(5000);               // หน่วงเวลา 5 วินาทีเพื่อวัด Chamber ถัดไป
    digitalWrite(V5,LOW);      // วาล์ว 5 เปิด Chamber2
    delay(30000);              // หน่วงเวลา 30 วินาที Chamber2
    digitalWrite(V5,HIGH);     // วาล์ว 5 ปิด Chamber2
    delay(5000);               // หน่วงเวลา 5 วินาทีเพื่อวัด Chamber ถัดไป
// digitalWrite(V8,LOW);      // วาล์ว 8 เปิด Chamber3
// delay(30000);              // หน่วงเวลา 30 วินาที Chamber3
// digitalWrite(V8,HIGH);     // วาล์ว 8 ปิด Chamber3
//
  }
  else
  {

```

```
digitalWrite(V1,HIGH);  
digitalWrite(V2,HIGH);  
digitalWrite(V3,HIGH);  
digitalWrite(V4,HIGH);  
digitalWrite(V5,HIGH);  
digitalWrite(V6,HIGH);  
digitalWrite(V7,HIGH);  
digitalWrite(V8,HIGH);  
digitalWrite(V9,HIGH);  
}  
} // END
```



## ขอโค้ดโปรแกรมประมวลผลภาพถ่าย

```
using System;
using System.Collections.Generic;
using System.ComponentModel;
using System.Data;
using System.Drawing;
using System.Linq;
using System.Text;
using System.Windows.Forms;

namespace SaladLost
{
    public partial class main : Form
    {
        public Bitmap ImageFile; // ประกาศตัวแปร ImageFile สำหรับเก็บภาพถ่าย
        public int w, h;
        public Color OriginalImage, NewImage; // ประกาศตัวแปร OriginalImage สำหรับเก็บไฟล์ภาพต้นฉบับ NewImage สำหรับเก็บไฟล์ภาพที่ผ่านการประมวลผลแล้ว

        public int grayScale;
        public int totalarea=0,lossarea=0;
        public float percent = 0;
        public main()
        {
            InitializeComponent();
        }
        // สร้างฟังก์ชันสำหรับเปิดไฟล์
        private void OpenImage()
        {
            OpenFileDialog OpenImage = new OpenFileDialog(); // ประกาศตัวแปรสำหรับเปิดไฟล์

            OpenImage.InitialDirectory = "c:\\"; // กำหนด Directory เริ่มต้นสำหรับเปิดไฟล์
            OpenImage.Filter = "Bitmap files (*.bmp)|*.bmp|JPEG files(*.jpg)|*.jpg|PNG Files(*.PNG)|*.png|All file(*.bmp/*.jpg/*.png)|*.bmp/*.jpg/*.png";
            OpenImage.FilterIndex = 2; // เลือกให้หา *.jpg เป็นค่าเริ่มต้นในการเปิดไฟล์
            OpenImage.RestoreDirectory = true;
            if(DialogResult.OK==OpenImage.ShowDialog())
            {
                ImageFile = new Bitmap(Image.FromFile(OpenImage.FileName), 1037,778);
            }
        }
        // โหลดรูปภาพมาเก็บในตัวแปร ImageFile
        this.Width = ImageFile.Width + 10;
        this.Height = ImageFile.Height + 10;
        totalarea = 0; lossarea = 0;
    }
}
```

```

        lbloss.Text = "0";
        lbPercentLoss.Text = "0.00%";
        lbTotal.Text = "0";
        this.Invalidate(); // ให้แสดงผลภาพถ่าย
    }
} // จบฟังก์ชันสำหรับการเปิดไฟล์

private void openImageToolStripMenuItem_Click(object sender, EventArgs e)
{
    OpenImage();
}

private void aboutToolStripMenuItem_Click(object sender, EventArgs e)
{
    Program.frmAbout.Show();
}

private void exitProgramToolStripMenuItem_Click(object sender, EventArgs e)
{
    this.Close();
}

//-----Analysis-----//
private void analysisToolStripMenuItem_Click(object sender, EventArgs e)
{
    Graphics gDPIX = this.CreateGraphics(); // สร้างตัวแปรเพื่อเก็บค่าความละเอียด
หน้าจอ ด้านแนว X
    Graphics gDPIY = this.CreateGraphics(); // สร้างตัวแปรเพื่อเก็บค่าความละเอียด
หน้าจอ ด้านแนว Y

    if (ImageFile == null)
    {
        MessageBox.Show("Image Not Found ", "Error", MessageBoxButtons.OK,
        MessageBoxIcon.Error);
    }
    else
    {
        w = ImageFile.Width;
        h = ImageFile.Height;
        int[,] H = new int[w, h];
        double[,] S = new double[w, h];
        double[,] L = new double[w, h];
        //-----แยกพื้นที่หลังออกจากภาพ-----//
        for (int i = 0; i < w; i++)

```

```

    {
        for (int j = 0; j < h; j++)
        {
            OriginalImage = ImageFile.GetPixel(i, j);
            H[i, j] = (int)OriginalImage.GetHue();
            S[i, j] = OriginalImage.GetSaturation();
            L[i, j] = OriginalImage.GetBrightness();
            //if (((H[i, j] < 130 && L[i, j] > 0.1))
            if ((L[i, j] > 0.1))
            {
                NewImage = Color.FromArgb(OriginalImage.R, OriginalImage.G,
OriginalImage.B);
                ImageFile.SetPixel(i, j, NewImage);
                totalarea++;
                if ((H[i, j] > 35 && H[i, j] < 80))
                {
                    lossarea++;
                }
            }
        }
    }
}
//-----จบการแยกพื้นหลัง-----//
double Total, Loss, x;
Total = totalarea / ((gDPIX.DpiX * gDPIY.DpiY) / (2.54 * 2.54)); // จำนวน
พื้นที่ของผักทั้งหมดในหน่วย ตารางเซนติเมตร
Loss = lossarea / ((gDPIX.DpiX * gDPIY.DpiY) / (2.54 * 2.54)); // จำนวน
พื้นที่ของผักที่สูญเสียคุณภาพในหน่วย ตารางเซนติเมตร

percent = ((float)Loss / (float)Total) * 100;
lbTotal.Text = string.Format("{0:f2}", Total);
lbLoss.Text = string.Format("{0:f2}", Loss);
lbPercentLoss.Text = string.Format("{0:f2}", percent) + "%";
x = ((gDPIX.DpiX * gDPIY.DpiY) / (2.54 * 2.54));
//label1x.Text = x.ToString();
this.Invalidate();
}
//-----End-----//
private void Form1_Paint(object sender, PaintEventArgs e)
{
    if (ImageFile == null)
    {
        return;
    }
}

```



```

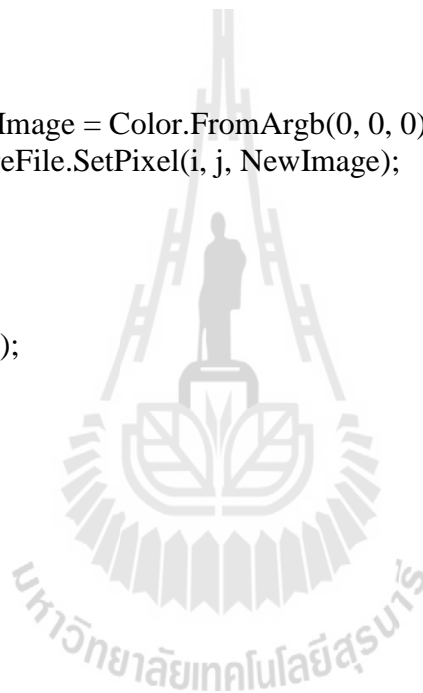
else
{
    Graphics g = e.Graphics;
    Rectangle r = new Rectangle(0, 0, ImageFile.Width, ImageFile.Height);
    g.DrawImage(ImageFile, r);
}

}
//-----Show color value-----//
private void main_MouseMove(object sender, MouseEventArgs e)
{
    Color C;
    if (ImageFile == null)
    {
        return;
    }
    else
    {
        if (e.Location.X >= 0 && (e.Location.X < ImageFile.Width))
        {
            C = ImageFile.GetPixel(e.Location.X, e.Location.Y);
            bthsi.Text = string.Format("R = {0}, G = {1}, B = {2}\nH = {3}, S =
{4:f3}, I = {5:f3}", C.R, C.G, C.B, (int)C.GetHue(),
C.GetSaturation(), C.GetBrightness());
        }
    }
}
//-----End-----//
//-----Show Loss Area-----//
private void showLossAreaToolStripMenuItem_Click(object sender, EventArgs
e)
{
    if (ImageFile == null)
    {
        MessageBox.Show("Image Not Found ", "Error", MessageBoxButtons.OK,
MessageBoxIcon.Error);
    }
    else
    {
        w = ImageFile.Width;
        h = ImageFile.Height;
        int[,] H = new int[w, h];
        double[,] S = new double[w, h];
        double[,] L = new double[w, h];
        for (int i = 0; i < w; i++)

```

```
{
    for (int j = 0; j < h; j++)
    {
        OriginalImage = ImageFile.GetPixel(i, j);
        H[i, j] = (int)OriginalImage.GetHue();
        S[i, j] = OriginalImage.GetSaturation();

        if ((H[i, j] >= 35 && H[i, j] <= 80))
        {
            NewImage = Color.FromArgb(OriginalImage.R, OriginalImage.G,
OriginalImage.B);
            ImageFile.SetPixel(i, j, NewImage);
        }
        else
        {
            NewImage = Color.FromArgb(0, 0, 0);
            ImageFile.SetPixel(i, j, NewImage);
        }
    }
}
this.Invalidate();
}}
```



## ประวัติผู้เขียน

นายสุวรรณ เอกรัมย์ เกิดวันที่ 22 ตุลาคม 2529 ที่จังหวัดบุรีรัมย์ เป็นบุตรคนที่ 5 ในบรรดาพี่น้องจำนวน 5 คน ของนายสมบุญ เอกรัมย์ และ นางพัน เอกรัมย์ เริ่มการศึกษาระดับประถมศึกษา ชั้นปีที่ 1 – 6 ที่โรงเรียนบ้านโคกขามโนนสมบูรณ์ จังหวัดบุรีรัมย์ ระดับมัธยมศึกษาชั้นปีที่ 1 – 6 ที่โรงเรียนเมืองยางพิทยาคม (ชานีพิทยาคม ในปัจจุบัน) จังหวัดบุรีรัมย์ สำเร็จการศึกษา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมเกษตร) จากสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา ในปี พ.ศ. 2551 และในปีเดียวกัน ได้เข้าศึกษาต่อระดับ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ณ สถาบันการศึกษาเดิม

ระหว่างศึกษาระดับปริญญาโท ได้มีโอกาสดำรงตำแหน่งเป็นผู้ช่วยวิจัยประจำหน่วยวิจัย “นวัตกรรมบรรจุภัณฑ์และอาหาร” สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร เป็นเวลา 5 ปี ตลอดระยะเวลาดังกล่าวได้รับมอบหมายให้รับผิดชอบงานวิจัยในหลากหลายด้าน ทั้งงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้และงานวิจัยในด้านอื่น ๆ อาทิเช่น งานวิจัยเกี่ยวกับบรรจุภัณฑ์ที่ย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ งานวิจัยเกี่ยวกับพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ และงานวิจัยเกี่ยวกับการออกแบบเครื่องจักรกลเกษตรและอาหาร เป็นต้น นอกจากนี้ผู้วิจัยยังได้นำความรู้ความเข้าใจในงานวิจัยที่ได้รับมอบหมายนำเสนอผลงานทางวิชาการ ดังต่อไปนี้

- S. AEKRUM and W. LERTSIRIYOTHIN (2012). Predictive Shelf life of Green Oak by Image Analysis. **Italian Journal of Food Science**, Vol. 24 Issue 4, p16,
- สุวรรณ เอกรัมย์ และ วีระศักดิ์ เลิศสิริโยธิน (2554) ระบบวัดอัตราการหายใจความไวสูงสำหรับผักและผลไม้สด ว. วิทย. กษ. 42 : 3 (พิเศษ) หน้า 319-322
- สุวรรณ เอกรัมย์ และ วีระศักดิ์ เลิศสิริโยธิน (2555) โปรแกรมประมวลผลภาพถ่ายเพื่อระบุพื้นที่ความผิดปกติของคุณภาพด้านสีของผักสลัด การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 13 4-5 เมษายน 2555 จังหวัดเชียงใหม่ รายละเอียดผลงานทางวิชาการที่นำเสนอถูกแสดงไว้ในภาคผนวก ก.