

การอบแห้งโดยใช้ปั๊มความร้อนในระดับอุตสาหกรรม

Industrial - Scale Heat Pump Drying

ฐานิตย์ เมธิยานนท์ สมชาติ โสภณรณฤทธิ์ และ ธนิต สวัสดิ์เสวี

Thanid Madhiyanon, Somchart Soponronnarit and Thanit Swasdisewi

ABSTRACT

The prototype of an industrial-scale heat pump dryer (HPD) was designed, constructed and evaluated for performance. Drying chamber contained four trolleys with product capacity of 600-700 kg. In the experiments, papaya glaze' was dried in closed system at an average temperature of 55°C, specific air flow rates of 25-32 kg dry air / h - kg dry papaya glaze' and the evaporator by-pass air of 81%. The papaya glaze' with initial moisture content of 83-86% dry basis was dried to final moisture content of 12-14% dry basis within approximately 32 hours. No significant variation of the average final moisture gradient along horizontal and vertical of dryer was observed (due to uniform air distribution within drying chamber). The results of experiment indicated that drying rate decreased rapidly with time, while total power consumption remained nearly constant. At high initial moisture content, the rate of moisture removal was higher than that of low initial moisture content. (The maximum average drying rate and SMER were 9.34 kg water evap/h and 0.782 kg water evap/kWh, respectively. The maximum average MER is 9.21 kg water cond/h, and the relative lowest average specific energy consumption is 4.92 MJ/kg water evap. The $(COP_{hp})_{sys}$ varied from 4.2 to 4.9 which was higher than $(COP_{hp})_{used}$ obtained by the internal condenser load which varied from 3.3 to 3.8. This attributed to the excess heat rejected to atmosphere through the external condenser.) The quality of dried papaya glaze' in terms of color was acceptable due to low drying temperature. In conclusion, HPD achieved high energy efficiency, and it was feasible to be commercialized, particularly in food drying industry.

Key words : heat pump dryer, industrial scale drying, papaya glaze' drying, energy consumption

บทคัดย่อ

เครื่องอบแห้งโดยใช้ป้อนความร้อนได้ถูกออกแบบ สร้าง และประเมินสมรรถนะเพื่อใช้เป็นเครื่องต้นแบบในระดับอุตสาหกรรม ส่วนของห้องอบแห้งบรรจุได้ 4 คัน รวมน้ำหนักผลิตภัณฑ์ 600-700 กิโลกรัม การทดลองเป็นแบบระบบปิด โดยอบแห้งมะละกอแช่เย็น อุณหภูมิอบแห้งโดยเฉลี่ย 55°C อัตราการไหลเชิงมวลเฉพาะของอากาศ 25 ถึง 32 กิโลกรัมอากาศแห้งต่อชั่วโมง-กิโลกรัมมะละกอแห้ง สัดส่วน evaporator by-pass air 81% ความชื้นเริ่มต้น 83-86% มาตรฐานแห้งอบแห้งจนเหลือความชื้นสุดท้าย 12-14% มาตรฐานแห้ง ใช้เวลาอบแห้งประมาณ 32 ชั่วโมง พบว่าความแตกต่างของค่าความชื้นสุดท้ายเฉลี่ยตามแนวยาวและขวางของตู้อบแห้งมีค่าไม่มากนัก (เนื่องจากผลของการกระจายอุณหภูมิความร้อนที่สม่ำเสมอตลอดทั้งตู้อบแห้ง) นอกจากนี้ยังพบว่า อัตราการอบแห้งลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อเทียบกับเวลาอบแห้ง ในขณะที่พลังงานทั้งหมดที่ใช้ค่อนข้างจะคงที่ตลอดช่วงเวลารอบแห้ง ที่ความชื้นเริ่มต้นสูง การระเหยน้ำออกจากมะละกอแช่เย็นจะดีกว่าที่ความชื้นเริ่มต้นต่ำ (อัตราการอบแห้ง และ SMER เฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 9.34 กิโลกรัมน้ำระเหยต่อชั่วโมง และ 0.732 กิโลกรัมน้ำระเหยต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมง ตามลำดับ อัตราการควบแน่นน้ำที่เครื่องทำระเหย (MER) เฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 9.21 กิโลกรัมน้ำควบแน่นต่อชั่วโมง ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะเฉลี่ยต่ำสุดเท่ากับ 4.92 เมกะจูลต่อกิโลกรัมน้ำระเหย ($\text{COP}_{\text{hp}}^{\text{sys}}$) มีค่าระหว่าง 4.2 ถึง 4.9 มากกว่า ($\text{COP}_{\text{hp}}^{\text{used}}$) ซึ่งคำนวณจากภาระความร้อนของเครื่องควบแน่นชุดใน โดยมีค่าระหว่าง 3.3 ถึง 3.8 ความแตกต่างของค่า COP_{hp} ทั้งสองมาจากมี ความร้อนส่วนหนึ่งถูกทิ้งสู่บรรยากาศโดยผ่านทางเครื่องควบแน่นชุดนอก) การใช้อุณหภูมิอบแห้งที่ไม่สูง ทำให้คุณภาพของ

มะละกอแช่เย็นอบแห้งในด้านของสีอยู่ในเกณฑ์ดี ดังนั้นการใช้ป้อนความร้อนร่วมกับเครื่องอบแห้งทำให้การใช้พลังงานมีประสิทธิภาพสูง จึงมีโอกาสดึงถูกนำมาใช้ในเชิงพาณิชย์ได้ โดยเฉพาะอุตสาหกรรมอบแห้งอาหาร

คำนำ

เครื่องอบแห้งโดยใช้ป้อนความร้อนประกอบไปด้วยสองส่วนหลัก ๆ คือส่วนห้องอบแห้งซึ่งต้องออกแบบให้มีการกระจายความร้อนที่ดี และระบบป้อนความร้อน ซึ่งก็คือระบบทำความเย็นนั่นเอง เพียงแต่นำด้านความร้อนมาใช้งานแทนที่จะเป็นด้านความเย็น รูปแบบของเครื่องอบแห้งโดยใช้ป้อนความร้อนสามารถแบ่งออกเป็น 1) เครื่องอบแห้งที่มีการดึงความชื้นออกจากอากาศก่อนอบแห้ง (dehumidifying dryer) ซึ่งจะมีลักษณะเป็นระบบปิด (closed system) หรือเปิดบางส่วน (partially open system) 2) เครื่องอบแห้งที่มีการปรับคืนความร้อนเพียงอย่างเดียว (heat recovery dryer) โดยไม่มีการดึงความชื้นออกจากอากาศก่อนอบแห้ง ซึ่งมีลักษณะเป็น ระบบเปิด (open system) โดยอากาศที่ออกจากห้องอบแห้งจะผ่านเครื่องทำระเหยก่อนทิ้งสู่บรรยากาศสมรรถนะของ HPD สามารถกำหนดได้ด้วยความสามารถในการอบแห้ง โดยพิจารณาในเทอมของอัตราการอบแห้ง (drying rate) มีหน่วยเป็นกิโลกรัมน้ำระเหยต่อชั่วโมง และการสิ้นเปลืองพลังงานในเทอมของ specific moisture extraction rate (SMER) หน่วยเป็นกิโลกรัมน้ำระเหยต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมง หรือการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (specific energy consumption, SEC) หน่วยเป็นเมกะจูลต่อกิโลกรัมน้ำระเหย

Clements *et al.* (1993) ศึกษาการอบแห้งต่อเนื่องในระบบเปิด โดยใช้ยางแผ่นเป็นวัสดุอบแห้ง พบว่าปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อค่า moisture extraction rate

(MER) และ SMER โดยตรงก็คือความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศก่อนเข้าเครื่องทำระเหย ซึ่งหากมีค่าสูงจะได้ MER และ SMER สูง นอกจากนี้สัดส่วน evaporator air by-pass ที่เหมาะสมมีค่าระหว่าง 60 ถึง 70% โดยสามารถทำค่า SMER ได้ระหว่าง 1.5 ถึง 2.5 kg/kWh เนื่องจากระบบปั๊มความร้อนใช้ไฟฟ้าซึ่งเป็นพลังงานเกรดสูง ดังนั้นจึงเหมาะสมที่จะใช้อุปกรณ์ทางเทคโนโลยีที่มีมูลค่า งานวิจัยของ Prasertsan and Saen-saby (1998) ได้เปรียบเทียบทางด้านเศรษฐศาสตร์ในแง่ของค่าใช้จ่ายในการดำเนินการ พบว่า HPD ให้ค่าใช้จ่ายต่ำสุดเทียบกับเครื่องอบแห้งที่ใช้ขดลวดไฟฟ้า และใช้น้ำมันเป็นเชื้อเพลิง ในงานวิจัยนี้ได้อบแห้งไม้ยางพาราและกล้วยแบบกะ (batch) โดยทดลองทั้งระบบเปิดบางส่วนและระบบปิด พบว่าความสิ้นเปลืองพลังงานทั้งสองระบบค่อนข้างจะคงที่ ค่า MER และ SMER เฉลี่ยสูงสุด เท่ากับ 2.854 กิโลกรัมน้ำระเหยต่อชั่วโมง และ 0.572 กิโลกรัมน้ำระเหยต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมง ตามลำดับ สำหรับการอบแห้งไม้ยาง และเท่ากับ 2.710 กิโลกรัมน้ำระเหยต่อชั่วโมง และ 0.540 กิโลกรัมน้ำระเหยต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมง ตามลำดับ สำหรับการอบแห้งกล้วย Pendyala *et al.* (1990) ได้ทดสอบสมรรถนะของ HPD โดยใช้สารทำความเย็น R-11 และ R-12 พบว่าถ้าใช้ R-11 ค่า COP และ SEC มีค่า 3.5 และ 3.5 เมกะจูลต่อกิโลกรัมน้ำระเหย ตามลำดับ สำหรับ R-12 ค่า COP และ SEC มีค่า 2.5 และ 1.8 เมกะจูลต่อกิโลกรัมน้ำระเหย ตามลำดับ จะเห็นว่าค่า SEC เมื่อใช้ R-12 สูงกว่าเมื่อใช้ R-11 ถึงแม้ว่า COP จะต่ำกว่าก็ตาม เพราะว่าเมื่อใช้ R-12 เครื่องอบแห้งสามารถทำอุณหภูมิอบแห้งได้สูงโดยไม่ต้องใช้ขดลวดไฟฟ้า Rossi *et al.* (1992) ศึกษาการอบแห้งในระบบปิดโดยใช้ HPD พบว่าในการอบแห้งหัวหอมขึ้นบาง การสิ้นเปลืองพลังงานน้อยกว่าเครื่องอบแห้งโดยทั่วไปประมาณ 30 ถึง 40% และคุณภาพของผลิตภัณฑ์ดีกว่า

เนื่องจากระยะเวลาการอบแห้งที่สั้น Young *et al.* (1995) ศึกษาการอบแห้งโดยใช้ HPD ระบบปิด แบบกะ (batch) พบว่าอุณหภูมิ และความเร็วของอากาศก่อนเข้าห้องอบแห้งมีผลโดยตรงต่อการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่อุณหภูมิและความเร็วของอากาศสูง ระยะเวลาการอบแห้งจะสั้น ทำให้การสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำ ในทำนองเดียวกันกับการอบแห้งวัสดุขนาดเล็ก พลังงานที่ใช้จะน้อย Strommen and Kramer (1994) ศึกษาการใช้ระบบปั๊มความร้อนร่วมกับเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดซ์เบด วัสดุอบแห้งได้แก่ กุ้งฝอย และปลาป่น อุณหภูมิอบแห้งสามารถทำได้ระหว่าง -20 ถึง 50°C ที่ความดันบรรยากาศ พบว่าผลิตภัณฑ์หลังอบแห้งมีคุณสมบัติในด้านของสี และความสามารถในการคืนรูปเมื่อละลายน้ำได้ดีเท่ากับวิธีการอบแห้งแบบแช่แข็งในสุญญากาศ แต่การสิ้นเปลืองพลังงานต่ำกว่า

จากงานวิจัยที่ผ่านมาจะเห็นได้ว่า HPD สามารถใช้พลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงเนื่องจากมีการปรับคืนความร้อนจากอากาศที่ออกจากห้องอบแห้ง โดยผ่านทางเครื่องทำระเหย และเครื่องควบแน่น แทนที่จะทิ้งออกสู่บรรยากาศ การอบแห้งมีทั้งอบแห้งในระบบปิด เปิดบางส่วน และระบบเปิด โดยอาจเป็นการอบแห้งในลักษณะที่เป็นกะ หรือแบบต่อเนื่องก็ได้ ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการอบแห้งได้แก่ อุณหภูมิอบแห้ง อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่เข้าเครื่องทำระเหย การอบแห้งในระบบปิดหรือเปิดบางส่วน ความชื้นในอากาศจะถูกควบแน่นโดยผ่านเครื่องทำระเหย ก่อนที่จะหมุนเวียนกลับไปใช้ในการอบแห้งต่อไป อากาศแวดล้อมภายนอกจะไม่มีอิทธิพลต่อการอบแห้งในระบบปิดงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบสร้าง และประเมินสมรรถนะของเครื่องอบแห้งต้นแบบระบบปั๊มความร้อน เพื่อใช้ในระดับอุตสาหกรรม โดยเน้นการอบแห้งมะละกอแช่แข็ง

อุปกรณ์และวิธีการ

เครื่องอบแห้งโดยใช้ป้อนความร้อนที่ใช้ในงานวิจัยถูกสร้างขึ้นมาเพื่อใช้ในระดับอุตสาหกรรม (Figure 1) ซึ่งสามารถทำงานได้ทั้งระบบปิด และระบบเปิดบางส่วน แต่ในงานวิจัยนี้ได้ทดลองอบแห้งเฉพาะระบบปิด เครื่องอบแห้งมีส่วนประกอบที่สำคัญ ดังนี้ 1) ห้องอบแห้งขนาด 1.0 ม (ก) $\times$ 4.0 ม (ย) $\times$ 1.5 ม (ส) บรรจุถาดขึ้นได้ 4 ชั้น แต่ละชั้นวางถาดได้ 17 ถาด แต่ละถาดมีขนาด 0.90×0.70 ตารางเมตร 2) ระบบปั๊มความร้อน ประกอบด้วย เครื่องอัดไอแบบลูกสูบ (hermetic reciprocating compressor) พิกัดมอเตอร์ 6.7 กิโลวัตต์ ใช้ ฟรียอน (R-22) เป็นสารทำความเย็น เครื่องควบแน่นตัวในระบายความร้อนได้ 25 กิโลวัตต์ ขนาด 4×25 (row by column) มีครีบบจำนวน 512 ครีบบต่อเมตร เครื่องควบแน่นตัวนอกระบายความร้อนได้ 10.5 กิโลวัตต์ ขนาด 2×18 (row by column) มีครีบบจำนวน 512 ครีบบต่อเมตร เครื่องทำระเหยทำความเย็นได้ 25 กิโลวัตต์ มีครีบบจำนวน 551 ครีบบต่อเมตร วาล์วขยายตัวแบบเทอร์โมสแตติก และพัดลมชนิดแรงเหวี่ยงใบโค้งหน้า พิกัดมอเตอร์ 5.5 กิโลวัตต์ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศ 2.8 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที ที่ความดัน 750 kPa ส่วนพัดลมสำหรับเครื่องควบแน่นตัวนอกเป็นชนิดใบพัดไหลตามแกน พิกัดมอเตอร์ 200 วัตต์ จำนวน 2 ชุด

งานวิจัยนี้ได้ทดลองที่โรงงานหลวงอาหารสำเร็จรูปที่ 4 จังหวัดบุรีรัมย์ โดยใช้มะละกอแช่เป็นวัสดุ อบแห้ง มีน้ำหนักเริ่มต้นอยู่ระหว่าง 600-700 กิโลกรัม ตำแหน่งที่วัดอุณหภูมิอากาศ กระเปาะแห้ง - กระเปาะเปียก และ อุณหภูมิสารทำความเย็นได้แสดงไว้ใน Figure 1 สำหรับวงจรรอากาศ ใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิด K ต่อเข้ากับ data logger ความละเอียด $\pm 1^{\circ}\text{C}$ สำหรับวงจรน้ำยาใช้วิธีสอดปลายเทอร์โมคัปเปิลเข้าไปในท่อทองแดงขนาดเล็กที่ฝังอยู่ในท่อน้ำยา

การวัดความดันของสารทำความเย็นใช้ปรูดองเกจตำแหน่งที่วัดแสดงใน Figure 1 การวัดความเร็วลมของอากาศ จะวัดที่ท่ออากาศไหลกลับ และท่อลม bypass โดยใช้ Hot wire anemometer การวัดพลังงานไฟฟ้าใช้กิโลวัตต์เอว-มิเตอร์ และเครื่อง clip-on meter การหามวลเริ่มต้นและสุดท้ายของมะละกอแช่ใช้ตาชั่งทางกล เช่นเดียวกันกับน้ำหนักของน้ำที่ควบแน่นจากเครื่องทำระเหย

การอบแห้งแบ่งออกเป็นสามช่วง ช่วงแรก อบแห้งมะละกอชิ้นใหญ่ขนาดประมาณ $11.5 \times 6.5 \times 1.7$ ลูกบาศก์เซนติเมตร จากความชื้นเริ่มต้นประมาณ 83 ถึง 86% มาตรฐานแห้ง จนเหลือความชื้นสุดท้ายอยู่ในช่วง 31 ถึง 37% มาตรฐานแห้ง ใช้เวลาอบแห้งในช่วงนี้ประมาณ 19 ชั่วโมง ช่วงที่ 2 นำมะละกอแช่จากช่วงแรกมาลดขนาดลงเป็น $1.0 \times 1.0 \times 1.0$ ลูกบาศก์เซนติเมตร โดยมีการพรมน้ำลงบนมะละกอเพื่อความสะดวกในการหั่นมะละกอ และเนื่องจากพื้นที่ถาดมีจำกัด จำเป็นต้องนำมะละกอแช่มาเรียงซ้อนกันหลาย ๆ ชั้น เพื่อให้สามารถบรรจุมะละกอแช่ได้หมด แล้วนำไปอบแห้งต่อจนความชื้นลดลงเหลือ 17 ถึง 22% มาตรฐานแห้ง ใช้เวลาประมาณ 9 ชั่วโมง จากนั้นนำไปคลุกกับน้ำตาลทรายบดละเอียด ก่อนที่จะนำไปอบแห้งในช่วงที่ 3 จนความชื้นสุดท้ายมีค่า 12 ถึง 14% มาตรฐานแห้ง ใช้เวลาประมาณ 4 ชั่วโมง รวมเวลาอบแห้งทั้งสิ้นประมาณ 32 ชั่วโมง

การบันทึกผลของอุณหภูมิ ความดัน มวลของน้ำที่ควบแน่นที่เครื่องทำระเหย และความสิ้นเปลืองพลังงาน จะบันทึกทุก 1 ชั่วโมง สำหรับการอบแห้งช่วงแรก และทุก $\frac{1}{2}$ ชั่วโมง ในการอบแห้งช่วงที่ 2 และ 3 สำหรับการหาความชื้นของมะละกอแช่เก็บตัวอย่างมาหั่นเป็นชิ้นเล็ก ๆ ชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งดิจิตอล (อ่านค่าได้ละเอียด 0.01 กรัม) แล้วนำเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 103°C เวลา 72 ชั่วโมง โดยเก็บตัวอย่างที่ชั่วโมงเริ่มต้น 5, 15 และ ชั่วโมงสุดท้าย

ในการอบแห้งช่วงแรก และเก็บตัวอย่างเฉพาะช่วงเริ่มต้น และสุดท้ายสำหรับการอบแห้งช่วงที่ 2 และ 3 ตัวอย่างสุ่มมาจากบริเวณกึ่งกลางถาดที่ 1, 5, 9, 13 และ 17 ของรถเข็นแต่ละคัน โดยจะปิดเครื่องอบแห้งทุกครั้งก่อนเก็บตัวอย่าง ก่อนการอบแห้งจะทำการปรับบานปรับลมเพื่อให้ลมร้อนกระจายสม่ำเสมอตลอดหน้าตัดของตู้อบแห้ง และให้อัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศประมาณ 2.8 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที โดยอัตราการไหลจำเพาะของอากาศจะมีค่าอยู่ระหว่าง 25-32 กิโลกรัมอากาศแห้งต่อกิโลกรัมมวลแห้งของมะละกอแช่อิ่ม ซึ่งขึ้นอยู่กับมวลเริ่มต้นของมะละกอแช่อิ่ม ตั้งค่าอุณหภูมิอบแห้งในช่วง 53 ถึง 55°C ในการควบคุมปริมาณลมที่ไหลข้ามเครื่องทำระเหย (evaporator by-pass air) ทำได้

โดยปรับบานปรับลมที่ท่อลม by-pass โดยในการทดลองที่ 2 และ 3 ใช้สัดส่วน evaporator by-pass air เท่ากับ 81%

การวิเคราะห์ค่า COP_{hp} จะใช้ข้อมูลทั้งจากทางด้านวงจรอากาศและวงจรน้ำยาเพื่อเปรียบเทียบกัน ค่า COP_{hp} จะแบ่งออกเป็น 1) $(COP_{hp})_{sys}$ ซึ่งคำนวณจากความร้อนที่ได้จากเครื่องควบแน่นตัวในและตัวนอก รวมกัน 2) $(COP_{hp})_{used}$ ได้จากความร้อนที่ระบายโดยเครื่องควบแน่นตัวในเท่านั้น ซึ่งเป็นส่วนที่นำมาใช้ประโยชน์ในการอบแห้ง

ผลและวิจารณ์

1. การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของอากาศและความชื้น

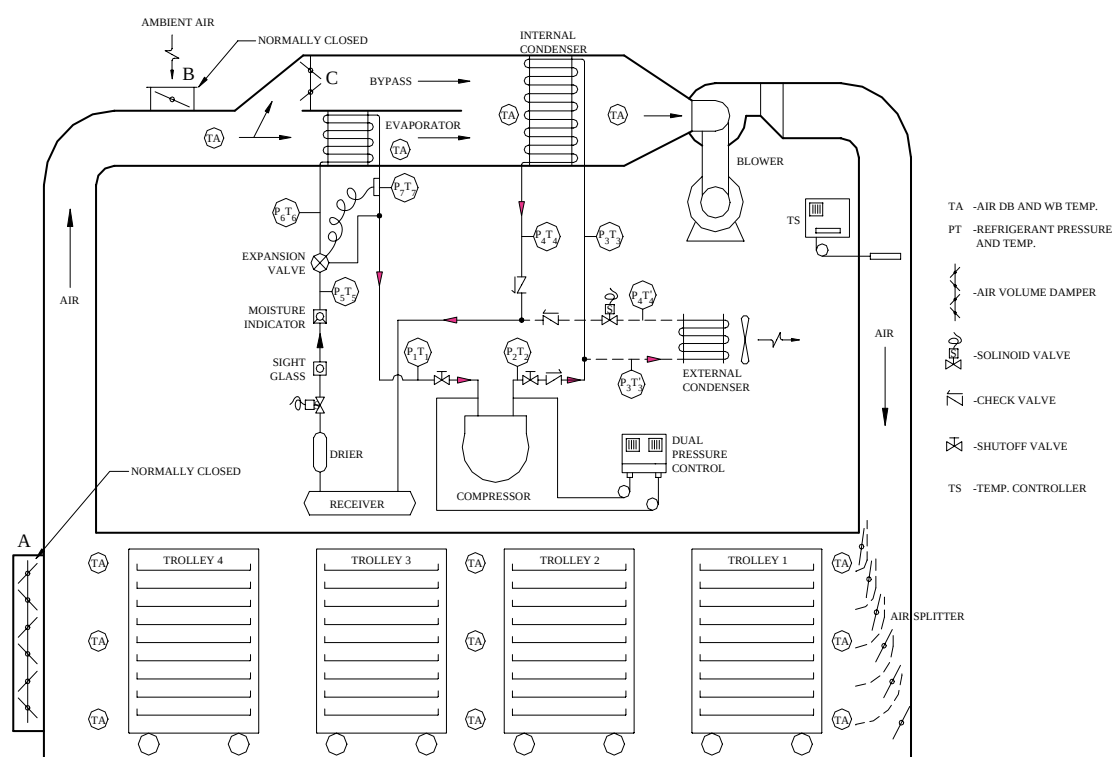


Figure 1 Schematic diagram of a heat pump dryer and locations of measuring temperature and pressure.

ของมะละกอแช่แข็ง

Table 1 แสดงผลการทดลองอบแห้งมะละกอแช่แข็ง เมื่อนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอากาศ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ของรถเย็นในห้องอบแห้งกับเวลาอบแห้งดังแสดงใน Figure 2 (ช่วง 1) 3 (ช่วง 2) และ 4 (ช่วง 3) พบว่าอุณหภูมิของลมร้อนลดลงตามระยะทางของห้องอบ แต่ในตอนท้ายของการอบแห้งแต่ละช่วง พบว่ามีความแตกต่าง

กันเพียงเล็กน้อยประมาณ 1°C ระหว่างอุณหภูมิอากาศที่เข้าและออกจากห้องอบแห้ง เนื่องมาจากความชื้นในมะละกอแช่แข็งเหลืออยู่น้อย ดังนั้นจึงใช้ความร้อนในการระเหยความชื้นต่ำ อย่างไรก็ตามผลของอุณหภูมิอากาศที่ลดลงตามแนวยาวของห้องอบแห้งทำให้ความชื้นสุดท้ายของมะละกอแช่แข็งใน รถเย็นที่ห่างออกไปมีค่าสูงขึ้น โดยความแตกต่างของค่าความชื้นสุดท้ายเฉลี่ยมีค่าประมาณ 5.6% และ 4.6%

Table 1 Experimental results of papaya glace' drying.

Description	Test No. 1			Test No. 2			Test No. 3		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Ambient condition									
Average temperature ($^{\circ}\text{C}$)	28.4	28.5	28.2	28.55	27.97	28.25	29.70	27.50	34.70
Average relative humidity (%)	70	72	73	75	72	75	65	75	46
Condition of fruit glacé									
Average moisture before drying (%d.b.)	83.48	44.11	22.20	86.29	42.39	19.47	86.95	40.88	16.93
Average moisture after drying (%d.b.)	37.39	22.29	14.23	31.56	19.47	14.70	33.60	16.93	12.00
Initial weight (kg)	711.5	^a 515.2	^a 439.7	602.5	^b 587.9	495.3	670.2	505.7	420.7
Final weight (kg)	532.5	437.2	410.7	425.6	493.3	475.5	479.6	419.7	403
Moisture removed (kg)	179	78	29	176.9	94.6	19.8	190.6	86.0	17.7
Drying air condition									
Drying temperature ($^{\circ}\text{C}$)	53	52.5	53.4	53.4	52.90	54.35	55.0	54.2	55.8
Specific air flow rate									
(kg dry air / h - kg dry papaya glacé)	27.0	31.56	30.67	32.3	25.30	25.20	29.1	29.1	29.1
Evaporator by - pass air (%)	81.0	82.0	85.9	81.7	81.7	81.7	81.7	81.7	81.7
Drying time (h)	19.5	8.5	9.5	19	9.5	3	19	8	4.5
Performance of heat pump									
Drying rate _{avg} (kg water evap / h)	9.18	9.18	3.05	9.31	9.96	6.6	10.03	10.75	3.93
MER _{avg} (kg water condensate / h)	7.39	9.93	3.99	8.73	11.80	4.06	8.61	9.43	3.73
SMER _{avg} (kg water evap / kWh)	.7649	0.7572	0.2265	0.728	0.618	0.495	0.781	0.860	0.305
Specific energy consumption									
(MJ / kg water evap) _{avg}	4.70	4.75	15.88	4.95	5.82	7.27	4.61	4.19	11.80
(COP _{hp}) _{sys}	4.49	4.60	3.40	4.42	4.57	4.24	4.58	4.62	4.90
(COP _{hp}) _{used}	3.68	3.79	2.73	3.25	3.45	3.60	3.36	3.50	3.81

^a Not the same batch of Papaya glacé dried in 1st stage.

^b Including approx. 130 kg of papayas glacé dried with an existing steam dryer

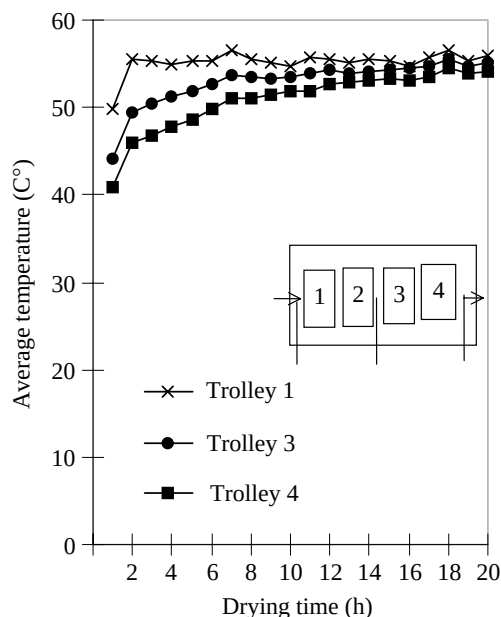


Figure 2 Variations of average air temperature along position of trolleys with time (3rd test, 1st stage).

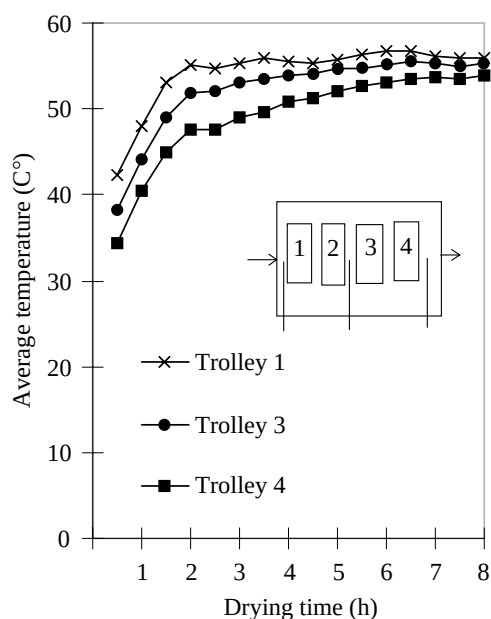


Figure 3 Variations of average air temperature along position of trolleys with time (3rd test, 2nd stage).

มาตรฐานแห่งสำหรับการอบแห้งช่วงแรก และช่วงที่ 2 ตามลำดับ และลดเหลือเพียง 1.4% ในการอบแห้งช่วงสุดท้าย ดังแสดงใน Figure 5 (ช่วง 1) และ 6 (ช่วง 2 และ 3) สำหรับการกระจายอุณหภูมิของอากาศตามแนวขวางของห้องอบแห้ง พบว่ามีความสม่ำเสมอดี ซึ่งเป็นผลจากมีการกระจายลมที่ดีตลอดหน้าตัดห้องอบแห้ง ดังแสดงใน Figure 7 (ช่วง 1), 8 (ช่วง 2) และ 9 (ช่วง 3) ส่งผลให้ค่าเฉลี่ยความชื้นสุดท้ายของมะละกอเชื่อมระหว่างถาดในรถขึ้นทั้ง 4 คัน มีค่าใกล้เคียงกัน โดยเฉพาะในช่วงที่ 2 และ 3 มีความแตกต่างของความชื้นสุดท้ายเฉลี่ยระหว่างถาดประมาณ 1.2% ดังแสดงใน Figure 10 (ช่วง 1) 11 (ช่วง 2) และ 12 (ช่วง 3)

2. สมรรถนะของเครื่องอบแห้ง

จากผลการทดลองพบว่า อัตราการอบแห้ง (drying rate) ลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงต้นการอบแห้ง

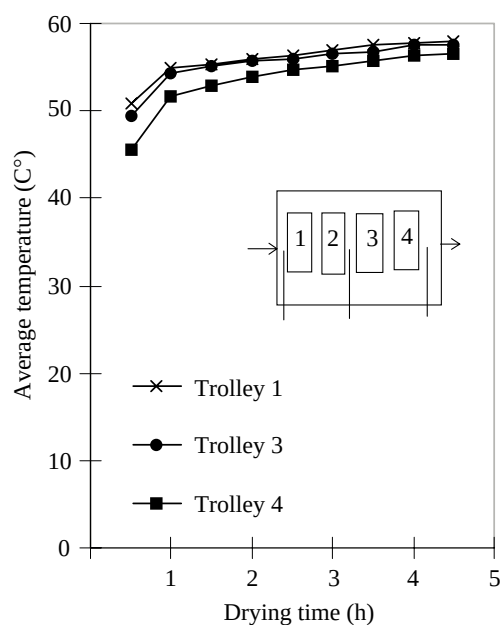


Figure 4 Variations of average air temperature along position of trolleys with time (3rd test, 3rd stage).

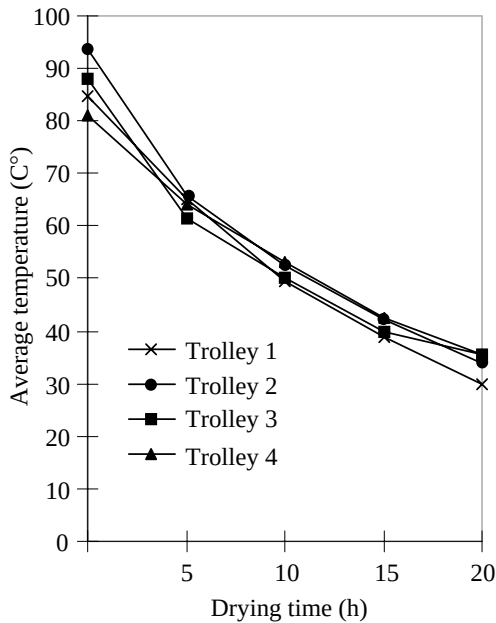


Figure 5 Variations of average moisture content along position of trolleys with time (3rd test, 1st stage).

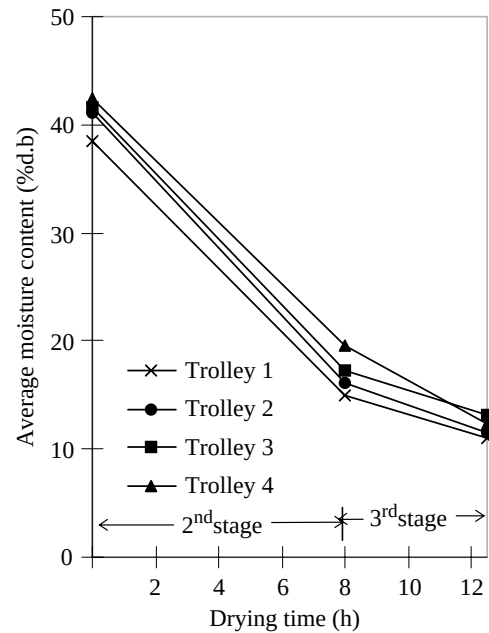


Figure 6 Variations of average moisture content along position of trolleys with time (3rd test, 2nd & 3rd stage).

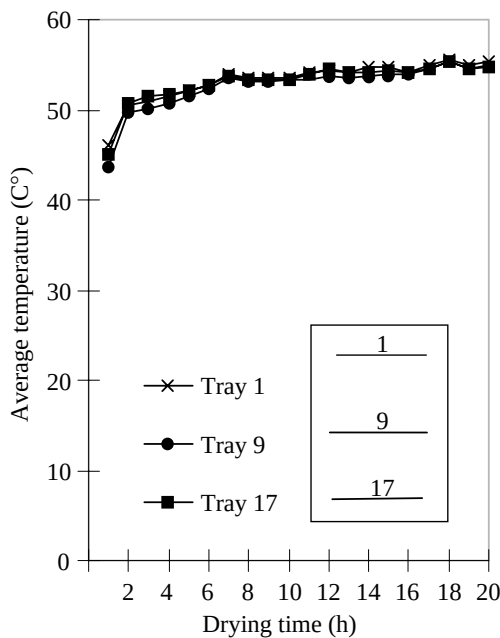


Figure 7 Variations of average air temperature of all trolleys along tray position with time (3th test, 1st stage)

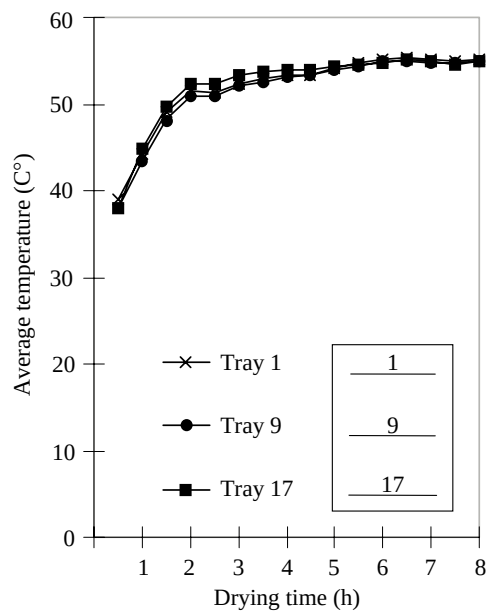


Figure 8 Variations of average air temperature of all trolleys along tray positions with time (3rd test, 2nd stage).

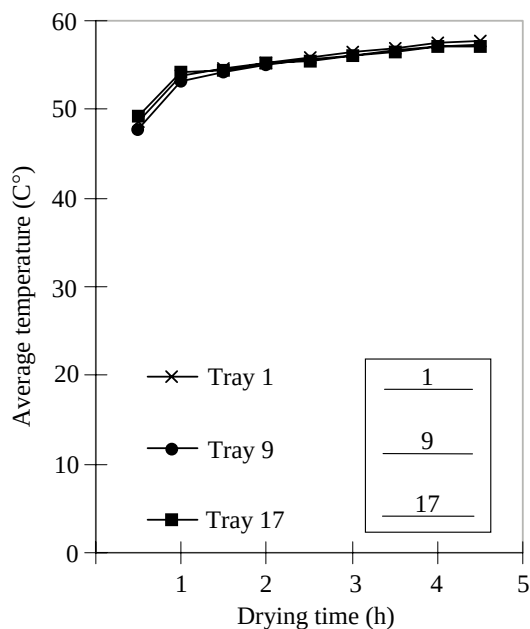


Figure 9 Variations of average air temperature of all trolleys along tray position with time (3rd test, 3rd stage).

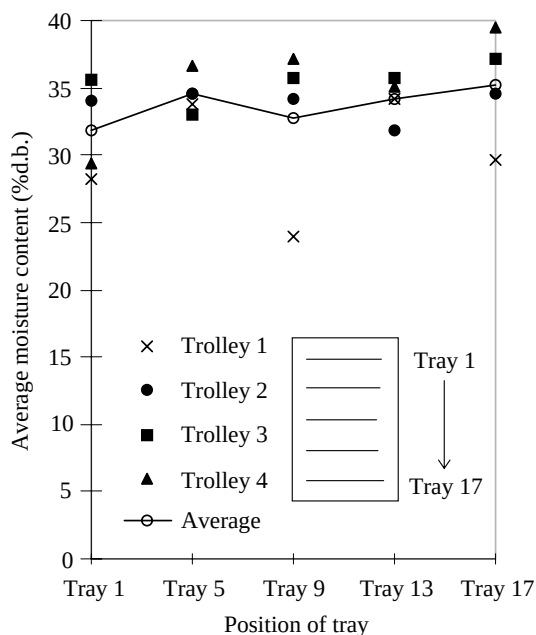


Figure 10 Effect of tray positions on the average moisture content (3rd test, 1st stage).

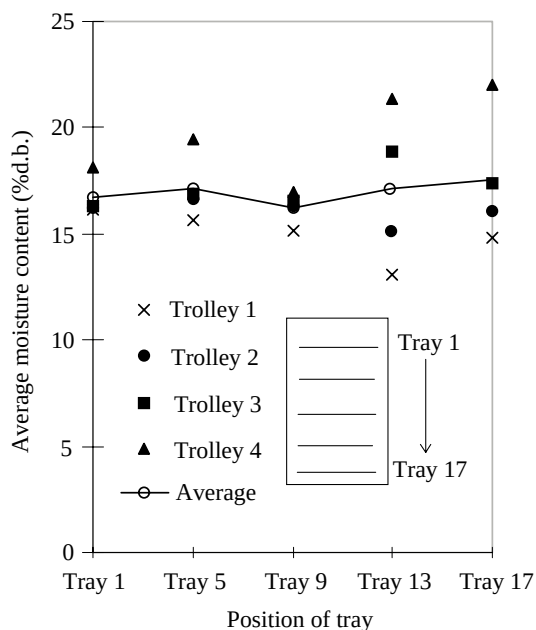


Figure 11 Effect of tray positions on the average moisture content (3rd test, 2nd stage).

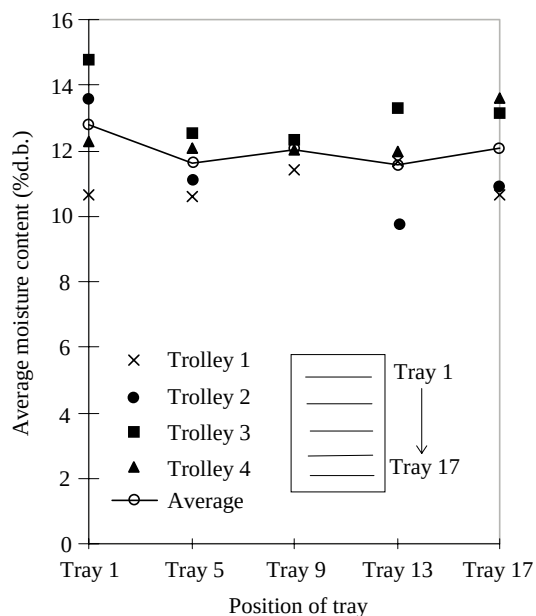


Figure 12 Effect of tray positions on the average moisture content (3rd test, 3rd stage).

ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากการเปลี่ยนแปลงความชื้นเฉลี่ยของมะละกอแช่แข็ง หรืออัตราการควบแน่นน้ำจากเครื่องทำระเหย (moisture extraction rate, MER) เทียบกับเวลา (Figure 13 และ 14) สำหรับช่วงแรก และ Figure 15 และ 16 สำหรับช่วงที่ 2 และ 3 จะเห็นได้ว่าความสิ้นเปลืองพลังงานทั้งหมดมีค่าค่อนข้างคงที่ตลอดช่วงเวลาอบแห้ง ถึงแม้กระบวนการอบแห้งจะดำเนินไปในลักษณะสภาวะไม่คงที่ (non-steady state process) ก็ตาม (ความชื้นมะละกอเปลี่ยนแปลงตามเวลาอบแห้ง) ซึ่งพิจารณาได้จาก Figure 14 และ 16 ในขณะที่พลังงานที่ให้กับพัดลมมีค่าค่อนข้างคงที่ เพราะอัตราการไหลของอากาศและความดันลดในระบบไม่เปลี่ยนแปลงตลอดช่วงเวลาอบแห้ง ซึ่งหมายความว่าพลังงานที่เครื่องอัดไอใช้ค่อนข้างคงที่ด้วย สาเหตุมาจากมีการระบายความร้อนส่วนเกินจาก

ภายในระบบออกสู่อากาศแวดล้อมภายนอกเป็นระยะๆ ตลอดช่วงเวลาอบแห้ง โดยผ่านทางเครื่องควบแน่นตัวนอก เพราะต้องการควบคุมไม่ให้อุณหภูมิภายในตู้อบแห้งสูงจนเกินไป ผลคืออุณหภูมิ สารทำความเย็นตลอดจนความดันที่เข้าและออกจากเครื่องทำระเหยเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วงที่แน่นอนในระยะเวลาสั้น ๆ มีลักษณะที่เป็นวัฏจักร หรืออาจกล่าวได้ว่าอัตราการไหลเชิงมวลของสารทำความเย็นตลอดจนสภาวะของสารทำความเย็นที่เข้าและออกจากเครื่องอัดไอ มีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะเดียวกัน ผลก็คืองานที่ป้อนให้กับเครื่องอัดไอ (ซึ่งก็ขึ้นอยู่กับอัตราไหลเชิงมวล, ความดันและอุณหภูมิของสารทำความเย็น ซึ่งสองปัจจัยหลังแสดงถึงค่าเอนทัลปีของสารทำความเย็น) มีค่าค่อนข้างคงที่ในคาบเวลาที่พิจารณา เช่น ทุก $1/2$ ชั่วโมง เป็นต้น

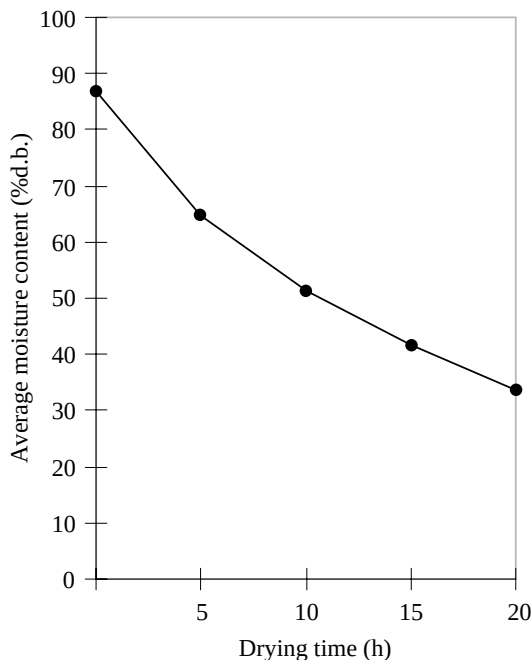


Figure 13 Variations of average moisture content with time (3rd test, 1st stage).

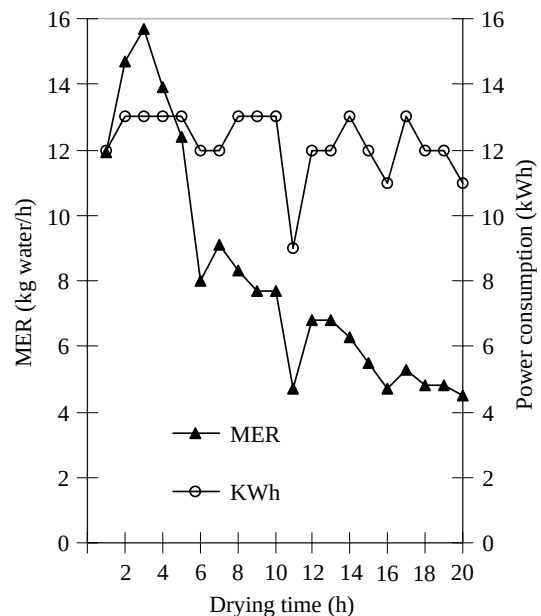


Figure 14 Variations of MER and power consumption with time (3rd test, 1st stage).

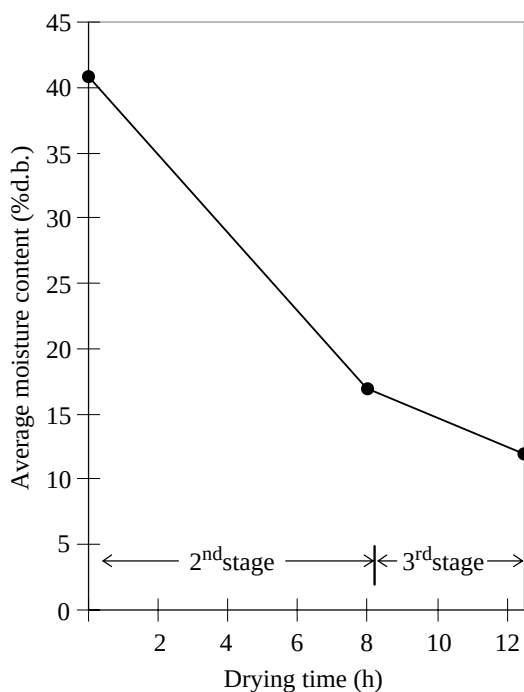


Figure 15 Variations of average moisture content with time (3rd test, 2nd & 3rd stage).

นอกจากนี้ผลการทดลองที่แสดงใน Table 1 ยังพบว่าปริมาณน้ำที่ดึงออกจากมะละกอแช่จะมีค่าน้อย ถ้าความชื้นเริ่มต้นมีค่าต่ำ ซึ่งพิจารณาได้จากการอบแห้งในช่วง 2 เปรียบเทียบกับช่วง 3 ของทุกการทดลอง (สังเกตว่าความชื้นเริ่มต้นในช่วง 2 เพิ่มขึ้นมาจากความชื้นสุดท้ายของช่วง 1 เป็นผลจากการพรมน้ำลงบนมะละกอแช่ในขั้นตอนการเตรียมมะละกอแช่ในช่วง 2) ซึ่งความชื้นเริ่มต้นในช่วงที่ 3 มีค่าประมาณ ครึ่งหนึ่งของช่วงที่ 2 ในขณะที่ปริมาณน้ำที่ดึงออกจากมะละกอแช่ในช่วงที่ 2 มากกว่าช่วง 3 ถึงประมาณ 4 เท่า แม้ว่าน้ำหนักเริ่มต้นในช่วงที่ 2 จะมากกว่าในช่วงที่ 3 แต่ก็ไม่เกิน 20% ซึ่งสาเหตุมาจากขณะที่มะละกอแช่มีความชื้นสูงบริเวณผิวของมะละกอแช่ด้วยน้ำ ทำให้ค่าอัตราการแพร่ความชื้นสูง แต่เมื่อมีความชื้นลดลง การ

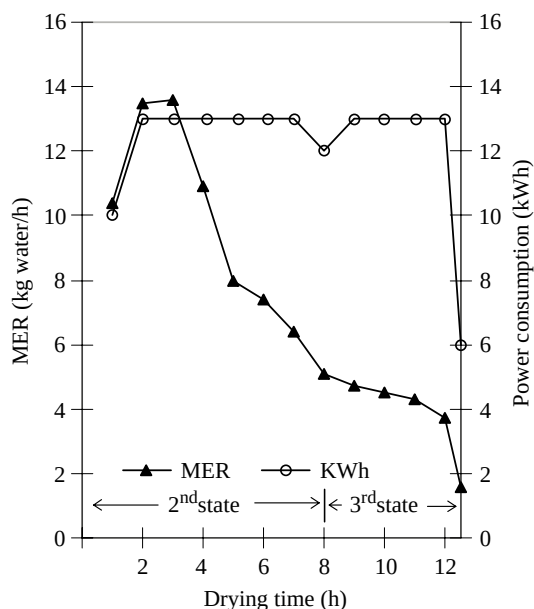


Figure 16 Variations of MER and power consumption with time (3rd test, 2nd & 3rd stage).

แพร่ความชื้นจะมาจากด้านในของมะละกอแช่ ทำให้การแพร่ความชื้นลดลง ส่งผลให้อัตราการอบแห้งและ SMER ในช่วงที่ 3 ลดลงอย่างมาก ในขณะที่ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะมีค่าสูงขึ้น นอกจากนี้จากกล่าวได้ว่า ค่า $SMER_{avg}$ และค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะเฉลี่ย (average specific energy consumption, SEC_{avg}) ซึ่งก็คืออัตราส่วนระหว่างมวลของน้ำที่ระเหยจากมะละกอแช่และพลังงานที่ใช้สัมผัสโดยตรงกับปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากมะละกอแช่ เพราะว่าพลังงานที่ใช้มีค่าค่อนข้างคงที่ดังที่กล่าวมาข้างต้น จากผลการทดลองโดยเฉลี่ยตัวเลขจากทั้งสามการทดลองพบว่าเครื่องอบแห้งสามารถทำอัตราการอบแห้ง และ SMER เฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 9.34 กิโลกรัมน้ำระเหยต่อชั่วโมง และ 0.732 กิโลกรัมน้ำระเหยต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมง ตามลำดับ และ

MER เฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 9.21 กิโลกรัมน้ำควบแน่นต่อชั่วโมง สาเหตุที่ MER แตกต่างจากอัตราการอบแห้ง เนื่องจากมีอากาศรั่วไหลเข้าและออกจากระบบ ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ และระยะเวลาอบแห้งเปรียบเทียบในช่วงเดียวกันของแต่ละการทดลอง มีค่าที่ไม่แตกต่างกันมากนัก เนื่องมาจากความชื้นเริ่มต้น, น้ำหนักเริ่มต้น ตลอดจนขนาดของมะละกอแช่แข็งที่มีค่าใกล้เคียงกัน จากการทดลองทั้งหมด การทดลองที่ 3 ให้ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะเฉลี่ยต่ำสุด (SEC) โดยมีค่า 4.92 เมกะจูลต่อกิโลกรัมน้ำระเหย

ค่า COP_{hp} วิเคราะห์จากทั้งวงจรอากาศและสารทำความเย็น พบว่าแตกต่างประมาณ 15% (ไม่ได้แสดงรายละเอียดไว้ในรายงานฉบับนี้) สาเหตุจากการทดลองไม่สามารถวัดอัตราการไหลเชิงมวลของสารทำความเย็นได้โดยตรง แต่คำนวณจากพลังงานที่เครื่องอัดไอใช้ นอกจากนี้อาจมีความคลาดเคลื่อนในการวัดปริมาณลม และสุดท้ายการวัดอุณหภูมิของสารทำความเย็นปลายสายเทอร์โมคัปเปิล ไม่ได้สัมผัสโดยตรงกับสารทำความเย็น ทำให้ค่าที่วัดได้คลาดเคลื่อนได้ ส่งผลต่อการหาค่าเอนทัลปีของสารทำความเย็น อย่างไรก็ตาม โดยวิเคราะห์ วงจรอากาศพบว่า $(COP)_{sys}$ มีค่าระหว่าง 4.2 ถึง 4.9 และ $(COP_{hp})_{used}$ ซึ่งคำนวณมาจากภาระความร้อนของเครื่องควบแน่นตัวใน มีค่าระหว่าง 3.3 ถึง 3.8 สังเกตว่าค่า $(COP_{hp})_{sys}$ มีค่ามากกว่า $(COP_{hp})_{used}$ สาเหตุจากมีความร้อนส่วนเกินถูกระบายทิ้งสู่บรรยากาศ เพื่อควบคุมอุณหภูมิในห้องอบแห้งไม่ให้สูงเกินความต้องการ คุณภาพของมะละกอแช่แข็งในด้านของสีพบว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ดี โดยมีสีส้มปนแดงค่อนข้างอ่อน (code 34-C ตามมาตรฐานเทียบสีของ R.H.S. color) ซึ่งเป็นเพราะการใช้อุณหภูมิอบแห้งที่ไม่สูง

สรุป

อุณหภูมิของอากาศร้อนภายในห้องอบแห้งจะลดลงไปตามแนวยาวของตู้อบแห้ง ทำให้ความชื้นสุดท้ายเฉลี่ยของมะละกอแช่แข็งในรถเข็นคันสุดท้ายสูงสุด แต่ความแตกต่างของความชื้นสุดท้ายจะลดลงเพียง 1.4% ในการอบแห้งช่วงสุดท้าย สำหรับการกระจายความชื้นระหว่างถาดอยู่ในเกณฑ์ดี ทำให้ความแตกต่างของความชื้นสุดท้ายเฉลี่ยระหว่างถาดของรถเข็นทั้ง 4 คัน มีค่าประมาณ 1.2% ในการอบแห้งช่วง 2 และ 3 ที่น่าสนใจก็คือการจัดเรียงของมะละกอแช่แข็งในช่วงที่ 2 และ 3 จะวางซ้อนกันหลาย ๆ ชั้น เพื่อให้สามารถบรรจุมะละกอ แช่แข็งให้ได้มากที่สุด แต่ก็สามารถที่จะลดความชื้น ตลอดจนการกระจายของความชื้นอยู่ในระดับที่น่าพอใจ ในการทดลองจะพบว่าอัตราการดึงความชื้นออกจากมะละกอแช่แข็งจะเป็นไปอย่างรวดเร็วในช่วงต้นของการอบแห้ง และจะค่อย ๆ ลดลงในเวลาต่อมา ซึ่งก็เป็นไปในทำนองเดียวกับค่า MER สังเกตได้ว่าค่า MER จะต่างจากอัตราการอบแห้ง การสิ้นเปลืองพลังงานตลอดช่วงระยะเวลาอบแห้งค่อนข้างจะคงที่ถึงแม้ว่ากระบวนการอบแห้งจะดำเนินไปในลักษณะสภาวะไม่คงที่ก็ตาม ซึ่งเป็นผลสืบเนื่องมาจากการพยายามทำให้เกิดสภาวะคงที่ในแง่ของความร้อน (ไม่ใช่ความชื้น) ภายในห้องอบแห้ง การอบแห้งมะละกอแช่แข็งที่มีความชื้นเริ่มต้นต่ำ จะค่อนข้างยากทำให้ได้อัตราการอบแห้งและ SMER ต่ำซึ่งจะตรงกันข้ามอย่างเห็นได้ชัดกับการอบแห้งมะละกอแช่แข็งที่มีความชื้นเริ่มต้นสูง ๆ ปริมาณน้ำที่ถูกดึงออกจากมะละกอแช่แข็งส่งผลโดยตรงต่อค่า SMER และความสิ้นเปลือง พลังงานจำเพาะ จากการเฉลี่ยตัวเลขของทั้งสามการทดลอง พบว่าเครื่องอบแห้งสามารถทำอัตราการอบแห้ง และ SMER เฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 9.34 กิโลกรัมน้ำระเหยต่อชั่วโมง และ 0.732 กิโลกรัมน้ำ

ระเหยต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมง ตามลำดับ ค่าMER เฉลี่ยสูงสุด 9.21 กิโลกรัมน้ำควบแน่นต่อชั่วโมง ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะเฉลี่ยต่ำสุดในการทดลองที่สามมีค่าเท่ากับ 4.92 เมกะจูลต่อกิโลกรัมน้ำระเหย เวลาอบแห้งรวมทั้งสิ้นประมาณ 32 ชั่วโมง และ $(COP_{hp})_{sys}$ มีค่าระหว่าง 4.2 ถึง 4.9 ในขณะที่ $(COP_{hp})_{used}$ มีค่าน้อยกว่าโดยมีค่าอยู่ระหว่าง 3.3 ถึง 3.8 นอกจากนี้ยังพบว่า คุณภาพของมะละกอแช่อบในด้านของสีออกมาอยู่ในเกณฑ์ดี จากที่กล่าวมาข้างต้นทั้งหมด โดยเฉพาะปัจจัยด้านพลังงานทำให้เครื่องอบแห้งโดยใช้ปั๊มความร้อนมีโอกาสสูงที่จะนำไปใช้ในอุตสาหกรรมอบแห้งอาหาร

คำขอบคุณ

ผู้เขียนใคร่ขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย ที่ให้ทุนสนับสนุนโครงการวิจัย บริษัทไรซ์เอ็นจิเนียริง ซัพพลาย จำกัด ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านสร้างเครื่อง และโรงงานหลวงอาหารสำเร็จรูปที่ 4 อำเภอโนนดินแดง จังหวัดบุรีรัมย์ ที่ให้ความร่วมมือระหว่างการทดสอบ

เอกสารอ้างอิง

Clements, S., X. Jia, and P. Jolly. 1993. Experimental

verification of a heat pump assisted continuous dryer simulation model. Intern J. Energy Research 17 : 19-28.

Pendyala, V.R., S. Devotta, and V.S. Patwardhan. 1990. Heat pump assisted dryer, part 2 : experimental study. Intern J. Energy Research 14 : 493-507.

Prasertsan, S. and P. Saen-saby. 1998. Heat pump drying of agricultural materials. Drying Technology-an Intern J. 16 : 235-250;1-2.

Rossi, S.J., L.C. Neves, and T.G. Kieckbusch. 1992. Thermodynamic and energetic evaluation of a heat pump applied to the drying vegetables. Drying Techn-an Intern J. 10 : 1475-1484.

Strommen, I. and K. Kramer. 1994. New applications of heat pumps in drying processes. Drying Technology-an Intern J. 12 : 889-901;4.

Young, G.S., S. Birchall, and R.L. Mason. 1995. Heat pump drying of food products-prediction of performance and energy efficiency, pp. 240-247. In Proc. Fourth ASEAN Conf on Energy Technology, Bangkok, August 28-29 1995.

วันรับเรื่อง : 6 ก.ค. 41

วันรับตีพิมพ์ : 15 ม.ค. 42