

จลนพลศาสตร์การกำจัดเอทิลีนของวัสดุดูดซับเอทิลีนประเภทแกลบข้าวที่สัมพันธ์กับอุณหภูมิเก็บรักษา  
Kinetics of Ethylene Scavenging of Rice Husk-based Ethylene Absorber in Relation to Storage  
Temperatures

สุดาทิพย์ นิระภาพ<sup>1</sup> สุทธิดา พันแสน<sup>1</sup> เรวัต ชัยราช<sup>1,2</sup> วัชรพงษ์ วัฒนกุล<sup>3</sup> อุดลย์ อภินันท์<sup>4</sup> และวีระเวทย์ อุทโย<sup>1,2,5</sup>  
Sudathip Nirapap<sup>1</sup>, Suthida Pansan<sup>1</sup>, Raywat Chairat<sup>1,2</sup>, Watcharapong Wattanakul<sup>3</sup>, Adul Apinan<sup>4</sup> and  
Weerawate Utto<sup>1,2,5</sup>

### Abstract

Rapid postharvest deteriorations of fresh fruit and vegetables stimulated by ethylene are considered important problems in transportation, sales, and storages. The present study purposely was to study kinetics of ethylene scavenging of ethylene absorbers in relations to storage temperatures. The ethylene absorber developed from ground Khao Dok Mali rice husk mixed with potassium permanganate (KMnO<sub>4</sub> 15% (w/v)), and fabricated as a 3x3x3 cm cube (so-called FQ block). The ethylene scavenging tests were undertaken in close-systems kept at 10, 25, and 35°C for 24 h. The close-systems for individual temperatures were referred to the sealed aluminum foil laminated with polyethylene film package containing a 250-ml beaker and one FQ block. Experimental results show that the FQ blocks had high abilities to scavenge ethylene. Ethylene concentrations manually injected into the package were reduced more than 70% from their initial values (~152 μL L<sup>-1</sup>) within 1 h. The concentrations thereafter were comparable to such reduced concentration levels throughout the storage period. Kinetics of ethylene concentration changes as results of ethylene scavenging by the FQ blocks were well predicted using the first-order fractional conversion model (0.97-0.99 R<sup>2</sup> values). Rates of ethylene scavenging became gradually decreased when the temperatures were elevated. Such ethylene scavenging characteristics indicate that the interactions between ethylene and KMnO<sub>4</sub> were endothermic reaction. The kinetic knowledge points out the temperature level at which the FQ block should be utilized in the supply chain.

**Keywords:** ethylene, ethylene absorber, fresh fruit and vegetables, active packaging

### บทคัดย่อ

การเสื่อมคุณภาพภายหลังการเก็บเกี่ยวอย่างรวดเร็วของผักและผลไม้สดจากกระดุนโดยเอทิลีนเป็นปัญหาสำคัญในการขนส่ง การจำหน่ายและการเก็บรักษา การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาจลนพลศาสตร์การกำจัดเอทิลีนของวัสดุดูดซับเอทิลีนที่สัมพันธ์กับอุณหภูมิการเก็บรักษา วัสดุดูดซับเอทิลีนพัฒนาจากแกลบข้าวขาวดอกมะลิผสมกับโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (KMnO<sub>4</sub> ความเข้มข้น 15% (w/v)) และขึ้นรูปเป็นก้อนลูกบาศก์ขนาด 3x3x3 cm (หรือเรียกว่าก้อน FQ) การทดสอบกำจัดเอทิลีนดำเนินการในระบบปิด ที่อุณหภูมิ 10 25 และ 35°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ทั้งนี้ระบบปิดในแต่ละอุณหภูมิ คือ ภาชนะบรรจุอุณหภูมิเย็บพอลิเอทิลีนปิดสนิทบรรจุเบเกอร์ขนาด 250 ml และก้อน FQ จำนวน 1 ก้อน ผลการศึกษาพบว่าก้อน FQ มีความสามารถสูงในการกำจัดเอทิลีน ความเข้มข้นของเอทิลีนที่ฉีดเข้าสู่ภาชนะบรรจุลดลงมากกว่าร้อยละ 70 จากความเข้มข้นเริ่มต้น (~152 μL L<sup>-1</sup>) ภายใน 1 ชั่วโมง จากนั้นความเข้มข้นมีค่าที่ใกล้เคียงกับระดับค่าที่ลดลงนั้นตลอดการเก็บรักษา จลนพลศาสตร์ของการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของเอทิลีนซึ่งเป็นผลจากการกำจัดเอทิลีนด้วยก้อน FQ สามารถทำนายได้ดีด้วย

<sup>1</sup> คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี อำเภอวารินชำราบ จังหวัดอุบลราชธานี 34190

<sup>1</sup> Faculty of Agriculture, Ubon Ratchathani University, Warin Chamrap, Ubon Ratchathani 34190

<sup>2</sup> ศูนย์นวัตกรรมเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา กรุงเทพฯ 10400

<sup>2</sup> Postharvest Technology Innovation Center, Office of the Higher Commission, Bangkok 10400

<sup>3</sup> คณะเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่ อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ 50000

<sup>3</sup> Faculty of Agricultural Technology, Rajabhat Chiangmai University, Chiangmai 50000

<sup>4</sup> สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์ อำเภอเมือง จังหวัดบุรีรัมย์ 31000

<sup>4</sup> Research and Development Institute, Rajabhat Burium University, Buriram 31000

<sup>5</sup> ศูนย์วิจัยและพัฒนาอุตสาหกรรมอาหารพื้นบ้าน คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี จังหวัดอุบลราชธานี 34190

<sup>5</sup> Indigenous Food Research and Industrial Development Center, Faculty of Agriculture, Ubon Ratchathani University, 34190

สมการ first-order fractional conversion model (ค่า  $R^2$  0.97-0.99) อัตราเร็วของการกำจัดเอทิลีนมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ลักษณะการกำจัดเอทิลีนดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าการเกิดปฏิกิริยาระหว่างเอทิลีนและสารละลาย  $KMnO_4$  เป็นปฏิกิริยาการคายความร้อน ความรู้ด้านจลนพลศาสตร์ได้ชี้ให้เห็นถึงระดับอุณหภูมิที่ก่อน FO ควรถูกใช้ในโซลูชัน

**คำสำคัญ:** เอทิลีน วัสดุดูดซับเอทิลีน ผักและผลไม้สด การบรรจุภัณฑ์แอคทีฟ

### คำนำ

ผักและผลไม้ยังคงดำเนินกิจกรรมทางสรีรวิทยาและชีวเคมีภายหลังการเกี่ยวส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณภาพและนำไปสู่การเสื่อมคุณค่าทางโภชนาการและมูลค่าทางการตลาด (Panahirad *et al.*, 2021) การตอบสนองของผลผลิตต่อ เอทิลีนซึ่งเป็นฮอร์โมนพืชที่สำคัญในรูปของแก๊ส ส่งผลให้เกิดการกระตุ้นการเปลี่ยนแปลงและเสื่อมเสียคุณภาพโดยเฉพาะผลไม้ในกลุ่มบ่มสุก (climacteric fruit) เช่น ถั่วลิสง พุริณ และมะม่วง (จริงแท้, 2549) การควบคุมความเข้มข้น เอทิลีนซึ่งสะสมอยู่ในบริเวณรอบผลไม้เป็นแนวทางสำคัญเพื่อชะลอการตอบสนองของผลไม้ต่อเอทิลีน โดยการใช้เทคโนโลยีการบรรจุภัณฑ์แอคทีฟ (active packaging technology) ด้วยวัสดุดูดซับเอทิลีน (ethylene absorber) ในรูปของซองขนาดเล็ก (sachet) หรือฟิล์มคอมโพสิต (composite film) วัสดุดูดซับเอทิลีนที่นิยมใช้ทั่วไปคือวัสดุที่มีรูพรุนสูงซึ่งมีการทำให้เอิบชุ่ม (pre-absorbed) ด้วยสารโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ( $KMnO_4$ ) ที่มีความสามารถในการออกซิไดซ์เอทิลีนให้กลายเป็นสารประกอบอื่นๆ ดังลักษณะปรากฏที่เห็นได้ชัดจากการเปลี่ยนสีม่วงของสาร  $KMnO_4$  เป็นสีน้ำตาลของสาร  $MnO_2$  ทั้งนี้วัสดุที่มีรูพรุนทำหน้าที่ในการดูดซับและสร้างพันธะกับเอทิลีนซึ่งอยู่บริเวณรอบๆ จากนั้นเอทิลีนที่ถูกดูดซับไว้จะทำปฏิกิริยากับสาร  $KMnO_4$  ส่งผลให้เกิดการกำจัดเอทิลีนตัวอย่างของวัสดุที่มีรูพรุน เช่น ถ่านกัมมันต์ (activated carbon) ซีโอไลต์ (zeolite) หรือวัสดุซิลิกา (silica-based material) (วีระเวทย์, 2562) ในการวิจัยนี้มีแนวคิดในการประยุกต์ใช้แคลบซาว ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการสีข้าวมาพัฒนาเป็นวัสดุกำจัดเอทิลีนเนื่องจากแคลบซาวมีวัสดุซิลิกาที่มีสมบัติความเป็นรูพรุนสูง (ภิเชก, 2554) จึงมีศักยภาพในการดูดซับเอทิลีนเข้าสู่โครงสร้างรูพรุน ดังนั้นการทำให้แคลบซาวเอิบชุ่มด้วยสาร  $KMnO_4$  จึงมีศักยภาพเป็นวัสดุดูดซับเอทิลีนได้ ทั้งนี้จังหวัดอุบลราชธานีเป็นพื้นที่ปลูกข้าวที่สำคัญในการปลูกข้าวของประเทศไทย ดังนั้นการใช้ประโยชน์จากแคลบซาวนอกเหนือจากการเผาให้พลังงานและทำปุ๋ย เป็นแนวทางในการเพิ่มมูลค่าของเหลือหรือผลพลอยได้จากการผลิตทางหนึ่ง การวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาจลนพลศาสตร์การกำจัดเอทิลีนของวัสดุดูดซับเอทิลีนจากแคลบซาวที่เอิบชุ่มด้วยสาร  $KMnO_4$  ที่สัมพันธ์กับอุณหภูมิการเก็บรักษาในโซลูชันผักและผลไม้ ผลการศึกษาที่ได้จะเป็นข้อมูลเบื้องต้นสำหรับการพัฒนาและประยุกต์ใช้วัสดุดูดซับเอทิลีนสำหรับผลิตผลต่อไป

### วิธีทดลอง

**การพัฒนาต้นแบบวัสดุกำจัดเอทิลีน** นำแคลบซาวสายพันธุ์หอมมะลิ 105 มาทำการบดให้เป็นผงและร่อนด้วยตะแกรงร่อนขนาด 40 mesh จากนั้นนำแคลบบด 3 g ใส่ลงในบีกเกอร์พร้อมกับเทสารละลาย  $KMnO_4$  ความเข้มข้น 15% (w/v) (น้ำเป็นตัวทำละลาย) ปริมาตร 5 ml พร้อมกับคลุกเคล้าให้เข้ากัน เมื่อเข้ากันดีแล้วนำไปเทใส่แม่พิมพ์ซิลิโคน แล้วตั้งทิ้งไว้ 10 นาที เพื่อขึ้นรูปเป็นก้อนขนาด 3x3x3 cm ซึ่งเรียกในงานวิจัยนี้ว่า FreshQube หรือ “ก้อน FO” **การทดสอบจลนพลศาสตร์การกำจัดเอทิลีนของก้อน FO ในระบบปิด** นำก้อน FO ใส่ลงในบีกเกอร์ (ปริมาตร 250 ml; 1 ก้อน ต่อ 1 บีกเกอร์) จากนั้นนำไปบรรจุในถุงอลูมิเนียมฟอยล์ลามิเนต (AL/PE) แล้วปิดปากถุงด้วยเครื่องปิดผนึกความร้อน โดยให้รอยปิดผนึกใกล้ชิดกับปากของบีกเกอร์ จากนั้นทำการฉีดเอทิลีน 5 ml เข้าสู่ถุงด้วยเข็มฉีดยาโดยปิดรูที่เกิดขึ้นบริเวณฉีดยาด้วยเทปอะลูมิเนียม แล้วเก็บรักษาที่ 3 อุณหภูมิประกอบด้วย 10 25 และ 35°C จากนั้นศึกษาการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นเอทิลีนภายใน 24 ชั่วโมง โดยวิเคราะห์ตัวอย่างแก๊สจากถุงด้วยเครื่อง gas chromatogram ประเภท flame ionized detector (FID-GC 2014) สภาวะการวิเคราะห์ คือ อุณหภูมิ injector และ detector เท่ากับ 150 และ 250°C ตามลำดับ โดยตั้งโปรแกรมของอุณหภูมิ oven ดังนี้ อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 3 นาที จากนั้นเพิ่มขึ้น 10°C/นาที จนถึง 200°C คงไว้ 3 นาที หน่วยความเข้มข้นของเอทิลีน คือ  $\mu L L^{-1}$  ความเข้มข้นของเอทิลีนเริ่มต้นภายในถุงค่าประมาณ 152  $\mu L L^{-1}$  จากการศึกษาเบื้องต้น พบว่า ความเข้มข้นในบรรจุภัณฑ์ที่ไม่มีก้อน FO มีค่าใกล้เคียงกับค่าเริ่มต้นตลอดระยะเวลาการทดสอบ ในการวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์ประเภท first-order fractional conversion model ดังแสดงใน Eq. 1 เพื่อศึกษาอัตราเร็วของการกำจัดเอทิลีนด้วยก้อน FO ซึ่งประมาณจากค่า  $k_{1st}$  โดยวิธี nonlinear regression ที่รายงานใน Yang and Chinnan (1988) ทั้งนี้ผลการวิจัยในความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $k_{1st}$  และอุณหภูมิเก็บรักษาได้พิจารณาจากองค์ความรู้ของกฎข้อที่ 2 ของเทอร์โมไดนามิกส์ (Eq. 2) สำหรับปฏิกิริยาของระบบ ณ อุณหภูมิและค่าคงที่ กล่าวโดยสรุปคือ ปฏิกิริยาสามารถเกิดขึ้นได้เอง (spontaneity) ต่อเมื่อค่า  $\Delta G < 0$  (หมายเหตุ การวิจัยนี้ไม่ได้วิเคราะห์หรือประมาณค่าที่เป็นตัวเลขของตัวแปรใน Eq.2)

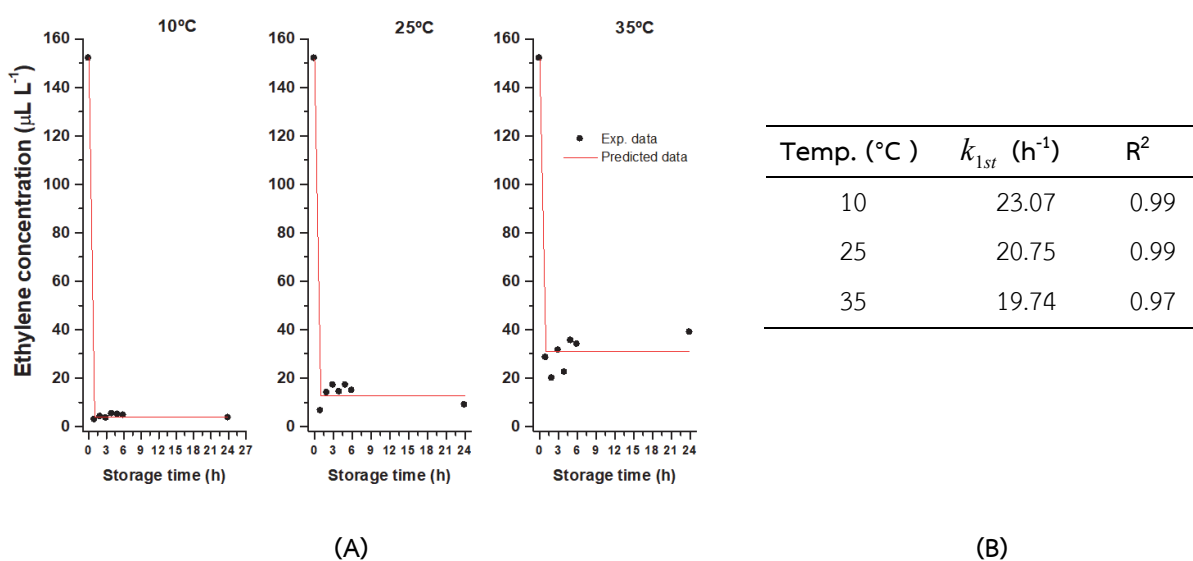
$$\frac{C_t^{C_2H_4} - C_{t_\infty}^{C_2H_4}}{C_{t_0}^{C_2H_4} - C_{t_\infty}^{C_2H_4}} = \exp(-k_{1st}t) \quad (\text{Eq. 1})$$

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (\text{Eq. 2})$$

โดย ใน Eq. 1 ประกอบด้วย  $C_t^{C_2H_4}$  คือ ความเข้มข้นของเอทิลีน ณ เวลาใดๆ ( $t$ ) ( $\mu\text{L L}^{-1}$ )  $C_{t_\infty}^{C_2H_4}$  คือ ความเข้มข้นของเอทิลีน ณ infinite time (ในที่นี้ คือ 24 h) ( $\mu\text{L L}^{-1}$ )  $C_{t_0}^{C_2H_4}$  คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของเอทิลีน ( $t = 0$ ) ( $\mu\text{L L}^{-1}$ )  $k_{1st}$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์ ( $\text{h}^{-1}$ ) และ  $t$  คือ เวลา (h); ใน Eq. 2 ประกอบด้วย  $\Delta G$  คือ การเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระ Gibbs ( $\text{kJ mol}^{-1}$ )  $\Delta H$  คือ การเปลี่ยนแปลง enthalpy ( $\text{kJ mol}^{-1}$ )  $\Delta S$  คือ การเปลี่ยนแปลง entropy ( $\text{kJ mol}^{-1} \text{K}^{-1}$ ) และ  $T$  คือ อุณหภูมิ (K)

### ผลการทดลองและวิจารณ์

การกำจัดเอทิลีนโดยก้อน FQ ในทุกอุณหภูมิการเก็บรักษา เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 1-2 ชั่วโมงแรกโดยความเข้มข้นของเอทิลีนลดลงมากกว่าร้อยละ 70 ของความเข้มข้นเริ่มต้น จากนั้นความเข้มข้นของเอทิลีนมีแนวโน้มที่คงที่อยู่ในระดับที่ลดลงนั้นตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา (Figure 1 A) ข้อมูลดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการกำจัดเอทิลีนของก้อน FQ เมื่อทำการสังเกตด้วยตาเปล่า พบว่า สีของก้อน FQ พบว่ามีการเปลี่ยนสีม่วงเข้ม (สีของสาร  $\text{KMnO}_4$ ) เป็นสีน้ำตาลคล้ำ (สีของสารประกอบ  $\text{MnO}_2$ ) ลักษณะปรากฏดังกล่าวสนับสนุนการเกิดปฏิกิริยาระหว่างสาร  $\text{KMnO}_4$  และเอทิลีน เมื่อพิจารณาข้อมูลใน Figure 1 A พบว่า ความเข้มข้นของเอทิลีนในช่วงคงที่ (steady-state) ของบรรจุภัณฑ์ซึ่งเก็บรักษาที่  $10^\circ\text{C}$  มีค่าต่ำกว่าที่อุณหภูมิ 25 และ  $35^\circ\text{C}$  โดยความเข้มข้นที่  $35^\circ\text{C}$  มีค่าสูงกว่าอุณหภูมิอื่นๆ ผลการศึกษาดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการกำจัดเอทิลีนของก้อน FQ ลดลงเมื่ออุณหภูมิการเก็บรักษาเพิ่มขึ้น ทั้งนี้ลักษณะการเปลี่ยนแปลงและระดับความเข้มข้นเอทิลีนในช่วงเวลาต่างๆภายในบรรจุภัณฑ์ถูกทำนายได้ดีด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์ first-order fractional conversion model (Eq. 1) โดยมีค่า  $R^2$  อยู่ในช่วง 0.97-0.99 (Figure 1 B) ข้อมูลดังกล่าวนี้ทำให้ทราบว่าการกำจัดเอทิลีนด้วยก้อน FQ เป็นปฏิกิริยาอันดับที่ 1 ซึ่งอัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาสัมพันธ์โดยตรงกับความเข้มข้นหรือปริมาณสารตั้งต้นของปฏิกิริยา (Robertson, 2012) ผลการศึกษานี้สอดคล้องกับการลดลงอย่างมากของความเข้มข้นเอทิลีนในช่วง 1-2 ชั่วโมง และหลังจากนั้นความเข้มข้นของเอทิลีนเปลี่ยนแปลงน้อยมาก (Figure 1 A) นอกจากนี้ค่า  $k_{1st}$  ของ Eq. 1 (Figure 1 B) ซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงอัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยา มีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ข้อมูลจากการศึกษาแบบจำลองคณิตศาสตร์นี้สนับสนุนผลการศึกษาในประเด็นการกำจัดเอทิลีนของก้อน FQ ที่มีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิการเก็บรักษาที่สูงขึ้น



**Figure 1:** Changes of ethylene concentrations as results of interactions between the ethylene absorber (FQ) and ethylene, at  $10\text{-}35^\circ\text{C}$  Note: dots and lines represent data experimentally collected (Exp.) (average values of  $n=3$ , at individual times) and those predicted by Eq. 1 (pred.), respectively (A), and values of  $k_{1st}$  and  $R^2$  estimated from the non-linear regression of Eq. 1 (B)

จากข้อมูลใน Figure 1 B การลดลงของอัตราเร็วการเกิดปฏิกิริยาเมื่ออุณหภูมิการเก็บรักษาเพิ่มขึ้นเป็นลักษณะสำคัญของปฏิกิริยาคายความร้อน (exothermic reaction) เมื่อทำการพิจารณา Eq. 2 ปฏิกิริยาคายความร้อนมีค่า  $\Delta H < 0$  ในขณะที่การกำจัดเอทิลีนของก้อน FO เป็นการทำให้เอทิลีนในระบบมีความเป็นระเบียบมากขึ้นจึงทำให้ค่า  $\Delta S < 0$  ดังนั้นสถานะที่ทำให้ค่า  $\Delta G < 0$  จึงควรอยู่ในอุณหภูมิที่ไม่สูงมากที่จะทำให้ผลลัพธ์ของ T $\Delta S$  มีค่าเป็นบวก (หรือ T $\Delta S > 0$ ) ที่สูงและมีค่ามากกว่า  $\Delta H$  ซึ่งมีค่าติดลบ และทำให้ค่า  $\Delta G > 0$  โดยสภาวะอุณหภูมิสูงนี้ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาการกำจัดที่ช้าหรือยุติลง ผลการวิเคราะห์ Eq. 2 ได้ทำให้ทราบได้ถึงแนวทางการใช้งานของก้อน FO ซึ่งควรใช้ในสภาวะอุณหภูมิต่ำ เพื่อให้ปฏิกิริยาระหว่างเอทิลีนและก้อน FO เกิดขึ้นได้อย่างต่อเนื่องและมีอัตราเร็วที่สูงกว่าการกำจัดที่อุณหภูมิสูง

### สรุปผลการทดลอง

ผลการศึกษาแสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการกำจัดเอทิลีนของวัสดุดูดซับเอทิลีน หรือ FreshQube ที่ได้พัฒนาขึ้นจากแกลบข้าวบดซึ่งเอบซุ่มด้วยสาร  $\text{KMnO}_4$  ทั้งนี้อัตราเร็วของการกำจัดเอทิลีนมีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิการเก็บรักษาที่สูงขึ้น ข้อมูลที่ได้จากการศึกษานี้เป็นแนวทางสำคัญสำหรับประยุกต์ใช้วัสดุดูดซับเอทิลีนในโซ่อุปทานและกิจกรรมโลจิสติกส์เพื่อควบคุมความเข้มข้นของเอทิลีนและชะลอการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ต่อไป

### คำขอบคุณ

ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี และสำนักงานความร่วมมือเพื่อการพัฒนาระหว่างประเทศ กระทรวงต่างประเทศ ที่ให้การสนับสนุนงบประมาณ สถานที่ และอุปกรณ์การวิจัย

### เอกสารอ้างอิง

- จรัสแท้ ศิริพานิช. 2549. สรีรวิทยาและเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยวผักและผลไม้. พิมพ์ครั้งที่ 6. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 396 หน้า.
- ภิเชก รุ่งโรจน์ชัยพร. 2554. วัสดุรูพรุนคืออะไร. วารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง 20(1). 60-69.
- วีระเวทย์ อุทโย. 2562. การบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปรแอคทีฟสำหรับผักและผลไม้. พิมพ์ครั้งที่ 2. โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี. 192 หน้า.
- Panahirad, S., M. Dadpour, S.H. Peighambaroudost, M. Soltanzadeh, B. Gullón, K. Alirezalu and J.M. Lorenzo. 2021. Applications of carboxymethyl cellulose- and pectin-based active edible coatings in preservation of fruits and vegetables: A review, Trends in Food Science & Technology 110: 673–663.
- Robertson, G.L. 2012. Food Packaging. Principles and Practice. 3<sup>rd</sup> edition. CRC Press. 568 pp.
- Yang, C.C. and M.S. Chinnan. 1988 Modeling the effect of  $\text{O}_2$  and  $\text{CO}_2$  on respiration and quality of stored tomatoes. Transactions of the ASAE 31 920-925.