Engng.J.CMU.(2012) 19 (3), 51-63

วารสารวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Engineering Journal
Chiang Mai University

การระบายความร้อนออกจากผักโดยท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนที่มีน้ำแข็งเป็นแหล่งระบายความร้อน

Vegetable Cooling by Thermosyphon Heat Pipe Using Ice as a Heat Sink

นพดล โพธิ์เอี้ยง[1] ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์[2] และ ณัฐ วรยศ[1]

[1] ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ อ.เมือง จ.เชียงใหม่ 50200

[2]ศูนย์นวัตกรรมเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว สถาบันวิจัยเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ อ.เมือง จ.เชียงใหม่ 50200

Noppadon Poaieng[1], Tanongkiat Kiatsiriroat[2] and Nat Vorayos[1]

[1]Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chiang Mai University, Chiang Mai 50200, Thailand

[2]Postharvest Technology Innovation Center, Postharvest Technology Research Institute, Chiang Mai University, Chiang Mai 50200, Thailand

Email : noppadon_poaieng@hotmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้ได้ศึกษาเชิงทดลองในการนำท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนที่มีน้ำแข็งเป็นแหล่งระบายความร้อนมาระบายความร้อนจากผักในระหว่างที่มีการขนส่ง การทดสอบได้ใช้ตู้บรรจุขนาด 6 ลูกบาศก์เมตร ติดตั้งอยู่หลังรถกระบะ 4 ล้อ ระบบระบายความร้อนประกอบไปด้วย ถังน้ำแข็งปริมาตร 0.245 ลูกบาศก์เมตร และชุดท่อความร้อนที่เป็นท่อทองแดงจำนวน 108 ท่อ แต่ละท่อมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของท่อทองแดง 9.525 x 10^{-3} เมตร ความสูงของท่อความร้อนส่วนทำระเหย 0.5 เมตร และส่วนนี้มีการติดครีบอลูมิเนียม ความสูงของท่อความร้อนส่วนควบแน่น 0.5 เมตร มีการวางท่อ 2 แถว แถวละ 54 ท่อ ระยะห่างของแต่ละแถว 25 เซนติเมตร ระยะห่างจุดศูนย์กลางของท่อความร้อนแต่ละท่อ 2.5 เซนติเมตร สารทำงานที่ใช้คือ R-22 โดยเติมที่ปริมาตรประมาณ 50% ของส่วนทำระเหย การศึกษาได้ทำการทดสอบโดยการนำผักกะหล่ำปลีมาบรรจุใส่ในตู้ พบว่าสำหรับการขนส่งผัก 100-450 กิโลกรัม และระยะเวลาในการขนส่งระหว่าง 3-6 ชั่วโมง จะมีปริมาณการใช้น้ำแข็งอยู่ในช่วง 60-170 กิโลกรัม โดยค่าอุณหภูมิของผักที่บรรจุอยู่ภายในตู้ที่มีระบบระบายความร้อนจะลดลงเรื่อยๆ โดยค่าเริ่มต้นอยู่ที่ 25-27 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิสุดท้ายอยู่ที่ 16-19 องศาเซลเซียส เมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิของผักที่บรรจุอยู่ภายในตะกร้าที่ตั้งทิ้งไว้กลางแจ้งซึ่งจะมีค่าอุณหภูมิอยู่ที่ 28–38 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิของผักที่บรรจุอยู่ภายในตะกร้าที่วางอยู่ในร่ม มีค่าอุณหภูมิอยู่ที่ 28–33 องศาเซลเซียส จากการตรวจสอบความเสียหายที่เกิดขึ้นกับผักหลังการทดลองด้วยตาเปล่า พบว่าไม่มีความเสียหายเกิดขึ้นกับผักที่ได้ทำการบรรจุอยู่ภายในตู้ที่มีระบบระบายความร้อน แต่มีความเสียหายเกิดขึ้นกับผักที่ไม่ได้ทำการบรรจุอยู่ภายในตู้ที่วางอยู่ในที่ร่มและกลางแจ้งหลังการทดสอบ 30-40% และจากการวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์ การขนส่งผักที่มีระบบการระบายความร้อน โดยใช้ท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนที่มีน้ำแข็งเป็นแหล่งระบายความร้อน ในปริมาณไม่เกิน 450 กิโลกรัม โดยรถกระบะ 4 ล้อ สำหรับการขนส่งผักกะหล่ำปลี มีค่าเท่ากับ 4.69 บาทต่อกิโลกรัม

ABSTRACT

In this work, an experimental study on a cooling system having a thermosyphon heat-pipe heat exchanger with ice-pack heat sink for cooling vegetable in a container during its transportation was carried out. The container had a volume of about 6 m^3 and it was installed on a four-wheel truck. The cooling system consisted of ice-pack container with a volume of 0.245 m^3 and a thermosyphon heat pipe. The heat pipe had a set of 108 copper tubes each had an external diameter of 9.525 x 10^{-3}m. The evaporator with aluminum fins and the condenser sections each had a length of 0.5 m. The tubes were adjusted in two rows with 25 cm. spacing and the tubes pitch was 2.5 cm. R-22 was the cooling fluid in the heat pipe and it was filled in with an amount of 50% of the evaporator volume. The experiments were carried out by loading cabbages into the container. It was found that with transporting 100-450 kilograms of the vegetable within 3-6 hours, approximately 60-170 kilograms of ice was consumed. The vegetable temperature contained in the container during cooling decreased from 25-27 °C to 16-19 °C compared with the temperatures of the vegetable contained in baskets exposing to the sun and those in the shade which were 28-38 °C and 28-33 °C, respectively. After the experiment, it was found that there was insignificant damage on the vegetable contained in the container with the cooling system but there was 30-40 percent damage on the vegetable if there was no cooling system. From economic analysis, the transportation cost per unit for cabbages of 450 kg with a four-wheel truck was 4.69 Baht/kg.

1. บทนำ

ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมที่มีผลผลิตทางการเกษตรเป็นรายได้หลักที่สำคัญอย่างหนึ่งและผลผลิตทางการเกษตรนี้จะต้องมีการขนส่งผลผลิตจากแปลงเพาะปลูกไปยังศูนย์จัดจำหน่ายและตลาดสด ในระหว่างการขนส่งผลผลิตทางการเกษตรเหล่านี้จะได้รับความร้อนจากปัจจัยภายนอก ได้แก่ รังสีอาทิตย์ การรับความร้อนจากอากาศรอบๆ และปัจจัยที่สำคัญคือ ความร้อนจากการหายใจของผลผลิตเอง ซึ่งทำให้อุณหภูมิภายในกองผลผลิตมีค่าสูงขึ้น อาจทำให้คุณภาพลดลง ดูไม่สดหรือเกิดการเน่าเสียหายได้ ทำให้ราคาตก และอาจไม่สามารถนำไปจำหน่ายได้ ก่อให้เกิดความเสียหายในแต่ละวันเป็นจำนวนมาก ซึ่งมูลค่าผลิตภัณฑ์มวลรวมภายในประเทศของสินค้าการเกษตรปี 2553 มีมูลค่าถึง 1,080,000 ล้านบาท [1] ถ้าเกิดความเสียหายเพียง 1% อาจมีมูลค่าถึง 10,800 ล้านบาทต่อปี ดังนั้นหลังจากการเก็บเกี่ยวผลผลิตตลอดจนการขนส่งผลผลิตไปสู่ผู้บริโภค การลดอุณหภูมิของผลผลิตลงเป็นสิ่งที่จำเป็นอย่างยิ่ง

วิธีในการควบคุมอุณหภูมิผลผลิตทางการเกษตรในระหว่างการขนส่ง จะช่วยให้ผลผลิตเหล่านั้นอยู่ในสภาพใกล้เคียงกับที่ออกจากแปลงให้มากที่สุด ทำให้ราคาไม่ตก อันจะเป็นการเกื้อหนุนให้เกษตรกรได้ผลประโยชน์เต็มที่และลดปัญหาขยะที่เกิดจากการนำผลผลิตคุณภาพที่ตกลงหรือเน่าเสียทิ้งไป ในปัจจุบันการขนส่งผักที่มีระบบระบายความร้อนส่วนใหญ่จะใช้กับการขนส่งผักที่มีการแช่แข็ง โดยการขนส่งจะใช้ปริมาณการขนส่งเป็นปริมาณครั้งละมากๆ และใช้ระยะเวลาในการขนส่งนาน โดยบรรจุใส่ลงในตู้ขนาดใหญ่และใช้รถบรรทุกหรือเรือในการขนส่ง ซึ่งระบบดังกล่าวเป็นระบบที่มีราคาแพงและใช้พลังงานสูง หากจะนำระบบระบายความร้อนดังกล่าวมาใช้ในการขนส่งผักที่เป็นผักสดของเกษตรกร ซึ่งส่วนใหญ่จะใช้รถกระบะ 4 ล้อในการขนส่งคงไม่เหมาะสม ทำให้เกษตรกรส่วนใหญ่เลือกใช้การขนส่งโดยใช้รถกระบะ 4 ล้อที่ไม่มีระบบทำความเย็น ทำการขนส่งในเวลากลางคืนในระยะทางที่ไม่ไกลมากนัก หากขนส่งในเวลากลางวันก็จะมีผ้าใบคลุมผักเอาไว้ ซึ่งวิธีดังกล่าวทำให้ผลผลิตจำนวนหนึ่งเกิดความเสียหาย

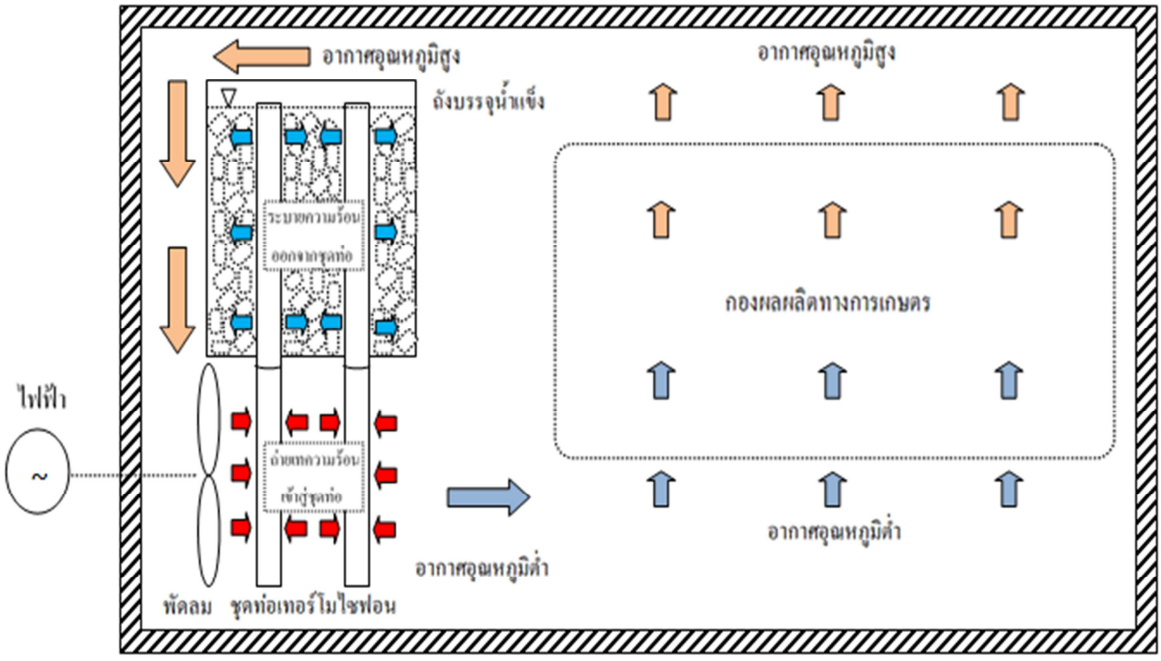
สำหรับบทความนี้ จะนำเสนอวิธีการระบายความร้อนจากกองผักภายในตู้เก็บ โดยใช้เทคนิคการระบายความร้อนด้วยท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน คล้ายกับการระบายความร้อนจากไซโลที่บรรจุข้าวเปลือก ข้าวโพด [2-4] ที่มีการฝังส่วนทำระเหยของท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนฝังอยู่ในกองข้าวเปลือกหรือข้าวโพด ดึงความร้อนที่เกิดจากการหายใจของผลผลิตไปทิ้งในส่วน

ควบแน่นของท่อความร้อน โดยระบายความร้อนสู่บรรยากาศรอบๆ ทำให้อุณหภูมิของผลผลิตที่เก็บรักษาไว้ใกล้เคียงกับอุณหภูมิอากาศรอบๆ ทำให้การเสียหายในผลผลิตลดลง

ทั้งนี้ในงานนี้ จะใช้วิธีการระบายความร้อนจากกองผัก โดยใช้เทคนิคการระบายความร้อนด้วยท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนที่มีน้ำแข็งเป็นแหล่งระบายความร้อน โดยสามารถควบคุมอุณหภูมิในการรักษาผักเพื่อลดความเสียหาย และศึกษาต้นทุนเชิงเศรษฐศาสตร์ของเทคนิคท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนที่มีน้ำแข็งเป็นแหล่งระบายความร้อน

2. การประยุกต์ใช้ท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนในการระบายความร้อนออกจากผัก

เทอร์โมไซฟอนคือท่อความร้อนที่บรรจุสารทำงานอยู่ภายใน จะประกอบด้วยส่วนทำระเหย (Evaporator) ส่วนกันความร้อน (Adiabatic) และส่วนควบแน่น (Condenser) โดยท่อความร้อนเป็นท่อที่ปราศจากวัสดุพรุนที่ช่วยในการดึงสารทำงานที่กลั่นตัวให้ไหลย้อนกลับมายังส่วนทำระเหย หลักการทำงานคือ เมื่อสารทำงานภายในท่อบริเวณส่วนทำระเหยได้รับความร้อนจากแหล่งความร้อนที่มีอุณหภูมิสูง สารทำงานที่อยู่ภายในท่อจะระเหยกลายเป็นไอและไอของของไหลทำงานจะไหลผ่านส่วนกันความร้อนขึ้นไปยังส่วนควบแน่นทางด้านบน ซึ่งส่วนควบแน่นมีการติดตั้งในแหล่งที่มีอุณหภูมิต่ำ ดังนั้นไอสารทำงานจึงเกิดการควบแน่นเปลี่ยนสถานะเป็นของเหลวและถ่ายเทความร้อนออกสู่ภายนอกท่อ ในขณะเดียวกันสารทำงานที่ควบแน่นไหลย้อนกลับลงมาตามผนังด้านในของท่อสู่ส่วนทำระเหยโดยอาศัยแรงโน้มถ่วงของโลก เพื่อย้อนกลับไปรับพลังงานความร้อนใหม่ ท่อความร้อนดังกล่าวจะถูกสร้างเป็นชุดเพื่อผลิตอากาศเย็น โดยมีน้ำแข็งเป็นแหล่งระบายความร้อนเพื่อผลิตอากาศเย็นสำหรับระบายความร้อนจากกองผัก ลักษณะการทำงานแสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 การทำงานของระบบระบายความร้อนโดยท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนที่มีน้ำแข็งเป็นแหล่งระบายความร้อน

ชุดท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน จะมีส่วนระบายความร้อนหรือส่วนควบแน่น อยู่ในถังบรรจุน้ำแข็ง สำหรับส่วนรับความร้อนหรือส่วนระเหยอยู่ที่ด้านล่าง จะมีพัดลมหมุนเวียนอากาศให้ไหลผ่านเพื่อผลิตอากาศเย็นจากส่วนรับความร้อน โดยอากาศที่ออกจากส่วนรับความร้อนจะวิ่งเข้าสู่กองผักและดึงความร้อนจากกองผัก จากนั้นออกจากกองผักทางด้านบนกลับไประบายความร้อนที่ส่วนรับความร้อนของท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน เพื่อผลิตอากาศเย็นออกมาอีก ความร้อนจากกองผักจะถูกถ่ายเทจากส่วนรับความร้อนไปยังส่วนระบายความร้อนของท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน ทำให้น้ำแข็งในถังบรรจุน้ำแข็งละลาย ด้วยเทคนิคนี้อุณหภูมิภายในกองผักจะถูกควบคุมไม่ให้สูงเกินไป ทำให้ผักคงสภาพใกล้เคียงกับที่ออกจากแปลงได้นานขึ้น สามารถนำมาใช้ในการระบายความร้อนจากกองผัก ในระหว่างการขนส่ง

3. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1 การคำนวณภาระทำความเย็น [5-7]

ภาระในการทำความเย็นภายในตู้ที่บรรจุผักและอุปกรณ์ที่แสดงในรูปที่ 1 สามารถประเมินจาก

$$Q = Q_{Envelope} + Q_{product} \quad (1)$$

$$Q_{Envelope} = U_{wall} A_{wall} (\Delta T) \quad (2)$$

$$Q_{product} = m_{product} \times \left(\left(\frac{C_{p,product} \times (T_i - T_f)}{t} \right) + \text{Respiration rate} \right) \quad (3)$$

โดยที่

Q = ภาระการทำความเย็น (W)

$Q_{Envelope}$ = อัตราความร้อนจากการนำความร้อนผ่านผนังเพดานและพื้น (W)

$Q_{Product}$ = อัตราความร้อนที่วัตถุดิบจ่ายออกมา (W)

$m_{product}$ = มวลของวัตถุดิบ (kg)

T_i = อุณหภูมิวัตถุดิบขาเข้าของวัตถุดิบ (^oC)

T_f = อุณหภูมิสุดท้ายของวัตถุดิบที่ต้องการ (^oC)

$C_{p,product}$ = ความร้อนจำเพาะของวัตถุดิบที่อุณหภูมิสูงกว่าจุดแข็งตัว (J/kg-^oC)

t = เวลาการทำงาน (sec)

Respiration Rate = อัตราความร้อนจากการหายใจ (W/kg)

3.2 การหาปริมาณน้ำแข็งที่ใช้ระบายความร้อน

จากภาระทำความเย็นสามารถหาปริมาณน้ำแข็งที่ใช้ในการระบายความร้อนโดย

$$M_{ice} = \frac{Q \times t}{L_{ice}} \quad (4)$$

โดยที่

M_{ice} = มวลของน้ำแข็ง (kg)

Q = ภาระทำความเย็น (W)

t = เวลาการทำงาน (sec)

L_{ice} = ความร้อนแฝงในการหลอมเหลวของน้ำแข็ง (J/kg)

3.3 การหาพื้นที่ถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน

ส่วนทำระเหยเป็นบริเวณอากาศอุณหภูมิสูงถ่ายเทความร้อนให้กับชุดท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนทำให้อากาศที่ออกมาจากชุดท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนมีอุณหภูมิที่ต่ำลง การหาขนาดพื้นที่การถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนส่วนทำระเหยสามารถจาก

$$A_E = \frac{Q}{U_E (T_{air} - T_E)} \quad (5)$$

โดยที่

A_E = พื้นที่การถ่ายเทความร้อนส่วนทำระเหย (m^2)

Q = ภาระการทำความเย็น (W)

U_E = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของอากาศที่

ไหลผ่านท่อความร้อนสู่สารทำงาน (W/m^2-K)

T_{air} = อุณหภูมิอากาศที่ไหลผ่านส่วนรับความร้อน (^oC)

T_E = อุณหภูมิสารทำงานภายในท่อความร้อนส่วนรับความร้อน (^oC)

3.4 การถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นในบริเวณชุดท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนที่ส่วนระเหย

ที่ส่วนระเหยของชุดท่อความร้อน ค่าการถ่ายเทความร้อนสามารถหาค่าได้จาก

$$QE = \rho_a V_a A_{evap} C_{p,a} (T_{E,i} - T_{E,o}) \qquad (6)$$

โดยที่

Q_E = อัตราการถ่ายเทความร้อนของส่วนระเหย (W)

$C_{p,a}$ = ค่าความจุความร้อนจำเพาะของอากาศ (J/kgK)

$T_{E,i}$ = อุณหภูมิอากาศด้านเข้าส่วนระเหย (^oC)

$T_{E,o}$ = อุณหภูมิอากาศด้านออกส่วนระเหย (^oC)

ρ_a = ค่าความหนาแน่นของอากาศ (kg/m^3)

V_a = ค่าความเร็วอากาศ (m/s)

A_{evap} = พื้นที่หน้าตัดที่อากาศไหลผ่านส่วนทำระเหย (m^2)

4. อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

อุปกรณ์การทดสอบการระบายความร้อนของผักโดยใช้ท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนโดยมีน้ำแข็งเป็นแหล่งระบายความร้อน มีดังต่อไปนี้

1) ตู้สำหรับบรรจุผักขนาด 6 ลูกบาศก์เมตร ที่ติดฉนวนกันความร้อน แสดงดังรูปที่ 2

รูปที่ 2 ตู้บรรจุผักและผลไม้

2) ระบบระบายความร้อน แสดงดังรูปที่ 3 ซึ่งประกอบด้วย

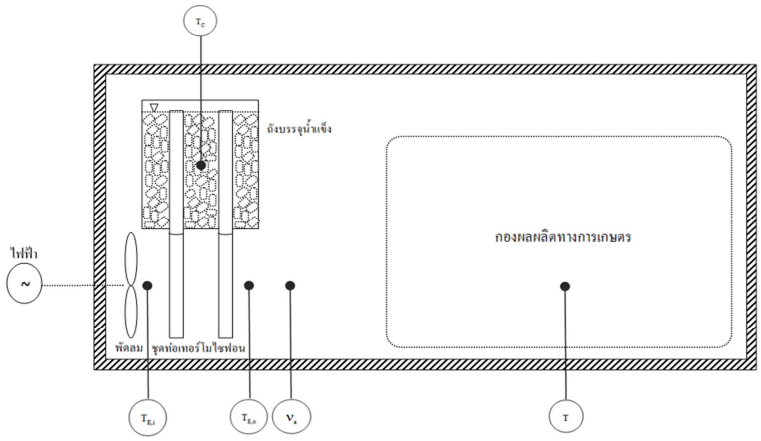
- ถังน้ำแข็งปริมาตร 0.245 ลูกบาศก์เมตร ที่ติดฉนวนกันความร้อนพร้อมฝาปิด
- ชุดท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน ท่อความร้อนที่ใช้เป็นท่อทองแดง ขนาดผ่านศูนย์กลางภายนอกของท่อทองแดง 9.525×10^{-3} เมตร ความสูงของท่อความร้อนส่วนทำระเหย 0.5 เมตร โดยที่โดยท่อความร้อนที่บริเวณส่วนระเหยนั้นมีการติดครีบอลูมิเนียม ความสูงของท่อความร้อนส่วนควบแน่น 0.5 เมตร ใช้ท่อความร้อนทั้งหมด 108 ท่อ วางท่อทั้งหมด 2 แถว แถวละ 54 ท่อ ระยะห่างของแต่ละแถวคือ 25 เซนติเมตร การจัดวางท่อระยะห่างจุดศูนย์กลางของท่อความร้อนแต่ละท่อ 2.5 เซนติเมตร
- สารทำงานที่ใช้คือ R-22 เติมที่ปริมาตรประมาณ 50% ของปริมาตรท่อความร้อนส่วนทำระเหย

รูปที่ 3 ระบบระบายความร้อน ประกอบด้วยถังน้ำแข็ง ชุดท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน และพัดลมหมุนเวียนอากาศ

3) พัดลมสำหรับหมุนเวียนอากาศขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 14 นิ้ว DC 12V 12A จำนวน 2 ตัว
4) หม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับจ่ายไฟให้แก่พัดลมหมุนเวียนอากาศ AC-DC 12V
5) ตะกร้าสำหรับบรรจุผัก
6) โครงเหล็กสำหรับวางพาดตะกร้า
7) อุปกรณ์สำหรับวัดความเร็วลม Anemometer
8) อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ Thermocouple Type T
9) อุปกรณ์สำหรับเก็บข้อมูล Data Logger และ Computer

การทดสอบสมรรถนะของชุดท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนในการลดอุณหภูมิภายในกองผัก จะพิจารณาถึงปริมาณน้ำแข็งที่ใช้ในการระบายความร้อน และความเสียหายของผลผลิต ทั้งนี้วิธีการทดสอบสามารถแสดงดังนี้

ก. เตรียมตู้สำหรับบรรจุผักและระบบระบายความร้อนให้พร้อมสำหรับการทดสอบ
ข. นำระบบระบายความร้อน ใส่ลงไปในตู้บรรจุผัก
ค. ติดตั้งอุปกรณ์วัดให้พร้อมสำหรับการทดสอบซึ่งอุปกรณ์วัดที่ใช้ในการทดสอบมีดังต่อไปนี้
- วัดพื้นที่ที่อากาศผ่านของส่วนระเหยของชุดท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน
- อุปกรณ์วัดความเร็วลม Anemometer โดยการวัดความเร็วลมจะทำการวัดความเร็วลมที่ออกจากชุดท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน
- อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ Thermocouple Type T ทำการติดตั้งทั้งหมด 12 จุด คือ บริเวณตะกร้าผักที่อยู่ภายในตู้ 4 จุด บริเวณตะกร้าผักที่ไม่ได้ทำการบรรจุในตู้แต่อยู่ในที่ร่ม 1 จุด บริเวณตะกร้าผักที่ไม่ได้ทำการบรรจุในตู้วางกลางแจ้ง 1 จุด บริเวณก่อนที่อากาศจะเข้าชุดท่อเทอร์โมไซฟอน 2 จุด บริเวณหลังที่อากาศจะออกชุดท่อเทอร์โมไซฟอน 2 จุด และบริเวณถังบรรจุน้ำและน้ำแข็ง 2 จุด แสดงได้ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 จุดต่างๆ ของตู้บรรจุผักที่จะทำการวัดค่าและเก็บข้อมูล

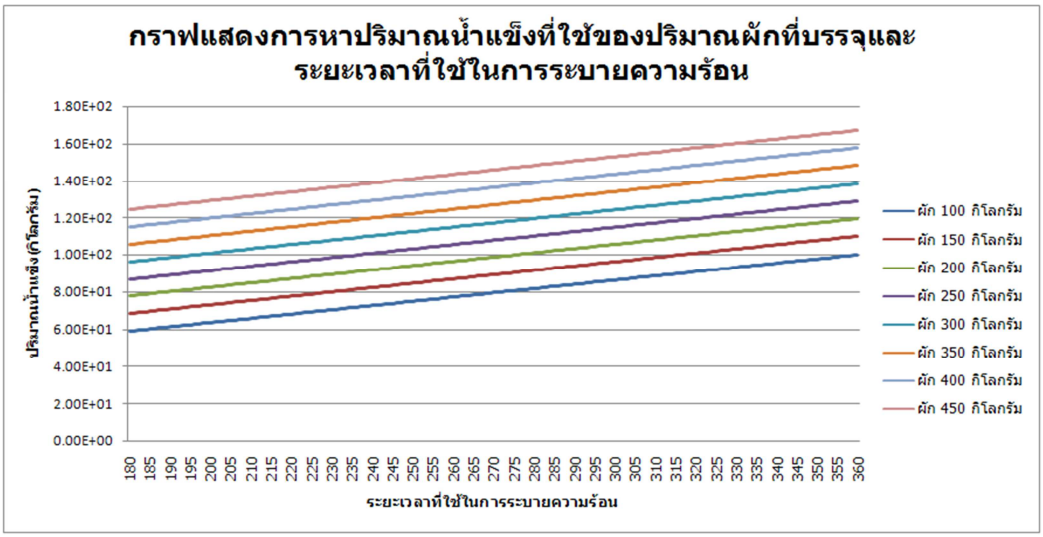
ง. ชั่งน้ำหนักน้ำแข็งที่จะใส่ลงในถังบรรจุน้ำแข็งสำหรับใช้ในการระบายความร้อน จากนั้นบรรจุน้ำแข็งใส่ถัง
จ. ชั่งน้ำหนักของผักที่จะบรรจุเข้าตู้ จากนั้นบรรจุผักลงในตะกร้า และนำตะกร้าที่บรรจุผักใส่ตู้
ฉ. เดินเครื่องระบายความร้อนและทำการเก็บข้อมูล
ช. ตรวจสอบความเสียหายหรือคุณภาพของผักหรือผลไม้ที่บรรจุภายในตู้และผักที่ไม่ได้ทำการบรรจุอยู่ภายในตู้
ซ. ตรวจสอบปริมาณน้ำแข็งที่เหลือ
ฌ. การทดสอบจะเปลี่ยนปริมาณผักที่ความจุ 100 50 และ 25% ของความจุตู้ โดยใช้น้ำแข็งในปริมาณที่เหมาะสม จากนั้นทำการทดสอบเหมือนเดิม

ญ. วิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดลองและวิเคราะห์ต้นทุนเชิงเศรษฐศาสตร์

5. ผลการทดลอง

5.1 ปริมาณน้ำแข็งที่ใช้ของปริมาณผักที่บรรจุและระยะเวลาที่ใช้ในการระบายความร้อน

ปริมาณของน้ำแข็งที่ใช้ในการระบายความร้อนจะเปลี่ยนไปตามปริมาณผักที่บรรจุและระยะเวลาที่ใช้ในการระบายความร้อน ซึ่งหากบรรจุผักไม่เต็มความจุตู้ก็ไม่จำเป็นต้องใส่น้ำแข็งเต็มถัง ปริมาณของน้ำแข็งที่จะใส่ลงในถังสามารถประมาณค่าได้จากได้โดยการคำนวณภาระทำความเย็น ซึ่งการหาปริมาณน้ำแข็งที่ใช้ของปริมาณผักที่บรรจุและระยะเวลาการระบายความร้อนช่วงต่างๆสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 ปริมาณน้ำแข็งที่ใช้สำหรับปริมาณผักที่บรรจุและระยะเวลาที่ใช้ในการระบายความร้อน

จากการทดลอง ซึ่งได้ทำการบรรจุผักกะหล่ำปลีที่ปริมาณ 100 50 และ 25% ของความจุตู้ จากนั้นทำการบรรจุน้ำแข็งตามปริมาณที่สามารถอ่านค่าได้จากกราฟที่แสดงดังรูปที่ 5 และเดินระบบระบายความร้อนเพื่อควบคุมอุณหภูมิของผักที่บรรจุอยู่ภายในตู้ทำให้ผักไม่เกิดความเสียหาย ซึ่งจากผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ตารางแสดงผลการทดสอบปริมาณน้ำแข็งที่ใช้เทียบกับปริมาณผักที่บรรจุและระยะเวลาที่ใช้ในการระบายความร้อน

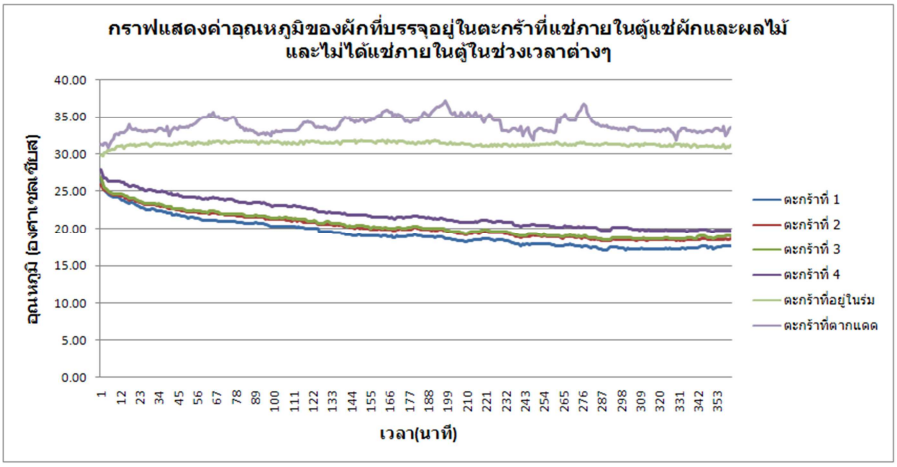
ปริมาณผัก	ระยะเวลาที่ใช้	ปริมาณน้ำแข็งที่ใช้จริง
397.4 kg	360 นาที	150 kg (160 kg*)
196 kg	360 นาที	109 kg (120 kg*)
98.1 kg	360 นาที	91 kg (100 kg*)

*ค่าที่อ่านได้กราฟที่แสดงดังรูปที่ 5

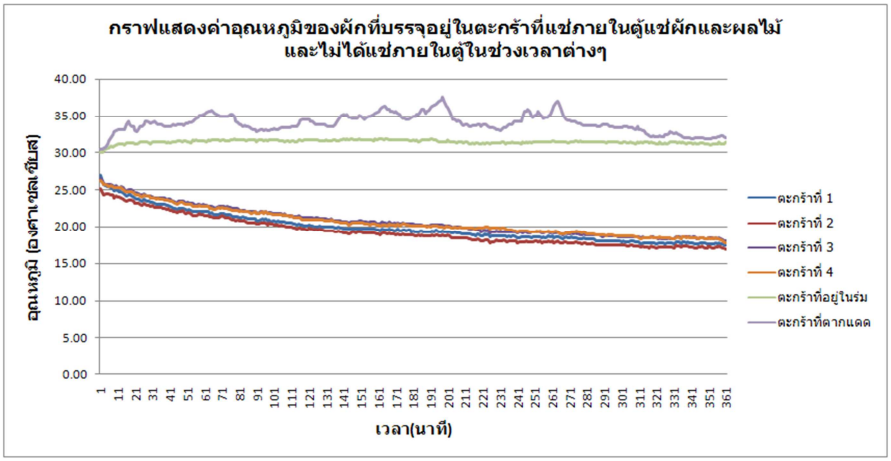
จากการทดสอบ พบว่าปริมาณน้ำแข็งที่ใช้ใกล้เคียงกับค่าที่สามารถหาได้จากการคำนวณภาระทำความเย็นที่ได้แสดงดังรูปที่ 5 ซึ่งการประมาณน้ำหนักน้ำแข็งที่ใช้ของปริมาณผักที่บรรจุและระยะเวลาการระบายความร้อนช่วงต่างๆ สามารถประมาณได้จากรูปที่ 5

5.2 การควบคุมอุณหภูมิภายในตู้เก็บผลผลิตทางการเกษตร ประเภทผักสดโดยเทคนิคท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนที่มีน้ำแข็งเป็นแหล่งระบายความร้อน

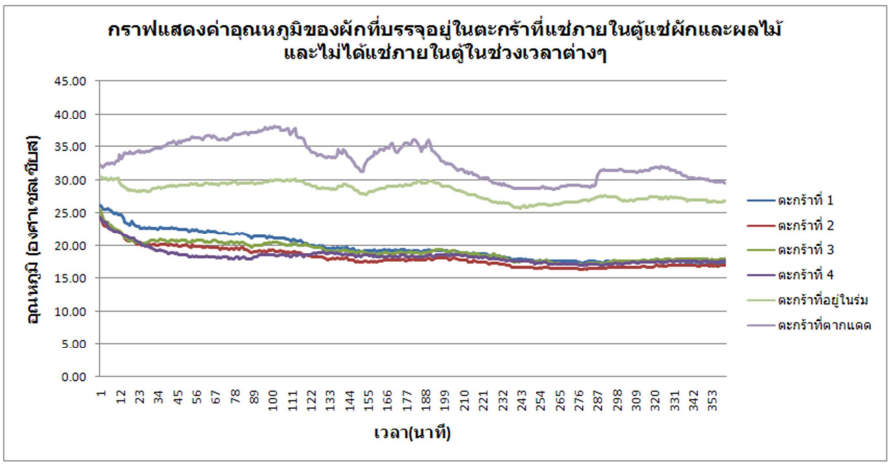
จากการทดสอบโดยวัดค่าอุณหภูมิผักที่บรรจุอยู่ภายในตู้ที่มีระบบระบายความร้อน ผักที่ไม่ได้บรรจุอยู่ภายในตู้แต่วางอยู่ในร่ม และผักที่ไม่ได้บรรจุอยู่ภายในตู้วางอยู่กลางแดด ซึ่งผลการทดสอบของการบรรจุผักที่ปริมาณ 100 50 และ 25% ของความจุตู้ แสดงได้ดังรูปที่ 6, 7 และ 8 ตามลำดับ



รูปที่ 6 อุณหภูมิของผักที่บรรจุอยู่ในตะกร้าที่บรรจุภายในตู้บรรจุผักและผลไม้ และไม่ได้บรรจุภายในตู้ในช่วงเวลาต่างๆ ของการบรรจุผักที่ปริมาณ 100% ของความจุตู้ 397.4 กิโลกรัม และใช้น้ำแข็ง 150 กิโลกรัม



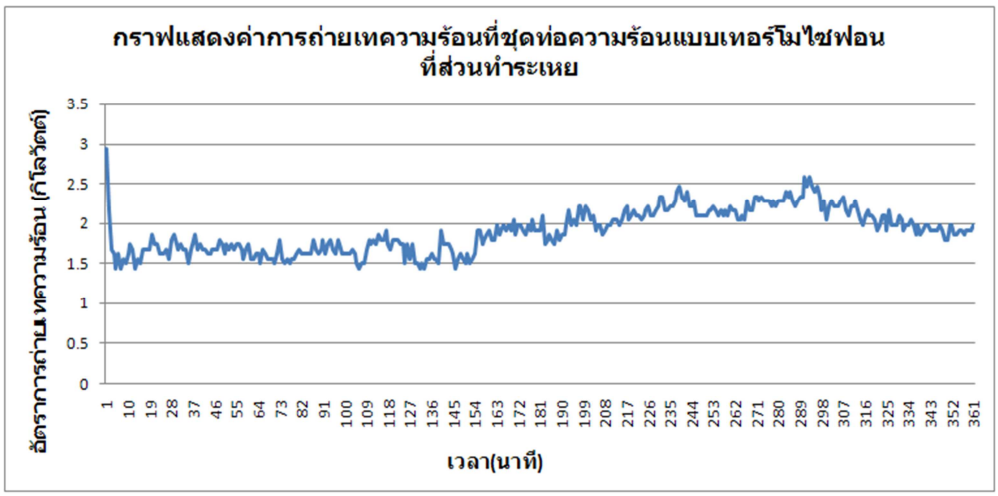
รูปที่ 7 อุณหภูมิของผักที่บรรจุอยู่ในตะกร้าที่บรรจุภายในตู้บรรจุผักและผลไม้ และไม่ได้บรรจุภายในตู้ในช่วงเวลาต่างๆ ของการบรรจุผักที่ปริมาณ 50% ของความจุตู้ 196 กิโลกรัม และใช้น้ำแข็ง 109 กิโลกรัม



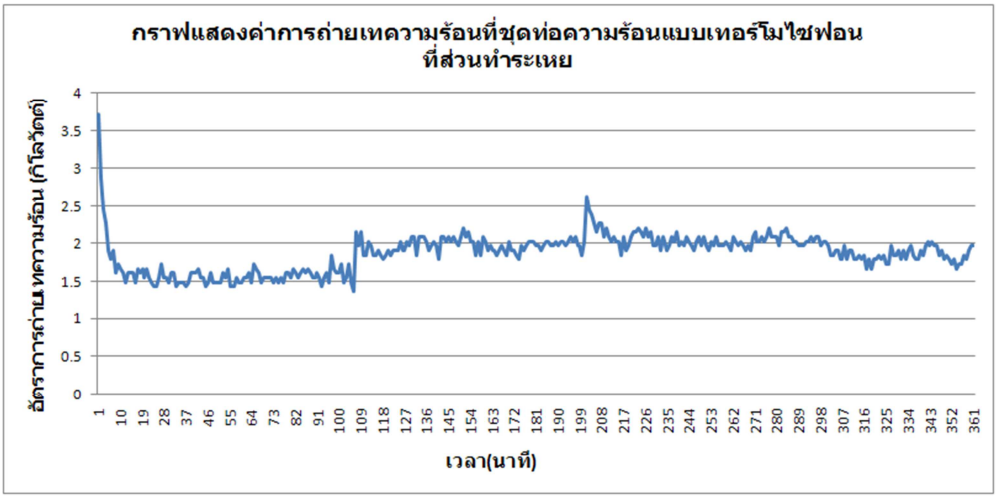
รูปที่ 8 อุณหภูมิของผักที่บรรจุอยู่ในตะกร้าที่บรรจุภายในตู้บรรจุผักและผลไม้ และไม่ได้บรรจุภายในตู้ในช่วงเวลาต่างๆ ของการบรรจุผักที่ปริมาณ 25% ของความจุตู้ 98.1 กิโลกรัม และใช้น้ำแข็ง 91 กิโลกรัม

ผลการทดสอบ พบว่าอุณหภูมิของผักที่บรรจุอยู่ภายในตู้ที่มีระบบระบายความร้อนจะลดลงเรื่อยๆ หลังจากทำการเดินเครื่อง โดยค่าเริ่มต้นอยู่ที่ 25-27 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิสุดท้ายอยู่ที่ 16-19 องศาเซลเซียส ซึ่งอุณหภูมิของผักที่บรรจุอยู่ภายในตะกร้าที่ตากกลางแจ้งนั้นมีค่าอุณหภูมิอยู่ที่ 28 – 38 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิของผักที่บรรจุอยู่ภายในตะกร้าที่วางอยู่ในร่ม มีค่าอุณหภูมิอยู่ที่ 28 – 33 องศาเซลเซียส ทำให้เห็นได้ว่าเทคนิคการควบคุมอุณหภูมิภายในตู้เก็บผลผลิตทางการเกษตรประเภทผักสดโดยเทคนิคท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนที่มีน้ำแข็งเป็นแหล่งระบายความร้อน สามารถลดอุณหภูมิให้กับผักสดได้เป็นอย่างดี

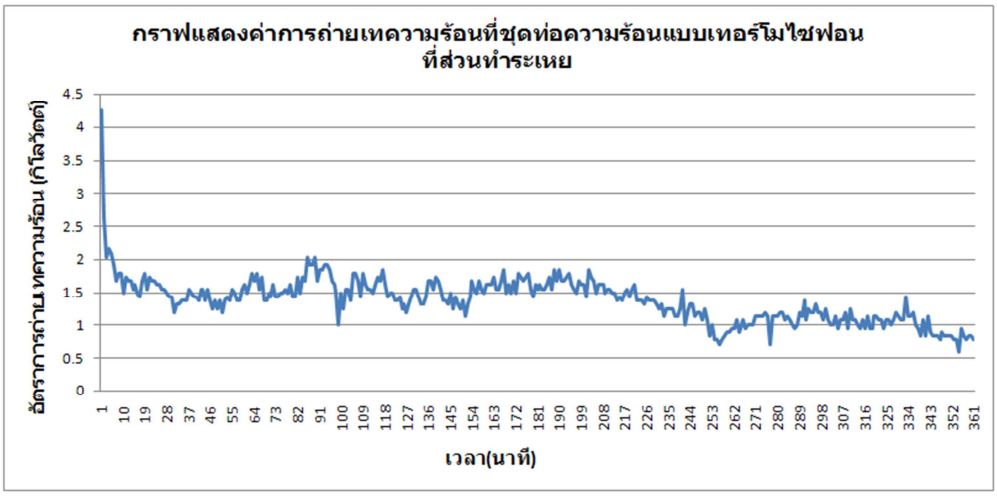
ค่าการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นในบริเวณชุดท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนที่ส่วนทำระเหย ของการทดลองการบรรจุผักที่ปริมาณ 100 50 และ 25% ของความจุตู้ ตลอดระยะเวลาที่ทำการทดสอบ สามารถหาได้จากสมการที่ 6 แสดงได้ดังรูปที่ 9, 10 และ 11 ตามลำดับ



รูปที่ 9 การถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นในบริเวณชุดท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนที่ส่วนทำระเหย ของการบรรจุผักที่ปริมาณ 100% ของความจุตู้ 397.4 กิโลกรัม และใช้น้ำแข็ง 150 กิโลกรัม



รูปที่ 10 การถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นในบริเวณชุดท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนที่ส่วนทำระเหย ของการบรรจุผักที่ปริมาณ 50% ของความจุตู้ 196 กิโลกรัม และใช้น้ำแข็ง 109 กิโลกรัม



รูปที่ 11 การถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นในบริเวณชุดท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนที่ส่วนทำระเหย ของการบรรจุผักที่ปริมาณ 25% ของความจุตู้ 98.1 กิโลกรัม และใช้น้ำแข็ง 91 กิโลกรัม

จากรูปข้างต้นจะเห็นได้ว่าค่าการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นบริเวณชุดท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนที่ส่วนทำระเหย ของการทดลองการการบรรจุผักที่ปริมาณ 100% ของความจุตู้ มีค่าระหว่าง 1.4-2.9 กิโลวัตต์ มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 1.91 กิโลวัตต์ ค่าการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นในบริเวณชุดท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนที่ส่วนทำระเหย ของการทดลองการการบรรจุผักที่ปริมาณ 50% ของความจุตู้ มีค่าระหว่าง 1.4-3.7 กิโลวัตต์ มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 1.88 กิโลวัตต์ ค่าการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นในบริเวณชุดท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนที่ส่วนทำระเหย ของการทดลองการการบรรจุผักที่ปริมาณ 25% ของความจุตู้ มีค่าระหว่าง 0.6-4.2 กิโลวัตต์ มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 1.39 กิโลวัตต์ จะเห็นได้ว่าเมื่อปริมาณผักที่บรรจุเพิ่มมากขึ้นจะทำให้ค่าการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยที่เกิดขึ้นบริเวณชุดท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนที่ส่วนทำระเหยเพิ่มขึ้นตามด้วย

5.3 ความเสียหายของผลผลิต

ในการเปรียบเทียบระหว่างผักที่บรรจุภายในตู้ที่มีระบบระบายความร้อนกับผักที่ไม่ได้บรรจุภายในตู้ พบว่าความเสียหายและคุณภาพผักที่บรรจุภายในตู้ที่มีระบบระบายความร้อน ทั้งก่อนและหลังการทดลองนั้น ยังคงความสด ไม่ส่งกลิ่นเน่าเหม็น และไม่มีส่วนที่เกิดการเหี่ยวหรือบอบช้ำ ซึ่งแสดงดังรูปที่ 12

รูปที่ 12 ผักที่ทำการบรรจุอยู่ภายในตู้ที่มีระบบระบายความร้อนก่อนและหลังการทดลอง

สำหรับผักที่ไม่ได้ทำการบรรจุอยู่ภายในตู้ จะเกิดการเหี่ยวย่นและบอบช้ำอย่างเห็นได้ชัด นอกจากนั้นยังเริ่มมีกลิ่นเหม็นอีกด้วย ซึ่งแสดงดังรูปที่ 13 มีความเสียหายเกิดขึ้น 30.33% สำหรับผักที่อยู่ในร่ม และ 41.67% สำหรับผักที่วางตากกลางแจ้ง

รูปที่ 13 ผักที่ตากกลางแจ้งก่อนและหลังการทดลอง

6. การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์

การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์จะทำการคิดเปรียบเทียบค่าต้นทุนการขนส่งของการขนส่งผักโดยรถกระบะ 4 ล้อ แบบมีตู้ที่มีระบบระบายความร้อน โดยใช้ท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนที่มีน้ำแข็งเป็นแหล่งระบายความร้อนกับการขนส่งของการขนส่งผักโดยรถกระบะ 4 ล้อ แบบมีตู้แต่ไม่มีระบบระบายความร้อน โดยกำหนดผักที่ใช้ในการขนส่งคือกะหล่ำปลี ระยะทางที่ใช้ในการขนส่งประมาณ 400 กิโลเมตร ระยะเวลาที่ใช้ในการขนส่ง 6 ชั่วโมง และช่วงเวลาที่ใช้ในการขนส่งคือตอนกลางวันและอุณหภูมิอากาศภายนอกสูง ทำให้ความเสียหายเกิดขึ้นกับผักหลังการขนส่งอย่างน้อย 30% สำหรับการขนส่งของการขนส่งผักโดยรถกระบะ 4 ล้อ แบบมีตู้แต่ไม่มีระบบระบายความร้อน มีจำนวนวันทำงานประมาณ 182 วัน/ปี ค่าอัตราส่วนลด (Discount rate) มีค่า 1.75**%** [8] อัตราเงินเฟ้อ (Escalation rate) มีค่า 3% [9] ข้อมูลการขนส่งแสดงดังตารางที่ 2 และ 3

ตารางที่ 2 ข้อมูลการขนส่งผักแบบมีตู้แต่ไม่มีระบบระบายความร้อน

รายการค่าใช้จ่าย	**การขนส่งผักแบบมีตู้ไม่มีระบบระบายความร้อน**
ข้อมูลการจัดส่ง	
ปริมาณผักที่ขนส่ง	642.86 กิโลกรัม
ปริมาณความเสียหายของผัก	30% (192.86 กิโลกรัม)
ผักที่สามารถจำหน่ายได้	450 กิโลกรัม
ผักที่สามารถจำหน่ายได้ต่อปี	81,900 กิโลกรัม/ปี
เงินลงทุน	
ค่าอุปกรณ์สำหรับขนส่ง	-
อายุการใช้งานของอุปกรณ์	15 ปี
มูลค่าซากของระบบ 10%	-
ค่าใช้จ่ายด้านพลังงาน	
ค่าน้ำมันเชื้อเพลิง	138,271.47 บาท/ปี
ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการและบำรุงรักษา	
ค่าน้ำแข็ง	-
ค่าแบตเตอรี่	450 บาท/ปี
ค่าซ่อมบำรุงระบบระบายความร้อน	-
ค่าความเสียหายของผัก	228,153.38 บาท/ปี
ค่าแรงงานคน	54,600 บาท/ปี
ค่าซ่อมบำรุงรถ	35,000 บาท/ปี

ตารางที่ 2 (ต่อ) ข้อมูลการขนส่งผักแบบมีตู้แต่ไม่มีระบบระบายความร้อน

รายการค่าใช้จ่าย	**การขนส่งผักแบบมีตู้ไม่มีระบบระบายความร้อน**
รวมค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานและบำรุงรักษา	318,203.38 บาท/ปี
ต้นทุนการขนส่ง	**7.05 บาทต่อกิโลกรัม**

ตารางที่ 3 ข้อมูลการขนส่งผักแบบมีตู้และมีระบบระบายความร้อน

รายการค่าใช้จ่าย	**การขนส่งผักแบบมีตู้และมีระบบระบายความร้อน**
ข้อมูลการจัดส่ง	
ปริมาณผักที่ขนส่ง	450 กิโลกรัม
ปริมาณความเสียหายของผัก	0%
ผักที่สามารถจำหน่ายได้	450 กิโลกรัม
ผักที่สามารถจำหน่ายได้ต่อปี	81,900 กิโลกรัม/ปี
เงินลงทุน	
ค่าอุปกรณ์สำหรับขนส่ง	120,000 บาท
อายุการใช้งานของอุปกรณ์	15 ปี
มูลค่าซากของระบบ 10%	12,000 บาท
ค่าใช้จ่ายด้านพลังงาน	
ค่าน้ำมันเชื้อเพลิง	143,039.45 บาท/ปี
ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการและบำรุงรักษา	
ค่าน้ำแข็ง	61,880 บาท/ปี
ค่าแบตเตอรี่	900 บาท/ปี
ค่าซ่อมบำรุงระบบระบายความร้อน	1,700 บาท/ปี
ค่าความเสียหายของผัก	-
ค่าแรงงานคน	54,600 บาท/ปี
ค่าซ่อมบำรุงรถ	35,000 บาท/ปี
รวมค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานและบำรุงรักษา	154,080 บาท/ปี
ต้นทุนการขนส่ง	**4.69 บาทต่อกิโลกรัม**

ในการขนส่งโดยรถกระบะ 4 ล้อ แบบมีตู้และมีระบบระบายความร้อน ใช้ท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนที่มีน้ำแข็งเป็นแหล่งระบายความร้อน ได้ว่าต้นทุนการขนส่งผักกะหล่ำปลี มีค่าเท่ากับ 4.69 บาทต่อกิโลกรัม ซึ่งมีต้นทุนการขนส่งที่ต่ำกว่าการขนส่งของการขนส่งผักโดยรถกระบะ 4 ล้อ แบบมีตู้แต่ไม่มีระบบระบายความร้อน ที่มีต้นทุนการขนส่งผักกะหล่ำปลี มีค่าเท่ากับ 7.05 บาทต่อกิโลกรัม ซึ่งทำให้เห็นได้ว่าการขนส่งที่มีระบบการระบายความร้อน โดยใช้ท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนที่มีน้ำแข็งเป็นแหล่งระบายความร้อน จะเหมาะสำหรับการขนส่งโดยเฉพาะในระยะทางไกลๆ และใช้ระยะเวลาขนส่งนานๆ ในตอนกลางวันที่มีอุณหภูมิอากาศสูงๆ

7. สรุปผลการวิจัย

เทคนิคการควบคุมอุณหภูมิภายในตู้เก็บผลผลิตทางการเกษตร ประเภทผักสดโดยเทคนิคท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนที่มีน้ำแข็งเป็นแหล่งระบายความร้อน สามารถลดอุณหภูมิและลดความเสียหายกับผักสดได้ โดยอุณหภูมิของผักที่บรรจุอยู่ภายในตู้ที่มีระบบระบายความร้อนสามารถรักษาให้มีค่าประมาณ 16-19 องศาเซลเซียส สำหรับค่าการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยที่เกิดขึ้นบริเวณท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนส่วนระเหยขึ้นอยู่กับปริมาณผักที่บรรจุ เมื่อปริมาณผักที่บรรจุเพิ่มมากขึ้น ค่าการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยที่เกิดขึ้นบริเวณชุดท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนที่ส่วนทำระเหยจะเพิ่มขึ้นด้วย

ค่าต้นทุนการขนส่งของการขนส่งผักโดยรถกระบะ 4 ล้อ แบบมีตู้และมีระบบระบายความร้อน ใช้ท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนที่มีน้ำแข็งเป็นแหล่งระบายความร้อน มีต้นทุนการขนส่งผักกะหล่ำปลี มีค่าเท่ากับ 4.69 บาทต่อกิโลกรัม ซึ่งต่ำกว่าการขนส่งของการขนส่งผักโดยรถกระบะ 4 ล้อ แบบมีตู้แต่ไม่มีระบบระบายความร้อน โดยการขนส่งที่มีระบบการระบายความร้อน โดยใช้ท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนที่มีน้ำแข็งเป็นแหล่งระบายความร้อน จะเหมาะสำหรับการขนส่งในระยะทางไกลๆ ใช้

ระยะเวลาขนส่งนานๆ ซึ่งทำการขนส่งในตอนกลางวันที่มีอุณหภูมิอากาศสูงๆ

8. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณศูนย์นวัตกรรมเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว สถาบันวิจัยเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว มหาวิทยาลัยเชียงใหม่สำหรับเงินทุนสนับสนุนงานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

[1] ข้อมูลพื้นฐานเศรษฐกิจการเกษตรปี 2553. ศูนย์สารสนเทศการเกษตร. สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร กระทรวงกระเกษตรและสหกรณ์, 2553.

[2] Kiatsiriroat, T. and Dussadee, N. Reduction of heat accumulated in a thermosyphon-paddy bulk storage. *International Journal of Ambient Energy*,2001; Vol. 22, No. 1: 12-18.

[3] Dussadee, N. and T, Kiatsiriroat. Performance analysis and economic evaluation of thermosyphon paddy bulk storage. *International Journal of Applied Thermal Engineering*, 2006. in press.

[4] ธรรมศักดิ์ พันธุ์แสนศรี ณัฐวุฒิ ดุษฎี และทนงเกียรติ เกียรติ ศิริโรจน์. การออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนในการลดความร้อนในถังเมล็ดพืช, การประชุมวิชาการเรื่องการถ่ายพลังงาน ความร้อนและมวลในอุปกรณ์ด้านความร้อน ครั้งที่ 5, เชียงใหม่, ประเทศไทย, 2549 หน้า 112-123.

[5] ชัชวาล ตัณฑกิตติ. คู่มือระบบระบายความร้อน (Refrigeration Handbook). เชียงใหม่:สยามรัตน พริ้นติ้ง, พิมพ์ครั้งที่ 1, 2543.

[6] สัมพันธ์ ฤทธิเดช. เอกสารประกอบการสอนวิชาการทำความเย็น (Refrigeration). วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม.

[7] การคำนวณภาระทำความเย็น. คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2554 *[ระบบออนไลน์]*

แหล่งที่มา http://mte.kmutt.ac.th/elearning/Refrigeration/Website/unit5_1.htm (5 กันยายน 2554).

[8] ธนาคารกรุงเทพ ณ วันที่ 31 December 2010, *[ระบบออนไลน์]*.

แหล่งที่มา: www.indexmundi.com/thailand/central_bank_discount_rate.html

[9] Asian Development Outlook 2006, *[ระบบออนไลน์]*.

แหล่งที่มา http://www.adb.org/Documents/Books/ ADO/2006/tha.asp