

การพัฒนาเครื่องอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำ

* ภัคดี สิทธิฤทธิ์กวิน¹, กอดขวัญ นามสงวน¹

¹ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ 239 ถนนห้าแยกห้า ตำบลสุเทพ อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ 50200

ผู้เขียนติดต่อ: ภัคดี สิทธิฤทธิ์กวิน E-mail: pakdee.me@gmail.com

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อศึกษาออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำโดยใช้ฟักทองเป็นวัสดุทดลอง ซึ่งจะศึกษาสมรรถนะการทำงานของเครื่องอบแห้งและจลนพลศาสตร์การอบแห้ง คุณภาพของฟักทองหลังอบแห้งซึ่งจะพิจารณาในด้าน สีและการหดตัว ในการทดสอบสมรรถนะการทำงานของเครื่องอบแห้งจะพิจารณาในแง่ ความสิ้นเปลืองพลังงานและความสามารถในการทำงานตามสภาวะจริง โดยจะทดลองอบแห้งฟักทองด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำที่อุณหภูมิอบแห้งในช่วง 70-110°C และ ความดันภายในห้องอบในช่วง 10 kPa-15 kPa สัมบูรณ์ ความชื้นเริ่มและสุดท้ายของการอบแห้งฟักทองในการทดลองแต่ละครั้งประมาณ 700-950% และ 18% มาตรฐานแห้ง จากการทดลองพบว่าเครื่องอบแห้งสามารถสร้างสุญญากาศได้ต่ำสุด 6 kPa สัมบูรณ์ อุณหภูมิสูงสุด 130°C และหม้อต้มผลิตไอน้ำได้สูงสุด 8 kg/hr และสามารถอบแห้งฟักทองได้ดีที่สุดที่ความดัน 10 kPa สัมบูรณ์ และ อุณหภูมิ 90°C โดยพิจารณาในแง่ความสิ้นเปลืองพลังงาน เวลาที่ใช้การอบแห้ง สี และการหดตัว

คำสำคัญ: คุณภาพ; เครื่องอบแห้ง; สมรรถนะการทำงาน; ไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่ความดันต่ำ

1. บทนำ

เทคโนโลยีการอบแห้งที่มีใช้อยู่ในปัจจุบันได้ถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่องจนสามารถใช้งานได้จริงในระดับครัวเรือนและอุตสาหกรรม เช่น เครื่องอบแห้งด้วยลมร้อน, เครื่องอบแห้งด้วยปั๊มความร้อน, เครื่องอบแห้งแบบสุญญากาศรวมไปถึงเครื่องอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันบรรยากาศ ซึ่งเครื่องอบแห้งแต่ละชนิดจะมีลักษณะเด่นและด้อยแตกต่างกันไป โดยที่ผู้ใช้งานจะต้องเลือกใช้งานให้เหมาะสมกับผลิตภัณฑ์นั้นๆ การอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งจะมีลักษณะเด่นที่ตรงที่กระบวนการอบแห้งจะไม่มีอากาศเข้ามาในห้องอบแห้ง ทำให้ผลิตภัณฑ์ไม่สัมผัสกับออกซิเจนที่มีอยู่ในอากาศ จึงช่วยลดปัญหาการเกิดออกซิเดชันต่างๆ และลดการหดตัวได้ดีเนื่องจากน้ำในผลิตภัณฑ์เกิดการเดือดและระเหยออกจากวัสดุอย่างรวดเร็วทำให้เกิดรูพรุนจำนวนมากและขนาดใหญ่ในวัสดุ [1] แต่ก็ยังมีข้อเสียตรงที่ความดันบรรยากาศอุณหภูมิต่ำที่ใช้ในการอบจะต้องใช้อุณหภูมิสูงเกินจุดเดือด 100°C ขึ้นไป ซึ่งเมื่อใช้ไอน้ำที่อุณหภูมิสูงมาอบแห้งผักและผลไม้ที่ไม่สามารถทนความร้อนสูงๆได้ก็จะทำให้คุณภาพบางตัวของอาหารสูญเสียไป [2] แต่ก็สามารถแก้ปัญหาเหล่านี้ได้ด้วยการลดความดันภายในห้องอบแห้งความ

ดันต่ำกว่าบรรยากาศ ซึ่งจะทำให้อุณหภูมิจุดเดือดของน้ำลดต่ำลงตามความดันจึงสามารถใช้อุณหภูมิต่ำของไอน้ำของไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่ต่ำกว่า 100°C ได้ส่งผลให้ค่าสีและคุณค่าทางโภชนาการต่างๆ ได้รับการรักษาเอาไว้ค่อนข้างดี ซึ่งที่ผ่านพบว่ามีนักวิจัยได้พัฒนาเครื่องอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำกว่าบรรยากาศ ในระดับห้องปฏิบัติการ Phet et al. [3] ได้ทำการอบมันฝรั่ง ที่ความดัน 7 kPa สัมบูรณ์ช่วงอุณหภูมิ 70 – 90°C ซึ่งได้ออกแบบห้องอบเป็นลักษณะทรงสี่เหลี่ยม ใช้ไอน้ำจากเครื่องผลิตไอน้ำที่มีความดันสูงแล้วลดความดันให้ต่ำลง และยังพบ Elustondo et al. [4] ได้ออกแบบห้องอบสำหรับใช้ในห้องปฏิบัติการ เป็นลักษณะท่อหมุนวนมีชุดทำความร้อนไอน้ำร้อนยวดยิ่ง และมีพัดลมแบบแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางเป็นกระจายลมภายในห้องอบแล้วศึกษาการอบแห้ง ไม้, เนื้อสัตว์, ผักและผลไม้เครื่องสามารถอบ ได้ช่วงอุณหภูมิ 60–90°C ความดัน 10–20 kPa และยังพบว่า Nimmol et al. [5] มีการประยุกต์เครื่องอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำกว่าบรรยากาศ ร่วมกับการให้ความร้อนด้วยฮีตเตอร์อินฟราเรด เป็นให้ความร้อนโดยตรงไปยังวัสดุ ที่เป็นกล้วยหอม ทำงานในช่วงอุณหภูมิ 70–90°C ความดัน 7-10 kPa สัมบูรณ์ ซึ่งสามารถ

ใช้งานได้ดีขึ้นกว่าแบบเดิมที่ไม่ชุดอินฟราเรดในแง่การประหยัดพลังงาน คุณภาพทางด้านสีและการหดตัว

ดังนั้นงานวิจัยนี้มีแนวคิดที่จะพัฒนาเครื่องอบแห้งดังกล่าวเป็นต้นแบบที่จะสามารถใช้งานได้ใกล้เคียงกับงานจริงได้ในลำดับถัดไป จึงมุ่งเน้นการออกแบบเป็นแบบขนาดเล็กกะทัดรัด ใช้งานง่ายสะดวก โดยใช้ฟักทองเป็นวัสดุทดลอง ซึ่งจะศึกษาสมรรถนะการทำงานของเครื่องอบแห้งและจลนพลศาสตร์การอบแห้งรวมถึงคุณภาพของฟักทองหลังอบแห้งซึ่งจะพิจารณาในด้านสีและการหดตัว ในการทดสอบสมรรถนะการทำงานของเครื่องอบแห้งจะพิจารณาในแง่ ความสิ้นเปลืองพลังงานและความสามารถในการทำงานตามสภาวะจริง

2. วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการวิจัย

วัสดุ

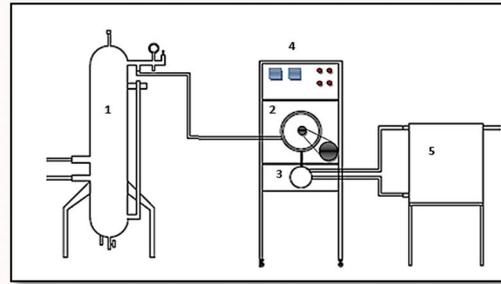
ฟักทองที่ใช้ในการทดสอบ เป็นพันธุ์ทองอำไพ (คางคกดำ) หั่นเป็นชิ้น ขนาด 20 x 30 x 3 mm. ซื้อมาจากตลาดขายส่งสินค้าเกษตร อำเภอเมือง จังหวัดเชียงราย

อุปกรณ์

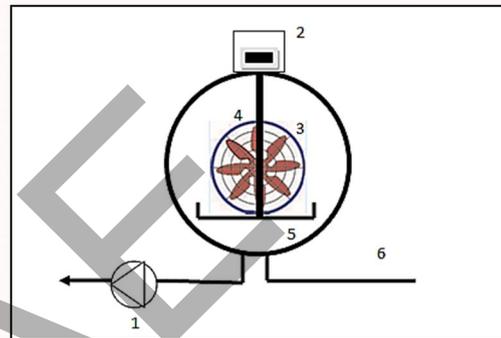
ค่าพลังงานไฟฟ้าจะบันทึกจากวัตต์ฮาวมิเตอร์ (MITSUBISHI Co. Ltd.) ใช้เครื่องชั่งน้ำหนักยี่ห้อ A&D รุ่น GF 3000 ค่าความละเอียด ± 0.01g ชุดควบคุมอุณหภูมิภายในห้องอบแบบ PID (Proportional-Integral-Derivative Controller) ค่าความถูกต้อง ±0.5°C ต่อเข้ากับเทอร์โมคัปเปิล ชนิด K เพื่อวัดอุณหภูมิภายในตู้อบแห้งและอุณหภูมิแวดล้อม

วิธีการวิจัย

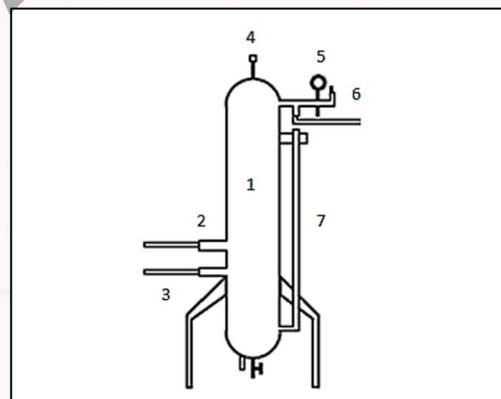
เครื่องอบแห้งด้วยอินฟราเรดด้วยความดันต่ำ แสดงดังรูปที่ 1 ส่วนหลักๆจะต้องประกอบไปด้วย ห้องอบแห้งรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 cm. ยาว 40 cm. หม้อต้มไอน้ำ ปั๊มสุญญากาศ อุปกรณ์ให้ความร้อน ถาดวางวัสดุทดสอบ พัดลมสำหรับกระจายไอน้ำ และเครื่องมือวัดต่างๆ ประกอบด้วย เครื่องมือวัดความดัน เครื่องมือวัดอุณหภูมิ มิเตอร์วัดการใช้ไฟฟ้า และเครื่องชั่งน้ำหนัก และรูปที่ 2 ได้แสดงรายละเอียดของอุปกรณ์ภายในเครื่องอบแห้ง ส่วนในรูปที่ 3 แสดงถึงรายละเอียดอุปกรณ์ภายในหม้อต้มไอน้ำ



รูปที่ 1 เครื่องอบแห้งด้วยอินฟราเรดด้วยความดันต่ำ (1. หม้อต้มไอน้ำ 2.ห้องอบแห้ง 3. ปั๊มสุญญากาศ 4. ชุดควบคุมการทำงานของเครื่องอบ 5. ถังน้ำหล่อเย็นปั๊มสุญญากาศ)



รูปที่ 2 รายละเอียดภายในเครื่องอบแห้งด้วยอินฟราเรดด้วยความดันต่ำ (1. ปั๊มสุญญากาศ 2. เครื่องชั่งน้ำหนัก 3. ชุดให้ความร้อน 4. พัดลม 5. ถาดรับวัสดุอบ 6. ท่อทางเข้าไอน้ำ)



รูปที่ 3 รายละเอียดอุปกรณ์ภายในหม้อต้มไอน้ำ (1.หม้อต้มไอน้ำ 2.ฮีตเตอร์ 3.ฮีตเตอร์ 4.เทอร์โมคัปเปิล 5. เกจวัดความดัน 6.วาล์วนิรภัย 7.ท่อเติมน้ำ)

1. การคำนวณหาขนาดฮีตเตอร์ให้ความร้อนในหม้อต้มน้ำจะคำนวณ 2 ส่วน คือ

- คำนวณค่าความร้อนสำหรับต้มน้ำจากอุณหภูมิเริ่มต้น 25°C ที่จนถึงจุดเดือด 100°C ภายในเวลา 1hr. โดยไม่คิดค่าความร้อนสูญเสียเนื่องจากการหุ้มฉนวนเป็นอย่างดีจากสมการ

$$Q_s = (mc_p \Delta T)/t \quad \dots(1)$$

เมื่อ

Q_s คือ พลังงานความร้อนที่ต้องการ, kW

m คือ ปริมาณน้ำ, kg

c_p คือ ค่าความร้อนจำเพาะของน้ำ, kJ/kg K

ΔT คือ ค่าความแตกต่างของอุณหภูมิ, °C

t คือ เวลาที่ต้องการใช้ในต้มน้ำร้อน, sec. แทนค่าสมการด้วยปริมาณน้ำในหม้อต้ม 40 kg ค่าความร้อนจำเพาะของน้ำ

$c_p = 4.187$ kJ/kg°C ค่าความแตกต่างของอุณหภูมิ น้ำเริ่มต้นจนถึงจุดเดือด

$\Delta T = 100^\circ\text{C} - 25^\circ\text{C}$ จะได้ค่าพลังงานความร้อนตามสมการ (1) เท่ากับ 3.5 kW

- การคำนวณค่าความร้อนสำหรับต้มน้ำร้อน ปริมาณ 40 kg ให้กลายเป็นไออิ่มตัว ทั้งหมดภายในเวลา 5 hr จากสมการ

$$QL = mhfg/t \quad \dots(2)$$

เมื่อ

Q_L คือพลังงานความร้อนที่ต้องการ, kW

m คือปริมาณน้ำ, kg

h_{fg} คือค่าความร้อนแฝงกลายเป็นไอ, kJ/kg

t คือเวลาที่ต้องการใช้ในต้มน้ำร้อนให้กลายเป็นไอ, sec. แทนค่าสมการด้วย ปริมาณน้ำในหม้อต้ม 40 kg ค่าความร้อนแฝงกลายเป็นไอ

$h_{fg} = 2260$ kJ/kg จะได้ปริมาณความร้อนตามสมการ (2) 5.02 kW สรุปลืออกฮีตเตอร์ ขนาด 5 kW แบ่งเป็น 2 ตัว ขนาด 3 kW และ 2 kW

2.) การคำนวณหาขนาดของฮีตเตอร์ในห้องอบแห้ง กำหนดให้ฟักทองสดที่ใช้ในการอบเท่ากับ 1 kg ความชื้นเริ่มต้น 85% d.b. ความชื้นสุดท้าย 18% d.b. ค่าความจุความร้อนจำเพาะของฟักทอง $C_p = 3.85$ kJ/kg oC [6] อุณหภูมิเริ่มต้นและอุณหภูมิสุดท้ายของฟักทองเท่ากับ 25°C และ 120°C ค่าความร้อนแฝงของน้ำที่ความดัน 5 kPa สัมบูรณ์ $h_{fg} = 2423$ kJ/kg ปริมาณน้ำที่ต้องระเหยหาได้จากสมการเมื่อทราบมวลแห้งของวัสดุแล้ว

$$M_d = \frac{(w - d)}{d} \quad \dots(3)$$

เมื่อ

M_d คือ ความชื้นมาตรฐานแห้ง, เศษส่วน

w คือ มวลของวัสดุ, kg

d คือ มวลของวัสดุแห้งที่ไม่มีน้ำ, kg dry product

อัตราความร้อนที่ต้องให้กับระบบ คือความร้อนที่ต้องการในระบบเพื่อใช้ในการระเหยน้ำออกจากฟักทองประกอบด้วย ความร้อนสัมผัสและความร้อนแฝง ซึ่งความร้อนทั้งสองชนิดดังกล่าวจะใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิของฟักทองและใช้ในการระเหยน้ำออกจากฟักทอง ปริมาณความร้อนที่ต้องใช้สามารถคำนวณได้จากสมการ [7]

$$Q = (m_i c_p \Delta T) + (m h_{fg}) + (m_o c_p \Delta T) \quad \dots(4)$$

เมื่อ

Q คือ ปริมาณความร้อนที่ต้องการในระบบ, kJ

m_i, m, m_o คือ มวลของวัสดุสด, มวลของน้ำที่ระเหย

และมวลของวัสดุแห้งอบ ตามลำดับ, kg

c_p คือ ค่าความร้อนจำเพาะของวัสดุ, kJ/kg°C

h_{fg} คือ ค่าความร้อนแฝงกลายเป็นไอ, kJ/kg

ΔT คือ ค่าความแตกต่างของอุณหภูมิ, °C

ให้ระบบมีการสูญเสียความร้อนในส่วนต่างๆโดยรวมไว้ในค่า Safety factor = 1.5 แทนค่าสมการตัวแปรต่างๆ ลงในสมการ (4) ทำให้ได้พลังงานความร้อนที่ใช้ในระบบเท่ากับ 1.05kW จึงเลือกฮีตเตอร์ขนาด 1.5 kW

3.) การหาขนาดของปั๊มสุญญากาศ ในการคำนวณหาขนาดฟัดมอเตอร์ของปั๊มสุญญากาศ สามารถคำนวณจากสมการ

$$W_s = V \Delta P / \eta_v \eta_m \quad \dots(5)$$

เมื่อ

W_s คือ กำลังทำงานมอเตอร์ปั๊มสุญญากาศ, kW

V คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของไอน้ำ, m³/s

ΔP คือ ความดันสูญเสียในระบบ, Pa

η_v คือ ประสิทธิภาพของปั๊มสุญญากาศ, %

η_m คือ ประสิทธิภาพของมอเตอร์, %

โดยกำหนดให้

ค่า Safety factor = 1.2 ความดันต่ำสุดในห้องอบแห้งที่ต้องการ 5 kPa ความดันภายนอกเท่ากับความดันบรรยากาศ 101 kPa ไม่คิดความดันสูญเสียในระบบส่วนอื่น เนื่องจากระยะจากห้องอบแห้งถึงท่อทางออกสั้นมาก $\eta_v = 0.5$ และ $\eta_m = 0.85$ ความหนาแน่นของไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่ความดัน 10 kPa อุณหภูมิ 150°C $\rho = 0.0512$ kg/m³ จากการคำนวณได้ $W_s = 12.15$ kW จึงเลือก เลือกฟัดมอเตอร์เท่ากับ 12.682 kW (17 hp) เพื่อป้องกันมอเตอร์ทำงานเกินกำลังและเลือกใช้ปั๊มสุญญากาศแบบวงแหวนน้ำ (Water-

Ring Vacuum pump) ซึ่งสามารถใช้งานได้ดีกับระบบที่มีไอน้ำในปริมาณมาก โดยมีอัตราการไหลเชิงปริมาตร 5-600 m³/hr ทำความดันได้ต่ำสุด 3.3 kPa สัมบูรณ์

ตารางที่ 1 พิกัดเครื่องอบแห้ง

อุปกรณ์	พิกัด
หม้อต้มไอน้ำ	
1. ฮีตเตอร์ให้ความร้อนในหม้อต้มไอน้ำ	*5 kW
2. อัตราผลิตไอน้ำ	*8 kg/hr
ห้องอบแห้ง	
1. ฮีตเตอร์ในห้องอบแห้ง	*1.5 kW
ปั๊มสุญญากาศแบบวงแหวนน้ำ	
1. มอเตอร์	*13 kW
2. อัตราการไหลเชิงปริมาตร	600 m ³ /hr
3. ความดันได้ต่ำสุด (สัมบูรณ์)	3.3 kPa

*ที่มา จากการคำนวณในสมการหน้าที่ 3 และ 4

ขั้นตอนการทดลอง

a) จัดเตรียมฟักทองโดยหั่นเป็นชิ้นสี่เหลี่ยม มีขนาด 20 x 30 x 3 mm. จำนวน 20 ชิ้นใส่ในถาดทดลอง จากนั้นทำการอบแห้งโดยควบคุมอุณหภูมิ 70, 80, 90, 100, 110 °C และความดันที่ 10, 13, 15 kPa สัมบูรณ์

b) เก็บข้อมูล, อุณหภูมิ, ความดัน, มวลของฟักทองและความสิ้นเปลืองพลังงาน ในแต่ละการทดสอบแล้วคำนวณค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific energy consumption, SEC) จากสมการ

$$SEC = \frac{3.6E_p}{(M_{in} - M_f)W_d} \quad \dots(6)$$

เมื่อ E_p คือ ปริมาณพลังงานที่ใช้ (kW-h), M_{in} คือ ความชื้นเริ่มต้นของฟักทอง (%dry-basis), M_f คือ ความชื้นสุดท้ายของฟักทอง (% dry-basis), W_d คือ น้ำหนักแห้ง (kg) และ 3.6 คือ ตัวเลขแปลงหน่วยของพลังงานไฟฟ้า

c) ทดสอบจนฟักทองมีความชื้นสุดท้ายประมาณ 18% db. และวิเคราะห์ข้อมูลโดยการเปรียบเทียบเวลาการอบแห้ง

d) นำตัวอย่างไปหาล้างน้ำหนักแห้งด้วยวิธี Hot Air Oven ที่อุณหภูมิ 103°C เป็นเวลา 72 ชม.

e) นำฟักทองที่ผ่านการอบแห้งเรียบร้อยแล้วไปทดสอบคุณภาพ ในด้าน สี การหดตัว

f) ทดสอบการทดสอบทำการทดสอบ 3 ซ้ำ

การวิเคราะห์คุณภาพฟักทองหลังการอบแห้ง

1. การทดสอบคุณภาพด้านสี จะทำการวัดโดยใช้เครื่องวัดสี Hunter Lab รุ่น Miniscan XE Plus โดยวัดค่าสีออกมาเป็น L เป็นค่าความสว่าง (Lightness: 0-100; ดำ - ขาว), a เป็นค่าสีแดงและเขียว (+ Redness/Greenness)

และ b เป็นค่าสีเหลืองและน้ำเงิน (+ Yellowness/Blueness) ในระบบ CIE LAB โดยจะทำการวัดสีฟักทองก่อนการอบแห้งและหลังการอบแห้ง โดยในแต่ละการทดลองจะทำการวัดสีฟักทองจำนวน 5 ชิ้น ชิ้นละ 3 จุดๆ ละ 3 ซ้ำ สมการคำนวณค่าการเปลี่ยนแปลงสี [8]

$$\Delta L/L_o = \frac{(L-L_o)}{L_o}, \Delta a/a_o = \frac{(a-a_o)}{a_o},$$

$$\Delta b/b_o = \frac{(b-b_o)}{b} \quad \dots(7)$$

$$\Delta E = \sqrt{\Delta L^2 + \Delta a^2 + \Delta b^2} \quad \dots(8)$$

เมื่อ L_o, a_o, b_o คือ ค่าความสว่าง, ค่าความเป็นสีแดงและค่าความเป็นสีเหลืองเริ่มต้นของฟักทองตามลำดับ, ΔE คือค่าการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมของฟักทอง

2. การทดสอบการหดตัวจะทำการวัดปริมาตรของตัวอย่างก่อนและหลังการอบแห้งโดยวิธีแทนที่ปริมาตรโดยการแทนที่ลงในน้ำมันพืช ในแต่ละการทดลองจะทำการวัดการหดตัวของฟักทองจำนวน 10 ชิ้น จะทำการทดลองจำนวน 3 ซ้ำ โดยปริมาตรของวัตถุจะเท่ากับปริมาตรของเหลวที่เพิ่มขึ้นในภาชนะ ดังนั้นจึงหาปริมาตรของวัตถุได้จาก สมการดังนี้

$$\%Shrinkage = \frac{V_o - V_f}{V_o} \times 100 \quad \dots(9)$$

เมื่อ

V_o คือ ปริมาตรของวัตถุเริ่มต้นอบแห้ง, ml

V_f คือ ปริมาตรของวัตถุหลังอบแห้ง, ml

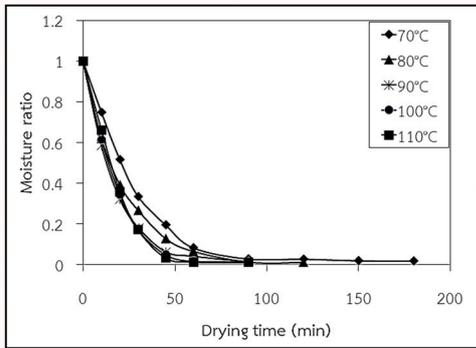
3. ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

จากผลการทดลองการอบแห้งฟักทอง โดยใช้สภาวะการอบแห้งต่างๆ และคำนวณหาค่าอัตราส่วนความชื้นที่เวลาต่างๆดังสมการที่ (10) และผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4

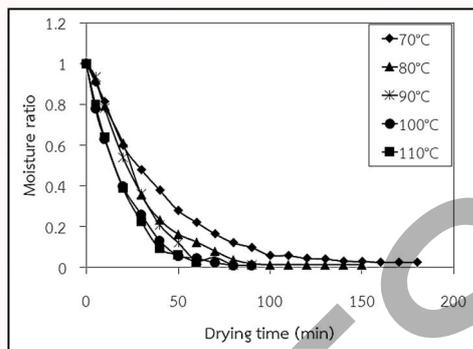
$$\text{Moisture ratio (MR)} = \frac{M_t}{M_{in}} \quad \dots(10)$$

เมื่อ M_{in} คือ ความชื้นเริ่มต้นของวัสดุ (%dry-basis), M_t คือความชื้นที่เวลาใดๆ ของวัสดุ (%dry-basis), จากรูปที่ 4 (ก) ถึง 4 (ค) แสดงจลนพลศาสตร์การอบแห้งฟักทอง โดยมีความชื้นเริ่มต้นอยู่ในช่วง 700-950%dry-basis และความชื้นสุดท้ายหลังอบแห้งแต่ละกรณีอยู่ประมาณ 18% d.b. จากกราฟทั้งสามรูปย่อย จะเห็นได้ว่าเมื่ออุณหภูมิอบแห้งสูงขึ้นและความดันในห้องอบแห้งลดลงจะใช้ระยะเวลาในการอบแห้งลดลง ทั้งนี้เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิอบแห้งเพิ่มมากขึ้น

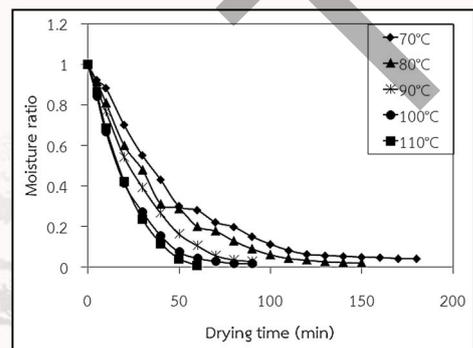
เกรเดียนท์ของอุณหภูมิระหว่างแหล่งพลังงานและวัสดุจะเพิ่มมากขึ้น อัตราการถ่ายโอนความร้อนยิ่งสูงมากขึ้นเช่นกัน ในส่วนของความดันภายในห้องอบที่ลดลงจะทำให้จุดเดือดของน้ำที่มีอยู่ในฟักทองลดต่ำลงทำให้น้ำสามารถระเหยออกไปได้ง่ายยิ่งขึ้น ซึ่งส่งผลให้อัตราการอบแห้งเร็วขึ้น



(ก) 10 kPa



(ข) 13 kPa



(ค) 15 kPa

รูปที่ 4 ผลการทดลองอัตราส่วนความชื้นของฟักทองกับระยะเวลาการอบแห้งด้วยความดันสัมบูรณ์ (ก) 10 kPa (ข) 13 kPa และ (ค) 15 kPa อุณหภูมิอบแห้ง 70-110°C

ความสัมพันธ์พลังงานจำเพาะของเครื่องอบแห้ง

จากผลการทดลองแสดงความสัมพันธ์พลังงานในแต่ละส่วนของระบบ และค่าความสัมพันธ์พลังงานจำเพาะ (Specific energy consumption, SEC) ของแต่ละเงื่อนไขที่ทำการทดลอง รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 4 จะเห็นได้ว่า ค่าความสัมพันธ์พลังงานของการอบแห้งฟักทองที่ อุณหภูมิอบแห้งในช่วง 70-110°C และความดัน 10-15kPa พบว่าเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งเพิ่มสูงขึ้นและความดันลดลง จะใช้ระยะเวลาในการอบแห้งลดลง ส่งผลให้ค่าความสัมพันธ์พลังงานจำเพาะในการอบแห้งมีแนวโน้มลดลง

คุณภาพด้านสีของฟักทอง

ผลการวัดสีของฟักทอง แสดงดังตารางที่ 5 พบว่า ค่าสีของผลิตภัณฑ์ฟักทองภายหลังการอบแห้งที่สภาวะการทดลองต่างๆ มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 จากตารางที่ 5 เมื่อเปรียบเทียบค่าสีของฟักทองก่อนและหลังการอบแห้ง พบว่าปัจจัยหลักที่ผลต่อสีของฟักทองคืออุณหภูมิที่ใช้ออบแห้งเมื่อเปรียบเทียบกับความดันภายในห้องอบ กล่าวคือ เมื่ออุณหภูมิอบแห้งสูงขึ้น ค่าความสว่างมีแนวโน้มลดลง ค่าความเป็นสีแดงมีแนวโน้มลดลง ค่าความเป็นสีเหลืองมีแนวโน้มลดลง และการเปลี่ยนแปลงสีรวมในรูปของ ΔE มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นขณะที่ปัจจัยของความดัน ไม่ส่งผลต่อสีของของฟักทองอบแห้งเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้ง

คุณภาพด้านการหดตัวของฟักทอง

จากตารางที่ 5 แสดงการหดตัวของฟักทองหลังการอบแห้ง การหดตัวของฟักทองเกิดจากการได้รับความร้อนจากไอน้ำ ส่งผลให้น้ำที่อยู่ภายในเซลล์ในเนื้อฟักทองมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น และเกิดความแตกต่างของความดันไอน้ำภายในและภายนอกเซลล์ จึงมีการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของน้ำจากภายในเนื้อฟักทองไปยังไอน้ำแวดล้อมในห้องอบแห้ง ทำให้เซลล์ภายในเนื้อฟักทองมีปริมาตรลดลงและเกิดการหดตัวขึ้น

ตารางที่ 4 ความสัมพันธ์พลังงานจำเพาะในการอบแห้งฟักทองที่สภาวะต่างๆ

Pressure (kPa)	Temp. (°C)	Time (min)	Energy consumption (kWh)				SEC (kWh/kg water)
			E. Vacc.	E. Heater	E. Boiler	Total	
10	70	133	3.50	0.45	6.90	10.85	268.9
	80	72.9	2.25	0.42	4.37	7.05	153.9
	90	63.6	1.50	0.38	3.70	5.85	125.8
	100	58.52	2.00	0.35	3.20	5.55	119.7

Pressure (kPa)	Temp. (°C)	Time (min)	Energy consumption (kWh)				SEC (kWh/kg water)
			E. Vacc.	E. Heater	E. Boiler	Total	
	110	51.65	1.50	0.35	2.50	4.35	107.6
13	70	180	5.00	1.12	10.80	16.92	476.9
	80	87.3	2.43	0.54	5.24	8.21	151.0
	90	69.2	2.00	0.35	3.40	5.75	105.8
	100	58.7	1.50	0.40	3.65	5.55	121.3
	110	51.9	1.50	0.35	3.10	4.95	108.2
15	70	180	4.13	1.17	10.80	16.10	560.2
	80	131.2	3.01	0.85	7.87	11.73	433.6
	90	98	2.50	0.50	5.20	8.20	303.0
	100	64	1.00	0.45	3.40	4.85	159.9
	110	54.22	1.50	0.40	3.20	5.10	166.8

ตารางที่ 5 ค่าสีของฟักทองหลังการอบแห้งและร้อยละการคืนตัวของฟักทองที่สภาวะอบแห้งต่างๆ

Pressure (kPa)	Temp (°C)	Colorness in CIE unit				%Shrinkage
		$\Delta L/L_0$	$\Delta a/a_0$	$\Delta b/b_0$	ΔE	
10	70	-0.28 ^d	0.47 ^a	0.16 ^a	22.30 ^d	87.91 ^c
	80	0.15 ^a	-0.05 ^c	0.09 ^b	19.42 ^c	85.35 ^b
	90	0.07 ^b	-0.21 ^d	-0.08 ^c	11.83 ^a	89.37 ^d
	100	-0.05 ^c	0.10 ^b	0.01 ^b	14.38 ^b	89.32 ^d
	110	-0.47 ^e	0.14 ^b	-0.40 ^e	43.04 ^e	81.73 ^a
13	70	-0.21 ^d	-0.27 ^d	-0.24 ^d	21.01 ^d	84.41 ^b
	80	-0.10 ^d	-0.29 ^d	-0.21 ^d	16.31 ^c	89.61 ^d
	90	-0.24 ^d	-0.25 ^d	-0.27 ^d	23.44 ^d	85.55 ^b
	100	-0.21 ^d	-0.16 ^d	-0.21 ^d	18.86 ^c	82.44 ^a
	110	-0.36 ^e	-0.29 ^d	-0.48 ^e	38.08 ^e	82.02 ^a
15	70	-0.15 ^d	-0.01 ^b	-0.17 ^d	14.09 ^c	85.35 ^b
	80	-0.16 ^d	-0.23 ^d	-0.23 ^d	18.60 ^c	84.00 ^b
	90	-0.24 ^d	-0.20 ^d	-0.26 ^d	22.53 ^d	84.31 ^b
	100	-0.38 ^e	0.56 ^a	-0.45 ^e	38.90 ^e	72.77 ^e
	110	-0.35 ^e	-0.20 ^d	-0.44 ^e	35.49 ^e	70.81 ^e

หมายเหตุ: ตัวอักษรที่เหมือนกันอยู่ในแถวแนวดิ่งเดียวกันหมายถึงไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ที่ $p \leq 0.05$

รวมทั้งการสูญเสียโครงสร้างในเนื้อฟักทองที่อุณหภูมิอบแห้งต่ำๆ การระเหยของน้ำจากภายในเนื้อฟักทองไปยังภายนอกเกิดอย่างช้าๆ จะทำให้ฟักทองเกิดการหดตัวสูงกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิสูง หรือกล่าวได้ว่าเมื่อทำการอบแห้งด้วยอุณหภูมิสูง ให้ค่าร้อยละการหดตัวมีคาลดลงเนื่องจากการอบแห้งที่อุณหภูมิสูง ผิวภายนอกของฟักทองจะเกิดเป็นโซนแข็งอย่างรวดเร็วทำให้ยึดตัวและคงสภาพของโครงสร้างส่งผลต่อเนื้อฟักทอง โครงสร้างไม่พังทลายทำให้เนื้อฟักทองมีการหดตัวได้น้อย ในส่วนของความดันพบว่า การหดตัวมีผลไม่แน่นอนเมื่อความดันเปลี่ยนแปลง

4. สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาและออกแบบสร้างเครื่องอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำโดยใช้ฟักทองเป็นวัสดุทดลอง มีการพิจารณาถึงสมรรถนะการทำงานของเครื่องและ

จลนพลศาสตร์การอบแห้งรวมถึงคุณภาพของฟักทองหลังอบแห้งซึ่งจะพิจารณาในด้านสีและการหดตัว จากการทดสอบสมรรถนะการทำงานของเครื่องอบแห้งได้แก่ ความสิ้นเปลืองพลังงานและความสามารถในการทำงานตามสภาวะจริง ผลที่ได้คือเมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นและลดความดันภายใน ห้องอบแห้ง จะช่วยลดเวลาในการอบแห้งให้น้อยลง ซึ่งจะส่งผลให้ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในการอบแห้งลดลงตามไปด้วย และตัวเครื่องอบแห้งสามารถสร้างสุญญากาศได้ต่ำสุด 6 kPa สัมบูรณ์ อุณหภูมิสูงสุด 130 °C และหม้อต้มผลิตไอน้ำได้สูงสุด 8 kg/hr ในด้านคุณภาพพบว่า อุณหภูมิและความดันมีผลต่อค่าสีและการหดตัว โดยอุณหภูมิมิมีผลต่อคุณภาพมากกว่าความดัน

ในการทดสอบอบแห้งฟักทองในครั้งนี้พบว่าที่ความดัน 10kPa สัมบูรณ์ และอุณหภูมิ 100°C จะให้ผลดีโดยพิจารณา

ในแง่ความสิ้นเปลืองพลังงานต่ำ เวลาที่ใช้การอบแห้งน้อย การเปลี่ยนสีโดยรวมไม่มากนัก และการหดตัวต่ำ ถึงแม้ว่าที่ อุณหภูมิ 110°C จะใช้เวลาที่น้อยที่สุดแต่มีการเปลี่ยนสี โดยรวมที่สูงที่สุดเช่นกัน การหดก็ไม่แตกต่างกันมากนัก แต่ในเรื่องคุณภาพของฟักทองหลังอบแห้ง ยังต้องพิจารณาในด้านอื่นๆ เพิ่มเติมอีก จึงจะได้สภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการอบแห้งฟักทอง

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่สนับสนุนสถานที่ อุปกรณ์ในการทำวิจัย และวิเคราะห์ผลด้านคุณภาพ และให้ทุนวิจัยเป็นเงินสนับสนุนในการทำโครงการวิจัยในครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Li.Y.B., Seyed-Yagoobi,J. Moreira, R.G.and Yamsaengsurg, R. 1999.Seperheated steam impingement drying of tortilla chip. Drying Technology.17(122), 191-213.
- [2] ฉัตรชัย นิยมมล (2548), การอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง, เทคนิค เครื่องกล-ไฟฟ้า-อุตสาหกรรม ปีที่ 22 ฉบับ 252 ส.ค. 48
- [3] Phet Pimpaporn, Sakamon Devahastin, Naphaporn Chiewchan,(2007), Effects of combined pretreatments on drying kinetics and quality of potato chips undergoing low-pressure superheated steam drying, Journal of Food Engineering 81 (2007) 318–329
- [4] D.Elustondo, M.P. Elustondo, and M.J.Urbicain (2000), Mathematical modeling of moisture evaporation from foodstuffs exposed to sub-atmospheric pressure superheated steam. Journal of Food Engineering, 49(2001) 15-24.
- [5] Chatchai Nimmol , Sakamon Devahastin , Thanit Swadisevi , Somchart Soponronnarit,(2007) Drying and heat transfer behavior of banana undergoing combined low-pressure superheated steam and far-infrared radiation drying, Applied Thermal Engineering 27 (2007) 2483–2494
- [6] Tools and Basic Information for Engineering and Design of Technical Applications URL: [http://www. engineeringtoolbox.com](http://www.engineeringtoolbox.com), access on 10/11/2014.

- [7] สำราญ ชีช่างทอง, สมชาติ โสภณธฤทธิ์ (2544), รายงานวิจัยเรื่อง การพัฒนาเครื่องต้นแบบของเครื่องอบแห้งกึ่งแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง,มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- [8] Chatchai Nimmol , Sakamon Devahastin, Thanit Swadisevi, Somchart Soponronnarit (2007), Drying of banana slices using combined low-pressure superheated steam and far-infrared radiation, Journal of Food Engineering 81 (2007) 624–633