

<http://journal.rmutp.ac.th/>

## การพัฒนาและประเมินผลเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนขนาดเล็ก สำหรับกล้วยน้ำว้าสไลด์

ไพโรจน์ จันท์แก้ว\*

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ตาก  
41/1 หมู่ 7 ถนนพหลโยธิน อำเภอเมือง จังหวัดตาก 63000

รับบทความ 29 พฤษภาคม 2563 แก้ไขบทความ 8 ธันวาคม 2563 ตอรับบทความ 28 ธันวาคม 2563

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาและทดสอบสมรรถนะเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนขนาดเล็กสำหรับกล้วยน้ำว้าสไลด์ ห้องอบขนาด  $0.48 \times 0.47 \times 0.39$  ลูกบาศก์เมตร ถูกออกแบบ สามารถบรรจุถาดขนาด  $0.33 \times 0.409$  ตารางเมตร จำนวน 3 ถาด คัดแปลงโบลเวอร์ของเครื่องปรับอากาศ ขนาดมอเตอร์ 174.6 วัตต์ สามารถปรับอัตราการไหลได้สามระดับ สำหรับให้ระบบหมุนเวียนของอากาศในเครื่องอบแห้ง มีวาล์วปรับอากาศไหลข้ามเครื่องทำระเหย ส่วนระบบปั๊มความร้อนใช้สารทำงาน R-134a ประกอบด้วยสี่อุปกรณ์หลัก คือเครื่องอัดแบบหุ้มปิดขนาด 497 วัตต์ เครื่องควบแน่น 1,800 วัตต์ วาล์วลดความดัน และเครื่องทำระเหย 1,300 วัตต์ ในการทดสอบสมรรถนะเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนขนาดเล็กใช้อากาศแบบปิด อากาศไหลข้ามเครื่องทำระเหยร้อยละ 60 อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 60 องศาเซลเซียส โดยปรับเปลี่ยนอัตราการไหล 0.117 0.128 และ 0.140 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที ใช้กล้วยน้ำว้าสไลด์จำนวน 400-500 กรัม มีความชื้นเริ่มต้น 244-281% dry basis อบแห้งกล้วยน้ำว้าสไลด์มีความชื้นสุดท้ายต่ำกว่า 6.35 % dry basis พบว่าทั้งสามอัตราการไหลใช้เวลาในการอบแห้ง 180 นาที ได้สัมประสิทธิ์สมรรถนะปั๊มความร้อน  $3.32 \pm 0.066$   $3.88 \pm 0.031$  และ  $4.24 \pm 0.08$  และได้อัตราการดึงน้ำออกจำเพาะ  $184.5 \pm 11.85$   $186.2 \pm 8.17$  และ  $200.1 \pm 21.34$  กรัมต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมง ตามลำดับ ที่อัตราการไหล 0.140 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที เป็นสถานะที่ดีที่สุดเนื่องจากให้ค่าอัตราการดึงน้ำออกจำเพาะสูง

**คำสำคัญ :** สมรรถนะการอบแห้ง; เครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนขนาดเล็ก; กล้วยน้ำว้าสไลด์

\* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร: +668 6732 4742, ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์: phairoac@rmutl.ac.th

<http://journal.rmutp.ac.th/>

## Development and Evaluation of Mini Heat Pump Dryer for Slice Banana

Phairoach Chunkaew\*

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna Tak  
41/1 Moo 7 Paholayothin road, Muang, Tak 63000

---

*Received 29 May 2020; Revised 8 December 2020; Accepted 28 December 2020*

### Abstract

The purposes of this research were to develop and to test performance of mini heat pump dryer for slice banana. Drying chamber of  $0.48 \times 0.47 \times 0.39 \text{ m}^3$  was designed and it could contain three trays. The three trays had dimension of  $0.33 \times 0.409 \text{ m}^2$ . A blower with 174.6 W motor of air condition was modify and could adjust flow rates of three levels for air cycle system in dryer. The air system had bypass air at evaporator. The refrigerant of R-134a and four main parts were used in the heat pump system. The four main parts were a 497 W hermetic compressor, a 1,800 W condenser, an expansion valve and a 1,300 W evaporator. Experiments for test performance of the mini heat pump dryer used close loop air system, an evaporator bypass air of 60 %, a temperature of  $60 \text{ }^\circ\text{C}$  and various flow rates of 0.117, 0.128 and  $0.140 \text{ m}^3/\text{s}$ . Slide bananas of 400-500 g had an initial moisture content of 244-281 %dry basis and were dried until final moisture content lower than  $6.24 \pm 0.007 \text{ %dry basis}$ . It was found that the flow rates of 0.117, 0.128 and  $0.140 \text{ m}^3/\text{s}$  had coefficients of performance ( $\text{COP}_h$ ) of  $3.32 \pm 0.066$ ,  $3.88 \pm 0.031$  and  $4.24 \pm 0.08$ , respectively and had specific moisture extraction rates (SMER) of  $184.5 \pm 11.85$ ,  $186.2 \pm 8.17$  and  $200.1 \pm 21.34 \text{ g/kWh}$ , respectively. The flow rate at  $0.140 \text{ m}^3/\text{s}$  was the best condition because it had high specific moisture extraction rate.

**Keywords :** Drying Performance; Mini Heat Pump Dryer; Slide Bananas

---

\* Corresponding Author. Tel.: +668 6732 4742, E-mail Address: [phairoac@rmutl.ac.th](mailto:phairoac@rmutl.ac.th)

## 1. บทนำ

เครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนมีการใช้งานมาเป็นเวลานาน และถูกพัฒนามาจนถึงปัจจุบันมีข้อดีคือสามารถอบแห้งในสถานะที่มีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ ใช้ระบบอากาศแบบปิดเนื่องจากมีเครื่องทำระเหยดึงน้ำออกจากอากาศขณะเดียวกันสามารถนำความร้อนคืนกลับเข้ามาในระบบปั๊มความร้อน ข้อเสียคือไม่สามารถใช้อุณหภูมิอากาศอบแห้งสูง มีการนำไปใช้อบแห้งผลไม้และผัก เช่น มะนาว [1] กากอุ่น [2] และ แครอท [3] เป็นต้น เครื่องอบแห้งที่คิดค้นแรก ๆ ใช้วิธีระบายความร้อนส่วนเกินด้วยการทำบายพาสสารทำงานไปยังเครื่องควบแน่นตัวนอก [4] ระยะต่อมาได้มีการพัฒนาเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนที่ใช้เครื่องอัดไอที่มีความเร็วรอบแปรผัน [5] โดยเครื่องอัดมีหน้าที่ปรับเปลี่ยนความเร็วรอบให้เหมาะสมกับภาระโหลดโดยไม่มีการระบายความร้อนทิ้งเหมือนเครื่องอบแห้งก่อนหน้าเป็นการใช้พลังงานอย่างคุ้มค่า และพบว่าเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนใช้อินเวอร์เตอร์ควบคุม นั้นให้สมรรถนะการอบแห้งที่สูงกว่าเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนประเภทบายพาสสารทำงานไปยังเครื่องควบแน่นตัวนอก [5], [6] จากหลักการดังกล่าวมีงานวิจัยหลายงานระบุถึงสีและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งชนิดนี้ว่าจัดอยู่ในเกณฑ์ดี [7] การอบแห้งโดยใช้ปั๊มความร้อนมีสมรรถนะสูงเมื่อใช้อุณหภูมิสูง ซึ่ง [8] สามารถควบคุมอุณหภูมิอากาศร้อนก่อนเข้าห้องอบแห้งสูงถึง 60 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ [9] ศึกษาผลของอากาศแวดล้อมที่มีผลกับสัมประสิทธิ์สมรรถนะของปั๊มความร้อนที่ใช้จริงในห้องอบแห้ง (Coefficient of Performance, COP<sub>n</sub>) ของโหมดการใช้งานโหมดแบบวงจรเดี่ยวมีขนาด 10.5 กิโลวัตต์ และโหมดแบบวงจรแบบสองขั้นตอน (Cascade Cycle Mode) ซึ่งวงจรอุณหภูมิด้านต่ำมีขนาด 9.1 กิโลวัตต์ และวงจรอุณหภูมิด้านสูงมีขนาด 10.5 กิโลวัตต์ พบว่าโหมดแบบวงจรเดี่ยว มีค่า COP<sub>n</sub> สูงกว่าโหมดแบบวงจรแบบสองขั้นตอน (Cascade Cycle Mode) เมื่ออุณหภูมิสิ่งแวดล้อมมากกว่า 2 องศาเซลเซียส [2] ได้ใช้เครื่องอบ

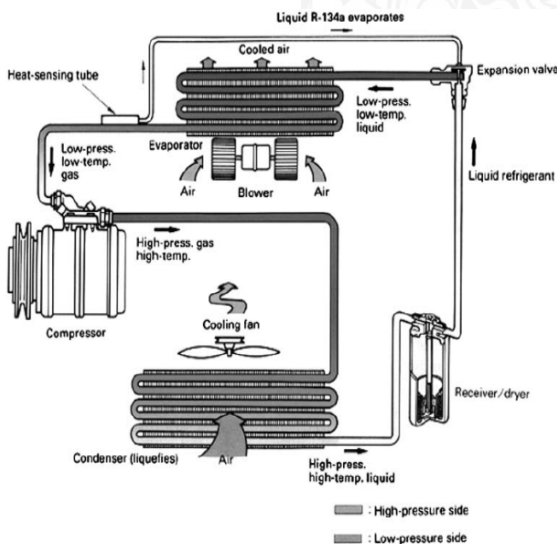
แห้งแบบปั๊มความร้อนขนาด 3.5 กิโลวัตต์ โดยใช้สารทำงาน R410A อบแห้งกากอุ่นที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส โดยใช้ความเร็ว 1.5 2 และ 2.5 เมตรต่อวินาที พบว่าเมื่อความเร็วเพิ่มขึ้นใช้เวลาในการอบแห้งน้อยลง [10] ศึกษาโหมดการควบคุมอุณหภูมิห้องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนแบบความเร็วรอบเครื่องอัดแบบแปรผันมี 2 วัฏจักรทดสอบโหมดการทำงานของอินเวอร์เตอร์แบบปิด-เปิด และแบบ พี ไอ ดี พบว่าโหมดการควบคุมอินเวอร์เตอร์แบบปิด-เปิด มีอัตราการดึงน้ำออกจำเพาะสูงกว่าโหมดการควบคุมอินเวอร์เตอร์แบบ พี ไอ ดี แต่อย่างไรก็ตามเครื่องอบแห้งที่มีอยู่ดังกล่าวยังคงมีขนาดตัวโครงสร้างที่ใหญ่ที่รองรับอุปกรณ์ของระบบปั๊มความร้อนและระบบอากาศที่ใช้ งาน ปัจจุบันวัตถุบิทางการเกษตรที่ใช้อบแห้งต่อครัวเรือนบางครั้งผลผลิตออกมามีไม่มากซึ่งเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนที่มีใช้มีขนาดใหญ่ไม่เหมาะสม ดังนั้นจึงพัฒนาเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนขนาดเล็กสำหรับใช้อบแห้งวัตถุบิทางการเกษตรคือ แป้งกล้วย ซึ่งมาตรฐานเลขที่ มผช.1375/2550 กองบริหารมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน (2550) [11] ได้กำหนดคุณภาพไว้ดังนี้ ลักษณะทั่วไปต้องเป็นผงละเอียด แห้ง ไม่จับตัวเป็นก้อน สีต้องมีสีที่ดีตามธรรมชาติของแป้งกล้วย กลิ่น ต้องมีกลิ่นที่ดีตามธรรมชาติของแป้งกล้วย ปราศจากกลิ่นอื่นที่ไม่พึงประสงค์ เช่น กลิ่นอับ กลิ่นหืน สิ่งแปลกปลอม ต้องไม่พบสิ่งแปลกปลอมที่ไม่ใช่ส่วนประกอบที่ใช้ เช่น เส้นผม ดิน ทราย กรวด ชิ้นส่วนหรือสิ่งปฏิกูลจากสัตว์ ความชื้น ต้องไม่เกินร้อยละ 12 โดยน้ำหนัก และจุลินทรีย์ ยีสต์ และรา ต้องไม่เกิน 500 โคโลนีต่อตัวอย่าง 1 กรัม สำหรับขั้นตอนการทำให้กล้วยน้ำว้าสไลด์อบแห้งสำหรับทำแป้งกล้วยใช้อุณหภูมิอบแห้งที่ 60 องศาเซลเซียส [12] ดังนั้นจุดเด่นของงานวิจัยที่แตกต่างจากงานวิจัยก่อนหน้าคือ เครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนมีขนาดเล็ก อุปกรณ์ที่ใช้ในระบบปั๊มความร้อนมีขนาดเล็กและมีขายในท้องตลาด ส่วนระบบการควบคุมอุณหภูมิในการอบแห้งใช้วิธีการควบคุมการทำงานของเครื่องอัดแบบปิด-เปิดร่วมกับการทำงานของวาล์วไฟฟ้าที่ติดตั้งก่อน

ลดความดันซึ่งปิดไม่ให้สารทำงานไหลผ่านไปยังลดความดันในช่วงเครื่องอัดหยุดการทำงานเมื่ออุณหภูมิอากาศร้อนถึงจุดที่ใช้งาน

## 2. รูปแบบหลักการทำงานของเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนที่มีการศึกษาวิจัย

### 2.1 เครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนใช้วิธีระบายความร้อนส่วนเกินด้วยการทำบายพาสสารทำงานไปยังเครื่องควบแน่นตัวนอก

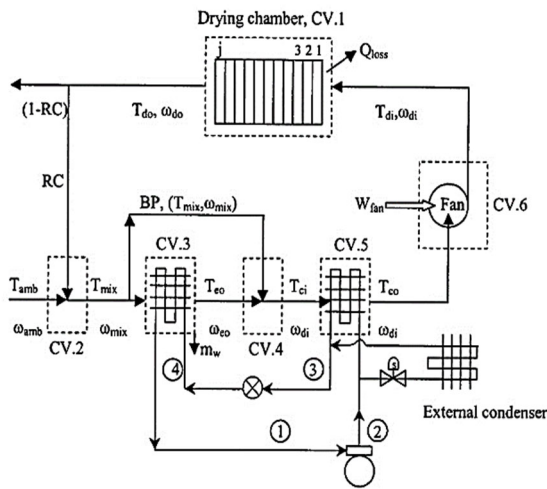
ระบบปั๊มความร้อนที่นิยมใช้กันมากที่สุดซึ่งออกแบบให้ทำงานในช่วงอุณหภูมิไม่สูงมาก ระบบปั๊มความร้อนจะมีอุปกรณ์หลัก ๆ เช่นเดียวกับระบบปรับอากาศหรือระบบทำความเย็น ที่มุ่งเน้นใช้ประโยชน์จากด้านร้อนของฝั่งเครื่องควบแน่นสำหรับเพิ่มอุณหภูมิของอากาศมีส่วนประกอบหลักดังนี้ เครื่องอัดหรือคอมเพรสเซอร์ (Compressor,  $W_{comp}$ ) เครื่องควบแน่นหรือคอนเดนเซอร์ (Condenser,  $Q_{rc}$ ) เครื่องทำระเหยหรืออีวาพอเรเตอร์ (Evaporator,  $Q_{re}$ ) และลิ้นลดความดัน หรือเอ็กซ์แพนชันวาล์ว (Expansion Valve) ดังรูปที่ 1



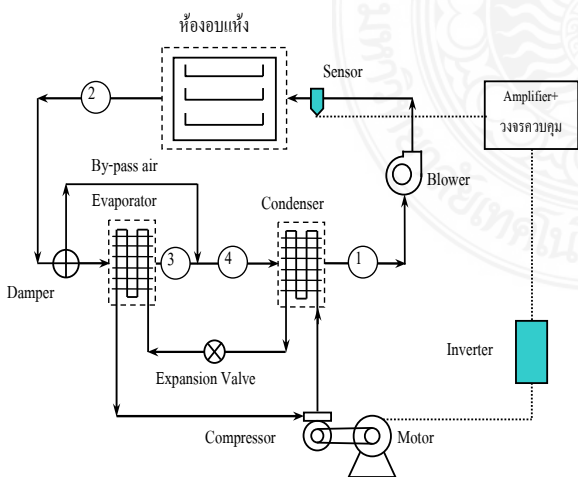
รูปที่ 1 ส่วนประกอบของระบบปั๊มความร้อน [13]

เครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนมีการดึงความชื้นออกจากอากาศก่อนอบแห้ง (Dehumidifying Heat Pump Dryer) จากทฤษฎีการอบแห้งเป็นที่ทราบกันว่า เมื่ออากาศที่ใช้ออบแห้งมีความชื้นต่ำ เป็นการเพิ่มความต่างศักย์ของความเข้มข้นไอน้ำที่ผิววัสดุอบแห้งกับไอน้ำในอากาศ ซึ่งเป็นการเพิ่มศักยภาพในการอบแห้ง เครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนจึงถูกออกแบบมาเพื่อจุดประสงค์นี้และสามารถอบแห้งได้ทั้งในระบบปิด (Closed System) และระบบเปิดบางส่วน (Partially Open System) ระบบปิดสามารถทำได้โดยปิดบานปรับลม ในระบบเปิดบางส่วนจะมีการนำอากาศภายนอกเข้ามาใช้ในระบบ และทิ้งอากาศร้อนขึ้นหลังอบแห้งสู่บรรยากาศไปในปริมาณที่เท่า ๆ กัน ความร้อนที่อากาศได้รับจากเครื่องควบแน่น เพื่อใช้ไปในการระเหยน้ำจากวัสดุอบแห้งจะถูกปรับคืน (Recovery) โดยผ่านทางเครื่องทำระเหยซึ่งความชื้นในอากาศจะถูกควบแน่นดึงออกมาในปริมาณที่เท่ากับปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากวัสดุอบแห้งสู่อากาศ อากาศหลังอบแห้งที่หมุนเวียนกลับไปใช้ในระบบจะมีบางส่วนที่ไหลข้ามเครื่องทำระเหย (By Pass Air) และไปผสมกับอากาศที่ออกจากเครื่องทำระเหยก่อนจะถูกส่งไปเพิ่มอุณหภูมิที่เครื่องควบแน่น เหตุผลที่บายพาสอากาศบางส่วนไหลข้ามเครื่องทำระเหย เนื่องจากในกระบวนการอบแห้ง ปริมาณลมที่ใช้มักจะมีเป็นจำนวนมาก ดังนั้นขนาดการทำความเย็นของเครื่องทำระเหยไม่อยู่ในวิสัยที่จะรับภาระจากอากาศร้อนได้ทั้งหมดในกรณีของระบบปิด สำหรับระบบควบคุมอุณหภูมิภายในห้องอบแห้งไม่สูงเกินความต้องการ สภาวะภายในห้องอบแห้งจะต้องอยู่ในสภาวะสมดุลทางความร้อน ซึ่งตามกฎหมายพลังงานไม่สามารถที่จะทำได้ เนื่องจากมีงานภายนอกซึ่งเป็นงานที่ป้อนให้กับเครื่องอัดไอและพัดลมใส่ให้กับระบบตลอดเวลาโดยเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของความร้อน รวมทั้งเมื่อวัสดุอบแห้งมีความชื้นต่ำลงส่งผลให้อัตราแลกเปลี่ยนความร้อนที่เครื่องควบแน่นตัวในให้กับ

อากาศมีความต้องการลดลงด้วยแต่เครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนชนิดนี้เครื่องอัดทำงานตลอดเวลาตั้งนั้นจึงมีความจำเป็นต้องมีชุดเครื่องควบแน่นตัวนอกเพื่อระบายความร้อนส่วนเกินสำหรับควบคุมอุณหภูมิอากาศให้คงที่ วงจรการทำงานของเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนชนิดนี้ตามรูปที่ 2



รูปที่ 2 วงจรการทำงานของเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนที่ใช้วิธีระบายความร้อนส่วนเกินด้วยการทำบายพาสสารทำงานไปยังเครื่องควบแน่นตัวนอก [4]



รูปที่ 3 วงจรการทำงานของเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนความเร็วรอบแปรผัน [5]

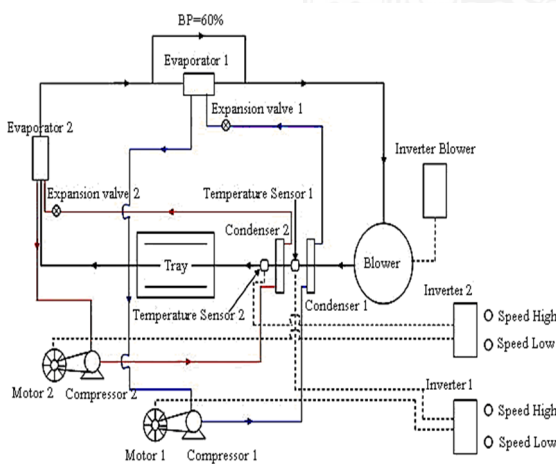
## 2.2 เครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนใช้อินเวอร์เตอร์มาใช้ในการปรับความเร็วรอบมอเตอร์ขับเคลื่อนเครื่องอัดไอของปั๊มความร้อน

เครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนชนิดนี้ใช้หลักการแปรเปลี่ยนอัตราการไหลของสารทำงานโดยไม่ใช้เครื่องควบแน่นตัวนอกในการควบคุมอุณหภูมิห้องอบแห้งแต่ใช้การปรับความเร็วรอบมอเตอร์ที่ใช้ขับเคลื่อนเครื่องอัดไอ ดังรูปที่ 3 [5] ได้ออกแบบเครื่องอบแห้งมีขนาดห้องอบแห้งขนาด 0.4x0.5x0.4 ลูกบาศก์เมตรบรรจุลำไยเฉพาะเนื้อได้จำนวน 10 ถาด (น้ำหนักลำไยเฉพาะเนื้อ 7.7-9 กิโลกรัม) ใช้ปั๊มความร้อนขนาด 1 ตันความเย็น และสารทำงานคือ R - 134a การประเมินสมรรถนะใช้วิธีการทดลอง กำหนดระบบลมร้อนเป็นระบบปิด มีเงื่อนไขในการอบแห้งคือใช้อุณหภูมิในการอบแห้งและความเร็วลมที่ 55 องศาเซลเซียส และ 0.7 เมตรต่อวินาที ตามลำดับ สัดส่วนอากาศข้ามเครื่องทำระเหยจะอยู่ในช่วงระหว่างร้อยละ 60-80 ลำไยเฉพาะเนื้อมีความชื้นเริ่มต้น 551-658 %dry basis อบแห้งจนมีความชื้นสุดท้าย 18 %dry basis พบว่าสัดส่วนอากาศข้ามเครื่องทำระเหยร้อยละ 60 ให้สมรรถนะดีที่สุด ใช้เวลาอบแห้ง 24 ชั่วโมง อัตราการอบแห้งเฉลี่ย 0.263 กิโลกรัม(น้ำ)ต่อชั่วโมง อัตราการดึงน้ำออกจำเพาะเฉลี่ย 0.302 กิโลกรัม(น้ำ)ต่อกิโลวัตต์ชั่วโมง ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบปั๊มความร้อนเฉลี่ยที่คำนวณจากวงจรสารทำงาน 7.096 ในการศึกษาคุณภาพของเนื้อลำไยหลังการอบแห้งโดยใช้สีเป็นบรรทัดฐานพบว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้มีสีเหลืองทอง และเมื่อใช้ผลจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถใช้ทำนายได้ดีสอดคล้องกับผลของการทดลอง

ไพโรจน์ จันทร์แก้ว และคณะ [8] ได้ทดสอบสมรรถนะเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อน 2 วัฏจักร ดังรูปที่ 4 โดยควบคุมอุณหภูมิอากาศก่อนเข้าห้องอบแห้งแบบใช้ความเร็วรอบเครื่องอัดแบบสูง-ต่ำ ซึ่งห้องอบแห้งมีขนาด 0.7x1.2x0.6 ลูกบาศก์เมตร ระบบหมุนเวียนของ

อากาศใช้พัดลมแบบแรงเหวี่ยง ชุดปั๊มความร้อนใช้ขนาด 1 ต้นความเย็น โดยใช้สารทำงาน R-134a เป็นสารทำงานจำนวน 2 ชุด การทดสอบเพื่อหาสมรรถนะใช้กล้วยน้ำว้าจำนวน 40 กิโลกรัม ซึ่งมีความชื้นเริ่มต้น 266.6 % dry basis ใช้วงจรอากาศแบบปิด อุณหภูมิและความเร็วอากาศก่อนเข้าห้องอบแห้ง  $60 \pm 2$  องศาเซลเซียส และ 0.65 เมตรต่อวินาที ตามลำดับ อบแห้งจนความชื้นลดลงเหลือ 65.8 % dry basis สัดส่วนอากาศไหลข้ามเครื่องทำระเหยวัฏจักรที่ 1 ร้อยละ 60 พบว่า ใช้เวลาการอบแห้ง 27 ชั่วโมง อัตราการอบแห้ง 0.81 กิโลกรัม(น้ำ)ต่อชั่วโมง ได้ค่า  $COP_h = 3.627$   $SMER_{ave} = 0.38$  กิโลกรัม(น้ำ)ต่อกิโลวัตต์ชั่วโมง และ ความสิ้นเปลืองพลังงานทั้งหมด 56.79 กิโลวัตต์ชั่วโมง

จากการศึกษางานวิจัยที่ศึกษาพอสรุปได้ว่า เครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนสามารถใช้อุปกรณ์จากระบบทำความเย็นหรือระบบปรับอากาศ อัตราการอบแห้งสูงเมื่อมีการใช้ความเร็ว และอุณหภูมิในการอบแห้งสูงแต่ระบบปั๊มความร้อนมีข้อจำกัด จากรายงานวิจัยสามารถใช้อุณหภูมิได้สูงสุดที่ 60 องศาเซลเซียส ซึ่งสามารถประยุกต์ในการอบแห้งกล้วยสไลด์ได้พอดีที่อุณหภูมิอบแห้ง 60 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4 ไดอะแกรมวงจรระบบควบคุมระบบปั๊มความร้อน 2 วัฏจักรโดยใช้ความเร็วรอบเครื่องอัดแบบสูง-ต่ำ [8]

### 3. ระเบียบวิธีวิจัย

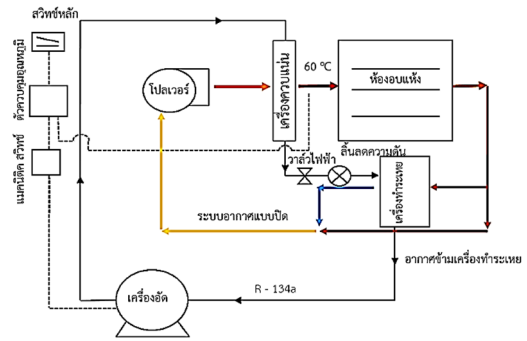
#### 3.1 วัสดุและวิธีการ

##### 3.1.1 การพัฒนาเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนขนาดเล็ก

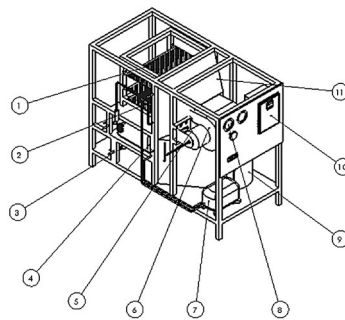
โดยการเลือกอุปกรณ์และจัดซื้อจัดหาอุปกรณ์ ทำการสร้างเครื่องอบแห้งโดยผนังปูด้วยฉนวนใยแก้ว และติดตั้งอุปกรณ์ ระบบปั๊มความร้อน ติดตั้งโบลเวอร์ พร้อมติดตั้งระบบไฟฟ้า ระบบควบคุมการทำงานของระบบปั๊มความร้อน เมื่อนำกล้วยสไลด์ใส่ในห้องอบแห้ง เปิดให้ระบบปั๊มความร้อนทำงาน เครื่องควบแน่นถ่ายเทความร้อนให้กับอากาศตามที่ตั้งอุณหภูมิไว้ ความร้อนในอากาศถ่ายเทความร้อนให้กับกล้วยสไลด์ระเหยเป็นไอ และทำให้อุณหภูมิที่ออกจากห้องอบแห้งลดลงแต่อัตราน้ำในอากาศมีค่าเพิ่มขึ้น อากาศที่ออกจากห้องอบแห้งผ่านเครื่องทำระเหยทำให้อากาศที่ผ่านเครื่องทำระเหยมีอุณหภูมิลดลง ทำให้อุณหภูมิที่ปนมากระทบต่อเย็นของเครื่องทำระเหยควบแน่นกลายเป็นของเหลว เมื่อน้ำที่ผิวกล้วยสไลด์แห้งลง น้ำที่อยู่ด้านในกล้วยสไลด์จะซึมออกมาสู่ผิวกล้วยสไลด์ ขนาดของโครงสร้างของเครื่องอบแห้ง มีขนาด  $0.510 \times 1.06 \times 0.85 = 0.459$  ลูกบาศก์เมตร ขนาดของถาดใส่กล้วยมีขนาด  $0.330 \times 0.409 = 0.134$  ตารางเมตร ตู้อบแห้งมีปริมาตรภายใน  $0.48 \times 0.47 \times 0.39 = 0.088$  ลูกบาศก์เมตร วัสดุที่นำมาใช้ทำผนังเลือกใช้เป็นสังกะสีแผ่นเรียบเป็นผนัง ใช้ฉนวนใยแก้วเป็นฉนวนกันความร้อน ใช้เครื่องอัดแบบหุ้มปิดยี่ห้อ Kultorn AE1360Y ขนาด 497 วัตต์ เครื่องควบแน่นสามารถถ่ายเทความร้อนได้ 1,800 วัตต์ และเครื่องทำระเหยสามารถถ่ายเทความร้อนได้ 1,300 วัตต์ ซึ่งเป็นอุปกรณ์ของรถยนต์ โบลเวอร์ที่ใช้เป็นโบลเวอร์ของระบบปรับอากาศแบบแยกส่วนยี่ห้อ IC รุ่น SCM4110357 ขนาดมอเตอร์ 174.6 วัตต์ โดยดัดแปลงใช้โบลเวอร์ด้านเดียวซึ่งมีขนาดเล็กพอเหมาะกับการดัดแปลงสำหรับผลัดดันอากาศให้ไหลในระบบอากาศของเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนขนาดเล็กดังนั้นจึงมี



ขีดจำกัดความสามารถในการผลิตต้นอากาศตั้งนี้สามารถปรับอัตราการไหล (Flow Rate,  $\dot{V}$ ) ได้สามระดับคือ 0.117 0.128 และ 0.140 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที โดยใช้ตัวปรับอัตราการไหลของพัดลมตั้งโต๊ะ เกจวัดความดันที่ใช้ยี่ห้อ Honsgsen และอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิใช้ตัวควบคุมอุณหภูมิ ยี่ห้อ TOHO รุ่น TTM-004 เพื่อควบคุมการทำงานของเครื่องอัดให้หยุดการทำงานที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และต่อการทำงานที่อุณหภูมิ 58 องศาเซลเซียส ซึ่งแตกต่างจากเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนที่เคยพัฒนามาก่อนหน้า เช่น ควบคุมอุณหภูมิโดยบายพาสสารทำงานบางส่วนไปยังเครื่องควบแน่นตัวนอกแต่เครื่องอัดยังทำงานอยู่ [4], [6] และอีกวิธีคือการควบคุมอุณหภูมิโดยใช้ความเร็วรอบเครื่องอัดแบบแปรผัน [10] วงจรการทำงานดังรูปที่ 5 และรูปที่ 6 แสดงรูปแบบเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนขนาดเล็ก



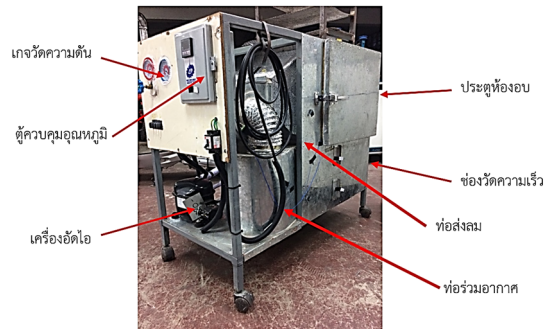
รูปที่ 5 การออกแบบวงจรเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนขนาดเล็ก



1. ถาดวัดอุณหภูมิ
2. เครื่องควบแน่น
3. บายพาส
4. เครื่องทำระเหย
5. มอเตอร์ขับพัดลม
6. โบลเวอร์
7. เครื่องอัดไอ
8. อุปกรณ์วัดความดัน
9. ท่อร่วมอากาศ
10. ชุดควบคุมอุณหภูมิ
11. ท่อเหลี่ยม

### 3.1.2 วัตถุประสงค์สำหรับการทดสอบ

กล้วยน้ำว้าดิบถูกนำมาใช้เป็นวัสดุที่ใช้ในการอบแห้งโดยกระบวนการนำมาปอกเปลือก และสไลด์ในแนวขวางซึ่งจะเป็นแผ่นกลมหนาประมาณ 2 มิลลิเมตร จากนั้นนำไปจัดเรียงบนถาดจำนวน 3 ถาด มีน้ำหนักประมาณ 400-500 กรัม ดังรูปที่ 7



รูปที่ 6 เครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนขนาดเล็ก

### 3.1.3 ตัวแปรที่ศึกษาสำหรับใช้ทดสอบหาสมรรถนะ

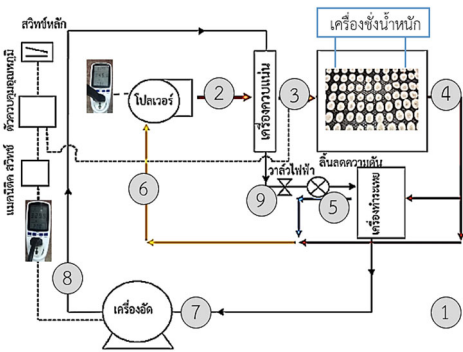
การทดสอบสมรรถนะโดยใช้อากาศแบบปิดอุณหภูมิก่อนเข้าห้องอบแห้ง 60 องศาเซลเซียส โดยแปรเปลี่ยนอัตราการไหล 0.117 0.128 และ 0.140 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที ซึ่งวัสดุอบแห้งกล้วยน้ำว้าดิบสไลด์มีความชื้นเริ่มต้น 244-281% dry basis และปรับสัดส่วนอากาศไหลข้ามเครื่องทำระเหยร้อยละ 60 เนื่องจากงานวิจัยก่อนหน้า [5] ให้สมรรถนะที่ดีที่สุดดังนั้นจึงนำมากำหนดใช้ในการทดสอบหาสมรรถนะโดยทำการอบแห้งจนมีความชื้นสุดท้ายต่ำกว่า 6.35 % dry basis และทำการทดสอบจำนวน 3 ซ้ำ



รูปที่ 7 กล้วยน้ำว้าดิบสไลด์สำหรับใช้ทดสอบ

3.1.4 ขั้นตอนการทดสอบ

ในการหาสมรรถนะของเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนขนาดเล็ก โดยวิเคราะห์จากวงจรอากาศในห้องอบแห้ง ซึ่งทดสอบแบบระบบปิด โดยใช้กล้วยน้ำว้าดิบสไลด์จำนวน 400-500 กรัม จากนั้นทำการอบแห้งจนมีความชื้นสุดท้าย โดยทดสอบที่อุณหภูมิอากาศก่อนเข้าห้องอบแห้ง 60 องศาเซลเซียส สัดส่วนของอากาศไหลเข้าเครื่องทำระเหย (BP) ร้อยละ 60 อัตราการไหลก่อนเข้าห้องอบแห้งตามเงื่อนไข จากนั้นทำการเก็บข้อมูลระหว่างการอบแห้ง คือ น้ำหนักของกล้วยที่อบแห้ง ความสิ้นเปลืองพลังงานของโบลเวอร์และเครื่องอัดไอ อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแวดล้อม อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศก่อนเข้าเครื่องควบแน่น อุณหภูมิอากาศออกจากเครื่องควบแน่น อุณหภูมิอากาศออกจากห้องอบแห้ง อุณหภูมิอากาศออกจากเครื่องทำระเหย อุณหภูมิอากาศก่อนเข้าโบลเวอร์ อุณหภูมิและความดันสารทำงานก่อนเข้าเครื่องอัด อุณหภูมิและความดันสารทำงานออกจากเครื่องอัด และอุณหภูมิสารทำงานออกจากเครื่องควบแน่นดังรูปที่ 8 โดยบันทึกผลทุก ๆ 15 นาที และนำข้อมูลที่เก็บมาวิเคราะห์หาสมรรถนะของเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนขนาดเล็ก



- ① อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแวดล้อม
- ② อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศก่อนเข้าเครื่องควบแน่น
- ③ อุณหภูมิอากาศออกจากเครื่องควบแน่น
- ④ อุณหภูมิอากาศออกจากห้องอบแห้ง
- ⑤ อุณหภูมิอากาศออกจากเครื่องทำระเหย
- ⑥ อุณหภูมิอากาศก่อนเข้าโบลเวอร์
- ⑦ อุณหภูมิและความดันสารทำงานก่อนเข้าเครื่องอัด
- ⑧ อุณหภูมิและความดันสารทำงานออกจากเครื่องอัด
- ⑨ อุณหภูมิสารทำงานออกจากเครื่องควบแน่น

รูปที่ 8 ตำแหน่งตรวจวัดในช่วงทดสอบเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนขนาดเล็ก

3.1.5 การประเมินสมรรถนะ

สมรรถนะของเครื่องอบแห้งส่วนใหญ่ใช้ค่าอัตราการดึงน้ำออกจำเพาะ (Specific Moisture Extraction Rate, SMER) ซึ่งใช้ในการเลือกสภาวะที่ให้สมรรถนะที่สูง ในการตรวจสอบพฤติกรรมของระบบอบแห้งแบบปั๊มความร้อนให้ได้ละเอียดมากขึ้น จึงได้ทำการวิเคราะห์ผลอื่น ๆ เช่น อัตราการอบแห้ง การคำนวณอัตราความร้อนที่เครื่องควบแน่น และค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของปั๊มความร้อนที่ใช้จริงในห้องอบแห้งดังต่อไปนี้

- อัตราการอบแห้ง (Drying Rate, DR) คือปริมาณน้ำที่ออกจากกล้วยสไลด์ต่อเวลาที่ใช้ดังสมการที่ (1)

$$DR = \frac{\text{Water}}{\text{Drying time}}, \text{ (g / min)} \quad (1)$$

- การคำนวณอัตราความร้อนที่เครื่องควบแน่นดังสมการที่ (2)

$$\dot{Q}_{ac} = \dot{m}_a C_a (T_{co} - T_{ci}) + \dot{m}_a W_d C_v (T_{co} - T_{ci}) \quad (2)$$

โดยที่

- $\dot{Q}_{ac}$  = อัตราความความร้อนของเครื่องควบแน่น, kW
- $T_{ci}$  = อุณหภูมิอากาศก่อนเข้าเครื่องควบแน่น, °C
- $T_{co}$  = อุณหภูมิอากาศออกจากเครื่องควบแน่น, °C
- $W_d$  = อัตราส่วนความชื้นของอากาศก่อนเข้าเครื่องควบแน่น,  $kg_{\text{water}}/kg_{\text{dry air}}$
- $C_a$  = ค่าความร้อนจำเพาะของอากาศแห้ง,  $kJ/kg \text{ } ^\circ C$
- $C_v$  = ค่าความร้อนจำเพาะของอากาศชื้น,  $kJ/kg \text{ } ^\circ C$
- $\dot{m}_a$  = อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศแห้งผ่านเครื่องควบแน่น,  $kg/s$

- ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของปั๊มความร้อนที่ใช้จริงในห้องอบแห้ง (Coefficient of Performance, COP<sub>h</sub>)

$$COP_h = \frac{\dot{Q}_{ac}}{W_{comp}} \quad (3)$$



โดยที่  $W_{comp}$  = อัตราความร้อนเครื่องอัด, kW และ  $W_{comp}$  ใช้ กิโลวัตต์ชั่วโมงบันทึกความสิ้นเปลืองของไฟฟ้าที่ป้อนให้กับมอเตอร์ที่ขับเครื่องอัดอาหารด้วยเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง

- อัตราการดึงน้ำออกจำเพาะ (Specific Moisture Extraction Rate, SMER) คือ ปริมาณน้ำที่ออกจากกล้วยสไลด์ต่อพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ตั้งสมการที่ (6)

$$SMER = \frac{\text{Water}}{\text{Total electric}}, \left( \frac{\text{g}}{\text{kW} \cdot \text{h}} \right) \quad (6)$$

หมายเหตุ ค่าที่แสดงในผลการทดสอบเป็นค่าเฉลี่ยจากการทดสอบ 3 ซ้ำ

### 3.1.6 สถิติสำหรับการวิเคราะห์ข้อมูล

จากการทำการทดสอบซ้ำดังนั้นผลการทดสอบใช้ค่าเฉลี่ย และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานในการนำเสนอในส่วนของการทดสอบ และใช้การทดสอบเปรียบเทียบเชิงซ้อนสำหรับทดสอบว่ามีค่าเฉลี่ยคู่ใดบ้างที่ไม่เท่ากัน โดยเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยหลาย ๆ คู่ในเวลาเดียวกันที่ระดับนัยสำคัญที่ 0.05

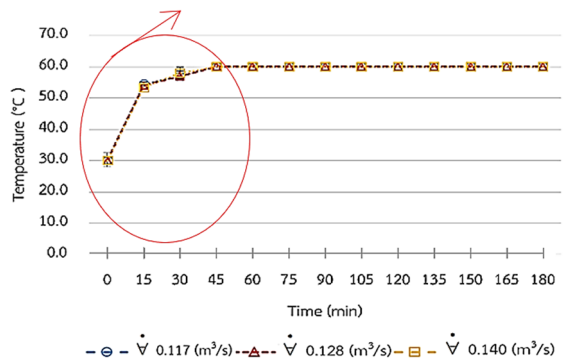
## 4. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

### 4.1 ผลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิก่อนเข้าห้องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนขนาดเล็ก

จากการทดสอบเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนขนาดเล็ก ที่ 0-45 นาที พบว่าเมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้นที่เวลาเดียวกันอุณหภูมิก่อนเข้าห้องอบแห้งลดลงเนื่องจากเมื่ออัตราการไหลของอากาศต่ำส่งผลให้อุณหภูมิอากาศที่ออกจากเครื่องควบแน่นสูง เป็นไปตามสมการที่ (2) เมื่อสมดุลสมการอัตราความร้อนที่ส่งมาจากสารทำงาน R-134a ที่ส่งมาแลกเปลี่ยนให้กับอากาศซึ่งเห็นได้ชัดเช่น ที่ 15 นาที ที่อัตราการไหล 0.117

0.128 และ 0.140 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที ได้อุณหภูมิ  $56.6 \pm 0.5$   $54.1 \pm 0.4$  และ  $51.9 \pm 2.3$  องศาเซลเซียสตามลำดับ ที่เวลาหลัง 45 นาที ตัวควบคุมอุณหภูมิควบคุมให้อากาศอยู่ที่ 60 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 9

เวลา (min)	อุณหภูมิก่อนเข้าห้องอบแห้ง (°C)		
	$\dot{V} = 0.117 \text{ m}^3/\text{s}$	$\dot{V} = 0.128 \text{ m}^3/\text{s}$	$\dot{V} = 0.140 \text{ m}^3/\text{s}$
0	30.2±2.3	29.9±1.2	30.1±1.1
15	56.6±0.5	54.1±0.4	51.9±2.3
30	57.0±0.6	57.0±1.6	56.1±2.0
45	60.0±0.0	60.0±0.0	57.7±2.7

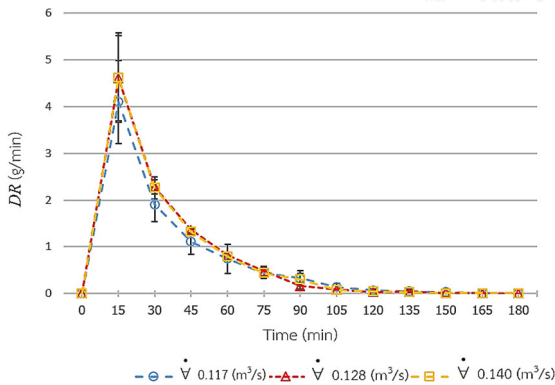


รูปที่ 9 ผลการควบคุมอุณหภูมิเฉลี่ยก่อนเข้าห้องอบแห้ง 60 องศาเซลเซียส ที่อัตราการไหล 0.117 0.128 และ 0.140 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที

### 4.2 ผลการเปลี่ยนแปลงอัตราการอบแห้ง (Drying Rate, DR)

การอบแห้งของเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนขนาดเล็ก เมื่ออบแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส อัตราการไหล 0.117 0.128 และ 0.140 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที ในช่วงแรกโดยเฉพาะที่ 15 นาที ได้ค่าอัตราการอบแห้งสูงกว่าช่วงเวลาอื่นและที่อัตราการไหล 0.140 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที อัตราการอบแห้งสูงรองลงมาที่อัตราการไหล 0.128 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที และน้อยสุดที่อัตราการไหล 0.117 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที เนื่องจากช่วง 15 นาที มีปริมาณน้ำที่อยู่ผิวกล้วยสไลด์จึงง่ายต่อการเปลี่ยนเฟสเป็นไอส่งผลให้อัตรา

การอบแห้งสูงส่วนตั้งแต่เวลา 30 นาที เป็นต้นไปอัตราการอบแห้งมีค่าลดลงตามระยะเวลาการอบแห้ง เนื่องจากน้ำที่อยู่ในกล้วยสไลด์ที่อยู่ในเนื้อกล้วยจะซึมออกมาถึงผิวกล้วยได้ช้า ส่งผลให้อัตราการอบแห้งลดลงตามระยะเวลาการอบแห้งเนื่องจากน้ำที่อยู่ในกล้วยสไลด์เริ่มลดลงตามเวลาอบแห้ง ที่อัตราการไหล 0.128 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที และอัตราการไหล 0.140 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที อัตราการอบแห้งไม่แตกต่างกันเนื่องจากความชื้นเริ่มต้นของอัตราการไหล 0.140 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที มีค่ามากกว่าอัตราการไหล 0.128 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที เล็กน้อยถึงแม้ว่าอัตราการไหล 0.140 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที มีอุณหภูมิอากาศต่ำกว่าอัตราการไหล 0.128 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที เล็กน้อยส่งผลให้ปริมาณน้ำที่ออกมีค่าไม่แตกต่างกันกับอัตราการไหล 0.128 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที แสดงดังรูปที่ 10

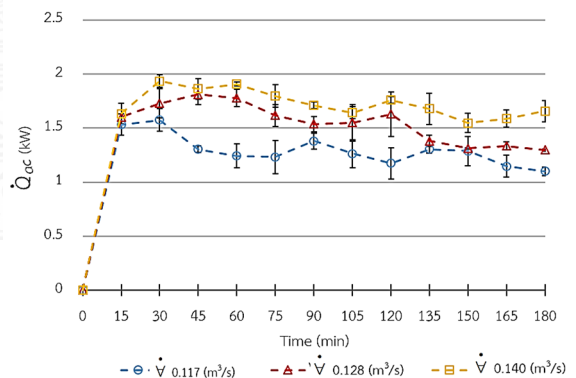


รูปที่ 10 การเปลี่ยนแปลงอัตราการอบแห้งกับเวลาอุณหภูมิเฉลี่ย 60 องศาเซลเซียส ที่อัตราการไหล 0.117 0.128 และ 0.140 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที

#### 4.3 อัตราความร้อนที่เครื่องควบคุม

การอบแห้งของเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนขนาดเล็กอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส อัตราการไหล 0.117 0.128 และ 0.140 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที พบว่าอัตราความร้อนเริ่มสูงขึ้น 15 ถึง 30 นาที

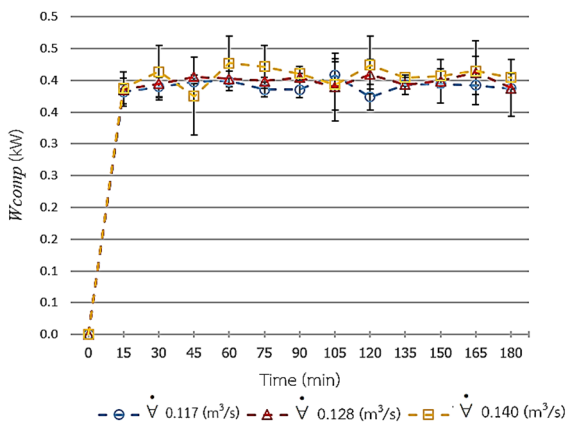
เนื่องจากความร้อนเข้าไปสะสมในโครงสร้างถาดและกล้วยสไลด์รวมถึงอัตราความร้อนของการดึงน้ำออกจากกล้วยสไลด์ จากนั้นอัตราความร้อนลดลงตามระยะเวลาที่มากขึ้นเนื่องจากปริมาณน้ำในกล้วยสไลด์เริ่มน้อยลงเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราการไหลพบว่าเมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้นอัตราความร้อนที่เครื่องควบคุมเพิ่มขึ้นเนื่องจากอัตราการไหลเชิงมวล ( $\dot{m}_a$ ) เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้อัตราความร้อนที่เครื่องควบคุมเพิ่มขึ้นตามสมการที่ (2) แสดงดังรูปที่ 11 เมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 10 กับรูปที่ 11 ในช่วงท้ายของการอบแห้งน้ำออกจากกล้วยน้อยมากแต่อัตราความร้อนมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยตามระยะเวลาอบแห้งเนื่องจากส่วนหนึ่งคือความร้อนสูญเสียให้กับสิ่งแวดล้อม และอีกส่วนหนึ่งสำหรับให้เกิดสมดุลความร้อนในวงจรกระแสอากาศในเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อน ซึ่งในการทำงานของเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนระบบอากาศเมื่ออากาศร้อนที่ออกจากห้องอบแห้งส่วนหนึ่งต้องเข้าเครื่องทำระเหยส่งผลให้อากาศส่วนนี้มีอุณหภูมิต่ำลงและไหลผสมกับอากาศที่ไหลข้ามเครื่องทำระเหยจากนั้นอากาศผสมถูกโบลเวอร์ผลักดันให้ไหลผ่านเครื่องควบคุมสำหรับเพิ่มอุณหภูมิอากาศ ดังนั้นในการสมดุลทำความร้อนการเปลี่ยนแปลงของอัตราความร้อนจึงปรากฏผลดังกล่าว



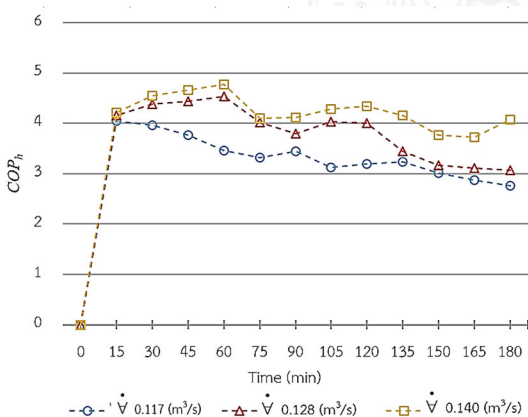
รูปที่ 11 การเปลี่ยนแปลงของอัตราความร้อนที่เครื่องควบคุมกับเวลาอุณหภูมิเฉลี่ย 60 องศาเซลเซียส ที่อัตราการไหล 0.117 0.128 และ 0.140 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที

#### 4.4 งานที่ใส่ให้เครื่องอัดไอ ( $W_{comp}$ )

เมื่อเพิ่มอุณหภูมิของอากาศที่ใช้ในการอบแห้ง ส่งผลให้ความดันและอุณหภูมิของสารทำงานด้านส่งของเครื่องอัดไอมีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้งานของเครื่องอัดไอเพิ่มขึ้น และเมื่ออัตราการไหลของอากาศที่ใช้ในการอบแห้งเพิ่มขึ้นงานของเครื่องอัดไอมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศมีค่าเพิ่มขึ้น ผลของงานที่ใส่ให้เครื่องอัดไอ แสดงดังรูปที่ 12



รูปที่ 12 งานที่ใส่ให้เครื่องอัดไอ ( $W_{comp}$ ) กับเวลาอุณหภูมิเฉลี่ย 60 องศาเซลเซียส ที่อัตราการไหล 0.117 0.128 และ 0.140 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที



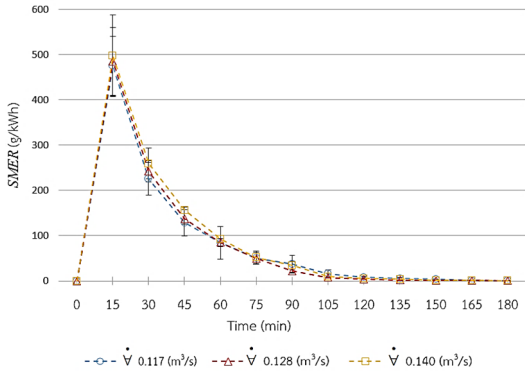
รูปที่ 13 การเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของปั๊มความร้อนกับเวลาอุณหภูมิเฉลี่ย 60 องศาเซลเซียส ที่อัตราการไหล 0.117 0.128 และ 0.140 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที

#### 4.5 ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของปั๊มความร้อน ( $COP_h$ )

สัมประสิทธิ์สมรรถนะปั๊มความร้อน ( $COP_h$ ) สามารถคำนวณได้โดยการเปรียบเทียบอัตราความร้อนที่ออกมาจากเครื่องควบแน่น กับงานที่ใช้ในการขับเครื่องอัดไอ เนื่องจากความสัมพันธ์ของระบบปั๊มความร้อนนั้นเมื่องานของเครื่องอัดไอเพิ่มขึ้นทำให้อัตราความร้อนที่เครื่องควบแน่นเพิ่มขึ้นด้วย พบว่า เมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้นสัมประสิทธิ์สมรรถนะปั๊มความร้อน ( $COP_h$ ) เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเนื่องจากระบบปั๊มความร้อนทำงานได้เต็มประสิทธิภาพ แสดงดังรูปที่ 13 เมื่อพิจารณาใช้เวลามากขึ้นค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะปั๊มความร้อนมีแนวโน้มลดลงทั้งสามอัตราการไหลเนื่องจากอัตราการอบแห้งลดลง ซึ่งเกิดจากปริมาณน้ำที่ออกจากกล้วยน้ำว่าดิบสไลด์มีปริมาณน้อยดังนั้นความต้องการความร้อนจากกระแสอากาศที่รับการถ่ายเทความร้อนจากเครื่องควบแน่นลดลงตาม แต่งานที่ใส่ให้เครื่องอัดจากรูปที่ 12 เปลี่ยนแปลงน้อยมาก

#### 4.6 การเปลี่ยนแปลงอัตราการดึงน้ำออกจำเพาะ (Specific Moisture Extraction Rate, SMER)

การเปลี่ยนแปลงอัตราการดึงน้ำออกจำเพาะเป็นอัตราน้ำที่ออกจากกล้วยน้ำว่าสไลด์ต่อการใช้พลังงานไฟฟ้าในเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนขนาดเล็ก จากการทดสอบสมรรถนะของเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนขนาดเล็กอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส อัตราการไหล 0.117 0.128 และ 0.140 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที พบว่าประสิทธิภาพในการดึงน้ำออกจำเพาะในช่วงเวลาที่ 0-15 นาที สูงและลดลงตามเวลาการอบแห้งทั้งสามอัตราการไหล และมีแนวโน้มเดียวกันกับการเปลี่ยนแปลงของอัตราการอบแห้ง และเมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้นอัตราการดึงน้ำออกจำเพาะเพิ่มขึ้นเนื่องจากอัตราความร้อนของอากาศมากขึ้นส่งผลให้น้ำออกจากกล้วยสไลด์ได้มากขึ้น ดังรูปที่ 14



รูปที่ 14 การเปลี่ยนแปลงอัตราการดึงน้ำออกจำเพาะกับเวลาอุณหภูมิเฉลี่ย 60 องศาเซลเซียส ที่อัตราการไหล 0.117 0.128 และ 0.140 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที

ตารางที่ 1 การเปรียบเทียบความสามารถของเครื่องอบแห้งกล้วยน้ำว้าสไลด์ของเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนขนาดเล็ก

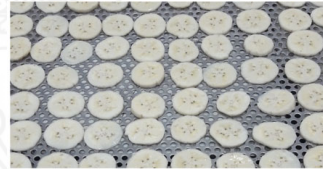
รายการ	$\dot{V} = 0.117 \text{ m}^3/\text{s}$	$\dot{V} = 0.128 \text{ m}^3/\text{s}$	$\dot{V} = 0.140 \text{ m}^3/\text{s}$	หน่วย
T	180	180	180	min
SMER	184.5±11.85 <sup>s</sup>	186.2±8.17 <sup>s</sup>	200.1±21.34 <sup>s</sup>	(g/kWh)
$W_{com}$	0.392±0.0032 <sup>h</sup>	0.398±0.007 <sup>h</sup>	0.407±0.0072 <sup>l</sup>	(kW)
$COP_h$	3.32±0.066 <sup>a</sup>	3.88±0.031 <sup>b</sup>	4.24±0.08 <sup>c</sup>	-
DR	1.730±0.105 <sup>d</sup>	1.774±0.068 <sup>d</sup>	1.816±0.018 <sup>d</sup>	(g/min)
$M_f$	6.35±0.001 <sup>e</sup>	6.12±0.397 <sup>e</sup>	6.27±0.073 <sup>e</sup>	(%dry basis)
$\dot{Q}_{ac}$	1.29±0.014 <sup>f</sup>	1.54±0.033 <sup>f</sup>	1.72±0.055 <sup>f</sup>	(kW)

หมายเหตุ อักษรต่างกันในแถวเดียวกันให้ความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

จากตารางที่ 1 จากเงื่อนไขอบแห้งให้กล้วยน้ำว้าสไลด์จนมีความชื้นสุดท้าย ( $M_f$ ) ต่ำกว่า 6.35 %dry basis ซึ่งทั้งสามอัตราการไหลได้ค่า  $M_f$  ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเพิ่มอัตราการไหล ค่า SMER DR และ  $\dot{Q}_{ac}$  มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แต่เนื่องจากทั้งสามอัตราการไหลที่ใช้แตกต่างกันไม่มากนักเนื่องจากผลมาจากขีดจำกัดในอุปกรณ์ที่เลือกใช้และใช้เวลาการอบแห้งเท่ากันดังนั้น ค่า SMER DR และ  $\dot{Q}_{ac}$  จึงไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

ส่วนค่า  $W_{comp}$  มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราการไหล 0.117 และ 0.140 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ส่วนที่อัตราการไหล 0.128 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญกับอัตราการไหลทั้งสอง เนื่องจากค่าอัตราการไหลใช้งานระหว่าง 0.117 กับ 0.128 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที และ 0.128 กับ 0.140 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที แตกต่างกันน้อยเกินไป

ส่วนค่า  $COP_h$  มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตาม  $\dot{Q}_{ac}$  และมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเพิ่มอัตราการไหล สภาวะที่เหมาะสมจากขอบเขตที่ศึกษา คือที่อัตราการไหล 0.140 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที เนื่องจากให้ค่า SMER DR และค่า  $COP_h$  สูงกว่าอัตราการไหล 0.117 และ 0.128 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที



กล้วยสไลด์ดิบ



กล้วยสไลด์อบแห้ง



กล้วยอบแห้งปั่นละเอียด



แป้งกล้วย

รูปที่ 15 ตัวอย่างลักษณะสีกล้วยของแป้งกล้วยที่ขั้นตอนต่าง ๆ อุณหภูมิเฉลี่ย 60 องศาเซลเซียส ที่อัตราการไหล 0.140 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที โดยเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนขนาดเล็ก

ผลทางด้านคุณภาพพิจารณาจากความชื้นสุดท้ายอยู่ในเกณฑ์ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน แป้งกล้วย [9] สีของแป้งกล้วยมีลักษณะสีใกล้เคียงกับกล้วยสไลด์ดิบ สีของแป้งกล้วยทั้งสามอัตราการไหลไม่

แตกต่างกันเนื่องจากใช้อุณหภูมิเฉลี่ยที่ 60 องศาเซลเซียส ตัวอย่างสีของกล้วยสไลด์อบแห้งตั้งแต่กล้วยสไลด์ดิบจนผลิตเป็นแป้งกล้วยที่อัตราการ 0.140 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที จากการบดละเอียดและคัดแยกแป้ง ดังรูปที่ 15

## 5. สรุป

เครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนขนาดเล็กสำหรับกล้วยน้ำว้าสไลด์ที่พัฒนามีขนาดห้องอบแห้ง  $0.48 \times 0.47 \times 0.39$  ลูกบาศก์เมตร สามารถบรรจุขนาด  $0.330 \times 0.409$  ตารางเมตร จำนวน 3 ถาด ใช้โบลเวอร์ขับด้วยมอเตอร์ 174.6 วัตต์ สำหรับระบบหมุนเวียนของอากาศที่ปรับอัตราการไหลได้สามระดับคือที่ 0.117 0.128 และ 0.140 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที ระบบปั๊มความร้อนใช้สารทำงาน R-134a และสี่อุปกรณ์หลัก คือเครื่องอัดแบบหุ้มปิดขนาด 497 วัตต์ ส่วนเครื่องทำระเหย 1,300 วัตต์ วาล์วลดความดัน และเครื่องควบแน่น 1,800 วัตต์ สามารถใช้อุณหภูมิสูงสุด 60 องศาเซลเซียส การควบคุมอุณหภูมิใช้วิธีการควบคุมการทำงานของเครื่องอัดแบบปิด-เปิดร่วมกับการทำงานของวาล์วไฟฟ้าที่ติดตั้งก่อนล้นลดความดัน ซึ่งปิดไม่ให้อากาศทำงานไหลผ่านไปยังล้นลดความดันในช่วงเครื่องอัดหยุดการทำงาน

ผลการทดสอบสมรรถนะเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนขนาดเล็กใช้กล้วยน้ำว้าสไลด์ ที่อุณหภูมิในการอบ 60 องศาเซลเซียส และอัตราการไหล 0.117 0.128 และ 0.140 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที ใช้วงจรอากาศแบบปิด และสัดส่วนอากาศไหลข้ามเครื่องทำระเหยร้อยละ 60 โดยความชื้นเริ่มต้นประมาณ 244-281% dry basis อบแห้งให้กล้วยน้ำว้าสไลด์ดิบจนมีความชื้นสุดท้ายต่ำกว่า 6.35 % dry basis พบว่าอัตราการไหล 0.117 0.128 และ 0.140 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที มีอัตราการอบแห้งเฉลี่ย (DR)  $1.730 \pm 0.105$   $1.774 \pm 0.068$  และ  $1.816 \pm 0.018$  กรัม(น้ำ)ต่อนาที

ตามลำดับ ค่าเฉลี่ยสัมประสิทธิ์สมรรถนะปั๊มความร้อนเฉลี่ย (COP<sub>p</sub>)  $3.32 \pm 0.066$   $3.88 \pm 0.031$  และ  $4.24 \pm 0.08$  ตามลำดับ และมีค่าประสิทธิภาพในการใช้พลังงานของระบบอบแห้ง (SMER)  $184.5 \pm 11.85$   $186.2 \pm 8.17$  และ  $200.1 \pm 21.34$  กรัมต่อกิโลวัตต์ชั่วโมง ตามลำดับ ดังนั้นที่อัตราการไหล 0.140 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที เป็นสถานะที่ดีที่สุดเนื่องจากให้ค่า SMER สูง

ผลทางด้านคุณภาพด้านความชื้นสุดท้ายอยู่ในเกณฑ์ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน และคุณภาพด้านสีของแป้งกล้วยทั้งสามอัตราการไหลมีลักษณะใกล้เคียงกับสีของกล้วยสไลด์ดิบ

## 6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ดาก ที่เอื้ออำนวยสถานที่ในการจัดเก็บข้อมูล

## 7. เอกสารอ้างอิง

- [1] W. Hao, H. Zhang, Sh. Liu, B. Mi and Y. Lai, "Mathematical modeling and performance analysis of direct expansion heat pump assisted solar drying system," *Renewable Energy*, vol. 165, pp. 77-87, Mar. 2021.
- [2] L. Taşeri, M. Aktaş, S. Şevik, M. Gülcü, G. Uysal Seçkin and B. Aktekel, "Determination of drying kinetics and quality parameters of grape pomace dried with a heat pump dryer," *Food Chemistry*, vol. 260, no. 15, pp. 152-159, Sep. 2018.
- [3] S. Liu, X. Li, M. Song, H. Li and Z. Sun, "Experimental investigation on drying performance of an existed enclosed fixed frequency air source heat pump drying

- system,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 130, no. 5, pp. 735–744, Feb. 2018.
- [4] U. Teeboonma, J. Tiansuwan and S. Soponronnarit, “Optimization of heat pump fruit dryers,” *Journal of Food Engineering*, vol. 59, no. 4, pp. 369–377, Oct. 2003.
- [5] A. Achariyaviriya, S. Achariyaviriya, Y. Namsanguan and P. Chunkaew, “Modified heat pump dryer for longan flesh drying,” in *Proceedings of IADC 2005 3rd Inter-American Drying Conference*, 2005, pp. C-6.
- [6] M. Chotswasd, “Effects of temperature control methods and drying conditions on heat pump dryer performance,” M. ENG. thesis, Dept. Energy ENG., Chiang Mai Univ., Chiang Mai, Thailand, 2007.
- [7] P. Chunkaew, “Design of Longan Flesh Heat Pump Dryer,” M. ENG. thesis, Dept. Mechanical ENG., Chiang Mai Univ., Chiang Mai, Thailand, 2005.
- [8] P. Chunkaew, A. Khadwilard, A. Tavata, Y. Sriudom, J. Visadmanee and P. Chorbamrung, “Performance of two-cycle heat pump dryer by max-min compressor round speed,” in *Proceeding of 10th Heat and Mass Energy Transfer in Thermal Equipment*, Chiang Mai Grand View Hotel, 2011, pp. 30-35.
- [9] J. Shen, T. Guo, Y. Tian and Z. Xing, “Design and experimental study of an air source heat pump for drying with dual modes of single stage and cascade cycle,” *Applied thermal engineering*, vol. 129, no. 25, pp. 280-289, Jan. 2018.
- [10] P. Chunkaew, Ch. Sritavorn, J. Visedmanee and Ch. Thawongamyingsakul, “Effect of Using Temperature Controller Modes with Variable Compressor Speed by Inverter on Heat Pump Dryer Performance,” in *Proceeding of the 8th Rajamagala University of Technology International Conference*, 2016, pp. 296-303.
- [11] *Banana Flour*, Community Product Standard number 1375/2550, 2007.
- [12] *Banana Product Processing Manual*, Nakhon Si Thammarat Rajabhat University, Nakhon Si Thammarat, NC, 2015, pp. 33–42.
- [13] S. Dayly, “Air-conditioning components,” in *Automotive Air-conditioning and Climate Control Systems*, First edition, Oxford, UK, 2006, pp. 91.