การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 21
17-19 ตุลาคม 2550 จังหวัดชลบุรี

อิทธิพลของอัตราการไหลของลมร้อนที่มีผลต่อสมรรถนะของเครื่องอบแห้งปั๊มความร้อนสำหรับอุตสาหกรรมขนาดเล็ก

Effect of Hot Air Flow Rate on the Performance of a Heat Hump Dryer for Small Industry

ศิวะ อัจฉริยวิริยะ* และ เรวัฒ คำวัน
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ จ.เชียงใหม่ 50200
โทร 0-66-5394-4146 โทรสาร 0-66-5394-4145 *อีเมล์ siva@dome.eng.cmu.ac.th

Siva Achariyaviriya* and Rawat Kumwan
Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chiang Mai University, Chiang Mai, 50200,
Thailand, Tel: 0-66-5394-4146, Fax: 0-66-5394-4145, *E-mail: siva@dome.eng.cmu.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของอัตราการไหลของลมร้อนที่มีผลต่อสมรรถนะและประสิทธิภาพการใช้พลังงานของเครื่องอบแห้งปั๊มความร้อนที่มีเครื่องอัดไอชนิดความเร็วรอบเปลี่ยนแปลง ตามภาระความร้อนที่ต้องการใช้ในการอบแห้งนอกจากนี้ยังศึกษาถึงผลของความเร็วรอบเริ่มต้นของเครื่องอัดไอที่มีต่อสมรรถนะและประสิทธิ ภาพการใช้พลังงาน การศึกษานี้ดำเนินการทดลองโดยใช้ใยผ้าอัดแผ่นเป็นวัสดุทดสอบ กำหนดเงื่อนไขของการทำงานของตัวแปรอื่นๆที่ไม่ศึกษาให้คงเดิมทุกการทดลอง เงื่อนไขที่กำหนดมีดังนี้คือน้ำหนัก เริ่มต้นของวัสดุทดสอบ 42.7 kg ความชื้นเริ่มต้น 310% มาตรฐานแห้ง อุณหภูมิลมร้อนก่อนเข้าห้องอบแห้ง 60°C และสัดส่วนอากาศไหลข้ามเครื่องทำระเหย 70% การทดลองเป็นระบบปิด โดยทำการอบใยผ้าอัดแผ่นชุบน้ำจนกระทั่งมีความชื้นสุดท้ายประมาณ 10–15%มาตรฐานแห้ง โดยมีตัวแปรที่ศึกษาคือ อัตราการไหลของลมร้อนจำเพาะเปลี่ยนแปลงในช่วง 100-200 $kg_{dry\ air}$/h-$kg_{dry\text{-}product}$ และความเร็วรอบเครื่องอัดไอเริ่มต้นเปลี่ยนแปลงในช่วง 1,000-2,000 รอบ/นาที จากวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อหาสมรรถนะของเครื่องอบแห้งปั๊มความร้อน(อัตราการดึงความชื้นจำเพาะเฉลี่ย) และประสิทธิภาพการใช้พลังงานของเครื่องอบแห้งปั๊มความร้อน(สัมประสิทธิ์สมรรถนะปั๊มความร้อนเฉลี่ย) พบว่าถ้าอัตราการไหลลมร้อนจำเพาะลดลงจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะลดลง สำหรับการศึกษาความเร็วรอบของเครื่องอัดไอเริ่มต้นพบว่า ถ้าความเร็วรอบเครื่องอัดไอเริ่มต้นลดลงจะทำให้ค่าอัตราการดึงความชื้นจำเพาะเฉลี่ยและค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ

Abstract

The purposes of this research were to study the effects of specific air flow rate (SAF) on the performance and energy efficiency of a vary speed drive heat pump dryer and also to study the effect of the startup compressor speed. The experiments were carried out by using material weight of 42.7 kg, the initial moisture content of 310.6 % dry basis, the inlet drying air temperature of 60°C, and the fraction of evaporator by-pass air of 70%. In each experiment, the testing materials were dried until the final moisture content was about 10-15% dry basis. Specific air flow rates were vary from 100-200 $kg_{dry\ air}$/h-$kg_{dry\text{-}product}$ and startup compressor speeds were vary from 1,000-2,000 rev/min. The criteria for evaluation of the performance and energy efficiency were the average specific moisture extraction rate ($SMER_{avr}$) and average coefficient of performance (COP_{avr}), respectively. It can be concluded that the specific air flow rate decreases with decreasing average coefficient of performance. For the effect of startup compressor speeds, the startup compressor speeds decreases with increasing average specific moisture extraction rate, and average coefficient of performance significantly.

1. บทนำ

การอบแห้งอาหารและ/หรือวัสดุเกษตรด้วยลมร้อนจะใช้อากาศเป็นตัวกลางในการถ่ายเทความร้อนจากอากาศไปยังวัสดุ แล้วความชื้นจากวัสดุก็ถ่ายเทให้กับอากาศ ซึ่งเครื่องอบแห้งลมร้อนที่ใช้ทั่วไปจะอุ่นอากาศโดยมีแหล่งความร้อนจากขดลวดความร้อนหรือความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง เช่น ก๊าซแอลพีจี น้ำมันเตา ถ่านหิน หรือเศษวัสดุเกษตรต่างๆ เป็นต้น การอบแห้งวัสดุเป็นกระบวนการที่ใช้พลังงานสูง ดังนั้นสิ่งต้องคำนึงถึงคือความสิ้นเปลืองพลังงาน เวลาการอบแห้ง และคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่อาจมีสีหรือกลิ่นสิ่งแปลกปลอมเกิดขึ้น เครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนเป็นอีกรูปแบบหนึ่งของเครื่องอบแห้งลมร้อนที่ได้มีการพัฒนาขึ้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงาน การอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนสามารถดำเนินการอบแห้งวัสดุแบบระบบปิด สามารถอบแห้งวัสดุได้ที่อุณหภูมิลมร้อน 50-60^{o}C ด้วยความชื้นสัมพัทธ์ของลมร้อนที่ต่ำ ไม่ต้องมีการระบายลมร้อนหลังการอบแห้งบางส่วนหรือทั้งหมดออกสู่ภายนอก ทำให้คุณภาพผลิตภัณฑ์ดีทั้งสีและกลิ่น อีกทั้งยังใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ

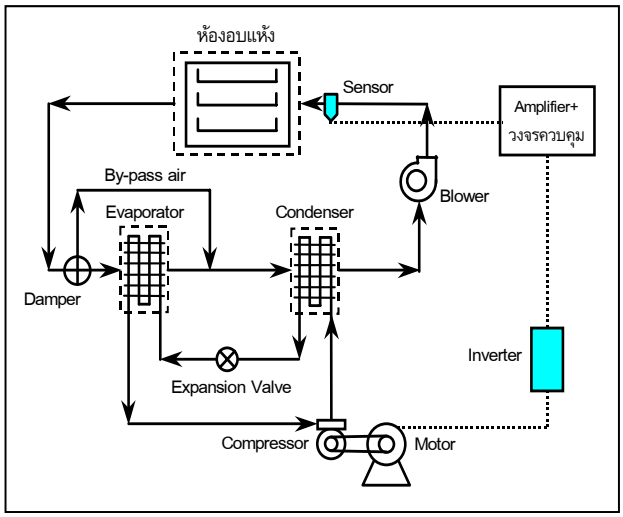
จากการศึกษางานวิจัยและการพัฒนาระบบของเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนมีดังนี้ Soponronnarit et al. [1] ได้ออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งแบบใช้ปั๊มความร้อนระดับอุตสาหกรรม ใช้ R-22 เป็นสารทำงานในระบบและมีเครื่องควบแน่นสองตัว เครื่องควบแน่นตัวนอกทำหน้าที่ระบายความร้อนส่วนเกินของระบบ ทั้งนี้ Tia et al. [2] ได้ใช้เครื่องนี้อบแห้งเนื้อสับปะรดจำนวน 90 kg พบว่า ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ 4.79 MJ/kg และค่า COP_{hp} เฉลี่ยเท่ากับ 4.92 ไพโรจน์ จันทร์แก้ว[3] และอานนท์ และคณะ[4] ได้ออกแบบเครื่องอบแห้งเนื้อลำไยแบบใช้ปั๊มความร้อนระดับห้องปฏิบัติการและสำหรับอุตสาหกรรมขนาดเล็กตามลำดับ ซึ่งเครื่องอบแห้งแบบใช้ปั๊มความร้อนสำหรับอุตสาหกรรมขนาดเล็ก สามารถบรรจุเนื้อลำไยสดได้ 100 kg ห้องอบแห้งมีขนาด 0.8 x 1.5 x 0.8 m^3 และลมร้อนไหลเข้าห้องอบแห้งในแนวขนานกับชั้นวางวัสดุ ในระบบปั๊มความร้อนใช้เครื่องควบแน่นและเครื่องทำระเหยขนาดเท่ากับ 12.5 kW และ 10.5 kW ตามลำดับ เครื่องอัดไอมีกำลังสูงสุดเท่ากับ 2.2 kW และใช้ R-134a เป็นสารทำงาน การควบคุมอุณหภูมิลมร้อนที่เข้าห้องอบแห้งโดยการปรับเปลี่ยนอัตราการไหลของสารทำความเย็นให้เหมาะสมกับภาระความร้อนที่ใช้ที่ห้องอบแห้ง โดยใช้อินเวอร์เตอร์ปรับความเร็วรอบของมอเตอร์ขับเครื่องอัดไอ ทั้งนี้ในการพิจารณาเลือกสารทำงานสำหรับเครื่องอบแห้งแบบใช้ปั๊มความร้อนที่มีอุณหภูมิควบแน่นต่ำและปานกลาง ควรเลือกใช้สารทำงาน R-22, R-124 และ R-134a [สมชาติ โสภณรณฤทธิ์ และศิวะ อัจฉริยวิริยะ[5] โดยที่สารทำงาน R-134a เป็นสารที่ไม่ทำลายชั้นบรรยากาศของโลก Havelsky [6] จากการทดลองและจำลองสภาพการอบแห้งวัสดุด้วยเครื่องอบแห้งแบบใช้ปั๊มความร้อน พบว่าการอบแห้งด้วยระบบไหลเวียนของอากาศในเครื่องอบแห้งระบบปิดจะให้สมรรถนะดีที่สุด [7],[8] สำหรับเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการอบแห้งผลไม้บางชนิดด้วยเครื่องอบแห้งแบบใช้ปั๊มความร้อนมีดังนี้ การอบแห้งมะละกอแช่อิ่มเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดนั้น Teeboonma et. al.,[7] พบว่าอุณหภูมิอบแห้ง 55^{o}C สัดส่วนการนำอากาศกลับมาใช้อีก 100% สัดส่วนอากาศไหลข้ามเครื่องทำระเหย 69% และอัตราการไหลของอากาศ 20.72 $kg_{kg\text{-}dryair}/kg_{dry\text{-}product}$ การอบแห้งมะม่วงแช่อิ่มเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุด คือ อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 55^{0}C สัดส่วนอากาศกลับนำมาใช้อีก 100% สัดส่วนอากาศไหลข้ามเครื่องทำเครื่องระเหย 71% และอัตราการไหลของอากาศอบแห้ง 31 $kg_{kg\text{-}dry\text{-}air}/kg_{dry\text{-}product}$ และการอบเนื้อลำไยเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุด Achariyaviriya,S. and Chankeaw,P. [8] พบว่า อุณหภูมิอบแห้ง 55 ^{0}C สัดส่วนอากาศข้ามเครื่องทำระเหย 60% ให้สมรรถนะดีที่สุด ใช้เวลาอบแห้ง 24 ชั่วโมง อัตราการอบแห้งเฉลี่ย 0.263 kg_w/h อัตราการดึงความชื้นจำเพาะเฉลี่ย 0.302 $kg_w/kW - h$

สำหรับงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของอัตราการไหลของลมร้อนที่มีผลต่อสมรรถนะและประสิทธิภาพการใช้พลังงานของเครื่องอบแห้งแบบใช้ปั๊มความร้อนที่มีเครื่องอัดไอชนิดความเร็วรอบเปลี่ยนแปลงตามภาระความร้อนที่ต้องการใช้ในการอบแห้ง นอกจากนี้ยังศึกษาผลของความเร็วรอบเริ่มต้นของเครื่องอัดไอที่มีต่อสมรรถนะและประสิทธิภาพการใช้พลังงานของเครื่องอบแห้งใช้ปั๊มความร้อนที่สร้างโดยอานนท์ และคณะ [4]

2.วัสดุและวิธีการ

2.1 หลักการอบแห้งด้วยระบบปั๊มความร้อน

การนำระบบปั๊มความร้อนมาใช้ในการอบแห้ง อาศัยหลักการทางวิศวกรรมการทำความเย็น ดังรูป 1 แสดงผังการทำงานของระบบเครื่องอบแห้งปั๊มความร้อน ซึ่งในระบบการไหลเวียนของลมร้อนเพื่อการอบแห้ง อากาศจะถูกทำให้ร้อนขึ้นหลังจากผ่านเครื่องควบแน่น (Condenser) แล้วอากาศร้อนจะถูกดูดผ่านพัดลม(Blower) เพื่อส่งต่อเข้าห้องอบแห้งและไหลผ่านชั้นวัสดุเพื่อลดความชื้นของวัสดุ ซึ่งจะทำให้ลมร้อนที่ไหลออกจากห้องอบแห้งมีอุณหภูมิลดลงแต่ความชื้นในอากาศเพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงต้องนำอากาศนี้ส่วนหนึ่งผ่านทางเครื่องทำระเหยเพื่อทำให้ความชื้นในอากาศถูกควบแน่นออกมาเป็นหยดน้ำ และอากาศอีกส่วนไหลข้ามเครื่องทำระเหย หลังจากนั้นก็ผสมกับอากาศทั้งสองนี้ส่วนก่อนส่งไปเพิ่มอุณหภูมิโดยการไหลผ่านเครื่องควบแน่นก่อนส่งเข้าห้องอบแห้ง ซึ่งอากาศจะหมุนเวียนอยู่ในระบบเช่นนี้



รูปที่ 1 ผังแสดงการทำงานของระบบเครื่องอบแห้งแบบใช้ปั๊มความร้อน

2. การทดลองอบแห้ง

ในการทดลองอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบใช้ปั๊มความร้อน วัสดุตัวอย่างที่อบแห้งคือ ผ้าอัดแผ่นที่มีขนาด 0.1m x 0.1 m x 0.01 m จำนวน 640 แผ่น มีความชื้นเริ่มต้น 310 %มาตรฐานแห้ง และน้ำหนักรวมประมาณ 42 kg ทำการจัดเรียงผ้าอัดแผ่นลงบนถาดอบแห้งทั้งหมด 32 ถาด โดยแต่ละถาดวาง 20 ชิ้นโดยไม่ซ้อนทับ แล้วจัดวางเรียงในชั้นของรถเข็นซึ่งมี 2 คัน คันละ 16 ถาด นำรถเข็นทั้ง 2 คัน เข้าห้องอบแห้ง ดำเนินการอบแห้งตัวอย่างแบบระบบปิดตามเงื่อนไขที่กำหนด ในระหว่างการทดลองอบแห้ง ทำการบันทึกข้อมูลดังนี้ น้ำหนักของตัวอย่างบันทึกทุกๆ 1 ชั่วโมงใน 2 ชั่วโมงแรก และทุกๆ 2 ชั่วโมงใน 9 ชั่วโมงต่อมา หลังจากนั้นบันทึกทุก 30 นาที ทำการอบจนกระทั่งตัวอย่างเหลือความชื้นประมาณ 10% มาตรฐานแห้งจึงสิ้นสุดการทดลอง สำหรับน้ำหนักของน้ำที่กลั่นตัวออกจากเครื่องทำระเหย อุณหภูมิกระแสอากาศ อุณหภูมิสารทำงาน ความดันของระบบปั๊มความร้อน ความสิ้นเปลืองพลังงานของพัดลม และมอเตอร์ที่ใช้ขับเครื่องอัดไอบันทึกข้อมูลทุกๆ 30 นาที

การทดลองหาอิทธิพลของอัตราการไหลจำเพาะของอากาศ ทำการอบแห้ง ที่มีอุณหภูมิก่อนเข้าห้องอบแห้ง 60°C และสัดส่วนอากาศไหลข้ามเครื่องทำระเหย 70% ที่ความเร็วรอบเริ่มต้น 2,000 rpm ในแต่ละการทดลองเลือกใช้ค่าอัตราการไหลของลมร้อนจำเพาะ คือ 100 150 และ 200 $kg_{dry\ air}$/h-$kg_{dry\ product}$

การทดลองหาอิทธิพลของความเร็วรอบเครื่องอัดไอเริ่มต้น ทำการอบแห้งที่มีอุณหภูมิก่อนเข้าห้องอบแห้ง 60°C และสัดส่วนอากาศไหลข้ามเครื่องทำระเหย 70% ที่อัตราการไหลจำเพาะของอากาศ 150 $kg_{dry\ air}$/h-$kg_{dry\ product}$ ในแต่ละการทดลองมีการเลือกใช้ค่าความเร็วรอบเครื่องอัดไอ คือ 1,000 1,600 และ 2,000 รอบ/นาที

3. การวิเคราะห์ข้อมูล

การประเมินสมรรถนะการทำงานของเครื่องอบแห้งแบบใช้ปั๊มความร้อน แสดงด้วยเทอมต่างๆดังต่อไปนี้

อัตราการดึงความชื้น (Moisture extraction rate, MER) แสดงความสามารถในการกลั่นตัวของความชื้นในอากาศเมื่อไหลผ่านเครื่องควบแน่น lk,ki5คำนวณได้จากสมการที่ (1)

$$MER = \frac{Quantity\ of\ moisture\ condensate\ from\ dryer}{drying\ time} \quad (1)$$

อัตราการดึงความชื้นจำเพาะ (Specific moisture extraction rate, SMER) เป็นเทอมที่แสดงประสิทธิภาพการใช้พลังงานของการอบแห้ง คำนวณได้จากสมการ (2)

$$SMER = \frac{amount\ of\ water\ evaporated\ from\ product}{energy\ input\ to\ the\ dryer} \quad (2)$$

ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของปั๊มความร้อน (coefficient of performance ,COP_{hp}) เป็นการประเมินประสิทธิภาพการใช้พลังงานของเครื่องอบแห้งใช้ปั๊มความร้อน คำนวณจากสัดส่วนของพลังงานความร้อนที่ได้รับที่เครื่องควบแน่นต่อกำลังงานที่ใช้ที่เครื่องอัดไอ ดังสมการ (3)

$$COP_{hp} = \frac{Useful\ heat\ output}{Power\ input} \quad (3)$$

อัตราการอบแห้ง (Drying rate, DR) คำนวณจากสมการ (4)

DR = ปริมาณน้ำที่ระเหยจากวัสดุ/ระยะเวลาการอบแห้ง (4)

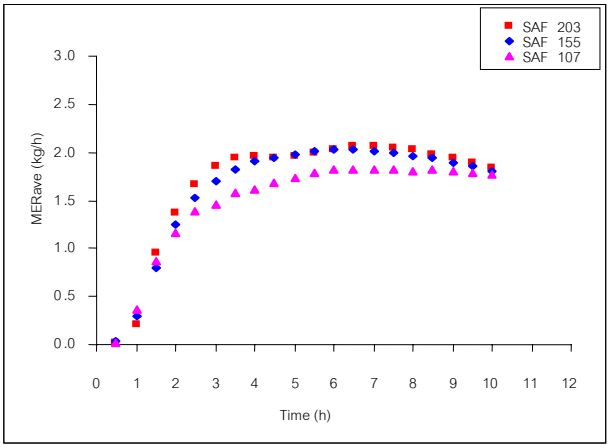
4 ผลการทดลอง

4.1 อิทธิพลของอัตราการไหลจำเพาะของอากาศ

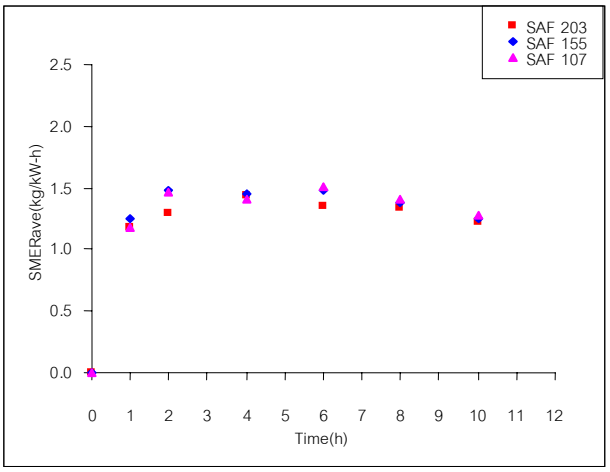
การอบทดลองแห้งผ้าอัดแผ่นด้วยเครื่องอบแห้งแบบใช้ปั๊มความร้อนที่อุณหภูมิ 60°C สัดส่วนอากาศไหลข้ามเครื่องทำระเหย 70% และความเร็วรอบเครื่องอัดไอเริ่มต้น 2,000 รอบ/นาที โดยมีค่าอัตราการไหลจำเพาะของอากาศ (SAF) 100 150 และ 200 $kg_{dry\ air}$/h-kg_{dry} ซึ่งผลของ SAF ที่มีต่อค่าอัตราการดึงความชื้น(MER) ค่าอัตราการดึงความชื้นจำเพาะเฉลี่ย ($SMER_{ave}$) และค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของปั๊มความร้อน (COP_{hp}) แสดงผลด้วยกราฟดังรูปที่ 2 ถึงรูปที่ 4 และตารางที่ 1

รูปที่ 2 แสดงความสัมพันธ์ของค่า MER กับเวลาการอบแห้งที่ SAFเท่ากับ 200 150 และ 100 $kg_{dry\text{-}air}$/h-$kg_{dry\text{-}product}$ พบว่าที่แต่ละค่าของ SAF การอบแห้งในช่วง 5 ชั่วโมงแรกของการอบแห้งค่า MER เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว แต่หลังนั้นค่า MER จะค่อนข้างคงที่ จนช่วงท้ายที่ใกล้จะสิ้นสุดการอบแห้งค่า MER มีค่าลดลงเล็กน้อย เนื่องจากในช่วงแรกวัสดุมีปริมาณความชื้นสูงและอุณหภูมิวัสดุต่ำ เมื่ออบแห้งจะมีการแลกเปลี่ยนความร้อนและมวลระหว่างอากาศร้อนกับวัสดุ ทำให้วัสดุมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นและอัตราการอบแห้งค่อยๆสูงขึ้น ช่วงต่อมาวัสดุมีอุณหภูมิใกล้เคียงกับลมร้อนทำให้สภาวะลมร้อนหลังการอบแห้งค่อนข้างคงที่ อัตราการกลั่นตัวของน้ำในอากาศค่อนข้างสม่ำเสมอ แต่ช่วงท้ายของการอบแห้งวัสดุแห้งลง จึงทำให้อัตราการระเหยน้ำออกจากวัสดุทำได้ยากขึ้น ดังนั้น MER จึงลดลง และเมื่อเปรียบเทียบการอบแห้งที่ SAF เท่ากับ 200 , 150 และ 100 $kg_{dry\ air}$/h-$kg_{dry\ product}$ พบว่าในช่วงแรกของการอบแห้งจะมีค่า MER ที่ใกล้เคียงกันมาก แต่ในช่วงชั่วโมงที่ 1.5-11 ค่า MER จะเพิ่มขึ้นเมื่อตามการเพิ่มขึ้นของค่า SAF

รูปที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $SMER_{ave}$ กับเวลาการอบแห้งที่ SAF เท่ากับ 200 , 150 และ 100 $kg_{dry\ air}$/h-$kg_{dry\ product}$ พบว่าที่แต่ละค่าของ SAF การอบแห้งจะให้ค่า $SMER_{ave}$ ที่มีลักษณะเป็นโค้งคว่ำที่คล้ายกัน โดยเมื่อ SAF มีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้ $SMER_{ave}$ ลดลงเล็กน้อย

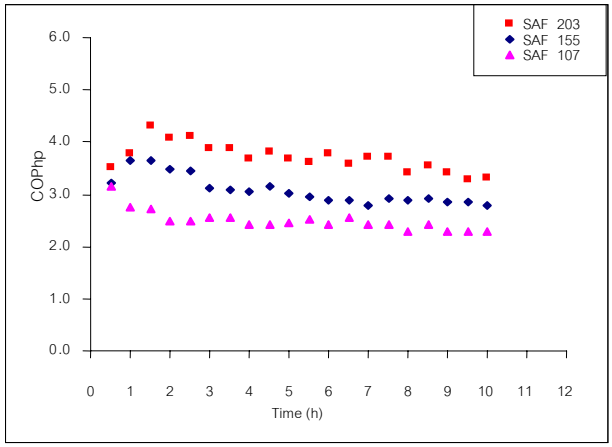


รูปที่ 2 ค่าอัตราการดึงความชื้นเฉลี่ย(MER_{ave})ในการอบแห้งผ้าอัดแผ่นด้วยเครื่องอบแห้งแบบใช้ปั๊มความร้อน ที่อุณหภูมิ 60°C สัดส่วนอากาศไหลข้ามเครื่องทำระเหย 70% และความเร็วรอบเครื่องอัดไอเริ่มต้น 2,000 รอบ/นาที โดยมีค่าอัตราการไหลจำเพาะของอากาศ(SAF) 107 , 155 และ 203 $kg_{dry\ air}$/h-kg_{dry}



รูปที่ 3 ค่าอัตราการดึงความชื้นจำเพาะเฉลี่ย($SMER_{ave}$)ระหว่างการอบแห้งผ้าอัดแผ่นด้วยเครื่องอบแห้งแบบใช้ปั๊มความร้อน ที่อุณหภูมิ 60°C สัดส่วนอากาศไหลข้ามเครื่องทำระเหย 70% และความเร็วรอบเครื่องอัดไอเริ่มต้น 2,000 รอบ/นาที โดยมีค่าอัตราการไหลจำเพาะของอากาศ(SAF) 107, 155 และ 203 $kg_{dry\ air}$/h-kg_{dry}

รูปที่ 4 แสดงค่า COP_{hp} ของปั๊มความร้อนขณะอบแห้ง พบว่าที่แต่ละค่าของ SAF จะให้ค่า COP_{hp} ที่มีลักษณะค่อยๆลดลงอย่างช้าๆ โดยการอบแห้งด้วย SAF ที่มีค่าสูงจะทำให้ COP_{hp} มีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงแรกก่อนแล้วจึงลดลง และจากการเปรียบเทียบในช่วงเวลาเดียวกันพบว่าเมื่อ SAF มีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้ COP_{hp} มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจาก อัตราการไหลจำเพาะของอากาศที่สูงกว่า สามารถแลกเปลี่ยนความร้อนได้ดีกว่า



รูปที่ 4 ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของปั๊มความร้อน(COP_{hp})ในการอบแห้งผ้าอัดแผ่นด้วยเครื่องอบแห้งแบบใช้ปั๊มความร้อนที่อุณหภูมิ 60°C สัดส่วนอากาศไหลข้ามเครื่องทำระเหย 70% และความเร็วรอบเครื่องอัดไอเริ่มต้น 2,000 รอบ/นาที โดยมีค่าอัตราการไหลจำเพาะของอากาศ(SAF)ค่าอัตราการไหลจำเพาะของอากาศ(SAF) 107, 155 และ 203 $kg_{dry\ air}$/h-kg_{dry}

ตารางที่1 สมรรถนะและประสิทธิภาพการใช้พลังงานของเครื่องอบแห้งแบบใช้ปั๊มความร้อนใน การอบแห้งผ้าอัดแผ่นที่อุณหภูมิ 60°C สัดส่วนอากาศไหลข้ามเครื่องทำระเหย 70% และความเร็วรอบเริ่มต้น 2,000 rpm ที่อัตราการไหลจำเพาะของอากาศ(SAF)ต่างๆ

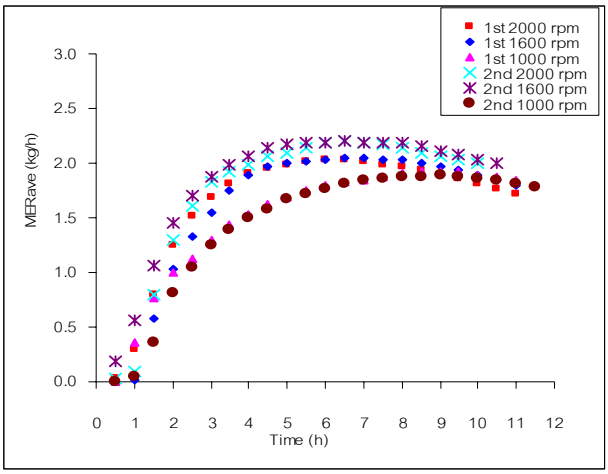
รายละเอียด	SAF ($kg_{dry\ air}$/h-$kg_{dry\ product}$)		
	107	155	203
น้ำหนักเริ่มต้นวัสดุ; kg	42.74	42.74	42.74
น้ำหนักสุดท้ายวัสดุ; kg	12.02	11.82	11.45
ความชื้นเริ่มต้นวัสดุ; % db.	310.6	310.6	310.6
ความชื้นสุดท้ายวัสดุ; % db.	15.5	14.3	10.5
เวลาที่ใช้อบแห้ง; h	10	10	10
อัตราการถ่ายเทความร้อนที่เครื่องควบแน่นเฉลี่ยkW	5.65	7.18	8.71
กำลังงานที่ให้แก่เครื่องอัดไอเฉลี่ย; kW	2.27	2.33	2.35
ความสิ้นเปลืองพลังงาน; kW-h	24.01	24.80	25.65
อัตราการดึงความชื้นเฉลี่ย(MER_{ave}); $kg_{water\ cond.}$/h	1.772	1.809	1.836
อัตราการดึงความชื้นจำเพาะเฉลี่ย($SMER_{ave}$); $kg_{water\ evap.}$/kW-h	1.279	1.247	1.218

ตารางที่ 1 แสดงผลของการเปลี่ยนค่า SAF ที่มีต่อสมรรถนะและประสิทธิภาพการใช้พลังงานของเครื่องอบแห้งแบบใช้ปั๊มความร้อน ในการอบแห้งของผ้าอัดแผ่นที่อุณหภูมิ 60°C สัดส่วนอากาศไหลข้ามเครื่องทำระเหย 70% และความเร็วรอบเริ่มต้น 2,000 rpm โดยตัวอย่างอบแห้งมีเงื่อนไขที่เหมือนกันคือ ความชื้นเริ่มต้น 310.6 %db. มวลเริ่มต้น 42.74 kg และเวลาอบแห้ง 10 ชั่วโมง พบว่า ในการอบแห้งของเครื่องอบแห้งแบบใช้ปั๊มความร้อนที่ SAF เท่ากับ 107 , 155 และ 203 $kg_{dry\ air}$/h-$kg_{dry\ product}$ พบว่า SAF สูงขึ้นทำให้ค่า COP_{hp} สูงขึ้นแต่ค่า $SMER_{ave}$ ลดลง ที่เป็นเช่นนี้เพราะการที่ SAF สูงขึ้นทำให้ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนที่เครื่องควบแน่นเฉลี่ยสูงขึ้นมากแต่ค่ากำลังงานที่ให้แก่เครื่องอัดไอเฉลี่ยมีค่าสูงขึ้นเล็กน้อยจึงมีผลทำให้ค่า COP_{hp} สูงขึ้น สำหรับ ค่า $SMER_{ave}$ ลดลงเนื่องจากเมื่อเพิ่ม SAF ค่าของอัตราการอบแห้งค่อนข้างคงที่แต่กำลังงานที่ให้แก่เครื่องอัดไอเฉลี่ยมีค่าสูงขึ้นเล็กน้อยจึงมีผลทำให้ค่า $SMER_{ave}$ ลดลงเล็กน้อย

4.2 อิทธิพลของความเร็วรอบเริ่มต้น

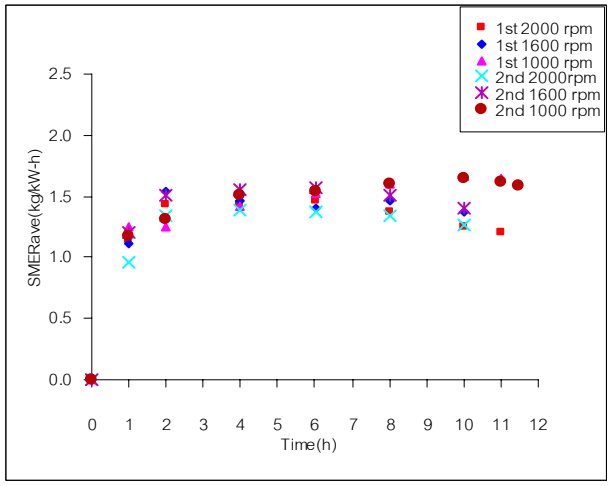
ผลการอบทดลองแห้งผ้าอัดแผ่นด้วยเครื่องอบแห้งแบบใช้ปั๊มความร้อนที่อุณหภูมิ 60°C สัดส่วนอากาศไหลข้ามเครื่องทำระเหย 70% และอัตราการไหลจำเพาะของอากาศ 155 $kg_{dry\ air}$/h-$kg_{dry\ product}$ ที่ใช้ความเร็วรอบเริ่มต้นของเครื่องอัดไอ1,000 1,500 และ 2,000 rpm ซึ่งมีผลต่อค่า MER, $SMER_{ave}$ และค่า COP_{hp} ดังรูปที่ 5 ถึงรูปที่ 7 และตารางที่ 2

รูปที่ 5 แสดงค่า MER $_{ave}$ ที่เครื่องทำระเหยกับเวลาอบแห้ง ที่ความเร็วรอบเครื่องอัดไอเริ่มต้น 2,000 , 1,600 และ 1,000 rpm เมื่อพิจารณาแต่ละความเร็วรอบเครื่องอัดไอเริ่มต้นพบว่า MER_{ave} มีลักษณะเป็นโค้งคว่ำ โดยในช่วงแรกค่า MER $_{ave}$ เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว แล้วค่อยๆ ลดลงอย่างช้าๆ โดยที่ความเร็วรอบเริ่มต้นของเครื่องอัดไอ 1,600 และ 2,000 rpm จะมีค่า MER $_{ave}$ ที่ใกล้เคียงกัน แต่ที่ 1000 rpm จะให้ค่า MER $_{ave}$ ที่ต่ำกว่าตลอดช่วงการอบแห้ง เนื่องจากภาระไม่เพียงพอ



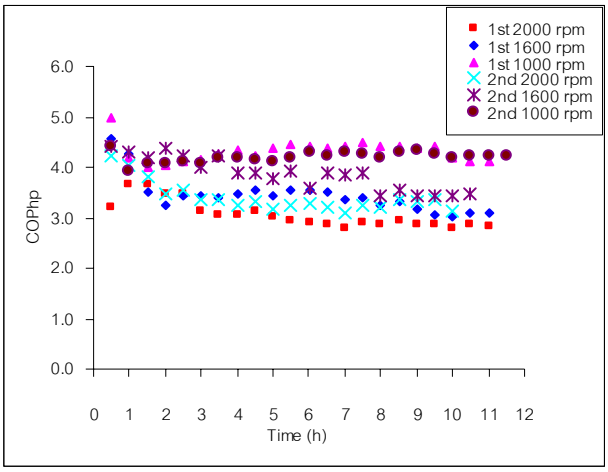
รูปที่ 5 ค่าอัตราการดึงความชื้นเฉลี่ย(MER_{ave})ในการอบแห้งผ้าอัดแผ่นด้วยเครื่องอบแห้งแบบใช้ปั๊มความร้อน ที่อุณหภูมิ 60°C สัดส่วนอากาศไหลข้ามเครื่องทำระเหย 70% อัตราการไหลจำเพาะของอากาศ 150 $kg_{dry\ air}$/h-$kg_{dry\ product}$ โดยใช้ความเร็วรอบเครื่องอัดไอเริ่มต้น(SAF) 1,000 1,500 และ 2,000 รอบ/นาที

รูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า SMER กับเวลาอบแห้ง ที่ความเร็วรอบเครื่องอัดไอเริ่มต้น 2,000, 1,600 และ 1,000 rpm เมื่อพิจารณาแต่ละความเร็วรอบเริ่มต้นพบว่าค่า $SMER_{ave}$ มีลักษณะเป็นโค้งคว่ำโดยค่า $SMER_{ave}$ ค่อยๆเพิ่มขึ้นแล้วลดลงอย่างช้าๆ โดยที่ค่า $SMER_{ave}$ มีค่าลดลงแปรผันตรงข้ามกับการเพิ่มขึ้นความเร็วรอบเริ่มต้นของเครื่องอัดไอ เนื่องจากความเร็วรอบเริ่มต้นที่ต่ำกว่าจะใช้พลังงานในการขับเครื่องอัดไอต่ำกว่า อีกทั้งใช้เวลาในการอบแห้งที่ใกล้เคียงกัน ส่งผลให้ $SMER_{ave}$ ที่ความเร็วรอบเริ่มต้นต่ำมีค่าสูงสุด และที่ความเร็วรอบเครื่องอัดไอเริ่มต้น 2,000 และ1,600 rpm มีค่า $SMER_{ave}$ สูงสุดอยู่ที่ในชั่วโมงที่ 2 ส่วนที่ความเร็วรอบเครื่องอัดไอเริ่มต้น1,000 rpm มีค่า $SMER_{ave}$ สูงสุดในชั่วโมงที่ 10



รูปที่ 6 ค่าอัตราการดึงความชื้นจำเพาะเฉลี่ย(MER_{ave}) ในการอบแห้ง ผ้าอัดแผ่นด้วยเครื่องอบแห้งแบบใช้ปั๊มความร้อนที่อุณหภูมิ 60°C สัดส่วนอากาศไหลข้ามเครื่องทำระเหย 70% อัตราการไหลจำเพาะของอากาศ (SAF) 150 $kg_{dry\ air}$/h-$kg_{dry\ product}$ โดยใช้ความเร็วรอบเครื่องอัดไอเริ่มต้น 1,000 1,500 และ 2,000 รอบ/นาที

รูปที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า COP_{hp} กับเวลาอบแห้ง ที่ความเร็วรอบเครื่องอัดไอเริ่มต้น 2,000 1,600 และ 1,000 rpm เมื่อพิจารณาแต่ละความเร็วรอบเริ่มต้นการอบแห้งพบว่า ที่ใช้ความเร็วรอบเครื่องอัดไอเริ่มต้น 1,000 rpm ให้ค่า COP_{hp} มากกว่าที่ใช้ความเร็วรอบ 1,500 และ 2,000 rpm โดยค่า COP_{hp} มีแนวโน้มคงที่ตั้งแต่ชั่วโมงที่ 3-11 ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะปั๊มความร้อนค่อนข้างคงที่ เนื่องจากความเร็วรอบเริ่มต้นที่ต่ำกว่าทำให้กำลังงานที่ขับเครื่องอัดไอลดลง และมีการควบคุมความเร็วรอบเครื่องอัดไอโดย อินเวอร์เตอร์ให้ความเหมาะสมกับอัตราการถ่ายเทความร้อนที่เครื่องควบแน่น



รูปที่ 7 ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะปั๊มความร้อน (COP_{hp}) ในการอบแห้งผ้าอัดแผ่นที่อุณหภูมิ 60°C สัดส่วนอากาศไหลข้ามเครื่องทำระเหย 70% อัตราการไหลจำเพาะของอากาศ(SAF) 150 $kg_{dry\ air}$/h-$kg_{dry\ product}$ โดยใช้ความเร็วรอบเครื่องอัดไอเริ่มต้น 1,000 1,500 และ 2,000 รอบ/นาที

ตารางที่ 2 แสดงผลการเปลี่ยนความเร็วรอบเริ่มต้นของเครื่องอัดไอที่มีต่อสมรรถนะและประสิทธิภาพการใช้พลังงานของเครื่องอบแห้งแบบใช้ปั๊มความร้อน เมื่ออบแห้งผ้าอัดแผ่นที่อุณหภูมิ 60°C สัดส่วนอากาศไหลข้ามเครื่องทำระเหย 70% และอัตราการไหลจำเพาะของอากาศ 150 $kg_{dry\ air}$/h-$kg_{dry\ product}$ โดยตัวอย่างอบแห้งมีความชื้นเริ่มต้น 310.6 %db และมวลเริ่มต้น 42.74 kg เวลาอบแห้ง 10-11.5 ชั่วโมง พบว่าความเร็วรอบเริ่มต้นของเครื่องอัดไอเพิ่มขึ้นทำให้ค่า $SMER_{ave}$ มีค่าลดลง เนื่องจากความเร็วรอบเริ่มต้นมีค่าเพิ่มขึ้นเวลาการอบแห้งลดลงเล็กน้อย แต่ค่ากำลังงานที่ให้แก่เครื่องอัดไอเพิ่มขึ้นมาก สำหรับค่า COP_{hp} พบว่ามีค่าลดลงเช่นเดียวกันเพราะอัตราการถ่ายเทความร้อนที่เครื่องควบแน่นเพิ่มขึ้นเล็กนอยเมื่อเทียบกับการเพิ่มขึ้นของกำลังงานที่ให้แก่เครื่องอัดไอ

ตารางที่ 2 สมรรถนะและประสิทธิภาพการใช้พลังงานของเครื่องอบแห้งแบบใช้ปั๊มความร้อนใน การอบแห้งผ้าอัดแผ่นที่อุณหภูมิ 60°C สัดส่วนอากาศไหลข้ามเครื่องทำระเหย 70% และอัตราการไหลจำเพาะของอากาศ 150 $kg_{dry\ air}$/h-$kg_{dry\ product}$ โดยใช้ความเร็วรอบเริ่มต้นของเครื่องอัดไอ 1,000 1,500 และ 2,000 rpm

รายละเอียด	ความเร็วรอบเริ่มต้นของเครื่องอัดไอ (rpm)					
	1,000		1,600		2,000	
น้ำหนักเริ่มต้นวัสดุ; kg	42.74	42.74	42.74	42.74	42.74	42.74
น้ำหนักสุดท้ายวัสดุ; kg	12.26	12.35	12.43	12.47	11.82	12.14
ความชื้นเริ่มต้นวัสดุ; % db.	310.6	310.6	310.6	310.6	310.6	310.6
ความชื้นสุดท้ายวัสดุ; % db.	17.8	16.6	19.5	19.8	15.3	16.6
เวลาที่ใช้อบแห้ง; h	11	11.5	10	10	10	10
อัตราการถ่ายเทความร้อนที่เครื่องควบแน่นเฉลี่ย (Q_C); kW	6.58	6.35	7.13	7.74	7.18	7.70
กำลังงานที่ให้แก่เครื่องอัดไอเฉลี่ย (W_{COM}) ; kW	1.53	1.51	2.05	2.00	2.33	2.26
ความสิ้นเปลืองพลังงาน; kW-h	18.49	19.16	22.08	21.50	24.80	24.16
อัตราการดึงน้ำออกเฉลี่ย(MER_{ave}); $kg_{water\ cond.}$/h	1.837	1.78	1.81	2.04	1.81	2.00
อัตราการดึงน้ำออกจำเพาะเฉลี่ย($SMER_{ave}$); $kg_{water\ vap.}$/kW-h	1.648	1.58	1.25	1.41	1.25	1.27
ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะปั๊มความร้อนเฉลี่ย (COP)	4.31	4.20	3.08	3.88	3.08	3.41

4. สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาอิทธิพลของอัตราการไหลของลมร้อนมีผลต่อประสิทธิภาพการใช้พลังงานของเครื่องอบแห้งปั๊มความร้อน พบว่าเมื่ออัตราการไหลอากาศลดลงจะทำให้ค่าอัตราการดึงน้ำออก และสัมประสิทธิ์สมรรถนะลดลงอย่างมีนัยสำคัญ และสำหรับการเปลี่ยนค่าความเร็วรอบเริ่มต้นลดลงจะทำให้ค่าอัตราการดึงความชื้นจำเพาะเฉลี่ย และ ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะปั๊มความร้อนเฉลี่ยเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ

5.เอกสารอ้างอิง

[1]. Soponronnarit, S., Swasdisevi, T. and Madhiyanon, T. 1999. Industrial-scale heat pump fruit drying. Proc. 1st Asian-Australian Drying Conference, October 24-27, Bali, Indonesia.

[2] Tia, W., Soponronnarit, S., and Kaewassadorn, W. 2001. Heat pump fruit dryer for small scale industry. The first regional conference on Energy Technology towards and Clean Environment . Chiangmai,Thailand. pp. 67-71.

[3] ไพโรจน์ จันทร์แก้ว. 2548. การออกแบบเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนสำหรับลำไยเฉพาะเนื้อ.วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต , มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

[4] อานนท์ สาดช้าง ศิวะ อัจฉริยวิริยะ และ อารีย์ อัจฉริยวิริยะ. 2549. การออกแบบและสร้างต้นแบบเครื่องอบแห้งแบบใช้ปั๊มความร้อนสำหรับอุตสาหกรรมขนาดเล็ก. การประชุมวิชาการเรื่องการถ่ายเทพลังงานความร้อนและมวลในอุปกรณ์ด้านความร้อน(ครั้งที่ 5) , 6-7 เมษายน โรงแรมโลตัส ปางสวนแก้ว อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่. หน้า154-169

[5] สมชาติ โสภณรณฤทธิ์ และศิวะ อัจฉริยวิริยะ 2543. การอบแห้งผักและผลไม้ด้วยปั๊มความร้อน. วารสารราชบัณฑิตยสถาน. ปีที่ 25 ฉบับที่ 2. หน้า 182-196.

[6] Havelsky. 2000. Investigation of refrigerating system with R-22 refrigerant. Applied Thermal Engineering. Vol 20. pp 133-140.

[7] Teeboonma, U., Soponronnarit, S. and Tiansuwan, J. 2002. Optimization of heat pump fruit dryer. Proc. 13th International Drying Symposium, August 26-30, Beijing, China.

[8] เหมือนจิต แจ่มศิลป์. 2547. สภาวะการทำงานที่เหมาะสมที่สุดของเครื่องอบแห้งมะละกอแช่อิ่ม. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.