

การออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนในการลดความร้อนสะสมในถังเมล็ดพืช

HEAT EXCHANGER DESIGN FOR REDUCTION OF ACCUMULATED HEAT IN GRAIN BULK STORAGE

ธรรมศักดิ์ พันธุ์แสนศรี

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีอาหาร
มหาวิทยาลัยแม่โจ้ – แพร่เฉลิมพระเกียรติ
ต. แม่ทราย อ. ร้องกวาง
จ. แพร่ 54140
โทรศัพท์ 01-7655111 โทรสาร 054 - 648596
Email: tammasak@phrae.mju.ac.th

ณัฐวุฒิ คุชฎี

ภาควิชาพืชไร่ คณะผลิตกรรมการเกษตร
มหาวิทยาลัยแม่โจ้
อ.สันทราย จ.เชียงใหม่ 50290
โทรศัพท์ 053-498168
โทรสาร 053-498168
Email: Natthawu@mju.ac.th

ทงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
อ.เมือง จ.เชียงใหม่ 50200
โทรศัพท์ : 053- 944144 ต่อ 943
โทรสาร : 053- 944145
Email: Tanong@dome.eng.cmu.ac.th

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและวิเคราะห์หาสมรรถนะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนในการลดความร้อนสะสมเมื่อเก็บรักษาเมล็ดพืช การศึกษาแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วนคือ การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายอุณหภูมิเมล็ดพืชและการทดสอบสมรรถนะของระบบ

ท่อความร้อนที่ใช้มีพื้นที่ถ่ายเทความร้อนด้านทำระเหยและด้านควบแน่น 38.8 m² และ 38.2 m² ตามลำดับ ใช้ไนยา R22 เป็นสารทำงาน ท่อความร้อนส่วนทำระเหยจมอยู่ในเมล็ดพืช ขณะที่ส่วนควบแน่นระบายความร้อนสู่อากาศ และมีพัดลมผ่านอีวาपोเรเตอร์ ช่วยในการระบายอากาศจากด้านล่างของไซโลสู่ด้านบนด้วยอัตราเร็วลม 0.0216 kg/s ซึ่งจะช่วยให้การถ่ายเทความร้อนด้านอีวาपोเรเตอร์ของท่อความร้อนดีขึ้น โดยทดสอบการทำงานโดยใช้ข้าวเปลือกและข้าวโพดที่ความจุ 5,000 kg

จากการจำลองการทำงาน พบว่าเงื่อนไขการเปิดปิดพัดลมที่เหมาะสมคือ ช่วงตุลาคม-มีนาคม ตั้งค่าอุณหภูมิข้าวเปลือกและข้าวโพด T_s=28°C และอุณหภูมิแตกต่างระหว่างข้าวเปลือก, ข้าวโพดกับอากาศแวดล้อม, T_a= 5°C และช่วงเมษายน-กันยายน ตั้งค่า T_{s, paddy}= 28°C, T_{s, corn}= 22°C T_d= 1°C โดยสามารถควบคุมอุณหภูมิข้าวเปลือกและข้าวโพดเฉลี่ยทั้งปีได้ 27°C, 26.9°C ตามลำดับโดยพัดลมทำงานเฉลี่ยทั้งปี 15.2%, 17.7 % ตามลำดับ

ผลการทดสอบการทำงานของระบบกับข้าวเปลือกความชื้น 14%wb.ที่เงื่อนไขการทำงานของพัดลม T_s=28 °C, T_d=1 °C เป็นเวลา 2 เดือน พบว่าสามารถควบคุมอุณหภูมิข้าวเปลือกเฉลี่ยอยู่ที่ 26.9 °C ค่าเปอร์เซ็นต์ต้นข้าวที่ได้จากการตรวจสอบตามระยะเวลาการเก็บรักษา(เดือนที่ 0, 1 และ2) คือ 55.9%, 58.6%และ54.9% ตามลำดับ ส่วนข้าวโพดความชื้น 17.4%wb.ที่เงื่อนไขการทำงานของพัดลม T_s=28 °C, T_d=5°C เป็นเวลา 3 เดือน พบว่าสามารถควบคุมอุณหภูมิข้าวโพดเฉลี่ยอยู่ที่ 26.2 °C จากการตรวจสอบความงอกมาตรฐานและความแข็งแรงของเมล็ดข้าวโพดหลังเก็บเป็นระยะเวลา 2 เดือน ความงอกมาตรฐานและความแข็งแรงของเมล็ดข้าวโพดลดลงคิดเป็น 41.5% และ 18.9% จากเดิม

Abstract

The objective of this research study is design and performance analysis of heat exchanger for reduction of heat accumulated in grain. The studies are divided into two parts; development of a mathematical model for predicting grain temperature in a silo, and performance testing.

The thermosyphon of 38.8 m² evaporator area is embedded in the 5,000 kg grain (paddy and corn) stored in the silo. The condenser area of 38.2 m² is exposed to the ambient air. R22 is the working fluid. The ambient air at 0.0216 kg/s is ventilated upward through the grain bed for the aeration and improved heat transfer rate at evaporator section.

For the simulated result, the on-off blower to control, during October-March, the blower is on when the paddy and corn set point temperature T_s=28 °C and the difference between the paddy, corn bed and the ambient temperature T_d=5°C and during April-September the blower is on when T_{s, paddy}= 28°C, T_{s, corn}= 22°C and T_d=1°C. The deterioration of the paddy, corn bed could be delayed. The temperature could be maintained at 27°C, 26.9 °C and the fan operating period is 15.2%, 17.7 % average for the whole year.

The 14% wet basis paddy temperature is maintained at 26.9 °C for two month with $T_s = 28$ °C and $T_d = 5$ °C on-off blower condition. The paddy quality in two months for paddy storage with aeration-thermosyphon in term of the head rice yield decreases from 55.9%, 58.6% and 54.9%, respectively.

The 17.4% wet basis corn temperature is maintained at 26.2 °C for three month with $T_s = 28$ °C and $T_d = 5$ °C on-off blower condition. The fan operating period is 14.45% annually. The corn quality in two months for corn storage with aeration-thermosyphon in term of the standard germination and the vigor index decreases to remain 41.5% and 18.9%, respectively.

1. บทนำ

ปัญหาการเสื่อมสภาพของเมล็ดพืช เช่น เมล็ดข้าวเปลือก เมล็ดข้าวโพด เมล็ดพืชตระกูลถั่วต่าง ๆ เป็นต้น ขณะเก็บรักษาจากความชื้นสัมพัทธ์อันเนื่องมาจากความชื้น ที่เกิดจากการหายใจของเมล็ดพืชและจุลินทรีย์ต่าง ๆ นั้น ในปัจจุบันได้มีการศึกษาหาแนวทางการจัดการที่เหมาะสม ซึ่งแนวทางที่นิยมได้แก่การระบายอากาศออกเป็นช่วง ๆ แต่การระบายอากาศถึงแม้ว่าจะควบคุมอุณหภูมิข้าวเปลือกให้ใกล้เคียงอากาศแวดล้อม แต่ก็ต้องใช้พัดลมในการระบายอากาศเป็นเวลานาน สำหรับการศึกษานี้ในประเทศไทยพบว่าบางครั้งอาจสูงถึง 30-40% ต่อปี (Miear,1993) เนื่องจากประเทศไทยเป็นประเทศในเขตร้อนชื้น นอกจากนั้นแล้วการระบายอากาศยังทำให้เกิดอุณหภูมิของเมล็ดพืชในระดับต่างๆ แตกต่างกันไป ซึ่งทำให้เมล็ดพืชที่ได้มีคุณภาพไม่สม่ำเสมอ

ปัจจุบันได้มีการศึกษาเทคนิคใหม่ในการระบายความชื้นสัมพัทธ์ในถังเก็บข้าวเปลือกและเมล็ดพันธุ์ถั่วเหลือง โดยใช้ ท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน ซึ่งนำเสนอครั้งแรกโดย Kiatsirirot and Dussadee (2001) การทำงานจะใช้ท่อความร้อนส่วนที่ระเหยฝังอยู่ในถังเก็บข้าวเปลือก และส่วนควบแน่นระบายความชื้นสู่อากาศ จากการศึกษาพบว่าระบบดังกล่าวสามารถควบคุมอุณหภูมิข้าวเปลือกความชื้น 26.9% ,มาตรฐานเปียก อยู่ที่ 37-38 °C ในขณะที่ระบบที่ไม่มีการควบคุมอุณหภูมิข้าวเปลือกอุณหภูมิสูงถึง 65 °C สามารถชะลอความเสียหายของข้าวเปลือกภายหลังการเก็บเกี่ยวในช่วงที่มีความชื้นสูงขณะรอการอบแห้งได้ถึง 7-10 วัน โดยที่คุณภาพข้าวสารที่สีได้ยังเป็นที่ยอมรับ สำหรับการทดสอบการเก็บรักษาข้าวเปลือกความชื้นต่ำที่ระดับ 13.5%wb. ท่อความร้อนสามารถควบคุมอุณหภูมิข้าวเปลือกอยู่ที่ประมาณ 28-29 °C ในขณะที่ระบบที่ไม่มีการควบคุมใดๆ อุณหภูมิข้าวเปลือกอยู่ที่ 31-32 °C ต่อมาได้ทำการทดสอบการเก็บรักษาเมล็ดพันธุ์ถั่วเหลือง พบว่า ถังเก็บเมล็ดพันธุ์ถั่วเหลืองที่มีการระบายความร้อนด้วยตัวเองโดยใช้ท่อความร้อนสามารถควบคุมอุณหภูมิถั่วเหลืองได้ใกล้เคียงกับถังที่มีพัดลมระบายอากาศคือ 24.4 °C และ 25.1 °C ตามลำดับ ซึ่งสามารถลดอุณหภูมิถั่วเหลืองได้ต่ำกว่าถังที่ไม่มีพัดลมใดๆ และถังที่มีท่อความร้อนยังมีอุณหภูมิแตกต่างระหว่างชั้นในระยะเวลาเดียวกัน 1-2 °C เมื่อเทียบกับถังที่มีพัดลมระบายอากาศ ต่อมา Dussadee and Kiatsirirot (2003) ศึกษาเปรียบเทียบระบบระบายอากาศซึ่งหลังจากการเก็บรักษาข้าวเปลือกเป็นเวลา 4 เดือน พบว่าคุณภาพข้าวภายหลังการสีในแง่ความขาวและเปอร์เซ็นต์ตันข้าวมีค่าใกล้เคียงกัน แต่ระบบการลดความชื้นสัมพัทธ์โดยใช้ท่อความร้อนไม่ต้องใช้พลังงานภายนอก ดังนั้นจึงประหยัดพลังงานมากกว่า และยังพบอีกว่าอุณหภูมิแตกต่างกันระหว่าง

ชั้นน้อยมากเมื่อเทียบกับการระบายอากาศ ทำให้คุณภาพข้าวที่ได้ค่อนข้างสม่ำเสมอมากกว่า แต่การใช้งานท่อความร้อนจำเป็นต้องใช้พื้นที่ในการถ่ายเทความร้อนสูง ซึ่งจากการศึกษาดังกล่าวถ้าต้องการควบคุมอุณหภูมิข้าวเปลือกให้อยู่ในระดับ 28 °C จะต้องใช้พื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนต่อความชื้นที่เข้าป้อนเรเตอร์อย่างต่ำ 16 m² สำหรับข้าวเปลือก 1,000 กิโลกรัม เนื่องจากสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนระหว่างข้าวเปลือกและสารทำงานมีค่าค่อนข้างต่ำ ขณะเดียวกันการใช้วิธีการระบายอากาศก็ค่อนข้างจะต้องใช้ระยะเวลาในการระบายอากาศต่อปีค่อนข้างสูง ดังนั้นทางกลุ่มวิจัยจึงได้มีแนวคิดที่จะใช้ข้อดีของระบบการลดความชื้นสัมพัทธ์ในข้าวเปลือกด้วยการระบายอากาศและด้วยท่อความร้อน ซึ่งเมื่อนำมาใช้ร่วมกันก็จะลดพื้นที่การถ่ายเทความร้อนและเวลาในการระบายอากาศได้ โดยการใช้งานร่วมกันของระบบท่อความร้อนร่วมกับการระบายอากาศ ซึ่งการทดสอบเบื้องต้นโดย ณัฐวุฒิ และทองเกียรติ(2546) ด้วยการเปิดพัดลมต่อเนื่องและเป็นช่วง ๆ พบว่าเมื่อระบายอากาศต่อเนื่องอุณหภูมิข้าวเปลือกมีค่าเปลี่ยนแปลงตามอากาศแวดล้อมจึงไม่เหมาะสมกับการใช้งาน แต่สำหรับการระบายอากาศเป็นช่วง ๆ พบว่าอุณหภูมิเฉลี่ยข้าวเปลือกมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิต่ำสุดของอากาศแวดล้อม ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ที่จะลดความชื้นสัมพัทธ์ในข้าวเปลือกด้วยระบบท่อความร้อนร่วมกับการระบายอากาศ แต่ช่วงระยะเวลาการเปิดปิดพัดลมที่เหมาะสมจำเป็นต้องมีการศึกษา นอกจากนั้นแล้วยังพบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายอุณหภูมิข้าวเปลือกที่พัฒนาสามารถทำนายอุณหภูมิข้าวเปลือกได้ใกล้เคียงกับผลจากการทดลอง

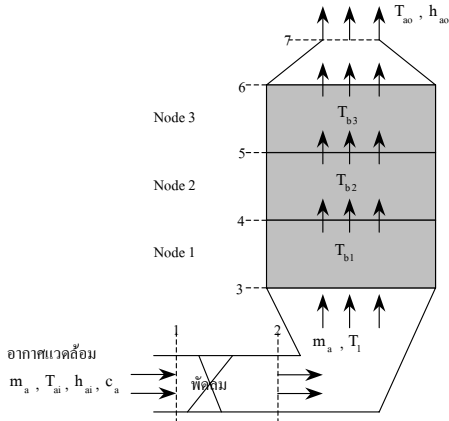
ดังนั้นในบทความนี้จึงมีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษาแนวทางที่เหมาะสมเพื่อควบคุมอุณหภูมิในการเก็บรักษาเมล็ดพืชในไซโลที่มีระบบท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนร่วมกับการระบายอากาศ ในการศึกษาครั้งนี้จะศึกษาการเก็บรักษาเมล็ดพืชโดยได้เลือกข้าวเปลือกและเมล็ดข้าวโพดเป็นกรณีการศึกษา

2. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการปรับปรุงแบบ

จำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายอุณหภูมิเมล็ดพืช

2.1 แบบจำลองอุณหภูมิเมล็ดพืช

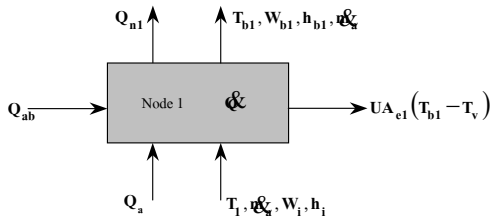
การศึกษานี้จะแบ่งเมล็ดพืชในไซโลออกเป็น 3 ชั้น ดังแสดงในรูปที่ 1 โดยจะพิจารณาการถ่ายเทความร้อนและมวลในแต่ละชั้นดังนี้



รูปที่ 1 แสดงการถ่ายเทความร้อนของการระบายอากาศในไซโลเก็บเมล็ดพืช

พิจารณา Node 1

จากหลักการอนุรักษ์พลังงาน การเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในของเมล็ดพืชและท่อความร้อนส่วนอิวาปอเรเตอร์เท่ากับความร้อนที่ถ่ายเทระหว่างระบบและสิ่งแวดล้อมดังรูปที่ 2 ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ว่า



รูปที่ 2 แสดงการถ่ายเทความร้อนของเมล็ดพืชใน Node 1

จากหลักการอนุรักษ์พลังงาน การเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในของเมล็ดพืชกับท่อความร้อนส่วนอิวาปอเรเตอร์และอัตราการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีของกระแสอากาศเท่ากับความร้อนที่ถ่ายเทระหว่างระบบและสิ่งแวดล้อม ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ว่า

$$M_b C_{pd} \frac{dT_{b1}}{dt} + M_e C_{pe} \frac{dT_e}{dt} = \alpha Q_{ab} + Q_a + \alpha_a (h_i - h_{b1}) - Q_{n1} - UA_{e1} (T_{b1} - T_v) \quad (1)$$

ถ้าสมมุติให้เกิดสมดุลความร้อนระหว่างเมล็ดพืชและท่อความร้อนส่วนทำระเหย ($T_e = T_{b1}$) สามารถเขียนสมการหาอุณหภูมิเมล็ดพืชที่ node 1 T_{b1} ในรูปสมการเชิงตัวเลขที่เวลาใด ๆ ได้ดังนี้

$$T_{b1}^{t+\Delta t} = T_{b1}^t + \frac{\Delta t}{M_b C_{pb} + M_e C_{pe}}$$

$$(\alpha Q_{ab} + Q_{conv} + \alpha_a (h_i - h_{b1}) - Q_{n1} - UA_{e1} (T_{b1} - T_v))^t \quad (2)$$

สำหรับ Node 2 และ Node 3 เมื่อพิจารณาโดยใช้หลักสมดุลพลังงานและสมดุลมวลเช่นเดียวกับ Node 1 จะสามารถหาอุณหภูมิเมล็ดพืชในรูปสมการเชิงตัวเลขได้ดังนี้ตามลำดับ

Node 2

$$T_{b2}^{t+\Delta t} = T_{b2}^t + \frac{\Delta t}{M_b C_{pb} + M_e C_{pe}}$$

$$(\alpha Q_{ab} + Q_{n1} + \alpha_a (h_{b1} - h_{b2}) - Q_{n2} - UA_{e2} (T_{b2} - T_v))^t \quad (3)$$

Node 3

$$T_{b3}^{t+\Delta t} = T_{b3}^t + \frac{\Delta t}{M_b C_{pb} + M_e C_{pe}}$$

$$(\alpha Q_{ab} + Q_{n2} + \alpha_a (h_{b2} - h_{b3}) - Q_{n3} - UA_{e3} (T_{b3} - T_v))^t \quad (4)$$

เมื่อ Q_{n1} = ความร้อนที่ถ่ายเทออกจาก Node 1, W

Q_{n2} = ความร้อนที่ถ่ายเทออกจาก Node 2, W

Q_{n3} = ความร้อนที่ถ่ายเทออกจาก Node 3, W

Q_{ab} = ความร้อนที่ถ่ายเทระหว่างอากาศและผนังไซโล, W

Q_a = ความร้อนเนื่องจากอากาศ, W

M_b = มวลของเมล็ดพืช, kg

M_e = มวลของข้าวท่อความร้อนส่วนทำระเหย, kg

C_{pb} = ความจุความร้อนจำเพาะของเมล็ดพืช, J/kg °C

C_{pe} = ความจุความร้อนจำเพาะท่อทองแดงส่วนทำระเหย, J/kg °C

T_b = อุณหภูมิเมล็ดพืช, °C

T_e = อุณหภูมิท่อทองแดง, °C

dt = ช่วงเวลา, s

T_v = อุณหภูมิสารทำงาน, °C

α = ความร้อนจากการหายใจ, W

α_a = อัตราการไหลอากาศ, kg/s

h_i = เอนทัลปีของอากาศก่อนเข้าเมล็ดพืช, J/kg

h_o = เอนทัลปีของอากาศหลังออกจากเมล็ดพืช, J/kg

U = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนระหว่างเมล็ดพืชและสารทำงาน, W/m² °C

A_e = พื้นที่การถ่ายเทความร้อนด้านทำระเหย, m²

จากการทดสอบพบว่าอุณหภูมิสารทำงาน T_v มีค่าใกล้เคียงอุณหภูมิเฉลี่ยอากาศแวดล้อมและอุณหภูมิของเมล็ดพืช ค่าเอนทัลปีของอากาศก่อนเข้าและหลังออกจากเมล็ดพืชสามารถคำนวณได้จาก

$$h_i = 1.006T_i + W_i (2501 - 1.775T_i) \quad (5)$$

$$h_o = 1.006T_o + W_o (2501 - 1.775T_o) \quad (6)$$

เมื่อ W_i = อัตราส่วนความชื้นอากาศก่อนเข้าถึงเก็บเมล็ดพืช, kg H₂O/kg air.

W_o = อัตราส่วนความชื้นอากาศก่อนออกจากถังเก็บเมล็ดพืช, kg H₂O/kg air.

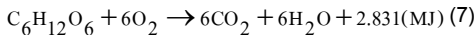
T_i = อุณหภูมิอากาศก่อนเข้าถังเก็บเมล็ดพืช, °C.

T_o = อุณหภูมิอากาศก่อนออกถังเก็บเมล็ดพืช, °C.

เมื่อ Δt คือช่วงเวลา, s และ เทอม $\frac{\Delta t \dot{Q}}{M_b C_{pb} + M_e C_{pe}}$ คือค่าความร้อนที่เกิดจากการหายใจ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการของ (Seib, et al, 1980) ในสมการที่ (2 ถึง 4)

2.2 แบบจำลองการหายใจเมล็ดพืช

ความร้อนที่เกิดขึ้นเนื่องจากการหายใจของเมล็ดพืชสามารถหาได้จากปฏิกิริยาเคมี ดังนี้



ในการหายใจ เมื่อเมล็ดพืชหายใจจะใช้แป้งและก๊าซออกซิเจน ถ้าในการหายใจใช้แป้งไป 1 kg จะต้องใช้ก๊าซออกซิเจน 1.07 kg และจะให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 1.47 kg น้ำ 0.6 kg และปลดปล่อยความร้อนออกมา 15.778 MJ ดังนั้นปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นจากการหายใจจึงสามารถคำนวณหาได้จากปริมาณแป้งที่หายไปจากการหายใจ ซึ่งเรียกว่าการสูญเสียมวลแห้ง

ความร้อนที่เกิดขึ้นจากการหายใจของเมล็ดพืชในแต่ละช่วงเวลาสามารถคำนวณได้จากสมการของ Seib, et al., 1980 ดังนี้

$$\Delta T = \frac{15778(DML)}{C_{pb}} \quad (8)$$

$$\dot{Q} = \frac{15778(DML)(M_b)}{\Delta t} \quad (9)$$

เมื่อ M_b = มวลของเมล็ดพืช, kg.

DML = การสูญเสียมวลแห้ง, เศษส่วน

C_p = ความร้อนจำเพาะของเมล็ดพืช, kJ/kg °C

Δt = ช่วงเวลาการเก็บรักษา, วินาที

การสูญเสียมวลแห้ง (DML) ของเมล็ดพืชขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ความชื้นและเปอร์เซ็นต์การแตกร้าง โดยอ้างอิงที่ 15.6 °C, 25%db และ 30% เขียนสมการได้ดังนี้ (Thompson, 1972)

$$DML = 0.000883 \left[\exp(0.006t) - 1 \right] + 0.0000102t \quad (10)$$

สำหรับช่วงเวลาที่เงื่อนไขการเก็บรักษาแตกต่างกันไปจากเงื่อนไขอ้างอิง ให้หาเวลาเทียบเท่า ดังนี้

$$t_{eq} = t / (M_M M_T M_D)$$

เมื่อ t_{eq} = เวลาในการเก็บรักษาที่เทียบเท่า, h.

M_M = แฟกเตอร์ความชื้น

M_T = แฟกเตอร์อุณหภูมิ

M_D = แฟกเตอร์การแตกร้าง

M_M และ M_T สามารถหาได้จากสมการของ Steelt (1967) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

$$M_M = 0.103 \left[\exp(455 / (100M))^{1.53} \right] - 0.845M + 1.558$$

สำหรับ $0.13 < M < 0.35$

$$M_T = 32.3 \exp \left[-3.48(1.8T + 32) / 60 \right]$$

$$+ (M - 0.19) \exp \left[0.61(1.8T - 28 / 60) \right]$$

สำหรับ $T > 15.6$ °C และ $0.19 < M \leq 0.28$

พิจารณาสมมูลมวลของอากาศขณะที่ระบายอากาศในถังเมล็ดพืช ถ้าสมมุติว่าเมล็ดพืชในถังเก็บไม่คายความชื้นออกมาเนื่องจากระบายอากาศในถังเมล็ดพืชด้วยอากาศแวดล้อมที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า อุณหภูมิเมล็ดพืชและด้วยอัตราการไหลอากาศต่ำ และสมมุติด้วยว่าความชื้นจากการหายใจเมล็ดพืชจะถูกพาออกจากเมล็ดพืชด้วยการระบายอากาศทั้งหมด ดังนั้นปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้นในอากาศจะเกิดเนื่องจากน้ำที่เกิดจากการหายใจเท่านั้นสามารถเขียนเป็นสมมูลมวลได้ว่า

$$\dot{Q}_a w_i + \dot{Q}_m = \dot{Q}_a w_o \quad (11)$$

เมื่อ \dot{Q}_a = อัตราการไหลอากาศ, kg air / s.

\dot{Q}_m = ปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้นในอากาศเนื่องจากการ

หายใจ, kg-H₂O / s

ดังนั้นอัตราส่วนความชื้นอากาศหลังออกจากเมล็ดพืชสามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$w_o = w_i + \frac{\dot{Q}_m}{\dot{Q}_a} \quad (12)$$

ปริมาณน้ำในอากาศที่เพิ่มขึ้นจากการหายใจ \dot{Q}_m ในช่วงเวลา

Δt สามารถหาได้จาก

$$\dot{Q}_m = \frac{0.6(DML)(M_b)}{\Delta t} \quad (13)$$

2.3 คุณสมบัติอากาศ

คุณสมบัติอากาศที่ใช้ในการจำลองสมรรถนะระบบเก็บรักษาเมล็ดพืชด้วยต่อความร้อนรวมกับการระบายอากาศสามารถแสดงได้ดังนี้

$$\phi = \frac{P_v}{P_{vs}} = \frac{101.325W}{(0.622P_{vs} + WP_{vs})} \quad (14)$$

เมื่อ P_{vs} คือความดันไออิ่มตัว สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\ln(P_{vs}) = -\frac{7511.52}{T_{abs}} + 89.63121 + 0.023998979T_{abs} - 1.165455 \times 10^{-5} T_{abs}^2 - 1.2810336 \times 10^{-8} T_{abs}^3 + 2.0998405 \times 10^{-11} T_{abs}^4 - 12.150799T_{abs}^{-5}$$

$$273.16K < T_{abs} < 393.16K \quad (15)$$

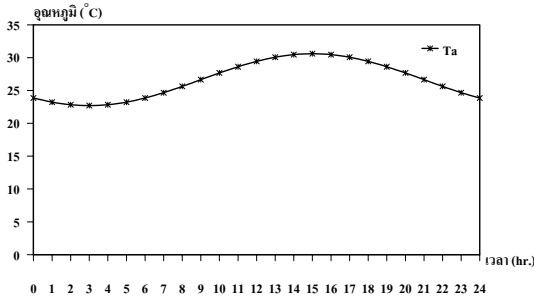
T_{abs} คืออุณหภูมิสมบูรณ์ ค่าอัตราส่วนความชื้นอากาศสามารถคำนวณได้ตามความสัมพันธ์ดังนี้

$$W = \frac{0.622\phi P_{vs}}{P_v - \phi P_{vs}} \quad (16)$$

การจำลองสมรรถนะระบบจะใช้ข้อมูลอากาศเฉลี่ยรายเดือน จังหวัดเชียงใหม่ ย้อนหลัง 10 ปี ตั้งแต่ พ.ศ.2532-2542 จากอุณหภูมิเฉลี่ยรายเดือนนำมาปรับเป็นอุณหภูมิเฉลี่ยรายชั่วโมงของเดือนนั้นๆ ได้โดยใช้สมการของ Wachirapuvadon (1996) ซึ่งได้ศึกษาเกี่ยวกับสมการในการหาค่าอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมที่เวลาต่าง ๆ กัน เมื่อแทนค่าของอุณหภูมิสูงสุดและต่ำสุด ซึ่งสามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$T_{amb}(t) = \frac{(T_{max} + T_{min}) + (T_{max} - T_{min}) \cdot \sin\left(\frac{2\pi t}{24}\right)}{2} \quad (17)$$

เมื่อ T_{max} = อุณหภูมิอากาศเฉลี่ยสูงสุด, K
 T_{min} = อุณหภูมิอากาศเฉลี่ยต่ำสุด, K
 t = Time(hour) - 9, hr.



รูปที่ 3 ตัวอย่างการคำนวณอุณหภูมิอากาศแวดล้อม

($T_{max} = 30.6^{\circ}\text{C}$ และ $T_{min} = 22.7^{\circ}\text{C}$)

2.4 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนระหว่างข้าวเปลือกและสารทำงาน

สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนระหว่างข้าวเปลือกและสารทำงานในส่วนอีวาพอเรเตอร์ของท่อความร้อน สามารถคำนวณได้จากสมการของ ณัฐวุฒิ และ ทนงเกียรติ [4] ดังนี้

$$U = 9.716m_w^{0.1714} \quad (18)$$

3. การจำลองสมรรถนะ

จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายอุณหภูมิเมล็ดพืชในถังเก็บของระบบการทำงานร่วมระหว่างท่อความร้อนและการระบายอากาศ นำมาพัฒนาแบบจำลองสมรรถนะของระบบด้วยคอมพิวเตอร์ เพื่อใช้วิเคราะห์หาเงื่อนไขการทำงานที่เหมาะสมที่ทำให้ชั่วโมงการทำงานของพัดลมต่อปีและพื้นที่ท่อความร้อนส่วนอีวาพอเรเตอร์ต่ำสุด ที่สามารถควบคุมอุณหภูมิเมล็ดพืชเฉลี่ยทั้งปีใกล้เคียง 28°C

เงื่อนไขการเปิดปิดพัดลม

การเปิดปิดพัดลมจะใช้การควบคุมแบบเปรียบเทียบ 2 จุด ดังนี้

เงื่อนไข 1 ($T_b - T_a \geq T_d$) และ ($T_b > T_s$) / ($T_b > T_a$) เป็นจริง ระบบท่อความร้อนและการระบายอากาศทำงาน

ถ้าอุณหภูมิเมล็ดพืชจากการตรวจวัด (T_b) สูงกว่าอุณหภูมิอากาศ (T_a) หรือสูงกว่าอุณหภูมิเมล็ดพืช (T_s) ที่ตั้งไว้และในเวลานั้นผลต่างของอุณหภูมิเมล็ดพืชและอากาศแวดล้อม ($T_b - T_a$) ต้องมากกว่าหรือเท่ากับค่า (T_d) ที่ตั้งค่าไว้ ถ้าเงื่อนไขเป็นจริงระบบท่อความร้อนและการระบายอากาศจะทำงานพร้อมกัน ถ้าเงื่อนไข 1 เป็นเท็จ โปรแกรมจะข้ามไปตรวจสอบเงื่อนไข 2

เงื่อนไข 2 ($T_b - T_a < T_d$) และ ($T_b > T_s$) / ($T_b > T_a$) เป็นจริง พัดลมระบายอากาศไม่ทำงานแต่ท่อความร้อนทำงาน

ถ้าอุณหภูมิเมล็ดพืชจากการตรวจวัด (T_b) สูงกว่าอุณหภูมิอากาศ (T_a) หรือสูงกว่าอุณหภูมิเมล็ดพืช (T_s) ที่ตั้งค่าและในเวลานั้นผลต่างของอุณหภูมิเมล็ดพืชและอากาศแวดล้อม ($T_b - T_a$) ต้องน้อยกว่า (T_d) ที่ตั้งค่าไว้ ถ้าเงื่อนไขเป็นจริง พัดลมระบายอากาศจะไม่ทำงานแต่ท่อความร้อนทำงานทำงานอย่างเดียว ถ้าเงื่อนไข 2 เป็นเท็จ โปรแกรมจะทำตามเงื่อนไข 3

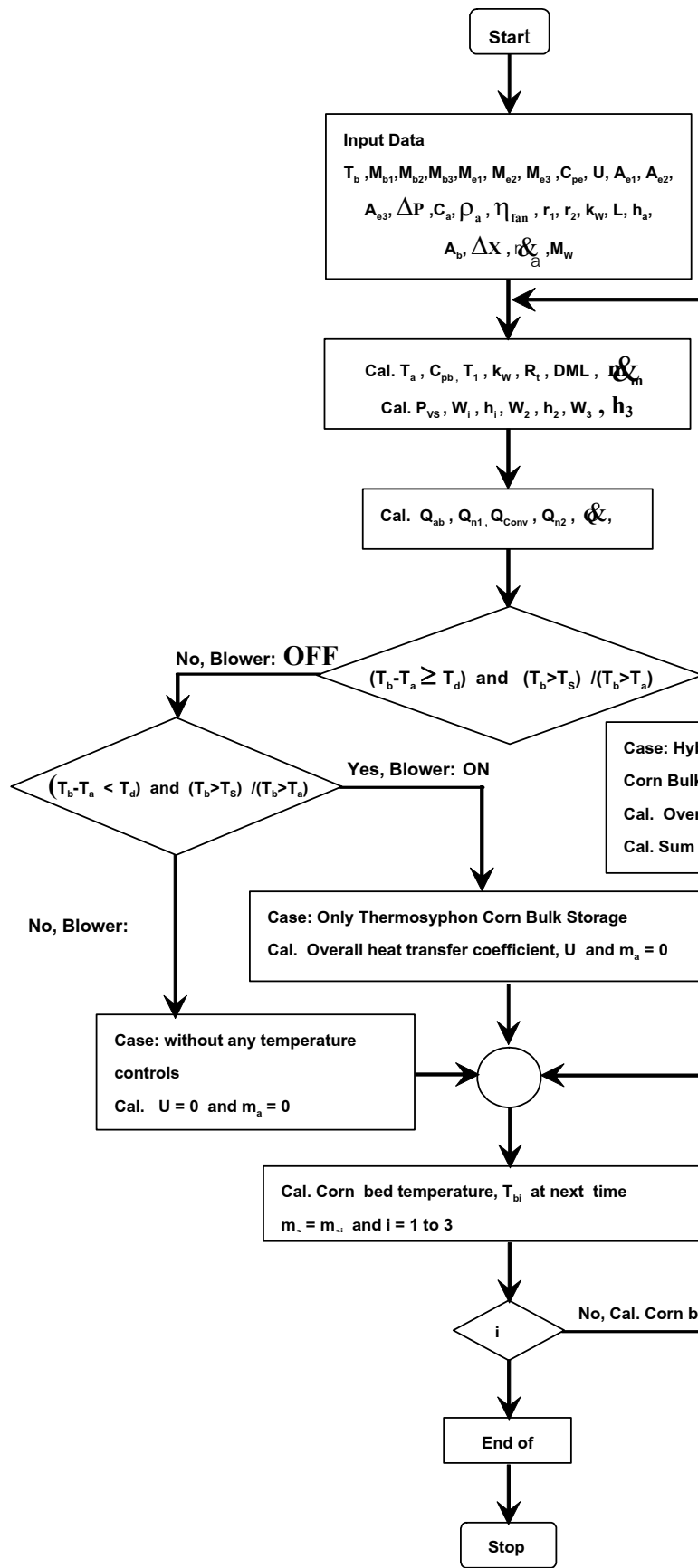
เงื่อนไข 3 ($T_b < T_s$) เป็นจริง พัดลมระบายอากาศและท่อความร้อนไม่ทำงาน

ถ้าอุณหภูมิเมล็ดพืชต่ำกว่าอากาศแวดล้อมทั้งระบบท่อความร้อนและการระบายอากาศจะไม่ทำงาน

จากเงื่อนไขขอบเขตการควบคุมอุณหภูมิเมล็ดพืชและเงื่อนไขการเปิดปิดพัดลม สามารถแสดงขั้นตอนการคำนวณได้ดังแสดงใน Flow chart ในรูปที่ 4 ซึ่งมีรายละเอียดการคำนวณดังนี้

รายละเอียดการคำนวณ

- กำหนดค่าเริ่มต้น ($M_{b1}, M_{b2}, M_{b3}, M_{e1}, M_{e2}, M_{e3}, C_{pe}, U, A_{e1}, A_{e2}, A_{e3}, \Delta P, C_a, \rho_a, \eta_{fan}, r_1, r_2, k_w, L, h_a, A_b, \Delta X, \rho_s, M_w$)
- คำนวณ T_a , T_1 และ DML จากสมการ (17) และ (10) ตามลำดับ)
- คำนวณความร้อนจากการหายใจแต่ละช่วงเวลาจากสมการ (9)
- คำนวณเอนทัลปีอากาศก่อนเข้าถังเก็บเมล็ดพืชจากสมการ (5) โดยใช้ T_i และ W_i ของอากาศก่อนเข้าถังเมล็ดพืช
- คำนวณปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้นในอากาศเนื่องจากการหายใจจากสมการ (13)
- คำนวณอัตราส่วนความชื้นอากาศออกจากเมล็ดพืช, W_o จากสมการ (12)
- คำนวณเอนทัลปีอากาศออกจากเมล็ดพืชโดยสมมติให้อากาศออกจากเมล็ดพืชมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิเมล็ดพืชที่ช่วงเวลาก่อนหน้านั้น จากสมการ (6)
- คำนวณ Q_a, Q_{n1} และ ตรวจสอบเงื่อนไขการเปิดปิดพัดลม
- คำนวณอุณหภูมิเมล็ดพืชใน Node 1 ที่เวลาถัดไปโดยแทนค่าต่าง ๆ ที่คำนวณได้ในข้อ 2 ถึง 8 ในสมการ (2)
- คำนวณอุณหภูมิเมล็ดพืชใน Node 2 โดยใช้ข้อมูลที่คำนวณได้ในการหาอุณหภูมิเมล็ดพืชใน Node 1 โดยแทนค่าต่าง ๆ ที่คำนวณได้ในข้อ 2 ถึง 8 ในสมการ (3)
- คำนวณอุณหภูมิเมล็ดพืชใน Node 3 โดยใช้ข้อมูลที่คำนวณได้ในการหาอุณหภูมิเมล็ดพืชใน Node 2 โดยแทนค่าต่าง ๆ ที่คำนวณได้ในข้อ 2 ถึง 8 ในสมการ (4)



รูปที่ 4 การจำลองสมรรถนะระบบเก็บเมล็ดพืชด้วยท่อความร้อนร่วมกับการระบายอากาศ

4. ผลการทดสอบระบบระบายอากาศร่วมกับท่อความร้อน

4.1 ผลการจำลองสมรรถนะของระบบระบายอากาศร่วมกับท่อความร้อนเทอร์โมไซฟอนในไซโลเก็บเมล็ดพืช

จากการจำลองสมรรถนะโดยพิจารณาเงื่อนไขที่ต้องการได้ อุณหภูมิข้าวเปลือกและข้าวโพดต่ำสุด พบว่าเมื่อลดค่าอุณหภูมิ T_s ลงจะทำให้อุณหภูมิข้าวเปลือกและข้าวโพดที่ได้ต่ำลงและมีค่าต่ำสุดที่อุณหภูมิ T_s 24°C และ 22.0°C ตามลำดับ ดังรูปที่ 5 จะได้อุณหภูมิเฉลี่ยข้าวเปลือกและข้าวโพดทั้งปีต่ำสุดที่ 26.5°C และ 24.7°C ตามลำดับ ที่ $T_d = 1^{\circ}\text{C}$ โดยมีเปอร์เซ็นต์การทำงานของพัดลม 38.5% และ 25.5 % ต่อปี ตามลำดับ เมื่อพิจารณาข้าวเปลือกจะเห็นว่าการทำงานของพัดลมมีเปอร์เซ็นต์ที่สูง ดังนั้นจึงพิจารณาอุณหภูมิ T_s ที่ 28°C จะได้อุณหภูมิเฉลี่ยข้าวเปลือกทั้งปีต่ำสุดที่ 26.9°C ที่ $T_d 1^{\circ}\text{C}$ โดยมีเปอร์เซ็นต์การทำงานของพัดลมเพียง 18.4% ต่อปี และเมื่อพิจารณาที่ $T_d = 5^{\circ}\text{C}$ ค่าเปอร์เซ็นต์การทำงานของพัดลมจะลดต่ำที่ 28°C โดยมีเปอร์เซ็นต์การทำงานของพัดลมที่ 8.2% และ 0.8% ต่อปี ตามลำดับ ดังรูปที่ 6 โดยที่อุณหภูมิเฉลี่ยทั้งปีประมาณ 27.3°C และ 28°C ตามลำดับ ดังนั้นเงื่อนไขที่เหมาะสมของการทำงานของพัดลมเมื่อต้องการให้ได้อุณหภูมิข้าวเปลือกและข้าวโพดต่ำ คือตั้งอุณหภูมิ $T_d = 1^{\circ}\text{C}$ และ $T_s = 28^{\circ}\text{C}$ และ 22°C ตามลำดับ และถ้าต้องการให้ชั่วโมงทำงานพัดลมต่ำสุดโดยที่อุณหภูมิไม่เกิน 28°C คือ ตั้งอุณหภูมิ $T_s = 28^{\circ}\text{C}$ และ $T_d = 5^{\circ}\text{C}$ โดยจะมีค่าชั่วโมงทำงานพัดลม 8.2% และ 0.8% ต่อปี

ในทางปฏิบัติการเลือกเงื่อนไขการทำงานของพัดลมควรพิจารณาความถี่ที่อุณหภูมิข้าวเปลือกและข้าวโพด และชั่วโมงการทำงานของพัดลมต่อปี ดังนั้นแนวทางที่เป็นไปได้คือการเลือกเงื่อนไขการทำงานของพัดลมตามฤดูกาล ซึ่งจากการจำลองพบว่าเงื่อนไขที่เหมาะสมคือ

1. ช่วงเดือน ตุลาคม-มีนาคม (6 เดือน) ซึ่งเป็นช่วงฤดูหนาวที่อุณหภูมิแวดล้อมมีค่าต่ำ เลือกเงื่อนไขการทำงานของพัดลมที่สามารถทำให้ชั่วโมงการทำงานของพัดลมต่ำ ดังนี้

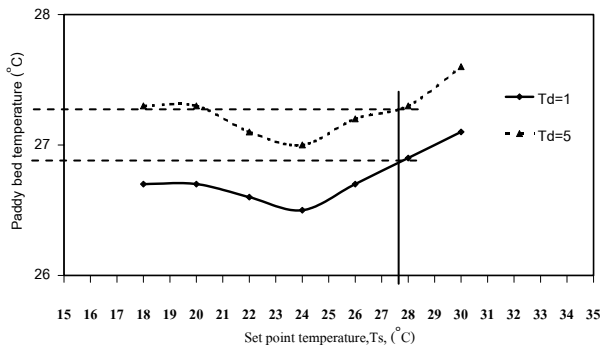
$$T_s = 28^{\circ}\text{C} \text{ และ } T_d = 5^{\circ}\text{C} \text{ (ข้าวเปลือกและข้าวโพด)}$$

2. ช่วงเดือน เมษายน-กันยายน (6 เดือน) ซึ่งเป็นช่วงฤดูร้อน อากาศแวดล้อมมีอุณหภูมิสูง เลือกเงื่อนไขการทำงานของพัดลมให้สามารถลดอุณหภูมิข้าวเปลือกและข้าวโพดได้ต่ำ ดังนี้

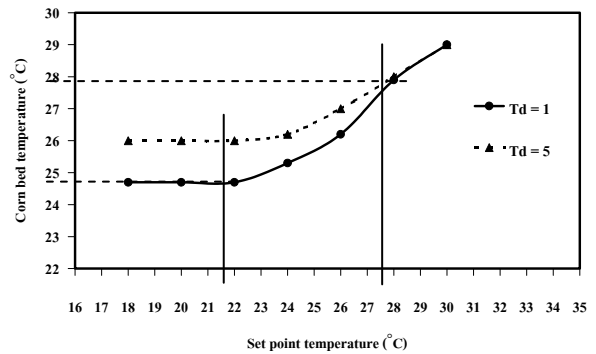
$$T_s = 28^{\circ}\text{C} \text{ และ } T_d = 1^{\circ}\text{C}$$

$$T_s = 22^{\circ}\text{C} \text{ และ } T_d = 1^{\circ}\text{C}$$

ซึ่งจากการเลือกเงื่อนไขการทำงานในลักษณะดังกล่าวสามารถควบคุมอุณหภูมิข้าวเปลือกและข้าวโพดได้ตามต้องการโดยมีค่าชั่วโมงการทำงานของพัดลมต่อปีต่ำสุด โดยสามารถควบคุมอุณหภูมิข้าวเปลือกและข้าวโพดเฉลี่ยทั้งปีได้ 27°C และ 26.9°C ตามลำดับ ดังรูปที่ 7 โดยเส้นประแสดงอุณหภูมิข้าวเปลือกและข้าวโพดที่ต้องการ เส้นทึบคืออุณหภูมิข้าวเปลือกและข้าวโพดที่ได้จากการจำลองสมรรถนะ และมีชั่วโมงทำงานของพัดลมเฉลี่ยทั้งปี 15.2% และ 17.7% (ใช้ข้อมูลอากาศเชียงใหม่ปี 2546)

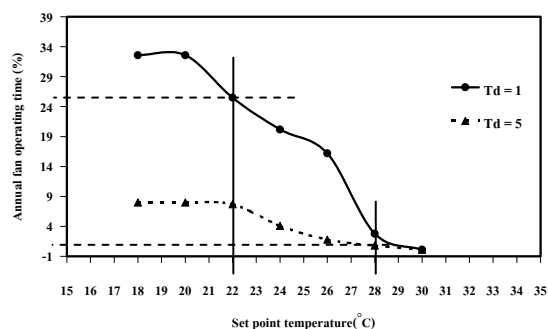
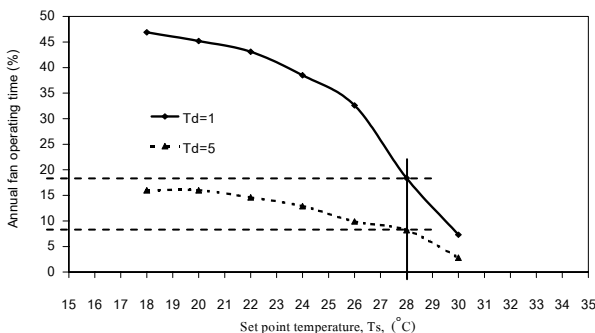


ก. ข้าวเปลือก



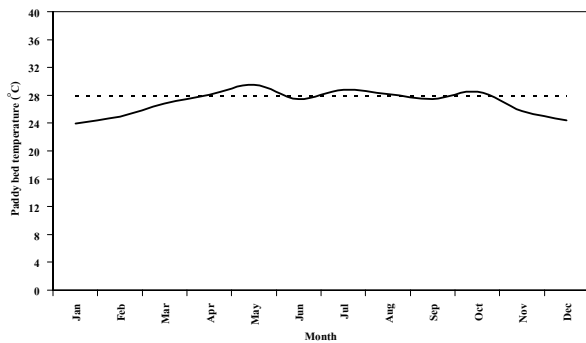
ข. ข้าวโพด

รูปที่ 5 อุณหภูมิข้าวเปลือกและข้าวโพดที่ได้จากแบบจำลองที่อุณหภูมิทำงานพัดลมต่างๆ

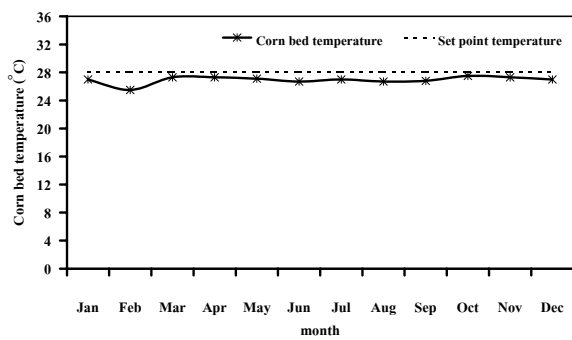


ก. ข้าวเปลือก

รูปที่ 6 เปร็เซ็นต์การทำงานพัตลมต่อปีจากแบบจำลองที่อุณหภูมิทำงานพัตลมต่างๆ



ข. ข้าวโพด



ก. ข้าวเปลือก

รูปที่ 7 อุณหภูมิเฉลี่ยข้าวเปลือกและข้าวโพดทั้งปีจากแบบจำลอง (ข้อมูลอากาศเชียงใหม่ (ปี 2546))

ข. ข้าวโพด

ตารางที่ 1 การจำลองสมรรถนะด้วยคอมพิวเตอร์ในการควบคุมอุณหภูมิข้าวเปลือกและข้าวโพด

รายละเอียด	ไซโลเก็บข้าวเปลือกขนาด 5 ตัน	ไซโลเก็บข้าวโพดขนาด 5 ตัน
1. อุณหภูมิเมล็ดพืชที่พัตลมทำงาน(T_s)		
ช่วงเดือนตุลาคม-มีนาคม	28 °C	28 °C
ช่วงเดือนเมษายน-กันยายน	28 °C	22 °C
2. อุณหภูมิแตกต่างระหว่างข้าวเปลือกกับอากาศแวดล้อม(T_d)		
ช่วงเดือนตุลาคม-มีนาคม	5 °C	5 °C
ช่วงเดือนเมษายน-กันยายน	1 °C	1 °C
3. อุณหภูมิข้าวเปลือกเฉลี่ยทั้งปี	27 °C	26.9 °C
4. เปร็เซ็นต์การทำงานของพัตลมเฉลี่ยทั้งปี	15.2%	17.7%

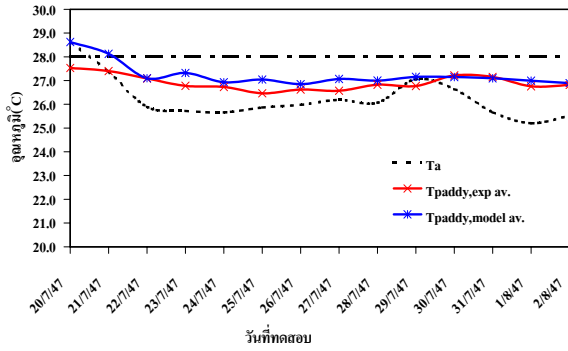
4.2 ผลการทดสอบระบบระบายอากาศร่วมกับท่อความร้อนเทอร์โมไซฟอนในการเก็บเมล็ดพืช

ในการทดสอบสมรรถนะของระบบระบายอากาศร่วมกับท่อความร้อนเทอร์โมไซฟอนในการเก็บรักษาเมล็ดพืช (ข้าวเปลือกและเมล็ดข้าวโพดอาหารสัตว์) โดยพิจารณาใช้เงื่อนไขการทำงานของการพัฒนาระบายอากาศที่เหมาะสม ซึ่งได้จากการจำลองสมรรถนะของระบบ โดยในช่วงของการเก็บข้าวเปลือกที่ทดสอบในช่วงเดือนเมษายน-กันยายน และเก็บเมล็ดข้าวโพดที่ทดสอบอยู่ในช่วงเดือน

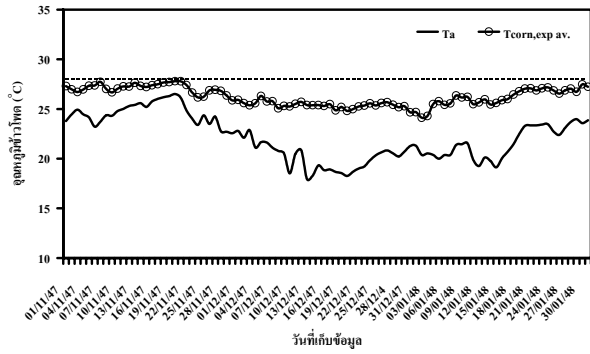
ตุลาคม-มีนาคม ได้ผลดังตารางที่ 2 และลักษณะการกระจายอุณหภูมิในไซโลของข้าวเปลือกสอดคล้องกับหลักการที่ว่าในระยะรัศมีเดียวกันแต่ความสูงต่างกันอุณหภูมิจจะไม่เท่ากัน โดยที่ส่วนบนสุดจะมีอุณหภูมิสูงที่สุดและจะลดลงตามความสูงที่ลดลง ทั้งนี้เกิดจากความชื้นได้รับความร้อนแล้วลอยตัวสูงขึ้น ส่วนบริเวณกลางไซโลจะมีอุณหภูมิสูงที่สุดและลดลงตามรัศมีไซโลที่เพิ่มขึ้น (ไมตรี, 2539; นราธิปและคณะ, 2539; วินิต, 2545;) ดังรูปที่ 8 และ 9

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบระบบระบายอากาศร่วมกับท่อความร้อนเทอร์โมไซฟอนในการเก็บเมล็ดพืช

รายละเอียด	ข้าวเปลือก	ข้าวโพด
1. เงื่อนไขการทำงานของการพัฒนาระบายอากาศที่เหมาะสมสำหรับการเก็บเมล็ดพืช		
ช่วงเดือนตุลาคม-มีนาคม		$T_s = 28\text{ °C}$ และ $T_d = 5\text{ °C}$
ช่วงเดือนเมษายน-กันยายน	$T_s = 28\text{ °C}$ และ $T_d = 1\text{ °C}$	
2. ระยะเวลาที่ทดสอบ	2	3
3. ความชื้นเริ่มต้น	14%wb.	17.4%wb.
4. อุณหภูมิเริ่มต้น	28 °C	27.3 °C
5. อุณหภูมิเฉลี่ย	26.9 °C	26.2 °C
6. ความชื้นสุดท้าย	12.3%wb.	13.5 %wb
7. เปร็เซ็นต์การทำงานของพัตลมเฉลี่ย	4.3 % ของเวลาที่ทดสอบ	14.45 % ของเวลาที่ทดสอบ
8. การกระจายอุณหภูมิเฉลี่ยในไซโล(แต่ละ Node)	มีค่าใกล้เคียงกัน	25.9 , 27.7 และ 27.7 °C

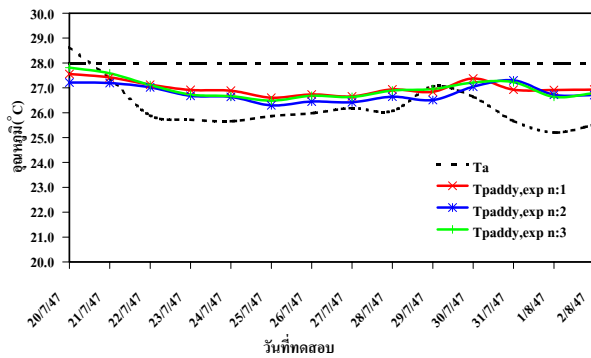


ก. ข้าวเปลือก ($T_s = 28^\circ\text{C}$ และ $T_d = 1^\circ\text{C}$)

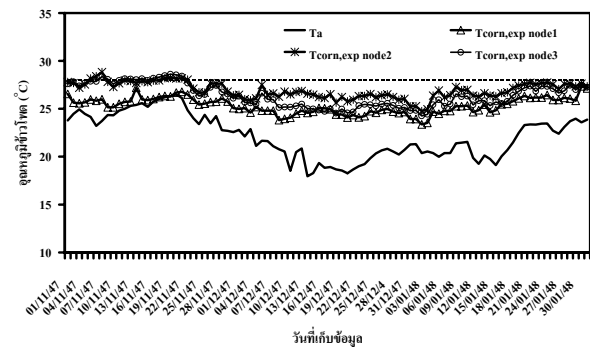


ข. ข้าวโพด ($T_s = 28^\circ\text{C}$ และ $T_d = 5^\circ\text{C}$)

รูปที่ 8 อุณหภูมิเฉลี่ยในแต่ละวัน



ก. ข้าวเปลือก ($T_s = 28^\circ\text{C}$ และ $T_d = 1^\circ\text{C}$)



ข. ข้าวโพด ($T_s = 28^\circ\text{C}$ และ $T_d = 5^\circ\text{C}$)

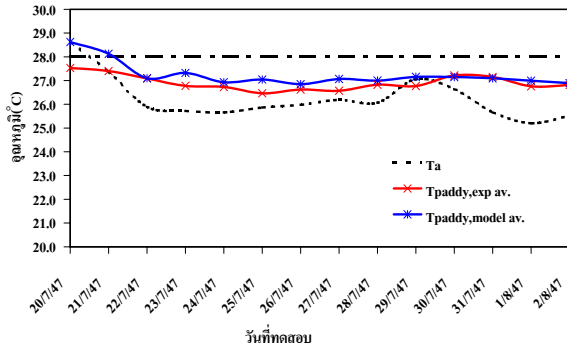
รูปที่ 9 อุณหภูมิเฉลี่ยของแต่ละ node

4.3 เปรียบเทียบอุณหภูมิที่ตรวจวัดได้จากการทดสอบและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

จากการนำอุณหภูมิข้าวเปลือกและข้าวโพดเฉลี่ยที่คำนวณได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และที่วัดได้จากการทดสอบ โดยใช้เงื่อนไขการทำงานของพัดลมที่ $T_s=28^\circ\text{C}$, $T_d=1^\circ\text{C}$ และ $T_s=28^\circ\text{C}$, $T_d=5^\circ\text{C}$ มาเปรียบเทียบ พบว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่แก้ไขสามารถทำนายอุณหภูมิข้าวเปลือกและข้าวโพดได้ใกล้เคียงกับอุณหภูมิข้าวเปลือกและข้าวโพดที่วัดจริงจากการทดสอบ คือ อุณหภูมิข้าวเปลือกเฉลี่ยที่ 26.9°C และ 27.2°C ตามลำดับ และมีอุณหภูมิข้าวโพดเฉลี่ยที่ 24.3°C และ 25.4°C ตามลำดับ แสดงว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายอุณหภูมิข้าวเปลือกและข้าวโพดที่แก้ไขนี้ มีความเหมาะสมใช้ในการออกแบบและทำนายสมรรถนะการทำงานของระบบระบายอากาศร่วมกับท่อความร้อนเทอร์โมไซฟอนในไซโลเก็บเมล็ดพืชขนาด 5 ตัน เมื่อใช้ในการเก็บรักษาเมล็ดพืชได้เป็นอย่างดี ดังแสดงในรูปที่ 10

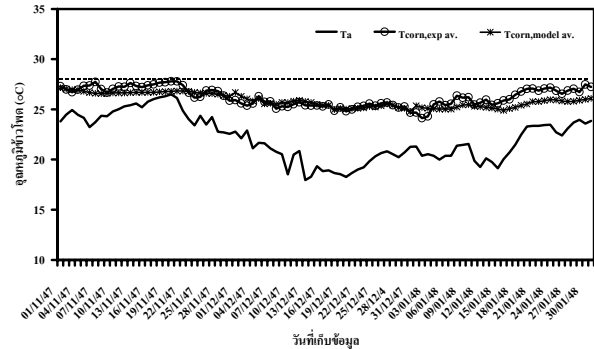
4.4 การใช้พลังงานของระบบระบายอากาศร่วมกับท่อความร้อนเทอร์โมไซฟอนในไซโลเก็บเมล็ดพืชขนาด 5 ตัน

จากการทดสอบที่เงื่อนไข การทำงานของพัดลม ที่ $T_s=28^\circ\text{C}$, $T_d=1^\circ\text{C}$ (ข้าวเปลือก) และ $T_s=28^\circ\text{C}$, $T_d=5^\circ\text{C}$ (ข้าวโพด) พบว่า ในการเก็บรักษาข้าวเปลือกและข้าวโพดจะมีชั่วโมงการทำงานของพัดลมโดยพิจารณาจาก Watt-hour meter สามารถคิดชั่วโมงการทำงานของพัดลมได้ 14.4 ชั่วโมง หรือคิดเป็น 4.3% ของเวลาที่ใช้ทดสอบ(สำหรับข้าวเปลือก) และ 319.0 ชั่วโมง หรือคิดเป็น 14.45% ของเวลาที่ใช้ทดสอบ(สำหรับข้าวโพด) เมื่อเปรียบเทียบกับการศึกษาาระบบระบายอากาศในประเทศไทยของ Mear(1993) ทำให้ระบบนี้สามารถลดชั่วโมงการทำงานของพัดลมจาก 30-40%ต่อปี เหลือเพียง 15.2%และ17.7%ต่อปี ตามลำดับ และช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานได้



ก. ข้าวเปลือก ($T_s = 28^\circ\text{C}$ และ $T_d = 1^\circ\text{C}$)

รูปที่ 10 อุณหภูมิเฉลี่ยจากการทดสอบวัดจริงและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์



ข. ข้าวโพด ($T_s = 28^\circ\text{C}$ และ $T_d = 5^\circ\text{C}$)

4.5 การตรวจสอบคุณภาพเมล็ดพืช

4.5.1 ข้าวเปลือก

ก. การเปลี่ยนแปลงของเปอร์เซ็นต์ต้นข้าว

เมื่อนำข้าวเปลือกไปสีเพื่อดูการเปลี่ยนแปลงปริมาณต้นข้าวในแต่ละเดือน พบว่า ก่อนการเก็บรักษา(ในเดือนที่ 0) ข้าวเปลือกมีความชื้น 14%wb. ได้ปริมาณต้นข้าว 55.9% จากนั้นนำไปเก็บรักษาด้วยระบบระบายอากาศร่วมกับท่อความร้อนเทอร์โมไซฟอนพบว่า การเก็บรักษาในระบบดังกล่าวปริมาณต้นข้าวเพิ่มขึ้นในเดือนที่ 1 (ข้าวเปลือกมีความชื้น 12.7%wb.) โดยมีปริมาณต้นข้าว 58.6% และลดลงในเดือนที่ 2 (ข้าวเปลือกมีความชื้น 12.3%wb.) เหลือ 53.7% ปริมาณต้นข้าวลดลงจากตอนเริ่มต้น 2.2% ซึ่งผลการทดลองได้ให้ผลสอดคล้องกับหลักการที่ว่าเมื่อระยะเวลาการเก็บรักษานานขึ้น จะส่งผลให้เมล็ดที่อยู่ในเมล็ดข้าวมีการจับตัวกันแข็งแรงมากขึ้น เมื่อนำข้าวเปลือกไปสีจึงทำให้ได้ปริมาณต้นข้าวที่เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่เก็บรักษา (Charstil,1990;Daniel et al.,1998; อรรถพร และคณะ,2539) สาเหตุที่ปริมาณต้นข้าวจากการทดสอบเริ่มลดลงในเดือนที่ 2 อาจเป็นเพราะความชื้นในเมล็ดข้าวลดลงจึงมีความแข็งและเปราะมากขึ้น และเมื่อพิจารณาปริมาณต้นข้าวในแต่ละชั้น พบว่า ปริมาณต้นข้าวมีค่าใกล้เคียงกัน

จากการเก็บตัวอย่างข้าวเปลือกจากยุงฉางของเกษตรกรนำมาสีและตรวจหาปริมาณต้นข้าว พบว่า ก่อนการเก็บรักษาในยุงฉางข้าวเปลือกมีความชื้น 14%wb. หลังการเก็บรักษา 2 เดือนข้าวเปลือกมีความชื้น 13.1%wb. ปริมาณต้นข้าวมีแนวโน้มเหมือนกับการเก็บรักษาในไซโลด้วยระบบระบายอากาศร่วมกับท่อความร้อนเทอร์โมไซฟอน โดยมีปริมาณต้นข้าวเป็น 55.6% , 57.8% และ 51.9% ตามลำดับ ปริมาณต้นข้าวลดลงจากตอนเริ่มต้น 3.7% ซึ่งการเก็บรักษาข้าวเปลือกในยุงฉางหรือการระบายด้วยอากาศแวดล้อมอย่างเดียวจะมีแนวโน้มปริมาณต้นข้าวลดลงเร็วกว่าการเก็บรักษาด้วยระบบระบายอากาศร่วมกับท่อความร้อนเทอร์โมไซฟอน และระบบนี้สามารถชะลอการลดลงของเปอร์เซ็นต์ต้นข้าวเฉลี่ย 0.75%ต่อเดือน ดังตารางที่ 3 ซึ่งคิดเป็นปริมาณข้าวที่สามารถลดความเสียหายได้ 37.5 kg/month ตารางที่ 3 เปรียบเทียบปริมาณต้นข้าวระหว่างยุงฉางของเกษตรกรกับการทดสอบ

	ปริมาณต้นข้าว	
	ยุงฉางของเกษตรกร	การทดสอบ
0	55.6	55.9
1	57.8	58.6
2	51.9	53.7
ปริมาณต้นข้าวที่ลดลง	3.7	2.2

ข. การเปลี่ยนแปลงค่าสีของข้าว(%ความขาวของข้าว) ในแต่ละเดือน

ค่า L^* คือความเข้มสว่างของสี ซึ่งมีค่าเริ่มตั้งแต่ 0 ถึง 100 ค่า L^* มีค่ามากแสดงว่าสีมีความสว่างมาก และถ้า L^* เท่ากับ 0 จะเป็นสีดำ

ค่า a^* คือ ค่าแสดงระดับสีแดง และสีเขียว ถ้า a^* มีค่าเป็นบวกแสดงถึงสีแดง มีค่าเป็นลบแสดงถึงสีเขียว เมื่อห่างจากจุด 0 มากแสดงถึงค่าสีแดงหรือสีเขียวมากขึ้น

ค่า b^* คือ ค่าแสดงระดับสีเหลือง และสีน้ำเงิน ถ้า b^* มีค่าเป็นบวกแสดงถึงสีเหลือง มีค่าเป็นลบแสดงถึงสีน้ำเงิน เมื่อห่างจากจุด 0 มากแสดงถึงค่าสีเหลืองหรือสีน้ำเงินมากขึ้น

การเปลี่ยนแปลงค่าสีของข้าว เมื่อเก็บรักษาข้าวเปลือกไว้ในไซโลที่มีระบบระบายอากาศร่วมกับท่อความร้อนเทอร์โมไซฟอนพบว่า ค่า L^* ที่บอกความสว่างหรือความขาวของข้าวเปลือกเริ่มต้นมีค่า 51.1% หลังการทดสอบแล้ว 1 เดือนและ 2 เดือน เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่า L^* ในตอนเริ่มต้น จะมีแนวโน้มที่ลดลงจากเดิมเล็กน้อยตามระยะเวลาการเก็บรักษาคือ 50.6% และ 48.8% ตามลำดับ เมื่อพิจารณาในแต่ละชั้น พบว่า ค่า L^* ในแต่ละชั้นของข้าวเปลือก มีค่าใกล้เคียงกันและมีแนวโน้มที่ลดลงเพียงเล็กน้อยเมื่อเวลาผ่านไป ค่า b^* ที่แสดงระดับสีเหลืองนั้น พบว่า มีแนวโน้มเพิ่มความเป็นสีเหลืองเพิ่มขึ้นตามอายุเก็บรักษาข้าวเปลือก(Daniel et al.,1998) และในแต่ละชั้นจะมีค่าใกล้เคียงกัน และค่า a^* พบว่า มีแนวโน้มเพิ่มความเป็นสีเขียวเพิ่มขึ้นตามอายุเก็บรักษาข้าวเปลือกและในแต่ละชั้นจะมีค่าใกล้เคียงกัน

เมื่อนำค่าสีของข้าวที่เก็บรักษาในระบบระบายอากาศร่วมกับท่อความร้อนมาเปรียบเทียบกับข้าวที่เก็บในยุงฉางของเกษตรกร พบว่า ที่เวลาเริ่มต้นของการเก็บรักษาเดียวกัน ค่า L^* , b^* และ a^* ของข้าวเปลือกมีค่าใกล้เคียงกันต่างกันเพียงเล็กน้อย และ

เมื่อเก็บรักษาข้าวเปลือกเป็นเวลา 2 เดือน เท่ากันค่า L*, b* และค่า a* ของข้าวเปลือกก็ยังมีค่าใกล้เคียงกัน แต่ข้าวจากยุงฉางเกษตรกรรมมีแนวโน้มที่ค่า L* ลดลง ค่า b* เพิ่มขึ้น และค่า a* ลดลง ก่อนข้าวที่เก็บรักษาด้วยระบบระบายอากาศร่วมกับท่อความร้อนตามระยะเวลาเก็บรักษา การเปลี่ยนแปลงค่าสีระหว่างการเก็บรักษาข้าวเปลือกในไซโลขนาด 5 ตัน แสดงดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่าสีระหว่างยุงฉางของเกษตรกรรมกับการทดสอบ

เดือนที่เก็บรักษา	L*		b*		a*	
	เกษตรกรรม	ทดสอบ	เกษตรกรรม	ทดสอบ	เกษตรกรรม	ทดสอบ
0	51.2	51.1	7.9	7.7	-0.6	-0.4
1	48.7	50.6	8.6	8.2	-0.7	-0.5
2	47.6	48.8	9.1	8.5	-0.9	-0.7

สรุปผลการตรวจสอบคุณภาพข้าวหลังการสี ข้าวที่เก็บรักษาในไซโลที่มีระบบระบายอากาศร่วมกับท่อความร้อน มีคุณภาพข้าวดีกว่าข้าวในยุงฉางเกษตรกรรมเพราะข้าวเปลือกในยุงฉางไม่มีการควบคุมอุณหภูมิ ทำให้อุณหภูมิข้าวเปลือกเปลี่ยนแปลงตามอากาศแวดล้อมที่เปลี่ยนไปบวกกับความชื้นสะสมจากการหายใจของข้าวเปลือก ซึ่งส่งผลกระทบต่อเมล็ดข้าวเปลือกทำให้เกิดรอยร้าวและเกิดการกลั่นตัวของไอน้ำในอากาศภายในกองข้าวเปลือกเนื่องจากอากาศที่อุณหภูมิสูงเคลื่อนที่ไปปะทะกับอากาศที่อุณหภูมิต่ำกว่า ทำให้ข้าวเปลือกที่เก็บโดยไม่มีการควบคุมเสื่อมสภาพเร็วกว่า ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยหลายเรื่องการศึกษาเปรียบเทียบระหว่างข้าวเปลือกที่มีการควบคุมอุณหภูมิและไม่มีการควบคุมอุณหภูมิ

4.5.2 ข้าวโพด

ก. วิธีการทดสอบ

ในการตรวจสอบคุณภาพเมล็ดข้าวโพด จะพิจารณาตรวจสอบความงอกมาตรฐาน และความแข็งแรงของเมล็ดข้าวโพดซึ่งมีวิธีการทดสอบดังนี้

1. ทดสอบความงอกมาตรฐาน โดยนำเมล็ดข้าวโพดมาเพาะระหว่างกระดาษเพาะ นำกระดาษเพาะแช่ในน้ำกลั่น แล้วเพาะเมล็ดข้าวโพด เรียงเป็น 5 แถว ๆ ละ 10 เมล็ด แล้วทำการเพาะในตู้เพาะอุณหภูมิ 25 °C ไม่ใช้แสง แล้วทำการนับต้นกล้าที่งอก(ปกติ, ไม่ปกติ)และเมล็ดที่ไม่งอก ในวันที่ 4 และ 7 หลังการเพาะ ซึ่งทดสอบ 4 ซ้ำ ๆ ละ 50 เมล็ด

2. Seedling Growth Rate Test โดยเพาะเมล็ดในตู้เพาะที่ 25 °C ไม่ใช้แสง นาน 7 วัน โดยเพาะในกระดาษเพาะแล้วใส่ในกล่องพลาสติก เมื่อครบกำหนด บันทึกผลการทดลองเป็นจำนวนต้นกล้าที่สมบูรณ์ ต้นกล้าไม่สมบูรณ์ และเมล็ดตาย นำเฉพาะต้นกล้าที่สมบูรณ์มาตัดเอาต้นกล้าออกจากเมล็ด แล้วนำไปอบที่ 80 °C 24 ชั่วโมง ซึ่งน้ำหนักแห้งของต้นกล้า คำนวณและรายงานผลเป็นน้ำหนักแห้ง (มิลลิกรัม/ต้น) (ในข้าวโพดน้ำหนักแห้งของต้นกล้าไม่รวมส่วนของ mesocotyl) ซึ่งทดสอบ 4 ซ้ำ ๆ ละ 50 เมล็ด

3. Germination Index Test โดยเพาะเมล็ดในตู้เพาะที่ 25 °C ไม่ใช้แสง นับจำนวนต้นกล้าที่งอก(ต้นกล้าปกติ) ในวันที่ 4 และ 7 ของการเพาะ ซึ่งทดสอบ 4 ซ้ำ ๆ ละ 50 เมล็ด นำมาคำนวณ GI = ต้นกล้าปกติ/วันแรกที่นับ + + ต้นกล้าปกติ/วันสุดท้ายที่นับ

$$GI = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\text{ต้นกล้าปกติ}}{\text{จำนวนวัน}} \quad (19)$$

ข. ผลการทดสอบคุณภาพข้าวโพด

จากตารางที่ 5 แสดงผลการทดสอบคุณภาพเมล็ดข้าวโพดภายหลังการเก็บรักษารักษาด้วยระบบระบายอากาศร่วมกับท่อความร้อนเทอร์โมไซฟอนในไซโล 1 และ 2 เดือนตามลำดับ พบว่าหลังจากเก็บรักษารักษาข้าวโพด 1 เดือน ความงอกมาตรฐาน (SG) ของเมล็ดข้าวโพด เมื่อพิจารณาในแต่ละ Node โดยใน Node 1 และ Node 2 มีค่าใกล้เคียงกัน คือ 56.7% และ 56.0% ส่วน Node 3 ต่ำกว่าชั้นอื่น ๆ คือ 51.3% ส่วนความแข็งแรงของเมล็ดข้าวโพดมีลักษณะเหมือนกับความงอกมาตรฐาน โดยมีความแข็งแรงเป็น 42.4 , 42.1 และ 40.7 mg/ต้น ตามลำดับ ที่เป็นเช่นนี้เพราะความชื้นสะสมเนื่องจากการหายใจของเมล็ดข้าวโพดเคลื่อนที่ไปยังชั้นบนทำให้บริเวณ Node 3 มีการสะสมความร้อนมากขึ้น ซึ่งมีผลต่อความงอกมาตรฐานและความแข็งแรงของเมล็ดข้าวโพด และหากพิจารณาตามแนวรัศมี พบว่า ความงอกมาตรฐาน (SG) ของเมล็ดข้าวโพด ในรัศมี 120 cm. จะมีค่ามากกว่ารัศมีอื่น ๆ รองมาคือ รัศมี 60 cm. และรัศมี 0 cm. โดยมีค่าความงอกมาตรฐาน คือ 61.3% , 52.0% และ 50.7% ตามลำดับ ส่วนความแข็งแรงของเมล็ดข้าวโพด ในรัศมี 0 cm. และรัศมี 120 cm. มีค่าใกล้เคียงกัน คือ 42.8 และ 42.7 mg/ต้น ส่วนรัศมี 60 cm. มีค่าความแข็งแรงน้อยสุดคือ 39.6 mg/ต้น โดยความงอกมาตรฐานและความแข็งแรงของเมล็ดข้าวโพดมีค่าเฉลี่ยที่ 54.7% และ 41.7 mg/ต้น

เมื่อเก็บรักษาเมล็ดข้าวโพดเป็นเวลา 2 เดือน พบว่าความงอกมาตรฐาน (SG) ของเมล็ดข้าวโพด เมื่อพิจารณาในแต่ละ Node โดยใน Node 1 และ Node 2 มีค่าเท่ากัน คือ 33.0% ส่วน Node 3 ต่ำกว่าชั้นอื่น ๆ คือ 30.0% ส่วนความแข็งแรงของเมล็ดข้าวโพด ใน Node 1 และ Node 3 มีค่าใกล้เคียงกัน คือ 33.0 และ 32.7 mg/ต้น ส่วน Node 2 มีค่ามากกว่าชั้นอื่น ๆ คือ 35.9 mg/ต้น หากพิจารณาตามแนวรัศมี พบว่า ความงอกมาตรฐาน (SG) ของเมล็ดข้าวโพด ในรัศมี 120 cm. จะมีค่ามากกว่ารัศมีอื่น ๆ รองมาคือ รัศมี 60 cm. และรัศมี 0 cm. โดยมีค่าความงอกมาตรฐาน คือ 40.0% , 28.0% และ 28.0% ตามลำดับ ส่วนความแข็งแรงของเมล็ดข้าวโพด ในรัศมี 120 cm. จะมีค่ามากกว่ารัศมีอื่น ๆ รองมาคือ รัศมี 60 cm. และรัศมี 0 cm. โดยมีค่าความแข็งแรงของเมล็ดข้าวโพด เป็น 37.3 , 36.3 และ 27.9 mg/ต้น ตามลำดับ ที่เป็นเช่นนี้เพราะความชื้นสะสมเนื่องจากการหายใจของเมล็ดข้าวโพดเคลื่อนที่เข้าสู่จุดศูนย์กลางของไซโล ซึ่งจะทำให้บริเวณรัศมี 0 cm. มีการสะสมความร้อนมากขึ้นและมีผลต่อความงอกมาตรฐานและความแข็งแรงของเมล็ดข้าวโพด โดยความงอกมาตรฐานและความแข็งแรงของเมล็ดข้าวโพดมีค่าเฉลี่ยที่ 32.0% และ 33.8 mg/ต้น

จากการทดสอบความงอกมาตรฐานและความแข็งแรงของ เมล็ดข้าวโพดทั้ง 2 ครั้ง จะเห็นว่าความงอกมาตรฐานและความ แข็งแรงของเมล็ดข้าวโพดลดลงคิดเป็น 41.5% และ 18.9% จาก

เดิม ทั้งนี้เป็นเพราะเมล็ดข้าวโพดที่ใช้ทดสอบเป็นเมล็ดข้าวโพด อาหารสัตว์ ไม่ใช่เมล็ดพันธุ์ในการเพาะปลูกและความชื้นในขณะเก็บ รักษาที่สูงอยู่

ตารางที่ 5 ผลการทดสอบความงอกและความแข็งแรงของเมล็ดข้าวโพด

Treatments	การทดสอบครั้งที่ 1 (ที่ 1 เดือน)			การทดสอบครั้งที่ 2 (ที่ 2 เดือน)		
	Germination (%)	Germination index	Seedling growth rate (mg/ต้น)	Germination (%)	Germination index	Seedling growth rate (mg/ต้น)
Node 1	56.7	5.2	42.4	33.0	2.7	33.0
Node 2	56.0	4.7	42.1	33.0	2.7	35.9
Node 3	51.3	4.5	40.7	30.0	2.5	32.7
รัศมี 0 cm.	50.7	4.5	42.8	28.0	2.2	27.9
รัศมี 60 cm.	52.0	4.3	39.6	28.0	2.3	36.3
รัศมี 120 cm.	61.3	5.6	42.7	40.0	3.4	37.3

5. สรุปผล

1. ลักษณะอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนมีรายละเอียดคือ ท่อความร้อนที่ใช้มีพื้นที่ถ่ายเทความร้อนด้านทำระเหยและด้าน ควบแน่น 38.8 m² และ 38.2 m² ตามลำดับ ใช้น้ำยา R22 เป็นสาร ทำงาน และมีพัดลมผ่านอีวาปอเรเตอร์ ช่วยในการระบายอากาศ จากด้านล่างของไซโลสู่ด้านบนด้วยอัตราเร็วลม 0.0216 kg/s ซึ่ง

2. เงื่อนไขการเปิดปิดพัดลมที่เหมาะสมสำหรับภูมิอากาศ จังหวัดเชียงใหม่คือ

ช่วงเดือน ตุลาคม-มีนาคม ตั้งค่า

$$T_s = 28\text{ }^{\circ}\text{C} \text{ และ } T_d = 5\text{ }^{\circ}\text{C} \text{ (ข้าวเปลือกและข้าวโพด)}$$

ช่วงเดือน เมษายน-กันยายน ตั้งค่า

$$T_s = 28\text{ }^{\circ}\text{C} \text{ และ } T_d = 1\text{ }^{\circ}\text{C} \text{ (ข้าวเปลือก)}$$

$$T_s = 22\text{ }^{\circ}\text{C} \text{ และ } T_d = 1\text{ }^{\circ}\text{C} \text{ (ข้าวโพด)}$$

อุณหภูมิข้าวเปลือกและข้าวโพดได้ตามต้องการ โดย สามารถควบคุมอุณหภูมิข้าวเปลือกและข้าวโพดเฉลี่ยทั้งปีได้ 27^oC และ 26.9^oC ตามลำดับ ดังรูปที่ 7 และมีชั่วโมงทำงานของพัดลม เฉลี่ยทั้งปี 15.2%และ17.7% (ใช้ข้อมูลอากาศเชียงใหม่ปี 2546)

3.แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่แก้ไขสามารถทำนาย อุณหภูมิข้าวเปลือกและข้าวโพดได้ใกล้เคียงกับอุณหภูมิข้าวเปลือก และข้าวโพดที่วัดจริง คือ อุณหภูมิข้าวเปลือกเฉลี่ยที่ 26.9^oCและ 27.2^oC ตามลำดับ และมีอุณหภูมิข้าวโพดเฉลี่ยที่ 24.3^oCและ25.4^oC ตามลำดับ

4.การใช้งานท่อความร้อนร่วมกับการระบายอากาศสามารถ ลดชั่วโมงการทำงานของพัดลมต่อปี จาก30-40% เหลือ 10-20%

5.คุณภาพข้าวที่เก็บรักษาในระบบระบายอากาศร่วมกับ ท่อความร้อนเทอร์โมไซฟอน มีแนวโน้มที่ลดลงตามอายุการเก็บ รักษาข้าวเปลือก โดยจะเห็นได้จากเปอร์เซ็นต์ข้าวที่ค่อย ๆ ลดลง จากเริ่มแรก 55.9% เหลือ 53.7% และค่าการเปลี่ยนแปลงสี โดยค่า L* มีแนวโน้มที่ลดลงจากเริ่ม 51.1% เหลือ 48.8% ส่วน ค่า b* มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการเก็บรักษา คุณภาพข้าว

ในแต่ละชั้นมีค่าใกล้เคียงกัน เมื่อเปรียบเทียบกับถังจางเกษตรกร คุณภาพข้าวมีค่าใกล้เคียงกัน แต่คุณภาพข้าวจากถังจางจะมี แนวโน้มลดลงเร็วกว่าเมื่อเก็บรักษาข้าวนานขึ้น และระบบนี้สามารถ ชะลอการลดลงของเปอร์เซ็นต์ข้าวได้ 0.75% ต่อเดือน คิดเป็น มูลค่า 6,750 บาท/ปี

6. การทดสอบความงอกมาตรฐานและความแข็งแรงของ เมล็ดข้าวโพดหลังเก็บเป็นระยะเวลา 2 เดือน ความงอกมาตรฐาน และความแข็งแรงของเมล็ดข้าวโพดลดลงคิดเป็น 41.5% และ 18.9% จากเดิม

6. อักษรย่อและสัญลักษณ์

A_e = พื้นที่การถ่ายเทความร้อนด้านอีวาปอเรเตอร์, m².

C_{pb}= ความจุความร้อนจำเพาะเมล็ดพืช, J/kg^oC.

C_{pe}= ความจุความร้อนจำเพาะท่อทองแดงส่วนอีวาปอเรเตอร์, J/kg^oC.

DML=มวลแห้งที่สูญเสีย, เศษส่วน

h_i =เอลล์ปีของอากาศก่อนเข้าเมล็ดพืช, J/kg.

h_o =เอลล์ปีของอากาศออกจากเมล็ดพืช, J/kg

W_a = อัตราการไหลอากาศ, kg/s.

W_m = ปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้นในอากาศเนื่องจากการหายใจ, kg H₂O /s.

M_w = ความชื้นเมล็ดพืช, % wb.

M_b = มวลของเมล็ดพืช, kg.

M_e = มวลของท่อความร้อนส่วนอีวาปอเรเตอร์, kg.

Pv = ความดัน, kPa

Pvs= ความดันไอน้ำอิ่มตัว, kPa

Q_h = ความร้อนจากการหายใจ, W.

T_b = อุณหภูมิเมล็ดพืช, ^oC.

T_e = อุณหภูมิท่อทองแดง, ^oC.

T_v = อุณหภูมิสารทำงาน, ^oC.

Td = อุณหภูมิแตกต่างระหว่างเมล็ดพืชและอากาศ, ^oC

T_s = อุณหภูมิเมล็ดพืชที่ให้พัสดมทำงาน, °C
 T_{max} = อุณหภูมิอากาศเฉลี่ยสูงสุด, K
 T_{min} = อุณหภูมิอากาศเฉลี่ยต่ำสุด, K.
 T_{abs} = อุณหภูมิสมบูรณ์, K.
 t = เวลา = Time(hour) - 9 , h.
 Δt = ช่วงเวลา, s.
 U = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน, W/m²C.
 W_1 = อัตราส่วนความชื้นอากาศก่อนเข้าเมล็ดพืช, kg H₂O/kg air.
 W_0 = อัตราส่วนความชื้นอากาศหลังจากออกจากเมล็ดพืช, kg H₂O/kg air.

7. กิตติกรรมประกาศ

โครงการนี้ได้รับเงินสนับสนุนจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนงาน (สกว) และศูนย์สาธิตและถ่ายทอดเทคโนโลยี พลังงานเพื่อการเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ สนับสนุนพื้นที่ในการทดสอบระบบ

8. เอกสารอ้างอิง

- [1]. Maier D.E., F.W. Bakker-Arkema and S.G. Ilangatleke. (1993). Ambient and chilled paddy aeration under Thai condition. Agricultural Engineering Journal. Vol 2(1&2), pp15-33.
- [2]. Kiatsirirot T. and N. Dussadee.(2001). "Reduction of heat accumulated in a thermosyphon-paddy bulk storage". International Journal of Ambient Energy. Vol. 22, No. 1, pp. 12-18.
- [3]. Dussadee N. and T. Kiatsirirot. (2003). "Performance analysis and economic evaluation of thermosyphon paddy bulk storage". International Journal of Applied Thermal Engineering. Accepted.
- [4]. ณัฐวุฒิ ดุษฎี และทงเกียรติ เกียรติ ศิริโรจน์, 2546, การวิเคราะห์สมรรถนะเทคนิคเทอร์โมไซฟอน-การเป่าอากาศในการเก็บข้าวเปลือก, การประชุมวิชาการเรื่องการถ่ายเทความร้อนและมวลในอุปกรณ์ด้านความร้อน, ณ.ศูนย์ฝึกอบรมแม่เกาะ การไฟฟ้าฝ่ายผลิต, จ.ลำปาง, 24-25 มีนาคม 2546, หน้า 6-13.
- [5]. Seib, P.A., H.B. Pfost, A. Sukaboi, V.S. Rao and R.B. Burroughs (1980). Spoilage of rough rice as measured by Carbon dioxide evaluation. Proceedings 3rd ASEAN Seminar on Grain Post-harvest Technology.
- [6]. Wilhelm, L.R. (1976). Numerical calculation of psychometric properties in SI units. Trans. ASAE. 19(2):318-321,325.
- [7]. Wachirapuvadom, S. (1996). An adapted model of passive roof solar collector for new house with respect to Thai style. Master Thesis of Science, Energy Technology Program, King Monkut's Institute of Technology Thonburi.