

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำและการทำความร้อนด้วยขดลวดความร้อนไฟฟ้า

Heating efficiency comparison of induction heating and electric heater

วสวัตดี thingsborirak^{1*}, กระวี ตรีอำนรรค¹, และ เทวรัตน์ ตรีอำนรรค²

Wasawat Thingborirak^{1*}, Krawee Treeamnuk¹, and Tawarat Treeamnuk²

¹สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี นครราชสีมา

²สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี นครราชสีมา

¹School of Mechanical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand 30000

²School of Agricultural Engineering, institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand 30000

*Corresponding author Email: nop75072@gmail.com

Received: 22-10-2024 Revised: 2-04-2025 Accepted: 30-06-2025

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้เป็นการศึกษาระบบผลิตลมร้อนด้วยการทำความร้อนแบบเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแก่กระบอกกลวงโลหะผิวเรียบผนังบาง ขนาดกำลัง 1,800 W เพื่อใช้เป็นแหล่งความร้อนในการอบแห้งผลผลิตทางการเกษตรหลังจากการเกี่ยวในอนาคต การทดลองเลือกใช้อัตราการไหลของอากาศที่ป้อนเข้าสู่ระบบทำความร้อนในรูปของเลขเรย์โนลด์สในช่วง 6,000 7,000 และ 8,000 โดยศึกษาที่อุณหภูมิอากาศร้อนที่ต้องการ 3 ค่า คือ 50 60 และ 70 °C เปรียบเทียบกับการใช้ขดลวดความร้อนไฟฟ้าขนาด 1,000 W ผลพบว่าที่อุณหภูมิอากาศ 50 °C การทำความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำใช้เวลาน้อยกว่าการทำความร้อนขดลวดความร้อนไฟฟ้า 79.55-84.96% ใช้กำลังไฟฟ้าน้อยกว่า 66.13-70.96% มีประสิทธิภาพการใช้พลังงานมากกว่า 67.11-73.43% ที่อุณหภูมิของอากาศออก 60 °C การทำความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำใช้เวลาน้อยกว่าการทำความร้อนขดลวดความร้อนไฟฟ้า 71.30-72.24% ใช้กำลังไฟฟ้าน้อยกว่า 64.44-67.58% มีประสิทธิภาพการใช้พลังงานมากกว่า 50.42-53.77% และที่อุณหภูมิของอากาศออก 70 °C การทำความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำใช้เวลาน้อยกว่าการทำความร้อนด้วยขดลวดความร้อนไฟฟ้า 54.46-62.03% ใช้กำลังไฟฟ้าน้อยกว่า 59.43-64.31% มีประสิทธิภาพการใช้พลังงานมากกว่า 26.02-32.99% การทำความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงเริ่มต้นของการเหนี่ยวนำซึ่งต่างจากการทำความร้อนด้วยขดลวดความร้อนไฟฟ้าที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ

คำสำคัญ : การเหนี่ยวนำความร้อน การผลิตอากาศร้อน ขดลวดความร้อนไฟฟ้า ประสิทธิภาพการใช้พลังงาน

ABSTRACT

This research article studies, a hot air production system using electromagnetic induction heating for a thin-walled, smooth-surfaced hollow metal cylinder with an electric power of 1,800 W. It is expected that can be used as a heat source for drying agricultural products after harvesting in the future. In the experiment, the flow rate of air fed into the heating system was used in the form of Reynolds number in the range 6,000, 7,000, and 8,000. Four hot air temperatures were studied at 50, 60 and 70 °C and an induction heating was compared to 1,000 W electric heating. The results found that an outlet air temperature of 50 °C, an induction heating takes 79.55-84.96% less time than electric heating, consume 66.13-70.96% less power and, energy efficiency of more than 67.11-73.43%. An outlet air temperature of 60 °C, induction heating takes 71.30-72.24% less time than electric heating, consume 64.44-67.58% less power and, energy efficiency of more than 50.42-53.77%. An outlet air temperature of 70 °C, induction heating takes 54.46-62.03% less time than electric heating, consume 59.43-64.31% less power and, energy efficiency of more than 26.02-32.99%. The induction heating provides, the rising temperature rapidly at the first period of testing. This is different from an electric heater which has a slower temperature increasing.

Keywords: Induction heating: Hot air production: Electric heater: Energy efficiency

1 บทนำ

ประเทศไทยเป็นประเทศผู้ผลิตและส่งออกสินค้าเกษตรที่สำคัญประเทศหนึ่งของโลก ประชากรส่วนใหญ่ของประเทศไทยประกอบอาชีพเกษตรกรรม การผลิตภาคเกษตรจึงมีความสำคัญต่อเศรษฐกิจของประเทศอย่างยิ่ง การวิจัยและพัฒนาเพื่อนำนวัตกรรม เทคโนโลยี และองค์ความรู้ใหม่ ๆ มาผนวกใช้จึงมีความสำคัญ และมีส่วนช่วยทำให้ผลิตภัณฑ์เกษตรมีคุณภาพดียิ่งขึ้น ซึ่งการอบแห้งเป็นเทคโนโลยีหนึ่งที่ใช้ในการลดความชื้นของผลผลิต เพื่อยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์หรือการทำงานของเอนไซม์เพื่อยืดอายุการจัดเก็บ นอกจากนี้การอบแห้งยังถูกใช้เพื่อแปรรูปผลิตผลอีกด้วย ปัจจุบันแหล่งพลังงานความร้อนที่ถูกนำมาใช้ในกระบวนการอบแห้งผลผลิตเกษตรและอาหารได้มาจากขดลวดความร้อนไฟฟ้า แก๊สหุงต้ม น้ำมันเชื้อเพลิง อย่างไรก็ตาม แหล่งพลังงานความร้อนเหล่านี้คิดเป็นต้นทุนที่สูงในกระบวนการอบแห้ง เพื่อลดต้นทุนของกระบวนการอบแห้งด้วยลมร้อนจึงเกิดแนวคิดในการนำแหล่งพลังงานความร้อนอื่นมาใช้

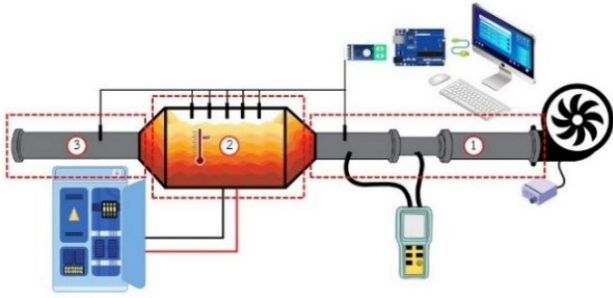
การเหนี่ยวนำความร้อนด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า เป็นแหล่งพลังงานความร้อนที่มีประสิทธิภาพสูง [1] ประหยัดพลังงานทำความร้อนรวดเร็วและสม่ำเสมอ [2-3] ใช้งานอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมสำหรับการให้ความร้อนแก่วัตถุจำพวกโลหะหรือเฟอร์โรแมกเนติก [4] ในงานวิจัยการวิเคราะห์ทางความร้อนเชิงตัวเลขและเชิงทดลองของกระบอกโลหะกลวงที่ให้ความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้า เพื่อวิเคราะห์ค่าความร้อนที่ถูกเหนี่ยวนำในตำแหน่งความลึกต่าง ๆ จากผิวของชิ้นงาน พบว่าความหนาแน่นของกระแสที่ผิวโลหะมีค่าสูงมาก ในทางกลับกันที่ความลึกลงไปจากผิวของกระบอกโลหะความหนาแน่นของกระแสจะมีค่าน้อยมาก และลดลงเรื่อย ๆ ตามความลึกที่เพิ่มขึ้นจนแทบจะไม่มีค่าความหนาแน่นของกระแสเหลืออยู่เลย จึงทำให้เกิดการเหนี่ยวนำความร้อนขึ้นเฉพาะบริเวณผิวของกระบอกโลหะที่มีความหนาแน่นของกระแสที่สูง [5] โดยตำแหน่งที่ลึกลงไปจากผิวความร้อนเกิดที่ก้นชิ้นงานจากการนำความร้อนจากผิวด้านนอกลงสู่เนื้อโลหะ ดังนั้นการเลือกใช้กระบอกโลหะกลวงที่มีความหนาแน่นน้อย ๆ ในการเหนี่ยวนำความร้อนจะส่งผลดีกว่าทั้งในด้านของพื้นที่ผิวการถ่ายโอนความร้อนระหว่างผิวกระบอกโลหะกับอากาศ และการใช้กำลังไฟฟ้าน้อยกว่า อุณหภูมิของอากาศร้อนที่ต้องการก็จะเพิ่มเร็วขึ้น เวลาในการเหนี่ยวนำกระบอกโลหะให้เกิดความร้อนก็จะลดลงเนื่องจากไม่สิ้นเปลืองพลังงานจากการนำความร้อนเข้าสู่แกนกลางกระบอกโลหะ นอกจากนี้การออกแบบขดลวดเหนี่ยวนำให้มีรูปร่างที่เหมาะสมกับภาระเหนี่ยวนำ สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการทำความร้อน และการกระจายตัวของอุณหภูมิได้อย่างมีนัยสำคัญ [6-7] จากการศึกษาเชิงทดลองและการจำลองตัวเลขระหว่างขดลวดเหนี่ยวนำแบบพิทซ์เท่ากัน พิตซ์แปรผัน และรัศมีแปรผัน ต่อประสิทธิภาพการทำความร้อนและการกระจายตัวของอุณหภูมิพบว่า เมื่อพิจารณาที่ผิวนอกสุดของชิ้นงานที่เหนี่ยวนำด้วยขดลวดพิทซ์เท่ากันจะมีการกระจายตัวของอุณหภูมิมساสมากกว่า พิตซ์แปรผัน และรัศมีแปรผัน ซึ่งผลที่

ได้จากการทดลองสอดคล้องกับแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ [8] และการใช้ชุดทำความร้อนแบบเหนี่ยวนำหลายชุดสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการทำความร้อน และการกระจายตัวของอุณหภูมิที่วัสดุได้ดีกว่าเมื่อเทียบกับการใช้ชุดทำความร้อนเหนี่ยวนำเพียงชุดเดียว [9] เช่นเดียวกับการเพิ่มขดลวดเหนี่ยวนำการใช้วงจรภาคกำลังเพียงหนึ่งชุดต่อขดลวดเหนี่ยวนำหนึ่งชุด สามารถเพิ่มพื้นที่การให้ความร้อนได้ แต่ก็สิ้นเปลืองพลังงานมากขึ้นด้วย [10]

งานวิจัยนี้นำเสนอการใช้สนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำให้เกิดความร้อนแก่กระบอกโลหะกลวงบางเปรียบเทียบกับทำความร้อนด้วยขดลวดความร้อนไฟฟ้าแบบที่ใช้ในปัจจุบัน เพื่อผลิตอากาศร้อนภายใต้การไหลของอากาศแบบปั่นป่วนในชุดทดลองที่สร้างขึ้น เพื่อช่วยเพิ่มการแลกเปลี่ยนความร้อนให้ดีขึ้น โดยใช้เลขเรย์โนลด์ส หรือสัดส่วนของแรงเฉื่อย ต่อ แรงเนื่องจากความหนืดเป็นตัวแปรไร้มิติที่บอกสภาพปรากฏการณ์การไหลของของไหล [11-12] ทำการศึกษาเวลา กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการผลิตอากาศร้อนตามอุณหภูมิที่ต้องการ และประสิทธิภาพการใช้พลังงาน ทั้งนี้เพื่อเป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้ระบบให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำในการผลิตอากาศร้อนเพื่อใช้ประโยชน์ในอบแห้งผลผลิตทางการเกษตรต่อไป

2. วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง

ชุดทดสอบมีส่วนประกอบต่าง ๆ ที่สำคัญ ดังแสดงในภาพที่ 1 โดยแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ส่วนแรกเป็นส่วนของอากาศเข้า (Inlet section, หมายเลข 1) จะใช้พัดลม (Blower) ขนาด 370 W เป่าอากาศให้เคลื่อนที่เข้าไปตามท่อยาว 600 mm ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ 57 mm เข้าสู่ห้องทำความร้อน (Heating section, หมายเลข 2) ที่มีหน้าตัดเป็นสี่เหลี่ยม ยาว 300 mm กว้าง 200 mm และสูง 200 mm โดยกำหนดอัตราการไหลในเทอมของเลขเรย์โนลด์ส 6,000 7,000 และ 8,000 วัดความดันของอากาศขาเข้าด้วย Digital Manometer (ยี่ห้อ AUTOOL) เพื่อคำนวณหาความเร็วของอากาศขาเข้า และปรับความเร็วรอบของพัดลมด้วยอุปกรณ์ปรับแรงดันไฟฟ้าเพื่อให้ได้อัตราการไหลและความเร็วของอากาศ ซึ่งเมื่อคำนวณด้วยสมการ (1) แล้วได้ค่าเรย์โนลด์สตามที่กำหนด อากาศนี้จะไหลผ่านเข้าสู่ชุดทำความร้อน 2 รูปแบบ ที่ติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ (ยี่ห้อ CKC tinner รุ่น PID REX-C 100) ลมร้อนจะไหลออกผ่านท่อส่วนสุดท้าย (Outlet section, หมายเลข 3) ที่มีความยาว 300 mm ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ 57 mm ซึ่งใช้เครื่องมือวัดอุณหภูมิ (Thermocouple type K ร่วมกับ MAX6675 Sensor module) ทั้งหมด 7 จุด แบ่งเป็นวัดอุณหภูมิขาเข้าและออกอย่างละ 1 จุด และอีก 5 จุดวัดอุณหภูมิที่ห้องทำความร้อน ติดตั้งโดยเว้นระยะห่างเท่ากันทุก 50 mm ที่ตำแหน่งศูนย์กลางของห้องทำความร้อน ซึ่งค่าของอุณหภูมิจะถูกส่งไปยังคอมพิวเตอร์ทุก ๆ วินาทีของการทำอุณหภูมิอากาศร้อนในช่วงที่ต้องการคือ 50 60 และ 70 °C และบันทึกค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าด้วย Power meter (ยี่ห้อ Intertek) ตลอดการทดลอง โดยชุดทำความร้อน 2 รูปแบบ ได้แก่



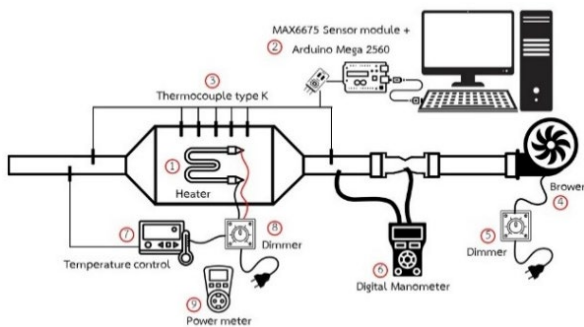
ภาพที่ 1 แผนภาพชุดทดสอบผลิตความร้อน

2.1 ชุดทำความร้อนแบบขดลวดความร้อนไฟฟ้า (ภาพที่ 2 ก)

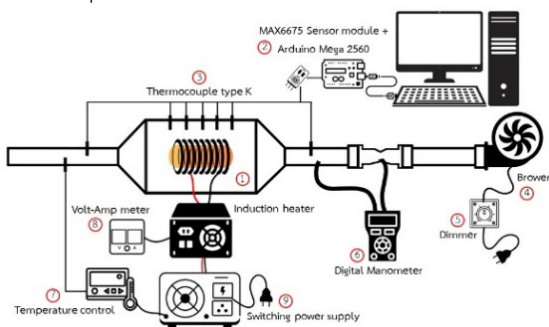
ทำความร้อนโดยใช้ขดลวดความร้อนไฟฟ้า 230 โวลต์ ขนาด 1,000 วัตต์ คัดด้วย ยาว 21 มิลลิเมตร (ภาพที่ 3 ก)

2.2 ชุดทำความร้อนแบบเหนี่ยวนำ (ภาพที่ 2 ข)

ทำความร้อนโดยใช้บอร์ดโมดูลเหนี่ยวนำความร้อนสำเร็จรูป (ZVS) ซึ่งเป็นวงจรอินเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์ (ภาพที่ 3 ข) เพื่อควบคุมเครื่องทำความร้อนแบบเหนี่ยวนำ ขนาดแรงดัน 24 V 40 A แกะกระบอกโลหะผิวเรียบกลวง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 25 mm หนา 1.2 mm ซึ่งวางไว้ตำแหน่งกึ่งกลางตามแนวแกนของขดลวดที่ทำจากท่อทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 4 mm หนา 1 mm ขดเป็นเกลียววงกลม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7.5 mm จำนวน 10 รอบ โดยมีระยะพิทช์ของเกลียวขดลวด 10 mm ซึ่งเป็นระยะที่เหมาะสม อุณหภูมิของภาระเหนี่ยวนำที่ถูกให้ความร้อนเกิดการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ [7]



(ก) ระบบชุดทดสอบทำความร้อนด้วยขดลวดความร้อนไฟฟ้า



(ข) ระบบชุดทดสอบทำความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำ

ภาพที่ 2 แผนภาพระบบชุดทดสอบผลิตความร้อน



(ก) ขดลวดความร้อนไฟฟ้า



(ข) บอร์ดโมดูลเหนี่ยวนำความร้อน (ZVS)

ภาพที่ 3 อุปกรณ์ทำความร้อน

ค่าเลขเรย์โนลด์สที่แสดงอยู่ในรูปเส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่า (D_h) ดังแสดงในสมการที่ 1 [13]

$$Re = \frac{\rho U D_h}{\mu} \quad (1)$$

เมื่อ ρ คือ ความหนาแน่นของของไหล (kg/m^3)

U คือ ความเร็วของของไหล (m/s)

D_h คือ เส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่าท่อ (m)

μ คือ ความหนืดสัมบูรณ์ของของไหล (kg/m.s)

เส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่าของท่อสี่เหลี่ยม หาได้จากสมการที่ 2 [13]

$$D_h = \frac{4A}{P} \quad (2)$$

เมื่อ A คือ พื้นที่ (m^2)

P คือ เส้นรอบวงท่อโมดูล (m)

ประเมินสมรรถนะการทำความร้อนของชุดทดสอบทั้ง 2 รูปแบบจากเวลาที่ใช้ในการทำให้อากาศร้อนถึงอุณหภูมิที่ต้องการ ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ และประสิทธิภาพการใช้พลังงานตามสมการที่ 3

$$\text{Efficiency (\%)} = \frac{\dot{Q}_{\text{conv}}}{VI} \times 100 \quad (3)$$

โดยที่ $\dot{Q}_{\text{conv}} = \dot{m}C_p(T_o - T_i)$

เมื่อ $\dot{m}$ คือ อัตราการไหลเชิงมวลอากาศ (kg/s)

C_p คือ ความร้อนจำเพาะของอากาศ (J/kg°C)

T_o คือ อุณหภูมิที่ทางออก (°C)

T_i คือ อุณหภูมิที่ทางเข้า (°C)

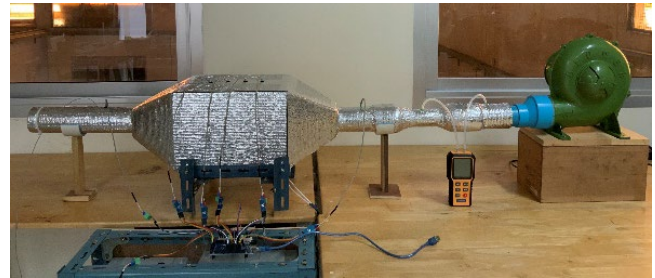
V คือ แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (V)

I คือ กระแสไฟฟ้า (A)

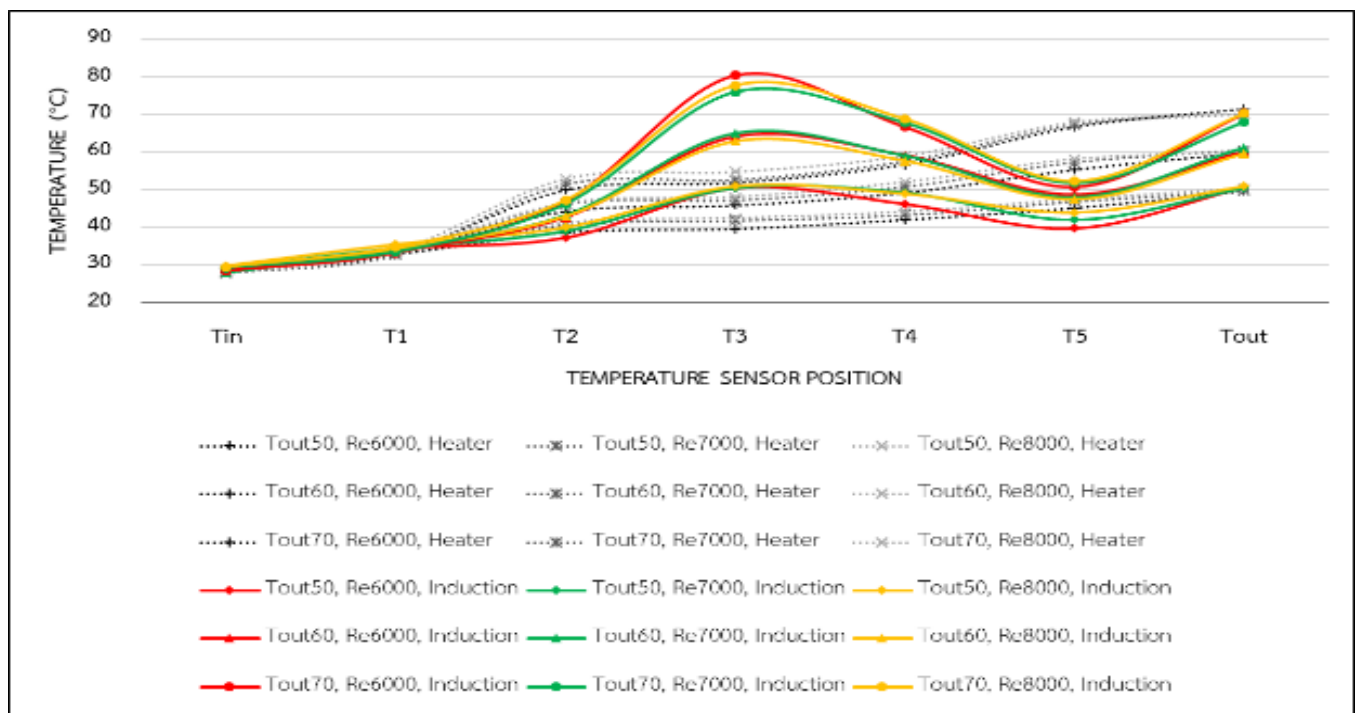
3. ผลการทดลองและอภิปรายผล

3.1 พฤติกรรมการทำความร้อน

การผลิตความร้อนด้วยขดลวดความร้อนไฟฟ้าและการทำความร้อนแบบเหนี่ยวนำ เป็นการใช้ลมเป่าผ่านอุปกรณ์ทำความร้อนทั้ง 2 ชนิดโดยตรง ดังแสดงในภาพที่ 4 ซึ่งการทำความร้อนลักษณะดังกล่าว อากาศร้อนที่ได้นั้นเกิดจากการพาความร้อนโดยส่วนใหญ่ [14] จึงได้ทำการวัดอุณหภูมิของอากาศที่ตำแหน่งต่าง ๆ เพื่อดูพฤติกรรมการทำความร้อน ได้ผลดังแสดงใน ภาพที่ 5



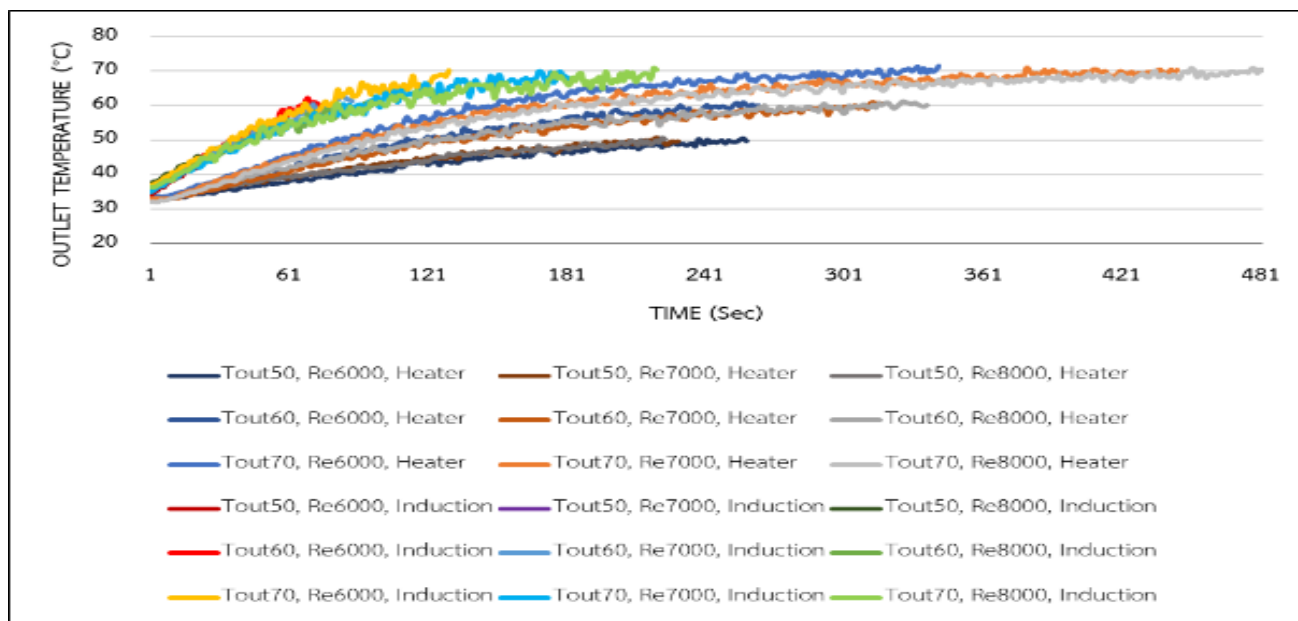
ภาพที่ 4 ชุดทดสอบผลิตความร้อน



ภาพที่ 5 แสดงอุณหภูมิของชุดทำความร้อนที่ตำแหน่งต่างๆ

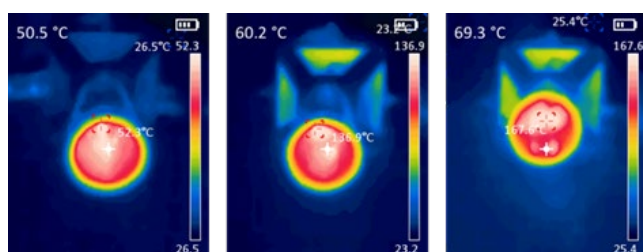
อุปกรณ์ทำความร้อนทั้ง 2 ชนิดมีลักษณะการทำความร้อนที่เฉพาะและแตกต่างกัน โดยที่อุณหภูมิของอากาศขาเข้าใกล้เคียงกัน ที่อุณหภูมิอากาศร้อนเดียวกัน พบว่าการผลิตอากาศร้อนด้วยขดลวดความร้อนไฟฟ้าอุณหภูมิของอากาศจะสูงที่สุดที่ตำแหน่งส่วนปลายของขดลวดความร้อนไฟฟ้า ส่วนการผลิตอากาศร้อนด้วยการ

ทำความร้อนแบบเหนี่ยวนำ อุณหภูมิของอากาศจะสูงที่สุดที่ตำแหน่งกึ่งกลางของกระบอกโลหะกลวงที่ถูกเหนี่ยวนำ เนื่องจากเส้นแรงแม่เหล็กจะคล้อยผ่านภายในขดลวดช่วงที่พันรอบกระบอกโลหะมากที่สุด ซึ่งจะให้อัตรากระแสไหลวนในชิ้นงานมากที่สุด [5]

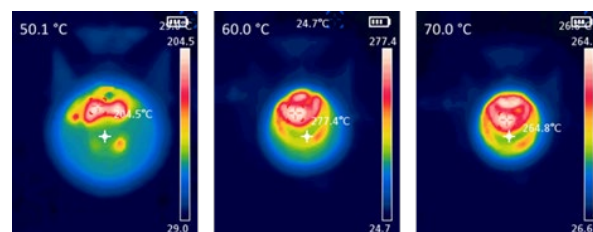


ภาพที่ 6 แสดงอุณหภูมิขาออกของชุดทำความร้อน

จากข้อมูลอุณหภูมิของอากาศในระหว่างการผลิตอากาศร้อนที่ต้องการ 50 60 และ 70 °C ด้วยขดลวดความร้อนไฟฟ้า และการเหนี่ยวนำความร้อนภายในชุดทดสอบ ดังแสดงในภาพที่ 6 พบว่าการผลิตอากาศร้อนด้วยขดลวดความร้อนไฟฟ้าอุณหภูมิของอากาศขาออกจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ และสม่ำเสมอมากกว่า การทำความร้อนแบบเหนี่ยวนำ ดังแสดงในภาพที่ 7 และ 8 อย่างไรก็ตาม การผลิตอากาศร้อนด้วยการเหนี่ยวนำความร้อน อุณหภูมิของอากาศที่ได้เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตั้งแต่วินาทีแรกจนถึงช่วงของอุณหภูมิของอากาศร้อนที่ต้องการ ด้วยเหตุผลนี้เองที่ส่งผลให้ค่าอุณหภูมิที่ได้ค่อนข้างไม่สม่ำเสมอ เนื่องจากการทดสอบถึงช่วงเวลาที่ใช้ในการผลิตอากาศร้อนที่ต้องการเท่านั้น แต่ในการนำไปประยุกต์กับการอบแห้งจริงนั้น ช่วงเวลาที่ใช้นานขึ้นทำให้เกิดความร้อนสะสมภายในห้องทำความร้อน อุณหภูมิของอากาศขาออกก็จะสม่ำเสมอเช่นเดียวกับการใช้ขดลวดความร้อนไฟฟ้า



ภาพที่ 7 ภาพถ่ายความร้อนของชุดทำความร้อนแบบขดลวดไฟฟ้าที่เรย์โนลด์ 6,000



ภาพที่ 8 ภาพถ่ายความร้อนของชุดทำความร้อนแบบเหนี่ยวนำที่เรย์โนลด์ 6,000

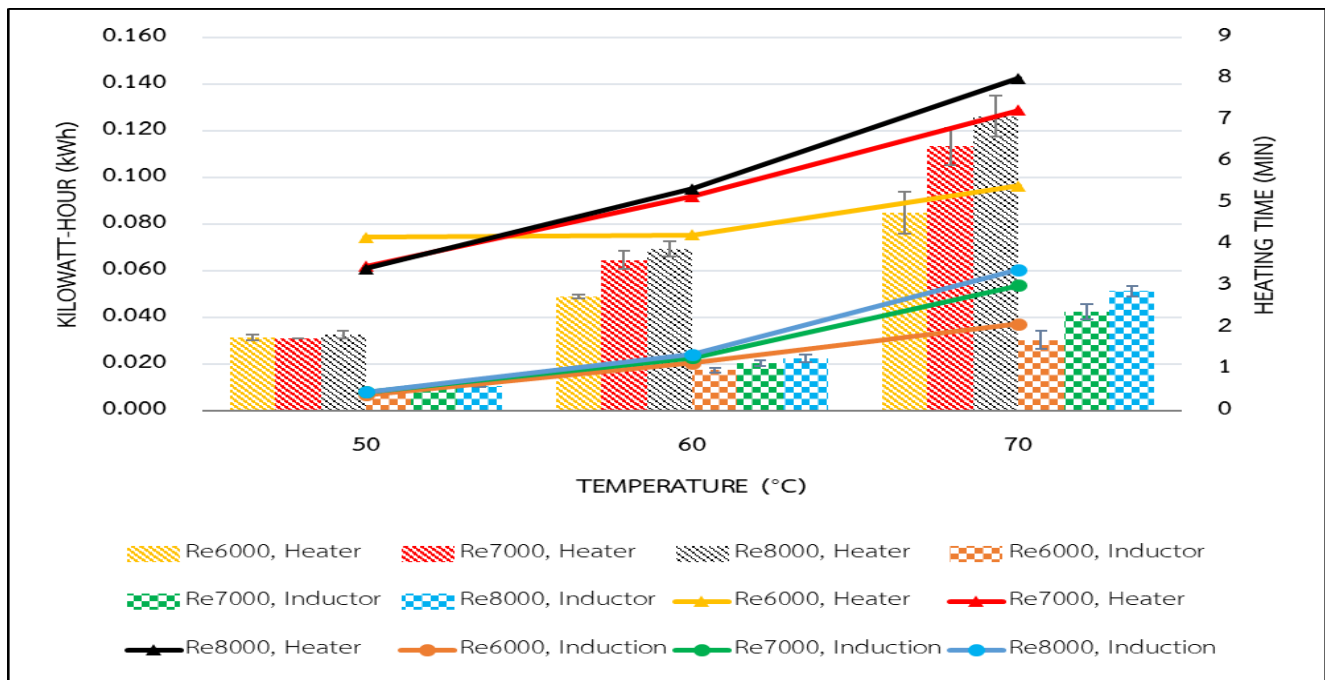
3.2 สมรรถนะการทำความร้อน

ระยะเวลาในการทำความร้อนเพื่อให้ได้อุณหภูมิของอากาศร้อน 50 60 และ 70 °C ในช่วงเรย์โนลด์ส 6,000 7,000 และ 8,000 พบว่าขดลวดความร้อนไฟฟ้าใช้เวลาเฉลี่ย 3.43-4.19 นาที, 4.24-5.36 นาที และ 5.42-8.02 นาที ตามลำดับ ส่วนการทำความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำใช้เวลาเฉลี่ย 0.39-0.46 นาที, 1.15-1.36 นาที และ 2.10-3.40 นาที ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบเวลาในการทำความร้อนเพื่อให้ได้อุณหภูมิของอากาศร้อน 50 60 และ 70 °C การทำความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำใช้เวลาน้อยกว่า การทำความร้อนด้วยขดลวดความร้อนไฟฟ้า 79.55-84.96%, 71.30-72.24% และ 54.46-62.03% ตามลำดับ โดยการทำความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงเริ่มต้นของการเหนี่ยวนำซึ่งต่างจากการทำความร้อนด้วยขดลวดความร้อนไฟฟ้าที่อุณหภูมิค่อย ๆ เพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ

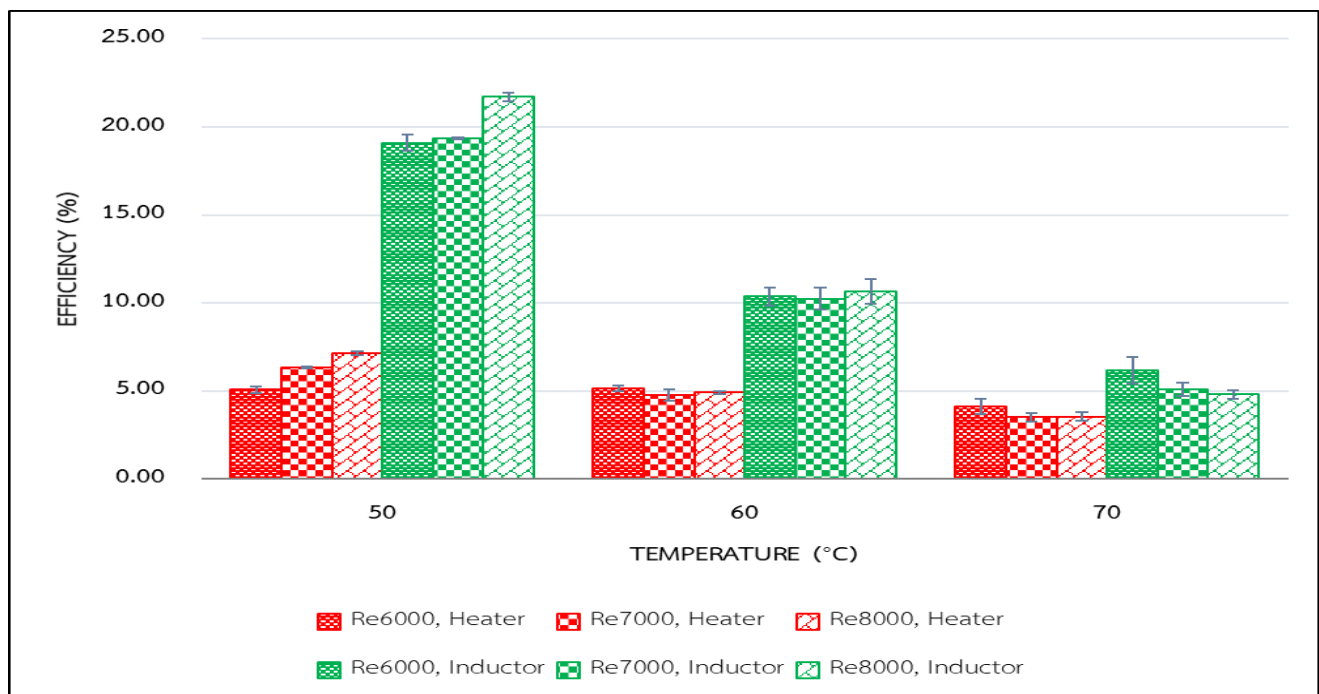
ส่วนการใช้กำลังไฟฟ้าในการทำความร้อนสอดคล้องกับระยะเวลาในการทำความร้อน โดยที่อุณหภูมิของอากาศร้อนที่ต้องการ 50 60 และ 70 °C ในช่วงเรย์โนลด์ส 6,000 7,000 และ 8,000 ขดลวดความร้อนไฟฟ้าใช้กำลังไฟฟ้าเฉลี่ย 0.031-0.033 kWh, 0.049-0.069 kWh และ 0.085-0.126 kWh ตามลำดับ การทำความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำใช้กำลังไฟฟ้าเฉลี่ย 0.009-

0.011 kWh, 0.017-0.022 kWh และ 0.030-0.051 kWh ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการทำความร้อนภายใต้ อุณหภูมิที่ต้องการดังกล่าวการทำความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำใช้ กำลังไฟฟ้าน้อยกว่าการทำความร้อนด้วยขดลวดความร้อนไฟฟ้า

66.13-70.96%, 64.44-67.58% และ 59.43-64.31% ตามลำดับ ดังแสดงใน ภาพที่ 9



ภาพที่ 9 แสดงเวลา และการใช้กำลังไฟฟ้าของชุดทำความร้อน



ภาพที่ 10 แสดงประสิทธิภาพการใช้พลังงานของชุดทำความร้อน

ประสิทธิภาพการใช้พลังงานในการทำความร้อนเพื่อให้ ได้อุณหภูมิของอากาศร้อน 50 60 และ 70 °C ในช่วงเรย์โนลด์ส์

6,000 7,000 และ 8,000 พบว่าขดลวดความร้อนไฟฟ้ามี ประสิทธิภาพ 5.07-7.14%, 4.76-5.14% และ 3.51-4.13%

ตามลำดับ ส่วนการทำความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำมีประสิทธิภาพ 19.09-21.71%, 10.24-10.67% และ 4.80-6.17% ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 10 และเมื่อเปรียบประสิทธิภาพการใช้พลังงานภายใต้อุณหภูมิที่ต้องการดังกล่าวการทำความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำมีประสิทธิภาพมากกว่าขดลวดความร้อนไฟฟ้า 67.11-73.43%, 50.42-53.77% และ 26.02-32.99% ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 10

เวลา การใช้กำลังไฟฟ้า และประสิทธิภาพในการทำความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำกับการใช้ขดลวดความร้อนไฟฟ้ามีความแตกต่างกันมาก เมื่อพิจารณาที่เงื่อนไขของการทดสอบเดียวกัน คือ อุณหภูมิของลมร้อนที่ต้องการและช่วงเรย์โนลด์ส์เดียวกัน พบว่าทุกเงื่อนไขของการทดสอบ การทำความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำใช้ระยะเวลา และกำลังไฟฟ้าในการทำความร้อนน้อยกว่าขดลวดความร้อนไฟฟ้าเกิน 50% ในทุกกรณี จะมีความแตกต่างกันมากในช่วงเริ่มต้นของการทำความร้อน สอดคล้องกับผลการศึกษาค่าสิ้นเปลืองพลังงานในการอบแห้งใบมะกรูด พบว่าการใช้ขดลวดความร้อนไฟฟ้าเป็นแหล่งพลังงานความร้อนให้อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานสูงที่สุด [15] และนอกจากนี้การทำความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำมีประสิทธิภาพการใช้พลังงานมากกว่าขดลวดความร้อนไฟฟ้าในทุกเงื่อนไขของการทดสอบเช่นกัน โดยมีประสิทธิภาพสูงขึ้นตามอุณหภูมิของอากาศร้อนที่ต้องการลดลง เนื่องจากที่อุณหภูมิต่ำใช้เวลาและกำลังไฟฟ้าน้อยก็ได้อุณหภูมิของอากาศที่ต้องการ ส่วนที่อุณหภูมิสูงขึ้นต้องใช้เวลามากขึ้นแต่อุณหภูมิกลับค่อยเพิ่มอย่างช้า ๆ อีกทั้งการทำความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำยังเกิดการสูญเสียพลังงานจากการนำความร้อนจากผิวภาระเหนี่ยวนำสู่ความลึกจากผิว และจากบริเวณที่ภาระเหนี่ยวนำถูกเหนี่ยวนำโดยตรงด้วยอิทธิพลของกระแสไหลวน และความเข้มของสนามแม่เหล็ก ซึ่งเป็นส่วนที่อยู่ในวงของขดลวดเหนี่ยวนำ ไปยังบริเวณด้านข้างของภาระเหนี่ยวนำที่ไม่ได้อยู่ในวงของขดลวดเหนี่ยวนำ อย่างไรก็ตามผลที่ได้จากการทดสอบส่งผลในเชิงบวกต่อการผลิตอากาศร้อนด้วยการทำความร้อนแบบเหนี่ยวนำ แสดงให้เห็นถึงข้อดีทั้งในด้านของการประหยัดพลังงาน ทำความร้อนได้รวดเร็ว และมีประสิทธิภาพการใช้พลังงานมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับขดลวดความร้อนไฟฟ้า ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่เหมาะสมและเป็นไปตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการหาแหล่งพลังงานความร้อนที่ประหยัดพลังงานงานเพื่อนำไปใช้ในการอบแห้งผลผลิตทางการเกษตรหลังจากการเก็บเกี่ยวต่อไป โดยในอนาคตผู้ศึกษามีแนวทางในการปรับปรุงชุดทดสอบเพื่อให้สามารถศึกษาอิทธิพลของอัตราเร็วของลมป้อนเข้าที่ส่งผลต่อพฤติกรรมและความสามารถในการถ่ายเทความร้อนได้อย่างถูกต้องและเที่ยงตรงมากขึ้น เนื่องจากในปัจจุบันชุดทดลองที่ใช้นั้นมีห้องทำความร้อนขนาดใหญ่เกินไปเมื่อเทียบกับขนาดของขดลวดและภาระเหนี่ยวนำ จึงมีความเป็นไปได้ที่อากาศป้อนเข้านั้นไม่ได้ผ่านขดลวดหรือภาระเหนี่ยวนำทั้งหมด เพิ่มสมรรถนะของการทำความร้อนด้วยการลดการสูญเสียพลังงาน โดยการเพิ่มจำนวนของขดลวดให้มีความยาวเทียบเท่าหรือใกล้เคียงกับความยาวของภาระเหนี่ยวนำลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวดเหนี่ยวนำให้มีระยะห่างจาก

ภาระเหนี่ยวนำน้อยที่สุด เพื่อให้ผิวข้างของภาระเหนี่ยวนำอยู่ในบริเวณที่ความเข้มของสนามแม่เหล็กสูง [16-17] ศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับ รูปแบบหรือรูปทรงของภาระเหนี่ยวนำอื่น ๆ ที่สามารถถ่ายเทความร้อนได้ดีกว่ากระบอกโลหะผิวเรียบกลวง ทั้งยังสามารถสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรมเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดสอบ หรือใช้ Machine Learning ทำนายช่วงของการทดสอบอื่น ๆ การจัดการข้อมูล การเก็บข้อมูล และการจัดตารางงาน เป็นต้น

4. สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาและเปรียบเทียบการผลิตลมร้อนด้วยขดลวดความร้อนไฟฟ้า และการทำความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำ พบว่าการทำความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำใช้เวลา และกำลังไฟฟ้าในการทำความร้อนน้อยกว่าขดลวดความร้อนไฟฟ้า และมีประสิทธิภาพการใช้พลังงานมากกว่าขดลวดความร้อนไฟฟ้า ซึ่งตอบปัญหาในประเด็นที่ต้องการจัดหาแหล่งพลังงานต้นทุนต่ำมาใช้ในกระบวนการผลิตลมร้อนเพื่ออบแห้งผลผลิตทางการเกษตร เนื่องจากต้นทุนหลักในการอบแห้งนั้นมาจากแหล่งพลังงานความร้อนที่ใช้ในระบบ หากการใช้ระบบเหนี่ยวนำความร้อนเป็นการลดต้นทุนดังกล่าวก็จะเกิดแนวทางในการนำระบบเหนี่ยวนำไปประยุกต์ใช้จริงให้เกิดผลประโยชน์เป็นที่ประจักษ์ต่อไป

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี (SUT) ที่ให้การสนับสนุนการวิจัยในครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Zinn S, Semiatin SL. Elements of Induction Heating: Design Control and Applications. n.p.: ASM International; 1988.
- [2] จีระพงศ์ ศรีวิชัย, คมกฤษณ์ ศรีสุวรรณ. กรณีศึกษาการอบแห้งลมร้อนด้วยวิธีความร้อนเหนี่ยวนำ. วารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง. 2558;24:16-26.
- [3] นพฤทธิ์ พรหมลิ่ง. การควบคุมอุณหภูมิในตู้อบสับปะรดปัตตาเวียด้วยการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ [วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต]. นครราชสีมา: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี; 2565.
- [4] Vázquez Ruiz, E. Analysis and Application of Maxwell's Equation for Induction Heating. Mechanical Engineering. 2013.
- [5] Jang, J.Y, Y.W Chiu. Numerical and experimental thermal analysis for a metallic hollow cylinder subjected to step-wise electro-magnetic induction heating. Applied thermal engineering. 2007;27:1883-1894.
- [6] Han Y, Wen H, Yu E. Study on electromagnetic heating process of heavy-duty sprockets with

- circular coils and profile coils. *Applied Thermal Engineering*. 2016;24:861-868.
- [7] Tharmapalan, E., Sivalingam, S., Seyyaf, et al. Performance Improvement of Industrial Induction Mould Heating Oven. In: 2020 Engineering Research Conference (MERCon): IEEE; 2020. P. 602-607.
- [8] Song K, Guan J, Li K, et al. Experimental and numerical study of the effect of coil structure on induction nitriding temperature field. *Advances in Mechanical Engineering*. 2020;12:1-14.
- [9] Shih SY, Nian SC, Huang MS. Comparison between single-and multiple-zone induction heating of largely curved mold surfaces. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2016;75:24-35.
- [10] Fujita H, Uchida N, Ozaki K. Zone controlled induction heating (ZCIH) A new concept in induction heating. In: 2007 Power Conversion Conference-Nagoya: IEEE; 2007. P. 1498-1504.
- [11] พิตตินันท์ สอนขาวไร่เงิน, ขวัญจิต วงษ์ขารี, สมิต์ เอี่ยมสะอาด และคณะ. การถ่ายเทความร้อนและความดันสูญเสียในท่อกลมด้วยแผ่นบิดสั้นหลายช่องการไหล. ใน: ทะนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์, บรรณาธิการ. งานประชุมวิชาการการถ่ายเทพลังงานความร้อนและมวลในอุปกรณ์ ด้านความร้อนและกระบวนการ ครั้งที่ 21; 10-11 มีนาคม 2565; โรงแรมวินทรี ซิตี้ รีสอร์ท. เชียงใหม่: ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่; 2565. หน้า. 196-200.
- [12] Man C, Lv X, Hu J, et al. Experimental study on effect of heat transfer enhancement for single-phase forced convective flow with twisted tape inserts. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2017;106:877-883.
- [13] เกษรา ศรีขำนิ, พิชิต แก้วโกสม, อาณัติ พิลลา. การประเมินสมรรถนะเชิงความร้อนของเครื่องอุ่นอากาศพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีการติดตั้งตัวสร้างการไหลหมุนวนชนิดแผ่นกั้นเอียงรูปตัวดัดเบิ้ลยู. ใน: ทะนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์, บรรณาธิการ. งานประชุมวิชาการการถ่ายเทพลังงานความร้อนและมวลในอุปกรณ์ ด้านความร้อนและกระบวนการ ครั้งที่ 21; 10-11 มีนาคม 2565; โรงแรมวินทรี ซิตี้ รีสอร์ท. เชียงใหม่: ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่; 2565. หน้า. 180-187.
- [14] อนุสรณ์ สุขเกษม. การศึกษาเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนโดยการพาของครีบทรงทรงกระบอก [วิทยานิพนธ์ปริญญาโท]. นครนายก: มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ; 2550.
- [15] ปุณยาพร แสนแปง. ผลของการอบแห้งด้วยระบบปั๊มความร้อน ฮีตเตอร์และผสมผสาน ต่อคุณภาพของใบมะกรูดและความสิ้นเปลืองพลังงาน [วิทยานิพนธ์ปริญญาโท]. เชียงใหม่: มหาวิทยาลัยแม่โจ้; 2564.
- [16] Shuang, W. Design and Optimization of Electromagnetic Induction Device based on Finite Element Analysis. *Journal of Physics: Conference Series*. 2023;2546:012005.
- [17] Al-Jrew, Aws H., Jawad R., et al. Analysis and design of the induction heating load using finite element method. *AIP Conference Proceedings*. 2024;(1):3229