



การออกแบบและพัฒนาระบบอบแห้งแบบปั๊มความร้อนสำหรับเมล็ดพันธุ์ถั่วเหลือง

Design and Development of Heat Pump Drying System for Soybean Seeds

อานนท์ สายคำฟู^{1*}, พินิจ จิรคกุล¹, ภัสสร วัฒนกุลภาคิน², วิชัย โอภาณุกุล¹, ธนพงศ์ แสนจุ่ม¹, เอกภาพ ปานภูมิ¹,
อนุชา เชาวโชติ¹, นิรุติ บุญญา¹

Arnon Saicomfu^{1*}, Pinit Jirakkakul¹, Paphatsorn Wattanakulpakin², Wichai Opanukul¹, Tanapong Sanchum¹,
Akkarpap Panpoom¹, Anucha Chaochot¹, Niruth Boonya¹

¹สถาบันวิจัยเกษตรวิศวกรรม กรมวิชาการเกษตร ลาดยาว จตุจักร กรุงเทพฯ 10900

²กองวิจัยพัฒนาเมล็ดพันธุ์พืช กรมวิชาการเกษตร ลาดยาว จตุจักร กรุงเทพฯ 10900

¹Agricultural Engineering Research Institute, Department of Agriculture, Chatuchak, Bangkok, 10900, Thailand

²Seed Research and Development Division, Department of Agriculture, Chatuchak, Bangkok, 10900, Thailand

*Corresponding author: Tel: +66-8-6673-1028, Fax: +66-25-5792-757, E-mail: arnon.scf@gmail.com

บทคัดย่อ

การออกแบบและพัฒนาระบบอบแห้งแบบปั๊มความร้อนในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาเครื่องจักรสำหรับลดความชื้นในเมล็ดพันธุ์ถั่วเหลือง โดยออกแบบให้ห้องอบแห้งมีขนาด 1.8x2.5x2.3 m (กว้าง x ยาว x สูง) สำหรับระบบปั๊มความร้อน ใช้คอมเพรสเซอร์ขนาด 7 hp (380V) ใช้สารทำความเย็น R-22 ซึ่งมีความสามารถในการทำความเย็นและความร้อนเท่ากับ 14.3 kW และ 17.3 kW ตามลำดับ ในการทดสอบระบบปั๊มความร้อน กำหนดค่าแรงดันสารทำความเย็นด้านสูง 3 ระดับ ได้แก่ 1.38 1.72 และ 2.07 MPa จากผลการทดสอบ พบว่า อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 33±1.02 °C, 39±2.9% RH; 38±0.98 °C, 36±2.3% RH และ 44±1.36 °C, 32±3.1% RH ตามลำดับ โดยพบว่าช่วงแรงดันด้านสูงเท่ากับ 1.72 MPa เป็นค่าแรงดันที่เหมาะสมสำหรับการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในการลดความชื้นเมล็ดพันธุ์ถั่วเหลือง การลดความชื้นเมล็ดพันธุ์ถั่วเหลือง 250 kg จากความชื้นเริ่มต้น 18% w.b. ให้เหลือ 11% w.b. ใช้ระยะเวลา 5 h จากการวิเคราะห์ต้นทุนเพื่อใช้ประกอบการตัดสินใจซื้อเครื่องจักรมาใช้งาน พบว่า ที่กำลังการผลิต 20, 30, 40 และ 50 tons year⁻¹ มีต้นทุนการใช้งานเฉลี่ยเท่ากับ 3.65, 2.73, 2.28 และ 2 Baht kg⁻¹ ตามลำดับ

คำสำคัญ: ปั๊มความร้อน ถั่วเหลือง การอบแห้งเมล็ดพันธุ์

Abstract

The design and development of a heat pump drying system in the present research were aimed at developing a machine to reduce the moisture of soybean seeds. The drying chamber was designed to have the dimensions of 1.8 x 2.4 x 2.3 m (width x length x height). The heat pump system utilized a compressor rated at 7 hp (380 V) and R-22 as the refrigerant; its cooling and heating capabilities were 14.3 kW and 17.3 kW, respectively. The heat pump system was tested at the high refrigerant pressures of 1.38, 1.72 and 2.07 MPa. The results showed that the average temperature and relative humidity within the drying chamber were 33±1.02 °C, 39±2.9% RH; 38±0.98 °C, 36±2.3% RH and 44±1.36 °C, 32±3.1% RH, respectively. The refrigerant pressure of 1.72 MPa was noted

Received: August 04, 2022

Revised: August 24, 2022

Accepted: September 01, 2022

Available online: January 16, 2023

to be optimal for controlling the temperature and relative humidity for soybean seeds drying. By drying 250 kg soybean seeds from an initial moisture content of 18% w.b. to 11% w.b. the drying time was around 5 h. The cost analysis revealed that the costs of soybean seeds drying at the capacities of 20, 30, 40, and 50 tons/year were 3.65, 2.73, 2.28, and 2.0 Baht kg^{-1} , respectively.

Keywords: Heat pump, Soybean, Seed drying

1 บทนำ

การลดความชื้นหรือการอบแห้งเมล็ดพันธุ์ถือเป็นขั้นตอนที่สำคัญในกระบวนการผลิตเมล็ดพันธุ์พืชที่จะหลีกเลี่ยงไม่ได้เนื่องจากในกระบวนการผลิตเมล็ดพันธุ์พืชโดยเริ่มจากการเพาะปลูก การเก็บเกี่ยว จนมาถึงขั้นตอนการลดความชื้นหรือการอบแห้ง แล้วนำไปคัดแยกและทำความสะอาด และสุดท้ายคือการเก็บรักษาเพื่อรอจำหน่ายหรือนำไปเพาะปลูกในฤดูถัดไปได้ ซึ่งวิธีการลดความชื้นเมล็ดพันธุ์ในปัจจุบันมีหลากหลายวิธี เช่น การลดความชื้นด้วยวิธีตากแดด การใช้เครื่องลดความชื้นด้วยลมร้อนที่ใช้แหล่งกำเนิดพลังงานความร้อนจาก ฮีตเตอร์ไฟฟ้า น้ำมัน ก๊าซ LPG น้ำมันเตา เป็นต้น เนื่องจากเมล็ดพันธุ์ที่เก็บเกี่ยวมาจากแปลงเพาะปลูกจะมีความชื้นสูงถึง 20-40 %w.b. ซึ่งค่าความชื้นนี้จะขึ้นอยู่กับเมล็ดพันธุ์แต่ละชนิดและขึ้นอยู่กับช่วงเวลาฤดูกาลที่เก็บเกี่ยว โดยในปัจจุบันการลดความชื้นเมล็ดพันธุ์พืชตระกูลถั่วยังนิยมใช้วิธีการลดความชื้นด้วยแสงแดด (sun drying) เนื่องจากเป็นวิธีที่มีต้นทุนต่ำ และประเทศไทยอยู่ในเขตร้อนชื้นซึ่งมีแสงแดดเพียงพอต่อการลดความชื้น และโดยทั่วไปวิธีดังกล่าวจะใช้เวลาในการลดความชื้นเมล็ดพันธุ์ประมาณ 1-2 day ขึ้นอยู่กับความชื้นเริ่มต้นของเมล็ดพันธุ์และปริมาณแสงแดดในช่วงเวลาที่ลดความชื้น เช่น การลดความชื้นเมล็ดพันธุ์ถั่วเขียวใช้เวลา 1 day สำหรับในการลดความชื้นจาก 16-18% w.b. ให้ลดลงเหลือ 11-12% w.b. ถั่วเหลืองใช้เวลา 2 วัน สำหรับในการลดความชื้นจาก 18-20% w.b ให้เหลือ 11-12% w.b. และถั่วลิสงใช้เวลา 2 วัน สำหรับในการลดความชื้นจาก 18-20% w.b. ให้ลดลงเหลือ 9-11% w.b. นอกจากนี้ “บุญมีและคณะ (2546)” ได้ทำการศึกษาการลดความชื้นเมล็ดพันธุ์ถั่วลิสงด้วยเครื่องอบแห้งแบบชนิดลมร้อน พบว่า การลดความชื้นจาก 27% w.b. ให้ลดลงเหลือ 5.7% w.b. ใช้เวลา 36 hr เปรียบเทียบกับการลดความชื้นด้วยวิธีตากแดดบนตะแกรงลวดและวิธีการผึ่งลมในที่ร่มจะใช้เวลามากถึง 3 และ 4 วัน ตามลำดับ นอกจากนี้การลดความชื้นด้วยวิธีการตากแดดยังจำเป็นต้องใช้แรงงานในการนำเมล็ดพันธุ์พืชตากแดด กลับกองและเก็บเมล็ดพันธุ์ อย่างไรก็ตามวิธีการนี้มีข้อเสียในช่วงฤดูฝน ซึ่งมีแสงแดดน้อย มีฝนตก ความชื้นสัมพัทธ์

ในอากาศสูง จึงทำให้ไม่สามารถลดความชื้นเมล็ดพันธุ์ให้อยู่ในระดับที่ปลอดภัย (12-14% w.b.) ได้ภายใน 1-2 วัน ส่งผลให้ขบวนการเมตาบอลิซึมของเมล็ดพันธุ์สูง เชื้อราเจริญเติบโต ส่งผลให้เมล็ดพันธุ์เสื่อมคุณภาพ ความแข็งแรงต่ำ และอายุการเก็บรักษาสั้น “จวงจันทร (2534); วันชัย (2542)” ดังนั้นการลดความชื้นด้วยเครื่องอบลดความชื้น อาจเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการลดความชื้นเมล็ดพันธุ์เพื่อช่วยให้เมล็ดพันธุ์ยังคงมีคุณภาพที่ดีและมีความแข็งแรงสูง ในช่วงฤดูฝนหรือในช่วงที่มีแสงแดดไม่เพียงพอ อีกทั้งสภาวะการเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศ (climate changes) ในปัจจุบันที่ค่อนข้างแปรปรวนไม่เป็นที่แน่นอน การลดความชื้นเมล็ดพันธุ์ด้วยเครื่องอบลดความชื้นจึงน่าจะเป็นประโยชน์ต่อการผลิตเมล็ดพันธุ์พืชตระกูลถั่วและส่งผลให้การจัดการเมล็ดพันธุ์เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ

ซึ่งในปัจจุบันเครื่องลดความชื้นแบบปั๊มความร้อนก็ได้มีการเริ่มนำมาใช้งานในการลดความชื้นผลิตภัณฑ์ต่างๆ อย่างแพร่หลาย “Hu (2022)” เช่น อุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ อุตสาหกรรมการผลิตยา อุตสาหกรรมการเกษตร เป็นต้น ซึ่งงานวิจัยที่ผ่านมา “จุฑาศินีและศิวิลักษณ์ (2555)” ได้มีการออกแบบใช้ปั๊มความร้อนลดความชื้นเมล็ดพันธุ์พืชผักพบว่า ที่อุณหภูมิ 50 °C ความชื้นสัมพัทธ์ 44.1% RH มีความสามารถในการระเหยน้ำได้ดีและมีค่าสิ้นเปลืองพลังงานต่ำ และ “Soponronnarit et al. (2000)” ได้ใช้ปั๊มความร้อนสำหรับการลดความชื้นเมล็ดพันธุ์ข้าวร่วมกับตู้อบแบบเมล็ดไหลคลุกเคล้า “Louisiana State University, LSU type” พบว่าที่อุณหภูมิอบแห้งไม่เกิน 43 °C สามารถลดความชื้นเมล็ดจาก 22.22% w.b. ลดลงเหลือ 12% w.b. ซึ่งหลังจากการอบแห้งเมล็ดพันธุ์ข้าวมีความงอกเฉลี่ย 97% และความแข็งแรงเมล็ด 96%

ดังนั้นคณะผู้วิจัยจึงได้มีการออกแบบและพัฒนาเครื่องลดความชื้นระบบปั๊มความร้อน (Heat Pump) หรือแบบลมแห้ง มาใช้งานสำหรับการลดความชื้นเมล็ดพันธุ์ถั่วเหลือง ซึ่งถือว่าเป็นพืชที่มีปริมาณน้ำมันสูง ถ้าหากการลดความชื้นด้วยอุณหภูมิที่สูงเกินไปจะทำให้เมล็ดพันธุ์มีอัตราการหายใจสูง ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้เมล็ดพันธุ์บางส่วนสูญเสียคุณภาพในด้านของความงอกและ

ความแข็งแรง โดยระบบปั๊มความร้อนที่ออกแบบนี้จะปรับสภาพอากาศให้อุ่นหมุมที่เหมาะสมคือไม่เกิน 43 °C และความชื้นสัมพัทธ์ที่ต่ำ (25-35% RH) ซึ่งจะทำให้ได้เมล็ดพันธุ์มีคุณภาพที่ดีและเทคโนโลยีที่ได้จากงานวิจัยนี้จะเป็นการเพิ่มขีดความสามารถแข่งขันให้กับการผลิตเมล็ดพันธุ์พืชของไทย และผลักดันให้ประเทศไทยเป็นศูนย์กลางพันธุ์พืช (Seed Hub) เมล็ดของอาเซียนและเอเชียในอนาคต ตามแผนแม่บทยุทธศาสตร์ศูนย์กลางเมล็ดพันธุ์ พ.ศ. 2558-2567 ในการพัฒนาเครื่องมือในกระบวนการผลิตซึ่งเป็นปัจจัยพื้นฐานสนับสนุนการผลิตเมล็ดพันธุ์พืชตระกูลถั่ว “สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (2559)” ที่กรมวิชาการเกษตรได้รับมอบหมายภารกิจจากกระทรวงเกษตรและสหกรณ์

2 อุปกรณ์และวิธีการ

2.1 การออกแบบระบบปั๊มความร้อนสำหรับการลดความชื้นเมล็ดพันธุ์ถั่วเหลือง

การออกแบบสำหรับการลดความชื้นโดยมีเงื่อนไขคือ เมล็ดพันธุ์ถั่วเหลืองมีความชื้นเริ่มต้น 18-20% w.b. แล้วทำการลดความชื้นให้เหลือ 11% w.b. และสามารถลดความชื้นเมล็ดพันธุ์ได้ 250 kg ต่อ 1 รอบ โดยใช้ระยะเวลาในการลดความชื้นไม่เกิน 10 hr ซึ่งเป็นระยะเวลาที่เหมาะสม “จวงจันทร (2534)” เนื่องจากจะทำให้เมล็ดพันธุ์ยังคงมีคุณภาพที่ดีและมีความแข็งแรงสูง โดยอุณหภูมิห้องอบอยู่ในระหว่าง 35-43°C และความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องอบ 25-35% RH โดยสามารถคำนวณการออกแบบระบบปั๊มความร้อนได้ดังสมการที่ 1 ถึง 5

สมการคำนวณหาน้ำหนักสุดท้ายของเมล็ดพันธุ์ตามความชื้นที่ต้องการ

$$W_f = W_i \left(\frac{100 - M_i}{100 - M_f} \right) \quad (1)$$

เมื่อ W_f คือ น้ำหนักเมล็ดพันธุ์หลังการลดความชื้น (kg)

W_i คือ น้ำหนักเมล็ดพันธุ์ก่อนการลดความชื้น (kg)

M_f คือ ความชื้นเมล็ดพันธุ์ที่ต้องการ (% w.b.)

M_i คือ ความชื้นเมล็ดพันธุ์เริ่มต้น (% w.b.)

สมการคำนวณปริมาณน้ำที่ต้องการระเหยออกจากเมล็ดพันธุ์

$$m_w = W_f - W_i \quad (2)$$

สมการคำนวณอัตราการระเหยปริมาณน้ำที่ออกจากเมล็ดพันธุ์

$$\dot{m}_w = \frac{(m_w)}{t} \quad (3)$$

เมื่อ $\dot{m}_w$ คือ ปริมาณน้ำที่ต้องการระเหยออก (kg_{water})

$\dot{m}_w$ คือ อัตราการระเหยของปริมาณน้ำ (kg_{water} hr⁻¹)

t คือ ระยะเวลาที่ใช้ในการลดความชื้น (hr)

สมการคำนวณปริมาณน้ำที่ใช้ในการลดความชื้น

$$\dot{m}_a = \frac{(\dot{m}_w)}{(w_f - w_i)} \quad (4)$$

$$Q_a = \frac{\dot{m}_a}{\rho} \quad (5)$$

เมื่อ $\dot{m}_a$ คือ อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศที่ใช้ในการลดความชื้น (kg_{dryair} hr⁻¹)

$\dot{m}_w$ คือ อัตราปริมาณน้ำที่ต้องการระเหยออก (kg_{water} hr⁻¹)

w_f คือ อัตราส่วนความชื้นของอากาศหลังการลดความชื้น (kg_{water} kg_{dryair}⁻¹)

w_i คือ อัตราส่วนความชื้นของอากาศก่อนการลดความชื้น (kg_{water} kg_{dryair}⁻¹)

ρ คือ ความหนาแน่นของอากาศ (kg m⁻³)

Q_a คือ ปริมาณน้ำที่ต้องใช้ในการลดความชื้น (m³ hr⁻¹)

แล้วนำอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศที่ต้องใช้ในการลดความชื้นไปใช้คำนวณหาขนาดคอยล์เย็นและคอยล์ร้อนของระบบปั๊มความร้อน ตามสมการที่ 6 และ 7

สมการคำนวณค่าความร้อนจำเพาะ (Specific Heat)

$$Q_s = \dot{m}_a C_p \Delta T \quad (6)$$

สมการคำนวณค่าความร้อนแฝง (Latent Heat)

$$Q_h = \dot{m}_a \Delta h \quad (7)$$

เมื่อ Q_s คือ ค่าพลังงานความร้อนเฉพาะ (kW)

Q_h คือ ค่าพลังงานความร้อนแฝง (kW)

$\dot{m}_a$ คือ อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ (kg_{dryair} hr⁻¹)

C_p คือ ค่าความร้อนจำเพาะของอากาศ (J kg⁻¹ K⁻¹)

ΔT คือ ผลต่างของอุณหภูมิก่อนและหลังผ่านคอยล์ (°C)

Δh คือ ผลต่างของค่าเอนทัลปี (Enthalpy) ของ

อากาศก่อนและหลังผ่านคอยล์ (J kg⁻¹)

ซึ่งขนาดของคอยล์เย็นและคอยล์ร้อนสามารถคำนวณได้จากผลรวมของ ค่าพลังงานความร้อนเพาะและค่าพลังงานความร้อนแฝง โดยที่ผลการคำนวณขนาดของคอยล์เย็นนี้สามารถนำไปกำหนดเลือกใช้ขนาดของคอมเพรสเซอร์

2.2 การสร้างเครื่องต้นแบบสำหรับการลดความชื้นเมล็ดพันธุ์ถั่วเหลือง

การสร้างเครื่องต้นแบบตู้อบลดความชื้นเมล็ดพันธุ์ขนาด $1.8 \times 2.4 \times 2.3 \text{ m}^3$ (กว้างxยาวxสูง) สามารถลดความชื้นเมล็ดพันธุ์ได้ 250 kg โดยผนังห้องลดความชื้นใช้โฟมเป็นฉนวนกันความร้อนเพื่อป้องกันการถ่ายเทความร้อนจากภายในออกไปยังภายนอก และระบบปั๊มความร้อนมีอุปกรณ์ในการทำงานหลักๆ คือ คอมเพรสเซอร์ (Compressor) เอ็กซ์แพนชันวาล์ว (Expansion Valve) คอยล์เย็น (Cooler Unit) คอยล์ร้อน (Condenser) ที่ติดตั้งภายในตู้สำหรับสำหรับลดความชื้นเมล็ดพันธุ์ถั่วเหลือง ดังแสดงแนวคิดการออกแบบการลดความชื้นด้วยระบบปั๊มความร้อนใน Figure 1 คือ ในการออกแบบได้กำหนดให้ อากาศก่อนเข้าคอยล์เย็นมีอุณหภูมิเริ่มต้น (T1) เท่ากับ 38°C และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเท่ากับ 45% RH เมื่ออากาศผ่านคอยล์เย็นแล้ว (T2) จะทำให้อุณหภูมิลดลงเหลือ 18.7°C และเกิดการควบแน่นของอากาศกลั่นตัวออกมาเป็นหยดน้ำทำให้มีความชื้นสัมพัทธ์ 100% RH ซึ่งในสภาวะนี้จะทำให้อุณหภูมิกระเปาะแห้ง กระเปาะเปียก และอุณหภูมิจุดน้ำค้าง (Dew point) มีค่าเท่ากัน และเมื่ออากาศผ่านคอยล์ร้อน (T3) อุณหภูมิจะสูงขึ้นเป็น 43°C และความชื้นสัมพัทธ์จะลดลงเหลือ 25% RH ซึ่งเป็นการดัดแปลงสภาพอากาศให้เป็นลมแห้งก่อนที่จะนำไปลดความชื้นเมล็ดพันธุ์ถั่วเหลือง

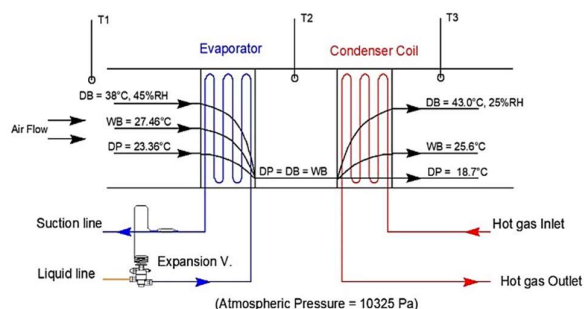


Figure 1 Concept design for temperature and relative humidity control.

ในส่วนของตู้ลดความชื้นได้ออกแบบให้เป็นลดความชื้นแบบระบบปิด (Closed loop system) ดังแสดงใน Figure 2

เนื่องจากการลดความชื้นเมล็ดพันธุ์ถั่วเหลืองนั้น ต้องการอุณหภูมิที่ไม่สูงมาก และต้องการความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่ต่ำ

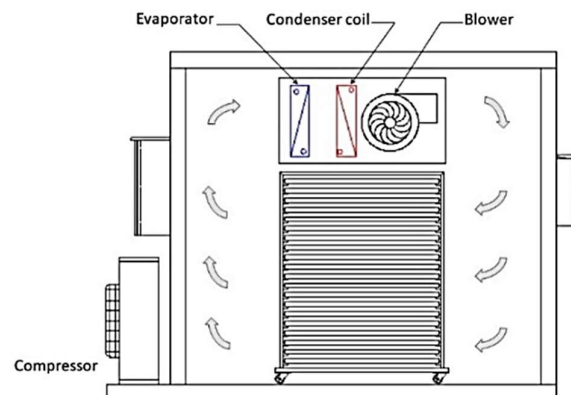


Figure 2 Concept design for chamber of Heat pump dryer.

2.3 ทดสอบการทำงานเบื้องต้น

ทดสอบการทำงานเบื้องต้นในอาคารปฏิบัติการ (Work shop) ซึ่งในขั้นตอนนี้ยังไม่มีกำหนดแรงดันด้านต่ำ (low pressure) และแรงดันด้านสูง (high pressure) ของระบบปั๊มความร้อน เพื่อดูแนวโน้มลักษณะการทำงานเบื้องต้น แล้วใช้ Data logger บันทึกอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ภายในและภายนอกตู้ลดความชื้น เพื่อนำข้อมูลมาวิเคราะห์การทำงานของระบบปั๊มความร้อนในเบื้องต้น

2.4 ทดสอบหาสภาวะการทำงานที่เหมาะสมของระบบปั๊มความร้อน

โดยในการทดสอบนี้ได้กำหนดการตั้งค่าแรงดันด้านสูง (High Pressure) ของระบบปั๊มความร้อนไว้ 3 ระดับ คือ 1.38 MPa 1.72 MPa และ 2.07 MPa ด้วยการตั้งค่าที่ High pressure switch ของระบบปั๊มความร้อน แต่ในส่วนของการตั้งค่าแรงดันด้านต่ำ (Low pressure) นั้นจะมีค่าแปรผันตามแรงดันด้านสูง แล้วทำการทดลองจำนวน 3 ชั่วโมง และบันทึกผลการทดลองดังนี้ 1) ค่าแรงดันด้านต่ำ 2) ค่าแรงดันด้านสูง และ 3) อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ภายในตู้อบ แล้วนำข้อมูลที่ได้จากผลการทดสอบมาวิเคราะห์หาค่าแรงดันด้านสูงที่เหมาะสมในการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องลดความชื้น

2.5 การหาระยะเวลาที่เหมาะสมสำหรับการลดความชื้นเมล็ดพันธุ์ถั่วเหลือง

ทดสอบหาระยะเวลาที่เหมาะสมของเครื่องอบแบบปั๊มความร้อนต่อการลดความชื้นพันธุ์ถั่วเหลือง พันธุ์เชียงใหม่ 60 โดยมี

ความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ย 18% w.b. แล้วทำการลดความชื้นให้เหลือ 11% w.b. จำนวน 250 kg ซึ่งในการลดความชื้นนี้ได้ใส่เมล็ดพันธุ์ถั่วเหลืองลงในถาดจำนวน 20 tray และมีความหนาของเมล็ดพันธุ์ในแต่ละถาดไม่เกิน 3 cm แล้วทำการเก็บตัวเมล็ดพันธุ์จำนวน 10 ถาด ๆ ละ 3 ตัวอย่าง มาชั่งน้ำหนัก ทุก ๆ 1 hr ดังแสดงใน Figure 3 เพื่อนำมาคำนวณหาความชื้นของเมล็ดพันธุ์ถั่วเหลืองระหว่างการลดความชื้น



Figure 3 Sampling of the seeds in the tray for the calculation of the moisture content.

2.6 การประเมินสมรรถนะของเครื่องลดความชื้น

การประเมินสมรรถนะของระบบปั๊มความร้อนที่ได้ออกแบบสำหรับการลดความชื้นเมล็ดพันธุ์ถั่วเหลืองนี้ ได้ทำการทดสอบตามวิธีการประเมินสมรรถนะเครื่องเครื่องลดความชื้นประสิทธิภาพสูงที่ดัดแปลงจากเครื่องปรับอากาศแบบหน้าต่าง “สฤทธิพรและสัมพันธ์ (2548)” โดยมีรายละเอียดการประเมินดังนี้

อัตราการดึงความชื้น (Moisture Condensation Rate, MCR)

$$MCR = m_{a,e}(W_{ei} - W_{eo}) \times 3600 \quad (8)$$

อัตราการดึงความชื้นจำเพาะ (Specific Moisture Extraction Rate, SMER) เป็นค่าที่แสดงปริมาณความชื้นเปลี่ยนแปลงพลังงานในการลดความชื้น

$$SMER = \frac{m_{a,e}(W_{ei} - W_{eo}) \times 3600}{W_{net}} \quad (9)$$

เมื่อ MCR คือ อัตราการดึงความชื้น ($\text{kg}_{\text{water}} \text{ hr}^{-1}$)

SMER คือ อัตราการดึงความชื้นจำเพาะ ($\text{kg}_{\text{water}} \text{ kW}^{-1}$)

$m_{a,e}$ คือ อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศที่ผ่านคอยล์เย็น (kg s^{-1})

W_{ei} คือ อัตราส่วนความชื้นก่อนเข้าอีแวปอเรเตอร์ ($\text{kg}_{\text{water}} \text{ kg}_{\text{dry air}}^{-1}$)

W_{eo} คือ อัตราส่วนความชื้นที่ออกจากอีแวปอเรเตอร์ ($\text{kg}_{\text{water}} \text{ kg}_{\text{dry air}}^{-1}$)

W_{net} คือ งานสุทธิที่ป้อนให้กับระบบ (kWh)

2.7 วิเคราะห์ต้นทุนการใช้งานปั๊มความร้อนสำหรับการลดความชื้นเมล็ดพันธุ์ถั่วเหลือง

การประเมินต้นทุนการลดความชื้นเมล็ดพันธุ์ถั่วเหลืองด้วยตู้อบแบบปั๊มความร้อนนี้ จะมีต้นทุนคงที่และต้นทุนแปรผัน ซึ่งต้นทุนคงที่คือ เครื่องจักรที่มีราคา 500,000 Baht ซึ่งมีอายุการใช้งาน 10 years และต้นทุนแปรผันซึ่งได้แก่ ค่าพลังงานไฟฟ้าและค่าซ่อมบำรุงประจำปี แล้วนำต้นทุนทั้งหมดมาเปรียบเทียบกับกำลังการผลิตคือ ปริมาณเมล็ดพันธุ์ที่ลดความชื้นใน 1 year เพื่อนำมาประเมินค่าใช้จ่ายสำหรับการลดความชื้นเมล็ดพันธุ์ถั่วเหลืองต่อ 1 kg

3 ผลและวิจารณ์

3.1 ผลการออกแบบระบบปั๊มความร้อน

จากเงื่อนไขสำหรับการลดความชื้นคือ เมล็ดพันธุ์มีความชื้นเริ่มต้น 18-20% w.b. แล้วทำการลดความชื้นให้เหลือ 11% w.b. และสามารถลดความชื้นเมล็ดพันธุ์ได้ 250 kg โดยกำหนดให้ใช้ระยะเวลาในการลดความชื้นไม่เกิน 10 hr เนื่องจากหากใช้เวลามากกว่านี้จะส่งผลต่อคุณภาพและเปอร์เซ็นต์ความงอกของเมล็ดพันธุ์ โดยอุณหภูมิห้องอบอยู่ในระหว่าง 35-43°C และความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องอบ 25-35% RH และเงื่อนไขสภาพแวดล้อมอื่นๆ ดังแสดงใน Table 1

Table 1 Conditioning for heat pump system design

Conditioning for heat pump drying system design			
1	Air Temperature	43	°C
2	Relative humidity	35	% RH
3	Soybean	250	kg
4	Drying time	10	hr
5	Initial moisture content of soybean	18	% w.b.
6	final moisture content of soybean	11	% w.b.
7	Air Temperature after drying	38	°C
8	Relative humidity after drying	45	% RH
9	Ambient temperature	30	°C
10	Ambient relative humidity	55	% RH

และจากการคำนวณโดยใช้คุณสมบัติของอากาศตามแผนภูมิ Psychometrics Chart ทำให้ได้ผลการคำนวณดังแสดงใน Table 2 ซึ่งอัตราการการไหลเชิงมวลของอากาศเท่ากับ $799.31 \text{ kg}_{\text{air}} \text{ hr}^{-1}$ หรือคิดเป็นปริมาณลมที่ต้องการใช้สำหรับการลดความชื้นเท่ากับ $707.98 \text{ m}^3 \text{ hr}^{-1}$

Table 2 The result of Air flow calculation for soybean drying by heat pump dryer system.

Description	Result	unit
Initial wight of soybean	250	kg
Final wight of soybean	230.34	kg
Initial moisture content	18	% w.b.
Final moisture content	11	% w.b.
Drying temperature	43	°C
Relative humidity for drying	35	% RH
Humidity ratio before drying (w_p)	0.0125	$\text{kg}_{\text{water}} \text{ kg}_{\text{dryair}}^{-1}$
Air density (ρ)	1.129	Kg m^{-3}
Air temperature after drying	38	°C
Relative humidity after drying	45	% RH
Humidity ratio after drying (w_p)	0.0166	$\text{kg}_{\text{water}} \text{ kg}_{\text{dryair}}^{-1}$
Ambient temperature	30	°C
Ambient relative humidity	70	% RH
Drying time	10	hr
Water evaporation of soybean	19.66	kg (water)
Evaporation rate of soybean	3.28	$\text{kg}_{\text{water}} \text{ hr}^{-1}$
Mass flow rate of air	799.31	$\text{kg}_{\text{air}} \text{ hr}^{-1}$
Air flow rate for drying	707.98	$\text{m}^3 \text{ hr}^{-1}$

จากผลการคำนวณอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศที่ใช้สำหรับการลดความชื้นต้องไม่น้อยกว่า $799.31 \text{ kg}_{\text{air}} \text{ hr}^{-1}$ เมื่อนำมาคำนวณตามสมการค่าร้อนจำเพาะและค่าความร้อนแฝงโดยใช้ค่าคุณสมบัติของอากาศได้จาก Psychrometric chart ดังแสดงใน Figure 4 ซึ่งได้จะขนาดของคอยล์เย็นและคอยล์ร้อนของระบบปั๊มความร้อนเมื่อเพิ่มค่า Safety factor 20% จะเท่ากับ 14.3 kW และ 17.3 kW ตามลำดับ ดังแสดงใน Table 3

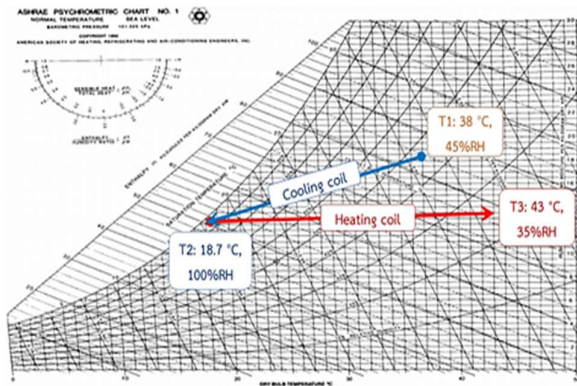


Figure 4 Psychrometrics Chart for cooling and heating coil calculations. (ASHRAE, 1998)

Table 3 The result of calculation of cooling and heating coil for heat pump drying system.

Description	Cooling coil	Heating coil
Air inlet Temp (°C)	38	18.7
Air inlet Humidity (%RH)	45	100
Air Outlet Temp (°C)	18.7	43
Air Outlet Humidity (%RH)	100	35
Specific heat (kW)	4.4	5.6
Latent heat (kW)	7.5	8.8
Safety factor (%)	20	20
Coil capacity (kW)	14.3	17.3

ซึ่งจากผลการคำนวณหาขนาดของคอยล์เย็นจะพบว่า มีขนาดเท่ากับ 14.3 kW ซึ่งสามารถนำค่านี้ไปเลือกใช้ขนาดของคอมเพรสเซอร์ในระบบปั๊มความร้อนได้ โดยในงานวิจัยนี้ได้เลือกคอมเพรสเซอร์ขนาด 7 hp ที่มีความสามารถในการทำความเย็นได้ไม่น้อยกว่า 14.3 kW

3.2 ผลการสร้างต้นแบบระบบปั๊มความร้อน

ผลการสร้างเครื่องต้นแบบในส่วนเครื่องทำความเย็นสำหรับระบบปั๊มความร้อน จากการสร้างตู้ลดความชื้นขนาด 1.8x2.4x2.3 m³ (กว้างxยาวxสูง) ดังแสดงใน Figure 5 จึงได้ดำเนินการสร้างระบบปั๊มความร้อนซึ่งระบบที่ออกแบบเป็นระบบแบบ (Hydro Heat pump) คือ การให้คอมเพรสเซอร์ทำน้ำเย็นก่อน โดยใช้ Shell and Tube เป็นตัวแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างสารทำความเย็นกับน้ำแล้วใช้น้ำส่งไปยังคอยล์เย็นอีก

ทีหนึ่ง แทนการฉีดสารทำความเย็นผ่านเอ็กแพนชันวาล์ว (Direct refrigerant cooling) เข้าไปในคอยล์เย็นโดยตรง ซึ่งเหตุผลที่ออกแบบให้ระบบปั๊มความร้อนใช้น้ำเย็นเพื่อป้องกันไม่ให้แรงดันด้านต่ำของระบบสูงเกินไป ซึ่งจะส่งผลให้แรงดันด้านสูงสูงขึ้นตามไปด้วย และอาจทำให้คอมเพรสเซอร์ทำงานหนักจนเกินไป (Over load) ดังแสดงแผนภาพวงจรระบบใน Figure 6 และส่วนประกอบของระบบปั๊มความร้อนแบบ Hydro Heat pump ดังแสดงใน Figure 7



Figure 5 Prototype of heat pump system for soybean drying.

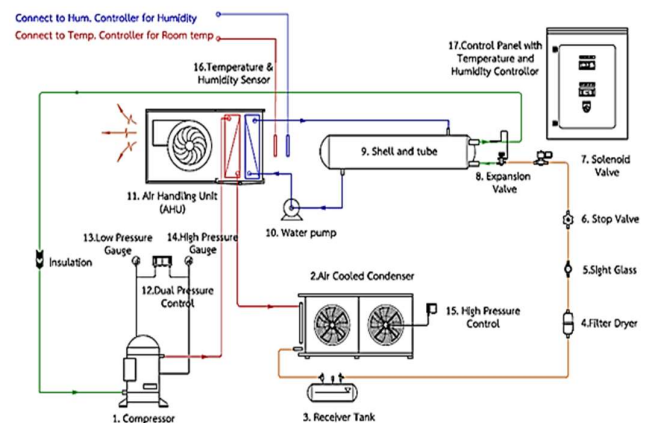


Figure 6 Piping diagram of hydro heat pump system.



Figure 7 Hydro heat pump system component.

3.3 ผลการทดสอบการทำงานเบื้องต้น

หลังจากที่ได้ทำการสร้างเครื่องต้นแบบเรียบร้อยแล้ว จึงได้ดำเนินการทดสอบการทำงานของเครื่องต้นแบบเบื้องต้น โดยบันทึกอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ภายในและภายนอกตู้ลดความชื้น ซึ่งผลการทดสอบการบันทึกอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ดังแสดง Table 4 ซึ่งพบว่าตู้ลดความชื้นแบบปั๊มความร้อนนี้สามารถควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 36.7 ± 1.04 °C และ $35.20 \pm 0.69\%$ RH ตามลำดับ ซึ่งเห็นได้ชัดเลยว่า ภายนอกมีอุณหภูมิเฉลี่ย 32.71 ± 1.09 °C และมีค่าความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยสูงถึง $70.99 \pm 3.6\%$ RH ดังแสดง Figure 8 ซึ่งผลการทดสอบนี้บ่งชี้ให้เห็นว่าระบบปั๊มความร้อนสามารถควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์สำหรับการลดความชื้นเมล็ดพันธุ์ข้าวเหลืองได้ตามคำแนะนำการลดความชื้นเมล็ดพันธุ์คือ อุณหภูมิที่ใช้ลดความชื้นเมล็ดไม่ควรเกิน 43 °C และความชื้นสัมพัทธ์ต้องต่ำกว่า 40% RH “ASHRAE (1999)” และจากผลการออกแบบตู้อบแบบปั๊มความร้อนนี้ให้เป็นการไหลเวียนของอากาศแบบระบบปิด (Closed loop system) ทำให้ผลของอุณหภูมิภายในตู้อบไม่สูงเกินไปและได้ค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่ต่ำ “Hu (2022)” แต่อย่างไรก็ตาม ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยภายในห้องลดความชื้นยังมีค่าที่ต่ำกว่า 43 °C อยู่ถึง 6 °C จึงจำเป็นต้องทำการทดสอบหาค่าแรงดันสารทำความเย็นของระบบปั๊มความร้อนที่เหมาะสม เพื่อให้ภายในห้องลดความชื้นมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น

Table 4 The result of temperature and humidity of heat pump drying system. (Pre-testing)

Inside drying chamber		Ambient	
Temperature (°C)	Humidity (%) RH	Temperature (°C)	Humidity (%) RH
$36.7 \pm 1.04^*$	$35.20 \pm 0.69^*$	$32.71 \pm 1.09^*$	$70.99 \pm 3.6^*$

*average $\pm$ SD

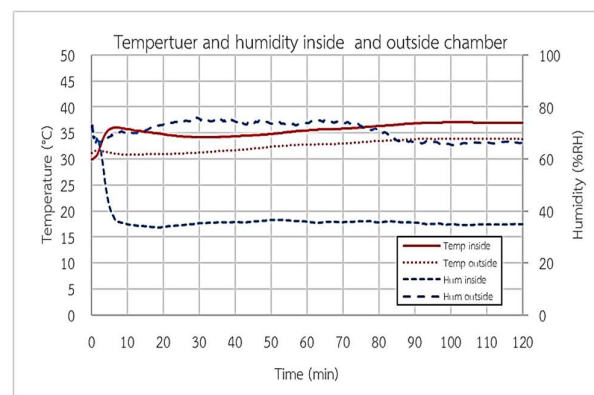


Figure 8 Temperature and humidity inside and outside of heat pump drying system (Pre-testing).

3.4 ผลการทดสอบหาสภาวะการทำงานที่เหมาะสม

การทดสอบหาสภาวะการทำงานนี้ได้กำหนดตั้งค่าแรงดันด้านสูง (High Pressure) ของระบบทำความเย็นไว้ 3 ระดับ คือ 1.38 MPa 1.72 MPa และ 2.06 MPa แล้วทำการบันทึกผลการทดลองดังนี้ 1) ค่าแรงดันด้านต่ำ (Low pressure) 2) อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ภายในตู้อบ โดยจากผลการทดสอบพบว่า ที่แรงดันด้านสูง 1.38 MPa 1.72 MPa และ 2.06 MPa แรงดันด้านต่ำจะมีค่าแปรผันตามแรงดันด้านสูงซึ่งเท่ากับ 0.41 0.48 และ 0.55 MPa ตามลำดับ มีอุณหภูมิภายในห้องลดความชื้นเฉลี่ย 33 ± 1.02 °C, 38 ± 0.98 °C และ 44 ± 1.36 °C ตามลำดับ มีความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเฉลี่ย $39 \pm 2.9\%$ RH, $36 \pm 2.3\%$ RH และ $32 \pm 3.1\%$ RH ตามลำดับ ดังแสดงใน Table 4 ซึ่งจากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า ที่แรงดันด้านสูงเท่ากับ 1.72 MPa เป็นแรงดันสภาวะการทำงานที่เหมาะสมของระบบปั๊มความร้อนสำหรับการลดความชื้นเมล็ดพันธุ์ข้าวเหลือง โดยมีอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ภายในตู้อบเท่ากับ 38 ± 0.98 °C และ $36 \pm 2.3\%$ RH ตามลำดับ ดังแสดงใน Figure 9 ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการลดความชื้นเมล็ดพันธุ์ข้าวเหลืองที่ต้องไม่เกิน 43 °C แต่อย่างไรก็ตาม หากต้องการอุณหภูมิที่สูงกว่านี้ อาจจะต้องปรับตั้งค่า High pressure เพิ่มขึ้นจาก 1.72 MPa เป็น 1.90

MPa แต่เนื่องด้วยในงานวิจัยนี้มีข้อจำกัดเรื่องการปรับตั้งค่าที่ High pressure switch จึงไม่สามารถปรับตั้งค่าที่ 1.90 MPa ได้ ซึ่งในอนาคตอาจจะปรับเปลี่ยนการตั้งค่า High pressure ด้วยการติดตั้งชุดควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์พัดลมคอนเดนเซอร์ (Fan speed motor controller) เข้าไปทดแทน

Table 5 The result of temperature and humidity of heat pump drying system at high pressure (1.38, 1.72 and 2.07 MPa)

High pressure (MPa)	Low pressure (MPa)	Temperature (°C)	Humidity (%RH)
1.38	0.41	33±1.02	39±2.9
1.72	0.48	38±0.98	36±2.3
2.07	0.55	44±1.36	32±3.1

*average±SD

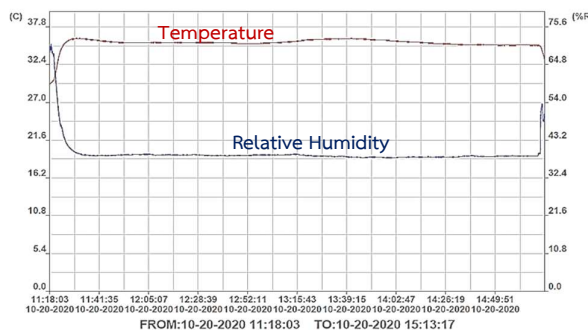


Figure 9 The result of temperature and humidity at a high pressure 1.72 MPa.

3.5 ผลการทดสอบหาระยะเวลาที่เหมาะสมสำหรับการลดความชื้นเมล็ดพันธุ์ถั่วเหลือง

เมื่อได้สภาวะการทำงานที่เหมาะสมของระบบปั๊มความร้อน ด้วยการตั้งค่าแรงดันด้านสูงไว้เท่ากับ 1.72 MPa จึงได้ทำการทดสอบหาระยะเวลาที่เหมาะสมของเครื่องอบแบบปั๊มความร้อนต่อการลดความชื้นพันธุ์ถั่วเหลือง โดยในการทดสอบ เมล็ดพันธุ์ถั่วเหลืองมีความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ย 18% w.b. จำนวน 250 kg จากผลการทดสอบ พบว่า การลดความชื้นเมล็ดพันธุ์ถั่วเหลืองให้ลดลงเหลือ 11, 10 และ 9% w.b. ใช้ระยะเวลาในการลดความชื้นเท่ากับ 5, 8 และ 10 hr ตามลำดับ ดังแสดงใน Figure 10 โดยมีอัตราการดึงความชื้นเฉลี่ย 1.22% w.b. hr⁻¹ ซึ่งผลการทดสอบได้สอดคล้องกับการอบแห้งข้าวแตนเปียกด้วยปั๊มความร้อน “สัมพันธและศิริชัย (2548)” คือ อัตราการลดความชื้นในช่วงแรกจะมีค่าสูงและค่อย ๆ ลดลงตามระยะเวลาการอบแห้ง

ซึ่งจากผลการลดความชื้นเมล็ดพันธุ์ถั่วเหลืองให้ลดลงเหลือ 11% w.b. ก็เพียงพอสำหรับการเก็บรักษาเมล็ดพันธุ์ไว้ได้นานถึง 6-8 เดือน “จวงจันทร (2534)”

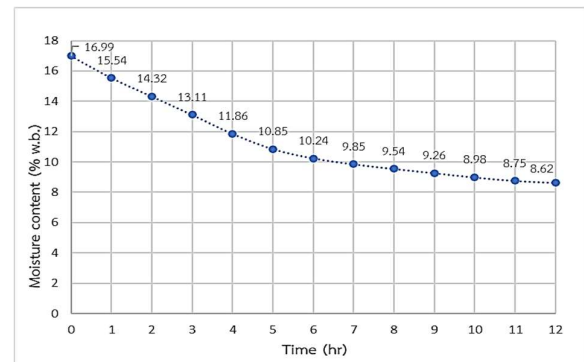


Figure 10 Moisture content of soybean and drying time.

3.6 ผลการประเมินสมรรถนะของเครื่องลดความชื้น

การประเมินสมรรถนะของเครื่องลดความชื้นปั๊มความร้อน สำหรับการอบแห้งเมล็ดพันธุ์ถั่วเหลืองนี้ พบว่า อัตราการดึงความชื้น (MCR) มีค่าเฉลี่ย 3.17 kg_{water} hr⁻¹ โดยใช้ค่าพลังงานไฟฟ้าเฉลี่ย 9.87 kWh ทำให้มีอัตราการดึงความชื้นจำเพาะ (SMER) ซึ่งเป็นค่าที่แสดงปริมาณความสิ้นเปลืองพลังงานในการลดความชื้นมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.32 kg_{water} kWh ซึ่งเป็นค่าที่แสดงให้เห็นถึงอัตราการใช้พลังงานของระบบปั๊มความร้อน และค่าใช้จ่ายสำหรับการลดความชื้นเมล็ดพันธุ์ถั่วเหลืองซึ่งจะนำไปคิดคำนวณต้นทุนในขั้นตอนต่อไป

3.7 ผลการวิเคราะห์ต้นทุนการใช้งานระบบปั๊มความร้อนสำหรับการลดความชื้นเมล็ดพันธุ์ถั่วเหลือง

การลดความชื้นเมล็ดพันธุ์ถั่วเหลืองด้วยตู้อบแบบปั๊มความร้อน เมื่อนำมาทำการวิเคราะห์ต้นทุนการใช้งาน โดยสามารถแยกเป็นต้นทุนคงที่และต้นทุนแปรผันดังนี้

1. ต้นทุนคงที่หมายถึงต้นทุนที่ตายตัวคือ ราคาของเครื่องจักรจะประกอบด้วย ระบบทำความเย็นสำหรับปั๊มความร้อน ผนังห้องเย็น ชุดควบคุมการทำงานแบบอัตโนมัติ รวมถึงค่าใช้จ่ายในการประกอบและติดตั้งเครื่องจักร ซึ่งราคาคำนวณคงที่โดยรวมแล้วประมาณ 500,000 Baht และมีอายุการใช้งาน 10 years

2. ต้นทุนแปรผันหมายถึงต้นทุนที่เปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณการใช้งานคือ ค่าพลังงานไฟฟ้าและค่าซ่อมบำรุงเพื่อดูแลรักษาเครื่องจักร ซึ่งต้นทุนห้องเย็นสำหรับเก็บรักษาเมล็ดพันธุ์พืชนี้ใช้พลังงานไฟฟ้าเฉลี่ย 9.87 kWh⁻¹ คิดค่าไฟฟ้าเฉลี่ยประมาณ 3.5 Baht kWh⁻¹ ซึ่งสามารถลดความชื้นเมล็ดพันธุ์ถั่วเหลืองได้ 250

kg และใช้เวลา 5 hr คิดเป็นค่าพลังงานไฟฟ้าเฉลี่ย 0.91 Baht kg^{-1} และค่าซ่อมบำรุงประจำปีเฉลี่ยประมาณ 5,000 Baht year^{-1}

เมื่อประเมินความคุ้มค่าและต้นทุนการลดความชื้นเมล็ดพันธุ์ถั่วเหลืองด้วยตู้อบแบบปั๊มความร้อนทั้งต้นทุนคงที่และต้นทุนแปรผัน เพื่อใช้ในการพิจารณาประกอบการตัดสินใจเลือกใช้งานตู้อบแบบปั๊มความร้อนพบว่า ที่กำลังการผลิต 20, 30, 40 และ 50 tons year^{-1} มีต้นทุนการใช้งานตู้อบแบบปั๊มความร้อนสำหรับการลดความชื้นเมล็ดพันธุ์ถั่วเหลืองเท่ากับ 3.65, 2.73, 2.28 และ 2 Baht kg^{-1} ตามลำดับ ดังแสดงใน Figure 11 อย่างไรก็ตามต้นทุนเฉลี่ยการใช้งานจะลดลงตามปริมาณการผลิตที่เพิ่มขึ้น

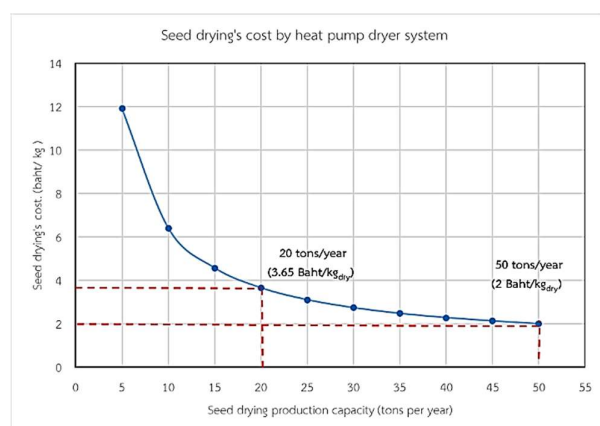


Figure 11 Cost analysis of heat pump's prototype for soybean seeds drying.

4 สรุป

การออกแบบและสร้างต้นแบบเครื่องอบแบบปั๊มความร้อนสำหรับลดความชื้นเมล็ดพันธุ์ถั่วเหลืองในปริมาณ 250 kg มีขนาด $1.8 \times 2.4 \times 2.3 \text{ m}^3$ (กว้างxยาวxสูง) ใช้คอมเพรสเซอร์ขนาด 7 hp มีความสามารถในการทำความเย็น 14.23 kW (R-22) โดยการตั้งค่าแรงดันน้ำยาตัวสูงของระบบปั๊มความร้อนที่ 1.72 MPa สามารถควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย $38 \pm 0.98^\circ\text{C}$ และ $36 \pm 2.3\% \text{ RH}$ ตามลำดับ ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการลดความชื้นเมล็ดพันธุ์ถั่วเหลือง และจากผลการทดสอบประเมินสมรรถนะของเครื่องลดความชื้น โดยทำการลดความชื้นเมล็ดพันธุ์ถั่วเหลืองจำนวน 250 kg จากความชื้นเริ่มต้น 18% w.b. ให้ลดลงเหลือ 11% w.b. โดยใช้ระยะเวลา 5 hr และจากการวิเคราะห์ต้นทุนเพื่อใช้ประกอบการตัดสินใจซื้อเครื่องจักรมาใช้งานพบว่า ที่กำลังการผลิต 20, 30, 40 และ 50 tons year^{-1} มีต้นทุนการใช้งานตู้อบแบบปั๊มความร้อนสำหรับการลดความชื้นเมล็ดพันธุ์ถั่วเหลืองเฉลี่ยเท่ากับ 3.65, 2.73,

2.28 และ 2 Baht kg^{-1} ตามลำดับ จากผลการวิจัยเครื่องอบแบบปั๊มความร้อนสำหรับลดความชื้นเมล็ดพันธุ์ถั่วเหลืองนี้ สามารถสร้างอุณหภูมิภายในห้องอบได้สูงสุด 46°C หากต้องการนำเครื่องต้นแบบนี้ไปใช้งานอบผลิตภัณฑ์อื่นๆ ที่ต้องการอุณหภูมิสูงกว่าจำเป็นต้องติดตั้งฮีตเตอร์ไฟฟ้าเพิ่มเข้าไป เพื่อสร้างอุณหภูมิให้สูงขึ้นแต่ไม่ควรเกิน 60°C เนื่องจากจะทำให้การทำงานของระบบปั๊มความร้อน(คอมเพรสเซอร์) เกิดสภาวะโอเวอร์โหลดและอาจส่งผลให้ระบบการทำงานเกิดความเสียหายได้

5 กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณผู้อำนวยการและเจ้าหน้าที่กลุ่มวิจัยของศูนย์วิจัยและพัฒนาเมล็ดพันธุ์พืชพิษณุโลกที่สนับสนุนการปฏิบัติงานให้เป็นไปด้วยความเรียบร้อยและบรรลุตามเป้าหมาย และขอขอบคุณ คุณณรงค์ ภูธนะพิบูลย์ กรรมการผู้จัดการ บริษัท เทอร์โมคูล ชัพพลายแอนด์เซอร์วิส จำกัด ที่ได้สนับสนุนอุปกรณ์ระบบเครื่องทำความเย็นสำหรับวิจัยและพัฒนาเครื่องอบแบบปั๊มความร้อนสำหรับลดความชื้นเมล็ดพันธุ์ถั่วเหลือง

6 เอกสารอ้างอิง

- จุฑาธิณี พรพุทธรศรี, ศิวลักษณ์ ปฐวีรัตน์. 2555. การออกแบบและทดสอบเครื่องอบแห้งเมล็ดพันธุ์ฝักโดยใช้ปั๊มความร้อน. การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 13 ประจำปี 2555, 556-570. ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 4-5 เมษายน 2555, เชียงใหม่.
- จวงจันทร ดวงพัตรา. 2534. เทคโนโลยีเมล็ดพันธุ์. ภาควิชาพืชไร่นา คณะเกษตรมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- บุญมี ศิริ, บุญจมาภรณ์ สุทธิ, โสภณวงศ์แก้ว. 2546. วิธีการลดความชื้นของเมล็ดพันธุ์ถั่วลิสง. วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร 34 (4-6 พิเศษ), 187-189.
- วันชัย จันทรประเสริฐ. 2542. เทคโนโลยีเมล็ดพันธุ์พืชไร่. ภาควิชาพืชไร่นา คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- สฤทธิพร วิทย์ผดุง, สัมพันธ์ ไชยเทพ. 2548. การออกแบบเครื่องลดความชื้นประสิทธิภาพสูงที่ดัดแปลงจากเครื่องปรับอากาศแบบหน้าต่าง. การประชุมวิชาการมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 43 ประจำปี 2548 สาขาวิศวกรรม, 239-246. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน. 1-4 กุมภาพันธ์ 2548, จตุจักร, กรุงเทพฯ.
- สัมพันธ์ ไชยเทพ, ศิริชัย สายอ้าย. 2548. การพัฒนาเครื่องอบแห้งข้าวแตนโดยใช้ปั๊มความร้อนลดความชื้น. การสัมมนา

ทางวิชาการวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยว/หลังการผลิต
แห่งชาติ ครั้งที่ 3. (หน้า 31). มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระ
จอมเกล้าธนบุรี; มหาวิทยาลัยเชียงใหม่; มหาวิทยาลัย
เกษตรศาสตร์; มหาวิทยาลัยขอนแก่น; สำนักงานกองทุน
สนับสนุนการวิจัย

สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ. 2559.

แผนแม่บทยุทธศาสตร์การเป็นศูนย์กลางเมล็ดพันธุ์.

ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and
Air Conditioning Engineers). 1998. ASHRAE
Fundamentals Handbook (SI unit). Chapter 6
Psychrometric chart.

ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and
Air Conditioning Engineers). 1999. HVAC Applications
Handbook. American society of heating, refrigerating
and air-conditioning engineers.

Soponronnarit, S., Wetchacama, S., Kanphukdee, T.
2000. Seed drying using heat pump. International
Energy Journal. 1(2): 97-102.

Zicheng Hu, Yang Li, Hany S. El-Mesery, Dixi Yin, Hao Qin
, Fenghua Ge. 2022. Design of new heat pump dryer
system: A case study in drying characteristics of kelp
knots. Case Studies in Thermal Engineering Journal.
32. (16).