การประเมินสมรรถนะเครื่องอบแห้งปั๊มความร้อนที่ใช้สารทำความเย็น R32

PERFORMANCE EVALUATION OF HEAT PUMP DRYER USING R32 REFRIGERANT

ประพันธ์พงษ์ สมศิลา, ทรงสุภา พุ่มชุมพล, อำไพศักดิ์ ทีบุญมา, อภินันต์ นามเขต*
Praphanpong Somsila, Songsupa Pumchumpol,
Umphisak Teeboonma, Apinunt Namkhat*
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี อ.วารินชำราบ จ.อุบลราชธานี ประเทศไทย 34190
Faculty of Engineering, Ubon Ratchathani University, Warin Chamrap District, Ubon Ratchathani, Thailand, 34190
*Corresponding author e-mail: apinunt.n@ubu.ac.th

วันที่เข้าระบบ 24 พฤษภาคม 2566
วันที่แก้ไขบทความ 25 มิถุนายน 2566
วันที่ตอบรับบทความ 26 มิถุนายน 2566

บทคัดย่อ

การอบแห้งเป็นกระบวนการลดความชื้นผลิตภัณฑ์เพื่อยืดอายุการเก็บรักษาและสร้างมูลค่าเพิ่ม ซึ่งเป็นที่ทราบกันดีว่ากระบวนการอบแห้งมีการใช้พลังงานค่อนข้างสูง ดังนั้นการพัฒนาเทคนิคการอบแห้งให้ประหยัดพลังงานจึงมีความจำเป็น ด้วยเหตุนี้งานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาเทคนิคการอบแห้งด้วยปั๊มความร้อน ซึ่งในการศึกษาได้สร้างเครื่องอบแห้งปั๊มความร้อนที่ใช้สารทำความเย็น R32 เพื่อประเมินสมรรถนะและได้เลือกใช้กล้วยเป็นผลิตภัณฑ์ในการทดสอบ โดยทดลองภายใต้เงื่อนไขดังนี้ อุณหภูมิอบแห้งเท่ากับ 50, 55 และ 60°C และความเร็วลมเท่ากับ 1.0, 1.5 และ 2.0 m/s ซึ่งมีเกณฑ์ที่ใช้ในการประเมินสมรรถนะเครื่องอบแห้งปั๊มความร้อน ได้แก่ อัตราการอบแห้ง อัตราการดึงออกน้ำจำเพาะ ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ และค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะปั๊มความร้อน ผลการศึกษาพบว่า การเพิ่มอุณหภูมิอบแห้งและความเร็วลมมีผลทำให้อัตราการอบแห้ง และอัตราการดึงน้ำออกจำเพาะเพิ่มขึ้น ในขณะที่ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะลดลง นอกจากนี้ ยังพบว่าอุณหภูมิอบแห้งและความเร็วลมมีผลต่อสัมประสิทธิ์สมรรถนะปั๊มความร้อนค่อนข้างน้อย และสุดท้ายจากการทดลองพบว่า สัมประสิทธิ์สมรรถนะปั๊มความร้อนที่ศึกษามีค่าอยู่ในช่วง 4.34–4.45

คำสำคัญ: การอบแห้ง, เครื่องอบแห้งปั๊มความร้อน, สารทำความเย็น

Abstract

Drying is a process of reducing moisture content to prolong the product's shelf life and increase product value. As it is generally known that energy consumption of drying is rather high, a development of drying technique for energy saving is necessary. For this reason, heat pump drying techniques were investigated in this research. A heat pump dryer using R32 refrigerant was constructed, and its performance was evaluated. Bananas were selected as product testing. The experiments were conducted under the following conditions: dying temperature of 50, 55 and 60°C and air velocity of 1.0, 1.5 and 2.0 m/s. The criteria used to evaluate the performance of the heat pump dryer consisted of drying rate (DR), specific moisture extraction rate (SMER), specific energy consumption (SEC) and coefficient of performance of heat pump (COP_h). The results indicated that an increment of drying temperature and air velocity resulted in an increment of drying rate and specific moisture extraction rate, whereas energy consumption decreased. Moreover, it was also found that drying temperature and air velocity did not significantly affect the ecoefficient of performance of heat pump. Finally, the results revealed that the ecoefficient of performance of heat pump was in the range of 4.34-4.45.

Keywords: Drying, Heat pump dyer, Refrigerant

1. บทนำ

กล้วยน้ำว้าเป็นผลไม้ที่มีคนปลูกและบริโภคกันมาก เนื่องจากมีประโยชน์และมีสรรพคุณทางยา เช่น ผลิตเป็นเม็ดสำหรับรับประทานเพื่อรักษาอาการของผู้ที่มีอุจจาระแข็ง หรือเป็นริดสีดวงทวาร ลดปัญหาการเกิดมะเร็งลำไส้ ช่วยยับยั้งการหลั่งน้ำย่อยในกระเพาะอาหาร รักษาอาการท้องเสีย บิดมูกเลือด ลดระดับคอเลสเตอรอล เป็นต้น ซึ่งถือได้ว่าเป็นแนวทางที่จะช่วยเพิ่มมูลค่าให้กับกล้วยน้ำว้าได้เป็นอย่างมาก นอกจากนั้นยังสามารถนำผงแป้งที่ผลิตจากกล้วยมาใช้ผลิตอาหารเส้น เช่น เส้นพาสต้า รวมทั้งสูตรผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปพัฒนาต่อยอดเพื่อใช้เป็นอาหารสำหรับการบำบัดโรคในกลุ่มผู้ป่วยต่าง ๆ (เพ็ญจันทร์ และคณะ, 2555) สำหรับกระบวนการผลิตกล้วยน้ำว้าตากแห้งเพื่อผลิตกล้วยน้ำว้าผงนั้น ปัจจุบันเกษตรกรส่วนใหญ่ยังคงใช้การตากแดด ซึ่งพบว่าเกิดปัญหาความไม่สะอาดหรือมีสิ่งสกปรกปะปนในผลิตภัณฑ์ และไม่สามารถควบคุมคุณภาพของกล้วยน้ำว้าตากแห้งได้ เนื่องจากข้อจำกัดของพลังงานแสงอาทิตย์ การอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งจึงถือเป็นแนวทางการแก้ปัญหานี้ได้เป็นอย่างดี

สำหรับการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งมีด้วยกันในหลายวิธีเช่น การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด การอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง การอบแห้งด้วยขดลวดไฟฟ้า การอบแห้งด้วยสุญญากาศ และการอบแห้งด้วยปั๊มความร้อน เป็นต้น โดยเป็นที่ทราบกันดีว่ากระบวนการอบแห้งมีการใช้พลังงานค่อนข้างสูง (Huelsz *et al*., 2012) อย่างไรก็ตามมีนักวิจัยทำการศึกษาและทดสอบเทคนิคการอบแห้งที่มีประสิทธิภาพการใช้พลังงานให้ได้ในระดับสูงพร้อมกับการควบคุมคุณภาพผลิตภัณฑ์ เช่น Wang *et al*. (2018) ได้ศึกษาเครื่องอบแห้งปั๊มความร้อนที่ใช้สารทำความเย็น R134a ประกอบกับการนำความร้อนกลับมาใช้ใหม่ด้วยอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน Levent *et al*. (2018) ศึกษาการใช้สารทำความเย็น R410a ในเครื่องอบแห้งปั๊มความร้อนจากการศึกษาพบว่า สามารถลดการใช้พลังงานได้มากถึงร้อยละ 51 และลดระยะเวลาการอบแห้งได้ร้อยละ 69 นอกจากนี้ยังมีการศึกษาปั๊มความร้อนร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์อาทิเช่น Norhaida *et al*. (2019) ต่อมา Niklas *et al*. (2019) ศึกษาการอบแห้งด้วยปั๊มความร้อนที่ใช้สารทำความเย็น R744 ผนวกกับการออกแบบระบบแลกเปลี่ยนความร้อนใหม่ ผลที่ได้สามารถลดใช้พลังงานได้ร้อยละ 7.2 Quancheng *et al*. (2019) ได้ศึกษาออกแบบท่อการไหลอากาศระบบปิดใหม่ และมีการใช้สารทำความเย็น R134a ผลที่ได้พบว่าสามารถลดการใช้พลังงานไฟฟ้าได้ Rony *et al*. (2019) ศึกษาการใช้ CO_2 และ R134a ในเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อน ผลการศึกษาพบว่าสามารถเพิ่มอัตราการดึงน้ำออกจำเพาะและสัมประสิทธิ์สมรรถนะได้ร้อยละ 13 และร้อยละ 8 ตามลำดับ Kuan *et al*. (2019) ศึกษาเปรียบเทียบผลของการอบแห้งด้วยปั๊มความร้อนกรณีใช้และไม่ใช้พลังงานแสงอาทิตย์ช่วยโดยมีการใช้สารทำความเย็น R134a จากการทดลองได้อัตราการดึงน้ำออกจำเพาะและสัมประสิทธิ์สมรรถนะประมาณ 0.6 kg/kWh และ 2.72 ตามลำดับ นอกจากนั้น จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าส่วนใหญ่เครื่องอบแห้งปั๊มความร้อนจะมีการใช้สารทำความเย็นที่ก่อให้เกิดปัญหาภาวะโลกร้อนสูง (Global Warming Potential, GWP) เช่น R22, R134a, R407C และ R410a ซึ่งมีค่า GWP เท่ากับ 1,810, 1,430, 1,774 และ 2,090 ตามลำดับ (Michael *et al*., 2020; Haonan *et al*., 2020; Cuneyt & Ibrahim, 2020; Jing & Zhou, 2020) ปัจจุบันได้มีการพัฒนาสารทำความเย็นที่ก่อให้เกิดภาวะโลกร้อนต่ำคือสารทำความเย็น R32 ซึ่งมีค่า GWP เท่ากับ 675 และที่ผ่านมาได้มีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้สารทำความเย็น R32 ในเครื่องอบแห้งปั๊มความร้อนอาทิเช่น In *et al*. (2014) ได้ศึกษาเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์สมรรถนะปั๊มความร้อนที่ใช้สารทำความเย็น R410a, R32 และ L41b ผลการศึกษาพบว่าสารทำความเย็น R32 จะให้สัมประสิทธิ์สมรรถนะปั๊มความร้อนสูงสุด และมากกว่าสารทำความเย็น R410a เฉลี่ยประมาณร้อยละ 5 ต่อมา Abdullah *et al*. (2015) ได้ทำการศึกษาและทดสอบการใช้สารทำความเย็นที่เหมาะสมเพื่อใช้ทดแทนสารทำความเย็น R410a ซึ่งพบว่า R32 มีความเหมาะสม ในเวลาต่อมา Akhilesh *et al*. (2019) ได้ทำการสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์เพื่อศึกษาสมรรถนะเครื่องอบแห้งปั๊มความร้อนกรณีใช้สารทำความเย็น R290, R600a, R32, R152a และ R1234yf โดย

มีวัตถุประสงค์เพื่อนำมาทดแทนสารทำความเย็น R134a ผลจากการศึกษาด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์พบว่า การใช้สารทำความเย็น R32 ในเครื่องอบแห้งปั๊มความร้อนให้ค่าอัตราการดึงน้ำออกจำเพาะสูงสุด

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า การศึกษาสมรรถนะเครื่องอบแห้งปั๊มความร้อนที่ใช้สารทำความเย็น R32 ยังมีไม่มาก ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและทดสอบสมรรถนะเครื่องอบแห้งปั๊มความร้อนที่มีการใช้สารทำความเย็น R32 ซึ่งมีค่า GWP ต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับสารทำความเย็นอื่นที่นิยมใช้ในปัจจุบัน โดยเลือกใช้กล้วยน้ำว้าดิบเป็นผลิตภัณฑ์ในการทดสอบ

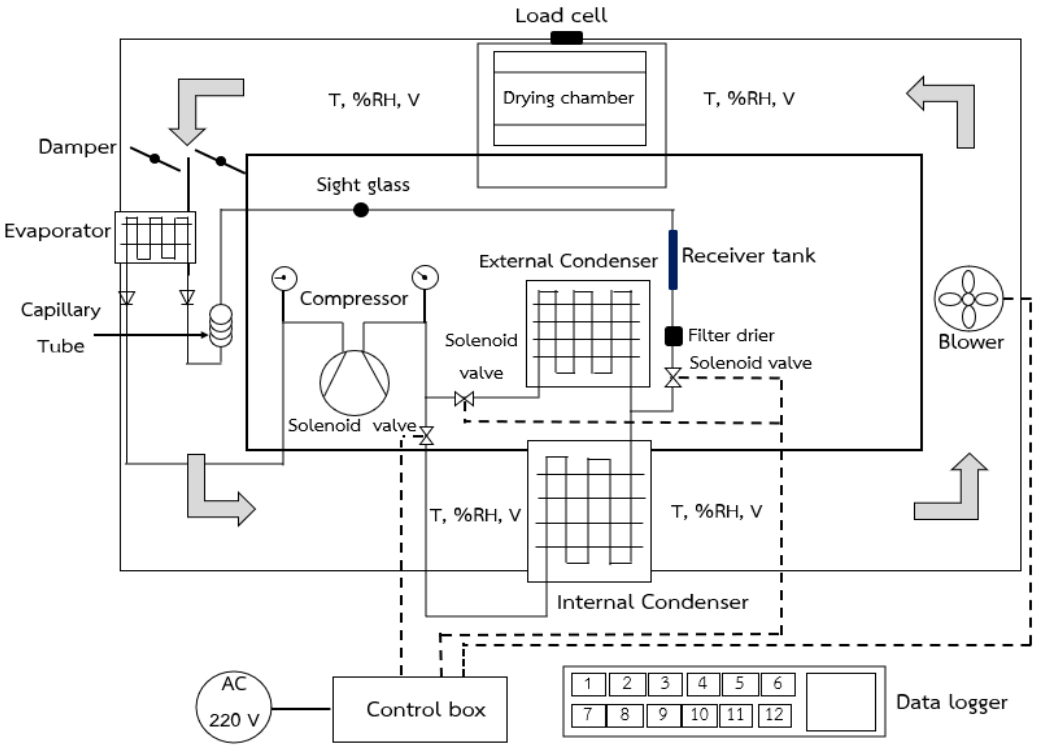
2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อศึกษาการอบแห้งกล้วยน้ำว้าดิบและสมรรถนะเครื่องอบแห้งปั๊มความร้อนที่ใช้สารทำความเย็น R32

3. วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 ชุดทดลอง

เครื่องอบแห้งปั๊มความร้อนที่ใช้ในการทดลองมีวงจรการทำงานดังภาพที่ 1 ซึ่งสามารถอธิบายส่วนประกอบและหลักการทำงานได้ดังนี้



ภาพที่ 1 แผนผังแสดงอุปกรณ์และวงจรการทำงานระบบเครื่องอบแห้งปั๊มความร้อน

ชุดทดลองเครื่องอบแห้งปั๊มความร้อนมีส่วนประกอบหลัก คือ เครื่องอัดไอขนาด 0.75 kW เครื่องควบแน่นชุดใน (Internal condenser) ขนาด 4.35 kW เครื่องควบแน่นชุดนอก (External condenser) ขนาด 4.35 kW อุปกรณ์ลดความดัน เครื่องทำระเหยขนาด 3.50 kW พัดลมสำหรับการไหลเวียนอากาศ ห้องอบแห้งขนาด 35 x 70 x 30 cm^3 ชุดเครื่องมือวัดและชุดควบคุมการทำงาน สำหรับกระบวนการทำงานของระบบเริ่มต้นจากอากาศที่ใช้ในการอบแห้งไหลผ่านเครื่องควบแน่นชุดในเพื่อรับความร้อนด้วยการแลกเปลี่ยนความร้อนผ่านอุปกรณ์ดังกล่าว ซึ่งจะทำให้อากาศที่ใช้สำหรับการอบแห้งมีอุณหภูมิสูงขึ้น ในขณะที่สารทำความเย็นก็จะเกิดการควบแน่นเช่นกัน จากนั้นอากาศร้อนส่วนนี้จะไหลผ่านไปยังห้องอบแห้งเพื่อถ่ายเทความร้อนให้กับกล้วยน้ำว้า ทำให้กล้วยน้ำว้ามีอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นจนทำให้ปริมาณน้ำที่อยู่ภายในระเหยออกสู่ผิวนอกของกล้วย ในขณะเดียวกันอากาศที่ไหลผ่านก็จะพัดพาความชื้นที่บริเวณผิวนอกของกล้วยออกจากห้องอบแห้ง หลังจากนั้นอากาศส่วนนี้จะไหลผ่านมายังเครื่องทำระเหย ซึ่งมีอุณหภูมิต่ำส่งผลให้ความชื้นในอากาศเกิดการควบแน่นและหยดน้ำที่เกิดขึ้นจะถูกปล่อยออกสู่ภายนอกต่อไป

สำหรับสารทำความเย็นที่อยู่ภายในเครื่องทำระเหยจะเกิดการระเหยกลายเป็นไอเนื่องจากอากาศร้อนที่ไหลออกจากห้องอบแห้ง โดยไอดังกล่าวจะถูกส่งไปยังเครื่องอัดไอเพื่อสร้างความดันให้กับสารทำความเย็น ทำให้สารทำความเย็นมีอุณหภูมิสูงขึ้น หลังจากนั้นอากาศที่ไหลผ่านเครื่องทำระเหยจะไหลมายังเครื่องควบแน่นชุดใน เพื่อรับความร้อนและไหลเข้าสู่ห้องอบแห้ง ซึ่งวงจรการไหลของอากาศร้อนก็จะเป็นเช่นนี้ไปเรื่อย ๆ จะพบว่ากระบวนการอบแห้งด้วยปั๊มความร้อนมีจุดเด่นคือสามารถดึงความชื้นของอากาศที่ได้จากผลิตภัณฑ์ด้วยเครื่องทำระเหย ทำให้อากาศในระบบมีความชื้นต่ำ ประกอบกับระบบที่ออกแบบให้เป็นระบบปิด ไม่มีการเติมอากาศจากภายนอกแต่อย่างใด นอกจากนั้นสำหรับหลักการควบคุมอุณหภูมิภายในห้องอบแห้งซึ่งได้เลือกใช้เครื่องควบแน่นชุดนอกเพื่อระบายความร้อนส่วนเกินโดยใช้โซลินอยด์วาล์วในการเปิด-ปิด เพื่อควบคุมทิศทางการไหลของสารทำความเย็น กล่าวคือ เมื่ออุณหภูมิในห้องอบแห้งอยู่ในระดับที่ตั้งค่าไว้ โซลินอยด์วาล์วจะเปิดเพื่อให้สารทำความเย็นไประบายความร้อนที่เครื่องควบแน่นชุดนอกแทนเครื่องควบแน่นชุดใน และเมื่ออุณหภูมิในห้องอบแห้งลดลง โซลินอยด์วาล์วจะเปิดเพื่อให้สารทำความเย็นไหลเข้าไปสู่เครื่องควบแน่นชุดในเช่นเดิม และปิดการไหลไปยังเครื่องควบแน่นชุดนอก ซึ่งการทำงานของระบบอบแห้งจะเป็นเช่นนี้ไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งเสร็จสิ้นการทำงานของเครื่องอบแห้งปั๊มความร้อน

3.2 วิธีการทดลอง

เครื่องอบแห้งปั๊มความร้อนที่ใช้สารทำความเย็น R32 ได้ทำการทดสอบภายใต้เงื่อนไขอุณหภูมิอบแห้ง 50, 55 และ 60°C และความเร็วลม 1.0, 1.5 และ 2.0 m/s ตามลำดับ โดยใช้กล้วยน้ำว้าดิบที่ถูกหั่นเป็นแผ่นตามแนวยาวให้มีความหนาประมาณ 3 mm ความยาวประมาณ 10 cm และน้ำหนักอบแห้งเริ่มต้นครั้งละ 1,000 g โดยกล้วยที่ใช้มีความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ยเท่ากับ 210.0% d.b.

ซึ่งจะถูกอบแห้งจนกระทั่งความชื้นสุดท้ายคงเหลือประมาณ 10.0% d.b. ซึ่งเป็นความชื้นสุดท้ายของผลิตภัณฑ์กล้วยผงที่วางจำหน่ายในท้องตลาด ในระหว่างการทดลองได้ตรวจวัดและบันทึกค่าต่าง ๆ ได้แก่ อุณหภูมิของอากาศ อุณหภูมิของสารทำความเย็น ความดันของสารทำความเย็น น้ำหนักของผลิตภัณฑ์ที่เปลี่ยนแปลงตลอดการอบแห้ง ค่ากำลังไฟฟ้า และค่าการใช้พลังงานไฟฟ้า ซึ่งรายละเอียดเครื่องมือวัดดังแสดงในตารางที่ 1 สำหรับการหาความชื้นของผลิตภัณฑ์ได้ใช้วิธีการหาความชื้นตามมาตรฐาน AOAC (2019)

ในการทดลองเริ่มต้นด้วยการเปิดเครื่องอบแห้งปั๊มความร้อนและทำการปรับตั้งค่าอุณหภูมิห้องอบแห้งและความเร็วลมตามเงื่อนไขที่ศึกษา พร้อมทั้งเปิดเครื่องมือวัดและบันทึก หลังจากนั้นทำการเดินเครื่องอบแห้งปั๊มความร้อนจนกระทั่งระบบเข้าสู่สภาวะสมดุลโดยพิจารณาจากค่าการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรแต่ละค่า เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะสมดุลจึงนำกล้วยน้ำว้าจัดวางในห้องอบแห้ง และดำเนินการทดลองจนกระทั่งได้ความชื้นสุดท้ายตามที่กำหนด

ตารางที่ 1 เครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดลอง

Devices	Technical properties	Accuracy
Electricity meter	Power, Amp, Volt, PF, Hz, Supply 220V, 50Hz	±1%
Temperature/ Thermocouple	Temperature: -40 - +120°C/Type K -200 – 1,300°C	±2°C /±0.01°C
Relative humidity (%RH)	Relative humidity: 0% - 100%	±4 %RH
Anemometer	Range 0 – 20 m/s	± 0.01m/s
Load cell	Output (mV/V) 2.0, 5-12V, 10kg (Max load)	±0.02%
Pressure gauge	Measuring pressure maximum 55 bar	±3%

3.3 การวิเคราะห์ข้อมูล

3.3.1 ความชื้นผลิตภัณฑ์ (Moisture content, MC) การหาความชื้นดำเนินการโดยเตรียมผลิตภัณฑ์บางส่วนเข้าอบแห้งในตู้อบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 103°C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง ตามมาตรฐานของ AOAC (2019) เพื่อใช้ในการหาน้ำหนักแห้ง หลังจากนั้นนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาค่าความชื้นที่แต่ละช่วงเวลาได้ดังสมการที่ (1)

$$MC = \frac{w - d}{d} \quad (1)$$

เมื่อ MC คือ ความชื้นมาตรฐานแห้งที่แต่ละช่วงเวลา (d.b.)
w คือ มวลเปียกของผลิตภัณฑ์ที่แต่ละช่วงเวลา (g)
d คือ มวลแห้งของผลิตภัณฑ์ (g)

3.3.2 อัตราการอบแห้ง (Drying rate, DR) เป็นตัวแปรบ่งชี้ถึงค่าความชื้นที่ระเหยได้ต่อหน่วยเวลา โดยมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (2) (Vijayan *et al*., 2016; Karthikeyan & Murugavelh, 2018)

$$DR = \frac{\Delta w}{\Delta t} \quad (2)$$

เมื่อ DR คือ อัตราการอบแห้ง (g/h)
Δw คือ มวลน้ำที่ระเหย (g)
Δt คือ เวลาที่เปลี่ยนแปลง (h)

3.3.3 อัตราการดึงน้ำออกจำเพาะ (Specific moisture extraction rate, SMER) คือ ปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากผลิตภัณฑ์ต่อพลังงานที่ใช้ เขียนสมการความสัมพันธ์ดังสมการที่ (3) (Chapchaimoh *et al*., 2016; Salih *et al*., 2017; Tunckal & Doymaz, 2020)

$$SMER = \frac{w_i - w_f}{E} \quad (3)$$

เมื่อ SMER คือ อัตราการดึงน้ำออกจำเพาะ (kg/kWh)
w_i คือ มวลเปียกก่อนอบแห้ง (kg)
w_f คือ มวลเปียกหลังอบแห้ง (kg)
E คือ ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ (kWh)

3.3.4 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific energy consumption, SEC) เป็นค่าที่แสดงถึงประสิทธิภาพการใช้พลังงาน ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (4)

$$SEC = \frac{3.6E}{w_i - w_f} \quad (4)$$

เมื่อ SEC คือ ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (MJ/kg)
w_i คือ มวลเปียกก่อนอบแห้ง (kg)
w_f คือ มวลเปียกหลังอบแห้ง (kg)

3.3.5 สัมประสิทธิ์สมรรถนะปั๊มความร้อน (Coefficient of performance of heat pump, COP_h) ซึ่งนิยามด้วยอัตราส่วนของอัตราการถ่ายเทความร้อนที่เครื่องควบแน่นต่อพลังงานไฟฟ้าที่เครื่องอัดไอใช้ ดังสมการที่ (5) (Salih *et al*., 2017; Tunckal & Doymaz, 2020)

$$COP_h = \frac{Q_c}{P_c} \quad (5)$$

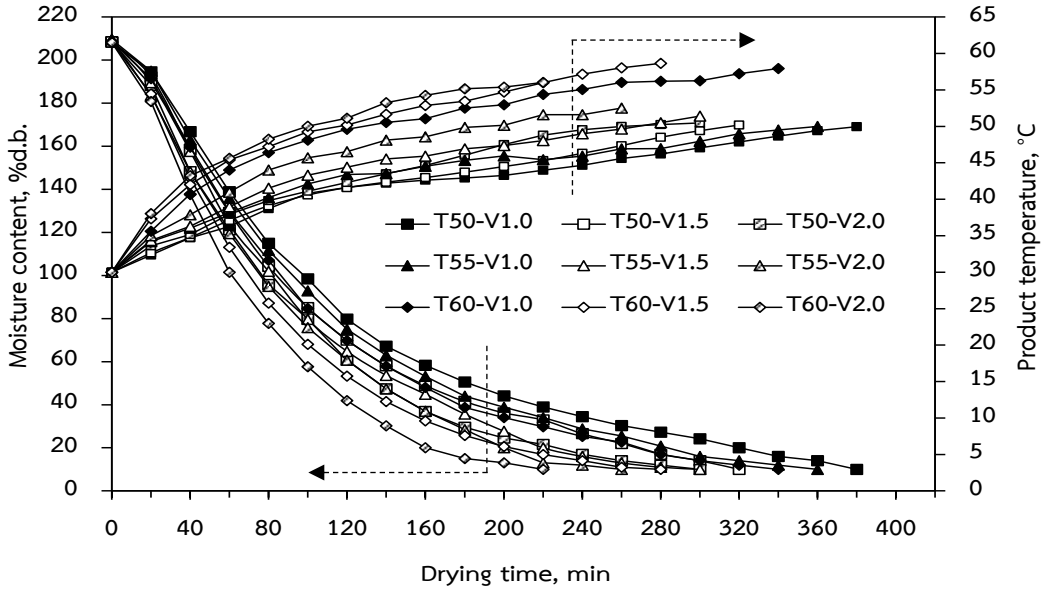
เมื่อ COP_h คือ สัมประสิทธิ์สมรรถนะปั๊มความร้อน (decimal)
Q_c คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนที่เครื่องควบแน่น (kW)
P_c คือ กำลังไฟฟ้าที่เครื่องอัดไอ (kW)

4. ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

ผลการศึกษาการอบแห้งกล้วยน้ำว้าดิบด้วยเครื่องอบแห้งปั๊มความร้อนที่เลือกใช้สารทำความเย็น R32 ภายใต้เงื่อนไขการทดลองอุณหภูมิอบแห้ง 50, 55 และ 60°C และความเร็วลม 1.0, 1.5 และ 2.0 m/s ตามลำดับ มีรายละเอียดผลการทดลองดังต่อไปนี้

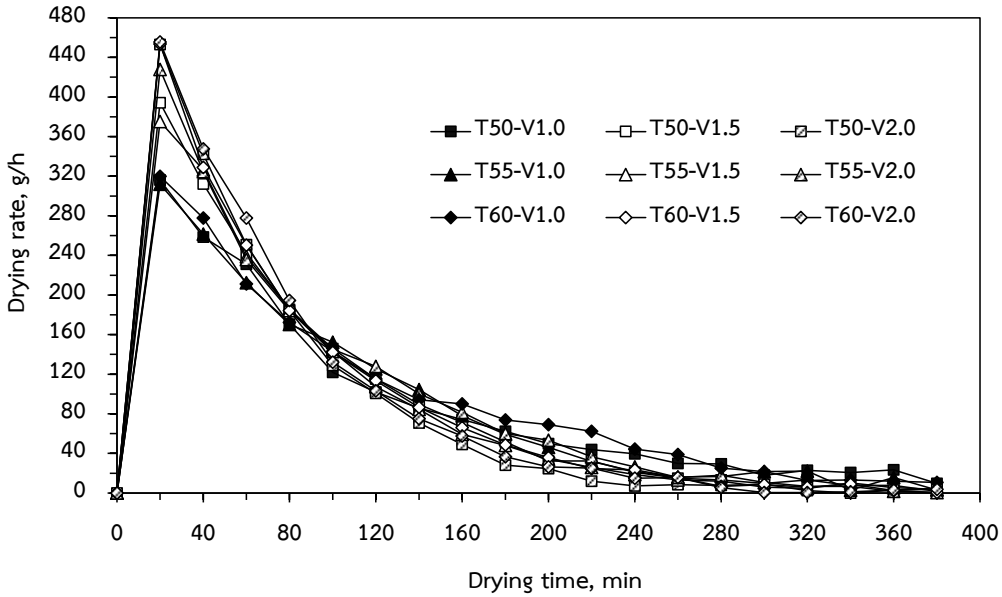
ภาพที่ 2 แสดงการเปลี่ยนแปลงความชื้นผลิตภัณฑ์และอุณหภูมิภายในผลิตภัณฑ์ในแต่ละเงื่อนไขการทดลอง จากข้อมูลพบว่า ความชื้นผลิตภัณฑ์ลดลงค่อนข้างรวดเร็วในช่วง 100 นาทีแรก หลังจากนั้นอัตราการลดลงจะเริ่มช้าลง ในทำนองเดียวกันอุณหภูมิผลิตภัณฑ์ก็จะเพิ่มขึ้นตามเวลาการอบแห้ง และพบว่าการเพิ่มอุณหภูมิอบแห้งและความเร็วลมจะส่งผลทำให้ระยะเวลาการอบแห้งลดลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัย Norhaida *et al*. (2019) ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอบแห้งจะเพิ่มผลต่างอุณหภูมิระหว่างอากาศร้อนและกล้วยน้ำว้าดิบ ทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนมากขึ้นและ

ขณะเดียวกันก็ทำให้การระเหยความชื้นออกจากผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นปัจจัยที่ทำให้เวลาในการอบแห้งสั้นลง และในทำนองเดียวกันการเพิ่มความเร็วลมก็จะส่งผลต่อการเพิ่มสัมประสิทธิ์การพาความร้อน ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้ก็จะทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน จากข้อมูลสรุปได้ว่าเงื่อนไขอุณหภูมิอบแห้ง 60°C และความเร็วลม 2.0 m/s จะใช้เวลาในการอบแห้งสั้นที่สุดเท่ากับ 220 นาที และเงื่อนไขอุณหภูมิอบแห้ง 50°C และความเร็วลม 1.0 m/s จะใช้เวลาในการอบแห้งนานที่สุดเท่ากับ 380 นาที

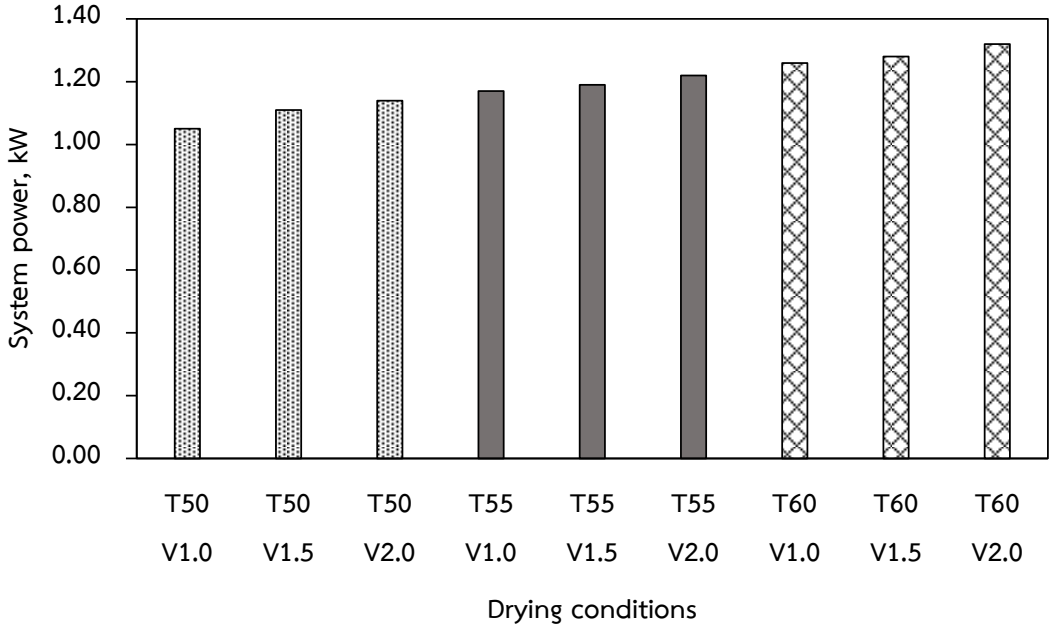


ภาพที่ 2 การเปลี่ยนแปลงความชื้นและอุณหภูมิผลิตภัณฑ์แต่ละเงื่อนไขการทดลอง

ภาพที่ 3 แสดงลักษณะการเปลี่ยนแปลงอัตราการอบแห้งตามระยะเวลาอบแห้งที่แต่ละเงื่อนไขการทดลอง จากข้อมูลจะพบว่าในช่วงแรกของการทดลองเป็นช่วงการเพิ่มอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ดังข้อมูลที่นำเสนอในภาพที่ 2 และจากการพิจารณาข้อมูลในภาพที่ 3 จะพบว่า ช่วงพฤติกรรมการอบแห้งกล้วยน้ำว้าดิบด้วยเครื่องอบแห้งปั๊มความร้อนจะอยู่ในช่วงการอบแห้งลดลง (Falling rate period) นอกจากนั้นพบว่า การเพิ่มอุณหภูมิอบแห้งหรือการเพิ่มความเร็วลมจะมีผลทำให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัย Chapchaimoh *et al*. (2016) โดยสามารถอธิบายเหตุผลได้ในลักษณะทำนองเดียวกับการเปลี่ยนแปลงความชื้นตามเวลาอบแห้งที่แต่ละเงื่อนไขการทดลอง



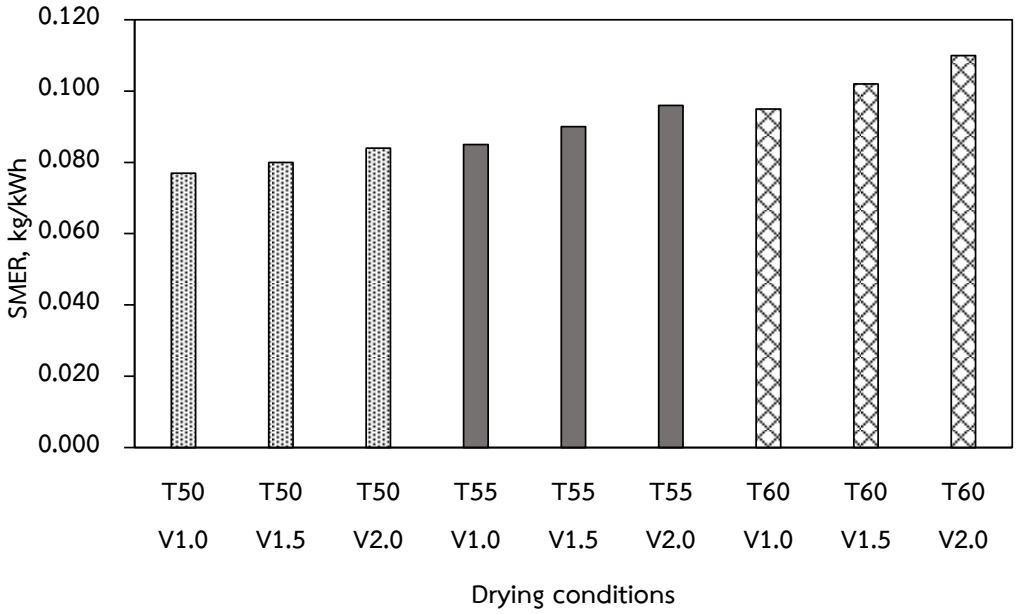
ภาพที่ 3 อัตราการอบแห้งของผลิตภัณฑ์แต่ละเงื่อนไขการทดลอง



ภาพที่ 4 กำลังไฟฟ้าเครื่องอบแห้งปั๊มความร้อนที่แต่ละเงื่อนไขการทดลอง

ภาพที่ 4 แสดงกำลังไฟฟ้าเครื่องอบแห้งปั๊มความร้อนที่แต่ละเงื่อนไขการทดลอง จากข้อมูลพบว่า กำลังไฟฟ้าเครื่องอบแห้งปั๊มความร้อนจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิอบแห้งและความเร็วลม ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า การเพิ่มอุณหภูมิอบแห้งจะส่งผลให้เครื่องอัดไอมีการทำงานเพิ่มมากขึ้นเพื่อสร้าง

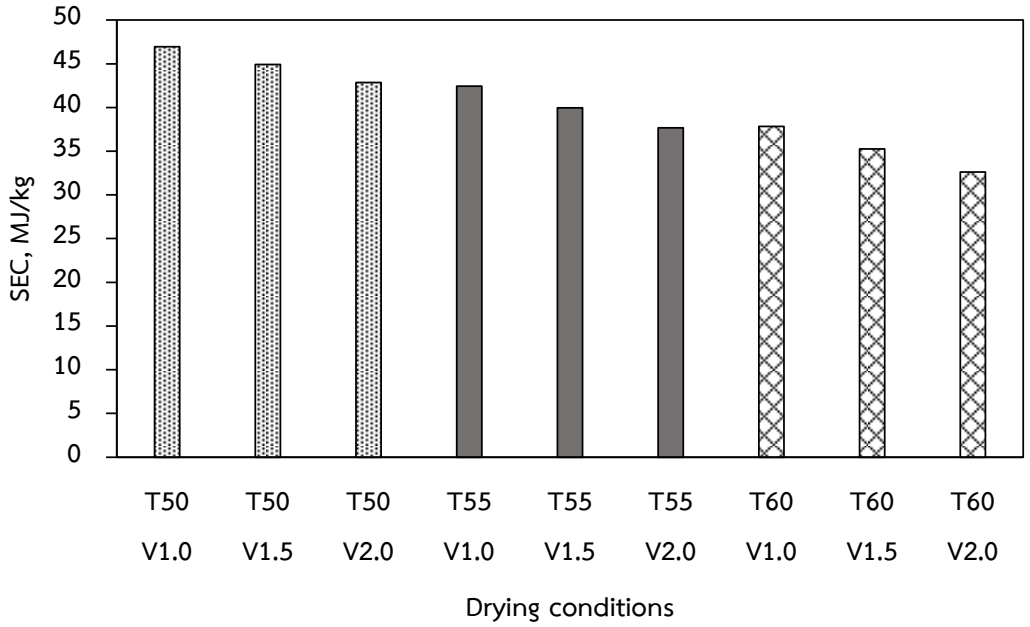
ความดันให้กับสารทำความเย็นให้อยู่ในระดับสูงเพียงพอและมีความสอดคล้องกับอุณหภูมิไออิ่มตัว เพื่อให้สามารถสร้างอุณหภูมิอบแห้ง (อุณหภูมิภายในห้องอบแห้ง) ตามที่ต้องการ และกระบวนการดังกล่าวจะส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของภาระทางความร้อนของเครื่องทำระเหยจากอุณหภูมิอบแห้งที่สูงมากขึ้น ผลที่ตามมาคือ สารทำความเย็นจะถูกปล่อยไปยังเครื่องทำระเหยในปริมาณที่เพิ่มขึ้น จากเหตุการณ์ดังกล่าวทำให้กำลังไฟฟ้าเครื่องอบแห้งปั๊มความร้อนเพิ่มมากขึ้น และในทำนองเดียวกัน การเพิ่มขึ้นของความเร็วลมจะส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของภาระทางความร้อนของเครื่องทำระเหยเช่นเดียวกันกับการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอบแห้ง ซึ่งทำให้สารทำความเย็นถูกปล่อยไปยังเครื่องทำระเหยในปริมาณที่มากเพียงพอเช่นเดียวกัน จึงทำให้กำลังไฟฟ้าเครื่องอบแห้งปั๊มความร้อนเพิ่มมากขึ้น นอกจากนั้นจากข้อมูลในภาพที่ 4 พบว่าเมื่ออุณหภูมิอบแห้งเพิ่มขึ้นร้อยละ 10 จะมีผลทำให้กำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเฉลี่ยประมาณร้อยละ 8 ในขณะที่เมื่อเพิ่มความเร็วลมร้อยละ 50 จะมีผลทำให้กำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเฉลี่ยประมาณร้อยละ 5



ภาพที่ 5 อัตราการดึงน้ำออกจำเพาะที่แต่ละเงื่อนไขการทดลอง

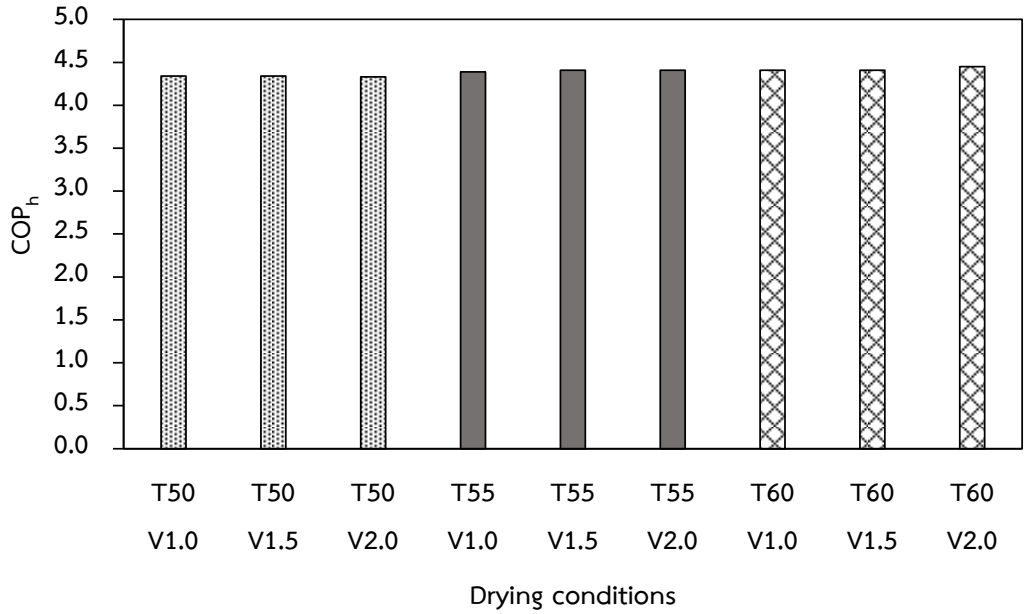
ภาพที่ 5 แสดงอัตราการดึงน้ำออกจำเพาะที่แต่ละเงื่อนไขการทดลอง ค่าที่นำเสนอดังกล่าวหากมีค่าสูงยิ่งบ่งชี้ถึงประสิทธิภาพการใช้พลังงาน จากข้อมูลพบว่า อัตราการดึงน้ำออกจำเพาะมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิอบแห้งและความเร็วลม ซึ่งพบว่าข้อสรุปนี้สอดคล้องกับผลการศึกษา Chapchaimoh *et al*. (2016), Cuneyt & Ibrahim (2020) และ Jing *et al*. (2020) โดยค่านี้แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพการใช้พลังงานที่เพิ่มมากขึ้น และจากงานวิจัยนี้พบว่าค่าอัตราการดึงน้ำออก

จำเพาะอยู่ระหว่าง 0.077 – 0.110 kg/kWh โดยเงื่อนไขที่มีค่าอัตราการดึงน้ำออกจำเพาะสูงที่สุด คือ อุณหภูมิอบแห้ง 60°C และความเร็วลม 2.0 m/s ซึ่งหากพิจารณาเฉพาะกำลังไฟฟ้าที่ใช้จะพบว่าเงื่อนไขนี้เครื่องอบแห้งปั๊มความร้อนใช้กำลังไฟฟ้าสูงที่สุด อย่างไรก็ตาม ที่เงื่อนไขนี้ใช้ระยะเวลาในการอบแห้งสั้นที่สุด เมื่อพิจารณาภายใต้เงื่อนไขการระเหยน้ำออกจากผลิตภัณฑ์เท่ากันจึงทำให้เงื่อนไขที่มีระยะเวลาการอบแห้งสั้นมีค่าอัตราการดึงน้ำออกจำเพาะสูง และค่านี้จะแปรผกผันกับความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะดังข้อมูลที่นำเสนอในภาพที่ 6



ภาพที่ 6 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่แต่ละเงื่อนไขการทดลอง

ภาพที่ 7 แสดงสัมประสิทธิ์สมรรถนะปั๊มความร้อนในแต่ละเงื่อนไขการทดลอง จากข้อมูลพบว่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะปั๊มความร้อนในแต่ละเงื่อนไขการทดลองมีค่าแตกต่างกันน้อยมาก ซึ่งมีค่าเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 4.34 – 4.45 โดยพบว่าค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะปั๊มความร้อนสอดคล้องกับผลการวิจัย Wang *et al*. (2018) และ Quancheng *et al*. (2019) ทั้งนี้หากพิจารณาตามสมการที่ (5) จะพบว่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะปั๊มความร้อนคืออัตราการถ่ายเทความร้อนที่เครื่องควบแน่นต่อกำลังไฟฟ้าที่เครื่องอัดไอ ซึ่งพลังงานทั้งสองชนิดนี้จะพบว่ามีการแปรผันแต่ละเงื่อนไขการทดลองในอัตราส่วนที่ใกล้เคียงกันมาก จึงส่งผลให้สัมประสิทธิ์สมรรถนะปั๊มความร้อนแต่ละเงื่อนไขการทดลองมีค่าที่ใกล้เคียงกัน ดังนั้นจึงสามารถกล่าวได้ว่าอุณหภูมิอบแห้งและความเร็วลมส่งผลต่อสัมประสิทธิ์สมรรถนะปั๊มความร้อนค่อนข้างน้อย



ภาพที่ 7 สัมประสิทธิ์สมรรถนะปั๊มความร้อนในแต่ละเงื่อนไขการทดลอง

ตารางที่ 2 สมรรถนะเครื่องอบแห้งปั๊มความร้อนที่ใช้สารทำความเย็นชนิด R32

รายการ	เงื่อนไขการศึกษา (อุณหภูมิ, ℃ : ความเร็วลม, m/s)								
	T50: V1.0	T50: V1.5	T50: V2.0	T55: V1.0	T55: V1.5	T55: V2.0	T60: V1.0	T60: V1.5	T60: V2.0
น้ำหนักกล้วยเริ่มต้น, g	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
ความชื้นเริ่มต้น, %d.b.	210	210	210	210	210	210	210	210	210
ความชื้นสุดท้าย, %d.b.	10	10	10	10	10	10	10	10	10
เวลาในการอบแห้ง, h	6.33	5.33	5.00	6.00	5.00	4.33	5.66	4.66	3.66
อัตราการอบแห้ง, g/h	107.58	127.77	136.20	113.50	136.20	157.27	120.32	146.14	186.07
พลังงานที่ใช้อบแห้ง, kWh	8.88	8.50	8.11	8.03	7.56	7.13	7.16	6.67	6.17
อัตราการดึงน้ำออกจำเพาะ, kg/kWh	0.077	0.080	0.084	0.085	0.090	0.096	0.095	0.102	0.110
ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ, MJ/kg	46.94	44.93	42.87	42.45	39.96	37.69	37.85	35.26	32.62
สัมประสิทธิ์สมรรถนะปั๊มความร้อน	4.34	4.34	4.33	4.39	4.41	4.41	4.41	4.41	4.45

ตารางที่ 2 นำเสนอข้อมูลในภาพรวมของการวิเคราะห์สมรรถนะเครื่องอบแห้งปั๊มความร้อนที่ใช้สารทำความเย็นชนิด R32 โดยข้อมูลสรุปในตารางดังกล่าว คือค่าเฉลี่ยตั้งแต่เริ่มต้นการทดลองจนกระทั่งสิ้นสุดการทดลอง พบว่า ที่เงื่อนไขอุณหภูมิ 60°C และความเร็วลม 2.0 m/s มีอัตราการอบแห้งเท่ากับ 186.07 g/h อัตราการดึงน้ำออกจำเพาะเท่ากับ 0.11 kg/kWh และสัมประสิทธิ์สมรรถนะปั๊มความร้อนสูงที่สุดเท่ากับ 4.45 นอกจากนั้นยังเป็นเงื่อนไขที่ให้ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำที่สุดด้วย

5. สรุปผล

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาและทดสอบสมรรถนะของเครื่องอบแห้งปั๊มความร้อนที่ใช้สารทำความเย็นชนิด R32 โดยใช้กล้วยน้ำว้าดิบเป็นตัวอย่างในการทดสอบ ผลจากการศึกษาพบว่า การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอบแห้งและความเร็วลมจะมีผลทำให้อัตราการอบแห้ง กำลังไฟฟ้าของเครื่องอบแห้งปั๊มความร้อน และอัตราการดึงน้ำออกจำเพาะมีค่าเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะมีค่าที่ลดลง นอกจากนั้นยังพบว่า การอบแห้งที่อุณหภูมิ 60°C ใช้ระยะเวลาในการอบแห้งสั้นที่สุด รองลงมาคือ อุณหภูมิ 55 และ 50°C ตามลำดับ และสุดท้ายยังพบว่าการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอบแห้งและความเร็วลมมีผลต่อสัมประสิทธิ์สมรรถนะของเครื่องอบแห้งปั๊มความร้อนค่อนข้างน้อย

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่สนับสนุนทุนและอุปกรณ์ในการวิจัยในครั้งนี้

7. เอกสารอ้างอิง

เพ็ญจันทร์ สุทธานุกูล, พรรณผกา รัตนโกศล, รักชัย คุรุบรรเจิดจิต และ จารินี จันทร์คำ. (2555). การคัดเลือกสายพันธุ์กล้วยน้ำว้ามีศักยภาพทางการค้าเพื่อการบริโภคผลสดเป็นอาหารเพื่อสุขภาพและการแปรรูป. **รายงานผลงานวิจัยศูนย์วิจัยพืชสวนสุโขทัย**

Abdullah, A., Radia, E., Yunho, H., Vikrant, A., & Reinhard, R. (2015). Testing simulation and soft-optimization of R410A low-GWP alternatives in heat pump system. **International Journal of Refrigeration**, 60, 106–117.

Akhilesh S., Jahar, S., & Rashmi R.S. (2019). Comparative analyses on a batch-type heat pump dryer using low GWP refrigerants. **Food and Bioproducts Processing**, 117, 1–13.

AOAC. (2019). **Official Methods of Analysis of AOAC International**, Virginia: Association of Official Analytical Chemists.

Chapchaimoh, N., Poomsa-ad, N., Wiset, L., & Morris, J. (2016). Thermal characteristics of heat pump dryer for ginger drying**. Applied Thermal Engineering**, 95, 491–498.

Cuneyt, T. & Ibrahim, D. (2020). Performance analysis and mathematical modelling of banana slices in a heat pump drying system. **Renewable Energy**, 150, 918-923.

Haonan, H., Qinqin, C., Jinfeng, B., Xinye, W., Xinwen, J., Xiao, L., Yening, Q. & Ying, L. (2020), Understanding appearance quality improvement of jujube slices during heat pump drying via water state and glass transition. **Journal of Food Engineering**, 272, 109-121.

Huelsz, G., Urbiola, S. L., Lopez, A. F., Rechtman, R. & Hernandez, C. G. (2012). Total energy balance method for venting electric clothes dryers. **Drying Technology**, 31, 576–586.

In, S., Cho, K., Lim, B., Kim, H., & Youn, B. (2014). Performance test of residential heat pump after partial optimization using low GWP refrigerants. **Applied Thermal Engineering**, 72, 315–322.

Jing, W. & Zhou, M. W. (2020). A comprehensive assessment of refrigerants for cabin heating and cooling on electric vehicles. **Applied Thermal Engineering,** 174, 1-11.

Karthikeyan, A. K., & Murugavelh, S. (2018). Thin layer drying kinetics and exergy analysis of turmeric (Curcuma longa) in a mixed mode forced convection solar tunnel dryer. **Renewable Energy**, 128, 305-312.

Kuan, M., Shakir, Y., Mohanraj, M., Belyayev, Y., Jayaraj, S. & Kaltayev, A. (2019). Numerical simulation of a heat pump assisted solar dryer for continental climates. **Renewable Energy**, 143, 214-225.

Levent, T., Mustafa, A., Seyfi, S., Mehmet, G., Gamze, U.S. & Burak, A. (2018) Determination of drying kinetics and quality parameters of grape pomace dried with a heat pump dryer. **Food Chemistry**, 260, 152–159.

Michael, J., Michael, B., Christian, K. & Espen, H. V. (2020). Modelica based modelling of heat pump-assisted apple drying for varied drying temperatures and bypass ratios. **Thermal Science and Engineering Progress**, 19, 100-111.

Norhaida, H., Ahmad, T., Siti, M.T., Wei, L. A., Masli, I. R. & Law, C. L. (2019). Comparison of drying kinetics and product quality from convective heat pump and solar drying of Roselle calyx. **Food and Bioproducts Processing**, 118, 40–49.

Niklas, B., Thomas, A., Wilhelm, T., & Marcos, B. (2019). Andreas M and Jurgen K. Exergetic analysis of different R744 heat pump tumble dryer system topologies. **Applied Thermal Engineering**, 161, 107-114.

Quancheng, D., Dechang, W., Xuerui, L., Yanhui, L. & Shaohong, Z. (2019). Thermal characteristics of a novel enclosed cascade-like heat pump dryer used in a tunnel type drying system. **Applied Thermal Engineering**, 155, 206–216.

Rony, A. S. & Chi, C. W. (2019). Comparative study for CO2 and R-134a heat pump tumble dryer – A rational approach. **International Journal of Refrigeration**, 106, 474–491.

Salih, C., Doymaz, I., Tunçkal, C., & Seçil, E. (2017). Investigation of drying kinetics of tomato slices dried by using a closed loop heat pump dryer. **Heat Mass Transfer**, 53, 1863–1871.

Tunckal, C., & Doymaz. I. (2020). Performance analysis and mathematical modelling of banana slices in a heat pump drying system. **Renewable Energy**, 150, 918-923.

Vijayan, S., Arjunan, T.V., & Kumar, A. (2016). Mathematical modeling and performance analysis of thin layer drying of bitter gourd in sensible storage based indirect solar dryer. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**, 36, 59-67.

Wang, J. F., Brown, C. & Cleland, D. J. (2018). Heat pump heat recovery options for food industry dryers. **International Journal of Refrigeration**, 86, 48–55.