
สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น ความสิ้นเปลืองพลังงาน และอัตราการระเหยน้ำจำเพาะ
ของการอบแห้งผลหมากด้วยพลังงานความร้อนร่วม

Moisture Diffusivity Coefficient Specific Energy Consumption and Specific Moisture Extraction
Rate of Betel Nut Drying Using Combined Thermal Energy

อีลีหัยะ สนิโซ*, ฟามีรา สะอูดี และรัชดาภรณ์ ฮานาฟี

ภาควิชาวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและการเกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา

Eleeyah Saniso*, Fameera Saudi and Radchadaporn Hanafee

Department of Science, Faculty of Science Technology and Agriculture, Yala Rajabhat University,

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ และอัตราการระเหยน้ำจำเพาะของการอบแห้งผลหมากไม่ผ่าซีกด้วยลมร้อน ไมโครเวฟ และลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟ ที่ความเร็วลมเท่ากับ 1 เมตรต่อวินาที อุณหภูมิลมร้อนในช่วง 60 - 80 องศาเซลเซียส และกำลังคลื่นไมโครเวฟในช่วง 180 - 600 วัตต์ จากการทดลองพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นมีค่าอยู่ในช่วง 6.05×10^{-4} - 91.80×10^{-3} ตารางเซนติเมตรต่อวินาที อัตราการระเหยน้ำจำเพาะมีค่าอยู่ในช่วง 0.0295 - 1.2978 กิโลกรัมต่อกิโลวัตต์ชั่วโมง และความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะมีค่าอยู่ในช่วง 0.0063 - 1.1071 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม

คำสำคัญ : ผลหมาก พลังงานความร้อนร่วม สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น

Abstract

The objective of this research is to determine the moisture diffusivity coefficient, specific energy consumption and specific moisture extraction rate of betel nut drying using hot air, microwave and hot air-microwave combination at the air flow rate of 1 m/s, the air temperature range of 60 - 80°C and microwave power of 180 - 600 W. The results show that the moisture diffusivity coefficient in rang of 6.05×10^{-4} - 91.80×10^{-3} cm²/min, specific moisture extraction rate of betel nut drying in rang of 0.0295 - 1.2978 kg/kWh and specific energy consumption in rang of 0.0063 - 1.1071 MJ/kg.

Keywords : Betel nut, Combined thermal energy, Moisture diffusivity coefficient.

*Corresponding author. E-mail: eleeyah.s@yru.ac.th, saniso.e@hotmail.com

บทนำ

หมาก มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Areca catechu* L. เป็นพืชใบเลี้ยงเดี่ยวตระกูลปาล์มไม่มีรากแก้วแต่มีรากฝอยกระจายรอบโคนต้น หมากเป็นไม้ยืนต้นที่มีลำต้นเดี่ยวไม่แตกกอสูง ประมาณ 20 m หมากให้ผลเกือบตลอดปีขึ้นอยู่กับอายุของต้นและสภาพแวดล้อมที่ปลูก เช่น ภูมิอากาศ ดิน และน้ำ ผลหมาก (Betel nut) มีลักษณะกลมหรือกลมรี ในหนึ่งทะลายมีผลประมาณ 10 - 150 ผล (กรมวิชาการเกษตร, 2552) หมากเป็นพืชเศรษฐกิจที่ปลูกและดูแลรักษาง่าย โรคและแมลงรบกวนน้อย ลงทุนไม่สูง ทำรายได้สม่ำเสมอต่อเนื่อง สามารถปลูกผสมผสานร่วมกับพืชเศรษฐกิจอื่นได้ ผลหมากประกอบด้วย 4 ส่วน คือ เปลือกชั้นนอก (เป็นเยื่อบางสีเขียว เนื้อเปลือกมีเส้นใยละเอียดและเหนียว) เปลือกชั้นกลาง (เป็นเส้นใยหนามองเห็นชัด เมื่อผลอ่อนเส้นใยจะอ่อนและเหนียวแข็งเมื่อผลแก่) เปลือกชั้นใน (เป็นเยื่อบางละเอียดติดอยู่กับเนื้อหมาก) และส่วนเมล็ดหรือเนื้อหมาก (เป็นส่วนหนึ่งของเนื้อหมาก อยู่ถัดจากเยื่อบางเข้าไป เมื่ออ่อนเนื้อจะนิ่มผิวจะมีลายเส้นสีเหลืองถึงสีน้ำตาล เนื้อจะมีสีเหลืองอ่อนถึงสีเหลืองเข้มอมแดง)

ผลหมากมีบทบาทสำคัญในอุตสาหกรรมหลายชนิด โดยเฉพาะอุตสาหกรรมสี แต่ละปีประเทศไทยส่งผลหมากออกจำหน่ายต่างประเทศคิดเป็นมูลค่าหลายล้านบาท อาทิเช่น ปี 2547 ไทยส่งออก หมาก 95,396 ตัน คิดเป็นมูลค่า 792 ล้านบาท นอกจากนี้เฉพาะเดือนมกราคม ถึง เดือนเมษายน 2549 ไทยส่งออก หมาก 8,485 ตัน คิดเป็นมูลค่า 201 ล้านบาท (นิรนาม, 2553) แต่กว่าผลหมากจะไปถึงมือผู้รับต้องใช้เวลาขนส่งผลให้ผลหมากเน่าเสีย เกษตรกรจึงผ่าผลหมากออกเป็น 2 ซีก แล้วตากแดดให้แห้งประมาณ 2-5 วัน แต่ประสบปัญหาเรื่องฝุ่นละออง เชื้อรา ฝนตกและความไม่สม่ำเสมอของแสงแดด จึงจำเป็นต้องนำเทคนิคการอบแห้งแบบต่างๆ เช่น การอบแห้งที่ใช้ความร้อนจากกระแสไฟฟ้าหรือก๊าซ การอบแห้งด้วยลมร้อนแบบตู้หรือถาด การอบแห้งด้วยลมร้อนแบบต่อเนื่อง การอบแห้งแบบพ่นฝอย การอบแห้งแบบลูกกลิ้ง การอบแห้งแบบเยือกแข็ง การอบแห้งด้วยไมโครเวฟ และการอบแห้งด้วยพลังงานความร้อน

การประยุกต์ใช้ไมโครเวฟ อินฟราเรด แสงอาทิตย์ และสารดูดซับความชื้น เข้ามาช่วยในการอบแห้งร่วมกับลมร้อนเป็นแนวทางที่เหมาะสมในการอบแห้งวัสดุอาหารและผลผลิตทางการเกษตร (สมชาติ โสภณธรณฤทธิ์, 2540; Bala, 1997) โดยเฉพาะการอบแห้งด้วยไมโครเวฟที่ใช้พื้นที่น้อย ประหยัดพลังงานและสามารถลดเวลาการอบแห้งเหลือเพียงหนึ่งในห้า

เทียบกับการอบแห้งด้วยลมร้อน การวิเคราะห์กระบวนการอบแห้งวัสดุอาหารและผลผลิตทางการเกษตรมีค่าชีวิตที่สำคัญหลายประการ และเป็นสมบัติเฉพาะของวัสดุแต่ละชนิด (สมชาติ โสภณธรณฤทธิ์, 2540; Bala, 1997; Brooker *et al.*, 1981) อาทิเช่น ค่าความชื้น ค่าความชื้นสัมพัทธ์ ค่าความชื้นสมดุล ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความร้อน และอัตราการระเหยน้ำจำเพาะ เป็นต้น โดยการศึกษาเอกสารที่เกี่ยวข้องยังไม่พบงานวิจัยที่เกี่ยวกับการอบแห้งผลหมากไม่ผ่าซีกด้วยไมโครเวฟจึงน่าสนใจว่าการอบแห้งลักษณะใดให้ผลดีที่สุด การวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความร้อน ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ และอัตราการระเหยน้ำจำเพาะของการอบแห้งผลหมากไม่ผ่าซีกด้วยลมร้อน ไมโครเวฟ และลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟ

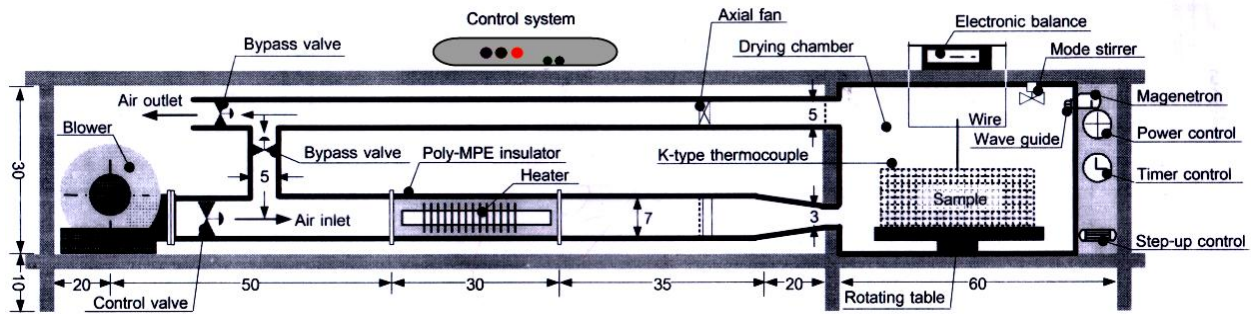
วัสดุอุปกรณ์และวิธีการวิจัย

1. การเตรียมตัวอย่าง

การทดลองนี้ใช้ผลหมากสดที่สังเกตเปลือกภายนอกด้วยสายตาเป็นสีเหลืองแดง คัดขนาดที่ใกล้เคียงกันมาปอกเปลือกออกแล้ววัดขนาดด้วยเวอร์เนียคาร์ลิปเปอร์ความละเอียด 0.02 mm โดยผลหมากไม่ผ่าซีกที่ได้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเท่ากับ 27.31 mm จากนั้นนำไปบรรจุในถุงพลาสติกที่ปิดสนิทแล้วเก็บไว้ในตู้เย็นที่อุณหภูมิ 3 - 5°C เป็นเวลา 7 วัน ระหว่างนี้ทำการเขย่าทุกวันเพื่อให้ความชื้นกระจายสม่ำเสมอ จากนั้นนำมาวางที่อุณหภูมิบรรยากาศประมาณ 2 - 3 h แล้วนำไปหาความชื้นเริ่มต้นตามมาตรฐาน AOAC (AOAC, 2005) ซึ่งผลหมากที่ได้มีความชื้นเฉลี่ยเท่ากับ 85.5% d.b.

2. อุปกรณ์อบแห้ง

อุปกรณ์อบแห้งที่ใช้เครื่องอบแห้งพลังงานความร้อนร่วมลมร้อนไมโครเวฟ YRU-HA/MW DRYER (FR&E) ที่ดัดแปลงจากเตาอบไมโครเวฟยี่ห้อ SAMSUNG รุ่น M1712N กำลังสูงสุด 800 W ที่ผนังด้านข้างถูกเจาะเป็นรูกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10.2 cm แล้วต่อเข้ากับท่อลมร้อนโลหะหนา 0.5 mm ที่หุ้มด้วยกระดาษฟอยล์ (Foil) 2 ชั้น เพื่อป้องกันการรั่วของคลื่นไมโครเวฟ บริเวณรอยต่อและหุ้มทับด้วยฉนวนกันความร้อนโพลีเอทิลีน (M-PE Alumax; R-Value 20 hr.ft².°f/Btu) หนา 10 mm ทับอีกครั้งเพื่อป้องกันการถ่ายเทความร้อนออกสู่ภายนอก ที่ตรงปลายสุดเชื่อมต่อกับพัดลมเป่าอากาศ (Blower) แบบแกนนอน กำลัง 1 hp ความเร็วรอบเท่ากับ 3,000 rpm (ภาพที่ 1) โดยอากาศในท่อถูกทำให้ร้อนด้วยขดลวดความร้อนแบบครีป รุ่น CAL-P 1071 ยาว 30 cm มีกำลังวัตต์เท่ากับ 1,000 W



ภาพที่ 1 ระบบอบแห้งพลังงานความร้อนร่วมลมร้อนไมโครเวฟ YRU-HA/MW DRYER (FR&E)

3. การทดลองอบแห้ง

การอบแห้งเริ่มโดยนำผลหมากไม่ผ่าซีกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 27.31 mm บรรจุลงในตะกร้าสำหรับใช้กับตู้อบไมโครเวฟซึ่งเจาะรูขนาดผ่านศูนย์กลาง 1.0 cm โดยรอบแบบเรียง 1 ชั้น แล้ววางไว้ในห้องอบแห้ง โดยอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 60, 70 และ 80°C ไมโครเวฟที่กำลัง 180, 300, 450 และ 600 W และลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟที่อุณหภูมิและกำลังไมโครเวฟเท่ากับ 60, 70 และ 80°C และ 180, 300, 450 และ 600 W ตามลำดับ ความเร็วลมคงที่ 1 m/s ซึ่งวัดด้วยเครื่องวัดความเร็วลม (Anemometer ; DIGICON DA-41) ความละเอียด 0.1 m/s วัดอุณหภูมิของอากาศด้วยเครื่องวัดอุณหภูมิแบบดิจิตอล (Digital multimeter; UNAOHM 9400) ความละเอียด 0.1°C ซึ่งต่อเข้ากับสายเทอร์โมคัพเบิลชนิด เค (K Type thermocouple) และชั่งน้ำหนักผลหมากระหว่างอบแห้งด้วยเครื่องชั่งดิจิตอลยี่ห้อ Mettler Toledo รุ่น PB 1502 ความละเอียด 0.01 g ทุกๆ 3 min ทำการทดลองทั้งหมด 3 ครั้ง แล้วคำนวณค่าเฉลี่ย

4. การวิเคราะห์การอบแห้ง

4.1 ค่าความชื้น (Moisture content, M) คือ ค่าที่บ่งบอกถึงปริมาณน้ำที่มีอยู่ในวัสดุเทียบกับมวลของวัสดุตามมาตรฐาน AOAC (AOAC, 2005) ความชื้นในวัสดุสามารถแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ คือ ความชื้นมาตรฐานเปียก (Wet basis, M_w) และความชื้นมาตรฐานแห้ง (Dry basis, M_d) ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (1) และ (2) ตามลำดับ ดังนี้

$$M_w (\%) = \frac{(w - d)}{w} \times 100 \quad (1)$$

$$M_d (\%) = \frac{(w - d)}{d} \times 100 \quad (2)$$

เมื่อ M_w คือ ความชื้นมาตรฐานเปียก (% w.b.) M_d คือ ความชื้นมาตรฐานแห้ง (% d.b.) w คือ มวลเปียกของวัสดุ (kg) และ d คือ มวลแห้งของวัสดุ (kg)

4.2 อัตราส่วนความชื้น (Moisture ratio, MR) คือ ค่าที่บ่งบอกถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงมวลน้ำในวัสดุเทียบกับความชื้นเริ่มต้นเมื่อเวลาการอบแห้งดำเนินไปเป็นเวลาใดๆ (AOAC, 2005; Crank, 1975; Ibrahim, 2005) เขียนเป็นสมการได้ ดังนี้

$$MR = \frac{M_t - M_{eq}}{M_0 - M_{eq}} \quad (3)$$

เมื่อถือว่า ค่าความชื้นสมดุลมีค่าน้อยมากเทียบกับค่าความชื้นเริ่มต้น ($M_{eq} \ll M_0$) และความชื้นที่เวลาใดๆ ($M_{eq} \ll M_t$) จึงละค่าความชื้นสมดุลในสมการข้างต้น ทำให้สามารถเขียนสมการ (3) ได้ใหม่ (Bala, 1997; Crank, 1975; Jena & Das, 2007) ดังนี้

$$MR = \frac{M_t}{M_0} \quad (4)$$

เมื่อ MR คือ อัตราส่วนความชื้น (Decimal) M_0 คือ ความชื้นเริ่มต้นของวัสดุ (% d.b.) M_t คือ ความชื้นของวัสดุที่เวลาใดๆ (% d.b.) และ M_{eq} คือ ความชื้นสมดุลของวัสดุ (% d.b.)

4.3 สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล (Effective moisture diffusivity coefficient, D_{eff}) คือ สมบัติเฉพาะทางกายภาพที่บ่งบอกถึงความสามารถในการเคลื่อนที่ของน้ำในวัสดุซึ่งจะขึ้นอยู่กับความชื้นเริ่มต้น อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์และความเร็วของกระแสอากาศ พิจารณาได้โดยอาศัยสมการการแพร่ตามกฎข้อที่ 2 ของฟิค (Fick's second law of diffusion) ที่สมมติว่าการแพร่ออกของมวลน้ำหรือความชื้นจากวัสดุเกิดจากเกรเดียนต์ค่าความเข้มข้นของความชื้น (สมชาติ โสภณธนฤทธิ์, 2540; Bala, 1997; Crank, 1975) สำหรับวัสดุที่เป็นทรงกลม (Sphere) สามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ได้ ดังนี้

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D_{eff} \left(\frac{\partial^2 M}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial M}{\partial r} \right) \quad (5)$$

เมื่อ M คือ ความชื้น (% d.b.) D_{eff} คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล (cm^2/min) r คือ รัศมี (cm) และ t คือ

เวลาที่ใดๆ (min)

เมื่อกำหนดให้สัมประสิทธิ์การแพร่มีค่าคงตัว วัสดุจะเกิดการกระจายความชื้นสม่ำเสมอ วัสดุไม่หดตัว และไม่เกิดความต้านทานของการถ่ายเทมวลที่ผิววัสดุรวมถึงอุณหภูมิคงที่ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลของผลหมางที่เป็นทรงกลม (สมชาติ โสภณธนฤทธิ, 2540; Crank, 1975; Jena & Das, 2007; Sacilik, 2007; Singh & Gupta, 2007) จะคำนวณได้จากผลเฉลยของสมการ (5) ดังนี้

$$MR = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{1}{n^2} \right) e^{-\left(\frac{n\pi}{r} \right)^2 D_{eff} t} \quad (6)$$

หรือ

$$MR = \left(\frac{6}{\pi^2} \right) \left[e^{-\left(\frac{\pi^2}{r^2} D_{eff} t \right)} + \frac{1}{4} e^{-\left(\frac{4\pi^2}{r^2} D_{eff} t \right)} + \frac{1}{9} e^{-\left(\frac{9\pi^2}{r^2} D_{eff} t \right)} + \dots \right] \quad (7)$$

เนื่องจากพจน์ท้ายๆ ของสมการ (7) มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับพจน์แรก จึงประมาณค่าโดยพิจารณาพจน์แรกเพียงพจน์เดียว ซึ่งเขียนได้เป็น

$$MR = \left(\frac{6}{\pi^2} \right) e^{-\left(\frac{\pi^2}{r^2} D_{eff} t \right)} \quad (8)$$

เมื่อ MR คือ อัตราส่วนความชื้น (decimal) t คือ เวลาที่ใดๆ (min) D_{eff} คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล (cm^2/min) และ n คือ จำนวนเต็ม 1, 2, 3,...

4.4 อัตราการระเหยน้ำจำเพาะ (Specific moisture extraction rate, SMER) คือ ปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากวัสดุต่อพลังงานที่ใช้ตลอดการอบแห้ง เขียนเป็นสมการความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$SMER = \frac{w_i - w_f}{P_e} \quad (9)$$

4.5 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific energy consumption, SEC) คือ พลังงานที่ใช้ต่อปริมาณน้ำที่ระเหย ซึ่งเป็นส่วนกลับของอัตราการระเหยน้ำจำเพาะ เขียนเป็นสมการความสัมพันธ์ได้ ดังนี้

$$SEC = \frac{3.6 \cdot P_e}{w_i - w_f} \quad (10)$$

เมื่อ SMER คือ อัตราการระเหยน้ำจำเพาะ (kg/kWh) SEC คือ ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (MJ/kg) w_i คือ มวลวัสดุก่อนอบแห้ง (kg) w_f คือ มวลวัสดุหลังอบแห้ง (kg) และ P_e คือ ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ (kWh)

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

การทดลองอบแห้งผลหมางไม่ผ่าซีกด้วยลมร้อน ไมโครเวฟ และลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟ ที่ความเร็วลมเท่ากับ 1 m/s อุณหภูมิ ลมร้อนในช่วง 60 - 80°C และกำลังคลื่นไมโครเวฟในช่วง 180 - 600 W สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ และอัตราการระเหยน้ำจำเพาะได้ดังรายละเอียดต่อไปนี้

1. สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น

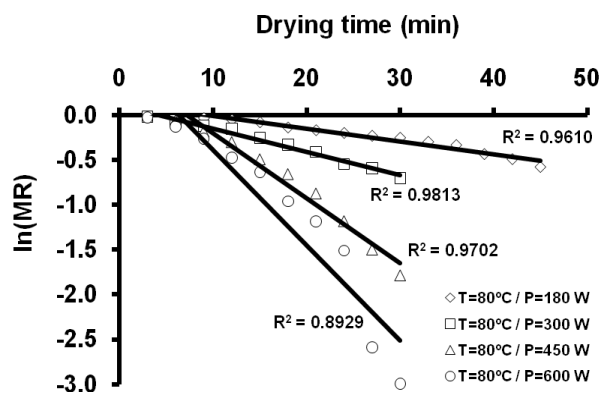
เมื่อพิจารณาความชันของกราฟ (Slope) จากความสัมพันธ์ระหว่างค่าลอการิทึมธรรมชาติของอัตราส่วนความชื้น ($\ln MR$) กับเวลาการอบแห้ง (t) ตามสมการ (8) จะคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลของการอบแห้งผลหมางไม่ผ่าซีกด้วยลมร้อน ไมโครเวฟ และลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟ ที่ความเร็วลมเท่ากับ 1 m/s อุณหภูมิ ลมร้อน 60, 70 และ 80°C และกำลังคลื่นไมโครเวฟ 180, 300, 450 และ 600 W ได้จากความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$\text{Slope} = -\frac{\pi^2 D_{eff}}{r^2} \quad (11)$$

หรือ

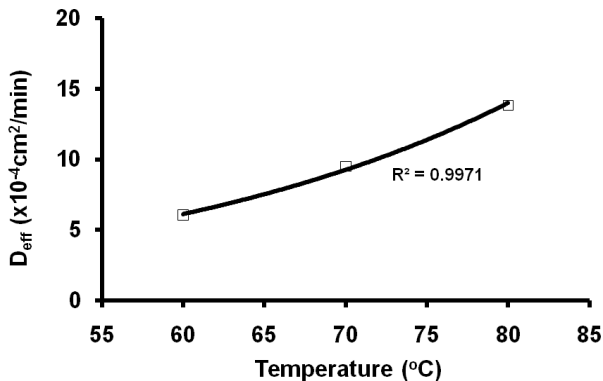
$$D_{eff} = -\frac{\text{Slope} \cdot r^2}{\pi^2} \quad (12)$$

เมื่อ D_{eff} คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล (cm^2/min) และ r คือ รัศมี (cm)

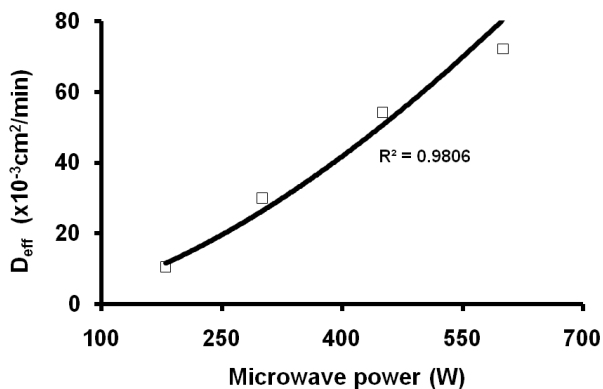


ภาพที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าลอการิทึมธรรมชาติของอัตราส่วนความชื้นกับเวลาการอบแห้งผลหมางไม่ผ่าซีกด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟ ที่ความเร็วลมเท่ากับ 1 m/s อุณหภูมิ ลมร้อน 80°C กำลังคลื่นไมโครเวฟ 180, 300, 450 และ 600 W

เมื่อเขียนความสัมพันธ์ระหว่างค่าลอการิธึมธรรมชาติของอัตราส่วนความชื้นกับเวลาการอบแห้ง (ภาพที่ 2) จะได้ค่าความชันเพื่อนำมาวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลตามสมการ (12) ซึ่งพบว่า การอบแห้งผลหมากไม่ผ่าซีกด้วยลมร้อนไมโครเวฟ และลมร้อนร่วมไมโครเวฟมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลอยู่ในช่วง 6.05×10^{-4} - 13.82×10^{-4} , 10.54×10^{-3} - 72.12×10^{-3} และ 7.00×10^{-3} - 91.80×10^{-3} cm^2/min ตามลำดับ และการอบแห้งผลหมากไม่ผ่าซีกด้วยไมโครเวฟ และลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลเฉลี่ยสูงกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนอย่างเดียว เนื่องจากมีพลังงานความร้อนจากไมโครเวฟมาช่วยให้ผลหมากเกิดความร้อนภายในได้เร็วขึ้น (เทวรัตน์ ทิพวยวิมล และ สมยศ เชิญอักษร, 2550) ส่งผลให้การแพร่ของความชื้นเกิดได้เร็วกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนอย่างเดียว

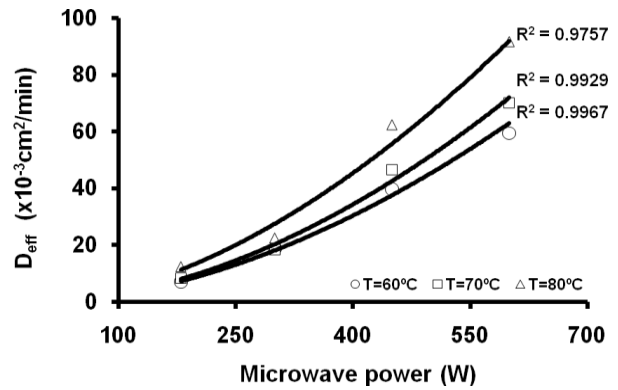


ภาพที่ 3 สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลเมื่ออบแห้งผลหมากไม่ผ่าซีกด้วยลมร้อน ที่อุณหภูมิ 60, 70 และ 80°C



ภาพที่ 4 สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลเมื่ออบแห้งผลหมากไม่ผ่าซีกด้วยไมโครเวฟ ที่กำลังคลื่นไมโครเวฟ 180, 300, 450 และ 600 W

เมื่อนำค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลที่ได้มาเขียนกราฟความสัมพันธ์กับอุณหภูมิและกำลังไมโครเวฟ พบว่าเมื่ออุณหภูมิและกำลังไมโครเวฟที่ใช้ในการอบแห้งเพิ่มขึ้นค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลจะเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย (ภาพที่ 3 ภาพที่ 4 และ ภาพที่ 5) ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองอบแห้งกล้วยแผ่น (จารุวรรณ กุลวิศวะ และคณะ, 2550) เมล็ดตองุ่น (*Vitis vinifera* L.) (Reza et al., 2011) บาร์เบอร์รี่ (*Berberis vulgaris* L.) (Gorjian et al., 2011) เมล็ดต้นโกโก้ (Hii et al., 2009) และการอบแห้งถั่วเหลืองของ Ibrahim (2005)



ภาพที่ 5 สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลเมื่ออบแห้งผลหมากไม่ผ่าซีกด้วยลมร้อนร่วมไมโครเวฟ ที่อุณหภูมิ 60, 70 และ 80°C กำลังคลื่นไมโครเวฟ 180, 300, 450 และ 600 W

2. พลังงานกระตุ้น

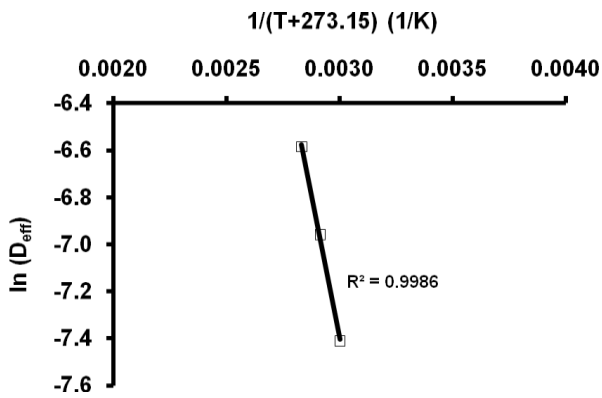
พลังงานกระตุ้น (Activation energy, E_a) ของการอบแห้งผลหมากไม่ผ่าซีกพิจารณาได้โดยอาศัยสมการความสัมพันธ์ของอาร์เรเนียส (Arrhenias type equation) (สมชาติ โสภณธรรมฤทธิ์, 2540; Bala, 1997; Sacilik, 2007; Singh & Gupta, 2007) ซึ่งสามารถคำนวณได้ ดังนี้

$$D_{\text{eff}} = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{R(T + 273.15)}\right) \quad (13)$$

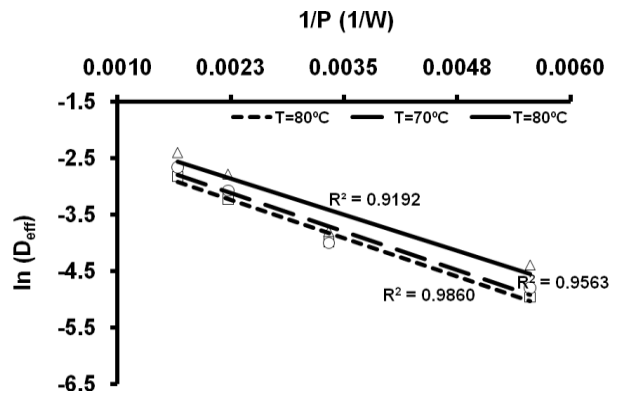
หรือ

$$\ln D_{\text{eff}} = -\frac{E_a}{R(T + 273.15)} + \ln D_0 \quad (14)$$

เมื่อ D_{eff} คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล (cm^2/min), D_0 คือ สัมประสิทธิ์การแพร่คงที่ (cm^2/min), E_a คือ พลังงานกระตุ้นที่ใช้ในการอบแห้ง (kJ/mol), T คือ อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$) และ R คือ ค่าคงที่สากลของก๊าซเท่ากับ $8.314 \text{ kJ}/\text{mol}\cdot\text{K}$



ภาพที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าลอการิทึมธรรมชาติของสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลกับ $1/R(T+273.15)$ เมื่ออบแห้งผลหมากไม่ผ่าซีกด้วยลมร้อน ที่อุณหภูมิในช่วง 60 - 80°C



ภาพที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าลอการิทึมธรรมชาติของสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลกับ $1/R(P)$ เมื่ออบแห้งผลหมากไม่ผ่าซีกด้วยไมโครเวฟ

เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าลอการิทึมธรรมชาติของสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นกับ $1/R(T+273.15)$ (ภาพที่ 6 และ ภาพที่ 7) แล้วอาศัยสมการ (14) ข้างต้น จะสามารถคำนวณค่าพลังงานกระตุ้นในการอบแห้งผลหมากไม่ผ่าซีกด้วยลมร้อนอย่างเดียวได้เท่ากับ 585.29 kJ/mol โดยที่ D_0 เท่ากับ 1344.53 cm^2/min ในขณะที่การอบแห้งด้วยไมโครเวฟอย่างเดียวมีค่าเท่ากับ 59.46 kJ/mol โดยที่ D_0 เท่ากับ 0.16 cm^2/min ส่วนการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมไมโครเวฟที่อุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 60, 70 และ 80°C กำลังคลื่นไมโครเวฟ 180, 300, 450 และ 600 W มีค่าเท่ากับ 65.34, 65.43 และ 61.77 kJ/mol โดยที่ D_0 เท่ากับ 0.13 cm^2/min , 0.15 cm^2/min และ 0.18 cm^2/min ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าการอบแห้งกล้วยแบบอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 50 - 70°C ของ Nogueira and Park (1992) ที่มีพลังงานกระตุ้นอยู่ในช่วง 15.50 - 25.32 kJ/mol และไม่สอดคล้องกับรายงานของ Rizvi (1986) ที่ระบุว่าพลังงานกระตุ้นของการอบแห้งวัสดุอาหารและผลผลิตทางการเกษตรจะมีค่าอยู่ในช่วง 15.00 - 40.00 kJ/mol

3. อัตราการระเหยน้ำจำเพาะ

อัตราการระเหยน้ำจำเพาะ (SMER) ในการอบแห้งผลหมากไม่ผ่าซีกในการวิจัยนี้พิจารณาจากพลังงานที่ให้กับพัดลมขับอากาศ (Blower) ขดลวดความร้อน (Heater) และตู้อบไมโครเวฟ ซึ่งวัดได้ด้วยมิเตอร์ไฟฟ้า (WATT-HOUR METER) ที่เวลาการอบแห้งเฉลี่ย 30, 30 และ 30 min สำหรับการอบแห้งด้วยลมร้อน (อุณหภูมิเท่ากับ 60, 70 และ 80°C) ไมโครเวฟ (กำลังคลื่นไมโครเวฟเท่ากับ 180, 300, 450 และ 600 W) และลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟ (อุณหภูมิเท่ากับ 60, 70 และ 80°C

และ กำลังคลื่นไมโครเวฟ 180, 300, 450 และ 600 W) ตามลำดับ พบว่า การอบแห้งด้วยลมร้อนอย่างเดียวค่า SMER เฉลี่ยเท่ากับ 0.0295 kg/kWh ในขณะที่การอบแห้งด้วยไมโครเวฟอย่างเดียวค่า SMER เฉลี่ยเท่ากับ 0.4880 kg/kWh และการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟค่า SMER เฉลี่ยเท่ากับ 1.2978 kg/kWh ซึ่งมีแนวโน้มที่สอดคล้องกับการทดลองอบแห้งถั่ว (alfalfa) ของ Phani *et al.* (2002) และการทดลองอบแห้งพริก (Chili) ของ Mohanraj and Chandrasekar (2009) ที่พบว่าค่า SMER อยู่ในช่วง 0.35-1.02 kg/kWh โดยค่า SMER ของการอบแห้งผลหมากไม่ผ่าซีกด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟมีค่ามากที่สุด รองลงมาคือการอบแห้งผลหมากไม่ผ่าซีกด้วยไมโครเวฟและลมร้อนเพียงอย่างเดียว ตามลำดับ

4. ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SEC) สำหรับการอบแห้งผลหมากไม่ผ่าซีกในการวิจัยนี้พิจารณาจากพลังงานที่ให้กับพัดลมขับอากาศ (Blower) ขดลวดความร้อน (Heater) และตู้อบไมโครเวฟ ซึ่งวัดได้ด้วยมิเตอร์ไฟฟ้า (WATT-HOUR METER) ที่เวลาการอบแห้งเฉลี่ย 30, 30 และ 30 min สำหรับการอบแห้งด้วยลมร้อน ไมโครเวฟ และลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟ ตามลำดับ พบว่า การอบแห้งด้วยลมร้อนอย่างเดียวค่า SEC เฉลี่ยเท่ากับ 1.1071 MJ/kg ในขณะที่การอบแห้งด้วยไมโครเวฟอย่างเดียวค่า SEC เฉลี่ยเท่ากับ 0.0094 MJ/kg และการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟค่า SEC เฉลี่ยเท่ากับ 0.0063 MJ/kg ซึ่งค่า SEC ของการอบแห้งผลหมากไม่ผ่าซีกด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียวมีค่ามากที่สุด รองลงมาคือการอบแห้งผลหมากไม่ผ่าซีกด้วยไมโครเวฟ

และลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟ ตามลำดับ โดยความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มพลังงานในการอบแห้ง เนื่องจากการเพิ่มพลังงานการอบแห้งจะช่วยเพิ่มความสามารถในการระเหยของน้ำในผลหมากให้มากขึ้น

สรุปผลการวิจัย

จากการทดลองอบแห้งผลหมากไม่ผ่าซีกด้วยลมร้อนไมโครเวฟ และลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟ ที่ความเร็วลมเท่ากับ 1 m/s อุณหภูมิลมร้อน 60, 70 และ 80°C และกำลังคลื่นไมโครเวฟในช่วง 180, 300, 450 และ 600 W ด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานความร้อนร่วมลมร้อนไมโครเวฟ YRU-HA/MW DRYER (FR&E) สรุปได้ดังนี้

1. สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลของการอบแห้งด้วยลมร้อน ไมโครเวฟ และลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟ อยู่ในช่วง 6.05×10^{-4} - 13.82×10^{-4} , 10.54×10^{-3} - 72.12×10^{-3} และ 7.00×10^{-3} - 91.80×10^{-3} cm²/min ตามลำดับ
2. พลังงานกระตุ้นในการอบแห้งด้วยลมร้อนเท่ากับ 585.29 kJ/mol โดยที่ D₀ เท่ากับ 1344.53 cm²/min ในขณะที่การอบแห้งด้วยไมโครเวฟอย่างเดียวมีค่าเท่ากับ 59.46 kJ/mol โดยที่ D₀ เท่ากับ 0.16 cm²/min ส่วนการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟที่อุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 60, 70 และ 80°C กำลังคลื่นไมโครเวฟ 180, 300, 450 และ 600 W มีค่าเท่ากับ 65.34, 65.43 และ 61.77 kJ/mol โดยที่ D₀ เท่ากับ 0.13 cm²/min, 0.15 cm²/min และ 0.18 cm²/min ตามลำดับ
3. อัตราการระเหยน้ำจำเพาะของการอบแห้งด้วยลมร้อน ไมโครเวฟ และลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟเฉลี่ยเท่ากับ 0.0295, 0.4880 และ 1.2978 kg/kWh ตามลำดับ
4. ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของการอบแห้งด้วยลมร้อน ไมโครเวฟ และลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟเฉลี่ยเท่ากับ 1.1071, 0.0094 และ 0.0063 MJ/kg ตามลำดับ
5. การอบแห้งผลหมากไม่ผ่าซีกด้วยไมโครเวฟและลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลเฉลี่ยสูงกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนอย่างเดียว และการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟ ที่อุณหภูมิ 80°C กำลังคลื่นไมโครเวฟ 600 W เป็นวิธีการอบแห้งที่ดีที่สุด

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อับดุลนาเซอร์ ฮายีสามะาะ ที่กรุณาตรวจสอบนิพนธ์ต้นฉบับ และคุณอามานะห์

อูมา นักวิทยาศาสตร์สาขาวิชาฟิสิกส์ที่อำนวยความสะดวกในการใช้อุปกรณ์การทดลอง จนการวิจัยสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- กรมวิชาการเกษตร. *หมาก* [ออนไลน์]. [22 เมษายน 2553]. เข้าถึงได้จาก URL <http://it.doa.go.th/vichakan/news.php?newsid=25>.
- จารุวรรณ กุลวิศวะ สมเกียรติ ปรัชญาวารากร และสมชาติ โสภณธณฤทธิ. (2550). ผลของอุณหภูมิอบแห้งที่มีต่อสารระเหยง่ายและคุณภาพทางกายภาพของกล้วยแผ่น. *วารสารวิจัยและพัฒนา มจร.* 30(4), 611-621.
- เทวรัตน์ ทิพวยวิมล และสมยศ เขียวอักษร. (2550). การอบแห้งฟริกซ์ฟ้าด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟ. *วารสารวิชาการเกษตร,* 25(1), 46 -57.
- สมชาติ โสภณธณฤทธิ. (2540). *การอบแห้งเมล็ดพืชและอาหารบางประเภท.* กรุงเทพฯ : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- นิรนาม. *อนาคตหมากไทยจะเป็นอย่างไร* [ออนไลน์]. [2 มกราคม 2553]. เข้าถึงได้จาก URL <http://www.Positioningmag.com/prnews/prnews.aspx?id=49268>.
- AOAC. (2005). *Official methods of analysis.* (18th edition). Washington, D.C. : Association of official analytical chemists.
- Bala, B.K. (1997). *Drying and storage of cereal grains.* New Delhi : Oxford & IBH Publishing.
- Brooker, D.B., Bakker-Arkema, F.W. and Hall, C.W. (1981). *Drying cereal grains.* (3rd edition). Westport, Connecticut : The AVI publishing company, Inc.
- Crank, J. (1975). *The mathematics of diffusion.* London : Oxford University Press.
- Gorjian, Sh., Tavakkoli. H. T., Khoshtaghaza1, M. H. and Nikbakht, A. M. (2011). Drying kinetics and quality of barberry in a thin layer dryer. *Journal of Agricultural Science and Technology,* 13, 303-314.
- Hii, C.L., Law, C.L. and Cloke, M. (2009). Modeling using a new thin layer drying model and product quality of cocoa. *Journal of Food Engineering,* 90, 191-198.

- Ibrahim, D. (2005). Drying behaviour of green beans. *Journal of Food Engineering*, 69, 161-165.
- Jena, S. and Das, H. (2007). Modelling for vacuum drying characteristics coconut presscake. *Journal of Food Engineering*, 79, 92-99.
- Mohanraj, M. and Chandrasekar, P. (1009). Performance of a forced convection solar drier integrated with gravel as heat storage material for chili drying. *Journal of Engineering Science and Technology*, 4(3), 305-314.
- Nogueira, R.I. and Park, K.J. (1992). *Drying parameters to obtain banana passa*. New York : Elsevier Science Publisher, USA.
- Phani, K. A., Shahab, S. and Greg, J.S. (2002). Performance study of a re-circulating cabinet dryer using a household dehumidifier. *Drying Technology an International Journal*, 20(8), 1673-1689.
- Reza, A.C., Mir, H.P., Mahmood, E.A. and Kamran, S. (2011). Influence of drying conditions on diffusivity, energy and color of seedless grape after dipping Process. *Australian Journal of Crop Sceince*, 5(1), 96-103.
- Rizvi, S.S.H. (1986). *Thermodynamic properties of foods in dehydration*. In Rao, M.A. and Rizvi, S.S.H., Engineering properties of foods. NewYork : Marcel Dekker. USA.
- Sacilik, K. (2007). Effect of drying methods on thin-layer drying characteristics of hull-less seed pumpkin (*Cucurbita pepo L.*). *Journal of Food Engineering*, 79, 23-30.
- Singh, B. and Gupta, A.K. (2007). Mass transfer kinetics and determination of effective diffusivity during convective dehydration of pre-osmosed carrot cubes. *Journal of Food Engineering*, 79, 459-470.