

## ผลและวิจารณ์

### 1. การล้างหน่อไม้ฝรั่งสดและคุณภาพของหน่อไม้ฝรั่งหลังการล้าง

การทดลองนี้ใช้หน่อไม้ฝรั่งสดจากแหล่งผลิตที่ อ.กำแพงแสน จ.นครปฐม ที่มีปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ปนเปื้อนตามธรรมชาติจากแหล่งเพาะปลูก ขนส่งโดยใส่กล่องโฟมปิดสนิทมาที่ห้องทดลองใช้เวลา 1 ชั่วโมง นำมาวิเคราะห์พบว่า มีค่าจุลินทรีย์เริ่มต้นทั้งหมด (Aerobic Plate Count; APC)  $4.77 \pm 0.04 \log \text{CFU/g}$  และมีเชื้อ *Escherichia coli* (*E.coli*) ปริมาณเริ่มต้น  $4.41 \pm 0.06 \log \text{CFU/g}$

หน่อไม้ฝรั่งที่ผ่านการล้างทั้ง 3 วิธี ได้แก่ การล้างด้วยน้ำประปา, น้ำผสมคลอรีนเข้มข้น 100 ppm และน้ำผสมไอโซนเข้มข้น 0.10 ppm เปรียบเทียบกับการไม่ล้าง (control) ที่อุณหภูมิ 10°C เป็นเวลา 15 นาที พบว่า การล้างช่วยลดปริมาณเชื้อ APC ได้เมื่อเปรียบเทียบกับการไม่ล้างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยวิธีการล้างแต่ละวิธีไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p > 0.05$ ) หน่อไม้ฝรั่งที่ผ่านการล้างด้วยสารละลายคลอรีนความเข้มข้น 100 ppm สามารถลดปริมาณเชื้อ APC ได้ดีที่สุด (ตารางที่ 4) และเมื่อเปรียบเทียบกับการไม่ล้างสามารถลดเชื้อ APC ได้  $2.16 \log \text{CFU/g}$  รองลงมาคือการล้างด้วยสารละลายไอโซนความเข้มข้น 0.10 ppm ที่สามารถลดเชื้อ APC ได้  $1.91 \log \text{CFU/g}$  ส่วนเมื่อเปรียบเทียบกับการล้างด้วยน้ำประปา พบว่าสามารถลดเชื้อ APC ได้  $1.74$  และ  $1.49 \log \text{CFU/g}$  ตามลำดับ

สำหรับการวิเคราะห์หาปริมาณ *E.coli* ปรากฏว่าไม่พบ *E.coli* ที่หลงเหลืออยู่หลังการล้างไม่ว่าด้วยวิธีใดก็ตาม ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากปริมาณเชื้อเริ่มต้นมีค่าน้อย ทำให้การล้างทุกวิธีการสามารถกำจัดเชื้อได้ทั้งหมดดังแสดงในตารางที่ 4

ก๊าซไอโซนมีความสามารถในการละลายน้ำค่อนข้างจำกัด และมีความคงตัวต่ำ (คิวพร, 2542; Molloy *et al.*, 2003) ประกอบกับความสามารถของเครื่องผลิตไอโซนที่ใช้ในการทดลองนี้ให้ความเข้มข้นของสารละลายไอโซนที่มีค่าต่ำกว่าความเข้มข้นของสารละลายคลอรีนค่อนข้างมาก ทำให้ผลของการล้างหน่อไม้ฝรั่งด้วยสารละลายคลอรีนสามารถลดปริมาณเชื้อ APC ได้มากกว่า แต่ก็ไม่ได้มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับการทดลองของ Baur *et al.* (2004) ซึ่งทดลองล้างผักกาดหอมด้วยสารละลายไอโซน สารละลายคลอรีน และน้ำประปาที่อุณหภูมิ 4 °C เป็นเวลา 2 นาที พบว่า การใช้สารละลายคลอรีนเข้มข้น 100 และ 200 mg/l สามารถ

ลดการเสื่อมเสียในด้านคุณภาพโดยรวมของผักกาดหอมได้ดีกว่าสารละลายไอโซนที่ความเข้มข้น 1 mg/l โดยสารละลายคลอรีนสามารถลดปริมาณเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นทั้งหมด (aerobic mesophilic) ได้ประมาณ 2 log cycle ส่วนสารละลายไอโซน สามารถลดปริมาณเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นทั้งหมดได้ประมาณ 1 log cycle ในขณะที่ Molloy *et al.* (2003) ทดลองใส่เชื้อ *E.coli* ในอัตราส่วนต่าง ๆ ลงในสารละลายไอโซนเข้มข้น 1 mg/l พบว่า สารละลายไอโซนสามารถลดปริมาณเชื้อ *E.coli* ได้ถึง 4 log cycle ภายในเวลา 6 นาที ที่อุณหภูมิ 4 °C แสดงว่า การใช้สารละลายไอโซนให้มีประสิทธิภาพที่ดีในการล้าง ควรควบคุมอุณหภูมิและเวลาให้เหมาะสมกับผักผลไม้สดแต่ละชนิด

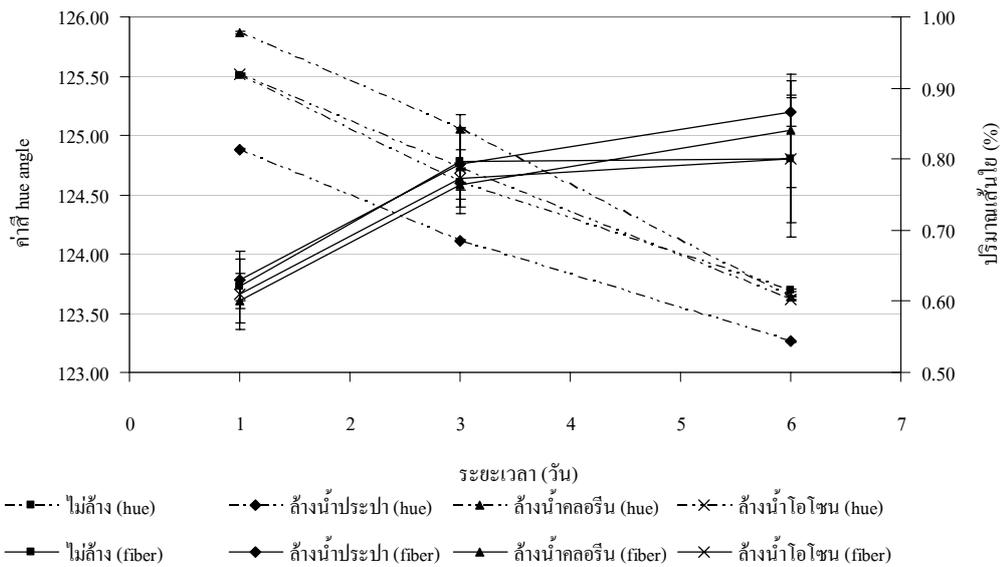
ตารางที่ 4 จำนวนจุลินทรีย์ที่รอดชีวิตบนหน่อไม้ฝรั่งที่ผ่านการล้างด้วยวิธีการต่าง ๆ

วิธีการล้าง	จำนวนจุลินทรีย์ที่รอดชีวิต (log CFU/g)	
	APC	<i>E.coli</i>
ไม่ล้าง	4.77 ± 0.04 a	4.41 ± 0.06
ล้างน้ำประปา	3.35 ± 0.09 b	ND
ล้างน้ำผสมคลอรีนเข้มข้น 100 ppm	2.61 ± 0.11 b	ND
ล้างน้ำผสมไอโซนเข้มข้น 0.10 ppm	2.86 ± 0.04 b	ND

หมายเหตุ ND = Not Detectable

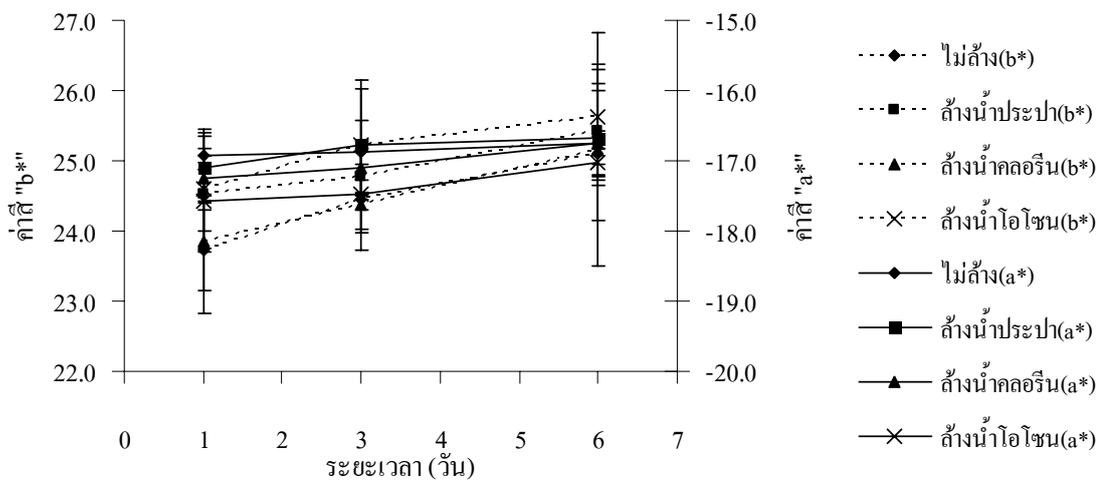
ตัวอักษรที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกัน แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p \leq 0.05$ )

ส่วนด้านคุณภาพทางกายภาพ เมื่อทำการเก็บรักษาหน่อไม้ฝรั่งหลังผ่านการล้างแต่ละวิธีในถุงพลาสติกแบบเปิดปากถุงเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 30 °C เป็นเวลา 6 วัน พบว่า วิธีการล้างทุกวิธีไม่มีความแตกต่างกันของปริมาณเส้นใย และสีในระหว่างการเก็บรักษา ( $p > 0.05$ ) แต่ปลายยอดของหน่อไม้ฝรั่งเริ่มนํ้า และมีราขึ้นเล็กน้อย ดังแสดงในภาพที่ 5 พบว่า ปริมาณเส้นใยมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการเก็บรักษา เช่นเดียวกับการทดลองเก็บหน่อไม้ฝรั่งในถาดโฟมห่อด้วยฟิล์มพลาสติกพีวีซีที่อุณหภูมิ 17°C ของอรษา (2536) ซึ่งสามารถเก็บรักษาได้นาน 12 วันก่อนจะมีการเน่าเสีย โดยมีการเพิ่มขึ้นของปริมาณเส้นใยเพียงเล็กน้อย แต่ค่า hue angle ( $H^\circ = 180 + [\tan^{-1}b^*/a^*]$ ) มีค่าลดลงตามระยะเวลาที่เก็บรักษา ซึ่งมีแนวโน้มเดียวกับการทดลองของ Albanese *et al.* (2007) ที่เก็บหน่อไม้ฝรั่งในถุงพลาสติกที่มีค่าการแพร่ผ่านของก๊าซปานกลาง (semi-permeable) ที่อุณหภูมิ 6°C ได้นาน 21 วันก่อนที่สีของหน่อไม้ฝรั่งจะไม่ใช่ที่ยอมรับของผู้ทดสอบ



ภาพที่ 5 ค่าสี hue angle และปริมาณเส้นใย (%) ของหน่อไม้ฝรั่งที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 30 °C

ค่า hue angle นี้มีความสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณคลอโรฟิลล์ (Lau *et al.*, 2000) และจากการสังเกตจะพบว่าหน่อไม้ฝรั่งกลายเป็นสีเหลืองมากขึ้น สอดคล้องกับการทดลองของ Albanese *et al.* (2007) ที่พบว่าการลดลงของค่าสี hue angle มีแนวโน้มเดียวกับการลดลงของปริมาณคลอโรฟิลล์ ในการทดลองนี้ ปริมาณ hue angle ที่ลดลงสามารถสรุปเป็นนัยได้ว่าการลดลงของปริมาณคลอโรฟิลล์ซึ่งสอดคล้องกับสีเหลืองที่ปรากฏให้เห็น และเมื่อพิจารณาจากค่าสี a\* และ b\* (ภาพที่ 6) พบว่า ค่าทั้งสองมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่ทำการเก็บรักษา



ภาพที่ 6 ค่าสี a\* และ b\* ของหน่อไม้ฝรั่งที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 30 °C เป็นเวลา 6 วัน

ซึ่งค่า  $a^*$  ที่เพิ่มขึ้น หมายถึง สีเขียวของหน่อไม้ฝรั่งลดลง ส่วนการเพิ่มขึ้นของค่า  $b^*$  หมายถึง การเพิ่มขึ้นของสีเหลือง แต่การเปลี่ยนสีของหน่อไม้ฝรั่งที่ผ่านการล้างทุกวิธี ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p > 0.05$ ) ซึ่งมีรายละเอียดในตารางผนวกที่ ง1

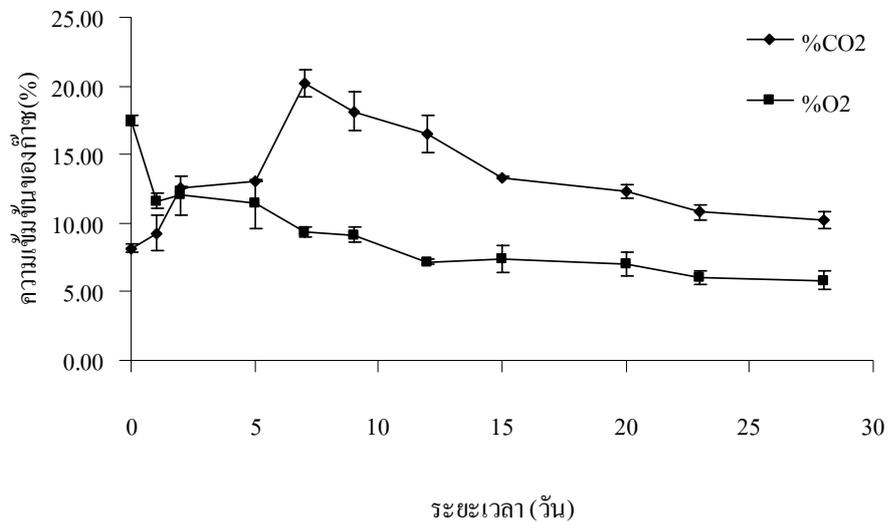
เมื่อพิจารณาจากคุณภาพโดยรวมแล้ว จึงเลือกการล้างหน่อไม้ฝรั่งด้วยสารละลายคลอรีน 100 ppm เพราะสามารถลดปริมาณเชื้อ APC ได้ดีที่สุดภายหลังการล้าง และรักษาสภาพภายนอกหลังเก็บรักษาไว้ 6 วันได้ดีกว่าการล้างด้วยวิธีการอื่นมาศึกษาในตอนต่อไป

## **2. การเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของก๊าซ และคุณภาพของหน่อไม้ฝรั่งในสภาพปรับบรรยากาศ**

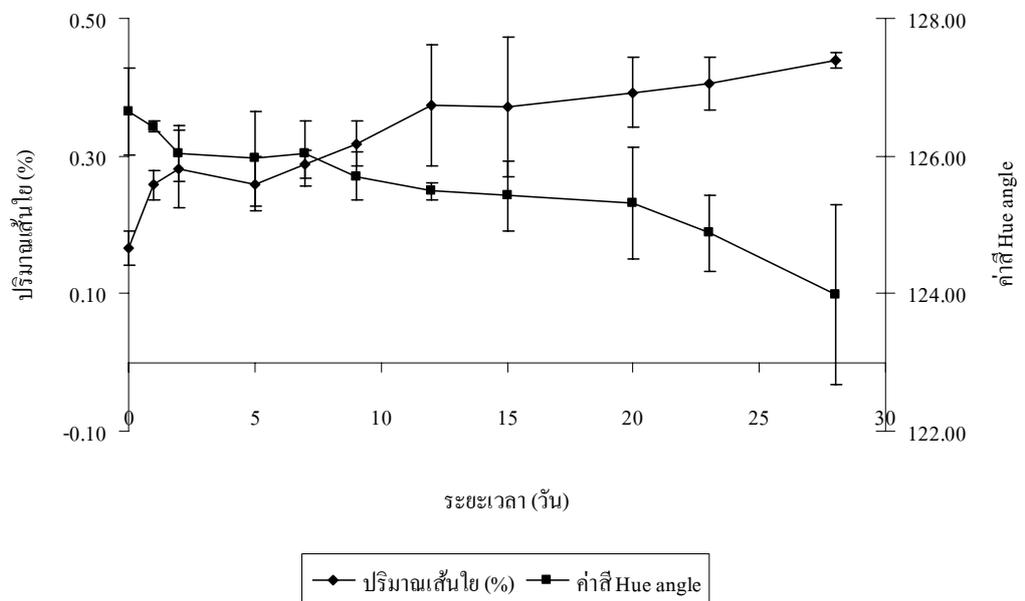
จากผลการทดลองตอนที่ 1 ได้นำหน่อไม้ฝรั่งมาผ่านการล้างด้วยสารละลายคลอรีน 100 ppm ที่อุณหภูมิ 10 °C เป็นเวลา 15 นาที และเป่าให้แห้งด้วยลมที่อุณหภูมิ 30 °C เป็นเวลา 15 นาที ก่อนบรรจุในถุง OPP แบบ active modified atmosphere packaging ซึ่งเป็นการปรับสภาพบรรยากาศภายในบรรจุภัณฑ์ให้เหมาะสมกับผักและผลไม้แต่ละชนิด Kader (1992) ได้เสนอแนะว่า ควรเก็บรักษาหน่อไม้ฝรั่งที่ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ประมาณ 5 – 10 % และปริมาณก๊าซออกซิเจนประมาณ 21% เมื่อเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 0 – 5 °C ในการทดลองนี้ได้ปรับปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เริ่มต้น  $8.15 \pm 0.29$  % และปริมาณก๊าซออกซิเจนเริ่มต้น  $17.51 \pm 0.39$  % แล้วนำไปเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 °C เนื่องจากอากาศปกติของประเทศไทยค่อนข้างร้อน ดังนั้น การใช้ อุณหภูมิช่วงสูงจึงสิ้นเปลืองพลังงานน้อยกว่า จากการทดลองพบว่าการเปลี่ยนแปลงของปริมาณก๊าซทั้งสองดังภาพที่ 7 โดยปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และออกซิเจนเริ่มเข้าสู่สมดุลในวันที่ 15 ในระดับ 13% และ 7% โดยประมาณตามลำดับ ซึ่งรายละเอียดแสดงในตารางผนวกที่ ง3

การเข้าสู่สมดุลของก๊าซทั้งสองชนิดดังกล่าว หากเปรียบเทียบกับที่ Powrie and Skura (1991) แนะนำไว้ พบว่า ก๊าซออกซิเจนมีค่าต่ำกว่า 21% ส่วนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อยู่ในช่วง 5 – 10% และในระหว่างการเก็บรักษาปริมาณเส้นใยมีค่าเพิ่มขึ้น และค่า hue angle มีค่าลดลง (ภาพที่ 8) ทำให้การรักษาคุณภาพทางกายภาพไม่ได้ดีเท่าที่ควร และสามารถเก็บรักษาหน่อไม้ฝรั่งได้ 23 วัน ก่อนที่หน่อไม้ฝรั่งมีกลิ่นเน่า และขอดเริ่มอ่อนตัว แสดงว่า ภายหลังระบบเข้าสู่สมดุลในวันที่ 15 ยังสามารถเก็บรักษาหน่อไม้ฝรั่งไว้ได้อีก 8 วัน ในขณะที่ผลการทดลองของ Villanueva *et al.* (2005) ที่บรรจุหน่อไม้ฝรั่งในถุง OPP ที่ปรับสภาพบรรยากาศแบบ passive modified atmosphere packaging คือบรรจุที่บรรยากาศปกติแล้วปล่อยให้ระบบเข้าสู่สมดุลเอง และเก็บรักษาที่อุณหภูมิ

2 °C ได้นาน 33 วัน พบว่า ก๊าซทั้งสองเข้าสู่สมดุลในระหว่างวันที่ 5 และ 9 ของการเก็บรักษา ที่ ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ประมาณ 15% และปริมาณก๊าซออกซิเจนประมาณ 7% ตามลำดับ



ภาพที่ 7 การเปลี่ยนแปลงของปริมาณก๊าซ CO<sub>2</sub> และ O<sub>2</sub> ในระหว่างการเก็บรักษาหน่อไม้ฝรั่งที่ อุณหภูมิ 4 °C



ภาพที่ 8 การเปลี่ยนแปลงของค่าสี (hue angle) และปริมาณเส้นใย (% fiber) ในระหว่างการเก็บรักษาหน่อไม้ฝรั่งที่อุณหภูมิ 4 °C

การเข้าสู่สมดุลของก๊าซทั้งสองชนิดที่แตกต่างกันเนื่องมาจากสมบัติของบรรจุภัณฑ์ด้านค่าการแพร่ผ่านของก๊าซออกซิเจน และปริมาณหน่อไม้ฝรั่งที่บรรจุแตกต่างกัน โดย Villanueva *et al.* (2005) ใช้ปริมาณหน่อไม้ฝรั่งที่มากกว่าและบรรจุภัณฑ์ที่ใช้ (OPP) มีค่าการแพร่ผ่านของก๊าซออกซิเจนที่มากกว่าด้วย ทำให้มีอัตราการใช้ก๊าซออกซิเจน และผลิตก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่สามารถแพร่ผ่านเข้าออกจากบรรจุภัณฑ์ได้ดี และเข้าสู่สมดุลได้เร็วกว่า แต่ข้อเสียของการบรรจุแบบ passive modified atmosphere packaging ก็คือต้องเลือกฟิล์มพลาสติกที่ใช้ทำบรรจุภัณฑ์ที่เหมาะสมกับอัตราการหายใจของพืช ณ อุณหภูมิที่ใช้เก็บรักษาเท่านั้น ระบบจึงจะเข้าสู่สมดุลได้ ซึ่งในการผลิตบรรจุภัณฑ์ต้องใช้เทคโนโลยีสูงจึงจะสามารถเลือกฟิล์มที่มีอัตราการแพร่ผ่านของก๊าซตามที่ต้องการได้

สำหรับผักและผลไม้สดส่วนใหญ่ ฟิล์มที่เหมาะสมในการนำมาเป็นบรรจุภัณฑ์ควรมีลักษณะใส เช่น OPP และจะต้องมีค่าการแพร่ผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มากกว่าออกซิเจนประมาณ 2 – 10 เท่า เพื่อให้ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรจุภัณฑ์ไม่สูงมากจนก่อให้เกิดผลเสียกับผักและผลไม้สดที่บรรจุ ส่วนฟิล์มที่เหมาะสมกับหน่อไม้ฝรั่งซึ่งมีอัตราการหายใจสูงมากเมื่อเทียบกับผักและผลไม้สดทั่วไป ควรมีค่าการแพร่ผ่านของก๊าซออกซิเจนมากกว่าที่ใช้ในการทดลอง ( $2000 - 2500 \text{ cm}^3 \text{ m}^{-2} \text{ day}^{-1} \text{ atm}^{-1}$ ) เพื่อให้หน่อไม้ฝรั่งมีก๊าซออกซิเจนเพียงพอต่อการมีชีวิตอยู่ และมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สะสมในบรรจุภัณฑ์ไม่สูงกว่า 15% เพื่อป้องกันการเกิดกลิ่นที่ไม่ดีเนื่องมาจากการหายใจแบบไม่ใช้ออกซิเจน (Powrie and Skura, 1991)

### 3. การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

#### 3.1 การหาค่าคงที่ปฏิกิริยาของ Michaelis – Menten แบบ uncompetitive

การทดลองวัดอัตราการหายใจของหน่อไม้ฝรั่งด้วยระบบปิด ในรูปฟังก์ชันของความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจน และคำนวณอัตราการหายใจ (Respiration rate) ในรูปของการใช้ก๊าซออกซิเจน ( $r_o$ ) และการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $r_c$ ) จากค่าความแตกต่างของความเข้มข้นของก๊าซสุดท้ายกับความเข้มข้นของก๊าซเริ่มต้น (ตารางที่ 5) ตามสมการที่ (17) ได้ผลดังตารางที่ 6 และตัวอย่างการคำนวณอัตราการหายใจในระบบปิดมีรายละเอียดดังแสดงในภาคผนวก จ1

**ตารางที่ 5** ค่าเฉลี่ยของความเข้มข้นสุดท้ายของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซออกซิเจนในระบบปิดในรูปฟังก์ชันของความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจน โดยไม่มีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (0 %)

ค่าเฉลี่ยของความเข้มข้นเริ่มต้น ของก๊าซ O <sub>2</sub> (%)	ค่าเฉลี่ยของความเข้มข้นสุดท้าย	
	CO <sub>2</sub> (%)	O <sub>2</sub> (%)
2.41 ± 0.24	0.51 ± 0.00	2.01 ± 0.22
5.30 ± 0.23	0.68 ± 0.00	4.71 ± 0.09
10.69 ± 0.00	0.88 ± 0.02	9.95 ± 0.01
15.32 ± 0.01	0.92 ± 0.04	14.42 ± 0.10
21.33 ± 0.09	0.87 ± 0.09	20.58 ± 0.01

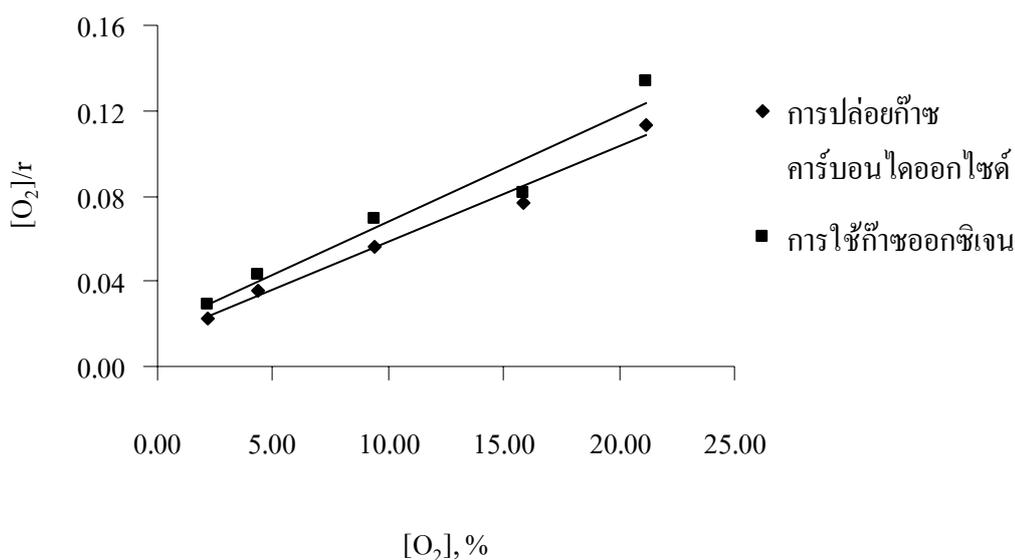
**ตารางที่ 6** อัตราการหายใจในระบบปิดในรูปฟังก์ชันของความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจน

O <sub>2</sub> (%)	r <sub>o</sub> (ml / kg·hr)	O <sub>2</sub> /r <sub>o</sub>	r <sub>c</sub> (ml / kg·hr)	O <sub>2</sub> /r <sub>c</sub>
2.41 ± 0.24	83.38 ± 2.88	0.0289 ± 0.0019	109.13 ± 1.00	0.0221 ± 0.0020
5.30 ± 0.23	123.48 ± 29.50	0.0439 ± 0.0086	148.62 ± 1.08	0.0356 ± 0.0018
10.69 ± 0.00	155.42 ± 1.12	0.0688 ± 0.0005	191.11 ± 4.85	0.0560 ± 0.0014
15.32 ± 0.01	187.38 ± 19.41	0.0822 ± 0.0086	198.65 ± 8.97	0.0772 ± 0.0035
21.33 ± 0.09	159.94 ± 17.43	0.1342 ± 0.0141	188.62 ± 20.64	0.1138 ± 0.0129

อัตราการหายใจคำนวณจากความแตกต่างระหว่างค่าความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ก่อน และหลังการทดลอง ซึ่งมีระยะเวลาห่างกัน 1 ชั่วโมง ข้อมูลที่ได้จากค่าเฉลี่ยของการทำ 2 ซ้ำในแต่ละโหลแก้วนั้นมีความแตกต่างกันมากในแต่ละความเข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซออกซิเจน แสดงว่า ปริมาณก๊าซออกซิเจนมีผลอย่างมากต่ออัตราการหายใจของหนูอัมฝรั่ง โดยอัตราการหายใจในรูปของการใช้ก๊าซออกซิเจน (r<sub>o</sub>) มีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 80 – 160 ml / kg·hr และอัตราการหายใจในรูปของการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (r<sub>c</sub>) มีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 110 – 190 ml / kg·hr ซึ่งสูงกว่าอัตราการหายใจของหัวหอมใหญ่ทั้งหัวที่ตัดหัวออกแล้ว (r<sub>c</sub> = 70 – 80 ml / kg·hr) ที่อุณหภูมิ 20 °C ในการทดลองของ Hong and Kim (2001) และในดอกบร็อกโคลี่ที่ตัดก้านออกจนเหลือความยาว 12 เซนติเมตร (r<sub>c</sub> = 8 – 9 ml / kg·hr) ที่อุณหภูมิ 1.5 °C ในการทดลองของ Christie *et al.* (1995) เนื่องจากอุณหภูมิในการทดลองที่แตกต่างกัน ซึ่ง

Kader *et al.* (1989) ได้กล่าวไว้ว่าอุณหภูมิ และ/หรือ การหันผลิตผลมีผลโดยตรงต่ออัตราการหายใจ โดยผลิตผลที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิสูง และ/หรือ ผ่านการหันจะมีอัตราการหายใจสูงกว่าผลิตผลที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำ และ/หรือ ไม่ผ่านการหัน

เมื่อนำค่าเฉลี่ยของก๊าซที่วัดได้จากการทดลองในการหาอัตราการหายใจด้วยระบบปิดในรูปฟังก์ชันของก๊าซออกซิเจนมา plot กราฟระหว่าง  $[O_2]$  (%) กับ  $[O_2] (\%)/r$  ดังภาพที่ 9 หรือที่เรียกว่า Hanes plot ตามสมการของ Michaelis-Menten (สมการที่ 19) จะได้ค่า  $V_m$  และ  $K_m$  ดังตารางที่ 7 ค่าคงที่จากสมการอัตราการหายใจของหน่อไม้ฝรั่งในระบบปิดนี้ ค่า  $V_m$  และ  $K_m$  ของหน่อไม้ฝรั่งสูงกว่าในหัวหอมใหญ่ (Hong and Kim, 2001) แครอท, กระเทียม และแตงกวา (Lee *et al.*, 1991) เพราะโดยปกติค่า  $V_m$  และ  $K_m$  จะขึ้นอยู่กับชนิดของผักผลไม้, ฤดูเก็บเกี่ยว, ความแก่อ่อนและสภาวะในการเก็บรักษา ซึ่งโดยปกติหน่อไม้ฝรั่งมีอัตราการหายใจสูงจึงมีค่าทั้งสองสูงกว่าดังกล่าว เนื่องจาก  $K_m$  (Michaelis-Menten constant) มีค่าเท่ากับความเข้มข้นของสารตั้งต้นจำเพาะที่ทำให้ความเร็วปฏิกิริยาเป็นครึ่งหนึ่งของความเร็วสูงสุด ( $V_m$ ) เมื่อปริมาณสารตั้งต้นต่ำจะได้ first order kinetics คือความเร็วเริ่มต้นขึ้นกับความเข้มข้นของสารตั้งต้นอย่างเดียว จนเมื่อความเร็วคงที่แม้จะเพิ่มปริมาณสารตั้งต้นอีกก็ตาม จะเรียกความเร็ว ณ จุดนี้ว่า  $V_m$  (ปราณี, 2535) เมื่อ  $K_m$  มีค่าสูงกว่า แสดงว่า ความเร็วของปฏิกิริยาขอมเร็วกว่าปฏิกิริยาที่มีค่า  $K_m$  ต่ำ หรือเสื่อมเสียได้เร็วกว่านั่นเอง ซึ่งรายละเอียดเรื่องเอนไซม์แสดงในภาคผนวก จ 2



ภาพที่ 9 Hanes plot สำหรับอัตราการหายใจของหน่อไม้ฝรั่งในรูปฟังก์ชันของก๊าซออกซิเจน

ตารางที่ 7 สมการเส้นตรงและค่าคงที่จากสมการอัตราการหายใจของหน่อไม้ฝรั่งในระบบปิดในรูปฟังก์ชันของก๊าซออกซิเจน

ค่าที่ได้	การใช้ก๊าซออกซิเจน	การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์
สมการเส้นตรง	$\frac{[O_2]}{r} = 0.0050[O_2] + 0.0184$	$\frac{[O_2]}{r} = 0.0045[O_2] + 0.0131$
R <sup>2</sup>	0.9455	0.9830
V <sub>m</sub> (ml/kg·hr)	200.00	222.22
K <sub>m</sub> (%)	3.68	2.91

ส่วนการทดลองวัดอัตราการหายใจของหน่อไม้ฝรั่งด้วยระบบปิด ในรูปฟังก์ชันของความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และคำนวณอัตราการหายใจ (Respiration rate) ในรูปของการใช้ก๊าซออกซิเจน (r<sub>O</sub>) และการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (r<sub>C</sub>) จากค่าความแตกต่างของความเข้มข้นของก๊าซสุดท้ายกับความเข้มข้นของก๊าซเริ่มต้น (ตารางที่ 8) ตามสมการที่ (17) ได้ผลดังตารางที่ 9

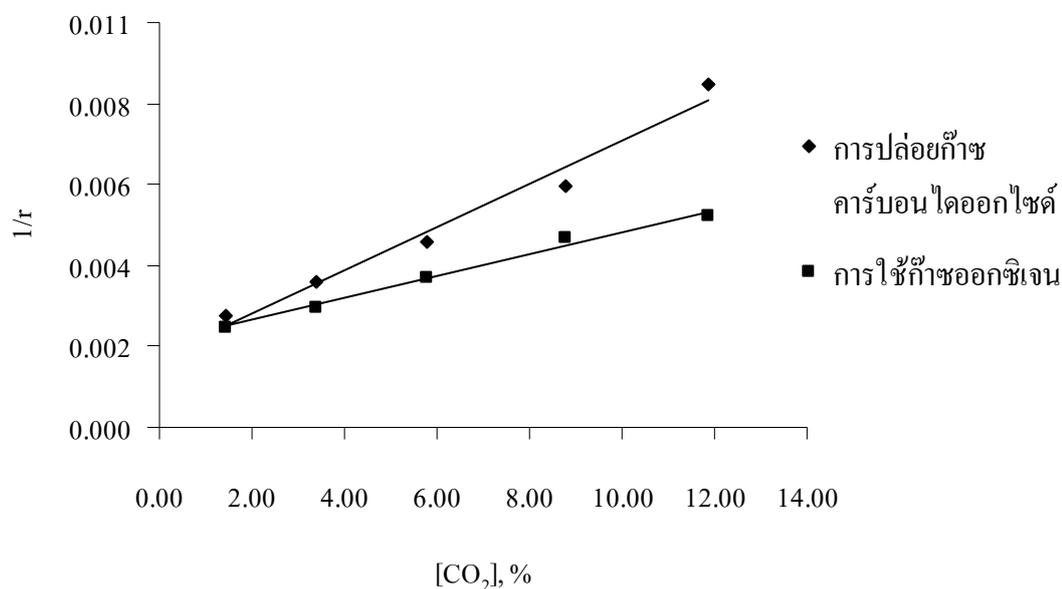
ตารางที่ 8 ค่าเฉลี่ยของความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซออกซิเจนในระบบปิดในรูปฟังก์ชันของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนเท่ากับ 21 %

ค่าเฉลี่ยของความเข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซ CO <sub>2</sub> (%)	ค่าเฉลี่ยของความเข้มข้นสุดท้าย	
	CO <sub>2</sub> (%)	O <sub>2</sub> (%)
1.43 ± 0.06	3.01 ± 0.16	19.11 ± 0.13
3.39 ± 0.25	4.61 ± 0.32	19.54 ± 0.30
5.76 ± 0.02	6.72 ± 0.13	19.61 ± 0.05
8.78 ± 0.05	9.52 ± 0.22	20.14 ± 0.16
11.87 ± 0.06	12.39 ± 0.05	20.28 ± 0.21

ตารางที่ 9 อัตราการหายใจในระบบปิดในรูปฟังก์ชันของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

CO <sub>2</sub> (%)	r <sub>0</sub> (ml / kg·hr)	1/r <sub>0</sub>	r <sub>c</sub> (ml / kg·hr)	1/r <sub>c</sub>
1.43 ± 0.06	382.99 ± 10.51	0.0026 ± 0.0001	344.60 ± 47.71	0.0029 ± 0.0004
3.39 ± 0.25	320.66 ± 32.55	0.0031 ± 0.0003	265.68 ± 16.45	0.0038 ± 0.0002
5.76 ± 0.02	257.23 ± 36.97	0.0039 ± 0.0006	206.91 ± 24.45	0.0049 ± 0.0006
8.78 ± 0.05	204.05 ± 3.66	0.0049 ± 0.0001	159.45 ± 37.83	0.0065 ± 0.0015
11.87 ± 0.06	182.73 ± 6.58	0.0055 ± 0.0002	112.29 ± 24.24	0.0091 ± 0.0020

นำค่าเฉลี่ยของก๊าซที่วัดได้จากการทดลองหาอัตราการหายใจด้วยระบบปิด ในรูปฟังก์ชันของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มา plot กราฟระหว่าง [CO<sub>2</sub>] (%) กับ 1/r ดังภาพที่ 10 หรือที่เรียกว่า Dixon plot ตามสมการของ Michaelis-Menten (สมการที่ 19) จะได้ slope เป็นค่า K<sub>i</sub> ดังตารางที่ 10 ซึ่งค่า K<sub>i</sub> จะเปลี่ยนแปลงตามกลไกเมแทบอลิซึม (metabolic pathways) และขึ้นอยู่กับชนิดของผลิตภัณฑ์ (Makino *et al.*, 1996) หมายความว่า การลดลงของอัตราการหายใจในรูปฟังก์ชันของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ขึ้นอยู่กับชนิดของผลิตภัณฑ์ และสภาพแวดล้อมในการเก็บรักษาเป็นสำคัญ



ภาพที่ 10 ส่วนกลับอัตราการทำใจของหน่อไม้ฝรั่งในรูปฟังก์ชันของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

ตารางที่ 10 สมการเส้นตรงและค่าคงที่จากสมการอัตราการทำใจของหน่อไม้ฝรั่งในระบบปิดในรูปฟังก์ชันของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

ค่าที่ได้	การใช้ก๊าซออกซิเจน	การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์
สมการเส้นตรง	$\frac{1}{r} = 0.0003[CO_2] + 0.0022$	$\frac{1}{r} = 0.0006[CO_2] + 0.0018$
$R^2$	0.9906	0.9759
$K_i$ (%)	16.67	7.50

ค่า  $K_i$  ที่ได้เมื่อเทียบกับดอกบร็อคโคลี่ในการทดลองของ Hagger *et al.* (1992) มีค่ามากกว่าทั้งในรูปฟังก์ชันของการใช้ก๊าซออกซิเจน และการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (3.96% และ 2.92% ตามลำดับ) แสดงว่า ตัวขี้บั้ง หรือก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในการทดลองนี้มีความสามารถในการเข้าทำปฏิกิริยากับสารประกอบเอโนไซม์ที่จับกับสารตั้งต้น (ES) ได้ดีกว่า อาจเนื่องมาจากความเข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงกว่าทำให้เข้าทำการขี้บั้งได้มากกว่า จากนั้นนำค่า  $V_m$ ,  $K_m$  และ  $K_i$  ไปแทนค่าในสมการที่ (15) และ (16) เพื่อคำนวณการเปลี่ยนแปลงปริมาณก๊าซต่อเวลาในการเก็บรักษา ซึ่งรายละเอียดอธิบายในหัวข้อวิธีการทดลองที่ 3.1.3

### 3.2 การหาค่าคงที่ของอัตราปฏิกิริยา ( $k$ ) ตามหลักจลนศาสตร์

การเปลี่ยนแปลงค่า hue angle ของหน่อไม้ฝรั่งพบว่ามีค่าลดลงเมื่อเวลาการเก็บรักษานานขึ้น ดังตารางที่ 11 โดยจากการวิเคราะห์ผลทางสถิติปรากฏว่าทั้งอุณหภูมิและระยะเวลาที่ทำการเก็บรักษามีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่า hue angle อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยการลดลงของค่า hue angle นี้มีลักษณะเดียวกันกับค่า hue angle ที่ลดลงของหน่อไม้ฝรั่งที่ผ่านความร้อนในการทดลองของ Lau *et al.* (2000) ซึ่งเกี่ยวข้องกับการเกิดปฏิกิริยาการสลายตัวของ

chlorophyll ไปเป็น pheophytin หรือเกิดการเปลี่ยนสีจากสีเขียวสด (bright green) ไปเป็นสีเขียวอ่อน (olive green) โดยมากกว่า 50% ของปฏิกิริยาการสลายตัวของ chlorophyll จะเกิดขึ้นก่อนที่จะสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงของสี ดังนั้นการอธิบายความเข้มสีที่มองเห็นได้เมื่อผู้บริโภครัดสติใจในการเลือกซื้อหน่อไม้ฝรั่ง จึงใช้วิธีการวัดด้วยเครื่องวัดสีโดยตรง ส่วนค่า  $k$  เฉลี่ยที่อุณหภูมิ 84 °C (54.8 kJ/mol) ในการทดลองของ Lau *et al.* (2000) มีค่าสูงกว่าค่า  $k$  ของหน่อไม้ฝรั่งที่เก็บรักษาที่ทั้ง 3 อุณหภูมิมาก จึงทำให้ค่า  $E_a$  แตกต่างกันมากด้วย

Albanese *et al.* (2007) เก็บรักษาหน่อไม้ฝรั่งที่ไม่ได้จุ่มสารละลาย ascorbic acid กับที่ผ่านการจุ่มสารละลาย ascorbic acid เข้มข้น 2% (w/w) ในบรรจุภัณฑ์พลาสติกที่อุณหภูมิ 6 °C พบว่า ค่า hue angle ลดลงอย่างสอดคล้องกับการลดลงของปริมาณ chlorophyll และอธิบายได้โดยจลนศาสตร์เคมีลำดับที่ 1 (first – order kinetics) เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดสอบทางประสาทสัมผัส กับผู้ทดสอบที่ไม่ได้ผ่านการฝึกฝนจำนวน 10 คน พบว่า ผู้ทดสอบตัดสินให้หน่อไม้ฝรั่งหมดอายุการเก็บรักษาในเวลา 21 วัน ซึ่งใกล้เคียงกับอายุการเก็บในผลการทดลองนี้

ตารางที่ 11 การเปลี่ยนแปลงค่า hue angle ของหน่อไม้ฝรั่งเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่าง ๆ

ระยะเวลาในการเก็บรักษา (วัน)	ค่า hue angle เมื่อเก็บที่อุณหภูมิ		
	10 °C	15 °C	25 °C
0	124.79 ± 0.01 fA	125.87 ± 0.10 fB	124.54 ± 0.03 fC
1	124.35 ± 0.01 efA	125.04 ± 0.07 efB	125.09 ± 0.07 efC
2	123.93 ± 0.11 defA	124.55 ± 0.02 defB	124.30 ± 0.01 defC
3	- *	- *	124.38 ± 0.02 defC
6	123.80 ± 0.02 defA	124.23 ± 0.02 defB	-
7	122.79 ± 0.04 cdeA	123.67 ± 0.05 cdeB	-
8	122.44 ± 0.06 bcdA	123.18 ± 0.07 bcdB	-
9	121.44 ± 0.03 bcA	122.51 ± 0.02 bcB	-
12	120.76 ± 0.24 bA	122.21 ± 0.03 bB	-
13	117.30 ± 0.04 aA	118.96 ± 0.03 aB	-

หมายเหตุ \* ไม่มีข้อมูลเนื่องจากห้องปฏิบัติการปิดทำการ

ตัวอักษรตัวพิมพ์เล็กที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกัน แสดงถึงระยะเวลาในการเก็บรักษามีความแตกต่างกัน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p \leq 0.05$ )

ตัวอักษรตัวพิมพ์ใหญ่ ที่แตกต่างกันในแถวเดียวกัน แสดงถึงอุณหภูมิมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p \leq 0.05$ )

ส่วนปริมาณเส้นใย (% fiber) มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาการเก็บรักษามากขึ้น ดังตารางที่ 12 โดยจากการวิเคราะห์ผลทางสถิติพบว่า อุณหภูมิไม่มีผลต่อปริมาณเส้นใย แต่ระยะเวลาที่ทำการเก็บรักษามีผลต่อปริมาณเส้นใยแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เส้นใย (fiber) คือเซลล์ sclerenchyma มีผนังหนา เนื่องจากการสะสมเซลลูโลส, เฮมิเซลลูโลส, เพกติน และ ลิกนิน ซึ่งจากโครงสร้างของหน่อไม้ฝรั่งที่ประกอบด้วยเซลล์ประเภท sclerenchyma ภายหลังจากเก็บเกี่ยวมาแล้ว หน่อไม้ฝรั่งจะสร้างเอทิลีนไปกระตุ้นการทำงานของเอนไซม์ peroxidase ทำให้มีการสร้างลิกนินมาสะสมที่ผนังเซลล์มากขึ้น (จริงแท้, 2546) ทำให้เนื้อสัมผัสเปลี่ยนเหนียว และไม่เป็นที่ต้องการของผู้บริโภค ซึ่ง Huyskens-Keil and Kadau (2003) ได้ทดลองเก็บรักษาหน่อไม้ฝรั่งในบรรจุภัณฑ์ต่างชนิดกันที่อุณหภูมิ 10 °C เป็นเวลา 4 วัน พบว่า ปริมาณลิกนินที่เพิ่มขึ้นสอดคล้องกับค่า firmness ที่ไม่เป็นที่ต้องการของผู้บริโภค ส่วน สุภารัตน์ (2544) ได้ศึกษาผลของสัดส่วน CO<sub>2</sub> ร่วมกับ O<sub>2</sub> ที่มีต่อคุณภาพและอายุการเก็บรักษาหน่อไม้ฝรั่งที่อุณหภูมิ 4 - 6 °C พบว่า สัดส่วนของก๊าซทั้งสองชนิดในทุกระดับความเข้มข้น ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงเส้นใย และ TSS (total soluble solid) ของหน่อไม้ฝรั่ง โดยมีค่าเฉลี่ยอายุการเก็บรักษา 35 วันและมีปริมาณเส้นใย 1.97% และ TSS 7.06 brix ซึ่งจะเห็นว่าค่าแตกต่างกับในงานวิจัยนี้มาก เนื่องจากปริมาณเส้นใยเริ่มต้นมีค่าแตกต่างกัน

ตารางที่ 12 การเปลี่ยนแปลงของปริมาณเส้นใย (%) ของหน่อไม้ฝรั่งเมื่อเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่าง ๆ

ระยะเวลาในการเก็บรักษา (วัน)	ปริมาณเส้นใยเมื่อเก็บที่อุณหภูมิ		
	10 °C	15 °C	25 °C
0	0.51 ± 0.02 a	0.46 ± 0.06 a	0.54 ± 0.02 a
1	0.56 ± 0.03 b	0.59 ± 0.06 b	0.61 ± 0.04 b
2	0.56 ± 0.04 b	0.62 ± 0.05 b	0.63 ± 0.03 b
3	- *	- *	0.69 ± 0.06 c
6	0.56 ± 0.02 b	0.65 ± 0.09 b	-

7	0.59 ± 0.01 b	0.64 ± 0.05 b	-
8	0.61 ± 0.04 b	0.65 ± 0.05 b	-
9	0.67 ± 0.03 c	0.69 ± 0.02 c	-
12	0.69 ± 0.01 c	0.69 ± 0.02 c	-
13	0.70 ± 0.02 c	0.70 ± 0.04 c	-

หมายเหตุ \* ไม่มีข้อมูลเนื่องจากห้องปฏิบัติการปิดทำการ

ตัวอักษรตัวพิมพ์เล็กที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกัน แสดงถึงความแตกต่างกัน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p \leq 0.05$ )

คุณภาพด้านปริมาณเส้นใย และค่าสี (hue angle) จากผลการทดลองเก็บรักษาหน่อไม้ฝรั่งในสภาพปรับบรรยากาศที่อุณหภูมิ 10, 15 และ 25°C นั้น ไม่สามารถระบุอายุการเก็บรักษาได้เท่ากับลักษณะภายนอกที่สังเกตเห็นได้ คือปลายยอดน้ำน้ำอย่างเห็นได้ชัด หน่อเริ่มอ่อนตัวและเริ่มมีกลิ่นเน่า เนื่องจากกลไกของการเปลี่ยนแปลงคุณภาพทางเคมีเมื่อเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำจะเกิดขึ้นช้ากว่าที่อุณหภูมิสูง ดังนั้นการตัดสินใจด้านอายุการเก็บรักษาจึงต้องอาศัยการสังเกตลักษณะภายนอกร่วมด้วย โดยมีการให้คะแนนในลักษณะปรากฏในทุก ๆ ด้านรวมกัน ผลการให้คะแนนแสดงดังตารางที่ 13

ตารางที่ 13 ค่าเฉลี่ยคะแนนของการสังเกตลักษณะภายนอก (appearance) โดยผู้ทดลอง

ระยะเวลาในการเก็บรักษา (วัน)	คะแนนของลักษณะปรากฏเมื่อเก็บที่อุณหภูมิ		
	10°C	15°C	25°C
0	4.0	4.0	4.0
1	4.0	4.0	3.0
2	4.0	3.3	3.0
3	-	-	2.0
6	3.7	3.0	-
7	3.0	3.0	-
8	3.0	2.0	-
9	3.0	2.0	-
12	2.3	1.3	-

13

2.0

1.0

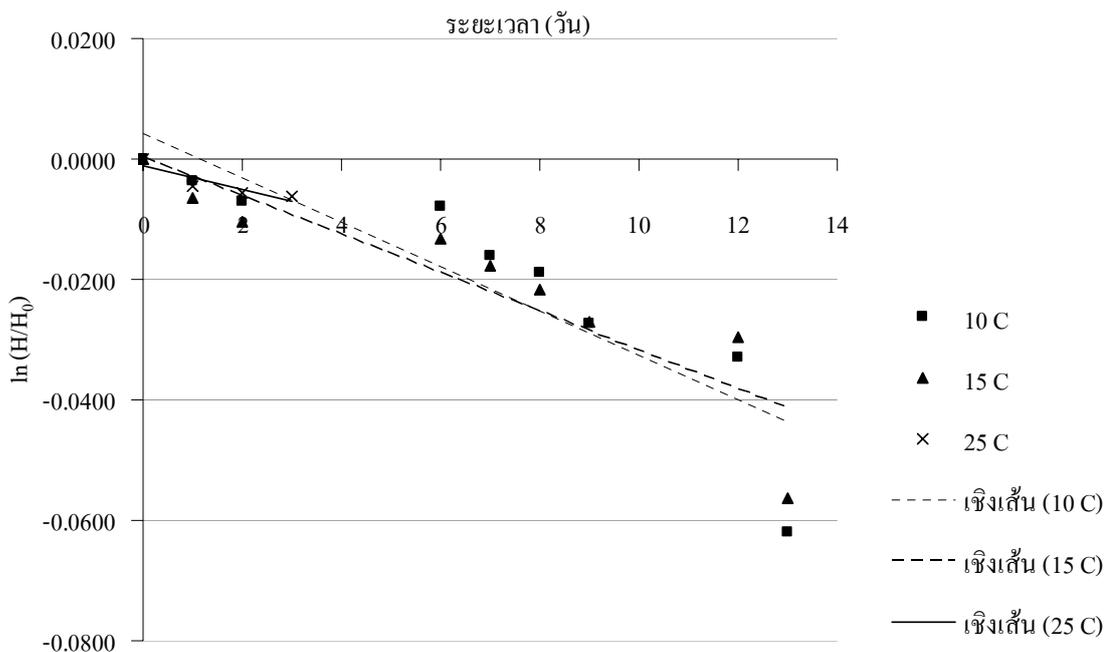
-

หมายเหตุ รายละเอียดการให้คะแนนเป็นไปตามตารางที่ 2

\* ไม่มีข้อมูลเนื่องจากห้องปฏิบัติการปิดทำการ

จากระยะเวลาการเก็บรักษาที่ทำให้คะแนนลดต่ำลงถึง 2 ซึ่งกำหนดให้เป็นค่าชี้วัดคุณภาพว่าไม่เป็นที่ต้องการของผู้บริโภค พบว่า ที่อุณหภูมิ 10 °C มีอายุการเก็บรักษา 12 วัน, ที่อุณหภูมิ 15 °C มีอายุการเก็บรักษา 8 วัน และที่อุณหภูมิ 25 °C มีอายุการเก็บรักษา 3 วัน

จากการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ด้วยโปรแกรม SPSS 12.0 for Windows ระหว่างค่าสี (hue), ปริมาณเส้นใย (fiber) และการสังเกตลักษณะภายนอก (app) พบว่า ค่าสี และการสังเกตลักษณะภายนอกมีความสัมพันธ์ในรูปเชิงเส้นที่ระดับนัยสำคัญ 0.01 โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เท่ากับ 0.683 ดังนั้นการอธิบายคุณภาพที่เสื่อมเสียโดยสังเกตจากลักษณะภายนอกที่ปรากฏ จึงมีแนวโน้มเดียวกับการเปลี่ยนแปลงของสีซึ่งเป็นไปตามกฎของ Arrhenius ซึ่งจากสมการที่ (4) เมื่อนำค่า hue angle ณ เวลาใด ๆ (H) หาค่า hue angle เริ่มต้น ( $H_0$ ) ของหน่อไม้ฝรั่งมาพล็อตกราฟในรูป  $\ln(H/H_0)$  เทียบกับเวลาการเก็บรักษา (ภาพที่ 11) จะได้ค่าความชันเป็นค่า k ที่แต่ละอุณหภูมิ ดังแสดงในตารางที่ 14



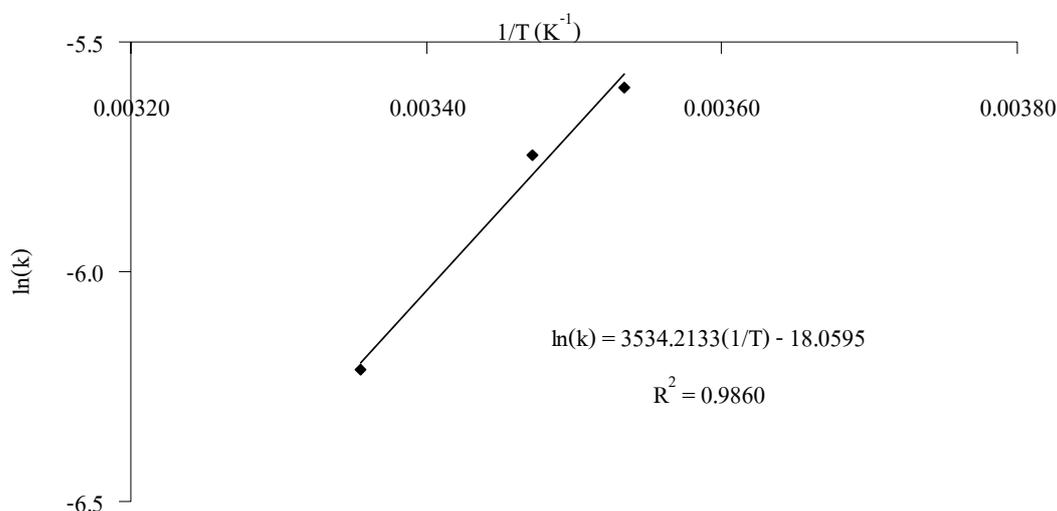
ภาพที่ 11 ค่า  $\ln(H/H_0)$  กับระยะเวลาในการเก็บรักษาหน่อไม้ฝรั่ง

ตารางที่ 14 ค่าคงที่ของความเร็วปฏิกิริยา (k) และ activation energy ( $E_a$ ) ของการลดลงของค่า hue angle

T (°C)	k (day <sup>-1</sup> )	R <sup>2</sup>	E <sub>a</sub> (kJ/mol)
10	-0.0037	0.7981	
15	-0.0032	0.8148	29.3834
25	-0.0020	0.8438	

หมายเหตุ อุณหภูมิ 1 °C เท่ากับ 273 K

เนื่องจากเครื่องหมายลบเป็นเพียงทิศทางที่เกิดปฏิกิริยา ดังนั้นนำค่า k ที่เป็นบวกมาหา Arrhenius plot (ภาพที่ 12) และจะได้ความชันของกราฟเป็นค่า  $E_a$  จะเห็นว่าค่า  $E_a$  ที่ได้ค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับค่า  $E_a$  (56 kJ/mol) ของปฏิกิริยาการยับยั้งเอนไซม์ lipoxygenase (LOX) ซึ่งเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงสีของผักสีเขียว (Morales-Blancas *et al.*, 2002) คือหากสามารถยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ LOX ได้ จะทำให้การเปลี่ยนสีเขียวของ chlorophyll เกิดขึ้นช้าลง และสามารถเก็บรักษาผักสดได้นานขึ้น แต่เนื่องจากค่า  $E_a$  ที่ได้ในการทดลองนี้มาจากการวัดค่าสี ไม่ใช่การทดลองวัดปริมาณคลอโรฟิลล์ จึงมีค่าแตกต่างกัน

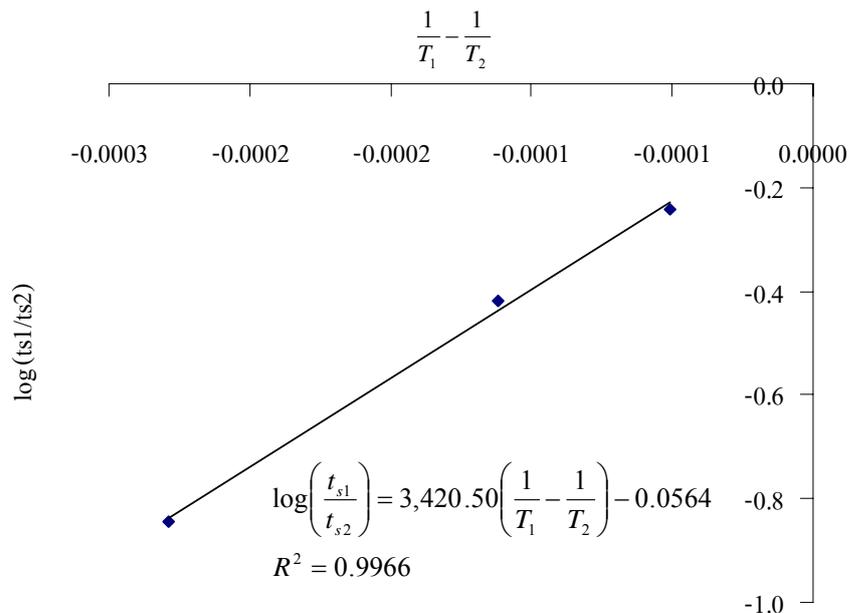


ภาพที่ 12 Arrhenius plot ระหว่างค่า  $\ln(k)$  กับ  $1/T$  ของค่า hue angle ของหน่อไม้ฝรั่ง

เมื่อนำค่า  $\log$  ของอายุการเก็บรักษาที่ได้จากการให้คะแนนการสังเกตลักษณะภายนอก มาพล็อตเทียบกับส่วนกลับของอุณหภูมิ (องศาเคลวิน) ตามสมการที่ (8) โดยใช้ค่าอายุการเก็บรักษา อ้างอิง 21 วัน ( $t_{s2}$ ) ณ อุณหภูมิอ้างอิงที่ 6°C หรือ 279 K ( $T_2$ ) จากการทดลองของ Albanese *et al.* (2007) ได้กราฟดังภาพที่ 13 เมื่อหาความสัมพันธ์ด้วยวิธี linear regression analysis จะได้สมการ เส้นตรงที่มีค่า  $R^2 = 0.9966$  จัดรูปสมการด้วยการแทนค่าอายุการเก็บรักษา และอุณหภูมิอ้างอิง จะ ได้สมการที่ใช้ทำนายอายุการเก็บรักษา ณ อุณหภูมิที่ต้องการตามสมการที่ (21)

$$t_s = 10^{\left(3420.5\left(\frac{1}{T}\right) - 10.99\right)} \quad \text{—————(21)}$$

เมื่อ  $t_s$  = อายุการเก็บรักษา (วัน) และ  $T$  = อุณหภูมิ (K)



ภาพที่ 13 Arrhenius shelf life plot ระหว่างค่า  $\log(t_{s1}/t_{s2})$  กับ  $\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}$  ของค่าลักษณะปรากฏของหน่อไม้ฝรั่ง

### 3.3 การแทนค่าคงที่ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และผลลัพธ์ที่ได้

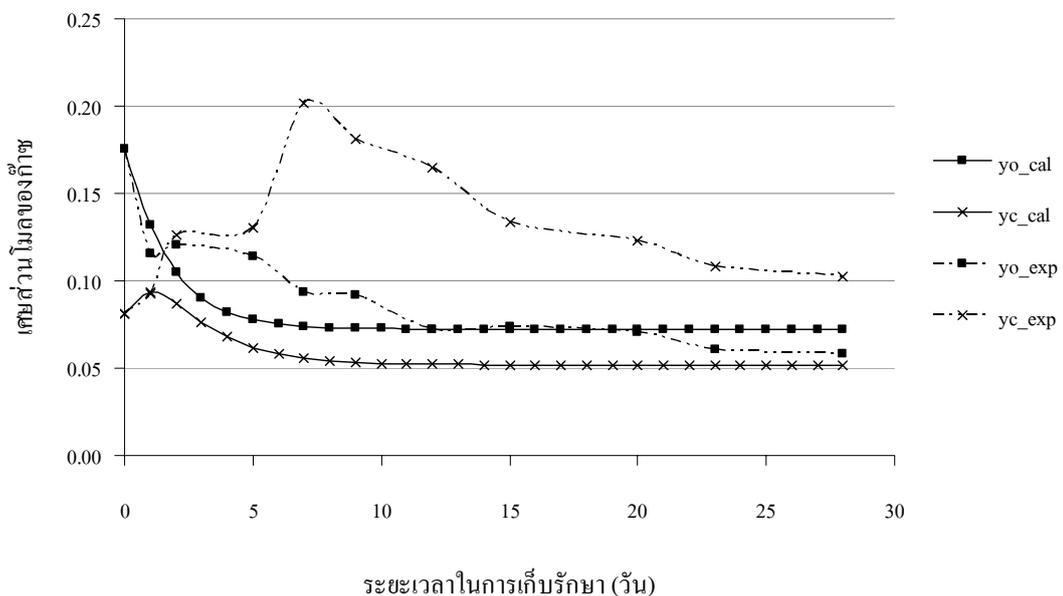
เมื่อทดลองแทนค่าสมการที่ (21) ด้วยอุณหภูมิ 4°C (277 K) พบว่ามีอายุการเก็บรักษา 22.61 วัน ซึ่งเท่ากับผลที่ได้จากการทดลองตอนที่ 2 (23 วัน) ดังนั้น สมการทำนายอายุการเก็บรักษา

ที่ได้จึงสามารถใช้ทำนายอายุการเก็บรักษาของหน่อไม้ฝรั่งในสภาพปรับบรรยากาศที่มีปริมาณก๊าซออกซิเจน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เริ่มต้นเท่ากับ 18 และ 8% ตามลำดับได้ดี

ส่วนสมการที่ (15) และ (16) เมื่อแก้ตามวิธี Runge-Kutta อันดับ 4 (ภาคผนวก ก1) โดยนำค่า  $V_m$ ,  $K_m$  และ  $K_i$  จากตารางที่ 6 และ 9 มาแทนค่าในสมการดังกล่าวได้เป็นสมการที่ (22) และ (23) แล้วคำนวณด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ Quick Basic ซึ่งดัดแปลงมาจากสมยศ (2540) ดังมีรายละเอียดในภาคผนวก ก2 เพื่อใช้หาคำตอบ คือการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ตามระยะเวลาในการเก็บรักษา ได้ผลดังภาพที่ 14 ซึ่งหากนำไปเปรียบเทียบกับกราฟทดลองเก็บรักษาหน่อไม้ฝรั่งที่อุณหภูมิ 4°C พบว่ามีลักษณะการเปลี่ยนแปลงที่คล้ายคลึงกัน โดยการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนมีความแตกต่างจากการทดลองคิดเป็น 3% ส่วนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีความแตกต่างถึง 52% ความแตกต่างที่เกิดขึ้นอาจเกิดจากความผิดพลาด (error) จากข้อมูล เนื่องจากข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณคือ ค่า  $V_m$ ,  $K_m$  และ  $K_i$  ในสภาวะการเก็บรักษาจริงอาจมีค่าเปลี่ยนแปลงได้ตามอุณหภูมิ แต่ในสมการที่ (22) และ (23) นั้นเป็นค่าคงที่ที่หาจากอุณหภูมิจุดเดียว

$$\frac{dy_o}{dt} = \frac{145.83 \times A \times (0.21 - y_o)}{VL} - \frac{W}{V} \cdot \frac{200.00 \times [y_o]}{3.68 + [y_o] \left(1 + \frac{[y_c]}{16.67}\right)} \quad (22)$$

$$\frac{dy_c}{dt} = \frac{543.54 \times A \times (0.0003 - y_c)}{VL} + \frac{W}{V} \cdot \frac{222.22[y_o]}{2.91 + [y_o] \left(1 + \frac{[y_c]}{7.50}\right)} \quad (23)$$

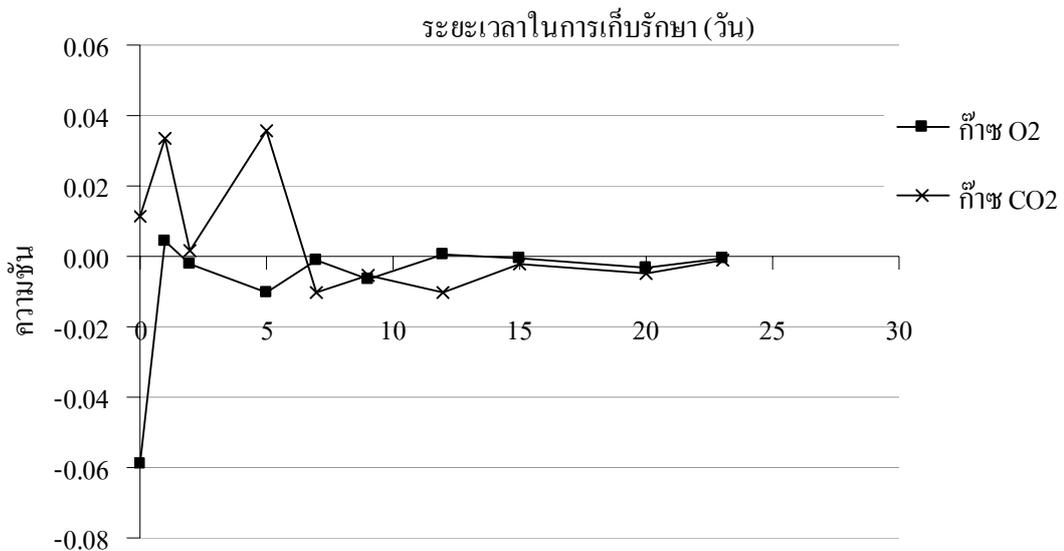


ภาพที่ 14 การเปลี่ยนแปลงของปริมาณก๊าซ CO<sub>2</sub> และ O<sub>2</sub> (%) ในระหว่างการเก็บรักษาหน่อไม้ฝรั่ง ที่อุณหภูมิ 4 °C เปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรม Quick Basic

กราฟของก๊าซออกซิเจนที่ได้จากการทดลอง (yo\_exp) ช่วงวันที่ 1 และ 2 มีค่าเพิ่มขึ้น อาจเนื่องมาจากหน่อไม้ฝรั่งมีการปรับตัวเมื่ออยู่ในสภาพปรับบรรยากาศก่อนระบบเข้าสู่สมดุล ทำให้อัตราการใช้ก๊าซออกซิเจนสำหรับการหายใจยังไม่คงที่ รวมถึงอาจเกิดการผิดพลาด (error) จากการเก็บข้อมูลเนื่องจากตัวอย่างก๊าซที่เก็บจากถุงที่บรรจุหน่อไม้ฝรั่งเป็นค่าเฉลี่ยของ 3 ถุง ซึ่งอาจมีบางถุงที่มีปริมาณก๊าซเริ่มต้นสูงกว่าถุงอื่น สังเกตได้จากข้อมูลในวันที่ 2 มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานค่อนข้างสูง ดังแสดงในตารางผนวกที่ 3 และเมื่อผ่านช่วงการปรับตัวแล้ว ความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนจึงค่อย ๆ ลดลงตามระยะเวลาในการเก็บรักษา ส่วนกราฟของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้จากการทดลอง (yc\_exp) ในช่วงวันที่ 1 ถึง 7 มีปริมาณก๊าซสะสมในระบบค่อนข้างมาก อาจเนื่องมาจากค่าการแพร่ผ่านฟิล์มของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ค่อนข้างน้อย การแพร่ผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกไปจากบรรจุภัณฑ์จึงช้าในช่วงแรก จนเมื่ออัตราการหายใจถูกยับยั้งด้วยปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่สะสมอยู่นั้น ความเข้มข้นจึงค่อย ๆ ลดลงจนถึงจุดสมดุล เช่นเดียวกับก๊าซออกซิเจน

ค่าที่ได้จากการคำนวณมีระยะเวลาเข้าสู่สมดุลเร็วกว่า (10 วัน) และที่จุดสมดุลปริมาณก๊าซออกซิเจนมีค่าเท่ากับ (7%) ส่วนปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าต่ำกว่า (5%) ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากพจน์ที่ใช้อธิบายการหายใจแบบ uncompetitive อาจไม่เหมาะสมกับการอธิบายการเปลี่ยนแปลงก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจริง และเมื่อนำข้อมูลผลการทดลองมาหาความสัมพันธ์ระหว่างจุด แล้วพล็อตกราฟได้ดังภาพที่ 15 พบว่า ค่าความสัมพันธ์เริ่มเข้าใกล้ศูนย์ (น้อยกว่า 0.001) และเริ่มคงที่ตั้งแต่วันที่ 12 สำหรับก๊าซออกซิเจน และวันที่ 15 สำหรับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งรายละเอียดแสดงในตารางผนวกที่ 8 โดยค่าความสัมพันธ์ที่เข้าใกล้ศูนย์ หมายถึงมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณก๊าซภายในบรรจุภัณฑ์น้อย หรือระบบเข้าสู่สมดุลนั่นเอง และภายหลังระบบเข้าสู่สมดุลแล้ว มีการเปลี่ยนแปลงความชันเกิน 0.001 อีกครั้งในวันที่ 20 ดังนั้น หากพิจารณาการเปลี่ยนแปลงปริมาณก๊าซออกซิเจนเป็นหลัก พบว่า ระยะเวลาช่วงที่ระบบอยู่ในสมดุลคือ 8 วัน ซึ่งสามารถรักษาคุณภาพของหน่อไม้ฝรั่งได้ดี อาจนำมาใช้ทำนายอายุการเก็บรักษาหน่อไม้ฝรั่งได้

โดยหากพิจารณาอายุการเก็บรักษาภายหลังระยะเวลาเข้าสู่สมดุลของก๊าซออกซิเจน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรจุภัณฑ์จากการทดลองตอนที่ 2 พบว่า การเปลี่ยนแปลง คุณภาพจนไม่เป็นที่ยอมรับนั้นมีอายุการเก็บรักษา 8 วันเช่นเดียวกับการทำนายจากสมการที่ (22) และ (23)



ภาพที่ 15 ค่าความชันของการเปลี่ยนแปลงปริมาณก๊าซ CO<sub>2</sub> และ O<sub>2</sub> (%) ในระหว่างการเก็บรักษา หน่อไม้ฝรั่ง