Engng.J.CMU.(2016) 23 (2), 25-33

วารสารวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Engineering Journal
Chiang Mai University

การอบแห้งลมร้อนด้วยวิธีการให้ความร้อนเชิงเหนี่ยวนำ
Hot Air Drying Using Induction Heating

จีระพงศ์ ศรีวิชัย

Geerapong Srivichai

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร

Department of Electrical Engineering, Faculty of Industry and Technology,
Rajamangala University of Technology Isan, Sakonnakhon Campus, 47160, Thailand
E-mail: geerapongs@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการอบแห้งลมร้อนด้วยวิธีการให้ความร้อนเชิงเหนี่ยวนำ ใช้เนื้อหมูตัวอย่าง 0.3 กิโลกรัม ถูกหั่นเป็นขนาด 30 × 100 × 10 มิลลิเมตร (กว้าง ยาว สูง) และถูกอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้ง ภายใต้สภาวะอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 50, 55 และ 60°C ความเร็วลม 1.3 เมตรต่อวินาที ประเมินอัตราการอบแห้ง อัตราการระเหยน้ำจำเพาะ และอัตราความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ พบว่า อัตราการอบแห้งเนื้อมีค่า 0.029, 0.034 และ 0.035 กิโลกรัมการระเหยน้ำต่อชั่วโมง ความชื้นเริ่มต้น 300% db เหลือ 105.60% db โดยใช้เวลาในการอบแห้ง 6, 5 และ 5 ชั่วโมง อัตราการระเหยน้ำจำเพาะ มีค่า 0.172, 0.148 และ 0.129 กิโลกรัมการระเหยน้ำต่อกิโลวัตต์ชั่วโมง และอัตราความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ มีค่า 20.863, 24.210 และ 27.771 เมกกะจูลต่อกิโลกรัมการระเหยน้ำ เรียงลำดับตามค่าอุณหภูมิที่ทดลอง ซึ่งยังพบว่า ผลของอัตราความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะและปริมาณพลังงานไฟฟ้าทั้งหมด มีค่าต่ำกว่าการใช้แหล่งความร้อนรูปแบบอื่นที่ใช้ไฟฟ้า

ABSTRACT

The objective of this research was to study a hot air drying using induction heating technique. The 0.3 kilograms of pork sample were cut to dimensions of 30 mm × 100 mm × 10 mm (width length thick) and dried in the dryer under the condition of drying air temperature of 50, 55 and 60°C with drying air velocity of 1.3 m/s Drying rate, specific moisture extraction rate (SMER) and specific energy consumption (SEC) of dried pork were evaluated. The drying rates were found to be 0.029, 0.034 and 0.035 kg water evap/h from the initial moisture content of 300% db to the final one of 105.60% db within 6, 5 and 5 hours The specific moisture extractions (SMER) were 0.172, 0.148 and 0.129 kg water evap/kW-h and the specific energy consumptions (SEC) were 20.863, 24.210 and 27.771 MJ/kg water evap following the test temperature. The results showed that the proposed method gave lower specific energy consumption and electrical energy compared with other electric dryer.

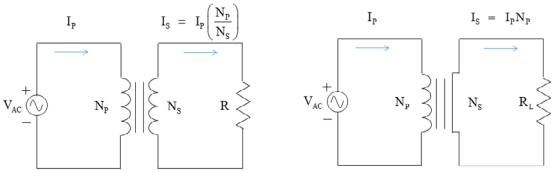
Received 20 January 2015
Accepted 21 September 2015

1. บทนำ

การอบแห้งเป็นกระบวนการลดความชื้นซึ่งส่วนใหญ่ใช้การถ่ายเทความร้อนไปยังวัสดุที่ชื้นเพื่อไล่ความชื้นออกโดยการระเหย โดยใช้ความร้อนที่ได้รับเป็นความร้อนแฝงของการระเหย [1] การลดความชื้นในวัสดุนั้นสามารถทำได้หลายวิธีด้วยกัน เช่น การอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยิ่งยวด การอบแห้งด้วยไมโครเวฟ การอบแห้งด้วยสุญญากาศ การอบแห้งด้วยปั๊มความร้อน การอบแห้งด้วยลมร้อน และการอบแห้งด้วยรังสีอินฟาเรด เป็นต้น [2] หากพิจารณาการอบแห้งด้วยลมร้อนเป็นอีกวิธีหนึ่งที่ได้รับความนิยมอย่างมากเนื่องจากมีต้นทุนในการสร้างเครื่องที่ต่ำเมื่อเทียบกับวิธีอื่น ๆ [3] ส่วนใหญ่ใช้แหล่งความร้อนที่อาศัยการเปลี่ยนรูปพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อนอย่างขดลวดความร้อน (Heater) [4-7] นั้นจะพบว่า ยังมีการใช้อัตราความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าที่ค่อนข้างสูงในการอบแห้ง ทำให้มีต้นทุนที่สูงและใช้ระยะเวลามาก หากมองถึงวิธีการอบแห้งด้วยเทคนิคการผสมผสาน เช่น เทคนิคการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับสนามไฟฟ้า [8] เทคนิคตัวเก็บรังสีอาทิตย์ติดแผ่นครีบเพื่อทำอากาศร้อนทำงานร่วมกับขดลวดความร้อนไฟฟ้าเพื่อใช้เป็นความร้อนเสริมในการอบแห้ง [9] นอกเหนือจากวิธีการสร้างความร้อนจากไฟฟ้าอย่างขดลวดความร้อนแล้วนั้น วิธีการสร้างความร้อนอีกรูปแบบหนึ่งที่ได้รับการพัฒนาขึ้นมาและได้รับความนิยมเพิ่มขึ้นคือวิธีการให้ความร้อนเชิงเหนี่ยวนำ (Induction Heating) กล่าวได้ว่าเป็นวิธีให้ความร้อนที่มีประสิทธิภาพสูง [10, 11, 12] มีข้อดีหลายประการ เช่น ประหยัดพลังงาน เกิดความร้อนขึ้นที่ชิ้นงานอย่างรวดเร็วสม่ำเสมอ กำหนดความร้อนเฉพาะจุดได้ ไม่ก่อให้เกิดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม ชิ้นงานกับแหล่งพลังงานไม่สัมผัสกันโดยตรง ดังนั้นการนำวิธีการสร้างความร้อนดังกล่าวมาประยุกต์ใช้แทนการสร้างความร้อนแบบเดิม จึงสามารถช่วยลดอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าลงได้ จากข้อดีของการให้ความร้อนเชิงเหนี่ยวนำที่กล่าวมาจึงนำไปสู่การพัฒนาการอบแห้งลมร้อนให้มีประสิทธิภาพที่สูง ดังนั้นแนวทางงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นศึกษาการอบแห้งลมร้อนโดยวิธีการให้ความร้อนเชิงเหนี่ยวนำเป็นแหล่งพลังงานความร้อน เบื้องต้นจะประเมินสมรรถนะของตู้อบแห้งลมร้อนโดยศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อสมรรถนะของตู้อบแห้งลมร้อนในการอบแห้งผลิตภัณฑ์

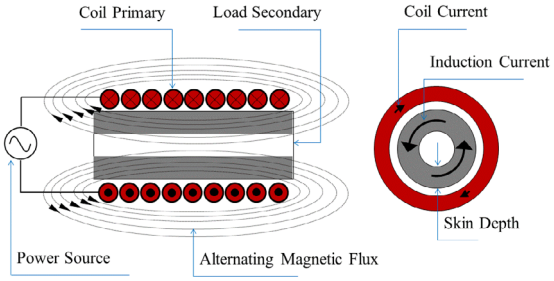
2. พื้นฐานการสร้างความร้อนเชิงเหนี่ยวนำ

การสร้างความร้อนเชิงเหนี่ยวนำจะอาศัยปรากฏการณ์พื้นฐาน 3 เรื่อง คือ การเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Induction), ปรากฏการณ์ผิว (Skin Effect) และ การถ่ายโอนความร้อน (Heat Transfer) [10, 11, 12] ซึ่งสามารถอธิบายได้เหมือนกับหลักการหม้อแปลงไฟฟ้าในรูปที่ 1 เมื่อกระแสไฟฟ้าในขดลวดทุติยภูมิสัมพันธ์โดยตรงกับกระแสไฟฟ้าในขดลวดปฐมภูมิตามสัดส่วนจำนวนรอบขดลวด ถ้าหากลัดวงจรทางด้านทุติภูมิ จะส่งผลให้เกิดความร้อนสูญเสียขึ้นเนื่องจากกระแสไฟฟ้าที่โหลด เมื่อนำมาเขียนใหม่จะได้ดังรูปที่ 2 ซึ่งจะเห็นได้ว่า พลังงานสูญเสียรวมจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับจะมาจากขดลวดทั้งสองนี้ เพียงแต่ขดลวดด้านทุติยภูมิได้ถูกลัดวงจร จึงทำให้เส้นแรงฟลักซ์สนามแม่เหล็กไฟฟ้าเหนี่ยวนำรอบ ๆ โหลดทางด้านทุติยภูมิ



(ก) วงจรเทียบเท่าหม้อแปลงไฟฟ้า (ข) ลัดวงจรด้านทุติยภูมิ

รูปที่ 1 หม้อแปลงไฟฟ้าเสมือนวงจรสมมูลการให้ความร้อนเชิงเหนี่ยวนำ



รูปที่ 2 ภาพจำลองเส้นแรงแม่เหล็กไฟฟ้า

การเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กไฟฟ้าตามรูปที่ 1 และ 2 เมื่อป้อนไฟฟ้ากระแสสลับเข้าไปจะเกิดเส้นแรงแม่เหล็กไฟฟ้ารอบ ๆ ขดลวดตามกฎของแอมแปร์ (Ampere's Law) ดังนี้

$$\int Hdl = Ni = F \qquad (1)$$

$$\phi = \mu HA$$

เมื่อ

H คือ ความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (A-Turns/m)

l คือ ความยาวเฉลี่ยทางเดินแม่เหล็กไฟฟ้า (m)

N คือ จำนวนรอบขดลวด (Turns)

i คือ กระแสไฟฟ้า (Ampere)

F คือ แรงเคลื่อนแม่เหล็กไฟฟ้า (Ampere-Turns)

ϕ คือ ฟลักซ์แม่เหล็กไฟฟ้าตลอดพื้นที่หน้าตัด (Webers, Wb)

μ คือ ความซึมซาบสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Henry/m)

A คือ พื้นที่หน้าตัด (m^2)

สนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความเร็วของการเคลื่อนที่แม่เหล็กไฟฟ้า ความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะมีมากบริเวณจุดกึ่งกลางและเริ่มลดลงไปสู่ผิวนอกตัวนำ จากกฎของฟาราเดย์ พบว่ากระแสไฟฟ้ารอบผิวตัวนำจะมีความสัมพันธ์ตรงข้ามกับกระแสไฟฟ้าที่เหนี่ยวนำขึ้นตามสมการที่ (2) กระแสไฟฟ้าบริเวณรอบผิวตัวนำนี้เราเรียกว่ากระแสไหลวน (Eddy Current)

$$E = \frac{d\lambda}{dt} = N\frac{d\phi}{dt} \qquad (2)$$

ผลที่ได้จากตัวเหนี่ยวนำกระแสไฟฟ้าไหลวนเมื่อเปลี่ยนกำลังไฟฟ้าและแปรเป็นพลังงานความร้อน พบได้ว่า กำลังไฟฟ้าเฉลี่ย (P) เท่ากับ

$$P = \frac{E^2}{R} = I^2R \qquad (3)$$

ในที่นี้ค่าความต้านทาน R (Resistance) พิจารณาจากค่าความนำ (ρ) และค่าความซึมซาบสัมพัทธ์ (μ) ของตัวนำ ส่วนกระแสไฟฟ้าหาจากค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า และปรากฏการณ์ทางผิวจะมีผลอย่างมากเมื่อป้อนความถี่สูงให้กับขดลวด เกิดกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำอย่างรุนแรงรอบ ๆ ผิวขดลวดตัวนำของโหลดความเข้มจากการเหนี่ยวนำกระแสไฟฟ้าความถี่สูงลดน้อยลงจากจุดศูนย์กลางตัวนำที่เขียนได้ด้วยสมการที่ (4) และ (5)

$$i_x = i_o e^{-\frac{x}{d_o}} \qquad (4)$$

ค่าคงที่ความต่างศักย์เนื่องจากความถี่เท่ากับ

$$d_o = \sqrt{\frac{2\rho}{\mu\omega}} \qquad (5)$$

เมื่อ

i_x คือ ระยะห่างจากพื้นผิวตัวนำต่อความเข้มกระแสไฟฟ้าที่ตำแหน่ง x

i_o คือ ความเข้มกระแสไฟฟ้าบนพื้นผิว ($x=0$)

ρ คือ ค่าความนำจำเพาะ

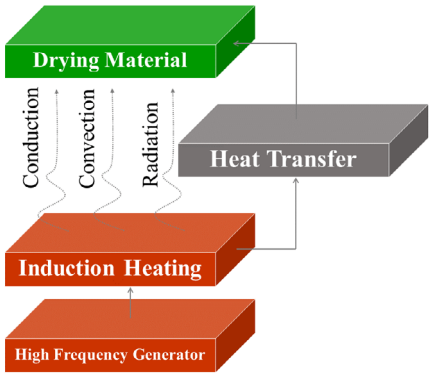
ω คือ ความถี่กระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวนำ

จากผลปรากฏการณ์ทางผิวนี้แสดงได้ว่าพลังงานความร้อนสามารถเปลี่ยนรูปได้จากพลังงานไฟฟ้าร่วมกันทำให้ได้พลังงานบริเวณพื้นผิวตัวนำ หากพิจารณาตัวนำโลหะประเภทที่ทำให้เกิดการเหนี่ยวนำได้ดีควรมีค่าความลึกผิวที่ต่ำมีค่าซึมซาบได้สัมพัทธ์และมีค่าความต้านทานจำเพาะที่สูงจึงไม่จำเป็นต้องใช้สัญญาณความถี่ที่สูงมากก็สามารถทำให้เกิดความร้อนได้ดี จากงานวิจัย [13, 14] พบว่า เหล็กหรือสแตนเลสมีคุณสมบัติดีกว่าทองแดงและอลูมิเนียม ที่ความถี่ประมาณ 20 kHz จะให้ค่าความลึกผิวเท่ากับ 0.11 mm

3. อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

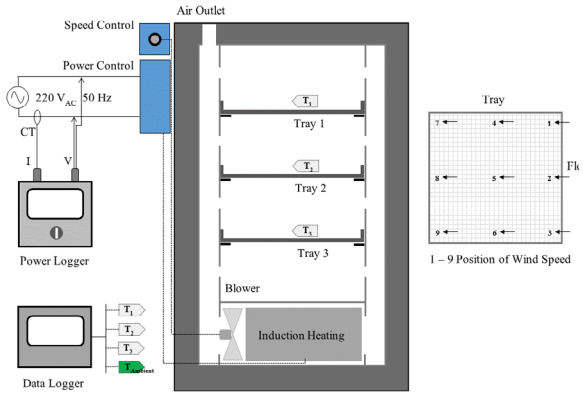
3.1 ชุดทดลอง

การทำงานของตู้อบแห้งลมร้อนถูกแสดงในรูปที่ 3 โดยตัวกำเนิดความร้อนเชิงเหนี่ยวนำจะถูกถ่ายเทให้กับผลิตภัณฑ์ด้วยกระบวนการนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสี



รูปที่ 3 ผังการทำงานของตู้อบแห้งลมร้อน

รูปที่ 4 ตู้อบแห้งลมร้อนด้วยวิธีความร้อนเชิงเหนี่ยวนำ



รูปที่ 5 ผังการทดลองของตู้อบแห้งลมร้อน

ลักษณะของตู้อบแห้งลมร้อนแสดงภาพถ่ายดังรูปที่ 4 โดยได้นำตู้เย็นขนาดภายนอก เท่ากับ 450× 520× 880 mm^3 ดัดแปลงทำเป็นตู้อบแห้ง และภายในห้องอบ มีขนาด 360× 410× 750 mm^3 กำหนดขนาดของถาดวางผลิตภัณฑ์อบแห้ง ขนาด 400 × 350 mm มีชั้นถาดจำนวน 3 ชั้น ภายในตู้อบด้านล่างกำหนดให้เป็นแหล่งกำเนิดลมร้อนจากความร้อนเชิงเหนี่ยวนำ ประกอบไปด้วยขดลวดเหนี่ยวนำใช้ตัวนำทองแดงเบอร์ 30 SWG มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.314 mm จำนวน 40 เส้น พันตีเกลียวเข้าด้วยกันเพื่อช่วยลดผลปรากฏการณ์ทางผิวเนื่องมาจากความถี่ใช้งานได้เส้นผ่านศูนย์กลางรวมกัน 2.5 mm แล้วนำขดลวดที่ตีเกลียวกันพันเป็นวงขดลวด (spiral coil) [15] จำนวน 30 รอบการพัน ถูกวางอยู่ภายใต้แผ่นสแตนเลส ขนาด 200× 340× 5 mm^3 ที่ระยะห่าง 10 mm ใช้อินเวอร์เตอร์แบบกึ่งบริดจ์เป็นแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าความถี่สูงเพื่อสร้างสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับที่ความถี่ไม่เกิน 20 kHz [13, 14] เพื่อจ่ายให้กับขดลวดตัวนำไปเหนี่ยวนำให้เกิดความร้อนบริเวณผิวของแผ่นสแตนเลส สามารถควบคุมกำลังไฟฟ้าด้วยการปรับเปลี่ยนภาระการทำงาน (Duty Cycle) ของอุปกรณ์สวิตช์กำลัง ให้พิกัดกำลังไฟฟ้าสูงสุด 0.6 kW ใช้พัดลมขับอากาศแบบใบพัด (Rotary Fan) ขนาด 150× 150× 50 mm^3 มีพิกัดกำลังไฟฟ้า 38 W สามารถปรับความเร็วรอบได้ เพื่อนำพาความร้อนหมุนเวียนภายในตู้อบดังกล่าว ส่วนอุปกรณ์เครื่องมือวัด ประกอบไปด้วยเครื่องบันทึกสัญญาณเวลา (Yogokawa Data Logger Model FX112-4-2) มีความละเอียด ± 0.5°C, เครื่องชั่งน้ำหนักดิจิตอล (OHAUS Model: Scout Pro SPS402F) ความละเอียด 0.01 g, เครื่องวัดความเร็วลม (Air Flow Anemometer : model ; TW-03), เครื่องวัดบันทึกค่าพลังงานไฟฟ้า (Power Logger) ยี่ห้อ Fluke model: 1735 สำหรับวัดพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในระบบอบแห้งทั้งหมด

3.2 วิธีดำเนินการวิจัย

การทดลองนี้มุ่งเน้นศึกษาการกำเนิดลมร้อนเชิงเหนี่ยวนำเพื่อการอบแห้ง ได้แบ่งการทดลองเป็น 3 ส่วนหลัก ๆ คือ ทดลองวัดการกระจายของอุณหภูมิภายในห้องอบแห้งแต่ละชั้นถาด ที่สภาวะอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 50-60ºC ด้วยความเร็วลมเฉลี่ย 1.3 m/s ในส่วนที่ 2 ความสามารถในการอบแห้ง โดยผลิตภัณฑ์ที่นำมาทดลองอบแห้งใช้เนื้อหมูสันหั่นเป็นทรงสี่เหลี่ยมให้มีขนาด 30× 100× 10 mm (กว้าง × ยาว × สูง) และในการทดลองแต่ละครั้งจะใช้ตัวอย่างเนื้อมีน้ำหนักรวม 0.3 kg แล้วนำมาจัดเรียงใส่ถาดทั้ง 3 ถาด แต่ละถาดมีน้ำหนัก 0.1 kg ที่สภาวะอุณหภูมิอบแห้ง 50, 55 และ 60ºC ตามลำดับ ด้วยความเร็วลมเฉลี่ย 1.3 m/s สำหรับตำแหน่งการบันทึกข้อมูลต่าง ๆ แสดงผังการทดลองตู้อบดังรูปที่ 5 ระหว่างการทดลองนั้นจะบันทึกผลโดยการวัดอุณหภูมิทางเข้าห้องอบของลมร้อน และอุณหภูมิเริ่มต้น วัดโดยใช้เทอร์โมคัปเปิล ชนิด K ต่อเข้ากับเครื่องบันทึกสัญญาณเวลา (Data logger) วัดอุณหภูมิภายในห้องอบแห้งแต่ละถาด รวม 3 ตำแหน่ง มีการควบคุมอุณหภูมิให้คงที่และความเร็วของลมโดยใช้เครื่องวัดความเร็วลม การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ โดยทุก ๆ 1 ชั่วโมง จะนำออกมาชั่งน้ำหนัก เพื่อดูการลดลงของความชื้น อ่านค่าจากเครื่องชั่งแบบดิจิตอล บันทึกผลการใช้พลังงานไฟฟ้าด้วยเครื่องวัดบันทึกค่าพลังงานและกำลังไฟฟ้า ท้ายสุดในส่วนที่ 3 จะทดลองเปรียบเทียบเทียบผลลัพธ์จริงในงานวิจัยนี้เทียบกับวิธีการให้ความร้อนด้วยฮีทเตอร์อินฟราเรดที่สภาวะอุณหภูมิคงที่ 60ºC ใช้อากาศร้อนเป็นตัวกลางการอบแห้ง โดยความเร็วลมของตัวกลางการอบ 1.3 m/s ทดลองอบแห้งเนื้อหมู ที่น้ำหนักเริ่มต้น 0.3 kg ใช้ระยะเวลา 6 ชั่วโมง ในส่วนของสถานที่ทดลองและเก็บข้อมูลใช้ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้า คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร

3.3 การประเมินสมรรถนะ

1. ค่าความชื้น (Moisture Content, MC) หาได้จากการนำน้ำหนักตัวอย่างมาคำนวณค่าความชื้นของผลิตภัณฑ์ [16] ได้จากสมการที่ (6)

$$MC = \frac{W_t}{W_d} \times 100\% \qquad (6)$$

เมื่อ

MC คือ ความชื้นมาตรฐานแห้ง (% db)

W_t คือ มวลของผลิตภัณฑ์ที่เวลาใด ๆ (kg)

W_d คือ มวลแห้งของผลิตภัณฑ์ (kg)

ความชื้นมาตรฐานแห้งนี้อาจมีค่าเกิน 100% ซึ่งงานวิจัยนี้จะบอกความชื้นเป็นเปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง

2. อัตราการอบแห้ง (Drying Rate, DR) เป็นการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นต่อหน่วยเวลา [17] คำนวณได้ดังสมการที่ (7)

$$DR = \frac{W_i - W_t}{t} \qquad (7)$$

เมื่อ

DR คือ อัตราการอบแห้ง (kg water evap/h)

Wi คือ มวลของผลิตภัณฑ์ที่เวลาใด ๆ (kg)

W_t คือ มวลของผลิตภัณฑ์หลังอบแห้ง (kg)

t คือ เวลาที่ใช้ในการอบ (hr)

3. การใช้พลังงานของตู้อบแห้งลมร้อนสามารถแสดงได้ด้วยความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific Energy Consumption, SEC) และอัตราการระเหยน้ำจำเพาะ (Specific Moisture Extraction Rate, SMER) [17] ซึ่งสามารถกำหนดได้ดังต่อไปนี้

$$SEC = \frac{3.6 P_e}{w_i - w_f} \qquad (8)$$

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

เมื่อ

SEC คือ ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (MJ/kg)

*SMER*คือ อัตราการระเหยน้ำจำเพาะ (kg/kW-h)

w_i คือ มวลของผลิตภัณฑ์ที่เวลาใด ๆ (kg)

w_f คือ มวลของผลิตภัณฑ์หลังอบแห้ง (kg)

P_e คือ ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ (kW-h)

4. ผลการศึกษา

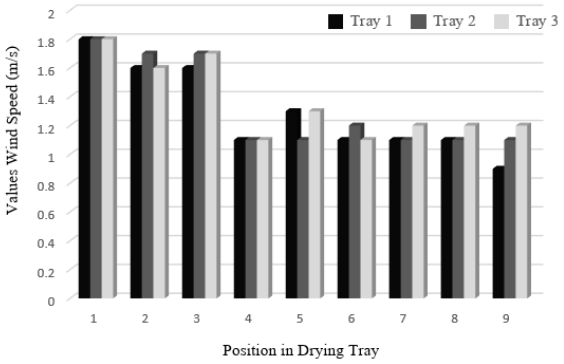
การควบคุมอุณหภูมิภายในห้องอบแห้ง ทดลองโดยกำหนดความถี่ของแหล่งจ่ายอินเวอร์เตอร์โดยประมาณ 20 kHz แล้วปรับเปลี่ยนภาระการทำงาน (Duty Cycle) ของอุปกรณ์สวิตซ์กำลังในช่วง 10–40% เพื่อพิจารณาค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า (pf) รวมถึงอุณหภูมิภายในห้องอบแห้ง ดังแสดงผลลัพธ์ในตารางที่ 1 จะเห็นได้ว่าค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าค่อนข้างดี แม้ว่าจะปรับภาระการทำงานเหลือเพียง 10% ก็ตาม จากกระบวนการนี้แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าเป็นผลให้อุณหภูมิภายในห้องอบแห้งเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย

ตารางที่ 1 อิทธิพลของการปรับเปลี่ยนกำลังไฟฟ้ากับอุณหภูมิภายในห้องอบแห้ง

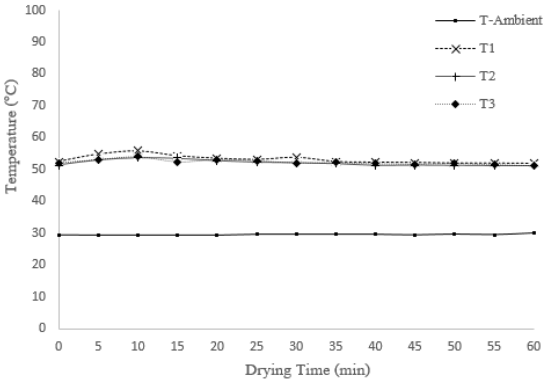
Duty Cycle (%)	Power Input (kW)	Power Factor (pf)	Drying Temperatures (ºC)
10	0.159	0.85	43.24
20	0.324	0.87	52.49
30	0.452	0.89	66.57
40	0.614	0.91	90.32

ผลการกระจายความเร็วลมร้อนบริเวณภายในห้องอบแห้งที่ชั้นถาดต่าง ๆ โดยหมายเลข 1-9 ถูกแสดงในรูปที่ 5 คือ ตำแหน่งที่ทำการวัดค่าความเร็วลม จากรูปที่ 6 พบว่าค่าความเร็วลมกระจายทั่วบริเวณภายในห้องอบแห้งโดยมีค่าเฉลี่ยแต่ละชั้นถาดเป็น 1.3 m/s

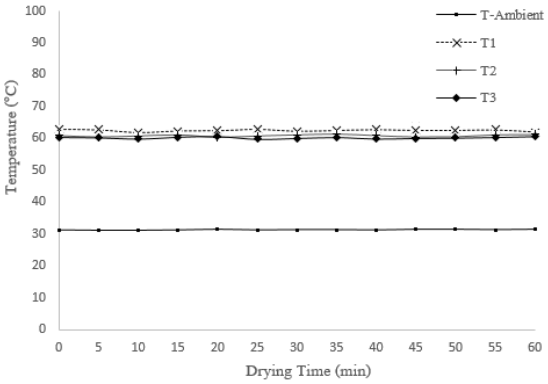
ผลการกระจายของอุณหภูมิภายในตู้อบแห้งลมร้อนที่ชั้นถาดต่าง ๆ แสดงในรูปที่ 7 และ รูปที่ 8 พบว่าการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในห้องอบแห้งมีการกระจายอุณหภูมิแตกต่าง (Δt) แต่ละชั้นถาด จากผลการทดลองนี้สอดคล้องกับเอกสาร [1]



รูปที่ 6 การกระจายความเร็วลมภายในตู้อบแห้งลมร้อน



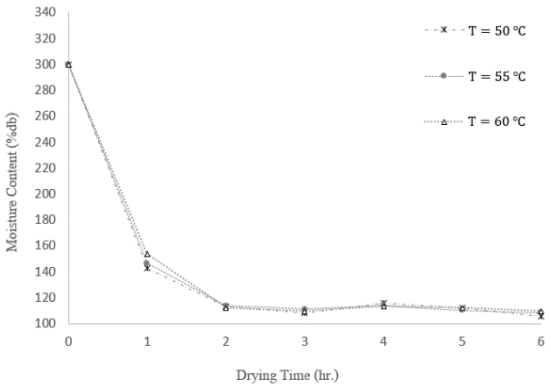
รูปที่ 7 การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในห้องอบแห้งลมร้อนแต่ละชั้นถาด ที่อุณหภูมิ 50ºC



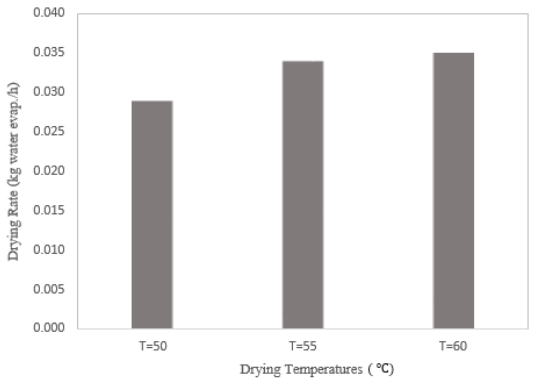
รูปที่ 8 การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในห้องอบแห้งลมร้อนแต่ละชั้นถาด ที่อุณหภูมิ 60ºC

ตารางที่ 2 ผลทดลองการอบแห้งลมร้อน ที่อุณหภูมิต่างๆ

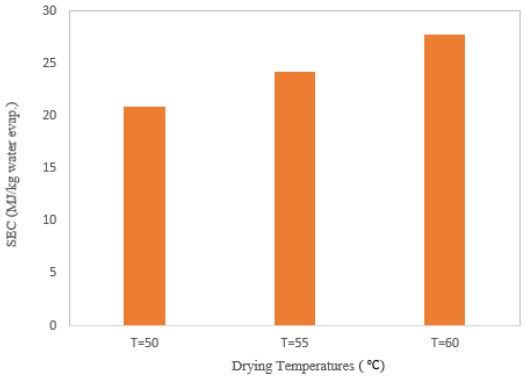
รายการ	อุณหภูมิอบแห้ง (°C)		
	50	55	60
เวลาในการอบแห้ง (hr)	6	5	5
น้ำหนักตัวอย่าง (kg)	0.3	0.3	0.3
ปริมาณน้ำระเหยจากผลิตภัณฑ์ (kg)	0.176	0.171	0.175
ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ทั้งหมด (kW-h)	1.02	1.15	1.35
DR (kg water evap/ h)	0.029	0.034	0.035
SMER (kg water evap/kW-h)	0.172	0.148	0.129
SEC (MJ/kg water evap)	20.863	24.210	27.771



รูปที่ 9 ความชื้นของผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิอบแห้งต่างกัน



รูปที่ 10 อัตราการอบแห้งของผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิอบแห้งต่างกัน

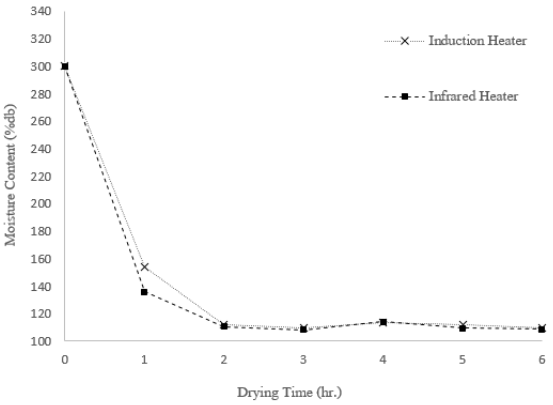


รูปที่ 11 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิอบแห้งต่างกัน

ผลการอบแห้งด้วยการให้ความร้อนเชิงเหนี่ยวนำ พบว่า พฤติกรรมการอบแห้งในรูปที่ 9 นั้นจะเห็นได้ว่า พฤติกรรมการอบแห้งโดยส่วนใหญ่อยู่ในช่วงของการอบแห้งลดลงโดยอุณหภูมิของการอบแห้งเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการอบแห้งเนื้อพบว่าที่อุณหภูมิ 60°C การลดลงของความชื้นของเนื้อจะเกิดขึ้นเร็วที่สุดทั้งนี้เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงกว่าจะทำให้ความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศมีค่าต่ำลงทำให้ความสามารถดูดซับความชื้นได้มากขึ้น ในทางตรงกันข้าม เมื่ออุณหภูมิที่ต่ำกว่า จะทำให้อากาศมีความสามารถในการได้รับความชื้นจากผลิตภัณฑ์ไปน้อยกว่า การอบแห้งจึงเกิดขึ้นได้ช้ากว่า

เมื่อคำนวณหาอัตราการอบแห้ง (DR) ในรูปของอัตราการระเหยน้ำต่อชั่วโมงพบว่าอัตราการอบแห้งของเนื้อที่อุณหภูมิ 50, 55 และ 60°C โดยเฉลี่ย ดังรูปที่ 10

จะเห็นว่ามีความสัมพันธ์เช่นเดียวกับพฤติกรรมการอบแห้ง นั่นคือ ที่อุณหภูมิที่สูงกว่า (60ºC) จะมีอัตราการอบแห้งสูงที่สุดและที่อุณหภูมิต่ำกว่า (50ºC) จะมีอัตราการอบแห้งเฉลี่ยต่ำสุด หากพิจารณาด้านพลังงานพบว่าอัตราความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SEC) ในการอบแห้งลมร้อนที่อุณหภูมิ 50, 55 และ 60ºC มีค่า 20.863, 24.210 และ 27.771 MJ/kg water evap จะเห็นว่าที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 50ºC มีค่าต่ำสุด ดังรูปที่ 11 ทั้งนี้เนื่องจากค่าเฉลี่ยการใช้พลังงานในการอบแห้งแต่ละอุณหภูมิการอบแห้งมีค่าแตกต่างกัน โดยที่อุณหภูมิสูงกว่าจะใช้พลังงานมากกว่า ที่อุณหภูมิการอบแห้ง 60ºC จะมีอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยมีค่า 0.27 kw-h/h ในขณะที่อุณหภูมิ 55 และ 50ºC มีอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยมีค่า 0.23 และ 0.17 kw-h/h ตามลำดับ สำหรับพารามิเตอร์อื่น ๆ ของการอบแห้งแสดงในตารางที่ 2 จากนั้นได้เปรียบเทียบผลลัพธ์จริงกับการอบแห้งด้วยแหล่งความร้อนที่ใช้ฮีทเตอร์อินฟราเรด ควบคุมสภาวะการอบแห้งให้อุณหภูมิคงที่ 60ºC ใช้อากาศร้อนเป็นตัวกลางการอบแห้ง โดยความเร็วลม 1.3 m/s ทดลองอบแห้งเนื้อหมู มีน้ำหนักเริ่มต้น 0.3 kg ที่ระยะเวลา 6 ชั่วโมง จากการศึกษาผลการลดความชื้นผลิตภัณฑ์ของการอบแห้งทั้งสองวิธี พบว่า อัตราการอบแห้งของงานวิจัยนี้ให้อัตราการอบแห้งสูงกว่าแหล่งความร้อนที่ใช้ฮีทเตอร์อินฟราเรด ดังแสดงในรูปที่ 12 อย่างไรก็ดี เมื่อพิจารณาอัตราความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะและปริมาณพลังงานไฟฟ้าทั้งหมดในงานวิจัยนี้ มีค่าต่ำกว่าการอบแห้งด้วยแหล่งความร้อนที่ใช้ฮีทเตอร์อินฟราเรดเตอร์ ทั้งนี้ เป็นผลมาจากจุดเด่นของการให้ความร้อนเชิงเหนี่ยวนำ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการอบแห้งด้วยความร้อนเชิงเหนี่ยวนำเป็นอีกหนึ่งทางเลือกสำหรับแหล่งพลังงานความร้อนให้กับกระบวนการอบแห้ง



รูปที่ 12 ความชื้นของผลิตภัณฑ์ระหว่างการอบแห้งความร้อนเชิงเหนี่ยวนำกับความร้อนใช้ฮีทเตอร์อินฟราเรด

5. สรุปผลการศึกษา

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการอบแห้งลมร้อนด้วยการให้ความร้อนเชิงเหนี่ยวนำตัวเครื่องตู้อบสามารถควบคุมอุณหภูมิในการอบได้ตามค่าเป้าหมาย โดยตลอดการทดลอง เมื่อทำการอบแห้งเนื้อที่อุณหภูมิอบแห้ง 50, 55 และ 60ºC ความเร็วลมร้อน 1.3 m/s ประเมินโดยอัตราการอบแห้ง อัตราการระเหยน้ำจำเพาะและอัตราความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ พบว่า อัตราการอบแห้งมีค่า 0.029, 0.034 และ 0.035 kg water evap/h อัตราการระเหยน้ำจำเพาะมีค่า 0.172, 0.148 และ 0.129 kg water evap/kW-h และอัตราความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะมีค่า 20.863, 24.210 และ 27.771 MJ/kg water evap นอกจากนี้ยังพบว่า อัตราความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ และปริมาณพลังงานไฟฟ้าทั้งหมด มีค่าต่ำกว่าแหล่งความร้อนที่ใช้ฮีทเตอร์อินฟราเรด

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร ที่อนุญาตให้ใช้อุปกรณ์เครื่องมือและสถานที่ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้า สำหรับทดลองงานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

[1] สมชาติ โสภณรณฤทธิ์. การอบแห้งเมล็ดพืชและอาหารบางประเภท, กรุงเทพฯ: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2540.

[2] Carl, W.H. Handbook of Industrial Drying. Taylor & Francis Group, 2006.

[3] Mongpraneet, S., Abe, T. and Tsurusaki, T. Accelerated Drying of Welsh Onion By Far infrared Radiation under Vacuum Conditions. *Journal of Food Engineering,* 2002; 55: 147–156.

[4] Rossi, S. J., Neves, L. C., and Kieckbusch, T. G. Thermodynamic and Energetic Evaluation of A Heat Pump Applied to Drying of Vegetables. *Drying Technology*, 1992; 10: 1475-1484.

[5] Chua, K. J. and Chou, S. K., Low-Cost Drying Methods for Developing Countries. *USA: Trends in Food Science & Technology*, 2003.

[6] Condori, M. Solar Drying of Sweet Pepper and Garlic Using the Tunnel Greenhouse Drier. *Renewable energy*, 2001; 22 (4): 447-460.

[7] พงษ์ศักดิ์ เทียมทัน. การพัฒนาตู้อบลมร้อนอัตโนมัติขนาดเล็ก. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน, 2544.

[8] สุชาติ ธนสุขประเสริฐ และคณะ. การอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งกระแสชน. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี*, 2555; 1(2): 1-10.

[9] สันติ สุดเฉลียว. การศึกษาการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับสนามไฟฟ้า. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยมหาสารคาม, 2550.

[10] Zinn, S. and Semiatin, S. L. Elements of Induction Heating. Ohio: Metal Park, 1988.

[11] Davies, E. J. and Simpson, P. Induction Heating Handbook. McGraw-Hill, UK, 1979.

[12] Application Notes AN9012. Induction Heating System Topology Review. Fairchild Semiconductor, July. 2000.

[13] Kwon, Y. S., Yoo, B. and Hyun, D. S. Half-Bridge Series Resonant Inverter for Induction Heating Applications with Load Adaptive PFM Control Strategy. *IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition,* 1999; 575-581.

[14] Kawaguchi, Y., Hiraki, E., Tanaka, T. and Nakaoka, M. Basic Study of a Phase Shifted Soft Switching High Frequency Inverter with Boost PFC Converter for Induction Heating. *Journal of Power Electronics*, 2008; 8(2):192-198.

[15] Circuits, Dk. Flat Spiral Coil Inductor Calculator. [Online] Available: http://www.circuits.dk/calculator_flat_spiral_coil_inductor.htm / # List, 9 January 2014.

[16] จารุวัฒน์ เจริญจิตร, ยะฝาด ดุสะเหม๊ะ, สุพัฒน์ เดชโสภา และสุริยา ช่วยอินทร์. ตู้อบแห้งและกลั่นความชื้นรังสีอาทิตย์แบบเทอร์โมไซฟอน. *วิศวกรรมสาร มหาวิทยาลัยขอนแก่น*, 2554; 38(1): 35-42.

[17] เทวรัตน์ ทิพยวิมล และวีรชัย อาจหาญ. การคงคุณภาพผักอบแห้งกึ่งสำเร็จรูปด้วยเทคนิคการอบแห้งแบบปั๊มความร้อน. สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2555: 13-14.