



บทความวิจัย

## การศึกษางานชุบแข็งเพลารถยนต์โดยใช้หลักการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ

### A Study of Car Shaft Surface Hardening Application Using Induction Heating Method

วิโรจน์ เพชรพันธุ์ศรี<sup>1,2</sup> วิเชียร หทัยรัตน์ศิริ<sup>1,2</sup> สายชล ชูดเจ็วจีน<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup> ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

<sup>2</sup> หน่วยวิจัยพลังงานทดแทน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

Wiroj Pechpunsri<sup>1,2</sup> Vichian Hathairatsiri<sup>1,2</sup> Saichol Chudjuarjeen<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup> Electrical and Telecommunication Department, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Krungthep

<sup>2</sup> Energy Renewable Research Unit, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Krungthep

\* Corresponding author.

2 ถนนนางลิ้นจี่ แขวงทุ่งมหาเมฆ เขตสาทร กรุงเทพมหานคร 10120

E-mail: saichol.c@mail.rmutk.ac.th; Telephone: 08 9664 6669

#### บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นการศึกษางานชุบแข็งเพลารถยนต์โดยใช้หลักการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันแบบเต็มบริดจ์ที่มีไอจีบีทีเป็นตัวสวิตช์เนื่องจากเป็นสวิตช์ที่เหมาะสมกับกำลังสูงและความถี่ปานกลาง สวิตช์ที่ความถี่ 20–60 กิโลเฮิร์ตซ์ ต่อเข้ากับวงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรมใช้ระบบแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส 380 โวลต์ 50 เฮิร์ตซ์ มีพิกัดกำลังไฟฟ้า 4 กิโลวัตต์ ระบบที่นำเสนอถูกทดสอบเพื่อเปรียบเทียบอัตราค่าไฟฟ้าที่ลดลง อัตราการผลิตที่เพิ่มขึ้นร้อยละ 44 และผลการทดสอบค่าความแข็งของชิ้นงานเฉลี่ยที่ 38.8 HRC

#### คำสำคัญ

เครื่องเหนี่ยวนำความร้อน ไอจีบีที เรโซแนนซ์แบบอัตโนมัติ งานชุบแข็งเพลารถยนต์ งานชุบแข็ง

#### Abstract

This paper studies the car shaft surface hardening application using induction heating method. The full bridge voltage source inverter uses IGBTs for the switch because of suitable medium frequency and high power and they operate switching frequency at frequencies of 20-60 kHz connected in series resonant with AC 3-phase 380 V, 50 Hz at a rated power with a minimum of 4 kW. The proposed system has been tested for comparing the lower electricity rates, increase production rate at 44 % and average hardness of work piece is 38.8 HRC.

#### Keywords

induction heating; inverter; IGBT; automated resonance; car shaft hardening; surface hardening

#### 1. บทนำ

ปัจจุบันการชุบแข็งชิ้นงานมักผ่านกระบวนการอบชุบความร้อนไม่ว่าจะทำให้อ่อนลงด้วยกระบวนการอบอ่อนหรือทำให้แข็งขึ้นด้วยกระบวนการชุบแข็ง การชุบแข็งชิ้นงานนั้นอาจกระทำได้ทั้งการชุบแข็งตลอดชิ้นงาน ซึ่งเป็นการปรับปรุงคุณสมบัติของชิ้นงานและเพิ่มความแข็ง ทนต่อการสึกหรอ การ

เสียดสีและความร้อน วิธีการชุบแข็งนั้นได้นำมาใช้ในกระบวนการผลิต เช่น เฟือง เพลาส่งกำลัง อะไหล่รถยนต์แม่พิมพ์ เป็นต้น ซึ่งการชุบแข็งชิ้นงานนั้นสามารถทำได้โดยใช้เตาอบชุบแข็งแบบฮีตเตอร์ในการให้ความร้อน การทำงานของเตาอบที่มีการทำงาน 2 ขั้นตอน คือการชุบแข็ง และการเทมเปอร์ริงหรือการอบคืนตัว โดยในช่วงเวลาที่ 1 การชุบแข็งจะ

ใช้อุณหภูมิประมาณ 810–900 องศาเซลเซียส โดยใช้ระยะเวลาทั้งหมด 3 ชั่วโมง และช่วงที่ 2 การอบคืนตัว จะใช้อุณหภูมิประมาณ 400–450 องศาเซลเซียส ระยะเวลาทั้งหมด 2 ชั่วโมง แต่ก่อนจะทำขั้นตอนที่ 2 ได้นั้น ต้องรอให้เตาอบเย็นตัวก่อนทำการเทมเปอร์ริ่ง และต้องรอเวลาไม่ต่ำกว่า 2 ชั่วโมง ซึ่งรวมระยะเวลาการทำงานทั้งสิ้น 7 ชั่วโมงต่อการอบชุบแข็ง 1 รอบ ซึ่งในการชุบแข็งวิธีนี้มีข้อเสียคือ ผนวกร้อนมีความร้อนมีอายุการใช้งานที่ต่ำ และมีราคาที่ยากลำบากสูงมาก ชิ้นงานที่ได้เกิดผิวดำทำให้ขนาดของชิ้นงานเกิดการเปลี่ยนแปลง เมื่อต้องการจำนวนชิ้นงานที่ไม่มากจะทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานไฟฟ้า และใช้เวลาที่นานในการชุบแข็ง

จากงานวิจัยของ บวรพงศ์ มังบุญแ้วน [1] และเลิศพันธุ์ ศรี-เจริญประมง [2] เป็นการศึกษาเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของเหล็ก และอุณหภูมิที่มีผลและเหมาะกับการอบชุบแข็งรวมถึงการเทมเปอร์ริ่ง การใช้สารชุบที่ใช้กับเหล็กแต่ละชนิดซึ่งจะแตกต่างกัน โดยในปริญญาานิพนธ์นี้ชนิดเหล็กที่ใช้ในการชุบแข็งคือ AISI 1050 ใช้สารชุบคือน้ำ และใช้อุณหภูมิในการชุบ 810 องศาเซลเซียสขึ้นไป โดยระบบดังกล่าวเป็นการให้ความร้อนกระจายความร้อนแบบใช้ขดลวดฮีตเตอร์ในตู้อบ

ในงานอุตสาหกรรมปัจจุบันเริ่มมีการนำเอาหลักการของการเหนี่ยวนำความร้อน (Induction Heating) มาใช้ในงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น งานเชื่อม (Brazing) ชุบแข็ง (Surface Hardening) เป็นต้น ซึ่งในแต่ละงานจะเลือกใช้ความถี่ที่แตกต่างกัน โดยการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำนี้จะเป็นการให้ความร้อนโดยตรงที่ชิ้นงานโดยไม่สัมผัสกับชิ้นงาน จึงทำให้เกิดความร้อนขึ้นอย่างรวดเร็ว และประหยัดพลังงานกว่าแบบขดลวดฮีตเตอร์ [5] การให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำมีการให้กระแสที่ความถี่ที่แตกต่างกันออกไปตามงาน สวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ถูกนำมาใช้ในอินเวอร์เตอร์ที่นิยมเช่น เอสซีอาร์ที่ความถี่ไม่สูงมาก ไอจีบีทีที่ความถี่ระดับกลาง และมอสเฟตที่ความถี่สูง เป็นต้น ในงานอินเวอร์เตอร์ที่ต้องการความถี่สูงและกำลังสูงในปัจจุบันจะนิยมใช้ไอจีบีทีเป็นตัวสวิตซ์ [3]

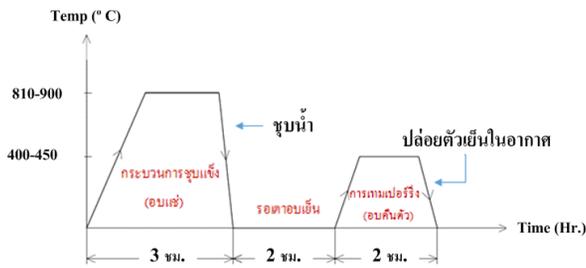
โดยมีการทบทวนวรรณกรรมเกี่ยวกับเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำโดยใช้อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายกระแสแบบเต็มบริดจ์สำหรับงานขึ้นรูปโลหะ [3] และเครื่องเหนี่ยวนำความร้อนสำหรับชุบแข็งผิว [4] การชุบแข็งด้วยวิธีนี้จะอาศัยหลักการของกระแสไฟฟ้าสลับ เมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน

ขดลวด จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้นรอบ ๆ ขดลวด และแม่เหล็กนี้จะกลับขั้วตามจำนวนความถี่ของกระแสไฟฟ้าสลับ เมื่อนำเหล็กไปใส่ไว้ในขดลวด สนามแม่เหล็กจะตัดผ่านเนื้อเหล็กในลักษณะกลับขั้วไปมา จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าขึ้นในเนื้อเหล็ก เรียกว่า กระแสไหลวน ซึ่งการเกิดกระแสไหลวนในเนื้อเหล็กนั้นจะไม่สม่ำเสมอตลอดพื้นที่หน้าตัดขวางของแท่งเหล็ก แต่จะเกิดมากบริเวณผิวของเหล็ก ยิ่งความถี่ของกระแสไฟฟ้าสูง กระแสไหลวนจะเข้มข้นมากตามบริเวณผิว ก่อให้เกิดความร้อนสำหรับใช้ในงานชุบแข็งโดยให้เหล็กมีอุณหภูมิวิกฤต ประมาณ 780–950 องศาเซลเซียส แล้วทำให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็วเกินอัตราการเย็นของวิกฤตของเหล็กด้วยน้ำหรือน้ำมันเพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเหล็ก

งานวิจัยนี้มีการนำเสนอเครื่องเหนี่ยวนำความร้อนสำหรับงานชุบแข็งเพลลา โดยใช้อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันแบบเต็มบริดจ์ โดยมีไอจีบีทีสวิตซ์ที่ความถี่ 20–60 กิโลเฮิร์ตซ์ และมีชุดให้ความร้อนเหนี่ยวนำต่อแบบอนุกรมโดยใช้แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส 380 โวลต์ 50 เฮิร์ตซ์ มีพิกัดกำลังไฟฟ้าไม่ต่ำกว่า 4 กิโลวัตต์ โดยชิ้นงานไม่สัมผัสขดลวดให้ความร้อนในการชุบแข็งโดยการเหนี่ยวนำความร้อนนั้นข้อดีคือ ให้ความร้อนโลหะได้รวดเร็ว มีอายุการใช้งานที่นาน เครื่องมีขนาดเล็ก และประหยัดไฟฟ้า เมื่อเทียบกับเตาอบชุบแข็งแบบฮีตเตอร์

## 2. ทฤษฎีและหลักการ

ปัจจุบันการชุบแข็งชิ้นงานมักผ่านกระบวนการอบชุบความร้อนไม่ว่าจะทำให้อ่อนลงด้วยกระบวนการอบอ่อนหรือทำให้แข็งขึ้นด้วยกระบวนการชุบแข็ง การชุบแข็งชิ้นงานนั้นอาจกระทำได้ทั้งการชุบแข็งตลอดชิ้นงาน ซึ่งเป็นการปรับปรุงคุณสมบัติของชิ้นงานและเพิ่มความแข็งแรง ทนต่อการสึกหรอ การเสียดสีและความร้อน วิธีการชุบแข็งนั้นได้นำมาใช้ในกระบวนการผลิต เช่น เพื่อง เพลาส่งกำลัง อะไหล่รถยนต์ แม่พิมพ์ เป็นต้น ซึ่งการ ชุบแข็งชิ้นงานนั้นสามารถทำได้โดยใช้เตาอบชุบแข็งแบบฮีตเตอร์ในการให้ความร้อนมีหลักการทำงานดังนี้



รูปที่ 1 หลักการทำงานเตาอบเพื่อชุบแข็งแบบฮีตเตอร์

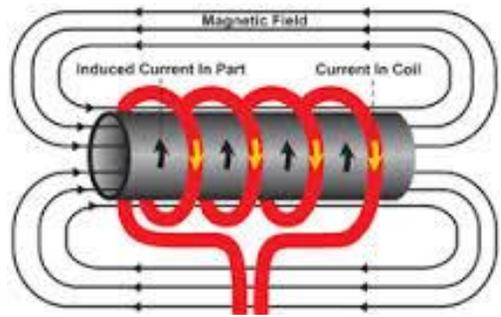
จากรูปที่ 1 หลักการทำงานของเตาอบที่มีการทำงาน 2 ขั้นตอน คือการชุบแข็ง และการเทมเปอร์รีจหรือการอบคืนตัว โดยในช่วงที่ 1 ใช้อุณหภูมิประมาณ 810–900 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 3 ชั่วโมง รวมการเข้าและออกของชิ้นงาน ช่วงที่ 2 ใช้อุณหภูมิประมาณ 400–450 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 2 ชั่วโมง รวมการเข้าและออกของชิ้นงาน แต่ก่อนจะทำขั้นตอนที่ 2 ได้นั้น ต้องรอให้เตาอบเย็นตัวก่อนทำการเทมเปอร์รีจ และต้องรอเวลาไม่ต่ำกว่า 2 ชั่วโมง ซึ่งรวมระยะเวลาการทำงานทั้งสิ้น 7 ชั่วโมงต่อการอบชุบแข็ง 1 รอบ ซึ่งในการชุบแข็งวิธีนี้มีข้อเสียคือ ควบคุมอุณหภูมิการใช้งานที่ต่ำ และมีราคาที่สูงมาก ชิ้นงานที่เกิดการเปลี่ยนแปลง เมื่อต้องการจำนวนชิ้นงานที่ไม่มากจะทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานไฟฟ้า และใช้เวลาที่นานในการชุบแข็ง

## 2.1 หลักการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ

หลักการพื้นฐานของการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำสามารถอธิบายให้เห็นได้ชัดเจนโดยเปรียบเทียบกับหลักการของหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งประกอบไปด้วยขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิ (Primary and Secondary Winding) โดยขดเหนี่ยวนำเปรียบเสมือนขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงและชิ้นงานก็เปรียบเสมือนขดลวดทุติยภูมิจำนวน 1 รอบที่ลัดวงจรไว้ โดย  $I_p$  เป็นกระแสที่จ่ายให้กับขดลวดเหนี่ยวนำและ  $I_s$  เป็นกระแสที่ไหลในชิ้นงาน

ลักษณะโครงสร้างอย่างง่ายของระบบการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำได้แสดงไว้ดังรูปที่ 2 เมื่อขดเหนี่ยวนำได้รับกระแสไฟสลับจะทำให้เกิดฟลักซ์แม่เหล็กสลับคล่องผ่านชิ้นงานทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำเกิดกระแสไหลวนในชิ้นงานทำให้เกิดความร้อนขึ้นที่ชิ้นงานได้และเนื่องจาก

กระแสที่ป้อนให้กับขดเหนี่ยวนำมีปริมาณที่สูง จึงต้องมี



รูปที่ 2 โครงสร้างอย่างง่ายของการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ [4]

ระบบระบายความร้อนด้วยน้ำภายในขดเหนี่ยวนำเพื่อลดความร้อนที่ขดเหนี่ยวนำ

ในหลักการดังกล่าวกระแสไหลวนจะมีความหนาแน่นมากที่สุดที่บริเวณผิวของชิ้นงานเนื่องจากผลของปรากฏการณ์ทางพื้นผิว (Skin Effect) และความหนาแน่นของกระแสลดลงมาเป็นประมาณ 0.368 เท่า ของค่าความหนาแน่นกระแสที่ผิวของชิ้นงานที่ค่าความลึกผิว (Skin Depth) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ 1

$$\text{Skin depth } \delta = \sqrt{\frac{\rho}{\mu f \pi}} \quad (1)$$

โดย

$\delta$  คือ ความลึกผิว (m)

$\rho$  คือ ความต้านทานจำเพาะของชิ้นงาน ( $\Omega\text{m}$ )

$\mu$  คือ ความซึมซาบแม่เหล็กของชิ้นงาน (H/m)

$f$  คือ ความถี่ของแหล่งจ่ายไฟสลับ (Hz)

จากสมการ (1) แสดงให้เห็นว่าค่าความลึกผิวขึ้นอยู่กับค่าความถี่ของกระแสไฟสลับที่จ่ายให้ขดลวดเหนี่ยวนำค่าความซึมซาบแม่เหล็ก (Permeability) และความต้านทานจำเพาะ (Resistivity) ของชิ้นงาน

## 2.2 แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของขดเหนี่ยวนำ

ในทางปฏิบัติลักษณะงานที่แตกต่างกันก็มีความต้องการค่าความลึกผิวและกำลังไฟฟ้าที่แตกต่างกัน เช่น การชุบแข็งที่ผิวชิ้นงานจะต้องการค่าความลึกผิวที่ต่ำจึงต้องใช้ความถี่ที่สูงทำให้มีค่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าที่สูง ส่วนในงานประเภทการให้ความร้อนสำหรับการหลอมโลหะจะต้องค่าความลึกผิวที่ค่อนข้างสูง ความถี่การทำงานจึงต่ำกว่า

### 2.3 ค่าความจุความร้อนของชิ้นงาน

ในการให้ความร้อนแก่ชิ้นงานจำเป็นต้องมีพลังงานจำนวนหนึ่งเพื่อให้ชิ้นงานมีอุณหภูมิตามที่ต้องการโดยพลังงานจำนวนนั้นสามารถคำนวณได้จากค่าความร้อนจำเพาะ (Specific Heat,  $c$ ) ซึ่งมีหน่วยเป็น watt-second per kilogram per Kelvin และความร้อนแฝง (Latent Heat) แต่ในทางปฏิบัตินิยมใช้ค่าความจุความร้อน (Heat Content) ซึ่งมีหน่วยเป็น kilowatt-hour per tone สำหรับการคำนวณเมื่อพิจารณาจากค่าความจุความร้อนจะเห็นได้ว่าพลังงานที่ต้องการในการให้ความร้อนให้ได้อุณหภูมิตามที่ต้องการนั้นจะขึ้นอยู่กับน้ำหนักของชิ้นงานและชนิดของวัสดุและระยะเวลาที่ต้องการ ค่าความจุความร้อนของวัสดุต่าง ๆ

## 3. การออกแบบและการจำลองทำงาน

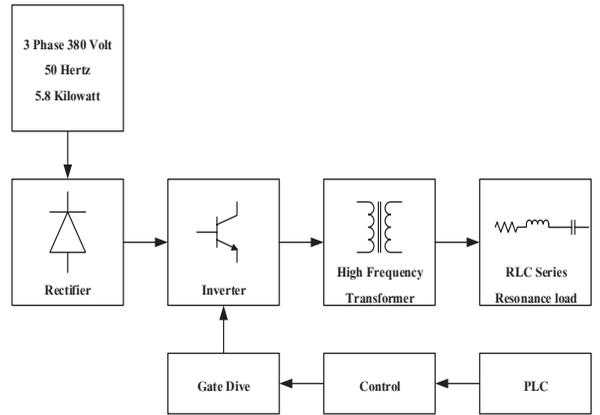
### 3.1 ระบบทั้งหมดของเครื่องเหนี่ยวนำความร้อนสำหรับชุบแข็งเพลลา

รูปที่ 3 แสดงระบบทั้งหมดของเครื่องเหนี่ยวนำความร้อนสำหรับงานชุบแข็งเพลลาใช้แรงดันอินพุต 3 เฟส 380 โวลต์ 50 เฮิร์ตซ์ กำลังไฟฟ้าอินพุตประมาณ 4 กิโลวัตต์ จ่ายให้กับวงจรเรียงกระแสเพื่อแปลงเป็นแรงดันกระแสตรงจ่ายเข้าไปยังอินเวอร์เตอร์ อินเวอร์เตอร์ทำหน้าที่เปลี่ยนแรงดันกระแสตรงเป็นแรงดันกระแสสลับความถี่สูง จ่ายให้หม้อแปลงความถี่สูงเพื่อปรับอิมพีแดนซ์ของโหลดให้เหมาะสมกับกำลังของอินเวอร์เตอร์และยังมีการป้องกันกระแสเกินที่โหลด ตรวจเช็คอุณหภูมิที่แผ่นระบายความร้อนของไอจีบีที และตรวจเช็คการไหลของน้ำภายในขดลวดเหนี่ยวนำ และจ่ายเข้าชุดโหลดเรโซแนนซ์แบบอนุกรม จุดประสงค์เพื่อทดสอบการควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์ให้มีกระแสด้านขาออกให้ไม่เกินจากค่าที่ตั้งไว้โดยการเลื่อนมุมเฟสระหว่างแรงดันกับกระแสออกไปเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของชิ้นงาน เช่น ความต้านทานจำเพาะและความชื้นขาปได้สัมผัส ทำให้ค่าพารามิเตอร์เปลี่ยนแปลง

#### การออกแบบชุดโหลดเรโซแนนซ์

การออกแบบขดเหนี่ยวนำความร้อน ( $L_{coil}$ )

โดยทั่วไปแล้วขดลวดเหนี่ยวนำจะทำขึ้นจากท่อทองแดงกลวง ทั้งนี้เพราะทองแดงเป็นตัวนำไฟฟ้าได้ดีทำให้มีกำลังสูญเสียในขดลวดเหนี่ยวนำต่ำ ซึ่งจะมีผลทำให้ระบบมี



รูปที่ 3 บล็อกไดอะแกรมของเครื่องให้ความร้อนเหนี่ยวนำสำหรับงานชุบแข็งเพลลา

ประสิทธิภาพสูงอย่างไรก็ดีเนื่องจากความหนาแน่นของกระแสในขดลวดเหนี่ยวนำมีค่าสูง ความร้อนที่เกิดจากกระแสที่ไหลในขดลวดเหนี่ยวนำจะมีค่ามาก ดังนั้นจึงต้องใช้ท่อทองแดงกลวงเพื่อให้สามารถระบายความร้อนโดยใช้ของเหลว เช่น น้ำ ผ่านเข้าไปในท่อได้ เป็นต้น

สำหรับชิ้นงานที่ใช้เป็นเหล็กทรงกระบอกมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร สูง 300 มิลลิเมตร โดยมีระยะห่างระหว่างผิวนอกของชิ้นงานกับผิวภายในของขดลวดเหนี่ยวนำให้เหมาะสมและให้สะดวกในการวางชิ้นงาน โดยลักษณะการวางชิ้นงานจะวางในแนวนอน ส่วนขดเหนี่ยวนำเป็นท่อทองแดงกลวงมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 3/8" สามารถพันได้ทั้งหมด 24 รอบ จากนั้นนำไปเชื่อมต่อกับแผ่นทองแดงเพื่อใช้เป็นขั้วไฟฟ้า และใช้น้ำระบายความร้อนภายในขดลวดทองแดง เนื่องจากกระแสที่ขดเหนี่ยวนำมีค่าสูง ขดเหนี่ยวนำที่ออกแบบและสร้างขึ้นมีลักษณะเป็นดังรูปที่ 4 โดย

$N_c$  คือ จำนวนรอบของท่อทองแดงขดเหนี่ยวนำ

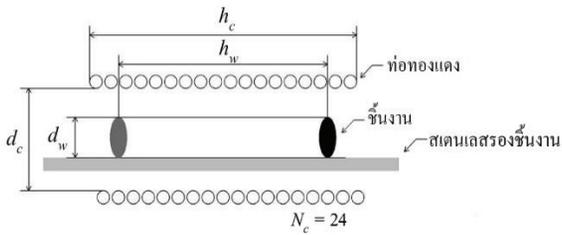
$h_w$  คือ ความสูงของชิ้นงาน

$h_c$  คือ ความสูงของท่อทองแดงขดเหนี่ยวนำ

$d_c$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อทองแดงขดเหนี่ยวนำ

$d_w$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงาน

การออกแบบตัวเก็บประจุ ( $C_r$ )



รูปที่ 4 ขดลวดเหนี่ยวนำสำหรับขُبแข็งที่ออกแบบ

จากขดลวดเหนี่ยวนำที่ได้ออกแบบไปในหัวข้อที่ผ่านมา นำไปวัดด้วยเครื่องวัดค่าความเหนี่ยวนำ ซึ่งค่าที่ได้เป็นค่าโดยประมาณ ในโครงการนี้ได้ใช้เครื่องวัดรุ่น HIOKI 3532-50 LCR HITESTER โดยเลือกใช้ความถี่ที่เครื่องวัดมีอยู่ 40 กิโลเฮิร์ตซ์ ค่าความเหนี่ยวนำที่ได้มีค่าโดยประมาณไมโครเฮนรี ค่าที่ได้นี้อาจมีความคลาดเคลื่อนจากเครื่องวัด ดังนั้นจึงไปเลือกขนาดของค่าตัวเก็บประจุที่ความถี่เรโซแนนซ์ 40 กิโลเฮิร์ตซ์ ดังสมการที่ (2)–(5)

$$\text{จาก} \quad f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2)$$

$$\text{ดังนั้น} \quad C_r = \frac{1}{4\pi^2 f^2 L} \quad (3)$$

$$C_r = \frac{1}{4\pi^2 (40 \times 10^3)^2 (8.63 \times 10^{-6})} \quad (4)$$

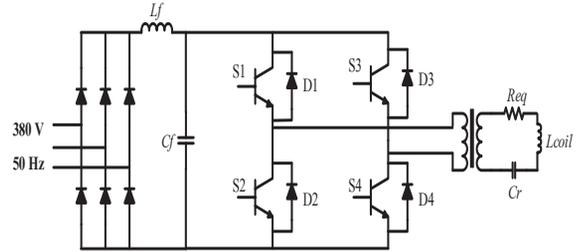
$$C_r \approx 1.8 \mu F \quad (5)$$

จากการคำนวณได้ค่าตัวเก็บประจุ 1.8 ไมโครฟารัด เพราะฉะนั้นจะใช้ตัวเก็บประจุขนาด 2 ไมโครฟารัดจำนวน 1 ตัว ค่าที่ได้นี้จะต่างกับค่าที่คำนวณได้ เนื่องมาจากค่าของตัวเก็บประจุที่มีใช้อยู่ และลักษณะการติดตั้งตัวเก็บประจุที่ขดลวดเหนี่ยวนำ ดังนั้นจึงเลือกใช้ตัวเก็บประจุที่มีค่า 2 ไมโครฟารัด

### 3.4 การออกแบบหม้อแปลงความถี่สูง

เนื่องจากโพลดใช้ความเข้มสนามแม่เหล็กสูงเพราะต้องการกระแสที่สูงกว่าโอจิปีทีหรือฝั่งปฐมภูมิจะสามารถรับได้ จึงต้องใช้หม้อแปลงความถี่สูงมาเป็นตัวช่วยลดกระแสฝั่งปฐมภูมิลง

อัตราส่วนระหว่างจำนวนรอบของขดลวดทุติยภูมิ จำนวนรอบของขดลวดปฐมภูมิ



รูปที่ 5 โครงสร้างของเครื่องให้ความร้อนเหนี่ยวนำสำหรับงานขُبแข็งเพลลา

$$\text{Turns Ratio} = \frac{N_p}{N_s} = 8 \quad (6)$$

จากที่เลือกใช้โอจิปีทีเบอร์ DM2G100SH12AE ที่มีพิกัดกระแส 100 แอมป์ แต่กระแสของโพลดมีค่าประมาณ 454 แอมป์ จากการจำลองการทำงาน เมื่อเปรียบเทียบกับอัตราส่วนของหม้อแปลงจะได้

$$\text{Turns Ratio} = \frac{i_s}{i_p} \quad (7)$$

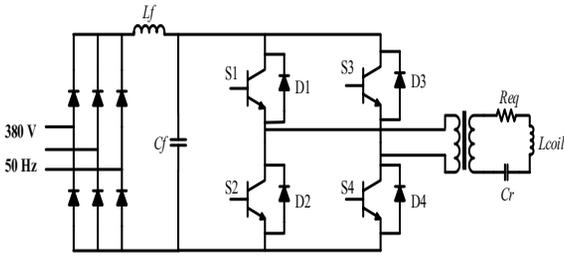
$$i_p = \frac{454}{8} = 56 A \quad (8)$$

ซึ่งค่ากระแสฝั่งปฐมภูมิจะค่าประมาณ 56 แอมป์ ไม่เกินพิกัดของที่โอจิปีที

### 3.5 การออกแบบอินเวอร์เตอร์

เนื่องจากในงานวิจัยนี้ใช้ความถี่ในการสวิตซ์สูงประมาณ 40-50 กิโลเฮิร์ตซ์ จึงเลือกใช้โอจิปีทีในการสวิตซ์ ในโครงการนี้ต้องการใช้กำลังไฟฟ้าประมาณ 5.8 กิโลวัตต์ จะมีกระแสที่ไหลผ่านสวิตซ์แต่ละตัวจะมีค่ายอดประมาณ 56 แอมป์ ขนาดของแรงดันตกคร่อมสวิตซ์มีค่ายอดประมาณ 540 โวลต์จึงเลือกใช้โอจิปีทีเบอร์ DM2G100SH12AE ซึ่งมีพิกัดกระแส 100 แอมป์ ที่อุณหภูมิทำงาน 25 องศาเซลเซียส พิกัดแรงดัน 1200 โวลต์

โครงสร้างของเครื่องให้ความร้อนเหนี่ยวนำสำหรับงานขُبแข็งเพลลาโดยจะมีแรงดันที่จ่ายเข้าวงจรเรียกระแส  $V_{in} = 380$  โวลต์,  $L_f = 53$  ไมโคร-เฮนรี,  $C_f = 2350$  ไมโครฟารัด,  $C_r = 2$  ไมโครฟารัด,  $L_{coil} \approx 8.68$  ไมโครเฮนรี และ  $R_{eq} = 0.147$  โอห์มดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 โครงสร้างของเครื่องให้ความร้อนเหนี่ยวนำสำหรับงานชุบแข็งเพลา



รูปที่ 7 ชิ้นงานก่อนการชุบแข็ง

## 4. การทดสอบเครื่องเหนี่ยวนำความร้อนเพื่อชุบแข็งผิว

### 4.1 จำลองการทำงาน

รูปที่ 6 แสดงรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมหม้อแปลง ความถี่สูงและกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านหม้อแปลงความถี่สูง โดยที่รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าจะนำหน้ารูปคลื่นกระแสไฟฟ้าอยู่ตลอดการทำงาน ซึ่งมีผลมาจากการทำงานในช่วงความถี่สูงกว่าความถี่เรโซแนนซ์

### 4.2 ผลการทดลองการชุบแข็งชิ้นงาน

การทดลองเริ่มจากสภาวะก่อนการให้ความร้อนขึ้นงาน การจ่ายแรงดันกระแสสลับสามเฟส 380 โวลต์ เข้าเครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ โดยควบคุมให้การทำงานของอินเวอร์เตอร์มีมุมเฟสของแรงดันนำหน้ากระแสที่ เพื่อทำการทดสอบวงจรเมื่อค่าพารามิเตอร์ของโหลดมีการเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ จนกระทั่งถึงการนำชิ้นงานชุบน้ำ หลังจากให้ความร้อนการทดลองจะทำการเหนี่ยวนำความร้อนตั้งแต่อุณหภูมิห้อง 27–800 องศาเซลเซียส แล้วจึงนำไปชุบน้ำเพื่อให้เย็นอย่างรวดเร็ว แล้วจึงนำไปทดสอบความแข็งของชิ้นงาน

จากรูปที่ 7 เป็นชิ้นงานก่อนนำมาชุบแข็ง ซึ่งเป็นเหล็กกล้าคาร์บอน AISI 1050 ซึ่งมีคาร์บอน 0.5 เปอร์เซ็นต์ ค่าความแข็งของเหล็กคือ 220 HV หรือเท่ากับ 18 HRC รูปที่ 10 แสดงถ่ายภาพขณะชิ้นงานมีอุณหภูมิที่ 27.5 องศาเซลเซียส

จากรูปที่ 8 ทำการทดสอบวัดอุณหภูมิของชิ้นงานขณะก่อนชุบแข็งที่อุณหภูมิห้องด้วยเครื่องวัดอุณหภูมิอินฟราเรด Sentry ST677 Infrared Thermometer และที่อุณหภูมิ 772 องศาเซลเซียส แสดงดังรูปที่ 9

จากผลการทดสอบที่แรงดัน 100 โวลต์ ถึง 380 โวลต์



รูปที่ 8 อุณหภูมิของชิ้นงานก่อนทำการให้ความร้อน

เครื่องเหนี่ยวนำความร้อนสำหรับงานชุบแข็งเพลาที่ใช้เหล็กกล้าคาร์บอน รหัส AISI 1050 ขนาดชิ้นงานกว้าง 20 มิลลิเมตร ยาว 300 มิลลิเมตร ที่อุณหภูมิทดสอบจากอุณหภูมิห้อง 27 องศาเซลเซียส ถึง 850 องศาเซลเซียส โดยวัดจากจุดที่อุณหภูมิต่ำที่สุด เพื่อให้ได้อุณหภูมิตามที่ต้องการสีของชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบมีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งเกิดจากการเหนี่ยวนำความร้อน โดยจะสังเกตเห็นได้ว่ายิ่งอุณหภูมิของชิ้นงานเพิ่มมากขึ้นสีของชิ้นงานก็จะยิ่งสว่างมากขึ้นเช่นกัน (สีส้มออกสว่าง) ซึ่งสามารถมองได้ด้วยตาเปล่า ผลการคำนวณค่า

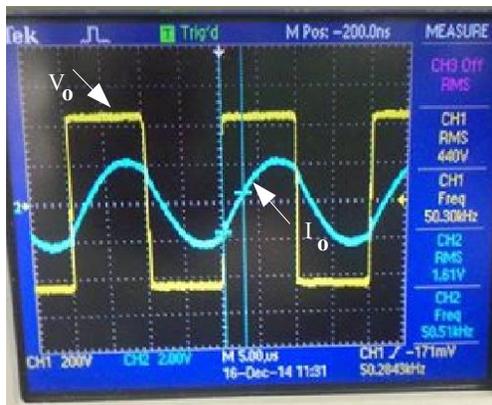
ไฟฟ้าต่อชิ้นและจำนวนอัตราการผลิตใน 1 ชั่วโมงซึ่งจะเห็นได้ว่าการให้ความร้อนด้วยวิธีการเหนี่ยวนำได้อัตราการผลิตที่มากกว่าและค่าพลังงานไฟฟ้าต่อชิ้นต่ำกว่า วัดสัญญาณแรงดันและกระแสขณะทำงานแสดงดังรูปที่ 10 ซึ่งมีผลเหมือนกับผลการจำลองการทำงานด้วยคอมพิวเตอร์



รูปที่ 9 อุณหภูมิของชิ้นงานที่อุณหภูมิ 772.9 องศาเซลเซียส



รูปที่ 11 การให้ความร้อนที่ชิ้นงานด้วยเครื่องเหนี่ยวนำความร้อน สำหรับงานชุบแข็งเพลลา



รูปที่ 10 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันที่ตกคร่อมหม้อแปลง ( $V_o$ ) และ กระแสหลังหม้อแปลงความถี่สูง ( $I_o$ )

จากผลการทดสอบในตารางที่ 1 จะเห็นได้ว่าการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำสามารถให้ความร้อนเพลลารถยนต์จำนวนชิ้นที่มากขึ้นถึงร้อยละ 44 และค่าไฟฟ้าต่อชิ้นลดลงจาก 3.66 บาท เหลือ 2.41 บาท และจากการทดสอบค่าความแข็งของชิ้นงานที่เป็นเหล็กกล้าคาร์บอนชนิด AISI 1050 ข้างต้นจำนวน 5 ชิ้น โดยให้ความร้อนที่ 700–800 องศาเซลเซียสซึ่งจะมีอุณหภูมิสีของชิ้นงานเปลี่ยนทั้งชิ้นแสดงดังรูปที่ 11 ก่อนนำชิ้นงานผ่านความเย็นทันทีด้วยการชุบน้ำ ผลการทดสอบความแข็งของชิ้นงานถูกแสดงดังตารางที่ 2 ซึ่งให้ค่าความแข็งเฉลี่ยต่อชิ้นที่ 38.38 HRC ค่าความแข็งที่วัดได้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของชิ้นงานขณะชุบแข็งโดยชิ้นงานที่ผ่านการชุบแข็งแสดงดังรูปที่ 12

ตารางที่ 1 ตารางเปรียบเทียบค่าไฟฟ้าระหว่างเครื่องเหนี่ยวนำความร้อนสำหรับงานชุบแข็งเพลลากับเตาอบชุบแข็งแบบฮีตเตอร์ (ที่ใช้ทั่วไป)

วิธี	เวลา (ชม.)	จำนวน (ชิ้น)	กำลังไฟฟ้า (วัตต์)	ค่าไฟฟ้า (บาท)	ไฟฟ้า(ต่อชิ้น) (บาท)
1	3	25	6100	91.50	3.66
2	3	36	5800	87	2.41

ตารางที่ 2 ผลการวัดค่าความแข็งของชิ้นงาน

ชิ้นงานที่	ทดสอบครั้งที่ / ค่าความแข็ง (HRC)					เฉลี่ยต่อชิ้น
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	
	ค่าความแข็ง	ค่าความแข็ง	ค่าความแข็ง	ค่าความแข็ง	ค่าความแข็ง	
1	39	40.5	38.5	35	35	37.6
2	40.5	38.5	41.5	39	36.5	39.2
3	39.5	41.5	39.5	40	37.5	39.6
4	37.5	38.5	38	35	35.5	36.9
5	36	38.5	40.5	36	42	38.6
					เฉลี่ยรวม	38.38



รูปที่ 12 ชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบค่าความแข็ง

## 5. สรุปผล

การศึกษางานชุบแข็งงานชุบแข็งเพลลาโดยใช้เครื่องเหนี่ยวนำความร้อนสำหรับได้ออกแบบและสร้างขึ้นใช้กับแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส 380 โวลต์ 50 เฮิร์ตซ์ ที่พิกัดกำลัง 4 กิโลวัตต์ โดยมีไอจีบีทีกำลังสวิทซ์ที่ความถี่ 20–60 กิโลเฮิร์ตซ์ ทดสอบโดยการให้ความร้อนเหล็กจากอุณหภูมิห้อง จนถึงอุณหภูมิ 700–800 องศาเซลเซียส ได้ที่เวลาเฉลี่ย 5 นาทีต่อชิ้น สามารถชุบแข็งชิ้นงานได้เป็นอย่างดี ในการทดสอบอินเวอร์เตอร์มีการสวิทซ์ที่ความถี่สูงกว่าเรโซแนนซ์ตลอดการทำงาน จากผลการทดสอบวิธีการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำที่นำเสนอสามารถเพิ่มอัตราการผลิตและลดการใช้พลังงานได้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] บวรพงศ์ มั่งบุญแว่น, วิมุติ ตงศิริ. เครื่องศึกษาการชุบแข็งมีดอัตโนมัติ. ปรียญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต มหาวิทยาลัยขอนแก่น. 2555.
- [2] เลิศพันธุ์ ศรีเจริญประมง. อิทธิพลของอุณหภูมิ และระยะเวลาอบแช่ในกระบวนการเทมเปอร์รีงที่มีต่อโครงสร้างจุลภาค และสมบัติทางกลของใบมีดพรวนหน้าดิน. การประชุมวิชาการเทคโนโลยีเชิงสร้างสรรค์ ราช มงคลกรุงเทพ. ปีที่ 2, ฉบับที่ 4 (กรกฎาคม). 2555; 2555. หน้า 14–36.
- [3] วีระเชษฐ์ ชันเงิน, วุฒิพล ธาราริธีระเชษฐ์. อิเล็กทรอนิกส์กำลัง *Power Electronics*. กรุงเทพฯ: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง; 2547.
- [4] สายชล ชุตเจ็จจิน. เครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำโดยใช้อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายกระแสแบบเต็มบริดจ์สำหรับงานขึ้นรูปโลหะ. *วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร์*

มหบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. 2547.

- [5] Davies J, Simpson P. *Induction Heating Handbook*. UK: McGraw-Hill; 1979.
- [6] Chudjuarjeen S, Sangswang A, Koopai C. An improved LLC resonant inverter for induction heating applications with asymmetrical control. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2011; 58(7): 2915–2925.
- [7] Jittakort J, Yachiangkam S, Sangswang A, Naetiladdanon S, Koopai C, Chudjuarjeen S. A variable-frequency asymmetrical voltage-cancellation control of series resonant inverter in domestic induction cooking. In: *Proceedings of IEEE ICPE-ECCE*. Asia; 2011. p. 2320–2327.
- [8] Viriya P, Yongyuth N, Matsuse K. Analysis of two continuous control regions of conventional phase shift and transition phase shift for induction heating inverter under ZVS and non-ZVS operation. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2008; 23(6): 2794–2805.
- [9] Kitcharoenwat S, Chudjuarjeen S. Sliding-Mode Control for Four Switches Single Phase AC-AC Converter. *International Electrical Engineering Transaction*. 2016; 2(1).
- [10] Chudjuarjeen S, Koopai C. A high-frequency induction cooker using quasi-resonant converter. In: *Proceedings of ECTI-CONFERENCE*; 2007. p. 378–381.
- [11] Chudjuarjeen S, Koopai C. Asymmetrical control with phase lock loop for induction cooking appliances. In: *Proceedings of ECTI-CONFERENCE*; 2008. p. 1013–1016.
- [12] Chuenwattanapanrit C, koopai C, Monyakul V. Half-bridge current fed inverter power supply for forging application. In: *Proceedings of 25th Electrical Engineering Conference, Thailand*; 2002. p. 97–101.
- [13] สายชล ชุตเจ็จจิน, วิเชียร หทัยรัตน์ศิริ, วิโรจน์ เพชรพันธุ์ศรี. เตาหลอมแบบเหนี่ยวนำด้วยอินเวอร์เตอร์เร

โซแนนซ์แบบครึ่งบริดจ์สำหรับทองเหลือง.  
*วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร ฉบับพิเศษ.*  
2555: 529-537.

- [14] วิเชียร หทัยรัตน์ศิริ, สายชล ชุตเจือจัน, วิโรจน์ เพชรพันธุ์ศรี, บุญญฤทธิ์ ทองจันทร์, อนุชิต โชคชัยลิขิตสกุล. การมอดูเลตความหนาแน่นพัลส์เพื่อควบคุมกำลังในเครื่องให้ความร้อนเหนี่ยวนำสำหรับชุบแข็ง. *UTK ENGINEERING JOURNAL*. 2555: 7-11.
- [15] บุญทัน ศรีบุญเรือง. การศึกษาการปรับกำลังแบบจำกัดดิวิตีไซเคิลแบบอสมมาตรสำหรับงานเตาหลอมแบบเหนี่ยวนำความร้อน. *วารสารวิชาการ วิศวกรรมศาสตร์ ม.อบ.* 2558; 8(1): 123-130.