

การพัฒนาเครื่องหลอมโลหะโดยใช้หลักการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ สำหรับกลุ่มวิสาหกิจเครื่องประดับจังหวัดสุรินทร์

ทรงยศ หวังชอบ^{1*} ศุภวัชร นิยมพันธุ์² กนกกานต์ ลายสนธิ³ สุรเชษฐ์ วงศ์ชัยประทุม⁴
คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสุรินทร์^{1*234}
อีเมล : s.wungchop@gmail.com^{1*}

วันที่รับบทความ 27 มกราคม 2568

วันแก้ไขบทความ 9 เมษายน 2568

วันที่ตอบรับบทความ 17 เมษายน 2568

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการพัฒนาเครื่องหลอมโลหะโดยใช้หลักการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำสำหรับกลุ่มวิสาหกิจเครื่องประดับจังหวัดสุรินทร์ โดยการศึกษา ออกแบบและสร้างเครื่องหลอมโลหะด้วยหลักการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ เพื่อช่วยลดปัญหาที่เกิดจากการหลอมเนื่องจากสามารถควบคุมอุณหภูมิขณะหลอมได้และหาประสิทธิภาพของเครื่องหลอมโลหะโดยใช้หลักการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ ผลการทดสอบประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของเครื่องหลอมโลหะโดยใช้หลักการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ พิจารณาจากการทดสอบประสิทธิภาพของเครื่อง โดยพิจารณาจากกำลังไฟฟ้าขาเข้า (Input Power) เปรียบเทียบกับค่าความสูญเสียที่กำลังไฟฟ้าขาออก (Output Power) มีประสิทธิภาพสูงสุดคือที่ 90.47 เปอร์เซ็นต์ ที่ความถี่ 28.67 kHz ที่กำลังไฟฟ้าขาเข้า 1,260 วัตต์ สามารถให้ความร้อนในการหลอมทองเหลืองขนาด 500 กรัม ที่บรรจุในเบ้ากราไฟท์ จากอุณหภูมิห้องถึงจุดหลอมละลาย 900 °C ในเวลา 10 นาที

คำสำคัญ: การหลอมโลหะ การให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ อินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์แบบอนุกรม



The development of metal melting furnaces using the induction heating application by ornament community enterprise in Surin

Songyot Wungchop^{1*}, Supawatchara Niyomphant², Kanokgan Laison³
,Surachet Wongchaipratum⁴

Faculty of Industrial Technology, Surindra Rajabhat University ^{1*,2,3,4}

E – mail : s.wungchop@gmail.com ^{1*}

Received 27 January 2025

Revised 9 April 2025

Accepted 17 April 2025

Abstract

This paper presents a development of metal melting furnaces using the Induction heating application by ornament community enterprise in Surin province. By using single-phase series-resonant inverter modules for reduce problems caused by melting because the temperature can be controlled during melting and find the efficiency of the metal melting furnaces using the principle of induction heating. Experimental results considered by testing the efficiency of the metal melting furnaces using the Induction heating application by considering the input power compared with the loss of the output power with the highest efficiency at 90.47 percent at the frequency of 28.67 kHz at Input power 1,260 watts. It can heat 500 grams of brass in a graphite crucible from room temperature to a melting point of 900 °C in 10 minutes.

Keywords: Metal melting furnaces, Series resonant inverter, Induction heating application

1. บทนำ

เตาหลอมโลหะในภาคอุตสาหกรรมมีลักษณะเป็นเตาที่มีการเผาไหม้ภายนอก (Externally Heated Furnaces) เปลวไฟของเชื้อเพลิงหรือก๊าซร้อนจากการเผาไหม้สัมผัสกับวัตถุทางอ้อมหรือมีตัวกลางในการถ่ายเทความร้อน โดยเชื้อเพลิงในการให้ความร้อนส่วนใหญ่นิยมใช้ก๊าซแอลพีจี เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการเผาไหม้ดีมาก มีอัตราอากาศส่วนเกินน้อยมากและไม่มีซีเถ้า การหลอมโลหะโดยการเหนี่ยวนำ (Induction Melting) ขดลวดเหนี่ยวนำเมื่อได้รับไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูงจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กสลับคล่องผ่านภาชนะ ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำสร้างกระแสไหลวนที่ขึ้นงาน ทำให้เกิดความร้อนขึ้นที่ขึ้นงาน (วิเชียร หทัยรัตน์ศิริ และคณะ, 2555) เมื่อนำโลหะใด ๆ ใส่ลงในเตาหลอมที่เป็นสนามแม่เหล็ก กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดที่พันอยู่รอบตัวเตา จะเกิดการเหนี่ยวนำขึ้นระหว่างขดลวดกับโลหะ เป็นผลทำให้โลหะเกิดความร้อนและหลอมละลายในที่สุด (เขมภัทร สมสังข์, 2549) หลักการพื้นฐานของเทคโนโลยีการหลอมโลหะโดยการเหนี่ยวนำ เป็นการให้ความร้อนเพื่อทำให้โลหะเปลี่ยนจากของแข็งเป็นของเหลว โดยการทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในเตาหลอมหรือในผลิตภัณฑ์โดยตรง ซึ่งเมื่อโลหะที่เป็นผลิตภัณฑ์ได้รับจนถึงจุดหลอมเหลวก็จะเกิดการเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของเหลว ประเภทของการใช้งานการประยุกต์ใช้งานการหลอมโลหะโดยการเหนี่ยวนำกับงานอุตสาหกรรมมีหลายประเภท เช่น การหล่อแบบโลหะ การยึดโลหะ เป็นต้น

ซึ่งปัจจุบันมีการประยุกต์ใช้เตาหลอมโลหะในอุตสาหกรรมขนาดเล็ก เช่น ธุรกิจขนาดย่อม (SME) วิสาหกิจชุมชน ฯลฯ เช่นเดียวกับวิสาหกิจชุมชนเครื่องทองเหลือง อำเภอเขวาสินรินทร์ จังหวัดสุรินทร์ ที่มีการใช้แก๊สแอลพีจีในการหลอม เนื่องจากทองเหลืองมีคุณสมบัติในการหลอมเหลว ณ อุณหภูมิที่ไม่สูงมาก อีกทั้งปริมาณในการหลอมแต่ละครั้งน้อย ดังนั้นการหลอมทองเหลืองด้วยวิธีดังกล่าวจึงง่ายและสะดวกต่อการใช้งาน ปัญหาที่เกิดจากการหลอมโลหะโดยใช้ก๊าซแอลพีจีคือ ควบคุมอุณหภูมิของการหลอมได้ยาก ทำให้การให้ความร้อนแก่ชิ้นงานไม่สม่ำเสมอส่งผลให้ชิ้นงานเกิดรูพรุนขนาดเล็ก ชิ้นงานแตกกร้าว ความที่เกิดจากการเผาไหม้ก๊าซแอลพีจี ก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศและอันตรายจากการระเบิดของก๊าซ

จากเหตุผลดังกล่าว ผู้วิจัยและคณะจึงมีความสนใจในการพัฒนาเครื่องหลอมโลหะโดยใช้หลักการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำสำหรับกลุ่มวิสาหกิจเครื่องประดับจังหวัดสุรินทร์ โดยการศึกษา ออกแบบและสร้างเครื่องหลอมโลหะด้วยหลักการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ เพื่อช่วยลดปัญหาที่เกิดจากการหลอมเนื่องจากสามารถควบคุมอุณหภูมิขณะหลอมได้ ทำให้ชิ้นงานไม่เกิดรูพรุน ไม่แตกกร้าว สามารถลดต้นทุนในการผลิต ประหยัดพลังงาน ลดการเกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมและอันตรายที่เกิดกับผู้ปฏิบัติงาน เพื่อให้การรวมตัวกันของเกษตรกรในการประกอบธุรกิจในระดับชุมชนมีความมั่นคง เป็นการส่งเสริมความรู้ภูมิปัญญาท้องถิ่น เพื่อให้ระบบเศรษฐกิจชุมชนมีความเข้มแข็งพึ่งพาตนเองได้และมีความพร้อมที่จะพัฒนาสำหรับการแข่งขันทางการค้าในอนาคต

2. วัตถุประสงค์

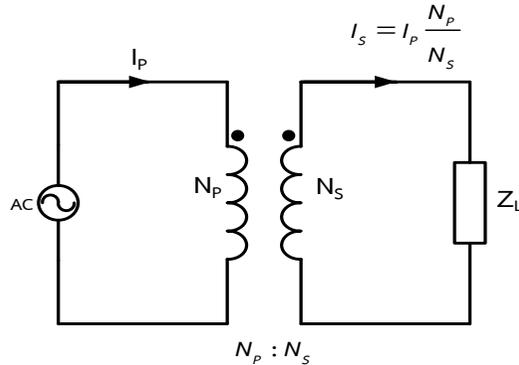
- 2.1 เพื่อพัฒนาเครื่องหลอมโลหะโดยใช้หลักการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ สำหรับกลุ่มวิสาหกิจเครื่องประดับจังหวัดสุรินทร์
- 2.2 หาประสิทธิภาพของเครื่องหลอมโลหะโดยใช้หลักการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำที่ได้สร้างขึ้น

3. วิธีการวิจัย

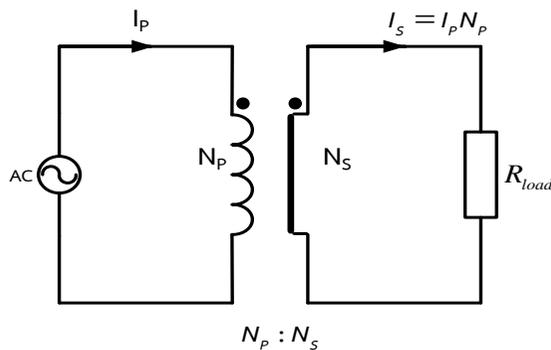
3.1 หลักการพื้นฐานของการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ

โมดูลอินเวอร์เตอร์อนุกรมเรโซแนนท์ 1 เฟส หลักการพื้นฐานของการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำสามารถอธิบายให้เห็นได้ชัดเจนโดยเปรียบเทียบกับหลักการของหม้อแปลงไฟฟ้า เมื่อใช้งานจะเกิดความร้อนขึ้น ซึ่งมีผลมาจากกระแสซึ่งเรียกว่ากระแสไหลวน (Eddy current) นำหลักการเกิดความร้อนจากการเกิดกระแสไหลวนดังกล่าว

มาใช้เพื่อให้ความร้อนกับชิ้นงานที่เป็นตัวนำทางไฟฟ้าเรียกว่า เตาเหนี่ยวนำ (Induction furnace) หลักการทำงานพื้นฐานคล้ายกับหม้อแปลงไฟฟ้าซึ่งประกอบไปด้วยขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิ (Primary and Secondary Winding) โดยขดเหนี่ยวนำเปรียบเสมือนขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงดังรูปที่ 1 โดยขดลวดทางด้านทุติยภูมิมีเพียงรอบเดียว ซึ่งหมายถึงการลัดวงจรทางทุติยภูมิ (วิเชียร ทัฬหีรัตน์ศิริ และสายชล ชุตเจื้อจิ้น, 2552) ดังรูปที่ 2



รูปที่ 1 วงจรสมมูลอย่างง่ายของหม้อแปลง



รูปที่ 2 วงจรสมมูลของขดลวดเหนี่ยวนำกับชิ้นงาน

จะเห็นได้ว่าถ้า I_p เป็นกระแสที่ป้อนเข้าในขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก I_s เป็นกระแสที่ไหลในชิ้นงานโดยที่ N_p คือจำนวนรอบของขดลวดเหนี่ยวนำและกำลังสูญเสีย P_{load} เป็นความร้อนของชิ้นงานมีค่าเท่ากับ

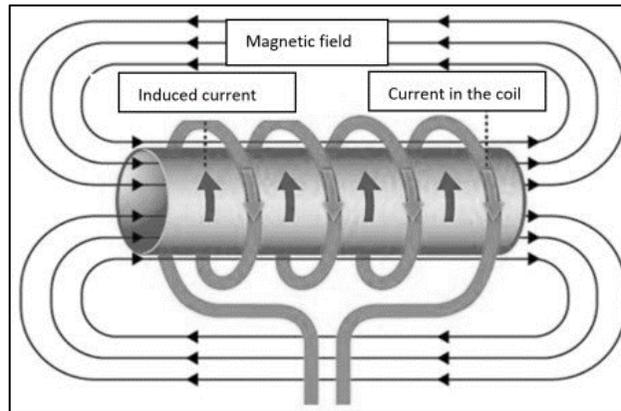
$$P_{load} = I_s^2 R_{load} \quad (1)$$

$$\text{แทนค่า } I_s = I_p N_p, \text{ จะได้} \quad P_{load} = I_p^2 N_p^2 R_{load} \quad (2)$$

โดยที่ P_{load} คือ กำลังที่ชิ้นงาน (W) และ R_{load} คือ ความต้านทานสมมูลของชิ้นงาน (Ω)

ลักษณะโครงสร้างของระบบการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ เมื่อขดลวดเหนี่ยวนำได้รับกระแสไฟฟ้าสลับ จะทำให้เกิดฟลักซ์แม่เหล็กสลับคล่องผ่านชิ้นงาน ทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ เกิดกระแสไหลวนในชิ้นงาน ทำให้เกิดความร้อนขึ้นที่ชิ้นงาน ความร้อนที่ชิ้นงานจะขึ้นอยู่กับปริมาณของกระแสไหลวน (I_{load}) และความต้านทานของชิ้นงาน (R_{load}) เป็นตามสมการ กำลังไฟฟ้าซึ่งมีค่าเท่ากับ ($I_{eddy}^2 R_{load}$) โดยที่กระแสจะหาได้จากความเข้มของสนามแม่เหล็ก ความต้านทานหาได้จากค่าความต้านทานจำเพาะ (Resistivity, ρ) และความซึมซาบแม่เหล็กของชิ้นงาน (Permeability, μ) เนื่องจากกระแสที่ป้อนให้กับขดลวดเหนี่ยวนำมักจะมีปริมาณที่สูงมาก จึงต้องมี

ระบบระบายความร้อนด้วยน้ำภายในขดลวดเหนี่ยวนำเพื่อลดกำลังสูญเสียที่ขดลวดเหนี่ยวนำ (วิเชียร หทัยรัตน์ศิริ และสายชล ชุตเจื้อจิ้น, 2557) ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 หลักการพื้นฐานการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ

ในหลักการดังกล่าวกระแสไหลวนจะมีความหนาแน่นมากที่สุดที่บริเวณผิวของชิ้นงาน เนื่องจากผลของปรากฏการณ์พื้นผิว (Skin Effect) และความหนาแน่นของกระแสลดลงมาเป็นประมาณ 0.368 เท่าของค่าความหนาแน่นกระแสที่ผิวของชิ้นงานที่ค่าความลึกผิว (Skin Depth) (วิเชียร หทัยรัตน์ศิริ และคณะ, 2555) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3)

$$\text{Skin depth, } \delta = \sqrt{\frac{\rho}{\mu f \pi}} \quad (3)$$

โดยที่ δ คือ ความลึกผิว (m)

ρ คือ ความต้านทานจำเพาะของชิ้นงาน (Ω / m)

μ คือ ความซึมซาบแม่เหล็กของชิ้นงาน (H/m)

f คือ ความถี่ของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ (Hz)

จากสมการที่ (3) แสดงให้เห็นว่าค่าความลึกผิวขึ้นอยู่กับค่าความถี่ของไฟฟ้ากระแสสลับที่จ่ายให้ขดลวดเหนี่ยวนำ ค่าความซึมซาบแม่เหล็ก(Permeability) ความต้านทานจำเพาะ(Resistivity) ของชิ้นงาน ในทางปฏิบัติลักษณะงานที่ต่างกัน จะมีความต้องการค่าความลึกผิวและกำลังไฟฟ้าที่แตกต่างกันเช่น การชุบแข็งที่ผิวชิ้นงาน จะต้องการค่าความลึกผิวที่ต่ำ จึงต้องใช้ความถี่ที่สูงทำให้มีค่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าที่สูง ส่วนในงานประเภทการให้ความร้อนสำหรับการหลอมโลหะจะต้องการค่าความลึกผิวที่ค่อนข้างสูง ความถี่การทำงานจึงต่ำกว่า

3.2 หลักการของวงจรเรโซแนนซ์

ในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับที่ประกอบด้วยตัวต้านทาน ตัวเหนี่ยวนำ(Inductor) และตัวเก็บประจุ (Capacitor) ที่ต่ออนุกรมกันเมื่อทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้าและปรับความถี่ของแหล่งจ่ายให้กับวงจร เมื่อความถี่ของแหล่งจ่ายมีค่าเท่ากับความถี่ธรรมชาติของวงจร จะทำให้เกิดสภาวะเรโซแนนซ์ (การทำให้ความถี่ของแหล่งจ่ายมีค่าเท่ากับความถี่ธรรมชาติของวงจรทำได้โดยการปรับค่า L (Inductance) หรือการปรับค่า C (Capacitance) หรือการปรับค่าความถี่ของแหล่งจ่ายเป็นผลให้ค่าอินดักทีฟรีแอกแตนซ์ (X_L : Inductive Reactance) เท่ากับค่าคาปาซิทีฟรีแอกแตนซ์ (X_C : Capacitive Reactance) ถ้า $X_L = X_C$ จะทำให้เกิดสภาวะเรโซแนนซ์ ขณะที่เกิดเรโซแนนซ์ค่าอิมพีแดนซ์ของวงจรจะน้อยที่สุดเหลือเท่ากับ R (Resistance) เพียงอย่างเดียว ค่าแรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ

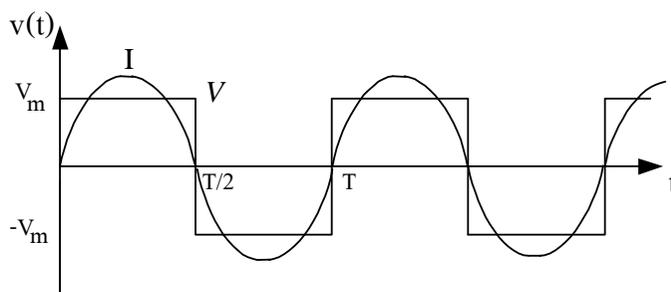
V_L และค่าแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ V_C จะมีทิศทางตรงกันข้ามและหักล้างกันหมด เหลือเฉพาะแรงดันตกคร่อมตัวต้านทาน แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวต้านทานจะเท่ากับแรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่าย ดังนั้นค่ากระแสไฟฟ้าขณะเกิดสภาวะเรโซแนนท์จึงมีค่าสูงสุดดังตารางที่ 1 คุณสมบัติของวงจรเรโซแนนท์อนุกรม (จิระศักดิ์ วงศา. 2555)

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของวงจรเรโซแนนท์อนุกรม

คุณสมบัติ	วงจรอนุกรม RLC
ความถี่เรโซแนนท์ f_r	$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$
แรงดันตกคร่อม R	สูงสุดที่ f_r
กระแสที่ไหลผ่าน R	สูงสุดที่ $\frac{V_s}{R}$
ค่า Q (Quality Factor)	$Q = \frac{2\pi f_r L}{R}$
ค่าแบนด์วิดท์ (Bandwidth)	$B_w = \frac{f_r}{Q}$
ค่า Impedance ที่จุดต่ำกว่า f_r	Capacitive
ค่า Impedance ที่จุดสูงกว่า f_r	Inductive
ผลกระทบเมื่อเปลี่ยนค่า R	เพิ่มค่า R ค่า B_w เพิ่ม

3.3 การวิเคราะห์หาค่ากำลังไฟฟ้าที่โหลดเรโซแนนท์

สัญญาณกระแสของอินเวอร์เตอร์เรโซแนนท์แบบอนุกรม จะมีลักษณะเป็นรูปคลื่นซายน์ เมื่ออินเวอร์เตอร์ทำงานใกล้กับความถี่เรโซแนนท์ โหลดจะมีค่า Damping Factor ต่ำ โดยสัญญาณแรงดันจะมีลักษณะเป็นรูปคลื่นพัลส์สลับ (วิเชียร หทัยรัตน์ศิริ และคณะ, 2555) ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 รูปคลื่นสัญญาณกระแสและแรงดันที่โหลด

จากรูปที่ 4 รูปคลื่นของแรงดันมีลักษณะเป็นฟังก์ชันคี่ องค์ประกอบฮาร์มอนิกต่างๆ ของแรงดันพัลส์สี่เหลี่ยมเป็นดังนี้ (วิเชียร หทัยรัตน์ศิริ และคณะ, 2555)

$$v(t) = V_1 \sin \omega t + V_3 \sin 3\omega t + \dots + V_n \sin n\omega t \quad (4)$$

โดยที่ $V_1 = \frac{4V_m}{\pi}$ และ $V_n = \frac{4V_m}{n\pi}$ เมื่อ $n =$ เลขจำนวนเต็มคี่

ดังนั้น $V_{1,rms} = \frac{4V_m}{\pi\sqrt{2}}$ ส่วนกระแสที่โหลดมีลักษณะเป็นคลื่นชานัน ดังนั้นจึงสามารถหาค่ากำลังไฟฟ้าได้จาก

$$P_{load} = I_{1,rms} V_{1,rms} \quad (5)$$

เมื่อแทนค่า $I_{1,rms}$ และ $V_{1,rms}$ จะได้

$$P_{load} = \frac{2I_m V_m}{\pi} \quad (6)$$

3.4 การวิเคราะห์หาค่ากำลังไฟฟ้าที่ขดลวดเหนี่ยวนำ

จากกำลังไฟฟ้ารูปคลื่นชานันในสภาวะอยู่ตัว สามารถนำมาใช้ในการพิจารณาหาความสัมพันธ์เพื่อหาค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยที่เกิดขึ้นในวงจรไฟฟ้าโดยทั่วไป กล่าวคือเมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นชานัน $e = V_m \sin \omega t$ ให้กับวงจรไฟฟ้าโดยทั่ว ๆ ไปวงจรหนึ่ง จะทำให้เกิดกระแส $i = I_m \sin(\omega t + \phi)$ โหลดในวงจรและมุมเฟส ϕ ที่เกิดขึ้นจะมีค่าเป็นบวกหรือลบก็ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะสมบัติของวงจรที่ปรากฏออกมาในรูปของคาปาซิแตนซ์หรืออินดักแตนซ์ ดังนั้นจะได้

$$p = ei = (V_m \sin \omega t)(I_m \sin(\omega t + \phi)) \quad (7)$$

แต่ $\sin A \sin B = \frac{1}{2} [\cos(A - B) - \cos(A + B)]$ และ $\cos(-A) = \cos A$ เพราะฉะนั้นจะได้

$$p = \frac{1}{2} E_m I_m [\cos \phi - \cos(2\omega t + \phi)] \quad (8)$$

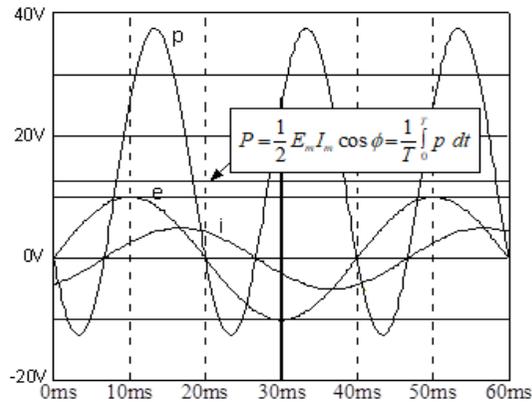
จากสมการที่ (8) จะพิจารณาเห็นได้ว่า กำลังไฟฟ้าที่ขณะใด ๆ ค่า p จะประกอบด้วยเทอมที่อยู่ในรูปของชานันคือ $\frac{1}{2} E_m I_m \cos(2\omega t + \phi)$ ซึ่งค่าเฉลี่ยของมันจะมีค่าเท่ากับศูนย์และเทอมคงที่คือ $\frac{1}{2} E_m I_m \cos \phi$ ดังนั้นค่าเฉลี่ยของกำลังไฟฟ้าที่ขณะใด ๆ คือ

$$P = \frac{1}{2} E_m I_m \cos \phi = EI \cos \phi \quad (9)$$

โดยให้ $E = \frac{E_m}{\sqrt{2}}$ และ $I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$ ซึ่งเป็นค่าประสิทธิผลของเฟสเซอร์ \vec{E} และ \vec{I} ตามลำดับและเทอม $\cos \phi$ ก็คือเพาเวอร์แฟคเตอร์ ส่วนมุม ϕ ซึ่งเป็นมุมระหว่างเฟสเซอร์ของแรงดัน E และกระแส I อย่างไรก็ตาม ค่าของกำลังไฟฟ้า สามารถคำนวณหาได้จากความสัมพันธ์ดังนี้คือ

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p \, dt \quad (10)$$

หน่วยของกำลังไฟฟ้า P คือ วัตต์ (W) ผลลัพธ์ของกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยตามสมการที่ (9) และ (10) จะสามารถอธิบายให้เห็นได้ด้วยภาพที่แสดงไว้ในรูปที่ 5

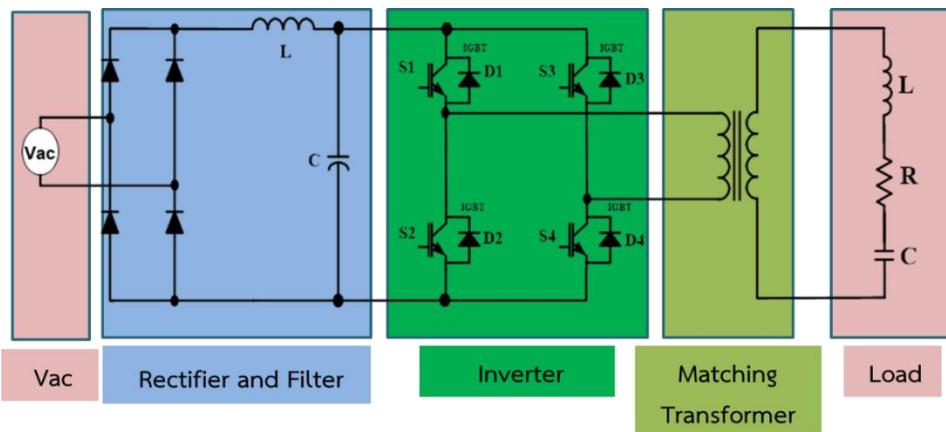


รูปที่ 5 กำลังไฟฟ้าเฉลี่ยของวงจรที่กระแสล้าหลังแรงดันเป็นมุม 60°

3.5 การออกแบบวงจรกำลัง

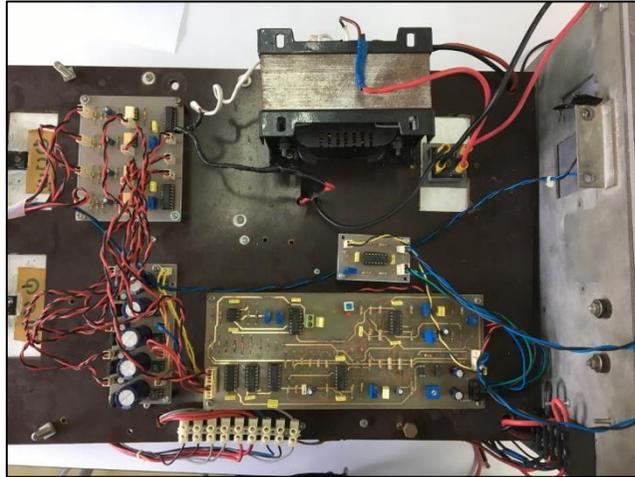
ในวงจรกำลัง วงจรจะเป็นแบบอินเวอร์เตอร์อนุกรมเรโซแนนซ์แบบเต็มบริดจ์ ประกอบด้วยวงจรเรียงกระแส 1 เฟส อินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันเต็มบริดจ์ ฟิลเตอร์ หม้อแปลงแมตซิง ขดลวดเหนี่ยวนำ ดังแสดงในรูปที่ 6 ประกอบไปด้วยส่วนย่อย ๆ ดังนี้

1. แหล่งจ่ายแรงดัน โดยแปลงจากแรงดันกระแสสลับเป็นแรงดันกระแสตรงผ่านวงจรเรียงกระแส 1 เฟส ต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำและขนานกับตัวเก็บประจุค่าสูงพอที่จะสามารถรักษาแรงดันให้เรียบ
2. อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันเต็มบริดจ์ ใช้ไอจีบีทีที่ขนานกับไดโอดเป็นอุปกรณ์สวิตซ์ในการเปลี่ยนแรงดันกระแสตรงให้เป็นแรงดันกระแสสลับรูปสี่เหลี่ยมที่มีความถี่สูง
3. หม้อแปลงความถี่สูงหน้าที่ปรับอิมพีแดนซ์ของโหลดให้เหมาะสมกับกำลังของอินเวอร์เตอร์ และ ยังช่วยแยกระหว่างโหลดกับวงจรกำลังทำให้เกิดความปลอดภัย
4. โหลดเป็นเข้าหาลมอดูมิเนียมที่ลักษณะวงจรเป็นแบบอนุกรมเรโซแนนซ์ ประกอบด้วยขดลวดเหนี่ยวนำต่ออนุกรมกับตัวเก็บประจุเพื่อแก้ตัวประกอบกำลังของขดลวดเหนี่ยวนำที่มีค่าต่ำ



รูปที่ 6 โมดูลอินเวอร์เตอร์อนุกรมเรโซแนนซ์ 1 เฟส

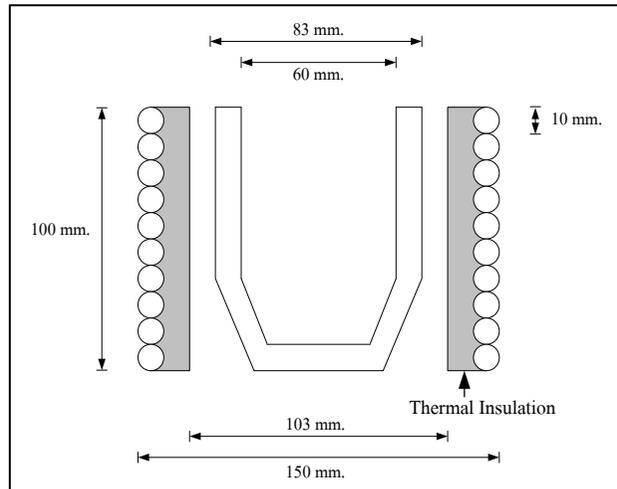
จากรูปที่ 6 เครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำในงานวิจัยนี้ การทำงานของระบบกำลังประกอบด้วย วงจรเรียงกระแส 1 เฟส แรงดันไฟตรงที่ได้เมื่อนำมาต่อกับตัวเหนี่ยวนำกับตัวเก็บประจุขนาดใหญ่ที่สามารถรักษาแรงดันให้เรียบได้ และนำแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้ป้อนเข้าสู่วงจรอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันเต็มบริดจ์ที่ใช้ไอจีบีทีขนานกับไดโอดเป็นอุปกรณ์สวิตซ์ในการเปลี่ยนแรงดันไฟตรงดังกล่าวให้เป็นพัลส์แรงดันไฟสลับรูปสี่เหลี่ยมที่มีความถี่สูง โดยที่โหลดจะต่อในลักษณะวงจรเรโซแนนท์อนุกรมซึ่งประกอบไปด้วย ขดเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุต่ออนุกรมเพื่อแก้ตัวประกอบกำลังของขดเหนี่ยวนำที่มีค่าต่ำ และมีหม้อแปลงความถี่สูงต่ออยู่ระหว่างฟลูบรีดจ์อินเวอร์เตอร์กับโหลดอนุกรมเรโซแนนท์เพื่อปรับอิมพีแดนซ์ของโหลดให้เหมาะสมกับกำลังของอินเวอร์เตอร์และ ยังช่วยแยกระหว่างโหลดกับวงจรกำลังทำให้เกิดความปลอดภัย



รูปที่ 7 ภาพจริงโมดูลอินเวอร์เตอร์อนุกรมเรโซแนนท์ 1 เฟส

3.6 การออกแบบขดเหนี่ยวนำ

ออกแบบเข้าหลอมเหล็กหล่อที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 83 มิลลิเมตร สูง 100 มิลลิเมตร โดยภายในเข้าหลอมเป็นก้อนอลูมิเนียม รวมความสูงของชิ้นงานเป็น 100 มิลลิเมตร และเพื่อลดอัตราการสูญเสียความร้อนสู่สิ่งแวดล้อม จึงต้องใส่ฉนวนความร้อนกันระหว่างขดเหนี่ยวนำกับชิ้นงาน และกำหนดให้เส้นผ่านศูนย์กลางภายในขดเหนี่ยวนำเป็น 130 มิลลิเมตร ซึ่งเมื่อฉาบปูนทนความร้อนแล้ว จะทำให้มีช่องว่างเพียงพอที่จะใส่ชิ้นงานได้สะดวก ท่อทองแดงที่ใช้ทำขดเหนี่ยวนำมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 10 มิลลิเมตร หนา 1.5 มิลลิเมตร สามารถพันได้ 10 รอบ (ท่อทองแดงมีฉนวนกันในแต่ละรอบ) จากนั้นนำไปเชื่อมต่อกับแท่งทองแดงเพื่อใช้เป็นขั้วไฟฟ้าและใช้น้ำระบายความร้อนภายในขดทองแดง เนื่องจากกระแสที่ขดเหนี่ยวนำมีค่าสูง ขดเหนี่ยวนำที่ออกแบบและสร้างขึ้นมีลักษณะเป็นดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 ขดเหนี่ยวนำที่ออกแบบ



รูปที่ 9 ภาพจริงเข้าหลอมและขดเหนี่ยวนำ

3.6.1 พารามิเตอร์ของขดเหนี่ยวนำ

ชิ้นงานเป็นแท่งเหล็กหล่อที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 83 มิลลิเมตร สูง 100 มิลลิเมตร ขดเหนี่ยวนำมีวงจรมวลที่ประกอบไปด้วยค่าความต้านทาน (R_s) และค่ารีแอกแตนซ์ (X_s) โดยค่าพารามิเตอร์ของขดเหนี่ยวนำ มีค่าดังนี้

1. ความถี่ทำงาน (f) = 15 kHz
2. จำนวนรอบของขดลวดเหนี่ยวนำ (N_c) = 10 รอบ
3. ความยาวขดลวดเหนี่ยวนำ (L_c) = 100 มิลลิเมตร
4. Coil Correction Factor (K_r) = 1.1

5. Permeability ของอากาศ (μ_0) = $4\pi \times 10^{-7}$
6. Relative Permeability ของชิ้นงาน (μ_w) = 5
7. Relative Permeability ของขดลวดเหนี่ยวนำ (μ_c) = 1
8. เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของชิ้นงาน (d_w) = 83 มิลลิเมตร
9. เส้นผ่านศูนย์กลางกลางภายในของขดลวดเหนี่ยวนำ (d_c) = 150 มิลลิเมตร
10. Resistivity of Work-piece ที่อุณหภูมิ 25°C (ρ_w) = $20 \times 10^{-8} \Omega$
11. Resistivity of Copper (ρ_c) = $2 \times 10^{-8} \Omega$

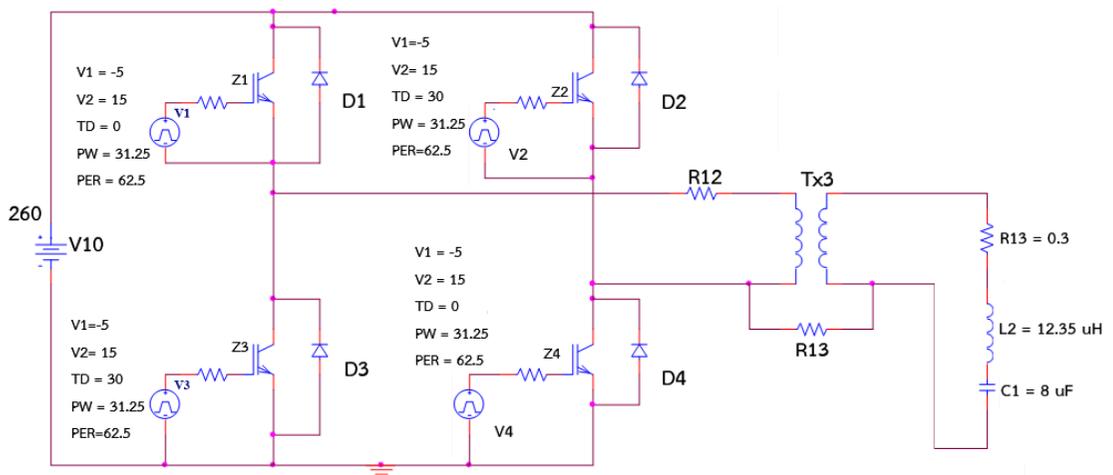
4. ผลการวิจัย

4.1 ผลการวิจัย

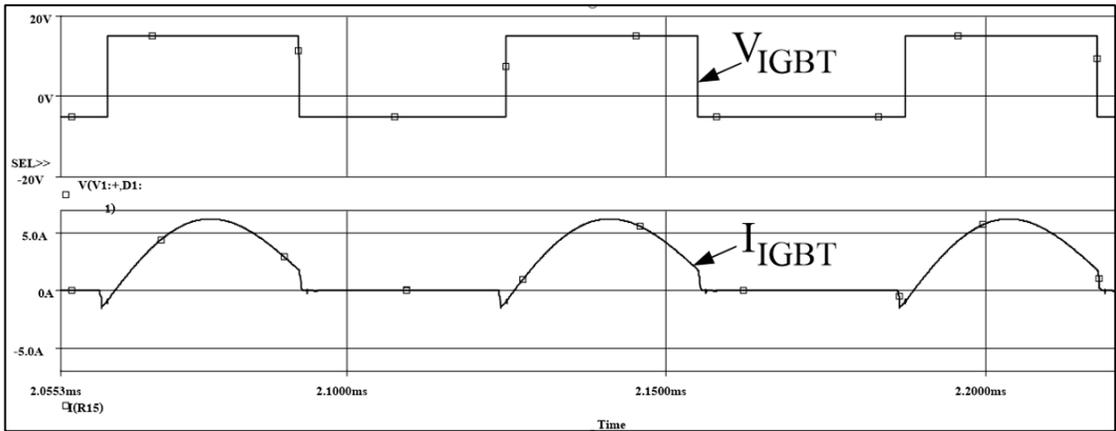
ใช้โปรแกรม ORCAD ในการจำลองการทำงาน โดยนำค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ได้จากการคำนวณของขดเหนี่ยวนำไปจำลองการทำงานในภาวะคงตัว (Steady State) เพื่อให้ทราบถึงการควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์ ขนาดของแรงดันและกระแสไฟฟ้าในวงจร เพื่อให้แน่ใจว่าในการทดลองจะไม่เกินค่าพิกัดของอุปกรณ์

4.1.1 การจำลองและวิเคราะห์การทำงานของโมดูลอินเวอร์เตอร์ขนาด 1 ชุด ขนาด 1 kW

แสดงการทำงานของอินเวอร์เตอร์ ประกอบด้วยแหล่งจ่ายแรงดันกระแสตรง วงจรฟลูบรีจด์อินเวอร์เตอร์ หม้อแปลงความถี่สูงและต่อกับโหลดอนุกรมเรโซแนนซ์ที่โหลดพารามิเตอร์ $R = 0.3 \Omega$ $L = 12.35 \mu\text{H}$ $C = 8 \mu\text{F}$ ที่ความถี่เท่ากับ 16 kHz ดังรูปที่ 10

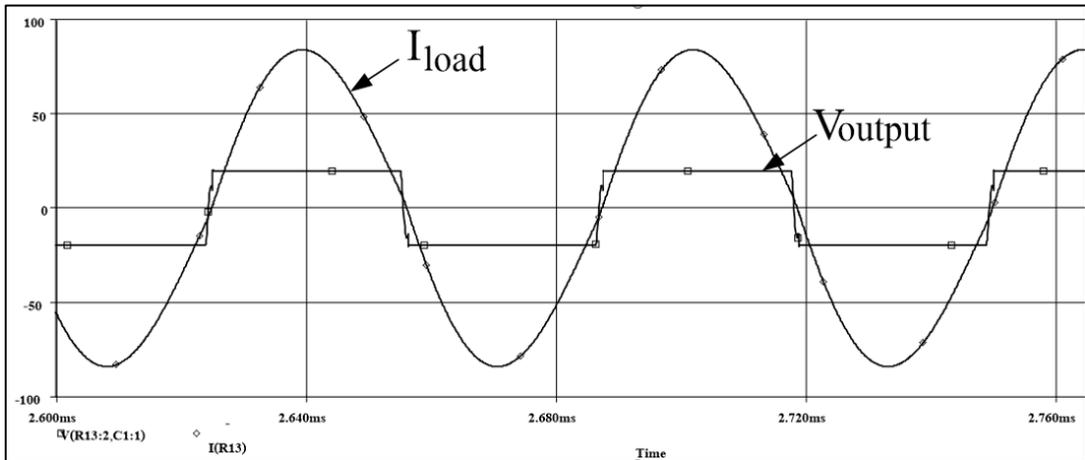


รูปที่ 10 การจำลองการทำงานของโมดูลอินเวอร์เตอร์ 1 ชุด 1 kW ต่อกับโหลดอนุกรมเรโซแนนซ์



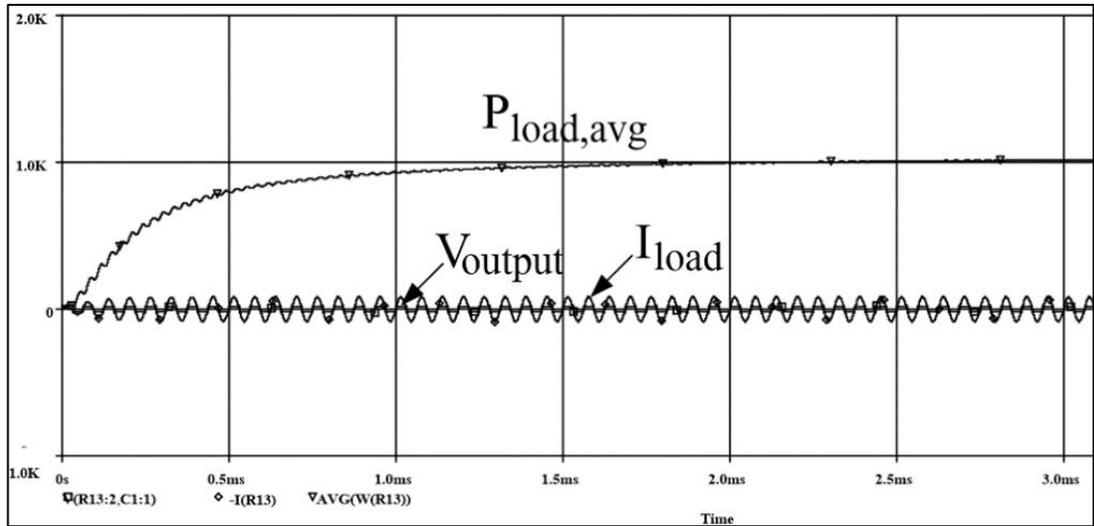
รูปที่ 11 ผลการจำลองกระแสและแรงดันที่อุปรกรณ์สวิตซ์

จากรูปที่ 11 แสดงผลการจำลองการทำงานสัญญาณขับนำสวิตซ์ โดยกำหนดให้มีเวลาการทำงานห่างกันอยู่ประมาณ 2 μ s เพื่อป้องกันการลัดวงจรเนื่องจากสวิตซ์ทำงานพร้อมกัน สัญญาณขับนำจะมีแรงดันช่วงลบ (-5V) เพื่อช่วยให้ไอจีบีทีหยุดทำงานเร็วขึ้นและป้องกันการนำกระแสตัวเองของไอจีบีทีเนื่องจากสัญญาณรบกวน



รูปที่ 12 ผลการจำลองกระแสและแรงดันที่โหลดเรโซแนนท์ที่กำลังเอาท์พุท 1 kW

จากรูปที่ 12 แสดงรูปคลื่นกระแสและแรงดันที่โหลดอนุกรมเรโซแนนท์ โดยค่ากระแสมีค่า 81.5 Apeak แรงดันมีค่า 19.5 V และมุมเฟสของแรงดันนำหน้ากระแสประมาณ 6 องศา



รูปที่ 13 ผลการจำลองกำลังเฉลี่ยที่เอาต์พุต

สรุปได้ว่า จากการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม ORCAD โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการคำนวณ เพื่อวิเคราะห์ผลที่เกิดขึ้น โดยผลที่ได้จากการจำลองเป็นไปตามสมมุติฐานที่ตั้งไว้

4.1.2 ผลการทดสอบเครื่องหลอมโลหะโดยใช้หลักการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ

การทดลองการทำงานโมดูลอินเวอร์เตอร์ 1 ชุดต่อกับโหลด โดยทำการวัดรูปคลื่นกระแสอินเวอร์เตอร์ กระแสและแรงดันที่โหลดอนุกรมเรโซแนนท์ กระแสและแรงดันที่คาปาซิเตอร์ ในการทดลองเครื่องหลอมโลหะโดยใช้หลักการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ โดยใส่ทองเหลืองหนัก 500 กรัม โดยการจ่ายแรงดันอินพุต $238.4 V_{rms}$ 50 Hz ไปยังวงจรเรกติไฟร์ผ่านไปยังอินเวอร์เตอร์แบบบริดจ์เต็ม ใช้สวิตช์ไอจีบีที IRG4PF50KD ทำงานที่ความถี่ในการสวิตช์ 28.73 kHz ซึ่งเป็นความถี่ที่สูง โดยความถี่เรโซแนนท์ของวงจรเท่ากับ 27 kHz ใช้พลังงานไฟฟ้าด้านขาเข้าในการหลอม 1.260 kW ผลการวัดค่าต่างๆ แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลการวัดค่าต่าง ๆ ของเครื่องหลอมโลหะโดยใช้หลักการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ

รายการ	ค่าทางไฟฟ้า	รายการ	ค่าทางไฟฟ้า
กำลังไฟฟ้าขาเข้า	1.260 kW	กำลังไฟฟ้าด้านออก	1.14 kW
ความถี่การทำงาน	28.73 kHz	ประสิทธิภาพ	90.47%
กระแสด้านปฐมภูมิ	5 Apeak	แรงดันไฟสลับขาเข้า	238.6 V
แรงดันด้านออก	17.7 V	กระแสไฟสลับขาเข้า	4.99 A
กระแสที่โหลด	76.96 Apeak	แรงดันไฟตรงขาเข้า	337.43 V
มมเฟส	10 องศา	ตัวประกอบกำลัง	0.84



รูปที่ 14 ภาพจริงการทดลองเครื่องหลอมโลหะโดยใช้หลักการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ

5. อภิปรายผลและสรุปผล

เครื่องหลอมโลหะโดยใช้หลักการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ เหมาะกับการใช้งานในขนาดกำลังไฟฟ้าที่ไม่สูง โดยจะทำงานในย่านความถี่ที่สูงกว่าความถี่เรโซแนนซ์ตลอดเวลา ควบคุมสวิตซ์ซึ่งทำงานขณะแรงดันไฟฟ้าเป็นศูนย์ (Zero Voltage Switch) ซึ่งสอดคล้องกับ วิเชียร หทัยรัตน์ศิริ และสายชล ชุตเจ็จจิน (2552) ที่ได้นำเสนอเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำสำหรับงานหุงต้ม โดยใช้อินเวอร์เตอร์เป็นแหล่งจ่ายกระแสชนิดคลาสดี มีการสวิตซ์ที่กระแสเป็นศูนย์ เพื่อช่วยลดกำลังสูญเสียขณะทำงาน กระแสอินพุทด้านเข้าเป็นรูปไซน์ เครื่องต้นแบบมีขนาด 900 W ให้ความร้อนแก่น้ำที่มีปริมาตร 0.6 ลิตร จากอุณหภูมิห้องถึง 100 °C ได้ภายในเวลา 2.30 นาที

ผลการทดลองพิจารณาจากการทดสอบประสิทธิภาพของเครื่อง โดยพิจารณาจากกำลังไฟฟ้าขาเข้า 1.260 kW เปรียบเทียบกับค่าความสูญเสียที่กัลังไฟฟ้าขาออก 1.14 kW เมื่อหาค่าประสิทธิภาพของเครื่องหลอมโลหะจะมีค่าประสิทธิภาพเท่ากับ 90.47 % ที่ความถี่ 28.73 kHz วงจรที่ใช้เป็นอินเวอร์เตอร์แบบบริดจ์เต็ม ใช้สวิตซ์ไอจีบีที IRG4PF50KD ถูกทดสอบด้วยวิธีการปรับความถี่ ซึ่งเหมาะกับการใช้งานในขนาดกำลังไฟฟ้าที่ไม่สูงนัก โดยจะทำงานในย่านความถี่ที่สูงกว่าความถี่เรโซแนนซ์ตลอดเวลา ควบคุมสวิตซ์ซึ่งทำงานขณะแรงดันไฟฟ้าเป็นศูนย์ (Zero Voltage Switch) ทำให้กำลังสูญเสียขณะเริ่มนำกระแสต่ำและสามารถให้ความร้อนขึ้นงานน้ำหนัก 500 กรัม จากอุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิหลอมเหลวภายในเวลา 3 นาที

6. ข้อเสนอแนะ

ในการปฏิบัติการทดลอง สามารถใช้ระบบควบคุมแบบดิจิทัลหรือระบบไมโครคอนโทรลเลอร์ได้ เพื่อให้เกิดความสะดวกและได้ผลการทดลองที่มีความเที่ยงตรง

7. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏสุรินทร์ ที่ให้ทุนสนับสนุนการวิจัยในครั้งนี้ ขอขอบคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่อนุเคราะห์ห้องปฏิบัติการในการทดสอบเครื่องหลอมโลหะและขอขอบคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ชยันต์ คัมภีร์ ที่ปรึกษาทางานวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- เขมภักดิ์ สมสังข์. (2549). การประมาณและควบคุมอุณหภูมิของน้ำเหล็กในเตาหลอมโลหะแบบเหนี่ยวนำ. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- จิระศักดิ์ วงศา, จิระศักดิ์ ส่งบุญแก้ว, เอกรัตน์ นภกานต์, บัญชา ศรีวิโรจน์ และยืน ปาระเคน. (2555). การประยุกต์ใช้หลักการเหนี่ยวนำความร้อนสำหรับเครื่องหลอมพลาสติก. ในการประชุมวิชาการดำเนินงาน วิศวกรรมอุตสาหกรรม 17 – 19 ตุลาคม 2555. มหาวิทยาลัยศรีปทุม. เพชรบุรี. 1,637 – 1,642.
- วิเชียร ท้ายรัตน์ศิริ และสายชล ชุตเจือจิน. (2552). การประยุกต์ใช้วงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายกระแสความถี่สูงในเตาหุงต้มเหนี่ยวนำ. รายงานการวิจัย. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ กรุงเทพมหานคร.
- วิเชียร ท้ายรัตน์ศิริ, สายชล ชุตเจือจิน และสรรรพณ คุ่มทรัพย์. (2555). เครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำความร้อนสำหรับงานชุบแข็งที่มีการควบคุมกำลังโดยการควบคุมความหนาแน่นพัลส์. รายงานการวิจัย. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ กรุงเทพมหานคร.