

แบบจำลองพลศาสตร์การอบแห้งกล้วยด้วยเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อน ความเร็วรอบแปรผัน

Dynamic Modeling of Banana Drying Using Variable Speed Drive Heat Pump Dryer

บุญมัน แสงสุลักษณ์¹, อารีย์ อัจฉริยวิริยะ^{1*} และ ศิวะ อัจฉริยวิริยะ¹

¹ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ 239 ถ.ห้วยแก้ว ต.สุเทพ อ.เมือง จ.เชียงใหม่ 50200

*ติดต่อ: E-mail aree@dome.eng.cmu.ac.th, เบอร์โทรศัพท์ 053-944146 ต่อ 953

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาแบบจำลอง พลศาสตร์ของการอบแห้งด้วย เครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนความเร็วรอบแปรผัน (VSD-HPD) สำหรับการอบแห้งกล้วยแผ่น และการจำลองสภาพการอบแห้งเพื่อศึกษาผลของอัตราการไหลจำเพาะของอากาศ (SAF) ที่มีต่อสมรรถนะการอบแห้งพิจารณาแบบปั๊มความร้อนที่เป็นระบบปิดหรือ RC เท่ากับ 100% สัดส่วนอากาศข้ามเครื่องทำระเหย 70% และใช้สารทำงาน R-134a ในการวิเคราะห์การอบแห้งแบบขั้นหนาใช้แบบจำลองการอบแห้งแบบใกล้สมดุลแบบจำลองของระบบปั๊มความร้อนเป็น รูปแบบเชิงทฤษฎีจากการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองได้ทำการเปรียบเทียบผลจากการจำลองสภาวะกับผล การทดลองที่อุณหภูมิอบแห้ง 60 °C ซึ่งได้ผลใกล้เคียงกันและจากการจำลองสภาวะการอบแห้งที่ SAF ต่างๆ (240 - 700 kg_{dry air}/kg_{dry product}-h) พบว่าที่ SAF เท่ากับ 240 kg_{dry air}/kg_{dry product}-h จะทำให้ค่า SMER_{เฉลี่ย} สูงสุดเท่ากับ 1.73 kg_{น้ำ}/kW-h ใช้เวลาอบแห้ง 6.24 h และค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของปั๊มความร้อนเฉลี่ย (COP_{hp-เฉลี่ย}) เท่ากับ 4.38

คำหลัก: อัตราการดึงความชื้นจำเพาะ/ปั๊มความร้อน/แบบจำลองการอบแห้ง/กล้วยน้ำว้า/อัตราการอบแห้ง

Abstract

This research developed a drying dynamic model of slice banana using a variable speed drive heat pump dryer (VSD-HPD). The simulation of mathematical drying model was also studied. The effect of specific airflow rate on drying performances were described. The system work under conditions, the fraction of air recycled was 100% and the fraction of the bypass air at the evaporator was 70%. The working fluid was R-134a. The behaviors of sample drying were analyze with a near-equilibrium model. Heat pump models was theoretical equations. Mathematical models were verified by an experimental result from banana drying of VSD-HPD. The results show that the simulated results were close to the experimental results. The specific airflow rate affected the drying efficiency which the specific airflow rate of 240 kg_{dry air}/kg_{dry product}-h gave the minimum drying time (DT) and the maximum average specific moisture extraction rate (SMER_{avr}) of 6.24 h and 1.73 kg_{water}/kW-h respectively and the average coefficient of heat pump performance (COP_{hp-avr}) of 4.38.

Keywords: specific moisture extraction rate /Heat Pump/Mathematical Models/banana/drying rate

1. บทนำ

เครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนได้เข้ามามีบทบาท และเป็นที่น่าสนใจอย่างมากที่จะเลือกนำมาใช้ในการอบแห้งวัสดุต่างๆ ทางเกษตร เพราะเครื่องอบแห้ง

แบบปั๊มความร้อนสามารถใช้พลังงานความร้อนได้คุ้มค่ากว่าเครื่องอบแห้งที่ใช้พลังงานความร้อนแบบเดิม คือ ขดลวดความร้อน และความร้อนจากการเผาไหม้น้ำมันเชื้อเพลิง ก๊าซธรรมชาติ และวัสดุเกษตร อีกทั้งการเผา

ไหมยังก่อให้เกิดมลภาวะทางอากาศ นอกจากนี้ผลิตภัณฑ์อาจมีสารปนเปื้อน และมีกลิ่นเหม็น เนื่องจากการเผาไหม้ที่นั่นด้วย และจากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาสามารถแบ่งประเภทของเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนตามวิธีการควบคุมอุณหภูมิในห้องอบแห้งได้เป็น 2 ประเภท คือ 1. การใช้วิธีระบายความร้อนส่วนเกินด้วยการทำบายพาสสารทำความเย็นไปยังเครื่องควบแน่นตัวนอก (Bypass working fluid heat pump dryer, BWF-HPD) 2. แบบที่มีการนำอินเวอร์เตอร์มาใช้ในการปรับความเร็วรอบมอเตอร์ขับเคลื่อนเครื่องอัดไอของปั๊มความร้อน (Variable speed drive heat pump dryer, VSD-HPD) เพื่อแปรเปลี่ยนอัตราการไหลของสารทำความเย็นให้เหมาะสมกับภาระทางความร้อนซึ่งสามารถสรุปได้ ดังนี้

ศิวะ และ เมธาวุฒิ [1] ได้ศึกษาเปรียบเทียบสมรรถนะของเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนระหว่าง BWF-HPD กับ VSD-HPD โดยทดลองอบแห้งกล้วยน้ำว้าแห้งที่มีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 210-230 %db. จนเหลือความชื้นสุดท้าย 16 %db. ที่อุณหภูมิอบแห้ง 40, 50 และ 60 °C สัดส่วนอากาศข้ามเครื่องทำระเหย 60, 70 และ 80% ความเร็วลมหน้าห้องอบแห้งคงที่ 1.3 m/s และเป็นระบบปิด พบว่าเครื่องอบแห้งแบบ VSD-HPD ให้ผลสมรรถนะการอบแห้งดีกว่าเครื่องอบแห้งแบบ BWF-HPD

Siva และ Methawut [2] ได้ศึกษาอิทธิพลของสัดส่วนอากาศข้ามเครื่องทำระเหยที่มีผลต่อสมรรถนะการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อน โดยทดลองอบแห้งกล้วยน้ำว้าแห้งที่มีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 215-229 %db. ความชื้นสุดท้ายที่ต้องการ 16 %db. ที่สัดส่วนอากาศข้ามเครื่องทำระเหย 60, 70 และ 80% อุณหภูมิอบแห้งคงที่ 60 °C ความเร็วลมที่หน้าห้องอบแห้งคงที่ 1.27 m/s และเป็นระบบปิด พบว่าที่สัดส่วนอากาศข้ามเครื่องทำระเหย 70% เครื่องอบแห้งแบบ VSD-HPD ให้ผลอัตราการดึงความชื้นจำเพาะ (SMER) สูงที่สุด

เหมือนจิต และ ศิวะ [3] ได้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนประเภท BWF-HPD เพื่อหาสภาวะการทำงานที่เหมาะสมที่สุดในการอบแห้งมะละกอแช่แข็ง โดยระบบปั๊มความร้อนใช้สารทำงาน R-22 จำลองสภาวะการอบแห้งมะละกอแช่แข็ง 100 kg. ที่มีความชื้นเริ่มต้น 40 %db. ความชื้นสุดท้ายที่ต้องการ 18 %db. ศึกษาที่ระบบปิด ระบบเปิด และระบบปิดบางส่วน โดยแต่ละระบบมีช่วงอัตราการไหล

ของอากาศ คือ 400 – 2000 kg_{dry air}/h, 200 – 600 kg_{dry air}/h และ 400 – 800 kg_{dry air}/h ตามลำดับ อุณหภูมิอบแห้ง 45, 50 และ 55 °C สัดส่วนอากาศข้ามเครื่องทำระเหย 0 - 80% พบว่าการอบแห้งด้วยระบบปิดให้สมรรถนะการอบแห้งดีที่สุด โดยมีเงื่อนไขการอบแห้งคือ อุณหภูมิอบแห้ง 55 °C สัดส่วนอากาศข้ามเครื่องทำระเหย 70% และอัตราการไหลของอากาศ 1398 kg_{dry air}/h

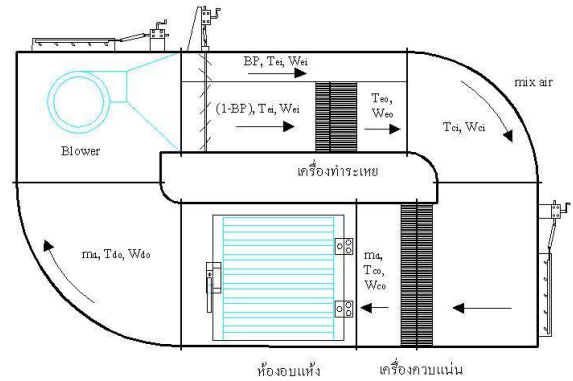
เอกกฤษ และ ศิวะ [4] ได้ศึกษาเปรียบเทียบสมรรถนะของเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนสำหรับอุตสาหกรรมขนาดเล็กที่มีวิธีการควบคุมอุณหภูมิลมร้อนแบบ BWF-HPD และ VSD-HPD โดยทดลองอบแห้งกล้วยน้ำว้าแห้งที่เริ่มต้น 33.59 kg ที่สัดส่วนอากาศข้ามเครื่องทำระเหยคงที่ 70% อุณหภูมิอบแห้งคงที่ 60 °C ความเร็วลมหน้าห้องอบแห้งคงที่ 1.25 m/s และเป็นระบบปิด พบว่าเครื่องอบแห้งแบบ VSD-HPD ให้ผลอัตราการดึงความชื้นจำเพาะเฉลี่ย และสัมประสิทธิ์สมรรถนะของปั๊มความร้อนเฉลี่ยสูงกว่าเครื่องอบแห้งแบบ BWF-HPD นอกจากนี้ยังได้ศึกษาอิทธิพลของความเร็วยุโรปเริ่มต้นของเครื่องอัดไอที่ 2000 rpm กับ 1600 rpm โดยทดลองอบแห้งใยผ้าอัดซูปน้ำที่มีความชื้นเริ่มต้น 217.4 %db. ให้เหลือความชื้นสุดท้ายที่ต้องการ 18 %db. ที่สัดส่วนอากาศข้ามเครื่องทำระเหยคงที่ 70% อุณหภูมิอบแห้งคงที่ 60 °C ความเร็วลมหน้าห้องอบแห้งคงที่ 1.25 m/s และเป็นระบบปิดสำหรับเครื่องอบแห้งแบบ VSD-HPD นั้นพบว่าการอบแห้งที่ใช้ความเร็วรอบเริ่มต้นของเครื่องอัดไอที่ 2000 rpm มีความสิ้นเปลืองพลังงานมากกว่าการใช้ความเร็วรอบเริ่มต้นของเครื่องอัดไอที่ 1600 rpm ในขณะที่ใช้เวลาในการอบแห้งให้เหลือความชื้นสุดท้ายเท่ากัน

U. Teeboonma et al. [5] ได้ศึกษาหาสภาวะการทำงานที่เหมาะสมที่สุดของการอบแห้งมะละกอแช่แข็งและมะม่วงแช่แข็งด้วยเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนประเภท BWF-HPD ด้วยการจำลองสภาวะการอบแห้งมะละกอแช่แข็งและมะม่วงแช่แข็งจำนวน 100 kg. ที่มีความชื้นเริ่มต้น 40 %db. และ 60 %db. ตามลำดับ จนเหลือความชื้นสุดท้ายที่ 18 %db. พบว่าสภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับอบแห้งมะละกอแช่แข็ง คือ ที่อุณหภูมิอบแห้ง 55 °C สัดส่วนอากาศข้ามเครื่องทำระเหย 69% อัตราการไหลจำเพาะของอากาศ 20.72 kg_{dry air}/kg_{dry product}-h และสัดส่วนอากาศนำกลับมาใช้ใหม่ 100% ส่วนมะม่วงแช่แข็ง คือ ที่อุณหภูมิอบแห้ง 55

๐C สัดส่วนอากาศข้ามเครื่องทำระเหย 71% อัตราการไหลจำเพาะของอากาศ 30.88 kg_{dry air}/kg_{dry product}-h และสัดส่วนอากาศนำกลับมาใช้ใหม่ 100%

ดังนั้นงานวิจัยนี้ จึงมีวัตถุประสงค์ที่จะ ทำการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อน ประเภท VSD-HPD ใช้สาร ทำงาน R-134a และจำลองสภาวะการอบแห้ง กลัวยน้ำว่าแผ่นเพื่อศึกษาอิทธิพลของอัตราการไหลจำเพาะของอากาศที่มีผลต่อสมรรถนะการอบแห้ง โดยศึกษาอัตราการไหลจำเพาะของอากาศในช่วง 240 – 700 kg_{dry air}/kg_{dry product}-h สัดส่วนอากาศข้ามเครื่องทำระเหย คงที่ 70% อุณหภูมิอบแห้งคงที่ 60 °C และเป็นระบบปิดโดยการจำลองสภาวะ การ อบแห้งกลัวยน้ำว่าแผ่นจะใช้โปรแกรม LabView เป็นโปรแกรมทำงาน

คุณสมบัติของสารทำงาน และแบบจำลองของสมรรถนะการอบแห้ง



รูปที่ 1 ผังแสดงระบบเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อน ความเร็วรอบแปรผัน

2. วิธีดำเนินงานวิจัย

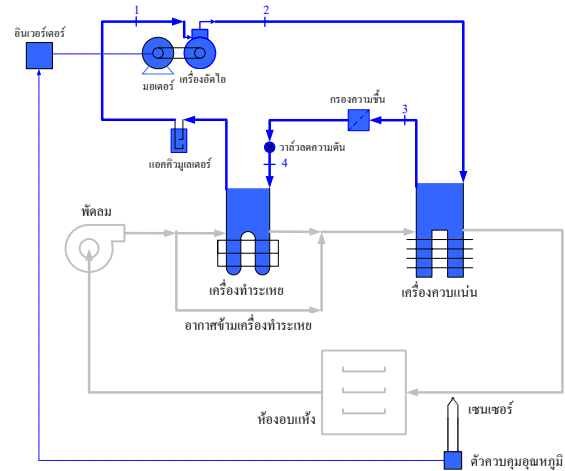
การดำเนินงานวิจัยแบ่งเป็น 3 ส่วนคือ การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้ง การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง และการจำลองสภาวะการอบแห้งเพื่อศึกษาอิทธิพลของ อัตราการไหลจำเพาะของอากาศที่มีผลต่อสมรรถนะการอบแห้ง

2.1 การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การอบแห้งวัสดุด้วย เครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อน ความเร็วรอบแปรผันที่เป็นระบบปิด มีการไหลเวียนของอากาศในระบบ (รูปที่ 1) โดยมีระบบปั๊มความร้อน ความเร็วรอบแปรผัน (รูปที่ 2) ประกอบด้วยอุปกรณ์สำคัญ คือ เครื่องควบแน่น, เครื่องทำระเหย, เครื่องอัดไอ, มอเตอร์ขับเคลื่อนเครื่องอัดไอ, วาล์วลดความดัน, อินเวอร์เตอร์ และชุดควบคุมอุณหภูมิ

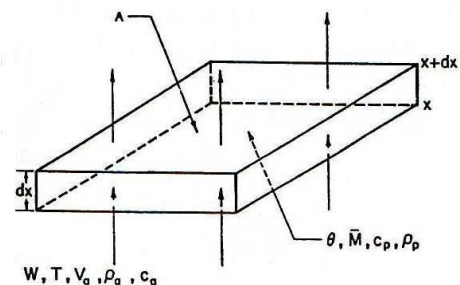
การพัฒนา แบบจำลอง ทางคณิตศาสตร์การอบแห้ง กลัวยน้ำว่าแผ่น ด้วยลมร้อนใช้ แบบจำลอง การอบแห้งแบบใกล้เคียงสมดุล เป็นการอบแห้งที่มีการเวียนลมร้อนกลับมาใช้ 100% โดยมีสมมุติฐานดังนี้

- 1) ไม่มีการหดตัวของปริมาตรวัสดุระหว่างอบแห้ง
- 2) เครื่องอบแห้งมีการหุ้มฉนวนหนาพอและไม่มีค่าความจุความร้อน
- 3) ชิ้นส่วนและอุปกรณ์ของระบบปั๊มความร้อนไม่มีการสูญเสียความร้อนให้กับอากาศแวดล้อม
- 4) ในระบบอบแห้งไม่มีการอัดตัวของอากาศ
- 5) ไม่คิดค่าความดันตกคร่อมเนื่องจากวัสดุอบแห้งแบบจำลองที่พัฒนาประกอบด้วย แบบจำลองในห้องอบแห้ง แบบจำลอง ระบบปั๊มความร้อนแบบจำลอง



รูปที่ 2 ผังแสดงระบบปั๊มความร้อนความเร็วรอบแปรผัน

2.1.1 แบบจำลองในห้องอบแห้ง



รูปที่ 3 การถ่ายเทพลังงานและมวลที่ปริมาตรควบคุม [6]

การคำนวณหาการลดลงของความชื้นวัสดุและสภาพอากาศออกจากห้องอบแห้ง(อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์) มีหลักการคือ ให้พิจารณา วัสดุอบแห้งเป็นชั้นบางมีความหนา dx และปริมาตรควบคุม Adx โดย

อากาศร้อนไหลผ่าน ดัง รูปที่ 3 วิเคราะห์หาสมการ ความสัมพันธ์ด้วยทฤษฎีของสมดุลมวลและพลังงาน ปริมาตรควบคุมสำหรับ แบบจำลอง การอบแห้งวัสดุ แบบ ใกล้เคียงสมดุลหลังการอบแห้งวัสดุเป็นขั้นในช่วงเวลา dt ตัวแปรที่จะคำนวณหาขึ้นต่อไปนี้

การคำนวณหาความชื้นของวัสดุหลังอบ

สมการการอบแห้งกึ่งทฤษฎีถูกนำมาใช้คำนวณหา อัตราการลดลงของความชื้น ดังนี้

$$\frac{dM}{dt} = -k(M - M_{eq}) \quad (1)$$

แก้สมการเชิงอนุพันธ์ ใช้วิธีการ แยกตัวแปร โดยมี เงื่อนไขเริ่มต้นคือ $M(0) = M_{in}$ และ $M(t) = M$ จะได้

$$\frac{M - M_{eq}}{M_{in} - M_{eq}} = \exp(-kt) \quad (2)$$

ทำการหาอนุพันธ์เทียบกับเวลา จะได้

$$\frac{dM}{dt} = (M_{in} - M_{eq})(-k) \exp(-kt) \quad (3)$$

ใช้หลักการ finite difference จะได้ความชื้นสุดท้าย ที่เวลาใดๆ ดังนี้

$$M_f = M_i - (M_{in} - M_{eq})(\Delta t)(k) \exp(-kt) \quad (4)$$

โดยจตุรรัตน์ และ ศิวะ [7] ได้หาค่าคงที่การอบแห้ง (k) ของกล้วยน้ำว้าแผ่นมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$k = 0.02T - 0.77RH + 1.35 \times 10^{-16}TRH - 0.34 \quad (5)$$

การคำนวณหาอุณหภูมิลมร้อนออกจากห้องอบ

ในขณะที่อากาศไหลผ่านวัสดุอบแห้งจะมีการถ่ายเท ความร้อนและความชื้นระหว่างอากาศกับวัสดุ โดยอากาศ จะมีอุณหภูมิลดลงแต่ความชื้นเพิ่มขึ้น ซึ่งกระบวนการ ดังกล่าวมีการเปลี่ยนแปลงค่าเอนทาลปีน้อยมาก จึง กำหนดให้เอนทาลปีของอากาศเข้าและออกจากห้อง อบแห้งเท่ากันดังนี้

$$\left[c_a T_{co} + W_{co} (h_g + c_v T_{co}) \right] = \left[c_a T_{do} + W_{do} (h_g + c_v T_{do}) \right]$$

หรือ
$$T_{do} = \frac{\left[c_a T_{co} + W_{co} (h_g + c_v T_{co}) - W_{do} h_g \right]}{(c_a + W_{do} c_v)} \quad (6)$$

การคำนวณหาอัตราส่วน ความชื้น ในอากาศ ออกจาก ห้องอบ

ปริมาณความชื้นในอากาศเพิ่มขึ้นหลังจากไหลผ่าน ชั้นวัสดุเท่ากับความชื้นที่ออกจากวัสดุคือ

$$(\Delta t)(\dot{m}_a)(W_{do} - W_{co}) = m_p (M_i - M_f)$$

$$\text{หรือ } W_{do} = \frac{m_p (M_i - M_f)}{(\Delta t)(\dot{m}_a)} + W_{co} \quad (7)$$

2.1.2 แบบจำลองระบบปั๊มความร้อน

แบบจำลองของระบบปั๊มความร้อนเป็นแบบจำลอง ทางทฤษฎี ประกอบด้วยแบบจำลองของเครื่องควบแน่น แบบจำลองของเครื่องทำระเหย และแบบจำลองของ เครื่องอัดไอ

แบบจำลองของเครื่องควบแน่น

พิจารณาอัตราการถ่ายเทความร้อนที่อากาศชั้นได้รับ จะเท่ากับอัตราการถ่ายเทความร้อนที่ออกจากสารทำ ความเย็น

$$\dot{Q}_{ac} = \dot{Q}_{rc} \quad (8)$$

$$\dot{Q}_{ac} = \dot{m}_a [c_a (T_{co} - T_{ci}) + W_{ci} c_v (T_{co} - T_{ci})] \quad (9)$$

$$\dot{Q}_{rc} = \dot{m}_r (h_3 - h_2) \quad (10)$$

แบบจำลองของเครื่องทำระเหย

พิจารณาอัตราการถ่ายเทความร้อนที่ออกจากอากาศ ชั้นจะเท่ากับอัตราการถ่ายเทความร้อนที่สารทำความเย็น ได้รับ

$$\dot{Q}_{ae} = \dot{Q}_{re} \quad (11)$$

$$\dot{Q}_{ae} = (1 - BP) \dot{m}_a \left[c_a (T_{ei} - T_{eo}) + (W_{ei} - W_{eo}) h_g \right] + W_{ei} c_v (T_{ei} - T_{eo}) \quad (12)$$

$$\dot{Q}_{re} = \dot{m}_r (h_1 - h_4) \quad (13)$$

จากการสมดุลมวลของ ไอน้ำและ การสมดุลพลังงาน ของอากาศชั้น จะได้

$$(1 - BP) \dot{m}_a W_{eo} = (1 - BP) \dot{m}_a (1 - BF) W_{cont.} + (1 - BP) \dot{m}_a BFW_{ei} \quad (14)$$

$$(1 - BP) \dot{m}_a [c_a T_{eo} + W_{eo} (h_g + c_v T_{eo})] = (1 - BP)(1 - BF) \dot{m}_a [c_a T_{cont.} + W_{cont.} (h_g + c_v T_{cont.})] + (1 - BP)(BF) \dot{m}_a [c_a T_{ei} + W_{ei} (h_g + c_v T_{ei})] \quad (15)$$

แบบจำลองของเครื่องอัดไอ

เครื่องอัดไอที่ใช้เป็นเครื่องอัดไอชนิดลูกสูบ ซึ่งมีการ อัดเป็นแบบโพลีโทรปิก จะได้

$$P_{com} = P_1 v_1 \dot{m}_r \left[\frac{n}{n-1} \right] \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{(n-1)}{n}} - 1 \right] \quad (16)$$

$$\dot{m}_r = \frac{(\eta_v)(P.D.)}{v_1} \quad (17)$$

$$\eta_V = \left[1 + C - C \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{1}{n}} \right] \quad (18)$$

2.1.3 แบบจำลองสมบัติของสารทำงาน

Cleland, A.C. [8] ได้เสนอสมการที่ใช้ในการคำนวณคุณสมบัติของสารทำงาน R-134a ดังนี้ ความดันและอุณหภูมิที่สถานะอิ่มตัว เอนทาลปีที่สถานะของเหลวอิ่มตัว เอนทาลปีที่สถานะไออิ่มตัว เอนทาลปีที่สถานะไอซูเปอร์ฮีต ปริมาตรจำเพาะที่สถานะไออิ่มตัว และปริมาตรจำเพาะที่สถานะไอซูเปอร์ฮีต โดยมีช่วงการใช้สมการได้ คือ อุณหภูมิอิ่มตัวอยู่ในช่วง -40°C to 70°C และอุณหภูมิไอซูเปอร์ฮีตน้อยกว่าหรือเท่ากับ 60°C

2.1.4 แบบจำลองของสมรรถนะการอบแห้ง

เทอมของ สมรรถนะการอบแห้งที่พิจารณา ได้แก่ ค่าอัตราการดึงความชื้นจำเพาะ (SMER, $\text{kg}_{\text{น้ำ}}/\text{kW-h}$) สัมประสิทธิ์สมรรถนะของปั๊มความร้อน (COP_{hp}) และเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (DT, h) สมการที่เกี่ยวข้องดังนี้

$$\text{SMER} = \frac{\text{ปริมาณน้ำระเหยจากวัสดุ}}{\text{ต่อพลังงานที่ใช้ทั้งหมด}} \quad (19)$$

$$\text{COP}_{\text{hp}} = \frac{h_2 - h_3}{h_2 - h_1} \quad (20)$$

$$\text{DT} = \text{เวลาทั้งหมดที่ใช้อบแห้ง} \quad (21)$$

2.2 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง การอบแห้ง

ทำการจำลองสภาวะการอบแห้งกล้วยน้ำว้าแผ่น ที่เงื่อนไขเดียวกับที่ทดลองของ เอกกฤษ และ ศิวะ [8] คือ อุณหภูมิอบแห้ง 60°C ความเร็วลมเข้าห้องอบ 1.25 m/s สัดส่วนอากาศข้ามเครื่องทำระเหย 70% และรอบเครื่องอัดไอเริ่มต้น 2000 rpm น้ำหนักวัสดุเริ่มต้น 33.59 kg และมีความชื้น $201 \% \text{db}$. อบจนเหลือความชื้น $18.8 \% \text{db}$. แล้วเปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองสภาพกับผลการทดลองได้แก่ การลดลงของความชื้น วัสดุอุณหภูมิเข้าและออกห้องอบแห้ง และเวลาที่ใช้อบแห้ง

2.3 การจำลองสภาวะการอบแห้งเพื่อศึกษาอิทธิพลของอัตราการไหลจำเพาะของอากาศ ที่มีผลต่อสมรรถนะการอบแห้ง

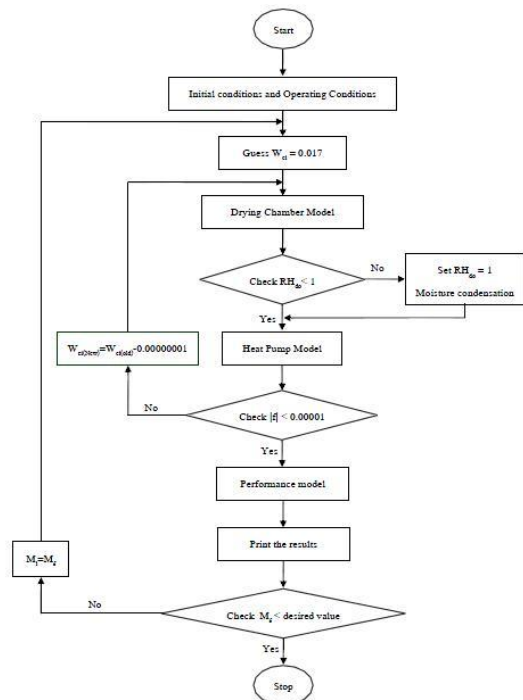
เพื่อศึกษาผลอัตราการไหลจำเพาะของอากาศ (SAF) ที่มีต่อสมรรถนะการอบแห้ง ได้ทำการจำลองสภาวะการอบแห้งกล้วยน้ำว้าแผ่น น้ำหนัก 33.6 kg และความชื้น $201 \% \text{db}$. อบจนเหลือความชื้น $20 \% \text{db}$. ที่อุณหภูมิอบแห้ง 60°C สัดส่วนอากาศข้ามเครื่องทำระเหย 70%

และรอบเครื่องอัดไอเริ่มต้น 2000 rpm โดยมีค่าอัตราการไหลจำเพาะของอากาศ $240 - 700 \text{ kg}_{\text{dry air}}/\text{kg}_{\text{dry product-h}}$ ซึ่งมีขั้นตอนการคำนวณ ในการจำลองสภาพการอบแห้ง แสดงดังรูปที่ 4 ดังนี้

1) ป้อนเงื่อนไขเริ่มต้น คือน้ำหนัก วัสดุ ความชื้นวัสดุเริ่มต้นและความชื้นสุดท้ายอุณหภูมิอบแห้ง อุณหภูมิอากาศและความชื้นสัมพัทธ์อากาศแวดล้อมอัตราการไหลจำเพาะของอากาศ

2) ป้อนค่า สมมุติ (W_{ci}) แล้วเริ่ม คำนวณ จากแบบจำลองของห้องอบแห้ง หาความชื้นวัสดุหลังอบ พร้อมทั้งตรวจสอบค่า RH_{do} ถ้าค่า $\text{RH}_{\text{do}} > 1$ ให้คำนวณใหม่ โดยกำหนด $\text{RH}_{\text{do}} = 1$ คำนวณความชื้นวัสดุใหม่ และสมบัติของอากาศชื้นที่ออกจากห้องอบแห้ง ต่อไปคำนวณด้วยแบบจำลองของปั๊มความร้อน หาค่า $W_{ci, \text{new}}$ แล้วเปรียบเทียบค่า W_{ci} สมมุติกับ $W_{ci, \text{new}}$ ถ้า ΔW_{ci} มีค่ามากกว่าในช่วงที่ยอมรับได้ ให้สมมุติ W_{ci} ใหม่และทำการคำนวณเช่นเดิมจนกว่า ΔW_{ci} จะยอมรับได้

3) คำนวณหาสมรรถนะการอบแห้ง และตรวจสอบค่าความชื้นของ วัสดุการคำนวณจะดำเนินจนกว่า ค่าความชื้นของวัสดุลดลงจนถึงค่าความชื้นที่ต้องการแล้วจึงหยุดการคำนวณ

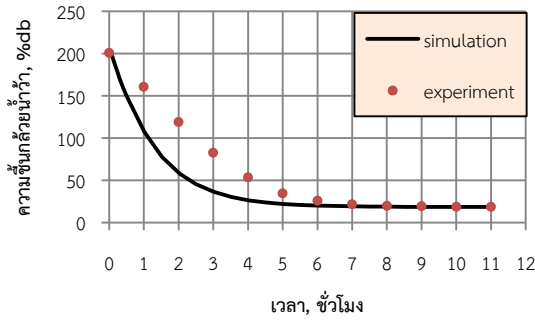


รูปที่ 4 ผังแสดงขั้นตอนการคำนวณในการจำลองสภาพการอบแห้ง

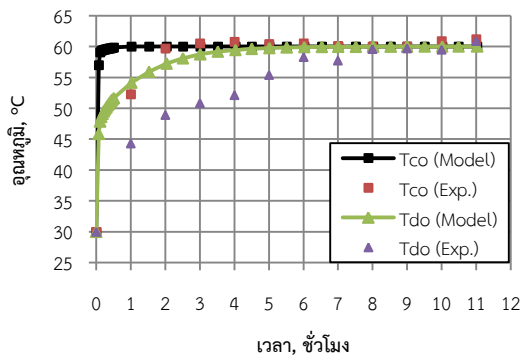
3. ผลการวิจัย

3.1 ผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

การเปรียบเทียบ ผลการลดลงของความชื้นอุณหภูมิ เข้าและออก ห้องอบระหว่างการจำลอง สภาพกับผลการทดลองอบแห้งกล้วยน้ำว้าแผ่น ดังนี้



รูปที่ 5 การเปรียบเทียบการลดลงความชื้นของกล้วยน้ำว้าแผ่นอบแห้ง



รูปที่ 6 การเปรียบเทียบการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเข้าและออกห้องอบแห้ง

รูปที่ 5 การเปรียบเทียบ ผลการลดลงของความชื้น พบว่าในช่วงแรกของการอบแห้งค่าความชื้นวัสดุจากการจำลองสภาพจะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วโดยความชื้นจะต่ำกว่าผลการทดลอง แสดงว่าในการจำลองสภาพวัสดุจะมีอัตราการอบแห้งที่สูงกว่าผลการทดลอง ทั้งนี้เป็นผลจากการคำนวณใช้สมการที่ 4 ที่ค่า k เป็นค่าคงที่ในแต่ละอุณหภูมิ แต่หลังจากนั้น 6 ชั่วโมง สามารถทำนายค่าความชื้นวัสดุได้ใกล้เคียงอย่างมากกับผลการทดลอง

รูปที่ 6 การเปรียบเทียบอุณหภูมิเข้า และออก ห้องอบแห้งในขณะอบแห้ง พบว่าการเพิ่มของ อุณหภูมิที่จะเข้าห้องอบจาก 30 °C เป็น 60 °C ผลการจำลองสภาพจะมีการเพิ่มของ อุณหภูมิอย่างรวดเร็วในช่วงเวลาที่สั้น ในขณะที่ผลการทดลองต้องใช้เวลาราว 2 ชั่วโมงอุณหภูมิเข้า

ห้องอบจึงจะเป็น 60 °C เช่นเดียวกันกับอุณหภูมิที่ออกจากห้องอบ ซึ่งการจำลองสภาพจะมีการเพิ่มของอุณหภูมิอย่างรวดเร็วกว่าผลการทดลอง ทั้งนี้เนื่องจากการทดลองปฏิบัติจริงจะมีการสูญเสียความร้อนออกผ่านผนังห้องอบ ตารางที่ 1 แสดง การเปรียบเทียบ กำลังงานและสมรรถนะการอบแห้ง กล้วยน้ำว้าแผ่น จาก การจำลองสถานะ การอบแห้งกับข้อมูลการทดลองด้วยค่าเฉลี่ยของกำลังงานของอุปกรณ์ที่ใช้พลังงานทั้งหมด และค่าเฉลี่ยของสมรรถนะการอบแห้ง พบว่ามีความแตกต่างกันไม่เกิน 10% ทุกค่าเปรียบเทียบ แสดงว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งสามารถใช้ได้ดี

ตารางที่ 1 การเปรียบเทียบ กำลังงานและสมรรถนะการอบแห้งกล้วยน้ำว้าแผ่น

กำลังงาน	Experiment	Simulation	Difference (%)
อัตราการถ่ายเทความร้อนที่เครื่องควบแน่นเฉลี่ย, $\dot{Q}_{c-เฉลี่ย}$ (kW)	10.652	10.875	+2.1
อัตราการถ่ายเทความร้อนที่เครื่องทำระเหยเฉลี่ย, $\dot{Q}_{e-เฉลี่ย}$ (kW)	8.550	8.188	-4.2
กำลังงานเครื่องอัดไอเฉลี่ย, $P_{คอม-เฉลี่ย}$ (kW)	2.855	2.687	-5.9
กำลังงานที่ให้กับพัดลมเฉลี่ย, $P_{Fan-เฉลี่ย}$ (kW)	0.474	0.473	-0.1
สมรรถนะการอบแห้ง	Experiment	Simulation	Difference (%)
เวลาที่ใช้อบแห้ง, t (h)	11	11	0.0
พลังงานทั้งหมดที่ใช้ (kW-h)	36.6	39.676	+8.7
อัตราการอบแห้งเฉลี่ย, $DR_{เฉลี่ย}$ (kgน้ำระเหย/h)	1.850	1.843	-0.4
อัตราการดึงความชื้นจำเพาะเฉลี่ย, $SMER_{เฉลี่ย}$ (kgน้ำระเหย/kW-h)	0.496	0.480	-3.2
สัมประสิทธิ์สมรรถนะของปั๊มความร้อนเฉลี่ย, $COP_{pH-เฉลี่ย}$	3.748	4.032	+7.6

$$\text{หมายเหตุ } Difference (\%) = \frac{Simulate - Experiment}{Experiment} \times 100$$

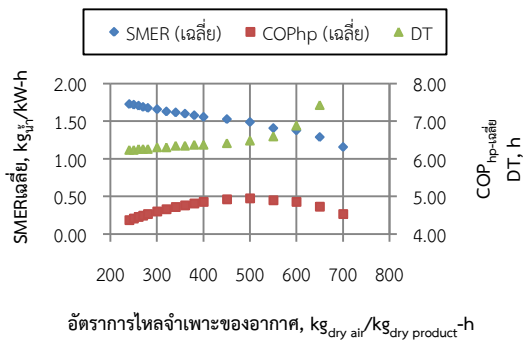
3.2 ผลอัตราการไหลจำเพาะของอากาศ ที่มีต่อค่าสมรรถนะการอบแห้ง

รูปที่ 7 แสดง ผลอัตราการไหลจำเพาะของอากาศ (SAF) ที่มีต่อค่าอัตราการดึงความชื้นจำเพาะเฉลี่ย ($SMER_{เฉลี่ย}$) พบว่าเมื่อค่า SAF เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่า $SMER_{เฉลี่ย}$ ลดลง เนื่องจากมีการใช้พลังงานโดยรวมมากขึ้น ซึ่งเป็นผลจากการทำงาน ของพัดลม เพราะเมื่อความเร็วลมเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความดันตกคร่อมภายในระบบห้องอบแห้งสูงขึ้น โดยค่า $SMER_{เฉลี่ย}$ สูงสุดคือ 1.73 kgน้ำ/kW-h ที่อัตราการไหลจำเพาะของอากาศ 240 kgdry air/kgdry



product-h สำหรับผลของค่า SAF มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของปั๊มความร้อนเฉลี่ย (COP_{hp-เฉลี่ย}) พบว่าเมื่อ SAF เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่า COP_{hp-เฉลี่ย} ค่อยเพิ่มขึ้นจนถึงที่ค่า SAF เท่ากับ 500 kg_{dry air}/kg_{dry product}-h มีค่า COP_{hp-เฉลี่ย} สูงสุดเท่ากับ 4.96 เนื่องจากอัตราการถ่ายเทความร้อนที่เครื่องควบแน่นจะมีค่าสูงเมื่อมีการไหลของอากาศที่ผ่านเครื่องควบแน่นมาก แต่การให้พลังงานที่เครื่องอัดไอนั้นเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ดังนั้นเมื่อมีปริมาณอากาศมากขึ้นค่า COP_{hp} จึงสูงขึ้น และเมื่อ SAF มากกว่า 500 kg_{dry air}/kg_{dry product}-h ค่า COP_{hp-เฉลี่ย} มีค่าลดลงเนื่องจากอัตราการไหลของอากาศ ที่สูง เมื่อผ่านเครื่องทำระเหยจะทำให้อากาศชื้นที่ผ่านเครื่องทำระเหยไม่สามารถดูดอุณหภูมิดีเท่ากับอัตราการไหลของอากาศน้อยๆ จึงทำให้เครื่องทำระเหยไม่สามารถรับความร้อนที่ถ่ายเทจากอากาศได้มาก ดังนั้นเครื่องควบแน่นจึงมีค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนที่ต่ำลงไปด้วย

ค่า SAF มีต่อเวลาอบแห้ง (DT) พบว่าเมื่อ SAF เพิ่มขึ้นจะทำให้ใช้เวลาในการอบแห้งเพิ่มขึ้น เนื่องจากอัตราการไหลของอากาศที่ต่ำเมื่อไหลผ่านเครื่องทำระเหยจะทำให้อากาศชื้น เกิดการควบแน่นได้ดีกว่าที่อัตราการไหลของอากาศสูง



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่าง SAF, SMER_{เฉลี่ย}, COP_{hp-เฉลี่ย} และ DT จากการจำลองสถานะอบแห้ง

4. สรุปผลการวิจัย

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ของเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนความเร็วรอบแปรผัน สำหรับการอบแห้งกล้วยด้วยแบบจำลอง ที่พัฒนาสามารถทำนายการลดลงของความชื้นอุณหภูมิเข้า และออก ห้องอบแห้ง กำลังงาน และสมรรถนะการอบแห้ง ได้ใกล้เคียงกับผลการทดลองเป็นอย่างดี

ในการจำลองสถานะการอบแห้ง ผลของค่าอัตราการไหลเฉพาะของอากาศ ที่มีต่อค่าสมรรถนะการอบแห้ง กล่าวคือ SAF เท่ากับ 240 kg_{dry air}/kg_{dry product}-h ให้สมรรถนะการอบแห้ง แสดงในเทอมของค่า SMER_{เฉลี่ย} และเวลาการอบแห้งที่ดีที่สุด คือ 1.73 kg_{น้ำ}/kW-h และ 6.24 h ตามลำดับ แต่ที่ SAF เท่ากับ 500 kg_{dry air}/kg_{dry product}-h นั้นให้ค่า COP_{hp-เฉลี่ย} สูงสุดเท่ากับ 4.96

5. รายการ

- A พื้นที่, m²
- a พื้นที่ของเมล็ดพืชที่สัมผัสกับอากาศต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร, m²/m³
- BP สัดส่วนอากาศข้ามเครื่องทำระเหย
- C clearance factor
- c ความร้อนจำเพาะ, kJ/kg-°C
- G ความเร็วเชิงมวล, kg/h-m²
- h' สัมประสิทธิ์การพาความร้อน, kJ/m²-°C-h
- h'fg ความร้อนแฝงการระเหยน้ำ, kJ/kg
- h เอนทาลปี, kJ/kg
- k ค่าคงที่ของการอบแห้ง, h⁻¹
- n ค่าคงที่ของกระบวนการโพลีโทรปิก
- M ความชื้นวัสดุ, เศษส่วนมาตรฐานแห้ง
- M̄ ความชื้นเฉลี่ยวัสดุ, เศษส่วนมาตรฐานแห้ง
- m อัตราการไหลเชิงมวล, kg/h
- P ความดัน, Pa
- p กำลังงาน, W
- P.D. compressor piston displacement, m³/min
- Q̇ อัตราการถ่ายเทความร้อน, kJ/h
- RH ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศชื้น
- SAF อัตราการไหลเฉพาะของอากาศ, kg_{dry air}/kg_{dry product}-h
- T อุณหภูมิ, °C
- t เวลา, ชั่วโมง
- V ความเร็ว, m/s
- v ปริมาตรจำเพาะ, m³/kg
- W อัตราส่วนความชื้นอากาศ, kg_{ไอน้ำ}/kg_{อากาศแห้ง}
- θ อุณหภูมิของเมล็ดพืช, °C
- ρ ความหนาแน่น, kg/m³
- η ประสิทธิภาพ, เศษส่วน
- Δt ช่วงเวลาที่พิจารณา, h

ตัวห้อย

a	อากาศแห้ง
ac	อากาศชื้นที่ผ่านเครื่องควบแน่น
ae	อากาศชื้นที่ผ่านเครื่องทำระเหย
ci	ก่อนผ่านเครื่องควบแน่น
co	หลังผ่านเครื่องควบแน่น
cont.	หลังจากสัมผัสผิวขดท่อเครื่องทำระเหยแล้ว
ei	ก่อนผ่านเครื่องทำระเหย
eo	หลังผ่านเครื่องทำระเหย
eq	สมดุล
f	สุดท้าย
g	ไอน้ำอิ่มตัวที่ 0 °C
l	เริ่มต้นในช่วงเวลาใดๆ
in	เริ่มต้น
p	วัสดุแห้ง
r	สารทำงาน
rc	สารทำงานที่เครื่องควบแน่น
re	สารทำงานที่เครื่องทำระเหย
V	ปริมาตร
v	ไอน้ำ
w	น้ำ
1	ก่อนเข้าเครื่องอัดไอ
2	ออกจากเครื่องอัดไอ
3	ออกจากเครื่องควบแน่น
4	ก่อนเข้าเครื่องทำระเหย

6. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ บัณฑิตวิทยาลัย

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ และภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่ให้การสนับสนุนด้านสถานที่ และทุนวิจัย เพื่อให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] ศิวะ อัจฉริยวิริยะ และ เมธาวุฒิ โชติสวัสดิ์ (2550). การเปรียบเทียบสมรรถนะของเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนที่มีเครื่องอัดไอชนิดความเร็วรอบเปลี่ยนแปลงกับชนิดความเร็วรอบคงที่, *การประชุมเชิงวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 3*, โรงแรมไบหยกสกาย จังหวัดกรุงเทพฯ
- [2] Siva Achariyaviriya and Methawut Chotswasd (2007). Effects of the Fraction of Evaporator

Bypass Air on Heat Pump Dryer Performance, Joint ASME/JSME Fluids Engineering Conference, San Diego, USA.

[3] เหมือนจิต แจ่มศิลป์ และ ศิวะ อัจฉริยวิริยะ (2006). สภาพการทำงานที่เหมาะสมที่สุดของการอบแห้งมะละกอแช่แข็งด้วยเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อน, *วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่* , 13(2), 16– 26.

[4] เอกกฤษ แก้วเจริญ ศิวะ อัจฉริยวิริยะ (2553). การเปรียบเทียบสมรรถนะของเครื่องอบแห้งชนิดปั๊มความร้อนสำหรับอุตสาหกรรมขนาดเล็กโดยวิธีการควบคุมอุณหภูมิความร้อนต่างกัน, *งานประชุมวิชาการการถ่ายทอดความร้อนและมวลในอุปกรณ์ด้านความร้อนครั้งที่ 9*, โรงแรมปัตตาเวีย รีสอร์ทแอนด์สปา จังหวัดประจวบคีรีขันธ์

[5] Teeboonma U., Tiansuwan J. and Soponronarit S., (2003). Optimization of heat pump fruit dryers, *Journal of Food Engineering*, Vol. 59, pp. 369-377

[6] สมชาติ โสภณธนฤทธิ (2540). *การอบแห้งเมล็ดพืชและอาหารบางประเภท*, กรุงเทพฯ: โครงการส่งเสริมการสร้างตำรา คณะพลังงานและวัสดุ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

[7] จุฑารัตน์ บุญปัญญา ศิวะ อัจฉริยวิริยะ (2553). การพัฒนาสมการจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งกล้วยน้ำว้าสไลด์, *งานประชุมวิชาการการถ่ายทอดความร้อนและมวลในอุปกรณ์ด้านความร้อนครั้งที่ 9*, โรงแรมปัตตาเวีย รีสอร์ทแอนด์สปา จังหวัดประจวบคีรีขันธ์

[8] Cleland, A.C. (1992). *Polynomial curve-fits for refrigerant thermodynamic properties : extension to include R-134a*, *Environmental technology, Massey University, Palmerstun North, New Zealand*.